

地層処分事業の安全確保 (2010 年度版)

—確かな技術による安全な地層処分の実現のために—

2011年9月 初版発行

2012年6月 第2版発行

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記へお問い合わせください。

〒108-0014 東京都港区芝4丁目1番地23号 三田NNビル2階
原子力発電環境整備機構 技術部

電話 03-6371-4004（技術部） FAX 03-6371-4102

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Science and Technology Department

Nuclear Waste Management Organization of Japan

Mita NN Bldg. 1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan

©原子力発電環境整備機構

(Nuclear Waste Management Organization of Japan) 2011

地層処分事業の安全確保

(2010年度版)

—確かな技術による安全な地層処分の実現のために—

2011年9月
原子力発電環境整備機構

要約

I. 本報告書作成の背景と目的

1999年に核燃料サイクル開発機構（現、日本原子力研究開発機構（以下、JAEA という））は、地層処分技術にかかわる20年以上にわたる研究開発成果を集大成し「第2次取りまとめ」¹として公表した。この第2次取りまとめは、2000年に原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会によって、「我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性が示されている」、「地層処分の事業化に向けての技術的拠り所となる」と評価された。

原子力委員会が示した「基本的考え方」²および「第2次取りまとめ」を受けて制定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（以下、最終処分法という）に基づいて、2000年10月に原子力発電環境整備機構（以下、NUMO という）が、高レベル放射性廃棄物の地層処分を行う実施主体として設立された。その後、2007年の同法改正に伴い、長半減期低発熱放射性廃棄物の一部も地層処分の対象（以下、地層処分低レベル放射性廃棄物という）とされたことから、NUMOはこれを事業の対象に加えた。

また、最終処分法の改正を受け「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」が2007年に改正されて地層処分事業に関する規制が追加され、その後、2008年には関係省令が制定されるなど、地層処分に関する国による安全規制の枠組みが整備された。

一方、NUMOは、2000年の設立以降、事業の安全な実施に向けて技術の整備に努めるとともに、今日までさまざまな理解活動や広報活動を展開してきたが、概要調査地区選定段階の調査（文献調査）を開始するには至っていない。NUMOは国や電気事業者、関係機関と連携し、総力を挙げて文献調査開始に向けて国民への理解活動などに取り組んでいる。

そのような状況の中で、2008年には、原子力委員会政策評価部会により、地層処分の安全性についての説明に対する国民の信頼を確保するために、「NUMOは（中略）、安全な処分の実施に係る技術的信頼性に関する技術報告をとりまとめ、学会等、第三者的で独立性の高い学術的な機関の評価を得て公表するとともに、この説明が常に最新の知見を踏まえているものであるように、定期的に改定していくべき」との提言がなされた。

このような状況を踏まえ、NUMOでは、「安全な処分の実施に係る技術的信頼性が向上したことを示し、地層処分事業の安全確保に関する説明の技術的拠り所とする」ことを目的として、2000年のNUMO設立から現在までの地層処分技術の整備状況を中心とした報告書「地層処分事業の安全確保（2010年度版）～確かな技術による安全な地層処分の実現のために～」を取りまとめて、公表することとした。報告書は、安全確保構想（安全確保に向けた取り組み方針）を示した「事業編」と安全な地層処分を支える技術の整備状況を示した「技術編」とで構成される。なお、本報告書は、日本原子力学会に専門的な観点から内容についての評価をいただき、また国際的な専門家のレビューを受け、それらのコメントを反映して取りまとめたものである。

II. 事業編の要約：安全確保構想

本報告書の事業編では、「第2章 わが国における地層処分事業の背景」で地層処分の必要性やNUMOが実施する地層処分事業の概要など、本報告書の背景や前提となる事項について解説した。

¹ わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—（核燃料サイクル開発機構、1999）

² 高レベル放射性廃棄物処分に向けての基本的考え方について（原子力委員会、1998）

その上で、「第3章 安全確保構想」で安全確保の目標、安全確保策、安全確保に向けたNUMOの方針を提示した。また、「第4章 地層処分事業の段階的な推進」では、地層処分事業をNUMOの安全確保に向けた方針に基づいてどのように実現していくのかを具体的に提示した。

安全確保の目標

地層処分の最終的な目標は、処分場閉鎖後の遠い将来にわたって放射性廃棄物が人間とその生活環境に影響を及ぼさないようにすること（閉鎖後長期の安全確保）である。一方で、サイト調査から事業廃止までの事業期間中の地域住民や作業従事者の安全確保（事業期間中の安全確保）を図ることが重要である。そのため、地層処分事業で達成すべき安全性にかかわる目標として以下の二つを設定した。

- ・ 閉鎖後長期の安全確保
- ・ 事業期間中の安全確保

地層処分は、閉鎖後長期の安全確保という目標を達成するために、放射性廃棄物を地下深くに閉じ込め（閉鎖後閉じ込め）、人間の生活環境から隔離することを基本とするシステムである。そのため、放射性廃棄物を安定な地下深部に埋設し、人工バリアと天然バリアから構成される多重バリアシステムによって安全性を確保する。このような閉鎖後閉じ込めと隔離を実現するために、以下の三つの安全確保策を確実に実施する。

- ・ 地層処分にとって適切な地質環境を選定し、建設段階以降はサイト選定時における評価の妥当性を確認する（適切なサイト選定と確認）。
- ・ 選定された地質環境に対して人工バリアや処分施設を適切に設計・構築する（処分場の設計・施工などの適切な工学的対策）。
- ・ 構築された地層処分システムの安全性を評価する（地層処分システムの長期安全性の評価）。

事業期間中の安全確保のためには、サイト選定から事業廃止までの事業中の各段階において、地域住民や作業従事者の放射線安全および一般労働安全の確保を行う。これらの安全対策については、一般の土木工事や原子力施設の建設・操業などで経験を有する技術を有効に活用すると同時に、地層処分の特殊性も考慮して、必要な技術開発を行う。一方、事業期間中の安全確保のために講じるさまざまな対策が、閉鎖後長期の安全確保に有意な影響を及ぼさないよう配慮する必要がある（例えば、処分場を建設・操業するために設置・使用する機材などの残置物が処分場の閉鎖後にも残るために、処分場の閉鎖後長期の安全性に有意な影響を及ぼす可能性があるというケース）。また、地層処分事業においては、周辺環境へ十分な配慮をすることも重要であり、事業期間中に実施するさまざまな活動が周辺環境に及ぼす影響を評価し、適切な環境保全策を講じる。

安全確保の目標を達成するための方針とその実施方策

地層処分事業を安全に行うために、100年程度にわたる事業の中で閉鎖後長期の安全確保策や事業期間中の安全対策をどのように実施し、安全な地層処分システムを作り上げていくかが、事業者の視点として重要である。この点を考慮して、以下の三つの方針を提示した。

方針1：安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進

方針2：信頼性の高い技術を用いた事業推進

方針3：安全性への信頼感醸成へ向けた技術的な取り組み

以下に、これらの安全確保の目標を達成するための方針とその実施方を概説する。

(1) 方針1：安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進

地層処分は、サイト選定の開始から処分場の建設・操業を経て最終的に処分場を閉鎖し、事業を廃止するまでに100年程度を要する長期にわたる事業である。そのため、長期間に起こり得る社会情勢の変化に適切に対応し、技術開発の進展などを適宜取り込んで事業を推進することが必要である。そこで、段階的に事業を推進することにより、地層処分システムの安全性を繰り返し確認しつつ、必要に応じて計画を修正し、将来の地層処分を取り巻く環境や条件の変化に柔軟に対応していく。

具体的には、長期にわたる事業期間全体を俯瞰して、安全確保ロードマップを作成し、計画的かつ合理的に事業を進める。安全確保に向けた取り組みの結果は、地層処分の長期的安全性を支持するさまざまな論拠を、概要調査以降の各段階における知見に基づき取りまとめた一連の文書群（セーフティケース）として取りまとめる。

また、閉鎖後長期の安全確保に関しては、事業の進展に伴い段階的に拡充・詳細化される地質環境の情報や技術開発などにより得られた最新の知見に基づいて、信頼性を常に向上させていく。例えば、サイト選定段階においては、概要調査地区選定段階の調査（文献調査）、地上からの調査を主体とした精密調査地区選定段階の調査（概要調査）、地下の調査施設を利用した処分施設建設地選定段階の調査（精密調査）と進むに従い、段階的に地質環境に関する情報が質・量ともに充実する。これらの情報に基づき、処分場の設計と安全性の評価を繰り返し実施し、得られた結果を次段階の調査計画に反映することにより、地層処分の安全性にかかわる信頼性を段階的に高める。

地層処分では数万年以上の長期にわたる安全性を担保する必要があるため、また広大で特性にばらつきのある地下を活用するため、ある程度の不確実性が存在することは避けられない。従って、最新の科学技術的知見を適切に反映するとともに、不確実性の残る部分についてはそれらを考慮した上で安全性が確保されていることを示していく。

一方、事業期間中の安全確保に関しては、事業段階ごとの安全対策と環境保全策の計画を策定し実行する。そして、各段階の実施途中において現場から得られる情報や最新の技術を活用することにより計画を適宜見直すことで、安全対策を高度化し、周辺環境への影響を回避・低減する。

これらの点を考慮し、以下の三つを方針1の実施方策とした。

- ・ 事業全体を俯瞰した計画の策定
- ・ 閉鎖後長期の安全性の繰り返し確認
- ・ 事業期間中の安全対策と環境保全策

(2) 方針2：信頼性の高い技術を用いた事業推進

地層処分の安全性を確保するためには、必要とされる技術の適用性や信頼性を評価し、確認する

ことが重要である。地層処分に特有な技術（例えば、人工バリアの搬送・定置技術など）については、個別の技術の開発とその統合化を行い、計画的に技術の整備を進める。開発した技術は、処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）に建設する地下調査施設（実サイト）などでの実証試験を通じて実用化を図る。

一方、汎用的な技術（例えば、ボーリング調査技術など）については、他分野で実績のある技術を用いる。その際には、必要に応じて適用性を確認した上で事業に活用する。

地層処分事業の実施に必要な技術は多岐にわたっており、また必要となる時期やその要求される到達レベルがそれぞれ異なる。そのため、事業の各段階で技術開発課題を体系的に整理し、技術開発ロードマップとして展開することにより、計画的かつ合理的に必要な技術を整備していく。この技術の整備は、わが国の技術開発の枠組みに基づき、NUMO と基盤研究開発機関³が適切に役割を分担し効率的に実施する。

事業の実施には、技術の整備に加えて、事業の中でそれらの技術を合理的・効率的に活用していく仕組みをつくることが重要であることから、NUMO は、ISO や IAEA などの国際的な基準や指針を参考にして、わが国の地層処分事業に適した品質保証体制を構築し運営していく取り組みを鋭意進める。また、科学技術的な品質を保証するために、学会や NUMO の技術アドバイザー委員会などでのレビューを通して専門家の客観的評価を受け、情報の品質（信頼性）確保に努める。

以上の取り組みに加え、技術を実際に利用する NUMO の組織体制の整備と人材確保・育成や国内外の関係機関との技術協力を推進する。

これらの点を考慮し、以下の三つを方針 2 の実施方策とした。

- ・ 計画的な技術の整備
- ・ 技術に関する品質保証の的確な実施
- ・ NUMO の組織および国内外協力体制の整備

(3) 方針 3：安全性への信頼感醸成へ向けた技術的な取り組み

地層処分事業は、安全上考慮すべき期間が極めて長期にわたることから、世代間倫理の問題なども絡んだ、社会的にこれまで経験したことのない事業である。このため、事業を実施するに当たっては、サイト選定から処分場閉鎖後の事業廃止に至るまでの各段階で地域住民の理解を得ながら進めていくことが重要である。段階的に地層処分事業を進めていく過程において、地域の意見を聞き、これを十分に尊重することが、最終処分法にも定められている。

事業を進める上で、地域住民や国民に適宜、信頼性の高い情報を提供していくことは、事業者としての責務であり、また NUMO に対する信頼を得るためにも重要である。特に、安全性の確保は地域住民や国民にとって最も関心のある事項であると考えられることから、安全性に関するさまざまな情報を可能な限り具体的に、積極的かつ透明性をもって提供していく。また、情報提供に当たっては、対話活動や意識調査などを通じて人々の求める情報を的確に把握し、可能な限りそれに応えていくことが重要である。

³ 資源エネルギー庁は、地層処分に関する研究開発を計画的、かつ効率的に実施することを目的として、地層処分基盤研究開発調整会議（以下、調整会議という）を設置した。この調整会議に参加している機関（日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所、産業技術総合研究所、放射線医学総合研究所）を基盤研究開発機関という。

これらの点を考慮し、以下の三つを方針3に関する実施方策とした。

- ・ 事業の各段階における意思決定にかかわる情報提供
- ・ 安全性や技術の信頼性にかかわる日常的な情報提供と対話活動
- ・ 将来世代が適切な判断を行うための環境整備

また、これらの実施方策を段階的な事業推進の中でどのように展開していくかを信頼感醸成ロードマップとして提示した。

III. 技術編の要約：安全な地層処分を支える技術

安全な地層処分を支える技術については、事業の各段階で、その時点で利用可能な最適で信頼性の高い技術を用いることが必要である。そこで、原子力政策大綱に示された役割分担のもと、NUMOでは地層処分の安全な実施と経済性および効率性の向上などを目的とした技術開発を進め、基盤研究開発機関では深地層の研究施設などを活用して、深地層の科学的研究や、地層処分技術の信頼性向上、安全評価手法の高度化などの基盤的な研究を実施している。

本報告書では、「第5章 地質環境の調査・評価技術」、「第6章 処分場の設計、建設・操業・閉鎖技術」、「第7章 地層処分システムの長期安全性評価技術」において、NUMOと基盤研究開発機関の技術開発成果を中心として、第2次取りまとめ以降の技術の進展を示した。さらに「第8章 概要調査地区選定段階および精密調査地区選定段階の技術的取り組み」では、第4章で述べた各段階の目標や実施項目および実施手順を示すとともに、第5章、第6章、第7章に述べた技術の適用について実施手順に沿って具体的に示した。

技術の整備状況を取りまとめる際には、関係機関である日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、産業技術総合研究所、電力中央研究所、放射線医学総合研究所、電気事業連合会、日本原燃株式会社の協力を得て、最新の技術開発成果を取り入れた。

1. 地質環境の調査・評価技術の進展

第2次取りまとめでは、わが国には地層処分概念の成立に必要な条件を満たす地層が広く存在し、当時の調査・評価技術を用いて、ある地域がそのような条件を備えているか否かを判断できることが示された。NUMOでは、第2次取りまとめ以降、概要調査地区選定ならびに精密調査地区選定に向けて、自然現象の影響および地質環境特性にかかわる調査・評価技術の体系を整備してきた。また、これと並行して、調査・評価技術の信頼性を向上させるため、NUMOおよび基盤研究開発機関が中心となり、地質環境にかかわる情報整備や、調査・評価体系を構成するさまざまな手法の改良・高度化を進めてきた。以下に、主要な技術の進展について概説する。

(1) 自然現象の影響にかかわる調査・評価技術の進展

わが国は変動帯に位置しており、処分施設建設地として選定されるサイトに対しては、例えば火山・火成活動による地下施設へのマグマの貫入・噴出や熱水の流入、地震・断層活動による地下施設の破壊、隆起・侵食による地下施設の地表への急速な接近といった自然現象による著しい影響を、将来にわたり回避できる場所であることが求められる。このような自然現象については、第2次取

りまとめなどにおいて、将来 10 万年程度までは十分な証拠に基づく予測が可能であるとされた。NUMO では、これを踏まえ、さらに長期の安全評価を行う可能性も考慮して自然現象の将来予測の考え方を整理し、第 2 次取りまとめ以降の研究の進展を取り込んだ調査・評価の進め方を示した。

自然現象の将来予測については、地域ごとおよび事象ごとに異なる過去に関する情報の量・精度、そして、地質構造の発達過程を考慮し、予測に用いる仮定を明らかにした上で、外挿⁴などの方法により行う。安全評価に向けた将来予測の期間は、予測に伴う不確実性の程度に応じて、期間 A：十分な過去の情報に基づく外挿法による予測が可能な期間、期間 B：不確実性は大きくなるが外挿法による予測が可能な期間、期間 C：外挿法による予測が難しい期間の三つに区分して設定する。

火山・火成活動の調査・評価技術については、ホットフィンガーモデルに代表される火山分布の規則性・偏在性にかかわる新知見がもたらされ、また、地震波トモグラフィなどの深部のマグマの存在を推定するための地球物理学的な探査手法にも進展が見られた。さらに、非火山地域の熱水活動の調査・評価手法や、単成火山群の確率論的な評価手法が開発された。NUMO では、これらの知見や技術を活用し、火山・火成活動の著しい影響を回避するための体系的な調査・評価技術を整備した。加えて、それを補足するための技術として、海外で用いられている複数の確率論的手法に基づく評価手法を開発した。

地震・断層活動については、近年起こったいくつかの地震の位置・規模と既存の活断層に関する情報との間に乖離が見られたことを背景に、地形学、地質学、測地学、地震学、地球物理学の各分野で、活断層の検出にかかわる手法の開発あるいは既存手法の高度化が進められている。これらにより、変位地形が不明瞭な活断層や伏在断層を検出する技術などが向上しつつある。NUMO では、これらの技術を組み合わせ、活褶曲や活断層帯などの影響範囲も含めた体系的な調査・評価技術を整備した。加えて、それを補足するための技術として、海外で用いられている歪速度を指標とした確率論的な評価手法を開発した。

隆起・沈降の評価では、長期の将来予測に際して過去の地質構造の発達過程を把握することが重要である。その一環として、これまで検討されていなかった内陸部の隆起速度の推定手法と、それを支える地質年代測定にかかわる技術の高度化が進められた。一方、侵食の評価については、シミュレーション技術を取り入れた地形変化モデルの開発、地質年代測定を応用した原位置での侵食速度測定技術の開発が進められている。NUMO では、これらの技術的な進展を取り込んだ体系的な調査・評価技術を整備した。

(2) 地質環境特性にかかわる調査・評価技術の進展

地質環境特性にかかわる調査では、自然現象による著しい影響を回避した場所において、地質・地質構造、地下水の流動特性や化学特性、岩盤の力学特性などを把握し、地質環境モデルを介して処分場の設計・施工などの工学的対策および地層処分システムの閉鎖後長期の安全性の評価に必要な情報を提供する。ここでは、調査計画の立案、調査の実施、地質環境モデルの構築・更新、結果の評価と課題の抽出、という一連のプロセスを繰り返すことにより、不確実性を着実に低減させていく。NUMO は、このような体系的な調査・評価技術を整備してきた。

地質環境特性に関する調査・評価技術の開発は、わが国の地質環境の多様性を考慮しつつ進められてきた。JAEA の深地層の研究施設計画において、わが国の地質環境を代表する結晶質岩および堆

⁴ 過去から現在までの情報に基づき現象の傾向や法則性を把握し、それらを将来にあてはめることにより予測する方法。

積岩を対象とした調査・評価技術の適用性の確認が進められており、NUMOの調査・評価に反映可能な多くの知見が得られている。また、2007年度からは、基盤研究開発機関により沿岸域を対象とした調査技術の開発が進められており、沿岸域特有の調査・評価手法についての知見が蓄積されつつある。NUMOでは、これらの先行的な研究成果を集約するとともに、ボーリング調査を主体とした実証的な研究などを通じて、一連の調査・評価技術の適用性の確認を行い、多様な地質環境を対象とした調査・評価を実施するための準備を進めている。

以上のように、NUMOでは、実際のサイト選定に向けて、文献調査および概要調査を的確に実施できるように、わが国の地質環境の多様性や空間的・時間的な不確実性に対応した体系的な調査・評価技術を整備してきた。また、それを支える個々の技術にも新たな知見が得られており、調査・評価技術全体としての信頼性が向上した。

2. 処分場の設計、建設・操業・閉鎖技術の進展

第2次取りまとめ以降、工学技術の分野では人工バリア材料の長期挙動や相互作用に関する現象の理解が進み、人工バリアを搬送・定置するための技術が大きく進展した。NUMOでは、これらの成果を踏まえて処分場の設計に必要な技術要件を体系的に整備するとともに、多様な地質環境に対応する廃棄体の定置方式と適用する操業技術の組み合わせを示した。以下に、主要な技術の進展について概説する。

(1) 地層処分安全機能と技術要件の設定

第2次取りまとめ以降の国際基準の整備や技術の進展に基づいて、閉鎖後長期の安全確保に向けた工学的対策上の要件を更新した。具体的には、「閉鎖後閉じ込め」、「隔離」といった安全確保の基本概念に基づき、それらを具体化した安全機能と処分場を構成する要素との関連付けを行い、構成要素ごとに安全機能を満足するように技術要件を体系的に整備した。これにより地質環境の調査・評価の進展に応じて、個々の地点に対する技術要件を明確化して設計に反映していく準備が整った。

(2) 処分場の設計の考え方の整備

人工バリア、地下施設、および地上施設の設計について、基本的な設計の考え方や手順を整備した。人工バリアの設計では、安全機能と技術要件に基づいて、人工バリア材料の特性や長期健全性を考慮した設計の考え方を整備した。地下施設の設計では、地質・地質構造、地質の長期安定性、地下水流動、地下水化学、空洞の力学的安定性や廃棄体発熱特性などを考慮した地下施設設置位置の設定の考え方を、また、地上施設の設計では、地上施設設置区域の選定や施設群ゾーニングなどの考え方を整備した。

(3) 建設・操業・閉鎖の安全性と工程確保に向けた取り組み

NUMOは、処分場の建設工程（建設開始から操業開始まで10年程度）や操業工程（年間約1,000体のガラス固化体を処分）を実現するための課題の分析を行い、特に重要な工程における手順や方法の検討を進めてきた。

建設工程については、処分孔掘削や掘削土搬出といった建設技術の効率化に関する検討を実施した。操業工程については、人工バリアの品質の信頼性向上と地下での操業にかかわる作業を軽減す

るための検討を実施した。それらの検討の中で、人工バリアをあらかじめ地上施設で一体型のモジュールに組み上げた上で搬送・定置する PEM (Prefabricated Engineered barrier system Module) 方式を、これまでの検討の主体であった原位置での施工・定置方式と並ぶ、有力な方式として位置付けた。

また、操業安全については、安全対策の多重化を基本とした考え方を示し、廃棄体搬送時に想定される異常事象を対象に適用した。このほか、操業安全対策が閉鎖後長期の安全性に影響を及ぼさないための対策の考え方を、影響を与える因子の検討に基づいて整備した。

(4) 多様な地質環境に対応した処分場の設計および操業技術

NUMO では、わが国の多様な地質環境に対応できるよう、処分場の設計、建設・操業・閉鎖に関する技術の整備に取り組んできた。具体的なサイトの地質環境特性が明らかになれば、上記に示した技術を利用して、サイトに適した処分場の設計を進める予定である。

多様な地質環境への対応としては、周囲を海に囲まれたわが国の地理的条件も踏まえ、第2次取りまとめまで検討の中心であった内陸部に加え、沿岸域における地質環境を地下水流動場や地下水化学環境などの観点から設計上の特徴や留意点を整理した。具体的には、海水準変動に伴う地下水流動の変化を考慮した地下施設位置の設定の考え方や、塩分濃度が高い地下水を考慮した緩衝材などの設計の考え方をまとめている。

また、実際に想定される多様な操業環境に対応できるよう廃棄体の定置方式や適用する操業技術のオプションの整備を進めている。例えば、地下環境において想定される条件(湧水、高湿度環境、岩盤強度の局所的な脆弱性など)を考慮し、処分孔縦置き定置方式および処分坑道横置き定置方式について、技術開発の到達レベル、作業効率の向上の見通しなどの観点から、現段階で有望と考えられる操業技術のオプションとして、縦置き・ブロック定置方式、横置き・吹付方式、横置き・PEM方式を選定した。

(5) 工学的対策を支える技術の整備

以上で述べた処分場の設計技術および建設・操業・閉鎖に関連する技術を整備するために、NUMO は、基盤研究開発機関と連携して技術開発を進めている。第2次取りまとめ以降は、特に人工バリア材料の長期挙動や相互作用に関する現象の理解が進むとともに、人工バリアを搬送・定置するための技術が大きく進展した。

人工バリアの設計では、サイトの地球化学特性やバリア材料間の相互作用に関する知見に基づいて、人工バリアの長期健全性が保たれるように設計を実施する。そのために、オーバーパックの腐食形態や放射線影響、塩水環境における緩衝材の特性、緩衝材とセメントとの相互作用などについて研究開発を進め、大学などの専門家の意見などを踏まえて知見を集約し、設計や性能評価に反映するための基盤的な情報を整備した。これにより、人工バリアの長期健全性に対する対策の検討が可能となり、信頼性を向上させることができる。

建設・操業・閉鎖にかかわる技術開発においては、オーバーパックの溶接および検査技術について、候補となる複数の方法について遠隔溶接・検査への適用性を確認した。また、操業技術のオプションとして、緩衝材ブロックの製作・搬送・定置や PEM 方式などに関連した要素技術について実証的な試験を実施し、それぞれの技術の実現性を見通しを得た。

以上のように、多様な地質環境に対応し、人工バリアの長期挙動を反映した処分場の設計の考え

方や操業技術のオプションについて、技術の整備を進めてきた。これらの成果により、処分場の設計および人工バリアの製作・搬送・定置に関して、安全性と技術に対する信頼性が向上した。

3. 地層処分システムの長期安全性評価技術の進展

第2次取りまとめや第2次 TRU レポート⁵においては、わが国の一般的な地質環境条件を想定して、地層処分システムの長期安全性を評価するための基本的な手法が示された。NUMO では、第2次取りまとめ以降、実際のサイトにおける地層処分システムの長期安全性を段階的に評価していくための考え方を検討してきた。また、これと並行して、NUMO および基盤研究開発機関は、長期安全性の観点から、多様な地質環境や設計オプションをより現実に即して評価するために、長期安全性評価に係る個別技術の高度化を進めた。以下に、主要な技術の進展について概説する。

(1) 基本的な考え方の整備

事業段階において長期安全性を評価するために、実際のサイトにおける段階的な情報の増加や第2次取りまとめ以降の国際的な動向を考慮して、長期安全性の評価、不確実性の取り扱い、シナリオの構築、モデルの選定、安全評価データセットの整備などに対する基本的な考え方を整備した。

(2) シナリオ構築手法の整備

地質環境の多様性と長期変遷への対応として、沿岸域における海水の影響や塩淡境界の時間的な変遷をより現実に即して取り扱うための地層処分システムの状態設定手法を開発した。また、事業段階において、関連する種々の科学的な知見を適切に安全評価に取り込めるようにするため、安全機能を中心軸として地層処分システムの長期挙動を把握し、ニアフィールドの長期変遷に関するシナリオを構築するための手法を開発した。さらには、基盤研究開発機関においても、FEP⁶情報の整備、自然現象の影響評価手法などのシナリオ構築に関する検討が進められている。これらの成果により、シナリオ構築を行う上で基盤となる技術や情報が強化された。

(3) モデルの整備

NUMO は、地下水の流れと水質の変遷を考慮して、天然バリア中の核種移行と生物圏を評価するためのモデル化技術を整備した。また、現時点での処分場の設計において提示されている多様な設計オプションに対して、より現実に即して評価できるようにするため、三次元の核種移行解析モデルを開発した。基盤研究開発機関においても、データセットに分布を与えた統計論的な解析手法や、統計論的な評価結果に対して影響が大きいパラメータを抽出する方法などが開発されている。これらの成果により、さまざまな安全解析のニーズに対応するための技術基盤が拡充され、安全評価モデルの選定における技術的な選択肢が拡充された。

(4) データセット設定技術の整備

長期安全性評価の信頼性を確保するためには、地質環境の多様性や長期変遷を考慮した上で、データセットを適切に設定することが重要である。第2次取りまとめ以降、基盤研究開発機関では、核種移行解析に用いるさまざまなデータベース（熱力学、収着、拡散、ガラスの溶解などに関する

⁵ TRU 廃棄物処分技術検討書—第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—(電気事業連合会・核燃料サイクル機構, 2005)

⁶ 地層処分システムの特性 (Feature), 特性に影響を与える事象 (Event), システムの時間的変遷の過程 (Process) の略称

各データベース)の開発・更新や生物圏評価に用いる環境移行データの整備が進められている。さらには、整備されたデータベースを用いたパラメータの設定手法についても検討が進められた。これらの成果により、核種移行解析を行う際に必要となる基盤的情報が強化された。

以上のように、地層処分事業における長期安全性評価技術の信頼性が一段と向上している。

4. 概要調査地区選定段階および精密調査地区選定段階の技術的取り組み

事業の各段階の実施事項とそれらを支える技術の整備について、特に当面の事業段階である概要調査地区選定段階(文献調査の段階)、精密調査地区選定段階(概要調査の段階)での技術の適用について具体的に示した。

(1) 文献調査および概要調査を実施するための目標および実施事項

段階的なサイト選定の目標および実施項目は以下に示すとおりである。

概要調査地区選定段階(文献調査の段階)では、事業目標を「概要調査地区選定」とし、また、安全確保にかかわる目標を「自然現象の著しい影響の回避(明らかに不適格な地域を避ける)」としている。概要調査地区選定上の考慮事項への適格性の確認、サイトの地質環境特性に応じた概略的な処分場概念の構築を実施し、最終的に法定要件への適合性を評価して概要調査地区を選定する。

精密調査地区選定段階(概要調査の段階)では、事業目標を「精密調査地区選定」とし、また、安全確保にかかわる目標を「自然現象の著しい影響の回避」、「長期安全性確保の見通し」、「事業期間中の安全性確保の見通し」を得ることとしている。別に定める精密調査地区選定上の考慮事項への適格性の確認、処分場概念の構築、セーフティケースの構築を実施し、最終的に、最終処分法に基づく法定要件ならびに原子力安全委員会が策定する安全審査基本指針(あるいは自主基準)への適合性を評価して、精密調査地区を選定する。

各段階の終わりには、NUMOは次段階の調査地区を選定し、国による承認を経て、調査地区の選定を完了する。以上の目標と主要な実施項目が達成されるよう、次に示す基本的な実施手順を準備した。

(2) 各段階を進めるための基本的な実施手順および技術の準備

各段階の基本的な実施手順は以下に示すとおりである。

概要調査地区選定段階(文献調査の段階)においては、まず、調査範囲を対象とした文献を詳細に分析し、評価する。その結果に基づいて、自然現象にかかわる影響の評価、地質環境モデルの構築、処分場の概念検討と概略的な安全性の検討を実施する。これらの検討結果を処分場概念として統合化し、工学的成立性、閉鎖後長期の安全性、地質環境の調査・評価、経済性などの観点からの概略的な評価を行う。その結果に基づいて、次段階の調査により取得すべき安全性にかかわる重要なサイトの情報を特定する。その上で、次段階の概要調査計画を立案する。併せて当該区域に処分場を設置した場合の地上・地下施設のイメージを作成する。以上の検討の結果を取りまとめ「文献調査に関する法定報告書」ならびに「文献情報に基づく処分場の概要」として公表する。

精密調査地区選定段階(概要調査の段階)においては、自然現象の長期的な影響の評価結果について、地表調査、ボーリング調査により確認する。また、地質環境モデルに基づいて、処分場を設置する候補母岩を選定し、選定した候補母岩を対象に、人工バリアの設計、処分施設の基本レイア

ウトの設定、予備的な安全評価を実施する。また、事業期間中の安全性（一般労働安全の確保、放射線安全の確保）、周辺環境の保全策の検討などを実施する。これらの検討結果に基づいて、複数の処分場概念を構築し、工学的成立性、閉鎖後長期の安全性、地質環境の調査・評価、経済性などの観点からの概略的な評価を行った上で、サイトに最も適する概念として、レファレンス処分場概念を選定する。以上の検討結果を取りまとめ「概要調査に関する法定報告書」を作成し、「概要調査に基づく概念設計と予備的安全評価に関する報告書」とその補足文書とともに安全性を提示する。これら一連の文書群がこの段階のセーフティケースを構成する。

なお、ここでの記述は、サイト選定の初期の2段階に記述の焦点を絞ったが、処分施設建設地選定の実施や処分場の建設・操業・閉鎖の実施に必要な技術についても、事業の推進に必要な技術の整備が進んでいる。このことから、地層処分事業の技術的な実現性およびその信頼性が向上したと判断している。今後、これらの成果についても、技術の実用化を進め、地層処分事業に反映する。

IV. まとめ

NUMO は、国の安全規制のもとで、安全確保構想に基づき、地層処分事業全体を俯瞰した上で、事業を安全に実施する。

安全な地層処分を支える技術は、NUMO が設立された 2000 年以降、以下の点で着実に進展した。

- ① より現実的な調査・設計・評価が可能な技術を整備した。
- ② サイト選定するための実用的な技術を体系的に整備した。
- ③ 調査・設計・評価において、多様な地質環境に対応可能な技術を整備した。

これらの技術の進展により、処分事業の実施に係る技術的信頼性が向上し、具体的にサイトが決まっていない現段階において当面の概要調査地区選定段階（文献調査の段階）とその次の段階である精密調査地区選定段階（概要調査の段階）の事業を実施するための具体的な技術の準備が整った。また、処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）以降の事業を実施するための技術についても、さらなる技術の蓄積がなされた。今後は、サイト固有の課題や、精密調査地区の選定以降に必要な技術を中心に、一層の信頼性の向上を目指し、基盤研究開発機関と緊密に連携し技術開発に取り組んでいく。

なお、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震に起因する東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故を踏まえ、国や学会、当事者などの調査結果を見据えながら、事業期間中や閉鎖後長期の安全確保に関するより幅広い視点からの検討を実施し、そこで得られた成果については、別途取りまとめる予定である。

目 次

第1章 はじめに	1-1
1.1 本報告書作成の背景と目的	1-1
1.2 本報告書における技術的信頼性の示し方	1-2
1.3 本報告書の構成	1-3
参考文献	1-6
第2章 わが国における地層処分事業の背景	2-1
2.1 原子力の利用と特定放射性廃棄物の発生	2-1
2.1.1 わが国の原子力発電と原子燃料サイクルの概要	2-1
2.1.2 放射性廃棄物	2-2
2.1.2.1 放射性廃棄物の種類	2-2
2.1.2.2 放射性廃棄物の埋設処分の方法	2-3
2.2 地層処分の概要	2-6
2.2.1 地層処分の選択と固有の課題	2-6
2.2.2 地層処分に関する放射線防護原則	2-6
2.2.2.1 操業中の放射線防護	2-7
2.2.2.2 処分場閉鎖後の放射線防護	2-7
2.2.3 わが国における地層処分事業の進展	2-9
2.2.3.1 基盤的研究開発の段階	2-9
2.2.3.2 最終処分法の制定と実施主体の設立	2-9
2.2.3.3 最終処分法の改正	2-11
2.2.3.4 段階的に整備される安全規制	2-13
2.2.3.5 事業の実施段階	2-15
2.2.4 わが国の地層処分事業の特徴	2-16
2.2.4.1 わが国の地質環境の特徴	2-16
2.2.4.2 三段階のサイト選定と公募	2-16
2.2.4.3 長期にわたる事業	2-18
2.2.4.4 役割分担による技術開発	2-18
2.2.4.5 処分場の規模	2-19
2.3 諸外国の取り組み状況	2-21
参考文献	2-23
第3章 安全確保構想	3-1
3.1 安全確保の目標	3-2
3.1.1 安全確保の考え方と目標設定	3-2
3.1.2 閉鎖後長期の安全確保	3-3
3.1.2.1 適切なサイト選定と確認	3-4
3.1.2.2 処分場の設計・施工などの適切な工学的対策	3-4
3.1.2.3 地層処分システムの長期安全性の評価	3-5
3.1.3 事業期間中の安全確保	3-8

3.1.3.1	放射線安全の確保	3-9
3.1.3.2	一般労働安全の確保	3-9
3.1.3.3	周辺環境の保全	3-9
3.1.4	閉鎖後長期と事業期間中の安全確保の両立	3-10
3.2	安全確保に向けた NUMO の方針	3-12
3.2.1	目標を達成するための方針策定	3-12
3.2.2	方針1「安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進」	3-13
3.2.2.1	方針1に関する基本的考え方	3-13
3.2.2.2	方策1：事業全体を俯瞰した計画の策定	3-14
3.2.2.3	方策2：閉鎖後長期の安全性の繰り返し確認	3-16
3.2.2.4	方策3：事業期間中の安全対策と環境保全策	3-25
3.2.3	方針2「信頼性の高い技術を用いた事業推進」	3-29
3.2.3.1	方針2に関する基本的考え方	3-29
3.2.3.2	方策1：計画的な技術の整備	3-30
3.2.3.3	方策2：技術に関する品質保証の的確な実施	3-37
3.2.3.4	方策3：NUMO の組織および国内外協力体制の整備	3-40
3.2.4	方針3「安全性への信頼感醸成へ向けた技術的な取り組み」	3-43
3.2.4.1	方針3に関する基本的な考え方	3-43
3.2.4.2	方策1：事業の各段階における意思決定にかかわる情報提供	3-44
3.2.4.3	方策2：安全性や技術の信頼性にかかわる日常的な情報提供と対話活動	3-45
3.2.4.4	方策3：将来世代が適切な判断を行うための環境整備	3-49
3.3	地層処分事業にかかわる個別課題に対する NUMO の考え方	3-51
3.3.1	地層処分事業におけるリスクマネジメント	3-51
3.3.2	モニタリング	3-53
3.3.3	可逆性と回収可能性	3-55
3.3.4	処分場の閉鎖	3-59
	参考文献	3-62
第4章	地層処分事業の段階的な推進	4-1
4.1	方針の具体的展開（ロードマップ）	4-1
4.1.1	基本的考え方	4-1
4.1.1.1	地層処分事業の段階的な展開と主要なマイルストーン	4-1
4.1.1.2	地層処分事業の展開と各分野間の連携	4-2
4.1.1.3	三つの方針とロードマップの関係	4-3
4.1.1.4	各段階における分野間の連携	4-6
4.1.1.5	各分野の段階間における連携	4-8
4.1.2	方針1の具体的展開（安全確保ロードマップ）	4-9
4.1.2.1	方針1を具体的に展開するに当たっての考え方	4-9
4.1.3	方針2の具体的展開（技術開発ロードマップ）	4-18
4.1.3.1	方針2を具体的に展開するに当たっての考え方	4-18
4.1.3.2	技術開発ロードマップ	4-19

4.1.3.3 分野別の技術開発ロードマップ	4-21
4.1.4 方針3の具体的展開	4-26
4.1.4.1 方針3を具体的に展開するに当たっての考え方	4-26
4.1.4.2 信頼感醸成ロードマップ	4-26
4.2 事業中の各段階における実施事項	4-28
4.2.1 サイト選定および安全審査の段階	4-28
4.2.1.1 概要調査地区選定段階（文献調査の段階）	4-28
4.2.1.2 精密調査地区選定段階（概要調査の段階）	4-33
4.2.1.3 処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）	4-36
4.2.1.4 安全審査の段階	4-40
4.2.2 建設～事業廃止までの段階	4-41
4.2.2.1 建設段階	4-41
4.2.2.2 操業段階（操業期間中）	4-41
4.2.2.3 操業段階（操業の終了・閉鎖措置計画認可申請）	4-42
4.2.2.4 閉鎖段階	4-42
4.2.2.5 閉鎖後～事業の廃止までの段階	4-43
参考文献	4-44
第5章 地質環境の調査・評価技術	5-1
5.1 わが国の地質環境の特徴と評価の考え方	5-1
5.1.1 自然現象の影響と将来予測	5-1
5.1.1.1 自然現象の影響	5-2
5.1.1.2 自然現象の将来予測	5-8
5.1.2 わが国の地質環境の多様性	5-17
5.1.2.1 地層処分にとって重要な地質環境の特性	5-17
5.1.2.2 多様な地質環境への対応	5-18
5.1.2.3 多様な地質環境に対する調査・評価の事例	5-22
5.2 文献調査および概要調査の基本的な考え方と進め方	5-25
5.2.1 文献調査および概要調査の基本的な考え方	5-25
5.2.1.1 安全確保にかかわる目標	5-25
5.2.1.2 段階的な調査・評価	5-25
5.2.1.3 不確実性の取り扱い	5-30
5.2.1.4 調査・評価技術の適用性の確認	5-31
5.2.1.5 調査・評価の体系化	5-32
5.2.2 文献調査の進め方	5-35
5.2.2.1 文献調査の目標	5-35
5.2.2.2 文献調査の準備	5-37
5.2.2.3 文献調査の実施	5-40
5.2.2.4 文献調査における評価	5-43
5.2.3 概要調査の進め方	5-44
5.2.3.1 概要調査の目標	5-44

5.2.3.2	概要調査の準備	5-46
5.2.3.3	概要調査の実施	5-51
5.2.3.4	概要調査における評価	5-53
5.2.4	調査・評価における品質マネジメント	5-55
5.2.4.1	品質マネジメントシステムの考え方	5-55
5.2.4.2	品質マネジメントシステムの整備	5-55
5.3	文献調査および概要調査の体系	5-58
5.3.1	自然現象の影響にかかわる調査・評価	5-58
5.3.1.1	火山・火成活動	5-58
5.3.1.2	地震・断層活動	5-69
5.3.1.3	隆起・侵食	5-77
5.3.2	地質環境特性にかかわる調査・評価	5-84
5.3.2.1	地質環境特性	5-84
5.3.2.2	施工・操業安全にかかわる調査・評価	5-94
5.4	調査・評価技術の整備	5-96
5.4.1	調査・評価技術の進展	5-96
5.4.1.1	自然現象の影響にかかわる調査・評価技術	5-96
5.4.1.2	地質環境特性にかかわる調査・評価技術	5-121
5.4.1.3	多様な地質環境にかかわる調査・評価技術	5-141
5.4.2	調査・評価技術の確認	5-151
5.4.3	調査・評価技術の評価と信頼性向上に向けた取り組み	5-158
5.4.3.1	技術の信頼性の評価	5-158
5.4.3.2	さらなる信頼性向上に向けた取り組み	5-160
5.5	まとめ	5-164
	参考文献	5-167
第6章 処分場の設計, 建設・操業・閉鎖技術		6-1
6.1	地層処分事業における設計の基本方針	6-2
6.1.1	段階的な設計の進め方と技術・知識の進展と成果の反映	6-2
6.1.2	不確実性への対処	6-4
6.1.2.1	地質環境情報の不確実性への対処	6-4
6.1.2.2	建設・操業・閉鎖に係る不確実性への対処	6-5
6.1.2.3	ニアフィールドの長期の性能変化に係る不確実性への対処	6-5
6.1.3	品質保証の考え方	6-5
6.2	処分場の安全機能と技術要件	6-7
6.2.1	安全確保の対象と安全機能の設定の考え方	6-7
6.2.1.1	安全確保の対象	6-7
6.2.1.2	安全機能の設定の考え方	6-8
6.2.2	閉鎖後長期の安全確保の要件	6-9
6.2.2.1	高レベル放射性廃棄物の多重バリアシステムの安全機能	6-10
6.2.2.2	地層処分低レベル放射性廃棄物処分場の安全機能	6-20

6.2.2.3	併置処分の考え方	6-22
6.2.3	事業期間中の安全確保の要件	6-23
6.2.3.1	放射線安全の安全対策の考え方	6-23
6.2.3.2	一般労働安全の安全対策の考え方	6-25
6.2.3.3	環境保全対策の考え方	6-26
6.2.3.4	事業期間中の安全確保の要件との処分施設の構成要素の関係	6-27
6.2.3.5	地上施設設計の技術要件	6-28
6.2.3.6	地下施設設計の技術要件	6-29
6.2.4	事業の進展に伴う安全機能と技術要件の管理	6-30
6.3	処分場の設計	6-31
6.3.1	基本的な設計の流れ	6-31
6.3.2	人工バリアの設計	6-34
6.3.2.1	オーバーパックの設計	6-34
6.3.2.2	緩衝材の設計	6-36
6.3.2.3	充填材の設計	6-38
6.3.3	地下施設の設計	6-39
6.3.3.1	地下施設設置位置の設定	6-39
6.3.3.2	坑道仕様・廃棄体定置仕様の設定	6-42
6.3.3.3	地下施設レイアウトの設定	6-47
6.3.3.4	埋め戻し・プラグの設計	6-49
6.3.4	地上施設の設計	6-50
6.3.4.1	地上施設設置区域の選定	6-51
6.3.4.2	アクセス方法の検討	6-51
6.3.4.3	施設群ゾーニングの検討	6-51
6.3.4.4	造成計画・施設設計	6-52
6.3.5	高レベル放射性廃棄物処分施設と地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設を併置する場合の留意点	6-52
6.4	処分場の建設・操業・閉鎖	6-55
6.4.1	処分場の建設	6-55
6.4.1.1	地上施設の建設	6-55
6.4.1.2	地下施設の建設	6-55
6.4.2	処分場の操業	6-60
6.4.2.1	高レベル放射性廃棄物処分施設	6-60
6.4.2.2	地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設	6-66
6.4.3	処分場の閉鎖	6-67
6.4.3.1	地下施設の閉鎖	6-67
6.4.3.2	地上施設の解体・撤去	6-69
6.4.4	事業期間中の安全確保	6-69
6.4.4.1	放射線安全の確保	6-70
6.4.4.2	一般労働安全の確保	6-73

6.4.4.3	環境保全の確保	6-74
6.4.5	閉鎖後長期と事業期間中の安全性両立の観点からの分析	6-78
6.5	多様な地質環境への対応	6-81
6.5.1	沿岸域に処分場を設置するときの対応	6-81
6.5.1.1	沿岸域の地質環境を考慮した設計上の特徴・留意点	6-81
6.5.1.2	「廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約」への配慮	6-87
6.5.2	想定される地質環境特性へ対応するための処分概念・技術オプション	6-88
6.5.2.1	想定される地質環境特性へ対応する処分概念・技術オプションの考え方	6-88
6.5.2.2	処分概念・技術オプションの基本形態の特徴	6-88
6.5.2.3	処分孔竖置き定置方式と処分坑道横置き定置方式の作業性	6-95
6.5.2.4	想定される地下環境の特徴と適応性	6-97
6.5.2.5	作業性と地下環境への適応性のまとめ	6-100
6.5.2.6	作業性および地下環境条件を考慮した技術オプション	6-102
6.5.2.7	処分概念・技術オプションの特徴のまとめ	6-108
6.6	工学的対策を支える技術の整備	6-112
6.6.1	工学的対策を支える技術の概要	6-112
6.6.2	人工バリア材料の基本特性と長期挙動に関する技術の整備状況	6-115
6.6.2.1	ガラス固化体の長期挙動	6-117
6.6.2.2	オーバーパックの長期挙動	6-119
6.6.2.3	緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用	6-127
6.6.2.4	低アルカリ性セメントの開発	6-137
6.6.3	地層処分施設の耐震性評価	6-138
6.6.4	建設・操業・閉鎖技術	6-141
6.6.4.1	低アルカリ性セメントの実施工への適用性確認	6-141
6.6.4.2	オーバーパックの遠隔溶接・検査技術	6-143
6.6.4.3	緩衝材の製作・搬送・定置技術	6-146
6.6.4.4	廃棄体回収技術	6-153
6.6.5	工学的対策を支える技術に対する今後の課題	6-158
6.6.5.1	人工バリアの長期挙動・相互作用に関する知見の整備に関する技術開発	6-158
6.6.5.2	人工バリアの製法・搬送定置の工学的実現性の向上に関する技術開発課題	6-159
6.6.5.3	人工バリアの信頼性向上に関する技術開発課題	6-159
6.7	まとめ	6-160
	参考文献	6-162
第7章 地層処分システムの長期安全性評価技術		7-1
7.1	基本的考え方	7-1
7.1.1	安全評価の手順	7-2
7.1.2	安全評価戦略の策定	7-4
7.1.2.1	安全評価の目的の設定	7-4
7.1.2.2	不確実性への対応	7-5
7.1.2.3	安全評価における品質保証	7-7

7.1.3 シナリオの構築	7-8
7.1.3.1 状態設定とシナリオの作成・分類	7-8
7.1.3.2 シナリオ分類の枠組み	7-9
7.1.4 モデルの選定	7-12
7.1.4.1 モデルの信頼性向上	7-12
7.1.4.2 モデルの不確実性の取り扱い	7-13
7.1.5 データセットの設定	7-14
7.1.5.1 設定の考え方	7-14
7.1.5.2 データの不確実性の取り扱い	7-14
7.1.6 安全解析の実施および基準との比較	7-15
7.1.6.1 安全解析の実施	7-15
7.1.6.2 安全解析の品質保証	7-15
7.1.7 各事業段階における安全評価の役割	7-16
7.1.7.1 概要調査地区選定段階（文献調査の段階）	7-17
7.1.7.2 精密調査地区選定段階（概要調査の段階）	7-18
7.1.7.3 処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）	7-19
7.2 安全評価の進め方	7-20
7.2.1 シナリオ構築の具体的な進め方	7-20
7.2.2 モデルの選定とデータセットの設定に関する具体的な進め方	7-27
7.2.2.1 人工バリアと天然バリアのモデル	7-27
7.2.2.2 生物圏のモデル	7-35
7.3 安全評価を支える技術の整備	7-39
7.3.1 安全評価に関する技術開発	7-39
7.3.2 シナリオの構築に関する取り組み	7-45
7.3.2.1 沿岸域における地質環境の長期変遷を考慮したシステムの状態設定手法	7-45
7.3.2.2 ニアフィールドの長期変遷を考慮したシナリオ構築手法	7-50
7.3.2.3 自然現象の著しい影響を仮想的に評価するためのシナリオ構築手法	7-58
7.3.2.4 FEPに基づくシナリオ構築手法およびFEP情報の整備	7-61
7.3.3 モデルの開発に関する取り組み	7-62
7.3.3.1 地質環境および地表環境の変遷を考慮した核種移行解析モデルの高度化	7-62
7.3.3.2 母岩の不均質性および設計のオプションを考慮した核種移行解析モデルの高度化	7-67
7.3.3.3 核種移行解析モデルにおける計算手法の効率化	7-69
7.3.4 データセットの整備に関する取り組み	7-73
7.3.4.1 データの整備	7-73
7.3.4.2 データセットの設定手法	7-75
7.3.4.3 地層処分低レベル放射性廃棄物に関する検討状況	7-76
7.3.5 今後の課題	7-77
7.4 まとめ	7-79
参考資料1 断層活動の影響に関する安全解析の例	7-80

参考資料 2 沿岸域の環境変遷を考慮した安全解析の例	7-86
参考資料 3 三次元核種移行モデルの例題への適用	7-93
参考文献	7-100
第 8 章 概要調査地区選定段階および精密調査地区選定段階の技術的取り組み	8-1
8.1 サイト選定段階における安全確保への取り組み	8-2
8.1.1 安全確保の取り組みの考え方	8-3
8.1.1.1 地層処分に適した地質環境の選定の考え方	8-3
8.1.1.2 多重バリアシステムによる安全確保の考え方	8-3
8.1.1.3 処分場概念の構築の考え方	8-4
8.1.1.4 セーフティケースの考え方	8-5
8.1.2 文献調査の開始から精密調査地区選定までの流れ	8-5
8.2 概要調査地区選定段階における技術的な取り組みの概要	8-8
8.2.1 概要調査地区選定段階における安全確保の目標と実施事項	8-8
8.2.2 文献調査計画の立案	8-11
8.2.3 文献調査の実施（文献情報の収集）	8-11
8.2.4 自然現象の影響にかかわる調査・評価	8-12
8.2.4.1 火山・火成活動の調査・評価	8-12
8.2.4.2 地震・断層活動の調査・評価	8-13
8.2.4.3 隆起・侵食の調査・評価	8-13
8.2.5 第四紀の未固結堆積物ならびに鉱物資源に関する調査・評価	8-13
8.2.6 概要調査地区の選定	8-14
8.2.6.1 概要調査地区選定上の考慮事項への適格性の確認	8-14
8.2.6.2 概要調査地区と補足的に調査する範囲の設定	8-14
8.2.6.3 文献調査に関する法定報告書の説明と概要調査の実施の判断	8-15
8.2.7 地質環境特性の調査・評価	8-15
8.2.8 処分場の概略検討	8-16
8.2.9 処分場の安全性の概略検討	8-16
8.2.10 次段階の準備	8-17
8.3 精密調査地区選定段階における技術的な取り組みの概要	8-20
8.3.1 精密調査地区選定段階における安全確保の目標と実施事項	8-20
8.3.2 概要調査の実施	8-24
8.3.2.1 地表調査のフェーズにおける調査の実施および概要調査計画の更新	8-24
8.3.2.2 ボーリング調査のフェーズにおける調査	8-25
8.3.2.3 概要調査における一般労働安全の確保と環境保全策	8-25
8.3.3 自然現象の影響にかかわる調査・評価	8-25
8.3.3.1 火山・火成活動の調査・評価	8-26
8.3.3.2 地震・断層活動の調査・評価	8-26
8.3.3.3 隆起・侵食の調査・評価	8-26
8.3.4 地質環境特性の調査・評価	8-27
8.3.5 候補母岩の選定	8-28

8.3.5.1 熱環境の評価	8-30
8.3.5.2 力学場の評価	8-31
8.3.5.3 水理場の評価	8-32
8.3.5.4 化学環境の評価	8-33
8.3.6 処分場の概念設計	8-33
8.3.6.1 人工バリアの概念設計	8-34
8.3.6.2 地上施設および地下施設の設計	8-34
8.3.6.3 処分概念・技術オプションの絞り込み	8-38
8.3.7 予備的な安全評価	8-39
8.3.7.1 安全評価戦略の策定	8-40
8.3.7.2 地層処分システムの設定	8-41
8.3.7.3 シナリオの構築	8-42
8.3.7.4 モデルの設定	8-46
8.3.7.5 データセットの整備	8-46
8.3.7.6 安全解析の実施	8-47
8.3.7.7 安全評価の信頼性に関する検討	8-48
8.3.8 レファレンス処分場概念の構築とセーフティケースの作成	8-48
8.3.9 精密調査地区の選定	8-49
8.3.9.1 精密調査地区選定上の考慮事項への適格性の確認	8-49
8.3.9.2 精密調査地区の設定	8-49
8.3.9.3 概要調査に関する法定報告書の説明と精密調査の実施の判断	8-49
8.3.10 次段階の準備	8-49
8.4 まとめ	8-51
参考資料 概要調査地区選定段階および精密調査地区選定段階の実施項目と関連する技術および 検討事項の関係	8-53
参考文献	8-56
第9章 おわりに	9-1

図目次

図 2.1.1-1	原子燃料サイクル	2-1
図 2.1.2-1	放射性廃棄物の処分方法の概念図	2-4
図 2.1.2-2	高レベル放射性廃棄物および地層処分低レベル放射性廃棄物形態のイメージ	2-5
図 2.2.3-1	NUMO 組織図 (2011 年 3 月現在)	2-11
図 2.2.3-2	地層処分低レベル放射性廃棄物のグループ分類と特徴	2-13
図 2.2.4-1	三段階のサイト選定過程	2-17
図 2.2.4-2	処分場の地下施設の例	2-19
図 2.2.4-3	高レベル放射性廃棄物処分の基本的なバリア構成	2-20
図 2.2.4-4	地層処分低レベル放射性廃棄物処分の基本的なバリア構成	2-20
図 3-1	安全確保構想の全体構成	3-2
図 3.1.4-1	閉鎖後長期の安全確保と事業期間中の安全確保の要件両立の考え方	3-11
図 3.2.2-1	要件管理システム	3-15
図 3.2.2-2	知識マネジメントシステムの概念	3-16
図 3.2.2-3	セーフティケースの構成要素と役割	3-21
図 3.2.2-4	セーフティケース構築に向けて三つの安全確保策を実施する過程で生じる不確実性	3-23
図 3.2.2-5	三段階の調査と平行した環境配慮の取り組みの手順	3-29
図 3.2.3-1	技術開発スケジュールと基盤研究開発との関連	3-31
図 3.2.3-2	技術開発課題の体系的整理	3-32
図 3.2.3-3	NUMO の技術開発と基盤研究開発機関における相互補完的な分担	3-33
図 3.2.3-4	基盤研究開発機関と緊密に連携した技術開発の取り組み	3-34
図 3.2.3-5	QMS 文書の階層構造および基準、要領書および標準様式集の構成	3-39
図 3.2.3-6	事業期間中の技術要員見通し	3-41
図 3.2.3-7	地層処分事業の国際的な協力	3-43
図 3.2.4-1	高レベル放射性廃棄物についての不安 (一般の方々, 回答者数約 1,400 名)	3-47
図 3.2.4-2	地層処分の概念や安全性を体感できる施設	3-49
図 3.3.1-1	ISO31000 におけるリスクマネジメントの原則, 枠組み, プロセスの関係	3-52
図 3.3.3-1	処分場の建設, 操業, 閉鎖措置の区分概念図	3-57
図 3.3.3-2	回収可能性に関する NUMO の基本的考え方	3-58
図 3.3.3-3	廃棄体の回収にかかわる R スケール	3-58
図 3.3.4-1	処分場の閉鎖に向けた技術的な情報の集約	3-60
図 4.1.1-1	地層処分事業の段階的な展開	4-2
図 4.1.1-2	三つの専門分野間の連携	4-3
図 4.1.1-3	安全確保の三つの方針と事業全体の意思決定の枠組み	4-4
図 4.1.1-4	ロードマップの関係図	4-6
図 4.1.1-5	事業各段階における専門分野間の連携	4-7
図 4.1.1-6	精密調査地区選定に至る意思決定の枠組み例	4-7
図 4.1.1-7	各段階での意思決定と段階間の各分野の連携	4-8

図 4.1.2-1	安全確保ロードマップ（概要版）	4-10
図 4.1.3-1	技術開発ロードマップの構成	4-19
図 4.1.3-2	技術開発ロードマップ（概要版）	4-20
図 4.1.3-3	技術開発ロードマップ（適切なサイト選定と確認）	4-23
図 4.1.3-4	技術開発ロードマップ（適切な工学的対策）	4-24
図 4.1.3-5	技術開発ロードマップ（地層処分システムの長期安全性の評価，事業期間中の各段階の安全性）	4-25
図 4.1.4-1	信頼醸成ロードマップ	4-27
図 4.2.1-1	概要調査地区選定段階（文献調査の段階）における実施フロー図	4-30
図 4.2.1-2	精密調査地区選定段階（概要調査の段階）における実施フロー図	4-34
図 4.2.1-3	処分施設建設地選定段階（地上からの調査）における実施フロー図	4-37
図 4.2.1-4	処分施設建設地選定段階（地下調査施設での調査）における実施フロー図	4-39
図 5.1.1-1	自然現象と地質環境への影響の関係	5-2
図 5.1.1-2	自然現象の時間的な変動様式	5-10
図 5.1.1-3	過去から現在までの変動の解明の基本的な流れ（隆起運動の例）	5-11
図 5.1.1-4	ハワイ-天皇海山列の位置および形成年代	5-14
図 5.1.2-1	日本列島の地質分布	5-21
図 5.1.2-2	わが国の地質環境の基本的な分類	5-22
図 5.1.2-3	深地層の研究施設（JAEA の施設）の計画概要	5-24
図 5.1.2-4	沿岸域における調査・評価にかかわる技術開発のイメージ	5-24
図 5.2.1-1	地質環境モデル構築の流れ（イメージ）	5-28
図 5.2.1-2	地質環境モデル構築のための複数の空間スケールの領域設定の例	5-29
図 5.2.1-3	統合化データフローダイアグラムの検討例	5-33
図 5.2.1-4	文献調査および概要調査の流れ，調査や情報の連携・共有化（検討例）	5-34
図 5.2.2-1	文献調査にかかわる業務の基本的な流れ（公募の場合の検討例）	5-39
図 5.2.3-1	概要調査計画立案の流れ（検討例）	5-47
図 5.2.3-2	概要調査の施工管理の流れ	5-48
図 5.2.3-3	概要調査の実施体制にかかわる検討例	5-49
図 5.2.3-4	概要調査地区および補足的に調査する範囲の設定イメージ	5-50
図 5.2.3-5	概要調査の基本的な流れ（検討例）	5-52
図 5.2.3-6	概要調査における段階的なアプローチの成果イメージ（2 フェーズの例）	5-53
図 5.2.4-1	文献調査のための地質環境データ管理システムと支援ツールの概要	5-56
図 5.2.4-2	文献調査システムフロー（火山・火成活動の評価）	5-57
図 5.3.1-1	文献調査における火山・火成活動（マグマの貫入・噴出）にかかわる調査・評価の流れ（検討例）	5-60
図 5.3.1-2	概要調査における火山・火成活動（マグマの貫入・噴出）にかかわる調査・評価の流れ（検討例）	5-62
図 5.3.1-3	文献調査における火山・火成活動（熱・熱水の影響）にかかわる調査・評価の流れ（検討例）	5-65
図 5.3.1-4	概要調査における火山・火成活動（熱・熱水の影響）にかかわる調査・評価の流	

	れ (検討例)	5-67
図 5.3.1-5	文献調査における地震・断層活動にかかわる調査・評価の流れ (検討例) .	5-72
図 5.3.1-6	概要調査における地震・断層活動にかかわる調査・評価の流れ (検討例) .	5-74
図 5.3.1-7	文献調査における隆起・侵食にかかわる調査・評価の流れ (検討例)	5-79
図 5.3.1-8	概要調査における隆起・侵食にかかわる調査・評価の流れ (検討例)	5-81
図 5.3.2-1	文献調査における地質環境特性にかかわる調査・評価の流れ (検討例) ...	5-88
図 5.3.2-2	概要調査における地質環境特性にかかわる調査・評価の流れ (検討例) ...	5-92
図 5.3.2-3	物理探査測線設定の検討例	5-93
図 5.4.1-1	新規火山の発生可能性に関する検討例.....	5-100
図 5.4.1-2	地球物理学的手法を用いたマグマの存在に関する検討例.....	5-101
図 5.4.1-3	国際テクトニクス会議 (ITM) を通じて構築した確率論的評価手法.....	5-103
図 5.4.1-4	東北地方のケーススタディにおける火山発生確率マップの例.....	5-104
図 5.4.1-5	三次元地震探査で検出された小断層.....	5-110
図 5.4.1-6	逆断層・活褶曲帯の発達過程・影響範囲に関する模型実験 (CT スキャン断面)	5-112
図 5.4.1-7	東北地方のケーススタディにおける確率論的な歪速度分布図の例.....	5-115
図 5.4.1-8	河成段丘を用いた内陸部の隆起量の調査・評価事例.....	5-119
図 5.4.1-9	水理試験装置の概念図	5-128
図 5.4.1-10	シーケンシャル水理試験手法の適用例.....	5-129
図 5.4.1-11	GEOMASS システムによる水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析の事例	5-130
図 5.4.1-12	過去 150 万年間の地質環境の変遷を考慮した幌延地域の地下水流動解析結果	5-132
図 5.4.1-13	過去 150 万年間の地形変化を考慮した東濃地域の地下水流動解析結果	5-133
図 5.4.1-14	東濃地域における ^4He と ^{14}C 地下水年代測定結果.....	5-135
図 5.4.1-15	M3 解析による瑞浪超深地層研究所周辺の地下水の M3 解析結果	5-136
図 5.4.1-16	岩盤分類評価要素からの粘着力の評価図.....	5-138
図 5.4.1-17	超深地層研究所計画第 1 段階 (地上からの調査予測研究段階) の地質環境モデル の例	5-142
図 5.4.1-18	幌延深地層研究計画第 1 段階 (地上からの調査予測研究段階) の地質環境モデル の変遷	5-145
図 5.4.1-19	沿岸域プロジェクトにおける検討成果の例.....	5-149
図 5.4.2-1	実証研究の全体フロー	5-151
図 5.4.2-2	電中研横須賀地区における共同研究の実施状況.....	5-152
図 5.4.2-3	地質・岩盤性状に応じたボーリング掘削・調査手順.....	5-156
図 6.1.1-1	段階的な設計の進め方	6-3
図 6.1.1-2	段階的な処分施設設計の詳細化イメージ.....	6-3
図 6.1.2-1	廃棄体を定置するのが相対的に好ましくない場所のイメージ.....	6-4
図 6.2.1-1	安全確保の基本概念と事業段階の関係.....	6-8
図 6.2.2-1	閉鎖後長期の安全確保のための「隔離」と「閉鎖後閉じ込め」の基本概念的イメ	

	ージ	6-9
図 6.2.2-2	安全確保の基本概念, 安全機能および技術要件の関係	6-10
図 6.2.2-3	ガラス固化体廃棄体特性	6-15
図 6.2.3-1	地層処分の放射線防護上の事故と異常事象の要因の関係	6-25
図 6.3.1-1	主な設計対象部位	6-31
図 6.3.1-2	処分場の設計手順	6-33
図 6.3.2-1	オーバーパック厚さ検討の手順例	6-35
図 6.3.2-2	炭素鋼製オーバーパックの設計仕様例	6-35
図 6.3.2-3	緩衝材の設計フロー	6-37
図 6.3.2-4	ブロック方式を一例とした緩衝材仮仕様の確認	6-38
図 6.3.3-1	坑道径と深度の関係	6-41
図 6.3.3-2	粒跡線解析のイメージ	6-42
図 6.3.3-3	処分坑道断面の仕様例	6-44
図 6.3.3-4	坑道の力学安定性評価 (局所安全係数の分布)	6-45
図 6.3.3-5	廃棄体 1 本あたりの専有面積	6-46
図 6.3.3-6	地下施設レイアウト例 (高レベル放射性廃棄物処分場)	6-47
図 6.3.3-7	主応力方向と坑道軸方向の関係	6-48
図 6.3.3-8	地下水流動方向と処分場の方向	6-48
図 6.3.3-9	地下施設レイアウト例 (地層処分低レベル放射性廃棄物処分場)	6-49
図 6.3.3-10	閉鎖システムの評価で考慮したプラグ, 埋め戻し材の配置関係, および処分パネル規模の解析で考慮した境界条件の設定	6-50
図 6.3.4-1	地上施設イメージ図	6-51
図 6.3.4-2	地上施設のゾーニングと作業動線 (併置処分)	6-52
図 6.3.5-1	併置処分地下施設レイアウト例	6-53
図 6.3.5-2	相互影響因子の影響範囲の時間的变化	6-54
図 6.4.1-1	トンネルボーリングマシンの外観例 (左) と掘削イメージ (右)	6-55
図 6.4.1-2	ショートステップ工法による立坑の掘削	6-56
図 6.4.1-3	空気カプセルによる鉛直ずり出し技術	6-57
図 6.4.1-4	スウェーデン, エスポ地下研究所で実施された処分孔掘削	6-57
図 6.4.1-5	2 軸回転機構を有する処分孔掘削機	6-58
図 6.4.1-6	円形処分坑道の掘削イメージ (左; 発破掘削, 右; 機械掘削)	6-59
図 6.4.1-7	大空洞の建設時の様子	6-59
図 6.4.1-8	底部緩衝材施工	6-60
図 6.4.2-1	返還ガラス固化体の輸送に使用されている輸送車両	6-61
図 6.4.2-2	遠隔操作による廃棄体のオーバーパックへの封入工程の概念図 (炭素鋼単体オーバーパックの場合)	6-62
図 6.4.2-3	廃棄体の搬送と定置の流れ	6-63
図 6.4.2-4	緩衝材および廃棄体定置手順 (縦置き定置方式の場合)	6-63
図 6.4.2-5	PEM 方式	6-65
図 6.4.2-6	高レベル放射性廃棄物処分場における廃棄体の搬送・定置タイムチャートの例 (処	

分孔竖置き方式)	6-66
図 6.4.2-7 廃棄体の定置 (地層処分低レベル放射性廃棄物)	6-67
図 6.4.3-1 閉鎖措置計画申請時の処分場イメージ	6-68
図 6.4.3-2 アクセス坑道の閉鎖作業イメージ	6-68
図 6.4.4-1 斜坑の安全設計例	6-72
図 6.4.4-2 オーバーパックの衝突解析例	6-73
図 6.4.4-3 排水坑道, 排水槽, ポンプ室の模式図	6-74
図 6.4.4-4 生物多様性の影響評価の視点	6-77
図 6.4.5-1 閉鎖後長期の安全性に影響を与える因子	6-79
図 6.5.1-1 沿岸域における長期的な海水準変動と塩淡境界の移動	6-82
図 6.5.1-2 沿岸部におけるサイト環境の特徴 (地形が急峻な場合)	6-83
図 6.5.1-3 沿岸部におけるサイト環境の特徴 (地形が緩やかな場合)	6-83
図 6.5.1-4 粒跡線解析による海水準変動による流出点移動のイメージ	6-84
図 6.5.1-5 塩分濃度をパラメータとした自己シール性を確保するために必要な有効粘土密度 と緩衝材厚さの関係	6-85
図 6.5.1-6 離岸距離が大きい場合のアクセス坑道を含む処分場レイアウト例	6-87
図 6.5.2-1 処分孔竖置き定置方式	6-89
図 6.5.2-2 処分坑道横置き定置方式	6-90
図 6.5.2-3 搬送・定置技術オプション	6-91
図 6.5.2-4 フィンランドにおける緩衝材ブロック定置実証試験	6-92
図 6.5.2-5 処分孔竖置き定置方式の基本的な作業手順	6-92
図 6.5.2-6 ESDRED における粒状ベントナイト充填試験状況	6-93
図 6.5.2-7 処分坑道横置き定置方式 (原位置施工方式) の基本的な作業手順	6-94
図 6.5.2-8 スウェーデンによるスーパーコンテナ移動実証試験	6-94
図 6.5.2-9 処分坑道横置き定置方式 (PEM 方式) の基本的な作業手順	6-95
図 6.5.2-10 高温高湿環境下での緩衝材ブロックの挙動	6-98
図 6.5.2-11 水滴落下試験	6-99
図 6.5.2-12 処分孔竖置き定置方式と処分坑道横置き定置方式の作業性と想定される地下環境 条件への適応性	6-101
図 6.5.2-13 処分孔の力学安定性確保策	6-102
図 6.5.2-14 想定される地下環境条件を考慮した技術オプションの適用事例	6-103
図 6.5.2-15 作業性を考慮した処分坑道横置き定置方式 (原位置施工方式)	6-104
図 6.5.2-16 処分坑道横置き定置方式定置手順	6-105
図 6.5.2-17 処分坑道横置き定置方式地下施設レイアウト	6-105
図 6.5.2-18 処分坑道レイアウト (短処分坑道版)	6-106
図 6.5.2-19 処分坑道断面の拡幅による作業性向上を指向した PEM の搬送概念	6-107
図 6.5.2-20 処分坑道断面を拡幅した PEM 概念 (処分坑道断面形状例)	6-107
図 6.5.2-21 処分坑道断面を拡幅した PEM 概念 (把持・搬送・定置工程)	6-108
図 6.5.2-22 設計因子に基づく処分概念・技術オプションの特徴整理	6-111
図 6.6.2-1 ニアフィールド要素の相互作用図	6-116

図 6.6.2-2	ガラス表面での物質移行過程を考慮した長期溶解モデル	6-118
図 6.6.2-3	緩衝材中、低酸素濃度雰囲気における炭素鋼の平均腐食深さの経時変化	6-122
図 6.6.2-4	緩衝材中における炭素鋼の不動態化条件	6-123
図 6.6.2-5	種々の環境における鉄鋼材料（非合金）の平均腐食深さと孔食係数の関係	6-123
図 6.6.2-6	酸性雰囲気における炭素鋼溶接部の平均腐食深さに対する最大腐食深さ	6-126
図 6.6.2-7	還元性雰囲気における炭素鋼母材、溶接部の平均腐食速度の経時変化	6-126
図 6.6.2-8	体積膨潤比と膨潤応力の有効粘土密度に対する依存性	6-130
図 6.6.2-9	有効粘土密度と透水係数の関係	6-131
図 6.6.2-10	セメントからの浸出液の pH の経時変化	6-132
図 6.6.2-11	Ca 型ベントナイトと Na 型ベントナイトの透水係数の有効粘土密度依存性	6-132
図 6.6.2-12	セメント硬化体と圧縮ベントナイトの接触試験	6-133
図 6.6.2-13	地球化学解析による人工バリアの鉱物相空間分布の変化	6-134
図 6.6.2-14	鉄を含む粘土鉱物の結晶構造の概念図	6-135
図 6.6.3-1	中越沖地震の地震動が大きかった要因分析	6-139
図 6.6.3-2	深部地下構造モデル	6-139
図 6.6.3-3	検討用地震動の時刻歴波形と地盤モデルの弾性波速度の深度分布	6-140
図 6.6.3-4	坑道周辺岩盤の最大せん断ひずみ（高レベル放射性廃棄物処分坑道）	6-141
図 6.6.4-1	HFSC 吹付コンクリートの模擬施工状況	6-142
図 6.6.4-2	オーバーパック蓋構造の概念図	6-143
図 6.6.4-3	落とし蓋構造、平蓋構造での TIG 溶接試験状況	6-144
図 6.6.4-4	落とし蓋構造への MAG 溶接適用例	6-144
図 6.6.4-5	超音波探傷法を用いた溶接部の検査方法の概念	6-145
図 6.6.4-6	炭素鋼オーバーパックの製作状況	6-146
図 6.6.4-7	製作された炭素鋼オーバーパック	6-146
図 6.6.4-8	プレス機による緩衝材ブロック製作状況	6-147
図 6.6.4-9	実規模緩衝材展示状況と緩衝材ブロックの密度分布	6-148
図 6.6.4-10	ブロック真空把持装置のうち真空把持部	6-148
図 6.6.4-11	実規模ブロック真空把持実証状況	6-149
図 6.6.4-12	原位置締固め緩衝材の施工試験	6-149
図 6.6.4-13	PEM 方式工程概念	6-150
図 6.6.4-14	PEM 方式試験例	6-151
図 6.6.4-15	ペレット充填方式の施工試験	6-151
図 6.6.4-16	吹付施工試験	6-152
図 6.6.4-17	レーザー計測による処分孔形状と壁面状態の把握状況	6-152
図 6.6.4-18	メッシュ型無線 LAN システムによる遠隔定置装置制御概念	6-153
図 6.6.4-19	②処分孔上部埋め戻し材など除去装置の例	6-154
図 6.6.4-20	③廃棄体周囲の緩衝材の拘束除去装置の例	6-155
図 6.6.4-21	④廃棄体の回収、⑤遮へい容器への収納例	6-155
図 6.6.4-22	処分坑道埋め戻し後の状況および力学プラグ除去状況の例	6-156
図 6.6.4-23	廃棄体周囲のオーバーコアリングおよび廃棄体の抜き出しと遮へい容器への収納	

例	6-156
図 6.6.4-24 横置き定置方式を模擬した緩衝材除去実験の状況	6-157
図 7.1.1-1 安全評価の手順	7-3
図 7.1.2-1 安全評価における不確実性の取り扱いの概念	7-7
図 7.1.3-1 安全評価におけるシナリオ分類（検討例）	7-10
図 7.1.3-2 シナリオの区分と将来予測期間の区分の関係（自然過程シナリオを対象とした検討の例）	7-11
図 7.1.4-1 性能評価モデルと現象解析モデルの相互補完的な利用	7-12
図 7.1.7-1 各段階における安全評価の主要な実施項目（自然過程シナリオを対象とした例）	7-17
図 7.2.1-1 状態設定とシナリオの作成・分類のアプローチ	7-20
図 7.2.1-2 期待する安全機能の時間的な変遷（第2次取りまとめに基づく例）	7-21
図 7.2.1-3 ストーリーボードのイメージ（高レベル放射性廃棄物を対象とした例）	7-23
図 7.2.1-4 安全機能と関連する現象の相互関係の表現例（放射性物質の漏出・移行開始後）	7-24
図 7.2.1-5 シナリオ分類に関する考え方	7-26
図 7.2.2-1 地下水中で核種移行に関する性能評価モデルおよびデータセットの構成例	7-28
図 7.2.2-2 ソースタームモデルにおける核種量の時間変化のイメージ	7-29
図 7.2.2-3 人工バリア中核種移行モデルにおける核種量の時間変化のイメージ	7-30
図 7.2.2-4 天然バリア中核種移行モデル（多孔質媒体モデル）の核種量の時間変化のイメージ	7-31
図 7.2.2-5 天然バリア中核種移行モデル（二重空隙モデル）の核種量の時間変化のイメージ	7-32
図 7.2.2-6 安全評価のためのモデルチェーンの例（概要調査の段階あるいは精密調査の段階）	7-34
図 7.2.2-7 生物圏評価データの重要度を特定するための作業フロー	7-38
図 7.3.2-1 沿岸域を対象とした地質環境の状態設定の手順	7-45
図 7.3.2-2 汀線および塩淡境界の変化を整理した例（パターン3）	7-47
図 7.3.2-3 状態設定のための時間・空間区分	7-48
図 7.3.2-4 断層活動の影響に関するシナリオの概念	7-59
図 7.3.2-5 FEP リスト構築からシナリオ構築までの作業フロー	7-61
図 7.3.3-1 沿岸域の環境変遷に対応した核種移行解析の手順の例	7-63
図 7.3.3-2 沿岸域の環境変遷に対応して核種移行率を算出するイメージ	7-64
図 7.3.3-3 GBI が沿岸海底堆積層および潮間帯堆積物である場合の生物圏内の核種移行に関する概念モデルの例	7-66
図 7.3.3-4 被ばく経路に関する概念モデルの例	7-66
図 7.3.3-5 母岩の不均質性および人工バリアの三次元形状を考慮した核種移行解析の手順	7-68
図 7.3.3-6 Goldsim を用いた核種移行解析モデルの画面	7-70
図 7.3.3-7 統計的な解析結果の例	7-71

図 7.3.3-8	近似解析解を導出する概念	7-72
図 7.3.3-9	グループ1 廃棄物における I-129 に対する工学的対策の効果についての感度解析結果の例	7-73
図 7.3.4-1	収着データベースの検索画面	7-74
図 7.3.4-2	収着分配係数の信頼度評価のガイドラインの概要—評価フローと基準—	7-75
図 7.3.4-3	収着データベースと条件変換法によるパラメータ設定のイメージ	7-76
図 8-1	本報告書の各章と第 8 章の関係	8-2
図 8.1.1-1	処分場概念の構築のイメージ	8-4
図 8.1.2-1	概要調査地区選定段階および精密調査地区選定段階における事業の流れと技術業務の流れ（公募の場合）	8-7
図 8.2.1-1	概要調査地区選定段階における実施事項フロー図（公募の場合）	8-9
図 8.2.1-2	全国一律に評価する事項に基づいた文献調査の対象地区となる条件（公募の場合）	8-10
図 8.2.1-3	文献調査を行う範囲と文献調査で確認する項目のイメージ（公募の場合）	8-10
図 8.2.3-1	文献調査のための地質環境データ管理システムと支援ツールの概要（図 5.2.4-1 の再掲）	8-11
図 8.2.4-1	自然現象の著しい影響と概要調査地区選定上の考慮事項の関係	8-12
図 8.2.6-1	概要調査地区および補足的に調査する範囲の設定イメージ（図 5.2.3-4 の再掲）（公募の場合）	8-15
図 8.2.10-1	概要調査における段階的なアプローチのイメージ（2 フェーズの例：図 5.2.3-6 の再掲）	8-17
図 8.2.10-2	統合化データフローダイアグラム（図 5.2.1-3 の再掲）	8-19
図 8.3.1-1	精密調査地区選定段階における実施事項フロー図	8-23
図 8.3.4-1	地質環境モデル構築の流れ（イメージ）（図 5.2.1-1 の再掲）	8-28
図 8.3.5-1	候補母岩の選定ならびに処分場設置可能領域の設定の流れ	8-30
図 8.3.5-2	処分深度と緩衝材最高温度の関係の例示	8-31
図 8.3.5-3	深度と坑道安定性（局所安全率）の関係の例示	8-32
図 8.3.5-4	水理場の評価において考慮する地質環境の概念図	8-33
図 8.3.6-1	地下施設レイアウトの例（地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設の併置を考慮したレイアウト，図 6.3.5-1 の再掲）	8-36
図 8.3.6-2	廃棄体を定置するのが相対的に好ましくない場所のイメージ（図 6.1.2-1 の再掲）	8-36
図 8.3.6-3	地上施設のゾーニング（併置処分）（図 6.3.4-2 の再掲）	8-37
図 8.3.6-4	廃棄体定置方式（縦置き，横置き）による核種移行率の比較（参考図 3-4 を編集し，再掲）	8-39
図 8.3.7-1	閉鎖後長期の安全性の評価手順（図 7.1.1-1 の再掲）	8-40
図 8.3.7-2	地層処分システムの構成のイメージ	8-42
図 8.3.7-3	蓋然性の区分に基づいたシナリオ分類の検討例（図 7.1.3-1 の再掲）	8-43
図 8.3.7-4	状態設定およびシナリオの作成・分類のアプローチ（図 7.2.1-1 の再掲）	8-44
図 8.3.7-5	シナリオ作成のためのストーリーボードのイメージ（図 7.2.1-3 の再掲）	8-45

図 8.3.7-6	地下水中での核種移行に関する性能評価モデルおよびデータセットの構成例（図 7.2.2-1 の再掲）	8-46
図 8.3.7-7	解析のフローチャート（安全評価のためのモデルチェーンの例）（図 7.2.2-6 の再掲）	8-47

第7章 参考資料 図目次

参考図 1-1	断層発生後の核種移行モデルの概念図	7-80
参考図 1-2	新生した断層活動の影響解析の結果	7-85
参考図 2-1	沿岸域における地下水化学環境の変遷の例	7-86
参考図 2-2	汀線の移動	7-87
参考図 2-3	処分パネルレイアウト	7-87
参考図 2-4	各処分パネルにおける環境変遷	7-88
参考図 2-5	地下水流動の外観と GBI	7-89
参考図 2-6	GBI の環境変遷	7-89
参考図 2-7	廃棄体一体当たりの核種移行率（最も海寄りの処分パネル）	7-90
参考図 2-8	気候（上）および GBI（下）変化の時期についての長期変遷	7-91
参考図 2-9	GBI の環境変遷を考慮した被ばく線量の算出結果	7-92
参考図 3-1	各岩種に対応した少数の粒子軌跡（各ガラス固化体でパルス入力：10 万年後）	7-94
参考図 3-2	Cs-135 移行率（ガラス固化体 1 体当たりの平均）の時間変化	7-96
参考図 3-3	ニアフィールド内の Cs-135 の軌跡（硬岩タイプ 1）	7-97
参考図 3-4	縦置きおよび横置きの核種移行率の比較	7-98
参考図 3-5	Np-237 移行率最大値（パルス入力に対する）の廃棄体依存性（硬岩タイプ 2）	7-99

表 目 次

表 1.3-1	「地層処分事業の安全確保（2010年度版）」の構成	1-4
表 1.3-2	地層処分に関係する機関，法律および報告書の略称一覧	1-5
表 2.2.3-1	処分費用の内訳	2-15
表 2.2.4-1	諸外国の状況	2-22
表 3.2.3-1	実証プログラムの分類とその特徴	3-35
表 3.3.2-1	モニタリングの分類とその概要	3-53
表 4.1.2-1	安全確保ロードマップ（詳細版）概要調査地区選定段階（文献調査の段階）	4-11
表 4.1.2-2	安全確保ロードマップ（詳細版）精密調査地区選定段階（概要調査の段階）	4-12
表 4.1.2-3	安全確保ロードマップ（詳細版）処分施設建設地選定段階（精密調査の段階のうち，地上からの調査段階）	4-13
表 4.1.2-4	安全確保ロードマップ（詳細版）処分施設建設地選定段階（精密調査の段階のうち，地下調査施設での調査段階）	4-14
表 4.1.2-5	安全確保ロードマップ（詳細版）建設段階	4-15
表 4.1.2-6	安全確保ロードマップ（詳細版）操業段階（操業期間中）	4-16
表 4.1.2-7	安全確保ロードマップ（詳細版）閉鎖段階	4-17
表 4.2.1-1	概要調査地区選定上の考慮事項	4-32
表 5.1.1-1	わが国で考慮すべき自然現象が地層処分システムに及ぼす影響とその取り扱い	5-4
表 5.1.1-2	サイト調査・評価からみた自然現象の将来予測期間の区分の考え方の整理	5-16
表 5.1.2-1	わが国の多様な地質環境の調査・評価に向けた研究開発	5-24
表 5.2.2-1	文献調査で収集する情報の項目と調査範囲の目安（検討例）	5-41
表 5.2.2-2	文献調査で収集する情報（1/2）	5-42
表 5.2.2-3	文献調査で収集する情報（2/2）	5-43
表 5.3.1-1	概要調査における火山・火成活動（マグマの貫入・噴出）にかかわる主な調査手法	5-63
表 5.3.1-2	概要調査における火山・火成活動（熱・熱水の影響）にかかわる主な調査手法	5-68
表 5.3.1-3	概要調査における地震・断層活動にかかわる主な調査手法（その1：陸域）	5-75
表 5.3.1-4	概要調査における地震・断層活動にかかわる主な調査手法（その2：海域）	5-76
表 5.3.1-5	概要調査における隆起・沈降にかかわる主な調査手法	5-82
表 5.3.1-6	概要調査における侵食にかかわる主な調査手法	5-83
表 5.4.1-1	火山・火成活動にかかわる調査・評価技術（1/2）	5-97
表 5.4.1-2	火山・火成活動にかかわる調査・評価技術（2/2）	5-98
表 5.4.1-3	地震・断層活動にかかわる調査・評価技術（1/2）	5-106
表 5.4.1-4	地震・断層活動にかかわる調査・評価技術（2/2）	5-107
表 5.4.1-5	隆起・侵食（気候・海水準変動含む）にかかわる調査・評価技術	5-117
表 5.4.1-6	地質環境特性にかかわる調査・評価技術（1/3）	5-122
表 5.4.1-7	地質環境特性にかかわる調査・評価技術（2/3）	5-123

表 5.4.1-8	地質環境特性にかかわる調査・評価技術 (3/3)	5-124
表 5.4.2-1	地質構造モデルの変遷と不確実性・信頼性の評価 (例)	5-154
表 5.4.2-2	地質・岩盤性状に応じたボーリング掘削・調査内容	5-156
表 5.4.2-3	ボーリング調査におけるリスク評価結果の例	5-157
表 5.4.3-1	概要調査に向けた調査・評価技術の評価 (1/3)	5-161
表 5.4.3-2	概要調査に向けた調査・評価技術の評価 (2/3)	5-162
表 5.4.3-3	概要調査に向けた調査・評価技術の評価 (3/3)	5-163
表 6.2.2-1	閉鎖後長期の安全確保の基本概念と安全機能	6-10
表 6.2.2-2	高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係	6-12
表 6.2.2-3	技術要件の設定の考え方	6-13
表 6.2.2-4	母岩の好ましい特性	6-14
表 6.2.2-5	ガラス固化体の特性	6-15
表 6.2.2-6	オーバーパックスの技術要件 (基本的なバリア性能の確保)	6-16
表 6.2.2-7	オーバーパックスの技術要件 (長期健全性の維持)	6-17
表 6.2.2-8	オーバーパックスの技術要件 (工学的実現性の確保)	6-17
表 6.2.2-9	緩衝材の技術要件 (基本的なバリア性能の確保)	6-18
表 6.2.2-10	緩衝材の技術要件 (長期健全性の維持)	6-19
表 6.2.2-11	緩衝材の技術要件 (工学的実現性の確保)	6-19
表 6.2.2-12	埋め戻し材・プラグの技術要件 (基本的なバリア性能の確保)	6-20
表 6.2.2-13	地層処分低レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係	6-22
表 6.2.3-1	放射線防護に関する基本的な安全対策	6-24
表 6.2.3-2	一般労働安全に対する安全対策の考え方	6-26
表 6.2.3-3	環境保全対策の考え方	6-27
表 6.2.3-4	事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係	6-28
表 6.3.3-1	地下施設設置位置の設定のための評価項目例	6-40
表 6.4.4-1	作業中に想定される異常事象と安全対策	6-71
表 6.4.4-2	地下水湧水による環境影響と保全措置の検討例	6-75
表 6.4.4-3	地下水放流による環境影響と保全措置の検討例	6-76
表 6.4.4-4	掘削土による環境影響と保全措置の検討例	6-76
表 6.5.2-1	処分概念・技術オプションの特徴比較の視点	6-109
表 6.6.1-1	工学的対策における技術開発項目と本節での記載項目	6-114
表 6.6.2-1	母材と溶接部の腐食挙動理解に関する科学的な知見の整備状況	6-121
表 6.6.2-2	放射線照射が炭素鋼の腐食に及ぼす影響	6-124
表 6.6.2-3	緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用に関する科学的な知見の整備状況 (1/2)	6-128
表 6.6.2-4	緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用に関する科学的な知見の整備状況 (2/2)	6-129
表 6.6.2-5	ベントナイトの変質と試験条件	6-136
表 6.6.4-1	地層処分低レベル放射性廃棄物処分概念の回収維持期間の作業工程	6-158
表 6.6.5-1	工学的対策を支える技術に対する今後の課題	6-159

表 7.1.1-1	セーフティケースの構築に関する重要な論点	7-4
表 7.2.1-1	安全機能および不確実性を基軸としたシナリオの表現例（放射性物質の漏出・移行開始後）	7-25
表 7.2.2-1	現象解析モデルの概要と目的（例）	7-33
表 7.3.1-1	第2次取りまとめ以降の安全評価に関する技術の進展（1/4）	7-41
表 7.3.1-2	第2次取りまとめ以降の安全評価に関する技術の進展（2/4）	7-42
表 7.3.1-3	第2次取りまとめ以降の安全評価に関する技術の進展（3/4）	7-43
表 7.3.1-4	第2次取りまとめ以降の安全評価に関する技術の進展（4/4）	7-44
表 7.3.2-1	初期条件の設定例	7-46
表 7.3.2-2	母岩の透水性に応じた塩淡境界の追従性	7-46
表 7.3.2-3	ニアフィールドの前提条件として着目する環境条件および影響因子	7-47
表 7.3.2-4	気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に関する状態設定の例（ケースa：パターン3）	7-49
表 7.3.2-5	安全機能を基軸とした状態設定に関する現象の整理例（安全機能と関連する条件）	7-52
表 7.3.2-6	安全機能を基軸とした状態設定に関する現象の整理例（条件と条件への影響因子）	7-53
表 7.3.2-7	ニアフィールドにおける状態設定の例	7-54
表 7.3.2-8	高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールド環境条件の様相区分の例	7-56
表 7.3.2-9	高レベル放射性廃棄物に対する蓋然性が高いシナリオの例（ニアフィールド）	7-57
表 7.3.2-10	処分場を横断する新たな断層が生じた場合の安全評価上の変遷を整理した例	7-60
表 7.3.3-1	地下水の塩分濃度と汀線との位置関係による区分	7-63
表 7.3.3-2	統計的な解析結果から影響が大きいパラメータを抽出した例	7-71
表 7.3.5-1	安全評価に関する技術開発課題と設定理由（特に優先度が高いもの）	7-78
表 8.3.2-1	概要調査の実施に伴い考慮の可能性がある環境影響評価項目の例	8-25
表 8.3.5-1	地下施設設置位置の設定のための評価項目例（表 6.3.3-1 の再掲）	8-29

第7章 参考資料 表目次

参考表 1-1	シナリオ1における廃棄体区分	7-81
参考表 1-2	シナリオ2における廃棄体区分	7-81
参考表 1-3	断層の各構造における透水係数に関する情報のまとめ	7-82
参考表 1-4	シナリオ1, シナリオ2の安全解析の条件	7-83
参考表 1-5	解析ケース	7-83
参考表 1-6	各解析ケースにおける水理パラメータの設定値	7-84
参考表 3-1	試行で想定した不均質透水係数場の例	7-93

第8章 参考資料 表目次

参考表 1	概要調査地区選定段階の実施項目と関連する技術の関係.....	8-53
参考表 2	精密調査地区選定段階の実施項目と関連する技術の関係.....	8-54

第1章

はじめに

第1章 目次

第1章 はじめに	1-1
1.1 本報告書作成の背景と目的	1-1
1.2 本報告書における技術的信頼性の示し方	1-2
1.3 本報告書の構成	1-3
参考文献	1-6

第1章 はじめに

1.1 本報告書作成の背景と目的

1999年に核燃料サイクル開発機構（以下、JNCという）（現、日本原子力研究開発機構（以下、JAEAという））は、「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—」（JNC, 1999a～e；以下、第2次取りまとめという）を作成した。第2次取りまとめでは、20年以上にわたる研究開発成果を総括し、以下の技術基盤が整備されたと結論付けている。

- ・ 地層処分概念の成立に必要な条件を満たす地質環境がわが国に広く存在し、特定の地質環境がそのような条件を備えているか否かを評価する方法が開発されたこと。
- ・ 幅広い地質環境条件に対して人工バリアや処分施設を適切に設計・施工する技術が開発されたこと。
- ・ 地層処分の長期にわたる安全性を予測的に評価する方法が開発され、それをを用いて安全性が確認されたこと。

また、第2次取りまとめは、原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会によって、「我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性が示されているとともに、処分予定地の選定と安全基準の策定に資する技術的拠り所となることが示されていると評価する。このことから、第2次取りまとめは地層処分の事業化に向けての技術的拠り所となると判断する」との評価がなされている（原子力委員会、2000）。

「高レベル放射性廃棄物処分に向けての基本的考え方について」（原子力委員会、1998）や第2次取りまとめなどを受けて2000年6月に制定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（以下、最終処分法という）に基づいて、同年10月に原子力発電環境整備機構（以下、NUMOという）が、高レベル放射性廃棄物の地層処分を行う実施主体として設立された。その後、2007年の長半減期低発熱放射性廃棄物（以下、TRU廃棄物という）の一部も地層処分の対象（以下、地層処分低レベル放射性廃棄物という）とする同法改正に伴い、NUMOはこれを事業の対象に加えた。最終処分法の改正を受け「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（以下、原子炉等規制法という）が2007年に改正され、その後、2008年には関係省令が制定されるなど、地層処分に関する国による安全規制の枠組みが整備された。

2008年には、原子力委員会政策評価部会による「原子力政策大綱に示している放射性廃棄物の処理・処分に関する取組の基本的考え方に関する評価について」（原子力委員会、2008：以下、政策評価部会報告書という）において、「高レベル放射性廃棄物の処分事業の推進にあたっては、処分の安全性についての説明に対する国民の信頼を確保していくことが最も重要です。（中略）NUMOは、処分事業に係る知識管理活動の観点も踏まえて、研究開発機関等との連携の下にリーダーシップを発揮し、地質学、放射化学、地球科学、原子力工学等の科学技術の新たな知見を踏まえて安全な処分の実施に係る技術的信頼性に関する技術報告をとりまとめ、学会等、第三者的で独立性の高い学術的な機関の評価を得て公表するとともに、この説明がいつも最新の知見を踏まえているものであるようにするために、これを定期的に改定していくべきです。」との提言がなされた。

一方、NUMOは、2000年の設立以降、事業の安全な実施に向けて技術の整備に努めるとともに、今日までさまざまな理解活動や広報活動を展開してきたが、概要調査地区選定段階の調査（文献調査）を開始するには至っていない。現在、NUMOは国や関係機関と連携して、総力を挙げて、文献調査開始に向けて国民への理解活動などに取り組んでいる。その一環として、2010年に「NUMOの取り組み」を公表し、地層処分事業を進めるに当たっての基本的な取り組み方針を以下のとおり示した。

【NUMOの取り組み方針】

- ・ 安全最優先で地層処分事業に取り組めます。
- ・ 地域の皆様の自主的なご判断を尊重します。
- ・ 地域の一員として皆様と共に考え、共に行動します。
- ・ 情報は公開し、透明性のある事業運営を行います。

このようなNUMOの取り組み方針や先に述べた原子力委員会政策評価部会報告書の提言を踏まえ、事業推進の基本としてきた地層処分の安全確保に向けた取り組み方針と2000年のNUMO設立以降の技術の進展についての報告書を取りまとめて広く公表することとした。

本報告書作成の目的は、「安全な処分の実施に係る技術的信頼性が向上したことを示し、地層処分事業の安全確保に関する説明の技術的拠り所とする」ことである。本報告書は、地層処分にある程度の知識を持った専門家を対象とした技術報告書である。一方、地層処分事業に関心を持つ一般の読者や、さらに広範な一般の読者のために、地層処分事業やその安全確保に関する説明資料を作成する際の技術情報については、本報告書が基本となる。

1.2 本報告書における技術的信頼性の示し方

海外諸国では、特定のサイトを対象としてサイト調査を実施し、処分施設の設計を行い、安全評価を実施することによって、地層処分システムの技術的信頼性を提示する活動が行われてきている（例えば、Nagra, 2002 ; SKB, 2006 ; ANDRA, 2006）。一方、1.1にも述べたように第2次取りまとめにおいては、わが国にも地層処分に適した地質環境が存在すること、および人工バリアや地層処分施設を適切に設計・施工することが可能であることを示すとともに、一般化した仮想的な地質環境条件下での地層処分の長期的な安全性を確認することによって、地層処分を安全に実施する上での技術基盤的信頼性を示した。しかし、現時点においても、特定のサイトを対象としたサイト調査や処分施設の設計、安全評価を実施することによって、地層処分システムの技術的信頼性を提示する段階には至っていない。

そこでNUMOはこのようなわが国の地層処分計画の現状を考慮して、①長期にわたる地層処分事業を安全に実施していくための「安全確保構想」（安全確保に向けた取り組み方針）を明確にするとともに、②その安全確保構想のもとで実際に事業を実現していくための技術が、NUMOや国内外の関係する研究開発機関などでの技術開発により、第2次取りまとめ以降着実に進展していることを示し、さらに、これらの技術開発成果の適切な評価を行い地層処分事業に取り組んでいく考え方や、今後の技術開発計画を事業の段階に応じて適切に進めていく方針について述べ、これらをもって「安全な処分の実施に係る技術的信頼性が向上した」ことを示すこととした。

安全確保構想は、NUMO が 100 年程度にわたる事業期間の中で安全な地層処分を実現していくに当たっての方針や具体的方策を提示するものであり、本報告書では第 2 章～第 4 章（以下、事業編という）に記載している。その基本となる考え方については、2009 年度に専門家のレビューを受け、「安全確保構想 2009～安全な地層処分の実現のために～」として先行して公開した。

一方、第 2 次取りまとめ以降の技術の進展と、事業の実施に当たっての技術的な準備状況に関しては、本報告書では第 5 章～第 8 章（以下、技術編という）に記載している。

地層処分においては、サイト調査・評価、工学的対策、安全評価という三つの安全確保策により安全確保ができることが、第 2 次取りまとめにおいて示されており、これは原子力安全委員会が示した安全確保原則（原子力安全委員会、2000）でも基本とされている。そこで、本報告書でも第 2 次取りまとめ以降の技術の進展と、事業の実施に当たっての技術的な準備状況に関しては、これらの三つの安全確保策に対応した専門分野ごとに示すこととした。また、サイト選定段階の最初である概要調査地区選定段階（文献調査の段階）および次の精密調査地区選定段階（概要調査の段階）における技術的実施事項を示し、各段階において各専門分野における実施事項をいかに連携して安全を確保していくかを示すこととした。

また、技術編の各章では、a) 各技術分野において事業を進めていく上での考え方が整備されていること、b) それを実施するための手順が決まっていること、c) 手順を実施するための技術が利用可能であること、の観点から、概要調査地区選定段階（文献調査の段階）および精密調査地区選定段階（概要調査の段階）を実施する技術的な準備が整っていることを示すこととした。

1.3 本報告書の構成

本報告書は、安全確保構想を示した「事業編」と、安全な地層処分を支える技術の整備状況を示した「技術編」で構成する（表 1.3-1）。

「事業編」は、第 2 章「わが国における地層処分事業の背景」、第 3 章「安全確保構想」、第 4 章「地層処分事業の段階的な推進」で構成する。

第 2 章では、原子燃料サイクルや地層処分のこれまでの経緯と現状など、わが国の地層処分事業の背景について解説する。

第 3 章では、第 2 章で示した地層処分事業の背景を踏まえて、地層処分の安全確保の目標である「閉鎖後長期の安全確保」と「事業期間中の安全確保」についてその基本的な考え方を述べる。さらに、段階的に事業を実施することで、100 年程度にわたる事業のリスクや不確実性に対処することを基本方針として、実施主体としての安全確保のための事業方針とその実施方策を示す。

第 4 章では、第 3 章で示した実施方策の 100 年程度にわたる事業全体における具体的な展開として、安全確保ロードマップ、技術開発ロードマップおよび信頼感醸成ロードマップを示す。

「技術編」は、第 5 章「地質環境の調査・評価技術」、第 6 章「処分場の設計、建設・操業・閉鎖技術」、第 7 章「地層処分システムの長期安全性評価技術」、第 8 章「概要調査地区選定段階および精密調査地区選定段階の技術的取り組み」で構成する。

技術編では、事業編に示した閉鎖後長期と事業期間中の安全確保を進めていくために必要な地層処分の技術が、計画的に整備されていることを具体的な事例とともに示す。安全な地層処分を支える技術を、それぞれの分野について、概要調査地区選定段階（文献調査の段階）および精密調査地区選定段階（概要調査の段階）において必要となる技術を中心に概説するとともに、技術開発ロードマップに示す技術の整備状況を示す。さらに第 8 章では、「概要調査地区選定段階および精密調査

地区選定段階の技術的取り組み」として、概要調査地区選定段階と精密調査地区選定段階において、第5章、第6章、第7章に述べる各技術分野の技術をどのように連携し、安全に事業を進めるかについて、実施する手順を踏まえて示す。

なお、「技術編」では、高レベル放射性廃棄物を主な対象として技術の整備状況を取りまとめている。地層処分低レベル放射性廃棄物の地層処分技術の詳細は、別途、技術報告書を公表している（NUMO、2011）。このため、本報告書では主要な技術の記述にとどめた。

文献調査の実施に当たっては、市町村からの応募による場合と、国が市町村に文献調査の実施を申し入れる場合がある。これら二つの場合では、文献調査の開始に至るまでの手順に差異があるが、いったん文献調査を開始すれば技術的な実施手順は同じである。従って、本報告書では、特に断らない限りは、市町村からの応募により文献調査が開始されるという場合を前提として記述する。

表 1.3-1 「地層処分事業の安全確保（2010年度版）」の構成

	章	タイトル	主な内容
		要約	
	1	はじめに	報告書の背景と目的、全体構成
事業編	2	わが国における地層処分事業の背景	安全確保のための目標設定と達成のための方針・方策 方針1：安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進 方針2：信頼性の高い技術を用いた事業推進 方針3：安全性への信頼感醸成へ向けた技術的な取り組み
	3	安全確保構想	
	4	地層処分事業の段階的な推進	
技術編	5	地質環境の調査・評価技術	地質環境の調査・評価に必要な技術の整備状況
	6	処分場の設計、建設・操業・閉鎖技術	適切な工学的対策として必要な技術の整備状況
	7	地層処分システムの長期安全性評価技術	長期安全性の評価に必要な技術の整備状況
	8	概要調査地区選定段階および精密調査地区選定段階の技術的取り組み	概要調査地区選定段階および精密調査地区選定段階における技術的な実施事項
	9	おわりに	全体総括

本報告書で用いる地層処分に関係する主な機関、法律および報告書の略称一覧を表 1.3-2 に記す。

表 1.3-2 地層処分に関係する機関、法律および報告書の略称一覧

	正式名称	本書での略称
機関など (国内)	原子力発電環境整備機構 (Nuclear Waste Management Organization of Japan)	NUMO
	独立行政法人 日本原子力研究開発機構 (Japan Atomic Energy Agency) (特殊法人 核燃料サイクル開発機構) (前) (Japan Nuclear Cycle Development Institute) (特殊法人 動力炉・核燃料開発事業団) (前々) (Power Reactor and Nuclear Development Corporation)	JAEA (JNC) (PNC)
	公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター	原環センター
	財団法人 電力中央研究所	電中研
	独立行政法人 産業技術総合研究所	産総研
	独立行政法人 放射線医学総合研究所	放医研
	日本原燃株式会社	原燃
	独立行政法人 原子力安全基盤機構 (Japan Nuclear Energy Safety Organization)	JNES
	電気事業連合会	電事連
	地層処分基盤研究開発調整会議	調整会議
	機関など (海外)	国際原子力機関 (International Atomic Energy Agency)
国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection)		ICRP
経済協力開発機構／原子力機関 (Organisation for Economic Cooperation and Development / Nuclear Energy Agency)		OECD/NEA
原子力規制委員会 (米) (Nuclear Regulatory Commission)		U. S. NRC
エネルギー省 (米) (Department of Energy)		U. S. DOE
スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社 (Svensk Kärnbränslehantering AB)		SKB
スイス放射性廃棄物管理共同組合 (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle)		Nagra
放射性廃棄物管理機関 (仏) (Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radioactifs)		ANDRA
原子力廃止措置機関 (英) (Nuclear Decommissioning Authority)		NDA
核燃料廃棄物管理機関 (カナダ) (Nuclear Waste Management Organization)		NWMO
廃棄物隔離パイロットプラント (米) (Waste Isolation Pilot Plant)	WIPP	
法律など	特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律	最終処分法
	核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律	原子炉等規制法
	特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針	最終処分基本方針
	特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画	最終処分計画
	原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画	原子力長期計画
報告書	高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書—平成3年度—	第1次取りまとめ
	わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—	第2次取りまとめ
	高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—	平成17年取りまとめ
	TRU 廃棄物処分概念検討書	第1次 TRU レポート
	TRU 廃棄物処分技術検討書—第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—	第2次 TRU レポート

参考文献

ANDRA (2006) : Dossier Argile 2005.

原子力安全委員会 (2000):高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第1次報告).

原子力委員会 (1998) : 高レベル放射性廃棄物処分に向けての基本的考え方について, 原子力委員会 高レベル放射性廃棄物処分懇談会.

原子力委員会 (2000) : 我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価, 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会.

原子力委員会 (2008) : 原子力政策大綱に示している放射性廃棄物の処理・処分に關する取組の基本的考え方に関する評価について, 原子力委員会政策評価部会.

JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999a) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 —地層処分研究開発第2次取りまとめ—, 総論レポート, JNC TN1400 99-020.

JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999b) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ— 分冊1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021.

JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999c) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 —地層処分研究開発第2次取りまとめ—, 分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022.

JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999d) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 —地層処分研究開発第2次取りまとめ—, 分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023.

JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999e) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—, 別冊 地層処分の背景, JNC TN1400 99-024.

Nagra (2002) : Project Opalinus Clay: Safety Report, Nagra Technical Report 02-05, Nagra, Wettingen, Switzerland.

NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011) : 地層処分低レベル放射性廃棄物に關する処分の技術と安全性, NUMO-TR-10-03.

SKB (2006) : Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation, Main Report of the SR-Can project, SKB TR-06-09.

第2章

わが国における 地層処分事業の背景

第2章 目次

第2章 わが国における地層処分事業の背景	2-1
2.1 原子力の利用と特定放射性廃棄物の発生	2-1
2.1.1 わが国の原子力発電と原子燃料サイクルの概要	2-1
2.1.2 放射性廃棄物	2-2
2.1.2.1 放射性廃棄物の種類	2-2
(1) 高レベル放射性廃棄物	2-2
(2) 低レベル放射性廃棄物	2-2
2.1.2.2 放射性廃棄物の埋設処分の方法	2-3
(1) 地層処分	2-3
(2) 余裕深度処分	2-3
(3) 浅地中処分	2-4
2.2 地層処分の概要	2-6
2.2.1 地層処分の選択と固有の課題	2-6
2.2.2 地層処分に関する放射線防護原則	2-6
2.2.2.1 操業中の放射線防護	2-7
2.2.2.2 処分場閉鎖後の放射線防護	2-7
2.2.3 わが国における地層処分事業の進展	2-9
2.2.3.1 基盤的研究開発の段階	2-9
2.2.3.2 最終処分法の制定と実施主体の設立	2-9
2.2.3.3 最終処分法の改正	2-11
2.2.3.4 段階的に整備される安全規制	2-13
2.2.3.5 事業の実施段階	2-15
2.2.4 わが国の地層処分事業の特徴	2-16
2.2.4.1 わが国の地質環境の特徴	2-16
2.2.4.2 三段階のサイト選定と公募	2-16
2.2.4.3 長期にわたる事業	2-18
2.2.4.4 役割分担による技術開発	2-18
2.2.4.5 処分場の規模	2-19
2.3 諸外国の取り組み状況	2-21
参考文献	2-23

第2章 わが国における地層処分事業の背景

本章は、地層処分の必要性や NUMO が行う地層処分事業について理解を深めていただくため、報告書の前提となる原子力発電・原子燃料サイクル・放射性廃棄物の基本知識、NUMO が行う地層処分事業に関する法律と安全規制の整備、研究開発の経緯や現状、地層処分事業の仕組み、さらに国や関係機関の取り組み、諸外国の状況について記述する。

2.1 原子力の利用と特定放射性廃棄物の発生

2.1.1 わが国の原子力発電と原子燃料サイクルの概要

わが国は、1966年にわが国初の商業用原子力発電所の営業運転を開始して以降、今日に至るまで、エネルギー供給のベストミックスを達成すべく原子力発電の開発・利用を積極的に進めてきた²⁻¹。

また、わが国では長期的なエネルギーの安定確保や放射性廃棄物の適切な処理・処分の観点から、原子力発電で使い終えた燃料（使用済燃料）を再処理し、回収したウランやプルトニウムを再び燃料に加工して利用する「原子燃料サイクル」（図 2.1.1-1）を原子力政策の基本としている。

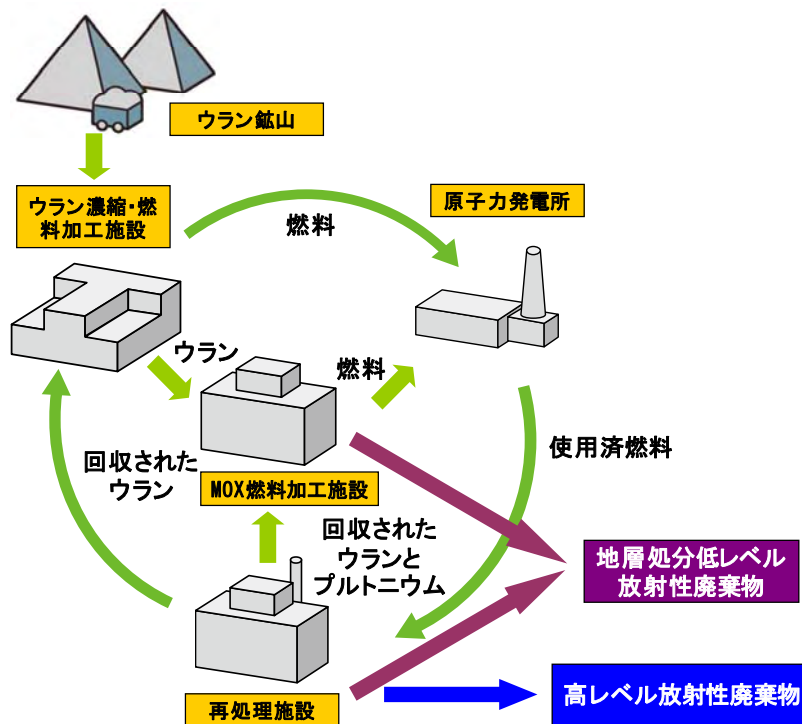


図 2.1.1-1 原子燃料サイクル
(NUMO, 2009 を編集)

原子燃料サイクルにおいて使用済燃料は、全国各地の原子力発電所の貯蔵プールなどで冷却貯蔵²⁻²された後、再処理される。

これまで主として英仏の再処理事業者に委託してきたが、今後は国内で原子燃料サイクルを確立すべく青森県六ヶ所村の日本原燃株式会社（以下、原燃という）で再処理を行うこととしている。

²⁻¹ 2010年3月末時点では、わが国の総発電電力量の約3分の1は、原子力発電により供給されており（経済産業省，2010），54基，4,884.7万kWの商業用原子力発電所が運転されていた。

²⁻² 原子力発電所に貯蔵されている使用済燃料は、13,530tUである（管理容量は、2010年9月末時点で20,420tU（電事連，2011））。

2.1.2 放射性廃棄物

2.1.2.1 放射性廃棄物の種類

原子力の研究，開発および利用に伴い廃棄物が発生する。この廃棄物には放射性物質を含むものがあり，放射性廃棄物と呼ばれる。放射性廃棄物のうち，原子力発電で使われた燃料（使用済燃料）を再処理した後に残る放射能レベルの高い廃液（高レベル放射性廃液）やこれをガラス固化したものを高レベル放射性廃棄物といい，これ以外の放射性廃棄物は，総じて低レベル放射性廃棄物と呼ばれている（総合資源エネルギー調査会，2008）。

(1) 高レベル放射性廃棄物

再処理工程で使用済燃料が硝酸に溶解された後，有機溶媒（リン酸トリブチル：TBP）によってウランとプルトニウムが抽出された後，核分裂生成物や超ウラン核種を含む放射能レベルの高い廃液（高レベル放射性廃液）が残る。

その廃液を取り扱いやすく安定した形態にするため，ガラス原料に混ぜ合わせて高温で融かし，ステンレス製容器に入れて固めたものが「ガラス固化体」である。ガラスは，その網目構造の中に放射性物質を取り込み長期間安定な状態を保つことが可能である。わが国では，高レベル放射性廃液とガラス固化体を高レベル放射性廃棄物と呼んでいる。諸外国の中には使用済燃料を再処理しない方針の国もあり，その場合には使用済燃料自体が高レベル放射性廃棄物と呼ばれる。以下では特に断らない限り，高レベル放射性廃棄物はガラス固化体の意味で用いる。

高レベル放射性廃棄物の発熱量は固化直後で約 2,300W／本（50 年後で約 350W／本）程度である（原子力委員会，2008）。

(2) 低レベル放射性廃棄物

低レベル放射性廃棄物は，発電所廃棄物，TRU 廃棄物，ウラン廃棄物，RI（Radioisotope：放射性同位元素）・研究所等廃棄物などに区分されている。

① 発電所廃棄物

原子力発電所の運転および定期検査や廃止措置・解体に伴って発生する低レベル放射性廃棄物である。

② TRU 廃棄物

再処理施設や MOX（ウラン－プルトニウム混合酸化物）燃料加工施設の操業・解体に伴って発生する低レベル放射性廃棄物のこと。半減期の長い核種を一定量以上含むことから長半減期低発熱放射性廃棄物（以下，TRU 廃棄物という）という。TRU 廃棄物のうち，ハルやエンドピースの圧縮体は発熱量が比較的大きく，発生時点で約 60W／本（25 年後で約 4.5W／本）程度である。また，TRU 廃棄物にはハル・エンドピース以外に，ベータ核種である I-129 の濃度が比較的高い廃銀吸着材，硝酸塩を含む濃縮廃液などを固化したもの，不燃性廃棄物などがある（原子力委員会，2008）。

NUMO では，地層処分の対象となる TRU 廃棄物を地層処分低レベル放射性廃棄物と定義している（2.2.3.3 参照）。

③ ウラン廃棄物

ウランの濃縮、転換、成型加工などに伴って発生するウランを含んだ放射性廃棄物のこと。半減期が極めて長いウランおよびその子孫核種（ウランの壊変により生成した核種）を含んでいること、放射性物質濃度が極めて低い廃棄物が大部分を占めることなどの特徴を有している（原子力委員会，2008）。

④ RI・研究所等廃棄物

RI 廃棄物とは、RI を使用した施設、医療機関や医療検査機関などから発生する放射性同位元素を含む廃棄物のこと。研究所等廃棄物とは、原子炉等規制法による規制のもとで、試験研究炉などを設置した事業所、ならびに核燃料物質などの使用施設などを設置した事業所から発生する放射性廃棄物のこと。試験研究炉の運転に伴い発生する放射性廃棄物は、原子力発電所から発生する液体や固体の廃棄物と同様なものである。そのほかは、核燃料物質などを用いた研究活動に伴って発生する雑固体廃棄物が主なものである。また、試験研究炉の運転、核燃料物質などの使用などを行っている研究所などにおいては、併せて RI が使用されることも多く、原子炉等規制法および放射性同位元素などによる放射線障害の防止に関する法律（以下、放射線障害防止法という）の双方の規制を受ける廃棄物も発生している（原子力委員会，2008）。

2.1.2.2 放射性廃棄物の埋設処分の方法

わが国における放射性廃棄物の埋設処分の方法は、深さや放射性物質の漏出を抑制するためのバリア²³の違いにより、地層処分、余裕深度処分、浅地中処分に分類される（原子力委員会，2008）。埋設処分の方法の具体的内容は、次のとおりである。

本報告書で主に扱う放射性廃棄物の種類ごとの埋設処分の方法を図 2.1.2-1 に示す。

(1) 地層処分

人間の生活環境から十分離れた安定な地層中（地下 300m より深い地層）に、適切な人工バリアを構築することにより処分の長期的な安全性を確保する処分方法。「地層処分」という用語の「地層」には、地質学上の堆積岩を指す「地層」と、地質学上は「地層」とみなされない「岩体」が含まれている（原子力委員会，2008）。対象となる放射性廃棄物は、高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物である（図 2.1.2-2）。

(2) 余裕深度処分

一般的な地下利用に対して十分余裕を持った深度（例：50～100m）への処分。対象廃棄物としては、原子炉施設の炉内構造物、使用済樹脂などが含まれる（原子力委員会，2008）。

²³ バリアとは、天然バリアと人工バリアから構成され、多重バリアともいう。「天然バリア」は、「人工構築物または埋設された廃棄物の周囲に存在し、埋設された廃棄物から漏出してきた放射性物質の生活環境への移行の抑制などが期待できる岩石・土壌など」、「人工バリア」は、「埋設された廃棄物から生活環境への放射性物質の漏出の防止および低減を期待して設けられるコンクリートピットなどの人工構築物、廃棄体の固型化材料および処分容器」とされている（原子力安全委員会，2004）

(3) 浅地中処分

最終的な天然バリアの覆土層が数m程度の厚さを持つ浅地層に放射性廃棄物を処分する方法である。低レベルで比較的半減期の短い核種を含む放射性廃棄物を主対象としており（原子力委員会，2008），コンクリートピット処分やトレンチ処分が該当する。

a) コンクリートピット処分

放射性廃棄物を浅地中処分する一つの形態で，地表を掘削したのち，コンクリート製の構築体を設置してその中に廃棄物を定置し，充填材で固めて一体化したあと，覆土する処分方法のこと。対象廃棄物としては，原子炉施設の廃液固化体，充填固化体などがある。

b) トレンチ処分

原子炉施設の解体などから発生する極めて放射能レベルの低いコンクリートなどの放射性廃棄物について，コンクリートピットなどの人工構築物を必要としない浅地中処分の方法のことである。

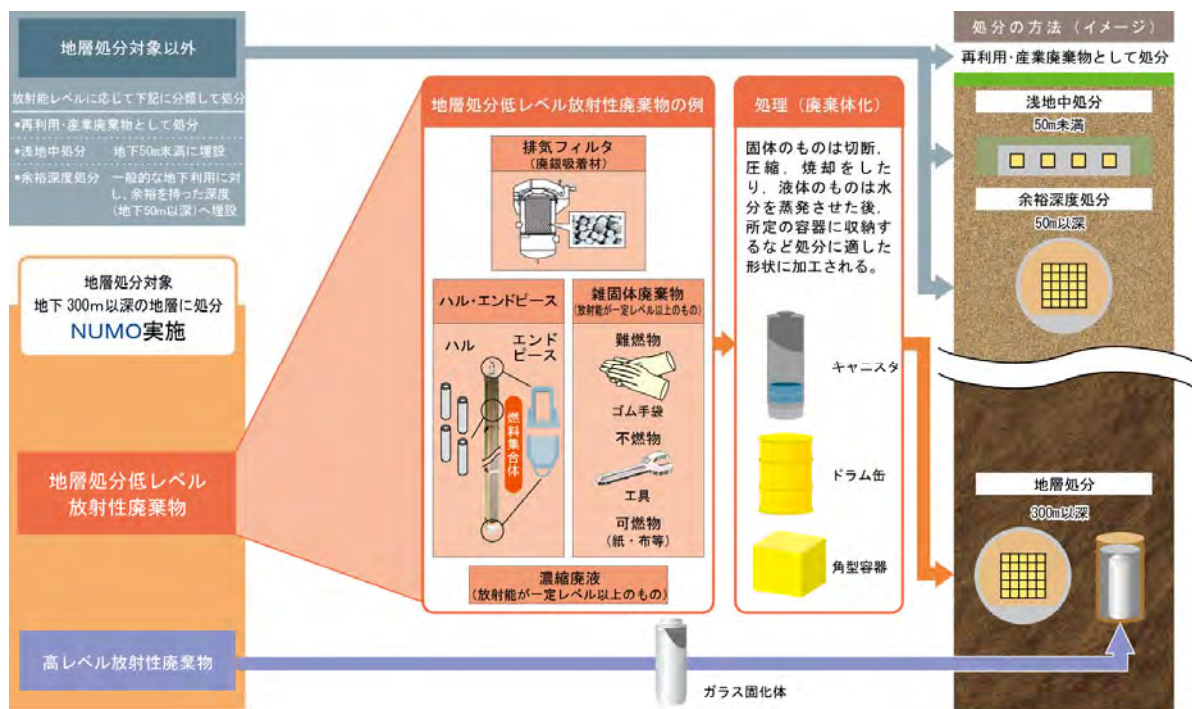


図 2.1.2-1 放射性廃棄物の処分方法の概念図

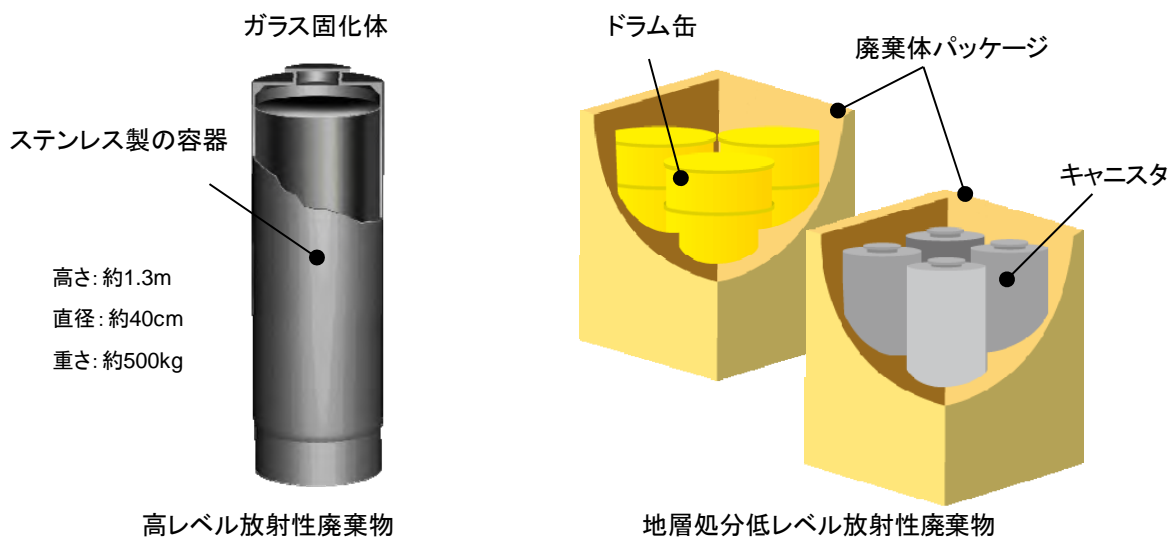


図 2.1.2-2 高レベル放射性廃棄物および地層処分低レベル放射性廃棄物形態のイメージ

2.2 地層処分の概要

2.2.1 地層処分の選択と固有の課題

高レベル放射性廃棄物などの地層処分対象廃棄物は、放射能レベルが高いものや半減期が極めて長い放射性物質を多く含むため、長期間にわたって人間とその生活環境に影響を及ぼす潜在的な危険性を有している。これらの廃棄物はこれまでに、宇宙空間、海洋底下、極地の氷床、深部の地層などに処分する概念が検討されてきたが、現在では、深部の地層を利用する地層処分が最も安全で確実な処分方法と考えられている。経済協力開発機構／原子力機関（以下、OECD/NEAという）は、その理由について、以下のような地層処分の特性によるとしている（OECD/NEA, 1984）。

- ・ 人間の継続的な関与なしに長期的に隔離することで安全が確保できること（受動的安全性）。
- ・ 長期にわたる安全性を評価できる見通しがあること。
- ・ 自国の領土内において実現可能であること。
- ・ 処分の実施に際して既存の技術や知見が利用できること。
- ・ いったん処分された廃棄物の回収が何らかの理由で必要となった場合、技術的に対応が可能であること。

また、各国がこのような地層処分計画を進めることは、環境上および倫理的側面から正当性があるという国際的な認識も示されている（OECD/NEA, 1995）。

このように、地層処分は高レベル放射性廃棄物などを隔離し、受動的安全性を確保するために適した特性を有するが、固有の課題も存在する。具体的には、地層処分ではこれまで実施されてきた大規模な土木事業や原子力事業などとは異なる以下のような課題が挙げられる。

- ・ 安全性の評価を極めて長い時間スケールに対して行わなければならない。
- ・ 天然の地層という不均質で大きな空間領域を対象とする必要がある。
- ・ 事業が長期にわたるため事業を取り巻く環境が変化する可能性がある。

地層処分の安全性を十分に確保するためには、地層処分の特性を考慮し、地層処分固有の課題を十分に認識する必要がある。その上で、事業を合理的に推進していくことが求められる。

2.2.2 地層処分に関する放射線防護原則

放射性廃棄物の処分の安全確保に関しては、一般論として「濃縮（固化）・閉じ込め」と「希釈・分散」という二つの基本的な考え方がある（OECD/NEA, 1977）。いずれの考え方においても環境への放射性核種の希釈放出または時間が経過した後の放出が生じるが、国際原子力機関（以下、IAEAという）により策定された放射性廃棄物管理の基本原則では、「将来世代の防護：放射性廃棄物は、将来世代の健康に対して予想される影響が、現在受け入れられている影響のレベルよりも大きくなるような方法で管理されなければならない。」とされている（IAEA, 1995）。大気中や水中への希釈放出のように環境における「希釈・分散」によって安全に処分することが期待できない放射性廃棄物に関しては、前者の「濃縮（固化）・閉じ込め」の考え方によって適切な形態に固化され処分する方法が採られる。閉じ込めには、放射性核種の放出を防ぐことに加え、長期的には、放射性核種の放出を最小限に抑えるといった考え方が含まれる。この考え方においても人間や環境に有意な

影響を与えないようにすることが重要である。

一般に上記の様な安全確保を考えるべき期間は、操業中および閉鎖後という大きく二つの期間に分けられる。地層処分事業において、放射線の防護を考えなければならないのは、一般公衆と作業従事者に対する操業中の期間および一般公衆に対する閉鎖後の期間となる。

以下に放射線防護の考え方について国際的にどのような議論がされているかについて述べる。

2.2.2.1 操業中の放射線防護

操業期間には、廃棄物の埋施設への搬入・定置、施設の閉鎖のための準備が行われる。操業期間中の作業は密封線源である固体放射性廃棄物の取り扱いであり、放射線による外部被ばくに対する防護が主要な課題となる。この間、線源となる廃棄物は管理され、影響については検証することができることから、国際的な指針や国内法に沿って通常の原子力施設など同様の方法により、放射線の防護を実施することが可能である。

操業期間中の防護目標および基準に関する基本的な考え方については、次に示す通常の原子力施設に対し IAEA によって示されているもの (IAEA, 1996) が適用可能である。

- ・ 防護目標

処分施設の操業による職業人や公衆の放射線被ばくは、社会的、経済的要因を考慮して合理的に達成し得る限り低いものとしなければならない。また、個人の被ばくは適用される線量限度および線量拘束値を超えないように維持されなければならない。

- ・ 基準 (実効線量)

- 職業人の被ばく限度：連続した5年間の平均年実効線量限度 20mSv；年間の実効線量限度 50mSv
- 不特定多数の公衆で構成される決定グループに対する平均推定線量の限度：年実効線量 1mSv

2.2.2.2 処分場閉鎖後の放射線防護

地層処分では処分場が閉鎖された後、放射性核種が非常に長い時間を経て環境に移行し、人間に被ばくを引き起こす可能性が想定される。このような問題に対して、国際放射線防護委員会 (以下、ICRP という) が ICRP Pub.26 によって示していた防護体系の考え方 (ICRP, 1977) の放射性固体廃棄物処分への適用性について OECD/NEA や ICRP において検討が行われた (OECD/NEA, 1984; ICRP, 1985)。

これらの検討の結果、地層処分による長期的な影響については、確率を考慮に入れたすべてのシナリオに起因する放射線被ばくによる個人のリスク限度を確立することが適切とされた。

ICRP は、その後の科学的知見の進展などに基づき、原則としてすべての放射線源を対象とした放射線防護体系を ICRP Pub.60 (ICRP, 1991) において示し、これを廃棄物処分に適用するための勧告として、放射性廃棄物全般にわたる処分方策に関する ICRP Pub.77 (ICRP, 1997)、長寿命の固体放射性廃棄物の処分方策に特化した ICRP Pub.81 (ICRP, 2000a) をまとめている。

ICRP Pub.60 では防護の最適化のために線量拘束値の概念が示された。また「潜在被ばく」の概念 (「被ばくが起こる可能性はあるが、起こることは確実ではない」ような被ばくをいう) が導入され、「通常被ばく」(多少の不確実性はあるものの将来ほぼ発生することが確からしいと考えられる被ば

く)と対となるものとして定義された (ICRP, 1991)。その後、ICRP Pub.103 において被ばく状況のタイプは、計画被ばく状況、緊急時被ばく状況、現存被ばく状況の3種に分類された。計画被ばく状況においては、潜在被ばくと通常被ばくの両方が発生する可能性がある (ICRP, 2007)。

前述の線量拘束値について ICRP Pub.77 では、廃棄物処分の放射線学的影響に対する防護について、線量拘束値が約 0.3mSv/y を超えないように最適化を行うことが適切であろうと勧告している。また将来世代の防護の観点から用いる指標として、通常被ばくに対しては決定グループの構成員に対する年間の個人線量、潜在被ばくに対しては決定グループ構成員に対する年間の個人リスクを勧告している (ICRP, 1997)。

ICRP Pub.81 では、最大の年線量を受けると予想される集団における個人を代表する人々のグループについて仮定される習慣と特性は、利用できるサイトまたは地域に固有の情報のほか、現在の生活様式を考えて合理的に保守的でもっともらしい仮定に基づいて選ばれるべきであるとしている。また、地層処分において考慮すべき被ばくの状況は、自然過程と人間侵入の二つのカテゴリーに分けられる。自然過程に対する放射線防護基準には、線量拘束値またはリスク拘束値を適用することが適切である。通常被ばく状況に適用する線量拘束値として年線量 0.3mSv を勧告しており、これは $10^5/y$ のオーダーのリスク拘束値に相当するとしている。一方、人間侵入の意味合いを考える時は、拘束値を地層処分に適用することは適切でないとしている (ICRP, 2000a)。

ICRP Pub.82 では、長寿命放射性核種の環境への計画放出があるような事情のもとでは、あらゆる被ばくの妥当な組み合わせとビルドアップを考慮して、環境中でのビルドアップが拘束値を上回る結果を生じるかどうかを考えるべきである、というガイダンスを発表した。このような検証の考察ができないかあるいは不確実すぎる場合には、線量の中における長寿命の人工放射性核種に起因する長期成分に年 0.1mSv のオーダーの線量拘束値を適用するべきであろうとしている (ICRP, 2000b, 2007)。

人間侵入については、自然過程を表すシナリオのように拘束値を適用することは適切ではないとしている。拘束値の代わりに、人間侵入の重要性を判断するための線量レベルを考える上で、それ以下であれば介入する必要はなさそうだという現存年線量 10mSv 程度と、それ以上であれば常に介入を考慮すべきという現存年線量 100mSv 程度とを参考とすることができるであろうとの示唆を与えている (ICRP, 2000b)。

ICRP Pub.81 における議論でも強調されているように、安全評価によって推定される遠い将来 (ICRP Pub.81 では「およそ数百年を超える」とされている) における線量あるいはリスクは、人間の健康への影響を正確に予測するための直接的な指標ではなく、地層処分システムの性能の評価に当たり適切な基準と比較して、その安全性が受け入れられるものかどうかを判断するために用いられる尺度である点に留意することが重要である。このことは、OECD/NEA の長期安全性の評価に関する集約意見 (OECD/NEA, 1991) においても指摘されている。また、OECD/NEA の First RWMC-RF Workshop Tokyo 2009 では、「放射線被ばくの予測の信頼性は、極めて遠い将来に関しては、技術的に最善の手段 (BAT: Best Available Technique) の概念が有効性を増すかもしれない」との報告もある (OECD/NEA, 2003)。

このような観点から、線量拘束値やリスク拘束値を満たしているかどうかの判断においては、遠い将来になればなるほど、こうした基準を参考値と考えるべきであり、単に数値が守られているだけで、あるいは拘束値を上回っているということだけで、安全性を議論すべきではないという ICRP の指摘は重要である (ICRP, 2000a)。

2.2.3 わが国における地層処分事業の進展

2.2.3.1 基盤的研究開発の段階

わが国の高レベル放射性廃棄物対策については、1976年に原子力委員会により地層処分に重点を置く旨の目標と所要の研究開発方針（原子力委員会，1976）が示され、これに沿って研究開発が進められた。

その後、JNCは、関係機関の協力のもとに第2次取りまとめ（JNC，1999a～e）を作成し、これにより、「わが国においても地層処分を事業化の段階に進めるための、信頼性のある技術的基盤が整備された」と総括した（JNC，1999a）。

第2次取りまとめは、原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会によってレビューを受け、「バックエンド対策専門部会報告書に示された技術的重点課題などが適切に達成され、その技術的信頼性が示されている」と評価されている（原子力委員会，2000b）。

このように、地層処分計画の初期の段階における基盤的な研究開発は、以降の段階の基礎を築くという観点から極めて重要な役割を果たした。

2.2.3.2 最終処分法の制定と実施主体の設立

これまで述べてきたように、今後の原子力政策がどのような方向に進められるにせよ、少なくともすでに存在する高レベル放射性廃棄物については、その処分を具体的に実施することが必要である（原子力委員会，1998）とされている。これを受けて、総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会にて高レベル放射性廃棄物処分事業の制度化のあり方について中間報告（総合資源エネルギー調査会，1999）がまとめられ、これに基づき2000年6月に最終処分法が公布された。最終処分法は、高レベル放射性廃棄物の地層処分を、計画的かつ確実に実施することを目的として制定された。TRU廃棄物の一部も地層処分の対象に加えるとするなどの最終処分法の改正が、2007年6月に行われている。

最終処分法には、主に以下の内容が定められている。

- a. 特定放射性廃棄物を、地下三百メートル以上の政令で定める深さの地層において、安全かつ確実に埋設することにより最終的に処分すること。
- b. 最終処分施設を建設しようとする地点の選定は、概要調査地区の選定、精密調査地区の選定および最終処分施設建設地の選定の3段階のプロセスを経ること。
- c. 経済産業大臣は、特定放射性廃棄物の最終処分を計画的かつ確実に実施させるため、特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（以下、最終処分基本方針という）および特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画（以下、最終処分計画という）定め、これを公表すること。
- d. 概要調査地区、精密調査地区および最終処分施設建設地（以下、概要調査地区等という）が実施主体により選定された場合には、経済産業大臣は、都道府県知事および市町村長の意見を聴き、十分に尊重して最終処分計画を改定すること。
- e. 概要調査地区等の選定のための要件（以下、法定要件という）。

- ① 概要調査地区の選定にあたっては、地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録がないこと、将来にわたって、地震等の自然現象による地層の著しい変動が生ずるおそれが少ないと見込まれること、およびその他経済産業省令で定める事項、のいずれにも適合していると

認めるものの中から概要調査地区を選定しなければならない。

- ② 精密調査地区の選定にあたっては、当該対象地層等において、地震等の自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないこと、当該対象地層等が坑道の掘削に支障のないものであること、当該対象地層等内に活断層、破碎帯又は地下水の水流があるときは、これらが坑道その他の地下の施設に悪影響を及ぼすおそれが少ないと見込まれること、およびその他経済産業省令で定める事項、のいずれにも適合していると認めるものの中から精密調査地区を選定しなければならない。
- ③ 最終処分施設建設地の選定にあたっては、地下施設が当該対象地層内において異常な圧力を受けるおそれがないと見込まれることその他当該対象地層の物理的性質が最終処分施設の設置に適していると見込まれること、地下施設が当該対象地層内において異常な腐食作用を受けるおそれがないと見込まれることその他当該対象地層の化学的性質が最終処分施設の設置に適していると見込まれること、当該対象地層内にある地下水又はその水流が地下施設の機能に障害を及ぼすおそれがないと見込まれること、およびその他経済産業省令で定める事項、のいずれにも適合していると認めるものの中から最終処分施設建設地を選定しなければならない。

その他、実施主体として原子力発電環境整備機構の設立、最終処分費用の確保・拠出金制度などが定められた。なお、安全の確保のための規制については別の法律で定めるとされた。

また、最終処分法施行令では、政令で定める深さは、地下三百メートル以上とすると定めている。

一方、最終処分法施行規則には、法定要件である「その他経済産業省令で定める事項」について以下のように定めている。

<文献調査の調査事項>

- ・ 概要調査地区として選定しようとする地区に第四紀の未固結堆積物があるときは、その存在状況の概要に関する事項。
- ・ 概要調査地区として選定しようとする地区に鉱物資源があるときは、その存在状況の概要に関する事項。

<概要調査地区の選定>

- ・ 当該概要調査地区として選定しようとする地区内の最終処分を行おうとする地層が、第四紀の未固結堆積物であるとの記録がないこと。
- ・ 当該概要調査地区として選定しようとする地区内の最終処分を行おうとする地層において、その掘採が経済的に価値が高い鉱物資源の存在に関する記録がないこと。

国においては、最終処分法の公布を受け、最終処分基本方針を策定している(通商産業省, 2000a)。ここには、実施主体は安全性の確保の前提のもと、経済性および効率性にも留意して事業を行うこと、事業が100年程度にわたることから技術などの変化に柔軟かつ機動的に対応できる体制であること、概要調査地区などの選定において地域住民の理解と協力を得られるよう、事業の各段階における情報公開を徹底し透明性を確保すること、が必要であるとされている。また、最終処分を金属製の容器などの人工バリアと岩盤などの天然バリアによる多重バリアシステムによって実施するこ

と、地層処分に係る技術開発については実施主体、国および関係機関で役割分担のもと進めることなども示されている。

また、原子力委員会、原子力安全委員会の意見をもとに、国は最終処分計画も策定している。ここには、平成 32 年頃までに見込まれる特定放射性廃棄物の発生量、処分場の選定や地層処分を行う時期、最終処分施設の規模、年間の処分施設の能力、実施の方法が定められている（通商産業省、2000b）。

NUMO は、最終処分法に基づき、実施主体として 2000 年 10 月 18 日に設立された。役員には、業務を総理する理事長を筆頭に、理事長を補佐する副理事長と 6 名以下の理事（非常勤を含む）、2 名の監事（非常勤を含む）を置き、経営にかかわる事項および業務執行にかかわる重要事項の意思決定機関として、理事会を設置している。また、理事長の諮問に応じて機構の運営にかかわる重要事項を審議する機関として評議員会を組織しており、評議員は最終処分について学識経験を有する者の中から経済産業大臣の認可を得て任命される。なお、評議員会は、役員を選任、解任に関する権限を有している。また、NUMO は業務の分担に応じて、企画部、業務部、広報部、立地部、技術部の 5 部で構成されており、2011 年 3 月現在約 90 名が在籍している（図 2.2.3-1）。

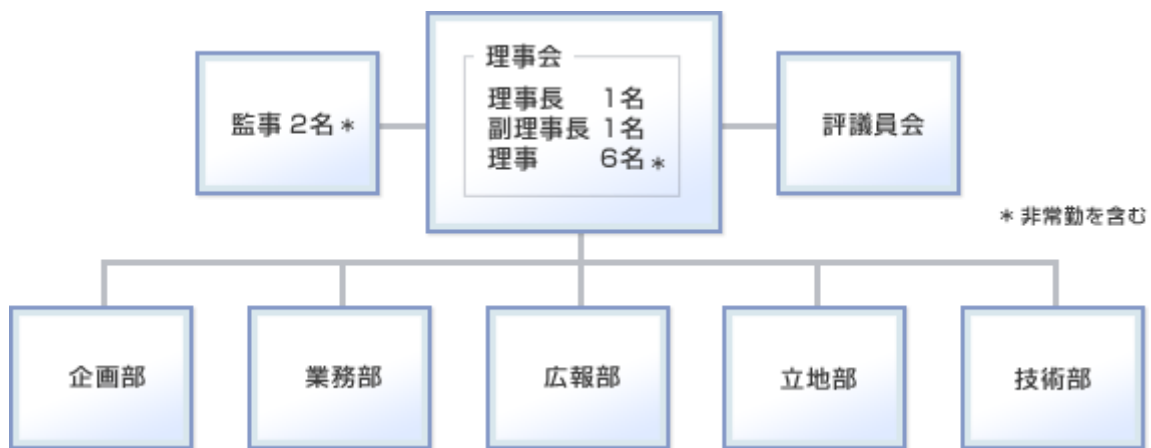


図 2.2.3-1 NUMO 組織図 (2011 年 3 月現在)

2.2.3.3 最終処分法の改正

2007 年に改正された最終処分法では、ガラス固化体が第一種特定放射性廃棄物として定義され、また、使用済燃料の再処理などに伴って発生し、長期間にわたり環境に影響を及ぼすおそれがある半減期の長い核種を一定量以上含む低レベル放射性廃棄物（TRU 廃棄物）の一部が第二種特定放射性廃棄物（地層処分低レベル放射性廃棄物）として定義された。この地層処分低レベル放射性廃棄物も高レベル放射性廃棄物と同様に地層処分することが追加された。これを受け、NUMO は 2008 年 4 月に、これを事業の対象に加えた。

地層処分低レベル放射性廃棄物とは、TRU 廃棄物のうち、最終処分法の第二条第九項で指定された放射性廃棄物であり、政令である最終処分法施行令の第三条によって定められるものとして以下に定義されている。

第三条 法第二条第九項の政令で定めるものは、次に掲げる物とする。

一 次に掲げる物を固型化し、又は容器に封入した物

イ 発電用原子炉の炉心に装てんされ、発電の用に供された金属であって、使用済燃料の再処理に伴って使用済燃料とともにせん断されたもの

ロ イに掲げる金属を収納した容器に充てんされた水および当該水のろ過に用いられたろ過材

ハ 使用済燃料の再処理に用いられたリン酸トリブチル溶液（よう素およびその化合物の除去が行われていないものに限る。）の精製に用いられた炭酸ナトリウム溶液

ニ 使用済燃料の再処理に伴って再処理施設から排出される空気に含まれるよう素およびその化合物の吸着に用いられた金属

二 前号に掲げる物のほか、使用済燃料の再処理等に伴い使用済燃料、分離有用物質又は残存物によって汚染された物を固型化し、又は容器に封入した物であって、次の表の上欄（ここでは左）に掲げる放射性物質についての放射能濃度がそれぞれ同表の下欄（ここでは右）に掲げる放射能濃度を超えるもの

対象核種	放射能濃度 (Bq/t)
C-14	8.7×10^{13}
Cl-36	9.6×10^{10}
Tc-99	1.1×10^{12}
I-129	6.7×10^9
全 α	8.3×10^9

TRU 廃棄物は、TRU 廃棄物処分技術検討書—第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ（以下、第2次 TRU レポートという）（電事連・JNC, 2005）の評価において、その特性に応じたグループ分けが行われ、廃銀吸着材を主要な廃棄物とするグループ 1、ハル・エンドピースを主要な廃棄物とするグループ 2、硝酸塩を含む廃棄物をまとめたグループ 3、そのほかの廃棄物をまとめたグループ 4 の四つのグループに分類された。これらの廃棄物は、現状、上記の最終処分法施行令によって地層処分の対象になる廃棄物（地層処分低レベル放射性廃棄物：NUMO, 2011a, 2011b）とそれ以外の廃棄物に区分されている。図 2.2.3-2 に地層処分対象の TRU 廃棄物である地層処分低レベル放射性廃棄物のグループ分類と特徴を示す。

概要				
廃棄体イメージ (例)				
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 放射性ヨウ素 (I-129) を含む セメント固化体 	<ul style="list-style-type: none"> 発熱量が比較的大 放射性炭素 (C-14) を含む 	<ul style="list-style-type: none"> 硝酸塩を含む モルタル、アスファルトによる固化体など 	<ul style="list-style-type: none"> 焼却灰、不燃物 セメント固化体など
グループ	1	2	3	4

図 2.2.3-2 地層処分低レベル放射性廃棄物のグループ分類と特徴
(総合資源エネルギー調査会, 2006 を参考に作成)

2.2.3.4 段階的に整備される安全規制

原子力安全委員会は、2000年に安全規制の基本的考え方（原子力安全委員会，2000；以下，第1次報告という）を公表した。ここでは、安全確保の原則として、長期的に安全な地質環境を選定するなど、常に長期的な観点から安全性に影響が及ぶおそれのある因子に配慮しつつ、安全確保のための対策（サイト選定，工学的対策）を講ずる必要があること，および事業許可申請以降，事業の各段階において安全確保対策の妥当性の確認が必要であり，これらの安全確認のうち最も早い段階で行われる事業許可申請時の安全確認は安全評価によって行うことが挙げられている。また，これらのための安全規制に関する基準・指針などは，サイト選定の進捗，サイト固有の状況，科学技術の進歩に応じて，段階的により詳細なものとなっていくことが重要であるとの考え方が示されている。

具体的には，原子力安全委員会は，精密調査地区選定開始時期までに，処分場の設計要件，安全評価にかかわる安全指標とその基準値，安全評価シナリオなどを定めた安全審査基本指針を策定すること，また新しい知見を基本指針に適宜取り入れ，処分場の安全審査開始前までに安全審査指針を策定することとしている。また，最終処分施設建設地選定がなされるまでに，処分場の建設段階から事業廃止までの各段階で国が確認すべき事項を定めた技術上の基準を策定することとしている。事業許可申請時における安全評価については，地層処分の安全性に影響を及ぼすと思われる種々の現象を考慮した解析を行い，一般公衆に対する評価線量が基準値を超えていないことなどを確認することが基本であるとし，今後国際動向を踏まえた安全指標および基準値が設定されることとしている（原子力安全委員会，2000）。

このような背景を経て，原子力安全委員会は，2004年6月に，「放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について」（原子力安全委員会，2004）をまとめ，極めて長期にわたる期間の安全評価にはそれに付随する不確実性は避けられず，これを踏まえた評価としてリスク論的考え

方の適用が有効であることを示すとともに、判断に用いる基準は ICRP の勧告も参考にすることなど、放射線防護基準など今後の検討の方向性を示した。

第1次報告で示された安全確保のためにサイトに要求される環境要件の在り方に基づき、原子力安全委員会特定放射性廃棄物処分安全調査会は、「高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階で考慮すべき環境要件について」を取りまとめている(原子力安全委員会, 2002)。この報告書は、概要調査地区を選定する際に、文献調査によって明らかにサイトとして不適切であると考えられる要件を示したものである。このなかで、環境要件をあらかじめ提示し、概要調査地区選定に際しての判断の根拠を示すことは、選定プロセスの透明性を高めるとともに、必要な安全確保に関する検討を着実に進める上でも重要であるとされている。なお、概要調査あるいはそれ以降の調査結果をもとに判断することが適当と考えられる事項や、処分施設の設計・施工との関連において検討すべき事項については環境要件とはしないとの考え方が示されている。

一方、土木学会原子力土木委員会においても、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する諸課題を議論する場として、地下環境部会が設立され、2001年に報告書が取りまとめられた(土木学会, 2001)。この報告書には、概要調査地区選定に関する基本的考え方、サイト選定におけるさまざまな条件も具体的に示されている。

これらの検討成果を受けて NUMO は、公募関係資料「概要調査地区選定上の考慮事項」を作成・公表した(NUMO, 2002)。

一方で、処分施設建設地選定段階における安全規制機関の関与として以下の動向がある。

NUMOが概要調査地区、精密調査地区、最終処分施設建設地の選定を行う際には、実施計画の変更を申請するが、この申請後に国は最終処分計画を変更するとしている。最終処分法には、経済産業大臣は最終処分基本方針および最終処分計画の改定を行う際には、原子力安全委員会に安全の確保のための規制に関する意見を聴かなければならないと規定されている。特に安全規制の最初の段階における事業許可申請および安全審査の段階において、事業計画の大幅な変更、さらには処分地の変更を余儀なくされることがないように、最終処分施設建設地の選定の段階において、安全の確保に関する事業者の判断およびその妥当性についてレビューした所管官庁の判断は、十分な知見とデータに基づく適正なものであることを、原子力安全委員会が最終処分計画の改定に当たり確認することが重要となるとされた(原子力安全委員会, 2007)。これに加え、原子力安全委員会では、概要調査地区および精密調査地区の選定段階における関与のあり方についての検討が行われる計画がある。

一方、総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会が、2006年9月に取りまとめた「放射性廃棄物の地層処分にかかわる安全規制制度のあり方について」(総合資源エネルギー調査会, 2006)において、サイト選定段階における規制機関の役割や基本設計から建設、操業、閉鎖、事業廃止までの各段階における安全規制の法的枠組みが検討されるとともに、閉鎖に関しては、最終的に閉鎖を判断するまでは、不測の事態への適切な対応などのために廃棄体の回収可能性を維持することが重要であると指摘している。

この報告書を技術的背景として2007年6月に原子炉等規制法が改正され、最終処分法で「安全の確保については、別に法律で定める」とされた安全規制が整備された。地層処分事業は、第五章の二の廃棄の事業に関する規制のうち、第一種廃棄物埋設として定義され、事業の実施にかかわる許可、設計および工事の方法の認可、使用前検査、定期検査、保安のための措置義務、埋設の確認、閉鎖措置(坑道埋め戻し)計画の認可、閉鎖の確認、事業の廃止、核物質防護など、事業の段階的

進展を踏まえた法的枠組みが整備された。

また、改正された原子炉等規制法の施行に必要な埋設規則の策定に資することを目的として、2008年1月「高レベル放射性廃棄物等の地層処分にかかわる安全規制について」（総合資源エネルギー調査会、2008）がまとめられた。これに基づき、「第一種廃棄物埋設の事業に関する規則」が新たに制定され、事業許可後20年を超えない期間ごとに廃棄物埋設施設の定期的な評価（以下、安全レビューという）を行うことなど、安全規制に求められる基本的な要件が規定された。

2.2.3.5 事業の実施段階

最終処分計画は、最終処分法の改正を受け、2008年の閣議決定により、廃棄物の発生量および処分時期については以下のように見直されている（経済産業省、2008）。

- ・ 使用済燃料の再処理後に生ずるガラス固化体の発生量は、2000年までに約13,300本相当、2006年までに約7,100本相当が発生していること、2021年頃までに約40,000本に達する見込みであること。
- ・ 地層処分低レベル放射性廃棄物の発生量は、再処理などにより2007年までに約4,100m³相当が発生していること、再処理施設などの操業計画から、総量約18,100m³が見込まれること。
- ・ 地層処分施設の規模および能力については、高レベル放射性廃棄物が40,000本以上／施設、処分能力1,000本／年であること、地層処分低レベル放射性廃棄物が19,000m³以上／施設であること。
- ・ 時期については、概要調査地区の選定を平成20年代中頃、処分施設建設地の選定を平成40年前後、地層処分の開始は平成40年代後半とされた。

地層処分の費用については、単位数量当たりの処分業務に必要な金額（以下、拠出金という）が経済産業省令により定められ、毎年改正されている。平成22年における処分費用は、高レベル放射性廃棄物は総額27,769億円、地層処分低レベル放射性廃棄物は総額7,548億円と見積もられている（資源エネルギー庁、2010）。表2.2.3-1に各々の処分費用の内訳を記す。

表 2.2.3-1 処分費用の内訳
（資源エネルギー庁、2010を編集）

項目	単位:億円	
	高レベル放射性廃棄物	地層処分低レベル放射性廃棄物
技術開発費	1,045	642
調査費および用地取得費	1,714	907
設計および建設費	9,012	1,556
操業費	7,594	1,718
解体および閉鎖費	921	99
モニタリング費	1,199	730
プロジェクト管理費	5,224	1,612
消費税	1,057	281
合計	27,769	7,548

2.2.4 わが国の地層処分事業の特徴

2000年のNUMO設立以降、最終処分法および原子炉等規制法の改正や安全規制に関する議論の進展など、地層処分事業を取り巻く環境にはさまざまな変化があった。そこで、わが国の地層処分事業の特徴を整理する。

2.2.4.1 わが国の地質環境の特徴

わが国は、変動帯に位置し、安定大陸に比べてプレート運動に起因する断層活動、火成活動、隆起・侵食などの自然現象が活発である。わが国の地層処分における長期的な安全性を確保するためには、まず、将来にわたりこれらの自然現象の著しい影響が見込まれる場所を回避する必要がある。

また、山がちで海に囲まれた地形・地理条件、変動帯に特有な複雑な地質構造や多種多様な岩種、豊富な地下水や高い地下水位などの地質環境の特性を把握し、それらの長期的な変遷を考慮して、地層処分にとってより好ましい条件を有する場所を選定することが重要である。

これらの条件に関しては、自然現象は過去数10万年程度の地質学的記録をもとに、将来10万年程度の予測が可能であることや、変動帯に位置するわが国においても、地層処分に必要な条件を満たす地質環境が広く存在することが示されている（JNC, 1999b）。

2.2.4.2 三段階のサイト選定と公募

サイト選定のプロセスは最終処分法において規定されており、「概要調査地区の選定」、「精密調査地区の選定」、「最終処分施設建設地の選定」の三段階の選定過程を経て、処分施設建設地が決定される（図 2.2.4-1）。

最初の概要調査地区の選定を行うための文献調査を実施するに当たり、地層処分事業は公共性が高く100年程度にわたることから、NUMOでは、地域の自主的な判断により受け入れていただくことが何より重要と考え、2002年に「特定放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域」を全国の市町村から公募することとし、応募獲得に向けてさまざまな取り組みを行ってきた（NUMO, 2009）。

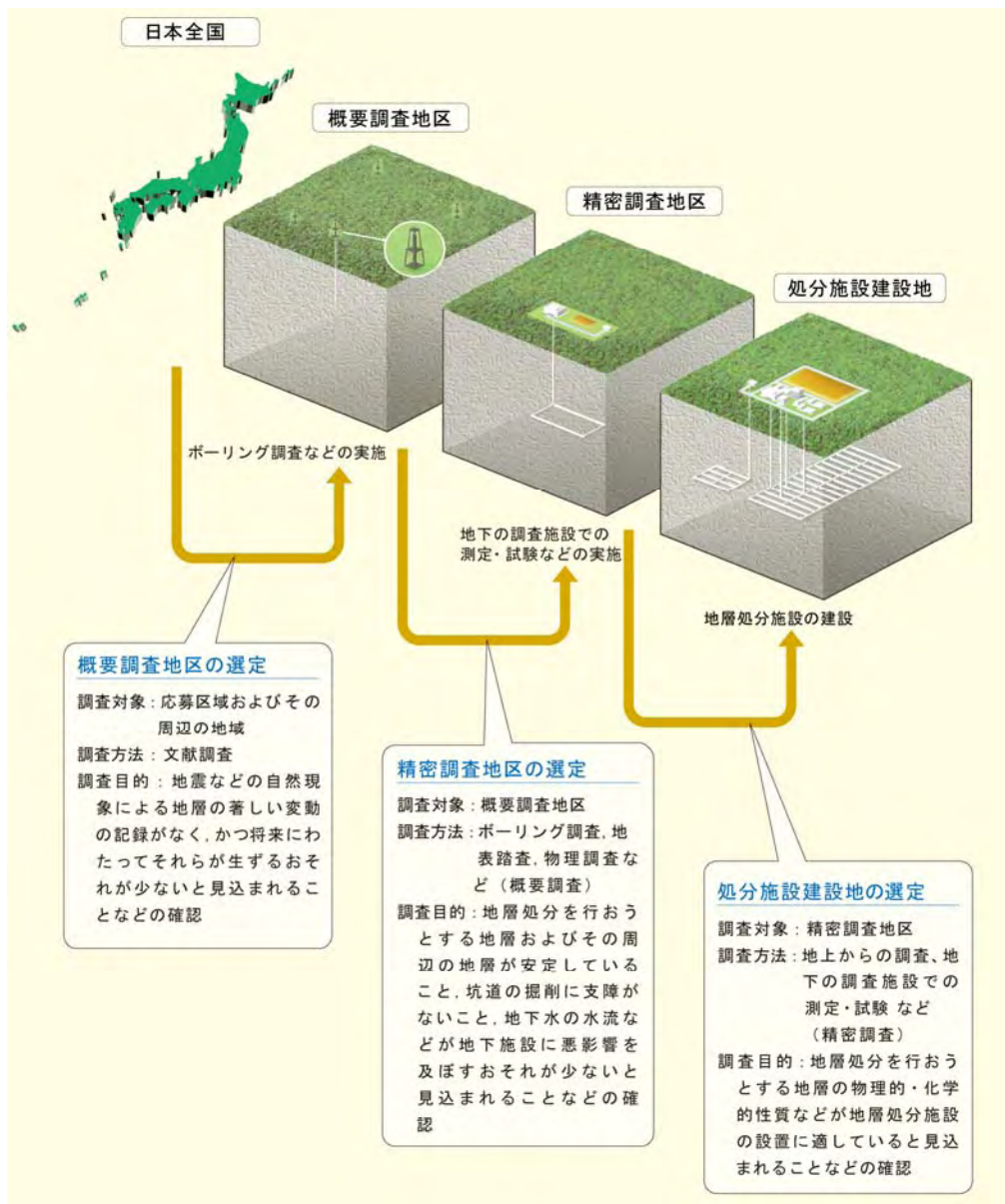


図 2.2.4-1 三段階のサイト選定過程
 (出典：NUMO, 2009)

なお、NUMO の事業に地層処分低レベル放射性廃棄物が加わったことにより、2008 年から高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の両者を対象とした公募²⁴を行っている (NUMO, 2009)。応募に当たっては、高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の両方を対象とすることも、いずれか一方を対象とすることも可能であるとした。

2007年1月に、高知県東洋町から全国で初めて文献調査への応募がなされ、国は同年3月にNUMOによる事業計画の変更申請を承認した。しかしながら、4月に行われた町長選挙の結果を受けて、応募が取り下げられたことから、東洋町での文献調査を取り止めた。

このような経緯を踏まえ、2007年11月に公表された「放射性廃棄物小委員会報告書 中間とりま

²⁴ NUMO では、高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物を同一のサイトに処分する方法を併置処分という。

とめ」(総合資源エネルギー調査会, 2007)を受け, 国が市町村に対して文献調査の実施を申し入れることが可能となった。

2.2.4.3 長期にわたる事業

NUMO では, 最終処分法および原子炉等規制法に基づく手続きを勘案し, 地層処分事業を①概要調査地区選定段階(文献調査の段階), ②精密調査地区選定段階(概要調査の段階), ③処分施設建設地選定段階(精密調査の段階のうち, 地上からの調査段階), ④処分施設建設地選定段階(精密調査の段階のうち, 地下調査施設での調査段階), ⑤安全審査の段階(事業許可申請), ⑥処分施設の建設段階, ⑦操業段階(操業期間中), ⑧閉鎖措置計画認可申請の段階, ⑨閉鎖段階, ⑩閉鎖後の管理を経て事業廃止に至る段階の10段階に分けている。

各段階に必要な期間は, サイト選定で20年程度(①~⑤), 処分場の建設と操業を併せて60年程度(⑥~⑧), 処分場の閉鎖で10年程度(⑨, ⑩)が見込まれ, 事業全体では100年程度にわたる長期プロジェクトとなる(NUMO, 2009)。このため, あらかじめ事業全体を俯瞰し, 各段階での目標とそれを達成するための実施事項を明確にし, 必要な技術開発を計画的かつ段階的に進めていくことが重要と考えている。

特に, 処分施設建設地選定段階では, 精密調査を行うための地下調査施設の建設を開始することとなることから, NUMO は, その前段階である精密調査地区選定段階は, 地層処分事業を推進する上で大変重要な段階であるという認識を持っている。

2.2.4.4 役割分担による技術開発

NUMO が設立された2000年以降の地層処分に関する技術開発の進め方については, 原子力長期計画(原子力委員会, 2000a)および原子力政策大綱(原子力委員会, 2005)で規定されている。例えば原子力政策大綱では「NUMO には, 高レベル放射性廃棄物の最終処分事業の安全な実施, 経済性および効率性の向上などを目的とする技術開発を計画的に実施していくことを期待する。また, JAEA を中心とした研究開発機関は, 深地層の研究施設などを活用して, 深地層の科学的研究, 地層処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化などに向けた基盤的な研究開発, 安全規制のための研究開発を引き続き着実に進めるべきである。」と述べられている。

この役割分担に沿って, NUMO は, 安全に事業を進めていく上で必要となる実務的な技術の整備を進めるとともに, 経済性や効率性の向上を目指した技術開発を進めている。一方, 国や研究開発機関が進める基盤研究開発では, 地層処分基盤研究施設(ENTRY, 茨城県東海村)や地層処分放射化学研究施設(QUALITY, 茨城県東海村), さらに瑞浪超深地層研究所(岐阜県瑞浪市)や幌延深地層研究センター(北海道幌延町)における研究開発が着実に進められている。また基盤研究開発では, 資源エネルギー庁とJAEA が中心となって全体計画を策定し, 原環センター, 財団法人電力中央研究所(以下, 電中研という), 独立行政法人産業技術総合研究所(以下, 産総研という), 独立行政法人放射線医学総合研究所(以下, 放医研という)の基盤研究開発機関と地層処分基盤研究開発調整会議(以下, 調整会議という)を組織して, 事業を支える基盤技術の強化を効率的に進めるよう努めている(資源エネルギー庁・JAEA, 2010)。NUMO は, これら基盤研究開発の成果が事業に効果的に活用できるよう, 技術開発ニーズを明示する(NUMO, 2010)とともに, 得られた成果の評価を行い事業に活用していく。

2.2.4.5 処分場の規模

高レベル放射性廃棄物処分場の規模としては、2020 年前後までの原子力発電によって発生すると見込まれるガラス固化体 40,000 本以上を処分する規模を想定している。ガラス固化体の発熱は時間の経過とともに減衰していくが、特に初期の段階の高い発熱による地層処分システムへの影響が有意なものとならないように、ガラス固化体に適切な離隔を確保して処分する。処分場のおおよその広がりとしては、5～6km²を想定しているが、サイトの地質環境の条件によっては、これよりも広い範囲を必要とする場合もある。

また、地層処分低レベル放射性廃棄物処分場の規模としては、使用済燃料の再処理などの操業・廃止措置計画を勘案して見込まれる地層処分低レベル放射性廃棄物として約 19,000m³ 相当を処分する規模を想定している。地層処分低レベル放射性廃棄物には高レベル放射性廃棄物と比べると廃棄物の形態・性状が多岐にわたり、発熱性が低い廃棄体が多く含まれることから、比較的大断面の処分坑道に廃棄体を効率的に集積して処分する方針であり、処分場のおおよその広がりとしては、約 0.25km²を想定している。

高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物を同一サイトに併置して処分した場合の地下施設のイメージを図 2.2.4-2 に示す。

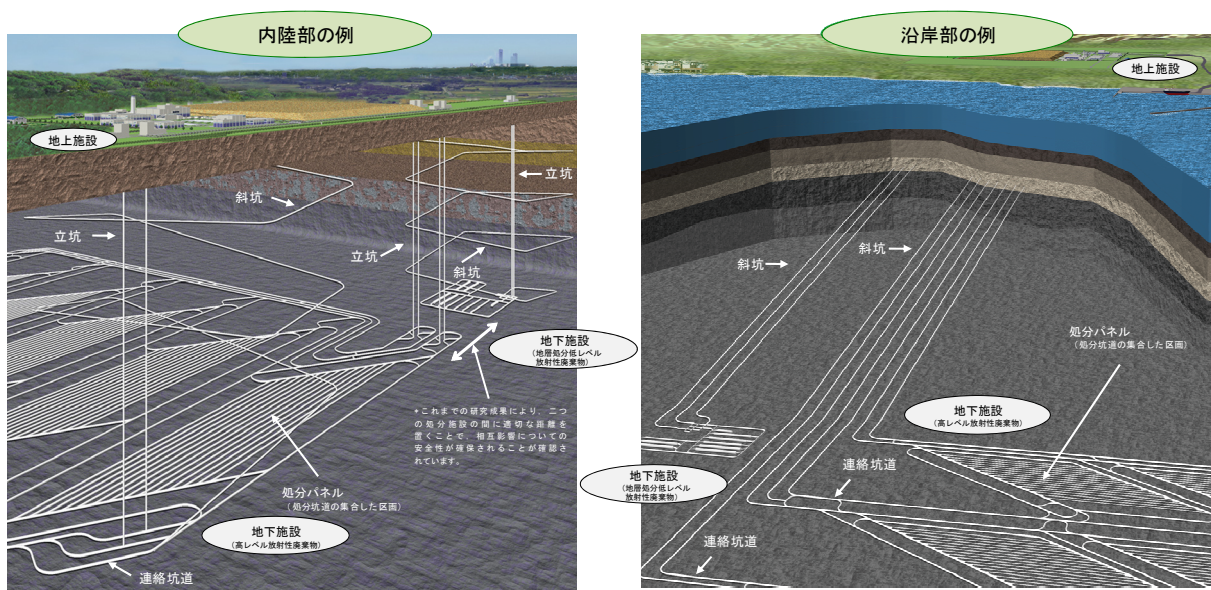


図 2.2.4-2 処分場の地下施設の例
(出典：NUMO, 2009)

高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の地下施設内の基本的な人工バリア構成を図 2.2.4-3 と図 2.2.4-4 に示す。高レベル放射性廃棄物処分では、ガラス固化体をオーバーパック（金属製の容器）に封入し、その周りに天然のベントナイトを主成分とした緩衝材を施す。地層処分低レベル放射性廃棄物は、2.2.3.3 で説明したとおり廃棄物の特性によって四つのグループに分け、それぞれにサイトに応じた適切な人工バリアを適用する。基本的な人工バリアは、グループ 1・2 では、廃棄体、緩衝材、埋め戻し材、グループ 3・4 では、廃棄体、充填材である。

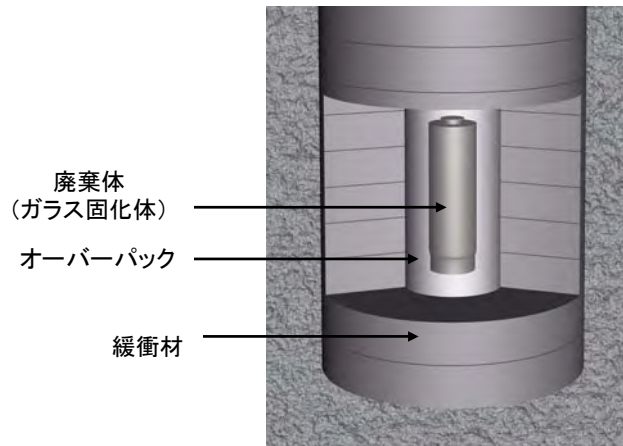
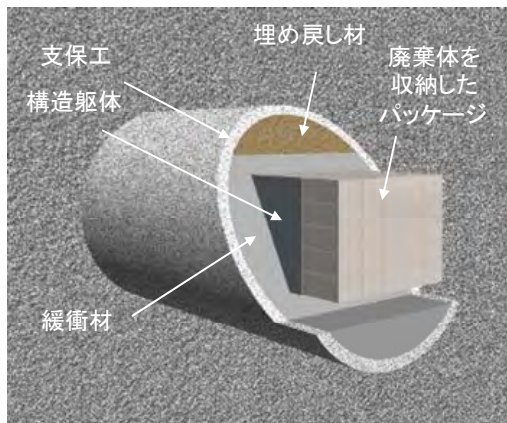
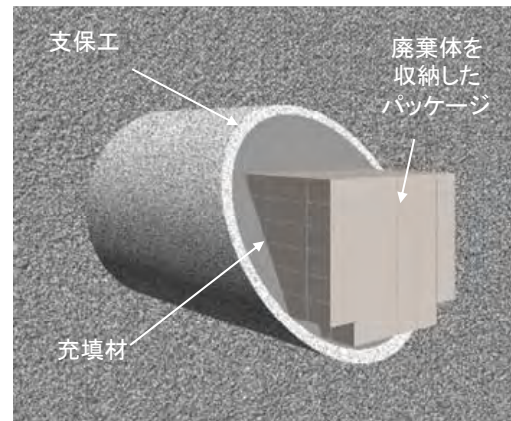


図 2.2.4-3 高レベル放射性廃棄物処分の基本的なバリア構成



(a) グループ1・2



(b) グループ3・4

図 2.2.4-4 地層処分低レベル放射性廃棄物処分の基本的なバリア構成

2.3 諸外国の取り組み状況

原子力発電を実施している諸外国においても、地層処分の検討が進められており、さまざまな段階にある。

処分場のサイト選定が完了しているのはフィンランド、スウェーデン、アメリカである。フィンランドでは建設許可申請に向けての準備が着々と進められており、スウェーデンでは2009年6月に処分場建設予定地として、エストハンマル自治体のフォルスマルクが選定され、2011年3月に処分場の立地・建設許可申請を行った。しかし、アメリカでは2009年1月に発足した民主党のオバマ政権がすでに安全審査段階にあるユッカマウンテンの処分場計画を中止する方針を打ち出し、先行きは不透明になっている。フランスでは処分場の候補地が地下研究所があるビュール近傍の30 km²圏内に絞られている。このほか、スイス、イギリス、カナダで初期段階のサイト選定手続きが進みだしている。

これらの国のほとんどが、地下研究施設や地下調査施設を有しており、実証を中心とした研究開発や処分場の建設許可の申請に必要なデータの取得などが行われている（経済産業省、2011）。

主要諸外国における地層処分への取り組みの状況を、表 2.2.4-1 に示した。

表 2.2.4-1 諸外国の状況
(経済産業省, 2011 に基づき作成)

国名	状況
フィンランド	2001年にオルキオトを最終処分地にすることが決定された。2004年6月よりオルキオトで地下特性調査施設の建設が進められており、地質環境調査も行われている。2012年に建設許可申請の予定。
スウェーデン	実施主体 SKB は、1995年から6自治体でフィジビリティ調査を行い、2000年に3自治体を次段階のサイト調査候補地に選定。その後、オスカーシャムとエストハンマルの2自治体がサイト調査受け入れを議決したことを受けて、2002年から両自治体におけるサイト調査と環境影響評価を実施。これらの評価を踏まえて SKB は、2009年6月に処分場建設予定地として、エストハンマル自治体のフォルスマルクを選定した。2011年3月に処分場の立地・建設許可申請した。
アメリカ	2002年にネバダ州ユッカマウンテンが処分サイトとして決定され、2008年9月より処分場の建設認可に関する安全審査が行われていた。しかし、2009年1月に発足したオバマ政権は、ユッカマウンテンでの処分計画を中止する方針を打ち出し、2010年3月に許認可申請の取下げ申請を行った。こうした計画変更に伴い、上級有識者委員会（ブルーリボン委員会）を設け、使用済燃料管理の在り方の再検討を進めている。なお、TRU 廃棄物の廃棄物隔離パイロットプラントは、1999年3月から操業が開始されている。
フランス	2000年から実施主体 ANDRA がビュールに地下研究施設建設、地下坑道で各種調査・試験を実施。2006年放射性廃棄物等管理計画法に基づき、可逆性のある地層処分場について、2015年に設置許可申請、2025年に操業開始を目標にビュールを含む250km ² 圏の追加調査を実施。その結果に基づき ANDRA が、2009年末に250km ² 圏から30km ² の処分場候補サイトを絞り込み、2013年予定の公開討論会を経てサイトが決定されれば、2014年に設置許可申請の予定。
スイス	2008年に策定された特別計画「地層処分場」に基づき、同年10月に3カ所の処分場候補サイト地域が実施主体 Nagra により提案された。特別計画で規定された3段階の選定手続きにより2018年を目途にサイト選定を進める。
イギリス	政府は2008年6月に放射性廃棄物管理に関する白書を公表し、将来の処分場受け入れに関心を持つ自治体の公募を開始。2009年1月までに2市1州が関心表明を行い、現在処分地としての適合可能性についての初期スクリーニング中。
カナダ	連邦政府は、2007年6月に、最終的には地層処分を行うものの、当面はサイト貯蔵、集中貯蔵を実施するという「適応性のある段階的管理」を進めることを決定。これを受けて実施主体 NWMO は、2010年5月に9段階からなる処分場サイト選定計画を公表し、第1段階の処分計画とサイト選定計画に関する情報提供手続きを開始した。2010年9月までに四つの地域が NWMO からの情報提供への関心表明に関する議決を行った。
ドイツ	ゴアレーベンで進められていたサイト特性調査は2000年以降凍結されていたが、2009年10月に発足した第2次メルケル政権は凍結を解除し、調査活動を再開する方針を示した。その後、調査活動が開始された。
スペイン	サイト選定活動が1998年に中断され、最終管理方策の決定は先送りされているが、地層処分を有力なオプションとして位置付けている。
ベルギー	地層処分の安全評価および実現可能性の中間報告書が公開され、研究開発の最終段階に入った。建設許可申請は2020年以降の予定。

参考文献

- 電事連 (電気事業連合会)・JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005) : TRU 廃棄物処分技術検討書一第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ一.
- 電事連 (電気事業連合会) (2011) : 「原子力・エネルギー」図面集 2011.
- 土木学会 (2001) : 概要調査地区選定時に考慮すべき地質環境に関する基本的考え方.
- 原子力安全委員会 (2000) : 高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第 1 次報告).
- 原子力安全委員会 (2002) : 高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について.
- 原子力安全委員会 (2004) : 放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について.
- 原子力安全委員会 (2007) : 特定放射性廃棄物処分に係る安全規制の許認可手続と原子力安全委員会等の関与のあり方について (中間報告).
- 原子力委員会 (1976) : 放射性廃棄物対策について.
- 原子力委員会 (1998) : 高レベル放射性廃棄物処分に向けての基本的考え方について, 原子力委員会 高レベル放射性廃棄物処分懇談会.
- 原子力委員会 (2000a) : 原子力の研究, 開発および利用に関する長期計画(平成 12 年).
- 原子力委員会 (2000b) : 我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価, 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会.
- 原子力委員会 (2005) : 原子力政策大綱, 平成 17 年 10 月 11 日 原子力委員会決定.
- 原子力委員会 (2008) : 原子力政策大綱に示している放射性廃棄物の処理・処分にに関する取組の基本的考え方に関する評価について, 原子力委員会政策評価部会.
- IAEA (1995) : The Principles of Radioactive Waste Management, IAEA, Safety Series No. 111-F, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (1996) : International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, IAEA Safety Series No. 115, International Atomic Energy Agency.
- ICRP (1977) : Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication no. 26, Pergamon Press, Oxford and New York.
- ICRP (1985) : Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication no. 46, Pergamon Press, Oxford and New York.
- ICRP (1991) : 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication no. 60, Pergamon Press, Oxford and New York.
- ICRP (1997) : Radiological Protection Policy for the Disposal of Radioactive Waste, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication no. 77, Pergamon Press, Oxford and New York.
- ICRP (2000a) : Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long lived Solid Radioactive Waste, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 81, Pergamon Press, Oxford and New York.
- ICRP (2000b) : Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure, International

- Commission on Radiological Protection, ICRP Publication no. 82, Pergamon Press, Oxford and New York.
- ICRP (2007) : The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication no. 103, Pergamon Press, Oxford and New York.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999a) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－, 総論レポート, JNC TN1400 99-020.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999b) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－ 分冊1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999c) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－, 分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999d) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－, 分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999e) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－, 別冊 地層処分の背景, JNC TN1400 99-024.
- 経済産業省 (2008) : 特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針, 平成20年3月14日 閣議決定.
- 経済産業省 (2010) : 「平成21年度エネルギーに関する年次報告」 (エネルギー白書2010).
- 経済産業省 (2011) : 諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2002) : 概要調査地区選定上の考慮事項, 高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の可能性を調査する区域の公募関係資料-3.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2009) : 公募関係資料, 特定放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2010) : 地層処分技術開発ニーズの整理, ～精密調査地区選定に向けて～, NUMO-TR-10-02.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011a) : 地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性, 「処分場の概要」の説明資料, NUMO-TR-10-03.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011b) : 地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性, 一付録資料-1, 「処分場の概要」の説明資料 (付録資料), NUMO-TR-10-04.
- OECD/NEA (1977) : Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes, Report by an NEA group of Experts, OECD/Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- OECD/NEA (1984) : Long-term Radiation Protection Objectives for Radioactive Waste Disposal, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (1991) : Can Long-term Safety be Evaluated? A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee, OECD/Nuclear Energy Agency, and the International Radioactive Waste Committee, IAEA endorsed by the Experts for the Community Plan of Action in the Field of Radioactive Waste Management, CEC, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (1995) : The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal, A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee of the OECD/Nuclear Energy Agency.

OECD/NEA (2003) : Main findings from the 1st RWMC Regulators' forum workshop, Tokyo, 20-22 January 2009, RWMC Regulators' Forum(RWMC-RF), OECD/Nuclear Energy Agency.

資源エネルギー庁 (2010) : 特定放射性廃棄物の最終処分費用及び拠出金単価の改定について, 平成 22 年 11 月 2 日.

資源エネルギー庁・JAEA (日本原子力研究開発機構) (2010) : 高レベル放射性廃棄物及び TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画.

総合エネルギー調査会 (1999) : 総合エネルギー調査会原子力部会中間報告—高レベル放射性廃棄物処分事業の制度化のあり方—.

総合資源エネルギー調査会 (2006) : 放射性廃棄物小委員会報告書, 総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会放射性廃棄物小委員会.

総合資源エネルギー調査会 (2007) : 放射性廃棄物小委員会報告書中間とりまとめ ~最終処分事業を推進するための取組の強化策について~, 総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会放射性廃棄物小委員会.

総合資源エネルギー調査会 (2008) : 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会.

通商産業省 (2000a) : 特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画, 平成 12 年 9 月 29 日 閣議決定.

通商産業省 (2000b) : 特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針, 平成 12 年 9 月 29 日 閣議決定.

第 3 章

安全確保構想

第3章 目次

第3章 安全確保構想	3-1
3.1 安全確保の目標	3-2
3.1.1 安全確保の考え方と目標設定	3-2
3.1.2 閉鎖後長期の安全確保	3-3
3.1.2.1 適切なサイト選定と確認	3-4
3.1.2.2 処分場の設計・施工などの適切な工学的対策	3-4
3.1.2.3 地層処分システムの長期安全性の評価	3-5
3.1.3 事業期間中の安全確保	3-8
3.1.3.1 放射線安全の確保	3-9
3.1.3.2 一般労働安全の確保	3-9
3.1.3.3 周辺環境の保全	3-9
3.1.4 閉鎖後長期と事業期間中の安全確保の両立	3-10
3.2 安全確保に向けた NUMO の方針	3-12
3.2.1 目標を達成するための方針策定	3-12
3.2.2 方針1「安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進」	3-13
3.2.2.1 方針1に関する基本的考え方	3-13
3.2.2.2 方策1：事業全体を俯瞰した計画の策定	3-14
3.2.2.3 方策2：閉鎖後長期の安全性の繰り返し確認	3-16
(1) 安全性の繰り返し確認	3-16
(2) セーフティケース	3-18
(3) 不確実性の取り扱い	3-21
3.2.2.4 方策3：事業期間中の安全対策と環境保全策	3-25
(1) 事業期間中の安全対策	3-25
(2) 環境保全策	3-27
3.2.3 方針2「信頼性の高い技術を用いた事業推進」	3-29
3.2.3.1 方針2に関する基本的考え方	3-29
3.2.3.2 方策1：計画的な技術の整備	3-30
(1) 技術開発の基本方針	3-30
(2) 技術開発課題の体系的な整理	3-32
(3) 技術開発成果の評価と事業への適用	3-33
(4) 技術開発ロードマップ	3-36
3.2.3.3 方策2：技術に関する品質保証の的確な実施	3-37
(1) 地層処分における品質保証の考え方	3-37
(2) 品質保証への取り組み	3-38
3.2.3.4 方策3：NUMO の組織および国内外協力体制の整備	3-40
(1) 人材の確保・育成・技術継承	3-40
(2) 国内外の関係機関との協力体制の整備と技術移転	3-41
3.2.4 方針3「安全性への信頼感醸成へ向けた技術的な取り組み」	3-43

3.2.4.1 方針3に関する基本的な考え方	3-43
3.2.4.2 方策1：事業の各段階における意思決定にかかわる情報提供.....	3-44
3.2.4.3 方策2：安全性や技術の信頼性にかかわる日常的な情報提供と対話活動.....	3-45
(1) 技術情報の提供	3-45
(2) 地層処分の安全性への理解醸成支援策.....	3-46
3.2.4.4 方策3：将来世代が適切な判断を行うための環境整備.....	3-49
3.3 地層処分事業にかかわる個別課題に対する NUMO の考え方	3-51
3.3.1 地層処分事業におけるリスクマネジメント.....	3-51
3.3.2 モニタリング	3-53
3.3.3 可逆性と回収可能性	3-55
3.3.4 処分場の閉鎖	3-59
参考文献	3-62

第3章 安全確保構想

本章では、安全な地層処分を実現するために NUMO が設定した安全確保にかかわる方針・方策について記述する（図 3-1 参照）。

まず、3.1 に安全確保の目標を提示する。NUMO は、地層処分の安全性は以下の二つを確保することによって達成できると考え、これらを安全確保の目標として設定し、その達成に向けて事業を計画・実施する。

- ・ 閉鎖後長期の安全確保
- ・ 事業期間中の安全確保

閉鎖後長期の安全性は、以下の三つの安全確保策を確実に実施することで確保する。

- ・ 適切なサイト選定と確認
- ・ 処分場の設計・施工などの適切な工学的対策
- ・ 地層処分システムの長期安全性の評価

事業期間中の安全確保は、以下の三つの安全確保策を確実に実施することで確保する。

- ・ 放射線安全の確保
- ・ 一般労働安全の確保
- ・ 周辺環境の保全

次に、3.2 に安全な地層処分を実現するための方針・方策について記述する。安全確保の二つの目標を 100 年程度にわたる長期の事業期間の中で確実に達成するために NUMO は安全確保に向けて以下の三つを方針として設定し、これに従って事業を推進する。

- ・ 方針 1：安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進
- ・ 方針 2：信頼性の高い技術を用いた事業推進
- ・ 方針 3：安全性への信頼感醸成へ向けた技術的な取り組み

さらに、3.3 に以下に示す地層処分固有の課題に対して、現時点における NUMO の考え方を提示する。

- ・ 地層処分事業におけるリスクマネジメント
- ・ モニタリング
- ・ 可逆性と回収可能性
- ・ 処分場の閉鎖

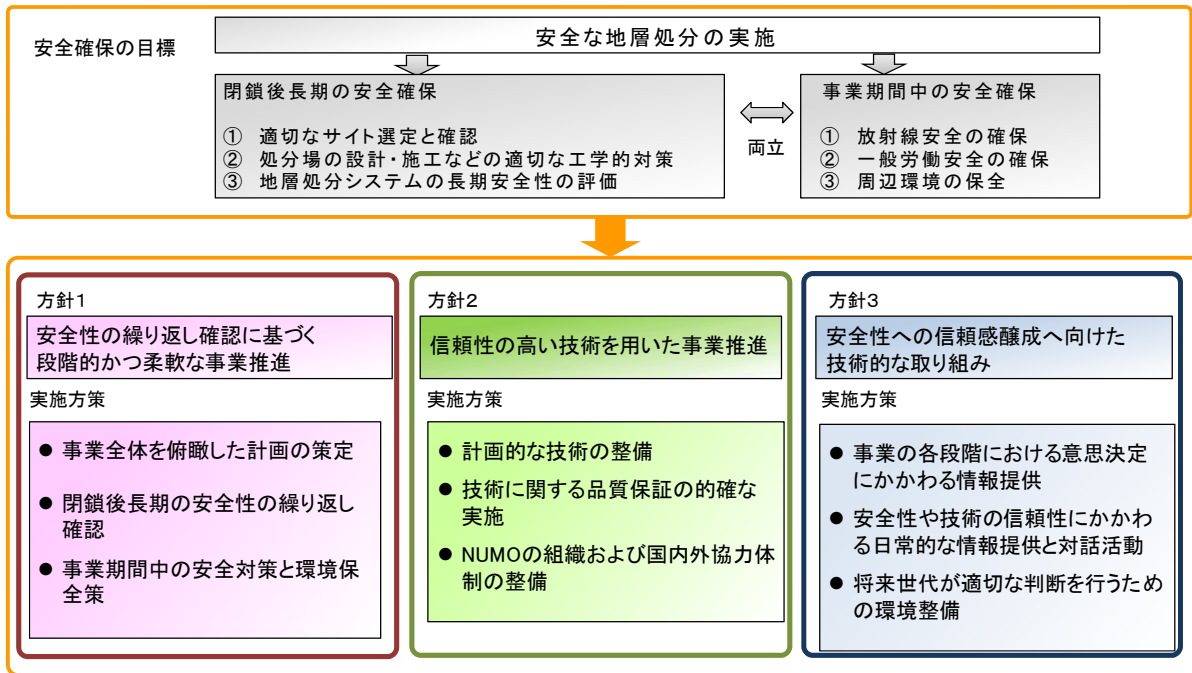


図 3-1 安全確保構想の全体構成

3.1 安全確保の目標

3.1.1 安全確保の考え方と目標設定

地層処分の安全確保の目標は、放射性廃棄物が処分場閉鎖後の遠い将来にわたって人間とその生活環境に影響を及ぼさないようにすることであり、また、事業廃止までの事業期間中において地域住民や作業従事者の安全を確保することである。すなわち、NUMOが進める地層処分事業における安全確保とは、「閉鎖後長期の安全確保」と「事業期間中の安全確保」の二つの目標を達成することである。

また、NUMOは、国の最終処分計画などに基づき、安全上の法令や規制の要件に従って、サイト選定と評価、設計、建設、操業、閉鎖および廃止措置を実施していくこと、そして、地層処分システムの安全性が確保され、処分施設の閉鎖後に人為的管理が不要となるように、事業を進めていく。

「閉鎖後長期の安全確保」については、安全性が多重の安全機能によって確保されるように、段階的な調査を通じて適切な地質環境を有する処分施設建設地を選定し、処分施設を設計し、建設、操業、閉鎖および廃止措置を実施する。地層処分システムは、放射性物質を地下深部に閉じ込め、それらを生物圏から隔離する機能を有する必要がある。これらの多重の安全機能を人工的に設ける障壁（人工バリア）と天然の地層（天然バリア）を組み合わせた多重バリアシステムにより担保する。また、安全評価手法を用いて、構築した地層処分システムの妥当性を評価し、最終的にはあらかじめ定められた放射線防護上の要件を満足することを示すことによりその安全性を確認する。併せて、安全評価にかかわる不確実性を低減することにより、その信頼性を高めていく。

一方、「事業期間中の安全確保」については、放射性廃棄物からの放射線や建設・操業時の事故などにより地域住民や作業従事者の安全が損なわれないように対策を講じる。

なお、事業期間中の安全確保のために講じるさまざまな対策（例えば、建設段階での止水対策など）は、長期的な安全確保策との両立性を図ることが必要である。すなわち、事業期間中の安全確

保のために講じる対策により、閉鎖後長期の安全機能を有意に損なうことがないように十分配慮する必要がある（NUMO, 2004c）。

3.1.2 閉鎖後長期の安全確保

放射性廃棄物が処分場閉鎖後の将来にわたって人間とその生活環境に影響を及ぼさないようにするという地層処分目標を達成するために、廃棄物を地下深部に閉じ込め、人間の生活環境から隔離することを基本概念として地層処分システムを構築する。具体的には対象廃棄物を安定な地下深部に埋設し、人工バリアと天然バリアから構成される多重バリアシステムによってその機能を担保する。

閉じ込めとは、「廃棄物からの放射性物質の浸出を抑制することで、地下水への放出率を低下させること」（放射性物質の浸出抑制）と、「浸出した放射性物質の移行を抑制することにより、放射性物質移行率を低下させること」（放射性物質の移行抑制）である。

隔離とは、「生活環境から十分離れた安定な地下深部に廃棄物を埋設し、侵食のような地形の変化から防護すること」（地質の長期的な変動からの防護）と、「偶発的な人の接近の可能性を低減するため、人が特殊な技術を用いることなしには廃棄物に接近することが困難であること」（人の接近の抑制）である（6.2.2 参照）。

処分場閉鎖後の潜在的な危険性としては、以下が考えられる。

- (a) 火山・火成活動や地震・断層活動による処分施設の直接的破壊や隆起・侵食による処分施設の地表への接近などの自然現象の著しい影響に起因する被ばく。
- (b) 地下水を介した放射性物質の移行による被ばく。
- (c) 偶発的な人間活動（処分場への侵入など）による被ばく。

地層処分の安全性を長期にわたって確保するために、以下の対策を実施する。

上記の (a) に対しては、適切なサイトを選定（深さも含む）することにより、処分施設が破壊されたり、隆起・侵食により処分施設が地表へ接近するなど、地層処分システムの性能を著しく低下させるような自然現象の影響を回避する。このため、サイト選定段階においてサイト調査を段階的に実施し、不確実性を低減することにより、安定したサイトを適切に選定する。

上記の (b) に対しては、選定したサイト固有の条件や安全を確保するために施される工学的対策などを踏まえ、人の健康に影響を及ぼす可能性のある現象を考慮した適切なシナリオを設定して安全性を評価するための解析（以下、安全解析という）を行い、その結果があらかじめ基準値として定められた放射線防護レベルを超えていないことを確認する。また、各バリアが個々に期待されている機能を発揮するように対策を講じることで、特定のバリアへの依存を回避し、安全性を確保する。

上記の (c) に対しては、人間侵入が起こる可能性の低いサイトの選定（例えば鉱物資源が存在する地域の排除）や処分施設的设计（深さも含む）を行うなどによって安全性を確保する。

このような閉鎖後長期の安全確保は、以下の三つの安全確保策により達成できることが第2次取りまとめで示されており、その妥当性が原子力委員会の評価（原子力委員会, 2000）によって確認されている。この考え方は原子力安全委員会が示した次の安全確保原則（原子力安全委員会, 2000）

とも整合している。

- 1) 地層処分にとって適切な地質環境を選定し、建設段階以降はサイト選定時における評価の妥当性を確認する（適切なサイト選定と確認）。
- 2) 選定された地質環境に対して人工バリアや処分施設を適切に設計・施工する（処分場の設計・施工などの適切な工学的対策）。
- 3) 構築された地層処分システムの安全性を評価する（地層処分システムの長期安全性の評価）。

これらの安全確保策を施すことで、地層処分システムが長期にわたって安全性を確保することができることを示す論拠を取りまとめることが、近年国際的に幅広く受け入れられているセーフティケースの概念である（3.2.2.3 参照）。

以下に上記の 1), 2), 3) の安全確保策について詳述する。

3.1.2.1 適切なサイト選定と確認

多重バリアシステムが、長期にわたって所期の性能を発揮できるように、適切な地質環境を有し安定性のある処分地を選定することが重要である。

わが国は変動帯に位置していることから、地層処分システムを成立させるための前提条件として、将来にわたり地震・断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食などの自然現象の著しい影響を回避する必要がある。その上で、地層処分システムの場合となる地質環境の特性を把握し、その長期的な変遷を理解することにより、処分場として技術的な観点から好ましい以下の二つの条件を有する場所を処分施設建設地として選定する。

- ・ 坑道掘削や人工バリアの構築など、工学的対策の観点からより適切と判断される条件（力学的に安定であること、施設を通過する地下水流量が小さいことなど）
- ・ 人工バリアや天然バリアの放射性物質の移行抑制など、地層処分システムの閉鎖後長期の安全性の観点からより適切と判断される条件（還元性、地下水流速が遅い、放射性物質の移行距離が長い、擾乱に対する緩衝能力あるいは回復力を有するなど）

また、将来の人間活動による偶発的な処分場への侵入を回避する観点から、経済的に価値が高い鉱物資源が存在する地域は含めないことも必要である。

このようなサイト選定における基本的考え方は、すでに公募関係資料（NUMO, 2009a, 2009b）や概要調査地区選定上の考慮事項の技術的背景（NUMO, 2004b）などで述べている。さらに、建設段階以降も、閉鎖後長期の安全確保の観点から重要と考えられる地質環境特性について調査し、データの取得を行い、その時点で得られる最新の知見に基づいて適宜安全性を確認していく。

3.1.2.2 処分場の設計・施工などの適切な工学的対策

選定されるサイトの地質環境特性や放射性廃棄物の特性に応じて、人工バリアおよび処分施設などの工学的対策を適切に講じることにより、閉鎖後長期の安全性を確保する。

具体的には、バリアを構成する要素のそれぞれに、廃棄物と地下水との接触抑制、放射性物質の浸出抑制や移行抑制など安全確保にかかわる重要な安全機能を割り当て、それらに十分な安全裕度

を持たせることにより、頑健な処分施設を設計する。この際、頑健性確保の観点から、一つのバリア要素の安全機能に過度に期待することがないように留意し、一つのバリア要素の安全機能が期待されたとおり有効に働かない場合でも、ほかのバリア要素の安全機能により相互に補完されることで十分な安全性が保てるように設計する。なお、ここで述べた安全機能は地層処分システムの長期安全性の評価においても、重要な視点となる。

人工バリアの構成と各構成要素に持たせるべき安全機能の設定に当たっては、サイトの地質環境特性や対象廃棄物の特性を十分に考慮するとともに、調査の進展とともに情報の詳細さが増す地質環境特性に応じて、多重バリアシステムの安全機能が有効に発揮されるように設定することが重要である。

NUMO では、高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の処分施設を併置することも選択肢としているが、その場合は、施設全体の安全機能が単独の処分の場合に比べて有意な影響を受けることのないように、個々の施設の設計および全体の設計を適切に行う必要がある。

地層処分低レベル放射性廃棄物は、高レベル放射性廃棄物に比べて放射能レベルや発熱量が十分低いことから、基本的には高レベル放射性廃棄物処分の技術を応用することで安全な処分は可能と考えられる。ただし、対象となる廃棄物の種類が多様であるため、廃棄物に含まれる物質などの影響を詳細に検討し、安全性を確保する必要がある。

また、国の「TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画」（資源エネルギー庁・JAEA, 2006）において、より幅広い地質環境に柔軟に対応するための代替技術が示されており、今後のサイト調査により得られる地質環境特性によっては、それら代替技術を適用することも視野に入れた検討により、頑健な処分場を構築する。

3.1.2.3 地層処分システムの長期安全性の評価

2000年にまとめられた原子力安全委員会報告（第1次報告）には、長期安全性の評価においては、地層処分の安全性に影響を及ぼす可能性のある種々の現象を考慮したシナリオに対して、適切なモデルとパラメータによる解析を行い、その一般公衆に対する評価線量が最大となる時期においても、あらかじめ基準値として定められた放射線防護レベルを超えていないことなどを確認することがその基本であるとされている（原子力安全委員会, 2000）。

一方、IAEAなどの国際機関では、以下のような認識が示されている。

- ・ 地層処分では、多重バリアシステムによって長期にわたり放射性核種を閉じ込め・隔離するため、一般公衆に対する評価線量が最大となるまでの、極めて長い期間の安全性を評価する必要がある。このような時間スケールにおいては、線量の推定に伴う不確実性が大きくなりすぎ、そのような基準は意思決定の合理的な基盤として役割を果たさなくなる（IAEA, 2010; ICRP, 1999ほか）。
- ・ 評価期間が長くなれば将来における不確実性が増大し、線量の予測に対する信頼性は低下することから、遠い将来に対しては線量を補完するそのほかの指標がより有意義であるという考え方もある（IAEA, 2003）。

地層処分においては、その影響が顕在化する可能性を考慮しなければならないのは、処分場が閉鎖されてから非常に長い時間を経た遠い将来であり、その影響の程度を事業期間中に検証すること

ができない。従って、予測的な手法に基づく安全評価によって長期的な影響の程度を確認する必要があり、この点がほかの原子力施設の安全評価とは異なる。予測的な手法に基づく安全評価では、まず地層処分システムの状態を理解し、これをもとに将来の地層処分システムがどのように変遷していくかを描いたシナリオを構築する。続いてそのシナリオを表現する数学モデルやデータを用いて、放射性廃棄物に含まれる放射性物質が環境に移行していく様子を解析し、その結果を人の被ばく線量に置き換え基準値と比較することによって、閉鎖後の安全性が長期にわたって確保できることを確認する。

なお、安全評価では、極めて長い時間スケールを考慮しなければならないこと、および天然の地層という不均質で大きな空間領域を対象とすることに起因する不確実性が含まれる。このような不確実性は、サイトの地質環境情報を段階的に取得することで、可能な限り低減する。さらには、残された不確実性を勘案して処分場の設計を保守的に行うことにより、不確実性の影響を可能な限り低減する。これらの安全確保対策によって、不確実性をできる限り小さなものとする。

しかし、不確実性を完全に排除することはできないため、地層処分の安全評価では、なお残された不確実性を、シナリオ、モデル、データの不確実性として考慮した上で、地層処分システムの安全性を示す。このような安全評価は、安全性を包括的に論証するセーフティケース（3.2.2.3 参照）において、処分場の長期の安全性を示す主要な構成要素のひとつとなる。安全評価に基づく安全性の確認は、安全解析の結果と基準値との比較のみではなく、補完的安全指標の適用や自然界や考古学分野における類似事例（ナチュラルアナログ事例）との比較など、より多面的な視点を含めて示すものである。これにより、安全性に対する信頼性をより一層向上させる（例えば、NUMO, 2004a）。

原子力安全委員会においては、上述のような避けることができない不確実性を考慮して安全評価を行うためには、シナリオの発生の可能性とその影響を組み合わせたりリスク論的考え方の適用が有効としている。また、評価期間の設定に関連して、比較的信頼性の高い評価が可能な期間を相対的に重視し、その期間における実体的防護機能をできるだけ高めておくことにより、それ以降の長期的な防護性能の頑健性を確保するという、いわば技術的に最善の手段を講ずるとの考え方の有効性の検討も提案されている（原子力安全委員会、2004）。

また放射線審議会は、放射性廃棄物処分に係る潜在被ばくについては、自然過程における通常の被ばく状況と偶然の人間侵入における被ばく状況に分けて、それぞれの放射線防護上の基準として、前者に対しては線量拘束値を適用し、後者については ICRP の考え方を参考に 20mSv/年を上限とする値を適用することが妥当との考え方を示している（ICRP, 1999；放射線審議会、2010）。

以上のような背景を踏まえ、NUMO としては、以下の考え方で長期の安全評価を行うことにしている。

(a) 安全評価の考え方

原子力安全委員会が策定した「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」（原子力安全委員会、2010）の解説には、原子炉等規制法に示される第二種廃棄物埋設の事業は、段階的な管理を経た後、最終的には、管理を必要としないような状況へ移行可能か否かについてあらかじめ審査を行い、このことについて見通しを得ておく必要があると記述されている。この際の「管理を必要としない」とは、事業者あるいは国の管理は一切見込まないということであり、基本的には事業者が管理期間において安全確保策を確実に実施することで、結果として管理期間終了後の安全も確保できるという考え方に基づいている。

一方、地層処分においては、対象とする廃棄物に長半減期の放射性物質が有意に含まれるため、放射能の減衰に応じた数100年程度の段階的な管理を行うことで安全が確保できるわけではない。すなわち、地層処分の概念は、前述の第二種廃棄物埋設のように、一定期間、人間の管理によって安全を確保するという概念とは異なり、地層の有する隔離・閉じ込め機能に委ねるというものである。具体的には、地質学的に安定な地層深くに廃棄物を隔離し、放射性物質を閉じ込めることによって人間の積極的な関与を期待することなく安全を確保しようというものである。なお、地層つまり天然のバリアによる安全確保に加えて、国による記録の保存や事業者からの申請に応じて国が行う保護区域の設定が可能な制度となっている。

地層処分の安全評価の方法を検討するに当たっては、以上のような第二種廃棄物埋設の事業との違いを念頭において検討していくことが重要である。

地層処分の安全審査における安全評価シナリオなどの具体化については、今後、原子力安全委員会などにおいて検討されることになるが、本報告書では、当面の考え方として、原子力安全委員会報告（原子力安全委員会、2004）および放射線審議会基本部会報告（放射線審議会、2010）の考え方に沿って以下のように自然過程を介するシナリオと人為過程を介するシナリオに区分する考え方を示す。

(b) 自然過程を介するシナリオ（自然過程における通常の被ばく状況を評価するシナリオ）

本シナリオを設定する際に重要となるのは、将来の地質環境の変遷や、火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食といった自然現象の影響を、どのように評価シナリオに取り込むのかということである。

自然現象の将来予測については、外挿法を中心として、これまで種々の検討がなされており、わが国では、「過去数10万年程度の地質学的記録を基に、将来10万年程度の推論は可能である」との合意が得られている（土木学会、2006）。しかし、地層処分では、その安全評価において最大線量が現れる時期が、10万年を大きく超える場合もあり、また、10万年を超える将来の地質環境の変遷や自然現象の発生に係る予測の精度については、現象ごと、地域ごとに異なると考えられることから、より長期の将来予測をどのように行うべきか検討する必要がある。

一方、この問題に対処するため、1999年にJNCが取りまとめた第2次取りまとめでは、超長期の将来の地質環境の変遷や自然現象の発生予測については、厳密に行うのではなく、種々の不確実性を取り込んだ様式化されたモデルを設定している（JNC、1999）。

このような背景を踏まえ、NUMOにおいては将来の地質環境の変遷や自然現象の予測期間を以下のように区分した。

期間A：過去～現在のデータが十分にあり、外挿法などによる将来予測が可能な期間。外挿法では、予測期間に対して十分長い期間の地形地質情報（変動傾向、メカニズム、駆動力）に基づき将来を予測する。過去の変動傾向について、複数の仮説があったとしても、将来予測をする上でそれらの違いがもたらす差が小さいと判断できる期間。

期間B：不確実性は大きくなるが、外挿法などにより将来予測が可能な期間。外挿法では、外挿を否定する積極的なデータがないことを前提に、予測期間よりも短い過去の期間の地形地質情報（変動傾向、メカニズム、駆動力）に基づき将来を予測する。このため、過去～現在のデータが少ない、あるいはばらつきがあることなどに起因し、過去の変動傾向

について複数の仮説が考えられ、それらの間の差を考慮する期間。

期間C：外挿法による将来予測が難しい期間。過去～現在のデータからでは変動傾向が得られないか、または、過去～現在の変動傾向、その要因が継続するのかがわからないか、継続しないことが想定される期間。

安全評価においては、一般公衆に対する評価線量が最大となる時期においてもあらかじめ基準値として定められた放射線防護レベルを超えていないことなどを確認することがその基本であるが（原子力安全委員会、2000）、超長期の放射線防護基準については、天然の放射能濃度との相対的比較などの補完的指標を考慮することも考えられる（原子力安全委員会、2004）。

これらを踏まえ、閉鎖後長期の安全評価においては、最大の線量が出現する時期まで評価することを基本とするが、上記のように将来予測の信頼性が期間により異なることから以下のようなシナリオ設定を行う。

期間A+期間Bの期間内では、地質環境の変遷や自然現象の予測を行うとともに、さまざまな不確実性の影響を線量評価シナリオに反映し、そのシナリオによって計算された線量と基準値とを比較することをもって、地層処分システムが閉鎖後長期間にわたって安全に構築されていることを確認する。

また、期間Aにおいては予測の不確実性は比較的小さいことから、最新の知見に照らして科学的に確からしいと予見される標準的なシナリオを策定することが可能と考えられる。このため、このようなシナリオを用いて線量評価することによって、安全性に対する裕度を事業者が自主的に確認することが可能となり、評価された被ばく線量が基準値を下回る場合でも、防護の一層の最適化の観点から、当該被ばく線量を合理的に達成可能な限り低く抑えるよう努力していることを示すことが可能になる。

期間Cにおける影響評価は不確実性が大きすぎ、必ずしも将来の人間環境における放射線レベルへの影響を評価するための論拠とはならないことから、線量評価の結果を基準値と比較しても意味を持たない。従って、考慮する地質環境の変遷や自然現象を様式化して評価モデルに取り込み、天然の放射能濃度との相対的な比較を行うなどの補完的な評価方法についても検討を行う。

(c) 人為過程を介するシナリオ（偶然の人間侵入における被ばく状況を評価するシナリオ）

地層処分では、人間の侵入をより難しくする地下深部へ処分施設を設置すること、さらに、国による処分の記録の永久保存や保護区域の設定による土地利用制限を行うこと、有用な鉱物資源の存在記録がない場所を処分場として選定するなどの措置を行うことにより、処分施設と人間との接触の可能性を小さくすることが可能となっている。人為過程を介するシナリオについては、これらの安全確保上の措置が講じられていることを考慮して設定する。

意図的な行為については、諸外国でも安全評価の対象とはしていないことから（OECD/NEA, 1995 : Nagra, 2002 : SKB, 2006など）、処分施設を認知しない偶発的な行為のみを評価の対象とする。

3.1.3 事業期間中の安全確保

NUMOは、サイト選定から事業廃止までの事業の各段階において、地域住民や作業従事者に対して放射線安全および一般労働安全の確保を徹底する。安全確保のための対策をより適切に実施する

ためには、事業期間中におけるさまざまなリスクを分析し、施設設計や調査・工事計画さらには保安規定などに反映し、適切な対策を講じることが重要である。

さらに、地層処分事業においては、坑道の掘削、掘削土の仮置きなど、大規模な土木工事を伴うため、周辺環境へのさまざまな影響を回避・低減することも重要である。

以上のことを考慮して、事業の各段階における安全確保策について、基本的な対策を述べる。

3.1.3.1 放射線安全の確保

放射線安全の確保については、原子炉等規制法などの関連する法律などを遵守し、地層処分施設に起因する放射線被ばくから一般公衆および作業従事者などを防護するため、十分な対策を講じる。この際、ALARA³¹の考え方に基づいて、放射線影響の低減に努める。

処分施設の設計では、地層処分施設に起因する一般公衆が受ける線量および作業従事者が受ける線量を合理的に達成可能な限り低く抑えるよう配慮し、遮へい設備、放射線管理設備など必要な設備を設ける。また、管理区域や周辺監視区域などの区域管理を適正に行う。

また操業においても、原子力関連施設における安全確保策をもとに対策を講じる。例えば、ガラス固化体の受入、検査、封入のプロセスにおいては、中間貯蔵施設における遠隔操作などの技術を適用することができる。また、火災や地震などの事象に対しては、二次的な事象として設備の破損などによる放射性物質の漏えいの可能性が考えられる。火災に関しては発生防止策や影響緩和策、地震に関しては耐震設計と地震に伴う事象（津波、大規模な斜面崩壊など）が発生した場合の対策などの検討などを行う。

3.1.3.2 一般労働安全の確保

一般労働安全とは、放射線影響以外の災害に関して安全を確保するものである。現地で地質調査などを開始する精密調査地区選定段階から事業の廃止に至るまでの期間が一般労働安全を確保する対象期間である。

一般労働安全に関しては、建設工事における従来の考え方を適用し、土木工事（トンネル工事など）や鉱山の操業などの安全対策の事例をもとに対策を検討して安全を確保する（NUMO, 2004a）。

例えば、坑道内の落盤、水没などの事象については、トンネル工事などにおける対策が有効である。また、敷地外においても、資材搬入車両による交通災害などの防止を徹底する。なお、地下施設における火災や爆発などの事象に関しても、坑道が長大であることなどに留意して既設の長大トンネルや鉱山の例を参考に適切な対策を講じる。

3.1.3.3 周辺環境の保全

わが国では、1993年に制定された「環境基本法」とこれを受けて1997年に制定された「環境影響評価法」により、環境への影響の評価に関する具体的な手続きなどが示されている。環境影響評価法における「環境影響評価」とは、ある事業の実施による環境への影響について、環境の構成要素にかかわる項目ごとに調査、予測および評価を行うとともに、これらを行う過程において環境保

³¹ ALARAとは国際放射線防護委員会が1977年勧告で示した放射線防護の基本的考え方を示す概念であり、「as low as reasonably achievable」の略語である。放射線防護の最適化として「すべての被ばくは社会的、経済的要因を考慮に入れながら合理的に達成可能な限り低く抑えるべきである」という基本精神にのっとり被ばく線量を制限することを意味する。この精神は原子力発電所周辺の住民が極力放射線被ばくを受けない事を合理的に達成することを意図している。

全のための措置（保全措置）を検討し、その措置を講じた場合の環境影響を総合的に評価することと定義されている。

現時点においては、地層処分事業は環境影響評価法で定める対象事業種に該当していないが、「今後の環境影響評価制度の在り方について（中央環境審議会，2010）では、「将来的に実施が見込まれる事業のうち、規模が大きく環境影響の程度が著しいと考えられる事業」として放射性廃棄物処分場の建設事業が挙げられ、「国の関与のもとに、何らかの形で環境影響評価を行う仕組みの検討が必要である」と述べられている。

NUMO は、地層処分事業の環境影響評価法の対象事業種への指定の有無にかかわらず、事業の進展に際しては、上記の考え方で地層処分事業を進めるとともに、将来、環境影響評価法での地層処分事業の位置付けが明らかになれば、それにのっとった適切な手続きを実施する。

3.1.4 閉鎖後長期と事業期間中の安全確保の両立

地層処分の安全確保の目標は、放射性廃棄物が処分場閉鎖後の遠い将来にわたって人間とその生活環境に影響を及ぼさないようにすることであるが、閉鎖完了までの事業期間中において地域住民や作業従事者の安全を確保することも重要である。すなわち、NUMO が進める地層処分事業における安全確保とは、「閉鎖後長期の安全確保」と「事業期間中の安全確保」の二つの目標を達成することであり、もしこれらの間で対立する要件が存在する場合には、さまざまな施策を導入することによりこれらを両立させる必要がある。ただし、ここで考慮する事業期間中の安全確保は、作業従事者の安全を確保するといったいわゆる労働安全にとどまらず、建設や操業を効率的に実施するために必要な措置なども含んでいる。

「閉鎖後長期の安全確保」と「事業期間中の安全確保」のそれぞれの要件に基づいて処分場建設の計画・設計を行った場合、特別な措置なしでは各要件が両立しない場合もある。例としては、処分場を建設・操業するために設置・使用する機材などの残置物が処分場の閉鎖後にも残るために、処分場の閉鎖後長期の安全性に有意な影響を及ぼす可能性があるというケースや、操業中に地下空洞を開けた状態で長期間にわたって換気や排水を行うことにより母岩が影響を受け、母岩の特性が変化するというケースがある。このようなケースに対しては、科学的な対処と工学的な対処の二種類の対処により要件の両立を図る。図 3.1.4-1 に、閉鎖後長期の安全確保の要件と安全かつ効率的な処分場の操業からの要件の対立という問題を、科学的小および工学的な対処を施すことにより要件を両立させる考え方を示す。

「閉鎖後長期の安全確保」と「事業期間中の安全確保」の要件を両立させるための方策の一つ目として科学的な対処により、残置物の及ぼす影響や操業期間中に地下環境が受ける擾乱の度合いを評価するという方法がある。この例としては、建設・操業中に設置された支保工（コンクリート、鋼材、有機系材料）が、人工バリアの変質による水理学的特性の変化や、人工バリア・天然バリアによる核種の遅延効果などに及ぼす影響を各種試験やシミュレーションなどにより科学的に評価するという方法が考えられる。

工学的な対処は、設計変更により残置物そのものをなくす方法や、代替材料を用いることによりその影響を低減するという対処方法である。例えば、残置物を処分場の閉鎖前に全部あるいは部分的に撤去することにより閉鎖後長期への影響を緩和する方法がある。あるいは、問題となる残置物の材料を異なった材料に変更することにより影響を回避するという方法もある。後者の例としては、コンクリートに由来する高アルカリ地下水が緩衝材や母岩に及ぼす影響を低減するために、低アル

カリ性セメントを開発・適用するといった対処がある。また、操業期間中の坑道の換気や排水が母岩に及ぼす影響を低減することを目的として、坑道の掘削から廃棄物の定置・坑道の埋め戻しまでの時間を短くするという方法も考えられる。スイスの Nagra は高レベル放射性廃棄物の処分のためにオパリナス粘土層を母岩として検討を進めているが (Nagra, 2002), 空洞を空けておく期間をできるだけ少なくすることにより岩盤の力学的影響を低減するために、トンネルの掘削と廃棄体の定置を並行して実施するという方法を検討しており、これは建設・操業中の影響を緩和するための工学的な対処の一例である。

わが国では、現状では対象とする母岩や処分場の設計が確定していないため、さまざまなケースを想定し、上記の対処により要件が両立するよう、科学的知見を拡充すると同時に工学的な対処法に関する検討も進めている。

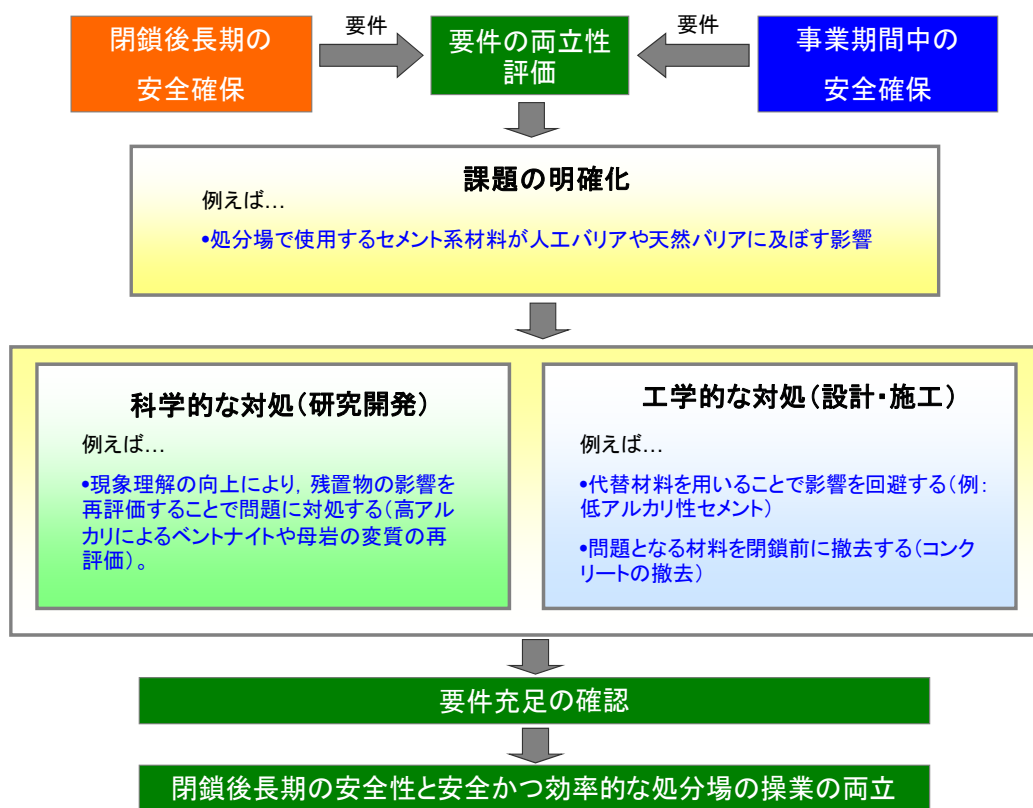


図 3.1.4-1 閉鎖後長期の安全確保と事業期間中の安全確保の要件両立の考え方

3.2 安全確保に向けた NUMO の方針

3.2.1 目標を達成するための方針策定

前節で述べた安全確保の二つの目標を達成するためには、地層処分が有する課題やわが国固有の前提条件を十分に考慮して事業を進める必要がある。

地層処分の閉鎖後長期の安全性については、安全確保のために考慮すべき時間が長く、不均質かつ広大な地下環境を活用するため、避け難い不確実性を伴う。そのため、念入りな調査や評価を行い、不確実性をできるだけ低減しながら安全性に関する信頼性を向上させていく必要がある。また、施設が安全に機能することを直接実証することができないので、社会的合意形成を図るためにも、不確実性の管理に重点を置いたセーフティケースの概念を適用することが有効である。セーフティケースは、安全性にかかわるさまざまな論拠に基づき、安全性とその信頼性に関する情報を総合的に取りまとめたものであり、地層処分の安全性を示すための根拠としての役割を有する。また、地層処分は、サイトの選定から処分場閉鎖に至るまでの間に 100 年程度の長い時間を要するため、この間に事業を取り巻く社会環境条件が変化することもあり得る。

このように複雑で長期的な事業を着実に遂行するためには、全体を俯瞰しつつ、事業を段階的かつ柔軟に進めることが肝要である。これにより、安全性にかかわる論拠を段階的に拡充することができるとともに、社会環境の変化にも適切に対応し、事業への信頼性を段階的に高めていくことができる。特に安全性に関しては、事業の各段階ごとに、それぞれの段階で得られる情報に基づいて安全評価を繰り返し実施し、結果を公表していくことで、国民や地域住民の理解を段階的に深めていくことにつながる。

以上により、NUMO は、

「安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進」

を安全確保に向けた事業方針とする。

また、上述のように数万年以上にわたる閉鎖後長期の安全性については、従来の実証的な手法で確認できないため、科学技術などの知見を集約してモデリングを図り、現実的なデータに基づく予測的手法を採用して評価を実施することになる。このような予測的な評価の信頼性を極力高めるために、その評価の前提となるサイト調査や工学的対策においては、信頼性の高い技術を用いることが不可欠である。また、安全評価の手法やそのもととなる科学技術などについては、それぞれの時点において可能な限り信頼性の高い手法を用いることが必要である。

このように、技術的に最善の手段を講じるということは、遠い将来の世代の健康と環境を守るための合理的な対策であり、現世代が果たすべき責務である。

以上により、NUMO は、

「信頼性の高い技術を用いた事業推進」

を安全確保に向けた事業方針とする。

地層処分事業においては、技術的な検討により示された安全性をいかに地域住民や国民の安心感につなげ、事業を受け入れてもらえるかということが、事業を実現させるための重要な要件である。そのため、信頼感醸成は地層処分事業においては欠くことのできない重要な視点であり、そのためにはさまざまな関係者を対象とした広範な理解活動・対話活動を行う必要がある。そのような活動のために技術面においても計画的な取り組みを実施していく必要がある。

以上により、NUMOは、

「安全性への信頼感醸成へ向けた技術的な取り組み」

を安全確保に向けた事業方針とする。

3.2.2 方針1「安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進」

3.2.2.1 方針1に関する基本的考え方

地層処分事業では、地下の地質環境を利用して放射性廃棄物を人間の生活環境から隔離し、処分場の閉鎖後長期間にわたり安全性を確保することが重要である。

地層処分システムの長期安全性の評価においては、評価期間の長期性や地質環境の不均質性に起因する時間的、空間的な不確実性に適切に対処していく必要がある。そのためには、三段階のサイト選定プロセスを通して、安全確保上重要な不確実性を特定して段階的に関連するサイトの地質環境の情報を蓄積・詳細化するとともに、地下における施設の建設や操業時においても同様に地質環境の情報を更新し、上記の不確実性を徐々に低減していくことが有効である。さらに、科学技術の最新知見を適切に取り込みつつ段階ごとに更新、拡充される地質環境の情報に基づき、処分場設計の最適化と安全評価を繰り返し実施することで、地層処分システムの長期安全性と技術的信頼性を向上・強化していく（安全性の繰り返し確認）。

各段階の節目や途中で安全性の確認を繰り返すことにより、安全確保の目標を達成しているかどうか、その時点で優先的に取り組むべき課題が何かを抽出する。これにより、次段階以降の適切な技術開発計画の策定などにもその結果を反映することが可能となる。ただし、地層処分の安全性は数万年以上の長期間を対象とした評価を行う必要があるが、実証することはできないため、安全性に関するさまざまな証拠や論拠の集合体であるセーフティケースを構築することにより各事業段階で安全性を示すことが地層処分の安全確保のために有効であると考えられる。なお、セーフティケースは各事業段階で得られる情報に基づいて構築されることになるため、段階的に更新されていくものである（段階的な事業推進）。

また、長い事業期間の中では、2.2.1に述べたように社会的な環境が変化するなど、事業を取り巻く環境・条件などが変化することも予想され、事業開始時点で策定した計画を、安全性を確保しつつ柔軟に変更していくことも重要である。このため、あらかじめ事業全体を俯瞰した計画を策定して着手し、事業の進展とともに各段階で得られる情報を活用して変化に柔軟に対応するとともに、その都度安全性の確認を行い信頼性を高めていく必要がある（柔軟な事業推進）。

以上より、事業の安全確保のための一連の検討に当たっては、3.1.2に述べた三つの安全確保策（適切なサイト選定と確認、処分場の設計・施工などの適切な工学的対策、地層処分システムの長期安全性の評価）の連携の仕組みを整えるとともに、事業全体を俯瞰した安全確保の目標を達成するための事業推進計画を策定し、3.1で述べた閉鎖後長期の安全確保および事業期間中の安全確保をこの計画に従って実現する。具体的には、以下の三つを方針1の具体的実施方策とする。

- 1) 事業全体を俯瞰した計画の策定
- 2) 閉鎖後長期の安全性の繰り返し確認
- 3) 事業期間中の安全対策と環境保全策

以下に、上記の実施方策について具体的に記述する。

3.2.2.2 方策1：事業全体を俯瞰した計画の策定

長期間にわたる事業を円滑に推進し、安全を確保していくためには、あらかじめ事業全体を俯瞰して計画を策定した上で、段階的かつ柔軟に進めることが肝要である。それにより、安全性を段階的に強化することができるとともに、社会環境の変化にも適切に対応でき、事業への信頼性を段階的に高めていくことができる。

NUMO は、事業全体を俯瞰した計画を策定するために、「安全確保ロードマップ」を作成した。安全確保ロードマップは、文献調査の開始から事業の廃止に至るまでを10の段階に分け、各段階における事業目標、安全確保にかかわる目標、目標達成にかかわる要件、各分野における実施事項を各段階について記述したものであり、具体的には第4章で紹介する。安全確保ロードマップは、事業の進展とともに、それまでの技術の進展や新たな状況変化を反映しつつ詳細な内容に改訂していく。なお、後述する方策2、方策3に関するロードマップもそれぞれ技術開発ロードマップ、信頼感醸成ロードマップとして作成しており、これらも第4章で紹介する。

このように段階的に推進する事業の中で意思決定を行う際の基準として、国が設定する基準（法規制）と、法的には規制されていないが事業者（民間）が自主的に設定する基準の二種類が考えられる。事業者が自主的に設定する基準は、国が設定する基準を事業者の立場から具体化するために設定するものに加えて、事業の運営管理にかかわるものも含んでおり、それらを自主基準として設定する。

100年程度にわたる長期の事業期間においては、社会的、制度的、技術的な変化が起こり得ることから、そうした変化に柔軟に対応していくためには、さまざまな事態を想定し、必要な技術オプションを検討、準備しておくことが大切である。

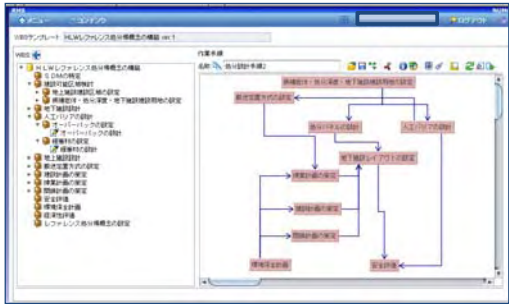
また、想定外の事態にも柔軟に対応できる体制や仕組みも整備しておく必要がある。さらに、技術的に安全性を担保することが困難な状況が生じた場合には、事業の推進を止めたり、あるいは逆戻りさせる場合もあり得るため、組織として柔軟な対応ができるようにしておくことが必要である。このような重大な意思決定を行う場合には、NUMO 単独ではなく、地域住民、規制関係機関、国の政策決定機関、廃棄物発生者などと十分協議の上で意思決定する必要性も生じ得る。

このような柔軟な対応を可能とするため、技術の開発・整備においては必要に応じ複数のオプションを用意することに努める。なお、事業を遂行する上でのさまざまなリスクへの対応（リスクマネジメント）については、現状での基本的考え方を3.3.1に示す。

外的状況の大きな変化に迅速かつ的確に対応するためには、過去の意思決定や技術判断の経緯や根拠に立ち返る必要が生じることもあることから、意思決定や技術判断にかかわる情報を体系的に記録・管理し、必要時に速やかに利用できる準備を進めておくことが重要である。NUMO では、事業の推進に当たって考慮すべき広範な要件とそれらを前提とした意思決定を一括管理する「要件管理システム」の開発を進めてきた（NUMO, 2009d）。このシステムでは、事業にかかわる要件（法的な要件、技術的な要件など）、意思決定項目やその付帯情報をデータベース化することにより、さまざまな意思決定を支援し、それらの結果を体系的に記録し、検索することができる（図 3.2.2-1）。

要件管理業務
 •法的な要件, 技術的な要件, 設計要件, 地質環境条件など
 •主要意思決定事項, 処分場概念の構築などの作業項目

電子データベース化



技術業務の支援
 •要件の体系化
 •技術業務の要件, 関連情報の閲覧および効率的な収集
 •過去の意思決定・技術業務の追跡性の確保

電子データベース化



図 3.2.2-1 要件管理システム

((a) 原環センター, 2004 を編集, 一部加筆 (b) 原環センター, 2008 を編集)

一方, 基盤研究開発機関でも地層処分に関する研究開発成果の管理を実施するための基盤的技術の整備が進められてきており, これらも NUMO が事業の全体を俯瞰しつつ柔軟な運営を進める上での支援ツールとして活用していく予定である。

その一例は, JAEA が開発・整備を進めている知識マネジメントシステム (KMS) である。KMS は, 100 年程度にわたる事業の長期性と安全確保の超長期性という地層処分固有の特徴を踏まえ, 時間とともに累積的に増加する膨大な情報を有機的な知識として利用することを支援するシステムで, 研究開発成果や関連する国内外の知見を体系化して管理, 伝承していくための知識ベースとその知識の活用を支援する知識マネジメントからなる (JAEA, 2010) (図 3.2.2-2)。NUMO では, KMS に蓄積された情報を有効に活用することで, 事業に必要な情報や知見を効率的に収集・活用する予定である。また, 必要に応じて KMS とデータを共有することも検討していく。

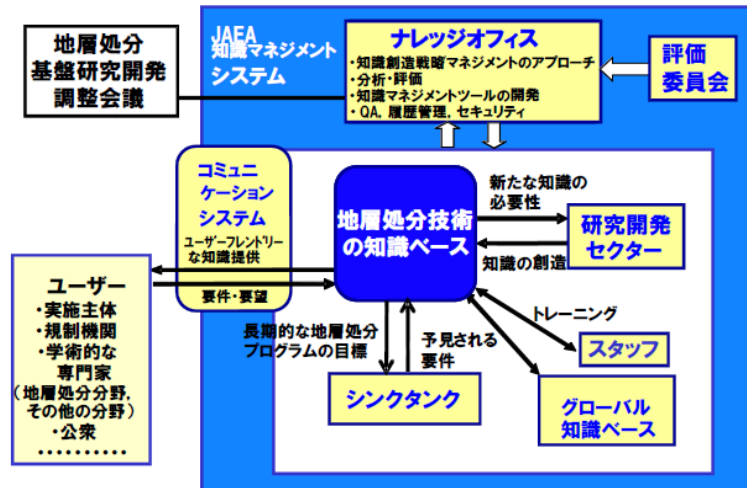


図 3.2.2-2 知識マネジメントシステム概念
(出典：JAEA, 2010)

3.2.2.3 方策2：閉鎖後長期の安全性の繰り返し確認

地層処分における安全確保を図るために、事業の各段階でそれぞれの安全確保のために施した対策の妥当性について確認することが必要であり、処分場の閉鎖後には人間の関与に頼らない受動的な安全性を確保できる地層処分システムを構築することが求められる。3.1.2.3 で述べたように、地層処分システムで長期にわたって安全性を確保できることを示すためには、安全評価によって得られた線量があらかじめ定められた放射線防護基準を超えることがないことを確認する。放射線防護基準は、安全規制の枠組みの中で明確に示されるべきものであるが、それが定められていない現段階では、諸外国の防護基準やわが国の放射線審議会での検討結果（放射線審議会，2010）などを評価の参考にする。

一方、安全確保に向けて地層処分システムを構築していく際には、放射線防護基準を満足するかどうかという視点に加えて、安全確保のための基本概念である「隔離機能」と「閉じ込め機能」を確保できるように、自然現象の著しい影響を回避した上で、地層処分に適したサイトや母岩を選定し、適切な工学的対策を施すことにより安全性を確保するという考え方が重要であり、そのような対策の妥当性の検討も含めて安全性を確認していくことを基本とする。

ここでは、安全性の確認をどのような考え方に従って繰り返し実施していくのかについて述べ、安全性の確認において重要な役割を果たすセーフティケースについて記述し、セーフティケースの信頼性において重要な意味を持つ不確実性について、NUMO の考え方を提示する。

(1) 安全性の繰り返し確認

NUMO は、閉鎖後長期の安全性を確保するために三つの安全確保策（適切なサイト選定と確認、処分場の設計・施工などの適切な工学的対策、地層処分システムの長期安全性の評価）を緊密に連携させ、得られた情報を統合しながら、地層処分システムの安全性を各段階の節目や途中で繰り返し確認することにより、その信頼性を継続的に向上させていく。地層処分の安全性を示すには、地層処分システムに必要とされる安全機能を示し、その機能が損なわれる可能性のある要因を明確化し、その要因が適切に取り扱われていることを示す必要がある。さらには、地層処分システムの安全機能にかかわる不確実性が適切に扱われていることが重要である。

不確実性に対して保守的なモデルやデータセットを安全評価上用いる場合には、十分な安全裕度を有しているとの主張が可能である。一方、現実的なモデルやデータセットを用いる場合には、その信頼性を確保するために、不確実性の影響を過小評価していないことを示す十分な根拠を準備する必要がある。ただし、過度に保守的なモデルやデータセットを採用することは、有望なサイトの排除や極端に保守的な設計に陥る可能性があり、事業を合理的に進めるという観点で好ましいことではない。このため、モデルやデータセットの選択に際しては、関連する知識に含まれる不確実性の大きさ、モデルやデータセットの保守性の程度、モデルやデータセットの妥当性を示す根拠の充実度という三者を十分考慮して適切なものとするのが重要である。

地層処分を実施する過程では、段階的なサイト調査による地質環境条件の理解や研究開発による現象理解などが進展することによって知見が拡充され、より定量的な検討が可能となる。このように事業の進展とともに情報を拡充することにより、安全性に対する信頼性を向上させる。同時にモデルやデータセットについての過度の保守性があればそれらを低減する。また、安全評価においては、サイト調査や処分場設計などの工学的対策と連携し、過度の保守性を低減しつつ、安全評価の信頼性を向上させることが重要である。従って、以下の三つの考え方に基づいて安全性を示していく。

- ・ サイトの地質環境の理解の深化と不確実性の低減
- ・ サイトの地質環境に応じた処分場概念の具体化
- ・ 安全評価の精度と信頼性の向上

まず、感度解析や不確実性解析などにより安全確保のために重要な不確実性要因とその感度の情報を把握して、安全確保戦略の策定、見直しを行う。また、この戦略をもとに、前段階までに得られた情報や知識に基づいて、サイト調査・評価や技術開発を実施することにより、対象とする地層処分システムの理解を深める。それに引き続いて、安全評価シナリオの構築（見直し）、モデル・データセットの作成（更新）を経て安全解析を行う。安全解析の結果およびその評価・分析に基づいて、安全確保の信頼性を向上させるために次段階で行うべき調査ターゲットを具体化するための情報をサイト調査・評価に対して提供する。また、処分場設計や建設・操業・閉鎖計画立案に対しては、不確実性の取り扱いに起因する過度の保守性の合理化を行うための情報あるいは設計オプションの違いが安全性に及ぼす定量的な差異の比較結果などの情報を適宜提供することが重要となる。

ただし、サイト調査の初期段階においては、厳密な安全評価を行うための地質環境特性などに関する情報が必ずしも十分に得られていない場合も想定される。その場合には、適切なサイト選定と確認に関する重要な情報は何か、処分場の設計・施工などの適切な工学的対策が施されることによって期待する安全機能（6.2.2.1 および 6.2.2.2 参照）がいかにかに発現されるかといった観点から、その段階で重要な不確実性を考慮に入れた安全確保のための条件の検討を行う。その際、地層処分システムに含まれる不確実性の中で安全性に影響の大きい要因をさまざまな解析的検討などを通じて特定する。それらの検討から、その段階での不確実性を反映した幅を持った概略的な線量評価結果とともに、次段階での不確実性の低減策とその実現性、妥当性の分析も含めて安全確保策の見通しを示す。

概要調査地区選定段階（文献調査の段階）では、法定要件を満足しているかどうか为主要な検討事項となり、火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食といった自然現象が処分施設に著しい

影響を及ぼす場所を避けることが重要である。法定要件を満足しない場合は次段階には進まないが、情報源が文献に限られるため、相当程度の不確実性が残る場合もあり、そのような場合には次段階以降の調査によって必要な情報を拡充する。

次の精密調査地区選定段階（概要調査の段階）では、前段階で文献情報に基づいて検討した当該地区への自然現象の著しい影響の有無を、現地で直接取得する情報を用いて評価・確認するとともに、当該サイトの地質環境が地層処分を実施するのに適しているか否かについて調査・検討を行う。処分施設建設選定段階（精密調査の段階）では地下調査施設の建設に多くの時間と費用を費やすことになるため、精密調査地区の選定はわが国の地層処分事業にとって重要な意思決定である。

処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）の前半では、前段階で実施した調査を補完するために、地上からの調査を実施する。この調査結果に基づき、地質環境モデルを更新し、処分場の基本レイアウトを決定し、処分施設の基本設計を行う。また、基本レイアウトおよび基本設計に基づいて処分場の安全性について検討を行う。これらの情報に基づいて、地下調査施設の設計を行う。処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）の後半では対象とする母岩中に地下調査施設を設置し、地質環境条件の調査、人工バリアシステムの実証を行い、処分施設の安全性を包括的に検討することで事業許可申請に必要な情報を整備する。

国の安全審査の段階では、安全審査指針の定めに従って安全評価を行い、放射線防護基準などとの比較において地層処分システムの安全性を確認するとともに国の審査を受ける。このとき、安全評価の結果を裏付けるさまざまな証拠や論拠をセーフティケースとして取りまとめ、このセーフティケースに基づいて地層処分システムの安全性を提示する。

事業許可以降の建設から事業廃止までの段階では、新たに得られた知見に基づき安全確保策の妥当性の確認や安全評価を行って安全性の確認を行い、安全レビュー報告書として取りまとめて国に提出する。

(2) セーフティケース³²

地層処分では安全性を確保しなければならない期間が非常に長く、その安全性を実証により示すことができない。そのため、予測的な手法に基づく方法によって長期的な安全性を検討することになり、さまざまな観点から地層処分システムの安全性を確認することを通じて、安全性に対する確信を得るという方法が取られる。近年では、このような地層処分システムの安全性を提示する方策として、安全性を幅広い観点から論ずるセーフティケースを事業者が構築し、安全性を提示することが重要であるということが国際的に共通の認識になってきている。これは、地層処分の安全性に関する信頼性構築が安全評価の結果によってのみ行われるのではなく、サイト調査・評価や処分場の設計・施工などのより幅広い要因によって多様な側面から論じられるべきであるという国際的な認識に基づくものである。

3.1.2にも述べたようにセーフティケースは、安全確保策を施すことにより、地層処分が長期にわたって安全性が確保できることを多面的なさまざまな証拠や論拠とともに示すものである。安全性

³² OECD/NEA では、セーフティケースは、「A safety case is the synthesis of evidence, analyses and arguments that quantify and substantiate a claim that the repository will be safe after closure and beyond the time when active control of the facility can be relied on. (セーフティケースは閉鎖された後の制度的な管理の維持が保証できないような時間枠においても、処分場が安全であり続けるとする主張を定量化し立証するための証拠、解析さらには論拠の統合体である)」と定義されている (OECD/NEA, 2004)。なお、セーフティケースは、操業期間中の作業者の安全など、事業各段階の安全性についても含まれる場合がある (IAEA, 2011)。

の提示に当たっては安全評価という解析的な手法を用いるが、安全評価で用いるモデルやパラメータの設定の根拠となるサイト調査・評価や処分場の設計・施工などの情報を併せて構成するという考え方がセーフティケースの概念である。また、事業の進展とともに安全性を裏付ける情報を拡充し、セーフティケースの信頼性を向上させていくためには、段階的な事業推進の中で、地層処分の長期安全性を支持するようなさまざまな論証を、拡充していく必要がある。換言すれば、安全性を脅かす可能性のある事象について安全評価の中で十分な検討が行われ、サイトの選定や工学的対策の中で必要な対策が施されており、またその時点で存在する不確実性についても十分な考慮がなされているため、これらの事象が地層処分システム全体の安全性を脅かすことがないということを示す科学技術的な拠り所となるものである。

さらに、セーフティケースの重要な役割として、幅広いステークホルダーから出される安全性に対する疑問、心配事項に適切に応えるための科学技術的な情報を提供することが挙げられる。ここでいうステークホルダーには、地層処分にかかわるすべての関係者、例えば安全性を審査する国の規制機関をはじめ、地域住民や国民、大学や研究機関の研究者といった人々が含まれる。

また、セーフティケースは、ある段階で得られている根拠に基づいて、ある特定の地層処分システムにより安全性が担保できることを示すと同時に、セーフティケースをさらに頑健なものとするために、どのような情報をさらに取得する必要があるかを明示することで、次段階以降のサイト調査や技術開発の方向性を提示する役割がある。また、地層処分システムが安全であるとの確信が幅広いステークホルダーにより共有されるよう配慮して構成する必要がある。

このようなセーフティケースの考え方は国際的にも議論されており、さまざまな検討がなされている（例えば、OECD/NEA, 2004, OECD/NEA, 2009）。そのような検討をベースに構成したセーフティケースの全体像を示したものが、図 3.2.2-3 である。わが国では法律により三段階のサイト選定を経て最終処分施設建設地を選定する手順が規定されており、その後は事業許可を得て建設、操業、閉鎖へと事業が進むことになる。この図は、地層処分システムが三つのサイト調査段階から事業許可を経て建設、操業、閉鎖段階に至るまでの間にセーフティケースが徐々に更新・精緻化されていく様子と、広範なステークホルダーから出される安全性に関する懸念や質問に対して、セーフティケースに基づいて安全性の論拠の提示がなされるという役割を模式的に示している。

セーフティケースの主要な構成要素は、「安全確保構想」、「適切なサイト選定と確認」、「適切な工学的対策」、「地層処分システムの長期安全性の評価」、「安全性にかかわる論拠の提示」からなる。

「安全確保構想」は、あるサイトにおいて与条件や満足すべき要件などを考慮して、どのような戦略で安全性を確保していくかという考え方を示すものである。

「適切なサイト選定と確認」では、地震・断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食などの自然現象の著しい影響が回避されており、その上で地層処分に適した地質環境をいかに調査・選定したのかという論拠を取りまとめる。

「適切な工学的対策」とは、安全確保構想で明示された人工バリアに要求される安全機能が工学的対策を施す中でどのように確保されたのかを示すものである。また、事業期間中の安全性が確保された上で、処分場の操業に必要な地上、地下施設をどのように構築し、どのように運転するのかについても包括的に記述する。

「地層処分システムの長期安全性の評価」では、安全解析においてどのようなモデルやデータセットを用いたのかを提示し、解析結果と規制基準値を比較することにより安全性の評価を行う。

「安全性にかかわる論拠の提示」は、セーフティケースにおいて最も重要な構成要素である。こ

ここでは、「地層処分システムの長期安全性の評価」に用いられたモデルやパラメータが、「適切なサイト選定と確認」や「適切な工学的対策」で取得された情報に基づいた論拠のもとに構成されているのかを示す。また、その時点でのセーフティケースの中にどのような不確実性が存在しており、それらの不確実性がどのように扱われているのかという点もセーフティケースの信頼性という観点で重要な点である。さらに、不確実性が地層処分システムの安全性に及ぼす影響や、それらの不確実性を低減するためにはどのような取り組みが必要かについても提示されている必要がある。

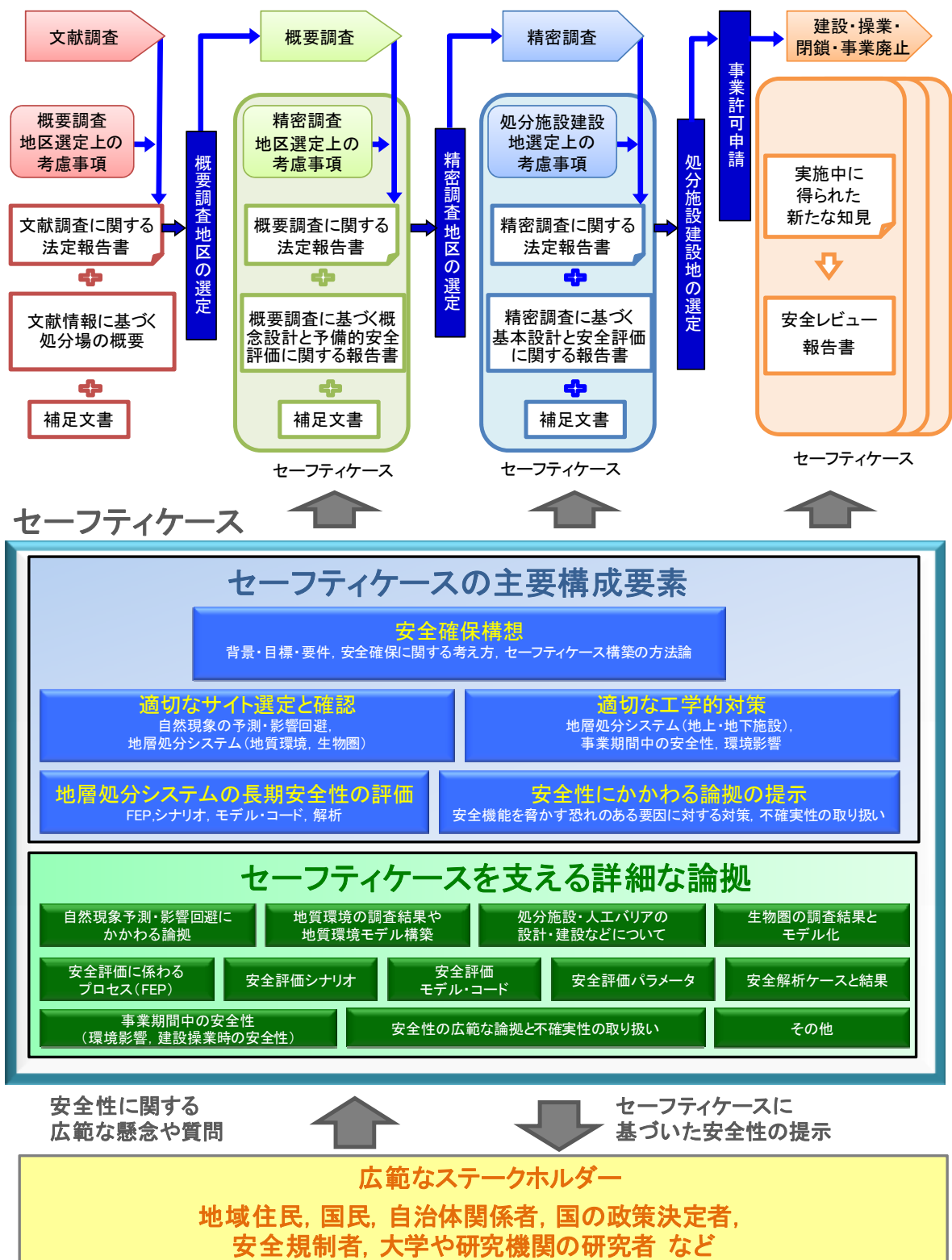


図 3.2.2-3 セーフティケースの構成要素と役割

(3) 不確実性の取り扱い

NUMO が提示する三つの安全確保策（適切なサイト選定と確認、処分場の設計・施工などの適切な工学的対策、地層処分システムの長期安全性の評価）を実施していく上では、地質環境の不均質

性や考慮する評価期間の超長期性に起因するさまざまな不確実性を考慮する必要がある。

NUMOにおける不確実性の取り扱いは、地層処分システムの安全性にかかわる重要な不確実性を特定し、三つの安全確保策の実施プロセスを通じてそれらをできるだけ回避または低減させるような対策を講じるが、それでも残存する不確実性に関してはそれらを考慮した安全評価を行い、最終的に安全性が確保できるシステムの構築を目指すことを基本とする。不確実性の取り扱いは、NUMOの安全確保策のすべての実施プロセスに関連し、セーフティケースの中でも重要な内容となるので、不確実性をどのように取り扱ったのかという点がセーフティケースの信頼性を左右する。

図 3.2.2-4 は、サイト調査段階におけるセーフティケースの構築に向けて、サイト調査・評価、工学的対策、安全評価を実施していく流れを示す。その上で、それぞれどのような不確実性が生じ、それらをどのように取り扱うのかについて記述する。

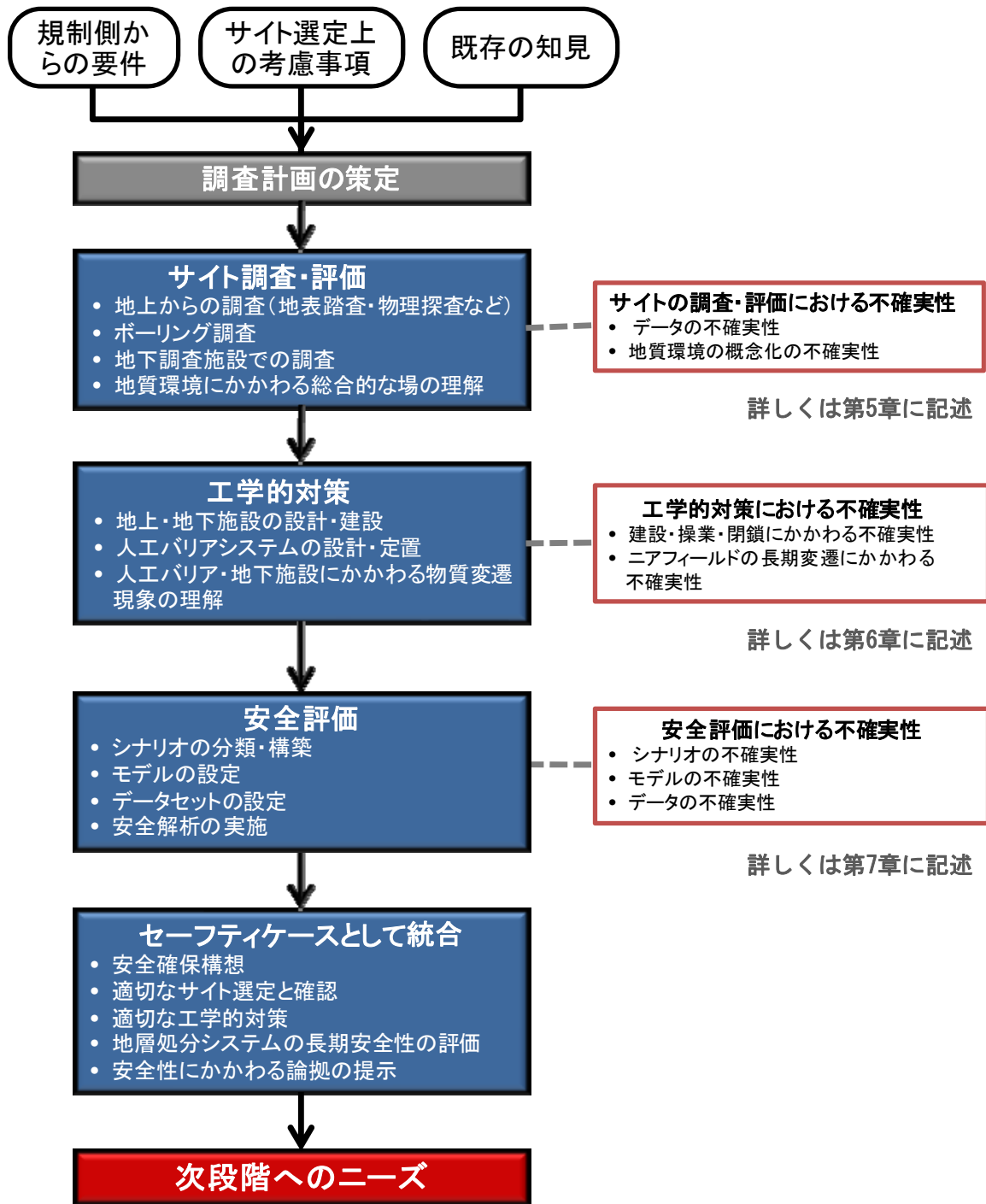


図 3.2.2-4 セーフティケース構築に向けて三つの安全確保策を実施する過程で生じる不確実性

(i) サイト調査・評価における不確実性

サイト調査・評価を実施する際には、工学的検討や安全評価を実施するために必要な地質環境情報に対するニーズを反映して、不確実性の低減に向けて計画を策定・実施することが基本である。ただし、地層処分では不均質かつ広大な地下空間を対象とするため、サイト調査・評価を実施する過程で何らかの不確実性が介在することは避けられない。そのような不確実性は、その特徴からデータの不確実性と地質環境の概念化の不確実性の二つに分類できる。

①データの不確実性

データに含まれる不確実性は、各種の調査により取得されるデータや、複数のデータを統合した情報（例えば、地質環境モデルのデータセット）などに含まれる不確実性である。これらは、測定誤差、測定精度（空間分解能、計測密度）など、複数の要因によって生じる。

②地質環境の概念化の不確実性

地質環境の概念化の不確実性は、データの解釈に起因するもので、自然現象の将来予測や当該サイトで生じている現象の理解において不可避な時間的・空間的な不確実性である。時間的な不確実性は、例えば、過去から現在までの変動・変遷の法則性や地質構造発達モデルといった、将来予測に用いる仮説（モデル）が複数の解釈に基づき複数存在するなど、現象の理解に内包される不確実性である。空間的な不確実性は、情報量の不足により個々の現象や複数の現象間の相互作用に関する理解が十分でないことなどに起因する。また、当該サイトが元来有している地質環境のさまざまな特性のばらつきや、データの代表性などにより、地質環境そのものの解釈・推定に伴う不確実性が含まれる。

(ii) 工学的対策における不確実性

工学的対策では、地質環境特性に含まれる不確実性を考慮して設計を行う必要がある。すなわち、地質環境特性が合理的に想定し得る範囲で変化したとしても適切に工学的な対策を施すことによって、安全性を担保する。一方、工学的対策そのものにおいても、建設・操業・閉鎖といった地層処分システムの構築にかかわる不確実性と、地層処分システムの長期変遷にかかわる不確実性が含まれている点は考慮する必要がある。

①建設・操業・閉鎖にかかわる不確実性

地層処分システムの閉鎖後長期の安全を確保するために工学的対策を施す過程において、坑道の掘削、人工バリア材料の製造や原位置での定置の過程で施工誤差や品質のばらつきなどが生じることが想定され、長期的な不確実性につながることも考えられる。これらについては、品質保証により要求品質を満足するよう管理を徹底することを基本とするが、安全評価においてはこれらを不確実性要因として安全性に及ぼす影響度について検討を要する場合もあるため、工学的対策を実施する中でどの程度の不確実性が含まれているのかについて明らかにする必要がある。

②ニアフィールドの長期変遷にかかわる不確実性

長期安全性問題におけるニアフィールドの長期変遷にかかわる不確実性は、対象とする期間が数万年を超える長期にわたり、現状の科学技術的な知見では正確に将来予測をすることができないことに起因して発生する。これについては、安全評価上での取り扱いに際して、科学技術的に想定可能でなおかつ合理的な範囲について検討を行う必要がある。

(iii) 安全評価における不確実性

安全評価では、サイト調査・評価、工学的対策で生じたさまざまな不確実性を考慮した上で地層処分システムを設計し、地層処分システムの安全性を検討する必要がある。さらに、安全評価を実施する作業において不確実性が介在する余地があり、それらも含めて安全評価で取り扱う不確実性

は、シナリオの不確実性、モデルの不確実性、データの不確実性の三つに分類して取り扱うことができる (OECD/NEA, 1991)。ここでは、安全評価で扱う三つの不確実性について述べた上で、これらを適切に取り扱うことによって、すべての不確実性をどのように安全評価に取り込むのかという点について概説する。

①シナリオの不確実性

シナリオの不確実性は、地層処分システムにおいて緩慢に進行する人工バリア材の劣化や地下水による放射性核種の移行などの現象の時間的推移に関する不確実性、地質環境の安定性にとって重要な自然現象の発生時期や頻度に関する不確実性など、地層処分システムにかかわる現象やプロセスに関する理解や知識の不足に起因してシナリオ設定時に生じる。

②モデルの不確実性

モデルには、場や現象を概念化した表現 (概念モデル)、その数学的な表現 (数学モデル)、数学モデルの計算コード上での表現 (解析コード) がある。モデルの不確実性には、概念モデルとしての表現手法が複数存在すること、数学モデル作成の際の簡略化が適切に行われないこと、数学モデルに対応する解析コードを誤って作成することから生じるものなどがある。

③データの不確実性

データの不確実性は、データの測定誤差、地質環境の不均質性を取り扱うためのデータが十分でないことから生じる。また、ナチュラルアナログなどで得られているデータを、処分環境の条件や処分対象とする時間スケールに適用する際に生じる不確実性も存在する。

(iv) セーフティケース構築における不確実性の取り扱い

不確実性の取り扱いでは、地質環境の調査・評価および処分場の設計から得られる情報を安全評価に反映する際に、不確実性を認識し、その影響を低減・緩和するとともに、残された不確実性の影響を安全評価に適切に反映することが重要である。また、不確実性には、影響の大きさや確からしさの異なる多様なものが含まれる。このため、多様な不確実性を合理的に取り扱うため、安全評価への影響が無視できるものを除外するとともに、不確実性が安全解析の結果に与える定量的な影響や包絡性 (ある事象の影響が別の事象の影響に包含されること) を考慮して、重要度分類を行う。重要度の高い不確実性に関しては、その低減に向けた取り組みを実施する。このような取り組みを段階的に実施していくことで、不確実性を確実に低減し、それでも残留する不確実性に対しては、それらを選択肢とした安全評価を行い、安全性を確認することによってセーフティケースの信頼性を高める (7.1.2.2 参照)。

3.2.2.4 方策3：事業期間中の安全対策と環境保全策

(1) 事業期間中の安全対策

事業期間中には、一般労働安全と放射線安全を確保することを目的として対策を施すが、それらの対策が地層処分システムのバリア機能に与える影響を常に評価し、事業期間中の安全と閉鎖後長期の安全性の両者が確実に確保できるように対策を講じていく。

サイト選定段階と建設段階では、放射性廃棄物の持ち込みはなく、主として一般労働安全を確保

するための対策を実施する。そのために必要な地質環境情報は、サイト調査時の地質環境特性に係る調査、および処分施設建設時に行われる調査により取得する。この段階の安全対策としては、一般の地下土木工事などの安全対策を適用できるが、事例の少ない地下深部での大規模な工事であることから、その時点で利用可能な信頼性の高い技術を用いる。地下深部に大規模構造物を建設するという経験は、国内外の地下研究所の建設、地下発電所の建設、先行している諸外国における処分施設の建設（例えば米国の廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）など）において経験が蓄積されてきており、NUMOとしてはこれらの経験を事業に反映し、最新のIT技術による情報化施工なども活用しつつ安全の確保を図る。

地下での坑道掘削時には切羽の不安定現象、山はね対策、湧水対策、ガス対策などの安全対策を施しながら作業を進める。その場合の安全対策として、ロックボルトにより坑道の力学安定性を図ったり、セメント系材料を注入して湧水を抑えたりするなどの対策が考えられる。これらの安全対策で必要となる部材や材料を閉鎖後も岩盤中などに残置する場合には、閉鎖後長期の安全機能を有意に損なう恐れがないことを確認した上でそれらの材料を採用する（3.1.4参照）。

地下空間での作業安全という観点で問題となるガスとしては、岩盤中に残存するガスのほかに、内燃機関などを使用する場合に発生する有毒ガス、発破を用いる場合に発生する後ガスなどが考えられる。これらに対しては坑内環境をモニタリングし、換気による除去または希釈を行い、坑内作業従事者に新鮮な空気を供給する。さらに、使用する建設機械についても、電動式あるいは今後開発が進むと思われる燃料電池方式の積極的な導入を図るなどの対策を適用する。

また、地下施設において緊急事態が発生した場合を想定して、作業従事者の安全を確保するための緊急退避所や緊急避難経路を確保しておく。特に処分場の地下施設は多数の坑道群が建設され、坑道の掘削や廃棄体の定置のために場所を移動しながらの作業が長期間にわたって行われることから、常に避難経路が確保された状態のもとで作業を行うことができるよう、計画段階から十分な検討を行い、安全確保を最優先とする地下施設全体の作業計画を立てておく。

操業段階から閉鎖段階では、放射性廃棄物の搬入を伴うため、上記対策に加えて、放射線安全を確保するための対策を実施する。この対策は、特に、これまでに例のない地下深部の環境下において放射性物質を取り扱う作業を伴うため、その特殊性を考慮して、その段階で利用可能な信頼性の高い技術で設備の設計、建設を行うとともに、必要な技術開発を進め、安全操業に万全を尽くす。例えば、遠隔操作技術を用いて廃棄体を搬送、定置する技術に関しては、再処理施設やガラス固化体貯蔵施設の操業で蓄積された知見を活用するが、通常の上地施設では考慮する必要がない高温、高湿度、湧水など地下環境特有の条件下における人工バリア材の取り扱いなどに対する課題に対しては技術開発を計画的に実施していく。

NUMOは、サイトの地質環境特性なども勘案し、地上施設および地下施設の設計段階において安全対策に関する詳細検討を行い、各設備の安全設計や運転・保守マニュアルなどに反映する。操業中においては、設備などの定期点検を実施して、損傷などの早期発見、性能確認などを行う。点検頻度については、対象に応じて日常点検、月例点検、年次点検などを設定する。

事故発生の防止と事故時の影響緩和の観点から、安全上重要な設備・機器について、安全機能の多重化が求められる。多重化の程度は、事故の影響の重大性に応じて検討を行い、対策に反映する。例えば、廃棄体を立坑のエレベータを用いて搬入する場合、エレベータのロープは十分な安全率を有するよう設計されるが、万一に備えて落下防止用把持装置を装備し、さらに立坑下部に緩衝装置を設けて衝突力を低減するといった対策が考えられる。

実際の地下施設は分割された複数の埋設区域からなり、それらの坑道の建設は、一区域ずつ順次進め、それに従い廃棄体の埋設作業も完成した区域から順次進める。このため、操業段階では建設が完成した区域における廃棄体の搬送・定置作業と、次の区域の坑道建設作業を並行して進めることとなるが、この段階では放射線管理を要する作業区域と、それを要しない作業区域を極力分離できるような計画とし、適切な管理を行う必要がある。こうした管理を確実にを行うため、坑内の状況（環境、人、機械、廃棄体などの状態、異常発生など）をリアルタイムで一元管理するシステムや坑内に入坑している人と効率的な連絡通信が行えるシステムの構築も行う。

また、わが国において自然災害の代表例として「地震」、「津波」、「台風」が挙げられる。「地震」に対しては「安全上の重要性に応じて想定すべき地震力に対して、必要な期間、安全上要求される機能を失わないように、十分な耐震力を持たせる」（適切な耐震設計）ことが基本的な考え方である。また、地震によって引き起こされる可能性のある地すべりや土石流に対しても幅広く影響を想定し、事前に対策を講じておく必要がある。沿岸部では、地震とともに発生すると想定される「津波」に対しては地上施設用地の高さを想定される津波遡上高より裕度をもって高くするなど、津波の遡上により地下施設が冠水しないよう配慮した設計を行う。また、「台風」による被害は、風による施設の倒壊、雨による施設の冠水や土砂崩れ、波浪による港湾施設の破損が想定されるが、それぞれ、実績のある耐風設計法、雨水排水設計法、耐波浪設計法が準備されており、サイトの地質環境の条件に応じて設計することが可能と考える。

(2) 環境保全策

NUMO はこれまで、「放射性廃棄物の地層処分事業について（公募関係資料）」（NUMO, 2009a, 2009b, 2009c）や「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性」（NUMO, 2004a）において、環境への影響や保全に関し、以下の考えや姿勢を示してきた。

[放射性廃棄物の地層処分事業について（公募関係資料）]

- ・ 分冊-2 概要調査地区選定上の考慮事項（NUMO, 2009b）：処分施設建設地の選定過程や建設・操業の各段階においては、自然環境の保護や開発行為にかかわる規制など、最終処分法以外の関連法令も遵守。
- ・ 分冊-3 地域共生への取り組み（NUMO, 2009c）：共生への取り組み方策について、「特に留意すべき重要事項」の三点目に「環境保全などへの配慮」を列挙。

[高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性]（NUMO, 2004a）

- ・ 法定の環境影響評価の適用の有無にかかわらず、事業の各段階を通じて処分場を建設する地域の環境に十分配慮。
- ・ 事業の各段階で生じる環境への影響について、それぞれの段階の前段階で調査、予測および評価を行い、環境に与える影響をできる限り回避、低減するとともに、必要に応じて代償措置（復元、創出）を採ることを含めた適切な保全措置を講ずることができるようあらかじめ準備。
- ・ 各段階において実際にモニタリングなどを行ってその効果を確認し、必要があれば保全措置の改善もしくは追加の措置を講ずるといった計画的かつ柔軟な対応。

以上の事項を、事業の各段階において計画的かつ着実に実施することが、「周辺環境の保全」を達成することにつながると考える。

地層処分は100年程度にわたる長期事業であるため、NUMOは、持続可能な社会形成の観点および地域共生の観点から、地域の環境を保全し、将来世代に対して良好な環境を引き継いでいくために必要な環境影響評価を実施し、長期的な視点に立って環境保全の取り組みを進めていく。このようなNUMOが自ら取り組む環境保全に関する行為を、ここでは「環境配慮」と総称する。

環境配慮の検討は、地域とのコミュニケーションを踏まえて進めることが重要であり、文献調査や概要調査などの結果を地域住民へ説明する機会に併せ、環境への影響や保全に関する考え方を示し、地域住民の意見を求めながら検討を進めていく予定である。

(i) 早期段階からの環境配慮の取り組み

NUMOは、より効果的に環境配慮を行う観点から、事業の初期段階、すなわち文献調査の段階から環境配慮の取り組みを進めていく。これは「戦略的環境アセスメント」(SEA: Strategic Environmental Assessment)の考え方と調和的である。

SEAとは、政策(policy)・計画(plan)・プログラム(program)を対象とする環境影響評価の手続きであり、事業の初期段階において政策・計画・プログラムの立案に環境配慮を組み込むことにより、環境配慮をより効果的に進めることができるという特徴を有する。

近年、国内外においてSEAの取り組みが進められており、国内では国のガイドラインの制定(戦略的環境アセスメント総合研究会, 2007; 国土交通省, 2008)や地方自治体におけるSEA制度導入が挙げられる。一方海外では、米国、カナダ、EU諸国³³、中国、韓国など、先進国を中心にSEA制度が導入されており(戦略的環境アセスメント総合研究会, 2007)、地層処分事業においては、スイスや英国においてSEAを実施することが計画されている(BFE, 2008; Defra et al., 2008; NDA, 2009a, 2009b)。

(ii) 取り組みの手順

NUMOは、三段階のサイト選定に応じて環境への影響に配慮しつつ事業を適切に管理していく方法について検討を進めており、サイト選定の初期の段階における環境配慮の考え方を整理した(高橋ほか, 2006)。

サイト選定の各段階において、次の段階以降における環境配慮を適切に行うために、必要な調査・予測・評価を行い、関連する法規制や条例なども踏まえ、適切な環境保全措置を検討することを基本とする。概要調査地区選定段階(文献調査の段階)においては、文献情報を用いて地域の環境面の特性を概略把握し、次段階以降の事業において必要とされる環境保全措置を検討する。精密調査地区選定段階(概要調査)および処分施設建設地選定段階(精密調査の段階)では、「事業特性・地域特性の把握→評価項目および手法の選定→現況の把握(調査)→環境影響の予測・評価→環境保全措置の立案・実施→環境保全措置の効果確認(モニタリング)→環境保全措置の改善」という基本的な流れで取り組みを進めていく(図 3.2.2-5)。

³³ EUのSEA指令(2001/32/EC)に基づき、2007年1月時点で27か国中25か国でSEA制度が導入されている(戦略的環境アセスメント総合研究会, 2007)。

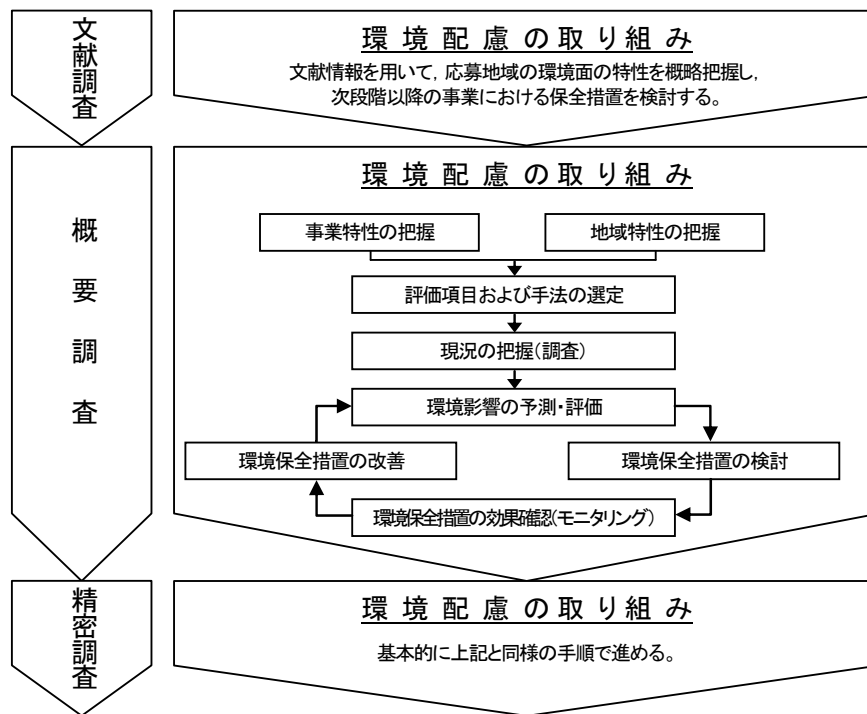


図 3.2.2-5 三段階の調査と平行した環境配慮の取り組みの手順

三段階の調査の進展に伴い、次段階以降の調査内容や処分施設の建設・操業に関する事業計画の詳細度が高まっていくが、これに応じて、環境への影響に関する予測の精度を高め、それに伴い環境保全措置を見直していくこととする。

3.2.3 方針2「信頼性の高い技術を用いた事業推進」

3.2.3.1 方針2に関する基本的考え方

NUMOは、十分な信頼度を持って安全確保策を実施していくために、最新の知見を踏まえ、その時点で利用可能な最適で信頼性の高い技術を用いて事業を推進する。信頼性の高い技術³⁴については、他分野での既往の使用実績や事業を効率的に進める観点での経済性を満足した上で、適切なレベルで品質を保証できるものであることが重要である。

地層処分事業で用いる技術の多くは、一般産業分野や原子力分野で使用実績があるものを用いるが、地層処分事業に固有の技術もあり、そうした技術は計画的に整備を行い、適用性を確認しておく必要がある。そのため、NUMOでは計画的に技術の整備を進めてきている。まず、概要調査地区選定段階（文献調査の段階）のための技術の整備を進め、2002年末までに必要な技術の準備が整ったと判断し、全国の市町村から「特定放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域（応募区域）」の公募を開始した。その後は、精密調査地区選定段階（概要調査の段階）を中心に、それ以降の段階で必要となる技術について技術開発を進めてきており、現時点においては、精密調査地区選定段階（概要調査の段階）で必要な技術も整備できたと考えている。

2.2.4.4で述べたように地層処分に関する技術開発は、JAEAなどの基盤研究開発機関とNUMOが

³⁴ ここでいう技術とは、技術的な知見（知識）や使用する技術を含む。

役割分担して実施しているが、技術の整備を効率的に進めるためには、両者間で密接な連携を取りつつ技術開発を進める必要がある。基盤研究開発機関は、NUMOの事業や実務的な技術開発に先行して研究開発を行うことにより、次段階以降でNUMOが必要とする技術や知識の基盤を提供する。基盤研究開発機関によって開発された技術は、NUMOが技術評価を行い、必要に応じて、効率化、最適化、合理化、実用化、体系化などの観点から、さらなる整備を行い事業に活用する。

JAEAは、深地層の研究施設の建設と研究開発を推進している。わが国では、地下深部における地層処分固有の課題に関する経験は限られており、予期せぬトラブル経験も含め事前に地下研究所でさまざまな経験を積み、得られた知見をNUMOに移転していくことは事業を安全かつ効率的に実施していく上で極めて重要である。

また、NUMOは、組織・体制作りや人材育成に努め、国内外の協力体制を整備することで、信頼性の高い事業を推進できる環境を構築する必要がある。

以上のように、「信頼性の高い技術を用いた事業推進」を実現するための実施方策として以下の三つに取り組んでいる。

- 1) 計画的な技術の整備
- 2) 技術に関する品質保証の的確な実施
- 3) NUMOの組織および国内外協力体制の整備

以下に、それぞれの方策の背景や考え方について述べる。

3.2.3.2 方策1：計画的な技術の整備

原子力政策大綱（原子力委員会、2005）では、NUMOは地層処分の安全な実施と経済性および効率性の向上を目的とした技術開発を進め、一方で、基盤研究開発機関は深地層の研究施設などを活用して、深地層の科学的研究や、地層処分技術の信頼性向上、安全評価手法の高度化などの基盤的研究を実施することとされており、NUMOでは、この方針に基づいて技術開発を実施してきた。

また、基盤研究開発機関が実施主体であるNUMOと規制機関の必要とする技術を把握し基盤研究開発に適切に反映されるよう、調整会議という枠組みが国により構築されている（資源エネルギー庁・JAEA、2010）。NUMOは、調整会議のメンバーとしてこの枠組みに積極的に参加し、基盤研究開発の成果が有効に地層処分事業に役立つよう、ニーズ提示と成果の評価・確認を実施してきた（NUMO、2010）。

(1) 技術開発の基本方針

図 3.2.3-1 は、地層処分事業における主要なマイルストーンと、それらに向けた技術の開発・整備や必要な基盤研究開発の関係を示したものである。NUMOは、「事業の各段階で安全確保のために必要な技術は何か」、「技術の目標到達レベルは何か」、「現時点において得られている技術のレベルはどの程度か」などを明確にし、計画的に技術の整備を行う。

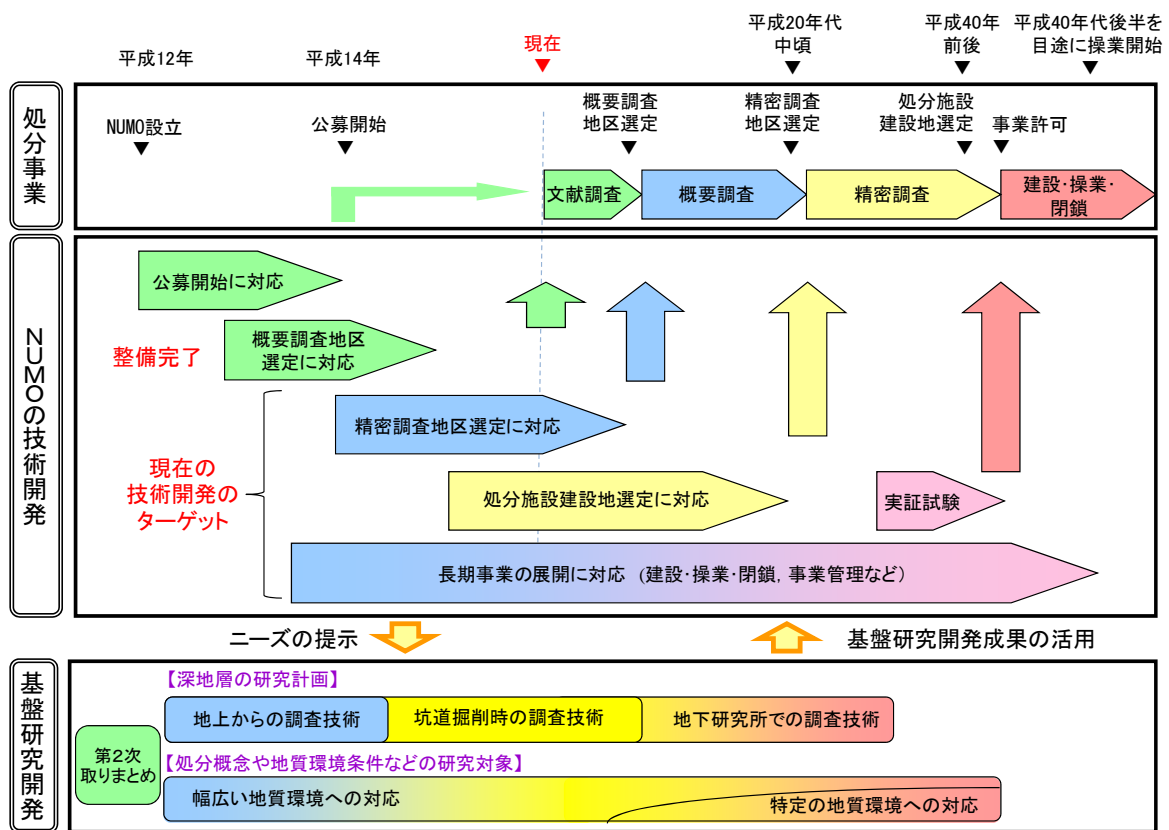


図 3.2.3-1 技術開発スケジュールと基盤研究開発との関連

NUMOでは、基盤研究開発として実施される研究開発の進捗状況を把握すると同時に、事業の進展とともに変化していくことが予想される NUMO のニーズが適切に反映されたものになっているかどうかの確認を行う。また、基盤研究開発の成果については、NUMO がその技術的信頼性や事業への適用可能性の評価を行い、必要に応じて追加検討を行うなどして事業への適用を図る。

整備された技術が事業に適用できることを示すためには、技術の実証³⁵による確認が有効な手段である。特に、廃棄体の遠隔定置技術などの地層処分に特有な技術については、実証試験によりその適用性・信頼性を確認するとともに、適宜改良を加え、事業への適用性を向上させる。また、ボーリング調査技術や廃棄体の搬送技術のような他分野ですでに実績のある技術であっても、地層処分事業に特有な制約条件下における適用性を評価し、必要に応じて実証試験などによりその信頼性を向上させる。

なお、閉鎖後長期の安全性の評価に関する技術については、実証試験によってその妥当性や信頼性を直接確認することができないため、評価に用いるシナリオやモデル、解析コード、データなどについて、評価期間の一部を対象とした実証的検証に加え、比較解析やナチュラルアナログ事例との比較、専門家によるレビューなどのさまざまな方法を組み合わせることにより、その信頼性を高めていく。

NUMO は上記の点を考慮し、事業期間全体を通して地層処分に必要な技術開発をどのように実施

³⁵ ここでいう技術の実証とは、対象とする技術の全部あるいは一部を、実際の条件を模擬して試行することにより、その技術の妥当性や適用性を検証することである。また、その検証を通じて対象技術の問題点を解決し、技術の適用性や信頼性を向上させることも含むほか、技術を実演することで信頼性を提示することも含む。

していくのかを取りまとめた技術開発ロードマップを作成し、事業期間全体を通じた技術開発への取り組みを提示した（4.1.3.2 参照）。

（2）技術開発課題の体系的な整理

第2次取りまとめ以降、NUMOでは、第2次取りまとめおよび高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術（電中研・電事連、1999）で得られた知見や情報を出発点として、基盤研究開発機関と協力しながら技術開発を進めてきた。技術開発テーマを策定する際には、図 3.2.3-2 に示す手順によって技術開発課題を明らかにし、見出された開発課題は、基盤研究開発機関で実施するものとNUMOが自ら実施するものに分類して取り組んできている。図 3.2.3-3 に、NUMOが実施する技術開発と国の基盤研究開発機関が実施する研究開発の相互補完的な関係を示す。

NUMOは「地層処分技術開発ニーズの整理—精密調査地区選定に向けて—」（NUMO、2010）の中で精密調査地区選定段階で必要とする技術を提示しており、これらの技術ニーズは資源エネルギー庁と基盤研究開発機関が策定した「地層処分基盤研究開発に関する全体計画」（資源エネルギー庁・JAEA、2010）に反映されている。

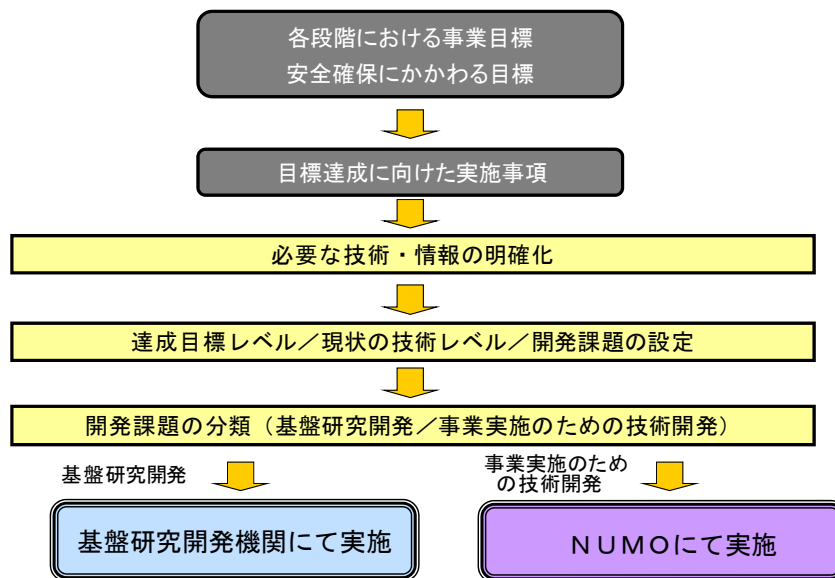


図 3.2.3-2 技術開発課題の体系的整理

図 3.2.3-2 の技術開発課題の体系的整理に当たっては、事業全体を俯瞰した安全確保ロードマップの中で各段階における事業目標と安全確保にかかわる目標を定め、目標達成に向けた実施事項を明らかにした上で、これらの実施事項を遂行するに当たって必要な技術や情報を明確化し、達成目標レベル、現状の技術レベルの検討を行う。設定した達成目標レベルに対して現状の技術レベルが十分ではない場合には、技術開発などによって技術レベルの向上を行うことが必要となるため、目標を達成するために必要な開発課題を設定する。これらの開発課題を、基盤研究開発機関が基盤研究開発として実施すべきものと、NUMOが事業実施のための技術開発として取り組むべきものに分類して推進する。明確化された必要な技術や情報を事業期間を通してどのように段階的に開発、取得するのかという枠組みを示したものが第4章で提示する技術開発ロードマップであり、これにはNUMOが自ら実施する技術開発と基盤研究開発として取り組むことが想定されるものの両方が含

まれている。

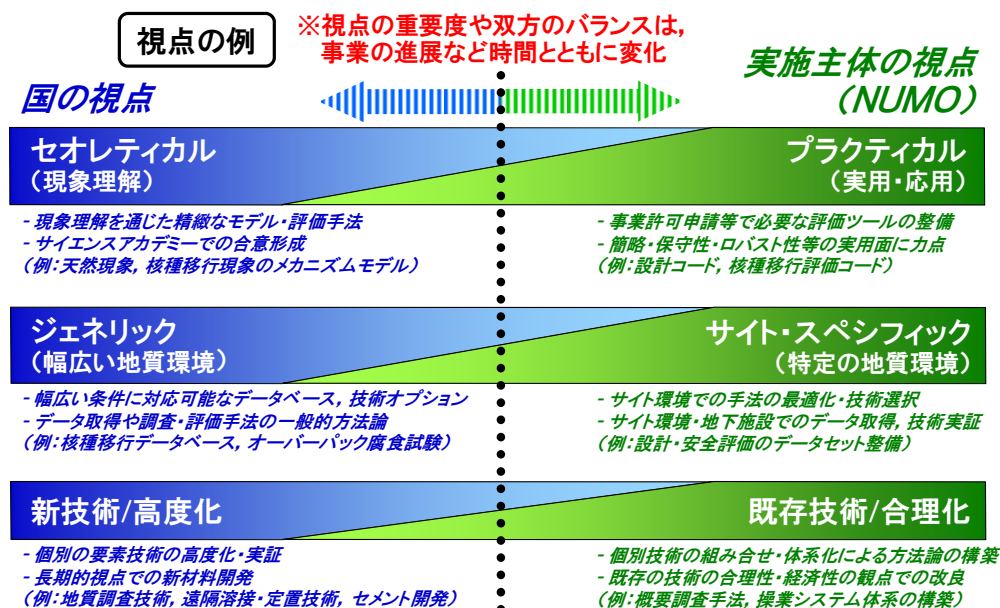


図 3.2.3-3 NUMO の技術開発と基盤研究開発機関における相互補完的な分担
(出典：資源エネルギー庁・JAEA, 2010)

(3) 技術開発成果の評価と事業への適用

前項で抽出された技術開発課題のうち、NUMO が実施する課題については、自ら開発計画を策定し計画的に技術開発を進める。一方、基盤研究開発として実施する課題については、調整会議の場を活用して、NUMO が事業を実施するという観点からの技術開発ニーズを提示している（図 3.2.3-4）。基盤研究開発として実施される技術開発は、専門機関でそれぞれ分担し計画的に実施される。技術開発成果については、最終的なユーザである NUMO との間で、技術開発テーマごとに設置される委員会や協力協定に基づく運営会議など、さまざまな場で意見交換が行われている。ただし、基盤研究開発機関と NUMO の情報共有はさらに強化する必要がある。例えば、NUMO が基盤研究開発機関から定期的に研究開発成果の報告を受け、NUMO からは事業的なニーズを伝えるような場をテーマごとに設けるといった方法も考えられる。具体的な方法については今後、関係者で協議していく予定である。

研究開発成果は、開発された技術の信頼性や事業への適用可能性について NUMO が十分に評価し、必要に応じて実証などにより追加確認作業を行うために十分な時間的余裕をもって提供される必要がある。そこで、NUMO は事業計画や技術開発計画などを定期的に提供し、基盤研究開発との調整を図っていく。

以上述べたように、NUMO は技術開発全体を事業者の立場から総合的にマネジメントしていく。基盤研究開発機関などが実施する技術開発の成果は、技術のユーザとして NUMO が事業への適用性や信頼性、経済性などの観点から評価を行い、地層処分技術として体系的に整備するなどの取り組みを行う。また、技術開発計画や NUMO も含めた技術開発成果の評価を行うに当たっては、有識者の助言を得ながら進める予定である。

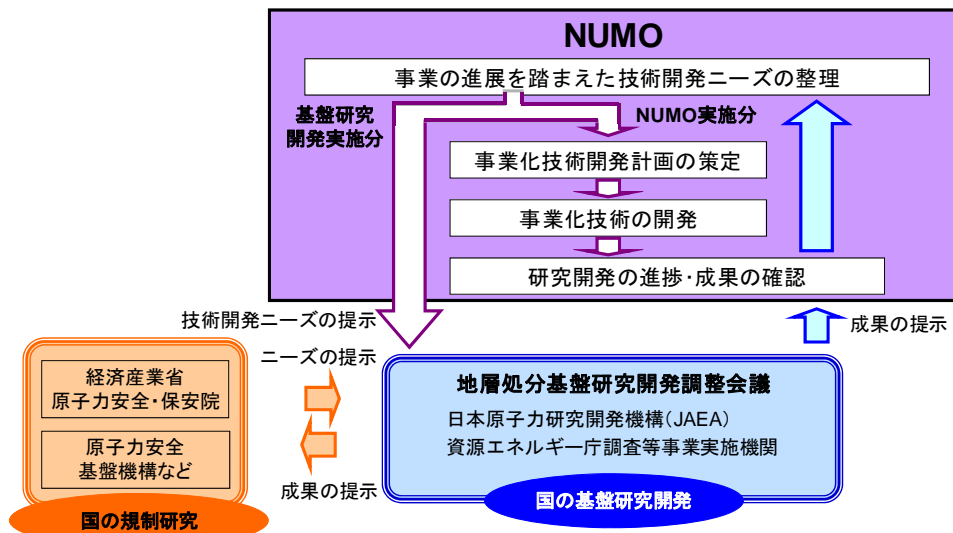


図 3.2.3-4 基盤研究開発機関と緊密に連携した技術開発の取り組み

(i) 技術開発成果の評価

前項ではNUMOが地層処分事業を実施するために必要な技術開発課題を整理し、NUMOが自ら技術開発を実施するものと、基盤研究開発機関へニーズを提示することで事業と基盤研究開発を連携させることを述べた。NUMO自らが開発する技術は元々事業への適用を意図して開発されるため、事業ニーズに沿ったものである。一方、NUMOが提示した技術開発ニーズに沿って実施された基盤研究開発により得られた成果をNUMOが事業に適用していく際には、その信頼性や適用性を評価し、必要に応じて追加検討を実施するなどして事業への適用性を確認する必要がある場合も想定される。ここでは、基盤研究開発により得られた成果をNUMOがどのように評価し、事業へ適用していくのかという基本的な考え方を示す。

基盤研究開発の成果は、報告書、データベース、経験や知見を有する人員、資機材などといったさまざまな形態でNUMOに提供される。それらは情報や知識といったいわゆるソフト的な成果と、開発した資機材といったハードに属するものがある。NUMOでは、ハード的な技術の多くは他産業で実績のあるものを中心に活用し、地層処分固有の技術を中心に研究・技術開発を行うという進め方を考えているため、研究開発成果の多くはソフト的な成果に属するものになる。以下では、ソフト的な成果、ハード的な成果についてそれぞれをどのように評価し、どのように事業に適用していくかについて記述する。

ソフト的な成果は、報告書、データベース、経験や知見を有する人材などの形態でNUMOに提供される。こういった成果を入手した後は、対象となる分野の外部専門家の協力を得ながら、その信頼性、事業への適用性、NUMOによる追加検討の必要性などの評価を行う。評価の結果、何らかの追加検討が必要と判断された場合は、NUMO自らが主体となって適切な措置を取る場合もあるが、基盤研究開発機関に追加ニーズを提示することにより事業への適用性の向上を図る場合も考えられる。

一例を挙げると、安全評価を実施する上で重要な役割を果たす熱力学データや収着・拡散など核種移行に係るデータベース(7.3.4.1参照)はJAEAが中心となって開発を進めているが、事業に適用するには、NUMOが対象とするサイトの地質環境や人工バリア構成などを考慮した上で、個々の核種について、外部専門家の協力を得て適用性の検討を実施する。その結果、何らかの追加検討

が必要と判断された場合には追加試験を実施するなどにより追加データの取得を行うが、その際には十分な知見を有する信頼性の高い機関に依頼することを基本とし、当該分野における知見を有する国内外の幅広い機関を対象として追加検討の依頼を行う。

一方、ハード的な技術にかかわる成果に関しては、対象とする技術分野の外部専門家の意見を聞きながら、基盤研究開発として実施された内容の信頼性評価を行い、また NUMO が対象とするサイト環境や処分場設計に対してどの程度適用性があるのかを評価する。その上で、必要な追加検討や実証の必要性について検討を行う。

(ii) NUMO による技術の実証

すでに述べたように、地層処分事業の実施に必要な技術は、必要となる段階までに確実に整備し、重要な技術についてはその信頼性や適用性などを実証によって確認する必要がある。実証は、①実サイトでの適用に先立ち、あるいは並行して国外の地下研究所や地上の研究施設などを利用して実施するもの（オフサイトで実施する実証）と、②実サイトの実際の地質環境下において当該技術の適用性や信頼性を確認するもの（実サイトで実施する実証）という二つを段階的に行うことを基本とする（表 3.2.3-1）。

基盤研究開発機関が実施する研究開発は、主として地層処分を対象とする地質環境が確定していない段階において、多様な地質環境や幅広い処分場概念を想定して進められる。また、実サイトでのサイト調査などが開始された後でも、基盤的な技術の実証などが、必要に応じて基盤研究開発機関が有する施設で行われる場合もある。

一方、NUMO はサイト固有の地質環境や処分場概念などに基づき、より絞り込んだ技術の実証を行う。これらは、事業目標の達成に向けて、実際のサイトで使用する技術の適用性を確認すること、各事業段階で行う技術的な判断の妥当性や信頼性について確認すること、具体的な品質保証項目を検討する基礎情報とすることなどを目的として実施する。

表 3.2.3-1 実証プログラムの分類とその特徴

分類	オフサイトで実施する実証	実サイトで実施する実証
目的	<ul style="list-style-type: none"> 整備された技術を体系化し、実サイトでの適用前に、その実用性を確認する 各事業段階を的確に進めるために用いる技術そのものに関する知見や技術的な判断にかかわるノウハウを得る 	<ul style="list-style-type: none"> 実際のサイトにおいて、使用する技術の適用性確認を行う 各事業段階で行う技術的な判断の妥当性や信頼性について確認する 事業の品質保証の一つの方策とする
実施場所	<ul style="list-style-type: none"> 既存の地下空間 国外の地下研究所 地上の研究施設など 	<ul style="list-style-type: none"> 実際のサイトの地上施設、地下施設
備考	<ul style="list-style-type: none"> 電中研横須賀地区にてサイト調査・評価技術の実証を実施中 	—

