

第7章

地層処分システムの 長期安全性評価技術

第7章 目次

第7章 地層処分システムの長期安全性評価技術	7-1
7.1 基本的考え方	7-1
7.1.1 安全評価の手順	7-2
7.1.2 安全評価戦略の策定	7-4
7.1.2.1 安全評価の目的の設定	7-4
(1) 地層処分システムの性能確認	7-4
(2) 安全基準遵守の確認	7-5
(3) 不確実性の影響把握	7-5
(4) 設計オプション間の比較	7-5
7.1.2.2 不確実性への対応	7-5
(1) 不確実性の特徴	7-5
(2) 不確実性の取り扱い	7-6
7.1.2.3 安全評価における品質保証	7-7
7.1.3 シナリオの構築	7-8
7.1.3.1 状態設定とシナリオの作成・分類	7-8
7.1.3.2 シナリオ分類の枠組み	7-9
(1) 地層処分システムの性能確認シナリオ	7-10
(2) 地層処分システムの長期安全性評価シナリオ	7-10
(3) 仮想シナリオ	7-11
7.1.4 モデルの選定	7-12
7.1.4.1 モデルの信頼性向上	7-12
(1) モデルの相互補完的活用	7-12
(2) 独立した情報との比較	7-12
(3) 解析ツールの品質	7-13
7.1.4.2 モデルの不確実性の取り扱い	7-13
7.1.5 データセットの設定	7-14
7.1.5.1 設定の考え方	7-14
7.1.5.2 データの不確実性の取り扱い	7-14
7.1.6 安全解析の実施および基準との比較	7-15
7.1.6.1 安全解析の実施	7-15
7.1.6.2 安全解析の品質保証	7-15
7.1.7 各事業段階における安全評価の役割	7-16
7.1.7.1 概要調査地区選定段階（文献調査の段階）	7-17
7.1.7.2 精密調査地区選定段階（概要調査の段階）	7-18
7.1.7.3 処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）	7-19
7.2 安全評価の進め方	7-20
7.2.1 シナリオ構築の具体的な進め方	7-20
7.2.2 モデルの選定とデータセットの設定に関する具体的進め方	7-27

7.2.2.1	人工バリアと天然バリアのモデル	7-27
(1)	性能評価モデル	7-27
(2)	現象解析モデル	7-32
(3)	性能評価モデルと現象解析モデル間の情報の流れ	7-32
(4)	データセットの設定	7-35
7.2.2.2	生物圏のモデル	7-35
(1)	地表環境	7-36
(2)	人間の生活様式	7-36
(3)	データセットの設定	7-37
7.3	安全評価を支える技術の整備	7-39
7.3.1	安全評価に関する技術開発	7-39
7.3.2	シナリオの構築に関する取り組み	7-45
7.3.2.1	沿岸域における地質環境の長期変遷を考慮したシステムの状態設定手法	7-45
7.3.2.2	ニアフィールドの長期変遷を考慮したシナリオ構築手法	7-50
(1)	背景と目的	7-50
(2)	状態設定のアプローチ	7-50
(3)	シナリオ作成のアプローチ	7-55
7.3.2.3	自然現象の著しい影響を仮想的に評価するためのシナリオ構築手法	7-58
(1)	力学的影響	7-58
(2)	化学的影響	7-58
(3)	熱的影響	7-58
(4)	水理学的影響	7-58
(5)	地層処分システムへの影響	7-59
7.3.2.4	FEPに基づくシナリオ構築手法およびFEP情報の整備	7-61
7.3.3	モデルの開発に関する取り組み	7-62
7.3.3.1	地質環境および地表環境の変遷を考慮した核種移行解析モデルの高度化	7-62
(1)	背景と目的	7-62
(2)	アプローチ	7-62
(3)	例題への適用	7-67
7.3.3.2	母岩の不均質性および設計のオプションを考慮した核種移行解析モデルの高度化	7-67
(1)	背景と目的	7-67
(2)	アプローチ	7-67
(3)	例題への適用	7-69
7.3.3.3	核種移行解析モデルにおける計算手法の効率化	7-69
(1)	データの不確実性を統計論的に取り扱うための核種移行解析モデルの開発	7-69
(2)	地層処分システムの応答特性を容易に把握するための近似解析解の導出	7-71
7.3.4	データセットの整備に関する取り組み	7-73
7.3.4.1	データの整備	7-73
7.3.4.2	データセットの設定手法	7-75

7.3.4.3 地層処分低レベル放射性廃棄物に関する検討状況	7-76
7.3.5 今後の課題	7-77
7.4 まとめ	7-79
(1) シナリオ構築手法の整備	7-79
(2) モデルの整備	7-79
(3) データセット設定技術の整備	7-79
参考資料1 断層活動の影響に関する安全解析の例	7-80
参考資料2 沿岸域の環境変遷を考慮した安全解析の例	7-86
参考資料3 三次元核種移行モデルの例題への適用	7-93
参考文献	7-100

第7章 地層処分システムの長期安全性評価技術

本章では、閉鎖後長期の安全確保を支える三つの安全確保策のうち、「地層処分システムの長期安全性の評価（以下、安全評価という）」を実施するための基本的な考え方と進め方、およびそれらを支える技術の進展について示す。

7.1 では、事業における安全評価の基本的な考え方について述べる。次に、7.2 では、基本的な考え方に基づく安全評価の進め方を概括的に示す。そして、7.3 では、第2次取りまとめ以降、基盤研究開発機関および NUMO が取り組んできた安全評価に関する主な技術開発成果について概説した上で、今後の課題整理の方向性を示す。最後に、7.4 では、本章のまとめを述べる。

本章に示した基本的な考え方やそれらを支える技術は、高レベル放射性廃棄物および地層処分低レベル放射性廃棄物に対して、共通に適用されるものである。ここでは、高レベル放射性廃棄物の場合について記述し、地層処分低レベル放射性廃棄物については、第2次 TRU レポートにおける課題である「想定される幅広い地質環境に対して地層処分システムの頑健性を確保すること」への取り組み、ならびに「安全評価のデータセットに関する最新の知見の整理」について記述した(7.3.3, 7.3.4 参照)。なお、NUMO は、地層処分低レベル放射性廃棄物の安全評価について、第2次 TRU レポートとそれ以降更新された知見に基づき、その背景と技術的根拠を取りまとめている (NUMO, 2011a)。

安全評価は、「地層処分システムに関連する危険性に対して、サイトの地質環境や処分場の設計が技術的な要件を満足するだけの安全機能を発揮し得るか否かを体系的に分析する作業過程」(IAEA, 2009) である⁷¹。また、安全評価は、地層処分システムの全体レベルの性能の定量化、関連する不確実性の分析、および安全基準との比較を含む。

7.1 基本的考え方

本節では、地質環境の調査・評価（第5章）、および処分場の設計、建設・操業・閉鎖（第6章）を通じて、段階的に具体化する地層処分システムの長期安全性をどのように評価していくか、そして、評価結果をサイトの地質環境の調査・評価および処分場の設計に対してどのようにフィードバックしていくかについて述べる。

3.2.1 において述べたように、「安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進」は、安全確保を達成するための方針の一つである。安全性の繰り返し確認では、地層処分システムの安全性をさまざまな観点から示すセーフティケースが重要な役割を果たす。安全評価は、セーフティケースの主要な構成要素のひとつであり、閉鎖後長期の安全性（以下、長期安全性という）を示す中心的な論拠となる。

第2次取りまとめおよび第2次 TRU レポートにおいては、わが国の一般的な地質環境条件を想定して、地層処分システムの安全性を総合的に評価した。一方、事業段階の安全評価では、わが国の一般的な地質環境条件を想定した安全評価 (JNC, 1999a ; 電事連・JNC, 2005a) を起点として、特定のサイトに対する地層処分システムの長期安全性を確認することが必要となる。

これらを踏まえ、以下では、まず、安全評価の手順についてまとめた (7.1.1 参照)。その上で、

⁷¹ 性能評価は、地層処分システム全体、あるいはその要素である個別システムが有する機能について解析した結果を適切な基準と比較し、その性能について判断を行うことである (原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会, 1997)。原子力安全や放射線防護における用語として、安全評価と性能評価は同義であるとの指摘もある (IAEA, 2007)。本章では、基本的に安全評価という用語を使用し、調査計画および処分場の設計への反映を主眼とした評価は、性能評価と表現する。

安全評価の手順に従い、安全評価戦略として、安全評価の目的および不確実性の取り扱いについて整理した（7.1.2 参照）。続いて、シナリオの構築（7.1.3 参照）、モデルの選定（7.1.4 参照）、データセットの設定（7.1.5 参照）、ならびに安全解析の実施および基準との比較（7.1.6 参照）のそれぞれについて、基本的な考え方をまとめた。各手順では、7.1.2 で述べた不確実性の取り扱いをどのように適用するかをそれぞれ示した。また、事業段階に応じて利用可能な地質環境の情報が異なることを念頭に、各事業段階における安全評価の役割について整理した（7.1.7 参照）。

7.1.1 安全評価の手順

地層処分システムの安全評価が通常の工学システムの評価と大きく異なる点は、極めて長い時間スケールを考慮しなければならないこと、および天然の地層という不均質で大きな空間領域を対象とすることである。このため、従来の工学技術のように、実際に作ってその挙動を確かめ、設計にフィードバックしながら最適化を図り安全性を実証するという直接的な方法を取ることはできない（OECD/NEA, 1983）。この点が地層処分システムの安全評価に固有な特徴である。

IAEAやOECD/NEAといった国際機関のプロジェクトでは、この特徴を考慮して、各国での研究や経験に基づく議論が重ねられ（IAEA, 1995 ; OECD/NEA, 1991a, 1991b, 1997, 2000a, 2002, 2004a, 2008）、一般的な方法論がほぼ満足できるレベルに達していることについて合意が得られている（OECD/NEA, 1991b, 1997）。事業段階における安全評価においても、この一般的な方法論に沿って進める。

なお、安全評価は、地層処分システムによる将来の人間への影響をいい当てるものではなく、その長期安全性の判断材料を提供するためのものである。従って、長期安全性を判断するという観点から、使用するシナリオ、モデル、データセットなどについて十分検討されているかどうかが重要となる（NUMO, 2004）。3.2.2.3で述べたように、地層処分の長期安全性は、安全解析の結果のみではなく、より幅広い多面的な視点を含めて示すものである。多面的な視点には、例えば、地質環境の調査・評価、処分場の設計、残された不確実性とその対策、代替的な安全指標の使用などがある。

以上を踏まえ、安全評価の手順を整理した（図 7.1.1-1）。以下では、図 7.1.1-1に示した手順の概要を記述する。

まず、安全確保構想に従い、前段階に行った検討結果や類似した地層処分システムの評価事例などにに基づき、評価の目的および不確実性の取り扱いを整理し、安全評価戦略として策定（あるいは見直し）する。

次に、当該段階までに得られている既存の知見および安全規制からの要求（安全審査指針など）に基づき、ストーリーボード（7.2.1参照）の作成を通じて、地層処分システムの状態がどのように変遷するか（以下、状態設定という）を整理する。ここでは、地質環境の調査・評価、処分場の設計および研究開発の知見に基づき、地層処分システムの特性、安全機能、およびその将来挙動を整理する。すなわち、安全機能が地層処分システムのどのような特性によってもたらされるのか、そして、将来の地層処分システムの挙動によって安全機能がどのように変化するのかを整理する。さらに、これに基づき、シナリオの作成・分類を行う。

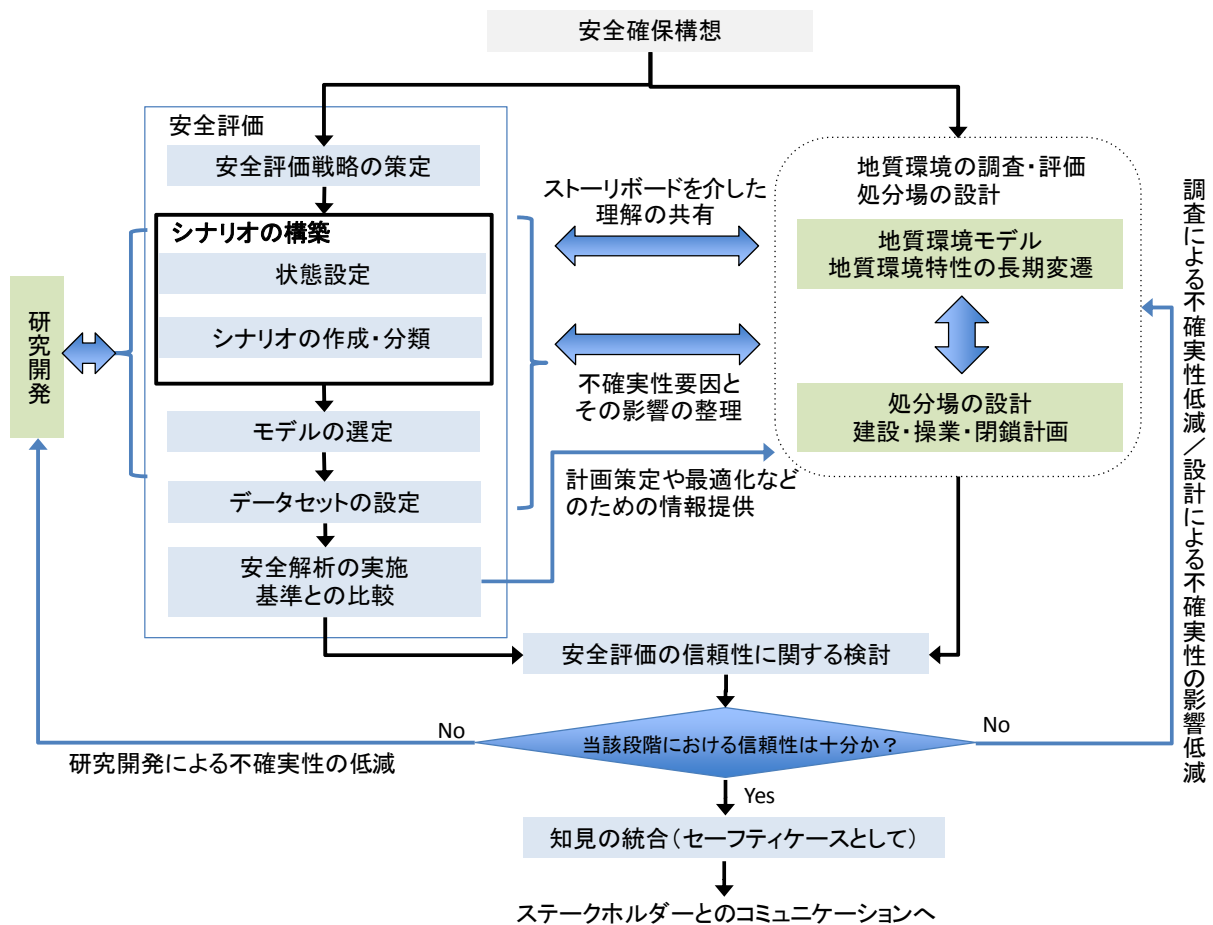


図 7.1.1-1 安全評価の手順

続いて、構築したシナリオに基づき、安全評価に用いるモデルおよびデータセットの設定を行い、安全解析を行う。そして、安全解析の結果と安全基準などとの比較を通じ、基準を満足するか否かを示す。なお、ここでは、次段階の調査計画の立案および処分場の設計の最適化に反映するため、性能評価の観点から、不確実性の影響把握および種々の設計オプション間の比較についても行う。

さらには、OECD/NEAが提案している多面的な論点（表 7.1.1-1：OECD/NEA, 2002）などを参考として、長期安全性の信頼性に関する検討を行う。当該段階において、長期安全性の信頼性の程度が十分と判断できる場合には、討論モデルに基づく手法（例えば、Osawa et al., 2009）などを参考として、安全評価の結果と信頼性、ならびに次段階以降の課題とその対策などをセーフティケースとして取りまとめる。一方、長期安全性の信頼性の程度が十分ではないと判断する場合には、不確実性の低減に向けた課題を明確にした上で、地質環境の調査・評価や処分場の設計や研究開発にフィードバックし、信頼性の向上を図る。

表 7.1.1-1 セーフティケースの構築に関する重要な論点
(OECD/NEA, 2002 を和訳)

地層処分システム自体の信頼性	<ul style="list-style-type: none"> 多重バリアシステムの本質的な頑健性 一部の安全機能が損なわれることを仮想的に想定したシナリオおよび関連する計算結果 よく知られたほかのシステムの事例やナチュラルアナログとの比較
地層処分システムに関するデータや知見の信頼性	<ul style="list-style-type: none"> 研究プログラムや地質環境の調査・評価の品質 品質管理体制 多様なソースや取得方法に基づくデータ 形式に則ったデータトラッキング手法の使用
アプローチの信頼性	<ul style="list-style-type: none"> 論理的であり、明快かつ体系的な評価アプローチ 監査することが可能なフレームワークのもとでの評価の実施 反復的な実施による理解の改善 独立した専門家によるレビュー
評価モデルの信頼性	<ul style="list-style-type: none"> 評価結果と直感的な理解との整合性 代替的な概念モデルや評価アプローチの考察 実験結果や自然の観察との比較によるモデルの妥当性の検討 複数のモデルの相互比較 ナチュラルアナログとの比較 古水理地質学的 (Paleohydrogeological) 情報などの独立した証拠
評価の信頼性	<ul style="list-style-type: none"> 解析上の仮定に関する明確な記述および根拠の説明 仮定の蓋然性あるいは保守性についての論証 感度解析 不確実性の取り扱いと低減方法についての明確な対策 多様な安全指標の使用 解析結果の妥当性に関する多様な理由付け
設計や地質環境の調査・評価へのフィードバックによる信頼性向上	<ul style="list-style-type: none"> 処分概念や仕様変更の根拠 地層処分システムの全体的な品質および安全性

7.1.2 安全評価戦略の策定

ここでは、安全評価戦略として、安全評価の目的および不確実性の取り扱いについて述べる。

7.1.2.1 安全評価の目的の設定

事業における安全評価の目的を以下に示す。以下の目的は、各事業段階の実施事項や必要な知見の充足度に応じて、力点を置くポイントが異なるものである。

(1) 地層処分システムの性能確認

地質環境の調査・評価と処分場の設計に基づき構築する地層処分システムについて、種々の安全機能の組み合わせによって、被ばく線量が合理的に達成できる限り低くなることを確認する。

(2) 安全基準遵守の確認

安全規制から示される枠組みに沿って、種々の不確実性の影響を考慮しても安全解析の結果が安全基準を満足することを確認する。これにより、不確実性に対する地層処分システムの頑健性について見通しを示す。

(3) 不確実性の影響把握

地質環境の調査・評価および処分場の設計において不確実性を効果的に低減するため、性能評価の観点から、安全評価に含まれる不確実性が長期安全性に与える影響を把握する。

(4) 設計オプション間の比較

処分場の設計では、廃棄体の定置方式や断層からの離隔距離などのさまざまな設計オプションを有する。そこで、処分場の設計の最適化に反映するため、性能評価の観点から、さまざまな設計オプションが性能評価の結果に与える影響を比較する。

7.1.2.2 不確実性への対応

地層処分の安全評価では、7.1.1 で述べたように、原子炉などの通常の原子力施設に対する評価期間に比べて対象とする期間が非常に長いこと、天然の地層という不均質で大きな空間領域を対象とすることを考慮する必要がある。これらに起因する不確実性に対しては、地質環境の調査・評価を段階的に詳細化することで、可能な限り低減する。さらには、残された不確実性を勘案して処分場の設計を保守的に行うことにより、不確実性の影響を可能な限り低減する。これらの安全確保対策によって不確実性をできる限り小さなものとする。しかしながら、不確実性を完全に取り除くことはできないため、安全評価では、残された不確実性を、シナリオ、モデル、データの不確実性として考慮する必要がある。従って、地質環境の調査・評価および処分場の設計に含まれる不確実性をどのように安全評価に反映するのか、および安全評価の結果を次段階の調査計画や設計課題にどのようにつなげていくのが重要である。以下では、不確実性の特徴および安全評価における不確実性の取り扱いについて述べる。

(1) 不確実性の特徴

安全評価における不確実性は、一般的に、シナリオ、モデルおよびデータの不確実性に区分することができる (OECD/NEA, 1991b)。ただし、シナリオ、モデルおよびデータといった不確実性の区分については、互いにはっきりと区別できない部分があり、ある程度任意の判断に基づいて分類してもよいと考えられている (OECD/NEA, 1997)。

また、不確実性の本質的な原因としては、評価対象とする現象がランダムなものであること (以下、ランダムネスという)、および評価対象に対する情報が不足していること (以下、イグノーランスという) という二つがある (European Commission, 1995)。ランダムネスは、確率分布として客観的に表現することが可能である。一方、イグノーランスは、主観的な判断によって取り扱うことになるため、情報の不足に起因してリスク希釈⁷²が生じることがある。地層処分では、評価期間に対して我々の経験し得る期間が限られていることや、不均質な深部地下環境に対して入手可能なデ

⁷²入力するデータセットが幅広い分布をしている場合に、線量あるいはリスクなどの平均値が低い値になってしまうこと (OECD/NEA, 2004c)。

ータが限られていることなどにより、イグノーランスが支配的になる。このため、安全評価において、シナリオ、モデル、データセットを設定するために不足している情報を補う際には、ランダムネスのように確率分布で表現するのではなく、複数の選択肢を不確実性として表現することになる。このための手法の例としては、例えば、ロジックツリーがある（Kessler et al., 1999）。

さらに、地層処分の長期安全性に関する将来予測の困難さのために、未だ誰も気づいていないような選択肢、換言すれば、知らないことさえ知らないという不確実性があるのではないかという指摘がある（Ross et al., 2002）。このような不確実性については、未知の選択肢を認識する可能性を高めるために、独立した外部の専門家によるレビュー、複数のモデルの相互比較、ナチュラルアナログとの比較などを行う（表 7.1.1-1）。

(2) 不確実性の取り扱い

不確実性の取り扱いとは、地質環境の調査・評価および処分場の設計から得られる情報を安全評価に反映する際に、不確実性を認識し、その影響を低減・緩和するとともに、残された不確実性の影響を安全評価に適切に反映するための一連の行為である（Posiva, 2008）。安全評価では、不確実性の抽出、重要度分類、不確実性の影響低減および安全評価への反映という四つの過程を各段階において反復的に繰り返すことを通じて不確実性を取り扱う（図 7.1.2-1）。この際、すべての不確実性やそれらの組み合わせを考慮するのではなく、以下の点に留意して、安全評価上考慮すべき不確実性を合理的に取り扱う。

- ・ 地質環境の調査・評価と処分場の設計において不確実性を考慮した上で対策を取るため、過度に保守的な不確実性の組み合わせを考慮しない。ただし、頑健性の例証や処分場の設計の最適化のために、一部の安全機能を見捨てるなどのあえて非現実的な想定を考慮する場合もある。
- ・ 専門家の判断や感度解析などにより影響が大きいと判断された不確実性のうち、その影響を完全に排除できないものについては、安全評価上、合理的な範囲における保守性を見込んで取り扱う。
- ・ 包絡性（ある事象の影響が別の事象の影響に包含されること）を考慮する。

