

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—

概要版

2012年9月
原子力発電環境整備機構

2012年9月 初版発行

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) 2012

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—

概要版

2012年9月
原子力発電環境整備機構

まえがき

原子力発電環境整備機構（以下、NUMO という）は、2000 年の設立以降、わが国における安全な地層処分の実現に向けた技術の整備を進めてきました。それらを「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－」（以下、NUMO2010 年技術レポートという）として取りまとめ、2011 年 9 月に公表しました。NUMO2010 年技術レポートには、NUMO が設立された 2000 年以降に整備された技術を中心として、地層処分にかかわる技術を広範に記載しており、800 ページを超す大冊となっています。そのため報告書全体を通して読むには相当な労力を要する結果となっています。そこで、NUMO2010 年技術レポートに記載された主要な内容をコンパクトにまとめた概要版（以下、本報告書という）を作成し、全体を通して読んでいただけるようにしました。

目 次

第1章 はじめに	1
1.1 NUMO2010年技術レポート作成の背景と目的	1
1.2 本報告書の構成	1
第2章 わが国における地層処分事業の背景	4
2.1 地層処分の対象とする放射性廃棄物	4
2.2 わが国の地層処分事業の特徴	5
2.3 諸外国の取り組み状況	8
第3章 安全確保構想	10
3.1 安全確保の目標	10
3.2 安全確保に向けたNUMOの方針	11
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	17
第4章 地層処分事業の段階的な推進	22
4.1 基本的考え方	22
4.2 方針の具体的展開（ロードマップ）	23
4.3 事業中の各段階における実施事項	28
第5章 地質環境の調査・評価技術	35
5.1 わが国の地質環境の特徴と評価の考え方	35
5.2 文献調査および概要調査の考え方	38
5.3 文献調査および概要調査の進め方	41
5.4 調査・評価を支える技術の進展	44
5.5 結論	47
第6章 処分場の設計、建設・操業・閉鎖技術	48
6.1 地層処分事業における設計の基本方針	48
6.2 地層処分の安全機能と技術要件の設定	49
6.3 処分場の設計の考え方の整備	52
6.4 処分場の建設・操業・閉鎖	58
6.5 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	62
6.6 工学的対策を支える技術の整備	64
6.7 結論	67
第7章 地層処分システムの長期安全性評価技術	69
7.1 安全評価の基本的な考え方	69
7.2 安全評価の進め方	71
7.3 安全評価を支える技術の整備	75
7.4 結論	80

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.....	81
8.1 公募および文献調査の開始から精密調査地区選定までの流れ.....	82
8.2 概要調査地区選定段階（文献調査の段階）.....	84
8.3 精密調査地区選定段階（概要調査の段階）.....	87
8.4 結論.....	90
第9章 おわりに.....	92

用語集

参考文献

付録

第1章 はじめに

1.1 NUMO2010年技術レポート作成の背景と目的

1998年に原子力委員会は「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）を高レベル放射性廃棄物処分懇談会の報告書として公表しました。また，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，1976年からの20年以上にわたる研究開発成果を総括した「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）を公表しました。これらに基づき，2000年6月に「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）が制定されました。

この最終処分法に基づいて，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ました。その後，2007年の同法改正により，長半減期低発熱放射性廃棄物（以下，TRU廃棄物という）の一部が地層処分の対象（以下，地層処分低レベル放射性廃棄物という）に加えられたことから，NUMOはTRU廃棄物を事業の対象に加えました。

NUMOは，2000年の設立以降，安全な地層処分の実現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ましたが，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ません。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ます。

こ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」との提言がなされました（原子力委員会，2008）。

この提言を受けて，NUMO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—」（以下，NUMO2010年技術レポートという）を取りまとめ，2011年9月に公表しました（NUMO，2011e）。本報告書は，NUMO2010年技術レポートの概要を紹介するものです。

1.2 本報告書の構成

本報告書は，元となるNUMO2010年技術レポートと同じ章構成とし，第2章から第9章にそれぞれの技術内容を記述しています。第2章～第9章は，NUMOが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した安全確保構想を示した「事業編」と，第2次取りまとめ以降の技術開発の進展と，事業の実施に当たっての技術的な準備状況を示した「技術編」で構成します（表1-1）。

「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」で構成します。

第2章では，わが国の地層処分事業の背景について解説します。

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ます。さらに、段階的に事業を実施し、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します。

第4章では、第3章で示した実施方策を100年程度にわたる事業の中で具体的に展開する方法として、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します。

「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」で構成します。

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の整備状況を具体的な事例とともに示します。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記述します。第8章では、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します。

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ことから（NUMO, 2011a）、本報告書では高レベル放射性廃棄物を中心に概要を記述することと決めました。

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る場合があります。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ます。

表 1-1 本報告書の構成

	章	タイトル	主な内容
	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
	3	安全確保構想	
	4	地層処分事業の段階的な推進	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取り組み
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 1-2 に記します。

表 1-2 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)	JAEA (JNC)
	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
	一般財団法人 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
	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)	IAEA
	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
	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
法律など	核燃料廃棄物管理機関 (カナダ) (Nuclear Waste Management Organization)	NWMO
	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
報告書	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
	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)	第2次取りまとめ
	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, 2005b)	第2次 TRU レポート

第2章 わが国における地層処分事業の背景

本章では、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、地層処分対象とする放射性廃棄物の基礎情報、放射性廃棄物の埋設処分の方法、わが国の地層処分事業の特徴、諸外国の取り組み状況について記述します。

2.1 地層処分対象とする放射性廃棄物

地層処分は人間の生活環境から十分離れた安定な地層中に、適切な人工バリアを構築することにより長期的な安全性を確保する処分方法です。わが国では「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、2000年6月に、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最終処分法が制定されました。その後、2007年にTRU廃棄物の一部も地層処分の対象（地層処分低レベル放射性廃棄物）とする同法改正が行われました。以下に最終処分法で地層処分対象としている放射性廃棄物の概要を示します。

2.1.1 高レベル放射性廃棄物

再処理工程では、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分離、抽出され、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）が残ります。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す（図 2-1 左図参照）。

2.1.2 地層処分低レベル放射性廃棄物

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は、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（TRU廃棄物）といます。

NUMOでは、このTRU廃棄物のうち地層処分の対象となるものを地層処分低レベル放射性廃棄物と定義しています。図 2-1 右図に地層処分低レベル放射性廃棄物形態のイメージを、図 2-2 には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します。

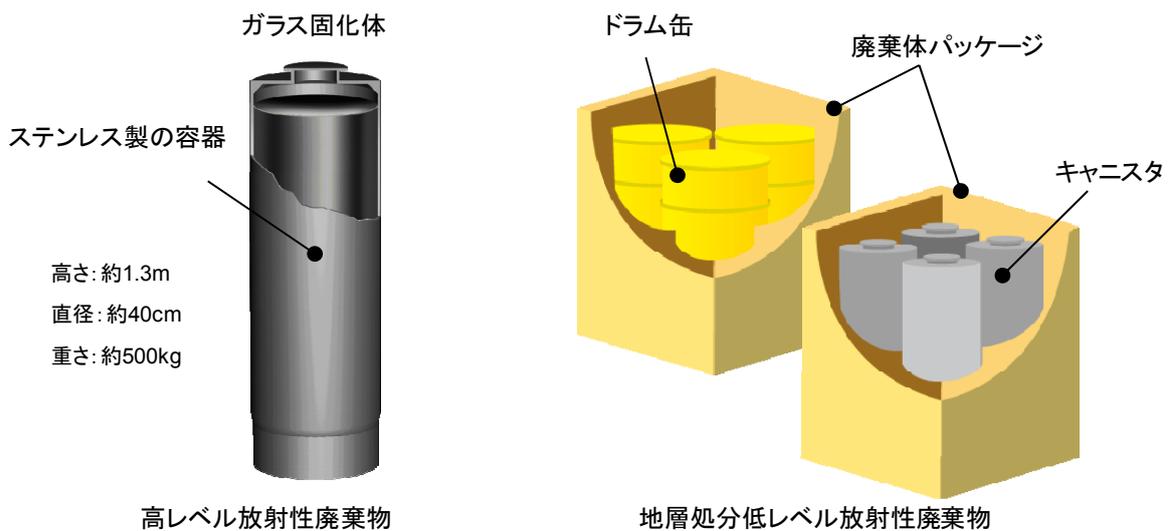


図 2-1 高レベル放射性廃棄物および地層処分低レベル放射性廃棄物形態のイメージ

	廃銀吸着材	エンドピース ハル	濃縮廃液など	難燃性廃棄物
概要	<p>放射性的ヨウ素を除去する吸着材料</p>	<p>細断・圧縮</p>	<p>硝酸系廃液 モルタルなど ペレット 乾燥・ペレット化</p>	<p>ゴム手袋 (焼却・圧縮) 不燃性廃棄物 工具 金属配管</p>
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 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 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「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)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いくつかの変化がありました。それらを踏まえ、わが国の地層処分事業の特徴について記述します。

2.2.1 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ます(図 2-3)。

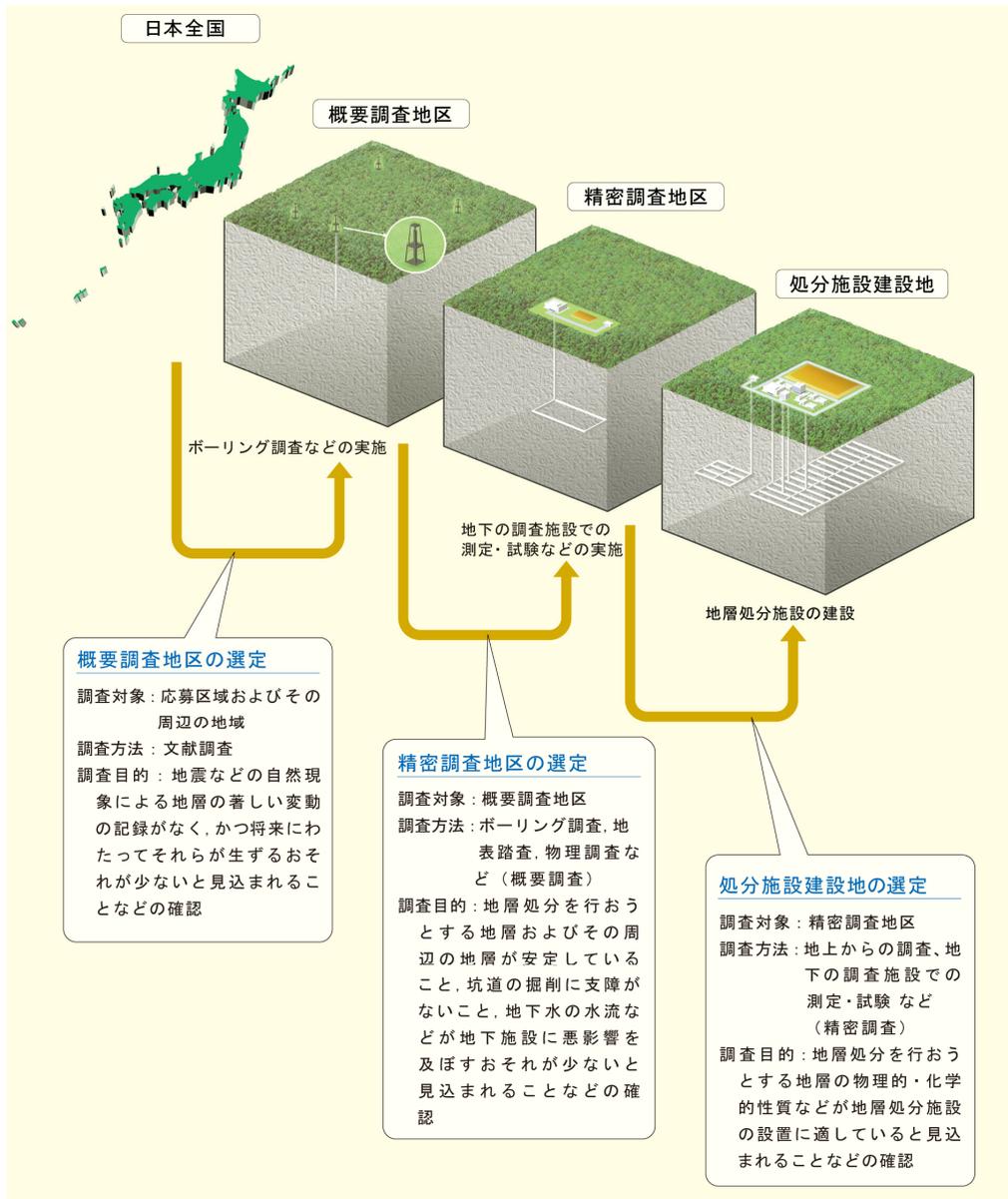


図 2-3 三段階のサイト選定過程
 (出典: NUMO, 2009b)

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事業を受け入れていただくことが何より重要と考えています。そのため, 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, 2002 年から全国の市町村を対象に, 「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」の公募を行っており, 応募獲得に向けてさまざまな取り組みを行ってきました。

なお, NUMO の事業の対象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方を対象とした公募を行っています

(NUMO, 2009a～d)。市町村からの応募に当たっては、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す。

一方、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、国が市町村に対して文献調査の実施を申し入れる方法も取り入れられました。

2.2.2 処分場の規模と人工バリアの構成

高レベル放射性廃棄物処分場は、最終処分計画(経済産業省, 2008)に基づき、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 本以上を処分することができる規模としています。ガラス固化体の発熱量は時間の経過とともに減衰していきますが、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、ガラス固化体は適切な離隔を確保して処分します。処分場のおおよその広がりとしては5～6km²を想定していますが、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ります。

また、地層処分低レベル放射性廃棄物処分場は、最終処分計画に基づき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約 19,000m³以上を処分することができる規模としています。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べると廃棄物の形態・性状が多岐にわたります。また、発熱性が低い廃棄物を多く含むため、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を想定しています。

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 2-4 に示します¹。

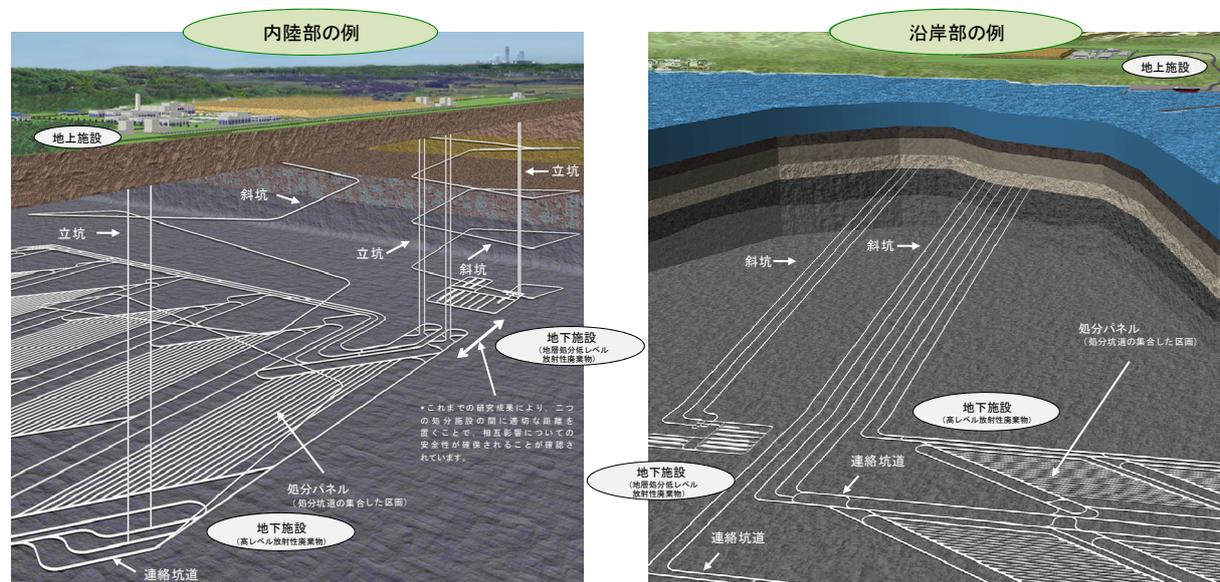


図 2-4 処分場の地下施設の例
(出典：NUMO, 2009a)

¹ 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いますが。

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的な人工バリア構成をそれぞれ図 2-5 と図 2-6 に示します。高レベル放射性廃棄物の処分では、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します。地層処分低レベル放射性廃棄物の処分では、廃棄物の特性によって四つのグループに分け（図 2-2）、それぞれに対してサイトに応じた適切な人工バリアを適用します。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、充填材です。

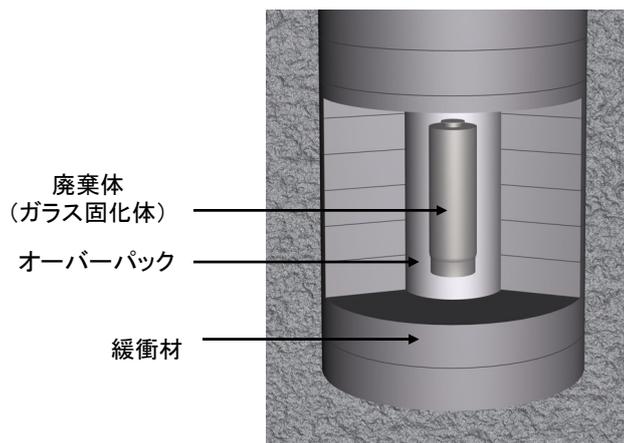


図 2-5 高レベル放射性廃棄物処分の基本的な人工バリア構成

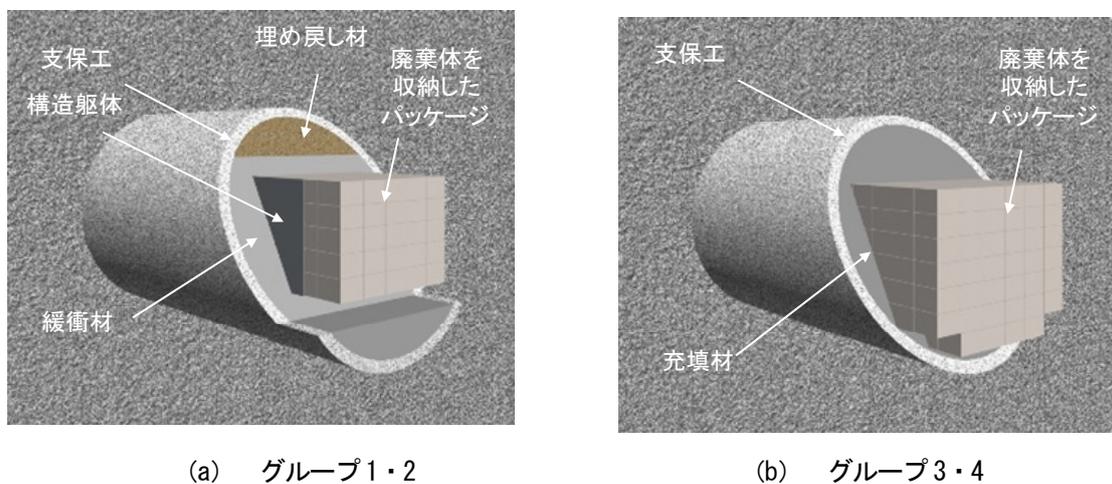


図 2-6 地層処分低レベル放射性廃棄物処分の基本的な人工バリア構成

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、事業はさまざまな段階にあります。

2012年7月時点において、処分場のサイト選定が完了しているのはフィンランド、スウェーデンです。フィンランドでは2001年にオルキオトがサイトとして選定され、建設許可申請に向けた準備が進められています。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・建設許可申請を行いました。

また、フランスでは処分場の候補地がビュール地下研究所近傍の 30 km² 圏内に絞られています。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始めています。主要諸外国における地層処分への取り組みの状況を表 2-1 に示します。

表 2-1 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自治体でフィー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年に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250 km ² 圏から30 km 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。

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・方策について記述します（図 3-1 参照）。

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す。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す。

3.1.2 閉鎖後長期の安全確保

閉鎖後長期の安全を確保するために、廃棄物を地下深部に「閉じ込め²」、人間の生活環境から「隔離³」することを基本概念として地層処分システムを構築します。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安全を確保します。

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います。その妥当性が原子力委員会（原子力委員会，2000）によって確認されており、また、この考え方は原子力安全委員会による安全確保原則（原子力安全委員会，2000）にも沿っています。

- 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）。

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します。安全確保のための対策を適切に実施するために、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、適切な対策を講じます。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いますが、できる限り、周辺環境へのさまざまな影響を回避・低減します。

² 「閉じ込め」とは、「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）です。

³ 「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を困難とすること」（人の接近の抑制）です。

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第2章で述べたわが国固有の条件を十分に考慮して事業を進める必要があります。

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、不均質な地下の深地層を活用するため、一定の不確実性を伴います。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ります。また、施設が長期にわたり安全に機能することを直接実証することができないことから、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す。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します。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が変化することもあり得ます。

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す。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ます。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、地域住民や国民の理解を段階的に深めていくことにつながるものと考えます。

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します。

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、取得した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としています。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す。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す。

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だと考えます。

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します。

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がいかに地域住民や国民の安心感につながり、事業を受け入れることができるかということが、事業を実現させるための重要な要件です。そのため、安全性への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す。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ります。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ります。