精密調査地区選定段階（概要調査の段階）および処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）の前半（地上からの調査の段階）では、地質環境の調査・評価技術に着目した実証を展開する。これ

らの段階での実証の主な目的は、信頼性の高い地質環境モデルの構築を指向したものであり、処分場概念の構築や安全評価に提供する情報として、地質環境をどこまで理解できているかを段階的に確認していくことである。そのためには、信頼性の高い調査技術と、さまざまなデータを解釈・統合化して地質環境モデルを構築する技術が必要であり、これらを実サイトでの作業に先立って実証しておく必要がある。選定されるサイトの地質環境は空間的な不均質性を有しており、それはサイト固有であることから、評価の空間スケールや時間軸を設定した上で、それらを適切に考慮するためになされるさまざまな「技術的な判断」の信頼性についても、併せて確認していくことが重要である。

NUMO と電中研の共同研究として実施してきた「実証研究」（近藤ほか，2011）は、NUMO がこれまで概要調査の実施に向けて整備してきた体系的な調査・評価技術の適用性を確認すること、そしてサイト調査を実施するための管理技術の整備を図ることを目的としている。ここでは、電中研横須賀地区の研究所敷地内におけるボーリング調査を中心に、文献調査、地表踏査、地上物理探査などを実施してきた。この実証研究を通して、サイトの地質環境などの条件を考慮して、すでに整備された多数の技術の中から最適な概要調査技術を選定・適用していくための「技術的な知見」や、概要調査を推進する上で必要となる「技術的な判断にかかわるノウハウ」を蓄積することができた。また、今後は、概要調査を的確に計画・推進するための技術的な知見（知識）などの蓄積を目的として、国外の地下研究所などで行われる原位置試験に参画していく予定である。

処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）の後半（地下調査施設での調査の段階）では、地下調査施設の建設を通して、処分場地下施設の施工にかかわる実証を展開する。また、完成した地下調査施設では、人工バリアの搬送・定置などの工学技術の実証を行い、模擬廃棄体を用いた再取り出しの技術実証などについても、必要に応じて実施する。これらの工学技術の実証の主な目的は、設計要件を満足する人工バリアシステムなどが十分な品質を持って構築できることを確認することであり、また搬送や定置に用いる設備や作業手順などの実用上の問題点を明らかにし、それを設計や運用方法の改良に反映することである。これら工学技術の実証の成果は、事業許可申請に用いる技術情報の信頼性向上にも役立てることができる。

人工バリアの搬送・定置技術の実証は、事業許可以降、操業段階の開始前まで適宜繰り返し実施し、技術の改善に反映するとともに、運転員の訓練にも役立てる。また、閉鎖段階の開始前までに地下施設の埋め戻し技術の実証を適宜実施し、その信頼性を高める。

（4） 技術開発ロードマップ

3.2.2.2 に述べた安全確保ロードマップで規定した各段階の目標達成に必要なとされる技術のうち、既存の技術レベルを分析し、「技術の開発や実証」が今後求められる項目を対象に、必要とされる段階までにどのように準備していくかに関して「技術開発ロードマップ」として取りまとめ第4章に示した。技術開発ロードマップは、開発が必要とされる技術分野を、①適切なサイト選定と確認、②適切な工学的対策、③地層処分システムの安全評価、④事業期間中の各段階の安全性の四分野に分けて示しており、さらにそれら全体をまとめたものを「技術開発ロードマップ概要版」として示している。

3.2.3.3 方策2：技術に関する品質保証の的確な実施

(1) 地層処分における品質保証の考え方

品質保証は、品質に関するマネジメント規格として一般的な JIS Q 9000:2006 (ISO9000:2005) では次のように定義されている。品質保証 (quality assurance) とは「品質要求事項が満たされるという確信を与えることに焦点を合わせた品質マネジメントの一部」であり、品質管理 (quality control) とは、「品質要求事項を満たすことに焦点を合わせた品質マネジメントの一部」、さらに品質マネジメントとは、「品質に関して組織を指揮し、管理するための調整された活動」とされている。さらに、その注記においては、「品質に関する指揮および管理には、通常、品質方針、品質目標、品質計画、品質管理、品質保証および品質改善が含まれる」とされている。

この定義によると、品質保証とは、顧客の持っているニーズや期待に応え、顧客に信頼感を与える製品およびサービスを提供していくための一連の活動とされている。

原子力施設に関連する品質保証の規定には、IAEA GS-R-3 (安全要件) (IAEA, 2006b)、社団法人日本電気協会の技術規程「原子力発電所における安全のための品質保証規程」JEAC4111-2009 (民間規格) (日本電気協会, 2009) などがある。また、最近、放射性廃棄物の処分に関する品質マネジメントシステムの指針として、IAEA より GS-G-3.4 (安全指針) (IAEA, 2008) が発行されているが、いずれも ISO9000 シリーズとの関係を明確にしている。

地層処分事業における IAEA の安全基準では、品質マネジメントへの主要な要求事項として、次のような事項が記載されている。

■ 実施主体に事業の各段階でのセーフティケースを構築すること。

(例) 各段階でのセーフティケースには、次のようなものが求められる

- ① サイト特性と処分概念固有の安全性の確認
- ② サイト特性を考慮した処分場オプションの選定
- ③ サイトの適格性判断への支援
- ④ 許認可申請への透明性・追跡性の確保

■ 処分場を要求された品質で構築するだけでなく、閉鎖後の長期の安全性も考慮した品質の確保を要求すること (安全と品質を統合したマネジメント)。

■ 個々の作業の特徴と相互の関連を考慮すること。

■ モデルやデータベースを検証したり、確認するプロセスを含めること。

■ サイト調査の追跡性の確保と性能評価、安全評価など作業プロセスにおいて認識できるように不確実性を文書化すること。

地層処分事業の品質マネジメントに関する法的な事項では、「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第一種廃棄物埋設の事業に関する規則」の第 46 条から第 52 条に品質保証への要求事項が規定されている。この要求事項を満たす民間規格として、JEAC4111 がある。JEAC4111 は、日本国内の原子力分野における最も知られている品質マネジメントの民間規格であり、原子力安全・保安院は、この規格が「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」第 7 条の 3 から第 7 条の 3 の 7、および「研究開発段階にある発電の用に供する原子炉の設置、運転等に関する規制」第 26 条の 2 から第 26 条の 2 の 7 にそれぞれに規定する要求事項 (品質保証計画・組織を定め、計画、実施、評価、改善を継続して行うこと) を満たす規格であることを明確にしている。また、第

二種廃棄物埋設事業に係る品質保証に対しても、JEAC4111 に基づく品質マネジメントシステムを事業所の実態に即して構築し、これを定めた品質保証計画を保安規定の一部として記載することを求めている。この JEAC4111 は、ISO9001 を基本として原子力発電所への適用を考慮して修正したものであり、IAEA の改訂版 GS-R-3 との比較も行っており、その類似性も示されている。

地層処分事業の品質保証に関しては、事業許可取得の建設・操業の段階から JEAC4111 が適用されることになるが、サイト選定段階から JEAC4111 を準用することが適切と考える。

(2) 品質保証への取り組み

NUMO では ISO9001:2000 に準じて、初期の段階の主要業務である技術文書の作成（各種技術報告書の作成）に対して品質マネジメントシステム（以下、QMS という）を構築し運用している。この品質マネジメントは、各種技術文書とそれらに含まれる情報が、統一的な考え方にに基づき各々の情報の重要度に応じて、適切な品質レベルを満足して作成・維持されることを管理することに重点を置いている。

現時点では、事業実施に向けた技術開発が主体であるため ISO9001 に準じた品質マネジメントシステムとしているが、事業の実施段階ではほかの原子力施設で使用実績が豊富な JEAC4111 に準拠したシステムに移行し、運用していく予定である。

現在の NUMO の品質保証システムでは、技術文書の管理に関して、文書の種類と重要度に応じたランクを三分類に分け、管理すべき文書などを明確にしている。特に重要な技術文書に対しては、主に次の内容が記載された「品質計画書」を作成し、完成までのプロセスを管理する（図 3.2.3-5）。

- ・ 成果品の品質目標，要求事項
- ・ 業務の実施体制
- ・ 実施手順，実施工程
- ・ レビュー者，レビュー方法および時期
- ・ 外部レビューの必要性
- ・ 不具合発生時の対応方法

NUMO では、科学的知見の最新性や技術的な判断の客観性を確保するために、外部専門家によるレビューを重視している。現在、NUMO が設置しているレビューの組織として、国内外の専門家による委員会（技術アドバイザー国内委員会（以下、DTAC という）、技術アドバイザー国際委員会（以下、ITAC という）など）があり、年数回実施し、技術業務のレビューを受けるとともに、重要な技術資料についても審査を受けている。このほかにも、対象とするテーマに応じてアドホックな専門レビューチームを構成してレビューを受けている。また、各種学会への論文投稿、技術報告会や国際専門家会議などの開催、国内外関係機関との技術協力、国際共同研究への参画などを通じた情報収集・発信活動や国内外の専門家との意見交換などにより、知識や判断の客観性を高めるよう努めている（Chapman et al., 2009）。

IAEA 安全指針 GS-G-3.4（IAEA, 2008）においても、地層処分のように長期にわたる事業期間中に技術開発による知識の拡充が行われ、それが順次事業に反映されていくような活動における品質マネジメントでは専門家によるレビュー（ピアレビュー）が有効な方法であることが示されている。

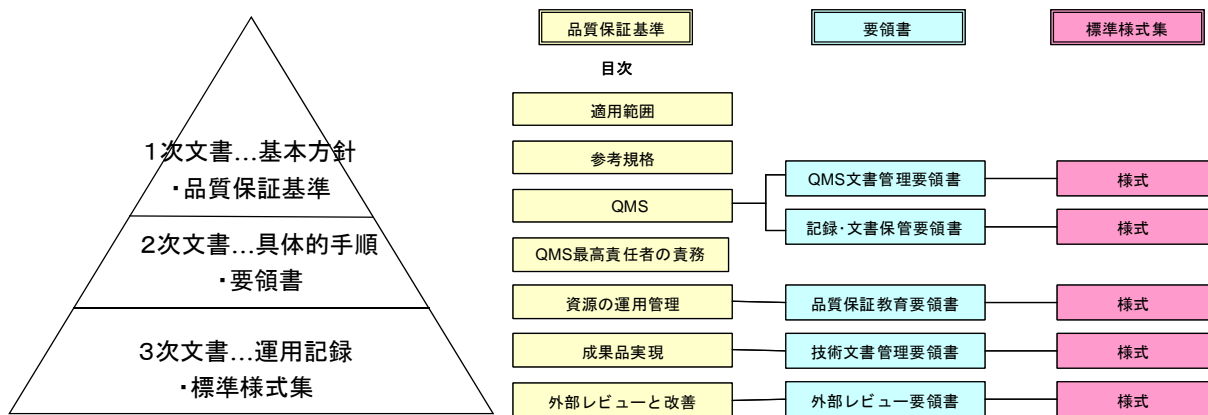


図 3.2.3-5 QMS 文書の階層構造および基準、要領書および標準様式集の構成

NUMO は、文献調査の実施に当たっては、以下の点に留意して品質マネジメントを行う。

- ・ 文献調査の開始前に調査計画書を策定する。
- ・ 概要調査地区選定の判断は、信頼性の観点から十分に品質が確保された文献情報に基づいて行う。
- ・ 文献情報の品質を判断する基準を規定する。
- ・ 品質マネジメントを支援するツールを整備する。

品質マネジメントを支援するツールの例としては、文献情報の整理を目的としたデータベースである地質環境データ管理システムや、文献情報から判断に用いる情報を整理する際の情報の追跡性を確保するためのシステムである文献調査システムフローが挙げられる。また、要件管理システムにより、法定要件への適格性の判断や付加的考慮事項に基づく総合評価結果を踏まえた、概要調査地区の選定にかかわる意思決定の記録と追跡性を確保する。

NUMO の掲げる段階的かつ柔軟な事業推進の考え方に基づいて、品質マネジメントにかかわるシステムも、技術の進展や法定要件、社会環境などの変化に応じて、業務体制を含めて段階的に改善を図りつつ、整備拡充を進めていく。当面、精密調査地区選定段階（概要調査の段階）に向けては、JEAC4111 の準用を意識したシステムの構築を進める。こうしたシステム作りにおいては、

- ・ 安全評価に用いるシナリオやモデル、データの検証にかかわる品質保証
- ・ サイト調査・施設設計・安全評価の統合化における作業の連携に関する品質保証
- ・ 他機関の研究開発成果の取り込みに関する品質保証

などに特に留意して整備作業を進める。

今後、段階的に整備拡充していく品質マネジメントの適切な運用を図るためには、個々の技術者を育成するとともに、業務体制を整えることが不可欠である。とりわけ内部監査やレビューなどは、第三者の視点を確保することが重要であり、実施部門から独立性を有する部門で実施できる体制を整えていくことも視野に入れて検討していく。

3.2.3.4 方策3：NUMOの組織および国内外協力体制の整備

NUMOは、わが国の地層処分事業を安全かつ着実に遂行していくために必要な要員を計画的に確保・育成する。NUMOが実施主体として社会的信頼を獲得していくためには、技術的にも高い信用度を得ることが肝要であり、モラルの高い技術集団を形成していく必要がある。

また、地層処分事業は幅広い分野の専門知識を必要とする事業であり、JAEAなどの基盤研究開発機関とは技術移転も含め、緊密に連携しながら事業を推進していく。

地層処分は原子力を利用している多くの国に共通の課題であり、国際的に協力して課題解決に取り組んでいる。そのため、NUMOは協力協定などを通じて必要な技術情報の交換や共同研究などを通じて技術レベルの向上に努めると同時に、わが国で得られた知見の積極的な公開などを通して国際的にも貢献するよう努める。

以下にNUMO自体の組織や人材の確保・育成に加え、国内外の関係機関との協力体制について述べる。

(1) 人材の確保・育成・技術継承

地層処分事業は約100年程度にわたる長期事業であり、その組織の整備においては、長期的な視点から事業を支える人材を確保・育成していく必要がある。事業の最盛期には100名を超える技術者が必要と見込まれ、地質学、土木工学、原子力工学など広範な専門分野の知識が必要であるが、事業各段階の業務の内容や量、必要とする技術的専門性などを見積もり、将来の技術業務の実施体制を検討している。

NUMOは、2000年に設立されて以来、地層処分事業の分野や発電所の建設などの大型プロジェクトの経験を有する出向社員を中心に業務を実施してきたが、事業の継続性を考慮して、2007年から職員の中途採用を開始した。また、2010年からは新卒採用も開始し、事業の進展に伴い順次プロパー職員の割合を増加させていく計画である(図3.2.3-6)。なお、中途採用者は、一般企業や研究機関において地層処分に関連する知見や業務経験を有し、即戦力となる人材を中心に採用してきている。

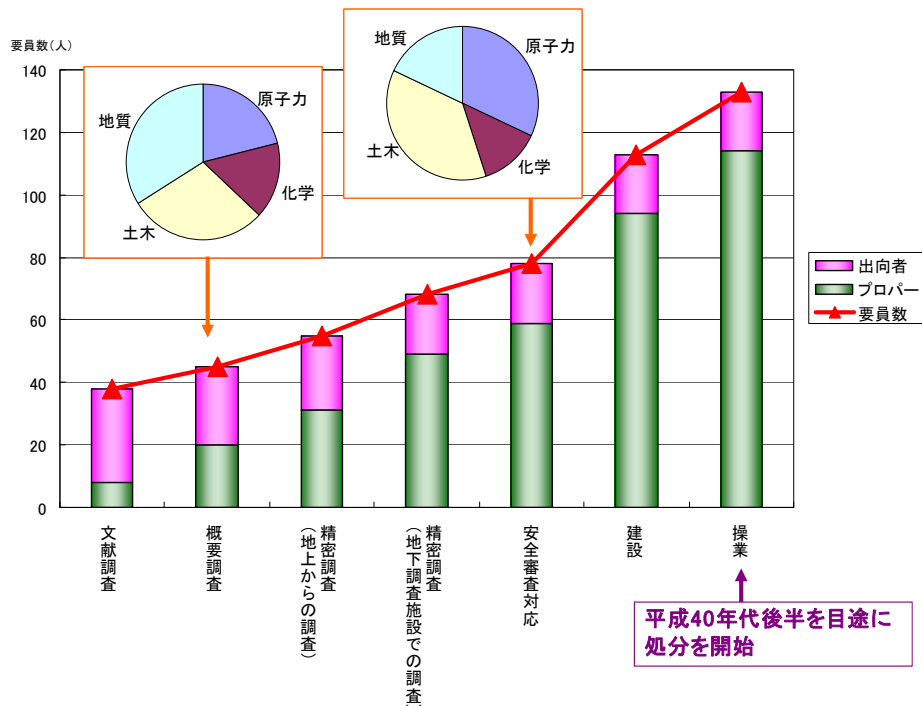


図 3.2.3-6 事業期間中の技術要員見通し

人材の育成に関しては、新卒で採用された職員には、地層処分の専門技術者として、それぞれの専攻・専門分野に関連が深い専門知識・技能の修得させることを考えている。また、専門分野以外の技術分野についても知識を修得する機会を積極的に設け、広範な知識を持たせるようにし、併せて、事業の推進に必要なプロジェクト管理技術の修得やコミュニケーション能力にも重点を置き育成する。このため、講義形式の座学のみならず、設計・性能評価演習や地質巡検、基盤研究開発機関などへの出向により専門知識・技能の向上を図ることも計画している。地層処分事業では国際的な協力関係も重要であることから、ITC (School of Underground Waste Storage and Disposal) などの海外の研修機関における研修を実施しているほか、海外実施主体への派遣や共同研究などを通じた人材交流も計画しており、国際的にも活躍できる人材の育成にも努める。

長期間の事業を実施する間には、数回の世代交代があると見込まれるため、世代間での技術継承についても検討が必要である。そこで、人から人への技術継承を円滑に行うために、組織の年代構成の適正化にも配慮するとともに、技術継承に有効な支援ツールの整備にも取り組んでいる。支援ツールとして、将来世代が過去の重要な技術・情報や意思決定の経緯などの情報を追跡できるような機能を、要件管理システムに搭載しているほか、設計図書などの技術情報のデータベース化と管理システムの導入も検討している。

(2) 国内外の関係機関との協力体制の整備と技術移転

地層処分の実施には、多岐にわたる科学技術分野の知見が必要とされるため、NUMO がすべての知見を独自で保有するのではなく、国内の関係機関と協力して、適切な役割分担のもとに事業を進めることとしている。具体的には、3.2.3.2 に述べたように、地層処分の技術開発では、NUMO が技術開発ニーズを提示し、国内の関係機関と連携して効率的に技術開発を進めている。また、技術開発以外にも、事業全般に関する情報交換や共同研究を実施するために、JAEA および電中研とは個

協定を締結しており、情報交換や共同研究を実施している。

これらの技術協力協定の枠組みの整備だけでなく、基盤的な技術開発が終了したものについては、基盤研究開発機関などから NUMO に速やかに技術移転を図り、事業に反映する。例えば、技術情報については、技術報告書や学术论文などの文献、さまざまな材料特性データベース、解析コードなどの譲渡などが挙げられる。最近では、JAEA を始めとする基盤研究開発機関が協力して、これまでの基盤研究開発の成果やデータベースを統合化するためのプラットフォームとして、知識マネジメントシステムの開発を進めている（梅木、2006）。このような取り組みは、技術移転の円滑な促進に資するものと期待できる。

技術者の長年の経験などに裏付けられた技術ノウハウに関しては、完全な文書化が容易ではなく、このような無形の技術的ノウハウをいかに移転するかも課題とされている。その一部については、知識マネジメントシステムなどに採録されると期待されるが、同時に NUMO としては、技術は人を介して組織に蓄積されていくとの基本的考えに立ち、基盤研究開発機関において性能評価や地質環境調査評価技術などの開発や計画管理に携わってきた研究者や技術者などの NUMO への長期出向や転籍により人材確保に努めている。また、前述のように、NUMO の技術者を基盤研究開発機関などに派遣することで技術移転を促進することも計画している。

また、実務的な分野において多くの経験を有している民間企業の知見も有効に活用することを考えており、民間企業が地層処分分野における固有のノウハウを蓄積・維持できるよう協力体制を構築していくことが重要である。そのためには、民間企業がそれぞれの得意分野での知見を維持し、長期にわたる事業期間中にわたって事業を支えていける環境を構築していくことも重要である。

例えば、スイスの実施主体 Nagra、スウェーデンの実施主体 SKB、フィンランドの実施主体 POSIVA などでは、事業に必要な知見を有する企業を地下研究所における活動や、サイト調査などを通して戦略的に育成してきており、事業の実施主体の技術力を支える柱として機能させている。NUMO においても、技術的なサポートを提供する民間企業が専門分野を強化することができる環境を作り出すことが重要であり、委託の発注方法について、具体的な方策を国や電気事業者と調整しながら検討していく必要があると考える。

放射性廃棄物の処分は、国際的に連携して取り組むべき課題でもあることから、海外の実施主体との協力体制の構築も重要である。NUMO は、11 カ国・12 機関から構成される EDRAM (International Association for Environmentally Safe Disposal of Radioactive Materials, 放射性物質環境安全処分国際協会) に加盟し、地層処分事業に関する情報交換を行ってきているほか、これまで、各国の実施主体である POSIVA (フィンランド)、Nagra (スイス)、SKB (スウェーデン)、U.S.DOE (アメリカ)、ANDRA (フランス)、NDA (イギリス) と、技術協力協定を締結している (図 3.2.3-7)。U.S.DOE、Nagra、SKB、POSIVA とは、すでに個別の地質調査や工学技術の分野で共同研究を実施しているが、今後、処分施設建設地選定段階に実証試験を実施することなどを見据えて、スウェーデンのエスポ岩盤研究所を活用した国際共同研究プロジェクトにも参画する予定である。また NUMO の運営方針にのっとり、IAEA や OECD/NEA といった国際機関の活動にも積極的に参加してきている。

EDRAM（放射性物質環境安全処分国際協会）加盟機関

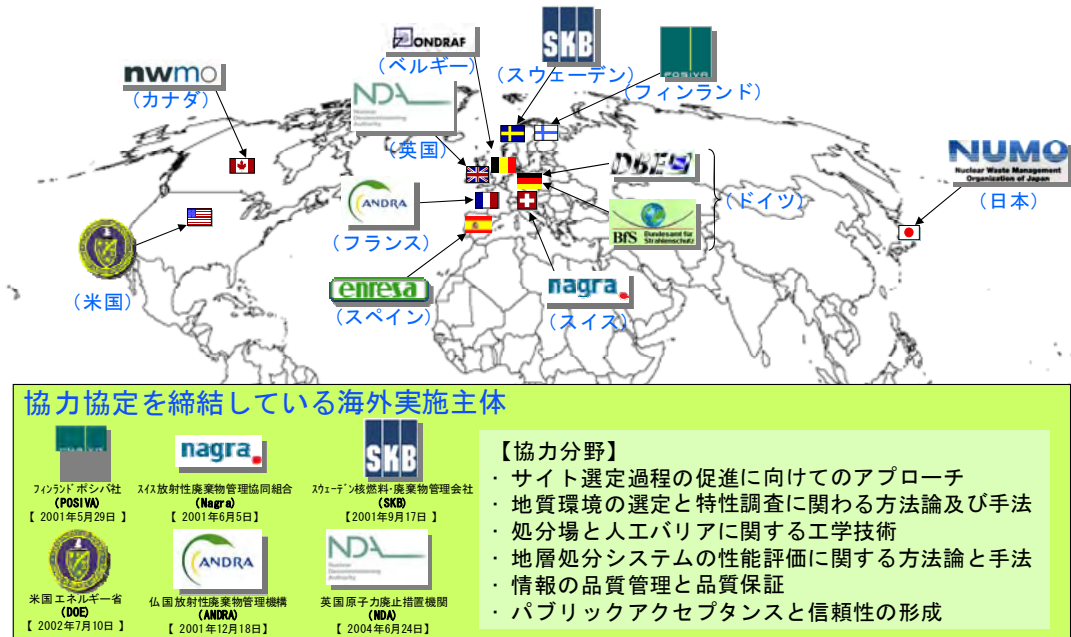


図 3.2.3-7 地層処分事業の国際的な協力

これらの共同研究を通じて、海外の地質調査や地下研究所などで培われた技術などを修得するだけでなく、職員自身も海外の処分事業の進め方、事業を取り巻く環境の相違、処分施設建設地選定までの経緯などを海外の技術者などから直接学ぶことにより、国内業務では得られない経験と知識を得ることが期待できる。

また、原子力をすでに導入していたり、現在原子力の導入を検討・予定しているが、まだ十分に放射性廃棄物の処理・処分について検討を実施していない国々に対して技術支援を実施することも検討していく。このような活動により、海外でわが国の原子力関連技術の幅広さを認知してもらうとともに、海外での技術支援活動が、わが国の地層処分技術の信頼性を国内で向上させることにもつながると考える。

以上のように、国内外の機関との協力体制を最大限に生かして、事業の推進や技術移転、職員の育成に役立てると同時に、わが国で蓄積された技術を用いて原子力分野において後発の各国の原子力事業にも貢献していくことを検討する。

3.2.4 方針3「安全性への信頼感醸成へ向けた技術的な取り組み」

3.2.4.1 方針3に関する基本的な考え方

地層処分事業は、安全上考慮すべき期間が極めて長期にわたることなどから、世代間倫理の問題なども絡んだ、社会的にこれまで経験したことのない事業である。このため、事業を実施するに当たっては、サイト選定から処分場閉鎖後の事業廃止に至るまでを段階に分け、それぞれの段階の節目ごとに地域住民の理解を得ながら、一歩ずつ前に進めていくことが重要である。

段階的に地層処分事業を進めていく過程において、事業を次の段階へ進めるとの意思決定はサイトを有する地域の自主的な判断を尊重し理解を得た上で行う。段階的に事業を進める上でそのような意思決定を行うためには、技術的に信頼性の高い判断材料を適時、地域住民や国民に情報提供して

いくことが重要であり、常にそのような情報公開を行っていくことは組織としての信頼性向上にも繋がると考えている。処分場計画の説明において、安全性の説明は地域住民にとって最も関心のあ
る事項であると考えられることから、技術情報を提供したり、地域住民が不安に感じている事項に
応えるような技術的活動を行うなどの取り組みによって安全な地層処分が実現可能であることを示
していくことが重要である。安全性の提示に当たっては、①国や NUMO の安全確保の計画が妥当
なものか、②事業を次段階に進める上での安全性に係る意思決定の根拠は妥当か、③その根拠のベ
ースとなっている技術の信頼性は十分なものか、④そのような技術的作業と判断を行う組織・マネ
ジメント体制（NUMO およびその支援体制）は確立しているか、⑤それを審査する国や規制上の法
律や仕組みは整っているか、などの情報を積極的かつ透明性をもって提供していく。

情報提供に当たっては一方的な説明に陥ることなく、対話活動や意識調査などにより相手の求め
ている情報を把握し、文書以外のさまざまな方法も活用して情報提供を行っていくことが重要であ
り、このような取り組みが安全性への信頼感醸成へ向けた活動の第一歩である。

長期的な安全性に関しては、有識者や規制者を対象にした説明とは異なり、安全解析手法や詳細
な結果などの専門的な説明ではなく、地層処分システムの安全機能について、天然バリアや人工バ
リアの閉じ込め性能を各自が身近な経験から感覚的に理解できるような説明を実施したり、天然の
類似現象（ナチュラルアナログ研究）からの情報との対比で説明するなど、日常生活への近接性に
配慮して説明を行っていく。また、地域住民への説明においては、長期的な安全性の説明もさるこ
とながら、日常生活面への影響などに配慮した説明が必要と考える。

また、規制者や中立的な有識者の判断が住民理解の参考となる場合も考えられるので、そのよ
うな有識者への情報提供も視野に入れて検討する。

このように、信頼感の醸成のための技術的説明の役割は、①双方向の対話活動を通じて、さまざ
まな側面からの地域住民の関心が高い事項（安全性）に答える、②次段階へ進むための意思決定に
係る十分な技術情報を提供し、説明する、③組織や体制、法的な枠組みに関する整備情報を合せて
提供することによって、事業者が考える事業の技術的实施内容に対する地元自治体や地域住民の理
解を得ることである。

ここでは、地域住民や国民への技術的な情報提供や対話活動の取り組みに関する方策を三つに分
けて説明する。

- 1) 事業の各段階における意思決定にかかわる情報提供
- 2) 安全性や技術の信頼性にかかわる日常的な情報提供と対話活動
- 3) 将来世代が適切な判断を行うための環境整備

これら三つの方策について、ロードマップを作成し第4章に示した。地層処分の安全性や技術に
対する信頼感醸成を行うためにはさまざまな活動を実施していく必要があるが、本報告書では技術
的な視点から、どのような取り組みを行い、どのような情報を提示するかについて記述した。

以下に、それぞれの方策の背景や今後の取り組み方について述べる。

3.2.4.2 方策1：事業の各段階における意思決定にかかわる情報提供

地層処分事業においては、サイト選定段階から事業の廃止に至る間に、いくつもの重要な意思決
定が行われる。こうした重要な意思決定を行い事業を円滑に進めていくためには、それぞれの段階

の意思決定に必要な情報を関係者に的確に提示し、理解を求めていくことが重要である。

サイト選定段階においては、最終処分法で求められている「法定報告書」を縦覧し、説明会を開催する。報告書に対する地域住民などからの意見については、NUMO はこれを意見書として受け、関係都道府県知事や市町村長に対し、意見の概要およびその意見についての見解を取りまとめて送付する。また、国は関係都道府県知事や市町村長の意見を聴取し、これを十分に尊重して地層処分事業を進めていくことになっており、その仕組みはすでに最終処分法で制度化されている。

このように、サイト選定段階における意思決定に、関係する自治体や地域住民の意見が反映される仕組みになっているが、意思決定を円滑に進めるためには、そのための判断材料となる情報を的確に関係者に提供していく必要がある。NUMO は、2002 年の公募開始時と 2007 年の最終処分法改正後に、地層処分事業の概要紹介や文献調査への応募手続きなどを周知するための「公募関係資料」を全国の市町村および都道府県に送付した。文献調査に基づく概要調査地区選定のための基準としては、最終処分法で規定されている条件のほか、原子力安全委員会から「概要調査地区選定時に考慮すべき環境要件」がすでに示されている。NUMO は、これらを元に事業者としての視点から自主基準として「概要調査地区選定上の考慮事項」を作成し「公募関係資料」の一部として公表しており、さらにその技術的根拠を取りまとめた技術報告書も公表している (NUMO, 2004b)。このような事業者としての自主基準については、その後の段階の調査に関しても、調査開始に先立って順次公表していく。

サイト選定段階において意思決定を行う際に、地層処分の安全性に対する信頼性は、大きな影響因子である。公募開始に当たって NUMO は、「処分場の概要」を「公募関係資料」の一部として提示し、その背景となる情報を詳述した技術報告書も公表した (NUMO, 2004a)。NUMO は、上述した法定報告書の作成の際には、その段階で得られた情報に基づく処分場の設計や安全評価に関する情報をまとめ、それらを安全規制当局に提示していくとともに、関係する自治体や地域住民にもできるだけ分かりやすい形で提示する。

3.2.4.3 方策 2 : 安全性や技術の信頼性にかかわる日常的な情報提供と対話活動

地層処分の安全性や技術の信頼性について関係者の理解を深めることは、3.2.4.2 に述べた意思決定を円滑に進める上で不可欠であり、特に関係する自治体や地域住民に対し、日ごろからの確でわかりやすい情報の提供と対話活動を進めていくことが重要である。そのために、事業期間中に NUMO が実施する技術的取り組みから得られる情報を提供し、対話活動などを通して、地層処分事業に対する理解を促進する必要がある。一方、地層処分の安全性への地域住民や国民の不安や疑問については、心配要因の調査・分析を行い、それに基づいた信頼感醸成活動を続けていくことが重要である。また、そのような活動結果を社会科学的な手法で分析し、信頼感醸成活動にフィードバックしていく仕組み作りを行う。

(1) 技術情報の提供

NUMO は地層処分の安全確保に向けてサイト調査・評価、工学的対策、安全評価といった対策を段階的に実施していくが、その過程で得られる技術情報を地域住民や国民にタイムリーに提供していく。例えば、概要調査地区選定段階（文献調査の段階）では文献リストや調査結果などを公表する。精密調査地区選定段階（概要調査の段階）では物理探査やボーリング調査などの実施状況を地域住民などに公開するとともに、現場で得られた情報をホームページや地元説明会などを通して適

宜紹介していく。処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）の後半では、地下調査施設を建設し、処分対象の母岩の中で地質環境の調査や実証試験などを実施していくが、これらの実施状況や得られた成果を公開することで、地層処分事業に関する理解増進に役立てる。また、事業許可取得後、処分施設の建設段階や操業段階では、安全や工程管理上で問題にならない範囲で、現場を公開し、得られた情報は適宜ホームページなどを用いて公開していく。

これらの日常的な情報提供活動には NUMO の技術系職員が直接携わることが重要であり、そのために日ごろから技術的な内容を一般の方々に説明する訓練やコミュニケーション能力の向上に努める必要がある。また、一般の方々と直接対話を行うことは、NUMO の技術者にとっても、一般の方々が地層処分についてどのような不安を感じているかということを知る良い機会になると考える。

(2) 地層処分の安全性への理解醸成支援策

一般の方々にとって地層処分の安全性を理解することは容易でないという基本的な認識があり、そうした中で信頼感醸成活動を進めるためには、さまざまな工夫をする必要がある。そこで、NUMO は、以下の方策によって信頼感を醸成していく。

(i) 安全性に関する心配要因の分析

NUMO は、高レベル放射性廃棄物に対して不安を感じる項目と、不安の程度について調査を 2005 年に実施し、地層処分に関する一般の方々の認識の分析を行った。その結果を図 3.2.4-1 に示す。不安の程度が大きい項目として「誰が責任を持つのか」、「埋めた土地の管理」など、地層処分の管理面に関するものが挙がっている。これらの心配要因を解消するには、単に技術的な安全性を訴えるだけでは不十分であり、管理体系や制度面で地域が安心できる体制がどこまで整っているかも丁寧に説明していく必要があることを示唆している。

NUMO は、今後も地層処分にかかわる一般の方々の関心事項、不安・懸念事項、理解の進展度合いなどについて、社会科学的な手法も取り入れた調査・分析を適宜行い、学際的な知識や経験を活用して信頼感醸成に有効な技術的取り組みとしてどのようなことをなすべきかについて検討を進めていく。また、実際にサイト調査などの現地での活動の開始後も、地域住民が地層処分事業の何に対して、不安に思っているのかを適切に把握し、不安解消に向けて真摯に対応していく。

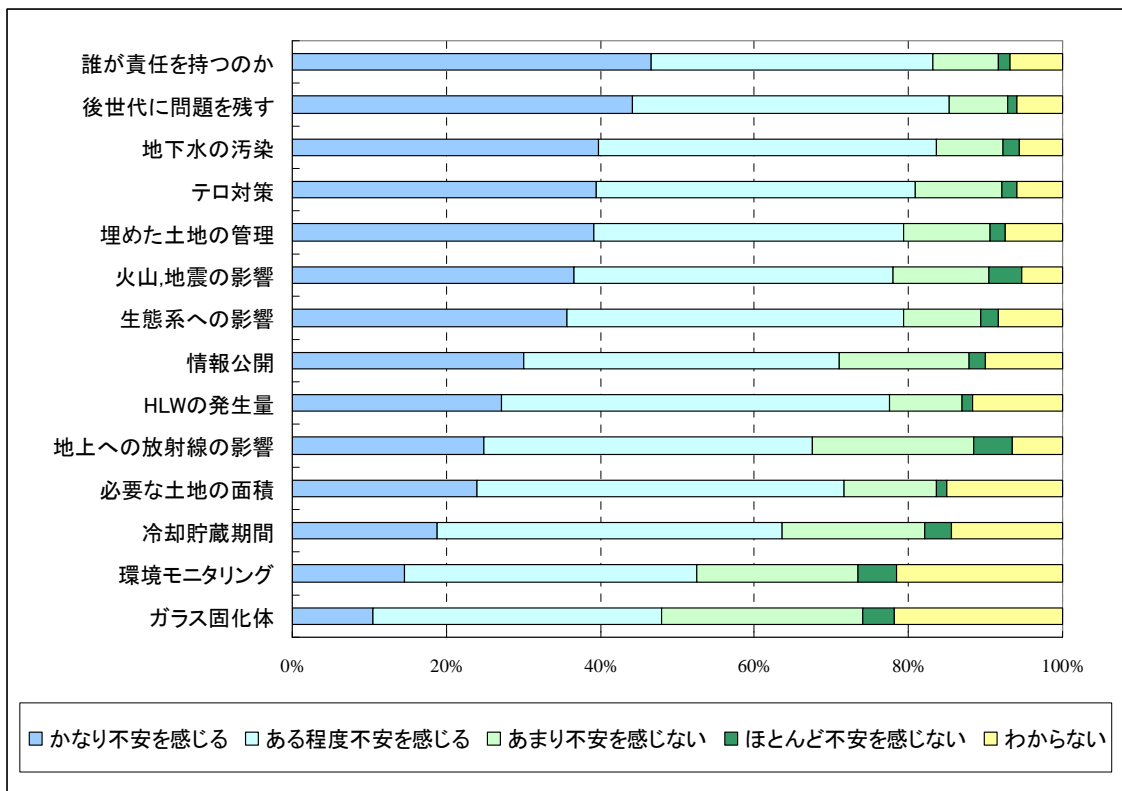


図 3.2.4-1 高レベル放射性廃棄物についての不安（一般の方々，回答者数約1,400名）

(ii) ナチュラルアナログの活用

地層処分想定される現象と類似した自然または考古学的な現象，すなわちナチュラルアナログの活用は，地層処分にかかわる種々の現象の理解を助ける手段として有効である。例えば，人類初の飛行が鳥の飛翔に学んで実現したように，自然から多くを学び，さまざまな自然現象のプロセス解明により技術的な問題に対する解決策を見出すことによって技術は発展してきた。地層処分もまた，放射性廃棄物を長期的に閉じ込め隔離する方法として人類が自然から学んだ解決策の一つとすることができる。

地球上には，アフリカのガボン共和国オクロ鉱床やカナダのシガーレイクウラン鉱床など，地層が10数億年もの長い間，放射性元素を閉じ込めてきた例が存在する（Miller et al., 2000）。また日本にも，東濃鉱山ウラン鉱床（岐阜県土岐市）や，約100万年前に堆積した泥質岩層の中に埋まった火山噴出物に含まれた「火山ガラス」など，地層処分想定する数十万年以上の間大きな変化が生じなかった事例が存在する（PNC, 1998）。これらの例に共通しているのは，母岩を中心とした地質や地質構造が長期的に安定で，地下深部の地下水の流れが遅く，還元的な環境が安定的に維持されてきた場所であるということである。こうした環境であれば，物質は極めて長期にわたり，安定的に保持されるという実例を自然界が示している。

一方，人工バリアシステムも，1900年以上前の古代ローマ時代の釘や，弥生時代に作られたと考えられる吉野ヶ里遺跡で発見されたガラスの管玉などがそのままの姿で出土したことを做ったものである。

こうしたナチュラルアナログは，地層処分期待する各バリアの安全機能の長期成立性を説明する論拠として利用することが可能で，NUMOでも，広報誌やホームページで，いくつかのナチュラル

ルアナログの事例を紹介してきた。長期的に安定した地層を選び、天然に存在する安定した材料で工学的なバリアを構築する地層処分とは、端的に言えばナチュラルアナログと同じ状況を作ろうとするものであるということができる。

また、ナチュラルアナログの活用の仕方についても、それを単に漠然とした安全性の例証として利用するだけでなく、そこで観察される現象の条件や範囲を明確にした上で、安全機能に関連する現象と科学的に結び付けた説明を行っていくことが重要である。

文献調査への応募があった場合または国による申し入れを受諾した場合、調査対象となる地域の地質環境が処分施設建設地として適するのかどうかという点が中心的な課題となる。その地域の代表的な地形や地質、出土品などに関して観察される現象の中には、長期の地質安定性や物質保持能力の直観的な理解に役立つ可能性があるものもあるので、ナチュラルアナログ事例の収集、整理に取り組むことも大切である。

(iii) 実証試験などの公開

処分技術を体感できるような実証試験や疑似体験設備の積極的な公開は、地層処分技術への信頼感醸成の面で、有益と考えられる。

こうした観点から、国やJAEAを中心に、「実規模設備」(原環センター, 2009, 2010)や「バーチャル処分場」(三菱総合研究所, 2009, 2010)など、国民が地層処分事業の概念や安全性を体感できるような設備やIT技術を駆使したシステムの整備が進められている。NUMOは、国やJAEAなどと協力し、こうした設備の見学などにより相互理解活動を推進していく。そのほかに、NUMOや基盤研究開発機関が地上の研究施設で各種工学実証試験などを行う場合にも、それらを適宜公開し、信頼感醸成に役立てる。

地下研究所やそこで行われる調査・研究の公開は、地層処分事業への体感的理解を深め、地層処分への信頼感を醸成する上で効果的であり、先行する諸外国の実施主体もそのような活動に力を入れている。わが国ではJAEAが岐阜県の瑞浪市と北海道の幌延町で深地層の研究施設の建設を進めており、一般にも公開している。NUMOはJAEAと協力し、メディアや地層処分に関心を持つ一般の方々を対象に、これら地下施設の見学会などを通じて、地層処分事業への理解拡大に努めていく。またNUMOは、国外の地下研究所を活用して、工学技術の原位置試験などを行うことも検討中であり、それらが実現すれば、実施状況や成果を広く公開していく予定である。

処分施設建設地選定段階(精密調査の段階)では、NUMO自らが地下調査施設の建設・運用していくことになるが、安全性に十分配慮した上で可能な限り、一般に地下施設やそこでの調査状況を公開する。また、地下調査施設完成後は、その一部を活用した模擬廃棄体を用いた搬送・定置などの実証試験が行われることになるが、それらの状況なども一般に公開し、多重バリアシステムなどの理解促進に活用することを検討している。

長期安全性の理解のための一方策として、地層処分システムの各バリアに期待する安全機能が実際に見て確認できるような実験や、人工バリアの変質や核種の移行の予測結果を示す動画の公開なども検討していく。図 3.2.4.2 にそのようなPR施設のイメージ図を示す。

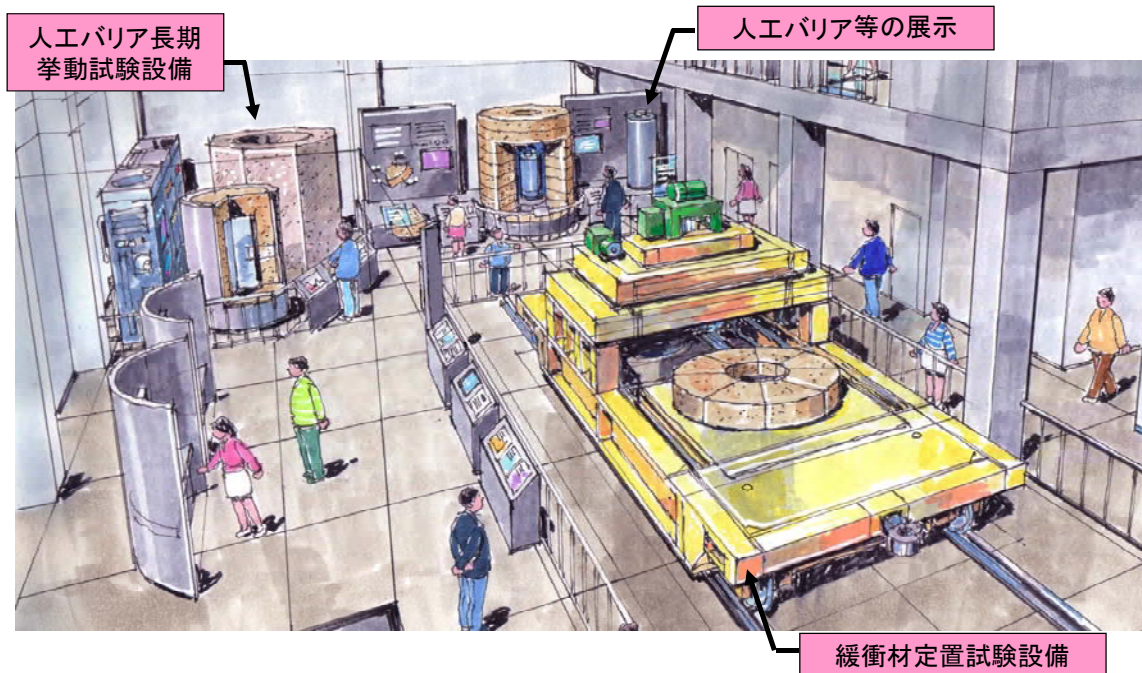


図 3.2.4-2 地層処分の概念や安全性を体感できる施設
(出典：原環センター，2009)

3.2.4.4 方策3：将来世代が適切な判断を行うための環境整備

地層処分事業においては、現世代が今の時点で、100年近い将来の事業の在り方を固定的に決めてしまうのではなく、将来世代がその時点における諸条件の中で一定の決定をする余地を残しておくことも重要である。

将来世代が行うことになる最も重要な意思決定は、処分場の閉鎖に関する決定である。地層処分は、可能な限り受動的な手段により安全を確保することを目標としており、NUMOは、処分場閉鎖に至るまでの間に、基本的にはその後の人間の能動的管理の必要性をなくすことを目指して、安全確保上必要なすべての対策を講じていく。しかしながら、すべての廃棄物の埋設が終了した後、いつの時点でどのような条件が整えば処分場の閉鎖を判断するのか、閉鎖後に何らかの管理を残すのか否か、残すとすればどのような管理をいつまで残すのか、といったことは、NUMOや国のみならず、関係自治体や地域住民にとっても重要な事項である。

閉鎖の可否を判断する上で、操業前から閉鎖完了に至るまでの間の継続的なモニタリングデータの収集と公開は、多重バリアシステムが期待する機能を果たしていることへの信頼感を得る有力な手立てとなり得る。そのようなモニタリングを継続しつつ、NUMOは処分場閉鎖に至るまでの間、廃棄体の回収可能性を維持する（モニタリングと回収可能性については3.3参照）。閉鎖措置計画の認可申請時点で、NUMOは、操業中に蓄積した記録や情報、閉鎖措置の具体的条件などを取り込んだ、より包括的なセーフティケースを構築し、モニタリングなど能動的管理に頼ることなく閉鎖後の長期安全性が担保できることを示す。一方、閉鎖後のモニタリングや回収可能性維持の要否についても、国際的な動向を含むさまざまな視点からの検討を続けることは、将来世代が適切な判断を行うための環境整備として重要である。

処分場閉鎖に向けて将来世代が適切な意思決定を行うためには、上述のような技術的な準備を着実に進めるとともに、NUMO自身が関係自治体や地域住民との間で相互に強い信頼関係を築いてい

く必要があり，そのためにも前述した日常的な情報提供や対話活動を重要視していく。

3.3 地層処分事業にかかわる個別課題に対する NUMO の考え方

地層処分は、天然の地層という不均質で大きな空間領域を利用し、事業期間が 100 年程度といった長期にわたるため、技術的、社会的な不確実性が大きく、事業を取り巻く環境が変化する可能性がある。これらに適切に対応していくためには、事業全体を俯瞰しつつ、状況に応じて柔軟に課題に対応する必要がある。そのような考え方を、安全確保に向けた三つの方針の中で述べてきたが、さまざまな不確実性への対応を体系的に行うためには、リスクマネジメント的手法を取り込んだ事業運営が有効であると考えられる。

また、地層処分は、多重バリアによる受動的安全性を担保できる地層処分システムを構築することを目指しているため、人の管理による安全確保から、多重バリアシステムによる受動的な安全確保に移行するという意思決定が重要である。受動的な安全確保に移行するという意思決定とは、処分場の閉鎖措置の開始を判断するということであり、その時点でサイト調査から建設、操業の段階で得られた情報のすべてを総合的に判断し、受動的な安全性を十分担保するための要件が充足されたとの判断を行うことになる。そのような判断を行うに当たっては、処分場のモニタリング、可逆性や回収可能性、処分場の閉鎖措置といった課題をどのように考えるのが重要である。

本節では、以下の課題についての現在の NUMO の考え方や取り組みを紹介する。ただし、これらは、今後のわが国における地層処分の制度化や国際的な議論の動向を勘案しつつ対応をさらに具体化していく必要がある。

- ・ 地層処分事業におけるリスクマネジメント
- ・ モニタリング
- ・ 可逆性と回収可能性
- ・ 処分場の閉鎖

3.3.1 地層処分事業におけるリスクマネジメント

地層処分事業は 100 年程度にわたる長期の事業であり、事業期間中の技術面、社会面におけるさまざまな不確実性に適切に対応していくことが求められる。安全性を確保するには、安全性を損ねるようなさまざまな状態を想定し、そのような状態に陥ることを未然に防止し、万一そのような状態になった場合の影響を許容範囲内に抑える手立てを講じておく必要がある。そのような取り組みは、リスクを特定、分析、評価して、対応策を策定するというリスクマネジメントの考え方と共通する。

一般的にリスクマネジメントは、①組織が置かれている外部状況および内部状況の確定、②リスクアセスメントとして、リスク特定、リスク分析、リスク評価の実施、③リスク対応の実施、④ステークホルダーとのコミュニケーション・協議の実施とモニタリング・レビューによる改善、というプロセスで行われる。また、こうしたプロセスを効果的に運用するための組織の運用管理体系を設定することも必要であり、①リスクを運用管理するための枠組みの設計、②リスクマネジメントの実践、③枠組みのモニタリングおよびレビュー、④枠組みの継続的改善、などの要素から構成される。

リスクマネジメントの国際規格 ISO31000 (Risk management—Principles and guidelines) は 2009 年 11 月に発行された。ISO31000 ではリスクの定義を「目的に対する不確かさの影響」と定め、特定分野に特化することなく、一般的な概念が示されている。ISO31000 の特徴は、リスクマネジメント

のための汎用的なプロセスと、そのプロセスを効果的に運用するための枠組み、それらを継続的に改善していく体系が示されていることである（図 3.3.1-1）。

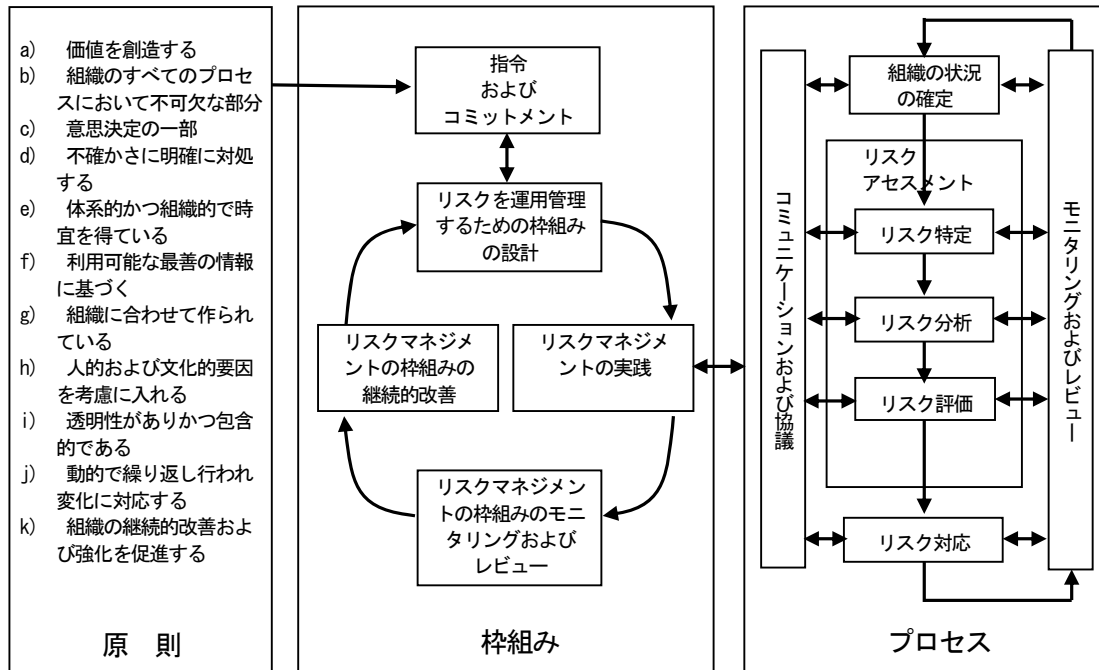


図 3.3.1-1 ISO31000 におけるリスクマネジメントの原則、枠組み、プロセスの関係（日本規格協会，2009 を一部修正）

NUMO では、閉鎖後長期の安全確保、事業期間中の安全確保を目標として地層処分事業を推進していく。これらの安全確保を脅かす要因に対するリスクマネジメントは、地層処分事業におけるリスクマネジメントの重要な要素である。また、100 年程度にわたる事業期間中には技術面、制度面、社会面においてさまざまな変化が起こることが予想され、さまざまな事業的なリスクも存在する。以下に、現時点で NUMO が考えている地層処分におけるリスクマネジメントに対する考え方を述べる。

閉鎖後長期の安全性の確保は、サイト調査や工学設計などにより状態を設定し（状況の確定）、FEP（Feature Event Process）に基づいてシナリオの構築を行い（リスク特定）、数学モデルやデータを用いた安全解析を実施し（リスク分析）、安全基準と比較し（リスク評価）、サイト調査を実施したり、工学的対策を再度検討する（リスク対応）、というプロセスを繰り返し実施することで達成される。この手法は ISO31000 で規定されているリスクマネジメントのプロセスと対応しているため、従来の安全確保策を的確に実施することにより、リスクマネジメント的な考え方も包含した取り組みが実施可能と考える。

事業期間中の安全に関しては、調査や建設などに伴う労働災害や火災、操業・閉鎖時の廃棄体の損傷による作業従事者の被ばく事故など、さまざまなリスクを抽出し、それらの発生頻度や影響度の評価を踏まえ、設計の改良や保安管理体制の改善を進めることになる。そうした活動のベースとして ISO31000 に基づいたリスクマネジメントの考え方を適用していく。

地層処分事業は、社会的にも技術的にも不確実性を含む事業であり、外部条件の変化に対して適

切にリスクマネジメントを実施していく必要がある。事業期間中の災害や想定外の事象による安全性の低下は実施主体である NUMO の信頼を著しく低下させ、事業の継続に大きな支障をもたらすことになる。NUMO として事業運営をどこまで ISO31000 に基づいたリスクマネジメント管理体系として整備していくかは、今後検討すべき重要課題である。

3.3.2 モニタリング

地層処分事業では、調査段階から閉鎖確認までの期間、安全確保や環境保全などの観点から、それぞれの段階においてさまざまな種類のモニタリングを実施する。モニタリングは、事業が正常に行われていることを確認する重要な手段であると同時に、その情報を国民や地域住民に公開することは、事業に対する信頼性を高めていく上で不可欠の事項である。なお、処分場の閉鎖は、安全面からはモニタリングなどの能動的管理を必要としない、受動的に安全な状態を実現することが前提条件となるが、閉鎖確認から事業廃止までの期間については必要に応じてモニタリングを継続する。NUMO が行うモニタリングはその目的に基づき、以下の四つに分類される（操上ほか、2010）。

- ・ 閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリング
- ・ 放射線安全の確保に関するモニタリング
- ・ 一般労働安全の確保に関するモニタリング
- ・ 周辺環境の保全に関するモニタリング

表 3.3.2-1 に各モニタリングの概要を示す。

表 3.3.2-1 モニタリングの分類とその概要

目的		モニタリングの分類	概要
閉鎖後長期の安全確保		閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリング	事業許可申請、事業許可以降の安全レビュー、閉鎖措置計画の認可申請、閉鎖措置の確認などにおいて、閉鎖後の長期的な安全性が担保できることを示すために実施するモニタリングである。閉鎖後長期の安全性を直接モニタリングにより示すことはできないため、安全評価で仮定された現象などが仮定どおり起こっていることを事業期間中のモニタリングにより確認することを基本とする。ベースライン状態を把握するためにサイト調査段階から行う必要がある。
事業期間中の安全確保	放射線安全の確保	放射線安全の確保に関するモニタリング	保安のための一環として放射線防護の確認のために行う放射線モニタリングであり、環境放射線モニタリング指針に基づいて実施する。また、管理区域におけるモニタリングは、現行の原子力施設周辺において実施されている放射線モニタリングを参考にして実施することができるが、地層処分事業では、管理区域が事業の進展とともに順次移動していくことを考慮して計画、実施する必要がある。
	一般労働安全の確保	一般労働安全の確保に関するモニタリング	坑道内の作業安全や良好な作業環境を確保するために、温度、湿度、酸素量、ガス、粉塵などを継続的に測定する。土木、鉱山、原子力などの分野における現行の法規制あるいは基準類などに準拠して実施可能である。
	周辺環境の保全	周辺環境の保全に関するモニタリング	周辺環境の保全の一環として行うモニタリング。事業の実施による周辺環境への影響を予測、評価するため、大気質（粉塵）、気象、騒音・振動、河川・地下水の水圧・水質、動植物などの項目について継続的に測定する。保全措置の効果を適宜評価し、必要があれば保全措置の改善もしくは追加措置の検討に資する。

このうち、地層処分事業固有のモニタリングは、閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリングである。「高レベル放射性廃棄物等の地層処分にかかわる安全規制について（報告書）」（総合資源エネルギー調査会、2008）では、事業許可以降 20 年を超えない期間ごとに行う定期的な評価（安全レビュー）において長期的な安全性が担保される見通しであることを確認するために、モニタリングに一定の役割を期待している。

しかし、モニタリングによって事業許可申請時の安全評価で仮定されるシナリオ全体の確かさを直接的に確認することはできない。従って、モニタリングでは、安全評価で仮定された個別の現象のいくつか（例えば緩衝材の飽和現象）について、それが実際に起こっていることを確認したり、地質環境モデルに含まれる特定の現象（例えば地下水位の遷移状況）の予測の妥当性を確認することなどによって、補完的に安全評価の妥当性を示すことが検討されている（操上ほか、2010）。

地下水シナリオ（JNC、1999）においては、地質環境（天然バリア）中の核種移行に関するパラメータとして、移行距離、亀裂の開口幅分布、亀裂密度（亀裂性媒体の場合）、母岩の透水性、有効間隙率、動水勾配、実効拡散係数、分配係数などが挙げられている。これらのパラメータの多くは地下施設の掘削などの影響をほとんど受けないと考えられ、調査段階における地質環境調査などで得られた情報を地質環境モデルとして固定的に設定する。一方、動水勾配など一部の水理的条件は地下調査施設や地下施設などの建設により影響を受けるが、地下施設の閉鎖以降には掘削前の状態に徐々に近づくと考えられる。そのため、モニタリングによって安全評価において仮定している将来的な水理的条件に近づきを確認することは、安全評価の妥当性を示す上で重要である。水質などの地化学的な条件についても、建設・操業時に外気が地下施設に持ち込まれることにより処分場近傍の母岩が酸化条件になることが予想されるが、地下施設閉鎖後に徐々に還元環境に戻ることが安全評価で仮定されている。このような観点から代表的な地下水水質についてもモニタリングによりその変遷を確認することが重要である。

地層処分事業で実施するモニタリング項目は、サイト条件が定まった段階でサイト固有の特性や安全評価からのニーズなどを考慮して決定する予定である。その際には、安全性に係る重要な現象やパラメータを抽出し、サイト調査で取得するか、あるいはモニタリングで状態の変遷を確認する必要があるかなどを整理して検討する必要がある。また、計測機器の耐久性や精度などに対する技術的実現性（既存技術および開発中であるが実用の見込みがある技術）、ステークホルダーからの要望、モニタリングを実施することによる環境・バリア性能への影響、経済性などを考慮することが重要である。

モニタリングは地下環境などの時間的変遷に関する情報を取得する行為であり、変化を把握するためには IAEA（2006a）が推奨するように、基準となる状態（ベースライン）を把握しておくことが重要である。そのため、地下調査施設の建設による擾乱を受ける前の地質環境、周辺環境、放射線の状態を「初期ベースライン」と定義し、初期ベースラインを把握するために、地下調査施設の建設前からモニタリングを開始することとする（操上ほか、2010）。なお、サイト調査段階においては、サイト調査とモニタリングを統合的に計画、実施、評価する必要がある。

モニタリングは、事業の開始から閉鎖措置の確認まで（必要性が認められれば事業廃止まで）の長期間にわたって実施されるものであるが、その間、モニタリングに対する要件の変化やモニタリング技術の進展が考えられる。従って、IAEA（2006a）が推奨しているように、モニタリングプログラムは将来の要件の変化や技術の進展に対応できるよう、定期的あるいは適切な時期に見直されることが、柔軟な事業の推進において重要である。また、適切なメンテナンス、情報・品質管理、

異常が検出された場合の適切な対応、情報公開を行うことが重要である。

閉鎖後の安全性はモニタリングを含む閉鎖後の能動的な制度的管理に依存してはならないということが地層処分の基本原則の一つであるが、一方で社会的要請などによりそのような制度的管理がある一定期間適用される可能性もある（IAEA, 2011）。

NUMO としては、処分施設の安全性が十分に示され、人間が関与した安全確保から受動的安全性に移行してよいという判断がなされた段階で閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリングは技術的役割を終えると考えている。ただし、閉鎖措置実施中は、閉鎖に係るモニタリングを実施することを考えている。一方、閉鎖後のモニタリングの在り方については、将来閉鎖の時点で、社会的要請などを考慮して、将来世代が判断すべき課題と考えており、事業期間中に将来世代が検討・判断するために必要な記録を残していくことが重要である。

3.3.3 可逆性と回収可能性

可逆性は事業の段階を実施してきた方向とは逆の方向に戻すことの可能性という意味で用いられている言葉であり、回収可能性は廃棄物の回収という可逆性を具体化する方策の一つと位置付けられる。

地層処分では、数万年以上という長い期間を対象として放射性廃棄物を隔離、閉じ込める必要があり、一定期間人間が関与した状態で安全性を担保し、最終的には地層の持つ機能を生かして受動的安全性に移行するという考え方が取られている。ただし、地層処分事業の実施には 100 年程度といった期間が必要で、さらに処分場の閉鎖後の期間まで考慮すると、多くの世代間にまたがる倫理問題などを考慮する必要があり、地層処分の在り方について考える際には、事業の可逆性と廃棄体の回収可能性をどこまで担保すべきかということが一つの重要な論点となる。

こうした議論は、深地層に放射性廃棄物を処分する方策が選ばれた 1970 年代にすでに行われており（OECD/NEA, 1977）、地中に埋設した廃棄物は技術的には回収することは可能であるとの基本的な認識が共有されている。なお、制度的には廃棄物の回収可能性については、米国の規制主体である U.S.NRC が、ユッカマウンテンにおける処分事業に対する規制文書である 10CFR Part63 の中で、廃棄物定置後の性能確認とその結果の U.S.NRC による評価が完了するまでの間の回収可能性の維持を義務付け、その期間は別途 U.S.NRC が指定しない限り廃棄物定置開始から 50 年と定めたのが最初である（U.S.NRC, 2001）。

事業の可逆性に関する議論は、IAEA において倫理的な課題として行われた（IAEA, 1995）。そこでの議論では、「放射性廃棄物の処分については、われわれの世代の責任としてその解決策を示さねばならないが、処分事業を段階的に進めるための意思決定では、将来世代の意思が反映できるように準備しておくことが重要である」とされた。この議論を受け、1999 年に米国で行われた可逆性を含めた処分事業の進め方の議論では、「Adaptive Staging Approach: 処分を取り巻く環境の変化に適用できる段階的な進め方」が推奨された。この考え方では、将来の社会構造や住民意識および技術革新を含めた環境の変化に柔軟に対応できる事業の進め方からさらに一歩進めて、さまざまな選択肢を準備することで、変化に対応するための方策を求めている。その中で、廃棄物の回収可能性も可逆性を具体化する一つの技術的な対応策として位置付けられている。地層処分の可逆性、回収可能性にかかわる最新の動きとしては、OECD/NEA 主催の国際共同研究である R&R プロジェクトが実施され、諸外国の実施主体、規制主体、学識経験者といった幅広いメンバーで議論が行われた。

わが国では回収可能性に関して、国の報告書に以下の記述があり、NUMO が回収可能性に関する

基本的考え方を検討する際の基礎となっている。

- ・ 「処分場の閉鎖に際しては、建設段階及び操業段階に得られたデータを追加し、安全評価の結果が妥当であることの確認を行う。また、その妥当性を確認するまでの期間は、高レベル放射性廃棄物の回収の可能性を維持することが重要である。」高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第1次報告）（原子力安全委員会，2000）。
- ・ 「処分場閉鎖までの間は、不測の事態への適切な対応等のために、廃棄体の回収可能性を維持することが必要と考えられ、事業実施主体の計画においてもこの点を考慮する必要がある。」放射性廃棄物の地層処分に係る安全規制制度の在り方について（総合資源エネルギー調査会，2006）。
- ・ 「国は、事業許可申請に対する安全審査を行い、許可後は基本設計ないし基本的設計方針が適切に反映され維持されていることを確認することから、基本的に廃棄体を回収するような事態が生じることはないと考えられる。＜中略＞埋設事業において、閉鎖までの間は、基本的に廃棄体を回収することは可能と考えられるが、これを安全かつ効率的に実施するために、回収可能性に配慮した設計の採用や具体的な回収手段を検討しておくことが重要と考えられる。」高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について（総合資源エネルギー調査会，2008）。

NUMOは、受動的安全性が確保された地層処分システムを構築するために、サイト調査段階で得られた情報を統合し、安全性が担保できるという確信を持って事業許可の申請を行う。国による事業許可を得た後は、処分場の建設、操業を行い、地層処分施設の構築を行う。処分場の閉鎖に際しては、建設段階および操業段階に得られたデータを追加し、安全評価の結果が妥当であることの確認を行い、閉鎖の判断を行う。閉鎖の判断は、地層処分システムが十分な信頼性を持って構築されたということが確認されたということであり、人間が関与した処分場の管理から受動的な安全性の担保に移行しても良いという重要な判断である。わが国の場合、閉鎖の判断は国によって閉鎖措置計画が認可されるという手続きで行われるが、その際には地域住民を含む幅広いステークホルダーの理解を得た上で閉鎖の判断を行うことが重要であると認識している。

NUMOは、閉鎖措置計画が認可されるまでの間、すなわち地層処分システムが十分な信頼性を持って構築されたということが確認されるまでは、上述の報告書の趣旨に従い廃棄体の回収可能性を維持し、閉鎖措置計画が認可されたのち、計画に基づいて閉鎖措置を行う。この段階では、図 3.3.3-1 に示すように廃棄体を定置した処分坑道はすでに埋め戻されており、処分坑道の端部には処分坑道内に定置したバリア材を保持する目的でプラグが設置された状態である。従って、閉鎖措置とは地下のアクセス坑道や立坑、斜坑など地下空洞をすべて埋め戻し、必要に応じてプラグを設置する作業を意味する。

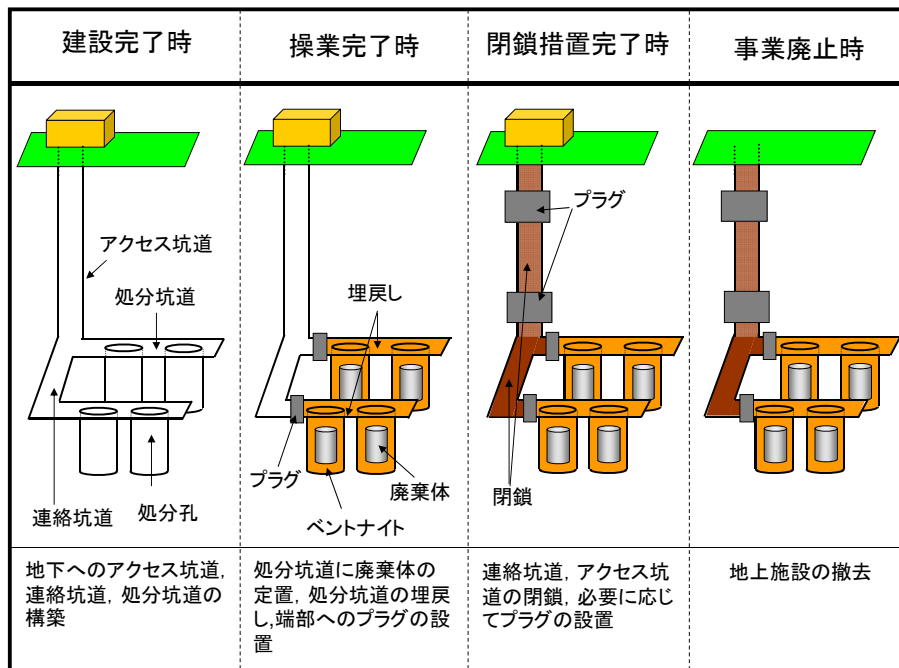


図 3.3.3-1 処分場の建設、作業、閉鎖措置の区分概念図

図 3.3.3-2 に回収可能性とモニタリングに関する NUMO の基本的考え方を示す。閉鎖措置計画認可申請までの期間は、閉鎖の判断を行うために必要なモニタリングを継続し、得られた結果は閉鎖の判断、つまり閉鎖措置計画の認可申請に適用する。閉鎖の判断がなされた段階で、処分場の受動的安全性が担保できるという判断がなされていることになり、閉鎖措置計画の認可以降は閉鎖後長期の安全確保という観点では、モニタリングや回収可能性を維持する必要性はなくなると考えている。ただし、その時点では処分場の閉鎖措置がまだ実施されておらず、受動的安全性を担保するために確実に閉鎖措置を行う必要があり、そのために必要なモニタリングは実施する。万一、閉鎖措置を実施するに当たって安全確保上の問題が生じた場合は、閉鎖措置の一部または全部をやり直す可能性がある。閉鎖措置が完了し、閉鎖確認が行われた後は、安全確保という観点ではモニタリングを継続する合理的な理由はなくなる。ただし、地層処分システムへの信頼感の向上という観点で必要に応じてモニタリングを実施する。

すなわち、NUMO としては、閉鎖措置計画が認可された段階で回収可能性を維持する必要はなくなると考えている。ただし、処分場の安全性以外の何らかの理由により回収の議論がなされた場合には、その時点で検討を行い廃棄体の回収を実施するか否かの判断が行われるべきである。その場合の廃棄物の回収は、鉱山技術などを応用することにより技術的には可能である。

NUMO は、そうした場合にも備え、事業期間中に蓄積した記録や情報などを保存し、将来世代が適切な判断を行うための環境整備に努める。

廃棄体の回収という可逆性に関しては、事業段階の進捗とともに困難になっていくということが OECD/NEA 主催の R&R プロジェクトでも共通の認識となっている (OECD/NEA, 2011)。R&R プロジェクトではそのような考え方を分かりやすく説明するために、図 3.3.3-3 に示す廃棄体の回収にかかわるリーフレットを作成し、事業段階の進行とともに人間が関与した安全確保から受動的な安全確保へと移行していき、同時に廃棄体の回収はより難しくなっていく、回収に要する費用も増大していくという考え方を示している。NUMO としては、このような点を認識し、事業の後戻りを

余儀なくされるような事態にならないよう慎重に事業を推進する。

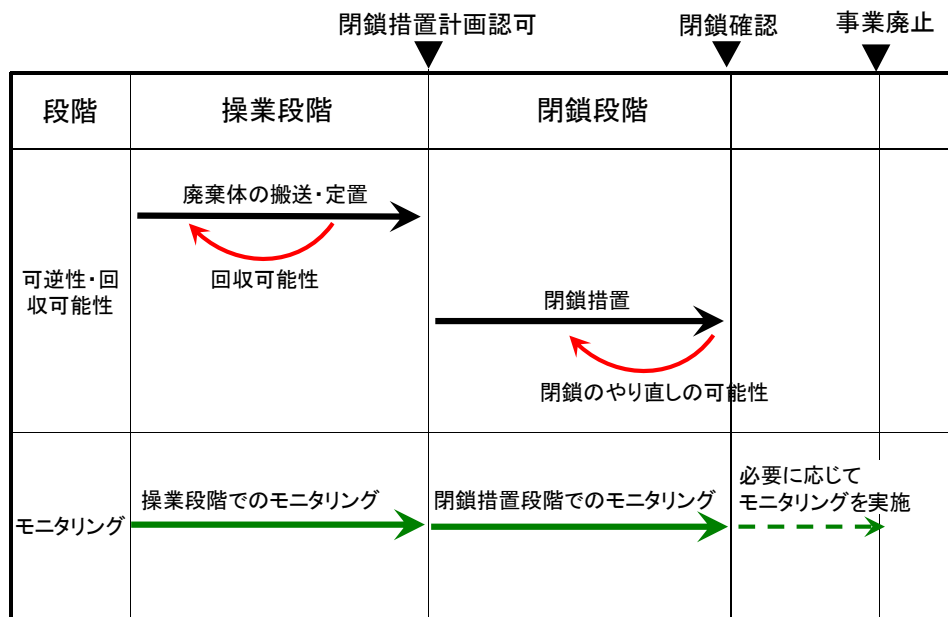


図 3.3.3-2 回収可能性に関する NUMO の基本的考え方

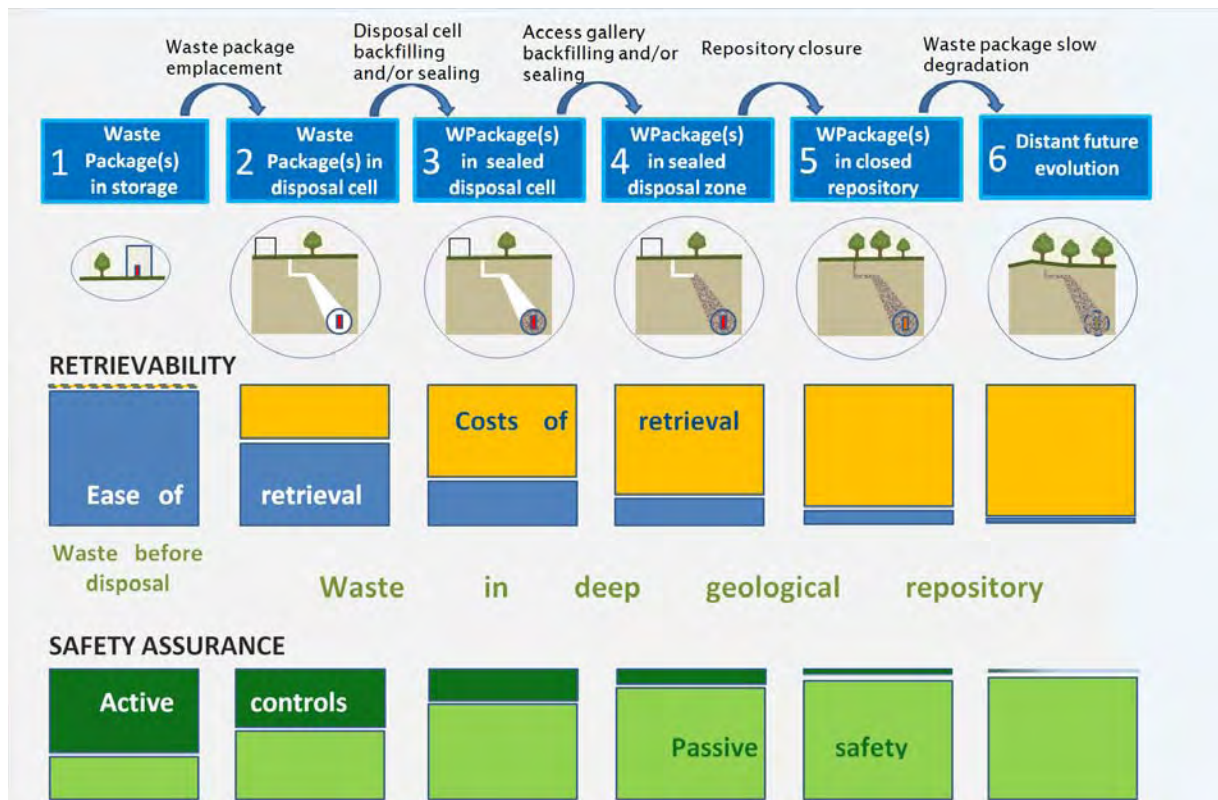


図 3.3.3-3 廃棄体の回収にかかわる R スケール
(出典：OECD/NEA, 2011)

3.3.4 処分場の閉鎖

「処分場の閉鎖」とは、事業期間中の人的な管理に依存した安全性確保から、管理に依存しない受動的な安全性（IAEA, 2006a）に移行する行為であり、長期の安全確保を保証する地層処分システムの完成を意味する。

2007年（平成19年）に改正された原子炉等規制法では、第一種廃棄物埋設事業に関する一連の許認可と検査などの手続きにおいて、実施主体は「閉鎖措置計画」を定め、認可を受けるとともに閉鎖措置終了後は国の確認が必要であると規定されている。処分場の閉鎖とは、認可された基本設計どおりの廃棄物埋設施設の完成、埋設事業の実質的な終了という重要な側面を有している。いったん処分場を閉鎖すると廃棄物の回収には多くの労力や時間が必要となるため、閉鎖措置計画の認可を申請するに当たって、実施主体は、閉鎖後における廃棄物埋設施設の安全性の見通しについて、操業中に実施する安全確認のレビュー結果とともに国内外の最新の知見を集約して安全レビューを行うことが必要である。なお、安全レビューとは、事業の進展に伴い得られるデータや最新知見を踏まえてもなお、廃棄物埋設施設の操業中のみならず閉鎖後も含めた長期的な安全性が担保される見通しがあることを確認することとされている（総合資源エネルギー調査会, 2008）。

また、国は安全レビュー結果をもとに、閉鎖後長期の安全が確保されていることを改めて確認することとなっている（閉鎖措置計画の認可）。NUMOは、このような地層処分の安全確保の特徴を踏まえ、閉鎖措置を事業の進め方の重要な目標として検討し、必要な事項は現段階から準備するという姿勢で取り組んでいくこととする。

処分場の閉鎖措置の具体的な作業は、連絡坑道、アクセス坑道を埋め戻し、必要に応じて坑道が地下水流の短絡流路となることを防止するためのプラグを施工し、関連する諸設備を解体・撤去することである。処分場の建設段階、操業段階、閉鎖段階の区分は図 3.3.4-1 に示したとおりである。建設段階では、地下へのアクセス坑道、連絡坑道、処分坑道の構築を行う。操業段階では処分坑道に廃棄体を定置し、処分坑道の端部にプラグを設置する。実際の処分場の操業時には、パネルごとに建設と操業が並行して実施されることもあり得る（図 3.3.4-1）。すべての廃棄体が処分坑道内に定置され、閉鎖措置計画の認可が得られた後に、前述の閉鎖措置を開始する。

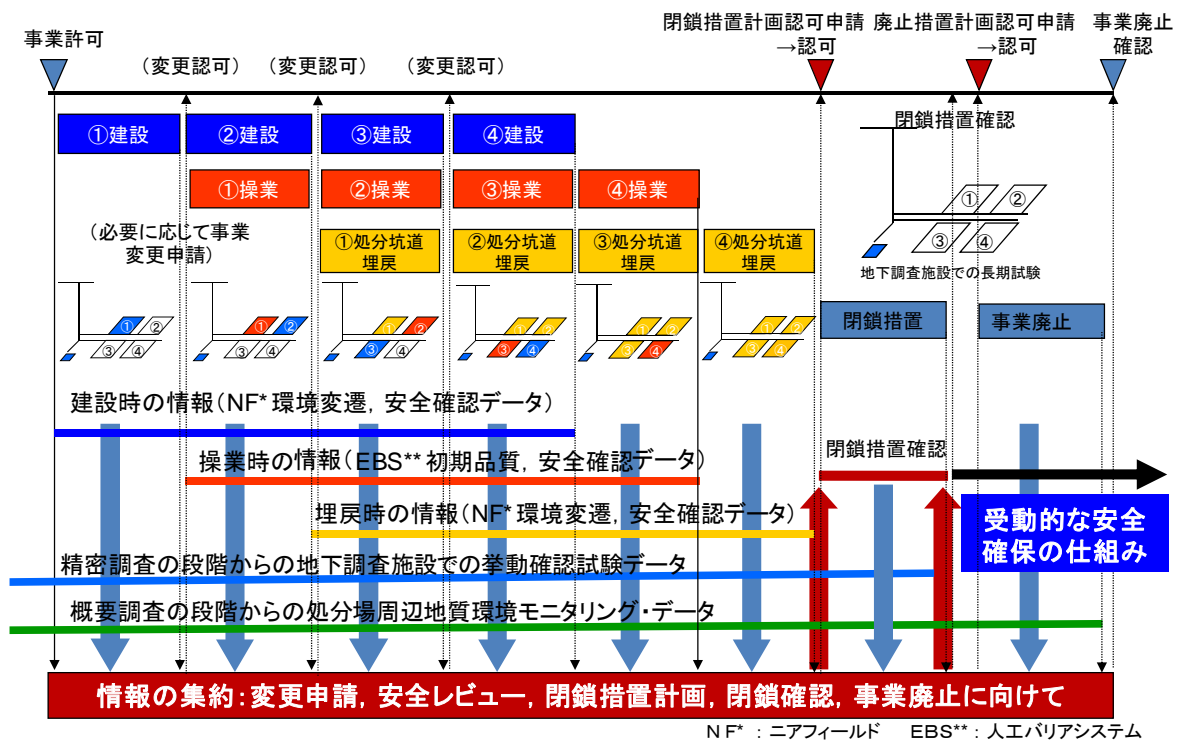


図 3.3.4-1 処分場の閉鎖に向けた技術的な情報の集約

3.3.3 で述べたように、地層処分における閉鎖という行為は人間が管理する状態から、受動的安全性へ移行する段階であるため、閉鎖の判断は、地層処分事業にとって極めて重要である。処分施設は、建設・操業中に実施する定期的な評価によって、閉鎖後に重要となる安全機能を発揮する方法で閉鎖を実施する。また、閉鎖措置は、適切な時期に安全に実施できる計画であることが確認された後でなければ実施しない。閉鎖措置に向けての取り組みとして、NUMO は以下のことを行う。

- ① 閉鎖後長期の安全確保について、三つの安全確保策である、適切なサイト選定と確認、処分場の設計・施工などの適切な工学的対策、そして地層処分システムの長期安全性の評価が確実に実施されていることを確認する。
 - ・ 地質環境の変遷状況が把握できていること：閉鎖措置計画の認可申請において、事業許可申請時に提示した地質環境をそれ以降に蓄積される情報やデータによって確認、あるいは必要に応じて更新する。モニタリングは、信頼性を向上するためのデータを提供する重要な手法の一つであり、適切な運用、情報・品質管理と情報公開を行いながら実施する。また、建設・操業を通じて変動した処分場周辺の地質環境が、閉鎖に伴い安全設計で設定した状態に移行しつつあることを把握する。
 - ・ 建設・操業における工学的対策が技術基準に適合していることを確認すること：安全審査の段階で設定した工学的対策による所定の品質（ここでは、人工バリアの定置品質とその周辺環境の把握）が、操業中の保安検査、施設確認を通じて保証されていることを示す。
 - ・ 最新の知見に基づく安全評価の結果が、放射線防護上の基準値と比較して、問題となる値でないこと：安全評価結果の確からしさは、段階的に取得される情報に基づき準備していくセーフティケースに多面的なエビデンスと安全論拠を集約する。

- ② 廃棄物埋設施設を完成させるために必要な閉鎖のための埋め戻し方法や必要な技術を示す。
- ・ 事業許可申請書に記述された閉鎖措置方法について、閉鎖を申請する段階で十分に信頼性のある技術および計画が準備できている必要がある。そのためには、閉鎖にかかわる技術が、あらかじめ実証などにより実現性が確認されている必要がある。閉鎖にかかわる技術の実証は、処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）で、技術的な実現性の確認を行い事業許可申請書の作成に資するとともに、操業段階の後半の閉鎖措置計画を策定する段階においてより詳細な実証を行うことにより、さらに技術的信頼性を向上させる。また、閉鎖措置にかかわる品質保証活動についても準備を行う。

参考文献

- BFE (2008) : Sachplan geologische Tiefenlager, Konzeptteil (Sectoral Plan for deep geological storage, Concept Part), Bern.
- Chapman, N., Apted, M., Beavan, J., Berryman, K., Cloos, M., Connor, C., Connor, L., Ellis, S., Jaquet, O., Kiyosugi, K., Litchfield, N., Mhony, S., Smith, W., Sparks, S., Stirling, M., Villamor, P., Wallace, L., Goto, J., Miwa, T., Tsuchi, H. and Kitayama, K.(2009) : Development of Methodologies for the Identification of Volcanic and Tectonic Hazards to Potential HLW Repository Sites in Japan, -Summary Report-, NUMO-TR-09-03.
- 中央環境審議会 (2010) : 今後の環境影響評価制度の在り方について (答申).
- Defra, BERR, Welsh Assembly Government and Department of the Environment Northern Ireland (2008) : Managing Radioactive Waste Safely: A Framework for Implementing Geological Disposal, Cm 7386. ISBN 0101738625.
- 電中研 (電力中央研究所)・電事連 (電気事業連合会) (1999) : 高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術.
- 土木学会 (2006) : 精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方, 土木学会原子力土木委員会地下環境部会.
- 原子力安全委員会 (2000) : 高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について (第1次報告).
- 原子力安全委員会 (2004) : 放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について.
- 原子力安全委員会 (2010) : 第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2004) : 平成 15 年度地層処分技術調査等遠隔操作技術高度化調査報告書 (2/2), 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2008) : 平成 19 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書 (第 1 分冊)ー遠隔操作技術高度化開発ー (1/2), 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.
- 原環センター (原子力発電環境整備促進・資金管理センター) (2009) : 平成 20 年度核燃料サイクル関係推進調整等委託費 (地層処分実規模設備整備事業).
- 原環センター (原子力発電環境整備促進・資金管理センター) (2010) : 平成 21 年度核燃料サイクル関係推進調整等委託費 (地層処分実規模設備整備事業).
- 原子力委員会 (2000) : 我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価, 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会.
- 原子力委員会 (2005) : 原子力政策大綱, 平成 17 年 10 月 11 日 原子力委員会決定.
- 放射線審議会 (2010) : 放射性固体廃棄物埋設処分及びクリアランスに係る放射線防護に関する基本的考え方について, 放射線審議会基本部会.
- IAEA (1995) : The Principles of Radioactive Waste Management, IAEA, Safety Series No. 111-F, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2003) : Safety indicators for the safety assessment of radioactive waste disposal, IAEA-TECDOC-1372, International Atomic Energy Agency.

- IAEA (2006a) : Geological Disposal of Radioactive Waste, Safety Requirements, IAEA Safety Standard Series No. WS-R-4, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2006b) : The Management System for Facilities and Activities, IAEA Safety Standards Series No. GS-R-3, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2008) : The Management System for the Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. GS-G-3.4, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2010) : Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Draft Safety Guide DS334, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2011) : Disposal of Radioactive Waste, SSR-5, International Atomic Energy Agency.
- ICRP (1999) : Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publ.81.
- JAEA (日本原子力研究開発機構) (2010) : 平成 21 年度研究開発・評価報告書評価課題「地層処分技術に関する研究開発」(中間評価), JAEA Evaluation 2010-001.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－, 総論レポート, JNC TN1400 99-020.
- 国土交通省 (2008) : 公共事業の構想段階における計画策定プロセスガイドライン, 15p.
- 近藤浩文, 木方建造, 五嶋慶一郎, 長谷川琢磨, 濱田崇臣, 大山隆弘, 鈴木浩一, 後藤和幸, 末永弘, 中田弘太郎, 田中姿郎, 長岡亨, 窪田健二, 土宏之, 三和公, 村元茂則, 河野一輝, 伊藤久敏 (2011) : 高レベル放射性廃棄物等の処分地選定のための概要調査技術に係わる実証研究－地質環境条件に応じた掘削・孔内調査・試験手法の適用性と課題－, 電力中央研究所報告, N15.
- 操上広志, 高橋美昭, 吉澤勇二, 三和公, 赤村重紀, 河野一輝 (2010) : 放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングと初期ベースラインに関する検討, NUMO-TR-10-01.
- Miller, W. M., Alexander, W. R., Chapman, N. A., McKinley, I. G. and Smellie J. A. T. (2000) : Geological disposal of radioactive wastes and natural analogues. Waste management series, vol. 2, Pergamon, Amsterdam, The Netherlands.
- 三菱総合研究所 (2009) : 平成 20 年度核燃料サイクル関係推進調整等委託費 (地層処分概念理解促進事業) 成果報告書.
- 三菱総合研究所 (2010) : 平成 21 年度核燃料サイクル関係推進調整等委託費 (地層処分概念理解促進事業) 報告書.
- Nagra (2002) : Project Opalinus Clay: Safety Report, Nagra Technical Report 02-05, Nagra, Wetingen, Switzerland.
- NDA (2009a) : Geological Disposal－ A Public and Stakeholder Engagement and Communications Strategy.
- NDA (2009b) : Geological Disposal: A Strategy for Sustainability Appraisal and Environmental Assessment, NDA/RWMD/014.
- 日本電気協会 (2009) : 原子力発電所における安全のための品質管理保障規程, JEAC4111-2009.
- 日本規格協会 (2009) : JIS Q 31000:2009 リスクマネジメント - 原則及び指針.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2004a) : 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性－「処分場の概要」の説明資料－, NUMO-TR-04-01.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2004b) : 概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠,－

「概要調査地区選定上の考慮事項」の説明資料一, NUMO-TR-04-02.

NUMO (原子力発電環境整備機構) (2004c) : Proceedings of the International Workshop on Bentonite Cement Interaction in Repository Environments, NUMO-TR-04-05.

NUMO (原子力発電環境整備機構) (2009a) : 公募関係資料 放射性廃棄物の地層処分事業について～公募のご案内～.

NUMO (原子力発電環境整備機構) (2009b) : 公募関係資料 概要調査地区選定上の考慮事項 分冊一2.

NUMO (原子力発電環境整備機構) (2009c) : 公募関係資料 地域共生への取り組み～地域と事業を結ぶために～ 分冊一3.

NUMO (原子力発電環境整備機構) (2009d) : Study on strategy and methodology for repository concept development for the Japanese geological disposal project, NUMO-TR-09-04.

NUMO (原子力発電環境整備機構) (2010) : 地層処分技術開発ニーズの整理, ～精密調査地区選定に向けて～, NUMO-TR-10-02.

OECD/NEA (1977) : Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes, Report by an NEA group of Experts, OECD/Nuclear Energy Agency.

OECD/NEA (1991) : Review of Safety Assessment Methods, Disposal of Radioactive Waste, A Report of the Performance Assessment, Advisory Group of the Radioactive Waste Management Committee, OECD/Nuclear Energy Agency.

OECD/NEA (1995) : Future Human Actions at Disposal Sites, Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories, A Report of the NEA Working Group on Future Human Actions at Radioactive Waste Disposal Sites, OECD/Nuclear Energy Agency.

OECD/NEA (2004) : Post-closure Safety Case for Geological Repositories-Nature and Purpose-, OECD/Nuclear Energy Agency.

OECD/NEA (2009) : International Experience in Safety Cases for Geological Repositories (INSTEC) – Outcomes of the INTESC Project-, OECD/Nuclear Energy Agency.

OECD/NEA (2011) : International understanding of reversibility of decisions and retrievability of waste in geological disposal, OECD/Nuclear Energy Agency.

PNC (動力炉・核燃料開発事業団) (1998) : Fact4, 地層処分研究開発 4.

資源エネルギー庁・JAEA (日本原子力研究開発機構) (2006) : TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画.

資源エネルギー庁・JAEA (日本原子力研究開発機構) (2010) : 高レベル放射性廃棄物及び TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画.

戦略的環境アセスメント総合研究会 (2007) : 戦略的環境アセスメント総合研究会報告書, 19+61+3pp.

SKB (2006) : Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar- a first evaluation, Main Report of the SR-Can project, SKB TR-06-09.

総合資源エネルギー調査会 (2006) : 放射性廃棄物の地層処分に係る安全規制制度のあり方について, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会.

総合エネルギー調査会 (2008) : 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会.

高橋美昭, 北山一美, 竹内光男, 稲継成文, 嘉代東一, 石橋陽一郎, 石黒純一 (2006) : 高レベル放射性廃棄物地層処分事業の概要調査地区選定段階における環境配慮の一考察, 環境アセスメント学会 2006 年度研究発表会要旨集, pp.187-192.

U.S.NRC (2001) : PART-63-DISPOSAL OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTES IN A GEOLOGIC REPOSITORY AT YUCCA MOUNTAIN, NEVADA.

梅木博之, 大澤英昭, 内藤守正, 中野勝志, 牧野仁史 (2006) : 地層処分技術に関する知識管理システムの基本的概念, JAEA-Research 2006-078.

第4章

地層処分事業の段階的な推進

第4章 目次

第4章 地層処分事業の段階的な推進	4-1
4.1 方針の具体的展開（ロードマップ）	4-1
4.1.1 基本的考え方	4-1
4.1.1.1 地層処分事業の段階的な展開と主要なマイルストーン	4-1
4.1.1.2 地層処分事業の展開と各分野間の連携	4-2
4.1.1.3 三つの方針とロードマップの関係	4-3
4.1.1.4 各段階における分野間の連携	4-6
4.1.1.5 各分野の段階間における連携	4-8
4.1.2 方針1の具体的展開（安全確保ロードマップ）	4-9
4.1.2.1 方針1を具体的に展開するに当たっての考え方	4-9
4.1.3 方針2の具体的展開（技術開発ロードマップ）	4-18
4.1.3.1 方針2を具体的に展開するに当たっての考え方	4-18
4.1.3.2 技術開発ロードマップ	4-19
4.1.3.3 分野別の技術開発ロードマップ	4-21
(1) 適切なサイト選定と確認	4-21
(2) 適切な工学的対策	4-21
(3) 地層処分システムの長期安全性の評価	4-22
(4) 事業期間中の各段階の安全性	4-22
4.1.4 方針3の具体的展開	4-26
4.1.4.1 方針3を具体的に展開するに当たっての考え方	4-26
4.1.4.2 信頼感醸成ロードマップ	4-26
4.2 事業中の各段階における実施事項	4-28
4.2.1 サイト選定および安全審査の段階	4-28
4.2.1.1 概要調査地区選定段階（文献調査の段階）	4-28
(1) 実施事項	4-28
(2) 概要調査地区選定上の考慮事項について	4-30
4.2.1.2 精密調査地区選定段階（概要調査の段階）	4-33
(1) 実施事項	4-33
(2) 精密調査地区選定上の考慮事項について	4-34
4.2.1.3 処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）	4-36
4.2.1.4 安全審査の段階	4-40
4.2.2 建設～事業廃止までの段階	4-41
4.2.2.1 建設段階	4-41
4.2.2.2 操業段階（操業期間中）	4-41
4.2.2.3 操業段階（操業の終了・閉鎖措置計画認可申請）	4-42
4.2.2.4 閉鎖段階	4-42
4.2.2.5 閉鎖後～事業の廃止までの段階	4-43
参考文献	4-44

第4章 地層処分事業の段階的な推進

本章では、第3章で提示した方針を地層処分事業の中でどのように展開するかについて、ロードマップとして提示する。

4.1 では、方針1「安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進」に対して安全確保ロードマップ、方針2「信頼性の高い技術を用いた事業推進」に対して技術開発ロードマップ、方針3「安全性への信頼感醸成へ向けた技術的な取り組み」に対して信頼感醸成ロードマップを提示する。

4.2 では、NUMO が各段階で実施する主要な技術的实施事項を整理する。サイト調査段階に関しては、各段階における調査地区選定上の考慮事項についても記述する。

なお、文献調査の実施に当たっては市町村からの応募による場合と、国が市町村に実施を申し入れる場合がある。本報告書では、特に断らない限りは市町村からの応募により文献調査が開始されるという場合を前提として記述している。

4.1 方針の具体的展開（ロードマップ）

4.1.1 基本的考え方

4.1.1.1 地層処分事業の段階的な展開と主要なマイルストーン

NUMO は、図 4.1.1-1 に示すように、文献調査から事業の廃止まで段階的に事業を推進する計画を明示している（NUMO, 2009a）。地層処分による安全確保の最終目標が、人の管理に依存しない受動的安全性を確保することであることから、サイト選定段階から閉鎖後まで段階的に安全確認を繰り返しながら、事業期間中に必要な措置を取ることで安全な地層処分を実現していく。

地層処分事業の初期段階における重要なマイルストーンは、図 4.1.1-1 中の上段に示したように、概要調査地区選定、精密調査地区選定、基本レイアウトおよび地下調査施設位置決定、処分施設建設地選定の四つである。特に、概要調査結果に基づく「精密調査地区の選定」は、その時点で得られている候補サイトの中から地下調査施設を建設するに値するサイトを選定するという重要な意思決定となることから、事業の初期段階における最も重要な目標と位置付けている。

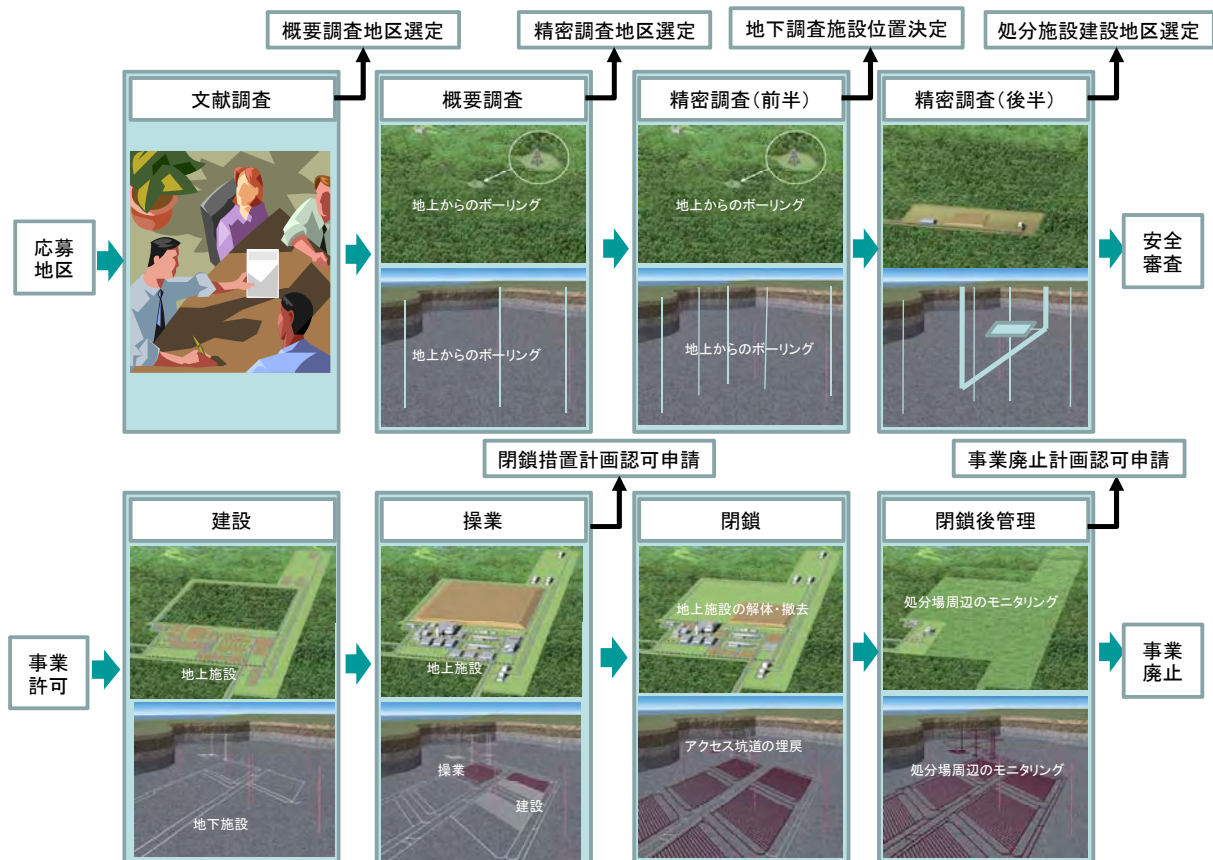


図 4.1.1-1 地層処分事業の段階的な展開
(NUMO, 2009a を一部修正)

図 4.1.1-1 の下段の事業展開では、事業許可を取得し、処分場の建設・操業を経て閉鎖、閉鎖後管理そして事業廃止までの流れを示している。これらの展開の中で、サイト調査段階で得られた情報を統合して安全審査を受けるステップと、操業終了後の閉鎖措置計画の認可を得るステップが、重要なマイルストーンとなる。特に、処分場の閉鎖の判断を行うという行為は、長期の安全確保を人の管理に依存しない受動的な安全確保に移行する十分な合理性があるという判断であり、極めて重要なステップである。NUMO は、これらのマイルストーンに向けて、安全性を繰り返し確認しながら、関係者と十分に協議した上で地層処分事業を推進していく。

4.1.1.2 地層処分事業の展開と各分野間の連携

地層処分事業では、「適切なサイト選定と確認」、「処分場の設計・施工などの適切な工学的対策」、「地層処分システムの長期安全性の評価」という三つの安全確保策を事業期間の中で段階的に展開することにより、安全性を確保する。その際には、これら三つの安全確保策を事業の中で実施するために作業ベースでは「サイト調査・評価」、「工学的対策」、「安全評価」という三つの専門分野における作業を実施することになるが、これらを連携させ、情報を統合化することによって、各段階における意思決定につなげていくことが重要である（図 4.1.1-2）。また、閉鎖後長期の安全性を確保するための取り組みは、事業期間中の安全性を確保した上で実施する必要がある。

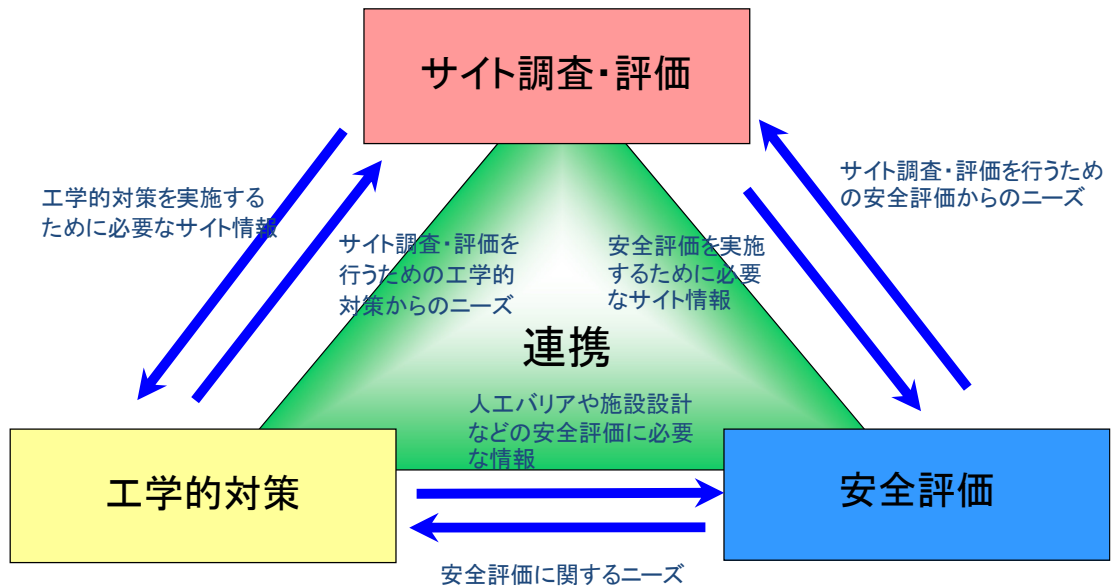


図 4.1.1-2 三つの専門分野間の連携

4.1.1.3 三つの方針とロードマップの関係

NUMO は、安全な地層処分を実現することを目標として、100 年程度にわたる長期の事業期間の中で事業を段階的に着実に進めていくために三つの方針を策定した。この方針それぞれに対してロードマップを作成し、これに基づいて事業を推進していく。

図 4.1.1-3 には三つの方針とロードマップの関係を示す。中心となるのは方針 1 を具体的に展開する安全確保ロードマップであり、それを支えるものとして、方針 2 に対応した技術開発ロードマップと、方針 3 に対応した信頼感醸成ロードマップを位置付ける。

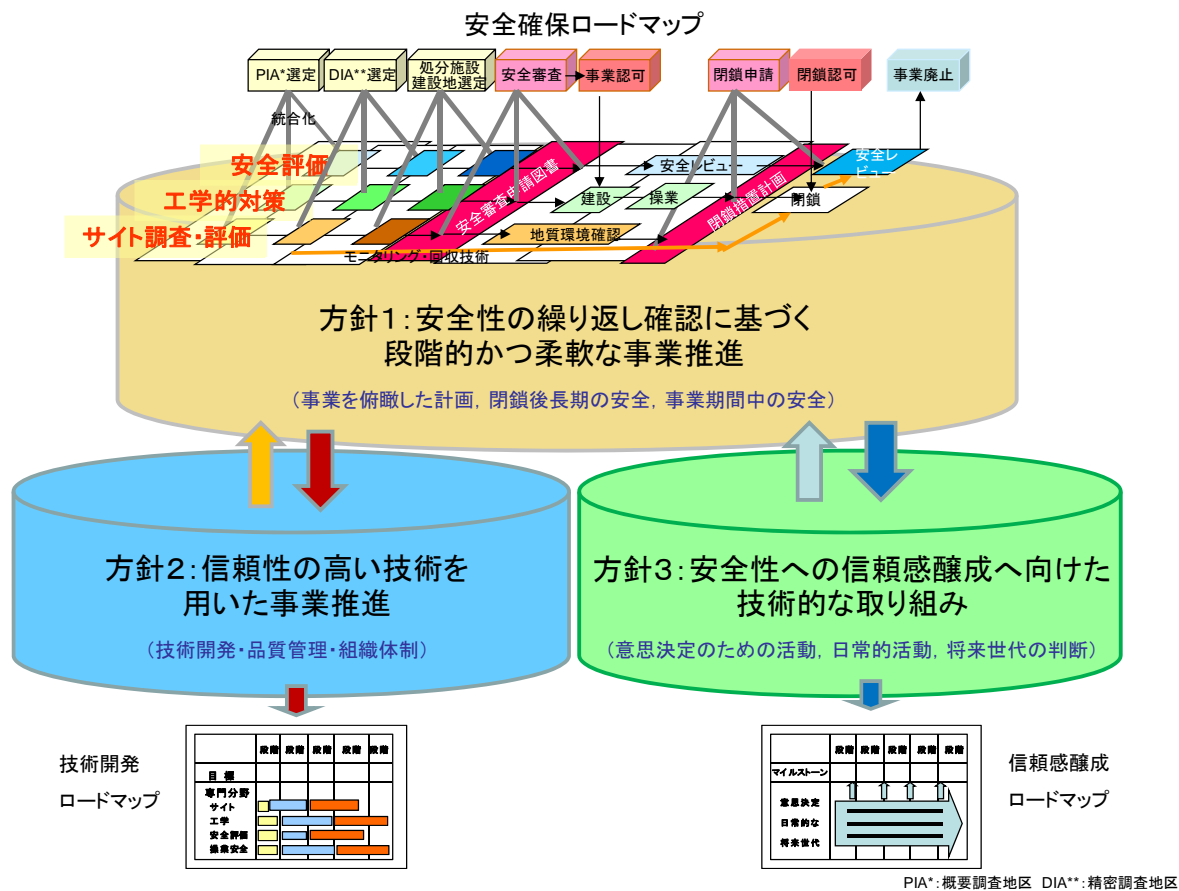


図 4.1.1-3 安全確保の三つの方針と事業全体の意思決定の枠組み

方針1「安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進」を具体的に展開するために策定したものが、安全確保ロードマップである。安全確保ロードマップはすべての段階を1枚のシートに記述した安全確保ロードマップ概要版と、段階ごとの実施事項をより詳細に記述した安全確保ロードマップ詳細版により構成される。安全確保ロードマップ概要版は、各段階で分野ごとに最も重要な実施事項を簡潔に記述したものであり、安全確保ロードマップ詳細版は、一つの段階を1枚のシートに記述し、実施事項を詳細に記述した上で、各実施事項のために必要な技術を提示したものである。

方針2「信頼性の高い技術を用いた事業推進」を実現するためには、

- a) 技術を事業期間の中でいかに準備するか (技術開発)
- b) 準備された技術を事業を実施する際にいかに用いるか (品質管理)
- c) 技術を開発し、使いこなすための組織体制や人材をいかに構築するか (組織体制)

といった点が重要であり、これらは3.2.1の方針策定の中で述べたとおりである。NUMOは、a)の技術開発の進め方について技術開発ロードマップを作成し、本報告書の中で提示することとした。

方針3「安全性への信頼感醸成へ向けた技術的な取り組み」とは、地層処分事業について関係者

の理解を得た上で、その安全性に対する信頼感を醸成するための技術面における取り組みを提示するものである。これは技術の整備とともに段階的かつ柔軟な事業推進を支える重要な柱であり、地層処分事業のように公共性の高い活動を行うに当たっては非常に重要な課題である。

NUMO は、地層処分の安全性に対する信頼感を醸成するために、幅広い活動を行っていくが、本報告書ではそのうち、技術面における取り組みを中心に記述する。特に、信頼感醸成ロードマップの中では、事業の進展とともに関係者に提示できる技術的コンテンツが拡充されていくことから、どのような情報をどのように信頼感醸成につなげていくことができるのかといった取り組みについて提示する。

図 4.1.1-4 に、安全確保ロードマップ、技術開発ロードマップ、信頼感醸成ロードマップの関係を表した図を示す。

安全確保ロードマップでは安全な地層処分を実現するために事業の中で実施するべき事項を示し、特に安全確保ロードマップ詳細版では事業の各段階で必要とされる技術を明示する。

技術開発ロードマップでは、安全確保ロードマップ概要版において、重要な実施事項として明示された実施項目と、安全確保ロードマップ詳細版において安全な地層処分を実現するために必要な技術として明示された技術を考慮して技術開発課題と開発時期を設定した。技術開発ロードマップは専門分野全体を1枚のシートに掲載した概要版と、技術開発を分野別に詳細に記述した分野別版により構成される。技術開発ロードマップでは技術開発をジェネリックな（特定のサイトや処分施設の条件に依存しない）技術開発と、特定のサイトや処分施設を対象とした技術開発に分けて提示した。

信頼感醸成ロードマップでは、地層処分の安全性に対する信頼感を醸成するために NUMO が行う技術的な取り組みについて概括的に整理した。

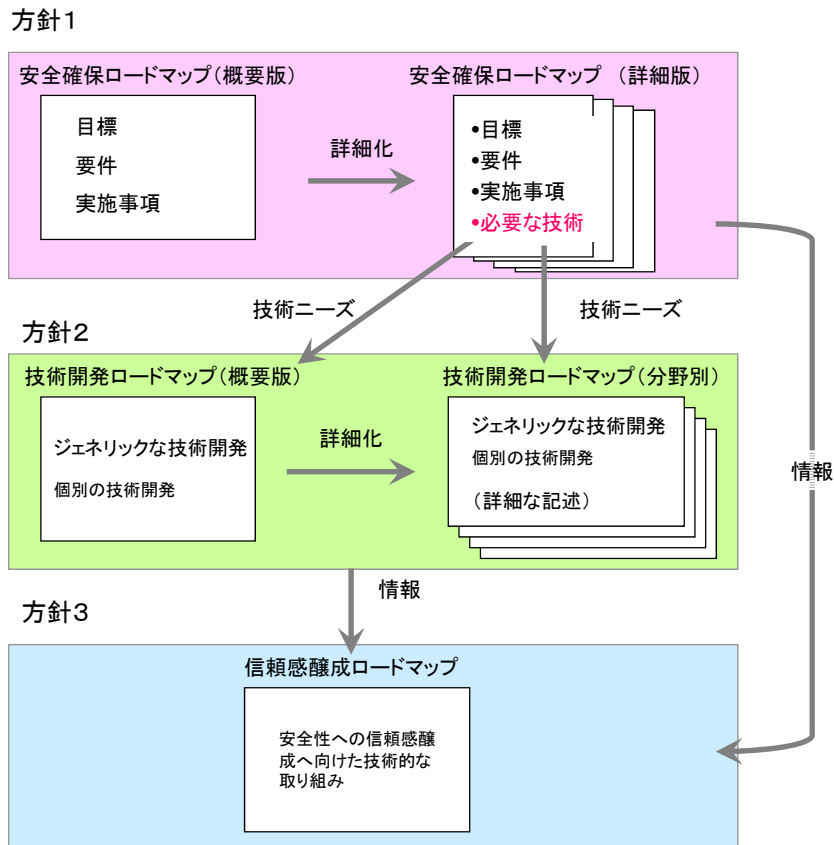


図 4.1.1-4 ロードマップの関係図

4.1.1.4 各段階における分野間の連携

安全確保のロードマップでは、閉鎖後長期の安全性を確保するために、適切なサイト選定と確認、処分場の設計・施工などの適切な工学的対策、地層処分システムの長期安全性の評価という安全確保策に対応した各専門分野での取り組みを提示した。しかし、実際の事業の中ではそれぞれの専門分野における実施事項は個別に実施するべきものではなく、互いに連携して実施する必要がある。そのことにより、専門分野間において相互に情報ニーズを把握でき、より合理的に事業目標達成に向けた計画を策定・実施することが可能となる。また、サイト調査で得られた結果は、専門家による評価を経て、処分場の設計のための基礎情報として活用され、地層処分システムの安全評価を行う。安全評価の結果によっては必要に応じてサイト調査・評価、工学的対策の検討の見直し、安全評価のやり直しなどを行い、最終的にはすべての情報を統合化し、その段階における重要な意思決定（例えば、次段階の調査地区選定）を行う。

このようなプロセスは、特にサイト調査・選定段階で重要であるが、各段階でサイト調査の内容が異なるため、必ずしも同じように専門分野間の連携を実施するわけではない。また専門分野間の連携には日常的に作業担当者レベルで実施されるべきものや、各専門分野での検討結果を持ち寄って重要な技術的判断を行うといった作業も存在する。ここでは、作業担当者間で実施するような日常的なものではなく、ある段階における実施プロセス中における重要な連携について記述する（図 4.1.1-5）。また、各段階における分野間の連携プロセスは、4.2 で段階ごとに記述するので、ここでは、ある段階における分野間の連携について、その内容を精密調査地区選定段階（概要調査の段階）を例として示す。

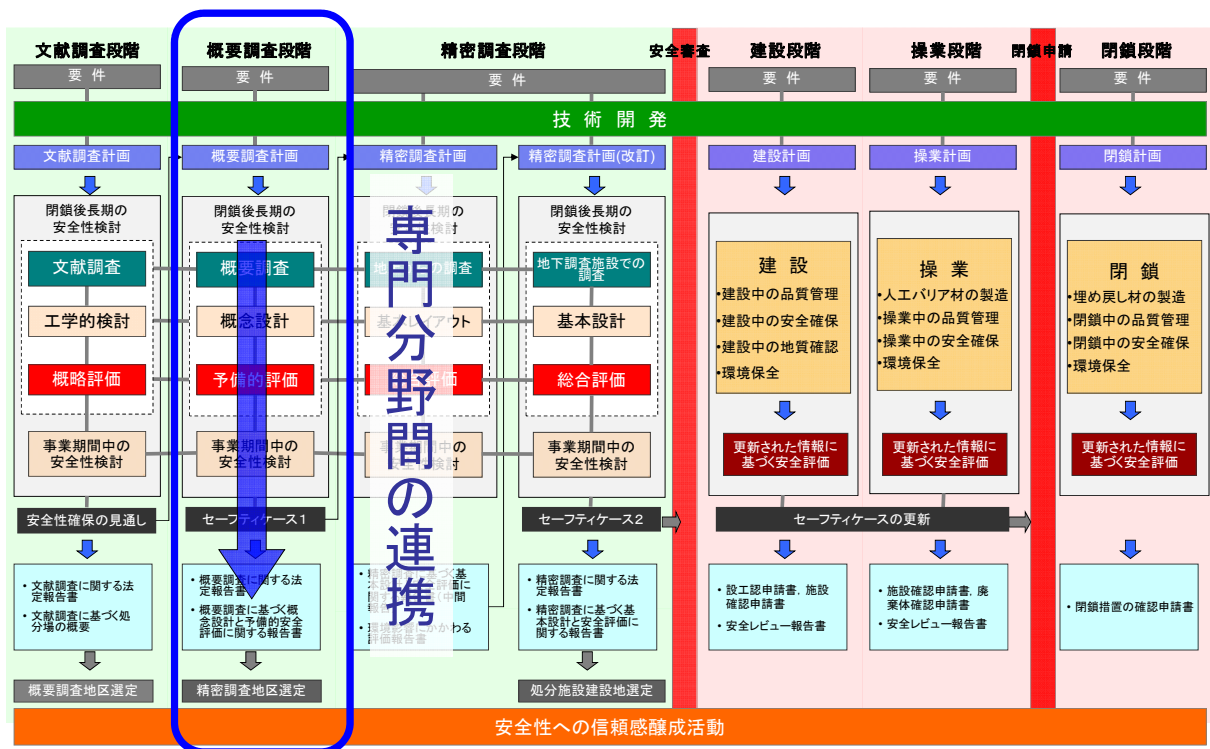


図 4.1.1-5 事業各段階における専門分野間の連携

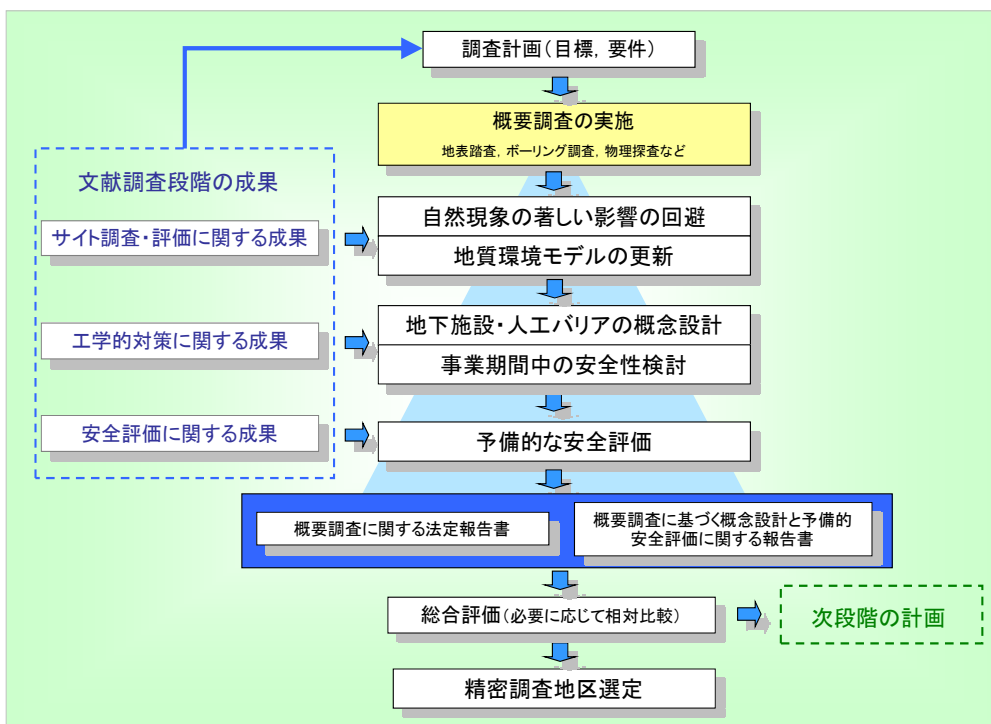


図 4.1.1-6 精密調査地区選定に至る意思決定の枠組み例

精密調査地区選定段階（概要調査の段階）における実施事項の流れを、図 4.1.1-6 に示す。サイト調査・評価として実施する「自然現象の著しい影響の回避」、「地質環境モデルの更新」、工学的対策として実施する「地下施設・人工バリアの概念設計」、「事業期間中の安全性検討」、さらに安全評

価として実施する「予備的な安全評価」の中で専門分野間で互いに情報をやり取りし、最終的にはそれぞれの検討成果を統合して報告書を取りまとめ、それに基づいて重要な意思決定を行う。

4.1.1.5 各分野の段階間における連携

NUMOは、安全な地層処分の実現に向けて、段階的に繰り返し安全性の確認を実施しながら事業を推進していく。その中で、分野間における連携を行い、最終的に情報の統合化し、その段階において必要な意思決定を行うことは前節で述べた。

段階的に事業を推進するには、分野間における連携に加えて、段階間においても連携を行い、継続性を持って事業を推進していく必要がある。すなわち、ある段階で得られた情報は次の段階における初期条件として活用することになり、これにより事業を連続性を持って効率的に推進することが可能になる。また、ある段階において構築されたセーフティケースにおいて、含まれている不確実性に対しては、それ以降の段階において、追加のサイト調査・評価を実施したり、研究・技術開発などの取り組みによって知見を拡充することで不確実性を減らす取り組みを行う。さらに、次段階での検討内容を視野に入れて、前の段階であらかじめ必要な情報を取得したり、技術的な検討を前倒して実施することもある。このように、一つの段階の中で、単にその段階の目標達成を指向して実施事項を展開するのではなく、段階的な事業展開の中で、専門分野内あるいは分野間においても連携することにより、事業を合理的に推進することが可能となる。

図 4.1.1-7 は、前節で述べた各段階での意思決定とともに、サイト調査・評価、工学的対策、安全評価などの各分野での作業が、段階間で継続的に展開していく流れを模式的に表している。

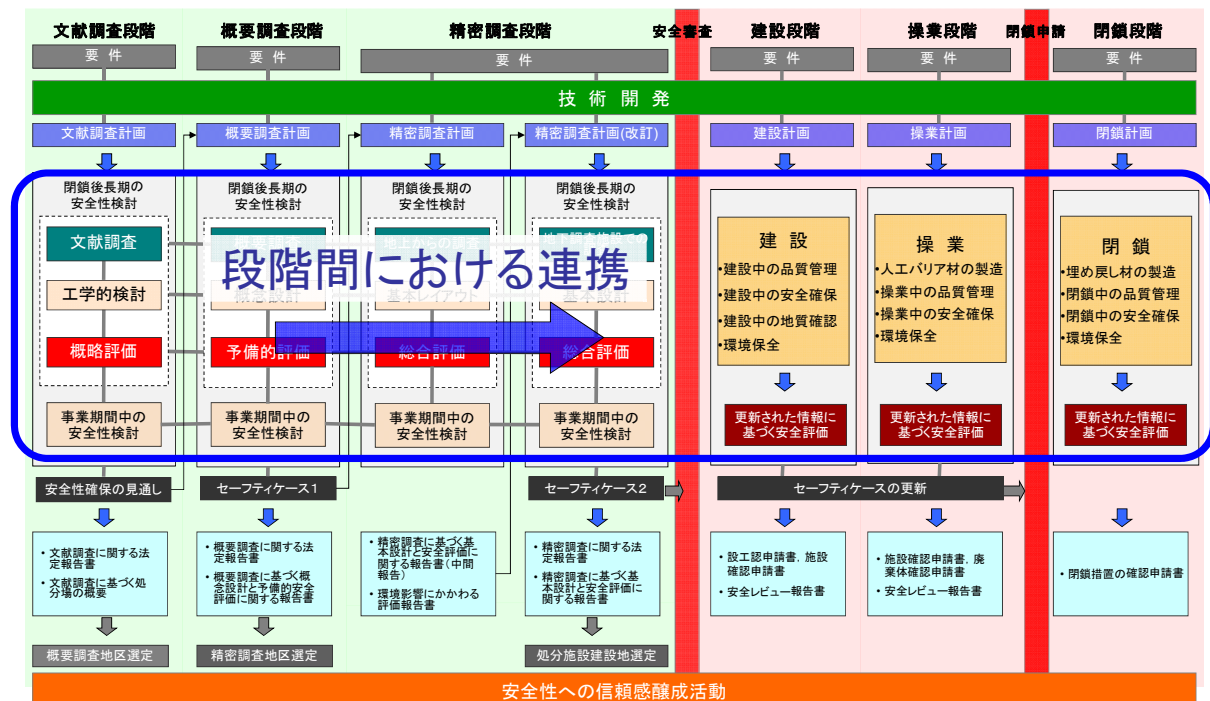


図 4.1.1-7 各段階での意思決定と段階間の各分野の連携

例えば、工学的対策の段階的な展開では、各段階で設定した目標を達成しながら、サイト調査・評価や安全評価と連携し、情報を統合化することで適切な工学的対策を準備していく。特に工学的

対策で重要な視点は、事業期間中（建設・操業・閉鎖）の安全確保と閉鎖後長期の安全確保を確実にする施設の設計であり、そのためには、段階的に得られる情報を介してサイト調査・評価や安全評価と連携しつつ、施設の合理化や最適化を目指す。

4.1.2 方針1の具体的展開（安全確保ロードマップ）

4.1.2.1 方針1を具体的に展開するに当たっての考え方

安全確保ロードマップは、事業全体を俯瞰した上で事業期間を10段階に分割し、各段階において目標、要件、実施事項、成果物としての主要な文書を明示する構造であり、各段階で設定した目標をクリアしていくことにより、最終的に安全な地層処分が実現できるよう構成されている。

安全確保ロードマップ概要版では、各段階で分野ごとに最も重要な実施事項を簡潔に記述している（図 4.1.2-1）。主要な実施事項のうち、安全確保上、特に重要な実施事項を赤色で、安全確保上重要な実施事項を黄色で表している。

全体の流れとしては、サイト調査段階初期においては、火山・火成活動、地震・断層活動などの自然現象の著しい影響を回避することに重点を置いており、その後は地質環境特性の把握、処分場の設計・安全性の確認へと進み、安全審査に臨む。安全審査を経て事業許可が得られたら、処分場の建設、操業、閉鎖を実施していく。

安全確保ロードマップ概要版は、事業全体でどの段階でどのような実施事項に焦点が当てられているかを概観する上でも有用である。

一方、安全確保ロードマップ詳細版では、各段階における分野ごとの実施事項に加えて、各実施事項を行うために必要となる技術を明示することにより、事業から技術へのニーズの橋渡しの役割を果たしている。詳細版として提示した段階は、概要調査地区選定段階（文献調査の段階）、精密調査地区選定段階（概要調査の段階）、処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）のうち地上からの調査段階、処分施設建設地選定段階のうち地下調査施設での調査段階、事業認可を受けたのちの建設段階、操業段階、閉鎖段階であり、それぞれの段階に対応した安全確保ロードマップ（詳細版）を表 4.1.2-1～7に取りまとめた。

段階	概要調査地区選定段階 (文献調査の段階)	精密調査地区選定段階 (概要調査の段階)	処分施設建設地選定段階 (精密調査の段階)		安全審査の段階	建設段階	作業段階		閉鎖段階	閉鎖後～事業廃止		
			地上からの調査	地下調査施設での調査			作業期間中	作業の終了・閉鎖措置計画認可申請				
			20年間程度								10年間程度	50年間程度
各段階における事業目標	概要調査地区選定	精密調査地区選定	基本レイアウトの決定	処分施設建設地選定	事業許可の取得	処分施設の建設	作業の実施	閉鎖措置計画の認可	閉鎖措置の実施	廃止措置の実施と確認		
安全確保にかかわる目標	・自然現象の著しい影響の回避 (明らかに不適格な地域を避ける)	・自然現象の著しい影響の回避 ・長期安全性確保の見通し ・事業期間中の安全性確保の見通し	・自然現象の著しい影響の回避を確認 ・長期安全性の確保 ・事業期間中の安全性の確保	・自然現象の著しい影響の回避を確認 ・長期安全性の確保 ・事業期間中の安全性の確保	・長期安全性の確実な確保 ・事業期間中の安全性の確実な確保	・新たな知見を踏まえた長期安全性の繰り返し確認 ・建設段階における安全性の確実な確保	・新たな知見を踏まえた長期安全性の確保 ・作業段階における安全性の確実な確保	・すべての情報を統合した長期安全性の提示	・閉鎖段階における安全性の確実な確保	・新たな知見を踏まえた長期安全性の確保 ・閉鎖後の段階における安全性の確実な確保		
目標達成にかかわる要件	・法定要件への適合性 ・概要調査地区選定の環境要件への適合性 ・自主基準(考慮事項含む)への適合性	・法定要件への適合性 ・精密調査地区選定の環境要件への適合性 ・安全審査基本指針への適合性 ・自主基準(考慮事項含む)への適合性	・法定要件への適合性 ・処分施設建設地選定の環境要件への適合性 ・安全審査基本指針への適合性 ・自主基準(考慮事項含む)への適合性	・法定要件への適合性 ・処分施設建設地選定の環境要件への適合性 ・安全審査基本指針への適合性 ・自主基準(考慮事項含む)への適合性	・安全審査指針への適合性 ・安全審査基本指針への適合性	・技術上の基準への適合性(設工認、施設確認、使用前検査) ・自主基準への適合性	・技術上の基準への適合性(施設確認、廃棄体確認、使用前検査) ・自主基準への適合性	・閉鎖措置計画の認可の基準への適合性	・閉鎖措置計画の認可の基準への適合性 ・自主基準への適合性	・廃止措置計画の認可の基準への適合性 ・廃止措置の終了確認の基準への適合性		
各分野における実施事項	閉鎖後長期の安全性	適切なサイト選定と確認	自然現象の著しい影響の回避	文献調査による回避	概要調査による回避	回避できていることの確認						
		地質環境特性の把握	地質環境モデルの構築	地質環境モデルの更新	地質環境モデルの更新	安全審査に提示する地質環境モデルの構築	地質環境モデルの更新					
		適切な工学的対策	地下施設	概略検討	基本レイアウトの設定と概念設計	基本レイアウトの決定と基本設計	基本設計	詳細設計	施工	製造・施工	閉鎖の仕様確定	閉鎖(地下)
		人工バリア	概念設計	仕様決定 製造/施工の実証	製造設備建設		製造・施工	現象確認				
地層処分システムの長期安全性の評価	概略的な評価	予備的な評価	安全審査に向けた総合的評価		補足的評価	建設時取得データに基づく安全性の確認	作業時取得データに基づく安全性の確認	閉鎖に向けた総合的評価	閉鎖時取得データに基づく安全性の確認			
事業期間中の各段階の安全性	一般労働安全の確保	情報収集・評価	対策立案(地上/地下施設)		基本設計	詳細設計	対策の実施	対策の実施・監視				
	放射線安全の確保	概略検討	概念設計		基本設計	詳細設計	対策実施・監視			監視		
	周辺環境保全	制約調査	影響予備評価		影響評価および保全措置	補足的検討	保全措置および監視(追加対策)					
安全確保にかかわる主要文書	・文献調査に関する法定報告書 ・文献情報に基づく処分場の概要	・概要調査に関する法定報告書 ・概要調査に基づく概念設計と予備的安全評価に関する報告書	・精密調査に基づく基本設計と安全評価に関する報告書(中間報告) ・環境影響にかかわる評価報告書	・精密調査に関する法定報告書 ・精密調査に基づく基本設計と安全評価に関する報告書	・事業許可申請書 ・環境影響評価書	・設工認申請書、施設確認申請書、使用前検査申請書、安全レビュー報告書	・施設確認申請書、廃棄体確認申請書、安全レビュー報告書	・閉鎖措置計画の認可申請書、安全レビュー報告書	・閉鎖措置の確認申請書	・廃止措置計画の認可申請書、安全レビュー報告書、廃止措置終了の確認申請書		

凡例 : 安全確保上特に重要な実施事項

: 安全確保上重要な実施事項

図 4.1.2-1 安全確保ロードマップ (概要版)

表 4.1.2-1 安全確保ロードマップ（詳細版）
概要調査地区選定段階（文献調査の段階）

段階		概要調査地区選定段階(文献調査の段階)			
事業目標		概要調査地区選定			
安全確保にかかわる目標		・ 自然現象の著しい影響の回避(明らかに不適格な地域を選ける)			
目標達成にかかわる要件		<ul style="list-style-type: none"> ・ 法定要件への適合性 ・ 概要調査地区選定の環境要件への適合性 ・ 自主基準(考慮事項含む)への適合性 			
主要な実施事項		<ol style="list-style-type: none"> ① 概要調査地区選定上の考慮事項への適合性の確認 ② サイトの地質環境特性に応じた概略的な処分場概念の構築 ③ 精密調査地区選定上の考慮事項の作成 ④ 概要調査計画の作成 			
各分野における実施事項	閉鎖後期の安全性	アクション	実施内容	必要とされる技術・知見	
		適切なサイト選定と確認	調査	・文献調査を実施し、地質環境の長期安定性・地質環境特性に関する文献情報を収集・整理する。	・収集した情報をデータベース化し、一元的管理する技術
			自然現象の著しい影響の回避	・文献情報を分析・評価し、火山・火成活動、地震・断層活動の著しい影響の範囲、および隆起・侵食の概略的な評価を行い著しい影響を回避する。→①④ ・精密調査地区選定に必要な情報およびそれに係る不確実性を把握する。→③④	・火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食の影響を評価する技術 ・次段階の調査計画を立案するための技術(マニュアル)
			地質環境特性の把握	・文献情報に基づき、付加的に評価する事項について分析・評価し、広域的な地質環境モデルを作成するとともに、地質環境の長期変遷について検討する。→①②③④ ・精密調査地区選定に必要な情報およびそれに係る不確実性を把握する。→③④	・付加的に評価する事項を評価するための技術 ・地質環境特性にかかわる情報を分析・評価する技術 ・地質環境モデルを構築する技術 ・地質環境の長期変遷の検討に係る技術 ・次段階の調査計画を立案するための技術(マニュアル)
			地下施設	・候補母岩を対象に、第2次取りまとめなどのジェネリックな処分場概念に基づいて、対象区域の地質環境特性に応じた概略的な処分施設設計を実施する。→①②④ ・次段階での処分施設設計のために取得すべき重要なサイト情報を特定する。→④	・概略的に処分施設を設計する技術(概略成立性判断の根拠) ・地下施設設置位置の設定手法 ・重要な情報と不確実性を特定する知見
	人工バリア	・候補母岩を対象に、地質環境モデルと長期予測に対応した安全確保の基本概念に基づく概略的な人工バリア仕様を、第2次取りまとめなどを参照して設定する。→①②③ ・次段階での人工バリア設計のために取得すべき重要なサイト情報を特定する。→④	・安全確保の基本概念を踏まえた概略的な人工バリア仕様の設定技術 ・重要な情報と不確実性を特定する知見		
	事業期間中の安全性	地層処分システムの長期安全性の評価	・文献調査情報と概略的な処分施設設計に基づき、概略的な安全性の検討を行う。→②④ ・次段階で取得すべき安全性にかかわる重要なサイト情報を特定する。→④	・わが国の一般役な地質環境に対する安全評価技術(シナリオ、モデル、データセット、安全解析) ・重要な不確実性を特定するための手法と知見 ・他分野との連携に関する方法論	
		一般労働安全の確保	・概略的な処分施設設計に対応し、建設・作業時の安全性確保にかかわる情報を収集・評価する。→② ・付加的に調査する事項を用い、建設および作業段階で支障となり得る自然現象に関する情報を収集・評価する。→② ・処分施設の耐震性検討のための文献情報を収集・評価する。→④ ・概要調査における作業安全計画を立案する。	・原子力施設の建設・作業時の想定事故・災害の設定技術 ・鉱山・地下施設建設での事故・災害に関する記録の分析・評価 ・自然現象の影響評価に係る評価手法と知見	
		放射線安全の確保	・概略的な処分施設設計に基づき、廃棄体の輸送時や地上施設における取り扱い時の一般公衆への安全確保の方針を検討する。→② ・概略的な処分施設設計に基づき、地下施設での廃棄体の搬送・定置時の取り扱い方法、作業従事者の放射線に対する放射線災害への対策について概略検討する。→②	・地上施設での廃棄体取り扱い時の安全確保に関する知見 ・地下施設での廃棄体取り扱い時の安全確保に関する知見 ・耐震性評価手法	
		周辺環境保全	・文献調査を実施し、処分施設設計に対応して、環境保全の観点(保護動植物の有無、騒音、振動、遺跡などの発掘可能性など)で必要となる情報を集約する。→②	・環境保全に関する知見、評価手法	
安全確保にかかわる主要文書		<ul style="list-style-type: none"> ・文献調査に関する法定報告書 ・文献情報に基づく処分場の概要 			

表 4.1.2-2 安全確保ロードマップ（詳細版）
精密調査地区選定段階（概要調査の段階）

段階		精密調査地区選定段階(概要調査の段階)		
事業目標		精密調査地区選定		
安全確保にかかわる目標		<ul style="list-style-type: none"> 自然現象の著しい影響の回避 長期安全性確保の見通し 事業期間中の安全確保の見通し 		
目標達成にかかわる要件		<ul style="list-style-type: none"> 法定要件への適合性 精密調査地区選定の環境要件への適合性 安全審査基本指針への適合性 自主基準(考慮事項含む)への適合性 		
主要な実施事項		<ul style="list-style-type: none"> ① 精密調査地区選定上の考慮事項への適合性の確認 ② レファレンス処分場概念(含むセーフティケース)の構築 ③ 処分施設建設地選定上の考慮事項の作成 ④ 精密調査計画の作成 ⑤ 安全審査基本指針への適合性の確認 ⑥ セーフティケースの構築 		
アクション		実施内容	必要とされる技術・知見	
各分野における実施事項	閉鎖後長期の安全性 適切な工学的対策	調査	<ul style="list-style-type: none"> 地上からの概略的な調査(地表踏査, 物理探査, ボーリング調査など)を複数のフェーズで段階的に実施する。 ベースラインモニタリングを視野に入れ, ボーリング孔などでモニタリングを開始する。 	<ul style="list-style-type: none"> 現地調査技術(地表踏査, 物理探査, ボーリング調査, モニタリングなど) 現地調査を管理する技術(マニュアル, 調査システムフロー) 取得した情報をデータベース化し一元的管理する技術
		自然現象の著しい影響の回避	<ul style="list-style-type: none"> 概要調査地区選定段階の評価の妥当性を確認するとともに, 自然現象の著しい影響を回避するためのほぼ最終的な評価を行う。→①⑥ 処分施設建設地選定に必要な情報およびそれに係る不確実性を把握する。→④⑥ 	<ul style="list-style-type: none"> 火山・火成活動, 地震・断層活動, 隆起・侵食の影響を調査・評価する技術
		地質環境特性の把握	<ul style="list-style-type: none"> 概要調査地区選定段階で構築した地質環境モデルを概要調査の進展に応じて更新する。→①② 候補母岩を含むスケールの地質環境モデルを作成し, 地質環境の長期変遷について検討する。→②④⑥ 処分施設建設地選定に必要な情報およびそれに係る不確実性を把握する。→④⑥ 	<ul style="list-style-type: none"> 付加的に評価する事項を評価するための技術 地質環境特性を調査・評価する技術 地質環境モデルを構築する技術 地質環境の変遷に関する検討にかかわる技術 地質環境の長期変遷の検討に係る技術 次段階の調査計画を立案するための技術(マニュアル)
		地下施設	<ul style="list-style-type: none"> 候補母岩を対象に, 地質環境特性に応じて, 地下施設の坑道仕様を検討, 基本レイアウトを設定し, レファレンス処分場概念としてとりまとめる。→② 安全審査基本指針(あるいは自主基準)に適合するようレファレンス処分場概念の安全機能と長期状態変遷を評価する。→⑤ 地下施設の閉鎖措置で求められる要件を検討する。→④⑥ 次段階での処分施設設計のために取得すべき重要なサイト情報を特定する。→④ 	<ul style="list-style-type: none"> レファレンス処分場概念を構築する技術(技術上の判断指標と根拠) 工学的成立性を評価する判断指標とレベル(自主基準) 不確実性を特定する知見
		人工バリア	<ul style="list-style-type: none"> 候補母岩を対象に, 地質環境特性に応じて, 人工バリア仕様を設定し, レファレンス処分場概念として取りまとめる。→②⑥ 人工バリアの長期変遷を検討することで安全審査基本指針(あるいは自主基準)への適合性を確保する。→⑤⑥ 次段階での人工バリア設計のために取得すべき重要なサイト情報を特定する。→④⑥ 	<ul style="list-style-type: none"> 人工バリア仕様を設定する技術(安全機能と判断指標) 工学的成立性を評価する技術(実現性と長期変遷評価) 安全機能を考慮した長期変質モデルの検証と考古学的な情報の活用 効率的な人工バリアおよび廃棄体の搬送・設置技術 不確実性を特定する手法と知見
地層処分システムの長期安全性の評価		<ul style="list-style-type: none"> レファレンス処分場概念に基づく予備的な安全評価を行い, 安全審査基本指針(あるいは自主基準)への適合性の見通しを評価する。→②⑤⑥ 評価結果の信頼性を分析し, 重要なサイト情報や入力パラメータの不確実性の低減に向けての方策を検討し, 結果を精密調査に反映させる。→②④⑥ 得られた情報に基づき, セーフティケースを構築する。→⑥ 	<ul style="list-style-type: none"> 地表環境, 地質環境, 人工バリアに対するサイト固有の長期変遷を考慮した安全評価技術 母岩不均質性および処分場の設計を考慮した核種移行解析手法 安全評価にかかわる品質保証および不確実性の取扱い手法 セーフティケース構築のための情報整理手法 	
事業期間中の安全性	一般労働安全の確保	<ul style="list-style-type: none"> レファレンス処分場概念に対応して, 建設・操業時の一般労働安全にかかわる事項(自然災害, 事故など)を抽出しその影響を概略評価する。→①②④ 影響を緩和するための安全対策を検討する。→①②⑤ 処分施設の耐震検討のためのデータを収集し, 耐震性の評価を行う。→④ 概要調査における一般労働安全の確保方策を実施する。 精密調査における作業安全計画を立案する。 	<ul style="list-style-type: none"> 地上からの調査段階での安全確保技術 処分場の建設・操業時の一般労働安全確保に関する知見 事故・自然災害の安全評価に係る評価手法と判断指標およびレベル 	
	放射線安全の確保	<ul style="list-style-type: none"> レファレンス処分場概念に対応して, 運搬時や処分施設における廃棄体取り扱い時の事故などを抽出し, その影響を概略評価する。→②⑥ 概略評価に基づき, 廃棄体の地下施設への搬送, 設置時の取り扱い方法, 作業従事者の放射線に対する放射線災害への具体的な対策を検討する。→②⑥ 	<ul style="list-style-type: none"> 地上施設での廃棄体取り扱い時の安全確保に関する知見(輸送時も含む) 地下施設での廃棄体取り扱い時の安全確保に関する知見 地震動策定, 耐震性評価手法 	
	周辺環境保全	<ul style="list-style-type: none"> 調査に取りかかる前に物理探査やボーリング掘削といった現場作業が周辺環境に及ぼす影響を評価し, 対応策を講じる。→② レファレンス処分場概念を対象とした周辺環境への影響の予備検討を行う。→② 次段階以降で地下掘削を開始した場合の影響について評価する。→② 	<ul style="list-style-type: none"> 地上での調査段階での環境保全技術 処分場規模での環境影響を評価するための知見 	
安全確保にかかわる主要文書		<ul style="list-style-type: none"> 概要調査に関する法定報告書 概要調査に基づく概念設計と予備的安全評価に関する報告書 		

表 4.1.2-3 安全確保ロードマップ（詳細版）
 処分施設建設地選定段階（精密調査の段階のうち、地上からの調査段階）

段階		処分施設建設地選定段階（精密調査の段階のうち、地上からの調査段階）		
事業目標		基本レイアウトの決定		
安全確保にかかわる目標		<ul style="list-style-type: none"> 自然現象の著しい影響の回避を確認 長期安全性の確保 事業期間中の安全性の確保 		
目標達成にかかわる要件		<ul style="list-style-type: none"> 法定要件への適合性 安全審査基本指針への適合性 処分施設建設地選定の環境要件への適合性 自主基準（考慮事項含む）への適合性 		
主要な実施事項		① 精密調査計画書（地下調査施設の建設計画・調査・実証計画）の作成 ② 事業許可申請に向けた安全性の予備的確認 ③ 処分施設建設地選定の考慮事項への適合性の予備的確認 ④ 環境調査および環境影響評価 ⑤ セーフティケースの更新		
アクション		実施事項	必要とされる技術・知見	
閉鎖後長期の安全性	適切なサイト選定と確認	調査	<ul style="list-style-type: none"> レファレンス処分場概念をベースに、法定要件などの考慮事項への適合性確認を目的として、処分施設建設候補地を中心とした地質環境に係る情報を得るため地上からの詳細な調査（地表踏査、物理探査、ボーリング調査など）を行う。 地上からの各種モニタリングを継続して実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> 現地調査技術（地表踏査、物理探査、ボーリング調査、モニタリングなど） 現地調査を管理する技術（マニュアル、調査システムフロー） 取得した情報をデータベース化し一元的管理する技術
		自然現象の著しい影響の回避	<ul style="list-style-type: none"> 地質環境特性に係る調査データに基づき、精密調査地区選定段階の評価の妥当性を確認する。→②③ 	<ul style="list-style-type: none"> 火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食の影響を評価する技術
		地質環境特性の把握	<ul style="list-style-type: none"> 精密調査地区選定段階で作成した地質環境モデルを調査の進展に応じて更新する。→①②③ 精密調査地区およびその周辺の地質環境特性の長期変遷を評価する。→①②③ 地下調査施設における調査の対象および確認する事項を抽出し、調査計画を立案する。 	<ul style="list-style-type: none"> 地質環境特性を調査・評価する技術 地質環境モデルを構築する技術 地質構造発達の検討に係る技術 地質環境の長期変遷の検討に係る技術 次段階の調査計画を立案するための技術（マニュアル）
	適切な工学的対策	地下施設	<ul style="list-style-type: none"> 著しい自然現象の影響の回避を確認した地質環境モデルをベースにレファレンス処分場概念を見直し、地下施設の基本レイアウトを決定する。基本レイアウトをもとに地下施設の基本仕様を決定する。→①②③④ 地下施設の基本レイアウトと仕様に基づき、建設・操業・閉鎖手法を検討し、基本計画を策定する。→①② 基本レイアウトおよび調査計画、実証試験計画に従い、地下調査施設の詳細設計と施工計画を立案する。→① 	<ul style="list-style-type: none"> 地上調査で確認された候補母岩を対象に地下施設の基本レイアウトと仕様を決定する技術（判断指標と根拠） 建設・操業・閉鎖計画を設定し、工学的成立性を評価する技術 効率的な人工バリアおよび廃棄体の搬送・定置技術（地下調査施設・実証計画に反映） 不確実性を特定する知見
		人工バリア	<ul style="list-style-type: none"> 地質環境に対応した安全概念に基づき、レファレンス処分場概念で設定した人工バリア仕様を見直し、基本仕様を設定する。→② 対象とする地下環境下での人工バリア候補材の性能面での検討を行う。→② 人工バリアに関する地下調査施設での実証計画を作成し、予備試験を開始する。→①④ 	<ul style="list-style-type: none"> 人工バリア基本仕様を設定する技術 人工バリアの工学的成立性を評価する技術 長期変遷モデルを検証する技術と考古学的な知見 不確実性を特定し、地下での実証計画に反映する手法と知見→II
		地層処分システムの長期安全性の評価	<ul style="list-style-type: none"> 見直された地質環境モデル、安全概念および工学的対策に基づき、地層処分システムの長期の状態変遷を検討する。→② 安全審査基本指針の規定事項への遵守のためシナリオ設定などの予備的安全評価を行う。→②、③ 地下調査施設で確認すべき事項を整理し、調査・実証計画に反映する。→① 長期の安全性確保につながる安全論拠を収集し、セーフティケースとして取りまとめる。→③ 	<ul style="list-style-type: none"> 更新された知見（地質環境モデルの更新や工学的対策の具体化）に基づく、地表環境、地質環境、人工バリアに対するサイト固有の長期変遷を考慮した安全評価技術（シナリオ解析、モデル開発、パラメータ設定、安全解析） 安全審査基本指針に対応した安全評価技術 母岩不均質性および処分場の設計を考慮した核種移行解析手法 安全評価にかかわる品質保証および不確実性管理手法 重要な不確実性を特定する手法と知見 他分野との連携に関する方法論 セーフティケース更新のための情報および知識の整理手法
事業期間中の安全性	一般労働安全の確保	<ul style="list-style-type: none"> 処分施設の基本設計仕様と基本計画に基づき、建設・操業・閉鎖時に安全確保上留意すべき事象を抽出し、その対応策を検討するとともに、対応策の有効性を判断するための情報を蓄積する。これらの結果は、地下調査施設の建設と調査・実証試験に反映する。→①、⑤ 地上からの精密調査において、作業安全計画に基づき安全確保方策を実施する。 地下での調査における作業安全計画を立案する。 	<ul style="list-style-type: none"> 地上からの調査段階での安全確保技術 処分場の建設・操業時の一般労働安全確保に関する知見と想定される事故・災害への対応策を設定する技術 事故・自然災害の安全評価に係る評価手法と判断指標およびレベルを設定する技術 	
	放射線安全の確保	<ul style="list-style-type: none"> 処分施設の基本レイアウトに基づき、廃棄体の輸送ルートと放射線防護の取り組み方針を策定する。 処分施設の基本レイアウトに基づき、廃棄体の地下への搬送、定置時の取り扱い方法、作業従事者の放射線に対する放射線災害防止への取り組み方針を策定する。→② 	<ul style="list-style-type: none"> 地上での廃棄体取り扱い時の安全確保に関する知見と想定される事故・災害への対応策を設定する技術 地下施設での廃棄体取り扱い時の安全確保に関する知見と想定される事故・災害への対応策を設定する技術 事故・自然災害の安全評価に係る評価手法と判断指標およびレベルを設定する技術 地震動策定、耐震性評価手法と安定性の判断根拠 	
	周辺環境保全	<ul style="list-style-type: none"> 調査計画で記載した周辺環境への対応策を調査行為の中で実践し、その状況を監視する。→④ 地下調査施設の建設計画、調査・実証計画に対する環境への影響評価を実施するとともに、対応策を検討する。地下調査施設の建設は、実機の建設時の環境対策も実証する役割を持たせる。→④ 	<ul style="list-style-type: none"> 地上での調査段階での環境保全対応技術 処分場規模での環境影響の可能性を考慮するための知見（地下の地質環境の影響は閉鎖措置への要件としても考慮しておく） 	
安全確保にかかわる主要文書		<ul style="list-style-type: none"> 精密調査に基づく基本設計と安全評価に関する報告書（中間報告） 環境影響にかかわる評価報告書 		

表 4.1.2-4 安全確保ロードマップ（詳細版）
 処分施設建設地選定段階（精密調査の段階のうち、地下調査施設での調査段階）

段階		処分施設建設地選定段階（精密調査の段階のうち、地下調査施設での調査段階）			
事業目標		処分施設建設地選定			
安全確保にかかわる目標		<ul style="list-style-type: none"> 自然現象の著しい影響の回避を確認 長期安全性の確実な確保 	<ul style="list-style-type: none"> 事業期間中の安全性の確実な確保 		
目標達成にかかわる要件		<ul style="list-style-type: none"> 法定要件への適合性 処分施設建設地選定の環境要件への適合性 	<ul style="list-style-type: none"> 安全審査指針への適合性 自主基準（考慮事項含む）への適合性 		
主要な実施事項		<ol style="list-style-type: none"> 処分施設建設地選定の考慮事項への適合性の確認 処分場の基本設計（建設・操業・閉鎖を含む） 地下調査施設での調査・試験 	<ol style="list-style-type: none"> 事業許可申請書の作成 環境調査および環境影響評価 セーフティケースの更新 		
アクション		実施事項	必要とされる技術・知見		
各分野における実施事項	閉鎖後長期の安全性	適切なサイト選定と確認	調査作業	<ul style="list-style-type: none"> 地下調査施設を用いた詳細な調査（坑道での地質調査、地下水調査、物理探査、ボーリング調査など）を実施する。 必要に応じて地上からの調査を実施し、付加的な地下情報を取得する（例えば、地下水の涵養・流出域の調査など）。 地上および地下調査施設における各種モニタリングを継続して実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道での調査技術（地質調査、地下水調査、物理探査、ボーリング調査、モニタリングなど） 現地調査を管理する技術（マニュアル、調査システムフロー） 取得した情報をデータベース化し一元的管理する技術
			自然現象の著しい影響の回避	<ul style="list-style-type: none"> 許認可申請のために、地上からの詳細調査および地下での調査結果を分析し、処分施設の基本仕様と安全評価結果を総合的に判断し、著しい影響が回避されるという判断の妥当性を確認する。→①④ 自然現象の将来予測に伴う不確実性を特定し、施設設計・安全評価との連携して、その対応策を検討する。 	<ul style="list-style-type: none"> 火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食の影響を評価する技術
			地質環境特性の把握	<ul style="list-style-type: none"> 安全審査に提示する地質環境モデルを構築し、地質環境特性の長期変遷を含む地質環境特性の総合評価を行う。→①② 地下での詳細な調査をもとに、ニアフィールドの特性を把握し、人工バリアの長期挙動評価に資する。 	<ul style="list-style-type: none"> 地質環境特性を調査・評価する技術 地質環境モデルを構築する技術 地質環境特性の長期変遷の検討に係る技術 地質環境の長期変遷の検討に係る技術
			地下施設	<ul style="list-style-type: none"> 基本設計で適用する施工技術を検討した地下調査施設を建設する。地下施設の設計の妥当性、建設技術の適用性の実証も行う。→①②③④ 更新された地質環境モデル、地下調査施設での実証試験結果や設計の妥当性の検証結果をもとに、建設／操業／閉鎖における品質確保、物流、安全確保、経済性の観点から処分施設の基本設計を更新する。→②④ 処分場の技術指針（仮称）への適合性を照査する。→④ 閉鎖措置に向けての基本計画を立案する。 	<ul style="list-style-type: none"> 許認可申請に向けての処分施設の基本レイアウト、仕様を合理化・最適化する技術 安全性・合理性などを考慮して建設・操業・閉鎖の具体的な手順と工法を設定する技術 閉鎖措置に向けての不確実性を特定する知見
	適切な工学的対策	人工バリア	<ul style="list-style-type: none"> 人工バリアの基本仕様に従い、廃棄体・人工バリアの定置技術に関する実証および施工品質確保の確認のための実証試験を地下調査施設で実施する。→②③④ 実証試験結果に基づき、人工バリアの基本仕様の見直し、許認可申請への仕様を決定する。→④ 人工バリアの挙動を確認する試験を地下調査施設で継続して実施することで、初期段階での過渡的な挙動を把握する。→③④ 	<ul style="list-style-type: none"> 処分施設の基本仕様設定に伴う人工バリアの最適化・合理化設計技術（廃棄体の回収技術を含む） 地下施設などでの搬送・定置実証技術とその結果に基づく工学的実現性の評価技術 長期変質モデルを検証する技術と考古学的な情報の活用技術 	
		地層処分システムの長期安全性の評価	<ul style="list-style-type: none"> 地下調査施設での取得データを加えて、安全審査に向けた処分場の安全性に係るすべての論拠を統合し、総合的な安全評価とその信頼性の評価をセーフティケースとして取りまとめる。→①④⑥ 安全審査への対応として、最終的な地質環境モデルおよび工学的対策を用いた安全評価を行い審査指針の遵守を確認する。また評価に用いたすべての情報を整理する。→④⑥ 安全性に影響を及ぼすと考えられる現象のうち、原位置試験（実証）により確認することが有効なものを実施する。→③⑥ 	<ul style="list-style-type: none"> 更新された知見（地下調査施設での取得データや建設・操業計画の具体化）に基づく、安全審査に対応した安全評価技術 安全審査に対応した安全論拠の統合技術 重要な不確実性を特定するための手法と知見 	
		一般労働安全の確保	<ul style="list-style-type: none"> 地下調査施設の建設において、作業安全計画に基づき一般労働安全確保対策を施し、安全管理を行う。→③ 処分施設の基本仕様に基づき、建設／操業／閉鎖に係る一般労働安全確保に関する詳細な作業安全計画を策定する（基本設計）。→① 地下調査施設を用いた建設・操業時の安全性に係る試験を行いその有効性を確認する。→③ 処分施設建設時の作業安全計画を立案する。 	<ul style="list-style-type: none"> 地下施設の建設・運営での安全確保技術 処分場の建設・操業時の一般労働安全確保に関する知見と想定される事故・災害への対応策を設定する技術 事故・自然災害の安全評価に係る評価手法と判断指標およびレベルを設定する技術 	
	事業期間中の安全性	放射線安全の確保	<ul style="list-style-type: none"> 処分施設の操業計画に基づき、廃棄体の輸送ルートや地上施設での放射線防護の取り組み方針を検討する（基本設計）。→② 廃棄体の地下への搬送、定置時の取り扱い方法、作業従事者の放射線に対する放射線災害防止への取り組み方針を検討する（基本設計）。→② 	<ul style="list-style-type: none"> 地上での廃棄体取り扱い時の安全確保に関する知見と想定される事故・災害への対応策を設定する技術 地下施設での廃棄体取り扱い時の安全確保に関する知見と想定される事故・災害への対応策を設定する技術 事故・自然災害の安全評価に係る評価手法と判断指標およびレベルを設定する技術 	
		周辺環境保全	<ul style="list-style-type: none"> 地下調査施設の建設による周辺環境への影響を調査・評価し、必要に応じて保全措置を行う。→⑤ 処分施設の建設／操業時の環境影響評価を行う。→④ 	<ul style="list-style-type: none"> 地下での調査段階での環境保全対応技術 処分場規模での環境影響の可能性を考慮するための知見 	
	安全確保にかかわる主要文書		<ul style="list-style-type: none"> 精密調査に関する法定報告書 精密調査に基づく基本設計と安全評価に関する報告書 		

表 4.1.2-5 安全確保ロードマップ（詳細版）
建設段階

段階		建設段階			
事業目標		処分施設の建設			
安全確保にかかわる目標		<ul style="list-style-type: none"> 新たな知見を踏まえた長期安全性の繰り返し確認 建設段階における安全性の確実な確保 			
目標達成にかかわる要件		<ul style="list-style-type: none"> 技術上の基準への適合性(設工認、施設確認、使用前検査) 自主基準への適合性 			
主要な実施事項		<ol style="list-style-type: none"> ① 要求品質を満足した処分施設の安全な建設 ② 新たな知見に基づく長期安全性の確認とセーフティケースの更新(安全レビュー対応) ③ 次段階の操業実施に備えた検討(使用前検査に向けた準備) ④ 建設時の安全性確保 ⑤ 施設建設による周辺環境への影響確認および低減 			
各分野における実施事項	閉鎖後長期の安全性	アクション	実施事項	必要とされる技術・知見	
		適切なサイト選定と確認	調査	<ul style="list-style-type: none"> 地下調査施設において計測を継続する。→② 建設中に得られるデータを用い事業許可申請の内容の妥当性を確認する(地質環境モデルの更新)。→② 安全レビューに向けたデータを蓄積する。→② 地上および地下施設でのモニタリングを継続する。→② 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道での調査検討技術 モニタリング技術(維持管理、データ集積など) 情報管理技術
			自然現象の著しい影響の回避		<ul style="list-style-type: none"> 火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食の影響を評価する技術
	地質環境特性の把握			<ul style="list-style-type: none"> 地質環境特性を調査・評価する技術 地質環境モデルを構築する技術 地質環境の長期変遷の検討に係る技術 	
	適切な工学的対策	地下施設	<ul style="list-style-type: none"> 事業申請に応じて、処分場の詳細設計ならびに建設/操業/閉鎖にかかわる詳細計画を更新する。→① 建設段階の安全確認への要件に対応した処分施設を建設する。→①② 新たな知見や建設技術の導入による合理化を図る。→①② 建設中の情報を記録する(建設完了確認、安全レビューおよび閉鎖措置計画策定に利用)。→② 	<ul style="list-style-type: none"> 技術基準を遵守するための品質検査、品質確認技術 施設仕様を変更するための技術(現設計の仕様設定のプロセスの記録) 	
		人工バリア	<ul style="list-style-type: none"> 操業段階への準備として実証試験などを通じ廃棄体・人工バリアの搬送・定置技術を確認する。→③ 	<ul style="list-style-type: none"> 遠隔操業システムの設計・製作技術 遠隔搬送・定置のためのシステム制御技術 品質管理・保証技術 	
		地層処分システムの長期安全性の評価	<ul style="list-style-type: none"> 建設時に取得された新たなデータや場合によっては設計変更に対応した安全評価を実施する。(許認可申請によっては、処分パネルごとの分割申請があり、変更申請での安全評価が要求されることも想定)。→② 建設の妥当性確認と定期安全レビューに反映する。→② 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時に取得された新たなデータや設計変更などに対応した安全評価技術 安全レビューに対応した安全評価技術 	
	事業期間中の安全性	一般労働安全の確保	<ul style="list-style-type: none"> 建設計画に対応した一般労働安全対策を実施して処分施設の建設を実施する。→④ 建設時の事故・災害を想定した対応策を準備する(リスク管理)。→①④ 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時の安全対策技術(発生防止・拡大防止技術) 自然災害防止技術(洪水、地震、津波など) 	
		放射線安全の確保	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体の地上における輸送・オーバーパックへの封入計画を確定し、一般公衆の被ばくを防ぐ対策を確立する(詳細設計)。→③ 廃棄体の地下における搬送・定置計画を確定し、作業従事者の被ばくを防ぐ対策を確立する。→③ 	<ul style="list-style-type: none"> 操業時の放射線安全対策技術(操業時のリスク評価、対応技術) 	
		周辺環境保全	<ul style="list-style-type: none"> 地下施設の建設による周辺環境への影響をモニタリングし、必要に応じて建設計画の変更および影響拡大防止策を施す。(保全措置・監視)。→⑤ 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時の周辺環境影響保全技術(排水、換気、ズリ、騒音など環境基準以下とするための防止技術、異常時のリスク管理技術) 	
安全確保にかかわる主要文書		<ul style="list-style-type: none"> 設工認申請書、施設確認申請書、使用前検査申請書、安全レビュー報告書 			

表 4.1.2-6 安全確保ロードマップ（詳細版）
 操業段階（操業期間中）

段階		操業段階(操業期間中)			
事業目標		操業の実施			
安全確保にかかわる目標		<ul style="list-style-type: none"> 新たな知見を踏まえた長期安全性の確認 操業段階における安全性の確実な確保 			
目標達成にかかわる要件		<ul style="list-style-type: none"> 技術上の基準への適合性(施設確認、廃棄体確認、使用前検査) 自主基準への適合性 			
主要な実施事項		<ol style="list-style-type: none"> ① 要求品質を満足するように廃棄体、人工バリアなどを設置 ② 新たな知見に基づく安全レビューによる長期安全性の確認とセーフティケースの更新 ③ 地下施設(空洞)を長期間空けた状態で操業することによる周辺環境への影響を最小限に抑制 ④ 操業時の安全性確保 ⑤ 次段階の閉鎖に向けた検討(閉鎖措置計画の申請の準備) 			
各分野における実施事項	閉鎖後長期の安全性	適切なサイト選定と確認	調査	<ul style="list-style-type: none"> 操業と並列して実施される建設にかかわる調査を行う。 安全レビューに対応するために、この時点までに得られたデータおよび最新の知見を総合的に評価し、地質環境の長期安定性と地質環境特性を再評価する。→② 	<ul style="list-style-type: none"> 地質環境モニタリング技術 情報管理技術
			自然現象の著しい影響の回避	<ul style="list-style-type: none"> 必要に応じて地質環境モデル、地質環境の長期変遷予測の更新を行う。→② モニタリングを継続する。→② 	<ul style="list-style-type: none"> 火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食の影響を評価する技術
			地質環境特性の把握		<ul style="list-style-type: none"> 地質環境特性を調査・評価する技術 地質環境モデルを構築する技術 地質環境の長期変遷の検討に係る技術
		適切な工学的対策	地下施設	<ul style="list-style-type: none"> 技術基準への適合性を常に監視しつつ操業を進めるとともに操業システムの継続的な改善を図る。→① 操業中の情報を記録する(操業環境の仕様前検査、安全レビューおよび閉鎖措置計画策定に利用)。→② 更新された地質環境モデルに対する詳細閉鎖仕様を設計する。→②⑤ 閉鎖措置計画のための閉鎖設計を行い、実証試験などを通じて閉鎖技術の確認を行う。→②⑤ 	<ul style="list-style-type: none"> 操業システムを改良する技術 使用前検査技術 閉鎖措置設計技術と閉鎖技術の実証のための手法
		人工バリア	<ul style="list-style-type: none"> 要求品質を満たすよう廃棄体および人工バリアの設置を行う。→① 輸送・定置システムの改善を行う。→① 人工バリア設置後の処分坑道の埋め戻し。→①② 回収可能性を維持する。→①②⑤ 閉鎖措置に向けての実証施設での人工バリア挙動確認試験を継続して実施する。→⑤ 	<ul style="list-style-type: none"> 遠隔での人工バリアの搬送・定置技術 品質確認技術 不具合発生時の修復技術 廃棄体回収技術 	
		地層処分システムの長期安全性の評価	<ul style="list-style-type: none"> 建設時および施工時などそれまでに得られたデータや最新の知見に基づき安全評価を実施し、安全基準を担保していることを確認(セーフティケースを更新し、安全レビューに備える)。→② 必要に応じて操業期間中に安全レビューを実施する。→②⑤ 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時および施工時などそれまでに得られたデータや最新の知見に基づく安全評価技術 安全レビューに対応した安全評価技術 	
	事業期間中の安全性	一般労働安全の確保	<ul style="list-style-type: none"> 操業段階における対策を実施し、一般労働安全の確保に努める。→④ 操業中の事故・災害を想定した対応策を準備する。→④ 施設を長期間使用することになるため、定期的に保守点検を実施し、安全性を保持する。→④ 	<ul style="list-style-type: none"> 労働安全確保技術 事故・災害に対する発生防止・拡大防止技術 	
放射線安全の確保		<ul style="list-style-type: none"> 策定した対策を実施し、地域住民、作業従事者の放射線安全を確保する。→④ 操業時の放射線事故を想定した対応策を準備する。 地上部における廃棄体の輸送やオーバーパックへの封入を安全に実施する。→① 	<ul style="list-style-type: none"> 放射線安全対策技術 放射線事故時の回収、補修、回復技術 		
周辺環境保全		<ul style="list-style-type: none"> 操業時に排出する地下水、換気などの周辺環境への影響を防止する設備を設置する。→③ 長期にわたり地下空洞を保持することの周辺環境への影響の把握と影響拡大を防止する方策を施す。→③ 	<ul style="list-style-type: none"> 影響把握のためのモニタリング技術 影響拡大防止技術 		
安全確保にかかわる主要文書		施設確認申請書、廃棄体確認申請書、安全レビュー報告書			

表 4.1.2-7 安全確保ロードマップ（詳細版）
閉鎖段階

段階		閉鎖段階			
事業目標		閉鎖措置の実施			
安全確保にかかわる目標		・ 閉鎖段階における安全性の確実な確保			
目標達成にかかわる要件		<ul style="list-style-type: none"> ・ 閉鎖措置計画の認可の基準への適合性 ・ 自主基準への適合性 			
主要な実施事項		<ul style="list-style-type: none"> ① 閉鎖措置計画に基づく確実な閉鎖措置 ② 閉鎖措置の確認 ③ 閉鎖後の制度的管理に向けての準備 ④ 事業廃止に向けての準備 			
各分野における実施事項	閉鎖後長期の安全性	アクション		実施事項	必要とされる技術・知見
		適切なサイト選定と確認	調査	・処分場周辺の地質環境モニタリングを継続して実施する。→①②	・地質環境モニタリング技術
			自然現象の著しい影響の回避	・閉鎖措置までに集積した情報による最終確認を行う。→③④	<ul style="list-style-type: none"> ・火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食の影響を評価する技術 ・影響の回避を判断した論拠(すでに確立された技術として最終判断に適用)
			地質環境特性の把握	・閉鎖後の制度的管理と事業廃止に向け、必要に応じて地質環境モデルを更新する。→③④	<ul style="list-style-type: none"> ・地質環境特性を調査・評価する技術 ・地質環境モデルを構築する技術 ・地質環境の長期変遷の検討に係る技術
		適切な工学的対策	地下施設	<ul style="list-style-type: none"> ・厳格な品質管理のもと、確実にアクセス坑道などを埋め戻し処分場を閉鎖する。→①② ・閉鎖措置が所定の品質を満たしていることを確認する。→①② ・閉鎖後の制度的管理の関する計画を立案する。→③④ 	<ul style="list-style-type: none"> ・閉鎖(埋め戻し、プラグなど)に伴う施工技術 ・品質管理・保証技術 ・閉鎖後の制度的管理を計画する技術
	人工バリア		・(閉鎖措置計画申請時に設置された人工バリアの初期品質が担保されていることを提示)	(状況によっては、実証施設での人工バリア挙動確認をする技術)	
	地層処分システムの長期安全性の評価		・必要に応じて実施	・安全評価技術	
	事業期間中の安全性	一般労働安全の確保	・閉鎖措置にかかわる安全対策の実施と監視	・閉鎖段階での安全確保技術	
		放射線安全の確保	・監視	・監視のための技術	
		周辺環境保全	・保全措置および監視	・閉鎖段階での周辺へ環境影響保全技術	
安全確保にかかわる主要文書		・閉鎖措置の確認申請書			

4.1.3 方針2の具体的展開（技術開発ロードマップ）

4.1.3.1 方針2を具体的に展開するに当たっての考え方

安全な地層処分の実現には、多岐にわたる学際的な知識と地層処分事業で必要とされるさまざまな技術を、それらが必要となる段階で使えるよう準備しておくことが必要である。このような知識と技術の整備について、原子力政策大綱（原子力委員会、2005）においては、「NUMOは地層処分の安全な実施と経済性と効率性の向上を目的とした技術開発を進め、一方で、基盤研究開発機関は深地層の研究施設などを活用して、深地層の科学的研究や、地層処分技術の信頼性向上、安全評価手法の高度化などの基盤的研究を実施すること」とされており、NUMOでは、この方針に基づいて役割分担の枠組みの中で地層処分事業に必要な技術開発を実施してきた。

本節では、このような背景から、安全確保ロードマップで規定した各段階の目標達成に必要なとされる技術のうち、既存の技術レベルを分析し、「技術の開発や実証」が今後求められる項目を対象に、必要とされる段階までにどのように準備していくかについて「技術開発ロードマップ」として取りまとめることとした。

本ロードマップで扱う「技術開発」の対象には、ものづくりの技術と関連する知識および経験、調査結果の分析や設計および安全評価に必要な手法や科学・工学的な知識、それらに使用するデータベースや研究成果などを含むものとする。技術開発ロードマップでは、各段階で関係機関の研究成果集約の方法をはじめ、各段階で品質が確保された知識と技術を適宜集約する方法についても言及する。

技術開発ロードマップでは、各段階での事業目標を達成するために設定された重要な実施事項をターゲットとして、その実施事項を確実にを行うために必要な技術開発を段階的に提示する。技術開発ロードマップは、NUMOが事業を進めるために実施する技術開発のマネジメントを遂行する上での基礎資料としても有効である。これらのロードマップをもとに個別の技術開発課題の実施工程、さらには技術開発項目間の調整事項などの詳細な管理を進めていく。

図 4.1.3-1 に技術開発ロードマップの構成を示す。技術開発ロードマップは全体を提示した概要版と専門分野別の技術開発ロードマップにより構成される。技術開発ロードマップ概要版は、事業全体を俯瞰して段階的に技術の開発を行っていく大枠を示している。一方、図 4.1.3-1 中の①から④は、分野ごとの技術開発内容を事業の進展に準じて記述している。

地層処分事業は事業期間が100年程度にわたる長期のプロジェクトであり、事業期間中に科学技術が大幅に進歩するものと思われる。従って、NUMOはそのような科学技術の進歩を考慮し、その時点で最も信頼性の高い技術を用いて、事業を推進する。ただし、地層処分事業固有のニーズに基づく技術開発は、信頼性の向上や合理化のために計画的に技術開発に取り組む必要がある。また、段階的に整備されていく規制からの要件や、幅広いステークホルダーからの要望に適切に対応していくために必要な技術開発も実施する必要がある。

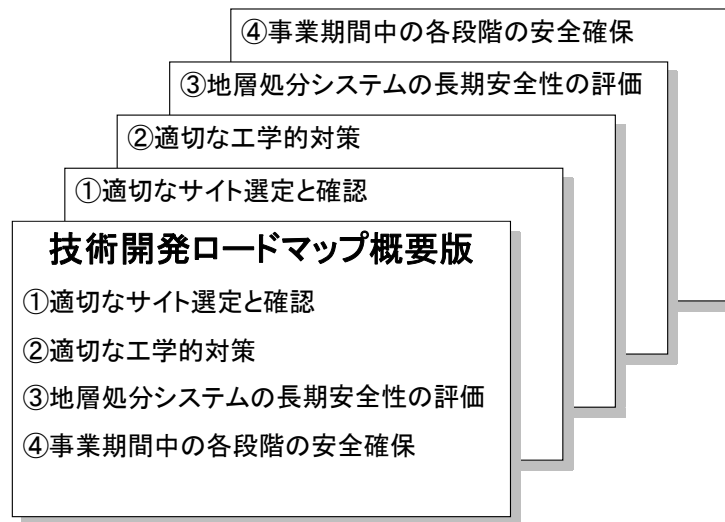


図 4.1.3-1 技術開発ロードマップの構成

技術開発全体ロードマップでは、安全確保ロードマップの実施事項を行うために必要な技術として挙げられた内容のうち、技術開発が必要とされる技術分野の全体像を、①適切なサイト選定と確認、②適切な工学的対策、③地層処分システムの長期安全性の評価、④事業期間中の各段階の安全確保に分類して示す。

4.1.3.2 技術開発ロードマップ

技術開発ロードマップ概要版を図 4.1.3-2 に示す。技術開発ロードマップ概要版では、安全確保ロードマップで設定した各専門分野に必要な実施事項を遂行するために必要な技術の整備を、ジェネリックな段階と特定のサイト・処分場を対象とした段階においてどのように開発していくかを明示した。

図中の黄色く色付けされたボックスは、サイトの地質環境や処分場設計が確定していない段階において、いずれ必要となる技術のオプションの整備や、地層処分事業で必要となる科学技術的知見の取得を表している。一方、青いボックスは、サイトの地質環境特性や処分場設計が確定、あるいは絞り込まれてきた段階において、事業で必要となる技術に焦点を当てた開発を示している。これらの技術開発には NUMO が直接実施するものに加えて、基盤研究開発機関が実施するものも含まれている。

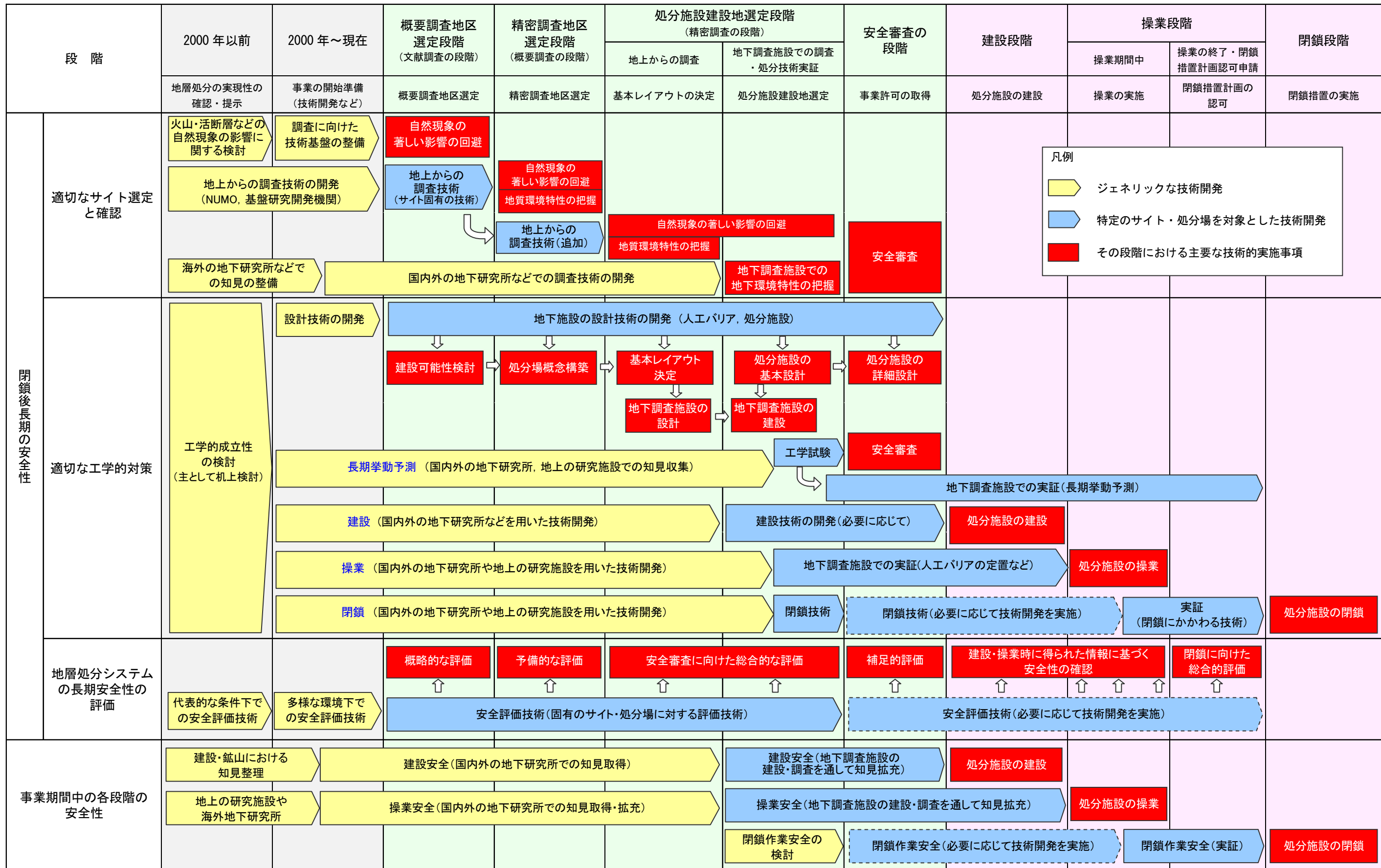


図 4.1.3-2 技術開発ロードマップ (概要版)

4.1.3.3 分野別の技術開発ロードマップ

技術開発ロードマップ概要版の中の、適切なサイト選定と確認、適切な工学的対策、地層処分システムの安全性の評価、事業期間中の各段階の安全性のそれぞれにおいて記述内容を詳細化したものを図 4.1.3-3 から図 4.1.3-5 に示す。

(1) 適切なサイト選定と確認

サイトの調査・評価では、法定要件に関連する情報や、各段階で実施する施設設計や安全評価で求められる情報をサイト調査により取得・評価することにより、自然現象の著しい影響を避け、信頼性の高い地質環境モデルを構築する。各段階で必要とされる技術は以下の項目である。

- ・ 自然現象の影響を評価する技術：火山・火成活動，地震・断層活動の発生可能性や影響範囲，隆起・侵食速度などを評価する技術。
- ・ 地質環境の各特性に係る情報を分析・評価する技術：地質・地質構造，地下水流動特性，地下水化学特性，岩盤特性（力学特性，熱特性など），物質移行特性などを評価する技術。
- ・ 地質環境モデルを構築する技術：地質環境の各特性に係る概念モデルや地質環境モデルを構築する技術。
- ・ 地質環境特性の長期変遷の検討に係る技術：火山・火成活動，地震・断層活動，隆起・侵食の過去の履歴と地質・地質構造の分布・特性に基づき，地質環境の長期変遷を検討する技術。
- ・ 収集した情報をデータベース化し，一元的に管理する技術：収集した情報を透明性・追跡性を担保しながら一元管理できるデータベースを整備し，適切に運用・管理する技術。
- ・ 調査計画を立案するための技術：既存の情報や前段階の調査・評価の情報，工学的対策や安全評価からの情報や要求に基づき，次段階の合理的・効率的な調査計画を立案するための技術（マニュアル類やシステムフローなどの支援ツールの整備，および調査・評価技術の実証的検討）。

(2) 適切な工学的対策

工学的な対策には，地上および地下の処分施設の設計，建設，操業および処分場の閉鎖措置が含まれる。そのため，ものづくりの技術と知識，工学的対策を実施する上での品質確保，工期や予算からの要件を満たす合理的かつ効率的な対策などが求められ，これらを満足する技術を準備する必要がある。

- ・ 処分施設を構築する母岩を選定する技術：地質環境モデル，地質環境特性の長期変遷，自然現象の発生可能性および影響範囲などの情報に基づき，処分施設の立地への要件に照らしあわせて母岩を選定する技術。
- ・ 処分施設を設計・建設する技術：選定した母岩を対象に，処分施設のレイアウト，施設の仕様を，目標品質を考慮してさまざまな要件から設計し，実現する技術。処分の段階に応じて，概念設計，基本設計，詳細設計へと合理化・最適化を図る技術。
- ・ 人工バリアを設計・製作・定置する技術：廃棄体の受入基準の設定および検査，オーバーパックや容器への封入，地下施設への搬送・定置のための設備の設計と操作する技術。人工バリアを設計・製作，地下への搬送・定置装置の設計と操業技術およびそれらを検査・監視す

る技術。

- ・ 処分施設の閉鎖措置を設計・施工する技術：建設・操業後の処分場の閉鎖にかかわる設計・施工技術。

(3) 地層処分システムの長期安全性の評価

閉鎖後長期の安全性は、安全解析によって提示するが、この安全解析結果は、直接的に実証することは困難である。このため、安全解析の結果のみではなく、より幅広い多面的な視点を含めて示す必要があり、以下の技術が必要である。

- ・ シナリオの構築技術：地質環境モデル、自然現象の発生可能性とその影響範囲などの情報に基づき構築される地層処分システムに対して、その状態がどのように変遷するかについて異なる時間枠とさまざまなスケールで設定する（状態設定）技術。さらに、状態設定に基づき、安全要件に対応した安全評価に向けてのシナリオを作成・分類する技術。
- ・ モデル・データセットの設定技術：地層処分システムの特長、事象、時間的な変遷の過程、およびシナリオに基づきモデルを選定し、安全解析の入力情報となるデータセットを設定する技術。
- ・ 安全解析技術：各シナリオに基づくモデルおよびデータセットに沿って、核種移行解析コードで安全解析を行うとともに、その結果を分析する技術。

(4) 事業期間中の各段階の安全性

対象となる技術は、調査・建設・操業・閉鎖中の一般労働安全および放射線安全にかかわる技術となる。また環境保全に係る技術もこの範疇に含む。そのため、各段階で必要とされる技術は以下の項目である。

- ・ 事業期間中の安全性を脅かす事象を設定する技術：サイト調査、処分施設の建設と操業および閉鎖段階において、一般労働安全と放射線安全に係る事象を推定し、その発生可能性や影響の程度などを設定する技術。
- ・ 安全性確保に向けた対応技術：安全性に係る事象の影響の程度や範囲に対し、工学的な対策や制度的な対応策を整備する技術。例えば、事故や災害を防止する技術と影響を削減する技術。
- ・ 事業期間中の安全評価技術と危機管理技術：事業期間中に想定される事故や災害に対応策の有効性を評価する技術と想定外事象への危機管理技術。
- ・ 事業期間中の周辺環境への影響因子とその形態を設定する技術：事業の段階的な進展と各段階での実施事項を考慮して、周辺環境に与える影響因子を設定する技術。
- ・ 環境保全技術：影響因子に対応して、その影響を防止あるいは削減するための技術。影響の状態を監視する制度やモニタリングを行う技術も含む。
- ・ 環境影響評価技術：事業の開始段階から閉鎖確認に至るまでの周辺環境への対応策などの有効性を評価する技術。

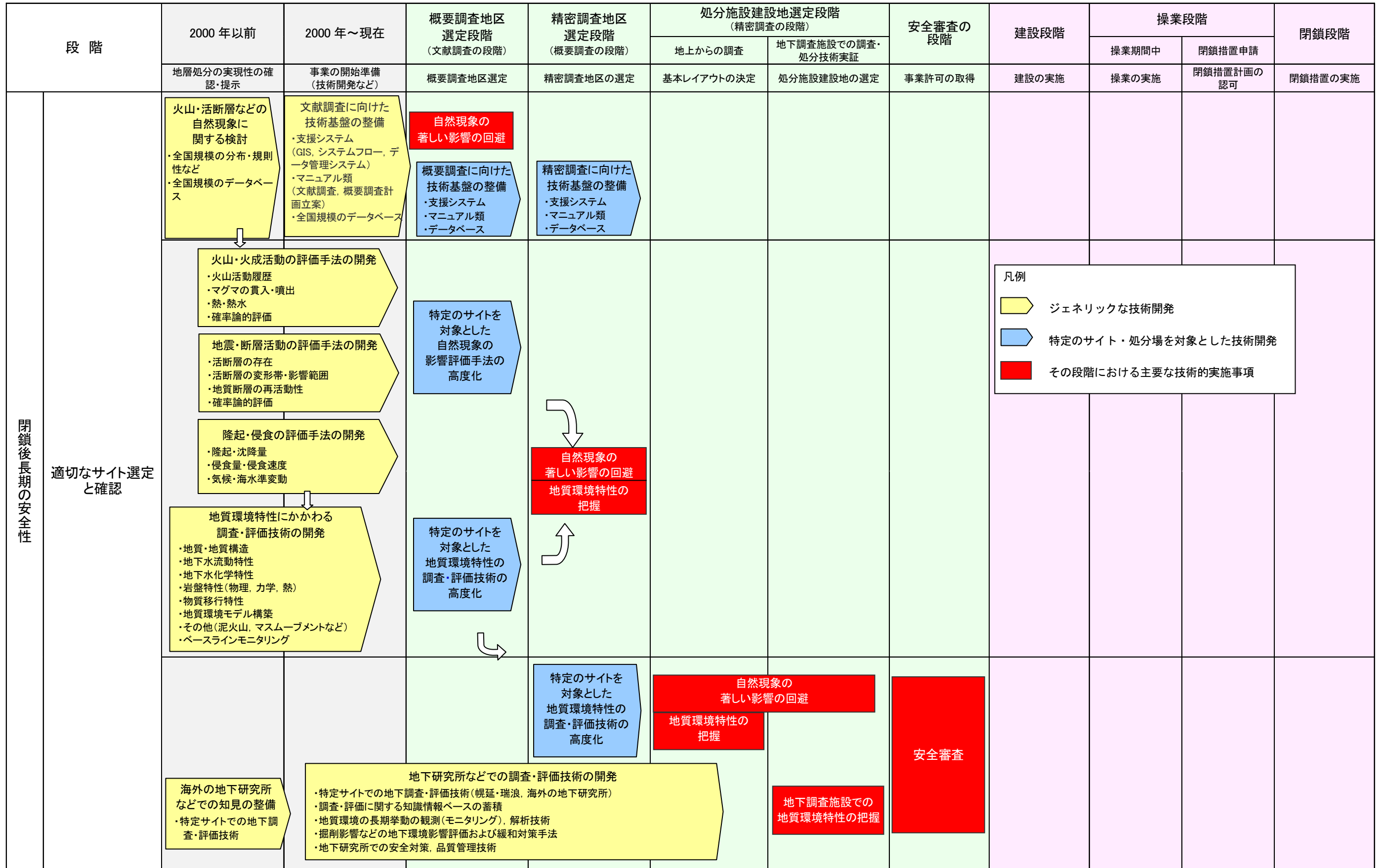


図 4.1.3-3 技術開発ロードマップ (適切なサイト選定と確認)



図 4.1.3-4 技術開発ロードマップ (適切な工学的対策)

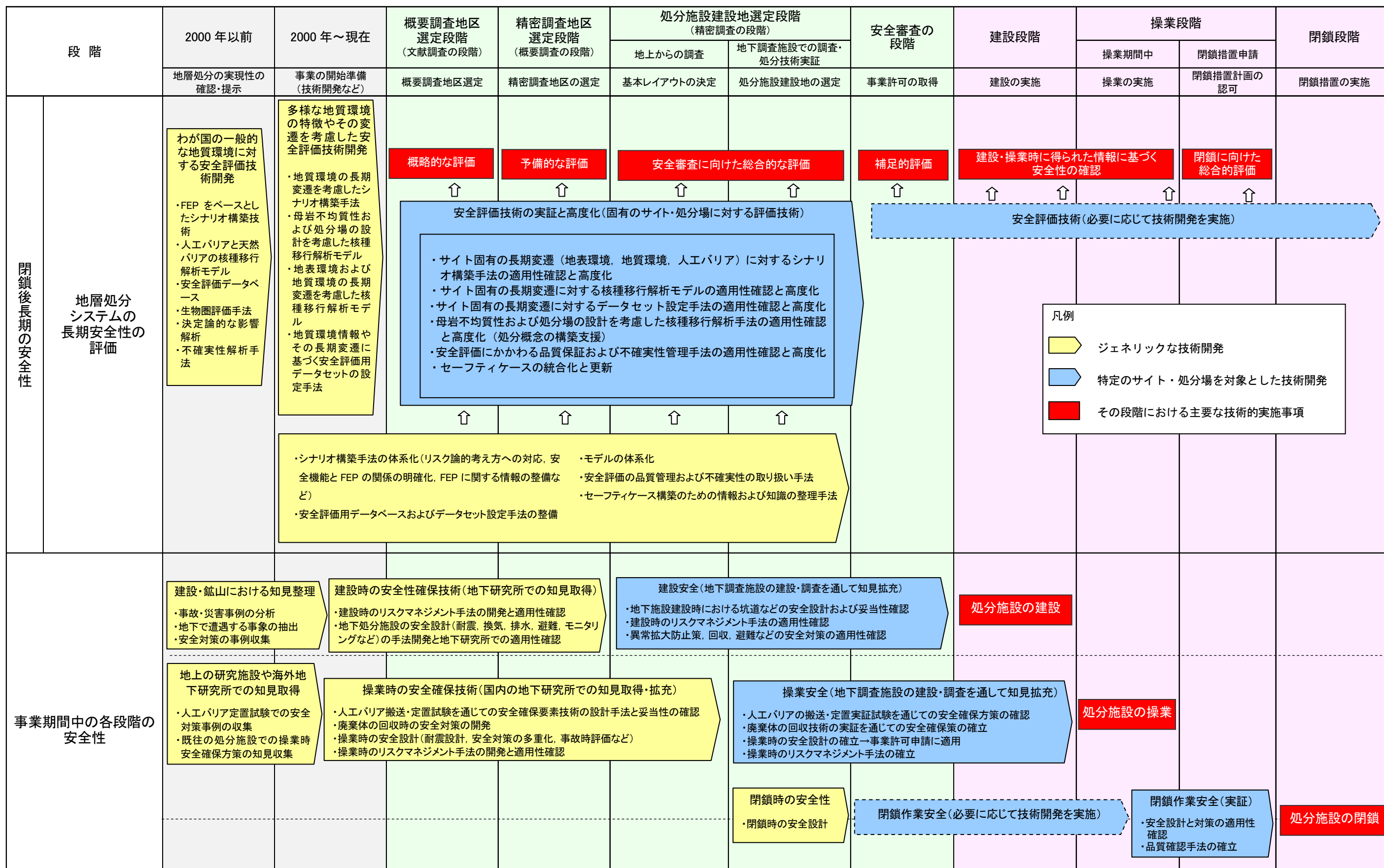


図 4.1.3-5 技術開発ロードマップ(地層処分システムの長期安全性の評価, 事業期間中の各段階の安全性)

4.1.4 方針3の具体的展開

4.1.4.1 方針3を具体的に展開するに当たっての考え方

3.2.4.1 で述べたように、地層処分事業は社会的にこれまで経験したことのない事業であり、各事業段階において安全な地層処分の実現に向けて行う技術的实施内容を分かりやすく提示していくとともに、社会のその時代の価値観に基本的な視点を置いて適切な施策を展開することが重要である。そのためには、各段階において得られる技術情報をホームページや説明資料などとして日常的に公開するとともに、関係する自治体や地域住民の関心事項、不安、懸念事項、認知度などを体系的に分析し、地層処分技術の現況が地域住民の価値観にどの程度適合しているかを常に把握し、必要な施策や行動を継続的に行っていくことが重要である。

地層処分は、「地下深部における」、「遠い将来を視野に入れた」、「放射線の影響」という直感的に理解しにくい内容を含むため、原子力分野の専門家以外の関係者に安全性への信頼感を醸成するには広範かつ継続的な取り組みが必要である。本報告書では、技術的な面で信頼感醸成のために取り組むべき内容を信頼感醸成ロードマップとして提示した（図 4.1.4-1）。

4.1.4.2 信頼感醸成ロードマップ

段階的に事業を推進する中で、方針3「安全性への信頼感醸成へ向けた技術的な取り組み」をどのように展開するかを信頼感醸成ロードマップとして提示する。信頼感醸成ロードマップは第3章で提示した三つの方策（方策1：事業の各段階における意思決定にかかわる情報提供、方策2：安全性や技術の信頼性にかかわる日常的な情報提供と対話活動、方策3：将来世代が適切な判断を行うための環境整備）に基づいて構成した。

方策1は、各段階における重要な意思決定に向けて、個別の技術的な取り組みから得られた成果を整理・統合して、安全性の根拠となる資料として提示する活動である。安全性の根拠を包括的に示す方法としてはセーフティケースという概念があるが、一般の関係者に対しては、技術的な論拠に基づいて構築したセーフティケースを理解しやすい形に再構成して提示する必要がある。信頼感醸成ロードマップでは、各段階における主要な意思決定事項を明示した上で、その意思決定に向けて提示する情報を整理する。

方策2は、技術的な実施事項から得られる情報を日常的に提供し、対話活動を実施するという取り組みと、地層処分の安全性に関する心配要因の分析や信頼感醸成活動という項目に分けて示した。前者は事業期間中に得られる情報をタイムリーに提示していく取り組みであり、例えばボーリング調査の現場で実施内容を紹介し、調査によって得られた技術情報を分かりやすく構成して提示するといった活動である。後者は対象とする関係者の心配要因分析に基づいて、心配要因の除去を行うためにどのような対応が必要かを検討し、信頼感醸成に向けてどのような技術的な取り組みを行うかという活動である。

方策3は、事業が長期間にわたることを考慮して、現世代が今の時点で100年近い将来のことまで一義的に決めてしまうのではなく、将来世代がその時点における諸条件の中で一定の決定の余地を残しておくという考え方である。将来世代がかかわる大きな意思決定には処分場の閉鎖の判断と、事業廃止の判断があり、また将来にわたって処分場をどのように扱うのかといった点が挙げられる。

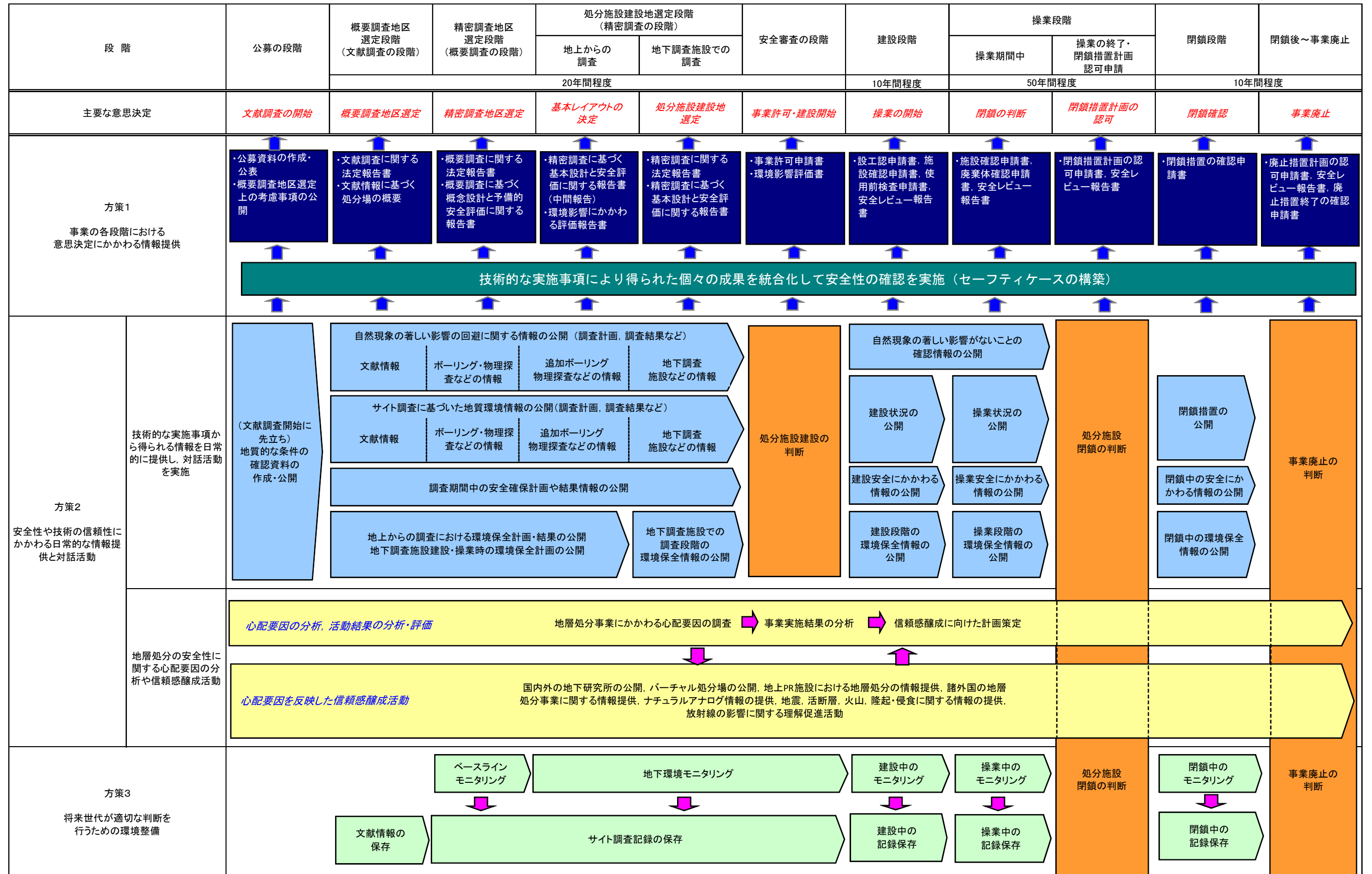


図 4.1.4-1 信頼醸成ロードマップ

4.2 事業中の各段階における実施事項

4.2.1 サイト選定および安全審査の段階

4.2.1.1 概要調査地区選定段階（文献調査の段階）

・本段階における事業目標	: 概要調査地区選定
・安全確保にかかわる目標	: 自然現象の著しい影響の回避 (明らかに不適格な地域を避ける)
・目標達成にかかわる要件	: 法定要件への適合性 概要調査地区選定の環境要件への適合性 自主基準（考慮事項含む）への適合性
・安全確保にかかわる主要文書	: 文献調査に関する法定報告書 文献情報に基づく処分場の概要

(1) 実施事項

概要調査地区選定段階（文献調査の段階）における事業目標は概要調査地区の選定であるが、安全確保にかかわる目標としては、自然現象の著しい影響の回避（明らかに不適格な地域を避ける）が挙げられる。これらの目標達成にかかわる要件としては、最終処分法で定められている法定要件に加え、概要調査地区選定の環境要件および自主基準（概要調査地区選定上の考慮事項（NUMO, 2009b）含む）への適合性がある。また、必要に応じて概要調査地区選定上の考慮事項に含まれる付加的に評価する事項などにより、地質環境の条件を含む総合的な評価や必要に応じ相対的評価を行う。

この段階では、文献調査の開始に先立ち、対象となる区域が「地質的な条件」により文献調査の対象となることを確認する。「地質的な条件」とは、全国一律に評価する地震と噴火に関する考慮事項の考え方を適用した条件であり、すでに公表している（NUMO, 2009b）。この確認作業の結果、対象となる区域が条件を満足した場合のみ、文献調査を実施する。

文献調査は「文献調査計画書」に基づいて実施し、文献情報の収集方法としては、データベース検索、関係機関からの提供、一般の方々からの提供を予定している。収集する文献情報は、「概要調査地区選定上の考慮事項」の法定要件に関する事項および付加的に評価する事項に対応する内容であり、具体的には、対象とする地域に関連する自然現象、地質環境特性などに関するものである。収集した文献情報は地質環境データ管理システムにより一元的に管理する。

NUMOは、文献調査により収集した資料を詳細に分析し、「概要調査地区選定上の考慮事項」のうち、法定要件である地震・断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食などの自然現象による影響の記録の評価を行い、それらが明らかに著しいと判断される範囲を除外する。これにより、安全にかかわる目標として設定した自然現象の著しい影響の回避（明らかに不適切な地域を避ける）を達成することができると考えている。さらに、第四紀の未固結堆積物と鉱物資源および付加的に考慮する事項に関する検討結果に基づいて、概要調査地区を選定し、「文献調査に関する法定報告書」を作成する。

併せて、収集した一連の文献情報に基づいて広域的な地質環境モデルを構築し、これまで開発してきた処分場概念オプション（NUMO, 2004）を出発点として、対象区域の地質環境特性に応じた概略的な処分施設設計を実施する。これらの情報に基づいて地層処分の閉鎖後長期の安全性に関する概略的な評価を行う。この作業から、次段階の調査により取得すべき安全性にかかわる重要なサ

イトの情報を特定し、次段階の概要調査計画の策定に反影する。

ただし、これらの作業は公開された文献・資料に基づいており、それらから得られる情報量には限界があるため、不確実性が存在する。そのような不確実性は、安全性に及ぼす影響の程度を考慮し、次段階における調査項目として調査計画に含め、不確実性の低減を図る。具体的には、工学的対策を検討する際には、地質環境特性に含まれる不確実性の高い情報に関しては、十分な保守性を考慮した状態を設定して対策検討を行う。また、安全評価においても、モデルやパラメータに含まれる不確実性を評価した上で、既存の性能評価モデルを活用した感度解析的な方法を用いることで、不確実性が安全性に及ぼす影響を幅広く検討できると考える。

上述したような処分場概念や閉鎖後長期の安全性の概略的な検討に基づき、当該区域に処分場を設置した場合の地上・地下施設のイメージを「文献情報に基づく処分場の概要」として取りまとめ公表する。これらの報告書とその補足文書からなる文書群により、安全性に関する検討を行う。この段階での安全性の検討は根拠となる情報が既存の文献に限られることなどから、セーフティケースとして文書化することはせず、その検討結果は、次段階の調査計画の策定に反映することを主たる目的とする。

一方、事業期間中の安全性に関しては一般労働安全の確保、放射線安全の確保、周辺環境の保全という三つの観点から検討を行う。

一般労働安全の確保に関しては、建設・操業の実現性確認のための情報を収集・評価するとともに、建設および操業段階で支障となり得る自然現象の有無などを評価する。また、地下構造物の耐震性の検討のための文献情報も収集・評価する。

放射線安全の確保に関しては、廃棄体の地上施設までの運搬時や地上施設における廃棄体取り扱い時の公衆安全および作業従事者の安全に関する検討を行う。

周辺環境の保全に関しては、環境保護の観点からの制約を調査する。事業期間中の安全性の検討結果も「文献情報に基づく処分場の概要」の中に含める。

上記をフロー図として示すと図 4.2.1-1 のようになる。

概要調査地区選定段階(文献調査の段階)

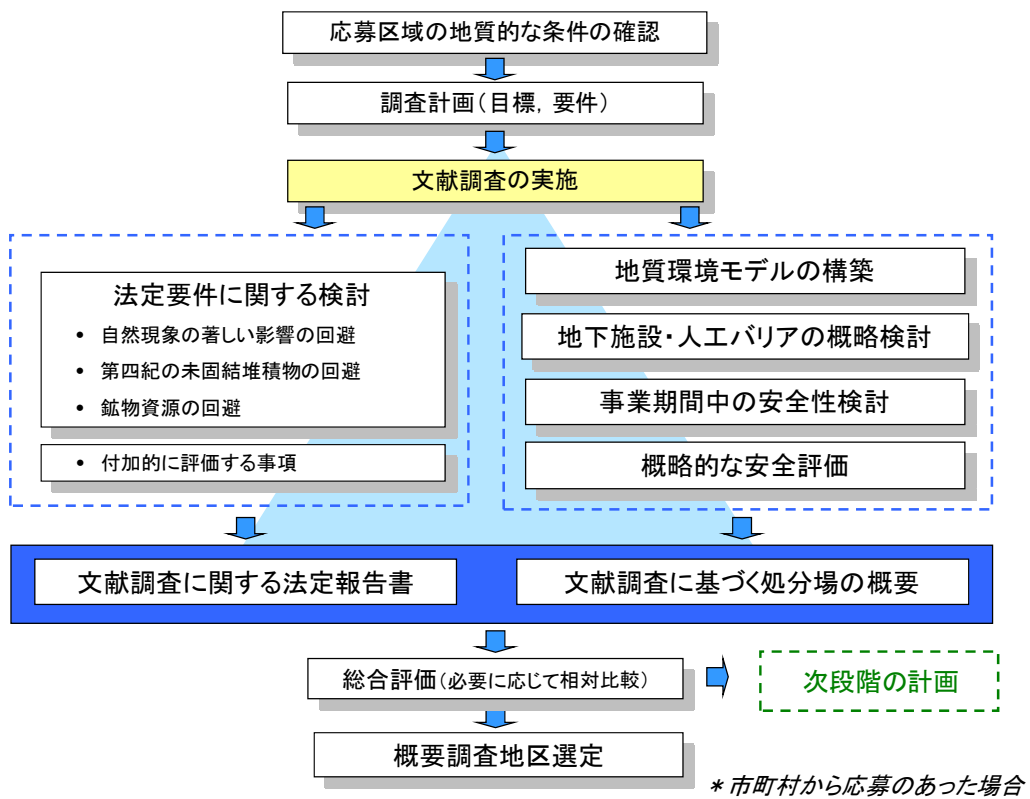


図 4.2.1-1 概要調査地区選定段階(文献調査の段階)における実施フロー図

(2) 概要調査地区選定上の考慮事項について

NUMOは、各段階の調査地区選定上の考慮事項は、その選定段階の調査を開始する前に作成・公表することとしている。なお、概要調査地区選定上の考慮事項は、公募関係資料としてすでに公開している。

サイト選定の最初の段階である概要調査地区の選定の目的は、文献調査で分かる範囲で、地震、噴火、隆起・侵食の観点から、処分施設建設地としての適性が明らかに劣る地域を含まないように概要調査地区を選定することである。

「概要調査地区選定上の考慮事項」は、概要調査地区を選定する上で考慮する事項とその評価の考え方などを示したものであり、最終処分法および同施行規則に示された概要調査地区の法定要件に基づくとともに、「高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について」(平成14年9月)(原子力安全委員会, 2002)を踏まえて策定した。

「概要調査地区選定上の考慮事項」には、「法定要件に関する事項」と「付加的に評価する事項」がある(表4.2.1-1)。

「法定要件に関する事項」は、最終処分法および同施行規則に定められた法定要件の内容を具体化した事項であり、概要調査地区を選定する上での除外要件となる。ここでは、地震、噴火、隆起・侵食、第四紀の未固結堆積物および鉱物資源に関する事項を対象に、全国規模で整備された情報に加えて、個別の応募区域およびその周辺の地域を対象とする文献調査により概要調査地区としての適格性を評価する。

一方、「付加的に評価する事項」は、概要調査地区選定に関する除外要件には該当しないものの、原環機構は、「安全性の確保の前提のもと、経済性および効率性にも留意して事業を行う必要がある」という事業推進に関する方針（通商産業省，2000）を踏まえ、次段階以降の法定要件や建設・操業に当たって必要な事項として設定したものである。法定要件に対する適合性が確認されたサイトを対象に、①地層の物性・性状に関する事項、②地下水の特性に関する事項、③地質環境の調査・評価に関する事項、④建設・操業時における自然災害に関する事項、⑤土地の確保に関する事項、⑥輸送に関する事項、により必要に応じて相対比較を行う。

表 4.2.1-1 概要調査地区選定上の考慮事項

分類	法定要件に関する事項		付加的に評価する事項
	地質的な条件の事前確認に関する事項	文献調査により評価する事項	
考慮事項の内容	<p>①地震 陸域では空中写真判読など、海域では海上音波探査などに基づいて、全国的に調査された文献に示されている活断層がある場所は、文献調査の対象としない。</p> <p>②噴火 第四紀火山の中心から半径 15km の円の範囲内にある地域は文献調査の対象としない。</p>	<p>①地震 繰り返し活動し、変位の規模が大きい活断層などについて、次の事項に該当すると明確に判断される場所、範囲は含めないように、概要調査地区を選定する。 ・全国一律に評価する事項で用いた以外の文献によって認められる活断層がある場所 ・活断層の幅（断層破砕帯）およびその外側の変形帯に含まれる範囲 ・活断層の分岐などの発生の可能性が高い場所 ・顕著な活動を継続している活褶曲や活撓曲の分布範囲</p> <p>②噴火 第四紀火山の中心から半径 15km の円の外側の地域でも、将来数万年にわたりマグマの地殻への貫入や地表への噴出が明確に判断される地域は含めないように、概要調査地区を選定する。また、将来も含め、マグマによる著しい熱の影響、強酸性の熱水、あるいは著しい熱水対流が存在すると明確に判断される地域は含めないように、概要調査地区を選定する。</p> <p>③隆起・侵食 過去 10 万年間の隆起の総量が 300m を超えていることが明らかな地域は含めないように、概要調査地区を選定する。</p> <p>④第四紀の未固結堆積物 地層処分を行おうとする地層が、第四紀の未固結堆積物である地域は含めないように、概要調査地区を選定する。</p> <p>⑤鉱物資源 地層処分を行おうとする地層において、その採掘が経済的に価値が高い鉱物資源が存在する地域は含めないように、概要調査地区を選定する。</p>	<p>①地層の物性・性状 岩盤の強度、変形・割れ目・風化・変質の状況、地温勾配、岩体の形状・規模、隆起・侵食の速度、異常間隙水圧・膨脹性地山・ガス突出・山はね・大出水の可能性</p> <p>②地下水の特性 地下水の流量・流速、水温、pH、酸化還元性</p> <p>③地質環境の調査・評価 調査の範囲・規模・期間、調査技術・評価手法などの適用性、火成活動・断層活動などの地質環境の評価・モデル化の容易性、調査に対する土地利用などの制約</p> <p>④建設・操業時における自然災害 地震・地すべり・洪水などの重大な自然災害の発生可能性</p> <p>⑤土地の確保 土地の確保の容易性</p> <p>⑥輸送 利用可能な港湾または港湾候補地からの距離などの輸送の容易性</p>
評価	文献調査の対象となることを確認	概要調査地区選定に関する法定要件に対する適格性を評価	法定要件に対する適格性が確認された地区を対象に、必要に応じて相対比較を実施
情報	NUMO が指定する全国規模の文献	応募区域およびその周辺の地域を対象とする全国規模および地域規模の文献その他資料	

4.2.1.2 精密調査地区選定段階（概要調査の段階）

・本段階における事業目標	: 精密調査地区選定
・安全確保にかかわる目標	: 自然現象の著しい影響の回避 長期安全性確保の見通し 事業期間中の安全性確保の見通し
・目標達成にかかわる要件	: 法定要件への適合性 精密調査地区選定の環境要件への適合性 安全審査基本指針への適合性 自主基準（考慮事項含む）への適合性
・安全確保にかかわる主要文書	: 概要調査に関する法定報告書 概要調査に基づく概念設計と予備的安全評価に関する報告書

(1) 実施事項

精密調査地区選定段階（概要調査の段階）における事業目標は「精密調査地区の選定」であるが、安全確保にかかわる目標としては、「自然現象の著しい影響の回避」、「長期安全性確保の見通し」、「事業期間中の安全性確保の見通し」がある。これらの目標達成にかかわる要件としては、最終処分法で定められた「法定要件への適合性」、「精密調査地区選定の環境要件への適合性」、「安全審査基本指針への適合性」、「自主基準（精密調査地区選定上の考慮事項含む）への適合性」がある。これらの要件を考慮した上で、この段階の目標を達成するために、NUMOは以下の事項を実施する。

概要調査は、「概要調査計画書」に基づいて、地域全体の広域的な地質環境の情報を得ることを主たる目的として、地表踏査、物理探査、ボーリング調査などを実施する。

概要調査の結果に基づき、「精密調査地区選定上の考慮事項」に示す地震・断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食といった自然現象による著しい影響を回避できることを確認する。

精密調査地区選定段階（概要調査の段階）では、概要調査で取得した地質環境の情報を踏まえて、概要調査地区選定段階（文献調査の段階）で構築した地質環境モデルを更新し、精密調査地区を対象としたスケールの地質環境モデルを構築し、地質環境特性の長期変遷についても検討を行う。

更新された地質環境モデルに基づいて、地上・地下施設の基本レイアウトを設定し、人工バリアの工学的実現性確認、長期安全性に関する予備的な評価、事業期間中の安全性の検討を行う。安全性については、複数のフェーズで段階的に実施する中で、三つの安全確保策（適切なサイト選定と確認、処分場設計・施工などの適切な工学的対策、地層処分システムの長期安全性の評価）を相互に連携させることで確保する。

さらに、処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）以降の技術開発や基盤研究開発への追加すべきニーズを取りまとめる。また、効率的に事業を進めるために、地質環境特性、安全性、経済性などの観点から総合的に判断した上で、処分場概念をレファレンス処分場概念として一つに絞り込む。この際に、この段階での不確実性を考慮し、一つに絞り込むことが適当でない場合には、複数の処分場概念オプションを示すことも検討する。

事業期間中の安全性について、一般労働安全の確保、放射線安全の確保、周辺環境の保全という三つの分野に分けて検討を行うという点は、前段階の概要調査地区選定段階（文献調査の段階）と同様であるが、前段階が文献情報のみに基づいた検討であったのに対し、この段階では、地表踏査、

物理探査, トレンチ調査, ボーリング調査などから, より詳細なサイトの情報が得られているため, より現実的な評価が可能になると考えている。これらの調査を実施するに当たっては, 作業安全に留意するとともに, 周辺環境に十分配慮する。

上記の検討結果を踏まえ, 「精密調査地区選定上の考慮事項」に基づいて精密調査地区を選定し, 法律に基づく「概要調査に関する法定報告書」を作成するとともに, 処分場の設計, 長期安全性や事業期間中の安全性などの評価結果を含む「概要調査に基づく概念設計と予備的安全評価に関する報告書」を取りまとめ公表する。

これらの報告書とその補足文書から成る文書群により, この段階のセーフティケースを構成し, ステークホルダーへの安全性の提示に利用する。また, 次段階に向けて, 処分施設建設地選定上の考慮事項を作成して公表し, これに基づき精密調査計画の立案を行う。

次段階の後半に予定している地下調査施設の建設が, 地質環境や周辺環境に擾乱を及ぼす可能性があることに配慮し, 影響を受ける前の状態を把握するためのモニタリングを開始する。

この段階における実施事項をフロー図として示すと図 4.2.1-2 のようになる。

精密調査地区選定段階(概要調査の段階)

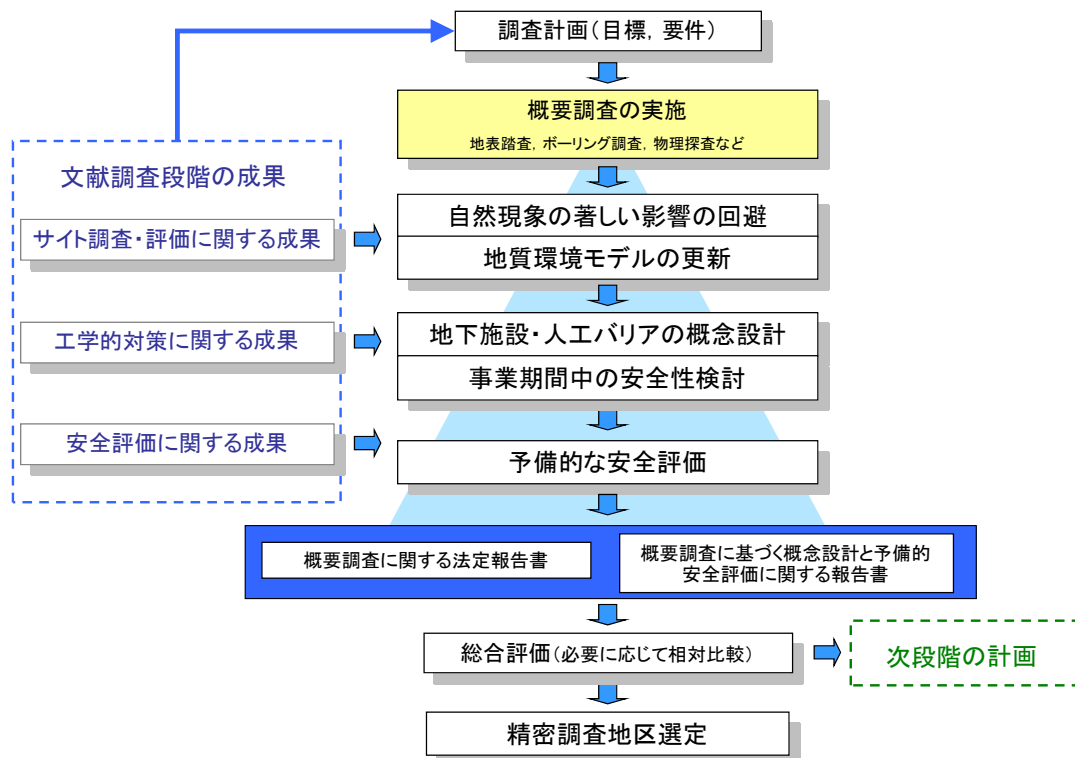


図 4.2.1-2 精密調査地区選定段階(概要調査の段階)における実施フロー図

(2) 精密調査地区選定上の考慮事項について

NUMO は, 各段階の調査地区選定上の考慮事項を, その選定段階の調査を開始する前に作成・公表することとしている。

精密調査地区選定に際しては, 地層処分事業における安全確保を念頭におき, 最終処分法に定められている要件(法定要件)への適合性を第一に評価を行う。また, 精密調査地区選定はサイト選

定の中間段階に当たることから、精密調査地区選定上の考慮事項の策定においては、本段階に関する法定要件はもとより、前段階（概要調査地区選定段階）の考慮事項への適合性などの確認、さらには次段階（処分施設建設地選定段階）の最終処分法に定められた要件も踏まえて行う。

本段階に関する法定要件は次の通りである。

- ・ 当該対象地層等において、地震等の自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないこと。
- ・ 当該対象地層等が坑道の掘削に支障のないものであること。
- ・ 当該対象地層等内に活断層、破碎帯又は地下水の水流があるときは、これらが坑道その他の地下の施設に悪影響を及ぼすおそれが少ないと見込まれること。
- ・ その他経済産業省令で定める事項。

精密調査地区選定上の考慮事項のうち、上記の法定要件に関する事項に関しては、地層の著しい変動、坑道掘削への支障、地下水の水流による地下施設への影響の観点から、事業の成立性を判断するための要件を設定する。

このうち、「地層の著しい変動」に対しては、概要調査地区内において、地震・断層活動、火山・火成活動および隆起・侵食に関する事項について検討を行う。

例えば、地震・断層活動に関しては、断層沿いのずれ破壊が地下施設および廃棄体へ直接的に破損を与える可能性があることから、最終処分法に定める「地層の著しい変動」として精密調査地区としての法定要件への適合性を評価することとし、活断層や活褶曲・活撓曲が存在していたり、将来的に断層の分岐などの可能性が高いと明確に判断される場所および範囲は含めないよう精密調査地区を選定する。

火山・火成活動に関しては、マグマの貫入・噴出に伴う力学的・熱的な破壊が地下施設および廃棄体へ直接的に破損を与える可能性があることから、最終処分法に定める「地層の著しい変動」として精密調査地区としての法定要件への適合性を評価することとし、第四紀にマグマが地表付近へ貫入または地表へ噴出したことが明らかな範囲や、マグマによる著しい熱や熱水・ガスの影響が及ぶ範囲、あるいはマグマの地表付近への上昇や地表への噴出の可能性の高い範囲は含めないよう精密調査地区を選定する。

隆起・侵食に関しては、地下施設の地表への露出や地下環境の酸化雰囲気への変化は地層処分システムの「隔離」あるいは「閉じ込め」機能の喪失につながることから、最終処分法に定める「地層の著しい変動」として精密調査地区としての法定要件への適合性を評価する。従って、地下施設の設置深度を考慮しても、隆起・侵食による地下施設および廃棄体の露出や地下施設周辺の環境が酸化雰囲気へ変化することにより被ばく影響が大幅に増加することが明らかな場所および範囲は含めないよう精密調査地区を選定する。

「坑道掘削への支障」に対しては、事業期間中の安全確保の観点から成立性を判断する事項について検討を行う。例えば、地層処分を行おうとする地層において未固結堆積物が分布していたり、地山の強度が著しく小さい、あるいは膨張性地山などにより難工事が予想されるなどの理由により、必要な廃棄体本数を定置するための処分坑道を安全かつ合理的（現実的な対策の範囲内）に掘削することが困難であると判断される場所および範囲は含めないよう精密調査地区を選定する。

また、大規模な破碎帯などの高透水性のゾーン（水みち）が存在する場合は、この水みちを介し

て浅層あるいは地下深部から地下水が地層処分を行おうとする地層に到達し、地下水流動特性、地化学特性、熱特性が地下施設のもつバリア性能に著しい影響を及ぼす恐れがあることから、最終処分法に定める「地下水の水流による地下施設への影響」の観点から、精密調査地区としての法定要件への適合性を評価する。

一方、概要調査に続いて実施する精密調査には多大な費用と期間を要するため、精密調査地区選定においては、実施主体として、安全確保はもとより事業推進の面からも事業としての成立性の見通しを可能な限り得ておく必要がある。

従って、法定要件に対する適合性の確認とともに、精密調査地区としての特性に関して、閉鎖後長期の安全確保や建設可能性および事業期間中の安全確保、環境影響の低減、土地の確保、経済性および工程確保などの観点から、法定要件以外に関する事項（地質環境特性、自然環境特性、社会環境特性などに関する事項）についても総合的に評価を行い、地層処分の成立性の判断および相対比較を行う。

「精密調査地区選定上の考慮事項」については、精密調査地区選定に関する原子力安全委員会などの検討状況などを踏まえつつ、精密調査地区選定段階（概要調査の段階）の開始までに策定し、公表する予定である。

4.2.1.3 処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）

(i) 地上からの調査段階

・本段階における事業目標	: 処分施設の基本レイアウトの決定
・安全確保にかかわる目標	: 自然現象の著しい影響の回避を確認 長期安全性の確保 事業期間中の安全性の確保
・目標達成にかかわる要件	: 法定要件への適合性 処分施設建設地選定の環境要件への適合性 安全審査基本指針への適合性 自主基準（考慮事項含む）への適合性
・安全確保にかかわる主要文書	: 精密調査に基づく基本設計と安全評価に関する報告書（中間報告） 環境影響にかかわる評価報告書

(a) 実施概要

「処分施設建設地選定段階」（精密調査の段階）は、「地上からの調査段階」と「地下調査施設での調査段階」の二つの段階に分けて実施する予定である。

「地上からの調査段階」における事業目標は、処分関連施設の基本レイアウトを決定することである。この基本レイアウトを基準として、地質環境の情報を得るために適した地下調査施設の配置や構成を検討・設定する。この段階の安全確保にかかわる目標は、「自然現象の著しい影響の回避の確認」、「長期安全性の確保」、「事業期間中における安全性の確保」の三つである。これらの目標を達成するために、要件としては「法定要件への適合性」、「処分施設建設地選定への環境要件の適合性」、「安全審査基本指針への適合性」、「自主基準（考慮事項を含む）への適合性」を満足する必要がある。これらの要件を考慮した上で、この段階の目標を達成するために、以下の事項を実施する。

まず、調査に先立ち経済産業大臣から実施計画の変更承認を受け、「精密調査計画書」を公表し、それに基づき地下調査施設での調査の前段となる地上からの調査を実施する。地上からの調査は、前段階の概要調査によって得られた地質環境情報の確認、詳細化、特に、処分場建設候補地周辺の地下情報の取得を目的として実施する。

また、新たに取得した地質環境の情報に基づき地質環境モデルを更新し、それを踏まえて人工バリアや処分パネルのレイアウトなどの設計を見直し、廃棄体および人工バリア材の運搬・定置にかかわる再検討および長期安全性の評価を行って処分施設の基本レイアウトを決定する。それらの結果は、「精密調査に基づく基本設計と安全評価に関する報告書（中間報告）」として取りまとめ、関連する補足文書と併せてこの段階のセーフティケースとして取りまとめる。

さらに、基本レイアウトに基づき、地下施設での調査や技術の実証などを目的に、次段階で建設する地下調査施設の配置を決定し、精密調査計画（地下調査施設での調査）を立案する。

また、地下調査施設の建設に先立ち環境影響評価を行い、適切な環境保全策を講じる。それらの結果は「環境影響にかかわる評価報告書」として取りまとめる。

この段階における実施事項をフロー図として示すと図 4.2.1-3 のようになる。

処分施設建設地選定段階（精密調査の段階） 地上からの調査

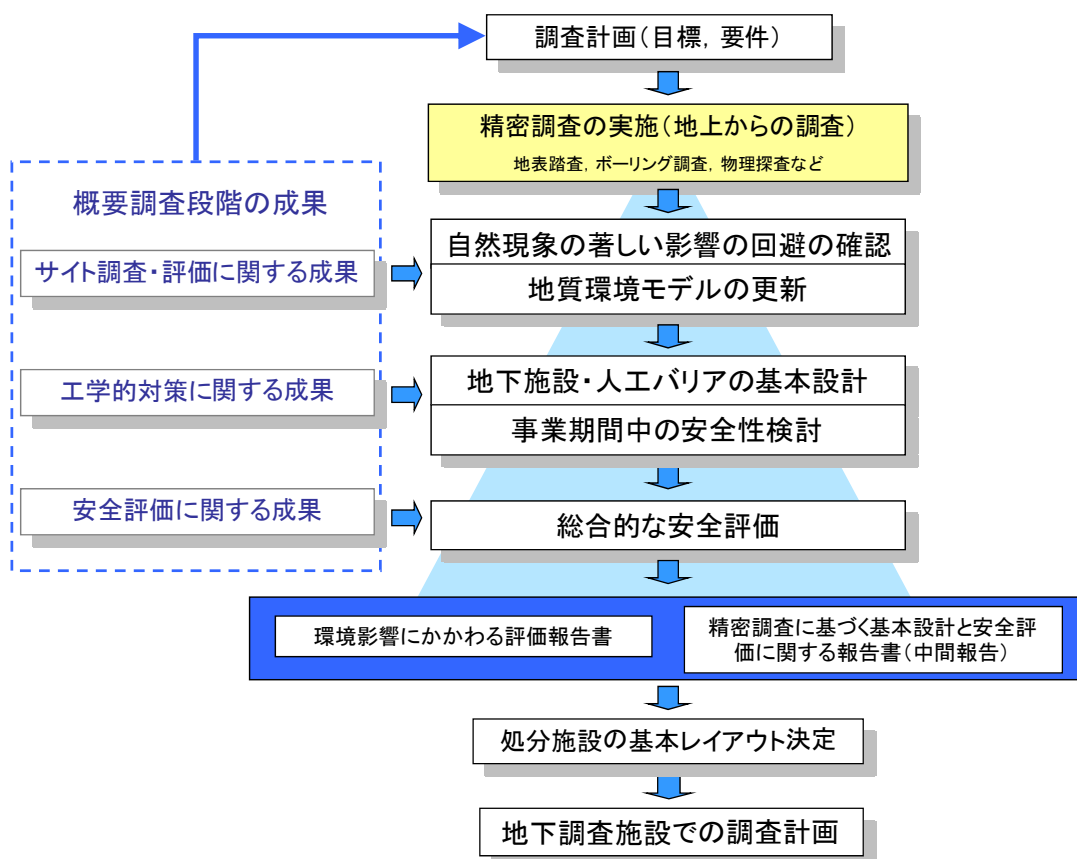


図 4.2.1-3 処分施設建設地選定段階（地上からの調査）における実施フロー図

(ii) 地下調査施設での調査段階

・本段階における事業目標	: 処分施設建設地選定
・安全確保にかかわる目標	: 自然現象の著しい影響の回避を確認 長期安全性の確実な確保 事業期間中の安全性の確実な確保
・目標達成にかかわる要件	: 法定要件への適合性 処分施設建設地選定の環境要件への適合性 安全審査指針への適合性 自主基準（考慮事項含む）への適合性
・安全確保にかかわる主要文書	: 精密調査に関する法定報告書 精密調査に基づく基本設計と安全評価に関する報告書

(a) 実施概要

「処分施設建設地選定段階」の後半として実施する「地下調査施設での調査段階」における事業目標は、「処分施設建設地選定」である。

この段階の安全確保にかかわる目標は、「自然現象の著しい影響の回避を確認」、「長期安全性の確実な確保」、「事業期間中における安全性の確実な確保」である。これらの事業目標と安全確保にかかわる目標を達成するための要件は、「法定要件の適合性」、「処分施設建設地選定の環境要件の適合」、「安全審査指針の適合性」、「自主基準（処分施設建設地選定上の考慮事項含む）の適合性」であり、これらの要件を考慮した上で、この段階の目標を達成するために、以下の事項を実施する。

この段階では、前段階の「(i) 地上からの調査段階」で作成した「精密調査計画書」を改定するとともに、地下施設での詳細な調査計画を作成し、対象としている母岩が地層処分に適していることを確認するために、対象母岩中に坑道を掘削し、地下深部における岩盤の特性調査や原位置試験などを行う。また、三つの安全確保策（適切なサイト選定と確認、処分場の設計・施工などの適切な工学的対策、地層処分システムの長期安全性の評価）を相互に連携させながら、不確実性の影響を効率的に低減させ、閉鎖後長期の安全性にかかわる信頼性を向上させる。

地上・地下施設に関しては、基本設計を行い、人工バリアの仕様の決定、製造・施工の実証を行うとともに、地質環境モデルおよび基本設計に基づいて閉鎖後長期の安全性の評価を実施する。また、建設・操業段階の計画を立案し事業期間中の詳細な安全確保策の検討を行う。

さらに、地下調査施設などの一部を活用して、建設や操業にかかわる技術のうち地層処分に固有な主要技術については実証試験を行う。また、人工バリアやニアフィールドの長期的な性状変化の予測・評価に資するデータ取得を目的とした実証試験を開始する。

この段階における実施事項をフロー図として示すと図 4.2.1-4 のようになる。

処分施設建設地選定段階(精密調査の段階) 地下調査施設での調査

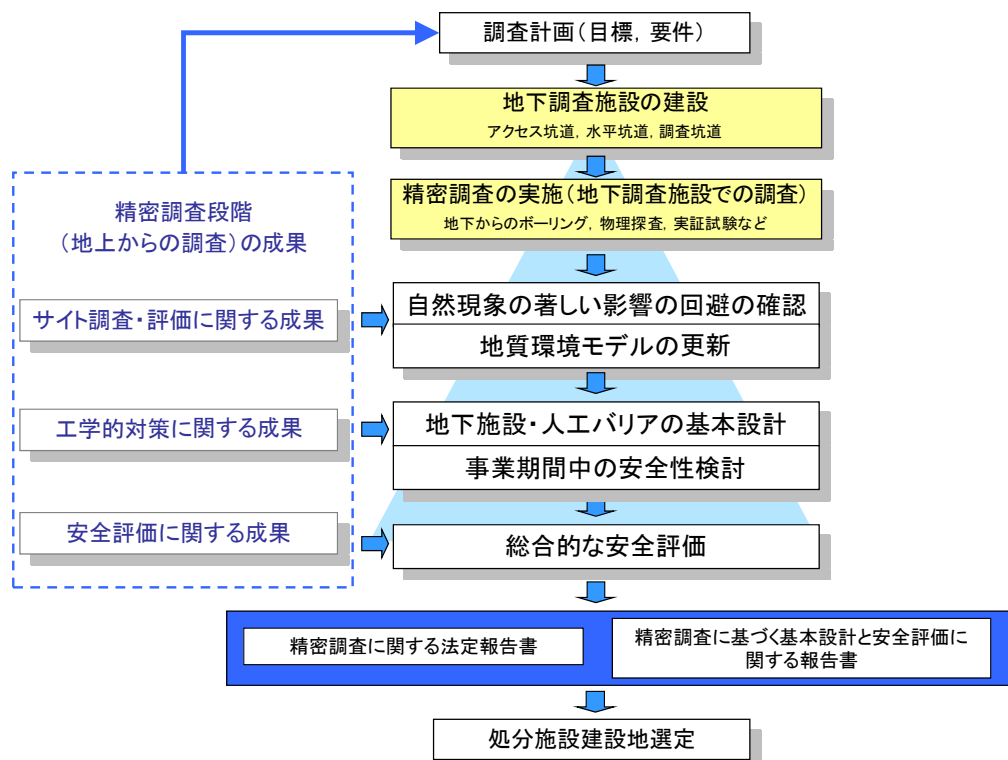


図 4.2.1-4 処分施設建設地選定段階(地下調査施設での調査)における実施フロー図

(b) 処分施設建設地選定上の考慮事項について

NUMOは、各段階の調査地区選定上の考慮事項を、その選定段階を開始する前に作成・公表することとしており、処分施設建設地選定上の考慮事項は処分施設建設地選定段階(精密調査の段階)を開始する前に作成・公表する。

処分施設建設地の選定の目的は、精密調査(地上からの調査および地下調査施設における調査)を実施し、その結果および前段階において取得した情報に基づき、地震などの自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないことを確認するとともに、地層処分システムの長期安全性が確実に確保される場所を処分施設建設地として選定することである。

処分施設建設地選定段階については、サイト選定の最終段階となることから、「処分施設建設地選定上の考慮事項」は、本段階に関して最終処分法に定められた法定要件はもとより、前段階(精密調査地区選定段階)の考慮事項への適合性などの確認、次段階の安全審査への準備を踏まえて策定する必要がある。

本段階に関して最終処分法に定められた法定要件は次のとおりである。

- ・ 地下施設が当該対象地層内において異常な圧力を受けるおそれがないと見込まれること、その他当該対象地層の物理的性質が処分施設の設置に適していると見込まれること。
- ・ 地下施設が当該対象地層内において異常な腐食作用を受けるおそれがないと見込まれること、その他当該対象地層の化学的性質が処分施設の設置に適していると見込まれること。
- ・ 当該対象地層に地下水またはその水流が地下施設の機能に支障を及ぼすおそれがないと見込

まれること。

- ・ その他経済産業省令で定める事項。

「処分施設建設地選定上の考慮事項」についても概要調査地区選定段階（文献調査の段階）あるいは精密調査地区選定段階（概要調査の段階）と同様に、「法定要件に関する事項」と「付加的に評価する事項」に分けられる。「法定要件に関する事項」に関しては、上記の最終処分法に定められた法定要件に基づいて、除外要件を設定することとなる。

また、「除外要件」を満足する地区の中から処分施設建設地としての特性を総合的に評価するために「付加的に評価する事項」を設定する。「付加的に評価する事項」は、本段階の除外要件には該当しないものの、処分施設の設置位置を最終的に確定することとなることから、より好ましい処分施設位置を選定するに当たって考慮すべき事項や、安全審査に資する情報の取得、建設・操業・閉鎖の段階などに関して本段階で可能な範囲で見通しを得るべき事項である。

4.2.1.4 安全審査の段階

・ 本段階における事業目標	: 事業許可の取得
・ 安全確保にかかわる目標	: 長期安全性の確実な確保 事業期間中の安全性の確実な確保
・ 目標達成にかかわる要件	: 安全審査指針への適合性 安全審査基本指針への適合性
・ 安全確保にかかわる主要文書	: 事業許可申請書 環境影響評価書

この段階では、「事業許可申請書」を国へ提出し、事業許可を申請する。また、安全審査期間中においても、必要に応じて補足的な調査・評価を実施する。

また、処分場の建設・操業に伴う周辺環境への影響に関する調査や予測評価、処分場の建設、操業時における保全対策の策定などの環境影響評価を実施し、「環境影響評価書」を作成し公表する。併せて、建設に向けた準備として「設計および工事の方法の認可」（以下、設工認という）の申請書などの作成も並行して進める。

4.2.2 建設～事業廃止までの段階

4.2.2.1 建設段階

・本段階における事業目標	: 処分施設の建設
・安全確保にかかわる目標	: 新たな知見を踏まえた長期安全性の繰り返し確認 建設段階における安全性の確実な確保
・目標達成にかかわる要件	: 技術上の基準への適合性（設工認，施設確認，使用前検査） 自主基準への適合性
・安全確保にかかわる主要文書	: 設工認申請書 施設確認申請書 使用前検査申請書 安全レビュー報告書

この段階では、国から事業許可を受けた後、地層処分施設建設のための準備工事に着手する。そして、廃棄物埋設施設は、随時設工認申請を行い、認可を受けた後、ガラス固化体受入・一時保管施設などの地上施設、並行して、地下施設の建設に着手する。地上・地下施設の建設では、事業許可申請と、設工認申請において示した処分場設計に基づき、要求機能を満足するように品質を適切に管理しながら建設を進める。認可を受けたとおりに適切に建設が行われたことを、国による使用前検査を受検して確認する。

この段階では、建設中に取得する地質環境特性データ、各種のモニタリングデータなど、新たな情報が得られるため、これらの情報に基づき安全評価を行って処分場の安全性を再確認し、「安全レビュー報告書」として取りまとめ公表する。

また、これらの新たに得られた情報を用いて、地質環境特性をより正確に地下施設設計に取り込むことにより、法律を遵守した上で、安全確保上の観点から必要に応じて処分坑道の位置や廃棄体の設置位置の変更を行う。また、操業技術・安全評価技術の高度化の観点から、地下調査施設で実証試験を必要に応じて実施する。

地上・地下施設の建設に際しては、原子力施設やトンネル・鉱山などの安全対策を参考として安全計画を立案し、国や地方自治体の承認を得た上で、それに従って建設を進める。

4.2.2.2 操業段階（操業期間中）

・本段階における事業目標	: 操業の実施
・安全確保にかかわる目標	: 新たな知見を踏まえた長期安全性の確認 操業段階における安全性の確実な確保
・目標達成にかかわる要件	: 技術上の基準への適合性（施設確認，廃棄体確認，使用前検査） 自主基準への適合性
・安全確保にかかわる主要文書	: 施設確認申請書 廃棄体確認申請書 安全レビュー報告書

この段階では、ガラス固化体の受け入れ、オーバーパックへの封入、廃棄体の搬送・定置などが

行われるため、各種基準や指針への適合性を確認するとともに、廃棄物受入施設などの性能、保安規定や核物質防護規定の遵守状況について国の定期的な検査を受ける。この段階においても、モニタリングを通じて得られる情報や新たな科学的知見を踏まえ、安全評価を行って処分場の安全性を再確認するとともに、定期的に「安全レビュー報告書」として取りまとめ公表する。

また、次段階の閉鎖について必要な技術の整備とその信頼性の向上を図るために、閉鎖技術の実証試験を行うとともに、精密調査段階以降から実施している人工バリアシステムの長期試験結果の取りまとめを行う。これらの情報も含め、この段階で得られる新たな情報や知見を加えてセーフティケースを更新し、「安全レビュー報告書」に反映する。

操業段階では、実際の放射性廃棄物を取り扱うため、一般労働安全と併せて、放射線安全のための対策を確実に講じ、操業を安全に進める。地下施設の建設および操業は処分パネル単位で実施するため、隣り合うパネルで建設と操業が同時期に並行して実施される場合もあるが、放射性廃棄物を搬入・定置するパネルでは放射線管理区域として厳格な管理を行うなど、建設にかかわる輸送や作業と明確に区分する。

また、次段階に向けて、安全レビュー結果、各段階における繰り返しの安全確認結果、実証試験成果などに基づき総合的に安全性を評価し、閉鎖措置計画の検討を行う。

4.2.2.3 操業段階（操業の終了・閉鎖措置計画認可申請）

・本段階における事業目標	: 閉鎖措置計画の認可
・安全確保にかかわる目標	: すべての情報を統合した長期安全性の提示
・目標達成にかかわる要件	: 閉鎖措置計画の認可の基準への適合性
・安全確保にかかわる主要文書	: 閉鎖措置計画の認可申請書 安全レビュー報告書

この段階では、操業を終了し、サイト調査から操業終了までに得られたすべての情報に基づき安全評価を行ってセーフティケースを更新することで、閉鎖の意思決定のための安全性の確認を行い、「安全レビュー報告書」を作成する。

原子炉等規制法の規定によれば、処分場を閉鎖しようとする場合、NUMOは閉鎖措置計画を定め、経済産業大臣の認可を受けなければならないと規定されているため、「閉鎖措置計画の認可申請書」を作成し認可を受ける。

4.2.2.4 閉鎖段階

・本段階における事業目標	: 閉鎖措置の実施
・安全確保にかかわる目標	: 閉鎖段階における安全性の確実な確保
・目標達成にかかわる要件	: 閉鎖措置計画の認可の基準への適合性 自主基準への適合性
・安全確保にかかわる主要文書	: 閉鎖措置の確認申請書

この段階では、原子炉等規制法の規定により、前の段階で認可された閉鎖措置計画に基づき、所要の品質を確保しつつ地下施設（連絡坑道やアクセス坑道など）を埋め戻し、処分場の閉鎖を行う。閉鎖措置が完了した時点で、実施状況や実施後の地形、地質、地下水の状況に関する事項を記載し

た「閉鎖措置の確認申請書」を作成し、経済産業大臣に申請を行い、確認を受ける。なお、閉鎖措置計画が認可されるまで、核物質の防護のための区域、廃棄体の回収可能性を維持する。

また最終処分法では、地層処分が終了したときは、あらかじめ処分施設の状況が定められた基準に適合していることを、経済産業大臣によって確認を受けなければならないと規定されている。閉鎖する場合、処分施設に関する記録は、NUMOが経済産業大臣に提出し、永久保存されることになっている。

この段階においても、一般労働安全と併せて放射線安全のための対策を確実に講じることにより、閉鎖を安全に進めるとともに、環境保全にも努める。

原子炉等規制法や最終処分法に基づく手続きを実行する上で必要な閉鎖措置計画の認可基準は、今後必要とされる時期までに具体化されるべき事項である。

4.2.2.5 閉鎖後～事業の廃止までの段階

・本段階における事業目標	: 廃止措置の実施と確認
・安全確保にかかわる目標	: 新たな知見を踏まえた長期安全性の確認 閉鎖後の段階における安全性の確実な確保
・目標達成にかかわる要件	: 廃止措置計画の認可の基準への適合性 廃止措置の終了確認の基準への適合性
・安全確保にかかわる主要文書	: 廃止措置計画の認可申請書 安全レビュー報告書 廃止措置終了の確認申請書

この段階では、原子炉等規制法に基づき、事業の廃止措置に向けて、長期にわたり安全性が確保されることを総合的に評価することにより、セーフティケースを更新し、安全レビュー報告書を作成する。その上で、「廃止措置計画の認可申請書」の作成・申請・認可取得を行う。

認可された廃止措置計画に基づき、所要の品質を確保して地上施設の解体を行い、廃止措置を行う。また、その際、品質管理を適切に行い、それらを記録する。廃止措置が終了した時点で、「廃止措置終了の確認申請書」を作成し、国へ確認の申請を行い、廃止措置の確認を受けた段階で、地層処分事業は原子炉等規制法の対象からはずれる。

なお、NUMOは、閉鎖後の処分施設跡地の区域管理を行い、NUMOの解散（最終処分法では、別の法律で定めるとされている）によりその責任は完了することになる。このような区域管理の具体的内容については今後、社会的要請などを考慮して改めて判断する。

また、最終処分法によれば、処分施設の敷地およびその周辺を保護する必要がある場合には、NUMOからの申請を受けて、国はその区域を保護区域として指定することができる。保護区域内では、経済産業大臣の許可を受けない土地掘削は禁止される。現時点においては、NUMO解散後の処分施設の扱いは別途法律で定めることとなっており、NUMOとしては、解散後の安全確保の妥当性について示し、国の確認を受けた後、国へ確実に管理業務を引き継ぐことが責務と考えている。

参考文献

原子力安全委員会 (2002) : 高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について.

原子力委員会 (2005) : 原子力政策大綱, 平成 17 年 10 月 11 日 原子力委員会決定.

NUMO (原子力発電環境整備機構) (2004) : 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性, NUMO-TR-04-01.

NUMO (原子力発電環境整備機構) (2009a) : 公募関係資料 処分場の概要 分冊-1.

NUMO (原子力発電環境整備機構) (2009b) : 公募関係資料 概要調査地区選定上の考慮事項 分冊-2.

通商産業省 (2000) : 特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針, 平成 12 年 9 月 29 日 閣議決定.

第5章

地質環境の調査・評価技術

第5章 目次

第5章 地質環境の調査・評価技術	5-1
5.1 わが国の地質環境の特徴と評価の考え方	5-1
5.1.1 自然現象の影響と将来予測	5-1
5.1.1.1 自然現象の影響	5-2
(1) 地層処分システムに著しい影響を及ぼす自然現象	5-2
(2) 考慮するそのほかの自然現象	5-3
(3) 地質環境特性の長期変遷	5-3
(4) 自然現象の地層処分システムへの影響とサイト選定における取り扱い	5-4
5.1.1.2 自然現象の将来予測	5-8
(1) 地層処分事業における将来予測に関する動向	5-8
(2) 将来予測の考え方	5-9
5.1.2 わが国の地質環境の多様性	5-17
5.1.2.1 地層処分にとって重要な地質環境の特性	5-17
5.1.2.2 多様な地質環境への対応	5-18
5.1.2.3 多様な地質環境に対する調査・評価の事例	5-22
5.2 文献調査および概要調査の基本的な考え方と進め方	5-25
5.2.1 文献調査および概要調査の基本的な考え方	5-25
5.2.1.1 安全確保にかかわる目標	5-25
5.2.1.2 段階的な調査・評価	5-25
(1) 基本的な考え方	5-25
(2) 地質環境モデルの構築	5-26
5.2.1.3 不確実性の取り扱い	5-30
(1) 不確実性の種類と特徴	5-30
(2) 不確実性の低減	5-30
(3) サイト選定にかかわる不確実性への対応	5-31
5.2.1.4 調査・評価技術の適用性の確認	5-31
5.2.1.5 調査・評価の体系化	5-32
5.2.2 文献調査の進め方	5-35
5.2.2.1 文献調査の目標	5-35
5.2.2.2 文献調査の準備	5-37
5.2.2.3 文献調査の実施	5-40
5.2.2.4 文献調査における評価	5-43
5.2.3 概要調査の進め方	5-44
5.2.3.1 概要調査の目標	5-44
5.2.3.2 概要調査の準備	5-46
5.2.3.3 概要調査の実施	5-51
5.2.3.4 概要調査における評価	5-53
5.2.4 調査・評価における品質マネジメント	5-55

5.2.4.1	品質マネジメントシステムの考え方	5-55
5.2.4.2	品質マネジメントシステムの整備	5-55
5.3	文献調査および概要調査の体系	5-58
5.3.1	自然現象の影響にかかわる調査・評価	5-58
5.3.1.1	火山・火成活動	5-58
(1)	マグマの貫入・噴出にかかわる調査・評価	5-58
(2)	熱・熱水活動の影響にかかわる調査・評価	5-64
5.3.1.2	地震・断層活動	5-69
(1)	調査・評価の基本的な考え方	5-69
(2)	文献調査における調査・評価の流れ	5-70
(3)	概要調査における調査・評価の流れ	5-72
5.3.1.3	隆起・侵食	5-77
(1)	調査・評価の基本的な考え方	5-77
(2)	文献調査における調査・評価の流れ	5-78
(3)	概要調査における調査・評価の流れ	5-79
5.3.2	地質環境特性にかかわる調査・評価	5-84
5.3.2.1	地質環境特性	5-84
(1)	調査・評価の基本的な考え方	5-84
(2)	文献調査における調査・評価の流れ	5-85
(3)	概要調査における調査・評価の流れ	5-88
5.3.2.2	施工・操業安全にかかわる調査・評価	5-94
(1)	異常間隙水圧	5-94
(2)	膨張性地山	5-94
(3)	山はね	5-95
5.4	調査・評価技術の整備	5-96
5.4.1	調査・評価技術の進展	5-96
5.4.1.1	自然現象の影響にかかわる調査・評価技術	5-96
(1)	火山・火成活動にかかわる調査・評価技術	5-96
(2)	地震・断層活動にかかわる調査・評価技術	5-105
(3)	隆起・侵食にかかわる調査・評価技術	5-116
5.4.1.2	地質環境特性にかかわる調査・評価技術	5-121
(1)	地質・地質構造	5-125
(2)	地下水流動特性	5-126
(3)	地下水化学特性	5-134
(4)	岩盤特性	5-137
(5)	物質移行特性	5-138
(6)	施工性・安全性にかかわる事象	5-139
(7)	モニタリング技術	5-140
5.4.1.3	多様な地質環境にかかわる調査・評価技術	5-141
(1)	結晶質岩・淡水系地下水を対象とした調査・評価技術	5-141

(2) 堆積岩・塩水系地下水を対象とした調査・評価技術.....	5-143
(3) 沿岸域を対象とした調査・評価技術.....	5-146
5.4.2 調査・評価技術の確認.....	5-151
5.4.3 調査・評価技術の評価と信頼性向上に向けた取り組み.....	5-158
5.4.3.1 技術の信頼性の評価.....	5-158
(1) 自然現象の影響.....	5-158
(2) 地質環境特性.....	5-159
5.4.3.2 さらに信頼性向上に向けた取り組み.....	5-160
5.5 まとめ.....	5-164
(1) 調査・評価の基本的考え方.....	5-164
(2) 調査・評価の進め方.....	5-164
(3) 調査・評価を支える技術の進展.....	5-165
参考文献.....	5-167

第5章 地質環境の調査・評価技術

本章では、第3章に示した安全確保に向けた三つの方針の方針1「安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進」に基づく適切なサイト選定と確認のうち、最初の概要調査地区選定段階で実施する文献調査、その次の精密調査地区選定段階で実施する概要調査を中心に、地質環境の調査・評価技術の整備状況について述べる。

5.1では、わが国の地質環境の特徴と地層処分における取り扱い、火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食などの自然現象の将来予測、多様な地質環境への対応など、調査・評価の前提となる考え方について述べる。5.2では、文献調査および概要調査について、両者に共通する重要な考え方、およびそれぞれの調査・評価の全体像を示す。5.3では、文献調査および概要調査の中で、自然現象の影響および地質環境特性にかかわる個別の調査・評価をどのように進めていくか体系的に示す。5.4では、調査・評価の体系を支える技術について、第2次取りまとめ（JNC, 1999b）以降の進展、NUMOによる技術の確認、ならびに技術の信頼性向上に向けた課題と取り組み方針について述べる。

なお、文献調査の実施に当たっては、市町村からの応募による場合と、国が市町村に文献調査の実施を申し入れによる場合がある。これら二つの場合では、文献調査の開始に至るまでの手順に差異があるが、いったん文献調査を開始すれば技術的な実施手順は同じである。従って、本章では、市町村からの応募により文献調査が開始されるという場合を前提として記述する。

また、処分施設建設地選定段階で実施する精密調査（地上からの調査および地下調査施設での調査）に向けた地質環境の調査・評価技術については、第2次取りまとめ以前より国内外の地層処分の実施機関や研究機関などが検討を進めており、知見が蓄積されている。また、5.4に示すとおり、第2次取りまとめ以降進展した個々の技術の多くは、精密調査にも適用することができる。さらに、基盤研究開発機関では、現在、深地層の研究施設計画をはじめとする精密調査に向けた技術開発が進められている。これらの知見や開発成果を取り込んだ精密調査に向けた調査・評価技術については、今後取りまとめて公表していく予定であり、本章では取り扱わないこととする。

5.1 わが国の地質環境の特徴と評価の考え方

3.1.2.1で述べたとおり、わが国は変動帯に位置していることから、地層処分システムを成立させるための前提条件の一つとして、将来にわたり火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食などの自然現象の著しい影響を回避する必要がある。そのため、サイト選定では、応募区域およびその周辺で生じている自然現象について、過去の変動傾向などからその将来の挙動を予測し、選定する地域が将来にわたりそれらの著しい影響を回避できる見通しを得ることが必要である。その上で、地層処分システムの場合となる地質環境特性を把握するとともに、それらの長期的な変遷を理解することにより、閉鎖後長期の安全確保の見通しが得られる場所を処分施設建設地として選定する（NUMO, 2010a）。

ここでは、地層処分システムへの影響の観点から、わが国の自然現象の特徴とその取り扱い、そして多様な地質環境への対応に関する包括的な考え方について述べる。

5.1.1 自然現象の影響と将来予測

サイトおよびその周辺の自然現象に関する情報は、自然現象による著しい影響を回避するために不可欠であるとともに、地質環境特性の長期変遷の評価やそれを考慮した安全評価シナリオを検討

する際の基礎情報となる。以下に、地層処分システムに著しい影響を及ぼす自然現象とその特徴、および自然現象の影響評価の基礎となる将来予測の考え方について述べる。

5.1.1.1 自然現象の影響

(1) 地層処分システムに著しい影響を及ぼす自然現象

日本列島は、アジア大陸の東縁部に沿って北東-南西方向に長く延びる弧状列島であり、ユーラシアプレート、北米プレート、太平洋プレートおよびフィリピン海プレートなどの、大陸プレートや海洋プレートの会合部に位置する(瀬野, 1995)。各プレートの運動、さらにはプレート間の相互作用により、火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・沈降運動などが生じている(図 5.1.1-1)。さらに、この隆起・沈降運動と、地球規模の周期的な気候変動に伴う海水準変動により、侵食・堆積作用が生じている。このように、わが国では、安定大陸とは異なる変動帯に特徴的な自然現象が、過去から現在まで生じており、それらは将来も続くものと考えられる。これらのうち、火山・火成活動および地震・断層活動は、その破壊的なエネルギーにより、処分場の破壊や放射性物質の地表への噴出といった、地層処分システムの成立性を脅かす現象を生じさせる可能性がある。また、隆起および侵食の速度が著しく速い場合、地下深部の放射性物質が短期間に地表に接近し、地層処分システムの長期的な安全性に影響を及ぼす可能性がある。以上のことから、わが国の地層処分事業においては、地層処分システムへの著しい影響について考慮すべき自然現象として、①火山・火成活動、②地震・断層活動、③隆起・侵食をとりあげる。

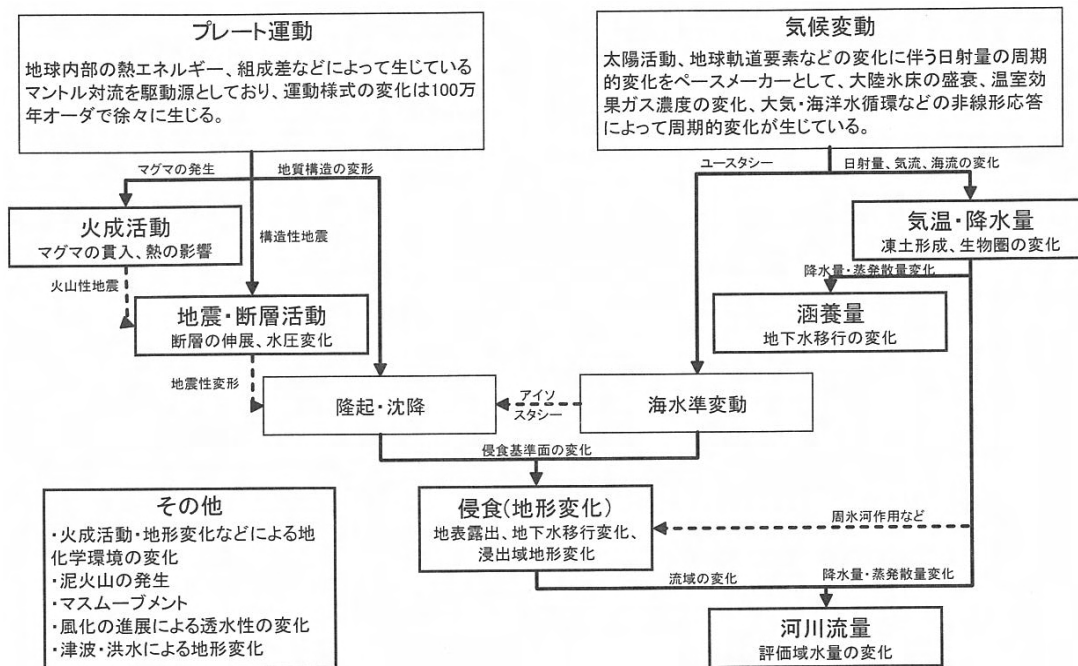


図 5.1.1-1 自然現象と地質環境への影響の関係

(出典：土木学会, 2007)

地層処分システムの長期変遷にかかわる現象は、大きく地球の内部エネルギーによるプレート運動などと、太陽活動や地球軌道要素などの周期的変化を主な要因とする気候変動のいずれか、あるいはその両方を起因として生じている。

(2) 考慮するそのほかの自然現象

気候変動が生じると、気温、降水量、蒸発散量、海水準などが変化し、地下水の涵養量、表流水の流量などにも変化をもたらす。その結果として、地下水の流動特性や化学特性、侵食速度などに対して影響が及ぶことになる。これらは、汎世界的な現象であり、回避できない。このため、地層処分事業においては、過去の気候・海水準変動にかかわる記録に基づき、将来の気候・海水準変動の規模やその周期性を仮定し、サイトにおいて地層処分システムの長期的な安全性の観点からより適切と判断される特性が維持され得るかどうかを評価する。さらに、設計・施工での対応（例えば、処分施設のレイアウトなど）を含めて、地層処分システム全体の安全性能（例えば、地下水の流動特性や化学特性などの変化を考慮した隔離機能など）について検討する。なお、近年の地球温暖化が将来の気候・海水準変動に及ぼす影響についても、国内外における研究動向を踏まえ知見を取り入れていく。

(3) 地質環境特性の長期変遷

地層処分では、閉鎖後数万年以上にわたる長期の安全性に対する評価が求められる。その際には、地層処分の観点からより適切と判断される地質環境特性（地下水流動特性、地下水化学特性、物質移行特性など）が、閉鎖後長期にわたって持続する見通しを示す必要がある。そのための方法として、後述する地質環境モデルに記述された現状の地質環境の各特性が、将来の自然現象の変動に伴う地形や地質構造の変化に応じて変化する様子を、複数の時間断面で表現することが考えられる（太田ほか、2007）。

地質環境特性は、過去から現在に至るさまざまな地質学的な過程を経て形成される。このため、地質環境特性の長期変遷の評価に当たっては、火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食などの個々の自然現象について理解するだけでなく、それらがどのように相互に関連しているか、単独にあるいは複合して地質環境に影響を及ぼすのか、などについて理解することが重要である。例えば、汎世界的に生じる海水準変動に加えて断層活動による地域的な隆起（沈降）が起きると、当該地域の地形面と海面との差はより大きくなる可能性がある。これにより、侵食速度や動水勾配の変化が生じ、地下水流動特性や化学特性に影響を及ぼす可能性がある。このように、地質環境は、個々の自然現象間の相互作用、個々の地質環境特性間の相互作用、および自然現象と地質環境特性の間の相互作用など、さまざまな現象が相互に影響を及ぼし合うシステムとして挙動する。このため、地質環境特性の長期変遷の検討に当たっては、当該地域の地形・地質構造発達過程に関する検討、個々の自然現象に関する検討、ならびに個々の地質環境特性に関する検討などの連携を図り、過去の地質環境の変遷の理解に基づき、将来の長期変遷を予測・評価する。

(4) 自然現象の地層処分システムへの影響とサイト選定における取り扱い

(1) で述べた各自然現象の地層処分システムへの影響とサイト選定における取り扱いについて、表 5.1.1-1 に取りまとめた。以下に、その詳細について述べる。

表 5.1.1-1 わが国で考慮すべき自然現象が地層処分システムに及ぼす影響とその取り扱い

自然現象	地層処分システムおよび地上施設に及ぼす影響	影響の程度	サイト選定における取り扱い
火山・火成活動	<ul style="list-style-type: none"> マグマの貫入・噴出による地下施設の直接的破壊 	<ul style="list-style-type: none"> 放射性物質の地表への放出の可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> 既存情報や現地調査データに基づいて、第四紀の火山・火成活動の痕跡が認められる場所や、過去の火山・火成活動の傾向・規則性から、将来火山・火成活動が生じると明確に判断される場所は、回避する
	<ul style="list-style-type: none"> 熱の放出による周辺岩盤の温度の上昇や変質などの変化 熱水対流系の生成やそれに伴う放射性物質の移行促進 地下水への熱水・火山ガスなど混入による地下水流動および地化学条件の変化 	<ul style="list-style-type: none"> 地層処分システムの性能低下などの大きな影響を及ぼす可能性がある 	
	<ul style="list-style-type: none"> 大規模なマグマ噴出や火砕流などによる地形の変化およびそれに伴う地下水流動状況の変化 	<ul style="list-style-type: none"> 火山活動によって生じる地形変化の規模に応じて地下水流動状況が変化する 	<ul style="list-style-type: none"> 既存情報および現地調査データに基づいて、地形変化の規模や位置を想定して、地質環境の長期変遷の一因として考慮する
	<ul style="list-style-type: none"> 降灰、火山泥流、火砕流などによる地上施設の破壊または安全機能の喪失 	<ul style="list-style-type: none"> 操業期間中における地上施設の安全機能を損なう可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> 既存情報および現地調査データに基づいて、操業期間中に発生する可能性のある火山現象、規模、サイトへの到達可能性、地上施設への影響の程度を評価して、その影響の程度に応じて回避または対策を検討する (※原子炉施設の設計における対処についての指針・規格は現在規定されていない)
地震・断層活動	<ul style="list-style-type: none"> 地震動による地下施設の破壊 	<ul style="list-style-type: none"> 既往の観測事例では、地表に比べて小さく、極めて大きな地震動の発生は考えづらい 	<ul style="list-style-type: none"> 既存情報および実測データに基づいて、耐震設計による対処が可能であることを評価・確認する
	<ul style="list-style-type: none"> 地震前後における地殻内のひずみの変化に起因する、地下水位や地下水圧の変化 	<ul style="list-style-type: none"> 数週間～数ヵ月後には元の状態に回復する観測事例があり、地下水流動に対して恒常的な影響を及ぼさないと考えられる 	<ul style="list-style-type: none"> 既存情報および実測データに基づいて、その発生と影響について検討する
	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の破断・破砕に伴う地下施設や廃棄体の直接的破壊 	<ul style="list-style-type: none"> 新たに形成される断層破砕帯を経路として、放射性物質が地下施設から漏出し、地表に向けた移行が加速される可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> 既存情報および現地調査データに基づいて、活断層などの存在が明らかな場所は回避する
	<ul style="list-style-type: none"> 破断・破砕・変位に伴う周辺岩盤の力学的変化 小断層や節理の発生に伴う周辺岩盤の透水性の変化 	<ul style="list-style-type: none"> 処分施設に大きな影響を与える規模のものではなく、割れ目が開口することなどにより、周辺岩盤の状態が変化する程度と考えられる 	<ul style="list-style-type: none"> 既存情報および現地調査データに基づいて、断層周辺岩盤にひずみ、小断層、節理などが生じている範囲やその性状を検討して、地質環境特性の一環として評価する
	<ul style="list-style-type: none"> 地震動による地上施設の破壊または安全機能の損失 	<ul style="list-style-type: none"> 操業期間中における地上施設の安全機能を損なう可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> 既存情報および実測データに基づいて、耐震設計による対処が可能であることを評価・確認する
隆起・侵食	<ul style="list-style-type: none"> 地下施設の地表への接近、ならびに地形変化に伴う地下水流動および地化学条件の変化 	<ul style="list-style-type: none"> 処分深度に対して隆起量、侵食量が大きい場合、地下施設の酸化的環境への移行、地下水の流速・流量の増大など、大きな影響を及ぼす可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> 著しい隆起が生じる地域では隆起量に応じた侵食が生じる可能性があり、地層処分システムに及ぼす影響は大きいことから、隆起が著しい場所は回避する

(土木学会, 2001, 2006a ; NUMO, 2004 などを参考に作成)

(i) 火山・火成活動

火山・火成活動は、地下深部からのマグマの貫入・噴出やそれに伴い熱・熱水の放出などが生じる急激かつ局所的な現象である。火山・火成活動が地層処分システムや地上施設に及ぼす影響としては、マグマの貫入・噴出による処分施設の直接的破壊と、それに伴う地表への放射性物質の放出が考えられる。また、熱・熱水の放出による周辺岩盤の温度の上昇や変質、熱水対流の生成、地下水への熱水・火山ガスなどの混入による地下水流動状況および地化学条件の変化などが考えられる。このため、マグマの地殻への貫入や地表への噴出、ならびに熱・熱水の放出を、最終処分法に定められた「地層の著しい変動」に該当する事象として取り扱う。

これらの現象については、既存情報や現地調査データに基づき、第四紀においてその痕跡が認められる場所や、過去の火山・火成活動の傾向・規則性から将来それが生じると明確に判断される場所をサイト選定において回避する。

そのほか、火山活動に伴う降灰、火山泥流、火砕流などは、建設・操業・閉鎖期間中の地上施設に影響を及ぼす可能性がある。これらの影響の程度は、発生した火山現象の種類、発生の規模、発生・到達時期によって異なると考えられるが、著しい場合は地上施設の破壊または安全機能の損失が生じる可能性がある。このため、既存情報および現地調査データに基づいて、建設・操業・閉鎖期間中に発生する可能性のある火山活動、規模、サイトへの到達可能性、地上施設への影響の程度を評価して、その影響の程度に応じて回避または対策を検討する。その際には、「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設のための安全審査指針」（原子力安全委員会、2002a）、「使用済燃料中間貯蔵施設の安全審査における『自然環境』の考え方について」（原子力安全委員会、2008）、「原子力発電所火山影響評価技術指針」（日本電気協会、2009）を念頭に、建設・操業時の安全確保の一環として評価を行う。一方、閉鎖後については、大規模なマグマの噴出や火砕流などにより、地形の変化やそれに伴う地質環境特性の変化が生じる可能性がある。これらについては、地質環境特性の長期変遷の要因の一つとして適宜検討する。

火山に関連した熱水活動のほかに、非火山性の温泉（例えば、紀伊半島南部の温泉）が地層処分システムに影響を与える可能性がある。非火山性の温泉の熱源について、これまで中新世の火成活動に関連する伏在火成岩体を熱源とする考え（中村ほか、1958）や、比較的若くかつ温かい四国海盆の沈み込みに伴う広域的な熱源からの熱伝導によるものであるとする考え（大石ほか、1995）が示されていた。しかし、近年、温泉ガスのヘリウム同位体比に基づく検討（Matsumoto et al., 2003）、震源分布や地震波速度構造などの地球物理学的検討（Salah and Zhao, 2003）が進められ、紀伊半島下では海洋地殻に加えて、スラブマントルから脱水した高いヘリウム同位体比を有する流体が、岩盤中の亀裂を通して上昇していると考えられること（Umeda et al., 2006a）が示されている。このように、非火山性の温泉の成因や起源を評価することが可能となり、マグマの貫入・噴出に伴う熱水活動との違いを検討することが可能となってきた。さらに、非火山性の温泉の熱源にかかわる近年の研究事例（例えば、Umeda et al., 2009）では、地球物理学的データ、温泉水の地化学データ（ヘリウム同位体比）などを組み合わせた調査・評価が行われ、能登半島における温泉の熱源は、火成活動に由来するものではなく、地下深部の花崗岩の放射壊変による熱が、断層に沿って上昇したものであるとの考え方が示されている。これらのことを踏まえ、非火山性の熱水の影響については、地下水の流動特性、化学特性、および岩盤特性として、地質環境特性にかかわる調査・評価の中で検討する。

(ii) 地震・断層活動

地震とは、地殻内に蓄積されたひずみエネルギーが岩盤の破壊強度を超えたとき、岩盤を構成する岩石の一部に破壊（断層運動）が生じ、ひずみエネルギーを一気に解放するとともに、そこから地震波（実体波、表面波など）が発生する現象である（宇津，1984；加藤，1989 など）。断層運動が地層処分システムに及ぼす影響として、岩盤の破断・破碎に伴う処分施設や廃棄体の直接的破壊、周辺岩盤の破断・破碎・変位に伴う力学的変化、小断層や節理の発生に伴う周辺岩盤の透水性の変化、地震前後の地殻内のひずみ変化に起因する地下水圧の変化、地震動による地下施設や地上施設の破壊などが考えられる。

活断層などが分布する場所は、大規模な地層のずれ（変位）や変形が生じることから、処分施設の破壊が生じることが想定される。また、断層破碎帯を経路として、地下施設から漏出した放射性物質の地表に向けた移行が加速される可能性がある。このことから、既存情報および現地調査データに基づいて、活断層などの存在が明らかな場所は、処分施設を配置することが困難な場合に当たると判断し、最終処分法に定められている「地層の著しい変動」に該当する事象として取り扱い、サイト選定において回避する。なお、調査・評価の対象とする活断層の定義については、既往文献（例えば、中田・今泉，2002；JNC，1999b）を踏まえて設定した「過去数 10 万年前以降繰り返し活動したことのある断層で、将来も活動する可能性のある断層」（NUMO，2004）を踏襲する。

断層活動により断層周辺の岩盤内にひずみ、小断層、節理などが生じている範囲については、力学的・水理学的特性が変化した領域と考えられるが、処分施設に大きな影響を与える規模のものではなく、割れ目が開口することなどにより周辺岩盤の特性が変化する程度と考えられる。このことから、処分施設の著しい変形、埋設した放射性廃棄物の地表への接近をもたらす「地層の著しい変動」には該当しないとし、地質環境特性にかかわる調査・評価の一環として、断層周辺岩盤にひずみ、小断層、節理などが生じている範囲やその性状を検討・評価する。

地震動による地下施設への影響については、鉱山や地下発電所の空洞における地震観測事例から、地下深部におけるゆれ（地震動）は地表に比べて小さいと指摘されている（Shimizu et al., 1996；Ishimaru and Shimizu, 1997 など）。また、近年飛躍的に整備された KiK-net などの地震観測網のデータの分析からも、地震波の入射角などの違いに起因する一部の例外を除き、その傾向には変わりがないことが示されている（Goto et al., 2009）。一方、地震動による地上施設への影響として、建設・操業段階から閉鎖段階の間にサイトにおいて規模の大きな地震が発生した場合、地上施設が破壊する、または安全機能を損失する可能性が考えられる。しかし、地震動による地下施設または地上施設への影響については、耐震設計などの工学的対策を施すことにより対応することが可能である。このため、地震動による影響は、「地層の著しい変動」に該当する事象として取り扱わないこととする。

既往の地下水の水圧や水質の観測事例（例えば、Shimizu et al., 1996；Ishimaru and Shimizu, 1997）において、地震の発生に伴い比較的広い範囲でそれらが変化することが知られている。しかし、これらの地震の発生に伴う変化は、一時的で短期間の間に元の状態に戻ること（例えば、1946 年南海道地震時の例：川辺，1991）、季節に伴う変化に比べて小さいこと（JNC，1999b）、浅層地下水の中での変化である（佐藤ほか，1999；阿部・酒井，1999）との知見がある。これらのことから、地震時の一時的な周辺岩盤の水理学的な影響については、「地層の著しい変動」として取り扱わないこととする。

断層活動に伴い地下深部のすべり面付近では、高温状態になると考えられており（福留，1984）、

破碎帯中の断層面などに沿ってシュードタキライトという岩石が形成されることがある（狩野・村田，1998）。鉱物の地質温度計や基質の化学組成を用いて見積もられたシュードタキライト形成時の摩擦溶融の温度は，これまでに 750°C から 1,400°C 以上の値が報告されている（林，2010）。しかしながら，シュードタキライトの幅は，数 mm 程度（例えば，Lin et al., 2003, 2005）である。断層活動に伴う摩擦熱は，野島断層を貫くボーリングコア試料を用いた研究によると，フィッシュン・トラック法では 200~300°C（田上ほか，1998），電子スピン共鳴（ESR）法では 300~350°C（福地ほか，2002）に達したことが示されている。一方，野島断層を貫くボーリング調査で確認された断層破碎帯中には比較的低温（150°C 以下）で安定な鉱物（スメクタイトや沸石など）が多量に存在すること（藤本ほか，1998），跡津川断層帯茂住断層の破碎帯中にもスメクタイトが確認され，熱による再結晶などの痕跡が認められないこと（佐竹・村田，1998）が示されている。このように，断層活動に伴う熱的影響は，局所的で瞬間的なものと考えられることから，「地層の著しい変動」として取り扱わないこととする。

（iii）隆起・侵食

隆起・沈降は，プレート運動に伴う断層および褶曲などの活動，地殻へのマグマの供給や地表への噴出，氷床の消長や海水準変動などのアイソスタティックな変動（荷重変化による弾性的な変動）などによる地殻の鉛直方向の運動である。侵食は，陸上で重力や流水などの営力（地質学的な現象を起こす自然の力）により地表が削剥される現象である。侵食は，降雨による雨食，河川の流れによる河食，水との化学反応による溶食，氷河の流れによる氷食，風の流れによる風食，波打ち際の波の作用による海食に区分される。周囲を海に囲まれ，温暖多雨な気候と起伏の大きい地形を有する日本列島では，河食と海食が主要なものとなっている。侵食の強さは，隆起による地盤の比高の増大，氷期・間氷期に対応した降水量の増減および海水準変動に応じて変化し，隆起・沈降の発生に伴い，主として隆起している場所では侵食が，沈降している場所では堆積が生じる。

隆起・侵食は，その変動量が長期間にわたり累積する。隆起・侵食が生じると，例えば，将来 10 万年程度で，地下施設の地表への露出や，それに伴う地下水の流動特性や化学特性の大きな変化が生じる地域があると考えられる。このため，そのような大きな変化を引き起こすような著しい隆起・侵食を，最終処分法に定められた「地層の著しい変動」に該当する事象として取り扱う。

一方，上記のような大きな変化を伴わない小規模な隆起・侵食の影響については，過去の隆起・侵食の規模や傾向などにに基づき，隆起・侵食による地形変化（処分施設の設置深度や地形勾配の変化），それに伴う地下水の流動特性や化学特性の変化，岩盤特性の変化などの評価を行い，地下施設的设计による対処などを含めて検討する。

なお，沈降については，堆積が生じることにより地表から放射性廃棄物への距離が増す方向への変動となることから，地層処分システムへの影響における検討の中では「地層の著しい変動」として取り扱わないこととする。

5.1.1.2 自然現象の将来予測

(1) 地層処分事業における将来予測に関する動向

地層処分システムに著しい影響を及ぼす可能性のある自然現象について、第2次取りまとめでは、過去から現在までの自然現象の活動履歴に関する情報の整備、各自然現象の規則性や傾向(周期性、継続性、地域性、変動範囲など)の把握、それらに基づく将来における活動の場、変動の規模や地質環境への影響などについて検討を行い、次のように整理している (JNC, 1999a, 1999b)。

- ・ 自然現象の種類や地域によって得られる情報の量や精度に違いはあるものの、おおむね過去数10万年まで遡って、活動の場所や変動の規模を追跡することができた。
- ・ 自然現象によっては、過去数100万年における活動の特徴や傾向を推定することができた。
- ・ これらの結果に基づき、10万年程度の将来にわたって、自然現象の活動やその影響が十分に小さいと期待できる場所を見出すことができるとの見通しを得た。

地層処分事業における地質環境の将来予測については、原子力委員会や土木学会においては、以下のような考え方が示されている (原子力委員会, 1997 ; 土木学会, 2001, 2006a)。

- ・ 天然現象の中には、地震・断層活動や火山・火成活動のように急激かつ局所的な現象と、隆起・沈降・侵食および気候・海水準変動のように緩慢かつ広域的な現象があり、それぞれ地下深部の環境に影響を及ぼしている。
- ・ 前者については、場所によっては地質環境への影響は大きいものの、大きな変形を伴うような影響を及ぼす地域は比較的狭い範囲に限定されており、また過去数10万年の時間スケールでみれば、これらの現象が規則的に起こっていることから、今後10万年程度であれば、その規則性および継続性から、それらの影響範囲を推論することができると考えられる。
- ・ 一方、後者は、地下水系などに広い範囲で影響を及ぼすが、緩慢かつ広域的であるから、過去数10万年程度について、広域にわたる比較的正確な地質学的記録が残されている。
- ・ それらの記録を基に、将来についても10万年程度であれば、その及ぼす影響の性質や大きさ、また影響の範囲の移動や拡大の速度などを推測することができると考えられる。

以上の知見・見解を踏まえ、NUMOは、日本列島周辺のプレートシステムおよび広域的な造構応力状態の変遷について整理し、自然現象の将来予測の考え方について、次のように取りまとめた (NUMO, 2004)。

- ・ 日本列島を取り巻くプレート配置やプレート運動の方向と速度は、将来10万年程度は安定であると考えられ、たとえ変化があったとしても10万年程度では大きな変化がないことが予測され、今後10万年程度は現在と同様の造構応力状態が継続すると推定される。
- ・ 従って、プレート運動に関連する地震などの自然現象については、外挿法により、過去数10万年程度の地質学的記録を基に、最終処分法で求められている将来数万年程度の予測が可能と考えられる。

このような背景のもと、地層処分事業においては、地質環境の長期的な変遷の要因となる自然現

象の将来予測期間を将来 10 万年程度と想定し、技術的な検討を進めてきた。

一方、近年、原子力安全委員会において、放射性廃棄物の処分に関する安全基準や安全評価の考え方などの検討が進められた。2010 年 4 月に公表された「余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方」（原子力安全委員会、2010a）では、「各国では、その国際的考えを参考にしつつ、それぞれの国の基準（判断の根拠）を定めており、わが国においても、各国の考えを参考としつつ、安全評価に際し数万年から数 10 万年の長期のシナリオ評価を行うことが必要であり、それによる不確かさの大きさなどを勘案すると、判断の根拠としては、余裕をみて、スウェーデン、スイス、英国などと同様に、管理期間終了以後のリスクを 10^{-6} 年以下とすることが妥当と判断した」とされた。このため、余裕深度処分における安全評価においては、評価対象となる自然現象（火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食、気候・海水準変動）に対して、各自然現象の時間的変遷を十分に考慮したシナリオを設定することが求められている。

さらに、将来 10 万年より先の将来予測については、産総研（2007a）において、「地質および気候関連事象の超長期予測でも、評価対象地域で過去に起きた地質学的な事象の履歴を明らかにし、これを将来に外挿することが基本となり、将来 10～100 万年間に外挿するのであれば、これと同じかこれ以上の過去にまで遡る必要がある」との考え方が示されている。

このような状況を鑑み、NUMO では、最新の科学的な知見を加味して上述の将来 10 万年程度までの将来予測の考え方をさらに推し進め、それを超える期間を含めた将来予測の考え方について、以下のとおり取りまとめた。

（2）将来予測の考え方

ここでは、まず検討の結果導かれた将来予測の基本的なスタンスを示し、それ以降でそれに至るまでの論理を展開し、最後にサイト調査・評価からみた将来予測期間の区分について述べる。

（i）将来予測の基本スタンス

自然現象の将来予測は、主に外挿法により、事象および地域ごとに異なる過去の情報の量、精度さらには地質構造発達過程を考慮し、予測の前提条件を明らかにした上で、予測期間とその精度を適切に設定して行う。

（ii）将来予測の方法論

地質環境の長期変遷の要因となる自然現象の将来を予測する方法は、外挿による方法、類推による方法、現象論的モデルなどを用いた数値解析による方法、確率論による方法の四つに大別される（例えば、田中・千木良、1997）。外挿による方法（以下、外挿法という）は、過去から現在までに発生した変動の傾向を明らかにし、その傾向を将来へ外挿する方法であり、時間的な変動特性（継続性、周期性など）の外挿（図 5.1.1-2）、空間的な変動特性（活動の場の収れん、移動、空白域など）の外挿を組み合わせることで予測を行う。類推による方法は、予測しようとする現象と類似の事例を検討することにより現象の一般化を図り、その類推から将来の変動・変化を予測する方法である。現象論的モデルなどを用いた数値解析による方法は、現象のメカニズムを解釈するために現象論的なモデルを構築し、それに基づき現象を複数のパラメータで数値モデル化し、数値解析により将来を予測する方法である。確率論による方法は、地殻変動の発生の可能性を数量的に見積もり、発生確率を求める方法である。

自然現象の将来予測では、これら四つの方法のうち外挿法が最も一般的な方法であるとされており（例えば、田中，2004），地層処分事業における自然現象の将来予測においても，外挿法を基本とし，必要に応じてほかの手法を補完的に組み合わせる。

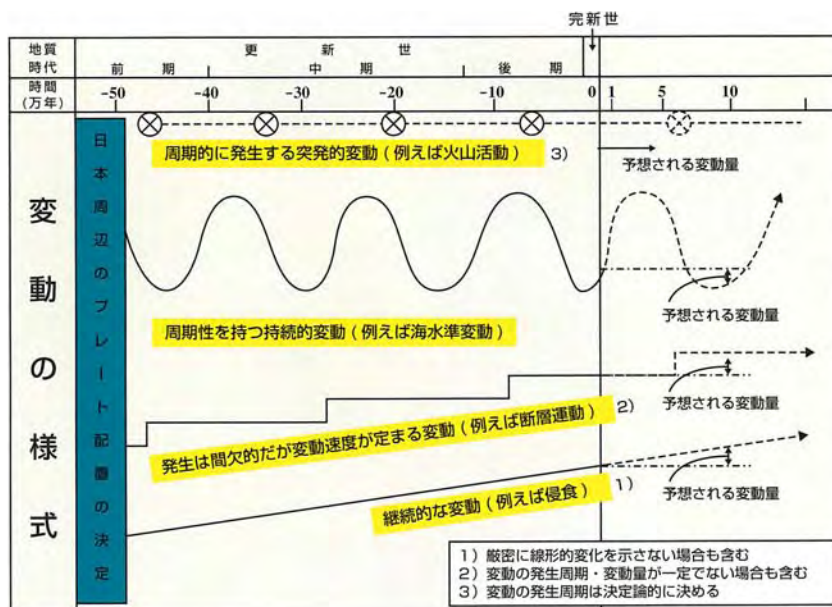


図 5.1.1-2 自然現象の時間的な変動様式
(地質環境の長期安定性研究委員会，2011)

将来の自然現象については，過去から現在までの変動を検討し，その中から周期性，法則性，地域性などを見出すことにより過去の現象を将来へ外挿することが可能となる。この場合，変動の背景となるテクトニクス（例えば，プレートの運動など）の傾向が継続すると考えられる期間などの検討が重要である。

(iii) 外挿法による将来予測の考え方

外挿法による将来予測では，まず，自然現象の過去から現在までの変動を明らかにすることが必要である。一般に，過去から現在までの変動の解明は，次に示す①～④の順序に従って検討される（図 5.1.1-3）。

- ① 過去から現在までの状態の把握・・・隆起量の分布など
- ② 変動傾向（法則性）の把握・・・周期性，継続性，規則性，偏在性など（図 5.1.1-2）
- ③ 変動を引き起こすメカニズムの解明・・・断層運動，褶曲運動など
- ④ メカニズムの駆動力となる外部要因との関係の解明・・・プレート運動など

外挿法により将来発生する自然現象の予測を行う場合，基本的にこの順序を逆にたどって検討することとなる。ただし，②と④との関係，すなわち，変動の傾向と，その原因と考えられるプレート運動などの継続性の関係（経験則）に基づいて議論されることもある。

一般に，自然現象の将来を予測するためには，何らかの仮定が必要である。そのための本質的な考え方として，「自然現象には何らかの秩序があり，同様の条件のもとでは，同様の現象が生じる」という斉一説（Lyell，1830 など）がある。上記の検討順序でいえば，②～④のいずれかの段階で齊

一説に基づく仮定をおくことが将来予測には必要となる。例えば、②から予測をはじめると場合には、過去の変動傾向（法則性）が将来も続くことが仮定となる。また、③の場合では、現在生じている変動のメカニズムが将来も継続することが仮定となる。④の場合は、変動のメカニズムを継続させる外部要因が継続することが仮定となる。ここで重要な点は、できるだけ確からしい仮定を用いることである。

変動傾向に対して、そのメカニズムを明らかにできれば、法則性自体の妥当性を検証することが可能となる。また、③と④の関係を明らかにすることは、以下に述べるように、外挿法による将来予測が可能な期間を検討する際に重要である。

ただし、実際には、対象とする事象のメカニズムやその駆動力となる外部要因について、必ずしも把握できるとは限らない。また、将来予測における議論の前提を②～④のいずれに置くことができるかは、地域性があり、対象とする事象によっても異なると考えられる。従って、NUMO では、議論を開始する上での前提条件を明確にした上で将来予測を行う。

さらに、自然現象の外挿に際しては、時間・空間スケールにも留意する必要がある。例えば、プレート運動が100万年スケールでは変化しても、10万年程度の時間でみればほぼ一定と近似できる場合がある。あるいは、広域的には、変形を伴った空間的に一様ではない隆起運動であっても、ごく狭い範囲では一様とみなせることもある。一方、断層運動のような、より短い時間スケールで議論すべきものは、平均的な運動と個別のイベントを区別して議論する必要がある。このため、予測の対象とする事象の変化の時間スケールと空間スケール、ならびに、それらの関係に留意して外挿を行う。なお、各自然現象の将来予測において導入する具体的な仮定については、5.3.1に述べる。

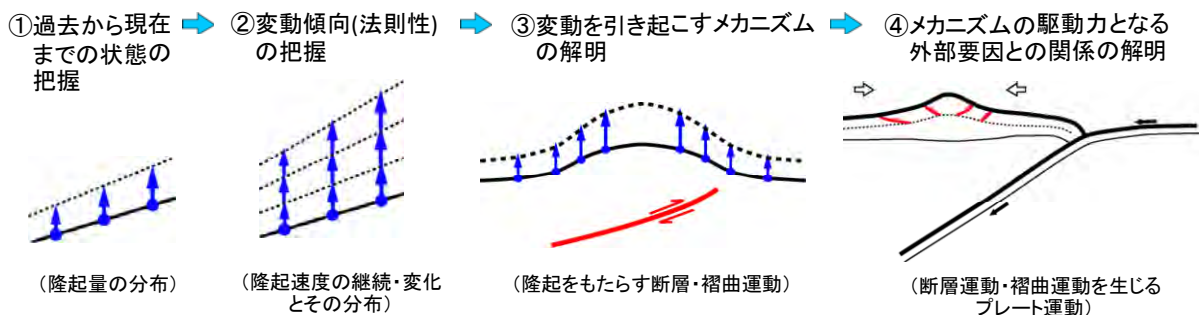


図 5.1.1-3 過去から現在までの変動の解明の基本的な流れ（隆起運動の例）

(iv) 自然現象の履歴の把握

外挿法による将来予測の確からしさは、外挿に用いる過去から現在までのデータの品質と量に依存する。一般に、予測期間に対して十分に長い期間にわたって外挿の根拠となるデータがある場合、さらには、データ量が多い場合には、将来予測に含まれる不確実性は小さく、逆に、予測期間に対して取得されているデータの期間が短く、データが少ない場合には、将来予測に含まれる不確実性が大きいと考えられている。従って、できるだけ長い期間に遡り自然現象（運動）の履歴を把握することが、外挿法の不確実性を低減させる。

過去の履歴を把握するための調査・評価手法は、測地学的手法、地形学的手法、地質学的手法に大別される。各手法がどの程度の過去の履歴把握に適用できるかは、それぞれの手法で利用する現象の時間スケールに依存し、大局的には、測地学的手法が最も至近の変動を対象とし、地質学的手

法が最も長い変動をとらえるものである。従って、より長期間の運動履歴を把握するためには、必然的に地質学的手法の果たす役割が大きく、10 万年程度を超える長期間の変動傾向や地質構造発達過程を把握する際には、10 万年オーダーと 100 万年オーダーの運動の関係（地形学的手法と地質学的手法の連携）に留意する。なお、各自然現象の具体的な調査・評価については、5.3.1 に述べる。

(v) 外挿法による将来予測期間の考え方

外挿法による将来予測期間の考え方は、変動傾向やメカニズムの継続性を仮定するか、変動のメカニズムの駆動力となる外部要因の継続性を仮定するかにより異なる。変動傾向やメカニズムの継続性を仮定する場合、どの程度の期間のデータに対して、どの程度の将来の予測が可能かという時間スケールについては明確に定めることが難しく、外挿に用いるために取得したデータに基づき判断することが重要となる。将来予測期間に関する既往の検討（例えば、JNC, 1999a; 土木学会, 2001, 2006a など）では、過去数 10 万年程度の履歴に基づき、将来 10 万年程度の将来予測が可能とされている。一方、運動のメカニズムとそれを引き起こした外部要因の関係に基づき、外部要因の将来の継続性を仮定した場合、将来予測が可能期間が外部要因の継続する期間に置き換わる。

例えば、外部要因として太平洋プレートの運動を考えた場合、その運動の継続性が仮定として認められれば、仮定した太平洋プレートの運動の継続期間に応じた 10 万年程度よりも長い期間の将来予測も可能であると考えられる。JNC の東北日本弧の検討例（JNC, 1999b）では、東北日本弧の南北方向の軸をもつ隆起帯と沈降帯の配列を太平洋プレートからの圧縮応力による上部地殻の座屈褶曲によるものとし、プレートの運動が大きく変化しない限り、隆起・沈降帯の分布は現在と大きく変化せず、褶曲と逆断層による山地の隆起と盆地の沈降が継続するとした。この将来予測の例に当てはめれば、メカニズムの駆動力となる外部要因（上記 (iii) の④）であるプレート運動の継続性から検討されており、その継続性を仮定できる時間が外挿可能な期間と考えられる。