(i) 不確実性の抽出

地質環境の調査・評価から得られるデータなどから安全評価に用いるシナリオ、モデルおよびデータセットを設定する一連の作業過程（アナロジー、内外挿など）に付随した不確実性について、最も発生可能性が高いもののみならず、発生可能性が低い選択肢についても抽出する。

(ii) 重要度分類

安全解析に含まれる不確実性には、影響の大きさや確からしさの異なる多様なものが含まれ、それらのすべてについて同様の取り扱いをすることは合理的ではない。そこで、影響の大きさや確からしさの観点から無視できる不確実性を除外するとともに、性能評価の観点から不確実性の影響を定量化し、包絡性も考慮して、重要度を分類する。

(iii) 不確実性の影響低減

重要度分類の結果, 重要度が高い不確実性については, その影響を低減するための対策を講ずる。ただし, 対策を講ずることの可能な時期が異なるため, 当該段階で対策を取るものと次段階で対策を取るものとを分類し, 次段階の計画策定に反映する。

(iv) 安全評価への反映

種々の不確実性要因を低減するための対策を取っても, これらの影響を完全に排除することは困難である。このため, 各段階の安全評価においては, 不確実性の大きさ, 保守性の程度および情報の充実度を考慮して, シナリオ, モデルおよびデータセットを設定する。なお, 遠い将来における自然事象の影響および生物圏に関する不確実性については, 様式化して設定する。

また, 残された不確実性について, 安全評価結果に与える影響やセーフティケースの信頼性向上の観点から, 課題とその対策を整理し, 次段階の計画へ反映する。

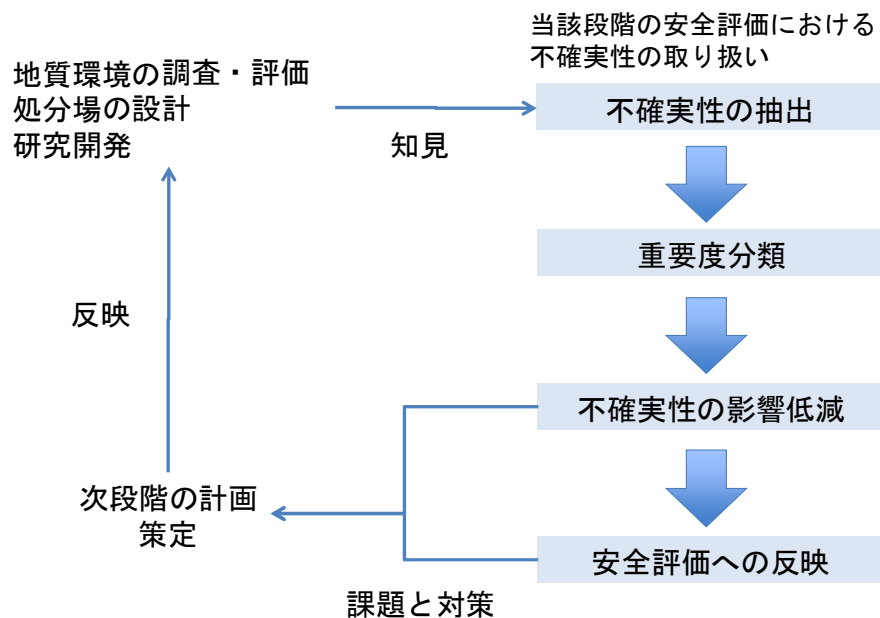


図 7.1.2-1 安全評価における不確実性の取り扱いの概念

7.1.2.3 安全評価における品質保証

安全評価では, 多くの知見を, シナリオ, モデルおよびデータセットとして取り込む。従って, その判断過程における透明性と追跡性を確保する必要がある。

例えば, 国内外の機関では, SR-Can 運営文書と呼ばれる一連の品質保証計画書が用意されている例 (SKB, 2006) や, 専門家による判断の不確実性を考慮して, シナリオ, モデルおよびデータセット設定の追跡性と説明性を保持しながら計算を実施する手法が検討されている例 (電中研, 2005) などがある。

第三者によるレビューは, 安全評価の品質保証のために重要な方法である。レビューには, 規制機関によるレビュー (例えば, U.S.NRC, 2003) に加え, 学協会などの外部の独立した機関や国際機関によるレビュー (例えば, OECD/NEA, 2000c, 2004b) などがある。

さらには, 国際的に合意された一般的な方法論や知見 (OECD/NEA, 1991b, 2000b) に加え, 最

新の動向（例えば、Ebashi et al., 2010）を反映することも肝要である。

また、安全評価の結果を、諸外国の評価結果と相互比較を行うことにより、類似点や相違点を明らかにすることも有効である。

7.1.3 シナリオの構築

安全評価におけるシナリオは、定量的な安全解析の前提となる地層処分システムの長期的な変遷を表したものであり、長期の将来予測に含まれる不確実性により、複数の選択肢を想定することになる。

以下では、状態設定とシナリオの作成・分類、およびシナリオ分類の枠組みについて記述する。

7.1.3.1 状態設定とシナリオの作成・分類

第2次取りまとめでは、国際的に合意が得られた体系的なアプローチ（OECD/NEA, 1991b）を踏襲しながら、「FEP^{7.3}に基づくシナリオ構築手法」によりシナリオを作成した。FEPに基づくシナリオ構築手法に対して、第2次取りまとめの国際レビューでは、その有効性は認めつつも、シナリオの構築から解析ケースの設定に至る一連の流れについて、よりわかりやすくすることが必要であると指摘されていた（OECD/NEA, 2000a）。

近年、従来の FEP に基づくシナリオ構築手法に対して、安全機能を基軸とした状態設定が重視される傾向にある（例えば、ONDRAF/NIRAS, 2001 ; Nagra, 2002 ; ANDRA, 2005 ; SKB, 2006）。安全機能を基軸とした状態設定では、安全機能がどのような地層処分システムの特性によってもたらされるのか、そして、地層処分システムの将来挙動によって安全機能がどのように変化するのかを整理することが重要である。この国際的な傾向を取り込むことにより、FEP に基づくシナリオ解析手法の課題に対して、シナリオの構築において着目すべき現象が明確になることから、その構築過程をより明確にすることおよび作業を効率化することが期待できる。

以上を踏まえ、NUMO は、長期安全性をおびやかすような現象について重大な抜け落ちがないように配慮しつつ、合理的にシナリオを構築することを目的として、従来のシナリオ解析手法と安全機能を基軸とした手法を組み合わせ、シナリオを構築する（NUMO, 2011c）。

シナリオの不確実性は、3.2.2.3 で述べたように、現象の時間的な変遷、自然現象の発生の時期や頻度、将来の人間活動などに伴う不確実性がある。そこで、シナリオの不確実性を取り扱う際には、7.1.2.2 で述べた考え方に従って、まず、長期の将来予測に含まれる不確実性を抽出し、重要度分類を行う。

なお、将来のシステムの状態については、さまざまな現象が関連して複雑に変化することが考えられ、それらすべてを精緻に把握して科学的に明らかにすることは容易ではない。従って、国際的な FEP リストや既存の FEP リストに基づき、安全評価上の保守性や核種移行の観点から、重大な抜け落ちがないように配慮しつつ現象を選択する。現象を選択する際には、科学的な知見などに基づいて、以下の視点に着目して安全評価で考慮する必要のない FEP を除外する。

- ・ 地質環境の調査・評価によって長期安全性に有意な影響を及ぼさないと判断する FEP
- ・ 処分場の設計によって長期安全性に有意な影響を及ぼさないと判断する FEP

^{7.3} 地層処分システムの各要素の特性（Feature）、特性に影響を与える事象（Event）、地層処分システムの時間的な変遷の過程（Process）の略称。

- ・ 発生可能性が極めて小さいと判断する FEP
- ・ 別の事象を取り扱うことによって包含されると判断する FEP
- ・ 上記以外で、現段階での科学的な知見により、地層処分システムへの影響が無視できるほど小さいと判断する FEP

また、現象を選択する際に知見が不十分な状況では、以下のように取り扱うこともある。

- ・ 現象が安全機能を向上させることが見込まれる場合には、その現象をあえて無視する (Reserve FEP : Nagra, 2002)。
- ・ 現象が安全機能を低下させることが見込まれる場合には、その現象が影響を与える安全機能を無視する。

7.1.3.2 シナリオ分類の枠組み

3.1.2 では、地質環境の長期変遷や自然現象についての将来予測の可能性についての考え方を整理した上で、安全評価におけるシナリオ設定に際して基本となる考え方を示した。ここでは、この考え方にに基づき、実際の安全評価シナリオを区分する際の具体的な枠組みを示す。

3.1.2 において述べたように、処分場閉鎖後の潜在的危険性としては、以下の被ばくを考慮する。

- マグマや活断層の処分場への直撃や隆起・侵食による処分施設の地表への接近などの自然現象の著しい影響に起因する被ばく
- 地下水の移行を介した放射性物質の移行による被ばく
- 処分場に侵入する偶発的な人間活動による被ばく

安全評価上は、(a) および (b) を自然過程を介するシナリオ (以下、自然過程シナリオという) と呼び、(c) を人為過程を介するシナリオ (以下、人為過程シナリオという) と呼んで区分する。自然過程シナリオは、ほぼ確実に生起すると予想できる事象から、可能性を完全に否定できないものの適切なサイト選定により発生確率の著しく低い事象まで多岐にわたる。そこで、NUMO は、これらのシナリオを発生可能性に応じて区分するリスク論的な考え方 (原子力安全委員会, 2004) に基づいて取り扱うことを検討している。しかしながら、現段階では、地層処分に対する具体的な安全規制の考え方が定められていないことから、シナリオの分類について検討を進めている (図 7.1.3-1)。

自然過程シナリオに関しては、地質環境の変遷や自然現象の予測可能性の観点から安全評価上の時間スケールも区分して考えることが適切である。具体的には、第3章において述べたように、過去～現在のデータが充分にあり、外挿法などによる将来予測が可能な期間 (期間 A)、不確実性は大きくなるが、外挿法などにより将来予測が可能な期間 (期間 B)、および外挿法による将来予測が難しい期間 (期間 C) に区分し、上述した三つのシナリオ区分との対応を以下のように設定することを検討している。評価期間と安全評価シナリオの区分との関係について、自然過程シナリオを対象として検討した例を図 7.1.3-2 に示す。なお、これらの関係は、放射性廃棄物の潜在的な毒性の変化 (NUMO, 2004) や安全機能の時間変遷といった複数の視点から検討する必要がある。また、これらの関係や分類については、今後の安全規制の動向などを踏まえ、柔軟に改訂する。

一方、人為過程シナリオについては、3.1.2 に述べたとおり、人間侵入が起こる可能性の低いサイトの選定や処分施設の設計を行うことなどによって安全性を確保する。このような対策によって偶発的な人間侵入の可能性は低減されるものの、将来の人間活動に関する確率を推定することには本質的に困難であることから、安全評価上は人間侵入が生じることをあえて想定し、万一の場合でも極端に大きな影響は生じないことを確認する。

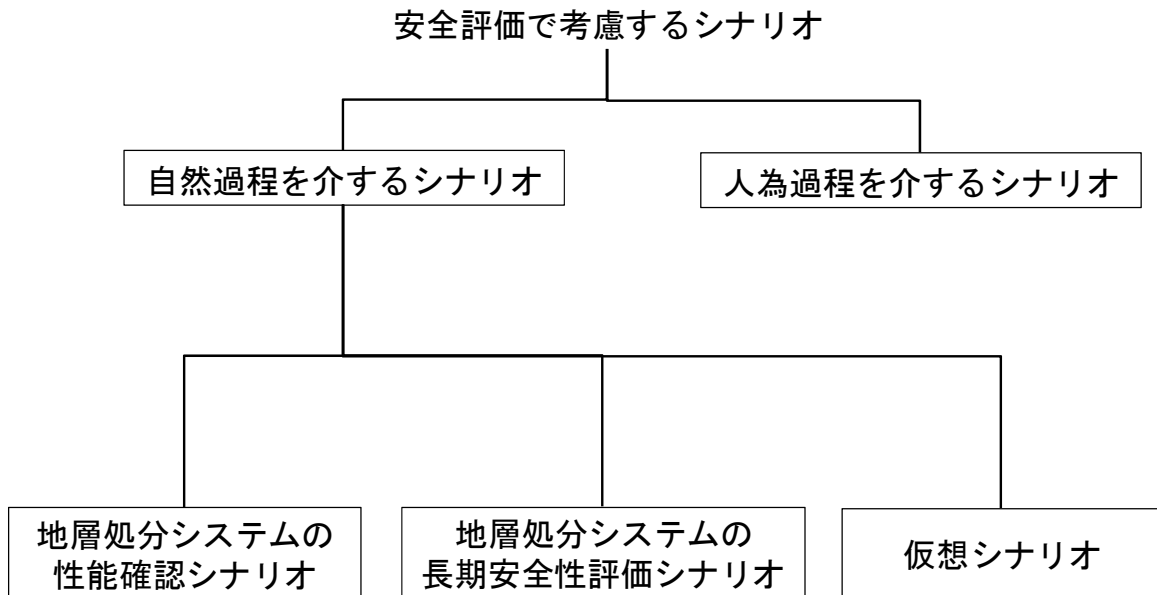


図 7.1.3-1 安全評価におけるシナリオ分類（検討例）

(1) 地層処分システムの性能確認シナリオ

3.1.2.3 において述べたように、期間 A については、予測の不確実性が比較的小さいことから、最新の知見に照らして科学的に確からしいと予見する標準的なシナリオを策定することが可能である。このため、このようなシナリオを用いて線量評価することによって、長期安全性に対する余裕の程度を事業者が自主的に確認することが可能となる。評価された被ばく線量が基準値を下回る場合でも、防護の一層の最適化の観点から、当該被ばく線量を合理的に達成可能な限り低く抑えるよう努力していることを示すことが可能になる。従って、このシナリオを地層処分システムの性能確認シナリオと位置付ける。

ここで、種々の安全機能が適切に組み合わせられていることを確認する上では、システム構成要素ごとの性能指標（あるバリアにおける核種移行率など）を算出することも有効である。なお、期間 A においても地表環境や人間の生活習慣についての予測には不確実性が含まれる可能性があることから、これらの指標は被ばく線量の評価結果を補完する役割も担う。

(2) 地層処分システムの長期安全性評価シナリオ

3.1.2.3 において述べたように、期間 A および期間 B では、地質環境の変遷や自然現象の予測を行うとともに、さまざまな不確実性の影響を線量評価シナリオに反映し、そのシナリオによって計算された線量と基準とを比較することをもって、地層処分システムが閉鎖後長期間にわたって安全に構築されていることを確認する。このシナリオを地層処分システムの長期安全性評価シナリオと位

置付ける。これにより、種々の不確実性を考慮したとしても長期安全性の見通しがある頑健なシステムが構成されていることを、被ばく線量および種々の性能指標によって確認する。ここで、期間 A と B とでは、将来予測に含まれる不確実性の大きさが異なることに留意して、それぞれ適切と考える範囲の変動要因を考慮してシナリオの設定を行う。

(3) 仮想シナリオ

「マグマや活断層の処分場への直撃や隆起・侵食による処分施設の地表への接近などの自然現象の著しい影響」の生じる可能性については、まず、期間 A においては、適切なサイトを選定することにより確実に回避することが基本であるが、発生する現象に応じて仮想シナリオの設定を考慮する。期間 B については、期間 A と同様、適切な対策により回避することが基本となるが、時間スケールの延長に伴う将来予測の不確実性の増大を勘案する。期間 B では、将来予測に基づく適切なサイト選定により自然現象の著しい影響を回避できることの確実性が自然現象や地域に応じて異なる。そこで、安全評価上は、期間 B においても、必要に応じて、「仮想シナリオ」として安全評価を行い、万一の場合でも特別な措置を必要とするような極端に大きな影響は生じないことを確認する。なお、3.1.2.3 において述べたように、期間 C では、外挿法による将来予測が難しいことから、考慮すべき自然現象を様式化して評価モデルに取り込み、天然の放射性物質の濃度との相対的な比較を行うなどの補完的な評価方法についても検討を行う。なお、地層処分システムの頑健性を示すために、what-if シナリオとして、物理化学的にはありえない非現実的な状況をあえて想定することも必要に応じて採用し、検討を行う。

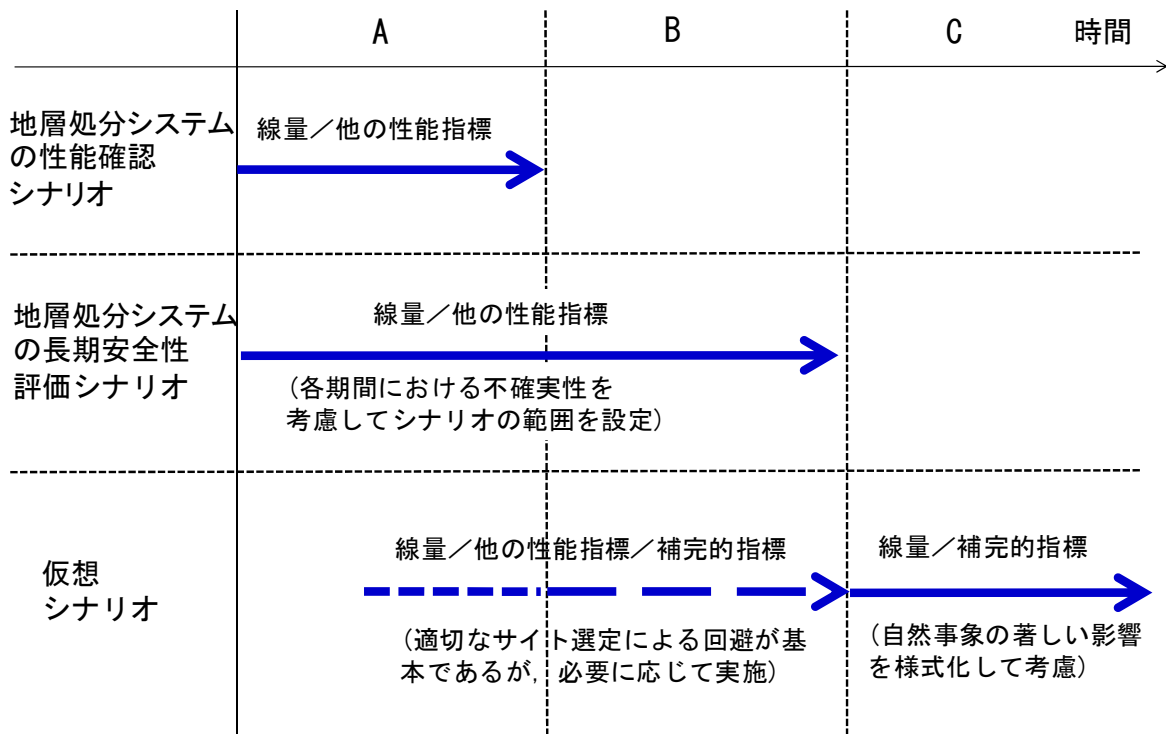


図 7.1.3-2 シナリオの区分と将来予測期間の区分の関係
(自然過程シナリオを対象とした検討の例)

7.1.4 モデルの選定

モデルの開発では、まず、シナリオで表現する地層処分システムの将来挙動および安全評価の目的に基づき、可能性のある概念モデルを明らかにする。そして、概念モデルに対して数学的な定式化（数学モデル）を行った後、計算コードを作成する（NUMO, 2004）。事業段階の安全評価では、特定のサイトにおける地層処分システムの特徴や安全評価の目的を考慮して、用いるモデルをモデル群から選定する。

以下では、モデルを選定する際の基本的な考え方について、モデルの信頼性向上および不確実性の取り扱いの観点から記述する。

7.1.4.1 モデルの信頼性向上

評価モデルの信頼性向上に向けて以下の取り組みを行う。

(1) モデルの相互補完的活用

モデルにおいては、関連する現象の多様性、地質環境の不均質性、評価期間の長期性に起因して、実際の地層処分システムの複雑な挙動を精緻に表現することは難しい。そこで、モデルを、安全機能に着目して簡略化した性能評価モデル（以下、性能評価モデルという）と地層処分システムの特徴や現象を表現した現象解析モデル（以下、現象解析モデルという）に大別し、これらを相互補完的に用いる（Ishiguro et al., 2007：図 7.1.4-1）。すなわち、性能評価モデルにおける簡略化の妥当性を現象解析モデルによって示すとともに、性能評価モデルを用いて全体システムにおける鍵となる不確実性と現象解析モデルの重要度を明らかにする。これにより、モデルの信頼性を向上させることが期待できる。

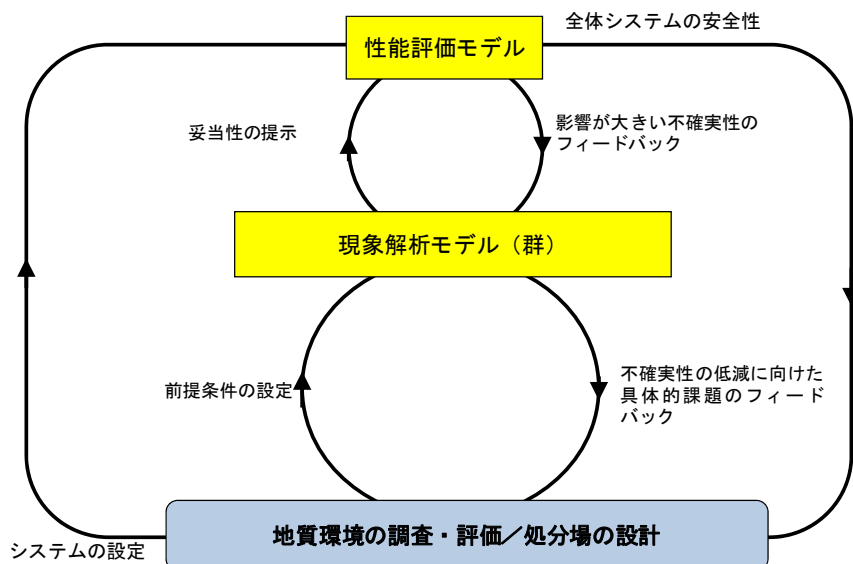


図 7.1.4-1 性能評価モデルと現象解析モデルの相互補完的な利用
(Ishiguro et al., 2007 に一部加筆)

(2) 独立した情報との比較

モデルによる解析結果が、ナチュラルアナログなどの独立したほかの情報と整合することは、モ

デルの信頼性を示す上で重要である。このような独立した情報を活用した示し方を以下に示す。

- ・ ナチュラルアナログ事例についての観察によって得られた知見や古水理地質学的情報と、モデルを用いた解析とを比較する
- ・ 関連する複数の専門分野間での整合性をクロスチェックする（例えば、地下水流動と地下水の水質形成）
- ・ 小規模あるいは短期の室内試験などにに基づき導出された評価モデルを、大規模あるいは長期の試験などに適用する