以上により、NUMOは、

「安全性への信頼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します。

図 3-1 には NUMO の設定した安全確保の目標、安全確保に向けた方針、実施方策の関係を示します。以下の節では各方針、実施方策について記述します。

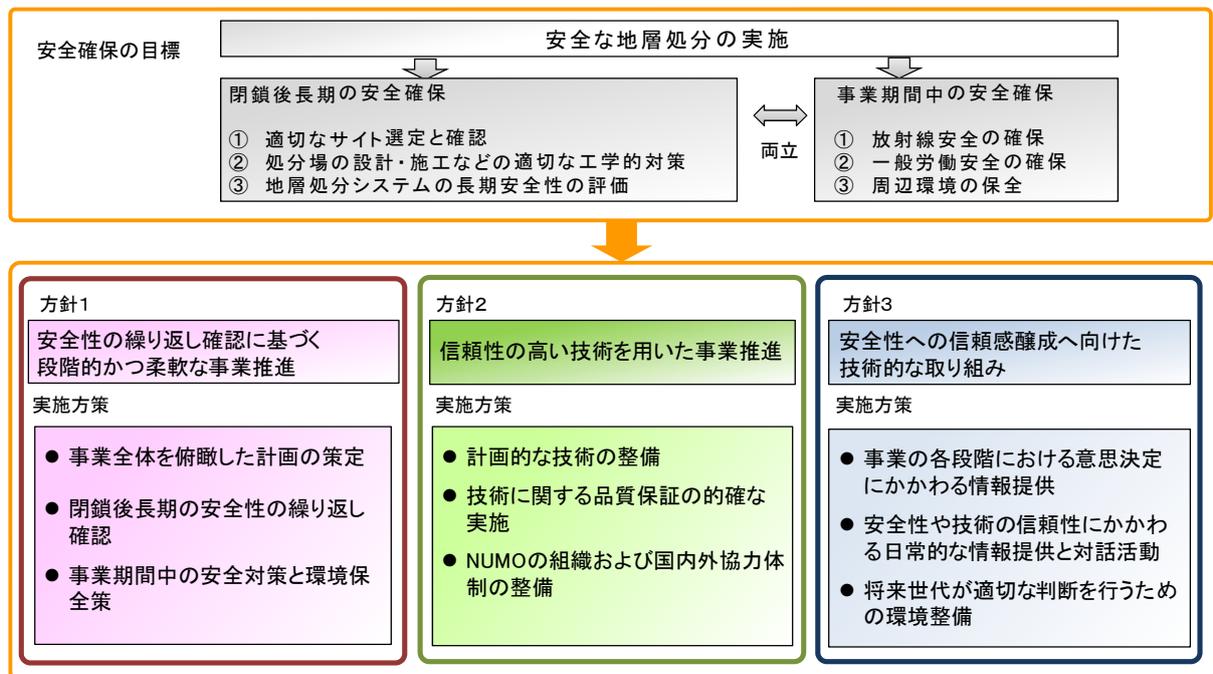


図 3-1 安全確保構想の全体構成

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」

地層処分事業では、閉鎖後長期の安全確保および事業期間中の安全確保という二つの目標を達成するために、事業全体を俯瞰した事業推進計画を策定し、この計画に従って事業を推進します。具体的には、以下の三つを方針1の具体的実施方策とします。

- 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

まず、「事業全体を俯瞰した計画の策定」について述べます。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す。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ます。

NUMOは、事業全体を俯瞰した計画を提示するために、「安全確保ロードマップ」を作成しました。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

項を記述したものです。

次に「閉鎖後長期の安全性の繰り返し確認」について述べます。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）を緊密に連携させます。そして、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、その信頼性を向上させていきます。

近年では、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ます。図 3-2 に NUMO におけるセーフティケースの構成要素と役割を示します。セーフティケースは、地層処分システムが三段階のサイト選定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徐々に更新・精緻化されます。

セーフティケースにおいて不確実性の取り扱いは重要な課題です。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、反映する情報に含まれる不確実性を把握し、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します。

次に、「事業期間中の安全対策と環境保全策」について述べます。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講じます。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の両者が確実に確保できるように対策を講じていきます。

サイト選定段階と建設段階では、放射性廃棄物のサイトへの持ち込みはなく、主として一般労働安全を確保するための対策を実施します。そのために必要な地質環境情報は、サイト選定時の調査、および処分施設建設時に行われる調査により取得します。

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します。この対策では、特に、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、その時点で利用可能な信頼性の高い技術を用いて設備の設計、建設を行います。

NUMOは、持続可能な社会形成および地域共生の観点から、将来世代に対して良好な環境を引き継いでいきます。その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きます。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」と総称します。

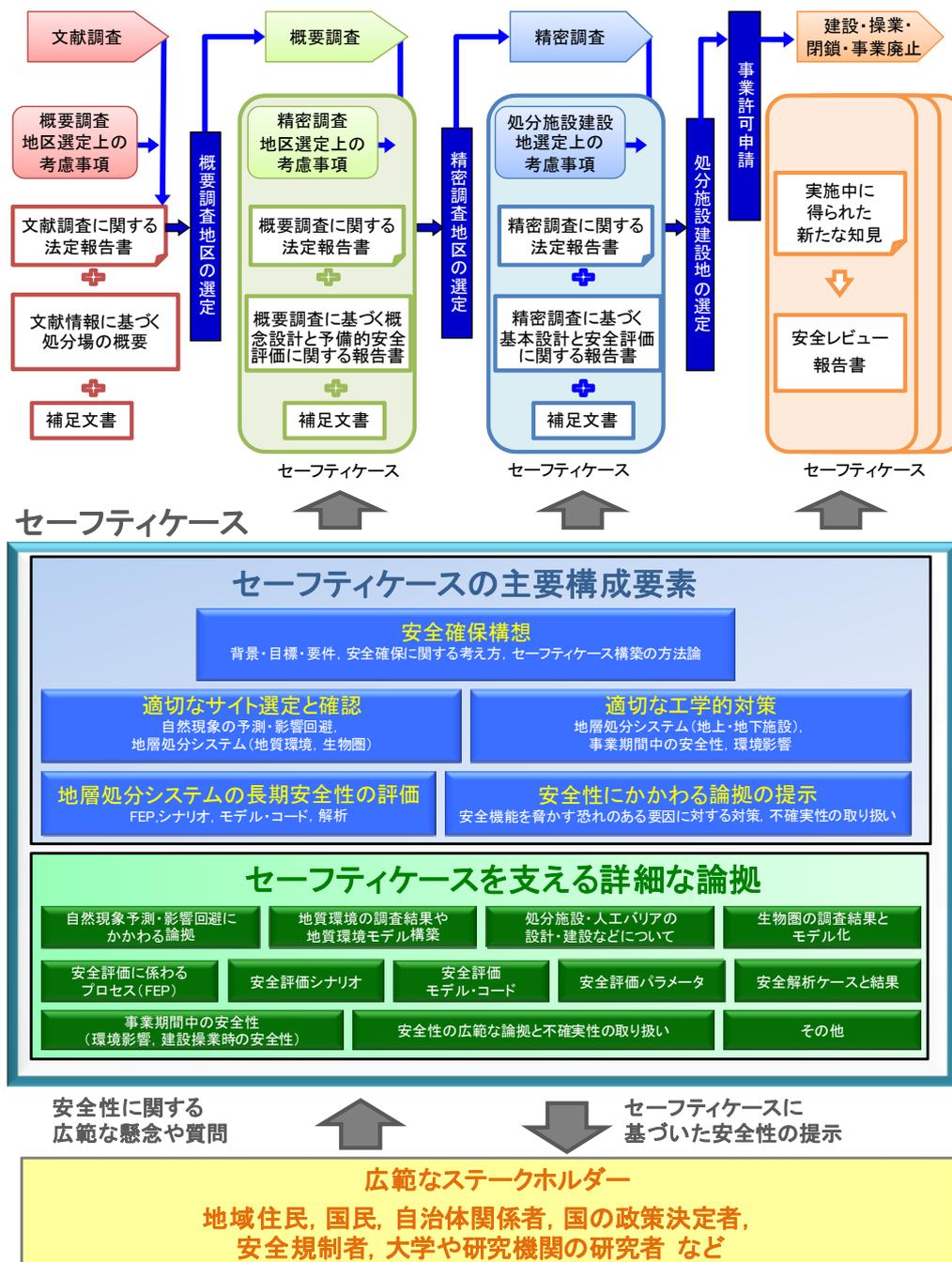


図 3-2 セーフティケースの構成要素と役割

3.2.3 方針 2 「信頼性の高い技術を用いた事業推進」

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します。信頼性の高い技術⁴とは、一般産業分野や原子力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證できるものです。

地層処分事業で用いる技術の多くは、他分野で使用実績があるものが利用可能ですが、地層処分

⁴ 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。

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ります。そのため、NUMO は計画的に技術の整備を進めてきています。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の構築を進めています。

以上のように、「方針2」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ます。

- 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

まず、「計画的な技術の整備」について述べます。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ることとされています。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います。NUMO では、この方針に基づいて技術開発を実施してきました。

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、地層処分基盤研究開発調整会議（以下、調整会議という）という枠組みが国により構築されています（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・確認を実施してきました（NUMO，2010）。

図 3-3 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す。NUMO は、各マイルストーンを達成することができるよう、計画的に技術の整備を行っています。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っていきます。

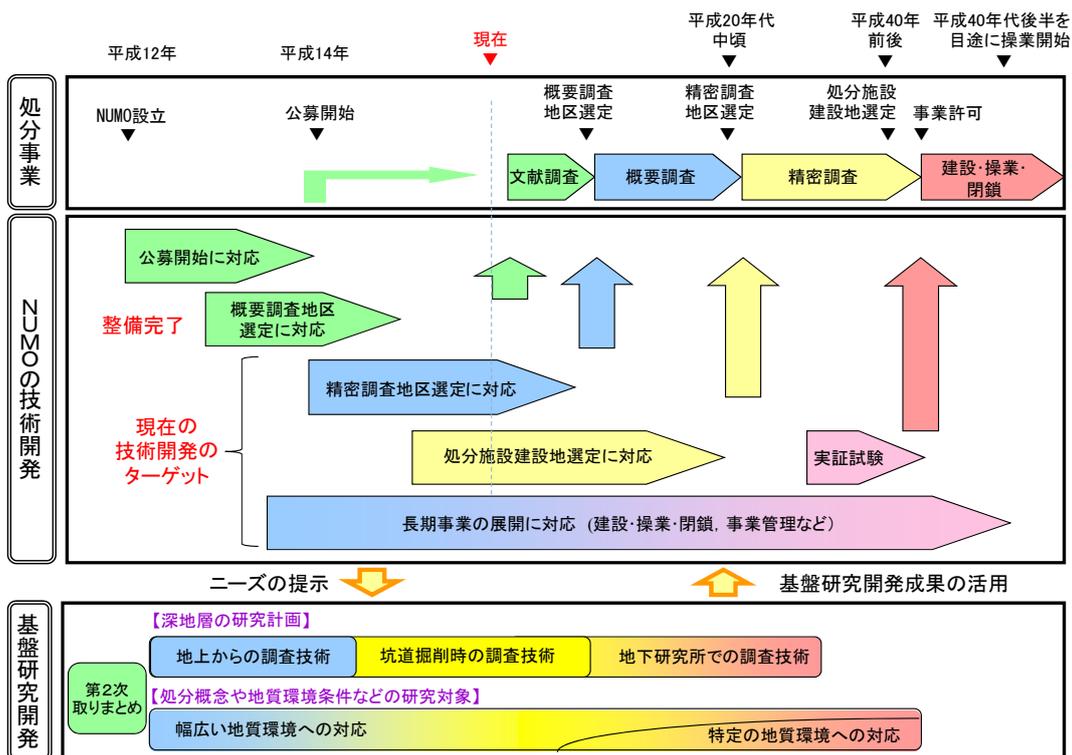


図 3-3 技術開発スケジュールと基盤研究開発との関連

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⁵による確認が有効な手段です。廃棄体の遠隔定置技術などの地層処分に固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ます。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、地層処分事業に固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ます。

次に「技術に関する品質保証の的確な実施」について述べます。NUMOではISO9001:2000に準じて、品質マネジメントシステムを構築し、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）に対して運用しています。この品質マネジメントシステムは、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ものです。

次に「NUMOの組織および国内外協力体制の整備」について述べます。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・育成します。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ります。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す。そのため、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考慮した上で、将来の技術業務の実施体制を検討しています。

⁵ 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す。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みます。

また、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、一部の専門的な知見については国内の関係機関が保有することとし、適切な役割分担のもとに事業を進めます。

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」

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す。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きます。

ここでは、「安全性への信頼感醸成へ向けた技術的な取り組み」に関する方策を三つに分けて説明します。

- 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

まず、「事業の各段階における意思決定にかかわる情報提供」について述べます。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ます。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、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、理解を求めていきます。

次に「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」について述べます。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、事業の各段階における意思決定を円滑に進める上で不可欠であり、特に地域住民や関係する自治体に対し、日ごろからの的確でわかりやすい情報の提供と対話活動を進めていきます。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す。また、そのような活動結果を社会科学的手法で分析し、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います。

次に「将来世代が適切な判断を行うための環境整備」について述べます。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きます。

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す。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います。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、安全確保上必要な対策を講じます。

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ります。これらに適切に対応していくためには、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す。

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おり、処分場の閉鎖には、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を伴います。受動的な安全性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ことを意味します。具体的には、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判断することです。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について、どのように考えるのかを明確にする必要があります。

こうした課題について、現在の NUMO の考え方を以下に述べます。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ります。

- ・ 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

地層処分事業の安全性を確保するには、安全性を損なう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するだけにとどまらず、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ります。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します。

閉鎖後長期の安全確保に関しては、三つの安全確保策を的確に実施すること自体が、リスクマネジメント的な考え方をすでに包含しています。一方、事業期間中の安全確保に関しては、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ます。そして、それらの発生頻度や影響度の評価を踏まえ、処分施設に関連する設計の改良や保安管理体制の改善を進めます。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きます。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す。

3.3.2 モニタリング

地層処分事業では、サイト選定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します。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す。また、その情報を地域住民や国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です。しかし、処分場の閉鎖に際しては、モニタリングなどの能動的な管理に依存せず、受動的に安全な状態を実現することが必要です。こうしたところから NUMO としては、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ことを考えています。

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ます（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

これら四つのモニタリングの中でも閉鎖後長期の安全確保に関しては、対象とする時間が非常に長いので、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ません。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）について確認します。つまり、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します（操上ほか、2010）。

具体的な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す。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します。

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、それに対し「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ます。

NUMO 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、閉鎖措置計画が認可されるまでは、廃棄物の回収可能性を維持します。そして、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います。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します（図 3-4）。

図 3-5 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します。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行います。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となります。そのため、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ます。ただし、地層処分事業を完成させるためには確実に閉鎖措置を行う必要があり、閉鎖措置が確実に実施されたことを確認するために必要なモニタリングは実施します。

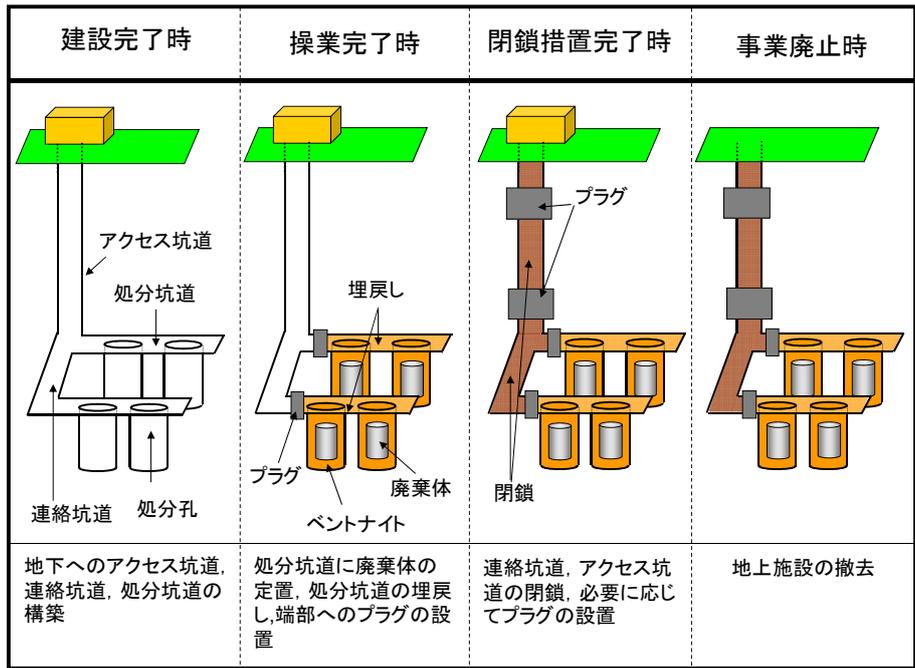


図 3-4 処分場の建設、操業、閉鎖措置の区分概念図

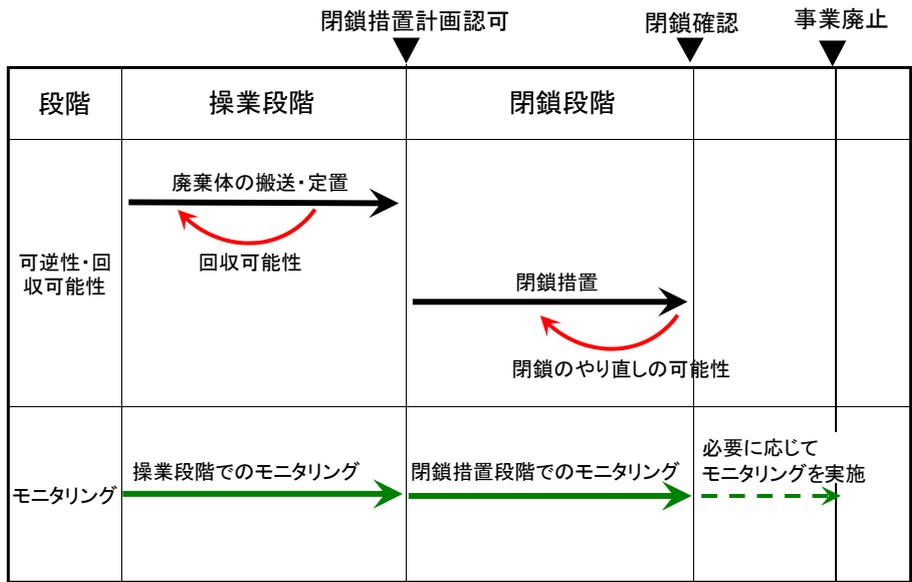


図 3-5 回収可能性に関する NUMO の基本的考え方

3.3.4 処分場の閉鎖

「処分場の閉鎖」とは、事業期間中の能動的な管理に依存した安全確保から、管理に依存しない受動的な安全性 (IAEA, 2006) 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します。

2007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、国の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ます。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ます。

このような地層処分の安全確保の特徴を踏まえ、NUMOは、閉鎖措置を事業の進め方の重要な目標として検討し、必要な事項に対しては現段階から準備するという姿勢で取り組んでいきます。

第4章 地層処分事業の段階的な推進

本章では、第3章で提示した以下の三つの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とともに、事業の各段階における実施事項について記します。

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」

4.1 基本的考え方

4.1.1 地層処分事業の段階的な展開と主要なマイルストーン

図4-1に示すように、NUMOは、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ます（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り、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きます。

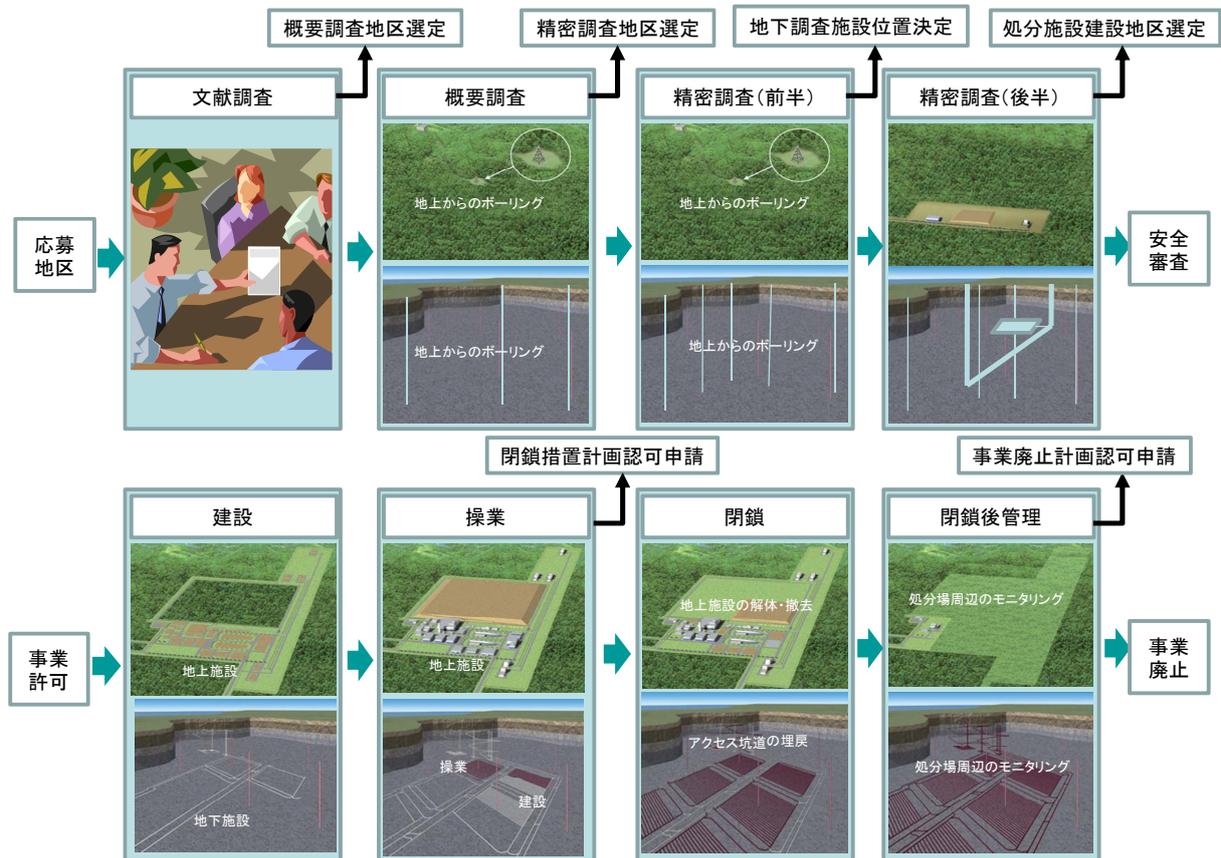


図 4-1 地層処分事業の段階的な展開
(NUMO, 2009a を一部修正)

4.1.2 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、前記のとおり「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に基づき計画を展開します。その際には、作業ベースではそれぞれ「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します。そして、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を行います（図 4-2）。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します。