変動傾向または変動のメカニズム、または、メカニズムの外部要因の継続性を仮定する際、過去から現在までの運動に関するデータが取得される期間は地域により異なる点にも留意し、将来予測が可能期間を調査データに基づき検討する。なお、安全評価シナリオの区分および時間枠を設定するためには、自然現象の将来予測可能な期間を考慮する必要がある。なお、安全評価シナリオ区分の考え方については、7.1.3 に述べる。

(vi) テクトニクスの継続性と将来予測期間

前述したように、運動のメカニズムとプレート運動の継続性とを結び付けることができれば、将来予測が可能期間は、プレート運動の継続時間としてとらえることができる。プレート運動の継続性に関する知見は以下のように整理できる（NUMO, 2004）。

日本列島周辺では、30Ma（Ma：100 万年前を表す地質学的な時間単位）頃から生じたアジア大陸東縁部での背弧海盆の形成がほぼ 15Ma に終了し（Jolivet et al., 1994）、15Ma から 14Ma にかけて日本列島周辺のプレートシステムの基本的枠組みが定まり、現在に至っている。また、日本列島周辺の海洋プレートの運動方向については、太平洋プレートが約 2.5Ma 以降、フィリピン海プレートが約 1.5Ma 以降変化がなく、現在に至っている（Kamata and Kodama, 1999）。このように、日本列島周辺のプレート運動の変化（プレートの運動方向・運動速度、プレートの沈込み角度など）をみると、日本海、千島海盆、四国海盆の拡大などは 15Ma 頃に終了した後、現在に至るまで大きな変化はなく、ほぼ定常状態に達していると判断される（Jolivet et al., 1994 ; Kimura and Tamaki, 1986 ;

Okino et al., 1998)。日本列島における造構応力状態については、地域性があるが、少なくとも過去数 10 万年間以上にわたって、東西方向の圧縮状態で特徴付けられる地殻変動が継続していると考えられる。

例えば、太平洋プレートの運動に関しては、地磁気異常の縞模様や海山列のデータに基づき、少なくとも 15~0Ma の間ほぼ一定であることが算定され（丸山・瀬野, 1985）、ハワイ海山列の並びから 5~2.5Ma にかけて運動方向が時計回りに数度以内で変化した（Cox and Engebreston, 1985; Pollitz, 1986）とされている。また、太平洋プレートの運動方向の大きな変化について、ハワイ-天皇海山列の屈曲が 50~42Ma に生じた（Sharp and Clague, 2006: 図 5.1.1-4）とされるが、近年、ハワイ-天皇海山列の形成年代やマントル内の物理的過程の検討などに基づき、81~47Ma の間にハワイホットスポットが移動したとの知見（例えば, Tarduno et al., 2009）が示されている。この知見を考慮すると、太平洋プレートの運動方向が大きく変化した期間は少なくとも 47~42Ma で、最大約 500 万年間と見積られる。一方で、プレートシステムの転換には少なくとも 100 年以上の期間を要する（JNC, 1999b）とされている。従って、太平洋プレートの運動の 100 万年程度の継続性を仮定することは十分に受け入れられると考えられる。これを (v) でとりあげた JNC の東北日本弧の検討例（JNC, 1999b）に当てはめるならば、数 10 万年~100 万年の遠い将来における予測の不確実性は大きくなるかもしれないものの、評価対象とする事象にかかわる変動（地史）と、変動の駆動力となるプレート運動の関連性にかかわるデータに基づいて、100 万年程度の将来予測の議論は可能といえる。

このように、プレート運動の一様性を将来予測の仮定とし、その継続時間を予測期間に置き換える場合には、地域レベルでの地質構造発達過程を解明し、プレート運動と対象となる自然現象の時間的・空間的スケールの関連性を把握することが重要である。NUMO は、地域性、さらには、データの品質・量により、外挿法により予測が可能な期間に差異がある点に留意して、将来予測期間を設定する。

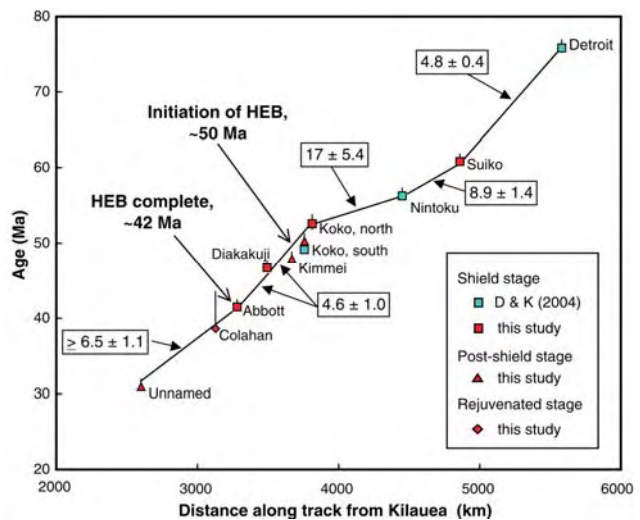
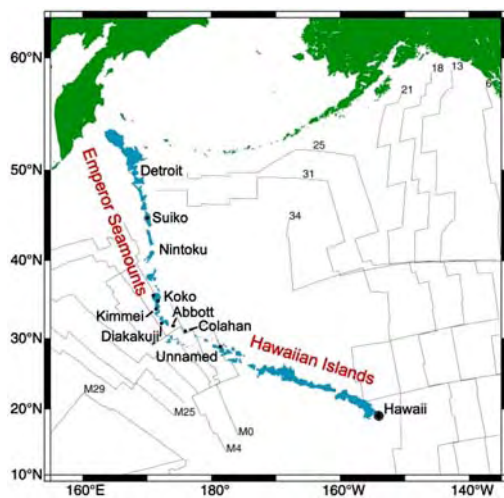


図 5.1.1-4 ハワイ-天皇海山列の位置および形成年代
(Sharp and Clague, 2006 を編集)

左：ハワイ-天皇海山列の位置，黒丸は海山の形成年代測定試料位置を，灰色線は地磁気極性編年に基づく海洋底の縞状磁気異常（数値：縞状地磁気異常番号）を示す。
右：ハワイ-天皇海山列の形成年代（ $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代）と現在のホットスポットの位置であるキラウエア火山からの海山列に沿った距離の関係，青四角は Duncan and Keller (2004) からの引用データを示す。ハワイ-天皇海山列の屈曲（HEB）は 50～42Ma に生じたとされる。

(vii) 外挿法が適用できない場合の評価

(a) プレート運動の一様性が仮定できない地域の評価

わが国には，海底の拡大，小陸塊の衝突やそれに伴うプレート境界の移動などにより，現在もテクトニクスが変化している可能性がある地域が存在する（日本海東縁部，新潟-神戸ひずみ集中帯，中央構造線沿い，伊豆半島の一部および伊豆-小笠原背弧リフト帯周辺，沖縄トラフなど）。これらの地域については，将来予測に関してより慎重な検討が必要である（NUMO, 2004）。

なお，プレート運動が変化している地域であっても，当該事象の変化そのものの法則性やメカニズムを把握できるならば，その法則性やメカニズムの進行を仮定した現象論としての将来予測は原理的に可能である。しかしながら，そのような地域では，信頼性の担保された予測期間を設定することは困難であり，予測に含まれる不確実性に十分注意することが必要である。

(b) 外挿自体ができない将来の評価

全く外挿し得ない将来については，現在の状態から移り変わるであろう次の状態（プレート運動の変化，広域応力場の変化など）を仮定し，そのような状態にあるほかの地域で起こっている自然現象を参考に，推定した状態に対して発生する可能性がある自然現象（例えば，圧縮場から引張場に変化した場合の，断層の再活動・新生やカルデラ火山形成など）を想定することが考えられる。

(viii) 将来予測の時間スケール

将来予測の時間スケールの設定では，まず，予測可能性と不確実性を整理することが重要である。この観点から，予測期間を定性的に以下の三つの期間に区分できると考えられる（表 5.1.1-2）。

期間 A : 十分な過去の情報に基づく外挿法による将来予測が可能な期間

予測期間に対して十分長い期間の過去の情報（変動傾向，メカニズム，駆動力）に基づき将来を予測することができる。過去の変動傾向に関する仮説が複数あったとしても，将来予測の差は小さいと考えられる。

期間 B : 不確実性は大きくなるが外挿法による将来予測が可能な期間

予測期間よりも短い期間の過去の情報（変動傾向，メカニズム，駆動力）に関する情報しか得られない場合，外挿を否定する積極的なデータがないことを前提に，将来を予測する。情報量や知識の不足あるいはばらつきなどに起因し，過去の変動傾向について複数の仮説が考えられ，それらを考慮することにより，将来予測の不確実性はより大きくなる。

期間 C : 外挿法による将来予測が難しい期間

過去～現在のデータからでは変動傾向が得られない，過去～現在の変動傾向やその要因が継続するわからない，あるいは継続しないことが想定され，将来予測の不確実性は著しく大きくなる。

基本的には，前項までに示した考え方に沿って検討を行い，事象ならびに地域性を考慮して，各期間に対して具体的な年代を与える。さらに，3.1.2.3 に述べたとおり，各期間における将来予測の不確実性を考慮して，安全評価に向けたシナリオを構築する。なお，シナリオ区分の意義，ならびに，将来予測とシナリオ設定の関係については，7.1.3 に述べる。

表 5.1.1-2 サイト調査・評価からみた自然現象の将来予測期間の区分の考え方の整理

将来予測期間の区分		期間A	期間B	期間C
		十分な過去の情報に基づく外挿法による将来予測が可能な期間	不確実性は大きくなるが外挿法による将来予測が可能な期間	外挿法による将来予測が難しい期間
将来予測の考え方		<ul style="list-style-type: none"> 予測期間に対して十分長い期間の過去の情報（変動傾向、メカニズム、駆動力）に基づく将来予測が可能 過去の変動傾向に関する仮説が複数あっても将来予測の差は小さい 	<ul style="list-style-type: none"> 予測期間よりも短い期間の過去の情報（変動傾向、メカニズム、駆動力）に基づき将来を予測する 情報や知識の不足・ばらつきに起因する変動傾向に関する複数の仮説を考慮することにより不確実性がより大きくなる 	<ul style="list-style-type: none"> 将来のプレート運動の変動傾向が変化する可能性が否定できない、あるいは過去の変動傾向が把握できないことから、将来予測の不確実性が著しく大きくなる 変動傾向が変化した後の状態において生じうる現象を想定する
将来予測における不確実性	相対的な大きさ	小	中	大
	主な種類	データの不確実性	概念化の不確実性、データの不確実性	概念化の不確実性
	パラメータ設定における留意点	<ul style="list-style-type: none"> 本来的な現象のばらつき、調査時の観測誤差などを考慮する 	<ul style="list-style-type: none"> 変動傾向に関する複数の仮説を考慮することによる不確実性に、本来的な現象のばらつきや観測誤差を併せて考える 	<ul style="list-style-type: none"> 変動傾向の解釈に大きな不確実性が含まれる 変動傾向が変化した後の状態を仮定し、そのような状態にあるほかの地域の情報を参考に、適切なパラメータを設定する
考慮する不確実性の例	火山・火成活動	火山の分布、火山フロントの位置の経時変化・ゆらぎなど		新たな火道の発生など
	地震・断層活動	空間的分布、活動性、変形帯の範囲、断層の分岐・伸展など		地質断層の再活動、断層の新生など
	隆起・侵食	隆起量・侵食量の見積り誤差など	左記に加え、運動様式による差異など	隆起・沈降の傾向や運動様式の急激な変化など

5.1.2 わが国の地質環境の多様性

5.1.2.1 地層処分にとって重要な地質環境の特性

地層処分における地質環境の役割としては、人工バリアにとって適切な設置環境を提供するとともに、それ自体が天然バリアとして機能すること、さらにそれらが長期的に維持されることが求められる。

人工バリアの設置環境については、処分施設と人工バリアの建設・施工性、および人工バリアの品質維持の両面から検討する必要がある。前者に関しては、処分空洞の安定性や作業環境の観点から、岩盤特性（地温や応力状態ならびに媒体としての諸物性）および地下水の流入量を評価することが重要である。後者については、オーバーパックスの腐食、ガラス固化体の溶解、あるいは緩衝材の変質などの観点から、地下水の化学特性や流動特性、ならびに岩盤の熱特性が重要となる。一般的には、地下水が還元的でその動きが遅いことなどが、人工バリアの劣化や放射性物質の溶解・移動を抑制する観点から、より適切と判断される条件となる。また、岩盤については、地温が低く熱伝導性が高いこと、応力や力学的異方性が小さく、十分な強度を有することなどがより適切と判断される条件となる。

天然バリアとしての機能については、人工バリアの設置環境としての条件に加えて、地下水を媒体とする物質移行に着目することが必要である。地下水によって岩盤中を移動する物質は、その過程において徐々に分散し希釈される。また、鉱物による収着現象や岩石のマトリクス中への拡散現象などにより、物質の移行が遅延される。

人工バリアの設置環境や天然バリアとしての機能については、気候・海水準変動や断層活動に起因する相対的な隆起・沈降現象や、それに伴う地質環境特性の変遷（例えば、隆起・侵食による地形変化に伴う地下水の流動特性や化学特性の変化など）を考慮しても、期待する機能が長期的に維持されることを、安全評価を通して示すことが求められる。

このように地層処分にとって重要な地質環境特性としては、地下水の流動特性および化学特性、岩盤特性（力学特性、熱特性など）、物質移行特性が挙げられる。また、これらの基盤的な情報として地質・地質構造が挙げられる。

岩石の種類や分布・連続性、断層や割れ目の分布・形状などは、岩盤特性だけではなく、地下水や物質の移行経路の構造やその中の地下水と岩石の化学的な反応などに影響を及ぼす可能性がある。このため岩盤と地下水の特性を理解する際に、地質・地質構造との関係を考慮する必要がある。特に、地下水や物質の移行経路となる大小さまざまな地質構造要素に着目し、その幾何学的形状・構造や化学的な性質を把握することが重要である（JNC, 1999b）。また、岩体の形状・規模は、地下施設の施工性、操業性、廃棄体の収容能力などと密接な関係があり、処分施設設計の基本的な条件となる（土木学会, 2001）。NUMO は、地下施設を設置しようとする地層およびそれを包含する地層において、割れ目、風化、変質、岩相変化が少ないこと、地下施設を収容し得る深さに良好な地層が広く分布することを、概要調査地区の選定にかかわる地質環境特性の総合的な評価を高める条件（以下、より好ましい条件とする。）とした（NUMO, 2004, 2009b）。

地下水の化学特性は、オーバーパックスの腐食およびガラス固化体の溶解に影響を及ぼすほか、緩衝材の化学的な安定性や緩衝材および岩盤中での放射性物質－鉱物－地下水の相互作用を支配する重要な要素である。特に地下水の酸化還元状態は、オーバーパックスの腐食速度や放射性物質の溶解度に大きく影響する（JNC, 1999b）。NUMO は、概要調査地区の選定において、地下水が著しく酸性あるいはアルカリ性でないこと、地下施設を設置しようとする地層や地下水が広範囲に酸化され

ていないことを、より好ましい条件とした (NUMO, 2004, 2009b)。

地下水の動きや水みちの連続性などは、物質移行経路と関連性があり、地層処分システムの閉じ込め機能に大きな影響を及ぼす (土木学会, 2006a)。また、地下水の動きは、地下水の水質とともにオーバーパックの腐食速度やガラス固化体および放射性物質の溶解速度を支配し、地下水の動きが大きい場合には、緩衝材自体の物理的な安定性に影響を及ぼすことも考えられる (JNC, 1999b)。NUMO は、概要調査地区の選定において、地下施設を設置しようとする地層での地下水の流量・流速が小さいことを、より好ましい条件とした (NUMO, 2004, 2009b)。

岩盤特性 (力学特性、熱特性など) については、人工バリアの仕様や地下施設のレイアウトなどを決める上で重要な要素である。岩盤の熱特性は、処分場の温度環境や人工バリアの化学的な反応に影響を及ぼす。特に緩衝材の化学的な安定性は、その品質維持にとって重要である。一方、力学特性は、処分場の建設・操業時における空洞安定性やオーバーパックや緩衝材の力学的な安定性を左右する (JNC, 1999b)。土木学会 (2001, 2006a) では、第四紀の堆積層のうち未固結なものは、強度が著しく小さく、坑道掘削が困難であることから、地下施設の設置対象から除外する必要があるとしている。NUMO は、概要調査地区の選定において、法定要件にも定められていることを受けて、文献情報に基づいて処分を行おうとする地層が第四紀の未固結堆積物である地域は含めないこととし、処分施設を設置しようとする地層およびそれを被覆する地層において岩盤の強度が低いこと、変形が小さいこと、地温勾配が小さいこと、地下施設を収容し得る深さに良好な地層が広く分布することを、より好ましい条件とした (NUMO, 2004, 2009b)。

岩盤中での物質移動は、天然バリアとしての機能に直接的に関与するものである。岩盤中における物質移動の主な原動力は地下水の動きであるが、単に動水勾配に沿った流れ (移流) だけではなく、濃度勾配により物質が岩石のマトリクス中に拡散する現象 (マトリクス拡散) を考慮することも重要である。また、地下水を媒体として移動する過程においては、物質が希釈・分散することや、鉱物の表面に収着するような現象にも注目すべきである (JNC, 1999b)。また、地下水中のコロイド、有機物、微生物の存在は、物質の移行挙動に影響を及ぼすと考えられている。岩盤中における物質の移行経路となり得る地質構造要素としては、岩石中の粒子間の間隙 (粒子間間隙)、岩石組織に起因する割れ目 (層理面や片理面沿いに形成される割れ目など)、地殻構造圧による岩石の破壊に伴って形成される割れ目 (節理、断層など)、加えて堆積岩層中の砂岩レンズなどが挙げられる。

5.1.2.2 多様な地質環境への対応

現在の日本列島の地質的な特徴としては、成因や形成時期が異なる多種多様な岩石で構成されており、地質分布が複雑であること (図 5.1.2-1)、また、断層が多数分布することが挙げられる。日本列島に分布する岩石の約 56% は堆積岩類 (付加コンプレックスを含む) であり、約 40% は火成岩類 (付加コンプレックスを含む)、変成岩類は約 4% 程度である (村田・鹿野, 1995)。火成岩類、堆積岩類および変成岩類は、それぞれの起源となったマグマ、堆積物、原岩の性質およびそれらが固結する過程での温度や圧力などの条件の違いにより、さらに多種多様な岩石に分類される。また、形成後の環境条件の違いにより、岩石の性質は変化する。

一方、地理・地形的な特徴としては、日本列島は起伏が大きく、国土の多くを丘陵や山地が占めており、山地が海岸付近まで迫っているところも少なくない。また、比較的温暖な気候や豊富な降水量、周囲を海に囲まれた島国といった特徴により、わが国では一般に地下水の水位が高く、地表付近まで地下水に満たされている。海岸付近の地下では、内陸部からもたらされた天水起源の淡水

系地下水と海水起源の塩水系地下水が接していると考えられる。このような地理的・地形的条件は、わが国における大局的な地下水の流動特性や化学特性を特徴付けている。さらに、これらは、隆起・侵食、および気候・海水準変動による長期的な影響を受けやすいといった特徴を有している。

わが国の地質環境特性の調査・評価に当たっては、上述した特徴に留意した上で、当該サイトの地層処分にとって重要な地質環境の条件や機能を抽出し、それらにかかわる特性を的確に把握するための調査・評価を行うことが重要である。

地質・地質構造に着目した場合、層状構造の発達する堆積岩は、反射法地震探査などの地表からの調査により、比較的容易に地下の地質・地質構造の分布・性状を推定することができる。一方、結晶質岩、特に花崗岩などの火成岩は、比較的大きく均質な岩体を形成し、堆積岩のような層状構造が発達していないことから、地表からの調査により岩体内部の岩相や地質構造の分布・性状を推定することは、堆積岩より難しくなる。

地下水の化学特性に着目した場合、地下水の起源は①天水起源、②海水起源、③マグマ由来の三つに区分される。天水起源の淡水系地下水は、主として内陸部に分布し、海水起源の塩水系地下水は沿岸域（海岸線付近の陸地から浅海域までを含む領域）に分布する。また、マグマ由来の地下水は火山地域に分布する。沿岸域では天水起源の淡水系地下水と海水起源の塩水系地下水が接し、それらが混合した地下水が存在する。そのような地下水の分布領域は、地層の水理特性、地下水の涵養量や流動特性などの諸条件を反映して、地域によって異なることが想定される。そのため、沿岸域においては、淡水系地下水の領域、塩水系地下水の領域、それらの混合領域、それぞれの分布を把握することが重要となる。さらに、沿岸域以外においても、地下浅部に天水起源の地下水（淡水）、地下深部にマグマ由来の地下水が存在する場合もある。

岩盤特性に着目した場合、岩種と岩石の力学強度の関係から、大きくは硬岩（一軸圧縮強度が20MPa程度以上）と軟岩（一軸圧縮強度が20MPa程度以下）の二つに区分される。岩石の力学強度の違いに基づき区分される軟岩は、岩石の力学強度が硬岩に比べ小さいだけでなく、岩盤（硬岩）と土質地盤（未固結地盤）の中間的な性質を有する。そのため軟岩では、スレーキング、膨張性、クリープなどの現象を生じるものもある。

岩盤中における物質移動、すなわち岩盤中における移行経路の違いに着目すると、①断層・節理などが主要な移行経路となる岩盤（例えば、花崗岩）、②粒子間間隙が主要な移行経路となる岩盤（例えば、新第三紀の堆積岩）に区分される。断層・節理などが主要な移行経路となる岩盤では、亀裂性媒体中の物質移行に着目した解析・評価が行われる。一方、粒子間間隙が主要な移行経路となる岩盤では、多孔質媒体中の物質移行に着目した解析・評価が行われる。このような物質の移行経路の違いは、調査・評価において特に着目する構造や組織の違いを生じさせる。断層・節理などが主要な移行経路となる岩盤では、割れ目などの面構造に着目した調査・評価が主体となり、粒子間間隙が主要な移行経路となる岩盤では、岩石の組織や物性（例えば、間隙率）に着目した調査・評価が主体になると考えられる。大局的にみれば、断層・節理などが主要な移行経路となる結晶質岩は硬岩、粒子間間隙が主要な移行経路となる堆積岩は軟岩として区分できる。

このようにわが国は多様な地質環境を有しているが、5.1.2.1に述べた地層処分にとって重要な地質環境の条件や機能に着目すると、地下水や物質の移行経路や岩盤特性の観点からは、結晶質岩と堆積岩に大きく区分できる（図5.1.2-2）。また、地下水の化学特性の観点からは、淡水系地下水と塩水系地下水に大きく区分できる。

以上のように区分される地質環境は、空間的な特性のばらつきを有している。このような地質環

境を効率的に理解するための調査・評価は、基本的には地質環境の区分によらず、広域の調査・評価からサイトスケールの調査・評価へと段階的に進め（5.2.1 参照）、各段階では調査計画の立案、調査の実施、調査データの解釈・解析・統合、地質環境モデル（5.2.1 参照）の構築、調査・評価結果に基づく課題の抽出、次段階の調査計画の立案、の順に進める（5.2.2, 5.2.3 参照）。しかし、沿岸域においては、海域では地表踏査などの調査技術の適用が困難であることや、淡水系地下水と塩水系地下水が混合した地下水が分布すると想定されることなどから、陸域に比べて調査・評価における物理探査の重要性が増すと考えられる。このように、地質環境特性のみならず、当該サイトの地理条件によっても、調査・評価の考え方に違いが生じる。このため、当該サイトに特徴的な地質環境の特性を把握するための調査・評価の考え方やその方法は、結晶質岩と堆積岩、淡水系地下水と塩水系地下水での調査研究事例、および沿岸域での調査研究を通して有効性が示された調査技術を適切に組み合わせることにより、多様な地質環境にも対応させることが可能になると考える。

＜地質図凡例＞

		堆積岩類	火山岩類	深成岩類	変成岩類
新生代	第四紀	浅藍色	赤色	白色	白色
	新第三紀	黄色	茶色	淡紫色	白色
	古第三紀	緑色	淡紫色	赤色	淡藍色
中生代		緑色	紫色	赤紫色	深藍色
				赤紫色	深藍色
古生代		緑色		赤紫色	深藍色
		緑色		赤紫色	深藍色

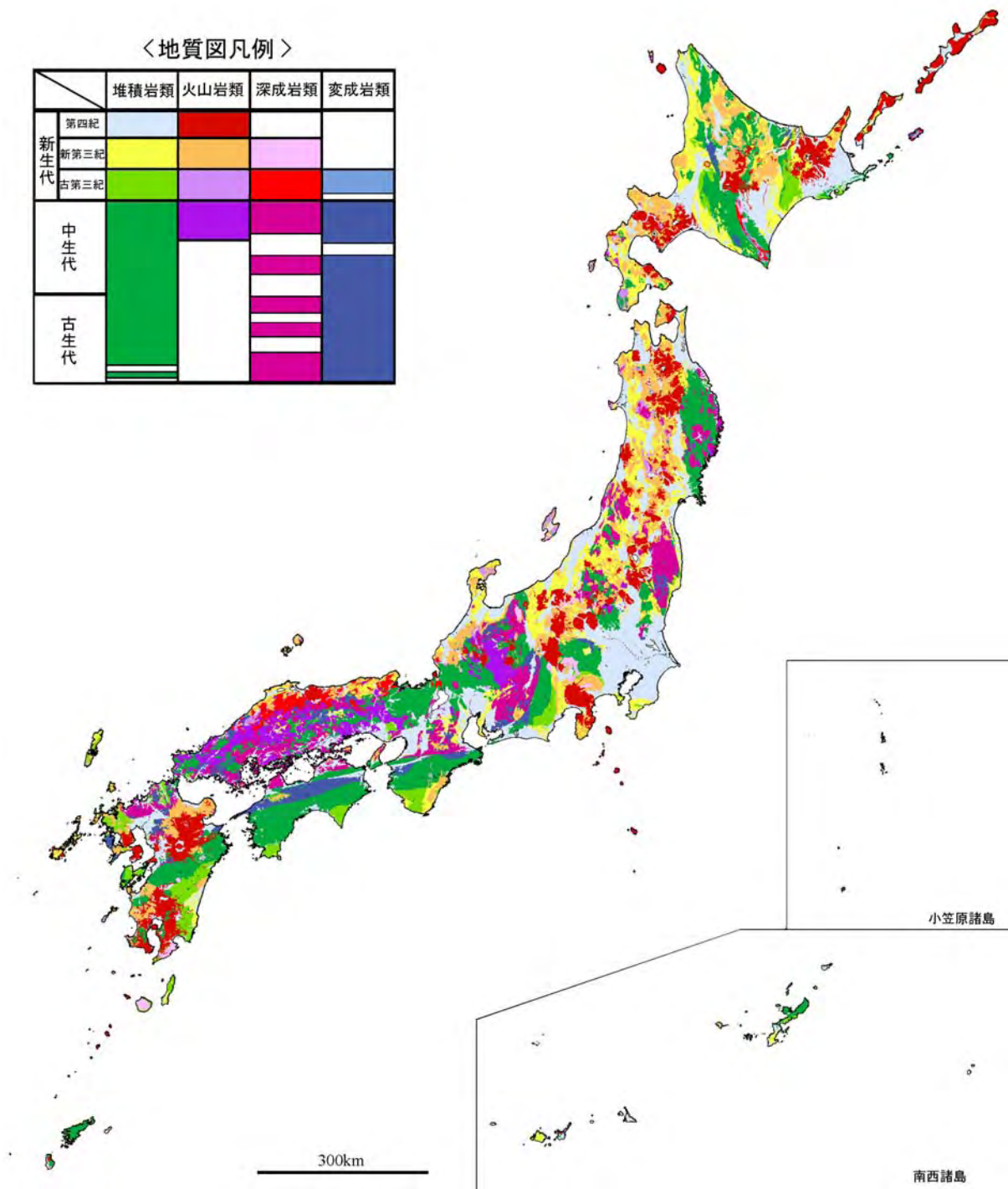


図 5.1.2-1 日本列島の地質分布

日本の地質は、古生代～新生代のさまざまな堆積岩、火成岩、変成岩からなり、大局的にみて弧状列島の伸びの方向とほぼ平行な帯状分布をしている（地質調査所，1995 を編集，承認番号 第 60635500-A-20101122-001 号）。

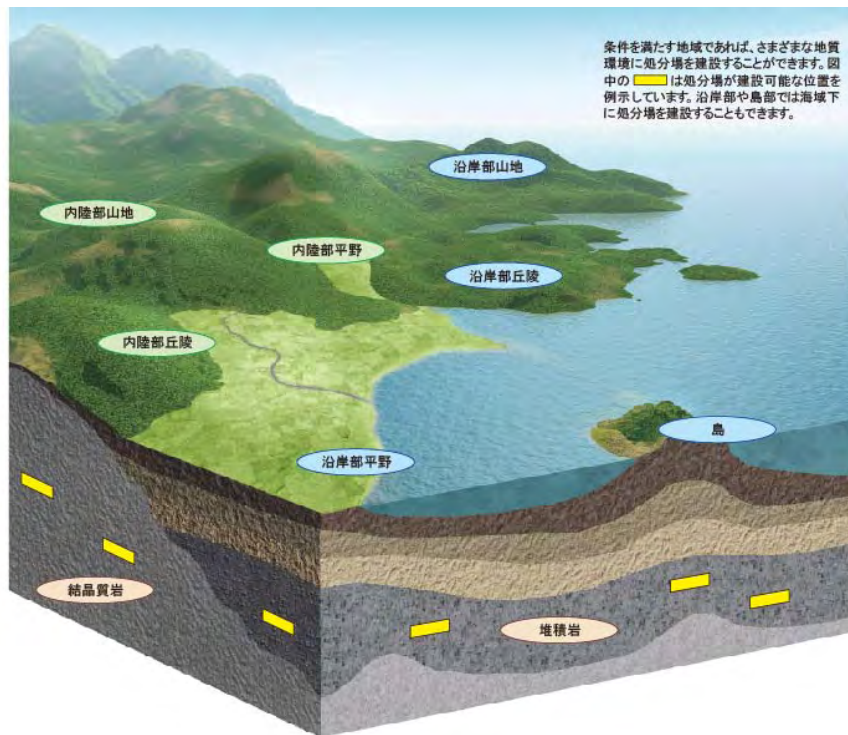


図 5.1.2-2 わが国の地質環境の基本的な分類
(出典：NUMO, 2009a)

わが国の地質環境は、地下水や物質の移行経路や岩盤特性の観点からは、大きくは結晶質岩と堆積岩に分類され、地理的条件からは、内陸部と沿岸域に分類される。

5.1.2.3 多様な地質環境に対する調査・評価の事例

5.1.2.2 に述べたように、わが国の地質環境は、結晶質岩と堆積岩、淡水系地下水と塩水系地下水に大きく区分される。また、地理的な条件からは、内陸部と沿岸域に区分される。実際には、地表付近に堆積岩が分布し地下深部に結晶質岩が分布する地域、付加体のように亀裂性媒体と多孔質媒体としての特徴をもつ地質がさまざまな割合で存在する地域などが存在する。このような地域においても、結晶質岩と堆積岩、淡水系地下水と塩水系地下水のそれぞれに特徴的な地質環境、内陸部と沿岸域といった地理条件に応じた調査・評価の考え方やその方法を適切に組み合わせることにより、地質環境を把握することが可能であると考えられる。このような考え方にに基づき、基盤研究開発機関および NUMO では、表 5.1.2-1 に示す研究開発を進めてきた。

JAEA は、2000 年までに整備してきた地質環境の調査技術や評価手法を、実際の地下深部の地質環境に適用することにより、重要な地質環境特性である地下水の流動特性や化学特性、岩盤特性、岩盤中での物質移行特性などに関する理解を深めている。また、これらを体系的に調査・解析・評価するための技術基盤の整備を目的として、深地層の研究施設計画を通じた研究開発を進めている。深地層の研究施設は、わが国の多様な地質環境のうち、結晶質岩・淡水系地下水を対象とした地質環境（瑞浪地域：三枝ほか、2007）と、堆積岩・塩水系地下水を対象とした地質環境（幌延地域：太田ほか、2007）に設置されている（図 5.1.2-3）。

瑞浪地域の超深地層研究所計画では、①深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備、②深地層における工学技術の基盤の整備を全体目標として 1996 年以降研究開発が進められており、

2005年3月に第1段階（地上からの調査予測研究段階）の調査研究が終了し、現在は第2段階（研究坑道の掘削を伴う研究段階）および第3段階（研究坑道を利用した研究段階）の調査研究が進められている。また、幌延深地層研究計画では、①深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備、②深地層における工学技術の基盤の整備、③実際の地質環境での地層処分技術の適用性確認を全体目標として、2001年以降研究開発が進められており、2006年3月に第1段階の調査研究が終了し、現在は瑞浪地域と同様に、第2段階に加えて第3段階の調査研究が進められている。これらの深地層の研究施設計画においては、地層処分にとって重要な地質環境特性やその形成プロセスに着目し、地上からの調査研究により研究坑道掘削前の未擾乱の地質環境特性が把握され、取得された情報の統合と解釈を通じて、地質環境モデルが構築されている。さらに調査の進展に伴い取得される情報に基づき、適宜、地質環境モデルが更新され、その結果を踏まえて調査の種類・量、解析・評価の手法および結果の精度との関係が整理され、一連の調査・解析・評価手法の有効性の検証が行われている（三枝ほか、2007；太田ほか、2007）。

このように、結晶質岩と堆積岩、淡水系地下水と塩水系地下水それぞれの地質環境については、JAEAにより研究開発が進められ、それぞれの地質環境特性に対応した一連の調査・解析・評価の方法論が提示されている。また、地上からの調査研究におけるノウハウなどの経験や技術的知見についても整備が進められている（JAEA, 2008, 2009, 2010a）。なお、これらの深地層の研究において得られた知見については、5.4に詳述する。

一方、沿岸域については、内陸部とは調査手法や取得できるデータの質や量が異なり、現状では技術的な課題が残されているが、近年、それらの解決に向けた取り組みが進められ、技術の整備および知見の蓄積が行われつつある。例えば、調査・評価技術の信頼性向上と体系的な整備を目的とした国の基盤研究開発として、北海道幌延町の沿岸域を対象としたプロジェクト（通称、沿岸域プロジェクト）が、2007年から幌延深地層研究計画の一環として進められている（太田ほか、2008）。このプロジェクトでは、一般的に想定される処分場の深度と地質環境特性の把握の観点から、地表～深度1,000m程度の地層を対象にしている。また、地質環境特性とその形成プロセスについては、大規模不連続構造の分布・性状とそれらが及ぼす地下水流動や水質形成への影響、地下水環境（塩水と淡水の混在や長期滞留領域）とその長期変遷を対象として、調査研究が進められている（図5.1.2-4）。これまでに、沿岸域を対象とした地質環境の長期変遷を考慮した調査・評価技術の体系的な枠組みや、沿岸域の地質環境を段階的に調査・評価するための方法論が整備された（Ota et al., 2010）。

NUMOでは、概要調査の実施に向けて検討・構築してきた調査技術・評価手法の体系的な適用性を確認すること、調査・管理技術の整備を図ることを目的として、沿岸域の堆積岩（付加体）の地質環境にある電中研横須賀地区において、電中研との共同研究として実証研究を進めてきた。なお、これらのプロジェクトによって得られた知見については、5.4.2に詳述する。

以上のように、わが国の地質環境は多様性を有しているが、そうした特徴を踏まえて、深地層の研究施設計画における研究開発および沿岸域を対象とした研究開発が着実に進められている。NUMOは、これらのプロジェクトにより得られた知見を活用し、調査対象サイトの地質環境に適合する調査・評価技術を適切に組み合わせることにより、わが国の多様な地質環境に対応した調査・評価を行う。

表 5.1.2-1 わが国の多様な地質環境の調査・評価に向けた研究開発

研究開発プロジェクト	超深地層研究所計画	幌延深地層研究計画	
		沿岸域プロジェクト*	
実施機関	JAEA	JAEA, 産総研, 電中研, 原環センター	横須賀実証研究*
地下水・物質の移行経路, 岩盤特性による分類	結晶質岩	堆積岩 (新第三系泥岩・砂岩)	
地下水の化学特性による分類	淡水系	塩水系	
地理的条件による分類	内陸部		沿岸部

*: 正式名ではなく通称

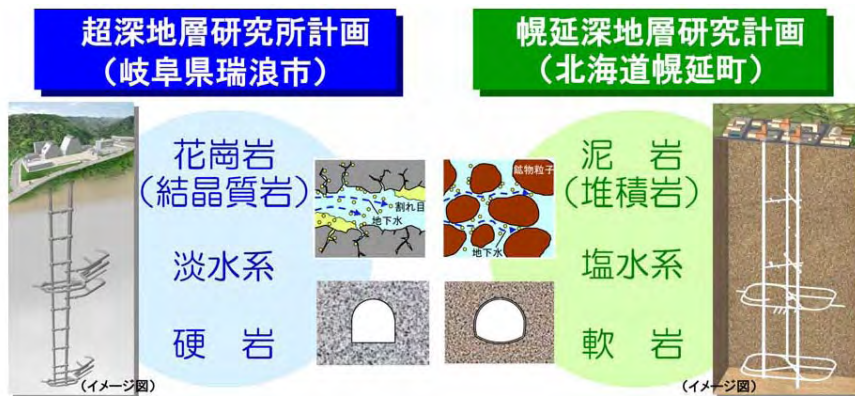


図 5.1.2-3 深地層の研究施設 (JAEA の施設) の計画概要
(出典: JNC, 2005a)

岐阜県瑞浪市では花崗岩 (結晶質岩) と淡水系地下水からなる地質環境, 北海道幌延町では泥岩 (新第三紀の堆積岩) と塩水系地下水からなる地質環境をそれぞれ対象とした研究が進められている。

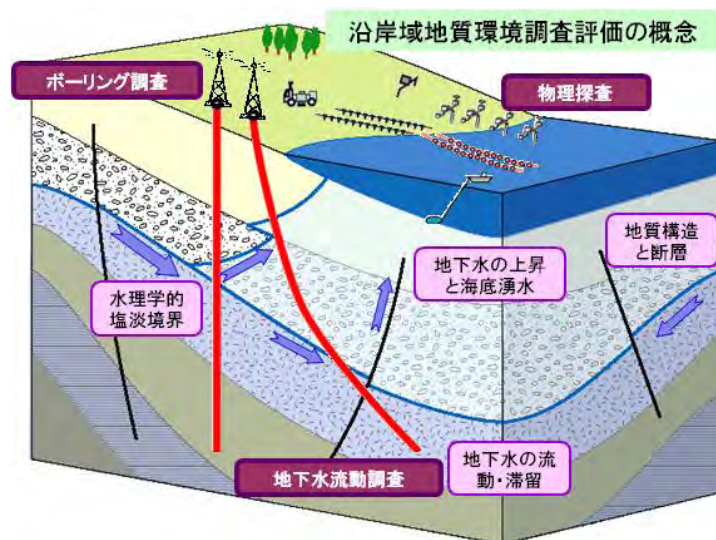


図 5.1.2-4 沿岸域における調査・評価にかかわる技術開発のイメージ
(出典: 大澤ほか, 2008)

断層などの大規模不連続構造の分布・性状と地下水流動や水質形成への影響, 塩水系・淡水系地下水の混合領域や地下水の長期滞留領域, およびそれらの長期変遷に関する調査・評価技術の開発が進められている。

5.2 文献調査および概要調査の基本的な考え方と進め方

本節では、サイト選定の初期段階に実施する文献調査および概要調査において、各段階の目標達成に向けてどのような考え方でどのように調査・評価を進めていくか述べる。まず、両方の調査・評価に共通する基本的な考え方を示し、次に、文献調査および概要調査のそれぞれの進め方について述べる。最後に、調査・評価にかかわる品質マネジメントシステムについて述べる。

5.2.1 文献調査および概要調査の基本的な考え方

ここでは、文献調査および概要調査の両方にかかわる基本的かつ重要な考え方として、サイト調査・評価の安全確保にかかわる目標、不確実性の低減に向けた段階的な調査・評価、不確実性の取り扱い、調査・評価の適用性の確認、調査・評価の体系化について述べる。

5.2.1.1 安全確保にかかわる目標

サイト調査・評価の安全確保にかかわる目標は、地層処分システムが長期にわたって期待される性能を維持・発揮できるような適切な地質環境の条件や機能を満たす安定した場所を選定することにある(3.1.2.1参照)。具体的には、変動帯に位置しているわが国では、まず地層処分システムを成立させる前提として、将来にわたり地震・断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食などの自然現象の著しい影響を回避する。そして、地層処分システムの間となる地質環境の諸特性を把握し、その長期的な変遷を理解することにより、以下に示すような地層処分システムの長期的な安全確保の観点からより適切と判断される条件を有する場所を選定する。

- ・ 坑道掘削や人工バリアの構築など、工学的対策の観点からより適切と判断される条件（力学的に安定であること、施設を通過する地下水流量が小さいことなど）
- ・ 人工バリアや天然バリアの放射性物質の移行抑制など、地層処分システムの閉鎖後長期の安全性の観点からより適切と判断される条件（還元性、地下水流速が遅い、放射性物質の移行距離が長い、擾乱に対する緩衝能力あるいは回復力を有するなど）

また、将来の人間活動による処分施設への侵入を回避する観点から、経済的に価値が高い鉱物資源が存在する地域は含めないことも重要な条件の一つである。

5.2.1.2 段階的な調査・評価

(1) 基本的な考え方

地層処分の対象は一辺数 km の地下空間であることから、広範囲の空間的な特性のばらつきを有しており、それらのすべてを把握することは困難である。また、閉鎖後数万年以上にわたる長期の安全性の評価が必要であり、それらにかかわる時間的な不確実性が伴う。これらの時空間的な不確実性に対する取り組みが必要であることが、地層処分事業の大きな特徴の一つである。このような広範囲かつ空間的な特性のばらつきを有する地質環境を、その長期的な安定性を含めて合理的に把握していくための考え方として、段階的なアプローチがある。この段階的な調査・評価は、段階ごとに安全確保の目標達成レベルを判定し、その時点で不確実性が大きくかつ重要度の高い因子を抽出し、それにかかわる情報を優先的に取得すべく、次段階の活動に取り込んでいくものである。具体的には、地質環境の調査の結果を統合的に解釈した上で地質環境モデルを構築するとともに、そ

の妥当性を確認しつつ不確実性の因子を明確にする。さらに、地質環境の調査・評価の結果に基づき工学的対策および安全評価にかかわる検討を行うことによって、重要度の高い不確実性の因子を抽出し、次段階の調査計画に反映する。

また、調査・評価を段階的に進めることは、地層処分事業と並行して進められる個別要素技術開発の成果を、サイト選定の各段階の調査・評価に柔軟に取り込み、調査・評価の計画を最適化していくことに対しても有効であると考えられる。さらに、各段階の途中や節目ごとに、国内外の専門家や規制当局によるレビューを受け、その妥当性について繰り返し確認することにより、安全性にかかわる論拠を段階的に充実していく。

(2) 地質環境モデルの構築

サイト選定において段階的に意思決定を行う際には、地質環境の調査・評価、工学的対策、安全評価の三つの専門分野が互いに連携を図り、閉鎖後長期の安全性を確保できることを段階的に示すことが重要である。そのためには、対象地域の地質環境に関する情報を相互に利用可能な形式で整理し、地質環境の場の理解や不確実性に関する認識を共有する必要がある。地質環境モデル (Site Descriptive Model) は、地質環境に関する情報を可視化することで、さまざまな分野の関係者間で認識の共有化を図り、調査地域の場の理解を深め、課題の抽出に用いるとともに、次段階の調査計画を作成する際の判断材料として利用する。また、データセットを通じて工学的対策や安全評価に必要なパラメータを受け渡すことを可能にすることから、各種パラメータの適用性、モデルに内在する不確実性やデータの信頼性を実務者の間で共有するためのツールとして使用する。さらに、ステークホルダーの地下深部の地質環境に関する理解を深めるためのツールとしても使えるよう、調査の段階ごとに更新を重ねていくことにより、モデルの信頼性を高めていく。

NUMOでは、海外および国内の先行事例 (例えば、SKB, 2001) を参考に、地質環境モデル構築にかかわる考え方を取りまとめた (NUMO, 2011)。以下に、地質環境モデルと、そのもととなる地質環境の概念モデルについて、定義と留意点について述べる。

<地質環境モデル>

- ・ 地質環境の概念モデルをベースに、地質環境の各種特性の分布や性状を二次元または三次元で定量的に示したものの総称と定義する。
- ・ モデル構築時の情報と地質環境の概念モデルに基づき構築されるため、情報の量や精度、作業仮説に依存した不確実性が内包されていることに留意する必要がある。
- ・ 地質構造モデルを基礎として、水理地質構造 (地下水流動) モデル、地下水化学モデル、岩盤特性モデル、物質移行特性モデルが構築され、それらは互いに整合性が取れていて矛盾がないことが望ましい。

<地質環境の概念モデル>

- ・ 地層処分において重要な地質環境特性の場、現象、メカニズムなどに関する解釈を概念的に示したものと定義する。
- ・ 必ずしも定量的に表現されるものではなく、過去から現在までの変遷に関する解釈、将来の変動に関する予測などの概念を含む場合もある。
- ・ 情報量の不足、現象やメカニズムに対する理解の不足などに起因する不確実性を考慮し、複

数のモデルについて検討しておくことが望ましい。それらは調査の進展に伴う情報量の増加により、一つの概念モデルに絞り込まれることもある。

- ・ 地質・地質構造に関する概念モデルを基礎として、水理地質構造（地下水流動）、地下水化学、岩盤特性などの地質環境特性ごとに概念モデルを構築するが、各モデル間の整合性について検討することが重要である。

各地質環境特性のモデル構築に関する全体の流れのイメージを図 5.2.1-1 に示す。地質環境モデルの妥当性については、次の段階、あるいはその中の複数のフェーズの調査の中で、解析値（モデル）と実測値（調査・試験）を比較して検証する。

地質環境モデルは、モデルの構築目的に応じた空間スケールを設定することが重要である。例えば、広域的な地下水流動状況を表現するためのモデルの場合、当該サイトの広域的な地下水流動系を包括したスケールで、当該サイトの候補母岩を通過する地下水の流動を評価するために必要となる領域（例えば、数 10km 四方）として設定することとなる（三枝ほか、2007）。一方、処分施設的设计（例えば、空洞の力学安定性の検討）に利用するモデルの場合は、構築する空洞の規模や空洞の掘削により物理的・力学的影響が検討可能なものであることが求められる。このため、地質環境モデルの空間スケールを設定する際には、地質環境モデルを利用する工学的対策や安全評価の観点から検討する必要がある。なお、異なる空間スケールの地質環境モデルが構築される場合には、各空間スケール間において、地質環境特性や現象の整合性または連続性を確保することが重要である。地質環境モデル構築のための複数の空間スケールの領域設定の例を図 5.2.1-2 に示す。ここでは、リージョナルスケール、ローカルスケール、サイトスケールからなる三つの空間スケールの領域が設定されている。

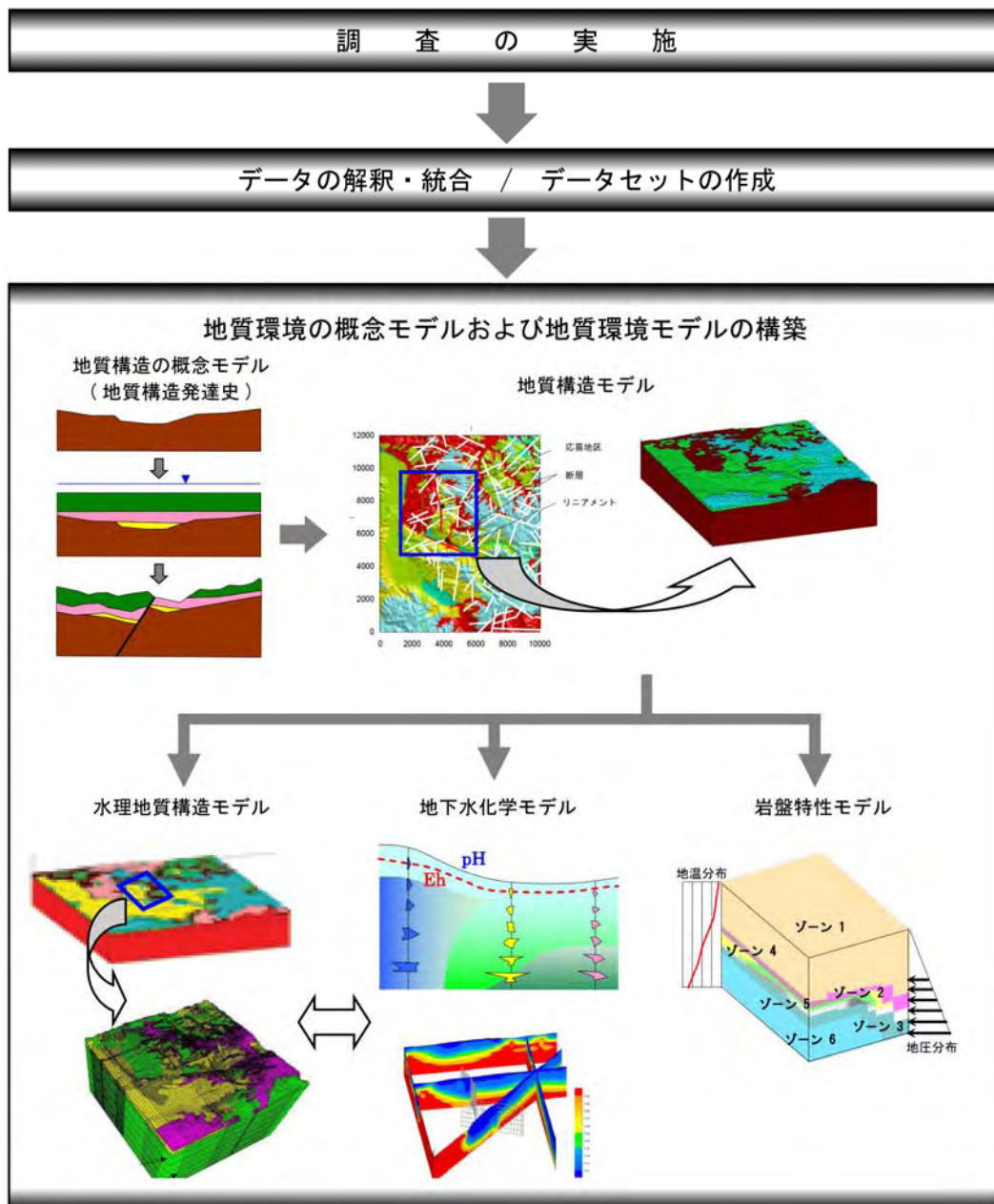


図 5.2.1-1 地質環境モデル構築の流れ (イメージ)

各段階の調査で取得した情報に基づき、地質環境の概念モデル（ここでは地質構造発達概念の例を示す）を構築し、それをベースとして、地質環境の各特性の分布や性状を定量的に可視化した地質環境モデル（ここでは地質構造、水理地質構造、地下水化学、岩盤特性のモデルの例を示す）を構築する。

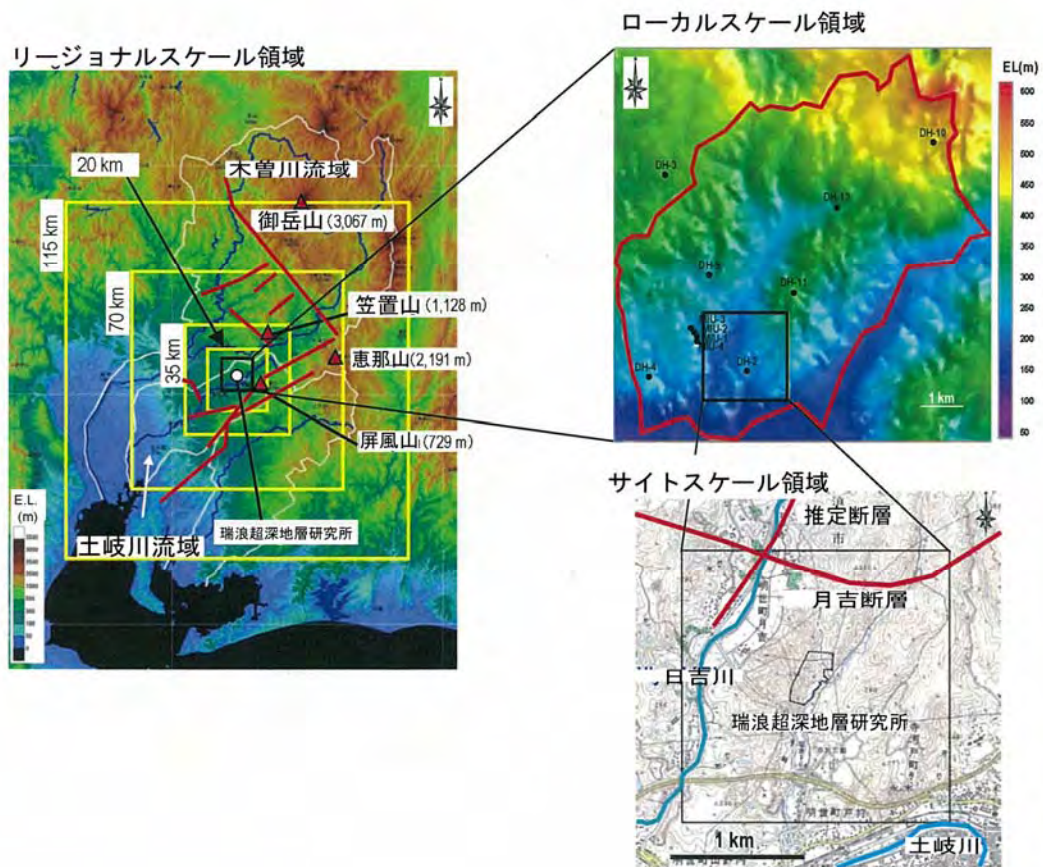
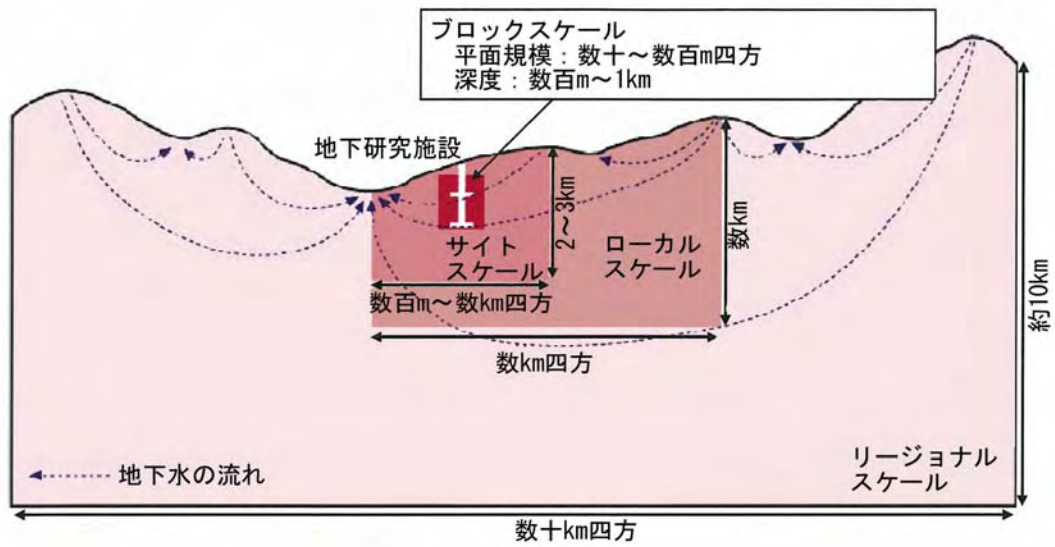


図 5. 2. 1-2 地質環境モデル構築のための複数の空間スケールの領域設定の例
(三枝ほか, 2007 を和訳)

地層処分にとって重要な地下水流動や物質移行などの地質環境特性の段階的な理解および評価の観点から、四つの空間スケールの概念が示され、東濃地域における広域地下水流動研究および超深地層研究所計画では、これまでに三つのスケールが設定されている。

5.2.1.3 不確実性の取り扱い

(1) 不確実性の種類と特徴

3.2.2 に述べたとおり、不確実性の管理は、NUMO における品質保証への取り組みにおいて重要な事項であり、サイト調査・評価から工学的対策、安全評価への連携の際の媒体情報に内在する不確実性についても、適切に管理・伝達されなければならない。

一般に、調査・評価にかかわる不確実性として、次に示すものが挙げられる。

- ① データの不確実性
- ② 地質環境の概念化の不確実性

①のデータの不確実性は、各種の調査により取得されるデータや、複数のデータを統合した情報（例えば、地質環境モデルのデータセット）などに含まれる不確実性である。これらは、測定誤差、測定精度（空間分解能、計測密度）など、複数の要因によって生じる。

②の地質環境の概念化の不確実性は、データの解釈に起因するもので、自然現象の将来予測や当該サイトで生じている現象の理解において不可避な時間的・空間的な不確実性である。時間的な不確実性は、例えば、過去から現在までの変動・変遷の法則性や地質構造発達モデルといった、将来予測に用いる仮説（モデル）が複数の解釈に基づき複数存在するなど、現象の理解に内包される不確実性である。空間的な不確実性は、情報量の不足により個々の現象や複数の現象間の相互作用に関する理解が十分でないことなどに起因する。また、当該サイトが元来有している地質環境のさまざまな特性のばらつきや、データの代表性などにより、地質環境そのものの解釈・推定に伴う不確実性が含まれる。

(2) 不確実性の低減

文献調査で取得されるデータは、地表付近の情報であることが多く、地下深部の情報は限られている可能性が高い。このため、この段階の地質環境モデルには、大きな不確実性があると考えられる。例えば、断層面の三次元分布について、地表における断層の位置と傾斜に関する情報しか得られていない場合、地下深部における分布・形状は、地表付近のデータのばらつきに依存して幅広く推定せざるを得ない。また、概要調査の段階においても、地質環境モデルを構築するための十分な情報が得られず、限られた情報から地質構造、地質環境特性、現象などを推定せざるを得ない場合が生じ得る。このような場合、取得された情報に基づく地質環境の理解度や、その時点における解釈・推定結果に含まれる不確実性の種類やその幅などを特定することが重要である。そのような不確実性にかかわる情報を、モデルやデータセットとともに、工学的対策・安全評価に受け渡す必要がある。さらに、工学的対策・安全評価にかかわる検討との連携を通じて、処分施設の成立性、閉鎖後長期の安全確保に影響を及ぼす重要な構造、地質環境特性、現象などを特定し、その結果を次段階（または次フェーズ）の調査計画に反映するとともに、不確実性を低減させていくように取り組む。

このような段階的な地質環境の調査・評価における不確実性の定量的評価について、柳沢ほか（2004）は、空間的な特性のばらつきを有する地質環境における不確実性を表現する方法として、決定論的モデルと地球統計学的モデルを組み合わせる手法を提案している。ここでは、東濃地域のデータを用いて、文献調査、地表地質調査、ボーリング調査1孔、ボーリング調査2孔の段階的な

調査を想定して解析した結果、調査の進展による情報量の増加に伴い、不十分な知識に基づく解釈に起因する不確実性が減少し、考慮すべき（あるいは否定できない）モデルが絞り込まれることが示された。それと同時に、途中の段階の調査で新たな地質が認識され、不確実性が必ずしも時系列的に単調に減少するとは限らないことも指摘された。

文献情報に基づく評価の不確実性を現地調査により低減した事例としては、幡谷ほか（2005）が挙げられる。河成段丘を用いた隆起量評価では、河成段丘の対比・編年に対する解釈が不確実性の大きな要因である。宮城県南部の陸前川崎盆地周辺の隆起量は、既存の文献情報からは53m/12.5万年などの値が見積もられていた。そこで、地形層序およびテフラ層序にかかわる詳細な現地調査を実施し、河成段丘群の対比・編年の見直しを行った結果、当地域の隆起量は20-30m/12万年であることが明らかになった。

このように、地質環境の調査・評価にかかわる不確実性については、最新の知見と技術に基づき、段階的に十分な調査を繰り返すことにより低減していくことを基本とする。さらに、次項（3）に示すように、サイト調査・評価だけではなく、工学的対策および安全評価との緊密な連携により、不確実性に合理的に対処する。

（3）サイト選定にかかわる不確実性への対応

地質環境の調査・評価にかかわる不確実性については、最新の知見と技術に基づき、段階的に十分な調査を繰り返すことにより低減していくことを前提とする。

概要調査地区選定段階では、文献調査の結果、概要調査地区選定上の考慮事項に照らして明らかに不適格な場所が認められた場合は、その場所を概要調査地区から除外することにより、リスクを回避する。その際、不確実性が大きく不適格かどうか明確に判断できない場合には、不確実性に伴うリスクの評価を保留し、精密調査地区選定段階へと進み、概要調査において不確実性の低減を図る。

精密調査地区選定段階では、概要調査の結果、精密調査地区選定上の考慮事項（検討中）に照らして明らかに不適格な場所が認められた場合は、その場所を精密調査地区から除外することにより、リスクを回避する。その際に、重要な不確実性が存在する場合は、その所在を明らかにし、調査・評価を繰り返すことにより可能な限り低減を図る。そのような不確実性に関する情報を工学的対策と安全評価の分野に的確に受け渡し、それらの検討結果を含めて安全確保の見通しが得られる地域を、精密調査地区として選定する。

なお、それぞれの段階の各分野の調査・評価における不確実性への具体的な対応については、5.3に述べる。

5.2.1.4 調査・評価技術の適用性の確認

3.2.3.1に述べたとおり、NUMOは、十分な信頼度をもって安全確保策を実施していくために、最新の知見を踏まえ、その時点で利用可能な最適で信頼性の高い技術を用いて事業を推進する。ここでの信頼性の高い技術については、事業の効率化や経済性を考慮し、適切なレベルで品質を保証できるものであることが重要である。このため、地質環境の調査・評価には、自然科学、資源探査、防災、土木、原子力施設建設などの分野において使用実績のある技術、および地層処分事業のためにNUMOや基盤研究開発機関が開発した技術を用いる。

自然現象の影響にかかわる調査・評価には、科学的な研究成果を取り込むことによる不確実性が

内在する。それらを低減させるためには、研究の事例を増やすとともに、地層処分事業への適用性を含めた研究成果の検証を行うことが重要である。NUMO は、国内および海外の専門家の参加する国際テクトニクス会議（International Tectonics Meeting : ITM）を開催し、火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・沈降などの自然現象の評価に関する既存の技術および新たな知見について議論し、それらのわが国の地層処分への基本的な適用性を確認してきた（Chapman et al., 2009a）。

また、地質環境特性にかかわる調査・評価においても、信頼性のある地質環境モデルを構築するためには、内在する不確実性を低減するために、基礎となる個別の研究や地質構造モデルなどの検証を行い、適用性を確認することが重要である。5.1.2 に述べたとおり、NUMO は電中研との共同研究（近藤ほか、2011）を通して、概要調査の主要な実施項目であるボーリング調査を中心とした体系的な調査・評価技術について、実施主体の観点から適用性を検討している。現在、JAEA は二つの深地層の研究施設計画において第2段階（研究坑道の掘削を伴う研究段階）および第3段階（研究坑道を利用した研究段階）の調査研究を進めている。今後、これらの結果に基づき、第1段階（地上からの調査予測研究段階）の調査研究で整備した、地質環境モデルの構築を含む深部地質環境の調査・解析・評価技術が検証される予定である。

以上のような調査・評価技術の確認は、セーフティケースの重要な構成要素の一つであり、今後ともさらに力を入れて進めていくことが必要である。

5.2.1.5 調査・評価の体系化

調査・評価の計画立案や実施に際しては、自然現象の影響評価、工学的対策および安全評価に必要な情報と、個別の調査・試験・解析などから得られるデータや情報について、相互の関連性や取得に至るプロセスを体系的に整理し、調査全体の中での位置付けや重要度を理解することは非常に重要である。体系的な調査・評価を進める上で参考となる知見として、統合化データフローダイアグラム（三枝ほか、2007；太田ほか、2007；Ota et al., 2010；原環センター、2007：図 5.2.1-3）が挙げられる。これらを利用することにより、データの取得から、調査結果の統合・解釈、概念化・モデル化に至る一連の情報の流れを把握することができ、さらに、調査・評価の過程の追跡性および透明性を確保すること、処分施設的设计や閉鎖後長期の安全性の評価との関連性を把握することもできる。

文献調査および概要調査における地質環境の調査・評価は、自然現象の影響と地質環境特性の二つの分野に大別される。これらの調査・評価では、5.3 に述べるように、基本的には個々の評価項目に応じた調査を行う。しかしながら、図 5.2.1-4 に示すように、自然現象の影響に関する情報と地質環境特性に関する情報は、相互に関連している。例えば、地質環境特性として取得する地質・地質構造の情報は、自然現象の分野における各事象の分布や傾向、地質構造の発達過程を検討するための基本的な情報となる。一方、自然現象の影響の分野における地質構造の発達過程や将来予測の検討結果は、地質環境の長期変遷に関する評価に対する入力情報となる。また、さまざまな調査を実施する場合、ある調査によって取得された情報が、別の調査を計画・開始する際の入力情報となることがある。このようなことから、当該サイトの調査・評価に当たっては、調査・評価項目ごとの調査・評価の論理的な手順や取得データの多角的な利用を考慮して有機的に結び付け、体系的に調査・評価を進めることが重要である（木方ほか、2011）。NUMO は、この考え方に基づき、5.3 に述べる調査・評価の体系を整備した。

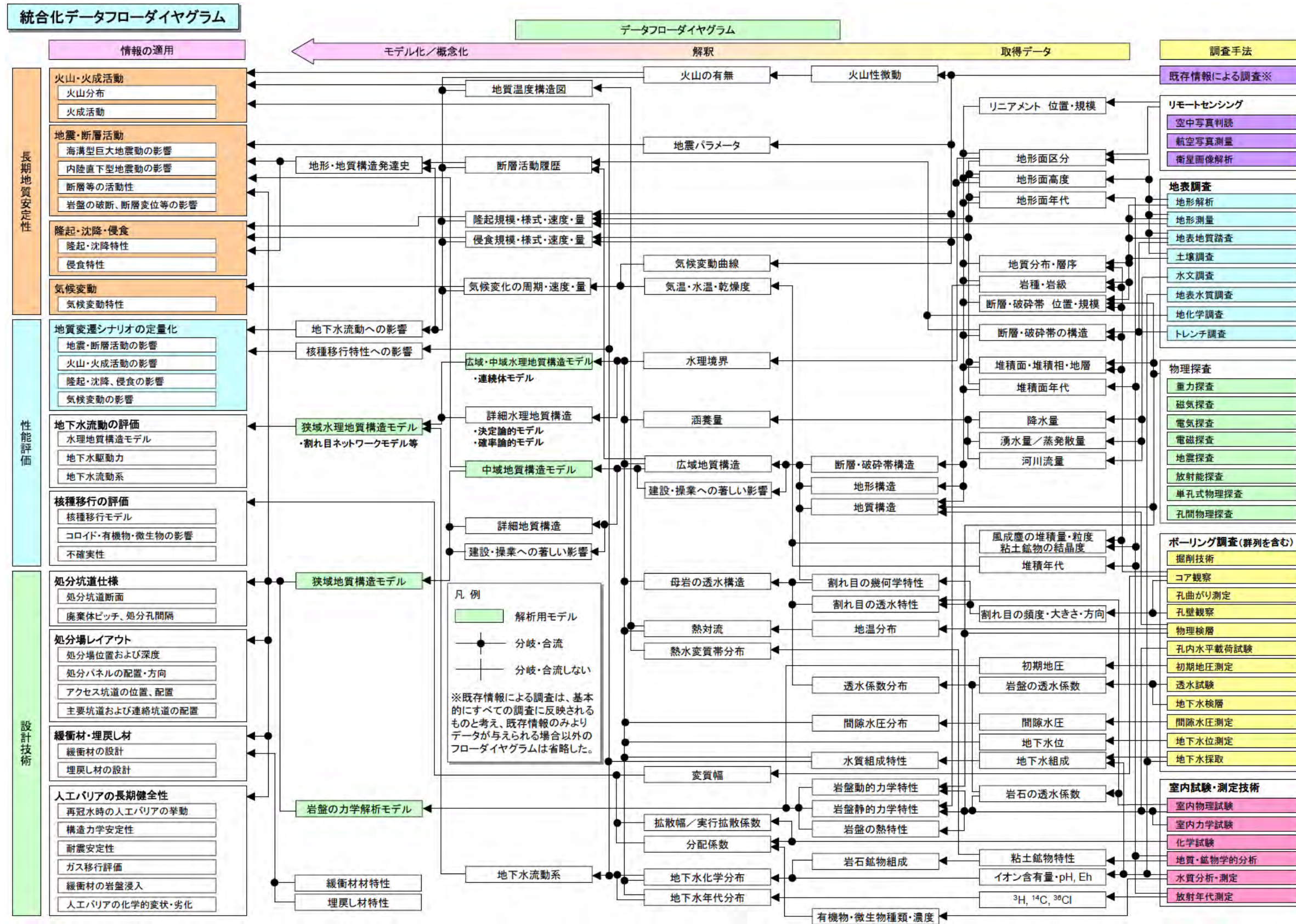
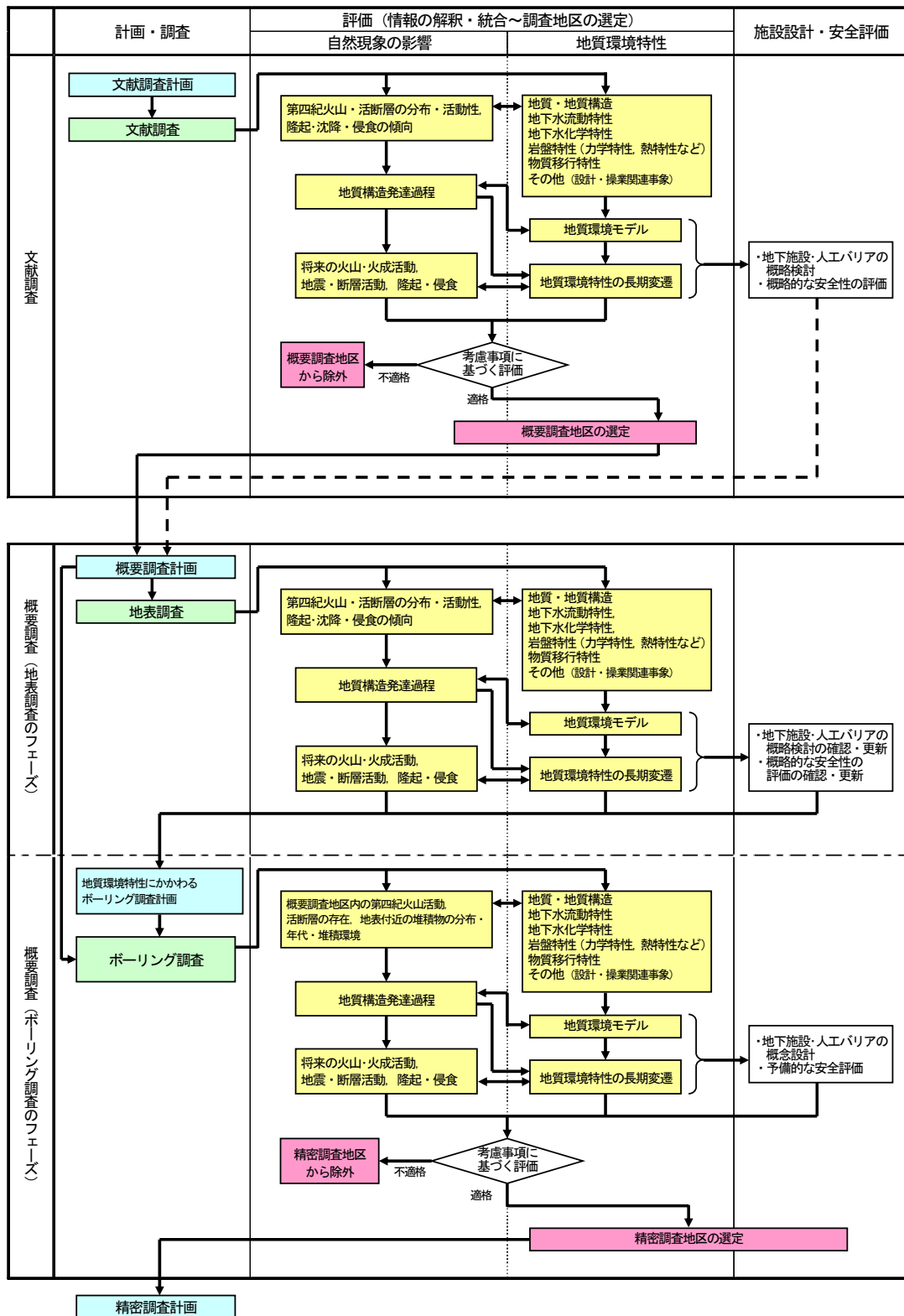


図 5.2.1-3 統合化データフローダイアグラムの検討例

(出典: 原環センター, 2007)

長期地質安定性、性能評価、設計技術の各項目の評価に向けて、どのような調査手法を用いてどのようなデータを取得し、どのような解釈を経て地質環境の概念モデルや地質環境モデルを構築し、データの流れと関連性を系統的に示している。



□：計画、■：調査、■：検討・評価項目、■：意思決定、□：他の計画、調査、検討・評価項目

図 5.2.1-4 文献調査および概要調査の流れ，調査や情報の連携・共有化（検討例）

わが国の多様な地質環境において、共通する情報の取得から各調査地区選定までの流れを例示したものである。サイト調査・評価を合理的・効率的に進めるために、自然現象の影響と地質環境特性の評価において地質・地質構造や地質構造発達過程に関する調査は、両分野において連携して行い、情報を共有化する。

5.2.2 文献調査の進め方

5.2.2.1 文献調査の目標

文献調査の目標は、最終処分法に照らして、自然現象の著しい影響が避けられないような明らかに不適格な場所を回避するとともに、地下施設の建設が明らかに困難な場所、鉱山開発などによる人間侵入の可能性の高い場所を避けて、概要調査地区を選定することである（4.2.1.1 参照）。また、文献情報に基づき地質環境モデルを構築するとともに、地下施設や人工バリアの概略検討、および概略的な安全性の評価（感度解析）に必要な、地形、地質・地質構造、地下水の流動特性および化学特性、岩盤特性（力学特性、熱特性など）、物質移行特性などの地質環境特性にかかわる情報を受け渡す。これらの結果に基づき、次段階で安全確保における不確実性を低減するために優先的に取得すべき情報を把握し、概要調査計画の立案に反映させる。

概要調査地区選定上の考慮事項（NUMO, 2009b）は、最終処分法および同施行規則に定める法定要件に基づき、さらに、概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件（原子力安全委員会, 2002b）を踏まえ、処分施設建設地としての適性が明らかに劣る地域を含めないように概要調査地区を選定するために、考慮する事項とその評価の考え方などを示したものである。

概要調査地区選定にかかわる法定要件を以下に示す。

- ・ 地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録がないこと
- ・ 将来にわたって、地震等の自然現象による地層の著しい変動が生ずるおそれが少ないと見込まれること
- ・ 地層処分を行おうとする地層が、第四紀の未固結堆積物であるとの記録がないこと
- ・ 地層処分を行おうとする地層において、その掘採が経済的に価値が高い鉱物資源の存在に関する記録がないこと

これらの法定要件に対する適格性を評価するための具体的な基準として、地震、噴火、隆起・侵食、第四紀の未固結堆積物および鉱物資源に関する「法定要件に関する事項」を設定した。これらは、全国規模でデータが整備された情報に基づき一律の基準により法定要件への適格性を評価するための「全国一律に評価する事項」と、個別の応募区域およびその周辺の地域を対象に概要調査地区としての適格性を評価するための「個別地区ごとに評価する事項」に分類されている。

【地震】

全国一律に評価する事項：

陸域では空中写真判読など、海域では海上音波探査などに基づいて全国的に調査された文献に示されている活断層がある場所は含めないように、概要調査地区を選定する。

個別地区ごとに評価する事項：

くり返し活動し、変位の規模が大きい活断層などについて、次の事項に該当すると明確に判断される場所、範囲は含めないように、概要調査地区を選定する。

- ① 全国一律に評価する事項で用いた以外の文献によって認められる活断層がある場所
- ② 活断層の幅（断層破碎帯）およびその外側の変形帯に含まれる範囲
- ③ 活断層の分岐などの発生の可能性が高い範囲

④ 顕著な活動を継続している活褶曲や活撓曲の分布範囲

【噴火】

全国一律に評価する事項：

将来数万年にわたるマグマの活動範囲の拡がりの可能性を考慮し、第四紀火山の中心から半径 15km の円の範囲内にある地域は含めないように、概要調査地区を選定する。

個別地区ごとに評価する事項：

第四紀火山の中心から半径 15km の円の外側の地域でも、将来数万年にわたりマグマの地殻への貫入や地表への噴出が明確に判断される地域は含めないように、概要調査地区を選定する。また、将来も含め、マグマによる著しい熱の影響、強酸性の熱水、あるいは著しい熱水対流が存在すると明確に判断される地域は含めないように、概要調査地区を選定する。

【隆起・侵食】

個別地区ごとに評価する事項：

過去 10 万年間の隆起の総量が 300m を超えていることが明らかな地域は含めないように、概要調査地区を選定する。

【第四紀の未固結堆積物】

個別地区ごとに評価する事項：

地層処分を行おうとする地層が、第四紀の未固結堆積物である地域は含めないように、概要調査地区を選定する。

【鉱物資源】

個別地区ごとに評価する事項：

地層処分を行おうとする地層において、その採掘が経済的に価値が高い鉱物資源が存在する地域は含めないように、概要調査地区を選定する。

また、法定要件に対する適格性が確認された地区を対象に、概要調査地区としての特性を総合的に評価し、必要に応じて相対比較を行うための「付加的に評価する事項」を設定した。これらは、法定要件には該当しないものの、「安全性確保の前提のもと、経済性および効率性にも留意する」という NUMO の事業推進に関する方針を踏まえ、精密調査地区および処分場建設地の選定段階の法定要件や建設・操業の段階で必要な事項に関し、文献調査で可能な範囲で見通しを得るためである。

① 地層の物性・性状

岩盤の強度、変形・割れ目・風化・変質の状況、地温勾配、岩体の形状・規模、隆起・侵食の速度、異常間隙水圧・膨張性地山・ガス突出・山はね・大出水の可能性

② 地下水の特性

地下水の流量・流速、水温、pH、酸化還元性

③ 地質環境の調査・評価

調査の範囲・規模・期間、調査技術・評価手法などの適用性、火成活動・断層活動などの地

質環境の評価・モデル化の容易性、調査に対する土地利用などの制約

- ④ 建設・操業時における自然災害
地震・地すべり・洪水などの重大な自然災害が発生する可能性
- ⑤ 土地の確保
土地の確保の容易性
- ⑥ 輸送
利用可能な港湾または港湾候補地からの距離などの輸送の容易性

5.2.2.2 文献調査の準備

NUMO は、文献調査を合理的・効率的かつ的確に遂行するために、文献調査マニュアルを整備してきた。文献調査マニュアル(案)には、①実施体制の構築、②応募区域の地質的条件の事前確認、③文献調査計画書の作成など、の文献調査の準備にかかわる業務、そして、④文献・資料の収集と管理、⑤文献情報の抽出・整理、⑥文献情報の総合的な解析・評価(地質総合解析)などの文献調査の実施にかかわる業務、さらに⑦概要調査地区の選定、⑧品質管理などの業務の具体的な進め方(方法)について記述している。これらの文献調査にかかわる業務の基本的な流れを図 5.2.2-1 に示す。ここでは、①から③の文献調査の準備について述べる。なお、④から⑥の文献調査の実施については 5.2.2.3 に、⑦の概要調査地区選定については 5.2.2.4 に、⑧の品質管理については 5.2.4 に、それぞれ述べる。

文献調査に当たっては、サイト調査・評価の担当部署を中心とする実施体制を構築する。概要調査地区選定のプロセスや、公開する文書などの技術的な妥当性については、NUMO が設置しているレビュー組織である技術アドバイザー国内委員会(以下、DTAC という。)および技術アドバイザー国際委員会(以下、ITAC という。)において、文献調査のためのレビューチームを限定的に組織し、それぞれ国内および海外の最新知見を踏まえた確認を行う。

応募受付後、文献調査開始に先立ち、概要調査地区選定上の考慮事項のうち、全国一律に評価する事項である「全国的に調査された文献に示されている活断層がある場所が含まれないこと」、および「第四紀火山の中心から半径 15km の円の範囲内にある地域が含まれないこと」の 2 点を応募区域の地質的な条件とし、下記の文献の記載情報に基づいて、条件を満足しているかどうかを確認する。

- ・ 陸域活断層：「活断層詳細デジタルマップ(中田・今泉, 2002)」
- ・ 海域活断層：「日本周辺海域の中新世最末期以降の構造発達史(徳山ほか, 2001)」の付図「日本周辺海域の第四紀地質構造図」
- ・ 第四紀火山：「日本の第四紀火山カタログ v.1.0 (CD-ROM) (第四紀火山カタログ委員会, 1999)」

事前確認の実施に当たっては、NUMO 地理情報システム(NUMO-GIS)を活用する。このシステムは、地理情報、上記の指定文献に記載された第四紀火山、活断層の情報のほか、NUMO が全国規模を対象とした地形・地質関連の文献・資料を収集し、その情報を GIS データに変換し、整備・データベース化したシステムで、現在も継続的に情報を蓄積・拡充している。

次に、以下の項目からなる文献調査計画書を作成する。

- 文献調査の位置付けと目的
- 応募受付から報告書作成までの流れ
- 文献調査の具体的な内容
- 応募区域の自然環境などに関する補充情報収集と「文献情報に基づく処分場の概要」の作成

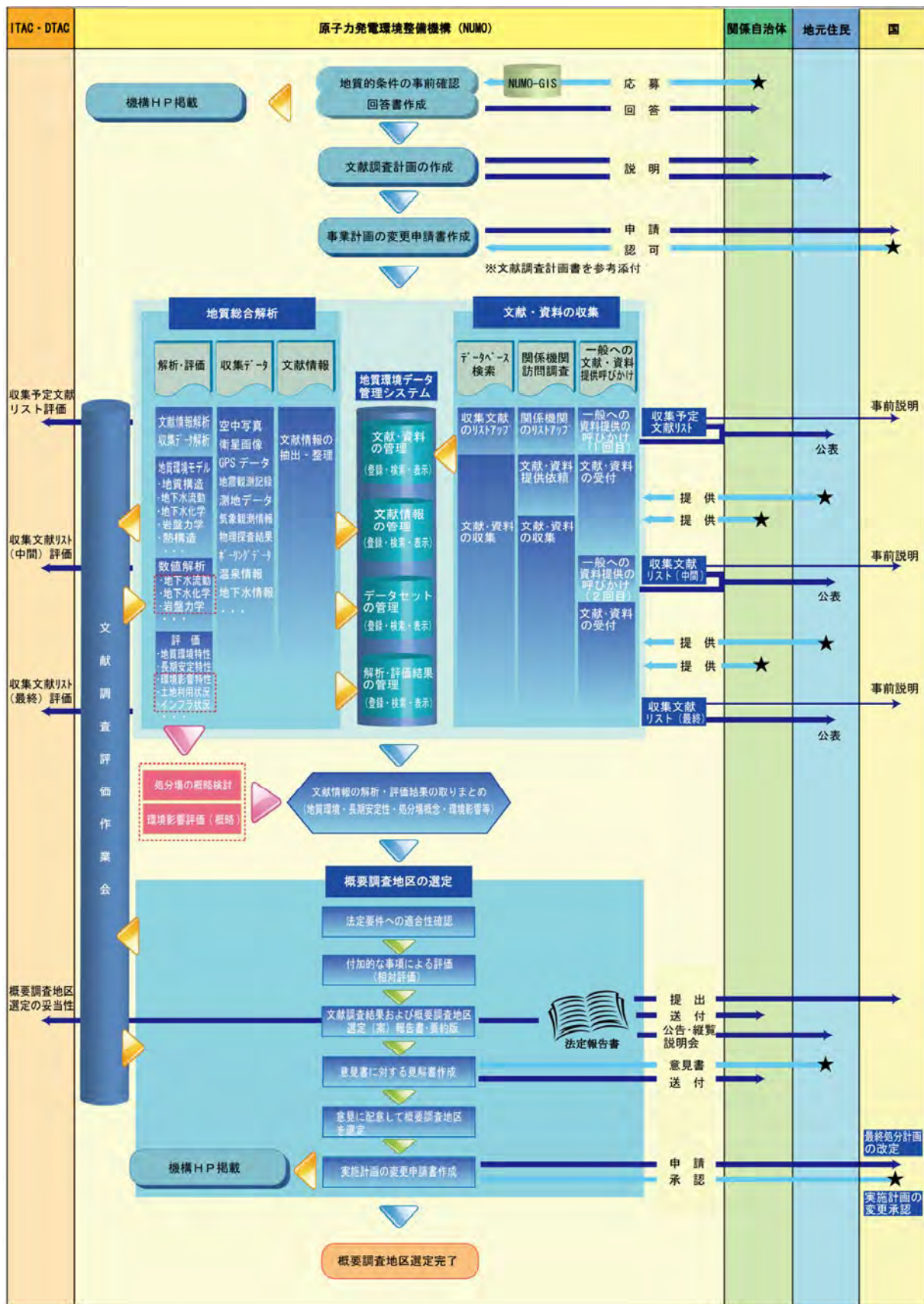


図 5.2.2-1 文献調査にかかわる業務の基本的な流れ (公募の場合の検討例)

5.2.2.3 文献調査の実施

文献調査を実施する範囲は、応募区域およびその周辺の地域を対象とした「概要調査地区選定上の考慮事項」の評価に必要な情報を取得することができるように設定する。具体的には、表 5.2.2-1 に例として示すように、国内外の調査事例を参考に、収集する情報の項目に応じて目安とする調査範囲を設定する。ただし、応募区域の広さ、地質環境の条件、調査途中の情報などに応じて、必要性が認められる場合は、範囲を拡大する。

文献調査の対象文献は、考慮事項に対する応募区域の適格性などの評価に関連する情報を鑑み、収集予定文献リストを作成した上で情報を収集する。収集する情報は、法定要件に関する事項（地震（地震・活断層）、噴火（火山・火成活動、熱・熱水）、隆起・侵食、第四紀の未固結堆積物、鉱物資源）と付加的に評価する事項（主に地質環境特性）とに区分されている。それぞれの区分ごとに、文献情報の項目、文献・資料の収集の目的、収集する情報および文献・資料の例を表 5.2.2-2、表 5.2.2-3 に示す。収集する情報は、考慮事項に対する応募区域の適格性などの評価を目的とするため、応募区域だけでなく、その周辺地域に関する情報も収集することになる。また、実際に文献・資料を入手する場所はさらに拡がり、都道府県庁など広域の関係機関の所在地に及ぶことが考えられる。文献・資料の収集に当たっては、網羅的に収集するため、データベース検索を用いた収集、関係機関への訪問調査による収集、一般の方々からの提供による収集の3種類の方法で実施する。考慮事項に対する応募区域の適格性などの評価に必要な情報は、文献・資料によって、同じ対象（例えば、断層や火山など）であっても見解が異なり、数値の信頼性に差があることが考えられるため、文献情報を見解の相違点、データの取得方法などの観点で情報項目ごとに整理した上で解析する。

収集したすべての情報は、概要調査地区選定の透明性・追跡性を確保するため、NUMO が整備した地質環境データ管理システムにより一元管理する。このシステムは、文献情報管理データベースと解析・評価データベースの二つのデータベースからなる。前者は、収集する文献・資料に関する情報を登録・保管するためのデータベースであり、後者は、文献・資料に記載された情報を用いて実施する各種解析・評価の結果を登録・保管するためのデータベースである。

一方、収集して情報を抽出し上記データベースへの登録が完了した文献・資料の原本は、順次 NUMO の文書管理システムに登録した上で、資料の複写・公開などに対応するため、適切に管理・保管する。

地質総合解析は、収集した情報を解析し、概要調査地区の選定に必要な情報を取りまとめることを目的として、次に挙げるような解析を適宜実施する。

- ・ リモートセンシングデータの判読および解析：空中写真、衛星画像など
- ・ 地形情報の解析：地形データ（水系、接峰面、高度分散量、谷密度、開析度など）
- ・ 測地情報の解析：測地データ（水準点、GPS、干渉合成開口レーダーなど）
- ・ 物理探査データの再解析：地震探査（反射法・屈折法）記録・海上音波探査記録、重力・磁気・放射能の異常分布、微小地震の観測記録など

また、以上の解析結果を用いて、地形、地質・地質構造、火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食、鉱物資源、岩石・岩盤・地下水の物性・性状、気象・水文、自然災害などについて文献情報の整理・分析を行う。そして、考慮事項の評価対象である地形・地質の総合解釈、断層活動、

火山活動，隆起・侵食，鉱物資源などの事項，および文献情報をもとに構築される初期的な地質環境モデルに対して総合的な解析・評価を行う。

文献調査の期間については，標準的な工程として2年程度が想定されている。

表 5.2.2-1 文献調査で収集する情報の項目と調査範囲の目安（検討例）

情報の項目	調査範囲の目安
広域の地質・地質構造	応募区域の中心から半径 30km*の範囲
火山・火成活動	応募区域およびその外側 160km*の範囲
自然環境（動植物，水・土壌など）	応募区域およびその外側 10km の範囲
地下水の流動	後背地地形と大規模な断層などから想定される広域的な地下水の涵養域から流出域（応募区域が含まれる流域全体など）
地震・断層活動	断層活動：応募区域およびその外側 30km*の範囲 地震活動：応募区域およびその外側約 100km の範囲
隆起・侵食	応募区域および（場合により）その外側数 10km の範囲
第四紀未固結堆積物	応募区域内
鉱物資源	
地層の物性・性状	応募区域の地層・地下水が分布すると想定される範囲
地下水の特性	
自然災害	応募区域内
土地の確保	
輸送	輸送港湾候補地，輸送ルート

*：「発電用原子炉施設の耐震安全性に関する安全審査の手引き（原子力安全委員会，2010b）」，「原子力発電所火山影響評価技術指針（日本電気協会，2009）」などを参考に検討した例。実際には，応募区域の広さ，地質環境の条件，調査中の状況などにより，必要に応じて変更する。

表 5.2.2-2 文献調査で収集する情報 (1/2)

【基本情報】

情報の項目	文献・資料の収集の目的	収集する情報	文献・資料の例
広域地質・地質構造	複数の法定要件に関係した共通事項である、応募区域およびその周辺地域の地質環境を理解する	<ul style="list-style-type: none"> ・広域的な地質・地質構造 ・地質構造発達史 ・広域的な水理地質構造 	<ul style="list-style-type: none"> ・地質図 ・ボーリング調査結果 ・物理探査記録 など

【法定要件に関する事項】

情報の項目	文献・資料の収集の目的	収集する情報	文献・資料の例
地震・断層活動	<p>繰り返し活動し、変位の規模が大きい活断層などについて、次の事項に該当すると明確に判断される場所、範囲は含めないように、概要調査地区を選定する</p> <ul style="list-style-type: none"> ・活断層がある場所 ・活断層の幅（断層破砕帯）およびその外側の変形帯に含まれる範囲 ・活断層の分岐などの発生の可能性が高い範囲 ・顕著な活動を継続している活褶曲や活撓曲の分布範囲 	<ul style="list-style-type: none"> ・活断層の存在、性状 ・断層破砕帯の幅、変形の及ぶ範囲 ・震源分布 ・活褶曲、活撓曲の存在および変形の及ぶ範囲 	<ul style="list-style-type: none"> ・活断層調査報告書 ・地形図（数値情報を含む） ・空中写真 ・断層分布図 ・物理探査記録 ・断層露頭スケッチ など
火山・火成活動	<p>第四紀火山の中心から半径15kmの円の外側の地域でも、将来数万年にわたりマグマの地殻への貫入や地表への噴出が明確に判断される地域は含めないように、概要調査地区を選定する</p> <p>将来も含め、マグマによる著しい熱の影響、強酸性の熱水、あるいは著しい熱水対流が存在すると明確に判断される地域は含めないように、概要調査地区を選定する</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・第四紀の火山、火口、岩脈などの存在 ・火山噴出物や貫入岩の分布、年代 ・基盤構造 ・地殻変動データ ・地下の温度構造 ・地下水の化学的特性 	<ul style="list-style-type: none"> ・地形図（数値情報を含む） ・空中写真 ・火山岩の年代測定結果 ・物理探査記録 ・GPS 測量データ ・温泉の分布と水質 など
隆起・侵食	<p>過去10万年間の隆起の総量が300mを超えていることが明らかな地域は含めないように、概要調査地区を選定する</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・段丘の対比・編年 ・段丘の分布 ・地質層序 ・地質構造（分布） ・侵食の規模 ・沖積層の分布 	<ul style="list-style-type: none"> ・地形図（数値情報を含む） ・地形分類図 ・GPS 測量データ ・ダム の堆砂量 など
第四紀未固結堆積物	<p>最終処分を行おうとする地層が、第四紀の未固結堆積物である地域は含めないように、概要調査地区を選定する</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・未固結堆積物の分布、性状 	<ul style="list-style-type: none"> ・地質図 ・ボーリング調査結果 ・物理探査記録 など
鉱物資源	<p>最終処分を行おうとする地層において、その採掘が経済的に価値が高い鉱物資源が存在する地域は含めないように、概要調査地区を選定する</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・鉱物資源の種類、分布、規模、品質 ・権利関係 	<ul style="list-style-type: none"> ・ボーリング調査結果 ・採掘権 など

表 5.2.2-3 文献調査で収集する情報 (2/2)

【付加的に評価する事項】

情報の項目	文献・資料の収集の目的	収集する情報	文献・資料の例
地層の物性・性状	応募区域における地層の物性・性状を把握し、そのほかの事項と共に概要調査地区としての特性を総合的に評価し、必要に応じて相対比較を行う	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の強度、変形・割れ目・風化・変質の状況 ・地温勾配 ・岩体の形状・規模 ・隆起・侵食の速度 ・異常間隙水圧・膨張性地山・ガス突出・山はね・大出水の可能性 	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤力学試験結果 ・地温勾配図 ・ボーリング調査結果 ・物理探査記録 ・段丘面分布図 ・トンネル工事中の災害記録 <p>など</p>
地下水の特性	応募区域における地下水の特性を把握し、そのほかの事項と共に概要調査地区としての特性を総合的に評価し、必要に応じて相対比較を行う	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水の流量・流速 ・水温 ・水質 ・pH ・酸化還元性 	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水位 ・岩盤水理試験結果 ・井戸の水温、水質 <p>など</p>
地質環境の調査・評価	応募区域の地質環境の調査・評価のしやすさなどを評価し、そのほかの事項と共に概要調査地区としての特性を総合的に評価し、必要に応じて相対比較を行う	<ul style="list-style-type: none"> ・地質・地質構造 ・調査に対する土地利用などの制約 	<ul style="list-style-type: none"> ・地質図 ・ボーリング調査結果 ・物理探査記録 ・開発制限 <p>など</p>
建設・操業時における自然災害	建設・操業期間中の安全確保の観点から、応募区域における重大な自然災害が発生する可能性を評価し、そのほかの事項と共に概要調査地区としての特性を総合的に評価し、必要に応じて相対比較を行う	<ul style="list-style-type: none"> ・災害の発生記録 ・災害の予測 	<ul style="list-style-type: none"> ・地震災害記録 ・ハザードマップ <p>など</p>
土地の確保	応募区域を土地の確保の容易さの観点で評価し、そのほかの事項と共に概要調査地区としての特性を総合的に評価し、必要に応じて相対比較を行う	<ul style="list-style-type: none"> ・土地の利用状況・利用計画 ・土地の取得などに関係する法令・条例 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉱業原簿、施業案 ・都市計画書 ・自然環境保全計画書 <p>など</p>
輸送	応募区域を輸送の容易さの観点で評価し、そのほかの事項と共に概要調査地区としての特性を総合的に評価し、必要に応じて相対比較を行う	<ul style="list-style-type: none"> ・既存港湾の規模と設備 ・既存道路の規格 	<ul style="list-style-type: none"> ・港湾台帳 ・道路台帳 <p>など</p>

5.2.2.4 文献調査における評価

文献調査の評価では、まず「概要調査地区選定上の考慮事項」(NUMO, 2009b)に照らして、概要調査地区としての適格性・特性の評価を行う。続いて、概要調査地区として選定された地域に対しては、精密調査地区の選定に必要な情報の不確実性を効果的に低減させるための調査・評価の課題や優先順位を明確にした上で、調査計画の立案に向けた検討を行う。

概要調査地区選定上の考慮事項のうち、法定要件に関する事項について評価し、概要調査地区としての適格性が明らかに劣る地域を除外する。この検討結果に基づいて、NUMOは概要調査地区を選定し、「文献調査に関する法定報告書」を作成する。なお、自然現象の著しい影響の可能性が残り(地形調査で活断層の存在を示唆する地形が新たに見つかるなど)、詳しい調査が必要と判断された場合は、その項目を概要調査の項目として追加設定する。

法定要件に関する事項の適格性を確認した後、付加的に評価する事項に関する情報に基づき、概要調査地区としての特性を総合的に評価する。応募区域が複数存在する場合は、必要に応じて相対比較を行い評価する場合も想定している。収集した文献情報に基づき、当該地域における地質環境の概念の検討・考察(概念モデルの作成)を行い、初期的な地質環境モデルを構築する。自然現象の影響にかかわる調査・評価の情報に基づき、地質環境特性の長期変遷を検討する。この地質環境

モデルと地質環境特性の長期変遷の検討結果を、地下施設・人工バリアの概略検討および概略的な安全性の評価のために受け渡す。なお、文献調査の段階で得られる地質環境特性の情報は限定的なものであり、大きな不確実性を伴うものと考えられる。これらの不確実性については、モデルを活用した感度解析結果に基づき、自然現象が地層処分システムの安全性に与える影響の程度や感度の高いパラメータなど、次段階の調査により取得すべき安全性にかかわる重要なサイトの情報を特定し、次段階の概要調査計画に反映する。

5.2.3 概要調査の進め方

5.2.3.1 概要調査の目標

概要調査の目標は、法定要件に照らして、地表調査、物理探査、ボーリング調査などの地上からの調査により、自然現象の著しい影響を回避できるか、坑道の掘削に支障がないか、地下施設に悪影響を及ぼさないかについて判断し、事業期間中の安全確保および閉鎖後長期の安全確保の見通しを得て精密調査地区を選定することである（4.2.1.2 参照）。この目標を達成するために、現地の情報を直接取得し、文献調査における評価結果を確認するとともに、地質環境の概念モデルや地質環境モデルを更新する。さらに、これらの情報をもとに地下施設や人工バリアの概念設計を行い、予備的な安全評価を行う。このため、工学的対策には、地質環境モデルおよび付随するデータセットを介して、地下施設設置位置の設定（6.3.3.1 参照）、地下施設レイアウトの設定（6.3.3.3 参照）、一般労働安全の確保（6.4.4.2 参照）に関する検討に必要な情報を受け渡す。また、安全評価には、サイトの地質環境の長期変遷、地下水流動解析、地球化学解析、力学解析、核種移行解析、熱・水・応力・化学連成解析などに用いるモデルおよびパラメータセットを受け渡す（図 7.2.2-6、表 7.2.2-1）。以上の検討結果に加え、操業期間中の安全確保、事業の効率性・経済性などの観点を踏まえた総合的な評価を行い、より適切と判断される場所を精密調査地区として選定する。さらに、次段階で安全確保における不確実性を低減するために優先的に取得すべき情報を把握し、精密調査計画の立案に反映させる。

「精密調査地区選定上の考慮事項」については、4.2.1.2 で述べたとおり、今後、精密調査地区選定に対する原子力安全委員会の検討状況などを踏まえつつ、精密調査地区選定段階の開始までに策定し、公表する予定である。ここでは、概要調査の目標設定の参考情報として、4.2.1.2 (2) の内容を再掲する。

精密調査地区選定に際しては、地層処分事業における安全確保を念頭におき、最終処分法に定められている要件（法定要件）への適格性を第一に評価を行う。また、精密調査地区選定はサイト選定の中間段階に当たることから、精密調査地区選定上の考慮事項の策定においては、本段階に関する法定要件はもとより、前段階（概要調査地区選定段階）の考慮事項への適格性などの確認、さらには次段階（処分施設建設地選定段階）の法定要件も踏まえて行う。

本段階に関する法定要件は次のとおりである。

- ・ 当該対象地層等において、地震等の自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないこと
- ・ 当該対象地層等が坑道の掘削に支障のないものであること
- ・ 当該対象地層等内に活断層、破碎帯又は地下水の水流があるときは、これらが坑道その他の地下の施設に悪影響を及ぼすおそれが少ないと見込まれること

- ・ その他経済産業省令で定める事項

精密調査地区選定上の考慮事項のうち、上記の法定要件に関する事項に関しては、地層の著しい変動、坑道掘削への支障、地下水の水流による地下施設への影響の観点から、地層処分事業の成立性を判断するための要件として設定する。「地層の著しい変動」については、地震・断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食などの自然現象の著しい影響、「坑道掘削への支障」および「地下水の水流による地下施設への影響」については、地質環境特性にかかわる事項として検討を行う。以下に現在議論を進めているそれらの検討内容の例を挙げる。

自然現象の著しい影響にかかわる事項では、例えば、地震・断層活動に関しては、断層沿いのずれ破壊が地下施設および廃棄体へ直接的に破損を与える可能性があることから、これを最終処分法に定める「地層の著しい変動」として精密調査地区としての法定要件への適格性を評価することとし、活断層や活褶曲・活撓曲が存在していたり、将来的に断層の分岐などの可能性が高いと明確に判断される場所および範囲は含めないように精密調査地区を選定する。

火山・火成活動に関しては、マグマの貫入・噴出に伴う力学的・熱的な破壊が地下施設および廃棄体へ直接的に破損を与える可能性があることから、最終処分法に定める「地層の著しい変動」として精密調査地区としての法定要件への適格性を評価することとし、第四紀にマグマが地表付近へ貫入または地表へ噴出したことが明らかな範囲や、マグマによる著しい熱・熱水活動の著しい影響が及ぶ範囲、あるいはマグマの地表付近への上昇や地表への噴出の可能性の高い範囲は含めないように精密調査地区を選定する。

隆起・侵食に関しては、地下施設の地表への露出や地下環境の酸化雰囲気への変化が地層処分システムの「隔離」あるいは「閉じ込め」機能の喪失につながることから、最終処分法に定める「地層の著しい変動」として精密調査地区としての法定要件への適格性を評価する。従って、地下深部への地下施設の設置を考慮しても、隆起・侵食により地下施設および廃棄体が露出したり、地下施設周辺の環境が酸化的な雰囲気へ変化することが明らかな場所および範囲は含めないように精密調査地区を選定する。

地質環境特性にかかわる事項である「坑道掘削への支障」に関しては、事業期間中の安全確保の観点から成立性を判断する事項について評価する。例えば、地層処分を行おうとする地層において未固結堆積物が分布していたり、地山の強度が著しく小さい、あるいは膨張性地山などにより難工事が予想されるなどの理由により、必要な廃棄体本数を定置するための処分坑道を安全かつ合理的（現実的な対策の範囲内）に掘削することが困難であると判断される場所および範囲は含めないように精密調査地区を選定する。

また、大規模な破碎帯などの高透水性の構造が存在する場合は、地下水がその構造を介して浅層あるいは地下深部から地層処分を行おうとする地層に到達し、地下水の流動特性や化学特性、岩盤の熱特性が変化することにより、地下施設のもつバリア性能に著しい影響を及ぼす恐れがある。そのため、最終処分法に定める「地下水の水流による地下施設への影響」に相当すると判断し、法定要件として適格性を評価する。

一方、概要調査に続いて実施する精密調査には、新たな大規模坑道掘削工事の実施に伴い多大な費用と期間を要するため、精密調査地区選定においては、実施主体として安全確保はもとより事業推進の面からも地層処分事業としての成立性の見通しを可能な限り得ておく必要がある。従って、法定要件に対する適格性の確認とともに、精密調査地区としての特性に関して、閉鎖後長期の安全

確保や建設可能性および事業期間中の安全確保、環境影響の低減、土地の確保、経済性および工程確保などの観点から、法定要件以外に関する事項（地質環境特性、自然環境特性、社会環境特性などに関する事項）についても総合的に評価を行い、地層処分の成立性の判断および相対比較を行う。

5.2.3.2 概要調査の準備

概要調査を的確かつ効率的に実施するためには、着手前の計画立案と調査実施中の管理が重要である。このため、NUMOは、概要調査計画立案マニュアル（NUMO，2011）および概要調査施工管理マニュアルを作成した。概要調査の実施に当たっては、概要調査計画立案マニュアルに従い、目的、範囲、方法、成果物、工程、実施体制などを明示した調査計画を立案する。

概要調査計画立案マニュアルは、海外および国内の先行事例における経験や教訓を踏まえて、概要調査計画の立案に際して考慮すべき検討方針、手順、留意点などの基本的な考え方を取りまとめたものである。図 5.2.3-1 に計画立案手順を示す。調査計画の立案はステップ1～ステップ7の七つのステップからなる。

手順の前半（ステップ1～3）では、概要調査の目標を設定するための準備段階である。ステップ1では、実施体制の整備、データベースの準備、文献情報の整理を行う。ステップ2では、文献調査で取得した情報に基づき地質環境の概念モデルや地質環境モデルを構築し、計画立案時における地質環境の理解の程度や不確実性を把握する。ステップ3では、地質環境モデルの情報に基づき行われる設計・性能評価に関する検討の結果から、概要調査への要求事項を把握する。

手順の後半（ステップ4～7）では、調査目標を達成するために具体的な計画立案にかかわる検討を行う。ステップ4では、地質環境の理解、考慮事項への適格性の確認および設計・性能評価からの要求などを踏まえ、文献調査終了時点の課題を整理し、調査目標を設定する。ステップ5では、当該サイトの地質環境条件や制約条件を考慮しながら、調査目標を達成する上で有効と考えられる調査手法を抽出・選定する。この際には、併せて、気象・海象、実施に必要な関連法令、環境影響、インフラストラクチャなど、調査の実施に対する制約条件や調査に必要な予算や工期についても検討する。また、調査目標の達成およびステップ2で構築した地質環境モデルの更新も考慮して、当該サイトおよびその周辺においてデータを取得する調査の範囲を検討する。さらに、取得するデータの量や精度の観点から、調査の密度や調査手法の組み合わせについても整理する。ステップ6では、調査目標の達成に向けて設定した複数の調査・評価を、適切な手順で組み合わせ整理・統合することにより、概要調査計画を立案する。まず、調査データの取得に伴い期待できる地質環境の理解の進展（不確実性の取り扱い）を考慮し、概要調査の枠組み（調査フェーズの数）を設定する。次に、調査で得られたデータを解釈する手法や、それらを地質環境モデルに反映する解析手法などについても検討する。さらに、ステップ5において抽出した調査と評価とのつながりについて、データの流れに着目して具体化し、調査目標の達成に向けた調査・評価の効率的な組み合わせとその手順を設定する。その際、社会的な制約条件や、複数の分野で活用できる調査データの効率的な取得を考慮した調査仕様などを設定する。続いて、調査フェーズ、調査・評価の組み合わせと手順に基づき、各項目の時間展開を策定し、概要調査計画の全体工程案を決定する。また、それぞれの調査・評価を完了させるために必要な期間、資源（人員、機材、予算）を算定する。ステップ7では、立案した概要調査計画案が妥当かどうかについて検討する。具体的には、①ステップ4において設定した調査目標の全てに対応した計画となっているか（設定した調査目標の重要度・優先度が反映されているか）、②概要調査を実施する上での制約条件や期間および資源（人員・機材・予

算)の効率性を考慮して、立案した計画が実現可能であるかが妥当性評価のポイントである。もし妥当ではないとの判断に至った場合は、ステップ4にもどり、設定した調査目標を再検討し、それ以降の検討ステップを慎重に進める。

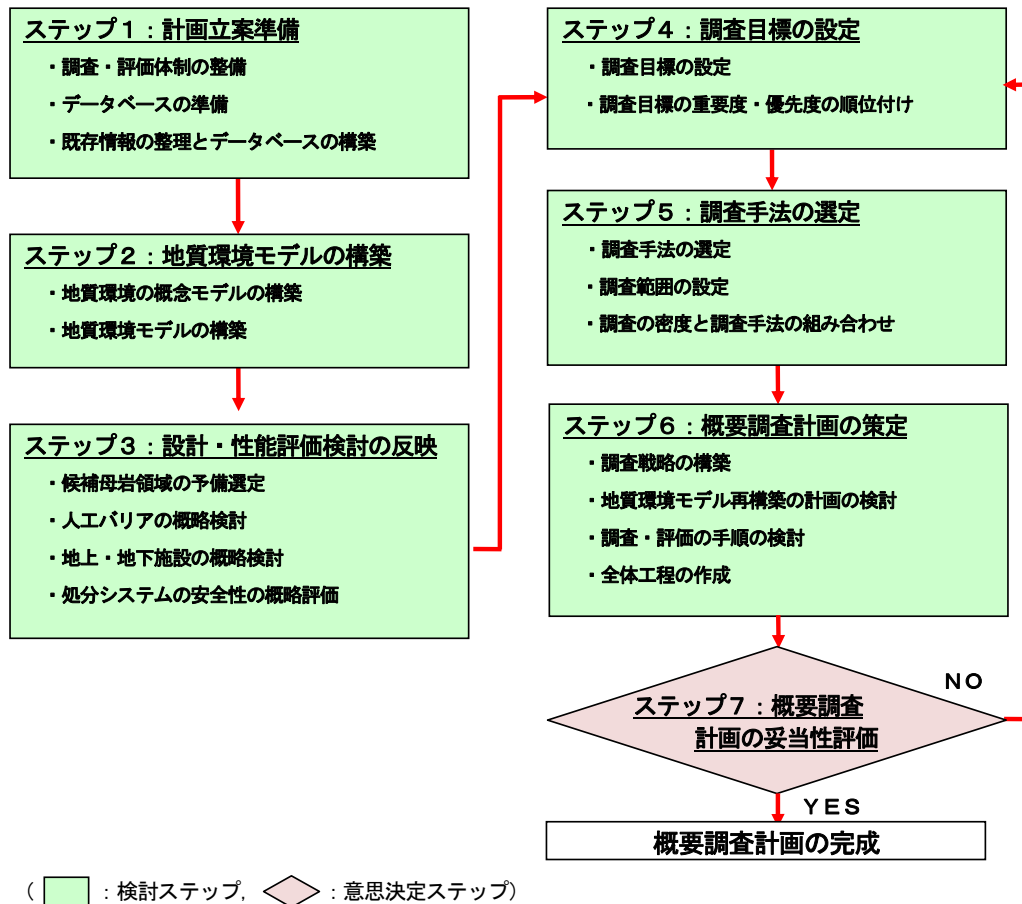


図 5.2.3-1 概要調査計画立案の流れ（検討例）
（出典：NUMO，2011）

概要調査計画は、七つのステップにより立案する。ステップ1～3では調査目標の設定に向けた検討、ステップ4～7では調査目標を設定しそれを達成するための具体的な検討を行う。

概要調査施工管理マニュアルは、当該サイトの地質環境を考慮し立案された概要調査計画を円滑に実施するため、個々の調査仕様の決定、実施計画の確定、調査の工程・品質・安全などの管理、想定外の事象発生時の対策など、概要調査実施時に必要となる現場管理の方法や手順、管理上の留意点など示したものである。施工管理のフローを図 5.2.3-2 に示す。ここでは、ステップ1～9に示す広範な活動に対して、マネジメントの手引きや確認事項をすべての調査手法で共通に取り扱う事項と調査手法ごとに取り扱う事項として整理している。

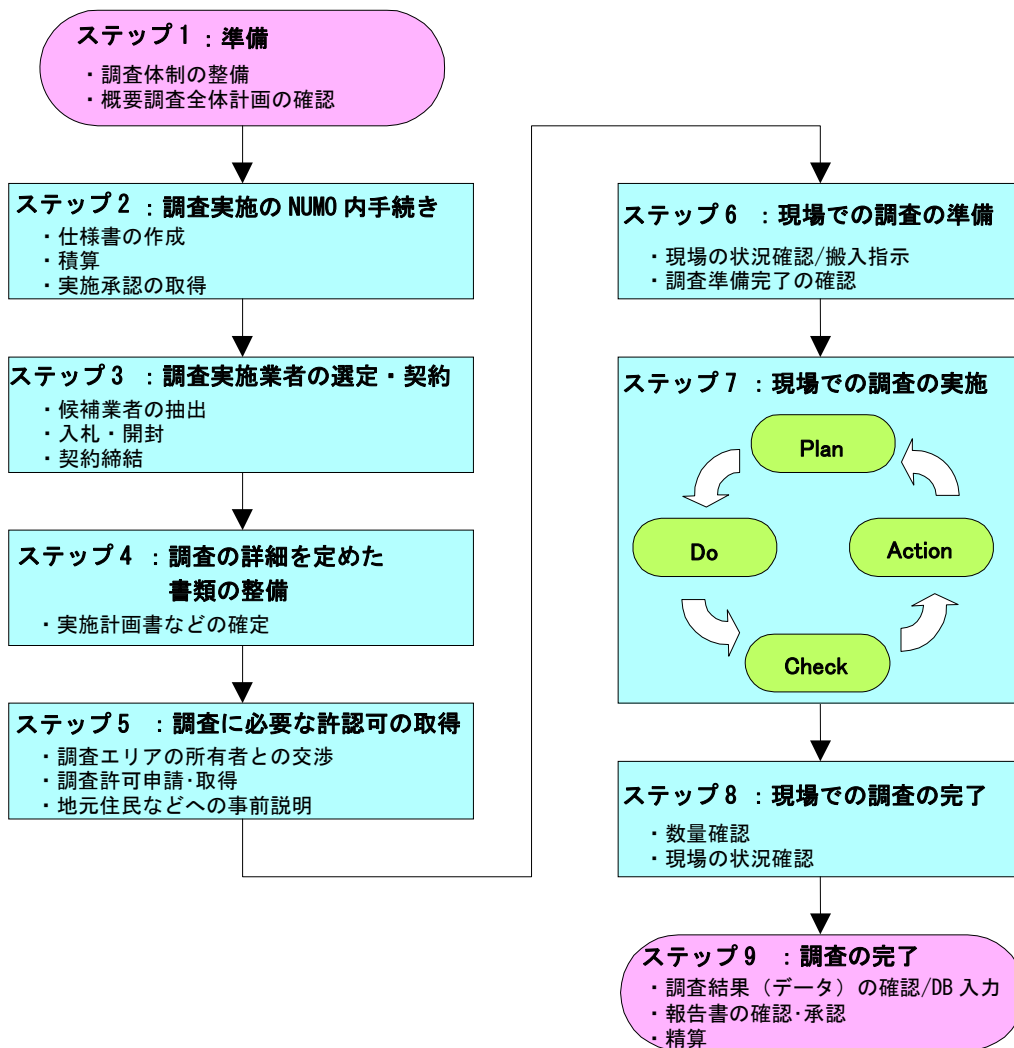


図 5.2.3-2 概要調査の施工管理の流れ

概要調査施工管理マニュアルはステップ1～9の活動に対するマネジメントの手引きや確認事項を提示する。

これらのマニュアルに沿って、概要調査の実施体制について検討した例を図 5.2.3-3 に示す。ここでは、概要調査における調査・評価は、サイト調査・評価、処分施設の設計・施工、安全評価の三つの分野の連携が不可欠であることから、各部署から派遣されるメンバーにより地質環境評価を実施するチームを編成し、処分場概念の検討、地質環境モデルの構築、現地調査を実施するチームと連携しながら業務を進めることとしている。

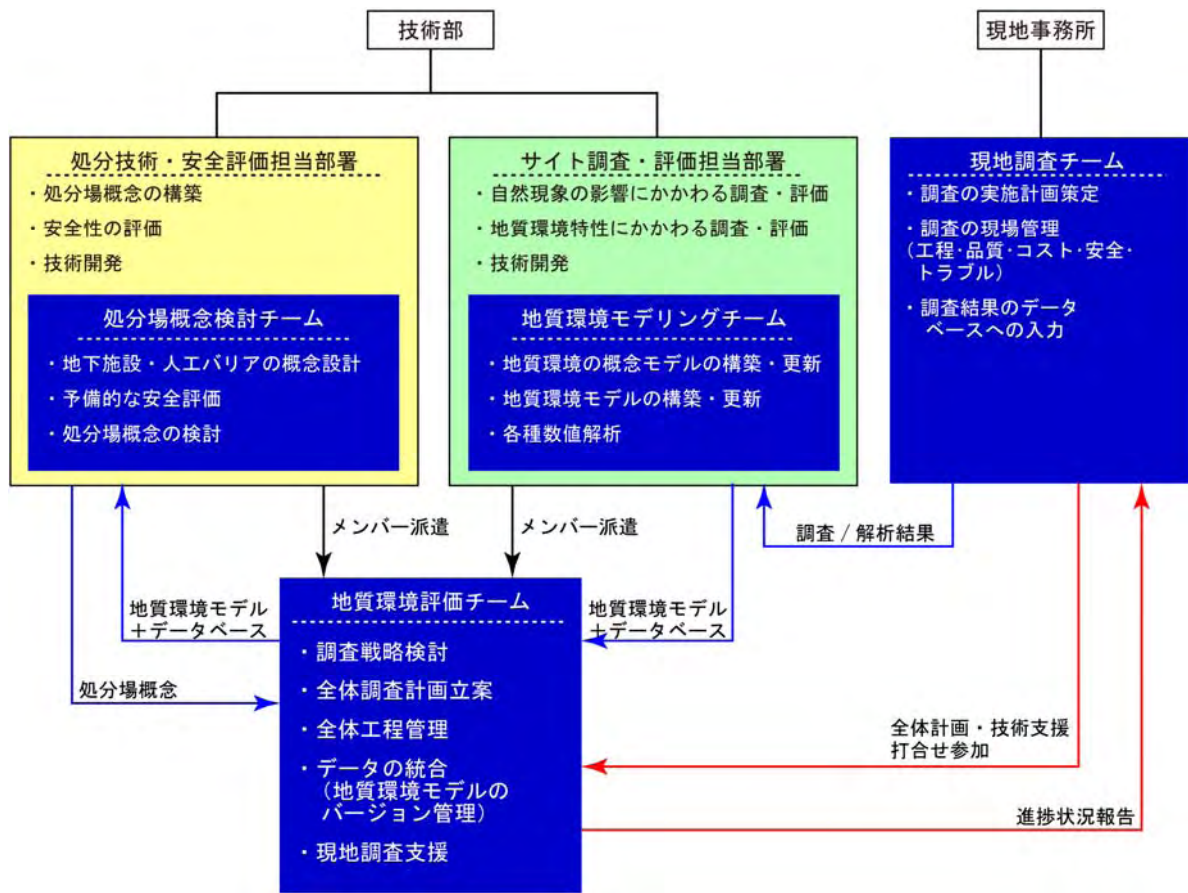


図 5.2.3-3 概要調査の実施体制にかかわる検討例

(出典：NUMO，2011)

各部署から派遣されるメンバーにより地質環境評価を実施するチームを編成し、処分場概念の検討、地質環境モデルの構築、現地調査を実施するチームと連携しながら業務を進める。なお、この実施体制は検討例であり、実際の概要調査においては、対象地点やNUMO内の状況に応じて適切な体制を組織する。

概要調査を実施する範囲は、「概要調査地区」と「補足的に調査を行う範囲」からなる。概要調査地区は、応募区域およびその周辺の地域のうち、「概要調査地区選定上の考慮事項」に適合する範囲の中から設定する。この際、事業期間中および閉鎖後長期の安全確保に関する評価に必要な地質環境特性に関する情報を取得できるよう、以下のことを念頭におく。

- ・ 広域地下水流動系を把握するための水理境界（地下水流動に影響を及ぼす尾根、河川、断層など）が含まれること
- ・ 将来の隆起・侵食および海水準変動を考慮に入れた大局的な地下水流動の上流側（涵養域）から下流側（流出域）が含まれること
- ・ 少なくとも処分施設の想定設置深度までの情報を取得するための調査が実施可能であること

また、概要調査の段階では、概要調査地区における火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食などに関する自然現象の影響や、それらによる地質環境特性に対する影響をより詳細に評価するため、概要調査地区の周辺で補足的に調査を行うことが必要になる場合がある。この場合、概要調

査地区の周辺に、次に示す観点を踏まえて補足的に調査を行う範囲を設定する。

- ・ 概要調査地区の評価に当たり、広域の地質・地質構造の分布や発達過程などを把握するため、概要調査地区およびその周辺の広い範囲における調査が必要となる場合がある。
- ・ 活断層や第四紀火山などが応募区域およびその周辺に存在する場合、これらを含めないように概要調査地区を設定するが、それらの影響が及ばないことを念のため確認するために調査が必要となる場合がある。
- ・ 隆起・侵食については、広域的な自然現象であるため、概要調査地区内においてそれらの評価が可能な海成段丘や河成段丘などが分布しない場合、概要調査地区の外に分布する海成段丘や河成段丘などの調査が必要となる場合がある。

以上のことから、概要調査地区では、地質環境特性にかかわる調査・評価が主体となり、補足的に調査を行う範囲では、地震・断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食といった自然現象の影響にかかわる調査・評価や広域の地質構造発達過程にかかわる調査が主体となる。このような考え方に基づき設定する概要調査地区および補足的に調査する範囲のイメージを図 5.2.3-4 に示す。

なお、各調査項目における具体的な調査範囲・位置の設定の考え方については、5.3 に述べる。

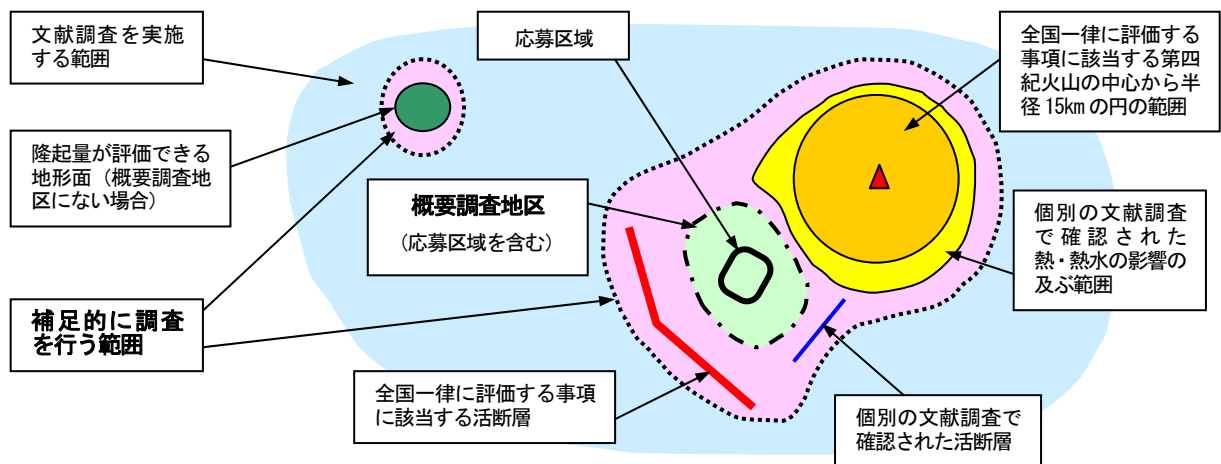


図 5.2.3-4 概要調査地区および補足的に調査する範囲の設定イメージ
(NUMO, 2009b を一部修正)

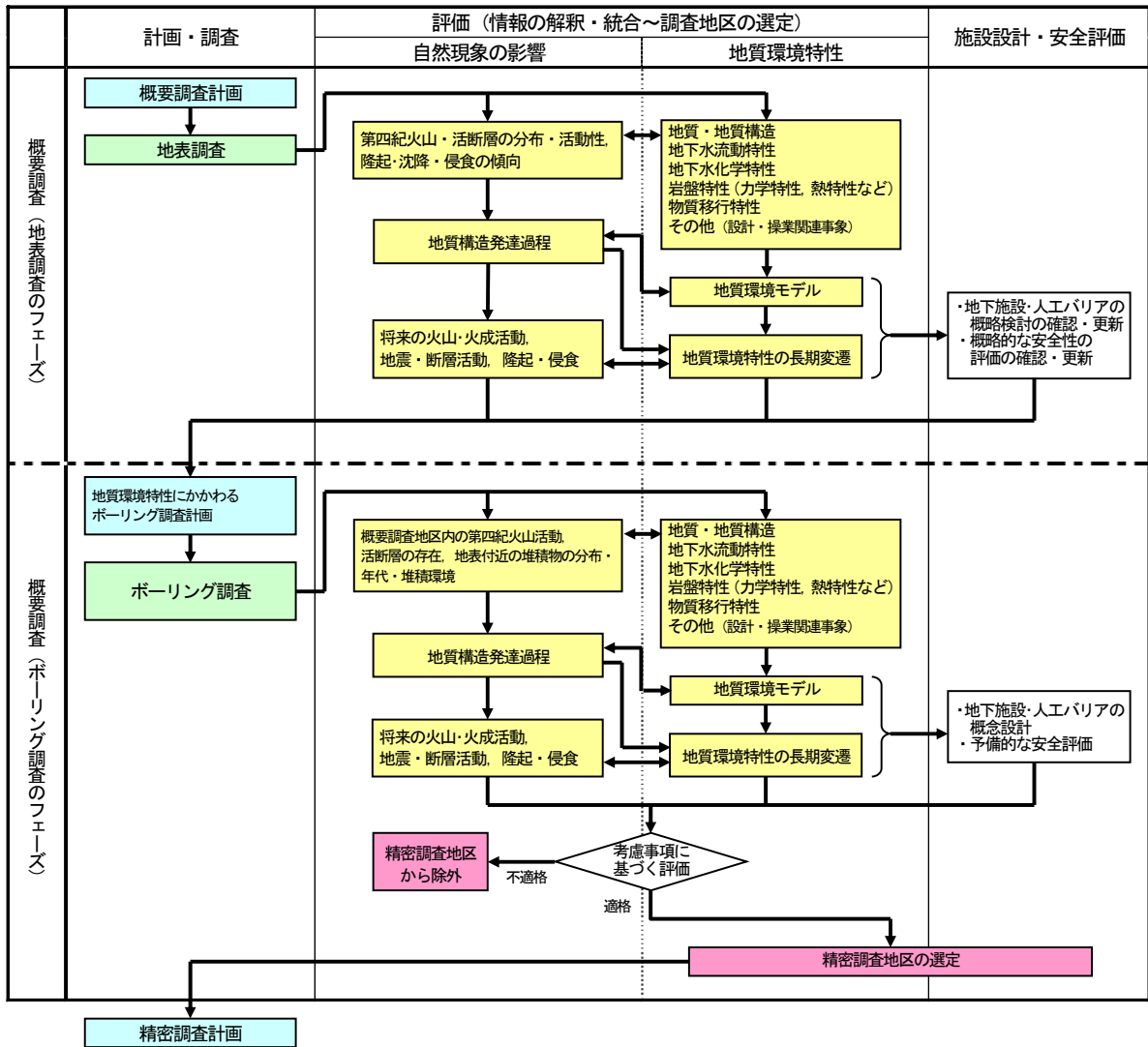
- ・ 法定要件に該当する活断層や火成活動などの分布範囲および著しい影響範囲は、概要調査地区に含まない。
- ・ 活断層や火成活動などに該当する範囲との位置関係、応募区域の大きさなどによっては、概要調査地区は応募区域より広がるが、広がった部分は概要調査などを行うにとどめ、処分施設建設地とすることはない。
- ・ 概要調査地区の特性をより詳細に評価するため、概要調査地区の周辺でも補足的に調査を行うことがある。

5.2.3.3 概要調査の実施

概要調査は、概要調査地区およびその周辺の地質環境を評価する上で必要な情報を確実かつ効率的に取得できるように、概要調査を複数のフェーズに区分し、段階的に実施することを基本とする（図 5.2.3-5）。段階的に調査を行うことにより、フェーズごとに調査結果を取りまとめ評価し、次のフェーズの調査計画をより適切なものに見直すことができる（NUMO, 2011）。

調査・評価のフェーズ設定は、一般土木構造物の建設にかかわる地質調査（全国地質調査業協会連合会, 2009）、わが国の深地層の研究施設計画（三枝ほか, 2007；太田ほか, 2007）、諸外国の地層処分事業（SKB, 2000）などを勘案すると、概要調査を前半と後半の二つのフェーズに区分することが適切と考えられる。このうち、前半の地表調査のフェーズでは、文献調査の評価結果を現地で確認し、その信頼性を向上させること、概要調査地区の地質環境特性の概要を把握すること、次フェーズの計画立案に資することを目的として、主に地表踏査、物理探査（空中、地上、海上）を実施する。これらは、ボーリング調査に比べて、対象となる地質環境の場を乱すことなく、広い範囲の面的な情報を取得することができることから、可能な限り有効に活用する。後半のボーリング調査のフェーズでは、地表調査のフェーズで取得できない地下深部の実測データを取得し、前フェーズで認識された不確実性を低減することを主目的として、大深度のボーリング調査を実施する（図 5.2.3-6）。ボーリング調査では、地質分布の確認、ボーリング孔内での各種検層を行い、必要に応じて単孔式物理探査（地表-ボーリング孔間の探査を含む）も併せて実施する。なお、各フェーズにおける調査項目やその実施順序については、調査地域の地質環境特性に応じて柔軟に設定する（例えば、地表調査のフェーズにおいて物理探査結果の解釈に利用するため、ボーリング調査の一部を実施するなど）。また、サイト選定の段階やフェーズにかかわらず、地質環境とその形成過程を理解するためには、対象とする事象のメカニズムやプロセスに関する情報を得ることが重要である。そのために、自然現象および地質環境特性に関する情報については、時間・履歴に関する情報も取得する。

概要調査の期間については、内部的な検討に基づき、標準的な工程として4年程度が想定されている。しかしながら、当該調査地区の地質環境特性、文献による情報の量・精度、当該調査地区の広さ、地理条件などに応じて長くも短くもなり得る。特に、5.2.3.1 に述べた精密調査地区選定段階における安全確保に関する目標や、閉鎖後長期の安全評価にとって重要となる事項については、十分に調査・評価を行うこととする。



□ : 計画, □ : 調査, □ : 検討・評価項目, □ : 意思決定, □ : 他の計画, 調査, 検討・評価項目

図 5.2.3-5 概要調査の基本的な流れ (検討例)

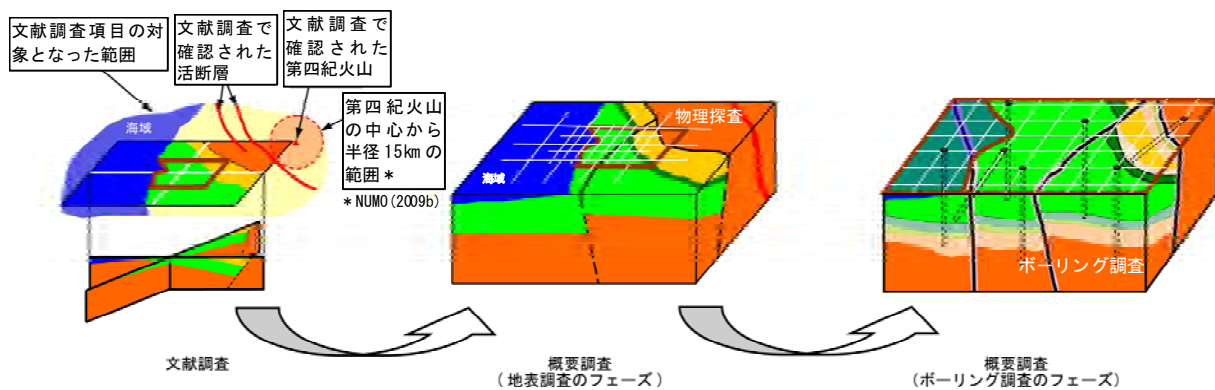


図 5.2.3-6 概要調査における段階的なアプローチの成果イメージ (2 フェーズの例)

概要調査を合理的に進めるために段階的なアプローチを採用し、二つのフェーズ（地表調査のフェーズ、ボーリング調査のフェーズ）に区分した例を示す。

5.2.3.4 概要調査における評価

概要調査では、今後公表する「精密調査地区選定上の考慮事項」に照らして、精密調査地区としての適格性を評価する。基本的な考え方として、自然現象の著しい影響を回避できるか否かを判断し、事業期間中の安全確保および閉鎖後長期の安全確保の見通しを得て、精密調査地区を選定する(4.2.1.2 参照)。

自然現象については、文献には記載されていない第四紀の火山・火成活動や活断層の分布・影響、あるいは、概要調査地区周辺の第四紀火山や活断層による影響の有無について評価する。また、隆起・侵食については、基本的に文献・資料などによる隆起量を確認・修正し、将来において地層処分システムの安全性に著しい影響が及ぶ可能性について評価する。以上の評価結果にかかわる判断については、将来の第四紀火山や活断層、および隆起・侵食による地層処分システムへの著しい影響が否定できない、あるいは評価における不確実性が大きく地層処分システムへの影響を判断できない場合には、そのような場所を精密調査地区から除外する。

地質環境特性については、処分場の設計および安全評価に必要な基本的情報である、岩盤の割れ目分布、化学組成、透水性、物理・力学特性、熱特性、地下水の水圧分布・水質などに関するデータ(表 6.3.3-1, 表 7.2.2-1)を取得し、調査フェーズごとに文献調査で構築した地質環境の概念を見直し、地質環境モデルを段階的に更新する。概要調査では、工学的対策や安全評価に影響を及ぼすと考えられる岩盤の割れ目分布や透水性などに関する情報が拡充され、地質環境モデルに記述される項目や内容はより詳細になると考えられる。しかしながら、概要調査(特にボーリング調査)により得られる情報の量や精度には空間的な差があり、それらを補間する技術を用いても、空間的な不確実性を完全に排除することはできない。この前提に立ち、当該地区などに地層処分システムの安全性に著しく悪い影響を及ぼし得る地質環境特性(例えば、広く分布する未固結堆積物、地下水の大きな水流、広く分布する酸化的な環境など)が把握された場合は、その場所は精密調査の対象から除外する。

更新された地質環境モデルをもとに地下施設や人工バリアの概念設計を行い、これらに対して予備的な安全評価を行う。上述のように、地質環境モデルの不確実性を完全に排除することはできないため、複数の地質環境モデルを考慮した概念設計や安全性の評価を行う可能性もあり得る。これ

らの結果に加え、閉鎖後長期の安全確保や建設可能性および事業期間中の安全確保、環境影響の低減、土地の確保、経済性および工程確保などの観点を踏まえて総合的に評価を行い、より適切と判断される場所を精密調査地区として選定する。概要調査地区が複数の場合にも、総合的な評価の結果を踏まえて相対的比較を行い、より適切と判断される地区を選定する。

最後に、精密調査計画を立案するための情報を整理する。その際、精密調査により最終的な処分施設建設地が選定されることから、以下の点に留意する。

- ・ 精密調査で行われる地質環境モデルの更新に反映させるため、概要調査の段階における地下施設・人工バリアの概念設計ならびに予備的な安全評価によって抽出された、閉鎖後長期の安全性の観点から重要な地質環境特性を効果的に取得できること
- ・ 自然現象の著しい影響を回避できているか否かを判断するために追加的・補足的な対策ができること
- ・ セーフティケースを構築するためのデータを取得できること

5.2.4 調査・評価における品質マネジメント

5.2.4.1 品質マネジメントシステムの考え方

3.2.3.3 に述べたとおり、NUMO では、JEAC4111 に従った品質保証を目指す。そのために、ISO9001:2000 の考え方に基づき、概要調査地区選定段階における技術文書などを中心とする技術業務を対象に品質マネジメントシステムを構築し運用している。この基本的な仕組みは、ISO9001 と同様で、プロセスの管理とレビューが中心である。サイト選定段階では、各段階の法定報告書などの文書を成果品として、成果品に至るまでの重要な一連の業務（プロセス）を明確にし（文書化）、これを管理するとともに、文書化されたとおり実施していることを確認し、プロセスの透明性・追跡性を確保する。

文献調査では、重要度の高い「文献調査に関する法定報告書」や文献調査の対象となる文献に関する「収集予定文献リスト」、「収集文献リスト」などの技術文書を作成する。文献調査における品質保証は、これらの技術文書が、科学的・技術的な妥当性を確保できているか、「概要調査地区選定上の考慮事項」に基づき概要調査地区としての適格性を評価する際の客観性・公平性が確保できているかということに重点をおく。文献調査では、国内外の地質学、地球物理学、土木工学、原子力工学などの専門家や、地層処分の事業者および関係機関に所属する専門家（DTAC および ITAC の委員など）によるレビューチームを組織し、調査・評価のプロセスや結果について、科学的・技術的な妥当性を確認しつつ進めていく。このような品質保証の活動を支援するツールとして、これまでに文献調査システムフローや地質環境データ管理システムを構築した。これは、文献による情報の収集・整理から始まり、個別の情報の分析・評価、地質環境モデルの構築、考慮事項に基づく評価に至る一連の作業と情報の流れを系統的に表示し、記録保存するシステムである（5.2.4.2 参照）。

概要調査では、文献調査と同様に重要度の高い「概要調査に関する法定報告書」や関連する技術文書などが成果品となる。文献調査との大きな違いは、概要調査では、地表踏査、物理探査、ボーリング調査などを現地で実施し、自然現象の影響や地質環境特性にかかわる情報（実測データ）を取得することである。実測データに基づく成果品は、地層処分システムの安全性に関するセーフティケースの構築において、重要な情報になる。従って、NUMO では、概要調査の実施に向けて、一連の作業と情報の流れを系統的に表示するシステムフローや取得データを適切に管理するシステムなどの体系的な整備を進めている。さらに、今後の技術の進展や新たな知見に応じて、調査・評価のプロセスや結果に対する判断が適切になされていることを客観的に示すことも重要である。そのために、技術業務を遂行する実施部門としては独立性を有する部門において、定められたとおりに確実に業務が遂行されていることを確認する品質マネジメントの体制を整えていく予定である。

5.2.4.2 品質マネジメントシステムの整備

NUMO 地理情報システム、地質環境データ管理システム、および文献調査システムフローの関連性について図 5.2.4-1 に示す。地質環境データ管理システムは、文献調査と、それに続く概要調査および精密調査において取得する各種地質環境の情報の解析・評価作業を円滑に進めるためのシステムである。そして、NUMO 地理情報システムに格納される地質環境の情報や文献調査システムフローと連携することにより、文献調査を網羅的・効率的に進めることができるよう、システムを改良・拡充している。

文献調査では、短期間に膨大な量の文献・資料やそれに記載された図面・数値・記述文書などの地質環境の情報、さらには、空中写真や衛星画像、地震観測データ、気象観測データ、既往の物理

探査やボーリング調査の結果など、さまざまな形式の地質環境情報を取り扱う。また、文献・資料の収集ならびに文献情報の整理を行うとともに、各種解析作業および評価作業を同時並行で進める。

これらのことから、地質環境データ管理システムでは、収集した文献・資料およびそれらに記載されている地質環境の情報と、文献情報から解析に用いるデータセット、さらには解析・評価結果に至るまでの意思決定レベルの異なる地質環境の情報を体系的に保管・管理するとともに、各分野の技術者が必要時に必要な情報を適切かつ網羅的に検索・抽出することが可能なシステムを目指して整備を進めている。本システムを活用することにより、合理的・効率的な文献調査の実施、選定過程の記録・管理、選定作業の品質保証を確保できるものと考えている。

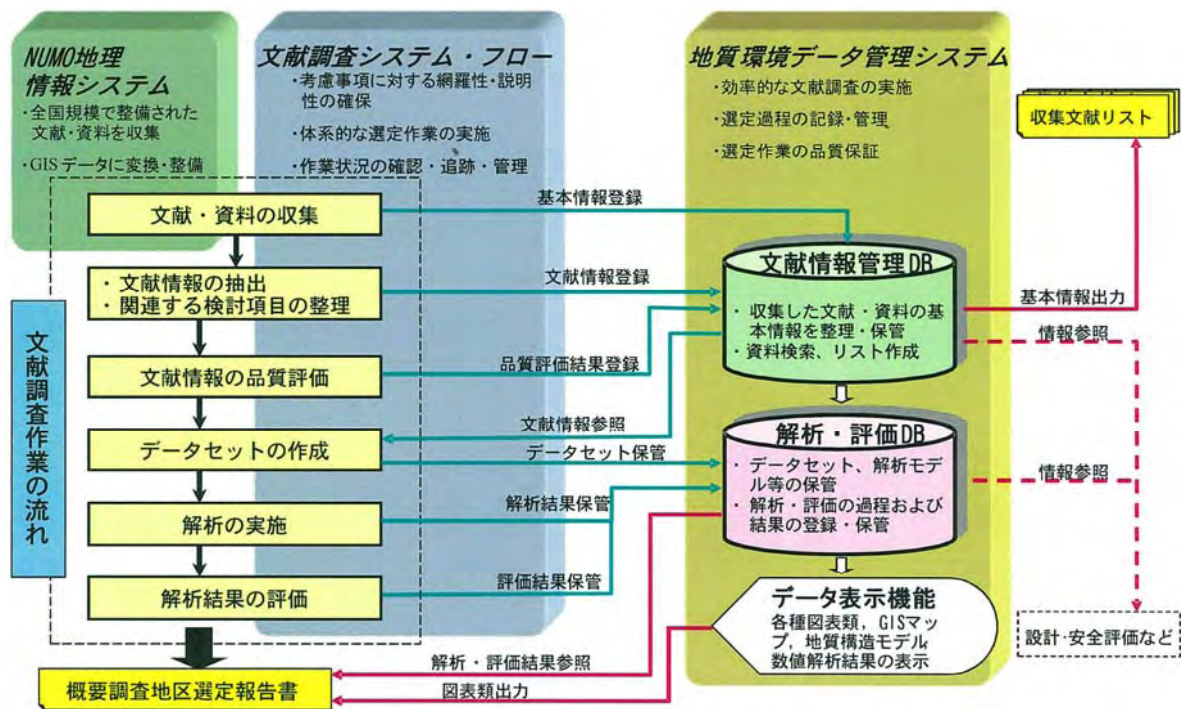


図 5.2.4-1 文献調査のための地質環境データ管理システムと支援ツールの概要

地質環境データ管理システムは、各種地質環境情報の解析・評価作業を円滑に進めるためのシステムであり、地質環境情報を体系的に保管・管理するとともに、各分野の技術者が必要時に必要な情報を適切かつ網羅的に検索・抽出することが可能なシステムを目指している。

文献調査システムフローは、文献調査を網羅的に進めることができるよう、概要調査地区を選定する際において必要となる各考慮事項について、文献情報から解析・評価結果に至るまでの一連のプロセスを体系的に実施するための方策として整備した（図 5.2.4-2）。

文献調査結果の品質保証の観点からは、文献情報から解析・評価結果に至るまでの作業プロセスおよび意思決定プロセスの追跡性を確保し、それらの妥当性を示すことが重要である。そのため、地質環境データ管理システムに保管される調査データや解析・評価結果などの情報について、文献情報の収集・整理から解析・評価に至るさまざまな作業や意思決定のプロセスを追跡的に管理することができるように、文献調査システムフローの改良および地質環境データ管理システムとの連携機能の整備を進めている。

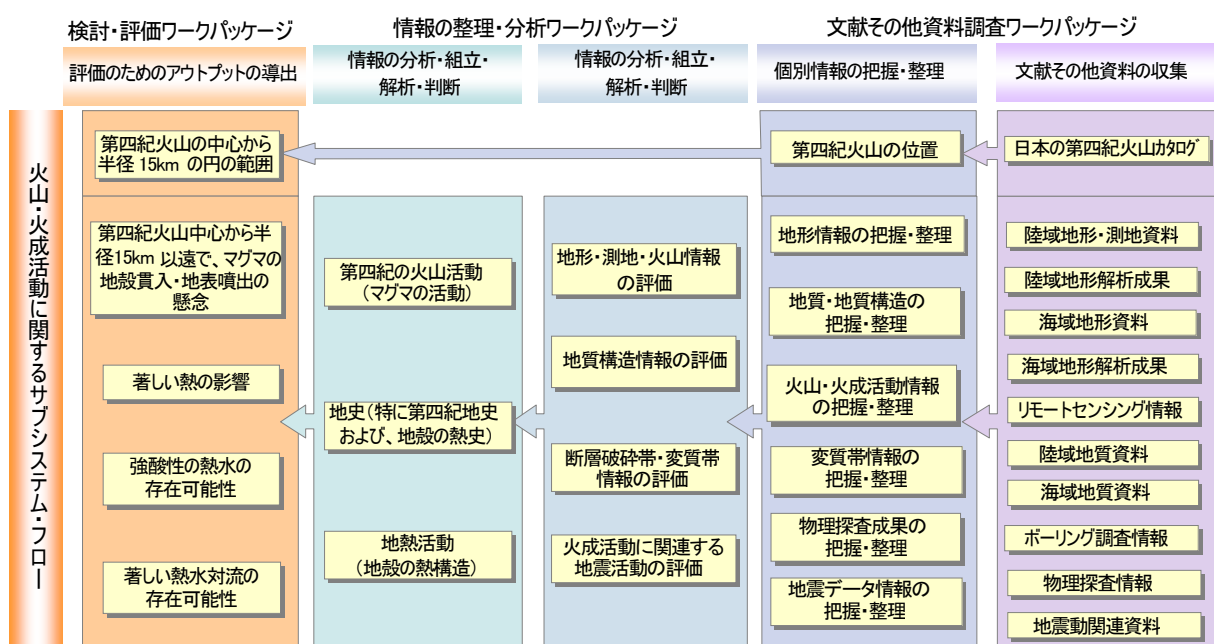


図 5.2.4-2 文献調査システムフロー（火山・火成活動の評価）

文献調査システムフローは、文献調査を網羅的に進めるために、概要調査地区を選定する上で必要となる各考慮事項（ここでは火山・火成活動）について、文献情報から解析・評価結果に至るまでの一連のプロセスを体系的に実施するための方策として整備している。

5.3 文献調査および概要調査の体系

本節では、文献調査および概要調査のそれぞれにおいて、自然現象の影響と地質環境特性の調査・評価をどのように進めるか具体的に述べる。なお、本節で取りあげている技術のうち、第2次取りまとめ（JNC, 1999b）以降特に進展したものについては、5.4において改めて述べる。

5.3.1 自然現象の影響にかかわる調査・評価

ここでは、火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食について、調査・評価の基本的な考え方、そして文献調査と概要調査における調査・評価の流れについて述べる。

5.3.1.1 火山・火成活動

5.1.1.1 に述べたように、火山・火成活動による地層処分システムおよび地上施設への影響としては、マグマの貫入や噴出による処分施設の直接的な破壊、熱・熱水による地質環境の変化（例えば、地温の上昇、熱水対流系の形成、地下水質の変化など）、大規模なマグマの噴出や火砕流などによる地形変化に伴う地下水流動状況の変化、降灰・火山泥流・火砕流などによる地上施設の破壊または安全機能の喪失が挙げられる（表 5.1.1-1）。これらの影響のうち、マグマの貫入や噴出による処分施設の直接的な破壊、熱・熱水による地質環境への影響を、「地層の著しい変動」に該当する事象として取り扱い、サイト選定において回避する。一方、火山活動による地質環境の変化については、活動の発生時期、規模、サイトへの影響の程度などを考慮して、適切な工学的対策や地層処分システムの長期安全性の評価により対処する。ここでは、処分施設に直接的な破壊を生じるマグマの貫入・噴出および、熱・熱水活動の影響のそれぞれについて述べる。

(1) マグマの貫入・噴出にかかわる調査・評価

(i) 調査・評価の基本的な考え方

応募区域は、第四紀火山の中心から半径 15km の円の外側に位置することから、基本的には将来のマグマの貫入・噴出は回避されていると考えられる。しかしながら、その可能性を否定できない地域（例えば、火山フロントより背弧側など）では、確認のための調査・評価を行う。

第四紀の定義については、国際地質科学連合が、2009年6月に地質時代としての「第四紀」の始まりを従来より約80万年さかのぼり258万年前とする国際層序委員会や国際第四紀学連合の提案を批准し、わが国においてもこの定義を受け入れた（遠藤・奥村, 2010）。NUMOにおける調査・評価対象としての第四紀火山は、既存文献やデータベースが定義変更に対応していないことを鑑み、当面はこれまでどおり、「日本の第四紀火山カタログ」（第四紀火山カタログ委員会, 1999）に示された、およそ200万年前から現在にかけて活動した火山を第四紀火山とし、同文献に記載されている新第三紀鮮新世の一部の火山や時代未詳の火山に加えて、文献調査や概要調査の結果、火山地形（火山原面）が残っていると判断される火山も調査・評価の対象として検討する。

わが国には、348の第四紀火山があり（第四紀火山カタログ委員会, 1999）、千島弧～東北本州弧～伊豆小笠原弧および山陰～九州～南西諸島にかけて二つの帯状に分布している。第四紀火山の分布は、島弧の中軸部で最も密となり、大陸側（背弧側）に向かって疎となっている。また、第四紀火山が分布する領域の海溝側の境界を火山フロント（杉村, 1958）といい、その地理的位置は、沈み込んだ海洋プレートの上面に相当する深発地震面の深度が100～110km程度のところにほぼ一致している。東北本州弧における火山フロントは、新第三紀中新世後期～鮮新世以降（背弧海盆拡大

停止以降)、時間の経過とともに西側へ移動し、遅くとも 10Ma 頃までに現在の火山フロントの東約 10km に達したとされている。それ以降現在まで大きな移動はなく、8~6Ma 頃に現在から最大 30km 東進したことを除くと、0~20km 程度の「ゆらぎ」にとどまる(大口ほか, 1989; 吉田ほか, 1995)とされる。わが国の火山フロントの背弧側に分布する第四紀火山の時間的・空間的分布に関する検討(JNC, 1999b など)によれば、第四紀火山は特定の地域に偏在し、その中で活動を繰り返す傾向がある。火山フロントが不明瞭な山陰や九州地方北部では、深部からのマントル上昇に伴いマグマがもたらされ火山活動が生じている可能性が指摘されている(Iwamori, 1992; 宇都, 1995)。この地域の火山活動は独立単成火山群の分布が特徴であるが、鮮新世以降の活動域は全体的に山陰側に限定される傾向が認められる(宇都, 1995; Kimura et al., 2003)。日本列島のような島弧におけるマグマの発生プロセスについては諸説あるが(巽, 1995; 高橋, 2000)、火山フロントよりも背弧側の地表付近からマントルまでの地球物理学的データでは、火山・火成活動の可能性を示唆する上部マントル内の高温領域の分布が示されている(例えば、地震波速度構造:長谷川ほか, 2004)。また、上部マントルにおける高温領域は、第四紀火山の集中域に対応していることが明らかにされている(Tamura et al., 2002)。

マグマの貫入・噴出に関する将来予測は、以上のような過去の火山分布の偏在性に関する知見に基づいて行う。具体的には、島弧スケールおよび個々の火山体スケールにおける火山・火成活動の傾向や規則性、地下のマグマの存否を把握し、その結果に基づいて時間的・空間分布を外挿することにより評価する。また、必要に応じて確率論的評価手法(Martin et al., 2004; Chapman et al., 2009b; Jaquet et al., 2008 など)を用いた評価も参考にする。

(ii) 文献調査における調査・評価の流れ

(a) 目標

文献調査では、応募区域における第四紀のマグマの貫入・噴出の有無、および将来のマグマの貫入・噴出の可能性を検討するための調査・評価を行う。その結果に基づき、以下に示す「概要調査地区選定上の考慮事項」の法定要件への適格性を評価し、概要調査地区を選定する。

全国一律に評価する事項:

将来数万年にわたるマグマの活動範囲の拡がりの可能性を考慮し、第四紀火山の中心から半径 15km の円の範囲内にある地域は含めないように、概要調査地区を選定する。

個別地区ごとに評価する事項:

第四紀火山の中心から半径 15km の円の外側の地域でも、将来数万年にわたりマグマの地殻への貫入や地表への噴出が明確に判断される地域は含めないように、概要調査地区を選定する。

(b) 調査

文献調査におけるマグマの貫入・噴出にかかわる調査・評価の流れを図 5.3.1-1 に示す。

文献調査では、文献・資料の収集・整理のほか、応募区域の周辺に分布する第四紀火山およびその周辺を対象として、空中写真判読、レーザープロファイラ画像解析などのリモートセンシング手法(佐々木・向山, 2009 など)を活用し、火山地形や火口配列などの認定、火成岩類の分布・岩相・層序・年代・化学組成、活動履歴、火山体およびその周辺の地下構造、火山活動にかかわる地殻変動などの情報を取得する。なお、火山体およびその周辺の地下構造、特に地表からマントルまでの

高温領域の分布に関する情報については、必要に応じて既往の物理探査データの再解析を実施する。

(c) 評価

(b) に述べた調査によって取得された情報に基づき、応募区域周辺の第四紀火山を認定するとともに、第四紀以前を含め可能な限り過去にさかのぼり活動履歴と発達過程を把握する。続いて、地震・断層活動、隆起・侵食、地質・地質構造、地質環境モデルの情報を考慮し、地形・地質構造発達過程を検討する。それらの結果を踏まえ、火山の分布・活動性、マグマの存在について評価する。また、マグマが将来移動する可能性については、三浦ほか (2006)、土志田ほか (2006) などの検討事例を参考に、当該地域の火山活動の傾向や規則性の外挿、地形・地質構造発達過程の外挿、プレート運動との関連性や火山の寿命などを考慮して評価する。

これらの結果に基づき、第四紀火山の中心から半径 15km の円の範囲内に加え、第四紀火山の中心から半径 15km の円の外側の地域においても将来数万年にわたりマグマの地殻への貫入や地表への噴出が明確に判断される地域を含めないように概要調査地区を選定する。

文献調査における評価は、文献情報や既存データの再解析結果であるため、十分な判断ができない場合がある（例えば、第四紀火山から離れた場所に年代未詳の火山岩（噴出岩あるいは貫入岩）が分布する場合や、火山地形が明瞭であるが活動年代に関する情報がない場合など）。このような不確実性については、応募区域との離隔距離や周辺の第四紀火山との関係を考慮した上で、概要調査またはそれ以降の調査において検討の対象とする。

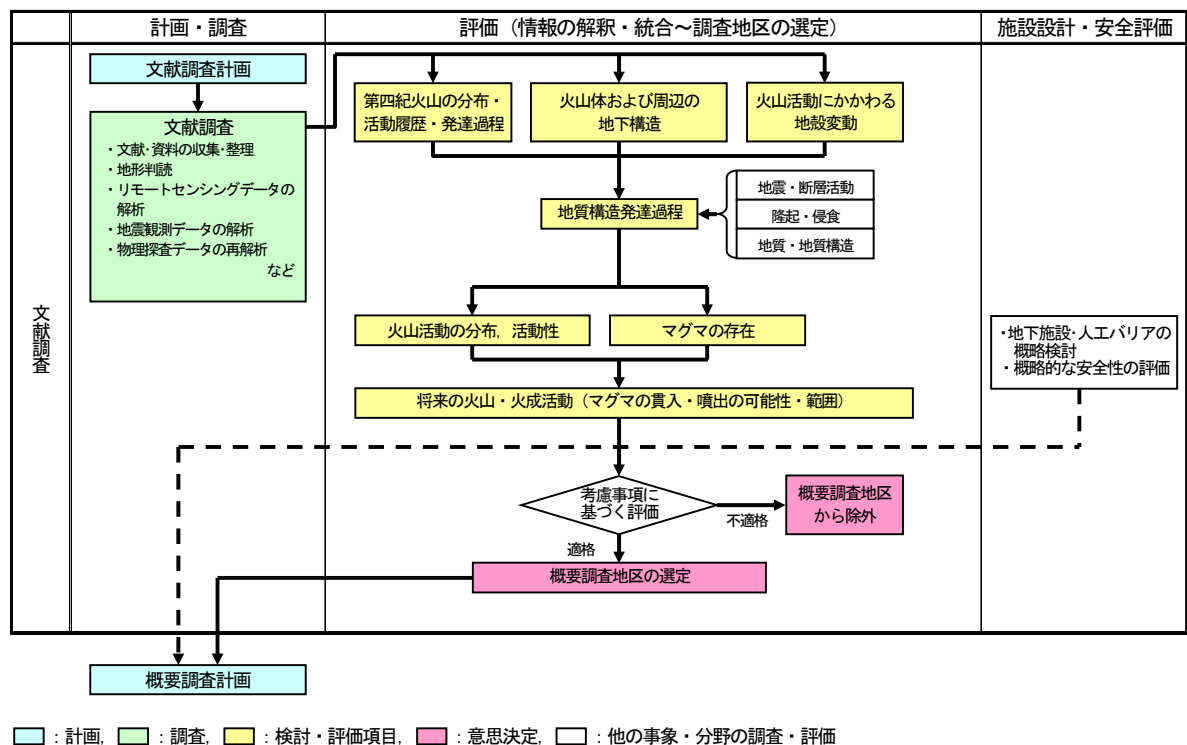


図 5.3.1-1 文献調査における火山・火成活動（マグマの貫入・噴出）にかかわる調査・評価の流れ（検討例）

図 5.2.1-4 に示した調査・評価の流れのうち、文献調査における火山・火成活動（マグマの貫入・噴出）にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

(iii) 概要調査における調査・評価の流れ

(a) 目標

概要調査では、文献調査で応募区域の近傍に第四紀火山あるいはマグマ供給系が存在する可能性が認められた場合に、将来のマグマの貫入・噴出の可能性や範囲に関する調査・評価を行う。さらに、概要調査地区において、第四紀火山のマグマの貫入・噴出を示す証拠の有無を確認する。これらの情報を施設・人工バリアの概念設計および予備的な安全評価に提供し、その結果と合わせて現在検討中の「精密調査地区選定上の考慮事項」に対する適格性を評価し、精密調査地区を選定する。

(b) 調査

概要調査におけるマグマの貫入・噴出にかかわる調査・評価の流れを図 5.3.1-2 に、主な調査手法とそれらの適用性について表 5.3.1-1 にそれぞれ示す。

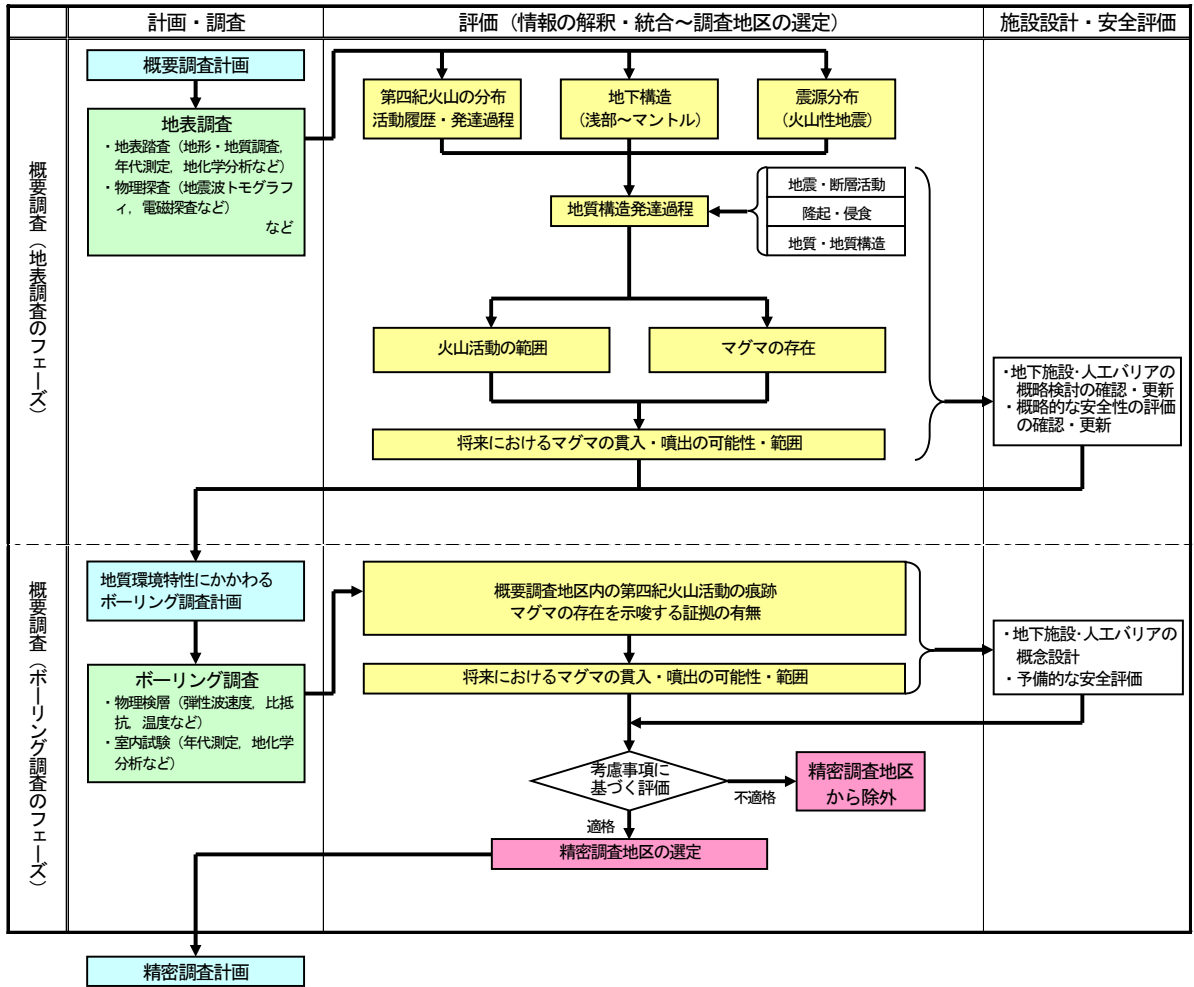
地表調査では、補足的に調査を行う範囲において、物理探査や地表踏査（岩石および地下水の年代測定や地化学分析を含む）などを実施する。特に、文献調査で明らかにされた、火山層序の不確実性がある個所や、年代値・化学分析値のデータが不足している個所、地質・地質構造、地殻変動と火山活動との対応関係を明らかにする上で重要な個所について重点的に実施する。この際、必要に応じて、火山体やその周辺の概略的な地下構造やマグマの分布を把握するために、地震波トモグラフィによる地震波速度構造解析（Xia et al., 2007 など）や電磁探査による比抵抗構造解析（浅森・梅田, 2005 ; Umeda et al., 2006b など）などの地球物理学的手法を用いる。活動的な第四紀火山が対象となる場合、測地学的手法（GPS 測量や傾斜計による観測など）も有効であり、必要に応じてこれらの情報も取得する。また、地下のマグマの存否を示す証拠として、地下水の遊離ガスや溶存ガスに含まれるヘリウム ($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比) や炭素 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比) の同位体比が有効であるため、Umeda (2009) に示されているように、これらの地球化学的手法を組み合わせ、調査結果の信頼性の向上を図る。

概要調査地区の地質環境特性にかかわるボーリング調査において、火山岩（噴出岩あるいは貫入岩）が認められた場合は、コアの年代測定や地下水の同位体分析などを行う。さらに、物理検層により温度のデータを取得する。

(c) 評価

(b) に述べた調査により取得された情報に基づき、概要調査地区内の第四紀の火山活動の痕跡（第四紀の火山岩）やマグマの存在を示唆する証拠（例えば、地震波低速度域、低比抵抗域、高い地温勾配など）の有無を確認する。概要調査地区の周辺地域については、将来的なマグマの貫入・噴火の可能性とその範囲について評価する。その結果を、地下施設・人工バリアの概念設計や予備的な安全評価の検討（例えば、母岩の選定や安全評価シナリオの構築）に資する情報として受け渡す。

概要調査に基づく評価結果、工学的対策および安全評価の結果を踏まえ、今後公表する「精密調査地区選定上の考慮事項」に照らして、例えば、第四紀にマグマが地表付近へ貫入または地表へ噴出したことが明らかな範囲、あるいはマグマの地表付近への上昇や地表への噴出の可能性の高い範囲などを除外した上で、事業期間中の安全確保および閉鎖後長期の安全確保の見通しを得て、精密調査地区を選定する。



□ : 計画, □ : 調査, □ : 検討・評価項目, □ : 意思決定, □ : 他の事象・分野の調査・評価

図 5.3.1-2 概要調査における火山・火成活動 (マグマの貫入・噴出) にかかわる調査・評価の流れ (検討例)

図 5.2.3-5 に示した概要調査の流れのうち、火山・火成活動 (マグマの貫入・噴出) にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

表 5.3.1-1 概要調査における火山・火成活動（マグマの貫入・噴出）にかかわる主な調査手法

調査手法		取得される情報	検討内容	適用限界・精度・条件など	備 考
地質学的 手法	地表踏査	火山岩類（噴出岩類 貫入岩類）の岩相・分 布・層序、火口・岩脈 の分布・配列、潜在す る火山活動の兆候、火 山活動と関連する地 質・地質構造	<ul style="list-style-type: none"> 年代・化学組成のデータと併せて、マグマ供給系の基本単位としての個々の第四紀火山を認定するとともに、マグマの地下での移動および活動範囲の変遷と、火山の形成発達史を検討する。 地質・地質構造、地殻変動と火山活動との対応関係を把握する。 	—	<ul style="list-style-type: none"> 第四紀火山の活動性と形成発達史の検討の基礎データとして、また、マグマの地下での移動、およびそれと関連する火山活動の要因や地質構造要素との関係を検討するための基礎データとして有効である。
	放射年代測定 (K-Ar 法、フィッシュ トラック法)	火山岩類の放射年代	<ul style="list-style-type: none"> 火山岩類の岩相・分布・層序と併せて、マグマ供給系の基本単位としての第四紀火山を認定し、活動の履歴を明らかにする。 火山岩類の岩相・分布・層序と併せて、第四紀火山の時間的・空間的な活動の規則性・偏在性を把握する。 	適用年代範囲 K-Ar 法： $10^4 \sim 10^9$ 年 フィッシュトラック法： $10^3 \sim 10^9$ 年	<ul style="list-style-type: none"> 調査の目的に応じた適切な試料採取が重要であり、文献情報の年代値を正しく解釈・評価するための基礎データとして有効である。
	化学分析 (全岩分析、鉱物分 析など)	岩石・鉱物の主成分お よび微量元素の化学 組成	<ul style="list-style-type: none"> マグマ溜りなどにおける諸過程（結晶分化、マグマの注入・混合など）、および条件（温度・圧力など）を推定する。 火山の形成発達史に伴うこれらの変化と、マグマの地下での移動との対応関係について検討する。 	測定限界 主要成分：0.1wt% 微量成分：1～0.1ppm	<ul style="list-style-type: none"> 地殻内のマグマ溜りなどにおける諸過程・条件を推定するための基礎データとして有効である。
地球物理 学的手法	空中磁気探査 空中電磁探査	広域的な磁気異常と 比較的浅部の比抵抗 構造	<ul style="list-style-type: none"> 磁気異常や比抵抗分布に基づき、変質による低磁性・低比抵抗岩体を抽出する。 	可探深度：500m 程度 (電磁探査)	<ul style="list-style-type: none"> 広範囲の地下地質情報が得られる。
	微小地震観測 地震波トモグラ フィー	微小地震の震源分布、 三次元地震波速度構 造、S波反射面分布	<ul style="list-style-type: none"> 第四紀火山下の低速度域、V_p/V_s 比から現在のメルト・高温領域の分布を推定する。併せて、S波反射面や、液相の運動によって生じると考えられる低周波地震との関係から、マグマ供給系の位置・規模、構造を把握する。 第四紀火山が分布しない地域においても、地殻（～マントル）内の低速度域、V_p/V_s 比から現在のメルト・高温領域の有無を検討する。併せて、S波反射面や、液相の運動によって生じると考えられる低周波地震との関連を検討する。 	可探深度：40km 程度	<ul style="list-style-type: none"> 広い地域のデータが得られるが、解像度はせいぜい数 km 程度である。 低 SN 比・多量データの処理の効率化が必要である。
	電磁探査 (MT 法)	二次元比抵抗構造	<ul style="list-style-type: none"> マグマ供給系に関連する地下構造、水理構造を推定する。 地殻（～マントル）内の比抵抗構造を把握し、マグマ（熱源）の分布に関する情報を取得する。 	可探深度：数 10km 程度 精度：深度の 1/10 程度	<ul style="list-style-type: none"> 比較的容易に深部構造のデータを得ることができる。 比抵抗断面の解釈（部分溶解域か、熱水変質域かなど）が難しい場合がある。 岩石の種類、温度、マグマ・水などの液相の関与により比抵抗が変化する。
測地学的 手法	GPS 観測	基準点変動量 (水平・上下)	<ul style="list-style-type: none"> 地殻変動と火山活動（特に、マグマの移動）との関係・影響範囲を検討する。 	精度：数 mm	<ul style="list-style-type: none"> 地殻変動調査としては一般的である。データを連続取得できる。20km 程度の間隔で既設置点がある。

(2) 熱・熱水活動の影響にかかわる調査・評価

(i) 調査・評価の基本的な考え方

応募区域は、第四紀火山の中心から半径 15km の円の外側に位置するが、マグマに起因する熱・熱水活動の可能性を否定できない地域（例えば、火山フロント背弧側など）では、確認のための調査・評価を行う。

日本列島における全国規模の温度構造、地熱資源賦存領域については、日本地熱資源賦存地域分布図（地質調査所、1980）などに示されており、地域レベルの情報としては、地熱資源図として熱水賦存領域の特徴（タイプ）が取りまとめられている。また、孔井や温泉などから得られる地温分布や地下水（熱水）の地球化学的な性質については、地温勾配図（矢野ほか、1999；田中ほか、2004）、日本の熱水系アトラス（村岡ほか、2007）などに取りまとめられており、酸性熱水や火山性の熱水の分布状況、深部熱水の地化学温度や特徴を概観できる。玉生ほか（2008）は、地質データ、地球物理データ、孔井データを総合的に解釈し、熱・熱水活動による高温域を抽出する方法を提示するとともに、高温域を含む地域のタイプ区分を示し、各タイプにおける熱・熱水活動の具体的な特徴を明らかにしている。

将来における熱・熱水の影響については、過去から現在までの熱水活動の範囲や規模、および地下のマグマ供給系の有無を把握し、(1) に述べた将来のマグマの貫入・噴出の可能性とその範囲に関する評価結果を考慮して評価する。

(ii) 文献調査における調査・評価の流れ

(a) 目標

文献調査では、応募区域における過去の熱・熱水活動の著しい影響の有無、および将来の熱・熱水活動の著しい影響の可能性について検討するための調査・評価を行う。それらの結果に基づき、以下に示す「概要調査地区選定上の考慮事項」の法定要件への適格性を評価する。

個別地区ごとに評価する事項：

マグマによる著しい熱の影響、強酸性の熱水、あるいは著しい熱水対流が存在すると明確に判断される地域は含めないように、概要調査地区を選定する。

(b) 調査

文献調査における熱・熱水活動の影響にかかわる調査・評価の流れを図 5.3.1-3 に示す。

文献調査では、まず文献・資料の収集・整理に加え、空中写真判読、衛星画像解析などのリモートセンシング手法により、地下水の水質（温度、化学組成など）、岩盤中の変質帯の分布やその形成年代などに関する情報を取得する。また、地下深部の熱源の位置を検討するために必要な情報（例えば、地震波速度構造、熱構造など）も取得する。この際、必要に応じて既存の物理探査データの再解析を実施する。

(c) 評価

(b) に述べた調査によって取得された情報に基づき、応募区域周辺の地下構造（特に、熱源の位置など）や、変質帯の分布やその形成年代などから熱史（地史）を検討する。また、現在の熱水賦存領域が応募区域の近傍に位置する場合には、広域的なモデルや解析手法の精度や不確実性に留意

しつつ、必要に応じて数値解析（中尾ほか，2008 など）により対流系（流体流動）の評価を行う。それらの結果および (1) のマグマの貫入・噴出にかかわる評価の結果を踏まえ、将来における熱・熱水の影響を評価する。

これらの結果に基づき、将来も含めて火山・火成活動による著しい熱の影響（例えば、大きい地温勾配）、強酸性の熱水あるいは著しい熱水対流が存在すると明確に判断される地域を含めないように概要調査地区を選定する。なお、文献調査における評価は、文献情報の分析や既存データの再解析に基づくため、十分な判断ができない場合がある（例えば、変質帯の形成年代が不明な場合、数値解析による熱水対流系の評価結果の解釈が分かれる場合など）。このような不確実性がある場合には、文献調査から予想される応募区域との離隔距離や熱・熱水の影響範囲との関係を考慮した上で、概要調査またはそれ以降の調査において検討の対象とする。

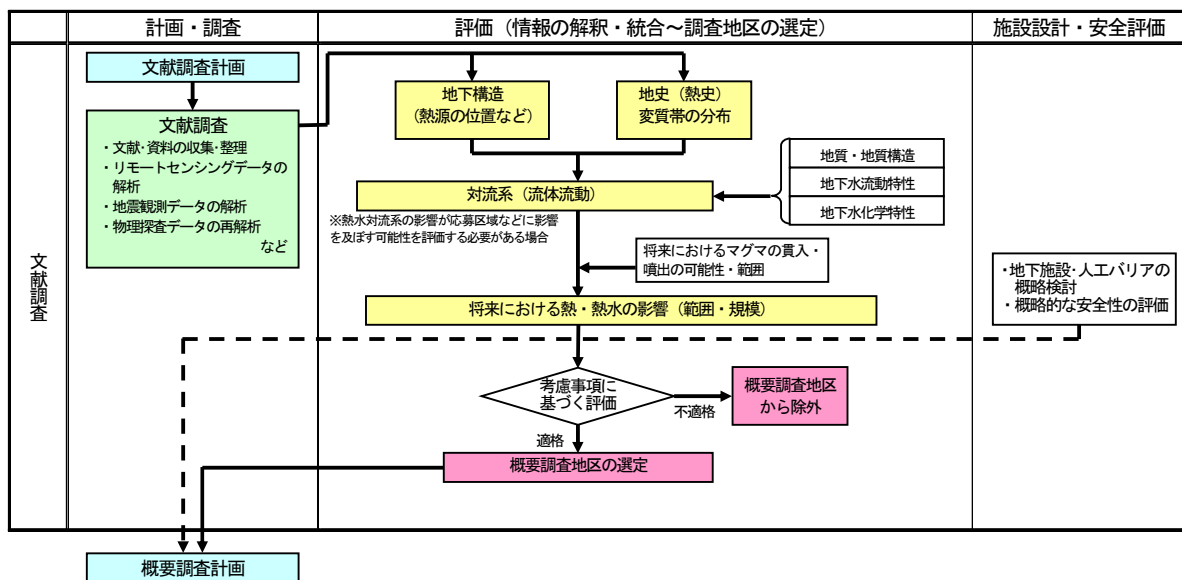


図 5.3.1-3 文献調査における火山・火成活動（熱・熱水の影響）にかかわる調査・評価の流れ（検討例）

図 5.2.1-4 に示した調査・評価の流れのうち、文献調査における火山・火成活動（熱・熱水の影響）にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

(iii) 概要調査における調査・評価の流れ

(a) 目標

概要調査では、文献調査で応募区域の近傍に熱・熱水活動の存在あるいは発生の可能性が認められた場合に、将来の熱・熱水活動の範囲や規模について評価する。併せて、概要調査地区において、第四紀の熱水活動を示唆する証拠の有無を確認する。これらの情報を地下施設・人工バリアの概念設計や予備的な安全評価に提供し、その結果と合わせて現在検討中の「精密調査地区選定上の考慮事項」に対する適格性を評価し、精密調査地区を選定する。

(b) 調査

概要調査における、熱・熱水活動の影響にかかわる調査・評価の流れを図 5.3.1-4 に、主な調査手法とそれらの適用性について表 5.3.1-2 にそれぞれ示す。

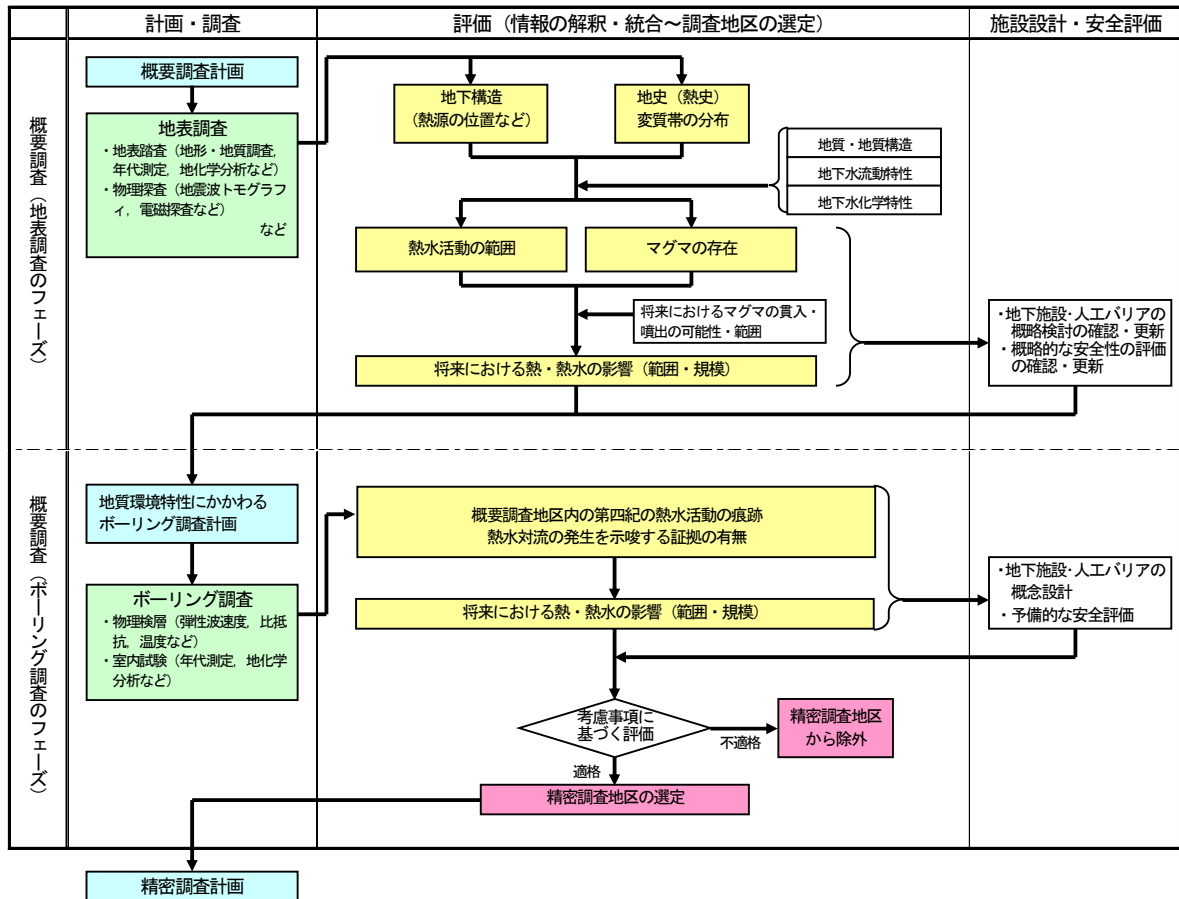
地表調査では、補足的に調査を行う範囲において、物理探査や地表踏査などを実施する。調査範囲は、応募区域周辺の第四紀火山の分布とその活動性、熱水賦存領域、地下構造（マグマの存在を示唆する構造）を考慮して設定する。これらの調査により地下水の水質（温度、化学組成など）、岩盤中の変質帯の分布やその形成年代などに関する情報を取得する。この際、マグマの貫入・噴出にかかわる調査・評価でも述べたように、必要に応じて、地球物理学的手法や地球化学的手法を組み合わせ合わせて適用し、調査結果の信頼性の向上を図る。

概要調査地区の地質環境特性にかかわるボーリング調査において著しい熱水変質が認められた場合は、コアおよび地下水の年代測定や地化学分析などを行う。さらに、物理検層により温度のデータを取得する。

(c) 評価

(b) に述べた調査により取得された情報に基づき、熱水活動の範囲やマグマの存在について評価する。その際には、深部熱源を評価した事例（Umeda et al., 2006b など）や熱源からの影響を評価した事例（JNC, 2005a ; 坂川ほか, 2005 など）を参考に、総合的な評価を行う。さらに、概要調査地区におけるボーリング調査の情報に基づき、第四紀の熱水活動の痕跡（例えば、第四紀の熱水変質）、将来の熱水対流の発生を示唆する証拠（例えば、高い温度勾配、地震波低速度域、低比抵抗域、マグマ由来の地下水など）の有無を確認し、将来的な熱・熱水活動の影響の範囲や規模について評価する。その結果を、地下施設・人工バリアの概念設計や予備的な安全評価の検討（例えば、母岩の選定や安全評価シナリオの構築）に資する情報として受け渡す。

概要調査に基づく評価結果ならびに工学的対策および安全評価にかかわる検討結果を踏まえ、精密調査地区選定段階の開始までに公表する「精密調査地区選定上の考慮事項」に照らして、例えば、マグマによる著しい熱・熱水の影響が及ぶ範囲を除外した上で、事業期間中の安全確保および閉鎖後長期の安全確保の見通しを得て、精密調査地区を選定する。



□ : 計画, □ : 調査, □ : 検討・評価項目, □ : 意思決定, □ : 他の事象・分野の調査・評価

図 5.3.1-4 概要調査における火山・火成活動 (熱・熱水の影響) にかかわる調査・評価の流れ (検討例)

図 5.2.3-5 に示した概要調査の流れのうち, 火山・火成活動 (熱・熱水の影響) にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

表 5.3.1-2 概要調査における火山・火成活動（熱・熱水の影響）にかかわる主な調査手法

調査手法		取得される情報	検討内容	適用限界・精度・条件など	備考	
地質学的手法	地表調査	地表踏査 (変質帯調査)	変質帯の分布・規模・性状	—	<ul style="list-style-type: none"> 変質帯の形成は、地層の年代によっては複数回の熱・熱水の影響を受けている可能性があることに留意する必要がある。 変質年代の測定は、試料の状況により適切な手法を適用する(熱ミネラル法、フィッシュトラック法、ESR法、U-Th/He法、K-Ar法など)。 井戸水や温泉水に含まれるHe同位体の分析結果から、マントル起源の流体の寄与について考察できる。 	
		化学分析 (鉱物分析を含む)	変質鉱物の種類・分布	—		
		年代測定	変質岩・変質帯の変質年代	<ul style="list-style-type: none"> 変質帯の種類、形成履歴、形成過程、地質・地質構造や火山との関連について検討し、変質鉱物や変質帯形成にかかわった熱水系の性状(温度、泉質)を検討する。 温泉・地下水の分布、温度、成分などから地下深部での貯留温度(地化学温度)や天水・火山性起源流体などの混合状態の検討、同位体分析結果から火山性起源流体の有無や地下水の滞留年代の推定などを行う。 		
		温泉・地下水等調査	温泉・噴気分布、泉温、泉質、湧出量			対象となる主な年代範囲： 10 ⁴ ～10 ⁶ 年
		流体化学分析 (同位体分析を含む)	主要溶存成分 同位体成分			測定限界： — 一般水質：10 ⁻² mg/l — 同位体比：10 ⁻¹ ‰
	ボーリング調査	コア観察	変質帯の分布・規模・性状	<ul style="list-style-type: none"> 地層の分布、比抵抗分布、変質鉱物の分布などから変質帯の連続性を検討し、地表の変質状況と併せた変質の解析、変質鉱物や変質帯形成にかかわった熱水系の性状などを把握する。 温度プロファイル、地化学温度、地層分布などから周辺地域の地下温度構造を検討する。 	—	<ul style="list-style-type: none"> 深度方向の情報が取得され、過去から現在の地温との関係が考察できる。 温度プロファイルは、特殊な環境ではわずかな間隔で大きく異なることがあることに注意する必要がある。 流体採取は不可能な場合もある。
		化学分析 (鉱物分析を含む)	変質鉱物の種類・分布		—	
		年代測定	変質岩・変質帯の変質年代		対象となる主な年代範囲： 10 ⁴ ～10 ⁶ 年	
		検層、孔内調査 (温度、比抵抗など)	温度プロファイル、温度勾配、地層ごとの温度特性、比抵抗分布		ボーリング孔の掘削孔径や地下の温度状況により適用できない場合もある。	
		流体採取および化学分析 (同位体分析を含む)	主要溶存成分 同位体成分		測定限界： — 一般水質：10 ⁻² mg/l — 同位体比：10 ⁻¹ ‰	
地球物理学的手法	空中磁気・電磁探査	広域的な磁気異常分布 広域的な比較的浅部の比抵抗構造	<ul style="list-style-type: none"> 磁気異常分布および比抵抗分布に基づき、変質による低磁性・低比抵抗岩体を抽出する。 	(電磁探査) 可探深度：500m程度	<ul style="list-style-type: none"> 広範囲の地下情報が取得できる。 	
	微小地震観測 地震波トモグラフィ	微小地震の震源分布 三次元地震波速度構造 S波反射面分布	<ul style="list-style-type: none"> 地殻(～マントル)内の低速度域、Vp/Vs比から現在のメルト・高温領域の分布を推定する。併せて、S波反射面や、液相の運動によって生じると考えられる低周波地震との関連を検討する。 地震波速度構造と高温領域の関係、地殻の温度構造と地震発生深度の関係、深部流体と微小地震分布の関係、比抵抗構造や地化学データを組み合わせて熱源の位置・規模を検討する。 	可探深度：40km程度	<ul style="list-style-type: none"> 広い地域のデータを取得できるが、解像度は数km程度である。 精度向上には、三次元速度構造を把握することが望ましい。 	
	電磁探査 (MT法、CSAMT法)	二次元(三次元)比抵抗構造	<ul style="list-style-type: none"> MT法では、低比抵抗域から変質帯、熱水貯留構造、熱原の位置・規模および高透水帯の分布を推定する。 CSAMT法では、比抵抗分布から火成岩の貫入場所、断層構造、変質帯の位置を検討する。 	(MT法) 可探深度：数10km程度 精度：深度の1/10程度 (CSAMT法) 可探深度：1km 精度：深度の1/10程度	<ul style="list-style-type: none"> MT法では比較的容易に深部構造のデータを取得できるが、比抵抗断面の解釈が難しい場合がある。 CSAMT法では、比較的浅部について精度のよい地下構造のデータを取得できるが、比抵抗構造の解釈が難しい場合がある。また、測定点から離れた位置に送信源を設置する必要がある。 	
	重力探査	重力異常分布、密度構造	<ul style="list-style-type: none"> 局所的な重力異常域の分布から推定される基盤構造を踏まえ、熱源の位置・規模を推定する。 	可探深度：数10km 測定精度：0.1mgal	<ul style="list-style-type: none"> 比較的容易に大域的な基盤構造を推定できる。 想定する密度構造モデルにより結果が異なり、一義的に決まらない。 	

5.3.1.2 地震・断層活動

(1) 調査・評価の基本的な考え方

5.1.1.1 に述べたように、地震・断層活動による地層処分システムおよび地上施設への影響として、岩盤の破断・破碎に伴う処分施設や廃棄体の直接的破壊、断層活動に伴う力学的変化、小断層や節理の発生に伴う周辺岩盤の透水性の変化、地震前後における地殻内のひずみの変化に伴う一時的な地下水位や地下水圧などの変化、地震動（ゆれ）による地下施設や地上施設の破壊が挙げられる。これらのうち、活断層などの分布範囲およびその周辺の影響の著しい範囲は、「地層の著しい変動」に該当する事象が認められる場所として取り扱い、サイト選定において回避する。一方、地震動による影響については、耐震設計などによる対処（工学的対策）の可能性について検討し、地震・断層活動に伴う地質環境の変化については後述する地質環境特性の一環として評価・検討する。

日本列島およびその周辺の活断層や活褶曲などの分布を網羅的に整理した資料としては、「50 万分の1 活構造図」、「新編 日本の活断層」（活断層研究会、1991）、「活断層詳細デジタルマップ」（中田・今泉、2002）、「日本周辺海域の第四紀地質構造図」（徳山ほか、2001）などがある。また、阪神・淡路大震災以降、地震調査研究推進本部が中心となり、活断層調査が精力的に進められており、活断層の分布や活動性などに関する評価結果が公開されている。これらは、文献調査に先立つ事前確認や概要調査計画立案などに用いる。

その一方で、わが国では、2000 年以降 M7 前後の被害地震が、これまでに活断層の存在が認められていなかった地域において複数発生している（例えば、2000 年鳥取県西部地震（M7.3）、2004 年新潟県中越地震（M6.8）、2008 年岩手・宮城内陸地震（M7.2）など）。これらの地震の震源域では、地形学的、地質学的、地球物理学的な調査などが行われ、短い活断層や活動性の低い活断層が存在することや、その活動性などに関する調査結果が報告された（例えば、井上ほか、2002；岡村・石山、2005；鈴木ほか、2008；遠田ほか、2010 など）。

断層の新生・再活動、活断層の分岐・伸展といった課題に対しては、東北日本弧では中新世の堆積盆を形成した正断層が現在の応力場に応じて逆断層として再活動していること（インバージョンテクトニクス；Kato et al., 2004）、横手盆地縁辺部に位置する逆断層の分岐（フロントマイグレーション）により活断層の位置が移動すること、中央構造線、阿寺断層、野島断層などでは西南日本の主要な構造線や活断層が新生代の初期にはすでに活動していたこと（Tagami and Murakami, 2007 など）などが明らかにされている。また、断層の発達過程、断層活動の累積に伴う地層の変形の進行に関しても、断層模型実験による検討や数値解析的な検討（例えば、上田、2009）により知見が得られてきている。

また、これらの研究と並行して、原子力発電の分野では、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（原子力安全委員会、2006）の改訂がなされ、より詳細な活断層の調査・評価が求められることとなった。この指針を受けた「発電用原子炉施設の耐震安全性に関する安全審査の手引き」（原子力安全委員会、2010b）では、既存文献の調査や変動地形学的調査、地表地質調査、地球物理学的調査などを適切に組み合わせた十分な調査を行うことが記されている。

これらの知見に基づき、活断層の調査・評価に関する最新の知見や技術を活用することにより活断層の分布や活動性などに関する情報を取得し、地形・地質構造発達過程を踏まえて、応募区域およびその周辺に分布する活断層、活褶曲などの分布とその活動性、活断層の幅およびその外側の変形帯の範囲について評価する。なお、活断層の幅とは、断層活動に伴い岩石が破碎され、不規則な割れ目の集合体となった断層破碎帯（角礫部、粘土部を含む）のことを指し、その外側の変形帯と

は、断層活動に伴う地層の変形が生じている領域のことを指す。

活断層などの分布・活動性、活断層の幅およびその外側の変形帯の評価については、変動地形学的な考え方（渡辺・鈴木，1999）を重視した地形調査，地質学的調査，地球物理学的調査などにより把握する。また，被覆層などが不整合に覆って地下に伏在している断層を検出するため，測地学，地球物理学（地震学を含む）に加えて，地球化学的な観点からも検討する。伏在断層の活動性は，当該断層の上位を覆う被覆層に変位が及んでいるか否かによりそれを判断し，評価する。

活断層や活褶曲など運動の将来予測は，活断層などの分布・活動性などにかかわる地形学的・地質学的な記録や測地学的な情報，地震学的な観点からの検討結果に基づき，それを外挿することにより評価する。その際，想定される変位量や断層の長さなどのパラメータと断層破碎帯の幅との相関関係（Otsuki, 1978；緒方・本荘，1981）に関する知見，断層模型実験（上田ほか，2003；上田，2009 など）から得られる知見，断層周辺のプロセスゾーン（金折，2001；吉田ほか，2009 など）に関する知見などを参考にする。一方，活断層の幅の外側の変形帯の範囲に関する将来予測については，外挿法による予測を基本とするが，必要に応じて確率論的手法（例えば，各種地殻変動量に基づく歪速度モデルによる確率論的評価手法：Chapman et al., 2009b）を用いた評価を考慮する。

また，地震動による影響（地下施設や地上施設の破壊）については，耐震設計による対処が可能であるか，当該サイトおよびその周辺における地震の履歴や活断層の調査結果に基づき検討するための情報を取得し，工学的対策の検討に対して情報を受け渡す。

(2) 文献調査における調査・評価の流れ

(i) 目標

文献調査では，応募区域において，過去数 10 万年の間に繰り返し活動を生じている活断層，活断層の幅（断層破碎帯）およびその外側の変形帯，活断層の分岐などの発生の可能性が高い場所の有無について検討するための調査・評価を行う。その結果に基づき，以下に示す「概要調査地区選定上の考慮事項」の法定要件への適格性を評価する。

全国一律に評価する事項：

陸域では空中写真判読など，海域では海上音波探査などに基づいて全国的に調査された文献に示されている活断層がある場所は含めないように，概要調査地区を選定する。

個別地区ごとに評価する事項：

繰り返し活動し，変位の規模が大きい活断層などについて，次の事項に該当すると明確に判断される場所，範囲は含めないように，概要調査地区を選定する。

- ① 全国一律に評価する事項で用いた以外の文献によって認められる活断層がある場所
- ② 活断層の幅（断層破碎帯）およびその外側の変形帯に含まれる範囲
- ③ 活断層の分岐などの発生の可能性が高い範囲
- ④ 顕著な活動を継続している活褶曲や活撓曲の分布範囲

(ii) 調査

文献調査における地震・断層活動にかかわる調査・評価の流れを図 5.3.1-5 に示す。

文献調査では，まず文献・資料の収集・整理，空中写真や高解像度数値標高モデルを用いた地形

判読、測地データの解析、既往の物理探査の記録の再解析、地震観測記録の解析などにより、応募区域およびその周辺の活断層の分布・活動性、変動地形の分布、震源分布に関する情報を取得する。

(iii) 評価

(ii) に述べた調査によって取得された情報に基づき、応募区域周辺の活断層や活褶曲などを認定するとともに、それらの分布・規模や活動性を把握する。また、変動地形の分布域や震源分布を把握し、文献情報で示されている活断層などとの関係についても検討する。それらの結果に加えて、火山・火成活動、隆起・侵食、地質・地質構造の情報を考慮して、地形や地質構造の発達過程を総合的に取りまとめる。その上で活断層などの分布・活動性、活断層の幅およびその外側の変形帯の範囲について検討・評価する。また、将来における活断層の分岐などの可能性や範囲については、過去から現在までの活断層などの位置やその時間的・空間的变化、地形や地質構造の発達過程、プレート運動との関連性などに基づいて評価する。

これらの結果に基づき、繰り返し活動し変位の規模が大きい活断層などについて、そのような活断層の場所、活断層の幅（断層破碎帯）およびその外側の変形帯に含まれる範囲、活断層の分岐などの発生可能性が高い範囲、顕著な活動を継続している活褶曲や活撓曲の分布範囲に位置すると明確に判断される場所を含まないように概要調査地区を選定する。なお、文献調査における評価は、文献情報や既往データの再解析結果であるため、十分な判断ができない場合がある（例えば、活動履歴が不明な断層が存在する場合や、変動地形が認められるが断層の存在に関する情報が存在しない場合）。このような不確実性については、応募区域との位置関係を考慮した上で、概要調査またはそれ以降の調査において調査・評価していく。

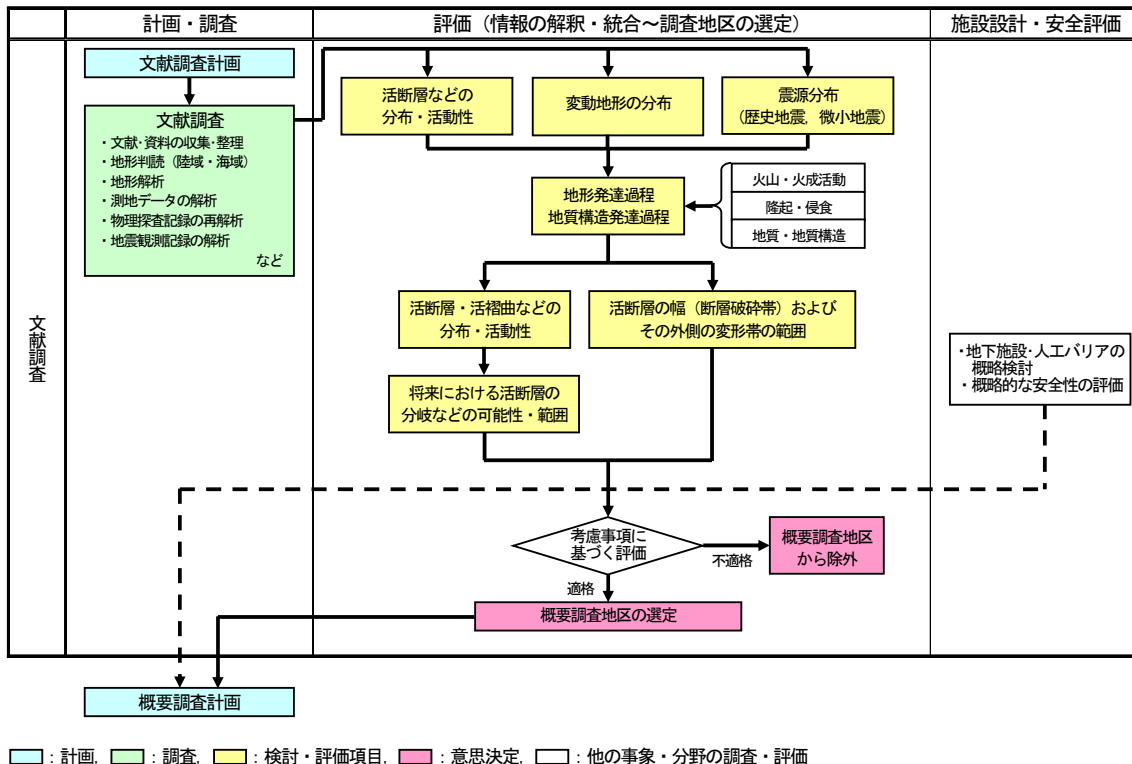


図 5.3.1-5 文献調査における地震・断層活動にかかわる調査・評価の流れ（検討例）

図 5.2.1-4 に示した調査・評価の流れのうち、文献調査における地震・断層活動にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

(3) 概要調査における調査・評価の流れ

(i) 目標

概要調査では、概要調査地区および補足的に調査を行う範囲において、地層処分システムの長期安全性に影響を与える活断層の有無を確認し、影響の及ぶ範囲を評価する。これらの情報を地下施設・人工バリアの概念設計や予備的な安全評価に提供し、その結果と合わせて現在検討中の「精密調査地区選定上の考慮事項」に対する適格性を評価し、精密調査地区を選定する。

(ii) 調査

概要調査における地震・断層活動にかかわる調査・評価の流れを図 5.3.1-6 に示すとともに、主な調査手法とそれらの適用性について表 5.3.1-3 および表 5.3.1-4 に示す。

概要調査地区では、文献に記述された活断層などが分布する場所、活断層の幅およびその外側の変形帯に含まれる範囲、活断層の分岐などの発生の可能性が高い範囲は除外されている。概要調査では、その評価結果の妥当性を確認するとともに、文献調査では十分な判断ができなかった事項（例えば、文献では活断層が認められていないが変動地形が分布する場所、活動性が不明な断層）について現地調査に基づき総合的な評価を行う。これらの調査範囲は、活断層などの存在を示唆する変動地形が分布する領域のほか、段丘の分布や測地学的データなどから把握される隆起・沈降運動の境界を含む範囲を含めるように設定する。この調査範囲において物理探査を実施する場合は、活断層などの存在を示唆する変動地形を横断する位置に測線を設定する。また、第四系が広く分布する地域で物理探査により伏在断層の有無を把握する場合には、その第四系を横断および縦断する位置

に測線を設定する。また、浅層のボーリング調査を実施する場合には、活断層などの存在を示唆する変動地形に対応する断層などの有無、第四系や段丘面などにより変位の有無を把握することができるように、また、断層の性状を把握できるように掘削位置と掘削深度を設定する。

概要調査地区内に文献調査時に活断層である可能性が疑われた断層があれば、それらについて、地表踏査、物理探査、ボーリング調査（例えば、群列ボーリング）、トレンチ調査などを実施し、活動性を評価する。

また、概要調査地区の地質環境特性にかかわるボーリング調査において確認された断層・破碎帯については、次に示す手順により地質構造の発達過程に基づき断層の活動性を検討・評価し、概要調査地区内の活断層などの存否について確認する。

- ① 分布・性状の確認（活断層と明確に判断される断層との比較を含む）
- ② 断層系のグルーピング
- ③ 各断層系の形成順序の検討
- ④ 活動性評価（最も新しい断層が、処分施設に著しい影響を与えるようなものか否かなど）

さらに、必要に応じて、概要調査地区周辺の補足的に調査する範囲に分布する活断層の調査を実施し、精密調査地区として選ばれる可能性のある地域への影響がないことを確認する。一方、活断層などが海域に分布するような場合には、音響測深やサイドスキャンソナーなどの海底地形測量、海上音波探査などの物理探査、ピストンコアなどの海底試料採取、年代測定などを実施する。これらの調査により、活断層などの位置、活動性などに関する情報を取得する。

地震動による影響については、既存観測点における地震観測データの収集を引き続き行うとともに、必要に応じて地震観測を行う。

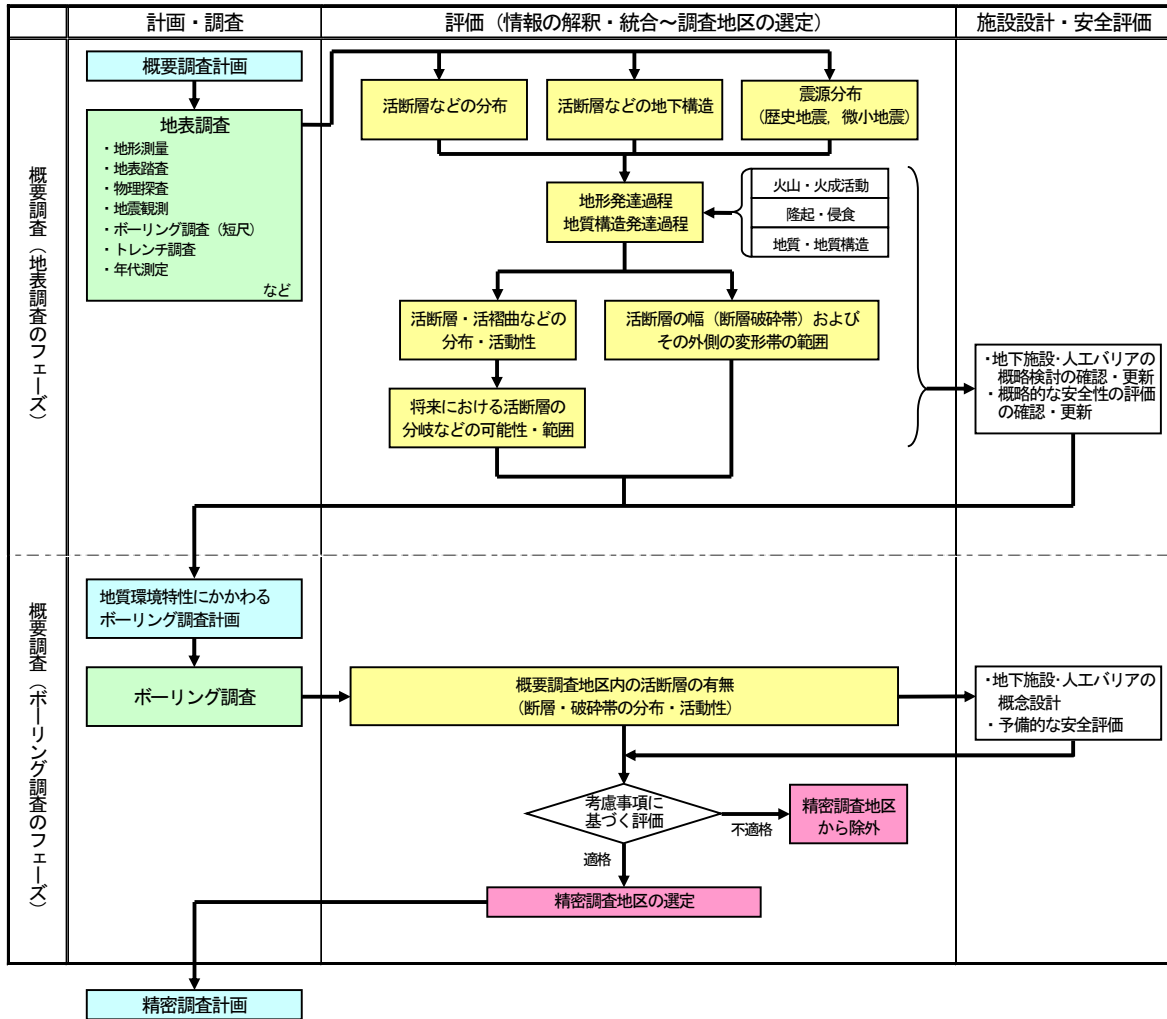
(iii) 評価

概要調査では、基本的には文献調査と評価事項が同じであること、概要調査地区だけではなく、補足的に調査を行う範囲における調査結果も含めて検討する必要があることから、(ii) に述べた調査により取得された情報に基づいて、文献調査と同様の流れで評価を行う。まず取得した情報に基づき、文献・資料に記載されていない活断層の有無を確認する。そのような活断層が認められた場合には、概要調査地区の周辺に分布する活断層も含めて、分布・活動性、幅およびその外側の変形帯の範囲、将来における活断層の分岐の可能性および範囲について評価する。これらの評価結果を、地下施設・人工バリアの概念設計や予備的な安全評価の検討（例えば、母岩の選定や安全評価シナリオの構築）に資する情報として受け渡す。

概要調査に基づく評価結果、工学的対策および安全評価にかかわる検討結果を踏まえ、今後公表する「精密調査地区選定上の考慮事項」に照らして、例えば、活断層や活褶曲・活撓曲が存在していたり、将来的に断層の分岐などの可能性が高いと明確に判断される場所および範囲は除外した上で、事業期間中の安全確保および閉鎖後長期の安全確保の見通しを得て、精密調査地区として選定する。

なお、不確実性が大きい遠い将来における断層の新生や再活動などの事象については、それらを引き起こす要因となる広域応力場の変化などの地殻の状態が変化し得る時期を踏まえ、安全評価上の仮想的なシナリオとして取り扱い、万が一の場合にも極端に大きな影響は生じないことを確認す

る。



□ : 計画, □ : 調査, □ : 検討・評価項目, □ : 意思決定, □ : 他の事象・分野の調査・評価

図 5.3.1-6 概要調査における地震・断層活動にかかわる調査・評価の流れ(検討例)

図 5.2.3-5 に示した概要調査の流れのうち、地震・断層活動にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

表 5.3.1-3 概要調査における地震・断層活動にかかわる主な調査手法（その1：陸域）

調査手法		取得される情報	検討内容	適用限界・精度・条件など	備考
地質学的 手法	地表踏査	地質層序、地質構造、微地形、断層の性状など	・活断層・活褶曲・活撓曲の有無・分布・活動性などを検討する。	—	・調査の進行状況に応じて、適切な精度（概査→精査）で実施する必要がある。
	ボーリング調査	地質層序（地質柱状図）、地質構造など	・活断層・活褶曲・活撓曲の有無・分布・活動性などを検討する。	—	・地下の情報を直接取得できる。
	トレンチ調査	断層の性状、断層周辺の地層の変形状況など	・活断層の有無・分布・活動性を検討する。	—	・断層を直接確認できる。
	年代測定	第四系の堆積年代、地形面の形成年代、火山岩の形成年代など	・活断層・活褶曲・活撓曲の活動性を検討する。	適用年代範囲 火山灰層序：10 ⁰ ～10 ⁶ 年 K-Ar 法：10 ⁴ ～10 ⁸ 年 ¹⁴ C年代測定：10 ² ～5×10 ⁴ 年	
地球物理 学的手法	反射法地震探査	二次元（三次元）地層境界などの反射面構造（反射断面）	・反射断面に基づき、断層・褶曲の有無・位置・形状、活動性を推定する。	可探深度：起震方法により異なる インバクター：1km S波/パイプレータ：1.5km P波/パイプレータ+爆薬：5km 空間分解能：数10m（受振点間隔による）	・深部データを比較的精度よく求めることができる。 ・結晶質岩では、岩石密度および地震波速度の変化が小さく明瞭な反射面が得られない場合がある。 ・層状構造を有する堆積岩分布域では、有効な手法である。
	屈折法地震探査	二次元（三次元）地震波速度構造	・地震波速度構造に基づき、断層・褶曲の有無・位置を推定する。	可探深度： 浅部：100～200m 深部：数km～100km 精度：深度に対して±10%	・反射法地震探査に比べ、探査深度に対して長い測線長（探査深度の7～10倍）、大きな起震エネルギーを必要とする。 ・断層に伴う破碎帯の分布や規模を低速帯として検出することは可能であるが、断層の変位・傾斜を評価することは困難である。
	電磁探査 （MT法、CSAMT法など）	二次元（三次元）比抵抗構造	・比抵抗構造に基づき、断層の有無・位置・形状を推定する。	（MT法） 可探深度：数10km 精度：深度の1/10程度 （CSAMT法） 可探深度：1km 精度：深度の1/10程度	・堆積岩分布域では、比抵抗断面の解釈が難しい場合がある。 ・CSAMT法の場合、測定点から離れた位置に送信源を設置する必要がある。
	重力探査	重力異常分布、密度構造	・局所的な重力異常域の分布から推定される基盤構造を踏まえ断層位置・規模を推定する。	可探深度：数10km 測定精度：1mgal	・比較的容易に大域的な基盤構造を推定できる。 ・総定する密度構造モデルにより結果が異なり、一義的には決まらない。
測地学的 手法	GPS観測	基準点変動量（水平・鉛直）	・地殻変動と断層活動の関係を検討する。	精度：数mm	・地殻変動調査としては一般的であり、データを連続的に取得できる。 ・20km程度の間隔で既設置点がある。
地震学的 手法	微小地震観測	微小地震の震源分布	・微小地震の震源分布に基づき震源断層を推定する。 ・微小地震の震源分布と活断層の分布、地質構造などの関係から、活断層の形状などについて検討する。	—	
地球化学 的手法	地化学調査 （Ra、He、CO ₂ など）	土壌ガス（Ra、He、CO ₂ など）の濃度分布	・土壌ガスの濃度分布に基づき、断層・破碎帯の有無・位置を推定する。	—	・すべての活断層、地震断層および地質断層の探査に有効な手法ではない。 ・土壌ガスの濃度異常は、測定孔周辺の地質、土壌、閉鎖的な地下ガス循環系などを反映することから、ほかの調査データと併せて解釈する必要がある。

表 5.3.1-4 概要調査における地震・断層活動にかかわる主な調査手法（その2：海域）

調査手法		取得される情報	検討内容	適用限界・精度・条件など	備考
地形学的手法	海底地形測量 (音響測深、サイドスキャンソナーなど)	変動地形および変動地形の可能性のある地形の分布	・変動地形やその可能性がある地形を抽出する。	適用水深：10,000m 以下 測定精度：(水中音速度補正+潮汐高補正) 浅海域 (200~500kHz)：10cm 深海域 (10~20kHz)：水深の1/100	
地質学的手法	海底試料採取	地質情報、層序	・音波探査や年代測定などの結果と併せて、断層・褶曲の位置・活動性を推定する。	最大20m程度 (海底の層相、採取方法によって異なる)	・地下データを直接得られる。 ・堆積物の種類に応じて適切な手法を選択する必要がある。
	ボーリング調査	地質層序 (地質柱状図)、地質構造など	・音波探査や年代測定などの結果と併せて、断層・褶曲の位置・活動性を推定する。	—	・地下の情報を直接取得できる。
	年代測定	第四系の堆積年代、地形面の形成年代、火山岩の形成年代など	・変位・変形に関与している地層、関与していない地層の年代を把握する。	適用年代範囲 火山灰層序：10 ⁰ ~10 ⁶ 年 ¹⁴ C年代測定：10 ² ~5×10 ⁴ 年 微化石分析：10 ⁵ ~10 ⁷ 年	
地球物理学的手法	音波探査	二次元 (三次元) 地層境界などの反射面構造 (反射断面)	・反射断面に基づき、断層・褶曲の有無・位置・形状、活動性を推定する。	可探深度 (音源によって異なる) ソフローブ：~30m程度 スパーカー：30~200m程度 ウォーターガン：100~1,000m程度 エアガン：数100~数1,000m 精度 (分解能)：(音源によって異なる) ソフローブ：10~50cm程度 スパーカー：0.5~3m程度 ウォーターガン：1~数10m程度 エアガン：数~数10m	・深部データを比較的精度よく求めることができる。 ・結晶質岩では、岩石密度および地震波速度の変化が小さく明瞭な反射面が得られない場合がある。 ・層状構造を有する堆積岩分布域では、有効な手法である。
	電磁探査 (MT法、CSAMT法)	二次元 (三次元) 比抵抗構造	・地下構造から断層の有無・位置・形状を推定する。	(MT法) 可探深度：数10km 精度：深度の1/10程度 (CSAMT法) 可探深度：1km 精度：深度の1/10程度	・堆積岩分布域では、比抵抗断面の解釈が難しい場合がある。 ・CSAMT法の場合、測定点から離れた位置に送信源を設置する必要がある。
	重力探査	重力異常分布、密度構造	・局所的な重力異常域の分布から推定される基盤構造を踏まえ断層位置・規模を推定する。	可探深度：数10km 測定精度：1mgal	・比較的容易に大局的な基盤構造を推定できる。 ・総定する密度構造モデルにより結果が異なり、一義的には決まらない。

5.3.1.3 隆起・侵食

(1) 調査・評価の基本的な考え方

5.1.1.1 に述べたように、隆起・侵食による地層処分システムへの影響としては、地下施設の地表への接近や、それに伴う地下水の流動状況や地球化学的条件の変化が挙げられる。規模の大きな隆起・侵食では、地層処分システムへの影響が大きくなることから、これらの事象を「地層の著しい変動」に該当すると考え、サイト選定において回避する。一方、規模の小さい隆起・侵食については、処分施設の設置位置や深度の設定といった工学的対策などの対処を含めて検討する。

隆起・沈降運動は、火山・火成活動、地震・断層活動などと密接な関係があり、プレート運動とも深くかかわっている。また、氷床の消長や海水準変動に伴うアイソスタティックな変動によっても生じる。従って、隆起・沈降運動の影響評価においては、隆起・沈降量の分布、侵食量の分布について調査し、気候・海水準変動、そのほかの自然現象との関連性を考慮する。

隆起・沈降量の調査・評価手法には、1,000年から10万年オーダーの隆起量を把握できる段丘を用いた地形学的手法（吉山・柳田，1995；小池・町田，2001など）、1,000年から100万年オーダーの隆起量を把握できる堆積深度が明らかな地層を用いた地質学的手法（成瀬，1990；増田ほか，2001；藤原ほか，2005aなど）などがあり、これらの適用可能な時間スケールの違いを考慮しつつ、適切に組み合わせて調査・評価を行う。この際、測地学的手法（多田ほか，1997；国見ほか，2001など）により把握できる期間は、最大でも過去100年程度であり（水準測量）、ほかの手法によって把握される隆起・沈降の傾向と必ずしも一致するとは限らないことに留意する。

一方、侵食量については、ダムの堆砂量データや高度分散量により評価する方法（Yoshikawa，1974；藤原ほか，1999など）に基づいて全国規模の侵食に関するマップが整備されている。しかしこれらのマップに用いられているデータ期間は短い。地域ごとの侵食量評価の知見としては、内陸では河川の下刻量（深さ）と隆起量がほぼ釣り合うというもの（高木ほか，2000）や、地質学的手法に基づき侵食量を評価した事例（高橋ほか，2005）がある。また、海岸部における侵食については、氷河性の最大海面低下約140mと地殻変動による評価期間内の海面変化量の合計値（最大相対的海面変化量）を考慮する方法（産総研，2007aなど）がある。これらの既往の評価事例を参考に、サイトの地形発達状況、特に侵食により形成された地形の分布やその規模など、地質分布状況などについて調査し、侵食量を評価する。

隆起・沈降量の将来予測については、過去の変動量、法則性などを外挿することにより、将来10万年程度の予測を行う。さらに、プレート運動との関連性を考慮し、隆起・沈降運動をもたらした地形・地質構造発達過程を明らかにすることにより、プレート運動の継続性を想定できる期間において、地質構造発達過程を外挿することにより予測する。ただし、これらの予測期間については、地域ごとに異なる地質構造の発達過程を考慮して設定する。一方、侵食量（最大下刻量）や将来の地形変化については、予測された隆起・沈降に対して、過去の侵食履歴などを考慮して評価する。

(2) 文献調査における調査・評価の流れ

(i) 目標

文献調査では、応募区域において、過去における著しい隆起・侵食の有無、および、将来における著しい隆起・侵食の可能性について検討するための調査・評価を行う。その結果に基づいて、以下に示す「概要調査地区選定上の考慮事項」の法定要件への適格性を評価する。

個別地区ごとに評価する事項：

過去 10 万年間の隆起の総量が 300m を超えていることが明らかな地域は含めないように、概要調査地区を選定する。

(ii) 調査

文献調査における隆起・侵食にかかわる調査・評価の流れを図 5.3.1-7 に示す。

文献調査では、文献・資料の収集・整理、空中写真や高解像度の数値標高モデルを用いた地形判読などにより地形・地質情報を取得し、応募区域およびその周辺の隆起・沈降量とその分布、侵食量、測地学的な境界、気候・海水準変動などを把握する。

(iii) 評価

「概要調査地区選定上の考慮事項」への適格性を評価する場合には、海成・河成段丘を用いた地形学的手法が最も適している。続いて、火山・火成活動（第四紀火山の分布など）、地震・断層活動（活断層などの分布など）、地質・地質構造の情報を考慮し、地形・地質構造発達過程を検討する。それらの検討結果を踏まえ、必要に応じて内挿・外挿するなどして、応募区域およびその周辺の過去の隆起量（分布）、侵食量（最大下刻量）を評価する。将来の隆起・侵食については、地形・地質構造発達過程の外挿、地形変化予測モデルなどにより評価する。地形変化予測モデルによる地形変化の将来予測については、新旧地形面からの類推/モデル化 (Sasaki et al., 2009)、地形変化シミュレーション (JNC, 2005a) といった研究事例を参考にして、河川による下刻だけではなく、河川の側刻、海岸侵食や断層運動の地形変化への影響も含めて検討する。これらの結果に基づき、過去 10 万年間の隆起の総量が 300m を超えていることが明らかな地域を含めないように概要調査地区を選定する。

なお、文献調査における評価は、文献情報や空中写真などの地形判読によるものであるため、隆起量算出の基準となる地形面（例えば、海成段丘や河成段丘）の形成年代に対して複数の解釈がある場合や、異なる手法により推定された隆起量が異なる場合がある。このように文献調査により当該サイトの隆起量が明らかにできない場合には、概要調査またはそれ以降の調査において詳細に検討する。

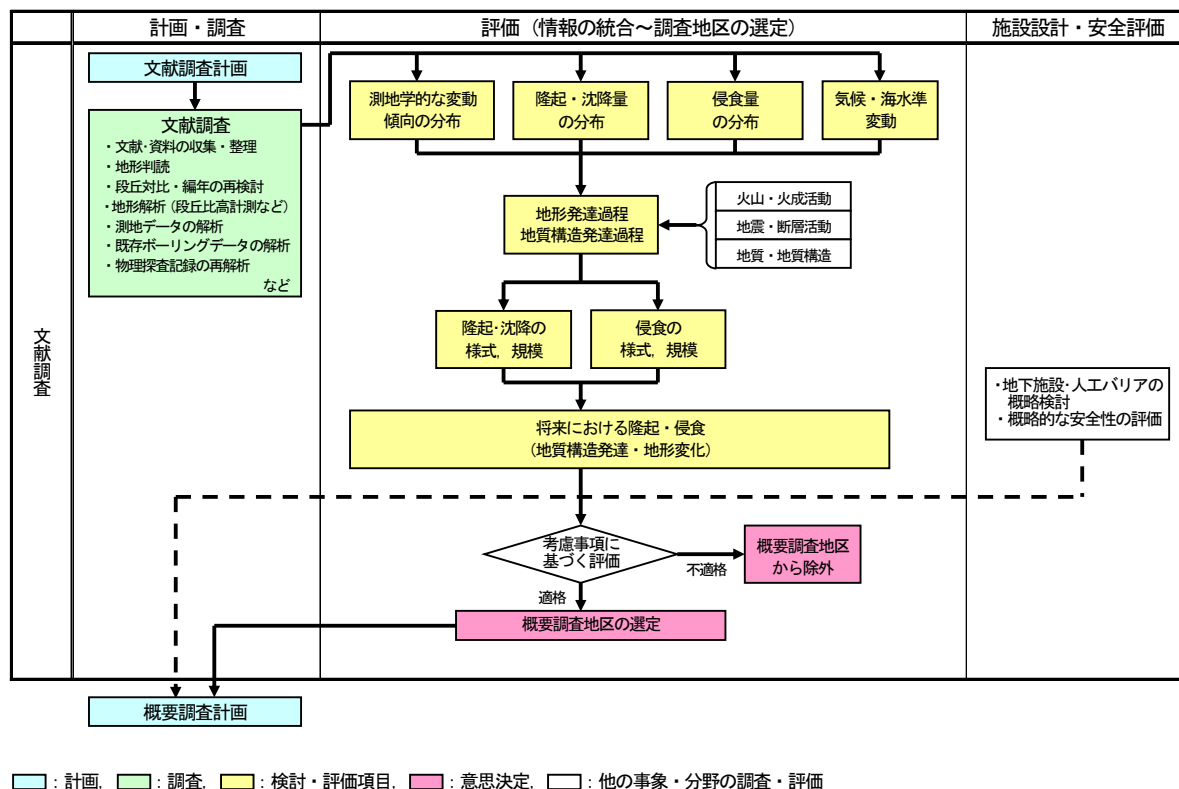


図 5.3.1-7 文献調査における隆起・侵食にかかわる調査・評価の流れ（検討例）

図 5.2.1-4 に示した調査・評価の流れのうち、文献調査における隆起・侵食にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

(3) 概要調査における調査・評価の流れ

(i) 目標

概要調査では、現地調査に基づき、概要調査地区において著しい隆起や侵食が生じる可能性について評価する。これらの情報を地下施設・人工バリアの概念設計や予備的な安全評価に提供し、その結果と合わせて現在検討中の「精密調査地区選定上の考慮事項」に対する適格性を評価し、精密調査地区を選定する。

(ii) 調査

概要調査における隆起・侵食にかかわる調査・評価の流れを図 5.3.1-8 に示す。また、主な調査手法とそれらの適用性について表 5.3.1-5、表 5.3.1-6 に示す。

概要調査では、文献調査により取得することができなかった情報（例えば、形成年代未詳の地形面の形成年代）を取得する。調査は概要調査地区および補足的に調査を行う範囲にまたがって実施し、これらの調査結果を総合的に解釈して評価を行う。このため、調査範囲の設定は、概要調査地区および補足的に調査を行う範囲の両者を合わせたものとして考える。この設定に当たっては、段丘を用いた隆起量評価、最大下刻量の見積り、さらに、隆起・沈降運動の様式、地形・地質構造発達過程の把握といった観点から、概要調査地区の近傍を流下する河川の河口から上流域までを包含し、既知の活断層などの存在を示唆する変動地形の分布、測地学的な隆起・沈降境界などに留意することが重要である（木方ほか, 2011）。従って、概要調査地区および補足的に調査を行う範囲には、

変動地形と隆起・沈降境界が含まれるように設定する。また、最終氷期の侵食深さの指標となる最終氷期以降の堆積物を対象とする場合には、主要河川の河口部において、河川に対してできるだけ直交する方向に測線を設定し物理探査を実施する。さらに、堆積物の確認のためのボーリング調査を実施する場合には、その最深部に到達することができるようにボーリング調査地点を選定する。

概要調査における隆起・侵食にかかわる調査は、基本的に地表調査において実施する。ここでは、隆起量や侵食量の指標となる段丘面の構成層やその形成年代に関する情報を取得するため、必要に応じて浅層のボーリング調査を実施する。その際には、同一段丘面内であっても段丘を構成する地質に多様性が認められる場合があること、ある段丘の形成年代の誤認がその地域の段丘全体の対比・編年に誤った評価をもたらす、隆起量評価の見直しが生じる可能性があることから、一つの段丘において地表踏査と浅層ボーリング調査を組み合わせ、複数個所で調査を実施する。

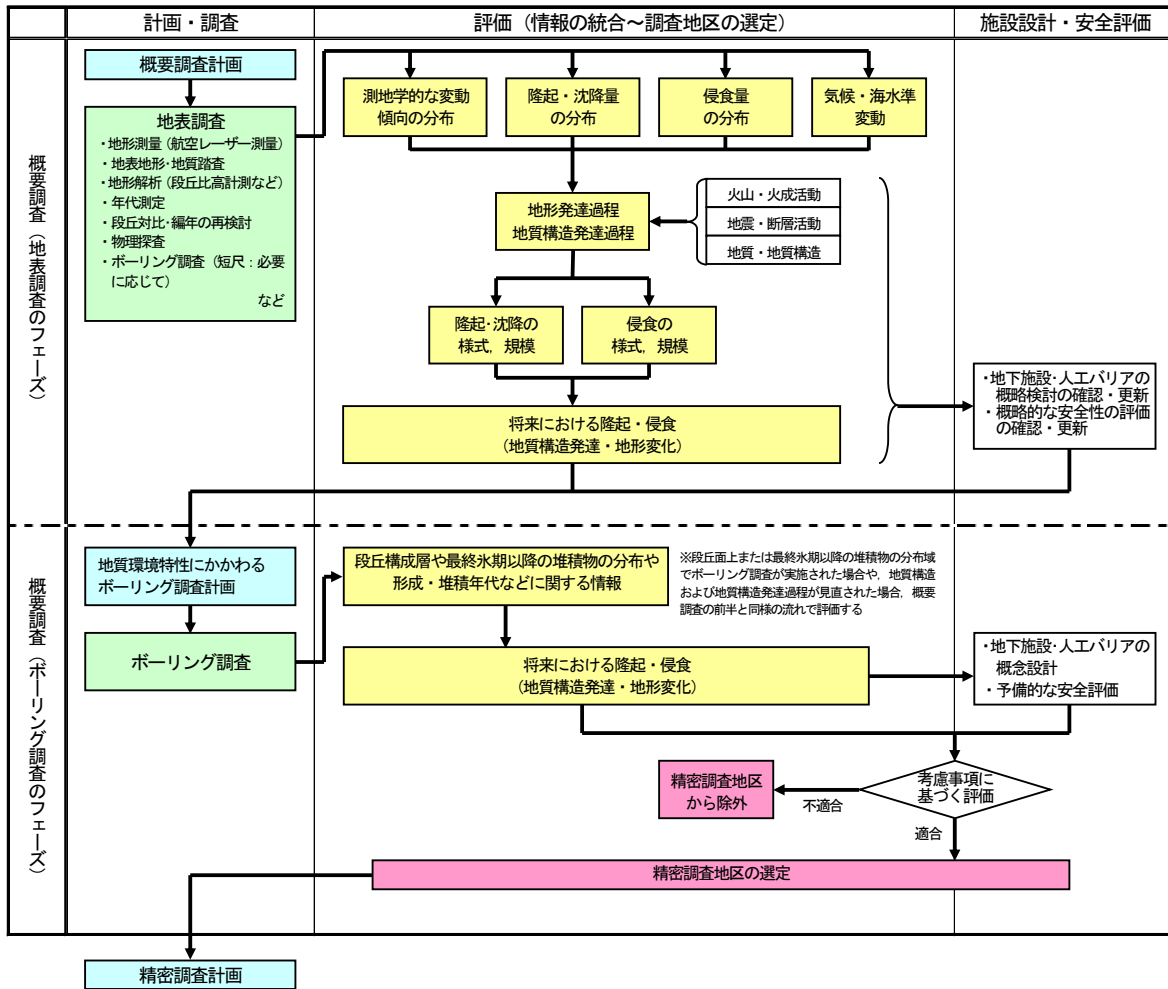
また、概要調査地区の地質環境特性にかかわるボーリング調査を、隆起量や侵食量の指標となる地形面上、または最終氷期以降の堆積物の分布域において実施する場合には、地表付近の堆積物の分布、形成年代、堆積環境などを、中・後期更新世の隆起量の指標となる情報、または最終氷期（海水準低下期）の侵食量の指標となる情報として取得する。

侵食については、最終氷期以降の堆積物の厚さを、最終氷期の侵食深さの指標とみなせることから、これを把握するための物理探査やボーリング調査などを必要に応じて実施する。

(iii) 評価

概要調査では、基本的には文献調査と評価事項が同じであること、概要調査地区だけではなく、補足的に調査を行う範囲における調査結果も含めて検討する必要があることから、(ii) に述べた調査により取得された情報に基づいて、文献調査と同様の流れで評価を行う。ただし、本段階では、海水準変動に伴う侵食基準面の低下、それに伴う地形変化、風化などを考慮し、将来にわたり地下施設が酸化的な雰囲気へ接近する可能性などについても検討する。以上の評価結果を、地下施設・人工バリアの概念設計や予備的な安全評価の検討（例えば、処分深度の設定や安全評価シナリオの構築）に資する情報として受け渡す。

概要調査に基づく評価結果、工学的対策および安全評価の結果を踏まえ、今後公表する「精密調査地区選定上の考慮事項」に照らして、事業期間中の安全確保および閉鎖後長期の安全確保の見通しを得て、精密調査地区を選定する。その際、例えば、地下深部への地下施設の設置を考慮しても、隆起・侵食により地下施設および廃棄体が露出したり、地下施設周辺の環境が酸化的な雰囲気へ変化することが明らかな場所および範囲は除外する。



□ : 計画, □ : 調査, □ : 検討・評価項目, □ : 意思決定, □ : 他の事象・分野の調査・評価

図 5.3.1-8 概要調査における隆起・侵食にかかわる調査・評価の流れ（検討例）

図 5.2.3-5 に示した概要調査の流れのうち、隆起・侵食にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

表 5.3.1-5 概要調査における隆起・沈降にかかわる主な調査手法

手法		取得される情報	検討内容	適用限界・精度・条件など	備 考
地形的な手法	海成段丘	更新世の海成段丘の分布・離水年代、旧汀線高度、海水面高度	・旧汀線高度または段丘面同士の比高と形成年代に基づき、過去から現在までの隆起量、平均隆起速度、変動の傾向を把握する。	適用条件：海成段丘分布域 対象期間：10 ⁴ ～10 ⁵ 年(更新世段丘) 10 ⁰ ～10 ³ 年(完新世段丘)	・海洋酸素同位体ステージ5eの海成段丘は、わが国の沿岸地域に広く分布する。 ・海成段丘の編年に対する信頼性と精度が重要である。 ・主な調査・研究事例として、小池・町田(2001)が挙げられる。
	河成段丘	河成段丘の分布・形成年代、河成段丘同士の比高		適用条件：河成段丘分布域 対象期間：10 ⁵ 年	・河成段丘は、わが国の内陸部に比較的多く分布する。 ・河成段丘の編年、特に海洋酸素同位体ステージ6段丘の認定に対して信頼性と精度が重要である。 ・主な調査・研究事例として、吉山・柳田(1995)、田力・池田(2005)、幡谷(2006a; 2006b)が挙げられる。
	山地高度	山地の平均高度・高度分散量	・隆起量と侵食量が平衡状態にあると仮定し、隆起速度のモデル計算により隆起速度を見積る。	対象期間：10 ⁶ 年	・Ohmori(1987)は、赤石山地における最大隆起速度を5～7mm/yと見積もっている。
	山地の地形的基準面	侵食小起伏面の分布・形成年代	・第四紀初期に日本列島が準平原であったとの仮定に基づき、侵食小起伏面の分布から隆起量を見積る。	対象期間：10 ⁶ 年	・評価の前提となる、準平原の認定、第三紀末の形成、第四紀以降の隆起という仮説にそれぞれ不確実性があり、それらに起因する見積りの不確実性がある。 ・主な調査・研究事例として、第四紀地殻変動グループ(1968)が挙げられる。
地質学的な手法	活断層の変位速度(鉛直成分)	活断層による変位量、平均変位速度	・活断層の周辺に分布する変位基準面などの比高と活動時期に基づき、変位量や平均変位速度を見積る。	対象期間：10 ³ ～10 ⁶ 年	・相対的な隆起・沈降量を示すが、段丘から見積られる隆起量などと組み合わせ、絶対的な隆起・沈降量を見積ることができる場合がある。 ・主な調査・研究事例として、活断層研究会(1991)、中田・今泉(2002)が挙げられる。
	特定の地層形成プロセス	前浜堆積物などの分布・堆積深度、形成年代	・形成時の堆積環境と年代が推定できる堆積面などを指標として、現在の分布標高、埋没深度、厚さなどを考慮して隆起・沈降量(速度)を見積る。	対象期間：10 ³ ～10 ⁶ 年	・原理的には、地層の新旧を問わないが、評価結果は、指標とする地層の形成以後のすべての変動が積分されたものである点に留意する必要がある。 ・主な調査・研究事例として、藤原ほか(1996; 1997)、白井・阿部(2001)が挙げられる。
	地質断面(特定の堆積面)	主に新第三紀～更新世の堆積岩の地層境界面の分布、堆積深度、厚さ(埋没深度)		対象期間：10 ⁵ ～10 ⁶ 年	・盆地での沈降量/速度の見積りに有効である。 ・堆積層の年代決定精度が良くないため、分解能は必ずしもよくない。 ・主な調査・研究事例として、小池・町田(2001)が挙げられる。
	特定の生物遺骸	離水したカキ礁などの潮位を示す生物遺骸の分布	・地震発生前の潮位を示す生物遺骸の分布に基づき、地震に伴う隆起量を把握する。	対象期間：地震隆起時	・2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震に伴う隆起量の見積りに使われている。
	花崗岩や貫入岩などの冷却史	花崗岩や貫入岩などの形成年代(FT法、U-Th)/He法)、形成深度、現在の分布高度	・過去と現在の地温勾配が同じであるとの仮定のもと、形成温度から形成時の深度を推定し、形成年代と分布高度から隆起量を見積る。	対象期間：10 ⁶ ～10 ⁷ 年	・数100万年オーダーの長期間における隆起・沈降量の積分値が把握できる。 ・主な調査・研究事例として、田中ほか(1992)、原山(1994)、伊藤(2006)が挙げられる。
測地学的な手法	GPS観測	基準点変動量(鉛直)	・観測データに基づき、変動量を把握する。	対象期間：数ヶ月～10年	・鉛直変位の精度は水準測量より低いのが、リアルタイムで変動を把握することができる。 ・地震予知連絡会報で随時公表されている。
	水準測量	一等水準点などの変動量		検出精度：0.1mm 対象期間：10 ⁰ ～10 ² 年	・測地学的な手法において検出精度が最も高いが、適用できる場所が限られている。 ・主な調査・研究事例として、壇原(1971)、国見ほか(2001)が挙げられる。
	潮位観測	潮位観測(変動)記録		対象期間：1日～10 ² 年	・海水量増減の影響もあることに留意する必要がある。 ・地震予知連絡会報で随時公表されている。
	干渉合成開口レーダー(InSAR)	衛星画像、干渉SAR画像(変動パターン)		・変動前後の合成開口レーダーのデータを干渉解析することにより鉛直変動量、変動パターンを把握する。	対象期間：数ヶ月～10年

表 5.3.1-6 概要調査における侵食にかかわる主な調査手法

手法	取得される情報	検討内容	適用限界・精度・条件など	備考
地形学的 手法	海や遷急点の後退	後退距離、形成時期、地質分布	・波食台の幅、滝の後退量などの計測データと、その期間に基づき、侵食速度を見積る。	対象期間：数ヶ月～10 ⁴ 年 ・主な調査・研究事例として、早川・松倉（2003）が挙げられる。
	段丘面の侵食	開析谷の形状（深さ、体積）、段丘面の形成年代	・形成年代が特定されている段丘面を開析する谷の計測データに基づき、侵食速度、侵食量を見積る。	対象期間：10 ⁴ ～10 ⁶ 年 ・海成段丘について検討された事例（藤原ほか、2005b）がある。
	沖積錐などの体積	堆積物の分布・体積、流域面積、堆積年代	・沖積錐や扇状地などの体積、形成年代、流域面積に基づき、侵食速度を見積る。	対象期間：10 ⁴ ～10 ⁶ 年 ・主な調査・研究事例として、磯ほか（1980）が挙げられる。
	成層火山の開析度	開析谷の形状（深さ、体積）、段丘面の形成年代	・形成年代が特定されている溶岩台地や火砕流面などを開析する谷の計測データに基づき、侵食速度、侵食量を見積る。	対象期間：10 ⁴ ～10 ⁶ 年 ・主な調査・研究事例として、鈴木（1969）が挙げられる。
	高度分散量などの山地地形	山地の平均高度・高度分散量	・隆起量と侵食量が平衡状態にあると仮定し、隆起速度のモデル計算により侵食速度を見積る。	対象期間：10 ⁶ 年 ・主な調査・研究事例として、Ohmori（1987）が挙げられる。
	隆起量と侵食量の釣り合い	河床縦断勾配、段丘分布、埋没谷の分布	・現在および過去の河床縦断勾配などに基づき、間氷期における埋積量、氷期における侵食量を把握する。	適用条件：現在および過去の河床勾配が平衡状態に達していること 対象期間：10 ⁴ ～10 ⁵ 年 ・高木ほか（2000）によれば、内陸部では、第四紀後期の隆起量と侵食量がほぼ釣り合うとされる。
	地形変化シミュレーション	地形変化量	・地形断面、地形計測などの情報に基づき、地形変化過程や地形変化量などを把握し、地形変化シミュレーション技術や外挿法に基づく地形変化予測手法により、将来の地形を予測する。	対象期間：10 ⁴ ～10 ⁵ 年 ・シミュレーション結果である将来の地形変化の検証方法に課題がある。 ・主な調査・研究事例として、Nogami et al.（2003）、JNC（2005a）、Sasaki et al.（2009）が挙げられる。
地質学的 手法	ダム堆砂	ダム堆砂量、堆砂期間、集水面積	・ダム堆砂量とその堆砂期間に基づき、侵食速度を見積る。また、侵食速度と基準高度分散量の相関関係から、基準高度分散量に基づき、侵食速度を推定する。	対象期間：10 ² ～5×10 ¹ 年 ・主な調査・研究事例として、藤原ほか（1999）が挙げられる。
	盆地や湖の堆積物	堆積物の分布・体積、流域面積、堆積年代	・盆地や湖に分布する堆積物の体積や流域面積などに基づき、後背地の侵食速度を見積る。	対象期間：10 ⁴ ～10 ⁶ 年 ・主な調査・研究事例として、阿子島（1983）が挙げられる。
	沖積層の基底深度	沖積層の分布、堆積年代	・沖積層の分布深度に基づき、海退期における最大下刻量を把握する。	対象期間：10 ⁴ 年 ・海退時における現在の海岸線付近の最大下刻量を見積ることができる。 ・主な調査・研究事例として、鳥越ほか（2002）が挙げられる。
	花崗岩、貫入岩の冷却史	花崗岩や貫入岩などの形成年代（FT法、(U-Th)/He法）、形成深度、現在の分布高度	・過去と現在の地温勾配が同じであるとの仮定のもと、形成温度から形成時の深度を推定し、形成年代、分布高度などから侵食量（速度）を見積る。	対象期間：10 ⁶ ～10 ⁷ 年 ・数100万年オーダーの長期間における侵食量の積分値が把握できる。 ・主な調査・研究事例として、田中ほか（1992）、原山（1994）、伊藤（2006）が挙げられる。
	シリカ鉱物の分布深度	形成時期、形成深度、現在の分布高度	・シリカ鉱物の形成深度と現在の分布高度などから、侵食量を見積る。	適用条件：火山や熱水の影響を受けていないこと 対象期間：10 ⁶ 年 ・古地温勾配、古地表温度の推定方法に課題がある。 ・主な調査・研究事例として、高橋ほか（2005）が挙げられる。
	宇宙線生成核種	宇宙線生成核種濃度、侵食速度、暴露年代	・宇宙線照射によって石英中に生成された核種の濃度分析結果に基づき、侵食速度や暴露年代を推定する。	適用条件：石英を含む岩種が分布し、侵食速度が一定であると推定される地域 対象期間：10 ⁴ ～10 ⁶ 年 ・オーストラリアの花崗岩分布域などにおける適用事例がある。 ・わが国における適用事例は少ない（例えば、若狭ほか、2004；Matsushi et al., 2006；Shiroya et al., 2010）。

5.3.2 地質環境特性にかかわる調査・評価

ここでは、自然現象の著しい影響を回避した上で、処分施設を設置しようとする地層および周辺の地質環境特性を把握する調査・評価について述べる。

なお、「概要調査地区選定上の考慮事項」のうち法定要件に関する事項として設定された、「第四紀の未固結堆積物」、「鉱物資源」については、地質分布と関連性があるため、これらの項目にかかわる調査・評価についても、本節において述べる。また、5.1.1.1 に述べたとおり、非火山性の熱水については、地下水の流動特性および化学特性の調査・評価の一環として考慮する。

本節では、5.3.2.1 に調査・評価の基本的な考え方、文献調査および概要調査における調査・評価の流れ、5.3.2.2 に施工・操業安全にかかわる調査・評価について述べる。

5.3.2.1 地質環境特性

(1) 調査・評価の基本的な考え方

地質環境特性の調査・評価の目的は、5.2.1.1 に述べたとおり、自然現象の著しい影響を回避した領域において、地層処分システムの観点からより適切と判断される以下の条件を有する場所を選定するために、地質環境の諸特性を把握し、それらの条件が長期にわたって維持される可能性が高いことを示すことにある。

- ・ 坑道掘削や人工バリアの構築など、工学的対策の観点からより適切と判断される条件（力学的に安定であること、施設を通過する地下水流量が小さいことなど）
- ・ 人工バリアや天然バリアの放射性物質の移行抑制など、地層処分システムの閉鎖後長期の安全性にの観点からより適切と判断される条件（還元性、地下水流速が遅い、放射性物質の移行距離が長い、擾乱に対する緩衝能力あるいは回復力を有するなど）

そのためには、重要な地質環境特性を直接把握し、それらの空間的な分布と長期的な変化を推定するための情報を取得する必要がある。

地層処分にとって重要な地質環境特性は、5.1.2.1 に述べたように、地下水流動特性、地下水化学特性、岩盤特性（力学特性、熱特性など）、物質移行特性などである。また、これらの空間分布と長期変遷の場を形成している重要な基盤情報として、地質・地質構造の特性が挙げられる。これらは、それぞれが独立しているのではなく相互に密接に関連していることから、各特性の相互関係とその整合性を踏まえた評価が重要である。そのため、NUMO は、各段階の調査において取得した情報を統合・解釈し、地質環境モデルを構築（更新）するとともに、それらを適切に活用して工学的対策や安全評価にかかわる検討を行い、その結果を地質環境特性の評価にフィードバックし、次段階の調査に反映していく。

地質環境の特性は、過去から現在に至る自然現象の相互作用により形成されてきていることから、地質環境特性の把握と形成過程の理解を踏まえ、過去からの変遷の理解に基づき将来の長期変遷を予測・評価することが重要である。

概要調査計画の立案においては、文献調査で構築した初期的な地質環境モデルの不確実性を低減させるために、文献調査で取得できていない情報や、工学的対策や安全評価の観点から重要度・優先順位の高い地質環境特性にかかわる情報を効率的に取得することが重要である。その際には、工学的対策や安全評価の観点（例えば、地下施設設置位置の設定（6.3.3.1 参照）、坑道仕様の設定（6.3.3.2

(1) (i), 地下施設レイアウトの設定 (6.3.3.3 参照), 安全評価のシナリオ構築 (7.2.1 参照) から必要とされる情報を取得することが求められる。

地質環境特性にかかわる包括的かつ体系的な調査・評価については, 結晶質岩を対象にした事例 (三枝ほか, 2007), 堆積岩を対象とした事例 (太田ほか, 2007), 沿岸域を対象とした基盤研究開発によって得られた知見 (Ota et al., 2010; Amano et al., 2010; Niizato et al., 2010) を通じて得られた成果 (例えば, 体系的な調査・評価技術および調査・評価に係るノウハウ) を踏まえて進める。また NUMO では, 調査・評価技術の体系化検討を踏まえ, 電中研・横須賀地区において, 電中研との共同研究により概要調査技術 (特に物理探査とボーリング調査) の実証 (5.4.2 参照) を行い, その適用性を確認していることから, ここで得られた成果も有効に活用する。

(2) 文献調査における調査・評価の流れ

(i) 目標

文献調査では, 処分施設を設置しようとする領域における第四紀の未固結堆積物の有無, 当該地層における経済的価値の高い鉱物資源の有無を確認する。さらに, 地層処分にとって重要な地質環境特性について, 人工バリアにとって適切な設置環境であること, 地質環境が天然バリアとして機能すること, それらが長期的に維持されることの見通しを得る。これらの結果に基づき, 「概要調査地区選定上の考慮事項」の法定要件に関する事項 (第四紀の未固結堆積物, 鉱物資源) への適格性を評価する。さらに, 地下施設・人工バリアの概略検討および概略的な安全性の評価の結果を踏まえて, 概要調査地区としての特性を総合的に評価する。

(ii) 調査

文献調査における地質環境特性にかかわる調査・評価の流れを, 図 5.3.2-1 に示す。文献調査では, 文献・資料の収集・整理, 空中写真判読, 衛星画像解析, 地形判読のほか, 必要に応じて既存の物理探査データの再解析を実施し, 以下に示す情報を取得する。

- ・ 第四紀の未固結堆積物の分布
- ・ 採掘に値する経済的に価値が高い鉱物資源の分布 (採掘権の有無, 経済的に価値の高いと判断できる公的な記録)
- ・ 地質・地質構造: 岩体および断層などの不連続構造の形状・規模, 岩盤の割れ目・風化・変質の状況など
- ・ 地下水流動特性 (非火山性熱水を含む): 涵養域および流出域の推定, 降水量・河川流量・地下水位などの表層水理, 地形, 地下水の流量・流速・動水勾配, 岩盤の透水性など
- ・ 地下水化学特性 (非火山性熱水を含む): 水温, pH, 電気伝導度, 酸化還元性, 水質など
- ・ 岩盤特性: 岩盤の強度, 初期応力, 変形の状況, 熱物性, 地温勾配など
- ・ 物質移行特性: 物質移行経路となる構造の分布や性状, 鉱物学的特性, 分散, 希釈, 収着, マトリックス拡散の特性など

(iii) 評価

(ii) に述べた調査により取得された情報のうち, 「概要調査地区選定上の考慮事項」として, まず第四紀の未固結堆積物の分布および鉱物資源に関する情報について統合・整理する。その結果に

に基づき、処分施設を設置しようとする地層が第四紀の未固結堆積物である地域、その採掘が経済的に価値の高い鉱物資源が存在する地域を含まないように概要調査地区を選定する。

次に、取得した情報に基づき、各特性について情報の集約・解釈を行い、地質構造発達過程の編纂を行うとともに、地質環境特性とその長期変遷にかかわる概念化を図り、それを踏まえて広域的な地質環境モデルを構築する（地質環境モデルの定義や役割は5.2.1.2（2）参照）。

地質・地質構造について、文献調査では既往の地質図幅などの地表付近の地質・地質構造に関する情報が主体になると考えられる。地下水の流動特性や化学特性、岩盤の物理・力学・熱特性については、当該サイトおよびその周辺を対象とした文献情報や既存のデータベース（土木学会、2006b など）に基づき評価する。この際、非火山性の熱水の存在とその範囲などについても検討する。当該サイトおよびその周辺を対象としたデータが得られない場合、類似する地質環境において取得されたデータに基づいて推定することとなる。地下水化学特性については、オーバーパックの腐食速度に影響する酸化還元電位、緩衝材の性能に影響する海水起源の地下水分布やガラスの溶解に影響するpHなどのパラメータなどを評価項目として、取得された情報に基づきどのような水質が分布するか評価する。ただし、当該サイトにおいて十分な情報が得られない場合には、類似した地質環境における事例などをもとに推定する。岩盤の物理・力学特性については、地下空洞の安定性に関連して、処分場の設計・施工性、地下空洞の形状および建設時の施工性、支保形状など処分場の設計や地下空洞での作業性に係るパラメータ取得が重要である。また、岩盤の熱特性は、坑道内での作業性、緩衝材の変質に影響することから、当該地区の地温勾配は地温勾配図（矢野ほか、1999；田中ほか、2004）などを参考にして、取得した文献情報から地下深部の温度分布状況の評価する。物質移行特性については、主要な物質移行経路となる地質構造、大規模な断層などの地質構造を抽出・評価することになるため、水理地質構造と関連付けて評価を行う。また、上述のデータに加えて、例えば、断層周辺の岩盤における力学強度、透水性やその分布幅などについては、既往の資源探査やトンネルなどの地下構造物の調査・建設時に取得された情報も加えて評価する。これらの評価において、地質環境モデルに含まれる不確実性の種類とその幅（大きさ）を特定する。さらに、5.3.1に述べた自然現象にかかわる調査・評価の結果を踏まえ、地質構造発達過程を解釈し、古水理地質学的アプローチによる地質環境の変化の予測・評価も適用し、現在の地質環境の状態がどのように変化するか検討・評価する。特に、「地層の著しい変動」に該当しない程度の隆起・侵食による地形変化や、汎世界的な気候・海水準変動に伴う地下水流動状況の変化や地下水化学特性の変化、断層活動に伴う周辺岩盤の力学的変化や透水性の変化などについて検討する。

これらの評価の結果を地下施設・人工バリアの概略検討や概略的な安全性の評価に対して情報を提供し、さらに、概略的な処分施設の構築結果、概略的な安全性の評価結果をもとに、概要調査地区としての適格性を総合的に評価する。文献調査により、複数の概要調査候補地がある場合は、ここに挙げた地質環境特性について相対評価を行い、処分場としてより適切と判断される場所を概要調査地区として選定することも検討する。

地質環境モデルは、モデル構築時まで取得された情報をもとに構築された地質環境の概念モデルをベースとして、地質環境の各特性の分布や性状を定量的に可視化したものであり、地質環境の各特性の分布を支配する幾何形状がベースとなる。そこで、水理地質構造モデルや岩盤特性モデルの構築に先立ち、幾何形状要素に地質環境特性を包含するための地質構造モデルを構築する（モデル構築の流れは、図5.2.1-1参照）。

具体的には、取得された地質学的な情報（岩種・岩相、層序、割れ目分布、破碎性状、風化程度、

変質程度など)に基づいて、水理地質構造、岩盤特性(力学特性、熱特性など)、地下水の地化学モデルを構築する上で重要と考えられる地質構造要素(岩体または地層、断層など)の分類・特徴付けを行い、それらの形成プロセスなども考慮して地質構造の概念モデルを構築する。次に、地質構造の概念モデルをベースとして、各地質構造要素の三次元分布を定量的に表現(可視化)した地質構造モデルを構築する。なお、各地質構造要素の分布は、取得した情報をベースとして、内挿または外挿により推定する。

地質環境モデルのうち、水理地質構造モデルの構築に当たっては、まず、取得した水理学的情報(透水係数など)と上述した地質構造要素との関係を勘案して水理地質区分を行い、水理地質構造の概念モデルを構築する。次に、各水理地質区分の地下水流動の場の概念(多孔質媒体、亀裂性媒体、多孔質媒体と亀裂性媒体の両方など)を考慮した上で、水理地質構造モデルの空間スケールや解像度に応じた補間方法を採用し、代表的な水理特性を設定する。それを踏まえて、各水理地質区分の水理特性の三次元分布を表現した水理地質構造モデルを構築する。また、地形状況、ポテンシャル分布、水文状況などの情報に基づいて、地下水の涵養域と流出域を推定して、当該サイトの地下水流動にかかわる境界条件を整理する。

地下水の地化学モデルの構築に当たっては、取得した地下水の水質に関する情報に基づく水質区分を行う。その際には、水理地質構造モデルを利用した地下水流動解析の結果や地下水流動の概念モデルと比較し、それらとの整合性について検討することが重要である。また、文献情報により可能である場合には、地下水の起源、岩石-水反応などを考慮する。このような検討において、地質・地質構造、地下水流動特性および地下水化学特性にかかわる概念モデルに不整合が認められる場合には、地質・地質構造の解釈に加えて、地下水流動解析における境界条件、水理地質区分やその水理特性の設定など再検討してモデルを再構築する。

岩盤特性モデルの構築に当たっては、まず、取得した物性値などの情報と地質構造要素の関係を踏まえて岩盤区分を行い、それらの特徴を記述した岩盤特性の概念モデルを構築する。次に、これに基づき、各岩盤区分の境界や物性分布を表現した岩盤特性モデルを構築する。各岩盤区分の特性については、空間スケールや解像度に応じた補間方法(例えば、クリギング法など)を採用する。

また、地質環境モデルに含まれる不確実性の低減および工学的対策や安全評価からの要求も考慮し、閉鎖後長期の安全性を確保する上で特に重要な構造・特性・現象を特定し、地質環境モデルを通じて概要調査において明らかにすべき事項、概要調査における構造・特性・現象に関するデータ取得の優先度などを明確にし、それらを概要調査計画に反映する。

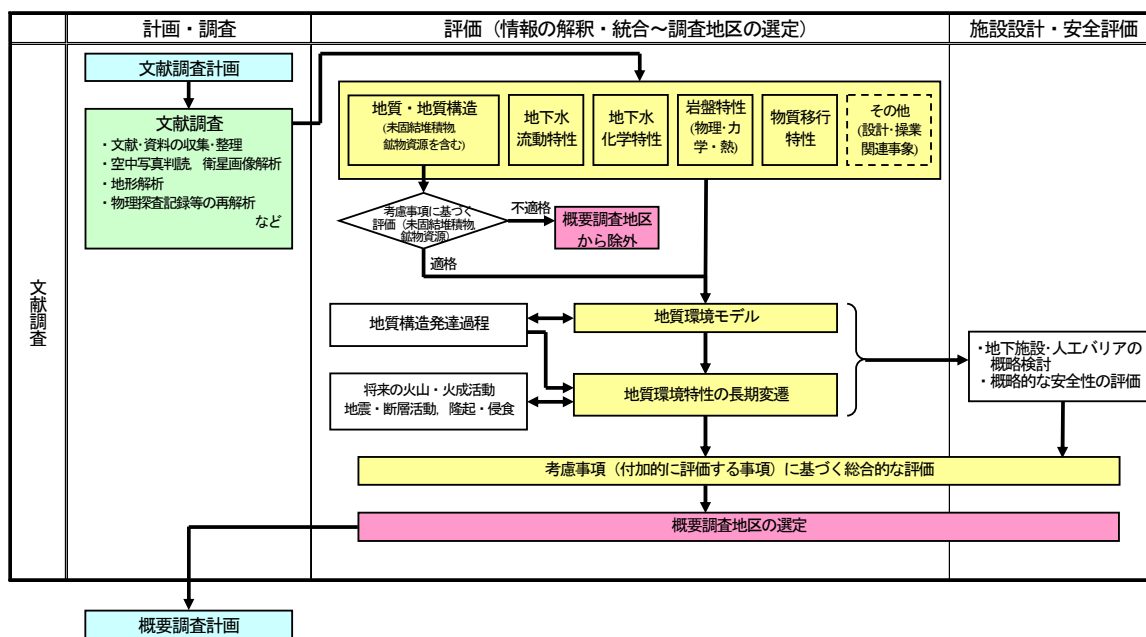


図 5.3.2-1 文献調査における地質環境特性にかかわる調査・評価の流れ (検討例)

わが国の多様な地質環境において、共通する情報の取得から各調査地区選定までの流れを例示したものである。図 5.2.1-4 に示した調査・評価の流れのうち、文献調査における地質環境特性にかかわる調査・評価の流れを抽出したものである。

(3) 概要調査における調査・評価の流れ

(i) 目標

概要調査では、文献調査による評価の結果を確認するとともに、現地調査データに基づき当該サイトの地質環境特性を把握するための調査・評価を行う。その結果、地質環境が天然バリアとして機能するとともに人工バリアにとって適切な設置環境であり、それらが長期的に維持されることにより閉鎖後長期の安全確保の見通しを得ること、さらに、事業期間中の施工性・安全性の確保の見通しを得ることを目標とする。

具体的には、調査・評価の結果を、地下施設・人工バリアの概念設計や、予備的な安全評価に対して情報を提供し、それらの結果と合わせて、法定要件に基づく観点から精密調査地区としての適格性を評価する。このうち、地下施設の建設・操業・閉鎖の観点からは、地質・地質構造（岩種、断層、褶曲など）、地下水流動特性（透水性、地下水の水流、水みちの分布など）、地下水化学特性（水温、pH、水質など）、岩盤特性（岩盤の強度、地温勾配など）を対象に評価を行う。また、地層処分システムへの影響の観点からは、地質・地質構造（岩種、断層など）、地下水流動特性（透水性、水みちなど）、地下水化学特性（水温、酸化還元状態、pH、水質など）を対象に評価を行う。これらの結果に基づき、「精密調査地区選定上の考慮事項」として現在検討している要件、例えば、地山の強度が著しく小さく、処分坑道を安全かつ合理的（現実的な対策の範囲内）に掘削することが困難であると判断される場所や、大規模な破碎帯などの高透水性の構造が存在し、地下施設のもつバリア性能に著しい影響を及ぼす恐れがある場所を除外するための要件への適格性を評価する。さらに、地下施設・人工バリアの概念設計や予備的な安全評価の結果を踏まえて、精密調査地区としての特性を評価する。

(ii) 調査

概要調査における地質環境特性にかかわる調査・評価の流れを、図 5.3.2-2 に示す。まず、概要調査地区内において、地表踏査や物理探査（空中、地表、海上）などの地表調査を実施する。また、地質構造モデルの信頼性の向上や地質構造発達過程の検討のために、必要に応じて補足的に調査を行う範囲を設定し、地表調査を実施する場合もある。

地表踏査では、地質環境の理解の基本となる地質・地質構造、ならびに地下水の移行経路となる割れ目（節理や小断層）、破碎帯、不整合面、岩石中の間隙構造や変形組織などのデータを取得する。また、地下水流動特性および地球化学特性の観点から、概要調査地区の地下水の涵養域と流出域を設定し、水収支に関する水文調査、表層水や地下水の水質や年代分析を実施する。さらに、露頭の岩石試料を収集し、岩盤の物理・力学・熱特性に関するデータを取得する。

概要調査地区において実施する物理探査測線の設定では、応募区域およびその周辺の地下深部の地質構造を把握できるような配置とし、測線間隔は、調査対象地域における地質分布、地形、人工構造物、もし海域を含む場合は沿岸域の地理的条件、海底地形、そして応募区域との位置関係を考慮して設定する（図 5.3.2-3）。物理探査の探査深度は概要調査地区の地質、地理的条件、処分場の設置深度などに密接に関係するため、一概には設定できないが、各特性の分布やプロセスの理解に必要な大規模な地質構造を把握するために、概ね処分場を包含する地下水流動解析の範囲を調査対象とする。概要調査地区が沿岸域に位置し、調査対象領域に海域が含まれる場合には、海底地形測量、物理探査、海底試料採取などを実施し、地質構造、地下水流動特性、地下水化学特性などに関する情報を取得する。そのうち、海底地形測量では、サイドスキャンソナーなどの音響システムにより海底地形を面的に把握するとともに、サブボトムプロファイラーも併用して海底堆積物の極浅部構造も併せて取得する。また、沿岸域に特化した物理探査としては、三次元音波探査（佐伯ほか、2006；朴ほか、2008 など）や海底電磁探査（吉村ほか、2006a など）などがあり、調査の必要性に応じて適用を検討する。なお、海底堆積物には、過去の気候・海水準変動に関する情報が含まれることがあるため、試料採取では堆積状態をできるだけ乱さない状態で取得できるピストンコアリングなどの手法を適用する。なお、この段階では、各特性の分布やプロセスの理解に必要な大規模な地質構造を把握し、そのうち重要なものはボーリング調査を通じて取得する。

ボーリング調査は、段階的な調査・評価のアプローチに従い、基本的には地表調査の結果を踏まえて実施する。しかしながら、当該サイトの条件によっては、地表調査の段階に物理探査と組み合わせ実施するなど、柔軟に対応する場合もある。ボーリング調査地点の選定では、応募区域およびその周辺において、地質・地質構造、岩盤の水理特性、地下水化学特性、岩盤特性（力学特性、熱特性など）のうち不確実性が大きく、かつ工学的対策や安全評価の観点から重要度の高い地質構造や地質環境特性を把握できるように、地表踏査や物理探査の結果も考慮して位置を選定する。ただし、物理探査結果の解釈において、地質・地質構造との対比を行うことの優先度が高い場合には、物理探査測線上あるいはその近傍にボーリング調査地点を設定する。また、水理学的に重要となる構造や地下水流動に影響を及ぼす構造（断層など）の水理特性の把握なども考慮する。ボーリング孔の掘削深度は、処分場の設計や安全評価の観点で重要な地下深部のデータを取得するとともに、処分施設の想定設置深度、地下水流動状況、地下水質の分布を考慮して設定する。ボーリング調査では、コア観察、孔壁観察、物理検層、水理試験、コア試料の室内試験、地下水試料の分析などを行う。さらに、ボーリング孔を利用した単孔式物理探査（VSP、トモグラフィなど）も必要に応じて実施する。これらの調査により、以下に示す情報を取得する。

- ・ 地質・地質構造：未固結堆積物の分布，岩体および断層などの不連続構造の形状・規模，岩盤の割れ目・風化・変質の状況など
- ・ 地下水流動特性（非火山性熱水を含む）：涵養域および流出域の特定，降水量，河川流量・地下水位，蒸発散量などの表層水理，地形，地下水の流量・流速・動水勾配，岩盤の透水性，間隙水圧分布，高透水性構造の分布，塩淡境界の形状など
- ・ 地下水化学特性（非火山性熱水を含む）：水温，pH，電気伝導度，酸化還元電位，水質（溶存成分，同位体，溶存ガスなど），地下水中のコロイド・有機物・微生物など
- ・ 岩盤特性：岩盤の強度，初期地圧，変形の状況，時間依存挙動，地温勾配，岩石の熱特性など
- ・ 物質移行特性：物質移行経路となる初生構造要因（分断，変形，層理面，不整合面など）の構造の分布や性状，鉱物学的特性，分散・希釈・収着・マトリックス拡散特性など

調査終了後のボーリング孔については，初期ベースラインを理解するための水位，水圧，水質などのモニタリング孔として利用することも検討する。

(iii) 評価

(ii) に述べた調査により取得された情報に基づき，文献調査結果の妥当性を確認するとともに，概要調査地区内の地質環境特性とその長期変遷をより詳細に評価し，文献調査により構築された地質環境モデルを更新する。また，候補母岩を含むスケール（広域的な地質環境モデルより一回り小さい空間スケール）の地質環境モデルを作成する。なお，工学的対策，安全評価と連携して検討する候補母岩の選定については，8.3.5 に述べる。

概要調査を二つのフェーズに分けて実施する場合，前半の地表調査のフェーズ終了時には，地表調査により取得された情報に基づき，広域的な地質環境モデルを更新するとともに，地質構造発達過程などを見直し，地下施設の概略検討や概略的な安全性の確認を行う。これらの結果や，更新された地質環境モデルの不確実性，工学的対策・安全評価側からの要求を踏まえ，ボーリング調査の計画を立案する。

後半のボーリング調査のフェーズ終了時には，ボーリング調査によって取得された情報を加えて，地質環境特性とその長期変遷について解釈を行い，地質環境モデルを更新するとともに，地質構造発達過程を見直すことにより，候補母岩を包含するスケールの地質環境モデルを構築する。ボーリング調査のフェーズ終了時には，地質・地質構造に関する情報だけでなく，岩盤の水理特性，地下水流動特性，地下水化学特性，岩盤特性（力学特性，熱特性など），物質移行特性などに関する情報も網羅的に取得されるため，地質環境の概念モデルや地質環境モデルの更新においては，それぞれの関連性を考慮し，整合的な解釈を図る。

その際，地下水流動解析などの解析結果と実測データの比較を行うなどして，各モデルの整合性を確認し，整合性がとれない場合にはその要因を特定し，次の段階の調査計画に反映する。

岩盤中における物質の移行経路となり得る地質構造（粒子間隙，層理面や片理面沿いに形成される割れ目，節理，断層など）は，遮水性を示すこともあるため，その性状に注意して評価する（原環センター，2006；中俣ほか，2007）。また，岩盤中での物質移行を遅延する現象であるマトリックス拡散や収着については，国内外の地下研究施設における原位置試験（例えば，Ota et al., 1999；Ota et al., 2003；Alexander et al., 2009 など）や室内実験などを通じて現象・挙動の理解に関する研究が進

められている（例えば、吉田ほか，2002；栃木ほか，2007）。概要調査の段階では，その地質環境下においてマトリクス拡散や収着が生じるかどうか，既往の研究事例などを踏まえてその影響の程度を検討していく。これらの検討に必要な情報を地下水試料やボーリングコア試料を用いた分析などにより取得し，必要に応じて物質移行特性にかかわるボーリング孔を中心とした概念モデルの構築を行う。

地下水中のコロイド，有機物，微生物が物質移行に対して及ぼす影響についても原位置試験や室内試験を通じて研究開発が進められている（例えば，村上ほか，2003；黒澤ほか，2004；Yoshida and Suzuki, 2006；上岡，2007；SKB，2009など）。このため，概要調査の段階では，地下水に含まれるコロイド，有機物，微生物の種類やその量について調査した上で，その条件下においてどのような現象や影響があるか，その影響の程度を検討する。

さらに，5.3.1 に述べた自然現象にかかわる調査・評価の結果，地質構造発達過程や古水理地質学的アプローチによる地質環境の変化の予測・評価，例えば，堆積岩中に存在し，その生成と変遷に関連した地下水の性状などを踏まえ，現在の地質環境の状態がどのように変化するかというような検討を行い評価する。特に，「地層の著しい変動」に該当しない程度の隆起・侵食による地形変化や，汎世界的な気候・海水準変動，断層活動による地域的な隆起・沈降による変動によって生じる塩淡水境界の移動や動水勾配の変化に対しても，それがどのように地下水流動特性や地下深部の地球化学的環境に影響するか，さらに，これらが周辺岩盤の力学的変化や透水性にどのように影響するかなどについて検討する。

これらの地質環境特性に関する情報を地下施設・人工バリアの概念設計や予備的な安全評価に提供し，それらの結果と合わせて，現在検討中の「精密調査地区選定上の考慮事項」の法定要件，例えば，大規模な破砕帯などの高透水性の構造の存在や，その著しい影響などに関する要件に対する適格性を評価する。さらに，次の二つの観点から，総合的な評価を行う。

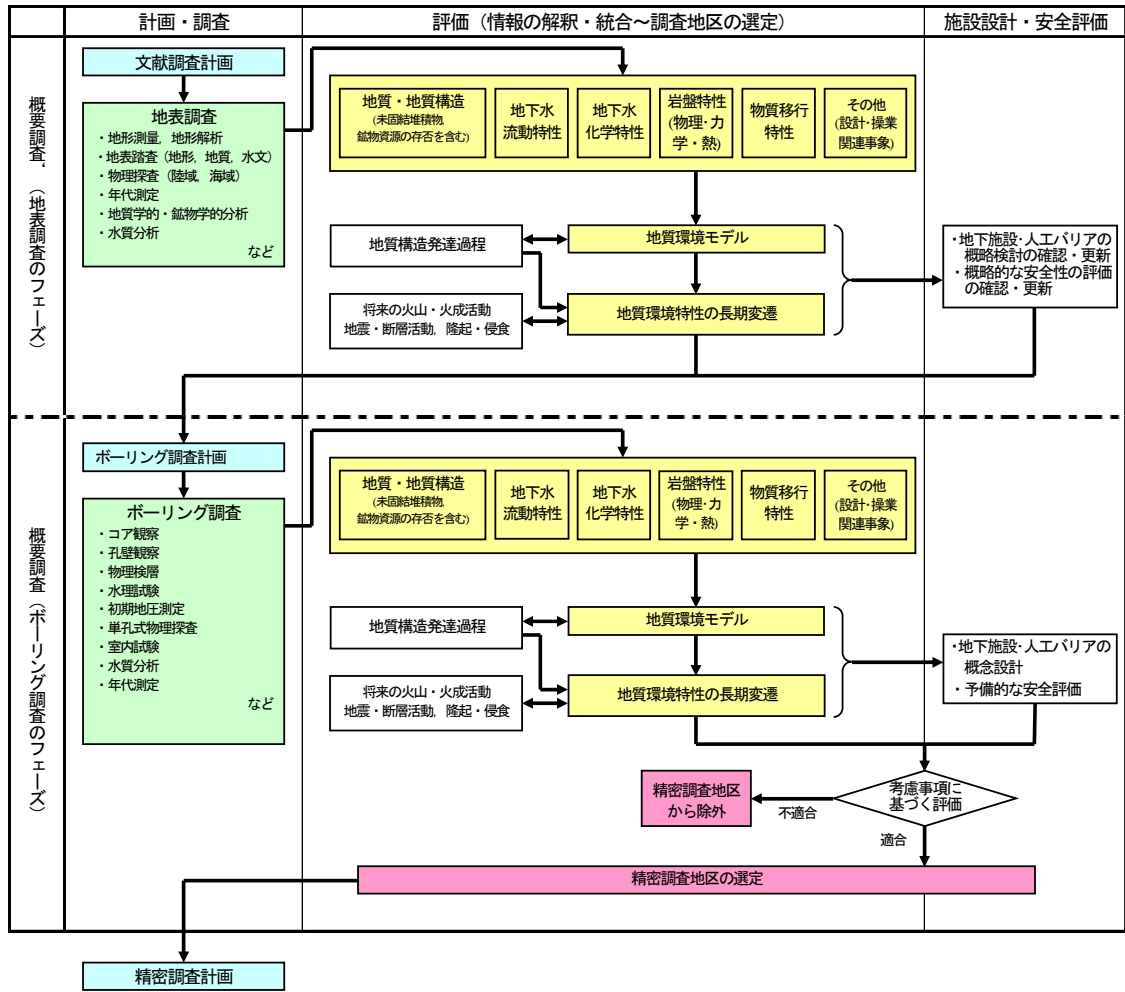
- ① 地下施設の建設・操業・閉鎖の観点
- ② 地層処分システムへの影響の観点

①については，建設・操業時の安全性から見た地下水の湧水，空洞掘削に伴い変化する可能性のある地下水流動特性（透水性，地下水の水流，水みちの分布など）や地下水化学特性（水温，pH，水質など），処分場のレイアウト，空洞掘削時の安定性，空洞内での作業性および空洞の形状や支保形態に係る岩盤特性（岩盤の強度，亀裂分布，断層・破砕帯などの脆弱部，地温勾配など）に基づき総合的に評価し判断する。

②については，地質・地質構造（岩種，断層など），地下水流動特性（透水性，水みちなど）および地下水化学特性（水温，酸化還元状態，pH，水質など）に基づき総合的に評価し判断する。

以上の全ての評価結果に基づき，事業期間中の安全確保および閉鎖後長期の安全確保の見通しを得て，精密調査地区を選定する。

また，地質環境モデルに含まれる不確実性の低減や信頼性の向上，および工学的対策や安全評価からの要求も考慮し，閉鎖後長期の安全性を確保する上で特に重要な構造・特性・現象を特定し，精密調査において明らかにすべき事項やそれらの優先度などを明確にし，精密調査計画に反映させる。



□ : 計画, □ : 調査, □ : 検討・評価項目, □ : 意思決定, □ : 他の事象・分野の調査・評価

図 5.3.2-2 概要調査における地質環境特性にかかわる調査・評価の流れ（検討例）

わが国の多様な地質環境において、共通する情報の取得から各調査地区選定までの流れを例示したものである。図 5.2.3-5 に示した概要調査の流れのうち、地質環境特性にかかわる調査・評価の流れを抽出したものである。

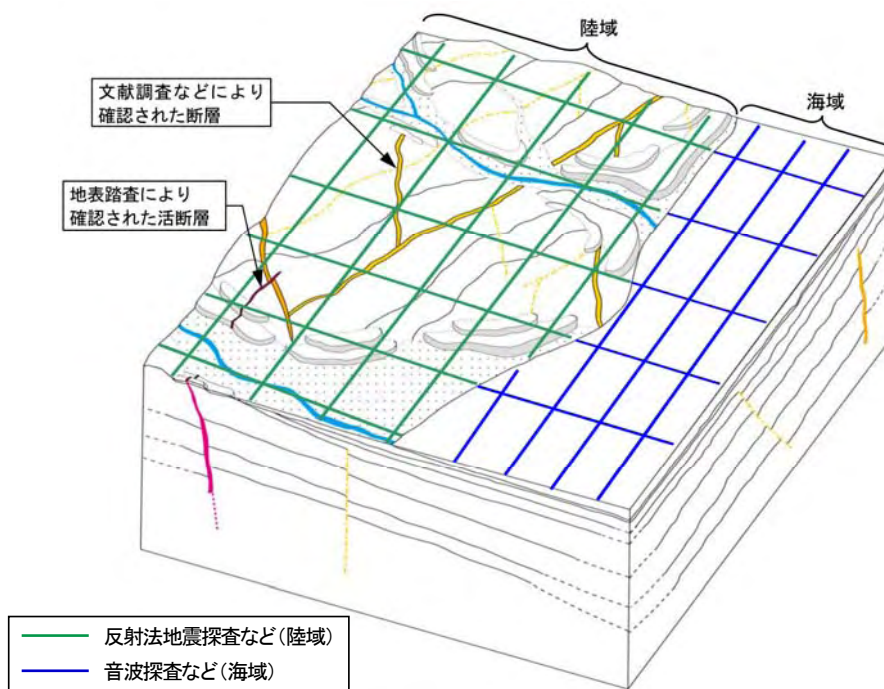


図 5.3.2-3 物理探査測線設定の検討例
(原環センター, 2002 を編集)

沿岸域の堆積岩を対象として、反射法地震探査および音波探査により陸域から海域に連続した測線設定を検討した例である。

5.3.2.2 施工・操業安全にかかわる調査・評価

施工・操業安全にかかわる事項としては、自然災害（地すべり、洪水など）、異常間隙水圧、膨脹性地山、山はね、有害ガスなどが考えられる。ここでは、これらの事象のうち坑道掘削への影響の観点から重要と考えられる異常間隙水圧、膨脹性地山、山はねについて、文献調査および概要調査における調査・評価の考え方を述べる。

(1) 異常間隙水圧

異常間隙水圧は、膨脹性地山、大量湧水の原因の一つになると考えられている。施工時に異常間隙水圧に遭遇した場合、坑道の崩壊、坑道内への著しい押し出しなどが発生し、坑道の掘削が難航するなど施工に影響が生じることがある。また、異常間隙水圧の解放に伴い発生する事象として、泥火山が知られている。泥火山が発生した場合、急激な流体の移動が生じることにより、天然バリア機能に対して影響を及ぼす可能性がある。

わが国における異常間隙水圧は、秋田・新潟などの油田地帯で実測されており（千木良・中田，1994）、第三紀～第四紀堆積岩分布地域、特に油田・ガス田地域の地下深部（1,000～2,000m程度）などの限られた条件を有する地域に分布していると考えられている（土木学会，2001）。異常間隙水圧の解放により発生したものと考えられる泥火山については、背斜軸や断層などに沿って分布していることが知られている。わが国においては、北海道新冠町（千木良・田中，1997）、新潟県松代町（新谷・田中，2005）などで認められている。

これらの知見を踏まえ、異常間隙水の存在が認められる地域と同様の特徴を有する地域であるか検討する。その際には、既往事例において異常間隙水の存在が認められる地域の地質・地質構造、水圧などと、当該サイトにおいて取得された情報を比較し、検討・評価する。これらの検討・評価を行うため、地質分布、地質構造、間隙水圧などの情報を取得する。また、それらの情報に基づき、処分施設の成立性、閉鎖後長期の安全性への影響を評価し、その影響が大きいと判断される場合には、その影響を受けないように回避するなどの対策を講じる。

(2) 膨脹性地山

施工時に膨脹性地山に遭遇した場合、坑道の内空への著しい押し出しが発生し、坑道の掘削が難航するなど施工時に影響が生じることがある。膨脹性地山の原因について、現状では、せん断破壊説、吸水膨脹説、クリープ説、大きな地圧説、高压のガス・間隙水圧説などがあるものの、それぞれの要因が複雑に関連し、定説がない状況である。既設トンネルの工事などにおいて、膨脹性地山に遭遇した事例が多く報告されており、遭遇した場所は志田原ほか（2004）により整理されている。このような膨脹性地山は、新第三紀の泥岩・凝灰岩、変成帯や構造帯の蛇紋岩、熱水変質帯など特定の場所で発生していることが知られている（土木学会，1983）。また、膨脹性地山に遭遇した場所の地層には、膨脹性にかかわる粘土鉱物（スメクタイトなど）の含有量が高く、一般に強度が低いことなど（仲野，1975，1995；朝倉・小島，1995）が知られている。

これらの知見を踏まえ、膨脹性地山が見られる地質と同様の特徴を有した地質が、当該サイトに分布するか検討する。その際には、既往事例において膨脹性地山が見られる地点の地質・地質構造、物理・力学特性などと、当該サイトにおいて取得された情報を比較し、検討・評価する。これらの検討・評価を行うため、地質分布、地質構造、岩盤特性などの情報を取得する。また、それらの情報に基づき、処分施設建設時の安全確保、処分施設の成立性、閉鎖後長期の安全性の観点からも検

討を行い、それらに対して影響が大きいと判断される場合には、その影響を受けないように回避するなどの対策を講じる。

(3) 山はね

山はねは、坑道の掘削時に坑壁が崩壊し岩片の急激な飛散が発生する事象であり、坑道の掘削に影響を及ぼす事象である。山はねの原因については、大きな地圧により脆性な岩盤中に応力集中を生じ、そこから亀裂が発生・連通し、連続的な破壊により周辺岩盤の弾性ひずみエネルギーが解放されることなどに起因すると考えられている（川本ほか、2001）。既設トンネルの工事などにおいて発生した山はねは、地下深部の割れ目の少ない均質・堅硬な岩盤でかつ空洞周辺の応力が岩盤の破壊条件に近い条件となる場合に発生することが多いことが知られている。

このような知見を踏まえ、山はねが生じるような力学特性を有する岩体が当該サイトに分布するか検討する。その際には、岩盤中の割れ目頻度、力学特性などに関する情報に基づいて、検討・評価する。これらの検討・評価を行うため、地質分布、岩盤特性などの情報を取得する。また、それらの情報に基づき、処分施設建設時の安全確保、処分施設の成立性の観点からも検討を行い、それらに対して影響が大きいと判断される場合には、その影響を受けないように回避するなどの対策を講じる。

5.4 調査・評価技術の整備

本節では5.3に示した調査・評価の体系を支える技術について、第2次取りまとめ（JNC, 1999b）以降に進展したものを中心に整備状況を取りまとめる。ここでは、現在開発中であるが、今後の処分事業にとって有望と考えられるものについても併せて紹介する。加えて、概要調査の技術を、NUMOが事業の効率化・合理化および品質保証の観点から確認した結果について述べる。最後に、NUMOが精密調査地区を的確に選定する上での、技術の信頼性向上に向けた課題と取り組み方針について述べる。

5.4.1 調査・評価技術の進展

調査・評価の技術体系を支える技術について、第2次取りまとめ時点での状況と課題、およびそれ以降の技術開発による個々の技術の進展と現状を、自然現象の影響、地質環境特性という二つの分野における調査・評価、それに加えて多様な地質環境に対する調査・評価という観点で取りまとめた。

5.4.1.1 自然現象の影響にかかわる調査・評価技術

(1) 火山・火成活動にかかわる調査・評価技術

第2次取りまとめ（JNC, 1999b）までに、火山の分布や活動年代を明らかにする年代測定法などの調査手法の整備に伴い、日本列島における第四紀火山分布図が編集された。その結果、第四紀火山の活動が偏在していること、過去数10万年の火山活動の変化が地域レベルの火山活動域の拡大・縮小として捉えられることなどが示された。また、火山の温度や地下水などへの影響を把握する手法が、地熱開発分野などにおける研究でも整備され、日本列島の地温勾配の分布が取りまとめられたことにより、火山からの影響範囲、マグマ溜りからの熱的な影響範囲とその期間などが検討された。第2次取りまとめでは、背弧側や西南日本の単成火山群などにおける新たな火山活動の発生可能性、および非火山地域における高温異常の評価などの課題が挙げられた。

第2次取りまとめ以降の進展としては、火山灰アトラスの改訂（町田・新井, 2003）によりテフラの対比の精度が向上したことが挙げられる。また、地震波トモグラフィなどの地下深部の解析技術の高度化に伴い、火山の新規発生と移動の評価手法、深部熱源評価手法などの開発が進められた。また、地球化学的手法を活用した深部熱水の評価法が示され、わが国にマグマ起源以外の熱水が存在することが明らかにされた。さらに、海外で用いられている確率論的な火山活動の評価手法を、わが国の背弧側や独立単成火山群の分布域の評価に適用する検討が行われた。

火山・火成活動にかかわる調査・評価技術については、検討の基礎となる情報整備および火山活動履歴の評価、主要な検討事項であるマグマの貫入と噴出の評価、熱・熱水の評価、さらに確率論的評価という項目に分けて記述する。表5.4.1-1と表5.4.1-2に、これらの項目ごとの調査・評価技術の概要と、その技術を適用できる調査段階（文献調査、概要調査、精密調査）、ならびに関連する文献を示す。

表 5.4.1-1 火山・火成活動にかかわる調査・評価技術 (1/2)

項目と内容	概要	段階			文献
		文献調査	概要調査	精密調査	
情報整備	全国規模の情報として、日本の第四紀火山 ¹⁾ 、新編火山灰アトラス ²⁾ 、坑井温度プロファイルデータベース ³⁾ 、温泉地化学データベース ⁴⁾ 、日本の熱水系アトラス ⁵⁾ が整備された。	○			1)産総研 (2010a) 2)町田・新井 (2003) 3)坂川ほか (2004) 4)浅森ほか (2003) 5)村岡ほか (2007)
火山活動履歴調査	放射年代測定の利用が困難な第四紀火山噴出物試料に対して、肉眼では識別できないテフラ起源物質やテフラ降灰層準を認定する手法 (RIPL 法) ⁶⁾ 、微量成分化学組成 ⁷⁾ 、火山灰起源の石英中のガラス包有物の主成分化学組成 ⁸⁾ 、斜長石斑晶の屈折率を用いた手法 ⁹⁾ が開発された。		○		6)古澤 (2004) 7)田村・山崎 (2004) 8)古澤・中村 (2009) 9)大石 (2010)
マグマの貫入・噴出の評価	新規火山の発生評価	東北日本弧において、火山と地形・地下構造、地震波低速度分布、プレート運動の関連性の検討から、将来の火山発生評価手法 ^{10), 11)} が示された。また、カルデラ・大規模火砕流についてはカルデラ形成とテクトニクスとの関係が明らかにされ ^{12), 13)} 、カルデラ生成噴火を評価するための作業仮説 ¹⁴⁾ が提案されている。	○	○	10)Kondo (2009a) 11)Kondo (2009b) 12)Miura (2005) 13)三浦・和田 (2007) 14)鍵山 (2010)
	既存火山からのマグマの移動の評価	マグマの移動の評価として、マグマの化学組成と火道分布方位の関係を現地調査で明らかにした火口移動に関する研究成果を用いて、マグマの水平移動に影響する要素を抽出する水平移動の評価法 ^{15), 16)} が提案されている。	○	○	15)三浦ほか (2006) 16)土志田ほか (2006)
	深部熱源評価	東北の背弧側火山の空白域での深部熱源評価を地震波トモグラフィによる地震波速度構造、微小地震分布、MT法による比抵抗構造、地化学データ (³ He/ ⁴ He) などの組み合わせで行い、地下のマグマの状態やマグマ起源の熱的影響を評価する手法 ^{17), 18), 19)} が示され、能登半島では非火山性温泉の熱源を解明するため、温泉ガスの希ガス同位体分析および三次元比抵抗構造解析を行い解明 ²⁰⁾ した。	○	○	17)浅森・梅田 (2005) 18)Umeda et al. (2006b) 19)Umeda (2009) 20)Umeda et al. (2009)
	深部構造評価手法	マグマの貫入・噴出の評価を支える新しい技術として、Double Difference トモグラフィ法 ²¹⁾ 、レシーバ関数 ²²⁾ 、後続波 ²³⁾ を利用した地震波解析技術が開発され、地下深部でのマグマの存在や上昇過程の評価の精度が向上した。	○	○	22)Zhang and Thurber (2003, 2006) 22)Shiomi et al. (2004) 23)Xia et al. (2007)

○ : 主な適用段階

表 5.4.1-2 火山・火成活動にかかわる調査・評価技術 (2/2)

項目と内容		概要	段階			文献
			文献調査	概要調査	精密調査	
熱・熱水の評価	総合的な熱・熱水の評価	評価の基礎として、地質・地球物理データの重ね合わせ表示による熱・熱水異常地域の抽出 ²⁴⁾ が行われ、高温域を含む地域のタイプ分け ²⁵⁾ がなされた。これをもとに、地熱シミュレータによる地温分布の評価手法 ²⁶⁾ 、温泉放熱量に基づく熱異常抽出・特性把握手法 ²⁷⁾ 、変質帯の解析手法 ²⁸⁾ が示された。また、流体/岩石反応で形成される地下水形成過程の解析法 ²⁹⁾ が示されている。さらに地化学手法をもとにした深部熱水の評価手法の開発 ³⁰⁾ が行われている。	○	○	○	24) 玉生ほか (2008) 25) 玉生 (2008) 26) 中尾ほか (2008) 27) 阪口 (2008) 28) 茂野 (2008) 29) 佐々木 (2008) 30) 産総研 (2009)
	熱履歴評価	複数の放射年代手法を組み合わせた熱年代学的手法による非火山地域の高温泉周辺の熱水変質履歴の評価手法 ³¹⁾ 、大規模火砕流の熱の影響をフィッシュトラック法による熱履歴解析 ³²⁾ で深部に外挿する解析手法の構築などが行われた。低温 (約 70 度以上) の熱履歴の解析には、(U-Th)/He 法年代測定システムが適用可能となった ³³⁾ 。		○	○	31) 花室ほか (2008) 32) 松崎ほか (2004) 33) JAEA (2010b)
	熱源・火山からの影響評価	一次元熱輸送モデルによる熱流束や流体速度を評価する手法 ³⁴⁾ 、マグマ溜りの周辺岩盤の熱や地下水理などを計算するための解析コードである Magma2002 による三次元熱水系シミュレーションによる手法 ³⁵⁾ などの技術開発が行われている。	○	○	○	34) JNC (2005a) 35) 坂川ほか (2005)
確率論的評価		火山の時空間分布や地球物理学的情報に基づき、確率モデルにより、将来 10 万年間の火山発生予測を行う手法 ^{36), 37)} 、独立単成火山に対する確率的評価手法、列島スケールの規模で、地球物理情報をベイズ法で確率モデルに取り込んだ multiple inference モデルによる手法の開発 ³⁸⁾ が進められている。	○	○		36) Chapman et al. (2009b) 37) Jaquet et al. (2008) 38) Martin et al. (2004)

○ : 主な適用段階

(i) 情報整備

日本の第四紀火山カタログ（第四紀火山カタログ委員会，1999）に続いて，第2次取りまとめ以降には，日本の第四紀火山（産総研，2010a），新編火山灰アトラス（町田・新井，2003），坑井温度プロファイルデータベース（坂川ほか，2004），温泉地化学データベース（浅森ほか，2003），日本の熱水系アトラス（村岡ほか，2007）などの火山・火成活動にかかわるデータベースが整備されている。

これらの情報は，文献調査計画や文献調査の段階などにおいて基礎的なデータとして火山・火成活動の評価に取り入れて活用することができる。

(ii) 火山活動履歴の評価

火山起源の物質の対比や火山の年代を測定する手法については，カリウム-アルゴン（K-Ar）法，フィッシュトラック法などの放射年代測定法，テフラ層序学などに基づく手法があり，基本的には確立されている。近年は，精度や信頼性を向上させることを目的とした研究が進められた。例えば，放射年代測定の適用が困難な第四紀火山噴出物の試料に対して，肉眼では識別できないテフラ起源物質やテフラ降灰層準を認定する手法（RIPL法：古澤，2004）が開発され，地層処分にかかわる調査研究などに適用された（梅田・古澤，2004）。また，微量成分化学組成を用いたテフラの対比（吉川ほか，1991；吉川ほか，2000；田村・山崎，2004）も行われている。これらの手法は概要調査の段階以降で第四紀火山の活動性の把握のほか，地震・断層活動や隆起・侵食にかかわる調査・評価などにおける地層対比にも利用できると考えられる。さらに，テフラ起源の石英中のガラス包有物の主成分化学組成を用いたテフラの同定（古澤・中村，2009），斜長石斑晶の屈折率を用いたテフラの対比（大石，2010）などの新しい手法の研究開発が進められている。

これらの手法については，今後，適用限界や信頼性を確認した上で必要に応じて利用する。

(iii) マグマの貫入・噴出の評価

第四紀の火山活動は，プレート配置やプレートの沈み込み角度に支配され，限定された地域で繰り返し活動し，火山の分布に偏在性があることが理解されており，さらにマグマの存在や活動性を評価する技術が求められている。