これらについては、これまでも JAEA などによってサイトを特定しない一般的な論拠が蓄積されるとともに、仮説検証を目的とした調査や研究計画および調査結果の解釈などについての方法論が開発されてきている（例えば、JAEA, 2009）。NUMO は、これらの成果を参照しつつ、事業の進展に応じて、特定のサイトに対するモデルの信頼性を示すための論拠を収集する。

(3) 解析ツールの品質

評価モデルを用いて安全解析を行う際には、多くの場合、数値解析用ソフトウェアなどを利用する。これらの解析ツールの開発については、ソフトウェア開発の一般的な手順に含まれる検証を適切に行う。また、安全評価で用いる種々の解析ツールについて、過去の使用実績や検証結果の有無から分類しておき、その分類に応じて解析モデルの品質情報を整理しておくとともに、これらの検証の過程でモデルの適用範囲を確認する。

7.1.4.2 モデルの不確実性の取り扱い

構築したシナリオおよび安全評価の目的に基づき、モデルを開発あるいは選定する。モデルの開発や選定に際しては、時間スケールの超長期性や母岩の空間的不均質性に起因して、多様な現象のすべてに対して十分な知見を得ることは難しい。このため、モデルの不確実性としては、3.2.2.3 で述べたように、モデルとしての表現方法が複数存在することや簡略化が適切に行われないことなどに伴う不確実性がある（NUMO, 2004）。したがって、モデルに関する各作業過程の追跡性と透明性を確保し、モデル化の対象とする個々の現象に関する理解の程度やモデルにおける保守的簡略化の程度を勘案して、安全評価に用いるモデルがどのような不確実性を有するのかが明らかになるようにする。ここでは、モデルの不確実性の取り扱い例として、以下の状況について述べる。

- ・ 十分な知見が得られており、適切なモデルをひとつに特定可能な場合 (a)
- ・ 知見は得られているが、複数のモデルが存在する場合 (b)

このうち、(a) については、当該モデルの適用可能であることを示すとともに（類似した問題への適用実績、検証の結果など）、外部レビューを通じてその妥当性を確認する。一方、(b) に対しては、7.1.2 に述べた不確実性の取り扱いを適用し、以下のような手順で不確実性を取り扱う。

- ・ 不確実性の抽出：想定可能なモデル候補を抽出する。
- ・ 重要度分類：定性的な判断および解析を通じて、モデルの違いが安全機能や結果に与える影

響を把握した上で、モデル候補の重要度を分類する。

- ・ 不確実性の影響低減：モデルの違いのうち、安全機能や結果に与える影響が大きいものについて、以下の対策をとることによって影響の低減を図る。
 - 地質環境の調査・評価や研究開発を通じてそれぞれのモデルの検証と改良を行い、適切なモデルを絞り込む。
 - 処分場の設計の変更により、モデルの違いによる影響を緩和する。
- ・ 安全評価への反映：上記の対策をとってもなお残るモデルの違いについては、複数のモデルに対する安全解析の結果を併記する（あるいは保守的なモデルやデータセットによって代表する）。

なお、上記の「重要度分類」のために行う解析では、モデルによって入力データの種類や数値が異なる可能性もある。このような場合には、モデルの不確実性の取り扱いと後述するデータセットの不確実性の取り扱い（7.1.5 参照）との間に明確な境界を設定することは困難である。従って、これら二種類の不確実性の影響を同時に把握した上で重要度を分類する。

7.1.5 データセットの設定

7.1.5.1 設定の考え方

前節までに述べた方法でシナリオを構築し、モデルを選定した後、モデルに必要なデータセットの値を設定する。ここでは、安全評価の目的や前提条件に即しており、かつ、整合性のとれた入力データの集合をデータセットと呼ぶ。データセットは、特定の目的のもとに注意深く設定するものであり、多様なデータの集合体を指すデータベースとは異なる。

事業の初期段階では、特定のサイトに対する情報が限られる。このため、特定のサイトに対する地層処分システムに該当するものをデータベースの中から抽出するとともに、既存のデータに基づく類推などによってデータセットを設定する。そして、地質環境の調査・評価が進展するにつれて、サイトに固有の条件に対応して新たに取得したデータ（対象サイトで取得された岩石試料や地下水を用いた収着試験データなど）を中心としたデータセットへと移行する。この段階では、既存のデータベースの傾向との比較分析によって、サイトに固有の特徴に対応したデータセットの検証を行い、信頼性を向上させる。

7.1.5.2 データの不確実性の取り扱い

データセットの設定においても、不確実性の取り扱いが重要である。すなわち、地質環境の調査・評価や実験などで測定することのできるデータを処理・解釈してデータセットを整備する過程で、さまざまな不確実性が介在する。例えば、3.2.2.3で述べたように、データの測定誤差や地質環境の不均質性を扱うためのデータが十分でないことなどから生じる。以下では、このようなデータの不確実性の取り扱いの考え方について述べる。

- ・ 不確実性の抽出：データセットを設定する過程を明らかにし、設定過程における不確実性を抽出する。
- ・ 重要度分類：安全評価データセットの設定への影響が無視できるものを除外するとともに、性能評価モデルや現象解析モデルを用いた感度解析を実施し、データセットの設定に与える

影響が大きい不確実性を特定する。

- ・ 不確実性の影響低減：重要な不確実性について、地質環境の調査・評価や研究開発を通じて、新たなデータの取得などを行い、不確実性の低減を図る。
- ・ 安全評価への反映：上記の対策にもかかわらずなお残る重要な不確実性については、合理的な範囲における保守性を考慮してデータセットを値あるいは幅として設定する。

データセットの変動幅が大きい原因には、地質環境の不均質性や試験・測定条件の変動によるデータのばらつき、地層処分システムの長期的な変遷に複数の選択肢が存在すること、評価モデルが実際の現象を適切に模擬していないこと、といった複数のものがある。不確実性の影響低減では、どの要因が支配的であるかを明らかにした上で、対策を行う。また、データセットの信頼性向上のために、こうした一連の作業過程や判断過程を記録しておくとともに、第三者によるレビューを受けることも検討する。

7.1.6 安全解析の実施および基準との比較

7.1.6.1 安全解析の実施

安全評価戦略を踏まえて構築したシナリオ、モデルおよびデータセットを用いて安全解析を行う。安全解析は、決定論的な方法を中心として、必要に応じて統計論的な方法で補完することによって行う。決定論的な方法は、不確実性を考慮してデータセットを一定の値に設定して解析を行うものである。一方、統計論的な方法は、不確実性を考慮してデータセットに確率密度関数を設定し、そこからサンプリングによって値を設定しながら、さまざまなデータセットの組み合わせに対して繰り返し計算を行うものである。

指標としては、線量やほかの性能指標あるいは補完的な指標を用いる。事業では、不確実性を考慮して、シナリオ、モデルおよびデータセットの組み合わせを想定した安全解析の結果が安全基準を満足することを確認する。また、このような解析結果が基準を満足する場合でも、不確実性の影響を考慮した感度解析を行い、解析結果と基準との差が十分なものであるか否かを評価する。

7.1.6.2 安全解析の品質保証

安全解析の一連の計算作業において、誤った入力値を用いる、あるいは、あるモデルの計算結果をほかのモデルの計算に誤って受け渡すといった過誤が生じる可能性が考えられる。このような過誤に対しては、例えば個々のモデルやデータセットに固有の記号を付し、シナリオに沿った解析ケースごとに一つのシートに記録するといった方法が挙げられる。第2次取りまとめでは、コードやデータを用いた安全評価解析作業において、入力データの管理、解析手順（内容）の管理、解析結果の管理を適切に行うための計算機システムが開発された（Neyama et al., 1998）。また、Nagraでは、こうした安全解析におけるデータセット管理のための定型化されたマニュアルを導入している（Nagra, 2002）。

NUMOは、これらの対策を参考としつつ、品質保証に取り組み、安全評価の信頼性を向上させていく。例えば、サイトの地質環境特性に応じて処分場の設計や安全評価を体系的かつ効率的に実施するため、計算機支援型の処分場概念構築システムを開発している（NUMO, 2004）。このシステムでは、入力情報を履歴データベースとして管理することにより、解析の再現性や用いたモデル、データの追跡性を確保できるようになっている。

さらに、安全評価を実施する際には、これまでに述べたモデルやデータセットに加えて、これらを活用するための知識が必要となる。このため、相互比較や検証などを通じてモデルやデータセットに対する品質保証を行うとともに、関連する知識についても体系的な品質保証を行う。さらには、知識の不足に起因する不確実性がどこに含まれているのかを明らかにし、安全評価のそれぞれの作業においてどのように不確実性が伝播するのかを記録・管理する。JAEA は、このような目的のために地層処分に係る知識の管理を進めている（JAEA, 2010a）。このうち、安全評価に関しては、性能評価統合レポートシステム（PAIRS）が開発されている（JAEA, 2010b）。このシステムは、「モデルやデータセット」と「モデルやデータセットを正しく適用するための知識」とを電子報告書という媒体を通じて有機的に結合したものであり、安全解析においてパターン化することの可能な作業をある程度自動化したものである。これにより、事業の進展に伴って更新される情報や最新の知見が安全評価結果に与える影響を把握する場合に、人的ミスの可能性を低減するとともに、作業の追跡性を確保しながら安全評価を効率的に実施することが可能になる。

また、第3章で述べたように、大きな外的状況の変化に迅速かつ的確に対応するためには、過去の意思決定や技術判断の経緯や根拠に立ち返る必要が生じることもあることから、こうした情報を体系的に記録・管理し、必要時に速やかに利用できる準備を進めておく。NUMO は、事業の推進に当たって考慮すべき広範な要件とそれらを前提とした意思決定を一括管理する「要件管理技術」の開発を進めている（NUMO, 2011b）。NUMO は、安全評価にかかわる意思決定の記録と追跡性を確保することが重要と考えており、事業の進展に応じて、前提条件、意思決定項目およびその付帯情報をこのシステムで管理する。

7.1.7 各事業段階における安全評価の役割

第3章で述べたように、事業における安全評価においては、長期安全性の信頼性を段階的に向上させるため、地質環境の調査・評価および処分場の設計の安全評価への反映を反復的に実施することが重要である。すなわち、段階が進むに連れて、以下の三つの点を同時に考慮し、信頼性を向上させる。この際、設計因子（6.5.2 参照；NUMO, 2004）を適用して、過度な設計とならないようにする。

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

安全評価の基本的な流れ（図 7.1.1-1）は各段階で共通である。しかしながら、事業全体としての主要な実施事項や入手可能な情報の制約に応じて、各段階において力点を置くポイントが変化する。

上記の内容を踏まえ、文献調査の段階、概要調査の段階、精密調査の段階における自然過程シナリオを例として、地質環境の調査・評価および処分場の設計と連携した各段階における安全評価の主要な実施項目を整理した（図 7.1.7-1）。以下では、図 7.1.7-1 に沿って、各段階における安全評価の役割について記述する。なお、事業に必要な技術開発を進める際には、第4章で示した技術開発ロードマップ（図 4.1.3-5）に基づき、各段階において力点を置くポイントを考慮し、その役割を達成できるように進める。

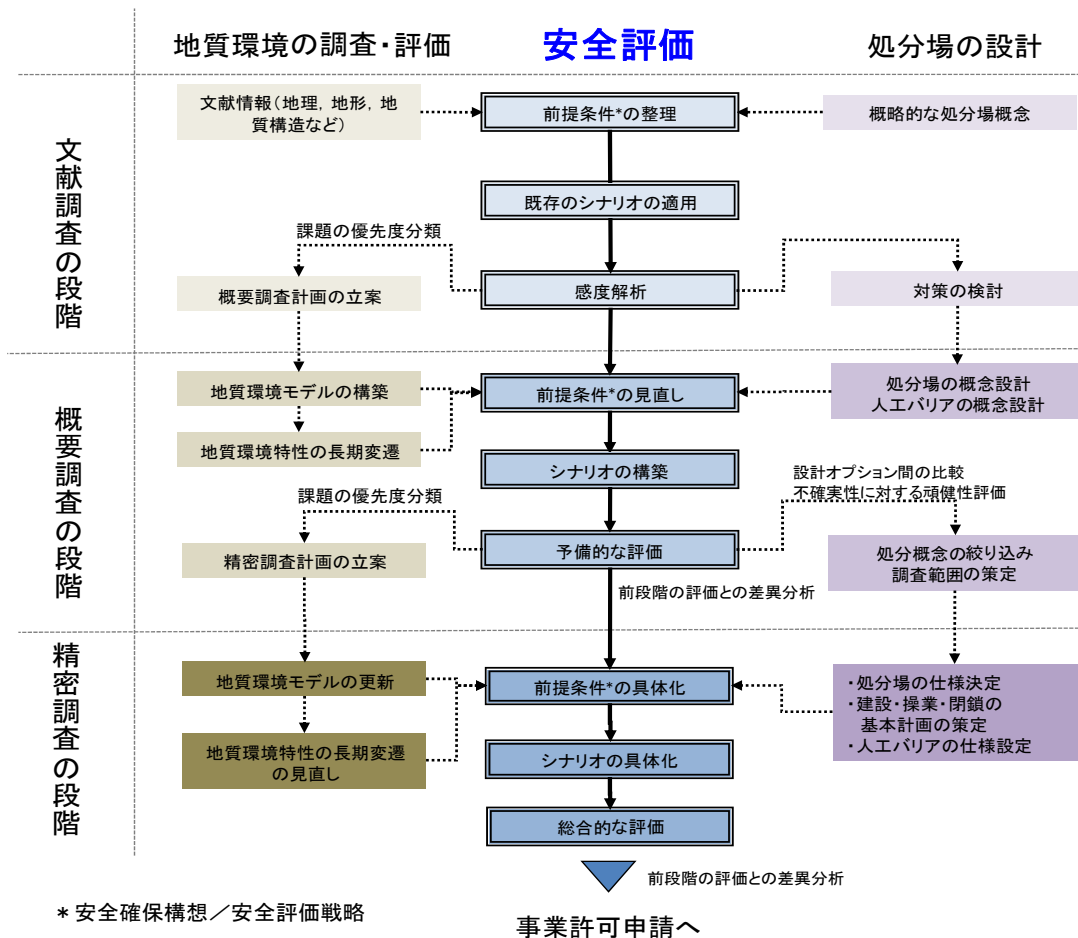


図 7.1.7-1 各段階における安全評価の主要な実施項目 (自然過程シナリオを対象とした例)

7.1.7.1 概要調査地区選定段階 (文献調査の段階)

本段階における安全評価は、概要調査計画の策定に反映することが主眼である (4.2.1.1 参照)。そのための役割を以下に示す。

- 地質環境の調査・評価や処分場の設計や研究開発によって不確実性を効果的に低減するため、次段階以降の安全評価に与える影響が大きい因子を抽出すること。

本段階では、一般的に、地理、地形、地質構造といった文献情報が入手可能と考えられるものの、地質環境に関する情報が限定的であることから、天然バリアとしての母岩の性能を適切に評価することが難しい。また、人工バリアについても、その設置条件としての地質環境に関する情報が限定的であることの影響を受けて、保守性を重視したものになる。

このため、この段階の安全評価は、特定のサイトにおける地層処分システムが技術的な要件を満足するだけの安全機能を発揮しうるかどうかを体系的に分析するものではなく、既存の知見を利用して個々の安全機能をどのように割り当てるかの見通しについて検討し、そして、不確実性の低減に向けてどのような地質環境の調査・評価および処分場の設計を行うかの判断に反映すること (安全性の概略的検討) が主眼である。このための有効なアプローチとしては、既存のシナリオやモデ

ル（例えば、JNC, 1999a；電事連・JNC, 2005a），および地下水流動解析などに基づく感度解析が有効である。そして、感度解析から得られる情報に基づき、評価結果に及ぼす影響が大きい因子と、地質環境の調査・評価および処分場の設計とを対応付ける（例えば、Umeki et al., 2004）。このような対応付けにおいては、地層処分システムの空間スケールおよび時間スケールを考慮する。

7.1.7.2 精密調査地区選定段階（概要調査の段階）

本段階における安全評価は、処分場の設計に関する妥当性確認やオプション間の比較、精密調査計画の作成、セーフティケースの構築に対して、結果を反映することが主眼である（4.2.1.2 参照）。そのための役割を以下に示す。

- ・ 処分場の設計に反映するため、性能評価の観点から、地下施設のレイアウトや人工バリア設計などに関する妥当性確認およびオプション間の比較を行うこと。
- ・ 精密調査計画に反映させるため、次段階で長期安全性を確保するために重要な地質環境の特徴や条件をあらかじめ抽出すること。
- ・ 次段階で長期安全性を確保するために重要なモデル・データを特定すること。
- ・ 安全審査基本指針への対応という観点から、重要な調査項目や設計課題を抽出すること。
- ・ この段階における長期安全性の信頼性について検討すること（セーフティケースへの反映）。

本段階においては、文献調査で得られた情報に加え、地上からの調査（地表踏査、物理探査、ボーリング調査など）により、地質環境特性に関する情報として、透水性や亀裂頻度などの知見を拡充できるため、地質環境モデルを更新するとともに、対象とする岩盤の長期安定性に関する知見が充実することから、地質環境の長期変遷の予測も更新する。また、処分場の設計においては、地質環境モデルの更新に従い、候補母岩の選定、地下施設と人工バリアの概念設計（基本レイアウトや人工バリア材料の選定など）を行い、設計オプションを具体化する。

選定した候補母岩に対して、シナリオの策定および予備的な評価を行う。ただし、この段階においても、入手可能な情報の制約、文献情報のばらつき、処分場の設計に関する複数の選択肢などを考慮する必要がある。

このため、安全評価では、安全評価データセットの範囲が幅広くなることから、一般に、目標値を満足するケースと満足しないケースが混在するような状況が生じる可能性がある。この両者の境界値を明らかにすることにより、目標値を満足するための定量的な条件を抽出することができる（例えば、JNC, 2005；電事連・JNC, 2005a）。この定量的な条件と性能割り当てを関係付けることにより、個々の安全機能をどのように割り当てるか（性能割り当て）の見通しを検討する。この定量的な条件は、地層処分システムの長期安全性を確保するために必要な条件ではなく、ほかの安全機能の性能によって変わりうるものである。

また、性能評価の観点から、処分場の設計オプションの絞り込みのために、各オプションが評価結果に与える影響を定量的に把握する。さらには、概要調査地区選定段階（文献調査の段階）と同様に、この段階で得られた地質環境の情報や具体化される処分場の設計に基づき、不確実性の影響が大きい因子を抽出し、精密調査計画に反映する。

最終的には、表 7.1.1-1などを参考として安全性の信頼性に関する検討を行い、この段階における長期安全性についての見通しとその信頼性について検討し、次段階以降の課題とその対策を取り

まとめる。

7.1.7.3 処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）

本段階における安全評価は、事業許可申請に向けた安全性の確認、事業許可申請書の作成、セーフティケースの更新に反映することが主眼である（4.2.1.3 参照）。そのための役割を以下に示す。

- ・ 地下調査施設での取得データを加えて、安全審査に向けた処分場の長期安全性に関する総合的な評価を実施すること。

本段階においては、地下調査施設を用いた詳細な調査により坑道スケールでの知見が拡充することから、地質環境モデルや地質環境長期変遷の予測を更新する。また、前段階で絞り込まれた処分場の設計に基づき、地下施設や人工バリアの仕様を決定するとともに、建設・操業・閉鎖の基本計画を作成する。安全評価においては、これらを反映して、前提条件の見直しを行う。そして、拡充された知見を取り込んだ総合的な安全評価を行う。また、安全解析の実施および基準との比較に加えて、長期安全性の信頼性に関する検討を行い、安全審査に向けて論拠を取りまとめる。

7.2 安全評価の進め方

本章では、事業の特徴を考慮した安全評価の具体的な進め方として、シナリオの構築、モデルの選定、データセットの設定について述べる。

7.2.1 シナリオ構築の具体的な進め方

第2次取りまとめ以降、シナリオ構築に関する主な留意点として、国際的に以下の点が合意されている（OECD/NEA, 2001）。

- ・ 可能性のあるすべてのシナリオを列挙することは不可能であることから、重大な抜け落ちがないように合理的な十分性を目指すことが肝要であること。
- ・ 評価に必要な情報を取りまとめることに加え、不足している知見の内容を明確化すること。
- ・ シナリオの構築過程や判断過程について透明性があり、方法や結果を追跡できること。
- ・ シナリオは、ステークホルダーとの対話におけるインターフェースとなりうること。
- ・ 研究開発の優先度、データ取得、資金の配分にかかわる意志決定に資すること。

上述の留意点も踏まえ、7.1.3 で述べたように、NUMO は、FEP に基づくシナリオ構築手法と安全機能を基軸とした状態設定に基づくシナリオ構築手法とを組み合わせたアプローチにより、状態設定およびシナリオの作成・分類を行う（図 7.2.1-1）。以下では、この手順に沿って、具体的な進め方を事例とともに示す。

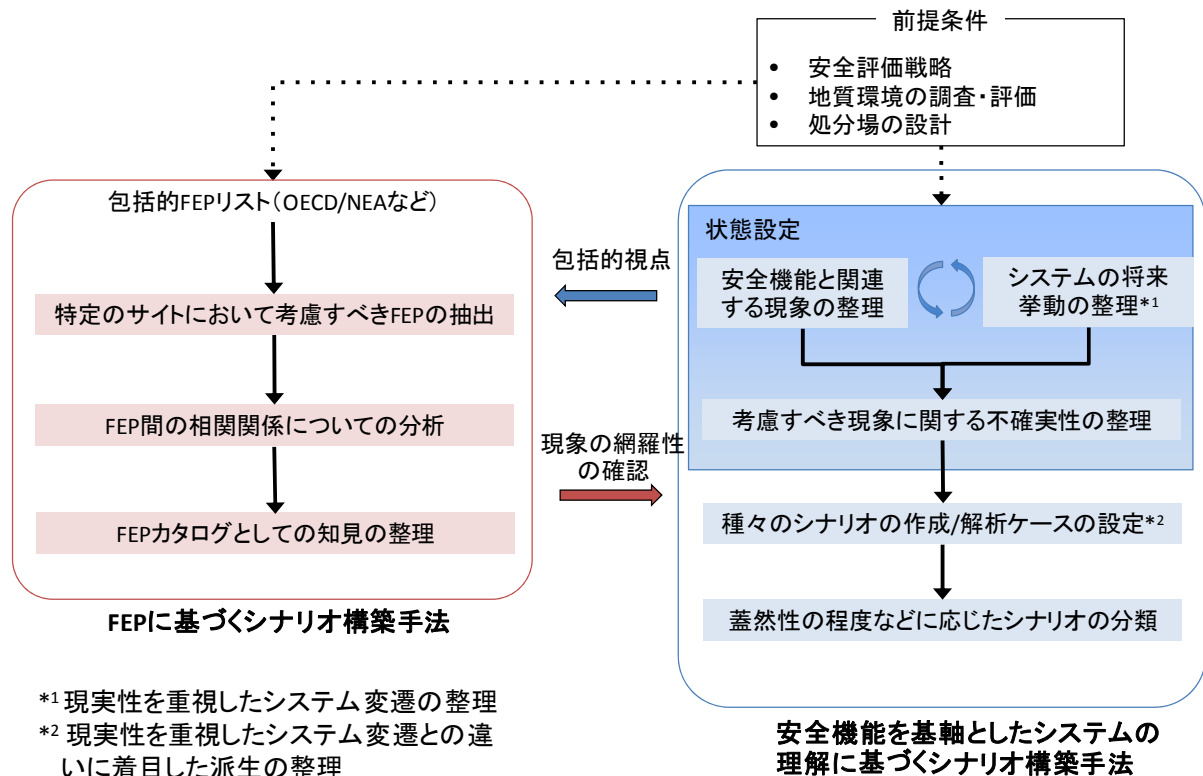


図 7.2.1-1 状態設定とシナリオの作成・分類のアプローチ

(出典：NUMO, 2011c)