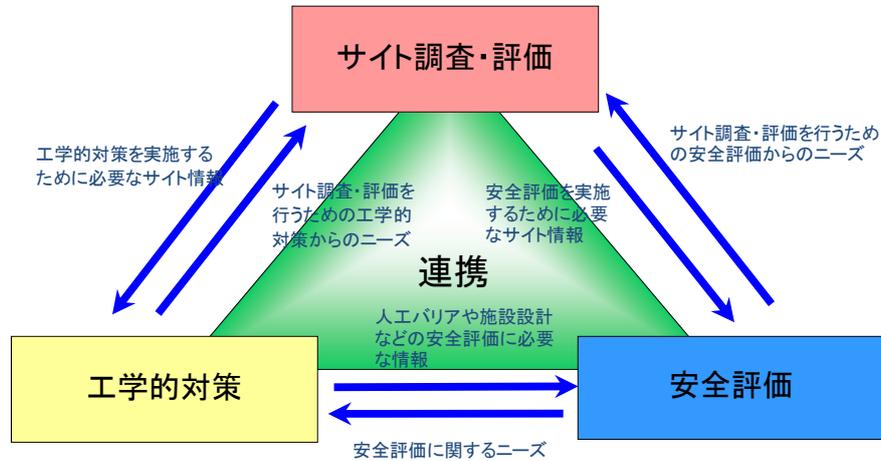


図 4-2 三つの専門分野間の連携

サイト選定段階において次段階の調査地区を選定するに当たっては、その選定理由を明確に説明する必要があります。そのベースになるのが各段階での調査地区選定上の考慮事項であり、NUMO は、それらの考慮事項を、その選定段階の調査を開始する前に作成・公表します。現時点では、「概要調査地区選定上の考慮事項」が作成・公表済みであり、精密調査地区選定上の考慮事項については、国によって定められる要件などを踏まえ、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、公表する予定です。これらに関しては、第 8 章に詳しく記述します。

4.2 方針の具体的展開（ロードマップ）

4.2.1 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」の具体的展開（安全確保ロードマップ）

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以下の各段階に分割し、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示しています。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ます（図 4-3）。

- ・ 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） 地上からの調査
- ・ 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
- ・ 安全審査の段階
- ・ 建設段階
- ・ 操業段階 操業期間中
- ・ 操業段階 操業の終了・閉鎖措置計画認可申請

- ・ 閉鎖段階
- ・ 閉鎖後～事業廃止段階

事業全体の流れとしては、サイト選定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き、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、安全審査に臨みます。安全審査を経て事業許可を得たのち、処分場の建設、操業、閉鎖を実施していきます。

4.2.2 方針2「信頼性の高い技術を用いた事業推進」の具体的展開（技術開発ロードマップ）

技術開発ロードマップでは、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」が今後求められる技術を対象に、その開発スケジュールを示しています（図 4-4）。

「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となる手法や知識、それらに使用するデータベースや研究成果などを含みます。

また、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を集約する方法をはじめ、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を示しており、NUMO はこれを技術開発マネジメントに活用します。

4.2.3 方針3「安全性への信頼醸成へ向けた技術的な取り組み」の具体的展開（信頼醸成ロードマップ）

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す。そのため、技術的な面で信頼醸成に向けて取り組むべき内容を信頼醸成ロードマップとして作成しました（図 4-5）。

信頼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）に基づいて構成しました。

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	操業段階		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		20年間程度	10年間程度			50年間程度	10年間程度										
	20年間程度		10年間程度										50年間程度		10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	操業の実施	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 ・長期安全性の確実な確保 ・事業期間中の安全性の確実な確保	・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繰り返し確認 ・操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	・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 ・安全審査指針への適合性 ・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	閉鎖後期の安全性	適切なサイト選定と確認	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		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		操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) ・精密調査に基づく基本設計と安全評価に関する報告書		・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							

図 4-3 安全確保ロードマップ

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

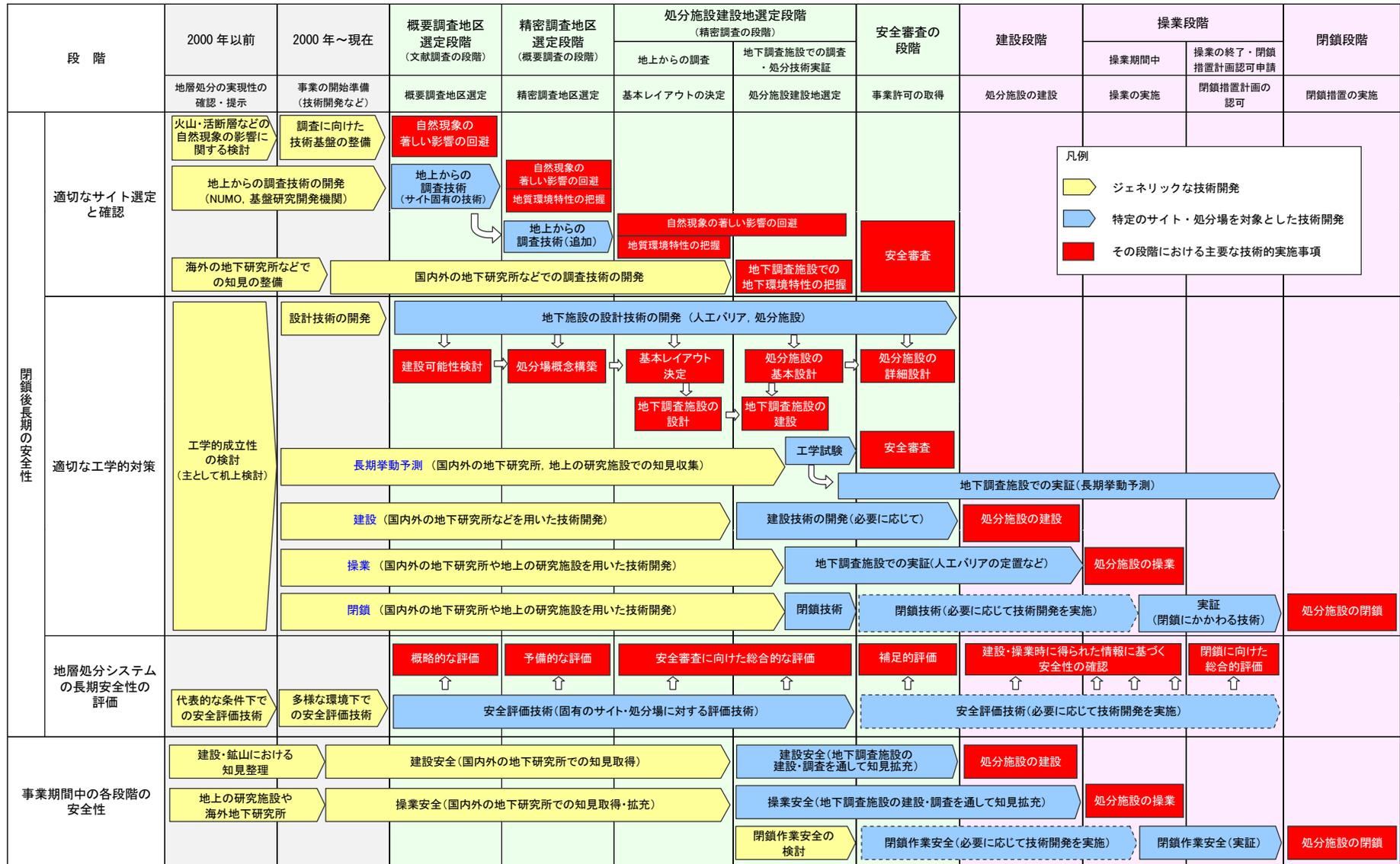


図 4-4 技術開発ロードマップ

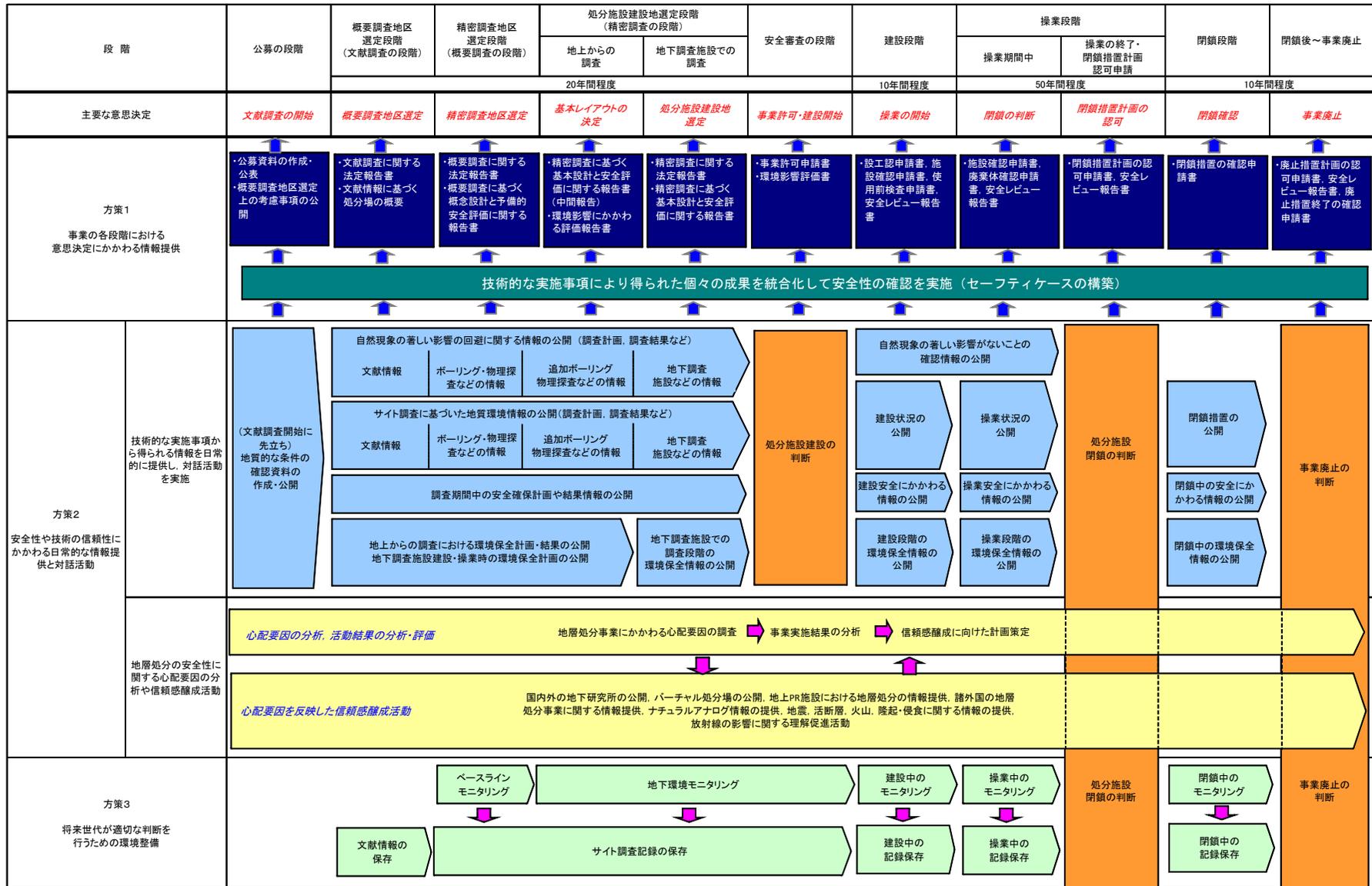


図 4-5 信頼感醸成ロードマップ

4.3 事業中の各段階における実施事項

4.3.1 サイト選定および安全審査の段階

(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

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、文献調査の対象とした地区の中から概要調査地区を選定することです。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（明らかに不適格な地域を避ける）」です。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」、「概要調査地区選定の環境要件への適合性」、「自主基準（概要調査地区選定上の考慮事項（NUMO, 2009b）含む）」があります。また、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相対的評価を必要に応じて行います。

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します。「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、すでに公表しました（NUMO, 2009b）。対象となる区域がこの条件を満足した場合のみ、文献調査を実施します。

文献情報の収集方法としては、データベース検索のほか、関係機関や、一般の方々からの提供を予定しています。収集する文献情報は、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す。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します。

収集した文献情報の分析により、「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ます。そして、それらの影響が明らかに著しいと判断される範囲を除外します。さらに、法定要件に定められている第四紀の未固結堆積物と鉱物資源など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」を作成します。

併せて、広域的な地質環境モデルを構築し、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します。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います。

これらの安全性の概略的な検討結果や、当該区域に処分場を設置した場合の地上・地下施設の概略的なレイアウトイメージを「文献情報に基づく処分場の概要」として取りまとめます。その検討結果は、次段階の調査計画の策定に反映します。

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います。

一般労働安全の確保に関しては、建設・操業の実現性評価のために、支障となり得る自然現象の

有無や地下構造物の耐震性について検討します。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います。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します。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」の中に含めます。

(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

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を選定することです。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」、「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」があります。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」があります。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します。

概要調査においては、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します。

その結果に基づき、「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します。また、取得した地質環境の情報を踏まえて、前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ます。さらに、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います。また、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、レファレンス処分場概念を構築します。

事業期間中の安全性については、前段階同様、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います。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得られる詳細なサイトの情報を用いることで、より現実的な評価が可能となります。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します。

上記の検討結果を踏まえ、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」を作成します。また、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」を取りまとめます。

(3) 処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）

「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す。

(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

「地上からの調査段階」における事業目標は、処分施設の基本レイアウトを決定することです。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・設定します。

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」の三つです。これらの目標達成にかかわる、要件は「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」です。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、以下の事項を実施します。

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、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します。

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ます。そして、廃棄体および人工バリア材の運搬・定置にかかわる検討および長期安全性の評価を行い、処分施設の基本レイアウトを決定します。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）」として取りまとめます。

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ます。それらの結果は「環境影響にかかわる評価報告書」として取りまとめます。

(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

「処分施設建設地選定段階」後半の「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す。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」です。これらの目標達成にかかわる要件は、「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（処分施設建設地選定上の考慮事項含む）の適合性」です。

この段階では、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実施し、地層処分の母岩としての適性を確認します。

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の実証試験を行います。

(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、事業許可を申請します。また、処分施設の建設・操業に伴う周辺環境への影響に関する調査や予測評価、処分施設の建設、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」を作成し公表します。

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とともに、必要に応じて補足的な調査・評価を実施します。

4.3.2 建設～事業廃止までの段階

(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

国から事業許可を受けた後、処分施設建設のための準備工事に着手します。そして、随時設工認申請を行い、認可を受けた後、廃棄物受入・一時保管施設などの地上施設と並行して、地下施設の建設に着手します。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ます。建設後には認可を受けたとおりに適切に建設が行われたことを、確認するために国による使用前検査を受けます。

建設中には、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します。

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います。

(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・定置などが行われます。そのため、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ます。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します。

また、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います。

さらに、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、実証試験結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います。

(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、サイト選定段階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します。それに基づいて、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」を作成します。

原子炉等規制法では、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ますので、NUMOは「閉鎖措置計画の認可申請書」を作成し認可を受けます。

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します。

(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、所要の品質を確保するように地下施設（連絡坑道やアクセス坑道など）を埋め戻し、処分場の閉鎖を行います。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、確認を受けます。

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ます。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ます。

(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ます。それに基づいて、安全レビュー報告書を作成し、「廃止措置計画の認可申請書」の作成・申請・認可取得を行います。

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、廃止措置を行います。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ます。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ます。

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ります。

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ます。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ます。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います。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ます。

第5章 地質環境の調査・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、「適切なサイト選定と確認」を実施するために必要な技術の整備状況を示します。最初の概要調査地区選定段階における文献調査、その次の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かを示します。さらに、それに必要な技術がこの10年間でどの程度進展したかを示します。

5.1 わが国の地質環境の特徴と評価の考え方

わが国は変動帯に位置することから、地層処分システムを成立させるための前提条件として、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影響について考慮する必要があります(表 5-1)。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か否か見通しを得ることが必要です。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します。

5.1.1 自然現象の将来予測

わが国の自然現象は、将来10万年程度までは過去の十分な証拠に基づく評価が可能であるとの見解が示されてきました(例えば、原子力委員会, 1997; JNC, 1999b; 土木学会, 2001; NUMO, 2004bなど)。NUMOでは、さらに長期の評価期間についても視野に入れ、第2次取りまとめ以降の研究の進展を取り込み、自然現象の将来予測の考え方を次のように示します。

将来予測の方法は、主に外挿法⁶を用います。その際には、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、予測期間を設定します。地質環境の調査・評価の観点からは、安全評価に向けた自然現象の将来予測の期間は、予測の不確実性の程度に応じて、次の三つに区分します(表 5-2)。

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

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

期間C：外挿法による将来予測が難しい期間

安全評価では、これらの期間における不確実性の程度を踏まえた上で、シナリオを構築します。

⁶ 外挿法(がいそうほう)：「過去から現在に至るまでの事象の時間・空間的変動特性を調べ、一般性を見出し、それらの現象が起こる原因となるメカニズムが今後も変化しないことを前提として、将来を予測しようとするもの」(地質環境の長期安定性研究委員会, 2011)

表 5-1 考慮すべき自然現象と地層処分システムに及ぼす影響、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はある 	<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はある 	
	<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はある 	<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が発生する可能性は低い 	<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などを評価・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す可能性は低い 	<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・破碎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碎帯を経路として、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・破碎・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である可能性が高い 	<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はある 	<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などを評価・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はある 	<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, 2006 ; NUMO, 2004bなどを参考に作成)

表 5-2 地質環境の調査・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

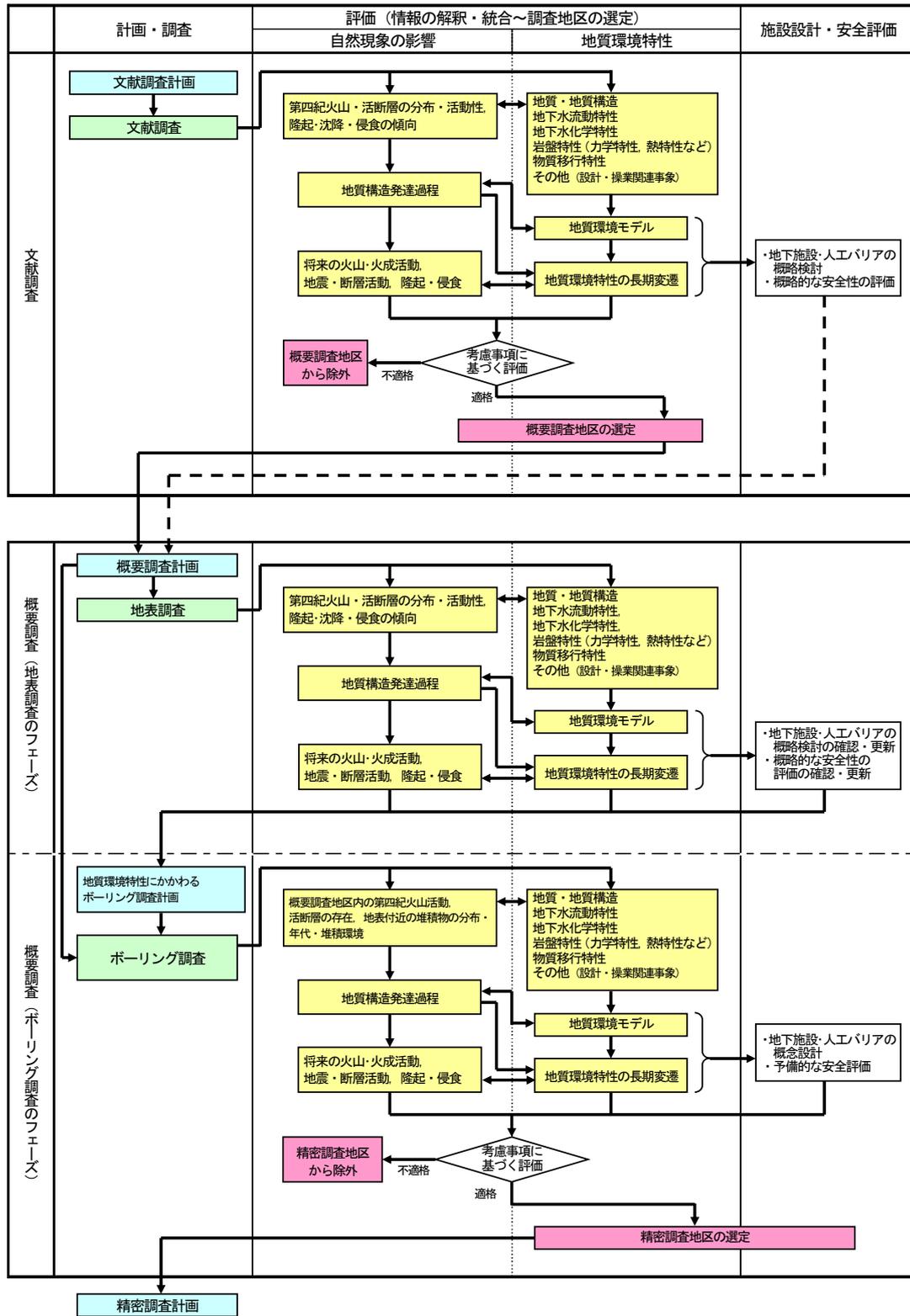
5.1.2 わが国の地質環境の多様性

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ます。さらに、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求められます。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います。NUMO は、5.4.2 に後述するそれらの検討成果を活用し、個別地点の地質環境に対応した調査・評価を行います。

5.2 文献調査および概要調査の考え方

5.2.1 段階的な調査・評価

地層処分場となる一辺数 km の地下の岩盤は、広範囲の空間的な特性のばらつきを有しています。また、安全性の評価は、閉鎖後数万年以上の長期を対象とするため、評価にあたっては空間的・時間的な不確実性が伴います。そのような不確実性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方法として、段階的な調査・評価があります（図 5-1）。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す。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します。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します。また、調査・評価を段階的に進めることは、科学技術の分野でその都度得られる新しい知見やノウハウを、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ためにも有効だと考えています。



□：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 5-1 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す。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二つの評価分野において地質・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、情報を共有化します。

5.2.2 調査・評価における不確実性の取り扱い

地質環境の調査・評価にかかわる不確実性として、データの不確実性と概念化の不確実性が存在します。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）などに含まれます。それらは、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ます。概念化の不確実性は、時間的・空間的な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ものです。

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ことから、この段階の地質環境モデルには、大きな不確実性が伴います。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ません。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ます。その場合、取得した情報に基づく地質環境の理解度や、その時点での解釈・推定結果に含まれる不確実性の種類や幅などにかかわる情報を、データセットと合わせて施設設計および安全評価の担当者に提示します。さらに、データセットに基づく工学的対策・安全評価を通じて、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地質構造、地質環境特性およびそれを変化させる現象などを特定します。その結果を次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みます。

5.2.3 調査・評価技術の適用性の確認

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信頼性の高い技術を用いて事業を推進します。このような技術の適用にあたっては、事業の効率化や経済性についても考慮します。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NUMOや基盤研究開発機関が開発した技術を用います。

NUMOは、自然現象の影響にかかわる調査・評価技術については、研究事例の蓄積、および地層処分事業への適用性を含めた研究成果の検証を行っています。例えば、国内および海外の専門家が参加する国際テクトニクス会議（International Tectonics Meeting：ITM；Chapman et al., 2009a）を開催してきました。その中で、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ついて検証し、それらの手法がわが国の地層処分の考え方に適用できることを確認しました。