文献調査段階および概要調査段階で適用される技術では，既存情報または既存情報と現地調査データに基づく，新規火山の発生評価手法（Kondo，2009a，2009b），既存火山からのマグマの移動を評価する手法（三浦ほか，2006；土志田ほか，2006）が提案されている。また，火山体の深部や非火山地域を評価する手法として，物理探査データや地化学情報の組み合わせで地下のマグマの状態やマグマの活動性を評価する手法が開発されてきた（浅森・梅田，2005；Umeda，2009など）。

以上のうち，新規火山の発生評価手法（Kondo，2009aなど）では，はじめに島弧スケールの情報として，対象地域の火山フロントとの位置関係，プレートの沈み込みの継続性を考慮し，評価の時間スケールを設定する。次に，火山岩の分布や岩相，層序，年代，化学成分の検討から，火山同士の時間的，空間的分布について評価する。続いて，地形データ，断層運動の分布とその時間変化，隆起・沈降運動の分布とその時間変化，重力データの検討から，火山活動に関連する地殻構造・変動を評価する。最後に，地震波速度構造の解析結果をもとに，マントルウェッジ中の高温域について，地震波低速度異常域の位置と広がり現状を把握した上で，火成活動の時間的，空間的分布パターンとの対比に基づき，その持続性に関する評価を行う（図 5.4.1-1）。以上の評価に基づき，将

来の火山が発生する可能性とその範囲を評価する。

火山地帯、非火山地帯を問わず高温域における熱源については、震源分布、地震波トモグラフィ解析、MT 法による深部比抵抗構造解析や地化学情報を組み合わせることによって評価が可能であると考えられている (Umeda et al., 2006b ; Umeda et al., 2009 ; Umeda, 2009 など)。例えば、非火山地域の中生界火山岩類からなる飯豊山での事例 (Umeda et al., 2006b ; Umeda et al., 2007a) では、地震波トモグラフィによる解析や電磁探査 MT 法による二次元断面解析で、飯豊山直下にマグマの存在を反映する可能性がある異常域を捉えている (図 5.4.1-2)。この異常域はさらに地殻深部まで連続する傾向があり、地表ではマンテル起源の He 同位体を多く含む高温泉が分布することや、異常域上部周辺に発生している微小地震の分布がマグマ溜りの周辺に発生している微小地震の分布と類似することなどから、この低比抵抗で地震波低速度層が示す異常域は、地殻の部分熔融を示すものであり、新しいマグマの活動を反映する可能性があることが示されている。以上のように異なる手法を適切に組み合わせることによって、対象地域と高温域の熱源の評価を行うことが可能であると考えられる。

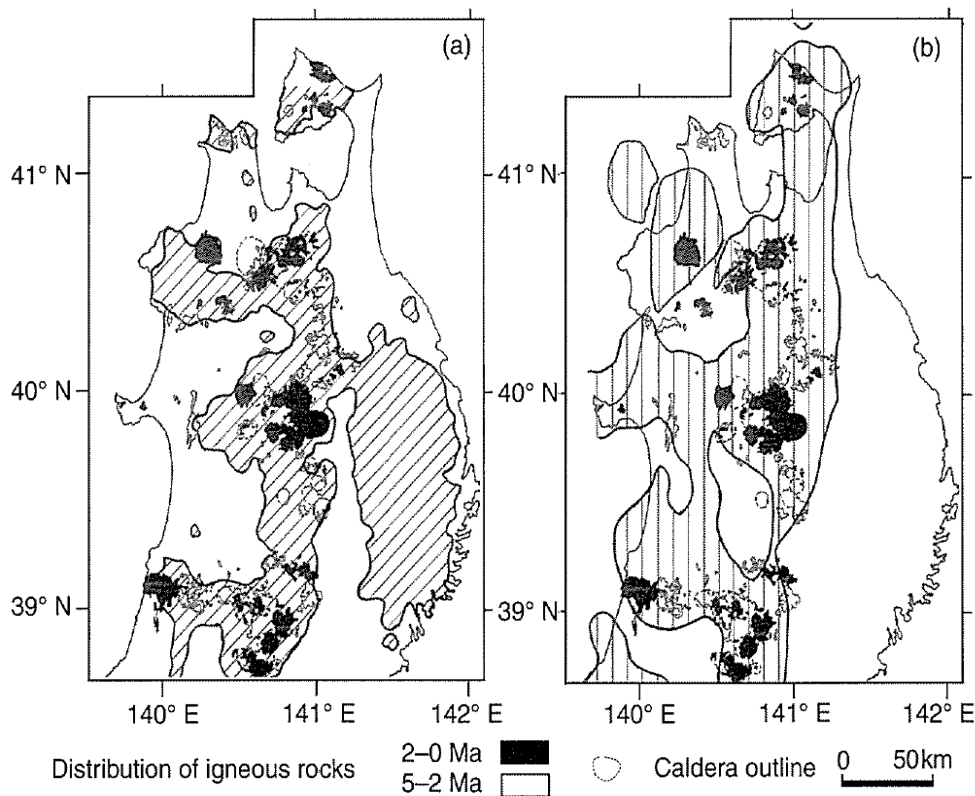


図 5.4.1-1 新規火山の発生可能性に関する検討例

(出典 : Kondo, 2009a)

左図 : 東北地方の 5Ma 以降の火山岩の分布と標高 500m 以上の山地の分布 (斜め線) の重ね合わせ。
 右図 : 5Ma 以降の火山岩の分布と沈み込むプレートに沿ったマンテルウェッジ内の地震波低速度領域 (縦線) の重ね合わせ。これらの事象が重なる地域では、将来火山が発生する可能性が相対的に高いと考えられる。

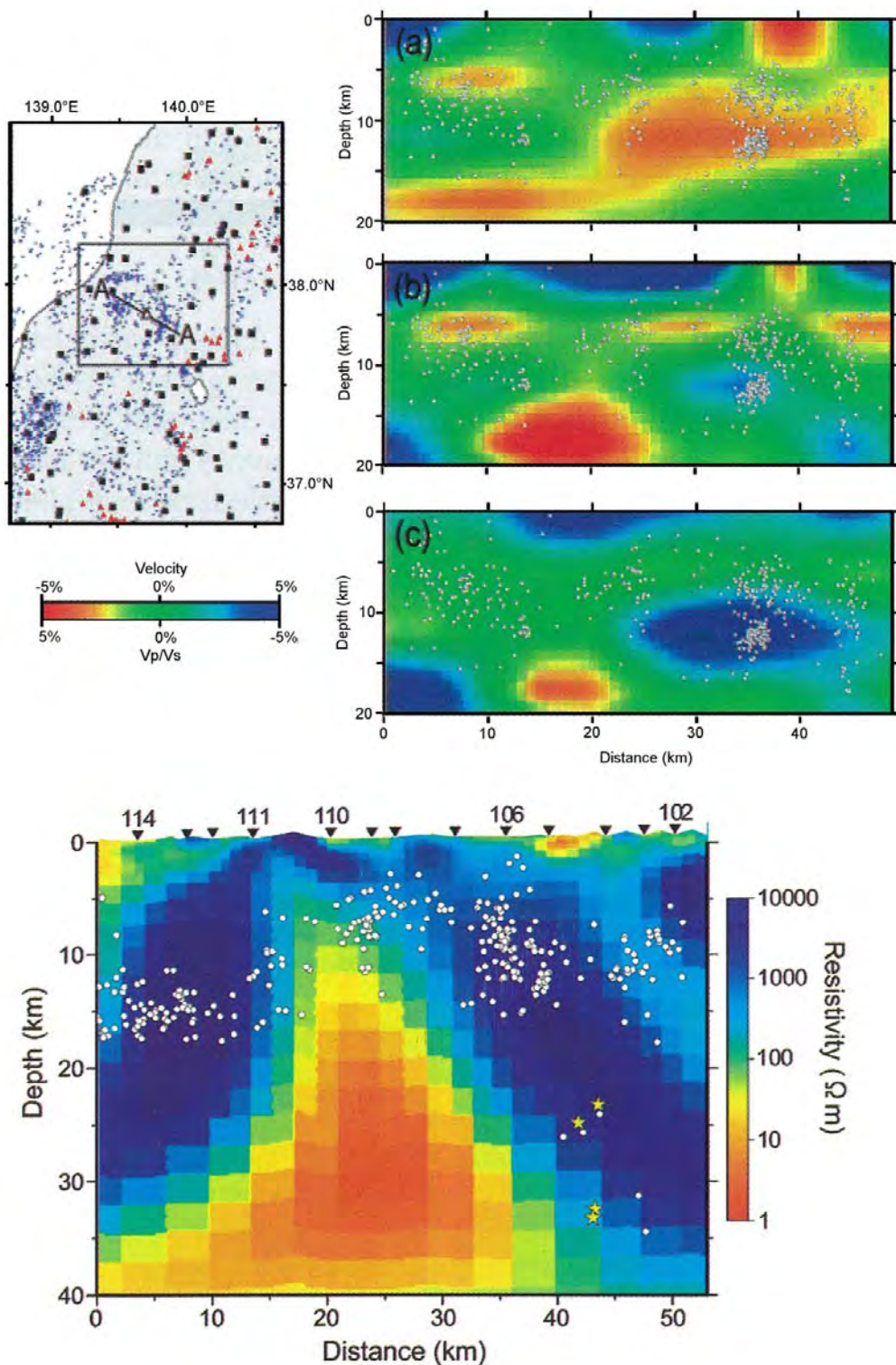


図 5.4.1-2 地球物理学的手法を用いたマグマの存在に関する検討例
(Umeda, 2009 を編集)

上図：飯豊山を横切る東西 (A-A') の地震波速度構造の断面図 [(a) P 波, (b) S 波, (c) Vp/Vs]。
 下図：同地域の MT 法探査の二次元比抵抗モデル断面図 (白点は微小地震の震源, 黄色の☆印は深部長周期地震源)。両図における, 深度 15km 以深のアノマリー (赤色) はマグマの存在を示唆している。

カルデラ・大規模火砕流についての新しい知見としては、カルデラ形成とテクトニクスとの関係が明らかにされ (Miura, 2005 ; 三浦・和田, 2007), カルデラを形成する噴火の準備過程の進行状況を評価するための作業仮説が提案され, その検証の必要性が示されている (鍵山, 2010)。

これらの手法は, 各調査地区とマグマ活動との関連性の評価を行う際に適用することが可能であると考えられる。

上記の評価手法を支える技術として, 地震波解析では, 地震観測網の整備とともに新しい解析手法である Double Difference トモグラフィ法 (Zhang and Thurber, 2003, 2006), レシーバ関数 (Shiomi et al., 2004), 後続波 (Xia et al., 2007) を利用した手法が開発され, 長谷川ほか (2004) や Tamura et al. (2002) などの研究に取り入れられているように, 地下深部の構造, 地震, マグマの存在の推定や発生メカニズムなどに関する情報提供に寄与している。

(iv) 熱・熱水の評価

熱・熱水にかかわる調査・評価技術は, 地熱資源開発の分野で開発されてきた技術が基本となる。

文献調査段階から概要調査段階に適用可能な手法として, 産総研は, 深部流体の評価手法を示し, 非火山性の熱水の存在とその主要な分布を明らかにしている (産総研, 2009)。玉生ほか (2008) は, 熱水活動域のタイプ別区分方法を示し, 中尾ほか (2008) はシミュレーションによる地温分布の評価手法を示している。さらに, 熱履歴の解析手法としては, 低温域に対応した (U-Th) /He 年代測定システムの開発があり (JAEA, 2010b), 熱年代学的手法による熱履歴評価手法の適用事例としては, Umeda et al. (2007b), 花室ほか (2008), がある。熱源や火山からの影響評価手法としては, 大規模火砕流の熱的影響を評価する手法 (松崎ほか, 2004), 一次元熱輸送モデルによる熱流束や流体速度を評価する手法 (JNC, 2005a ; Umeda et al., 2007c), マグマ溜りの周辺岩盤の熱や地下水理などを計算するための解析コードである Magma2002 による三次元熱水系シミュレーションによる手法 (坂川ほか, 2005) などの技術が開発されている。

これらの総合的な熱・熱水の評価手法, 深部流体の評価手法は, 対象地域の概略的な評価に有効である。特に, 熱源や火山からの熱的影響の評価手法は, 的確な条件 (熱源の位置, 物性など) が与えられれば, 主に概要調査の段階以降に有効な評価手法として適用することが考えられる。

(v) 確率論的評価

上述した決定論的手法を補足する手法として, 確率論的に将来の火山活動の評価を行う手法が検討されてきた。NUMO では, 国際テクトニクス会議 (ITM) での日本の火山・火成活動評価に関する議論 (Chapman et al., 2009a) に基づき, 東北地方や九州地方において海外で用いられているカーネル法やコックスプロセス法などの確率モデルを適用し, 将来の火山発生可能性を評価する手法を開発した (Chapman et al., 2009b, 2009c, 2009d ; Jaquet et al., 2008, 2009 : 図 5.4.1-3, 図 5.4.1-4)。また, JNC (2005a) による独立単成火山群に対する評価手法や, Martin et al. (2004) による島弧規模の地球物理学的情報をベイズ法で確率モデルに取り込んだ multiple inference モデルの開発が進められている。

これまでの検討により, 確率論的な評価手法のわが国の地質環境への基本的な適用性が確認された。一方, これらの評価手法は, 火山の分布や活動年代が主な入力情報であり, その精度は情報の質に依存する。限られた情報しか得られない場合や, より小さなスケールへの適用性, そして確率論的評価の結果をどのように活用していくか, などの検討課題が残されている。

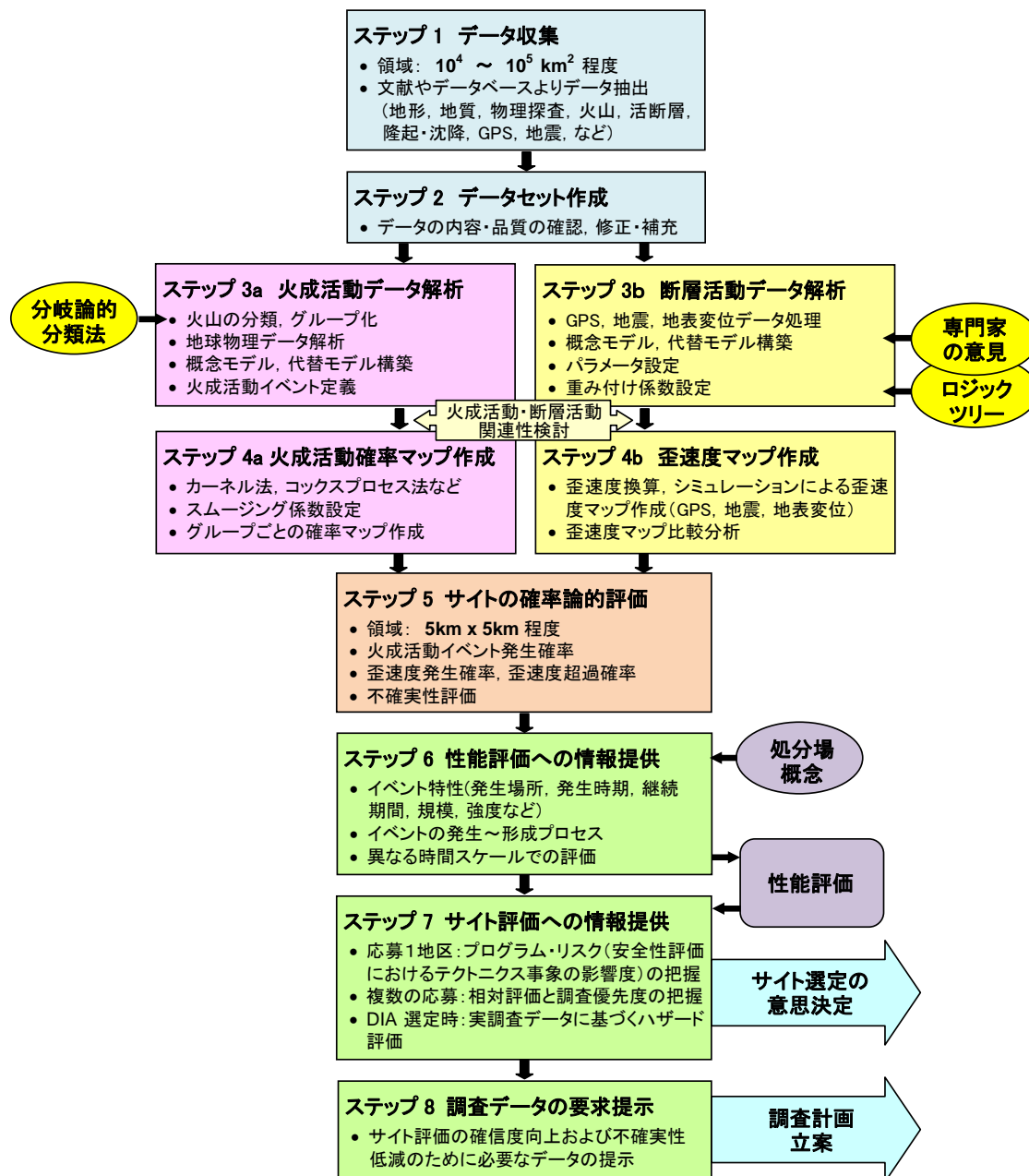


図 5.4.1-3 国際テクトニクス会議 (ITM) を通じて構築した確率論的評価手法
(Chapman et al., 2009a に基づき作成)

データの収集から、テクトニクスや火成活動の傾向・法則性の理解、確率論的解析および解析結果の使い方までを含む包括的な手法で、文献情報のみに基づく文献調査およびそれに現地調査データが加わる概要調査の各段階で用いることができる。また、科学的知見の進展に応じて、その時々最適な技術を取り入れ、手法そのものを改良していく柔軟性を有している。

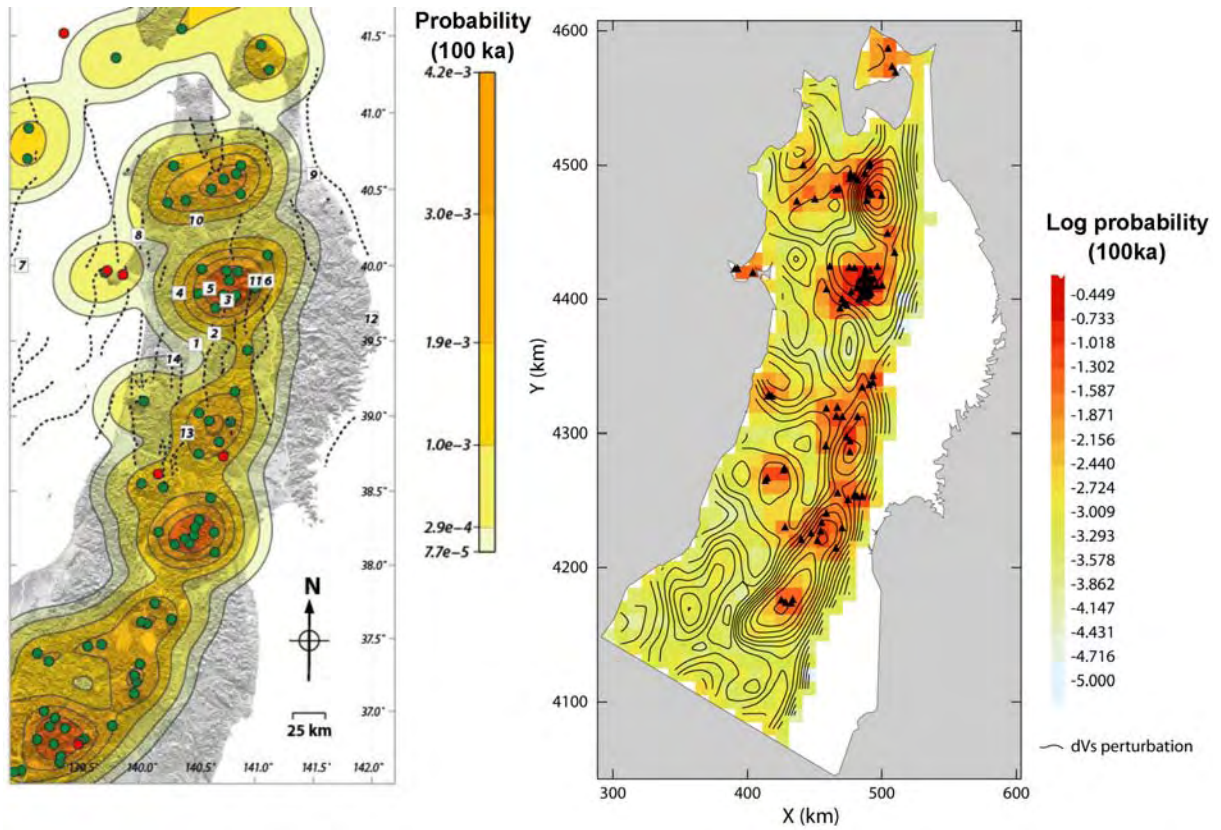


図 5.4.1-4 東北地方のケーススタディにおける火山発生確率マップの例
(Chapman et al., 2009c を編集)

- (左) 定まった関数の確率ポテンシャルに基づき平均的な確率を導くカーネル法による, 将来 10 万年間に 5km 四方の領域内に一つまたはそれ以上の火山が発生する確率。緑と赤の点は第四紀火山を示す。
- (右) ランダムな確率ポテンシャルに基づきあらゆる不確実性を内包した確率を導くコックスプロセス法による, 将来 10 万年間に 10km 四方の領域内に一つまたはそれ以上の火山が発生する確率。黒三角は第四紀火山を示す。

(2) 地震・断層活動にかかわる調査・評価技術

第2次取りまとめ（JNC, 1999b）までには、主要な活断層の分布を把握する手法、活断層周辺の岩盤や地下水の性状を把握する手法などが整備され、全国規模の陸域の活断層分布が200万分の1日本列島活断層図などとして示された。また、主な地震・断層活動は既存の断層帯において過去10万年間にわたり同様の活動様式で繰り返し生じていること、活断層の分布密度には偏在性があり、タイプと活動性には地域性があることが示された。第2次取りまとめ（JNC, 1999b）では、地表に明瞭な変位を伴わない活断層の検出手法や断層活動による影響の評価が課題として挙げられていた。

第2次取りまとめ以降は、地表で活断層が認識されていなかった内陸地域でM7クラスの被害を伴う地震（2000年鳥取県西部地震、2003年宮城県北部地震、2004年新潟県中越地震、2008年岩手・宮城内陸地震など）が発生し、それらの震源域を対象とした調査が行われた。2000年鳥取県西部地震（M7.3）は、長さ20km、幅10kmの震源断層により生じたが、地表において確認された変位はわずかなものであった。本地震後の調査では、震源断層の直上付近に短い推定活断層やリニアメントが認められている（井上ほか、2002など）。2004年新潟県中越地震（M6.8）や2007年新潟県中越沖地震は、背弧海盆に堆積岩類が厚く分布し活褶曲が発達する地域において生じた地震である。これらの地震については、断層関連褶曲の考え方にに基づき、伏在した断層の活動により生じたものであるとの解釈がなされている（岡村・石山、2005；青柳・阿部、2007など）。2008年岩手・宮城内陸地震（M7.2）の発生域は山間部であり、これまで十分な調査が行われていない地域であることから、活断層の存在は認められていなかった。しかし、地震後の調査では、短い活断層が存在することが報告されている（鈴木ほか、2008；遠田ほか、2010など）。これらの調査の結果、震源断層と活断層の関係を把握することの重要性が認識された。また、このような地表に明瞭に出現しない断層は、伏在断層、未成熟な断層などとされ、その検出や評価の重要性が再認識された。

このような課題に対し、例えば、地表に明瞭な変位を伴わない活断層の評価には変動地形学的手法、断層関連褶曲の考えをもとにした数値解析や模型実験を含めた解釈、地質断層の再活動を考慮した解釈が行われるようになってきた。また、断層の影響範囲の評価にも数値解析や模型実験と現状の比較で評価する手法が示された。さらに、国際テクトニクス会議（ITM）の提言をもとに確率論的に将来の断層発生の可能性を評価する確率論的手法が開発され、決定論的手法とは別の観点からの評価が試みられている。

以下、地震・断層活動にかかわる項目は、活断層の存在の把握、活断層周辺の変形帯・影響範囲の把握、地質断層の再活動性の評価、断層活動に関する確率論的評価に分けて記述する。表5.4.1-3と表5.4.1-4に、これらの項目ごとの調査・評価技術の概要と、その技術を適用できる調査段階（文献調査、概要調査、精密調査）、ならびに関連する文献を示す。

表 5.4.1-3 地震・断層活動にかかわる調査・評価技術 (1/2)

項目と内容	概要	段階			文献
		文献調査	概要調査	精密調査	
活断層の存在の把握	文献情報など	○			1) 徳山ほか (2001) 2) 中田・今泉 (2002) 3) 産総研 (2010b) 4) 池田ほか (2002) 5) 国土地理院 (例えば、渡辺ほか, 2001) 6) 汐見ほか (2009)
	測地学的手法 (SAR, GPS)	○			7) 雨貝ほか (2008) 8) sagiya et al. (2000) 9) 鷺谷 (2009)
	地形学的手法 (変動地形)	○	○		10) 青柳・阿部 (2009) 11) 丸山ほか (2009) 12) 高田ほか (2003) 13) 木下ほか (2005) 14) 田力・池田 (2005) 15) 幡谷 (2006b) 16) 幡谷・濱田 (2009) 17) 田力ほか (2009)
	構造地質学的手法 (地質構造解析, 年代測定)		○	○	18) 小林・杉山 (2004) 19) 相澤ほか (2005) 20) 田上ほか (2010) 21) 伊藤 (2006) 22) Tagami and Murakami (2007) 23) 池原 (2000)
	地球物理学的手法 (反射法地震探査, 電磁探査, 地震波解析)			○	○

○ : 主な適用段階

表 5.4.1-4 地震・断層活動にかかわる調査・評価技術 (2/2)

項目と内容		概要	段 階			文 献
			文献調査	概要調査	精密調査	
存在の把握 活断層の	地球化学的手法 (H ₂ , He)	岩石の破壊により生じる水素ガスの測定や, 地下水や温泉, 土壌ガスに含まれるヘリウム同位体の測定から断層の位置, 断層を評価する手法の開発 ^{38), 39), 40)} が進められた。		○		38) 黒澤ほか (2010) 39) Shimada et al. (2008) 40) Umeda and Ninomiya (2009)
	総合的評価手法	地表に明瞭な地震断層が出現しないような地域で, 微小地震活動, 航空レーザー測量, 反射法地震探査で震源断層にかかわる活構造を評価する手法 ⁴¹⁾ が示された。	○	○		41) 青柳・阿部 (2009)
活断層周辺の 変形帯・影響範囲の把握	変形領域の把握 (活褶曲など)	堆積環境にある海域では断層関連褶曲解析 (growth strata など) を利用して音波探査データとの組み合わせなどで断層構造の抽出に対して成果を上げている ⁴²⁾ 。 日本の活褶曲の形成メカニズムとタイプ分け ⁴³⁾ が行われ, 模型実験による活褶曲・逆断層帯の発達過程・影響帯の評価 ^{44), 45)} や, 断層関連褶曲の考え方にに基づき既存の地質データとバランス断面法による評価 ⁴⁶⁾ が行われている。 逆断層や横ずれ断層に関する評価として, 地質調査結果をもとにバランス断面法を適用した手法 ^{47), 48), 49)} , 断層周辺の岩盤の変形領域や地形変化の範囲の推定に数値解析プログラムを適用する手法の有効性 ⁵⁰⁾ が確認されている。	○	○		42) 岡村 (2000) 43) 池田 (2002) 44) 上田ほか (2005) 45) 上田 (2011) 46) 岡村・石山 (2005) 47) 楳原ほか (2006) 48) 小坂ほか (2009) 49) Kagohara et al. (2009) 50) JAEA (2010b)
	断層の発達・伸展 の評価	逆断層に関して, 模型実験による発達過程の解析からの評価手法 ⁵¹⁾ が検討されている。 横ずれ断層に関して, 中国地方と中部地方の主要断層の発達程度の比較 ⁵²⁾ , 実験・シミュレーションによる評価 ^{53), 54), 55), 56)} が行われている。	○	○		51) 上田ほか (2003) 52) 松田ほか (2004) 53) 上田 (2009) 54) 澤田・上田 (2009) 55) 小山・谷 (2003) 56) Kase and Day (2006)
	断層破碎帯の評価	地下水流動など地下環境変化にかかわる断層のダメージゾーン, プロセスゾーンの地質学的評価 ^{57), 58), 59)} , MT 法探査で取得された比抵抗によるダメージゾーンの広がり ⁶⁰⁾ の事例が示されている。	○	○	○	57) 金折 (2001) 58) 吉田ほか (2009) 59) Yoshida et al. (2005) 60) 麻植ほか (2007)
地質断層の再活動性の評価		近年発生した被害地震 (2003 年宮城県北部地震, 2008 年岩手・宮城内陸地震など) の断層活動や南関東の立川断層などでは, 既存の地質断層の再活動による可能性が示されている ^{61), 62), 63)} 。また, モデル実験や数値解析による地質断層の再活動性の検討 ⁶⁴⁾ が進められている。	○	○		61) Kato et al. (2006) 62) 遅沢 (2009) 63) 山崎 (2006) 64) 山田・松岡 (2004)
断層活動に関する 確率論的評価		活断層・隆起などの地表変化, GPS データ, 歴史地震データから得られる各々の歪速度分布, 年間歪速度の超過確率から将来 10 万年程度の断層発生予測手法 ⁶⁵⁾ が開発されている。 確率論的な地震ハザード解析として, 防災分野 ^{66), 67)} では数 10 年程度の予測が行われている。	○	○		65) Chapman et al. (2009b) など 66) 地震調査研究推進本部 (2010) 67) Stirling et al. (2002)

○ : 主な適用段階

(i) 活断層の存在の把握

① 文献情報など

文献情報に関して、全国規模で整理された情報のうち、第2次取りまとめ以降にまとめられた主なものとしては、活断層詳細デジタルマップ(中田・今泉, 2002)、日本周辺海域の第四紀地質構造図(徳山ほか, 2001)、活断層データベース(産総研, 2010b)がある。また、地域的な情報として、第四紀逆断層アトラス(池田ほか, 2002)や国土地理院による都市圏活断層図(例えば、渡辺ほか, 2001)の出版などが挙げられる。現在、地震調査研究推進本部は、活断層に対する情報の体系的収集・整備と評価の高度化により、活断層の詳細位置に各種調査・評価結果を併記した「活断層基本図(仮称)」の作成を進めている(地震調査研究推進本部, 2009)。

全国規模の情報取得システムとしては、防災科学技術研究所による地震観測網(K-net・KiK-net, Hi-Net, F-net)や国土地理院によるGPS観測網の整備が行われ、精度の高い解析により活断層などの存在の把握にも活用が可能となっている。

② 測地学的手法

広域のかつ継続的なデータ取得による解析を可能とした手法として、地球観測衛星搭載の合成開口レーダーシステムとGPSによる観測データがある。

地球観測衛星「だいち」の合成開口レーダー(PALSAR)システムでは、数10kmの範囲の地殻変動を数cmの精度で捉えることが可能であり、2008年岩手・宮城内陸地震地域への適用では、解析結果として得られる干渉画像から断層の走向や変位のセンスを求められることが示されている(雨貝ほか, 2008)。GPS観測データからは、東北地方から近畿にかけての日本海側で、三角測量で指摘されていた変形集中帯の存在が明瞭となり(Sagiya et al., 2000)、この変形帯と内陸地震との関連の可能性が指摘されている。また、定常時の地殻変動を広範囲で精度よく得られることから、解析が手軽に行えるようになり、広域的にはプレート境界におけるすべりの時空間分布やすべり欠損分布の推定が試みられ、数km間隔で設置されたGPS観測点のデータに基づき活断層周辺の歪の蓄積過程を捉えることが可能となっている(鷲谷, 2009)。

サイト調査・評価の各段階において、合成開口レーダーやGPS観測などのデータを用いた測地学的手法を用いた地殻変動調査を行うことにより、断層周辺の地殻変動の状況を把握し、活動性の評価に反映することができる。

③ 地形学的手法

変動地形学の基本的な考え方は、渡辺・鈴木(1999)や日本応用地質学会応用地形学研究小委員会(2002)などにまとめられているが、近年の地震において、起震断層相当の活断層などが全国規模の活断層図などに記載されていなかった事例もあり(2008年岩手・宮城内陸地震など)、空中写真判読に代表される地形調査により不明瞭な変動地形を事前に検出することは、現在も重要な課題となっている。

この課題に対する近年の新たな研究として、高田ほか(2003)および木下ほか(2005)は、活断層であるかどうか不明確なりニアメントの偏在性に着目し、明瞭な活断層が地表に分布しない地域に対してリニアメント判断基準の検討を行っている。また、広域的な地殻変動を把握するという観点から、段丘から見積った隆起量の分布、あるいは、区分した段丘の分布から変動を抽出し、地表での位置が不明瞭な活断層の検出・活動性評価に活用する試みがなされた(田力・池田, 2005; 田

力ほか, 2009 ; 幡谷, 2006b ; 幡谷ほか, 2006 ; 幡谷・濱田, 2009)。さらに, 航空レーザー測量で作成された DEM (Digital Elevation Model, 以下 DEM という) の地形情報は, これまでにない解像度と客観性を有している。2008 年岩手・宮城内陸地震域での適用事例 (丸山ほか, 2009) では, 山間部の植生のある地域において断層変位地形が抽出されている。また, DEM を用いて地形の微小変化を捉えるための手法などが開発・提案されている (佐々木・向山, 2009 など)。

サイト調査・評価の各段階では, 変動地形学的手法は伏在断層の抽出や活動性の評価に適用が可能である。レーザー測量は詳細な DEM から変動地形を抽出する際に適用可能と考えられ, 必要に応じて概要調査の段階以降に適用できると考えられる。

④ 構造地質学的手法

現地調査において確認された断層の活動性の評価に際して, 断層とそれを覆う地層との関係に基づく評価ができない場合がある。このため, 断層を構成する物質 (断層岩) から直接断層の活動性を評価する手法の開発が進められている (田上ほか, 2010)。また, 断層岩の性状 (断層沿いの破碎, 変形, 変質などの状況) や断層ガウジの色調から断層の活動性を評価する手法の開発が進められ (小林・杉山, 2004 ; 相澤ほか, 2005), さらに, 断層岩や周辺地層の熱年代学的調査を含めた地質構造発達過程を踏まえて断層の活動履歴を評価する手法 (Tagami and Murakami, 2007 ; 伊藤, 2006 など) も検討されている。断層の摩擦熱によって形成される断層岩 (シュードタキライト) や断層熱に関する知見は, Lin et al. (2003, 2005) や福地ほか (2002) などに示されている。

海域では, 海底のタービダイトの詳細な解析により, 地震発生の頻度を解析する手法が開発されている (池原, 2000)。

これらの研究開発はその多くが現在進行中であり, その適用性にかかわる研究動向を注視しながら, 概要調査の段階とそれ以降の段階で, 状況に応じて適用する。

⑤ 地球物理学的手法

活断層調査に適用される一般的な物理探手法は, 反射法地震探査 (海域では音波探査), 電磁探査, 重力探査などであり, このほか地震波を利用した解析・評価手法がある。

反射法地震探査は, 特に層構造をなす堆積岩地域で有効な手法である。近年二次元解析処理技術や三次元地震探査技術の進展が著しく, 資源探査や海域での構造調査, 表層の地形, 堆積物調査への有効性が示され, 活断層の調査にも活用が進んだ。この 10 年間で多くの事例が蓄積され, 最も信頼性が向上した調査手法の一つである。さらに, より小規模な地質構造を把握する試みもなされている。佐々木ほか (2008) は, 六ヶ所村の鷹架層を対象とした地質詳細調査に三次元地震探査を適用し, ボーリング調査で認められていた中角度の落差数 10m の sf-c 断層について, 調査地域での連続性を明らかにした。また, 同地域で実施されていたボーリング調査などでは, 把握できていなかった小規模な変位の断層 (落差は約 5m) を sf-c 断層の上部に抽出しており (図 5.4.1-5), その後に掘削された調査坑道において, 固結・ゆ着した面なし断層として確認したことでその有効性を示した。

海域では, 浅海域を対象としたマルチチャンネル音波探査システムが開発され, 2007 年の能登半島地震の海底断層の調査などで使用された (井上ほか, 2007)。

以上のような反射法地震探査については, 概要調査における探査深度や目的に応じて, 多様な周波数の震源を組み合わせ, 適切な調査仕様を選択することにより, 水平方向の地質構造の比較や,

地下深部から浅部までの情報を取得する際に活用していく。

電磁探査では、海上音波探査を補完する水深 200m から波打ち際に対応した電磁探査システムの開発や改良が行われ（吉村ほか，2006a；大澤ほか，2010），ほかの電磁法と組み合わせることにより沿岸域から海域に及ぶ電磁探査法の適用性が検討されている（吉村ほか，2009；大里ほか，2009；上田ほか，2010）。

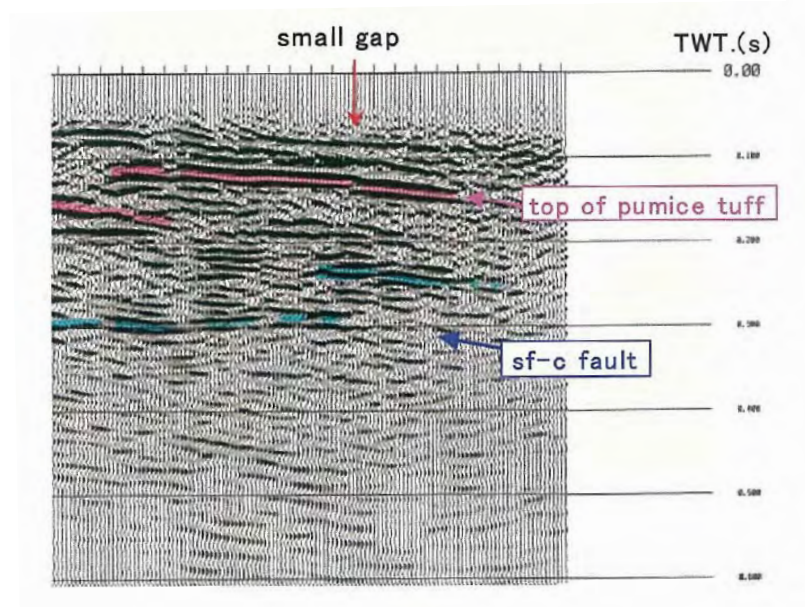


図 5.4.1-5 三次元地震探査で検出された小断層
(出典：佐々木ほか，2008)

sf-c 断層上盤の軽石凝灰岩最上部の反射面 (top of pumice tuff) に小さな変位を与える明瞭な小断層を確認。走向 N50° E，落差は約 5m（区間速度を 2000m/s と仮定）と推定された。

主要な活断層近傍では、重力変化の大きい急変帯となっていることや、断層長が重力の急変帯を超えることは少ない（井上ほか，2006）ことなどから活断層の概略の位置，連続性を評価する手法の一つとして重力探査の活用も考えられる。

地震波を利用した解析手法は、地震観測網の整備と解析手法の高度化により精度の高い地下構造の評価が可能となっている。岡田・長谷川（2005）は、地震観測データをトモグラフィ解析することにより 1995 年兵庫県南部地震域，2003 年宮城県北部地震域での震源断層のイメージングを行った。また、地震データの解析をもとにした、活褶曲地域における震源断層評価として、青柳・阿部（2007）は新潟県中越地震の震源域において、補正した震源分布から震源断層を推定し、有限要素法による模擬的変動解析と地質構造とを対比する手法で、活褶曲地帯での断層評価を行う手法を示している。

概要調査では、調査対象地域の特徴に応じた地球物理学的手法を組み合わせることでサイト選定のための調査・評価を進める。特に、現地調査の初期では、二次元の反射法地震探査（海上音波探査）を優先的に行い、必要に応じて三次元の反射法地震探査などを取り入れる。

⑥ 地球化学的手法

伏在断層の存否および活動性を地球化学的に抽出、評価する手法の開発が進められている。主な手法として、岩石の破壊により生じる水素ガス (Kameda et al, 2003) を地表で測定する手法 (黒澤ほか, 2010 ; Shimada et al., 2008) や温泉, 地下水, 土壌中のガスに含まれるヘリウム同位体を測定することにより変動地形が不明瞭な断層や伏在断層を抽出する技術 (Umeda et al., 2008 ; Umeda and Ninomiya, 2009 など) などがある。

これらの手法は、事例の蓄積など、実証性の向上にかかわる動向に留意し、概要調査の段階以降において、活断層の分布を把握する際に必要に応じて適用する。

⑦ 総合的評価手法

近年、震源断層の評価として、複数の調査手法を組み合わせ、総合的に評価する方法論が検討されている。青柳・阿部 (2009) は、微小地震活動のデータ解析, 航空レーザー測量による地形起伏量の変化ゾーンの抽出, 反射法地震探査による不連続地下構造の解析を組み合わせることにより、震源断層にかかわる活構造を評価する手法を示している。

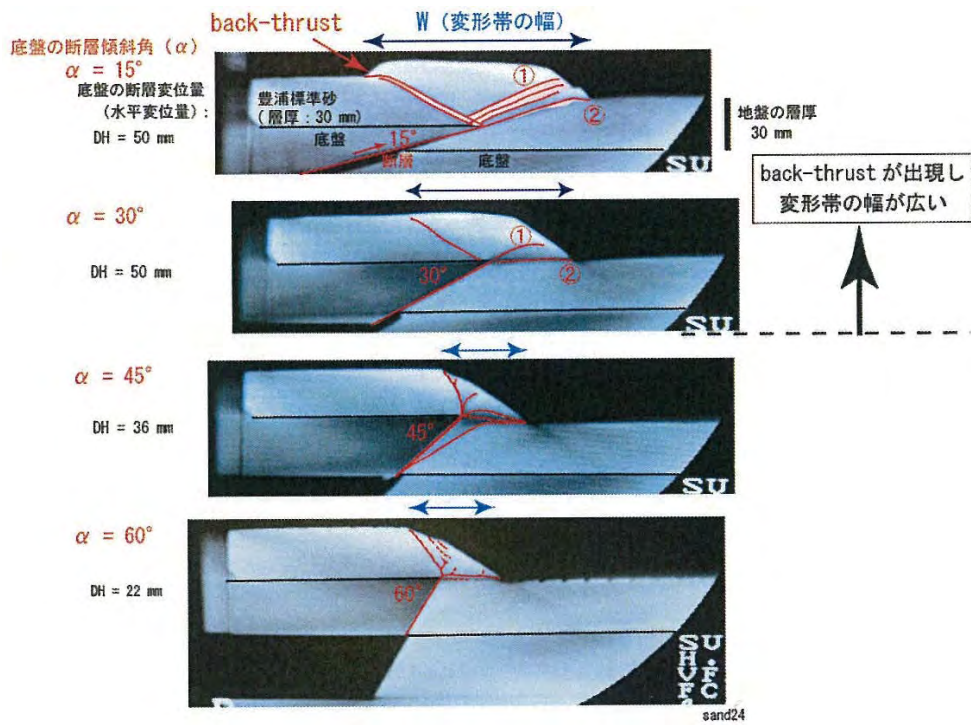
地下深部の活断層の存在を三次元的に把握するためには、それぞれの個別の調査手法はもとより、測地, 地質学, 物理探査, 地球化学, ボーリング調査, 数値解析など複数の調査手法を適切に組み合わせることが重要であり、総合的な評価手法については今後も高度化していく必要がある。

(ii) 活断層周辺の変形帯・影響範囲の把握

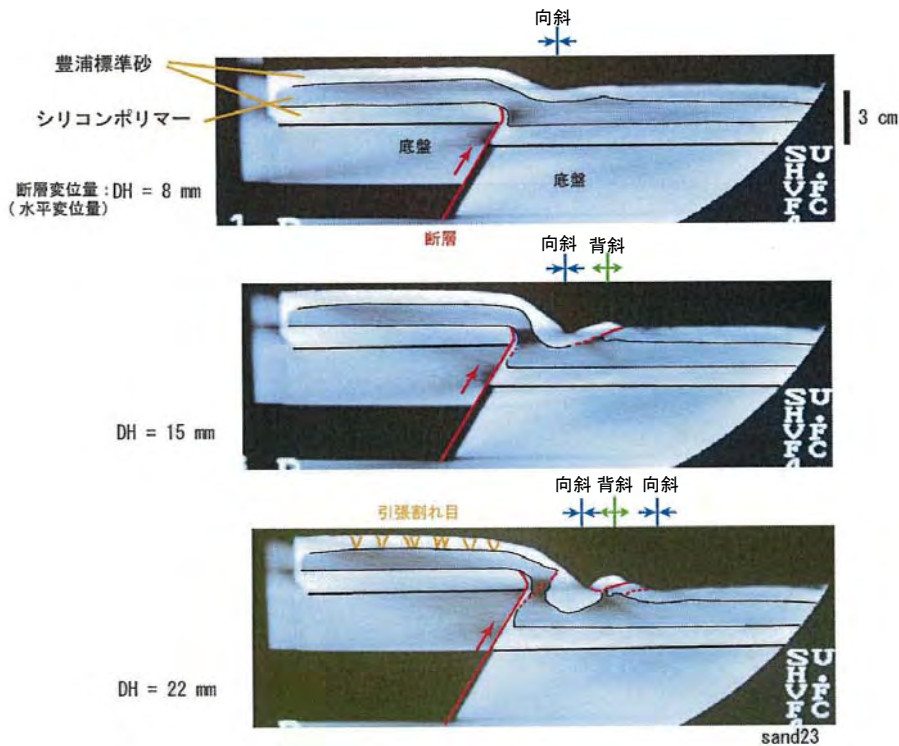
① 変形領域の把握

断層関連褶曲の評価には、断層運動によって形成される撓曲および活褶曲の発達過程に伴い形成される特徴的な堆積構造 (growth triangle および growth strata) について、音波探査データなどをもとにバランス断面法などを活用し、解析・評価する手法 (岡村, 2000) が適用されている。

活褶曲に関する知見は、池田 (2002) により形成メカニズムに基づくタイプ分けとして示されている。活褶曲に関する評価手法は、2004年新潟県中越地震域を対象に開発・検討されており、模型実験による逆断層・活褶曲帯の発達過程・影響範囲を評価する手法 (上田ほか, 2005 ; 上田, 2011), 断層関連褶曲の考えに基づき既存の地質構造データとバランス断面法により地下の断層形態を推定する手法 (岡村・石山, 2005) が示されている。上田 (2011) は、基盤岩 (花崗岩類・先新第三系など) の逆断層の変位に伴い形成される被覆層内 (新第三紀層など) の活断層・活褶曲群の形態や発達過程が、基盤岩の逆断層の傾斜角や被覆層の性状の違いによりどのように変化するか検討するために、乾燥砂やシリコンポリマーを用いた模擬被覆層の変形に関する模型実験を行った (図 5.4.1-6)。基盤岩の逆断層の傾斜角を変えた乾燥砂の単層の実験では、断層の傾斜角が低角の場合は逆向きに傾斜する断層 (back-thrust) が生じ、高角の場合に比べ変形帯の幅が広がった。乾燥砂・シリコンポリマーの複数層の実験では、基盤の逆断層の変位増大に伴い、主要な撓曲崖の低下側に小規模な褶曲群・逆断層群が形成された。このような変形様式は、実際の逆断層・活褶曲帯における地質構造の解釈と整合することから、このような地域の変形領域を評価する際には、基盤の断層傾斜角, 累積変位量, 被覆層の構成・物性を現地調査で明らかにすることが重要であると指摘した。



(a)



(b)

図 5. 4. 1-6 逆断層・活褶曲帯の発達過程・影響範囲に関する模型実験 (CT スキャン断面)
(上田, 2011 を編集, 一部加筆)

- (a) 基盤岩の逆断層の傾斜角の違いによる乾燥砂層の変形様式の変化：基盤岩（底盤）の逆断層の傾斜角が低角の場合は逆向きに傾斜する断層（back-thrust）が生じ、高角の場合に比べ変形帯の幅が広がる。
- (b) 基盤岩の逆断層の変位に伴う乾燥砂・シリコンポリマー複数層の変形過程：基盤岩（底盤）の逆断層の変位増大に伴い、主要な撓曲崖の低下側に小規模な褶曲群（向斜・背斜）や逆断層群が形成される。

逆断層帯の形成過程および変形領域の評価は、地質構造調査（地形、地質、物理探査）から得られた地質構造をもとにバランス断面法を適用して解析する手法が用いられる。小坂ほか（2009）は、北上低地西縁断層帯に、楮原ほか（2006）、Kagohara et al.（2009）などは、横手盆地東縁断層帯・千屋断層を対象に解析を行っている。

横ずれ断層については、JAEA が、断層周辺の岩盤の変形領域や地形変化の範囲の推定を既存の数値解析プログラムで解析し、その有効性と適用性を確認している（JAEA, 2010b）。

以上のような断層関連褶曲の概念をもとにした解析は、影響範囲の評価や調査計画の立案における参考情報あるいは目安となる。概要調査では、現地調査と解析結果との整合性を確認しながら、その適用について検討する。

② 断層の発達・伸展の評価

逆断層の評価としては、模型実験による発達過程の解析による評価手法（上田ほか、2003）があり、横ずれ断層の評価については、中部地方と中国地方での、横ずれ断層の発達程度の比較（松田ほか、2004）や模型実験・シミュレーションによる横ずれ断層の発達過程や幅の検討が小山・谷（2003）、Kase and Day（2006）、上田（2009）、澤田・上田（2009）などにより行われている。

横ずれ断層評価事例の中で、上田（2009）は、断層変位に伴う岩盤の変形過程に関して模型実験と実地盤の地表の変形帯の比較を行い、その結果から変形特性を把握し変形帯の幅を予測する手法と評価する上での留意点を示している。すなわち、変形過程の初期に、断層変位の増大に伴いリーデルセン断に相当する雁行状のフラクチャー群が形成され、次にリーデルセン断は連結し屈曲部を有する一連の主断層が形成される。屈曲部では逆断層成分を有する新しいフラクチャーが分岐・発生し外側へ発達するため断層の幅が広がる。しかし、屈曲部の岩盤深部ではフラクチャーゾーンの幅は狭く、より直線状の主断層が形成される。このような事実に基づき断層変位に伴う岩盤の変形を評価する上での留意点は、評価対象の断層の形態・活動性を把握し、断層の成長過程（発達段階）と岩盤の物性と応力状態を考慮し評価を行うことであるとしている。

上記の手法については、必要なデータが得られた段階で、モデル実験やシミュレーションを組み合わせた解析を行い、その結果を追加調査の立案へ反映させたり、断層の発達・伸展の評価・予測に供する。

③ 断層破碎帯の評価

断層の発達過程で形成される破碎帯やその分布範囲に関する知見は、地下水流動、地下水の地球化学的状態の変化、岩盤中での物質の移動にかかわる影響を評価する上で重要である。例えば、破碎された部分は水みちに、さらに細かく破碎され粘土化した部分は遮水構造になり得るため、岩盤の透水性や物質移行特性に影響を及ぼす可能性がある。また、破碎帯は、地表付近の酸素を溶存した地下水の流入経路にもなり得るため、地下深部の酸化・還元環境に変化を与える可能性がある。一般的に断層の規模が大きいほど破碎帯の幅も大きくなるとされている。断層運動の影響が周囲の岩盤に及んだ範囲に関する地質学的知見は金折（2001）にまとめられている。近年では、花崗岩分布域において割れ目の発達過程や変質の程度などについて地質学的、地球化学的な調査を行い、地下水流動や岩盤中での物質の移動にかかわるダメージゾーンの研究が進められている（例えば、Yoshida et al., 2005；吉田ほか、2009）。吉田ほか（2009）は、断層および割れ目の充填鉱物を用いることにより、断層の影響の及んだ範囲に形成される割れ目（酸化物で充填された連続性の悪いネ

ットワーク状の割れ目)と既存の岩体に普遍的に形成されたバックグラウンド割れ目(連続性がよく熱水性起源の充填鉱物を有する単一割れ目)を区分する手法を示している。また、その手法を岐阜県東部の阿寺断層に適用し、200m程度の範囲に短い割れ目の密度が増加し、ダメージゾーンが形成されていると評価している。さらに、断層の近傍では、母岩の主成分元素のうちNa, K, Siなどの減少が見られることや酸化鉱物が見られることから熱水変質と天水の循環が生じていたことを示唆している。

地球物理学的手法を適用した事例として、麻植ほか(2007)は、電磁探査MT法で断層深部の比抵抗のイメージングにより、ダメージゾーンの広がり进行评估している。

概要調査の段階以降の地表調査、ボーリング調査、地下調査施設における調査において、これらの手法はダメージゾーンの判定や割れ目の形成履歴の解析を通じて地質環境特性(岩体中の割れ目の状態や分布特性、水理学的な影響範囲など)の評価に適用可能と考えている。

(iii) 地質断層の再活動性の評価

東北日本弧では、新第三紀中新世に形成された正断層帯が新第三紀鮮新世～第四紀の広域的なテクトニクスの変化により逆断層活動へと変化しているとされ(佐藤, 1996; Kato et al., 2006), 近年発生した被害地震である2003年宮城県北部地震や2008年岩手・宮城内陸地震などは、地質断層の再活動によることが示されている(Kato et al., 2004; 遅沢, 2009など)。また、山崎(2006)によれば、南関東では基盤に大きな変位を与える中新世に形成された正断層(基盤断層)のうち、長津田付近から東北東方向に推定される基盤断層が、鮮新世末頃に再活動を開始したが、前期更新世末には活動を停止したことが示されている。一方、北西走向の立川断層は反射断面や変位速度などによる考察から、中期更新世に逆断層として再活動をはじめ、現在も継続しているとしている。このような基盤断層の再活動の時期が顕著に異なる原因について、山崎(2006)は伊豆半島の衝突による応力場の局所的な変化によると推定している。梅田ほか(2010)では、活断層の多くが地質断層の分布と整合的であり、既存の地質断層が応力場の変化に伴い再活動したことを指摘している。以上のことから、活断層以外では規模の大きな地質断層を対象に再活動性を検討していくことが重要であると考えられる。

山田・松岡(2004)は、既存断層の再活動の評価について、既存断層面の再活動ポテンシャルを検討することにより可能であるとしている。ここでの三次元的な解析では、最大圧縮主応力軸方向と断層面の走向方向が30°程度にあるとき、最も再活動しやすいと述べている。

このように、断層の再活動に関する知見は蓄積されているものの、その評価手法は確立されたとは言いがたく、概要調査地区内で検出された活断層ではない断層の遠い将来における再活動については、不確実性が大きい。このため、5.3に述べたように、再活動の可能性を安全評価上のシナリオとして考慮し、ここに紹介した研究事例を安全評価シナリオ構築の参考とする。

(iv) 断層活動に関する確率論的評価

国際テクトニクス会議での日本の地震・断層活動評価に関する議論(Chapman et al., 2009a)に基づき、決定論的な評価を補足するための手法として、GPS、地震、地表変位などのデータを活用した断層活動の確率論的な評価手法が開発された(Chapman et al., 2009b, 2009c, 2009d)。ここでは、過去数万年の地表変位データ(活断層、活褶曲、隆起・沈降)、数10年間のGPSデータ、約400年間の歴史地震データからそれぞれの歪速度モデルを作成し、パラメータの幅や概念モデルの不確実

性を考慮したロジックツリーを構築し、それに基づくモンテカルロ・シミュレーションを行うことにより、確率論的な歪速度分布図を作成し評価を行っている（図 5.4.1-3, 図 5.4.1-7）。

また、防災の観点からは、数 10 年程度の予測として地震ハザード解析をもとにした地震動の発生確率値が示されている（地震調査研究推進本部, 2010）。同様な地震のハザードマップはニュージーランドでも作成されている（Stirling et al., 2002）。

サイト調査・評価の各段階において、確率論的手法による評価結果は、用いるデータの精度を考慮した上で、決定論的手法による評価の参考情報として利用することができる。また、火山・火成活動に関する手法と同様に、限られた情報しか得られない場合や、より小さなスケールへの適用性、そして確率論的評価の結果をどのように活用するか、などの検討課題が残されている。

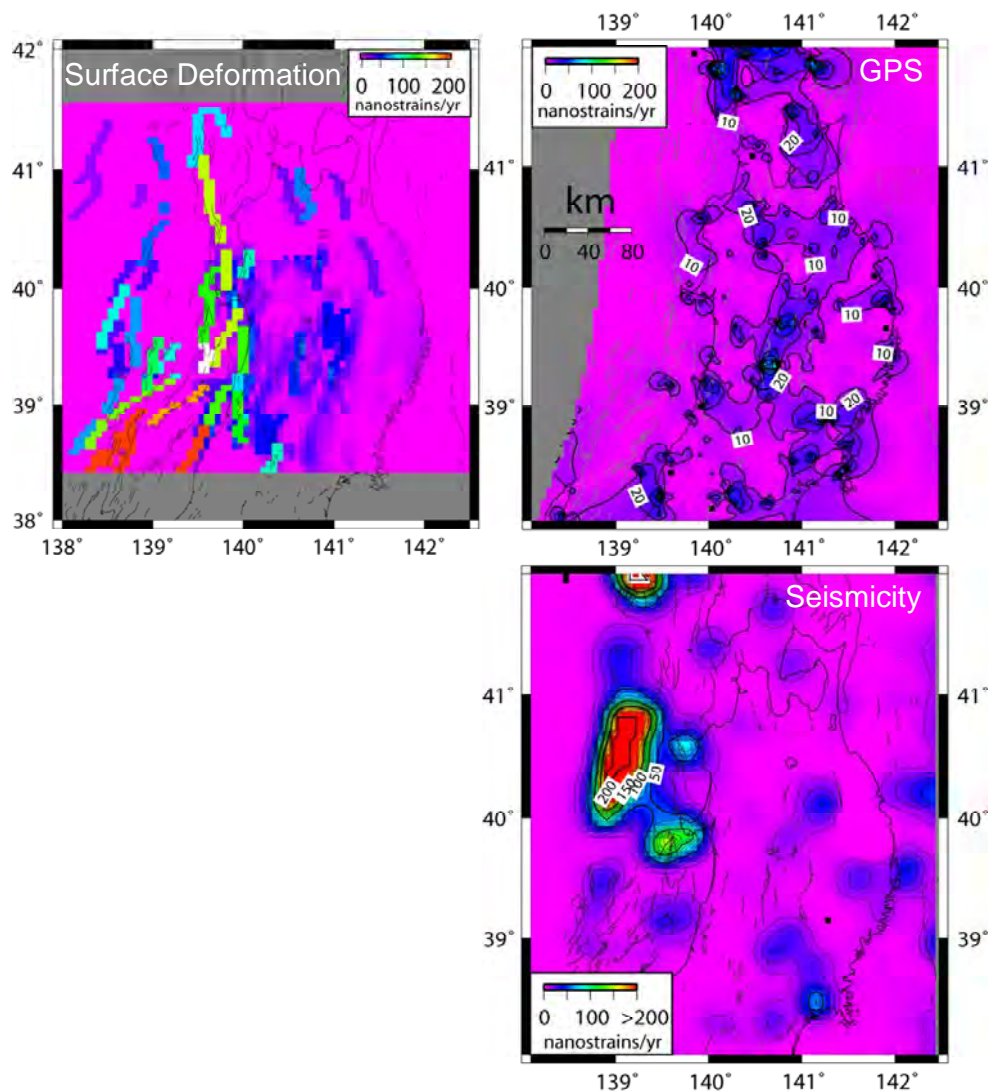


図 5.4.1-7 東北地方のケーススタディにおける確率論的な歪速度分布図の例
 (Chapman et al., 2009c を編集)

地表変形（断層変位と傾動）（左上）、GPS（右上）、歴史地震（右下）の文献情報に基づくそれぞれのロジックツリーをモンテカルロ・サンプリングすることにより得られる、5km 四方の領域の「最も生じる可能性の高い歪速度」の分布。歪速度の単位はナノストレイン/年。例えば、10 万年間に 5km の区間が 2m 変位した場合の歪速度は、4 ナノストレイン/年に相当する。

(3) 隆起・侵食にかかわる調査・評価技術

隆起・侵食については、第2次取りまとめ（JNC, 1999b）までに、段丘などを指標とした過去の隆起量、侵食量を評価する手法の整備が行われた。全国の隆起・沈降速度の概略的な分布が把握され、各地の侵食速度については、面的な侵食と線的な侵食（下刻）に分けて検討が行われた。面的な侵食については地形の起伏状態と相関が大きいことを利用して全国の分布図が作成され、線的な侵食については代表的な河川を例として侵食の規模やプロセスが検討された。第2次取りまとめ（JNC, 1999b）では、内陸部の隆起・侵食量の評価手法の信頼性向上、海水準変動を含めた将来の地形変化予測手法の開発が課題として挙げられていた。

隆起・侵食、気候・海水準変動に関する基本的な調査・評価手法については、第2次取りまとめ以降、情報整備がなされ、さらに、事例研究などを通じて、隆起・沈降量調査・評価、侵食量・侵食速度調査・評価、気候・海水準変動の復元などの手法の改良、高度化、体系化が図られている。後述するように、河成段丘の対比・編年の信頼性の向上に伴い、過去10万年間程度の内陸部の隆起量とその不確実性を評価することが可能となり、活断層の活動性評価にも応用できる可能性が示された。将来の地形変化予測では、過去の侵食履歴に基づき、気候・海水準変動も考慮した地形変化予測手法や拡散方程式による地形変化シミュレーション技術の開発が進められ、長期的な地下水流動解析への情報提供が行われている。表 5.4.1-5 に、以上の項目ごとの調査・評価技術の概要と、その技術を適用できる調査段階（文献調査、概要調査、精密調査）、ならびに関連する文献を示す。

(i) 情報整備

全国規模の情報として、日本の海成段丘アトラス（小池・町田, 2001）、最近約10万年間の全国の隆起・沈降量分布図（NUMO, 2004）、最近約10万年間の隆起速度分布図（藤原ほか, 2005a；地質環境の長期安定性研究委員会, 2011）がある。藤原ほか（2005a）は、わが国に10万年間の隆起の総量が300mを超えない地域が広く分布していることが示した。また、侵食に関連する情報として、200万分の1日本列島の地すべり地形分布図（藤原ほか, 2004）が整備された。

表 5.4.1-5 隆起・侵食（気候・海水準変動含む）にかかわる調査・評価技術

項目と内容	概要	段階			文献	
		文献調査	概要調査	精密調査		
情報整備	全国規模の情報として、日本の海成段丘アトラス ¹⁾ 、最近約10万年間の全国の隆起・沈降量分布図 ²⁾ 、最近約10万年間の隆起速度分布図 ³⁾ 、200万分の1日本列島の地すべり地形分布図 ⁴⁾ が整備された。	○			1)小池・町田(2001) 2)NUMO(2004) 3)藤原ほか(2005a) 4)藤原ほか(2004),地質環境の長期安定性研究委員会(2011)	
隆起・沈降量の調査・評価	段丘対比・編年	年代測定データの誤解釈を避けるため、地形層序・地質層序・年代情報のバランスを重視した総合的な段丘対比・編年の考え方が示され ⁵⁾ 、詳細な火山灰分析手法 ⁶⁾ を使って実証された ⁷⁾ 。これらを支える技術として、数値標高モデル(DEM)を用いた段丘面の定量化手法とその段丘対比への応用 ⁸⁾ 、河成段丘を構成する被覆層と段丘礫層の風化指標の見直しが行われた ⁹⁾ 。これらにより、内陸部の隆起量評価に用いる海洋酸素同位体ステージ6の後期(14万年前頃)に形成された河成段丘の同定の信頼性が向上した。	○	○	5)幡谷(2005,2006a);幡谷ほか(2005) 6)古澤(2004) 7)幡谷ほか(2006) 8)山本ほか(2008) 9)濱田・幡谷(2009,2011)	
	河成段丘を用いた内陸部の隆起量評価	河成段丘を用いた内陸部の隆起量評価の適用性を取りまとめ、誤差要因が整理された ¹⁰⁾ 。また、活断層の落差と段丘の比高から求められる断層両側の隆起量差とが釣り合うことから、河成段丘を用いた隆起量の見積りの妥当性が示された ¹¹⁾ 。	○	○	10)田力・池田(2005) 11)幡谷(2006b)	
	堆積物による隆起・沈降運動の復元	年代が明らかな地層の堆積時の深度と現在の分布高度と海水準を比較することにより、過去から現在までの隆起・沈降運動を把握する手法 ¹²⁾ 、シーケンス堆積相解析手法を用いて古地理、内陸盆地の発達過程を解明する手法 ¹³⁾ が示された。		○	12)白井・阿部(2001) 13)守屋ほか(2008)	
侵食量・侵食速度の調査・評価	地形変化の予測 地形変化モデル	新旧海成段丘面上の侵食地形の比較から過去の侵食履歴・侵食量を見積り、これと気候・海水準変動を組み合わせた地形変化予測手法 ¹⁴⁾ 、拡散方程式による地形変化シミュレーションによる地形変化予測手法 ¹⁵⁾¹⁶⁾ の開発が行われている。また、氷期-間氷期の1周期の間に形成される海成段丘面上の開析谷の深さとその体積をDEMを使って求め、これらから下刻速度と段丘全体の平均侵食速度を求める手法 ¹⁷⁾ が提案された。	○	○	14)Sasaki et al.(2009) 15)JNC(2005a) 16)三箇・安江(2008) 17)藤原ほか(2005b)	
	年代測定手法を応用した長期的侵食(削剥)量の評価	鉱物の閉鎖温度と埋没深度の関係に基づいて、年代測定手法を応用し、数100万年オーダーの地質体の上昇(隆起)、削剥速度の評価を行う手法 ¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾ 、鉱物・有機物の熱による変化(シリカ鉱物相転移など)と堆積物の埋積深度、年代、埋積時の地温勾配の推定などにより堆積層の隆起、削剥量を推定する手法 ²¹⁾ が開発された。		○	○	18)川上ほか(2006) 19)末岡ほか(2010) 20)Yamada and Tagami(2008) 21)JNC(2005a);石井ほか(2008)
	宇宙線生成核種を用いた侵食速度測定	地表物質と宇宙線が反応することにより生成される原位置宇宙線生成核種とその核種の年間生成量から、露出していた期間や侵食速度を推定する手法 ²²⁾²³⁾²⁴⁾ の開発が進められている。		○		22)若狭ほか(2004,2008) 23)松四ほか(2007) 24)Matsushi et al.(2006)
気候・海水準変動の復元	段丘の風成層の解析 ²⁵⁾ 、内陸盆地で掘削されたコアの堆積物解析 ²⁶⁾ 、花粉分析 ²⁷⁾ により、地域的な気候変動の解析や植生変遷の復元が進められている。		○	○	25)Kimura et al.(2001) 26)佐々木ほか(2006) 27)守田ほか(2006)	

○：主な適用段階

(ii) 隆起・沈降量調査・評価

サイトの隆起・沈降特性を的確に把握するためには、海岸部と内陸部にわたる隆起・沈降量（速度）分布の把握が必要である。海岸部の隆起量については、海成段丘を使った手法により過去 10 万年間の隆起速度分布が日本全国網羅的に取りまとめられた（小池・町田，2001）のに対し、内陸部の研究が遅れていたため、その解決に向けた検討が進められた。また、地形学的手法では見積りが難しい 10 万年よりも長期の隆起・沈降量評価に向けた検討も進められた。

① 河成段丘を用いた内陸部の隆起量調査・評価

過去 10 万年間程度の内陸部の隆起量評価については、河成段丘を用いる手法が提案されていたが（吉山・柳田，1995），河成段丘の対比・編年の信頼性を確保することと、隆起量の指標となる河成段丘の比高が隆起量をどの程度正しく反映しているかを示すこと、という信頼性向上にかかわる二つの課題があった。前者については、地形層序・地質層序・年代データのバランスを重視した段丘対比・編年手法の検討が進められ、河成段丘の対比・編年の信頼性が向上した（幡谷，2005，2006a；幡谷ほか，2005，2006；幡谷・濱田，2009；山本ほか，2008；濱田・幡谷，2009，2011）。後者に対しては、隆起量の指標となる河成段丘の比高の信頼性について適用性の取りまとめと誤差要因の整理や、断層変位との比較による妥当性の検証がなされた（田力・池田，2005；幡谷，2006b；Hataya et al.，2009：図 5.4.1-8）。これらの研究を通じ、段丘を指標とした隆起量評価の不確実性の所在が整理され、誤差はやや大きい場合があるものの、不確実性を考慮した評価ができるようになった。

これらの手法は、文献調査では既存データによる概略的な評価、概要調査では詳細なデータによる評価が可能であり、対象地域における隆起量とともに、地殻変動の把握に向けた情報取得のため、各段階で適用する。

② 堆積物による隆起・沈降運動の復元

2000 年以前には、藤原ほか（1997），下山ほか（1999）といった、海洋酸素同位体ステージ 5e に堆積した海成層から地殻変動を復元した検討事例があった。これに対し、2001 年以降には、より長期の変動が復元されるようになった。

例えば、白井・阿部（2001）は、堆積層中の基準面を設定し、その上位の各地層の形成年代および汎世界的海水準から水深と基準面までの層厚を差し引くことで、現在の海水準に対する基準面の高度変化（隆起・沈降）を把握する手法を提案し、40 万年程度の地殻変動の解析を行っている。また、守屋ほか（2008）は、新庄盆地の鮮新統の堆積層解析から堆積シーケンスの区分を行い、フィッシュトラック年代測定と合わせた構造発達史を示している。

これらの手法は、基本的には、地層の堆積当時の深度と現在の分布標高あるいは深度との比較から隆起・沈降量を見積るという基本的な原理に基づくものである。サイト調査・評価においては、堆積深度の見積り、堆積年代などに含まれる不確実性に留意し活用していく。

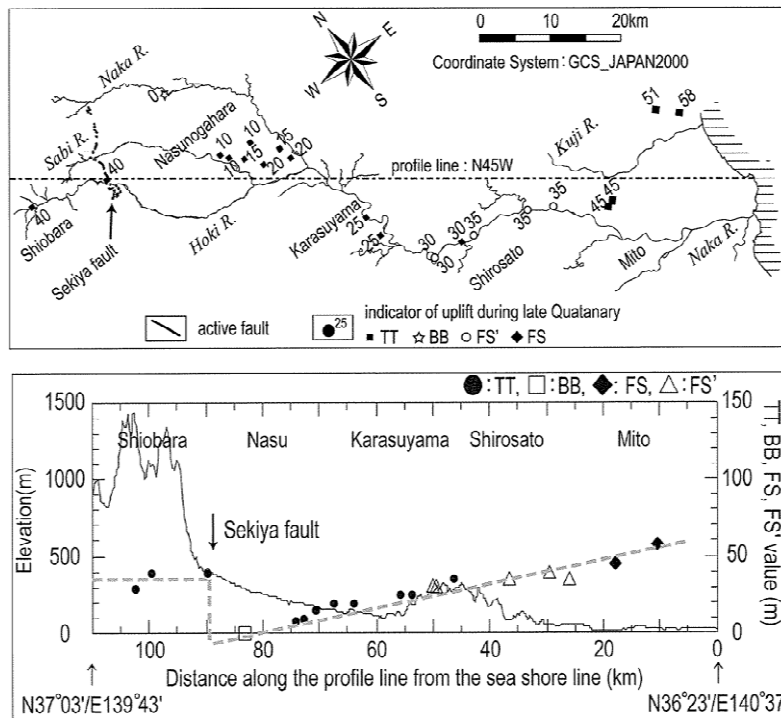


図 5.4.1-8 河成段丘を用いた内陸部の隆起量の調査・評価事例
(出典：Hataya et al., 2009)

上：那珂川流域の河成段丘の調査位置と用いた手法。下：河成段丘の詳細な対比・編年に基づく第四紀後期の隆起量のプロットと地形断面図。TT, BB, FS, FS' は吉山・柳田 (1995) により定義された過去 10 万年程度の隆起量の算出に用いた手法。活断層の南東側の地域の傾動運動が明瞭に認められる。

(iii) 侵食量・侵食速度の調査・評価

侵食量については、ダムの堆砂量データや高度分散量により評価する方法に基づいて全国規模の侵食に関するマップが整備されている (Yoshikawa, 1974; 藤原ほか, 1999 など)。しかし、これら侵食量の見積りの根拠となったデータの取得期間は短い。このため、近年は、より長期の地形変化予測手法、地形変化 (侵食量) の直接測定にかかわる検討が進められている。

① 地形変化の予測, 地形変化モデルの構築

地形変化の予測手法としては、過去の侵食履歴に基づき、気候・海水準変動も考慮した地形変化予測手法 (Sasaki et al., 2009) や、DEM を利用した海成段丘の開析谷の体積から侵食速度を求める手法が提案された (藤原ほか, 2005b)。内陸の侵食量評価では、大河川の中～上流域では 1 サイクルの氷期・間氷期ごとに下刻量と隆起量がほぼつりあい、隆起量がおおむね長期的な下刻速度となることが示された (高木ほか, 2000)。気候段丘モデル (貝塚, 1977) も含め、これらの研究成果により、内陸部も含めた考え得る最大の下刻量の見積りが可能となった。

一方、開発途上の研究開発としては、拡散方程式による地形変化シミュレーション技術の開発がある (JNC, 2005a; 三箇・安江, 2008 など)。これらの研究開発上の課題としては、現実に即したパラメータの設定、河川の側方侵食、河川の凹形度、地質分布を含めたプログラムの開発、沿岸部を取り込んだシミュレーションの実行などが挙げられる。これらの手法は、地形変化の検証が大きな課題となっているが、評価の保守性が確保できれば、これらの結果をもとにした地質環境の評価

に利用することも可能であると考えられる。従って、研究開発の進行状況を鑑み、その保守性を確認し、適切に取り入れていく。

② 年代測定手法などを応用した長期的な侵食（削剥）量の評価

熱年代学的手法による長期的な変動履歴の解析手法として、鉱物の閉鎖温度と埋没深度の関係に基づいて、フィッシュントラック法・(U-Th)/He法などの年代測定手法を応用した数100万年オーダーの地質体の上昇（隆起）、削剥速度の評価（川上ほか、2006；Yamada and Tagami, 2008；末岡ほか、2010）が行われている。また、鉱物・有機物の熱による変化（シリカ鉱物相転移など）と堆積物の埋積深度、年代、埋積時の地温勾配の推定などで堆積層の隆起、削剥量を比較的長い地質時代を対象に評価する手法の開発が進められている（JNC, 2005a；高橋ほか、2005；石井ほか、2008）。

また、現在、宇宙線生成核種を用いた年代測定手法を応用した侵食速度の推定手法の開発が進められている（若狭ほか、2004；松四ほか、2007；Mahara et al., 2010 など）。これは、地表が宇宙線の照射を受けた期間に、地表物質と宇宙線が反応することにより生成され、地表物質中に蓄積された、原位置宇宙線生成核種量とその核種の年間生成量から、露出していた時間や侵食速度を測定する手法である。この手法を適用し、中期更新世の海成砂岩層の侵食速度の推定（Matsushi et al., 2006）、河床の露出年代から下刻速度を推定（若狭ほか、2008）している事例がある。

熱年代学的手法や鉱物・有機物の熱による変化を利用した手法は、過去の地温勾配を仮定する必要があるなど不確定要素が含まれ、分解能の高い評価が困難な場合もあるが、数100万年の長期の概略的な評価を可能とした。また、宇宙線生成核種を利用した侵食速度測定技術は、地形変化モデルの検証への適用が期待されている。概要調査の段階以降においては、これらの適用事例を参考にしつつ、最新の情報を取り入れて必要に応じて活用していく。

(iv) 気候・海水準変動の復元

気候・海水準変動の解析については、過去数10万年間の地球規模での氷期-間氷期サイクルが存在することに対する知見は整理されているが（EPICA community members, 2004 など）、地域的な規模の変動に対する解析手法の整備と知見の蓄積が必要とされている。

近年の研究としては、段丘の風成層の解析（Kimura et al., 2001）、内陸盆地で掘削されたコアの堆積物解析（佐々木ほか、2006）、花粉分析（守田ほか、2006）などの研究により、地域の気候変動の解析や植生変遷の復元が進められてきた。

ここに示した気候・海水準変動の解析手法は、細粒堆積物の分布が必要条件であり、対象地域にそのような地層が分布する場合には適用できる。

5.4.1.2 地質環境特性にかかわる調査・評価技術

地質環境特性にかかわる分野では、第2次取りまとめ（JNC, 1999b）までには、特に地層処分を目的として地下深部の地下水流動や岩盤中での物質の移動などにかかわる評価に必要なデータを取得する機器や手法の開発、サイト調査の基礎になる要素技術（物理探査など）について適用性の確認や基盤技術の整備が行われてきた。それに続く第2次取りまとめ以降の技術開発の目標には、幌延および瑞浪の深地層の研究施設を利用して、手法の高度化と体系化を図りつつ、わが国の代表的な地質環境である堆積岩と結晶質岩における地質環境の特性のばらつきに関する知見の蓄積が挙げられている。これに基づき、第2次取りまとめ以降の深地層の研究施設計画では、地質・地質構造に関するデータ取得から解釈・モデル構築までの一連の調査・評価の調査研究の成果を用いて、文献に基づく調査段階から地上からの調査段階（精密調査の前半までに相当）までを対象とした手法の高度化ならびに統合的調査評価システムが開発された。また、沿岸域を対象にした調査評価手法の整備では、沿岸域の断層評価手法、塩淡水界面形状把握、海底地下水湧出探査技術、ボーリング技術、物理探査技術の高度化調査などが行われてきた。

ここでは、地質環境特性にかかわる項目について、地質・地質構造、地下水流動特性、地下水化学特性、岩盤特性（力学特性、熱特性など）、物質移行特性、そのほかの特性、地質環境、周辺環境、放射線の状況などを対象としたモニタリング技術に区分して記述する。表 5.4.1-6～表 5.4.1-8 に、これらの項目ごとの調査・評価技術の概要と、その技術を適用できる調査段階（文献調査、概要調査、精密調査）、ならびに関連する文献を示す。

なお、ここに示した調査手法は、既存の手法を調査・評価対象に応じて改良したものや解析手法の高度化が行われたものである。NUMO は調査地域の地質環境特性に応じて、概要調査の段階以降、実績が豊富な既存の調査・評価手法はもとより、これらの高度化手法も選択肢として適用する。得られた結果は地質環境モデルの構築に反映する。

表 5.4.1-6 地質環境特性にかかわる調査・評価技術 (1/3)

項目と内容		概要	段階			文献	
			文献調査	概要調査	精密調査		
地質・地質構造	物理探査	反射法地震探査（海域では音波探査）においては、二次元手法の処理法の進展 ¹⁾ と三次元手法による資源調査 ²⁾ 、海域での地質構造解析、活断層、堆積物、地形調査 ^{3) 4) 5)} や、陸域での地質地盤調査（落差 5m 程度の小規模断層）分野 ⁶⁾ での適用が進んでいる。また、浅海域の地質構造を精度よく把握するためのマルチチャンネル音波探査システム ⁷⁾ が開発されている。音波探査を補完する水深 200m～波打ち際に対応した海底電磁探査システム ⁸⁾ の開発 ⁹⁾ や、陸域から海域に対応した手法の整備と三次元解析手法の開発 ⁹⁾ が進められている。MT 法の解析に必要な高品質データの取得に重要なスタッキング法の開発 ¹⁰⁾ が行われている。		○	○	1) Yilmaz (2001) 2) 芦田 (2005) 3) 松岡 (2007) 4) 佐伯ほか (2006) 5) 朴ほか (2008) 6) 佐々木ほか (2008) 7) 井上ほか (2007) 8) 吉村ほか (2006a) 9) 吉村ほか (2006b) 10) 根木ほか (2007a, 2007b)	
	ボーリング掘削	掘削方位や傾斜を制御しコア採取や孔内調査を行うことができるシステムとして開発され、沿岸域などでの掘削にも対応している ^{11), 12)} 。		○	○	11) 木方ほか (2006) 12) 木方ほか (2009)	
	結晶質岩中の亀裂解析	花崗岩中のボーリング孔の亀裂と基盤岩地形・断層との関連を考慮した空間的な亀裂密度分布推定手法 ¹³⁾ 、異なるスケール間の亀裂分布の法則性・相互関係を考慮可能なマルチスケールでの亀裂分布のシミュレーション技術 ¹⁴⁾ が開発されている。		○	○	13) 栗原ほか (2008) 14) 小池ほか (2008)	
	堆積岩中の亀裂解析 (三次元構造)	水理特性解析の基礎となる断層などの透水構造の三次元分布を把握する手法について異なるスケールで開発 ¹⁵⁾ されている。ボーリング調査結果に基づく亀裂の特性解析手法と地質構造モデルの構築手法 ¹⁶⁾ 、断層の成長メカニズムを考慮した岩盤力学的応力計算に基づく高透水構造の空間分布の調査・解析手法 ¹⁷⁾ 、シリカ鉱物の続成作用に基づく背斜構造の成長開始時期の調査・解析手法 ¹⁸⁾ なども整えられている。		○	○	15) 石井・福島 (2006) ; 石井ほか (2006) 16) 舟木ほか (2009) 17) Ishii et al. (2010) 18) 石井ほか (2008)	
地下水流動特性	水理特性	深部岩盤の水理特性の把握	深部岩盤を対象としたシーケンシャル水理試験手法 ¹⁹⁾ の開発で透水性などの水理パラメータを適切に解析するための一連の手法が開発され、堆積岩中の溶存ガスを含む地下水条件に対応するための試験装置が考案 ²⁰⁾ されている。		○	○	19) 竹内ほか (2007) 20) 竹内・平田 (2003)
		透水性割れ目・水みちの把握	高感度孔内流速検層により孔井内の湧水個所と逸水個所を評価する手法 ²¹⁾ 、電気伝導度検層により透水性割れ目（水みち割れ目）を抽出、推定する方法 ²²⁾ 、光ファイバ温度検層により流出・流入個所を流速の変化する個所として捉える水みち分布モデルの推定手法 ²³⁾ などが開発された。		○	○	21) 関ほか (2005) 22) 松岡ほか (2007) 23) 末永ほか (2000)
	地下水流向・流速の把握	固体トレーサの移動軌跡を超音波センサ追跡することによって、地下深部の極低流速に対応した 10^{-9} m/s 程度の流向・流速の測定を可能とする計測方法 ²⁴⁾ が開発された。		○	○	24) 戸井田ほか (2007a, 2007b)	

○ : 主な適用段階

表 5.4.1-7 地質環境特性にかかわる調査・評価技術 (2/3)

項目と内容		概要	段階			文献	
			文献調査	概要調査	精密調査		
地下水流動特性	水理地質構造モデル・地下水流動解析	結晶質岩系	岩盤中の地下水流動を評価するための数値モデルの作成から地下水流動解析までを統合した GEOMASS システムの開発 ²⁵⁾ が行われている。		○	○	25) 稲葉・三枝 (2003)
		堆積岩系	地下水流動解析を用いた地上からの調査の体系化とガスが溶存する塩水系地下水の存在する堆積岩地域での解析 ²⁶⁾ 、地層間隙内の地下水の結合度合い (pF) に応じた地下水の安定性のモデル化 ²⁷⁾ などを進めている。		○	○	26) 操上ほか (2008) 27) 産総研 (2010c)
		長期変遷のモデル化	堆積岩が分布する沿岸域を対象として気候・海水準の長期的な変動を時間変動境界条件として考慮した、将来の長期間の地下水流動評価 ²⁷⁾ 、古地形分布モデルを用いた過去から現在までの地下水流動解析 ^{28), 29), 30), 31)} が行われている。		○	○	28) 操上ほか (2007) 29) 尾上ほか (2009) 30) 中田・長谷川 (2010) 31) 長谷川ほか (2010)
地下水化学特性	水質, 年代評価	地下水の採水, 分析技術に関する検討事例 ³²⁾ 、地下深部に分布する化石海水に関して、地下の岩盤中で生成される ^{36)Cl} 地下水年代評価と安定同位体データをもとにした化石海水の同定手法を提案 ³³⁾ している。		○	○	32) 岩月ほか (2009) 33) 馬原ほか (2006)	
	地下水化学モデル	経時的な地下水の水質変化の範囲や程度などを定量的に評価するため、主成分分析に混合とマスバランス計算を組み合わせた M3 解析 (Multivariate Mixing and Mass balance modeling analysis) ³⁴⁾ 、岩石コアから抽出した間隙水のイオン濃度を求め、地下水流動との関係を考察した事例 ³⁵⁾ がある。			○	34) 阿島ほか (2006) 35) 伊藤ほか (2010a)	
岩盤特性	力学特性評価	一軸圧縮強度, RQD, 割れ目の状態の3要素を指標とする岩盤評価方法 ^{36), 37)} が示された。地圧測定では、軟岩に適したオーバーコアリング法による応力測定システムの開発 ³⁸⁾ 、深部地圧計測のための下向き円錐孔底ひずみ法の開発 ³⁹⁾ が行われている。 花崗岩を試料とした鉱物比の違いによる一軸圧縮強度の違いについての考察 ⁴⁰⁾ 、珪質岩の力学的な特徴を評価のため力学特性と岩盤特性との相関の深度方向での整理 ⁴¹⁾ が行われている。また、接線ヤング率の変化に基づく岩盤応力の測定手法の検討 ⁴²⁾ が行われている。瑞浪超深地層研究所では、地表からボーリング調査を行い、その結果を用いて岩盤の力学的概念モデルを構築している ⁴³⁾ 。		○	○	36) 澤田ほか (2009) 37) 澤田ほか (2011) 38) Ghimire et al. (2004a) 39) 坂口ほか (2006) など 40) 藤井ほか (2005) 41) 真田ほか (2009) 42) 藤井ほか (2006) 43) 松井ほか (2000)	
	熱特性評価	高温低温下における岩盤物性 (物理, 力学, 透水, 熱) について、既往文献調査をもとにデータベース化を行い ⁴⁴⁾ 。高温環境下における堆積軟岩の力学特性 (三軸圧縮強度, クリープ特性の温度依存性) ⁴⁵⁾ が示されている。		○	○	44) 土木学会 (2006b) 45) 岡田 (2005, 2006)	
	難工事評価	既存情報の整理より、事前の地質情報からトンネル施工時の地山の押出し性を判断・評価する基準および施工方法の設計方針 ⁴⁶⁾ が提示され、また、概要調査段階までの情報で難工事遭遇可能性を評価する手法 ⁴⁷⁾ が示された。断層・破砕帯部の立坑施工時に発生する蓋然性の高い崩落形態である高抜けと覆工破損に対してより安全な工法 ⁴⁸⁾ が提示されている。		○	○	46) 高橋ほか (2004) 47) 新ほか (2011a, 2011b) 48) 櫻井ほか (2006)	

○ : 主な適用段階

表 5.4.1-8 地質環境特性にかかわる調査・評価技術 (3/3)

項目と内容	概要	段階			文献
		文献調査	概要調査	精密調査	
物質移行特性	熱力学・収着・拡散データベース ⁵⁰⁾ が整備されている。結晶質岩中の透水性割れ目における放射性物質の移行・遅延を規制するプロセスや場の構造などの把握、原位置試験手法やモデル化手法などの開発 ^{51) . 52) . 53)} が進められている。		○	○	50) JAEA (2005-2009) 51) JNC (2005b) 52) 三枝ほか (2007) 53) 太田ほか (2007)
そのほかの特性	泥火山 泥火山噴出の起源となる流体は、深度 2km より深部から上昇し ⁵⁴⁾ 、流体の形成に粘土鉱物の脱水の寄与が大きく、生物起源有機物の熱分解で生成した炭化水素ガスを含むこと ⁵⁵⁾ 、また、外国の事例から泥火山の活動周期、噴出量についての知見 ⁵⁶⁾ が得られている。泥火山の地下構造や地表での形態・規模を測地または物理探査手法により推定する事例 ^{57) . 58)} が示されている。中新統の泥ダイヤピルについての知見から、形成メカニズムや規模に関する検討が行われている ⁵⁹⁾ 。		○		54) 井尻 (2009) 55) 新谷・田中 (2009) 56) 高橋ほか (2006) 57) 鈴木ほか (2009) 58) 田近ほか (2009) 59) 宮田ほか (2009)
	マスムーブメント	伊吹山の大规模崩壊によって形成された堰止湖堆積物の ¹⁴ C年代から崩壊の頻度を推定し、美濃帯で発生する可能性がある大规模崩壊の予測手法 ⁶⁰⁾ が示され、地震時の大规模地すべりの事例 ⁶¹⁾ が示されている。		○	60) 小嶋ほか (2006) 61) 大野ほか (2010)
モニタリング	瑞浪および幌延におけるボーリング孔を利用した地下水の水圧、水質の長期モニタリング ^{62) . 63)} 、JAEA 東海事業所では、人工バリアの性能確認のためのモニタリングの技術開発および適用性確認を進められている。このほかでは、データ伝送技術 ⁶⁴⁾ 、センサや計測手法に関する技術選択肢 (技術メニュー) の整備に関する開発が進められている ^{65) . 66)} 。		○	○	62) JNC (2005a) 63) 太田ほか (2007) 64) 高村ほか (2006) 65) 竹ヶ原ほか (2004) 66) 原環センター (2009a)

○ : 主な適用段階

(1) 地質・地質構造

地質・地質構造にかかわる調査・評価技術については、文献情報と地表踏査のデータに基づき岩盤中の特性のばらつき（岩相、地層の分布、割れ目帯）や不連続構造の三次元分布を把握するための手法や、物理探査とボーリング調査により地質・地質構造をモデル化するための技術が、おおむね整備されてきている。

物理探査技術の進展は、近年の電子技術やコンピュータ関連技術の発展に伴い、大量の情報を高精度で効率よく取得、解析できるようになったことに負うところが多く、特に解析技術の進展によって精度の高い地質構造の把握が可能となってきている。技術開発が行われている分野は、地球科学の研究分野、土木地質、資源開発関連などさまざまであるが、地層処分にも適用可能なものが多い。このうち、反射法地震探査は、層状構造を有する堆積岩分布地域では有効な手法であり、データ処理技術の進展、例えば重合前マイグレーション処理（Yilmaz, 2001）などの適用が広がり、断層構造など複雑な地質構造での解析精度が向上している（Schapper et al., 2009）。また、データ取得装置の多チャンネル化と併せて、二次元探査よりも探査結果の信頼性が高い三次元探査の適用も広がり、海域および陸域での資源探査（芦田, 2005）、詳細な堆積物や古地形情報、断層構造の三次元的解析（松岡, 2007；佐伯ほか, 2006；朴ほか, 2008）が行われている。例えば、佐々木ほか（2008）は、地質地盤調査の小規模断層調査において、落差約 5m の小規模断層を反射波の不連続構造から抽出しており、地下構造を正確に理解しやすく可視化する技術として利用されている。

沿岸浅海域を対象とした調査では、これまで地球科学研究分野や資源探査分野で広く用いられてきたマルチチャンネル音波探査システムが沿岸域の地震活動に伴う断層調査に適用され、能登半島地震の海底断層の調査（井上ほか, 2007）で使用されるなど、地質構造調査における使用実績が増えている。特にマルチチャンネル音波探査では、三次元探査の導入でデータの空白域がなくなったことに加えて、二次元探査では不確実性が大きかった断層分布について、取得データの時間スライスを解析することで、数 10m 程度の空間分解能を有する三次元分布が把握できるようになり、断層の見落としが減少している。

自然の地磁気・地電流を用いる MT 法電磁探査では、鉄道や送電線などに起因する人工ノイズの影響を低減できる重み付けスタッキング法（根木ほか, 2007a, 2007b）が開発されて深部の地下構造の解析に用いられている。沿岸域においては、極浅海域や結晶質岩地域など、従来の音波探査が適用困難な環境における補完的調査手法として、浅海用電磁探査法が開発され（吉村ほか, 2006a）、既存の電磁探査法と併せて陸域から浅海域までの連続した調査手法が整備されている。データ解析技術では、解析結果の信頼性向上を目的とした三次元解析技術開発が進められ、結晶質岩中の断層構造探査、堆積岩地域の断層構造探査および地下深部に塩水系の地下水が分布する堆積岩地域における地質構造探査など、多様な地質環境における技術の適用性評価が行われている（吉村ほか, 2006b など）。

ボーリング掘削技術は、地下の情報を直接取得する手法として、ほとんどの地球科学分野で重要な調査技術として用いられている。資源探査（石油、地熱、鉱物資源など）では従来から使用されており、内陸や海域で現在も広く用いられている技術である。また、火山・深海掘削などの科学掘削においても雲仙火山科学掘削プロジェクトや統合国際深海掘削計画などに伴う技術開発が進められている。地層処分の分野では、沿岸海底下での調査が困難な地形・地質条件下で、掘削の方位や傾斜を自由に制御しコア採取・孔内調査を効率的に行うことを目的としたコントロールボーリング掘削・原位置調査技術システムの開発（木方ほか, 2006, 2009）が行われている。

地質・地質構造の不均質や不連続構造として、地層中の亀裂に関する情報を取得することは、岩盤の物理・力学特性、地下水流動特性の観点から重要な調査・評価項目である。結晶質岩中の亀裂に関する研究における進展として、ボーリング孔の亀裂データと断層や基盤岩地形との関連を考慮した空間的な亀裂密度分布推定手法（栗原ほか，2008）やマルチスケールでの亀裂分布のシミュレーション技術が開発（小池ほか，2008）されている。堆積岩中の亀裂分布解析としては、断層などの透水構造の三次元分布を把握する手法（石井ほか，2006；石井・福島，2006；Ishii et al., 2010）、ボーリング調査結果に基づく亀裂の特性解析手法と地質構造モデルの構築手法（舟木ほか，2009）などが開発されてきている。このような地質・地質構造を調査・評価する技術については、測定原理に基づく精度や適用限界、適用する地質環境を適切に判断し、また岩盤中の亀裂に関する研究成果を参考にしつつ、調査地域での使用環境も考慮して活用する。

(2) 地下水流動特性

岩盤の水理特性にかかわる調査・評価技術については、ボーリングコアやボーリング孔を利用した試験・検層に基づき、岩盤中の水みちとなる亀裂に対する評価手法はおおむね整備されている。ここでは、岩盤の水理特性や岩盤中の地下水の流向・流速の調査技術、また、水理地質構造のモデル化および地下水流動解析技術の現状について述べる。サイト選定のための調査・評価の各段階では、利用可能なデータの量や精度を考慮し、適切なツール（モデリングソフト、地下水流動解析コードなど）を利用した調査・評価を行う。なお、その際には、既往の解析事例を参考に、解析条件などの設定を行う。

(i) 水理特性の調査技術

ボーリング孔を利用した原位置水理試験は、従来から一般土木分野において、浅部の地盤を対象として適用されてきた技術であり、試験方法やデータの解析方法については、すでに規格化されている（地盤工学会，2004）。放射性廃棄物の地下施設は地下 300m 以深に設置するため、原位置水理試験のうち、深部岩盤に適用可能な水理試験方法を適用する。

深部岩盤を対象とした水理試験方法では、竹内ほか（2007）が、図 5.4.1-9 に示す試験装置を用いてパルス試験、スラグ試験、揚水試験および回復試験などの複数の非定常試験を連続的に行う手法（シーケンシャル水理試験手法）を開発している。この手法は、水理試験を相対的に短時間で終了できるパルス試験から開始し、リアルタイムで岩盤の透水性を算定しながら順次時間を要する試験を実施するものである。この手法による原位置水理試験の適用事例を図 5.4.1-10 に示す。この事例では、試験中にリアルタイムで圧力データとその時間微分プロットを確認し、これに基づいた水理パラメータの把握や試験終了の判断を行うことにより、深部岩盤での水理試験を効率的に実施できることを示している。このほか、堆積岩中において溶存ガスを含む地下水に対応した手法（竹内・平田，2003）も開発されている。また、高透水性の割れ目の分布と透水性を把握するための調査技術では、新しい検層技術として、ボーリング孔内の湧水個所や逸水個所を評価する高感度孔内流速検層（関ほか，2005）、ボーリング孔内の電気伝導度分布の経時変化から透水性割れ目を検出する電気伝導度検層（竹内ほか，2004；松岡ほか，2007；Takeuchi et al., 2008）、光ファイバを用いて深度ごとの経時的な温度変化を高精度に測定することで水みちを推定する光ファイバ温度検層（末永ほか，2000）などが開発されている。実際の調査においては、ボーリング孔内や地質の性状を勘案して適切な手法を選択する。

(ii) 地下水流向・流速の調査技術

ボーリング孔内において、岩盤中の地下水の流向、流速を計測する調査技術は、従来から浅部の一般土木調査の分野で適用されている。しかし、地下施設の設置深度では、一般土木調査で対象とする浅層の地下水流速と比べて極めて遅いため、極低流速場でも適用可能な計測技術が開発されている（斎藤ほか，2006；戸井田ほか，2007a, 2007b など）。このうち、戸井田ほか（2007a, 2007b）は、ボーリング孔内の一定区間をパッカーで仕切り、計測区間中に固体粒子トレーサを浮遊させて、その軌跡を1組の超音波センサで追跡し、固体粒子トレーサの流動軌跡から三次元的流向・流速を測定する技術を開発している。開発された測定装置は室内の性能試験により 10^{-9} m/s 程度の流向・流速を計測することが可能であることが示されており、概要調査において極めて低い流速場の調査・評価を行う場合には、本技術の適用についても検討する。

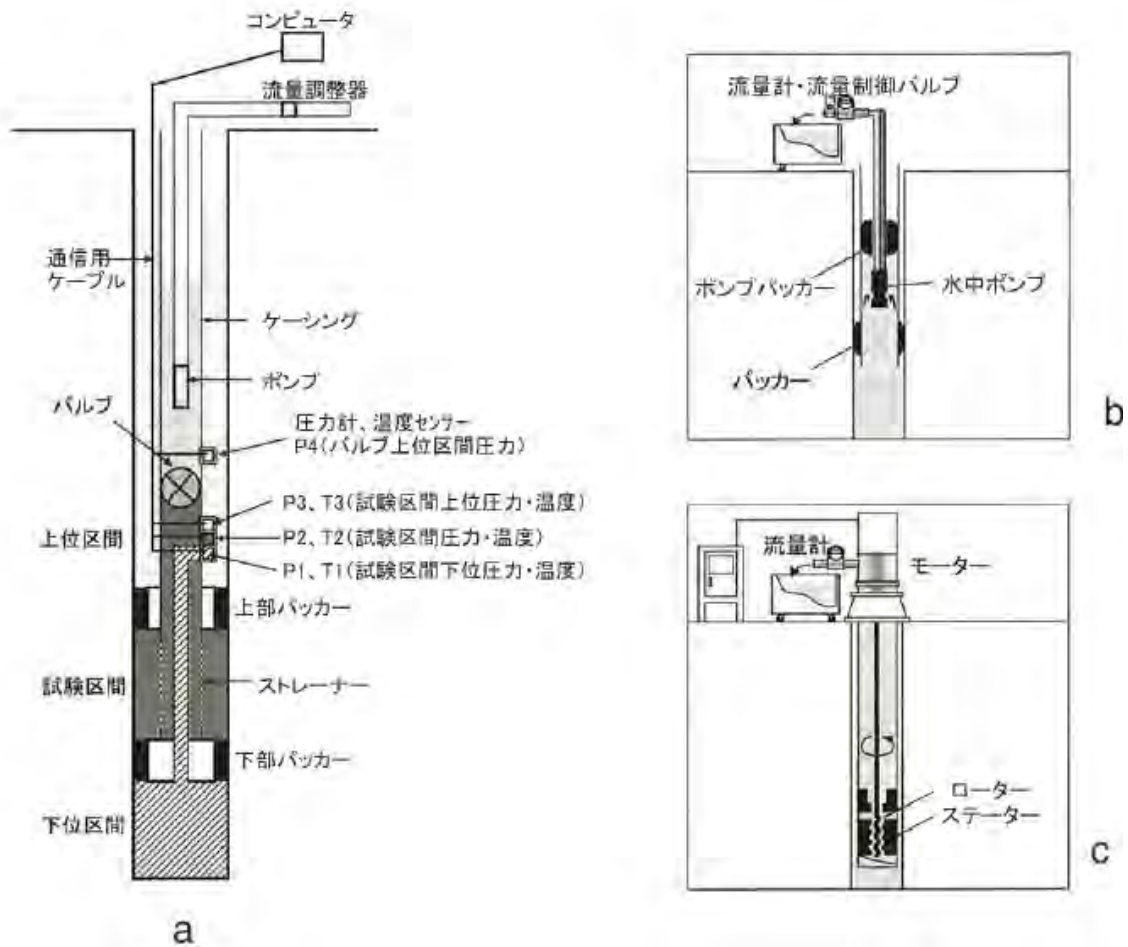
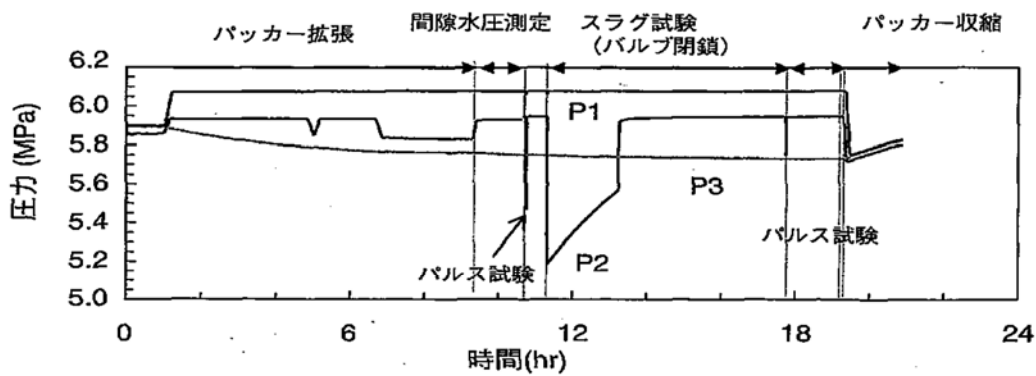


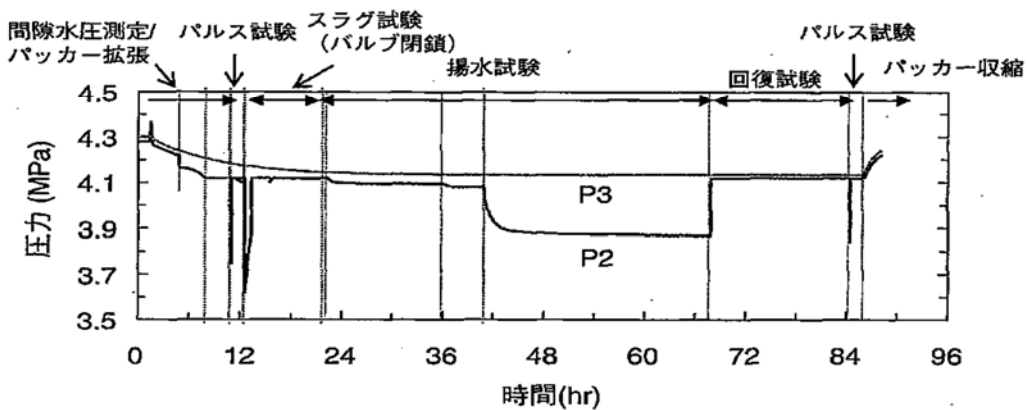
図 5.4.1-9 水理試験装置の概念図

(出典：竹内ほか，2007)

- a: 水理試験装置は、試験区間を形成するための上下のパッカー、試験区間の圧力 (P2) と温度 (T2) を測定するセンサ、および試験区間の圧力漏洩の有無や試験開始前の圧力の安定を確認するための試験区間上下の圧力・温度センサ (上側: P3, T3 下側: P1, T1)、地下水をくみ上げるためのポンプ、試験区間の圧力を制御するための開閉バルブなどで構成される。
- b: 揚水ポンプの上位にパッカーを接続し閉鎖系で揚水することにより、地下水をくみ上げる際の孔内貯留の影響を低減することができるポンプパッカー、
- c: 連続的に無脈動で定量性が高く、流量を制御しやすいキャビティポンプなどの装置が開発されている。



a



b

図5 シーケンシャル試験の例

a: 低透水性岩盤における例

b: 高透水性岩盤における例

Fig. 5 Example of sequential tests

a: Test for a low permeable rock

b: Test for a high permeable rock

図 5.4.1-10 シーケンシャル水理試験手法の適用例

(出典: 竹内ほか, 2007)

本手法では、相対的に短時間で終了できるパルス試験から開始し、リアルタイムで岩盤の透水性を算定しながらスラグ試験、揚水試験および回復試験などの時間を要する複数の非定常試験を連続的に行う。最初のパルス試験で低透水性と判断された場合 (a) はスラグ試験を中心に、高透水性と判断された場合 (b) は揚水試験を中心に試験を実施する。

(iii) 水理地質構造モデル化および地下水流動解析技術

処分施設の設置領域周辺の空間的な地下水流動状況は、地質環境の調査データに基づいて水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析を実施して評価する。ここでは、水理地質構造モデルの構築と地下水流動解析技術の現状について述べる。

① 結晶質岩系サイトにおける水理地質構造モデル化・地下水流動解析の事例

稲葉・三枝 (2003) は、各種地質データの解析を支援する Landmark 社製ソフトウェア群、地質構造モデルの構築および可視化を支援する EarthVision、水理地質構造モデルの作成と数値解析を行う Frac-Affinity を統合化した GEOMASS システムを開発した。このうち、Landmark 社製ソフトウェ

ア群は、地質データの統合管理、地質データの可視化、物理探査データの解析、衛星画像処理などを行う。EarthVision は、地質構造の複雑な幾何学形状の効率的なモデル化を行い、Frac-Affinity は、地質構造モデルに対して指定したパラメータを可視化することが可能である (図 5.4.1-11)。東濃地域の地下水流動解析に本システムを適用した結果では、水頭分布については、システムによる解析値と実測値に差が認められたが、水頭分布の傾向は一致したほか、これまでの地下水流動結果と整合した結果が得られ、GEOMASS システムは複雑な地質構造をモデル化・解析する場合や、複数のモデルを作成するような場合 (感度解析など) に有効であるとされている (稲葉・三枝, 2003)。NUMO は、これらの成果を参考に、サイトの地質環境の条件に適したモデル化および地下水流動解析の手法を選択し評価を行う。

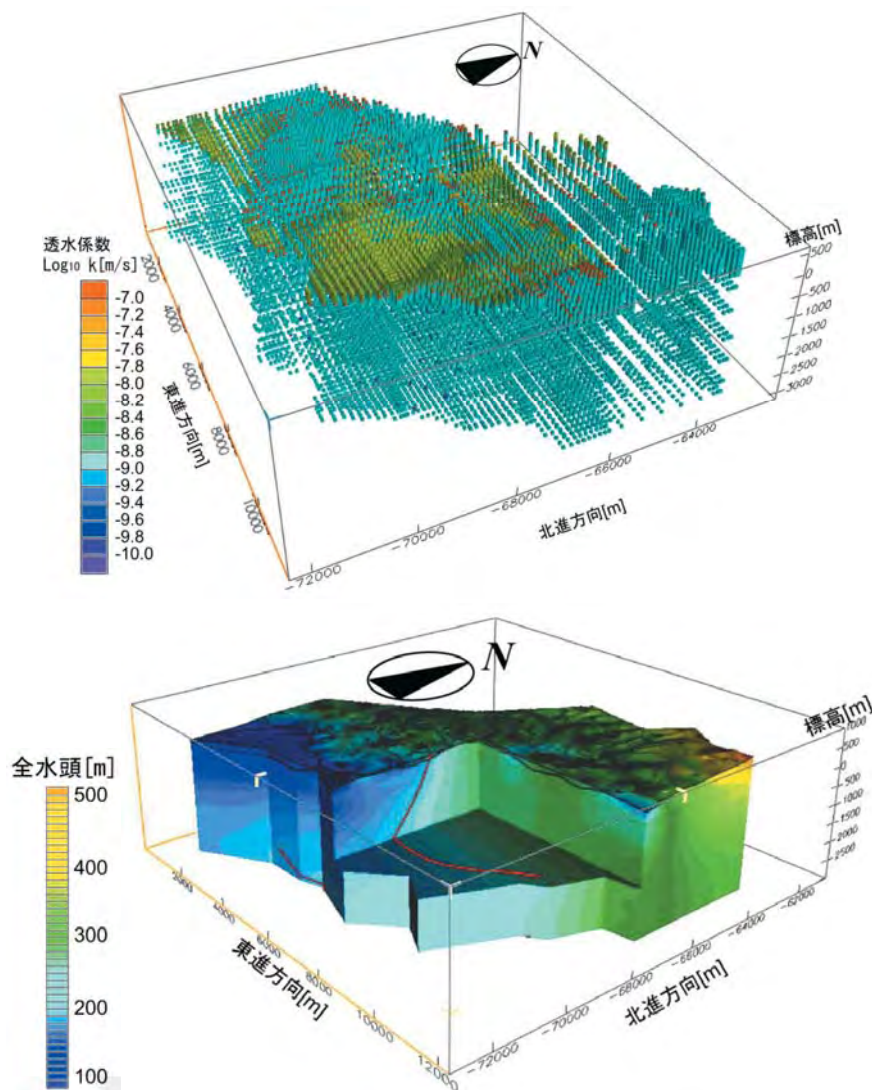


図 5.4.1-11 GEOMASS システムによる水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析の事例 (稲葉・三枝, 2003 を編集)

上 : Frac - Affinity による各格子の中心 (節点) とその点における透水係数の分布の表示。
 下 : EarthVision による地下水流動解析結果の可視化。

② 堆積岩系サイトにおける水理地質構造モデル化・地下水流動解析の事例

操上ほか(2008)は北海道幌延地域に分布する新第三紀堆積岩を対象とした地下水流動系の把握に関する事例研究を通じて、地下水流動解析を用いた地上からの調査の体系化、ガスが溶存する塩水系地下水が存在する堆積岩地域での調査のための技術開発の概要を取りまとめている。また、調査や解析の各々の要素を比較することで相互の妥当性を確認するプロセスを示している。

産総研では、地下水流動とその滞留時間、深部地化学環境に関する研究が実施されており、地層間隙内の地下水の結合度(pF)に応じた地下水の安定性に係る研究により、深部地下水環境の安定性がモデル化されつつある(産総研, 2010c)。

③ 地質環境の長期変遷の検討事例

操上ほか(2007)は、幌延周辺において堆積岩が分布する沿岸域を対象として、自然現象の長期変遷による地下水流動への影響に着目し、気候・海水準の長期的な変動を時間変動境界条件として設定して、12万年で変動する気候・海水準モデルを用いて、将来60万年間の地下水流動、物質移動の感度解析を行った。その結果、涵養量や海水準変化は地下水流動や塩分濃度の経時的な変化をもたらし、その影響の大きさは透水係数分布や着目する場所により異なるとしている。また、今井ほか(2009)は、断層活動、隆起・沈降・侵食、気候・海水準変動などの自然現象による地質環境の変遷が地下水流動に与える影響を連続的にモデル化することのできるシステムを考案した。さらに、そのシステムを用いて、幌延地域を対象として過去150万年間の地質構造発達に伴う応力状態の変化や堆積過程、氷期の涵養量の変化や地下水の塩分の密度差が地下水流動に与える影響について解析的な検討を行った。その結果、過剰間隙水圧の発生を理解するためには間隙率や有効応力の変化に応じた透水係数の設定が重要であること、氷期の涵養量の設定に伴う影響が丘陵部や沿岸域で認められること、密度差の影響は沿岸域の地下水流動に影響を与え地下深部での淡水の侵入を抑制することが示された(図 5.4.1-12)。

尾上ほか(2009)は、東濃地域において、地下水流動に影響を及ぼす可能性が考えられる長期的な地形変化に着目し、概略的な過去の古地理分布を推定して150万年前から現在までの地下水流動解析を実施し、これをもとにした地形変化による将来の地下水流動の変化を推定する方法論を示した(図 5.4.1-13)。地下水流動解析結果の妥当性については、既往の調査データと地下水流動解析結果を比較して検討し、概略的には妥当であるとしている。文献調査および概要調査では、これらの成果を参考にしつつ、地質環境特性の長期変遷について検討する。

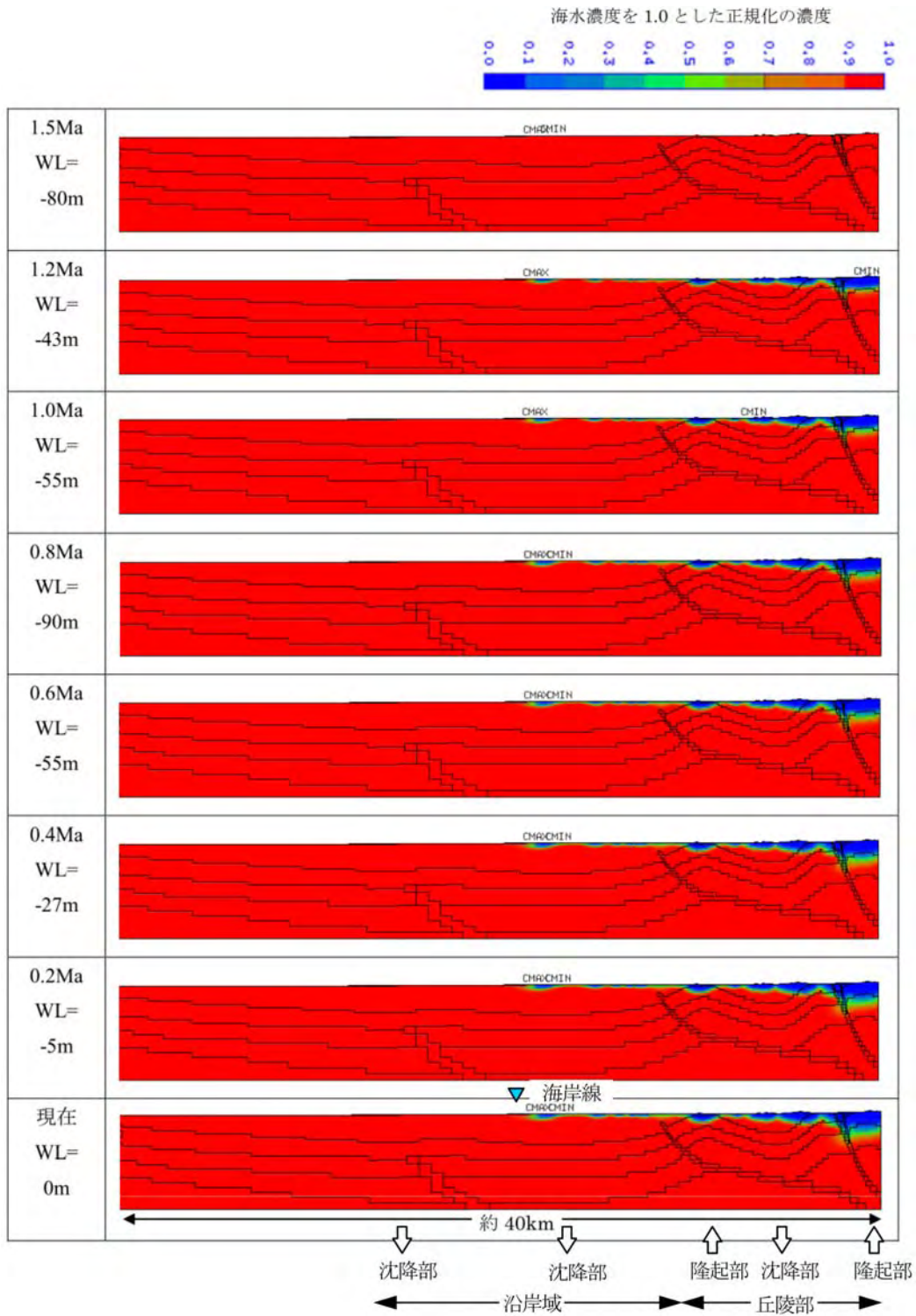


図 5.4.1-12 過去 150 万年間の地質環境の変遷を考慮した幌延地域の地下水流動解析結果
(今井ほか, 2009 に一部加筆)

過去 150 万年間を 10 万年または 20 万年のステップに分割し、地質構造および透水係数の時間変化、ならびに海水準変動および氷期と間氷期の涵養量の変化を考慮した地下水流動解析結果（濃度分布）を示す。淡水化は主に丘陵部で生じ、隆起域では深部から塩分を含んだ地層の上昇が示されている。また、丘陵部から沿岸域にかけて淡水化が広く生じている。

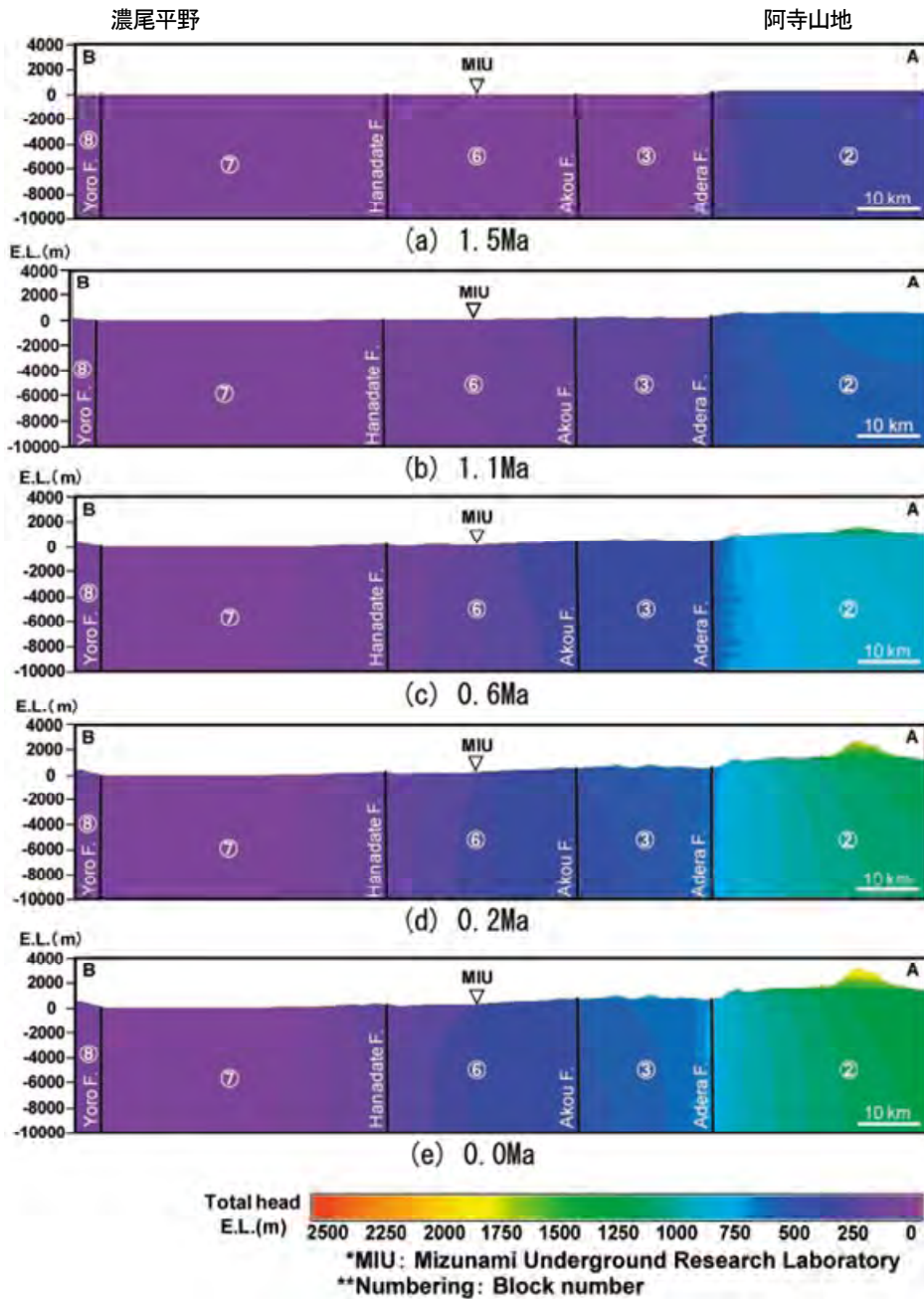


図 5.4.1-13 過去 150 万年間の地形変化を考慮した東濃地域の地下水流動解析結果
(尾上ほか, 2009 に一部加筆)

断層で囲まれたブロックに分割し、各ブロックにおける山地の隆起開始時期や断層の変位量の時間変化を考慮し、隆起速度と侵食速度が一定、または沈降速度と堆積速度が平衡であると仮定し復元された古地形を反映した地下水流動解析結果(全水頭分布)を示す。阿寺山地を涵養域とし濃尾平野を流出域とする地下深部までの大局的な地下水流動が形成されていることが示されている。また、山地が本格的に隆起し始めた0.6Maでは阿寺断層東側のブロック②では地形の起伏が明瞭となり、動水勾配が他のブロックに比べ大きくなっていることが示されている。

(3) 地下水化学特性

地質環境の長期評価において、現状の地下水化学特性を精度良く把握し、過去から現在までの地下水の変遷を理解することは、処分場の性能を評価する上で重要である。このことに関しては、近年地上からの調査で岩盤や地下水化学的特性の不均質な分布を把握するための地下水の採取技術、調査技術（地下水組成、同位体組成の分析技術など）、データの解析、モデル化の手法が整備されている。また、第2次取りまとめ以降の課題となっていた数100万年程度の地下水年代を評価する技術の整備が行われている。概要調査段階以降では、以下に示す最新の知見も考慮して地下水化学特性を把握する。ここでは、近年進展の見られた水質・年代評価技術と水質形成のモデル化に関する事例を示す。

(i) 水質・年代評価

地下水化学特性の調査では、井戸やボーリング孔から地下水を採取し分析することにより、地下水化学特性を表す溶存イオン成分やpH、酸化還元電位などの物理化学パラメータを取得する。ボーリング孔を利用した地下水化学特性に関する調査はこれまで多く事例が報告されている（例えば、古江ほか、2003、2005；彌榮ほか、2004；岩月ほか、2009）。このうち、岩月ほか（2009）は、地下水の採水および分析技術について、地下深部に分布する地下水の物理化学パラメータ（pH、酸化還元電位、温度）を測定する際の考え方や測定値の補正方法を取りまとめて整理している。また、馬原ほか（2006）は、地下深部に分布する化石海水に関して、地下の岩盤中で生成される ^{36}Cl の放射平衡論の議論をもとにした地下水年代評価と安定同位体データをもとにした地下水起源の情報を加味した化石海水の同定手法を提案している。中田・長谷川（2010）、長谷川ほか（2010）は、幌延地域の堆積岩および東濃地域の結晶質岩を対象にして、 ^4He 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl を用いた地下水年代評価法を適用し、既存の調査から推定される広域的な地下水流動と整合していることを示した（図 5.4.1-14）。堆積岩中の地下水年代について中田・長谷川（2010）は、標高-200mで200万年、-600mでは1,000万年と評価しており、調査地域では堆積時からほとんど地下水が移動していないことを示している。地下水の水質は人工バリアシステムの性能、また地下水年代は地下水流動の長期的評価に不可欠であるため、信頼性の高いデータを取得するために、上記手法の適用についても検討する。

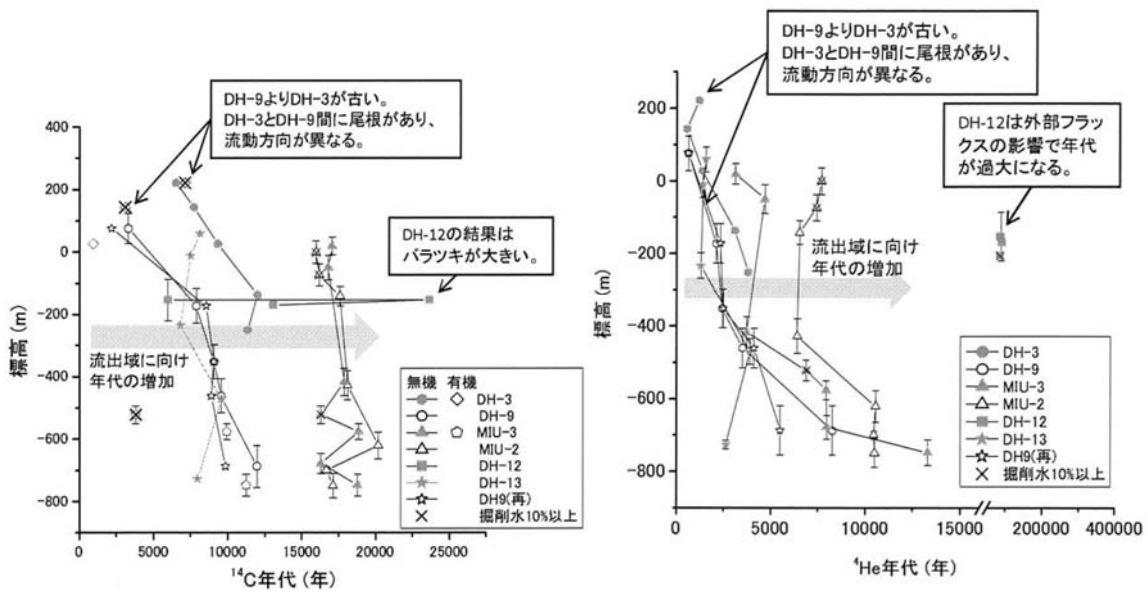


図 5.4.1-14 東濃地域における ^4He と ^{14}C 地下水年代測定結果
(長谷川ほか, 2010 を編集)

涵養域と流出域の中間に位置するボーリング孔 (MIU-2, MIU-3 など) の地下水年代は、涵養域に位置するボーリング孔 (DH-9, DH-3 など) の地下水年代に比べて古く、流出域に向けて地下水年代が増加しており、広域的な地下水流動を反映していると考えられている。

(ii) 地下水化学モデル

処分施設周辺の地下水化学特性を空間的に表現するための地下水化学モデルの構築手法や岩石-水の化学反応を考慮した解析手法を適用した事例の報告として、阿島ほか (2006) などが挙げられる。ここでは、地下研究施設の建設に付随して起こる経時的な地下水の水質変化の範囲や程度などを定量的に評価するため、主成分分析に混合とマスバランス計算を組み合わせた M3 解析 (Multivariate Mixing and Mass balance modeling analysis) を適用している (図 5.4.1-15)。伊藤ほか (2010a) は、京都府亀岡市の砂岩からなる試験地の深度 100m ボーリングの岩石コアから抽出した間隙水のイオン濃度を求め、地下水流動との関係を考察している。試験地では間隙水のイオン濃度の深度方向の分布は、陽イオン濃度が地下水の結合度 (pF) によって異なる傾向を示し、浅部では地下水流動が活発であること、深部では地下水が滞留し間隙水の水質が長期間変化しなかったことを示している。これらの手法は、深部地下水の長期安定性評価や、地下水化学モデルの構築に適用できる。

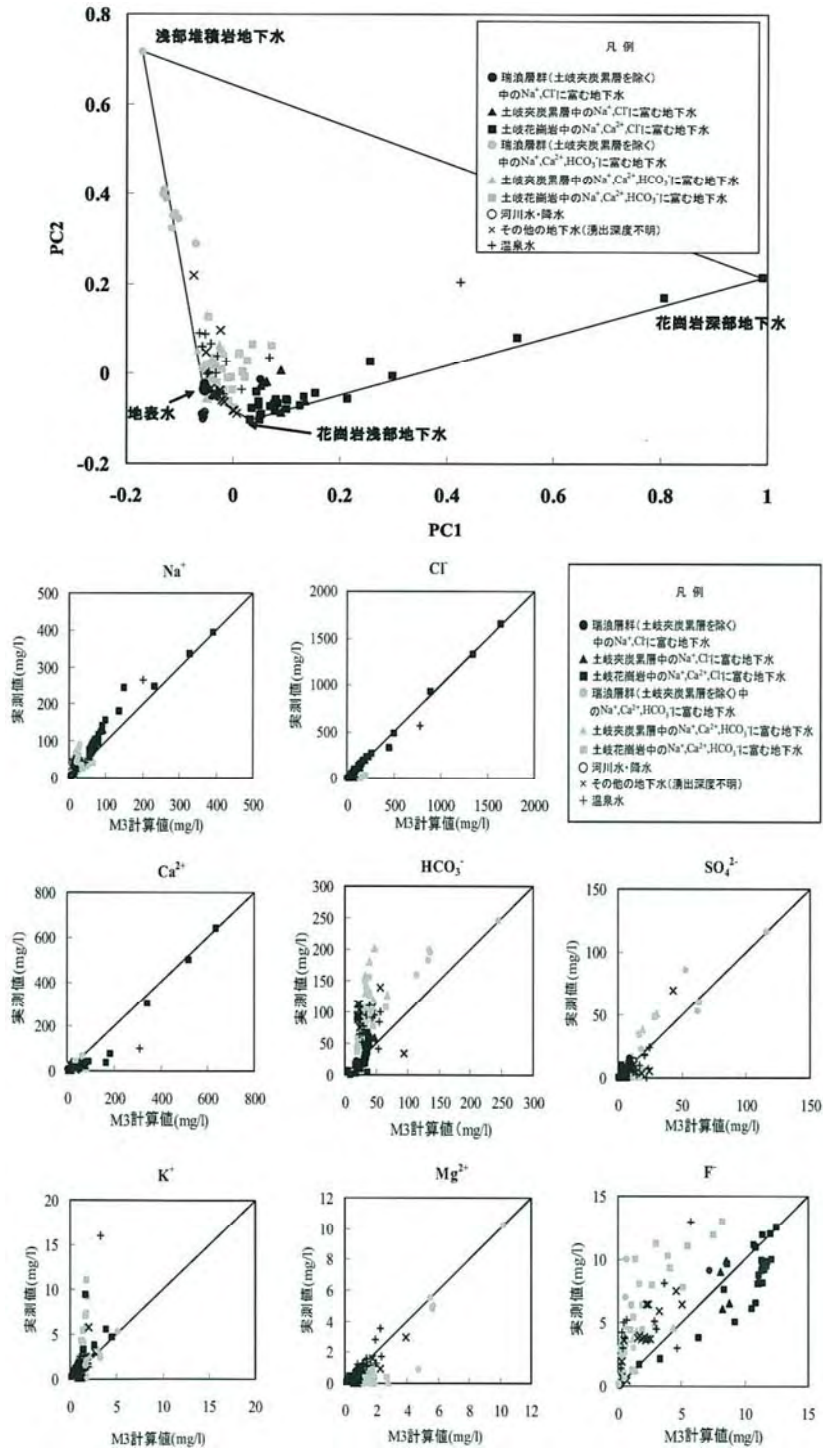


図 5.4.1-15 M3 解析による瑞浪超深地層研究所周辺の地下水の M3 解析結果 (阿島ほか, 2006 を編集)

上 : 主成分分析結果, $PC1=0.53[Na]+0.20[K]+0.49[Ca]-0.13[Mg]-0.18[HCO_3]-0.15[SO_4]+0.17[F]+0.56[Cl]$,
 $PC2=0.10[Na]+0.29[K]+0.20[Ca]+0.56[Mg]+0.45[HCO_3]+0.53[SO_4]-0.17[F]+0.09[Cl]$

下 : マスバランス計算の結果 (地下水組成の実測値と M3 計算値の比較)

主成分分析の結果から, 混合の端成分として「花崗岩深部地下水」, 「花崗岩浅部地下水」, 「地表水」, 「浅部堆積岩地下水」の 4 種類の地下水が考えられるが, マスバランス計算結果では, Cl^- を除く各成分で実測値と計算値に違いが生じており, 検討地域の地下水の形成については端成分地下水の混合だけでなく, 水-岩石反応などを考慮する必要があると考えられている。

(4) 岩盤特性

対象となる地層を地下施設の工学的実現性の観点から評価するためには、岩盤の力学特性、熱特性などに関する情報を取得する必要がある。以下に、既存情報や地上からの調査（ボーリング調査など）を用いて、岩盤特性や三次元応力分布を把握するための調査研究の事例を示す。

(i) 力学特性

地下施設の建設可能性について、澤田ほか（2009, 2011）は、坑道建設評価のための岩盤評価法を示している。また、坑道設計に重要な入力データとなる地圧の測定技術に関しては、Ghimire et al.（2004a, 2004b）や坂口ほか（2006）が新たな測定方法の開発を行い、コントロールボーリングシステムの開発の中では、孔内での応力測定装置の開発・高度化が進められている（木方ほか, 2009）。

概要調査段階では、地表からのボーリング調査や物理探査が行われ、ボーリングコアなどから地下岩盤の情報を得ることができる。澤田ほか（2009, 2011）は、ボーリング調査から得られたコアで岩盤を分類し、岩盤の物性値や施工性を推定する岩盤評価法を開発し、岩盤の硬さ（一軸圧縮強度）、割れ目間隔、割れ目状態の3要素で岩盤を分類し、それに応じて強度や変形性、さらに掘進速度や支保程度を推定する評価分類図を作成している。既往ダムの国内施工実績を整理・分析した結果に基づいて作成された、岩盤の粘着力に関する評価分類図の例を図 5.4.1-16 に示す。

また、力学特性にかかわる技術開発では、稲田花崗岩を試料とした鉱物比の違いによる一軸引張割れ目の特性についての考察（藤井ほか, 2005）、力学特性と岩盤特性との相関を深度方向で整理した珪質岩の力学的な特徴の評価（真田ほか, 2009）、接線ヤング率の変化に基づく岩盤応力の測定手法の検討（藤井ほか, 2006）などが行われている。瑞浪超深地層研究所では、地表からボーリング調査を行い、その結果を用いた岩盤の力学的概念モデルが構築されている（松井ほか, 2000）。ボーリング掘削時には、岩石サンプルを行うため、調査地区の力学特性評価には、従来技術のほかこれら技術の取り込むことも含めて検討する。

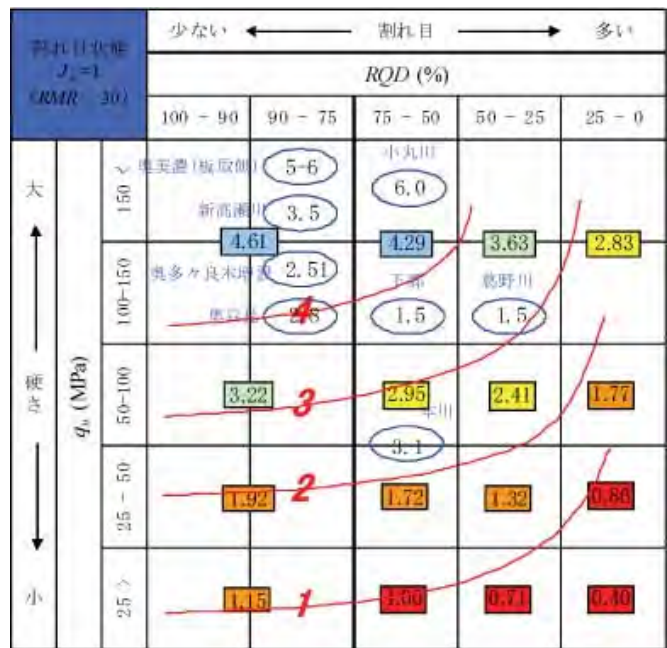


図 5.4.1-16 岩盤分類評価要素からの粘着力の評価図
(出典：澤田ほか，2009)

ボーリング調査から得られる岩盤情報 3 要素（一軸圧縮強度 q_u ，割れ目間隔 RQD，割れ目状態 J_c ）から粘着力を推定する評価図。この図は、5 段階に区分した J_c のうち $J_c=1$ （割れ目の状態が最も良好な場合、RCM では評点 30 に相当し、不連続面の状態が粗い、不連続、密着、新鮮に相当する）での評価図である。赤で示す数値および曲線は、組み合わせマトリクス上の粘着力 (MPa) を示す。四角内の数値は、既往ダム基礎岩盤データについて、各要素の組み合わせマトリクスにおける粘着力の平均値 (MPa) を示す。地点名と合わせて楕円内に示す数値は、既往地下発電所地点で得られている粘着力 (MPa) を表し、本評価図とおおむね整合している。なお RMR (Rock Mass Rating System) は Bieniawski (1989) により提案された評点式岩盤分類。

(ii) 熱特性

高温・低温下における熱特性を含む岩盤物性について、既往文献の調査結果をもとにデータベース化が行われている（土木学会，2006b）。また、岡田（2005，2006）は高温環境下における堆積軟岩の力学特性の温度依存性評価を行い、三軸圧縮強度は、常温と比較して 60°C で低下し、変形特性は、同条件で細粒砂岩のヤング率が減少する傾向が見られた。また、クリープ特性の温度依存性は、常温から 95°C の範囲の実験結果で凝灰岩のクリープ特性に温度の影響が見られ、最小ひずみ速度や破壊時間なども温度に依存することを示した。岩盤物性に対する地熱勾配の影響や廃棄体からの熱の影響を検討するに当たっては、これらの研究成果も参照する。

(5) 物質移行特性

物質移行特性については、前述の地下水流動特性や岩盤特性などをもとにした解析が行われる。深地層研究計画（三枝ほか，2007；太田ほか，2007），では、物質移行にかかわるデータ取得、解析手法などについての知見の蓄積や、熱力学・収着・拡散データベースの整備（JAEA，2005-2009），ボーリングコアを用いて重要な元素（Cs，Se，Np，Th）についての物質移行・遅延プロセスの室内試験からモデル化などを進めている（牧野ほか，2005 など）。

マトリクス拡散・収着についての原位置試験や室内試験を通じた研究 (Ota et al., 2003 ; 増田ほか, 2009 ; Alexander et al., 2009 ; 吉田ほか, 2002 ; 栃木ほか, 2007 など) やコロイドや微生物の物質移行に及ぼす影響についての検討 (村上ほか, 2003 ; 黒澤ほか, 2004 ; 上岡ほか, 2007 など) が進められている。

増田ほか (2009) は、地層中の物質移行にかかわるパラメータのうち、拡散や分配係数を原位置でかつ1週間程度の短期間で測定できる、マイクロ流路法の適用性の検討を行っている。マイクロ流路法は、測定対象となる岩石表面に微小流路計測器を押し当てて、極少量のトレーサ溶液 (重水、ウラン、カリウム) を通液した結果を測定し、破過曲線を得た後、移流・分散方程式を解き、フィッティングで拡散係数および分配係数を得る方法である。花崗岩中に掘削されたボーリング孔を利用した原位置での試験結果は、室内試験のデータ、ほかの試験法による結果などと同様であり、手法の妥当性が確認されたとしている。

物質移行については、今後の地下研究施設を用いた調査研究などにおける移行・遅延プロセスの解明やモデル化・解析の検討成果を取り込み評価に適用していく。

(6) 施工性・安全性にかかわる事象

(i) 難工事事象

地下施設建設工事の施工計画や安全性などを検討する上で、工事の計画変更、建設費の大幅増額や重大な事故につながる難工事の可能性を事前に把握しておくことは重要である。最近の研究成果としては、既往トンネル工事事例の情報を整理・分析した結果 (志田原ほか, 2004) から難工事遭遇可能性を評価するための岩盤評価法が開発 (新ほか, 2011a, 2011b) されている。新ほか (2011a, 2011b) は、難工事につながる事象として山はね、地山の膨張、大湧水、有害ガスなどを挙げているが、このうち地山膨張ならびに山はねについて、遭遇可能性評価の検討を行っている。また、超大深度立坑工事で発生する可能性の高い崩落形態についての考察 (櫻井ほか, 2006) や、事前の地質情報からトンネル施工時の地山の押出し性を判断・評価する基準および施工方法の設計方針 (高橋ほか, 2004) などが提示されている。

(ii) そのほかの自然事象

そのほかに関分場建設時および閉鎖後長期の安全性に重大な影響を及ぼす可能性のある事象として、泥火山、泥ダイアピルおよびマスムーブメントが挙げられる。

泥火山や泥ダイアピルは、急激な堆積により堆積物が厚くなった場所やプレートの収束域に集中する傾向があるとされる (山縣・小川, 1989)。泥火山は火山ガスの噴出を伴う円錐形をした泥や岩石の堆積体であるとされ (Bates and Jackson, 1987)、国内陸域では北海道の新冠や新潟県十日町市松之山などに知られ、海域では近年資源探査に伴う詳細な海底調査などで多くの泥火山の存在が明らかになっている (Kopf, 2002)。

松之山の泥火山については、ボーリング調査、物理探査、地化学探査などでその物理化学的性状や構造、含まれる流体の起源についての知見が得られている (新谷・田中, 2009 ; 石原・田中, 2009 ; 鈴木ほか, 2009 など)。また、泥火山の特性は、膨張性地山を形成することと高塩分濃度の地下水からなることであり、高橋ほか (2006) によれば国外の事例から泥火山の活動周期、噴出量についての知見が得られている。

泥ダイアピルの形成には、異常間隙水圧の発生、大きな圧力差が発生するための異常間隙水圧を

開放する機構（例えば断層運動など）が必要であるとされている（山縣・小川，1989）。

宮田ほか（2009）は、紀伊半島の中新統に認められる泥ダイヤピルの産状を記載し、貫入形態を明らかにしてダイヤピルの上昇機構を考察している。また、実験により上昇機構の要因の検討を行っている。ダイヤピルの規模は数10m～200m程度であり、周囲約400mに泥岩脈を伴うことがあり、形態的には円筒、ドーム、ラコリス状で堆積層の物性により形態が異なる可能性が指摘されている。形成要因は下位層に封じ込められた泥水（ガス）であり、現在の熊野海盆の海底では音波探査（Baba and Yamada, 2004）で泥ダイヤピルの存在が推定されているとしている。

マスマーブメントは、地表の構成物質がそれ自体の重みで塊（マス）として動く現象で、崩壊（地崩れ）、地すべり、土石流、クリープからなる（高浜，1996；産総研，2007a）。100万m³を超えるような巨大規模崩壊は、火山体周辺と四万十帯の泥質堆積岩地域に多く、これら以外では付加体堆積物中の石灰岩体周辺、三波川帯の結晶片岩地域、グリーンタフ地域に比較的多いとされる（千木良，1995；産総研，2007a）。

小嶋ほか（2006）は、付加体である美濃帯の伊吹山の大规模崩壊によって形成された堰止湖堆積物の¹⁴C年代から崩壊の頻度を推定し、美濃帯で発生する可能性がある大规模崩壊の発生周期予測手法を示している。また、大野ほか（2010）により地震時の大规模地すべりの事例が、田近・岡村（2010）により大规模地すべり地形の発達の事例が示されている。

泥火山、泥ダイヤピル、マスマーブメントは特殊な地質環境で発生する現象であることから、上記の事例などを参考に対象地域ごとに評価を行う。

（7）モニタリング技術

概要調査の段階あるいは精密調査の地上からの調査段階に開始するベースラインモニタリング（地下調査施設の建設による擾乱を受ける前の地質環境、周辺環境、放射線の状態を示す「初期ベースライン」を把握するためのモニタリング；3.3.2参照）には、以下の技術を適用することができる。これらはモニタリング技術として、主に国およびJAEAにより開発、整備されている。主なモニタリング技術として、JAEAが所有する岐阜県瑞浪市と北海道幌延町の2カ所の深地層の研究施設において、ボーリング孔を利用した地下水の水圧、水質の長期モニタリングが導入されている（JNC，2005a；太田ほか，2007）。JNC（2005a）は、既存の地下水の水圧・水質の長期モニタリングシステムをまとめており、このうち、幌延深地層研究所においては、ピエゾ水頭計測方式のシステムおよび直接圧力計測方式のシステムを設置してモニタリングを行っている。2カ所の深地層の研究施設においては、このほかにも、精密制御定常信号システムを利用して、従来の物理探査技術よりも、地下構造の把握と岩盤物性や水理場の時間変動を高分解能で推定する技術や光ファイバ地中変位計の開発（中山ほか，2008）などの技術開発ならびにそれらの適用性確認が行われている。また、JAEAの東海研究開発センターでは、室内連成試験設備などを利用して人工バリアの性能確認のためのモニタリングの技術開発および適用性確認を進めている（JNC，2005b）。モニタリングに関する技術開発で、国は、地中無線通信による伝送技術などの開発（例えば、高村ほか，2006）とともに、各機関の計画するモニタリングに柔軟に資することができるように、「なぜ（目的）、いつ（時期・期間）、どこで、誰が、何を、どのように（手法）モニタリングを行うか」の視点で分類した「技術的選択肢（技術メニュー）」の開発を進めている（竹々原ほか，2004；原環センター，2009a）。また、ここでは地下施設で、温度、圧力、水分量などのモニタリングを念頭にしたモニタリングの在り方に関する検討も行われている（須山ほか，2010）。

5.4.1.3 多様な地質環境にかかわる調査・評価技術

わが国の多様な地質環境を代表する結晶質岩・淡水系地下水と堆積岩、および堆積岩・塩水系地下水を対象に、実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認を目的とした調査研究が、それぞれ超深地層研究所計画および幌延深地層研究計画として進められている。これら二つの深地層の研究施設計画の第1段階では、第2次取りまとめ（JNC, 1999b）に示された地質環境の調査・評価技術を実際の地質環境に適用することにより、その実用性や信頼性を確認することとともに、体系的な調査・評価技術を整備してきた。ここでは、調査—予測—検証のプロセスを繰り返し、地質環境の理解を段階的に深め、次の調査を最適化していくアプローチを採用している（JAEA, 2010b）。

一方で、調査実績や経験的な知識が少なく研究開発の余地の大きい沿岸域を対象とした研究開発もこれらに並行して進められている。沿岸域では、地層処分に関する研究のほか、資源探査、活断層調査、土木工事に関する調査が行われており、これらから得られる知見は、地層処分へ有効に反映できる可能性があると考えられる。

以下に、これらの研究の概要を示すとともに、既存および新たに開発された調査・評価技術の地層処分事業への適用性や課題について述べる。

(1) 結晶質岩・淡水系地下水を対象とした調査・評価技術

結晶質岩・淡水系を対象とした体系的な調査・評価技術に関する検討は、JAEA が超深地層研究所計画で実施している。本研究開発は、1996年度に岐阜県瑞浪市のJAEA用地（正馬様用地）で開始され、その後は瑞浪超深地層研究所用地において進められている。本研究開発の第1段階調査（地上からの調査予測研究段階）は、2005年3月に終了し、現在は第2段階（研究坑道の掘削を伴う研究段階）および第3段階（研究坑道を利用した研究段階）の調査研究が進められている。

第1段階の調査では、設定した課題に対して5段階のステップによる繰り返しアプローチ（調査—予測—検証プロセス）を適用している。具体的には、調査研究の進展に伴う情報の種類・量と地質環境の理解度や不確実性との関係を順次評価するとともに、その評価結果に基づき次のステップの調査研究課題を明確にしてその計画に反映している。その結果は、地質構造モデルや水理地質構造モデルなどの変遷として示され（図 5.4.1-17）、地層処分にとって重要な地質環境特性やプロセスについて理解を深めることができた（三枝ほか, 2007）。

第1段階では、地質・地質構造については、不連続構造などを予測・把握するための手法、地下水流動特性については、ローカルスケール（数キロメートル四方以上）やサイトスケールの調査・解析領域の設定手法や段階的調査解析手法が検討されている（JNC, 2005a）。地下水化学特性については、水質形成プロセスを把握するためのM3解析手法（阿島ほか, 2006）や溶存成分に関する複数の調査手法（阿島ほか, 2006；三枝ほか, 2007）が検討されている。また、ローカルスケールやサイトスケールにおける物理・力学特性、初期応力状態および地下の地下環境温度を把握する技術を整備し、これをもとにしたモデル化手法や掘削影響予測手法の検討も行われている（JNC, 2005a）。以上の個々の手法や、それに基づき作成されたモデルについては、第2段階および第3段階の調査研究でその妥当性の確認や適用性の検討が行われる（JAEA, 2010b）。

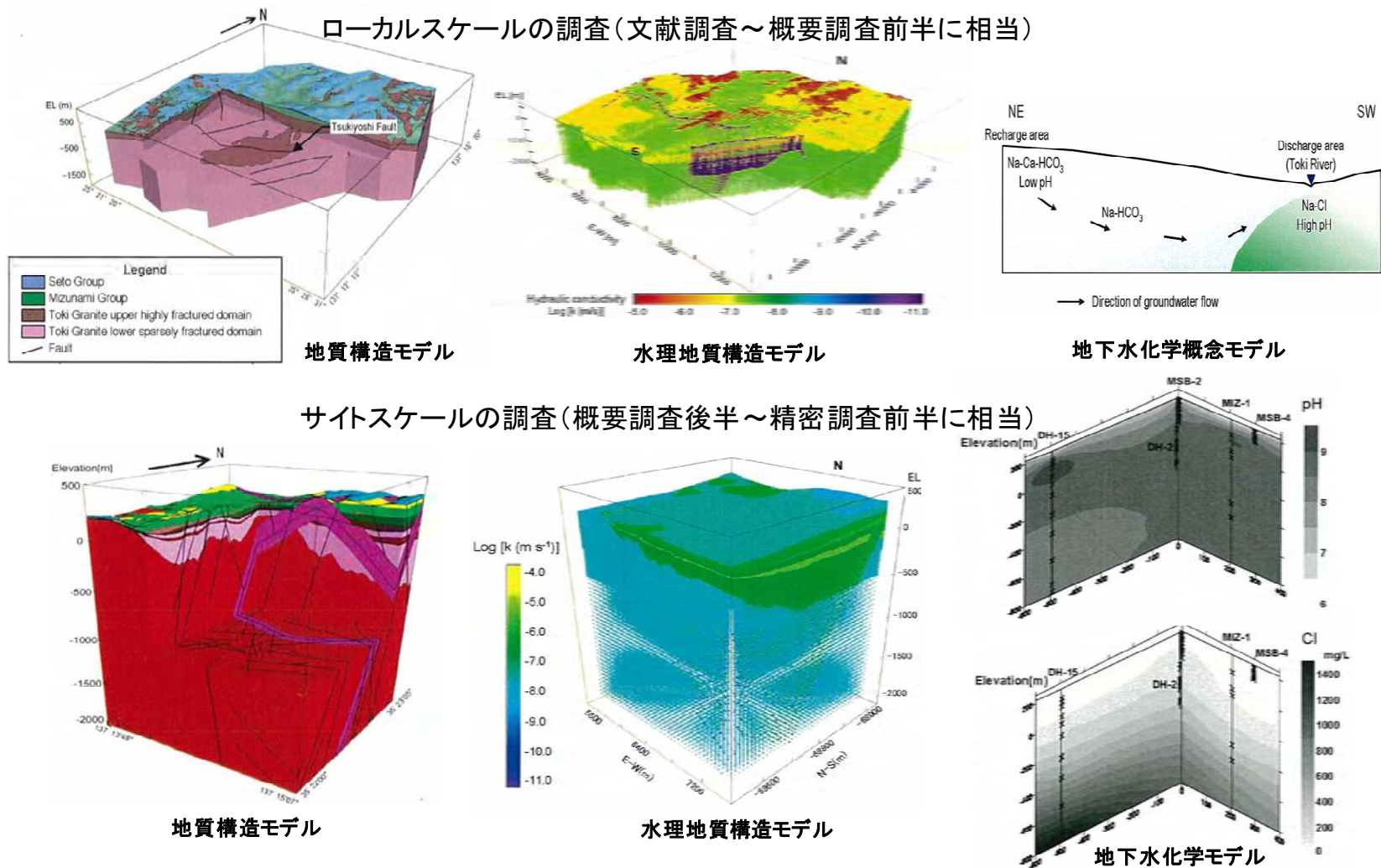


図 5.4.1-17 超深地層研究所計画第1段階(地上からの調査予測研究段階)の地質環境モデルの例
(三枝ほか, 2007 を編集)

調査フェーズの進展に合わせてより詳細なスケールの地質環境モデルを構築し、理解度や不確実性を段階的に把握している。

第2段階および第3段階の調査研究では、物質移行特性について、岩盤中の水みちとなる断層や割れ目の性状、またそれらの天然バリア機能としての収着・拡散といった特性を把握することが重要である。そのための情報整備として深層ボーリングのコアを用いた室内試験による収着データベースの構築などが重要となる。その例として、釜石鉾山の花崗岩類の収着係数、拡散係数の妥当性の確認や(太田ほか, 2005) 物質移行場の構造特性・空隙構造特性の値や範囲の推定が挙げられる。

以上のような各段階の調査を展開する上で、調査手法の組み合わせ、取得するデータの種類・解釈、情報の統合を行う統合化データフローの構築による体系的な調査・評価手法が示されている。

本研究開発は、わが国の代表的な地質環境である内陸部の結晶質岩を対象として、地質環境の調査・評価技術の適用性を評価してきたものである。図 5.4.1-17 に示した特定の地質環境下における地質環境モデル構築に至るまでの調査・評価の過程および結果の統合は、5.2.1.2 に示した段階的な調査・評価の具体例とみなすことができる。

本研究開発を通して整備された調査・評価技術や知見の多くは、場所や地質環境の条件が異なっても、普遍的に適用できると考えられる(三枝ほか, 2007) ことから、今後も引き続き、NUMO で構築した調査・評価体系に反映していく。

(2) 堆積岩・塩水系地下水を対象とした調査・評価技術

堆積岩・塩水系を対象とした体系的な調査・評価技術に関する検討は、JAEA が幌延深地層研究計画で実施している。本研究開発は、第1段階(地上からの調査予測研究段階)として、2001年3月から2006年3月にかけて、「研究所設置地区および研究所設置場所の選定」、「地上からの地質環境の調査研究」、「深地層における工学技術の基礎の開発」、「地下施設建設に伴う周辺環境への影響調査」が実施された(例えば、太田ほか, 2007)。第2段階(研究坑道の掘削を伴う研究段階)では、2005年度から坑道掘削時の調査研究が進められており、現在は第3段階(研究坑道を利用した研究段階)の調査研究も一部並行して実施されている。

第1段階の研究で得られた主な技術的知見として、地質・地質構造については、海成堆積物の地層中で断層帯の位置とその水理特性を把握するために、物理探査技術において地下浅部の地層の比抵抗を把握することが有効であること、一方でVSP探査は物性値の変化に乏しい地層では有効性が低いことが示された。また、珪藻化石を用いた後背地解析法は、古流向から碎屑物を供給した供給源を推定することで過去の堆積・削剥環境(海陸分布)を把握するのに有効であったとしている。さらに、段丘の対比をする上でのRIPL法(表 5.4.1-1)の有効性やGPS基線長(観測点間の距離)と自然地震との関係を検討することが地質環境(応力や歪)に対する地震の影響の有無や程度の把握に有効であることなどが示されている。

地下水流動特性については、対象地域が多孔質岩盤であるか、亀裂性岩盤であるかを初期の段階で見極めることが重要であること、また岩盤の水理特性に応じた手法の開発と柔軟な対応が求められること、さらに、深部の地下水流動と生物圏の境界である表層水理に関する調査が重要であることが示されている。ボーリング孔を利用した調査では、流体検層から水理試験位置選定のプロセスや水理試験シーケンスなどがほぼ体系化され、流体電気伝導度検層では、水みち個所の抽出やその透水性などについて総合的な検討が可能となっている。また、ボーリング孔を利用した調査を実施する場合に調査対象の岩盤、地下水化学特性などに適した調査手法(調査の組み合わせ)が異なるため、調査の早い段階でその場に合わせた調査手法の体系化が必要であることが知見として得られている。

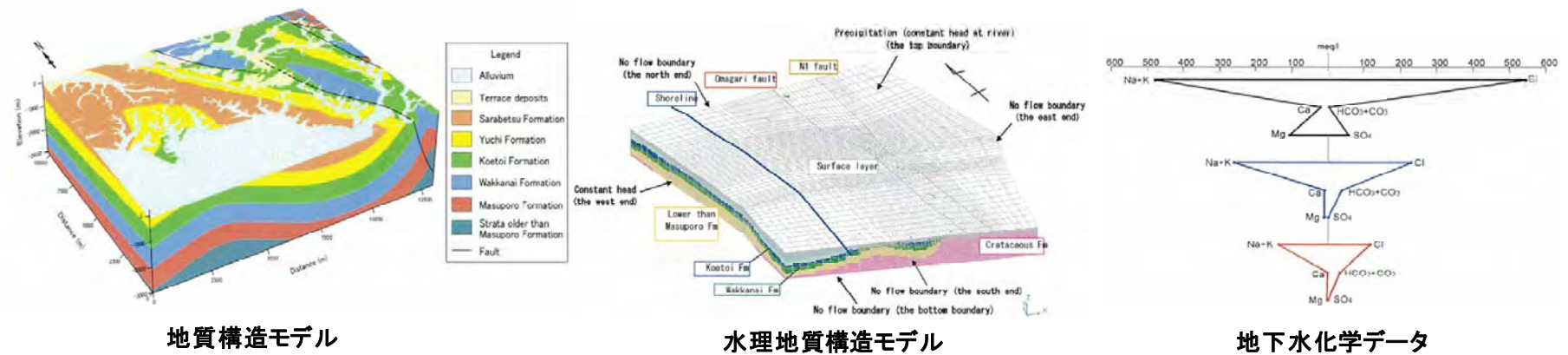
地下水化学特性については、透水試験中の揚水した地下水、コアからの間隙水の抽出水の分析など、適用した調査手法および解析手法（主成分解析など）の有効性が示され、個々の要素技術は地層処分事業における調査・評価に適用できることが示されている。

岩盤特性に関する調査研究では、調査の進展に伴う新たな不確実性の存在が示された。地表調査（物理探査、地表踏査）の結果からは、調査地域の岩盤は水平方向に岩相変化に乏しい新第三紀の堆積岩であり、均一な特性の地層が深部にも連続するものと予測された。その後のボーリング調査では、岩盤特性は深度方向に必ずしも均一ではないことが明らかになった。このような地域の岩盤調査では、物理検層データのように深度方向の連続データの重要性が認識された。初期応力測定では、大曲断層を挟んだ東西領域の深度 500m 程度までの主応力の方向や値のデータが得られている。

以上に述べてきた第 1 段階における段階的な調査・評価の結果は、図 5.4.1-18 に示す地質環境モデルに集約されている。また、地上からの調査研究で得られた知識と経験に基づき、段階的な調査・解析・評価の体系的な枠組みとして、統合化データフローダイヤグラムが構築されている。現在、主に坑道掘削中および坑道からの調査研究が進められ、地上からの調査の段階の結果が検証されつつあり、NUMO は、これらの知見を着実に調査・評価体系に反映していく。

さらに、幌延深地層研究計画では、深地層の研究施設を設置するという前提条件に基づき地質環境要件と安全要件を基本的な要件として設定し、既存情報を用いた調査および広域的な調査から研究所設置地区の絞り込みを行い、さらに、ボーリング孔を利用した調査結果などに基づき研究所設置地区を選定している。このようなプロセスは、概要調査から精密調査に至るサイト選定の手順と同様なものであることから、その知見についても NUMO におけるサイト選定に反映していく。

広域スケールの調査(文献調査～概要調査前半に相当)



サイトスケールの調査(概要調査後半～精密調査前半に相当)

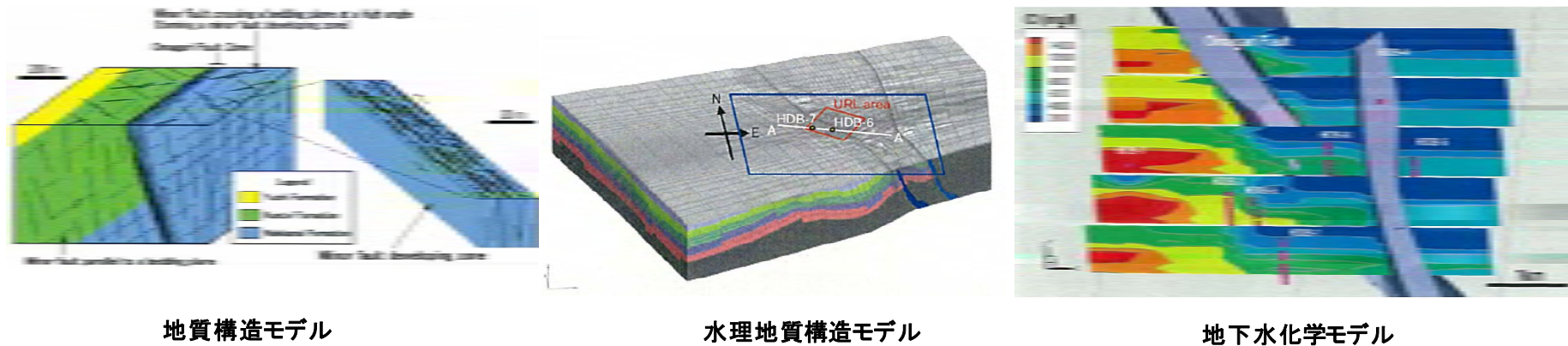


図 5.4.1-18 幌延深地層研究計画第1段階(地上からの調査予測研究段階)の地質環境モデルの変遷
(太田ほか, 2007 を編集)

本研究計画においても、調査フェーズの進展に応じて広域スケールおよびサイトスケールの地質環境モデルを構築し、理解度や不確実性を段階的に把握している。

(3) 沿岸域を対象とした調査・評価技術

沿岸域を含む海域においては、前出のように物理探査技術分野において、ここ 10 年間で大量の情報を高精度で効率よく取得、解析できるようになっている。特に反射法地震探査では、従来の二次元データの解析では、データがカバーされていない領域に対しては、内挿による推定が必要であったが、三次元探査の導入でデータの空白域がなくなったことが挙げられる。さらに、二次元探査では不確実性が大きかった断層分布について、取得データの時間スライスを解析することにより、三次元分布が把握できるようになり、見落としが減少したことも挙げられる。そして、反射波と岩石の特性を解析することにより、チャンネル構造や堆積物の三次元形態分布が把握できるようになったように、三次元可視化技術と堆積学とが融合した新しい学問・技術領域が提唱されている（高野ほか、2006）。こうした三次元反射法地震探査はすでに石油・天然ガスの資源探査では、重要な調査・評価技術として適用されている。地層処分分野でも資源エネルギー庁の委託事業として、沿岸域を対象とした研究も行われており、これまで技術的な空白域であった領域が補完されてきている。沿岸域を対象にした研究事例として、高精度物理探査技術高度化調査（平成 12 年度～平成 18 年度）、塩淡境界面形状把握調査（平成 14 年度～平成 18 年度）、平成 19 年度から開始された沿岸域プロジェクト（太田ほか、2008）などがある。地層処分関連研究以外の沿岸域（海域）における調査は、海上保安庁による沿岸域海底活断層調査、文部科学省の交付金による地方公共団体の活断層調査の一部、国土地理院による沿岸海域基礎調査、石油・ガスなどの資源探査、海底トンネル工事、そのほかの研究機関による学術調査などが行われている。

以下にこれらの技術の概要と地層処分に応用した場合に考えられるサイト調査・評価技術としての現況を述べる。

① 高精度物理探査技術高度化調査

本研究開発では、概要調査段階で適用する物理探査を対象にして、要素技術を高度化開発したもので、沿岸域については、技術的な空白を補完するものとして海底電磁法の計測機器および海水の影響を補正できる解析手法の開発が行われた（原環センター、2004）。この研究では米国西海岸のモンテレー湾において、沿岸域の活断層を対象にした探査結果が示されている。これは、音波探査では水深が浅く不明確であった海底下の断層を対象に海底電磁法探査を実施し、断層の分布位置、地下深部への延長および花崗岩質岩盤の健全度や劣化状況に関する情報を得たものである（吉村ほか、2006a）。

本研究開発成果は、結晶質岩の地質環境や音波探査が困難な極浅海域において、沿岸域では一般に実施される音波探査を補完する技術として適用できるものと考えられる。

② 塩淡境界面形状把握調査

沿岸域では天水を起源とした淡水系地下水と海水を起源とした塩水系地下水が互いに接して、境界面を形成していると考えられている。塩淡境界面形状把握調査（産総研、2007b など）は、野外調査により塩淡境界の形状やその周辺における地下水流動状況の把握と、地質状況に応じた塩淡境界の形成機構の解明を通して概要調査で適用可能な精度の高い塩淡境界の形状推定手法の開発を目的として行われた。ここでは、千葉県および茨城県の沿岸域での現地調査に基づく研究と井戸台帳、地下水・岩石試料を用いた統合データベースが構築された。

千葉県蓮沼海浜公園の研究試験地では、ボーリング調査および物理探査法による塩淡境界の把握

手法の検証・評価が行われた（丸井ほか，2004；上原ほか，2007）。深部の塩淡境界の構造解明のための AMT 法による調査・解析手法の開発が行われ，海岸平野の電磁探査では，探査深度の異なる三つの手法（AMT，TEM，ループ法）を適用し地層の比抵抗分布を解析している（Mitsuhata et al., 2006）。また，検層により塩淡境界の深度，形状を推定する手法として，地下水化学特性を把握する地化学検層が有効であることが明らかにされている（丸井ほか，2004）。

茨城県東海村の研究試験地では，蓮沼海浜公園研究試験地で開発した手法で塩淡境界の把握を試み，地下水観測井による塩淡境界の観測を行っている（伊藤ほか，2007）。さらに地下水流動解析を行うための基礎データとして弾性波探査で地質構造の解明などを行っている。

上記の先行調査事例は，地質環境の調査・評価において，沿岸域の塩淡境界の形状把握に適用できる部分がある。ただし，地下深部の塩淡境界の形状把握については，次項で説明する沿岸域プロジェクトの進展で得られる成果を反映していくことが効果的と考える。

③ 沿岸域プロジェクト

沿岸域プロジェクト（通称）は，幌延深地層研究計画の一環として，海域から陸域までを包括した地質環境を対象に，沿岸域特有の地質環境特性に関する知識を蓄積しつつ調査・評価技術の信頼性向上と体系化を進めることを目標として，基盤研究開発機関により平成 19 年度から 5 カ年程度の計画で開始された（太田ほか，2008）。具体的な研究内容は，塩淡境界/地下水総合評価技術の開発，沿岸域地質構造/断層評価技術の開発，関連データベースの開発からなり，以下のように段階的に研究開発を進めることとしている。

- ・ 既存の技術や知見，幌延と瑞浪の両地層研究所で整備した地上からの体系的な調査・評価技術や統合化データフローなどを活用し，一連の調査・評価の考え方を体系的に整理する。
- ・ 物理探査やボーリング調査などを組み合わせて適用し，個々の調査・評価技術の適用性を確認するとともに，塩水と淡水が混在する場における地下水流動や水質形成・変化，その時間変遷などに関する理解を深め，その調査・評価技術を整備する。
- ・ 地下水流動と地下水年代を関連付けて評価する技術，孔内での各種調査を組み合わせたコントロールボーリング技術，海底における地下水湧水の探査技術などの最新の技術を適用し，沿岸域に特徴的な現象や地質環境条件に関する知見を拡充しつつ，調査・評価技術の信頼性を向上する。
- ・ 沿岸域を対象とした一連の調査・評価技術の適用性確認や信頼性向上などの研究開発成果を統合するとともに，工学的対策・安全評価の観点も念頭において，沿岸域における体系的な調査・評価技術の方法論として取りまとめる。

沿岸域プロジェクトは現在進行中のプロジェクトであり，沿岸域に適用可能な技術の開発や信頼性の向上，高度化が進められている（原環センター，2009b；産総研，2008，2010c：図 5.4.1-19）。現在までに得られた成果のうち，幌延町の沿岸域では，海岸線付近の陸域から浅海域を含む範囲で複数の電磁探査法の実施と既存データを用いた解析から，塩淡境界や断層系に着目した電磁法探査技術の適用性の検討（吉村ほか，2009；大里ほか，2009 など）が行われ，二次元または三次元比抵抗分布の把握ができることが初めて示され，地質構造および地下水の水質分布に関する情報が得られた。しかし，既存調査で指摘されている沿岸海域の断層に対して，本手法では明瞭な比抵抗不連

続構造が得られていないなど、堆積岩における電磁探査法の技術的な限界も示されている（吉村ほか、2009）。

地下水流動解析では、地下水の長期的な流動・滞留状況の評価に主眼をおいた塩淡境界の現状解析と海水準変化（120m 低下）を考慮した予測（伊藤ほか、2010b）が試みられている。また、電磁探査法から得られた比抵抗構造から推定した地下水の水質分布と地下水流動解析の結果が対比されている（吉村ほか、2010）。ここでは、沿岸海域に推定される断層の透水性、海岸部の背斜構造および浅部地質の透水性などの水理地質構造が水質分布に影響することが示されている。しかし地下水流動解析結果と電磁法の比抵抗分布とが整合せず、間隙水圧分布や透水異方性など電磁法では取得できない地質環境特性が地下水流動特性に影響するため、ボーリング調査などの手法との組み合わせが必要であることが示されている（吉村ほか、2010）。

JAEA は北海道幌延町の沿岸域を事例とした古水理地質学的研究を進めており、沿岸域に特徴的な地質環境特性（塩水と淡水の混在など）に着目し、その時間的・空間的変遷の調査・評価をとおして、沿岸域の地質環境を対象とした総合的な調査・評価技術の整備を図っている。具体的には、沿岸域プロジェクトを含む幌延深地層研究計画において整備した調査・評価技術や取得した地質環境の特性や長期変遷に関する数多くの情報を踏まえ、①沿岸域を対象とした統合化データフローダイアグラムに基づき、沿岸域における地質環境特性の長期変遷を段階的に調査・評価するための方法論の整備（Ota et al., 2010）、②地質環境特性に影響を及ぼすと考えられる地形変化や気候・海水準変動を把握し（Niizato et al., 2010）、長期的な地下水流動の様式やその変遷を表現する概念モデルの構築（Amano et al., 2010）を実施している。①については、他地域での適用性の確認を通じて信頼性を向上させることにより、汎用的な技術とする方針である（Ota et al., 2010）。

④ 地層処分関連研究以外の沿岸域（海域）での調査

海上保安庁などの活断層関連の調査（海上保安庁、2010）は、1995年から開始され、沿岸域海底活断層調査では18カ所、地方公共団体の活断層調査では、沿岸海域の調査は10カ所程度で実施されている。調査では、基本的に音波探査とピストンコアリング（ボーリング調査）の組み合わせによる地質構造の解明が行われている。そのほか、断層の延長部の調査事例では、沿岸部における海上全磁力探査による磁気異常から断層の延長を推定する手法が示されている（長尾ほか、2009）。

国土地理院の調査は、沿岸海域の開発、利用、促進を目的にし、沿岸陸域から水深50m程度までを対象に地形・地質の基本情報整備として1999年から行われ、これまで4地域の結果が沿岸海域地形図としてまとめられている。

資源調査は海域を対象に物理探査やボーリング調査により深部構造の把握が行われ、近年では2007年に三次元資源探査船「資源」が導入されて、日本海沿岸や三陸沖で物理探査（反射法地震探査）が行われている。石油・天然ガス資源を調査する基礎試錐調査によって掘削深度3,000m級の大深度ボーリングが掘削されている。さらに、三次元地震探査データを単に構造解釈に用いるだけでなく、地震波のさまざまな属性に着目して、地層流体を含んだ岩石特性の変化を把握するための技術開発などが進められている。このような物理探査を用いた地層の評価技術は、地層処分対象となる地層を含む領域を非破壊で推定、評価できるため、地層処分事業では重要な調査手法であるといえる。

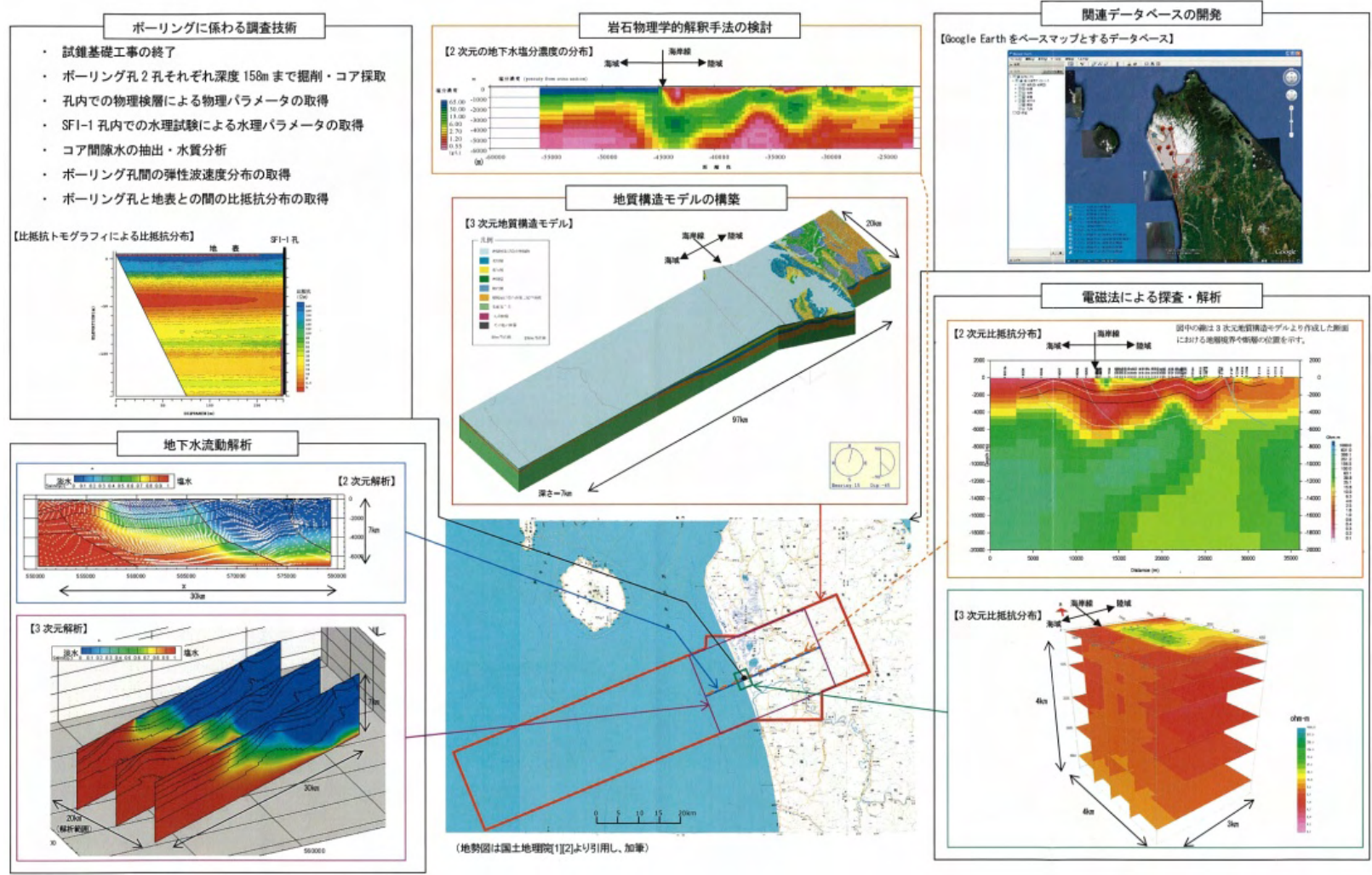


図 5.4.1-19 沿岸域プロジェクトにおける検討成果の例
(出典：原環センター，2009b)

幌延深地層研究計画の一環として、陸域から浅海域にかけての電磁探査による空間的な比抵抗分布の把握、それとボーリング調査の組み合わせによる地質構造および地下水の水質分布の推定、ならびに長期的な地下水の流動・滞留状況の評価に向けた塩淡水境界の把握と地下水流動解析などが行われている。

海底トンネル工事では青函トンネルにおいて、規模の大きな出水個所が貫入岩の位置に対応しており、磁気探査で予測可能とされている事例がある（日本鉄道建設公団，1990）。

各研究機関による沿岸海域を対象とした物理探査（空中重力、海底磁力、反射法地震探査など）による調査、研究が多数行われており、空中重力探査（Segawa et al., 2005 ; 西坂ほか，2006）では、陸域と海域で等価のデータが、短時間で取得可能であることから沿岸域での活用が期待される。また、沿岸域の重力探査空白域を補完することを目的とした海底重力計の開発（大熊ほか，2010）も行われている。

地球科学的研究分野においては、物理探査船の「大陸棚」、海洋研究開発機構の地球深部探査船「ちきゅう」およびさまざまな海洋調査船による調査研究が進められている。また、手法の組み合わせによる事例では、マルチチャンネル反射法地震探査とボーリングや検層データとの組み合わせで、100 万年スケールの地質変動が解明できる可能性が示されている（古屋ほか，2009）。

⑤ 沿岸域での調査事例の地層処分への反映

沿岸域を対象とした地層処分に関する技術の適用性、高度化は現在も継続している。公的機関による既存手法による活断層調査や資源探査からの深部地質構造に関する知見や調査解析事例は地層処分にも適用される一般的な手法である。

沿岸域での地質構造調査で最も適用性の高い手法は音波探査（反射法地震探査）であり、解析手法の高度化やイメージング技術の発達、三次元探査の適用などにより詳細な構造の把握が可能となってきている。音波探査に加え、重力探査、電磁探査などの開発・高度化されつつある物理探査手法やボーリング調査などを組み合わせることにより、基本的にはさまざまな環境に対応した調査を行うことが可能となってきていると考えられる。

沿岸域における地下水流動や地下水の地球化学的性状の調査には、電磁探査などによる比抵抗分布のイメージングが有効であると考えられる。しかし、塩淡境界の将来的な変化を地下水流動解析により解明するためには、気候変動とそれに伴う海水準変動や地形変化も組み込む必要があり、今後もそれらの予測手法の高度化が必要と考えられる。

5.4.2 調査・評価技術の確認

概要調査に適用する地表踏査、物理探査、ボーリング調査などの調査技術については、既存の技術を当該サイトの地質環境や制約条件などを考慮し適切に選択するとともに、概要調査では、それらの調査技術を組み合わせることにより、信頼性の高い調査を行う。

JAEA は、岐阜県瑞浪地域に分布する結晶質岩・淡水系地下水、北海道幌延地域に分布する堆積岩・塩水系地下水を対象とし、地上からの調査予測研究段階（精密調査の地上からの調査までの段階に相当）に関する調査・研究を実施した。ここでは、両地域における地質環境特性にかかわるデータの取得から解釈・地質環境モデル構築までの一連の検討を行い、地下深部の地質環境に対する地上からの調査技術として、その成果を取りまとめた（三枝ほか，2007；太田ほか，2007）。これらの技術の有効性については、現在進めている研究坑道の掘削を伴う研究段階および研究坑道を利用した研究段階の結果に基づき検証される。

このような状況のもと、NUMO では、概要調査の実施に向けて検討・構築してきた調査技術・評価手法の体系的適用性を確認すること、調査・管理技術の整備を図ることなどを目的として、2006年度から電中研横須賀地区の研究所敷地内において、ボーリング調査を主体とする実証研究を電中研との共同研究として進めてきた。実証研究では、文献調査および概要調査の各段階に相当するサイト調査を模擬して実施した（図 5.4.2-1）。

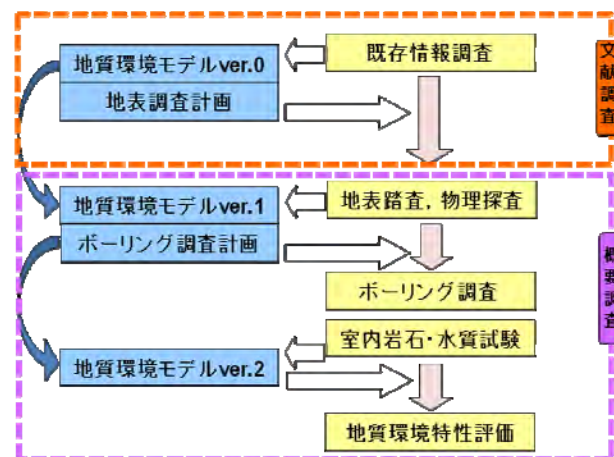


図 5.4.2-1 実証研究の全体フロー

文献調査に相当する既存情報調査においては、収集・整理した文献情報および空中写真判読結果から概要調査地区選定上の考慮事項に基づき、法定要件に関する事項および付加的に評価する事項に関する情報を整理し、評価した。

概要調査に相当する地上からの調査では、電中研横須賀地区の研究所敷地内を対象とした地表踏査、物理探査および同敷地内で2孔（掘削深度 350m および 500m、離間距離約 10m）のボーリング調査を実施した（図 5.4.2-2）。地上での物理探査は、電気探査、電磁探査、反射法地震探査を実施した。さらに、ボーリング孔を利用した VSP 探査を実施した。

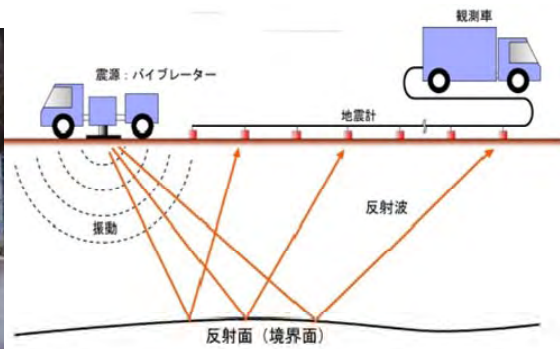


図 5.4.2-2 電中研横須賀地区における共同研究の実施状況

左上写真：反射法地震探査で用いる小型起震車
左下写真：ボーリング調査現場の全景

右上図：反射法地震探査の概念図
右下写真：ボーリング調査（孔内検層）の様子

ボーリング調査の実施に当たっては、コア採取率およびコア形状保持の向上を基本方針とし、調査計画段階ではケーシングプログラムをはじめ、掘削孔径、泥剤の選定などについて検討した。調査実施段階では、一部の区間において孔壁の押し出しによる掘削障害などが発生したが、地質性状と孔壁の状態を的確に把握し、掘削ビット形状の改良、ビット径の変更など、その都度状況に応じて既存調査技術の適切な選択・適用と一部の改良をタイムリーに実施することによって、深度 500m までのボーリング調査を比較的高いコア採取率とコア形状保持を維持しながら工程遅延をきたすことなく実施することができた（近藤ほか、2011）。また、当該サイトにおける岩石や地下水の特性を把握するため、概要調査にて実施する各種の孔内検層・試験および室内岩石・水質試験を実施し、地質・岩盤性状の違いに応じた孔内検層・試験の手法・手順の適用性を確認することができた（近藤ほか、2011）。

実証研究により取得した地質環境にかかわるデータは、調査段階ごとに整理し、その結果に基づき、地質環境モデルを調査の進展に応じて構築・更新した。実証研究では、実際の概要調査に比べ



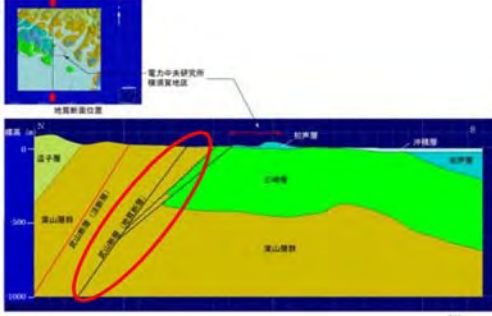
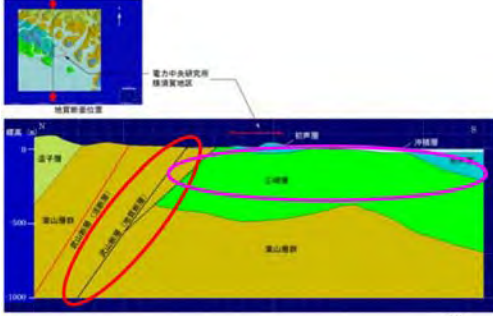
て調査・取得データが限られているものの、既存情報調査段階、地表調査段階、ボーリング調査段階と調査の進展に応じて地下深部の地質環境特性に関するデータが取得・蓄積された。これらのデータを整理・解釈し、モデルに反映することによって地質環境モデルに内在する地下深部の地質環境特性に関する不確実性が低減し、その信頼性を向上させることができることを確認した（表 5.4.2-1）。

なお、実証研究において実施した一連の調査・試験に関する調査管理技術を整理することにより、文献調査から概要調査に至る調査・評価の流れを検討した。同時に、調査範囲や調査位置の制約のある中での調査ではあるが、地質・岩盤性状の違いに応じたボーリング掘削、孔内検層・試験の内容とその手順についても検討し、取りまとめを行った（表 5.4.2-2、図 5.4.2-3）。

さらに、ボーリング調査を実施する際に想定される発生事象に対するリスク評価についても検討した（表 5.4.2-3）。リスク評価は、人的災害にかかわる事項と技術的な不具合にかかわる事項に分類し、各作業工種の評価指標を分析してリスクレベルを整理した。抽出した発生事象については、低減措置、残存リスク発生時の対策を取りまとめることにより、調査・試験に携わる作業従事者が潜在的なリスクの存在とその重大性、対策を認識する情報となり、災害の未然防止に役立てることができた。



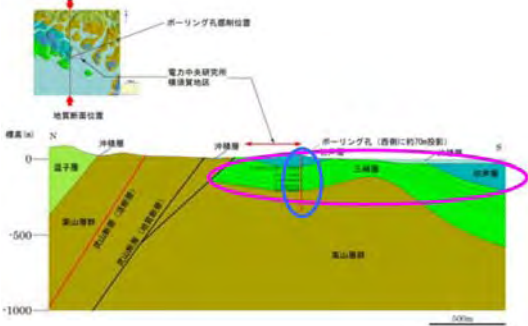
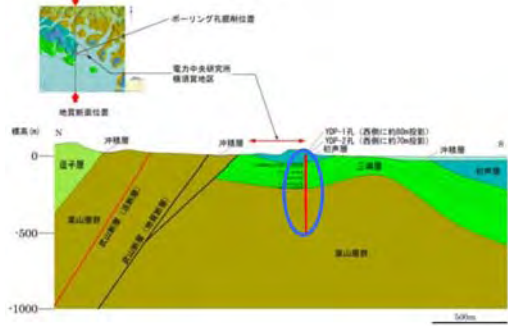
以上のように、既存情報調査、地表調査（地表踏査、物理探査）およびボーリング調査からなる一連の実証研究を実施した結果、文献調査から概要調査の実施に向けて検討・構築してきた地質環境の調査・評価の体系（5.3 参照）のうち、主に地質環境特性に係る調査・評価の論理的な手順や取得データの多角的な利用に関する適用性を実証することができた。また、概要調査の計画立案から調査・評価に至る一連の業務を実施することにより、調査実施の工程管理・品質管理にかかわる的確かつ合理的な意思決定や安全管理に関する手法の有効性などを確認することができた。地質・地質構造の判定、掘削方法などについても、研究経過および結果の評価を適切に行うことができた。さらに、この実証研究では、技術的信頼性をより確実なものにしていくため、広く国内外の専門家との意見交換を行いながら進めた。これらの実証研究で得られた成果は、概要調査計画を策定する際に反映できる知見であり、概要調査実施時において工程遅延防止や適切な手法の選択に活用できるほか、地層処分事業者である NUMO に求められる適確で迅速なマネジメントの実現に寄与できるものと考えている。

表 5.4.2-1 地質構造モデルの変遷と不確実性・信頼性の評価（例）

		既存情報調査段階	地表調査段階
地質構造モデル	地質平面		
	地質断面		
	確実性	<p>・地表地質分布は、地表踏査などに基づき作成された既存情報（地質図）であることから確実性は高いが、地下深部の情報という点では、地表分布に基づく推定のため確実性は低い。</p>	<p>・地表地質分布の変更点は、現地での観察結果によるもので確実性は高いが、地下の地質分布については、新たなデータによる更新はなく、前段階と同じである。</p>
	信頼性	<p>・公的機関の資料（地質調査所発行の地質図幅など）に基づくデータであり、信頼性は高い。</p>	<p>・地質構造モデルの地表付近の更新部分は、地表踏査および横坑内地質観察による観察データに基づくものであり、信頼性は高い。</p>

○：地質構造モデルの更新箇所（既存情報調査段階⇒地表調査段階），○：地質構造モデルの更新箇所（地表調査段階⇒ボーリング調査段階：YDP-1 孔），○：地質構造モデルの更新箇所（ボーリング調査段階：YDP-1 孔⇒ボーリング調査段階：YDP-2 孔），●：ボーリング調査地点

表 5.4.2-1 地質構造モデルの変遷と不確実性・信頼性の評価（例）（つづき）

		ボーリング調査段階（YDP-1 孔）	ボーリング調査段階（YDP-2 孔）
地質構造モデル	地質平面		
	地質断面		
	確実性	<ul style="list-style-type: none"> ボーリング掘削地点の深度 354m までは、ボーリング調査（コア観察、孔壁観察など）の結果によるデータであり、確実性は高い。ボーリング調査地点以外については、前段階と同じである。 	<ul style="list-style-type: none"> 葉山層群については、岩相分布、層理面や岩相境界の走向・傾斜、微化石分析結果を基に両ボーリング孔の対比が行われているが、側方連続性が悪く、葉山層群を細分し、モデルに表現することは困難である。 ボーリング調査地点以外については、前段階と同じである。
	信頼性	<ul style="list-style-type: none"> 地質構造モデルの更新部分は、ボーリング調査結果に基づくものであり、信頼性は高いが、葉山層群と解釈した深度 207.43m 以深の泥岩（破碎質）については、堆積年代と地層対比の関係に問題が残る。 	<ul style="list-style-type: none"> 地質構造モデルの更新部分は、基本的にボーリング調査結果に基づくものであり、信頼性は高い。ただし、ノンコア区間においては岩相境界深度の正確な認定は困難であり、やや信頼性に劣る。

○：地質構造モデルの更新箇所（既存情報調査段階⇒地表調査段階），○：地質構造モデルの更新箇所（地表調査段階⇒ボーリング調査段階：YDP-1 孔），○：地質構造モデルの更新箇所（ボーリング調査段階：YDP-1 孔⇒ボーリング調査段階：YDP-2 孔），●：ボーリング調査地点

表 5.4.2-2 地質・岩盤性状に応じたボーリング掘削・調査内容
(近藤ほか, 2011 を編集)

	掘削・調査計画 (孔壁の安定性が高い) (例: 三浦層群)	掘削・調査計画 (孔壁の安定性が低い) (例: 葉山層群)
計画深度	500m	500m
掘削孔径 (最終孔径)	HQ (98.4mm)	PQ (123mm)
掘削水の種類	泥水 (ベントナイト泥水)	泥水 (フレックス泥水, KCl ポリマー泥水)
掘削方法	ワイヤーライン工法	ワイヤーライン工法
ケーシング プログラム	2段階 (1 段目: 孔口保護, 2 段 目: 掘削・調査スパンを考 慮)	3 (~4) 段階 (1 段目: 孔口保護, 2 段目 以降: 掘削・調査スパンを 考慮)
掘削・調査 スパン	200~300m	100m (葉山層群出現深度以深)
検層・試験時 の孔内状況	・清水環境 (孔内洗浄によ り置換) (泥水環境下で取得デー タの品質に影響がない 検層・試験項目につい ては, 泥水環境下で実施)	・泥水環境 (泥壁を保持) (泥水環境下で適用可能 な検層・試験を選択の上 実施. 透水試験・採水の 際には, フラッシングを 実施)

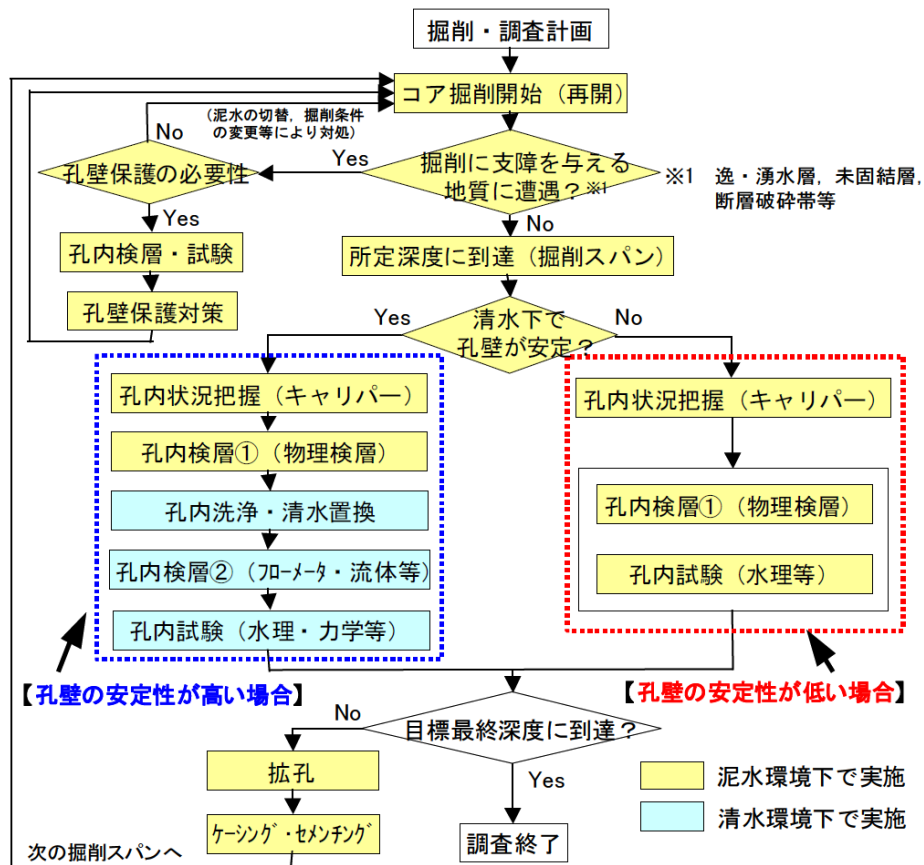


図 5.4.2-3 地質・岩盤性状に応じたボーリング掘削・調査手順
(出典: 近藤ほか, 2011)

清水環境下で孔壁が自立可能か否かに着目し、ボーリング掘削・調査内容および手順を検討した。

表 5.4.2-3 ボーリング調査におけるリスク評価結果の例
(人的災害にかかわる事項)

発生事象	評価点				リスクレベル		低減措置	残存リスク発生時の対策
	作業	作業の頻度	危害の発生可能性	危害の重大性	評価値	レベル		
1 クレーンの転倒	仮設工 (櫓設置撤去)	3	2	6	30	a	作業計画の遵守	連絡、必要な場合は病院への搬送
2 巻き込まれ、挟まれ	ボーリング掘削工	3	2	6	30	a	回転物の防護	連絡、必要な場合は病院への搬送
3 作業床の不備	孔内試験	3	2	3	15	b	作業周囲の整理・整頓	連絡、必要な場合は病院への搬送

(技術的な不具合にかかわる事項)

発生事象	評価点				リスクレベル		低減措置	残存リスク発生時の対策
	作業	作業の頻度	危害の発生可能性	危害の重大性	評価値	レベル		
1 すでに掘削した浅部にて、地盤応力により孔形状が変形し、装置が仰留	掘削	1	3	6	24	a	キャリパー検層やボアホールTVの実施 場合によってはダミーバッカーの降下試験 結果によって拡幅掘削	拡幅掘削などにより、形状復旧
2 スライム化した掘削泥水が装置内部に浸入し、操作不能	透水試験	2	3	6	30	a	孔内洗浄の徹底 装置の操作マニュアルの事前確認	スライムなどの排出作業による操作性の復旧
3 孔壁への載荷荷重が大きすぎるために孔壁を壊してしまい、載荷板が仰留	孔内水平載荷試験	1	2	6	18	b	適切な実施計画による載荷荷重の設定	拡幅掘削などにより装置の回収、孔形状の復旧
4 ロッドの孔内落下	ロッドを使う全作業	3	2	3	15	b	手順書の確認 特にホールドの確認	同一のロッドやタップによる回収
5 昇降中、ワイヤーが切断して、装置が孔内に落下	ワイヤーを使う全作業	3	3	6	36	a	作業前のワイヤーの点検と装置荷重の確認	ワイヤー交換 タップによる回収

(評価指標と算定表)

評価項目	評価点	評価の目安
頻繁にある	3	工事期間中毎日
時々ある	2	特定作業中
めったにない	1	工事期間中2~3回

評価項目	評価点
確実に起こる	4
可能性が高い	3
可能性がある	2
ほとんどない	1

評価項目	評価点
極めて有害	6
有害	3
わずかに有害	1

評価項目	評価値	リスクレベル	
重大なリスク	大きなリスク	24以上	a
	中程度のリスク	12~23	b
小さなリスク	6~11	c	
些細なリスク	5以下	d	

評価値 = (作業の頻度 + 危害の発生可能性) × (危害の重大性)

5.4.3 調査・評価技術の評価と信頼性向上に向けた取り組み

NUMO は、3.2.3.2 に述べた技術開発の体系的整理の方法に従い、「的確に精密調査地区を選定する」という目標の達成に必要な調査・評価技術について、基盤研究開発機関との議論を経て、達成目標レベル、現状の技術レベル、今後の技術開発課題、成果が必要となる時期、技術開発の業務分担（基盤研究開発機関あるいは NUMO）について取りまとめた。（NUMO, 2010b）。ここでは、その内容を中心に、概要調査にかかわる技術の評価とさらなる信頼性向上に向けた取り組みについて述べる。

5.4.3.1 技術の信頼性の評価

(1) 自然現象の影響

ここでは、一般に確度の高い評価が可能とされている将来 10 万年程度を対象とした火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食（気候・海水準変動を含む）に関する調査・評価技術について検討を行った（表 5.4.3-1, 表 5.4.3-2）。

火山・火成活動については、対象地域の第四紀火山、熱・熱水の分布や活動履歴に関するデータを取得し、マグマの貫入・噴出などの精度の高い評価ができることが目標となる。そのための技術は、現状でも十分なレベルにあると考えられる。個々の手法については、検討事例の蓄積による技術の信頼性の向上と、それらの技術の体系化を進めることが重要である。具体的には、後期鮮新世～前期更新世を含めた火山の活動履歴をよりの確に評価するための年代測定技術の高度化や、確率論的評価手法の高度化（概要調査規模の領域の評価、安全評価への情報提供の方法）などが挙げられる。

地震・断層活動については、対象地域の活断層の分布の把握や活動履歴と将来の活動性（伸展、再活動など）、断層周辺の変形帯や影響範囲の評価が行えることが目標となる。そのための基本的な調査・評価手法は整備されていると考えられる。個々の手法については、今後は手法の適用事例の蓄積や改良により信頼性の向上、体系化を進めることが重要である。特に重要な課題として、断層の活動性の評価手法（地質断層の再活動、ボーリング調査や坑道で出現した断層が活断層であるかどうかの評価手法）、伏在断層の検出方法と評価手法、地表の短い活断層の評価手法（震源断層との関連の有無）、確率論的評価手法、地域特性に応じた総合的調査・評価手法（数値モデル・模型実験による評価も含む）などが挙げられる。

隆起・侵食（気候・海水準変動を含む）については、過去 10 数万年間またはそれ以前からの隆起・沈降量および侵食量、気候・海水準変動、地形変化を把握できることが目標となる。現状の技術では大きな誤差を見込まざるを得ない場合もあるが、それに伴う不確実性について整理されてきていることから、隆起・侵食の評価はおおむね可能であると考えられる。今後、改良や高度化、信頼性の向上が必要なものとして、河成段丘の対比・編年にかかわる情報整備、隆起量評価事例の蓄積、岩石・鉱物の化学組成・結晶構造、有機物組成に基づく温度・時間指標を用いて数 100 万年程度の長期的な隆起量・侵食量を間接的に推定・評価する手法、宇宙線生成核種の濃度測定や閉鎖温度の低い鉱物を用いた年代測定による直接的な侵食量評価手法、シミュレーションなどによる地形変化予測手法などが挙げられる。

また、安全評価の観点から、自然現象の将来 10 万年程度を超える超長期の評価が求められる可能性がある。これはサイト選定に必要な要件ではないが、プレート運動の継続性を含めた将来予測の可能性や不確実性に関する科学的立場からの検討が課題である。

(2) 地質環境特性

ここでは、地質環境の場の理解にかかわる項目（地質・地質構造、地下水流動特性、地下水化学特性、岩盤特性、物質移行特性、そのほかの特性（泥火山、マスマーブメント、など）、と地質環境特性の長期変遷について検討を行った（表 5.4.3-3）。

地質環境の場の理解については、JAEA の 2 カ所の深地層の研究施設計画における、地上からの調査段階（NUMO の文献調査から精密調査の前半に相当）の調査研究を通して、わが国の主要な岩種である結晶質岩・淡水系地下水と堆積岩・塩水系地下水を対象とした調査・評価に関する知見が得られている。ここでは、地質環境特性の各項目のデータ取得からモデル構築に至る一連の作業を段階的に繰り返し、地質環境の理解を深め不確実性を低減させていく、体系的な調査・評価の具体的な事例が示された。一方、沿岸域については、文献情報に基づく活断層の推定、海上・海底での物理探査、塩淡境界面の形状把握、海底の地下水湧出探査、コントロールボーリングによる掘削・調査などに関する技術開発が行われ、陸域から海域にかけてのひと続きの調査・評価が可能になりつつある。さらに、後述する概要調査技術の実証的な検討を通して、付加体からなる地質環境の調査・評価に関する知見が得られている。以上のことから、NUMO は、これまで構築してきた調査・評価体系に、以上の知見を取り入れることにより、わが国の多様な地質環境に対する調査・評価を的確に実施できると考えている。

これらの技術において、検討事例の蓄積による技術の信頼性の向上や、技術の体系化に関する課題以外に、検討が必要と考えられる項目は以下のとおりである。

地質・地質構造の把握については、適用する岩種によって物理探査の検出能力が異なるため、多様な地質環境（結晶質岩、堆積岩、陸域、海域など）における地質・地質構造検出の程度および限界の検討をしておく必要がある。これについては横須賀での実証研究で沿岸域を対象にした各種物理探査の適用性について検討を進めている。しかし沿岸域については、波浪の影響を受ける潮間帯を含むいわゆる波打ち際の調査については、依然として物理探査などの計測技術に関する課題が残されている。地下水流動特性については、断層が水みちになるか遮水壁となるかなど、断層の性状と水理特性の関係などを考慮して、調査・評価を合理的・効率的に行うための体系的な手法が必要と考え、現在 NUMO と LBNL（米国ローレンスバークレー国立研究所）が共同で検討を進めている（Karasaki et al., 2010）。ここでは、物理探査とボーリング調査を併用して、断層を的確に検出するための手法の検討も併せて実施している。

岩盤特性については、坑道掘削時に重要となる岩盤の三次元応力場の解析手法が検討されてきたが、まだ開発途上であるため、今後も引き続き検討していく。

物質移行特性については、コロイド、有機物、微生物に関する理解は進んできたが、原位置での分析事例はまだ少なく、それらが物質移行に及ぼす影響の検討を含めた評価技術の整備が課題である。

塩淡境界面の分布・形状については、現在、幌延地域などにおいて国および基盤研究開発機関による検討が進められている。今後の課題としては、過去から現在に至る塩淡境界の変遷を把握する手法が挙げられる。

海域におけるボーリング調査は、主に資源探査や科学的研究を目的としてきたため、地下水化学特性を含めた詳細な地質環境特性を直接確認している事例は極端に少ない。現在、沿岸域を対象とした基盤研究開発が実施されているが、海域におけるボーリング調査技術の適用性に関する検討は、まだ行われていない。このため今後は、沿岸から海域における各種試験を含む調査・評価技術につ

いて、実証試験を含め、事例の蓄積や技術の体系化が課題である。

地質環境モデルの構築・評価技術に関しては、ボーリング調査などの進展に従い情報量が増加した領域については精度が向上し不確実性が低減されるが、それ以外の領域に対する不確実性は低減されない。これについては、今後、地球統計学的手法などによる空間的な情報の補間方法や、工学的対策や安全評価への影響に関する検討などを含めて、不確実性への対処方法について検討していく必要がある。

地質環境特性の長期変遷については、予備的な安全評価を行うために、将来 10 万年程度における長期的な状態の変化をおおむね設定できることが目標となる。そのために、今後検討が必要と考えられる項目としては、将来 10 万年程度の地質環境特性（地質・地質構造、地下水流動特性、地下水化学特性、物質移行特性）の時間的・空間的変遷に関する知見の整理、長期的な地質環境の変化を評価する手法の確立、その体系化・実用化などが挙げられる。

5.4.3.2 さらに信頼性向上に向けた取り組み

前項で抽出した検討項目のうち、知見・実績の蓄積、整備、高度化などに関する各課題は、今後の基盤研究開発の進展や調査・評価事例の蓄積によって解決されることが期待される。一方、NUMO では、本節で紹介した調査・評価手法の適用性の確認、あるいはモデルの検証を進めていく。さらに、基本的考え方の整備や地層処分事業に即した技術の体系化など、事業者として検討すべきと認識された以下の技術課題については、現在 NUMO 内で検討を進めている。

- ・ 自然現象の超長期評価の考え方および方法論の構築
- ・ 地質環境特性の長期変遷を評価する手法の確立および体系化
- ・ 沿岸域から海域における深部地質調査技術の適用性確認および実証

NUMO は、今後も最新の科学的知見や技術開発の成果を取り込み、これまでに体系化した調査・評価技術を改善していく。これと並行して、精密調査に向けた技術開発のニーズの取りまとめを行い、基盤研究開発機関と業務分担あるいは共同して、必要な技術開発を進めていく。

表 5.4.3-1 概要調査に向けた調査・評価技術の評価 (1/3)

	項目	現状	調査・評価への適用性	さらなる信頼性向上に向けた課題
火山・火成活動	情報整備	<ul style="list-style-type: none"> ・第四紀火山、火山灰、温泉、熱水賦存領域の分布やその特徴などに関する全国規模のデータベースが整備された。 	<ul style="list-style-type: none"> ・各段階の調査における基礎データとして活用することができる。 	—
	火山活動履歴の調査・評価	<ul style="list-style-type: none"> ・火山の活動履歴を把握する手法は基本的に確立されており、テフラの認定や対比などについて精度や信頼性を向上させるための研究開発が行われている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・概要調査の段階およびそれ以降において、各手法の適用限界や精度を確認した上で活用することができる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・年代測定技術の高度化
	マグマの貫入・噴出の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・地質学的・地球物理学的・地球化学的データに基づき、第四紀火山の活動性や深部熱源を総合的に評価する手法が開発されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・サイト選定の各段階において、各調査地区とマグマ活動との関連性の評価を行う際に活用することができる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・評価事例の蓄積、探査・測定技術の高度化
	熱・熱水の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・熱水賦存域の調査・評価手法は、地熱資源分野の技術開発において確立されており、地質学的・地球物理学的・地球化学的データなどに基づき、熱・熱水の影響を総合的に評価する手法が開発されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・総合的な熱・熱水の評価手法などは、概略的な評価に有効であり、熱源や火山からの熱的影響の評価手法は、評価に必要な情報が得られた場合に有効であると考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・評価事例の蓄積、探査・測定技術の高度化
	確率論的評価	<ul style="list-style-type: none"> ・NUMO や JAEA により、確率論的に将来の火山活動を評価する手法の開発が行われている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・決定論的手法を用いた評価を補足する手法として適用していく。 	<ul style="list-style-type: none"> ・確率論的手法による結果の利用方法に関する検討、手法の高度化
地震・断層活動	活断層の存在の把握	<ul style="list-style-type: none"> ・活断層データベースなどの全国規模の情報整備、SAR や GPS など測地学的手法、航空レーザ一測量を用いたなど地形学的手法の整備が進み、微細な変位地形やひずみの分布などに基づいた検討が行われるようになってきた。 ・物理探査手法では、三次元探査の適用、沿岸海域に対応したシステムの開発、解析手法の高度化などが進められている。また、トモグラフィの解析精度の向上は深部地質構造の解明に大きく寄与した。 ・断層の分布や活動性を評価する際に適用する、地球化学的手法や構造地質学的手法の開発が進められている。 ・上記の手法を総合的に組み合わせて評価する手法の開発が進められている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・文献調査の段階における基礎データとして活用することができる。 ・測地学的手法や地形学的手法は文献調査や概要調査の初期の段階で適用する。 ・物理探査、地化学探査などは概要調査で地下での活構造の検出や確認に活用していく。 ・構造地質学的手法は上載法が適用できない場合など有効な手法であり手法の高度化を進めながら適用していく。 ・総合的な評価手法は、対象地域に応じて適切な手法を組み合わせて適用していく。 	<ul style="list-style-type: none"> ・断層の活動性（特に地下で遭遇する）を評価するための手法の高度化 ・伏在断層の検出・評価手法の高度化 ・地表の短い活断層などの評価手法の高度化 ・地域の特性に応じた総合的な評価手法（モデル実験など含む）の高度化

表 5.4.3-2 概要調査に向けた調査・評価技術の評価 (2/3)

	項目	現状	調査・評価への適用性	さらなる信頼性向上に向けた課題
地震・断層活動	活断層周辺の変形帯の把握、活断層周辺の影響範囲の把握、断層の発達・伸展の評価、断層破碎帯の評価	<ul style="list-style-type: none"> 断層関連褶曲の考え方に基づく検討が進展し、褶曲地帯の地表変形と深部の断層の理解が進んだ。 横ずれ断層や逆断層の模型実験や数値解析による検討で、断層の発達過程や周辺への影響についての理解が進んだ。 ダメージゾーンやプロセスゾーンに対する地質学的手法の適用や物理探査（比抵抗法）によるイメージングによる解析が進められている。 	<ul style="list-style-type: none"> サイト選定の各段階において、各手法の適用性を考慮して評価に適用していく。 概要調査の段階およびそれ以降の地質調査、ボーリング調査、地下調査施設における調査において、適用可能である。 	<ul style="list-style-type: none"> 地質調査と模型実験やモデル解析を組み合わせた手法の整備 花崗岩地域以外の地質環境での事例検討、探査手法の高度化
	地質断層の再活動性の評価	<ul style="list-style-type: none"> 応力場の変化に伴う既存断層の再活動の事例が示され、モデル実験などによる解析も進められている。 	<ul style="list-style-type: none"> 事例を参考に評価を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> 活動性評価のための手法の整備・高度化
	確率論的評価	<ul style="list-style-type: none"> 数 10 年程度の地震動の発生確率はハザードマップとして公表されている。10 万年程度の予測としては、NUMO の歪速度による確率論的評価手法が開発されている。 	<ul style="list-style-type: none"> 決定論的手法を補足する目的での適用が考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> 確率論的手法による結果の利用方法に関する検討や手法の高度化
	隆起・侵食	情報整備	<ul style="list-style-type: none"> 海成段丘アトラス、最近 10 万年間の隆起速度分布図など全国規模の情報が整備された。 	<ul style="list-style-type: none"> 各段階の調査における基礎データとして活用することができる。
隆起・沈降量の調査・評価		<ul style="list-style-type: none"> 河成段丘について、対比・編年、内陸部隆起量評価の指標としての信頼性について検討が行われ、手法の妥当性や信頼性が向上した。また堆積物を用いた隆起・沈降運動を復元する手法の検討事例が蓄積された。 	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査や概要調査の段階において、隆起量の評価だけでなく、活断層などの抽出にも適用していく。 	<ul style="list-style-type: none"> 信頼性の高い段丘対比・編年データの蓄積 河成段丘を用いた内陸部隆起量評価事例の蓄積 堆積物を用いた隆起量評価事例の蓄積
侵食量・侵食速度の評価		<ul style="list-style-type: none"> 年代測定、鉱物相転移の温度依存性を利用した長期的侵食速度の推定手法や、宇宙線生成核種を利用して直接的に侵食速度を推定する手法の開発が進められている。また、長期の地形変化を予測する手法の開発が進められている。 	<ul style="list-style-type: none"> 侵食速度測定手法などは、概要調査の段階およびそれ以降において、その適用性などを考慮して必要に応じて活用していく。 地形変化予測手法は、適用限界を考慮しつつ地下水流動解析への基礎データとしても利用していく。 	<ul style="list-style-type: none"> 侵食速度測定手法の改良、わが国における事例の蓄積など 地形変化シミュレーションの検証 過去の履歴に基づく評価と地形変化シミュレーションを組み合わせた体系的な調査・評価手法の高度化
気候・海水準変動の復元		<ul style="list-style-type: none"> 風成層やコアの堆積物の解析により地域的な気候変動を解析する研究が進められている。 	<ul style="list-style-type: none"> 各手法の適用性などを考慮して活用していく。 	<ul style="list-style-type: none"> 評価事例の蓄積、分析手法の高度化

表 5.4.3-3 概要調査に向けた調査・評価技術の評価 (3/3)

項目	現状	調査・評価への適用性	さらなる信頼性向上に向けた課題	
地質環境特性	地質・地質構造	<ul style="list-style-type: none"> 地下構造を把握するための二次元または三次元の物理探査技術（解析手法を含む）の改良や高度化、沿岸域などの地質環境に応じた手法の開発が進められている。 結晶質岩、堆積岩を対象とした亀裂の分布解析手法の検討が進められた。 沿岸海底下において効率的に調査を行うボーリングシステムの開発が行われている。 	<ul style="list-style-type: none"> 各手法の適用性などを考慮して、概要調査の段階およびそれ以降に適用する。 	<ul style="list-style-type: none"> 海域におけるボーリング調査事例の蓄積とそれに基づく調査・評価手法の体系化 多様な地質環境（結晶質岩、堆積岩、陸域、海域）における地質構造検出の程度および限界の検討 波打ち際での計測技術の高度化
	地下水流動特性	<ul style="list-style-type: none"> シーケンシャル水理試験法をはじめとする地下水深部を対象とする水理試験手法、地下水流向・流速測定手法などが整備された。また、堆積岩、結晶質岩における水理地質構造モデルの作成から地下水流動解析が行われ、さらに気候・海水準変動を考慮した解析手法が示された。 	<ul style="list-style-type: none"> サイト選定の各段階において、対象地域に応じた手法を選定して適用する。 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水流動に影響する断層の検出手法の検討 断層に関連した水理特性評価の手法の体系化
	地下水化学特性	<ul style="list-style-type: none"> 地下水の安定同位体を利用した地下水年代測定から地下水の特性や流動解析を行う手法の整備が進められ、また、地下水化学モデルの構築手法が提示されている。 	<ul style="list-style-type: none"> 各手法の適用性などを考慮して、概要調査の段階およびそれ以降に適用する。 	<ul style="list-style-type: none"> 地質環境の長期変遷を考慮した評価手法の高度化
	岩盤特性	<ul style="list-style-type: none"> 既存情報や地上からの調査で得られる情報に基づき地下施設の建設可能性や難工事遭遇可能性を評価する岩盤評価手法が構築されている。 熱特性については、データベースの整備、および堆積軟岩の温度依存性評価が行われた。 	<ul style="list-style-type: none"> 主に概要調査以降からデータの取得を行い、手法の適用は対象地域の特性に応じて行う。 	<ul style="list-style-type: none"> 三次元応力場解析手法の高度化
	物質移行	<ul style="list-style-type: none"> 物質移行特性ではデータベースの整備や物質移行プロセスのモデル化などが進められている。 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水流動や概要調査などで取得したデータに基づく概略の評価に適用する。 	<ul style="list-style-type: none"> 今後の地下研究施設などでの物質移行・遅延プロセスの解明、モデル化の検討による評価技術の整備
	その他の特性	<ul style="list-style-type: none"> 泥火山・泥ダイアピルやマスマーブメントに対する知見の蓄積が進んだ。 	<ul style="list-style-type: none"> 泥火山やマスマーブメントは特殊地質環境で発生する現象であることを考慮し対象地域の評価に反映させる。 	<p>—</p>
総合的な調査・評価	<ul style="list-style-type: none"> 深地層の研究施設計画などでは、統合化データフローダイアグラムを構築し、体系的な調査・評価手法が示されている。 	<ul style="list-style-type: none"> サイト選定の各段階において、体系的な調査・評価を行う上での参考事例として活用することができる。 	<ul style="list-style-type: none"> 沿岸域および海域における調査・評価手法の体系化 データのない部分の空間的補間方法、不確実性が工学的対策・安全評価に与える影響の検討 	

5.5 まとめ

第5章では、概要調査地区選定段階における文献調査および精密調査地区選定段階における概要調査を中心に、NUMOが地質環境の調査・評価をどのような考え方でどのように実施していくのか、そしてそれに必要な技術がこの10年間でどの程度進展したか述べてきた。以下にそれらの要点をまとめる。

(1) 調査・評価の基本的考え方

わが国は変動帯に位置するため、処分施設建設地として選定されるサイトは、将来にわたり火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食などの自然現象による著しい影響を回避できる場所であることが求められる。その上で、地層処分の場となる地質環境の特性を把握するとともに、それらの長期変遷を理解し、処分場の設計・施工および閉鎖後長期の安全確保の観点からより適切と判断される場所を処分施設建設地として選定する。

地層処分の対象となる地質環境は、広範囲の空間的な特性のばらつきを有しており、それらをすべて調査し把握することは困難である。また、閉鎖後数年以上にわたる長期の安全性の評価には、時間的な不確実性が伴う。このため、段階的な調査・評価により、節目ごとに安全確保の目標に対する達成レベルを確認するとともに、不確実性が大きくかつ重要度の高い因子を抽出し、次段階にそれにかかわる情報を優先的に取得する。そのために、地質環境モデルを段階的に構築・更新し、サイト調査・評価、工学的対策、安全評価の三つの分野で地質環境の場の理解や不確実性に関する情報を共有する。自然現象の影響評価のための将来予測は、対象とする地域および事象ごとに主に外挿法により行い、予測に伴われる不確実性の程度に応じて、期間A：十分な過去の情報に基づく外挿法による予測が可能な期間、期間B：不確実性は大きくなるが外挿法による予測が可能な期間、期間C：外挿法による予測が難しい期間の三つに区分して情報を整理する。

わが国の地質環境は、地層処分の観点からは、大きくは結晶質岩（硬岩）と堆積岩（軟岩）、そして淡水系地下水と塩水系地下水の区分の組み合わせにより代表される。また、淡水系と塩水系の地下水が接する沿岸域については、内陸部とは一部異なる調査・評価の考え方や技術が必要である。これらの地質環境に対する調査・評価技術については、基盤研究開発機関を中心に検討が進められており、NUMOはその成果を活用し個別地点の地質環境に対応した調査・評価を行う。

(2) 調査・評価の進め方

【文献調査】

文献調査では、「概要調査地区選定上の考慮事項」のうちの地震（地震・活断層）、噴火（火山・火成活動、熱・熱水）、隆起・侵食、第四紀の未固結堆積物、鉱物資源にかかわる法定要件に関する事項に照らして、自然現象の著しい影響が避けられないような明らかに不適格な場所を回避するとともに、地下施設の建設が明らかに困難な場所、鉱山開発などによる人間侵入の可能性の高い場所を避けて、概要調査地区を選定する。なお、この段階での評価において、情報量の不足などに起因する不確実性のため明確な判断を下せない場合は、次の概要調査において判断する。

法定要件に関する事項の適格性を確認した後、付加的に評価する事項（地層の物性・性状、地下水の特性、調査・評価の難易度、自然災害、土地や輸送経路など）について総合的に評価し、概要調査地区としての特性を総合的に評価する。応募区域が複数存在する場合は、必要に応じて他地点との相対比較を行う。

また、以上の作業と並行して、地質・地質構造、地下水の流動特性および化学特性、岩盤特性の地質環境モデルを構築する。それに基づき、不確実性の所在と程度を把握し、工学的対策や安全評価からの要求も考慮して優先度を明確にし、概要調査計画に反映する。

【概要調査】

概要調査では、法定要件に照らして、地表調査、物理探査、ボーリング調査などの地上からの調査により、自然現象の著しい影響を回避できるか、坑道の掘削に支障がないか、地下水の水流が地下施設に悪影響を及ぼさないかについて判断し、事業期間中および閉鎖後長期の安全確保の見通しを得て精密調査地区を選定する。この段階における法定要件のうち、「地層の著しい変動」に対しては、例えば、火山・火成活動、地震・断層活動および隆起・侵食にかかわる評価を行う。その結果、地層処分システムへの著しい影響が否定できない、あるいは評価における不確実性が大きく明確な判断が下せない場合には、そのような場所を精密調査地区から除外する。

地質環境特性の調査・評価は、基本的には地表調査とボーリング調査の二つのフェーズに分けて実施する。まず、地表踏査や物理探査などの地表調査の結果に基づき、地質環境モデルを更新し、地質環境特性の長期変遷について検討する。これらの情報をもとに地下施設・人工バリアの概略検討や概略的な安全性の評価を行い、その結果を踏まえてボーリング調査の計画を検討する。次に、ボーリング調査により取得した情報に基づき地質環境モデルを更新し、地質環境特性の長期変遷の検討を経て、地下施設・人工バリアの概念設計や、予備的な安全評価を行う。その結果、法定要件の「坑道掘削への支障」に対する未固結堆積物、「地下水の水流による地下施設への影響」に対する大規模な高透水性構造（水みち）などの項目について、地層処分システムへの著しい影響が否定できない場合、事業期間中の安全確保が困難であると判断される場合、あるいは評価における不確実性が大きく明確な判断が下せない場合には、そのような場所を精密調査地区から除外する。

さらに、法定要件以外にも、事業期間中および閉鎖後長期の安全確保、自然環境への影響、経済性などの観点から総合的な評価を行い、事業を進める上でより適切と判断される場所を精密調査地区として選定する。概要調査地区が複数の場合にも、総合的な評価の結果を踏まえて相対的比較を行い、より適切と判断される地区を選定する。

(3) 調査・評価を支える技術の進展

第2次取りまとめでは、わが国には地層処分に必要な条件を満たす地層が広く存在し、当時の調査・評価技術を用いて、そのような条件を備えているか否かを判断できることが示された。第2次取りまとめ以降、NUMO および基盤研究開発機関では、地層処分事業の推進を見据え、個々の調査・評価技術を改良・高度化するとともに、わが国の多様な地質環境を考慮した体系的な調査・評価技術に関する検討を進めてきた。ここでは、自然現象と地質環境特性の項目ごとに、上述の調査・評価支える技術の進展について述べる。

火山・火成活動については、わが国の火山灰に関するデータが整理され、テフラの対比の精度が向上した。また、地震波トモグラフィなどの地下深部の解析技術の高度化に伴い、火山の新規発生やマグマの移動の評価手法、深部熱源の評価手法における信頼性が向上した。さらに、地球化学的手法を活用した深部熱水の評価手法が開発され、マグマ起源以外の熱水の存在が明らかになった。これらの決定論的な評価を補足する手法として、海外で用いられている複数の確率論的手法に基づく火山発生確率の評価手法が開発され、わが国の広域的な領域や単成火山群の評価に対する適用性

が確認された。以上の技術の進展により、対象地域の第四紀火山の分布や活動履歴に関するデータを取得し、将来の評価を行うことは、現状の技術で可能と考えている。

地震・断層活動については、地表で活断層が認識されていなかった内陸地域の被害地震に対する調査を通して、震源断層と活断層の関係、伏在断層や未成熟な断層の検出、既存の活断層図の十分性などの課題が見出された。このような課題に対し、例えば、地表に明瞭な変位を伴わない活断層の評価には、変動地形学的手法、断層関連褶曲の考えに基づく数値解析や模型実験、地質断層の再活動を考慮した解釈などが取り入れられてきている。また、断層の影響範囲の評価にも、数値解析や模型実験と現状を比較することにより評価する手法が示された。これらの決定論的な評価を補足する手法として、測地などの複数のデータの歪速度に基づき将来の断層活動を確率論的に評価する手法が開発され、わが国の広域的な領域への適用性が確認された。以上の技術の進展により、対象地域の活断層の分布や活動性、活動履歴を把握し、将来の評価を行うことは、現状の技術で概ね可能と考えている。

隆起・侵食については、情報の整備および事例研究などを通じて、隆起・沈降量、侵食量・侵食速度の推定、気候・海水準変動の復元などの手法の高度化、体系化が図られた。河成段丘の対比・編年の信頼性の向上に伴い、過去 10 万年間程度の内陸部の隆起量の見積りへの信頼性が向上した。また、過去の侵食履歴と気候・海水準変動に基づく、将来の地形変化の予測手法やシミュレーション技術の開発が進められ、長期的な地下水流動解析への情報提供が可能になってきた。これらの技術の進展により、隆起・沈降量および侵食量、気候・海水準変動、地形変化を把握し、将来の評価を行うことは、現状の技術で概ね可能と考えている。

地質環境特性については、JAEA の二つの深地層の研究施設計画における、地表からの調査段階（NUMO の文献調査から精密調査の前半に相当）の調査研究を通して、わが国の代表的な地質環境である内陸部の結晶質岩・淡水系地下水および堆積岩・塩水系地下水を対象とした調査・評価に関する知見が得られている。ここでは、地質環境特性の各項目のデータ取得からモデル構築に至る一連の作業を段階的に繰り返し、地質環境の理解を深め不確実性を低減させていくという、体系的な調査・評価の具体的な事例が示された。一方、沿岸域については、文献情報に基づく活断層の推定、海上・海底での物理探査、塩淡境界面の形状把握、海底の地下水湧出探査、コントロールボーリングによる掘削・調査などに関する技術開発が行われ、陸域から海域にかけての一続きの調査・評価が可能になりつつある。以上の知見を NUMO がこれまで構築してきた調査・評価の体系に取り込むことにより、わが国の多様な地質環境に対する調査・評価を的確に実施することができる。

NUMO は、体系的な調査・評価技術の適用性を確認すること、および調査管理技術の整備を図ることを目的として、現地調査に基づく実証的な検討を行った。その結果、文献調査、地表調査、ボーリング調査を通じて段階的にデータを取得・解釈し、地質環境モデルを更新する過程を通して、地質環境モデルの不確実性が低減されることを確認した。また、調査計画立案から結果の評価に至る一連の業務を実施することにより、調査実施の工程管理・品質管理にかかわる的確かつ合理的な意思決定や、安全管理などに関する手法の有効性を確認することができた。

以上に述べてきたことから、今後あらゆる地点からの応募に対して、NUMO が的確に文献調査および概要調査を実施し、サイト選定にかかわる評価を行うための基本的な準備は整ったと考えている。

参考文献

- 阿部寛信, 酒井隆太郎 (1999) : 地震・断層活動が水理環境に及ぼす影響, サイクル機構技報, No.5, pp.77-83.
- 相澤泰隆, 小林健太, 梅津健吾, 山本亮 (2005) : 2000年鳥取県西部地震の余震域およびその周辺に分布する断層岩類, 地質学雑誌, 第111巻, 第12号, pp.737-750.
- 阿島秀司, 戸高法文, 岩月輝希, 古江良治 (2006) : 多変量解析による瑞浪超深地層研究所周辺の地下水化学モデルの構築, 応用地質, 第47巻, 第3号, pp.120-130.
- 阿子島功 (1983) : 山形県馬見ヶ崎川流域における過去2万年間および最近の侵蝕速度, 地形, 第4巻, 第1号, pp.97-106.
- Alexander, W. R., Frieg, B. and Ota, K. (2009) : The Nagra-JAEA in situ study of safety relevant radionuclide retardation in fractured crystalline rock III: The RRP project final report, Nagra Technical Report NTB 00-07.
- 雨貝知美, 鈴木啓, 和田弘人, 藤原みどり, 飛田幹男, 矢来博司 (2008) : 干渉合成開口レーダーを用いた平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震に伴う地殻変動の検出, 国土地理院時報, 第117集, pp.15-20.
- Amano, K., Niizato, T., Yokota, H., Ota, K., Lanyon, B. and Alexander, W. R. (2010) : Development of comprehensive techniques for coastal site characterisation: (2) Integrated palaeohydrogeological approach for development of site evolution models, Proceedings of the ASME 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM 10, October 3-7, 2010, Tsukuba, Japan.
- 青柳恭平, 阿部信太郎 (2007) : 2004年新潟県中越地震と地質構造の関係ー活褶曲地域における震源断層評価ー, 電力中央研究所報告, N06030.
- 青柳恭平, 阿部信太郎 (2009) : 明瞭な活断層が見出されない地域での震源断層評価ー長野県西部地震震源域における地球物理学的調査ー, 電力中央研究所報告, N08038.
- 朝倉俊弘, 小島芳之 (1995) : 膨張性地山の調査・試験・解析, 地質と調査, 63, pp.7-14.
- 浅森浩一, 梅田浩司 (2005) : 地下深部のマグマ・高温流体等の地球物理学的調査技術ー鬼首・鳴子火山地域および紀伊半島南部地域への適用ー, 原子力バックエンド研究, Vol.11, No.2, pp.147-155.
- 浅森浩一, 梅田浩司, 石丸恒存, 小松亮 (2003) : 温泉地化学データベースの作成, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7450 2002-003.
- 麻植久史, 小池克明, 吉永徹, 高倉伸一 (2007) : 布田川ー日奈久断層帯の深部比抵抗構造のイメージングと微小地震分布からの考察, 応用地質, 第48巻, 第4号, pp.180-191.
- 芦田譲 (2005) : 日本列島をめぐる領土と資源エネルギー, 季報エネルギー総合工学, Vol.28, No.1, pp.48-57.
- Baba, K. and Yamada, Y. (2004) : BSRs and associated reflections as an indicator of gas hydrate and free gas accumulation: An example of accretionary prism and forearc basin system along the Nankai Trough, off Central Japan, Resource Geology, Vol.54, No.1, pp.11-24.
- Bates, R.L. and Jackson, J.A. (1987) : Glossary of geology, third edition, American Geological Institute.
- Bieniawski, Z. T. (1989) : Engineering Rock Mass Classifications, Wiley, New York.

- 朴進牛, 鶴哲郎, 野徹雄, 瀧澤薫, 佐藤壮, 金田義行 (2008) : 紀伊半島南東沖南海トラフでの高分解能 3 次元反射法地震探査と重合前深度マイグレーション処理, 物理探査, 第 61 巻, 第 3 号, pp.231-241.
- Chapman, N., Apted, M., Beavan, J., Berryman, K., Cloos, M., Connor, C., Connor, L., Ellis, S., Jaquet, O., Kiyosugi, K., Litchfield, N., Mahony, S., Smith, W., Sparks, S., Stirling, M., Villamor, P., Wallace, L., Goto, J., Miwa, T., Tsuchi, H. and Kitayama, K. (2009a) : Development of Methodologies for the Identification of Volcanic and Tectonic Hazards to Potential HLW Repository Sites in Japan,-Summary Report -, NUMO-TR-09-03.
- Chapman, N., Apted, M., Beavan, J., Berryman, K., Cloos, M., Connor, C., Connor, L., Hasenaka, T., Jaquet, O., Kiyosugi, K., Litchfield, N., Mahony, S., Miyoshi, M., Smith, W., Sparks, S., Stirling, M., Villamor, P., Wallace, L., Goto, J., Miwa, T., Tsuchi, H. and Kitayama, K. (2009b) : Development of Methodologies for the Identification of Volcanic and Tectonic Hazards to Potential HLW Repository Sites in Japan,-The Kyushu Case Study-, NUMO-TR-09-02.
- Chapman, N., Apted, M., Beavan, J., Berryman, K., Cloos, M., Connor, C., Connor, L., Jaquet, O., Litchfield, N., Mahony, S., Smith, W., Sparks, S., Stirling, M. and Wallace, L. (2009c) : Development of Methodologies for the Identification of Volcanic and Tectonic Hazards to Potential HLW Repository Sites in Japan,-The Tohoku Case Study-, NUMO-TR-08-03.
- Chapman, N., Goto, J. and Tsuchi, H. (2009d) : Likelihood of Tectonic Activity Affecting the Geological Stability of a Repository in Japan: Development of NUMO's ITM Methodology, Stability and Buffering Capacity of Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste : Application to Crystalline Rock, Workshop Proceedings, Manchester, United Kingdom, 13-15 November 2007, pp.67-75.
- 千木良雅弘 (1995) : 風化と崩壊, 近未来社.
- 千木良雅弘, 中田英二 (1994) : 堆積岩の続成作用 (その 1) - 圧密・脱水と水理地質特性 -, 電力中央研究所報告, U94026.
- 千木良雅弘, 田中和弘 (1997) : 北海道南部の泥火山の構造的特徴と活動履歴, 地質学雑誌, 第 103 巻, 第 8 号, pp.781-791.
- 地質調査所 (1980) : 日本地熱資源賦存地域分布図, 地質調査所.
- 地質調査所 (1992) : 新潟県中部地域, 日本油田・ガス田図 13.
- 地質調査所 (1995) : 100 万分の 1 日本地質図第 3 版 CD-ROM 版, 数値地質図 G-1, 地質調査所.
- 地質環境の長期安定性研究委員会 (2011) : 地質リーフレット 4 日本列島と地質環境の長期安定性, 日本地質学会.
- Cox, A. and Engebreston, D. (1985) : Change in motion of pacific plate at 5My BP., Nature, 313, pp.472-474.
- 第四紀地殻変動研究グループ (1968) : 第四紀地殻変動図, 第四紀研究, 第 7 巻, 第 4 号, pp.182-187.
- 第四紀火山カタログ委員会 (1999) : 日本の第四紀火山カタログ v.1.0 (CD-ROM 版), 日本火山学会.
- 壇原毅 (1971) : 日本における最近 70 年間の総括的上下変動, 測地学会誌, 第 17 巻, 第 3 号, pp.100-108.
- 土木学会 (1983) : トンネルの地質調査と岩盤計測, 土木学会.
- 土木学会 (2001) : 概要調査地区選定時に考慮すべき地質環境に関する基本的考え方, 土木学会原子力土木委員会地下環境部会.
- 土木学会 (2006a) : 精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方, 土木学会原

子力土木委員会地下環境部会.

土木学会 (2006b): 熱環境下の地下岩盤施設の開発をめざして—熱物性と解析—, 土木学会岩盤力学委員会岩盤の熱環境に関する研究小委員会.

土木学会 (2007): 余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方, 土木学会エネルギー委員会低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会.

Duncan, R.A. and Keller, R.A. (2004) : Radiometric ages for basement rocks from the Emperor Seamounts, ODP Leg 197, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Vol.5, No.8, Q08L03, doi:10.1029/2004GC000704.

遠藤邦彦, 奥村晃史 (2010): 第四紀の新たな定義: その経緯と意義についての解説, 第四紀研究, 第49巻, 第2号, pp.69-77.

EPICA community members (2004) : Eight glacial cycles from an Antarctic ice core, *Nature*, Vol. 429, pp.623-628.

藤井幸泰, 竹村貴人, 高橋学, 林為人, 赤岩俊治 (2005): 異方性を考慮した稲田花崗岩の一軸引張割れ目の特性, 応用地質, 第46巻, 第4号, pp.227-231.

藤井義明, 大高憲道, 中川嘉文, 児玉淳一 (2006): 接線ヤング率の変化に基づく岩盤応力の推定に関する基礎実験, 資源と素材, Vol.122, No.10/11, pp.483-488.

藤本光一郎, 大谷具幸, 田中秀美, 樋口孝幸, 富田直人, 伊藤久男, Agar, S.M. (1998): 地震直後の断層破砕帯の性質—地質調査所平林坑井のコアの物質科学的解析, 地球号外, 断層解剖計画, Vol.21, pp.149-153.

藤原治, 増田富士雄, 酒井哲弥, 布施圭介, 斉藤晃 (1997): 房総半島南部の完新世津波堆積物と南関東の地震隆起との関係, 第四紀研究, 第36巻, 第2号, pp.73-86.

藤原治, 増田富士雄, 酒井哲弥, 岡崎浩子, 斉藤晃, 鈴木俊秀 (1996): 海浜堆積物から見た下総台地の隆起運動像, 堆積学研究, 43, pp.39-46.

藤原治, 三箇智二, 大森博雄 (1999): 日本列島における侵食速度の分布, サイクル機構技報, No.5, pp.85-93.

藤原治, 柳田誠, 三箇智二, 守屋俊文 (2005a): 地層処分からみた日本列島の隆起・侵食に関する研究, 原子力バックエンド研究, Vol.11, No.2, pp.113-124.

藤原治, 柳田誠, 三箇智二, 守屋俊文 (2005b): 地層処分から見た侵食作用の重要性—海成段丘を対象とした侵食速度の推定を例として—, 原子力バックエンド研究, Vol.11, No.2, pp.139-146.

藤原治, 柳田誠, 清水長正, 三箇智二, 佐々木俊法 (2004): 日本列島における地すべり地形の分布・特徴, 日本地すべり学会誌, 第41巻, 第4号, pp.335-344.

藤原智 (2006): 宇宙から大地の動きを見る衛星干渉合成開口レーダー (SAR)による地殻変動検出, ないふる, No.56, pp.2-3.

福地龍郎, 溝口一生, 嶋本利彦, 林愛明 (2002): ESR解析による断層摩擦発熱温度の推定—野島断層と高速剪断実験結果を例として—, 地球号外, 沈み込み帯地震発生帯—その物質科学と深海掘削—, Vol.36, pp.82-89.

福留高明 (1984): 熱源として見た活断層, 秋田大学鉱山学部地下資源研究施設報告, 49, pp.33-40.

舟木泰智, 石井英一, 常盤哲也 (2009): 新第三紀堆積岩中の割れ目は主要な水みちとなり得るか?, 応用地質, 第50巻, 第4号, pp.238-247.

古江良治, 岩月輝希, 濱克宏 (2005): 深層ボーリング孔を用いた地下水の地球化学調査の課題に対

- する試み, 応用地質, 第 46 卷, 第 4 号, pp.232-236.
- 古江良治, 岩月輝希, 水野崇, 彌榮英樹 (2003): 試錐孔を利用した地下水の地球化学特性調査手法と品質管理, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7520 2003-001.
- 古澤明 (2004): RIPL 法により由布岳火山周辺のテフリックレスから見いだした火山活動, 地質学雑誌, 第 110 卷, 第 1 号, pp.19-37.
- 古澤明, 中村千怜 (2009): 石英に含まれるガラス包有物の主成分分析による K-Tz の識別, 地質学雑誌, 第 115 卷, 第 10 号, pp.544-547.
- 古屋裕, 伊藤谷生, 佐藤比呂志, 平田直, 駒田希充, 津村紀子, 浅尾一巳, 荒井良祐, 半場康弘 (2009): 反射法地震探査による房総半島南西部内房沿岸の浅部地下構造, 地震研究所彙報, Vol.84, pp.307-329.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2002): 平成 13 年度地層処分経済性向上調査地層処分サイト評価技術確証試験 報告書 (第 3 分冊)調査システムの総合評価.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2004): 平成 15 年度地層処分技術調査等高精度物理探査技術高度化調査.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2006): 平成 17 年度地層処分技術調査等地質環境評価技術高度化調査.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2007): 平成 18 年度地層処分技術調査等地質環境評価技術高度化調査.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2009a): 平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書 (第 3 分冊)ーモニタリング技術の開発ー.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2009b): 平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 地層処分共通技術調査 沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発.
- 原子力安全委員会 (2002a): 金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設のための安全審査指針 (平成 22 年 12 月 20 日一部改訂).
- 原子力安全委員会 (2002b): 高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について.
- 原子力安全委員会 (2006): 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針.
- 原子力安全委員会 (2008): 使用済燃料中間貯蔵施設の安全審査における「自然環境」の考え方について.
- 原子力安全委員会 (2010a): 余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方.
- 原子力安全委員会 (2010b): 発電用原子炉施設の耐震安全性に関する安全審査の手引き.
- 原子力委員会 (1997): 高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について, 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会.
- Ghimire, H.N., Ishijima, Y., Sugawara, T. and Nakama, S. (2004a) : Development of Stress Measuring System by Overcoring Method Suitable for Soft Rocks, Shigen-to-Sozai, Vol.120, No.1, pp.32-38.
- Ghimire, H.N., Ishijima, Y., Sugawara, T., Matsui, H. and Nakama, S. (2004b) : Stress Measurement in Weak Rock by Borehole Deformation Method-A Case Study of Horonobe, Shigen-to-Sozai, Vol.120, No.10/11, pp.545-554.

- Goto, J., Tsuchi, H. and Mashimo, M. (2009) : Examination on earthquake ground motion in the deep underground environment of Japan, Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Crystalline Rock, Workshop Proceedings, Manchester, United Kingdom, 13-15 November 2007, OECD-NEA No.6362, pp.227-234.
- 濱田崇臣, 幡谷竜太 (2009) : 段丘の対比・編年の信頼性向上のための風化指標の検討—新潟県中越地域等に分布する段丘の観察・分析結果に基づいて—, 電力中央研究所報告, N08063, 33p.
- 濱田崇臣, 幡谷竜太 (2011) : 河成段丘を用いた内陸部隆起量評価手法の適用性の検討—経験的指標を重視したアプローチ—, 電力中央研究所報告, N10050 (印刷中).
- 花室孝広, 梅田浩司, 高島勲, 根岸義光 (2008) : 紀伊半島南部, 本宮および十津川地域の温泉周辺の熱水活動史, 岩石鉱物科学, Vol.37, No.2, pp.27-38.
- 原山智 (1994) : 世界一若い露出プルトンの冷却史—北アルプス, 滝谷花崗閃緑岩の年代と冷却モデル—, 地質学論集, 第 43 号, pp.87-97.
- 長谷川昭, 中島淳一, 海野徳仁, 三浦哲, 諏訪謡子 (2004) : 東北日本弧における地殻の変形と内陸地震の発生様式, 地震, 第 56 巻, 第 4 号, pp.413-424.
- 長谷川琢磨, 中田弘太郎, 富岡祐一, 後藤和幸, 柏谷公希, 濱克宏, 岩月輝希, 武田匡樹, 小坂寛 (2010) : 地下水年代測定評価技術の開発 (その 12) : —東濃地域における ^4He と ^{14}C 地下水年代測定の適用性検討—, 電力中央研究所研究報告, N10001.
- 幡谷竜太 (2005) : 河成段丘を用いた第四紀後期の隆起量評価手法の検討 (1)—段丘対比の考え方の提案と河成段丘の編年に関わるケーススタディー—, 電力中央研究所報告, N05005.
- 幡谷竜太 (2006a) : 河成段丘を用いた第四紀後期の隆起量評価手法の検討 (2)—那珂川沿いに分布する河成段丘の層序—, 電力中央研究所報告, N05016.
- 幡谷竜太 (2006b) : 河成段丘を用いた第四紀後期の隆起量評価手法の検討 (3)—過去 10 万年間の隆起量分布により明らかにされる内陸部の地殻運動—, 電力中央研究所報告, N05017.
- 幡谷竜太, 濱田崇臣 (2009) : 河成段丘の分布から見た内陸部の隆起特性評価—新潟県中越地域の例—, 電力中央研究所報告, N08044.
- Hataya, R., Yanagida, M. and Sato, M. (2009) : Study on characterisation of Quaternary tectonic movement by uplift estimation using fluvial terraces, Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Crystalline Rock, Workshop Proceedings, Manchester, United Kingdom, 13-15 November 2007, OECD/NEA No.6362, pp.217-225.
- 幡谷竜太, 柳田誠, 佐藤賢, 佐々木俊法 (2005) : 宮城県川崎盆地における海洋酸素同位体ステージ 6 河成段丘の認定とその意義, 第四紀研究, 第 44 巻, 第 3 号, pp.155-167.
- 幡谷竜太, 柳田誠, 山本真哉, 佐藤賢, 古澤明 (2006) : 新潟県魚沼丘陵北部の河成段丘の層序, 応用地質, 第 47 巻, 第 3 号, pp.140-151.
- 早川裕一, 松倉公憲 (2003) : 日光, 華厳滝の後退速度, 地学雑誌, 第 112 巻, 第 4 号, pp.521-530.
- 井尻暁 (2009) : 海底泥火山堆積物中の間隙水の起源, 地学雑誌, 第 118 巻, 第 3 号, pp.435-454.
- 池田安隆 (2002) : 日本の活褶曲帯の形成メカニズムとその起源, 活断層研究, 第 22 号, pp.67-70.
- 池田安隆, 今泉俊文, 東郷正美, 平川一臣, 宮内崇裕, 佐藤比呂志 (2002) : 第四紀逆断層アトラス, 東京大学出版会.
- 池原研 (2000) : 北海道北端部, 利尻トラフの海底堆積物中にタービダイトとして記録された地震第四紀研究, 第 39 巻, 第 6 号, pp.569-574.

- 今井久, 山下亮, 塩崎巧, 浦野和彦, 笠博義, 丸山能生, 新里忠史, 前川恵輔 (2009): 地下水流動に対する地質環境の長期的変遷の影響に関する研究 (委託研究), 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2009-001.
- 稲葉薫, 三枝博光 (2003): 地下水流動の予測解析統合システム (GEOMASS システム)の概要と東濃地域への適用事例, サイクル機構技報, No.18, pp.71-82.
- 井上大榮, 宮腰勝義, 上田圭一, 宮脇明子, 松浦一樹 (2002): 2000年鳥取県西部地震震源域の活断層調査, 地震, 第54巻, 第4号, pp.557-573.
- 井上直人, 楠本成寿, 竹村恵二 (2006): 重力異常からみた活断層・地震断層・地殻変動, 号外地球, 活断層・古地震とアクティブテクトニクス, No.54, pp.233-238.
- 井上卓彦, 村上文敏, 岡村行信, 池原研 (2007): 2007年能登半島地震震源域の海底活断層, 地震研究所彙報, Vol.82, pp.301-312.
- 石原朋和, 田中和広 (2009): 泥火山周辺の地質構造と地下水の地化学特性—新潟県十日町市蒲生における検討—, 地学雑誌, 第118巻, 第3号, pp.350-372.
- 石井英一, 福島龍朗 (2006): 新第三紀珪質岩における断層の解析事例, 応用地質, 第47巻, 第5号, pp.280-291.
- Ishii, E., Funaki, H., Tokiwa, T. and Ota, K. (2010): Relationship between fault growth mechanism and permeability variations with depth of siliceous mudstones in northern Hokkaido, Japan, Journal of Structural Geology, Vol.32, pp.1792-1805.
- 石井英一, 安江健一, 大平寛人, 古澤明, 長谷川健, 中川光弘 (2008): 北海道北部, 大曲断層近傍の背斜成長の開始時期, 地質学雑誌, 第114巻, 第6号, pp.286-299.
- 石井英一, 安江健一, 田中竹延, 津久井朗太, 松尾公一, 杉山和稔, 松尾重明 (2006): 北海道北部, 幌延地域における大曲断層の三次元分布と水理特性, 地質学雑誌, 第112巻, 第5号, pp.301-314.
- Ishimaru, K. and Shimizu, I. (1997): Groundwater pressure changes associated with earthquakes at the Kamaishi Mine, Japan: A study for stability of geological environment in Japan, Proc. 30th International Geological Congress, Vol.24, pp.31-41.
- 磯望, 山川克己, 米澤宏, 松原敏子 (1980): 岐阜県高原川流域における土石流による岩屑供給と沖積錐の成長速度, 地理学評論, 第53巻, 第11号, pp.699-720.
- 伊藤久敏 (2006): 閉鎖温度の低い年代測定法を用いた地殻浅部の熱履歴と変動史の評価—野島断層と柳ヶ瀬断層の例—, 電力中央研究所報告, N05060.
- 伊藤成輝, 町田功, 丸井敦尚 (2010a): 間隙水の化学的性質と地下水流動との関係—3段階で遠心分離した砂岩間隙水の水質分析結果に基づいて—, 地下水学会誌, 第52巻, 第2号, pp.183-194.
- 伊藤成輝, 丸井敦尚, 越谷賢 (2010b): 幌延沿岸域における地下水流動・塩淡境界解析の解析条件, 日本地下水学会春季講演会講演要旨, pp.108-111.
- 伊藤成輝, 丸井敦尚, 宮越昭暢, ガヤルドアドリアン, 市村隆人 (2007): 揚水に伴う沿岸域堆積軟岩中の塩淡境界形状と地下水流動の変化, 地下水学会誌, 第49巻, 第1号, pp.33-48.
- Iwamori, H. (1992): Degree of Melting and Source Composition of Cenozoic Basalts in Southwest Japan: Evidence for Mantle Upwelling by Flux Melting, J. Geophys. Res., Vol.97, No.B7, pp.10983-10955.
- 岩月輝希, 森川佳太, 細谷真一, 吉川英樹 (2009): 深部地下水の物理化学パラメータ (pH, 酸化還元電位)の測定とその留意点, 地下水学会誌, 第51巻, 第3号, pp.205-214.
- JAEA (日本原子力研究開発機構) (2005-2009): 熱力学・収着・拡散データベース, 2005-2009JAEA.

- JAEA (日本原子力研究開発機構) (2008) : 平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発.
- JAEA (日本原子力研究開発機構) (2009) : 平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発.
- JAEA (日本原子力研究開発機構) (2010a) : 平成 21 年度地層処分技術調査等委託費 地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発.
- JAEA (日本原子力研究開発機構) (2010b) : 深地層の科学的研究カーネル.
- Jaquet, O., Connor, C. and Connor L. (2008) : Probabilistic Methodology for Long-Term Assessment of Volcanic Hazards, Nuclear Technology, Vol.163, No.1, pp.180-189.
- Jaquet, O., Lantuéjoul, C and Goto, J. (2009) : Cox process models for the estimation of long-term volcanic hazard, Volcanic and Tectonic Hazard Assessment for Nuclear Facilities, edited by Connor, C.B., Chapman, N.A. and Connor, L.J., Cambridge University Press, pp.369-384.
- 地盤工学会 (2004) : 地盤調査の方法と解説, 地盤工学会.
- 地震調査研究推進本部 (2009) : 新たな地震調査研究の推進について.
- 地震調査研究推進本部 (2010) : 全国地震動予測地図 2010 年版.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999a) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第 2 次取りまとめ - 総論レポート, JNC TN1400 99-020.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999b) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第 2 次取りまとめ - 分冊 1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005a) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 - 平成 17 年取りまとめ - 分冊 1 深地層の科学的研究, JNC TN1400 2005-014.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005b) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 - 平成 17 年取りまとめ - 分冊 2 工学技術の開発, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 2005-015.
- Jolivet, L., Tamaki, K. and Fournier, M. (1994) : Japan Sea, opening history and mechanism: A synthesis, J. Geophys. Res., Vol.99, No.B11, pp.22237-22259.
- 鍵山恒臣 (2010) : カルデラ生成噴火の準備過程解明に向けた研究の展望, 地質学雑誌, 第 116 巻, 第 9 号, pp.463-472.
- 楮原京子, 今泉俊文, 宮内崇裕, 佐藤比呂志, 内田拓馬, 越後智雄, 石山達也, 松多信尚, 岡田真介, 池田安隆, 戸田茂, 越谷信, 野田賢, 加藤一, 野田克也, 三輪敦志, 黒澤英樹, 小坂英輝, 野原壯 (2006) : 横手盆地東縁断層帯・千屋断層の形成過程と千屋丘陵の活構造, 地学雑誌, 第 115 巻, 第 6 号, pp.691-714.
- Kagohara, K., Ishiyama, T., Imaizumi, T., Miyauchi, T., Sato, H., Matsuta, N., Miwa, A. and Ikawa, T. (2009) : Subsurface geometry and structural evolution of the eastern margin fault zone of the Yokote basin based on seismic reflection data, northeast Japan, Tectonophysics, Vol.470, No.3/4, pp.319-328.
- 海上保安庁 (2010) : 海域活断層域を含む沿岸調査及びその成果, 海上保安庁海洋情報部, <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAIYO/FAULTS/main.html>, (参照 2011 年 4 月 3 日).
- 貝塚爽平 (1977) : 日本の地形, 岩波書店, 234p.
- Kamata, H. and Kodama, K. (1999) : Volcanic history and tectonics of the Southwest Japan Arc, Island Arc, Vol.8, No.3, pp.393-403.

- Kameda, J., Saruwatari, K. and Tanaka, H. (2003) : H₂ generation in wet grinding of granite and single-crystal powders and implications for H₂ concentration on active faults, *Geophysical Research Letters*, Vol.20.
- 上岡昇 (2007) : コロイドによる核種吸着性—希土類元素を中心に, *地質ニュース*, 631 号, pp.29-32.
- 金折裕司 (2001) : 断層の影響はどこまで及んでいるか, *応用地質*, 第41 卷, 第6 号, pp.323-332.
- 狩野謙一, 村田明広 (1998) : *構造地質学*, 朝倉書店.
- Karasaki, K., Onishi, T., Gasperikova, E., Goto, J, Miwa, T., Tsuchi, H., Ueta., K., Kiho, K. and Miyakawa, K. (2010) : Development of characterization technology for fault zone, *Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM 10*, October 3-7, 2010, Tsukuba, Japan., ICEM2010-40121.
- Kase, Y. and Day, S.M. (2006) : Spontaneous rupture processes on a bending fault, *Geophysical Research Letters*, Vol.33, pp.L10302, doi:10.1029/2006GL025870.
- Kato, N., Sato, H. and Umino, N. (2006) : Fault reactivation and active tectonics on the fore-arc side of the back-arc rift system, NE Japan, *Journal of Structural Geology*, Vol.28, No.11, pp.2011-2022.
- Kato, N., Sato, H., Imaizumi, T., Ikeda, Y., Okada, S., Kagohara, K., Kawanaka, T. and Kasahara, K. (2004) : Seismic reflection profiling across the source fault of the 2003 Northern Miyagi earthquake (Mj 6.4), NE Japan: basin inversion of Miocene back-arc rift, *Earth Planets and Space*, Vol.56, No.12, pp.1369-1374.
- 加藤碩一 (1989) : *地震と活断層の科学*, 朝倉書店.
- 活断層研究会 (1991) : *新編 日本の活断層 - 分布図と資料*, 東京大学出版会.
- 川辺岩夫 (1991) : 地震に伴う地下水・地球化学現象, *地震2*, 第44 卷, 特集号, pp.341-364.
- 川上源太郎, 大平寛人, 在田一則, 板谷徹丸, 川村信人 (2006) : 熱年代学データに基づく日高山脈の上昇史, *地質学雑誌*, 第112 卷, 第11 号, pp.684-698.
- 川本眺万, 石黒幸文, 呉旭 (2001) : 山はねとその対策に関する文献調査, *トンネルと地下*, 第32 卷, 第7 号, pp.47-56.
- 木方建造, 新孝一, 鈴木浩一, 宮川公雄, 岡田哲実, 増原康布, 井ヶ田徳行, 小早川博亮, 山本真哉 (2006) : コントロールボーリングによる掘削・調査技術の開発 (フェーズ1), 電力中央研究所報告, N01.
- 木方建造, 新孝一, 大津正士, 宮川公雄, 鈴木浩一, 岡田哲実, 須永崇之, 小早川博亮, 末永弘, 井ヶ田徳行, 山本真哉 (2009) : コントロールボーリングによる掘削・調査技術の開発 (フェーズ2), 掘削・調査システムの高度化と断層への適用—電力中央研究所報告, N03.
- 木方建造, 新孝一, 近藤浩文, 田中靖治, 幡谷竜太, 上田圭一, 長谷川琢磨 (2011) : 高レベル放射性廃棄物処分に係る概要調査の体系化研究—調査・評価フローの構築と要素技術開発—, 電力中央研究所報告, N11.
- Kimura, G and Tamaki, K. (1986) : Collision, rotation and back arc spreading: the case of the Okhotsk and Japan Seas, *Tectonics*, 5, pp.389-401.
- Kimura, J., Okada, Y., Nakayama, K. and Okada, S. (2001) : Variations of magnetic susceptibility and fine quartz accumulation rate in Daisen loam over the past 200000 years: Interaction between winter and summer monsoons in south-west Japan, *Island Arc*, Vol.10, No.2, pp.85-97.
- Kimura, J., Kunikiyo, T., Osaka, I., Nagano, T., Yamauchi, S., Kakubuchi, S., Okada, S., Fujibayashi, N., Okada, R., Murakami, H., Kusano, T., Umeda, K., Hayashi, S., Ishimaru, T., Ninomiya, A. and Tanase, A.

- (2003): Late Cenozoic volcanic activity in the Chugoku area, southwest Japan arc during back-arc basin opening and reinitiation of subduction, *Island Arc*, Vol.12, No.1, pp.22-45.
- 木下博久, 野原壯, 中田高, 池田安隆, 伊藤潔, 大槻憲四郎, 鷺谷威, 高田圭太, 遠田晋次 (2005): 比較的規模の大きな地下活断層の特徴とその調査手法の検討, *活断層研究*, 第 25 号, pp.27-37.
- 小林健太, 杉山雄一 (2004): 2000 年鳥取県西部地震の余震域とその周辺における断層と断層岩—"未知の断層" の検出に向けて, *地質ニュース*, 第 602 号, pp.36-44.
- 小池克明, 劉春学, 天野健治, 栗原新 (2008): 広域的な地質構造・物性分布の空間モデル作成と有効性の検証—東濃地域における亀裂分布を主としたケーススタディー, *Journal of MMIJ*, 第 124 巻, 第 12 号, pp.700-709.
- 小池一之, 町田洋 (2001): 日本の海成段丘アトラス (CD-ROM および付図), 東京大学出版会.
- 小嶋智, 西尾洋三, 徐勝, 永澤智江, 後藤紘亮, 大谷具幸, 矢入憲二 (2006): 滋賀県東部, 姉川流域に分布するせき止め湖堆積物の特徴と ^{14}C 年代, *応用地質*, 第 47 巻, 第 4 号, pp.196-207.
- Kondo, H. (2009a): Regional-scale volcanology in support of site-specific investigations, *Volcanic and Tectonic Hazard Assessment for Nuclear Facilities*, edited by Connor, C., Chapman, N, Connor, L., Cambridge University Press, pp.307-325.
- Kondo, H. (2009b): Understanding the Characteristics of Long-term Spatio-temporal Variation in Volcanism and the Continuity of the Related Phenomena for Estimating Regions of New Volcano Development, Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Crystalline Rock, *Workshop Proceedings, Manchester, United Kingdom, 13-15 November 2007*, OECD/NEA No.6362, pp.247-255.
- 近藤浩文, 木方建造, 五嶋慶一郎, 長谷川琢磨, 濱田崇臣, 大山隆弘, 鈴木浩一, 後藤和幸, 末永弘, 中田弘太郎, 田中姿郎, 長岡亨, 窪田健二, 土宏之, 三和公, 村元茂則, 河野一輝, 伊藤久敏 (2011): 高レベル放射性廃棄物等の処分地選定のための概要調査技術に係わる実証研究—地質環境条件に応じた掘削・孔内調査・試験手法の適用性と課題—, *電力中央研究所報告*, N15.
- Kopf, A.J. (2002): Significance of mud volcanism, *Reviews of Geophysics*, Vol.40, No.2, 1005, doi:10.1029/2000RG000093.
- 小坂英輝, 立石良, 三輪敦志, 市川八州夫, 鎌滝孝信, 今泉俊文 (2009): 北上低地西縁断層帯・花巻市下堰田地区の断層露頭と地層変形—バランス断面による地下断層形状の推定, *活断層研究*, 第 30 号, pp.37-46.
- 小山良浩, 谷和夫 (2003): 横ずれ断層の模型実験で観察された砂地盤の表面に発達するせん断帯の構造分析, *土木学会論文集*, 750 巻, III-65 号, pp.171-181.
- 國見利夫, 高野良仁, 鈴木実, 斉藤正, 成田次範, 岡村盛司 (2001): 水準測量データから求めた日本列島 100 年間の地殻上下変動, *国土地理院時報*, 第 96 集, pp.23-37.
- 栗原新, 天野健治, 劉春学, 小池克明 (2008): 花崗岩体上部に発達する低角度亀裂の空間分布特性と地質学的解釈—瑞浪超深地層研究所周辺の土岐花崗岩からの知見—, *Journal of MMIJ*, Vol.124, No.12, pp.710-718.
- 操上広志, 安江健一, 新里忠史, 今井久, 塩崎功, 山下亮 (2007): 気候・海水準変動が地下水流動に与える影響に関する解析的検討—幌延地域を例として—, *地下水流動解析とモデル化に関するシンポジウム発表論文集 (日本地下水学会)*, pp.59-66.
- 操上広志, 竹内竜史, 藪内聡, 瀬尾昭治, 戸村豪治, 柴野一則, 原稔, 國丸貴紀 (2008): 幌延深地層研究計画の地上からの調査研究段階における地下水流動に関する調査研究, *土木学会論文集 C*, Vol.64, No.3, pp.680-695.

- 黒澤英樹, 石丸恒存, 島田耕史, 丹羽正和, 小坂英輝, 齊藤聡, 二ノ宮淳 (2010) : 水素ガス原位置測定による断層破碎帯調査手法の検討, JAEA-Research 2009-043.
- 黒澤進, 茨木希, James, S., 油井三和, Alexander, R. (2004) : グリムゼル岩盤試験場におけるコロイドと核種の移行遅延実験に関する解析, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2004-016.
- Lin, A., Lee, C., Maruyama, T. and Chen, A. (2005) : Meso- and microstructural of coseismic shear zone of the 1999 Mw 7.6 Chi-Chi earthquake, Taiwan, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.95, pp.485-501.
- Lin, A., Tanaka, N., Uda, S. and Satish-Kumar, M. (2003) : Repeated coseismic infiltration of meteoric and seawater into deep fault zones: a case study of the Nojima fault zone, Japan, Chem. Geol., Vol.202, No.1/2, pp.139-153.
- 林愛明 (2010) : 地震の化石—シュードタキライトの形成と保存—, 近未来社.
- Lyell, C. (1830) : Principle of Geology, Volume 1. (Secord J.A. 編, 河内洋佑訳 (2006) : 地質学原理 (上), 朝倉書店).
- 町田洋, 新井房夫 (2003) : 新編火山灰アトラス [日本列島とその周辺] , 東京大学出版会.
- 馬原保典, 中田英二, 大山隆弘, 宮川公雄, 五十嵐敏文, 市原義久, 松本裕之 (2006) : 化石海水の同定法の提案—太平洋炭鉱における地下水水質・同位体分布と地下水年代評価—, 地下水学会誌, 第48巻, 第1号, pp.17-33.
- Mahara, Y., Hohjo, K., Kubota, T., Ohta, T., Mizuochi, Y., Tashiro, T., Sekimoto, S., Takamiya, K., Shibata, S. and Tanaka, K. (2010) : Vertical distribution of ^{10}Be , ^{26}Al , and ^{36}Cl in the surface soil layer of weathered granite at Abukuma, Japan, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, Vol.268, No.7/8, pp.1197-1200.
- 牧野仁史, 澤田淳, 前川恵輔, 柴田雅博, 笹本広, 吉川英樹, 若杉圭一郎, 小尾繁, 濱克宏, 操上広志, 國丸貴紀, 石井英一, 竹内竜史, 中野勝志, 三枝博光, 竹内真司, 岩月輝希, 太田久仁雄, 瀬尾俊弘 (2005) : 地質環境の調査から物質移行解析にいたる一連の調査・解析技術 — 2つの深地層の研究施設計画の地上からの調査研究段階 (第1段階)における地質環境情報に基づく検討—, JNC TN1400 2005-021.
- Martin, A., Umeda, K., Conner, C., Weller, J., Zhao, D. and Takahashi, M. (2004) : Modeling long-term volcanic hazards through Bayesian inference: An example from the Tohoku volcanic arc Japan, J. Geophys. Res., Vol.109, B10208, 20p, doi:10.1029/2004JB003201.
- 丸井敦尚, 楠瀬勤一郎, 林武司 (2004) : 沿岸域の塩淡境界面と地下水流動, 物理探査, 第57巻, 第4号, pp.351-357.
- 丸山茂徳, 瀬野徹三 (1985) : 日本列島周辺のプレート相対運動と造山運動, 科学, Vol. 55, pp.32-41.
- 丸山正, 遠田晋司, 吉見雅行, 小俣雅志 (2009) : 2008年岩手・宮城内陸地震に伴う地震断層沿いの詳細地形—地震断層・変動地形調査における航空レーザ計測の有効性—, 活断層研究, 30号, pp.1-12.
- 増田富士雄, 藤原治, 酒井哲弥, 荒谷忠 (2001) : 房総半島九十九里浜平野の海浜堆積物から求めた過去6000年間の相対的海水準変動と地震隆起, 地学雑誌, 第110巻, 第5号, pp.650-664.
- 増田遊介, 大江俊昭, 吉田拓真, 野下健司, 加藤和之, 長崎晋也, 天野健治, 二口克人, 金子岳夫 (2009) : マイクロ流路法による花崗岩盤原位置での拡散係数・分配係数の同時測定, 原子力バックエンド研究, Vol.16, No.1, pp.3-15.
- 松田時彦, 岡田真介, 渡邊トキエ (2004) : 横ずれ活断層の累積変位量・断層長・破碎帯幅から見た断層の発達度—中国地方と中部地方の比較, 活断層研究, 第24号, pp.1-12.

- 松井裕哉, 前田信行, 吉川和夫 (2000) : MIU-3 号孔における力学特性調査結果及び正馬様用地における土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデル, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7420 2001-001.
- Matsumoto, T., Kawabata, T., Matsuda, J., Yamamoto, K. and Mimura, K. (2003) : $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in well gases in the Kinki district, SW Japan surface appearance of slab-derived fluids in a non-volcanic area in Kii Peninsula, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol.216, pp.221-230.
- 松岡清幸, 竹内真司, 新堀雄一 (2007) : 電気伝導度検層を用いた水みちの検出例, 物理探査学会第116回学術講演会講演論文集, 166, pp.149-152.
- 松岡俊文 (2007) : 地圏環境資源研究における物理探査の役割, 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門研究成果報告誌, *Green Report 2007*, pp.13-15.
- Matsushi, Y., Wakasa, S., Matsuzaki, H. and Matsukura, Y. (2006) : Long-term denudation rates of actively uplifting hillcrests in the Boso Peninsula, Japan, estimated from depth profiling of in situ-produced cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al , *Geomorphology*, Vol.82, pp.283-294.
- 松四雄騎, 若狭幸, 松崎浩之, 松倉公憲 (2007) : 宇宙線生成核種 ^{10}Be および ^{26}Al のプロセス地形学的応用, *地形*, 第28巻, 第2号, pp.87-107.
- 松崎達二, 角田地文, 石丸恒存, 鎌田浩毅, 檀原徹, 岩野英樹, 吉岡哲 (2004) : 大規模火砕流による基盤岩への熱的影響の検討—フィッション・トラック法による熱履歴解析—, *応用地質*, 第45巻, 第5号, pp.238-248.
- 彌榮英樹, 岩月輝希, 古江良治, 水野崇 (2004) : 超深地層研究所計画 (第1段階)における地下水の地球化学特性調査, *サイクル機構技報*, No.23, pp.41-49.
- Mitsuhata, Y., Uchida, T., Matsuo, K., Marui, A. and Kusunose, K. (2006) : Various scale electromagnetic investigations of high-salinity zones in a coastal plain, *Geophysics*, vol.71, no.6, pp.B167-B173.
- Miura, D. (2005) : Effects of changing stress states on the development of caldera-bounding faults: Geological evidence from Kumano caldera, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.144, pp.89-103.
- 三浦大助, 和田穰隆 (2007) : 西南日本弧前縁の圧縮テクトニクスと中期中新世カルデラ火山, *地質学雑誌*, 第113巻, 第7号, pp.283-295.
- 三浦大助, 土志田潔, 幡谷竜太, 阿部信太郎 (2006) : 活火山の火口移動に関する検討—電力重要構造物の立地に関わる基本的留意点—, *電力中央研究所報告*, N05024.
- 宮田雄一郎, 三宅邦彦, 田中和広 (2009) : 中新統田辺層群にみられる泥ダイアピル類の貫入構造, *地質学雑誌*, 第115巻, 第9号, pp.470-482.
- 守田益宗, 関口千穂, 佐々木俊法, 宮城豊彦, 須貝俊彦, 柳田誠, 古澤明, 藤原治, 守屋俊文 (2006) : 東海地方の中間温帯における中期更新世以降の植生変遷—内陸小盆地堆積物の花粉分析から—, *季刊地理学*, 第58巻, 第3号, pp.123-139.
- 守屋俊治, 鎮西清高, 中嶋健, 檀原徹 (2008) : 山形県新庄盆地西縁部の鮮新世古地理の変遷—出羽丘陵の隆起時期と隆起過程, *地質学雑誌*, 第114巻, 第8号, pp.389-404.
- 村上由記, 岩月輝希, 長沼毅 (2003) : 東濃地域における地下水化学と地下微生物の相互作用, *地学雑誌*, 第112巻, 第2号, pp.277-287.
- 村岡洋文, 阪口圭一, 玉生志郎, 佐々木宗建, 茂野博, 水垣桂子 (2007) : 日本の熱水系アトラス, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 村田泰章, 鹿野和彦 (1995) : 「100万分の1日本地質図第3版 CD-ROM版」から求めた日本列島を構成する岩石の分布面積, *地質ニュース*, 493号, pp.26-29.

- 長尾年恭, 神谷親征, 佐柳敬造 (2009) : 静岡県・焼津沖 (想定糸魚川-静岡構造線延長部)での海上磁気探査, 東海大学海洋研究所研究報告, 第 30 号, pp.39-44.
- 中俣公德, 鶴田忠彦, 天野健治, 西本昌司, 吉田英一 (2007) : 遮水性構造として機能する断層の内部構造と変形・変質作用—瑞浪超深地層研究所に分布する土岐花崗岩での研究事例—, 日本応用地質学会平成 19 年度研究発表会講演論文集, pp.207-208.
- 中村久由, 前田憲二郎, 鈴木孝 (1958) : 紀伊半島中南部地方の温泉群について, 地質調査月報, Vol.9, pp.357-370.
- 仲野良紀 (1975) : 膨張性地山の実体, トンネルと地下, 第 6 巻, 第 10 号, pp.15-25.
- 仲野良紀 (1995) : 膨張性トンネルの吸水膨張説再考—限界状態の土質力学の観点より—, 地質と調査, Vol.63, pp.37-43.
- 中尾信典, 菊地恒夫, 玉生志郎 (2008) : 熱・熱水の影響を考慮した広域地下水流動の数値シミュレーション, 地質調査研究報告, 第 59 巻, 第 1/2 号, pp.53-64.
- 中田弘太郎, 長谷川琢磨 (2010) : 地下水年代測定評価技術の開発 (その 10)—北海道幌延地域における ^4He ・ ^{36}Cl 法適用の試み—, 電力中央研究所報告, N09027
- 中田高, 今泉俊文 (2002) : 「活断層詳細デジタルマップ」付図 200 万分の 1 日本列島活断層図, 東京大学出版会.
- 中山雅, 真田祐幸, 杉田裕 (2008) : 幌延深地層研究計画; 平成 19 年度調査研究成果報告, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2008-074.
- 成瀬洋 (1990) : 日本の第四紀盆地の形成と変遷, 大阪経済大学教養部紀要, Vol.8, pp.69-86.
- 根木健之, 梅田浩司, 浅森浩一 (2007a) : MT 法スペクトル・データの効果的なスタッキング方法, 物理探査学会第 116 回学術講演会論文集, pp.176-179.
- 根木健之, 梅田浩司, 松尾公一, 浅森浩一 (2007b) : MT 法データのロバスト・スムージング手法の開発とスタッキングへの応用, 物理探査学会第 117 回学術講演会論文集, Vol.117, pp.195-198.
- 日本電気協会 (2009) : 原子力発電所火山影響評価技術指針, 電気協会原子力規格委員会, JEAG 4625-2009.
- 日本応用地質学会応用地形学研究小委員会 (2002) : 応用地形フォーラム (2), 応用地質, 第 43 巻, 第 5 号, pp.320-327.
- 日本鉄道建設公団 (1990) : 津軽海峡線工事誌 (青函トンネル上・下), 日本鉄道建設公団青函建設局.
- Niizato, T., Amano, K., Ota, K., Kunimaru, T., Lanyon, B. and Alexander, W.R. (2010) : Development of comprehensive techniques for coastal site characterisation: (3) Conceptualisation of long-term geosphere evolution, Proceedings of the ASME 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM 10, October 3-7, 2010, Tsukuba, Japan, ICEM2010-40052.
- 西坂直樹, 大野裕記, 浅野彰洋, 瀬川爾朗 (2006) : 四国北西部伊予灘周辺地域におけるヘリコプター搭載型重力測定, 電力土木, 321 号, pp.122-126.
- Nogami, M., Fujiwara, O. and Sanga, T. (2003) : Landform Development Simulation of a Small Drainage basin during the Future of 120,000 years., Trans. Jap. Geomorphology Union, Vol.24, pp.105-106.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2004) : 概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠, —「概要調査地区選定上の考慮事項」の説明資料—, NUMO-TR-04-02.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2009a) : 公募関係資料 処分場の概要 分冊—1.

- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2009b) : 公募関係資料 概要調査地区選定上の考慮事項 分冊-2.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2010a) : 安全確保構想 2009 ~安全な地層処分の実現のために~, NUMO-TR-09-05.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2010b) : 地層処分技術開発ニーズの整理, ~精密調査地区選定に向けて~, NUMO-TR-10-02.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011) : 概要調査計画立案の基本的考え方, NUMO-TR-10-08.
- 尾上博則, 笹尾英嗣, 三枝博光, 小坂寛 (2009) : 過去から現在までの長期的な地形変化が地下水流動特性に与える影響の解析的評価の試み, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.8, No.1, pp.40-53.
- 緒方正虔, 本荘静光 (1981) : 電力施設の耐震設計における断層活動性の評価, 応用地質, 第 22 卷, pp.67-87.
- 大口健志, 吉田武義, 大上和良 (1989) : 東北本州弧における新生代火山活動域の変遷, 地質学論集, 第 32 号, pp.431-455.
- 大石朗, 村松容一, 吉田裕, 橋詰良吉 (1995) : 流体包有物による和歌山県本宮地域の熱水活動の検討, 温泉科学, Vol.45, pp.63-75.
- 大石雅之 (2010) : 斜長石斑晶の屈折率を用いたテフラ対比の検討, 第四紀研究, 第 49 卷, 第 1 号, pp.35-42.
- 大熊茂雄, 駒澤正夫, 押田淳 (2010) : 海底重力計の製作と実海域実験, 物理探査学会第 123 回学術講演会論文集, pp.127-130.
- Ohmori, H. (1987) : Mean Quaternary Uplift Rates in the Central Japanese Mountains Estimated by Means of Geomorphological Analysis, Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo, Vol.19, pp.29-36.
- 大野亮一, 山科真一, 山崎孝成, 小山倫史, 江坂文寿, 笠井史宏 (2010) : 地震時大規模地すべりの発生機構—荒砥沢地すべりを例として—, 日本地すべり学会誌, 第 47 卷, 第 2 号, pp.8-14.
- 大里和己, 山岡昌信, 中嶋智, 吉村公孝, 岡崎幸司, 茂田直孝, 藪内聡, 山中義彰 (2009) : 幌延地域の沿岸域電磁法探査 (その 2)—調査結果とその解釈—, 物理探査学会第 121 回学術講演会論文集, pp.79-82.
- 大澤英昭, 太田久仁雄, 濱克宏, 澤田淳, 竹内真司, 天野健治, 三枝博光, 松岡稔幸, 宮本哲雄, 豊田岳司, 岩月輝希, 前川恵輔, 國丸貴紀, 新里忠史, 浅森浩一, 平賀正人, 山中義彰, 重廣道子, 島田顕臣, 阿部寛信, 梅木博之 (2008) : 「地質環境総合評価技術高度化開発: 次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発」平成 19 年度成果報告書 (受託研究), 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2008-085-1.
- 大澤健二, 光畑裕司, 上田匠, 内田利弘, 佐波瑞恵, 佐藤龍也 (2010) : 浅海電磁探査システムの改良・動作試験と幌延沿岸域における予備実験, 物理探査学会第 122 回学術講演会論文集, pp.271-274.
- 岡田哲実 (2005) : 高温環境下における堆積軟岩の力学特性 (その 1)—三軸圧縮試験による温度依存性の把握—, 電力中央研究所報告, N04026.
- 岡田哲実 (2006) : 高温環境下における堆積軟岩の力学特性 (その 2)—一軸圧縮試験によるクリープ特性の温度依存性の評価—, 電力中央研究所報告, N05057.
- 岡田知己, 長谷川昭 (2005) : DD トモグラフィによる震源断層とアスペリティのイメージング—1995 年兵庫県南部地震 (M7.3)・2000 年鳥取県西部地震 (M7.3)・2003 年宮城県北部地震 (M6.4) の場合—, 地震予知連絡会会報, 73, pp.624-628.

- 岡村行信 (2000) : 音波探査プロファイルに基づいた海底活断層の認定—fault related fold, growth strata 及び growth triangle の適用—地質調査所月報, 第 51 巻, 2/3 号, pp.59-77.
- 岡村行信, 石山達也 (2005) : 2004 年新潟県中越地震震源域での地質構造を用いた伏在断層モデルの作成, 活断層・古地震研究報告, 第 5 号, pp.17-28.
- Okino, K., Kasuga, S. and Ohara, Y. (1998) : A New Scenario of the Parece Vela Basin Genesis, Marine Geophysical Researches, Vol.20, No.1, pp.21-40.
- 遅沢壮一 (2009) : 荒砥沢ダムにおける 2008 年岩手・宮城内陸地震 (M6.9)の地表地震断層,後期中新世カルデラ縁正断層が再動した逆断層, 地球科学, 第 63 巻, 第 5 号, pp.321-326.
- Ota, K., Amano, K. and Ando, T. (1999) : Brief overview of in situ contaminant retardation in a fractured crystalline rock at the Kamaishi In Situ Test Site, Proc. International Workshop for the Kamaishi In Situ Experiments, Kamaishi, Japan, 24-25 Aug. 1998, JNC TN7400 99-007, pp.67-76.
- Ota, K., Möri, A., Alexander, W.R., Frieg, B. and Schild, M. (2003) : Influence of the mode of matrix porosity determination on matrix diffusion calculations, J. Contam. Hydrol., Vol.61, pp.131-145.
- 太田久仁雄, 佐藤稔紀, 竹内真司, 岩月輝希, 天野健治, 三枝博光, 松岡稔幸, 尾上博則 (2005) : 東濃地域における地上からの地質環境の調査・評価技術,核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-023.
- 太田久仁雄, 安部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗 (2007) : 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階 (第 1 段階)研究成果報告書, 分冊「深地層の科学的研究」, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-044.
- 太田久仁雄, 茂田直孝, 丸井敦尚, 内田利弘, 木方建造, 長谷川琢磨 (2008) : 沿岸プロジェクト (1) 全体計画, 日本原子力学会 2008 年秋の大会.
- Ota, K., Amano, K., Niizato, T., Alexander, W.R. and Yamanaka, Y. (2010) : Development of comprehensive techniques for coastal site characterisation: (1) Strategic overview, Proceedings of the ASME 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM 10, October 3-7, 2010, Tsukuba, Japan, ICEM2010-40056.
- Otsuki, K. (1978) : On the relationship between the width of shear zone and the displacement along fault, Journal of the geological Society of Japan, Vol.84, No.11, pp.661-669.
- Pollitz, F.F. (1986) : Pliocene change in Pacific-plate motion., Nature, Vol.320, pp.738-741.
- 三枝博光, 瀬野康弘, 中間茂雄, 鶴田忠彦, 岩月輝希, 天野健治, 竹内竜史, 松岡稔幸, 尾上博則, 水野崇, 大山卓也, 濱克宏, 佐藤稔紀, 久慈雅栄, 黒田英高, 仙波毅, 内田雅大, 杉原弘造, 坂巻昌工 (2007) : 超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階 (第 1 段階)研究成果報告書, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-043.
- 佐伯龍雄, 稲盛隆穂, 高野修 (2006) : 熊野海盆北縁部における三次元地震探査, 物理探査, 第 59 巻, 第 3 号, pp.249-259.
- 鷺谷威 (2009) : GPS 観測に基づく日本列島の地震テクトニクス, 地震 2, 第 61 巻, 特集号, pp.S479-S487.
- Sagiya, T., Miyazaki, S. and Tada, T. (2000) : Continuous GPS Array and Present-day Crustal Deformation of Japan, Pure Appl. Geophys., Vol.157, pp.2303-2322.
- 齋藤宏則, 大江俊昭, 新屋敷直木, 八木原晋, 海野裕哉, 戸井田克, 田中真弓, 佐藤光吉, 鈴木健彦, 長井敏, 西垣誠 (2006) : 超音波反射エコーを用いた地下水 3 次元流向・流速測定のための安定浮遊固体トレーサの開発, 原子力バックエンド研究, Vol.13, No.1, pp.23-30.

- 坂川幸洋, 梅田浩司, 鈴木元孝, 梶原竜哉, 内田洋平 (2004) : 日本の坑井温度プロファイルデータベース, 地震 2, 第 57 巻, 第一号, pp. 63-67.
- 坂川幸洋, 梅田浩司, 浅森浩一 (2005) : 熱移流を考慮した日本列島の熱流束分布と雲仙火山を対象とした熱・水連成シミュレーション, 原子力バックエンド研究, Vol.11, No.2, pp.157-166.
- 阪口圭一 (2008) : 温泉放熱量に基づく熱異常抽出・特性把握方法に関する検討, 地質調査研究報告, 第 59 巻, 第 1/2 号, pp.65-69.
- 坂口清敏, 吉田宣生, 南将行, 原雅人, 鈴木康正, 松木浩二 (2006) : 深部地圧計測のための下向き円錐孔底ひずみ法の開発と室内実証試験, 資源と素材, Vol.122, No.6/7, pp.338-344.
- 櫻井春輔, 清水則一, 芥川真一, 吉田秀典, 佐藤稔紀, 山地宏志 (2006) : 国内超大深度立坑工事の地山崩壊形態から見た崩壊発生機構に関する考察, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.4, pp.662-673.
- Salah, M.K. and Zhao, D. (2003) : 3-D seismic structure of Kii Peninsula in southwest Japan: evidence for slab dehydration in the forearc, *Tectonophys.*, Vol.364, pp.191-213.
- 真田祐幸, 丹生屋純夫, 松井裕哉, 藤井義明 (2009) : 堆積履歴が幌延地域に分布する珪質岩の力学特性や微視的構造変化に及ぼす影響, *Journal of MMIJ*, Vol.125, No.10/11, pp.521-529.
- 三箇智二, 安江健一 (2008) : 河床縦断形のシミュレーション, 地形, 第 29 巻, 第 1 号, pp.27-49.
- 産総研 (産業技術総合研究所) (2007a) : 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料—長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方—, 産業技術総合研究所深部地質環境研究センター, 地質調査総合センター研究資料集, no.459.
- 産総研 (産業技術総合研究所) (2007b) : 平成 18 年度地層処分技術調査等委託費, 地層処分共通技術調査, 塩淡境界面形状把握調査.
- 産総研 (産業技術総合研究所) (2008) : 平成 19 年度地層処分技術調査等委託費, 地層処分共通技術調査, 沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発 成果報告書.
- 産総研 (産業技術総合研究所) (2009) : 平成 20 年度核燃料サイクル施設安全対策技術調査 (放射性廃棄物処分安全技術調査等のうち地層処分に係る地質情報データの整備)平成 20 年度事業報告書.
- 産総研 (産業技術総合研究所) (2010a) : 日本の第四紀火山, http://riodb02.ibase.aist.go.jp/strata/VOL_JP/, (参照 2011 年 3 月 17 日).
- 産総研 (産業技術総合研究所) (2010b) : 活断層データベース, <http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/>, (参照 2011 年 3 月 17 日)
- 産総研 (産業技術総合研究所) (2010c) : 平成 21 年度地層処分技術調査等委託費, 地層処分共通技術調査, 沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発.
- 佐々木寿, 向山栄 (2009) : 地形判読を支援する新しい地形表現方法の開発とその利用—航空機レーザスキャナ DEM を用いたカラー標高傾斜図 (ELSAMAP), 応用地質, 第 49 巻, 第 6 号, pp.318-330.
- 佐々木宗建 (2008) : 地下水水質の形成過程の基礎的数値解析, 地質調査研究報告, 第 59 巻, 第 1/2 号, pp.117-122.
- 佐々木泰, 浜田憲彦, 藤原八笛, 鶴旨純, 中東秀樹 (2008) : 地盤調査のための三次元反射法地震探査による詳細地質解析, 物理探査, 第 61 巻, 第 3 号, pp.243-249.
- Sasaki, T., Morimoto, T., Ikeda, H., Shiraishi, T. and Sugi, S. (2009) : Groundwater flow prediction method in consideration of long-term topographic changes of uplift and erosion, *Stability and Buffering Capacity*

- of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Crystalline Rock, Workshop Proceedings, Manchester, United Kingdom, 13-15 November 2007, OECD/NEA No.6362, pp.277-288.
- 佐々木俊法, 須貝俊彦, 柳田誠, 守田益宗, 古澤明, 藤原治, 守屋俊文, 中川毅, 宮城豊彦 (2006) : 東濃地方内陸小盆地地埋積物の分析による過去 30 万年間の古気候変動, 第四紀研究, 第 45 巻, 第 4 号, pp.275-286.
- 佐竹洋, 村田正信 (1998) : 地下水から見る断層周辺の水の動き, 月刊地球, Vol.20, No.3, pp.160-164.
- 佐藤比呂志 (1996) : 日本列島のインバージョンテクトニクス, 活断層研究, 第 15 号, pp.128-132.
- 佐藤努, 酒井隆太郎, 大澤英昭, 古屋和夫, 児玉敏雄 (1999) : 淡路島で地震後異常に湧出した地下水の酸素・水素同位体比, 日本水文科学会誌, 29, pp.13-24.
- 澤田昌孝, 上田圭一 (2009) : 横ずれ断層の進展に伴う地盤の破壊領域評価のための数値シミュレーション, 電力中央研究所報告, N08028, 19p.
- 澤田昌孝, 新孝一, 秦野輝儀, 津田延裕, 三和公, 土宏之 (2009) : 概要調査段階の処分空洞建設性評価—ボーリングコアを利用した評点式岩盤評価法—, 第 38 回岩盤力学シンポジウム, pp.347-352.
- 澤田昌孝, 新孝一, 猪原芳樹, 志田原巧, 秦野輝儀 (2011) : 地上からの調査に基づく坑道建設性評価 (その 3)—割れ目を有する硬質岩盤に対するボーリングコア情報を用いた施工性・岩盤物性の評価法—, 電力中央研究所報告, N10016.
- Schapper, S., Jefferson, R. and Calvert, A. (2009) : Anisotropic velocities and offset vector tile prestack-migration processing of the Durham Ranch 3D, Northwest Colorado, The Leading Edge, Vol.28, pp.1352-1361.
- Segawa J., Komazawa, M., Kumar, K., Nakayama, E., Joseph, E. J., Kusumoto, S., Onodera, K. and Kuroishi, Y. (2005) : Examination of consistency of marine gravity with land gravity in and around the Japanese Islands using a helicopter-borne gravimeter, Earth Planet Space, Vol.57, pp.243-252.
- 関陽児, 菱田省一, 小西千里, 内藤一樹, 渡部芳夫 (2005) : 高感度ヒートパルス式孔内流速計の現場適用例 : みずみちの捕捉と低透水性岩盤への浸透流の検出, 応用地質, 第 46 巻, 第 4 号, pp.190-197.
- 瀬野徹三 (1995) : プレートテクトニクスの基礎, 朝倉書店.
- Sharp, W.D. and Clague, D.A. (2006) : 50-Ma Initiation of Hawaiian-Emperor Bend Records Major Change in Pacific Plate Motion, Science, Vol.313, pp.1281-1284.
- 志田原巧, 秦野輝儀, 大塚正幸, 荒井融, 畑元浩樹, 土宏之 (2004) : 事前検討段階での地下施設の施工難易度推定に関する予備的検討, 平成 16 年度研究発表会講演論文集, 日本応用地質学会, pp.97-100.
- 茂野博 (2008) : 地熱井変質データベースの構築と事例 6 地域のモデル化による多様な変質環境の検討, 地質調査研究報告, 第 59 巻, 第 1/2 号, pp.71-107.
- Shimada, K., Tanaka, H. and Saito, T. (2008) : Rapid and Simple Measurement of H₂ Emission from Active Faults Using Compact Sampling Equipments, Resource Geology, Vol. 58, No.2, pp.196-202.
- Shimizu, I., Osawa, H., Seo, T., Yasuike, S. and Sasaki, S. (1996) : Earthquake-related ground motion and groundwater pressure change at the Kamaishi Mine, Engineering Geology, Vol. 43, pp.107-118.
- 下山正一, 木下裕子, 宮原百々, 田中ゆかり, 市原季彦, 竹村恵二 (1999) : 旧汀線高度からみた九州の後期更新世地殻変動様式, 地質学雑誌, 第 105 巻, 第 5 号, pp.311-331.