状態設定に当たっては、まず、閉鎖後の閉じ込めを確保するために必要な安全機能とその機能を担う構成要素、およびそれぞれの安全機能の時間変遷を整理する。図 7.2.1-2 は、安全機能の考え方 (6.2.2 参照) に基づき、第 2 次取りまとめにおける地層処分システムを対象として期待する安全機能の時間的変遷を整理した例である。このような整理により、各時間枠で期待する機能やこれらの機能間の相互関係 (多重性や相互補完性) を明らかにすることができる。

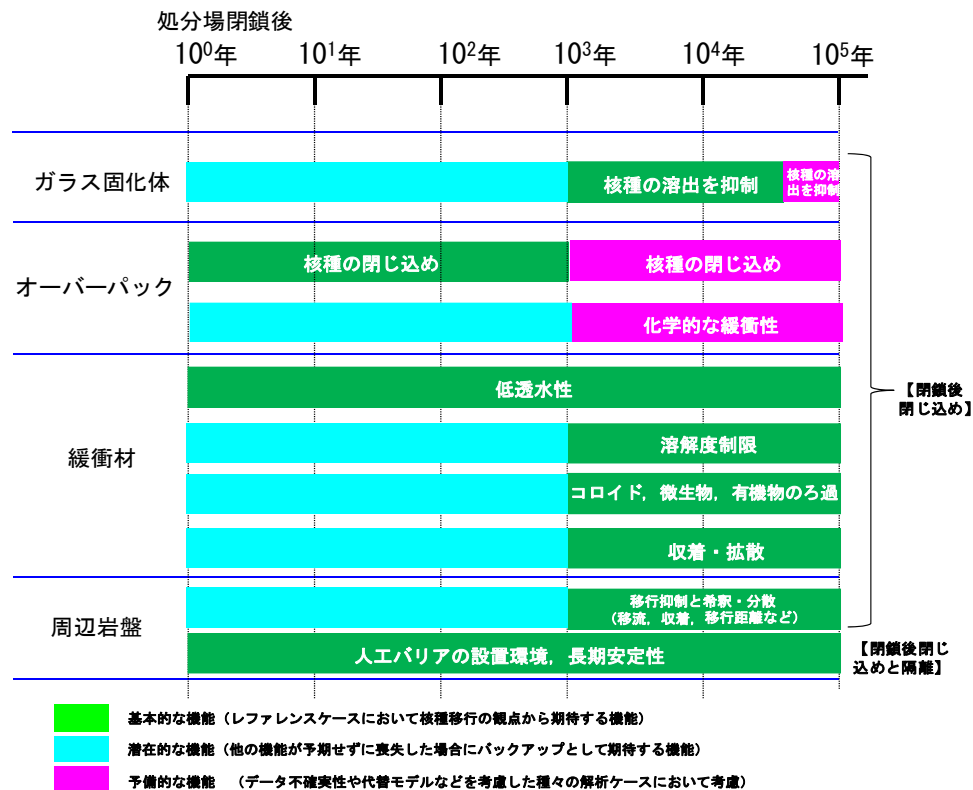


図 7.2.1-2 期待する安全機能の時間的な変遷 (第 2 次取りまとめに基づく例)

地層処分システムの将来挙動を整理する際には、安全機能に着目した上で、個々の FEP に関する最新の知見や個々の FEP が安全機能に与える影響に関する知見を取りまとめる。このためには、分野の異なる知見を取りまとめるための共通の枠組みが必要となり、NUMO はこのような枠組みとしてストーリーボードを開発している (Kurikami et al., 2009 ; Ebashi et al., 2010 ; NUMO, 2011c)。ストーリーボードは、前述した安全機能とその時間的変遷を基軸として、それぞれの時間および空間スケールにおいて安全評価上想定する地層処分システムの将来挙動を、概念図と言葉を用いて描写するものである。

図 7.2.1-3 は、自然現象の著しい影響をサイト選定により回避することを前提として、時間および空間スケールで区分した地層処分システムの蓋然性の高い状態変化と核種移行プロセスを整理したストーリーボードの例である。ストーリーボードの作成手順の概要を以下に示す (NUMO, 2011c)。

- ・ 前提条件の設定：安全評価の前提となる地層処分システムとその状態変遷を設定する。
- ・ 時間枠の設定：環境条件や安全機能の変遷を考慮して設定する。
- ・ 対象領域の設定：対象領域の空間スケールを設定する。

- ・ 各欄への記載：蓋然性が高いと考えられる現象やプロセスのうち、安全機能や感度解析の観点から安全評価上重要と考えられるものを記述する。この際、環境変遷、安全機能の時間変化、核種移行挙動について、ほかの時間枠と対象領域における記述内容の連続性を持たせて齟齬がないようにする。
- ・ そのほかの自然現象の記述：サイト選定などによって回避する自然現象の著しい影響について、各時間枠における取り扱いを記述する。
- ・ 留意事項の記述：安全評価上重要と考えられる現象やプロセスについて、知見不足などにより明言できない事項や、発生可能性を否定できないような代替的な状況、あるいは意見の一致が得られないような状況といった問題点が生じる可能性がある。これらの内容は、各時間枠における留意事項の欄に記述する。

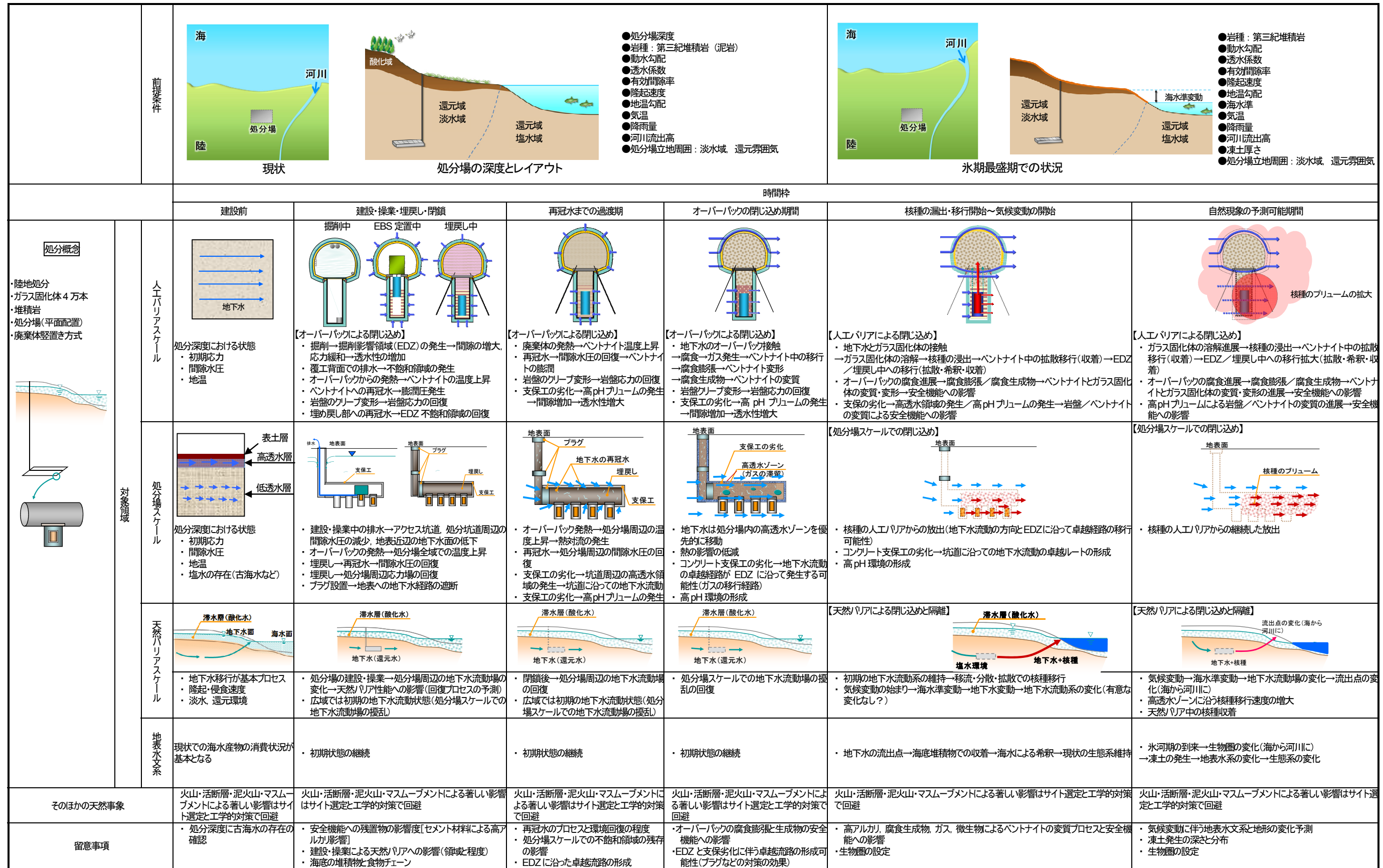
このような手順に基づきストーリーボードを作成することにより、以下の効果が期待できる。

- ・ 地質環境の調査・評価、処分場の設計、および安全評価の各分野間で理解を共有するための共通の枠組みを提供することができる。
- ・ また、ストーリーボードにおける地層処分システムの将来挙動の表現は、視覚的に捉えやすいものでもあり、非専門家も含めたステークホルダーとの対話においても、理解を共有するための道具として活用できる可能性がある。

状態設定においては、考慮すべき現象に関する知見を取りまとめ、地層処分システムの将来挙動を整理するとともに、これらの知見に含まれる不確実性についても併せて整理を行う。また、FEPについては、国際的なFEPリスト（OECD/NEA, 2000b）や国内外の事例（JNC, 1999a；電事連・JNC, 2005a, 2005b）に基づき、以下の項目と内容をFEPカタログとして整理する。この際、膨大なFEP情報から考慮すべき知見を効率的に収集するため、安全機能にかかわる現象に着眼して整理する。

- ・ 名称：対象とする現象や特性の名称を記述する。
- ・ 概要：対象とする現象や特性に対する一般的な知見やその対象範囲について記述する。
- ・ 現象間の関係：対象とする現象やほかの関連事象との関係を記述する（例えば、PID⁷⁴の作成）。
- ・ 現象、特性に関する理解の現状：対象とする現象や特性について、文献から得られた知見をまとめる。
- ・ 安全機能への影響の発生可能性と関連する不確実性：対象とする現象や特性が安全機能に与える影響を記述するとともに、考慮すべき不確実性とその範囲を記述する。
- ・ 可能性および関連する不確実性：対象とする現象に対する発生可能性について記述する。
- ・ 核種移行評価上の取り扱い：既存の知見に基づき、核種移行評価上の取り扱いについて記述する。また、更新された知見の核種移行評価上の取り扱いについても記述する。
- ・ 今後の課題：上記の整理を通じて、今後検討が必要と判断できる課題を記述する。
- ・ 文献：上記の整理において、使用した文献を記述する。

⁷⁴ プロセスインフルエンスダイアグラム（現象の影響相関図）の略称



EDZ: Excavated Disturbed Zone (掘削影響領域), EBS: Engineered Barrier System (人工バリアシステム), 高 pH プリューム: 岩盤中に形成される高アルカリ性の地下水領域
 図 7.2.1-3 ストーリーボードのイメージ（高レベル放射性廃棄物を対象とした例）

表 7.2.1-1 安全機能および不確実性を基軸としたシナリオの表現例（放射性物質の漏出・移行開始後）
 （出典：NUMO, 2011c）

安全機能	蓋然性の高い安全機能の変遷の記述	核種移行に関連するプロセス	不確実性
ガラス固化体からの核種の緩慢な放出	<ul style="list-style-type: none"> オーバーパック破損後、ガラスマトリクス溶解とガラス固化体近傍のシリカ濃度の急速な飽和 シリカ飽和後、長期のガラス溶解はシリカ濃度に依存 	<ul style="list-style-type: none"> オーバーパック破損後、地下水がガラス固化体と接触 ガラスマトリクス溶解に伴う廃棄体に含まれた放射性物質の放出 	<ul style="list-style-type: none"> 二次鉱物の沈殿とオーバーパック腐食生成物によるシリカの共沈／収着による溶出したシリカの消費に起因したガラス溶解度の加速
オーバーパックの化学的緩衝作用	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材中の還元環境の維持 		
緩衝材中の拡散	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材の低透水性の確保による放射性物質の移行抑制 	<ul style="list-style-type: none"> 放射性物質の拡散による移行 	<ul style="list-style-type: none"> 高アルカリ地下水による緩衝材中の鉱物の溶解に起因する緩衝材密度の低下
緩衝材中の核種移行遅延	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材中を移行する放射性物質の鉱物への収着。これにより移行が遅延され、緩衝材からの短寿命核種の放出が低減される 	<ul style="list-style-type: none"> 放射性物質の緩衝材鉱物への収着 	<ul style="list-style-type: none"> 腐食生成物による緩衝材の変質と緩衝材の移行特性の低下 高アルカリ地下水による緩衝材の変質と緩衝材の遅延機能の低下
低い溶解度	<ul style="list-style-type: none"> 還元環境下ではほとんどの核種は難溶性 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水中の核種濃度は溶解度により制限 	<ul style="list-style-type: none"> 高アルカリ地下水の影響による溶解度の変化
緩衝材の化学的緩衝作用	<ul style="list-style-type: none"> 高アルカリ地下水の緩衝材への侵入によっても、緩衝材中の pH 緩衝材鉱物との反応により pH8~9 を維持 		<ul style="list-style-type: none"> 高アルカリ地下水の影響による変質に起因する緩衝材の遅延機能の低下
低透水性（地下水フラックスの制限）	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材の低透水性の確保による地下水の浸入抑制 緩衝材の膨潤による、施工時に生じたすべての隙間および開口部の閉塞。これによりニアフィールドは均質で詳細な隙間構造を確保 		<ul style="list-style-type: none"> 高アルカリ地下水の影響による変質に起因する緩衝材の透水性の上昇 二次鉱物の沈殿に起因する隙間の減少（物質移行の抑制）
母岩の核種移行遅延	<ul style="list-style-type: none"> 放射性物質の岩盤中の鉱物への収着 十分な核種移行距離の確保 	<ul style="list-style-type: none"> 母岩中における放射性物質の分散を伴う移流 地下水で移動する放射性物質は収着により移行が遅延 	<ul style="list-style-type: none"> 高アルカリ地下水の影響による変質に起因する母岩の透水性の上昇 高アルカリ地下水の影響による母岩の変質と遅延機能の低下
処分場に適した環境	<ul style="list-style-type: none"> 地下水化学特性は還元環境を維持 母岩は処分場の建設や人工バリアの定置に適した力学特性を確保 		

構築したシナリオを、影響の程度と発生可能性の観点から分類し、シナリオ区分と対応付ける。なお、構築したシナリオとシナリオ区分との対応付けは一義的に定まるものではなく、安全確保対策や時間スケールの考え方などに依存して変化する。安全確保対策や時間スケールの考え方は、サイトの地質環境特性や安全規制の枠組みに影響を受ける。これらが明確に定まっていない現段階では、安全評価において考慮すべきシナリオのそれぞれがどの区分に入るかを示すことは困難である。従って、ここでは、地層処分の安全評価においてシナリオを分類していくための考え方を示す。

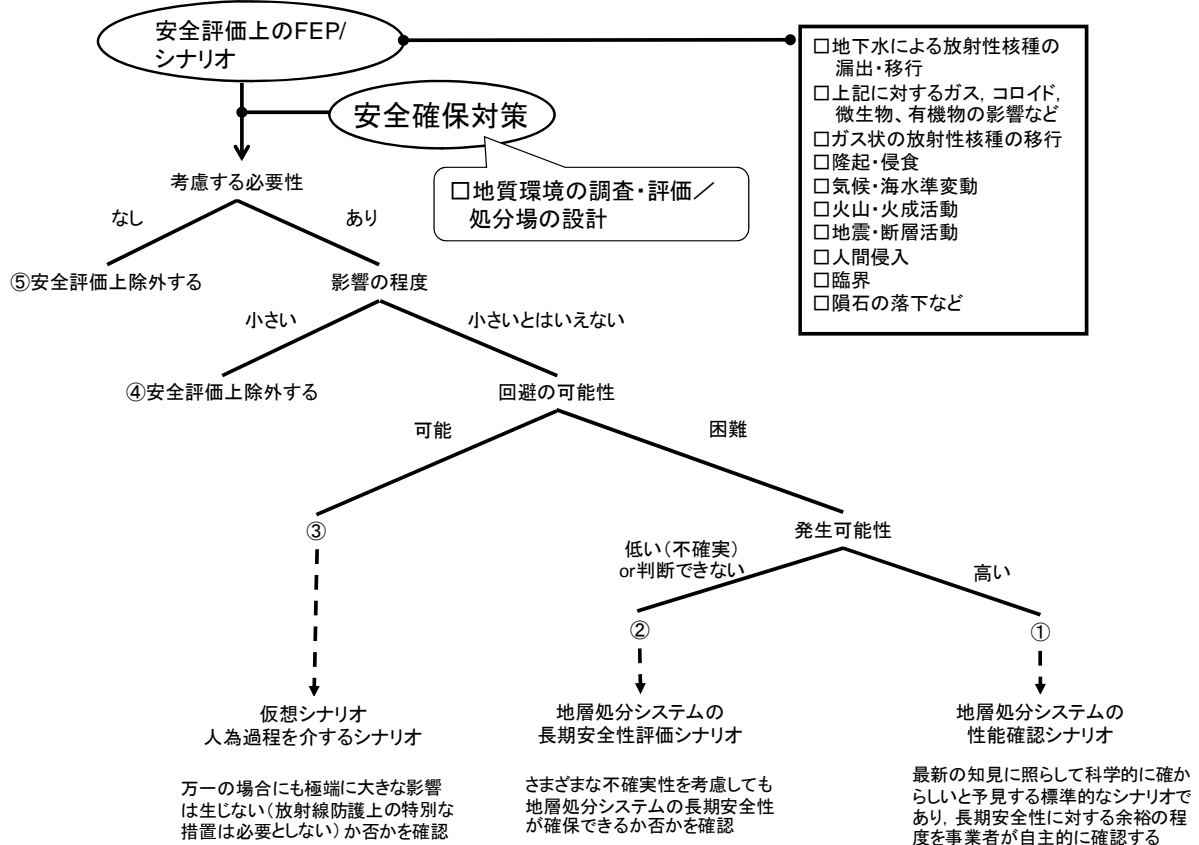


図 7.2.1-5 シナリオ分類に関する考え方

地層処分の安全評価において考慮すべき事項やシナリオは、多岐にわたる。この中には、安全評価から除外すべきことについて国際的に合意が得られているものが含まれている(図 7.2.1-5 の⑤)。また、安全確保対策などにより、地層処分システムへの影響が無視できるほど小さいと判断できるものについても、安全評価から、除外できる(図 7.2.1-5 の④)。なお、発生可能性を考慮すべきであり、かつ、影響が小さいと一般的にはいえないものについては、回避できる可能性を判断する。そして、回避が可能と考えられるものについては、仮想シナリオあるいは人為過程シナリオに分類する(図 7.2.1-5 の③)。一方、回避することが困難な事象のうち、発生可能性が高いと考えられるものについては、地層処分システムの性能確認シナリオに分類するとともに(図 7.2.1-5 の①)、発生可能性が低いものあるいは蓋然性を判断できないものについては、地層処分システムに対する不確実性あるいは変動要因として捉え、地層処分システムの長期安全性評価シナリオとして分類する(図 7.2.1-5 の②)。

7.2.2 モデルの選定とデータセットの設定に関する具体的進め方

7.1.4において述べたように、安全評価では、性能評価モデルと現象解析モデルとを階層的に準備し、用途に応じて相互補完的に組み合わせていく。これらのモデルの選定および対応するデータセットの設定に対する考え方は、多重バリアシステム（人工バリアと天然バリア）と生物圏とでは、予測に付随する不確実性の大きさが異なったものとなるため、ここでは、これらの二つに区分して具体的な進め方を説明する。

7.2.2.1 人工バリアと天然バリアのモデル

7.1.4.1で述べたように、モデルについては、性能評価モデルと現象解析モデルに大別し、これらを相互補完的に用いる。以下では、性能評価モデル、現象解析モデル、モデル間の情報の流れ、性能評価モデルに必要なデータセットの設定について述べる。

(1) 性能評価モデル

性能評価モデルは、安全機能に着目してさまざまな現象を簡略化して表現したものである（7.1.4.1参照）。期待する安全機能としては、容器による閉じ込めを含めた廃棄体からの浸出抑制、人工バリアによる核種の移行抑制、天然バリアによる核種の移行抑制が挙げられる（6.2.2参照）。性能評価モデルでは、これらの安全機能の効果を、廃棄体中の核種が生物圏に流入すると考えられる割合（生物圏への核種移行率）として定量化する。性能評価モデルは、ソースタームモデル、人工バリア中の核種移行モデルおよび天然バリア中の核種移行モデルによって構成され、それぞれに選択肢がある。これらは、地質環境特性や処分場の設計によって具体化される地層処分システムの特徴に応じて選択する。そこで、地下水中の核種移行に関する性能評価モデルおよびデータセットの構成を整理した（図 7.2.2-1）。なお、性能評価モデルを選定する際には、特定のサイトを対象とした地層処分システムに対して、不確実性や保守性に加え、その適用範囲や対象とするシナリオとの関係なども勘案して設定する。