また、地質環境特性にかかわる調査・評価においては、電力中央研究所（以下、電中研という）との共同研究（近藤ほか、2011）を通して、概要調査の実施項目であるボーリング調査などの個別技術とともに、ほかの調査手法と組み合わせた体系的な調査・評価技術について、実用化の観点から適用性を検討しています。

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きます。

5.3 文献調査および概要調査の進め方

5.3.1 文献調査の進め方

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ことです。そして、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す。この段階では、文献情報に基づき地質環境モデルを構築します。そこには、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情報が含まれます。これらの情報をもとに、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）を行います。その結果に基づき、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、次段階の概要調査計画の立案に反映します。文献調査は、以下の手順で進めます（図 5-2）。

(1) 文献調査計画の作成

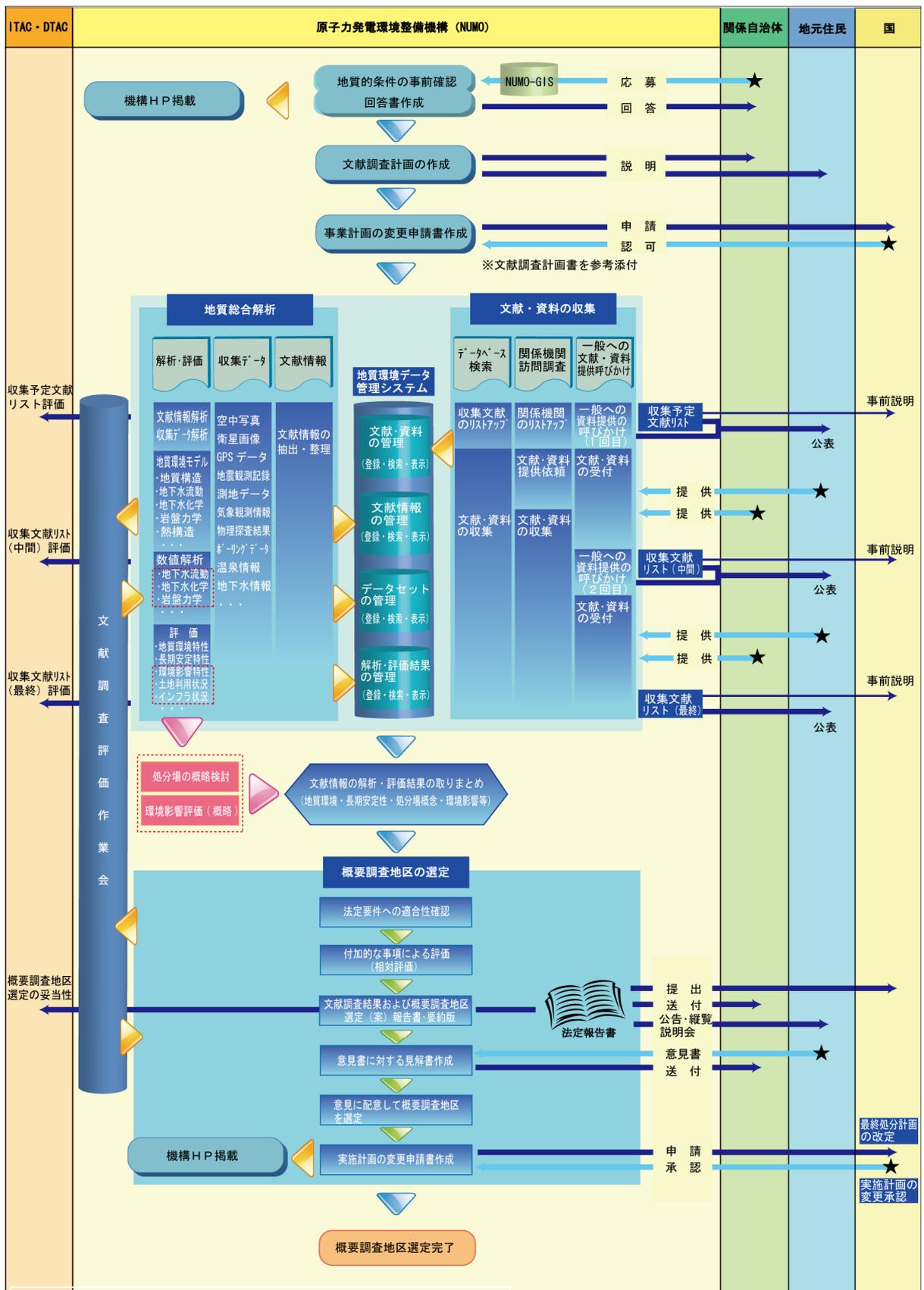
文献調査を実施する範囲を設定し、収集予定文献リストを含む文献調査計画書を作成します。収集する情報は、考慮事項に対する応募区域の適格性などの評価を目的とするため、応募区域だけでなく、その周辺地域に関する情報も収集することになります。その内容は、「概要調査地区選定上の考慮事項」の法定要件に関する事項と、付加的に評価する事項に区分されます。前者の法定要件に関する事項には、地震・断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食、第四紀の未固結堆積物、鉱物資源が含まれます。後者の付加的に評価する事項には、地層の物性・性状、地下水の特性、調査・評価の難易度、自然災害、土地の確保や輸送経路などが含まれます。

(2) 文献・資料の収集・整理

文献・資料の収集は、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三種類の方法で実施します。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します。

(3) 文献情報の解析・評価（地質総合解析）

地質総合解析では、収集した文献・資料に基づき、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、自然災害などの情報を取りまとめます。また、必要に応じて、リモートセンシング、地形、測地、物理探査などのデータの解析を実施します。そして、「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の評価を行います。さらに、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し、地質環境特性にかかわる総合的な評価を行います。



ITAC : 技術アドバイザー国際委員会 DTAC : 技術アドバイザー国内委員会

図 5-2 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)

5.3.2 概要調査の進め方

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、岩盤の温度や地下水の化学組成などが地下施設に悪影響を及ぼさないかについて判断することです。そして、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ことです。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します。そして、前段階で作成した地質環境モデルを更新します。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います。概念設計では、地質環境モデルおよびデータセットをもとに、地下施設設置位置の設定、地下施設レイアウトの設定、一般労働安全の確保に関する検討を行います。また、安全評価では、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・化学連成解析を行います。以上の検討結果に、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加えた総合的な評価を行います。そして、より適切と判断される場所を精密調査地区として選定します。さらに、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、次段階の精密調査計画の立案に反映します。概要調査は、以下の手順で進めます。

(1) 概要調査計画の作成

概要調査の目的、範囲、方法、成果物、工程、実施体制などを記述した概要調査計画書を作成します。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」からなります。前者の概要調査地区は、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します。後者の補足的に調査を行う範囲は、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に、必要に応じて設定します。

(2) 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、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します(図 5-3)。地表調査のフェーズでは、主に地表踏査と物理探査(空中、地上、海上)を実施します。ここでは、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ます。そして、概要調査地区の地質環境特性の概要を把握し、次フェーズの計画立案を策定します。ボーリング調査のフェーズでは、主に大深度ボーリングを主体とする調査を実施します。この調査では、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います。そして、地表調査のフェーズで取得できない地下深部の地質・地質構造、地下水(非火山性熱水を含む)の流動特性・化学特性、岩盤特性(力学特性、熱特性など)、物質移行特性に関する情報を取得します。

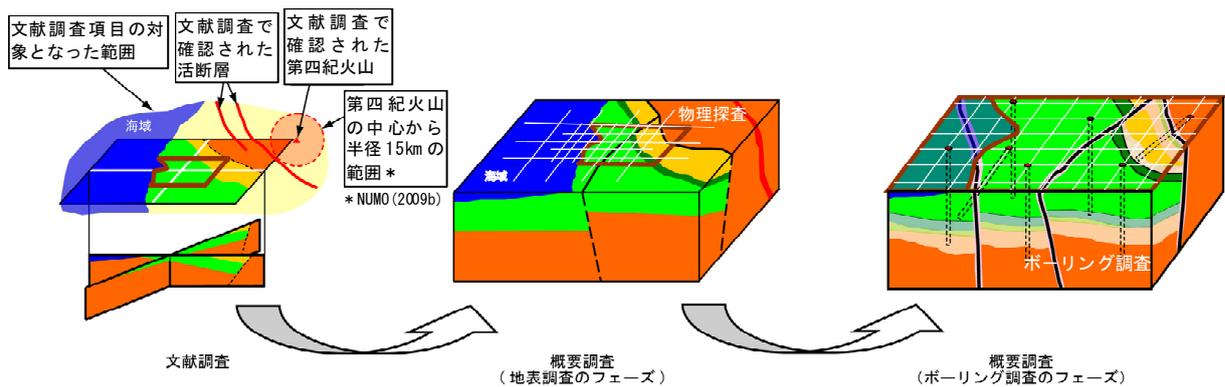


図 5-3 概要調査における段階的なアプローチの成果イメージ (2 フェーズの例)

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）に区分した例を示します。

(3) 概要調査における評価

概要調査では、今後公表する予定の「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します。自然現象については、文献調査では概要調査地区内に明確には認められなかった第四紀の火山・火成活動や活断層の分布・影響、あるいは、文献調査で認められた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します。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します。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とな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を取得します。そして、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、地質環境モデルの更新に反映していきます。さらに、自然現象の影響にかかわる検討結果を踏まえて、地質環境特性の長期変遷に関する検討を行います。以上の情報をもとに、地下施設や人工バリアの概念設計、および予備的な安全評価を行います。

5.4 調査・評価を支える技術の進展

文献調査と概要調査における、自然現象の影響と地質環境特性の二つの分野の技術について、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進展と現状を取りまとめています。第2次取りまとめ以降進展した技術については、付表 5-1 から付表 5-8 に網羅的に取りまとめました。そのうち、NUMO が特に重要と判断した技術については、以下にそれらの評価と反映先について記述します。

5.4.1 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次取りまとめまでには、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（第四紀火山カタログ委員会、1999）が編集されました。その結果、第四紀火山の活動域が偏在していること、過去数10万年の火山活動の変化が各地域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ました。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てきています。例えば、日本列島の地温勾配の分布が取りまとめられ、火山からの影響範囲、マグマ溜りからの熱的な影響の範囲・期間などが示されました。

他方、第2次取りまとめの中では、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が、実際の地質環境における事例研究などを通して検討すべき課題として挙げられています。

第2次取りまとめ以降の進展としては、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ました（Kondo, 2009 ; Umeda, 2009 など）（付表 5-1, 付表 5-2）。さらに、これらに地球化学的手法を活用した熱水の起源の評価手法の検討が進み、非火山性の熱水の存在や影響を適切に評価できるようになりました（Umeda et al., 2009 など）。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ていて、それはわが国の広域的な領域（例えば、東北地方など）や単成火山群の火山発生確率の評価に対しても適用性があることを確認しています（Chapman et al., 2009b ; Martin et al., 2004 など）。

(2) 地震・断層活動にかかわる調査・評価技術

第2次取りまとめまでには、空中写真判読、物理探査、地表踏査、トレンチ調査などを組み合わせて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（中田・今泉, 2002）として示されています。また、主な地震・断層活動はこれまでに確認されている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ました。

他方、第2次取りまとめの中では、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などが、実際の地質環境における事例研究などを通して検討すべき課題として挙げられています。

さらに、第2次取りまとめ以降、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より具体的な課題が見出されました。これらの課題に対し、例えば、地表に明瞭な変位を伴わない活断層については、測地学的手法、変動地形学的手法、構造地質学的手法、地球物理学的手法、地球化学的手法などを組み合わせた評価手法が検討されました（青柳・阿部, 2009 ; 梅田ほか, 2010 など）（付表 5-3, 付表 5-4）。また、断層の破碎帯や変形帯などの影響範囲の評価にも、断層関連褶曲（地下の断層運動に伴い形成される褶曲）の考えに基づく数値解析や模型実験と現地調査のデータを比較することにより評価する手法が示されています（上田, 2011 など）。以上に示した決定論的な評価を補足する手法として、GPS、地震、地表変位などの複数のデータから得られる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ていて、それはわが国の広域的な領域（例えば、東北地方など）への適用性が確認されています（Chapman et al., 2009b など）。

(3) 隆起・侵食にかかわる調査・評価技術

第2次取りまとめまでには、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ました。全国の隆起・沈降速度の概略的な分布が把握され（小池・町田, 2001）、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ています。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（藤原ほか，1999）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ています。

他方、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などの課題も、第2次取りまとめの中で挙げられています。

第2次取りまとめ以降の進展としては、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、体系化が図られています（付表 5-5）。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予測の信頼性が向上しています（Hataya et al., 2009 など）。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ています（三箇・安江，2008 など）。

5.4.2 地質環境特性にかかわる調査・評価技術

第2次取りまとめまでには、地層処分を対象とした地下水流動や岩盤中の物質移動にかかわる測定機器や手法の開発、物理探査などの要素技術の適用性の確認を終えています。

他方、多様な地質環境における地質環境の特性に関する知見の蓄積と、地質環境特性にかかわる調査・評価手法の高度化と体系化が、第2次取りまとめ以降の技術開発の目標として挙げられています。

これに基づき、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、施工性・安全性にかかわる事象、モニタリングなど、調査・評価の対象に応じた既存手法の改良や高度化が行われてきています（付表 5-6、付表 5-7、付表 5-8）。

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ます。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になります。JAEA の二つの深地層の研究施設計画では、それらの代表的な組合せとして、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検討が進められています（三枝ほか，2007；太田ほか，2007）。その第1段階である地表からの調査研究段階では、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ました。

沿岸域については、淡水系と塩水系の地下水が接する場であること、海上からの調査が伴うことなど、内陸部とは一部異なる調査・評価の考え方や技術が求められます。このため、文献情報からの活断層の推定、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・調査などについて検討されてきています。その結果、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ります（産総研，2010 など）。これらの地層処分に関する研究のほかにも、資源探査、活断層調査、土木工事に関する調査などのほかの分野においても類似の地下調査が行われており、その知見を地層処分へ有効に活用していきます。

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・評価を的確に実施します。

一方 NUMO は、基盤研究開発機関などが開発した調査・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、電中研との共同研究の中で、電中研横須賀地区

内の現地調査に基づく実証的な検討を行いました（近藤ほか，2011）。その結果，文献調査，物理探査，ボーリング調査などにより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，概要調査段階で活用するための体系的な調査・評価技術の整備を終えています。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ました。

5.5 結論

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，ある地域が必要な条件を備えているか否かを判断できることが示されています。これを受け，第2次取りまとめ以降，NUMOでは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・評価技術の体系化を行ってきています。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・高度化を進めてきました。以上のことから，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いました。また今後も，新たな科学的な知見や調査・評価技術の進展を随時取り込み，地層処分に關する地質環境の調査・評価技術の信頼性をより高めていきます。

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の整備状況について説明します。

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材料間の相互作用に関する現象の理解および人工バリアを搬送・定置するための技術が進展しました。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し、設計、建設・操業・閉鎖の基本的な方法を示すとともに、多様な地質環境に対応するための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ました。

6.1 地層処分事業における設計の基本方針

6.1.1 段階的な設計の進め方

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情報を蓄積していきます。そして、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きます。

地層処分の最終的な目的は、閉鎖後長期の安全性を確保することであるので、人工バリアを含む地下施設の設計においては、長期という時間スケールに起因するバリア性能の変化などを考慮する必要があります。これについては、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、国内外の最新の知見を集積して設定し、適宜更新していきます。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を今後も継続し、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していきます。

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、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きます。

6.1.2 設計における不確実性への対処

地下施設が設置される深地層は、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ります。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す。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が有効な対応策です。地下施設の規模は岩盤特性に起因して変わり得ますが、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、地下施設の規模に関する精度は高まっていきます。

また、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、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います。人工バリアの性能は、長期的に変化することが考えられ、時間の経過とともに性能の変化に関する不確実性が増大します。性能の変化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ことができるように設計上考慮することを基本とします。

6.2 地層処分の安全機能と技術要件の設定

第2次取りまとめ以降の技術の進展や国際基準（IAEA, 2006, 2011）の整備に基づいて、閉鎖後長期の安全確保に向けた工学的対策上の要件について検討しました。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、処分場を構成する要素と安全機能の関連付けを行い、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ました。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具体化して設計に反映していきます。

図 6-1 に放射線防護に関連する安全確保の対象と事業段階の関係を示します。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、「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ます。閉鎖後については、「隔離」と「閉鎖後閉じ込め」を安全確保の基本概念とします。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方で共通的に適用します。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」の関係を表 6-1 に示します。

		事業段階	
		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)	操業時閉じ込め (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 6-1 安全確保の対象と事業段階の関係

表 6-1 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を困難とすること
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

これらの「隔離」、「閉鎖後閉じ込め」に関する安全機能が相互補完的に働き、その将来における放射線による生活環境への影響が低くなるような工学的な対策の具体的な手段が、多重バリアシステムです。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します。処分施設に求められる安全機能とバリア構成要素の関係において、「地質の長期的な変動からの防護」、「人の接近の抑制」という安全機能については、天然バリアがその役割を担います。「放射性物質の浸出抑制」と「放射性物質の移行抑制」という安全機能については、前者に対して廃棄体とオーバーパックが、後者に対して緩衝材、埋め戻し材、プラグ、天然バリアがそれぞれその役割を担うようにすることとしました。

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三種類に分類して設定します。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します。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します。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します。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、人工バリアの製作性や施工性、コストが過大とならないことと定義し、実際に人工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します。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します。この考え方に沿って設定した技術要件のうち、基本的なバリア性能の確保に関する技術要件を表 6-2～表 6-4 に示します。

表 6-2 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）

表 6-3 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	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）

表 6-4 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）

一方、事業期間中の安全確保における放射線安全の基本概念は、「作業時閉じ込め」、「放射線遮へい」、「放射線被ばく管理」です。これらと安全対策の関係を表 6-5 に示します。また、異常事象に対する安全対策の考え方は、次のとおりです。「異常事象」とは、通常の作業状態から逸脱させるような何らかの要因が施設あるいは廃棄体に加えられた事象と定義します。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ます。「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します。地震、津波など（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、作業中に廃棄体の装置からの逸脱による落下、転倒などの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ます。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します。さらに、異常事象が発生した場合、放射性物質の飛散を防ぐため、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の設置などによる異常事象の拡大防止対策を施します。もし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します。

表 6-5 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
作業時閉じ込め	廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止	作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	作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

6.3 処分場の設計の考え方の整備

6.3.1 処分場の設計手順

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できるように地下施設と人工バリアの仕様、必要となる地上施設などの仕様を設定するものです。

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図 6-2 に示します。処分場は、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します。

まず、候補母岩の熱環境、力学場、水理場、地化学環境、母岩の広がりなどの地質環境特性を把握します。それらを踏まえ、坑道の力学安定性や廃棄体発熱特性などから決まる坑道の最大設置深度、放射性物質の移行時間・経路が相対的に有利となる（長くなる）領域、さらに、廃棄物量から決まる処分場規模を考慮して地下施設設置位置（深度・エリア）を設定します。

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します。

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します。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します。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します。

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します。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います。

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、坑口位置を設定します。その上で、放射線管理区域や、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します。

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ます。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きます。

上記の手順は、一方向的な流れを説明したものですが、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、設定値の修正、再設計などを柔軟かつ適切に実施します。

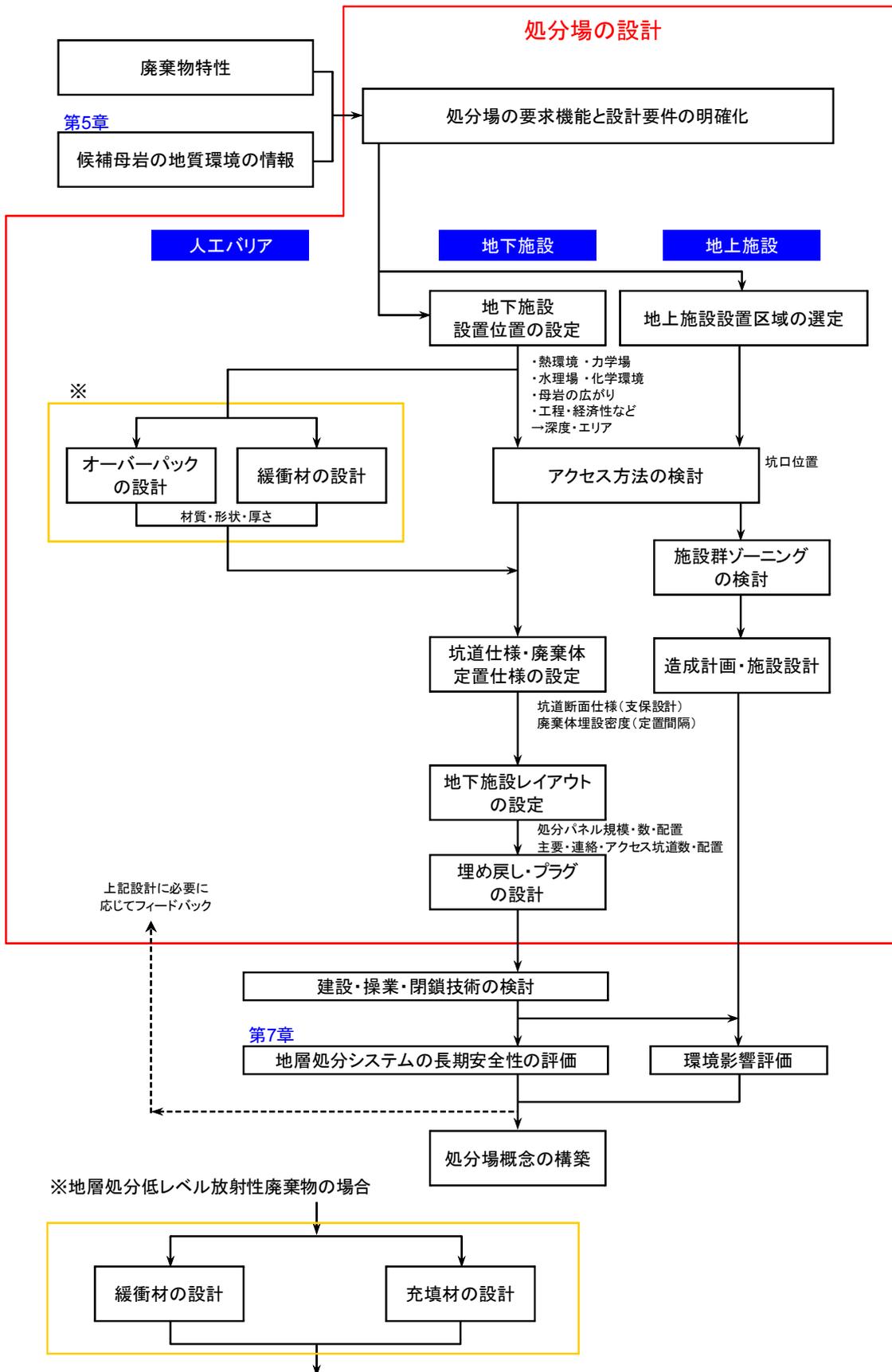


図 6-2 処分場の設計手順

6.3.2 人工バリアの設計

高レベル放射性廃棄物の人工バリアは、ガラス固化体、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ます。ここでは、技術要件に基づいた人工バリアの設計方法を示します。なお、ガラス固化体は、発生者側で製作するため、NUMO の設計項目には含めていません。