- 新孝一, 澤田昌孝, 猪原芳樹, 志田原巧, 秦野輝義 (2011a): 地上からの調査に基づく坑道建設性評価 (その1)~難工事事象の地質要因の分析と山はね予測評価法の提案~, 電力中央研究所報告, N10013.
- 新孝一, 澤田昌孝, 猪原芳樹, 志田原巧, 荒井融 (2011b): 地上からの調査に基づく坑道建設性評価 (その2)~膨張性地山の予測評価法の提案~, 電力中央研究所報告, N10014.
- 新谷俊一, 田中和広 (2005): 新潟県十日町市松代に分布する泥火山の地質, 自然災害科学, Vol.24-1, pp.49-58.
- 新谷俊一, 田中和広 (2009): 新潟県十日町市における泥火山噴出物の起源, 地学雑誌, 第118巻, 第3号, pp.340-349.
- Shiomi, K., Sato, H., Obara, K. and Ohtake, M. (2004): Configuration of subducting Philippine Sea plate beneath southwest Japan revealed from receiver function analysis based on the multivariate autoregressive model, *J. Geophys. Res.*, Vol.109, B04308, doi:10.1029/2003JB002774.
- 汐見勝彦, 小原一成, 針生義勝, 松村稔 (2009): 防災科研 Hi-net の構築とその成果, 地震2, 第61巻, 特集号, pp.S1-S7.
- 白井正明, 阿部信太郎 (2001): 浅海成堆積サイクルの詳細な解析による地殻変動復元手法の検討, 電力中央研究所報告, U01016, 20p.
- Shiroya, K., Yokoyama, Y. and Matsuzaki, H. (2010): Quantitative determination of long-term erosion rates of weathered granitic soil surfaces in western Abukuma, Japan using cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al depth profile, *Geochemical Journal*, Vol.44, pp.e23-e27.
- SKB (2000): Geoscientific programme for investigation and evaluation of sites for the deep repository, *Svensk Kärnbränslehantering AB*, TR-00-20.
- SKB (2001): Site investigations, Investigation methods and general execution programme, *Svensk Kärnbränslehantering AB*, TR-01-29.
- SKB (2009): Äspö Hard Rock Laboratory Annual report 2008, *Svensk Kärnbränslehantering AB*, TR-09-10.
- Stirling, M.W., McVerry, G.H. and Berryman, K.R. (2002): A New Seismic Hazard Model for New Zealand, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 92, No.5, pp.1878-1903.
- 末永弘, Schreck, M., 宮川公雄, 中川加明一郎 (2000): 光ファイバ温度検層による水みち推定への適用性検討, 電力中央研究所報告, U99068.
- 末岡茂, 田上高広, 堤浩之, 長谷部徳子, 田村明弘, 荒井章司, 山田隆二, 松田達生, 小村健太郎 (2010): フィッション・トラック熱年代に基づいた六甲地域の冷却・削剥史, 地学雑誌, 第119巻, 第1号, pp.84-101.
- 杉村新 (1958): “七島—東北日本—千島” 活動帯, 地球科学, 第37巻, pp.34-39.
- 須山泰宏, 田辺博三, 江藤次郎, 吉村公孝 (2010): 閉鎖時の意志決定における地層処分モニタリングのあり方に関する検討, *原子力バックエンド研究*, vol.17, No.2, pp.71-84.
- 鈴木浩一, 徳安真吾, 田中和広 (2009): 電磁探査法および地形・地質調査による新潟県十日町市泥火山の深部地下構造, 地学雑誌, 第118巻, 第3号, pp.373-389.
- 鈴木隆介 (1969): 日本における成層火山体の侵食速度, 火山, 第14巻, 第3号, pp.133-147.
- 鈴木康弘, 渡辺満久, 中田高, 小岩直人, 杉戸信彦, 熊原康博, 廣内大助, 澤祥, 中村優太, 丸島直史, 島崎邦彦 (2008): 2008年岩手・宮城内陸地震に関わる活断層とその意義——関市巖美町付近の調査速報——, 活断層研究, 第29号, pp.25-34.

- 田近淳, 岡村俊邦 (2010): 大規模地すべり地形の発達, 積丹半島沼前地すべりの例, 日本地すべり学会誌, 第47巻, 第2号, pp.15-21.
- 田近淳, 中迎誠, 石丸聡, 原口強, 中田賢, 志村一夫 (2009): 2003年十勝沖地震に伴う新冠泥火山の変動の記録, 北海道立地質研究所報告, 第80号, pp.147-156.
- 多田堯, 鷺谷威, 宮崎真一 (1997): GPS でみた変動する日本列島, 科学, Vol.67, No.12, pp.917-924.
- Tagami, T. and Murakami, M. (2007): Probing fault zone heterogeneity on the Nojima fault: Constraints from zircon fission-track analysis of borehole samples, *Tectonophysics*, 443, pp.139-152.
- 田上高広, 長谷部徳子, 蒲原秀典, 竹村恵二 (1998): 500m コアのフィッショントラック熱年代学から見いだされた野島断層近傍の温度異常 (総特集 断層解剖計画), 地球, 号外, Vol.21, pp.175-179.
- 田上高広, 渡辺裕美子, 板谷徹丸 (2010): 地震断層の年代学—最近の新展開と今後の展望, 月刊地球, Vol.32, No.1, pp.3-9.
- 田力正好, 池田安隆 (2005): 段丘面の高度分布からみた東北日本弧中部の地殻変動と山地・盆地の形成, 第四紀研究, 第44巻, 第4号, pp.229-245.
- 田力正好, 池田安隆, 野原壯 (2009): 河成段丘の高度分布から推定された, 岩手・宮城内陸地震の震源断層, 地震2, 第62巻, 第1号, pp.1-12.
- 高田圭太, 中田高, 野原壯, 原口強, 池田安隆, 伊藤潔, 今泉俊文, 大槻憲四郎, 鷺谷威, 堤浩之 (2003): 震源断層となりうる活断層とリニアメントの検討—中国地方を事例として—, 活断層研究, 23号, pp.77-91.
- 高木俊男, 柳田誠, 藤原治, 小澤昭男 (2000): 河岸段丘から推定した河床高度変化の歴史, 地学雑誌, 第109巻, 第3号, pp.366-382.
- 高浜信行 (1996): マスムーブメント, 新版地学事典, 地学団体研究会編, 平凡社.
- 高橋浩, 進士正人, 中川浩二 (2004): 事例に基づく押出し性地山におけるトンネルの設計・施工法の提案, 土木学会論文集, 777, VI-65, pp.83-96.
- 高橋一晴, 新里忠史, 安江健一, 石井英一 (2005): 北海道北部幌延町における地球化学的特徴を用いた侵食量の推定, 核燃料サイクル開発機構 (研究報告), JNC TN5400 2005-011.
- 高橋正明, 森川徳敏, 戸丸仁, 高橋浩, 大和田道子, 竹野直人, 風早康平 (2006): 遠別旭温泉・歌越別泥火山について, 地質ニュース, 第627号, pp.48-53.
- 高橋正樹 (2000): 島弧・マグマ・テクトニクス, 東京大学出版会.
- 高村尚, 奥津一夫, 須賀原慶久, 虎田真一郎, 大内仁 (2006): 地下深部岩盤中における無線データ通信特性に関する検討, 原子力バックエンド研究, Vol.12, No.1/2, pp.21-29.
- 高野修, 荒戸裕之, 中西健史, 松岡俊文, 佐伯龍男 (2006): 三次元反射法地震探査技術の進展がもたらす地質学, とくに堆積学分野へのインパクト, 物理探査, 第59巻, 第3号, pp.225-231.
- 竹ヶ原竜大, 虎田真一郎, 朝野英一, 大内仁, 坪谷隆夫 (2004): 地層処分にかかわるモニタリングの研究—位置付け及び技術的可能性—, 原環センター技術報告書, RWMC-TRJ-04003.
- 竹内真司, 下茂道人, 城まゆみ, Chin-Fu Tsang (2004): 電気伝導度検層による深部花崗岩中の水みちの抽出と水理特性の評価, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.451-456.
- 竹内真司, 中野勝志, 平田洋一, 進士喜英, 西垣誠 (2007): 深層岩盤を対象としたシーケンシャル水理試験手法の開発と適用, 地下水学会誌, 第49巻, 第1号, pp.17-32.

- Takeuchi, S., Amano, K., Takeuchi, R. and Saegusa, H. (2008) : Fluid electric conductivity logging: Useful application for characterization of water-conducting features, Proceedings of 36th IAH Congress, October, 2008, Toyama, Japan.
- 竹内竜史, 平田洋一 (2003) : 溶存ガスを含む地下水調査手法に関する一考察, 第 38 回地盤工学研究発表会 講演論文集, pp.1259-1260.
- 玉生志郎 (2008) : 地下温度分布から見た高温地区を含む広域地域のタイプ分けー東北地方と中国・四国地方の例ー地質調査研究報告, 第 59 巻, 第 1/2 号, pp.45-52.
- 玉生志郎, 阪口圭一, 佐藤龍也, 加藤雅士 (2008) : 地質・地球物理データの重合処理による熱・熱水異常地域の抽出ー東北地方と中国・四国地方の例ー, 地質調査研究報告, 第 59 巻, 第 1/2 号, pp.7-26.
- 田村糸子, 山崎晴雄 (2004) : 北陸層群のテフクロノロジーーテフラ層序および広域テフラ層との対比に基づく北陸層群の堆積年代ー地質学雑誌, 第 110 巻, 第 7 号, pp.417-436.
- Tamura, Y., Tatsumi, Y., Zhao, D., Kido, Y. and Shukuno, H.(2002) : Hot fingers in the mantle wedge: new insights into magma genesis in subduction zones, Earth Planet. Sci. Lett., Vol.197, pp.105-116.
- 田中明子, 山野誠, 矢野雄策, 笹田政克 (2004) : 日本列島及びその周辺地域の地温勾配及び地殻熱流量データベース, 数値地質図 DGM P-5, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 田中秀実, 坂幸恭, 安部武史, 小浜俊介, 板谷徹丸 (1992) : 赤石裂線の断層ガウジとその K-Ar 年代, 地質学雑誌, 第 98 巻, 第 1 号, pp.39-48.
- 田中和広 (2004) : 地質環境の将来予測の考え方と現状, 月刊地球, Vol.26, No.6, pp.344-348.
- 田中和広, 千木良雅弘 (1997) : 我が国の地質環境の長期変動特性評価 (その 1)ー将来予測の基本的考え方と課題ー, 電力中央研究所報告, 研究報告, U96027.
- Tarduno, J., Bouge, H.P., Sleep, N. and Hansen, U. (2009) : The Bent HawaiianーEmperor Hotspot Track: Inheriting the Mantle Wind, Science, Vol.324, pp.50-53.
- 巽好幸 (1995) : 沈み込み帯のマグマ学, 東京大学出版会, 186p.
- 栃木善克, 甲川憲隆, 向井悟, 神徳敬, 笹本広, 柴田雅博, 油井三和 (2007) : 花崗岩質岩石のマトリクスにおける拡散深さに関する研究, JAEA-Research 2007-024.
- 遠田晋次, 丸山正, 吉見雅行, 金田平太郎, 栗田泰夫, 吉岡敏和, 安藤亮輔 (2010) : 2008 年岩手・宮城内陸地震に伴う地表地震断層ー震源過程および活断層評価への示唆ー地震 2, 第 62 巻, pp.153-178.
- 戸井田克, 田中真弓, 長井敏, 鈴木健彦, 佐藤光吉, 小舞正文, 大江俊昭, 西垣誠 (2007a) : 超音波反射エコーを利用した孔内地下水 3 次元流向・流速計測手法について, 地下水学会誌, 第 49 巻, 第 4 号, pp.291-307.
- 戸井田克, 田中真弓, 杉本映湖, 菱谷智幸, 西垣誠, 大江俊昭, 佐藤光吉, 小舞正文 (2007b) : 孔内 3 次元流向・流速測定における計測区間内の地下水流動状況評価について, 地下水学会誌, 第 49 巻, 第 4 号, pp.309-326.
- 徳山英一, 本座英一, 木村政昭, 倉本真一, 芦寿一郎, 岡村行信, 荒戸裕之, 伊藤康人, 徐垣, 日野亮太, 野原壯, 阿部寛信, 坂井眞一, 向山建二郎 (2001) : 日本周辺海域の中新世最末期以降の構造発達史, 海洋調査技術, 第 13 巻, 第 1 号, pp.27-53.
- 鳥越祐司, 幡谷竜太, 柳田誠, 佐藤賢, 佐々木俊法 (2002) : 氷期 (最大海退期)における海面低下による影響を考慮した河川の下刻作用による最大侵食ポテンシャルの履歴, 日本地質学会第 109 年学術大会講演要旨, 日本地質学会, P-266.

- 土志田潔, 三浦大助, 幡谷竜太 (2006) : マグマの水平移動に対する評価法の提案—隠岐島前火山の火道分布に基づく化学組成の影響の検討—, 電力中央研究所報告, N05026.
- 上田圭一 (2009) : 横ずれ断層の変位に伴う岩盤の3次元変形過程—ヘリカルX線CTを用いた断層変位実験による検討—, 電力中央研究所報告, N08039.
- 上田圭一 (2011) : 模型実験による逆断層-活褶曲帯の発達過程の検討, 電力中央研究所報告, N10049.
- 上田圭一, 井上大栄, 宮腰勝義, 宮川公雄, 三浦大助 (2003) : 長大な活断層系における活動性調査法の高精度化—現地調査・模型実験による断層系の発達過程・断層変位地形の形成過程に関する検討—, 電力中央研究所報告, U03022.
- 上田圭一, 井上大栄, 鳥越祐司 (2005) : 2004年新潟県中越地震震源域における上部新生界の変形機構—模型実験による基礎的検討—, 地震2, 第58巻, 第3号, pp.309-327.
- 上田匠, 内田利弘, 光畑裕司 (2010) : 沿岸域MT法における2次元解析の検討と幌延沿岸域データへの適用, 物理探査学会第122回学術講演会論文集, pp.275-278.
- 上原大二郎, 菊池晃, 田中篤史, 勝田充, 永川誠, 大熊勝, 渡辺京志, 光畑裕司 (2007) : 九十九里浜沿岸地域における陸上—海底横断電気探査法の適用, 物理探査, 第60巻, 第6号, pp.489-499.
- Umeda, K. (2009) : An Integrated approach for detecting latent magmatic activity beneath non-volcanic regions: An example from the crystalline Iide Mountains Northeast Japan, In Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Crystalline Rock, Workshop Proceedings, Manchester, United Kingdom, 13-15 November 2007, OECD/NEA No.6362, pp.289-301.
- 梅田浩司, 古澤明 (2004) : RIPL法によるテフラ降灰層準の認定と最新の噴火活動の推定, 月刊地球, Vol.26, No.6, pp.395-400.
- Umeda, K. and Ninomiya, A. (2009) : Helium isotopes as a tool for detecting concealed active faults, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Vol.10, 10Q08010, doi:10.1029/2009GC002501.
- Umeda, K., Ogawa, Y., Asamori, K. and Oikawa, T. (2006a) : Aqueous fluids derived from a subducting slab: Observed high ^3He emanation and conductive anomaly in a non-volcanic region, Kii Peninsula southwest Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.149, pp.47-61.
- Umeda, K., Asamori, K., Negi, T. and Ogawa, Y. (2006b) : Magnetotelluric imaging of crustal magma storage beneath the Mesozoic crystalline mountains in a non-volcanic region, northeast Japan, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Vol.7, pp.Q08005, doi:10.1029/2006GC001247.
- Umeda, K., Asamori, K., Ninomiya, A., Kanazawa, S. and Oikawa, T. (2007a) : Multiple lines of evidence for crustal magma storage beneath the Mesozoic crystalline Iide Mountains, northeast Japan, *J. Geophys. Res.*, Vol.112, .B05207, doi:10.1029/2006JB004590.
- Umeda, K., Hanamuro, T., Yamada, K., Negishi, Y., Iwano, H. and Danhara, T. (2007b) : Thermochronology of non-volcanic hydrothermal activity in the Kii Peninsula, Southwest Japan: evidence from fission track dating and helium isotopes in paleo-hydrothermal fluids, *Radiation Measurements*, 42, pp.1647-1654, doi:10.1016/j.radmeas.2007.09.013.
- Umeda, K., Sakagawa, Y., Ninomiya, A. and Asamori, K. (2007c) : Relationship between helium isotopes and heat flux from hot springs in a non-volcanic region, Kii Peninsula, southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.34, .L05310, doi:10.1029/2006GL028975.
- Umeda, K., McCrank, G.F. and Ninomiya, A. (2008) : High ^3He emanations from the source regions of recent large earthquakes, Central Japan, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Vol.9, .Q12003, doi:10.1029/2008GC002272.

- Umeda, K., Ninomiya, J. and Negi, Y. (2009) : Heat source for an amagmatic hydrothermal system, Noto Peninsula, Central Japan, *J. Geophys. Res.*, Vol.114, .B01202, doi:10.1029/2008JB005812.
- 梅田浩司, 安江健一, 浅森浩一 (2010) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分における断層研究の現状と今後の展望, *月刊地球*, Vol.32, No.1, pp.52-63.
- 宇根寛, 佐藤浩, 矢来博司, 飛田幹男 (2008) : SAR 干渉画像を用いた能登半島地震及び中越沖地震に伴う地表変動の解析, *日本地すべり学会誌*, 第 45 卷, 第 2 号, pp.125-131.
- 宇都浩三 (1995) : 火山と年代測定 : K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定の現状と将来, *火山*, 第 40 卷, 特別号, pp.S27-S46.
- 宇津徳治 (1984) : 地震学 第 2 版, 共立出版.
- 若狭幸, 松崎浩之, 松倉公憲 (2004) : 原位置宇宙線生成核種年代測定法—侵食地形変化速度の解明への適用, *地形*, 第 25 卷, 第 3 号, pp.247-265.
- 若狭幸, 森口有里, 松崎浩之, 松倉公憲 (2008) : 宇宙線核種濃度から推定される木曾川上流寢覚ノ床における下刻速度, *季刊地理学*, Vol.60, No.2, pp.69-76.
- 渡辺満久, 鈴木康弘 (1999) : 活断層地形判読, 古今書院.
- 渡辺満久, 堤浩之, 鈴木康弘, 金幸隆, 佐藤尚登 (2001) : 都市圏活断層図「小千谷」, 都市圏活断層図 1:25,000 国土地理院技術資料 D.1-No.388, 国土地理院.
- Xia, S., Zhao, D., Qie, X., Nakajima, J., Matsuzawa, T. and Hasegawa, A. (2007) : Mapping the crustal structure under active volcanoes in central Tohoku, Japan using P and PmP data, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.34, No.10, .L10309, doi:10.1029/2007GL030026.
- Yamada, K. and Tagami, T. (2008) : Postcollisional exhumation history of the Tanzawa Tonalite Complex, inferred from (U-Th) /He thermochronology and fission track analysis, *J. Geophys. Res.*, Vol.113, pp.B03402, doi:10.1029/2007JB005368.
- 山田泰広, 松岡俊文 (2004) : 地質構造モデリングによる小断層の形態と断層再活動ポテンシャルの推定, *物理探査学会第 110 回学術講演会論文集*, pp.117-120.
- 山縣毅, 小川勇二郎 (1989) : 混在岩の形成における泥ダイアピリズムの役割, *地質学雑誌*, 第 95 卷, 第 4 号, pp.297-310.
- 山本真哉, 幡谷竜太, 濱田崇臣 (2008) : 数値標高モデルを用いた段丘面形状の定量化と段丘対比への応用, *電力中央研究所報告*, N07017, 25p.
- 山崎晴雄 (2006) : 関東平野の地震地質—南関東の基盤断層と活断層の関係—, *月刊地球*, Vol.28, No.1, pp.8-16.
- 柳沢孝一, 大澤英昭, 武田精悦, 高瀬博康, 青山裕司, 古市光昭, 戸井田克, 須山泰宏, 若松尚則, 西垣誠 (2004) : 地質環境特性評価の不確実性解析手法に関する検討—variability と ignorance を考慮した不確実性解析の方法論の構築および東濃地域への適用—, *原子力バックエンド研究*, Vol.10 No.1/2, pp.5-20.
- 柳沢幸夫, 小林巖雄, 竹内圭史, 立石雅昭, 茅原一也, 加藤碩一 (1986) : 小千谷地域の地質, *地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅)*.
- 矢野雄策, 田中明子, 高橋正明, 大久保泰邦, 笹田政克, 梅田浩司, 中司昇 (1999) : 日本列島地温勾配図, 地質調査所.
- Yilmaz, O. (2001) : Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data, *Society of Exploration geophysicists books Chapter 5*.

- 吉田英一, 佐藤治夫, 仙波毅 (2002) : マトリクス拡散による物質移動の遅延効果の評価手法とその検討, 応用地質, 第 43 巻, 第 1 号, pp.24-34.
- 吉田英一, 大嶋章浩, 吉村久美子, 長友晃夫, 西本昌司 (2009) : 断層周辺に発達する割れ目形態とその特徴—阿寺断層における ‘ダメージゾーン’ 解析の試み—, 応用地質, 第 50 巻, 第 1 号, pp.16-28.
- Yoshida, H., Takeuchi, M., Metcalfe, R. (2005) : Long-term stability of flow-path structure in crystalline rocks distributed in an orogenic belt Japan, *Engineering Geology*, Vol.78, pp.275-284, doi:10.1016/j.enggeo.2005.01.002.
- Yoshida, T. and Suzuki, M. (2006) : Migration of strontium and europium in quartz sand column in the presence of humic acid: Effect of ionic strength, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, Vol.270, No.2, pp.363-368.
- 吉田武義, 大口健志, 阿部智彦 (1995) : 新生代東北本州弧の地殻・マントル構造とマグマ起源物質の変遷, 地質学論集, 第 44 号, pp.263-308.
- 吉川周作, 吉田史郎, 須川栄司 (1991) : 東海層群の火山灰層とその対比, *地球科学*, 第 45 巻, 6 号, pp.453-467.
- 吉川周作, 水野清秀, 加藤茂弘, 里口保文, 宮川ちひろ, 衣笠善博, 三田村宗樹, 中川康一 (2000) : 神戸市東灘 1,700m ボーリングコアの火山灰層序, *第四紀研究*, 第 39 巻, 第 6 号, pp.505-520.
- Yoshikawa, T. (1974) : Denudation and Tectonic Movement in Contemporary Japan, *Bulletin of the Department of Geography, University of Tokyo*, Vol.6, pp.1-14.
- 吉村公孝, 大久保秀一, 山根一修 (2006a) : 海底電磁探査による伏在断層や地下水理情報の取得可能性について, *地学雑誌*, 第 115 巻, 第 3 号, pp.400-415.
- 吉村公孝, 坂下晋, 大久保秀一, 山根一修, 瀬谷正巳 (2006b) : 地層処分における電磁法解析技術の開発 (その 6)—北海道幌延町における AMT 法 3 次元調査—物理探査学会第 115 回学術講演会論文集, pp.209-212.
- 吉村公孝, 岡崎幸司, 大里和己, 大澤健二, 山岡昌信, 中嶋智, 茂田直孝, 藪内聡, 山中義彰 (2009) : 幌延地域の沿岸域電磁法調査 (その 1)—調査の概要—, *物理探査学会第 121 回学術講演会論文集*, pp.75-78.
- 吉村公孝, 若松尚則, 安藤賢一, 橋本修爾, 茂田直孝, 藪内聡 (2010) : 沿岸域の水理地質構造に着目した塩淡水境界に関する地下水流動解析, 日本原子力学会「2010 年春の年会」予稿集.
- 吉山昭, 柳田誠 (1995) : 河成地形面の比高分布からみた地殻変動, *地学雑誌*, 第 104 巻, 第 6 号, pp.809-826.
- 全国地質調査業協会連合会 (2009) : 改訂 地質調査要領—効率的な地質調査を実施するために, 経済調査会.
- Zhang, H. and Thurber, C. (2003) : Double - Difference Tomography: The Method and Its Application to the Hayward Fault, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.93, No.5, pp.1875-1889.
- Zhang, H. and Thurber, C. (2006) : Development and Applications of Double - Difference Seismic Tomography, *Pure Appl. Geophys.*, Vol.163, pp.373-403.

第6章

処分場の設計，建設・操業・閉鎖技術

第6章 目次

第6章 処分場の設計, 建設・操業・閉鎖技術	6-1
6.1 地層処分事業における設計の基本方針	6-2
6.1.1 段階的な設計の進め方と技術・知識の進展と成果の反映	6-2
6.1.2 不確実性への対処	6-4
6.1.2.1 地質環境情報の不確実性への対処	6-4
6.1.2.2 建設・操業・閉鎖に係る不確実性への対処	6-5
6.1.2.3 ニアフィールドの長期の性能変化に係る不確実性への対処	6-5
6.1.3 品質保証の考え方	6-5
6.2 処分場の安全機能と技術要件	6-7
6.2.1 安全確保の対象と安全機能の設定の考え方	6-7
6.2.1.1 安全確保の対象	6-7
6.2.1.2 安全機能の設定の考え方	6-8
6.2.2 閉鎖後長期の安全確保の要件	6-9
6.2.2.1 高レベル放射性廃棄物の多重バリアシステムの安全機能	6-10
(1) 多重バリアシステムの安全機能と構成要素の関係	6-11
(2) 多重バリアシステムの構成要素の技術要件	6-13
6.2.2.2 地層処分低レベル放射性廃棄物処分場の安全機能	6-20
(1) 地層処分低レベル放射性廃棄物のグループ	6-20
(2) 閉鎖後長期の安全性の要件と多重バリアシステムの構成要素の関係	6-20
6.2.2.3 併置処分の考え方	6-22
6.2.3 事業期間中の安全確保の要件	6-23
6.2.3.1 放射線安全の安全対策の考え方	6-23
(1) 操業期間中の放射線防護の基本的な考え方	6-23
(2) 操業期間中の放射線被ばく管理	6-23
(3) 操業期間中の放射線防護の安全対策の考え方	6-24
(4) 異常事象に対する安全対策の考え方	6-24
6.2.3.2 一般労働安全の安全対策の考え方	6-25
6.2.3.3 環境保全対策の考え方	6-26
6.2.3.4 事業期間中の安全確保の要件との処分施設の構成要素の関係	6-27
6.2.3.5 地上施設設計の技術要件	6-28
6.2.3.6 地下施設設計の技術要件	6-29
(1) 地下施設レイアウト設計の技術要件	6-29
(2) 坑道設計の技術要件	6-29
(3) 操業にかかわる技術要件	6-29
6.2.4 事業の進展に伴う安全機能と技術要件の管理	6-30
6.3 処分場の設計	6-31
6.3.1 基本的な設計の流れ	6-31
6.3.2 人工バリアの設計	6-34

6.3.2.1	オーバーパックスの設計	6-34
6.3.2.2	緩衝材の設計	6-36
6.3.2.3	充填材の設計	6-38
6.3.3	地下施設の設計	6-39
6.3.3.1	地下施設設置位置の設定	6-39
6.3.3.2	坑道仕様・廃棄体定置仕様の設定	6-42
	(1) 高レベル放射性廃棄物処分	6-42
	(2) 地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設	6-46
6.3.3.3	地下施設レイアウトの設定	6-47
	(1) 高レベル放射性廃棄物処分施設	6-47
	(2) 地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設	6-49
6.3.3.4	埋め戻し・プラグの設計	6-49
6.3.4	地上施設の設計	6-50
6.3.4.1	地上施設設置区域の選定	6-51
6.3.4.2	アクセス方法の検討	6-51
6.3.4.3	施設群ゾーニングの検討	6-51
6.3.4.4	造成計画・施設設計	6-52
6.3.5	高レベル放射性廃棄物処分施設と地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設を併置する場合の留意点	6-52
6.4	処分場の建設・操業・閉鎖	6-55
6.4.1	処分場の建設	6-55
6.4.1.1	地上施設の建設	6-55
6.4.1.2	地下施設の建設	6-55
	(1) 高レベル放射性廃棄物処分施設	6-55
	(2) 地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設	6-58
6.4.2	処分場の操業	6-60
6.4.2.1	高レベル放射性廃棄物処分施設	6-60
	(1) 地上での作業	6-60
	(2) 地下での作業	6-62
6.4.2.2	地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設	6-66
	(1) 地上での作業	6-66
	(2) 地下での作業	6-66
6.4.3	処分場の閉鎖	6-67
6.4.3.1	地下施設の閉鎖	6-67
	(1) 閉鎖措置計画	6-67
	(2) 連絡坑道の閉鎖	6-68
	(3) アクセス坑道の閉鎖	6-68
	(4) プラグの設置	6-69
	(5) 坑口の処置	6-69
	(6) ボーリング孔などの埋め戻し	6-69

6.4.3.2	地上施設の解体・撤去	6-69
6.4.4	事業期間中の安全確保	6-69
6.4.4.1	放射線安全の確保	6-70
6.4.4.2	一般労働安全の確保	6-73
6.4.4.3	環境保全の確保	6-74
6.4.5	閉鎖後長期と事業期間中の安全性両立の観点からの分析	6-78
6.5	多様な地質環境への対応	6-81
6.5.1	沿岸域に処分場を設置するときの対応	6-81
6.5.1.1	沿岸域の地質環境を考慮した設計上の特徴・留意点	6-81
	(1) 地下施設設置位置の設定における地下水流動場と地下水化学環境	6-82
	(2) 地下水化学環境の変化に伴う人工バリアの設計	6-84
	(3) アクセス坑道の設計	6-86
6.5.1.2	「廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約」への配慮	6-87
6.5.2	想定される地質環境特性へ対応するための処分概念・技術オプション	6-88
6.5.2.1	想定される地質環境特性へ対応する処分概念・技術オプションの考え方	6-88
6.5.2.2	処分概念・技術オプションの基本形態の特徴	6-88
	(1) 廃棄体定置方式	6-88
	(2) 搬送・定置技術オプション	6-90
	(3) 現時点での有望な技術の組み合わせ	6-91
6.5.2.3	処分孔縦置き定置方式と処分坑道横置き定置方式の作業性	6-95
	(1) 処分孔縦置き定置方式	6-95
	(2) 処分坑道横置き定置方式（原位置施工方式）	6-96
	(3) 処分坑道横置き定置方式（PEM方式）	6-96
6.5.2.4	想定される地下環境の特徴と適応性	6-97
	(1) 想定される地下環境の特徴	6-97
	(2) 想定される地下環境への適応性	6-99
6.5.2.5	作業性と地下環境への適応性のまとめ	6-100
6.5.2.6	作業性および地下環境条件を考慮した技術オプション	6-102
	(1) 処分孔縦置き定置方式	6-102
	(2) 処分坑道横置き定置方式（原位置施工方式）	6-103
	(3) 処分坑道横置き定置方式（PEM方式）	6-106
6.5.2.7	処分概念・技術オプションの特徴のまとめ	6-108
6.6	工学的対策を支える技術の整備	6-112
6.6.1	工学的対策を支える技術の概要	6-112
6.6.2	人工バリア材料の基本特性と長期挙動に関する技術の整備状況	6-115
6.6.2.1	ガラス固化体の長期挙動	6-117
	(1) ガラスの溶解挙動	6-117
	(2) イエローフェーズを含むガラス固化体の影響評価	6-118
6.6.2.2	オーバーパックの長期挙動	6-119
	(1) 全面腐食挙動に関する理解の進展	6-122

(2) 局部腐食, 不動態化に関する理解の進展	6-122
(3) 放射線照射影響	6-123
(4) 腐食に対する微生物の影響	6-124
(5) 溶接部の腐食挙動に関する理解	6-125
6.6.2.3 緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用	6-127
(1) 緩衝材の膨潤性, 透水性に対する塩水の影響	6-130
(2) セメント-ベントナイト相互作用	6-131
(3) 炭素鋼腐食生成物とベントナイトの相互作用	6-134
(4) イライト化	6-136
(5) 緩衝材の流出現象	6-137
6.6.2.4 低アルカリ性セメントの開発	6-137
6.6.3 地層処分施設の耐震性評価	6-138
6.6.4 建設・操業・閉鎖技術	6-141
6.6.4.1 低アルカリ性セメントの実施工への適用性確認	6-141
(1) 吹付コンクリートの実施工への適用性確認	6-141
(2) 立坑覆工コンクリートの実施工への適用性検討	6-142
6.6.4.2 オーバーパックスの遠隔溶接・検査技術	6-143
6.6.4.3 緩衝材の製作・搬送・定置技術	6-146
(1) 緩衝材の製作・搬送・定置に必要な技術の概要	6-146
(2) 緩衝材の製作に関する技術の開発状況	6-147
(3) 緩衝材の搬送・定置に関する技術の開発状況	6-148
(4) 緩衝材の製作・搬送・定置技術のオプションの開発状況	6-149
(5) 緩衝材の搬送・定置にかかわるそのほかの関係技術の開発状況	6-152
6.6.4.4 廃棄体回収技術	6-153
(1) 回収を考慮する時期	6-153
(2) 処分坑道埋め戻し前の回収作業	6-153
(3) 処分坑道埋め戻し後の回収作業	6-155
(4) 閉鎖後長期の安全性に与える影響	6-155
(5) 高レベル放射性廃棄物横置き定置方式の場合	6-156
(6) 地層処分低レベル放射性廃棄物の場合	6-157
6.6.5 工学的対策を支える技術に対する今後の課題	6-158
6.6.5.1 人工バリアの長期挙動・相互作用に関する知見の整備に関する技術開発	6-158
6.6.5.2 人工バリアの製法・搬送定置の工学的実現性の向上に関する技術開発課題	6-159
6.6.5.3 人工バリアの信頼性向上に関する技術開発課題	6-159
6.7 まとめ	6-160
(1) 地層処分の安全機能と技術要件の整備	6-160
(2) 処分場の設計	6-160
(3) 建設・操業・閉鎖の安全性と工程計画の実現性の向上の取り組み	6-160
(4) 多様な地質環境に対応した処分場の設計および操業技術	6-160
(5) 基盤研究開発による工学技術の整備	6-161

参考文献..... 6-162

第6章 処分場の設計、建設・操業・閉鎖技術

本章では、閉鎖後長期の安全確保を支える三つの安全確保策のうち、「処分場の設計・施工などの適切な工学的対策」を実施するために必要な技術とその技術が着実に整備されていることを示すとともに、「事業期間中の安全確保」の具体的な方法などを示す。

放射性廃棄物が長期にわたり人間とその生活環境に影響を及ぼさないようにするという地層処分事業の目標を達成するため、「処分場の設計・施工などの適切な工学的対策」を、「適切なサイト選定と確認」および「地層処分システムの長期安全性の評価」と連携して実施する。まず、第5章で示した「適切なサイト選定と確認」に係る技術により、応募区域およびその周辺において段階的に地質環境特性などの調査を行い、地層処分システムに与える影響が大きいと考えられる自然現象の著しい影響として火山・火成活動、地震・断層活動などを回避できるように適切なサイト選定を行う。選定したサイトにおいて調査により取得する地質環境の情報に基づき、地質環境に適合するように「適切な工学的対策」として処分場を設計する。処分場の設計では、地層処分の閉鎖後長期にわたる受動的安全性が確保できるようにするために、好ましい条件を有する地下施設設置位置を設定し、長期安全性評価とのやりとりを踏まえて安全で合理的な多重バリアシステムを設計するとともに、建設・操業・閉鎖の各作業が安全かつ効率的に実施できるようにする。このように設計された処分場に対して、第7章で示す「地層処分システムの長期安全性の評価」に係る技術により、放射性廃棄物が長期にわたり人間とその生活環境に影響を及ぼさないことを確認する。これら三つの安全確保策の連携のもと、NUMOは、地質環境の情報が段階的に詳細化される過程で、処分場の設計を繰り返し実施し、設計方針が今後整備される安全審査指針に適合していることを事業許可申請時に示す。国から「事業許可」および「設計および工事の方法の認可」を受けると、国の検査を受検しつつ、建設・操業を実施する。処分場の閉鎖は、閉鎖措置計画の認可申請により、処分場が閉鎖後長期の受動的安全性を確保できることを操業段階終了までに取得した情報に基づき示すとともに、適切な閉鎖措置の計画を示した上で実施する。

「閉鎖後長期の安全」と「事業期間中の安全」が確保できる処分場を設計するに当たり、6.1では処分場の設計に対するNUMOの基本方針を説明し、6.2では処分場を構成する各構成要素に求める安全機能とそれに対応した技術要件を体系的に整理して示す。6.3では技術要件を踏まえた処分場の設計の基本的な流れを説明し、6.4では建設・操業・閉鎖に適用する技術と、それらの安全性や効率性を向上させるためのNUMOの取り組みを示す。6.5では、多様な地質環境へ対応するため、処分場が沿岸域に設置される場合の設計上の特徴や留意点、坑道内への湧水や高湿度条件などの実際に想定される地下の環境条件や技術の進展を踏まえた現実的な人工バリアの搬送・定置方式を示すことで、事業者として多様な地質環境へ対応するための準備を着実に進めていることを示す。そして6.6において、第2次取りまとめ以降、基盤研究開発機関と連携して、設計、建設・操業・閉鎖を支える個別の技術の整備が着実に進められ、それらが工学的対策の信頼性向上に寄与していることを示す。最後に6.7で本章のまとめを示す。

なお、「処分場の設計・施工などの適切な工学的対策」に係る技術については、第2次取りまとめ以前より国内外の地層処分の実施機関や研究機関などが検討を進めており、知見が蓄積されている。本章では、第2次取りまとめ以降に進展した技術や事業者として実用化に向けた取り組みを中心に説明する。

6.1 地層処分事業における設計の基本方針

本節では、処分場の設計に対する NUMO の基本方針として、地質環境情報の詳細化や技術・知識の進展に伴って段階的に設計をどのように進めるのか、地層処分事業固有の特徴である空間的・時間的スケールなどに起因する不確実性へどのように対処するのか、品質保証をどのような考え方で行うのかについて述べる。

6.1.1 段階的な設計の進め方と技術・知識の進展と成果の反映

地層処分事業では、三段階のサイト選定プロセスを経ながら、段階的にサイトの地質環境の情報、自然・社会環境に関する情報を蓄積していく。NUMO は、処分場を構成する地上・地下施設の設計を、各段階におけるサイトに係る情報や技術・知識の進展に応じて繰り返し実施し、その詳細度や信頼性を向上させていく。

処分場の設計では、基本的に各段階で同様の手順、方法を適用するが、その段階の情報の質・量に応じて合理的な範囲で処分施設を設計し、併せて事業工程や経済性を確認する。特に地質環境の情報は、段階的に詳細化される。例を挙げると、地下施設設計において坑道の仕様を設定する場合、概要調査地区選定段階（文献調査の段階）では、設計に必要な地下深部の情報は限定的であることから、岩盤種類に応じた簡易的な力学的安定性評価により、掘削可能な坑道径や深度を概略設定することになる。これに対して、精密調査地区選定段階（概要調査の段階）では、調査の進展に伴い岩盤の応力状態や力学特性などが明らかになると、合理的な掘削方法や手順を設定し、岩盤特性に応じたより詳細な解析を実施して坑道の仕様を決定していくことになる。

地層処分は、最終的には閉鎖後長期の安全性を確保することが目的であり、人工バリアを含む地下施設の設計では、長期という時間スケールに起因する性能の変化や不確実性の増大の要因を考慮する必要がある。これらの要因については、ベントナイト系材料、セメント系材料や金属系材料といった人工バリア材料の長期挙動に関する技術開発を基盤研究開発機関と協力しながら進め、国内外の情報も含めて最新の知見を集積して設定する。さらに、これまで進めてきた安全かつ効率的な操業システムに関する技術開発は今後も継続し、これらの工学技術の進展を、建設・操業・閉鎖技術の選定に反映する。そして信頼性の高い技術を絞り込んだ上で、効率的で安全性が高い技術へと開発を集約させていく。このことから、第4章の技術開発ロードマップに示しているように、精密調査地区選定段階（概要調査の段階）においても、精密調査の段階の後半での地下調査施設における実証試験に向けた建設・操業・閉鎖技術の選定の方向性を見極めることが重要である。

以上のような、地質環境情報の段階的な詳細化、技術・知識の進展に加え、地下施設の基本レイアウトに基づく地下調査施設の範囲設定、精密調査の段階での地下調査施設における技術の実証試験に向けたオプションの絞り込み、事業許可申請時期などを考慮した上で、サイトに適した設計仕様を決定しつつ、設計の信頼性や合理性を向上させていく（図 6.1.1-1）。処分場の設計においては、文献調査、概要調査の段階までは、処分深度やエリアの選定（6.3.3.1 参照）を先行して進め、精密調査の段階以降に候補母岩に適した施設の設計仕様の詳細化を図っていく。その具体的なイメージを図 6.1.1-2 に示す。例えば、地下施設のうち処分深度・エリアについては、文献調査、概要調査の結果を踏まえて、処分場の設置可能深度、放射性物質の移行抑制に有利な位置などを検討して、概要調査の段階が終了するまでに詳細化していくことを線の色が徐々に濃くなることで示している。なお、図中には、設計実施項目ごとに仕様を決める時期の目安を示すとともに、一旦仕様を決めた後も調査の進展を踏まえて最適化に向けた検討を継続することを、線を延長することで示している。

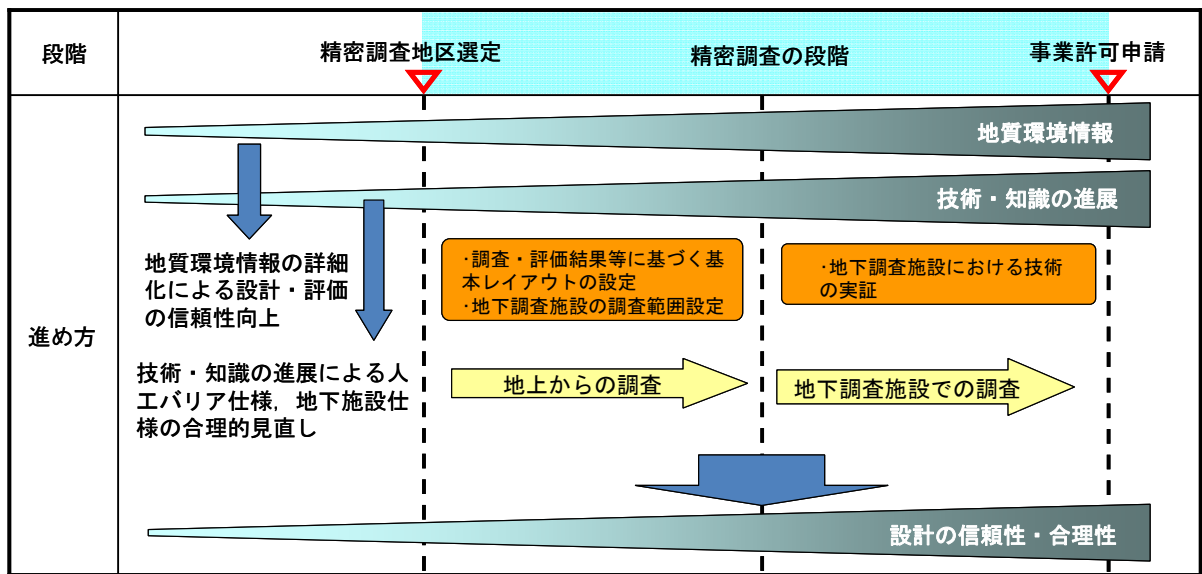


図 6.1.1-1 段階的な設計の進め方

実施項目	主要な検討項目	文献調査の段階	概要調査の段階	精密調査の段階		事業許可申請段階
				地上	地下	
人工バリア設計	廃棄体	オーバーバック材質、構造仕様など			▽	
	ベントナイト、セメント	緩衝材・充填材などの材料選定、構造仕様など			▽	
地下施設設計	処分深度、エリア	設置可能深度、核種移行抑制に有利な位置		▽		
	地下坑道	内空断面、支保仕様、離間距離			▽	
	レイアウト	処分パネルの数、配置、アクセス方式、物流などを考慮した連絡坑道配置、プラグ配置など				▽
地上施設設計	地上施設エリア	必要面積、位置、専用道路、ゾーニング、環境保全など		▽		
	廃棄体受入・検査・封入施設	施設の仕様（放射線安全、構造など）				▽
	その他の施設・設備	その他の施設・設備の仕様、配置、構造など				▽
建設方法、手順	坑道掘削方法（工法、対策工、工程など）					▽
操作方法、手順	廃棄体、人工バリアの搬送・設置方法、オーバーバックの遠隔溶接方法、工程など					▽
閉鎖方法、手順	閉鎖方法、プラグ施工方法など					▽

▽：仕様を決める時期の目安

▬：仕様設定に向けて検討が詳細化する状況を表示

■：仕様設定後も最適化に向けて検討を継続している状況を表示

図 6.1.1-2 段階的な処分施設設計の詳細化イメージ

6.1.2 不確実性への対処

処分場の設計における不確実性の要因として、次のことがある。

- ① 広大かつ不均質な地下空間を対象とすることに起因する空間的な地質環境情報の不確実性
- ② 建設・操業・閉鎖措置における施工誤差
- ③ 処分場に持ち込まれ残置される人工バリア以外の材料の処分環境への擾乱，長期間を対象としていることに起因する人工バリア周辺のニアフィールドの長期状態予測の不確実性（バリアシステムの長期の性能変化予測に係る不確実性）

ここでは、これらの不確実性の特徴，設計における低減策を含めた対処について述べる。

6.1.2.1 地質環境情報の不確実性への対処

地下施設が設置される地下空間は，広大かつ不均質であるために，地質調査で取得できる情報に不確実性が残ることは避けられない。例えば，地質環境情報の不確実性としては，場の不均質さとその解釈に起因する岩盤特性のばらつきや湧水亀裂の分布の不確かさなどが考えられる。

構造物の設計では，不確実な事項に対して設計に余裕を持たせることが一般的であり，処分場の設計においても同様な考え方が有効である。岩盤特性のばらつきに対しては，力学特性，熱特性などのばらつきによる地下施設の全体面積の変動を考慮して，特にサイト選定の初期の段階では地下施設を設置する候補母岩の選定領域に余裕を持たせることも有効な対応策である。地下施設の規模は岩盤特性に起因して変わり得るが，調査の進展に伴って岩盤特性に関する調査情報は充実するため，地下施設の必要規模に関する精度は高まっていく。

一方，湧水亀裂の分布の不確かさについては，調査の進展に伴って新たに見つかる湧水亀裂などが，廃棄体を定置するのに相対的に好ましくない場所（図 6.1.2-1）になり得ることを考慮し，岩盤特性のばらつきへの対応と同様に，特にサイト選定の初期の段階では地下施設を設置する候補母岩の選定領域に余裕を持たせる必要がある。調査の進展に伴って湧水亀裂などの分布についても不確実性は低減すると考えられるが，このことはサイト選定の初期の段階で余裕を見込んで設定した候補母岩の選定領域を必ずしも狭めるものではない。場合によっては，亀裂が多く見付き，廃棄体を定置するのが好ましくない場所が増えることもある。このような場合，当初設定した候補母岩の選定領域が面積的に不足することも考えられ，廃棄体定置位置の好ましさを評価するなどして合理的に地下施設設置エリアを決めていくことや，地下施設を多層に配置するなどにより対応していく。

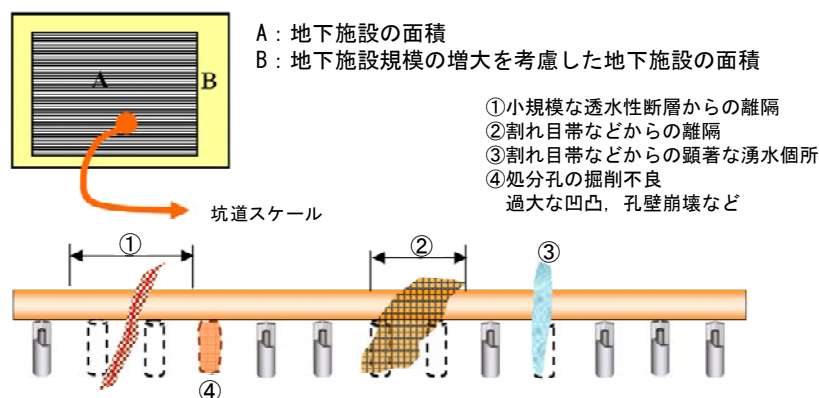


図 6.1.2-1 廃棄体を定置するのが相対的に好ましくない場所のイメージ

6.1.2.2 建設・操業・閉鎖に係る不確実性への対処

地層処分システムの閉鎖後長期の安全を確保するために工学的対策を施す過程において、坑道の掘削、人工バリア材料の製造や原位置での定置の過程で施工誤差や品質のばらつきなどが生じることが想定され、長期的な不確実性につながることも考えられる。これに対しては、例えば地下調査施設を活用した実証試験などにより、複数の施工方法による寸法誤差や品質のばらつきの範囲を比較・評価し、所要の性能を満足するような最適な施工方法と品質管理方法の組み合わせを選定するとともに、品質保証活動を徹底することで対応する。

また、事業期間中の安全確保の観点から処分場に持ち込まれる人工バリア以外の材料などについては、そのまま処分場に残留することによって場に与える長期的な擾乱も不確実性として考慮すべき事項である。この不確実性を低減させるためには、残置物が場に与える影響の大きさを定量的あるいは定性的に分析し、影響の大きいものについては処分場の閉鎖時に撤去するとか、影響の少ない材料に置き換えるなどの対処を施す（6.4.5 参照）。

6.1.2.3 ニアフィールドの長期の性能変化に係る不確実性への対処

地層処分においては、閉鎖後長期の安全性を確保するために、人工バリアを含む地下施設の設計を行う上で、長期的な観点から安全性に影響が及ぶおそれのある要因に配慮して設計を行うことが重要である。人工バリアの性能は、長期的に変化することが想定され、時間の経過とともにその不確実性が増大する。性能の低下の要因や不確実性の増大の要因については、安全評価結果や長期挙動予測評価結果などを分析・評価し、人工バリアが現状の技術で合理的に達成できる範囲において基本性能を確保するように設計上考慮することを基本としている。また、人工バリアの長期挙動に関する科学技術的知識の進展を踏まえ、逐次設計に反映することも重要である。

6.1.3 品質保証の考え方

処分場の設計を行う際は、まず、地層処分事業に適用される法令、規準類などの要求事項を踏まえ、設計対象に求められる安全機能や技術要件（6.2 参照）を明確にする。その際、国内外において蓄積されてきた地層処分に関する技術や知見などを適切に考慮し、サイト調査の進展に応じて、安全機能や技術要件をよりサイトの地質環境に適したものと最適化を図っていく。NUMO は、長期間にわたる事業において、それらの修正や変遷を明確なトレーサビリティを持って関係者内で共有していくため、要件管理システムを構築している（3.2.2 参照）。設計のアウトプットには、設計図面、設計計算書、仕様書などがある。アウトプットの品質を保証するため、設計の適切な段階で、各種の計算や検討、解析に不備がないかどうかを検証するとともに、それらの手法が妥当であるかどうかを第三者によるレビューも含めて確認する。また、モデルあるいは解析コードについての妥当性を確認する。これらの妥当性は、国内外で実施されている、あるいはこれから実施していく実験や工学規模の実証試験成果を最大限に活用し実験や実証試験成果のみでその妥当性を判断することが困難である場合には、国内外の中立性のある専門家によるレビューなどを通じて確認していく。設計手法や解析手法については、必要に応じて複数の手法で解析などを行い、結果をクロスチェックすることにより妥当性を検証する。このようなクロスチェックは設計における不適合の発生を予防することにも効果がある。万一、不適合が発生した場合には、適切な是正対策をとる。

建設・操業・閉鎖では、使用前検査、施設確認における検査項目、頻度、規格値を明確にし、それらを満足していることを確認しつつ作業を進める。また、測定に多くの時間を要し高い頻度での

測定が困難な特性については、代替指標（例えば、緩衝材の透水係数を有効粘土密度などで代替）による管理を行う場合も考えられるが、この際は代替指標と保証したい品質の相関性に関する十分なデータをあらかじめ取得しておくことが必要である。さらに、人工バリアへの影響を極力低減するという観点からは、例えば人工バリアの品質管理に際しては有効な非破壊検査の採用なども考えていく。

さらに、処分場の設計、建設・操業・閉鎖に関する品質の記録は、適切に保存、管理する。記録は全事業段階を通じて行い、トレーサビリティを明確にする。万一、品質に不具合が確認された場合には、是正処置を施し、所定の品質を保証する。以上、NUMOは、処分場の設計、建設・操業・閉鎖に関して、ISO9001の考え方にも準じて、客観的な測定結果に基づく作業の継続的改善を行っていくとともに、地層処分事業の段階的遂行にあわせて、品質マネジメントシステムの改善も図っていく。

6.2 処分場の安全機能と技術要件

本節では、事業期間中と閉鎖後の安全性を確保する上での安全機能について述べるとともに、安全機能を達成するために必要な技術要件を示す。

第2次取りまとめ以降、放射性廃棄物の処分に関する国際的な安全要件の考え方の整備や、わが国の原子炉等規正法の改正、第一種埋設規則の施行など、安全規制の考え方が整備されてきている。NUMOは、第2次取りまとめおよび第2次 TRU レポートに記載された安全確保の考え方や技術要件を出発点としつつ、処分場の安全機能と技術要件について体系的な整備を進めている。

本節では、第3章の安全確保の目標で示した閉鎖後長期と事業期間中の安全確保の基本概念に基づいて、現時点における地層処分の要件について述べる。6.2.1では、サイト選定の進展に併せて段階的に地層処分の要件を詳細化するために、安全確保の対象と安全機能の設定の考え方について述べる。6.2.2では、閉鎖後長期の安全確保の要件として、高レベル放射性廃棄物および地層処分低レベル放射性廃棄物の処分場についてその安全機能を示し、多重バリアシステムの設計にどう反映されるのかを技術要件として記述する。6.2.3では、事業期間中の安全確保の要件について述べ、放射線安全、一般労働安全、環境保全に関する対策の考え方を示す。6.2.4では、段階的に安全機能と技術要件を更新するための考え方を示す。なお、文中や表で使用している「安全機能」は閉鎖後長期および事業期間中の安全確保のために処分場が有するべき役割または要件のことである。ただし、事業期間中の安全確保に対しては、閉鎖後長期の安全確保との区別を明確にするため、以後、「安全機能」という用語の代わりに「安全対策」という用語を使用する。

安全機能と技術要件の整備においては、国際的な地層処分の安全要件を示したIAEAの地層処分を含む放射性廃棄物管理の安全要件の基準（IAEA, 2006, 2011）や安全規制報告書（総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会, 2008）、「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」（原子力安全委員会, 2010）などを参考にした。また、技術要件の内容については、高レベル放射性廃棄物については第2次取りまとめを参考にした。このほかにも、余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方（土木学会, 2009a）を参考にした。

6.2.1 安全確保の対象と安全機能の設定の考え方

6.2.1.1 安全確保の対象

図 6.2.1-1 に放射線防護に関連する安全確保の基本概念と事業段階の関係を例示する。廃棄体受け入れから閉鎖までは、事業期間中の安全確保が対象であり、「作業時閉じ込め」、「放射線遮へい」とともに（総合資源エネルギー調査会, 2008）、「放射線被ばく管理」を基本的な安全対策の考え方とする。一方、閉鎖後については、「隔離」と「閉鎖後閉じ込め」をその基本概念とした。これらの概念は、高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の両者で共通的に適用する。

		安全確保対策の対象期間	
		廃棄体受入～閉鎖まで	閉鎖後長期
安全確保の対象	事業期間中の安全確保 (放射線安全)	作業時閉じ込め (廃棄体密閉, 施設閉じ込め)	
		放射線遮へい (遮へい体の設置)	
		放射線被ばく管理 (管理区域設定, 被ばく管理, モニタリング)	
	閉鎖後長期の安全確保		隔離 (自然現象の回避, 人間接近抑制)
			閉鎖後閉じ込め (浸出抑制, 移行抑制, 移行経路形成抑制)

図 6.2.1-1 安全確保の基本概念と事業段階の関係

6.2.1.2 安全機能の設定の考え方

「安全機能」は、地層処分システムがどのようにして安全性を提供するかということ役割として表現したものであり、主に閉鎖後長期の安全評価においてシナリオを構築する際にシステムの安全性を概念的に説明するために利用されるとともに、設計や安全評価を進める上での共通的な考え方として利用されてきた (JNC, 1999a)。その考え方は、近年、セーフティケースを構築するための枠組みの中で、地層処分システムの概念的な説明と、処分場の設計や安全評価などの実際的な業務を直接対応させるための重要な要素として位置付けられている (OECD/NEA, 2009)。

わが国でも、安全機能に基づいた設計は、すでに第2次取りまとめや第2次 TRU レポートでも示されている。本節では、国際的な安全機能に関する議論の動向を踏まえ、第2次取りまとめ以降の技術開発の進展や科学的知見の拡充を踏まえて情報を集約し、安全機能を設定する。例えば、第2次取りまとめ以降の放射性廃棄物の処分に関する国際的な安全要件の考え方の整備 (IAEA, 2006, 2011)、わが国の原子炉等規正法の改正、第一種埋設規則の施行など、安全規制の考え方が整備されてきており、これらの考えも取り込んだ上で、安全機能の設定を実施する。

本書では、国際的な基準や規制機関の要件を事業に反映できるよう、以下のような考え方に基づいて安全機能を設定する。

- ・ 隔離や閉じ込めのような地層処分の安全原則に基づいて、多重バリアシステムを構成する各バリア (例えば、天然の岩盤、オーバーパック、緩衝材など) の安全確保上の役割を「安全機能」として記述する。
- ・ 設計では、「安全機能」を確保することを方針とし、設計上の要件と関連付け、さらにはその数値的な目標を設定することで、設計の基準とする。
- ・ 安全評価では、サイトの地質環境や処分場の設計に基づく多重バリアシステムが、長期的な変遷を考慮しても、技術的な要件を満足するだけの安全機能を発揮しうるか否かを分析する。

また、地層処分低レベル放射性廃棄物と高レベル放射性廃棄物は、廃棄物特性の違いや人工バリアの構成など概念的な違いはあるが、その基本となる地層処分の安全確保の考え方には共通する部分が多い。従って、安全機能の整備においても、基本的な設定の考え方や枠組みについては共通のものとして適用する。

6.2.2 閉鎖後長期の安全確保の要件

地層処分の目標は、放射性廃棄物が処分場閉鎖後の将来にわたって人間とその生活環境に影響を及ぼさないようにすることである。そのため、放射性廃棄物を安定な地下深部に埋設し、また、人工バリアと天然バリアから構成される多重バリアシステムによってその機能を担保する(3.1 参照)。これらの二つを地層処分の安全の基本概念と位置付け、そのイメージを図 6.2.2-1 に示す。図中、前者の生活環境と放射性廃棄物との距離を「隔離」として矢印で示し、後者の放射性物質を廃棄物の周辺に長期間閉じ込める「閉鎖後閉じ込め」を図中の波線の円で示した。

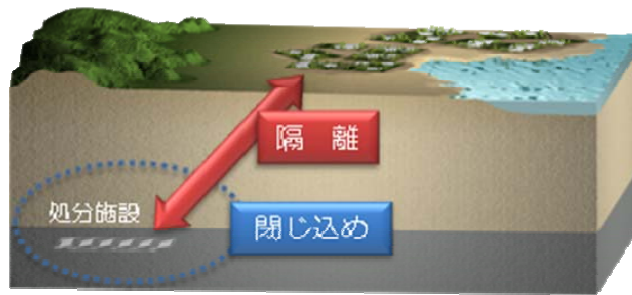


図 6.2.2-1 閉鎖後長期の安全確保のための「隔離」と「閉鎖後閉じ込め」の基本概念のイメージ

「隔離」とは、廃棄物および付随する危険性を人間社会から十分に遠ざけ、地下深部に保持することである (IAEA, 2006, 2011)。すなわち、生活環境から十分離れた安定な地下深部に廃棄物を埋設し、侵食のような地形変動から防護すること、および地層が障壁となって偶発的な人の接近の可能性を最小にし、人が特殊な技術を用いることなしには廃棄物に接近することを困難にすることである (総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会, 2008)。

「閉鎖後閉じ込め」とは、廃棄物からの放射性物質の放出および分散を防止あるいは抑制し、地下深部にとどめることである (IAEA, 2006, 2011)。また、放射能の大部分、特に短寿命核種の有する放射能の大部分が減衰するまで放射性物質を閉じ込めること、ほとんどの長寿命核種の生活環境までの移行に非常に時間がかかるようにすることで、その間に放射能の大部分が減衰することである (総合資源エネルギー調査会, 2008)。

以上の考え方は、対象とする廃棄物 (高レベル放射性廃棄物および地層処分低レベル放射性廃棄物) および地質環境特性によらず、地層処分に共通の安全確保の考え方である。

これらの「隔離」、「閉鎖後閉じ込め」に関する措置が相互補完的に働き、その将来における放射線学的な影響が低くなるように工学的な対策をとる。その具体的な手段として、多重バリアシステムを構築する。安全確保の基本概念を設計として具体化するために、多重バリアシステムの安全機能を設定し、その安全機能が確保されるよう技術要件を設定する (図 6.2.2-2)。

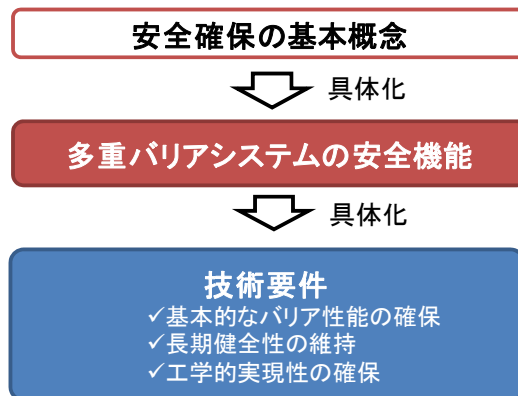


図 6.2.2-2 安全確保の基本概念，安全機能および技術要件の関係

6.2.2.1 高レベル放射性廃棄物の多重バリアシステムの安全機能

表 6.2.2-1 に閉鎖後長期の安全確保の基本概念とした「隔離」，「閉鎖後閉じ込め」と「安全機能」の関係を示す。

「隔離」に関する安全機能のうち、「地質の長期的な変動からの防護」については，第5章で述べた火山・火成活動，地震，断層活動，隆起・侵食などの自然現象による地層処分システムへの大きな影響を回避できるよう，地下深部に安定な地質環境を有する地域を選定することにより確保する。また，「人の接近の抑制」については，地下深部に廃棄物を埋設することで，人の接近の可能性を低くすることと，また，経済的に価値の高い鉱物資源が存在する地域を含めないようにすることにより確保する。これらの隔離に関する安全機能は，地質環境が有する特性を安全確保上の役割として期待するものであり，地質環境の調査・評価を通じて確認する。

一方で，「閉鎖後閉じ込め」に関しては，廃棄体からの放射性物質の浸出を抑制し，かつ，浸出した放射性物質の移行を抑制し，大部分の放射性物質を廃棄物とその周辺に閉じ込めるための対策を施す。このため廃棄体周辺の人工バリアの設置と埋め戻し材やプラグ設置などの閉鎖措置，および天然バリアが有する特性にも期待して閉鎖後閉じ込めの機能を確保する。

表 6.2.2-1 閉鎖後長期の安全確保の基本概念と安全機能

基本概念	安全機能	安全機能の説明
隔離	地質の長期的な変動からの防護	生活環境から十分離れた安定な地下深部に廃棄物を埋設し，侵食のような地形の変化から防護すること
	人の接近の抑制	偶発的な人の接近の可能性を低減するため，人が特殊な技術を用いることなしには廃棄物に接近することが困難であること
閉鎖後閉じ込め	放射性物質の浸出抑制	廃棄体からの放射性物質の浸出を抑制することで，地下水への放出率を低下させること
	放射性物質の移行抑制	浸出した放射性物質の移行を抑制することにより，放射性物質移行率を低下させること

(1) 多重バリアシステムの安全機能と構成要素の関係

多重バリアシステムの安全機能は、まず、地下深部に埋設した放射性廃棄物から、放射性物質が地下水を介して移行し、最終的に人間の生活環境に影響を及ぼさないことを目標として、地下水を介した移行を低減する観点から設定した。

多重バリアシステムは、人工バリアと天然バリアにより構成され、閉鎖後長期の安全性を確保するための種々の安全機能を有する。高レベル放射性廃棄物地層処分の人工バリアは、ガラス固化体をオーバーパックに封入した後、地下深部の安定で好ましい条件を有する地質環境に設置し、その周囲に緩衝材を施工することによって形成する（NUMO, 2004a）。なお、「隔離」については、適切なサイト選定により自然現象の著しい影響を回避した上で、処分深度を確保することで対処する。このため、以下では多重バリアシステムによる「閉鎖後閉じ込め」について技術要件を示す。表 6.2.2-2 には、安全機能とバリア構成要素との関係を示す。

「放射性物質の浸出抑制」においては、地下水との接触により廃棄体から放射性物質が浸出することを抑制することを目的として、安全機能を設定した。廃棄体であるガラス固化体はガラスの性質により放射性物質を物理化学的に安定に閉じ込め、地下水に溶けにくい性質を有する。また、IAEA（2006）では、閉じ込めにかかる要件において、発熱と放射能の減衰が十分でない期間は、放射性物質を閉じ込めるように人工バリアを設計することを要求している。また、ガラス固化体の発熱が著しい期間は、地下水の熱対流や緩衝材中に不飽和部が発生する可能性が考えられ、その結果、この期間の安全評価が複雑になる。そのため、短半減期の放射性物質の壊変に伴う発熱が著しい期間は、廃棄体と地下水とが接触しないようにこの安全機能を設定し、その対策として金属製オーバーパックを設ける。

「放射性物質の移行抑制」においては、廃棄体近傍に溶存する放射性物質の移流による移行、コロイド化した放射性物質の地下水中の移行などを抑制することを目的として、緩衝材に安全機能を持たせる。また、天然バリアについては、収着により放射性物質の移行を遅延するとともに、分散による移行率の低減を安全機能としている。このほか、地下深部の還元環境では、Npなどの一部の放射性物質の溶解度が極めて低く制限されるため、これらも放射性物質の移行の抑制に寄与する。ただし、これらの機能は、設計で担保するものではなく、天然の岩盤が持つ特質として調査により確認し、適切なサイトを選定することにより確保した上で、安全評価に反映する。また、廃棄体の埋設のために建設した坑道類が放射性物質の卓越した移行経路とならないよう、閉鎖用のプラグや埋め戻し材を施工する。

表 6.2.2-2 高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係

基本概念	安全機能		構成要素		
隔離	地質の長期的な変動からの防護		天然バリア		
	人の接近の抑制				
閉鎖後閉じ込め	放射性物質の浸出抑制	ガラスマトリクスによる浸出抑制	廃棄体		
		発熱が著しい期間の地下水接触の防止	オーバーパック		
	放射性物質の移行抑制	放射性物質の溶解度制限		還元環境を保つことなどにより機能として発現	
		移流による移行の抑制		緩衝材	
		コロイド移行の防止・抑制			
		収着による放射性物質の移行遅延			
	放射性物質の移行抑制	分散による移行率の低減		天然バリア	
		アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制		埋め戻し材プラグ	

(2) 多重バリアシステムの構成要素の技術要件

表 6.2.2-3 に技術要件の設定の考え方を示す。技術要件は、基本的なバリア性能の確保、バリアの長期健全性の維持および工学的実現性の確保の3種類に分類して設定する。

基本的なバリア性能とは、安全機能に直接的に関係するもので、安全確保の観点から必要な性能と定義し、その性能を確保するように技術要件を設定する。バリアの長期健全性とは、閉鎖後長期の間にバリア特性が変化しても、基本的なバリア性能が維持できる状態と定義する。地質環境特性や廃棄体からの発熱などに起因する人工バリア材料の変質など、長期的な材料特性の変化により、安全確保に必要なバリア性能が損なわれないように技術要件を設定する。工学的実現性の確保とは、上記の技術要件を満足する範囲において、バリアの製作性や施工性、品質管理、コストが過大とならないことと定義し、実際にバリアを合理的に施工できるようにする観点から、技術要件を設定する。なお、バリアの長期健全性の維持と工学的実現性の確保にかかわる技術要件は、基本的なバリア性能に対して従属的に設定する。

表 6.2.2-3 技術要件の設定の考え方

技術要件の分類	説明
基本的なバリア性能の確保	安全機能に直接的に関係するもので、安全確保の観点から設計において必ず確保する性能として、技術要件を設定する。例えば、緩衝材の低透水性など。
バリアの長期健全性の維持	閉鎖後長期間にわたり多重バリアシステムの性能が維持されるよう人工バリア材料の長期的な特性や、バリア材料間の相互作用の理解に基づいて、設計上の対策を検討し、技術要件を設定する。例えば、セメントーベントナイト相互作用の考慮など。
工学的実現性の確保	実現性の見通しのある技術を用いて、サイトの地質環境特性において、安全機能を合理的に確保するように、設計上の対策を検討し、技術要件を設定する。例えば、緩衝材の施工技術など。

以下に示す技術要件は、第2次取りまとめの設計要件の記述に基づいて、多様な地質環境に対応できるように設定したものである。なお、技術要件の設定においては、第2次取りまとめ以降の人工バリア材料の特性や長期挙動の現象理解の進展（6.6.2 参照）を考慮した。

(i) 天然バリア

天然バリアに設定している安全機能（地質の長期的な変動、人の接近の抑制、収着による放射性物質移行の遅延、分散による移行率の低減）は、天然の岩盤が持つ特性である。そのため、後述の人工バリアのように技術要件は設定せず、今後、サイト調査においてこれらの安全機能に関連する特性を調査・評価し、安全機能として期待できることを示していく。

隔離に関連する地質の長期的な変動、人の接近の抑制については、サイト選定時に自然現象の著しい影響が明確な地域や、経済的に採掘が可能な鉱物資源の分布する地域を含めないように調査地区を選定することが基本方針である（NUMO, 2004b）。その上で、放射性廃棄物を安定して隔離し、

廃棄物に含まれる放射性物質を閉鎖後の長期間にわたり閉じ込めるのに有効な特性を有する岩盤（以下、母岩という）を選ぶ。そこで、母岩の好ましい特性を表 6.2.2-4 に示す。

表 6.2.2-4 母岩の好ましい特性

分類	好ましい特性
熱環境	閉鎖後の処分場の温度が低いこと
力学場	坑道の力学的安定性が確保できるとともに、閉鎖後の処分場とその周辺の力学場が人工バリアの安定性に適していること
水理場	閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流束が小さく、緩慢であること
化学環境	閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶解性と人工バリアの安定性に適していること

このほか事業工程や経済性の観点、所定の廃棄体数量を収容できる地層・岩体の分布状況などについて検討し、母岩を選定する。母岩の選定は調査、設計、安全評価の連携により行う（8.3.7 参照）。

(ii) ガラス固化体

ガラス固化体には、「ガラスマトリクスによる浸出抑制」の安全機能を期待している。ガラス固化体は、NUMO が実施する地層処分事業の設計項目には含まれないが、処分施設の設計および安全評価の入力情報となるので、ガラス固化体の基本特性や受入時の管理項目について述べる。

ガラス固化体は、使用済燃料の再処理の過程で発生する高レベル放射性廃液をステンレス製キャニスタ（円筒状の容器）内にガラス固化したものである。ガラス固化体の重量、寸法については図 2.1.2-2 に示したとおりである。炉取り出し後 4 年で再処理し、貯蔵期間 50 年の標準的なガラス固化体の発熱量と放射能の経時変化を図 6.2.2-3 に示す。

放射能の経時変化においては、処分後数百年までは、比較的半減期の短い核分裂生成物である Cs-137 (Ba-137m) や Sr-90 (Y-90) のような放射能が支配的であるが、数百年以降ではアクチノイド放射性物質である Am-241 が支配的となる。さらに数千年以降では、より半減期の長い核分裂生成物である Tc-99 や Zr-93 およびアクチノイド放射性物質の放射能が支配的となる。発熱量の経時変化においても処分後百年程度までは、Cs-137 (Ba-137m) や Sr-90 (Y-90) の寄与が支配的であるが、数百年から数千年までは Am-241 が支配的に寄与する。

処分場の設計および安全評価において必要なガラス固化体の特性については、処分場受け入れ時に想定される要件などの検討が進められており、表 6.2.2-5 に示すとおりである（日本原子力学会，2010）。ガラス固化体の仕様設定と製造は、発生者側（電力会社、原燃、JAEA）において実施されることから、NUMO がガラス固化体を受け入れる際には、表 6.2.2-5 に示した特性データが取得されていること、また、運転管理などの情報に基づき設定されたデータについては、その評価方法や設定方法の妥当性について確認を行う。

なお、日本原燃（株）六ヶ所再処理工場のガラス固化設備のアクティブ試験を実施した際に、キャニスタへのガラス充填の際に低粘性流体の流下が認められ、イエローフェーズ（モリブデン酸塩を主成分とする結晶相）が発生したと判断されている（日本原子力学会，2008）。これまでのところ、

仮にイエローフェーズを少量含むガラス固化体が地層処分されることを想定しても、多重バリアシステムの相互補完性により、システム性能全体に重大な影響を及ぼさないと判断されている（日本原子力学会，2008）（6.6.2.1（2）参照）。このような、ガラス固化体の製造プロセスにおける運転状態の逸脱（変動）により、当初目指していた品質と特性が一部異なるガラス固化体、あるいはガラス固化設備の熔融炉運転立ち上げ時や洗浄運転時に発生するガラス固化体（日本原子力学会，2010）については、その特性を十分把握した上で、今後、処分における対応を検討することとし、以下では、通常のプロセスを経て製造されたガラス固化体を前提として検討した結果を述べる。

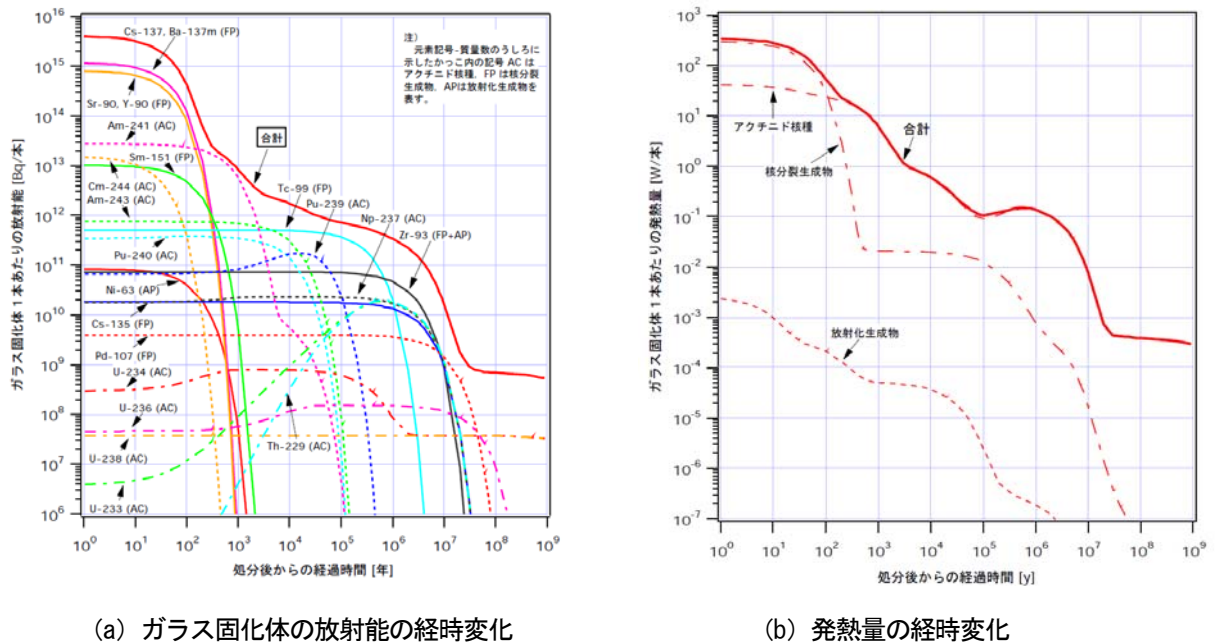


図 6.2.2-3 ガラス固化体廃棄体特性
（出典：JNC，1999b）

表 6.2.2-5 ガラス固化体の特性
（日本原子力学会，2010 を一部修正）

放射性物質濃度	固化ガラス熱特性（熱容量，熱伝導度）
高レベルガラス固化体表面線量率	固化ガラス密度
固化ガラス化学組成	キャニスタ材質
発熱量（発熱核種インベントリ）	キャニスタ寸法・形状
高レベルガラス固化体重量	キャニスタ溶接部の健全性（胴部）
プレナム部容積	キャニスタ母材の健全性
表面汚染密度	キャニスタ強度
固化ガラス重量	キャニスタ熱特性
固化ガラス寸法（外径・高さ）	キャニスタ溶接部の健全性（蓋部）
固型化の状態（均質性）	破損・欠陥がないこと（外観）
固化ガラス破碎係数	整理番号
固化ガラス浸出速度（溶解速度）	整理番号の表示方法・位置
最低結晶化温度	—

(iii) オーバーパック

オーバーパックには、「発熱が著しい期間の廃棄体と地下水の接触防止」の安全機能を設定している。表 6.2.2-6 には、オーバーパックの基本的なバリア性能の確保に関する技術要件を示す。安全機能に影響を与える事象としては、オーバーパックの貫通孔の発生や力学的な変形、破壊による機能の喪失がある。これらの懸念事象による影響を防止あるいは低減するような対策として、バリア性能の確保のための技術要件を設定する。なお、ここで示した技術要件は、第2次取りまとめ(JNC, 1999b)で示されたオーバーパックの設計上考慮すべき項目(設計要件)を基本とし、技術要件の考え方(表 6.2.2-3)に基づいて、設定したものである。

基本的なバリア性能の確保の技術要件としては、「耐食性」、「構造健全性」、「溶接部耐食性・構造健全性」を設定した。これらの要件に基づいて、オーバーパックの材質選定、構造、溶接方法の選定などの設計を実施する。

- ・「耐食性」の技術要件については、オーバーパックの定置後の腐食により、安全機能が損なわれないように、適切な対策を設定する。例えば、建設、操業段階に地下に流入し、残存した酸素による腐食、酸素消費後の水による全面腐食などが腐食現象として考えられている(6.6.2.2 参照, JNC, 1999b)。また、ガラス固化体からの放射線により、地下水が放射線分解し発生した酸化性化学種の影響による不動態化の可能性(6.6.2.2 (3) 参照)などについても、設計上の対応を講じる(6.3 参照)。
- ・「構造健全性」の技術要件については、地下環境において、埋設後に作用するさまざまな応力に対して、オーバーパックが機械的に破損しないように対策を講じる。オーバーパックに作用する応力の要因としては、水圧、地圧などの処分深度に依存する圧力や、岩盤のクリープ変形などに起因する応力、また腐食膨張に伴い緩衝材が圧密され、その反作用として現れる圧密反力、緩衝材の膨潤圧などが挙げられる。なお、緩衝材が変形することにより、これらの応力の要因を緩和できるため(JNC, 2005)、緩衝材の技術要件として、「オーバーパックの保護(物理的緩衝性)」を設定した。
- ・「溶接部耐食性・構造健全性」の技術要件については、オーバーパックの溶接部が物理的にも化学的にも弱部となって、オーバーパックの放射性物質の溶出抑制の安全機能が損なわれないように溶接方法を選定する(6.6.4.2 参照)。

表 6.2.2-6 オーバーパックの技術要件(基本的なバリア性能の確保)

安全機能		技術要件	技術要件の説明	設計項目
放射性物質の浸出抑制	発熱が著しい期間の地下水接触の防止	耐食性	所定の期間、腐食により安全機能が損なわれないこと	オーバーパックの設計(材料設計、形状・厚さの設計)
		構造健全性	埋設後作用する機械的荷重に対して構造健全性を維持すること	オーバーパックの設計(材料設計、形状・厚さの設計)
		溶接部耐食性・構造健全性	溶接部の機械強度、耐食性が母材と比較して著しく劣らないこと	オーバーパックの溶接設計(材料設計、蓋構造設計、溶接法、溶接条件)

オーバーパックの長期健全性の維持の技術要件を表 6.2.2-7 に示す。これらの要件は、基本的な要件として表 6.2.2-6 に示した技術要件に対して、長期にわたって影響を与える可能性がある要因に対する要件（耐熱性、耐放射線性、残置物の相互作用の影響低減、バリア材料間の相互作用の影響の低減）、およびほかのバリアの保護の要件（ガラス固化体の過熱防止）として設定した。また、工学的実現性の確保の技術要件を表 6.2.2-8 に示す。これらの各技術要件の設定の詳細については、NUMO（2011a）に記述した。

表 6.2.2-7 オーバーパックの技術要件（長期健全性の維持）

技術要件	技術要件の説明	設計項目
耐熱性	廃棄体からの発熱により耐食性や強度が著しく低下しないこと	オーバーパックの設計 (材料設計)
耐放射線性	放射線脆化が著しくないこと	オーバーパックの設計 (材料設計)
残置物との相互作用の影響の低減	コンクリートなどの残置物との相互作用により安全機能が著しく低下しないこと	坑道の設計 (支保工の材料設計)
バリア材料間の相互作用の影響の低減	人工バリア材料間の相互作用により安全機能が著しく低下しないこと	オーバーパックの設計 (材料設計)
ガラス固化体の過熱の防止	良好な熱伝導性を有すること	オーバーパックの設計 (材料設計, 形状・厚さの設計)

表 6.2.2-8 オーバーパックの技術要件（工学的実現性の確保）

技術要件	技術要件の説明	設計項目
製作性	既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術に基づいた構造であること	オーバーパックの設計 (材料設計, 形状・厚さの設計)
遠隔封入性	ガラス固化体の遠隔操作による封入が、既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術により、ガラス固化体の安定な形態を損なうことなく可能な構造であること	オーバーパックの設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) 溶接装置の設計
遠隔定置性	廃棄体の遠隔操作による定置が、既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術により、ガラス固化体の安定な形態を損なうことなく可能な構造であること	オーバーパックの設計 (形状・厚さ・把持部の設計) 搬送・定置装置の設計
品質確認性	遠隔封入時および遠隔定置時に、所定の品質の確認技術を有すること	溶接検査装置の設計 搬送・定置装置の設計

(iv) 緩衝材

緩衝材は過去の検討経緯を踏まえ、ベントナイトを主とする材料を圧縮成形したものを前提として技術要件を設定する。緩衝材の安全機能としては、「移流による移行抑制」、「コロイド移行の防止・抑制」、「収着による放射性物質の移行遅延」を設定している（表 6.2.2-2）。これらの安全機能が確保されるように、緩衝材の基本的なバリア性能として、表 6.2.2-9 に示すように低透水性、コロイドろ過能、収着性といった技術要件を設定する。

なお、ここで示した技術要件は、第2次取りまとめで示された緩衝材の設計上考慮すべき項目（設計要件）を基本としており、技術要件の考え方（表 6.2.2-3）に基づいて、その後の知見の進展なども考慮して設定したものである。これらの要件に基づいて、緩衝材の材料設計、形状、厚さの設計を行う。

表 6.2.2-9 緩衝材の技術要件（基本的なバリア性能の確保）

	安全機能	技術要件	技術要件の説明	設計項目
放射性物質の移行抑制	移流による移行の抑制	低透水性	緩衝材中の地下水の動き（移流）を抑制し、結果的に放射性物質の移行を抑制すること	緩衝材の設計（材料設計、形状・厚さの設計）
	コロイド移行の防止・抑制	コロイドろ過能	放射性物質がコロイドとして移行することを抑制すること	緩衝材の設計（材料設計、形状・厚さの設計）
	収着による放射性物質の移行遅延	収着性	ガラス固化体から溶出した放射性物質を収着することにより遅延すること	緩衝材の設計（材料設計）

- ・ 「低透水性」の技術要件は、緩衝材が有する低透水性を活かし、周囲の動水勾配がある程度大きくなっても、緩衝材中の物質移行が拡散により支配され、移行が抑制されるように材料組成と緩衝材の乾燥密度を高く設定する。
- ・ 「コロイドろ過能」の技術要件は、廃棄体から浸出した放射性物質がコロイド化する場合に、コロイドの移行を物理的に防止または抑制するための対策である。このため、コロイドのろ過能が確保されるように、緩衝材中の空隙がコロイドをろ過できる大きさ以下となるように乾燥密度を高く設定する。
- ・ 「収着性」の技術要件については、緩衝材の有する収着能力を活かし、放射性物質の拡散による移行を遅延する。

緩衝材の長期健全性の維持の技術要件を表 6.2.2-10 に示す。これらの要件は、表 6.2.2-9 に示した基本的な技術要件に対して、長期にわたって影響を与える可能性がある要因に対する要件（自己修復性、耐熱性、耐放射線性、緩衝材流出の抑制、残置物との相互作用の影響の低減、バリア材料間の相互作用の影響の低減）、およびほかのバリアの保護（ガラス固化体の過熱防止、オーバーパックスの保護、オーバーパックスの沈下防止）を目的として設定した。なお、施工時の隙間の充填（自己シール性）の技術要件は、緩衝材の安全機能が実現するには、施工時の隙間が緩衝材により充填されることが前提となることから設定した。

工学的実現性の確保の技術要件を表 6.2.2-11 に示す。これらの長期健全性の維持および工学的実現性の技術要件は、表 6.2.2-10 に示した緩衝材の安全機能と技術要件のすべてに関連しているため、緩衝材の設計では、基本的なバリア性能が確保されるように設計した上で、長期健全性と工学的実現性の技術要件についてその影響などを評価して設計に反映する（6.3.2 参照）。各技術要件の設定の詳細については NUMO（2011a）に記述した。

表 6.2.2-10 緩衝材の技術要件（長期健全性の維持）

技術要件	技術要件の説明	設計項目
自己修復性	施工後変形などにより隙間が生じたとしても、自己修復できること	緩衝材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計)
耐熱性	廃棄体の発熱により緩衝材の機能が著しく低下しないこと	地下施設の設計 (坑道離間距離, 廃棄体ピッチ)
耐放射線性	廃棄体の放射線により緩衝材の機能が著しく低下しないこと	緩衝材の設計 (材料設計)
緩衝材流出の抑制	地下水流による緩衝材の流出が著しくないこと	地下施設の設計
残置物との相互作用の影響の低減	コンクリートなどの残置物との相互作用により安全機能が著しく低下しないこと	坑道の支保, プラグ, グラウト設計 (材料設計)
バリア材料間の相互作用の影響の低減	人工バリア材料間の相互作用により安全機能が著しく低下しないこと	緩衝材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計)
ガラス固化体の過熱の防止	良好な熱伝導性を有すること	緩衝材の設計 (材料設計)
オーバーパックの保護 (物理的緩衝性)	オーバーパックの腐食膨張, 岩盤の変形を緩和し, オーバーパックを機械的な破壊から保護するよう, 物理的緩衝性を有すること	緩衝材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計)
オーバーパックの沈下の防止	廃棄体オーバーパックを力学的に支持すること	緩衝材の設計 (材料設計)
施工時の隙間の充填 (自己シール性)	施工時の隙間を充填するよう, 膨潤性を有すること	緩衝材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) 操業システムの設計 (施工技術)

表 6.2.2-11 緩衝材の技術要件（工学的実現性の確保）

技術要件	技術要件の説明	設計項目
製作性	既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術に基づき製作が可能であること	緩衝材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) 緩衝材製作装置の設計
遠隔定置性	遠隔操作による搬送・定置が, 既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術により可能であること	緩衝材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) 搬送・定置装置の設計
品質確認性	緩衝材製作時および遠隔定置時に, 所定の品質の確認ができること	製作検査装置の設計 搬送・定置装置の設計

(v) 埋め戻し材・プラグ

処分場の閉鎖措置は、処分場の建設や操業に用いたアクセス坑道や、ボーリング孔を埋め戻すことにより完了する。埋め戻されたアクセス坑道が卓越した移行経路とならないよう、アクセス坑道には埋め戻し材と止水プラグ（低透水性を期待するプラグ）および必要により力学プラグ（止水プラグを力学的に支持するプラグ）を設置する。埋め戻し材とプラグの基本的な技術要件を表 6.2.2-12 に示す。

表 6.2.2-12 埋め戻し材・プラグの技術要件（基本的なバリア性能の確保）

安全機能		技術要件	技術要件の説明	設計項目
放射性物質の移行抑制	アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制	坑道に沿った移行経路の形成抑制	坑道に沿った地下水の卓越した水みちの発生を抑制すること	埋め戻し材の設計 (材料設計) 止水プラグの設計 (材料設計, 配置設計) 力学プラグの設計 (材料設計, 配置設計)

埋め戻し材は、ベントナイトを主とする材料と現地で発生した掘削土を混合し締め固めたものを前提とした。ただし、掘削土が埋め戻し材として適さない場合には、別途、搬入する材料の特性を考慮して、埋め戻し材の仕様を設定する。アクセス坑道途中に放射性物質の移行経路となる亀裂が存在するといった場合では、坑道に沿った移行経路の形成抑制が必要になり、その亀裂と隔離するために止水プラグの設置などが考えられる。止水プラグの材料は粘土系材料を候補としている。

このほかにも閉鎖時に施工するプラグとしては、坑口プラグもある（NUMO, 2004a）。埋め戻し材とプラグの長期健全性の維持について、および工学的な実現性の確保に関する各技術要件についてはNUMO（2011a）にその詳細を示している。

6.2.2.2 地層処分低レベル放射性廃棄物処分場の安全機能

(1) 地層処分低レベル放射性廃棄物のグループ

地層処分低レベル放射性廃棄物は、特性の異なるさまざまな廃棄物で構成され、高レベル放射性廃棄物に比べて放射能レベルや発熱量が低いといった特徴を有している。そのため、処分を合理的に行う観点から、地層処分低レベル放射性廃棄物は、その特性に応じて、廃銀吸着材を主要な廃棄物とするグループ1、ハル・エンドピースを主要な廃棄物とするグループ2、硝酸塩を含む廃棄物をまとめたグループ3、そのほかの廃棄物をまとめたグループ4の四つのグループに分類されている（図 2.2.3-2）。これら地層処分低レベル放射性廃棄物の廃棄体特性（内訳、物量、放射性物質ごとの放射線量、発熱量など）についてはNUMO（2011b, 2011c）に示している。

(2) 閉鎖後長期の安全性の要件と多重バリアシステムの構成要素の関係

地層処分の安全確保の考え方は、廃棄体特性や地質環境特性によらず地層処分低レベル放射性廃棄物においても共通である。ここでは、NUMO（2011b）で記述されている地層処分低レベル放射性廃棄物の地層処分の安全確保の考え方と幅広い地質環境に対応するための対策に基づいて、高レベル放射性廃棄物の表 6.2.2-2 と同じ構成で、安全機能と構成要素の関係を示す。

地層処分低レベル放射性廃棄物処分場は、高レベル放射性廃棄物処分場と比べ、以下のような特徴を有している（NUMO, 2011b）。

- ・ 地層処分低レベル放射性廃棄物は、高レベル放射性廃棄物に比べて発生量が多いものの、比較的発熱量が小さいことから、廃棄体を大断面坑道内に集積して処分することが可能である。
- ・ 廃棄物の特性（含まれる放射性物質のインベントリ、固化形態、発熱特性など）が多様であることから、その特性に応じたグルーピングを行い、各々に適した人工バリア構成とすることが合理的である。

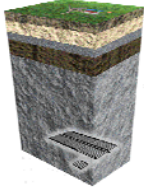
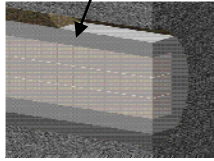
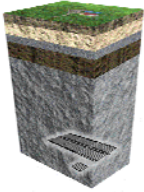
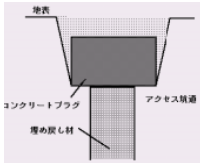
地層処分低レベル放射性廃棄物処分場は、廃棄体、充填材、構造躯体、緩衝材、埋め戻し材、支保工で構成されている。このうち、人工バリアとして、閉鎖後閉じ込めの機能を設定する構成要素は、充填材、緩衝材および埋め戻し材である（図 2.2.4-4）。ただし、廃棄体や構造躯体であっても、セメント系材料などを利用する場合には、収着などの機能を期待できる可能性があると考えている。表 6.2.2-13 には、グループごとの多重バリアシステムの安全機能とバリア構成要素の関係を示す。

現在基本としている地層処分低レベル放射性廃棄物の処分概念では、グループ 1 および 2 に対しては緩衝材を設置することで、「放射性物質の移行抑制」の安全機能のうち「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止・抑制」の機能を設定できるようにしている。これは、グループ 1 および 2 は、人工バリアや天然バリアへの収着性が低い放射性物質を多く含んでいるためである。また、セメント系材料中では、コロイドによる移行の可能性は低いと考えられているが、緩衝材の設置により、「コロイド移行の防止・抑制」の機能も期待している（NUMO, 2011b）。一方、天然バリアに対しては「収着による放射性物質移行の遅延」、「分散による移行率の低減」、「アクセス坑道に沿った移行経路の形成抑制」の安全機能を、すべてのグループに対して設定している。また、「卓越した移行経路の形成抑制」の安全機能についても、すべてのグループに対して設定している（6.2.2.2 参照）。

以上の処分概念に加え、NUMO（2011b）では、より幅広い地質環境に対応する代替的な処分概念について述べている。グループ 1 に対しては、現在のセメント固化体を、放射性物質の浸出率が低い代替的な廃棄体に変更することが検討されている。代替技術としては、現在、岩石固化技術、BPI ガラス固化技術、アルミナセメント固化技術の検討が進んでいる（NUMO, 2011b）。グループ 2 に対しては、閉じ込め機能を有する容器を利用することで、放射性物質の浸出抑制（閉じ込めによる放射性物質の減衰）の安全機能を設定する。容器としては高強度高緻密コンクリートまたはチタン合金を用いた容器が検討されている（NUMO, 2011b）。グループ 3, 4 については、充填材に加え、緩衝材を設置することによる放射性物質の移行抑制も技術的なオプションの例として挙げている（NUMO, 2011b）。

なお、地層処分低レベル放射性廃棄物の構成要素に対する技術要件については、NUMO（2011b）の各構成要素の設計の項に示している。

表 6.2.2-13 地層処分低レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係

基本概念	安全機能		廃棄体グループ				構成要素	
			1	2	3	4		
隔離	地質の長期的な変動からの防護		●	●	●	●	天然バリア	
	人の接近の抑制		●	●	●	●		
閉鎖後閉じ込め	放射性物質の浸出抑制	固化マトリクスによる浸出抑制	●*				廃棄体	
		閉じ込めによる放射性物質の減衰		●*			廃棄体パッケージ	
		放射性物質漏えい開始の遅延			●*	●*	廃棄体パッケージ	
	放射性物質の移行抑制	放射性物質の溶解度制限		●	●*	●*	還元環境を保つことなどにより機能として発現	
		移流による移行の抑制	●	●	●*	●*	緩衝材	
		コロイド移行の防止・抑制	●	●	●*	●*		
		収着による放射性物質移行の遅延	●	●	●	●	充填材	
		分散による移行率の低減	●	●	●	●	天然バリア	
		アクセス坑道に沿った移行経路の形成抑制	●	●	●	●	埋め戻し材プラグ	

● : 安全機能と廃棄体グループごとの構成要素の関係箇所
 * 代替概念を採用した場合に設定できる安全機能

6.2.2.3 併置処分の考え方

高レベル放射性廃棄物処分場と地層処分低レベル放射性廃棄物処分場を併置する場合には、併置によって双方の処分場の閉鎖後長期の安全性が損なわれないことが要件である。現状では、高レベル放射性廃棄物処分場と地層処分低レベル放射性廃棄物処分場の廃棄体と人工バリアの仕様および

地下施設形状の違いなどから建設・操業・閉鎖をそれぞれ独立したエリアで行うこととしている。このため、併置処分による閉鎖後長期の安全性が損なわれないという要件に対しては、両処分場が互いに影響を及ぼす可能性が小さいと考えられる十分な距離を確保することにより対応する。影響を及ぼす因子としては、熱、化学（有機物、硝酸塩、高アルカリ性地下水）などを考慮する（原子力委員会、2006）。

6.2.3 事業期間中の安全確保の要件

第3章に述べたように、閉鎖までの事業期間においては、処分施設の建設や操業などに従事する作業者はもとより、周辺地域の一般公衆の安全を確保する。この期間の安全確保の対象を「放射線安全」、「一般労働安全」、「環境保全」に分類し、その要件について述べる。なお、地層処分低レベル放射性廃棄物の事業期間中の安全確保に関する安全機能と処分場構成要素の関係は高レベル放射性廃棄物の処分場とその基本的な考え方は同じである。

6.2.3.1 放射線安全の安全対策の考え方

(1) 操業期間中の放射線防護の基本的な考え方

操業期間中は、輸送されてきた廃棄体の受け入れ・検査の工程、容器封入・検査の工程、廃棄体の搬送定置作業の工程などにおいて、放射線安全上の対策を講じる。潜在的な危険性としては、廃棄物からの外部放射線および廃棄物から漏えいした放射性物質の摂取による地域住民および作業従事者の被ばくであり、そのための安全対策を講じる。放射線防護の考え方は、「操業時閉じ込め」と「放射線遮へい」を基本的な考え方とする（表 6.2.3-1）。

「操業時閉じ込め」とは、閉鎖までの操業期間中において放射性物質を限定された区域に閉じ込め、施設外への放出を防止する。「放射線遮へい」とは、廃棄物からの放射線による地域住民および作業従事者の被ばくを合理的に十分低減する措置をいう。廃棄体からの放射能レベルに応じて適切な遮へい体を設置することで、空間線量率を低減する。これらの基本的な概念に基づいた安全対策が確実に機能することで、操業期間中に地域住民および作業従事者が受ける影響を合理的に達成可能な範囲で低くするよう遮へい設備、放射線管理設備の設置など必要な対策を実施する。また、これらの放射線安全の対策に加え、「放射線被ばく管理」を実施することにより、操業期間中の放射線安全を確保する。

(2) 操業期間中の放射線被ばく管理

「放射線被ばく管理」の目的は、操業時閉じ込めや放射線遮へいの安全対策に加え、運用面から放射線被ばくの可能性を低減することが目的である。「放射線被ばく管理」の考え方は、原子力施設と同様であり、管理区画設定、放射線モニタリング、人の出入り管理、物品の搬出入管理などを実施する。「実用発電用原子炉の設置、運転などに関する規則の規定に基づく線量限度などを定める告示」（経済産業省、2001）では、放射線管理区域（以下、管理区域という）を設定し、放射線業務従事者に対する適正な放射線防護を目的とした放射線被ばく管理の実施を定めている。

地層処分対象の廃棄物は、廃棄体受入時に表面汚染の有無などを確認し、廃棄体容器の密閉性（閉じ込め）が確認されたものだけを受け入れる。そのため、通常時には放射性物質の吸入・経口摂取のリスクを排除することができる。一方で、高い放射能を有していることから、確実な遮へい対策を施し、管理区域を設定し、遠隔操作などにより放射線取り扱い作業時間を短縮し、作業従事者の

被ばくのリスクを低減する。また、操業期間中は、作業従事者の被ばく管理を実施し、施設内はもちろんのこと、敷地の境界などの野外においても放射線モニタリングを実施する（表 6.2.3-1）。

(3) 操業期間中の放射線防護の安全対策の考え方

放射線防護の概念に基づき、処分場が有すべき安全確保上の役割を「安全対策」として表 6.2.3-1 に示す。「廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止」に関しては、廃棄体自身に放射性物質を閉じ込めることを期待するが、廃棄体を容器などに封入することによる漏えいの防止も考慮する。「施設外への放射性物質の過大な放出の防止」に関しては、先の廃棄体からの漏えいの防止の機能が失われた場合の機能であり、漏えいの可能性とその影響の程度を評価し、施設ごとに対策を講じる。「放射線の遮へい」については、廃棄体の外側に適切な遮へい体を設置することで安全を確保する。「放射線管理区域の設定」は、放射線管理を適切に実施するための措置として地上施設、地下施設、操業施設・設備の設計の段階から考慮する。

表 6.2.3-1 放射線防護に関する基本的な安全対策

基本概念	安全対策	説明
操業時 閉じ込め	廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止	操業期間中において廃棄体からの放射性物質の漏えいを防止すること
	施設外への放射性物質の過大な放出の防止	操業期間中において放射性物質取り扱い施設からの放射性物質の過大な放出を防止すること（廃棄体受入時）
放射線 遮へい	放射線の遮へい	廃棄体からの外部放射線による空間線量率を遮へいにより低減すること
放射線 被ばく管理	放射線管理区域の設定	放射線管理区域を設定すること
	モニタリング・被ばく管理	作業従事者の被ばく管理、管理区域および敷地周辺において放射線モニタリングを実施すること

(4) 異常事象に対する安全対策の考え方

「異常事象」とは、通常の操業状態から逸脱させるような何らかの要因が施設もしくは廃棄体に加えられた事象と定義する。例えば、地上、地下施設では廃棄体の落下・転倒や衝突などが挙げられる。「事故」とは、異常が拡大して施設から外に放射性物質が放出される事象とする。図 6.2.3-1 には、異常事象の要因から事故に発展するまでの経過を模式的に示す。

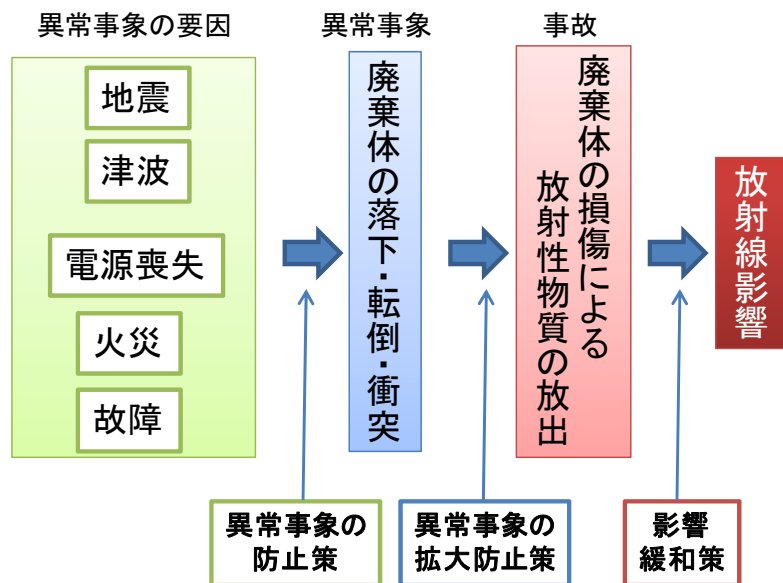


図 6.2.3-1 地層処分の放射線防護上の事故と異常事象の要因の関係

地震、火災、津波、電源喪失などの異常事象の要因を起点として、最終的に事故まで発展するには、操業中に廃棄体が装置から逸脱し落下、転倒、あるいは搬送装置の逸走などにより施設壁面に衝突するような異常事象が発生し、さらに廃棄体が損傷するなどして、漏えいした放射性物質が空气中に放出されるという過程を経る。従って、異常事象に対する安全対策の考え方は、廃棄体の落下・転倒・衝突などの異常事象の発生防止対策を要因ごとに検討する。さらに異常が発生した場合に備えて放射性物質の飛散などを防ぐためのフィルタなどの除染機能を有した機器を含む換気系設備などによる異常拡大防止対策を施した上で、万が一、事故にまで発展した場合は、除染などの事故の影響緩和策を実施することを基本とする。

6.2.3.2 一般労働安全の安全対策の考え方

一般労働安全とは、放射線影響以外の災害に関して安全を確保するものであり、一般労働安全を確保する期間は、現地で地質調査などを開始する概要調査の段階から事業の廃止に至る期間が対象である。一般労働安全では、労働災害対策と作業環境対策を安全対策とした。労働災害対策においては、自然災害（地震、津波、土砂崩れなどを要因とする労働災害）および人的災害（坑道内の落盤、水没、火災、爆発、酸素不足などを要因とする労働災害）に対する安全対策を講じる。施設の基本的な安全対策としては、災害の発生・拡大を防止する対策が要求されるとともに、災害時に労働者の人命が確保されるよう、避難経路の確保も要求される。作業環境とは、地下あるいは地上施設の環境（温度、湿度、酸素濃度、粉じん濃度、照度、騒音レベルなど）のことであり、安全対策はこれらの作業環境を労働に適するように改善または維持するために講じる。表 6.2.3-2 に安全対策の考え方を示す。

表 6.2.3-2 一般労働安全に対する安全対策の考え方

安全対策		説明
労働災害対策	災害の発生・拡大の防止	労働災害の要因となる事象の発生防止と拡大の対策を有すること
	災害時の避難経路確保	災害時の避難経路が確保されていること
作業環境対策	作業環境の維持	労働に適する環境を維持すること

6.2.3.3 環境保全対策の考え方

事業期間中の環境保全対策は、対策を施す環境要素を分類し、それぞれの環境要素に対して適切な対策を実施する（NUMO, 2004a）。基本的な考え方を以下に示す。

- ・ 事業の各段階を通じて処分場を建設する地域の環境に十分配慮する。
- ・ 事業の各段階で生じる環境への影響について、それぞれの段階の前段階で調査、予測および評価を行い、環境に与える影響をできる限り回避、低減するとともに、必要に応じて代償措置（復元、創出）をとることを含めた適切な保全措置を講ずることができるようあらかじめ準備を行う。
- ・ 当該段階においては実際にモニタリングなどを行ってその効果を確認し、必要があれば保全措置の改善もしくは追加の措置を講ずるといった計画的かつ柔軟に対応する。

対策を施す環境要素は、以下の環境要素を基本とし、表 6.2.3-3 に示す環境保全対策を行うことにより事業期間中の環境影響をできる限り回避、低減する。

- ・ 環境の自然的構成要素の良好な状態の保持；人の健康、生活環境および自然環境に影響を及ぼす環境要素
- ・ 生物の多様性の確保および自然環境の体系的保全；動物・植物・生態系を対象にした環境要素
- ・ 環境への負荷低減；事業実施により発生する環境への負荷を対象にした環境要素

表 6.2.3-3 環境保全対策の考え方

環境保全対策対象の環境要素		環境保全対策の説明	
環境の自然的構成要素の良好な状態の保持	大気環境	大気質	大気汚染物質の排出を低減する対策が施されていること
		騒音・振動	騒音・振動の対策が施されていること
		悪臭	悪臭物質の発生を低減する対策が施されていること
	水環境	水質	水質汚染物質の排出を低減する対策が施されていること
		地下水	周辺環境に著しい影響を与える地下水位低下や地下水水質変化を低減する対策が施されていること
	土壌環境・その他	地形・地質	保全対象の地形・地質に影響を与えない対策が施されていること 地盤沈下などの有意な発生を低減する対策が施されていること
		土壌	土壌汚染の影響を低減する対策が施されていること
生物の多様性の確保および自然環境の体系的保全	動物・植物・生態系	天然記念物や学術的価値の高い動物・植物への影響を低減する対策が施されていること 地域を特徴付ける生態系に対する影響を低減する対策が施されていること	
環境への負荷低減	廃棄物	事業に伴い発生する廃棄物量を低減する対策が施されていること	
	温室効果ガス	温室効果ガスの排出量を低減する対策が施されていること	

6.2.3.4 事業期間中の安全確保の要件との処分施設の構成要素の関係

処分施設は、地上施設、地下施設および操業システムから構成され、事業期間中の安全を確保するためのさまざまな安全対策を有する。地上施設は、廃棄体受入・封入・検査施設や人工バリアの製造施設などから構成され、地下施設は、アクセス坑道、主要坑道、処分坑道などの坑道群から構成される。一方、操業システムは、廃棄体の受け入れと人工バリアの施工にかかわる一連の作業、設備から構成される。操業システムを地上・地下施設の一部と捉え、施設ごとに技術要件を整理することもできるが、ここでは、操業にかかわる作業の相互の関係や、工程計画の連続性、および操業区画の設定などの観点から、廃棄体の取り扱いに関する作業を操業システムとして、総合的に安全対策を設定した。表 6.2.3-4 には、事業期間中の安全確保に関する基本的な安全対策と処分施設の構成要素ごとの安全対策との関係を示す。

「廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止」に関しては、操業期間中の放射性物質の漏えいを防止するために、廃棄体自身に放射性物質を密封する機能を持たせる。また、搬送機器・設備には、地震、故障などの際に異常事象の発生防止の機能を持たせるとともに、異常の拡大防止対策として、廃棄体への衝撃を緩和する機能を搬送機器に持たせ、また、施設からの放射性物質の放出の防止の安全対策を、廃棄体受入施設に備える。

「放射線遮へい」については、遠隔操作による廃棄体の取り扱いを基本とし、遮へい壁を適切に

設けることとする。また、搬送時には、搬送容器に遮へい機能を持たせることで、合理的に廃棄体からの放射線を遮へいする。

一般労働安全のうち作業環境として、温度、湿度、酸素濃度、粉じん濃度などの管理の機能を、地上・地下施設に設ける。このほかにもサイトの環境に応じて、必要に応じて作業環境の維持のための機能を追加する。災害の発生・拡大防止、ならびに避難経路の確保についても地上・地下施設的设计時に考慮する。

表 6.2.3-4 事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係

基本的な安全対策		安全対策	構成要素
放射線安全	作業時 閉じ込め	廃棄体から放射性物質の漏えいの防止	廃棄体の密封性 搬送時の落下・転倒・衝突時の廃棄体への衝撃の緩和
		施設からの放射性物質の過大な放出の防止	負圧管理および遠隔操作
		放射線遮へい	遮へい壁による放射線の遮へい 搬送容器による放射線の遮へい
	放射線被ばく管理	管理区域の設定	放射線管理区域の設定
		被ばく管理・モニタリング	作業従事者の被ばく管理および放射線取り扱い作業従事時間の制限、放射線モニタリングの実施
			モニタリングポストの設置
	一般労働安全	作業環境の維持	空洞の力学的安定性の確保*
換気経路の確保			
排水対策			
災害の発生・拡大の防止		防火対策	
		そのほかの災害防止対策	
災害時の避難経路の確保	避難経路の確保		

(* 地下施設でのみ考慮する安全対策)

6.2.3.5 地上施設設計の技術要件

地上施設は、ガラス固化体を受け入れ、地下に搬送し、処分するための所要の準備と地下施設で行われる作業を支援する一群の施設である。廃棄体受入・封入・検査施設、緩衝材の成型、加工に必要な施設に加え、排気・排水処理施設、掘削土置き場など地下施設の建設、操業に必要な一連の施設で構成される。さらにサイトによってはガラス固化体を受け入れるための港湾施設や専用

道路も処分場の敷地内に設置する場合がある。これらの施設は、処分場の閉鎖に伴い最終的には撤去されるため、閉鎖後長期の安全確保にかかわる技術要件は特に考慮する必要はない。このため、事業期間中のみを対象とした安全確保にかかわる技術要件を考慮する。

地上施設を構成する各施設には、個々の施設の機能に対応して技術要件を考慮するが、ここでは例として廃棄体受入・封入・検査施設の安全にかかわる技術要件を示す。廃棄体は地上施設（廃棄体受入・検査施設）において表面汚染検査により汚染のないことを確認する。ただし、輸送中の廃棄体の振動などにより廃棄体の破損の可能性を考慮すると、廃棄体受入・封入・検査施設では、廃棄体などにより汚染する可能性があるエリアが存在する。従って、廃棄体受入・封入・検査施設に対しては、一般的な施設に対する技術要件に加えて、放射線防護対策と放射線被ばく管理を適切に行うことが技術要件となる。そのほかの地上施設については、放射性物質を取り扱わないことから基本的に管理区域を設定する必要はない。

6.2.3.6 地下施設設計の技術要件

地下施設は、地上施設から廃棄体や建設資材などを搬送するためのアクセス坑道（立坑、斜坑）や連絡坑道、廃棄体を定置するための処分坑道あるいは処分孔（廃棄体を竖置きに定置する場合）などから構成される。以下では、地下施設レイアウト、坑道および操業システムの技術要件を示す。

(1) 地下施設レイアウト設計の技術要件

候補母岩における地下施設建設可能領域内へ廃棄体を適切に配置できることが技術要件となる。このため、地下施設建設可能領域での処分パネルの規模や配置などを検討するために、対象とする岩盤の規模や空間的な広がり、割れ目の位置や長さ、幅、方向などの空間的な分布を考慮して地下施設レイアウトを設定する。

一般労働安全としては、施設内の作業従事者の安全を確保することを技術要件とし、空洞の力学的安定性確保の観点から、主たる地圧の方向（最大主応力の方向）と坑道の方向の関係を考慮する。また、酸素濃度、温度、湿度などの管理においては、平常時や何らかの異常時においても、換気経路を確保することとし、かつ、風速が過大とならないよう、経路を設計する。また、火災・事故防止対策と緊急時の避難経路の確保についても、地下施設レイアウトに関する技術要件とする。

また、施工実現性の観点から、工期内に建設、操業、閉鎖ができること、物流経路を確保すること、操業スケジュール変更に対応できることなどを考慮して坑道を適切に配置する。

(2) 坑道設計の技術要件

地下施設の坑道には、必要に応じて排水設備、換気設備などを設置するための空間が必要となる。各坑道の利用目的にあわせた役割により、各坑道が所要の内空断面（形状、寸法、断面積）を有していることと、建設・操業・閉鎖の各作業段階を通じて力学的安定性が確保されていることが技術要件となる。

(3) 操業にかかわる技術要件

操業は、廃棄体の受け入れと人工バリアの施工にかかわる一連の施設、設備、作業を指す。操業にかかわる作業の相互の関係や、工程計画の連続性および操業区画の設定などの観点から、廃棄体の取り扱いに関する技術要件を設定する。例えば操業期間中の放射線管理区域の設定や遠隔操作に

より廃棄体の定置や人工バリアの施工を実施することなどが技術要件となる。

6.2.4 事業の進展に伴う安全機能と技術要件の管理

本節で示した安全機能と技術要件は、現時点におけるわが国の多様な地質環境に対応することを目的として設定したものであり、既往の高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の基本構成の検討に基づいている。ここで示した安全機能は、今後、大きく変更することはないと考えている。ただし、事業の進展とともに前提条件がより明確となることや、技術の進展などを考慮すると、前提条件が変わった場合に安全機能や技術要件が十分であることをその都度確認する必要がある。前提条件が変化する要因を以下に例示する。

- ・ サイトの調査・評価の進展に伴い、地質環境モデルが更新された場合
- ・ 指針類の整備、民間規格の整備など、安全規制の枠組みが整備された場合
- ・ 技術開発などにより地層処分の技術や知見に進展があった場合

そのため、以上で示した要件を、要件管理システム（NUMO, 2011d）に登録し、変更の追跡性を確保する計画である。

6.3 処分場の設計

処分場の設計は、サイト調査・評価の進展に応じて明確となる地質環境の条件を前提とし、地層処分事業の各段階における安全性および閉鎖後長期の安全性を確保すべく地下施設と人工バリアの仕様、また、必要となる地上施設や操業システムを具体化するものである。

以下に処分場の設計の基本的な考え方を説明する。

6.3.1 基本的な設計の流れ

処分場の設計対象の主な部位を図 6.3.1-1 に示す。主な設計対象は、地上施設と地下施設、および地下施設に含まれる人工バリアである。主な人工バリアは、高レベル放射性廃棄物処分ではオーバーパックと緩衝材、地層処分低レベル放射性廃棄物処分では緩衝材、充填材である。地下施設のうち両者に共通するものとして、坑道の支保工、坑道の埋め戻し、およびプラグがあり、地層処分低レベル放射性廃棄物処分に固有のものとして、廃棄体パッケージや構造躯体がある。

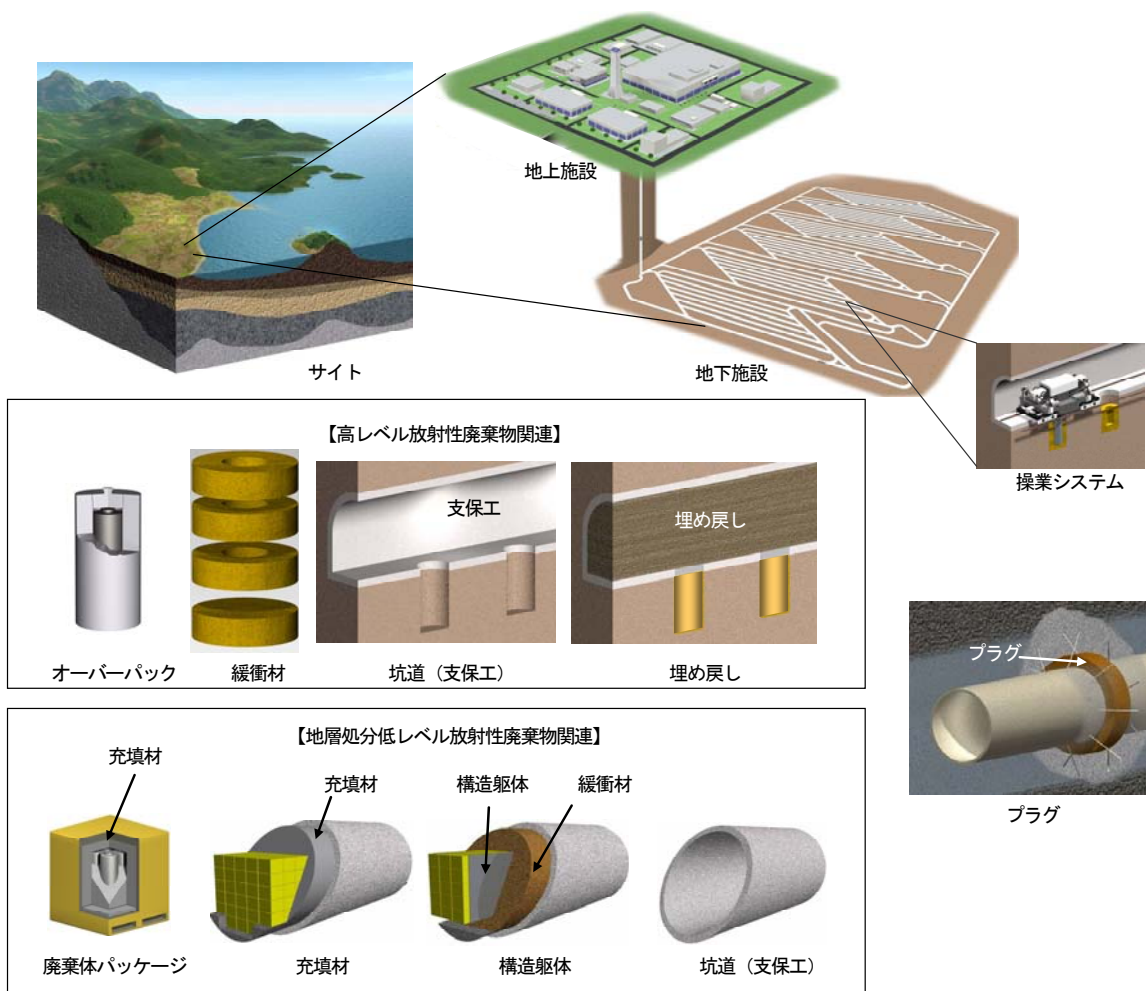


図 6.3.1-1 主な設計対象部位

処分場の設計の基本的な手順を図 6.3.1-2 に示す。処分場は、6.2 で示した処分場に求められる安全機能とそれに対応した技術要件を満たすように設計する。

まず、候補母岩の地質環境特性について熱環境、力学場、水理場、化学環境、母岩の広がりなどの特性を把握する。岩盤の力学特性と直接関連する坑道の力学安定性、地温分布、廃棄物発熱特性などから坑道径と坑道を設置することが可能な最大深度を評価する。また、候補母岩領域から放射性物質の移行時間と移行経路が相対的に有利となる（長くなる）領域を絞り込む。さらに、廃棄物量から決まる処分場の規模を踏まえ、地下施設設置位置（深度・エリア）を設定する。

設定した地下施設設置位置の母岩の特性を踏まえ、人工バリアを構成するオーバーパックと緩衝材を設計し、オーバーパックと緩衝材の材料・形状・厚さといった人工バリア仕様を設定する。

また、設定した地下施設設置位置へのアクセス方法を検討し、該当深度における各坑道の断面仕様や処分坑道内の廃棄体定置仕様を設定する。廃棄体と人工バリアを定置するために必要となる坑道断面寸法を算定した上で、その寸法を確保するため、坑道の力学安定性評価に基づく支保設計を実施する。また、廃棄体の発熱に関する熱的評価を行い、人工バリアに有意な温度上昇が生じないよう廃棄体の定置間隔などを設定する。

設定した坑道断面仕様・廃棄体定置間隔を踏まえ、処分パネルの規模や形状、およびその配置に加え、主要・連絡坑道の配置やアクセス坑道の数や配置などを検討し、地下施設全体のレイアウトを設定する。また、坑道の埋め戻しとプラグの仕様や配置などの設計を行う。

地上施設については、まず、自然・社会環境条件、輸送ルートなどを考慮して地上施設設置区域を選定し、地下施設との位置関係などから、坑口位置を設定する。その上で、放射性管理区域や、建設資機材などの物流動線に留意して必要な施設群の配置を検討する。そして、安全評価による地層処分システム全体の性能が十分であることを確認した上で、以上を処分場概念として取りまとめる。

NUMO は、これらの手順を、各段階におけるサイトに係る情報や技術・知識の進展に応じて繰り返し実施し、その詳細度や信頼性を向上させていく。例えば、概要調査地区選定段階では、坑道仕様を設定する場合、簡易な力学的安定性評価により坑道径や深度を概略設定するのに対して、精密調査地区選定段階では、調査で得られる岩盤の初期応力状態や力学特性を反映した合理的な掘削方法や手順を設定し、岩盤特性に応じた詳細な解析を実施して坑道の仕様を決定することになる。

なお、地層処分低レベル放射性廃棄物については、高レベル放射性廃棄物処分の人工バリア（オーバーパック、緩衝材）に相当する要素として、緩衝材、充填材が挙げられる。

上記の手順は、一方向的な流れを説明したものであるが、実際の設計では、人工バリア、地下施設、地上施設、それぞれの検討結果、あるいは調査情報や評価結果を総合的に判断しながら、設定値のやりとり、修正、再設計などを柔軟かつ適切に実施する。

6.3.2 以降に図 6.3.1-2 に示す各設計の内容を説明する。なお、項番号との対応は図 6.3.1-2 に示したとおりである。

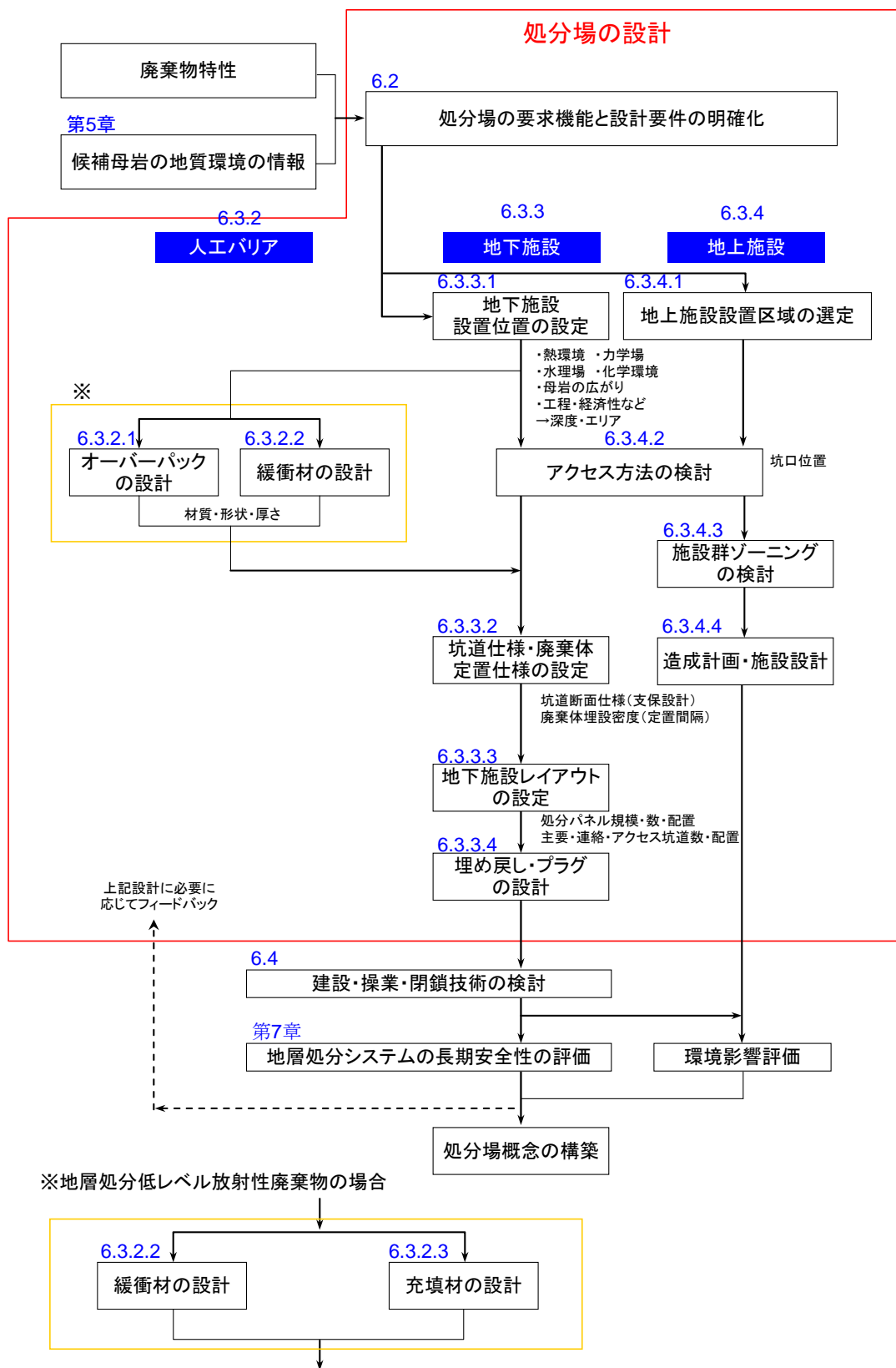


図 6.3.1-2 処分場の設計手順

6.3.2 人工バリアの設計

人工バリアには、放射性物質の浸出抑制や放射性物質の移行抑制などの安全機能を期待しており、それらの安全機能を確保するように技術要件を設定した（6.2 参照）。高レベル放射性廃棄物の人工バリアは、ガラス固化体、金属製オーバーパック、緩衝材を基本とし、一方、地層処分低レベル放射性廃棄物の人工バリアは、充填材と緩衝材を基本としている。本項では、技術要件に基づいた人工バリアの設計方法とその設計例を示す。また、人工バリアの設計においては、材料の基本特性や長期挙動などの材料特性の理解が重要である。本項では、材料の特性を設計にどのように反映するのかについて記述し、最近の技術開発成果については6.6.2 で詳述する。なお、人工バリアのうちガラス固化体については、地層処分事業としての設計対象に含まれないため、ここではその設計については記述していない。

6.3.2.1 オーバーパックの設計

6.2 で述べたように、オーバーパックは、廃棄体中の短寿命核種の放射能が減衰するまでの間、地下水がガラス固化体と接触し、放射性物質が溶出することを防止する機能を持つ。これにより発熱が著しい期間の放射性物質の移行を防ぎ、高温環境下における放射性物質の移行を想定するような複雑な安全評価シナリオを排除することができる。発熱の著しい期間は、ガラス固化体の放射能と発熱の特性を考慮すると初期の1,000年間程度であり、オーバーパックは少なくともこの期間、地下水とガラス固化体との接触を防止する。

表 6.2.2-6 に示したようにオーバーパックの技術要件としては、母材の腐食に対する耐食性、荷重に対する構造健全性を設定した。また、オーバーパックはガラス固化体を収納した後、溶接封入されるが、溶接部についても母材と比較して、閉鎖後長期にわたり耐食性や構造健全性が著しく劣らないことを要件として設定した。

オーバーパックの設計項目としては、材料設計、形状・厚さがある（表 6.2.2-6 参照）。オーバーパックの候補材料としては、炭素鋼、銅、チタンが考えられているが（JNC, 1999b, 2005 など）、材料の加工実績などから、これまでのところ炭素鋼が有力候補であると考えている。そこで、まず炭素鋼オーバーパックの設計について述べる。

オーバーパックの形状としては、収納するガラス固化体が円柱形であることから、円筒形が合理的であると判断している。オーバーパックの母材の厚さは、腐食挙動が全面腐食で、応力腐食割れが起こらない環境が選ばれることを前提として、図 6.3.2-1 に示す検討手順に沿って決定している（JNC, 1999b）。

例として設計耐用年数を1,000年間、材料を炭素鋼であるとしたときのオーバーパックの設計例を示す（JNC, 1999b）。図 6.3.2-1 には、オーバーパック厚さの検討の手順例を示す。

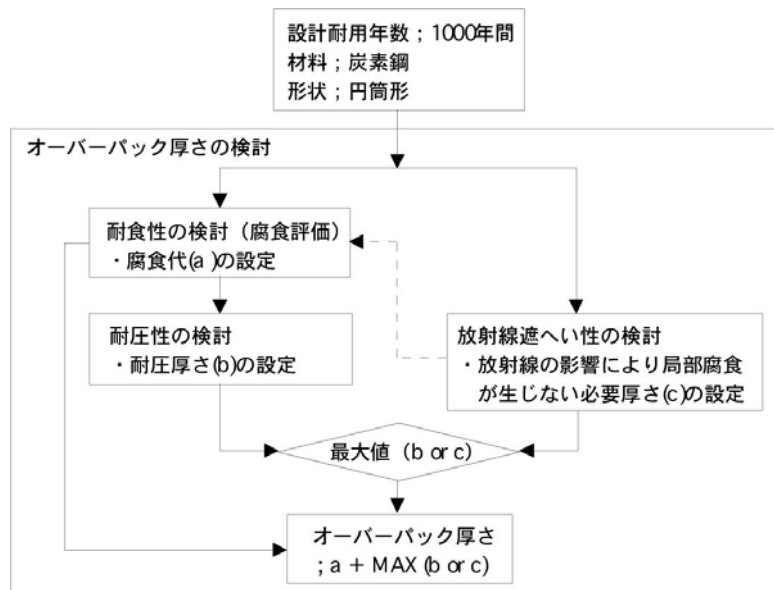


図 6.3.2-1 オーバーパック厚さ検討の手順例
(出典：JNC, 1999b)

耐食性については、炭素鋼の酸素による腐食深さ、還元環境下での水による腐食深さなどを合算し、32mm以上の腐食代を与えることで、1,000年以上の耐食性が確保できることを示している(JNC, 1999b)。最終的に腐食代としては、余裕を見込んで40mmと設定している。

また、局部腐食は炭素鋼の不動態化が要因の一つとして考えられるが、不動態化する可能性として、放射線分解により生成される酸化性化学種(過酸化水素など)の影響が懸念される。そのため、不動態化を防止するための放射線遮へい厚さが設定されており、保守的な評価に基づいて150mmの厚さを設定している(JNC, 1999b)。

一方、構造健全性の評価では、オーバーパックに作用する外荷重として、地下水静水圧、オーバーパックの腐食膨張により生じる緩衝材からの圧密反力、岩盤のクリープ変形により生じる緩衝材の圧密反力などを想定して、耐圧厚さの設計を実施している。耐圧上必要な厚さは、硬岩系岩盤で蓋部110mm、胴部(母材)50mm、軟岩系岩盤では蓋部80mm、胴部30mmである(JNC, 1999b)。図6.3.2-1に示した設計フローでは、放射線遮へい厚さと耐圧厚さを比較し、厚い方の値を採用することとしており、現在は放射線遮へい厚さと腐食代の和を炭素鋼オーバーパックの厚さとしている。以上に基づいて、炭素鋼オーバーパックの厚さは、岩盤の種類やオーバーパックの部位によらず、190mmを基本としている(図6.3.2-2)。

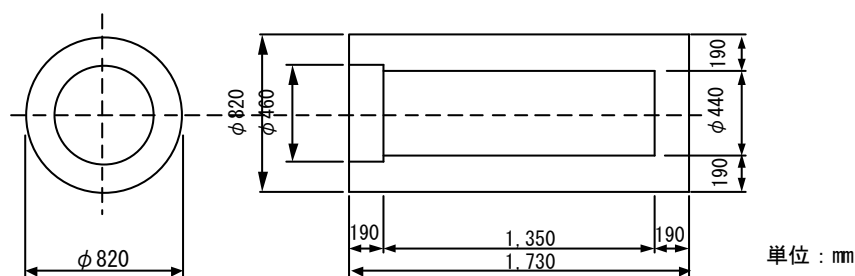


図 6.3.2-2 炭素鋼製オーバーパックの設計仕様例
(出典：JNC, 1999b)

第2次取りまとめ以降、炭素鋼オーバーパックスの腐食挙動評価に関する技術開発が進められ、上記の設計例の保守性や実現性が確認されている。耐食性については、10年間の腐食試験に基づいて、腐食速度が長期的には低下し、第2次取りまとめ時に評価した全面腐食速度に比べ、5分の1程度の腐食速度となることが示されている（谷口ほか、2009、6.6.2.2参照）。また、放射線分解生成物による不動態化の可能性については、放射線照射下での炭素鋼の腐食試験により、想定される放射線量程度ではその影響は観測されないことが示されている。そのため、放射線遮へい厚さについては、今後、影響の再評価により、減少させることができると考えている。このほか、放射線脆化の影響（耐放射線性）、コンクリートの劣化に伴う高pH水の影響（残置物との相互作用の影響）および微生物の影響などについて、現象の理解が進んでいる（詳細は6.6.2.2参照）。

また、図6.3.2-2に示したオーバーパックスの製作が現状技術で十分対応可能なことは、オーバーパックスの試作や溶接技術の開発を通じて確認されている（6.6.4.2参照）。試作したオーバーパックスの重量は約6tである（原環センター、2010a）。溶接技術については、板厚が190mmと厚い円筒部と蓋部の溶接に対して、TIG溶接、MAG溶接、電子ビーム溶接などの技術開発が進められている（6.6.4.2参照）。また、溶接部の耐食性や構造健全性についても検討が進められ、母材と同等か著しく低下することがないことが確認されている（6.6.2.2（5）参照）

炭素鋼以外にも還元性の環境で優れた耐食性を発揮し得る銅や、高耐食性金属であるチタン（低合金チタンを含む）もオーバーパックスの候補材料である。銅やチタンを使用する場合には、それぞれの内側に炭素鋼を強度部材として用いる複合オーバーパックスが合理的である。それぞれの候補材料の耐食性の評価では、チタンについては、人工バリアの環境条件に応じて適切な合金種を選択すれば、1,000年間程度では脆化しないという知見が得られている（JNC、1999b）。また銅については、40mm程度の腐食代で1,000年間の腐食寿命が期待できる（JNC、1999b）。

6.3.2.2 緩衝材の設計

緩衝材の設計フローを図6.3.2-3に示す。6.2で示したように、高レベル放射性廃棄物、地層処分低レベル放射性廃棄物ともに、緩衝材には「放射性物質の移行抑制」の安全機能を設定しており、その詳細な安全機能として、「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止・抑制」、「収着による移行遅延」を設定した。また、これらの安全機能に対して、基本的なバリア性能を確保するための技術要件として、低透水性、コロイドろ過能、収着性を設定している。

設計では、まず、これらの技術要件と自己シール性、製作・施工性の技術要件が満たされるよう、緩衝材の仕様範囲を設定する。また、仕様範囲の設定では、長期健全性の維持に関する技術要件として、施工時の隙間を充填するための自己シール性についても検討する。なお、高レベル放射性廃棄物に関しては、オーバーパックスを変形から保護するために物理的緩衝性の技術要件についても、仕様範囲の設定で検討する。仕様範囲の中から、品質管理方法や経済性なども考慮して、材料設計および形状、厚さなどの仕様を決定する。

図6.3.2-4に、高レベル放射性廃棄物の緩衝材のブロック方式に対する緩衝材の仕様範囲の検討の例として、緩衝材の乾燥密度と緩衝材厚さの仕様範囲を示す。図中の曲線のうち、cは自己シール性、dはコロイドろ過能、eは物理的緩衝性のそれぞれ技術要件に対応している。緩衝材の乾燥密度と厚さの仕様範囲は、曲線で囲まれた範囲となる。なお、技術要件のうち、低透水性については、緩衝材の透水係数や周辺の母岩の動水勾配、透水係数などに基づいて別途評価するため、この図では示していない。また、収着性については、緩衝材の主要材料としてベントナイトを利用している

ことで技術要件を満たしていると判断しており、同じくこの図中には示していない。

この仕様範囲から図 6.3.2-3 のフローの後半に従い、緩衝材の製作、搬送、定置の方法 (6.5.2, 6.6.4.3 参照) に合わせて品質管理方法や経済性を考慮して、最終的な緩衝材の材料仕様や形状・寸法を決定する。現在の緩衝材の基本仕様では、施工方法としてブロック定置方式を採用した場合には、ケイ砂を 30 重量%混合した Na 型ベントナイトを乾燥密度 1.8 Mg/m^3 となるように圧縮成型したものを緩衝材材料の仕様とし (膨潤後の乾燥密度は 1.6 Mg/m^3)、緩衝材の形状は円筒形、厚さは 70 cm としている (NUMO, 2004a)。

ここまでの手順で緩衝材の特性に基づいて仕様を決定した後には、材料の長期的な健全性について評価する。緩衝材の長期健全性に影響する要因と対応する技術要件としては、例えば、高温環境におけるイライト化 (耐熱性)、長期的な変形に伴う隙間やオーバーパックの腐食に伴う水素ガスの透気経路形成 (自己修復性)、コンクリート支保などのセメント系材料とベントナイトの相互作用 (残置物との相互作用の影響低減)、鉄腐食生成物とベントナイトの相互作用 (バリア材料間の相互作用の影響の低減) などが挙げられる。これらの要因が長期的に作用し、影響が著しいと判断された場合には、材料の仕様設定にフィードバックし、緩衝材の厚さを増す、乾燥密度を高めるなどの設計上の対策を検討する。

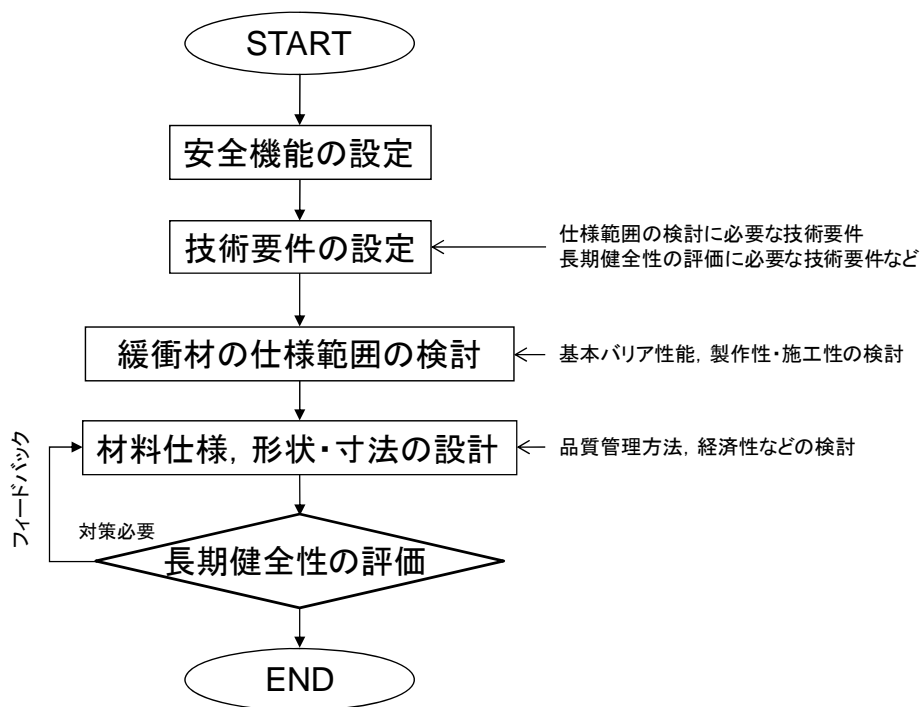


図 6.3.2-3 緩衝材の設計フロー
(出典: NUMO, 2011a)

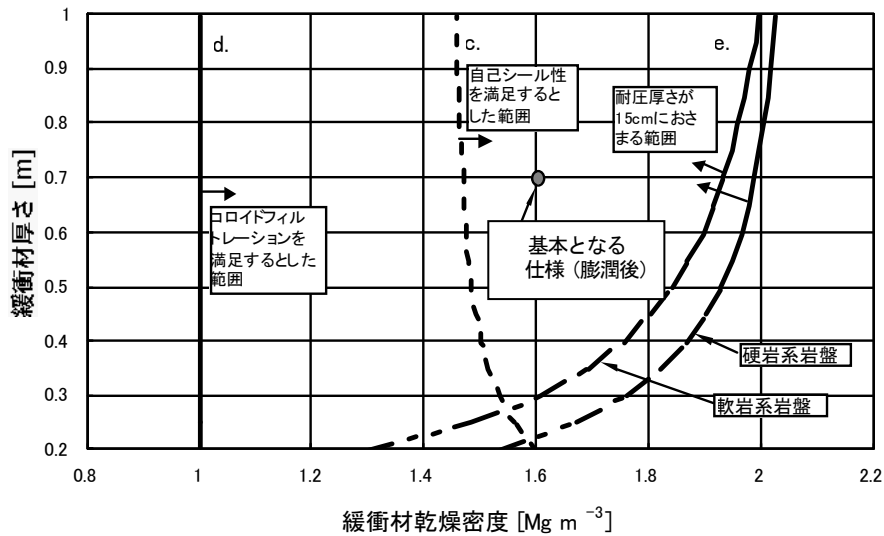


図 6.3.2-4 ブロック方式を一例とした緩衝材仮仕様の確認
(JNC, 1999b を編集, 一部加筆)

なお、地層処分低レベル放射性廃棄物の緩衝材については、安全機能は高レベル放射性廃棄物と同様である。ただし、安全確保上考慮すべき重要な放射性物質が I-129 や C-14 であること、発熱性が低く廃棄物を集中配置できることに起因して、人工バリアの構成や、形状、施工方法などが異なるため、仕様範囲の設定は地層処分低レベル放射性廃棄物の処分概念に適した方法に基づいている (NUMO, 2011b)。

第2次取りまとめ以降、緩衝材の基本特性データの整備と長期健全性に関する科学的な知見の整備が進んでいる (6.6.2.3 参照)。例えば、塩分濃度による膨潤性の低下については、多くの知見が得られており、(田中・中村, 2004, Komine and Ogata, 2004, 小峯ほか, 2009), これらの成果は自己シール性の評価に利用することができる (6.5.1.1 (2) 参照)。また、地下施設の建設においてはコンクリート支保やグラウトの利用が想定されるため、セメント系材料とベントナイトの相互作用に関する試験検討や予測解析手法の開発も進んでおり、これらの成果は、将来、長期健全性の評価に反映する (6.6.2.3 (2) 参照)。

6.3.2.3 充填材の設計

充填材は、地層処分低レベル放射性廃棄物に特有の人工バリアである。安全機能として「収着による移行遅延」を設定している (表 6.2.2-13)。充填材の候補材料としては、セメント系材料が検討されている。セメント系材料は放射性物質 (C-14, Se-79, I-129, Cs-137 など) に対する収着能を有する (NUMO, 2011b)。セメントの詳細な配合設計は今後実施するが、安全評価上のモデル物質としては、普通ポルトランドセメントの利用が想定されている。また、収着能以外にも、操業期間中に放射性物質が漏出しないことや、廃棄物を積み上げた際の機械的な強度、製作・施工性として打設時の流動性や充填性などの要件に基づいて適切な材料設計を実施する (NUMO, 2011b)。

6.3.3 地下施設の設計

地下施設は、①地下施設設置位置の設定、②坑道仕様・廃棄体定置仕様の設定、③地下施設レイアウトの設定、④埋め戻し・プラグの設計の手順で設計する。なお、①と②の間で、地上施設の設計と連携を図りながら「アクセス方法の検討」を行う（図 6.3.1-2）。

6.3.3.1 地下施設設置位置の設定

サイト選定の初期の段階では（特に精密調査地区選定まで）、応募区域の中から地下施設を設置するのに好ましい候補母岩を選定することが重要な設計対象事項となる。候補母岩は、最終処分法で定める深度 300m より深い地層を対象に、概要調査地区選定上の考慮事項（NUMO, 2004b）、NUMO が今後策定する精密調査地区選定上の考慮事項と、サイトの環境条件などを踏まえて選定する。地下施設の設計では、まず、候補母岩の中に地下施設設置位置を設定する。表 6.3.3-1 には、NUMO が考えている地下施設設置位置の設定の際の評価項目例を示す。6.2 で示した好ましい母岩の特性に加え、施工上に必要となる力学場の観点、地下施設全体を候補母岩中に配置するための岩体の広がりや、工程・経済性の観点からの項目を加えた。

表 6.3.3-1 地下施設設置位置の設定のための評価項目例

評価項目	評価指標の例	評価に必要な情報
<p>【熱環境】 閉鎖後の処分場の温度が低いこと</p>	<p>廃棄体の発熱量と岩盤特性に基づく廃棄体専有面積や温度の経時変化</p>	<p>岩盤特性モデル, 廃棄体の発熱量, 地温勾配, 岩盤の熱特性など</p>
<p>【力学場】 坑道の力学的安定性が確保できるとともに, 閉鎖後の処分場とその周辺の力学場が人工バリアの安定性に適していること</p>	<p>岩盤特性に基づく坑道離間距離や支保の仕様</p>	<p>岩盤特性モデル, 初期地圧, 側圧比, 岩盤の力学特性, 地山強度比など</p>
<p>【水理場】 閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流束が小さく, 緩慢であること</p>	<p>地下水移行経路長, 地下水移行時間など</p>	<p>水理地質構造モデル, 地質環境の長期変遷評価結果, 動水勾配, 地温勾配, 地下水組成, 透水係数, 有効間隙率, 地下水流向</p>
<p>【化学環境】 閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶解性と人工バリアの安定性に適していること</p>	<p>地下水化学特性に基づく人工バリアの長期挙動</p>	<p>地下水化学モデル, 酸化還元電位, 地下水の pH, 地下水組成, 鉱物組成など</p>
<p>【母岩の広がり】 処分場を収容できる面積(容積)を有するとともに, 処分パネルを効率的に配置できる形状を有すること</p>	<p>処分場の規模, 処分パネルの数・形状</p>	<p>地質構造モデル, 母岩の空間的な広がり, 断層・破碎帯の分布など</p>
<p>【工程・経済性など】 工程確保の見通しがあるとともに, 経済性が確保されること</p>	<p>建設工程, 操業工程, 建設費の概算結果など</p>	<p>アクセス坑道の延長距離, 処分形態や処分坑道断面の仮設定情報</p>

表 6.3.3-1 に示した評価項目のうち、熱環境、水理場、力学場の観点からの評価の具体的な考え方を以下に示す。

熱環境の観点では、深度が増すと地温が高くなるため、作業環境の維持や人工バリアの熱的溫度制限を考慮し設置位置の下方限界（最大深度）を把握する。

力学場の観点では、法定要件である地下 300m 以深に設置する坑道径は、岩盤の強度と坑道に作用する地圧の関係から決まる。一般に深度が増すと地圧が大きくなり、坑道の力学安定性が低下する傾向があるため、坑道の力学的な安定が確保できる最大深度を把握する。

図 6.3.3-1 には、熱環境と力学場の観点から設定される坑道径と深度の関係を示す。空洞安定性から制限される最大深度は、坑道径が大きくなると小さくなり、岩盤の力学強度が上がると大きくなる。岩盤中では坑道の鉛直方向と水平方向に作用する地圧が異なる場合がある。このような坑道断面方向の地圧の異方性が大きくなると同じ坑道径でも最大深度は小さくなる。また、図 6.3.3-1 には熱影響の観点について、高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物のうちの発熱性廃棄体を含むグループ 2 の処分坑道を例として熱的制限から決まる坑道径と深度の関係も示す。高レベル放射性廃棄物の熱影響については、深度が深くなるに従い地温が高くなるため、人工バリアの熱的制約から廃棄体間の離隔（専有面積）が大きくなる。また、第 2 次 TRU レポートによると地層処分低レベル放射性廃棄物では、熱影響の観点から深度 300m で外径 13m 程度の処分坑道になる。人工バリアの熱的制約から坑道断面あたりに収納できる廃棄体量は少なくなるため坑道径も小さくなる。これらの関係は、岩盤の熱特性、地温勾配、廃棄体の発熱特性によって変わる。

このように法定深度以深で、岩盤の力学条件および熱的制限により掘削可能な深度と坑道径の関係を把握し、操業上必要な坑道径を確保できる範囲を把握する。図 6.3.3-1 では黄色の部分である。

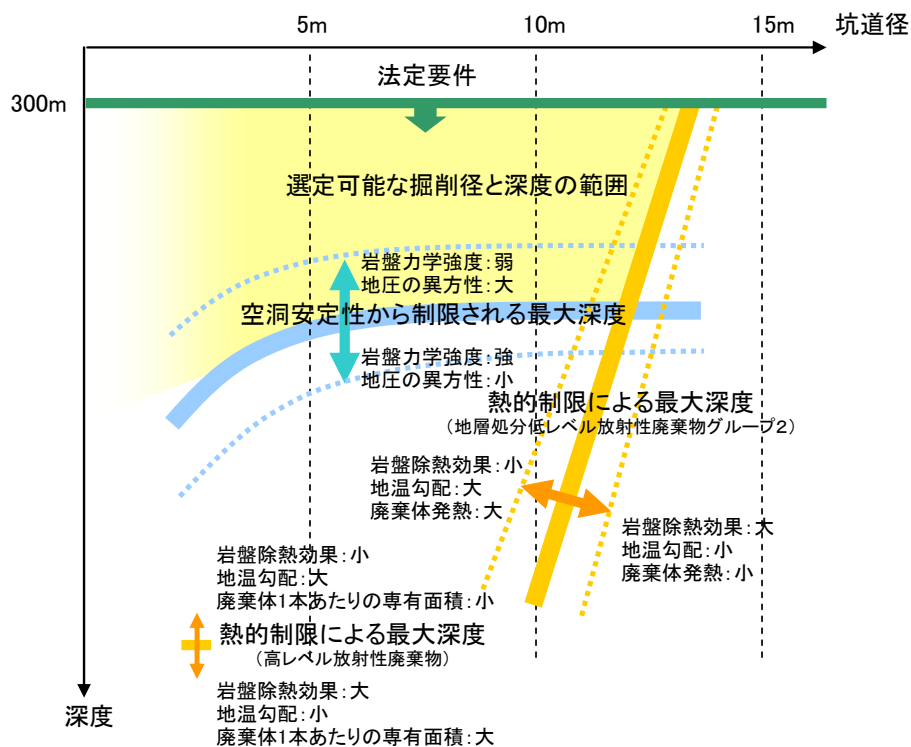


図 6.3.3-1 坑道径と深度の関係

水理場の観点では、候補母岩の地下水流動（下降流，上昇流，流出点など）や処分エリア・深度ごとの地下水移行経路と地下水移行時間を評価し，上記で説明した坑道の力学的観点および熱的観点での成立性が評価された領域から，相対的に放射性物質の移行評価の観点から有利な領域，例えば，地下水移行経路と地下水移行時間とが相対的に長くなる領域を地下施設の設置可能エリアとして抽出する。地下水の移行時間の算定手法としては，深度ごとに規則的に配置した点から出発する粒子の動きを算定する粒跡線解析（図 6.3.3-2）などがある。この際，沿岸域では長期的な気候変動などに起因して，海水準が変動することが想定される。その結果，塩淡水境界が移動し，地下水流動（流向・流速）に加えて，地下水化学条件も時間的に変遷する（6.5.1 参照）。さらに，放射性物質の移行先となる生物圏も時間的に変遷する。このため，沿岸域では，地下水流動の将来変遷も考慮し，総合的観点から地下施設の設置可能エリアと深度を設定する。

また，処分エリアの規模を設定する際には，母岩中に廃棄体を定置することが好ましくない局所的な個所があることに留意し，工学的判断によりある程度の余裕を持ったエリアを設定する（6.1.2 参照）。なお，廃棄体を定置することが好ましくない個所とは，破碎帯や坑道内への湧水が多い個所などのことである（図 6.1.2-1）。なお，地下施設の設置位置は複数種の岩盤にまたがる場合もある。

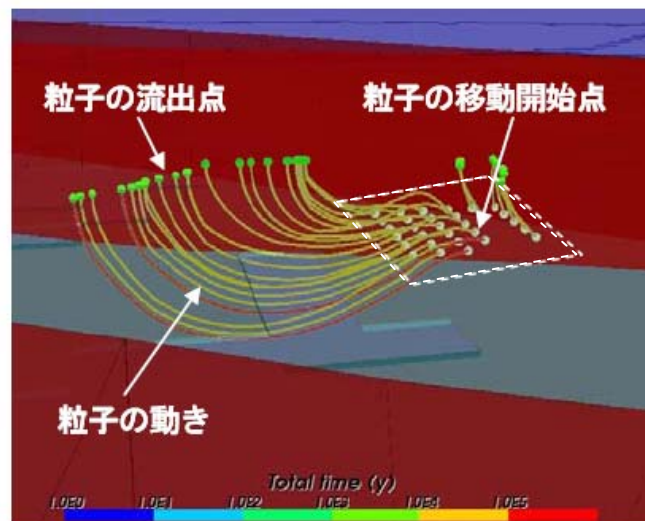


図 6.3.3-2 粒跡線解析のイメージ

6.3.3.2 坑道仕様・廃棄体定置仕様の設定

(1) 高レベル放射性廃棄物処分

坑道仕様の設定では，坑道の断面寸法と断面形状の設定および支保工の設計が主な実施項目であり，廃棄体定置仕様の設定では，主に熱的観点からの廃棄体設置間隔（廃棄体埋設密度）の設定が主な実施項目である。

(i) 坑道仕様の設定

まず，人工バリアの設計で設定した緩衝材の仕様を踏まえ，緩衝材と廃棄体を設置するために必要な坑道の大きさ，また，緩衝材やオーバパックを地下施設内に搬送し，定置する設備や機械を設定し，それらから決まる坑道の建築限界（設備などを設置するのに最低限必要となる坑道の大きさ）を設定する。坑道の断面形状は，力学的安定性（坑道が力学的に安定でその変形量が小さいこ

と)、作業性、経済性(必要断面積を確保しつつ極力小さな断面とすること)から設定する。

(a) アクセス坑道

アクセス坑道は地上施設と地下施設を結ぶ坑道で、両施設間の人員や物資の搬送および換気、給排水、給電などの経路となる坑道である。立坑と斜坑の2種類が考えられる。

① 立坑

立坑の断面形状には、円形、楕円形、四角形などが考えられる。処分場では、施工深度が大きく地圧が大きくなるため、地圧が等方均一に作用する場合には力学安定性の観点から、形状としては円形が有利である。地圧の異方性が大きいサイトにおいては、楕円形状の採用もありうる。立坑は、建設・操業・閉鎖の各作業や換気・排水などの用途に複数本構築する。立坑を廃棄体の搬送経路とする場合には、遮へい機能付き移動車両を搬送するための設備により立坑の径を設定する。また、建設用に用いる場合には、地下の水平坑道施工時の施工条件などを踏まえ立坑の径を設定する。第2次取りまとめにおける検討を参考にすると、内径 6.5m 程度が目安と考えている。

② 斜坑

斜坑の場合、その形状と寸法は次に示す連絡坑道と同じ考え方で設定でき、勾配や線形(直線、らせん、多角形)は、処分場のレイアウトと関連して設定する。勾配は、輸送手段をタイヤ方式の車両とすると12~14%程度以下、ベルトコンベヤで25%程度以下としている例が多い(土木学会, 2006)。また、線形は、敷地条件(位置、面積、形状など)、廃棄体の搬送装置の形状寸法や能力、走行安全性などを考慮して設定する。

なお、アクセス坑道の種類や配置は、大局的な地下水流動方向などを踏まえ、閉鎖後長期の安全性の観点や建設・操業・閉鎖の作業性などの観点から総合的に判断して決定する。

(b) 連絡坑道

連絡坑道は、アクセス坑道と処分坑道とを結ぶ坑道であり、物資の搬送経路や換気・排水経路となるものである。連絡坑道の形状や寸法は、坑道の力学的安定性ととも、施工性や操業時の作業性を考慮して決定する。勾配は、施工中の湧水を自然流下させるため、0.3~0.5%程度が目安となる(土木学会, 2006)。処分坑道との交差角度は、操業に要する装置や施工実績を考慮して設定する。交差部の力学安定性は、三次元的な形状を考慮した評価によって確認する。

(c) 処分坑道と処分孔

廃棄体の代表的な定置方法には処分孔縦置き定置方式と処分坑道横置き定置方式がある。

① 処分孔縦置き定置方式

処分孔縦置き定置方式は処分坑道の床面に処分孔を掘削し、その処分孔内に廃棄体を定置するものである。この場合の処分坑道の形状と寸法は、処分孔掘削機械、廃棄体、緩衝材定置装置の寸法と形状などを踏まえて決定する。第2次取りまとめでは、硬岩系岩盤においては幌型断面形状を、軟岩系岩盤においては、坑道の力学安定性をより重視し、三心円形状が示されている(図 6.3.3-3 (a))(JNC, 1999b)。

② 処分坑道横置き定置方式

処分坑道横置き方式は処分坑道に廃棄体を定置させる。その形状や寸法は、基本的には人工バリアの仕様と、その定置設備により決定する（図 6.3.3-3 (b)）（JNC, 1999b）。

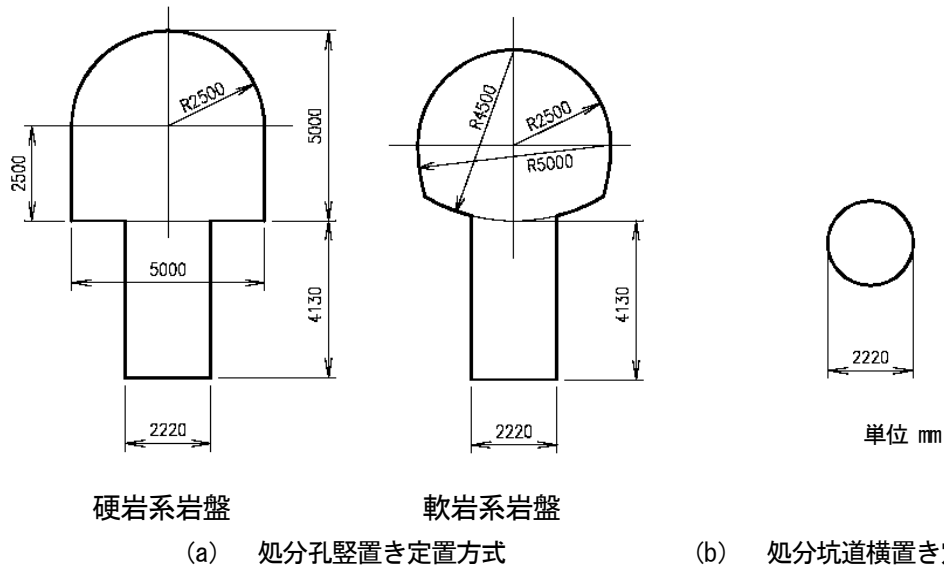


図 6.3.3-3 処分坑道断面の仕様例

(出典：JNC, 1999b)

(ii) 各坑道の力学的安定性の検討

各坑道の工学的実現性の観点について、まず、坑道の力学的安定性を確保するための支保工の必要性を検討する。支保工が必要となる場合には、支保工仕様（厚さ、強度など）を設定した上で、坑道の力学安定性評価を行う。

(a) 支保工の検討

支保工は坑道の掘削に伴って力学的に不安定となる坑道周辺の岩盤の安定を、施工中から操業期間にわたって保ち、掘削作業の安全と完成後の坑道の安全な供用を確保するために設置される。支保工には吹付コンクリート、覆工コンクリート、コンクリートセグメント、ロックボルト、鋼製支保工などがあり、それぞれを単独あるいは組み合わせて用いる。

(b) 坑道の力学的安定性

6.2 で述べたとおり、地下施設を構成する各坑道には、建設時から最終的に埋め戻しが行われるまで坑道の力学的安定性が確保されていることが安全対策として要求される。精密調査における調査坑道の掘削前は、地上からのボーリング調査などで得られた岩盤の力学特性データをもとに、主に数値解析的な手法などに基づき、空洞の力学的安定性を評価する。数値解析による検討では二次元あるいは三次元弾塑性解析などにより、岩盤の最大せん断ひずみ、局所安全係数、支保工応力度などを指標として坑道の力学安定性を評価し、必要となる坑道離間距離と廃棄体ピッチを算定する。図 6.3.3-4 は、局所安全係数が 1.2 以下になる領域が「NATM 設計施工指針」（日本鉄道建設公団、1996）に規定されている坑道掘削径の 20% 以下になるかどうかを算定した事例である。

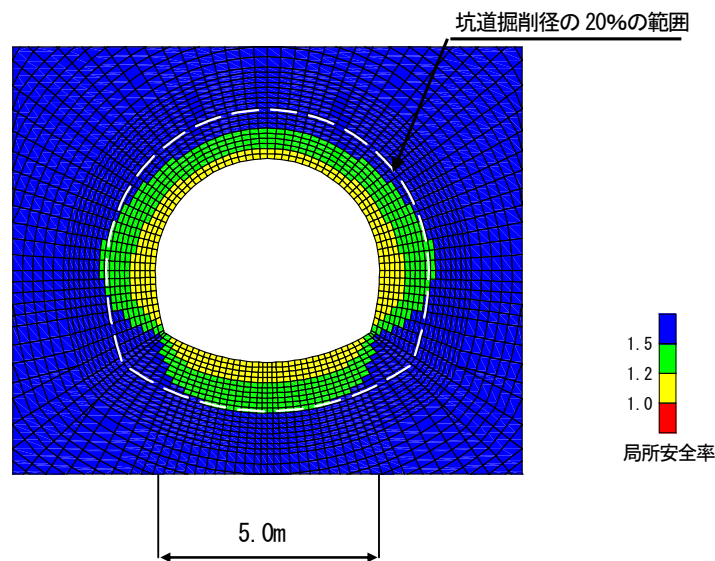


図 6.3.3-4 坑道の力学安定性評価（局所安全係数の分布）
（出典：NUMO，2011e）

なお，将来，サイトが特定された段階においては，その地質環境の条件に応じて割れ目による岩盤の不連続性や異方性，支保工の効果などにも留意してサイトに適した解析手法を選択する。また，サイト調査から得られる事前の情報だけでなく，建設時における調査や計測から得られる情報を適宜，支保工の仕様の設定などに反映する。

また，上記の掘削時の空洞の力学安定性評価に加え，2006年に改訂された「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（原子力安全委員会，2006）を参照し，耐震重要度に応じた耐震設計を行う。NUMOが実施した耐震性評価の検討事例については，6.6.3で説明する。

（iii）廃棄体定置仕様の設定

廃棄体定置仕様に関して，処分坑道離間距離と廃棄体定置ピッチは，力学的安定性に加え，坑道埋め戻し後の人工バリアの温度制限の観点から，廃棄体発熱による熱的影響を考慮して設定する。

坑道の力学安定性が確認された処分坑道を処分パネルに配置するためには，廃棄体からの放熱に伴う緩衝材の温度上昇によって，緩衝材に安全機能を損なうような変質が生じないように適切な廃棄体ピッチを確保する。このため，廃棄体定置後のニアフィールドにおける温度の時間的変化を解析的に評価し，緩衝材の最高上昇温度が一定の制限温度を下回るように処分坑道離間距離と廃棄体ピッチを設定する。

第2次取りまとめでは，温度が100℃未満の場合には緩衝材性能を損なうような変質は生じにくいと考え，緩衝材の制限温度の目安を100℃と設定し，ニアフィールドの温度分布の解析が行われている。人工バリア各部位の温度は，廃棄体定置後10年から20年程度で最大となり，その後徐々に低下することが示されている（JNC，1999b）。

処分パネルの坑道配置を合理的に検討する上での基本的な設計パラメータとして，処分坑道離間距離 xD および廃棄体ピッチ y を用いる（図6.3.3-5）。これらは，地下施設の概略総面積（廃棄体1本あたりの専有面積 $xD \times y$ と廃棄体本数の積），処分坑道の総延長（廃棄体ピッチ y と廃棄体本数の積），総掘削量（処分坑道総延長 \times 坑道断面積）を支配する重要なパラメータでもある。経済性，サ

イト選定の柔軟性を高めるなどの観点から地下施設規模をできるだけ小さくするためには、地下施設の総面積を最小化（専有面積 $xD \times y$ を最小化）するとともに、処分坑道の総延長を最小化（廃棄体ピッチ y を最小化）することが望ましい（JNC, 1999b）。一方、概要調査地区選定段階の設計では、岩盤の熱特性を十分把握することが難しく、処分深度や地質環境に応じて設計結果が変わる可能性があることに留意する。例えば、NUMO が実施した岩盤熱特性が地下施設の占有面積に与える影響に関する検討によれば、熱特性の分布を考慮すると平均値で設計した場合に比して専有面積が数10%程度以上増加する可能性が5%の確率で生じるという結果が得られている（Umeki et al., 2004）。

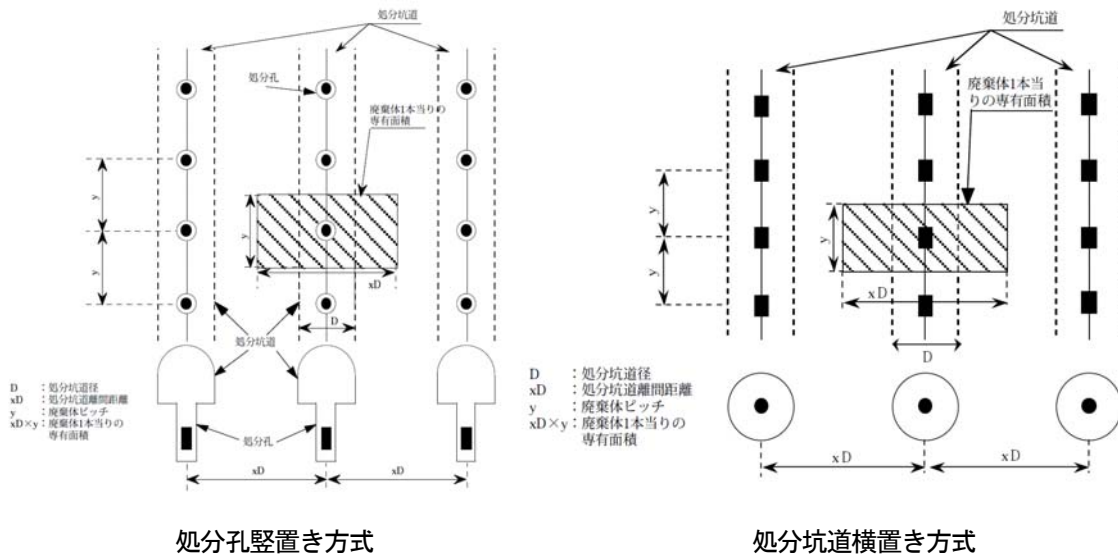


図 6.3.3-5 廃棄体 1 本あたりの専有面積
(出典：JNC, 1999b)

(2) 地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設

地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設においても、アクセス立坑、斜坑、主要・連絡坑道などの仕様の設定は、高レベル放射性廃棄物処分施設のそれぞれの考え方と基本的には同じである。処分坑道は廃棄体の定置密度を高める方が経済的に有利となる。地層処分低レベル放射性廃棄物は高レベル放射性廃棄物と比較して発熱性の低いものが多いため、坑道は大断面とし多くの廃棄体を集約して定置することを指向している（NUMO, 2011b）。処分坑道の形状は、地質環境特性を踏まえて選定するが、円形坑道、幌型坑道などが考えられる。

坑道が大断面になると、実際の坑道掘削では力学安定性の確保や作業の安全性確保の観点から、坑道断面を複数に分割して掘削する。坑道の力学安定性は、そのような実際の施工手順を模擬した数値解析により評価する。なお、高レベル放射性廃棄物処分施設の坑道の力学的安定性で説明したとおり、将来、サイトが特定された段階においては、その地質環境特性に適した解析手法を選択すること、および建設時に得られる力学安定性にかかわる計測情報を適切に力学安定評価にフィードバックすることが重要である。

また、地層処分低レベル放射性廃棄物処分坑道には、必要に応じて構造躯体を構築する。構造躯体は廃棄体、緩衝材、充填材などの搬送・定置作業を効率化し、操業中の作業の安全性を確保するためのものである。構造躯体には期待する機能に応じて種々の形態が考えられる。第2次 TRU レポートにおいて、幌型坑道では、構造躯体を厚さ 1m 前後の鉄筋コンクリート製とし、側壁部上部に

廃棄体定置クレーンを走行させる形態、円形坑道では、構造躯体を厚さ 5cm の鋼製とし、廃棄体は処分坑道端部からフォークリフトなどの車両系定置装置で所定個所に定置する形態が示されている（電事連・JNC，2005）。構造躯体は、用途に応じて想定されるクレーン荷重、充填材施工時に作用する充填圧、埋め戻しにより作用する荷重などを考慮した構造解析により設計する。

6.3.3.3 地下施設レイアウトの設定

(1) 高レベル放射性廃棄物処分施設

高レベル放射性廃棄物処分地下施設は廃棄体を定置する処分坑道群、それらを取り囲む主要坑道からなる複数の区画（処分パネル）および主要坑道とアクセス坑道を結ぶ連絡坑道から構成される（図 6.3.3-6）。廃棄体を定置する領域を複数の処分パネルに独立させることで、地質環境の条件などに応じて柔軟な地下施設レイアウトが可能になるとともに、建設・操業・閉鎖という主要な作業を錯綜することなく並行して実施することが可能になる。

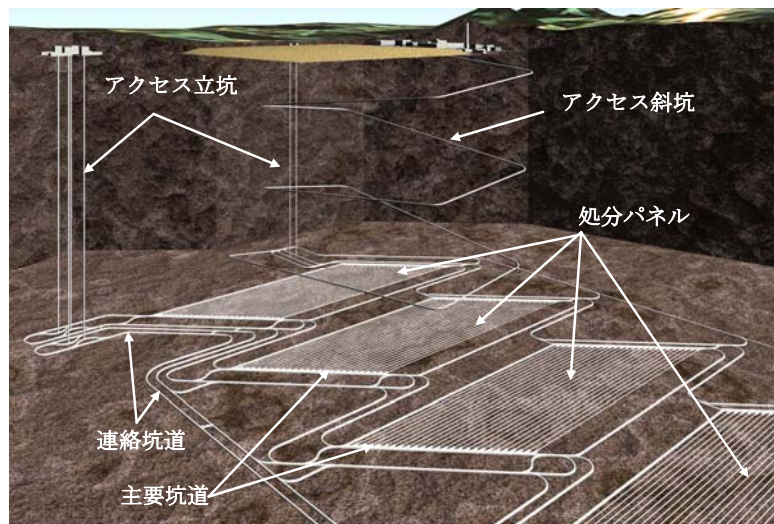


図 6.3.3-6 地下施設レイアウト例（高レベル放射性廃棄物処分場）

地下施設レイアウトの検討では、処分パネルの規模と数を設定し、処分パネルを構成する坑道群の方向を設定する。次に、それらを取り囲む主要坑道、および地上施設と接続するアクセス立坑や斜坑の配置を設定する。坑道群の方向や配置は、建設・操業・閉鎖作業の安全性や物流の確保のほか、岩盤の主応力方向、地下水流動方向などの地質環境特性も考慮する。

岩盤の主応力方向に関して、坑道軸方向を水平面内の最大主応力方向に一致させる方が坑道の変形は小さく空洞安定性の面で有利である（図 6.3.3-7）。地下施設は、処分坑道、主要坑道、連絡坑道など多くの坑道群から構成されており、すべての坑道の方向を一致させることはできないが、処分坑道がほかの坑道と比較して総延長が長いことから、処分坑道軸を水平面内の最大主応力方向に向けることが望ましい。

一方、岩盤中の割れ目と坑道の方向については、地下発電所の考え方（電力土木技術協会，1986）によると、坑道軸方向を割れ目に直交させるように配置することが空洞の安定上望ましいとの考え方が示されている。また、卓越した地圧の作用方向と割れ目の卓越方向が一致しない場合には、両者の空洞安定性への影響の度合いを考えた場合、後者の方が影響が大きくなることから、最大主応

力より割れ目などの地質的不連続面との関係を重視して決める方が望ましいとの考え方が示されている。

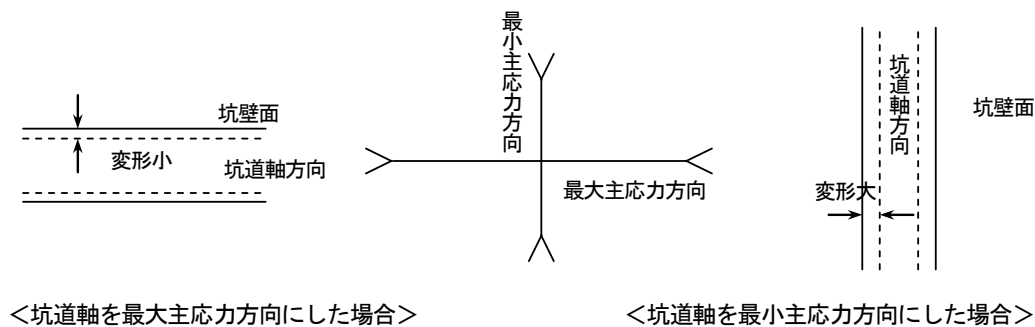


図 6.3.3-7 主応力方向と坑道軸方向の関係

地下水流動に対しては、地下施設の形状の短辺方向が主要地下水流動方向と直交する方が、地下施設を通過する地下水流量は少なくなり、放射性物質の移行の観点からは有利であると考えられる(図 6.3.3-8) (JNC, 1999b)。

総延長が最も長くなる処分坑道の坑道軸はこれらに加えて、力学場や水理場に影響を与える岩盤中の亀裂の状況なども踏まえて設定する。なお、上記の力学安定性および地下水流動方向の観点から有利と考えられる処分坑道の方法が違っても想定されるが、そのような場合にはそれぞれの得失を総合的に判断し、適切な地下施設レイアウトを見出すことになる。

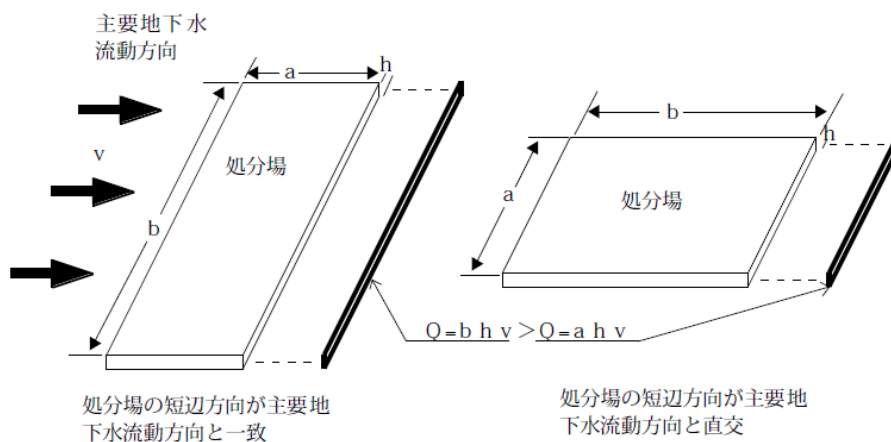


図 6.3.3-8 地下水流動方向と処分場の方向
(出典：JNC, 1999b)

また、主要・連絡坑道は、作業時の安全確保、管理区域の明確化の観点から、各処分パネルに対して独立した物流動線が確保できるように配置する。坑道の曲率や坑道同士の接続部の角度などは、操業機械の回転半径なども考慮して決定する。

アクセス立坑および斜坑の本数は、地下施設における建設・操業・閉鎖作業を円滑かつ安全に実施するために必要な本数とする。また、アクセス坑道は主要な地下水流動方向を踏まえ、天然バリア中の放射性物質の移行抑制の観点から、適切な位置に配置する。

(2) 地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設

地層処分低レベル放射性廃棄物処分では、処分坑道の本数が高レベル放射性廃棄物処分のように多くはないため、処分パネルという概念ではなく、処分坑道を以下の観点で配置する（NUMO, 2011b）。

- ・ 重要核種を含むグループ1, 2の処分坑道を主要な地下水の流れに対して上流側に配置して、緩衝材がセメント系材料の溶出成分の影響を受けないようにするとともに、放射性物質の移行距離を長くする。
- ・ 硝酸塩を含むグループ3の処分坑道は、ほかのグループの人工バリアおよび天然バリア特性に及ぼす影響をできるだけ排除するように、ほかのグループから主要な地下水の流れの向きに対して水平方向に離して配置する。

硬岩系岩盤の深度 1,000m における地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設のレイアウト例を図 6.3.3-9 に示す。

高レベル放射性廃棄物処分は、処分パネル別に建設、操業、閉鎖作業を並行して進めるのに対し、地層処分低レベル放射性廃棄物処分場は地下施設全体として、建設・操業・閉鎖と順番に進める。操業とほかの作業とは錯綜しないので、アクセス坑道、主要坑道を放射線管理の観点から作業別には分けない。

アクセス立坑および斜坑の本数と配置は、高レベル放射性廃棄物処分と同様の考え方で設定する。

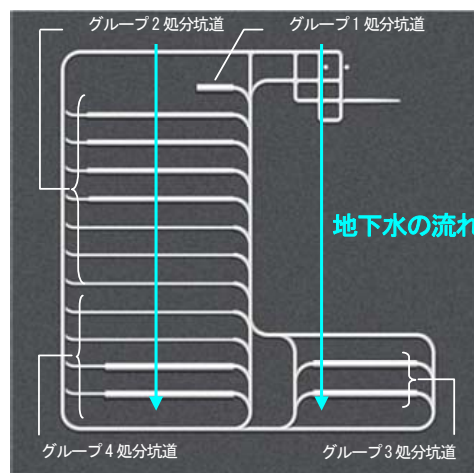


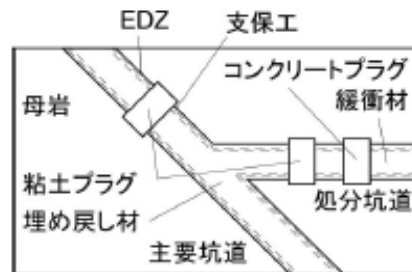
図 6.3.3-9 地下施設レイアウト例（地層処分低レベル放射性廃棄物処分場）
(NUMO, 2011b に基づき作成)

6.3.3.4 埋め戻し・プラグの設計

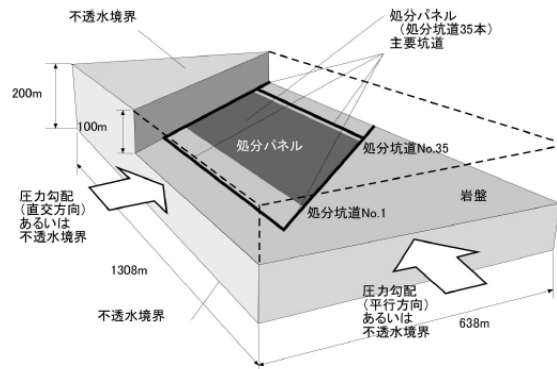
埋め戻し・プラグの設計では、埋め戻し材、プラグの仕様とそれらの設置位置を設定する。6.2 で述べたとおり、坑道の埋め戻し材と止水プラグには、閉鎖後の地下水の移流による放射性物質の移行の抑制など、力学プラグには緩衝材の密度低下につながる膨潤の低減などを期待する。

具体的には、坑道の残された空間を埋め戻し、必要に応じて掘削影響領域などを止水プラグで分

断することや、緩衝材の移動・流出を防止する力学プラグを処分坑道端部などに設置する。設計の妥当性については、埋め戻し材やプラグなどの単体評価ではなく、これらを組み合わせた閉鎖システム全体として評価する。NUMO は JAEA と共同で閉鎖システム性能に関する検討を進めている (NUMO, 2006) (図 6.3.3-10)。



(a) 坑道交差部



(b) 解析モデルの境界条件

図 6.3.3-10 閉鎖システムの評価で考慮したプラグ，埋め戻し材の配置関係，および処分パネル規模の解析で考慮した境界条件の設定 (出典：NUMO, 2006)

また、アクセス坑道の埋め戻し終了後、アクセス坑道の坑口にプラグが設置される。このようなプラグには、埋め戻し材の膨潤応力に抵抗でき、人間の不用意な侵入を防ぐという観点から、第2次取りまとめでは強度の高いコンクリートプラグが適するとされている (JNC, 1999b)。

6.3.4 地上施設の設計

地上施設は、廃棄体を受け入れ、地下に搬送して定置するための準備と事業管理に必要な施設、また、地下施設で行われる作業を支援するための一群の施設である。

また、地下施設の建設で発生した掘削土 (岩や土砂) を再び埋め戻し材として利用する場合には、再利用するまでの間保管しておくための場所が必要となる。サイト条件によっては廃棄物を受け入れるための港湾施設や専用道路も処分場の敷地内に設置する場合がある。

地上施設の全体配置として、高レベル放射性廃棄物処分場と地層処分低レベル放射性廃棄物処分場を併置する場合のイメージを図 6.3.4-1 に示す。

このように地上施設の役割は多様であるが、必ずしも集中して配置する必要はなく、地形などの条件の特徴を踏まえて配置することができる。また、地上施設は地下施設の建設に先立ってその多

くを建設する必要があるとともに、処分場の閉鎖に伴い最終的には撤去されることになる。なお、地上施設の建設や操業には、原子力施設や一般の産業施設に適用されている技術を基本的に適用することができる。

地上施設は、① 地上施設設置区域の選定、② アクセス方法の検討、③ 施設群ゾーニングの検討、④ 造成計画・施設設計の手順で設計する。

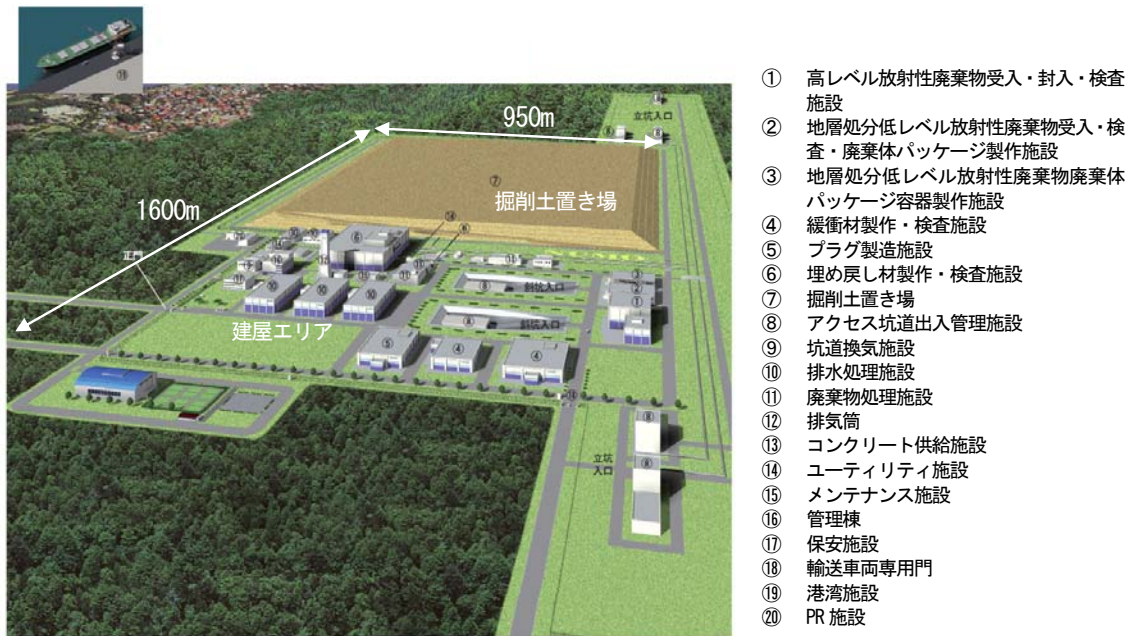


図 6.3.4-1 地上施設イメージ図

(出典：NUMO, 2011b)

(高レベル放射性廃棄物，地層処分低レベル放射性廃棄物処分場を併置する場合)

6.3.4.1 地上施設設置区域の選定

地上施設設計では、まず、地上施設の設置区域を選定する。設置区域の選定では、応募区域の地理・地形などの自然環境条件や、地すべり、津波などの自然災害の発生の可能性、また、周辺の土地利用状況などの社会環境条件を考慮する。さらに、廃棄体を輸送するための周辺のインフラ設備、例えば港湾、道路などの整備状況を確認し、それらが使用可能かどうかを検討するとともに、廃棄体の概略輸送経路を検討する。また、インフラ設備が未整備の場合、それらの拡充や補強、新設などにより廃棄体輸送経路が確保できるか否かを検討した上で設置区域を選定する。

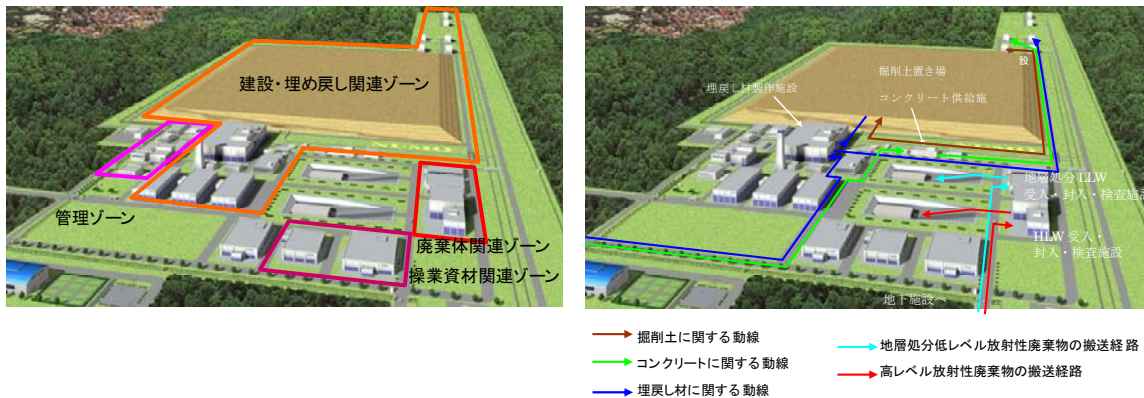
6.3.4.2 アクセス方法の検討

地下施設の深度・エリアの設定と並行して地上施設から地下施設へのアクセス方法、すなわち立坑、斜坑、それらの組み合わせなどと坑道の本数を検討する。この後、地下施設の設計は、坑道細部の設計と地下施設レイアウトの設定へと進むが、地下施設のレイアウトの検討が進んだ時点で、アクセス方法および坑口位置の詳細について再検討し最適化していく。

6.3.4.3 施設群ゾーニングの検討

廃棄体を取り扱う施設，操業関連資材を取り扱う施設，建設・閉鎖に関する施設および管理に関

する施設などについて、それぞれが担う作業が効率的に実施できるよう施設群を用途に応じてゾーニングする。図 6.3.4-2 には、廃棄物運搬と建設・閉鎖作業の動線を示す。その際、廃棄物の受け入れから地下施設への払い出しまでの作業動線、あるいは、建設・操業・閉鎖・管理などに必要な物資や作業動線が交わらないように配慮する。地層処分低レベル放射性廃棄物と高レベル放射性廃棄物を併置処分する場合には、共有できる施設を統合するなど合理化を図る。例えば、管理ゾーンおよび建設・埋め戻し関連ゾーンの施設は基本的には共有する。



(a) 地上施設のゾーニング

(b) 作業動線

図 6.3.4-2 地上施設のゾーニングと作業動線（併置処分）

6.3.4.4 造成計画・施設設計

地上施設の中で最も大きな面積を占めるのは掘削土置き場である。掘削土置き場に仮置する土量は、サイトによっては1,000万 m^3 オーダーになる（NUMO, 2011b）。地下施設の建設工事で発生する掘削土は、地下施設の埋め戻し材料として再利用することが考えられるため、掘削と同時に地上へ搬送し、再利用するまでの期間、地上施設の敷地内に仮置きする。地上施設の造成計画の際には、掘削土の風雨による飛散や流出などの防止対策を講じ、周囲の環境への影響を極力低減する対策を実施する。また、地上施設の各施設は、それぞれの施設の要件に応じた設計を行う。

6.3.5 高レベル放射性廃棄物処分施設と地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設を併置する場合の留意点

高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の地下施設を併置する場合の地下施設レイアウト例を図 6.3.5-1 に示す（NUMO, 2011b）。この例では、両施設の処分坑道を地下水の流れの向きに対して直交するように配置し、アクセス坑道を上流側に配置している。

高レベル放射性廃棄物処分施設では、各処分パネルの作業を独立して行うこととし、地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設では、建設・操業（廃棄物搬送以外）・閉鎖作業を順に行うことを想定している。

なお、両施設へのアクセスを別系統にすることで、それぞれの施設における建設・操業・閉鎖などの作業が錯綜しないようにする。

地質環境の条件によっては、まとまった岩体の大きさを確保できない可能性もあり、その場合は望ましい岩体の分布に従って、両処分施設の位置関係、ならびに高レベル放射性廃棄物処分施設の場合の処分パネルや地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設の各坑道の配置などを考えることとな

る。

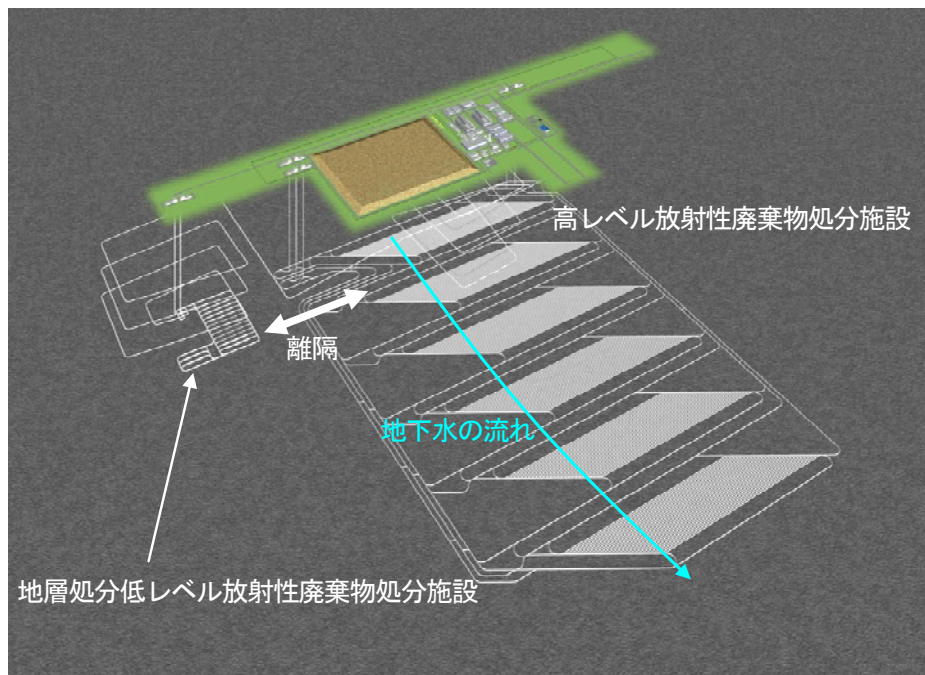


図 6.3.5-1 併置処分地下施設レイアウト例
(NUMO, 2011b を編集)

高レベル放射性廃棄物処分施設と地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設を併置する場合には、それぞれの廃棄物の特性などが違うことに起因する有意な相互影響を回避することが重要である (NUMO, 2011b)。地層処分低レベル放射性廃棄物と高レベル放射性廃棄物とを相互に近接して処分するとした場合の相互影響因子として、熱、水、応力、化学および放射線を考慮し、相互に影響を与えることのないように両施設を離して配置する。

原子力委員会 (2006) によると、熱に関しては、高レベル放射性廃棄物処分施設と地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設の距離が近いときには相互に熱影響があるが、両施設を 50m 程度離すことによって他方の施設に起因する温度上昇はほとんどなくなることが示されている。これは、グループ 2 のハル・エンドピースを対象に検討されている。また、化学的影響については、地層処分低レベル放射性廃棄物に含まれる有機物、硝酸塩、あるいは充填材などに使用されるセメントによる高アルカリ性地下水が高レベル放射性廃棄物処分場へ与える影響を検討対象としている。これらの影響因子の経時影響を図 6.3.5-2 に示す。図 6.3.5-2 では、地下水流動方向に対して、低レベル放射性廃棄物処分施設の横方向と上流方向へのそれぞれの影響が及ぶ距離を時間的に示したものである。同図に示すように、影響範囲が最も遠方まで及ぶと評価された因子は硝酸塩である。硝酸塩は高レベル放射性廃棄物処分施設のオーバーパックの腐食への影響が懸念されるが、オーバーパックの健全性が期待される 1,000 年では、その影響範囲は 50m 程度である。実際のサイトでは、地質環境特性に応じて、適切な離隔距離を考慮してそれぞれの施設を配置することになる。

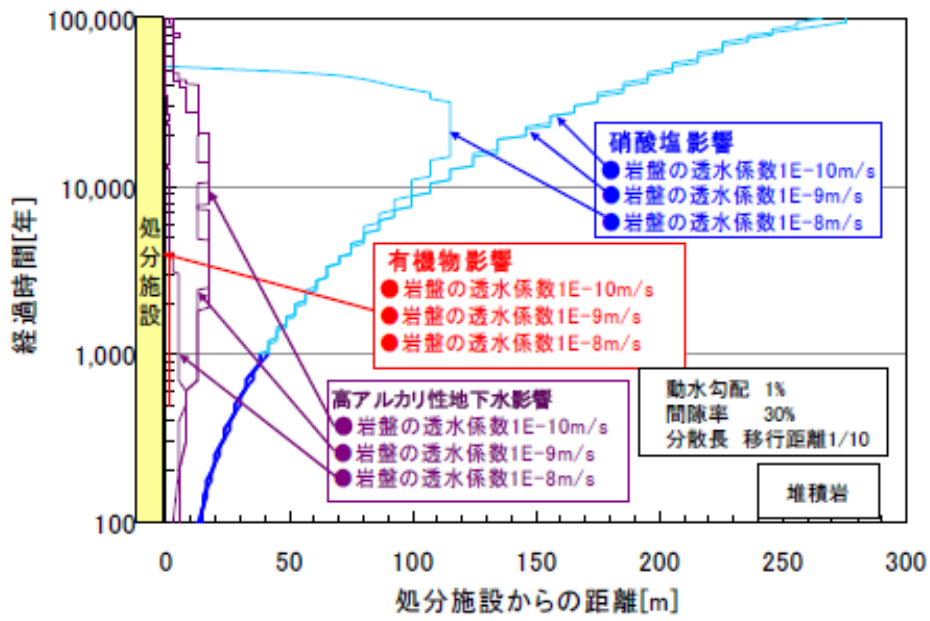


図 6.3.5-2 相互影響因子の影響範囲の時間的变化
 (出典：経済産業省・JAEA, 2007)

6.4 処分場の建設・操業・閉鎖

本節では、6.3 で述べた考え方に従い設計される処分場の建設・操業・閉鎖に適用する技術の概要を説明する。第2次取りまとめでは、処分場の建設・操業・閉鎖について概略の工程が示されている。NUMO は、それらを事業者の視点から分析し、課題を整理するとともに、効率性、品質向上、事業期間中の安全確保などに関する検討を進めており、それらの内容についても併せて説明する。

6.4.1 処分場の建設

6.4.1.1 地上施設の建設

地上では、まず敷地の造成や敷地内道路の整備を行い、事業期間を通じて所要の電力や水などを供給するためのユーティリティ施設や管理棟などの共用施設を建設する。次に、本格的な地下施設建設に必要な坑道内の換気施設や湧水の処理施設などの工事を進め、その後地下施設の建設を開始する。これらの地上施設の建設には、一般産業施設や原子力施設の建設に用いられている既存技術が適用できると考えており、その際は周辺環境保全に十分に努める。

6.4.1.2 地下施設の建設

(1) 高レベル放射性廃棄物処分施設

(i) 掘削技術

地下施設はアクセス坑道、連絡坑道および処分坑道から構成される坑道群であり、6.3.3 に述べた設計方法に基づき設定された仕様を満足するように建設される。地下施設の建設は、避難経路や坑道換気経路の確保など、作業安全と良好な作業環境を常に確保しながら、岩盤の状態や工事の進捗に応じた適切な方法を用いて進める。

坑道掘削については、地質環境条件、作業の安全性や効率性、坑道周辺岩盤の緩みを抑えることを考慮して、類似の土木工事などで実績のある掘削工法の中から、立坑、斜坑、水平坑道のそれぞれの特徴に適した施工方法を適用する。例えばトンネルボーリングマシン（Tunnel Boring Machine）工法（図 6.4.1-1）は、地質環境条件が良好で掘削延長距離が長い場合には、掘削効率が高く有望な掘削工法である（日本トンネル技術協会、2000）。また、基盤研究開発では、幌延、瑞浪の深地層の研究施設において、坑道掘削時の調査研究が進められており、ショートステップ工法により安全に立坑の建設が進められている（JAEA、2008a）（図 6.4.1-2）。

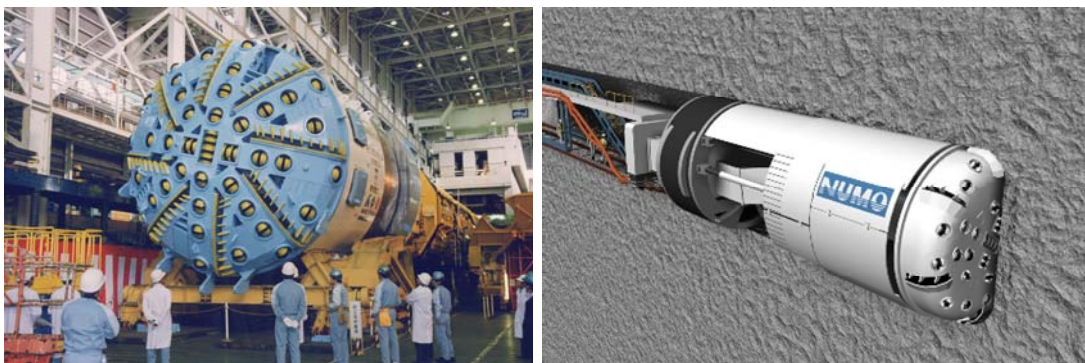


図 6.4.1-1 トンネルボーリングマシンの外観例（左）と掘削イメージ（右）

（左）写真提供：東京電力株式会社 （右）出典：NUMO、2002）

掘削工法

換気・西立坑：機械掘削工法

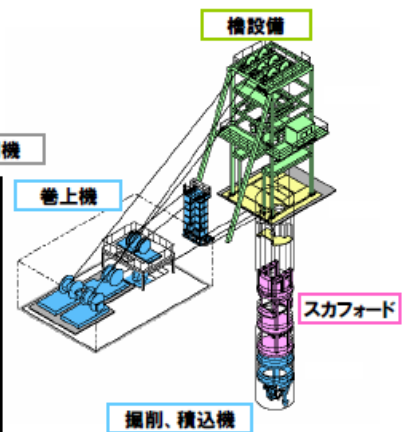
東立坑：発破工法

換気ダクト スカフォード 覆工コンクリート

換気立坑内部状況
(坑底を望む)**支保工法**

ショートステップ工法

積込機 小型電動バックホウ 掘削機

掘削、積込機
(換気立坑：140m水平坑道との接続部)

槽(やぐら)設備の概要図

図 6.4.1-2 ショートステップ工法による立坑の掘削

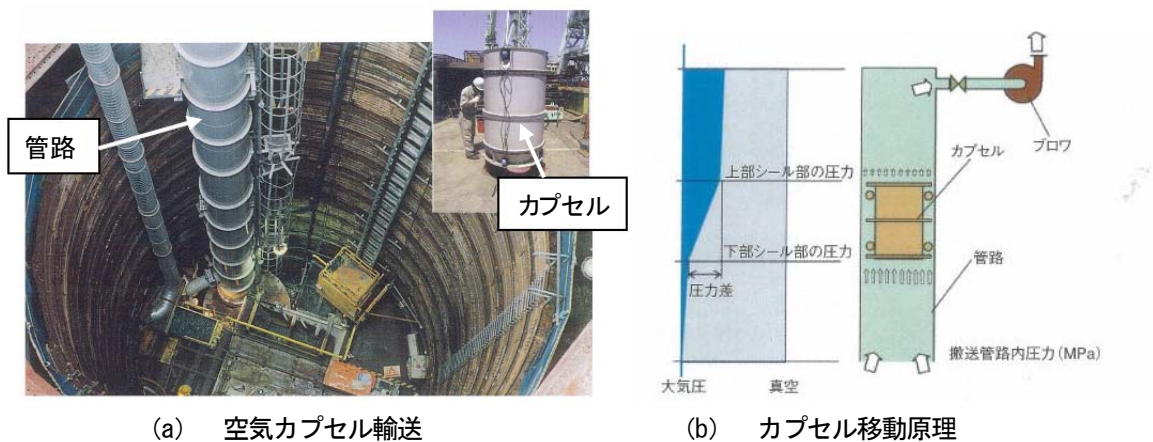
(出典：JAEA, 2008a)

(ii) 工程確保の観点からの取り組み

地下施設の建設工程について、第2次取りまとめでは、処分場全体を六つの処分パネルに分割し、一つの処分パネルを10年間で建設する工程が示されている。この工程は、1日24時間、連続的かつ円滑に建設されることを前提としており、想定ケースのうち最も工事数量の多い堆積岩における処分孔竖置き定置方式の場合には、13本の処分坑道を並進して掘削することとしている(JNC, 1999b)。

実際の地質環境では、地質の不良部などに遭遇し、その個所の施工に相当の時間を要することも想定される。NUMOは、一般労働安全への配慮や工程確保の観点からも、適切な作業動線の確保、良好な作業環境の維持、緊急時の避難経路の確保、工程計画に適切な裕度を持たせることが必要であると考えている。地下施設の建設では、立坑掘削と処分坑道掘削が工程上のクリティカルパスとなり、加えて処分孔竖置き定置方式の場合には処分孔の掘削も工程上のクリティカルパスとなる。このため、それぞれの施工効率を向上させることが必要となる。

掘削土(ずり)の搬出に関して、立坑掘削時にはワイヤロープとずりキブルを用いた仮設的な搬送方式が一般的であるが、ずり出し能力は高くはない。そこで、立坑の完成後、ずり出し設備をスキップ方式などずり出し能力の高い本設設備に変更し、地下施設の坑道群建設時における大量のずり出しに対応する。アクセス坑道の断面や本数が限られた中での大規模地下施設の建設では、立坑内のずり出し能力を従来技術に対して向上させることが有効であり、例えば空気カプセル輸送技術(図6.4.1-3)の立坑内ずり搬送への適用性検討などを行っている(原環センター, 2005)。空気カプセル輸送技術は、被輸送物を積載したカプセルを管路内に入れ、ブローで管路内の空気を吸引することにより発生するカプセル上下間の差圧を駆動力としてカプセルを移動させる技術である。本技術は、すでに資材輸送用のパイプラインシステムや、掘削土搬送に実用化されている技術である。



(a) 空気カプセル輸送

(b) カプセル移動原理

図 6.4.1-3 空気カプセルによる鉛直ずり出し技術

(出典：原環センター，2005)

処分坑道横置き定置方式の場合には関係しないが、処分孔縦置き定置方式の場合には、処分坑道の掘削に引き続き処分孔を掘削することになり、処分孔の掘削効率の向上が工程確保のために重要となる。処分孔の深さは一つの処分孔に廃棄体1体を定置する場合は4m程度になる。フィンランドのオルキオトやスウェーデンのエスポ地下研究所では、一軸圧縮強度が200MPa程度の硬岩を対象に直径1.75m、深さ8m程度の処分孔掘削の実証試験が行われている(図6.4.1-4; Christer and Åsa, 2002)。

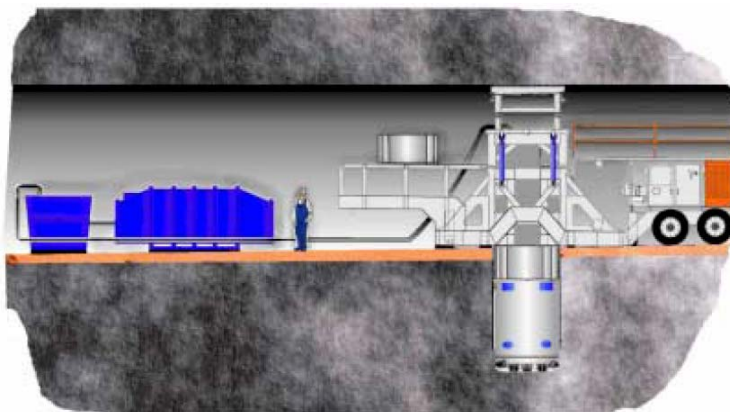


図 6.4.1-4 スウェーデン，エスポ地下研究所で実施された処分孔掘削

(出典：Christer and Åsa, 2002)

スウェーデンの実証試験では、処分孔切羽のずりを流体輸送により揚土する全断面掘削機が使われ、14孔での処分孔掘削の平均的な掘削速度は2.5時間/mであった。処分孔掘削では、掘削以外にも機械の移動やセット、掘削後の機械の整備や調整などの時間が必要であると報告されている(Christer and Åsa, 2002)。

一方、第2次取りまとめでは、1日あたり1本の処分孔を掘削するという設定で工程が検討されている(JNC, 1999b)。上記のスウェーデンにおける実績などを参考にすると、第2次取りまとめ

の工程を満足させるため、効率的に処分孔を掘削することができる技術を整備しておく必要があり、NUMOでは処分孔の高速掘削機械の概念設計などを行っている。

鉛直下向きの掘削は、水平掘進と異なり掘削進行方向にずりが溜まるため、カッターディスク面で切削されたずりをクラムシェルバケットにより適宜排土することが困難で、カッターがスタックし易く損耗が激しいという課題がある。このような課題を踏まえ、スウェーデンの事例では掘削ずりに水を混合してスラリー化し、切羽部から上方にスラリー輸送することによって排土するシステムが利用されている。しかしながら、この方法ではスラリーポンプの配管システムなどが必要であり、段取替えに要する時間などを考慮すると、短時間に処分孔を掘削して次の処分孔掘削を開始するのは難しいと考えられる。そこで、NUMOでは、カッターヘッドとカッターホイールが直交して回転する二軸回転機構を採用した掘削・ずり搬出機械の概念を検討している(図 6.4.1-5)。この場合、カッターホイールに排土機能を持たせることにより掘削ずりをスラリー化することなく、乾いた状態で排土口からカッターホイール内に収土し、バキュームポンプで上部へ排土することが可能となる。また、カッターホイールが掘削機能も担っており、掘削効率が向上する。乾式でずりの揚土が可能であることから、ずり出し設備がコンパクトになり、機械設備の構内移動や準備時間も短縮される。

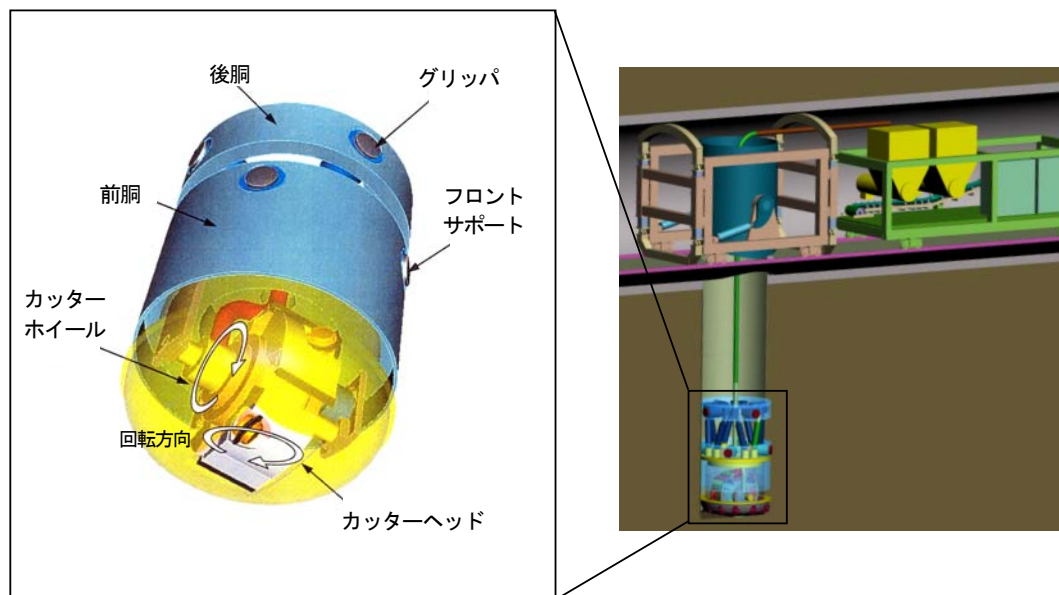


図 6.4.1-5 2 軸回転機構を有する処分孔掘削機

(2) 地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設

アクセス坑道である立坑や斜坑、主要坑道や連絡坑道の掘削工法は、基本的に高レベル放射性廃棄物処分施設の坑道掘削方法と同様である。処分坑道の断面が、高レベル放射性廃棄物の処分坑道と比較して大きくなるため、一度に全断面を掘削するのではなく、断面を分割して掘削と支保工構築を進める方式が有効である。例えば、円形坑道では上半、下半に分割することが考えられる。図 6.4.1-6 は、下半の掘削状況のイメージを示したものである。実際は、上半の掘削を数十 m 程度先行して進め、坑道延長方向で作業が錯綜しないようにして、上半と下半の作業を並行して進める。比較的大きな断面の坑道建設に際しては、国内の地下発電所、石油地下備蓄基地など大規模地下空洞

の施工実績も参考にしつつ、適切な施工方法を採用していく（図 6.4.1-7）。

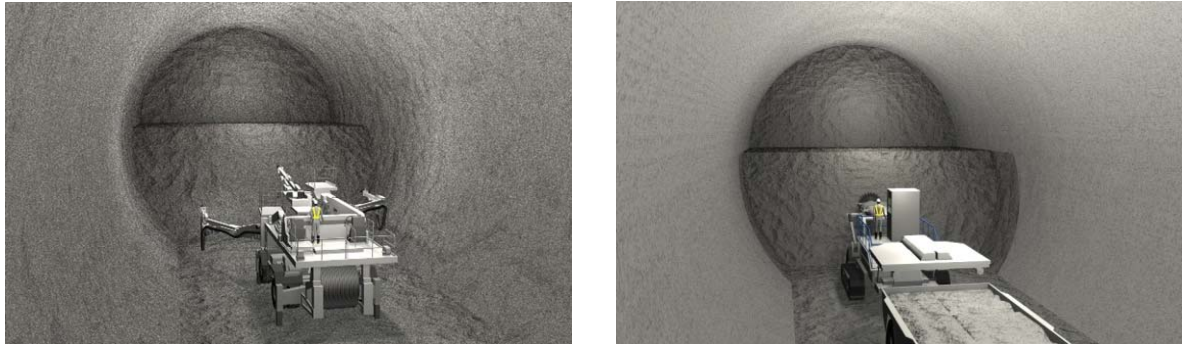


図 6.4.1-6 円形処分坑道の掘削イメージ（左；発破掘削，右；機械掘削）
（出典：NUMO，2011b）



図 6.4.1-7 大空洞の建設時の様子
（写真提供：東京電力株式会社）

グループ1と2に分類される廃棄体を処分する処分坑道には、人工バリアとして緩衝材を敷設することを基本に考えている。底部緩衝材については、廃棄体定置前に敷設を完了させる必要がある。緩衝材は、処分場の閉鎖後長期の安全性を確保するために施される重要な人工バリアである。緩衝材の施工方法については、国内外において鋭意技術開発が進められており、代表的な方式として原位置施工方式やブロック定置方式がある。基盤研究開発では、余裕深度処分を対象に実規模かつ実環境下において人工バリアの施工技術と品質管理方法の確立などを目的とした試験が実施されており、ここで培われた技術は地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設の人工バリアの施工とその品質管理への適用が可能であると考えられる。図 6.4.1-8 は、試験の一項目として実施された底部緩衝材施工の状況であり、緩衝材を撒き出し、大型振動ローラで締固め施工した事例である。（原環センター，2008a）



図 6.4.1-8 底部緩衝材施工
(出典：原環センター，2008a)

このような工法により底部緩衝材の敷設が終了すると、構造躯体の構築へ移る。構造躯体は、鋼製あるいは鉄筋コンクリート製が考えられる。比較的大断面の空洞とはいえ、空洞内での建設作業には空間的な制約が多く、そのことを考慮した施工方法を採用する。鋼製の構造躯体に対しては、鋼材を処分坑道内に搬入し、それぞれの部材を現地で溶接あるいはボルト接合により組み立てる。また、鉄筋コンクリート製の構造躯体については、足場、鉄筋、型枠を現地で組み立て、コンクリートを打設するという一般の鉄筋コンクリート構造物の施工を基本としつつ、地上で鉄筋コンクリート部材を製作し地下で組み立てるプレキャスト施工の併用も考えられる。緩衝材を必要とするグループ 1、2 の処分坑道では、底部緩衝材上に構造躯体を施工するため、作業従事者や施工機械などが底部緩衝材の上を移動することに対して、適切に緩衝材の養生を行う必要がある。NUMO では、これらの実績や要件を踏まえて建設方法の最適化を図っていく。

6.4.2 処分場の操業

6.4.2.1 高レベル放射性廃棄物処分施設

操業作業は、地上施設における廃棄体の受け入れ・封入・検査、地上から地下への搬送、処分坑道内への定置の順に作業が行われる。

(1) 地上での作業

ガラス固化体の受入開始により処分場の操業が開始される。地上施設での操業においては、ガラス固化体の受入検査やオーバーパックへの封入・検査などの技術、放射線管理の面などから、専用輸送容器に入れられたガラス固化体の受け入れから地下への廃棄体搬送装置への積み込みまでの工程が重要な作業となる。

(i) ガラス固化体の受け入れ

(a) ガラス固化体の処分場への輸送

ガラス固化体は、中間貯蔵施設において 30～50 年間ほど冷却貯蔵された後に、発熱量や放射能レベル、寸法など必要な検査が行われた上で、専用輸送容器に収納されて処分場へ向け搬出される。ガラス固化体の輸送には、海上輸送および陸上輸送の実績がすでにある。

放射性物質の輸送については、IAEA が「放射性物質安全輸送規則」(IAEA, 1996 ; 以下, IAEA

輸送規則という)を定めており、各国ともこれを国内法令に取り入れて安全規制を実施している。

わが国でも IAEA 輸送規則を取り入れて放射性物質の輸送に関する法令が定められており、ウランやプルトニウム、原子力発電に用いる原子燃料やその使用済燃料、原子力発電所や再処理施設から発生する放射性廃棄物などの輸送に関する法令体系(以下、輸送関係法令という)が整備されている。

輸送関係法令に基づく安全規制では、輸送容器の線量当量率については、輸送容器表面において 2mSv/h、表面から 1m の位置において 0.1mSv/h を超えないことが技術基準として定められている。ガラス固化体は人間が近づくことができないほど高い放射線を発するものであるため、ガラス固化体の専用輸送容器はこの基準を満足する遮へい能力を有するように設計・製作される。

(b) 地上施設での受入作業

処分場へ輸送されたガラス固化体(輸送容器)は、専用輸送車両に積載された状態のまま高レベル放射性廃棄物受入・封入・検査施設へ搬入される(図 6.4.2-1)。同施設内では、輸送途上における輸送容器やガラス固化体への損傷などの異常の有無について検査を行い、オーバーパックへの封入前にその健全性を確認する。



図 6.4.2-1 返還ガラス固化体の輸送に使用されている輸送車両
(写真提供：日本原燃株式会社)

(ii) 廃棄体の製作・検査

受入検査に合格したガラス固化体は、①オーバーパックへの収納、②オーバーパックの上蓋溶接、③オーバーパック溶接部の検査の工程を経て、廃棄体となり地下施設へ搬送される。これら一連の作業は遠隔操作で行う。オーバーパック溶接装置と、超音波探傷試験によるオーバーパック溶接部の検査装置の使用を想定した、廃棄体製作概念を図 6.4.2-2 に示す。オーバーパックの遠隔溶接・検査に関する技術の整備状況は 6.6.4.2 で説明する。

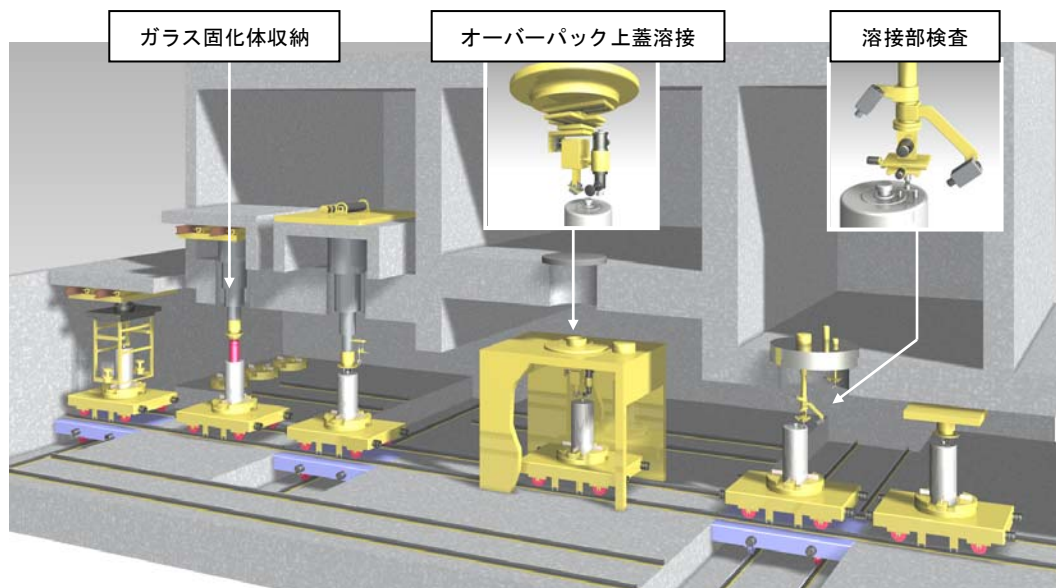


図 6.4.2-2 遠隔操作による廃棄体のオーバーパックへの封入工程の概念図
 (炭素鋼単体オーバーパックの場合)
 (出典：NUMO, 2002)

(iii) 緩衝材の製作

緩衝材は人工バリアの一つとして廃棄体とともに処分坑道へ定置する。両者を適切に地下へ搬送し定置作業が滞ることがないように、緩衝材の製作設備の設計、製作工程の調整・管理を行う。緩衝材の形態としては、6.6.4.3 で説明するように、ブロック方式、原位置施工方式（原位置締固め方式、ペレット充填方式、吹付方式）などの技術の整備が進んでいる（原環センター, 2003b, 2004b, 2005, 2009b など）。どのような施工方式とするかについては、地質環境特性、工学的実現性、長期安全性、経済性などを総合的に評価した上で決定する。

(iv) 埋め戻し材などの製作

廃棄体と緩衝材の定置が完了した処分坑道（処分坑の上）は、適切な時期に埋め戻される。また、閉鎖時には主要・連絡坑道など、すべての坑道を順次埋め戻していく。埋め戻しに用いる埋め戻し材は、採用する埋め戻し工法などによってさまざまな仕様のものが考えられるが、基本的には埋め戻し後長期にわたって地下水が流れにくいように設計し、埋め戻し材製作・検査施設において製作する。

(2) 地下での作業

(i) 廃棄体および緩衝材の地下への搬送、定置

地上施設内での検査終了後、廃棄体を地下に搬送し処分坑道内に定置する。図 6.4.2-3 に、地上施設から定置位置までの廃棄体搬送の流れを概略的に示す。廃棄体の搬送に使用するアクセス坑道の形態や定置方式の組み合わせに応じ、搬送途中に廃棄体を縦方向または横方向へ傾転する。廃棄体の搬送装置および定置装置は、採用する搬送方式や定置方式などに応じて遠隔制御による無人または有人での運転とすることが考えられ、いずれの場合においても廃棄体からの放射線を遮へいするための構造および設備を設ける。

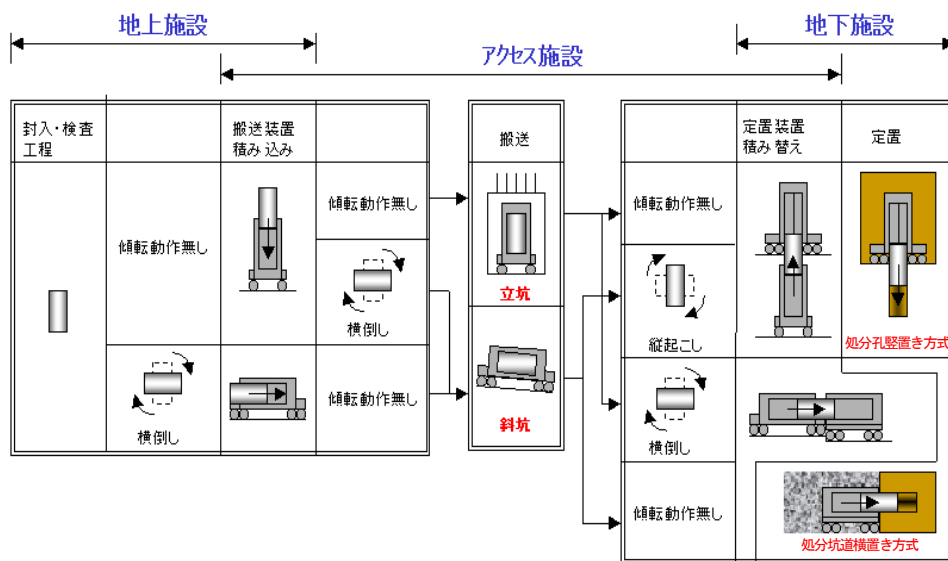


図 6.4.2-3 廃棄体の搬送と定置の流れ
(原環センター, 2001 を一部修正)

処分孔縦置き定置方式の場合について、緩衝材ブロック方式を例とした廃棄体および緩衝材定置作業の手順の概念を図 6.4.2-4 に示す。緩衝材定置装置を用いて、地上施設で製作した緩衝材ブロックを処分孔下部から順に所定の高さまで定置する。その後、廃棄体定置装置を用いて、廃棄体を緩衝材の内側に定置する。再び、緩衝材定置装置を用いて緩衝材を処分坑道底面の高さまで定置し、一つの処分孔の定置作業が完了する。廃棄体と緩衝材の搬送および定置をどのような方式で行うかについては、6.5.2 で説明するように地質環境の条件、安全性、作業性、経済性などを総合的に検討して決定することになる。

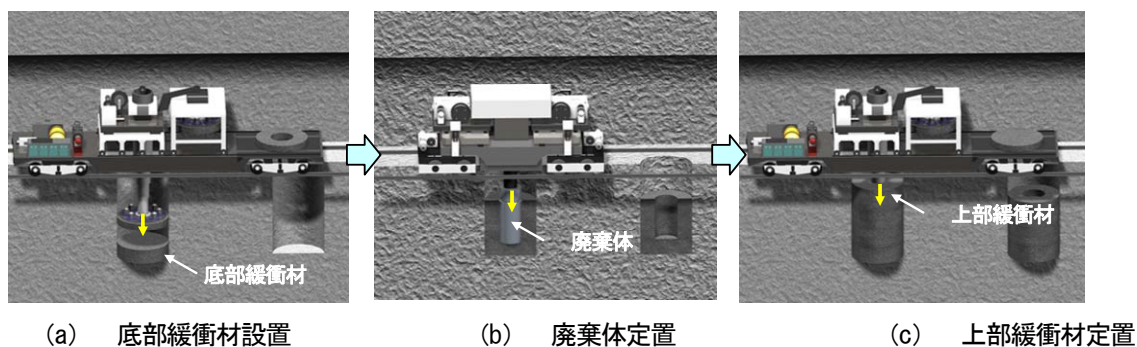


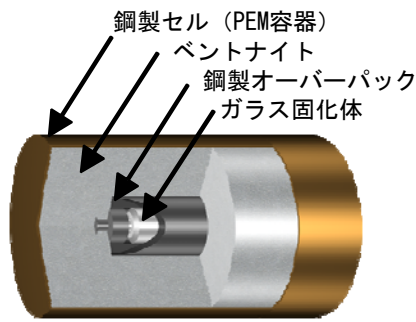
図 6.4.2-4 緩衝材および廃棄体定置手順 (縦置き定置方式の場合)
(出典: NUMO, 2002)

(ii) 緩衝材の品質の信頼性向上と作業の効率性向上

処分坑道横置き定置方式の場合は、緩衝材外径とほぼ同程度の内径の処分坑道内で、緩衝材と廃棄体を数100m水平移動させ、所定の位置に定置する必要がある。この場合、処分坑道内の限定された作業空間で、緩衝材と廃棄体を交互に搬送後、確実に定置するための遠隔搬送・定置技術とともに、位置決めなどの定置精度の確保が考慮すべき点として認識されてきた。また、廃棄体底部の緩

衝材定置, 廃棄体定置, 上部緩衝材定置と複数の搬送装置が交互に処分坑道を往来するという搬送・定置作業には, 物流の観点からの改善検討を加えてきた。

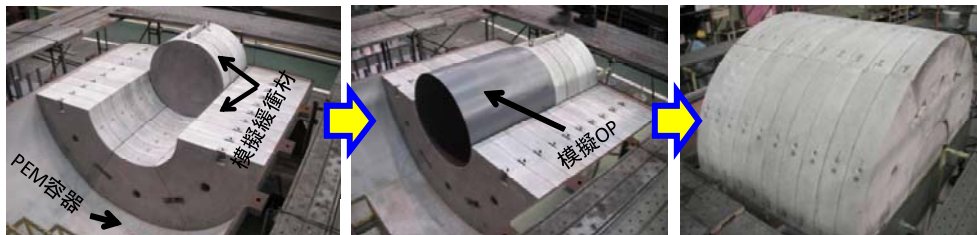
これらについて, NUMOは地上施設であらかじめ緩衝材と廃棄体を鋼製セル内に格納し, 地下施設へ鋼製セルを搬送・定置するPEM (Prefabricated Engineered Barrier System Module) 方式を, 従来から検討が進められてきたブロック定置方式, ペレット充填方式などと並び有力な定置方式であると位置付けて検討を進めている。図 6.4.2-5には, PEM容器の構造および基盤研究開発機関にて製作されたPEM容器と模擬緩衝材と模擬オーバーパックを用いたPEM容器内の組立確認試験状況を示す。PEMの利点は, 地上施設での組立てによる品質の信頼性向上と搬送作業の効率化が期待できる点である。一方, PEMは廃棄体, 緩衝材, 鋼製セルを含めて約35tと比較的重量が重いため, 空間的制約が大きい処分坑道内での水平方向への搬送・定置の機構, PEM容器と処分坑道との隙間の充填技術に着目し, 基盤研究開発機関において技術開発が着実に進められている (6.6.4.3参照)。



(a) PEMの構造



(b) PEM容器の製作例



下半模擬緩衝材ブロックを PEM容器に設置したところ。

模擬オーバーパック (OP) を設置したところ。

上半模擬緩衝材ブロックを組み上げたところ。

(c) PEM組立試験

図 6.4.2-5 PEM方式

(b) 出典：原環センター，2009c (c) 原環センター，2008b を編集，一部加筆)

(iii) 物流検討

建設・操業，および次項で説明する閉鎖では，地下施設内に多くの物流が発生する。各種の作業を円滑に実施するため，NUMO は，地下施設の建設・操業・閉鎖にかかわる物流を体系的に検討している。操業作業は，高レベル放射性廃棄物処分では，図 6.4.2-6 に示すタイムチャート例のように，1日あたり5体の廃棄体を定置する場合，次のような特徴を持つ。

- 一つの廃棄体について地上から処分坑道内定置まで作業が連続しており，並行して作業が進められない。
- 廃棄体の地下での搬送と定置装置が一体化しており，処分坑道入り口での積み替えがない。
- アクセス搬送装置から地下搬送定置装置へは坑底施設で積み替えるが，搬送定置装置への積み替えのため，非常に時間を要してアクセス搬送装置が拘束され地上に戻るまでに5時間以上必要である。
- 搬送定置装置の系列数は廃棄体数と同じである。
- 緩衝材を1日に5廃棄体分定置しなければならない。
- アクセス坑道の延長増加や定置方式を横置きに変更した場合にさらに時間がかかる。

このような操業を効率的に行うには，坑道内の物流を最適化することが重要であり，NUMO は，種々のバリア形態や定置方式についての物流を検討している。例えば，坑底に廃棄体の仮置きエリアを設けることは，アクセス坑道での搬送と坑道での搬送定置を独立して行うことを可能とし，物流の有効な改善策の一つである。

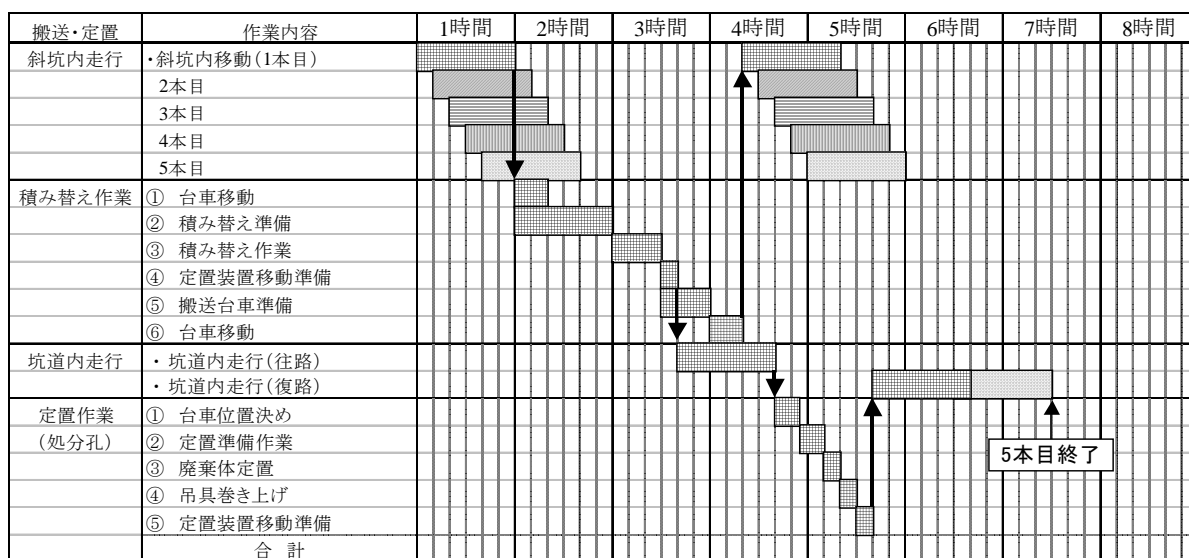


図 6.4.2-6 高レベル放射性廃棄物処分場における廃棄体の搬送・定置タイムチャートの例
(処分孔縦置き方式)
(原環センター, 2001 に一部加筆)

6.4.2.2 地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設

(1) 地上での作業

地層処分低レベル放射性廃棄物は、貯蔵施設において発熱量や放射能レベルおよび寸法など必要な検査が行われた上で、専用輸送容器に収納されて処分場へ向け搬出される。廃棄体の中には比較的高い放射線を発するハル・エンドピースなどが存在するため、輸送容器からの廃棄体取り出し以降の作業は、遮へい対策を講じた区域内で、遠隔操作により実施する。

受入検査に合格した廃棄体は、①廃棄体パッケージ容器への収納、②モルタル充填、③廃棄体パッケージの検査の工程を経て地下施設へ搬送される。これら一連の作業は遠隔操作で行う。

(2) 地下での作業

(i) 廃棄体の搬送

地上施設から地下施設まではアクセス立坑あるいは斜坑により廃棄体を搬送する。高レベル放射性廃棄物処分場と併置する場合でも、地層処分低レベル放射性廃棄物用の専用のアクセス立坑あるいは斜坑を利用し、搬送設備も専用のものとする。搬送作業に人が携わる場合には、廃棄体あるいは搬送設備に遮へい機能を持たせる。

アクセス立坑で廃棄体を搬送する場合には、重量物の搭載が可能な専用エレベータでの搬送になる。専用エレベータによる廃棄物の大深度への搬送は、米国の TRU 廃棄物の処分場である WIPP (Waste Isolate Pilot Plant) ですでに実施されている (U. S. DOE, 2004)。アクセス斜坑で搬送する場合には、トラックなどのタイヤ方式の搬送車両や軌道方式の搬送車両が考えられる。アクセス斜坑をほかの用途にも使用する場合や搬送の柔軟性の観点からは、タイヤ方式の搬送車両による搬送が有効であると考えている。

(ii) 廃棄体の定置

地下施設に搬送された廃棄体または廃棄体パッケージは、物流を円滑化する目的で必要に応じて坑底施設で一時保管する（NUMO, 2011b）。一時保管した廃棄体または廃棄体パッケージは、専用車両で処分坑道まで搬送する。処分坑道に到着した廃棄体または廃棄体パッケージをクレーンやフォークリフトにより所定の位置に定置する（図 6.4.2-7）。放射線量が高いため、これらの作業は遠隔操作で実施しなければならない。このため、位置検知や自立制御に関する技術が重要になる。近年、土木工事における建設技術の高度化により建設中のトンネル内を完全自動で自立走行できる搬送機械が実用に供されており、それらの先端技術を取り入れていく。

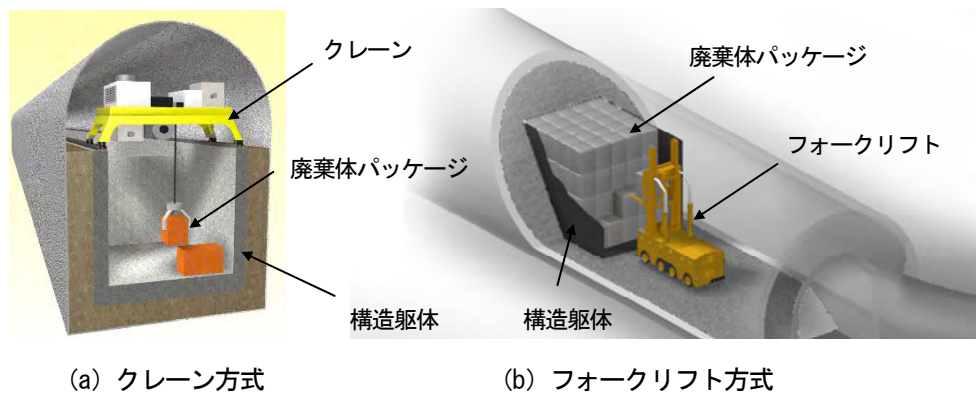


図 6.4.2-7 廃棄体の定置（地層処分低レベル放射性廃棄物）

(iii) 充填材の施工

廃棄体または廃棄体パッケージの定置が終了した構造躯体内の隙間への充填材の施工は遠隔操作で実施する。充填材は隙間に密実に充填させるため、流動性、材料不分離性に優れたものを用いる（電事連・JNC, 2005）。

6.4.3 処分場の閉鎖

閉鎖段階では、地下施設を地上から隔離することを目的として、連絡坑道、アクセス坑道およびボーリング孔の埋め戻しを行う。地上施設は、建設または操業が終了した段階で不要となった施設から順次解体・撤去作業を行う。

6.4.3.1 地下施設の閉鎖

(1) 閉鎖措置計画

坑道の埋め戻しおよび坑口の閉塞に関する計画を「閉鎖措置計画」として定め、経済産業大臣の認可を受けた上で閉鎖を開始する。図 6.4.3-1に閉鎖措置計画申請前の処分場のイメージを示す。図中の茶色の部分は操業段階で埋め戻しが完了している坑道で、図中の白色の部分が閉鎖の対象となる坑道である。

3.3.3で述べたように、閉鎖措置計画が認可されるまで、回収可能性を維持する。廃棄体の回収技術の検討状況については6.6.4.4で述べる。

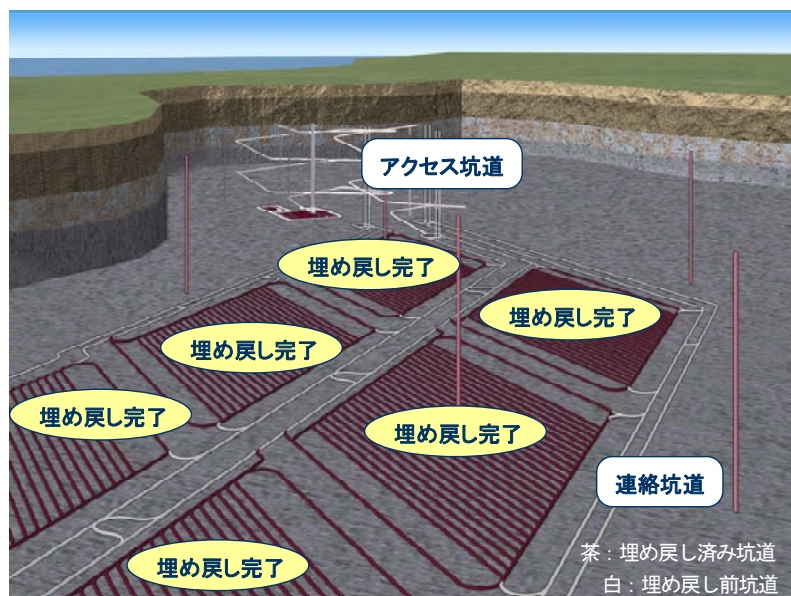


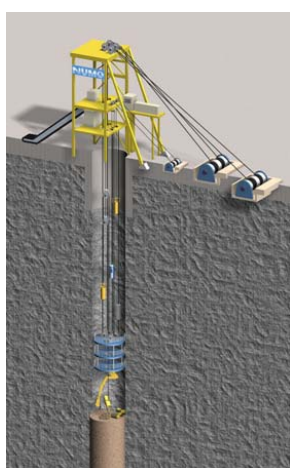
図 6.4.3-1 閉鎖措置計画申請時の処分場イメージ

(2) 連絡坑道の閉鎖

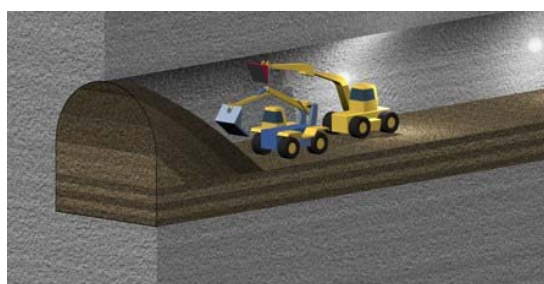
連絡坑道は処分パネル間あるいは処分パネルとアクセス坑道を結ぶ坑道であり，処分パネルの周囲にはほぼ同一平面内に建設されるものであるが，処分パネルが多層配置または傾斜配置される場合その一部は立坑または斜坑となる。水平坑道に対しては，ブロックの積み上げあるいは埋め戻し材の締固め，吹付などの原位置施工方式を適用する。

(3) アクセス坑道の閉鎖

立坑の閉鎖は，立坑下部より順次締固めながら埋め戻していく方法が効率的であり，原位置施工方式が有望である。また，斜坑についても，坑道の形状に合わせて柔軟な対応が可能な締固め工法を適用する（図 6.4.3-2）。



(a) 立坑の閉鎖



(b) 斜坑の閉鎖

図 6.4.3-2 アクセス坑道の閉鎖作業イメージ

(4) プラグの設置

岩盤の割れ目などからの湧水量が多い場合には、坑道建設時または操業時においてセメント系グラウトの注入などによる止水対策を適宜実施するが、長期的には止水機能が低下していずれは水みちとなりバリア機能に影響を与える可能性がある。このような割れ目に対しては粘土系グラウトの注入や、低透水性を有するベントナイト系材料からなる止水プラグの設置などの方法により閉鎖時に適切に処置する。止水プラグの施工や割れ目の充填方法に関しては、JAEAなどがその実現性に関する研究を実施し、止水の有効性や施工技術の確認が行われている。また、坑道内の湧水状況によっては、処分場の閉鎖までに地下水が緩衝材や埋め戻し材に浸潤し、閉鎖の完了していない空間側へ膨潤することが考えられる。この対策として、強度を持たせたコンクリート製の力学プラグを処分坑道端部に設置することを考えている。

(5) 坑口の処置

閉鎖完了後は、坑道内の埋め戻し材の密閉および不用意な人間の侵入の防止を目的としたプラグをアクセス坑道の坑口に設置する。

(6) ボーリング孔などの埋め戻し

処分場には、サイト調査段階に地表から掘削されたボーリング孔や、湧水を緩和するための水抜き孔など、さまざまな方向や径、長さのボーリング孔などが残存することになる。特に地表からのボーリング孔は地下施設と地表を短絡する水みちに、坑道内からのボーリング孔などは岩盤内での新たな水みちとなる可能性があるため、これらは適切に止水処置をする。

6.4.3.2 地上施設の解体・撤去

地下施設の建設、地上施設と地下施設での操業、および地下施設の閉鎖の作業がそれぞれ終了していくのに伴い、地上施設は不要となるものから順次解体・撤去を行っていく。

受け入れ時のガラス固化体や地層処分低レベル放射性廃棄物の表面や輸送容器の内面は、放射性物質が付着している可能性が否定できないため、受け入れ時には表面汚染密度検査を行い、汚染がある場合は除染などを行って汚染拡大を防止する。このため、廃棄物の受入・封入・検査施設内の建物構造物や機器類が汚染される可能性は少ないと考えられるが、解体・撤去においては汚染の有無を確認しながら作業を進める。万が一汚染している場合には、現在開発されている原子力発電所などの解体技術を適用するなどして汚染レベルに応じた工法で解体するとともに、発生する廃棄物はその汚染レベルに応じ、法令などで定められている方法により、適切な施設において処理・処分する。

6.4.4 事業期間中の安全確保

NUMOは、サイト選定から事業廃止までの事業各段階において施設周辺の一般公衆や作業従事者の放射線安全および一般労働安全の確保の徹底に加えて、環境保全にも十分に配慮する。事業期間中の安全対策については、第2次取りまとめや、その事業化技術の取りまとめ（電中研・電事連、1999）での検討結果も踏まえ、NUMOとしての取り組みの基本的な方針をまとめている（NUMO、2004a）。その後、NUMOではこの方針を踏まえて、具体的な安全対策の検討を進めてきている。2008年には新たに地層処分低レベル放射性廃棄物が事業対象に加わり、これについても安全対策の検討

を開始している。また、2007年に原子炉等規制法が改正され、地層処分事業についてもこれまでの埋設事業や廃棄物管理事業と同様な枠組みが適用されることとなった。NUMOはこれを踏まえ、6.2で示したように、事業期間中の安全対策のうち放射線安全に関しては、安全対策を「操業時閉じ込め」、「放射線遮へい」、「放射線被ばく管理」に分類し、それぞれに対して安全確保に関する要件を設定して対策を検討している。また、一般労働安全に対する安全対策は「労働災害対策」および「作業環境対策」に分類して対策を検討している。さらに、環境保全対策の対象の環境要素については、「環境の自然的構成要素の良好な状態の保持」、「生物の多様性の確保および自然環境の体系的保全」、「環境の負荷低減」に分類して対策を検討している。これらは安全確保の方針1の方策3に掲げた事業期間中の安全対策と環境保全策に対応する検討内容である。

なお、事業期間中の安全確保のために施す対策については、それらが閉鎖後長期の安全を低下させることがないように十分に検討した上で適用する（6.4.5参照）。

6.4.4.1 放射線安全の確保

放射性廃棄物が持ち込まれるため、操業期間中は放射線防護のために「操業時閉じ込め」、「放射線遮へい」、「放射線被ばく管理」を基本的な安全対策として実施する。この対策は、ほかの原子力施設の安全対策と基本的に同様であるが、これまでに例のない地下深部の環境下において放射性物質を取り扱う作業を伴うため、その特殊性を考慮して、操業段階から閉鎖段階に必要な信頼性の高い設備の設計、建設を行うとともに、必要な技術開発を進め、安全操業に万全を尽くす。一般公衆が受ける線量および作業従事者が受ける線量を合理的に達成可能な範囲で低くする。

例えば、「放射線被ばく管理」としては原子炉等規制法により処分場に放射線管理区域を設定する（NUMO, 2004a）。放射線管理区域外であるアクセス坑道や地下での搬送経路では、「操業時閉じ込め」と「放射線遮へい」の対策として高レベル放射性廃棄物を遮へい容器付きの搬送装置で搬送することを基本とする。また、ガラス固化体をオーバーパックに封入し遮へい容器に入れるまでの地上施設での作業や、廃棄体を遮へい容器から取り出す地下での積み替えや定置の作業は、放射線管理区域を設定して遠隔操作で実施する。特に、廃棄体をオーバーパックに封入する工程は高放射線場となり、地下施設内でオーバーパックを定置する工程は放射線遮へいが必要な環境となる。このため、1995年に操業を開始した高レベル放射性廃棄物貯蔵管理施設で蓄積された知見などを活用しつつ、地下深部での作業などの地層処分事業固有の課題を考慮して、基盤研究開発では遠隔操作による確実な封入技術や搬送・定置技術の開発が計画的に実施されている（6.6.4参照）。

NUMOは、さまざまな異常事象の抽出とその異常事象による影響、ならびにそれらに対する対策の検討を実施している。具体的には、6.2で示したように、「異常事象」（通常運転を逸脱させるような何らかの要因が施設もしくは廃棄体に加えられた事象と定義）に対する対策は、まず、“異常事象の防止”の対策を十分に施し、それでも異常事象が発生したときには“異常拡大の防止”の対策を施す。“異常事象の防止”の対策と、“異常拡大の防止”の対策に加えて、異常事象が万一事故にまで発展した場合も想定して、“影響の緩和”の対策を適切に実施する。

想定される異常事象と対策の例を表 6.4.4-1 に示す。

ただし、これらの異常事象に対する対策は、サイト条件や最新の技術の進展を踏まえて、適宜、安全性の向上に留意して見直す。

表 6.4.4-1 作業中に想定される異常事象と安全対策
(原環センター, 2001 を参考に作成)

要因		異常事象	安全対策の例
装置・設備に起因する異常事象	搬送・定置設備の故障, 損傷	・搬送・定置設備の機能停止による廃棄体の転倒, 落下	<ul style="list-style-type: none"> ・重要機能へのインターロックの設置 (過走行防止, 吊り上げ高さ制限) ・転倒防止機能, 脱輪防止機能の設置 ・多重化措置 (吊りワイヤの二重化など) ・吊り荷の確実な保持機構の採用 ・搬送・定置設備の定期点検の実施
	運転操作のミス	・建屋, 他設備との衝突による廃棄体の転倒, 落下	<ul style="list-style-type: none"> ・運転範囲の制限 ・運転要領書の整備 ・ヒューマンエラー防止機能の設置 (フルプルーフ機能設置)
	電源喪失	・搬送・定置設備の機能停止による廃棄体の転倒, 落下	・フェイルセーフ機能の設置 (安全側に保持)
自然現象などに起因する異常事象	地震	<ul style="list-style-type: none"> ・搬送・定置設備の揺れによる廃棄体の転倒, 落下 ・建屋の倒壊 ・坑道, 処分孔の崩落 	<ul style="list-style-type: none"> ・搬送・定置設備の耐震設計 ・建屋, 坑道, 処分孔の耐震設計
	落盤	<ul style="list-style-type: none"> ・落石による廃棄体の転倒, 落下 ・坑道, 処分孔の崩落 	・支保工の品質管理と施工管理
	火災・爆発	・搬送・定置設備の延焼	<ul style="list-style-type: none"> ・警報・消火設備の設置 ・不燃性・難燃性材料の使用 ・着火源の排除 ・必要に応じて可燃性ガス対策 ・異常な温度上昇の防止対策
	地震以外の自然現象 (津波, 台風, 浸水, 豪雪など)	<ul style="list-style-type: none"> ・搬送・定置設備の機能停止による廃棄体の転倒, 落下 ・建屋の倒壊 ・搬送・定置設備や坑道の浸水 	<ul style="list-style-type: none"> ・転倒防止機能, 脱輪防止機能の設置 ・風, 積雪荷重などを考慮した建屋の設計 ・施設設置高さの設計, 防潮堤, 排水設備の設置

また, NUMO で検討している安全対策検討のうち, 地上から地下への廃棄体搬送を対象とした検討例を以下に説明する。

検討の流れは, まず, (a) 異常事象を抽出し, (b) 異常事象を防止するための安全対策を施す (異常事象の防止策)。 (c) それでも発生するかもしれない異常事象を想定し, (d) 異常事象が発生したときの自動対応機構を準備する (異常拡大の防止策)。 (e) 次に, その対応機構が作動しない場合にはさらに次の機構が作動するという多重化を施す (異常拡大の防止策)。 (f) さらに重大な事象として, 敷地外に放出された放射性物質による影響を評価して適切な対策を施す (影響緩和策)。

この流れに従い「斜坑における廃棄体搬送車両の逸走」の検討例を以下に示す。

- a 異常事象として, 「斜坑における廃棄体搬送車両の逸走」を抽出する。
- b ガラス固化体はオーバーパックに封入され, さらに遮へい容器に入れられて搬送される。制限速度以上になった場合, 駆動力を車輪に伝達せず, 自動的に制動する車両設計とする。

- c 制御が効かず重力により加速する状態になった場合を想定する。
- d 曲線に入るまでに速度を減じて停止するように、水平区間を設ける。
- e それでも速度を減じない場合を想定して、衝突時衝撃緩和区間を設けておく。斜坑の安全設計例を図 6.4.4-1 に示す。
- f ガラス固化体が損傷して飛散した微粉などが外部へ出るかどうかについて衝突解析や試験による破壊の有無の評価を行う。万一破壊が想定される場合には、逸走の衝突速度から固化ガラス微粉発生率を導出し、この微粉のキャニスタ外への放出、空気中への移行、建物から大気中への移行に影響などについて評価する。大気中へ移行した放射性物質による敷地外一般公衆への影響が基準値以下であることを確認する。

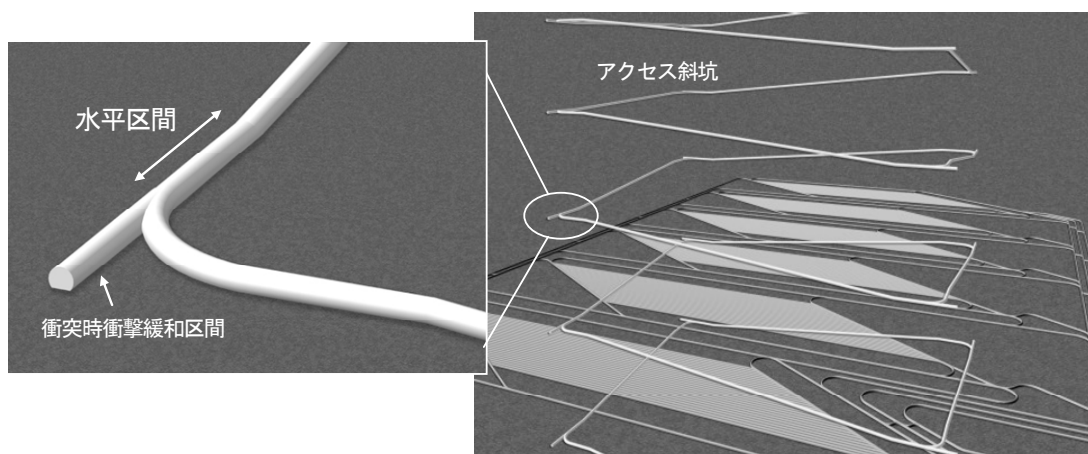


図 6.4.4-1 斜坑の安全設計例

高レベル放射性廃棄物処分施設では、地上施設の一部を除いて、廃棄体はオーバーパックに封入された形で扱われることから、事故時の評価のうち放射性物質の外部放出の評価においては、オーバーパックの衝突などに対する堅牢性の評価が重要である。地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設でも廃棄体を収納するパッケージの堅牢性の評価が重要になると考えられる。

このような背景から、NUMO ではオーバーパックの衝突解析を実施している (NUMO, 2011a)。衝突解析では、保守的にオーバーパックが格納容器に格納されていない状態で、アクセス斜坑搬送中に搬送車が逸走し、剛壁に衝突した場合を想定した。衝突時のオーバーパックの健全性を、オーバーパックに発生する相当塑性ひずみと材料の破断ひずみとの比較により評価した。図 6.4.4-2 はその例であり、上述した車両の逸走によってオーバーパックが底面より坑道壁面に衝突したと想定した場合の相当塑性ひずみ分布である。最大相当塑性ひずみは4.6%であり、材料の破断伸びを27%とすると、それ以下であることから、オーバーパックは破損しない可能性が高く内容物の外部放出の可能性は低いという結果となった。

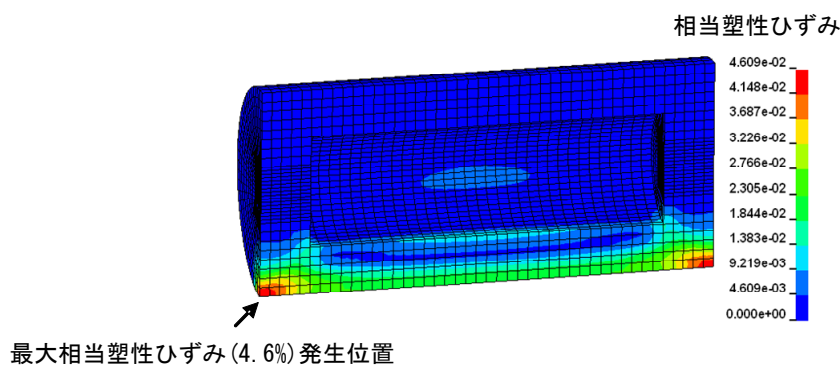


図 6.4.4-2 オーバーパックスの衝突解析例
(出典：NUMO, 2011a)

6.4.4.2 一般労働安全の確保

地下施設内では、第2次取りまとめで示されたように、建設・操業・埋め戻しをパネルごとに独立に並行して進めること、建設時に最大で13切羽を併進するものと仮定すると、各作業の最盛期には地下施設内で最大200人程度が作業をすることになり、その一般労働安全対策は非常に重要である。一般労働安全のための安全対策は、6.2の一般労働安全の確保で示したように、「労働災害対策」および「作業環境対策」に分類して検討している。

一般労働安全の対策例を以下に示す (NUMO, 2004a)。

- ・ 坑道掘削時の現象 (切羽の不安定、湧水および湧水に起因する地山の崩壊、ガスの発生、山はねなど) に対して事前調査や掘削中の施工安全管理を十分に行う。
- ・ 温度、湿度、ガス、粉塵に関して、換気設備による換気や必要な場合には冷房設備などにより適切な作業環境を維持する。
- ・ 緊急退避所を設置することや緊急避難経路を確実に確保する。
- ・ 地震、落盤、火災・爆発などの自然現象に起因する異常事象に対しては、耐震設計、不燃性・難燃性材料の使用と着火源の排除などの対策を確実に実施する。

これらの一般労働安全については、基本的に土木工事などにおける安全対策を適用できるが、事例の少ない地下深部での大規模な工事であることから、その時点での信頼性の高い技術を用いて、地下調査施設や処分場の建設を安全に進める。地下での坑道掘削時には、切羽の不安定現象や山はねに対する力学安定対策、湧水対策、ガス対策などの適切な安全対策を施しながら作業を進める。これらの事業期間中の安全対策 (岩盤中へのロックボルト挿入による力学安定対策、セメント系材料の注入による湧水対策など) に必要となる材料を閉鎖後も岩盤中などに残置する場合には、6.4.5で述べるように、閉鎖後長期の安全機能を有意に損なうことがないように十分配慮した上でそれらを採用する。ガス対策としては、岩盤中から発生するガスのほかに、内燃機関などを使用する場合に発生する有害ガス、発破を用いる場合に発生する後ガスなどが対象であり、適切に換気設備を設計し、除去または希釈により坑内の作業従事者に新鮮な空気を供給するように、温度、湿度、粉塵に対する対策と併せて実施する。

さらに、万一地下施設において緊急事態が発生した場合も想定して、坑内の作業従事者の安全を

確保するための緊急退避所や緊急避難経路を確保しておく。特に処分場の地下施設は多数の坑道群が建設され、場所を移動しながらの作業が長期間にわたって行われることから、常に避難経路が確保された状態のもとで作業を行うことができるよう、計画段階から十分な検討を行い地下施設全体の作業計画を立てておく。

NUMO は、一般労働安全についてもサイト特性を踏まえ、放射線安全で述べたような多重化した対策の検討を進めている。検討例として沿岸海底下に地下施設を建設する場合の坑道内湧水に対する排水対策を以下に示す。沿岸海底下では坑道内には海底と短絡する断層破碎帯が存在する可能性があり、湧水量が多くなる場合を想定したものである。

- a 基本的には、顕著な湧水が想定される岩体は候補母岩の選定により回避するか、グラウトなどで止水対策を講じる。
- b 次に、通常湧水量を想定し、自然流下によりアクセス坑底の排水槽に集水する。排水槽に集水した湧水は高揚程ポンプなどで地上に排水する。
- c 排水槽は避難に必要な時間を確保するのに十分な湧水量の貯水を可能なものとする。
- d ポンプは点検、修理ならびに異常湧水時を考えて、通常の 2 倍の予備台数を設置しておくとともに、万一の電源喪失に備えて非常用電源系統を確保する。

このような想定湧水量の排水設備とは別に、大規模な突発的な湧水が想定した対策も視野に入れて検討を行う。例えば、青函トンネルなどの事例を参考にすると、図 6.4.4-3 に示すように十分に余裕をもったポンプ設備でも対応できない場合、非常用水門を閉じて排水坑道全体を貯水槽として利用する方法も考えられる。この非常用貯水槽の容量は青函トンネルの例では通常排水量の約 3.5 日分である（竹内，1987）。

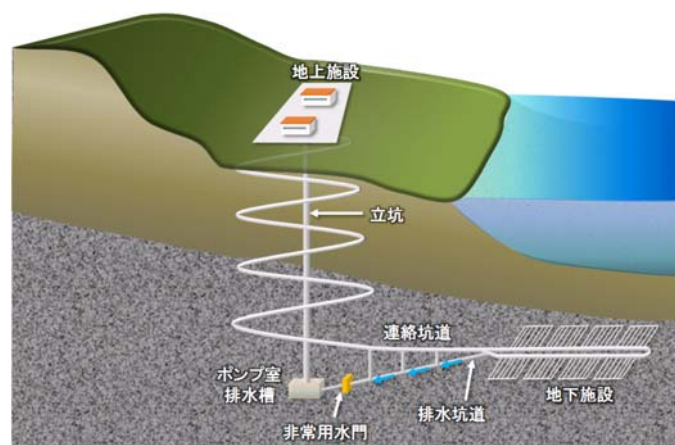


図 6.4.4-3 排水坑道，排水槽，ポンプ室の模式図

6.4.4.3 環境保全の確保

事業期間中の環境保全は、6.2.3.3 で示した環境要素である「環境の自然的構成要素の良好な状態の保持」、「生物の多様性の確保および自然環境の体系的保全」、「環境への負荷低減」に対し、適切な対策を実施することにより確保する。また、事業期間中は事前の環境影響評価結果を元に、必要な環境保全対策を実施し、環境保全対策の有効性を確認していくとともに、環境影響の程度が著し

い場合には、追加の環境保全措置などを実施する。環境保全は、調査の段階から実施するものであるが、ここでは、特に環境への影響が大きいと考えられる建設段階以降を対象として、環境保全の具体的方策などについて述べる。

「環境の良好な状態の保持」への影響が大きい要素として、坑道掘削によって発生する大量の地下水湧水と掘削土に起因する影響が考えられる。地下水湧水については、地下水位の低下、湧水の放流による周辺水環境への影響が考えられ、掘削土については、仮置きした掘削土の飛散による大気環境への影響、掘削土への雨水の浸入による地下水や周辺の河川や湖沼への浸出が考えられる。保全措置の検討は、事業段階ごとに次段階で生じる環境影響について、調査・予測および評価を実施し、必要に応じて適切な保全措置の準備と、保全措置を考慮した環境への影響を予測・評価し、次段階でのモニタリング結果と対比して予測精度を検証するとともに、必要があれば保全措置の改善、追加措置を講じていくことが基本的な手順となる。これらに対する基本的な取り組みは、表 6.4.4-2～表 6.4.4-4 に示す既往のトンネル工事や岩盤空洞掘削工事における環境への影響事例とその対策事例が参考になると考える。

表 6.4.4-2 地下水湧水による環境影響と保全措置の検討例

環境への影響	地下水湧水・湧水
類似施設・工事での事例	<ul style="list-style-type: none"> ・ 深度が 300m を超えるトンネルでの湧水事例は極めて少ない ・ 断層破碎帯が極度に発達している場合では湧水範囲は 2,000m 程度にまで及んだ事例がある（日本トンネル技術協会, 1983） ・ 大深度トンネルでは、湧水対策としては排水工法（あるいは止水工法との併用）を採用している場合が多い
対策検討の基本的考え方	<ul style="list-style-type: none"> ・ 事前調査（坑道内からの物理探査、先進ボーリングなど）により断層破碎帯などが確認され大量に湧水の恐れがある場合は、処分坑道のレイアウトを変更する事により極力回避する ・ トンネル構造は基本的には排水型とするが、高透水部については部分的にグラウトなどにより湧水量の低減を図る
保全措置の例	<ul style="list-style-type: none"> ・ 湧水対策：高圧湧水に遭遇した場合は排水工法（あるいは止水工法との併用）により切羽の崩壊を防止 ・ 湧水対策（万一地表面に影響が及んだ場合）：代替水道、ビオトープなどによる代償

表 6.4.4-3 地下水放流による環境影響と保全措置の検討例

環境への影響	地下水放流（放流先への水質影響）
類似施設・工事での事例	<ul style="list-style-type: none"> 一般的なトンネル工事では、主に濁度と pH などを排水処理設備により適切な範囲に調整 湧水の有効利用として、豪雪地域における融雪システムへの利用、熱を回収し地域暖房に利用などが実施されている（安立ほか、1998）
対策検討の基本的考え方	<ul style="list-style-type: none"> 放流水及び放流先の水質をモニタリングし、必要に応じて排水処理方法を修正する 湧水の有効利用を図ることで、可能な限り放流量の低減を図る 可能な場合は、放流先を分散することで、放流先への影響低減を図る
保全措置の例	<ul style="list-style-type: none"> 放流水の調整：水質については排水処理設備により調整 放流水の有効利用：融雪システムに利用（降雪地帯）、熱を回収して地域暖房に利用、公共施設などでの雑用水に利用

表 6.4.4-4 掘削土による環境影響と保全措置の検討例

環境への影響	掘削土の仮置き（大気への飛散、周辺水系の水質汚染）
類似施設・工事での事例	<ul style="list-style-type: none"> 有害物質を含む掘削土については、重金属類の含有（熱水変質岩）と酸性水の発生（熱水変質岩、海成泥岩）事例があり、封じ込め措置、プラントでの処理などが行われている 一般の掘削土については、降雨時の表流水による濁水対策（沈砂池）が取られている
対策検討の基本的考え方	<ul style="list-style-type: none"> 概要調査段階におけるボーリング調査での地下水組成分析などにより、掘削土自体が有害かどうかを早期に把握する 可能な限り、仮置き土量を小さくする 掘削土置場において、裸地および重機の稼動範囲が大面積にならないように掘削土の仮置き手順を工夫する
保全措置の例	<ul style="list-style-type: none"> 有害物質を含む掘削土の場合：盛土措置（飛散防止）、封じ込め措置（遮水型・遮断型処分）、将来的には浄化技術の適用 一般の掘削土の場合：降雨時の表流水については沈砂池で対応、大気への飛散についてはモニタリングを実施しながら必要に応じて対策を実施、または改善（散水、覆土、植栽、掘削土置場形状の工夫、飛散防止シートなど）

1993年に発効された「生物の多様性に関する条約」によれば、生物の多様性とは「生態系」、「種間」、「種内」の三つの多様性と定義されている。「生物の多様性の確保および自然環境の体系的保全」に対しては、「生態系の多様性」として環境のタイプの多様性、「種間の多様性」として生息する生物種の多様性、「種内の多様性」として生物種内の遺伝的多様性を評価の視点として事業を進める。これら評価のイメージは、図 6.4.4.4 に示すとおりである。例えば、生態系レベルの多様性は、「アシの生える水辺、コナラの生育する斜面など、どれだけ多様な環境があるか」、種レベルの多様性は、「アシの生える水辺にどれくらいの鳥や昆虫が生息するか」、遺伝子レベルの多様性は、「アシ原に生息する希少なトンボが分布上固有な種かどうか」といったことになる。さらに、これら三つのレ

ベルの生物多様性を安定した状態で保つためには、例えばトンボが飛べる範囲でアシ原が連続して分布しているように、広域的に生物生息環境の機能が整っていることが必要条件となる。事業を進めるに当たっては、そのような「空間的配置」の視点を加えて、四つの視点から体系的に生物多様性の影響評価を実施していく。ここで、影響評価は、すべての生物種を対象とした「全種評価」と、生態系を代表する注目種を選定して行う「注目種による評価」とに分かれる。具体的な実施方法としては、例えば常時注目種モニタリングにより評価を行いながら、節目ごとを目安にすべての生息種を対象としたモニタリングを行い「全種評価」を行うことも考えられる。

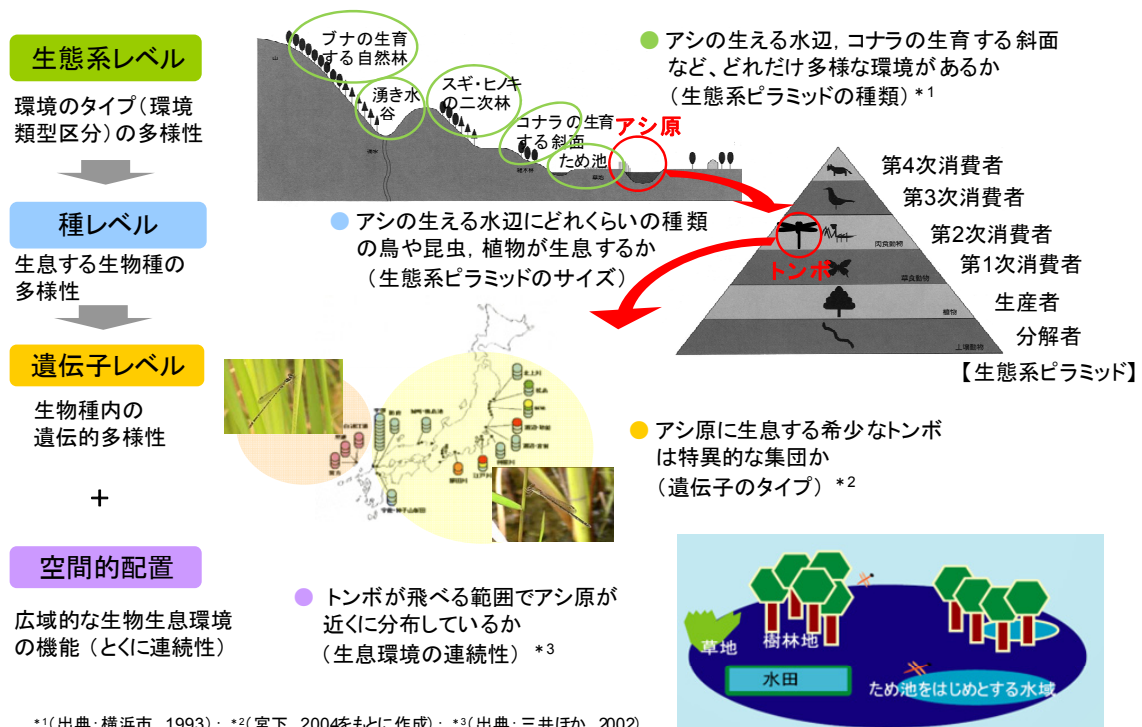


図 6.4.4-4 生物多様性の影響評価の視点
(NUMO, 2008 を編集)

「環境への負荷低減」については、廃棄物発生量の減容化、温室効果ガス排出量の低減などについて対策を実施する。

廃棄物の減容化としては、例えば、排水処理設備にて、排水中に含まれる汚泥分を除去した後にフィルタプレスに代表される脱水装置を用いて減容化する対策などがある。また、必要に応じて排水処理した水を工事用水として再利用したりするなど、廃棄物発生量の低減に努めていく。

また、「温室効果ガス排出量の低減」については、土木分野における CO₂ の排出量は全産業の 1 割程度であり、そのうちのおよそ 75% は材料の製造に伴うものといわれている(土木学会, 2010)。これについては、例えば、近年有効利用拡大が進んでいるフライアッシュは、ポルトランドセメントに比べて製造時における CO₂ 排出量が少ないことから(土木学会, 2009b)、混和材としての利用などが考えられる。

NUMO は、環境保全に関する法規制は勿論のこと、地方において制定された条例や指導要綱を遵守し、さらには地域の状況や要望も十分に考慮した、環境負荷の低減対策を実施していく。

6.4.5 閉鎖後長期と事業期間中の安全性両立の観点からの分析

建設・操業および閉鎖の各段階における作業は、程度の差はあるものの、深部地質環境の条件を変化させる可能性がある。さらに、各作業を安全に実施するためには、人工バリア以外のさまざまな材料（主として人工材料）を地下に持ち込む必要がある。事業期間中の坑道の力学安定性を確保するためには支保工（鋼製材料，セメント系材料）が必要となり，坑道掘削時の湧水を抑制するためには，主にセメント系材料によるグラウト注入などの対策工が必要となる。これらの多くは閉鎖後も地下施設内，あるいは近傍の岩盤内に残置されることになる。

このため，閉鎖後長期の安全性を確保するために天然バリアと人工バリアに期待しているバリア機能に対して，建設，操業および閉鎖作業は，深部地質環境への擾乱と人工バリア以外の残置物（主として人工材料）の存在，という二種類の影響を与えることになる。これら二種類の影響について，作業段階ごとに影響を受けるバリアを含めて図 6.4.5-1 にまとめて示す。深部地質環境への擾乱については，第7章で説明する閉鎖後長期の安全評価で考慮し，必要に応じて設計あるいは建設・操業・閉鎖で影響を低減する方策をとる。バリアの影響については6.6.2でも説明する。

閉鎖後長期の安全性に影響を与える因子	因子の分類		影響を受けるバリア	具体的な影響	記号*
	作業段階	作業段階における作業、事象			
深部地下環境の条件変化	建設・閉鎖	建設：坑道掘削 閉鎖：プラグ部拡幅掘削	天然バリア	(力学的影響) 掘削損傷領域（岩盤のゆるみ）の発生	A1 C1
			天然バリア	(水理学的影響) 掘削損傷領域の形成による処分坑道近傍の地下水流動経路の変化	A1 C1
			天然バリア	(水理学的影響) 破碎帯などの高透水性部との交差による連続した水みちの形成	A1
	操業・閉鎖	坑道内への湧水・浸水の存在	人工バリア	(水理学的影響) 湧水・浸水による廃棄体や緩衝材品質への影響	A3
			天然バリア 人工バリア	(熱的影響) 定置された廃棄体の発する熱による緩衝材や周辺岩盤の温度上昇	B1, B2 C1, C2
	建設・操業・閉鎖	深部地下への空気導入	天然バリア 人工バリア	(化学的影響) 坑道開放中の酸素や二酸化炭素による影響	A1, A2 B1, B2 C1, C2
人工バリア以外の残置物（主として人工材料）の存在	建設・閉鎖	セメント系材料の使用	天然バリア	セメント系材料による地下水組成変化に起因する岩盤の劣化	A1 C1
		建設時：吹付コンクリート、覆工コンクリート、インパットコンクリート、グラウトなど 閉鎖時：プラグ、グラウト	人工バリア	セメント系材料に起因するアルカリ環境下における緩衝材の変質	A2, A3 C2
			人工バリア	セメント系材料に起因するアルカリ環境下における炭素鋼オーバーパックの孔食	A2 C2
			人工バリア	オーバーパック孔食による密閉性消失後のガラスの溶解	A2 C2
		天然バリア	コンクリート支保の劣化による坑道に沿った卓越移行経路の形成	A1	
	天然バリア 人工バリア	鉄系材料（鋼製支保工、ロックボルトなど）の使用	鋼製支保工の腐食膨張による影響	A1 A2	
建設・操業	有機物（セメント混和材、防水シート、裏面排水材など）の使用	天然バリア	有機物による放射性物質の移行特性への影響（放射性物質溶解度上昇、収着分配係数の変化）	A1 B1	

*記号の意味

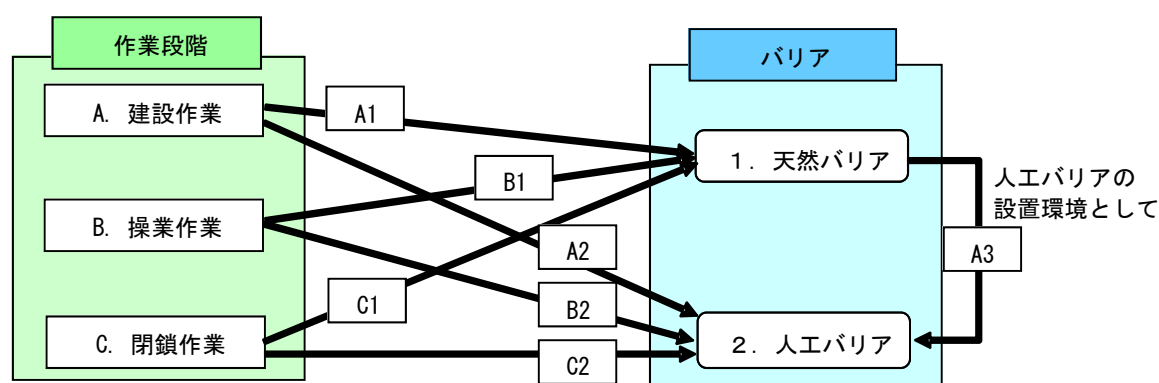


図 6.4.5-1 閉鎖後長期の安全性に影響を与える因子

JAEA は、フィンランドの地層処分事業者である POSIVA が地下調査施設 ONKALO に対して実施した検討 (POSIVA, 2003) を参考とし、幌延深地層研究所を対象として人工バリア以外の材料を使用する際の閉鎖後長期の安全性の観点からの留意点を整理している。これによると、地下施設で使用される人工バリア以外の材料が処分場の閉鎖後長期の安全性に与える影響などの観点から、以下の 5 種類 (一部言葉を修正) に分類されている (山田ほか, 2007)。

- a 閉鎖後長期の安全性に対して影響がない。残置してもよいもの。
- b 閉鎖後長期の安全性に対して影響がある。必要に応じて除去できるもの。
- c 閉鎖後長期の安全性に対して影響がある。必要に応じて代替材料に替えられるもの。
- d 閉鎖後長期の安全性に対して影響がある。除去、代替ができないもの。
- e 閉鎖後長期の安全性に対して影響が不明なもの。

閉鎖後長期の安全性への影響については、人工バリア以外の材料と、地下水、岩石および人工バリア材料との相互作用に関する基盤研究開発成果など (6.6.2 参照) に基づきにより判断していく。

処分場の閉鎖後長期の安全性への影響があり、その影響が有意であると判断された場合には、b については除去することになる。c に関して、例えば、残置物がバリア機能に顕著な影響を与えることはないものの、残置する量が大量であり、現時点での知見に不確実性があり影響が無視できないものとして、セメント系材料や有機材料が挙げられる。これらについては、代替材料として低アルカリ性セメントが開発され、処分施設への適応性確認が進められている (6.6.4.1 参照)。d, e については、残置することの影響について操業計画を立てるまでに十分な知見を整備し、閉鎖後長期の安全性を低下させない安全対策を構築していく。

6.5 多様な地質環境への対応

処分施設の設置可能性を調査する区域の応募を募っている現段階において、NUMOは、わが国の多様な地質環境に対応できる処分場の設計検討を行っている。具体的な応募をいただくと、まず応募区域およびその周辺地域の地形、地質、土地利用状況などに関する文献調査の結果に基づき、図6.3.1-2で示した設計手順に沿って処分場の概略の設計を行う。処分場の設計は、調査の進展に伴い拡充していく地質環境の情報に応じて、より地質環境に適したものと詳細化していくが、サイト選定の初期の段階における処分場の設計では、地質環境条件の特徴に応じた処分場の姿を検討の出発点とすることにより、その後の処分場の設計を効率的に実施することができると考えている。

NUMOでは、これまで基盤研究開発機関などで検討が進められてきた内陸部に加え、多様な地質環境への対応の一環として、沿岸域の地質環境条件を考慮した処分場の設計の特徴および留意点を整理している。また、想定される地下の環境条件やこれまでの技術開発の進展を踏まえ、人工バリアの搬送・定置に関する技術のオプションの整備を進めている。

6.5.1 沿岸域に処分場を設置するときの対応

処分場の設計の出発点として、第2次取りまとめで示されている結晶質岩と堆積岩といった地質環境特性に応じた処分場の姿を活用することができる。NUMOは、これに加えて周囲を海に囲まれたわが国の地理的条件を考慮し、特に、沿岸域の地質環境特性を地下水流動場や地下水化学環境などの観点から分析し、設計上の特徴や留意点を整理し、サイトの地質環境条件に適する処分場の設計を行う準備を整えている。

沿岸域に処分場を設置するときの対応としては、地下施設設置位置の選定における地下水移行時間、汀線から地下施設までの離岸距離、地下水化学環境に応じた緩衝材や埋め戻し材の材料設計への影響などの特徴と留意点を整理した。さらに、沿岸域では地上施設の設置高さや配置などの検討において、津波の影響を回避できるようにする必要がある。また、技術的視点以外にも「廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約」による制約などにも配慮する。

6.5.1.1 沿岸域の地質環境を考慮した設計上の特徴・留意点

沿岸域では、陸域と海底の地形条件や、それに伴う地下水流動場の違い、降水系地下水と海水系地下水といった地下水化学環境の違いが処分場の設計に影響を与える。また、図6.5.1-1に示すように、長期的には気候変動に伴う海水準変動が想定され、それに伴って塩淡境界が移動し地下水流動場（流向、流速）に加えて地下水化学環境も時間的に変遷する。地下施設を海底下に配置する場合には、地上施設を地下施設の真上に配置することができないという制約があり（6.5.1.2参照）、汀線から地下施設までの距離が施設の概念や設計に影響を及ぼす。

ここでは、このような沿岸域の地質環境の特性やその長期的な変動を考慮した地下施設設置位置の設定、地下水化学環境の変化に伴う人工バリアの材料設計、地下施設の設計における離岸距離の制約に関してそれらの特徴と留意点を取りまとめた。

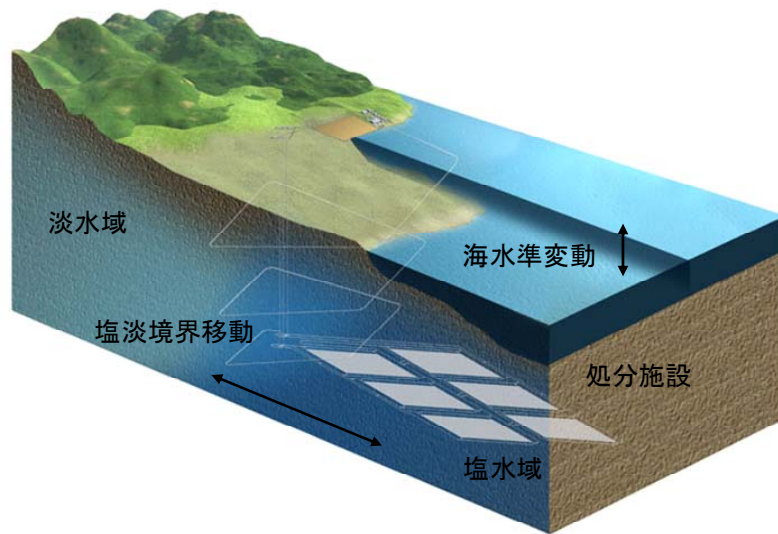


図 6.5.1-1 沿岸域における長期的な海水準変動と塩淡境界の移動

(1) 地下施設設置位置の設定における地下水流動場と地下水化学環境

沿岸域の地質環境の特性，ならびに設計上の特徴と留意点を以下に説明する。図 6.5.1-2は，陸域と海域の地形が急峻な場合の沿岸域における地下水環境の特徴を示したものである。地下水流動は物質移行との関係が深く，地下水化学環境は緩衝材の膨潤性などと関係があるため，沿岸域は地下水流動や地下水化学環境の特徴により，図 6.5.1-2に示す①～③の領域に概略区分けすることができる。つまり，地下水の流向，流速の観点では，①の領域は内陸部の降水系地下水の動水勾配と塩淡境界面付近の地下水流動特性の影響を受ける沿岸域であり，陸域地形が急峻であると動水勾配は大きくなる傾向がある。また，降水系地下水と海水系地下水の密度差に起因して塩淡境界に沿って上向きに降水系地下水が流れる傾向がある。③の領域は，内陸部の降水系地下水の動水勾配の影響を受けない沖合域であり，地下水流動が緩慢な領域である。①と③の中間に位置する②の領域は，現在は沖合域ではあるものの，長期的には気候変動に伴い海水準が変動すると陸域になる可能性がある領域であり，降水系地下水と海水系地下水が周期的に変化し得る領域である。③の領域は，海底地形が急峻である場合，長期的に海水準が変動しても，海水準変動に敏感ではなく海域を維持する可能性が大きいと考えられる領域である。

一方，図 6.5.1-3に示すように，陸域と海底の地形が緩やかな場合には，①の領域における地下水の動水勾配は，地形が急峻な場合と比較して小さくなる傾向にある。また，長い将来にわたり海域を維持する③の領域は汀線からの距離が大きくなる傾向がある。降水系地下水と海水系地下水が周期的に代わり得る②の領域幅も広がる。

このように沿岸域では，地下水流動場や地下水化学環境に応じて，大きく①，②，③の領域で特徴が異なると考えられる。

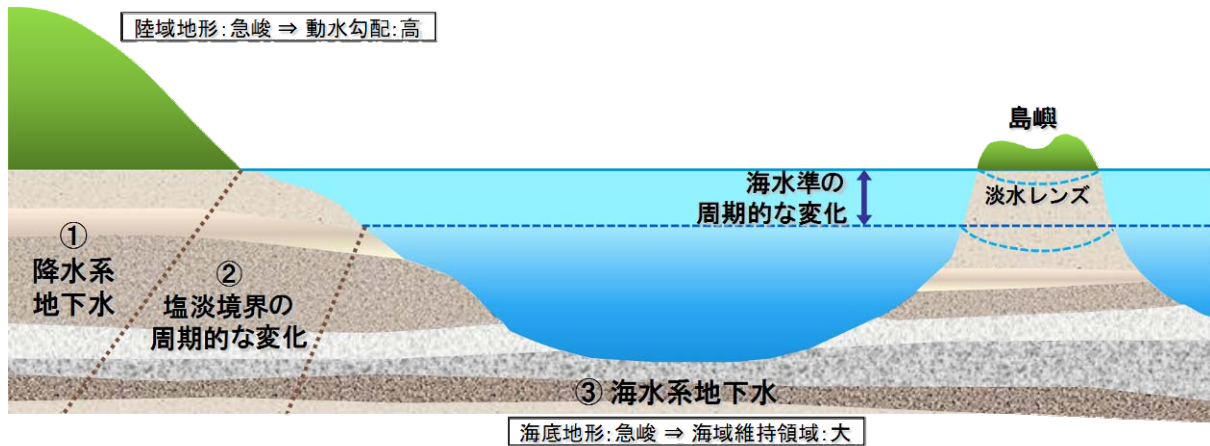


図 6.5.1-2 沿岸部におけるサイト環境の特徴（地形が急峻な場合）

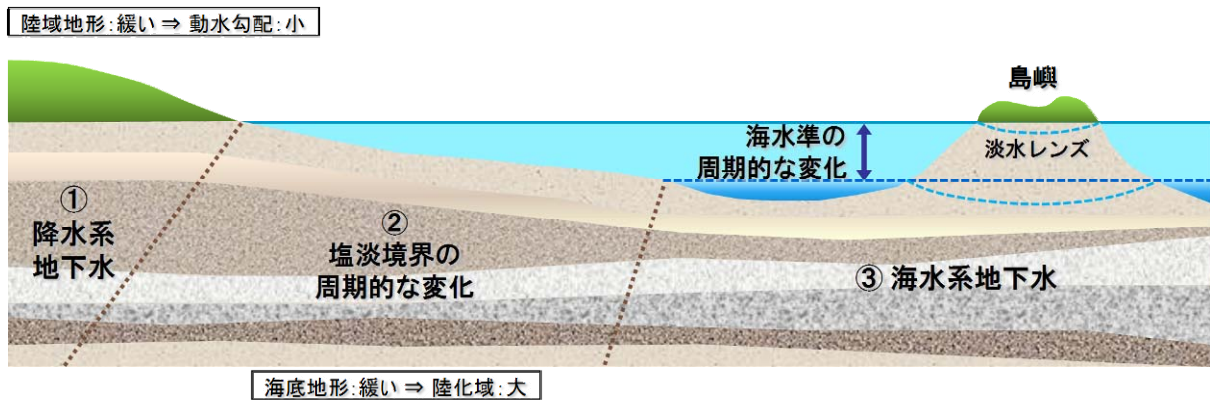


図 6.5.1-3 沿岸部におけるサイト環境の特徴（地形が緩やかな場合）

この沿岸域の特徴に応じた処分施設設計の留意点として、まず、サイト選定の初期の段階で重要な設計対象事項である候補母岩の選定が挙げられる。地下水の移行経路やその特性を踏まえ、複数の地下施設設置候補位置の処分環境条件を比較（表 6.3.3-1）することで、放射性物質の移行抑制の観点から相対的に好ましい位置を設定する。長期的な地質環境の変遷を踏まえて上記の評価を行う際には、陸域において考慮する隆起・侵食に加えて、海水準変動により放射性物質の地表あるいは海底における流出点が変わるなどの影響を考慮して地下水の移行時間などを評価する必要がある。

沿岸域の長期的な地質環境特性は、周期的な海水準変動による塩淡境界の移動に依存する。従って、放射性物質の移行評価では、地下水の流速、流出点（移行時間に影響）や地下水中の塩分濃度（放射性物質の溶解度や分配係数に影響）などの周期的な変遷が、放射性物質の移行に及ぼす影響を考慮することが必要である。候補母岩の選定においては、粒跡線解析により、移行経路や移行時間などの評価を行うが、海水準変動に伴い移行経路と流出点が変わることに留意する必要がある。例えば、海退により汀線が海側に移動することにより、②の領域は動水勾配が小さい拡散場である海域から、地下水が塩淡境界に沿って上昇する流動場となる沿岸域、陸域の動水勾配の影響を受ける領域へと移行していくことが考えられる。海水準変動に伴って移行経路と流出点が変わるイメージを図 6.5.1-4に示す。

候補母岩の評価では、天然バリアとして期待する岩体の領域をどの程度に設定するかに留意する必要がある。サイト調査の進展により得られる情報に基づいて、初期に実施した地下施設設置位置

の設定結果の妥当性を段階的に確認していくことが重要である。

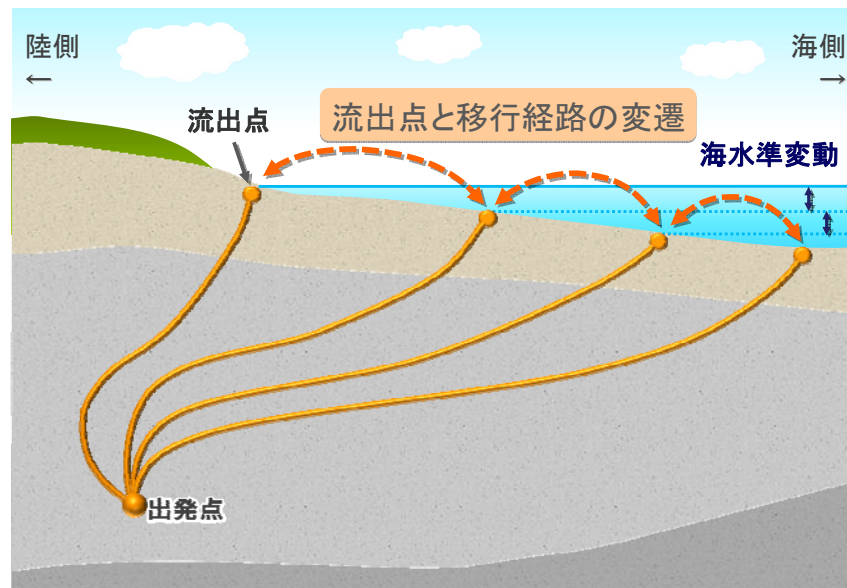


図 6.5.1-4 粒跡線解析による海水準変動による流出点移動のイメージ

(2) 地下水化学環境の変化に伴う人工バリアの設計

沿岸域の特徴に応じた処分施設設計の次の留意点として、人工バリアの材料設計が挙げられる。緩衝材、埋め戻し材に使用する主要な材料であるベントナイトは、塩分により膨潤特性が影響を受ける(6.6.2 参照)。海水準の変動に伴い、沿岸域では地下水の塩分濃度などの地下水化学環境が変化することとなり、緩衝材や埋め戻し材の仕様が図 6.5.1-2 に示した①、②、③の領域別に異なるものとなる可能性がある。①と③の領域は、将来にわたりそれぞれ降水系地下水と海水系地下水が卓越する領域である。①の領域については、図 6.3.2-4 などをもとに緩衝材の仕様を選定する。③の領域については、海水系地下水環境下におけるベントナイト材料の基本特性への影響を考慮した緩衝材、埋め戻し材の仕様(材料、配合など)を設定する必要がある。また、②に関しても、周期的な塩淡水境界の移動の影響を受け、将来的に塩水環境に変化する領域として人工バリアを設計することとなる。

第2次取りまとめ以降得られた塩水環境を対象とした人工バリア材料の基本特性に関する知見をもとに、海水系地下水環境下における緩衝材および埋め戻し材の設計の変更の必要性について検討した事例を示す。なお、塩水環境における材料の基本特性については、6.6.2 で概説している。

(i) 緩衝材

塩分濃度の高い地下水が予測される場合には、緩衝材の特性である透水係数や膨潤量の変化に留意して設計する必要がある。緩衝材の設計の技術要件としては、6.2 で示したように、「低透水性を有すること」、「自己シール性」、「緩衝材の流出抑制」などが挙げられる。以下ではこれらの技術要件に着目して、塩水環境下における緩衝材の設計の考え方とその例を示す。

「低透水性を有すること」については、その暫定的な指標としてペクレ数を用いる(JNC, 1999a)。ペクレ数が1より十分小さい場合、緩衝材中の放射性物質の移行は拡散によるものが支配的となり、移流による移行が抑制されていると判断できる。塩水環境下で取得した透水係数を用いて、ペクレ

数を見積もったところ、有効粘土密度 $1.0\sim 2.0\text{Mg/m}^3$ の領域で 0.003 未満の値であり、移流による移行が抑制されていると判断できる (NUMO, 2011d)。