以下では、この構成に沿って、ソースタームモデル、人工バリア中の核種移行モデルおよび天然バリア中の核種移行モデルの概要について記述する。

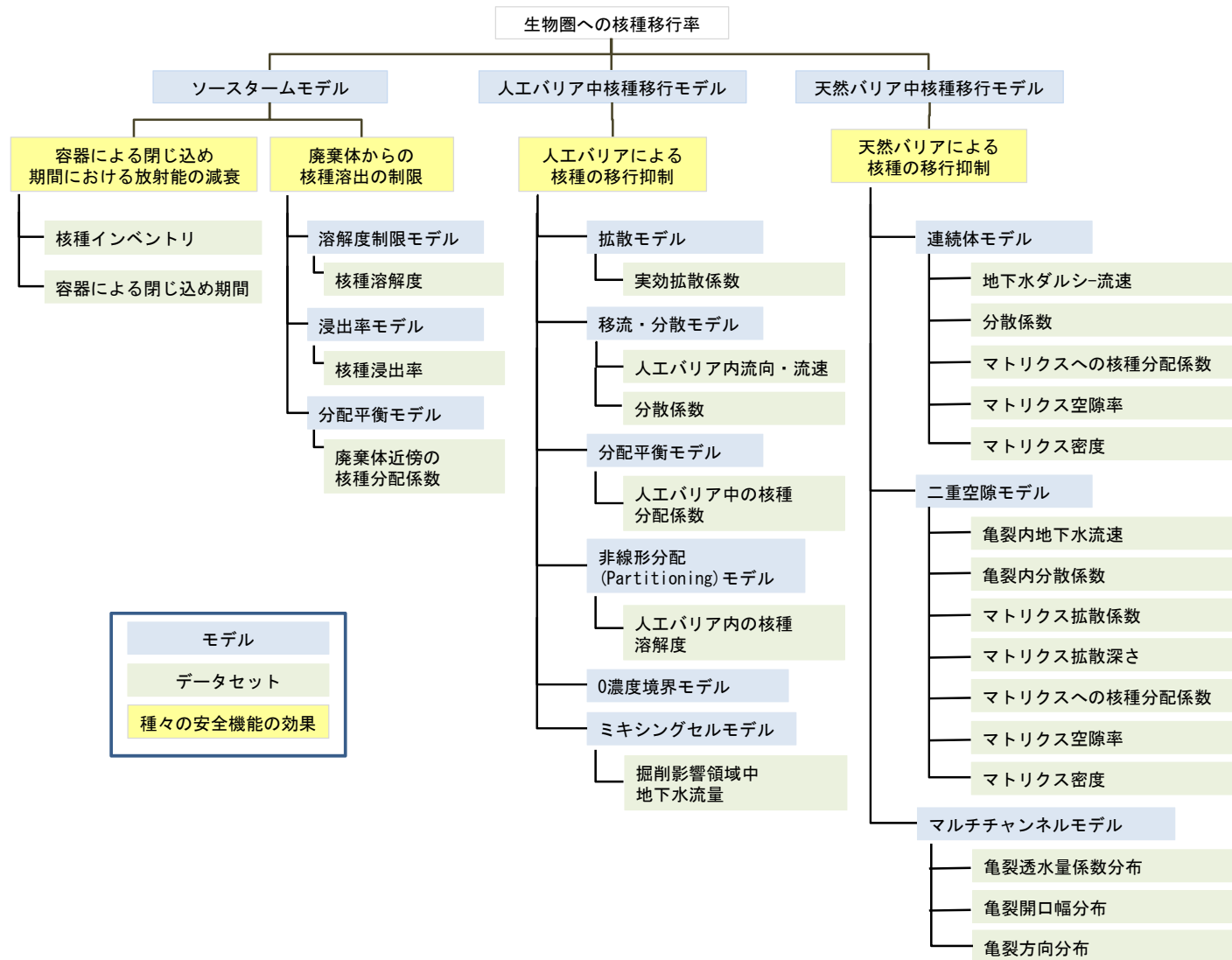


図 7.2.2-1 地下水中の核種移行に関する性能評価モデルおよびデータセットの構成例

(i) ソースタームモデル

ソースタームモデルは、廃棄体中とその近傍に存在する各核種の量（インベントリ）の時間変化を表すものである。数学モデルとして表す際には、通常、（当該核種の廃棄体中のインベントリの時間変化）＝（親核種の放射性壊変による生成）－（当該核種の放射性壊変による消滅）－（廃棄体からの核種浸出率）という微分形式となる（図 7.2.2-2）。

容器による閉じ込め期間においては、廃棄体からの核種浸出率を0とし、容器の閉じ込め機能が腐食による強度の低下などを理由に喪失した後は、廃棄体からの核種浸出率に従って核種の浸出が開始することを想定する。

廃棄体近傍の核種総量の時間変化やそれに伴う人工バリアへの核種移行率を算出するモデルは、対象とする廃棄体や核種の種類によって異なる（溶解度制限モデル、浸出率モデル、分配平衡モデル、など）。

例えば、高レベル放射性廃棄物ガラス固化体中のアクチノイドなどの難溶解性の元素の場合には、ガラスが溶解しても、人工バリア中に地下水の流れが小さく核種移行が遅いこと、および地下水化学状態が還元性雰囲気であり、溶解度制限が見込まれることから、核種の大半は沈殿して廃棄体近傍に留まるので、溶解度制限モデルを用いる。一方、可溶性の元素の場合には、ガラス固化体の溶解速度によって人工バリアへの核種移行率が制限されるため、浸出率モデルを用いる。なお、一部の TRU 廃棄物などでは、可溶性の核種が廃棄体とその近傍に収着することによって液相と固相の間に分配されることを想定した分配平衡モデルを用いる。これらのモデルは組み合わせられ、元素ごとの溶解度や廃棄体に応じて適用するモデルを選択する。

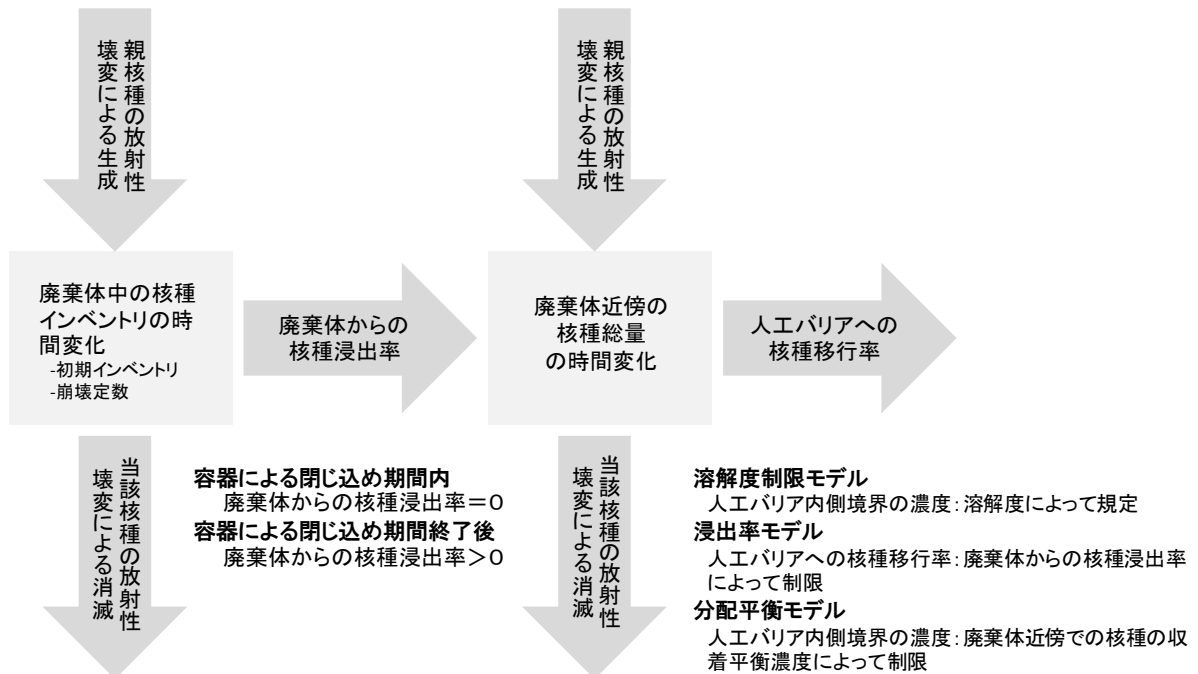


図 7.2.2-2 ソースタームモデルにおける核種量の時間変化のイメージ

(ii) 人工バリアの核種移行モデル

人工バリアの核種移行モデルは、人工バリア中の各位置における核種質量の時間変化を表すものである。数学的な定式化においては、コロイド状の核種がろ過され移行には寄与しないことを前提とすれば、(各位置での核種の質量の時間変化) = (液相中の核種の拡散あるいは分散による移動) + (液相中の核種の移流による移動) + (親核種の壊変による生成) - (当該核種の壊変による消滅) という微分形式となる (図 7.2.2-3)。

廃棄体側の条件は、前述したソースタームモデルによって決まる。具体的には、ソースタームに溶解度制限モデルあるいは分配平衡モデルを用いる場合には、廃棄体領域と人工バリアとの境界における核種の濃度が廃棄体側の条件となり、また、浸出率モデルを用いる場合には、核種の移行率が廃棄体側の条件となる。一方、母岩側の条件は、質量保存が保たれるように、後述する天然バリア中核種移行モデルと関係付けて設定する。

また、人工バリア内部の核種の移動が拡散による場合には、人工バリアの外側において0濃度であることを仮定して核種の濃度勾配を保守的に表現するモデル (0濃度境界モデル^{7.5}) や、人工バリアの外周にある掘削影響領域内の地下水流れによって人工バリアから移行した核種が瞬時に完全に混合されることを仮定して核種濃度を規定するモデル (ミキシングセルモデル) などを用いる。これらの条件を適用する場合には、必ずしも現実的とはいえない仮定を導入することにより安全評価の信頼性が低下しないようにする必要がある。掘削影響領域の状態に関する知見や解析の用途に応じて、現実性と保守性のバランスを勘案し、これらのモデルの中から適切なモデルを選択する (若杉ほか, 2004)。

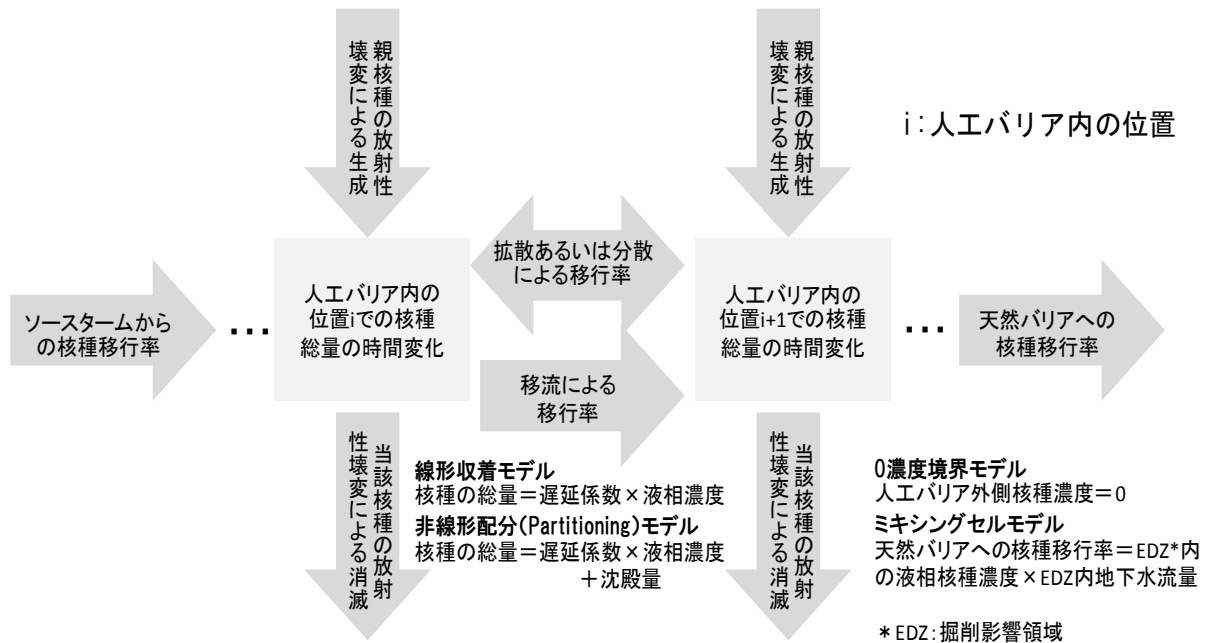


図 7.2.2-3 人工バリア中核種移行モデルにおける核種量の時間変化のイメージ

^{7.5} 0濃度境界モデルは、掘削影響領域内に核種濃度が常に0になるような非常に大きな地下水の流れが存在し、緩衝材外側に到達した核種の全量はその地下水により天然バリアへ移行することを想定したモデルである。

(iii) 天然バリアの核種移行モデル

天然バリアの核種移行モデルは、母岩中移行経路内の任意の位置における核種量の時間変化を表すものである。天然バリア中核種移行モデルとしては、多孔質媒体モデルや二重空隙モデル、または、これらの複合モデルが一般的である。また、母岩の空間的不均質性を表すモデルとして、亀裂透水量係数分布を仮定したマルチチャンネルモデルもある (JNC, 1999a)。マルチチャンネルモデルとは、複数の二重空隙媒体モデルを考慮してそれぞれに異なる亀裂内流速と亀裂開口幅とを定義したモデルである (JNC, 1999a)。

天然バリア中の各核種移行モデルの適性は、母岩の特性のほか、移行距離のスケールにも依存して変化すると考える。このような点を考慮した上で、安全評価の目的に応じてモデルを選択する。

多孔質媒体モデルは、前出の人工バリア中核種移行モデルの場合と同様、(各位置での核種の質量の時間変化) = (液相中の核種の拡散あるいは分散による移動) + (液相中の核種の移流による移動) + (親核種の壊変による生成) - (当該核種の壊変による消滅) という微分形式として定式化される (図 7.2.2-4)。ただし、地下水の流向・流速や分配係数といったデータセットは、母岩の空間的不均質性に対応して位置によって異なるものとなることがある (不均質性を表現した連続体モデル)。

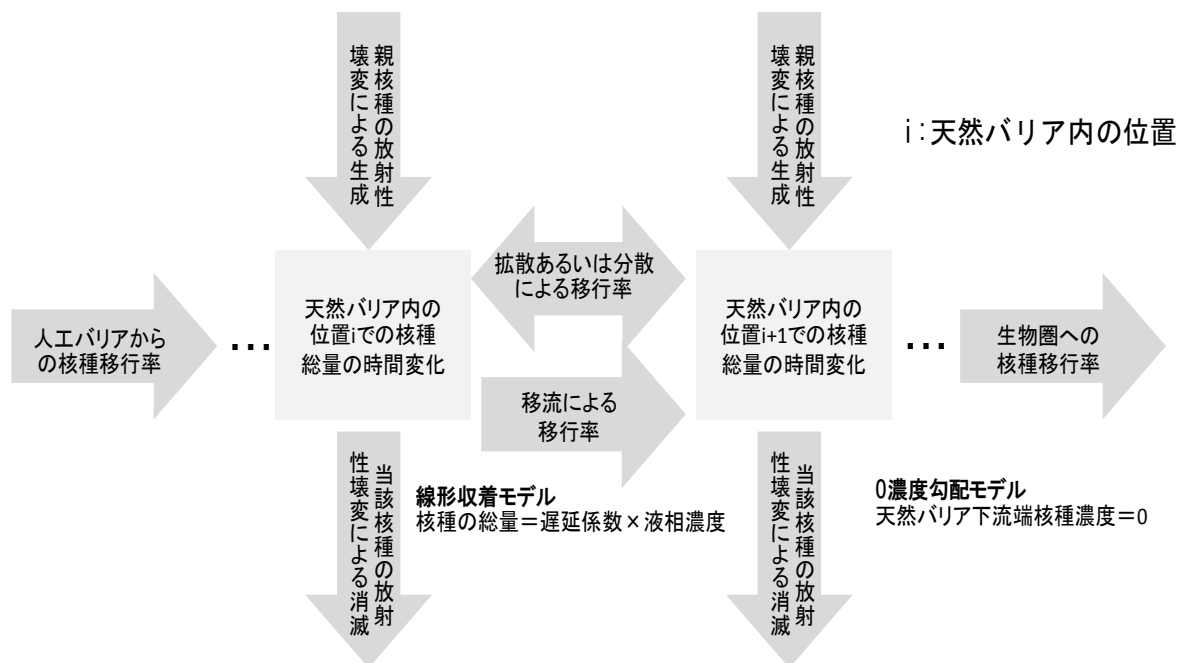


図 7.2.2-4 天然バリア中核種移行モデル (多孔質媒体モデル) の核種量の時間変化のイメージ

二重空隙モデルは、高透水性の亀裂などの主要流動経路とそれら流動経路に接する岩石基質部 (マトリクス) を考慮したモデルであり、亀裂内での移流・分散による核種移行とマトリクス内での拡散による核種移行とを連立して解く (図 7.2.2-5)。この場合には、亀裂とマトリクスに対応してそれぞれ異なる方程式が必要となり、亀裂内地下水流速、亀裂開口幅、マトリクス拡散係数、マトリクス空隙率、マトリクス密度、および、マトリクスへの核種分配係数についてのデータセットが必要となる。これらのデータセットは、母岩の不均質性を考慮して設定する。特に、特性の異なる複

数の亀裂が存在する場合には、第2次取りまとめのマルチチャンネルモデルも選択肢に含まれる。

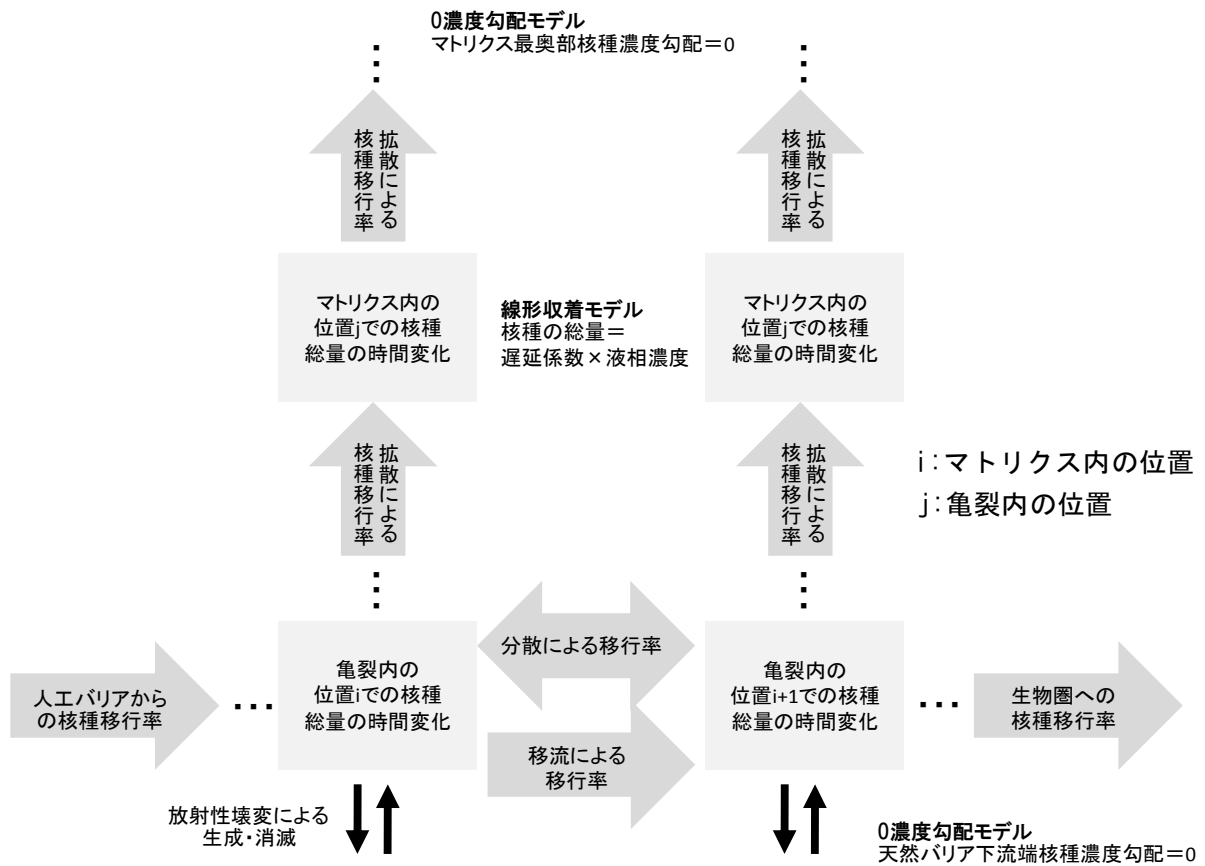


図 7.2.2-5 天然バリア中核種移行モデル（二重空隙モデル）の核種量の時間変化のイメージ

(2) 現象解析モデル

7.1.4.2 で述べたように、現象解析モデルは、性能評価モデルにおける簡略化の妥当性を示すことが主な目的である。各現象解析モデルの概要と目的（例）を表 7.2.2-1 に示す。

(3) 性能評価モデルと現象解析モデル間の情報の流れ

性能評価モデルと現象解析モデル間には、一つのモデルの計算結果をほかのモデルの入力データとするといった情報の流れが存在する。このため、安全評価において、このような情報の流れをあらかじめ整理しておくことが必要である。文献調査の段階においては、一般的に、現象解析モデルを利用する上で必要となるサイト固有の情報は少ない。一方、概要調査の段階以降では、地表調査および少数のボーリング調査と処分場の設計に関する情報が増加することから、それらを入力条件とした種々の現象解析を行うことが可能となる。そこで、概要調査の段階および精密調査の段階を対象として、現象解析モデルと性能評価モデルにおける情報の流れを整理した（図 7.2.2-6）。図 7.2.2-6 では、ソースターム、人工バリア、天然バリア、生物圏に領域を大別し、それぞれのモデルでどのような情報が主な入力となるかを整理した。

表 7.2.2-1 現象解析モデルの概要と目的 (例)

現象解析モデル	概要	目的
地下水流動解析モデル (広域)	水理地質構造モデル、涵養量および海岸や河川湖沼などの前提条件に基づき、将来の地形変化や気候・海水準変動を考慮した広域の地下水流動を把握する(定常飽和流動モデルあるいは非定常密度流モデル)	<ul style="list-style-type: none"> ニアフィールド地下水流動解析の境界条件を設定 処分地点および深度に関するオプション比較
地下水流動解析モデル (ニアフィールド)	地質環境モデルにおける母岩の不均質な透水性と設計における坑道や人工バリアの形状・特性に基づき、広域地下水流動解析の結果を境界条件として、ニアフィールド内の地下水流動を把握する(定常飽和流動モデル)	<ul style="list-style-type: none"> 核種移行解析のための詳細な流速情報を提供 廃棄体定置位置や坑道設計などに関するオプション比較
ニアフィールド 地球化学解析モデル	鉄、緩衝材およびコンクリートなどの相互作用に伴う地球化学条件の時間的変化およびバリア材料の変質を把握する(多成分反応移動解析モデル)	<ul style="list-style-type: none"> 核種溶解度や分配係数設定のために空隙水質の情報を提供 バリア材料に関するオプション比較
ニアフィールド 力学解析モデル	応力場の時間変化とオーバーパックおよびガラス固化体の変形・破壊挙動を把握する	<ul style="list-style-type: none"> 閉じ込め期間およびガラス破碎の情報を提供 人工バリア形状や仕様に関するオプション比較
ニアフィールド 核種移行解析モデル	母岩の不均質性に起因する複雑な核種移行経路やさまざまな設計オプションの影響を考慮した核種移行率を把握する(三次元核種移行モデル)	<ul style="list-style-type: none"> 性能評価モデルのデータセット設定 廃棄体定置位置や坑道設計などに関する設計オプション比較
熱-水-応力-化学 連成解析モデル	坑道掘削、廃棄体や人工バリアの設置および坑道閉鎖に起因する熱、水理、力学あるいは化学的擾乱によってその後のニアフィールドがどのように変遷するかを把握する	<ul style="list-style-type: none"> 種々の擾乱により、人工バリアの不可逆的な変質や形状変化などが生じないことを解析により確認する
ガラス溶解モデル	地下水水質や温度などの環境条件に対応したガラス溶解速度を推定する。また、時間の経過に伴う表面変質層(拡散層)の成長とそこでの物質移動律速によるガラス溶解速度の長期的減少を説明する	<ul style="list-style-type: none"> 性能評価モデルの環境条件に適したデータセットの設定 安全機能発現のメカニズムの説明(ガラスの長期的な低浸出性)
収着モデル	性能評価モデルにおける経験的な表現(分配係数)ではなく、イオン交換や表面錯体生成といった収着メカニズムについての理論的なモデルに基づき、地下水水質およびベントナイトや岩石表面の特性に応じた核種の収着量を推定する	<ul style="list-style-type: none"> 性能評価モデルの環境条件に適したデータセットの設定 安全機能発現のメカニズムの説明(岩石やベントナイトによる核種移行遅延)
溶解度モデル	各放射性元素についての溶解度制限固相とその溶解/沈殿反応および液相での液相中の化学種分布を考慮した地球化学解析によって地下水水質や温度などの環境条件に対応した溶解度を推定する	<ul style="list-style-type: none"> 性能評価モデルの環境条件に適したデータセットの設定 安全機能発現のメカニズムの説明(アクチニドなどの難溶解性)