(1) オーバーパックの設計

オーバーパックには、「放射性物質の浸出抑制」の安全機能を設定しており、その詳細な安全機能として、「発熱が著しい期間の地下水接触防止」を設定しました。発熱が著しい期間は、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 年間程度です。こ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、母材および溶接部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ています。これらを踏まえたオーバーパックの設計項目として、材料設計、形状・厚さがあります。オーバーパックの候補材料としては、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ます。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厚さの検討手順例を示します (図 6-3)。

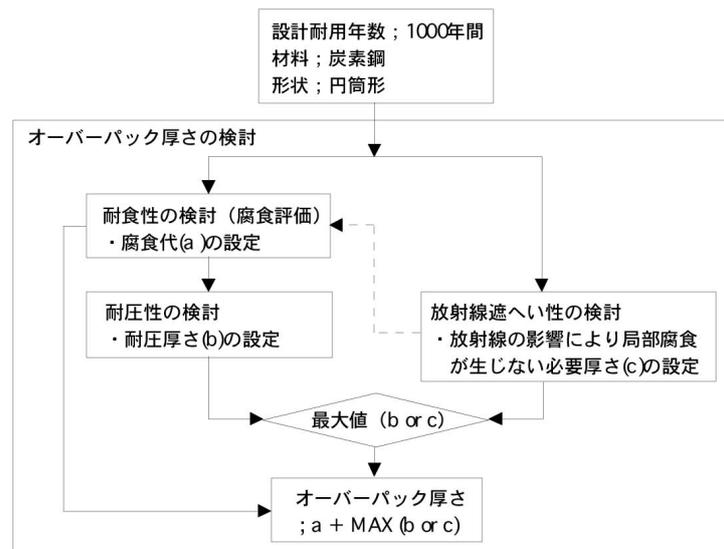


図 6-3 オーバーパック厚さ検討の手順例 (出典 : JNC, 1999b)

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ます。例えば、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ます。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ます。

(2) 緩衝材の設計

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」を設定していま

す。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ます。これらを踏まえた緩衝材の設計フローを図 6-4 に示します。まず、基本的なバリア性能の確保に関する技術要件、長期健全性の維持に関する技術要件、工学的実現性の確保に関する技術要件が満たされるよう、緩衝材の仕様範囲を設定します。この仕様範囲から、緩衝材の製作、搬送、定置の方法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・寸法を決定します。ここまでの手順で緩衝材の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を行い、緩衝材の長期健全性への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します。

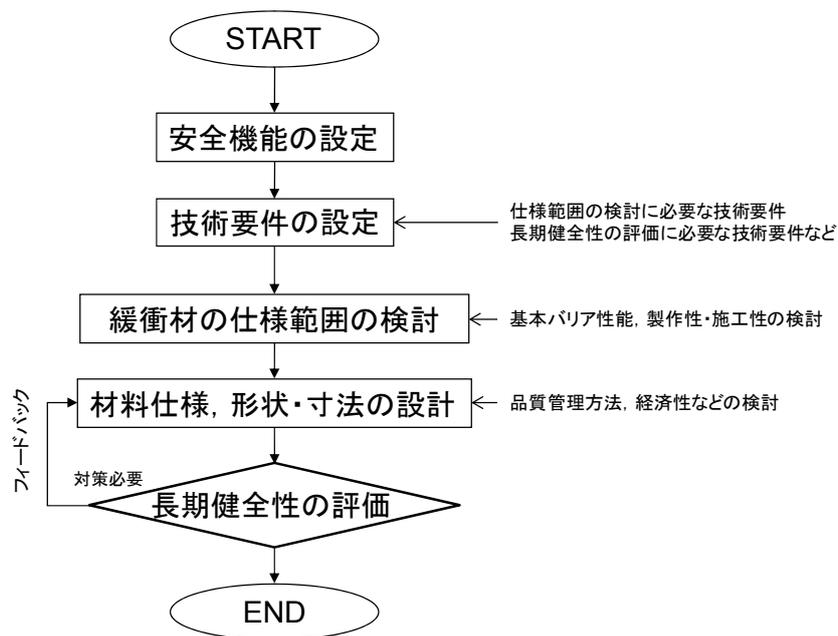


図 6-4 緩衝材の設計フロー (出典: NUMO, 2011a)

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ます。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、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ます。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します。

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します。

(1) 地下施設設置位置の設定

表 6-6 に、地下施設設置位置の設定のための評価項目の例を示します。評価項目の枠組みは、熱、

水、応力、化学といった地質環境特性に加え、事業の成立性の観点から母岩の広がりや工程・経済性を挙げました。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温度制限を考慮し設置位置の最大深度を把握します。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定されます。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します。水理場の観点では、候補母岩の地下水流動特性や処分エリア・深度ごとの地下水移行経路と地下水移行時間を評価します。熱環境の観点および力学場の観点から成立性が見通しがある深度よりも浅い領域の中から、放射性物質の移行抑制の点で有利な領域（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します。

表 6-6 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
【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束が小さく、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

(2) 坑道仕様・廃棄体定置仕様の設定

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す。廃棄体定置仕様の設定では、高レベル放射性廃棄物処分の場合は主に熱環境の観点からの廃棄体定置間隔（廃棄体埋設密度）の設定が主な実施項目です。

坑道の仕様は、緩衝材と廃棄体を設置するために必要な空間の確保、また、緩衝材や廃棄体を地下施設内に搬送・定置するための設備の建築限界（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）を考慮して設定します。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

設定します。支保工の検討は、設定した坑道断面の力学的安定性評価の結果をもとに行います。また、処分坑道離間距離と廃棄体定置間隔は、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、廃棄体発熱による影響を考慮して設定します。具体的には、廃棄体からの発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定置間隔を確保します。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定置間隔を設定します。

また、地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設においても、坑道仕様の設定は高レベル放射性廃棄物処分施設の考え方と基本的には同じです。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ります。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ます（NUMO, 2011a）。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します。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します。

(3) 地下施設レイアウトの設定

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します。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します。坑道群の方向や配置にあたっては、建設・操業・閉鎖作業の安全性や物流の確保のほか、岩盤内の地圧の主応力方向、地下水流動方向などの地質環境特性も考慮します。

地圧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す。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す。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うる岩盤中の亀裂の状況なども踏まえて設定します。

(4) 埋め戻し・プラグの設計

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します。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します。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します。

6.3.4 地上施設の設計

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します。

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して設定します。次に、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します。そして、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します。また、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の防止対策などの周囲の環境への影響を極力低減する対策を実施します。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います。

6.4 処分場の建設・操業・閉鎖

6.4.1 処分場の建設

処分場の建設は、まず地上において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します。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します。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を適用することが可能であり、その際は周辺環境保全に十分に努めます。

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ます。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します。例えば、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ます（JAEA, 2008）（図 6-5）。

また、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ました。例えば、処分孔掘削や掘削土搬出が工程に影響を与える大きな要因になると評価しており、これらの建設技術の効率化に関する検討を実施しました。



図 6-5 ショートステップ工法による立坑の掘削（出典：JAEA, 2008）

6.4.2 処分場の操業

処分場の操業は、地上施設におけるガラス固化体の受入・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を行います。

処分場に輸送したガラス固化体（輸送容器）を、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・検査施設へ搬入します。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します。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します。これら一連の作業は遠隔操作で行います。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 6-6 に示します。

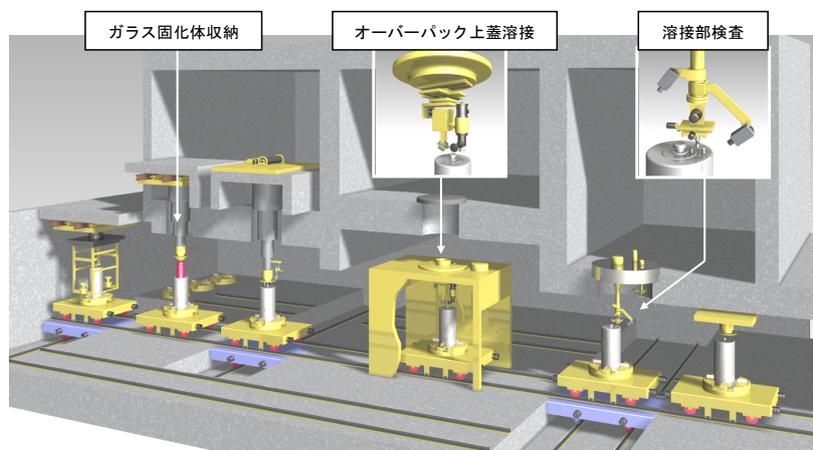


図 6-6 遠隔操作による廃棄体のオーバーパックへの封入工程の概念図
(炭素鋼単体オーバーパックの場合) (出典：NUMO，2002)

また、NUMO は、廃棄体の地下への搬送・定置について、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ました。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ました。PEM の構造を図 6-7 に示します。

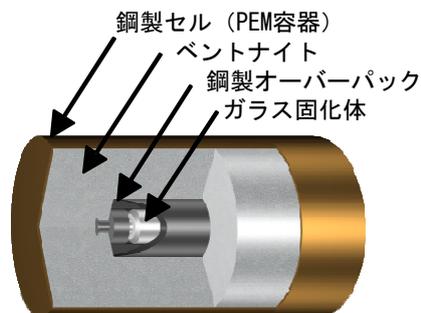


図 6-7 PEM の構造

PEM方式の利点は、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す。一方、PEM容器は廃棄体、緩衝材、鋼製セルを含めて約35tと比較的重量が重く、空間的制約が大きい処分坑道内での重量物の水平方向への搬送・定置の方法や、PEM容器と処分坑道との隙間の充填技術が課題です。これらの課題に対しては、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ます。

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います。地上施設は、建設または作業が終了した段階で不要となった施設から順次解体・撤去作業を行います。閉鎖に当たっては、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します。図 6-8に閉鎖措置計画申請前の処分場のイメージを示します。図中の茶色の部分は作業段階で埋め戻しが完了している坑道で、図中の白色の部分閉鎖の対象となる坑道です。第3章で述べたように、閉鎖措置計画が認可されるまで、回収可能性を維持します。

水平坑道の閉鎖は、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します。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す。斜坑については、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します。

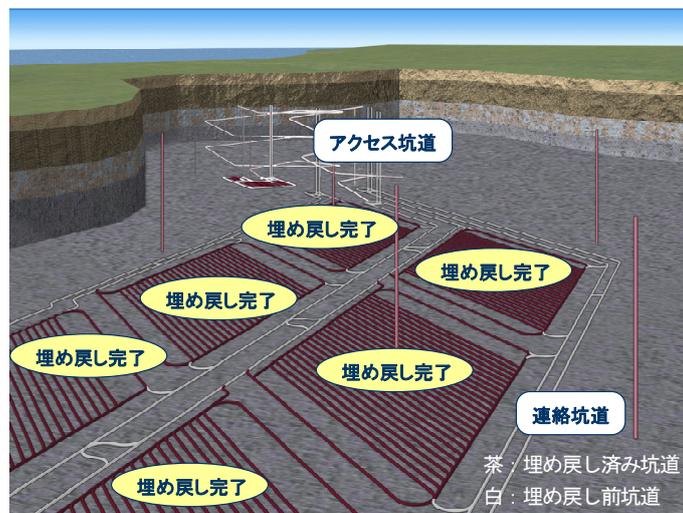


図 6-8 閉鎖措置計画申請時の処分場イメージ

6.4.4 作業安全に対する基本的な考え方

作業期間中は、放射性廃棄物が持ち込まれるため、放射線防護のための「作業時閉じ込め」、「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します。こうした対策は、ほかの原子力施設の安全対策と基本的に同様です。ただし、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、作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、安全作業に万全を尽くします。これにより、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

範囲で低くします。

例えば、「放射線被ばく管理」としては原子炉等規制法に基づき処分場に放射線管理区域を設定します。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、「作業時閉じ込め」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します。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します。

また、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ます。具体的には、安全対策の多重化を基本とします。その考え方は、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します（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します（異常事象の拡大防止策）。(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します（異常事象の拡大防止策）。(f) さらに重大な事象として、敷地外に放射性物質が放出された場合の影響を評価して適切な対策を施します（影響緩和策）。

6.4.5 事業期間中の安全と閉鎖後長期の安全確保の両立

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ました。

建設・操業および閉鎖の各段階における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ことから、程度の差はあるものの、深部地質環境の性質を変化させる可能性があります。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ります。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となります。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の存在、という二種類の影響を与えることとなります。

閉鎖後長期の安全性への影響については、人工バリア以外で処分場に残置される材料と、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知見などに基づき判断していきます。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、除去が可能なものについては除去します。また、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、残置する量が多く、その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ます。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ます。さらに、影響がありそうなものの除去や代替が不可能なケース、影響が不明なケースについては、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きます。

6.5 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

6.5.1 沿岸域における設計上の留意点

NUMO は、わが国の多様な地質環境に対応するための処分場の設計、建設・操業・閉鎖に関する技術の整備に取り組んできました。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について、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ました。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などをまとめています。

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します。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す。

また、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の膨潤特性は、塩分により影響を受けます。塩淡境界よりも海側の領域については、海水がベントナイト材料の特性へ与える影響を考慮して緩衝材、埋め戻し材の仕様（材料、配合など）を設定する必要があります。第2次取りまとめ以降に、新たに人工バリア材料の特性への影響に関する知見が得られており、それら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仕様の検討を行います。また、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塩分濃度に応じて異なるものとなる可能性があります。

さらに、沿岸域における設計上の留意点として、上記の他にアクセス坑道の設計が挙げられます。具体的には、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、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ります。アクセス坑道が長くなると、地下施設建設工程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ます。アクセス延長が10km程度を超えると、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ります。

6.5.2 多様な地質環境への対応を踏まえた処分概念・技術オプション

多様な地質環境への対応として、NUMO は現状の技術開発の到達レベルなどを勘案し、さまざまな処分概念・技術オプションを検討しています。ここでいう処分概念・技術オプションとは、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と定義します。廃棄体の定置方式には、処分孔縦置き定置方式および処分坑道横置き定置方式があります。これらの定置方式に対して、地下環境において想定される条件（湧水、高湿度環境、岩盤の局所的な脆弱性など）を考慮し、現段階で有望と考え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方式を選定しました。これら三方式の処分概念イメージを図6-9、図6-10および図6-11に示します。

上記に示した技術オプションの特徴の比較には、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注目しました。サイトが特定されていない現時点では、定性的な比較になりますが、提示した三種類の処分概念・技術オプションの特徴について、設計因子に照らして整理しています。工学的成立性の設計因子に関しては、工程、作業性、効率性、地下環境への適用性という観点から特徴付けを行っています。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

て異なります。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きます。

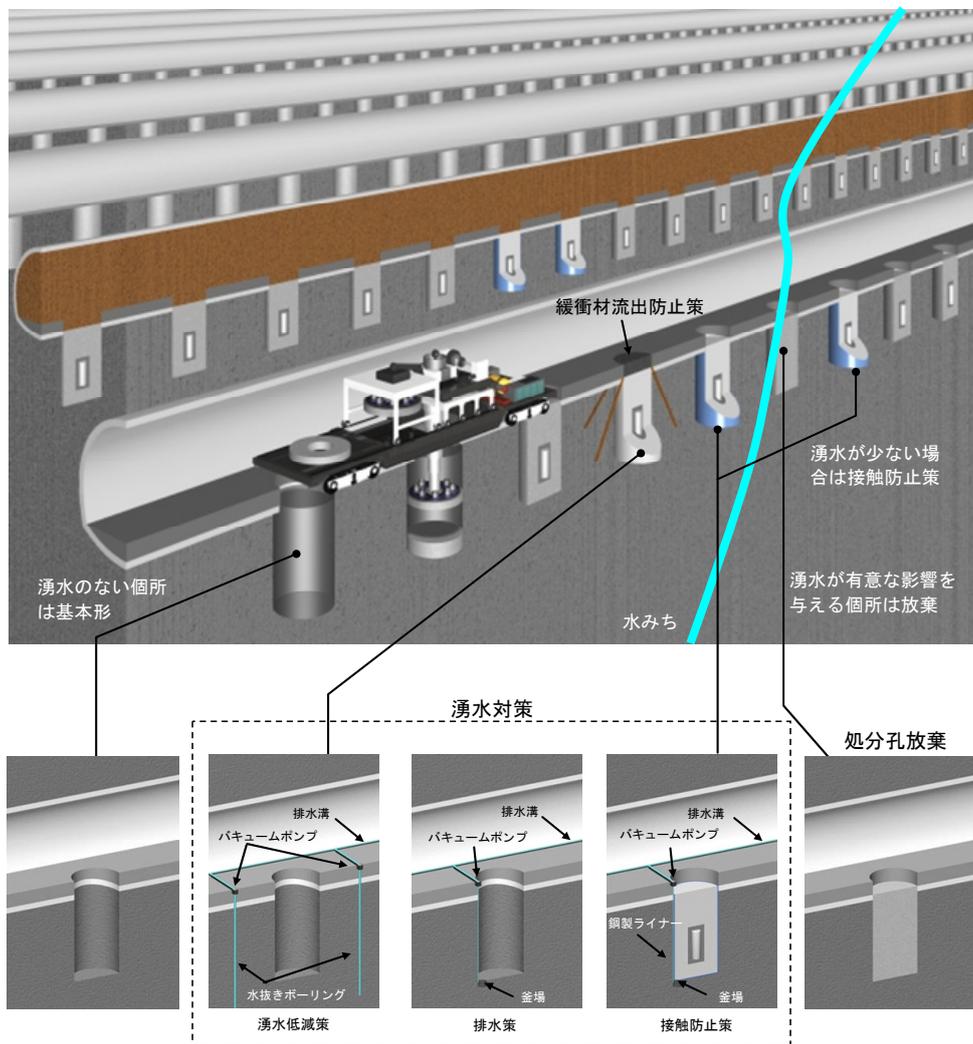


図 6-9 想定される地下環境条件を考慮した操業技術オプション（処分孔縦置き定置方式）

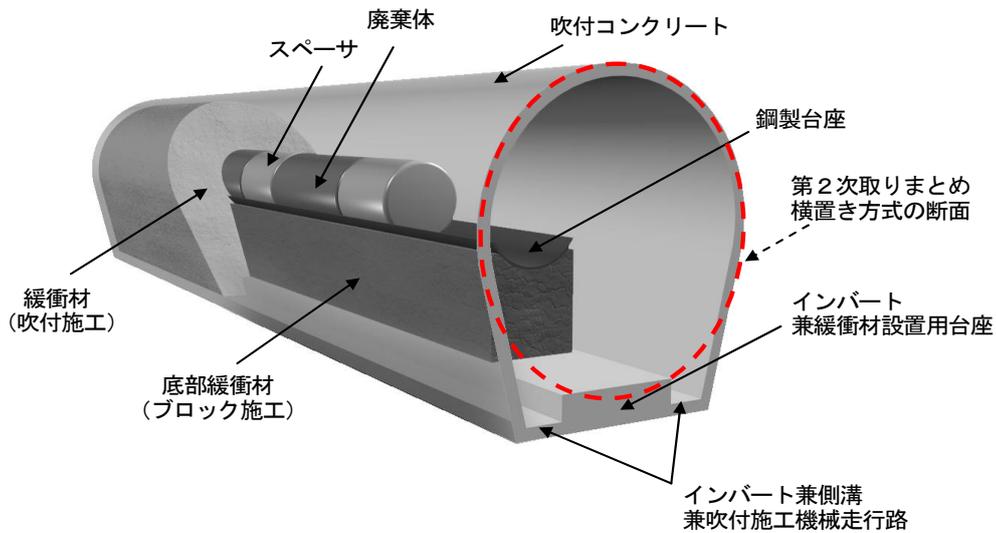


図 6-10 作業性を考慮した操業技術オプション（処分坑道横置き定置方式／原位置施工方式）

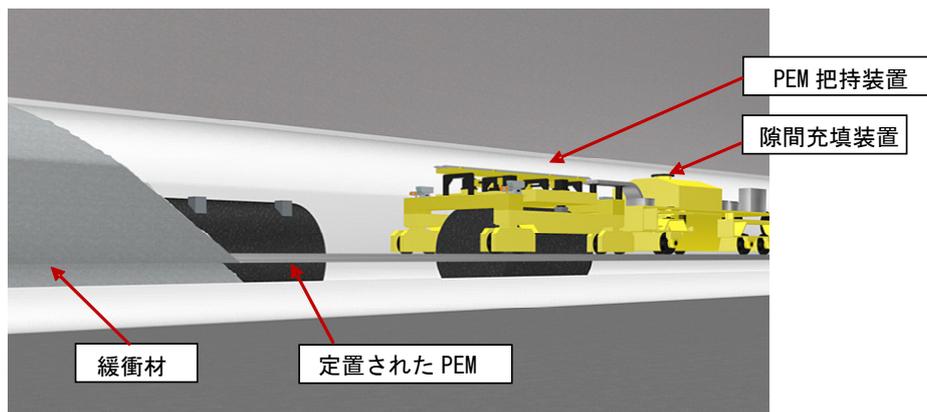


図 6-11 作業性を考慮した操業技術オプション（処分坑道横置き定置方式／PEM 方式）

6.6 工学的対策を支える技術の整備

工学的対策を支える技術として、第2次取りまとめ以降に特に技術が進展した、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の整備状況を示します。

- 人工バリア材料の基本特性と長期挙動に関する技術
 - ・ ガラス固化体の長期挙動
 - ・ オーバーパックの長期挙動
 - ・ 緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用
- 地層処分施設の耐震性評価
- 建設・操業技術
 - ・ 低アルカリ性セメントの実施工への適用性確認
 - ・ オーバーパックの遠隔溶接・検査技術