「自己シール性」について、ブロック定置方式を例として施工時にできる緩衝材ブロック間やブロックと坑壁の間にできる隙間が閉塞できるように、緩衝材の膨潤変形による体積膨潤比が隙間の 2 倍となる条件を暫定的な指標として、緩衝材の厚さと有効粘土密度を求めた (図 6.5.1-5)。ここでは施工時の隙間として、岩盤と緩衝材ブロックの間の隙間を 4 cm 、緩衝材ブロックとオーバーパットの隙間を 2 cm と設定した (JNC, 1999a)。

自己シール性を確保するために必要な有効粘土密度の下限は、緩衝材が厚いほど低くなる。 70 cm の厚さで、有効粘土密度を見積もると、人工海水程度の塩分濃度の地下水では 1.26 Mg/m^3 以上となる。第2次取りまとめで示された緩衝材ブロックの仕様 (ケイ砂混合率 30 重量%で乾燥密度は 1.8Mg/m^3) では、有効粘土密度は 1.58Mg/m^3 であるため、人工海水中でも自己シール性を有すると判断できる。塩分濃度が海水の 10% 、 1% ではそれぞれ、自己シール性を有する有効粘土密度の範囲は、 0.83 Mg/m^3 以上、 0.40Mg/m^3 以上となる。このように、塩分濃度が低いほど自己シール性を確保するのに必要な密度は低くなる。施工時の隙間が上記の設定よりも大きい場合などは、施工時の隙間の割合を見積もり、必要な自己シール性を確保するために、有効粘土密度を高くするなどの対策を検討する。また、ここで暫定的に挙げた指標以外にも、膨潤後の発生圧力を指標とする自己シール性の評価方法もあるので (JNC, 2005, Komine et al., 2009)、今後、緩衝材の膨潤性に関する技術開発成果も踏まえ、設計手順や指標を設定する。

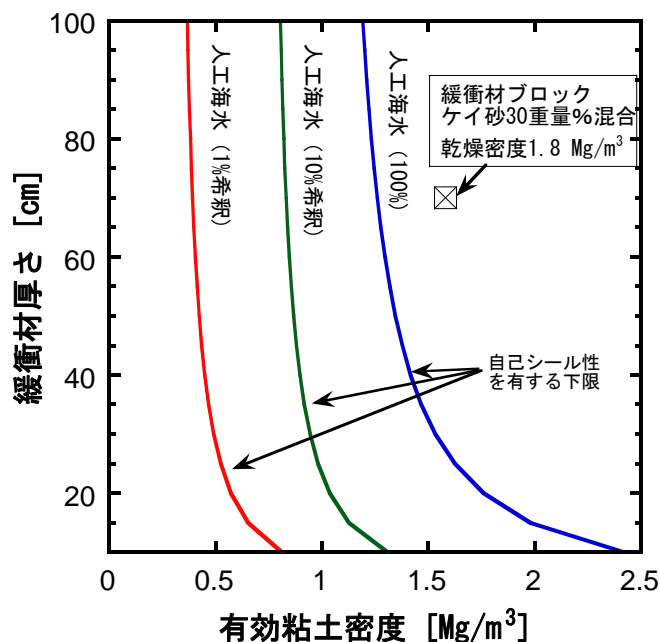


図 6.5.1-5 塩分濃度をパラメータとした自己シール性を確保するために必要な有効粘土密度と緩衝材厚さの関係

(出典 : NUMO, 2011d)

体積膨潤比は、田中・中村 (2004) のクニゲル V1 の体積膨潤比の実測値に基づく。人工海水 (100%) : 人工海水を試験溶液を用いて取得した体積膨潤比に基づいた評価結果、人工海水 (1%希釈または 10%希釈) : 人工海水を 1%または 10%に希釈した試験溶液を用いて取得した結果に基づいた評価結果

「緩衝材の流出抑制」とは、緩衝材と透水性の高い割れ目が接触している場合に、主要成分であるベントナイトが地下水の流れによって流出する現象を抑制するための要件である。6.6.2.3 (5) で示すように、ベントナイトの流出は、地下水の流速が一定以上の場合にのみ起こること、また、塩水環境では緩衝材の膨潤性が低下するため、起こりにくい現象であることが分かっている。

(ii) 埋め戻し材

埋め戻し材には、アクセス坑道に沿って卓越した移行経路が形成されることを抑制する安全機能を期待している。埋め戻し材は、緩衝材同様、ベントナイトを主成分としており、塩水環境ではその性能が低下する可能性がある。これまで、埋め戻し材は、周囲の岩盤と同程度かそれより低い透水性を目安として設計検討が進められている (JNC, 2005)。例えば、周囲の岩盤の透水係数が 1×10^{-10} m/s の場合、埋め戻し材の有効粘土密度は 1.2 Mg/m^3 よりも高い値が必要となる (JNC, 2005)。埋め戻し材は、掘削土とベントナイトを混合した材料を締め固めることを考えており、掘削土の混合率を 60 重量%未満とし、乾燥密度 1.8 Mg/m^3 以上とした場合には、有効粘土密度が 1.2 Mg/m^3 以上となる。

(3) アクセス坑道の設計

海底面下に地下施設を配置する場合、地上施設を地下施設の直上に配置できないことから (6.5.1.2 参照)、直上に地上施設を配置する場合と比較して必然的にアクセス坑道の延長が長くなる。処分場領域として、海底の地形、岩盤の透水性、必要な処分深度などを考慮して沖合部への配置を想定した地下施設レイアウトとアクセス坑道の検討例を図 6.5.1-6 に示す。

アクセス坑道が長くなると、アクセス坑道掘削に時間を要する、地下施設建設工期が長くなることに加え、地下施設の換気・排水設備の能力増強が必要になることなどが想定される。NUMO は、アクセス坑道の延長と建設工期、換気・排水設備能力などの関係を検討している。アクセス延長が 10km 程度を超えると建設工期に及ぼす影響を考慮し、第 2 次取りまとめで示されているアクセス坑道の本数を増やすか、坑道断面を大きくするなど設計上の対応が必要となる。

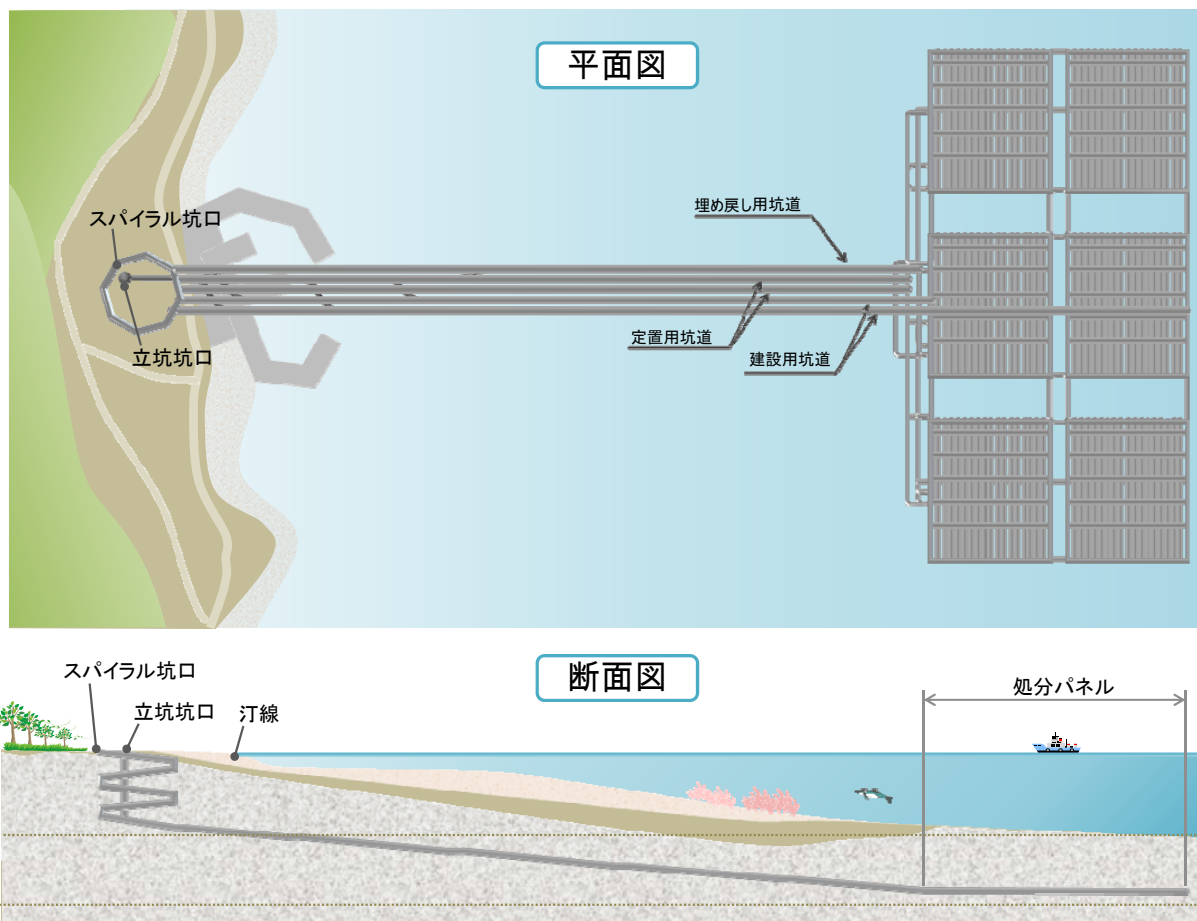


図 6.5.1-6 離岸距離が大きい場合のアクセス坑道を含む処分場レイアウト例

6.5.1.2 「廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約」への配慮

沿岸域における設計では、前述した技術的視点以外にも条約や法規制にも留意する必要がある。

海洋投棄による海洋の汚染を防止することを目的とした「廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約」（以下、ロンドン条約という）と呼ばれる国際条約があり、1996年の改正では従来よりも厳しい内容となり、廃棄物の海中への投棄と、海底下への廃棄も原則禁止とされている（環境省、2003a）。

ただし、1996年の改正では、海底下について「陸上からのみ利用することのできる海底の下の貯蔵所を含まない」と定めている（環境省、2003b）。そこで、廃棄体の地下施設への搬入口は、陸域に設置することを基本とする。

ロンドン条約に対応する国内法として、「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律」（以下、海洋汚染防止法という）があるが、同法は制定当時から原子炉等規制法および放射線障害防止法などの関連法令による体系が十全であることから、「第52条；この法律の規定は、放射性物質による海洋の汚染及びその防止については、適用しない」とされている（海洋汚染・海上災害防止法研究会編、1996）。

6.5.2 想定される地質環境特性へ対応するための処分概念・技術オプション

6.5.2.1 想定される地質環境特性へ対応する処分概念・技術オプションの考え方

多様な地質環境への対応の一環として、NUMOは、岩盤の力学強度が低く処分孔の自立性が悪い、あるいは、緩衝材を定置する個所への湧水があるなどの地下環境条件を想定し、それらの条件に対応できる処分概念・技術オプションを、現状の技術開発の到達レベルなどを勘案して検討している。なお、ここでいう処分概念・技術オプションとは、人工バリアの形態や組み合わせ、廃棄体の定置方式、処分坑道の断面などの処分概念と、操業技術の組み合わせのことで定義する。

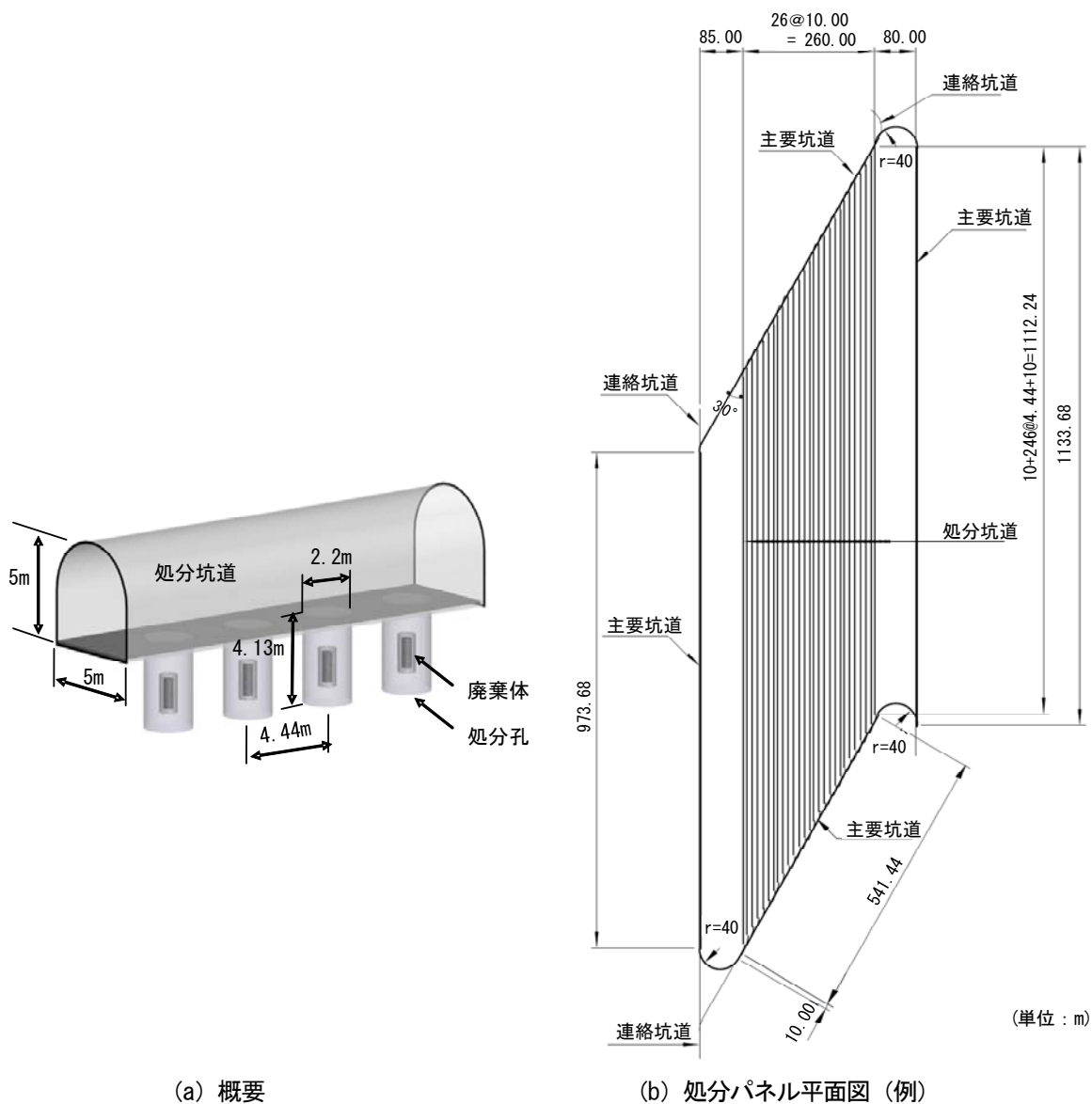
ここでは、第2次取りまとめで示されている代表的な処分概念である処分孔縦置き定置方式と処分坑道横置き定置方式を検討の出発点とし、まずそれらについて操業の作業性の観点から特徴や課題を整理する。そして、坑道内への湧水や高湿度環境といった地下環境において想定される条件のもとで、実際にこれらの処分概念に対して操業技術を適用する際の、処分概念への影響、適切な技術の組み合わせについて検討例を述べる。作業性については、工学的成立性に係る定置作業性、事業を進める上で重要な操業安全と効率性（物流性）に関する特徴を述べる。また、地下環境で想定される条件は、操業環境の維持の観点からその特徴を述べる。その上で、それらに対応する処分概念・技術オプションの検討例を説明する。

6.5.2.2 処分概念・技術オプションの基本形態の特徴

(1) 廃棄体定置方式

廃棄体の定置方式は処分概念を形作る上で重要な要素である。代表的な廃棄体定置方式として処分孔縦置き定置方式と処分坑道横置き定置方式がある（JNC, 1999b）。

処分孔縦置き定置方式は、処分坑道から掘削した処分孔の中に廃棄体と緩衝材を定置するものである。廃棄体は、坑道の力学的安定性の確保や、発熱による人工バリアへの閉鎖後長期の性能への影響などを回避するために必要な間隔を設けて定置される。処分孔の上部の処分坑道は、坑道を埋め戻すまでの間は物流経路として有効に利用できる。第2次取りまとめでは、硬岩において、1処分パネルに長さ1,100m程度の処分坑道27本を配置し、処分坑道に直径2.2m、深さ4.13mの処分孔を4.44mの間隔で配置する例が示されている（JNC, 1999b）（図 6.5.2-1）。



(a) 概要

(b) 処分パネル平面図 (例)

図 6.5.2-1 処分孔縦置き定置方式
(b) JNC, 1999b を一部加筆・修正)

処分坑道横置き定置方式は、処分坑道内に緩衝材と廃棄体がある間隔をおいて定置するもので、理想的には坑道の径を必要な人工バリアの径まで小さくできるため掘削量や埋め戻し量が少なくなるという特徴がある。第2次取りまとめでは、軟岩において、一つの処分パネルに長さ 600m 程度、直径 2.2m の処分坑道 35 本を配置し、処分坑道内に 3.13m の間隔で廃棄体を定置する例が示されている (JNC, 1999b) (図 6.5.2-2)。

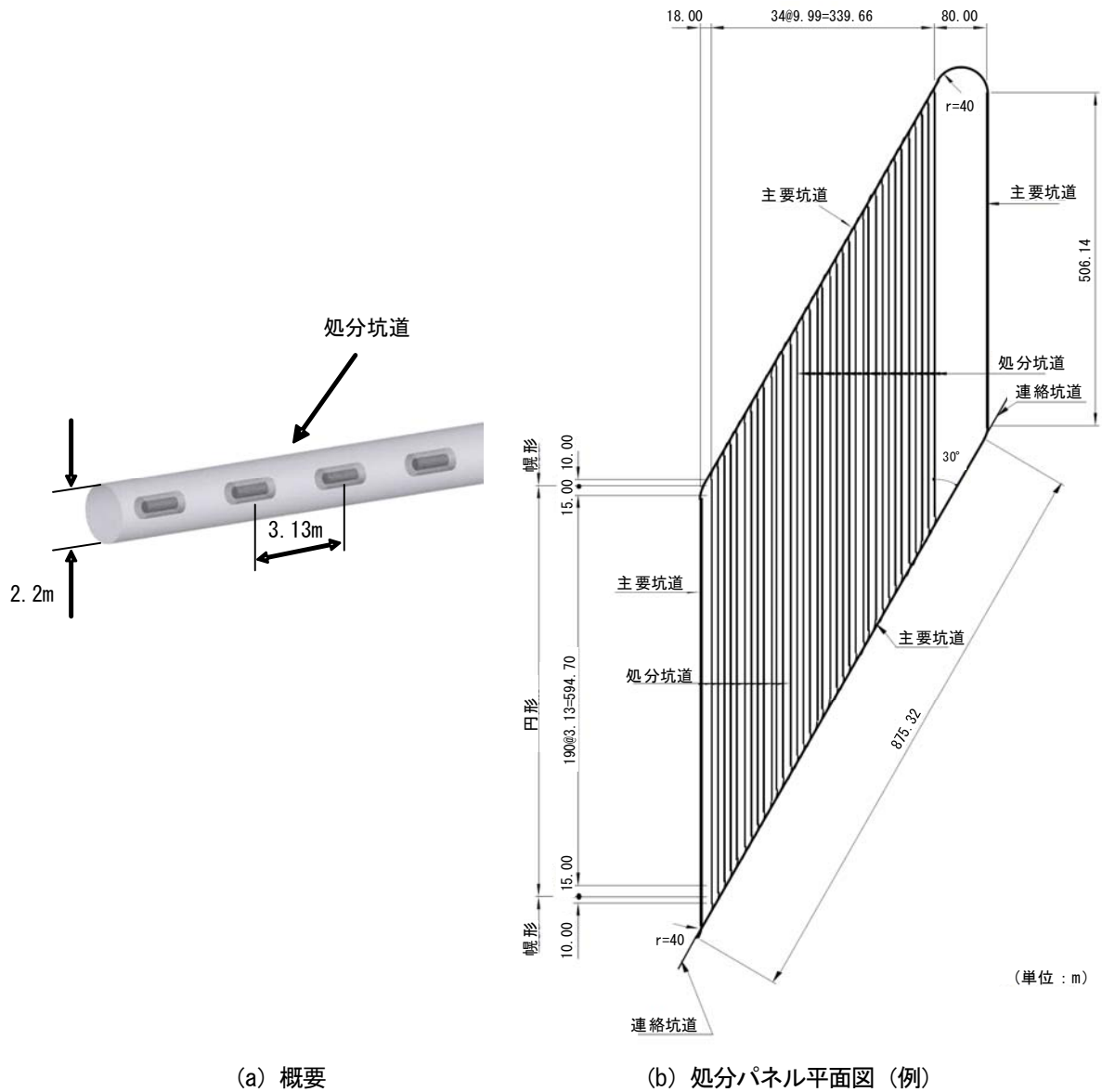


図 6.5.2-2 処分坑道横置き定置方式

((b) JNC, 1999a を一部加筆・修正)

(2) 搬送・定置技術オプション

処分孔縦置き定置方式と処分坑道横置き定置方式について、廃棄体と緩衝材を搬送・定置する作業技術のうち代表的なものを図 6.5.2-3 に示す (原環センター, 2006)。

ブロック方式は、複数に分割した緩衝材ブロックをあらかじめ地上施設で製作し、地下に搬送して組み立てるものである。底部および側部の緩衝材ブロックを設置後、廃棄体を定置し上部緩衝材ブロックを設置する。また、緩衝材の密度を確保するため、処分孔壁、あるいは処分坑道壁と緩衝材ブロックの間に生じる隙間を充填する必要がある場合には、緩衝材ペレットなどで隙間を充填する。

原位置締め固め方式は、緩衝材材料を地下に搬送し、原位置で所定の密度まで締め固め施工するものである。底部緩衝材を所定の密度・厚さに締め固め、廃棄体定置スペースを確保するためのリング

状内型枠を設置した後、側部緩衝材を撒き出し締固める。側部緩衝材締固め後に廃棄体を定置し、上部緩衝材を撒き出し締固める。

ペレット充填方式は、まず、廃棄体を定置するための底部緩衝材をブロック方式で施工し、その上に廃棄体を定置する。側部および上部緩衝材を地上で製作したペレット状の緩衝材を充填することにより構築する。

吹付方式は、まず、廃棄体を定置するための底部緩衝材をブロック方式で施工し、その上に廃棄体を定置する。側部および上部緩衝材を吹付により構築する。

PEM方式は、6.4.2.1で説明したとおり、廃棄体と緩衝材を地上施設において所定の形状に組み立てたものを、地下に搬送し処分孔内あるいは処分坑道内に定置するものである。

なお、それぞれの方式に関する技術の整備状況については、6.6.4.3で説明する。

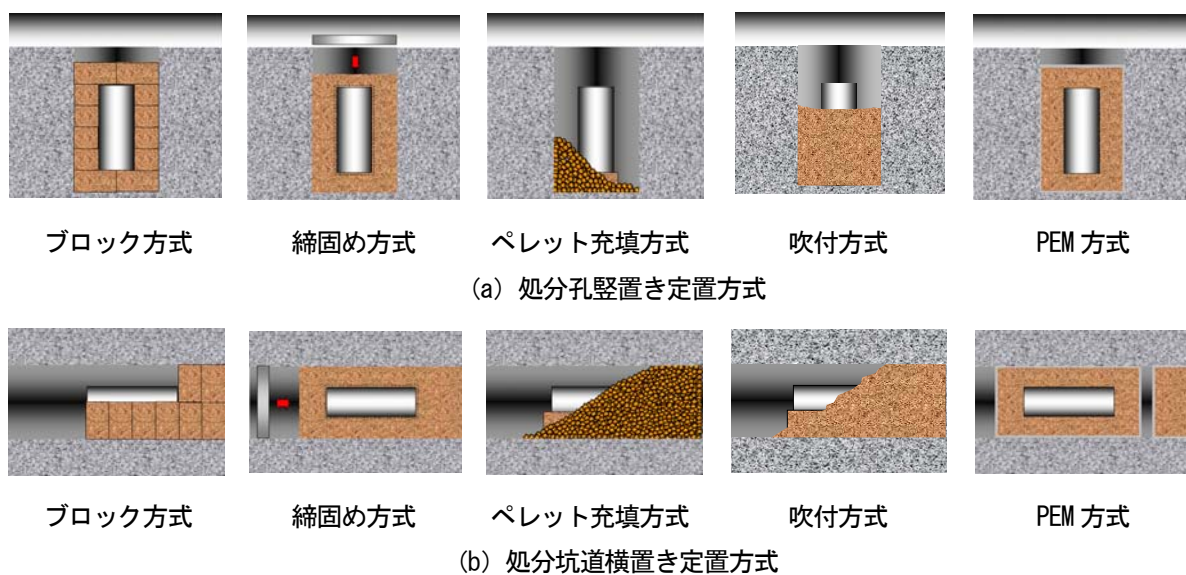


図 6.5.2-3 搬送・定置技術オプション
(原環センター，2006 に基づき作成)

(3) 現時点での有望な技術の組み合わせ

処分孔縦置き定置方式と処分坑道横置き定置方式について、適用する技術の組み合わせは種々のものが考えられるが、基盤研究開発成果(6.6.4.3 参照)や海外機関による技術開発状況などを踏まえ、現時点で有望な技術の組み合わせとして、以下の3パターンを設定した。なお、この設定は、ほかの組み合わせを排除するものではなく、今後の技術開発の進展や地質環境に応じて適切に判断し設定していくものである。

(i) 処分孔縦置き定置方式

処分孔縦置き定置方式については、6.6.4.3に示すとおり、基盤研究開発機関において、ブロック方式や締固め方式について実規模レベルでの製作・実証試験が行われており、その実現性が示されている(原環センター，2010b)。特にブロック方式は、緩衝材ブロックの製作と真空把持装置を用いた定置技術が開発されている(原環センター，2004a)。フィンランドの地層処分事業者である

POSIVA も、真空把持装置を用いて実規模の緩衝材ブロックの定置実証試験（外径 1,700mm，高さ 7,600 mm）を行い（図 6.5.2-4），ブロックの定置誤差を±25mm 以下にできること，3 時間あまりですべてのブロックを定置できることを確認している（POSIVA，2010）。これらの技術開発状況を踏まえ，ブロック方式を処分孔竖置き定置方式に適用できる有望な技術であると考ええる。



(a) 真空把持装置



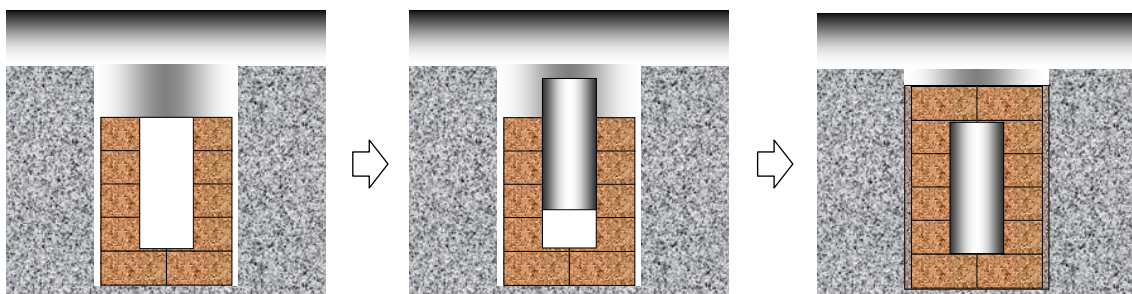
(b) 定置済みブロック



(c) 定置試験状況

図 6.5.2-4 フィンランドにおける緩衝材ブロック定置実証試験
（出典：POSIVA，2010）

処分孔竖置き定置方式の場合の基本的な作業手順を図 6.5.2-5 に示す。まず，(a) 底部および側部の緩衝材ブロックを定置し，次に，(b) 廃棄体を定置する。上部緩衝材定置後に，必要に応じて (c) 隙間を緩衝材ペレットなどで充填する。



(a) 底側部緩衝材ブロック定置

(b) 廃棄体定置

(c) 隙間充填

図 6.5.2-5 処分孔竖置き定置方式の基本的な作業手順

(ii) 処分坑道横置き定置方式（原位置施工方式）

処分坑道横置き定置方式は、狭隘空間での長距離かつ遠隔施工になること、廃棄体と緩衝材の定置方向も重力の作用する方向とは異なる水平方向であることなどから、搬送・定置作業の難易度は処分孔縦置き定置方式よりも高くなると考えられる。例えば、ブロック方式を適用する場合、ブロックの定置や廃棄体の定置作業には水平移動が伴うため、鉛直方向の定置と比べて荷重の支持方法など、定置装置の設計への要求事項が多くなる。また、処分坑道内を長距離移動し、定置済み緩衝材の位置を正確に認知した上で精度の高い緩衝材定置技術が必要になる。このような課題に対し、第2次取りまとめ以降、緩衝材の施工を簡便に行うための技術として、ペレット充填方式や吹付方式が基盤研究開発機関により開発されている（6.6.4.3 参照）。海外においても、スイスの地層処分事業者である Nagra は、粒状ベントナイトの模擬処分坑道内への充填試験を実施している（図 6.5.2-6）。ペレットあるいは粒状ベントナイトを充填する方式では坑道壁面の不陸に対して柔軟に対応できるというメリットがある。しかしながら、高密度の緩衝材を実現することは現状ではやや難しく、Nagra の事例における緩衝材の乾燥密度は 1.4 から 1.5Mg/m³ 程度と報告されている（ESDRED, 2009）。一方、吹付方式は 6.6.4.3 で示すように、高密度（乾燥密度 1.6Mg/m³）の緩衝材を狭隘空間においても施工できる実績があることから（原環センター, 2010b）、処分坑道横置き定置方式に適用できる有望な技術であると考えられる。

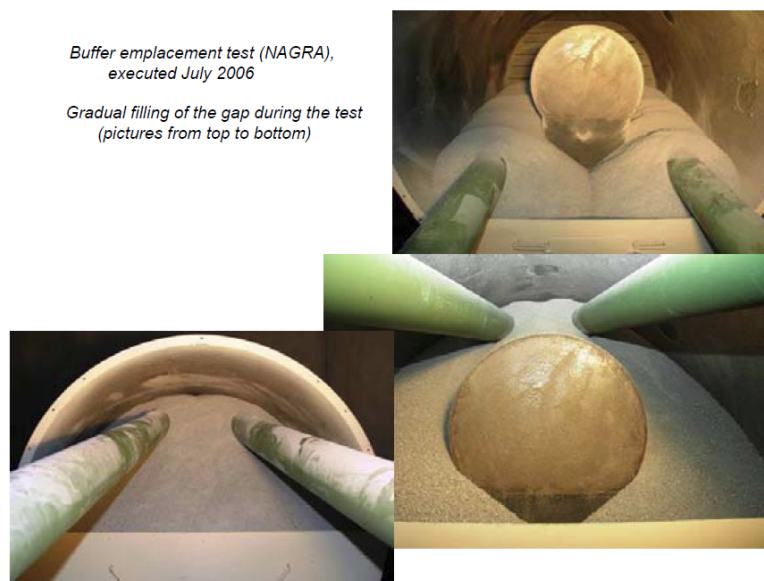
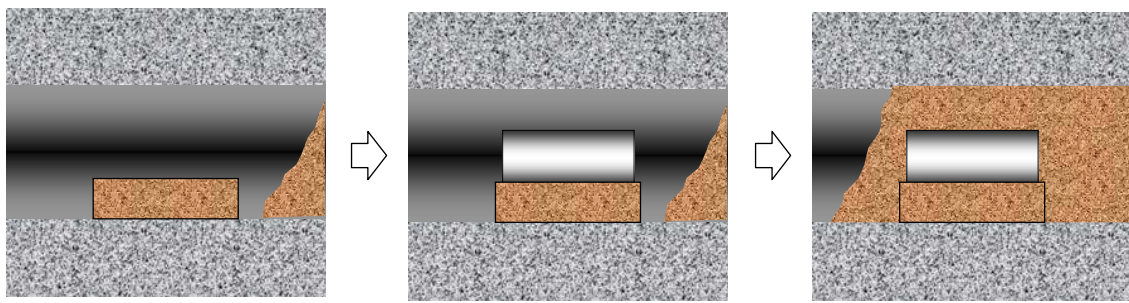


図 6.5.2-6 ESDRED における粒状ベントナイト充填試験状況
（出典：ESDRED, 2009）

処分坑道横置き定置方式の場合の基本的な作業手順を図 6.5.2-7 に示す。まず、(a) 底部に廃棄体を定置するための緩衝材を遠隔施工が比較的容易と考えられるブロック方式にて定置する。次に、(b) 廃棄体を定置する。廃棄体周囲の残った空間に (c) 吹付工法により緩衝材を施工する。



(a) 底側部緩衝材ブロック定置

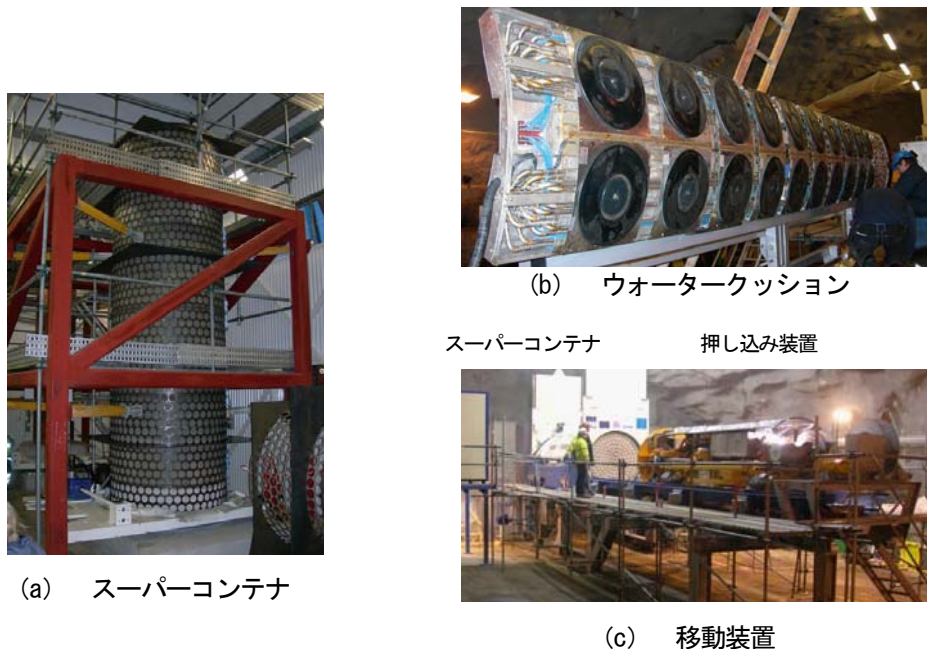
(b) 廃棄体定置

(c) 吹付施工

図 6.5.2-7 処分坑道横置き定置方式（原位置施工方式）の基本的な作業手順

(iii) 処分坑道横置き定置方式（PEM方式）

処分坑道横置き定置方式は、上記のとおり処分孔縦置き定置方式に比べて搬送・定置作業の難易度が高いと考えられる。原位置での処分坑道横置き定置方式の作業性と緩衝材の施工品質を向上させるための方策として、6.4.2.1で説明したPEM方式について検討を進め、第2次取りまとめ以降、6.6.4.3で示すように基盤研究開発により技術が着実に整備されている（原環センター，2004a, 2009b）。スウェーデンの地層処分事業者であるSKBは、廃棄体と緩衝材を一体化したスーパーコンテナ（外径1,765mm，長さ5,525mm，重量46t）をほぼ水平に掘削した坑道（直径1,850mm，長さ95m）内を移動させる実証試験を実施している（SKB，2008）。ウォータークッション装置により水圧でコンテナを浮上させ、押し込み装置で少しずつ押し込んでいく方式を採用している（図6.5.2-8）。



(a) スーパーコンテナ

(b) ウォータークッション

スーパーコンテナ 押し込み装置

(c) 移動装置

図 6.5.2-8 スウェーデンによるスーパーコンテナ移動実証試験
(SKB, 2008 を一部修正)

このような技術開発状況を踏まえ、処分坑道横置き定置方式については、PEM方式も適用できる有望な技術として考える。処分坑道横置き定置方式（PEM方式）の場合の基本的な作業手順を図

6.5.2-9 に示す。まず、PEM を地上施設で組み上げ、地下に搬送し、処分坑道内に定置する。PEM と処分坑道の坑壁には、PEM の搬送・定置の作業性の面から、ある程度の隙間（基盤研究開発では15cm 程度を想定（原環センター，2010b））を設ける必要がある。隙間の充填には狭隘部の施工に適した緩衝材ペレット充填工法を有望な技術として想定する。

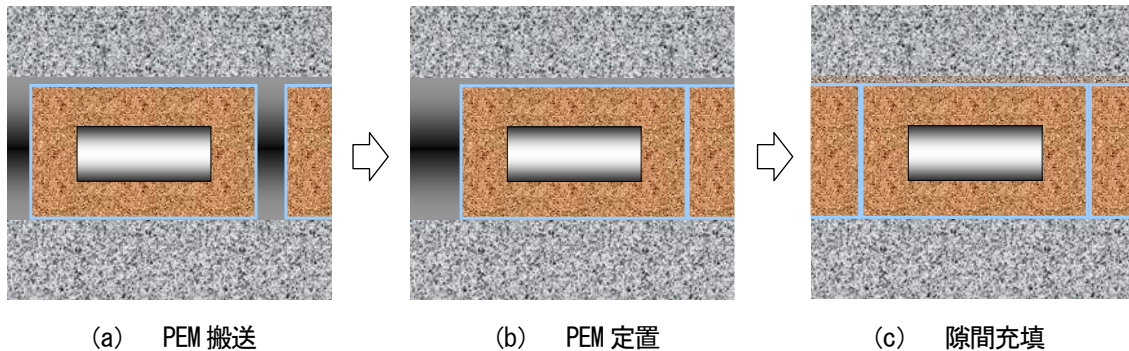


図 6.5.2-9 処分坑道横置き定置方式（PEM 方式）の基本的な作業手順

6.5.2.3 処分孔縦置き定置方式と処分坑道横置き定置方式の作業性

上記の設定は、現時点で有望な技術を組み合わせたものと考えているが、実際に作業を行うためには改善すべき課題は残されている。作業の特徴と課題は、サイトの地質環境の条件が詳細に特定されなくても、現実的な作業環境を想定することで検討が可能な「定置作業性」、「操業安全性」、および「作業の効率性（物流性）」の観点から説明する。

(1) 処分孔縦置き定置方式

【定置作業性の特徴】

処分孔縦置き定置方式では、緩衝材と廃棄体を処分坑道から処分孔内に順次定置する。定置装置自体は比較的広い処分坑道内で稼働するため、動作スペースの広さの観点から、定置装置の設計の自由度は比較的高いと考える。また、定置作業の方向は重力が作用する方向と同じであることから、作業にとっては有利な方向である。

【操業安全性の特徴】

定置装置が稼働する処分坑道の空間に比較的余裕があるため、定置装置が坑壁と接触し稼働停止状態に陥る可能性は少ない。定置装置が仮に処分坑道内を移動中に停止したとしても、廃棄体が遮へいのための装置の中に格納されていれば、作業従事者が坑道内に入り修理作業を行うことも可能である。また、処分坑道を埋め戻すまでは、処分坑道内は二方向からアクセスすることが可能であり、換気も坑道の全断面を利用した効率的な換気が可能である。

【効率性（物流性）の特徴】

定置装置が処分坑道を一方向に通り抜けることが可能であり、複数の定置装置の動線が錯綜しない。1本の処分坑道内に1日に複数の廃棄体を定置する場合でも、定置装置をすれ違いや待ち合わせをさせることなく数珠つなぎで稼働させることができるため、作業効率を高く設定できる。

(2) 処分坑道横置き定置方式（原位置施工方式）

【定置作業性の特徴】

定置装置は、直径が 2m 強の狭隘空間内を最大 600m 程度移動し、緩衝材と廃棄体を定置するため、狭隘空間内での長距離の遠隔作業になる。定置手順としては、底部緩衝材ブロックを定置し、廃棄体定置後、側部および上部緩衝材を施工する。吹付方式は、材料の圧送距離の制約から処分坑道の長さをポンプ圧送が可能な 100m 程度にまで短くする必要がある。定置作業は、1 本の処分坑道内で、廃棄体単位で緩衝材定置と廃棄体定置とを、必要な設備機械を入れ替えながら繰り返し進めることになる。

【操業安全性の特徴】

処分坑道は一旦緩衝材と廃棄体を定置すると一方向からのアクセスしかできなくなる。また、処分坑道内で廃棄体は遮へいされていないため、遠隔での作業になる。定置装置が稼働する処分坑道の断面が小さいため、定置装置が坑壁と接触し稼働停止状態に陥る可能性は処分孔縦置き方式よりも高いと考えられる。アクセスが一方向になるため、坑道換気はできない。緩衝材の品質確保のため、高湿度環境対策として換気が必要であれば風管などを用いて換気を行うことになる。風管を用いる場合、その移動や撤去作業を遠隔で実施する必要がある。

【効率性（物流性）の特徴】

定置作業空間が狭隘で、長距離の一方向アクセスとなるため、定置作業効率 は処分孔縦置き定置方式と比べると低い。

(3) 処分坑道横置き定置方式（PEM 方式）

【定置作業性の特徴】

PEM 方式は、処分坑道横置き定置方式（原位置施工方式）に対して、地上で廃棄体と緩衝材の組み立てを実施することにより、緩衝材の品質向上と搬送・定置の作業性改善を目的とした方式である。基盤研究開発では、処分坑道の断面積をなるべく広げずに重量物（約 35t）である PEM を搬送する方法として、鋼製セルの組み立てと PEM の搬送・定置方法に関する実証試験などが進められている（原環センター，2004a，2009c）。基盤研究開発で実証試験が進められている方法は、エアベアリングにより PEM の重量を支えて水平移動させ、定置位置でエアジャッキにより一時的に PEM 重量を支え、その間にエアベアリングを退避させ、その後エアジャッキの操作により PEM を定置する方法である。これにより狭隘空間における重量物搬送の実現性の見通しが示されているとともに、PEM を搬送する床面の不陸を 10mm 程度に抑える必要があることなどが確認されている（6.6.4.3 参照）。今後、坑壁と PEM のクリアランスや坑道線形からの搬送の制約、閉鎖後長期の安全性について PEM を構成する鋼製セルの残置による閉鎖後長期の安全性への影響についての検討が必要である。

【操業安全性の特徴】

処分坑道は一旦 PEM を定置すると一方向からのアクセスしかできなくなるなど、操業安全上の特徴は、基本的には原位置施工による吹付方式とほぼ同程度であると考えられる。隙間の充填作業が必要ない場合には、作業工程が PEM の搬送と定置に限られるため、操業安全面は向上する。

【効率性（物流性）の特徴】

定置作業空間が狭隘で、長距離の一方アクセスとなるため、PEM方式の効率性は処分孔縦置き定置方式と比べると低いと考えられるが、原位置施工による吹付方式と比較すると、定置作業の種類と回数が少なくなるため効率性は高くなる。

6.5.2.4 想定される地下環境の特徴と適応性

(1) 想定される地下環境の特徴

大深度で大規模な坑道群を建設する際には、従来のトンネル建設工事でも経験があるように、地質不良部と遭遇したり、突発的な湧水に見舞われたりすることが想定される。しかしながら、これらの事象に対しては、類似の建設工事で実績のある対策工を施すことにより対応できるものと考えている。ここでは、操業環境を維持する観点から、対応が必要と考えられる地下環境の特徴を述べる。

岩盤の力学特性については、縦置き方式の処分孔上部の岩盤（処分坑道底部）に応力が集中する傾向があり、岩盤の強度が低い場合には処分孔が無支保で力学的安定性を確保できないことも想定される。この場合は、処分孔の力学的安定性を確保するための対策が必要になる。

また、緩衝材の施工とその品質確保に影響を及ぼすと考えられる地下環境条件として、坑道内の湿度と緩衝材施工箇所への湧水が挙げられる。国内の文献（酢谷ほか，1991）によると、坑道内の相対湿度は70%～90数%であり、換気を行わない場合はほぼ100%と想定される。また、坑道内への湧水については、国内の文献（日本鉄道建設公団，1987；大島ほか，1987；日本トンネル技術協会，1983）によると、堆積岩（泥質岩など）で0～0.3ℓ/分/m、結晶質岩（花崗岩など）で0～0.6ℓ/分/mが想定される。これらを踏まえ、湿度や湧水に関して以下のことを想定しておく必要があると考えられる。

- ・ 坑道内の湿度は換気による管理を基本とするが、高湿度環境であると考えられる。
- ・ 延長の長い坑道なので、岩盤の状態に不均質性があり、湧水量も場所によって大小がある。
- ・ 通常のトンネルに比べて深度が大きき、間隙水圧が高いことが予想される。

高湿度、湧水を想定した場合の緩衝材の状態について、基盤研究開発機関と国外関連機関により以下の知見が得られている。

基盤研究開発機関では、ブロック型緩衝材の搬送技術に関する研究の予備試験として、ブロックの含水比などの製作条件を変化させて高温・高湿環境に暴露させた試験を行い、ブロックの性状変化を把握するとともに、環境影響を受けにくいブロック仕様を把握している（図 6.5.2-10）。この実験結果では、周辺環境湿度を考慮して含水比を高めに調整したブロックでは48時間後でも表面に亀裂は発生しないが（図 6.5.2-10，上欄）、含水比を低めに設定した場合にはブロック内の飽和度と周辺環境の湿度の差異により、吸水によるブロック表面の割れが発生する（図 6.5.2-10，下欄）。このことより、高湿度環境下に緩衝材ブロックをある程度の時間放置する必要がある場合には、緩衝材ブロックの製作時初期含水比を定置環境の湿度を考慮して適切に設定することが必要となる。ただし、高湿度環境を想定して高めに初期含水比を調整したベントナイトブロックは、地上での保管時に乾燥によるひび割れが発生するため、保管時には外気に触れないような処理を施しておく必要がある。

坑道内への湧水が緩衝材定置に与える影響について、SKB では水滴が緩衝材に落下した場合の緩衝材の膨潤状況を評価している (Börgesson et al., 2005) (図 6.5.2-11)。水滴がベントナイトブロックに落下するとベントナイトは急速に膨潤するため定置作業に影響を及ぼすことが想定される。このため、定置作業時はトンネル壁面からの滴水がブロックに触れないよう、防滴対策を施す必要がある。







状態・条件		試験開始時	7 時間後	48 時間後
高温高湿環境下 <u>問題なし</u>	ベントナイト:50% ケイ砂: 50% 含水比: 7% 乾燥密度: 1.9Mg/m ³ 温度: 45°C 湿度: 95%			
高温高湿環境下 <u>7 時間後より吸湿による剥離発生</u>	ベントナイト:70% ケイ砂: 30% 含水比: 4% 乾燥密度: 1.9Mg/m ³ 温度: 45°C 湿度: 95%			

図 6.5.2-10 高温高湿環境下での緩衝材ブロックの挙動
(原環センター, 2005 を編集)

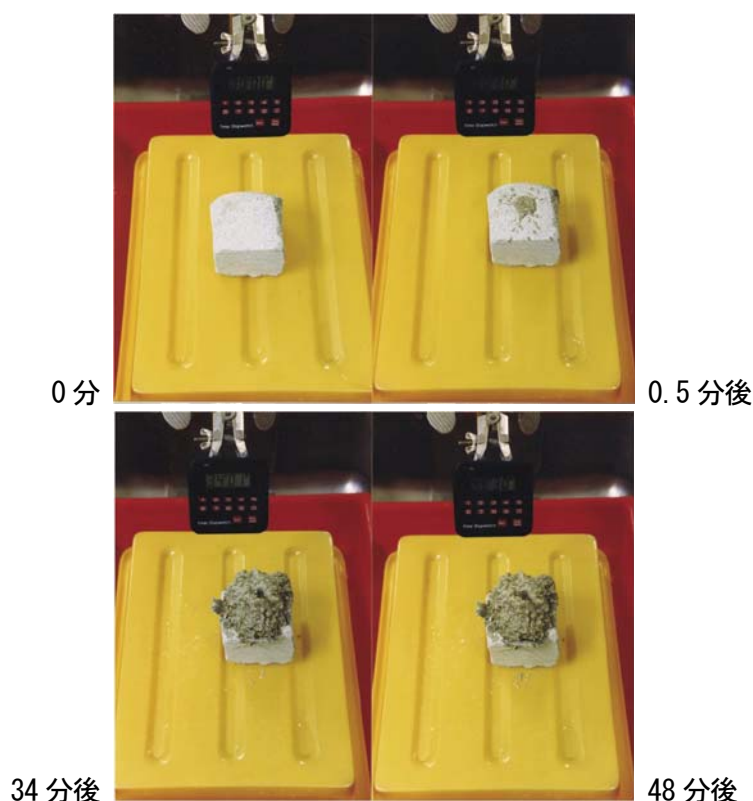


図 6.5.2-11 水滴落下試験
(出典 : Börgesson et al., 2005)

(2) 想定される地下環境への適応性

想定される地下環境に対して、処分孔縦置き定置方式と処分坑道横置き定置方式（原位置施工方式、PEM方式）の適応性を以下に説明する。

処分孔縦置き定置方式では、処分孔の自立性が良好でない場合に、支保工を施すことにより処分孔の力学安定性を確保する。坑道内の高湿度条件への対応は、換気が基本である。処分孔縦置き定置方式の場合、処分坑道を埋め戻すまでは坑道換気が可能であり、処分坑道内に外気を十分給気することにより坑道内の湿度を低下させることが期待できる。湧水がある場合は、処分孔内に地下水が溜まることになり対策が必要である。いずれの場合も、処分孔縦置き定置方式では対応すべき個所が「処分孔」として独立しているため、処分孔底部に溜まった湧水の汲み上げなど、必要な個所に必要な対策を施すという局所的な対応を施すことになる。なお、汲み上げた水は処分坑道内の排水設備を通して排水する。

処分坑道横置き定置方式では、原位置で緩衝材を施工する場合、処分坑道内の高湿度条件に関して、廃棄体定置後は換気が難しくなるので緩衝材の初期含水比の設定に留意する必要がある。また、坑道内への湧水が緩衝材定置に有意な影響を及ぼす場合は、処分孔縦置き定置方式の処分坑道内の排水設備のように坑道に沿った設備での対応になる。

PEM方式の場合は、PEM自体の搬送・定置には高湿度や湧水への対策は不要である。ただし、PEMと処分孔壁との隙間をベントナイト材料で充填する必要がある場合には、充填材の施工時に高湿度や湧水への対策を必要に応じて考慮する必要がある。

6.5.2.5 作業性と地下環境への適応性のまとめ

定置方式ごとの作業性と想定される地下環境条件への適応性を図 6.5.2-12 にまとめる。

処分孔豎置き定置方式は、作業性は良好であると考えられる。また、処分孔の力学安定性や湧水対策などの地下環境への適応性については必要に応じて処分孔ごとに局所的な対応を施すことになる。

処分坑道横置き定置方式のうち原位置で緩衝材を施工する吹付方式では、処分坑道長を短くして作業性を改善するとともに地下環境への適応性を向上させることが必要である。

PEM 方式は、品質確保の確実性と原位置施工の作業性改善を図る概念である。具体的に適用する技術は基盤研究開発が進められており、それらの成果を踏まえてさらに作業性の改善を図る処分概念・技術オプションを整備していく予定である。なお、PEM 容器には水密性を持たせる場合とそうでない場合が考えられる。水密性を持たせる場合は、PEM 本体の地下環境条件への適応性は高い。図 6.5.2-12 は PEM 容器に水密性を持たせた場合の説明を記載している。また、上記のとおり PEM と処分坑壁との隙間をベントナイト材料で充填する必要がある場合には、高湿度や湧水の影響を考慮した充填材の施工法を検討する必要がある。

図 6.5.2-12 では、作業性と地下環境への適応性の観点からそれぞれの方式を比較しているが、処分概念・技術オプションの特徴を総合的に比較する際には、6.5.2.7 で後述するように適切な因子などをもとに比較することも有効であると考えられる。

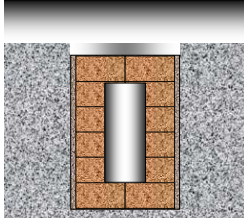
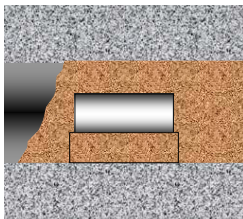
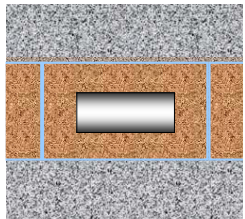
分類	処分孔縦置き 定置方式	処分坑道横置き定置方式		
		原位置施工方式	PEM方式	
作業性				
	【定置作業性】 処分坑道に空間的余裕があり、定置装置の空間的制約は少ない。 緩衝材ブロック製作・定置に関する要素技術は実証試験が行われている。	底部緩衝材ブロック、側部・上部緩衝材吹付に関する要素技術は開発済みである。 吹付材料の圧送可能距離に応じて処分坑道長を設定する必要がある。	狭隘空間での重量物搬送・定置に関する要素技術は開発中である。	
	【操業安全性】 処分坑道に空間的余裕があり定置装置の稼働は容易である。 坑道換気が可能である。 処分孔上部遮へい後、入坑が可能である。 2方向の入坑・避難経路が確保できる。	処分坑道内の換気は容易ではない。 廃棄体定置後は入坑することはできない。	処分坑道内の換気は容易ではない。 廃棄体定置後は入坑することはできない。	
【効率性（物流）】	搬送性は良好と考えられる。往復作業がないため作業効率を上げることができる。	狭隘空間での往復作業になるため、搬送距離が長いと効率が低下する。	狭隘空間での重量物搬送を含む往復作業になるため、搬送距離が長いと効率が低下する。	
地下環境への 適応性	【空洞安定性】	処分孔別に必要に応じて補強が必要である。	坑道断面が小さいので縦置き方式に比べて有利である。	坑道断面が小さいので縦置き方式に比べて有利である。
	【高湿度対策】	ブロックの初期含水比調整、処分坑道内換気により対応可能である。	高湿度対策として十分な換気を行うのは難しい。	緩衝材がPEM容器内に収納されているので、換気は不要である。
	【湧水対策】	処分孔別に湧水低減策、排水策、地下水と緩衝材の接触防止策で対応する。	処分坑道全線で排水工を施す。	鋼製セルに水密性を持たせる場合、本体については、湧水対策は不要である。 隙間充填に関しては、湧水対策を施す必要がある。

図 6.5.2-12 処分孔縦置き定置方式と処分坑道横置き定置方式の作業性と想定される地下環境条件への適応性

6.5.2.6 作業性および地下環境条件を考慮した技術オプション

(1) 処分孔竖置き定置方式

本方式では、廃棄体を定置する処分孔がそれぞれ独立しているため、対策が必要な個所について個々に対策を施すことが可能である。そこで、技術オプションは局所的な対応策を示す。

無支保で処分孔の安定が確保できないような場合には、図 6.5.2-13 に示すように吹付コンクリートを施したり、鋼製ライナーを建て込んだりするなどの対策が必要になる。また、処分孔壁は上部の肩部に応力が集中し力学安定性上の弱部になることが多いため、上部に補強リングを施し安定を図るという対策も考えられる。

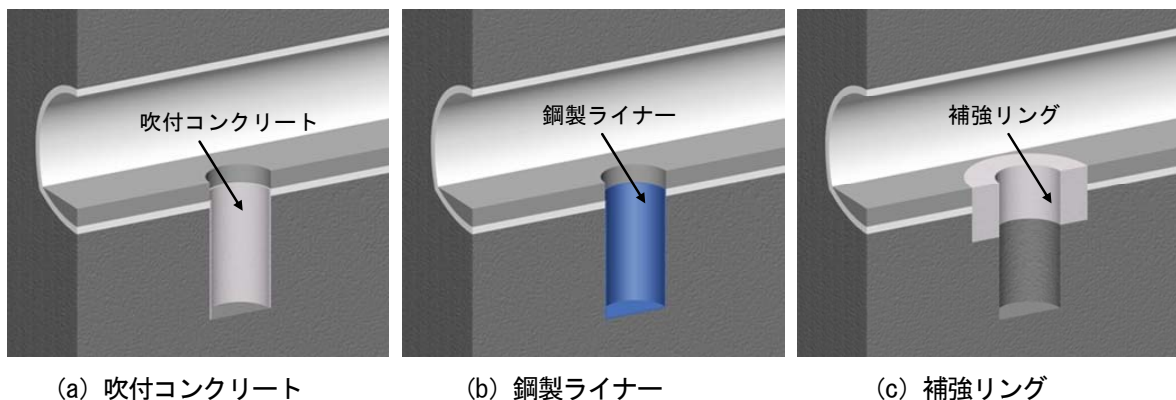


図 6.5.2-13 処分孔の力学安定性確保策

処分孔竖置き定置方式は、力学的な制約に加えて高湿度や湧水に対しては、個々の処分孔ごとに必要に応じて対策を施す。

図 6.5.2-14 には、想定される地下環境における処分孔竖置き定置方式の技術オプションの適用イメージを示す。湧水がない場合には通常の定置作業を行う。湧水がある場合で湧水量が非常に多いときは、その処分孔に廃棄体を定置することなく埋め戻し、放棄することもあり得る。湧水量が少ないときは、湧水対策を実施する。湧水対策としては、処分孔内への湧水を低減するため、処分孔周辺に水抜きボーリングを施し地下水を低下させる湧水低減策、処分孔内に浸入した地下水をポンプで排水する排水策、埋め戻し前の緩衝材と地下水との接触を鋼製ライナーなどを設置することで防止する接触防止策などがある。接触防止策は、鋼製ライナーの浮き上がりを防止するため鋼製ライナー背面の湧水をポンプで排水する必要がある。

湧水低減策は、処分孔内への湧水量は低減できるが、完全に止水することは困難であるため、緩衝材設置時から緩衝材の膨潤が始まることになる。

排水策は、緩衝材を定置する直前に処分孔内に溜まっている地下水を汲み上げる方法であり、この対応策も緩衝材定置時から地下水と緩衝材の接触が始まる。これらの二つの対策は処分孔内への湧水量が少ないときに有効であると考えられる。

湧水がある程度多くなると、接触防止策が有利になると考えられる。接触防止策で鋼製ライナーなどを使用するときは、処分孔の補強も兼ねることができると考えられる。また、湧水低減策と排水策は緩衝材定置時から緩衝材の膨潤が始まるため、処分坑道埋め戻しまでの間は緩衝材の処分坑道内への流出防止策を施す必要がある。

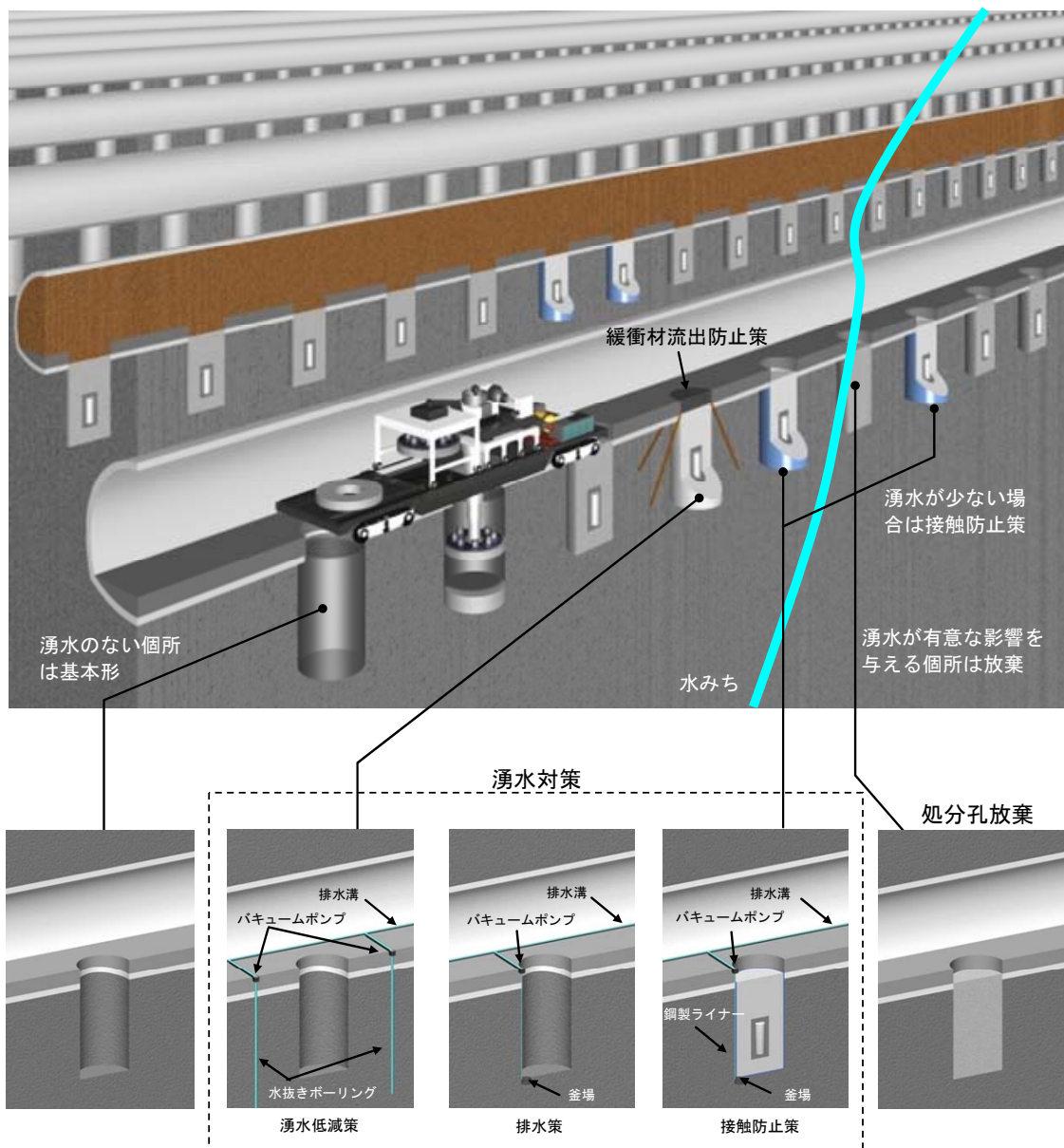


図 6.5.2-14 想定される地下環境条件を考慮した技術オプションの適用事例

(2) 処分坑道横置き定置方式（原位置施工方式）

処分坑道横置き定置方式では、まず、作業性を改善し操業環境維持の観点からの対策を加える。

作業性を考慮した処分坑道横置き定置方式（原位置施工方式）を図 6.5.2-15 に示す。処分坑道断面は第 2 次取りまとめで示されている坑道断面とほぼ同じ径とするものの、作業性や排水を考慮して坑道底部に定置装置走行用のインバートを設ける分だけ坑道断面を大きくする。底部緩衝材上には廃棄体の定置を安定させるための鋼製台座を設置する。廃棄体と廃棄体の間には、緩衝材の温度上昇を抑えるために必要な隔離を確保するために緩衝材ブロックからなるスペーサを設置する。廃棄体と緩衝材の設置手順を図 6.5.2-16 に示す。

坑道掘削後、坑道底部にインバートを施工し、底部緩衝材ブロックをインバート上に設置する。その上に廃棄体定置用台座を設置する。その後、廃棄体をインバート上を走行する専用定置装置により所定個所に定置する。インバートをガイドとして走行することにより、長距離遠隔移動の作業

性が改善される。廃棄体定置後、側部・上部緩衝材を吹付により施工する。吹付は、インバート上を走行する遠隔吹付装置により行う。

また、吹付では材料をポンプ圧送するが、圧送性を考慮して施工延長を最大 100m 程度に押さえる。処分坑道長は、坑道両側から 100m ずつ吹付施工することになるので、図 6.5.2-17 に示すように処分パネル内に作業坑道を 2 本追加し、処分坑道長が最大で 200m 程度になるようにする。なお、処分坑道端部には緩衝材の移動・流出を防止する力学プラグを設置する。

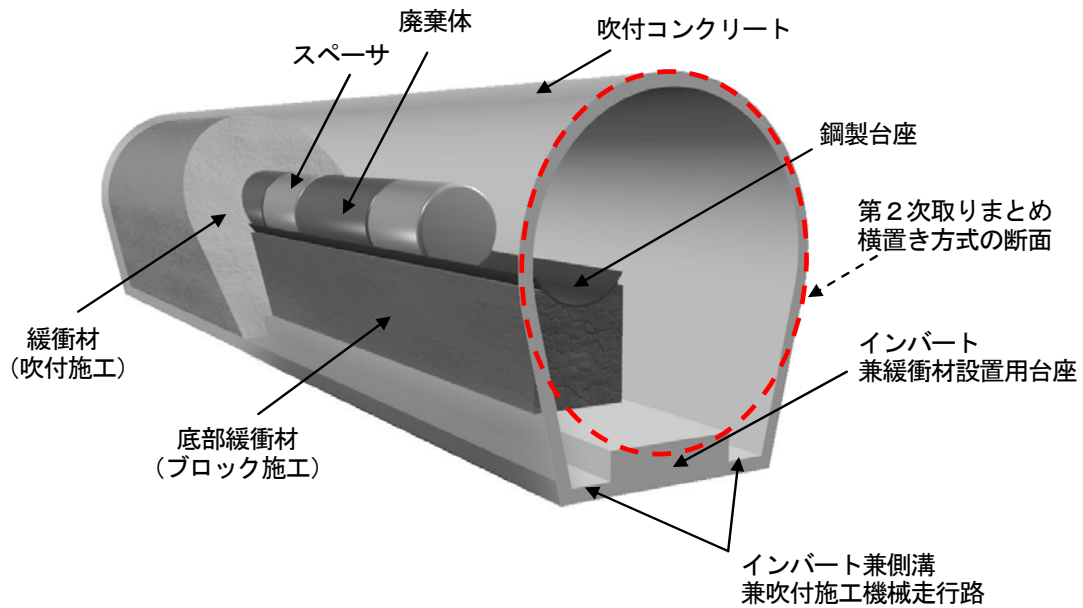


図 6.5.2-15 作業性を考慮した処分坑道横置き定置方式（原位置施工方式）

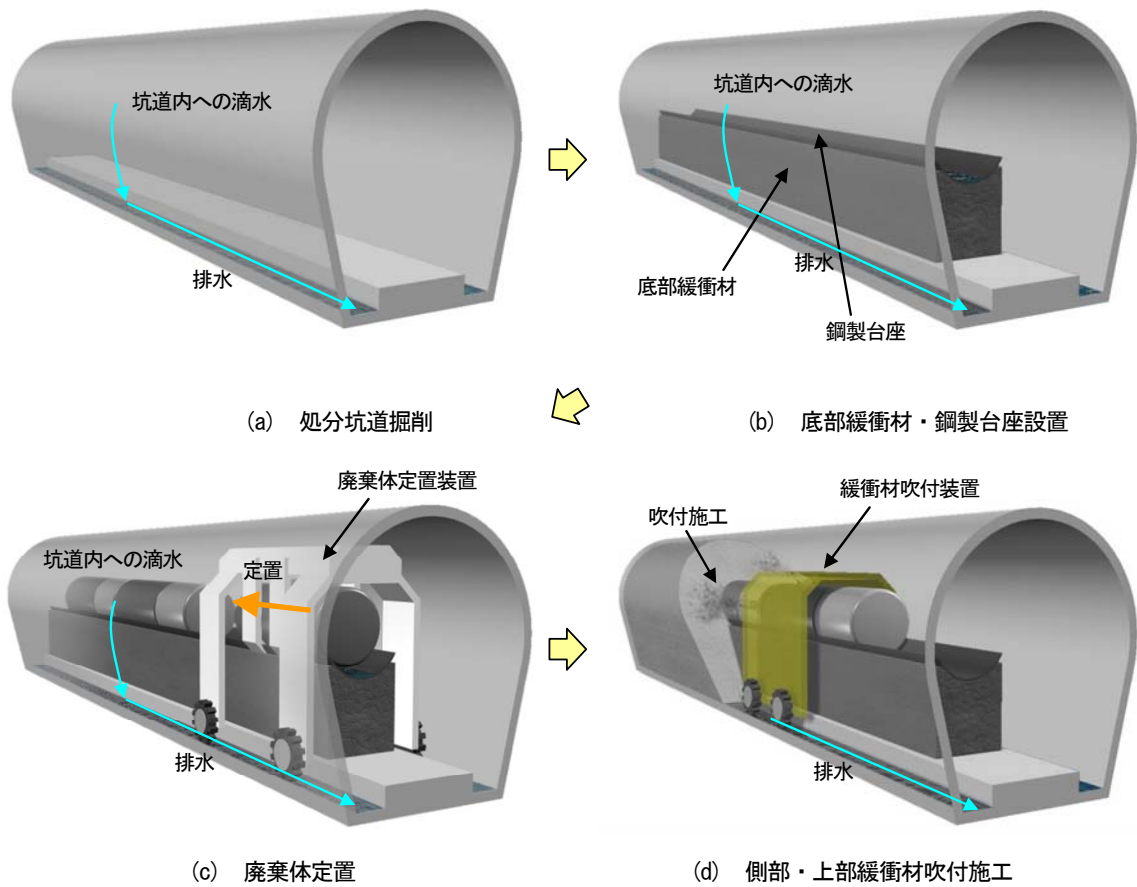


図 6.5.2-16 処分坑道横置き定置方式定置手順

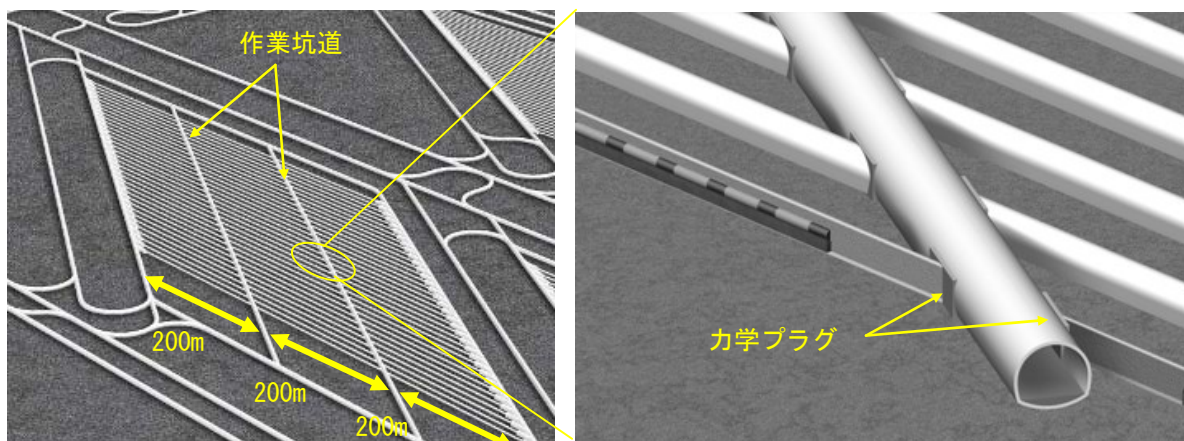


図 6.5.2-17 処分坑道横置き定置方式地下施設レイアウト

坑道内への湧水対策の方法としては、必要に応じて二次覆工背面に防水シートを敷設し、坑道内への浸入を遮断することで対応可能である。処分孔縦置き定置方式と異なり処分坑道単位で対策を施す。なお、図 6.5.2-15 で示した概念は、インバート部が側溝を兼ねており、湧水量が少ない場合には、防水シートを施さず坑道内に浸入する地下水、滴水などを直接側溝に流し排水することを念頭に置いたものである。

高湿度対策については、図 6.5.2-10 で示したとおり緩衝材の初期含水比を適切に調整することによる対応が考えられるが、底部緩衝材を放置する期間をなるべく短くするため、1 日あたりの廃棄体定置数を目安に処分坑道長を廃棄体 5 体分に相当する 25m 程度^{*})とした概念を図 6.5.2-18 に示す。

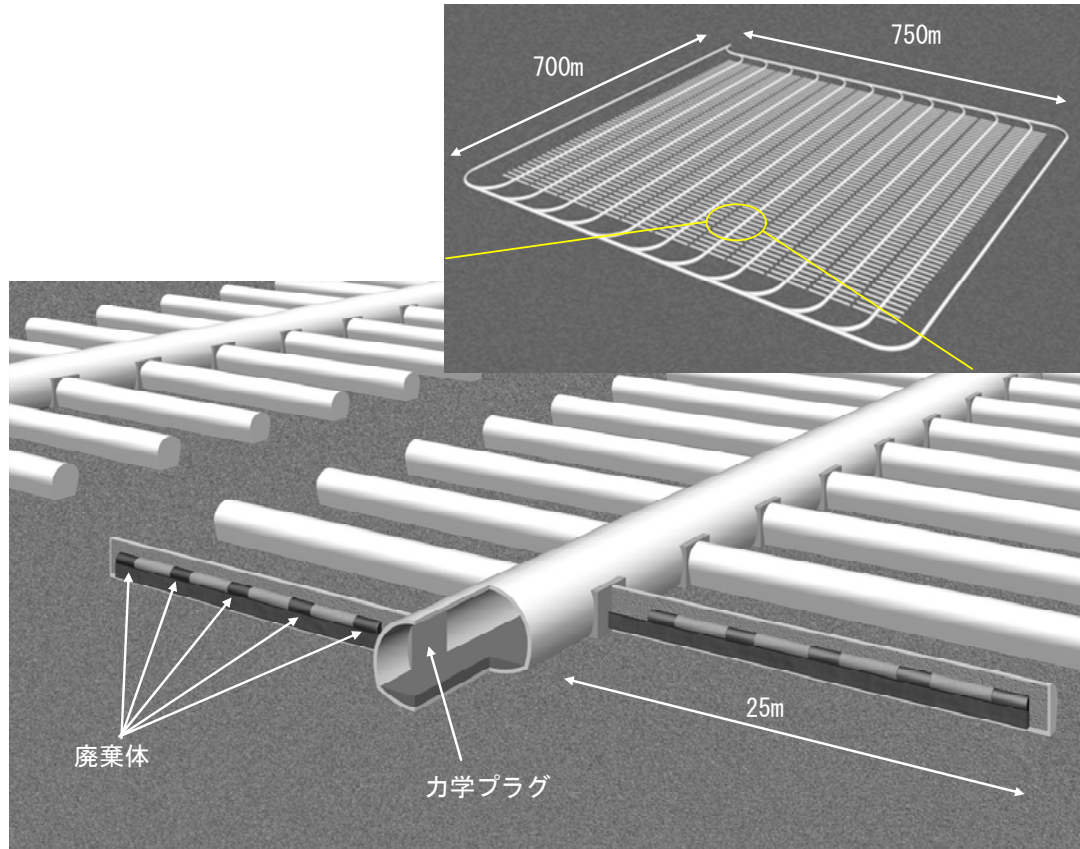


図 6.5.2-18 処分坑道レイアウト（短処分坑道版）

^{*}) 第 2 次取りまとめで示されている横置き定置方式の廃棄体ピッチより 20m (≒3.13m×6 (廃棄体両端部の緩衝材含む)) とカ学プラグ設置部などを考慮。さらに主要坑道とのすりつけ部の長さも必要。この場合、底部緩衝材定置と鋼製台座を設置後、早い時期に廃棄体 5 体を定置し、速やかに側部・上部緩衝材を施工することで、底部緩衝材が放置される時間を短くすることができる。

(3) 処分坑道横置き定置方式 (PEM 方式)

PEM方式は処分坑道横置き定置方式を対象に、地上施設であらかじめ緩衝材と廃棄体を鋼製セル内に格納し、地下施設へ鋼製セルを搬送・定置する方式である。PEMは坑道内での作業工数を削減し、人工バリアの品質の信頼性向上と作業の効率化が期待できる。一方、約35tと比較的重いPEMを狭隘な処分坑道内で、前方状況を確認しにくい状態で遠隔操作により水平に数百メートル移動させるための技術が必要となる。必要となる技術のうち、基盤研究開発ではエアジャッキとエアパレットを用いた搬送・定置概念を対象に技術開発が進められている（原環センター，2004a，2009cなど）(6.6.4.3参照)。

NUMO では、PEM の利点を考慮するとともに現状の技術開発レベルを踏まえ、重量物の PEM の処分坑道内における信頼性の高い搬送・定置装置として、処分坑道断面を拡幅し、PEM を上部から機械的に把持する概念について検討を実施している（図 6.5.2-19）。同図に示す概念は、図 6.5.2-20 に示すように隙間充填装置を連結した搬送装置が処分坑道に敷設した軌道

上を走行するものである。

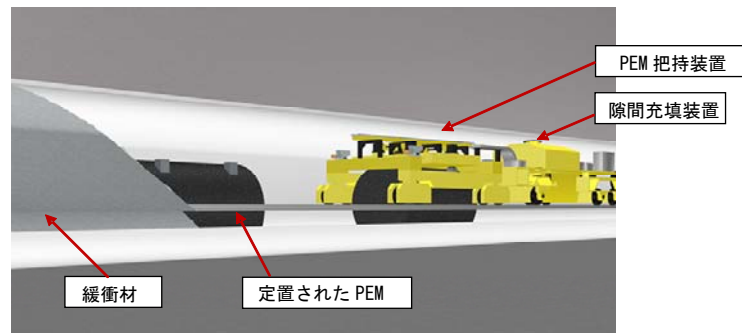


図 6.5.2-19 処分坑道断面の拡幅による作業性向上を指向した PEM の搬送概念

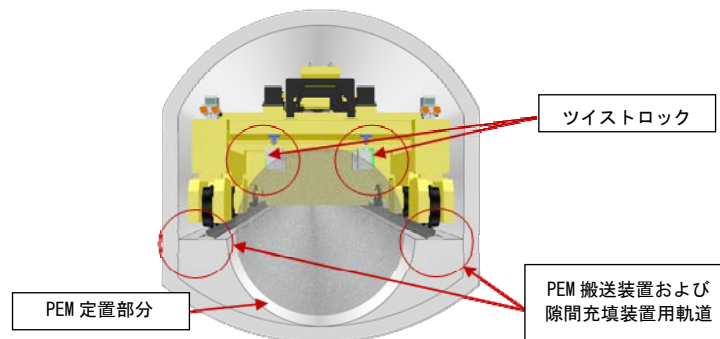
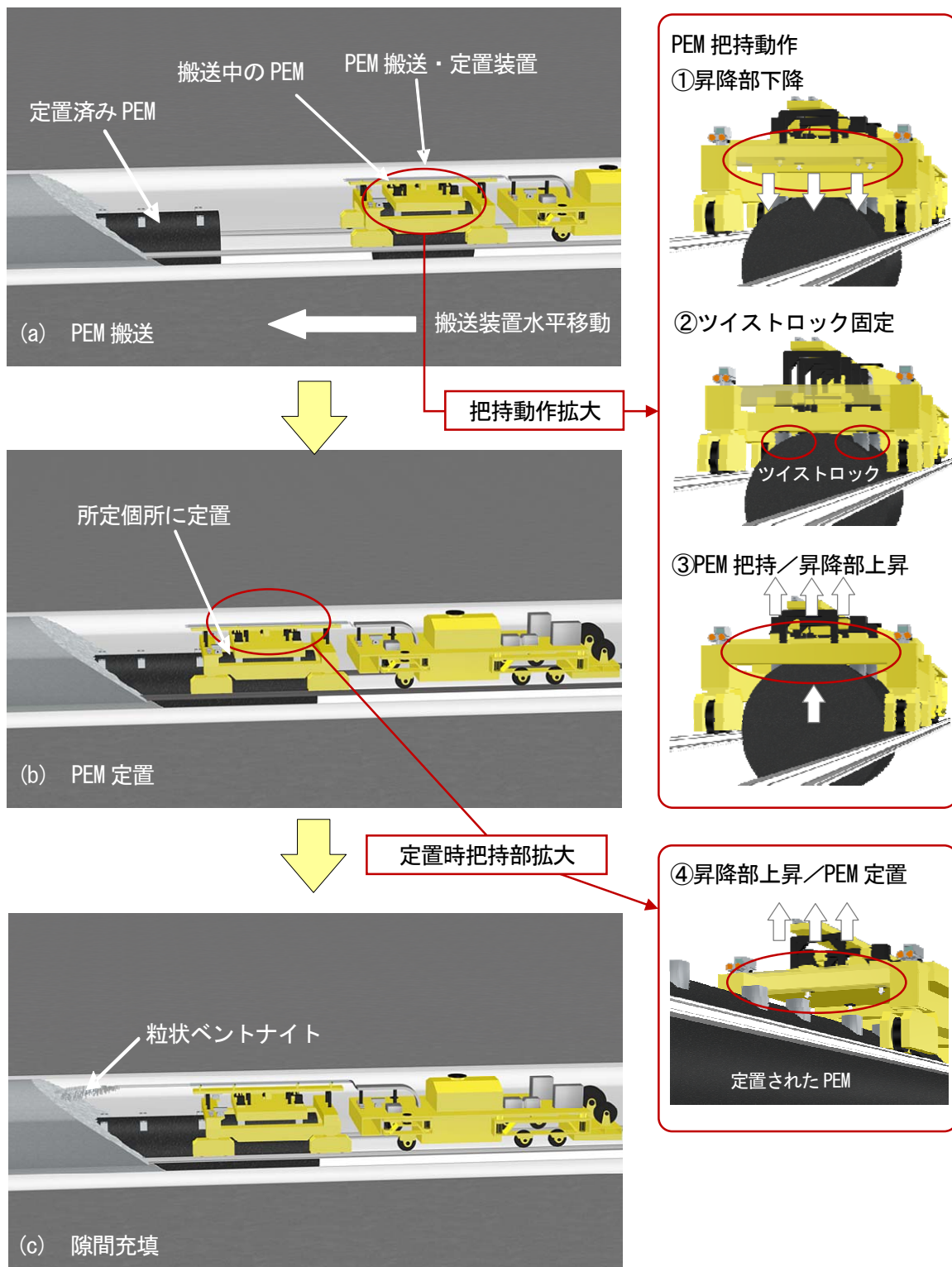


図 6.5.2-20 処分坑道断面を拡幅した PEM 概念（処分坑道断面形状例）

定置作業工程を図 6.5.2-21 の左側に示す。まず、(a) PEM を機械的に把持した搬送装置で処分坑道を所定位置まで水平移動する。(b) 所定位置において搬送車両を下降させて PEM を定置する。次に、一つ前に定置された PEM 周囲の空隙に、(c) ノズルにより粒状ベントナイトを充填する。粒状ベントナイトは PEM 定置装置に連結された充填材搬送装置のタンクに搭載し、PEM 搬送の作業工程の阻害にならないようにしている。また、PEM のツイストロックを用いた把持・搬送・定置時の動作概念を図 6.5.2-21 の右側に示す。

坑道を PEM の大きさよりも大きくすることにより、搬送装置の操舵性と PEM 前方の視認性が向上し、機械的な故障などのリスクへの対応性も向上すると考えられる。NUMO は、現状の技術開発状況を考慮し、基盤研究開発などにより処分坑道を拡幅する必要がない技術が確立されたと判断されれば、処分坑道断面の縮小などの合理化を積極的に図ることを考えている。



<定置作業工程>

図 6.5.2-21 処分坑道断面を拡幅した PEM 概念（把持・搬送・定置工程）

6.5.2.7 処分概念・技術オプションの特徴のまとめ

ここまで、操業技術の作業性、想定される地質環境への対応など工学的成立性の観点から処分概

念・技術オプションの検討例を説明した。それぞれの処分概念・技術オプションの特徴を以下に比較する。特徴比較には、処分場概念構築の際の評価基軸である設計因子（NUMO, 2004a）を参考に用いており、設計因子の中でも工学的成立性に着目した。表 6.5.2-1 には、設計因子による処分概念・技術オプションの特徴比較の視点をまとめる。

表 6.5.2-1 処分概念・技術オプションの特徴比較の視点

設計因子		特徴比較の視点
閉鎖後長期の安全性	放射性物質の移行	<ul style="list-style-type: none"> ・ 定置方式の形状に対する移行フラックスの大小 ・ 処分孔および処分坑道の掘削影響領域の連続性
	人工バリアの長期安定性	<ul style="list-style-type: none"> ・ ニアフィールドにおける残置物と人工バリアとの相互作用
操業安全性	放射線安全	<ul style="list-style-type: none"> ・ 遮へいの有無 ・ 事故時・復旧時の人のアクセスの可能性
	一般労働安全	<ul style="list-style-type: none"> ・ 避難経路の数・延長 ・ 換気・排水経路の数・延長 ・ 落盤の危険性
工学的成立性／品質保証	工程	<ul style="list-style-type: none"> ・ 処分坑道・処分孔の掘削速度
	定置作業性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 定置装置稼働部の空間的制約 ・ 緩衝材搬送・定置、廃棄体搬送・定置技術レベル
	技術開発の進展	<ul style="list-style-type: none"> ・ 実証試験による技術の成立性の確認
	効率性（物流）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 物流量 ・ 搬送・定置の作業量
	地下環境への適応性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 想定される地下環境条件への適応性
工学的信頼性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 建設・操業作業の地質環境条件の不確実性に対する柔軟性 ・ 操業条件（1日あたりの定置廃棄体数など）の変化に対する柔軟性 ・ 繰り返し動作の信頼性、メンテナンスの頻度、容易さ 	
サイト調査とモニタリング	<ul style="list-style-type: none"> ・ サイト調査のしやすさ ・ モニタリングのしやすさ 	
回収可能性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 回収のしやすさ ・ 実証試験による回収技術の成立性の確認 	
環境影響	<ul style="list-style-type: none"> ・ 施工数量（掘削土、排水） 	
社会経済的側面	<ul style="list-style-type: none"> ・ ステークホルダーの受容性 ・ 施工数量 	

「閉鎖後長期の安全性」については、処分孔縦置き定置方式における処分坑道周りの掘削影響領域と処分孔周りの掘削影響領域の連続性、処分坑道のロックボルト、セメント系支保工などの残置物の種類と量などに留意し、対象とする処分概念・技術オプションについて処分場の閉鎖後長期の安全性を判断する。

「操業安全性」では、処分概念ごとの操業安全性に関して、避難経路の数や延長、遮へいの有無、復旧作業時の人のアクセスの可能性、換気・排水経路などを評価し、操業安全性が十分に確保されているかどうかを判断材料となる。

「工学的成立性／品質保証」では、処分場の建設・操業・閉鎖について、品質保証を含めて技術的な実現可能性を評価する。操業だけでなく、建設・閉鎖を含めた実現可能性を判断する必要がある。例えば、全体工程の制約がある場合、処分孔縦置き定置方式における処分孔の掘削速度が十分かなどについても評価する（6.4.1.2 参照）。緩衝材や廃棄体の定置技術の完成度や地下環境への適応性は設計因子の中でも重要な評価項目である。現時点においては、現在の技術レベルだけで判断するのではなく、開発中の技術の今後の見通しや、今後の技術開発への投資対効果も含めて判断することになるが、レファレンス処分場概念を絞り込んでいく精密調査地区選定段階では、その時点で最も信頼性の高い技術を優先的に選んでいく。

「工学的信頼性」については、換気・排水などの設備、あるいはエレベータやずり出し装置など、建設にかかわる設備や、緩衝材や廃棄体を搬送・定置する装置について、地質環境条件の不確実性に対する柔軟性を判断する。また、1日あたりの廃棄体定置数などの前提条件の変動に対する柔軟性を持つことが重要である。

「サイト調査とモニタリング」については、サイト調査とモニタリングのしやすさが重要になる。

「回収可能性」については、定置後閉鎖前までの廃棄体の回収の容易さが判断材料となる。処分孔縦置き定置方式では、処分坑道を埋め戻す前までは、回収すべき廃棄体の直上までアプローチすることができ、個別に廃棄体を回収することができる。一方、処分坑道横置き定置方式では、定置済み廃棄体を端部から順番に回収していく必要がある。これらの違いをどう評価するかが処分概念と技術オプションを絞り込む際の判断指標となる。

「環境影響」については、地層処分事業に関するすべての環境影響を評価する。掘削量、埋め戻し量など、施工数量が増えると一般的には環境に与える影響も大きくなるため、極力施工数量が小さい処分概念が有利である。

「社会経済的側面」については、ステークホルダーの受容性や処分費用が評価指標となる。後者については、掘削量、埋め戻し量、換気・排水量などが施工数量に依存するため、施工数量の小さな概念と技術オプションが有利である。

サイト選定の進展とともにこれらの特徴を総合的に比較し、処分概念・技術オプションを絞り込んでいくことになるが、それぞれの因子や判断指標の重み付けは、地質環境の情報の充実度やその時点での技術到達レベルによって異なる。また、絞り込みが、その時点における最も信頼性の高い技術を選ぶものなのか、それとも、その時点では未完成ながら、完成するとより信頼性の高い技術が実現することを見越し、次段階の技術開発目標を明確にするためのものなのかなどによっても異なる。このように因子そのものの重み付けも変化させながら、段階に応じた絞り込みを行っていく。サイトが特定されていない現時点では、定量的な比較はできないが、6.5.2.6 で示した処分概念・技術オプションの特徴について、上記の視点に照らして整理した結果を図 6.5.2-22 に示す。

設計因子		処分孔縦置き定置方式 	処分坑道横置き定置方式		
			原位置施工方式 	PEM方式 	
閉鎖後長期の安全性		処分孔と処分坑道の掘削影響領域の連続性	処分坑道インバート部のセメント系材料の影響	処分坑道インバート部のセメント系材料の影響	
操業安全性		処分孔上部遮へい後、入坑可能 避難経路として2方向確保	廃棄体定置後は入坑不可	廃棄体定置後は入坑不可	
工学的成立性 ／ 品質保証	工程	処分孔を掘削する必要がある	処分孔掘削の必要性がない	処分孔掘削の必要性がない	
	定置作業性	処分坑道に空間的余裕があり、定置装置の空間的制約は小さい 緩衝材ブロック製作・定置に関する要素技術は実証試験が実施されている	底部緩衝材ブロック、側部・上部緩衝材吹付施工に関する要素技術は開発済み	遠隔での重量物搬送・定置技術は開発中	
	効率性（物流）	搬送性は良好と考えられる	搬送性は縦置き方式より難易度が高い	坑道断面を大きく確保すれば搬送性は良好と考えられる	
	地下環境への適応性	空洞安定性	処分孔ごとに必要に応じて補強	坑道断面が小さいので安定性は確保しやすい	坑道断面が小さいので安定性は確保しやすい
		高湿度対策	処分坑道内換気により対応	風管換気になるが難易度は高い	換気は不要
	湧水対策	処分孔別に湧水低減策、排水策、地下水と緩衝材の接触防止策で対応	処分坑道単位で排水工を施す	水密なPEM容器に対する湧水対策は不要	
工学的信頼性		—	—	—	
サイト調査とモニタリング		—	—	—	
回収可能性		処分坑道の埋め戻しまでは回収すべき廃棄体の直上までアプローチすることが可能	処分坑道端部から順次回収する必要がある	処分坑道端部から順次回収する必要がある	
環境影響		掘削土量：大	掘削土量：小	掘削土量：中	
社会経済的側面		施工数量：大	施工数量：小、ただし作業坑道の追加や力学プラグの追加が必要	施工数量：中	

—：今後明確化していく事項

図 6.5.2-22 設計因子に基づく処分概念・技術オプションの特徴整理

6.6 工学的対策を支える技術の整備

6.6.1 工学的対策を支える技術の概要

前節までに、処分場に求められる技術要件、処分場の設計、建設・操業・閉鎖方法、ならびに適切な工学的対策に関する NUMO の技術的取り組みについて説明した。本節では、処分場の設計、建設・操業・閉鎖技術を支える技術として、人工バリア材料の長期挙動などの現象理解や建設・操業に係る技術開発に関する基盤研究開発成果を中心に、以下の項目について、技術が着実に整備されていることを説明する。

- ・ 人工バリア材料の基本特性と長期挙動に関する技術の整備状況 (6.6.2)
 - ・ ガラス固化体の長期挙動 (6.6.2.1)
 - ・ オーバーパックの長期挙動 (6.6.2.2)
 - ・ 緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用 (6.6.2.3)
 - ・ 低アルカリ性セメントの開発 (6.6.2.4)
- ・ 地層処分施設の耐震性評価 (6.6.3)
- ・ 建設・操業・閉鎖技術 (6.6.4)
 - ・ 低アルカリ性セメントの実施工への適用性確認 (6.6.4.1)
 - ・ オーバーパックの遠隔溶接・検査技術 (6.6.4.2)
 - ・ 緩衝材の製作・搬送・定置技術 (6.6.4.3)
 - ・ 廃棄体回収技術 (6.6.4.4)

NUMO は適切な役割分担のもと、技術開発を基盤研究開発機関と連携して進めている。表 6.6.1-1 に工学的対策に関する技術開発項目のうち、第2次取りまとめから現在まで開発を進めている項目と、本節での記載個所の関係を示す。なお、表 6.6.1-1 には、前節までの関連する個所も示した。

6.6.2 では、人工バリア材料の長期挙動に関する第2次取りまとめ以降の進展について概説する。閉鎖後長期の処分場の安全機能や技術要件を設定あるいは決定する上で、人工バリア材料の長期挙動を理解することが重要である。また、「オーバーパックの設計」や「緩衝材の設計」を行う際には、異種材料間の相互作用やオーバーパックの腐食挙動に関する知見が不可欠である。これらは、第2次取りまとめ以降に基盤研究開発などにおいてその理解が深まっている。NUMO では2002年より国内の大学や研究機関の専門家からなる委員会を組織し、人工バリア長期挙動に関する国内外の最新の研究動向を調査・分析するとともに、基盤研究開発機関をリードしながら、優先的に取り組んでいく課題を設定している。また、2004年にセメントーベントナイト相互作用に関する国際ワークショップ、2005年には、鉄ーベントナイト相互作用などの人工バリアの長期挙動に関する国際ワークショップを開催し、海外の専門家との間で知見を共有し、また、その解決策について情報交換を行った。

6.6.3では、地層処分施設の耐震性評価について説明する。地層処分施設の地震時の安全性については、第2次取りまとめ (JNC, 1999b) および第2次TRUレポート (電事連・JNC, 2005) において検討されているが、2006年9月の「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」(原子力安全委員会, 2006) の改定や「2007年新潟県中越沖地震」の発生を受け、近年では原子力施設に対し最新の知見を反映した耐震性評価が実施されている。第一種廃棄物埋設事業に関する耐震設計審査指針は未策定であるが、2010年8月に策定された「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え

方」(原子力安全委員会, 2010)によれば,地震に対する設計上の考慮について,次のような記述がある。

「廃棄体の取り扱い中の落下事故あるいは一時貯蔵時の転倒事故などを想定しても,放射性固体廃棄物が容器に固型化されており容易に飛散する恐れがない場合,含有する放射性物質が飛散することがないように放射性固体廃棄物が封入されるよう廃棄体が設計されている場合,あるいは取り扱う放射性固体廃棄物の放射能濃度が一般公衆の被ばくの観点から十分に低い場合には,耐震設計上の重要度分類のCクラスの施設に対応するものとして定め,これに適合しない場合には,耐震設計上の重要度分類のBクラスの施設に対応するものとする。」

これより,地層処分施設についても耐震重要度に応じた耐震設計は必須になると考えられる。ここでは,施設への影響が大きいと考えられる地震動(水平動および鉛直動)を模擬的に設定し,地層処分施設の耐震性について,操業時の空間保持の観点から評価を行ったので,その内容を紹介する。

6.6.4では,処分場の建設・操業・閉鎖技術に関する技術開発状況を説明する。2000年にNUMOが設立され,2002年に公募方式による処分場の候補サイトの選定を開始したことを受け,応募区域の地質環境に適合する処分場概念の構築を円滑に進めていくため,建設・操業・閉鎖技術においても多様な地質環境への適応性を検討する必要性が生じた。そのため,基盤研究開発では,第2次取りまとめ以降,操業技術に関する実規模あるいは工学規模の実証試験を含めた種々の要素試験が実施され,廃棄体や人工バリアの製作・搬送・定置に関する技術が整備されている。また,JAEAによる瑞浪,幌延での深地層の研究施設の建設が始まり,地層処分施設の建設にかかわる有用な知見が培われている。処分場の建設については,瑞浪,幌延の深地層の研究施設などの建設を通じて,低アルカリ性セメントの実施工への適用性確認試験も実施されている。操業技術については,6.4あるいは6.5.2で説明したとおり,基盤研究開発において,オーバーパックあるいは緩衝材の製作・搬送・定置技術の整備が着実に進められている。6.6.4.2と6.6.4.3では,オーバーパックの遠隔溶接・検査技術と緩衝材の製作・搬送・定置技術の技術開発状況を説明する。

6.6.4.4では,廃棄体の回収技術について説明する。『高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第1次報告)』(原子力安全委員会,2000)では,「処分場の閉鎖に際しては,建設段階および操業段階に得られたデータを追加し,安全評価の結果が妥当であることの確認を行う。また,その妥当性を確認するまでの期間は,高レベル放射性廃棄物の回収の可能性を維持することが重要である。」とされている。また,『高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について』(総合資源エネルギー調査会,2008)では,「埋設事業において,閉鎖までの間は,基本的に廃棄体を回収することは可能と考えられるが,これを安全かつ効率的に実施するために,回収可能性に配慮した設計の採用や具体的な回収手段を検討しておくことが重要と考えられる。」とされている。このような背景を踏まえ,閉鎖を開始するまでの期間の回収の具体的な方法や技術について,NUMOの検討状況や基盤研究開発機関における研究開発成果について説明する。

表 6.6.1-1 工学的対策における技術開発項目と本節での記載項目

主な実施項目		第2次取りまとめから現在までに開発を進めている項目	本節での記載箇所	備考：6.2から6.5での関連箇所
処分施設の仕様の設定(地下調査施設も含む)	長期状態設定技術	○	6.6.2 人工バリア材料の基本特性と長期挙動に関する技術の整備状況	6.2 処分場の安全機能と技術要件
	空洞安定性評価(操業中・長期)	○	6.6.3 地層処分施設の耐震性評価	6.3.3.2 坑道仕様・廃棄体定置仕様の設定
処分施設の建設工法の設定と施工	坑道・処分孔掘削技術	○		6.4.1 処分場の建設
	ずり出し技術	○		
	低アルカリ性セメントの施工技術	○	6.6.4.1 低アルカリ性セメントの実施工への適用性確認	
	グラウト・埋め戻し・閉鎖・シーリング技術	○		6.4.3 処分場の閉鎖
ニアフィールド長期挙動評価把握	ニアフィールド相互作用を考慮した長期挙動評価	○	6.6.2.1 ガラス固化体の長期挙動 6.6.2.2 オーバーパックスの長期挙動	
	緩衝材長期挙動評価(変質・流出・変形)	○	6.6.2.3 緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用	
人工バリア仕様設定	オーバーパックス代替材料開発	○	6.6.2.2 オーバーパックスの長期挙動	
	オーバーパックス長期腐食挙動評価	○		
	技術要件整理	○	6.6.2 人工バリア材料の基本特性と長期挙動に関する技術の整備状況	6.2 処分場の安全機能と技術要件
人工バリア施工方法と定置(その1)	オーバーパックス溶接・搬送・定置技術	○	6.6.4.2 オーバーパックスの遠隔溶接・検査技術	6.4.2 処分場の操業
	緩衝材製作・搬送・定置技術	○	6.6.4.3 緩衝材の製作・搬送・定置技術	
	(PEM 製作・搬送・定置技術)	○		
人工バリア施工方法と定置(その2:設計・施工管理, 検査対応)	オーバーパックス検査技術	○	6.6.4.2 オーバーパックスの遠隔溶接・検査技術	
	緩衝材検査技術	○		
	品質確認	○		6.4.2 処分場の操業

6.6.2 人工バリア材料の基本特性と長期挙動に関する技術の整備状況

NUMO では、設計・安全評価に反映することを目的として、人工バリア材料の基本特性と長期挙動の理解について、国内外の研究成果を調査し、専門家の意見とともに取りまとめている。図 6.6.2-1 に、人工バリアとその周辺の支保工や岩盤を含む領域で生起する可能性のある物理的・化学的な現象を、高レベル放射性廃棄物の人工バリア構成を例として模式的に示した。ニアフィールド要素の複雑な相互作用のなかでも重要となる地下水の影響を考慮し、地下水の変遷と各人工バリア材料間の相互作用による影響を示している。ここで取り上げた現象は、FEP⁶¹リストなどに取り上げられている複数の現象から、個々の現象の物理的・化学的な相互関係を PID⁶²として整理し、特に重要なプロセスとして抽出した現象である。これらの現象の整理に基づいて、ニアフィールドの状態変化は次のようであると考えている。

人工バリアの定置後から、ニアフィールドへの地下水の流入と緩衝材の膨潤、放射性物質の放射壊変に伴う廃棄体（ガラス固化体）からの発熱により、ニアフィールドの物理的・化学的な状態が変化する。やがて、ガラス固化体の発熱量の低下、地下水による緩衝材の含水飽和の完了などに伴い、状態の変化は緩慢になると考えられる。

この間、コンクリート支保工を利用している場合には、地下水とコンクリートの反応により地下水の組成や pH が変化し、さらにその反応水が緩衝材の構成鉱物と反応する。そのため、緩衝材の鉱物組成や間隙率、Ca 型化などにより、緩衝材の性能が接触部から徐々に変化する（6.6.2.3 (2) および 6.6.2.3 (3) 参照）。これらの影響を低減するために、低アルカリ性セメントの開発が進められている（6.6.2.4 参照）。

オーバーパックとの境界部では、閉鎖後の初期にはガラス固化体の発熱により緩衝材の温度が上昇するが、時間が経過するとともに数 10 年程度で低下する。温度が 100°C よりも高い時期が長期間継続すると、イライト化による緩衝材の性能の変化の可能性が懸念されるが、これまでの知見から、その可能性は低いことが分かっている（6.6.2.3 (4) 参照）。また、オーバーパックの腐食に伴い Fe²⁺ イオンが緩衝材中に拡散するが、鉄水酸化物や鉄炭酸塩鉱物として沈殿する。また、一部は緩衝材と反応するが、その程度は Fe²⁺ イオンの供給量（腐食速度）と Eh, pH, 温度などのニアフィールドの物理・化学環境に依存する（6.6.2.3 (3) 参照）。

また、オーバーパックの腐食においては、初期には建設・操業に伴い地下に流入した酸素を酸化剤とした腐食反応が進行するが、酸素が消費された後は水を酸化剤として緩慢に腐食反応が進み、オーバーパックの厚さが徐々に減少する（6.6.2.2 (1) 参照）。腐食が進行して、機械強度を保持する厚さが保てなくなると、地下深部の高い圧力（水圧、地圧）や緩衝材からの圧密反力により、オーバーパックが機械的に破壊し、地下水がガラス固化体と接触する可能性が高くなる。また、地下水の化学組成によっては、不動態化する可能性もある（6.6.2.2 (2) 参照）。溶接部の金属組織は、急速な融解と凝固により母材と比べて構造が微細となり、また、化学組成も異なる。このため、溶接部と母材では腐食挙動が異なる可能性があるが、腐食挙動の研究から、溶接部の耐食性は母材と同等または著しく低くないことが示されている（6.6.2.2 (4) 参照）。

腐食や機械的な破壊によりオーバーパックの機能が失われると、ガラス固化体と地下水が接触す

⁶¹ FEP：地層処分システムの各要素の特性 (Feature)、特性に影響を与える事象 (Event)、地層処分システムの時間的変遷の過程 (Process) の略称。

⁶² PID：プロセス インフルエンス ダイアグラム (現象の影響相関図) の略称。

る⁶³。地下水と接触してからは、非常に緩慢ではあるがガラスマトリクスが地下水に溶解し、その結果、放射性物質も徐々に浸出する。この際、放射性物質の浸出率は、ガラスマトリクスの溶解速度や、ガラス表面変質層内の拡散などにより律速される(6.6.2.1 参照)。ガラス固化体から浸出した放射性物質は、難溶性の放射性物質(例えば、U, Th, Am などのアクチノイド元素)であれば、溶解度制限により、その大半はガラス固化体の周辺で沈殿する。溶存した放射性物質は濃度勾配に規制されて、オーバーパック腐食生成物の間隙水や、緩衝材の間隙水中を拡散し、途中、鉱物表面に収着されることにより遅延されて、最終的に緩衝材と岩盤(またはコンクリート支保工と岩盤)の境界にまで達する。この間、放射能は徐々に減少する。また、難溶性の放射性物質の一部は、ガラス固化体から浸出した後にコロイドを形成する可能性があるが、緩衝材の細孔により濾過され緩衝材から外側には浸出できない。岩盤に達した放射性物質は、地下水の流れとともに運ばれるとともに、地下水中を拡散することにより移行すると考えられる。

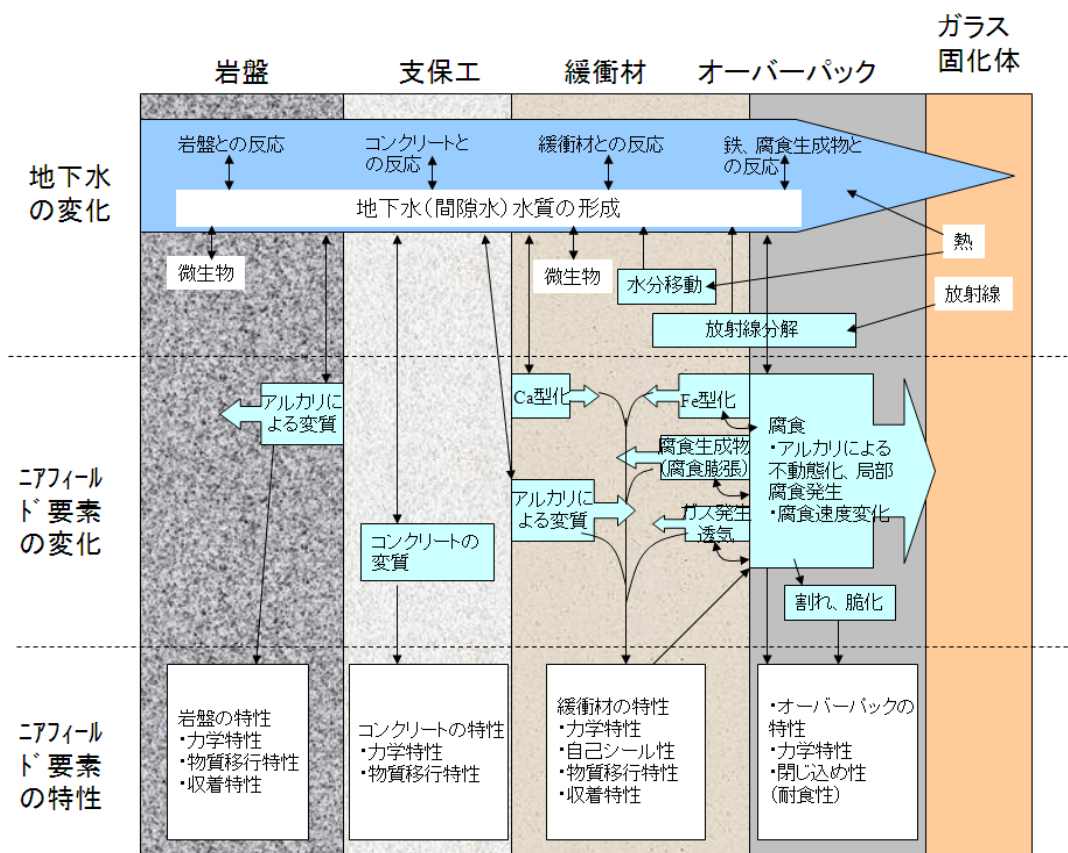


図 6.6.2-1 ニアフィールド要素の相互作用図

以上のプロセスを想定し、ニアフィールドの人工バリアや岩盤の長期的な状態の変遷についての知見の整備を進めた結果を以下に示す。

- 個々の人工バリア材料の特性や長期挙動の理解だけでなく、構成要素間の物理的・化学的な相互作用の理解が重要である。

⁶³ ガラス固化体はステンレス製のキャニスタを容器として固化されているので、地下水が直ちにガラスマトリクスと接触することは考えにくい。ただし、キャニスタには長期のバリア機能を期待していないため、地下水とすぐに接触するものとして取り扱っている。

- ・ 保守性を取り入れたアプローチを基本とするが、それぞれの人工バリア要素で独立に保守的な指標を設定するのではなく、人工バリア材料の特性とバリア間の相互作用を考慮して、全体システムとして相互に矛盾しないように保守性の設定が必要である。例えば、オーバーパックの腐食や鉱物反応などの化学反応は、緩衝材中の遅い物質移行により律速されていることを考慮して、腐食速度の設定や鉄-ベントナイト相互作用反応を論じるべきである。

これらの現象理解に関する技術開発は、わが国では主として基盤研究開発機関により進められており、例えば、最近の進展はJAEA (2010a) にまとめられている。ここでは、これらの成果も踏まえ、人工バリアの設計や安全評価で重要となる、現象理解に関する知見の整備状況について概説する。

6.6.2.1 ガラス固化体の長期挙動

ガラス固化体に対しては6.2に示したように、「ガラスマトリクスによる浸出抑制」の安全機能を期待している。放射性物質は、ホウケイ酸ガラスに分子レベルで混合されており、地下水と接触したとしてもすぐに浸出することはない。ただし、非常に緩慢ではあるが、ガラスマトリクス自身が地下水中に溶けることに伴い放射性物質が溶解すると考えている。以下では、ガラスの溶解挙動に関する技術開発について述べる。また、日本原燃(株)再処理工場で実施されたアクティブ試験中に発生した低粘性流体(イエローフェーズ)に関する安全評価結果への影響について、日本原子力学会(2008)に基づいて記述する。

(1) ガラスの溶解挙動

ガラスの溶解挙動については、1980年代にガラス中の元素の溶解析出反応とガラスマトリクス溶解反応を加味した Grambow モデル (Grambow, 1985, 1987) が提唱され、現象理解に大きな貢献をなした。しかし、1990年代に入ると、同モデルだけではガラスの長期溶解・変質を説明できないことが示唆され、長期溶解反応やガラス表面変質層中における固相形成反応について、メカニズムや速度が十分理解されていないとの指摘がなされた (Lemmens et al., 1992)。

ガラス表面での物質移行が、ガラスの溶解・変質の律速過程であるとする速度論的溶解モデル(ガラスマトリクスの水和変質 (Lemmens et al., 1992; Inagaki et al., 1994; Grambow et al., 2001; Mitsui and Aoki, 2001), 保護的なゲル層による溶解反応の抑制 (Jégou et al., 2000; Gin. and Mestre., 2001, Vernaz. et al., 2001), 二次鉱物生成による溶存ケイ酸の消費 (Strachan and Croak., 2000; Strachan, 2001) が提唱され、ガラス固化体の現象理解とそのモデル化が進んだ。これらの知見は稲垣ほか(2004)にまとめられている(図 6.6.2-2)。

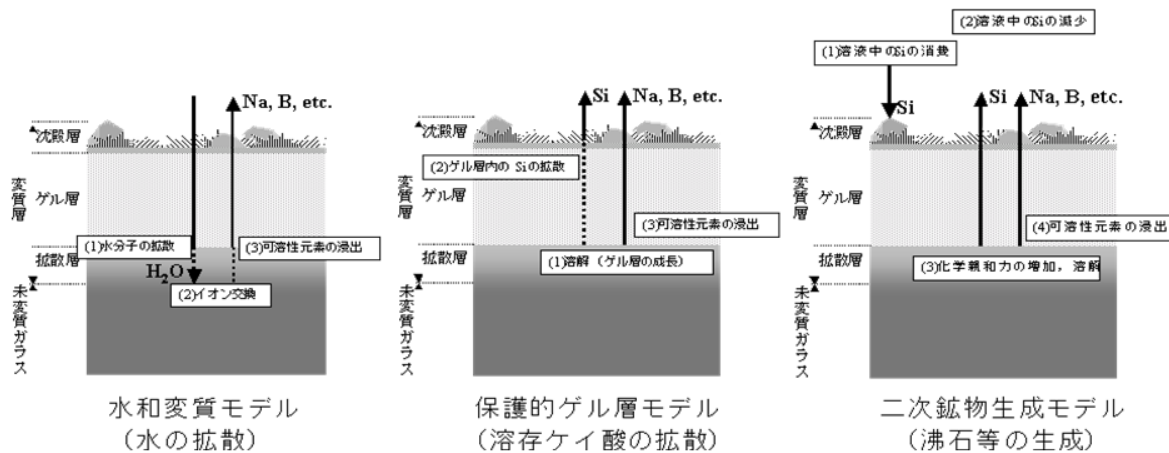


図 6.6.2-2 ガラス表面での物質移行過程を考慮した長期溶解モデル
(出典：稲垣ほか，2004)

第2次取りまとめにおいては、上記の現象により溶解速度が時間とともに低下する可能性については把握していたが、保守性の観点から、ガラス固化体からの放射性物質浸出挙動の評価は溶解速度が時間に依らず一定とするモデルが採用されていた。第2次取りまとめ以降は、上記のモデルを評価シナリオやモデルに採用することを視野に入れて、ガラスの溶解に関する現象理解の深化とモデルの高度化の試みとしてガラスの溶解の pH 依存性を確認する研究が行われている (Inagaki et al., 2009, 2010)。さらに、JAEA においては、ガラスの溶解・変質の現象理解などの研究を支援するためガラスの溶解に関するデータベースを開発しており、そのプロトタイプデータベースの改良が行われ (林ほか, 2008), JAEA のホームページに公開されている (<http://migrationdb.jaea.go.jp/GlassDB/>)。

以上のように、第2次取りまとめ以降もガラス固化体の溶解挙動に関する現象理解の研究が継続的に進められている。今後これらの成果を、蓋然性の高いシナリオの検討や、モデルとガラスの寿命などの検討に反映していく。

(2) イエローフェーズを含むガラス固化体の影響評価

2007年11月より、日本原燃(株)再処理工場においてガラス固化設備のアクティブ試験が行われたが、その際、少量の低粘性流体を含むガラスを固化したガラス固化体の発生が報告されている (日本原子力学会, 2008)。イエローフェーズは、再処理廃液に含まれるモリブデン酸とアルカリ金属、アルカリ金属土類の塩 (モリブデン酸塩) を主成分として、そのほかに、硫酸塩やクロム酸塩との混合物とされる (IAEA, 1985)。通常、ガラス固化体の製造プロセスを最適条件に設定することで、イエローフェーズの発生を防止することが可能である。イエローフェーズは、Csなどの塩を作りやすい放射性物質を随伴する可能性が高く、ガラス相からは分離していると考えられている。

イエローフェーズを含んだガラス固化体を地層処分した場合の影響を、イエローフェーズを含まないガラス固化体の安全評価の結果と比較することで把握している。イエローフェーズは、ガラスに比べ、地下水に溶解しやすいという特徴がある。そこで、解析においては、1年間でイエローフェーズに含まれる放射性物質 (Cs-135, Zr-93, Pd-107, Tc-99 を設定) が溶解し、早期溶出すると仮定している (日本原子力学会, 2008)。解析の結果を以下に要約する。

- ・ Cs-135 は、緩衝材からの年間放出量（フラックス）が初期の数百年程度の間、100 倍程度増加する。ただし、1 年で全量が放出されるため、徐々に減少し、数百年以降の年間放出量はガラス固化体と同程度になる。
- ・ Zr-93 は、緩衝材が有する「収着による放射性物質の移行遅延」の安全機能により、早期溶出の影響が表れない。
- ・ Pd-107, Tc-99 は、地下水に溶解しても沈殿を生成し、「溶解度制限」の安全機能によりガラス固化体と同じ放出率となるので、早期溶出の影響が表れない。
- ・ また、天然バリア中の移行に関する解析結果は、天然バリアが有する「収着による放射性物質の移行遅延」や「分散による移行率の低減」などの安全機能により、年間放出量の差異は大きくない。

以上のことから、「国内の処分に関する影響評価事例である第2次取りまとめを参考に、文献情報をもとに過程や条件を設定することにより、ガラス固化体中に結晶相が生成した場合の、地層処分への影響を計算した。高レベルガラス固化体の処分時の評価核種として、Zr-193, Tc-99, Pd-107, Cs-135 に着目し、種々の条件で核種移行解析を行った結果、結晶相生成の影響はない、または、非常に小さいことが評価結果として得られた。」とされている（日本原子力学会、2008）。

この結果については、仮にこのようなガラス固化体が地層処分されることを想定しても、システム性能に重大な影響を及ぼさないように、多重バリアシステムの相互補完性により対応しているためであると考えられている（日本原子力学会、2008）。ただし、同時にガラス固化体を安定した品質で製造することの重要性も指摘されている。

その後、日本原子力学会は、「地層処分対象放射性廃棄物の品質マネジメント」特別専門委員会を設置し、地層処分において必要なガラス固化体の特性とその把握のために適切に録取すべき製造時の記録、およびその記録の取得方法、地層処分への影響評価を踏まえた要件、要件に照合した場合の製造目標の十分性の確認、品質マネジメントの考え方の整理、少数の逸脱したガラス固化体あるいは非定常の高レベルガラス固化体に対する処分における対応の検討などを実施している（日本原子力学会、2010）。

以上のように、イエローフェーズを含むガラス固化体については、地層処分したとしても解析に基づいてその影響が小さいという結果を得ている。ただし、処分における対応については、その特性を十分把握した上で検討することとし、今後も関係機関と協力して、対応策を検討する。

6.6.2.2 オーバーパックの長期挙動

オーバーパックには、「閉鎖後閉じ込め」のうち「放射性物質の浸出抑制」の安全機能として、「発熱が著しい期間、地下水との接触を避けること」を設定している。この安全機能を確保するための技術要件として、

- ・ 所定の期間、腐食により安全機能が損なわれないこと
- ・ 埋設後に作用する機械的荷重に対して構造健全性を維持すること
- ・ 溶接部の耐食性、構造健全性が母材と比較して著しく劣らないこと

を挙げた。以下ではこれらの技術要件に関連し、母材の腐食挙動と溶接部の耐食性について、オー

オーバーパック材料の挙動に関する基盤研究開発成果を取りまとめて示す。

オーバーパックの腐食は、定置後初期は建設・操業により地下へ流入した酸素による腐食が発生するが、処分場が閉鎖されそれらの酸素が消費されてから後は、地下水が酸化剤として働いて腐食が進行する。オーバーパックの腐食挙動には、大きく分けると全面腐食と局部腐食という二つの腐食モードがある。全面腐食は不動態化せず、表面からほぼ均一に腐食が進行する形態である。一方、局部腐食は、金属表面を不動態皮膜が覆うため腐食速度は極端に遅くなるが、何らかの原因で不動態皮膜の一部が破壊され、その部分が局部的に腐食する形態である。不動態化は応力腐食割れとも密接に関連することから、オーバーパックの設計時に避けられるよう対策を検討する。一方、局部腐食には孔食、隙間腐食といった腐食形態がある。

上述以外の腐食形態として水素脆化があり、これは周辺に存在する酸素が消費された後に、水の還元によるカソード反応から生じた水素が炭素鋼に吸蔵されることによって生じる可能性がある。

オーバーパックの溶接部に対しては、第2次取りまとめ以降、遠隔溶接技術の開発(6.6.4.2参照)とともに溶接部の耐食性の評価が実施されている(原環センター, 2009c)。溶接部は、溶接方法に依存して母材には含まれない不純物が含まれることや、金属結晶の微細構造が異なることなどから、母材と異なる腐食挙動を示す可能性がある。そのため、溶接部の腐食挙動を試験的に調べ、母材のそれと比較する研究が進められている。溶接部の腐食挙動に関する評価は、母材と同様に実施されており、評価項目としては、全面腐食、局部腐食・孔食、応力腐食割れ感受性、水素脆化がある。

オーバーパックの設計では、これらの腐食挙動を考慮してオーバーパックの厚さを決定している(JNC, 1999b)。また、今後、遠隔溶接技術の選定において、作業効率性、経済性の観点に加えて、溶接部の腐食挙動評価の観点からも比較検討を実施する。表 6.6.2-1 に、母材および溶接部の腐食挙動理解に関する科学的な知見の整備状況の要約を示す。

表 6.6.2-1 母材と溶接部の腐食挙動理解に関する科学的な知見の整備状況

項目と内容		概要	文献
母材	全面腐食挙動	腐食速度データが拡充され、試験により腐食速度が長期的には鈍化することが示された。	JNC (2005) 谷口ほか (2008)
	局部腐食, 不動態化	緩衝材による pH 緩衝効果や低アルカリ性セメントの利用により, 不動態化を回避できる見通しが示された。また, 局部腐食の試験データが拡充され, 局部腐食が起こったとしても腐食寿命に影響を及ぼすような顕著な影響はないという見通しが示された。	JNC (1999b, 2005) 谷口ほか (2002)
	放射線分解生成物による耐食性への影響	ガラス固化体の γ 線に起因する地下水の放射線分解生成物 (過酸化水素など) による腐食速度に対する影響は顕著ではないことを試験的に確認し, 従来の設計で考慮していた局部腐食を防止するための放射線遮へい代 (150mm) が保守的な設定であることが示された。	JAEA (2008b, 2010b) 産業創造研究所 (2005, 2006, 2007)
	腐食に対する微生物の影響	室内実験により, ベントナイト/水比が大きくなるほど硫酸還元菌の活性が低下することが報告されている。また, 硫酸還元菌などの微生物の影響は, 圧縮ベントナイトのろ過効果などによって微生物の移行が阻害され, 生息や活動が制限されるため, 地層処分システムへの影響は無視できるほど小さいと判断されている。	JNC (1999b) Little et al. (1991) King et al. (2003) Pedersen (2000) Stroes-Gascoyne and King (2002, 2003) 谷口ほか (2001)
溶接部	全面腐食挙動	酸化性環境では選択的な腐食が確認されたが, 溶接材料組成の改良で改善できる目処が立っている。また, 還元性環境では, 耐食性は母材と同等以上であることが示された。	原環センター (2009c, 2010c)
	応力腐食割れ, 水素脆化など	炭酸塩溶液中で応力腐食割れ感受性, 人工海水中での水素脆化感受性について評価し, 感受性は母材よりも低いことが示された。	原環センター (2009c, 2010c)

(1) 全面腐食挙動に関する理解の進展

第2次取りまとめ以降は、処分環境を模擬した長期間にわたる腐食試験などが実施され、緩衝材中の腐食メカニズムの理解が進展したほか、腐食速度のデータが拡充されており、従来の設定の保守性が確認されている。

例えば、沿岸域を想定した塩水環境を模擬して人工海水などを用いた低酸素雰囲気下、緩衝材中の10年間にわたる長期浸漬試験が実施され、腐食速度が試験期間が長くなるほど低下することが示されている（例えば、谷口ほか，2008）。この試験では実際の腐食環境に近付けるために、緩衝材（圧縮ベントナイトにより模擬）中に金属試験片を埋め込み、その腐食量を測定した。炭素鋼の表面に炭酸鉄の被膜が生成するため、腐食速度は時間とともに減少することなどが示された。また、1～10年の腐食変化の傾きより推定される腐食速度は $2\mu\text{m}/\text{y}$ （1,000年あたり2mm）未満であり（図6.6.2-3）、第2次取りまとめの耐食代設定の設定値 $10\mu\text{m}/\text{y}$ よりも十分低いことから、1,000年以上の寿命が期待できる。そのほか、銅、チタンなどの代替材料の腐食挙動データの拡充や、ナチュラルアナログ試料の分析結果に基づく腐食速度の評価なども実施されている（JNC, 2005）。このように、オーバーパックの寿命が設計上想定されている1,000年よりも長いことを示すデータが蓄積されている。

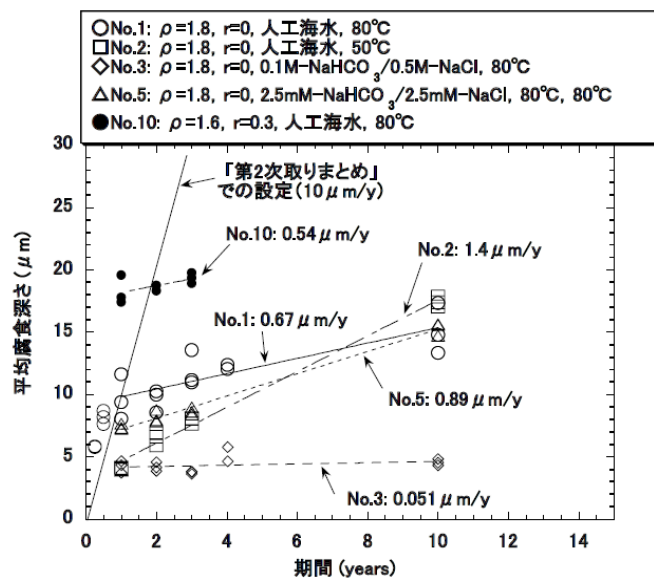


図 6.6.2-3 緩衝材中、低酸素濃度雰囲気における炭素鋼の平均腐食深さの経時変化
(出典：谷口ほか，2008)

(2) 局部腐食、不動態化に関する理解の進展

炭素鋼が不動態化する条件は、炭酸塩濃度が高い高 pH の環境である。緩衝材中の炭素鋼は不動態化しにくいことから、全面腐食を主要な腐食形態として評価が実施されてきた（JNC, 1999b）。第2次取りまとめ以降は、コンクリート支保工の利用も想定して、炭素鋼の局部腐食に対するセメント系材料の影響に関する現象理解も進められている。

炭素鋼は緩衝材間隙水の pH が 10.5 以上になると不動態化する可能性が示されている（谷口ほか，2002）。緩衝材の pH 緩衝作用により、緩衝材に接触する溶液の pH が 13 以下であれば、湿潤後の pH が 10.5 以下となるため炭素鋼が不動態化しない可能性が示された（図 6.6.2-4）（JNC, 2005）。今後、緩衝材の pH 緩衝作用の長期的な変化などについても継続的に検討を進める必要がある。

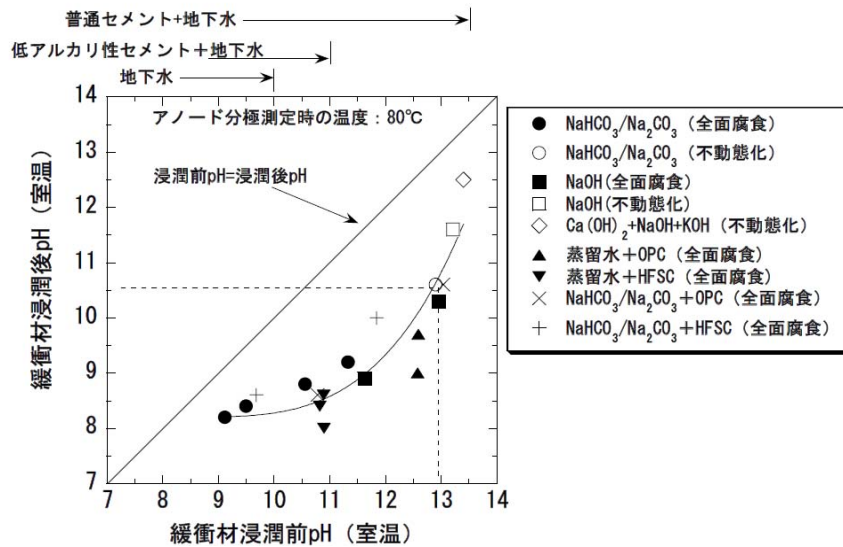


図 6.6.2-4 緩衝材中における炭素鋼の不動態化条件
(出典：JNC, 2005)

また、局部腐食が生じた場合の炭素鋼の腐食寿命に対する評価も進められている。図 6.6.2-5 に示すように、酸化性環境での孔食係数（最大腐食深さを平均腐食深さで除した値であり、値が大きいほどより不均一な腐食が生じていることを示している）は、平均腐食深さが大きくなるに従って小さくなる傾向にあり、緩衝材中での平均腐食深さ 0.1mm 以上の腐食量に対する孔食係数は、土壤中に長期埋設されていた鋼構造物で観察される値とほぼ同程度になることが明らかになっている（図 6.6.2-5）。従って、セメント系材料に起因する高 pH 環境によって炭素鋼が不動態化し孔食が発生しても、腐食寿命に影響を及ぼすような顕著な腐食の局在化は生じにくいとしている（JNC, 2005）。

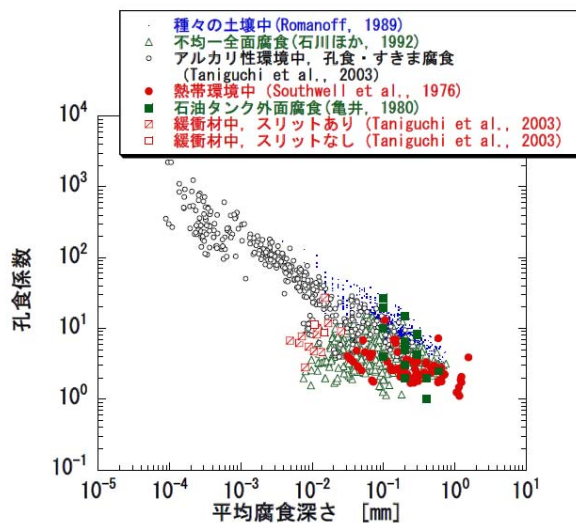


図 6.6.2-5 種々の環境における鉄鋼材料（非合金）の平均腐食深さと孔食係数の関係
(出典：JNC, 2005)

(3) 放射線照射影響

第2次取りまとめでは、ガラス固化体からの放射線による放射線分解生成物により炭素鋼材料の

局部腐食の可能性を懸念し、机上検討により炭素鋼が不動態化を起こさないように、また放射線分解生成物の生成量（濃度）を抑制するために、放射線遮へい代として 150mm を設定していたが、試験検討の必要性が指摘されていた（JNC, 1999b）。第2次取りまとめ以降、放射線照射下における炭素鋼挙動に関する研究が進展し、放射線影響の定量的な評価が進んでいる。

ガラス固化体からは中性子線と γ 線が放射されているが、オーバーパックスの遮へい効果により γ 線の方が影響は大きい。オーバーパック表面における γ 線の線量は、オーバーパックスの厚さに依存するが数 10mGy/y 程度と見積もられている。

放射線分解生成物によるオーバーパックスの腐食に対して緩衝材が有する緩衝能力について明らかにするため、 γ 線（30～50Gy/h）を照射して炭素鋼の腐食速度を測定したところ、水溶液中では従来の知見のとおり腐食速度がわずかに増加する傾向が認められたが、圧縮ベントナイト中に埋め込まれた炭素鋼については γ 線の照射による腐食量の増加は観測されなかった（表 6.6.2-2）（JAEA, 2008b）。また、放射線照射下において腐食電位を測定したところ、照射の有無にかかわらず自然電位の変化はないことが確認された（産業創造研究所, 2005, 2006, 2007 ; JAEA, 2008b）。その原因としては、鉄腐食生成物、緩衝材中の黄鉄鉱や有機物による酸化性化学種の消費などが理由として考えられている（JAEA, 2010b）。

以上のように、緩衝材中では放射線照射による局部腐食の促進の可能性が低いと考えられる。この現象については今後も知見を拡充し、オーバーパックスの設計に反映させる予定である。

表 6.6.2-2 放射線照射が炭素鋼の腐食に及ぼす影響
(JAEA, 2008b を編集)

試験条件	腐食速度 (mm/y) (緩衝材中)	腐食速度 (mm/y) (水溶液中)
照射あり	0.032—0.039	0.021—0.024
照射なし	0.038—0.043	0.014—0.017

(4) 腐食に対する微生物の影響

微生物には、活動に必要なエネルギーを鉄や硫黄の酸化還元反応により得る種類がある。そのため、金属材料が自然環境に晒される場合、微生物による腐食の促進の可能性があることが示されており（Little et al., 1991）、オーバーパックスの腐食に対する微生物の影響について検討が進められた。

炭素鋼の腐食に対する微生物の影響としては、硫酸還元菌と硫酸の生成が関係していることが多い（Little et al., 1991）。微生物の腐食に対する影響の予測は容易ではないため、国際的には、人工バリア領域で微生物活動が生じないことを実証し、腐食挙動に対する影響の可能性を排除するアプローチが採用されている。このような研究は、スウェーデン（Pedersen, 2000）とカナダ（Stroes-Gascoyne and King, 2002）で実施されており、そのメカニズムの解釈は異なるものの乾燥密度が高い緩衝材を使用することで微生物の活動が阻害されることが示されている。また、微生物およびその代謝副産物による金属容器の腐食に対する影響は、僅かであることが示されている（King and Stroes-Gascoyne., 2002, 2003 ; King et al, 2003）。

一方、わが国では、第2次取りまとめ（JNC, 1999b）において圧縮ベントナイトのろ過効果などにより人工バリア中での微生物の移行が阻害され生息や活動が制限されることにより、微生物による地層処分システムへの影響は無視できるほど小さいと判断されている。室内実験による研究では、栄養剤を投入した人工海水（30℃）においてベントナイト中に生息する硫酸還元菌の増殖試験を実

施したところ、ベントナイト／水比が大きくなるほど硫酸還元菌の活性が低下し、約1,000g/lではほとんど増殖ができなくなったことが報告されている（谷口ほか，2001）。

(5) 溶接部の腐食挙動に関する理解

(i) 溶接部の全面腐食挙動の影響評価

炭素鋼の溶接部は、溶接方法に依存して母材には含まれない不純物が存在することや、金属組織が急速な融解と凝固により、母材と比べて構造が微細となり化学組成が異なる。このため溶接部と母材の耐食性が異なる可能性がある。そこで母材と溶接部の耐食性を比較するために、実規模で実施されたオーバーパック溶接試験体を用いた耐食性試験が実施されている。この際、炭素鋼母材の腐食シナリオで想定されている腐食速度である 10 $\mu\text{m}/\text{y}$ に対して、溶接部の耐食性が母材と同等または著しく低下しないことを評価している（原環センター，2010c）。

酸化性環境における溶接部の腐食挙動は、全面腐食型になることが確認されている（原環センター，2009c）。溶接金属部には溶接材料に起因すると考えられる選択的な腐食が確認されたが、平均腐食深さに対する最大腐食深さは母材で想定した値を下回る結果となっている（図 6.6.2-6）。また、この選択的な腐食は溶接材料組成の改良で改善できる目処が立っている。還元性環境における溶接部の腐食速度は、母材の腐食シナリオで想定されている値を下回っており、溶接部の耐食性は母材と同等以上であると評価されている（図 6.6.2-7）（原環センター，2010c）。

(ii) 溶接部の応力腐食割れ、水素脆化などの影響評価

溶接時の熱影響による応力腐食割れ感受性について、炭酸塩溶液中で調べたところ、溶接部の応力腐食割れ感受性は母材よりも低くなることが確認されている。これは、溶接部の結晶粒が母材と比較して小さくその組織構造が複雑であるため、粒界割れが進展し難くなることが感受性低下の要因であると考えられている。また、溶接部の応力腐食割れ発生の臨界炭酸塩濃度は母材と同じでおよそ 0.5mol/l であり、溶接によって高 pH 環境での炭素鋼の応力腐食割れ感受性が高くなる傾向は認められていない（原環センター，2009c）。

水素脆化に関しては、還元性雰囲気での腐食に伴い炭素鋼中に侵入する水素量の調査と、溶接部の各部位（母材、熱影響部、溶接金属）の水素脆化感受性が評価されている。溶接部は母材に比べ水素濃度が高い傾向があるが、実測された溶接部の拡散性の水素濃度は溶接部の強度から求めた水素脆化に寄与する拡散性の水素濃度よりも一桁小さい 0.05ppm にとどまるため、水素脆化による割れの発生の可能性は低いと評価されている（原環センター，2009c）。

このように、第2次取りまとめ以降に母材について長期的な試験検討やナチュラルアナログとの比較が行われ、従来よりも長い寿命が期待できる見通しが示されている。また、溶接部の腐食挙動に関するデータの大幅な蓄積がなされ、その現象理解が進展し、評価モデルも高度化されている。溶接部については、熱処理による残留応力の低減技術の開発なども進められている（原環センター，2010c）。今後、これらの知見をオーバーパックの設計に反映し、処分場の閉鎖後の安全性に対する信頼性を向上させる。

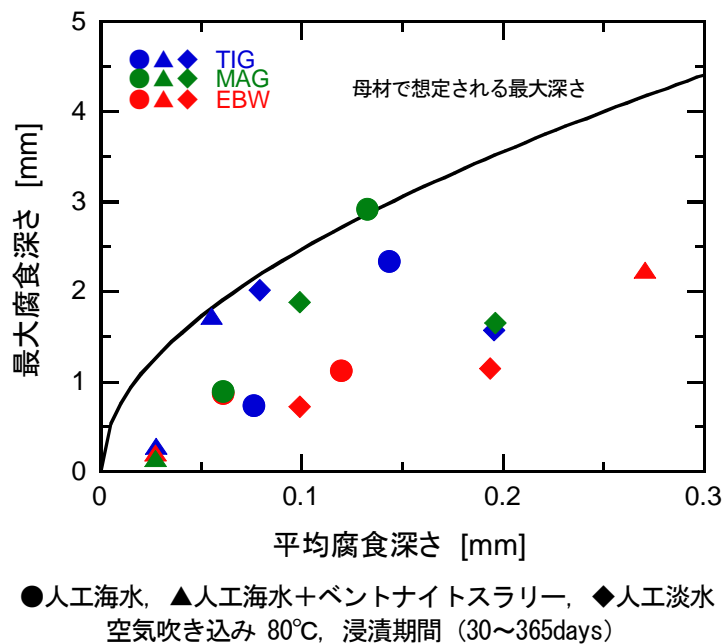
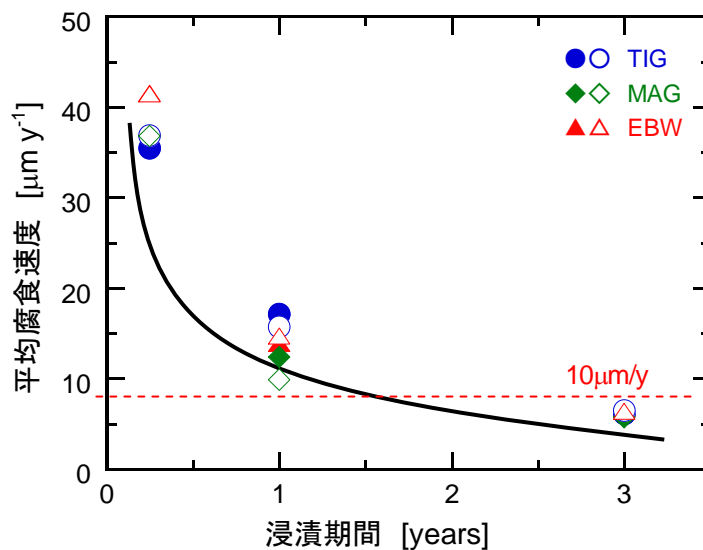


図 6.6.2-6 酸化性雰囲気における炭素鋼溶接部の平均腐食深さに対する最大腐食深さ (原環センター, 2009c を和訳)



圧縮ベントナイト (1.6g/cm²) + 人工海水, N₂ガス雰囲気, 80°C, 浸漬期間 (90days~3years), ●▲◆溶接部つき, ○△◇母材
TIG: タングステン不活性ガス溶接, MAG: 金属活性ガス溶接, EBW: 電子ビーム溶接の略

図 6.6.2-7 還元性雰囲気における炭素鋼母材, 溶接部の平均腐食速度の経時変化 (原環センター, 2009c を和訳)

なお, 6.6.2.2 で示したほかのオーバーパック (炭素鋼, 銅, チタンを含む) の腐食挙動に関する研究開発成果は, JAEA (2010a, カーネル工学技術 2.1.1 オーバーパックの基本特性) に報告されている。

6.6.2.3 緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用

緩衝材の安全機能として「放射性物質の移行の抑制」を求めており、移流による移行の抑制、コロイド移行の抑制・防止、収着による放射性物質の移行の遅延を期待していることを述べた。これらの安全機能に関連する緩衝材の特性としては、膨潤性や透水性や収着性が挙げられる。また緩衝材の長期健全性の観点からは、セメントや鉄との相互作用が緩衝材の安全機能に与える影響を確認し、必要に応じて対策を検討する必要がある。これらの要件に関連した現象の理解として、緩衝材の特性に対する塩水の影響、長期的な挙動やほかのバリア材料との相互作用として、セメント系材料とベントナイトの相互作用、炭素鋼腐食生成物とベントナイトの相互作用などについて述べる。表 6.6.2-3 および表 6.6.2-4 に緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用に関する科学的な知見の整備状況を示す。

なお、ここで示していない緩衝材の長期挙動に関する技術開発成果のうち、長期力学的挙動については、JAEA（2010a, カーネル工学技術 2.2.1 緩衝材の長期力学挙動評価技術）、ガス透気回復挙動については JAEA（2010a, カーネル工学技術 2.2.5 ガス透気回復挙動）で報告されている。

表 6.6.2-3 緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用に関する科学的な知見の整備状況 (1/2)

項目と内容		概要	文献
塩水の影響		塩分濃度が高いほど、膨潤圧は小さくなるが、有効粘土密度が 1.5Mg/m ³ 以上では、純水による膨潤圧との差は顕著ではない。また、体積膨潤比は有効粘土密度が高いほど増加するが、塩分濃度が高いほど小さいことが分かった。	JAEA (2010a) JNC (2005) Komine and Ogata (2004) 小峯ほか (2009) Komine et al. (2009) 棚井ほか (2010) 田中・中村 (2004)
セメントとベントナイトの相互作用	緩衝材中粘土鉱物のカルシウム型化	コンクリート支保、プラグなどを通過して緩衝材に接する地下水は Ca イオンの多い組成となるため、イオン交換により緩衝材中の Na 型スメクタイト ⁶⁻⁴ が Ca 型スメクタイトに変化し、透水性の上昇と膨潤性の低下が起こる可能性について、検討が進められている。	電事連・JNC (2005)
	緩衝材中粘土鉱物の溶解	緩衝材の主要構成鉱物であるスメクタイトが地下水に溶解する現象であり、高 pH 条件で促進されることが報告されている。pH、温度をパラメータとして定式化が進められている。	Gama et al. (2000) 亀井ほか (2007) Köhler et al. (2003) Kuwahara (2006) Nakayama et al. (2004) Sato et al. (2004)
	二次鉱物の沈殿	緩衝材の主要構成鉱物であるスメクタイトが、二次鉱物を生成して置換される現象で、スメクタイトが鉱物学的に不安定化する物理化学条件の時に顕著となる。その結果、膨潤特性や透水特性が変化する可能性がある。	Gaucher and Blanc (2006) 原環センター (2003b, 2010d) 金 (2001) Oda (2004)
	セメンテーション	セメント-ベントナイトの境界領域近傍で、双方の間隙中に二次鉱物が沈殿し、間隙を閉塞する現象。その結果、膨潤特性や透水特性が変化する可能性がある。	Pusch (1982)

6-128

⁶⁻⁴ スメクタイト：ベントナイトを構成する膨潤性を有する粘土鉱物の名称。スメクタイトには、化学組成比により、モンモリロナイト、バイデライト、ノントロロナイト、サポナイト、鉄サポナイトなどの名称の鉱物があるが、天然に産するスメクタイトとしては、モンモリロナイトとバイデライトの中間的な組成を有する鉱物が多いとされている（日本粘土学会編，2009）。

表 6.6.2-4 緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用に関する科学的な知見の整備状況 (2/2)

項目と内容		概要	文献
炭素鋼腐食生成物とベントナイトの相互作用	粘土鉱物の層間の交換性陽イオンのFe型化	ベントナイトの主成分で膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトの層間の交換性陽イオン (Na ⁺ イオン) が, Fe ²⁺ イオンと置換することにより, ベントナイトの膨潤性や透水性, 収着性などの特性が変化する可能性について検討が進められている。	Carlson et al. (2007) Ishidera et al. (2007) Kozai et al. (2001) 笹本ほか (2010) 柴田ほか (2004) 陶山ほか (2008)
	鉱物化学変質	Fe ²⁺ イオンの割合が増加すると, 擬クロライト化/鉄クロライト化, バーチェリン化, ノントロナイト化, 鉄サポナイト化など鉱物が生成する可能性がある。このうち, 膨潤性を示さない擬クロライト化, 鉄クロライト化, バーチェリン化が起こるとベントナイトの膨潤性や透水性, 収着性などの特性が変化する可能性について検討が進められている。	Fukushi et al. (2010) JAEA (2008b, 2010b) Lantenois et al. (2005) Marty et al. (2010) 笹本ほか (2009) 陶山ほか (2008) Wersin et al. (2006)
	腐食生成物によるセメンテーション	鉄腐食生成物の沈殿や, 鉱物化学反応の結果, 別の鉱物が副次的に沈殿し, 空隙を閉塞する可能性がある。その結果, 膨潤性や透水性, 収着性などの特性が変化する可能性について検討が進められている。	Bildstein et al. (2006) Marty et al. (2010) Savage et al. (2010) 上野ほか (2008)
イライト化		イライト化は, 130°C以下でほとんど生じることがなく, 緩衝材の安全機能に対する顕著な影響がないことが分かった。	Huang et al. (1993) 石川ほか (1994) JNC (1999b)
緩衝材の流出		侵食現象は降水系地下水条件において留意すべき事象であるが, 海水系条件ではその影響が小さいことが分かった。サイトの地下水が降水系地下水である場合には, 緩衝材と接する亀裂の流出挙動に対する影響を評価した上で, 適切な対策を講じる必要がある。	JNC (2005) 松本・棚井 (2003, 2004, 2008, 2010) 松本ほか (2005)

(1) 緩衝材の膨潤性、透水性に対する塩水の影響

緩衝材の特性のうち、透水性、膨潤性は、接触する水の塩分濃度の影響を受けることが知られている。わが国は周囲を海で囲まれており、特に沿岸域に処分場を建設する場合には、周囲の地下水が海水を起源とする塩分濃度の高い地下水（塩水）である可能性がある。そのため、沿岸域に処分場を建設する場合には、6.5.1 で述べたように緩衝材に求められる安全機能が確保されるように緩衝材を設計する必要がある。

緩衝材の膨潤性を定量的に表す膨潤量や膨潤応力は、6.2 の技術要件で述べた自己シール性を評価する指標となる。図 6.6.2-8 に示すように、膨潤応力は塩分濃度が高いほど小さくなるが、有効粘土密度が $1.5\text{Mg}/\text{m}^3$ 以上ではその差は顕著ではない。一方、体積膨潤比は有効粘土密度が高いほど増加するが、塩分濃度が高いほど小さいことが知られている（JNC, 2005 ; 田中・中村, 2004）。膨潤性の低下と塩分濃度の関係を定式化する試みも実施されており、さまざまなベントナイトに対して、適用可能な関係式が提唱されている（Komine and Ogata, 2004）。

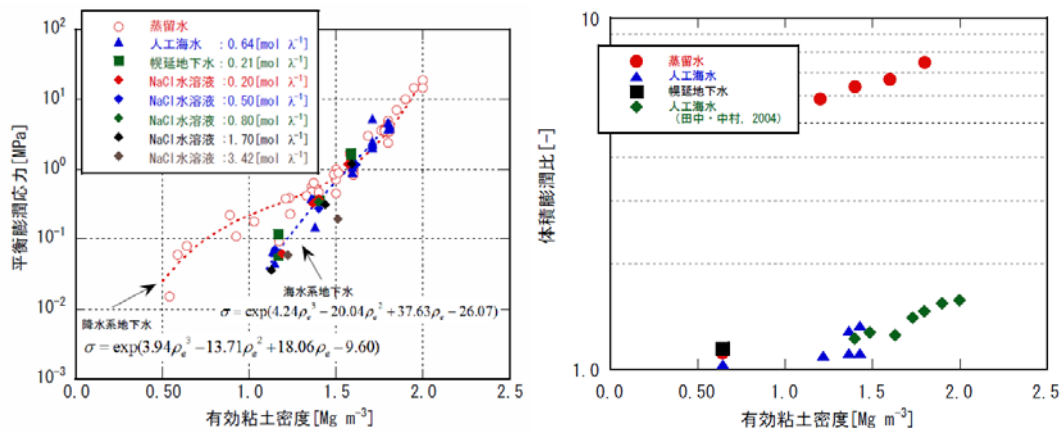


図 6.6.2-8 体積膨潤比と膨潤応力の有効粘土密度に対する依存性
(出典：JNC, 2005)

上記のような膨潤性の低下が緩衝材の自己シール性に及ぼす影響を評価する研究も実施されており、人工海水を利用した場合、隙間の割合が大きいほど隙間充填後の発生圧力が低下するが、乾燥密度を高くすることにより、海水程度の塩分濃度を持つ塩水条件でも淡水条件と同程度の自己シール性が確保できることが報告されている（小峯ほか, 2009 ; Komine et al., 2009）。

また、低透水性の指標となる緩衝材の透水係数は海水系地下水条件下の方が降水系地下水条件下に比べて 10~50 倍程度高いことが報告されている（図 6.6.2-9）。従って、これらの海水条件下における緩衝材特性の変化を考慮して設計を実施する必要がある。

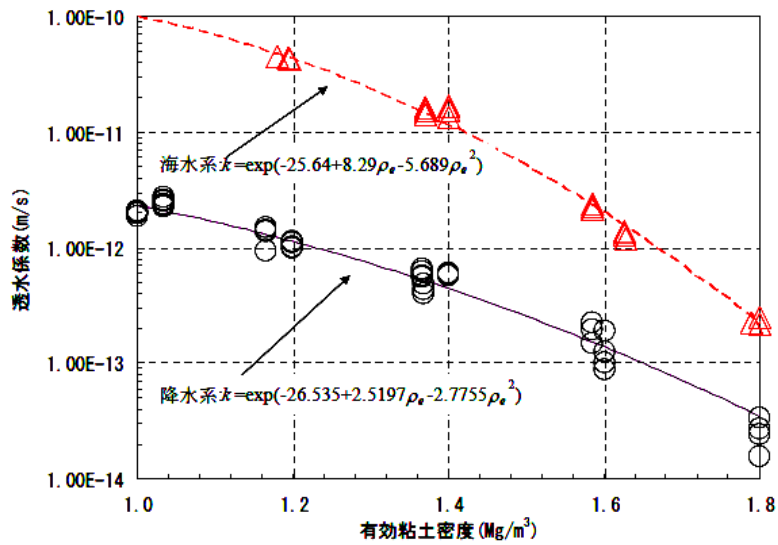


図 6.6.2-9 有効粘土密度と透水係数の関係
(出典：電事連・JNC, 2005)

なお、このほかの緩衝材の特性に関する研究開発成果は、JAEA（2010a：カーネル工学技術 2.1.2 緩衝材の基本特性）に報告されている。

今後も体積膨潤比や膨潤応力のデータの拡充と取得方法の標準化（棚井ほか，2010）などを実施し，データベースを拡充（<http://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/>）することで，緩衝材の設計に対する信頼性が向上する。

(2) セメントーベントナイト相互作用

処分場の建設では，湧水を止水するためのグラウトや地下の坑道を力学的に支持するコンクリート支保，止水プラグ（ベントナイト）を力学的に支持する力学プラグとしてセメント系材料を利用する可能性がある。これらのセメント系材料は，長期間にわたって，地下水中にカルシウム（Ca）を溶出する可能性や，地下水との反応により高い pH の反応水を生成する可能性がある（図 6.6.2-10）。セメントと地下水の反応に伴い，緩衝材の性能に影響を与える可能性のある現象をセメントーベントナイト相互作用と呼び，表 6.6.2-3 に示す現象を検討してきた。

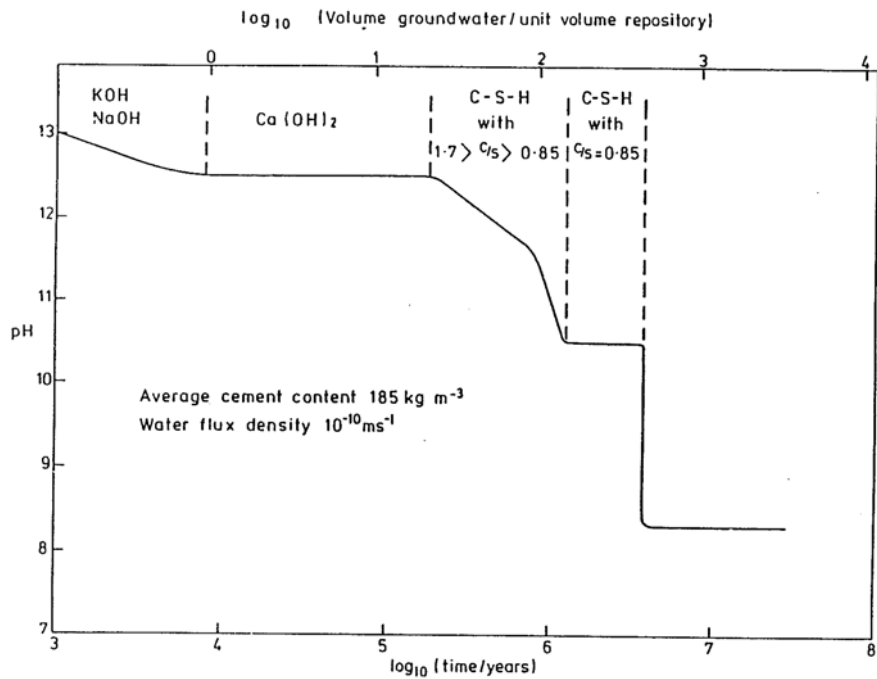


図 6.6.2-10 セメントからの浸出液の pH の経時変化
(出典：Atkinson, 1985)

緩衝材中の粘土鉱物の Ca 型化については、コンクリート支保，プラグなどを通過して緩衝材に接する地下水は Ca イオンの多い組成となるため，イオン交換により緩衝材中の Na 型スメクタイトが Ca 型スメクタイトに変化し，透水性の上昇と膨潤性の低下が起こる可能性が指摘されている。ただし，乾燥密度が高くなると，Na 型および Ca 型ベントナイトの間での膨潤性や透水係数の差が小さくなることが報告されている（図 6.6.2-11）。

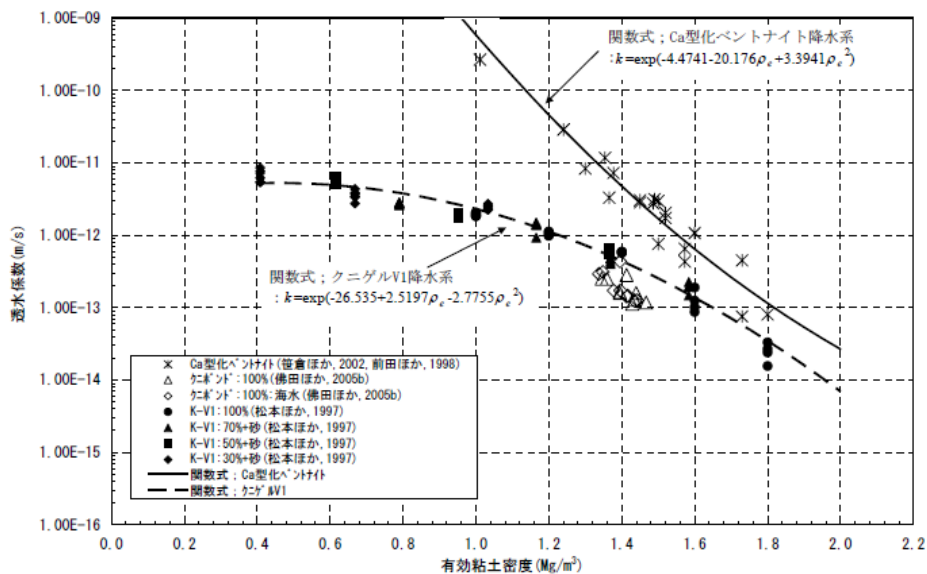


図 6.6.2-11 Ca 型ベントナイトと Na 型ベントナイトの透水係数の有効粘土密度依存性
(出典：電事連・JNC, 2005)

緩衝材中の粘土鉱物の溶解については、スメクタイトの溶解試験を実施し、溶解速度を反応温度と pH などをパラメータとして定式化する試みがなされている (Cama et al., 2000, Köhler et al., 2003, Sato et al., 2004, Kuwahara, 2006, 亀井ほか, 2007)。また、高 pH (13-14) と高温環境 (90-170°C) では、スメクタイトが溶解しやすいといった結果も報告されている (Nakayama et al., 2004)。ただし、実際の緩衝材中ではスメクタイトの溶解と二次鉱物の生成が連続的に起こるため、スメクタイトの溶解については後述の二次鉱物の生成と合わせて評価するのが適切と考えられる。

二次鉱物の生成については、反応試験により生成する二次鉱物の同定と、主として熱力学的平衡反応を仮定した緩衝材の長期変遷の予測が実施されている。ベントナイトを高アルカリ溶液 (水酸化ナトリウム溶液, 水酸化カルシウム溶液, セメント平衡水など) に少量添加し、生成する鉱物を観測する試験では、ベントナイトの主成分であるスメクタイトがアナルサイムやローモンタイトなどの非膨潤性のゼオライト系鉱物に変化することが報告された (金, 2001)。

一方でコンクリートは緻密な材料であり、アルカリ金属や高 pH 成分の浸出がコンクリート中の物質移行により抑制されることや、緩衝材中の物質移行も拡散過程により抑制されるため、全体の反応が前述した試験のように進まない可能性がある。そのため最近では、低温でセメント硬化体と圧縮ベントナイトを 5 年程度接触させて、二次鉱物の沈殿反応を観測するといった試験が行われている。例えば、原環センター (2010d) では、セメント硬化体の種類によって、緩衝材へのカルシウムの浸入量が異なるといった結果が得られている (図 6.6.2-12)。これはフライアッシュセメントを利用したセメント硬化体の方が緻密であるため、普通ポルトランドセメント (OPC) に比べカルシウムやアルカリ成分 (NaOH や KOH) の浸出率が小さいため、反応が進みにくいことなどが原因であると考えられている。また二次鉱物としては C-S-H が同定されているが、アナルサイムなどのゼオライト系鉱物は生じていない。なお、二次鉱物の生成に関する知見については、Oda (2004) や Gaucher and Blanc (2006) にまとめられている。

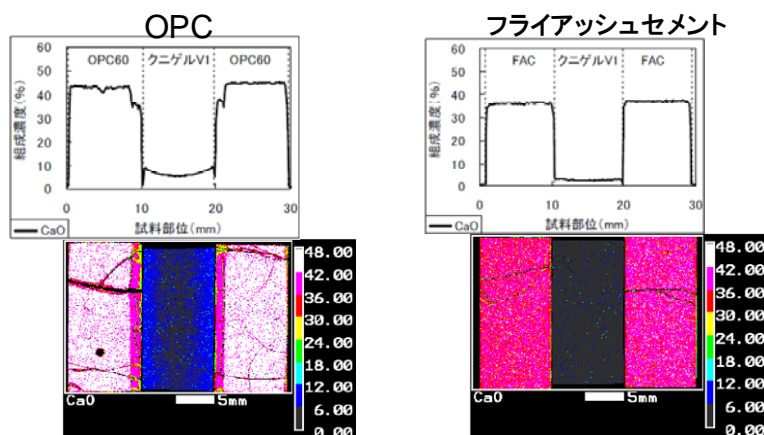


図 6.6.2-12 セメント硬化体と圧縮ベントナイトの接触試験 (原環センター, 2010d を編集)

以上の知見は、二次鉱物の沈殿の予測解析にも反映されている。予測解析手法の例としては、セメント硬化体中と緩衝材中の Na, K, Ca, シリカ, 水酸化物イオンなどの成分の物質移行現象を解析し、また、逐次、それらの元素の反応により二次鉱物の生成を化学平衡論に基づいて解析する方法がある。図 6.6.2-13 に示すように地球化学解析によれば、セメントと緩衝材の境界部では、二次鉱物の生成や鉱物の溶解により空隙が閉塞され、物質移行が制限される様子が再現されている (原

環センター, 2003b)。

セメンテーションについては、その影響を積極的に示唆するような結果は得られていない (Pusch, 1982)。これまでのところ、セメンテーションはここまで述べてきたような二次鉱物の沈殿現象とも関連があると考えられるので、その影響は二次鉱物の沈殿現象の理解に含めて考えていく必要がある。

このように、実際のコンクリートや緩衝材中では浸出率、拡散係数、透水係数などが小さいため、粘土鉱物の溶解とそれに伴う二次鉱物の沈殿の反応全体が抑制されることが分かってきた。二次鉱物としては、C-S-H が同定されているのみでそのほかの鉱物の生成は確認されていない。ただし、低温で二次鉱物が結晶として観測できるようになるには、長期間かかる可能性もある。そのため、二次鉱物の生成の確認は、5～10 年の長期的な試験に基づいて計画的に実施している (原環センター, 2010d)。

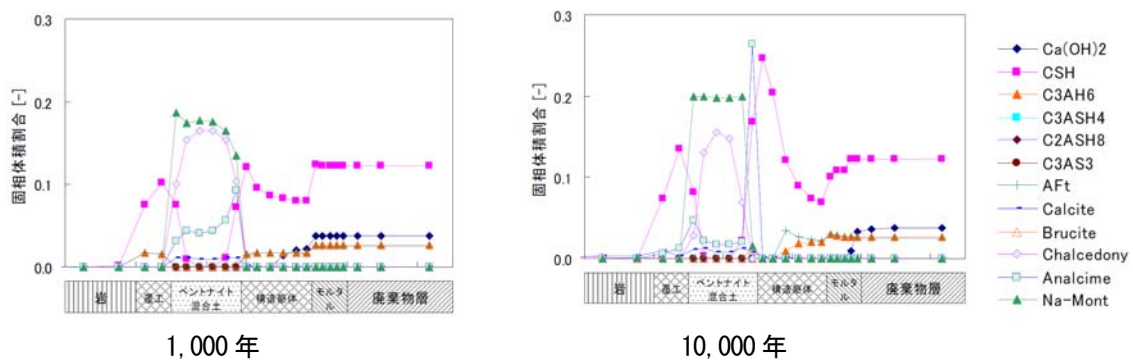


図 6.6.2-13 地球化学解析による人工バリアの鉱物相空間分布の変化 (原環センター, 2003b を編集)

以上のように、ベントナイト特性への影響の少ないセメント材料の開発およびそれらの材料の実施工への適用性を確認するための検討が進められている (6.6.4.1 参照)。セメント-ベントナイト相互作用は、人工バリア性能に影響を与える可能性のある現象で長期間にわたり緩慢に進行する。また、コンクリートからのアルカリ成分の浸出率が全体の反応の進行に大きく関与するので、コンクリートの長期的な材料変遷についても技術開発を進める必要がある。このことを解析評価において考慮し、信頼性を向上させることが重要である。

なお、セメント-ベントナイト相互作用に関連して、アルカリ成分の浸出率の低減対策として、低アルカリ性セメントの材料開発も進展している。この成果については、6.6.2.4 に示す。

(3) 炭素鋼腐食生成物とベントナイトの相互作用

炭素鋼製オーバーパックの腐食に伴う腐食生成物により、緩衝材中のスメクタイトが変質し、期待される低透水性などに影響を及ぼす可能性がある。第2次取りまとめや柴田ほか (2004) によれば、緩衝材の長期的な健全性評価として鉄-ベントナイト相互作用に伴い、緩衝材における鉱物化学的変遷に関して調査・研究・実験を通して、緩衝材の基本性能に重大な影響が生じないと評価した。鉄-ベントナイトの相互作用に関する現象は表 6.6.2-4 をまとめて示している。

鉄-ベントナイト相互作用のキープロセスとしては、①層間陽イオン交換反応によるイオン型の変化 (Fe 型化)、②鉱物化学的変質 (擬クロライト化、鉄クロライト化、バーチェリン化、ノント

ロナイト化, 鉄サポナイト化), ③腐食生成物によるセメンテーションが挙げられる。それぞれの鉱物の結晶構造については, 図 6.6.2-14 に示す。

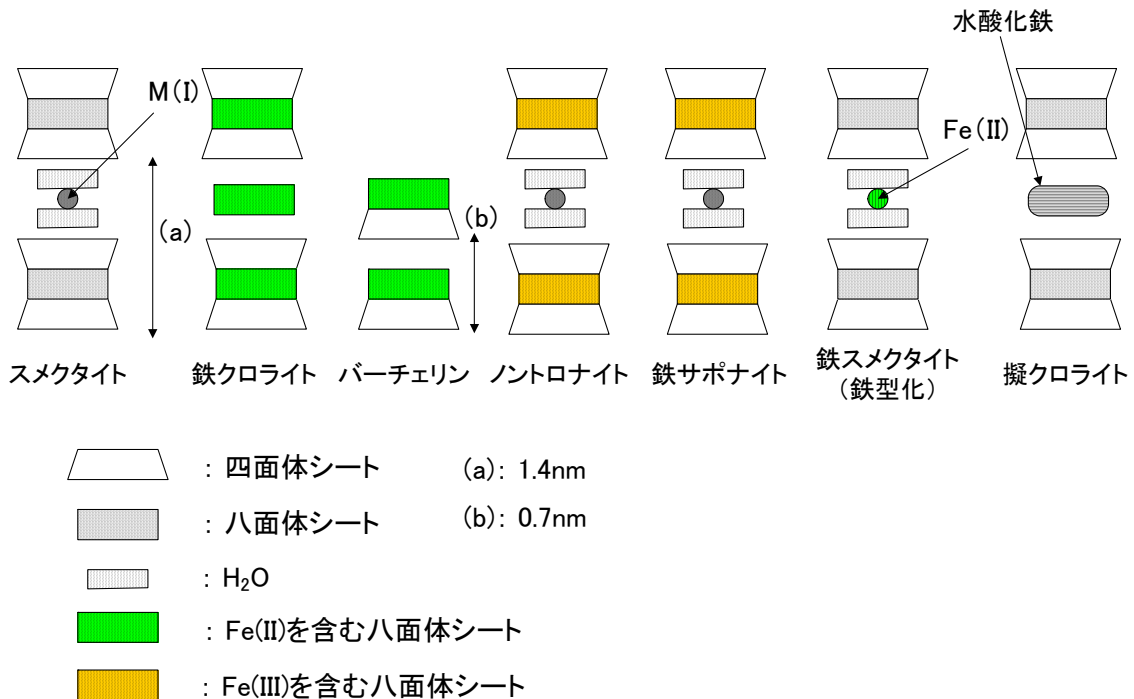


図 6.6.2-14 鉄を含む粘土鉱物の結晶構造の概念図

層間陽イオン交換反応による Fe 型化については, 試験材料として鉄粉を利用するとベントナイトの一部が Fe 型化することが分かっている (Kozai et al., 2001, 笹本ほか, 2010)。しかし, 炭素鋼片と圧縮ベントナイトを接触させた試験では Fe 型化は確認されていない (Ishidera et al.; 2007, Carlson et al., 2007, 陶山ほか, 2008)。これは, 鉄粉を用いた試験では炭素鋼試験片に比べてその比表面積が極めて大きく, 鉄の浸出率が高いことが要因と考えられる。

鉱物化学変質については鉄粉を利用した試験により, パーチェリン様の鉱物を形成する可能性が指摘されている (Lantenois et al., 2005)。これに対し JAEA (2008b) では, ベントナイトの変質が発生する条件を明らかにするため, 温度および鉄/ベントナイト重量比をパラメータとした調査を実施した (表 6.6.2-5)。X 線回折測定結果から温度が 150°C, 鉄/ベントナイト重量比が 1:1 の条件以外では, ベントナイトの変質は起こらなかった。約 10 年間にわたり室温で鉄粉とベントナイトを接触させた試験でも, 同様にベントナイトの変質は確認されなかった (笹本ほか, 2009)。また, 圧縮ベントナイトを用いた試験期間 10 年で実施された試験では, 鉄片試料は腐食しているが, スメクタイトの鉱物化学的変質は確認できなかったと報告されている (陶山ほか, 2008)。

腐食生成物のセメンテーションについては, 鉄共存系での圧縮ベントナイトによる最長 10 年程度の試験の結果, セメンテーションは確認されていない (上野ほか, 2008)。

以上のように, 鉄粉などの比表面積の大きな試料を用いて腐食速度などを加速した条件では, ベントナイトの変質の可能性が指摘されているが, 実際の環境では, 腐食速度が遅いことと圧縮ベントナイトを利用していることから, 鉄-ベントナイト相互作用の反応は進みにくいと考えられる。

表 6.6.2-5 ベントナイトの変質と試験条件
(JAEA, 2008b を編集)

試験期間	試験温度 (°C)	鉄粉/ベントナイト重量比			
		0.1	0.2	0.5	1.0
45 日 程度	80				○
	100				○
	120		○	○	○
	150	○	○	○	×
90 日 程度	80				○
	100				○
	120		○	○	○
	150	○	○	○	×

○ : 変化が認められない条件 × : 変化が認められた条件

鉄-ベントナイト相互作用に関する予測解析やナチュラルアナログ研究も実施されている。解析によると鉄材（例えば、鋼製支保など）とベントナイト界面において、マグネタイトなどの二次鉱物の生成による空隙の閉塞が生じ、物質移行が抑制されることや (Bildstein et al., 2006; Savage et al., 2010; Marty et al., 2010), 鉱物化学変質の影響を受ける領域は界面近傍に限られていることなどが報告されている (JAEA, 2010b; Marty et al., 2010; Wersin et al., 2006)。このほか、ナチュラルアナログ事例の検討も進められており、ベントナイト鉱床の鉄に富む緑色脈の周辺のベントナイトの分析などの事例が報告されている (Fukushi et al., 2010)。

以上のように、鉄-ベントナイトの相互作用については変質を示唆するデータが一部で得られているが、実際の処分環境では、緩衝材中の物質移行が制限されていることや炭素鋼の腐食速度が遅く、鉄の供給量が少ないことから、鉄-ベントナイトの反応は顕著には進まない可能性が示唆されている。この現象の理解については今後も継続的に技術開発を進め、上記の考えを支える論拠を充実させていく。

このほかの鉄-ベントナイト相互作用に関する研究開発成果は、JAEA (2010a, カーネル工学技術 2.2.3 緩衝材の変質・劣化挙動) に報告されている。

(4) イライト化

イライト化については、第2次取りまとめにおいて影響が顕著でないことが示されているため、ここでは簡単にその論拠を述べる。

ガラス固化体からの発熱により、緩衝材周辺は周囲の地温に比べ高温状態におかれる。この高温状態により緩衝材は物理的・化学的な特性に対して影響を受け、バリア性能を低下させる可能性があるため、これまで処分場の温度が 100 °C を超えないことを目標として、坑道離間距離や廃棄体間隔が設定されている (JNC, 1999b)。緩衝材の温度制限を 100 °C とする理由としては、高温条件におけるスメクタイトのイライト化による膨潤特性、透水特性の変化が懸念事象として挙げられる。スメクタイトは 100 °C を超えるような環境に長期間さらされると、非膨潤性のイライトという粘土鉱物に変化することが知られている。イライト化の反応が進むためには、緩衝材が高温状態に長期間さらされると同時に K⁺ イオンが外部から供給されることが条件となる。

イライト化の発生条件には、高温環境と K⁺ イオンの供給が不可欠であるが (Huang et al., 1993),

このような物理化学的環境は、現実的な処分環境においてはまれである。また、既往の研究成果から、130℃以下ではイライト化はほとんど生じることがなく、緩衝材の安全機能に対する顕著な影響はないことが示唆されている（石川ほか，1994）。しかし、さまざまな化学反応が高温で促進されることを考慮して、安全評価の不確実性を増大させないために、処分場の温度が100℃を超えないことを設計上の要件としている。

(5) 緩衝材の流出現象

緩衝材には自己シール性により周辺岩盤の亀裂に侵入、充填し、地下水流動を抑制する機能が求められる。しかし人工バリア周辺の岩盤の開口幅が大きい場合、また高い割れ目頻度を有する場合には、膨潤によるベントナイトの割れ目への侵入が止まらず、緩衝材密度の低下により緩衝材の諸機能ならびに構造力学安定性に影響を与えることが懸念される（JNC，2005）。

緩衝材の岩盤亀裂内への侵入現象については、初動の侵入速度に関するデータの整備（松本・棚井，2003）と、降水系地下水と海水系地下水に大別した水質の違いによる挙動の把握（松本・棚井，2004）が行われている。その結果、海水系地下水においては試験条件の範囲（最大平均流速 $8 \times 10^{-6} \text{m/s}$ ）では、侵入現象は起こらないことが確認されている。一方、降水系地下水では平均流速 $2 \times 10^{-6} \text{m/s}$ において侵入現象が確認されている。侵入現象は降水系地下水条件において留意すべき事象であるが、海水系条件ではその影響が小さいことが示唆されている（JNC，2005；松本ほか，2005）。

また、ベントナイト密度分布の X 線 CT スキャナを用いた非破壊検査による取得（松本・棚井，2008）ならびに、侵入現象モデルの入力データの整備を進め、評価手法の妥当性・適用性について検討を行った。その結果、実際の侵入現象では、既存のモデル化で用いられている粘度といった物性パラメータ以外に評価上影響する要因が含まれていることが推測され、現状の物性パラメータによる侵入現象のモデル化には限界があることが示された（松本・棚井，2010）。このほかの緩衝材の流出現象に関する研究開発成果は、JAEA（2010a，カーネル工学技術 2.2.2 緩衝材の流出／浸出挙動）に報告されている。

6.6.2.4 低アルカリ性セメントの開発

6.6.2.2および6.6.2.3に述べたように、オーバーパックの不動態化の抑制、セメント系材料とベントナイトとの相互作用の影響を低減するための対策の一つとして、低アルカリ性セメントの開発が進められてきた（例えば，小林ほか，2009a，2009b）。

処分施設の緩衝材や施設周辺の岩盤に対する影響を軽減することを目的に開発された低アルカリ性セメントは、①LAC（クリンカー設計型），②HFSC（ポゾラン質混和材添加型），③SAC（アルミノシリケート系混和材添加型）に大別される。植田ほか（2008）は、上記の三種類の低アルカリ性セメントと一般に普及している普通ポルトランドセメント（OPC）の硬化体について、力学特性、化学特性などを室内試験により比較している。力学特性については、低アルカリ性セメントは OPC とほぼ同等の特性を有していた。一方、化学特性については、蒸留水を利用した試験ではいずれのセメント系材料においても OPC に比較して水和した硬化体の Ca の溶出溶解度が低く低アルカリ性であり、海水系地下水に接しても HFSC と SAC は OPC に比較して Ca の溶脱量が小さかった。セメント水和鉱物の溶解現象は共存イオンの影響を受けるため、長期評価においては地下水成分の影響を評価することが重要であることを示唆している。なお、低アルカリ性セメントの研究開発成

果は、JAEA（2010a, カーネル工学技術 2.3.3 支保工材料（低アルカリ性セメント））に報告されている。以上のように、低アルカリ性セメントの材料開発が着実に進展しており、OPC と同程度の材料特性を有しながらも、アルカリ成分の浸出量や浸出液の pH を低下できることが示されている。低アルカリ性セメントの施工適用性に関する技術開発成果については 6.6.4.1 に示す。

6.6.3 地層処分施設の耐震性評価

2006 年の「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（原子力安全委員会, 2006）の改定や、2010 年の「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」（原子力安全委員会, 2010）の策定を踏まえ、地層処分施設についても耐震重要度分類に応じた耐震設計が必要になると考えられる。地層処分のための地下施設は、耐震設計の観点からこれまでの原子力発電関連施設に比べて、地下深部に建設する構造物であること、大規模な接続坑道を有する広い面積の構造物であること、閉鎖後も安全性を確保する必要があることなどの特殊性を有している。地震が多く発生するわが国では、地震時における施設の安全検討は極めて重要であり、段階的かつ戦略的に検討を進めていく必要がある。

発電用原子炉施設を対象にした基準地震動策定においては、距離減衰式、波動伝播特性など国内外の研究・適用事例は膨大であるが、地層処分場の平面的拡がりに対応した地下深部の地震動伝播特性についての研究事例は多くはない。

放射性廃棄物処分における地震動にかかわる技術開発は、原子力発電所の基準地震動策定などを参考にしながら、安全規制、候補サイトの調査、処分場の設計などとの関係を考慮しつつ進めていく。NUMO は、地下深部における地震動評価に資するため、地下深部地震動評価手法、国の委員会などで実施されている審査における活断層評価および強震動評価、地質・地盤に関する安全審査の手引き検討委員会における活断層評価、震源断層の設定、最近発生した地震などに関する最新知見を常に収集・整理している。地下深部地震動評価手法について、近年、国内で発生した大規模な内陸地殻内地震の調査研究によって、新たな知見が増えてきている。これらの地震では大きな震源近傍の地震動が観測され、地震被害も大きかった。地震動や地震被害を大きくした要因として、地震動の周期の長短やアスペリティ（大きなゆれを起こす地震波が発生すると考えられる部分）の位置といった震源特性による影響に加え、深部地盤構造に起因する地震動増幅などが指摘されている。例えば、2007 年新潟県中越沖地震における柏崎刈羽原子力発電所サイトでの強震動の要因として、深部地盤における不整形性の影響、古い褶曲構造での増幅などが明らかとなってきている（東京電力, 2008）（図 6.6.3-1）。

NUMO は、これらの知見を踏まえ、図 6.6.3-2 のように褶曲構造モデル、段差構造モデル、半地溝構造モデルなどの地下構造モデルを設定し、工学的基盤より下部の深部地盤の不整形性がサイトの地震動特性に及ぼす影響を解析的に検討している（NUMO, 2011e）。検討により、深部地盤の不整形性により地震動の伝播特性が異なること、不整形構造境界の近傍において地震動振幅の大きな領域が局在化することなどを明らかにした。

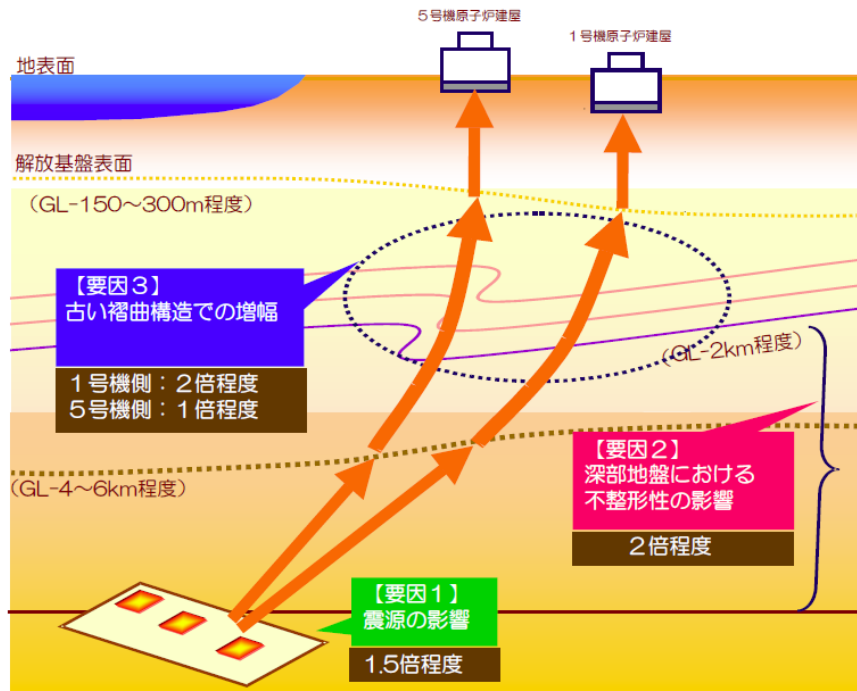


図 6.6.3-1 中越沖地震の地震動が大きかった要因分析
(出典：東京電力株式会社, 2008)

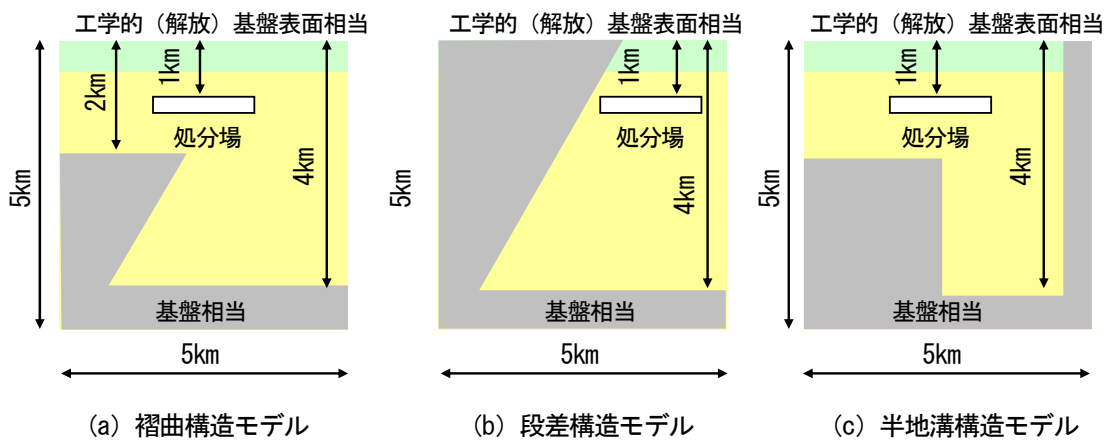


図 6.6.3-2 深部地下構造モデル
(出典：NUMO, 2011e)

NUMO は、このような深部地震動に関する検討を踏まえて、地下施設に与える影響が大きいと考えられる地震動を模擬的に設定し、操業期間中の空間保持の観点から処分坑道の耐震性を次のように評価している (NUMO, 2011e)。

岩盤条件は、現時点でサイトが特定されていないため、第2次取りまとめと同様の岩盤モデルを用いた。対象施設は、高レベル放射性廃棄物処分施設と地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設の処分坑道とし、操業中に坑道の空間を安定に保持するという観点から耐震安全性評価を行った。

検討用地震動は、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」に示される「距離減衰式に基づく経験的な方法」による標準応答スペクトルを用いて作成した (図 6.6.3-3 (a))。「距離減衰

式に基づく経験的な方法」による標準応答スペクトルは、せん断弾性波速度 V_s が 2,200m/s 以上の地震基盤相当における応答スペクトルである。検討対象とした地盤条件は第2次取りまとめと同様であり、解析モデル下端においてせん断弾性波速度 V_s が 2,200m/s 以上であることから、地震動の設定位置は解析モデルの地盤最下端レベルである GL.-1,200m とした (図 6.6.3-3 (b))。

処分坑道の耐震性評価においては、坑道掘削時の応力状態を二次元静的 FEM 解析で求め、これを常時応力とし、地震時増分応力を二次元動的 FEM 解析 (水平動・鉛直動同時入力) によって算出した。さらに、これらを重ね合わせた応力状態にて地震時安全性を評価した。高レベル放射性廃棄物処分坑道の解析結果の一例を図 6.6.3-4 に示す。常時と地震時の岩盤の最大せん断ひずみ (γ_{max}) は同程度であり、処分坑道に対する地震の影響は小さい。地層処分低レベル放射性廃棄物処分坑道についても同様であり、掘削時の各坑道の力学的安定性が確保されていれば、地震時にも安定性は確保される見通しが得られた。処分場は、大規模な連接坑道群を有する地下構造物であり、坑道群には多くの交差部がある。今後は、これらの構造的特徴を踏まえた地層処分施設全体の地震時挙動特性を把握していくとともに、閉鎖後長期の地震影響評価の基本的な考え方を整理していく。

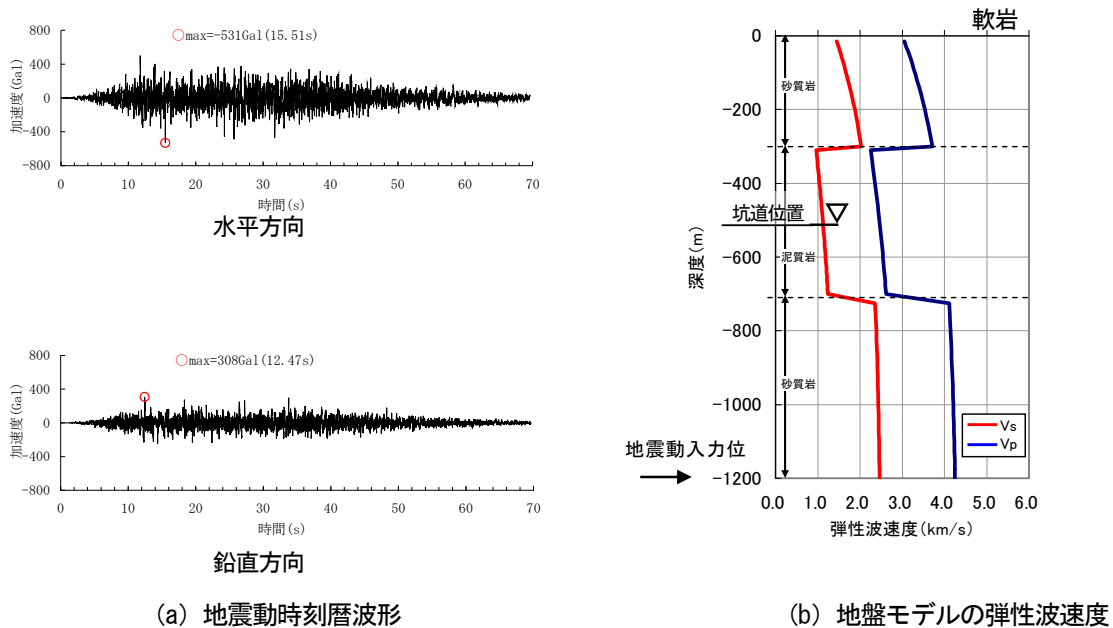


図 6.6.3-3 検討用地震動の時刻歴波形と地盤モデルの弾性波速度の深度分布 (出典: NUMO, 2011e)

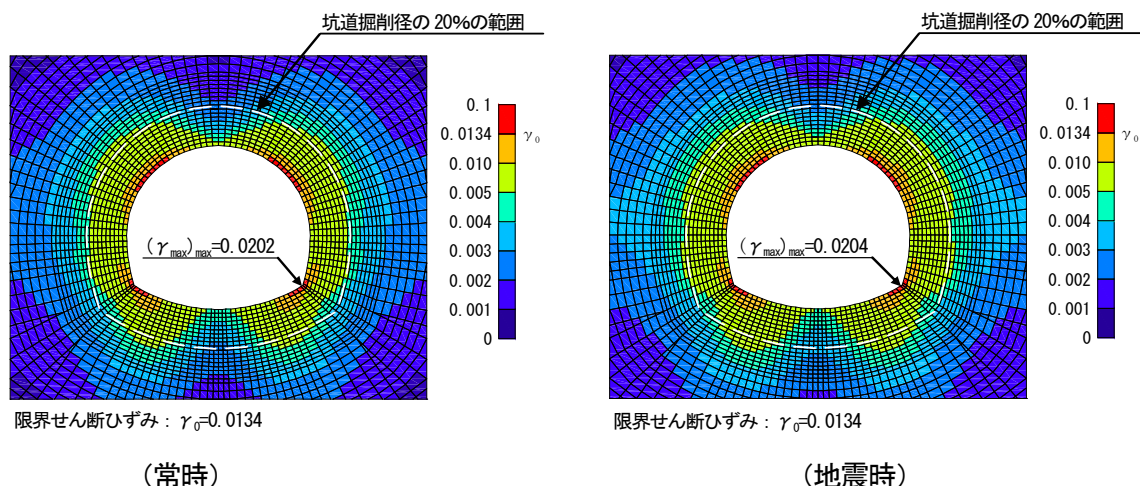


図 6.6.3-4 坑道周辺岩盤の最大せん断ひずみ（高レベル放射性廃棄物処分坑道）
（出典：NUMO, 2011e）

6.6.4 建設・操業・閉鎖技術

2000年にNUMOが設立され、2002年に処分場の候補サイトの公募を開始した。これを受け、応募区域の多様な地質環境に対しても適切かつ円滑に建設・操業・閉鎖を進めていくための技術開発を進めている。JAEAでは深地層の研究施設の建設を通じて、地層処分施設の建設にかかわる有用な知見が蓄積している。また、基盤研究開発機関は、第2次取りまとめ以降、操業技術に関する実規模あるいは工学規模の実証試験を含めた種々の要素試験を実施している（表 6.6.1-1）。

ここでは、これらの検討状況のうち、JAEAの深地層の研究施設などの建設を通じて適用性確認試験が実施されている低アルカリ性セメントの開発状況について示す。基盤研究開発については、オーバパックの遠隔溶接・検査技術と緩衝材の製作・搬送・定置技術の技術開発状況を示した。また、閉鎖措置計画認可時までの期間を対象とした回収の具体的方法や技術について、NUMOの検討状況や基盤研究開発機関における開発成果について示す。

6.6.4.1 低アルカリ性セメントの実施工への適用性確認

放射性廃棄物処分施設においては、構造強度の確保などの観点から、また、既存の地下構造物における実績を考えると、セメント系材料が広く適用されることが想定される。しかし、既存のセメント系材料を処分場に適用する場合、その溶脱により生じる高アルカリ成分が、緩衝材の膨潤性の低下や天然バリアとしての岩盤の変質など、それらの機能に有意な影響を与えることが懸念される。このため、これらの影響を回避・低減するための代替材料を適用可能なように準備しておくことが、処分場の成立性を担保するために重要となる。このようなニーズのもと、JAEAが開発した低アルカリ性セメント（入矢・三原, 2003）を吹付コンクリートや立坑覆工コンクリートなどに用いる場合の、実施工への適用性が確認されている。

(1) 吹付コンクリートの実施工への適用性確認

吹付コンクリートは、近年の山岳トンネル工事において施工実績が非常に多い NATM 工法における主要な支保部材であり、地下施設の建設においても適用される可能性が高いと考えられる。このような背景から、JAEAにて開発された HFSC などのポズラン材料を高含有したタイプの低アルカ

リ性セメントを用いた吹付コンクリートの実施工への適用性検討が実施された（図 6.6.4-1）。



(a) 地下での HFSC 吹付施工の様子

(b) HFSC 吹付施工後の坑内状況

図 6.6.4-1 HFSC 吹付コンクリートの模擬施工状況

（出典：JAEA, 2009）

これまでに、シリカフューム、フライアッシュなどを種々に混合したセメントペーストに対する材料特性試験を行い、その結果をもとに地下施設の支保工としての吹付コンクリートに適した HFSC を検討してきた。HFSC の強度特性に関しては、HFSC のベースコンクリートで 25N/mm^2 以上、吹付コアで 35N/mm^2 以上の材齢 28 日圧縮強度が確認されている。地下施設への適用例として、幌延深地層研究所では設計基準強度 36N/mm^2 に対して高強度用の配合を選定し、さらに現地骨材を使用した配合や現地プラントを用いた配合により地上での吹付施工試験を実施し、その適用性が確認されている（入矢ほか, 2006）。

原位置での実証試験としては、幌延深地層研究所の調査坑道において、普通ポルトランドセメント、シリカフュームおよびフライアッシュの混合比を 4:2:4 とする低アルカリ性セメント（以下、HFSC424 という）を選定し、吹付コンクリートの原位置試験により HFSC コンクリートは、原位置においても、普通ポルトランドセメントと同等の施工性と強度発現性が確保されることが確認されている。リバウンド率（壁面に付着せず跳ね返ってくるコンクリート量の割合）に関しても、13.3% という結果が得られており、同施設において普通ポルトランドセメントを用いた吹付コンクリートのリバウンド率（23.9%）よりも小さいことから、坑内における吹付施工時においても坑内粉塵濃度の低減が期待される（中山ほか, 2010）。

以上より、坑道の支保工の吹付コンクリートへの適用を目的とした HFSC の配合選定試験ならびに地上・地下における吹付施工試験を行い、原位置への適用性を確認した。

(2) 立坑覆工コンクリートの実施工への適用性検討

JAEA は、HFSC424 について、場所打ちコンクリートとして立坑の覆工に使用することを想定して、強度発現性、施工性、寸法安定性などの基礎特性について検討している。

立坑の覆工の仕様を満足する HFSC424 を用いた場所打ちコンクリートの配合においては、施工性を示す各種試験においてその性能を確認しており、掘削や脱枠のために早期強度が要求される立坑建設においては、脱枠などの施工上のサイクルタイムに問題がないことが確認されている。また、低アルカリ性セメントにシリカフュームの混入により自己収縮が生じるため、乾燥収縮と合わせて

寸法安定性を確認しておく必要がある。HFSC424では超微粒子であるシリカフェームを含んでいるため普通ポルトランドセメントの自己収縮量より大きい傾向を示しているが、単位結合材量を多くした配合においては普通ポルトランドセメントとほぼ同等となっている。乾燥収縮量は、普通ポルトランドセメントより小さくなっており、シリカフェームやフライアッシュのポズラン反応による水和組織の緻密化が影響している。両者を合わせた全収縮量は普通ポルトランドセメントとほぼ同等であり、寸法安定性の観点からは実用上、大きな問題はないことを把握している(中山ほか, 2009)。

このように、HFSC424 を用いた低アルカリ性コンクリートは、適切な配合を選定することで、強度、施工性および、ひび割れなどの初期欠陥の発生要因に対して大きな問題はなく、実用が可能との見通しを得ている。

6.6.4.2 オーバーパックの遠隔溶接・検査技術

オーバーパックの封入について第2次取りまとめでは、溶接影響を考慮した材料の品質、溶接法の作業効率や遠隔自動化、また検査については超音波探傷法での欠陥の検出性、およびオーバーパックの健全性確保の目安となる欠陥の大きさの定量化などを留意点として挙げている(JNC, 1999b)。

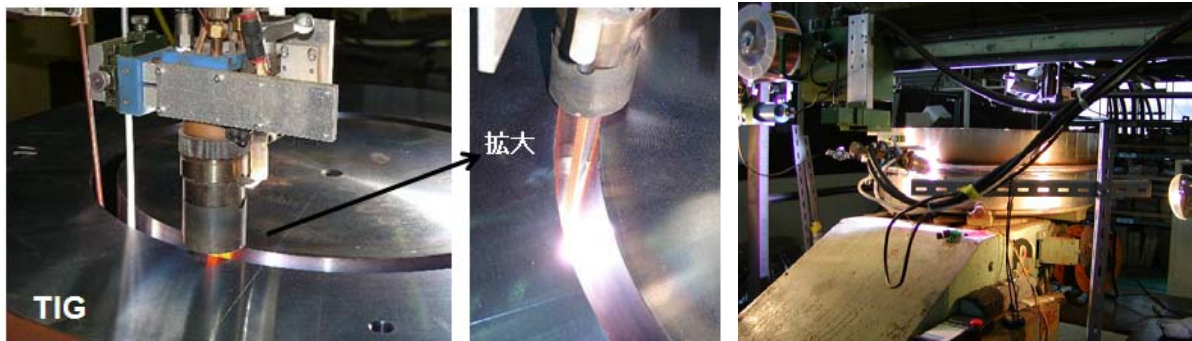
基盤研究開発では、第2次取りまとめに示されたオーバーパックの基本構造を基に、溶接・検査を前提にした平蓋と落とし蓋の二つの蓋構造を提示している(原環センター, 2001)。これを図 6.6.4-2 に示す。深さ 190mm という厚板の溶接になること、また、平蓋の場合には内周と外周の比が約 2 倍になるというオーバーパック特有の構造を有していることが分かる。またオーバーパックに要求される機能や溶接性の観点から、その材質を調査、検討して炭素鋼鍛鋼品(SF340A)を試験対象材料としている。



図 6.6.4-2 オーバーパック蓋構造の概念図
(原環センター, 2001 を編集)

溶接技術については、第2次取りまとめでの評価が高い代表的な高エネルギービーム溶接法である電子ビーム溶接、および代表的なアーク溶接法である TIG 溶接(図 6.6.4-3)、MAG 溶接(図 6.6.4-4)などを対象に、基盤研究開発において実規模の蓋構造試験体を用いた溶接試験が実施されている。その結果、電子ビーム溶接はその溶接原理からオーバーパック 1 本当たり 30 分程度での封入が可能であるが、封入溶接において必須となる電子ビームの終端処理工程において微小な傷が発生しやすいこと、また特に平蓋では大きな内外周差に起因する入熱量の差により溶融金属が外側に膨出する現象が見られることが確認されている(原環センター, 2002)。一方、アーク溶接法は多層盛であることから、オーバーパック 1 本当りに要する溶接時間が、TIG 溶接で 24~30 時間、MAG 溶接はその 1/10 程度となる。しかし、TIG 溶接はその原理、使用実績、および一般的な評価からも

明らかとおり、現時点では最も高品質の溶接が可能であることが確かめられている。このように溶接技術については、蓋構造との関係を含めてオーバーパックへの適用性、適用条件といった技術的特徴が網羅的に把握されている（原環センター，2002，2004b，2008b，2009b）。



(a) 落とし蓋構造へのTIG溶接適用例

(b) 平蓋構造へのTIG溶接適用例

図 6.6.4-3 落とし蓋構造，平蓋構造でのTIG溶接試験状況

((a) 出典：原環センター，2009b

(b) 出典：原環センター，2003c)



(a) 落とし蓋構造へのMAG溶接適用例

(b) 平蓋構造へのMAG溶接適用例

図 6.6.4-4 落とし蓋構造へのMAG溶接適用例

((a) 出典：原環センター，2008b

(b) 出典：原環センター，2004b)

検査技術については、溶接により発生する可能性のある傷の検出と定量を行って、溶接部の構造健全性を評価するという視点から、超音波探傷法の適用性を把握することが重要である。超音波探傷には各種の方法があるが、その原理などから表面、表層、内部、深部というように探傷深さに応じた使い分けが求められる。基盤研究開発では、こうした特徴に着目して、人工欠陥、および自然欠陥を付与した実規模大の試験体に対して超音波探傷試験を実施し、表面と表層にはクリーピングウェーブ法、内部と深部には飛行時間回折法（TOFD法）、あるいは、フェイズドアレイ法、およびフェイズドアレイ-TOFD法の組み合わせが適することを提示している（図 6.6.4-5）。また、自然欠陥付与試験体の破壊試験を行って超音波探傷試験の結果と比較することで、欠陥寸法に対する検出確率を算定し、探傷深さ 190mm に対して高さ 2mm 以上の欠陥を 100%の確率で検出可能であることが確認されている（原環センター，2008b）。

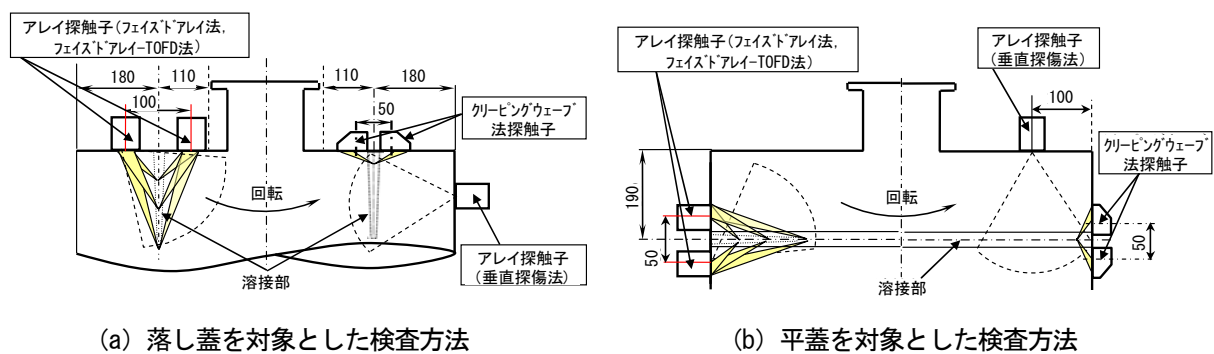


図 6.6.4-5 超音波探傷法を用いた溶接部の検査方法の概念
(原環センター, 2008b に一部加筆)

オーバーパックの耐用期間を 1,000 年とする場合 (6.3.2.1 参照) には、溶接部には母材と同様、1,000 年間の健全性が求められる。金属が短時間の内に加熱、熔融、凝固のプロセスをたどる溶接部では、金属組織、化学組成、応力状態の変化や傷の発生などが想定される。従って、こうした溶接影響を前提にした健全性評価が求められる。基盤研究開発では、溶接傷の存在を前提にして、破壊力学に基づくオーバーパック溶接部の構造健全性評価手法が提示され、亀裂進展と各種の腐食、放射線照射脆化など、懸念される材料の劣化による溶接部の破壊が寿命期間中には生じないことを、溶接・検査終了時点で評価するための検討が進んでいる (Asano et al, 2006 ; Asano and Aritomi, 2010 ; 原環センター, 2007, 2008b, 2009b)。

こうした溶接・検査技術の開発成果の一部は地層処分実規模設備整備事業 (図 6.6.4-6, 図 6.6.4-7) における炭素鋼製オーバーパックの製作に利用され、その技術の適用性が確認されて一般に紹介されている。

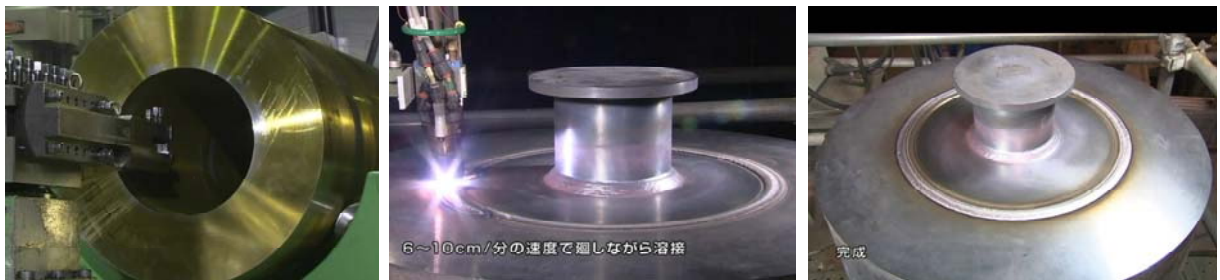
NUMO は今後、これらの知見を反映し、また、基盤研究開発機関と相互に補完し合ってデータの収集と技術の信頼性の向上を図りつつ設計手法の検討を進めることで、閉鎖後長期の安全性と工学的成立性に対する信頼性を向上させる。



(a) 1,000°C程度に加熱後切り出し

(b) 鍛造（高さ調整）

(c) 鍛造（厚さ調整）



(d) 自然冷却後の加工

(e) 溶接

(f) 製作後の外観

図 6.6.4-6 炭素鋼オーバーパックの製作状況
（原環センターホームページを編集）



図 6.6.4-7 製作された炭素鋼オーバーパック
（出典：原環センター，2010e）

6.6.4.3 緩衝材の製作・搬送・定置技術

(1) 緩衝材の製作・搬送・定置に必要な技術の概要

緩衝材はオーバーパックの閉じ込め機能が失われた後の長期に対しては、閉鎖後閉じ込めのための安全機能として放射性物質の移行の抑制が期待されている。この長期に対する放射性物質の移行の抑制は、緩衝材内部の物質移行を拡散支配にすることにより担保する。このため緩衝材は、放射性物質の移行抑制が期待できる密度以上に圧縮成型する必要がある。また、圧縮成型して密度を上げることによりコロイドによる放射性物質の移行を抑制し、放射性物質の収着現象による放射性物質の移行の遅延効果が期待できる。上記の機能に加え、長期変質による特性の変化やほかのバリアとの関係なども考慮した設計により緩衝材の材質（材料組成、密度）と形状、厚さを設定する。

緩衝材の製作・搬送・定置技術は、設計で設定されるこれらの材質と形状、厚さを的確に実現させる製作方法や地上施設から地下施設へ効率的に搬送する方法および処分孔または処分坑道への的確な定置施工方法の選定と技術の確立が必要である。その際、製作・搬送・定置技術に加えて品質確認技術を含めた品質保証方法を確立することが重要である。これに対して第2次取りまとめまでは、ベントナイトを主体とした緩衝材の基本物性や基本特性を室内での試験を中心に把握し、設計に必要なデータの整備に力点が置かれていたため実規模での検討事例が乏しかった。また、一般産業においても同様の使用目的と狭隘な地下施設内での施工などの条件下でベントナイトを用いた実績は示されていない。このため第2次取りまとめ以降では、基盤研究開発を中心に緩衝材の製作・搬送・定置に対する工学的信頼性を向上させることを目的に、各種の要素試験と実規模レベルでの試験が行われている。

(2) 緩衝材の製作に関する技術の開発状況

図 6.6.4-8 に、2,000t プレス機による高さ 35cm の緩衝材ブロック圧縮成型時の状況を示す。圧縮成型時には材料条件を考慮した圧縮時間や速度、圧縮力の保持時間などを考慮することにより、型枠から取り出した後の緩衝材ブロックの寸法変化（圧縮により締め固められているため、圧縮力を除荷後、徐々に緩衝材寸法が変化しはじめる現象）の影響をある程度制御可能であることを確認している。また、型枠の脱型時には、緩衝材ブロックに亀裂が発生することがあるため、この亀裂発生を制御するような脱型方法について知見が蓄積されている。実規模の一軸プレス機により製作したブロックの密度分布状況を図 6.6.4-9 に示す。ブロック内の密度分布は目標乾燥密度 1.6Mg/m^3 以上を達成している（原環センター，2004a）。こうした緩衝材の製作・搬送・定置技術の開発成果の一部は、地層処分実規模設備整備事業（図 6.6.4-9）における緩衝材ブロックの製作に利用され、その技術の適用性が確認されて一般に紹介されている。

また、ブロックの製作方法については、一軸プレス機による実績以外に CIP（冷間等方圧プレス）による製作性の確認なども行われている（原環センター，2004a；Awano et al., 2001）。

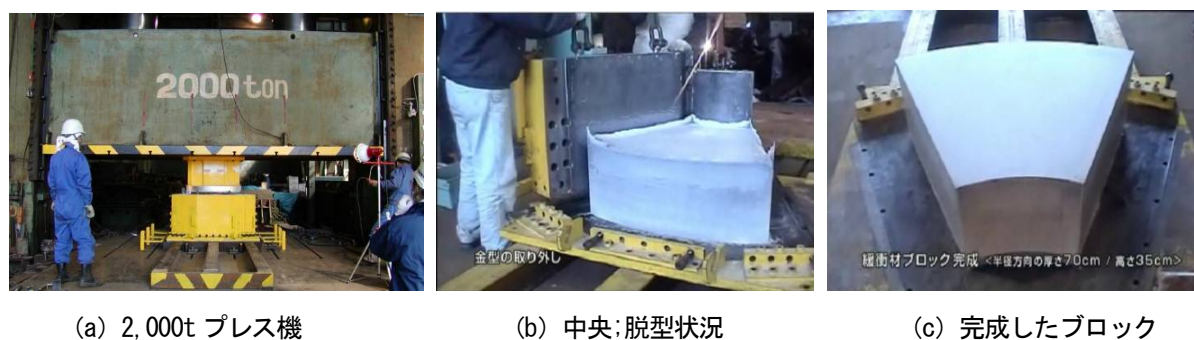
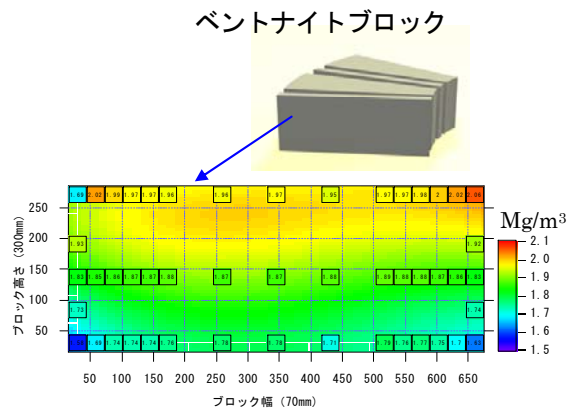


図 6.6.4-8 プレス機による緩衝材ブロック製作状況
((a) 出典：原環センター，2004a (b) (c) 原環センターホームページを編集)



(a) 実規模緩衝材外観



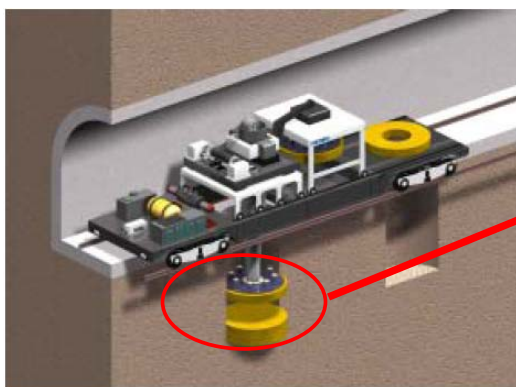
(b) 緩衝材ブロック密度分布測定例

図 6.6.4-9 実規模緩衝材展示状況と緩衝材ブロックの密度分布
 ((a) 原環センター, 2010a を編集 (b) 原環センター, 2004a を編集)

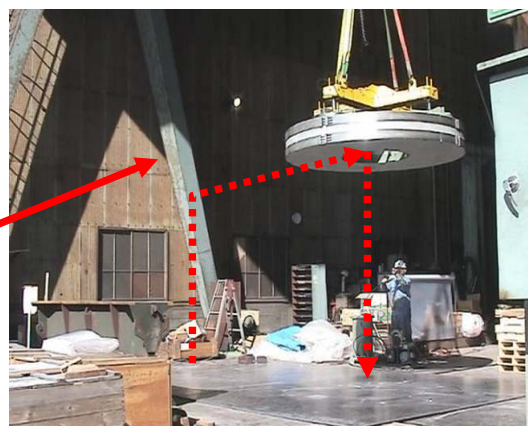
(3) 緩衝材の搬送・定置に関する技術の開発状況

地上・地下施設での積み卸し、積み替え、処分孔への定置作業時には緩衝材ブロックに損傷を与えず、かつ、狭隘な空間で把持が行える真空吸引技術の利用を想定している。特に処分孔への緩衝材定置時には狭隘な空間内で精度良くブロックを定置するために、位置決めに必要なテレスコピック（重なり合った筒が伸び縮みする構造）の先端に真空吸引装置を取り付けて用いる。緩衝材ブロックを確実に把持し、かつ、損傷を与えないか、真空吸引ポンプ停止時の把持性能への影響がないかなどについて実規模の緩衝材ブロックを用いた試験が実施されている（原環センター，2004a）。

図 6.6.4-10 に搬送定置装置のうち真空吸引把持部を示し、図 6.6.4-11 に真空吸引性能確認状況を示す。これらの試験により搬送・定置時の真空吸引技術の有効性の確認と吸引ポンプ停止時などの不具合発生時にも直ちにブロックが落下することはないことが確認されている。



(a) 縦置き緩衝材定置装置の概念図



(b) 真空吸引把持

図 6.6.4-10 ブロック真空把持装置のうち真空把持部
 ((a) 出典：NUMO, 2004a (b) 原環センター, 2004a を編集, 一部加筆)

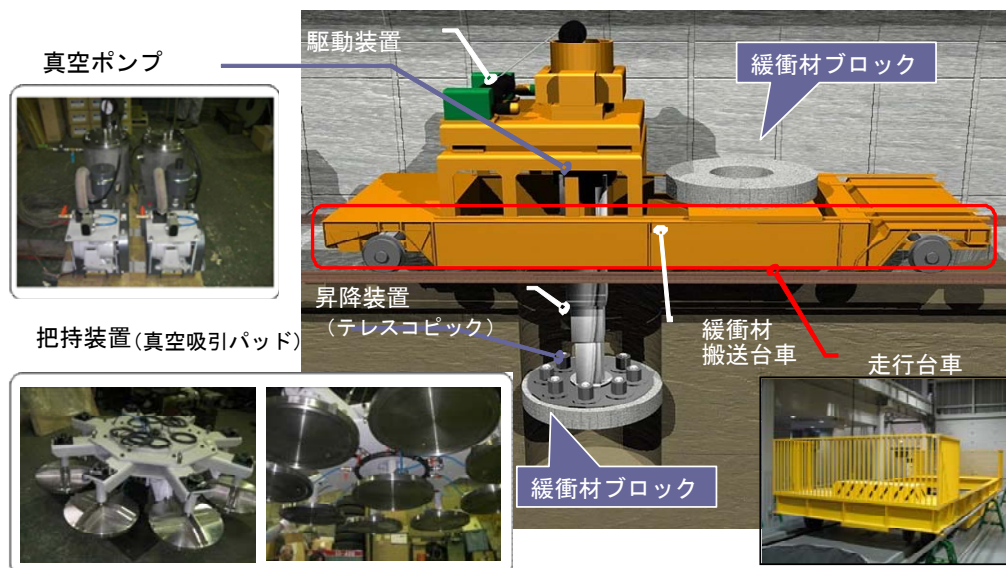


図 6.6.4-11 実規模ブロック真空把持実証状況
(原環センター, 2010a を編集)

(4) 緩衝材の製作・搬送・定置技術のオプションの開発状況

図 6.6.4-12 に実規模での原位置締固め方式の試験状況を示す。試験はハンマーを用いた締固めに より目標乾燥密度 1.6Mg/m^3 以上の緩衝材製作が可能なること、廃棄体部分の空間を維持するために設置された内型枠が、締固め作業後の取り外しに際して問題なく作動することを確認している。また、ハンマーの打撃による衝撃力が周辺の岩盤に悪影響を与えないことを試験値と解析により確認している (原環センター, 2003a)。



(a) 締固めハンマーと内型枠

(b) 内型枠の脱型状況

(c) 製作された緩衝材

図 6.6.4-12 原位置締固め緩衝材の施工試験
(出典：原環センター, 2003a)

上記までの処分孔縦置き定置方式に対して、処分坑道横置き定置方式は発生する掘削土量の低減、施工費用の低減、掘削時の周辺地山へ与える影響の低減などの利点がある一方、狭隘な処分坑道内での人工バリア搬送・定置作業は技術的に難易度が高く、現状でも処分坑道横置き定置方式の概念構築を含めて、要素試験、実規模試験などによる工学的信頼性を上げるための技術開発が進められている。

主に検討されている横置き定置方式の概要を以下に示す。

図 6.6.4-13 に PEM 方式の定置工程概念を示す。PEM の定置工程は、図中 (2) に示すように水平移動時にはエアベアリングにより PEM の重量を支持し、搬送装置により所定の位置まで移動する。その後、PEM の重量をエアジャッキ (図中 (4)) で把持して、その間に底部のエアベアリングを退避させる (図中 (6))。最後に水平度を保ちつつ静かに PEM を下降させて定置後 (図中 (7))、エアベアリングを始動させて定置装置を退避させる (図中 (8)) (原環センター, 2009c)。

実規模の PEM 容器の製作とエアベアリングでの水平移動試験により乗り越えられる処分坑道底部の段差の高さの確認、およびエアジャッキでの PEM の昇降定置試験などが実施されている (図 6.6.4-14)。

また、基盤研究開発では緩衝材ペレットを用いた「隙間充填技術」について、横置き定置方式を前提にした実規模の模擬処分坑道を用いた隙間充填試験が実施されている。使用する緩衝材ペレットの形状や寸法、異なるサイズの混合ペレットの効果、隙間充填の程度、緩衝材ペレット供給条件などについて定量的な評価を行い、緩衝材ペレットの圧空を利用した隙間充填技術の成立性と適用条件を把握している (原環センター, 2008c)。

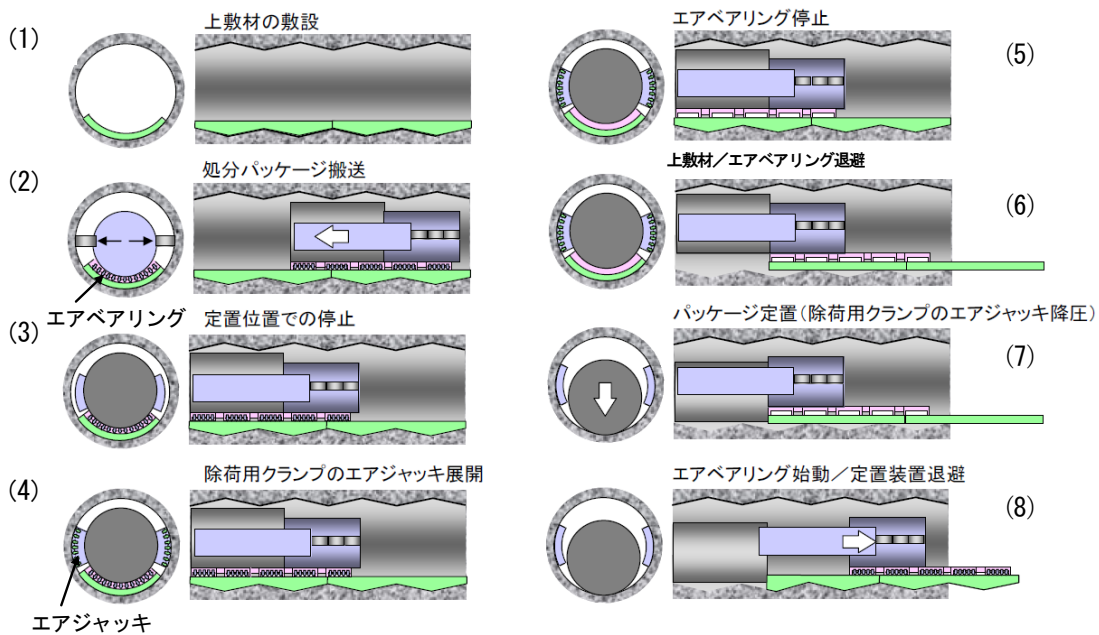
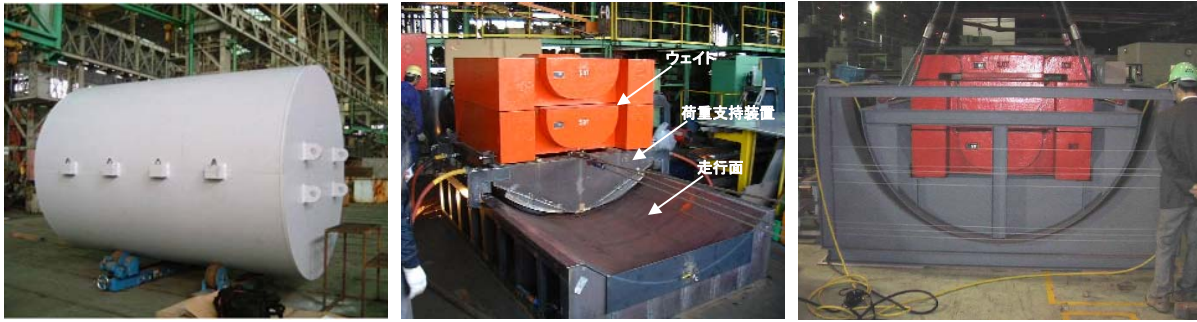


図 6.6.4-13 PEM 方式工程概念
(出典：原環センター, 2009c)



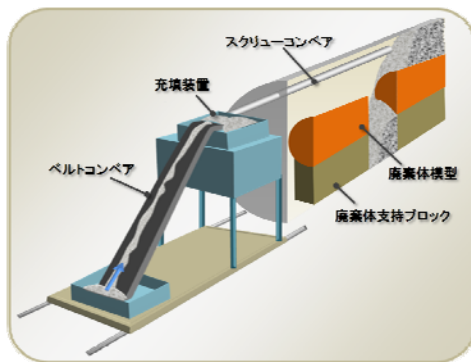
(a) 実規模 PEM 容器製作例 (b) エアベアリング牽引試験例 (c) エアジャッキによる PEM の昇降

図 6.6.4-14 PEM 方式試験例

((a) (c) 出典：原環センター，2009c (b) 出典：原環センター，2004a)

図 6.6.4-15 にペレット充填方式の施工試験状況を示す。廃棄体はブロック状の緩衝材の上に定置され、残された空間にペレット状の緩衝材を移送して充填する。実規模の半断面を模擬した実証試験により、充填前のペレットの特性把握、ペレット充填後の密度分布（平均 1.3Mg/m^3 ）の把握、ペレット充填時の安息角の把握と達成可能な密度、残存する空隙の位置などを確認している（原環センター，2005）。

図 6.6.4-16 (a) に、吹付方式による緩衝材の施工試験状況を示す。超音速ノズル（図 6.6.4-16 (b)）を用いて高速でベントナイト材料を吹き付けることにより、ベントナイト単体でも高い乾燥密度 1.6Mg/m^3 の緩衝材の施工が可能であることが実証されている（原環センター，2010b）。吹付方式により施工した緩衝材は密度の均一性が高く、ブロック方式や締め固め方式で施工した場合の乾燥密度の標準偏差が 0.09, 0.12 であるのに対し、吹付による場合は 0.02 という値が得られている（原環センター，2009a）。



(a) 施工試験装置（横置き）イメージ図



(b) ペレット充填状況

図 6.6.4-15 ペレット充填方式の施工試験

((a) 原環センター，2005 を参考に作成 (b) 原環センター，2005 を一部修正)



(a) 吹付施工法の機械構成



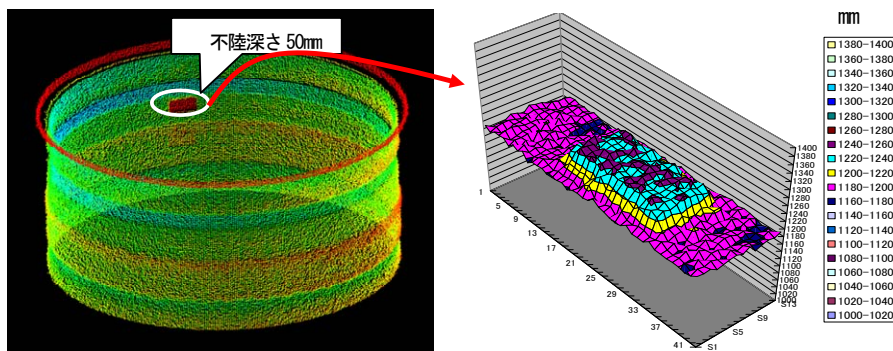
(b) 実規模縦型処分施設吹付試験状況

図 6.6.4-16 吹付施工試験
(出典：原環センター，2010b)

(5) 緩衝材の搬送・定置にかかわるそのほかの関係技術の開発状況

処分孔竖置き定置方式における最終的な人工バリアの品質は、処分孔の形状と人工バリア定置時の施工精度の影響を受ける。このため、人工バリア定置直前の処分孔の仕上がり状態を把握し、定置後の人工バリアの状態を精度良く計測する必要がある。さらにこの計測作業は搬送・定置作業の障害とならないように短時間で行う必要がある。

このため処分孔の形状を計測するためにレーザー計測器とデジタル画像データを用いた計測方法の検討が実験的に行われている。実験は実規模の模擬処分孔を製作し、処分孔の壁面の状態（色，不陸，キズ）に対応した計測時間と計測精度に関するデータを取得し、デジタル画像データとレーザー計測装置を組み合わせた計測装置の概念構造が提示されている（原環センター，2004a）。図 6.6.4-17 にレーザー計測による模擬処分孔の形状の計測例と壁面に設けられた不陸部の分析結果の例を示す。



(a) 計測された模擬処分孔の形状

(b) 不陸部分の分析表示例

図 6.6.4-17 レーザー計測による処分孔形状と壁面状態の把握状況
(原環センター，2004a に一部加筆)

地下施設は作業空間が狭いため地下施設内に計測用や機械の制御用のケーブルを設置することは好ましくない。また、これらのケーブルは地下施設を埋め戻すときに撤去する必要があるが、埋め戻し作業と撤去作業を同時に行うことは作業性が悪いと想定される。このため、地下施設の中で遠

隔定置装置の制御や計測データの無線により制御するシステム検討が行われている(原環センター, 2009c)。図 6.6.4-18 にメッシュ型無線 LAN により制御するシステムの概念を示す。

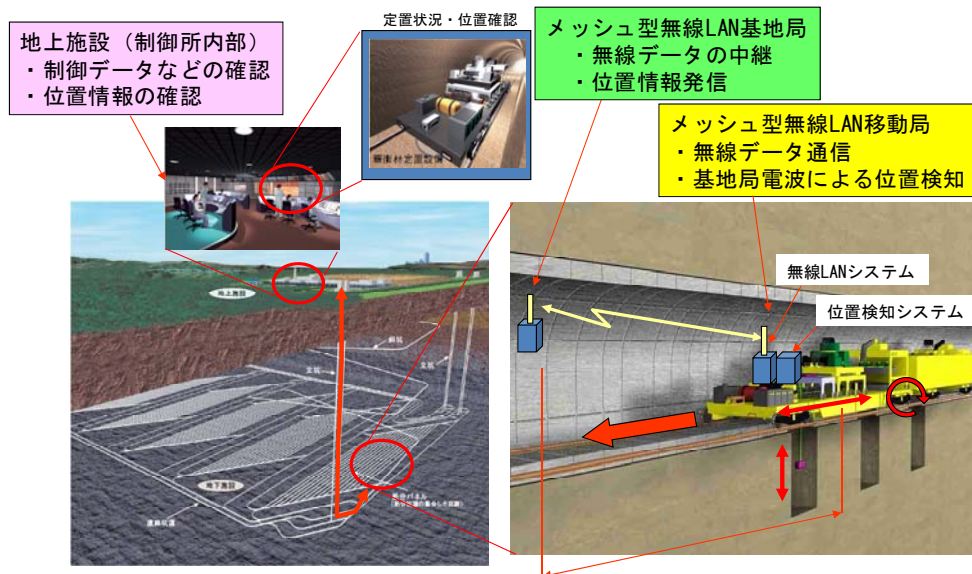


図 6.6.4-18 メッシュ型無線 LAN システムによる遠隔定置装置制御概念
(原環センター, 2009c に一部加筆)

6.6.4.4 廃棄体回収技術

ここでは、閉鎖措置計画認可時までの期間の回収の具体的方法や技術について、NUMOの検討状況や基盤研究開発機関における開発成果について説明する。閉鎖措置計画の認可時は処分坑道が埋め戻され、地上施設と地下施設をつなぐアクセス坑道や主要坑道、連絡坑道などは埋め戻されていない状態である。回収が必要になる原因については、安全確保のための工学的な問題だけではなく、現状ではその原因を技術面からは同定できないような問題も想定される。ここでは、特定の廃棄体について品質管理上の問題が判明したために回収することになったと想定し、必要な技術の検討状況を説明する。また、必要な回収手段や技術の特徴を示すことを主眼に、高レベル放射性廃棄物の縦置き定置方式を中心に説明し、横置きなどのほかの定置方式については技術的に異なる点について補足する。

(1) 回収を考慮する時期

回収可能性を考慮する時期は、処分場に廃棄体が持ち込まれる操業段階から、処分場が受動的な安全性を担保できると判断できる閉鎖措置開始までを考える。ここでは、操業段階において回収に用いられる技術の検討が有意義だと考えられる処分孔の埋め戻し後、処分坑道を埋め戻す前の段階の前後の具体的な回収方法を示す。

(2) 処分坑道埋め戻し前の回収作業

廃棄体周囲に緩衝材ブロックが定置され、処分孔上部はさらに十分な遮へい機能を持つように埋め戻し材で埋め戻されている。このため処分坑道内は放射線の影響のない非管理区域である。この時点からの回収作業では、まず、処分孔上部の埋め戻し材除去により放射線の影響を考慮する必要

があるため、①遮へい扉の設置、管理区域の設定を行い、②処分孔上部埋め戻し材などを除去する。次に、③廃棄体周囲の緩衝材の拘束を除去し、④廃棄体を取り出す。そして、⑤廃棄体を遮へい容器に収納し、⑥地上施設へ搬送する。⑦地上施設では廃棄体の洗浄、検査などを実施する。

地下での②～⑤の作業は、管理区域での遠隔作業が想定され、地上での⑦の作業も管理区域内での作業となる。①、④～⑥の回収作業は、定置技術や搬送技術の流用により対応が可能と考えられるが、②、③については、現状の操業システムに例がないため、一般の建設技術などを参考にして、以下のように新たな概念の検討を実施している。

②の処分孔上部埋め戻し材および上部緩衝材を除去するための専用装置の概念検討例を図 6.6.4-19 に示す。回収作業は掘削前の放射線の影響のない段階で、処分孔上部の正確な位置に装置を据え付ける。装置の据え付け後は放射線の影響を考慮して遠隔操作により掘削作業を行い、上部埋め戻し材と上部緩衝材を除去して廃棄体把持部を露出させる。

③の廃棄体周囲の緩衝材の拘束除去の技術は、緩衝材膨潤圧による廃棄体の拘束が小さい場合には、廃棄体をそのまま引き抜くことが可能であるが、拘束が大きい場合には石材やコンクリートの切り出しなどに用いられるオーバーコアリング技術の適用を有望な方法として想定している。これは図 6.6.4-20 に示すような円筒形の筒の先端にカッターを装着し、円筒の回転により緩衝材を切削して廃棄体と緩衝材の間の拘束を除去するものである。切削時の発熱除去や切削屑の除去のために水または圧縮空気を用いることになり、高放射線場における水または圧縮空気および切削屑の回収に工夫が必要である。この際、廃棄体の品質管理上の問題が発生した場合を想定していることから、放射線場からの排水が処分孔や処分坑道に浸水することを抑えるために、極力、水の使用量を低減することに留意する必要がある。今後は実際に掘削や排土が可能な機構、設備や除去した緩衝材や緩衝材を除去するために用いた掘削水または循環空気の回収機構や処理方法を検討した上で、これらの遠隔操作性の確認、必要な機構の検討を行っていく。

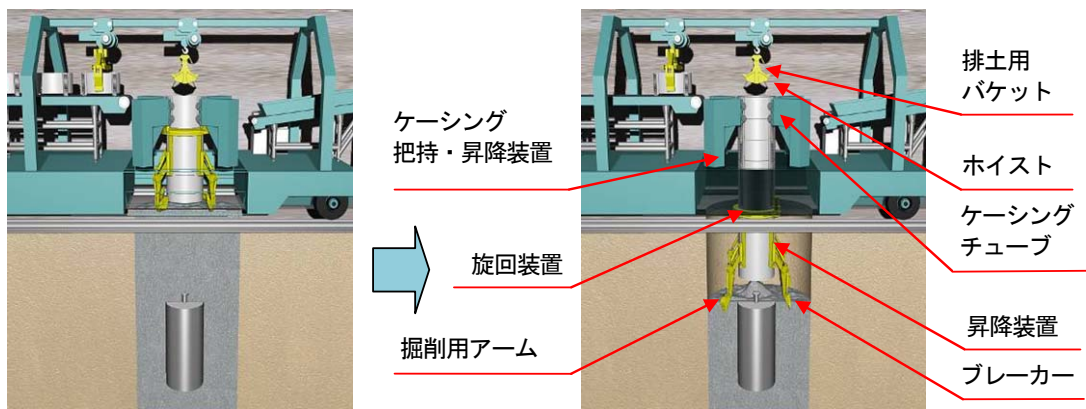


図 6.6.4-19 ②処分孔上部埋め戻し材など除去装置の例

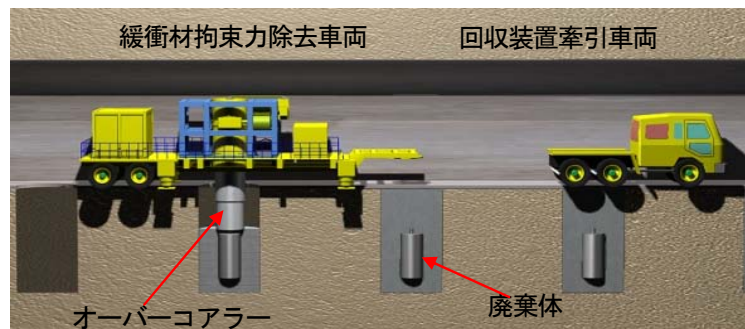


図 6.6.4-20 ③廃棄体周囲の緩衝材の拘束除去装置の例

次の④廃棄体を引き抜き、⑤廃棄体の遮へい容器への収納については、その概念検討例を図 6.6.4-21 に示す。このように廃棄体の搬送や取り扱い時に用いられる技術は廃棄体定置時の技術が活用できると考えられる。

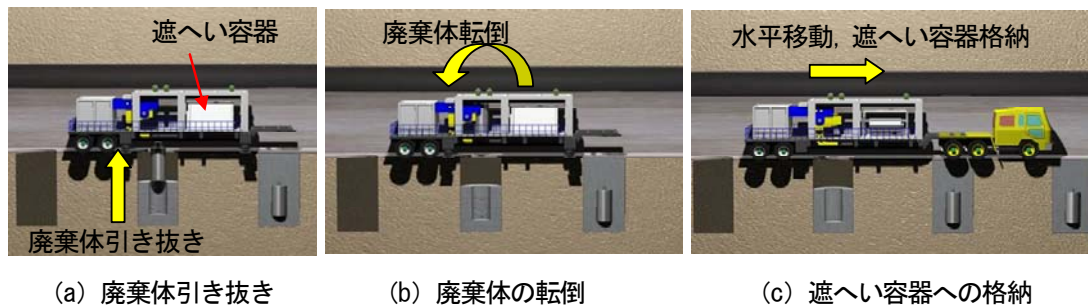


図 6.6.4-21 ④廃棄体の回収, ⑤遮へい容器への収納例

②および③の工程で必要となる緩衝材などを除去する技術には、オーバーコアリングに代表される機械的に掘削する方法のほかにもいくつかの方法が考えられる。その中の一つに液体を用いて緩衝材などをスラリー化させて除去する方法がある。この方法は、基盤研究開発機関で実験的な検討が行われている。具体的には、緩衝材などの表面に比較的低い圧力で塩水を噴射し、緩衝材などをスラリー化して除去する方法の適用性検討が進められている。

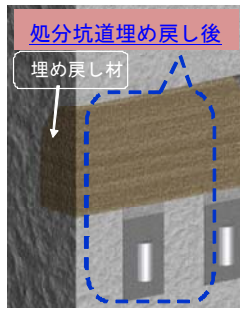
(3) 処分坑道埋め戻し後の回収作業

処分坑道埋め戻し後の状況を図 6.6.4-22 に示す。処分坑道埋め戻し後は処分坑道端部にプラグが設置されており、この時点で回収を行うためには、端部のプラグの除去、処分坑道内部の埋め戻し材の除去、必要により処分坑道の補修などを実施する。これらの作業は放射線の影響を考慮する必要がないため、処分場建設時に用いられた掘削技術などが適用できる。

処分坑道埋め戻し材除去後は前記の処分坑道埋め戻し材の回収作業と同様の作業が実施される。

(4) 閉鎖後長期の安全性に与える影響

回収作業が閉鎖後長期の安全性に与える影響については、回収のために掘削された部分は、もともと緩衝材や埋め戻し材で埋め戻されていた場所であり、回収作業後には当初と同様に埋め戻せば、地下水流動に与える影響は少ないと考えられる。



(a) 処分坑道埋め戻し後の状況



(b) 力学プラグ除去状況の例

図 6.6.4-22 処分坑道埋め戻し後の状況および力学プラグ除去状況の例

(5) 高レベル放射性廃棄物横置き定置方式の場合

横置き定置方式では、廃棄物が定置された処分坑道の緩衝材を除去しつつ、縦置きと同様にオーバーコアリングによる緩衝材除去を想定している（図 6.6.4-23）。廃棄物の抜き出し、遮へい容器への収納はほぼ定置作業の逆の手順であり、定置装置の機構、技術が活用できる。また、緩衝材除去技術に関しては、基盤研究開発で検討されている塩水を用いた緩衝材除去技術（図 6.6.4-24）を用いることも考えられる（原環センター，2010b）。

縦置き定置方式と横置き定置方式を比較した場合、縦置き定置方式は処分坑道からの回収作業により比較的容易に回収が可能であるが、横置き定置方式では処分坑道に連続して廃棄物が定置されているため、個別の廃棄物の回収作業は困難である。このため、横置き定置方式を対象にして、新たに回収用の坑道を設置し、その坑道から回収を実施するなどの概念についても検討を行っている。

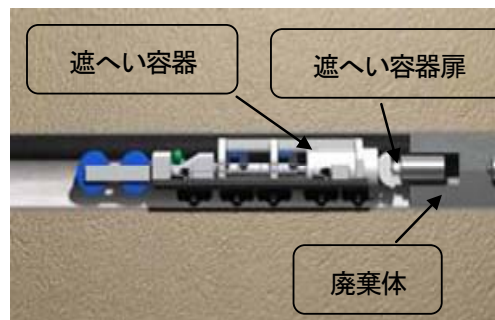
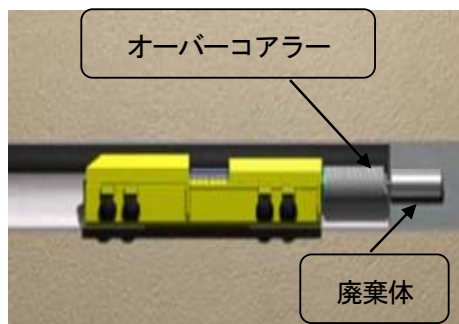


図 6.6.4-23 廃棄物周囲のオーバーコアリングおよび廃棄物の抜き出しと遮へい容器への収納例

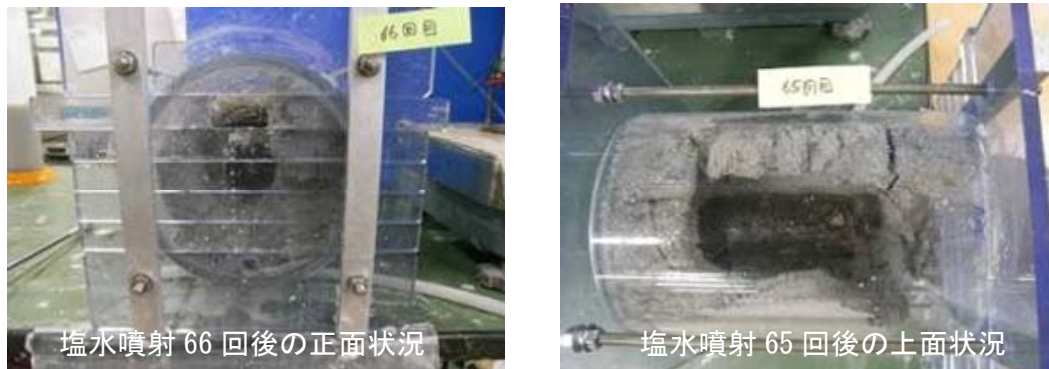


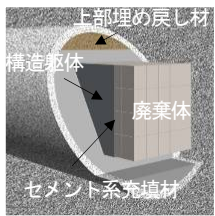
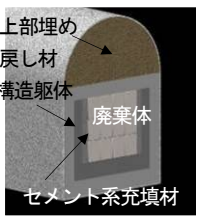
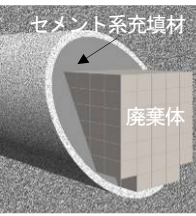
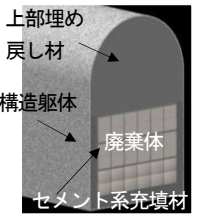
図 6.6.4-24 横置き定置方式を模擬した緩衝材除去実験の状況
(原環センター, 2010b を編集)

(6) 地層処分低レベル放射性廃棄物の場合

地層処分低レベル放射性廃棄物の定置概念と回収維持期間の工程を表 6.6.4-1 に示す。地層処分低レベル放射性廃棄物の場合には、廃棄体をパッケージに収納してセメント系材料で固定したものを集積して定置すること、および緩衝材を設置する廃棄体と設置しない廃棄体があることが高レベル放射性廃棄物とは異なる。

地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設の標準である円形処分坑道では、廃棄体には処分坑道端部からアクセスすることとなる。これに対して、幌型処分坑道の場合には天井クレーンを使用して、上方からのアクセスも可能である。いずれの処分坑道においても、地層処分低レベル放射性廃棄物は集積して定置されているため、高レベル放射性廃棄物とは異なり、個々の廃棄体にアクセスすることは困難である。また、廃棄体あるいは廃棄体パッケージを回収するためには、その周囲の拘束を除去する必要がある。地層処分低レベル放射性廃棄物の場合には、除去対象が緩衝材（土質系材料）ではなくセメント系材料である。セメント系材料の場合、土質系材料に比して拘束の除去は難しくなるが、原子力発電所における解体技術や一般的な建設技術を応用することで可能である。

表 6.6.4-1 地層処分低レベル放射性廃棄物処分概念の回収維持期間の作業工程

		グループ1,2 円形	グループ1,2 幌型	グループ3,4 円形	グループ3,4 幌型	
処分概念						
必要となる作業工程	坑道上部埋め戻し後に	上部埋め戻し材（土質系）の掘削	同左		上部埋め戻し材（セメント系）の掘削	
		坑道上部埋め戻し前に必要となる作業工程	構造躯体内セメント系充填材の除去と廃棄体パッケージの回収（横からの作業）	構造躯体内セメント系充填材の掘削（上からの作業）	坑道内セメント系充填材の掘削と廃棄体パッケージの回収（横からの作業）	構造躯体内セメント系充填材の掘削（上からの作業）
				廃棄体またはパッケージの回収（上からの作業）		廃棄体またはパッケージの回収（上からの作業）
	廃棄体の輸送					
	地上施設での作業					

6.6.5 工学的対策を支える技術に対する今後の課題

第2次取りまとめ以降から現在までの工学的対策を支える技術について、前節までに NUMO と基盤研究開発機関などでの検討状況を概説した。

今後はこれらの技術の検討状況と、「地層処分技術開発ニーズの整理～精密調査地区選定に向けて～」(NUMO, 2010) で技術課題を抽出し、課題解決の優先度を設定して、各課題を着実に解決していく。

特に工学的対策に係る課題の技術開発の優先度は、例えば地下水条件や岩盤力学条件などによりサイトごとに異なる事が想定される。このため、NUMO としては技術課題の開発状況などを踏まえ、技術開発課題の優先順位も必要により適宜見直し、効率的な技術開発を実施していく。

表 6.6.5-1 に開発の優先度が高い工学的対策を支える技術の課題の例を示す。課題は以下の三項目に分類して示した。

6.6.5.1 人工バリアの長期挙動・相互作用に関する知見の整備に関する技術開発

長期的な安全性の提示において、長期挙動理解だけでなく、定置後から所期の性能が発現するまでの過渡期の人工バリア、ニアフィールド環境の理解が重要となる。そこで、従来の材料挙動に関する理解をより深めるとともに、すでに検討が開始されているベントナイトの再冠水挙動などの基盤研究などの進展状況も踏まえつつ、検討が不足している項目については、引き続き技術開発を進めていく。

6.6.5.2 人工バリアの製法・搬送定置の工学的実現性の向上に関する技術開発課題

実際の処分環境において所定の安全機能を有するように人工バリアを施工する必要がある。これまでは概念的な検討が主であった。今後は、事業者として、工学的実現性をさらに高めるための技術開発とその実証が重要であると考えている。

6.6.5.3 人工バリアの信頼性向上に関する技術開発課題

第2次取りまとめにおいて、技術的開発課題として示されているテーマのうち、人工バリアの信頼性向上に資する課題については、引き続き知見の拡充を行い、より一層の信頼性向上に努める。

表 6.6.5-1 工学的対策を支える技術に対する今後の課題

工学技術の開発分野	技術課題	技術課題の概要
人工バリアの長期挙動・相互作用に関する知見の整備に関する技術開発 (O/P;オーバーパック)	ガラスマトリクスからの浸出挙動の評価手法の高度化	浸出挙動に関する現象理解の高度化, データ拡充
	O/P 腐食挙動現象理解の高度化およびデータ拡充	現実的な腐食速度の再設定, 腐食生成物の現象理解の高度化およびデータ拡充と設計への反映
	過渡期のニアフィールド現象の理解, コードの高度化およびデータ拡充	過渡期のニアフィールド現象である再冠水挙動や塩濃縮現象などの連成現象に関する現象理解, コード高度化およびデータ拡充と設計への反映
	O/P-緩衝材界面の相互作用影響の評価手法の高度化	O/P-緩衝材界面の温度・化学環境の相互作用影響の評価手法の高度化と設計への反映
	セメント-ベントナイト相互作用影響の評価手法の高度化	セメント系材料とベントナイト系材料の長期変質挙動から人工バリアとニアフィールドの長期特性の把握と設計への反映
人工バリアの製法・搬送定置の工学的実現性の向上に関する技術開発課題 (O/P;オーバーパック)	O/P 遠隔溶接・検査技術開発	O/P 遠隔溶接・検査技術開発, 実証試験の実施
	縦置き人工バリア搬送・定置(ブロックなど)に関する要素技術の開発と実証	人工バリア製作・搬送・定置工程を含めた縦置き定置方式の必要要素技術の開発と地上での実証試験および地下調査施設での実証試験準備
	横置き定置方式の概念選定とそれに係る要素技術の開発と実証	横置き定置方式概念選定(原位置施工, PEM方式など)。製作・搬送・定置の必要要素技術開発と地上での実証試験および地下調査施設での実証試験準備
	回収技術概念選定と要素技術の開発および実証	定置概念, 廃棄体特性に応じた必要な回収要素技術の開発と地上施設での実証試験および地下調査施設での準備
人工バリアの信頼性向上に関する技術開発課題 (O/P;オーバーパック)	O/P 腐食挙動に対する放射線影響の評価手法の高度化	O/P 厚さ設定に関する放射線分解によって生じる酸化性化学種供給速度などデータ拡充と設計への反映
	O/P 溶接部の耐食性評価技術の高度化	地質環境を考慮した条件での O/P 溶接部の耐食性評価技術の高度化と設計への反映
	O/P 溶接部の腐食速度低減対策の技術の高度化	地質環境を考慮した条件での O/P 溶接部の腐食速度低減対策の高度化と設計への反映

6.7 まとめ

本章では、冒頭に述べたように三つの安全確保策のうち、「処分場の設計・施工などの適切な工学的対策」を実施するために必要な技術が着実に整備されていることを示すとともに、「事業期間中の安全確保」の具体的な考え方や方法などについて事例を交えて説明した。

第2次取りまとめや第2次 TRU レポートなどでは、わが国における幅広い地質環境における高レベル放射性廃棄物処分と地層処分低レベル放射性廃棄物処分について、処分施設や人工バリアに求められる要求機能や設計要件、設計や建設・操業・閉鎖の基本的な考え方や手順が示された。NUMO は、設立以降、それらを踏まえ事業者の立場で、事業を進めるために必要となる工学的対策の検討を深めている。以下に、これらの主要な技術の進展をまとめる。

(1) 地層処分の安全機能と技術要件の整備

第2次取りまとめ以降の国際基準の整備や技術の進展に基づいて、閉鎖後長期の安全確保に向けた工学的対策の要件を更新した。閉鎖後長期の安全確保のために必要な技術要件については、「閉鎖後閉じ込め」、「隔離」といった安全確保の基本概念に基づいて、基本的な安全機能と処分場構成要素との関連付けを行った上で、構成要素ごとに安全機能を満足するように技術要件を体系的に整備した。これにより地質環境の調査・評価の進展に応じて、個々の地点に対する技術要件を明確化して設計に反映していく準備を整えている。

(2) 処分場の設計

処分場の設計について、地質環境の調査・評価からの情報を受けて、まず取り組むのが、地下施設設置位置の設定である。これは、サイト選定の初期の段階における事業者としての重要な設計対象事項であるとの認識に立ち、NUMO は、熱環境、力学場、水理場、化学環境、母岩の広がり、工程・経済性などを踏まえ、空洞の力学的安定性や廃棄体発熱特性などを考慮した地下施設設置位置の設定の考え方を示し、その基本的な評価技術を整理した。

(3) 建設・操業・閉鎖の安全性と工程計画の実現性の向上の取り組み

処分場の建設・操業・閉鎖に適用する基本的な技術や手順は、第2次取りまとめなどで示されている。これに対して、NUMO は、ガラス固化体4万本の処分場規模に対し、建設工程（建設開始から操業開始まで10年）や操業工程（年間1,000体のガラス固化体を処分）を実現するための課題の分析を行い、クリティカルな工程に対応するための手順や方法の検討を行ってきた。処分孔掘削やずり出しといった建設技術の効率化に関する検討、あるいは品質向上と地下での操業作業を軽減するための検討を実施した。それらの検討の中で、廃棄体と人工バリアをあらかじめ地上施設で一体型のモジュールに組み上げた上で搬送・定置する PEM (Prefabricated Engineered barrier system Module) 方式を従来の原位置での施工・定置方式に加え、有力な工学的対策として位置付け、その実現性に関する検討などを進めている。また、事業期間中の安全確保のうち、操業安全については、安全の多重化を基本とした安全対策を検討するとともに、事業期間中の安全確保のために施す対策工が閉鎖後長期の安全性に影響を及ぼさないよう対策工の材料などに関する検討を行っている。

(4) 多様な地質環境に対応した処分場の設計および操業技術

NUMO は、サイトの地質環境を特定せず多様な地質環境を想定し、処分場の設計、建設・操業・

閉鎖に関する技術の整備を進めてきた。また、サイト選定の初期の段階における設計を効率的に実施することを目的として、わが国の多様な地質環境への対応した設計手法の確立を目指した検討を行ってきた。特に、周囲を海に囲まれたわが国の地理的条件も踏まえ、沿岸域における地下水流動場や地下水化学環境などの観点から設計上の特徴や留意点を整理し、サイトに適した処分場の設計を行う準備を整えている。

また、多様な地質環境に対応できるよう、処分概念や適用する操業技術のオプションの整備を進めている。例えば、処分孔縦置き定置方式、処分坑道横置き定置方式について、作業性、現状技術の到達レベルなどの観点から、その特徴や課題を整理するとともに、地下環境において想定される条件（湧水、高湿度環境、岩盤強度の局所的な脆弱性など）を考慮し、特に操業環境の維持の観点から、これまでに検討の主体であった処分概念をより現実的に検討し、処分概念・技術オプションの高度化を図っている。

(5) 基盤研究開発による工学技術の整備

工学技術については、第2次取りまとめ以降、基盤研究開発機関と連携して研究開発を進めてきており、技術の信頼性や安全性に関する知見が着実に向上している。人工バリアの仕様を設定する上では、選定されたサイトの地球化学特性や人工バリア間の相互作用を考慮することが重要であり、オーバーパックの腐食形態や放射線影響、塩水環境における緩衝材の特性、緩衝材とセメントや鉄との相互作用などについての理解が進展している。建設・操業・閉鎖に係る技術開発としては、オーバーパックの遠隔溶接や検査技術、人工バリアの製作・搬送・定置技術の実証に向けた要素試験が着実に進められている。

以上のように、技術要件を整備して設計体系を構築したこと、有望な操業技術オプションの整備や技術開発の進展により、建設や操業の効率化やその実現の見通しを示すとともに、人工バリアの長期挙動や相互作用に関する理解が進展し、人工バリアの設計技術の信頼性が向上していることなどを示した。今後も、NUMOは、基盤研究開発機関における研究開発と連携し、工学的対策と事業期間中の安全確保対策の確実な実施とさらなる信頼性の向上に取り組んでいく。

参考文献

- 安立憲康, 杉原伸一, 高橋伸司, 千葉隆, 望月正孝, 齊藤政義, 井上隆文 (1998) : トンネル湧水を利用したヒートパイプ式融雪システム, 第14回寒地技術シンポジウム, pp.707-713.
- Asano, H., Kataoka, S., Maeda, K. and Aritomi, M. (2006) : Long-term integrity of waste package final closure for HLW geological disposal, (IV)Influence of Welding and Prediction of Long-Term Integrity of Weld Joint -, J. Nucl. Sci. Technol., Vol.43, No.8, pp. 924-936.
- Asano, H. and Aritomi, M. (2010) : Long-Term Integrity of Waste Package Final Closure for HLW Geological Disposal, (VI)Consistency of the Structural Integrity Evaluation Model for the Weld Joint, J. Nucl. Sci. Technol. Vol.47, No.1, pp. 70-83.
- Atkinson, A. (1985) : The Time Dependence of pH within a Repository for Radioactive Waste Disposal, AERE11777.
- Awano, T., Kanno, T., Kawakami, S., Ueda, H. and Kimoto, T. (2001) : Manufacturing and Handling Techniques of the Monolithic Buffer Material for HLW Disposal, ICEM'01, International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, Bruges, Belgium..
- Bildstein, O., Trotignon, L., Perronnet, M. and Jullien, M. (2006) : Modelling iron-clay interactions in deep geological disposal conditions. Phys. Chem. Earth, 31, pp.618-625.
- Börgesson, L., Sandén, T., Fälvh, B., Åkesson, M. and Lindgren, E. (2005) : Studies of buffers behavior in KBS-3H concept Working during 2002-2004, SKB R-05-50.
- Carlson, L., Karland, O., Oversby, V. M., Rance, A. P., Smart, N. R., Snellman, M., Vähänen, M. and Werme, L. O. (2007) : Experimental Studies of the Interactions between Anaerobically Corroding Iron and Bentonite, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 1-7, pp.334-345.
- Cama, J., Ganor, J., Aroya, C. and Lasaga, C. A. (2000) : Smectite dissolution kinetics at 80°C and pH8.8, Geochimica et Cosmochimica Acta, 64, 15, 2701-2717.
- Christer Andersson and Åsa Johansson (2002) : Boring of full scale deposition holes at the Äspö Hard Rock Laboratory Operational experiences including boring performance and a work time analysis, TR-02-26, SKB.
- 電中研 (電力中央研究所)・電事連 (電気事業連合会) (1999) : 高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術.
- 電事連 (電気事業連合会)・JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005) : TRU 廃棄物処分技術検討書一第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ一, JNC TY1400 2005-013.
- 電力土木技術協会 (1986) : 電力施設地下構造物の設計と施工.
- 土木学会 (2006) : トンネル標準示方書「山岳工法編」・同解説.
- 土木学会 (2009a) : 余裕深度処分における地下施設の設計, 品質管理および検査の考え方.
- 土木学会 (2009b) : コンクリートライブラリー132号 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術ー利用拡大に向けた設計施工指針試案ー.
- 土木学会 (2010) : コンクリート委員会示方書改訂小委員会報告書.
- ESDRED (2009) : Module 1 Final Report, Work Package 6, FI6W-CT-204-508851, European Commission.
- Fukushi, K., Sugiura, T., Morishita, T., Takahashi, Y., Hasebe, N. and Ito, H. (2010) : Iron-Bentonite Interactions

in the Kawasaki bentonite deposit, Zao area, Japan, Applied Geochemistry, 25, pp.1120-1132.

Gaucher, E. C. and Blanc, P. (2006) : Cement/clay interactions -A review: Experiments, natural analogues, and modeling, Waste Management, 26, pp.776-788.

原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2001) : 平成 12 年度高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査報告書 (第 2 分冊)―遠隔操作技術高度化調査―, 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2002) : 平成 13 年度高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査報告書―遠隔操作技術高度化調査― (1/2), 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2003a) : 平成 14 年度地層処分技術調査等遠隔操作技術高度化調査 報告書―遠隔操作技術高度化調査― (1/2), 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2003b) : 平成 14 年度 TRU 廃棄物関連処分技術調査報告書―人工バリア長期性能確認試験―, 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2003c) : 平成 14 年度地層処分技術調査等遠隔操作技術高度化調査 報告書―遠隔操作技術高度化調査― (1/2), 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2004a) : 平成 15 年度地層処分技術調査等遠隔操作技術高度化調査報告書 (2/2), 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2004b) : 平成 15 年度地層処分技術調査等遠隔操作技術高度化調査報告書 (1/2), 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2005) : 平成 16 年度地層処分技術調査等遠隔操作技術高度化調査 報告書 (2/2), 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2006) : 平成 17 年度地層処分技術調査等遠隔操作技術高度化調査報告書― (1/2), 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2007) : 平成 18 年度地層処分技術調査等遠隔操作技術高度化調査報告書― (1/2), 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告..

原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2008a) : 平成 19 年度管理型処分技術等委託費地下空洞型処分施設性能確認試験報告書, 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2008b) : 平成 19 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書 (第 1 分冊)―遠隔操作技術高度化開発― (1/2), 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2008c) : 平成 19 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書―遠隔操作技術高度化開発 (2/2)―, 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2009a) : 平成 20 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書―人工バリア品質評価技術の開発―, 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2009b) : 平成 20 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書(第 1 分冊)―遠隔操作技術高度化開発― (1/2), 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2009c) : 平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書 (第 1 分冊)―遠隔操作技術高度化開発― (2/2), 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2010a) : 平成 21 年度核燃料サイクル関係推進調整等委託費 (地層処分実規模設備整備事業) 報告書, 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2010b) : 平成 21 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書 (第 1 分冊)―遠隔操作技術高度化開発― (2/2), 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2010c) : 平成 21 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書 (第 2 分冊)―人工バリア品質評価技術の開発― (1/2), 経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告..
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2010d) : 平成 21 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発報告書 (第 1 分冊)―人工バリアの長期挙動の評価―.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2010e) : 原環センター HP, <http://www.rwmc.or.jp/>. (参照 2010 年 4 月 19 日).
- 原燃 (日本原燃株式会社) (2000) : 会社案内, パンフレット, 2000 年 08 月.
- 原子力安全委員会 (2000) : 高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について (第 1 次報告).
- 原子力安全委員会 (2006) : 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針.
- 原子力安全委員会 (2010) : 第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方.
- 原子力委員会 (2006) : 長半減期低発熱放射性廃棄物の地層処分の基本的考え方―高レベル放射性廃棄物との併置処分等の技術的成立性―.
- Gin, S. and Mestre, J. P. (2001) : SON 68 nuclear glass alteration kinetics between pH 7 and pH 11.5, J. Nucl. Mater., 295, pp.83-96.
- Grambow, B. (1985) : A general rate equation for nuclear waste glass corrosion, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 44, pp.15-27.
- Grambow, B. (1987) : Nuclear Waste Glass Dissolution: Mechanism, Model and Application. Technical Report-JSS Project Phase IV 87-02.
- Grambow, B. and Müller, R. (2001) : First-order dissolution rate law and the role of surface layers in glass performance assessment. J. Nucl. Mater. 298, pp.112-124.
- 林真紀, 笹本広, 吉川英樹 (2008) : ガラスの溶解に関するデータベースの改良 JAEA-DATA/Code 2008-008.
- Huang, W., Longo, J. M. and Pevear, D. R. (1993) : An Experimentally Derived Kinetic Model for Smectite-to-Illite Conversion and Its Use as a Geothermometer, Clays and Clay Minerals, Vol.41, No. 2, pp.162-177.
- IAEA (1985) : Chemical durability and related properties of solidified high-level waste forms, IAEA Technical Report Series, No. 257, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (1996) : Regulations for Safe Transport of Radioactive Material, No. TS-R-1, International Atomic

Energy Agency.

IAEA (2006) : Geological Disposal of Radioactive Waste, Safety Requirements, IAEA Safety Standard Series No. WS-R-4, International Atomic Energy Agency.

IAEA (2011) : Disposal of Radioactive Waste, SSR-5, International Atomic Energy Agency.

Inagaki, Y., Furuya, H., Idemitsu, K. and Yonezawa, S. (1994) : Corrosion behavior of a powdered simulated nuclear waste glass: A corrosion model including diffusion process, J. Nucl. Mater., 208, pp.27.

Inagaki, Y., Makigaki, H., Mitsui, S., Idemitsu, K., Arima, T. and Noshita, K. (2010) : Initial dissolution rate of P0798 simulated HLW glass as a function of pH and temperature measured by using micro-reactor flow-through test, American Ceramic Society, Glass and Optical Material Division.

稲垣八穂広, 三ツ井誠一郎, 牧野仁史, 石黒勝彦, 亀井玄人, 河村和廣, 前田敏克, 上野健一, 馬場恒孝, 油井三和 (2004) : 高レベルガラス固化体の性能評価に関する研究—現状と信頼性の向上にむけて—, 原子力バックエンド研究, Vol.10, No.1-2, pp.69-83.

Inagaki, Y., Mitsui, S., Makigaki, H., Idemitsu, K., Arima, T., Banba, T. and Noshita, K. (2009) : Measurement of HLW glass dissolution/alteration kinetics by using micro-reactor flow-through test method, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXIII, MRS.

Ishidera T., Ueno K., Kurosawa S. and Suyama T. (2007) : Investigation of Montmorillonite Alteration and Form of Iron Corrosion Products in Compacted Bentonite Being in Contact with Carbon Steel for Ten Years, Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, ANDRA, Lille, pp.269-270.

石川博久, 柴田雅博, 藤田朝雄 (1994) : 放射性廃棄物地層処分における緩衝材のイライト化変質シミュレーション, 粘土科学, vol.34, pp.149-156.

入矢桂史郎, 三原守弘 (2003) : ポズランを高含有した低アルカリ性コンクリートの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.185-190.

入矢桂史郎, 中山雅, 小西一寛, 三原守弘 (2006) : ポズラン高含有低アルカリ性吹付けコンクリートの施工性, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.173-178.

JAEA (日本原子力研究開発機構) (2008a) : 幌延深地層研究計画 平成 20 年度調査研究計画.

JAEA (日本原子力研究開発機構) (2008b) : 平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム化学影響評価高度化開発.

JAEA (日本原子力研究開発機構) (2009) : プレス発表「低アルカリ性セメントを用いた地下施設の本格的な施工に成功」, 2009年10月15日.

JAEA (日本原子力研究開発機構) (2010a) : COOL REP, <http://kms1.jaea.go.jp/CoolRep/>.

JAEA (日本原子力研究開発機構) (2010b) : 平成 21 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム化学影響評価高度化開発報告書.

Jégou, C., Gin, S. and Larche, F. (2000) : Alteration kinetics of a simplified nuclear glass in an aqueous medium: Effects of solution chemistry and of protective gel properties on diminishing the alteration rate, J. Nucl. Mater., 280, pp.216-229.

JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999a) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 —地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—, 総論レポート, JNC TN1400 99-020.

JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999b) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—, 分冊 2 地層処分の工学技術, JNC TN1400

99-022.

- JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—, 分冊2 工学技術の開発—, JNC TN1400 2005-015.
- 海洋汚染・海上災害防止法研究会 (1996) : 海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律の解説.
- 亀井玄人, 本田明, 三原守弘, 小田治恵, 村上裕, 増田賢太, 山口耕平, 中西博, 佐々木良一, 市毛悟, 高橋邦明, 目黒義弘, 山口大美, 青山佳男, 小華和治 (2007) : TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発 平成18年度報告, JAEA-Research 2007-067.
- 環境省 (2003a) : ロンドン条約及びロンドン条約96年議定書の概要—中央環境審議会地球環境部会第1回海洋環境専門委員会 配付資料—.
- 環境省 (2003b) : 1972年の廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約の1996年の議定書—中央環境審議会地球環境部会 第1回海洋環境専門委員会 配付資料—.
- 経済産業省 (2001) : 実用発電用原子炉の設置, 運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示, 経済産業省告示第187号.
- 金善永 (2001) : ベントナイト構成鉱物のアルカリ溶液に対する影響—モンモリロナイト, 長石, 石英混合実験—, JNC TN8400 2001-008.
- King, F., Kolar, M. and Stroes-Gascoyne, S. (2002) : Theory manual for the microbiological copper corrosion model CCM-MIC.0. Ontario Power Generation Nuclear Waste Management Division Report No: 06819-REP-01200-10091.
- King, F., Kolar, M. and Stroes-Gascoyne, S. (2003) : Preliminary simulations of the long-term activity of microbes in a deep geologic repository using CCM-MIC.0 and the implications for corrosion of copper containers. Ontario Power Generation Nuclear Waste Management Division Report No: 06819-REP-01200-10116.
- King, F., Kolar, M., Stroes-Gascoyne, S. and Maak, P. (2003) : Model for the microbiological corrosion of copper containers in a deep geologic repository. In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, V.M. Oversby and L.O. Werme (eds.), Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 807 (Materials Research Society, Warrendale, PA), pp. 811-816.
- 小林保之, 山田勉, 内藤守正, 油井三和, 中山雅, 佐藤治夫, 西田孝弘, 廣永道彦, 山本武志, 杉山大輔, 西内達雄 (2009a) : 高レベル放射性廃棄物処分施設への低アルカリ性セメントの適用性に関する研究, その1—セメント系材料の適用部位と要求機能— (共同研究), JAEA Research 2008-112.
- 小林保之, 山田勉, 内藤守正, 油井三和, 中山雅, 佐藤治夫, 西田孝弘, 廣永道彦, 山本武志, 杉山大輔, 西内達雄 (2009b) : 高レベル放射性廃棄物処分施設への低アルカリ性セメントの適用性に関する研究 (その2), JAEA Research 2009-013.
- Köhler, S. J., Dufaud, F. and Oelkers, E. H. (2003) : An experimental study of illite dissolution kinetics as a function of pH from 1.4 to 12.4 and temperature from 5 to 50°C, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67, pp.3583-3594.
- Komine, H. and Ogata, N. (2004) : New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials, *Canadian Geotechnical Journal*, 40, pp. 460-475.
- 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲 (2009) : 人工海水環境下におけるベントナイトの一次元自己シール性, *土木学会論文集 C*, 65, pp.389-400.
- Komine, H., Yasuhara, K. and Murakami, S. (2009) : Swelling characteristics of bentonites in artificial seawater, *Canadian Geotechnical Journal*, 46, 2, pp. 177-189.

- Kozai, N., Adachi, Y., Kawamura, S., Inada, K., Kozaki, T., Sato, S., Ohashi, H., Ohnuki, T. and Banba, T. (2001) : Characterization of Fe-Montmorillonite: A Stimulant of Buffer Materials Accommodating Overpack Corrosion Product, Nuclear Science and Technology, 38, 12, pp.1141-1143.
- Kuwahara, Y. (2006) : In-situ AFM study of smectite dissolution under alkaline conditions at room temperature, Am.Miner., 91, pp.1142-1149.
- Lantenois, S., Lanson, B., Muller, F., Bauer A., Jullien, M. and Plançon, A. (2005) : Experimental Study of Smectite Interaction with Metal Fe at Low Temperature: 1. Smectite Destabilization, Clays and Clay Minerals, 53, 6, pp.597-612.
- Lemmens, K., Iseghem, P. V. (1992) : The Long-term Dissolution Behaviour of the Pamela Borosilicate Glass SM527 -Application of SA/V Accelerating Parameter, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 257, pp.49-56.
- Little, B., Wagner P. and Mansfeld, F. (1991) : Microbiologically influenced corrosion of metals and alloys. Int. Mater. Rev. 36, pp.253-272.
- Marty, C.M.N., Fritz, B., Clément, A. and Michau, N. (2010) : Modelling the long term alteration of the engineered bentonite barrier in an underground radioactive waste repository, Appl. Clay Sci., 47, pp.82-90.
- 松本一浩, 棚井憲治 (2003) : ベントナイト緩衝材の流出特性の評価 (II), JNC TN8400 2003-006.
- 松本一浩, 棚井憲治 (2004) : 緩衝材の流出/侵入特性, JNC TN8400 2003-035.
- 松本一浩, 棚井憲治, 菅野毅, 岩田裕美子 (2005) : 拡散モデルを用いた侵入現象による緩衝材密度変化の事例解析, JNC TN8400 2005-009.
- 松本一浩, 棚井憲治 (2008) : X線 CT スキャナによる亀裂内侵入ベントナイトの密度測定に関する適用性, 原子力バックエンド研究, Vol.15 No.1, pp.27-35.
- 松本一浩, 棚井憲治 (2010) : 緩衝材の侵入現象モデルに関する適用性の確認, JAEA Research 2009-070.
- Mitsui, S. and Aoki, R. (2001) : Effect of a siliceous additive on aqueous alteration of waste glass with engineered barrier materials, Journal of Nuclear Materials, 298, pp.184-191.
- 三井雄一郎, 伊藤休一, 一ノ瀬友博, 美濃伸之, 斎藤庸平 (2002) : 農村地域における土地利用分布に着目した生物生息環境の評価手法. 農村計画学会春季大会ポスターセッション.
- 宮下衛 (2004) : ヒヌマイトトンボおよびベッコウトンボの遺伝的多様性保全のためのモニタリング. 土木学会第 59 回年次学術講演会, 229-230.
- 中山雅, 小林保之, 野口聡, 三浦律彦, 納多勝, 入矢桂史郎, 人見尚 (2009) : 幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメントの適用性に関する研究 3, JAEA-Research 2009-036.
- Nakayama, M., Sato, H., Sugita, Y., Ito, S., Minamide, M., and Kitagawa, Y.(2010) : Low alkaline cement used in the construction of a gallery in the Horonobe underground research laboratory, Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM 10, October 3-7, 2010, Tsukuba, Japan., ICEM2010-40038.
- Nakayama, S., Sakamoto, Y., Yamaguchi, T., Akai, M., Tanaka, T., Sato, T. and Iida, Y. (2004) : Dissolution of montmorillonite in compacted bentonite by highly alkaline aqueous solutions and diffusivity of hydroxide ions, Appl. Clay Sci., 27, pp.53-65.
- 日本原子力学会 (2008) : イエローフェーズを含むガラス固化体の処分時影響評価試算結果の妥当性について, 「イエローフェーズ含有ガラス固化体評価」 特別専門委員会.

- 日本原子力学会 (2010) : 地層処分対象放射性廃棄物の品質マネジメント～地層処分において必要と考えられる高レベル放射性廃棄物 (ガラス固化体) の特性～報告書, 「地層処分対象放射性廃棄物の品質マネジメント」 特別専門委員会.
- 日本粘土学会編 (2009) : 粘土ハンドブック (第三版), 技法堂出版.
- 日本鉄道建設公団 (1987) : 湧水の調査及び対策に関する研究報告書.
- 日本鉄道建設公団 (1996) : NATM 設計施工指針.
- 日本トンネル技術協会 (1983) : トンネル施工に伴う湧水, 湧水に関する調査研究 (その 2).
- 日本トンネル技術協会 (2000) : TBM ハンドブック.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2002) : 処分場の概要, 高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公募関係資料-2.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2004a) : 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性-「処分場の概要」の説明資料-, NUMO-TR-04-01.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2004b) : 概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠, -「概要調査地区選定上の考慮事項」の説明資料-, NUMO-TR-04-02.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2006) : 処分システムに求められる閉鎖性能の考え方-処分場パネル規模の水理に関する試解析-, NUMO-TR-06-01.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2008) : NUMO 技術開発成果報告会 2008 年 1 月 17 日, p73.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2010) : 地層処分技術開発ニーズの整理, ~精密調査地区選定に向けて~, NUMO-TR-10-02.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011a) : 処分場の安全機能と技術要件, NUMO-TR-10-11.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011b) : 地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性, 「処分場の概要」の説明資料, NUMO-TR-10-03.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011c) : 地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性, 一付録資料-, 「処分場の概要」の説明資料, NUMO-TR-10-04.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011d) : 地層処分の要件管理技術, NUMO-TR-10-12.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011e) : 地層処分施設の耐震性評価, NUMO-TR-10-13.
- Oda, C. (2004) : An Analysis of Cement-Bentonite Interaction and Evolution of Pore Water Chemistry, Proceedings of the International Workshop on Bentonite-Cement Interaction in Repository Environments, NUMO-TR-04-05, A3-74-79.
- OECD/NEA (2009) : International experiences in safety cases for geological repositories (INTESC), Outcomes of INTESC Project, Radioactive Waste Management, OECD Nuclear Energy Agency
- 大島洋志, 高木盛男, 榎本秀明, 辻徹 (1987) : 鉄道トンネルの湧水量実態調査, トンネルと地下, Vol. 18, No. 1, pp.43-49.
- Pedersen, K. (2000) : Microbial processes in radioactive waste disposal, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company Technical Report, SKB TR 00-04.
- POSIVA (2003) : Assessment of Disturbances Caused by Construction and Operation of ONKALO, POSIVA 2003-06.
- POSIVA (2010) : Emplacement of Small and Large Buffer Blocks, Working Report 2010-29.

- Pusch, R. (1982) : Chemical interaction of clay buffer materials and concrete, SFR 82-01.
- 産業創造研究所 (2005) : バリア機能総合調査 (バリアシステム放射線影響評価), 経済産業省資源エネルギー庁地層処分技術調査等委託費 平成 16 年度成果報告書.
- 産業創造研究所 (2006) : バリア機能総合調査 (バリアシステム放射線影響評価), 経済産業省資源エネルギー庁地層処分技術調査等委託費 平成 17 年度成果報告書.
- 産業創造研究所 (2007) : バリア機能総合調査 (バリアシステム放射線影響評価), 経済産業省資源エネルギー庁地層処分技術調査等委託費 平成 18 年度成果報告書.
- 笹本広, 陶山忠広 (2009) : 鉄-ベントナイト反応に関わる実験的検討 一室温における10年程度の試験後試料の分析結果一, JAEA-Research 2009-039.
- 笹本広, 石井智子, 佐藤久夫, 九石正美 (2010) : 鉄共存下でのベントナイトの変質に関する実験的研究 JAEA-Research 2010-030.
- Sato, T., Kuroda, M., Yokoyama, S., Tsutsui, M., Fukushi, K., Tanaka, T. and Nakayama, S.(2004) : Dissolution mechanism and kinetics of smectite under alkaline conditions, Proceedings of the International Workshop on Bentonite-Cement Interaction in Repository Environments, NUMO-TR-04-05, A3-38-41.
- Savage, D., Watson, C., Benbow, S. and Wilson, J. (2010) : Modelling iron-bentonite interactions, Applied Clay Science, 47, pp.91-98.
- 柴田雅博, 笹本広, 神徳敬, 油井三和 (2004) : 緩衝材の長期安定性評価技術の現状, 核燃料サイクル開発機構 技術資料, JNC TN8400 2004-010.
- 資源エネルギー庁・JAEA(日本原子力研究開発機構) (2007) : 地層処分計画を支える技術基盤の継続的な強化一国の地層処分基盤研究開発の成果と今後の展開一.
- SKB (2008) : Horizontal deposition of canisters for spent nuclear fuel Summary of the KBS-3H Project 2004-2007, Technical Report TR-08-03, SKB.
- 総合資源エネルギー調査会 (2008) : 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会.
- Strachan, D. M. and Croak, T. L. (2000) : Compositional effects on long-term dissolution of borosilicate Glass, Journal of Non-Crystalline Solids, 272, pp.22-33.
- Strachan, D. M. (2001) : Glass dissolution : testing and modeling for long-term behavior, Journal of Nuclear Materials, 298, pp.69-77.
- Stroes-Gascoyne, S. and King, F. (2002) : Microbially influenced corrosion issues in high-level nuclear waste repositories, In Proc. CORROSION/02 Research Topical Symposia, (NACE International, Houston, TX)pp.97-111.
- 酢谷佳尚, 渡辺邦夫, 佐久間秀樹, 野口義文 (1991) : 釜石鉱山におけるベンチレーションテストを用いた湧水量の測定, 第 23 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.182-186.
- 陶山忠宏, 上野健一, 笹本広 (2008) : 炭素鋼と10年間接していた圧縮ベントナイトの変質挙動調査, JAEA-Data/Code 2008-007.
- 竹内忠之 (1987) : 青函トンネルの排水計画と設備概要, 鉄道と電気, Vol.4, No.10, pp.51-61.
- 棚井憲治, 菊池広人, 中村邦彦, 田中幸久, 廣永道彦 (2010) : ベントナイト系材料の標準的室内試験法構築に向けての試験法の現状調査と試験による検討一日本原子力研究開発機構/電力中央研究所共同研究成果報告一, JAEA-Research 2010-025.
- 田中幸久, 中村邦彦 (2004) : 海水の濃度と高温履歴がベントナイトの膨潤特性に及ぼす影響, 電力

中央研究所報告, 研究報告, N04007.

谷口直樹, 川崎学, 藤原和雄 (2001) : ベントナイト中における硫酸塩還元菌の活性と硫化水素によるオーバーパック材料の腐食への影響, JNC TN8400 2001-011.

谷口直樹, 川上進, 森田光男 (2002) : ベントナイト/ケイ砂混合体における炭素鋼の不動態化条件, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2001-025.

谷口直樹, 川崎学, 内藤守正 (2008) : 緩衝材中における炭素鋼の腐食挙動の実験的検討-I, -10年間の浸漬試験結果に基づく腐食進展挙動の検討, JAEA-Research 2008-011.

谷口直樹, 川崎学, 内藤守正 (2009) : 緩衝材中における炭素鋼の腐食挙動の実験的検討-II, -10年間浸漬試料の腐食生成物分析結果-I, JAEA-Research 2008-108.

東京電力株式会社 (2008) : 平成 19 年新潟県中越沖地震を踏まえた柏崎刈羽原子力発電所の基準地震動の策定について, 原子力安全委員会, 耐震安全評価特別委員会, 第 7 回会合, 耐特委第 7-2-2 号.

植田浩義, 兵藤英明, 鈴木覚, 廣永道彦, 山本武志, 西田孝弘, 西内達郎, 杉山大輔 (2008) : 低アルカリ性セメントの処分場における長期適用性に関する検討, NUMO-TR-08-02.

上野健一, 笹本広, 陶山忠宏 (2008) : 緩衝材長期安定性に関する概略的評価, -鉄-ベントナイトの相互作用に関わる影響評価-, JAEA-Research 2008-073.

Umeki, H., Sakabe, Y., Ueda, H., Takahashi, Y., McKinley, I. G., Takase, H., Shimbo, H., and Ijiri, Y. (2004) : Managing uncertainty on site characteristics for the design of a high-level radioactive waste repository, 3rd Asian Rock Mechanics Symposium "Contribution of Rock Mechanics to the New Century", November 30 - December 2, 2004, Kyoto, Japan.

U.S.DOE (2004) : Compliance Recertification Application, Rapport DOE/WIPP 04-3231.

Vernaz, E., Gin, S., Jegou, C., Ribet, I. (2001) : Present understanding of R7T7 glass alteration kinetics and their impact on long-term behavior modeling, J. Nucl. Mater., 298, pp.27-36.

Wersin, P., Johnson, L. H. and Snellman, M. (2006) : Impact of iron released from steel components on the performance of the bentonite buffer: a preliminary assessment within the framework of the KBS-3H disposal concept, In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIX, (eds.), Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 932, pp.95-102.

山田勉, 平本正行, 小林保之, 油井三和, 佐藤治夫, 松井裕哉 (2007) : 処分場建設の際に持ち込まれる材料の長期性能評価の観点からの留意点, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Review 2007-008.

横浜市 (1993) : ヨコハマエコアップマニュアル.