ニアフィールド：人工バリアとその近傍の岩盤の領域

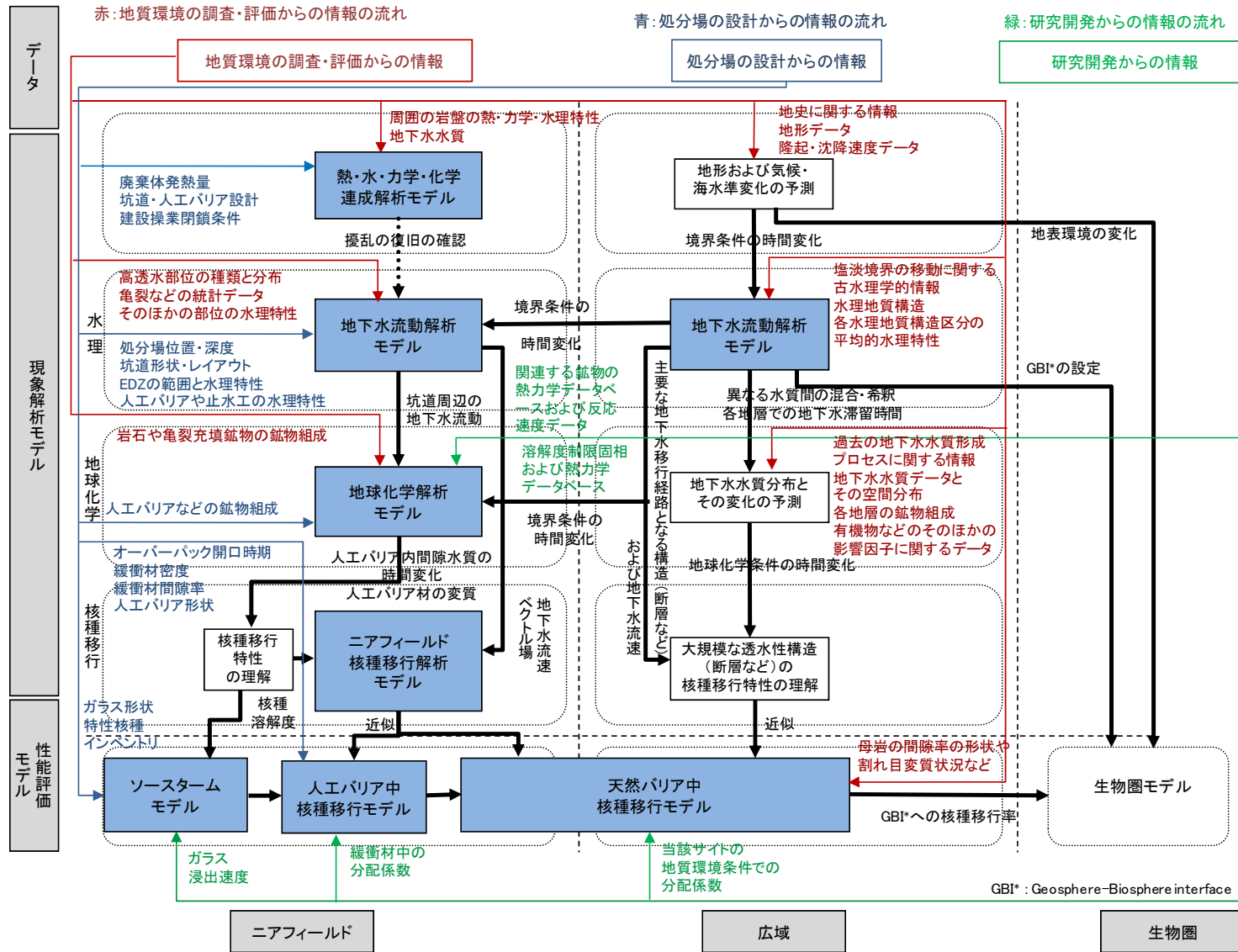


図 7.2.2-6 安全評価のためのモデルチェーンの例（概要調査の段階あるいは精密調査の段階）

(4) データセットの設定

データセットは、不確実性を考慮したシナリオやモデルに応じて、実験やデータベースなどを活用しながら設定する。図 7.2.2-1 からわかるように、人工バリアと天然バリアに対するデータはモデルに対応して多岐にわたることから、これらの整備には多大の費用と時間を要する。このため、信頼性の確保とデータ取得効率の観点から、汎用性があり共通に用いることが可能なデータベースの開発が、国際共同プロジェクトや基盤研究開発機関によって進められている。

データセットの設定においては、実験によるデータ取得、既存のデータベースの利用、現象理解に基づくモデルによる推定といった方法が考えられる（例えば、舘ほか、2009）。以下では、文献調査と概要調査を対象として、これら三つの方法に対するデータセット設定の考え方について述べる。

第2次取りまとめやそれ以降の研究開発により、種々のデータベースやデータセットが整備された（7.3.4 参照）。これらは、文献調査などから得られる情報をもとに推定される岩種や地下水の性質などに応じて、事業の初期段階におけるデータセットの設定に用いることができる。なお、サイトの地質環境特性に大きく依存しないデータについては、さまざまなサイトに対して、共通して用いることが可能である。

一方、事業が進展するに従い、サイトにおけるボーリングなどを用いた実際の調査データが得られることになる。また、地下水や岩石のコアサンプルが入手可能となり、それらを用いた室内試験が可能となる。そして、既存のデータベースや現象理解に基づくモデルを用いて、室内試験により取得されたデータとの比較分析を行い、設定値の信頼性を向上させることができる。室内試験によって取得されたデータとデータベースから得られるデータの幅との間に違いが生じる場合には、データベースのデータが有する信頼性や取得条件、および母岩が有する不均質性を考慮して、信頼性および傾向を分析する。また、調査期間の制限によってすべてのデータセットに対して十分なデータが得られない場合には、類似の環境条件で取得されたデータや既存のデータベースなどを活用する。

7.2.2.2 生物圏のモデル

安全評価においては、人間の生活環境である地表環境における核種移行プロセスと被ばくの形態（被ばく経路）を想定して、モデルの構築とデータセットの作成を行い、人間への影響を推定する。このような評価は、生物圏評価と呼ばれる（JNC, 1999a ; 電事連・JNC, 2005a）。

生物圏では、将来の人間の環境や生活様式を予測することは困難であるため、長期間安定に存在する地下深部の地質環境やそこに構築される人工バリアと比較して、予測に付随する不確実性が相対的に大きくなる。このため、地層処分を対象とした生物圏のモデル化に当たっては、IAEA の国際共同プロジェクト BIOMASS において検討されているレファレンスバイオスフィアの考え方（IAEA, 2003）を適用していくことを基本とする。レファレンスバイオスフィアは、人間生活の環境や生活様式の仮定を安全評価の目的に沿って整合性を取りながら合理的に設定し、適切な評価指標（線量など）に変換するための道具として生物圏をとらえる考え方である。この概念は、第2次取りまとめや第2次 TRU レポートなどの国内の事例に加え、米国（U. S. NRC, 2009）やスイス（ENSI, 2009）などの国外の評価事例でも取り込まれている。

生物圏モデルの主要な構成要素は、人間の生活環境とそれを取り巻く地表環境に大別される。NUMO は、これら二つの構成要素について、レファレンスバイオスフィアの考え方を適用した上で、サイト周辺の条件やわが国の一般的な知見などに基づきモデル化を行うとともに、データセットを

設定する。以下では、(原子力安全委員会, 2010) を参考としつつ、これらの二つの構成要素およびデータセット設定に対する考え方について述べる。

(1) 地表環境

生物圏の取り扱いに関しては、時間的な変遷を考慮しない場合と考慮する場合のアプローチとに大別できる (IAEA, 2003)。NUMO は、これらの二つの取り扱いを、安全評価の目的やステークホルダーからの要求や懸念に応じて適切に組み合わせながら用いる。

時間的な変遷を考慮しない場合には、現在と同様な生物圏が将来も継続するという仮定をおいて、サイトの地質環境特性に基づき、地形や地下水などを考慮して GBI (天然バリアと生物圏の境界面) や評価条件を設定し、モデル化を行う。第2次取りまとめにおいては、この考え方に基づき、幅広い地質環境特性に対応した生物圏評価が行われている (JNC, 1999a)。

一方、生物圏の時間的な変遷を考慮する場合には、将来の生物圏に変化を与え得る自然現象を考慮する。自然現象の例としては、氷期-間氷期サイクルによる気候変化、海水準変動および隆起・侵食による地形の変化などである。これらの自然現象は、放射性物質が地下水により生物圏に流入すると仮定する領域 (GBI) や被ばく経路に影響を与える可能性がある。具体的な例としては、海水準変動と隆起・侵食により、核種を収着した沿岸海域堆積層が地表となり、その土地を利用することにより被ばくが生じるといったことが想定される。このため、生物圏評価モデルは、現在の地表環境に対応したモデルから、将来の地表環境に対応した別のモデルへの変遷を考慮することになる。この際、将来の地表環境は、現在の類似した状況にある地域の事例も参照して設定する。

(2) 人間の生活様式

前述のように、将来の人間の生活環境や生活様式を予測することが基本的に困難であることから、将来の人間の生活様式については、現世代の人間の生活環境や生活様式を前提として、被ばく経路やそれに基づく人間への影響を評価する考え方を適用する。この考え方は、国際的な議論とも整合する (ICRP, 2000)。具体的には、現世代の人間の生活様式を前提に被ばく経路を想定し、それぞれの被ばく経路ごとに人への影響の程度を同じく現世代の人間の生活様式を前提に評価する。このような考え方は様式化 (stylization) といわれている (原子力安全委員会, 2010)。

また、生物圏では、決定グループ (ICRP, 2000) を設定する必要がある。決定グループは、ICRP の勧告において、「現在利用できるサイトまたは地域の情報に基づくサイト固有のアプローチか、もっと一般的な習慣と条件に基づいた様式化されたアプローチを用いて規定すべきである」としている (ICRP, 2000)。また、「様式化されたアプローチの使用は、評価の時間尺度が長くなるほど重要になる」としている。決定グループの考え方としては、第2次取りまとめと同様に、まず、移行プロセスに応じて設定された河川などの地表のさまざまな構成要素と人間との接点ごとに適切な異なるタイプの被ばくグループを想定する。その後、想定される複数の被ばくグループの中で最大の影響を受けるグループを決定グループとして設定する。

NUMO は、これらの考え方に基づいて人間の生活様式を設定し、モデル化する。この際、前項で述べたように、地表環境の時間的な変遷を考慮する必要がある場合には、この環境変遷に対応して土地利用形態などを含む人間の生活様式も変化する可能性があることから、現在の類似した状況の事例などを参考にしつつ想定する。なお、安全評価を実施すべき期間が長期にわたることを考慮して、線量以外の補完的な指標 (例えば、JNC, 1999a ; Miyahara and Kato, 2007) も視野に含めて検討す

る。また、上述した地表環境の変遷が人間の生活環境や生活様式に影響を与える可能性もあり、必要に応じてその影響を考慮する。

(3) データセットの設定

生物圏評価では、一般に、数多くのデータを取り扱い、サイトの特徴やわが国の一般的な特徴に関連するものも多く存在する。限られた資源を有効に活用して生物圏評価を行うためには、優先的に整備すべきデータを評価する必要がある。このため、生物圏評価におけるデータの重要度を把握するための作業フローを整理している（加藤ほか，2005：図 7.2.2-7）。この作業フローは、線量評価上重要な事項、重要な核種移行プロセスや被ばく経路（KIPPs：Key Issues, Processes and Pathways）の特定、および KIPPs に基づくデータの重要度の把握という二つの要素から構成されている。この作業フローを用いてデータの重要度を把握し、データセットの効率的な設定を行う。

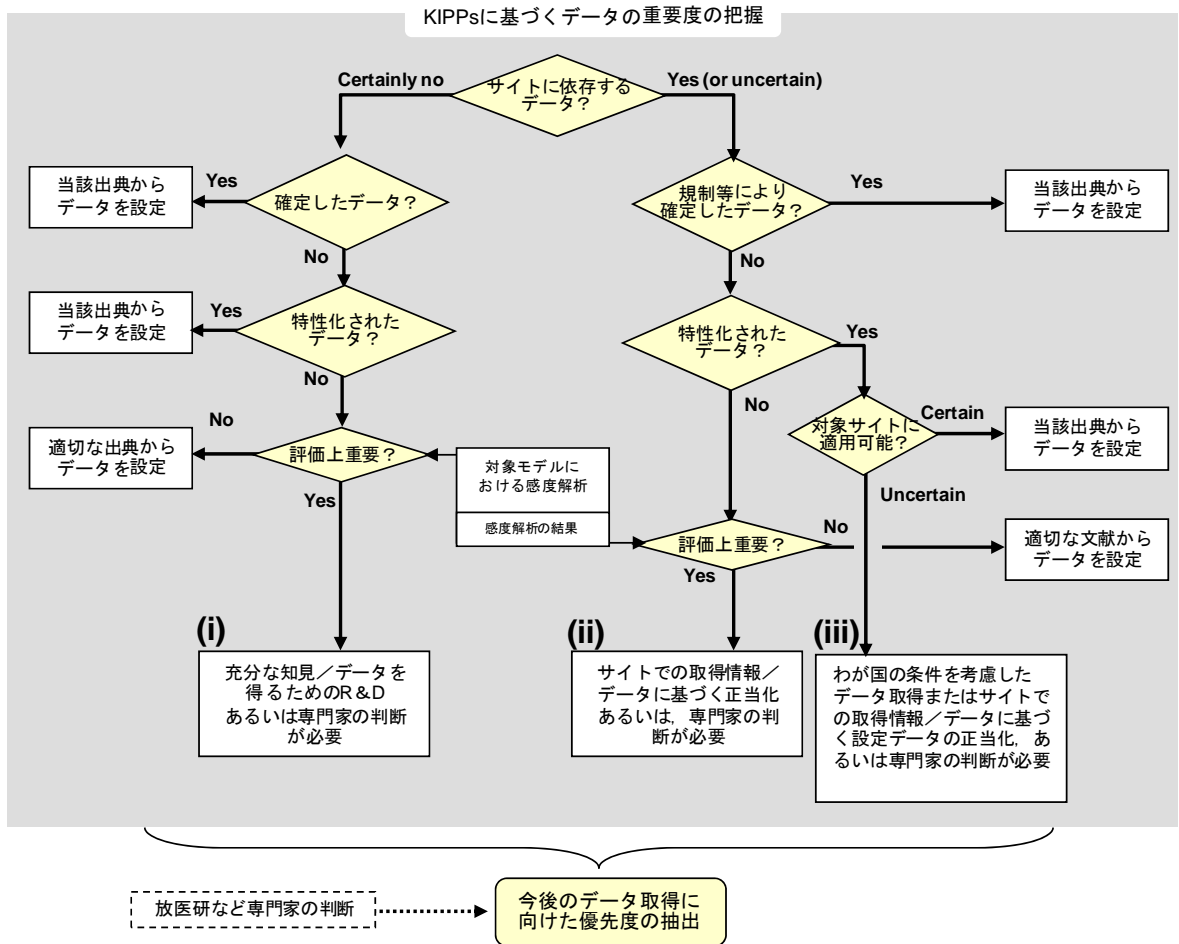
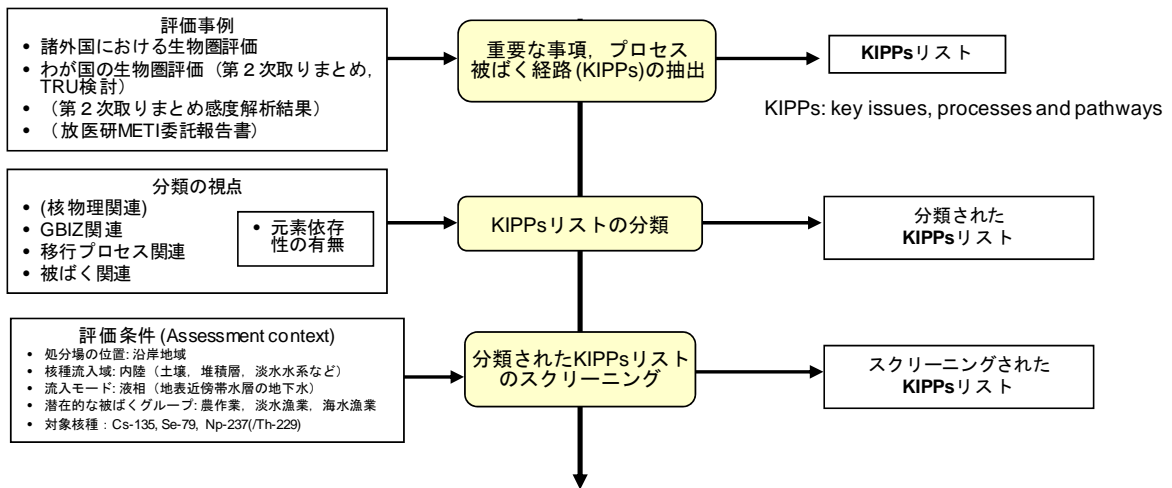


図 7.2.2-7 生物圏評価データの重要度を特定するための作業フロー
(出典：加藤ほか, 2005)

7.3 安全評価を支える技術の整備

本節では、第2次取りまとめ以降、基盤研究開発機関および NUMO が取り組んできた安全評価に関する技術の進展について概説するとともに、さらなる信頼性向上に向けた今後の課題策定の方向性についても示した。

7.3.1 安全評価に関する技術開発

基盤研究開発機関および NUMO は、第2次取りまとめ以降、事業を進める上で必要な以下の四点を考慮して、安全評価の信頼性を向上させるための研究開発および技術開発を進めてきた。

① 地質環境の多様性と長期変遷に対応できるようにすること

サイトや岩種を特定しない研究開発段階においては、わが国の一般的な地質環境を対象として、地層処分システムの閉鎖後長期の安全性が評価された（JNC, 1999a；電事連・JNC, 2005a）。一方、事業段階の安全評価においては、サイトが有する地質環境の特徴を安全評価に適切に取り込むことが必要である。事業編で述べたように、地質環境特性としては、地理、地形、地質学的にさまざまな可能性が考えられる（例えば、地理的には内陸部、沿岸部、島部、地形的には山地、丘陵、平野など）。また、地質環境特性は、隆起・侵食や気候・海水準変動などに影響を受けて、長期的に変遷する可能性がある。このため、想定されるさまざまな地質環境特性や長期変遷に対応できるように、安全評価手法を整備しておくことは、地質環境の多様性への対応という観点から重要である。

② さまざまな設計オプションに対応できるようにすること

処分場は、放射性廃棄物の特徴や地質環境の条件を考慮して、閉鎖後の安全性に加え、工学的実現性、経済性、品質保証、操業時の安全性といった種々の視点も含めた総合的な評価に基づいて、段階的に具体化・詳細化する。この総合的な評価には、廃棄体の定置方式などのさまざまな設計オプションが含まれる。サイトや岩種を特定しない研究開発段階の安全評価においては、代表的な地質環境の条件および設計条件を仮定した上で、まず、単体の放射性廃棄物に対して人工バリアと天然バリアを想定した核種移行解析を実施し、その結果に廃棄体の本数を乗じることで、システム全体の性能を保守的に評価した（JNC, 1999a）。この評価方法では、廃棄体の定置個所の違いに起因する不均質性や定置方式の違いが保守的な評価に埋没してしまい、その影響を把握することが困難である。このため、これらの特徴をより現実に即して性能評価に取り込む手法を整備しておくことは、工学的対策へのフィードバックという観点から重要である。

③ 更新される知見を適切に安全評価に取り込めるようにすること

地層処分事業は長期的なプロジェクトであり、その間に関連する種々の科学的な知見が段階的に拡充されることが想定される。このため、NUMO は、それらの知見を適宜整理するとともに、それらを適切な段階で安全評価に取り込むことができるようにしておくことが重要である。

④ 自然現象の著しい影響を仮想的に評価できるようにすること

自然現象の著しい影響については、適切なサイト選定によって回避することが地層処分事業の基本的な考え方である。しかしながら、地層処分の安全評価において対象とする時間スケールが超長期となることから、その発生時期や頻度に関する不確実性を考慮することが必要となる。①で述べ

た点に加え、この点においてもわが国の一般的な自然現象の特徴やサイト固有の特徴を考慮した上で、遠い将来における自然現象の著しい影響を仮想的に評価するための手法をあらかじめ整備しておくことは重要である。これにより、ステークホルダーからのさまざまな要求や懸念に対して応えることが可能になる。

事業段階の安全評価は、7.1.1 で述べたように、シナリオの構築、モデルの選定、データセットの整備、安全解析といった手順に沿って進める。そこで、安全評価の手順に沿って、第2次取りまとめ以降、基盤研究開発機関および NUMO が取り組んできた安全評価に関する技術の進展を整理した（表 7.3.1-1～4）。技術の進展を整理する際には、性能評価カーネル（JAEA, 2010c）および国内の文献を対象として、第2次取りまとめで取り扱っていなかったものや、今後の事業の進展に応じて活用することが有望と考えられるものに着眼した。表 7.3.1-1～4 に示した個々の技術は、本報告書ではすべてを詳細に掲載しないものの、第4章で示した技術開発ロードマップ（図 4.1.3-5）のうち、事業の安全評価を支えるジェネリックな技術開発成果に相当するものである。

本節では、表 7.3.1-1～4 に示した技術の進展のうち、上述した四つの点に直接関連する技術の進展を代表的に記述する。なお、そのほかの技術についても、さまざまなニーズに応じて適宜活用あるいは参考とすることが可能と考えているものである。