- ・緩衝材の製作・搬送・定置技術
- ・廃棄体回収技術

6.6.1 人工バリア材料の基本特性と長期挙動に関する技術

人工バリアの設計では、ニアフィールドで生起する可能性のある現象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配慮する必要があります。そのため、基盤研究開発機関はガラス固化体の溶解挙動、オーバーパックの腐食形態、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研究開発を進め、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ています。

ガラスの溶解挙動については、第2次取りまとめにおいて、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ましたが、保守的に評価する観点から、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ました。第2次取りまとめ以降は、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に向けてガラスの溶解の pH 依存性を確認する研究が行われています (Inagaki et al., 2009, 2010)。

オーバーパックの長期挙動として、母材と溶接部の腐食挙動に関する知見の整備状況を付表 6-1 にまとめて示します。緩衝材の基本特性と長期挙動やほかの材料との相互作用として、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に関する知見の整備状況を付表 6-2 および付表 6-3 にまとめて示します。

6.6.2 地層処分施設の耐震性評価

地層処分施設は、これまでの原子力関連施設に比べて、地下深部に建設する構造物であること、大規模な連接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ます。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性は極めて重要です。

このため NUMO は、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、第2次取りまとめと同様の岩盤モデルを用いて操業期間中の空間保持の観点から処分坑道の耐震性評価を行いました。具体的には、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、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ました。解析結果の一例を図 6-12 に示します。常時と地震時の岩盤の最大せん断ひずみは同程度であり、処分坑道に対する地震の影響が小さいことを確認しました。

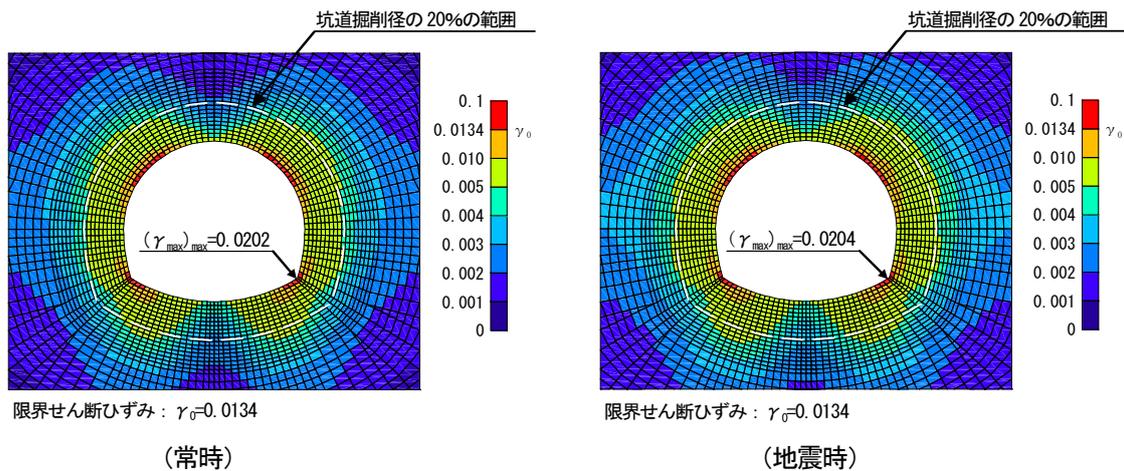
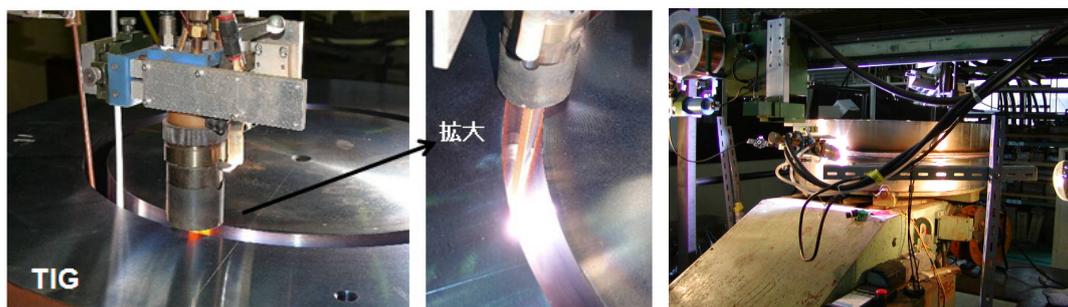


図 6-12 坑道周辺岩盤の最大せん断ひずみ (高レベル放射性廃棄物処分坑道) (出典: NUMO, 2011d)

6.6.3 建設・操業技術

処分施設においては、構造強度の確保などの観点から、セメント系材料が広く適用されることが想定されます。しかし、既存のセメント系材料を処分施設に適用する場合、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ます。このため、これらの影響を回避・低減するための代替材料として低アルカリ性セメントが開発され、その材料特性が把握されています(入矢・三原, 2003)。また、低アルカリ性セメントの実施工への適用性を確認するために、吹付コンクリートなどの施工試験が行われ、施工性や強度発現性などが良好であることが確認されています(中山ほか, 2009)。

オーバーパックの溶接技術については、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 6-13)、MAG 溶接などを対象に、基盤研究開発において実規模の蓋構造試験体を用いた試験が実施されています。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ます(原環センター, 2009a)。



(a) 落とし蓋構造への TIG 溶接適用例

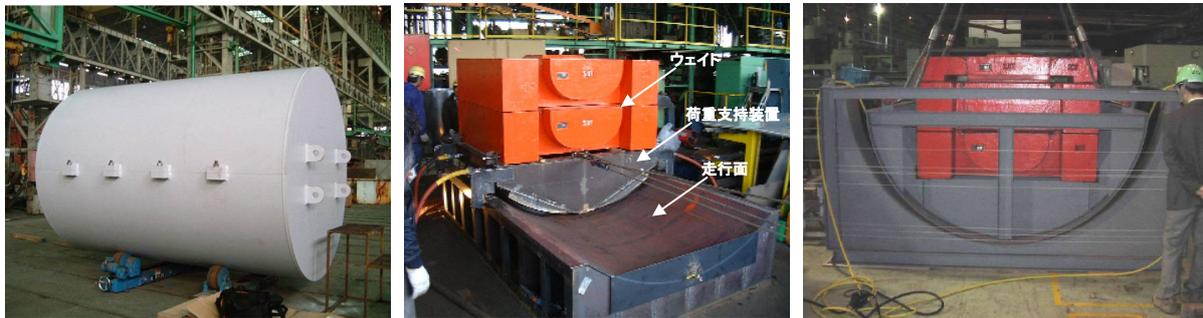
(b) 平蓋構造への TIG 溶接適用例

図 6-13 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, 2009a (b) 出典: 原環センター, 2003)

緩衝材の製作・搬送・定置技術については、ブロック製作と把持, 原位置締め, ペレット充填, 吹付施工, PEM 方式などの開発が進められており, それぞれについて実規模での実証が行われ, 施工性や密度達成状況などが確認されています。

PEM については、実規模の PEM 容器の製作やエアジャッキを用いた PEM 容器の昇降定置試験などが実施されています（図 6-14）（原環センター，2009b）。



(a) 実規模 PEM 容器製作例 (b) エアーベアリング牽引試験例 (c) エアジャッキによる PEM 容器の昇降
 図 6-14 PEM 方式試験例 ((a) (c) 出典：原環センター，2009b (b) 出典：原環センター，2004)

また、緩衝材ペレットを用いた隙間充填技術については、横置き定置方式を前提にした実規模の模擬坑道を用いた試験が実施されています（原環センター，2008）。その中で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ます。

吹付方式については，超音速ノズルを用いたベントナイト材料の吹き付けにより，ベントナイト単体でも高い乾燥密度の緩衝材の施工が可能であることが実証されています（原環センター，2010）。また，そのように施工した緩衝材は，密度の均一性が高いことが確認されています。

廃棄体回収技術については，処分坑道埋め戻し前と後の回収方法の検討を進めています。その一例として，NUMO が有望な技術として検討を行っている例を図 6-15 に示します。これは，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を応用したものです。

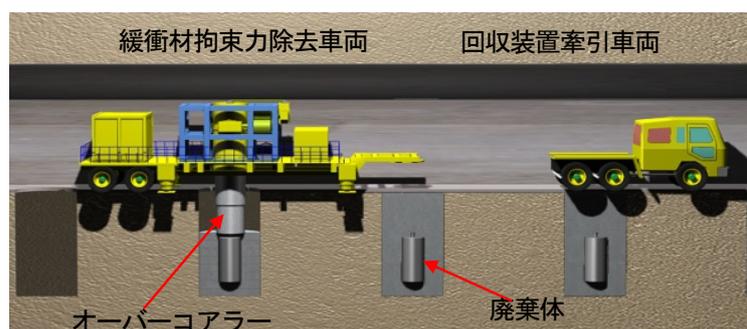


図 6-15 廃棄体回収技術の検討例

6.7 結論

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ました。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・定置などの工学的対策を支える技術は第2次取りまとめ以

降着実に進展し、安全性と信頼性が向上しました。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、閉鎖後長期の安全性確保のための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きます。

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、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」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説明します。

第2次取りまとめや第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長期安全性を評価するための基本的な手法が示されました。NUMO では、第2次取りまとめ以降、サイト選定段階に応じて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ました。また、これと並行して、NUMO および基盤研究開発機関は、多様な地質環境や設計オプションに基づいて処分システムの安全性をより現実に即して評価するために、安全評価に係る個別技術の高度化を進めました。以下に、地層処分システムの長期安全性評価の進展について説明します。

7.1 安全評価の基本的な考え方

7.1.1 安全評価の手順

地層処分システムの安全評価に固有の特徴であり、また、通常の工学システムの評価と大きく異なる点は、原子炉などの通常の原子力施設と比較して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す。このため、従来の工学技術のように、実際に地層処分システムを構築し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ません (OECD/NEA, 1983)。

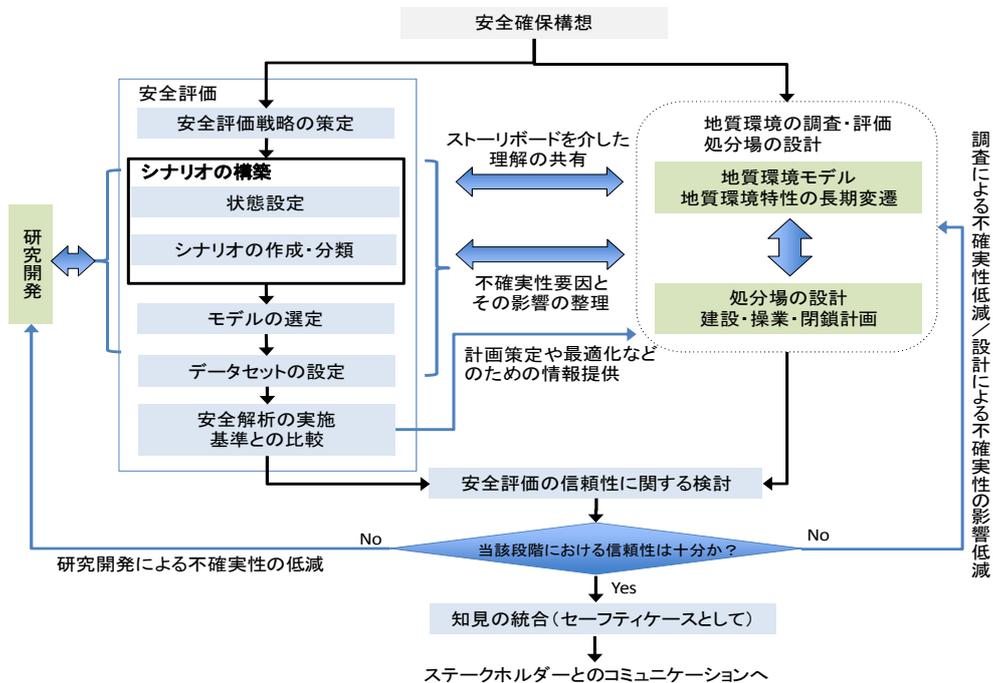


図 7-1 安全評価の基本的な手順

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 (例えば, OECD/NEA, 1991a, 1991b), 次に示す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ます (OECD/NEA, 1991b, 1997)。一般的な方法論とは、

シナリオの構築，モデルの選定，データセットの設定，安全解析を行い，適切な安全基準と比較することです。また，3.2で述べたように，第2次取りまとめ以降，安全評価は，国際的に，長期安全性を多面的な視点から示すセーフティケースの枠組みの中で捉えられる傾向があります。多面的な視点には，地質環境の調査・評価，処分場の設計，不確実性とその対策，代替的な安全指標の使用などがあります。以上を踏まえ，各事業段階において長期安全性を評価するための基本的な手順をまとめました（図 7-1）。

安全評価の基本的な手順は各段階で共通ですが，事業全体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します。

文献調査の段階では，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であるものの，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評価にかかわる不確実性が大きくなります。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ります。したがって，この段階の安全評価は，地層処分システムが安全機能を発揮するかどうかを体系的に評価するものではなく，次段階以降不確実性を効果的に低減させていくために，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が主眼となります。

概要調査の段階においては，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や対象とする岩盤の長期安定性に関する知見が充実します。また，処分場の設計においては，充実した知見に従い，候補母岩の選定，地下施設と人工バリアの概念設計を行うことができます。したがって，安全評価においては，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，セーフティケースの構築，精密調査計画の作成に対して，その結果を反映することが主眼となります。

精密調査の段階においては，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します。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します。したがって，安全評価においては，これらを反映して，地質環境や処分場設計などの前提条件を見直した上で総合的な安全評価を行い，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となります。

7.1.2 不確実性への対応

3.2.2で述べたように，セーフティケースにおいて不確実性の取扱いは重要な課題です。これに対しては，地質環境の調査・評価を段階的に詳細化することで，可能な限り低減します。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します。不確実性を完全に排除することはできませんが，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います（図 7-2）。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います。

- ・ 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ことにします。ただし，処分場の設計の最

適化や頑健性の例証のために、一部の安全機能が無視するなどのあえて非現実的な想定をする場合があります。

- ・ 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います。
- ・ 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）を考慮します。

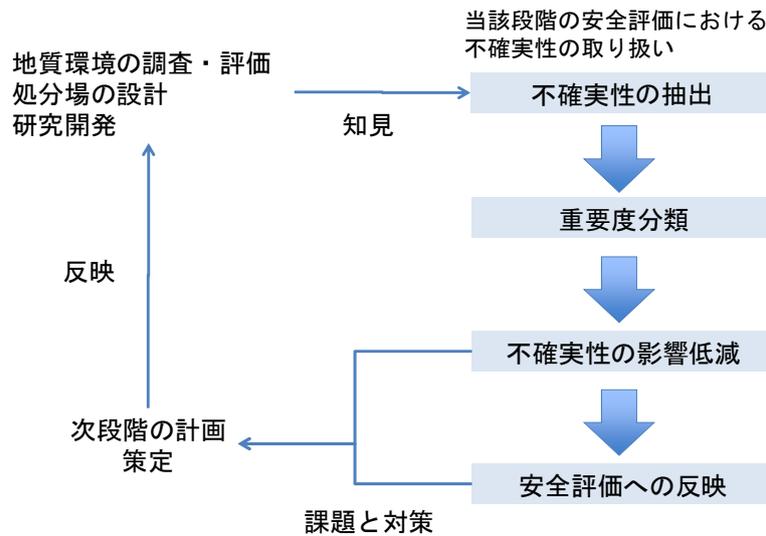


図 7-2 安全評価における不確実性の取り扱いの概念

7.2 安全評価の進め方

7.2.1 シナリオの構築

安全評価におけるシナリオは、地層処分システムの安全機能を体系的に評価するために、地層処分システムの将来挙動を時系列的に記述することにより、評価に必要なモデルの開発やデータ設定の枠組みを与えるものです。また、超長期の将来予測に関する不確実性などにより、複数の選択肢を想定することが不可欠です。これまで、複数の選択肢を想定する際には、地層処分システムの特徴 (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) に関する情報 (これらの総称を FEP という) を中心として、シナリオ構築が進められてきました。一方、近年、従来の FEP に基づくシナリオ構築手法に対して、安全機能を基軸とすることが重視される傾向にあります (例えば、ONDRAF/NIRAS, 2001 ; Nagra, 2002 ; ANDRA, 2005 ; SKB, 2006 ; Ebashi et al., 2010)。すなわち、安全機能がどのような地層処分システムの特徴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かを整理することです。このことにより、着目すべき現象の範囲が明確になること、シナリオの構築過程がより明確になること、および作業を効率化することが期待できます。一方、従来の FEP に基づくシナリオ構築手法では、重大な抜け落ちがないことを確認していきます。このため、NUMO では、従来の FEP に基づくシナリオ構築手法と安全機能を中心としたシナリオ構築手法とを組み合わせ、シナリオを構築していきます。また、地層処分システムの将来挙動を整理する際には、さまざまな分野の異なる知見を取りまとめるために、ストーリーボードを準備します (図 7-3)。なお、システムの将来挙

動については、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ありません。したがって、国際的に検討されている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現象を選択します。

7.2.2 モデルの選定

安全評価におけるモデルに関しては、段階的に具体化す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、評価に用いるモデルを選定します。しかしながら、関連する現象の多様性、地質環境の不均質性、評価期間の長期性という特徴のため、実際の地層処分システムの複雑な挙動を精緻にモデルとして表現することは困難です。そこで、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ます（図 7-4）。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します。これにより、用いるモデルの信頼性を向上させることが期待できます。モデルの不確実性は、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から生じます（NUMO, 2004a）。そこで、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の選択肢を示すとともに、それらの選択肢が安全評価の結果に与える影響の把握を行います。

7.2.3 データセットの設定

安全評価におけるデータセットに関しては、事業の初期段階において、特定のサイトについて取得できる情報量が限られます。このため、対象サイトに類似する情報に基づいてデータセットを設定します。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）を反映します。さらには、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、信頼性を向上させます。データの不確実性については、地質環境の調査・評価や実験などで取得するデータを処理・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します。したがって、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します。

7.2.4 安全解析の実施

安全解析は、シナリオ、モデルおよびデータセットに基づき実施します。安全解析は、一つのパラメータに一つのデータセットを設定する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います。この際、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幅を想定し、さまざまな安全解析の結果が安全基準を満足することを確認します。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ます。また、次段階の調査計画の策定や処分場の設計の最適化に反映するため、不確実性の影響把握および種々の設計オプションの比較についても検討します。

前提条件		現状		処分場の深度とレイアウト		水期最盛期での状況			
		海	陸	海	陸	海	陸		
		<ul style="list-style-type: none"> ● 処分場深度 ● 岩種：第三紀堆積岩（泥岩） ● 動水勾配 ● 透水係数 ● 有効閉鎖率 ● 隆起速度 ● 地温勾配 ● 気温 ● 降雨量 ● 河川流出高 ● 処分場立地周囲：淡水域 還元雰囲気 		<ul style="list-style-type: none"> ● 岩種：第三紀堆積岩 ● 動水勾配 ● 透水係数 ● 有効閉鎖率 ● 隆起速度 ● 地温勾配 ● 海水準 ● 気温 ● 降雨量 ● 河川流出高 ● 凍土厚さ ● 処分場立地周囲：淡水域 還元雰囲気 					
		時間枠							
		建設前	建設・操業・埋戻し・閉鎖	再冠水までの過渡期	オーバーバックの閉じ込め期間	核種の漏出・移行開始～気候変動の開始	自然現象の予測可能期間		
<p>【処分概念】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・陸地処分 ・ガラス固化体 4 万本 ・堆積岩 ・処分場（平面配置） ・廃棄体設置方式 	<p>【人工バリアスケール】</p>	<p>処分場深度における状態</p> <ul style="list-style-type: none"> ・初期応力 ・間隙水圧 ・地温 	<p>掘削中</p> <p>EBS 定置中</p> <p>埋戻し中</p> <p>【オーバーバックによる閉じ込め】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・掘削→掘削影響領域（EDZ）の発生→間隙の増大 ・応力緩和と一透水性の増加 ・掘削再開での排水→不飽和領域の発生 ・オーバーバックからの発熱→ベントナイトの温度上昇 ・ベントナイトへの再冠水→膨潤圧発生 ・岩盤のクランプ変形→岩盤応力の回復 ・埋戻し部への再冠水→EDZ 不飽和領域の回復 	<p>【オーバーバックによる閉じ込め】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体の発熱→ベントナイト温度上昇 ・再冠水→間隙水圧の回復→ベントナイトの膨潤 ・岩盤のクランプ変形→岩盤応力の回復 ・支保工の劣化→高 pH プリュームの発生→間隙増加→透水性増大 	<p>【オーバーバックによる閉じ込め】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地下水のオーバーバック接触 →腐食→ガス発生→ベントナイト中の移行 →腐食膨張→ベントナイトの変質 →腐食生成物→ベントナイトの変質 ・支保工の劣化→高 pH プリュームの発生→間隙増加→透水性増大 	<p>【人工バリアによる閉じ込め】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地下水とガラス固化体の接触 →ガラス固化体の溶解→核種の浸出→ベントナイト中の拡散移行（収着）→EDZ / 埋戻し中への移行拡大（拡散・希釈・収着） →埋戻し中への移行（拡散・希釈・収着） ・オーバーバックの腐食進展→腐食膨張 / 腐食生成物→ベントナイトとガラス固化体の変質・変形の進展→安全機能への影響 ・支保工の劣化→高透水領域の発生 / 高 pH プリュームの発生→岩盤 / ベントナイトの変質による安全機能への影響 	<p>【人工バリアによる閉じ込め】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の溶解進展→核種の浸出→ベントナイト中の拡散移行（収着）→EDZ / 埋戻し中への移行拡大（拡散・希釈・収着） ・オーバーバックの腐食進展→腐食膨張 / 腐食生成物→ベントナイトとガラス固化体の変質・変形の進展→安全機能への影響 ・高 pH プリュームによる岩盤 / ベントナイトの変質の進展→安全機能への影響 		
		<p>【処分場スケールでの閉じ込め】</p> <p>処分場深度における状態</p> <ul style="list-style-type: none"> ・初期応力 ・間隙水圧 ・地温 ・塩分の存在（古海水など） 	<p>建設・操業中の排水→アクセス坑道 処分坑道周辺の閉鎖水圧の減少、地表近辺の地下水面の低下</p> <p>オーバーバックの発熱→処分場全域での温度上昇</p> <p>埋戻し→再冠水→間隙水圧の回復</p> <p>埋戻し→処分場周辺応力場の回復</p> <p>プラグ設置→地表への地下水経路の遮断</p>	<p>オーバーバック発熱→処分場周辺の温度上昇→熱対流の発生</p> <p>再冠水→処分場周辺の閉鎖水圧の回復</p> <p>支保工の劣化→坑道周辺の高透水領域の発生→坑道に沿っての地下水流動</p> <p>支保工の劣化→高 pH プリュームの発生</p>	<p>地下水は処分場内の高透水ゾーンを優先的に移動</p> <p>熱の影響の低減</p> <p>コンクリート支保工の劣化→地下水流動の卓越経路（EDZ）に沿って発生する可能性（ガス）の移行経路</p> <p>高 pH 環境の形成</p>	<p>【処分場スケールでの閉じ込め】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・核種の人工バリアからの放出（地下水流動の方向とEDZに沿って卓越経路の移行可能性） ・コンクリート支保工の劣化→坑道に沿っての地下水流動の卓越経路の形成 ・高 pH 環境の形成 	<p>【処分場スケールでの閉じ込め】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・核種の人工バリアからの継続した放出 		
		<p>【天然バリアスケール】</p> <p>潜水層（酸化水）</p> <p>地下水（還元水）</p> <p>海水準</p>	<p>潜水層（酸化水）</p> <p>地下水（還元水）</p>	<p>潜水層（酸化水）</p> <p>地下水（還元水）</p>	<p>潜水層（酸化水）</p> <p>地下水（還元水）</p>	<p>【天然バリアによる閉じ込めと隔離】</p> <p>潜水層（酸化水）</p> <p>地下水・核種</p> <p>塩水環境</p>	<p>【天然バリアによる閉じ込めと隔離】</p> <p>流出点の変化（海から河川へ）</p> <p>地下水・核種</p>		
		<p>そのほかの天然現象</p> <p>火山・活断層・泥火山・マスマーグメントによる著しい影響はサイト選定と工学的対策で回避</p>	<p>火山・活断層・泥火山・マスマーグメントによる著しい影響はサイト選定と工学的対策で回避</p>	<p>火山・活断層・泥火山・マスマーグメントによる著しい影響はサイト選定と工学的対策で回避</p>	<p>火山・活断層・泥火山・マスマーグメントによる著しい影響はサイト選定と工学的対策で回避</p>	<p>火山・活断層・泥火山・マスマーグメントによる著しい影響はサイト選定と工学的対策で回避</p>	<p>火山・活断層・泥火山・マスマーグメントによる著しい影響はサイト選定と工学的対策で回避</p>		
<p>留意事項</p> <ul style="list-style-type: none"> ・処分深度に古海水の存在の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・初期状態の継続 	<ul style="list-style-type: none"> ・初期状態の継続 	<ul style="list-style-type: none"> ・初期状態の継続 	<ul style="list-style-type: none"> ・初期状態の継続 	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水の流出点→海底堆積物での収着→海水による希釈→現状の生態系維持 	<ul style="list-style-type: none"> ・水河期の到来→生物圏の変化（海から河川）→凍土の発生→地表水系の変化→生態系の変化 			