第7章

地層処分システムの 長期安全性評価技術

第7章 目次

第7章 地層処分システムの長期安全性評価技術	7-1
7.1 基本的考え方	7-1
7.1.1 安全評価の手順	7-2
7.1.2 安全評価戦略の策定	7-4
7.1.2.1 安全評価の目的の設定	7-4
(1) 地層処分システムの性能確認	7-4
(2) 安全基準遵守の確認	7-5
(3) 不確実性の影響把握	7-5
(4) 設計オプション間の比較	7-5
7.1.2.2 不確実性への対応	7-5
(1) 不確実性の特徴	7-5
(2) 不確実性の取り扱い	7-6
7.1.2.3 安全評価における品質保証	7-7
7.1.3 シナリオの構築	7-8
7.1.3.1 状態設定とシナリオの作成・分類	7-8
7.1.3.2 シナリオ分類の枠組み	7-9
(1) 地層処分システムの性能確認シナリオ	7-10
(2) 地層処分システムの長期安全性評価シナリオ	7-10
(3) 仮想シナリオ	7-11
7.1.4 モデルの選定	7-12
7.1.4.1 モデルの信頼性向上	7-12
(1) モデルの相互補完的活用	7-12
(2) 独立した情報との比較	7-12
(3) 解析ツールの品質	7-13
7.1.4.2 モデルの不確実性の取り扱い	7-13
7.1.5 データセットの設定	7-14
7.1.5.1 設定の考え方	7-14
7.1.5.2 データの不確実性の取り扱い	7-14
7.1.6 安全解析の実施および基準との比較	7-15
7.1.6.1 安全解析の実施	7-15
7.1.6.2 安全解析の品質保証	7-15
7.1.7 各事業段階における安全評価の役割	7-16
7.1.7.1 概要調査地区選定段階（文献調査の段階）	7-17
7.1.7.2 精密調査地区選定段階（概要調査の段階）	7-18
7.1.7.3 処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）	7-19
7.2 安全評価の進め方	7-20
7.2.1 シナリオ構築の具体的な進め方	7-20
7.2.2 モデルの選定とデータセットの設定に関する具体的進め方	7-27

7.2.2.1	人工バリアと天然バリアのモデル	7-27
(1)	性能評価モデル	7-27
(2)	現象解析モデル	7-32
(3)	性能評価モデルと現象解析モデル間の情報の流れ	7-32
(4)	データセットの設定	7-35
7.2.2.2	生物圏のモデル	7-35
(1)	地表環境	7-36
(2)	人間の生活様式	7-36
(3)	データセットの設定	7-37
7.3	安全評価を支える技術の整備	7-39
7.3.1	安全評価に関する技術開発	7-39
7.3.2	シナリオの構築に関する取り組み	7-45
7.3.2.1	沿岸域における地質環境の長期変遷を考慮したシステムの状態設定手法	7-45
7.3.2.2	ニアフィールドの長期変遷を考慮したシナリオ構築手法	7-50
(1)	背景と目的	7-50
(2)	状態設定のアプローチ	7-50
(3)	シナリオ作成のアプローチ	7-55
7.3.2.3	自然現象の著しい影響を仮想的に評価するためのシナリオ構築手法	7-58
(1)	力学的影響	7-58
(2)	化学的影響	7-58
(3)	熱的影響	7-58
(4)	水理学的影響	7-58
(5)	地層処分システムへの影響	7-59
7.3.2.4	FEPに基づくシナリオ構築手法およびFEP情報の整備	7-61
7.3.3	モデルの開発に関する取り組み	7-62
7.3.3.1	地質環境および地表環境の変遷を考慮した核種移行解析モデルの高度化	7-62
(1)	背景と目的	7-62
(2)	アプローチ	7-62
(3)	例題への適用	7-67
7.3.3.2	母岩の不均質性および設計のオプションを考慮した核種移行解析モデルの高度化	7-67
(1)	背景と目的	7-67
(2)	アプローチ	7-67
(3)	例題への適用	7-69
7.3.3.3	核種移行解析モデルにおける計算手法の効率化	7-69
(1)	データの不確実性を統計論的に取り扱うための核種移行解析モデルの開発	7-69
(2)	地層処分システムの応答特性を容易に把握するための近似解析解の導出	7-71
7.3.4	データセットの整備に関する取り組み	7-73
7.3.4.1	データの整備	7-73
7.3.4.2	データセットの設定手法	7-75

7.3.4.3 地層処分低レベル放射性廃棄物に関する検討状況	7-76
7.3.5 今後の課題	7-77
7.4 まとめ	7-79
(1) シナリオ構築手法の整備	7-79
(2) モデルの整備	7-79
(3) データセット設定技術の整備	7-79
参考資料1 断層活動の影響に関する安全解析の例	7-80
参考資料2 沿岸域の環境変遷を考慮した安全解析の例	7-86
参考資料3 三次元核種移行モデルの例題への適用	7-93
参考文献	7-100

第7章 地層処分システムの長期安全性評価技術

本章では、閉鎖後長期の安全確保を支える三つの安全確保策のうち、「地層処分システムの長期安全性の評価（以下、安全評価という）」を実施するための基本的な考え方と進め方、およびそれらを支える技術の進展について示す。

7.1 では、事業における安全評価の基本的な考え方について述べる。次に、7.2 では、基本的な考え方に基づく安全評価の進め方を概括的に示す。そして、7.3 では、第2次取りまとめ以降、基盤研究開発機関および NUMO が取り組んできた安全評価に関する主な技術開発成果について概説した上で、今後の課題整理の方向性を示す。最後に、7.4 では、本章のまとめを述べる。

本章に示した基本的な考え方やそれらを支える技術は、高レベル放射性廃棄物および地層処分低レベル放射性廃棄物に対して、共通に適用されるものである。ここでは、高レベル放射性廃棄物の場合について記述し、地層処分低レベル放射性廃棄物については、第2次 TRU レポートにおける課題である「想定される幅広い地質環境に対して地層処分システムの頑健性を確保すること」への取り組み、ならびに「安全評価のデータセットに関する最新の知見の整理」について記述した(7.3.3, 7.3.4 参照)。なお、NUMO は、地層処分低レベル放射性廃棄物の安全評価について、第2次 TRU レポートとそれ以降更新された知見に基づき、その背景と技術的根拠を取りまとめている (NUMO, 2011a)。

安全評価は、「地層処分システムに関連する危険性に対して、サイトの地質環境や処分場の設計が技術的な要件を満足するだけの安全機能を発揮し得るか否かを体系的に分析する作業過程」(IAEA, 2009) である⁷¹。また、安全評価は、地層処分システムの全体レベルの性能の定量化、関連する不確実性の分析、および安全基準との比較を含む。

7.1 基本的考え方

本節では、地質環境の調査・評価（第5章）、および処分場の設計、建設・操業・閉鎖（第6章）を通じて、段階的に具体化する地層処分システムの長期安全性をどのように評価していくか、そして、評価結果をサイトの地質環境の調査・評価および処分場の設計に対してどのようにフィードバックしていくかについて述べる。

3.2.1 において述べたように、「安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進」は、安全確保を達成するための方針の一つである。安全性の繰り返し確認では、地層処分システムの安全性をさまざまな観点から示すセーフティケースが重要な役割を果たす。安全評価は、セーフティケースの主要な構成要素のひとつであり、閉鎖後長期の安全性（以下、長期安全性という）を示す中心的な論拠となる。

第2次取りまとめおよび第2次 TRU レポートにおいては、わが国の一般的な地質環境条件を想定して、地層処分システムの安全性を総合的に評価した。一方、事業段階の安全評価では、わが国の一般的な地質環境条件を想定した安全評価 (JNC, 1999a ; 電事連・JNC, 2005a) を起点として、特定のサイトに対する地層処分システムの長期安全性を確認することが必要となる。

これらを踏まえ、以下では、まず、安全評価の手順についてまとめた (7.1.1 参照)。その上で、

⁷¹ 性能評価は、地層処分システム全体、あるいはその要素である個別システムが有する機能について解析した結果を適切な基準と比較し、その性能について判断を行うことである (原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会, 1997)。原子力安全や放射線防護における用語として、安全評価と性能評価は同義であるとの指摘もある (IAEA, 2007)。本章では、基本的に安全評価という用語を使用し、調査計画および処分場の設計への反映を主眼とした評価は、性能評価と表現する。

安全評価の手順に従い、安全評価戦略として、安全評価の目的および不確実性の取り扱いについて整理した（7.1.2 参照）。続いて、シナリオの構築（7.1.3 参照）、モデルの選定（7.1.4 参照）、データセットの設定（7.1.5 参照）、ならびに安全解析の実施および基準との比較（7.1.6 参照）のそれぞれについて、基本的な考え方をまとめた。各手順では、7.1.2 で述べた不確実性の取り扱いをどのように適用するかをそれぞれ示した。また、事業段階に応じて利用可能な地質環境の情報が異なることを念頭に、各事業段階における安全評価の役割について整理した（7.1.7 参照）。

7.1.1 安全評価の手順

地層処分システムの安全評価が通常の工学システムの評価と大きく異なる点は、極めて長い時間スケールを考慮しなければならないこと、および天然の地層という不均質で大きな空間領域を対象とすることである。このため、従来の工学技術のように、実際に作ってその挙動を確かめ、設計にフィードバックしながら最適化を図り安全性を実証するという直接的な方法を取ることはできない（OECD/NEA, 1983）。この点が地層処分システムの安全評価に固有な特徴である。

IAEAやOECD/NEAといった国際機関のプロジェクトでは、この特徴を考慮して、各国での研究や経験に基づく議論が重ねられ（IAEA, 1995 ; OECD/NEA, 1991a, 1991b, 1997, 2000a, 2002, 2004a, 2008）、一般的な方法論がほぼ満足できるレベルに達していることについて合意が得られている（OECD/NEA, 1991b, 1997）。事業段階における安全評価においても、この一般的な方法論に沿って進める。

なお、安全評価は、地層処分システムによる将来の人間への影響をいい当てるものではなく、その長期安全性の判断材料を提供するためのものである。従って、長期安全性を判断するという観点から、使用するシナリオ、モデル、データセットなどについて十分検討されているかどうかが重要となる（NUMO, 2004）。3.2.2.3で述べたように、地層処分の長期安全性は、安全解析の結果のみではなく、より幅広い多面的な視点を含めて示すものである。多面的な視点には、例えば、地質環境の調査・評価、処分場の設計、残された不確実性とその対策、代替的な安全指標の使用などがある。

以上を踏まえ、安全評価の手順を整理した（図 7.1.1-1）。以下では、図 7.1.1-1に示した手順の概要を記述する。

まず、安全確保構想に従い、前段階に行った検討結果や類似した地層処分システムの評価事例などにに基づき、評価の目的および不確実性の取り扱いを整理し、安全評価戦略として策定（あるいは見直し）する。

次に、当該段階までに得られている既存の知見および安全規制からの要求（安全審査指針など）に基づき、ストーリーボード（7.2.1参照）の作成を通じて、地層処分システムの状態がどのように変遷するか（以下、状態設定という）を整理する。ここでは、地質環境の調査・評価、処分場の設計および研究開発の知見に基づき、地層処分システムの特性、安全機能、およびその将来挙動を整理する。すなわち、安全機能が地層処分システムのどのような特性によってもたらされるのか、そして、将来の地層処分システムの挙動によって安全機能がどのように変化するのかを整理する。さらに、これに基づき、シナリオの作成・分類を行う。

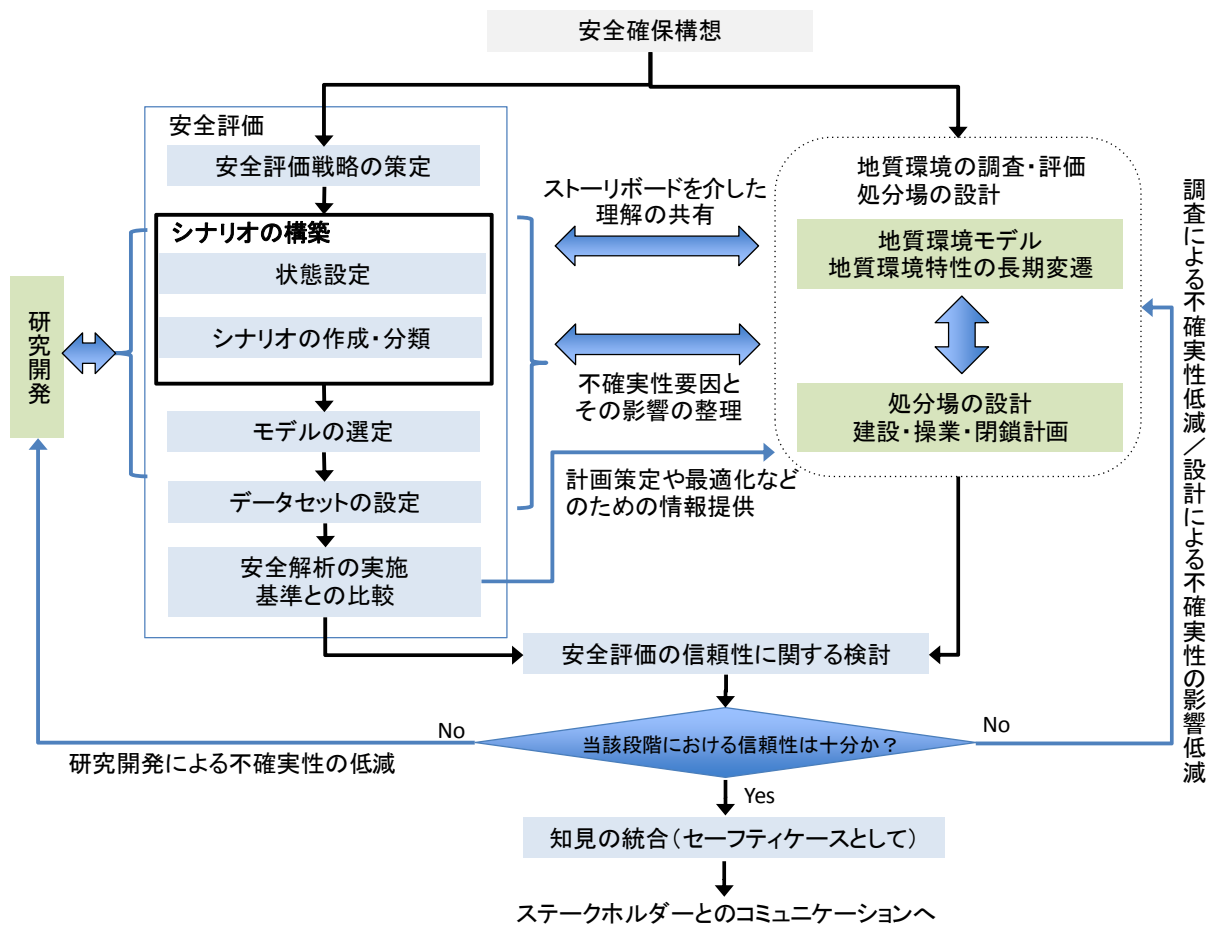


図 7.1.1-1 安全評価の手順

続いて、構築したシナリオに基づき、安全評価に用いるモデルおよびデータセットの設定を行い、安全解析を行う。そして、安全解析の結果と安全基準などとの比較を通じ、基準を満足するか否かを示す。なお、ここでは、次段階の調査計画の立案および処分場の設計の最適化に反映するため、性能評価の観点から、不確実性の影響把握および種々の設計オプション間の比較についても行う。

さらには、OECD/NEAが提案している多面的な論点（表 7.1.1-1：OECD/NEA, 2002）などを参考として、長期安全性の信頼性に関する検討を行う。当該段階において、長期安全性の信頼性の程度が十分と判断できる場合には、討論モデルに基づく手法（例えば、Osawa et al., 2009）などを参考として、安全評価の結果と信頼性、ならびに次段階以降の課題とその対策などをセーフティケースとして取りまとめる。一方、長期安全性の信頼性の程度が十分ではないと判断する場合には、不確実性の低減に向けた課題を明確にした上で、地質環境の調査・評価や処分場の設計や研究開発にフィードバックし、信頼性の向上を図る。

表 7.1.1-1 セーフティケースの構築に関する重要な論点
(OECD/NEA, 2002 を和訳)

地層処分システム自体の信頼性	<ul style="list-style-type: none"> 多重バリアシステムの本質的な頑健性 一部の安全機能が損なわれることを仮想的に想定したシナリオおよび関連する計算結果 よく知られたほかのシステムの事例やナチュラルアナログとの比較
地層処分システムに関するデータや知見の信頼性	<ul style="list-style-type: none"> 研究プログラムや地質環境の調査・評価の品質 品質管理体制 多様なソースや取得方法に基づくデータ 形式に則ったデータトラッキング手法の使用
アプローチの信頼性	<ul style="list-style-type: none"> 論理的であり、明快かつ体系的な評価アプローチ 監査することが可能なフレームワークのもとでの評価の実施 反復的な実施による理解の改善 独立した専門家によるレビュー
評価モデルの信頼性	<ul style="list-style-type: none"> 評価結果と直感的な理解との整合性 代替的な概念モデルや評価アプローチの考察 実験結果や自然の観察との比較によるモデルの妥当性の検討 複数のモデルの相互比較 ナチュラルアナログとの比較 古水理地質学的 (Paleohydrogeological) 情報などの独立した証拠
評価の信頼性	<ul style="list-style-type: none"> 解析上の仮定に関する明確な記述および根拠の説明 仮定の蓋然性あるいは保守性についての論証 感度解析 不確実性の取り扱いと低減方法についての明確な対策 多様な安全指標の使用 解析結果の妥当性に関する多様な理由付け
設計や地質環境の調査・評価へのフィードバックによる信頼性向上	<ul style="list-style-type: none"> 処分概念や仕様変更の根拠 地層処分システムの全体的な品質および安全性

7.1.2 安全評価戦略の策定

ここでは、安全評価戦略として、安全評価の目的および不確実性の取り扱いについて述べる。

7.1.2.1 安全評価の目的の設定

事業における安全評価の目的を以下に示す。以下の目的は、各事業段階の実施事項や必要な知見の充足度に応じて、力点を置くポイントが異なるものである。

(1) 地層処分システムの性能確認

地質環境の調査・評価と処分場の設計に基づき構築する地層処分システムについて、種々の安全機能の組み合わせによって、被ばく線量が合理的に達成できる限り低くなることを確認する。

(2) 安全基準遵守の確認

安全規制から示される枠組みに沿って、種々の不確実性の影響を考慮しても安全解析の結果が安全基準を満足することを確認する。これにより、不確実性に対する地層処分システムの頑健性について見通しを示す。

(3) 不確実性の影響把握

地質環境の調査・評価および処分場の設計において不確実性を効果的に低減するため、性能評価の観点から、安全評価に含まれる不確実性が長期安全性に与える影響を把握する。

(4) 設計オプション間の比較

処分場の設計では、廃棄体の定置方式や断層からの離隔距離などのさまざまな設計オプションを有する。そこで、処分場の設計の最適化に反映するため、性能評価の観点から、さまざまな設計オプションが性能評価の結果に与える影響を比較する。

7.1.2.2 不確実性への対応

地層処分の安全評価では、7.1.1 で述べたように、原子炉などの通常の原子力施設に対する評価期間に比べて対象とする期間が非常に長いこと、天然の地層という不均質で大きな空間領域を対象とすることを考慮する必要がある。これらに起因する不確実性に対しては、地質環境の調査・評価を段階的に詳細化することで、可能な限り低減する。さらには、残された不確実性を勘案して処分場の設計を保守的に行うことにより、不確実性の影響を可能な限り低減する。これらの安全確保対策によって不確実性をできる限り小さなものとする。しかしながら、不確実性を完全に取り除くことはできないため、安全評価では、残された不確実性を、シナリオ、モデル、データの不確実性として考慮する必要がある。従って、地質環境の調査・評価および処分場の設計に含まれる不確実性をどのように安全評価に反映するのか、および安全評価の結果を次段階の調査計画や設計課題にどのようにつなげていくのが重要である。以下では、不確実性の特徴および安全評価における不確実性の取り扱いについて述べる。

(1) 不確実性の特徴

安全評価における不確実性は、一般的に、シナリオ、モデルおよびデータの不確実性に区分することができる (OECD/NEA, 1991b)。ただし、シナリオ、モデルおよびデータといった不確実性の区分については、互いにはっきりと区別できない部分があり、ある程度任意の判断に基づいて分類してもよいと考えられている (OECD/NEA, 1997)。

また、不確実性の本質的な原因としては、評価対象とする現象がランダムなものであること (以下、ランダムネスという)、および評価対象に対する情報が不足していること (以下、イグノーランスという) という二つがある (European Commission, 1995)。ランダムネスは、確率分布として客観的に表現することが可能である。一方、イグノーランスは、主観的な判断によって取り扱うことになるため、情報の不足に起因してリスク希釈⁷²が生じることがある。地層処分では、評価期間に対して我々の経験し得る期間が限られていることや、不均質な深部地下環境に対して入手可能なデ

⁷²入力するデータセットが幅広い分布をしている場合に、線量あるいはリスクなどの平均値が低い値になってしまうこと (OECD/NEA, 2004c)。

ータが限られていることなどにより、イグノーランスが支配的になる。このため、安全評価において、シナリオ、モデル、データセットを設定するために不足している情報を補う際には、ランダムネスのように確率分布で表現するのではなく、複数の選択肢を不確実性として表現することになる。このための手法の例としては、例えば、ロジックツリーがある（Kessler et al., 1999）。

さらに、地層処分の長期安全性に関する将来予測の困難さのために、未だ誰も気づいていないような選択肢、換言すれば、知らないことさえ知らないという不確実性があるのではないかという指摘がある（Ross et al., 2002）。このような不確実性については、未知の選択肢を認識する可能性を高めるために、独立した外部の専門家によるレビュー、複数のモデルの相互比較、ナチュラルアナログとの比較などを行う（表 7.1.1-1）。

(2) 不確実性の取り扱い

不確実性の取り扱いとは、地質環境の調査・評価および処分場の設計から得られる情報を安全評価に反映する際に、不確実性を認識し、その影響を低減・緩和するとともに、残された不確実性の影響を安全評価に適切に反映するための一連の行為である（Posiva, 2008）。安全評価では、不確実性の抽出、重要度分類、不確実性の影響低減および安全評価への反映という四つの過程を各段階において反復的に繰り返すことを通じて不確実性を取り扱う（図 7.1.2-1）。この際、すべての不確実性やそれらの組み合わせを考慮するのではなく、以下の点に留意して、安全評価上考慮すべき不確実性を合理的に取り扱う。

- ・ 地質環境の調査・評価と処分場の設計において不確実性を考慮した上で対策を取るため、過度に保守的な不確実性の組み合わせを考慮しない。ただし、頑健性の例証や処分場の設計の最適化のために、一部の安全機能を見捨てるなどのあえて非現実的な想定を考慮する場合もある。
- ・ 専門家の判断や感度解析などにより影響が大きいと判断された不確実性のうち、その影響を完全に排除できないものについては、安全評価上、合理的な範囲における保守性を見込んで取り扱う。
- ・ 包絡性（ある事象の影響が別の事象の影響に包含されること）を考慮する。

(i) 不確実性の抽出

地質環境の調査・評価から得られるデータなどから安全評価に用いるシナリオ、モデルおよびデータセットを設定する一連の作業過程（アナロジー、内外挿など）に付随した不確実性について、最も発生可能性が高いもののみならず、発生可能性が低い選択肢についても抽出する。

(ii) 重要度分類

安全解析に含まれる不確実性には、影響の大きさや確からしさの異なる多様なものが含まれ、それらのすべてについて同様の取り扱いをすることは合理的ではない。そこで、影響の大きさや確からしさの観点から無視できる不確実性を除外するとともに、性能評価の観点から不確実性の影響を定量化し、包絡性も考慮して、重要度を分類する。

(iii) 不確実性の影響低減

重要度分類の結果, 重要度が高い不確実性については, その影響を低減するための対策を講ずる。ただし, 対策を講ずることの可能な時期が異なるため, 当該段階で対策を取るものと次段階で対策を取るものとを分類し, 次段階の計画策定に反映する。

(iv) 安全評価への反映

種々の不確実性要因を低減するための対策を取っても, これらの影響を完全に排除することは困難である。このため, 各段階の安全評価においては, 不確実性の大きさ, 保守性の程度および情報の充実度を考慮して, シナリオ, モデルおよびデータセットを設定する。なお, 遠い将来における自然事象の影響および生物圏に関する不確実性については, 様式化して設定する。

また, 残された不確実性について, 安全評価結果に与える影響やセーフティケースの信頼性向上の観点から, 課題とその対策を整理し, 次段階の計画へ反映する。

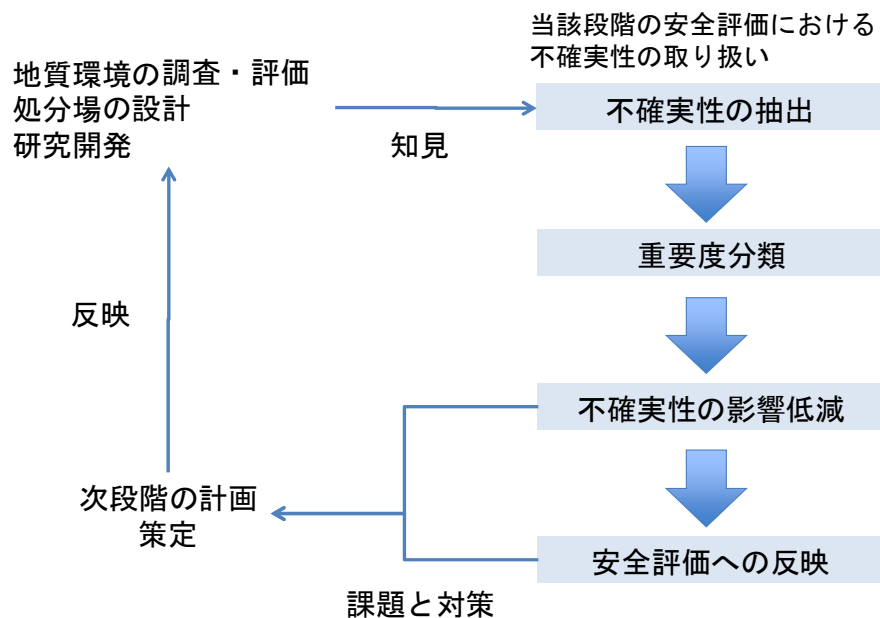


図 7.1.2-1 安全評価における不確実性の取り扱いの概念

7.1.2.3 安全評価における品質保証

安全評価では, 多くの知見を, シナリオ, モデルおよびデータセットとして取り込む。従って, その判断過程における透明性と追跡性を確保する必要がある。

例えば, 国内外の機関では, SR-Can 運営文書と呼ばれる一連の品質保証計画書が用意されている例 (SKB, 2006) や, 専門家による判断の不確実性を考慮して, シナリオ, モデルおよびデータセット設定の追跡性と説明性を保持しながら計算を実施する手法が検討されている例 (電中研, 2005) などがある。

第三者によるレビューは, 安全評価の品質保証のために重要な方法である。レビューには, 規制機関によるレビュー (例えば, U.S.NRC, 2003) に加え, 学協会などの外部の独立した機関や国際機関によるレビュー (例えば, OECD/NEA, 2000c, 2004b) などがある。

さらには, 国際的に合意された一般的な方法論や知見 (OECD/NEA, 1991b, 2000b) に加え, 最

新の動向（例えば、Ebashi et al., 2010）を反映することも肝要である。

また、安全評価の結果を、諸外国の評価結果と相互比較を行うことにより、類似点や相違点を明らかにすることも有効である。

7.1.3 シナリオの構築

安全評価におけるシナリオは、定量的な安全解析の前提となる地層処分システムの長期的な変遷を表したものであり、長期の将来予測に含まれる不確実性により、複数の選択肢を想定することになる。

以下では、状態設定とシナリオの作成・分類、およびシナリオ分類の枠組みについて記述する。

7.1.3.1 状態設定とシナリオの作成・分類

第2次取りまとめでは、国際的に合意が得られた体系的なアプローチ（OECD/NEA, 1991b）を踏襲しながら、「FEP^{7.3}に基づくシナリオ構築手法」によりシナリオを作成した。FEPに基づくシナリオ構築手法に対して、第2次取りまとめの国際レビューでは、その有効性は認めつつも、シナリオの構築から解析ケースの設定に至る一連の流れについて、よりわかりやすくすることが必要であると指摘されていた（OECD/NEA, 2000a）。

近年、従来の FEP に基づくシナリオ構築手法に対して、安全機能を基軸とした状態設定が重視される傾向にある（例えば、ONDRAF/NIRAS, 2001 ; Nagra, 2002 ; ANDRA, 2005 ; SKB, 2006）。安全機能を基軸とした状態設定では、安全機能がどのような地層処分システムの特性によってもたらされるのか、そして、地層処分システムの将来挙動によって安全機能がどのように変化するのかを整理することが重要である。この国際的な傾向を取り込むことにより、FEP に基づくシナリオ解析手法の課題に対して、シナリオの構築において着目すべき現象が明確になることから、その構築過程をより明確にすることおよび作業を効率化することが期待できる。

以上を踏まえ、NUMO は、長期安全性をおびやかすような現象について重大な抜け落ちがないように配慮しつつ、合理的にシナリオを構築することを目的として、従来のシナリオ解析手法と安全機能を基軸とした手法を組み合わせ、シナリオを構築する（NUMO, 2011c）。

シナリオの不確実性は、3.2.2.3 で述べたように、現象の時間的な変遷、自然現象の発生の時期や頻度、将来の人間活動などに伴う不確実性がある。そこで、シナリオの不確実性を取り扱う際には、7.1.2.2 で述べた考え方に従って、まず、長期の将来予測に含まれる不確実性を抽出し、重要度分類を行う。

なお、将来のシステムの状態については、さまざまな現象が関連して複雑に変化することが考えられ、それらすべてを精緻に把握して科学的に明らかにすることは容易ではない。従って、国際的な FEP リストや既存の FEP リストに基づき、安全評価上の保守性や核種移行の観点から、重大な抜け落ちがないように配慮しつつ現象を選択する。現象を選択する際には、科学的な知見などに基づいて、以下の視点に着目して安全評価で考慮する必要のない FEP を除外する。

- ・ 地質環境の調査・評価によって長期安全性に有意な影響を及ぼさないと判断する FEP
- ・ 処分場の設計によって長期安全性に有意な影響を及ぼさないと判断する FEP

^{7.3} 地層処分システムの各要素の特性（Feature）、特性に影響を与える事象（Event）、地層処分システムの時間的な変遷の過程（Process）の略称。

- ・ 発生可能性が極めて小さいと判断する FEP
- ・ 別の事象を取り扱うことによって包含されると判断する FEP
- ・ 上記以外で、現段階での科学的な知見により、地層処分システムへの影響が無視できるほど小さいと判断する FEP

また、現象を選択する際に知見が不十分な状況では、以下のように取り扱うこともある。

- ・ 現象が安全機能を向上させることが見込まれる場合には、その現象をあえて無視する (Reserve FEP : Nagra, 2002)。
- ・ 現象が安全機能を低下させることが見込まれる場合には、その現象が影響を与える安全機能を無視する。

7.1.3.2 シナリオ分類の枠組み

3.1.2 では、地質環境の長期変遷や自然現象についての将来予測の可能性についての考え方を整理した上で、安全評価におけるシナリオ設定に際して基本となる考え方を示した。ここでは、この考え方に基づき、実際の安全評価シナリオを区分する際の具体的な枠組みを示す。

3.1.2 において述べたように、処分場閉鎖後の潜在的危険性としては、以下の被ばくを考慮する。

- マグマや活断層の処分場への直撃や隆起・侵食による処分施設の地表への接近などの自然現象の著しい影響に起因する被ばく
- 地下水の移行を介した放射性物質の移行による被ばく
- 処分場に侵入する偶発的な人間活動による被ばく

安全評価上は、(a) および (b) を自然過程を介するシナリオ (以下、自然過程シナリオという) と呼び、(c) を人為過程を介するシナリオ (以下、人為過程シナリオという) と呼んで区分する。自然過程シナリオは、ほぼ確実に生起すると予想できる事象から、可能性を完全に否定できないものの適切なサイト選定により発生確率の著しく低い事象まで多岐にわたる。そこで、NUMO は、これらのシナリオを発生可能性に応じて区分するリスク論的な考え方 (原子力安全委員会, 2004) に基づいて取り扱うことを検討している。しかしながら、現段階では、地層処分に対する具体的な安全規制の考え方が定められていないことから、シナリオの分類について検討を進めている (図 7.1.3-1)。

自然過程シナリオに関しては、地質環境の変遷や自然現象の予測可能性の観点から安全評価上の時間スケールも区分して考えることが適切である。具体的には、第3章において述べたように、過去～現在のデータが充分にあり、外挿法などによる将来予測が可能な期間 (期間 A)、不確実性は大きくなるが、外挿法などにより将来予測が可能な期間 (期間 B)、および外挿法による将来予測が難しい期間 (期間 C) に区分し、上述した三つのシナリオ区分との対応を以下のように設定することを検討している。評価期間と安全評価シナリオの区分との関係について、自然過程シナリオを対象として検討した例を図 7.1.3-2 に示す。なお、これらの関係は、放射性廃棄物の潜在的な毒性の変化 (NUMO, 2004) や安全機能の時間変遷といった複数の視点から検討する必要がある。また、これらの関係や分類については、今後の安全規制の動向などを踏まえ、柔軟に改訂する。

一方、人為過程シナリオについては、3.1.2 に述べたとおり、人間侵入が起こる可能性の低いサイトの選定や処分施設の設計を行うことなどによって安全性を確保する。このような対策によって偶発的な人間侵入の可能性は低減されるものの、将来の人間活動に関する確率を推定することには本質的に困難であることから、安全評価上は人間侵入が生じることをあえて想定し、万一の場合でも極端に大きな影響は生じないことを確認する。

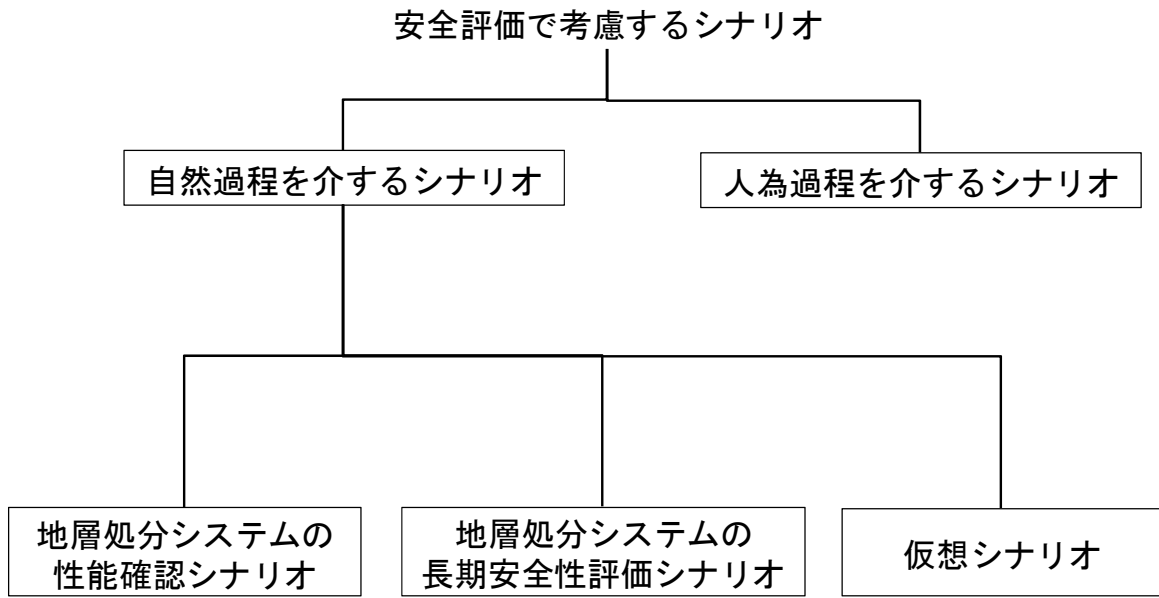


図 7.1.3-1 安全評価におけるシナリオ分類（検討例）

(1) 地層処分システムの性能確認シナリオ

3.1.2.3 において述べたように、期間 A については、予測の不確実性が比較的小さいことから、最新の知見に照らして科学的に確からしいと予見する標準的なシナリオを策定することが可能である。このため、このようなシナリオを用いて線量評価することによって、長期安全性に対する余裕の程度を事業者が自主的に確認することが可能となる。評価された被ばく線量が基準値を下回る場合でも、防護の一層の最適化の観点から、当該被ばく線量を合理的に達成可能な限り低く抑えるよう努力していることを示すことが可能になる。従って、このシナリオを地層処分システムの性能確認シナリオと位置付ける。

ここで、種々の安全機能が適切に組み合わせられていることを確認する上では、システム構成要素ごとの性能指標（あるバリアにおける核種移行率など）を算出することも有効である。なお、期間 A においても地表環境や人間の生活習慣についての予測には不確実性が含まれる可能性があることから、これらの指標は被ばく線量の評価結果を補完する役割も担う。

(2) 地層処分システムの長期安全性評価シナリオ

3.1.2.3 において述べたように、期間 A および期間 B では、地質環境の変遷や自然現象の予測を行うとともに、さまざまな不確実性の影響を線量評価シナリオに反映し、そのシナリオによって計算された線量と基準とを比較することをもって、地層処分システムが閉鎖後長期間にわたって安全に構築されていることを確認する。このシナリオを地層処分システムの長期安全性評価シナリオと位

置付ける。これにより、種々の不確実性を考慮したとしても長期安全性の見通しがある頑健なシステムが構成されていることを、被ばく線量および種々の性能指標によって確認する。ここで、期間 A と B とでは、将来予測に含まれる不確実性の大きさが異なることに留意して、それぞれ適切と考える範囲の変動要因を考慮してシナリオの設定を行う。

(3) 仮想シナリオ

「マグマや活断層の処分場への直撃や隆起・侵食による処分施設の地表への接近などの自然現象の著しい影響」の生じる可能性については、まず、期間 A においては、適切なサイトを選定することにより確実に回避することが基本であるが、発生する現象に応じて仮想シナリオの設定を考慮する。期間 B については、期間 A と同様、適切な対策により回避することが基本となるが、時間スケールの延長に伴う将来予測の不確実性の増大を勘案する。期間 B では、将来予測に基づく適切なサイト選定により自然現象の著しい影響を回避できることの確実性が自然現象や地域に応じて異なる。そこで、安全評価上は、期間 B においても、必要に応じて、「仮想シナリオ」として安全評価を行い、万一の場合でも特別な措置を必要とするような極端に大きな影響は生じないことを確認する。なお、3.1.2.3 において述べたように、期間 C では、外挿法による将来予測が難しいことから、考慮すべき自然現象を様式化して評価モデルに取り込み、天然の放射性物質の濃度との相対的な比較を行うなどの補完的な評価方法についても検討を行う。なお、地層処分システムの頑健性を示すために、what-if シナリオとして、物理化学的にはありえない非現実的な状況をあえて想定することも必要に応じて採用し、検討を行う。

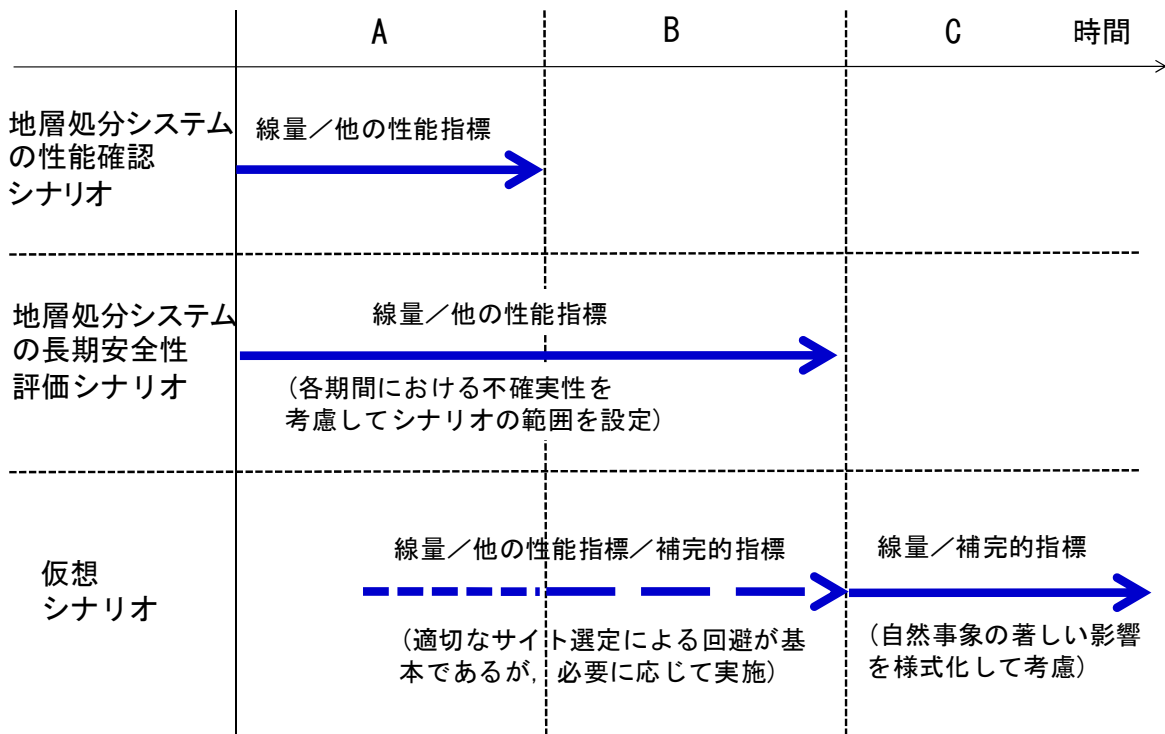


図 7.1.3-2 シナリオの区分と将来予測期間の区分の関係
(自然過程シナリオを対象とした検討の例)

7.1.4 モデルの選定

モデルの開発では、まず、シナリオで表現する地層処分システムの将来挙動および安全評価の目的に基づき、可能性のある概念モデルを明らかにする。そして、概念モデルに対して数学的な定式化（数学モデル）を行った後、計算コードを作成する（NUMO, 2004）。事業段階の安全評価では、特定のサイトにおける地層処分システムの特徴や安全評価の目的を考慮して、用いるモデルをモデル群から選定する。

以下では、モデルを選定する際の基本的な考え方について、モデルの信頼性向上および不確実性の取り扱いの観点から記述する。

7.1.4.1 モデルの信頼性向上

評価モデルの信頼性向上に向けて以下の取り組みを行う。

(1) モデルの相互補完的活用

モデルにおいては、関連する現象の多様性、地質環境の不均質性、評価期間の長期性に起因して、実際の地層処分システムの複雑な挙動を精緻に表現することは難しい。そこで、モデルを、安全機能に着目して簡略化した性能評価モデル（以下、性能評価モデルという）と地層処分システムの特徴や現象を表現した現象解析モデル（以下、現象解析モデルという）に大別し、これらを相互補完的に用いる（Ishiguro et al., 2007：図 7.1.4-1）。すなわち、性能評価モデルにおける簡略化の妥当性を現象解析モデルによって示すとともに、性能評価モデルを用いて全体システムにおける鍵となる不確実性と現象解析モデルの重要度を明らかにする。これにより、モデルの信頼性を向上させることが期待できる。

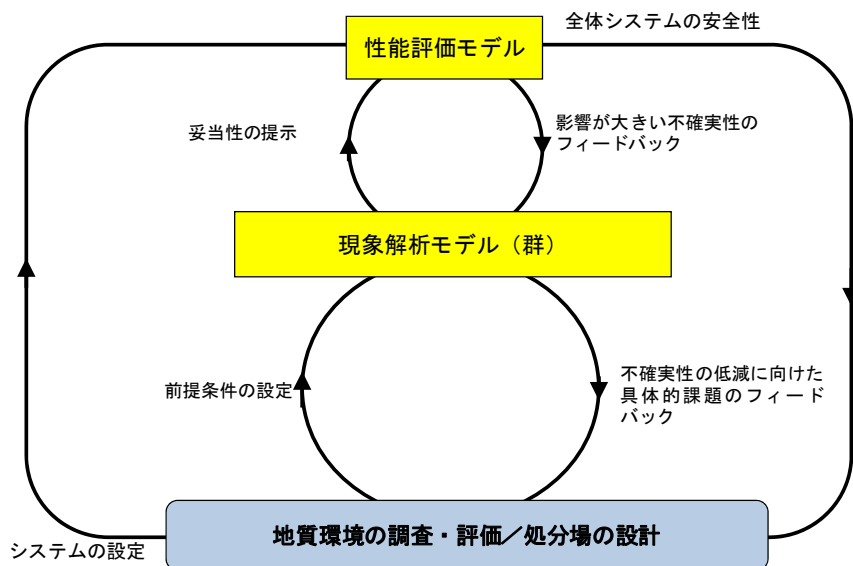


図 7.1.4-1 性能評価モデルと現象解析モデルの相互補完的な利用
(Ishiguro et al., 2007 に一部加筆)

(2) 独立した情報との比較

モデルによる解析結果が、ナチュラルアナログなどの独立したほかの情報と整合することは、モ

デルの信頼性を示す上で重要である。このような独立した情報を活用した示し方を以下に示す。

- ・ ナチュラルアナログ事例についての観察によって得られた知見や古水理地質学的情報と、モデルを用いた解析とを比較する
- ・ 関連する複数の専門分野間での整合性をクロスチェックする（例えば、地下水流動と地下水の水質形成）
- ・ 小規模あるいは短期の室内試験などにに基づき導出された評価モデルを、大規模あるいは長期の試験などに適用する

これらについては、これまでも JAEA などによってサイトを特定しない一般的な論拠が蓄積されるとともに、仮説検証を目的とした調査や研究計画および調査結果の解釈などについての方法論が開発されてきている（例えば、JAEA, 2009）。NUMO は、これらの成果を参照しつつ、事業の進展に応じて、特定のサイトに対するモデルの信頼性を示すための論拠を収集する。

(3) 解析ツールの品質

評価モデルを用いて安全解析を行う際には、多くの場合、数値解析用ソフトウェアなどを利用する。これらの解析ツールの開発については、ソフトウェア開発の一般的な手順に含まれる検証を適切に行う。また、安全評価で用いる種々の解析ツールについて、過去の使用実績や検証結果の有無から分類しておき、その分類に応じて解析モデルの品質情報を整理しておくとともに、これらの検証の過程でモデルの適用範囲を確認する。

7.1.4.2 モデルの不確実性の取り扱い

構築したシナリオおよび安全評価の目的に基づき、モデルを開発あるいは選定する。モデルの開発や選定に際しては、時間スケールの超長期性や母岩の空間的不均質性に起因して、多様な現象のすべてに対して十分な知見を得ることは難しい。このため、モデルの不確実性としては、3.2.2.3 で述べたように、モデルとしての表現方法が複数存在することや簡略化が適切に行われないことなどに伴う不確実性がある（NUMO, 2004）。したがって、モデルに関する各作業過程の追跡性と透明性を確保し、モデル化の対象とする個々の現象に関する理解の程度やモデルにおける保守的簡略化の程度を勘案して、安全評価に用いるモデルがどのような不確実性を有するのかが明らかになるようにする。ここでは、モデルの不確実性の取り扱い例として、以下の状況について述べる。

- ・ 十分な知見が得られており、適切なモデルをひとつに特定可能な場合 (a)
- ・ 知見は得られているが、複数のモデルが存在する場合 (b)

このうち、(a) については、当該モデルの適用可能であることを示すとともに（類似した問題への適用実績、検証の結果など）、外部レビューを通じてその妥当性を確認する。一方、(b) に対しては、7.1.2 に述べた不確実性の取り扱いを適用し、以下のような手順で不確実性を取り扱う。

- ・ 不確実性の抽出：想定可能なモデル候補を抽出する。
- ・ 重要度分類：定性的な判断および解析を通じて、モデルの違いが安全機能や結果に与える影

響を把握した上で、モデル候補の重要度を分類する。

- ・ 不確実性の影響低減：モデルの違いのうち、安全機能や結果に与える影響が大きいものについて、以下の対策をとることによって影響の低減を図る。
 - 地質環境の調査・評価や研究開発を通じてそれぞれのモデルの検証と改良を行い、適切なモデルを絞り込む。
 - 処分場の設計の変更により、モデルの違いによる影響を緩和する。
- ・ 安全評価への反映：上記の対策をとってもなお残るモデルの違いについては、複数のモデルに対する安全解析の結果を併記する（あるいは保守的なモデルやデータセットによって代表する）。

なお、上記の「重要度分類」のために行う解析では、モデルによって入力データの種類や数値が異なる可能性もある。このような場合には、モデルの不確実性の取り扱いと後述するデータセットの不確実性の取り扱い（7.1.5 参照）との間に明確な境界を設定することは困難である。従って、これら二種類の不確実性の影響を同時に把握した上で重要度を分類する。

7.1.5 データセットの設定

7.1.5.1 設定の考え方

前節までに述べた方法でシナリオを構築し、モデルを選定した後、モデルに必要なデータセットの値を設定する。ここでは、安全評価の目的や前提条件に即しており、かつ、整合性のとれた入力データの集合をデータセットと呼ぶ。データセットは、特定の目的のもとに注意深く設定するものであり、多様なデータの集合体を指すデータベースとは異なる。

事業の初期段階では、特定のサイトに対する情報が限られる。このため、特定のサイトに対する地層処分システムに該当するものをデータベースの中から抽出するとともに、既存のデータに基づく類推などによってデータセットを設定する。そして、地質環境の調査・評価が進展するにつれて、サイトに固有の条件に対応して新たに取得したデータ（対象サイトで取得された岩石試料や地下水を用いた収着試験データなど）を中心としたデータセットへと移行する。この段階では、既存のデータベースの傾向との比較分析によって、サイトに固有の特徴に対応したデータセットの検証を行い、信頼性を向上させる。

7.1.5.2 データの不確実性の取り扱い

データセットの設定においても、不確実性の取り扱いが重要である。すなわち、地質環境の調査・評価や実験などで測定することのできるデータを処理・解釈してデータセットを整備する過程で、さまざまな不確実性が介在する。例えば、3.2.2.3で述べたように、データの測定誤差や地質環境の不均質性を扱うためのデータが十分でないことなどから生じる。以下では、このようなデータの不確実性の取り扱いの考え方について述べる。

- ・ 不確実性の抽出：データセットを設定する過程を明らかにし、設定過程における不確実性を抽出する。
- ・ 重要度分類：安全評価データセットの設定への影響が無視できるものを除外するとともに、性能評価モデルや現象解析モデルを用いた感度解析を実施し、データセットの設定に与える

影響が大きい不確実性を特定する。

- ・ 不確実性の影響低減: 重要な不確実性について、地質環境の調査・評価や研究開発を通じて、新たなデータの取得などを行い、不確実性の低減を図る。
- ・ 安全評価への反映: 上記の対策にもかかわらずなお残る重要な不確実性については、合理的な範囲における保守性を考慮してデータセットを値あるいは幅として設定する。

データセットの変動幅が大きい原因には、地質環境の不均質性や試験・測定条件の変動によるデータのばらつき、地層処分システムの長期的な変遷に複数の選択肢が存在すること、評価モデルが実際の現象を適切に模擬していないこと、といった複数のものがある。不確実性の影響低減では、どの要因が支配的であるかを明らかにした上で、対策を行う。また、データセットの信頼性向上のために、こうした一連の作業過程や判断過程を記録しておくとともに、第三者によるレビューを受けることも検討する。

7.1.6 安全解析の実施および基準との比較

7.1.6.1 安全解析の実施

安全評価戦略を踏まえて構築したシナリオ、モデルおよびデータセットを用いて安全解析を行う。安全解析は、決定論的な方法を中心として、必要に応じて統計論的な方法で補完することによって行う。決定論的な方法は、不確実性を考慮してデータセットを一定の値に設定して解析を行うものである。一方、統計論的な方法は、不確実性を考慮してデータセットに確率密度関数を設定し、そこからサンプリングによって値を設定しながら、さまざまなデータセットの組み合わせに対して繰り返し計算を行うものである。

指標としては、線量やほかの性能指標あるいは補完的な指標を用いる。事業では、不確実性を考慮して、シナリオ、モデルおよびデータセットの組み合わせを想定した安全解析の結果が安全基準を満足することを確認する。また、このような解析結果が基準を満足する場合でも、不確実性の影響を考慮した感度解析を行い、解析結果と基準との差が十分なものであるか否かを評価する。

7.1.6.2 安全解析の品質保証

安全解析の一連の計算作業において、誤った入力値を用いる、あるいは、あるモデルの計算結果をほかのモデルの計算に誤って受け渡すといった過誤が生じる可能性が考えられる。このような過誤に対しては、例えば個々のモデルやデータセットに固有の記号を付し、シナリオに沿った解析ケースごとに一つのシートに記録するといった方法が挙げられる。第2次取りまとめでは、コードやデータを用いた安全評価解析作業において、入力データの管理、解析手順（内容）の管理、解析結果の管理を適切に行うための計算機システムが開発された（Neyama et al., 1998）。また、Nagraでは、こうした安全解析におけるデータセット管理のための定型化されたマニュアルを導入している（Nagra, 2002）。

NUMOは、これらの対策を参考としつつ、品質保証に取り組み、安全評価の信頼性を向上させていく。例えば、サイトの地質環境特性に応じて処分場の設計や安全評価を体系的かつ効率的に実施するため、計算機支援型の処分場概念構築システムを開発している（NUMO, 2004）。このシステムでは、入力情報を履歴データベースとして管理することにより、解析の再現性や用いたモデル、データの追跡性を確保できるようになっている。

さらに、安全評価を実施する際には、これまでに述べたモデルやデータセットに加えて、これらを活用するための知識が必要となる。このため、相互比較や検証などを通じてモデルやデータセットに対する品質保証を行うとともに、関連する知識についても体系的な品質保証を行う。さらには、知識の不足に起因する不確実性がどこに含まれているのかを明らかにし、安全評価のそれぞれの作業においてどのように不確実性が伝播するのかを記録・管理する。JAEA は、このような目的のために地層処分に係る知識の管理を進めている（JAEA, 2010a）。このうち、安全評価に関しては、性能評価統合レポートシステム（PAIRS）が開発されている（JAEA, 2010b）。このシステムは、「モデルやデータセット」と「モデルやデータセットを正しく適用するための知識」とを電子報告書という媒体を通じて有機的に結合したものであり、安全解析においてパターン化することの可能な作業をある程度自動化したものである。これにより、事業の進展に伴って更新される情報や最新の知見が安全評価結果に与える影響を把握する場合に、人的ミスの可能性を低減するとともに、作業の追跡性を確保しながら安全評価を効率的に実施することが可能になる。

また、第3章で述べたように、大きな外的状況の変化に迅速かつ的確に対応するためには、過去の意思決定や技術判断の経緯や根拠に立ち返る必要が生じることもあることから、こうした情報を体系的に記録・管理し、必要時に速やかに利用できる準備を進めておく。NUMO は、事業の推進に当たって考慮すべき広範な要件とそれらを前提とした意思決定を一括管理する「要件管理技術」の開発を進めている（NUMO, 2011b）。NUMO は、安全評価にかかわる意思決定の記録と追跡性を確保することが重要と考えており、事業の進展に応じて、前提条件、意思決定項目およびその付帯情報をこのシステムで管理する。

7.1.7 各事業段階における安全評価の役割

第3章で述べたように、事業における安全評価においては、長期安全性の信頼性を段階的に向上させるため、地質環境の調査・評価および処分場の設計の安全評価への反映を反復的に実施することが重要である。すなわち、段階が進むに連れて、以下の三つの点を同時に考慮し、信頼性を向上させる。この際、設計因子（6.5.2 参照；NUMO, 2004）を適用して、過度な設計とならないようにする。

- ・ サイトの地質環境の理解の深化と不確実性の低減
- ・ サイトの地質環境に応じた処分場概念の具体化
- ・ 安全評価の精度と信頼性の向上

安全評価の基本的な流れ（図 7.1.1-1）は各段階で共通である。しかしながら、事業全体としての主要な実施事項や入手可能な情報の制約に応じて、各段階において力点を置くポイントが変化する。

上記の内容を踏まえ、文献調査の段階、概要調査の段階、精密調査の段階における自然過程シナリオを例として、地質環境の調査・評価および処分場の設計と連携した各段階における安全評価の主要な実施項目を整理した（図 7.1.7-1）。以下では、図 7.1.7-1 に沿って、各段階における安全評価の役割について記述する。なお、事業に必要な技術開発を進める際には、第4章で示した技術開発ロードマップ（図 4.1.3-5）に基づき、各段階において力点を置くポイントを考慮し、その役割を達成できるように進める。

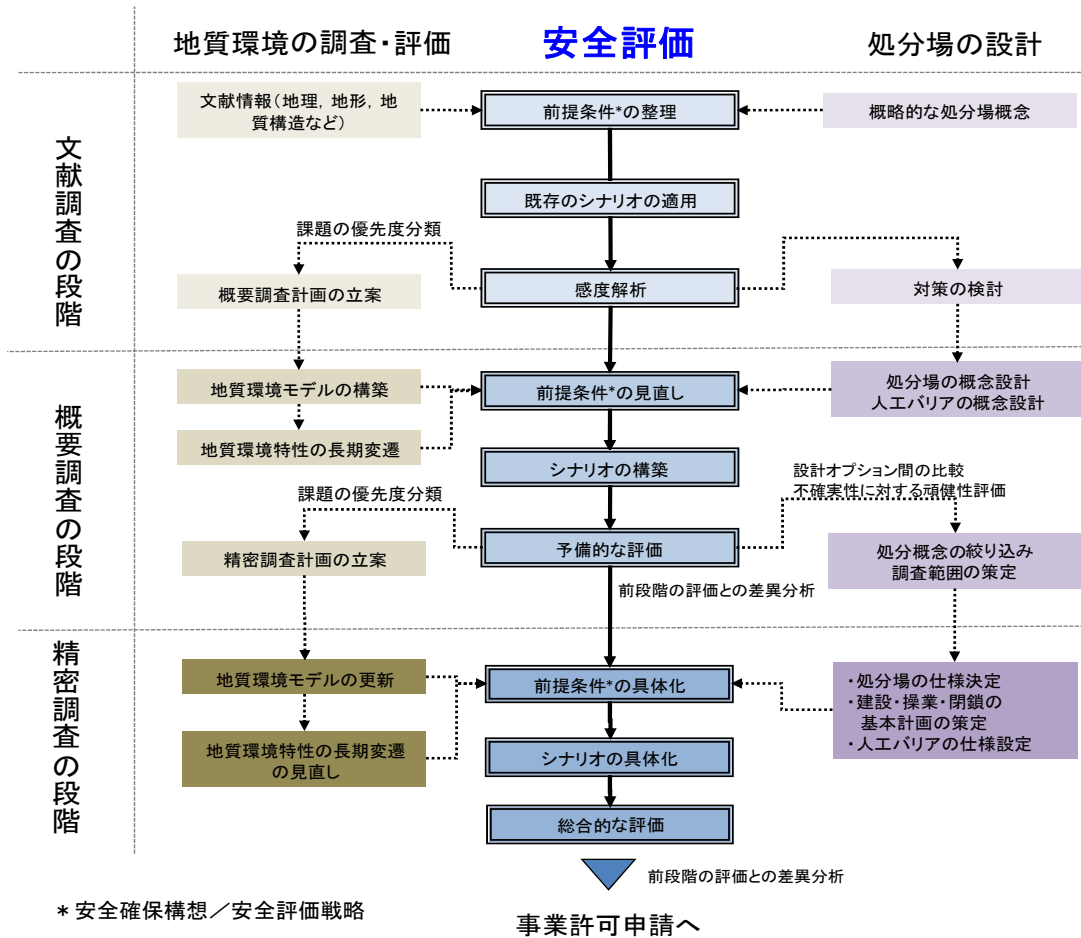


図 7.1.7-1 各段階における安全評価の主要な実施項目 (自然過程シナリオを対象とした例)

7.1.7.1 概要調査地区選定段階 (文献調査の段階)

本段階における安全評価は、概要調査計画の策定に反映することが主眼である (4.2.1.1 参照)。そのための役割を以下に示す。

- 地質環境の調査・評価や処分場の設計や研究開発によって不確実性を効果的に低減するため、次段階以降の安全評価に与える影響が大きい因子を抽出すること。

本段階では、一般的に、地理、地形、地質構造といった文献情報が入手可能と考えられるものの、地質環境に関する情報が限定的であることから、天然バリアとしての母岩の性能を適切に評価することが難しい。また、人工バリアについても、その設置条件としての地質環境に関する情報が限定的であることの影響を受けて、保守性を重視したものになる。

このため、この段階の安全評価は、特定のサイトにおける地層処分システムが技術的な要件を満足するだけの安全機能を発揮しうるかどうかを体系的に分析するものではなく、既存の知見を利用して個々の安全機能をどのように割り当てるかの見通しについて検討し、そして、不確実性の低減に向けてどのような地質環境の調査・評価および処分場の設計を行うかの判断に反映すること (安全性の概略的検討) が主眼である。このための有効なアプローチとしては、既存のシナリオやモデ

ル（例えば、JNC, 1999a；電事連・JNC, 2005a），および地下水流動解析などに基づく感度解析が有効である。そして、感度解析から得られる情報に基づき、評価結果に及ぼす影響が大きい因子と、地質環境の調査・評価および処分場の設計とを対応付ける（例えば、Umeki et al., 2004）。このような対応付けにおいては、地層処分システムの空間スケールおよび時間スケールを考慮する。

7.1.7.2 精密調査地区選定段階（概要調査の段階）

本段階における安全評価は、処分場の設計に関する妥当性確認やオプション間の比較、精密調査計画の作成、セーフティケースの構築に対して、結果を反映することが主眼である（4.2.1.2 参照）。そのための役割を以下に示す。

- ・ 処分場の設計に反映するため、性能評価の観点から、地下施設のレイアウトや人工バリア設計などに関する妥当性確認およびオプション間の比較を行うこと。
- ・ 精密調査計画に反映させるため、次段階で長期安全性を確保するために重要な地質環境の特徴や条件をあらかじめ抽出すること。
- ・ 次段階で長期安全性を確保するために重要なモデル・データを特定すること。
- ・ 安全審査基本指針への対応という観点から、重要な調査項目や設計課題を抽出すること。
- ・ この段階における長期安全性の信頼性について検討すること（セーフティケースへの反映）。

本段階においては、文献調査で得られた情報に加え、地上からの調査（地表踏査、物理探査、ボーリング調査など）により、地質環境特性に関する情報として、透水性や亀裂頻度などの知見を拡充できるため、地質環境モデルを更新するとともに、対象とする岩盤の長期安定性に関する知見が充実することから、地質環境の長期変遷の予測も更新する。また、処分場の設計においては、地質環境モデルの更新に従い、候補母岩の選定、地下施設と人工バリアの概念設計（基本レイアウトや人工バリア材料の選定など）を行い、設計オプションを具体化する。

選定した候補母岩に対して、シナリオの策定および予備的な評価を行う。ただし、この段階においても、入手可能な情報の制約、文献情報のばらつき、処分場の設計に関する複数の選択肢などを考慮する必要がある。

このため、安全評価では、安全評価データセットの範囲が幅広くなることから、一般に、目標値を満足するケースと満足しないケースが混在するような状況が生じる可能性がある。この両者の境界値を明らかにすることにより、目標値を満足するための定量的な条件を抽出することができる（例えば、JNC, 2005；電事連・JNC, 2005a）。この定量的な条件と性能割り当てを関係付けることにより、個々の安全機能をどのように割り当てるか（性能割り当て）の見通しを検討する。この定量的な条件は、地層処分システムの長期安全性を確保するために必要な条件ではなく、ほかの安全機能の性能によって変わりうるものである。

また、性能評価の観点から、処分場の設計オプションの絞り込みのために、各オプションが評価結果に与える影響を定量的に把握する。さらには、概要調査地区選定段階（文献調査の段階）と同様に、この段階で得られた地質環境の情報や具体化される処分場の設計に基づき、不確実性の影響が大きい因子を抽出し、精密調査計画に反映する。

最終的には、表 7.1.1-1などを参考として安全性の信頼性に関する検討を行い、この段階における長期安全性についての見通しとその信頼性について検討し、次段階以降の課題とその対策を取り

まとめる。

7.1.7.3 処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）

本段階における安全評価は、事業許可申請に向けた安全性の確認、事業許可申請書の作成、セーフティケースの更新に反映することが主眼である（4.2.1.3 参照）。そのための役割を以下に示す。

- ・ 地下調査施設での取得データを加えて、安全審査に向けた処分場の長期安全性に関する総合的な評価を実施すること。

本段階においては、地下調査施設を用いた詳細な調査により坑道スケールでの知見が拡充することから、地質環境モデルや地質環境長期変遷の予測を更新する。また、前段階で絞り込まれた処分場の設計に基づき、地下施設や人工バリアの仕様を決定するとともに、建設・操業・閉鎖の基本計画を作成する。安全評価においては、これらを反映して、前提条件の見直しを行う。そして、拡充された知見を取り込んだ総合的な安全評価を行う。また、安全解析の実施および基準との比較に加えて、長期安全性の信頼性に関する検討を行い、安全審査に向けて論拠を取りまとめる。

7.2 安全評価の進め方

本章では、事業の特徴を考慮した安全評価の具体的な進め方として、シナリオの構築、モデルの選定、データセットの設定について述べる。

7.2.1 シナリオ構築の具体的な進め方

第2次取りまとめ以降、シナリオ構築に関する主な留意点として、国際的に以下の点が合意されている（OECD/NEA, 2001）。

- ・ 可能性のあるすべてのシナリオを列挙することは不可能であることから、重大な抜け落ちがないように合理的な十分性を目指すことが肝要であること。
- ・ 評価に必要な情報を取りまとめることに加え、不足している知見の内容を明確化すること。
- ・ シナリオの構築過程や判断過程について透明性があり、方法や結果を追跡できること。
- ・ シナリオは、ステークホルダーとの対話におけるインターフェースとなりうること。
- ・ 研究開発の優先度、データ取得、資金の配分にかかわる意志決定に資すること。

上述の留意点も踏まえ、7.1.3 で述べたように、NUMO は、FEP に基づくシナリオ構築手法と安全機能を基軸とした状態設定に基づくシナリオ構築手法とを組み合わせたアプローチにより、状態設定およびシナリオの作成・分類を行う（図 7.2.1-1）。以下では、この手順に沿って、具体的な進め方を事例とともに示す。

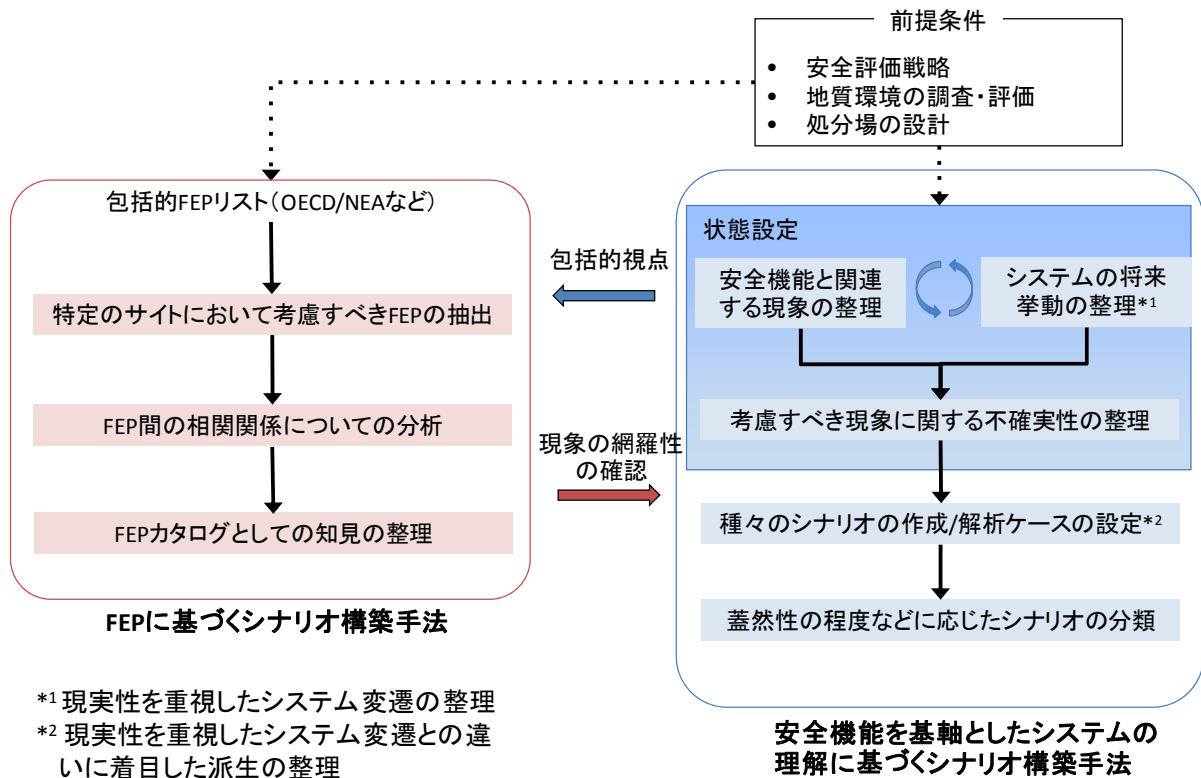


図 7.2.1-1 状態設定とシナリオの作成・分類のアプローチ

(出典：NUMO, 2011c)

状態設定に当たっては、まず、閉鎖後の閉じ込めを確保するために必要な安全機能とその機能を担う構成要素、およびそれぞれの安全機能の時間変遷を整理する。図 7.2.1-2 は、安全機能の考え方 (6.2.2 参照) に基づき、第 2 次取りまとめにおける地層処分システムを対象として期待する安全機能の時間的変遷を整理した例である。このような整理により、各時間枠で期待する機能やこれらの機能間の相互関係 (多重性や相互補完性) を明らかにすることができる。

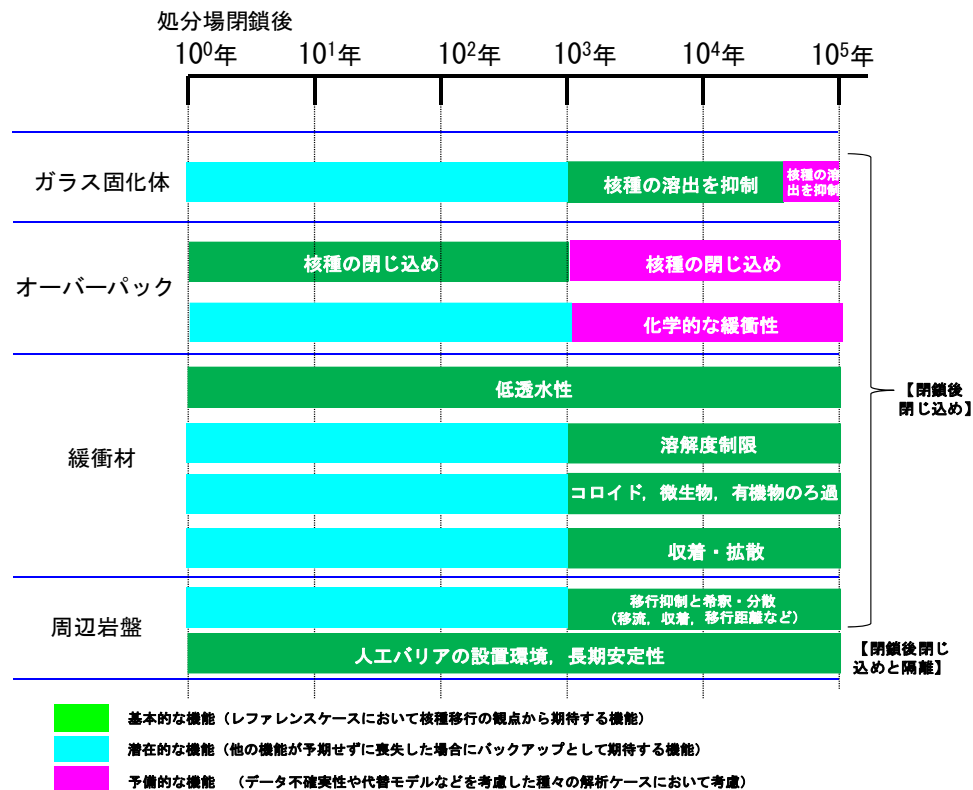


図 7.2.1-2 期待する安全機能の時間的な変遷 (第 2 次取りまとめに基づく例)

地層処分システムの将来挙動を整理する際には、安全機能に着目した上で、個々の FEP に関する最新の知見や個々の FEP が安全機能に与える影響に関する知見を取りまとめる。このためには、分野の異なる知見を取りまとめるための共通の枠組みが必要となり、NUMO はこのような枠組みとしてストーリーボードを開発している (Kurikami et al., 2009 ; Ebashi et al., 2010 ; NUMO, 2011c)。ストーリーボードは、前述した安全機能とその時間的変遷を基軸として、それぞれの時間および空間スケールにおいて安全評価上想定する地層処分システムの将来挙動を、概念図と言葉を用いて描写するものである。

図 7.2.1-3 は、自然現象の著しい影響をサイト選定により回避することを前提として、時間および空間スケールで区分した地層処分システムの蓋然性の高い状態変化と核種移行プロセスを整理したストーリーボードの例である。ストーリーボードの作成手順の概要を以下に示す (NUMO, 2011c)。

- ・ 前提条件の設定：安全評価の前提となる地層処分システムとその状態変遷を設定する。
- ・ 時間枠の設定：環境条件や安全機能の変遷を考慮して設定する。
- ・ 対象領域の設定：対象領域の空間スケールを設定する。

- ・ 各欄への記載：蓋然性が高いと考えられる現象やプロセスのうち、安全機能や感度解析の観点から安全評価上重要と考えられるものを記述する。この際、環境変遷、安全機能の時間変化、核種移行挙動について、ほかの時間枠と対象領域における記述内容の連続性を持たせて齟齬がないようにする。
- ・ そのほかの自然現象の記述：サイト選定などによって回避する自然現象の著しい影響について、各時間枠における取り扱いを記述する。
- ・ 留意事項の記述：安全評価上重要と考えられる現象やプロセスについて、知見不足などにより明言できない事項や、発生可能性を否定できないような代替的な状況、あるいは意見の一致が得られないような状況といった問題点が生じる可能性がある。これらの内容は、各時間枠における留意事項の欄に記述する。

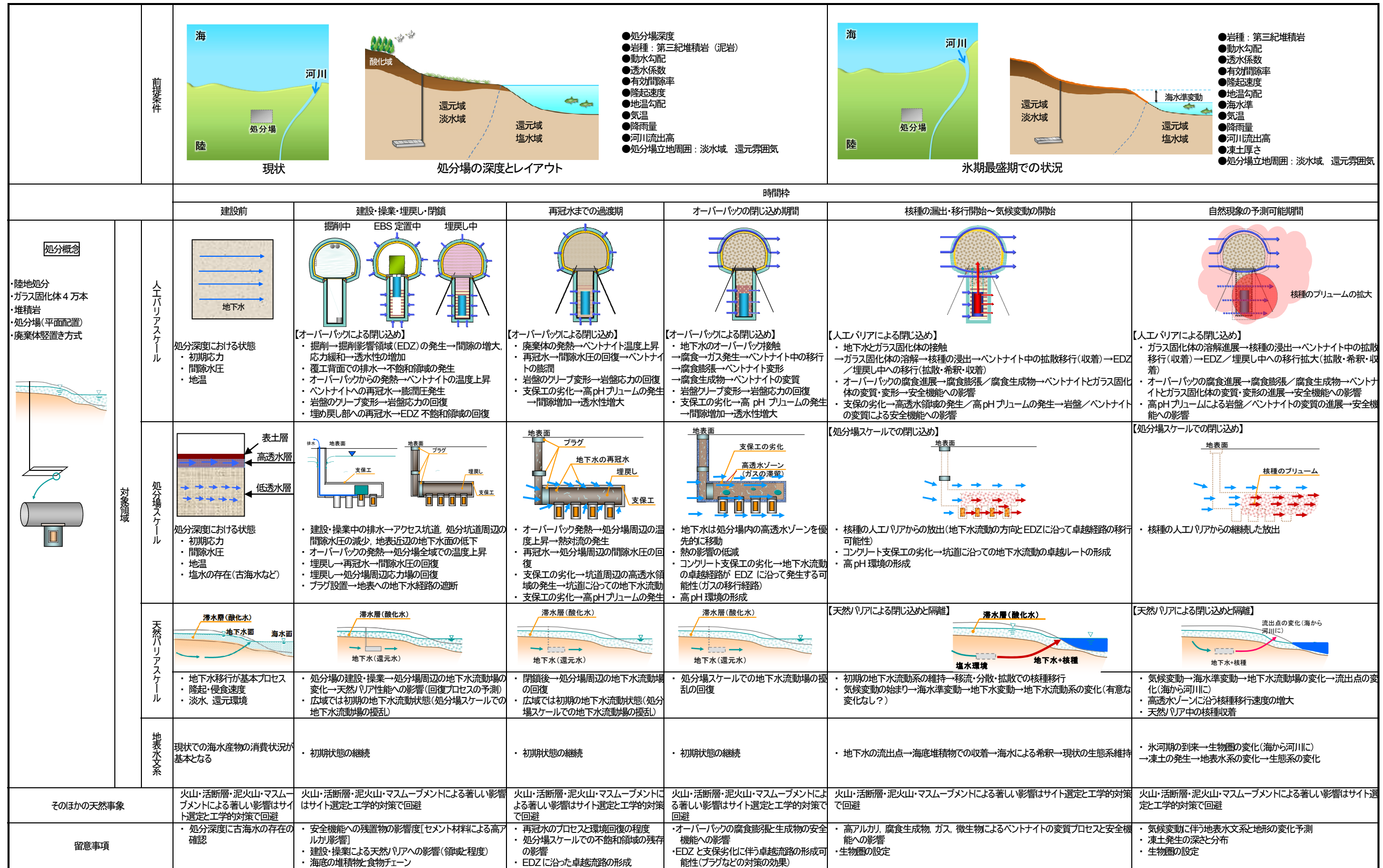
このような手順に基づきストーリーボードを作成することにより、以下の効果が期待できる。

- ・ 地質環境の調査・評価、処分場の設計、および安全評価の各分野間で理解を共有するための共通の枠組みを提供することができる。
- ・ また、ストーリーボードにおける地層処分システムの将来挙動の表現は、視覚的に捉えやすいものでもあり、非専門家も含めたステークホルダーとの対話においても、理解を共有するための道具として活用できる可能性がある。

状態設定においては、考慮すべき現象に関する知見を取りまとめ、地層処分システムの将来挙動を整理するとともに、これらの知見に含まれる不確実性についても併せて整理を行う。また、FEPについては、国際的なFEPリスト（OECD/NEA, 2000b）や国内外の事例（JNC, 1999a；電事連・JNC, 2005a, 2005b）に基づき、以下の項目と内容をFEPカタログとして整理する。この際、膨大なFEP情報から考慮すべき知見を効率的に収集するため、安全機能にかかわる現象に着眼して整理する。

- ・ 名称：対象とする現象や特性の名称を記述する。
- ・ 概要：対象とする現象や特性に対する一般的な知見やその対象範囲について記述する。
- ・ 現象間の関係：対象とする現象やほかの関連事象との関係を記述する（例えば、PID⁷⁴の作成）。
- ・ 現象、特性に関する理解の現状：対象とする現象や特性について、文献から得られた知見をまとめる。
- ・ 安全機能への影響の発生可能性と関連する不確実性：対象とする現象や特性が安全機能に与える影響を記述するとともに、考慮すべき不確実性とその範囲を記述する。
- ・ 可能性および関連する不確実性：対象とする現象に対する発生可能性について記述する。
- ・ 核種移行評価上の取り扱い：既存の知見に基づき、核種移行評価上の取り扱いについて記述する。また、更新された知見の核種移行評価上の取り扱いについても記述する。
- ・ 今後の課題：上記の整理を通じて、今後検討が必要と判断できる課題を記述する。
- ・ 文献：上記の整理において、使用した文献を記述する。

⁷⁴ プロセスインフルエンスダイアグラム（現象の影響相関図）の略称



EDZ: Excavated Disturbed Zone (掘削影響領域), EBS: Engineered Barrier System (人工バリアシステム), 高 pH プリューム: 岩盤中に形成される高アルカリ性の地下水領域
 図 7.2.1-3 ストーリーボードのイメージ (高レベル放射性廃棄物を対象とした例)

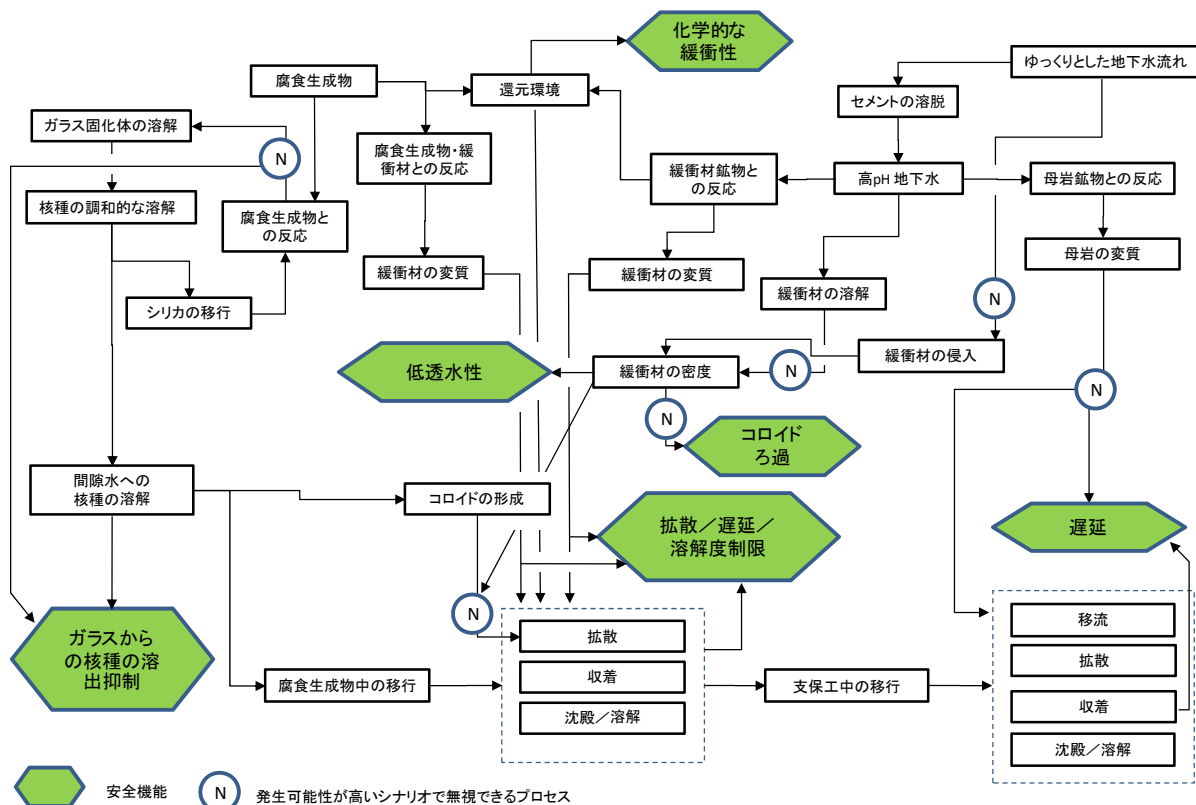


図 7.2.1-4 安全機能と関連する現象の相互関係の表現例（放射性物質の漏出・移行開始後）
 (出典：NUMO, 2011c)

種々のシナリオの構築では、状態設定と FEP カタログの整理を行った上で、ストーリーボードで定義した時間および空間スケールの区分に従い、安全機能と関連する現象の相互関係を整理する。フローチャートを用いて整理した事例を図 7.2.1-4 に示す。図 7.2.1-4 では、緑色の六角形は安全機能、四角の箱は関連する現象、矢印はそれらの相互関係、N と標記された部分は発生可能性が高いシナリオで無視できるプロセスを示している。発生可能性が高いシナリオは、N と表記された部分を除いて構築する。その構築例を表 7.2.1-1 に示す。一方、代替的なシナリオでは、N と標記された部分を発生可能性が高いシナリオに対する擾乱として、シナリオを派性させることによって取り扱う。

解析ケースの設定においては、シナリオに応じて、それぞれ長期安全性を示す上で重要な不確実性に着目して選定する。

表 7.2.1-1 安全機能および不確実性を基軸としたシナリオの表現例（放射性物質の漏出・移行開始後）
 (出典：NUMO, 2011c)

安全機能	蓋然性の高い安全機能の変遷の記述	核種移行に関連するプロセス	不確実性
ガラス固化体からの核種の緩慢な放出	<ul style="list-style-type: none"> オーバーパック破損後、ガラスマトリクス溶解とガラス固化体近傍のシリカ濃度の急速な飽和 シリカ飽和後、長期のガラス溶解はシリカ濃度に依存 	<ul style="list-style-type: none"> オーバーパック破損後、地下水がガラス固化体と接触 ガラスマトリクス溶解に伴う廃棄体に含まれた放射性物質の放出 	<ul style="list-style-type: none"> 二次鉱物の沈殿とオーバーパック腐食生成物によるシリカの共沈/収着による溶出したシリカの消費に起因したガラス溶解度の加速
オーバーパックの化学的緩衝作用	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材中の還元環境の維持 		
緩衝材中の拡散	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材の低透水性の確保による放射性物質の移行抑制 	<ul style="list-style-type: none"> 放射性物質の拡散による移行 	<ul style="list-style-type: none"> 高アルカリ地下水による緩衝材中の鉱物の溶解に起因する緩衝材密度の低下
緩衝材中の核種移行遅延	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材中を移行する放射性物質の鉱物への収着。これにより移行が遅延され、緩衝材からの短寿命核種の放出が低減される 	<ul style="list-style-type: none"> 放射性物質の緩衝材鉱物への収着 	<ul style="list-style-type: none"> 腐食生成物による緩衝材の変質と緩衝材の移行特性の低下 高アルカリ地下水による緩衝材の変質と緩衝材の遅延機能の低下
低い溶解度	<ul style="list-style-type: none"> 還元環境下ではほとんどの核種は難溶性 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水中の核種濃度は溶解度により制限 	<ul style="list-style-type: none"> 高アルカリ地下水の影響による溶解度の変化
緩衝材の化学的緩衝作用	<ul style="list-style-type: none"> 高アルカリ地下水の緩衝材への侵入によっても、緩衝材中の pH 緩衝材鉱物との反応により pH8~9 を維持 		<ul style="list-style-type: none"> 高アルカリ地下水の影響による変質に起因する緩衝材の遅延機能の低下
低透水性（地下水フラックスの制限）	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材の低透水性の確保による地下水の浸入抑制 緩衝材の膨潤による、施工時に生じたすべての隙間および開口部の閉塞。これによりニアフィールドは均質で詳細な隙間構造を確保 		<ul style="list-style-type: none"> 高アルカリ地下水の影響による変質に起因する緩衝材の透水性の上昇 二次鉱物の沈殿に起因する隙間の減少（物質移行の抑制）
母岩の核種移行遅延	<ul style="list-style-type: none"> 放射性物質の岩盤中の鉱物への収着 十分な核種移行距離の確保 	<ul style="list-style-type: none"> 母岩中における放射性物質の分散を伴う移流 地下水で移動する放射性物質は収着により移行が遅延 	<ul style="list-style-type: none"> 高アルカリ地下水の影響による変質に起因する母岩の透水性の上昇 高アルカリ地下水の影響による母岩の変質と遅延機能の低下
処分場に適した環境	<ul style="list-style-type: none"> 地下水化学特性は還元環境を維持 母岩は処分場の建設や人工バリアの定置に適した力学特性を確保 		

構築したシナリオを、影響の程度と発生可能性の観点から分類し、シナリオ区分と対応付ける。なお、構築したシナリオとシナリオ区分との対応付けは一義的に定まるものではなく、安全確保対策や時間スケールの考え方などに依存して変化する。安全確保対策や時間スケールの考え方は、サイトの地質環境特性や安全規制の枠組みに影響を受ける。これらが明確に定まっていない現段階では、安全評価において考慮すべきシナリオのそれぞれがどの区分に入るかを示すことは困難である。従って、ここでは、地層処分の安全評価においてシナリオを分類していくための考え方を示す。

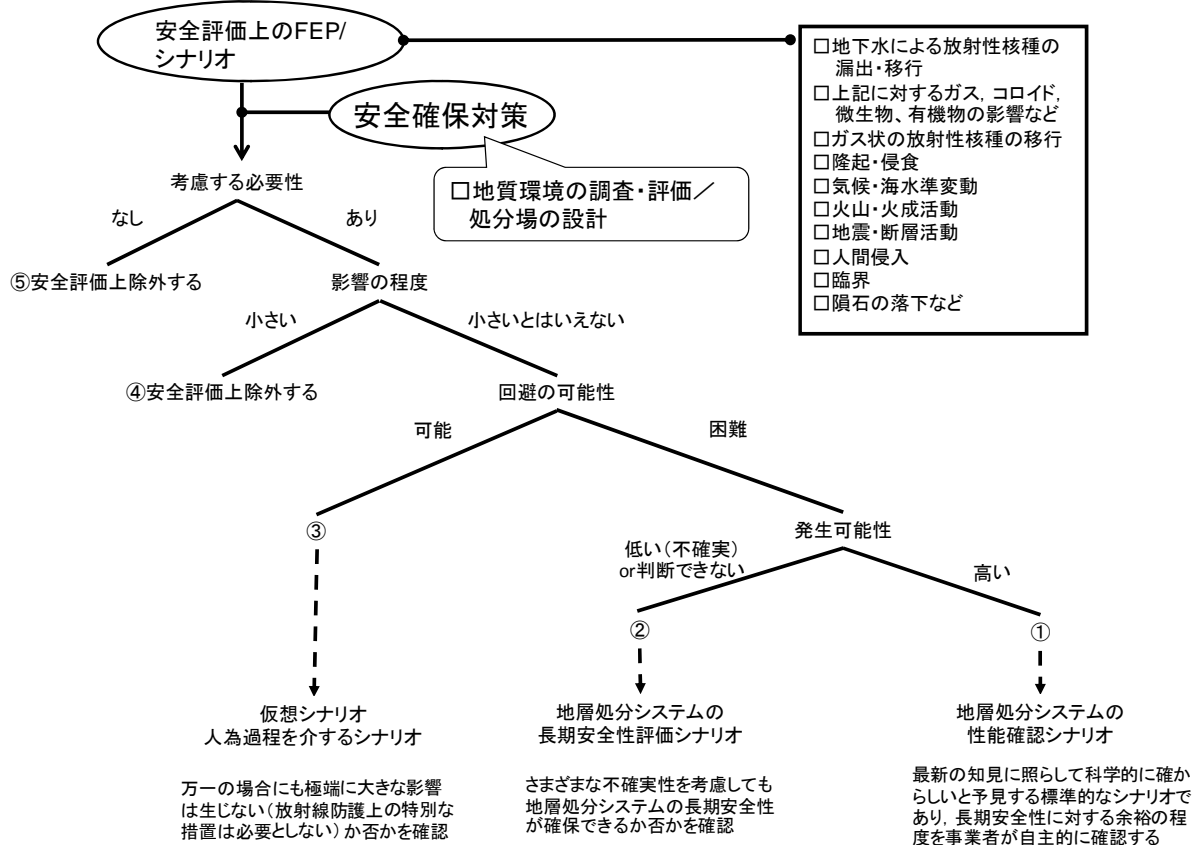


図 7.2.1-5 シナリオ分類に関する考え方

地層処分の安全評価において考慮すべき事項やシナリオは、多岐にわたる。この中には、安全評価から除外すべきことについて国際的に合意が得られているものが含まれている(図 7.2.1-5 の⑤)。また、安全確保対策などにより、地層処分システムへの影響が無視できるほど小さいと判断できるものについても、安全評価から、除外できる(図 7.2.1-5 の④)。なお、発生可能性を考慮すべきであり、かつ、影響が小さいと一般的にはいえないものについては、回避できる可能性を判断する。そして、回避が可能と考えられるものについては、仮想シナリオあるいは人為過程シナリオに分類する(図 7.2.1-5 の③)。一方、回避することが困難な事象のうち、発生可能性が高いと考えられるものについては、地層処分システムの性能確認シナリオに分類するとともに(図 7.2.1-5 の①)、発生可能性が低いものあるいは蓋然性を判断できないものについては、地層処分システムに対する不確実性あるいは変動要因として捉え、地層処分システムの長期安全性評価シナリオとして分類する(図 7.2.1-5 の②)。

7.2.2 モデルの選定とデータセットの設定に関する具体的進め方

7.1.4において述べたように、安全評価では、性能評価モデルと現象解析モデルとを階層的に準備し、用途に応じて相互補完的に組み合わせていく。これらのモデルの選定および対応するデータセットの設定に対する考え方は、多重バリアシステム（人工バリアと天然バリア）と生物圏とでは、予測に付随する不確実性の大きさが異なったものとなるため、ここでは、これらの二つに区分して具体的な進め方を説明する。

7.2.2.1 人工バリアと天然バリアのモデル

7.1.4.1で述べたように、モデルについては、性能評価モデルと現象解析モデルに大別し、これらを相互補完的に用いる。以下では、性能評価モデル、現象解析モデル、モデル間の情報の流れ、性能評価モデルに必要なデータセットの設定について述べる。

(1) 性能評価モデル

性能評価モデルは、安全機能に着目してさまざまな現象を簡略化して表現したものである（7.1.4.1参照）。期待する安全機能としては、容器による閉じ込めを含めた廃棄体からの浸出抑制、人工バリアによる核種の移行抑制、天然バリアによる核種の移行抑制が挙げられる（6.2.2参照）。性能評価モデルでは、これらの安全機能の効果を、廃棄体中の核種が生物圏に流入すると考えられる割合（生物圏への核種移行率）として定量化する。性能評価モデルは、ソースタームモデル、人工バリア中の核種移行モデルおよび天然バリア中の核種移行モデルによって構成され、それぞれに選択肢がある。これらは、地質環境特性や処分場の設計によって具体化される地層処分システムの特徴に応じて選択する。そこで、地下水中の核種移行に関する性能評価モデルおよびデータセットの構成を整理した（図 7.2.2-1）。なお、性能評価モデルを選定する際には、特定のサイトを対象とした地層処分システムに対して、不確実性や保守性に加え、その適用範囲や対象とするシナリオとの関係なども勘案して設定する。

以下では、この構成に沿って、ソースタームモデル、人工バリア中の核種移行モデルおよび天然バリア中の核種移行モデルの概要について記述する。

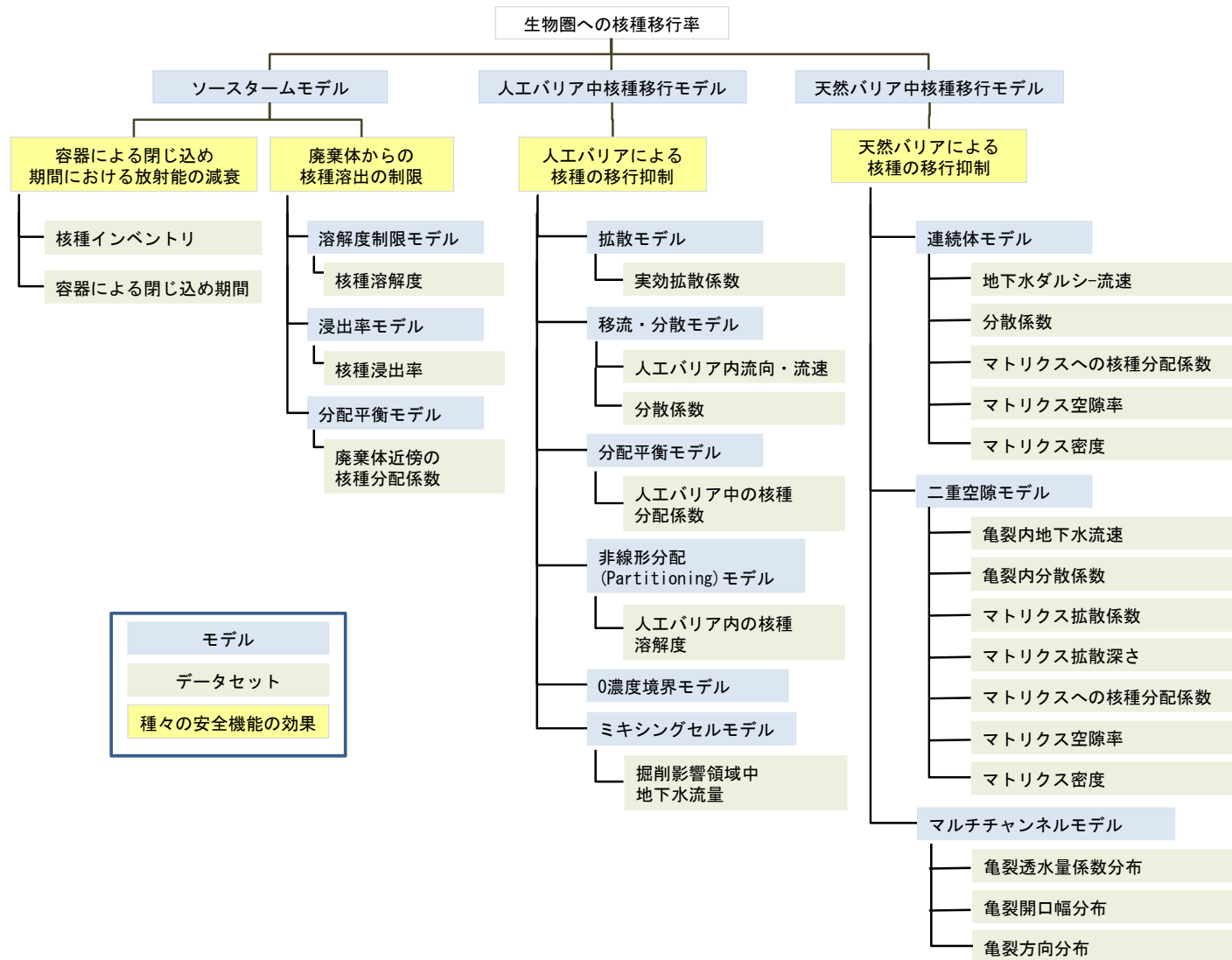


図 7.2.2-1 地下水中の核種移行に関する性能評価モデルおよびデータセットの構成例

(i) ソースタームモデル

ソースタームモデルは、廃棄体中とその近傍に存在する各核種の量（インベントリ）の時間変化を表すものである。数学モデルとして表す際には、通常、（当該核種の廃棄体中のインベントリの時間変化）＝（親核種の放射性壊変による生成）－（当該核種の放射性壊変による消滅）－（廃棄体からの核種浸出率）という微分形式となる（図 7.2.2-2）。

容器による閉じ込め期間においては、廃棄体からの核種浸出率を0とし、容器の閉じ込め機能が腐食による強度の低下などを理由に喪失した後は、廃棄体からの核種浸出率に従って核種の浸出が開始することを想定する。

廃棄体近傍の核種総量の時間変化やそれに伴う人工バリアへの核種移行率を算出するモデルは、対象とする廃棄体や核種の種類によって異なる（溶解度制限モデル、浸出率モデル、分配平衡モデル、など）。

例えば、高レベル放射性廃棄物ガラス固化体中のアクチノイドなどの難溶解性の元素の場合には、ガラスが溶解しても、人工バリア中に地下水の流れが小さく核種移行が遅いこと、および地下水化学状態が還元性雰囲気であり、溶解度制限が見込まれることから、核種の大半は沈殿して廃棄体近傍に留まるので、溶解度制限モデルを用いる。一方、可溶性の元素の場合には、ガラス固化体の溶解速度によって人工バリアへの核種移行率が制限されるため、浸出率モデルを用いる。なお、一部の TRU 廃棄物などでは、可溶性の核種が廃棄体とその近傍に収着することによって液相と固相の間に分配されることを想定した分配平衡モデルを用いる。これらのモデルは組み合わせられ、元素ごとの溶解度や廃棄体に応じて適用するモデルを選択する。

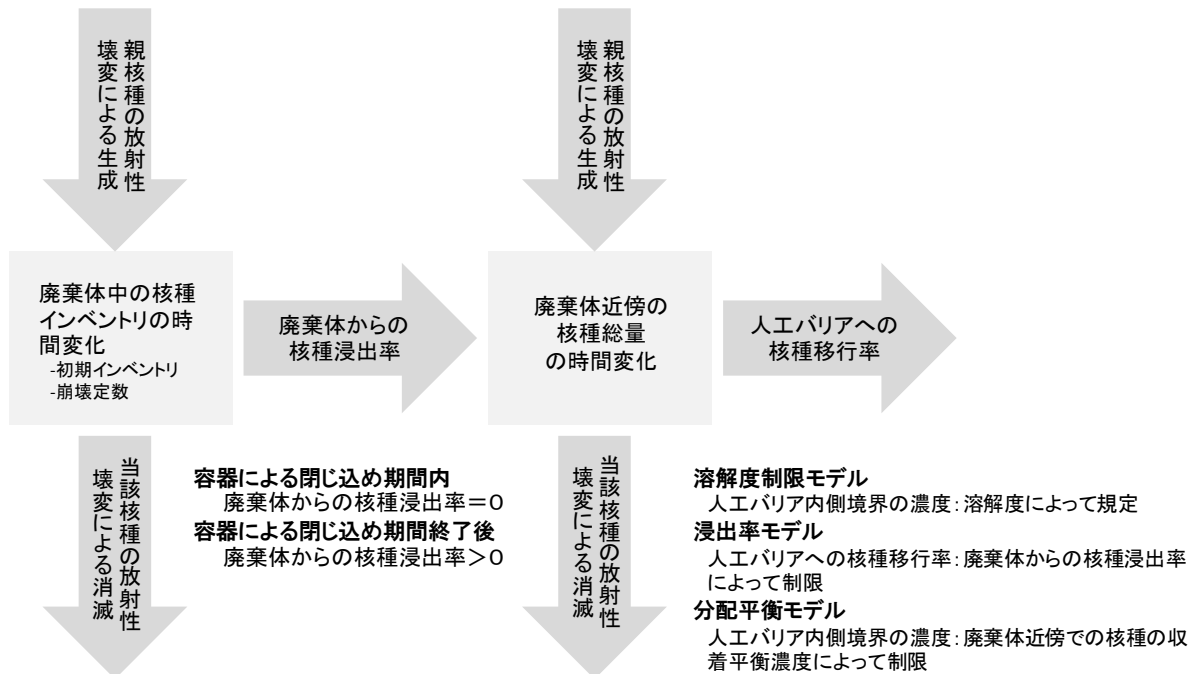


図 7.2.2-2 ソースタームモデルにおける核種量の時間変化のイメージ

(ii) 人工バリアの核種移行モデル

人工バリアの核種移行モデルは、人工バリア中の各位置における核種質量の時間変化を表すものである。数学的な定式化においては、コロイド状の核種がろ過され移行には寄与しないことを前提とすれば、(各位置での核種の質量の時間変化) = (液相中の核種の拡散あるいは分散による移動) + (液相中の核種の移流による移動) + (親核種の壊変による生成) - (当該核種の壊変による消滅) という微分形式となる (図 7.2.2-3)。

廃棄体側の条件は、前述したソースタームモデルによって決まる。具体的には、ソースタームに溶解度制限モデルあるいは分配平衡モデルを用いる場合には、廃棄体領域と人工バリアとの境界における核種の濃度が廃棄体側の条件となり、また、浸出率モデルを用いる場合には、核種の移行率が廃棄体側の条件となる。一方、母岩側の条件は、質量保存が保たれるように、後述する天然バリア中核種移行モデルと関係付けて設定する。

また、人工バリア内部の核種の移動が拡散による場合には、人工バリアの外側において0濃度であることを仮定して核種の濃度勾配を保守的に表現するモデル (0濃度境界モデル^{7.5}) や、人工バリアの外周にある掘削影響領域内の地下水流れによって人工バリアから移行した核種が瞬時に完全に混合されることを仮定して核種濃度を規定するモデル (ミキシングセルモデル) などを用いる。これらの条件を適用する場合には、必ずしも現実的とはいえない仮定を導入することにより安全評価の信頼性が低下しないようにする必要がある。掘削影響領域の状態に関する知見や解析の用途に応じて、現実性と保守性のバランスを勘案し、これらのモデルの中から適切なモデルを選択する (若杉ほか, 2004)。

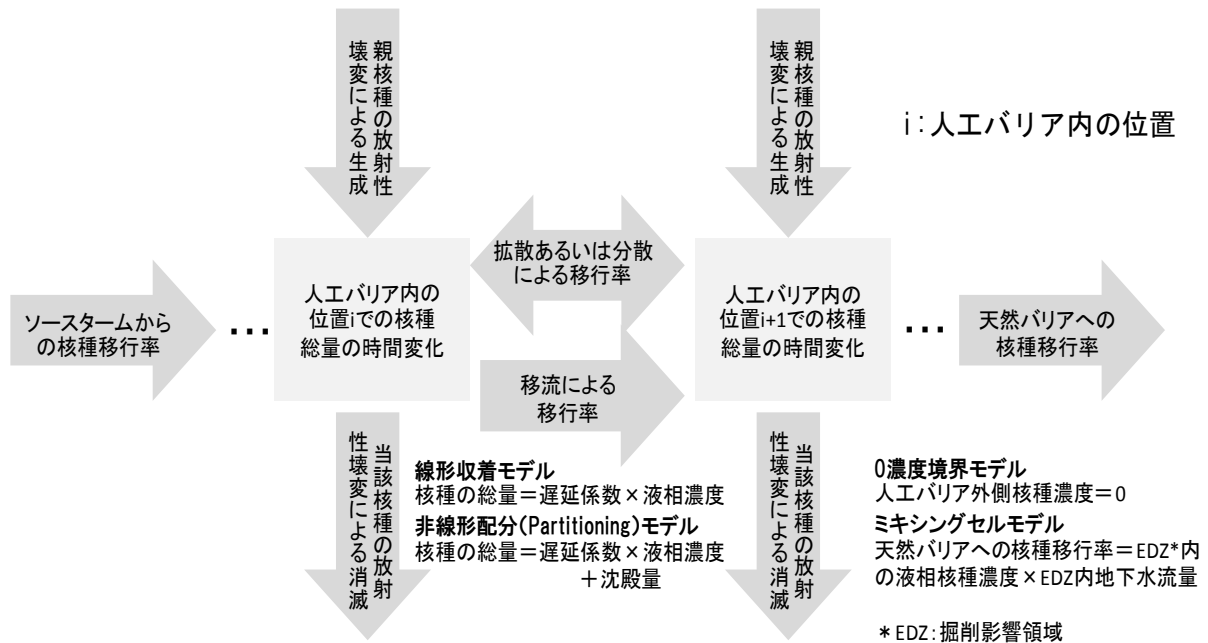


図 7.2.2-3 人工バリア中核種移行モデルにおける核種量の時間変化のイメージ

^{7.5} 0濃度境界モデルは、掘削影響領域内に核種濃度が常に0になるような非常に大きな地下水の流れが存在し、緩衝材外側に到達した核種の全量はその地下水により天然バリアへ移行することを想定したモデルである。

(iii) 天然バリアの核種移行モデル

天然バリアの核種移行モデルは、母岩中移行経路内の任意の位置における核種量の時間変化を表すものである。天然バリア中核種移行モデルとしては、多孔質媒体モデルや二重空隙モデル、または、これらの複合モデルが一般的である。また、母岩の空間的不均質性を表すモデルとして、亀裂透水量係数分布を仮定したマルチチャンネルモデルもある (JNC, 1999a)。マルチチャンネルモデルとは、複数の二重空隙媒体モデルを考慮してそれぞれに異なる亀裂内流速と亀裂開口幅とを定義したモデルである (JNC, 1999a)。

天然バリア中の各核種移行モデルの適性は、母岩の特性のほか、移行距離のスケールにも依存して変化すると考える。このような点を考慮した上で、安全評価の目的に応じてモデルを選択する。

多孔質媒体モデルは、前出の人工バリア中核種移行モデルの場合と同様、(各位置での核種の質量の時間変化) = (液相中の核種の拡散あるいは分散による移動) + (液相中の核種の移流による移動) + (親核種の壊変による生成) - (当該核種の壊変による消滅) という微分形式として定式化される (図 7.2.2-4)。ただし、地下水の流向・流速や分配係数といったデータセットは、母岩の空間的不均質性に対応して位置によって異なるものとなることがある (不均質性を表現した連続体モデル)。

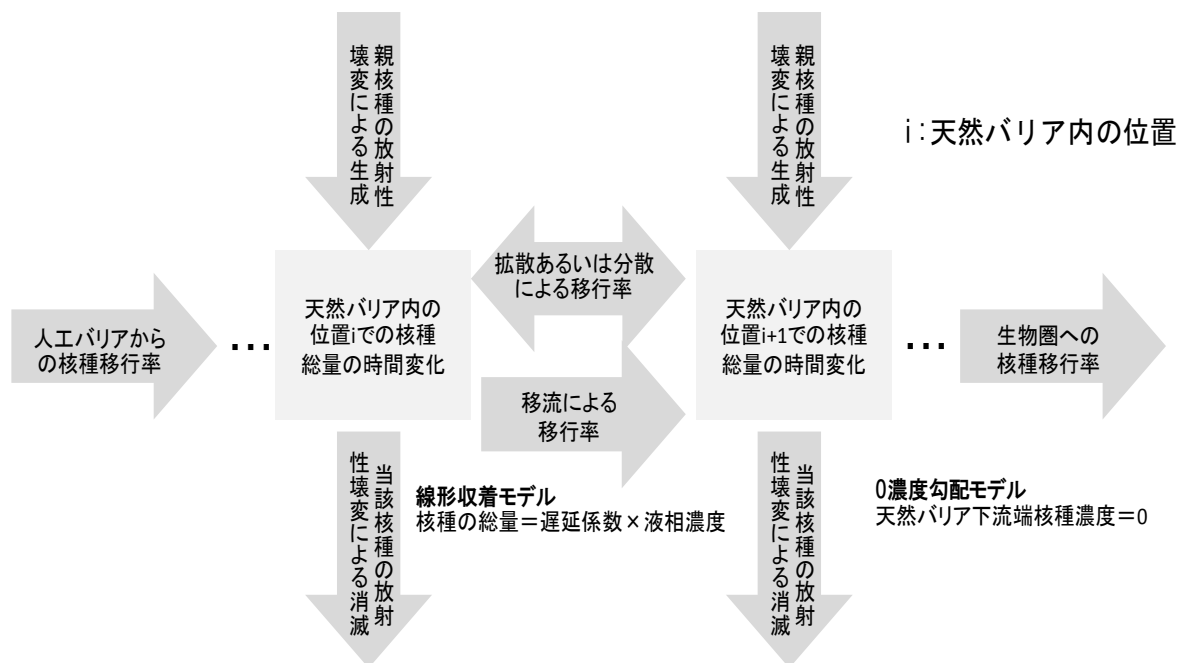


図 7.2.2-4 天然バリア中核種移行モデル (多孔質媒体モデル) の核種量の時間変化のイメージ

二重空隙モデルは、高透水性の亀裂などの主要流動経路とそれら流動経路に接する岩石基質部 (マトリクス) を考慮したモデルであり、亀裂内での移流・分散による核種移行とマトリクス内での拡散による核種移行とを連立して解く (図 7.2.2-5)。この場合には、亀裂とマトリクスに対応してそれぞれ異なる方程式が必要となり、亀裂内地下水流速、亀裂開口幅、マトリクス拡散係数、マトリクス空隙率、マトリクス密度、および、マトリクスへの核種分配係数についてのデータセットが必要となる。これらのデータセットは、母岩の不均質性を考慮して設定する。特に、特性の異なる複

数の亀裂が存在する場合には、第2次取りまとめのマルチチャンネルモデルも選択肢に含まれる。

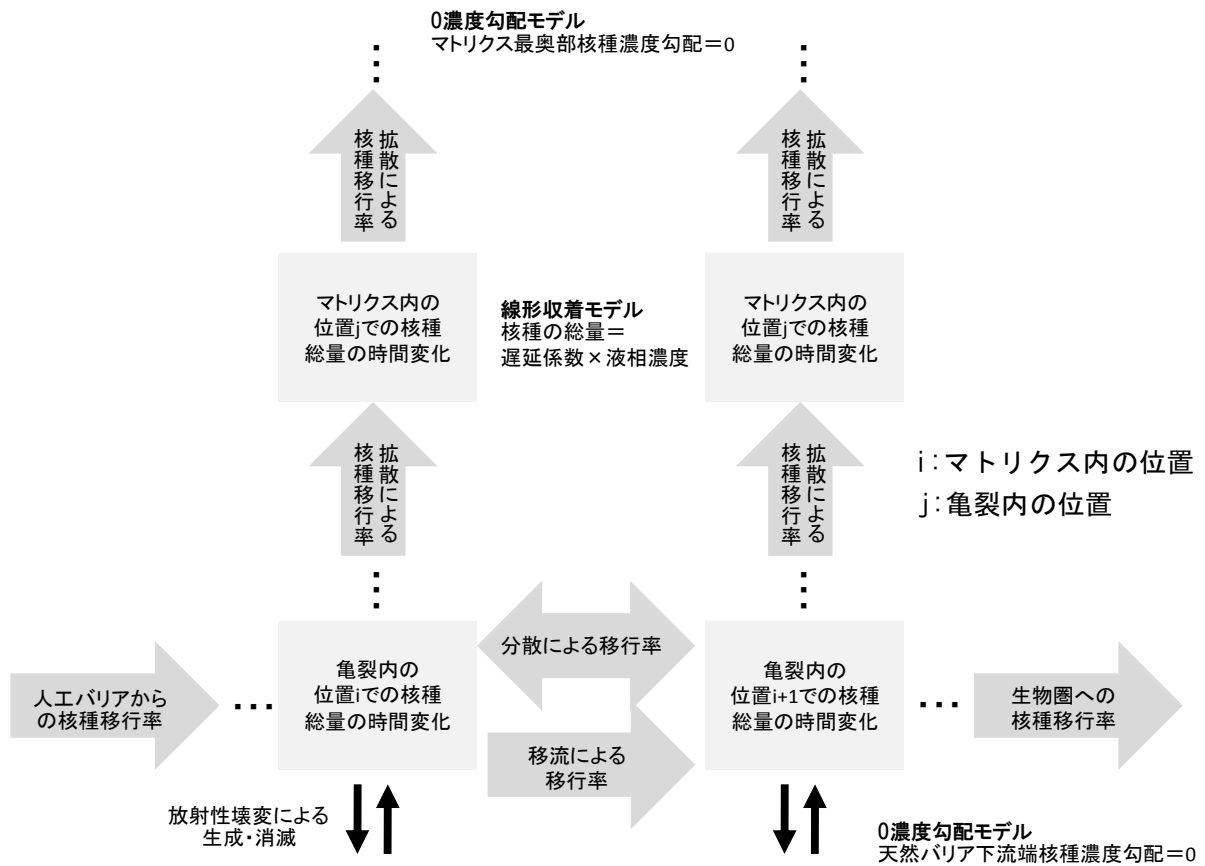


図 7.2.2-5 天然バリア中核種移行モデル（二重空隙モデル）の核種量の時間変化のイメージ

(2) 現象解析モデル

7.1.4.2 で述べたように、現象解析モデルは、性能評価モデルにおける簡略化の妥当性を示すことが主な目的である。各現象解析モデルの概要と目的（例）を表 7.2.2-1 に示す。

(3) 性能評価モデルと現象解析モデル間の情報の流れ

性能評価モデルと現象解析モデル間には、一つのモデルの計算結果をほかのモデルの入力データとするといった情報の流れが存在する。このため、安全評価において、このような情報の流れをあらかじめ整理しておくことが必要である。文献調査の段階においては、一般的に、現象解析モデルを利用する上で必要となるサイト固有の情報は少ない。一方、概要調査の段階以降では、地表調査および少数のボーリング調査と処分場の設計に関する情報が増加することから、それらを入力条件とした種々の現象解析を行うことが可能となる。そこで、概要調査の段階および精密調査の段階を対象として、現象解析モデルと性能評価モデルにおける情報の流れを整理した（図 7.2.2-6）。図 7.2.2-6 では、ソースターム、人工バリア、天然バリア、生物圏に領域を大別し、それぞれのモデルでどのような情報が主な入力となるかを整理した。

表 7.2.2-1 現象解析モデルの概要と目的 (例)

現象解析モデル	概要	目的
地下水流動解析モデル (広域)	水理地質構造モデル、涵養量および海岸や河川湖沼などの前提条件に基づき、将来の地形変化や気候・海水準変動を考慮した広域の地下水流動を把握する(定常飽和流動モデルあるいは非定常密度流モデル)	<ul style="list-style-type: none"> ニアフィールド地下水流動解析の境界条件を設定 処分地点および深度に関するオプション比較
地下水流動解析モデル (ニアフィールド)	地質環境モデルにおける母岩の不均質な透水性と設計における坑道や人工バリアの形状・特性に基づき、広域地下水流動解析の結果を境界条件として、ニアフィールド内の地下水流動を把握する(定常飽和流動モデル)	<ul style="list-style-type: none"> 核種移行解析のための詳細な流速情報を提供 廃棄体定置位置や坑道設計などに関するオプション比較
ニアフィールド 地球化学解析モデル	鉄、緩衝材およびコンクリートなどの相互作用に伴う地球化学条件の時間的変化およびバリア材料の変質を把握する(多成分反応移動解析モデル)	<ul style="list-style-type: none"> 核種溶解度や分配係数設定のために空隙水質の情報を提供 バリア材料に関するオプション比較
ニアフィールド 力学解析モデル	応力場の時間変化とオーバーパックおよびガラス固化体の変形・破壊挙動を把握する	<ul style="list-style-type: none"> 閉じ込め期間およびガラス破碎の情報を提供 人工バリア形状や仕様に関するオプション比較
ニアフィールド 核種移行解析モデル	母岩の不均質性に起因する複雑な核種移行経路やさまざまな設計オプションの影響を考慮した核種移行率を把握する(三次元核種移行モデル)	<ul style="list-style-type: none"> 性能評価モデルのデータセット設定 廃棄体定置位置や坑道設計などに関する設計オプション比較
熱-水-応力-化学 連成解析モデル	坑道掘削、廃棄体や人工バリアの設置および坑道閉鎖に起因する熱、水理、力学あるいは化学的擾乱によってその後のニアフィールドがどのように変遷するかを把握する	<ul style="list-style-type: none"> 種々の擾乱により、人工バリアの不可逆的な変質や形状変化などが生じないことを解析により確認する
ガラス溶解モデル	地下水水質や温度などの環境条件に対応したガラス溶解速度を推定する。また、時間の経過に伴う表面変質層(拡散層)の成長とそこでの物質移動律速によるガラス溶解速度の長期的減少を説明する	<ul style="list-style-type: none"> 性能評価モデルの環境条件に適したデータセットの設定 安全機能発現のメカニズムの説明(ガラスの長期的な低浸出性)
収着モデル	性能評価モデルにおける経験的な表現(分配係数)ではなく、イオン交換や表面錯体生成といった収着メカニズムについての理論的なモデルに基づき、地下水水質およびベントナイトや岩石表面の特性に応じた核種の収着量を推定する	<ul style="list-style-type: none"> 性能評価モデルの環境条件に適したデータセットの設定 安全機能発現のメカニズムの説明(岩石やベントナイトによる核種移行遅延)
溶解度モデル	各放射性元素についての溶解度制限固相とその溶解/沈殿反応および液相での液相中の化学種分布を考慮した地球化学解析によって地下水水質や温度などの環境条件に対応した溶解度を推定する	<ul style="list-style-type: none"> 性能評価モデルの環境条件に適したデータセットの設定 安全機能発現のメカニズムの説明(アクチニドなどの難溶解性)

ニアフィールド：人工バリアとその近傍の岩盤の領域

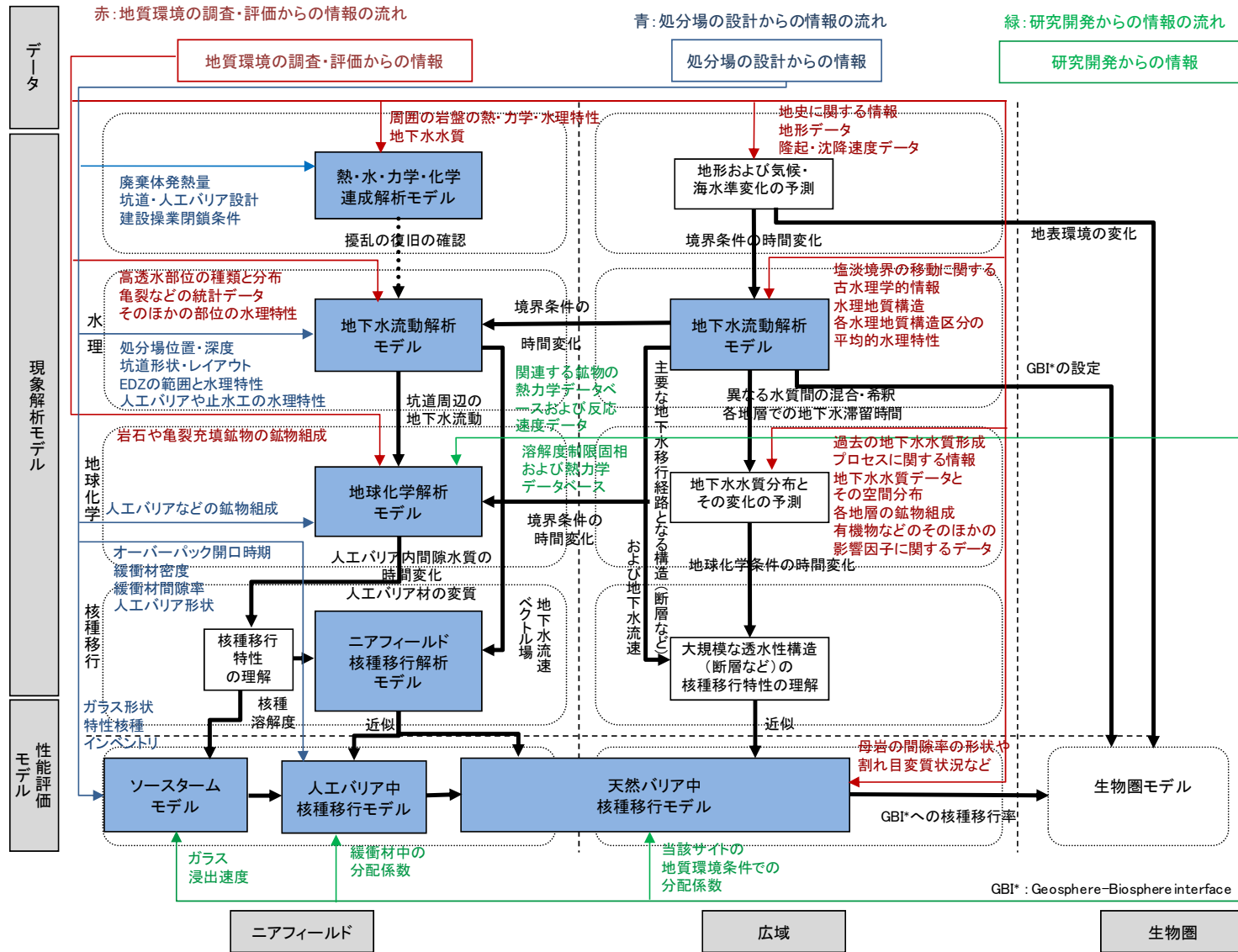


図 7.2.2-6 安全評価のためのモデルチェーンの例（概要調査の段階あるいは精密調査の段階）

(4) データセットの設定

データセットは、不確実性を考慮したシナリオやモデルに応じて、実験やデータベースなどを活用しながら設定する。図 7.2.2-1 からわかるように、人工バリアと天然バリアに対するデータはモデルに対応して多岐にわたることから、これらの整備には多大の費用と時間を要する。このため、信頼性の確保とデータ取得効率の観点から、汎用性があり共通に用いることが可能なデータベースの開発が、国際共同プロジェクトや基盤研究開発機関によって進められている。

データセットの設定においては、実験によるデータ取得、既存のデータベースの利用、現象理解に基づくモデルによる推定といった方法が考えられる（例えば、舘ほか、2009）。以下では、文献調査と概要調査を対象として、これら三つの方法に対するデータセット設定の考え方について述べる。

第2次取りまとめやそれ以降の研究開発により、種々のデータベースやデータセットが整備された（7.3.4 参照）。これらは、文献調査などから得られる情報をもとに推定される岩種や地下水の性質などに応じて、事業の初期段階におけるデータセットの設定に用いることができる。なお、サイトの地質環境特性に大きく依存しないデータについては、さまざまなサイトに対して、共通して用いることが可能である。

一方、事業が進展するに従い、サイトにおけるボーリングなどを用いた実際の調査データが得られることになる。また、地下水や岩石のコアサンプルが入手可能となり、それらを用いた室内試験が可能となる。そして、既存のデータベースや現象理解に基づくモデルを用いて、室内試験により取得されたデータとの比較分析を行い、設定値の信頼性を向上させることができる。室内試験によって取得されたデータとデータベースから得られるデータの幅との間に違いが生じる場合には、データベースのデータが有する信頼性や取得条件、および母岩が有する不均質性を考慮して、信頼性および傾向を分析する。また、調査期間の制限によってすべてのデータセットに対して十分なデータが得られない場合には、類似の環境条件で取得されたデータや既存のデータベースなどを活用する。

7.2.2.2 生物圏のモデル

安全評価においては、人間の生活環境である地表環境における核種移行プロセスと被ばくの形態（被ばく経路）を想定して、モデルの構築とデータセットの作成を行い、人間への影響を推定する。このような評価は、生物圏評価と呼ばれる（JNC, 1999a ; 電事連・JNC, 2005a）。

生物圏では、将来の人間の環境や生活様式を予測することは困難であるため、長期間安定に存在する地下深部の地質環境やそこに構築される人工バリアと比較して、予測に付随する不確実性が相対的に大きくなる。このため、地層処分を対象とした生物圏のモデル化に当たっては、IAEA の国際共同プロジェクト BIOMASS において検討されているレファレンスバイオスフィアの考え方（IAEA, 2003）を適用していくことを基本とする。レファレンスバイオスフィアは、人間生活の環境や生活様式の仮定を安全評価の目的に沿って整合性を取りながら合理的に設定し、適切な評価指標（線量など）に変換するための道具として生物圏をとらえる考え方である。この概念は、第2次取りまとめや第2次 TRU レポートなどの国内の事例に加え、米国（U. S. NRC, 2009）やスイス（ENSI, 2009）などの国外の評価事例でも取り込まれている。

生物圏モデルの主要な構成要素は、人間の生活環境とそれを取り巻く地表環境に大別される。NUMO は、これら二つの構成要素について、レファレンスバイオスフィアの考え方を適用した上で、サイト周辺の条件やわが国の一般的な知見などに基づきモデル化を行うとともに、データセットを

設定する。以下では、(原子力安全委員会, 2010) を参考としつつ、これらの二つの構成要素およびデータセット設定に対する考え方について述べる。

(1) 地表環境

生物圏の取り扱いに関しては、時間的な変遷を考慮しない場合と考慮する場合のアプローチとに大別できる (IAEA, 2003)。NUMO は、これらの二つの取り扱いを、安全評価の目的やステークホルダーからの要求や懸念に応じて適切に組み合わせながら用いる。

時間的な変遷を考慮しない場合には、現在と同様な生物圏が将来も継続するという仮定をおいて、サイトの地質環境特性に基づき、地形や地下水などを考慮して GBI (天然バリアと生物圏の境界面) や評価条件を設定し、モデル化を行う。第2次取りまとめにおいては、この考え方に基づき、幅広い地質環境特性に対応した生物圏評価が行われている (JNC, 1999a)。

一方、生物圏の時間的な変遷を考慮する場合には、将来の生物圏に変化を与え得る自然現象を考慮する。自然現象の例としては、氷期-間氷期サイクルによる気候変化、海水準変動および隆起・侵食による地形の変化などである。これらの自然現象は、放射性物質が地下水により生物圏に流入すると仮定する領域 (GBI) や被ばく経路に影響を与える可能性がある。具体的な例としては、海水準変動と隆起・侵食により、核種を収着した沿岸海域堆積層が地表となり、その土地を利用することにより被ばくが生じるといったことが想定される。このため、生物圏評価モデルは、現在の地表環境に対応したモデルから、将来の地表環境に対応した別のモデルへの変遷を考慮することになる。この際、将来の地表環境は、現在の類似した状況にある地域の事例も参照して設定する。

(2) 人間の生活様式

前述のように、将来の人間の生活環境や生活様式を予測することが基本的に困難であることから、将来の人間の生活様式については、現世代の人間の生活環境や生活様式を前提として、被ばく経路やそれに基づく人間への影響を評価する考え方を適用する。この考え方は、国際的な議論とも整合する (ICRP, 2000)。具体的には、現世代の人間の生活様式を前提に被ばく経路を想定し、それぞれの被ばく経路ごとに人への影響の程度を同じく現世代の人間の生活様式を前提に評価する。このような考え方は様式化 (stylization) といわれている (原子力安全委員会, 2010)。

また、生物圏では、決定グループ (ICRP, 2000) を設定する必要がある。決定グループは、ICRP の勧告において、「現在利用できるサイトまたは地域の情報に基づくサイト固有のアプローチか、もっと一般的な習慣と条件に基づいた様式化されたアプローチを用いて規定すべきである」としている (ICRP, 2000)。また、「様式化されたアプローチの使用は、評価の時間尺度が長くなるほど重要になる」としている。決定グループの考え方としては、第2次取りまとめと同様に、まず、移行プロセスに応じて設定された河川などの地表のさまざまな構成要素と人間との接点ごとに適切な異なるタイプの被ばくグループを想定する。その後、想定される複数の被ばくグループの中で最大の影響を受けるグループを決定グループとして設定する。

NUMO は、これらの考え方に基づいて人間の生活様式を設定し、モデル化する。この際、前項で述べたように、地表環境の時間的な変遷を考慮する必要がある場合には、この環境変遷に対応して土地利用形態などを含む人間の生活様式も変化する可能性があることから、現在の類似した状況の事例などを参考にしつつ想定する。なお、安全評価を実施すべき期間が長期にわたることを考慮して、線量以外の補完的な指標 (例えば、JNC, 1999a ; Miyahara and Kato, 2007) も視野に含めて検討す

る。また、上述した地表環境の変遷が人間の生活環境や生活様式に影響を与える可能性もあり、必要に応じてその影響を考慮する。

(3) データセットの設定

生物圏評価では、一般に、数多くのデータを取り扱い、サイトの特徴やわが国の一般的な特徴に関連するものも多く存在する。限られた資源を有効に活用して生物圏評価を行うためには、優先的に整備すべきデータを評価する必要がある。このため、生物圏評価におけるデータの重要度を把握するための作業フローを整理している（加藤ほか，2005：図 7.2.2-7）。この作業フローは、線量評価上重要な事項，重要な核種移行プロセスや被ばく経路（KIPPs：Key Issues, Processes and Pathways）の特定，および KIPPs に基づくデータの重要度の把握という二つの要素から構成されている。この作業フローを用いてデータの重要度を把握し，データセットの効率的な設定を行う。

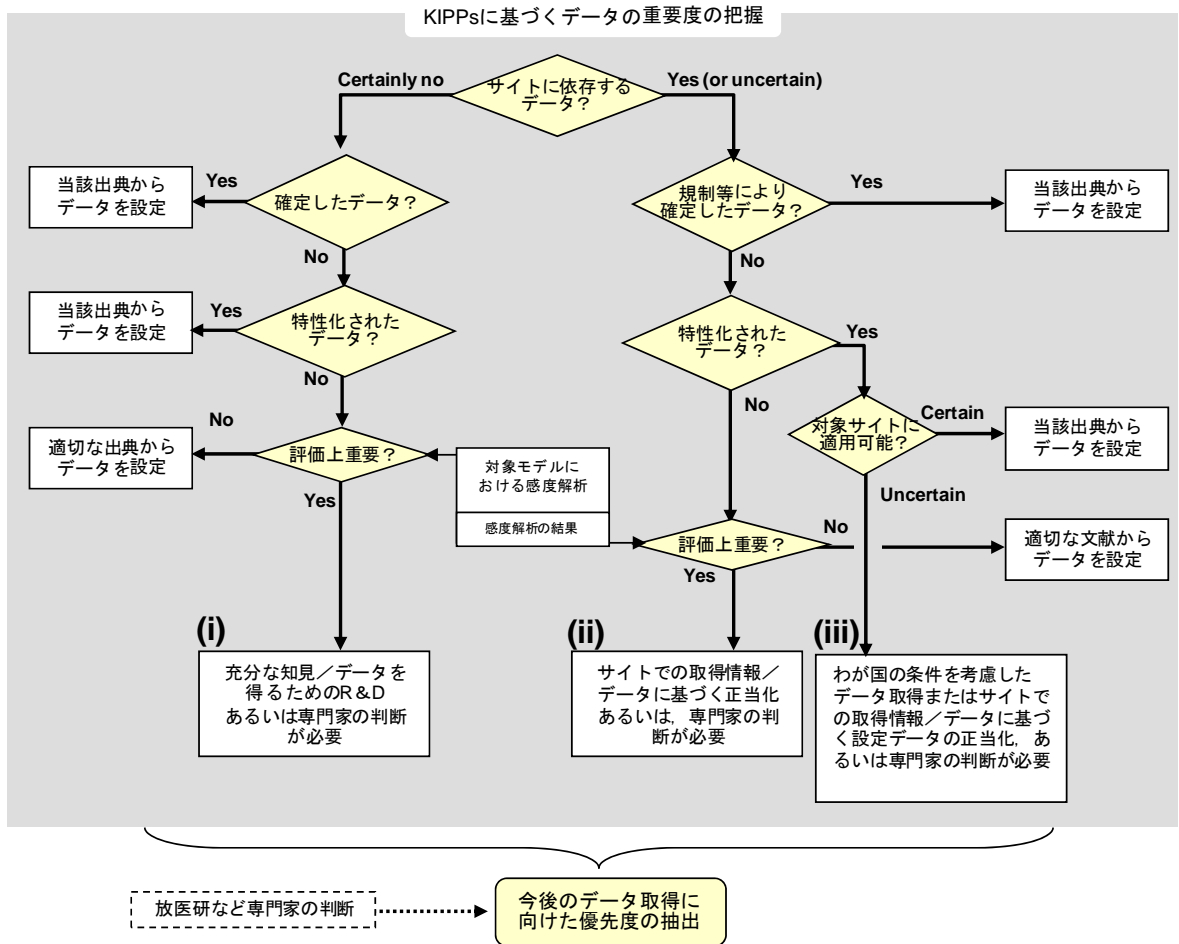
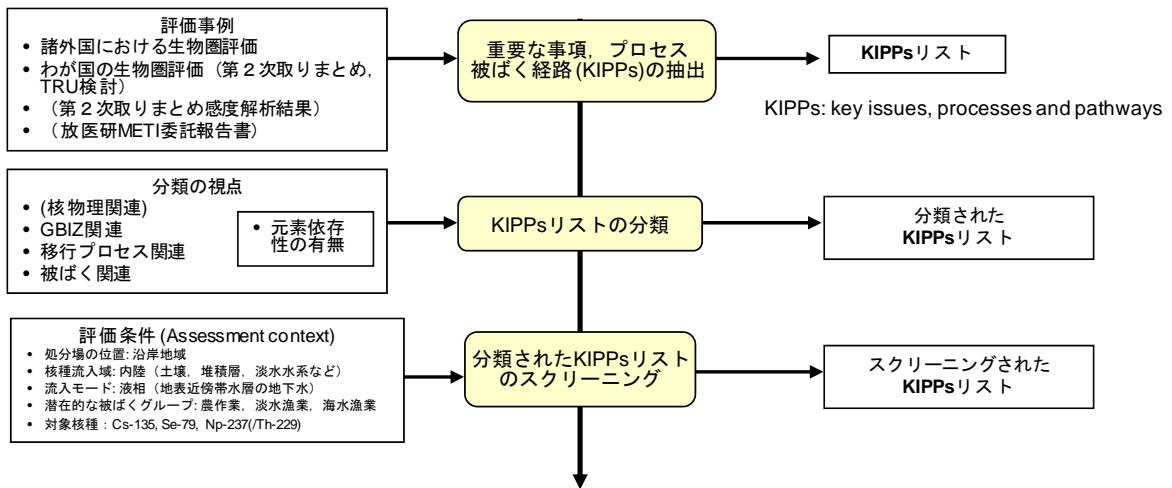


図 7.2.2-7 生物圏評価データの重要度を特定するための作業フロー
(出典：加藤ほか, 2005)

7.3 安全評価を支える技術の整備

本節では、第2次取りまとめ以降、基盤研究開発機関および NUMO が取り組んできた安全評価に関する技術の進展について概説するとともに、さらなる信頼性向上に向けた今後の課題策定の方向性についても示した。

7.3.1 安全評価に関する技術開発

基盤研究開発機関および NUMO は、第2次取りまとめ以降、事業を進める上で必要な以下の四点を考慮して、安全評価の信頼性を向上させるための研究開発および技術開発を進めてきた。

① 地質環境の多様性と長期変遷に対応できるようにすること

サイトや岩種を特定しない研究開発段階においては、わが国の一般的な地質環境を対象として、地層処分システムの閉鎖後長期の安全性が評価された（JNC, 1999a；電事連・JNC, 2005a）。一方、事業段階の安全評価においては、サイトが有する地質環境の特徴を安全評価に適切に取り込むことが必要である。事業編で述べたように、地質環境特性としては、地理、地形、地質学的にさまざまな可能性が考えられる（例えば、地理的には内陸部、沿岸部、島部、地形的には山地、丘陵、平野など）。また、地質環境特性は、隆起・侵食や気候・海水準変動などに影響を受けて、長期的に変遷する可能性がある。このため、想定されるさまざまな地質環境特性や長期変遷に対応できるように、安全評価手法を整備しておくことは、地質環境の多様性への対応という観点から重要である。

② さまざまな設計オプションに対応できるようにすること

処分場は、放射性廃棄物の特徴や地質環境の条件を考慮して、閉鎖後の安全性に加え、工学的実現性、経済性、品質保証、操業時の安全性といった種々の視点も含めた総合的な評価に基づいて、段階的に具体化・詳細化する。この総合的な評価には、廃棄体の定置方式などのさまざまな設計オプションが含まれる。サイトや岩種を特定しない研究開発段階の安全評価においては、代表的な地質環境の条件および設計条件を仮定した上で、まず、単体の放射性廃棄物に対して人工バリアと天然バリアを想定した核種移行解析を実施し、その結果に廃棄体の本数を乗じることで、システム全体の性能を保守的に評価した（JNC, 1999a）。この評価方法では、廃棄体の定置個所の違いに起因する不均質性や定置方式の違いが保守的な評価に埋没してしまい、その影響を把握することが困難である。このため、これらの特徴をより現実に即して性能評価に取り込む手法を整備しておくことは、工学的対策へのフィードバックという観点から重要である。

③ 更新される知見を適切に安全評価に取り込めるようにすること

地層処分事業は長期的なプロジェクトであり、その間に関連する種々の科学的な知見が段階的に拡充されることが想定される。このため、NUMO は、それらの知見を適宜整理するとともに、それらを適切な段階で安全評価に取り込むことができるようにしておくことが重要である。

④ 自然現象の著しい影響を仮想的に評価できるようにすること

自然現象の著しい影響については、適切なサイト選定によって回避することが地層処分事業の基本的な考え方である。しかしながら、地層処分の安全評価において対象とする時間スケールが超長期となることから、その発生時期や頻度に関する不確実性を考慮することが必要となる。①で述べ

た点に加え、この点においてもわが国の一般的な自然現象の特徴やサイト固有の特徴を考慮した上で、遠い将来における自然現象の著しい影響を仮想的に評価するための手法をあらかじめ整備しておくことは重要である。これにより、ステークホルダーからのさまざまな要求や懸念に対して応えることが可能になる。

事業段階の安全評価は、7.1.1 で述べたように、シナリオの構築、モデルの選定、データセットの整備、安全解析といった手順に沿って進める。そこで、安全評価の手順に沿って、第2次取りまとめ以降、基盤研究開発機関および NUMO が取り組んできた安全評価に関する技術の進展を整理した（表 7.3.1-1～4）。技術の進展を整理する際には、性能評価カーネル（JAEA, 2010c）および国内の文献を対象として、第2次取りまとめで取り扱っていなかったものや、今後の事業の進展に応じて活用することが有望と考えられるものに着眼した。表 7.3.1-1～4 に示した個々の技術は、本報告書ではすべてを詳細に掲載しないものの、第4章で示した技術開発ロードマップ（図 4.1.3-5）のうち、事業の安全評価を支えるジェネリックな技術開発成果に相当するものである。

本節では、表 7.3.1-1～4 に示した技術の進展のうち、上述した四つの点に直接関連する技術の進展を代表的に記述する。なお、そのほかの技術についても、さまざまなニーズに応じて適宜活用あるいは参考とすることが可能と考えているものである。

なお、第3章および7.1.3 にて述べた評価期間に関する考え方は、技術を整備する際の前提条件となるものである。しかしながら、評価期間に関するより具体的な考え方がサイトの地質環境条件や安全規制側での検討を踏まえて明確になるものであることから、本節では、評価期間の区分を設けずに技術の進展を示すこととした。

表 7.3.1-1 第2次取りまとめ以降の安全評価に関する技術の進展 (1/4)

項目		概要	文献 (あるいは本章の該当箇所)	対象領域		
				EBS	NB	BIO
状態設定と シナリオ構築	効率的なシナリオ 構築手法	安全機能に基づく状態設定に着目した作成手法と FEP に基づく作成手法を組み合わせた統合化手法の整備	NUMO (2011c) (7.2.1)	○	○	
		FEP と安全機能の関係を階層化して網羅性と効率性を向上させる手法の整備 マトリクス形式による FEP の相関関係を整理するためのツールの整備	JNC (2005) 牧野ほか (2007)	○	○	
		既存の成果に基づき、シナリオを部分的に更新していくための考え方とその適用事例の整備	稲垣ほか (2009)	○	○	
		懸念される事象の影響について、安全機能と核種移行パラメータとの連鎖で分析し、影響の重要度を分類していく考え方の整備	大井ほか (2008) Ohi et al. (2009)	○	○	
	FEP に基づくシナリオ構築手法と FEP 情報の整備	FEP のリストや各 FEP に対する知見の文献情報に基づく整理 (わが国の典型的な地質環境と人工バリアにおける地下水移行シナリオを対象) FEP 間の相関関係に対して、シナリオとして取り込む必要性や影響の有無に関する判定を実施 地層処分低レベル放射性廃棄物の安全評価に関する FEP 情報の整備	神崎ほか (2009) 電事連・JNC (2005b) (7.3.2.4)	○	○	
	長期変遷を考慮した状態設定およびシナリオ構築手法	沿岸域における地質環境の長期変遷を考慮したシステムの状態設定手法の整備	NUMO (2011c) (7.3.2.1)	○	○	
		ニアフィールドの長期変遷を考慮したシナリオ構築手法の整備	NUMO (2011c) (7.3.2.2)	○	○	
		自然現象の特徴とそれによる影響の伝播に関する地球科学的な知見を THMC (熱, 水理, 力学, 化学) の変化に着目して整理し、核種移行解析モデル・パラメータ設定へとつなげていく手法の整備	JNC, 2005 川村ほか (2008) 江橋ほか (2009b) 川村ほか (2010)	○	○	
	自然現象の著しい影響に関するシナリオ構築手法	サイト選定や工学的対策により回避することが前提となっているシナリオが発生したと仮定した場合 (what if) の性能評価上の取り扱い手法の整備	Miyahara et al. (2008)	○	○	
		自然現象の著しい影響を仮想的に評価するための手法の整備	Miyahara et al. (2009) Kawamura et al. (2010) NUMO (2011c) (7.3.2.3)	○	○	

(各研究開発成果が対象とする領域 EBS:人工バリア NB:母岩 BIO:生物圏)

表 7.3.1-2 第2次取りまとめ以降の安全評価に関する技術の進展 (2/4)

項目		概要	文献 (あるいは本章の該当箇所)	対象領域		
				EBS	NB	BIO
モデルの開発	母岩の不均質性および設計のオプションを考慮した核種移行解析モデルの高度化	掘削影響領域における核種移行および遅延をより現実的に評価するための二次元の核種移行モデルの整備	若杉ほか (2004)	○		
		母岩の不均質性や設計オプションをより現実的に評価するための三次元核種移行モデルの整備	Wakasugi et al. (2008) NUMO (2011d) (7.3.3.2)	○	○	
		処分場の合理化・最適化の設計研究開発との連携強化に向けた、処分場デザインの変化に対応可能な核種移行モデルの整備	Murakami and Ahn(2008a) Murakami and Ahn(2008b)	○	○	
		地質環境の好ましい部位に処分場のレイアウトを展開することで、地層処分システム全体の性能改善を図るアプローチの整備	高瀬ほか (2006)	○	○	
		地下水流動解析から得られる不均質な移行経路情報を核種移行解析モデルに取り込むための方法論の整備	牧野ほか (2005)			
	地表環境および地質環境の長期変遷を考慮した核種移行解析モデルの高度化	生物圏における気候変動の影響を、冷帯気候やツンドラ気候での降水量の減少に着目し、灌漑水量、浸透/流出量、食物摂取のパラメータを変更することで取り扱う生物圏評価モデルと線量への換算係数の整備	JNC (2005) 鈴木ほか (2006)			○
		帯水層などの表層環境での水理・物質移行を明示的にモデル化し、生物圏評価に取り込むための手法の整備	稲垣ほか (2007) 板津ほか (2009)			○
		沿岸域における地質環境の長期変遷を、核種移行解析モデルとして取り込むための手法の整備	NUMO (2011d) (7.3.3.1)		○	○
	核種移行解析に関する計算手法の効率化	地下水解析コード (FEGM) と核種移行解析コード (FERM) に関する改良およびエスポ地下研究施設の地下水解析・塩化物イオン濃度解析への適用	長谷川ほか (2004)		○	
		GoldSimによる統計論的な核種移行解析モデルの整備	Wakasugi et al. (2000) JNC (2005) (7.3.3.3)	○	○	
		パラメータの時間的変化を考慮した効率的な核種移行解析ツールの整備	小尾 (2010)	○	○	
		地層処分システムの応答特性を容易に把握するための近似解析解の導出	NUMO (2011a) (7.3.3.3)	○		
	データセットの整備	データの整備	ガラス溶解に関するデータベースの整備 熱力学データベースの整備 収着データベースの整備 拡散データベースの整備	林ほか (2005) Kitamura et al (2010) 館ほか (2009) 栃木・館 (2009) 栃木・館 (2010) (7.3.4.1)	○	

(各研究開発成果が対象とする領域 EBS:人工バリア NB:母岩 BIO:生物圏)

表 7.3.1-3 第2次取りまとめ以降の安全評価に関する技術の進展 (3/4)

項目		概要	文献 (あるいは本章の該当箇所)	対象領域		
				EBS	NB	BIO
安全評価データセットの整備	データの整備	ICRP1990年勧告を反映した現行法令に基づく生物圏評価対象核種に対する線量への換算係数の整備 (高レベル放射性廃棄物および TRU 廃棄物)	鈴木ほか (2006)			○
		収着や拡散に関するデータ測定方法の標準化	日本原子力学会 (2006)	○	○	
		環境移行データの整備	放医研 (2008, 2009, 2010)			○
	データセットの設定	実際の地質環境などを対象とした収着分配係数の設定の試行と JAEA の収着データベースの活用に関する手法の整備	Ochs et al. (2008) 館ほか (2009) 館ほか (2010) (7.3.4.2)		○	
		特定の地表環境条件に関する生物圏パラメータを、重要度、整備状況、入手可能性などを考慮して設定する手順の整備	Kato et al. (2009) Smith and Kato (2010)			○
		余裕深度処分安全評価における地下水シナリオで用いる核種移行パラメータのうち、土木工学に関係の深い事項を中心として、関連する知見および設定の考え方に関する整備	土木学会 (2008)	○	○	
		具体的な地質環境情報を用いたデータセット設定の試行 (間隙水数, 分配係数)	牧野ほか (2005)	○	○	
	地層処分低レベル放射性廃棄物の安全評価のための核種移行データセットの作成	Mihara and Sasaki (2005) (7.3.4.3)				
安全解析	感度解析手法	評価結果に対して影響が大きいパラメータやそれらの定量的な条件を抽出する手法の開発	若杉ほか (2002) JNC (2005) Ohi et al. (2007) 江橋ほか (2009a) (7.3.3.3)	○	○	
		生物圏評価で重要な GBI (Geosphere-Biosphere Interface) の設定に影響を与える不確実性要因の整理 多数の生物圏評価パラメータの中から重要度の高いパラメータを特定するための手法の整備	JNC (2005) 加藤ほか (2005) 加藤・鈴木 (2008) Kato et al. (2009) Smith and Kato (2010)		○	○
	補完的指標	表層での希釈水量などの不確実性を排除するための、処分場起源の放射性核種のフラックスと天然のフラックスを比較する手法の整備 天然放射性核種の濃度とフラックスにかかわるデータ収集・整理および集水域に着目した天然放射性核種のフラックスの算出方法の整備	Miyahara and Kato (2007) JNC (2005) IAEA (2005)		○	○

(各研究開発成果が対象とする領域 EBS:人工バリア NB:母岩 BIO:生物圏)

表 7.3.1-4 第2次取りまとめ以降の安全評価に関する技術の進展 (4/4)

項目	概要	文献 (あるいは本章の該当箇所)	対象領域		
			EBS	NB	BIO
他分野との連携	具体的な地質環境が対象として与えられた場合の地質環境の調査・評価から核種移行解析に至る一連の作業手順の例示	牧野ほか (2005)	○	○	
	幌延深地層研究計画における不確実性を考慮した安全評価手法の検討	高瀬ほか (2007)		○	
総合的な安全評価 (手法を含む)	我が国の一般的な地質環境を対象とした地層処分低レベル放射性廃棄物に対する総合的な安全評価	電事連・JNC (2005a)	○	○	○
	第2次 TRU レポートにおいて示された課題に対する検討結果や新たに得られた知見を用いて、システムの頑健性の程度や実現性を検討	NUMO (2011a)	○	○	○

(各研究開発成果が対象とする領域 EBS:人工バリア NB:母岩 BIO:生物圏)

7.3.2 シナリオの構築に関する取り組み

7.1 および 7.2 において述べたように、NUMO は、特定のサイトを対象とした地層処分システムなどの前提条件に応じて、状態設定を行い、シナリオを作成する。ここでは、7.3.1 に示した四つの点に直接関連するシナリオの構築に関する技術開発成果として、以下の項目に関する概要について記述する。各技術を開発した背景については、それぞれの冒頭において簡潔に述べる。

- ・ 沿岸域における地質環境の長期変遷を考慮したシステムの状態設定手法
- ・ ニアフィールドの長期変遷を考慮したシナリオ構築手法
- ・ 自然現象の著しい影響を仮想的に評価するためのシナリオ構築手法
- ・ FEP に基づくシナリオ構築手法および FEP 情報の整備

7.3.2.1 沿岸域における地質環境の長期変遷を考慮したシステムの状態設定手法

事業編で述べたように、地質環境特性として、地理、地形、地質学的にさまざまな可能性が考えられる。このうち、沿岸域では、特に、内陸部に比べて、海水の影響や塩淡境界の変遷などを、隆起・侵食や気候・海水準変動などの自然現象と関係付けながら考慮する必要がある。このような特徴を考慮した安全評価手法を整備しておくことは、地質環境の多様性および長期変遷への対応という観点から重要である。

ここでは、これらの特徴を踏まえて、地質環境の長期変遷に関するシステムの状態設定について例示する。具体的には、沿岸域の特徴を考慮したシステムの状態設定手順（図 7.3.2-1）を整理するとともに、それらを例題に適用した内容について記述する（NUMO, 2011c）。

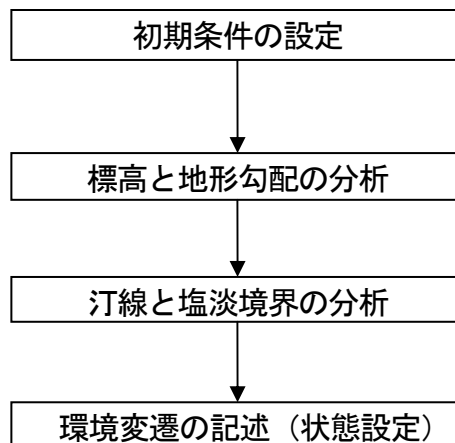


図 7.3.2-1 沿岸域を対象とした地質環境の状態設定の手順

まずは、初期条件として、仮想的な沿岸域の地質環境（表 7.3.2-1）を設定し、標高、海底の地形勾配、処分場深度の減少について分析した。この際、侵食速度の不確実性を考慮して、侵食速度が隆起速度と等しいとした場合（ケース a）と侵食速度を 0 とした場合（ケース b）を想定した。

表 7.3.2-1 初期条件の設定例

項目	値	備考
海水準変動の周期	10 万年 海退：7.5 万年 海進：2.5 万年	参考：過去数 10 万年程度については 10 万年程度の明瞭な周期性が認められている（JNC, 1999b など）。
海水準変動の範囲	現在の海水準～-120m	参考：過去数 10 万年程度の海水準は、現在の水準と比較して、+数 m～-120m程度の範囲で変動している（JNC, 1999b など）
地形勾配	5%	—
隆起速度	0.5 mm/y	参考：藤原ほか（2005）によれば、日本列島における隆起速度は最大 1mm/y 程度であり、中でも 0.6 mm/y を超える地域は分布が限られる。
侵食速度	<隆起速度>	参考：JNC（1999b）など
地温勾配	3°C/100m	参考：日本における平均的な地温勾配

その上で、ケース a を対象に、母岩の透水性によって、海水準変動への塩淡境界の追随性の違いを、以下のように類型化した（表 7.3.2-2）。

- ① 母岩の透水性が十分高く、海進・海退のいずれにおいても、汀線の移動に追随しガイベンヘルツベルグ平衡の位置にある（パターン 1）
- ② 海退時には汀線の移動に追随しガイベンヘルツベルグ平衡の位置にあるが、海進時には追随できない（パターン 2）
- ③ 母岩の透水性が低く、海進・海退のいずれにおいても汀線の移動に追随できない（パターン 3）
- ④ 母岩の透水性が極めて低く、塩淡境界はほとんど移動しない（パターン 4）

表 7.3.2-2 母岩の透水性に応じた塩淡境界の追随性

パターン	母岩の透水性	塩淡境界の追随	
		海進への追随	海退への追随
1	高	○	○
2	中	×	○
3	低	×	×
4	極低	—	—

なお、一般的に、地下深部における塩淡境界の位置は汀線の位置と一致しない。そこで、パターン 3 を例として、汀線および塩淡境界の変化を整理した（図 7.3.2-2）。このような整理により、沿岸域の環境が、対象とする時間において、海底下にあるか、陸側にあるか、塩水環境にあるか淡水環境にあるかを把握することができる。

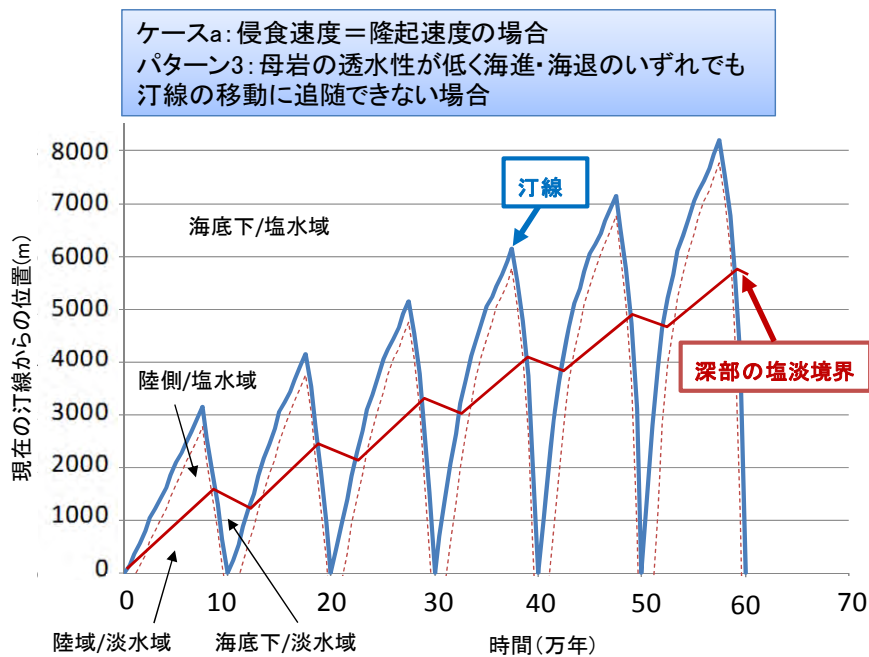


図 7.3.2-2 汀線および塩淡水境界の変化を整理した例 (パターン3)

侵食速度を0と仮定したケースbにおいても、同様の類型化を行うことが可能である。この場合には、すでに述べたように、一定期間を経過すると、処分場を含む領域は離水し、完全に陸域の環境へと推移する (NUMO, 2011c)。

前項において述べたように、将来の気候・海水準変動および隆起・侵食の複合的な影響によって生じる沿岸域での環境変遷は、ある程度類型化することが可能と考える。

一方、ニアフィールドについては種々の安全機能を期待することになり (6.2.2), これらの安全機能の性能は、熱的条件, 水理条件, 力学・物理条件, および化学条件といった環境条件に影響を受ける。従って、ここで整理する環境変遷は、ニアフィールドのシナリオを構築する上での前提条件となるものであるとともに、ニアフィールドの環境条件がどのような現象によって時間とともに推移するかという視点から整理することが効果的と考える。そこで、ケースaのパターン3 (図7.3.2-2) を例として、ニアフィールドの前提条件として着目すべき処分場周辺の環境条件と、気候・海水準変動や隆起・侵食による環境条件への影響因子とを整理した (表 7.3.2-3)。

表 7.3.2-3 ニアフィールドの前提条件として着目する環境条件および影響因子

環境条件		影響因子
熱的条件	・ 地温	・ 隆起・侵食による深度減少
水理条件	・ 地下水流向分布 ・ 地下水量分布 ・ 圧力分布	・ 隆起・侵食による地形変化 ・ 海水準変動による動水勾配の変化 ・ 塩淡水境界の移動による流向・流速の変化 ・ 気候変動による涵養量の変化
力学および物理条件	・ 地圧 ・ 水圧	・ 隆起・侵食による深度減少 ・ 海水準変動による基準面の変化
化学条件	・ 地下水水質	・ 塩淡水境界の移動による水質変化 ・ 異なる水質間での混合

表 7.3.2-3 に挙げた観点に着目して、期間4～期間6を対象とした状態設定の例を表 7.3.2-4 に示す。状態設定は、不確実性を考慮して、安全評価上、地層処分システムが将来どのように変遷するかを記述することを目的としたものである。ここでは、図 7.3.2-3 に示した環境変遷のパターンに従い、時間および空間を以下のように区分した。

- ・ 空間区分：現在の標高-750mにおいて汀線から沖合 3km～5km に展開される処分場領域の中で、汀線からの距離に応じて環境変化に時間的なずれが生じることから、処分場領域を陸側、中央部および沖合側の三つに区分する。
- ・ 時間区分：上記の三つの処分場領域において環境変化の生じる 2 回目～6 回目の海水準変動のそれぞれにおいて処分場よりも汀線が陸側にある期間と海側にある期間とを区分する。

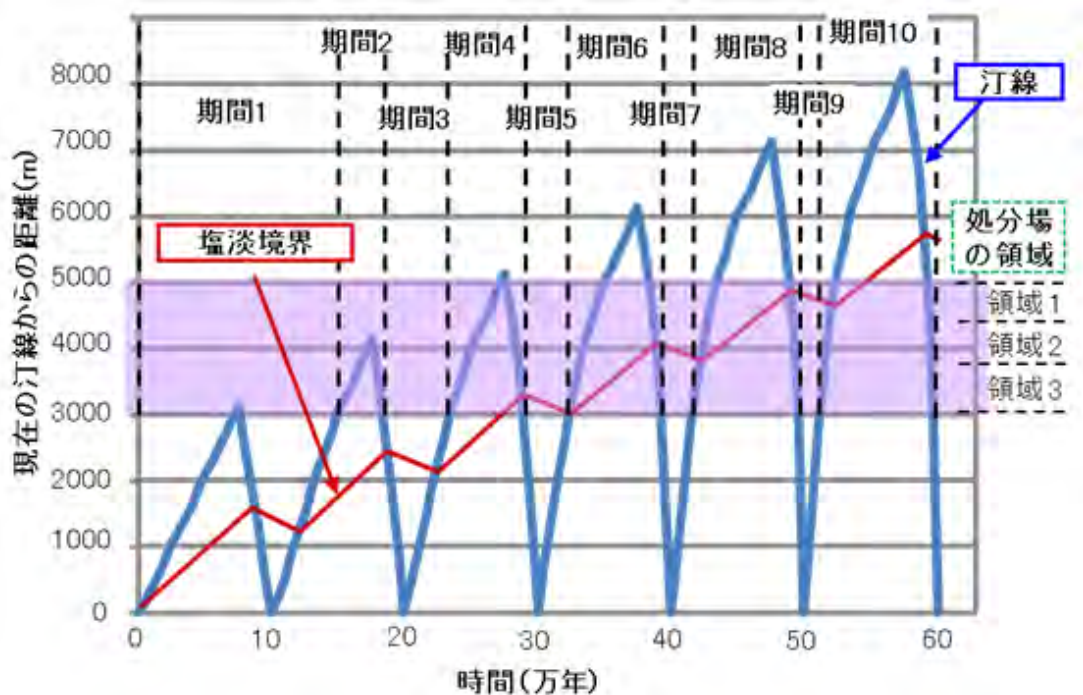


図 7.3.2-3 状態設定のための時間・空間区分

以上の検討を通じて、沿岸域における海水の影響や塩淡水境界の分布の時間的な変遷をより現実的に取り扱うためのシステムの状態設定手法を例示した。本検討により、沿岸域におけるシステムの頑健性を検討する際に重要となる将来の気候・海水準変動および隆起・侵食というような要素を抽出し、これらの複合的な影響によって生じる地形変化、汀線や塩淡水境界の移動といった沿岸域での環境変遷を踏まえた評価が可能となった。

表 7.3.2-4 気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に関する状態設定の例（ケース a：パターン3）

		期間 4	期間 5	期間 6
領域 1	熱的条件	深度減少により 10 万年間で 1.5°C 程度低下		
	水理条件	汀線よりも陸側，塩淡水境界よりも海側にあり，海側に向かった遅い流れ	海底下で海退時には沖合に，海進時には陸側に微小な流動	汀線および塩淡水境界よりも陸側にあり地形勾配による比較的速い流れ
	力学条件	10 万年間で地圧が数 MPa 程度低下		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	降水起源の地下水
領域 2	熱的条件	深度減少により 10 万年間で 1.5°C 程度低下		
	水理条件	汀線よりも陸側，塩淡水境界よりも海側にあり，海側に向かった遅い流れ	海底下で海退時には沖合に，海進時には陸側に微小な流動	汀線よりも陸側，塩淡水境界よりも海側にあり，海側に向かった遅い流れ
	力学条件	10 万年間で地圧が数 MPa 程度低下		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）
領域 3	熱的条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず温度は変化しない		
	水理条件	汀線よりも陸側，塩淡水境界よりも海側にあり，海側に向かった遅い流れ	海底下で海退時には沖合に，海進時には陸側に微小な流動	汀線よりも陸側，塩淡水境界よりも海側にあり，海側に向かった遅い流れ
	力学条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず地圧は変化しない		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）

（矢印は，地下水の流向と大きさを表す）

7.3.2.2 ニアフィールドの長期変遷を考慮したシナリオ構築手法

(1) 背景と目的

7.3.1において述べたように、地層処分事業では拡充された知見の整理とその長期の安全性に与える影響の把握が必要である。そこで、研究開発などにより得られた最新の知見をシナリオ構築へどのように取り込んでいくかについて、ニアフィールドの長期変遷に関するシナリオ構築を例として示す。

ニアフィールドを構成する人工バリアや周辺母岩は、核種移行を抑制するバリアとして機能する。このため、地層処分システムの将来挙動を記述することは、処分場の設計にも影響を与えるため、重要である。そのため、基盤研究開発機関は、第2次取りまとめ以降、ニアフィールドにおける長期的変遷が人工バリアや周辺母岩へ及ぼす影響の理解を深めるために、研究開発を継続的に進めている(6.6.2 参照)。また、ニアフィールドは、サイト固有の地質環境に依存する程度が、天然バリアと比較して、相対的に小さい。このため、特定のサイトがない現段階においても、ニアフィールドを対象とした技術開発を先行的に進めることは、特定のサイトの特徴を的確に取り込んでいくための起点を準備するという観点から有用である。

ここでは、上記の点を踏まえ、ニアフィールドを対象として、シナリオを構築する上で前提とする考え方を示すとともに、新たな知見を考慮して状態設定およびシナリオの構築を行う手順について例示する。

(2) 状態設定のアプローチ

状態設定は、不確実性を考慮して、安全評価上、地層処分システムが将来どのように変遷していくのかを記述することを目的としたものである。具体的には、地質環境の調査・評価によって明らかになる地質環境条件や処分場の設計によって具体化する処分施設・人工バリアの仕様を取り入れつつ進める。なお、サイト調査および設計が状態設定に基づき行われるものでもあるため、反復的に進めるものでもある。

地下水による放射性核種の漏出と移行を想定した場合のニアフィールドでの閉じ込めは、核種移行率の低減および移行を遅延する間の放射能の減衰を目指すものであり、6.2.2において述べたように以下に挙げる安全機能が作用するものと考えられる。

- ・ 放射性物質の浸出抑制（固化マトリクスによる浸出抑制、発熱が著しい期間の地下水接触の防止など）
- ・ 放射性物質の移行抑制（放射性物質の溶解度制限、移流による移行の抑制、コロイド移行の防止・抑制、収着による放射性物質の移行遅延、分散による移行率の遅延など）

安全機能を設定して設計を行うためには、状態設定を考慮して進めることになる。状態設定の手順を以下に示す。

- ① 地下水による放射性物質の浸出・移行に関連する地層処分システムの特長（以下、特長という）あるいは現象を抽出する。
- ② 抽出した特長と安全機能とを対応付け、各安全機能を地層処分システムのどの部位に期待するかを明らかにする。

- ③ 特性に影響を与えるような地層処分システムの環境条件（以下、環境条件という）を抽出する。
- ④ 環境条件の変遷に関与するような具体的な現象（以下、条件への影響因子という）を抽出する。
- ⑤ 地質環境の特徴や処分施設・人工バリアの仕様を踏まえ、「条件への影響因子」によって生じる「環境条件」の変遷、環境条件の変遷に対応した「安全機能に寄与する特性」の振る舞いについて、当該時点で得られる最適の科学的知見を整理する（FEP カタログ）。また、科学的知見に含まれる不確実性要因を抽出する。
- ⑥ 上述の整理を踏まえ、システムの状態設定を行う。

①～④では、核種移行挙動、安全機能に寄与する現象、環境条件および環境条件への影響因子（これらを総括して、以下、状態設定に関連する FEP という）について、地層処分システムの構成要素および安全機能と対応付けながら整理する。第2次取りまとめのレファレンスケースにおける人工バリアの概念および7.3.2.1で示した環境条件を対象として、状態設定に関連するFEPを整理した(表 7.3.2-5 および表 7.3.2-6)。なお、⑤については、既存の FEP 情報を適用した（神崎ほか、2009）。

⑥については、時間スケールや空間スケールに配慮すること、分野間の情報の整合性を確保すること、および視覚的に理解しやすいものとすることに留意する。安全機能を基軸とした状態設定に関する現象およびそれらの相互作用に着目しつつ、ニアフィールド環境がどのように変遷するかについて安全評価上の設定を行った（表 7.3.2-7）。

状態設定を作成する際には、期間を区分する。この区分は、安全機能を視軸として、放射能の減衰、人工バリア材の変質、地質環境や地表環境の変遷およびこれらに関する不確実性の増大などに留意して決定する。ここでは、安全機能のうち、オーバーパックによる発熱が著しい期間の地下水接触の防止に着目して、第2次取りまとめ以降更新された知見を踏まえて設定した。

第2次取りまとめ以降のオーバーパック腐食に関する研究開発では、人工海水などを用いた10年間にわたる長期浸漬試験が実施され、還元環境での炭素鋼の全面腐食速度が $2\mu\text{m/y}$ 未満であり、第2次取りまとめの設定値 $10\mu\text{m/y}$ よりも十分に低いことが示されている（谷口ほか、2008；6.6.2.2参照）。このため、オーバーパックの開口時期は、第2次取りまとめのレファレンスケースの設定（1,000年）以上の寿命が期待できる可能性があることに着目し、ニアフィールドの環境変遷を、安全確保上の意義の観点から以下の三期間に区分した。

- ・ 期間Ⅰ：坑道閉鎖後の過渡期（坑道閉鎖～1,000年後）
- ・ 期間Ⅱ：オーバーパック開口までの期間（1,000年後～1万年後）
- ・ 期間Ⅲ：1万年後～10万年後

表 7.3.2-5 安全機能を基軸とした状態設定に関する現象の整理例（安全機能と関連する条件）

安全機能		特性	関連する条件	
安全機能 (閉鎖後閉じ込め)	放射性物質の浸出抑制	発熱が著しい期間の地下水の接触防止	<ul style="list-style-type: none"> ・ 耐食性 ・ 力学的強度 ・ 構造的健全性 ・ 溶接部耐食性 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水質 (pH, Eh および主要な塩分濃度など) ・ 緩衝材水分飽和度 ・ 温度 ・ 放射線 ・ 外荷重 (水圧, 地圧など)
		ガラスマトリクスによる浸出抑制	<ul style="list-style-type: none"> ・ ガラス固化体の低浸出性 ・ 核種の難溶解性 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水質 (pH, Eh および主要元素濃度など) ・ 温度 ・ 地下水流速
	放射性物質の移行抑制	収着による放射性物質の移行遅延	<ul style="list-style-type: none"> ・ 緩衝材への核種の収着 ・ 岩石への核種の収着 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水質 (pH, Eh および主要元素濃度など) ・ 緩衝材の鉱物組成 ・ 岩石の鉱物組成 ・ 亀裂充填鉱物
		放射性物質の溶解度制限	<ul style="list-style-type: none"> ・ 溶解挙動 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水質 ・ 温度
		移流による移行の抑制	<ul style="list-style-type: none"> ・ 拡散 ・ 分散 ・ 緩衝材の止水性 ・ 岩盤の低透水性 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 緩衝材の材料組成と乾燥密度 ・ 緩衝材中のギャップおよび割れ目の有無と形状 ・ 母岩マトリクス部の透水性 ・ 母岩中の亀裂特性 ・ 坑道掘削影響領域の透水性

* 「コロイド移行の防止・抑制」および「アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制」については、適切な対策により確保されていることを前提とする

表 7.3.2-6 安全機能を基軸とした状態設定に関する現象の整理例（条件と条件への影響因子）

条件		条件への影響因子（現象）
熱的条件	温度	<ul style="list-style-type: none"> ・ ガラス固化体の発熱 ・ 熱伝導（人工バリアおよび岩盤） ・ 蒸発および水蒸気の移動
水理条件	地下水（実）流速	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地下水飽和流動（定常流れ，密度差による非定常流れ）
	緩衝材水分飽和度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 再冠水 ・ 蒸発および水蒸気の移動
力学的条件 （物理条件を含む）	母岩マトリクス 坑道掘削影響領域の透水性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 岩石の変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿） ・ 地下水流動 ・ 岩盤の割れ ・ 応力場の変化による亀裂開口幅の変化 ・ 亀裂表面および充填鉱物の変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿）
	圧力（水圧，地圧およびそのほかの応力）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 岩盤クリープ ・ 緩衝材の膨潤 ・ 炭素鋼の腐食膨張
	緩衝材中ベントナイト有効密度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 緩衝材の膨潤 ・ 緩衝材の化学的変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿） ・ 緩衝材の侵食
化学条件	埋め戻し材中ベントナイト有効密度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 埋め戻し材の膨潤 ・ 埋め戻し材の化学的変質 ・ 埋め戻し材の侵食
	水質（pH, Eh および主要塩分濃度など）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地下水水質形成 ・ 地下水 - 岩石反応 ・ 微生物および有機物の反応 ・ 作業時の空気の侵入 ・ Fe の腐食および腐食生成物と水の反応 ・ 緩衝材と水の反応 ・ セメント系材料の溶脱・変質
	緩衝材の鉱物組成	<ul style="list-style-type: none"> ・ 緩衝材の化学的変質
	岩石の鉱物組成（亀裂充填鉱物，亀裂表面，マトリクス（変質部，未変質部など）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 岩石の変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿） ・ 亀裂表面および充填鉱物の変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿）

表 7.3.2-7 ニアフィールドにおける状態設定の例

		期間 I : 処分場閉鎖～1,000 年後	期間 II : 1,000 年後～1 万年後	期間 III : 1 万年後～10 万年後
システムの 状態		<p>坑道掘削時に生じた割れ目 コンクリート支保 ギャップ オーバーパック ガラス固化体作製時の割れ 鉄鉱物や微生物による酸素の消費 ベントナイト膨潤による自己シール 緩衝材ブロック 温度勾配 水分飽和度</p>	<p>溶脱し変形/破壊したコンクリート ベントナイトの圧密 水酸化物イオンやCaの拡散 腐食生成物による膨張 炭素鋼の水素発生型腐食 ガラスの破碎 鉄・ベントナイト反応による変質層 鉄イオンの拡散 高pHでの溶解/二次鉱物沈殿による変質層</p>	<p>マトリクス拡散 核種移行 コロイドろ過 変形/開口したオーバーパックと腐食生成物 ガラスの溶解と変質層の成長 難溶性核種の沈殿 緩衝材への核種収着 拡散による核種移行 核種移行による核種移行</p>
安全確保上の 意義		<p>廃棄体発熱および処分場建設・作業時に導入された空気の影響（不飽和領域形成および酸性条件への推移）がなくなり核種の閉じ込めに適した地下深部本来の条件が回復する。ベントナイトの膨潤により一様な圧縮応力場が形成され、緩衝材中および隣接したバリアとの間のギャップが閉塞することで、物質移動が拡散によって支配される場が確保される。</p>	<p>炭素鋼と緩衝材、緩衝材とコンクリート支保という異なる材料を配置した場合、熱力学的に安定ではないため、材料間の溶質移動と化学反応に伴い、環境に対してより整合的な二次鉱物の境界層が形成され、間隙が閉塞することで、地球化学的に定常となる。オーバーパックの水密性により、地球化学的に定常となるまで廃棄体中に核種が閉じ込められる。</p>	<p>オーバーパック開口後ガラス固化体が接液し溶解と核種の浸出が開始する。アクチニドなどの濃度は溶解度で制限され超過分は沈殿する。オーバーパックの外側では期間 II までに達成された定常的な場において拡散による核種移行が生じる。この際、核種は鉄腐食生成物や緩衝材（二次鉱物を含む）に収着され遅延される。</p>
環境 条件	T	<p>廃棄体の発熱により温度が上昇するが緩衝材中の最高温度は100℃以下である。放射能の減衰により数百年後には地温程度にまで低下。</p>	期間 I の定常状態が継続する	
	H	<p>坑道閉鎖後岩盤中の地下水の圧力水頭が回復し、緩衝材への浸透が生じる。岩盤透水係数が小さい場合には緩衝材冠水に数10年を要する。</p>		
	M	<p>緩衝材の膨潤によりギャップが閉塞し一様な圧縮場となる。岩盤中の応力条件が変化し、坑道のクリープ変形が生じる。</p>	<p>オーバーパックの腐食による強度低下および腐食膨張による緩衝材圧密によってオーバーパックが変形し開口に至る。ガラスの破碎が進む。</p>	<p>炭素鋼の腐食膨張が継続し緩衝材の圧密およびガラス固化体の破碎が継続する。</p>
	C	<p>閉鎖時に残留した酸素はオーバーパック、緩衝材中の鉄鉱物や微生物によって速やかに消費される。</p>	<p>Fe イオンによる変質（内側）および高 pH 条件での変質（外側）により緩衝材の境界部に變質層が形成され間隙が閉塞に向かう。</p>	<p>ガラス溶解により核種が浸出する。ガラス近傍での水の放射線分解によって生じる酸化剤は鉄腐食生成物によって消費されるために還元環境が維持される。</p>

T : 熱的条件 H : 水理条件 M : 力学条件 C : 化学条件

(3) シナリオ作成のアプローチ

状態設定に基づき、安全評価上想定すべきシナリオを作成する。それぞれのシナリオにおいては、環境条件の変遷、安全機能の時間的变化、核種移行挙動を相互に矛盾なく記述する。

シナリオの構築に当たっては、安全評価上想定するシナリオについて合理的な十分性を確保する(7.1.3)。そこで、事象の連鎖としてのシナリオを展開する際に、データのばらつきや知識の不足などに起因して、複数の代替的なシナリオを選択肢として考慮せざるを得ない個所(シナリオ分岐)を抽出する。ただし、合理的な十分性とは、長期安全性を主張する上で遺漏がないという意味である。具体的には、以下のように時間区分と様相区分を設定して、安全評価上の有意な違いを明確にすることで、効率的にシナリオを構築する。

- ・ 時間区分：安全機能を視軸として、放射性廃棄物中の放射能の減衰、人工バリア材の変質、地質環境や地表環境の変遷およびこれらに関する不確実性の増大などの観点からの評価期間を区分する。
- ・ 様相区分：安全機能に期待できる性能および核種移行挙動への影響の観点から環境条件を定性的に区分した様相を定義する。

7.3.2.1 で示した沿岸域を対象としたシステムの状態設定を境界条件として、ニアフィールドを対象に上記の時間区分および様相区分を行った(表 7.3.2-8)。なお、時間区分については、状態設定(表 7.3.2-7)と同じものを想定している。

これらの区分のもとに、各時間区分において、環境条件、安全機能に関する性能、および核種移行挙動のすべてが同じ様相にあるような二つのシナリオは、同じものとして取り扱うことができる。逆に、どこかの時間区分において、一つでも異なる様相にあるような状況が発生する場合には、シナリオの分岐として取り扱う。なお、分岐の妥当性については定量的な解析を行う段階で感度解析を行って確認する必要がある。

前述の状態設定(表 7.3.2-7)に基づき 10 万年後までを対象として、蓋然性が高いシナリオの例を整理した(表 7.3.2-9)。なお、第2次取りまとめでは、人工バリアは期待する安全機能を発揮することなどを前提とした基本シナリオに対して、相互比較のための参照としてレファレンスケースを設定した上で、人工バリアに対するさまざまな解析ケースを想定した安全解析が実施されている(JNC, 1999a)。この安全解析では、データ不確実性ケースや代替設計ケースなどが設定され、人工バリアからの移行率にそれほど大きな影響を与えないことが示されている。蓋然性が高いシナリオの例(表 7.3.2-9)は、第2次取りまとめにおける人工バリアに対するさまざまな解析ケースに含まれるものであり、その影響は顕著ではないことが示唆される。

ここでは、研究開発などにより得られた最新の知見をシナリオへどのように取り込んでいくかについて、ニアフィールドの長期変遷を例として、安全機能に基づく状態設定に着目した手法を示した。これにより、最新の知見の考慮や地質環境の多様性への観点から、合理的にシナリオを構築するための起点を整理した。

表 7.3.2-8 高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールド環境条件の様相区分の例

環境条件		様相の区分
熱的条件	温度	標準（地温程度）／やや高（ガラス溶解促進・核種移行特性変化）／高（緩衝材熱変質）
水理条件	処分孔周辺の地下水流速	低（ニアフィールドの核種移行が母岩中の拡散によって支配される）／中（母岩中の移流によって支配される）／高（緩衝材中の拡散によって律速される）
	緩衝材水分飽和度	乾燥（施工時よりも低下した状態）／初期値／飽和
	母岩マトリクス部の透水性	標準（拡散支配となる状態）／高（移流支配となる状態）
	坑道掘削影響領域の透水性	小（処分孔周辺地下水流速低）／初期状態（同中）／大（同高）
力学的条件	圧力（水圧、地圧およびそのほかの応力）	低（標準以下）／標準（水圧＋容器腐食膨張後の緩衝材膨潤圧）／高（標準以上）
	緩衝材中ベントナイト有効密度	低（初期値以下）／初期値／高（初期値以上）
	緩衝材中ギャップ・割れ目	なし／あり
	埋め戻し材中ベントナイト有効密度	低（初期値以下）／初期値／高（初期値以上）
	埋め戻し材中ギャップ・割れ目	なし／あり
化学条件	水質（pH）	低（標準以下）／標準（地下水－緩衝材反応の平衡状態）／高（標準以上）
	水質（Eh）	還元性／酸化性
	緩衝材のベントナイトのタイプ	Na型／Ca型
	緩衝材中の初期成分以外の鉱物割合	低（初期不純物の反応・溶解）／初期状態／高（二次鉱物の沈殿）

（標準や初期値以上あるいは以下として定義する様相については、FEPカタログに含まれる過去の解析や検討の事例および予察な解析の結果などを踏まえ、安全評価の観点から「有意な」差異とみなすべきしきい値を設定する。）

表 7.3.2-9 高レベル放射性廃棄物に対する蓋然性が高いシナリオの例（ニアフィールド）

		閉鎖後 1,000 年間	1,000 年~1 万年後	1 万年~10 万年後	
核種 移行	核種の溶解	—	—⇒○	○	
	核種の拡散	—	—⇒○	○	
	核種の移流・分散	—	—	—⇒○(母岩のみ)	
安全 機能	発熱が著しい期間の地下水接触の防止	○	○⇒—	—	
	ガラスマトリクスによる浸出抑制	△	△⇒○	○	
	収着による放射性物質の移行遅延	△	△⇒○	○	
	放射性物質の溶解度制限	△	△⇒○	○	
	移流による移行の抑制	△	△⇒○	○	
環境 条件	熱	温度	やや高⇒標準*1	標準	
	水 理	処分孔周辺地下水流速	中		
		緩衝材水分飽和度	初期値⇒飽和*2	飽和	
		母岩マトリクス透水性	標準		
		掘削影響領域透水性	初期状態		
	力 学 物 理	圧力	低	低⇒標準*3	標準
		緩衝材ベントナイト有効密度	初期値	初期値⇒低*4	低
		緩衝材中ギャップ・割れ目	あり⇒なし*5	なし	
		埋め戻し材ベントナイト有効密度	初期値	初期値⇒低*6	低
		埋め戻し材中ギャップ・割れ目	なし		
	化 学	水質 (pH)	標準	標準⇒高*7	高⇒標準*8
		水質 (Eh)	酸化性⇒還元性*9	還元性	
		緩衝材のベントナイトタイプ	Na 型	Na 型⇒Ca 型*10	Ca 型 (境界部のみ)
		緩衝材中初期成分以外の鉱物割合	初期状態	初期状態⇒高*11	高

注1：安全機能の「○」は安全機能として期待していることを、「△」はほかの機能のバックアップとして期待していることを、「—」は機能が期待していないことを示す。

注2：表中のピンク色の網掛けは様相変化が生じる個所を示す。

注3：環境変遷の要因；*1（廃棄体発熱量低下・熱伝導）、*2（緩衝材再冠水）、*3（緩衝材膨潤・容器腐食膨張）、*4（アルカリ条件でのベントナイト溶解）、*5（緩衝材膨潤・自己シール）、*6（アルカリ条件でのベントナイト溶解）、*7（セメント反応・水酸化物イオンの拡散）、*8（セメント溶脱による C/S 比低下）、*9（残留酸素の散逸・Fe などとの反応による消費）、*10（境界部のみ、セメント反応・Ca の拡散・イオン交換）、*11（アルカリ条件での二次鉱物沈殿）

7.3.2.3 自然現象の著しい影響を仮想的に評価するためのシナリオ構築手法

地震・断層活動および火山・火成活動については、わが国において一般的に発生し得ると考えられる規模の地震などを除いて、適切なサイトを選定することで著しい影響を回避することが基本である。従って、一般的には、地震・断層活動および火山・火成活動については、適切なサイト選定を行うことを前提としつつも、対象とする時間スケールが超長期となるため、その発生時期や発生可能性に関する不確実性を考慮しなければならない。このため、わが国の一般的な特徴やサイト固有の特徴を考慮した上で、遠い将来において自然現象の著しい影響を仮想的に評価するための手法を整備しておくことは必要である。

以上を踏まえ、ここでは、自然現象がシステムに与える影響を仮想的に評価するための技術基盤を整備することを目的として、地震・断層活動を例としたシナリオ構築手法について記述する (NUMO, 2011c)。

(1) 力学的影響

断層・破砕帯の構造については、変位量の大部分を受け持った部分と、その周辺の割れ目などが発達した力学的損傷領域 (ダメージゾーン) に区分する定義が一般化している。地下深部で新たな断層が発生する場合、断層の発生直後はまだ後者の領域は発達していないが、その後、断層運動が繰り返されることにより、その幅は 100~200m 程度までに達する可能性がある。

また、断層・破砕帯のように歪みが局所的に集中している部分の周辺にも、歪みが (先行的に) 発生している変形領域が広範に分布することが想定される。そのような変形領域内には微小亀裂の発達や既存亀裂の変形などが想定される。

(2) 化学的影響

断層の新生により、地表から涵養される地下水との化学的相互作用などにより、角礫や砂状の破砕物などの比表面積の大きい部位の変質が進むと考える。

(3) 熱的影響

地震性の断層活動による摩擦熱により温度の上昇が生じることがある。摩擦熱により上昇する断層周辺の温度は、熱の影響を受けた断層ガウジ (細粒・未固結の断層内物質) の鉱物組成などにより推定されることがある。野島断層の断層ガウジの研究では、過去には 400~450°C 以上で 5 分間に相当する摩擦熱を被り、最近では少なくとも 300~350°C で約 5 分間に相当する摩擦熱を被った可能性が推定されている (Fukuchi et al., 2007)。

(4) 水理学的影響

断層活動の水理学的影響としては、地震に伴う地下水圧 (水位) の変化と、破砕帯の形成に伴う透水構造の変化が挙げられる。地震に伴う地下水圧の変化は、一般的には一時的なものであり、変化量も通常の季節変化の範囲内に収まるとされている (Ishimaru and Shimizu, 1997)。破砕帯の透水性については、結晶質岩や堆積硬岩の場合、透水性が母岩より低い部分と、高い部分からなり、後者が前者を挟むように分布するサンドイッチ構造をなすことが多い (例えば、Wibberley and Shimamoto, 2003)。

(5) 地層処分システムへの影響

前項に述べた知見に基づき、将来、処分場を横切る断層が新生した場合、断層によって直撃される廃棄体については、廃棄体や人工バリアの破壊といった直接的な影響が生じるものと考えられ、それ以外の廃棄体についても、地下水流動や地下水水質の変化といった間接的な影響が生じることが想定される。断層の新生時の地下水流動パターンとしては、還元性深部地下水の上昇（シナリオ1）、および酸化性地表水の引き込み（シナリオ2）を設定した（図 7.3.2-4）。

シナリオ1の場合、新生断層から一定の範囲内にある廃棄体については母岩中の移行距離が短縮されるが、それ以上離れた廃棄体については移行距離は不変と考える。なお、断層および母岩中の地下水は還元性である。一方、シナリオ2の場合、新生断層を通じて深部に下降した地表水は処分場を通過してほかの既存の透水性断層などに至り、そこから地表に向かうという保守的な仮定をおく。ここで、断層割れ目帯と交差するものも含めすべての廃棄体について核種移行距離は不変と仮定することができる。なお、このシナリオでは母岩および断層中の地下水は酸化性であるものと想定する。

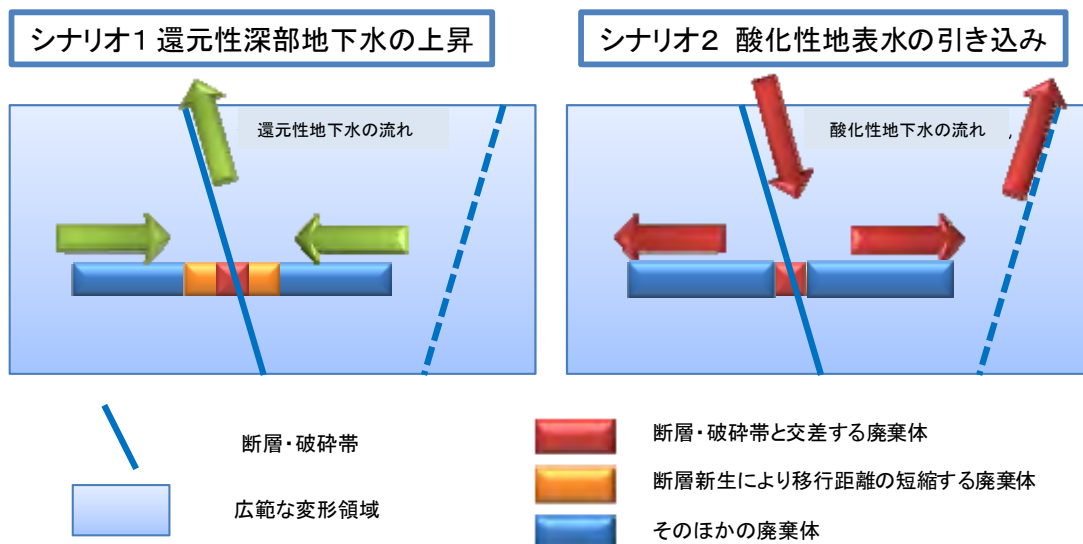
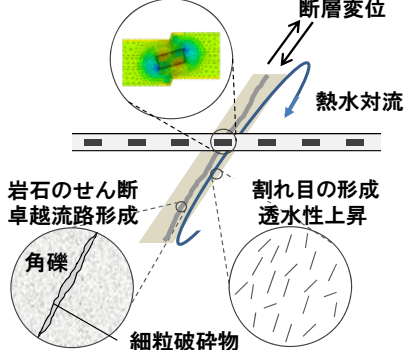
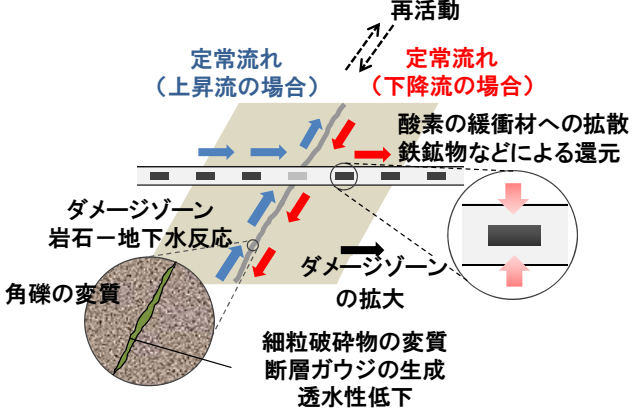


図 7.3.2-4 断層活動の影響に関するシナリオの概念

以上の二種類のシナリオ、および断層との位置関係に応じた廃棄体区分について、安全評価上、地層処分システムがどのように変遷するかを設定した（表 7.3.2-10）。また、断層活動の影響に関する安全解析を試行した結果を参考資料1に示す。

ここでは、長期安全性を議論する際に考慮すべき自然現象との一つである断層活動を例として、これらの著しい影響に関するシナリオ構築手法について検討した。これにより、実際のサイトの特徴を考慮して自然現象がシステムに与える影響を仮想的に評価するための出発点を整備した。

表 7.3.2-10 処分場を横断する新たな断層が生じた場合の安全評価上の変遷を整理した例

		断層新生直後の現象	その後の定常的変遷
		<p>廃棄体の破壊・緩衝材のせん断 温度上昇 核種の溶解・散逸</p>  <p>断層変位 熱水対流</p> <p>岩石のせん断卓越流路形成 角礫</p> <p>割れ目の形成透水性上昇 細粒破砕物</p>	 <p>再活動 定常流れ (上昇流の場合) 定常流れ (下降流の場合)</p> <p>酸素の緩衝材への拡散 鉄鉱物などによる還元</p> <p>ダメージゾーン 岩石-地下水反応 角礫の変質 ダメージゾーンの拡大 細粒破砕物の変質 断層ガウジの生成 透水性低下</p>
シナリオ 1 (還元性深部地下水の上昇)	断層と交差する廃棄体	<p>熱：断層摩擦発熱により 300℃以上まで上昇（数分間）</p> <p>水：発熱に起因する熱水対流・緩衝材止水性低下</p> <p>力：廃棄体の破壊・緩衝材のせん断</p> <p>化：核種の溶解および人工バリア外への散逸</p>	<p>熱：再活動時の温度上昇</p> <p>水：発熱に起因する熱水対流</p> <p>力：緩衝材の反復的せん断</p> <p>化：核種は完全に散逸</p>
	それ以外の廃棄体	<p>熱：若干の温度上昇（短期間）</p> <p>水：間隙水圧変化による過渡的流動</p> <p>力：地震動</p> <p>化：-</p>	<p>熱：-</p> <p>水：広範な変形領域の透水性上昇に伴う流速増大</p> <p>力：地震動</p> <p>化：還元性雰囲気での核種移行</p>
シナリオ 2 (酸化性地表水の引き込み)	断層と交差する廃棄体	<p>熱：断層摩擦発熱により 300℃以上まで上昇（数分間）</p> <p>水：発熱に起因する熱水対流・緩衝材止水性低下</p> <p>力：廃棄体の破壊・緩衝材のせん断</p> <p>化：核種の溶解および人工バリア外への散逸</p>	<p>熱：再活動時の温度上昇</p> <p>水：発熱に起因する熱水対流</p> <p>力：緩衝材の反復的せん断</p> <p>化：核種は完全に散逸</p>
	それ以外の廃棄体	<p>熱：若干の温度上昇（短期間）</p> <p>水：間隙水圧変化による過渡的流動</p> <p>力：地震動</p> <p>化：-</p>	<p>熱：-</p> <p>水：広範な変形領域の透水性上昇に伴う流速増大</p> <p>力：地震動</p> <p>化：周辺の地下水の酸化・緩衝材中の鉄鉱物による還元</p>

7.3.2.4 FEPに基づくシナリオ構築手法およびFEP情報の整備

7.1.3 および 7.2.1 で述べたように、状態設定やシナリオ作成では、安全機能を基軸として構築したシナリオ構築に対して、FEP（7.1.3 参照）を抽出して、それらの相互関係を考慮しながらシナリオの十分性を確保する。FEPは、人工バリアと天然バリアの長期的な変遷を設定する上での基盤となるものである。従来のFEPに基づくシナリオ構築手法では、以下の点が課題となっていた。

- ・ リスト化した個々のFEPの相関関係には、複数の起因事象の発生に伴う影響が混在し、相関関係を整理し、理解することが困難な場合が多い
- ・ 選定したシナリオと考慮されるFEPとの関係（範囲）が不明瞭なケースが存在する
- ・ シナリオの設定に至る科学的知見や専門家判断の追跡性の確保

また、FEPに関する情報は、データベースとして格納することが重要であるとともに、得られた知見を反映して継続的に更新する必要がある。

そこで、この課題に対して、神崎ほか（2009）は、FEPリスト作成から、シナリオ構築に至るまでの作業フロー（図 7.3.2-5）を策定するとともに、作業フローに基づきFEP情報をFEPデータベースとして取りまとめている。さらに、地層処分低レベル放射性廃棄物については、第2次TRUレポートで用いられたFEPに関する情報が、包括的FEPリストに基づいて整理されている（電事連・JNC, 2005b）。

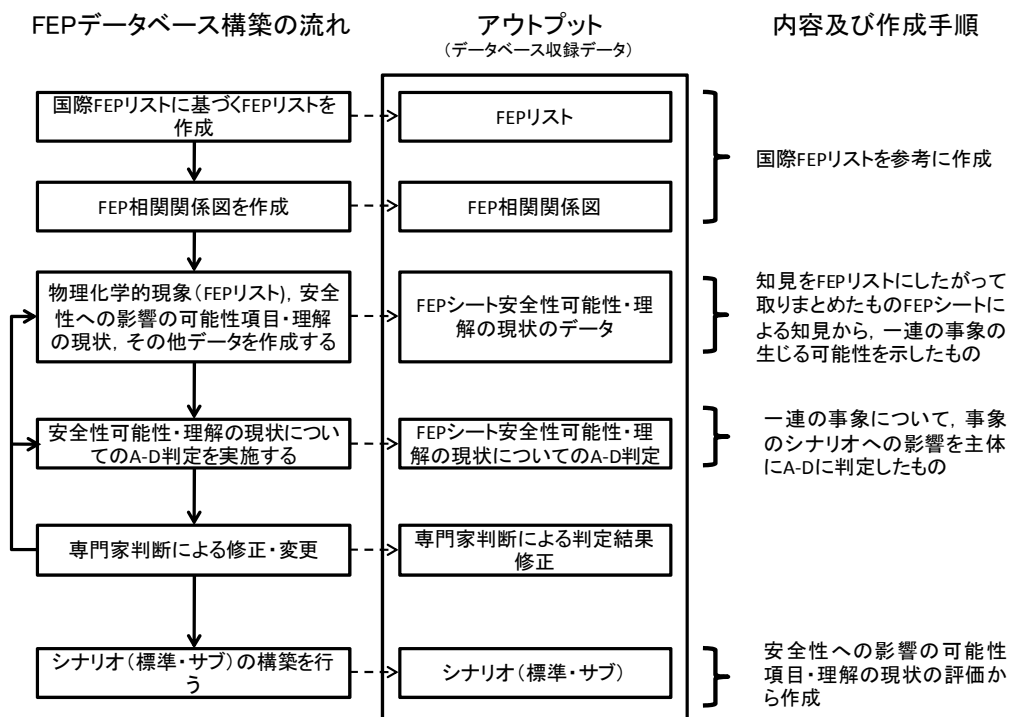


図 7.3.2-5 FEP リスト構築からシナリオ構築までの作業フロー

(出典：神崎ほか，2009)

以上のことから、長期変遷を考慮してシナリオを構築するための基盤情報として、FEPに基づくシナリオ構築手法およびFEPに関するデータベースが整備された。

7.3.3 モデルの開発に関する取り組み

ここでは、NUMO および基盤研究開発機関が進めてきたモデルの開発のうち、7.3.1 に示した四つの点に直接関連する技術開発成果として、以下の項目に関する概要について記述する。

- ・ 地質環境および地表環境の変遷を考慮した核種移行解析モデルの高度化
- ・ 母岩の不均質性および設計のオプションを考慮した核種移行解析モデルの高度化
- ・ 核種移行解析モデルにおける計算手法の効率化

7.3.3.1 地質環境および地表環境の変遷を考慮した核種移行解析モデルの高度化

(1) 背景と目的

7.3.2.1 で述べたように、沿岸域では、処分場周辺での塩淡境界の移動に伴う地下水水質や流向・流速の変化が生じるとともに、GBI の位置や環境条件も時間とともに推移することが特徴である。このため、不均質な母岩中での卓越した移行経路の分布という内陸部と共通の課題に加えて、これらの沿岸域の特徴を考慮した核種移行解析を行うことが必要となる。

一方、空間的不均質性を考慮した各位置・各時刻の流動条件や地下水水質に対応した核種移行特性をそのまま入力条件として用いた核種移行解析は極めて複雑なものとなり、種々の影響因子や変動要因の影響を明確にすることが困難となる。

以上の点を踏まえ、沿岸域の特徴をより現実に即して取り込むための技術基盤を整備することを目的として、以下のような場の変遷を考慮した核種移行解析手法を開発した (NUMO, 2011d)。

- ・ 地質環境の変遷を考慮した核種移行解析
- ・ 地表環境の変遷を考慮した生物圏評価

(2) アプローチ

沿岸域の環境変遷に対応した核種移行解析の手順を図 7.3.3-1 に示す。

(i) 前提条件の設定および GBI の環境変遷の把握

沿岸域では、塩淡境界に起因する密度流が発生する可能性があることから、処分場領域の代表点での地下水流向・流速および地下水水質の時間変化は、極めて複雑な挙動を示す (例えば、太田ほか, 2007)。このため、このような複雑な場の特徴を核種移行解析に取り込むためには、地下水流向・流速および地下水水質の時間的な変化をそのまま核種移行解析の入力情報として用いることは合理的ではない。従って、安全評価上の保守性を確認しつつ、複雑な挙動を単純化して核種移行解析や生物圏評価の前提条件とすることが必要がある。

7.3.2 に示したように、気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に伴い、沿岸域にある処分場領域内は、処分場領域内の代表点が陸域または海底下に属するか、地下水水質が塩水・淡水であるかによって表 7.3.3-1 の 4 パターンに区分することができる。

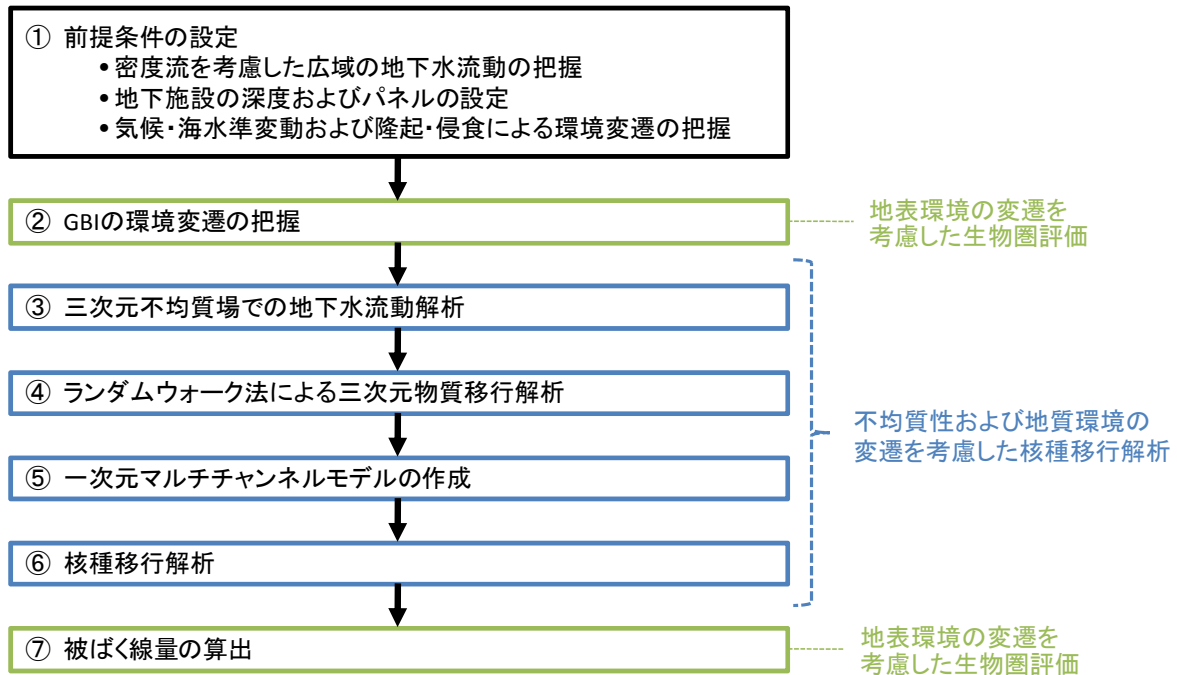


図 7.3.3-1 沿岸域の環境変遷に対応した核種移行解析の手順の例

表 7.3.3-1 地下水の塩分濃度と汀線との位置関係による区分

区分番号	塩分濃度と位置
a	海底下の塩水域
b	陸側の塩水域
c	海底下の淡水域
d	陸側の淡水域

そこで、まず、当該地域での気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷の類型化を行い、処分場領域内の代表点ごとに、核種移行の場のタイプがどの時期に切り替わるかを明らかにする。

次に、該当する環境変遷パターンにおいて生じる核種移行の場のタイプごとに、以下の情報を抽出する。

- 処分場領域内の代表点ごとの地下水の流向および流速（最大値）
- 処分場領域内の代表点ごとの代表的な地下水水質（塩分濃度）
- 処分場領域内の代表点ごとの GBI

GBI の環境変遷の把握においては、GBI の範囲を把握し、環境の変遷（海底／陸域）についての時間区分を行う。

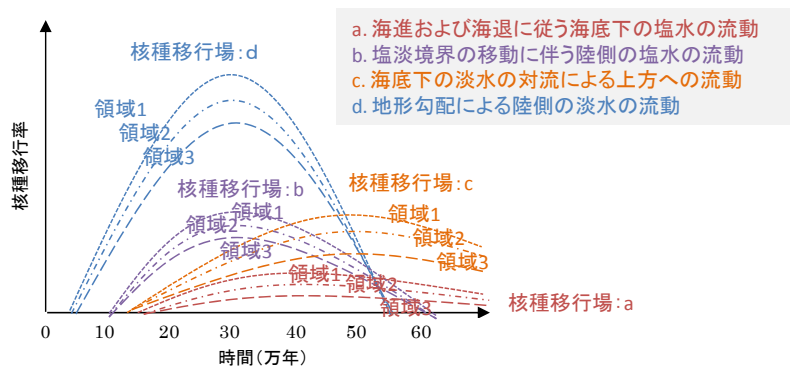
(ii) 変遷する地質環境における核種移行解析技術

不均質場での三次元水理解析では、前提条件として設定した各時間・空間区分に対応して、それぞれ不均質場におけるニアフィールドを対象とする。次に、三次元水理解析の結果に基づき、ニア

フィールドの三次元物質移行解析を行う。この三次元物質移行解析結果に基づき、核種移行に関する一次元マルチチャンネルモデルを作成する。これらの手順の詳細は、7.3.3.2 に示す(Wakasugi et al., 2008 : NUMO, 2011d)。

核種移行解析においては、作成した一次元マルチチャンネルモデルを用いて、それぞれの核種移行の場が現在から将来にわたって継続することを仮定した計算を個別に行い、それぞれ対応する GBI への核種移行率を算出する。さらに、各代表点に対して、核種移行の場が切り替わる時期に対応して各 GBI への核種移行率を切り替えて合算する。模式図を図 7.3.3-2 に示す。

① 処分場周辺で予想される複数の流動場それぞれについての核種移行解析を個別に実施する



② 処分場内の位置ごとに異なる「場のタイプの転換時期」に応じてこれら4種類の核種移行解析結果のうち該当するものを採用し継ぎ合わせる

	期間1	期間2	期間3	期間4	期間5	期間6	期間7	期間8	期間9	期間10
領域1	a	a	a	b	a	d	c	d	c	d
領域2	a	a	a	b	a	b	a	d	c	d
領域3	a	a	a	b	a	b	a	b	c	d

③ 各時期ごとにそれぞれの GBI への核種移行率を積算し、当該時点での GBI の環境条件に対応する生物圏での被ばく線量を算出する

(領域 1~3 は図 7.3.2-3 に例示したような母岩領域を表す)

図 7.3.3-2 沿岸域の環境変遷に対応して核種移行率を算出するイメージ

(iii) 変遷を考慮した生物圏評価技術

沿岸域の生物圏では、GBI の時間変化を考慮して、被ばく線量を算出するための換算係数を算出する。

沿岸域での環境変化を考慮した生物圏評価技術を構築するに当たって、Biosphere Model Validation Study (BIOMOVs II, 1996) の第2フェーズで開発されている生物圏評価のための様式化アプローチを用いる。この手法は、IAEA の生物圏モデリングと評価手法 (BIOMASS) (IAEA, 2003) や BIOCLIM プロジェクト (BIOCLIM, 2004) のもとで開発され、種々の事例への適用を通じて検証・改良が行われてきたものである。ここでは、このアプローチに基づき、以下の手順について記述する。

- ・ 生物圏評価のための評価条件の設定
- ・ 着目する生物圏の特定
- ・ 被ばくグループの想定
- ・ 生物圏モデルの構築と評価の実施

生物圏評価のための評価条件の設定では、評価の目的、評価の指標、評価の考え方、地層処分システム、サイト条件、ソースタームおよび GBI、評価の時間スケール、社会条件に関する仮定の各項目を決定する。

次に、着目する生物圏の特定では、生物圏とその変遷をどのように解析に取り込むかを決定する。BIOMASS で提案されている以下の三段階から成る手順に従い決定する。

- Step1：評価背景に記載された情報に基づいて生物圏に含めるべき構成要素を系統的に特定し、その妥当性を検討する。
- Step2：評価背景に基づいて、生物圏の変化を考慮すべきかどうかを判断する。生物圏の変化を扱うことが必要となった場合、将来の生物圏の経時的変化を整理し、生物圏への影響を記述する。
- Step3：各シナリオにおいて生物圏の変化を表す手法を選択する。

これらの段階を経て、沿岸域における生物圏モデルでは、気候変動による人間活動への影響、海水準変動および隆起・侵食による GBI の変遷を取り入れる。また、変遷としては、気候変動と GBI の変遷を取り入れたケース、陸域が GBI であるケース、海底が GBI であるケースなどを考慮する。

被ばくグループの想定では、BIOMASS のリスト (IAEA, 2003) を参照し、潜在的に被ばくグループとなり得る人間活動のタイプを抽出して、評価対象を設定する。BIOMASS では、生物圏に含まれる種々の媒体のそれぞれに関連する人間活動を分類している (IAEA, 2003)。このようなアプローチに基づき、沿岸域において線量が最も高くなり得るグループを想定した場合、海洋環境（潮間帯を含む）を利用する漁業従事者グループと臨海部の土地を使って放牧を行う農業従事者グループを想定する。将来の気候変動によって、次第に寒冷化する時期には、農業システムの変化やそれに伴う食生活や移住率の変化が農業従事者グループに生じると想定する。また、被ばく経路として、吸入、外部被ばく、および種々の食品（畜産物、魚介類、海藻・藻）の摂取を想定する。これらの被ばく経路は、GBI の位置の変遷や、気候変動などによって影響を受けると想定する。

生物圏モデルの構築と評価の実施では、前項までの検討結果に基づき、生物圏を構成するコンパートメント（主要な生物圏構成要素を、それぞれ一定の容積を有する区画としてとらえたもの）およびこれらの間の核種移行を設定する。本検討の設定例を図 7.3.3-3 および図 7.3.3-4 に示す。これらに基づき、生物圏評価を実施するとともに、生物圏評価結果の分析を行う。

処分場領域が陸側の淡水域にある場合には潮間帯堆積層が GBI となり、それ以外の場合には沿岸海底堆積層（無酸素層）が GBI となる。線量換算係数の算出に当たっては、個々の核種および崩壊系列の親核種について一定の GBI への移行率を設定することによって被ばく線量を計算し、それらの比率として被ばく線量換算係数を算出する。GBI ごとに算出する核種移行率に対して、被ばく線量換算係数を適用することにより、全体システムについての安全解析の結果を得る。

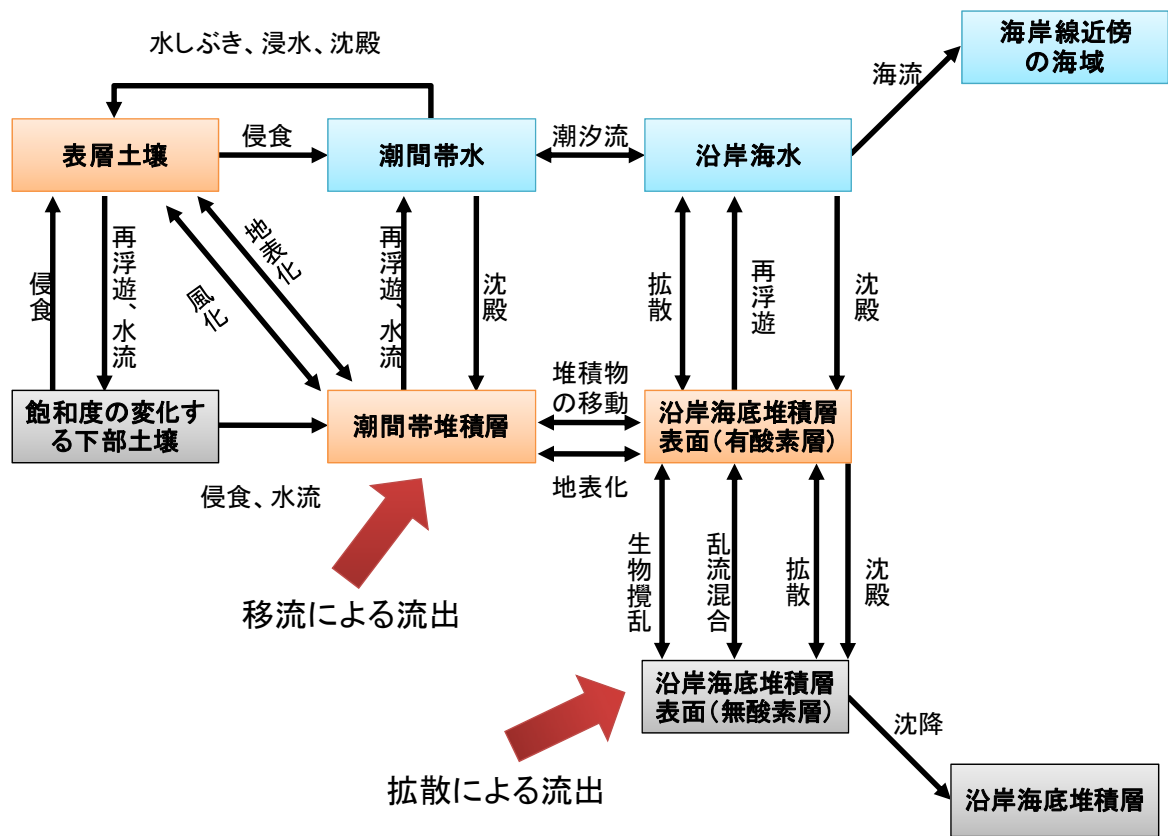


図 7.3.3-3 GBI が沿岸海底堆積層および潮間帯堆積物である場合の生物圏内の核種移行に関する概念モデルの例

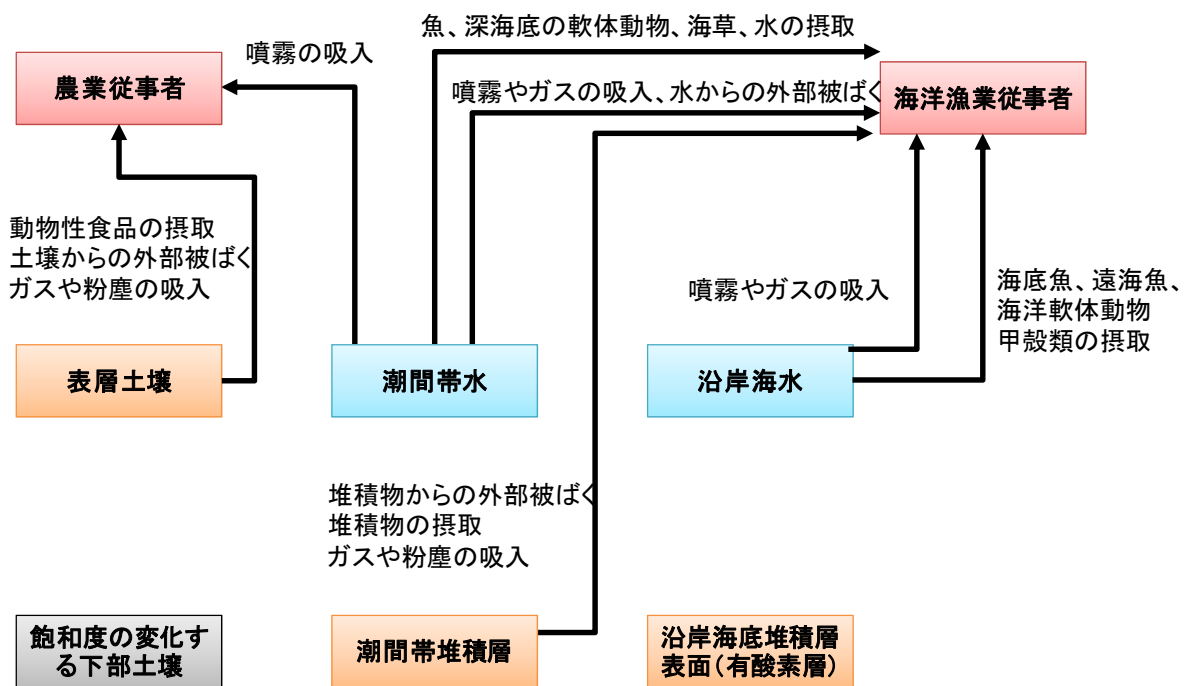


図 7.3.3-4 被ばく経路に関する概念モデルの例

(3) 例題への適用

前述のモデル化手法に従って、隆起・侵食および気候・海水準変動などの自然現象によって生じる沿岸域での環境変遷を考慮した安全解析を試行した（参考資料2：NUMO，2011d）。

これらの検討により、不均質場を取り入れた核種移行解析技術、将来の環境変遷を考慮に入れた沿岸域におけるシナリオ構築技術、処分場周辺の広域場とその環境変遷を考慮に入れた生物圏評価技術などの技術基盤に基づき、これまでの安全評価では適用が困難であった沿岸域の処分場での環境変遷を考慮した安全解析が可能となった。

7.3.3.2 母岩の不均質性および設計のオプションを考慮した核種移行解析モデルの高度化

(1) 背景と目的

段階的に進められる地層処分事業では、さまざまな不確実性や制約条件への対応に配慮して、複数の設計オプション（パネル／坑道配置方法、廃棄体定置方式など）を検討する。設計オプションを適切に絞り込むためには、設計オプション間の相違を、安全性、経済性など、さまざまな観点から評価することが必要である。ここで、性能評価の観点から設計オプション間の差異を評価する場合、既存の一次元モデルでは、人工バリアや地下施設の三次元的形状および周囲の岩盤の不均質性が保守的に単純化されるため、定量的な差別化が困難な状況であった。

そこで、設計オプションの違いを性能評価の観点で評価するための技術基盤を整備することを目的とし、人工バリア／地下施設の形状や周囲の岩盤の不均質性を考慮するための手順およびツールを開発した（Wakasugi et al., 2008：NUMO，2011d）。

(2) アプローチ

(i) 概要

母岩の不均質性や人工バリアの三次元的形状といった設計オプションに起因する複雑な核種移行経路を適切に考慮するための手順を開発した（図 7.3.3-5）。この手順を具現化するツールとして、三次元不均質場核種移行解析ツール Partridge（Particle tracking in deep geological environment）を開発した。

前提条件の設定

前提条件として、三次元水理解析や三次元物質移行解析の対象となる解析領域を設定し、人工バリアなどの構造物の寸法や形状、それらの配置を設定する。それらに基づき、構造物の形状情報を含んだ三次元のメッシュデータを作成する。

三次元水理解析

三次元水理解析では、水理条件としての不均質場および境界条件を設定し、定常状態の三次元地下水流動解析を行う。

不均質場の設定においては、母岩中の亀裂を再現するために、個々の亀裂の位置、方向、大きさ、透水量係数などを設定し、三次元亀裂ネットワークを作成する。次に、三次元亀裂ネットワークと三次元メッシュデータを前提として、透水係数場を作成する。

さらに、解析領域に対して水頭やダルシー流速に関する境界条件を設定し、作成した透水係数場を用いた三次元地下水流動解析（定常）を実施する。地下水流動解析から得られる圧力分布やダルシー流速分布に基づき、実流速分布を計算し、次のステップにおける物質移行解析の入力データと

する。

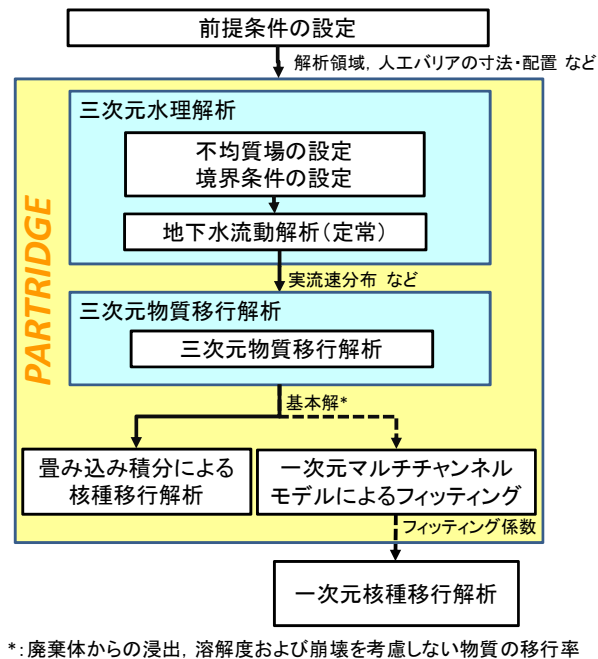


図 7.3.3-5 母岩の不均質性および人工バリアの三次元形状を考慮した核種移行解析の手順

三次元物質移行解析

三次元物質移行解析では、水理解析から得られた実流速分布に加えて、各媒体での分配係数や拡散係数などの物質移行データに基づき、初期に廃棄体に配置した保存性トレーサの粒子に関して、物質移動解析を行う。多数の粒子について移行解析を行うことにより、各位置での物質の移行率に関する基本解（廃棄体からの浸出、溶解度および崩壊を考慮しない物質の移行率）を得ることができる。

畳み込み積分による核種移行解析

三次元物質移行解析において得た各位置における物質移行率の基本解は、放射性崩壊や溶解度を考慮しておらず、また、廃棄体からの浸出期間を考慮せずに瞬時放出を仮定した移行率を表すものである。そこで、この物質移行率の基本解と廃棄体からの浸出率を畳み込み積分する。この際、核種の放射性崩壊や溶解度制限放出の効果も同時に組み込むことによって、廃棄体からの核種浸出率や放射性崩壊、溶解度を考慮した、各位置における核種移行率を算出する。

一次元マルチチャンネルモデルによるフィッティング

ここでは、三次元物質移行解析結果を近似する一次元マルチチャンネルモデルを作成する。これにより、三次元の解析を模擬する計算時間の短いモデルが整備され、多数の解析ケースに対応可能となる。ここで用いる一次元マルチチャンネルモデルは、掘削影響領域の地下水流量が異なる複数の人工バリアが成すマルチチャンネルと、透水量係数が異なる複数の母岩亀裂が成すマルチチャンネルによって構成されるモデルである。そして、作成した一次元マルチチャンネルモデルを用いて、

複数の核種に関する核種移行解析を行う。

なお、不均質場の作成および三次元物質移行解析については、独立した解析や知見との比較検証を行い、その妥当性を確認している (NUMO, 2011d)。

(3) 例題への適用

上述のモデル化技術を例題に適用した事例を参考資料 3 に示す (NUMO, 2011d)。具体的には、複数の不均質場を想定し、三次元水理解析および三次元核種移行解析を実施するとともに、廃棄体の豎置きと横置きに起因する性能評価上の違いや、坑道と直交する断層と廃棄体との離隔についても検討した。

これらの検討により、多様な地質環境のもとで設計オプションの違いを性能評価の観点から評価できるようになった。

7.3.3.3 核種移行解析モデルにおける計算手法の効率化

安全評価においては、長期変遷を考慮して設定したシナリオに基づき、さまざまな解析ケースを設定して核種移行解析を行う。このため、解析作業や計算時間を効率化することは有効である。ここでは、基盤研究開発機関および NUMO が進めてきた以下の技術開発の概要について記述する。

- ・ データの不確実性を統計論的に取り扱うための核種移行解析モデルの開発
- ・ 地層処分システムの応答特性を容易に把握するための近似解析解の導出

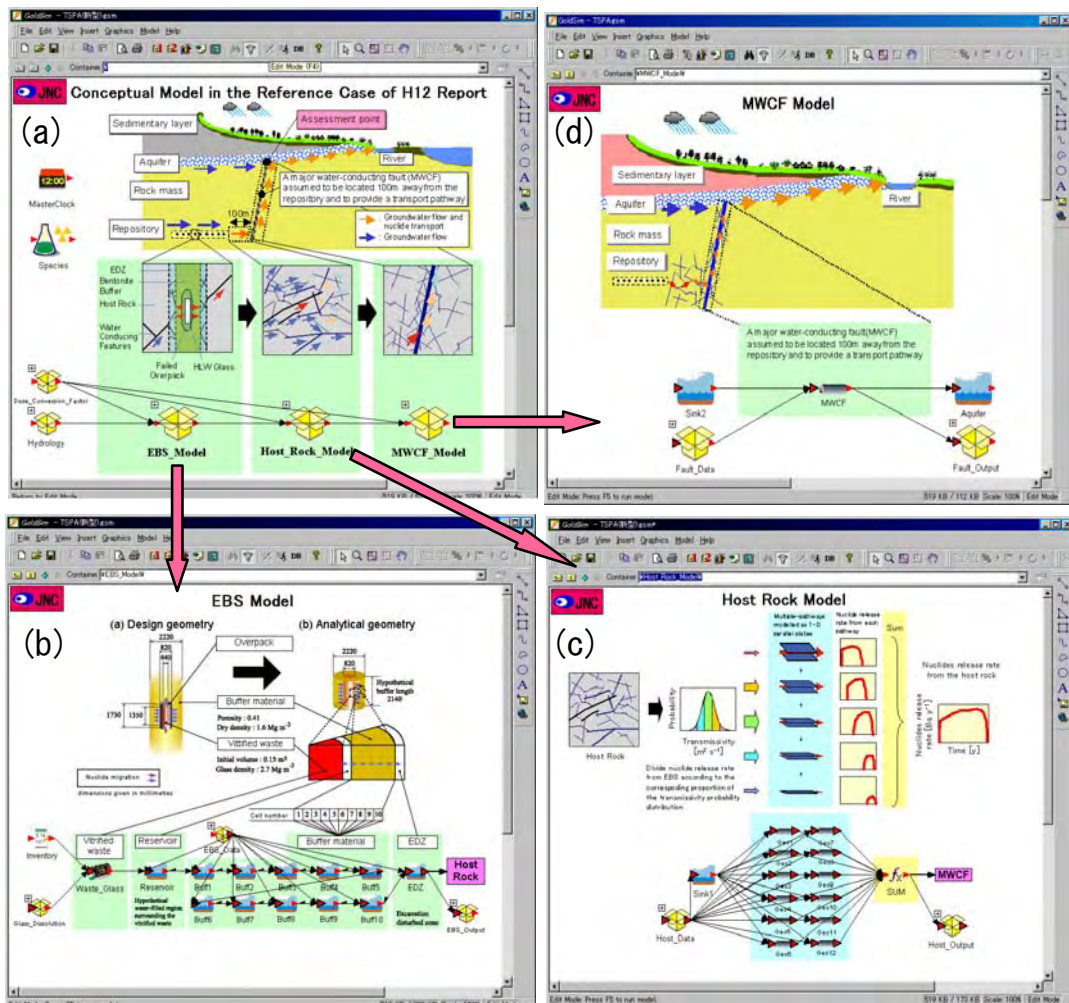
(1) データの不確実性を統計論的に取り扱うための核種移行解析モデルの開発

事業の安全評価では、安全解析の結果のみならず、モデルやデータの不確実性が結果に与える影響を把握し、地質環境の調査・評価および処分場の設計にフィードバックすることが重要である。

第2次取りまとめにおいては、決定論的な計算手法（一つのパラメータに一つの値を設定する方法）が採用され、個々の不確実性の影響を個別に評価した。このような決定論的な計算手法では、個々の不確実性の取り扱いと解析結果との対応がわかりやすいという利点がある一方で、複数の不確実性を同時に考慮した組み合わせが適切であることを示すことが難しいという課題がある。

この課題に対しては、データセットの幅からランダムにサンプリングする統計論的な手法が有効であることから、データの不確実性の影響を網羅的かつ効率的に把握するための核種移行解析モデルが開発されている (Wakasugi et al., 2000 : JNC, 2005)。モデル構築においては、諸外国の安全評価において使用された実績 (例えば, U.S.DOE, 1998) を有する汎用的なソフトウェアである GoldSim が用いられている (図 7.3.3-6)。開発されたモデルによる統計論的な計算手法の結果を図 7.3.3-7 に示す。図 7.3.3-7 では、第2次取りまとめにおけるレファレンスケースとシステム性能の総合的評価に対する線量の最大値をプロットしており、統計論的な計算手法の結果が決定論的な計算手法の結果の上限値とほぼ等しいことがわかる。これにより、決定論的な計算手法と統計論的な計算手法を相互補完的に用いることにより、不確実性の取り扱いに対する信頼性と効率を向上させることができる。なお、諸外国の安全評価においても、決定論的な計算手法以外に統計論的な計算手法を用いている場合も多く (例えば, Nagra, 2002 : SKB, 2006)、事業段階では安全評価の目的に応じてこれらを組み合わせて使用する。

さらには、統計論的な計算手法の結果に対して、複数の統計手法を組み合わせることにより、計算結果に与える影響が大きいパラメータが抽出されている(表 7.3.3-2)。表 7.3.3-2 では、影響が大きいパラメータとして透水量係数分布の平均値が抽出されている。このような情報は、事業段階において不確実性を効果的に低減するという観点から、調査計画の立案に反映することが可能である。なお、地層処分低レベル放射性廃棄物および生物圏評価についても類似の検討が進められている(電事連・JNC, 2005a : Ohi et al., 2007 : JNC, 2005)。



(a) 概念モデル, (b) 人工バリア, (c) 母岩, (d) 断層

図 7.3.3-6 Goldsim を用いた核種移行解析モデルの画面
(出典 : JNC, 2005)

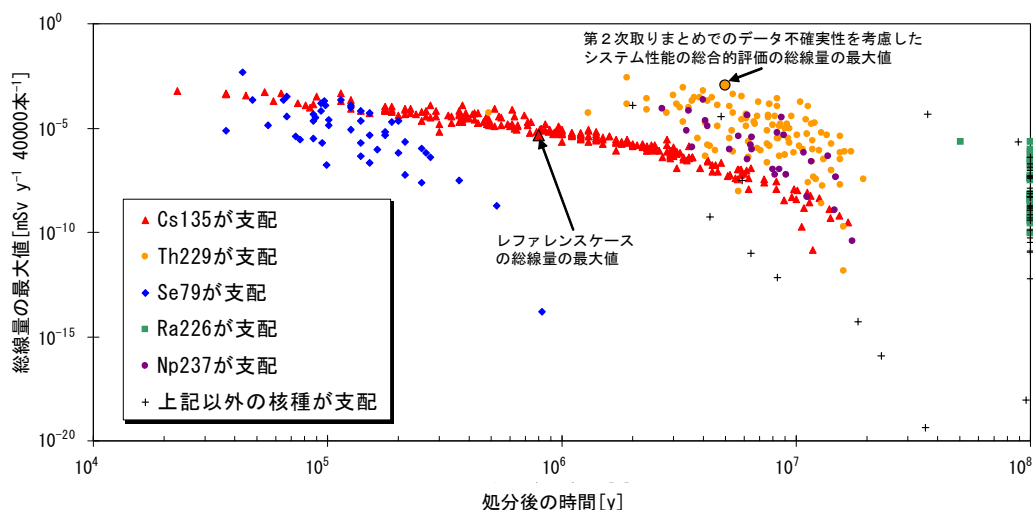


図 7.3.3-7 統計的な解析結果の例
(若杉ほか, 2002 を一部修正)

表 7.3.3-2 統計的な解析結果から影響が大きいパラメータを抽出した例
(若杉ほか, 2002 を一部修正)

順位	全リアライゼーション**	クラスタ1	クラスタ2	クラスタ3
1	透水量係数の平均値 (正)	透水量係数の平均値 (正)	透水量係数の平均値 (正)	透水量係数の平均値 (正)
2	岩盤に対するCsの分配係数 (負)	岩盤に対するCsの分配係数 (負)	マトリクス拡散深さ (負)	マトリクス拡散深さ (負)
3	マトリクス拡散深さ (負)	マトリクス拡散深さ (負)	岩盤に対するCsの分配係数 (負)	岩盤に対するUの分配係数 (負)
4	マトリクス拡散寄与面積率 (負)	マトリクス拡散寄与面積率 (負)	マトリクス拡散寄与面積率 (負)	岩盤に対するThの分配係数 (負)
5	-	ガラスの溶解速度 (正)	Npの溶解度 (正)	岩盤に対するCsの分配係数 (負)

*: 正の相関は当該パラメータの増加により総線量の最大値が増加し、負の相関は当該パラメータの増加により総線量の最大値が減少することを示す。

** : 5番目以降のパラメータの感度は無視できるほど小さい。

(2) 地層処分システムの応答特性を容易に把握するための近似解析解の導出

地層処分低レベル放射性廃棄物には、多様な種類の廃棄物が含まれ、個々の廃棄物の特徴を詳細に検討し、安全性を確保する必要がある。また、「TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画」(資源エネルギー庁・JAEA, 2006)において、幅広い地質環境に柔軟に対応するための代替技術が示されており、これらの代替技術を活用することも視野に入れて、安全確保の頑健性の向上を図ることとしている。そこで、地層処分低レベル放射性廃棄物については、前項までに述べた解析技術による詳細な定量的検討を行うのに先立ち、個々の放射性廃棄物の特徴に対して、代替技術を含めた適切な工学的対策を対応付けることにより、幅広い地質環境特性における安全確保の方策を明らかにすることが当面の課題となる。

このため、NUMO では、地層処分システムの応答特性を容易に把握するための近似解析解を導出し(図 7.3.3-8)、地層処分システムの頑健性の向上を目的とした検討を行っている(NUMO, 2011a)。このような感度解析の結果から、例えば、廃銀吸着材のセメント混練固化体などのグループ 1 廃棄

物に含まれる I-129 は、極めて長寿命であり、また、岩石への吸着による移行遅延がほとんど生じないため、天然バリアの性能に期待することができず、人工バリアからの放出率を制限することが必要となることが示されている。なお、図 7.3.3-9 より、グループ 1 廃棄物に含まれる I-129 に対しては、一定溶出率が大きい場合においても、充填材の分配係数 (Kd) を大きくすることによって人工バリアからの放出率を制限可能であることを把握できる。NUMO は、このような検討をほかのパラメータや廃棄体グループなどのさまざまな条件に対して行い、地層処分低レベル放射性廃棄物のシステムの頑健性を確保する上で重要と考えられる安全機能やパラメータの整理を行っている (NUMO, 2011a)。

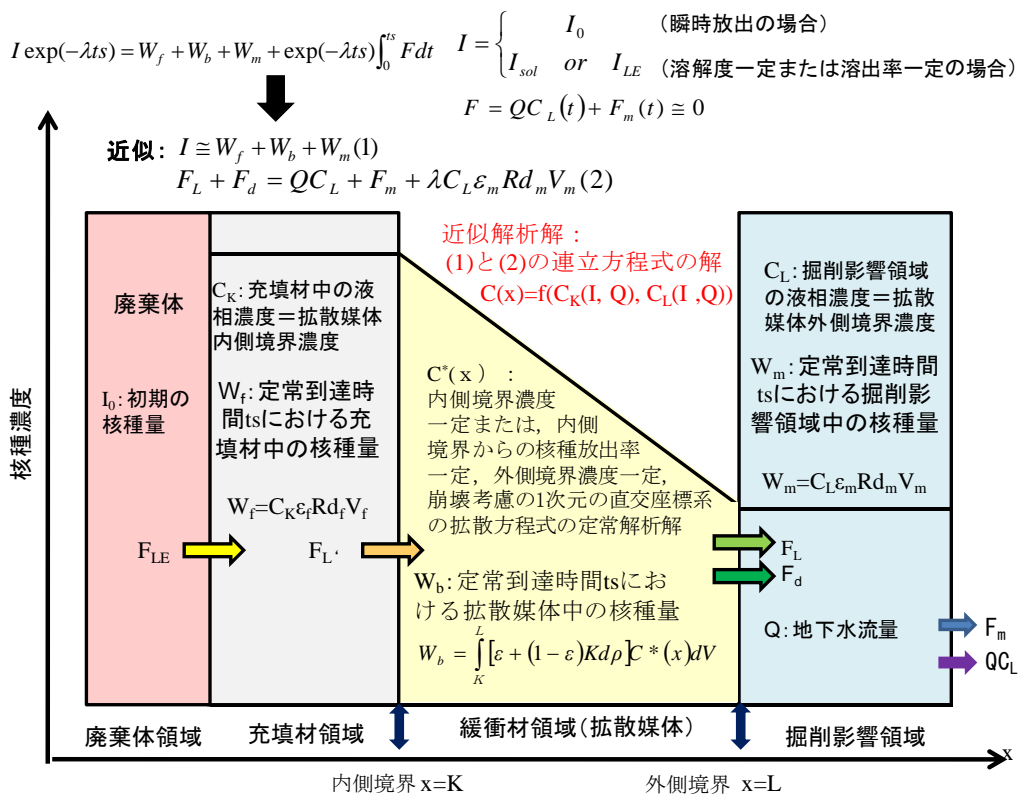


図 7.3.3-8 近似解析解を導出する概念
(出典: NUMO, 2011a)

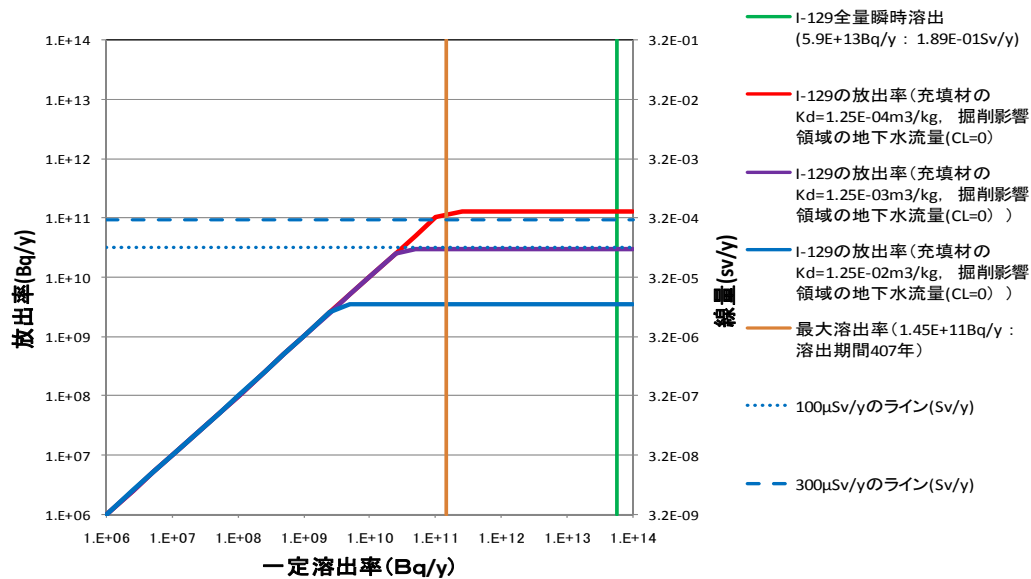


図 7.3.3-9 グループ1 廃棄物における I-129 に対する工学的対策の
効果についての感度解析結果の例
(出典：NUMO, 2011a)

7.3.4 データセットの整備に関する取り組み

安全評価の信頼性を確かなものとするためには、より現実的なモデルの開発に加え、対象とするシナリオやモデルに対応して、データセットを適切に設定することが必要となる。7.2.3 で述べたように、安全評価で用いるパラメータは多岐にわたるものである。今後、NUMO が実施する安全評価においては、サイトが有する地質環境特性に対応したデータセットが必要となる。

ここでは、基盤研究開発機関が進めてきたデータセットの整備に関する成果のうち、7.3.1 に示した四つの点に直接関連する技術開発成果として、以下の項目に関する概要について記述する。

- ・ データの整備
- ・ データセットの設定手法
- ・ 地層処分低レベル放射性廃棄物に関する検討状況

7.3.4.1 データの整備

基盤研究開発機関は、核種移行解析に関するパラメータに関する以下のデータベースや調査データを公開している。NUMO は、データセットを作成する際の基盤情報として、これらを用いる。

- ・ 熱力学データベース (JAEA-TDB)：放射性元素および地球化学元素に関する熱力学データベースを種々の地球化学コード (PHREEQC など) で利用可能なフォーマットで整備したもの (Kitamura et al., 2010)
- ・ 収着データベース (JAEA-SDB)：国内外の文献から抽出されたベントナイトや岩石などに対する分配係数データを整理したものであり、また、指定された条件に該当するデータの検索やデータ群に対する回帰分析などの処理を行う機能を有する (館ほか, 2009：図 7.3.4-1)
- ・ 拡散データベース (JAEA-DDB)：文献から抽出されたわが国に分布する種々の岩石などに対

する実効拡散係数データを整備したもの（栃木・館，2009；栃木・館，2010）

- ・ ガラスの溶解に関するデータベース（GlassDB）：文献より，ガラス，ガラス組成，試験法，溶液，共存物，成分，変質生成物，試験条件，試験結果などに関する情報を集約したもの（林ほか，2005）
- ・ 環境移行データ：わが国の風土，農業活動などを反映した環境移行パラメータとして，水田・畑土壌での核種の動きやすさ（Kd）や農作物への核種の移行割合（TF）に関するパラメータを集約したもの（放医研，2008，2009，2010）

独立行政法人
日本原子力研究開発機構
核種移行データベース
Nuclide Migration Database

取得データベース
Sorption Database

データ表示 クリア グラフ表示 English 終了

トップページ(検索画面)

■ 元素 ■

Gr-1

<input type="checkbox"/> Ac	<input checked="" type="checkbox"/> Am	<input type="checkbox"/> Bi	<input type="checkbox"/> Cm	<input type="checkbox"/> Cs	<input type="checkbox"/> Nb	<input type="checkbox"/> Ni	<input type="checkbox"/> Np	<input type="checkbox"/> Pa	<input type="checkbox"/> Pb	<input type="checkbox"/> Pd	<input type="checkbox"/> Po
<input type="checkbox"/> Pu	<input type="checkbox"/> Ra	<input type="checkbox"/> Sb	<input type="checkbox"/> Se	<input type="checkbox"/> Sm	<input type="checkbox"/> Sn	<input type="checkbox"/> Tc	<input type="checkbox"/> Th	<input type="checkbox"/> U	<input type="checkbox"/> Zr		

Gr-2

<input type="checkbox"/> Ag	<input type="checkbox"/> Ba	<input type="checkbox"/> Ca	<input type="checkbox"/> Ce	<input type="checkbox"/> Cl	<input type="checkbox"/> Co	<input type="checkbox"/> Eu	<input type="checkbox"/> Fe	<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> Mn	<input type="checkbox"/> Mo	<input type="checkbox"/> Na
<input type="checkbox"/> Nd	<input type="checkbox"/> Ru	<input type="checkbox"/> Sr	<input type="checkbox"/> Zn								

■ 固相グループ ■

<input type="checkbox"/> Basaltic rocks	<input checked="" type="checkbox"/> Bentonite (Clay minerals)	<input type="checkbox"/> Cementitious materials	<input type="checkbox"/> Granitic rocks
<input type="checkbox"/> Mudstone (Sedimentary rocks)	<input type="checkbox"/> Other minerals	<input type="checkbox"/> Sandstone	<input type="checkbox"/> Tuff

■ 詳細検索条件設定 ■ 画面更新

固相
BAS_MINER
BENTONITE
bentonite
bentonite/quartz(10:90)
Ca-bentonite

溶液種類
0.01M CO3/0.01M Tris
0.01M NaClO4
0.06M NaCl
0.10M NaCl
0.1M Na-ClO4

pH		
Eh(mV)		
イオン強度(mol/L)		
温度(℃)		
液固比(mL/g)		
反応時間(日)		
初期濃度(mol/L)		

分離方法 遠心分離 ろ過分離 限外ろ過 未ろ過 その他

雰囲気/酸化還元条件 大気条件 雰囲気制御条件 その他

図 7.3.4-1 収着データベースの検索画面

（出典：館ほか，2009）

このうち，収着・拡散データベースについては，実験条件や手法の信頼性あるいは情報の追跡性などのさまざまな品質のデータが混在していることを勘案して，以下の判断基準から構成されるガイドラインを策定するとともに，各データの信頼度評価を進めている（Ochs et al, 2008）。

- ・ クライテリアⅠ：文献の記載情報の網羅性・追跡性
- ・ クライテリアⅡ：実験方法や条件の信頼度
- ・ クライテリアⅢ：関連するデータ相互間の整合性

データの信頼性評価を行うための評価フローと基準を図 7.3.4-2 に示す。まず，クライテリアⅠ

を適用し、信頼性の評価を行う上で必要な情報を網羅していないものについては除外する。次に、必要な情報を網羅しているデータに対しては、クライテリアⅡに関する項目（図 7.3.4-2）について専門家が評価を行う。クライテリアⅡの赤字で示した項目は、特に重要な基準として最初に評価がなされ、基準を満たさない場合には、信頼度不十分（unreliable）としてデータが整理される。そして、クライテリアⅡに照らして信頼性を有するとみなせるデータ群について、類似したデータを同時にプロットして、データ相互間の整合性を確認する。これらの手続きを踏むことにより、高い信頼性を有するデータを効率的に抽出して、データの傾向を把握することやデータセットを設定することが可能となる。

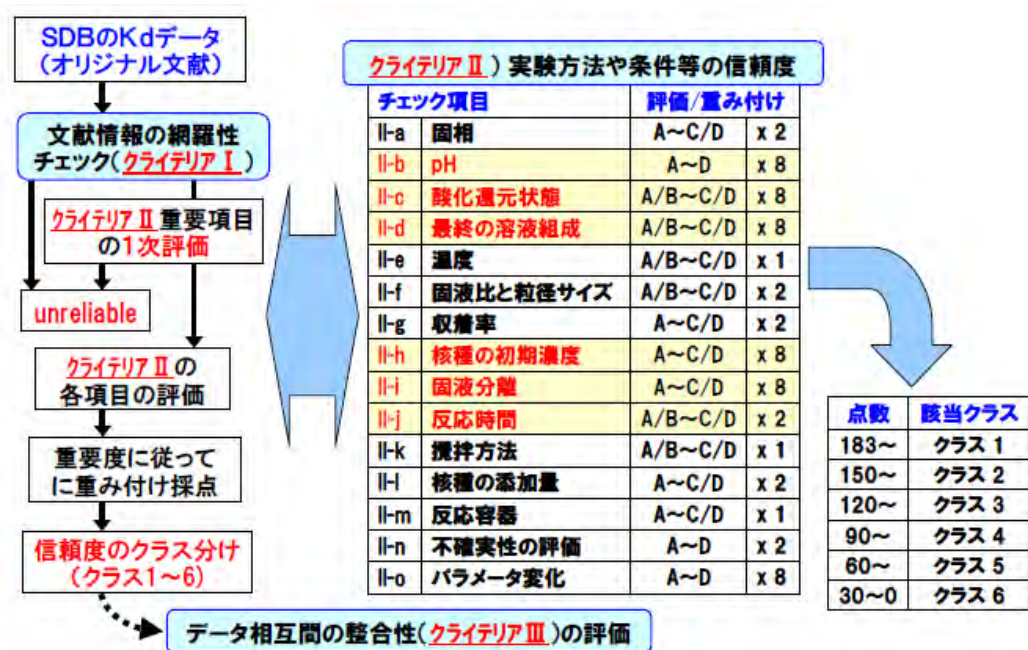


図 7.3.4-2 収着分配係数の信頼度評価のガイドラインの概要 —評価フローと基準—
(出典：館ほか，2009)

7.3.4.2 データセットの設定手法

第2次取りまとめにおける核種移行解析のためのデータセットの設定では、まず、熱力学データベースを用いて、地下水と岩石との反応および地下水と緩衝材との反応を計算することによって、それぞれ、地下水水質および間隙水水質を設定した。次に、この結果に基づき放射性元素の溶解・沈殿に関する熱力学データベースを用いて溶解度や化学種分布を推定した。また、間隙水水質や地下水水質を考慮しつつ、見かけの拡散係数（Da）やバッチ収着試験における Kd の実測値データから安全評価に用いる分配係数値を設定し、さらに、実効拡散係数（De）の実測値などから緩衝材および岩盤中の実効拡散係数値を設定した。

第2次取りまとめ以降、パラメータ設定の信頼性を向上させるため、データベースに含まれる個別データの信頼度評価を踏まえ、環境条件の違いを補正する手法の検討も進められている（Ochs et al, 2008）。具体的には、一定以上の信頼性を有する分配係数データを抽出した後、これらのデータが取得された実験条件と安全評価の対象として想定している地質環境条件との間の差異について補正する（図 7.3.4-3）。このような補正において着目すべき要因は、元素によっても異なる。例えば、Cs

の場合には、CEC（陽イオン交換容量）、粘土鉱物含有量、および共存イオンであり、また、アクチニウムの場合には、固相の表面特性に関連した pH 依存性や、溶液中での化学種分布となる。このため、着目すべき要因の違いを考慮して、補正するための変換係数を導出する。このような補正手法は、Cs および堆積岩に対して適用し、粘土鉱物としてイライト含有率、また、共存イオンとして Na イオン濃度を考慮した変換係数を用いることにより、実験値と概ね整合的な値が導出できることが示されている（Ochs et al, 2008）。

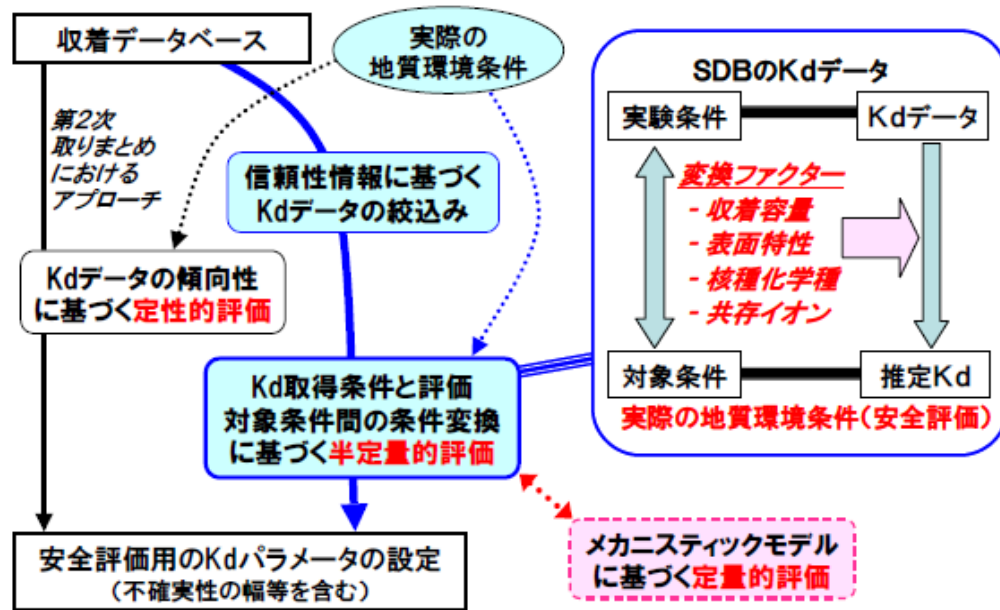


図 7.3.4-3 到着データベースと条件変換法によるパラメータ設定のイメージ
(出典：館ほか，2009)

7.3.4.3 地層処分低レベル放射性廃棄物に関する検討状況

第2次 TRU レポートの核種移行解析モデルは、移流、拡散、分散に基づく溶存物質の移動と、平衡論的に評価された沈殿（溶解度）、媒体への収着を考慮して構築されている（Mihara and Sasaki, 2005：以下，RAMDA という）。核種移行パラメータとしては、このモデルに沿って、核種の濃度を決定する溶解度、分子拡散を表す実効拡散係数および収着分配係数を設定している。

このうち、セメント系材料に対する元素の収着分配係数は、普通ポルトランドセメントを用いたバッチ法による試験結果に基づいた値が設定されている。レファレンスケースの解析に用いた各グループの収着分配係数は、以下の考え方に基づいて設定されている（Mihara and Sasaki, 2005）。RAMDA では、セメント系材料の収着分配係数をセメント系材料の変質領域の区分（pH の変化に応じて Region I および II, III を設定）ごとに設定している。

- ・ グループ 1：RAMDA の Region I および II の最小値を用いる。ただし、ヨウ素については、廃棄体の核種量が全量充填材中に溶解するとその濃度は、0.1mol/l と非常に高濃度となることから、 10^6 mol/l より高濃度領域における収着分配係数の低下を考慮した。収着分配係数の低下の考慮においては、初期濃度を変えて測定したセメントペーストに対するヨウ素の収着試験結果（加藤ほか，2001）から、高濃度におけるヨウ素

の収着分配係数を低濃度の収着分配係数の値の10分の1とした。

- ・ グループ2:RAMDA の Region I および II の最小値および有機物影響に基づく収着分配係数低減係数を考慮して設定した。

第2次 TRU レポートでは、OPC ペーストを用いた収着試験の実測値に基づいて収着分配係数が設定されており、それ以外のセメント系材料や骨材の種類などは考慮されていない。そのため、セメント系材料の組成や OPC 以外の材料の使用を考慮することにより収着性の向上が期待できるので、廃棄体グループごとの重要核種について適切なセメント系材料を検討し、期待できる収着分配係数を検討した。セメント系材料の人工バリア材としての成立性を判断するためには、核種の収着性以外にも、①力学的安定性、②化学的安定性、③施工性などの要件を総合的に判断し、適切な材料選定を行う必要があるが、重要核種に対応してセメント系材料を最適化することで収着性の向上が期待できる可能性がある。しかし、現状では、人工バリアの成立性を判断するまで検討が至っていないため、第2次 TRU レポートと同様の評価パラメータを用いることが妥当と判断している (NUMO, 2011a)。

また、硝酸塩が充填材および緩衝材に及ぼす影響については、第2次 TRU レポートの性能評価において、硝酸塩影響が不可避であることを仮定して核種の収着分配係数が設定されている。現在、鉍物による硝酸塩還元現象の解明や微生物による硝酸イオン変遷スキームの詳細化が進められているが、研究開発途上であり、定量的な安全評価結果を得るまでは至っていない。そこで、現状では、第2次 TRU レポートと同様の取り扱いとすることが妥当と判断している (NUMO, 2011a)。

NUMO は、上述のように、感度解析から得られた重要因子 (安全機能やパラメータ) や関連する事象などに対して、第2次 TRU レポート以降に更新された知見を含めて再整理している (NUMO, 2011a)。

以上のことから、安全評価におけるデータセットを設定する上で必要な基盤となる技術が強化された。

7.3.5 今後の課題

前節までに、第2次取りまとめ以降、NUMO および基盤研究開発機関が取り組んできた技術の整備状況を概説した。

今後は、これらの技術の整備状況と、「地層処分技術開発ニーズの整理～精密調査地区選定に向けて～」(NUMO, 2010)などを踏まえて具体的な技術課題を抽出する。具体的な例として、NUMO および基盤研究開発機関にとって、特に優先度が高い安全評価に関する技術開発課題を表 7.3.5-1 に示す。そして、課題優先度を設定した上で、各課題を着実に解決していき、長期安全性評価技術の継続的な信頼性向上に努める。

なお、候補サイトが具体化されていない現段階では、NUMO が準備すべき安全評価のための体系は、多様な地質環境およびさまざまな設計オプションに適用可能なものとして開発することが必要となる。ここで、個別の課題ごとにそれぞれ適切と考えられる安全評価手法を準備し、その事例の蓄積によって安全評価体系を構築するというアプローチは効率的ではなく、また、事例間の整合性を確保することが困難であるために品質管理上も好ましいものではない。そこで、類型化された地質環境、異なる処分概念オプションなどの観点から必要となる安全評価手法を抽出し、さらに、こ

これらの間の共通点や相違点を分析することによって必要な要素技術を体系化するという目的指向の取り組みが有用である。

表 7.3.5-1 安全評価に関する技術開発課題と設定理由（特に優先度が高いもの）

(NUMO, 2010 を編集)

技術開発課題	設定理由
<ul style="list-style-type: none"> ・ 蓋然性に基づくシナリオ構築技術の整備 ・ 安全規制から示されるシナリオの枠組みに即したデータ設定技術の開発（例：最尤値の設定） 	<p>安全規制の動向やバリア機能の現実的な性能把握などの観点から、蓋然性の高いシナリオを評価するため</p>
<ul style="list-style-type: none"> ・ 蓋然性に基づく地質環境の長期的変遷を考慮したシナリオ構築技術の整備 ・ 地質環境の多様性や地質環境の長期的変遷を考慮したファーフィールドの特性評価技術の整備（例えば、海水準変動を考慮した水理特性など） ・ 地質環境の多様性や長期的変遷を考慮した地表付近の地質環境特性（例えば、風化帯の特性）評価技術の整備 ・ 地表環境の長期的変遷を考慮した生物圏、被ばくグループの評価技術の開発 ・ 地質環境の長期的変遷を考慮した水理・核種移行モデルの整備 ・ 地表環境の長期的変遷を考慮した生物圏モデルの開発（含、GBI の取り扱い） ・ 地質環境条件や長期的変遷を考慮した性能評価データ設定の標準化と検証（データベースおよび実測データの使い方、地下研究施設での方法論の検証など） 	<p>安全規制の動向やバリア機能の現実的な性能把握などの観点から地球環境の長期変遷を考慮した閉鎖後長期の安全性を評価するため</p>
<ul style="list-style-type: none"> ・ サイト調査—安全評価の連携 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 地質環境モデルの情報（移行経路情報・水理特性などの長期的変遷など）の安全評価への取り込みに関する技術 ➢ サイト調査により安全評価の不確実性を効率的に低減させるための技術の整備 ・ 設計—安全評価の連携 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 性能評価の観点からの設計オプションの絞り込みに必要な評価技術の整備 ➢ 閉鎖前の安全性と閉鎖後の安全性を包括的に評価するための技術の整備 ・ 地下研究施設を活用した「安全評価—サイト調査—設計」の連携の実証 	<p>段階的に増える地質環境の情報を活用し、効率的な不確実性の低減および安全に対する信頼性の向上を実現するため、地質環境の調査・評価、工学的対策、安全評価が有機的に連携できるようにするため</p>

7.4 まとめ

本章では、実際のサイトにおける地層処分システムの長期安全性を段階的に評価していくため、セーフティケースと安全評価との関係、不確実性の取り扱い、各事業段階における安全評価の役割などの基本的な考え方を示した。さらに、シナリオ構築、モデルの開発・設定およびデータセットの整備に対する具体的な進め方を示した。また、第2次取りまとめ以降、基盤研究開発機関およびNUMOが、長期安全性の観点から、多様な地質環境や設計オプションをより現実に即して評価するために進めてきた個別技術についても取りまとめた。以下に、主要な個別技術の進展についてまとめる。

(1) シナリオ構築手法の整備

地質環境の多様性と長期変遷への対応として、沿岸域における海水の影響や塩淡境界の時間的な変遷をより現実に即して取り扱うための地層処分システムの状態設定手法を開発した。また、事業段階において、関連する種々の科学的な知見を適切に安全評価に取り込めるようにするため、安全機能を中心軸として地層処分システムの長期挙動を把握し、ニアフィールドの長期変遷に関するシナリオを構築するための手法を開発した。さらには、基盤研究開発機関においても、FEP情報の整備、自然現象の著しい影響を評価するための手法などのシナリオ構築に関する検討が進められている。これらの成果により、シナリオ構築を行う上で基盤となる技術や情報が強化された。

(2) モデルの整備

地質環境の多様性と長期変遷への対応として、地下水の流れと水質の変遷を考慮して、天然バリア中の核種移行と生物圏を評価するためのモデル化技術を整備した。また、さまざまな設計オプションをより現実に即して評価できるようにするため、三次元の核種移行解析モデルを開発した。さらには、データセットに分布を与えた統計論的な核種移行解析モデルや、統計論的な評価結果に対して影響が大きいパラメータを抽出する方法などが開発されている。これらの成果により、さまざまな安全解析のニーズに対応するための技術基盤が拡充され、モデルの選定における技術的な選択肢が拡充した。

(3) データセット設定技術の整備

長期安全性評価の信頼性を確保するためには、地質環境の多様性や長期変遷、およびさまざまな設計オプションを考慮した上で、データセットを適切に設定することが重要である。第2次取りまとめ以降、基盤研究開発機関では、データセットを設定するための基盤情報として、核種移行解析に用いるさまざまなデータベース（熱力学、収着、拡散、ガラスの溶解などに関する各データベース）の開発・更新や生物圏評価に用いる環境移行データの整備が進められている。さらには、整備されたデータベースを用いたデータセットの設定手法についても検討が進められた。これらの成果により、核種移行解析を行う際に必要となる基盤的情報が強化された。

以上のことから、地層処分事業における長期安全性評価技術の信頼性が一段と向上した。

参考資料1 断層活動の影響に関する安全解析の例

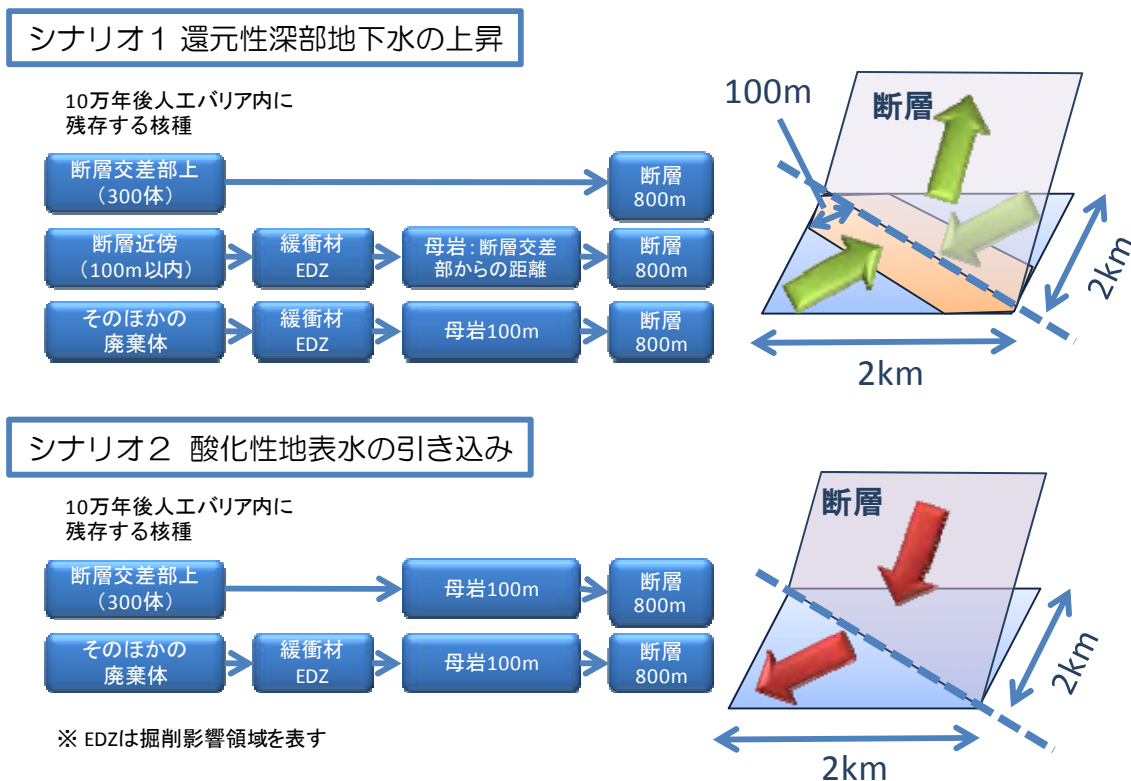
7.3.2.3 では、自然事象の著しい影響を仮想的に評価できるようにすることを目的として、断層活動を例としてシナリオ構築手法を示すとともに、将来新たな断層が処分場を直撃するという仮想的な状況を想定した二つのシナリオを示した。ここでは、この二つのシナリオに基づく安全解析を行った結果を例示する（NUMO, 2011c）。

1. 概念モデル

断層発生前の核種移行モデルとしては、第2次取りまとめのレファレンスケースと同一のモデルおよびデータセットを用いる。また、断層発生以前の核種移行距離は、いずれの廃棄体についても、第2次取りまとめレファレンスケースにて想定された100mと想定する。

断層発生後における核種移行モデルの概念図を参考図 1-1 に示す。

シナリオ1においては、新生断層と交差する廃棄体および人工バリアは断層発生時にその機能を喪失するものとし、廃棄体および人工バリア中の核種は瞬時に断層に至るものとする。断層と交差しない廃棄体はその健全性を維持するものと仮定する。また、新生断層から100m以内にある廃棄体については母岩中の移行距離が短縮することとし、それ以上離れた廃棄体については母岩中の移行距離は100mのまま不変であるとする。なお、シナリオ1では断層および母岩中の地下水は還元性であるものとする。



参考図 1-1 断層発生後の核種移行モデルの概念図

シナリオ2では、新生断層を通じて深部に下降した地表水が地下施設を通過してほかの既存の透水性断層などに至り、そこから地表に向かうものとする。新生断層と交差する廃棄体および人工バ

リアは断層発生時にその機能を喪失するものとし、廃棄体および人工バリア中の核種は瞬時に母岩に至るものとする。断層と交差しない廃棄体はその健全性を維持するものと仮定する。ここで、断層割れ目帯と交差するものも含め全ての廃棄体について核種移行距離は 100m と仮定する。シナリオ 2 では母岩および断層中の地下水は酸性性であるものと仮定する。

どちらのシナリオにおいても、断層活動直後の過渡的な地下水流動は数日から数か月程度の短期的なものであるため無視できるものとする。また、その後の地下水流動の変化は応力場の変化による間隙水圧の変化ではなく、断層活動に伴う岩盤の透水性の変化によるものとし、広域的な動水勾配も初期の値に復帰するものと仮定する。発生した断層からの距離に基づいて廃棄体を区分し、区分ごとに核種移行経路を定義する（参考表 1-1 および参考表 1-2）。被ばく線量は、それぞれの区分について廃棄体 1 体あたりの核種移行率に廃棄体数と線量換算係数を乗ずることによって算出する。なお、生物圏は断層発生による影響を受けないものと仮定し、断層発生の前後で同一の線量換算係数を用いる。解析コードは、GoldSim（GoldSim Technology Group, 2010）を用いる。

参考表 1-1 シナリオ 1 における廃棄体区分

	断層からの距離	廃棄体数
断層と交差する廃棄体	0m	300
核種移行距離を短縮する廃棄体	0m—10m	264
	10m—20m	560
	20m—30m	556
	30m—40m	551
	40m—50m	548
	50m—60m	544
	60m—70m	539
	70m—80m	536
	80m—90m	532
90m—100m	527	
それ以外の廃棄体	100m 以上	34543

参考表 1-2 シナリオ 2 における廃棄体区分

	断層からの距離	廃棄体数
断層と交差する廃棄体	100m	300
それ以外の廃棄体	100m	39700

2. 解析ケースとデータ

自然現象の著しい影響については、適切なサイト選定によって回避することが事業の基本的な考え方である。自然現象の将来予測については、外挿法を中心として、これまでさまざまな議論がなされ、わが国では、「過去数 10 万年程度の地質学的記録をもとに、将来 10 万年程度の推論は可能である」との合意がある（JNC, 1999b；土木学会, 2006）。また、10 万年を超える将来の地質環境の変遷や自然現象の発生に係る予測の精度は、事象ごと、地域ごとに異なるものである。以上を踏まえ、ここでは、新たな断層は 10 万年後に生じるものと仮定する。

断層の透水性は、断層を構成する構造ごとに異なることが一般的に知られている。多くの建設工

事の事例や研究開発事例などを収集し、参考表 1-3 のように断層の構造ごとの透水係数の範囲を整理した。

断層発生後の核種移行解析においては、断層・破碎帯および周辺の広範な変形領域が母岩に比べてどれだけ大きい透水性を有するかが重要となるが、本解析では、参考表 1-3 の結果から、断層・破碎帯の透水性は母岩の約 1,000 倍程度、また、周辺の広範な変形領域の透水性は母岩の約 10 倍程度と設定する。

参考表 1-3 断層の各構造における透水係数に関する情報のまとめ

区 分	断層の構造	透水係数 (m/sec) の範囲
断層・破碎帯	ガウジ部	$10^{-14} \sim 10^{-7}$
	破碎部	$10^{-10} \sim 10^{-5}$
広範な変形領域	マイロナイト 割れ目発達部	$10^{-13} \sim 10^{-6}$
母 岩	—	$10^{-13} \sim 10^{-8}$

*区分および断層の構造は、(吉田ほか, 2009) に基づき設定

主要な解析条件を参考表 1-4~1-6 に示す。

以下では、断層・破碎帯および広範な変形領域の水理特性について、不確実性を考慮してそれぞれ複数のケースを想定し、それらを組み合わせることで解析ケースを設定した。

それぞれのシナリオに対して、断層発生前後の溶解度、分配係数および母岩中核種移行距離を設定した(参考表 1-4)。断層・破碎帯について、断層ケース 1 では断層の透水係数として母岩平均透水係数より 2 桁高い値を設定し、断層ケース 2 では第 2 次とりまとめの断層に相当する透水係数を設定した。広範な変形領域については、次の二つのケースを設定した。広範な変形領域 1 では透水量係数分布は断層新生前(第 2 次取りまとめレファレンスケースの母岩)と同一とし、亀裂頻度のみ 10 倍とした。広範な変形領域 2 では、透水量係数分布は断層新生前(第 2 次取りまとめレファレンスケースの母岩)の 10 倍、亀裂頻度は断層新生前と同一とした。

なお、シナリオ 1 で主要な核種移行経路となる新生断層とシナリオ 2 における既存の断層では水理特性が異なる可能性も考えられるが、ここでは、簡単化のため同等と仮定した。

上記のシナリオと断層・破碎帯、広域な変形領域を組み合わせることにより、解析ケースを設定し(参考表 1-5)、各解析ケースに対する水理パラメータを設定した(参考表 1-4)。線量換算係数については、断層発生の前後ともに第 2 次取りまとめのレファレンスケースにおける線量換算係数を用いた。

参考表 1-4 シナリオ 1, シナリオ 2 の安全解析の条件

	溶解度および分散係数		母岩中核種移行距離		
	断層新生前	断層新生後	断層新生前	断層新生後	
シナリオ 1	第 2 次取りまとめの レファレンスケース		すべての 廃棄体 : 100m	断層割れ目帯と交差 する廃棄体 (300 体)	0m
				断層近傍の廃棄体	各廃棄体から 断層までの 距離
				そのほかの廃棄体	100m
シナリオ 2	第 2 次取りまと めのレファレン スケース	酸化性条件 の値	すべての廃棄体 : 100m		

参考表 1-5 解析ケース

解析ケース番号	シナリオ	断層・破碎帯	広範な変形領域 (亀裂特性)
1-1	シナリオ 1	断層ケース 1	広範な変形領域 1
1-2			広範な変形領域 2
1-3		断層ケース 2	広範な変形領域 1
1-4			広範な変形領域 2
2-1	シナリオ 2	断層ケース 1	広範な変形領域 1
2-2			広範な変形領域 2
2-3		断層ケース 2	広範な変形領域 1
2-4			広範な変形領域 2

参考表 1-6 各解析ケースにおける水理パラメータの設定値

解析ケース番号		断層・破碎帯の透水係数	広範な変形領域の亀裂透水量係数 (幾何平均)	広域的な動水勾配
シナリオ 1	1-1	$6.4 \times 10^{-8} \text{m/s}$ ※1	$10^{-9.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※3	0.01
	1-2		$10^{-8.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※4	
	1-3	$1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ※2	$10^{-9.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※3	
	1-4		$10^{-8.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※4	
シナリオ 2	2-1	$6.4 \times 10^{-8} \text{m/s}$ ※1	$10^{-9.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※3	
	2-2		$10^{-8.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※4	
	2-3	$1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ※2	$10^{-9.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※3	
	2-4		$10^{-8.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※4	

※1：母岩平均透水係数より2桁高い値

※2：第2次取りまとめの断層に相当する値

※3：断層新生前（第2次取りまとめレファレンスケースの母岩）と同じ透水量係数分布で亀裂頻度のみ10倍

※4：断層新生前（第2次取りまとめレファレンスケースの母岩）と同じ透水量係数分布の10倍（亀裂頻度は同一）

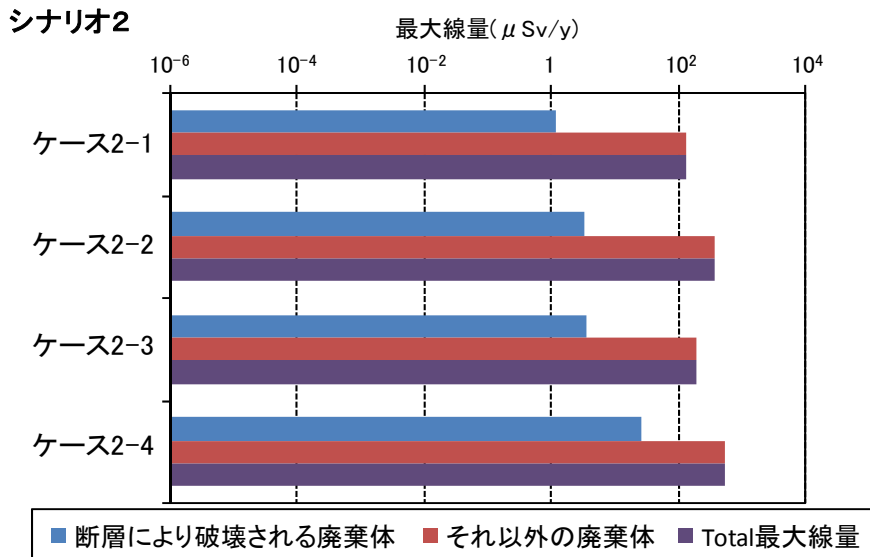
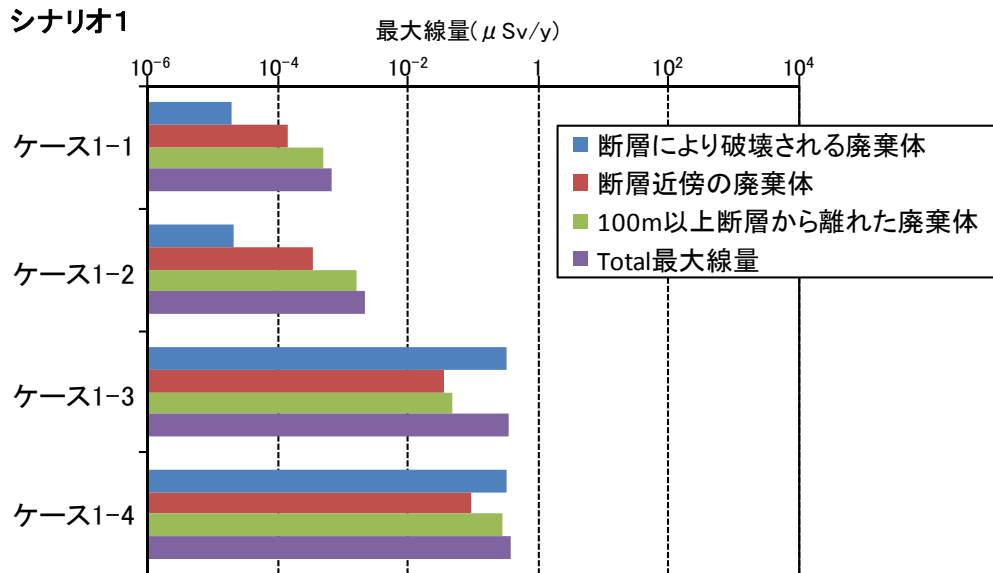
3. 解析結果

解析結果の例を参考図 1-2 に示す。これらの結果から、安全解析において着目した不確実性要因の感度を次のようにまとめる。

- ・ シナリオ 1 ではいずれのケースにおいても最大被ばく線量が $1\mu\text{Sv/y}$ 程度であるが、シナリオ 2 ではいずれのケースにおいても最大被ばく線量が $100\mu\text{Sv/y}$ 以上となっており、地下水の酸化還元状態が大きな感度を有することが分かる。
- ・ 断層活動直後に生じる最大被ばく線量は、ケース 1-3 およびケース 1-4 を除いて、断層活動の直接的な影響を受けないそのほかの廃棄体（広範な変形領域）によって支配される傾向にある。
- ・ シナリオ 1 においては、断層によって破壊された廃棄体からの放射性物質が断層に直接流入するために断層の透水係数は大きな感度を示すのに対して、シナリオ 2 においては、いずれの廃棄体においても広範な変形領域中で一定の核種移行距離が確保されているため、断層の透水係数の感度は小さい。
- ・ 広範な変形領域のモデルの感度は顕著なものではなく、断層新生による影響が亀裂頻度の上昇をもたらすものであっても、あるいは亀裂開口幅の増大をもたらすものであっても、平均透水係数が一定であれば影響の大きさはほぼ同じになるものと考えられる。

以上の安全解析の結果より、第2次取りまとめと同様の地質環境を想定して10万年以降に処分場を直撃するような断層が新生することを想定しても、断層により破壊などの直接的な影響を受ける

廃棄体数が限られること、加えて、断層の直撃を受けない大多数の廃棄体についても一定以上の地層処分システムの安全機能が保持されることを示唆している。ただし、これらの解析結果は、ベースとなる地質環境特性に依存するものであり、今後は、実際のサイトの特徴を考慮して同様の解析を行う。また、断層活動が地層処分システムに与える影響については、関連する知見や事例が限られることから、専門家との議論を通じてコンセンサスを得ながら進めることが肝要である。



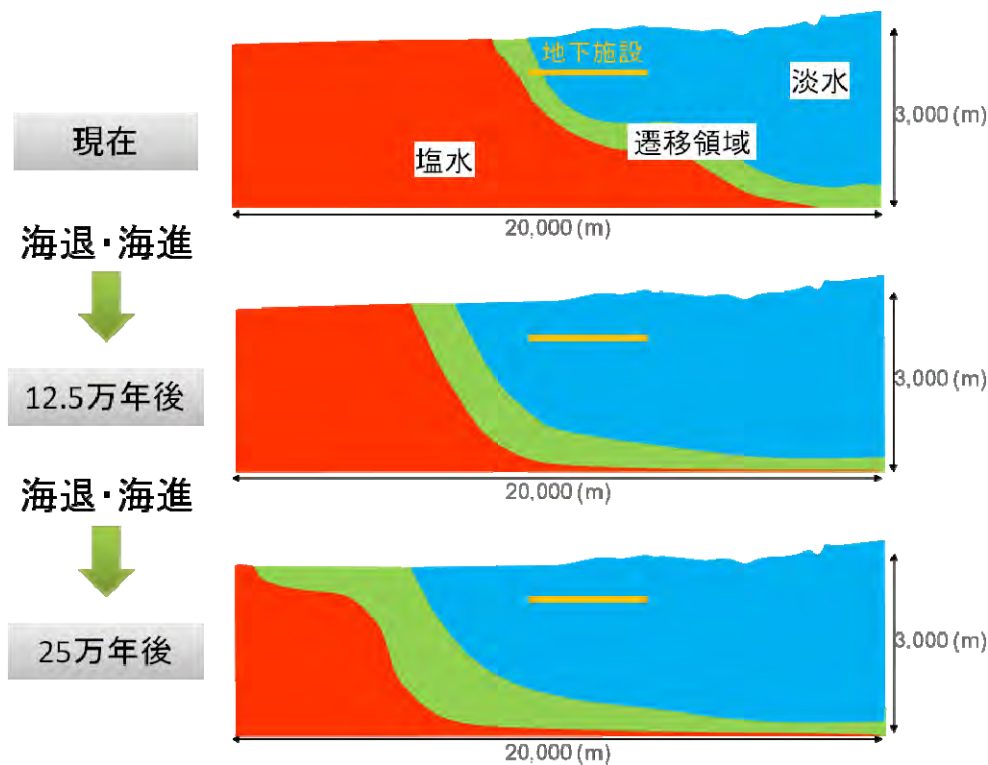
参考図 1-2 新生した断層活動の影響解析の結果

参考資料2 沿岸域の環境変遷を考慮した安全解析の例

7.3.3 では、沿岸域の特徴をより現実に即して取り込むための核種移行解析および生物圏評価の手順を示した。ここでは、この手順を仮想的な地質環境に対して適用し、核種移行解析および生物圏評価を例示的に実施した内容を記述する (NUMO, 2011d)。

1. 前提条件の設定

沿岸域では、海水準変動および隆起・浸食に伴って地形と地下水中の塩分濃度分布が変化すると考えられ、これらの環境変遷は核種移行解析に影響を与えるものである。将来の塩分濃度分布は密度流解析によって推定することが可能である。ここでは、仮想的に参考図 2-1 のような地下水化学環境の変遷を考慮した。12.5 万年の周期で海進・海退を繰り返すことを想定している。

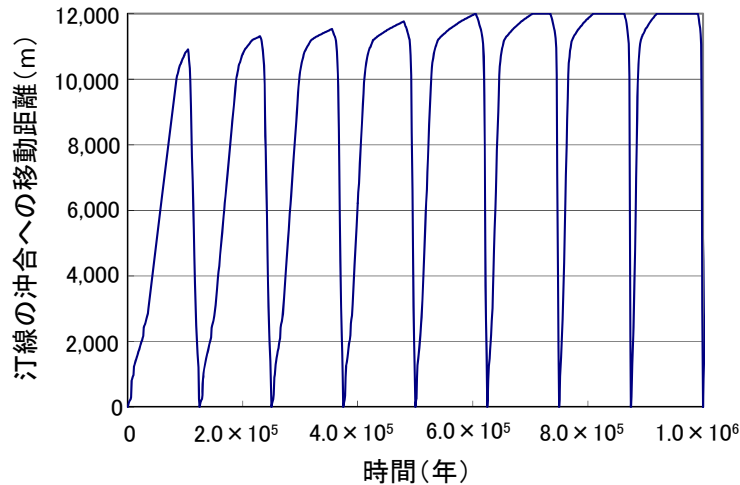


参考図 2-1 沿岸域における地下水化学環境の変遷の例

他方、隆起・侵食に関しては、隆起速度を平均 0.3mm/y と設定し、陸域では隆起と同じ速度で侵食が進行すると仮定した。なお、ここでは、簡単化のため、隆起・侵食に伴う処分深度の現象は考慮しないと仮定した。このため、実際の海水準の移動は、上図のようなサイクルを繰り返しつつ、長期的には隆起・侵食による地形変化の影響を受けながら変遷して行くものと考えられる。また、これと対応して、地下の塩淡水境界も気候変動による周期的変化と隆起・侵食による地形変化の双方の影響を受けつつ変化する。

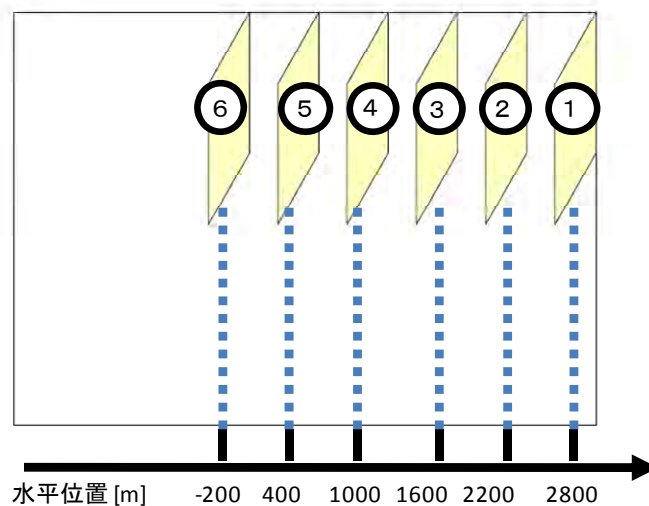
地形変化と海水準変動により、参考図 2-2 のように汀線が移動することを仮定した。現在の陸域および汀線付近の海底が、海域では隆起によって、今後ほとんどの期間、海水面よりも上にあるため隆起と侵食がほぼ相殺するのに対して、沖合では海底下にあり隆起のみが生じる期間が長い

海側の地形勾配は徐々に減少する。このため、海水準の低下に対応して海退時には汀線がより沖合にまで移動する。一方、現在の陸域は継続して陸域であり続け、その間、隆起と侵食の相殺によって地形が変化しないために、海進時の汀線の位置は変化せず、汀線の移動距離および移動速度は時間とともに増大する傾向がある。



参考図 2-2 汀線の移動

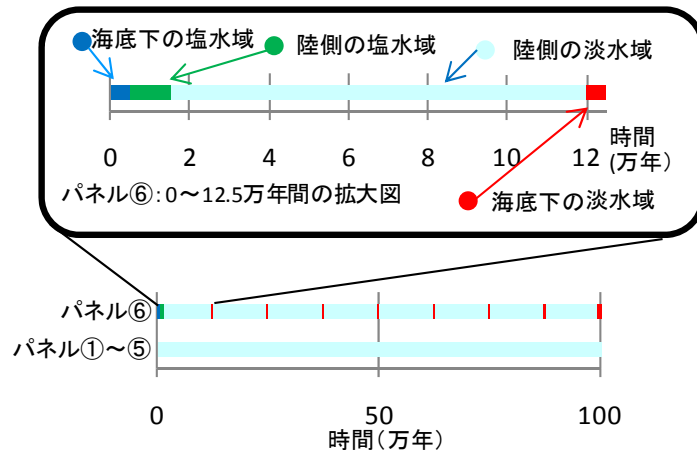
廃棄体を定置する処分パネルは、現在の海水準を基準から 800m の深度に、参考図 2-3 に示すレイアウトで六つの処分パネルを置くことを仮定した。この図では、水平位置は現在の汀線を基準とし、負の水平位置は現在海底下にあることを表す。ここで、処分場の位置については、沿岸域を対象とした安全解析の技術を確認する上で有用性を確認するため、処分場のレイアウトに対して海水準変動に起因する塩分濃度の水平方向の変化が顕著である点を仮定した。



参考図 2-3 処分パネルレイアウト

上記の各処分パネルは参考図 2-4 に示すような環境変遷をたどると設定した。最も海側の処分パネル (パネル 6) は、初期は海底下の塩水域であるが、後に陸側の塩水域となり、さらに陸側の淡水域となる。このパネルは、海底下の塩水という現在の場が出発点であり、次の海退時の汀線の移

動に追従できないために陸域に塩水が取り残された場となり、その後、一定期間を経た後に陸域における淡水の流れの場となるが、引き続き海進に際して淡水が海底下に取り残される。それ以降は、ほとんどの期間は陸域の淡水の流れの場となるが、海進時に短期間海底下に淡水が取り残される状況が生じ、また陸域に戻るといった変遷を約 12 万年周期で繰り返すこととなる。そのほかのパネル (1～5) は常に陸側に位置し、常に淡水環境下となる。

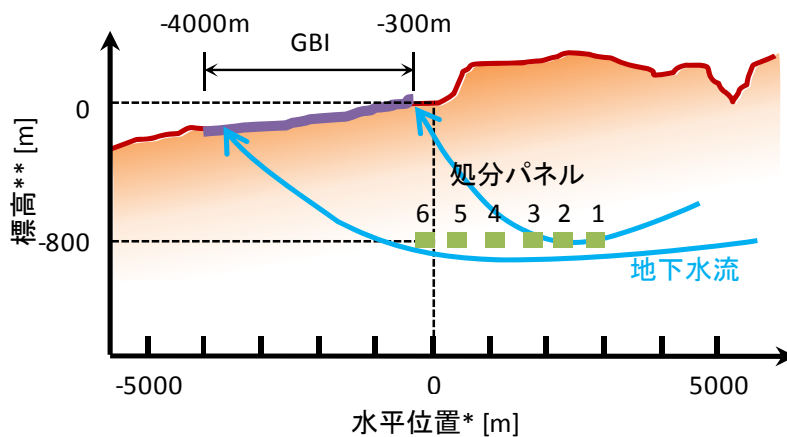


参考図 2-4 各処分パネルにおける環境変遷

処分パネルでの地下水流動場としては、最も海寄りの処分パネル以外のすべての処分パネルにおける地下水流動は時間によらず海側に向かって一定の流速 (10^3 m/y オーダー) であると仮定した。

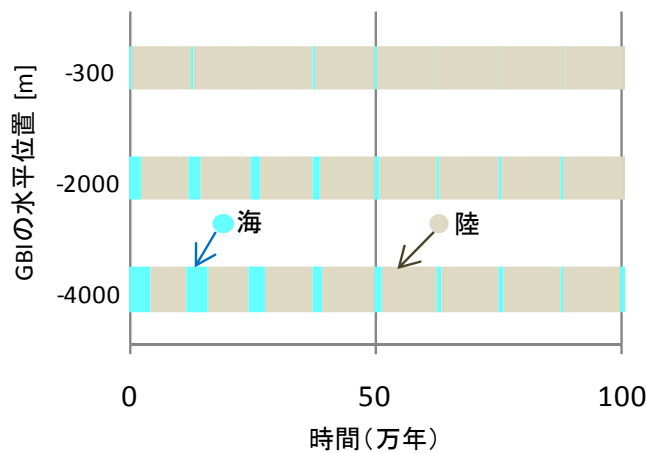
2. GBI の環境変遷の把握

前項で述べたように、沿岸域に位置する仮想サイトでは、約 12 万年の周期で汀線が 10km 以上にわたり移動する。その結果、地下施設を設置する岩盤の透水性に応じて塩淡水境界の移動に遅れが生じ、その程度によって GBI (地下施設から核種が生物圏に到達することを想定する位置) の変遷パターンが変化する。ここでは、GBI は、現在の汀線から 300m～4,000m 沖合の範囲に位置するとした (参考図 2-5)。参考図 2-2 に示した汀線の移動に基づき、この範囲における GBI の環境変遷を抽出した (参考図 2-6)。この場合、GBI は海水準変動に応じて陸域および海底の間で推移する。



*)水平位置は現在の汀線位置を0mとし、陸側を正とした。
 **)標高は現在の海水準を0mとした。

参考図 2-5 地下水流動の外観と GBI



参考図 2-6 GBI の環境変遷

3. 三次元物質移行解析

処分パネル周辺の母岩は先新第三紀堆積岩であり、参考資料 3 に例示した硬岩タイプ 3 に分類されると想定し、三次元不均質場を設定した。7.3.3.2 で述べた三次元核種移行解析モデルを用いて、想定した地質環境における三次元地下水流動解析および三次元物質移行解析を行い、人工バリア外側境界および天然バリア下流側境界（ここでは坑道からの距離 100m と仮定）における移行率の時間変化を算出した（NUMO, 2011d）。

4. 一次元マルチチャンネルモデルの作成

三次元物質移行解析からの移行率の基本解と一次元モデルからの移行率との差が最小となるように、EBS フィッティング係数を算出した（NUMO, 2011d）。また、続いて、EBS フィッティング係数と同様な考え方で、母岩亀裂の透水量係数の重み分布（NBS フィッティング係数）を調整し、三次元物質移行解析の母岩からの移行率を近似した（NUMO, 2011d）。

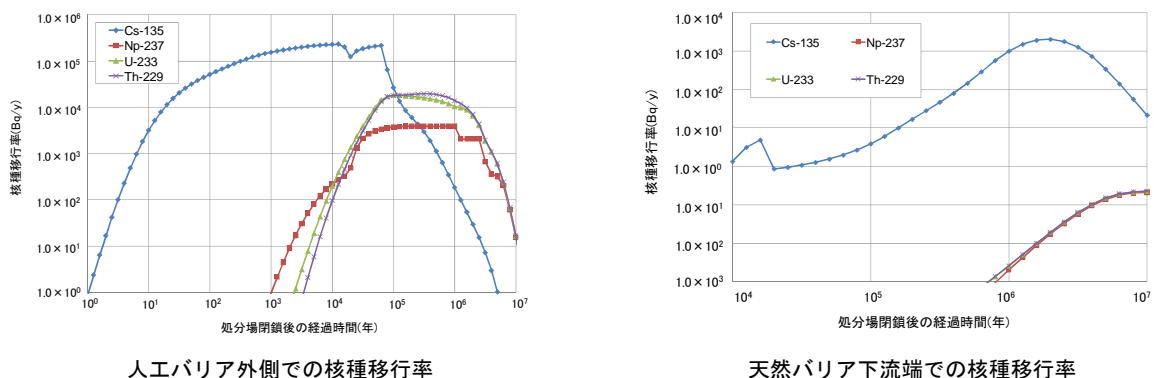
5. 核種移行解析

上記のようにして作成した一次元マルチチャンネルモデルを用いて核種移行解析を実施した (NUMO, 2011d)。

データセットは、第2次取りまとめにおいて設定されたもののうち、降水系および海水系地下水、先新第三紀堆積岩などのデータを用いた。対象核種は、第2次取りまとめにおける種々の解析ケースにおいて、最大被ばく線量に寄与した核種である Cs-135 および Np 系列とした。すでに述べたように、ここでは6個の処分パネルのうち、最も海側の処分パネルのみ環境変遷が生じており、変動の生じる時期に対応して入力データセットを切り替えた。

核種移行解析を行った結果を参考図 2-7 に示す。核種移行解析結果の特徴は、以下のようにまとめることができる。人工バリアからの核種移行率は、100 万年後までにはほぼ最大値 (Np 系列の場合は定常値) に到達している。また、人工バリア外側境界における Cs-135 と Np-237 の移行率の最大値が最も海寄りの処分パネルで摂動している様子が見られ、これは 1.5 万年後に水質が海水系から降水系へと変化することに対応している。さらに、天然バリア下流端の Cs-135 移行率の最大値は約 100 万年経過時点で生じているのに対して、Np 系列の移行率が最大値に到達するのはおよそ 1,000 万年後である。

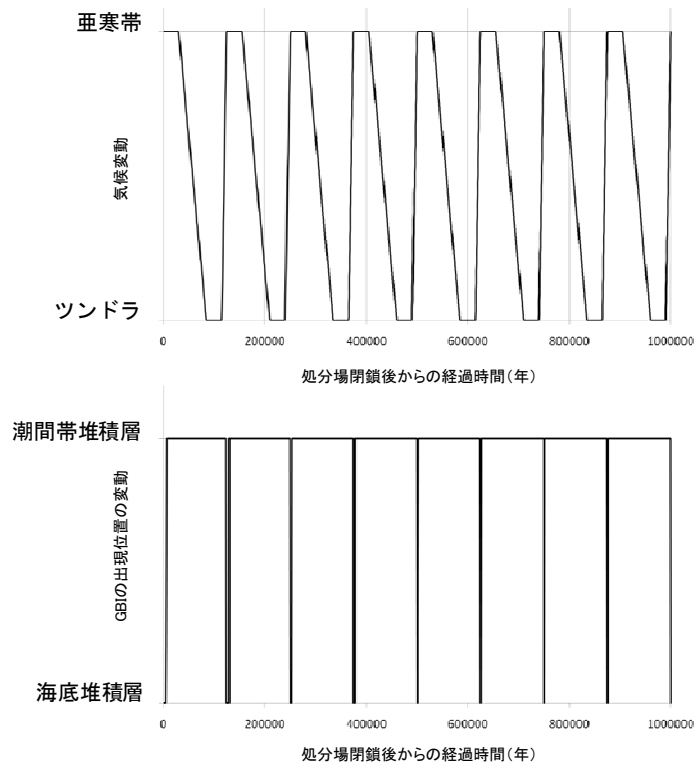
最も海寄りの処分パネルでは初期の地下水水質が塩水であり、母岩および緩衝材における Cs の分配係数は淡水の場合の 1/10 程度であるため、塩水環境である 1.5 万年の間に天然バリア下流端において最大値の 1/1,000~1/100 程度の核種移行率が生じている。



参考図 2-7 廃棄体一体当たりの核種移行率 (最も海寄りの処分パネル)

6. 被ばく線量の算出

核種移行率をもとに被ばく線量の算出を行うため、7.3.3.1 で述べた環境変遷を考慮した生物圏モデルを用いた。具体的には、以下のような環境変遷をモデルに取り入れた。生物圏各構成要素に関して想定すべき将来の変遷を記述することが必要であるが、ここでは、人間活動に影響を与えると考えられる気候変動 (亜寒帯→ツンドラ→冷温帯…) と、生物圏への核種の流入に関する GBI の変遷 (海底堆積層→潮間帯堆積層→海底堆積層…)、海域と陸域間の核種移行率に影響を与える海水準変動速度を考慮した。このうち、気候と GBI の環境変遷を参考図 2-8 に示す。



参考図 2-8 気候（上）および GBI（下）変化の時期についての長期変遷

このような生物圏モデルを用いて、汎用の生物圏評価コードである AMBER に支配方程式と各種パラメータを入力して生物圏評価を行った (NUMO, 2011d)。この評価では、個々の放射性核種および崩壊系列の親核種の GBI への移行率を仮定して、各被ばくグループに与える線量を算出し、被ばく線量換算係数とした。

このように、前出のシナリオにおける環境条件と核種移行場のタイプおよび不均質場における廃棄体の区分に従って GBI ごとに算出する核種移行率に対して被ばく線量換算係数を設定し、核種移行解析の結果に乗じることによって、全体システムについての安全評価結果を得る。

参考図 2-9 に、天然バリア下流端での核種移行率に対して、GBI の切り替わりを考慮して、期間ごとに設定した換算係数を用いて被ばく線量を算出した結果を例示した。GBI は海水準変動に応じて変化し (-300m~4,000m の範囲)、参考図 2-6 に示したように位置によって環境が海底と陸域の間で切り替わる時期も異なることから、GBI の範囲の両端 (-300m および 4,000m) における切り替わり時期を用いた解析をそれぞれ行った。

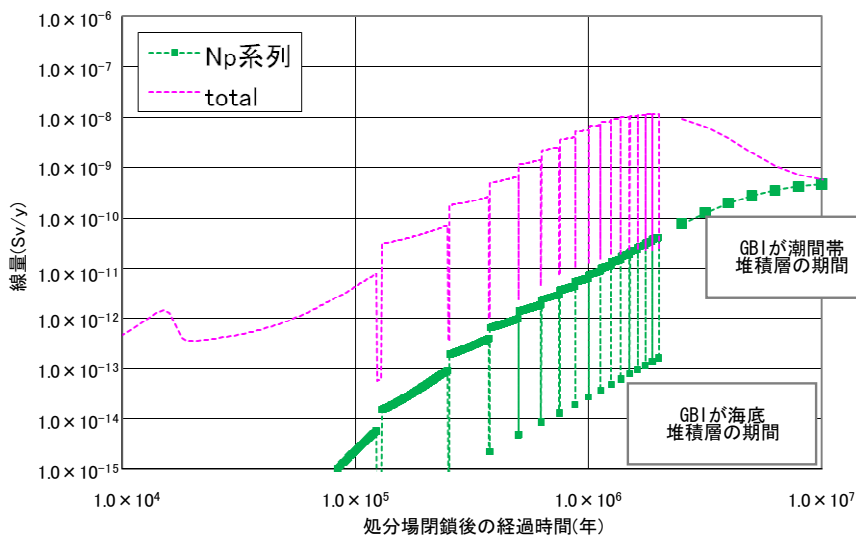
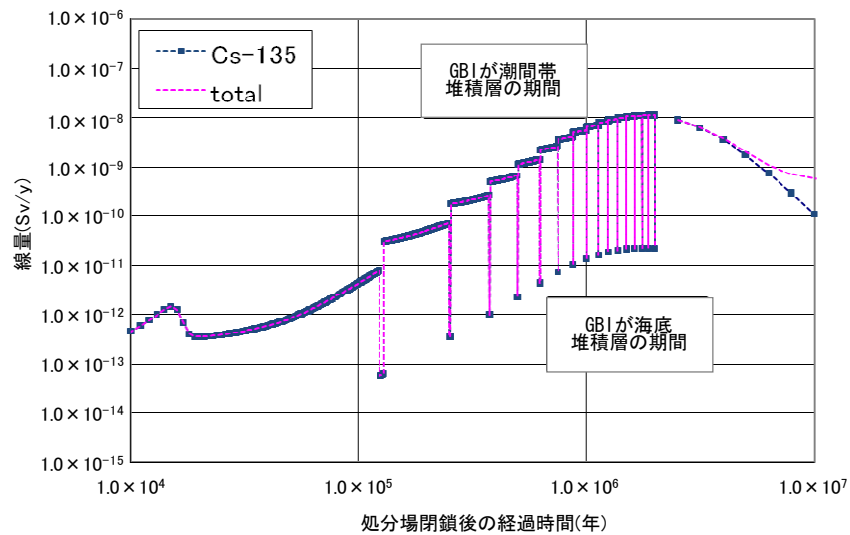
また、各図において、マーカー (Cs-135 については紺色の正方形, Np 系列については緑色の正方形) を付けた部分が該当する GBI に対応する被ばく線量であり、赤色の点線が各核種による被ばく線量の総和を示す。なお、いずれのケースにおいても農業従事者の被ばく線量が海洋漁業従事者を 1 桁程度上回る結果となったため、ここでは、前者についての算出結果のみを示す。

これらの解析結果の主要な特徴およびケース間の差異は以下のようにまとめることができる。

- GBI が海底（海底堆積層）に位置する期間の被ばく線量は、GBI が陸域（潮間帯堆積層）に

位置する期間よりも 2 桁程度以上小さく、また、GBI が海底から陸域に推移した直後には、前述の核種を保持している海底堆積層の陸化による被ばく線量の増大が生じている。

- GBI の環境切り替わり時期の影響は、初期の 10 万年程度の期間においては顕著であるが、それ以降の期間では必ずしも大きくない。
- 100 万年後までの期間においては、Np 系列による被ばく線量は Cs-135 に比して小さく、総線量への寄与は無視し得る程度である。



参考図 2-9 GBI の環境変遷を考慮した被ばく線量の算出結果

(GBI の環境変遷時期を最も海側の地点 (現在の汀線から沖合に 300m) で代表した場合)

参考資料 3 三次元核種移行モデルの例題への適用

7.3.3.2 では、母岩の不均質性および処分場の設計を考慮した核種移行解析モデルを示した。ここでは、この核種移行モデルを、さまざまな例題へ適用した内容について述べる。具体的には、複数の母岩、廃棄体の縦置きと横置きの違い、坑道と直交する断層と廃棄体との離隔について検討した結果について述べる (NUMO, 2011d)。

1. 複数の母岩への適用

母岩の透水性は地層処分システムの性能に影響を及ぼすものとして最も重要性の高いものの一つである。従って、断層や破碎帯などの出現頻度の異なる高透水性構造が分布するために、スケールごとに平均的な透水性が異なり、スケールによらず一つの透水係数値によって代表することは適切ではない。例えば、透水性がほぼ一様に 10^{-9} m/s の岩盤と、 10^{-10} m/s 程度の健全部と数 10m 間隔で分布する 10^{-7} m/s 程度の破碎帯を有する巨視的平均透水係数 10^{-9} m/s の岩盤とでは天然バリアとしての安全性能は大きく異なる可能性がある。そこで、健全部、ブロックスケール、各スケール、処分パネルスケールごとの平均透水係数を定義する。本検討で考慮した不均質透水係数場の例を岩種ごとに参考表 3-1 に示す。

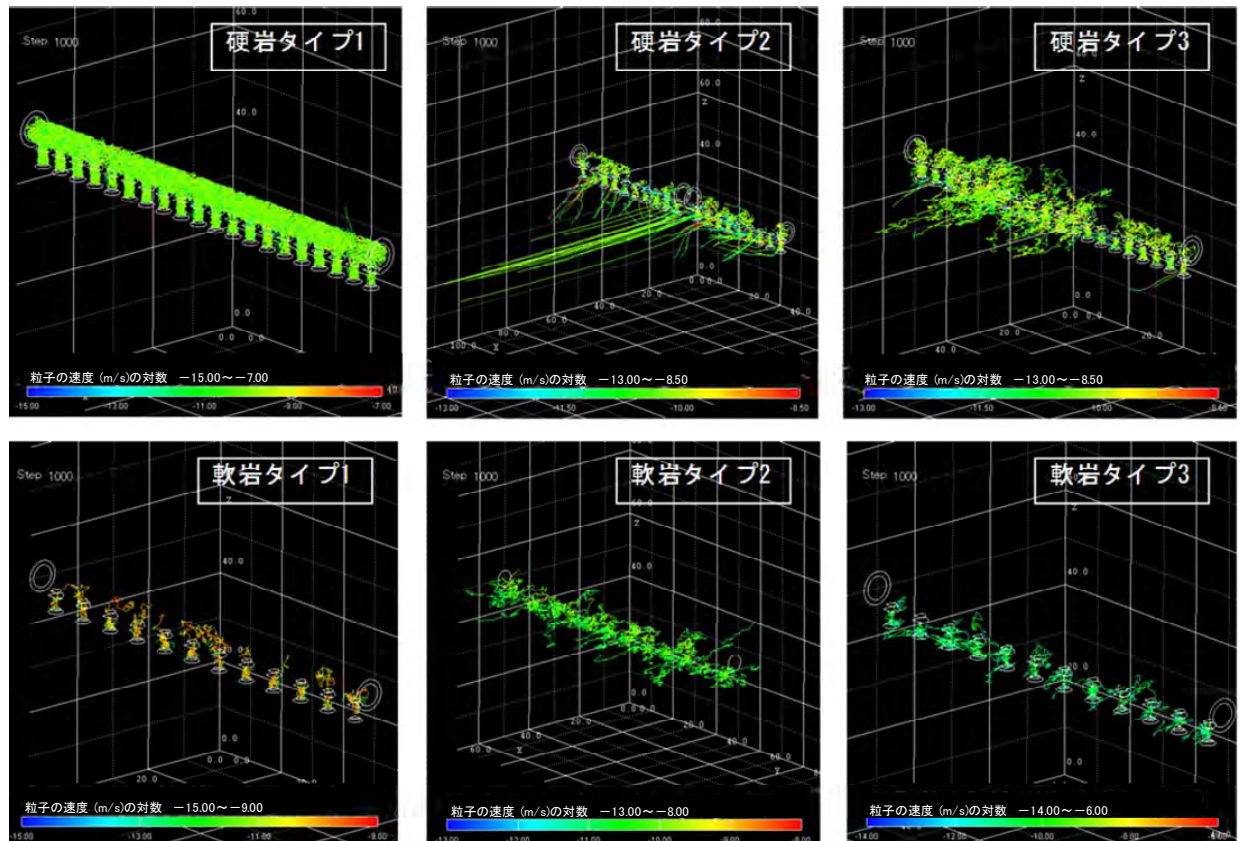
参考表 3-1 試行で想定した不均質透水係数場の例

岩種	タイプ	マトリクス透水性 (亀裂透水性)	平均透水係数 (m/s)			該当する地質環境の事例	モデル	備考
			健全部	ブロックスケール	処分パネルスケール			
結晶質岩 堆積硬岩 (硬岩)	1	低 (低)	10^{-10}	10^{-10}	10^{-8}	第2次取りまとめレファレンス	亀裂	難透水性のマトリクスおよび等方的で低頻度かつ低透水性の亀裂ネットワークがランダムに分布している
	2	低 (高)	10^{-8}	10^{-7}	10^{-7}	花崗岩		個々の亀裂の透水性が高く、ブロックスケールではより高透水性の断層が分布している
	3	低 (低)	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	付加体		個々の亀裂の透水性は低いが高頻度が極めて高く明瞭な異方性を示す。
堆積軟岩 (軟岩)	1	低 (低)	10^{-10}	10^{-10}	10^{-9}	新第三紀堆積軟岩 (深部)	亀裂または多孔質	地圧のために亀裂 (等方的/低頻度) は閉塞しマトリクス部も圧密されている
	2	高 (低)	10^{-8}	10^{-8}	10^{-7}	新第三紀—第四紀砂岩 + 凝灰岩	多孔質	亀裂は極めて低頻度のため平均透水係数にはほとんど寄与しない
	3	高 (高)	10^{-8}	10^{-8}	10^{-7}	新第三紀堆積軟岩 (浅部)	亀裂および多孔質	マトリクス部の層理面および亀裂が開いているためいずれも一定の透水性を示す。ブロックスケール以上では透水性の高い割れ目帯が含まれる

* 透水係数の数値はいずれもおよその数値でありオーダーを表現したものである

上述した 6 種類の岩種それぞれにおける核種移行挙動の特徴を比較することを目的として、三次元核種移行解析モデルを用いて解析を行った。

6種類の岩種に対して算出したダルシー流速場（NUMO, 2011d）に基づき、各要素に含まれる亀裂中の実流速およびマトリクス中の流速を推定し、核種移行解析を行った。ここで、粒子は放射性壊変しないCs同位体であるとし、緩衝材およびそれぞれの母岩での分配係数を仮定して各ケースにおいて合計10万個程度を24体のガラス固化体内に入力して、その後の挙動を解析した。少数（100個）の粒子をランダムに抽出し、10万年後までの軌跡を描画した結果を参考図3-1に示す。軌跡の色は、各タイムステップにおける粒子の移動速度を表現している。



参考図 3-1 各岩種に対応した少数の粒子軌跡（各ガラス固化体でパルス入力：10 万年後）

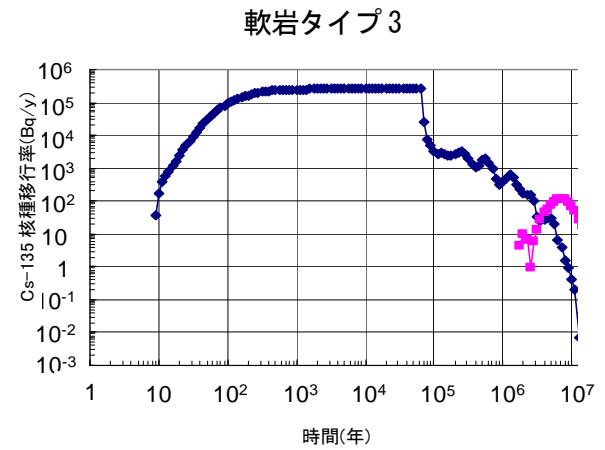
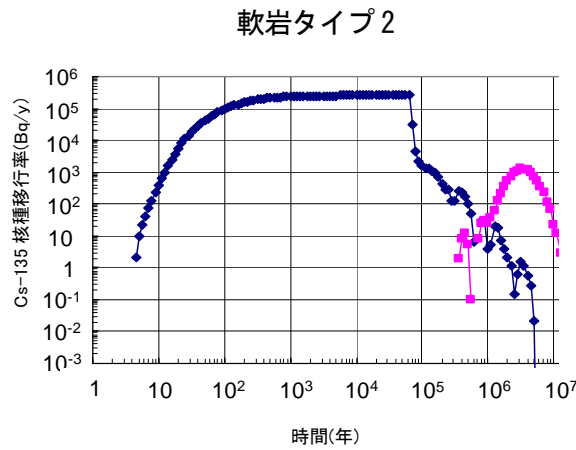
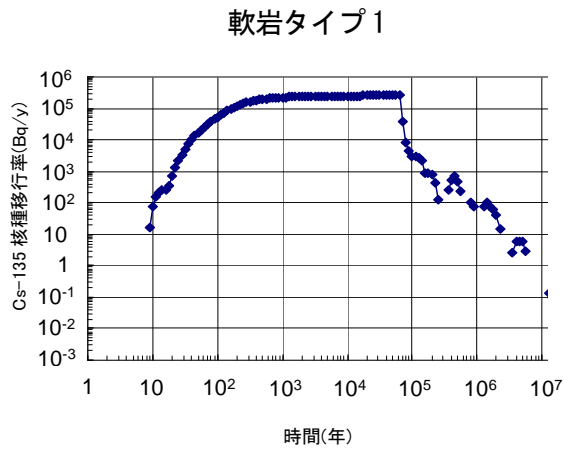
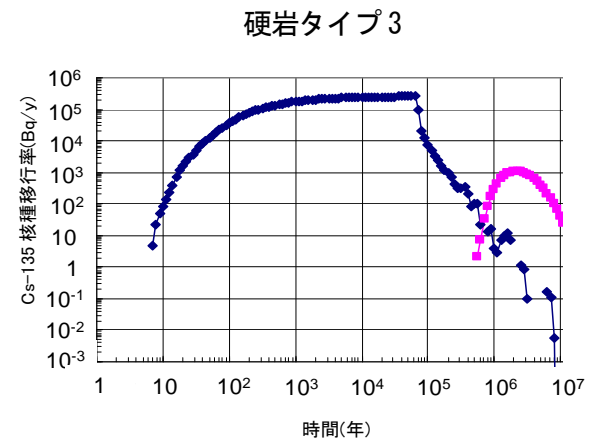
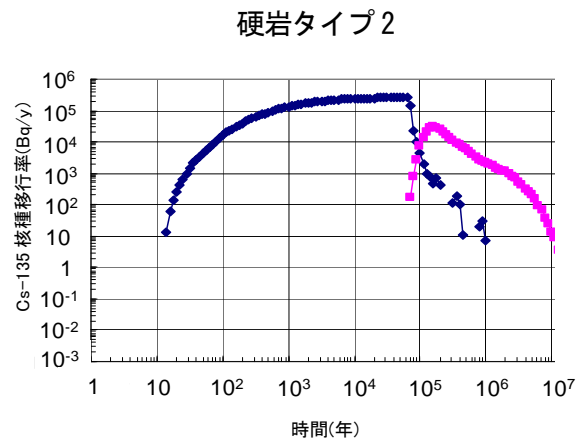
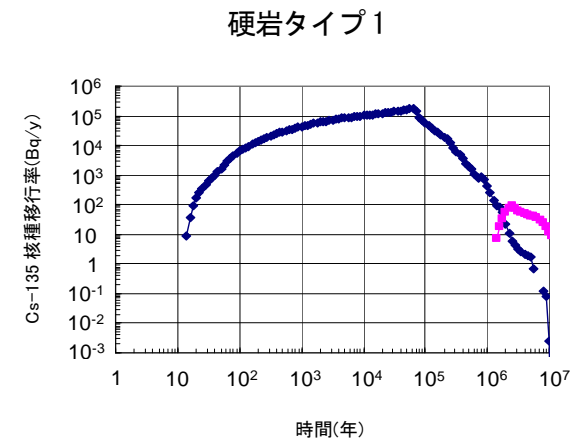
硬岩タイプ1では、亀裂頻度が低いために母岩の透水性が小さく、また、空隙率および実効拡散係数も小さいために、緩衝材および上部坑道埋め戻し材中の核種移行の方が周辺の母岩中の核種移行よりも顕著に速く、各粒子は、緩衝材および埋め戻し材の内部を拡散によりランダムに移行する（緩衝材および埋め戻し材の内部が粒子軌跡によって充たされていることと対応する）。そして、10万年後には、坑道と交差する少数の透水性亀裂に沿って母岩中を移行する粒子の軌跡がいくつか見ることができる（上部坑道から斜め上方に移行する軌跡群）。これに対して、透水性亀裂の頻度が顕著に高い硬岩タイプ2およびタイプ3では、各処分孔においてこれらの亀裂との交差部が存在していることからガラス固化体から緩衝材に至った核種は上部坑道に拡散する以前に処分孔から亀裂へと移行している。また、硬岩タイプ2では、坑道中央部で幅5mの高透水性断層と直交しているために、断層内での粒子の移動が卓越して生じているのに対して、硬岩タイプ3では、複雑な形状で分布する割れ目帯に沿って母岩中の卓越した核種移行経路が生じていることが分かる。低透水性の均質連続体である軟岩タイプ1では、坑道近傍は母岩中でも拡散支配の場であり、粒子は等方的に

広がっている。また、粒子は10万年後でも坑道の直近に留まっている。一方、マトリクスが透水性であり顕著な移流が生じている軟岩タイプ2およびタイプ3ではマトリクス内を拡散でランダムに移行する粒子軌跡が時間とともに地下水流動方向（左側）に徐々に推移していることが分かる。解析領域内に含まれる24体のガラス固化体中に時刻0で入力した約10万個の粒子のその後の挙動は、それぞれの不均質場における拡散—移流方程式の基本解とみなすことができる。そこで、ソースタームとして、第2次取りまとめレファレンスケースと同様に、ガラス固化体の浸出率律速（溶解期間7万年）を仮定してこの基本解に対する畳み込み積分を行い、さらに、Cs-135の半減期（約230万年）に対応した減衰の係数を乗ずることによって、同じく、人工バリア外側境界および解析領域下流端でのCs-135の移行率を算出することができる。

上述した手法によって各岩種についてのCs-135の人工バリア外側境界および解析領域下流端での移行率を算出した結果を参考図3-2に示す。

いずれの岩種においてもCs-135の人工バリア外側での核種移行率に顕著な差異は認められない。これは、Cs-135の放出率がガラス固化体からの浸出率で規定されていること、および人工バリア外側の地下水流速の感度が顕著ではない範囲にあるためである。一方、解析領域下流端での移行率には、以下に述べるような特徴を把握することができる。

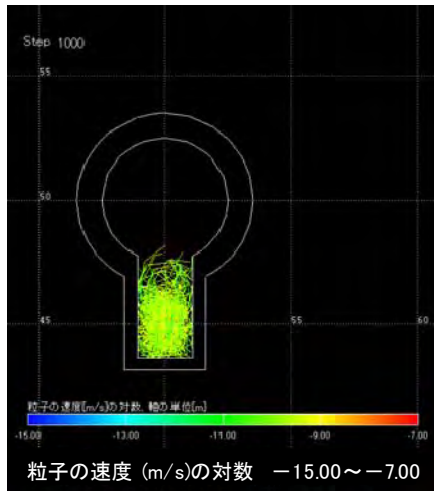
- ・ 低透水性の均質な連続体である軟岩タイプ1では、下流端での移行率は極めて小さい（ガラス固化体1体当たりの移行率が 10^3 Bq/y以下であるため図中には表示されていない）。
- ・ 亀裂の頻度が低く透水量係数も比較的小さい硬岩タイプ1および低透水性のマトリクスに規定された軟岩タイプ3における最大移行率はいずれも 10^2 Bq/y程度であるが、ピークの出現時期は亀裂の影響の顕著な硬岩タイプ1の方が早い。
- ・ 硬岩タイプ3と軟岩タイプ2における最大移行率はいずれも 10^3 Bq/y程度であるが、ピークの出現時期は亀裂を含む硬岩タイプ3の方が若干早い。
- ・ 硬岩タイプ2は、中央の大規模な断層のために顕著に最も高い被ばく線量（ 10^4 Bq/y程度）を示し、また、断層を経路とした核種移行率とそのほかの部分のより遅く小さい核種移行率とが重なりあっているものと推定される。



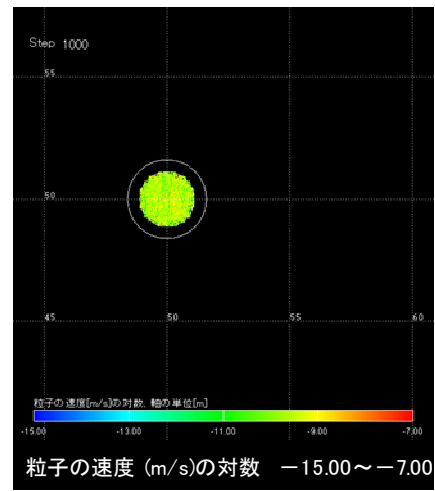
参考図 3-2 Cs-135 移行率（ガラス固化体 1 体当たりの平均）の時間変化
 （青色のプロットは人工バリアからの核種移行率を、ピンク色のプロットは母岩からの核種移行率を示す。）

2. 縦置きと横置きの比較

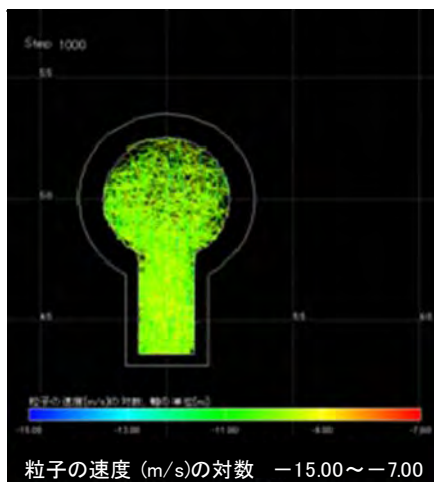
第2次取りまとめの安全評価において想定した岩盤においては、緩衝材中の拡散による核種移行の方が岩盤中のマトリクス拡散も考慮した平均的な移動よりも速いものである。このため、横置きの場合には、ガラス固化体から放出された核種はまず緩衝材中に貯留される（参考図 3-3）。この時点での緩衝材間隙水中での核種濃度は、可溶性の核種（Cs-135 など）の総インベントリが緩衝材中で収着分配平衡にあるものとして算出した空隙水中濃度とほぼ等しいものである。



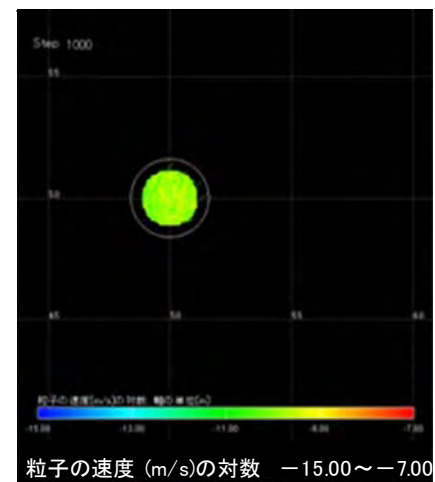
(a) 縦置き (1,000年)



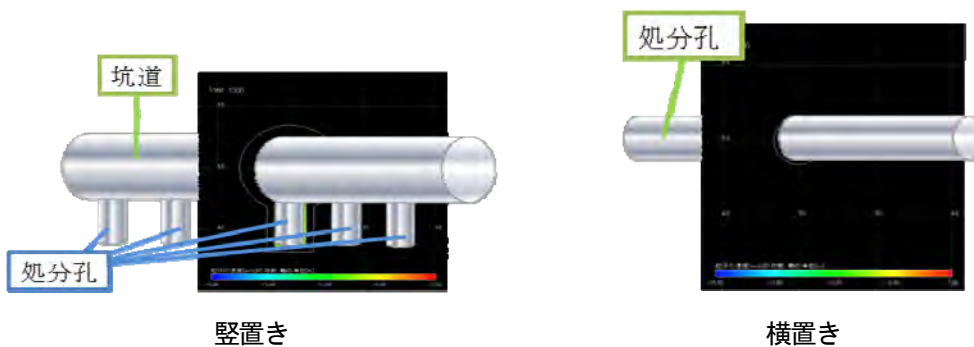
(b) 横置き (1,000年)



(c) 縦置き (1万年)

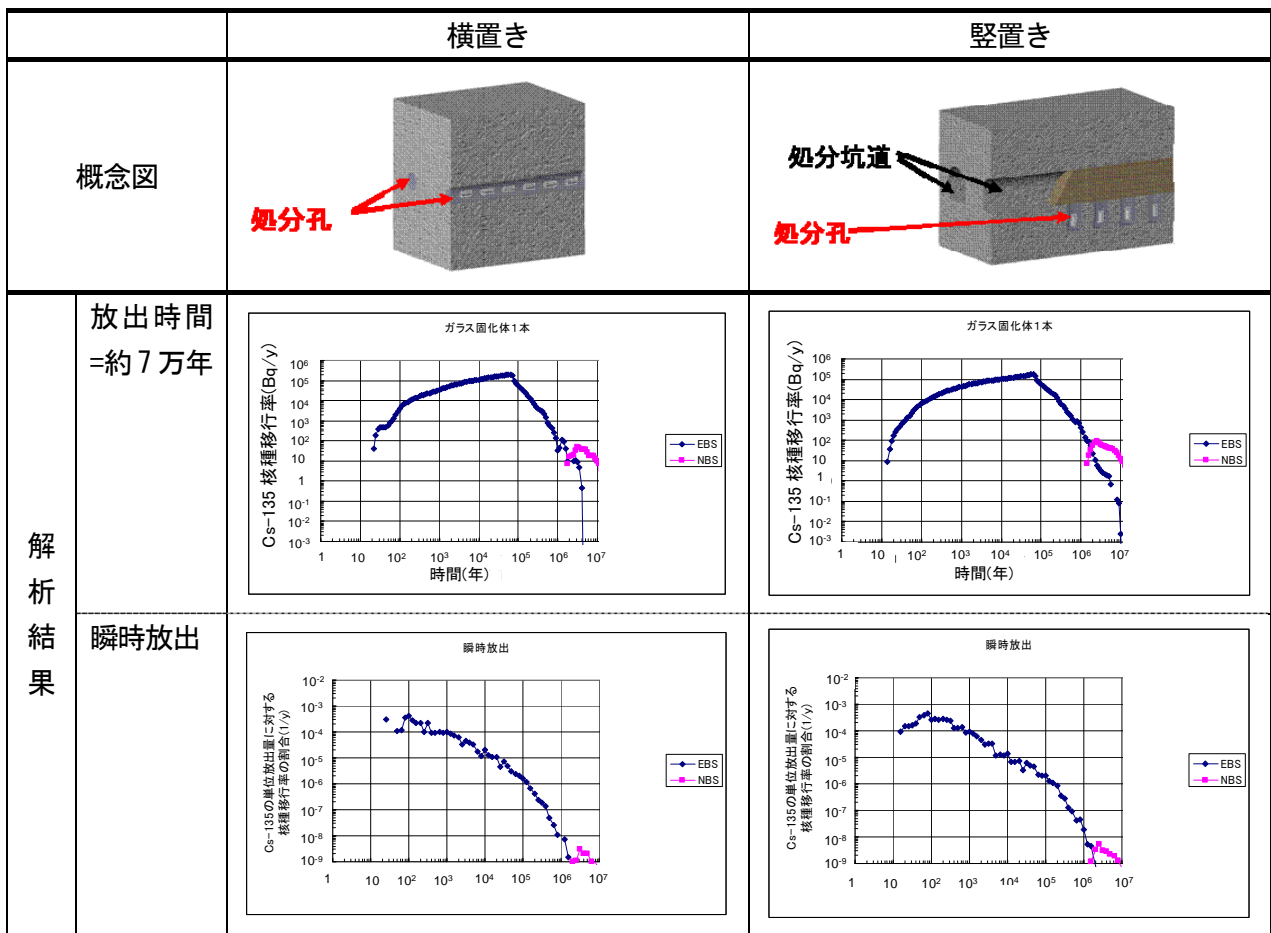


(d) 横置き (1万年)



参考図 3-3 ニアフィールド内の Cs-135 の軌跡 (硬岩タイプ1)

その後、時間をかけて岩盤中に移行していくが、この岩盤中への核種移行率の最大値は上記の緩衝材中の核種濃度によって影響を受ける。このような観点からは、縦置きの場合には、処分孔内の緩衝材に加えて上部坑道内に埋め戻し材が存在し、かつ、後者の体積が支配的であるために、この場合の緩衝材中濃度は横置きの場合よりも顕著に低減されるはずである。しかしながら、実際には、縦置きの場合に廃棄体から移行する核種が上部坑道内の埋め戻し材に至るまでには長期間を要し、周囲の母岩への核種移行はそれ以前に生じるために、縦置きの場合にも、周辺母岩への核種移行率は処分孔内の緩衝材中の収着を考慮した平衡濃度によって規定される。そして、第2次取りまとめの設計では、縦置きの場合も横置きの場合も廃棄体一体当たりの緩衝材体積は同等であることから、母岩への核種移行率の最大値を規定する緩衝材空隙水中の分配平衡の核種濃度もほぼ等しい。このため、ほぼ同等の岩盤を想定したケースにおいて算出された人工バリアからの核種移行率の最大値は縦置きおよび横置きの場合でほぼ等しいという結果を得ている（参考図 3-4 参照）。このような設計オプションに対応した核種移行挙動の定量的な比較とその解釈は、本項で述べる詳細な核種移行解析手法を用いることの重要なメリットの一つである。

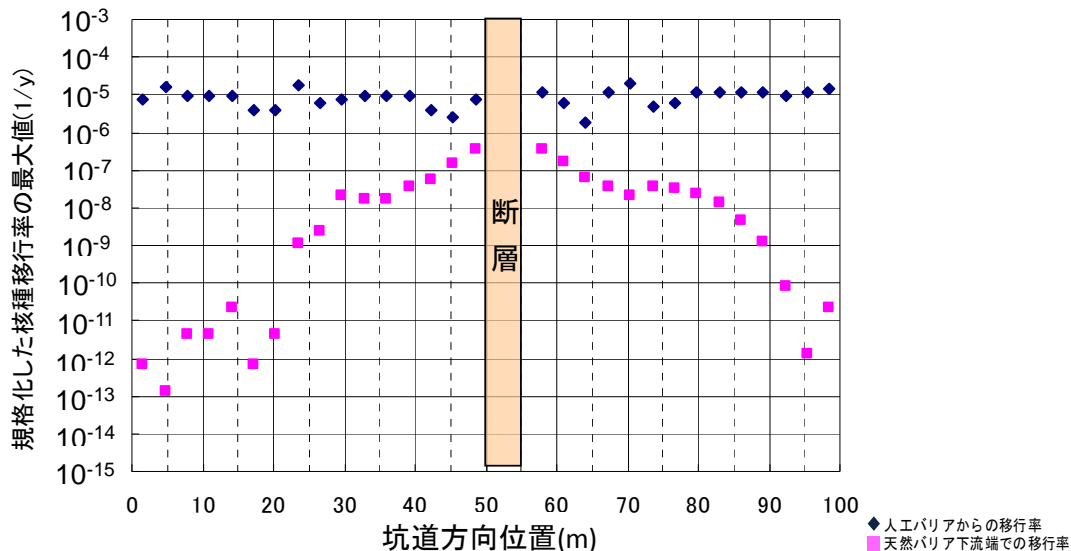


(◆: EBS (人工バリア) からの核種移行率の割合, ■: NBS (母岩) からの核種移行率の割合)

参考図 3-4 縦置きおよび横置きの核種移行率の比較

3. 断層からの離隔に関する知見（硬岩タイプ2の場合）

坑道の中央部で直交する幅 5m の高透水性断層を有する硬岩タイプ 2 の解析領域下流端での Cs-135 の移行率は、この断層のために最も高い移行率 (10^4Bq/y 程度) を示し、また、断層を経路とした核種移行率とそのほかの健全部のより小さい核種移行率とが重なりあっているものと推定される。そこで、解析対象領域に含まれる約 30 体の廃棄体それぞれから移行した核種の人工バリアおよび下流端での移行率の最大値（パルス入力に対するものであり、畳み込み積分は行っていない）を比較した。断層直近の廃棄体からの移行率の最大値は十分離れた廃棄体よりも 2 桁程度大きく、また、断層の集水域に対応して約 30m 以内にある廃棄体からの核種移行率の最大値には有意な影響があることが分かった。また、Np-237 についても同様の解析を行い、解析対象領域に含まれる約 30 体の廃棄体それぞれから移行した核種の人工バリアおよび下流端での移行率の最大値（パルス入力に対する）を比較した結果を参考図 3-5 に示す。この比較結果より、断層直近の廃棄体と断層から十分離れた廃棄体との移行率最大値の差は約 6 桁に達しており、断層の影響がより顕著であることが分かる。



参考図 3-5 Np-237 移行率最大値（パルス入力に対する）の廃棄体依存性（硬岩タイプ2）

一方、坑道および掘削影響領域にベントナイトプラグによる止水工を施した場合でも母岩中の透水性亀裂のために坑道と断層をつなぐ短絡路が多数存在しており、止水工の効果は有意なものとはならないことが分かった。

参考文献

- ANDRA (2005) : Dossier 2005 Argile.
- BIOCLIM (2004) : Development and Application of a Methodology for Taking Climate-Driven Environmental Change into Account in Performance Assessments. BIOCLIM Deliverable pp.D10-12.
- BIOMOVS II (1996) : Development of a Reference Biospheres Methodology for Radioactive Waste Disposal, BIOMOVS II Technical Report No. 6, published on behalf of the BIOMOVS II Steering Committee by the Swedish Radiation Protection Institute, Sweden.
- 電事連 (電気事業連合会)・JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005a) : TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02..
- 電事連 (電気事業連合会)・JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005b) : TRU 廃棄物処分技術検討書 根拠資料集, FEP 辞書.
- 電中研 (電力中央研究所) (2005) : 核燃料サイクル関係推進調整等(放射性廃棄物等広報対策等－放射性廃棄物処分におけるセーフティケースに関する社会的受容性調査).
- 土木学会 (2006) : 精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方, 土木学会原子力土木委員会地下環境部会.
- 土木学会 (2008) : 余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方, 土木学会エネルギー委員会低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会.
- 江橋健, 小尾繁, 大井貴夫 (2009a) : 高レベル放射性廃棄物地層処分における性能評価パラメータの安全裕度評価方法の例示, 原子力バックエンド研究, Vol.15, No.2, pp.99-115..
- 江橋健, 川村淳, 稲垣学, 小尾繁, 柴田雅博, 板津透, 仲島邦彦, 宮原要 (2009b) : 仮想的な堆積岩分布域における地層処分の地下水シナリオを対象とした隆起・侵食の影響評価手法の例示, JAEA-Research 2008-117.
- Ebashi, T., Ishiguro, K., Wakasugi, K., Kawamura, H., Gaus, I., Vomvoris, S., Martin, A. J. and Smith, P. (2010) : Trends in Scenario Development Methodologies and Integration in NUMO's Approach, Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM2010), ICEM2010-40124.
- ENSI (2009) : Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis, Erläuterungsbericht zur Richtlinie, ENSI G-03.
- European Commission (1995) : Review on development of methodologies for modeling with uncertainty and variability : Munvar project, EUR1617EN, 1995.
- 藤原治, 柳田誠, 三箇智二, 守屋俊文 (2005) : 地層処分からみた日本列島の隆起・侵食に関する研究, 原子力バックエンド研究, vol. 11, No. 2, pp.113-124.
- Fukuchi, T., Yurugi, J., and Imai, N. (2007) : ESR detection of seismic frictional heating events in the Nojima fault drill core samples, Japan. Tectonophysics, Vol.443, pp.127-138.
- GoldSim Technology Group (2010) : GoldSim User's Guide.
- 原子力安全委員会 (2004) : 放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について.
- 原子力安全委員会 (2010) : 余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する技術資料 (案), 原子力安全委員会放射性廃棄物廃止措置専門部会.