なお、第3章および7.1.3 にて述べた評価期間に関する考え方は、技術を整備する際の前提条件となるものである。しかしながら、評価期間に関するより具体的な考え方がサイトの地質環境条件や安全規制側での検討を踏まえて明確になるものであることから、本節では、評価期間の区分を設けずに技術の進展を示すこととした。

表 7.3.1-1 第2次取りまとめ以降の安全評価に関する技術の進展 (1/4)

項目		概要	文献 (あるいは本章の該当箇所)	対象領域		
				EBS	NB	BIO
状態設定と シナリオ構築	効率的なシナリオ 構築手法	安全機能に基づく状態設定に着目した作成手法と FEP に基づく作成手法を組み合わせた統合化手法の整備	NUMO (2011c) (7.2.1)	○	○	
		FEP と安全機能の関係を階層化して網羅性と効率性を向上させる手法の整備 マトリクス形式による FEP の相関関係を整理するためのツールの整備	JNC (2005) 牧野ほか (2007)	○	○	
		既存の成果に基づき、シナリオを部分的に更新していくための考え方とその適用事例の整備	稲垣ほか (2009)	○	○	
		懸念される事象の影響について、安全機能と核種移行パラメータとの連鎖で分析し、影響の重要度を分類していく考え方の整備	大井ほか (2008) Ohi et al. (2009)	○	○	
	FEP に基づくシナリオ構築手法と FEP 情報の整備	FEP のリストや各 FEP に対する知見の文献情報に基づく整理 (わが国の典型的な地質環境と人工バリアにおける地下水移行シナリオを対象) FEP 間の相関関係に対して、シナリオとして取り込む必要性や影響の有無に関する判定を実施 地層処分低レベル放射性廃棄物の安全評価に関する FEP 情報の整備	神崎ほか (2009) 電事連・JNC (2005b) (7.3.2.4)	○	○	
	長期変遷を考慮した状態設定およびシナリオ構築手法	沿岸域における地質環境の長期変遷を考慮したシステムの状態設定手法の整備	NUMO (2011c) (7.3.2.1)	○	○	
		ニアフィールドの長期変遷を考慮したシナリオ構築手法の整備	NUMO (2011c) (7.3.2.2)	○	○	
		自然現象の特徴とそれによる影響の伝播に関する地球科学的な知見を THMC (熱, 水理, 力学, 化学) の変化に着目して整理し、核種移行解析モデル・パラメータ設定へとつなげていく手法の整備	JNC, 2005 川村ほか (2008) 江橋ほか (2009b) 川村ほか (2010)	○	○	
	自然現象の著しい影響に関するシナリオ構築手法	サイト選定や工学的対策により回避することが前提となっているシナリオが発生したと仮定した場合 (what if) の性能評価上の取り扱い手法の整備	Miyahara et al. (2008)	○	○	
		自然現象の著しい影響を仮想的に評価するための手法の整備	Miyahara et al. (2009) Kawamura et al. (2010) NUMO (2011c) (7.3.2.3)	○	○	

(各研究開発成果が対象とする領域 EBS:人工バリア NB:母岩 BIO:生物圏)

表 7.3.1-2 第2次取りまとめ以降の安全評価に関する技術の進展 (2/4)

項目		概要	文献 (あるいは本章の該当箇所)	対象領域			
				EBS	NB	BIO	
モデルの開発	母岩の不均質性および設計のオプションを考慮した核種移行解析モデルの高度化	掘削影響領域における核種移行および遅延をより現実的に評価するための二次元の核種移行モデルの整備	若杉ほか (2004)	○			
		母岩の不均質性や設計オプションをより現実的に評価するための三次元核種移行モデルの整備	Wakasugi et al. (2008) NUMO (2011d) (7.3.3.2)	○	○		
		処分場の合理化・最適化の設計研究開発との連携強化に向けた、処分場デザインの変化に対応可能な核種移行モデルの整備	Murakami and Ahn(2008a) Murakami and Ahn(2008b)	○	○		
		地質環境の好ましい部位に処分場のレイアウトを展開することで、地層処分システム全体の性能改善を図るアプローチの整備	高瀬ほか (2006)	○	○		
		地下水流動解析から得られる不均質な移行経路情報を核種移行解析モデルに取り込むための方法論の整備	牧野ほか (2005)				
	地表環境および地質環境の長期変遷を考慮した核種移行解析モデルの高度化	生物圏における気候変動の影響を、冷帯気候やツンドラ気候での降水量の減少に着目し、灌漑水量、浸透/流出量、食物摂取のパラメータを変更することで取り扱う生物圏評価モデルと線量への換算係数の整備	JNC (2005) 鈴木ほか (2006)			○	
		帯水層などの表層環境での水理・物質移行を明示的にモデル化し、生物圏評価に取り込むための手法の整備	稲垣ほか (2007) 板津ほか (2009)			○	
		沿岸域における地質環境の長期変遷を、核種移行解析モデルとして取り込むための手法の整備	NUMO (2011d) (7.3.3.1)		○	○	
	核種移行解析に関する計算手法の効率化	地下水解析コード (FEGM) と核種移行解析コード (FERM) に関する改良およびエスポ地下研究施設の地下水解析・塩化物イオン濃度解析への適用	長谷川ほか (2004)		○		
		GoldSimによる統計論的な核種移行解析モデルの整備	Wakasugi et al. (2000) JNC (2005) (7.3.3.3)	○	○		
		パラメータの時間的変化を考慮した効率的な核種移行解析ツールの整備	小尾 (2010)	○	○		
		地層処分システムの応答特性を容易に把握するための近似解析解の導出	NUMO (2011a) (7.3.3.3)	○			
	データセットの整備	データの整備	ガラス溶解に関するデータベースの整備 熱力学データベースの整備 収着データベースの整備 拡散データベースの整備	林ほか (2005) Kitamura et al (2010) 館ほか (2009) 栃木・館 (2009) 栃木・館 (2010) (7.3.4.1)	○		

(各研究開発成果が対象とする領域 EBS:人工バリア NB:母岩 BIO:生物圏)

表 7.3.1-3 第2次取りまとめ以降の安全評価に関する技術の進展 (3/4)

項目		概要	文献 (あるいは本章の該当箇所)	対象領域		
				EBS	NB	BIO
安全評価データセットの整備	データの整備	ICRP1990年勧告を反映した現行法令に基づく生物圏評価対象核種に対する線量への換算係数の整備 (高レベル放射性廃棄物および TRU 廃棄物)	鈴木ほか (2006)			○
		収着や拡散に関するデータ測定方法の標準化	日本原子力学会 (2006)	○	○	
		環境移行データの整備	放医研 (2008, 2009, 2010)			○
	データセットの設定	実際の地質環境などを対象とした収着分配係数の設定の試行と JAEA の収着データベースの活用に関する手法の整備	Ochs et al. (2008) 館ほか (2009) 館ほか (2010) (7.3.4.2)		○	
		特定の地表環境条件に関する生物圏パラメータを、重要度、整備状況、入手可能性などを考慮して設定する手順の整備	Kato et al. (2009) Smith and Kato (2010)			○
		余裕深度処分安全評価における地下水シナリオで用いる核種移行パラメータのうち、土木工学に関係の深い事項を中心として、関連する知見および設定の考え方に関する整備	土木学会 (2008)	○	○	
		具体的な地質環境情報を用いたデータセット設定の試行 (間隙水数, 分配係数)	牧野ほか (2005)	○	○	
	地層処分低レベル放射性廃棄物の安全評価のための核種移行データセットの作成	Mihara and Sasaki (2005) (7.3.4.3)				
安全解析	感度解析手法	評価結果に対して影響が大きいパラメータやそれらの定量的な条件を抽出する手法の開発	若杉ほか (2002) JNC (2005) Ohi et al. (2007) 江橋ほか (2009a) (7.3.3.3)	○	○	
		生物圏評価で重要な GBI (Geosphere-Biosphere Interface) の設定に影響を与える不確実性要因の整理 多数の生物圏評価パラメータの中から重要度の高いパラメータを特定するための手法の整備	JNC (2005) 加藤ほか (2005) 加藤・鈴木 (2008) Kato et al. (2009) Smith and Kato (2010)		○	○
	補完的指標	表層での希釈水量などの不確実性を排除するための、処分場起源の放射性核種のフラックスと天然のフラックスを比較する手法の整備 天然放射性核種の濃度とフラックスにかかわるデータ収集・整理および集水域に着目した天然放射性核種のフラックスの算出方法の整備	Miyahara and Kato (2007) JNC (2005) IAEA (2005)		○	○

(各研究開発成果が対象とする領域 EBS:人工バリア NB:母岩 BIO:生物圏)

表 7.3.1-4 第2次取りまとめ以降の安全評価に関する技術の進展 (4/4)

項目	概要	文献 (あるいは本章の該当箇所)	対象領域		
			EBS	NB	BIO
他分野との連携	具体的な地質環境が対象として与えられた場合の地質環境の調査・評価から核種移行解析に至る一連の作業手順の例示	牧野ほか (2005)	○	○	
	幌延深地層研究計画における不確実性を考慮した安全評価手法の検討	高瀬ほか (2007)		○	
総合的な安全評価 (手法を含む)	我が国の一般的な地質環境を対象とした地層処分低レベル放射性廃棄物に対する総合的な安全評価	電事連・JNC (2005a)	○	○	○
	第2次 TRU レポートにおいて示された課題に対する検討結果や新たに得られた知見を用いて、システムの頑健性の程度や実現性を検討	NUMO (2011a)	○	○	○

(各研究開発成果が対象とする領域 EBS:人工バリア NB:母岩 BIO:生物圏)

7.3.2 シナリオの構築に関する取り組み

7.1 および 7.2 において述べたように、NUMO は、特定のサイトを対象とした地層処分システムなどの前提条件に応じて、状態設定を行い、シナリオを作成する。ここでは、7.3.1 に示した四つの点に直接関連するシナリオの構築に関する技術開発成果として、以下の項目に関する概要について記述する。各技術を開発した背景については、それぞれの冒頭において簡潔に述べる。

- ・ 沿岸域における地質環境の長期変遷を考慮したシステムの状態設定手法
- ・ ニアフィールドの長期変遷を考慮したシナリオ構築手法
- ・ 自然現象の著しい影響を仮想的に評価するためのシナリオ構築手法
- ・ FEP に基づくシナリオ構築手法および FEP 情報の整備

7.3.2.1 沿岸域における地質環境の長期変遷を考慮したシステムの状態設定手法

事業編で述べたように、地質環境特性として、地理、地形、地質学的にさまざまな可能性が考えられる。このうち、沿岸域では、特に、内陸部に比べて、海水の影響や塩淡境界の変遷などを、隆起・侵食や気候・海水準変動などの自然現象と関係付けながら考慮する必要がある。このような特徴を考慮した安全評価手法を整備しておくことは、地質環境の多様性および長期変遷への対応という観点から重要である。

ここでは、これらの特徴を踏まえて、地質環境の長期変遷に関するシステムの状態設定について例示する。具体的には、沿岸域の特徴を考慮したシステムの状態設定手順（図 7.3.2-1）を整理するとともに、それらを例題に適用した内容について記述する（NUMO, 2011c）。

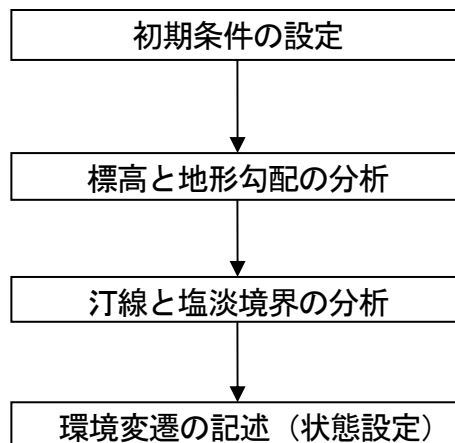


図 7.3.2-1 沿岸域を対象とした地質環境の状態設定の手順

まずは、初期条件として、仮想的な沿岸域の地質環境（表 7.3.2-1）を設定し、標高、海底の地形勾配、処分場深度の減少について分析した。この際、侵食速度の不確実性を考慮して、侵食速度が隆起速度と等しいとした場合（ケース a）と侵食速度を 0 とした場合（ケース b）を想定した。

表 7.3.2-1 初期条件の設定例

項目	値	備考
海水準変動の周期	10 万年 海退：7.5 万年 海進：2.5 万年	参考：過去数 10 万年程度については 10 万年程度の明瞭な周期性が認められている (JNC, 1999b など)。
海水準変動の範囲	現在の海水準～-120m	参考：過去数 10 万年程度の海水準は、現在の水準と比較して、+数 m～-120m程度の範囲で変動している (JNC, 1999b など)
地形勾配	5%	—
隆起速度	0.5 mm/y	参考：藤原ほか (2005) によれば、日本列島における隆起速度は最大 1mm/y 程度であり、中でも 0.6 mm/y を超える地域は分布が限られる。
侵食速度	<隆起速度>	参考：JNC (1999b) など
地温勾配	3°C/100m	参考：日本における平均的な地温勾配

その上で、ケース a を対象に、母岩の透水性によって、海水準変動への塩淡境界の追従性の違いを、以下のように類型化した (表 7.3.2-2)。

- ① 母岩の透水性が十分高く、海進・海退のいずれにおいても、汀線の移動に追従しガイベンヘルツベルグ平衡の位置にある (パターン 1)
- ② 海退時には汀線の移動に追従しガイベンヘルツベルグ平衡の位置にあるが、海進時には追従できない (パターン 2)
- ③ 母岩の透水性が低く、海進・海退のいずれにおいても汀線の移動に追従できない (パターン 3)
- ④ 母岩の透水性が極めて低く、塩淡境界はほとんど移動しない (パターン 4)

表 7.3.2-2 母岩の透水性に応じた塩淡境界の追従性

パターン	母岩の透水性	塩淡境界の追従	
		海進への追従	海退への追従
1	高	○	○
2	中	×	○
3	低	×	×
4	極低	—	—

なお、一般的に、地下深部における塩淡境界の位置は汀線の位置と一致しない。そこで、パターン 3 を例として、汀線および塩淡境界の変化を整理した (図 7.3.2-2)。このような整理により、沿岸域の環境が、対象とする時間において、海底下にあるか、陸側にあるか、塩水環境にあるか淡水環境にあるかを把握することができる。

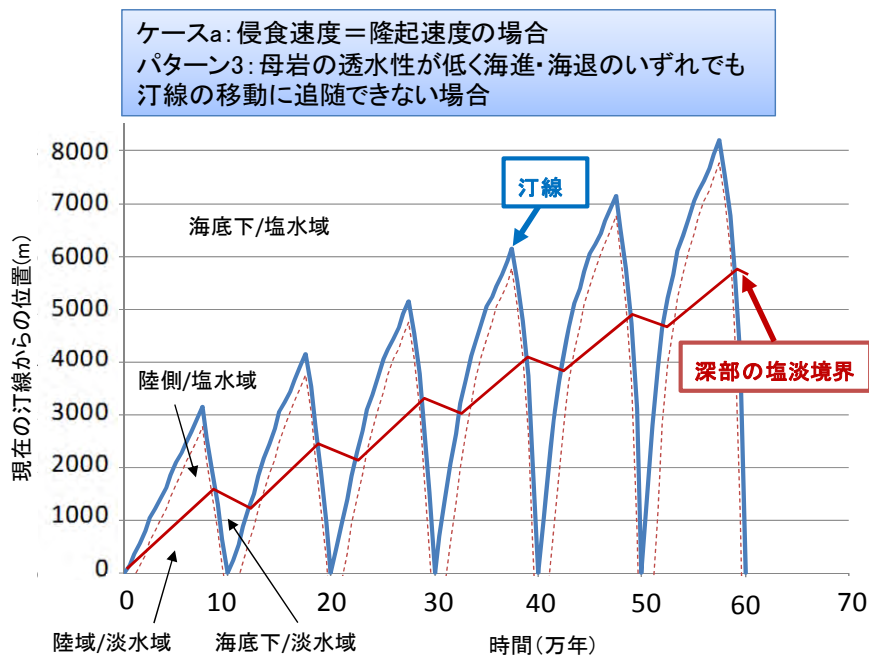


図 7.3.2-2 汀線および塩淡水境界の変化を整理した例（パターン3）

侵食速度を0と仮定したケースbにおいても、同様の類型化を行うことが可能である。この場合には、すでに述べたように、一定期間を経過すると、処分場を含む領域は離水し、完全に陸域の環境へと推移する（NUMO, 2011c）。

前項において述べたように、将来の気候・海水準変動および隆起・侵食の複合的な影響によって生じる沿岸域での環境変遷は、ある程度類型化することが可能と考える。

一方、ニアフィールドについては種々の安全機能を期待することになり（6.2.2）、これらの安全機能の性能は、熱的条件、水理条件、力学・物理条件、および化学条件といった環境条件に影響を受ける。従って、ここで整理する環境変遷は、ニアフィールドのシナリオを構築する上での前提条件となるものであるとともに、ニアフィールドの環境条件がどのような現象によって時間とともに推移するかという視点から整理することが効果的と考える。そこで、ケースaのパターン3（図7.3.2-2）を例として、ニアフィールドの前提条件として着目すべき処分場周辺の環境条件と、気候・海水準変動や隆起・侵食による環境条件への影響因子とを整理した（表7.3.2-3）。

表 7.3.2-3 ニアフィールドの前提条件として着目する環境条件および影響因子

環境条件		影響因子
熱的条件	・ 地温	・ 隆起・侵食による深度減少
水理条件	・ 地下水流向分布 ・ 地下水流量分布 ・ 圧力分布	・ 隆起・侵食による地形変化 ・ 海水準変動による動水勾配の変化 ・ 塩淡水境界の移動による流向・流速の変化 ・ 気候変動による涵養量の変化
力学および物理条件	・ 地圧 ・ 水圧	・ 隆起・侵食による深度減少 ・ 海水準変動による基準面の変化
化学条件	・ 地下水水質	・ 塩淡水境界の移動による水質変化 ・ 異なる水質間での混合

表 7.3.2-3 に挙げた観点に着目して、期間4～期間6を対象とした状態設定の例を表 7.3.2-4 に示す。状態設定は、不確実性を考慮して、安全評価上、地層処分システムが将来どのように変遷するかを記述することを目的としたものである。ここでは、図 7.3.2-3 に示した環境変遷のパターンに従い、時間および空間を以下のように区分した。

- ・ 空間区分：現在の標高-750mにおいて汀線から沖合 3km～5km に展開される処分場領域の中で、汀線からの距離に応じて環境変化に時間的なずれが生じることから、処分場領域を陸側、中央部および沖合側の三つに区分する。
- ・ 時間区分：上記の三つの処分場領域において環境変化の生じる 2 回目～6 回目の海水準変動のそれぞれにおいて処分場よりも汀線が陸側にある期間と海側にある期間とを区分する。

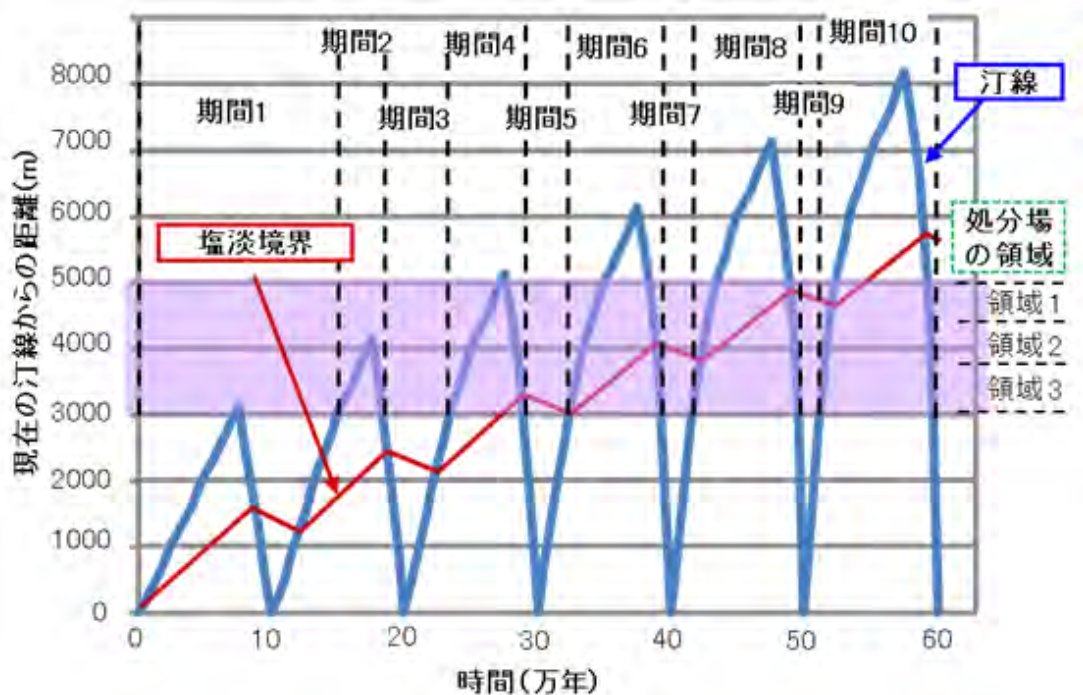


図 7.3.2-3 状態設定のための時間・空間区分

以上の検討を通じて、沿岸域における海水の影響や塩淡水境界の分布の時間的な変遷をより現実的に取り扱うためのシステムの状態設定手法を例示した。本検討により、沿岸域におけるシステムの頑健性を検討する際に重要となる将来の気候・海水準変動および隆起・侵食というような要素を抽出し、これらの複合的な影響によって生じる地形変化、汀線や塩淡水境界の移動といった沿岸域での環境変遷を踏まえた評価が可能となった。

表 7.3.2-4 気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に関する状態設定の例（ケース a：パターン3）

		期間 4	期間 5	期間 6
領域 1	熱的条件	深度減少により 10 万年間で 1.5°C 程度低下		
	水理条件	汀線よりも陸側，塩淡水境界よりも海側にあり，海側に向かった遅い流れ	海底下で海退時には沖合に，海進時には陸側に微小な流動	汀線および塩淡水境界よりも陸側にあり地形勾配による比較的速い流れ
	力学条件	10 万年間で地圧が数 MPa 程度低下		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	降水起源の地下水
領域 2	熱的条件	深度減少により 10 万年間で 1.5°C 程度低下		
	水理条件	汀線よりも陸側，塩淡水境界よりも海側にあり，海側に向かった遅い流れ	海底下で海退時には沖合に，海進時には陸側に微小な流動	汀線よりも陸側，塩淡水境界よりも海側にあり，海側に向かった遅い流れ
	力学条件	10 万年間で地圧が数 MPa 程度低下		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）
領域 3	熱的条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず温度は変化しない		
	水理条件	汀線よりも陸側，塩淡水境界よりも海側にあり，海側に向かった遅い流れ	海底下で海退時には沖合に，海進時には陸側に微小な流動	汀線よりも陸側，塩淡水境界よりも海側にあり，海側に向かった遅い流れ
	力学条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず地圧は変化しない		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）