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 7-3 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）

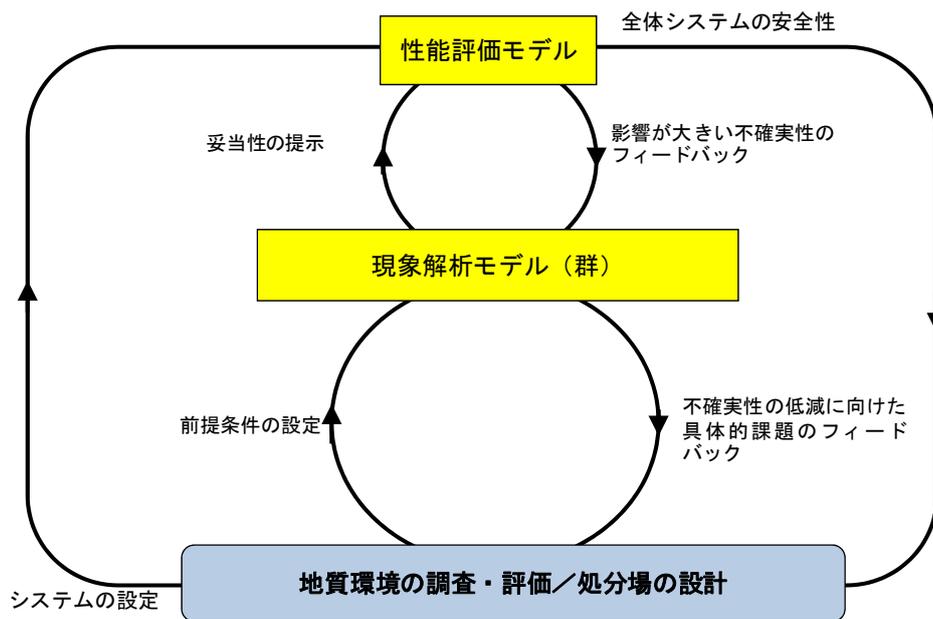


図 7-4 性能評価モデルと現象解析モデルの相互補完的な利用
(Ishiguro et al., 2007 に一部加筆)

7.2.5 安全評価の信頼性に関する検討および知見の統合

安全解析を実施した後は、OECD/NEA が提案している線量以外の多面的な論点（表 7-1：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います。それぞれの段階において、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、安全評価の結果とその信頼性、ならびに次段階以降の課題とその対策の方向性などをセーフティケースとして取りまとめます。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、信頼性の向上を図ります。

表 7-1 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

7.3 安全評価を支える技術の整備

NUMO および基盤研究開発機関は、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可能とする研究開発および技術開発を進めてきました。

- ① 地質環境の多様性と長期変遷に対応すること
- ② さまざまな設計オプションに対応すること
- ③ 更新される知見を適切に安全評価に取り込むこと
- ④ 自然現象の著しい影響を仮想的に評価すること

そこで、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安全評価に関する技術の進展を整理しました (付表 7-1~付表 7-4)。以下では、上述した四点に直接関連する主な技術について記述します。

7.3.1 シナリオ構築技術の整備

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ります。このうち、沿岸域では、内陸部に比べて、海水の影響や塩淡水境界の長期変遷などを、隆起・侵食や気候・海水準変動と関係づけながら考慮する必要があります。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水境界の長期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ました (NUMO, 2011b)。

また、地層処分事業では、技術開発や研究開発によって種々の知見が段階的に拡充されることが想定されるため、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必要です。また、ニアフィールドは、核種移行を抑制するバリアとして重要な役割を果たすとともに、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、相対的に小さいという性質があります。したがって、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す。そこで、安全機能を中心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ました (NUMO, 2011b)。

なお、基盤研究開発機関では、シナリオ構築の基盤となる FEP をデータベースとして取りまとめています (神崎ほか, 2009)。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 が、包括的 FEP リストに基づき整理されています (電事連・JNC, 2005a)。

自然事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す。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になることから、その発生時期や頻度に関する不確実性を考慮する必要があります。このため、NUMO および基盤研究開発機関は、地震・断層活動の著しい影響に関するシナリオ構築手法 (表 7-2) とその影響解析を検討しています (NUMO, 2011b : Miyahara et al., 2008)。

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ました。

表 7-2 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 (NUMO, 2011b)

		断層新生直後の現象	その後の定期的変遷
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	熱：断層摩擦発熱により 300°C以上まで上昇（数分間） 水：発熱に起因する熱水対流・緩衝材止水性低下 力：廃棄体の破壊・緩衝材のせん断 化：核種の溶解および人工バリア外への散逸	熱：再活動時の温度上昇 水：発熱に起因する熱水対流 力：緩衝材の反復的せん断 化：核種は完全に散逸
	それ以外の廃棄体	熱：若干の温度上昇（短期間） 水：間隙水圧変化による過渡的流動 力：地震動 化：-	熱：- 水：広範な変形領域の透水性上昇に伴う流速増大 力：地震動 化：還元性雰囲気での核種移行
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	熱：断層摩擦発熱により 300°C以上まで上昇（数分間） 水：発熱に起因する熱水対流・緩衝材止水性低下 力：廃棄体の破壊・緩衝材のせん断 化：核種の溶解および人工バリア外への散逸	熱：再活動時の温度上昇 水：発熱に起因する熱水対流 力：緩衝材の反復的せん断 化：核種は完全に散逸
	それ以外の廃棄体	熱：若干の温度上昇（短期間） 水：間隙水圧変化による過渡的流動 力：地震動 化：-	熱：- 水：広範な変形領域の透水性上昇に伴う流速増大 力：地震動 化：周辺の地下水の酸化・緩衝材中の鉄鉱物による還元

熱：熱的影響，水：水理学的影響，力：力学的影響，化：化学的影響

7.3.2 モデル化技術の整備

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（放射性物質が地表に流入すると想定する場所）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す。このため、不均質な母岩中での移行経路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ります。そこで、沿岸域の特徴をより現実的に即して評価できるようにすることを目的として、地下水の流れと水質の変遷を考慮して、母岩の性能と生物圏を評価するためのモデル化技術を整備しました（NUMO, 2011c）。

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（坑道配置方法、廃棄体定置方式など）を検討します。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違いを、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す。これに関して、性能評価の観点から設計オプション間の違いを評価する場合、既存の一次元モデルでは、人工バリア周辺の岩盤の不均質性および人工バリアや地下施設の三次元的形状が保守的に単純化されるため、定量的な違いを把握することが難しい状況でした。そこで、岩盤の不均質性や設計オプションが物質移行現象と核種移行現象に与える影響をより現実的に即して評価できるようにするため、三次元のモデル化技術を開発しました（Wakasugi et al., 2008 : NUMO, 2011c）。開発した三次元のモデル化技術のうち、物質移行解析モデルを二種類の岩盤の不均質性に対して適用した例を図 7-5 に示します。図 7-5 中の色は、それぞれの時間間隔における粒子の移動速度を表現しています。この例における硬岩タイプ1では、各粒子が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一方で、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行しているため、断層による粒子の移動が多くなります。これらの情報は、処分場の設計における坑道配置方法の検討に対して、有用な判断材料の一つになると考えています。

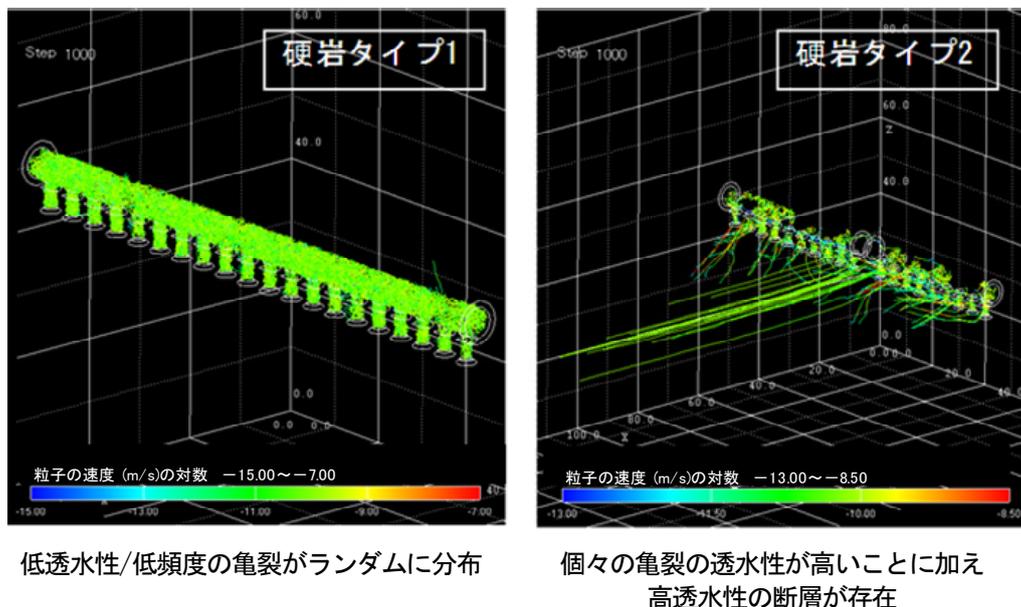


図 7-5 三次元物質移行解析の適用例（10 万年後における粒子軌跡）（NUMO, 2011c）

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強化され、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ました。

7.3.3 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、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します。第2次取りまとめ以降、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ます。

- ・ 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るとともに、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もの (館ほか, 2009)
- ・ 拡散データベース (JAEA-DBD) : 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, 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)

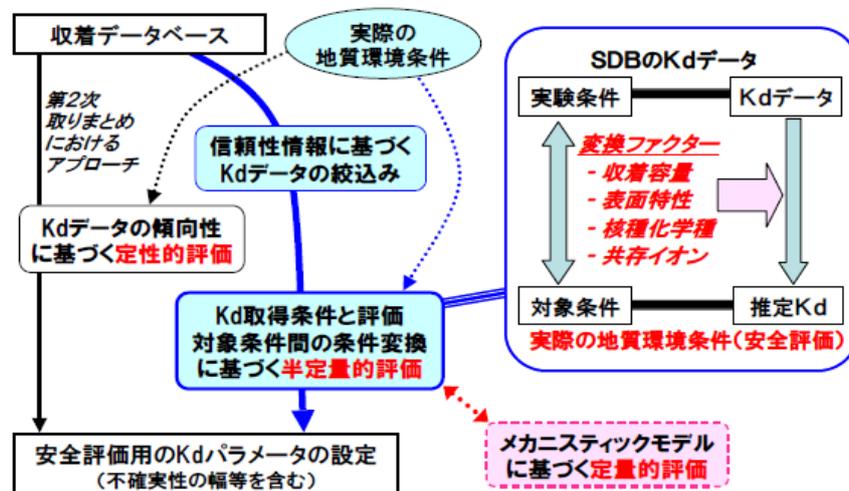


図 7-6 収着データベースと条件変換法によるパラメータ設定のイメージ

(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、実験条件や実験手法の信頼性あるいは情報の追跡性などの面においてさまざまな品質のデータが混在していることを勘案し、その信頼度を評価するために複数の判断基準から構成されるガイドラインを策定しています (Ochs et al, 2008)。

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ま

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、環境条件の違いを補正する手法の検討も進められています。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対象とし、これらのデータが取得された実験条件と、安全評価を行う上で想定している地質環境条件との間の差異について補正します。この補正手法を、評価上重要な核種であるセシウムの堆積岩中での収着挙動に対して適用しました (Ochs et al, 2008)。この結果、粘土鉱物としてイライト含有率、また、共存イオンとしてナトリウムイオン濃度を考慮した変換係数を補正手法として用いることにより、実験値と概ね整合的な値が導出できることが示されました。

第2次 TRU レポートでは、pH の変化に応じて区分したセメント系材料の変質領域ごとに、セメント系材料の収着分配係数が設定されています (Mihara and Sasaki, 2005)。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、同レポートの性能評価において、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ます。現在、鉱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を詳細化するための検討が進められていますが、現時点において、その影響については、同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ます (NUMO, 2011a)。

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データセットの設定に関する基盤的情報が強化されました。

7.4 結論

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の基本的な考え方と進め方を示しました。また、第2次取りまとめ以降、NUMO および基盤研究開発機関が、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ました。これらの成果により、地層処分事業における長期安全性評価を支える技術は、2000年以降、地質環境の多様性や長期変遷への対応、さまざまな設計オプションへの対応、最新の知見への対応といった観点から、その信頼性が一段と向上しています。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、長期安全性評価技術に関するさらなる信頼性向上に取り組みます。

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

本章では、ここまでの章で述べてきたことを取りまとめ、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）、および精密調査地区選定段階（概要調査の段階）を対象として、事業を推進するための手順とその実施内容を述べます。また、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に向けた技術的な内容について述べます。

本報告書における各章の位置付けを示すと図 8-1 のようになります。

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ります。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りますが、文献調査を開始した以降、技術的な実施手順は同じです。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します。

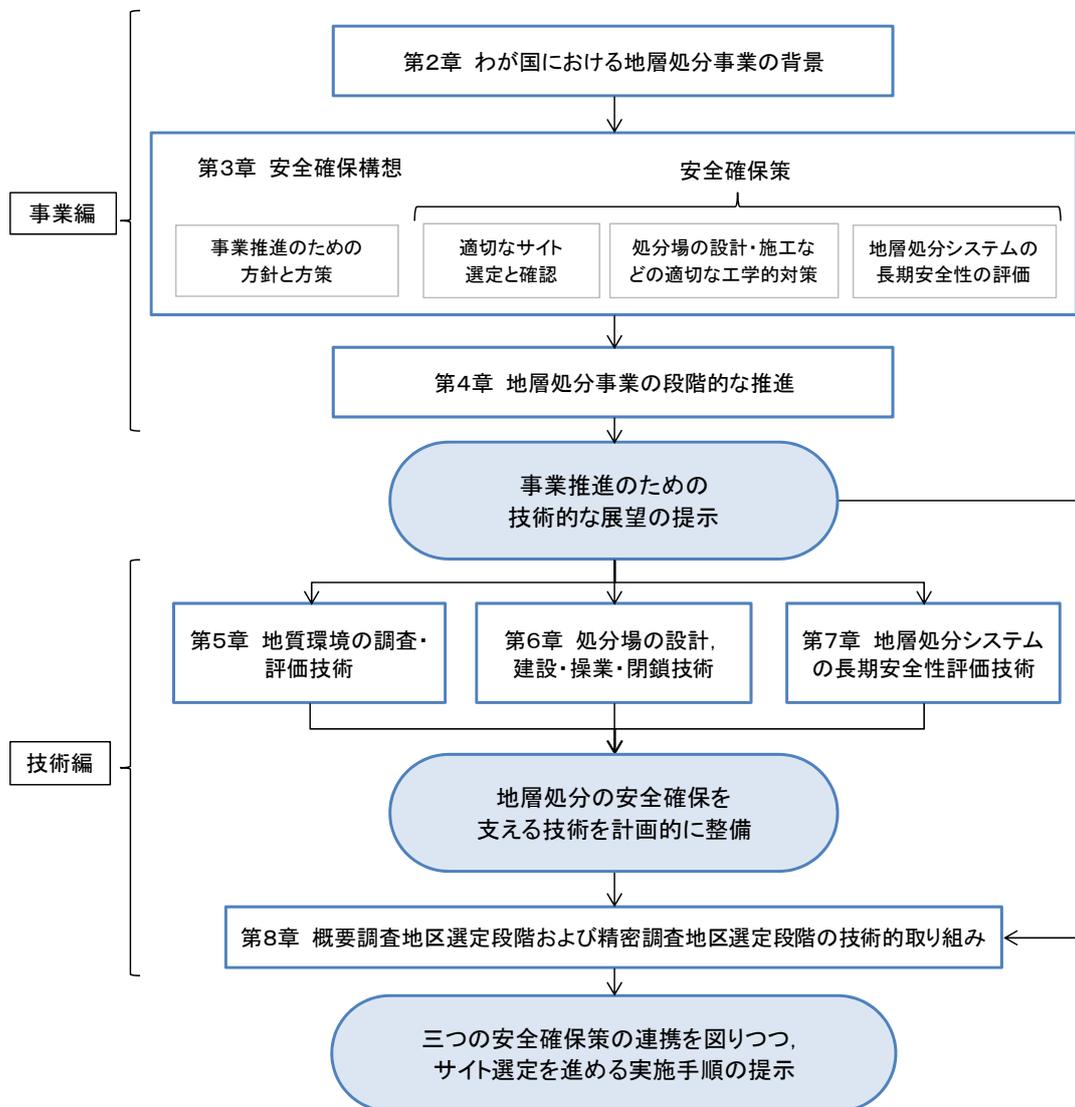


図 8-1 本報告書の各章と第 8 章の関係

8.1 公募および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す。このうち、公募から精密調査地区選定段階（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 8-2 に示します。

NUMO は、地域から応募がなされた場合、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います。確認を行う項目は以下の二点です。

- ・ 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、応募がなされた市町村長に送付します。なお、事前確認で上述二点に適合しない場合には、文献調査の対象としません。

文献調査計画を当該地域などに説明した後、文献調査を実施して、概要調査地区選定上の考慮事項への適格性を確認します。その結果、不適格の場合は、概要調査地区の対象としません。適格の場合は、文献調査に関する法定報告書を取りまとめて公開し、応募し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います。また、地域に向けて説明会を開催します。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 の見解を作成します。これらを踏まえて、NUMO は次の段階の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します。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を改定します。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します。また、これと並行して、NUMO では、次段階の準備として概要調査計画書を作成します。

概要調査についても、同様の手順により、次の段階の精密調査地区を選定し、経済産業大臣に実施計画の変更を申請します。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を改定します。以上の過程を経て、実施計画の変更が承認され精密調査地区の選定を完了します。また、これと並行して、NUMO では、次段階の準備として精密調査計画書を作成します。

精密調査についても同様の流れとなります。

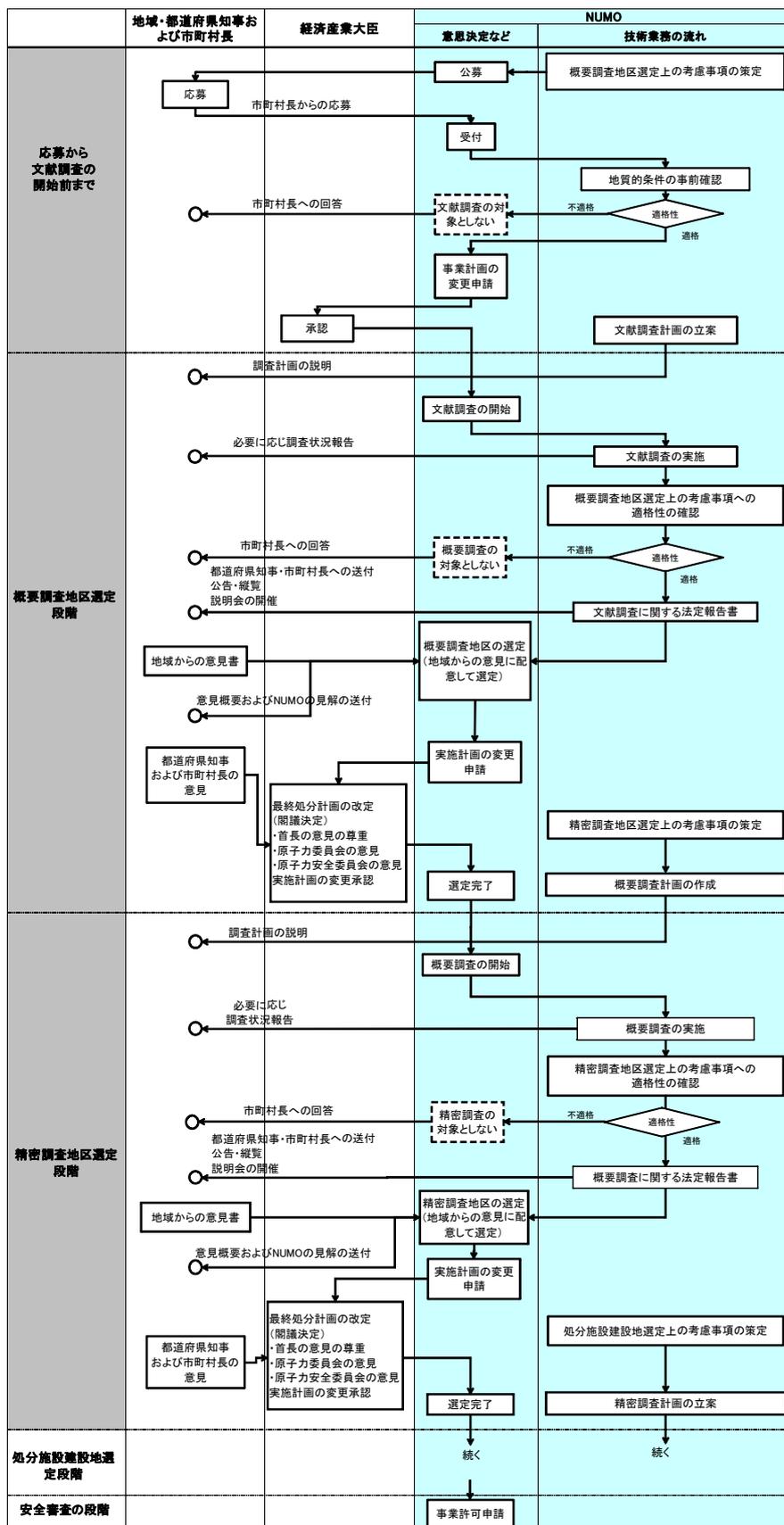


図 8-2 概要調査地区選定段階および精密調査地区選定段階における事業の流れと技術業務の流れ（公募の場合）

8.2 概要調査地区選定段階（文献調査の段階）

8.2.1 概要調査地区選定段階（文献調査の段階）の実施事項

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）」としています（4.3 参照）。

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します。その際、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には、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ります。