- 原子力委員会 (1997) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について, 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会.
- 長谷川琢磨, 田中靖治, 馬場保典, 五十嵐敏文 (2004) : Aspo Hard Rock Laboratory 建設に伴う地下水流動の変化に着目した解析モデルの検証, 土木学会論文集, No. 757/III-66, pp.189-202.
- 林真紀, 佐竹憲治, 吉川英樹, 油井三和 (2005) : ガラスの溶解速度データベースの構築, JNC TN8400 2005-008.
- 放医研 (放射線医学総合研究所) (2008) : 平成 19 年度放射性廃棄物共通技術調査等委託費, 放射性核種生物圏移行評価高度化調査.
- 放医研 (放射線医学総合研究所) (2009) : 平成 20 年度放射性廃棄物共通技術調査等委託費, 放射性核種生物圏移行評価高度化調査.
- 放医研 (放射線医学総合研究所) (2010) : 平成 21 年度放射性廃棄物共通技術調査等委託費, 放射性核種生物圏移行評価高度化調査.
- IAEA (1995) : The Principles of Radioactive Waste Management, IAEA, Safety Series No. 111-F, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2003) : “Reference Biospheres” for Solid Radioactive Waste Disposal : Report of BIOMASS Theme 1 of the BIOSphere Modelling and ASSEssment (BIOMASS Programme). IAEA-BIOMASS-6, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2005) : Natural activity concentrations and fluxes as indicators for the safety assessment of radioactive waste disposal, Results of a coordinated research project, IAEA-TECDOC-1464, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2007) : Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection 2007 edition, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2009) : Disposal of Radioactive Waste, Draft Specific Safety Requirements No.SSR-5 DS354 Draft4, International Atomic Energy Agency.
- ICRP (2000) : Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long lived Solid Radioactive Waste, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 81, Pergamon Press, Oxford and New York.
- 稲垣学, 加藤智子, 吉田英爾, 小山田潔, 深谷友紀子, 鈴木祐二, 大井貴夫 (2007) : 表層での水理・物質移行を考慮した生物圏における評価に関する検討, JAEA-Research 2007-029.
- 稲垣学, 蛭名貴憲 (2009) : 処分環境や設計オプションに対応した性能評価手法の構築 (2), JAEA-Research 2008-114.
- Ishiguro, K., Ueda, H., Wakasugi, K., Sakabe, Y., Kitayama, K., Umeki, H. and Takase, H. (2007) : EBS Modelling for the Development of Repository Concepts Tailored to Siting Environments, Engineered Barrier Systems(EBS)in the Safety case: The role of modeling, Workshop proceeding La Coruna, 24-26 August 2005, OECD/NEA.
- Ishimaru, T. and Shimizu, I. (1997) : Groundwater pressure changes associated with earthquakes at the Kamaishi Mine, Japan: A study for stability of geological environment in Japan, Proc. 30th International Geological Congress, Vol.24, pp.31-41.
- 板津透, 稲垣学, 加藤智子, 鈴木祐二, 小山田潔, 江橋健, 川村淳, 蛭名貴憲, 宮原要 (2009) : 表層環境を考慮した生物圏評価手法の構築に関する検討, JAEA-Review 2009-015.
- JAEA (日本原子力研究開発機構) (2009) : 平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 地層処分共通技術

調査 地質環境総合評価技術高度化開発.

- JAEA (日本原子力研究開発機構) (2010a) : KMS, http://kms1.jaea.go.jp/kmsif/kms_login.html. (参照 2010年4月19日)
- JAEA (日本原子力研究開発機構) (2010b) : KMS, http://kms1.jaea.go.jp/PAIRS/PAIRS_info.html. (参照 2010年4月19日)
- JAEA (日本原子力研究開発機構) (2010c) : カーネル【性能評価研究】, http://kms1.jaea.go.jp/CoolRep/images/stories/Kernel%20Seinohyouka_0613.pdf. (参照 2010年4月19日)
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999a) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ— 分冊 3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999b) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ— 分冊 1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—分冊 3 安全評価手法の開発, JNC TN1400 2005-016..
- 神崎裕, 武田聖司, 木村英雄 (2009) : 高レベル放射性廃棄物処分における地下水移行に係わる安全評価のシナリオ構築のための FEP データベース (受託研究), JAEA-Data/Code 2009-011.
- 加藤大生, 嶺達也, 三原守弘, 大井貴夫, 本田明 (2001) : セメント系材料に対する核種の収着データベースの整備, JNC-TN8400 2001-029.
- 加藤智子, 鈴木祐二, 牧野仁史, 内田雅大, 宮本陽一, 内藤守正, 若杉圭一郎, 奥山茂, 浦上学, 石黒勝彦, 北山一美 (2005) : 生物圏データの重要度に関する検討, NUMO-TR-05-01, JNC TN1400 2005-024.
- 加藤智子, 鈴木祐二 (2008) : 地層処分生物圏評価における感度解析による重要パラメータの抽出に関する検討, JAEA-Research 2008-021.
- Kato, T., Suzuki, Y. and Ohi, T. (2009) : Development of the methodology on priority of element-specific biosphere parameters for geological disposal applicable to any proposed repository site, Jpn. J. Health Phys., 44 (1), pp.72-79.
- 川村淳, 大井貴夫, 新里忠史, 安江健一, 常盤哲也, 丹羽正和, 島田耕史, 黒澤英樹, 浅森浩一, 河内進, 江橋健, 北村暁, 石丸恒存, 牧野仁史, 梅田浩司, 瀬尾俊弘 (2008) : 高レベル放射性廃棄物地層処分における天然現象影響評価に関する研究, JAEA-Research 2008-018.
- Kawamura, M., Yasue, K., Niizato, T. and Tanikawa, S. (2010) : Development of Methodology to Construct a Generic Conceptual Model of River-Valley Evolution for Performance Assessment of HLW Geological Disposal, ICM2010-40137, October 3-7, 2010, Tsukuba, Japan.
- 川村淳, 江橋健, 牧野仁史, 新里忠史, 安江健一, 稲垣学, 大井貴夫 (2010) : 高レベル放射性廃棄物処分における性能評価のための隆起・侵食に起因する地質環境条件変化の評価方法の検討, 応用地質, 第51巻, 第5号, pp.229-240.
- Kessler, J., H. and McGuire, R., K. (1999) : Total System Performance Assessment for Waste Disposal Using a Logic Tree Approach, Risk Analysis, Vol.19, 5, pp.915-931.
- Kitamura, A., Fujiwara, K., Doi, R., Yoshida, Y., Mihara, M., Terashima, M. and Yui, M. (2010) : JAEA thermodynamic database for performance assessment of geological disposal of high-level radioactive

- and TRU wastes, JAEA-Data/Code 2009-024.
- 小尾繁, 稲垣学 (2010) : Goldsim による核種移行パラメータの時間変化を考慮した地層処分核種移行解析モデルの構築, JAEA-Data/Code 2010-006.
- Kurikami, H., Suzuki, S., Wakasugi, K., Ueda, H., Ishiguro, K., Tsuchi, H., Kaku, K., Gaus, I. and Vomvoris, S. (2009) : Study on strategy and methodology for repository concept development for the Japanese geological disposal project, NUMO-TR-09-04.
- 牧野仁史, 川村淳, 若杉圭一郎, 大久保博生, 高瀬博康 (2007) : 高レベル放射性廃棄物地層処分安全評価のシナリオ解析のための計算機支援ツールの開発, JAEA-Data/Code 2007-005.
- 牧野仁史, 澤田淳, 前川恵輔, 柴田雅博, 笹本広, 吉川英樹, 若杉圭一郎, 小尾繁, 濱克宏, 操上広志, 國丸貴紀, 石井英一, 竹内竜史, 中野勝志, 三枝博光, 竹内真司, 岩月輝希, 太田久仁雄, 瀬尾俊弘 (2005) : 地質環境の調査から物質移行解析にいたる一連の調査・解析技術 — 2つの深地層の研究施設計画の地上からの調査研究段階 (第1段階)における地質環境情報に基づく検討—, JNC TN1400 2005-021.
- Mihara, M. and Sasaki, R. (2005) : Radio-nuclides Migration Datasets (RAMDA) on Cement, Bentonite and Rock for the performance assessment of TRU Waste Repository in Japan, JNC-TN8400 2005-027.
- Miyahara, K. and Kato, T. (2007) : “Illustration of HLW repository performance: using alternative yardsticks to assess modeled radionuclide fluxes”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXI, MRS Symposium Proceedings, Vol.1107, pp.673-680.
- Miyahara, K., Inagaki, M., Kawamura, M. and Ebina, T. (2008) : “What-if?” Calculations to Illustrate Fault-Movement Effects on a HLW Repository, Proceedings of International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas, Nevada, September 7-11, 2008, pp.593-599.
- Miyahara, K., Inagaki, M., Kawamura, M., Ebina, T. and I. G. Mckinley (2009) : “Disruptive effects on a HLW repository due to uplift-erosion in the distant future”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXIII, Mat. Res. Soc. Sym. Proc., Vol.1193, pp.177-184.
- Murakami, H. and J. Ahn (2008a) : Development of Geologic Repository Models for Design and Decision Making, proceedings of 16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC), P16P1212.
- Murakami, H. and J. Ahn(2008b) : Development of Compartment Models for Radionuclide Transport in Repository Region, proceedings of 2008 International High-Level Radioactive Waste Conference, Las Vegas, Nevada, September 7-11, 2008.
- Nagra (2002) : Project Opalinus Clay: Safety Report, Nagra Technical Report 02-05, Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Neyama, A., Ishihara, Y. and Fusaeda, S. (1998) : Quality Assurance Program with Computer-Oriented Management System for Performance Assessment, Proc. of the 1998 International High-Level Radioactive Waste Management Conference.
- 日本原子力学会 (2006) : 【標準委員会 技術レポート】 収着分配係数の測定方法—浅地中処分のバリア材を対象としたバッチ法の基本手順及び深地層処分のバリア材を対象とした測定の基本手順—, AESJ-SC-TR001:2006.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2004) : 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性—「処分場の概要」の説明資料—, NUMO-TR-04-01.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2010) : 地層処分技術開発ニーズの整理, ~精密調査地区選定に向けて~, NUMO-TR-10-02.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011a) : 地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安

- 全性, 「処分場の概要」の説明資料, NUMO-TR-10-03.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011b) : 地層処分の要件管理技術, NUMO-TR-10-12.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011c) : 地層処分事業のための安全評価技術の開発 (I) : シナリオ構築技術の高度化, NUMO-TR-10-09.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011d) : 地層処分事業のための安全評価技術の開発 (II) : 核種移行解析モデルの高度化, NUMO-TR-10-10.
- Ochs, M., Kunze, S., Saito, Y., Kitamura, A., Tachi, Y. and Yui, M. (2008) : Application of the Sorption Database to Kd -setting for Horonobe Rocks” , JAEA-Research 2008-017.
- OECD/NEA (1983) : Long-Term Measurement of High-Level Radioactive Waste; The meaning of a Demonstration, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (1991a) : Can Long-term Safety be Evaluated? A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee, OECD/Nuclear Energy Agency, and the International Radioactive Waste Committee, IAEA endorsed by the Experts for the Community Plan of Action in the Field of Radioactive Waste Management, CEC, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (1991b) : Review of Safety Assessment Methods, Disposal of Radioactive Waste, A Report of the Performance Assessment, Advisory Group of the Radioactive Waste Management Committee, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (1997) : Lessons learnt from Ten Performance Assessment Studies, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2000a) : Regulatory Review of Assessments of Deep Geologic Repositories: Lessons Learnt, OECD/Nuclear Energy Agency..
- OECD/NEA (2000b) : Features, Events and Processes (FEPs)for Geological Disposal of Radioactive Waste, An International Database, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2000c) : OECD/NEA International Peer Review of the Main Report of JNC's H12 Project to Establish the Technical Basis for HLW Disposal in Japan, OECD Nuclear Energy Agency International Review Group, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2001) : Scenario Development Methods and Practice, An Evaluation Based on the NEA Workshop on Scenario Development, May 1999, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2002) : Establishing and Communicating Confidence in Safety Case of Deep Geologic Disposal: Approaches and Arguments, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2004a) : Post-closure Safety Case for Geological Repositories - Nature and Purpose-, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2004b) : Safety of Disposal of Spent Fuel, HLW and Long-lived ILW in Switzerland, An international peer review of the post-closure radiological safety assessment for disposal in the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland, ISBN 92-64-02063-2, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2004c) : Management of Uncertainty in Safety Cases and the Role of Risk, Workshop Proceedings, Stockholm, Sweden, February 2-4, 2004, OECD Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2008) : Safety Cases for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand?, Symposium Proceedings, Paris, France, 23-25 January 2007, OECD/Nuclear Energy Agency.
- 大井貴夫, 稲垣学, 川村淳 (2008) : シナリオの重要度をわかりやすく提示可能なシナリオ解析手法

の整備, JAEA-Research 2008-023.

- Ohi, T., Takase, H., Inagaki, M., Oyamada, K., Sone, T., Mihara, M., Ebashi, T. and Nakajima, K. (2007) : Application of a comprehensive sensitivity analysis method on the safety assessment of TRU waste disposal in JAPAN. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXX (Mater. Res.Soc. Symp. Proc. Vol. 985), Boston, Massachusetts, U.S.A, November 27-December 1, 2006, pp.129-134.
- Ohi, T., Inagaki, M., Kawamura, M. and Ebashi, T. (2009) : A Systematic Approach to Evaluate the Importance of Concerns Affecting the Geological Disposal of Radioactive Wastes” , Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXII, Mat. Res. Soc. Sym. Proc., Vol.1124, pp.407-412.
- ONDRAF/NIRAS (2001) : Technical Overview of SAFIR-2: Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2, ONDRAF/NIRAS Report NIRON2001-05E, Belgium..
- Osawa, H., Hioki, K., Umeki, H., Takase, H. and McKinley, I. (2009) : Use of the safety case to focus KMS applications, Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Management ICEM'09, 2009.
- POSIVA (2008) : Safety Case Plan 2008, Posiva 2008-05, Finland.
- Ross, T.J., Booker, J.M. and Prkinson, W.J.(2002) : Fuzzy logic and probability applications ; Bridging the gap, Society for industrial and applied mathematics, Philadelphia, 2002.
- 資源エネルギー庁・JAEA (日本原子力研究開発機構) (2006) : TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画.
- SKB (2006) : Long-term safety for KBS-3repositories at Forsmark and Laxemar - a first evaluation, Main Report of the SR-CAN project, SKB Technical Report TR-06-09, SKB, Stockholm, Sweden..
- Smith, G and Kato, T. (2010) : International Collaboration in Assessment of Radiological Impacts Arising from Releases to the Biosphere after Disposal of Radioactive Waste into Geological Repositories, Journal of the Korean Nuclear Society, Nuclear Engineering and Technology, Vol.42, No.1, pp.1-8.
- 鈴木祐二, 加藤智子, 牧野仁史, 大井貴夫 (2006) : TRU 廃棄物処分に特有な放射性核種を考慮した生物圏評価データセットの整備と線量への換算係数の算出, JAEA-Data/Code 2006-011.
- 舘幸男, 栃木善克, 陶山忠宏, 齋藤好彦, Ochs, M., 油井三和 (2009) : 地層処分安全評価のための核種の収着・拡散データベースシステムの開発, JAEA-Data/Code 2008-034.
- 舘幸男, 四辻健治, 陶山忠宏, M. Ochs, 油井三和 (2010) : 地層処分安全評価のために現象論的収着・拡散モデル/データベースの開発ーベントナイト系プロトタイプモデル/データベースの開発ー, JAEA-Research 2009-069.
- 高瀬博康, 稲垣学, 須山泰宏 (2006) : 地質環境条件の空間的不均質性に応じた施設レイアウト等の工学的対策によるシステム全体性能の改善の可能性について, 原子力バックエンド研究, Vol.13, No.1, pp.13-22.
- 高瀬博康, 稲垣学, 野口俊英 (2007) : 幌延深地層研究計画における不確実性を考慮した安全評価手法の検討 (委託研究), JAEA-Research 2007-066.
- 谷口直樹, 川崎学, 内藤守正 (2008) : 緩衝材中における炭素鋼の腐食挙動の実験的検討ー I , -10年間の浸漬試験結果に基づく腐食進展挙動の検討, JAEA-Research 2008-011.
- 栃木善克, 舘幸男 (2009) : 緩衝材及び岩石中での核種の拡散データベースの整備, JAEA-Data/Code 2008-035.
- 栃木善克, 舘幸男 (2010) : 緩衝材及び岩石中での核種の拡散データベースの整備ー海外の緩衝材データの拡充とその活用法ー, JAEA-Data/Code 2009-029.

- Umeki, H., Sakabe, Y., Ueda, H., Takahashi, Y., McKinley, I.G., Takase, H., Shimbo, H. and Ijiri, Y. (2004) : Managing uncertainty on site characteristics for the design of a high-level radioactive waste repository, 3rd Asian Rock Mechanics Symposium, Contribution of Rock Mechanics to the New Century, November 30 , December 2, 2004, Kyoto, Japan.
- U.S.DOE (1998): Viability Assessment of a Repository at Yucca Mountain, U. S. Department of Energy Office of Civilian Radioactive Waste Management, DOE/RW-0508.
- U.S.NRC (2003) : Yucca Mountain Review Plan, NUREG-1804, Revision 2, US Nuclear Regulatory Commission.
- U.S.NRC (2009) : 10 CFR Part 63 - DISPOSAL OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTES IN A GEOLOGIC REPOSITORY AT YUCCA MOUNTAIN, NEVADA.
- Wakasugi, K., Webb, E. K., Makino, H., Ishihara, Y., Ijiri, Y., Sawada, A., Baba, T., Ishiguro, K. and Umeki, H. (2000) : A Trial of Probabilistic Simulation for Reference Case in the Second Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan, Proceedings of the 5th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM5, Osaka, 2000.11.27-12.1), Vol.4, pp.1469-1475.
- 若杉圭一郎, 小尾繁, 牧野仁史 (2002) : モンテカルロシミュレーションによる高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価に対するデータ不確実性解析, サイクル機構技報, No.14, JNC TN1340 2001-010, pp.149-160.
- 若杉圭一郎, 牧野仁史, 小尾繁 (2004) : 核種移行解析における掘削影響領域のモデルバリエーションに関する検討, 原子力バックエンド研究, Vol.10, No.1-2, pp.21-30.
- Wakasugi, K., Ishiguro, K., Kitayama, K., Takase, H., Noguchi, T., Shizawa, A. and Hane, K.(2008) : Development of performance assessment methodologies to evaluate differences among repository design options, 2008 East Asia Forum on Radioactive Waste Management Conference, 20-23 October 2008, Tokyo, Japan.
- Wibberley, C.A.J. and Shimamoto, T. (2003) : Internal structure and permeability of major strike-slip fault zones: The Median Tectonic Line in Mie Prefecture, southwest Japan: Journal of Structural Geology, v. 25 pp. 59-78.
- 吉田英一, 大嶋章浩, 吉村久美子, 長友晃夫 (2009): 断層周辺に発達する割れ目形態とその特徴—阿寺断層における‘ダメージゾーン’解析の試み—, 応用地質, 第50巻, 第1号, pp.16-28, 2009, J. Japan Soc. Eng. Geol., Vol.50, No.1, pp.16-28, 2009.

第 8 章

概要調査地区選定段階および精密
調査地区選定段階の技術的取り組み

第8章 目次

第8章 概要調査地区選定段階および精密調査地区選定段階の技術的取り組み.....	8-1
8.1 サイト選定段階における安全確保への取り組み.....	8-2
8.1.1 安全確保の取り組みの考え方.....	8-3
8.1.1.1 地層処分に適した地質環境の選定の考え方.....	8-3
8.1.1.2 多重バリアシステムによる安全確保の考え方.....	8-3
8.1.1.3 処分場概念の構築の考え方.....	8-4
8.1.1.4 セーフティケースの考え方.....	8-5
8.1.2 文献調査の開始から精密調査地区選定までの流れ.....	8-5
8.2 概要調査地区選定段階における技術的な取り組みの概要.....	8-8
8.2.1 概要調査地区選定段階における安全確保の目標と実施事項.....	8-8
8.2.2 文献調査計画の立案.....	8-11
8.2.3 文献調査の実施（文献情報の収集）.....	8-11
8.2.4 自然現象の影響にかかわる調査・評価.....	8-12
8.2.4.1 火山・火成活動の調査・評価.....	8-12
8.2.4.2 地震・断層活動の調査・評価.....	8-13
8.2.4.3 隆起・侵食の調査・評価.....	8-13
8.2.5 第四紀の未固結堆積物ならびに鉱物資源に関する調査・評価.....	8-13
8.2.6 概要調査地区の選定.....	8-14
8.2.6.1 概要調査地区選定上の考慮事項への適格性の確認.....	8-14
8.2.6.2 概要調査地区と補足的に調査する範囲の設定.....	8-14
8.2.6.3 文献調査に関する法定報告書の説明と概要調査の実施の判断.....	8-15
8.2.7 地質環境特性の調査・評価.....	8-15
8.2.8 処分場の概略検討.....	8-16
8.2.9 処分場の安全性の概略検討.....	8-16
8.2.10 次段階の準備.....	8-17
8.3 精密調査地区選定段階における技術的な取り組みの概要.....	8-20
8.3.1 精密調査地区選定段階における安全確保の目標と実施事項.....	8-20
8.3.2 概要調査の実施.....	8-24
8.3.2.1 地表調査のフェーズにおける調査の実施および概要調査計画の更新.....	8-24
8.3.2.2 ボーリング調査のフェーズにおける調査.....	8-25
8.3.2.3 概要調査における一般労働安全の確保と環境保全策.....	8-25
8.3.3 自然現象の影響にかかわる調査・評価.....	8-25
8.3.3.1 火山・火成活動の調査・評価.....	8-26
8.3.3.2 地震・断層活動の調査・評価.....	8-26
8.3.3.3 隆起・侵食の調査・評価.....	8-26
8.3.4 地質環境特性の調査・評価.....	8-27
8.3.5 候補母岩の選定.....	8-28
8.3.5.1 熱環境の評価.....	8-30

8.3.5.2	力学場の評価	8-31
8.3.5.3	水理場の評価	8-32
8.3.5.4	化学環境の評価	8-33
8.3.6	処分場の概念設計	8-33
8.3.6.1	人工バリアの概念設計	8-34
	(1) オーバーパックの設計	8-34
	(2) 緩衝材の設計	8-34
8.3.6.2	地上施設および地下施設の設計	8-34
	(1) 坑道の設計	8-34
	(2) 基本レイアウトの設定	8-34
	(3) 地上施設の設計	8-36
	(4) 事業期間中の安全対策の設計への反映	8-37
8.3.6.3	処分概念・技術オプションの絞り込み	8-38
8.3.7	予備的な安全評価	8-39
8.3.7.1	安全評価戦略の策定	8-40
8.3.7.2	地層処分システムの設定	8-41
8.3.7.3	シナリオの構築	8-42
	(1) シナリオ分類の枠組みの整備	8-42
	(2) 状態設定とシナリオの作成	8-43
8.3.7.4	モデルの設定	8-46
8.3.7.5	データセットの整備	8-46
8.3.7.6	安全解析の実施	8-47
8.3.7.7	安全評価の信頼性に関する検討	8-48
8.3.8	レファレンス処分場概念の構築とセーフティケースの作成	8-48
8.3.9	精密調査地区の選定	8-49
8.3.9.1	精密調査地区選定上の考慮事項への適格性の確認	8-49
8.3.9.2	精密調査地区の設定	8-49
8.3.9.3	概要調査に関する法定報告書の説明と精密調査の実施の判断	8-49
8.3.10	次段階の準備	8-49
8.4	まとめ	8-51
	(1) 概要調査地区選定段階の目標と実施事項	8-51
	(2) 精密調査地区選定段階の目標と実施事項	8-51
参考資料	概要調査地区選定段階および精密調査地区選定段階の実施項目と関連する技術および 検討事項の関係	8-53
参考文献		8-56

第8章 概要調査地区選定段階および精密調査地区選定段階の技術的取り組み

本報告書におけるこの章の位置付けを図 8-1 に模式的に示す。第3章では、NUMO が適切なサイト選定と確認、処分場の設計・施工などの適切な工学的対策、地層処分システムの長期安全性の評価の三つの安全確保策を軸として、段階的に事業を進めることで、地層処分の安全性を確保しようとしていることを述べた。第4章では、約100年にわたる事業期間において、段階的に事業を推進する際の技術的な視点から、将来的な展望をロードマップとして示した。また、サイト選定の開始から処分場の閉鎖に至るまでの各段階で、個々に得られた情報や成果に基づいて、三つの安全確保策を相互に連携・フィードバックさせながら、繰り返し安全性を確認する重要性についても述べた。第5章から第7章においては、各段階の実施事項の中心となるサイト調査・評価、工学的対策（設計、建設・操業・閉鎖）、安全評価を支える技術の整備状況について述べ、NUMO および基盤研究開発機関が連携して計画的に技術を整備していることを述べた。

本章では、これらの章で述べてきたことを取りまとめ、第4章に示した安全確保ロードマップに従い、サイト調査段階の初期である概要調査地区選定段階（文献調査の段階）、および精密調査地区選定段階（概要調査の段階）における以下の三つの事項について述べ、これらの段階の実施に向けた技術的な準備が整っていることを示す。

- ・ 文献調査および概要調査を実施するための目標や実施事項を明確化していること
- ・ 地質環境の調査・評価技術、処分場の設計・建設・操業・閉鎖技術、地層処分システムの長期安全性評価技術を連携し、概要調査地区および精密調査地区を選定するための基本的な実施手順を準備していること
- ・ 各段階の実施手順に従って、第5章から第7章に示した技術の適用を検討していること

8.1 では、サイト選定段階の安全確保への取り組みとして、その考え方と、文献調査の開始から精密調査地区選定までの技術的な実施事項と NUMO や国などが行う意思決定との関係を示す。8.2 および 8.3 では、概要調査地区選定段階および精密調査地区選定段階の主要な実施事項について、その基本的な手順を示した上で、その概要と支える技術の適用について述べる。

なお、文献調査の実施に当たっては、市町村からの応募による場合と、市町村に文献調査の実施を国から申し入れる場合がある。これら二つの場合では、文献調査の開始に至るまでの手順に差異があるが、いったん文献調査を開始すれば、技術的な実施手順は同じである。従って、この章では、特に断らない限りは、市町村からの応募により文献調査が開始される場合を前提として記述する。

また、この章では、サイト選定の初期の2段階について記述の焦点を絞るが、5章から7章にも示したように、処分施設建設地選定の実施や処分場の建設・操業・閉鎖の実施に必要な技術の整備が進んでいる（5.4.1.2 および 6.6.4 など）。例えば、第2次取りまとめ以降の技術開発により、国内外において多くの地下研究所の建設が進み、地下深部において坑道を安全に掘削できることが示され、地下の地質環境の調査技術の適用性の確認が進んだ。また、人工バリアの施工性についても実規模大の模型試験により、実証的な確認が進んだ。これらの技術開発成果に基づいて、精密調査の実施、さらには、処分場の建設・操業・閉鎖に至るまでの地層処分事業の技術的な実現性の見通しが得られ、その信頼性が向上したと判断している。今後、これらの成果についても、実用化の視点から、計画的に技術開発を進め、地層処分事業に反映する。

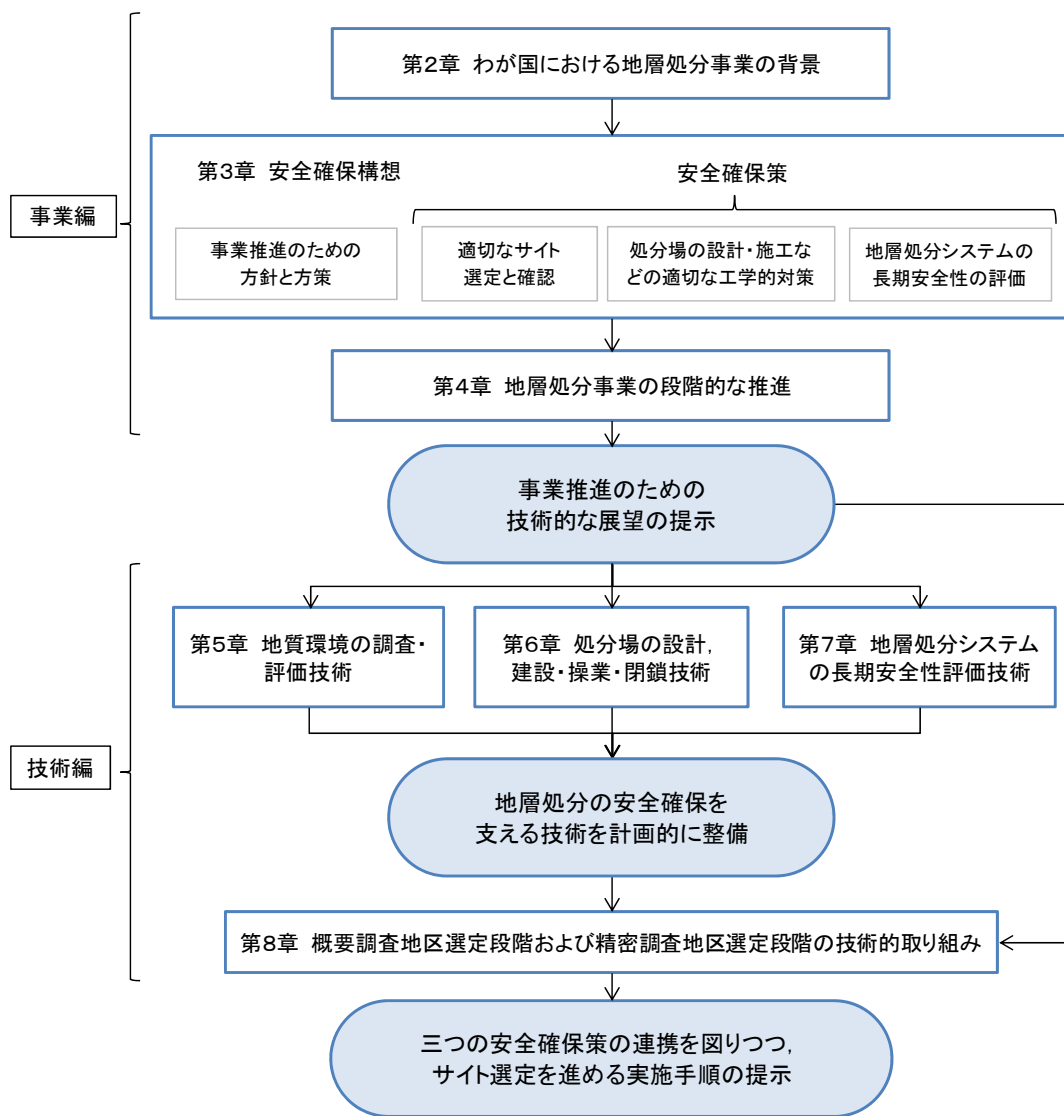


図 8-1 本報告書の各章と第 8 章の関係

8.1 サイト選定段階における安全確保への取り組み

NUMO は、概要調査地区選定段階（文献調査の段階）、精密調査地区選定段階（概要調査の段階）、処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）の三段階のサイト選定段階において、閉鎖後長期の安全確保のために以下に示す検討を行う（3.1.2 参照）。

- ・ 地層処分にとって適切な地質環境を選定し、建設段階以降はサイト選定時における評価の妥当性を確認する（適切なサイト選定と確認）。
- ・ 選定された地質環境に対して人工バリアや処分施設を適切に設計・施工する（処分場の設計・施工などの適切な工学的対策）。
- ・ 構築された地層処分システムの安全性を評価する（地層処分システムの長期安全性の評価）。

また、サイト調査においては、一般労働安全と環境保全策を講ずるとともに、建設・操業・閉鎖の各段階における事業期間中の放射線安全、一般労働安全、環境保全策についても処分施設の設計

において検討する（3.1.3 参照）。

上述の検討を進める際には、地質環境の調査・評価、処分場の設計、安全評価の各分野の情報を共有し、相互に連携を図りつつ作業を進める。連携は特別な技術ではないが、段階的な意思決定に基づいて事業を効果的に進め、地層処分の技術的信頼性を高めるための重要な手段である（Littleboy et al., 1998 ; Jonkman et al., 2002）。

8.1.1 安全確保の取り組みの考え方

8.1.1.1 地層処分に適した地質環境の選定の考え方

地層処分システムを成立させるための前提条件として、将来にわたり火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食などの自然現象の著しい影響を回避すると同時に、処分場の設計・施工などの適切な工学的対策、および地層処分システムの長期安全性の評価を実施する上で好ましい以下の二つの条件を有する場所を処分施設建設地として選定する（3.1.2 参照）。

- ・ 坑道掘削や人工バリアの構築など、工学的対策の観点からより適切と判断される条件（力学的に安定であること、施設を通過する地下水流量が小さいことなど）
- ・ 人工バリアや天然バリアの放射性物質の移行抑制など、地層処分システムの閉鎖後長期の安全性の観点からより適切と判断される条件（還元性、地下水流速が遅い、放射性物質の移行距離が長い、擾乱に対する緩衝能力あるいは回復力を有するなど）

また、将来の人間活動による偶発的な処分場への侵入を回避する観点から、経済的に価値が高い鉱物資源が存在する地域は含めない。

サイト選定においては、概要調査地区選定段階、精密調査地区選定段階、処分施設建設地選定段階の三段階の調査により、上述の条件を考慮して応募区域の地質環境を評価する。

自然現象については、サイト選定の初期段階（概要調査地区選定段階および精密調査地区選定段階）では、応募区域周辺で生じている自然現象の過去の変動傾向などから将来の挙動を予測し、将来にわたりそれらの影響が著しいと判断した場合には、そのような場所を含めないように概要調査地区および精密調査地区を選定する。

その上で、処分場を設置する場の地質・地質構造、地下水の流動特性や地化学特性、岩盤の熱特性や力学特性、物質移行特性などの地質環境特性を把握する。さらに地質環境特性の長期的な変遷を理解することにより、処分施設建設地選定段階において地層処分の安全確保にとって好ましい条件を有する場所を特定して処分施設建設地として選定する（4.2 参照）。

8.1.1.2 多重バリアシステムによる安全確保の考え方

地層処分による安全確保の基本概念は、3.1.2 に述べたように高レベル放射性廃棄物および地層処分低レベル放射性廃棄物を生活環境から十分に離れた安定な地下深部に埋設し、廃棄物に含まれる放射性物質を閉鎖後の長期間にわたり閉じ込めることである。前者を「隔離」と呼び、後者を「閉鎖後閉じ込め」と呼ぶ。隔離は、地層処分に適した地質環境を選定することにより確保する。一方、閉鎖後閉じ込めは、人工バリアと天然バリアが有する性能（安全機能）により確保する（3.1.2, 6.2.2 参照）。地層処分システムによる安全確保は、これらの多重の安全機能を組み合わせた多重バリアシステムにより担保する。

8.1.1.3 処分場概念の構築の考え方

地質環境特性，処分場の設計，安全評価の結果を統合して処分場概念を構築・更新する。処分場概念は，基本的に以下の項目により構成される（図 8.1.1-1）。

- ・ 地質環境の長期安定性に関する評価結果
- ・ 処分場の設置環境としての地質環境の評価結果
- ・ 処分場のレイアウトおよび人工バリア，操業システム，閉鎖措置などの仕様
- ・ 事業期間中ならびに閉鎖後長期の安全評価の結果
- ・ 上述の結果を踏まえた工学的成立性，経済性などの観点からの評価結果

サイトの地質環境特性に適した処分場概念を構築するためには，サイト選定の各段階において三つの安全確保策を連携させ，地質環境の適性，地層処分システムの安全性とその工学的な実現性を繰り返し確認する。処分場概念のサイトへの適性は，閉鎖後長期の安全性，操業安全性，工学的成立性，品質保証などの設計因子の観点からその安全性と実現性を評価する（NUMO, 2004a）。

2000年にNUMOが設立されて以降，NUMOは第2次取りまとめの処分場概念を出発点とし，実際に処分場を建設・操業するという観点，および新たな知見を反映して処分場概念を高度化するという観点から，段階的な処分場概念の開発の方法論の検討を進めてきた（NUMO, 2004a）。例えば，処分場の候補地が具体化されていない現段階では，多様な地質環境を想定し，サイトの地質環境特性に適した設計の考え方について整備を進めてきた（6.5参照）。また，地質環境の不確実性に柔軟に対応しつつ，安全性を有する地層処分システムを構築することが可能となるよう，基盤研究開発機関と連携してさまざまな処分技術オプションの整備を進めている（6.5.2参照）。今後，三つの安全確保策を支える技術を活用し，サイトに適した処分場概念を構築していく。

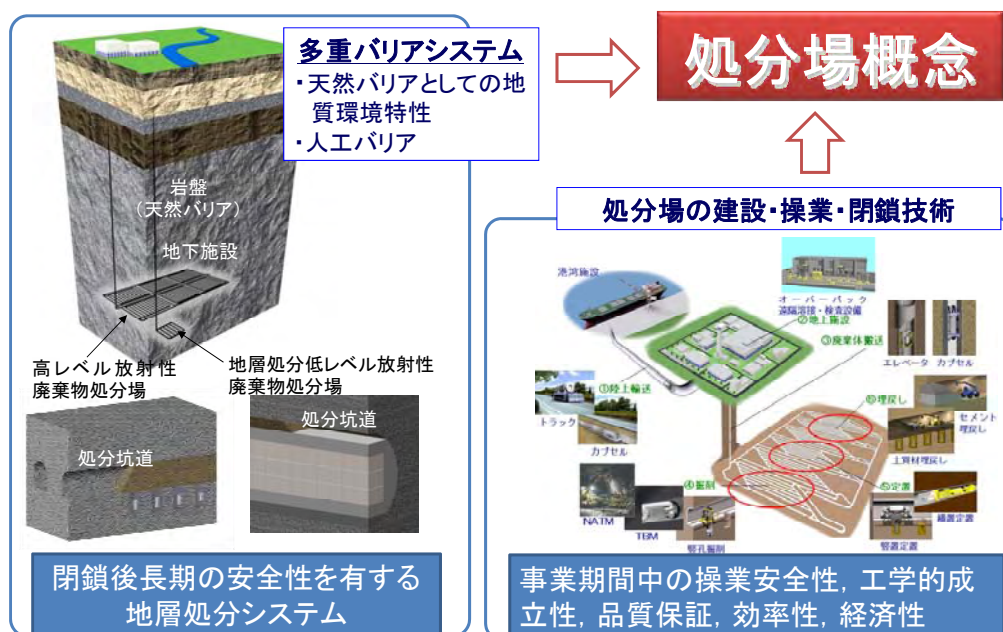


図 8.1.1-1 処分場概念の構築のイメージ

8.1.1.4 セーフティケースの考え方

セーフティケースは、安全確保策を施すことにより、地層処分が長期にわたって安全性を確保できることをその根拠となる多面的なさまざまな証拠や論拠とともに示すために、事業者が構築するものである。さらに、セーフティケースの重要な役割として、幅広いステークホルダーから出される安全性に対する疑問、心配事項や不安要因といったものに応えるための科学技術的な情報を提供することが挙げられる。セーフティケースの主要な構成要素は、「安全確保構想」、「適切なサイト選定と確認」、「適切な工学的対策」、「長期安全性の評価」、「安全性にかかわる論拠の提示」からなる。また、セーフティケースには、構築した時点においてどのような不確実性が存在しているか、また、その不確実性が地層処分システムの安全性に及ぼす影響や、それらの不確実性を低減するための取り組みなどについても言及する。このような不確実性の取り扱いは、セーフティケースの信頼性を確保する上で重要なポイントである（3.2.2.参照）。

サイト選定段階においては、精密調査地区選定時および処分施設建設地選定時に併せて、各段階の終わりに作成する法定報告書、設計と安全評価に関する報告書、それらの補足文書などからセーフティケースを構成する。セーフティケースに基づいて、地域をはじめとする幅広いステークホルダーに安全性を提示する。

8.1.2 文献調査の開始から精密調査地区選定までの流れ

事業の初期における重要なマイルストーンは、三段階のサイト選定（概要調査地区選定、精密調査地区選定、処分施設建設地選定）、およびそれに続く事業許可である（4.1.1.1 参照）。このうち、公募から概要調査の段階における事業の流れと技術業務の流れを図 8.1.2-1 に示す。

NUMO は、2002 年に「特定放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域」について全国の市町村からの公募を開始し、それに併せ概要調査地区選定上の考慮事項を公表した。地域からの応募をいただくと、まず、地質的条件の事前確認を実施する（4.2.1.1 参照）。事前確認の結果は、応募していただいた地域の市町村長に書面で回答する。また、2007 年 11 月に公表された「放射性廃棄物小委員会報告書中間とりまとめ」（総合資源エネルギー調査会、2007）を受け、国が文献調査の申し入れを行うことも可能となった。この場合は、市町村長が国からの申し入れに対して受諾の可否を表明することとなる。文献調査の開始に先立ち、文献調査計画の説明を地域などに行った後、文献調査を進め、適宜調査状況の報告を行う。

概要調査地区の選定に当たっては、文献調査に関する法定報告書を取りまとめて公開し、応募された市町村長および関係都道府県知事に送付し、公告および縦覧の手続きを行う。また、地域に向けて説明会を開催する。このとき、意見書をいただいた場合には、その意見に対する NUMO の見解を作成する。

NUMO は概要調査地区を選定し、経済産業大臣に実施計画の変更を申請する。経済産業大臣は、都道府県知事、および市町村長からの意見を聴取し、それを尊重した上で、原子力委員会および原子力安全委員会の意見を聴き、閣議決定を経て最終処分計画が改定される。以上の過程を経て、実施計画の変更が承認され概要調査地区の選定を完了する。また、これと並行して、NUMO では、次段階の準備として、原子力安全委員会の定める環境要件を鑑みて、精密調査地区選定上の考慮事項を公表するとともに概要調査計画を策定する。

概要調査の実施に当たっては、概要調査計画を地域などに説明し、環境への配慮や調査期間中の安全も含め調査実施内容についての理解を得ながら実施する。概要調査の結果に基づいて、精密調

査地区選定上の考慮事項への適格性を確認し精密調査地区を設定する。概要調査の結果の公表から精密調査地区の選定の完了までの流れは、すでに述べた概要調査地区の選定までの流れと基本的に同じである。

なお、8.2 および 8.3 では、上述の事業の流れの中から特に技術的な実施内容と三つの安全確保策の連携に焦点を当てて、技術的な実施手順を適用する技術とともに示す。

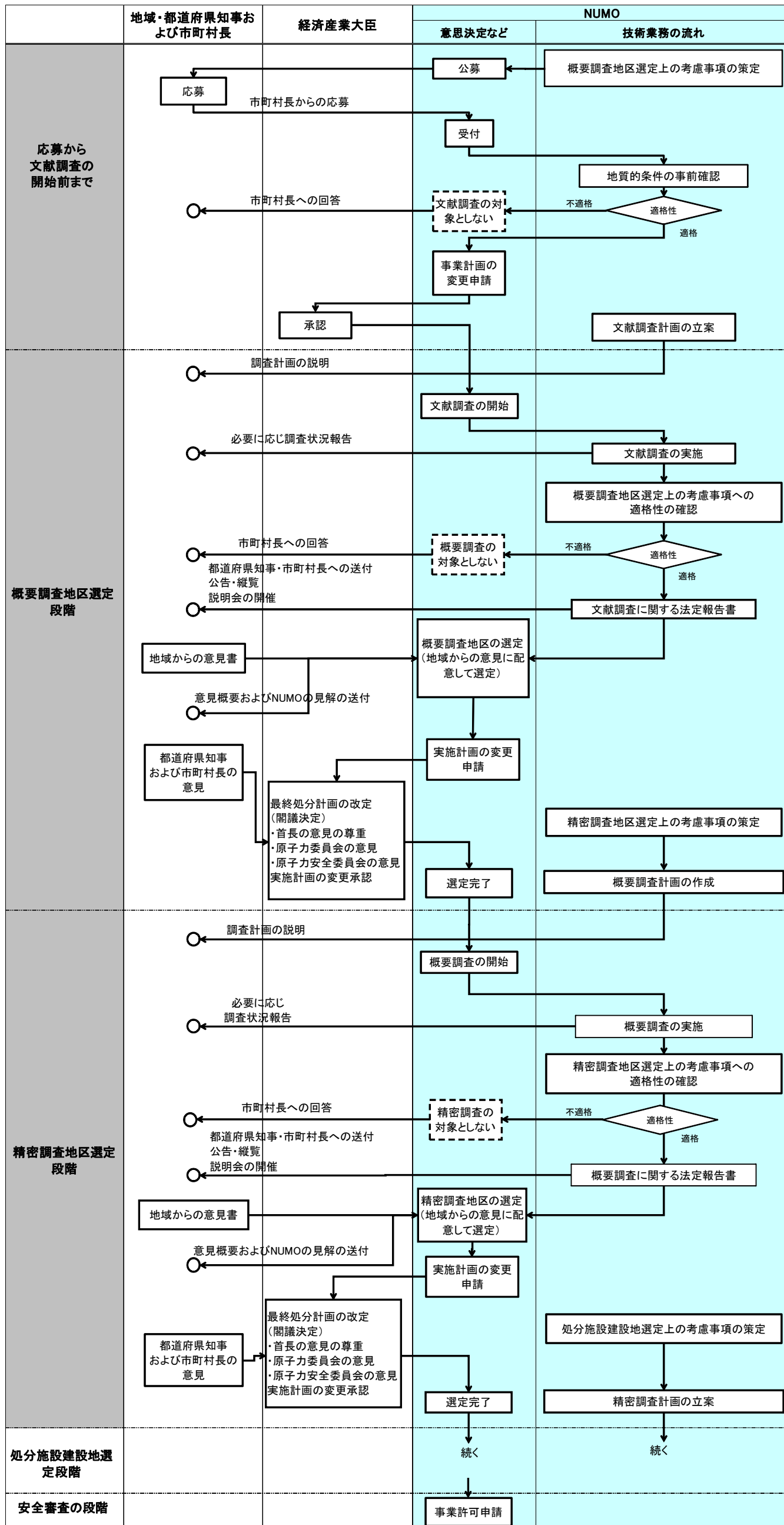


図 8.1.2-1 概要調査地区選定段階および精密調査地区選定段階における事業の流れと技術業務の流れ（公募の場合）

8.2 概要調査地区選定段階における技術的な取り組みの概要

8.2.1 概要調査地区選定段階における安全確保の目標と実施事項

概要調査地区選定段階（文献調査の段階）では、事業目標を概要調査地区の選定とし、安全確保の目標を自然現象の著しい影響の回避（明らかに不適切な地域を避ける）としている（4.2.1.1 参照）。また、具体的な目標達成にかかわる要件と成果として公表する安全確保にかかわる主要文書を以下に示す。

・本段階における事業目標	: 概要調査地区選定
・安全確保にかかわる目標	: 自然現象の著しい影響の回避 (明らかに不適格な地域を避ける)
・目標達成にかかわる要件	: 法定要件への適合性 概要調査地区選定の環境要件への適合性 自主基準（考慮事項含む）への適合性
・安全確保にかかわる主要文書	: 文献調査に関する法定報告書 文献情報に基づく処分場の概要

概要調査地区選定段階における実施事項のフローを図 8.2.1-1 に示す。

この段階で実施する主な事項としては、「安全確保ロードマップ（詳細版）」（表 4.1.2-1 参照）に示した以下の事項がある。

- ① 概要調査地区選定上の考慮事項への適格性の確認
- ② サイトの地質環境特性に応じた概略的な処分場概念の構築
- ③ 精密調査地区選定上の考慮事項の作成
- ④ 概要調査計画の作成

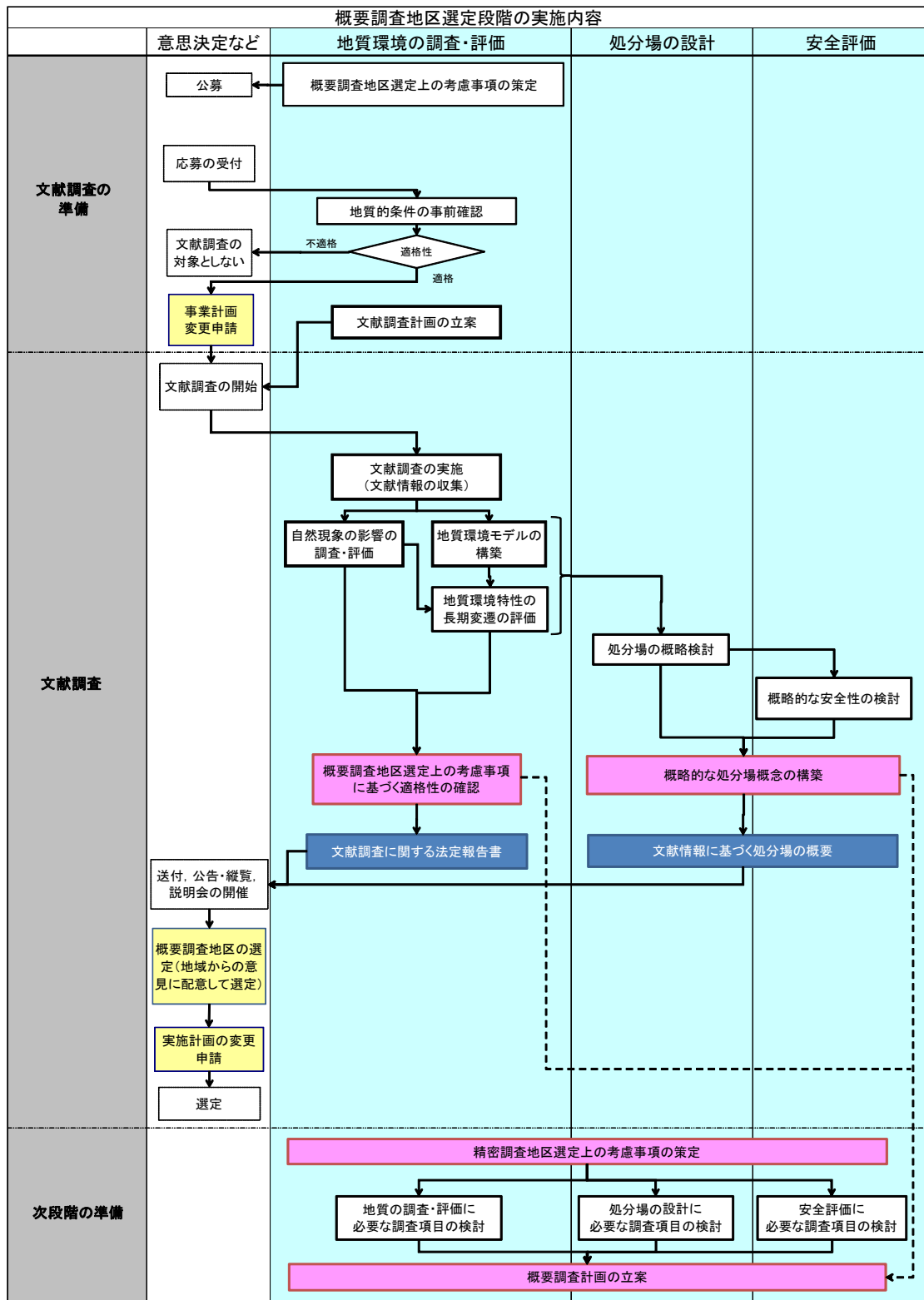
この段階では、文献調査に基づいて「概要調査地区選定上の考慮事項」（NUMO, 2009）で示した将来にわたり火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食などの自然現象の著しい影響を回避できる長期的に安定な地質環境の中から、概要調査地区を選定する。

NUMO は、地域から応募をいただいた場合、文献調査の実施に先立ち地質的条件について事前確認を行う（4.2.1.1 参照）。確認を行う項目は以下の 2 点である（図 8.2.1-2）。

- ・ 陸域では空中写真判読など、海域では海上音波探査などに基づいて全国的に調査された文献に示されている活断層がある場所が含まれないこと
- ・ 将来数万年にわたるマグマの活動範囲の拡がりの可能性を考慮し、火山（第四紀火山）の中心から半径 15km の円の範囲内にある地域が含まれないこと

事前確認の結果は、応募をいただいた市町村長に送付する。なお、事前確認で上述 2 点に適合しない場合には、文献調査の対象としない。

以上の条件に関連した情報として、地質的な条件に関する全国の市町村の概況をホームページで公開している（http://www.numo.or.jp/koubo/bunken_chisitsu/index.html）。



安全確保の重要文書
 意思決定事項
 実施の流れ

主要な実施事項
 技術業務
 フィードバック

図 8.2.1-1 概要調査地区選定段階における実施事項フロー図（公募の場合）

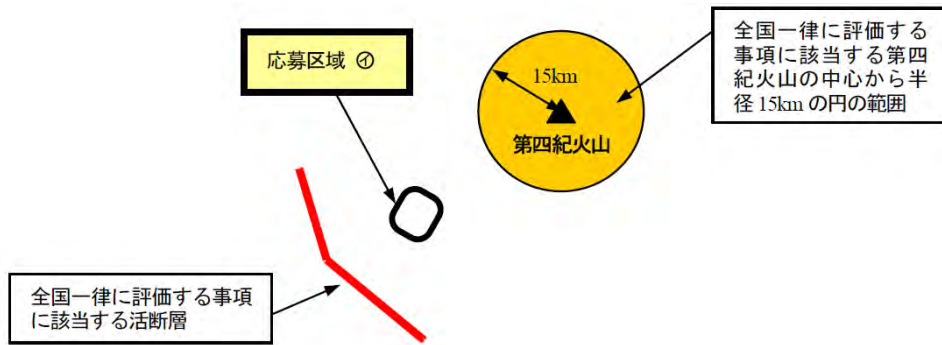


図 8.2.1-2 全国一律に評価する事項に基づいた文献調査の対象地区となる条件（公募の場合）
（出典：NUMO，2004b）

文献調査では、応募区域を評価するために必要となる概要調査地区を仮設定し、文献調査を行う範囲を設定する（図 8.2.1-3）。文献調査の具体的な調査・評価の内容は、5.3 に述べたとおりで、文献調査の範囲を対象とした個別の文献、そのほかの資料を詳細に分析・評価する。分析・評価の結果に基づいて、自然現象の影響にかかわる評価（5.3.1 参照）、地質環境モデルの構築（5.2.1, 5.3.2 参照）、処分場の検討と概略的な安全性の検討（6.3.1, 7.1.7.1 参照）を実施する。さらに、これらの検討結果などに対して、工学的成立性、閉鎖後長期の安全性、地質環境の調査・評価、経済性などの観点からの評価を行い、次段階の調査により取得すべき安全性にかかわる重要なサイトの情報を特定する。以上の検討の結果を取りまとめ「文献調査に関する法定報告書」、ならびに、応募区域に処分場を設置した場合の地上・地下施設のイメージを「文献情報に基づく処分場の概要」として公表する。その上で、概要調査地区の範囲の設定（5.2.3 参照）、次段階の概要調査計画の立案（5.2.3 参照）などを行う。

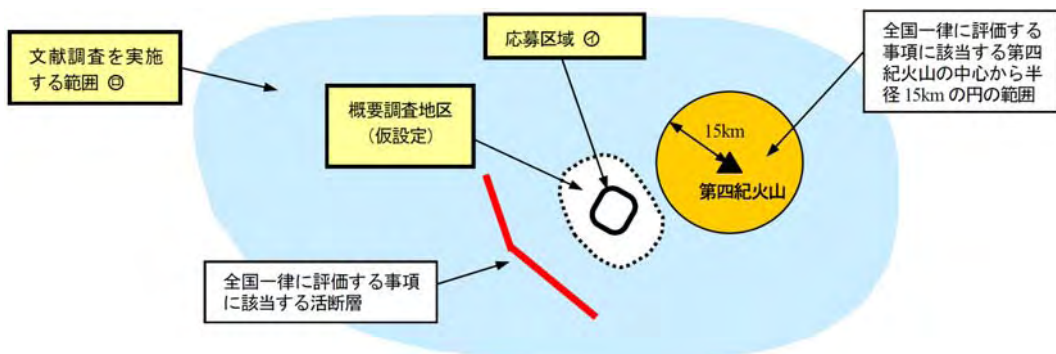


図 8.2.1-3 文献調査を行う範囲と文献調査で確認する項目のイメージ（公募の場合）
（出典：NUMO，2004b）

この段階における安全確保策の連携のポイントは、次段階の準備として実施する概要調査計画の立案である（8.2.10 参照）。立案においては、地質環境の調査・評価や設計や安全性の概略的な検討などの結果に基づいて、必要な調査項目を分析し、項目を取りまとめ、調査計画に反映する。

なお、以下に示す実施項目と関連する技術および検討事項の関係を参考資料に示す。

8.2.2 文献調査計画の立案

文献調査計画は、以下の項目について、文献調査マニュアルに従って作成する（5.2.2 参照）。

- ・ 文献調査の位置付けと目的
- ・ 応募受付から報告書作成までの流れ
- ・ 文献調査の具体的な内容
- ・ 応募区域の自然環境などに関する補充情報収集と「文献情報に基づく処分場の概要」の作成

8.2.3 文献調査の実施（文献情報の収集）

文献調査では、まず、文献調査マニュアルに基づいて、文献・資料を収集し、それらに記載されている地質環境情報などを体系的に整理・管理する。収集の対象となる情報は、自然現象の影響と地質環境特性に関する情報、自然環境、社会環境の分野の情報である。これらの情報に基づいて解析を進め、概要調査地区選定上の考慮事項に対する適格性について評価を行う。

文献情報は、概要調査地区選定上の考慮事項で示した多岐にわたる事項について、文献を網羅的に収集・整理する。これらの作業で取り扱うデータは膨大になることが予想されるため、NUMOは、地理情報システム（NUMO-GIS）、文献調査システムフロー、地質環境データ管理システムからなる一連の支援ツールを整備している（図 8.2.3-1、5.2.4 参照）。文献調査では、これらの支援ツールを活用して、作業品質の確保や文献情報に基づいた意志決定の追跡性の確保を行う。

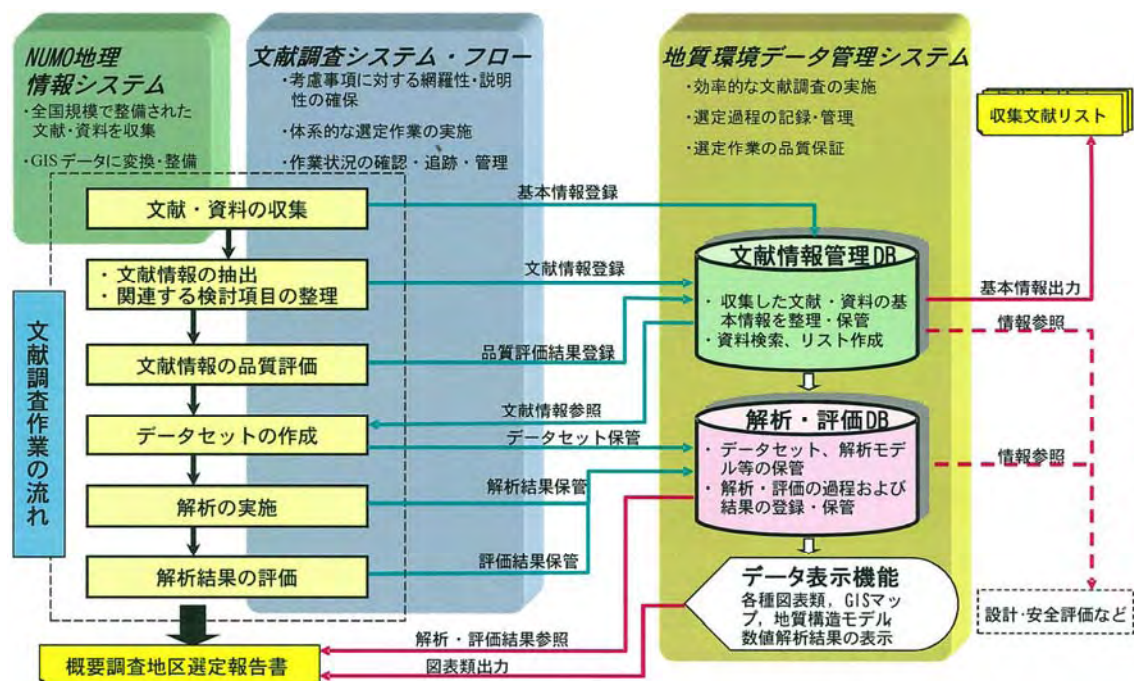


図 8.2.3-1 文献調査のための地質環境データ管理システムと支援ツールの概要

（図 5.2.4-1 の再掲）

地質環境データ管理システムは、地質環境情報の解析・評価作業を円滑に進めるためのシステムであり、地質環境情報を体系的に保管・管理するとともに、各分野の技術者が必要時に必要な情報を適切かつ網羅的に検索・抽出することが可能なシステムを目指している。

8.2.4 自然現象の影響にかかわる調査・評価

自然現象の長期的な影響にかかわる調査・評価を行う項目は、火山・火成活動、地震・断層活動ならびに隆起・侵食である。文献調査の範囲を対象とした個別の文献、そのほかの資料を詳細に分析・評価し、応募区域およびその周辺地域の法定要件に対する適格性を確認する。将来にわたり自然現象の影響が著しいと判断した場合には、そのような場所を含めないように概要調査地区を選定する(図 8.2.4-1)。また、評価結果を「文献調査に関する法定報告書」として取りまとめる(4.2.1.1 参照)。

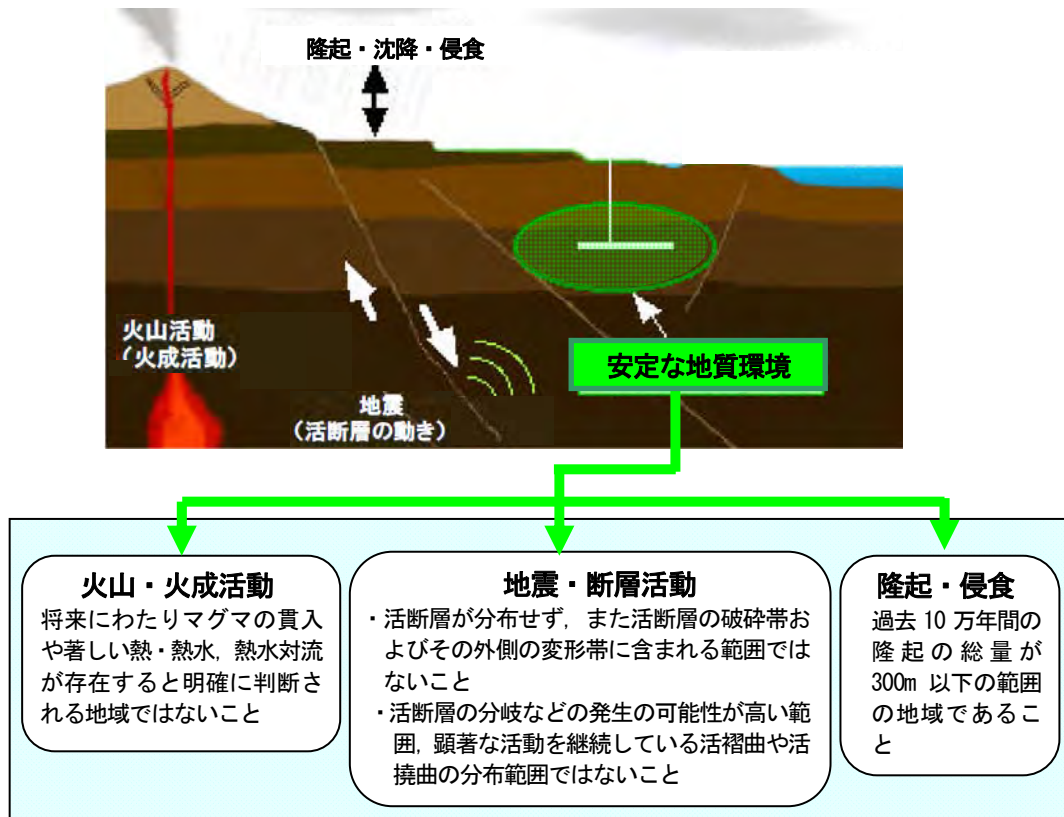


図 8.2.4-1 自然現象の著しい影響と概要調査地区選定上の考慮事項の関係
(JNC, 1999a を編集)

8.2.4.1 火山・火成活動の調査・評価

火山・火成活動による地層処分システムへの長期的な影響としては、マグマの貫入・噴出による処分施設の直接的な破壊、熱・熱水による地質環境の変化(例えば、温度上昇、熱対流系の生成、地下水の化学特性など)、および地質環境の変化に伴う人工バリアの性能低下などが挙げられる。

マグマの貫入・噴出に関する調査では、文献・資料の収集・整理から得られる情報、応募区域および周辺に分布する第四紀火山とその周辺を対象とした空中写真判読、リモートセンシングの情報などにより、火山地形、岩石学的特徴などの情報を収集する。それらの情報に基づいて、評価の対象とすべき応募区域周辺の第四紀火山を確認する。また、第四紀以前を含め可能な限り過去にさかのぼり活動履歴と発達過程を把握する。火山および周辺の地下構造、特に、地表からマントルまでの高温領域の分布に関する情報については、地球物理学、地球化学、測地学などの情報を収集して検討する(5.3.1.1 参照)。

熱・熱水に関する調査では、文献情報のほかに、空中写真判読、衛星画像解析などのリモートセンシング手法を用いて、変質帯の分布やその形成年代などに関する情報を取得する。地下深部の熱源の位置を検討するために必要な情報として、地震波速度構造や熱構造などに関する物理探査記録の再解析などを必要に応じて行う。また、現在の熱水賦存領域が応募区域の近傍に位置する場合には、必要に応じて数値解析により熱水対流系の評価を行い参考にする（5.3.1.1 参照）。

以上の検討により、火山・火成活動の著しい影響が明確に判断される場所を含めないように概要調査地区の候補となる地区を設定し、さらに、その地区が将来にわたり火山・火成活動の著しい影響を受ける場所でないことを確認した上で、概要調査地区として選定する。

8.2.4.2 地震・断層活動の調査・評価

地震・断層活動による地層処分システムへの長期的な影響としては、岩盤の破断・破砕に伴う処分施設や廃棄体の直接的破壊、小断層や節理の発生に伴う周辺岩盤の力学特性や水理特性の変化、地震動による地下施設や地上施設の破壊などが挙げられる。

文献調査では、文献・資料の収集・整理から得られる情報、空中写真や高解像度数値標高モデルを用いた地形判読、測地データの解析、地震観測記録の解析、物理探査記録の再解析などにより、応募区域およびその周辺の活断層、活褶曲や活撓曲の分布・活動性、変動地形の分布、震源分布に関する情報を取得する。また、火山・火成活動、隆起・侵食、地質・地質構造の情報を考慮し、地形・地質構造発達過程として総合的に取りまとめる。その上で活断層などの分布・活動性、活断層の幅およびその外側の変形帯の範囲について検討する（5.3.1.2 参照）。

以上の検討により、活断層の場所、活断層の幅（断層破砕帯）およびその外側の変形帯に含まれる範囲、活断層の分岐などの発生可能性が高い範囲、顕著な活動を継続している活褶曲や活撓曲の分布範囲に位置すると明確に判断される場所を含めないように概要調査地区を選定する。

8.2.4.3 隆起・侵食の調査・評価

隆起・侵食による地層処分システムへの長期的な影響としては、処分施設の地表への接近、それに伴う地下水の流動状況や地下水の化学環境の変化が挙げられる。

文献調査では、文献・資料の収集・整理から得られる情報、空中写真や高解像度数値標高モデルを用いた地形判読などにより、地形・地質情報を取得し、応募区域およびその周辺の隆起・沈降量やその分布、侵食量などを把握する。また、火山・火成活動（第四紀火山の分布など）、地震・断層活動（活断層の分布など）、地質・地質構造の情報を考慮し、地形・地質構造発達過程を検討する。それらの検討結果を踏まえ、必要に応じて内挿・外挿するなどして、応募区域およびその周辺の過去の隆起量（分布）、侵食量（最大下刻量）を検討する（5.3.1.3 参照）。

以上の検討により、過去 10 万年間の隆起の総量が 300m を超えることが明らかな地域を含めないように概要調査地区を選定する。

8.2.5 第四紀の未固結堆積物ならびに鉱物資源に関する調査・評価

文献・資料の収集・整理、空中写真判読、衛星画像解析、地形判読のほか、既存の物理探査記録などの情報、さらに、処分施設を設置しようとする地層が第四紀の未固結堆積物である地域、その採掘が経済的に価値の高い鉱物資源が存在する地域を含めないことを確認して概要調査地区を選定する。

8.2.6 概要調査地区の選定

概要調査地区の選定のプロセスにおいては、まず、概要調査地区選定上の考慮事項への適格性を確認し、文献情報に基づいて概要調査地区と補足的に調査する範囲を設定する。また、概要調査地区の選定結果の妥当性を評価するために、国内外の専門家で構成する委員会を設置する(5.2.4 参照)。文献調査の結果は、「文献調査に関する法定報告書」として取りまとめ公表する。以下では、概要調査地区の選定の進め方について述べる。

8.2.6.1 概要調査地区選定上の考慮事項への適格性の確認

応募区域を含む概要調査地区を設定しようとする地区について、概要調査地区選定上の考慮事項への適格性を検討する。この段階においては、概要調査地区選定上の考慮事項と照らし合わせて、明らかに不適合な地域を除外する。

検討の結果については、国内外の専門家による委員会などを組織し、概要調査地区選定の科学的な妥当性を客観的に評価する(5.2.4 参照)。これらの結果は、「文献調査に関する法定報告書」として取りまとめる。

8.2.6.2 概要調査地区と補足的に調査する範囲の設定

文献調査の結果に基づいて、概要調査を実施する「概要調査地区」と「補足的に調査を行う範囲」からなる調査地区を設定する。概要調査地区は、応募区域およびその周辺の地域のうち、概要調査地区選定上の考慮事項に適合する範囲の中から選定する。この際、閉鎖後長期および事業期間中の安全確保の評価に必要な情報を取得できるように範囲を設定する(5.2.3 参照)。

概要調査地区の範囲は、文献調査の結果に基づき、将来の隆起・沈降および海水準変動と地下水流動系を考慮して設定する(5.2.3 参照)。

概要調査地区における自然現象の影響や地質環境特性をより詳細に評価するため、火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食などに関して、概要調査地区の周辺で補足的に調査を行う範囲を設定することが必要になる場合がある。調査範囲の設定の具体的な考え方については、5.2.3 に述べたとおりで、以下に示す事項を踏まえて補足的に調査を行う範囲を設定する。

- ・ 概要調査地区の評価に当たり、広域の地質・地質構造の分布や発達過程などを把握するため、概要調査地区およびその周辺の広い範囲における調査が必要となる場合がある。
- ・ 活断層や第四紀火山などが応募区域およびその周辺に存在する場合、これらを含めないように概要調査地区を設定するが、それらの影響が及ばないことを念のため確認するために調査が必要となる場合がある。
- ・ 隆起・侵食については、広域的な自然現象であるため、概要調査地区内においてそれらの評価が可能な海成段丘や河成段丘などが分布しない場合、概要調査地区の外に分布する海成段丘や河成段丘などの調査が必要となる場合がある。

以上のように、概要調査地区では、地質環境特性にかかわる調査・評価が主体となり、補足的に調査を行う範囲では、特に火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食などの自然現象の影響にかかわる調査・評価、広域の地質構造発達過程にかかわる調査が主体となる。このような考え方に基づき設定する概要調査地区、および補足的に調査する範囲のイメージを図 8.2.6-1 に示す。

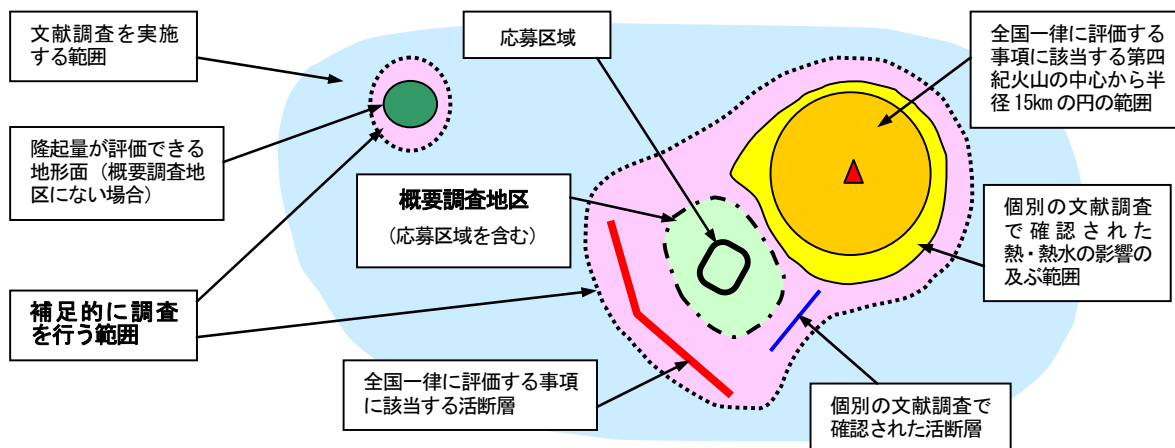


図 8.2.6-1 概要調査地区および補足的に調査する範囲の設定イメージ (図 5.2.3-4 の再掲)
(公募の場合) (出典 : NUMO, 2004b)

- ・ 法定要件に該当する活断層や火成活動などに該当する範囲は、概要調査地区に含まない。
- ・ 活断層や火成活動などに該当する範囲との位置関係、応募区域の大きさなどによっては、概要調査地区は応募区域より広くなるが、広がった部分は概要調査などを行うにとどめ、NUMO が処分施設建設地とすることはない。
- ・ 概要調査地区の特性をより詳細に評価するため、概要調査地区の周辺でも補足的に調査を行うことがある。

8.2.6.3 文献調査に関する法定報告書の説明と概要調査の実施の判断

法定報告書については公告・縦覧し、関係都道府県内において、説明会を開催する。また、報告書の内容に対する意見の概要を取りまとめ、これについての NUMO の見解を作成する。ここまでに示したプロセスを経て、概要調査地区を選定する。

概要調査地区を選定後、NUMO は実施計画の変更を経済産業大臣に申請する。経済産業大臣は市町村長、都道府県知事の意見を聴取しこれを尊重する。さらに、原子力委員会および原子力安全委員会からも意見を聴取し、最終処分計画の改定を閣議決定する。経済産業大臣により実施計画の変更が承認され、概要調査地区選定のすべてのプロセスが完了することとなる。

8.2.7 地質環境特性の調査・評価

地質環境特性の評価は、この段階で構築する地質環境モデルを用いて行う。地質環境モデルは、地層処分にとって重要な地質環境特性である地下水流動特性、地下水化学特性、岩盤特性 (物理特性、力学特性、熱特性)、物質移行特性などを表現したモデルである (5.2.1 参照)。

地質環境モデルの構築は、まず、地質構造発達過程 (地史) の検討に基づいた地質・地質構造の概念モデルを構築する。次に、地下水の水理・化学特性、岩盤の力学特性などの地質環境特性の空間的分布、現象・挙動、メカニズムなどを表現した概念モデルを文献情報に基づいて構築する。地質環境モデルは、概念モデルをベースとして、それぞれのモデルに関する情報を定量的に表現し可視化したモデルとして構築する (5.2.1 参照)。

地質環境モデルは、5.3.2 に述べたように既往の地質図幅などの地表付近の地質・地質構造に関する情報のほか、資源探査やトンネルなどから取得される地下深部の情報や既往のデータベースなどの文献・資料、空中写真判読、衛星画像解析などにより、地質・地質構造、岩盤の水理特性、地下水の化学特性、岩盤の物理・力学・熱特性、水文などに関する情報に基づいて構築する。

その際、5.3.1 に述べた自然現象にかかわる調査・評価の結果を踏まえ、地質構造発達過程を解釈し、古水理地質学的アプローチによる地質環境の変化の予測・評価も適用し、現在の地質環境の状態がどのように変化するか検討・評価する。特に、「地層の著しい変動」に該当しない程度の隆起・侵食による地形変化や、汎世界的な気候・海水準変動に伴う地下水流動状況の変化や地下水化学特性の変化、断層活動に伴う周辺岩盤の力学的変化や透水性の変化などについて検討する。

これらの情報に基づいて、付加的に評価する事項などの概要調査地区選定上の考慮事項（4.2.1.1 参照）に関する適格性を評価する。また、候補母岩の抽出、候補母岩の地質環境特性と地質構造発達過程（地史）を踏まえた地質環境特性の長期変遷についての評価など、処分場の概略検討、概略的な安全性の検討に用いる情報を整理する。

文献調査で取得される情報は、地表付近の情報が多く、地下深部の情報は限られたものとなる可能性が高い。このため、モデルを構築する際の解釈・推定結果に含まれる不確実性の種類やその大きさなどを特定することが重要となり、不確実性の程度に応じて、複数の地質環境モデルを設定する場合も考えられる。このため、地質環境モデルに含まれる不確実性の低減および施設設計や安全評価からの要求も考慮し、閉鎖後長期の安全性を確保する上で特に重要な構造・特性・現象を特定する。その上で、地質環境モデルを通じて概要調査において明らかにすべき事項、概要調査における構造・特性・現象に関するデータ取得の優先度などを明確にし、それらを概要調査計画に反映する。

8.2.8 処分場の概略検討

処分場の概略検討では、地質環境モデルに基づいて、これまで NUMO（2004a, 2004c）や JNC（1999b）などで示している人工バリアや地下施設の設計の適用性を概略的に検討する。例えば、坑道の仕様などの設計を行う場合、この段階では、設計に必要な地下深部の岩盤の力学特性などの情報は限定的であると想定されることから、岩盤の種類に応じた簡易的な力学的安定性評価により、対象地域において掘削可能な坑道の大きさや深度を概略的に検討する。人工バリアについては、対象地域で安全機能が確保できることの見通しを確認するが、必要に応じて新たな工学的対策の追加検討を実施する（6.1.1 参照）。

また、概要調査計画や次段階の設計検討に反映するために、工学的成立性、経済性や建設工程などを含めた事業の成立性についても総合的な評価を行い、設計の観点から次段階の調査項目や設計課題を整理する。

8.2.9 処分場の安全性の概略検討

概要調査地区選定段階（文献調査の段階）においては、一般的に、地理、地形、地質構造といった情報が入手可能と考えられるものの、地質環境に関する情報が限定的であることから、天然バリアとしての母岩の性能の評価は概略的なものとどまる。また、人工バリアについては、地質環境に関する情報が限定的であるため、保守性を重視した設計になると想定している。

このため、この段階の安全評価は、定量的な評価結果を得ることよりも、むしろ多重バリアシステムの各構成要素をどのように割り当てるかについての見通しを検討する。このためのアプローチとしては、既存のシナリオやモデル（例えば、JNC, 1999c；電事連・JNC, 2005）などに基づく感度解析が有効であり、安全評価の観点からの課題を調査や設計にフィードバックすべき因子を抽出する（7.1.7.1 参照）。

以上の処分場の概略検討（8.2.8 参照）と、処分場の安全性の概略検討に基づいて、文献調査に基づく処分場概念を構築する。また、その結果は、「文献情報に基づく処分場の概要」として取りまとめ公表する。

8.2.10 次段階の準備

概要調査地区の選定と並行して、次段階の準備として概要調査計画を策定する。概要調査では、地上からの調査（地表踏査、物理探査、ボーリング調査など）により、地層処分システムに著しい影響を及ぼす自然現象や地下深部の地質環境特性に関する情報と、適切な工学的対策や閉鎖後長期の安全性の評価に必要な情報を取得する。

文献調査の結果に基づく地質環境の理解は、文献情報の量や精度に依存することから、概要調査は、複数のフェーズに分けて行う段階的なアプローチにより実施する計画を策定する。これは、それぞれのフェーズまでに得られている情報に基づいて、次のフェーズの調査計画を見直すことで、合理的かつ効率的に概要調査ができると考えているためである。（図 8.2.10-1, 5.2.3 参照）。

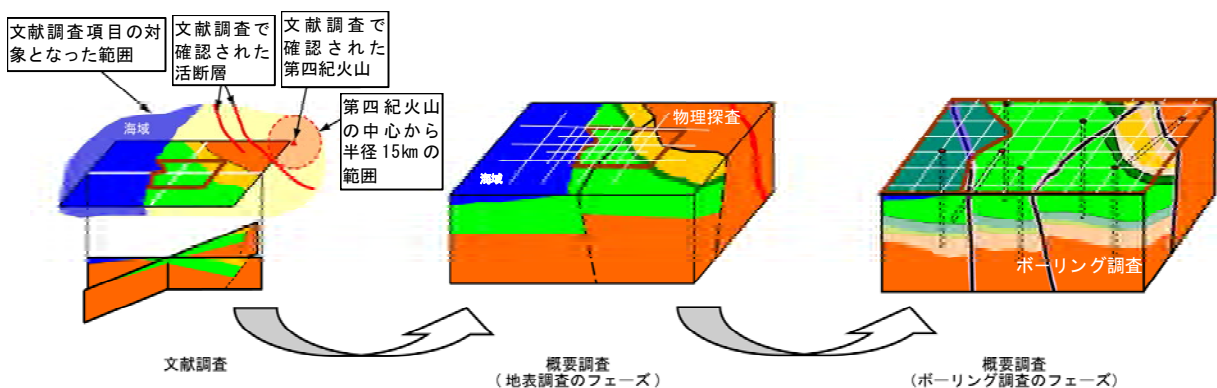


図 8.2.10-1 概要調査における段階的なアプローチのイメージ
（2 フェーズの例：図 5.2.3-6 の再掲）

概要調査を合理的に進めるために段階的なアプローチを採用し、二つのフェーズ（地表調査のフェーズ、ボーリング調査のフェーズ）に区分した例を示す。

概要調査で実施する調査の項目については、文献調査の成果、およびこの段階までに準備される精密調査地区選定上の考慮事項に基づいて、地質環境の調査・評価、処分場の設計および安全評価の観点から必要な調査項目を設定する。

調査項目、調査数量、調査位置の設定などの調査計画の立案に際しては、文献情報に基づいた自然環境の長期的な影響にかかわる評価、地質環境特性の評価、処分場の概略検討、さら処分場の安全性の概略検討から、不確実性の要因とその重要度分析に基づいた具体的な調査目標を設定して計画を策定する。このためには、調査や、設計・安全評価に必要な調査データを効率的に取得することができるように準備を行っておく。具体的には、統合化データフローダイアグラム（原環センター，2007：図 8.2.10-2；三枝ほか，2007；太田ほか，2007；Ota et al., 2010）などの形で、調査データの取得、解釈から地質構造モデルの構築に至る一連のデータの関係や設計・安全評価の項目との関係について、あらかじめ連携する項目を明確化し調査データとその反映先を整理する（5.2.1 参照）。

この整理結果を活用して、調査・設計・安全評価に携わる技術者間の情報の共有化を図ることにより、効率的なデータの取得が可能となる。

概要調査計画は、計画立案手順を示した概要調査計画立案マニュアルに基づいて作成する（5.2.3 参照）。その基本的な考え方は、NUMO（2011a）に示している。また、個々の調査仕様の決定、実施計画の策定、調査の工程・品質・安全などの管理、さらに現地調査で想定される発生事象についての対策など、概要調査実施時に必要となる現場管理の方法や手順、管理上の留意点などを示した概要調査施工管理マニュアルを活用して概要調査を円滑に実施する（5.2.3 参照）。

概要調査では、地表踏査、資機材の運搬、トレンチ掘削、物理探査、ボーリング調査などを行う。このため、調査計画では、サイトの条件に応じた調査・試験時における一般労働安全の確保策を立案し調査計画に反映させる。また、NUMO は、サイト選定の早い段階から地域の環境に十分配慮する方針である。このため、概要調査計画では、現地調査・試験により環境に与える影響を回避・低減するための環境保全対策を立案し調査計画に反映させる。

統合化データフローダイアグラム

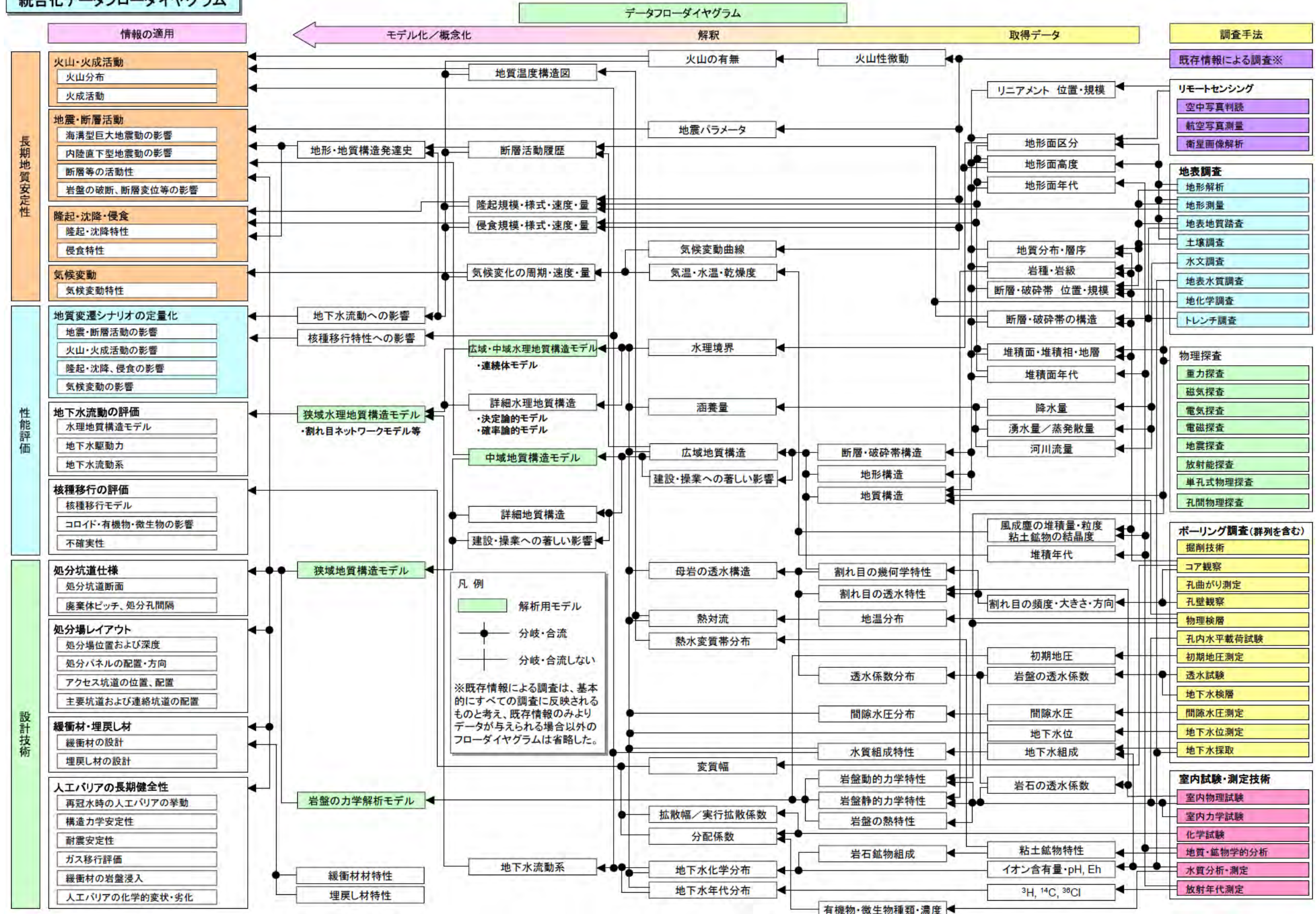


図 8.2.10-2 統合化データフローダイアグラム (図 5.2.1-3 の再掲)
(出典：原環センター，2007)

8.3 精密調査地区選定段階における技術的な取り組みの概要

8.3.1 精密調査地区選定段階における安全確保の目標と実施事項

精密調査地区選定段階（概要調査の段階）では、事業目標を「精密調査地区選定」とし、また、安全確保の目標を「自然現象の著しい影響の回避」、「長期安全性確保の見通し」、「事業期間中の安全性確保の見通し」としている（4.2.1.2 参照）。また、具体的な目標達成にかかわる要件と成果として公表する安全確保にかかわる主要文書を以下に示す。

・本段階における事業目標	: 精密調査地区選定
・安全確保にかかわる目標	: 自然現象の著しい影響の回避 長期安全性確保の見通し 事業期間中の安全性確保の見通し
・目標達成にかかわる要件	: 法定要件への適合性 精密調査地区選定の環境要件への適合性 安全審査基本指針への適合性 自主基準（考慮事項含む）への適合性
・安全確保にかかわる主要文書	: 概要調査に関する法定報告書 概要調査に基づく概念設計と予備的安全評価に関する報告書

精密調査地区選定段階における実施事項のフローを図 8.3.1-1 に示す。

この段階で実施する主な事項としては、「安全確保ロードマップ（詳細版）」（表 4.1.2-2 参照）で示した以下の事項がある。

- ① 精密調査地区選定上の考慮事項への適格性の確認
- ② レファレンス処分場概念の構築
- ③ 処分施設建設地選定上の考慮事項の作成
- ④ 精密調査計画の作成
- ⑤ 安全審査基本指針への適合性の確認
- ⑥ セーフティケースの構築

概要調査は、調査の段階を複数のフェーズに分け、フェーズごとに調査結果を取りまとめ、次のフェーズの調査計画を見直して調査を行う段階的なアプローチにより実施する（5.2.3 参照）。調査のフェーズ設定は、一般土木構造物の建設にかかわる地質調査の事例、わが国の深地層の研究施設計画や諸外国の地層処分事業における調査などを勘案して、概要調査を地表調査のフェーズとボーリング調査のフェーズの2段階で実施する。

(i) 地表調査のフェーズ

文献調査の評価結果を現地で確認して概要調査地区の地質環境の概要を把握すること、およびボーリング調査の計画立案に資する情報を取得することを目的として、地上からの地形・地質調査、物理探査（空中、地上、海上）などを実施するフェーズ。

(ii) ボーリング調査のフェーズ

地下深部のデータを取得することを目的とした深層ボーリング調査などを行うフェーズ。

概要調査では、法定要件に示された火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食といった自然現象による著しい影響の回避について、現地調査結果に基づいて判断する（5.3.1 参照）。また、概要調査地区の地質環境モデルを更新するとともに、地質環境の長期変遷についての検討を行う（5.3.2 参照）。

概要調査で更新された地質環境モデルに基づいて、三つの安全確保策（適切なサイト選定と確認、処分場の設計・施工などの適切な工学的対策、地層処分システムの長期安全性の評価）の連携による検討により、処分場を設置する候補母岩の選定および地上施設の概略の位置を設定する。選定した候補母岩を対象に、人工バリアの仕様や地上・地下施設の基本レイアウトを検討し、人工バリアの工学的成立性の確認、事業期間中の安全性（一般労働安全の確保、放射線安全の確保）、周辺環境の保全策の検討、予備的な安全評価などの処分場の概念設計を行う。さらに、地質環境特性、事業期間中ならびに閉鎖後長期の安全性、経済性などの観点から総合的に判断した上で、処分場概念をレファレンス処分場概念として一つに絞り込む。この際に、この段階での不確実性を考慮し、一つに絞り込むことが適当でない場合には、複数のオプションを示すことも検討する。

上述の検討結果を踏まえ、精密調査地区選定上の考慮事項に基づいて精密調査地区を選定し、「概要調査に関する法定報告書」の作成、ならびに処分場の設計、事業期間中および閉鎖後長期の安全性などの評価結果を含む「概要調査に基づく概念設計と予備的安全評価に関する報告書」を取りまとめる。さらに、これらの報告書とその補足文書からなる文書群により、この段階のセーフティケースを構成し、ステークホルダーへの安全性の提示に利用する。また、次段階に向けて、処分施設建設地選定上の考慮事項を作成して公表し、これに基づき精密調査計画の立案を行う。

なお、次段階の後半に予定している地下調査施設の建設が地質環境や周辺環境に擾乱を及ぼす可能性があることに配慮し、影響を受ける前の状態を把握するためのモニタリングを必要に応じてこの段階から開始する。

この段階の安全確保策の連携のポイントは、以下に示すとおりである。

- ・ ボーリング調査のフェーズの概要調査計画の更新
- ・ 地質環境モデルの構築
- ・ 候補母岩の選定
- ・ 精密調査地区選定上の考慮事項への適格性の確認
- ・ レファレンス処分場概念の構築
- ・ 精密調査計画の策定

これらの項目の実施に当たっては、三つの分野で情報を共有しながら、必要に応じてフィードバックし業務を実施する。例えば、候補母岩の選定では、地質環境の調査・評価で作成した地質環境モデルを分野間での共有のインターフェースとして利用し、処分場の設計や閉鎖後長期の安全確保の観点から適切な岩盤を選定する（8.3.5 参照）。また、処分場の概念設計に際しては、設計の妥当性を検討するために、性能評価検討を実施し、設計に反映するなど、多くの実施項目で連携が重要となる（8.3.6.3 参照）。

なお、以下に示す実施項目と関連する技術および検討事項の関係を参考資料に示す。

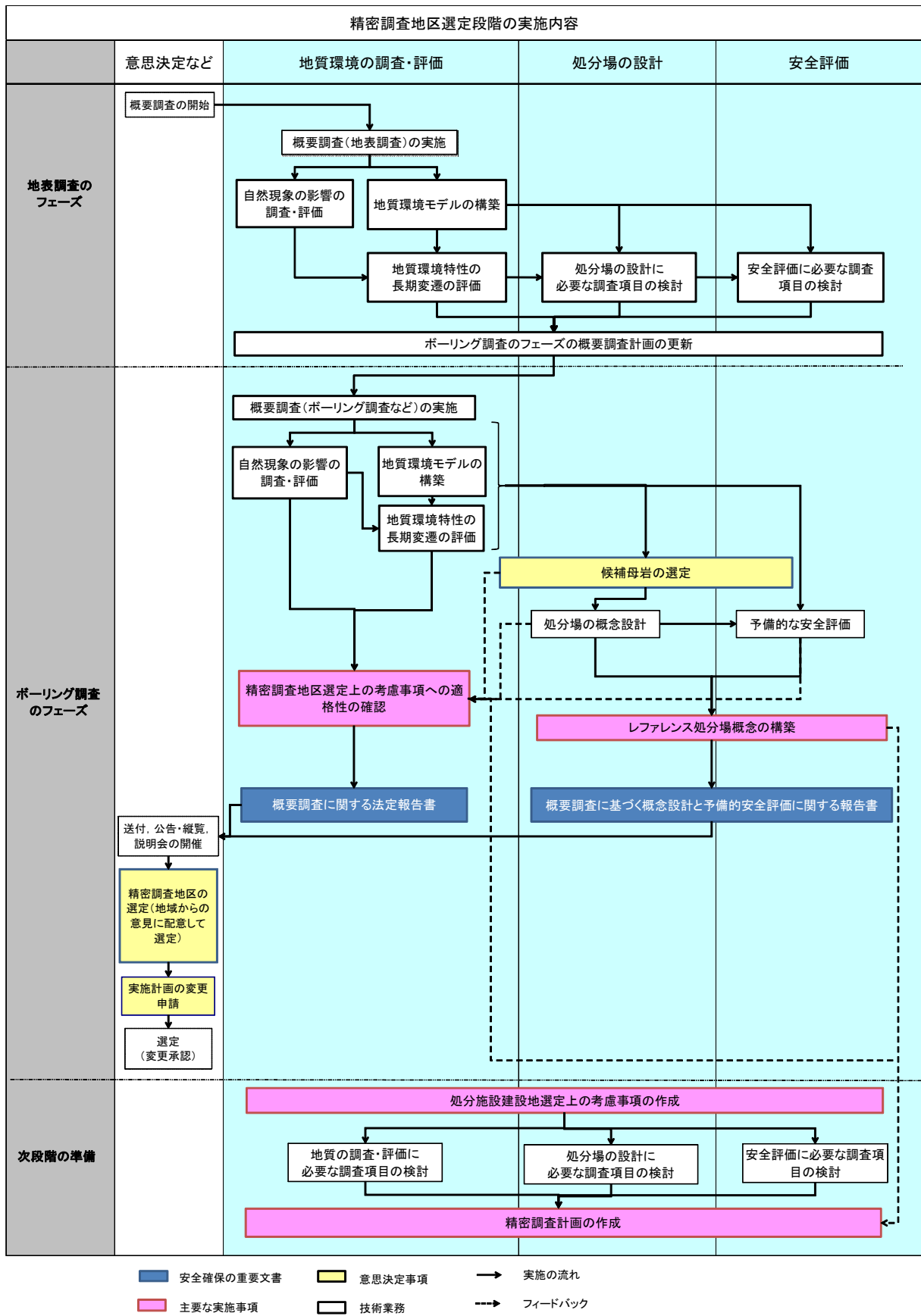


図 8.3.1-1 精密調査地区選定段階における実施事項フロー図

8.3.2 概要調査の実施

地質環境の調査は、地表調査のフェーズとボーリング調査のフェーズの2段階で実施する計画である。また、現地調査の実施に際しては、概要調査計画で策定した一般労働安全の確保策、環境保全対策に基づいて調査業務を行うとともに、現場の状況に応じてこれらの対策を適宜改善して、一般労働安全および環境保全を図る。

8.3.2.1 地表調査のフェーズにおける調査の実施および概要調査計画の更新

地表調査のフェーズの目的は以下に示すとおりである。

- ・ 文献調査に基づく地質環境の評価結果を現地調査により確認し、その信頼性を向上させる。
- ・ 自然現象の影響の評価、地質環境の長期変遷の評価、地質環境モデルの作成など、地質環境特性の概要を把握するための調査項目を設定し、また、設計や安全評価の観点からも必要な調査項目を抽出して次フェーズの調査計画を更新する。

このフェーズでは、主に地表踏査、物理探査（空中、地上、海上）、トレンチ調査、浅層ボーリング、地表で採取する岩石や河川水などの室内試験・分析、さらに水文に関する調査・観測などを実施する（5.3.1, 5.3.2 参照）。なお、物理探査結果の解釈などに利用するため、深層ボーリングをこのフェーズから実施するなど、調査の進展や地質環境の理解に応じて、適宜、調査計画を見直す柔軟な対応を行い、合理的かつ効率的に調査を実施することを基本とする。また、地表調査により得られた情報は、適宜、処分場の設計や安全評価の検討にも反映し、これらの業務の実施に必要な調査項目について検討した結果をボーリング調査の計画に反映する。

次に、地表調査の結果の取りまとめと評価に基づき、ボーリング調査のフェーズの調査計画を更新する。ボーリング調査のフェーズのその主な目的は、前フェーズで認識された不確実性を低減することであり、さらに以下に示す目的が達成できるよう概要調査計画を更新する（5.3.1, 5.3.2 参照）。

- ・ 地表調査では取得できなかった地下深部のデータを取得し、火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食に関する評価を行い、自然現象の著しい影響の回避について判断する。
- ・ 地表の詳細な地質環境の情報および物理探査結果と、ボーリング調査で得られる地下深部の情報を統合して地質環境モデルを更新する。
- ・ 地質構造発達過程、自然現象の影響ならびに地質環境モデルに基づき、地質環境の長期変遷についての評価を行う。
- ・ 処分場の設計や閉鎖後長期の安全性に大きな影響を及ぼすと考えられる地質環境特性や地質環境の長期変遷にかかわる不確実性について、設計、安全評価と連携した評価を行う。

概要調査計画の更新では、ボーリング調査の位置や調査の仕様（深度、試験項目、数量など）などの具体的な内容を含むものとする。調査計画の更新に際しては、地質環境モデルの構築にかかわる情報（地質構造、熱特性、力学場、地下水流動特性、化学特性など）、処分場の設計や安全評価に必要な地質環境の長期安定性に関する情報が確実に得られるような計画を策定する。また、ボーリング孔の効率的な利用として、初期ベースラインを理解するために実施するモニタリング孔（水位、水圧、水質など）としての利用も念頭においた計画を策定する（4.2.1 参照）。

8.3.2.2 ボーリング調査のフェーズにおける調査

ボーリング調査のフェーズでは、前フェーズで認識された不確実性を低減することを目的として、地下深部の地質環境特性に関するデータを取得する。また、自然現象および地質環境の形成のメカニズムやプロセスに関する情報を取得する。

ボーリング調査の実施に際しては、調査の進捗で得られる情報を前フェーズまでの地質環境モデルに反映し、取得データやモデルの妥当性をサイトの地質環境、施設設計、安全評価の観点から適宜評価して問題点や課題の抽出に努める。また、調査の過程で問題点や課題が認識された場合は、その影響の大きさを検討する。検討の結果、影響が大きいと判断した場合は、ボーリング深度の変更、新たなボーリングや調査・試験の追加実施などの柔軟な対応を行うことを基本として調査を実施する。

8.3.2.3 概要調査における一般労働安全の確保と環境保全策

概要調査における一般労働安全の確保策は、地表からの調査やボーリング調査などの現地の調査を実施する際に想定される発生事象を、人的災害にかかわる事項と技術的な不具合にかかわる事項に分類し、各作業のリスクレベル、低減措置、残存リスク発生時の対策を立案する（5.4.2 参照）。

環境保全対策の考え方は、3.2.2 および 6.2.3 に示したとおりであり、大気環境、水環境ならびに土壌環境などの良好な状態の保持、生物多様性の確保、自然環境の体系的保全、環境への負荷の低減などを基本的な考え方とする。概要調査の実施による環境影響については、文献調査で得られた自然環境や社会環境の情報や調査の内容に応じて、表 8.3.2-1 に示す評価項目を考慮するとともに、環境モニタリングを含めた適切な環境保全対策を立案する（NUMO, 2004a）。

表 8.3.2-1 概要調査の実施に伴い考慮の可能性がある環境影響評価項目の例
(NUMO, 2004a を一部修正)

概要調査における影響要因	環境影響評価項目例
トレンチ掘削	地下水、動植物への影響
ボーリング孔の掘削、孔内試験など	地下水への影響
やぐらの設置（資材などの輸送、掘削作業、保孔、ボーリングやぐらの存在）	動植物への影響
空中物理探査	ヘリコプターの騒音などによる家畜などへの影響
地表／海上物理探査（火薬や規模の大きな起振方法の場合）	地域住民、生物への影響
林道工事などの樹木伐採	動植物への影響

8.3.3 自然現象の影響にかかわる調査・評価

概要調査の結果に基づき、精密調査地区選定上の考慮事項の法定要件に示された火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食による地層の著しい変動が長期間生じてないことを確認する（5.3.1 参照）。その上で、自然現象の著しい影響の回避についての判断を行い、「概要調査に関する法定報告書」を作成する。

8.3.3.1 火山・火成活動の調査・評価

応募区域の近傍に第四紀火山あるいはマグマが存在する可能性がある場合は、物理探査、地表踏査（年代測定、地化学分析を含む）などの調査により、第四紀火山の火山層序の認定、活動履歴などの時代変遷の検討を行う。さらに温度プロファイル、岩石の年代・化学組成、温泉水や地下水の化学組成、同位体成分などのデータ、地球物理学的手法による調査結果などを総合的に評価して、マグマ供給系の基本単位としての個々の第四紀火山を認定する。

また、変質帯の分布・性状、地質・地質構造や火山との関連について検討し、変質鉱物や変質帯形成にかかわった熱水系の性状（温度、泉質など）を検討する。

ボーリング調査と地表からの調査により取得した情報に基づき、概要調査地区ならびにその周辺地域の第四紀の火山・火成活動や地下のマグマの存在について検討する。また、温度プロファイルや採取した地下水の遊離ガスや溶存ガスの同位体比測定などの地球化学的手法、さらに地球物理学的手法（地震波速度構造解析や比抵抗構造解析）などを組み合わせた調査・評価により、応募区域ならびにその周辺の第四紀火山や熱水賦存領域の存在について検討する。

これらの結果は、地質環境の評価や予備的な安全評価のための情報となる。

8.3.3.2 地震・断層活動の調査・評価

地上からの調査では、活断層、活褶曲および活撓曲の分布・活動性、活断層の幅およびその外側の変形帯の範囲などの文献調査結果を、地表踏査（地形、地質）、物理探査、トレンチ調査などで確認する。また、海域に分布する活断層などが検討の対象となる場合には、音響測深やサイドスキャンソナーなどの海底地形測量、海上音波探査などの物理探査、ピストンコアなどの海底試料採取などを実施する。なお、この段階では、地震・断層活動の評価のための観測設備（微小地震観測設備など）を必要に応じて設置して、情報を取得する場合もある。

また、地表からの調査やボーリング調査で新たに確認された断層・破碎帯については、取得された情報に基づき、①分布・性状の確認（活断層と明確に判断される断層との比較を含む）、②断層系のグルーピング、③各断層系の形成順序の検討、④活動性の評価を行い、概要調査地区内の活断層の存否について確認する。

調査により取得した情報、さらに火山・火成活動、隆起・侵食、地質・地質構造の情報を考慮し、地形・地質構造発達過程として総合的な取りまとめを行い、活断層などの幅およびその外側の変形帯に含まれる範囲、活断層の分岐などの発生の可能性が高い範囲を特定する。その際には、震源分布に関する情報と、地形判読や測地データの解析、物理探査などの調査結果を総合的に検討して評価する（5.3.1 参照）。

以上の検討により、応募区域の中から、活断層、活褶曲および活撓曲による影響の及ばない場所を評価し、予備的な安全評価のための情報とする。

8.3.3.3 隆起・侵食の調査・評価

地上からの調査では、海成・河成段丘や空中写真などから得られた文献調査結果を確認する調査を行う。隆起量や侵食量の指標となる段丘面の構成層やその形成年代に関する情報を、地形測量、地形解析や年代測定などにより取得する。また、隆起量や侵食量の指標となる地形面上、または最終氷期以降の堆積物の分布域においてボーリング調査を実施した場合には、堆積物の分布、形成年代、堆積環境などの隆起量、侵食量の指標となる情報を取得する。

ボーリング調査結果と前段階までの情報を統合して、隆起運動の背景にある地質構造発達過程を検討する。これらの結果に基づき、地形・地質構造発達過程や隆起・沈降量を再評価し、さらに地質構造発達過程を外挿することにより将来の隆起・沈降量を予測する。

一方、侵食については、最終氷期以降の堆積物の厚さを最終氷期の侵食深さの指標とみなせることから、これを把握するための物理探査、ボーリング調査を必要に応じて実施する。これらの調査により取得された情報と、隆起・侵食にかかわる情報に基づき、最大下刻量の評価を行い、地形変化予測モデルなどにより将来の侵食量を評価する（5.3.1 参照）。

これらの結果は、地質環境の評価や予備的な安全評価のための情報とする。

8.3.4 地質環境特性の調査・評価

地質環境特性の評価は、まず、前段階までに構築した地質構造発達過程（地史）の妥当性の確認、地質構造、地下水の水理・化学特性、岩盤の力学特性など地質環境の概念モデル（5.2.1 参照）を概要調査結果に基づいて更新する。その際には、それぞれの概念モデル間の整合性が図られていることを確認する。その次に、先の概念モデルをベースとして、地表の詳細な情報と物理探査結果、ボーリング調査で得られた地下の情報を定量的に表現し可視化した地質構造モデル、水理地質構造モデル、地下水の地化学特性モデル、岩盤特性モデルなどの地質環境モデルを構築し、地質環境特性の評価を行う（5.2.1 参照）。

地質環境モデルは、調査により得られた岩種・岩相、層序、割れ目分布、破碎性状、風化・変質の程度などの地質学的な情報に基づいて、地質構造要素（岩体または地層、断層など面構造など）の分類・特徴付けを行い構築する地質構造モデルをベースとして、水理地質構造、地下水の地化学特性、岩盤特性などのモデルを構築する（図 8.3.4-1）。また、それぞれの地質環境モデルは、直接取得したデータ、データの解釈、解析結果と計測データの比較、さらにデータや解釈の不確実性の評価などのモデルの妥当性の確認を経て構築する。例えば、地下水流動解析や密度流解析により得られた塩分濃度分布と実測データとの比較を行い、モデル間の整合性や妥当性を確認する。また、解析と実測データとの整合性が確認できない場合には、解析に用いた境界条件や、透水係数分布の設定などを検討して、差異の要因を特定し、追加的な調査の実施や次段階の調査計画の策定に反映する。

地質環境モデルの構築では、モデルの不確実性に応じて複数の地質構造モデルを設定する場合や、地質環境特性のデータに不確実性の情報（例えば、データのばらつきの幅や統計的な評価結果など）を加えることにより、地質環境モデルの不確実性を表現する。例えば、岩盤の力学特性（割れ目や層理面、劈開面などの岩盤分離面の分布頻度や方向など）の空間的な広がり起因した不確実性が大きな場合には、岩盤の力学特性モデル（岩盤の物理・力学的物性値のデータセット）を複数設定することも考えられる。

また、地質環境特性の長期的な変遷については、5.3.1 に述べた自然現象にかかわる調査・評価の結果、地質構造発達過程や古水理地質学的アプローチによる地質環境の変化の予測・評価、例えば、堆積岩中に存在し、その生成と変遷に関連した地下水の性状などを踏まえ、現在の地質環境の状態がどのように変化するかというような検討を行い評価する。特に、「地層の著しい変動」に該当しない程度の隆起・侵食による地形変化や、汎世界的な気候・海水準変動、断層活動による地域的な隆起・沈降による変動によって生じる塩淡境界の移動や動水勾配の変化に対しても、それがどのように地下水流動特性や地下深部の地球化学的環境に影響するか、さらに、これらが周辺岩盤の力学的

変化や透水性にどのように影響するかなどについて検討する。

上述のようにこの段階に構築した地質環境の概念モデルや地質環境モデルは、概要調査地区の地質環境の理解を深め、処分場を設置する候補母岩の選定、人工バリアの概念設計、処分場の基本レイアウトの設定、予備的な安全評価などの処分場概念の構築や、次段階の調査計画を策定する際の判断材料として利用する。また、施設設計および安全評価で利用する各種パラメータの適用性、モデルに内在する不確実性やデータの信頼性を NUMO 内の技術者間で共有するためのツールとして用いる。

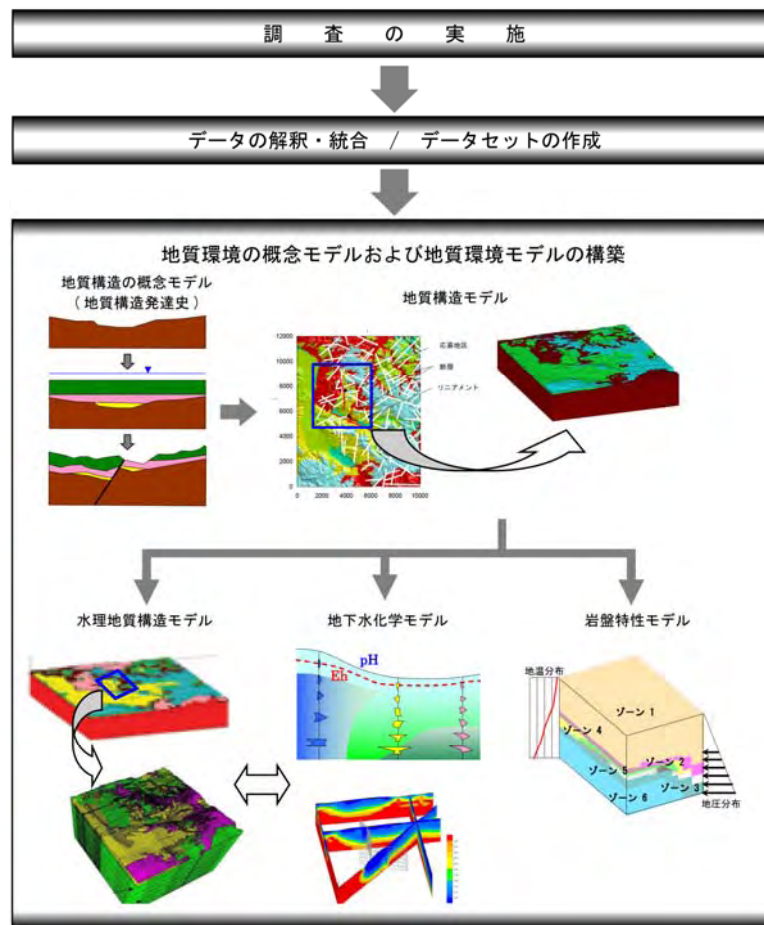


図 8.3.4-1 地質環境モデル構築の流れ (イメージ) (図 5.2.1-1 の再掲)

各段階の調査により取得された情報に基づき地質環境の概念モデルを構築し、それをベースとして、地質環境の各特性の分布や性状を定量的に可視化した地質環境モデルを構築する。

8.3.5 候補母岩の選定

地質環境モデルや地質環境の長期変遷に関する情報に基づいて、候補母岩の適性を評価する。なお、複数の母岩が候補となる場合には、それぞれの母岩について評価を行う。候補母岩の適性は、表 8.3.5-1 に示した項目に基づいて評価し、母岩としての適性が見通しがあると判断された岩体の中から、次段階の地下調査施設を建設する候補母岩を選定する。その際には、地下深部の地質や断層の空間的な分布などの地質環境特性のデータがもつ不確実性を考慮する。

候補母岩の評価は、天然バリアとして求められる安全機能（6.2.2 参照）、廃棄体および人工バリアの設置環境として好ましい処分環境の条件（6.2.2 参照）、ならびに所定量の廃棄体を収容できる岩体の広がり（処分場の収容性）、工程・経済性などの地層処分事業の成立性の観点から評価を行う（表 8.3.5-1）。なお、候補母岩は上述の条件を満たすのであれば、複数の地層や岩体を選択する可能性もある。以上のように、母岩としての適性を有する地層（または岩体）を候補母岩として選定する。

表 8.3.5-1 地下施設設置位置の設定のための評価項目例（表 6.3.3-1 の再掲）

評価項目	評価指標の例	評価に必要な情報
【熱環境】 閉鎖後の処分場の温度が低いこと	廃棄体の発熱量と岩盤特性に基づく廃棄体専有面積や温度の経時変化	岩盤特性モデル、廃棄体の発熱量、地温勾配、岩盤の熱特性など
【力学場】 坑道の力学的安定性が確保できるとともに、閉鎖後の処分場とその周辺の力学場が人工バリアの安定性に適していること	岩盤特性に基づく坑道離間距離や支保の仕様	岩盤特性モデル、初期地圧、側圧比、岩盤の力学特性、地山強度比など
【水理場】 閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流量が小さく、緩慢であること	地下水移行経路長、地下水移行時間など	水理地質構造モデル、地質環境の長期変遷評価結果、動水勾配、地温勾配、地下水組成、透水係数、有効間隙率、地下水流向
【化学環境】 閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶解性と人工バリアの安定性に適していること	地下水化学特性に基づく人工バリアの長期挙動	地下水化学モデル、酸化還元電位、地下水の pH、地下水組成、鉱物組成など
【母岩の広がり】 処分場を収容できる面積（容積）を有するとともに、処分パネルを効率的に配置できる形状を有すること	処分場の規模、処分パネルの数・形状	地質構造モデル、母岩の空間的な広がり、断層・破碎帯の分布など
【工程・経済性など】 工程確保の見通しがあるとともに、経済性が確保されること	建設工程、操業工程、建設費の概算結果など	アクセス坑道の延長距離、処分形態や処分坑道断面の仮設定情報

候補母岩の抽出から候補母岩の選定、ならびに処分場設置可能領域の設定までの手順を図 8.3.5-1 に示す。処分場設置可能領域は、次段階に建設する地下調査施設の位置を設定するために、地下施設の概略的な位置を検討するために候補母岩中に設定する。まず、先に選定した候補母岩に対して、熱環境と力学場の評価から制約条件となる処分場設置可能深度を設定する。次に、水理場および地下水の化学環境に基づく核種移行抑制の観点から、相対的に好ましい条件の領域を抽出する。また、地質環境に応じた工学的対策の効果や実現性を評価して、その領域の岩体の広がりや地上施設との位置関係（アクセス坑道の延長距離）などの工程・経済性に関する評価項目を加えた総合的な評価により、処分場設置可能領域を設定する。

なお、以上で述べた候補母岩の評価の基本的な考え方は、サイト調査・評価の進展や得られた情報の質や量に併せて必要な検討事項を追加するなど、実際の事業の進展に併せて改訂する。

以下では、具体的な候補母岩の選定の方法について、評価の手順の例を示す。

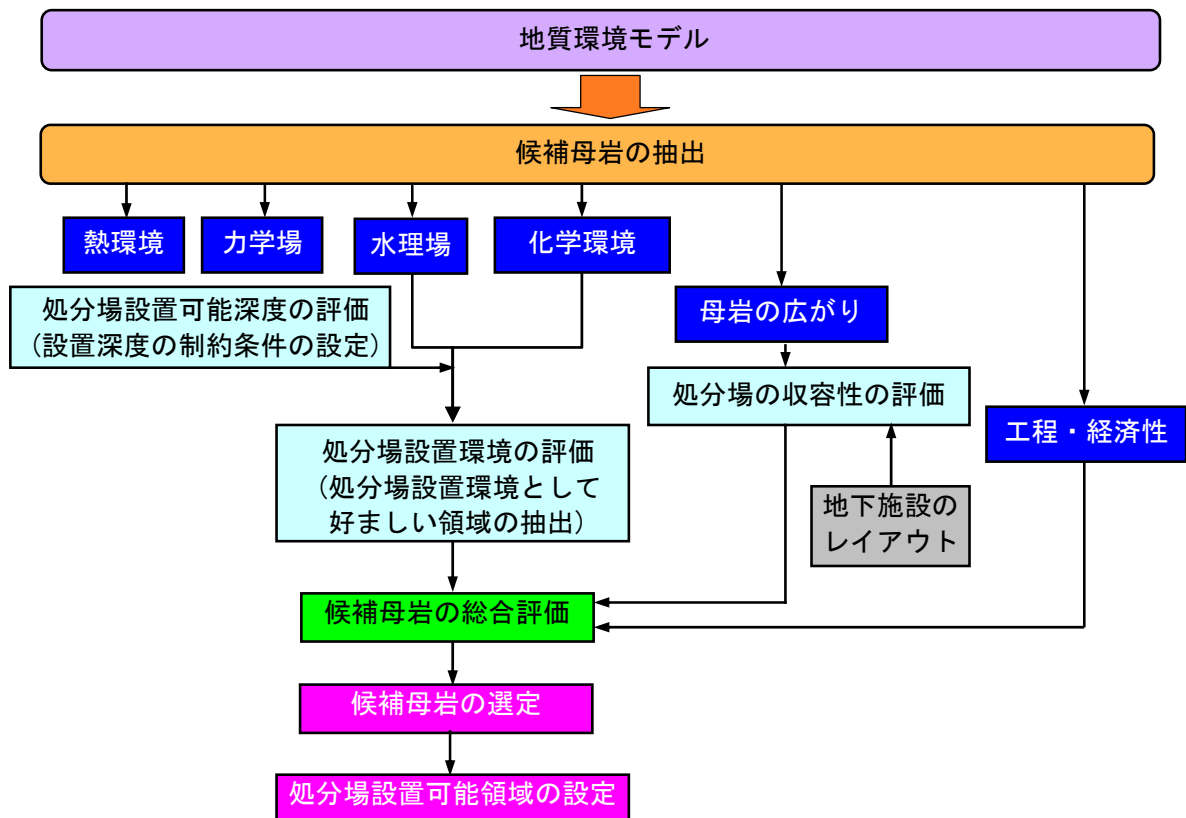


図 8.3.5-1 候補母岩の選定ならびに処分場設置可能領域の設定の流れ

8.3.5.1 熱環境の評価

熱環境の評価は、岩盤特性モデルで示される地温勾配に基づいた地温の深度方向の分布と母岩の熱特性（比熱、熱伝導率など）、さらに処分坑道間隔と廃棄体の間隔で規定される廃棄体の専有面積（6.3.3 参照）を考慮して、深度に応じた緩衝材の最高温度を熱解析により評価を行う（図 8.3.5-2）。

熱環境は、閉鎖後の処分場の温度が低いことが望ましく、廃棄体の発熱量と岩盤特性に基づく廃棄体専有面積や温度の経時変化などが評価指標として考えられる。処分場概念構築の制約条件となる地下施設の設置可能深度は、緩衝材の最高温度が 100℃未満となる深度を目安として設定する（6.3.3 参照）。

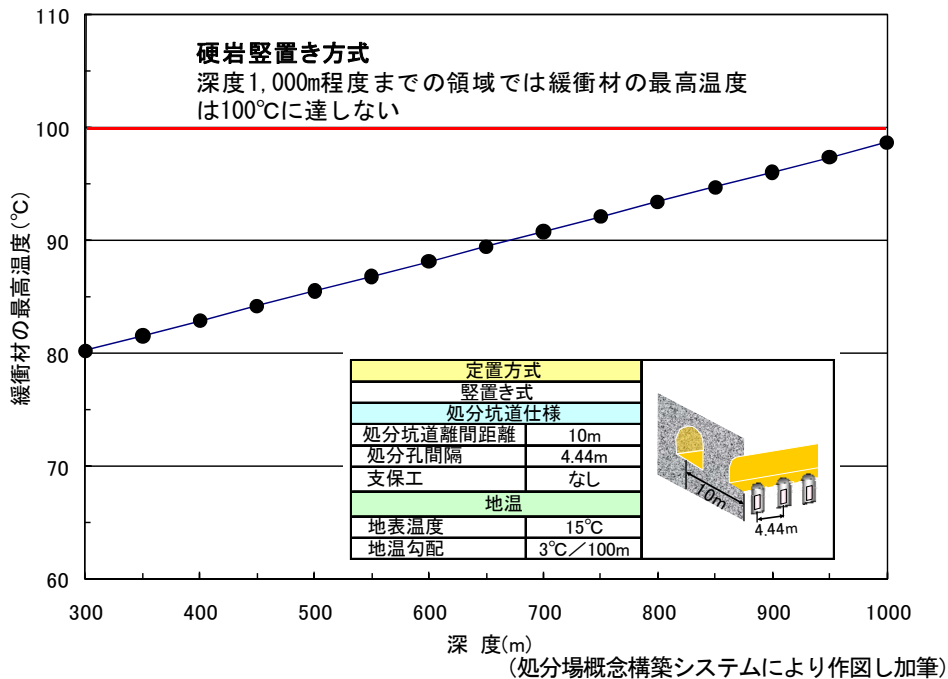


図 8.3.5-2 処分深度と緩衝材最高温度の関係の例示

硬岩系岩盤を母岩としたケースを想定し、堅置き方式、地表温度を15°C、地温勾配を3°C/100mと設定して、緩衝材の最高温度(オーバーパックとの境界部)と深度の関係を示したものである。この図で示した深度1,000m程度以浅の領域では、緩衝材の最高温度は100°C以下となり、この深度までの領域が処分場の設置可能深度と判断できる。

8.3.5.2 力学場の評価

力学場の評価は、岩盤特性モデルで示される岩盤の力学特性と岩盤の応力状態などの岩盤特性に基づいて、合理的な支保工の適用性を考慮した坑道の力学的安定性の確認、ならびに閉鎖後の処分場とその周辺の力学場が人工バリアの安定性に適していることについて評価を行う。力学場の評価指標としては、坑道の力学的安定性が確保できる合理的な坑道離間距離や支保の仕様の設定などが考えられる。坑道の力学的安定性は、岩盤の最大せん断ひずみ、局所安全率、支保工の応力度などを指標として評価する(図 8.3.5-3, 6.3.3 参照)。処分場の設置可能深度は、熱環境への対応と併せて、成立可能な処分坑道の規模・形状、離間距離などの処分方式のオプションによる工学的対策を考慮した上で設定する。

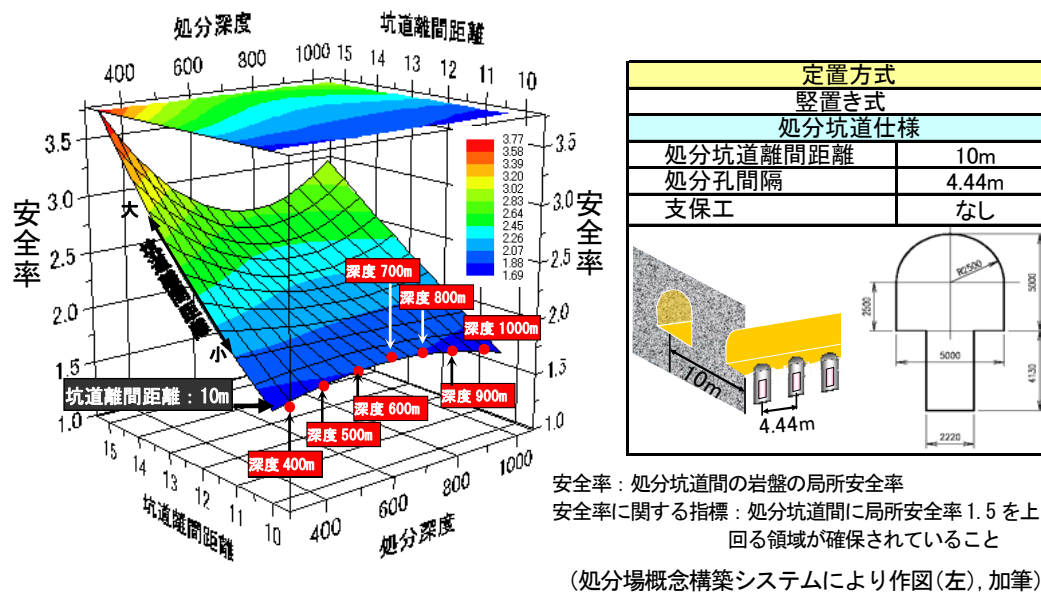


図 8.3.5-3 深度と坑道安定性（局所安全率）の関係の例示

硬岩系岩盤を母岩としたケースを想定し、坑道間の岩盤の局所安全率を評価指標とした力学的安定性の評価結果を例示した。ここで示したケースでは、深度 1,000m 程度までの範囲で坑道の力学的安定性があると判断できる。

8.3.5.3 水理場の評価

水理場の評価は、水理特性を考慮する上で重要な地質環境の特性（岩盤の透水性の三次元的な分布）などの情報を含む水理地質構造モデルに基づいて行う。水理場は、工学的対策が過剰とならないよう地下水の動きが緩慢で流量の小さいことが好ましい。評価指標としては、放射性物質の移行抑制の観点から、地下水の流速や移行時間などが考えられる（6.3.3 参照）。このため、地下水の流動特性に影響を及ぼす要因となる地質構造（例えば断層や割れ目帯の分布）、水理特性（透水係数、透水量係数、有効空隙率など）の分布を把握し、地下水の流動解析により水理場を評価する。

わが国の地形・地質の基本的な分類（5.1.2 参照）のうち、沿岸域の堆積岩分布地域を例に、水理場に影響を与える地質環境を図 8.3.5-4 に示す。地質構造は先新第三紀堆積岩（硬岩系岩盤）を基盤として、その上部に新第三紀堆積岩（軟岩系岩盤）が分布するものとした。例えば、地下水の流れ（青い矢印）に影響を与える地質環境の特性としては、地形、汀線の位置、岩盤の水理特性、断層の分布と水理特性、地下水の化学的特性（塩淡境界の分布）などが考えられる。また、周期的な海水準変動の影響による塩淡境界の移動を考慮した地下水流動解析により、水理場を評価する必要がある（6.5.1 参照）。

地下水流動解析では、複数の解析ケースを設定し、解析結果と概要調査によって得られた地下水流動に関するデータ（間隙水圧や塩分濃度の分布など）との整合性を確認して、モデルならびに設定したデータの妥当性を検証する（尾上ほか，2007）。

ボーリング調査で得られる情報が質・量において不十分である場合には、次段階の調査の結果も併せてその影響を評価することを基本とする。また、この段階で得られる母岩や断層の水理特性の不確実性に基づいた工学的対策の検討や感度解析などを実施して、安全評価結果に及ぼす影響が大きいデータの絞り込みや重要度の検討を行い、次段階の調査計画に反映する。

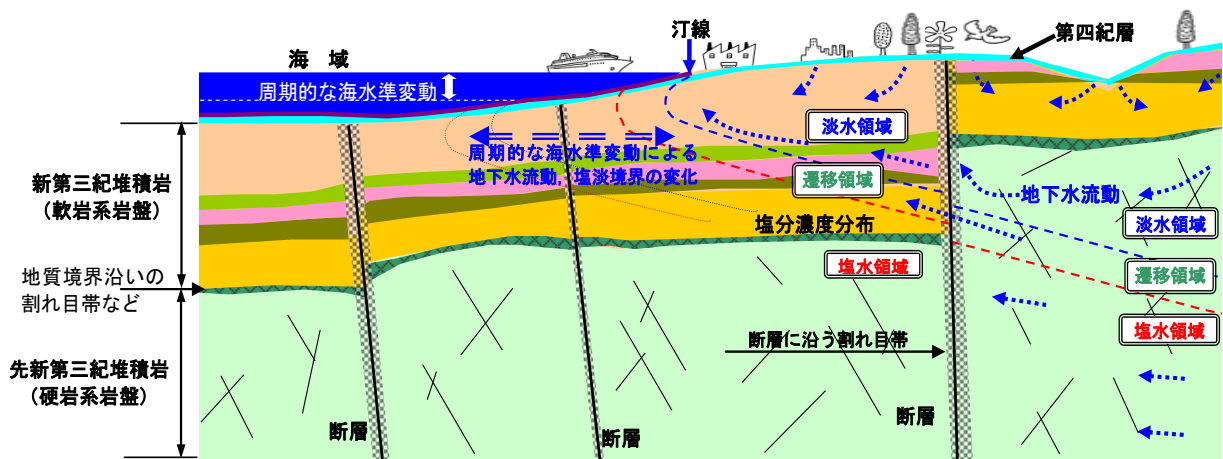


図 8.3.5-4 水理場の評価において考慮する地質環境の概念図

8.3.5.4 化学環境の評価

化学環境の評価は、地下水の化学的な特性（地下水のpH、酸化還元電位、地下水組成、鉱物組成など）の情報を含む地下水化学モデルに基づいて行う。評価指標としては、工学的対策の検討や性能評価の結果に基づいて、対象とする地質環境における放射性物質の溶解度特性（放射性物質の溶解度を低く維持し、移行を抑制する機能）や、緩衝材や母岩の収着特性、ならびに人工バリアの安全機能の長期的な維持（人工バリアの長期挙動）などが考えられる。

地下水の化学環境は、地下水と岩石の相互的な化学作用や地下水の流動と密接にかかわるものであり、それらの相互作用が概念的に整合性を有して理解されていることを確認する上でも重要である（岩月ほか、1998）。例えば、図 8.3.5-4 の概念図に示したように、沿岸域を想定した場合には、陸側の淡水と、海側の塩水を起源とする地下水が接触し、遷移領域を含む塩淡境界を形成する結果、塩分濃度などの地下水組成と地下水流動の空間的な変化を生じることが考えられる（6.5.1.1 参照）。また、隆起や気候変動に起因する海水準変動により、汀線が移動することによっても塩淡境界の移動と地下水流動が変化することも考えられる（7.3.2.1 参照）。従って、塩淡境界の空間的な広がりや、時間的な変遷を考慮した地下施設の位置の設定、人工バリアの設計や性能評価を行い候補母岩としての適性を評価する。

8.3.6 処分場の概念設計

処分場の設計の項目は、6.3.1 に示したようにサイト選定の各段階で共通的であるが、段階的に詳細化される地質環境の情報と各段階の性能評価の結果をフィードバックさせることで、処分場の設計の信頼性と合理性を向上させる。精密調査地区選定段階の処分場の設計の役割は以下の2点である。

- ・ レファレンス処分場概念の構築を目的とした処分場の概念設計
- ・ 次段階で実施する技術実証試験の計画策定を目的とした技術オプションの絞り込み

処分場の概念設計では、地質環境モデルと候補母岩の特性に基づいて、地下施設の設計（地下施設建設可能区域（深度とエリア）の設定）、人工バリアの設計（材料設計、構造設計など）、地下坑

道の仕様（内空断面、支保仕様、離間距離など）、地下施設の基本レイアウトの設定（処分パネルの形状、数、配置、アクセス方式の設定など）を実施する（6.3.1 参照）。なお、これらの設計には、後述する技術オプションの絞り込みも検討項目に含まれる。これらの結果は、処分場概念として性能評価の結果とともに統合化され、設計因子により包括的にサイトの地質環境特性への適合性が評価される（NUMO, 2004a）。

技術オプションの絞り込みでは、処分概念・技術オプションから、サイトの地質環境への適用性や建設工程の実現性、経済性などに基づいた評価を行う。また、この段階までの技術開発の進捗状況について検討し、次段階の前半までに実証試験を実施する技術項目を決定することを念頭に、複数の技術オプションから候補となる材料や技術を絞り込む（6.5.2 参照）。

8.3.6.1 人工バリアの概念設計

この段階の人工バリアの設計では、サイトの地質環境特性や、性能評価、人工バリアの施工技術開発の成果などに基づいて材料設計および形状などを設定する。この際には、材料の長期挙動の評価結果などを反映した人工バリアの長期健全性の評価を行う（6.3.2 参照）。

(1) オーバーパックの設計

サイトの地質環境特性とオーバーパックに期待する安全機能を考慮して、耐食性や構造健全性を検討しオーバーパックを設計する。オーバーパックの候補材料（炭素鋼、銅、チタン）の環境条件への適用性、オーバーパックの製作や溶接技術などの施工性の観点などから材料を選定する（6.3.2.1 参照）。

(2) 緩衝材の設計

緩衝材の材料設計では、サイトの地質環境特性と緩衝材に期待する安全機能を考慮して、ベントナイト材料を選定し乾燥密度などの仕様を設計する。候補となるベントナイト材料の選定においては、締め固め特性、膨潤性、透水特性などの緩衝材の基本特性などを考慮する（6.3.2.2 参照）。

8.3.6.2 地上施設および地下施設の設計

(1) 坑道の設計

概要調査により得られた地下深部の岩盤の応力状態や力学特性などに基づき、合理的な掘削方法や施工手順を設定し、詳細な力学的安定解析を実施して坑道の仕様を決定する。

坑道の断面は、坑道の用途により、アクセス坑道、連絡坑道、処分坑道（および処分孔）に分類できる（6.3.3.2 参照）。坑道の断面の設計では、それぞれの用途に応じて必要な内空断面を確保し、処分場の設置深度と候補母岩の力学特性に基づいて、支保工の設計、坑道の力学的安定性や耐震性の評価を実施する。

また、処分坑道（および処分孔）は、廃棄体の発熱特性や人工バリアの仕様などに基づいて、熱的影響により緩衝材の安全機能を損なうような変質が起こらないように、廃棄体定置仕様として処分坑道の離間距離と廃棄体ピッチを設定する。

(2) 基本レイアウトの設定

処分場の地下施設の位置、深度、処分パネルやアクセス坑道などの基本レイアウトは、候補母岩

の評価・選定の結果、および主要な地下水流動方向などを踏まえた天然バリア中の放射性物質移行抑制の観点に基づいて設定する(6.3.3.3 参照)。また、候補母岩の評価・選定で例示した内容に加え、操業の効率性(物流、操業計画など)、操業安全に関する制約(換気計画、避難経路確保など)、建設費用や建設開始から操業開始までの時間の制約、さらに地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設の併置などを考慮して設定する(図 8.3.6-1)。基本レイアウトの設定の結果は、精密調査地区選定段階の前半の調査計画に反映する。

地下施設の基本レイアウトの設計仕様項目としては、廃棄体を定置する単位区画としての処分パネルの形状、規模、数や配置、また、主要坑道・連絡坑道、地上施設からのアクセス坑道や換気・排水・電源用の坑道の配置などがある。アクセス坑道は、立坑および斜坑方式があり、物流などの操業システム、搬送効率、排気・排水、避難、地上施設と地下施設の位置関係、施工性・作業の安全性、経済性の観点からアクセス方式などを選定する(6.3.3 参照)。

基本レイアウトは、処分場の規模と候補母岩の広がり(規模)を比較して、処分場の収容性を評価する。候補母岩の広がり(規模)は、高レベル放射性廃棄物で4万本以上の廃棄体、地層処分低レベル放射性廃棄物では約19,000m³相当の廃棄体を収容できる処分場の規模が必要であり、その規模は、高レベル放射性廃棄物で約6km²、地層処分低レベル放射性廃棄物で約0.25km²と見積もられている(NUMO, 2004a, 2011b)。

なお、収容性の評価に際しては、図 8.3.6-2 に示すような湧水や処分孔の掘削不良などにより、廃棄体を設置できない個所や、坑道を交差する割れ目などが人工バリアの性能に影響を与えると判断される場合などを考慮して、必要に応じて処分場の規模に余裕をもたせるなどの対策が必要となる(SKB, 2006, 2008 ; POSIVA, 2007)。このため、この段階までに得られている情報に基づいて、処分場規模の増大の可能性を考慮した収容性の評価を行い、母岩の広がり(規模)に応じた柔軟なレイアウトの検討を行う。

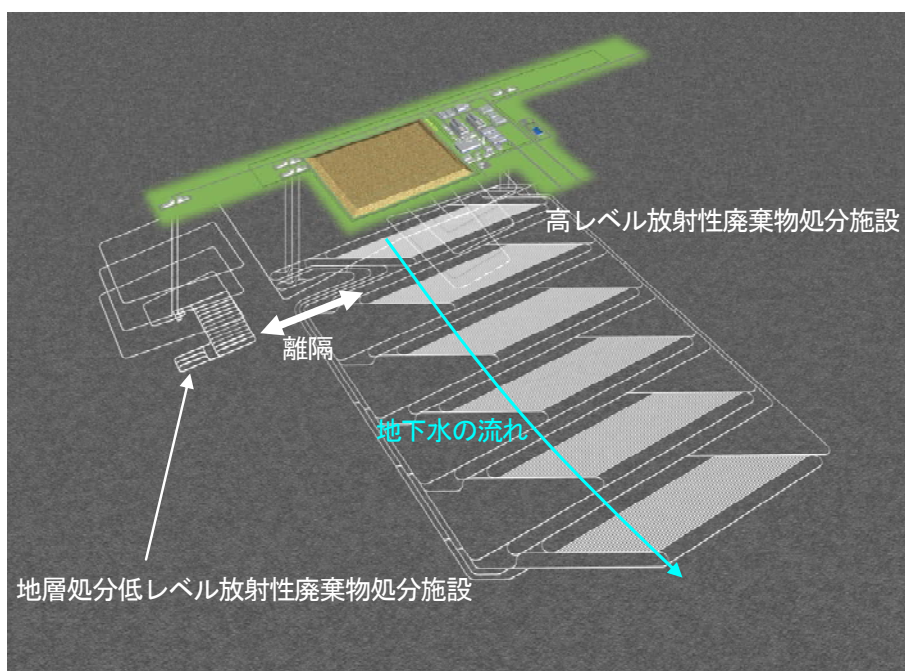


図 8.3.6-1 地下施設レイアウトの例
(地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設の併置を考慮したレイアウト, 図 6.3.5-1 の再掲)

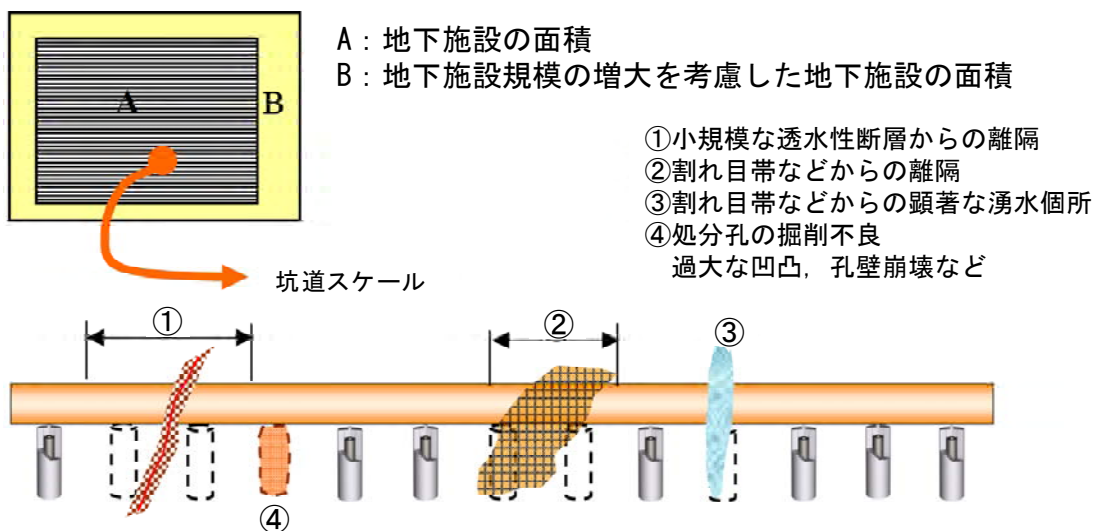


図 8.3.6-2 廃棄体を定置するのが相対的に好ましくない場所のイメージ
(図 6.1.2-1 の再掲)

(3) 地上施設の設計

この段階の地上施設の設計は、地上施設設置区域の敷地面積と社会環境条件などによる敷地面積の制約を確認して行う。地上施設の設計は、地上施設設置区域の設定、アクセス方法の検討、施設群ゾーニングの検討、造成計画、施設設計の手順で進める (6.3.4 参照)。

地上施設設置区域の設定は、地理・地形などの自然環境条件や、周辺の土地利用状況などの社会環境条件、港湾、道路などのインフラ設備などを考慮して設計する。また、地形が山地など急峻な場合や景観の保護といった条件により敷地面積に制約がある場合は、地上施設の分散配置や諸施設

を半地下化，あるいは複数階化するなどのオプションも検討する（NUMO，2004a）。

アクセス方法の検討では，地下施設の基本レイアウトの設定と並行して，立坑，斜坑およびそれらの組み合わせ，坑口の位置などを設定する。

施設群ゾーニングの検討では，地下施設の建設，掘削土の搬出，廃棄体の受入，地下施設への搬入などの施設群の用途に応じてゾーニングを行う。また，処分場の建設・操業・閉鎖などの一連の作業の動線を考慮して設計を行う（図 8.3.6-3）。

地上施設の造成計画や施設設計は，掘削土置き場の配置，掘削土の風雨による飛散や流出などの防止対策の検討を行う。その際には，環境への負荷の軽減などに配慮する。



図 8.3.6-3 地上施設のゾーニング（併置処分）（図 6.3.4-2 の再掲）

（4） 事業期間中の安全対策の設計への反映

地上施設および地下施設の設計においては，放射線安全，一般労働安全および環境保全の対策も併せて検討する。例えば，廃棄体受入・検査施設では，遠隔操作による廃棄体の取り扱いを基本として，施設に放射線の遮へい壁の設置や，管理区域を設定する。地下施設の設計では，作業環境の維持を目的として，換気および排水設備の設計を行う。また，事故発生時の退避施設や避難経路などの設計を実施する。このほかの対策についても，建設・操業・閉鎖の作業手順を踏まえて，想定される自然災害についての具体的な安全対策を講じる。

この段階には，処分場の地下施設・地上施設などの処分場の概念設計に基づいた開発規模の概要が明らかになる。また，次段階の調査で建設する地下調査施設や処分場の建設で発生する坑道からの湧水の化学組成，掘削土の鉱物組成などの性状，大気環境，水環境，動植物や生態系の状況などの自然環境や，社会環境に関する具体的な情報が得られ，環境へ影響を及ぼす範囲やその大きさなどが予測される。これらの情報に基づいて，必要に応じて代償措置（復元・創出）を含めた環境保全に関する対策の検討を行う。

地上施設の中で最も大きな面積を占めるのは掘削土置き場で，その容積は1,000万 m^3 オーダーになると見積もっている（NUMO，2004a）。掘削土は地下施設の埋め戻し材料として再利用することを考えているが，地上施設の造成計画の際には，掘削土の風雨による飛散や流出などの防止対策を講じ，周囲の環境への影響を極力低減する対策を実施する。

事業を推進する際には、このほかにも事業が自然環境や社会環境に与える影響を整理し、事業に伴う自然環境の改変や環境への負荷を軽減するために必要な環境保全技術の適用や、環境モニタリングの方法などを検討して環境保全計画を立案する。

8.3.6.3 処分概念・技術オプションの絞り込み

NUMOは、概要調査地区選定段階までは、地質環境特性のデータが文献情報に限られること、複数の異なる地質環境が設定されることなどを想定して、処分場の設計・施工に関して代替材料や処分技術などの処分概念・技術オプションを複数整備している（NUMO, 2004a, 2004c）。

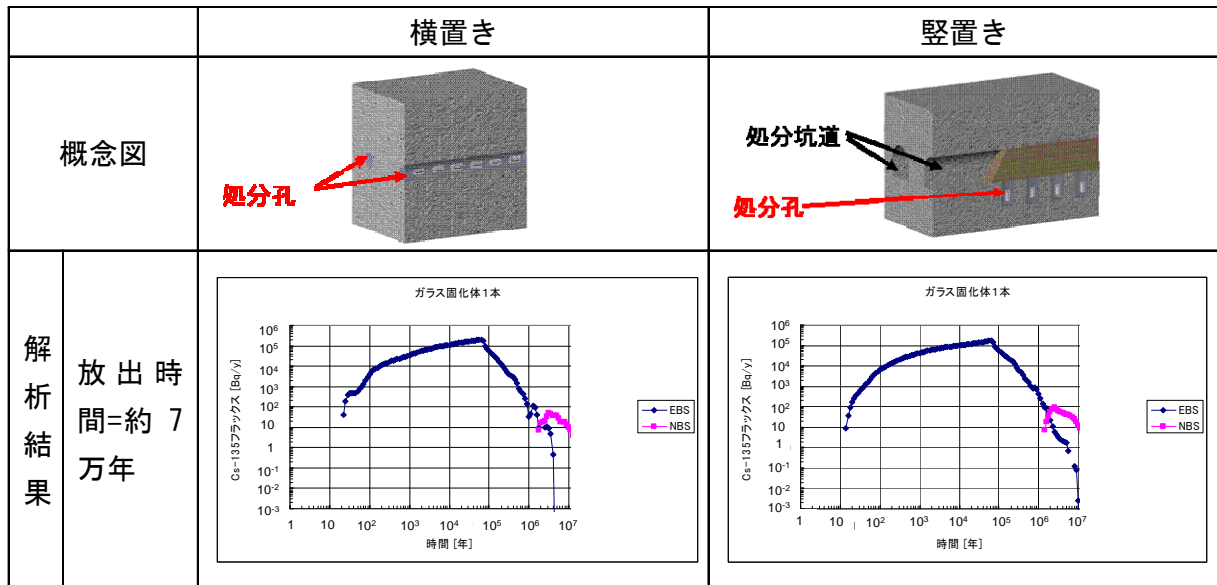
処分概念・技術オプションの絞り込みは、以下に示す事業を効率的に進める観点から重要である。

- ・ 人工バリア材料を選定することで、設計や安全評価のベースとなる解析モデルやデータの取得条件の範囲を絞り込み、人工バリアの長期健全性の評価や関連するデータ取得などの人的・経済的な資源を集中させる。
- ・ 地下調査施設において実証する工学技術を選定することで、実証試験計画を策定し、また、必要な装置、設備の基本設計のための人的・経済的な資源を集中させる。

従って、処分概念・技術オプションの絞り込みは、精密調査地区選定段階の前半（地上からの調査の段階）を目途に、次段階の実証試験計画を策定するための準備として、サイトの地質環境特性に適した有力な技術を選定してレファレンス処分場概念に反映させる。

処分概念・技術オプションの絞り込みの評価項目としては、閉鎖後長期ならびに操業の安全性や工学的成立性、社会経済的側面などの設計因子の観点、技術開発の進捗と実現性の見通し、さらに事業スケジュール・経済性の観点から総合的に評価して絞り込む（6.5.2 参照）。なお、絞り込む際には、個々のオプションの優位性だけでなく、その組み合わせも考慮して相互に矛盾がないことに留意する。

図 8.3.6-4 には、閉鎖後長期の安全性の観点からの比較の例として、定置方式の違いが、放射性物質の移行に与える影響について予察的に評価した結果を示す（7.3.3 参照）。このような安全評価の視点からの検討結果を人工バリアの設計にフィードバックするとともに、遠隔操作技術などの実現性の観点からの制約条件を併せて検討し定置方式の設定を行う。このような結果は、次段階の地下調査施設で実施する搬送定置技術などの地下調査施設の実証試験計画に反映する。



(◆: EBS (人工バリア) からの核種移行率の割合, ■: NBS (母岩) からの核種移行率の割合)

図 8.3.6-4 廃棄体定置方式 (縦置き, 横置き) による核種移行率の比較

(参考図 3-4 を編集し, 再掲)

ニアフィールド領域の三次元核種移行解析の結果に基づいた定置方式の違いによる閉鎖後長期の安全性への影響の比較の例示。この比較では、定置方式による天然バリアへの移行率はわずかな差であり(グラフの右端)、核種移行評価上の差異はほとんど認められない。従って、この例では長期的安全性よりも力学的安定性などの要因に着目することが合理的といえる。

8.3.7 予備的な安全評価

安全評価の基本手順 (7.1.1 参照) を図 8.3.7-1 に示す。以下では、基本手順に従い精密調査地区選定段階の実施事項とその技術を示す。

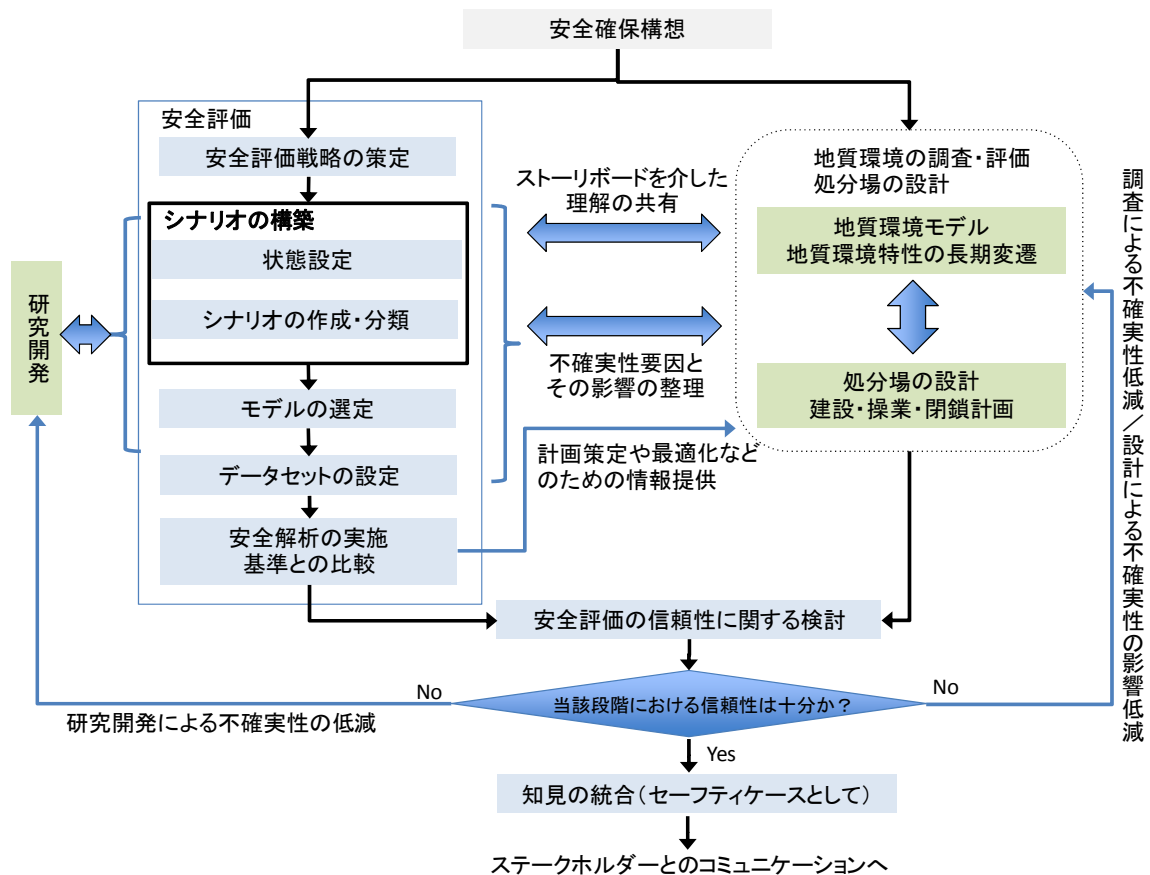


図 8.3.7-1 閉鎖後長期の安全性の評価手順 (図 7.1.1-1 の再掲)

8.3.7.1 安全評価戦略の策定

この段階の安全評価は、処分場の設計に関する妥当性確認やオプション間の比較、精密調査計画の作成、セーフティケースの構築に対して、結果を反映することが主眼である。この段階の安全評価の役割は以下のとおりである (7.1.7.2 参照)。

- ① 処分場の設計の妥当性の確認とフィードバック
 - ・ 地下施設のレイアウトや人工バリア設計などの安全性の確認
 - ・ 処分概念・技術オプション間の比較
- ② 精密調査計画、次段階の実施事項への反映
 - ・ 安全評価上、重要な地質環境の特徴や地質的な条件の把握
 - ・ 次段階に必要なモデルの開発やデータ取得の条件範囲の把握
 - ・ 安全審査基本指針が公表される場合、指針に対応するために重要な調査項目や設計課題の把握
- ③ 安全性に対する信頼性の段階的な提示
 - ・ 閉鎖後長期の安全性に対する信頼性を支持する論拠の収集

なお、この段階の安全評価に関する不確実性は、7.1.2.2 に示した考え方に従って、不確実性を適切に取り扱う。

8.3.7.2 地層処分システムの設定

地層処分システムの設定のイメージを図 8.3.7-2 に示す。地層処分システムは、放射性廃棄物、処分場（人工バリアと地下施設）、それらが設置される地質環境（天然バリア）、および生物圏との接点により構成される（JNC, 1999c ; NUMO, 2004a）。地層処分システムは地質環境モデルおよび処分施設設計に基づいて設定し、その構成要素の安全機能とともに記述することで、安全評価の対象を明確にする。システムの状態は、以下の事項を記述する。

- ・ 概要調査地区における地質環境の長期的な安定性（火山・火成活動，地震・断層活動，隆起・侵食）
- ・ 処分場を設置する候補母岩の特性（処分場の設置環境）
- ・ 概要調査地区における地質環境モデル（地質・地質構造，水理地質構造，地下水化学，岩盤特性）とその長期的な変遷
- ・ 概要調査地区の地質環境に対して期待する天然バリアの安全機能
- ・ 人工バリアの安全機能と概念設計に基づいた仕様，長期健全性
- ・ 地下施設の基本レイアウト
- ・ 閉鎖措置の安全機能と概念設計に基づいた仕様
- ・ 主要な核種移行経路と移行時間の設定
- ・ 概要調査および類似した環境での事例に基づいて想定される生物圏

なお，これらの設定は，概要調査によって得られる地質環境の情報の質・量に依存して，不確実性を伴うものと考えられる。従って，システムの設定においては，地層処分システムの各要素が有する不確実性の要因とその幅についても記述する。

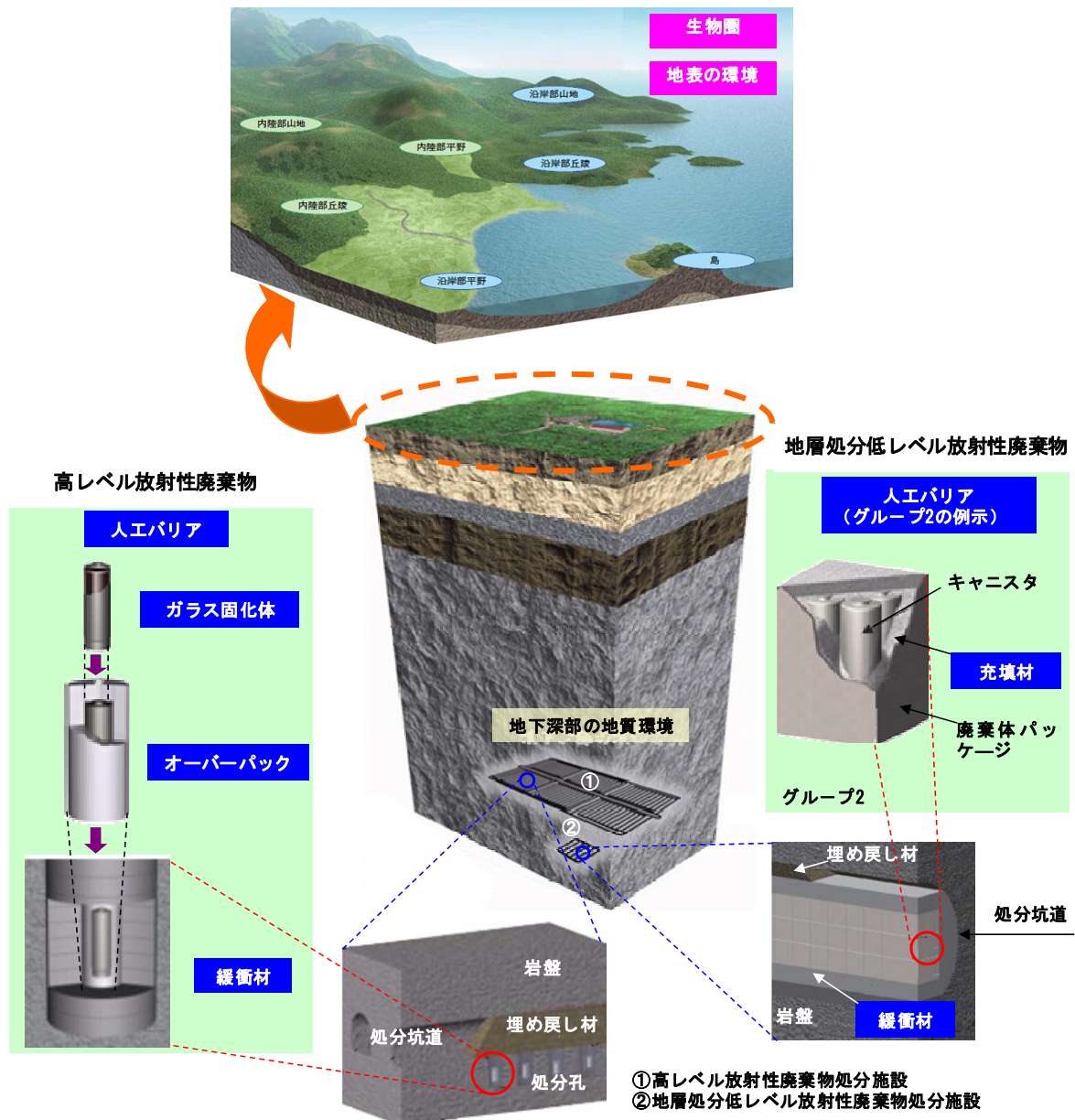


図 8.3.7-2 地層処分システムの構成のイメージ

8.3.7.3 シナリオの構築

安全評価シナリオは、地層処分システムの将来挙動を記述したものであり、安全評価の出発点となる(7.2.1 参照)。シナリオの考え方や方法論は、国際的に合意が得られた体系的なアプローチ(OECD/NEA, 1991)に基づいており、サイト選定の各段階で大きく変わるものではない。ただし、わが国では、地層処分の安全評価の考え方についての議論が規制機関により今後実施されることから、第2次取りまとめなどで示されている方法を基本として議論の結果も適宜反映する。

(1) シナリオ分類の枠組みの整備

構築したシナリオや解析ケースに対して、安全評価で考慮するシナリオ分類の枠組みを設定する。シナリオの分類の枠組みについては、今後、原子力安全委員会などにおいて検討されるが、当面の考え方として、原子力安全委員会(2004)および放射線審議会基本部会(2010)の考え方に沿って、

自然過程を介するシナリオと人為過程を介するシナリオに区分して検討を進めている（3.1.2 参照）。これらのシナリオ分類の考え方を参考としつつ、NUMO では蓋然性の区分に基づいたシナリオの分類の枠組みについても検討を進めている（図 8.3.7-3）。なお、これらのシナリオ分類の枠組みは、今後の安全規制における評価方法の検討も反映する計画である。

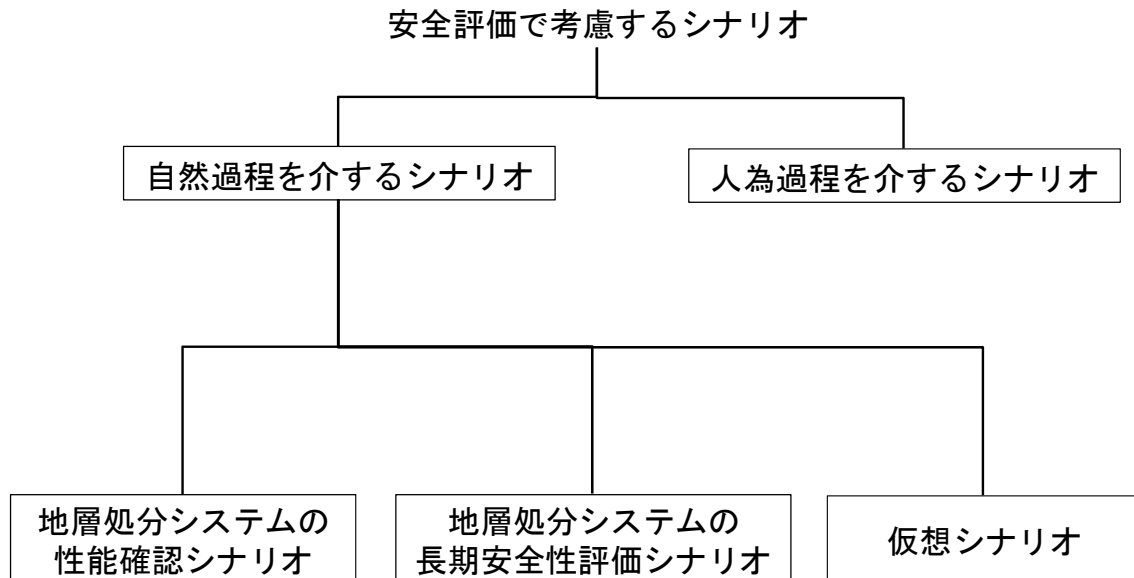
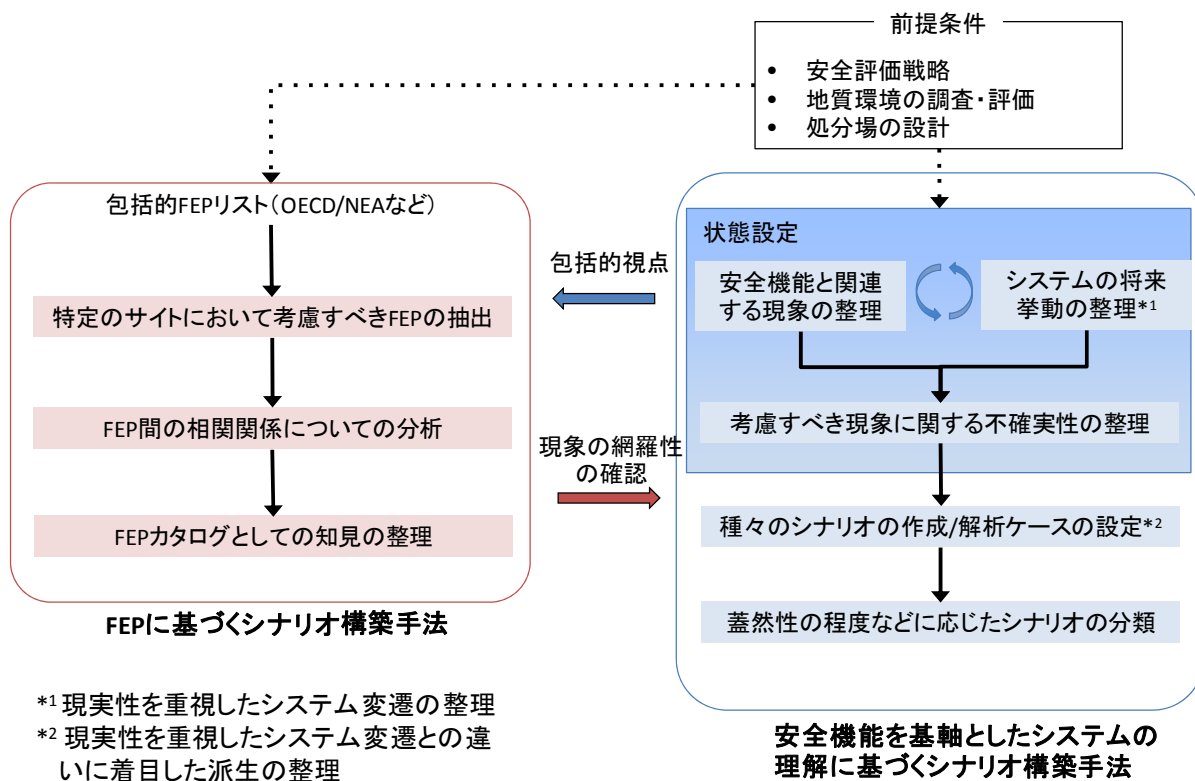


図 8.3.7-3 蓋然性の区分に基づいたシナリオ分類の検討例（図 7.1.3-1 の再掲）

(2) 状態設定とシナリオの作成

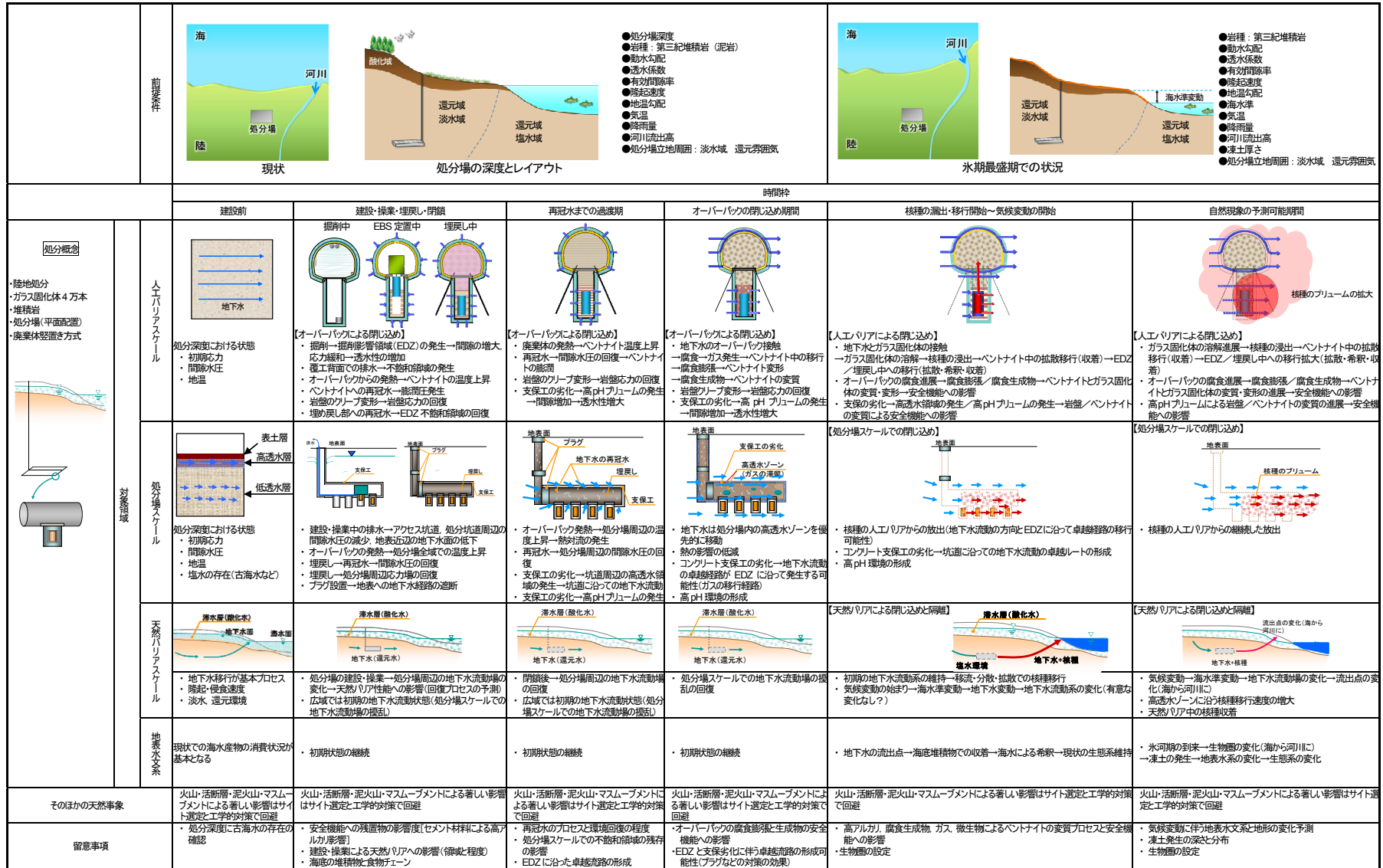
状態設定およびシナリオの作成においては、図 8.3.7-4 に示すアプローチに沿って進める。NUMO は、状態設定の枠組みとしてストーリーボードの開発を進めている（図 8.3.7-5, 7.2.1 参照）。そこで、ストーリーボードを用いて、地層処分システム全体と各要素の長期的な変遷、人工バリアおよび天然バリア中での放射性物質の移行に関する現象、将来の人間活動などの記述を整備して状態設定を行った上でシナリオを作成する。

シナリオを作成した後は、シナリオから導かれる解析ケースの設定を行う。地層処分システムの設定やシナリオの作成過程、さらに、後述するモデルやデータセットの設定に伴う不確実性を考慮して、複数の解析ケースを設定する。また、安全評価結果の比較を効率的に実施するためには、標準的なシナリオを設定し、このシナリオに対応する解析ケースを起点とすることが有効であると考えている。また、将来予測に含まれる不確実性に適切に対処するために、変動シナリオおよび仮想シナリオといった代替的なシナリオを設定してそれぞれ評価を行う（7.1.3.1 参照）。また、7.1.4～7.1.6 に示す方法でモデルおよびデータについての不確実性の管理に取り組む（7.1.2 参照）。



*1 現実性を重視したシステム変遷の整理
 *2 現実性を重視したシステム変遷との違いに着目した派生の整理

図 8.3.7-4 状態設定およびシナリオの作成・分類のアプローチ (図 7.2.1-1 の再掲)



EDZ: Excavated Disturbed Zone (掘削影響領域), EBS: Engineered Barrier System (人工バリアシステム), 高 pH フリュウム: 岩盤中に形成される高アルカリ性の地下水領域

図 8.3.7-5 シナリオ作成のためのストーリーボードのイメージ (図 7.2.1-3 の再掲)

8.3.7.4 モデルの設定

安全評価で用いる性能評価モデル（7.1.4）とデータセットの構成の例を図 8.3.7-6 に示す。これらのモデルを用いて、多重バリアシステムの放射性物質を閉じ込める性能（放射性物質の浸出抑制、放射性物質の移行抑制）を定量的に評価する。モデルには、ソースタームモデル、人工バリア中の核種移行モデル、天然バリア中の核種移行モデルで構成され、このほかに生物圏モデルが加わる。これらのモデルは、解析ケースに対応するように設定する。モデルは、地層処分システムの構成や核種移行のメカニズムなどに基づいて、適切なモデルを選定する（7.2.2 参照）。

なお、モデル開発の取り組みの事例は、地質環境と生物圏の変遷に関するモデル（7.3.3.1 参照）、および岩盤の不均質性と処分施設設計に対応したモデル（7.3.3.2 参照）として、第7章にその詳細を示している。

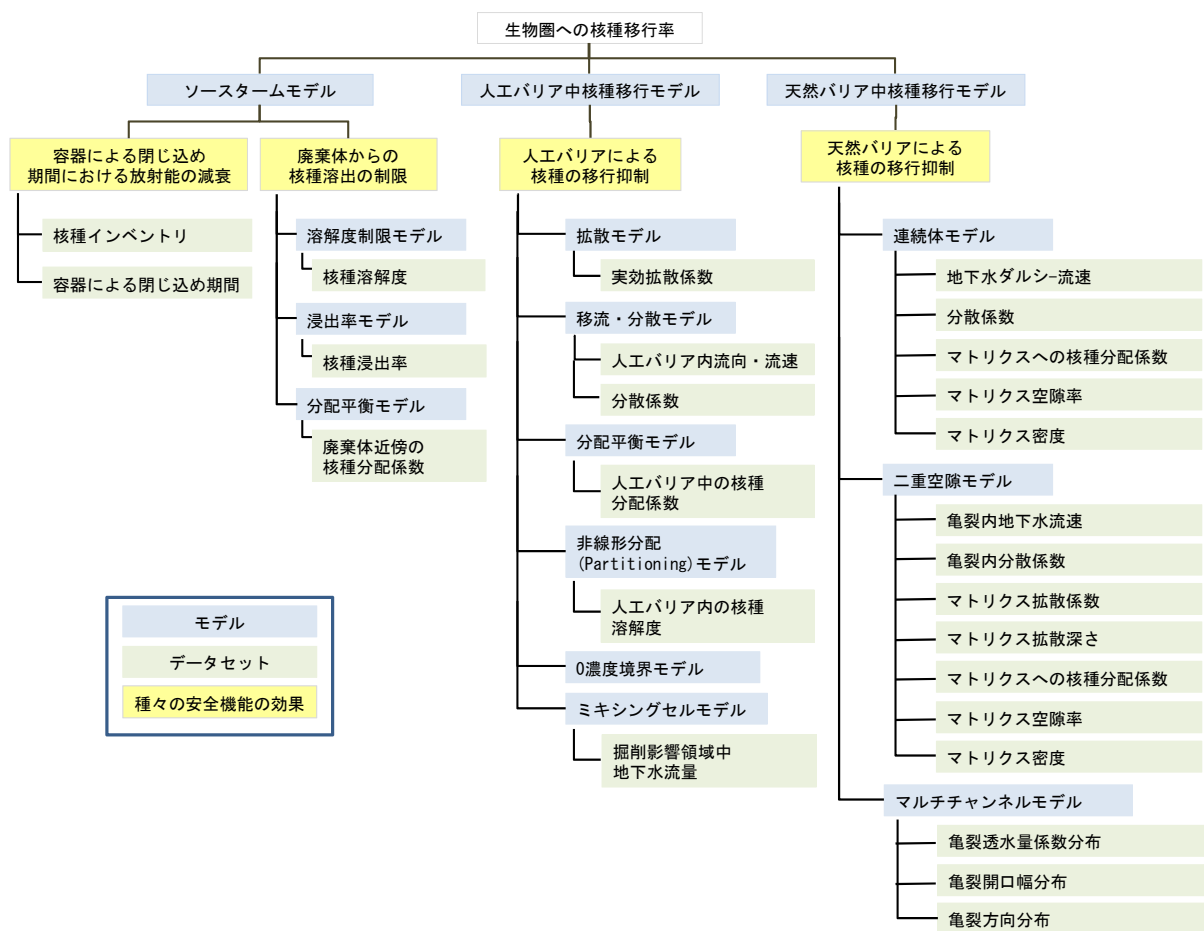


図 8.3.7-6 地下水中での核種移行に関する性能評価モデルおよびデータセットの構成例
(図 7.2.2-1 の再掲)

8.3.7.5 データセットの整備

概要調査の段階においては、ボーリング調査により地下水や岩石コアサンプルの採取ができることから、これらの試料を用いて、あるいは、条件を模擬して核種移行にかかわるデータセットを取得することができる。データセット設定においては、これらの現地の試料を利用して取得したデータセットと、既存のデータベースを比較して、地下水化学条件への依存性の傾向（例えば、分配係

数の pH 依存性) などを確認することで、データセットの変動範囲を設定する。既存のデータベースとしては、JAEA で整備しているガラス溶解データベース (GlassDB), 熱力学データベース (JAEA-TDB), 収着データベース (JAEA-SDB), 拡散データベース (JAEA-DDB) などがあり、これらのデータベースを活用してデータセットの設定を行う (7.3.4 参照)。

8.3.7.6 安全解析の実施

安全解析は、ここまで述べてきたシナリオの構築、モデル、データセットの整備に基づいて、シナリオごとに複数の解析ケースを設定して実施する。モデルの相関関係と入力するデータセットの関係を解析フローチャートとして図 8.3.7-7 に例示する。解析では、ここに示したモデル間で解析結果を順次引き継ぎながら解析を進める。ただし、これらの解析の相互の整合性を確認するとともに、それぞれの解析で得られた新たな知見にも柔軟に対応するために、必要に応じて反復的に解析を繰り返すこととする。なお、既往の安全解析の実施例を第 7 章の参考資料に示した。

この段階の安全解析に基づいて、次段階で長期安全性を確保するために重要な地質環境の特徴や条件をあらかじめ把握する。また、処分場の設計の妥当性を性能評価により確認するとともに、その結果を処分場の設計にフィードバックすることで次段階の調査・設計の方針に反映する。さらに、この段階の終わりまでに安全審査基本指針が公表される場合には、指針に対応するための重要な調査項目や設計課題、取得すべきデータなどを安全解析結果に基づいて準備する。

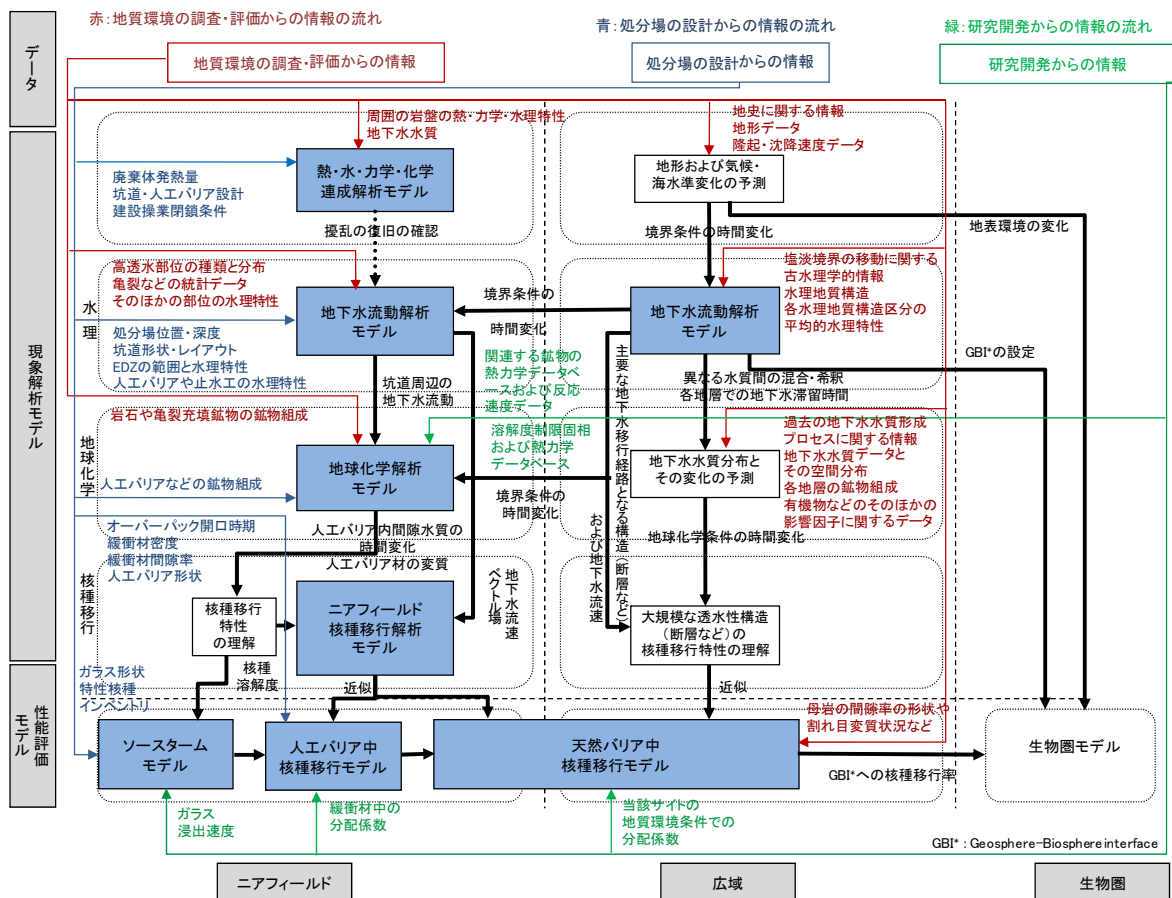


図 8.3.7-7 解析のフローチャート (安全評価のためのモデルチェーンの例)

(図 7.2.2-6 の再掲)

8.3.7.7 安全評価の信頼性に関する検討

安全評価の信頼性の検討は、地層処分システムの閉鎖後長期の安全性を示す上での重要な活動の一つであり、セーフティケースの重要な要素である。信頼性の検討では、安全評価の基本となるシナリオやモデル、データセットとこれらを用いた安全解析結果の信頼性の確保に加え、さまざまな観点から地層処分の長期安全性にかかわる説明(多面的な議論)を示すことが重要となる。さらに、7.1.1に述べたように、これら一連の長期安全性を示す論拠に対して行われる専門家による独立したレビューも、信頼性を示す上で有効である(OECD/NEA, 2002)。

安全評価の妥当性を示すためには、以下の点が綿密に検討されていることが重要である(NUMO, 2004a)。

- ・ シナリオは過不足なく定義されているか
- ・ 評価の目的に照らし、個々のモデルやコード、データセットは十分に妥当性が検討されているか
- ・ これらを組み合わせたシステム全体の解析の手順や数値計算は正しく実行されているか

また、これらの視点に加え、信頼性を確保するためには、安全解析に至るまでのすべての作業について、透明性と追跡性を確保することが不可欠である。

具体的には、精密調査地区選定段階で実施した安全評価の妥当性について、国内外の専門家のレビューを受け、次段階の安全評価の方針や許認可申請までに整備すべきシナリオやモデル、データセットなどの内容を明確化して精密調査計画や技術開発計画に反映する。また、安全評価に関する品質管理体制も整備し、モデル化の対象となる個々の現象の理解や概念モデルの作成、さらに数学モデルや計算モデルの作成過程で生じる不確実性、あるいはモデルに対応したデータセットの取得/設定の過程で生じる不確実性についても対処する。また、計算技術の進展に伴う必要な計算機コードの改良もこのような品質管理に含める。さらに、安全評価の多面的な議論に利用するナチュラアナログの整備や補完的安全指標など、信頼性の提示に必要な項目を検討して計画に反映する。

8.3.8 レファレンス処分場概念の構築とセーフティケースの作成

地質環境の調査・評価、処分場の設計、安全評価のそれぞれの結果を集約し、処分場概念として統合する。統合する際には、集約した結果が相互に矛盾を含んでいないこと、論拠の追跡性が確保されていることなどを確認する。その上で、処分場概念がサイトの地質環境特性に適する形で安全性が確保されていることや、工学的に成立可能であること、環境保全にも配慮されていること、社会環境条件にも適合していることを確認し、さらに、経済性についても評価する。また、セーフティケースの構築とも関連させて、この段階で残された課題や不確実性についても明確に示し、次段階の計画に反映する。このようにして構築した処分場概念が複数の場合には、適切な概念を絞り込む。この処分場概念をレファレンス処分場概念と呼び、次段階の処分場の設計や安全評価の出発点とする。

レファレンス処分場概念に含まれる情報のうち、特に安全評価のシナリオの設定や、モデル、データの設定、安全解析の結果と、それらの設定の論拠に関連する情報を集約してセーフティケースを構成する。この段階で示すセーフティケースは、「概要調査に関する法定報告書」および「概要調査に基づく概念設計と予備的安全評価に関する報告書」とそれらの補足文書により構成する計画で

ある(3.2.2.3 参照)。この中で、サイトの地質環境や、そのサイトに適した処分場の設計と安全評価の結果に加え、8.3.7.7 に示した安全評価の結果の信頼性向上に関する議論について記述し、次段階以降に検討が必要となる課題や対策を示す。

8.3.9 精密調査地区の選定

精密調査地区の選定の手順については、基本的に概要調査地区の選定と同様の手順(8.2.6 参照)で進める。

8.3.9.1 精密調査地区選定上の考慮事項への適格性の確認

考慮事項への適格性の確認では、法定要件に関する事項に対して、不適格な地域が精密調査地区の範囲に含まれないことを概要調査の結果に基づいて確認する。概要調査の結果については、専門家による評価も踏まえて、「概要調査に関する法定報告書」として取りまとめる。

8.3.9.2 精密調査地区の設定

概要調査の結果に基づいて精密調査計画を策定し、法定要件を考慮した上で精密調査地区の範囲を設定する。

8.3.9.3 概要調査に関する法定報告書の説明と精密調査の実施の判断

法定報告書については公告・縦覧し、関係都道府県内において、説明会を開催する。また、報告書の内容に対する意見の概要を取りまとめ、これについての NUMO の見解を作成する。ここまでに示したプロセスを経て、精密調査地区を選定する。

精密調査地区を選定後、NUMO は実施計画の変更を経済産業大臣に申請する。概要調査地区選定と同様に、経済産業大臣は関係市町村長、都道府県知事の意見を聴き、これを尊重するとともに、原子力委員会および原子力安全委員会の意見も聴き、最終処分計画の改定を閣議決定する。経済産業大臣による実施計画の変更の承認後、NUMO は、精密調査地区の選定のプロセスを完了させる。

8.3.10 次段階の準備

次段階の準備として、精密調査地区の選定と並行して処分施設建設地選定上の考慮事項を作成し、精密調査計画を策定する。精密調査は、地下の地質に関するデータの拡充と地下調査施設建設の準備のために、ボーリング調査を主体とする段階と、地下調査施設の建設と調査の段階に分けて実施する計画である(4.2.1.3 参照)。このため、この時点では精密調査の全体計画と地表からの調査の実施計画を策定する。

前半の地表からの調査の段階では、前段階で構築した処分場の概念設計に基づいて、処分場の候補母岩と処分場の基本レイアウトを考慮した調査計画を策定する。その際には、前段階で特定した重要な地質環境の不確実性の低減に向けた観点から調査計画を策定する。地質構造モデルの不確実性(例えば、断層や地層境界の分布形状など)や候補母岩の地質環境特性の不確実性などによる閉鎖後長期の安全に及ぼす影響が感度解析などで大きいと評価した場合は、概要調査で更新した地質環境モデルに基づいて、必要と考えられる範囲を対象とした調査を実施する柔軟な調査計画を策定する。また、調査の後半で実施する地下調査施設の建設が地質環境や周辺環境に擾乱を及ぼす可能性があることを考慮し、調査計画では、地下調査施設建設前の地質環境の状態を把握する調査項目

を計画に反映する。

地表からの調査の後半においては、それまでの調査結果を受けて更新される処分場のレイアウトに基づいて、地下調査施設の建設計画ならびに調査計画を作成する。また、この段階までに絞り込まれた技術オプションの実証試験計画を策定する。

精密調査計画の策定に際しては、調査の実施による環境への影響についての予測および評価を行い、環境に与える影響を回避、低減する方策を検討し、それを反映する。特に調査の後半においては、地下調査施設を建設することから、掘削土置き場への対策などが必要となる。また、このほかにも、自然環境や社会環境に与える影響を評価し、適切な環境保全対策を検討して精密調査計画に反映する。

以上の精密調査計画の策定の考え方については、実際の調査計画を進めるまでに得られている情報の質や量に基づいて、必要な調査項目を加えるなど柔軟に適用する。

8.4 まとめ

本章では、概要調査地区選定段階（文献調査の段階）および精密調査地区選定段階（概要調査の段階）における以下の三つの事項について述べ、この段階の実施に向けた技術的な準備が整っていることを示した。

- ・ 文献調査および概要調査を実施するための目標や実施事項を明確化していること
- ・ 地質環境の調査・評価技術，処分場の設計・建設・操業・閉鎖技術，地層処分システムの長期安全性評価技術を連携し，概要調査地区および精密調査地区を選定するための基本的な実施手順を準備していること
- ・ 各段階の実施手順に従って，第5章から第7章に示した技術の適用性を検討していること

まず，安全確保の基本的な考え方として，地層処分に適した地質環境の選定の考え方と多重バリアシステムによる安全確保の考え方を述べた。その上で，処分場概念の構築とセーフティケースの作成についてその概要を示した。これらの考え方に基づいて，文献調査および概要調査において，適切なサイト選定と確認，処分場の設計・施工などの適切な工学的対策，地層処分システムの長期安全性の評価の三つの安全確保策を連携させながら，事業を推進するための手順とその実施内容を提示した。

(1) 概要調査地区選定段階の目標と実施事項

概要調査地区選定段階においては，NUMOが行う公募から概要調査地区の選定までの実施事項を，国および地域との関係を考慮した手順に沿って述べた。この段階は，安全性の確認として，自然現象の著しい影響が明確な地域を除外するために，文献調査に基づいて火山・火成活動，地震・断層活動，隆起・侵食などの影響の評価，ならびに第四紀の未固結堆積物と鉱物資源に関する評価結果を法定報告書として取りまとめ公表する。また，処分場の設計と安全性についても概略的に検討して，次段階の調査計画に反映するとともに処分場の概要として公表する。

(2) 精密調査地区選定段階の目標と実施事項

精密調査地区選定段階においては，地表調査（地表踏査やトレンチ調査，物理探査など）およびボーリング調査の結果に基づいて，自然現象の著しい影響が回避されていること，地質環境が処分場の設置に適していること，天然バリアの放射性物質の移行遅延などの機能を確認する。また，処分場の設計の妥当性の確認，予備的な安全評価を行い安全確保の見通しを得る。これらの結果は法定報告書などとして取りまとめ公表するとともに，安全性に関する論拠や論証を取りまとめセーフティケースとする。このセーフティケースに基づいて，ステークホルダーに安全性を提示する。

以上のように，NUMOは，概要調査地区選定および精密調査地区選定の実施に向け，各段階における安全確保の目標，事業を進めるための基本的な手順を設定し，各実施項目を支える技術の適用性の検討を進めており，文献調査および概要調査の実施に向けた技術的な準備が整ったと判断している。また，処分施設建設地選定の実施や処分場の建設・操業・閉鎖の実施に必要な技術についても，先行する国の基盤研究開発機関や海外実施主体の技術開発に基づいて，精密調査の実施や，処分場の設計，安全性の評価，さらには，処分場の建設・操業・閉鎖に至る地層処分事業の全体に関

して、技術的な実現性が見通しがあると判断できる。

今後、三つの安全確保策を連携させて事業を進めるとともに、計画的な技術開発を着実に実施して地層処分の安全の確保と実現性に対する信頼性をさらに向上させる。

参考資料 概要調査地区選定段階および精密調査地区選定段階の実施項目と関連する技術および検討事項の関係

第8章に記述した概要調査地区選定段階（文献調査の段階）および精密調査地区選定段階（概要調査の段階）の実施項目と第3章から第7章までに示した関連する技術の関係をとりまとめた。矢印（→）は、技術および検討事項の詳細を記述した第3章から第7章の該当箇所を示している。

参考表 1 概要調査地区選定段階の実施項目と関連する技術の関係

実施項目	実施内容	関連する技術など
8.2.2 文献調査計画の立案	・ 文献調査計画書の作成	・ 事前確認のための地質的な条件（→ 4.2.1.1） ・ 概要調査地区選定上の考慮事項（→ 5.2.2.1） ・ 文献調査マニュアル（→ 5.2.2.2）
8.2.3 文献調査の実施（文献調査の収集）	・ 文献情報の収集・整理 ・ 品質管理	・ 自然現象および地質環境特性にかかわる全国規模および地域ごとのデータベース、図幅、観測網など（→ 5.2.2.3） ・ 空中写真判読（→ 5.2.2.3） ・ 衛星画像解析（リモートセンシング）（→ 5.2.2.3） ・ 地形判読（数値標高モデルなど）（→ 5.2.2.3） ・ 測地データ解析（→ 5.2.2.3） ・ 地球物理データ解析（地震波トモグラフィなど）（→ 5.2.2.3） ・ 地震観測データ解析（→ 5.2.2.3） ・ 文献調査マニュアル（→ 5.2.2.2） ・ NUMO 地理情報システム（→ 5.2.2.2） ・ 文献調査システム・フロー（→ 5.2.4.2） ・ 地質環境データ管理システム（→ 5.2.4.2）
8.2.4 自然現象の影響にかかわる調査・評価	・ 火山・火成活動の著しい影響が明確な地域の除外 ・ 活断層、断層破碎帯と変形帯に含まれる範囲、活断層の分岐などの発生可能性が高い範囲、顕著な活動を継続している活褶曲、活撓曲の分布範囲に位置することが明確な地域の除外 ・ 過去10万年間の隆起の総量が300mを超えることが明確な地域の除外	・ 火山・火成活動の調査・評価の体系（火山活動履歴、新規火山の発生、深部熱源、深部構造、確率論的評価など）（→ 5.3.1.1） ・ 地震・断層活動の調査・評価の体系（活断層の存在、変形帯、影響範囲、再活動性、確率論的評価など）（→ 5.3.1.2） ・ 隆起・侵食の調査・評価の体系（段丘対比・編年、河成段丘による隆起量の見積もり、隆起・沈降運動の復元など）（→ 5.3.1.3）
8.2.5 第四紀の未固結堆積物ならびに鉱物資源の調査・評価	・ 処分施設を設置しようとする地層が第四紀の未固結堆積物である地域、その採掘が経済的に価値の高い鉱物資源が存在する地域の除外	・ 地質環境特性の調査・評価の体系（→ 5.3.2.1）
8.2.6 概要調査地区の選定	・ 概要調査地区選定上の考慮事項への適格性の確認 ・ 概要調査地区の選定 ・ 調査・評価のプロセスや結果に対する国内外の専門家委員会による評価 ・ 文献調査に関する法定報告書の作成	・ 概要調査地区選定上の考慮事項（→ 5.2.2.1）
8.2.7 地質環境特性の調査・評価	・ 地質環境モデル（地質構造モデル、水理地質構造モデル、地下水化学モデル、岩盤特性モデル）の構築 ・ 地質環境特性の長期変遷の評価 ・ 処分場の概略検討、概略的な安全性の検討に用いる情報の整理	・ 地質環境特性の調査・評価の体系（→ 5.3.2.1） ・ 特性評価のための解析手法（地下水流動解析、地下水形成モデルなど）（→ 5.4.1.2） ・ 地質環境モデルの構築手法（→ 5.2.1.2(2)）
8.2.8 処分場の概略検討	・ すでに公表している人工バリアや地下施設の適用性の概略的な検討 ・ 必要に応じた新たな工学的対策の追加検討 ・ 処分場概念に対する工学的成立性、経済性や建設工程などを含めた総合的な評価	・ 地下施設と人工バリアの仕様例（→ 6.3.2, 6.3.3） ・ 岩盤の種類に応じた簡易的な坑道の力学的安定性評価（→ 6.3.3.2） ・ 多重バリアシステムの安全機能（→ 6.2.2.1(1)）
8.2.9 処分場の安全性の概略検討	・ 多重バリアシステムの各構成要素の割り当ての見通しの検討	・ 多重バリアシステムの安全機能（→ 6.2.2.1(1), 7.2.1） ・ 既存の安全評価シナリオやモデル、パラメータ（JNC, 1999c など） ・ 不確実性の取り扱い（→ 7.1.6.1）
8.2.10 次段階の準備	・ 処分施設建設地選定上の考慮事項の策定 ・ 地質環境の調査・評価、処分場の設計・施工の概略検討、処分場の安全性の概略検討における課題（不確実性など）の抽出と重要度の分析 ・ 概要調査の実施項目の設定 ・ 補足的に調査する範囲の設定 ・ 概要調査計画書の作成	・ 概要調査計画立案マニュアル（→ 5.2.3.2） ・ 統合化データフローダイアグラム（→ 5.2.1.5） ・ 概要調査技術の確認（→ 5.4.2）

参考表 2 精密調査地区選定段階の実施項目と関連する技術の関係 (1/2)

実施項目	実施内容	関連する技術など
8.3.2 概要調査の実施	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地表調査のフェーズ：地表踏査、物理探査など ・ 次フェーズの調査計画更新 ・ ボーリング調査のフェーズ：ボーリング調査など ・ 品質管理 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 火山・火成活動の調査手法：地表踏査、年代測定、化学分析、空中磁気・電磁探査、微小地震観測、地震波トモグラフィ、電磁探査、重力探査、GPS 観測、温泉・地下水等調査、ボーリング調査など（→ 表 5.3.1-1、表 5.3.1-2、表 5.4.1-1、表 5.4.1-2） ・ 地震・断層活動の調査手法：地表踏査、トレンチ調査、短尺ボーリング調査、年代測定、地震探査、電磁探査、重力探査、GPS 観測、微小地震観測、地化学調査、海底地形測量、海底試料採取、音波探査など（→ 表 5.3.1-3、表 5.3.1-4、表 5.4.1-3、表 5.4.1-4） ・ 隆起・侵食の調査手法：地形測量・解析、測地（GPS、水準、潮位、合成開口レーダー）、地表踏査、年代測定、物理探査、短尺ボーリング調査、堆積砂量調査など（→ 表 5.3.1-5、表 5.3.1-6、表 5.4.1-5） ・ 地質環境特性の調査手法：地表踏査、物理探査（空中、地上、海上）、ボーリング調査（コア観察、孔壁観察、物理検層、水理試験、地下水分析、室内試験）など（→ 表 5.4.1-6、表 5.4.1-7、表 5.4.1-8） ・ 概要調査に関するマニュアル類（→ 5.2.3.2）
8.3.3 自然現象の影響にかかわる調査・評価	<ul style="list-style-type: none"> ・ 火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食による地層の著しい変動が長期間生じていないことの確認 ・ 将来のマグマの貫入・噴出の可能性・範囲、熱・熱水の影響範囲に関する評価（文献調査で応募区域近傍に第四紀火山、マグマ供給系、熱水活動の存在可能性が認められた場合） ・ 文献・資料に記載されていない活断層の有無の確認、概要調査地区周辺の活断層を含めた活断層の分布・活動性、幅およびその外側の変形帯の範囲、分岐の可能性・範囲の評価 ・ 著しい隆起や侵食が生じる可能性の評価、ならびに、海水準変動に伴う地形変化を考慮に入れた地下施設の酸化的な雰囲気への接近可能性の評価 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 火山・火成活動の調査・評価の体系（火山活動履歴、新規火山の発生、深部熱源、深部構造、確率論的評価など）（→ 5.3.1.1） ・ 地震・断層活動の調査・評価の体系（活断層の存在、変形帯、影響範囲、再活動性、確率論的評価など）（→ 5.3.1.2） ・ 隆起・侵食の調査・評価の体系（段丘対比・編年、河成段丘による隆起量の見積もり、隆起・沈降運動の復元など）（→ 5.3.1.3）
8.3.4 地質環境特性の調査・評価	<ul style="list-style-type: none"> ・ 坑道掘削への支障および地下水の水流による地下施設への影響の観点からの地層処分事業の成立性の評価 ・ 地質環境特性にかかわる情報の解析および取りまとめ <ul style="list-style-type: none"> ・ 地質・地質構造：未固結堆積物の分布、岩体および断層などの不連続構造の形状・規模、岩盤の割れ目、風化・変質の状況など ・ 地下水流動特性：涵養域および流出域の特定、降水量、河川流量・地下水位、地下水の流量・流速・動水勾配、間隙水圧分布、塩淡境界の形状など ・ 地下水化学特性：水温、pH、電気伝導度、酸化還元電位、水質など ・ 岩盤特性：岩盤強度、初期地圧、地温勾配、岩石の熱特性など ・ 物質移行特性：分散・希釈・収着・マトリクス拡散特性など ・ 段階的な地質環境モデルの更新、より詳細なスケールの地質環境モデルの構築 <ul style="list-style-type: none"> ・ 地質環境特性の長期変遷の評価 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地質環境特性の調査・評価の体系（→ 5.3.2.1） ・ 特性評価のための解析手法（地下水流動解析、地下水形成モデルなど）（→ 5.4.1.2） ・ 地質環境モデルの構築手法（→ 5.2.1.2(2)） ・ 日本を代表する結晶質岩・淡水系地下水および堆積岩・塩水系地下水を対象とした段階的な調査および地質構造モデル構築の事例（→ 5.4.1.3(1)、(2)） ・ 沿岸域を対象とした調査・評価技術（→ 5.4.1.3(3)） ・ 地質環境特性の長期変遷の評価手法（地形変化を考慮した地下水流動解析など）（→ 5.4.1.2(2)）
8.3.5 候補母岩の選定	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地質環境モデルや地質環境の長期変遷に関する情報に基づいて、候補母岩の適性（熱環境、力学場、水理場、化学環境、母岩の広がり、工程・経済性など）を評価し、選定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地質環境モデルの構築手法（→ 5.2.1.2(2)） ・ 熱環境：廃棄体占有面積の評価（→ 6.3.3.1、8.3.5.1） ・ 力学場：坑道の力学的安定性の評価（→ 6.3.3.1、8.3.5.2） ・ 水理場：地下水流動解析（→ 6.3.3.1、8.3.5.3） ・ 化学環境：塩淡境界の評価（→ 6.3.3.1、8.3.5.4）

参考表 2 精密調査地区選定段階の実施項目と関連する技術の関係 (2/2)

実施項目	実施内容	関連する技術など
8.3.6 処分場の概念設計	<ul style="list-style-type: none"> 人工バリアの仕様，地上・地下施設の仕様・配置などの設定 次段階に実施する技術実証試験の計画策定を目的とした技術オプション絞り込み 	<ul style="list-style-type: none"> サイトに適した処分場の概念設計 <ul style="list-style-type: none"> 処分場の安全機能と技術要件 (→ 6.2) 人工バリア材料の基本特性と長期挙動の理解 (→ 6.6.2) 人工バリアの設計技術 (→ 6.3.1, 6.5.1) 坑道の設計技術 (支保工の設計, 坑道の力学的安定性評価, 耐震性評価技術など) (→ 6.3.3.2, 6.5.1, 6.6.3) 地上・地下施設の設計技術 (→ 6.3.3.1~4, 6.3.4.1~4) 処分概念・技術オプションの絞り込み (→ 6.5.2) <ul style="list-style-type: none"> オーバーパックの遠隔溶接技術 (→ 6.6.4.2) 人工バリア搬送・定置技術 (ブロック施工方式, PEM, 吹付ベントナイト, ペレットなど) (→ 6.6.4.3)
8.3.7 予備的な安全評価	<ul style="list-style-type: none"> 処分場の設計の妥当性の確認とフィードバック 精密調査計画, 次段階の実施事項への反映 安全性に対する段階的な信頼性の提示 	<ul style="list-style-type: none"> シナリオの作成・分類 <ul style="list-style-type: none"> 体系的なシナリオ構築手法 (→ 7.2.1) FEP情報の整備 (→ 7.3.2.4) 地質環境の長期変遷のシナリオ化 (→ 7.3.2.1, 7.3.2.2) 自然現象の影響の評価手法 (→ 7.3.2.3) モデルの開発 <ul style="list-style-type: none"> 母岩の不均質性, 設計オプションの影響解析手法 (→ 7.3.3.2) 地質環境の長期変遷の影響解析手法 (→ 7.3.3.1) 解析コードの改良 (→ 7.3.3.2, 7.3.3.3, 第7章の参考資料3) データセットの整備 <ul style="list-style-type: none"> データベースや知見の整備 (収着, 拡散, 溶解度など) (→ 7.3.4.1) データセットの設定手法 (→ 7.3.4.2) 安全解析 (→ 7.3.3.3)
8.3.8 レファレンス処分場概念の構築とセーフティケースの作成	<ul style="list-style-type: none"> 地質環境の調査・評価, 処分場の設計, 安全評価のそれぞれの結果を集約し, 処分場概念として統合化 閉鎖後長期, 事業期間中の安全確保, 工学的成立性, 経済性などの観点から処分場概念を評価し, サイトに適した処分場概念 (レファレンス処分場概念) として設定 レファレンス処分場概念に含まれる情報のうち, 安全評価のシナリオの設定や, モデル, データの設定, 安全解析の結果とそれらの設定の論拠に関連する情報を集約してセーフティケースを作成 セーフティケースは, 「概要調査に関する法定報告書」, 「概要調査に基づく概念設計と予備的安全評価に関する報告書」とそれらの補充文書で構成する計画 	<ul style="list-style-type: none"> 処分場概念の考え方, 構築と評価の方法論 (→ 8.1.1.3) セーフティケース構築の考え方 (→ 3.2.2.3, 7.1.1)
8.3.9 精密調査地区の選定	<ul style="list-style-type: none"> 精密調査地区選定上の考慮事項への適格性の確認 精密調査地区の範囲などの設定 調査・評価のプロセスや結果に対する国内外の専門家委員会による評価 精密調査に関する法定報告書の作成 	<ul style="list-style-type: none"> 精密調査地区選定上の考慮事項 (→ 5.2.3.1)
8.3.10 次段階の準備	<ul style="list-style-type: none"> 処分施設建設地選定上の考慮事項の策定 地質環境の調査・評価, 処分場の概念設計, 予備的な安全評価における課題 (不確実性など) の抽出と重要度の分析 精密調査の実施項目の設定 (実証試験計画, 精密調査の環境保全対策を含む) 補足的に調査する範囲の設定 (必要に応じて) 精密調査計画書の作成 	

参考文献

- 電事連 (電気事業連合会)・JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005) : TRU 廃棄物処分技術検討書一第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ一, JNC TY1400 2005-013.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2007) : 平成 18 年度地層処分技術調査等 地質環境評価技術高度化調査.
- 原子力安全委員会 (2004) : 放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について.
- 放射線審議会基本部会 (2010) : 放射性固体廃棄物埋設処分及びクリアランスに係る放射線防護に関する基本的考え方について.
- 岩月輝希, 豊嶋賢治, 吉田英一 (1998) : 深地層を対象とした地下水の地球化学調査の現状, バックエンド研究, vol. 4., No.2, pp.73-81.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999a) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性一地層処分研究開発第 2 次取りまとめ一 分冊 1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999b) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性一地層処分研究開発第 2 次取りまとめ一 分冊 2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999c) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性一地層処分研究開発第 2 次取りまとめ一 分冊 3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023.
- Jonkman, R.M., Bos, C. F. M., Breunese, J. N., Morgan, D. T. K., Spencer, J. A. and Sondena, E. (2002) : Best Practices and Methods in Hydrocarbon Resource Estimations, Production and Emission Forecasting, Uncertainty Evaluation, and Decision Making, SPE Reservoir Evaluation & engineering, Vol. 5, No. 2, pp.146-153.
- Littleboy, A.K., Degnan, P.J., Mcleod, R.S. and Norris, S. (1998) : Site Characterisation Strategy and Its Role in Post Closure Performance Assessment, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 506, pp.719-730.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2004a) : 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性一「処分場の概要」の説明資料一, NUMO-TR-04-01.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2004b) : 概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠,一「概要調査地区選定上の考慮事項」の説明資料一, NUMO-TR-04-02.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2004c) : Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments, NUMO-TR-04-03.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2009) : 概要調査地区選定上の考慮事項, 放射性廃棄物の地層処分事業について 分冊一2.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011a) : 概要調査計画立案の基本的考え方, NUMO-TR-10-08.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011b) : 地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性, 「処分場の概要」の説明資料, NUMO-TR-10-03.
- OECD/NEA (1991) : Review of Safety Assessment Methods, Disposal of Radioactive Waste, A Report of the Performance Assessment, Advisory Group of the Radioactive Waste Management Committee, OECD Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2002) : Establishing and Communicating Confidence in Safety Case of Deep Geologic Disposal:

Approaches and Arguments, OECD Nuclear Energy Agency.

尾上博則, 三枝博光, 大山卓也, 遠藤令誕 (2007): 繰り返しアプローチに基づくサイトスケールの水理地質構造のモデル化・地下水流動解析 (ステップ4), JAEA Research 2007-034.

太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗 (2007): 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階 (第1段階)研究 成果報告書, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-044.

Ota, K., Amano, K., Niizato, T., Alexander, W.R. and Yamanaka, Y. (2010) : Development of comprehensive techniques for coastal site characterisation: Part1 – Strategic overview, Proc. 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM2010), Tsukuba, Japan, 3-7 Oct. 2010.

POSIVA (2007) : Modelling of Hydro-Zones for Layout Planning and Numerical Flow Model in 2006, Working Report 2007-01.

三枝博光, 瀬野康弘, 中間茂雄, 鶴田忠彦, 岩月輝希, 天野健治, 竹内竜史, 松岡稔幸, 尾上博則, 水野崇, 大山卓也, 濱克宏, 佐藤稔紀, 久慈雅栄, 黒田英高, 仙波毅, 内田雅大, 杉原弘造, 坂巻昌工 (2007): 超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階 (第1段階)研究成果報告書, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-043.

総合資源エネルギー調査会(2007): 放射性廃棄物小委員会報告書中間とりまとめ ～最終処分事業を推進するための取組の強化策について～, 総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会放射性廃棄物小委員会.

SKB (2006) : Final repository for spent nuclear fuel, Underground design Forsmark, Layout D1 SKB R-06-34.

SKB (2008) : Underground design Forsmark, Layout D2, SKB R-08-116.

第9章

おわりに

第9章 目次

第9章 おわりに.....	9-1
---------------	-----

第9章 おわりに

地層処分事業を進めていく上では、放射性廃棄物処分に特有な閉鎖後長期の安全を確保するとともに、サイト調査から事業廃止に至るまでの事業期間中の安全を確保することが重要である。このため、NUMO では、「閉鎖後長期の安全確保」と「事業期間中の安全確保」を事業を進めていく上での目標と定めた。

地層処分を行う放射性廃棄物は、放射能自体は時間とともに減衰していくものの、放射能の潜在的な環境への影響は長期間残存すると考えられることから、事業期間終了後、数万年以上にわたる将来世代に影響が及ぶことのないよう安全を確保する必要がある。このため、サイト選定の初期の段階から慎重に地質環境の調査を行い、安定な地質環境を選んだ上で、人工バリアと天然バリアの多重バリアシステムによって安全に放射性物質を閉じ込め、隔離する。事業を推進するに当たっては、処分場の建設、操業、閉鎖の各段階に応じて安全性を慎重に繰り返し確認していく。また、地層処分の事業は100年程度にわたり、そのような長期の事業では、新しい技術的知見や社会的変化などに対し、柔軟に対応できるよう配慮しておく必要がある。

このため、長期的な視野に立ち、かつ事業全体を俯瞰した上で、「方針1：安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進」、「方針2：信頼性の高い技術を用いた事業推進」、「方針3：安全性への信頼感醸成へ向けた技術的な取り組み」の三つの方針で事業を進める。各方針を達成するための具体的な方策を定め、ロードマップを作成し、事業の各段階において適切に実施できるようにしている。

一方、安全な地層処分の実施を支える技術については、事業の各段階で、その時点で利用可能な最適で信頼性の高い技術を用いることが重要である。このため、2000年のNUMO設立以降、必要な時期までに必要なレベルで準備が整うよう、基盤研究開発機関との適切な役割分担のもと、計画的に技術開発を進めてきた。今後も地層処分の安全な実施と経済性および効率性の向上などを目的とした技術開発を進めるとともに、基盤研究開発機関の成果をあわせて、事業に必要な技術を体系的に整備していく。

本報告書では、日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所、産業技術総合研究所、放射線医学総合研究所、電気事業連合会、日本原燃株式会社の関係機関の協力を得て、最新の技術開発成果を取り入れて、安全な地層処分の実施を支える技術の整備状況について取りまとめた。

安全な地層処分の実施においては、その技術基盤が整備されたことを第2次取りまとめが示している。その上で、NUMO が設立された2000年以降、地層処分事業を実施するための技術は、以下の点で着実に進展した。

- ① より現実的な調査・設計・評価が可能な技術を整備した。
- ② サイト選定するための実用的な技術を体系的に整備した。
- ③ 調査・設計・評価において、多様な地質環境に対応可能な技術を整備した。

これらの技術の進展により処分事業の実施に係る技術的信頼性が向上し、具体的にサイトが決まっていない現段階において当面の概要調査地区選定段階（文献調査の段階）とその次の段階である精密調査地区選定段階（概要調査の段階）の事業を実施するための具体的な技術の準備が整った。

また、処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）以降の事業を実施するための技術についても、さらなる技術の蓄積がなされた。今後は、サイト固有の課題や、精密調査地区選定以降に必要な技術を中心に、一層の信頼性の向上を目指し、基盤研究開発機関と緊密に連携し技術開発に取り組んでいく。

本報告書の作成に当たっては、NUMOの技術アドバイザリー委員会、基盤研究開発機関など、多くの専門家の方々から有益なご意見やご助言をいただくとともに、日本原子力学会特別専門委員会や海外の専門家などの第三者的な評価（レビュー）をお願いし、多くの重要なコメントをいただいた。本報告書は、これらのご助言やコメントを反映して作成したものである。

なお、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に起因する東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故を踏まえ、国や学会、当事者などの調査結果を見据えながら、事業期間中や閉鎖後長期の安全確保に関するより幅広い視点からの検討を実施し、そこで得られた成果については、別途取りまとめる予定である。

用語集

【ア行】

安全審査

原子力事業者は、原子力施設の設置または変更を行おうとする場合、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」などの関係法令の定めるところにより、施設や設備の基本設計など安全性について、行政庁による審査（一次審査）を受け、その結果についてさらに原子力安全委員会による審査（二次審査）を受けて、必要な許可を取得することとされており、この許可を得るまでの審査のことをいう。

安全評価

地層処分システムに関連する危険性に対して、サイトの地質環境や処分場の設計が技術的な要件を満足するだけの安全機能を発揮し得るか否かを体系的に分析する作業過程（IAEA, 2009）。安全評価は、地層処分システムの全体レベルの性能の定量化、関連する不確実性の分析、および安全基準との比較を含む。

安全レビュー

事業の進展に伴い得られるデータや最新知見を踏まえてもなお、廃棄物埋設施設の操業中のみならず閉鎖後も含めた長期的な安全性が担保される見通しであることを事業者が確認すること。事業の許可を受けた日から20年を超えない期間ごとの実施が「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第一種廃棄物埋設の事業に関する規則」によって規定されている。

イエローフェーズ

ガラス固化の際に、再処理の過程において使用済燃料から分離される高レベル放射性廃液中に一定量以上の硫酸塩もしくは塩化物イオンが含まれている場合、硫酸塩および塩化物は分離相となり、ガラス熔融物の表面に浮遊する。同様の現象は、モリブデン酸塩やクロム酸塩を含む廃液のガラス固化においても生じる。これらの分離相は有色であり、イエローフェーズと呼ばれる。

埋め戻し材

坑道の掘削により影響を受けた領域を空間として放置しておく、地圧の作用により坑道の力学的安定性が損なわれたり、地下水の卓越した水みちとなるなど、処分場全体のバリア性能に有意な影響を及ぼすことが想定される。このような影響を排除するために、処分のために掘削した坑道や立坑（地上施設と地下施設を結ぶトンネル）などを埋めるもの。材料としては粘土などが考えられている。

塩淡水境界

地下における海水と淡水の境界面をいう。海岸部付近の地層中では、降水系地下水（淡水）と海水系地下水（塩水）の密度差に起因して、淡水の下に海水が侵入している現象が見られる。

オーバーパック

ガラス固化体を封入する容器をいう。ガラス固化体に地下水が接触することを防止し、地圧などの外力からガラス固化体を保護する。人工バリアの構成要素の一つで、材料としては鉄などが考え

られている。

【カ行】

回収可能性

地層処分において、いったん定置した廃棄物を再度取り出す行為が可能であることをいう。「地層処分場における長寿命放射性廃棄物の回収可能性に関する協調行動」(Grupa et al., 2000)では「処分場システムが具備する能力であり、何らかの理由によって回収が望まれた場合に廃棄体パッケージを回収すること」とされている。

概要調査

三段階のサイト選定段階のうち、二段階目の精密調査地区選定のための調査 (Preliminary Investigation)。ボーリング調査、地表踏査、物理探査などの地上からの調査が行われる。

概要調査地区

概要調査を実施する地区。文献調査結果に基づき、NUMO が選定する。

海洋投棄

放射性廃棄物の処分方法の一種で、固体廃棄物や固化した廃棄物を海洋に投棄して処分する方法。国際的には、1975年に発効した「廃棄物その他の物体の投棄による海洋汚染の防止に関する条約」(ロンドン条約)によって投棄が規制されており、1993年11月の第16回条約加盟国会議において放射性廃棄物の海洋投棄の禁止が採択された。

火山フロント

プレート沈み込み境界(島弧)である日本列島に沿って、外側には海溝があり、内側には多くの火山が分布している。火山は無秩序に分布するわけではなく、最も密集した領域が、海溝から一定の距離を置いて、それとほぼ平行に並んでいる。この領域の海溝側の縁を火山フロントという。

火成活動

地下深部で形成されたマグマが地殻に貫入したり、地表に噴出したりする、あるいはマグマにより地下水、岩盤などにさまざまな物理的・化学的な影響を生じさせる現象をいう。

かつしゅうきよく 活褶曲

層状の地層に水平方向の応力が作用することなどにより、波状に変形する運動を褶曲運動といい、この褶曲運動が現在あるいは最近まで進行し、地形の変形などとして認められ、将来も活動する可能性のあるものを活褶曲という。公募関係資料「概要調査地区選定上の考慮事項」では、過去数十万年前以降活動したものを対象としている。

活断層

過去数十万年前以降繰り返し活動したことのある断層で、将来も活動する可能性のある断層をいう。

かつとうきょく 活撓曲

地層が厚く堆積しているような地域で、深部の基盤が断層運動などにより上下に変位することにより、地表付近では断層が生じず、地層が連続したまま屈曲しているもので、現在あるいは最近まで活動し、将来も活動する可能性のあるものをいう。公募関係資料「概要調査地区選定上の考慮事項」では、過去数十万年前以降活動したものを対象としている。

ガラス固化

再処理の過程において使用済燃料から分離される高レベル放射性廃液を、ガラスを形成する成分と一緒に高温で加熱することにより水分を蒸発させ溶解した後、非晶質に固結（ガラス化）し、物理的・化学的に安定な形態にするプロセスをいう。廃液はステンレス製の堅牢な容器（キャニスタ）に閉じ込められた状態でガラス固化され、人工バリアの構成要素の一つであるガラス固化体となる。ガラス固化体は放射性物質を安定な形態に保持し、地下水に対する耐浸出性に優れることが特徴である。

環境保全

事業活動そのほかの人の活動に伴って環境に加えられる影響であって、環境の良好な状態を維持する上での支障の原因となるおそれのあるもの（環境負荷）の発生の防止、抑制または回避、影響の除去、発生した被害の回復またはこれらに資する取り組みをいう。

緩衝材

人工バリアの構成要素の一つで、候補材料はベントナイトなどの粘土。オーバーパックと岩盤の間に充填し、地下水の浸入や放射性物質の移動を抑制するものをいう。さらに岩盤の変位を物理的に緩衝するクッションの働きや、地下水の水質を化学的に緩衝して変化を抑える働きを持つ。

キャニスタ

高レベル放射性廃棄物をガラス固化する際の容器、あるいは地層処分低レベル放射性廃棄物のハル・エンドピースなどが収納されている容器をいう。

局部腐食

表面に生成する不動態皮膜（腐食作用に抵抗する酸化被膜）によって耐食性が保たれている場合に、金属表面状態の不均一あるいは環境の不均一などの原因でその一部が破壊され新生面が露出すると、その部分が選択的に溶出し局部的に腐食が進行する。この腐食形態を局部腐食という。オーバーパック材料選定に際して局部腐食生起の有無が重要な条件の一つとなる。

亀裂性媒体

岩盤中の地下水や地下水中の物質の移動を考える上での岩盤の分類の一つをいう。岩盤中に亀裂（割れ目）が発達しており、亀裂を主要な移行経路として地下水などの動きを取り扱うことができる。花崗岩などがこれに相当する。一般には多孔質媒体と対語をなす。

空中写真判読

航空機などから撮影した地表面の写真（空中写真）を用いて、地形、地質、土壌、植生などの状況を読み取る調査をいう。

掘削影響領域（EDZ：Excavated Disturbed Zone）

岩盤が、掘削の影響を受け、初期の性質から変化している領域をいう。破壊特性や変形特性などの力学特性、透水係数などの水理特性、あるいは空気の侵入により地下水の酸化還元電位などの地球化学特性が変化することが想定される。

グラウト

地盤や構築物の間隙・割れ目・空洞に対して、止水や弱部の補強を目的として固結材を注入する工法。注入材にはセメント、粘土、水ガラス系の薬液などがあり、セメントは強度や経済性の点で優れ、広く用いられている。

結晶質岩

マグマが冷えて固まってできた火成岩（例：花崗岩）および既存の岩石が熱や圧力によって変化してできた変成岩（例：結晶片岩、片麻岩）をいう。

原位置締め固め方式

緩衝材の施工方法の一つで、原位置において、振動ローラーなどの機械を用いて土質系材料にエネルギーを与えることで、材料を締め固めて密度を増大させる方法をいう。

原子力政策大綱／原子力長期計画

原子力委員会は、原子力基本法に沿って国の施策を計画的に進めるために、1956年（昭和31年）からおおむね5年ごとに、9回にわたって「原子力長期計画」（正式名称：原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画）を策定してきた。10回目の見直しでは、「原子力政策大綱」と名称を改め、2005年（平成17年）10月に、今後10年程度の原子力の基本方針として閣議決定された。

原子炉等規制法

核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律。この法律は1957年（昭和32年）に制定され、核原料物質、核燃料物質および原子炉に関し、(1) 平和利用に限定、(2) 計画的利用実施の確保、(3) 災害防止と安全確保、を図るための規制を定めている。また、国際規制物資に関し、原子力の研究、開発および利用に関する条約、そのほかの国際約束を実施するための規制を定めている。

建設・操業・閉鎖

建設は、廃棄体定置のための地下施設（坑道群）と地上施設を構築することをいう。操業は廃棄体の受け入れに始まり、オーバーパックへの封入や廃棄体パッケージ、緩衝材などの製作、これらの搬送・定置、その後に行う処分坑道の埋め戻しまでの一連の作業をいう。閉鎖は、連絡坑道、アクセス坑道の埋め戻しをいう。

構造躯体

第二種特定放射性廃棄物を処分するに当たり、廃棄体や廃棄体パッケージの定置空間と緩衝材などの設置空間を区画分けするものである。人工バリアの種類や処分坑道の形状を踏まえ、鉄筋コンクリート製や鋼製など適切な部材で構成する。

坑道離間距離

隣接して掘削される坑道間の距離をいう。空洞の力学的安定性や廃棄体からの放熱による緩衝材や充填材などの人工バリアの熱変質防止などの観点から、適切な坑道離間距離が設定される。

高レベル放射性廃棄物

再処理の過程において使用済燃料から分離される高レベル放射性廃液またはそれを固化したガラス固化体をいうが、一般には後者の意味でガラス固化体を指して用いられることが多い。なお、諸外国の中には使用済燃料を再処理しない方針の国もあり、その場合には使用済燃料自体が高レベル放射性廃棄物となる。本報告書では、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」における「第一種特定放射性廃棄物」という語の代わりに「高レベル放射性廃棄物」を用いている。「第一種特定放射性廃棄物」には、海外再処理により発生する TRU 廃棄物を一定の基準に基づき交換され返還されるガラス固化体も含まれる。

【サ行】

再冠水

廃棄体の定置後、地下水が周辺岩盤から埋め戻し材や緩衝材などに浸潤し飽和する。この地下水により飽和状態になる過程を再冠水という。再冠水の期間（再冠水時間）やその状態を把握することは、廃棄体定置後のニアフィールド周辺の長期の状態変遷を理解する上で重要である。

最終処分基本方針

わが国における原子力政策（原子力白書や原子力政策大綱など）で規定された放射性廃棄物処分に関する基本的な取り組みや方策をいう。2000年（平成12年）に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」に基づき閣議決定され、「高レベル放射性廃棄物は安定な形態に固化した後、30年間から50年間程度冷却のための貯蔵を行い、その後、地下の深い地層中に処分する」とされている。2008年（平成20年）には「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」の改正によって長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU廃棄物）の一部などが地層処分対象（地層処分低レベル放射性廃棄物）として追加されたことに伴い、改定された。

最終処分計画

国は2000年（平成12年）に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」を定め、「国の基本方針及び最終処分計画の明確化」、「拠出金の納付」、「概要調査地区等の選定」、「処分の実施主体」、「資金管理主体」などを定めた。「最終処分計画」では、5年ごと、10年を一期として策定するとし、そこには、最終処分を実施する時期、量、施設の規模および能力に関する事項などを定めるものとしている。2008年（平成20年）には「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」の改正によって長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU廃棄物）の一部などが地層処分対象（地層処分低レベル放射性

廃棄物)として追加されたことに伴い、改定された。

最終処分法

特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律。原子力発電所の運転に伴って生じた使用済燃料の再処理後に生ずる高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)の最終処分を計画的かつ確実に実施するため、最終処分費用の拠出制度、最終処分を実施する主体の設立、拠出金の管理を行う法人の指定などの関係規定の整備を行うことを目的として2000年に制定された法律。2008年に改定され、長半減期低発熱放射性廃棄物(TRU廃棄物)の一部などが地層処分対象(地層処分低レベル放射性廃棄物)として追加された。

サイト

本報告書では、地層処分施設を建設することが可能と考えられる場所を幅広く意味する語として「サイト」を用いる。特定の地域を指している「処分施設建設地」および「応募区域」とは別の語として使い分けている。

サイドスキャンソナー

水中曳航式の送受波器から水底に向けて扇状に発振された超音波が、水底表層部で反射した波の信号をもとに、露岩分布、水底の地質(底質)の相違、砂堆・海釜の形状などの情報を画像化するシステムをいう。

サイト選定/サイト選定段階

概要調査地区、精密調査地区、処分施設建設地を順次選定する段階を総称して、サイト選定段階という。

サイト調査・評価

サイトの地質環境特性、ならびに、地質環境の安定性に係る地形・地質・岩盤・地下水などの調査・評価全般のことをいう。

酸化還元性

物質を酸化あるいは還元する性質をいう。一般に地下深部は、金属が腐食しにくいなどの還元性の環境にあるとされている。

自己シール性

緩衝材の特性の一つで、地下水の浸入に伴う膨潤によって、周辺岩盤との隙間や緩衝材内に生じた隙間を充填する特性をいう。

自主基準

実施主体が安全な処分の実現に向けて自主的に定める基準で、上位の行動規範から、地層処分事業各段階でのサイト選定の考慮事項、意思決定の判断指標や尺度、品質保証のルールなどから構成され、その項目は階層構造をなす。自主基準は、事業の進展に伴い整備されていく法規制や技術基

準に従い見直される性格を有する。項目によっては、法規制が整備されたのちにも実施主体独自の基準として保持していくものもある。

支保工

支保工は、坑道の掘削に伴って力学的に不安定となる坑道周辺の岩盤を施工中から完成後にわたって安定に保ち、掘削作業の安全と完成後の坑道の安全な供用を確保するために設置される構造物をいう。支保部材としては、吹付コンクリート、覆工コンクリート、コンクリートセグメント、ロックボルト、鋼製支保工などが一般的であり、単独あるいは組み合わせて用いられる。

遮へい

放射線をさえぎり、外部への放射線の影響を少なくすること。遮へい材としては多くの場合、水、コンクリート、鉛、鉄などが用いられる。

収着

人工バリア材、天然バリアなどの固相と間隙水などの液相との界面において、間隙水中に溶存する溶質が固相へ吸着、吸収される現象を収着という。収着性が高い溶質は固相への移行率が高く、間隙水中の濃度が低下する。放射性核種の収着性は固相と液相との収着分配係数 (m^3/kg) として評価される。

充填材

廃棄体パッケージの中および構造躯体内の廃棄体以外の隙間を埋める材料およびその部位のことをいう。セメント系材料などを検討している。操業期間中は万一の汚染拡大防止、処分場閉鎖後は長期間にわたって放射性物質が容易に漏れ出ないようにする機能を期待することもある。

受動的安全性

IAEA による *Passive Safety* の概念を和訳した用語で、地層処分の長期安全確保の原則 (IAEA) である「能動的な制度的管理に依存しない安全確保方策」をいう。受動的な安全確保は、地層処分にとって実質的に最終段階となる「閉鎖措置」によって実現される。

処分坑道

廃棄体と廃棄体に応じた人工バリアを定置する坑道のことをいう。

処分場

地層処分に必要な人工バリアを含む一群の施設 (処分施設) と天然の地層 (天然バリア) によって構成され、閉鎖後長期間にわたって高レベル放射性廃棄物などを人間環境から安全に隔離するための機能を持つシステムをいう。従って処分場は、閉鎖までに必要な一群の施設と閉鎖後長期にわたる安全機能が期待される構成要素すべてを総称したものをいう。閉鎖後の長期にわたる安全機能に着目し、一つのシステムとして表現する際には、多重バリアシステムという。

処分場概念

地層処分施設とそのサイトにおけるサイト環境条件をあわせた、処分場についての包括的な概念で、地層処分施設的设计仕様やレイアウト、建設・操業・閉鎖やモニタリングの方法、事業期間中の安全対策および閉鎖後の長期安全性、品質保証、環境影響や社会経済的側面などに関する概念を含む。

処分パネル

高レベル放射性廃棄物を埋設するための処分坑道群とそれを取り囲む坑道からなる一つの区画をいう。

人工バリア

生活環境への放射性廃棄物の漏出を防止、および低減するために設けられる人工構築物をいう。高レベル放射性廃棄物の場合、ガラス固化体、オーバーパックおよび緩衝材からなる。地層処分低レベル放射性廃棄物のハル・エンドピースの場合は、充填材、緩衝材および埋め戻し材からなる。また、廃棄体や構造躯体であっても、セメント系材料などを利用する場合には、収着などの機能を期待できる可能性があると考えられる。多重バリアシステムの構成要素の一つ。

新第三紀

地質年代単元の一つで、約 2,300 万年前から約 260 万年前の期間をいう。新生代 (Cenozoic Era) の一部をなす Neogene Period の訳語。

深地層の研究施設

国内における高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の一環として、深部地質環境の調査・解析・評価技術および深地層における工学技術の基盤の整備を目的とした研究施設をいう。

ステークホルダー

IAEA 安全用語集においては、「ステークホルダーには一般に、所有者、運転者、従業者、メディア、公衆などを含んでいる」とされ、また IAEA INSAG-20 (原子力の課題におけるステークホルダー関与) では、「与えられた課題または決定に特定の関心のある者で、このグループに一般公衆を含めることができる」とされている。本報告書では、地層処分に係るすべての関係者、例えば安全性を審査する国の規制機関をはじめ、地域住民や国民、大学や研究機関の研究者をいう。

ストーリーボード

対象とする空間スケールと時間スケールごとに、バリアの状態や核種の移行に関係するプロセスを、概念図や言葉を用いて描写したものをいう。

生物圏

地球表面において、人間を含むいろいろな生物が住んでいる部分であり、大気圏、水圏および地圏の一部から成る。生物圏は、人間の生存場所、あるいは最も広義の人間環境を含んでいる。

精密調査

三段階のサイト選定段階のうち、三段階目の処分施設建設地選定のための調査（Detailed Investigation）。地表からさらに詳細な調査を行うとともに、地下に調査施設を建設して、地下の特性などを調べるための調査が行われる。

精密調査地区

精密調査を実施する地区。概要調査結果に基づき、NUMO が選定する。

セーフティケース

IAEA では「ある施設または活動の安全を裏付ける論拠および証拠を収集したもの」、OECD/NEA では「ある特定の（放射性廃棄物）処分場の開発段階において、処分場の長期の安全を裏付ける論拠を収集したもの」と定義され、事業主体が自主的に作成、更新する。

浅地中処分

液体廃棄物を濃縮した廃液や放射能レベルの低い使用済樹脂、可燃物を焼却した焼却灰などをセメントなどでドラム缶に固形化したものや、配管やフィルターなど固体状の廃棄物で放射能レベルの比較的低いものを、浅地中にコンクリートピットなどの人工構築物を設置して埋設する方法をいう。

全面腐食

金属材料表面が均一に腐食する状態。一般に腐食速度が小さい時や金属表面を保護性皮膜で覆わない時に生じる。オーバーパック表面に局部腐食が発生しない条件で、オーバーパックの材料選定や厚さ設定に際して全面腐食の速度が重要な条件の一つとなる。

戦略的環境アセスメント

戦略的環境アセスメント（SEA：Strategic Environmental Assessment）とは、個別の事業実施に先立つ「戦略的（Strategic）な意思決定段階」、すなわち、個別の事業の計画・実施に枠組みを与えることになる計画（上位計画）や政策を対象とする環境アセスメント。早い段階からより広範な環境配慮を行うことができる。

【夕行】

第一種／第二種特定放射性廃棄物

「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」では「第一種特定放射性廃棄物」と「第二種特定放射性廃棄物」を定めている。「第一種特定放射性廃棄物」は具体的にはガラス固化体を意味している。日本では、再処理委託した外国より返還されたガラス固化体（再処理に伴い発生する TRU 廃棄物を一定の基準に基づきガラス固化体と交換したものを含む）や、JAEA および原燃において作られるガラス固化体が地層処分の対象となる。「第二種特定放射性廃棄物」は具体的に政令で定められている。JAEA および原燃の再処理や MOX 燃料工場の操業・解体に伴って生じる TRU 廃棄物のうちの一部が地層処分の対象となる。

第一種／第二種廃棄物埋設

2007年に改正された「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」により、廃棄物埋設の事業区分に係る基準が定められた。同法では、核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物であって、これらに含まれる政令で定める放射性物質の放射能濃度が政令で定める基準を超える物の埋設の方法による最終的な処分を第一種廃棄物埋設（地層処分）といい、第一種廃棄物埋設以外は第二種廃棄物埋設という。

堆積岩

海底や河床などに運ばれた泥や砂などの堆積物や、火山噴出物などが固まってできた岩石（例：砂岩、泥岩）をいう。

第2次 TRU レポート

TRU 廃棄物処分の事業ならびに制度化に資するため、電気事業者などと JNC が協力し、2000年に取りまとめた「TRU 廃棄物処分概念検討書（第1次 TRU レポート）」以降、両者が進めてきた研究開発の最新の成果を反映し、当該廃棄物処分の技術的成立性および安全性の見通しについてより確かなものとするを目的に、2005年に関係機関の協力を得て取りまとめたものである。正式名称：TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－

第2次取りまとめ

1997年4月に公表された原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会報告書「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発などの今後の進め方について」に従い、関連する研究機関などの協力を得て、JNC が1999年11月に公開した報告書をいう。正式名称：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－

第四紀

地質年代単元の一つで、約260万年前から現在までの期間。Quaternary Period の訳語。その開始時期は、これまでは約170万年前からとされていたが、2009年に国際地質科学連合（IUGS）により再定義され、日本の各学会においても2010年1月にこれに従う決定を下した（遠藤・奥村, 2010）。NUMO では、この変更への対応をまだ行っていないため、現時点では旧定義を用いている。

第四紀火山

第四紀は約260万年前以降から現在までの期間をいうが、「日本の第四紀火山カタログ」（1999）では、約200万年前以降に活動したことが認められる火山を第四紀火山とし、日本全国で348の第四紀火山が記載されている。

多孔質媒体

岩盤中の地下水や地下水中の物質の移動を考える上での岩盤の分類の一つをいう。多孔質の岩盤は粒子や間隙からなり、透水性や貯留性は間隙の大きさと量に依存する。新第三紀の堆積岩がこれに相当する。一般には亀裂性媒体と対語をなす。

多重バリアシステム

放射性廃棄物を、長期間にわたり生物圏から隔離し、放射性物質の移動を抑えることにより、処分された放射性廃棄物による影響が、将来にわたって人間とその環境に及ばないようにするための多層の防護系から成るシステムをいう。工学技術により設けられる人工バリアと、天然の地層である天然バリアにより構成される。

段階的なアプローチ

段階的なアプローチは、Step by step approach (IAEA) あるいは Phased approach (OECD/NEA) と訳され、地層処分事業をサイト調査、建設、操業、閉鎖まで段階的に進めていく方策をいう。各段階では、実施者による意思決定とともに、規制当局、為政者の意思決定も考慮される場合がある。

段丘

河川・海・湖などに隣接していて、崖によって境された平坦面。過去に形成された河床や海浜などが隆起して取り残されたもの。

段丘対比・編年

同じ時代に形成された段丘を認定することを「対比」、段丘が形成された年代を明らかにすることを「編年」という。

断層破碎帯

断層の活動に伴い、岩石が破碎され、不規則な割れ目の集合体となったもので、角礫部、ガウジ部などから構成される、ある幅を持った帯をいう。

地下研究所

国内外の関係研究機関が設置する地下の研究施設をいう。

地下施設

廃棄体を地上から地下に搬送するためのアクセス坑道や連絡坑道、廃棄体を埋設するための処分坑道と処分孔などをいう。

地下調査施設

処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）において、最終処分法第二条第十一号で定める調査などを実施するために、精密調査地区内に設置する地下の調査施設をいう。

地質環境／地質環境特性

地層処分の観点から見た地下の環境を地質環境という。地質・地質構造、岩盤の性状・力学特性、地下水の地球化学特性、地下水の流動特性などが含まれ、これらの特性を総称し、地質環境特性という。

地質環境モデル

地質環境特性にかかわるサイトの具体的なデータを用いて、二次元または三次元座標における構造の幾何学的性状や諸特性の分布を可視化するもので、地質構造モデル、水理地質構造モデル、地球化学モデル、岩盤力学モデル、物質移動モデルなどがあり、これらのモデルを総称して、地質環境モデルという。

地上施設

ガラス固化体受入・封入・検査施設、緩衝材製作・検査施設、管理棟など、地下での建設や操業から閉鎖までに必要な地上の施設をいう。地下施設の閉鎖後は撤去されるが、閉鎖後管理が行われる場合、その間は必要な施設が残される。

地層

狭義には、堆積岩などの成層構造をなした岩体に限定して「地層」と呼ぶが、ここでは成因や構成要素を限定せず、地層処分において考慮される一定の広がりを持つた地層および岩体を含む意味で用いる。

地層処分基盤研究開発調整会議

地層処分に関する研究開発を計画的かつ効率的に実施することを目的として、資源エネルギー庁や日本原子力研究開発機構が中心となって、国の基盤研究開発を対象とした全体計画（高レベル放射性廃棄物及び TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画）を策定し、技術基盤の継続的な強化を目指して研究開発が進められている。資源エネルギー庁が設置した地層処分基盤研究開発調整会議には、日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所、産業技術総合研究所、放射線医学総合研究所が基盤研究開発機関として参加している（2010年度現在）。

地層処分システム

閉鎖後長期の安全性を評価する上で対象となるシステム全体の総称。一般に多重バリアシステム（または処分場）に人間環境（生物圏）が含まれる。

地層処分低レベル放射性廃棄物

TRU 廃棄物の中には、長期間にわたり環境に影響を及ぼすおそれがあるため、高レベル放射性廃棄物と同様に深い地層へ処分する必要のある廃棄物があり、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」では「第二種特定放射性廃棄物」と特定されている。本報告書では、この「第二種特定放射性廃棄物」という語の代わりに「地層処分低レベル放射性廃棄物」を用いている。

地表踏査

地表面を踏査して行う現地調査をいう。地表で確認できる事項、例えば、地層・岩石の分布、地質構造、活断層の分布などを調べる。

中間貯蔵施設

原子力発電所の運転に伴って発生する使用済燃料を、再処理に備えて発電所外で一時的に安全に貯蔵管理しておく施設。これまで、使用済燃料は再処理施設に搬出されるまで各発電所内で貯蔵されてきている。現在、年間約 1,000 トンの使用済燃料が発生する一方で、操業が予定されている再処理施設の処理能力は年間 800 トンであり、発電所内での貯蔵が厳しくなると予想されることから建設が進められている。

長期安定性

ここでは地質環境の状態（変動の傾向などを含む）の長期にわたる安定性をいう。岩盤や地下水などの地質環境に大きな変化を及ぼす可能性のある自然現象として、地震・断層運動、噴火、隆起・侵食といったものが考えられる。

超長期

10 万年程度を超える長期間をいう。

低アルカリ性セメント

その浸出液の pH が最大でも 11.0 程度のセメントをいう。現在国内で市販されているセメント系材料（普通ポルトランドセメント）の pH は約 12.5～13.0 の高アルカリ性を示し、これを処分場において使用した場合、地下水の pH を上昇させることが想定される。この場合、ニアフィールドのバリア機能に有意な影響を及ぼす可能性があり、この影響を低減するためには、セメント系材料の pH を 11.0 程度にすることが必要であるといわれている。このような背景から、低アルカリ性セメントの開発とその適用性が検討されている。

定置

オーバーパックに封入したガラス固化体、廃棄体パッケージや緩衝材などを処分坑道内の所定の位置に据えることをいう。

低レベル放射性廃棄物

わが国では、放射性廃棄物は高レベル放射性廃棄物と低レベル放射性廃棄物に区分される。低レベル放射性廃棄物は高レベル放射性廃棄物以外の放射性廃棄物の総称である。

天然バリア

処分された廃棄物と人間の生活環境との間にある地層などをいい、天然のものではあるが、廃棄物が人間の生活環境に影響を及ぼさないようにする障壁としての役割も期待される。多重バリアシステムの構成要素の一つ。

閉じ込め

放射性核種の放出を防止する、または放出を最少限に抑制するための処分施設の設計を意味する。閉じ込めは、人工バリアまたは人工バリアとサイトの地質環境によって提供される。通常は、廃棄物が地層処分システムに対して悪影響を与え得る熱エネルギーを生じる期間、あるいは、放射能の

減衰によって廃棄物に起因する危険性が十分に低減するまでの期間において、閉じ込めを提供するように地層処分システムの設計がなされる。

トレンチ調査

主に、活断層の活動履歴を明らかにすることなどを目的に、細長い溝（トレンチ）を掘って行う地質調査をいう。断層を横切る方向に溝を掘り、断層にそって生じた地層のずれ（変位）の量、ずれた地層・断層を覆う地層の年代を測定するなどして、活断層が活動した年代や活動の頻度を調べる。

【ナ行】

ナチュラルアナログ

放射性廃棄物埋設後の放射性物質の挙動や人工バリアの腐食・変質など、地層処分システムにおいて想定される現象と類似した、自然界で過去に起こった長期的変化に関する現象をいう。火山から噴出した火山ガラス、古代の遺跡などから発掘される銅鐸、地下に埋設された古い铸铁管などは、人工バリアの候補材であるガラスや金属に類似しているため、これらの地下での長期的な変化を調べることにより、人工バリアで生じ得る現象を確認したり、評価方法の妥当性をチェックすることができる。また、天然の放射性物質を含むウラン鉱床などは、地層処分システム全体のナチュラルアナログの研究の場として利用できる。

ニアフィールド

人工バリアと、その設置などにより影響を受けると考えられる人工バリア近傍の岩盤とを合わせた領域をいう。

【ハ行】

バーチャル処分場

バーチャル（Virtual）とは、実態を伴わない仮想的な状況をいう。バーチャル処分場は、三次元コンピュータグラフィックを用いて処分場を疑似的に体験できる処分場である。視覚や聴覚、運動感覚に訴える人工的な空間をコンピュータにより作り出し、人間があたかもその環境に存在するような環境を生み出すことが可能である。

廃棄体

容器に封入し、または容器に固型化した放射性廃棄物をいう。

廃棄体パッケージ

廃棄体をまとめて金属性などの箱に収納し充填材を充填したものをいう。

廃棄物埋設施設

2007年に改正された「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」により、廃棄の事業に関する規制に係る基準が定められた。同法では、廃棄物埋設地およびその付属施設を廃棄物埋設施設という。廃棄物埋設地とは、例えば、廃棄物を埋設するためにまたは人工バリアを設置す

るために土地を掘削した場所、および廃棄物を埋設し、埋め戻した場所（人工バリアを含む）をいう。

ハル・エンドピース

使用済燃料集合体をせん断・溶解した後の残渣であり、被覆管（ハル）と集合体端末片（エンドピース）などから構成される。ハルは主にジルカロイ、エンドピースは主にステンレス鋼製。

ビルドアップ

放射線が物質へ照射されると、物質内で散乱されるため、実際の吸収線量は、理論的な吸収線量よりも大きくなる。このような効果をビルドアップという。

品質管理, 品質保証, 品質マネジメント

国際標準化機構（International Organization for Standardization）の規格（ISO 9000:2005）では、以下のように定義されている。

- ・ 品質管理（Quality Control）：品質要求事項を満たすことに焦点を合わせた品質マネジメントの一部。
- ・ 品質保証（Quality Assurance）：品質要求事項が満たされるという確信を与えることに焦点を合わせた品質マネジメントの一部。
- ・ 品質マネジメント（Quality Management）：品質に関して組織を指揮し、管理するための調整された活動。品質に関する指揮および管理には、通常、品質方針および品質目標の設定、品質計画、品質管理、品質保証および品質改善が含まれる。

フールプルーフ

工業製品や生産設備、ソフトウェアなどで、利用者が誤った操作をしても危険に晒されることがないように、設計の段階で安全対策を施しておくこと。基本的には、「人間は間違いをおかす」ことが前提となっており、多くの事故がヒューマンエラーから引き起こされている分析に基づく。

フェイルセーフ

設備やシステムの安全設計思想の一つで、想定される事故や誤作動を仮定し、そのことが発生しても、被害を最小限に抑える装置やシステムをあらかじめ組み込んでおくなどの対応策をいう。

不確実性

天然現象には偶然的要素に支配される側面もあり、現象の理解の程度や定義のあいまいさなどから、これに基づくモデルやデータには必然的に結果を確実に予測できない面があり、不確実性を有する。放射性廃棄物処分の性能評価では取り扱う現象が多岐にわたり、空間的規模や時間的領域が広範にわたるため、必要とされる精度のレベルも個々の解析に応じて異なると考えられ、不確実性についても十分考慮しておく必要がある。

普通ポルトランドセメント

建築・土木構造物などに最もよく使用されているセメントであり、珪酸三カルシウム、珪酸二カ

ルシウム、カルシウムアルミネート、カルシウムアルミノフェライト、硫酸カルシウムなどを成分に含む。普通ポルトランドセメントの浸出液の pH は約 12.5～13.0 と高アルカリ性を呈することから、ニアフィールドのバリア機能に有意な影響を及ぼす可能性がある。そのため、低アルカリ性セメントの開発とその適用性が検討されている。

物理探査

人工的に発生させた地震波や電磁波などを利用して、空中、地上、水上などから地下の状況を間接的に調査することをいう。地質構造の状況、鉱床の有無などを調査することができる。

プラグ

坑道の間中部や端部をふさぐために設置される構造物。埋め戻し材や緩衝材の移動や流出を防いだり、水の通りやすい経路を分断したり、不用意な人間侵入を防ぐ目的で設置される。

ブロック方式

緩衝材の施工方法の一つで、ブロック型の圧縮成形体を製作し、地下施設で成形体を組み上げて緩衝材を施工する方法をいう。

文献調査

文献そのほかの資料（記録文書、学術論文、空中写真、地質図など）から得られたデータに基づく分析・解析作業をいう。

併置

本報告書では、高レベル放射性廃棄物処分場と地層処分低レベル放射性廃棄物処分場を同じ場所に設置することを併置という。

ペレット充填方式

緩衝材の施工方法の一つで、球状、粒状に成形した緩衝材を施工空間に充填し、緩衝材を施工する方法をいう。

ベントナイト

モンモリロナイトという鉱物を主成分とする粘土の一種で、緩衝材の主要材料。ベントナイトは、その層間に入っている交換性の陽イオンの違いによって二つのタイプに分類される。ナトリウムイオンが入っているものをナトリウム型ベントナイト（膨潤型）、カルシウムイオンの場合はカルシウム型ベントナイト（非膨潤型）という。カルシウム型ベントナイトは、ナトリウム型ベントナイトに比べ層間結合が比較的強いいため水が浸潤しにくい膨潤性能は劣る。

膨潤圧

緩衝材に含まれるベントナイトは、その主成分であるモンモリロナイトの層間に水を取り込むことにより膨潤する。このモンモリロナイトの層状体が外界に対して働かせる圧力が膨潤圧である。

法定要件

「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」および同施行規則に示された概要調査地区等（概要調査地区、精密調査地区、最終処分施設建設地）の選定要件のことをいう。

ボーリング調査

地下の地質状況などを調べるため、地中に直径数 cm～十数 cm 程度の円筒状の孔を掘って行う調査をいう。この際に採取した岩石試料の分析や孔を用いた各種の計測などによって、地下の岩石、地下水などに関するさまざまな情報を取得することができる。高レベル放射性廃棄物の地層処分では、ボーリング調査を行う深さは、数 100m～千 m 程度となる。

母岩

処分場が設置される地層のことをいう。

補完的安全指標

地層処分システムの安全を評価するための尺度を安全指標という。指標には、人間への放射線影響を直接示すリスクや線量などがあるが、生物圏モデルでなされている仮定に依存せずに、線量やリスクに基づく評価を補完するための指標を補完的安全指標という。例えば、地層処分システムの隔離能力や放射性廃棄物の潜在的な危険性を示す尺度として、放射性核種の濃度や移動量（フラックス）、時間、放射能毒性指数などが挙げられる。

【マ行】

未固結堆積物

礫、砂、泥などの堆積物が固結していない状態にあるものをいう。

【ヤ行】

余裕深度処分

一般的であると考えられる地下利用に対して十分な余裕を持った深度（例えば、地表から 50～100m 程度）に埋設する処分をいう。

【ラ行】

レファレンスケース

「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—（JNC, 1999）」や「TRU 廃棄物処分技術検討書—第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—（電事連・JNC, 2005）」では、処分場の閉鎖後に地下水によって放射性物質が人間の生活環境にもたらされる場合の影響をさまざまな条件で数多くのケースを評価している。これらケースのうち基本的なケースをレファレンスケースという。

レファレンス処分場概念

複数あるそれぞれの概要調査地区に対して成立性が高いと考えられる処分場概念をレファレンス処分場概念と呼ぶ。レファレンス処分場概念には、この段階までに整備されてきた人工バリア材料、

溶接技術や人工バリアの搬送定置技術などから、サイトの地質環境特性や技術の信頼性などを考慮して絞り込んだ成立性が高い技術が含まれる。レファレンス処分場概念を設定することにより、処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）以降の技術開発や実証試験を効率的に進めることができる。

【A～Z 行】

FEP

地層処分システムの各要素の特性 (Feature)、特性に影響を与える事象 (Event)、地層処分システムの時間的変遷の過程 (Process) の略称。

GIS

GIS (Geographic Information System, 地理情報システム) とは、「地理的位置を手がかりに、位置に関する情報を持ったデータ (空間データ) を総合的に管理・加工し、視覚的に表示し、高度な分析や迅速な判断を可能にする技術」。例えば、位置情報を使ってすべての情報をまとめ、地図や航空写真の上にその情報を重ね合わせることで、さまざまな情報の関連性が一目でわかるようになり、これまでには想像できなかった新しい情報が得られるとともに、空間的な関係を視覚的にわかりやすい形で表現できる。

ITC (School of Underground Waste Storage and Disposal)

放射性廃棄物の処分に必要な人材を養成するため、2003年、スイスに設立された非営利の国際教育研修機関。放射性廃棄物の地層処分計画を進める16ヶ国において政策決定、事業実施、安全規制、研究開発などを担う61の組織を法人会員とする。ITCはこれまでに欧州をはじめ、米国、日本などにおいて年数回、科学技術、社会科学など多様な分野で1～2週間程度の研修コースを年数回開催してきており、これまでの受講者は43カ国から600名を超えている(2010年3月末現在)。

ITC School: <http://www.itc-school.org/>

MAG (Metal Active Gas) 溶接

オーバーパック溶接技術オプションの一つ。アーク溶接技術の一種で、シールドガス(溶接部が大気と触れるのを防ぐ)に不活性ガスと炭酸ガスを混合したものを使用して溶接する方法をいう。

MOX 燃料

MOX 燃料 (Mixed Oxide Fuel の略) のこと。ウランとプルトニウムを混合させて作られる燃料をいう。

PEM 方式

高レベル放射性廃棄物の人工バリア施工方法の一つで、地上施設であらかじめ廃棄体を含むオーバーパック、緩衝材を専用の容器内に格納し、一体化したものを地下施設に定置する方法をいう。

PEM は、Prefabricated Engineered barrier system Module の略語。

THMC (Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical)

熱-水-応力-化学連成挙動の略。廃棄体定置後のニアフィールドにおいて、熱、水理、応力、化学のプロセスが相互に作用して起こる挙動をいう。ニアフィールドでは、ガラス固化体からの発熱に伴う温度変化、周辺岩盤から緩衝材への地下水の浸入、緩衝材の膨潤に伴う応力、地下水と緩衝材の構成鉱物などとの化学反応が相互に作用することが想定され、これを同時に取り扱うために熱-水-応力-化学連成挙動のモデル化が行われる。

TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接

オーバーパック溶接技術オプションの一つ。アーク溶接技術の一種で、タングステン電極からアークを出し、不活性ガス中で溶接する方法をいう。

TRU 廃棄物

再処理工場や MOX 燃料工場の操業および解体に伴って発生する低レベル放射性廃棄物。ウランより原子番号が大きい放射性核種 (TRU 核種: Transuranium nuclides) を含む廃棄物であることから TRU 廃棄物と呼ばれる。TRU 廃棄物は、使用済燃料の燃料被覆管 (ハル) や使用済燃料集合体の末端部分 (エンドピース)、放射性ヨウ素を除去するために使用した使用済銀吸着材 (廃銀吸着材)、使用済燃料の溶解などに用いられたプロセス濃縮廃液、施設内で使用されるゴム手袋 (難燃性廃棄物)、工具、金属配管 (不燃性廃棄物) などの雑固体廃棄物など、施設の操業に伴い発生する廃棄物 (操業廃棄物) や、施設の解体に伴い発生する配管や設備などの廃棄物 (解体廃棄物) などさまざまなものを含む廃棄物である。この TRU 廃棄物の中で「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」により定められた「物または定められた放射性物質についての放射能濃度を超えるもの」を含む廃棄物が、地層処分対象となる「地層処分低レベル放射性廃棄物」となる。

what if

極端なあるいは物理的にはありえないようなシナリオをあえて想定して解析を行うこと。What-if 解析を行う目的は、そのようなことが起きたとしても影響が小さいことを示すことによって、さまざまな不確実性を内包するシステムに対して強力に頑健性を論証することである。一般にシナリオに伴う不確実性の評価は容易ではないが、想定されるシステムの変遷を包絡するようにシナリオが設定されていることを確かなものとするという観点で、極端な (あるいは物理的にはありえないような) ”what-if”シナリオを含めるといった対応を行うことが可能であることが「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成 17 年取りまとめ— (JNC, 2005)」でも示されている。

参考文献

- 第四紀火山カタログ委員会 (1999) : 日本の第四紀火山カタログ v.1.0 (CD-ROM 版), 日本火山学会.
- 電事連 (電気事業連合会)・JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005) : TRU 廃棄物処分技術検討書—第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02.
- 土木学会編 (1996) : 第四版 土木工学ハンドブック, 技報堂出版.
- 遠藤邦彦, 奥村晃史 (2010) : 第四紀の新たな定義: その経緯と意義についての解説, 第四紀研究, 第49巻, 第2号, pp.69-77.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (1997) : 国際原子力機関 放射性廃棄物管理用語集 (日本語版), RWMC-89-P-12.
- 原子力委員会 (2006) : 長半減期低発熱放射性廃棄物の地層処分の基本的考え方—高レベル放射性廃棄物との併置処分等の技術的成立性—, 原子力委員長半減期低発熱放射性廃棄物処分技術検討会.
- Grupa, J. B., Dodd, D. H., Hoorelbeke, J. M., Mouroux, B., Potier, J. M., Ziegenhagen, J., Santiago, J. L., Alonso, J., Fernandez, J. J., Zuidema, P., Crossland, I. G., McKirdy, B., Vrijen, J., Vira, J., Volckaert, G., Papp, T. and Svemar, C. (2000): Concerted action on the retrievability of long-lived radioactive waste in deep underground repositories, Final Report, Nuclear Science and Technology, EUR19145EN, ISBN92-828-9466-5.
- IAEA (2006) : Geological Disposal of Radioactive Waste, Safety Requirements, IAEA Safety Standard Series No. WS-R-4, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- 岩波書店 (2000) : 岩波 理化学辞典 第5版.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—, 総論レポート, JNC TN1400 99-020.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—, 分冊3 安全評価手法の開発, JNC TN1400 2005-016.
- 経済産業省 (2008) : TRU 廃棄物の地層処分について考えてみませんか.
- 経済産業省 (2008) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分について考えてみませんか.
- 共同作業チーム (2000) : TRU 廃棄物処分概念検討書, JNC TY1400 2000-001, TRU TR-2000-01.
- 日本規格協会 (2006) : JIS Q9000:2006 品質マネジメントシステム—基本及び用語.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2004) : 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性—「処分場の概要」の説明資料—, NUMO-TR-04-01.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2004) : 概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠—「概要調査地区選定上の考慮事項」の説明資料—, NUMO-TR-04-02.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2009) : 公募関係資料 地域共生への取り組み～地域と事業を結ぶために～ 分冊—3.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2009) : 公募関係資料 放射性廃棄物の地層処分事業について～公募のご案内～.
- 資源エネルギー庁・JAEA (日本原子力研究開発機構) (2010) : 高レベル放射性廃棄物及び TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画.

総合資源エネルギー調査会 (2006) : 放射性廃棄物小委員会 報告書,総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会放射性廃棄物小委員会.

総合資源エネルギー調査会 (2008) : 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会.

原子力発電環境整備機構

(略称：原環機構)

Nuclear Waste Management Organization of Japan(NUMO)