文献調査においては、文献調査マニュアルに基づいて、文献・資料（文献情報）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・管理します。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す。

自然現象の影響としては、火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食について、さらに第四紀の未固結堆積物ならびに鉱物資源について調査・評価を行います。

得られた地質環境情報から、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します。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について、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構築します。概念モデルをベースに、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）、物質移行特性に関する情報を定量的に表現し可視化して地質環境モデルを構築します。

構築した地質環境モデルを用いて、自然現象の影響の調査・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・評価も適用して、現在の地質環境の状態がどのように変化するか地質環境特性の長期変遷を評価します。

自然現象の影響の調査・評価、および地質環境特性の長期変遷の評価を受け、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」と照らし合わせて、明らかに不適格な地域を除外し、適格性を確認します。検討の結果については、文献調査に関する法定報告書として取りまとめます。

一方、処分場の概略検討として、地質環境モデルに基づいて、人工バリアや地下施設の設計の適用性を検討します。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、次段階の調査項目や設計課題を整理します。

また、概略的な安全性の検討として、文献調査で得られた地質環境に関する限定的な情報を基に、処分場の概略検討で実施した人工バリアや地下施設の設計に対して、天然バリアとしての母岩の性能の概略的な評価、および人工バリアの保守性を重視した設計に基づく、概略的な安全評価を実施します。

これらの処分場の概略検討と、概略的な安全性の検討に基づき、概略的な処分場概念を構築して、その結果を「文献情報に基づく処分場の概要」として取りまとめます。

文献調査に基づき作成された、「文献調査に関する法定報告書」および「文献情報に基づく処分場の概要」を公表し、当該地域において公告・縦覧し、関係都道府県内で説明会を開催します。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 の見解を作成します。ここまで示したプロセスを経て、概要調査地区を選定します。

以上の文献調査の実施事項をフローにすると図 8-3 に示すようになります。

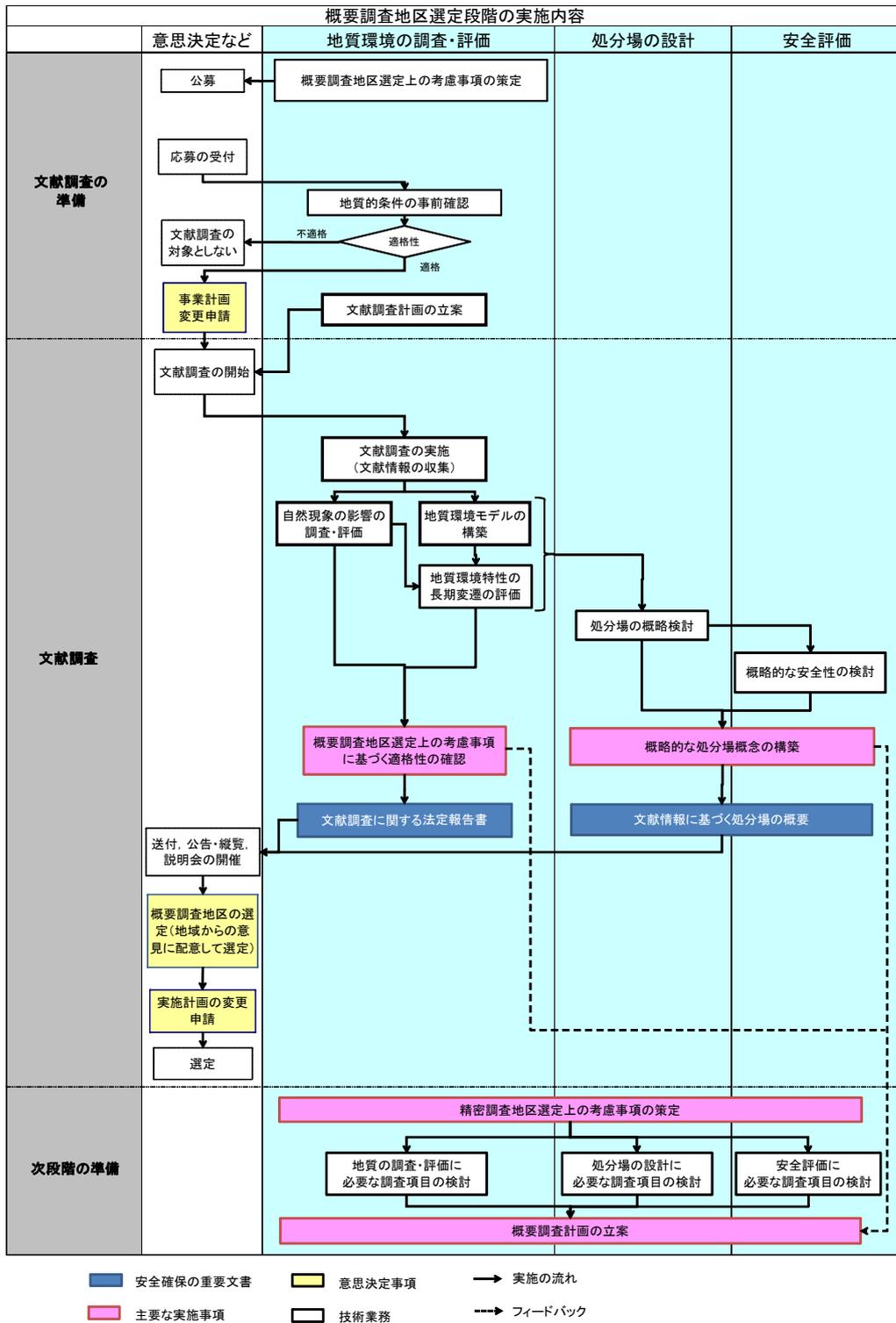


図 8-3 概要調査地区選定段階における実施事項フロー図 (公募の場合)

このように、概要調査地区（一点鎖線で囲まれた範囲）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（点線で囲まれた範囲）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ります。このような考え方に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 8-4 に示します。

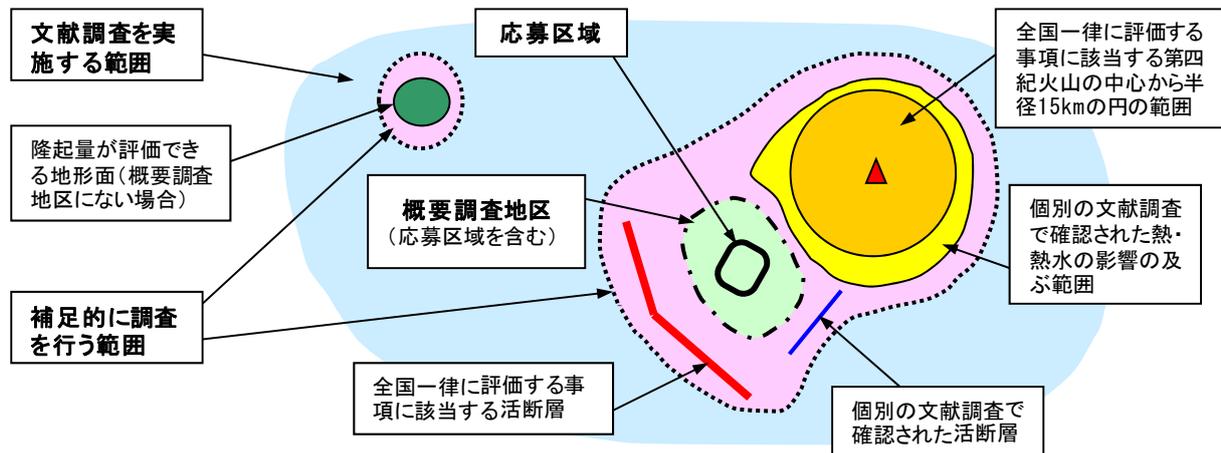


図 8-4 概要調査地区および補足的に調査する範囲の設定イメージ（公募の場合）

（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、概要調査地区に含めません。
- ・ 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りますが、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ありません。
- ・ 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ります。

8.2.2 「概要調査地区選定上の考慮事項」について

「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す。これは、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）を踏まえて策定しています。

「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」があります。

「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ります。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します。

本段階に関する法定要件は次のとおりです。

- ・ 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。(経済産業省令で定められる事項)
- ・ 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。(経済産業省令で定められる事項)

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、「安全性の確保の前提の下、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す。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、の各項目に対して必要に応じて相対比較を行います。

8.3 精密調査地区選定段階（概要調査の段階）

8.3.1 精密調査地区選定段階（概要調査の段階）の実施事項

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ます（4.3 参照）。

概要調査は、地表調査のフェーズとボーリング調査のフェーズの二つに分けて順次実施します。

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フェーズの計画立案に資する情報を取得することを目的として、地表踏査・トレンチ調査による地上からの地形・地質調査、物理探査（空中、地上、海上）などを実施します。地表調査から得られた結果に基づき、自然現象の影響として火山・火成活動の調査・評価、地震・断層活動の調査・評価、隆起・侵食の調査・評価を行います。

地表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、文献調査における評価結果を確認し、地質構造モデルを更新します。また、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、岩盤特性などの地質環境モデルを更新します。更新された地質環境モデルを用いて、自然現象の影響の調査・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、地質環境特性の長期変遷を評価します。

ボーリング調査のフェーズでは、地表調査では取得できなかった地下深部のデータをボーリング調査により取得します。地表調査およびボーリング調査から得られた結果に基づき、火山・火成活動の調査・評価、地震・断層活動の調査・評価、隆起・侵食といった自然現象の影響の調査・評価を行います。

地表調査およびボーリング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・特徴付けを行います。これに対して、文献調査における評価結果を確認し、地質構造モデルを更新します。また、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、

岩盤特性などの地質環境モデルを更新します。

更新された地質環境モデルを用いて、自然現象の影響の調査・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地質環境特性の長期変遷を評価します。

これらの地質環境調査・評価の結果をもとに、精密調査地区を設定しようとする地区について、後述する「精密調査地区選定上の考慮事項」と照らし合わせて、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確認します。検討の結果については、「概要調査に関する法定報告書」として取りまとめます。

次に、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します。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います。候補母岩の適性は、熱環境、力学場、水理場、化学環境、母岩の広がり、工程・経済性などについて評価し、母岩としての適性の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します。

ここまでで得られた地質環境モデルと候補母岩の特性に基づいて、処分場の概念設計を行います。これは、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（内空断面形状、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）、および地上施設の設計からなります。そして、処分概念・技術オプションについて、サイトの地質環境への適用性、建設工程の実現性、経済性などに基づいて評価し、絞り込みを行います。

また、地質環境モデルと処分場の概念設計に基づき、安全評価シナリオと性能評価モデルおよびデータセットを用いて、予備的な安全評価を実施します。

さらに、処分場の概念設計と予備的な安全評価のそれぞれの結果を集約し、レファレンス処分場概念として統合し、「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」として取りまとめます。

概要調査地区の選定と同様に、「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」を公表し、当該地域において公告・縦覧し、関係都道府県内で説明会を開催します。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の見解を作成します。ここまでで示したプロセスを経て、精密調査地区を選定します。

以上の概要調査の実施事項をフローにすると図 8-5 に示すようになります。

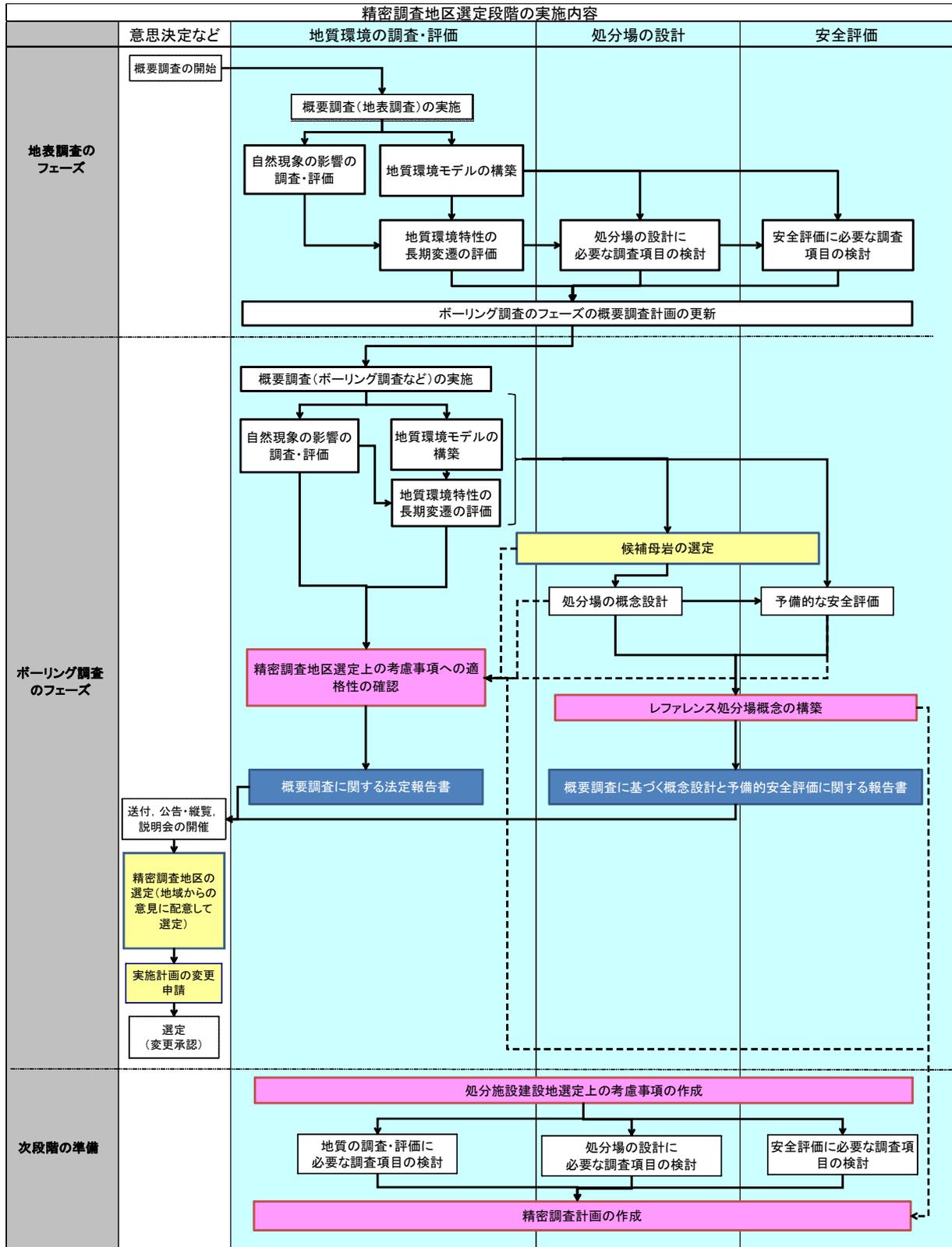


図 8-5 精密調査地区選定段階における実施事項フロー図

8.3.2 「精密調査地区選定上の考慮事項」について

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います。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、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います。

本段階に関する法定要件は次のとおりです。

- ・ 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。

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います。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います。

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ります。このことから、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します。

一方、地下調査施設を建設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ります。従って、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ます。これにより、法定要件に対する適合性の確認とともに、地層処分の成立性の判断および相対比較を行います。

「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、公表する予定です。

8.4 結論

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ました。

- ・ 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。

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す。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ています。

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ります。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、隔離します。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きます。また、地層処分事業は100年程度にわたる長期の事業であり、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ります。

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ます。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ます。

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す。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ました。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きます。

2010年技術レポートおよび本報告書は、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、安全な地層処分の実施を支える技術の整備状況を取りまとめました。

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ます。その上で、NUMO設立以降、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ました。

- ① より現実的な調査・設計・評価が可能な技術を整備しました。
- 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ました。
- 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ました。

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いまし

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ました。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となる技術を中心に、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きます。

本報告書は、2010年技術レポートの主な内容を紹介しました。2010年技術レポート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きました。日本原子力学会特別専門委員会や海外の専門家などに第三者的な評価（レビュー）をお願いし、多くの重要なコメントをいただきました。2010年技術レポートは、これらのご助言やコメントを反映して作成したものです。

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。

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、淡水の下に海水が浸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。

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。

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。

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融した後、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。

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。

原子力政策大綱

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。

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。

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。

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。

【夕行】

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」（第四紀火山カタログ委員会，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と深さを持っ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。

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鑄鉄管などは，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。

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。

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。

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。

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。

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。

【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。

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

参考文献

- ANDRA (2005) : Dossier 2005 Argile.
- 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—長野県西部地震震源域における地球物理学的調査—, 電力中央研究所報告, N08038.
- 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., Jaquet, O., Litchfield, N., Mahony, S., Smith, W., Sparks, S., Stirling, M. and Wallace, L. (2009b) : 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.
- 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.
- 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) (2005a) : TRU 廃棄物処分技術検討書 根拠資料集, FEP 辞書.
- 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—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 (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 (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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2003) : 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) (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—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(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) (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― (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) (2010) : 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.
- 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 (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.
- 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.
- 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.
- 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 (2006) : Geological Disposal of Radioactive Waste, Safety Requirements, IAEA Safety Standard Series No. WS-R-4, International Atomic Energy Agency.

- IAEA (2009) : Disposal of Radioactive Waste, Draft Specific Safety Requirements No.SSR-5 DS354 Draft4,International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2011) : Disposal of Radioactive Waste, SSR-5, International Atomic Energy Agency.
- 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.
- 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.
- 入矢桂史郎, 三原守弘 (2003) : ポゾ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.
- 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.
- JAEA (日本原子力研究開発機構) (2008) : 幌延深地層研究計画 平成 20 年度調査研究計画.
- 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.
- 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.
- 経済産業省 (2008) : 特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画, 平成 20 年 3 月 14 日 閣議決定.
- 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.
- 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.
- Kondo, H. (2009) : 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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., 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.
- Nagra (2002) : Project Opalinus Clay: Safety Report, Nagra Technical Report 02-05, Nagra, Wettingen, Switzerland.
- 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, 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.
- 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) (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) (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—3.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2009d) : 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) (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) (2011c) : 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.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011d) : 地層処分施設の耐震性評価, NUMO-TR-10-13.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011e) : 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—, NUMO-TR-11-01.
- 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 Management 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 (2002) : Establishing and Communicating Confidence in Safety Case of Deep Geologic Disposal: Approaches and Arguments, OECD/Nuclear Energy Agency.
- ONDRAF/NIRAS (2001) : Technical Overview of SAFIR-2: Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2, ONDRAF/NIRAS Report NIROND 2001-05E, Belgium.
- 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.
- 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) (2010) : 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.
- 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.
- SKB (2006) : Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation, Main Report of the SR-CAN project, SKB Technical Report TR-06-09, SKB, Stockholm, Sweden.
- 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.

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.

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.

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－海外の緩衝材データの拡充とその活用法－, JAEA-Data/Code 2009-029.

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.

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.

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.

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.

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.

付 録

注 本項に記載する表は、2010年技術レポート（地層処分事業の安全確保（2010年度版））からの再掲であるため、本表に掲載されている文献情報については、2010年技術レポートを参照いただきたい。

付表 5-1～5-8 の文献情報は2010年技術レポートの第5章の参考文献を、付表 6-1～6-3 の文献情報は第6章の参考文献を、付表 7-1～7-4 の文献情報は第7章の参考文献を参照してください。

付表 5-1 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	放射年代測定の適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とされ ^{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

付表 5-2 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	○	○	○	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		○	○	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	○	○	○	34) JNC (2005a) 35) 坂川ほか (2005)
確率論的評価	○	○		36) Chapman et al. (2009b) 37) Jaquet et al. (2008) 38) Martin et al. (2004)	

○：主な適用段階

付表 5-3 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

付表 5-4 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	
活断層の存在の把握	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)楮原ほか (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)
	断層破砕帯の評価	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の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

付表 5-5 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

付表 5-6 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の開発 ⁸⁾ 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

付表 5-7 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し出し性を判断・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

付表 5-8 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。		○	
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が進められている。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

付表 6-1 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)

付表 6-2 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 $1.5\text{Mg}/\text{m}^3$ 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 ¹ 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。	Cama 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)

¹ 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）。

付表 6-3 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 (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)	

付表 7-1 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)	○	○	
		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)	○	○	
	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)	○	○	
		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)	○	○	
		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)	○	○	

(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)

付表 7-2 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)	○	○		
		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)		○	○	
	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)	○	○		
		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)	○			
	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)	○		

(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)

付表 7-3 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)		○	
		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)	—	—	○
		余裕深度処分の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)					
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)	○	○	
		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)

付表 7-4 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	B10
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 B10:生物圏)

原子力発電環境整備機構

(略称:原環機構)

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)