（矢印は，地下水の流向と大きさを表す）

7.3.2.2 ニアフィールドの長期変遷を考慮したシナリオ構築手法

(1) 背景と目的

7.3.1において述べたように、地層処分事業では拡充された知見の整理とその長期の安全性に与える影響の把握が必要である。そこで、研究開発などにより得られた最新の知見をシナリオ構築へどのように取り込んでいくかについて、ニアフィールドの長期変遷に関するシナリオ構築を例として示す。

ニアフィールドを構成する人工バリアや周辺母岩は、核種移行を抑制するバリアとして機能する。このため、地層処分システムの将来挙動を記述することは、処分場の設計にも影響を与えるため、重要である。そのため、基盤研究開発機関は、第2次取りまとめ以降、ニアフィールドにおける長期的変遷が人工バリアや周辺母岩へ及ぼす影響の理解を深めるために、研究開発を継続的に進めている(6.6.2参照)。また、ニアフィールドは、サイト固有の地質環境に依存する程度が、天然バリアと比較して、相対的に小さい。このため、特定のサイトがない現段階においても、ニアフィールドを対象とした技術開発を先行的に進めることは、特定のサイトの特徴を的確に取り込んでいくための起点を準備するという観点から有用である。

ここでは、上記の点を踏まえ、ニアフィールドを対象として、シナリオを構築する上で前提とする考え方を示すとともに、新たな知見を考慮して状態設定およびシナリオの構築を行う手順について例示する。

(2) 状態設定のアプローチ

状態設定は、不確実性を考慮して、安全評価上、地層処分システムが将来どのように変遷していくのかを記述することを目的としたものである。具体的には、地質環境の調査・評価によって明らかになる地質環境条件や処分場の設計によって具体化する処分施設・人工バリアの仕様を取り入れつつ進める。なお、サイト調査および設計が状態設定に基づき行われるものでもあるため、反復的に進めるものでもある。

地下水による放射性核種の漏出と移行を想定した場合のニアフィールドでの閉じ込めは、核種移行率の低減および移行を遅延する間の放射能の減衰を目指すものであり、6.2.2において述べたように以下に挙げる安全機能が作用するものと考えられる。

- ・ 放射性物質の浸出抑制（固化マトリクスによる浸出抑制、発熱が著しい期間の地下水接触の防止など）
- ・ 放射性物質の移行抑制（放射性物質の溶解度制限、移流による移行の抑制、コロイド移行の防止・抑制、収着による放射性物質の移行遅延、分散による移行率の遅延など）

安全機能を設定して設計を行うためには、状態設定を考慮して進めることになる。状態設定の手順を以下に示す。

- ① 地下水による放射性物質の浸出・移行に関連する地層処分システムの特性（以下、特性という）あるいは現象を抽出する。
- ② 抽出した特性と安全機能とを対応付け、各安全機能を地層処分システムのどの部位に期待するかを明らかにする。

- ③ 特性に影響を与えるような地層処分システムの環境条件（以下、環境条件という）を抽出する。
- ④ 環境条件の変遷に関与するような具体的な現象（以下、条件への影響因子という）を抽出する。
- ⑤ 地質環境の特徴や処分施設・人工バリアの仕様を踏まえ、「条件への影響因子」によって生じる「環境条件」の変遷、環境条件の変遷に対応した「安全機能に寄与する特性」の振る舞いについて、当該時点で得られる最適の科学的知見を整理する（FEP カタログ）。また、科学的知見に含まれる不確実性要因を抽出する。
- ⑥ 上述の整理を踏まえ、システムの状態設定を行う。

①～④では、核種移行挙動、安全機能に寄与する現象、環境条件および環境条件への影響因子（これらを総括して、以下、状態設定に関連する FEP という）について、地層処分システムの構成要素および安全機能と対応付けながら整理する。第2次取りまとめのレファレンスケースにおける人工バリアの概念および7.3.2.1で示した環境条件を対象として、状態設定に関連するFEPを整理した(表 7.3.2-5 および表 7.3.2-6)。なお、⑤については、既存の FEP 情報を適用した（神崎ほか、2009）。

⑥については、時間スケールや空間スケールに配慮すること、分野間の情報の整合性を確保すること、および視覚的に理解しやすいものとすることに留意する。安全機能を基軸とした状態設定に関する現象およびそれらの相互作用に着目しつつ、ニアフィールド環境がどのように変遷するかについて安全評価上の設定を行った（表 7.3.2-7）。

状態設定を作成する際には、期間を区分する。この区分は、安全機能を視軸として、放射能の減衰、人工バリア材の変質、地質環境や地表環境の変遷およびこれらに関する不確実性の増大などに留意して決定する。ここでは、安全機能のうち、オーバーパックによる発熱が著しい期間の地下水接触の防止に着目して、第2次取りまとめ以降更新された知見を踏まえて設定した。

第2次取りまとめ以降のオーバーパック腐食に関する研究開発では、人工海水などを用いた10年間にわたる長期浸漬試験が実施され、還元環境での炭素鋼の全面腐食速度が $2\mu\text{m/y}$ 未満であり、第2次取りまとめの設定値 $10\mu\text{m/y}$ よりも十分に低いことが示されている（谷口ほか、2008；6.6.2.2参照）。このため、オーバーパックの開口時期は、第2次取りまとめのレファレンスケースの設定（1,000年）以上の寿命が期待できる可能性があることに着目し、ニアフィールドの環境変遷を、安全確保上の意義の観点から以下の三期間に区分した。

- ・ 期間Ⅰ：坑道閉鎖後の過渡期（坑道閉鎖～1,000年後）
- ・ 期間Ⅱ：オーバーパック開口までの期間（1,000年後～1万年後）
- ・ 期間Ⅲ：1万年後～10万年後

表 7.3.2-5 安全機能を基軸とした状態設定に関する現象の整理例（安全機能と関連する条件）

安全機能		特性	関連する条件	
安全機能 (閉鎖後閉じ込め)	放射性物質の浸出抑制	発熱が著しい期間の地下水の接触防止	<ul style="list-style-type: none"> 耐食性 力学的強度 構造的健全性 溶接部耐食性 	<ul style="list-style-type: none"> 水質 (pH, Eh および主要な塩分濃度など) 緩衝材水分飽和度 温度 放射線 外荷重 (水圧, 地圧など)
		ガラスマトリクスによる浸出抑制	<ul style="list-style-type: none"> ガラス固化体の低浸出性 核種の難溶解性 	<ul style="list-style-type: none"> 水質 (pH, Eh および主要元素濃度など) 温度 地下水流速
	放射性物質の移行抑制	収着による放射性物質の移行遅延	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材への核種の収着 岩石への核種の収着 	<ul style="list-style-type: none"> 水質 (pH, Eh および主要元素濃度など) 緩衝材の鉱物組成 岩石の鉱物組成 亀裂充填鉱物
		放射性物質の溶解度制限	<ul style="list-style-type: none"> 溶解挙動 	<ul style="list-style-type: none"> 水質 温度
		移流による移行の抑制	<ul style="list-style-type: none"> 拡散 分散 緩衝材の止水性 岩盤の低透水性 	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材の材料組成と乾燥密度 緩衝材中のギャップおよび割れ目の有無と形状 母岩マトリクス部の透水性 母岩中の亀裂特性 坑道掘削影響領域の透水性

* 「コロイド移行の防止・抑制」および「アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制」については、適切な対策により確保されていることを前提とする

表 7.3.2-6 安全機能を基軸とした状態設定に関する現象の整理例（条件と条件への影響因子）

条件		条件への影響因子（現象）
熱的条件	温度	<ul style="list-style-type: none"> ・ ガラス固化体の発熱 ・ 熱伝導（人工バリアおよび岩盤） ・ 蒸発および水蒸気の移動
水理条件	地下水（実）流速	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地下水飽和流動（定常流れ，密度差による非定常流れ）
	緩衝材水分飽和度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 再冠水 ・ 蒸発および水蒸気の移動
力学的条件 （物理条件を含む）	母岩マトリクス 坑道掘削影響領域の透水性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 岩石の変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿） ・ 地下水流動 ・ 岩盤の割れ ・ 応力場の変化による亀裂開口幅の変化 ・ 亀裂表面および充填鉱物の変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿）
	圧力（水圧，地圧およびそのほかの応力）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 岩盤クリープ ・ 緩衝材の膨潤 ・ 炭素鋼の腐食膨張
	緩衝材中ベントナイト有効密度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 緩衝材の膨潤 ・ 緩衝材の化学的変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿） ・ 緩衝材の侵食
化学条件	埋め戻し材中ベントナイト有効密度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 埋め戻し材の膨潤 ・ 埋め戻し材の化学的変質 ・ 埋め戻し材の侵食
	水質（pH, Eh および主要塩分濃度など）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地下水水質形成 ・ 地下水 - 岩石反応 ・ 微生物および有機物の反応 ・ 作業時の空気の侵入 ・ Fe の腐食および腐食生成物と水の反応 ・ 緩衝材と水の反応 ・ セメント系材料の溶脱・変質
	緩衝材の鉱物組成	<ul style="list-style-type: none"> ・ 緩衝材の化学的変質
	岩石の鉱物組成（亀裂充填鉱物，亀裂表面，マトリクス（変質部，未変質部など）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 岩石の変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿） ・ 亀裂表面および充填鉱物の変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿）

表 7.3.2-7 ニアフィールドにおける状態設定の例

		期間 I : 処分場閉鎖～1,000 年後	期間 II : 1,000 年後～1 万年後	期間 III : 1 万年後～10 万年後
システムの 状態				
安全確保上 の意義		<p>廃棄体発熱および処分場建設・操業時に導入された空気の影響（不飽和領域形成および酸性条件への推移）がなくなり核種の閉じ込めに適した地下深部本来の条件が回復する。ベントナイトの膨潤により一様な圧縮応力場が形成され、緩衝材中および隣接したバリアとの間のギャップが閉塞することで、物質移動が拡散によって支配される場が確保される。</p>	<p>炭素鋼と緩衝材、緩衝材とコンクリート支保という異なる材料を配置した場合、熱力学的に安定ではないため、材料間の溶質移動と化学反応に伴い、環境に対してより整合的な二次鉱物の境界層が形成され、間隙が閉塞することで、地球化学的に定常となる。オーバーパックの水密性により、地球化学的に定常となるまで廃棄体中に核種が閉じ込められる。</p>	<p>オーバーパック開口後ガラス固化体が接液し溶解と核種の浸出が開始する。アクチニドなどの濃度は溶解度で制限され超過分は沈殿する。オーバーパックの外側では期間 II までに達成された定常的な場において拡散による核種移行が生じる。この際、核種は鉄腐食生成物や緩衝材（二次鉱物を含む）に収着され遅延される。</p>
環境 条件	T	<p>廃棄体の発熱により温度が上昇するが緩衝材中の最高温度は 100℃以下である。放射能の減衰により数百年後には地温程度にまで低下。</p>	期間 I の定常状態が継続する	
	H	<p>坑道閉鎖後岩盤中の地下水の圧力水頭が回復し、緩衝材への浸透が生じる。岩盤透水係数が小さい場合には緩衝材冠水に数 10 年を要する。</p>		
	M	<p>緩衝材の膨潤によりギャップが閉塞し一様な圧縮場となる。岩盤中の応力条件が変化し、坑道のクリープ変形が生じる。</p>	<p>オーバーパックの腐食による強度低下および腐食膨張による緩衝材圧密によってオーバーパックが変形し開口に至る。ガラスの破碎が進む。</p>	<p>炭素鋼の腐食膨張が継続し緩衝材の圧密およびガラス固化体の破碎が継続する。</p>
	C	<p>閉鎖時に残留した酸素はオーバーパック、緩衝材中の鉄鉱物や微生物によって速やかに消費される。</p>	<p>Fe イオンによる変質（内側）および高 pH 条件での変質（外側）により緩衝材の境界部に變質層が形成され間隙が閉塞に向かう。</p>	<p>ガラス溶解により核種が浸出する。ガラス近傍での水の放射線分解によって生じる酸化剤は鉄腐食生成物によって消費されるために還元環境が維持される。</p>

T : 熱的条件 H : 水理条件 M : 力学条件 C : 化学条件

(3) シナリオ作成のアプローチ

状態設定に基づき、安全評価上想定すべきシナリオを作成する。それぞれのシナリオにおいては、環境条件の変遷、安全機能の時間的变化、核種移行挙動を相互に矛盾なく記述する。

シナリオの構築に当たっては、安全評価上想定するシナリオについて合理的な十分性を確保する(7.1.3)。そこで、事象の連鎖としてのシナリオを展開する際に、データのばらつきや知識の不足などに起因して、複数の代替的なシナリオを選択肢として考慮せざるを得ない個所(シナリオ分岐)を抽出する。ただし、合理的な十分性とは、長期安全性を主張する上で遺漏がないという意味である。具体的には、以下のように時間区分と様相区分を設定して、安全評価上の有意な違いを明確にすることで、効率的にシナリオを構築する。

- ・ 時間区分：安全機能を視軸として、放射性廃棄物中の放射能の減衰、人工バリア材の変質、地質環境や地表環境の変遷およびこれらに関する不確実性の増大などの観点からの評価期間を区分する。
- ・ 様相区分：安全機能に期待できる性能および核種移行挙動への影響の観点から環境条件を定性的に区分した様相を定義する。

7.3.2.1 で示した沿岸域を対象としたシステムの状態設定を境界条件として、ニアフィールドを対象に上記の時間区分および様相区分を行った(表 7.3.2-8)。なお、時間区分については、状態設定(表 7.3.2-7)と同じものを想定している。

これらの区分のもとに、各時間区分において、環境条件、安全機能に関する性能、および核種移行挙動のすべてが同じ様相にあるような二つのシナリオは、同じものとして取り扱うことができる。逆に、どこかの時間区分において、一つでも異なる様相にあるような状況が発生する場合には、シナリオの分岐として取り扱う。なお、分岐の妥当性については定量的な解析を行う段階で感度解析を行って確認する必要がある。

前述の状態設定(表 7.3.2-7)に基づき 10 万年後までを対象として、蓋然性が高いシナリオの例を整理した(表 7.3.2-9)。なお、第 2 次取りまとめでは、人工バリアは期待する安全機能を発揮することなどを前提とした基本シナリオに対して、相互比較のための参照としてレファレンスケースを設定した上で、人工バリアに対するさまざまな解析ケースを想定した安全解析が実施されている(JNC, 1999a)。この安全解析では、データ不確実性ケースや代替設計ケースなどが設定され、人工バリアからの移行率にそれほど大きな影響を与えないことが示されている。蓋然性が高いシナリオの例(表 7.3.2-9)は、第 2 次取りまとめにおける人工バリアに対するさまざまな解析ケースに含まれるものであり、その影響は顕著ではないことが示唆される。

ここでは、研究開発などにより得られた最新の知見をシナリオへどのように取り込んでいくかについて、ニアフィールドの長期変遷を例として、安全機能に基づく状態設定に着目した手法を示した。これにより、最新の知見の考慮や地質環境の多様性への観点から、合理的にシナリオを構築するための起点を整理した。

表 7.3.2-8 高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールド環境条件の様相区分の例

環境条件		様相の区分
熱的条件	温度	標準（地温程度）／やや高（ガラス溶解促進・核種移行特性変化）／高（緩衝材熱変質）
水理条件	処分孔周辺の地下水流速	低（ニアフィールドの核種移行が母岩中の拡散によって支配される）／中（母岩中の移流によって支配される）／高（緩衝材中の拡散によって律速される）
	緩衝材水分飽和度	乾燥（施工時よりも低下した状態）／初期値／飽和
	母岩マトリクス部の透水性	標準（拡散支配となる状態）／高（移流支配となる状態）
	坑道掘削影響領域の透水性	小（処分孔周辺地下水流速低）／初期状態（同中）／大（同高）
力学的条件	圧力（水圧、地圧およびそのほかの応力）	低（標準以下）／標準（水圧＋容器腐食膨張後の緩衝材膨潤圧）／高（標準以上）
	緩衝材中ベントナイト有効密度	低（初期値以下）／初期値／高（初期値以上）
	緩衝材中ギャップ・割れ目	なし／あり
	埋め戻し材中ベントナイト有効密度	低（初期値以下）／初期値／高（初期値以上）
	埋め戻し材中ギャップ・割れ目	なし／あり
化学条件	水質（pH）	低（標準以下）／標準（地下水－緩衝材反応の平衡状態）／高（標準以上）
	水質（Eh）	還元性／酸化性
	緩衝材のベントナイトのタイプ	Na 型／Ca 型
	緩衝材中の初期成分以外の鉱物割合	低（初期不純物の反応・溶解）／初期状態／高（二次鉱物の沈殿）

（標準や初期値以上あるいは以下として定義する様相については、FEP カタログに含まれる過去の解析や検討の事例および予察な解析の結果などを踏まえ、安全評価の観点から「有意な」差異とみなすべきしきい値を設定する。）

表 7.3.2-9 高レベル放射性廃棄物に対する蓋然性が高いシナリオの例（ニアフィールド）

		閉鎖後 1,000 年間	1,000 年~1 万年後	1 万年~10 万年後	
核種 移行	核種の溶解	—	—⇒○	○	
	核種の拡散	—	—⇒○	○	
	核種の移流・分散	—	—	—⇒○(母岩のみ)	
安全 機能	発熱が著しい期間の地下水接触の防止	○	○⇒—	—	
	ガラスマトリクスによる浸出抑制	△	△⇒○	○	
	収着による放射性物質の移行遅延	△	△⇒○	○	
	放射性物質の溶解度制限	△	△⇒○	○	
	移流による移行の抑制	△	△⇒○	○	
環境 条件	熱	温度	やや高⇒標準*1	標準	
	水 理	処分孔周辺地下水流速	中		
		緩衝材水分飽和度	初期値⇒飽和*2	飽和	
		母岩マトリクス透水性	標準		
		掘削影響領域透水性	初期状態		
	力学 物理	圧力	低	低⇒標準*3	標準
		緩衝材ベントナイト有効密度	初期値	初期値⇒低*4	低
		緩衝材中ギャップ・割れ目	あり⇒なし*5	なし	
		埋め戻し材ベントナイト有効密度	初期値	初期値⇒低*6	低
		埋め戻し材中ギャップ・割れ目	なし		
	化 学	水質 (pH)	標準	標準⇒高*7	高⇒標準*8
		水質 (Eh)	酸化性⇒還元性*9	還元性	
		緩衝材のベントナイトタイプ	Na 型	Na 型⇒Ca 型*10	Ca 型 (境界部のみ)
		緩衝材中初期成分以外の鉱物割合	初期状態	初期状態⇒高*11	高

注1：安全機能の「○」は安全機能として期待していることを、「△」はほかの機能のバックアップとして期待していることを、「—」は機能が期待していないことを示す。

注2：表中のピンク色の網掛けは様相変化が生じる個所を示す。

注3：環境変遷の要因；*1（廃棄体発熱量低下・熱伝導）、*2（緩衝材再冠水）、*3（緩衝材膨潤・容器腐食膨張）、*4（アルカリ条件でのベントナイト溶解）、*5（緩衝材膨潤・自己シール）、*6（アルカリ条件でのベントナイト溶解）、*7（セメント反応・水酸化物イオンの拡散）、*8（セメント溶脱によるC/S比低下）、*9（残留酸素の散逸・Feなどとの反応による消費）、*10（境界部のみ、セメント反応・Caの拡散・イオン交換）、*11（アルカリ条件での二次鉱物沈殿）

7.3.2.3 自然現象の著しい影響を仮想的に評価するためのシナリオ構築手法

地震・断層活動および火山・火成活動については、わが国において一般的に発生し得ると考えられる規模の地震などを除いて、適切なサイトを選定することで著しい影響を回避することが基本である。従って、一般的には、地震・断層活動および火山・火成活動については、適切なサイト選定を行うことを前提としつつも、対象とする時間スケールが超長期となるため、その発生時期や発生可能性に関する不確実性を考慮しなければならない。このため、わが国の一般的な特徴やサイト固有の特徴を考慮した上で、遠い将来において自然現象の著しい影響を仮想的に評価するための手法を整備しておくことは必要である。

以上を踏まえ、ここでは、自然現象がシステムに与える影響を仮想的に評価するための技術基盤を整備することを目的として、地震・断層活動を例としたシナリオ構築手法について記述する (NUMO, 2011c)。

(1) 力学的影響

断層・破砕帯の構造については、変位量の大部分を受け持った部分と、その周辺の割れ目などが発達した力学的損傷領域 (ダメージゾーン) に区分する定義が一般化している。地下深部で新たな断層が発生する場合、断層の発生直後はまだ後者の領域は発達していないが、その後、断層運動が繰り返されることにより、その幅は 100~200m 程度までに達する可能性がある。

また、断層・破砕帯のように歪みが局所的に集中している部分の周辺にも、歪みが (先行的に) 発生している変形領域が広範に分布することが想定される。そのような変形領域内には微小亀裂の発達や既存亀裂の変形などが想定される。

(2) 化学的影響

断層の新生により、地表から涵養される地下水との化学的相互作用などにより、角礫や砂状の破砕物などの比表面積の大きい部位の変質が進むと考える。

(3) 熱的影響

地震性の断層活動による摩擦熱により温度の上昇が生じることがある。摩擦熱により上昇する断層周辺の温度は、熱の影響を受けた断層ガウジ (細粒・未固結の断層内物質) の鉱物組成などにより推定されることがある。野島断層の断層ガウジの研究では、過去には 400~450°C 以上で 5 分間に相当する摩擦熱を被り、最近では少なくとも 300~350°C で約 5 分間に相当する摩擦熱を被った可能性が推定されている (Fukuchi et al., 2007)。

(4) 水理学的影響

断層活動の水理学的影響としては、地震に伴う地下水圧 (水位) の変化と、破砕帯の形成に伴う透水構造の変化が挙げられる。地震に伴う地下水圧の変化は、一般的には一時的なものであり、変化量も通常の季節変化の範囲内に収まるとされている (Ishimaru and Shimizu, 1997)。破砕帯の透水性については、結晶質岩や堆積硬岩の場合、透水性が母岩より低い部分と、高い部分からなり、後者が前者を挟むように分布するサンドイッチ構造をなすことが多い (例えば、Wibberley and Shimamoto, 2003)。

(5) 地層処分システムへの影響

前項に述べた知見に基づき、将来、処分場を横切る断層が新生した場合、断層によって直撃される廃棄体については、廃棄体や人工バリアの破壊といった直接的な影響が生じるものと考えられ、それ以外の廃棄体についても、地下水流動や地下水水質の変化といった間接的な影響が生じることが想定される。断層の新生時の地下水流動パターンとしては、還元性深部地下水の上昇（シナリオ1）、および酸化性地表水の引き込み（シナリオ2）を設定した（図 7.3.2-4）。

シナリオ1の場合、新生断層から一定の範囲内にある廃棄体については母岩中の移行距離が短縮されるが、それ以上離れた廃棄体については移行距離は不変と考える。なお、断層および母岩中の地下水は還元性である。一方、シナリオ2の場合、新生断層を通じて深部に下降した地表水は処分場を通過してほかの既存の透水性断層などに至り、そこから地表に向かうという保守的な仮定をおく。ここで、断層割れ目帯と交差するものも含めすべての廃棄体について核種移行距離は不変と仮定することができる。なお、このシナリオでは母岩および断層中の地下水は酸化性であるものと想定する。

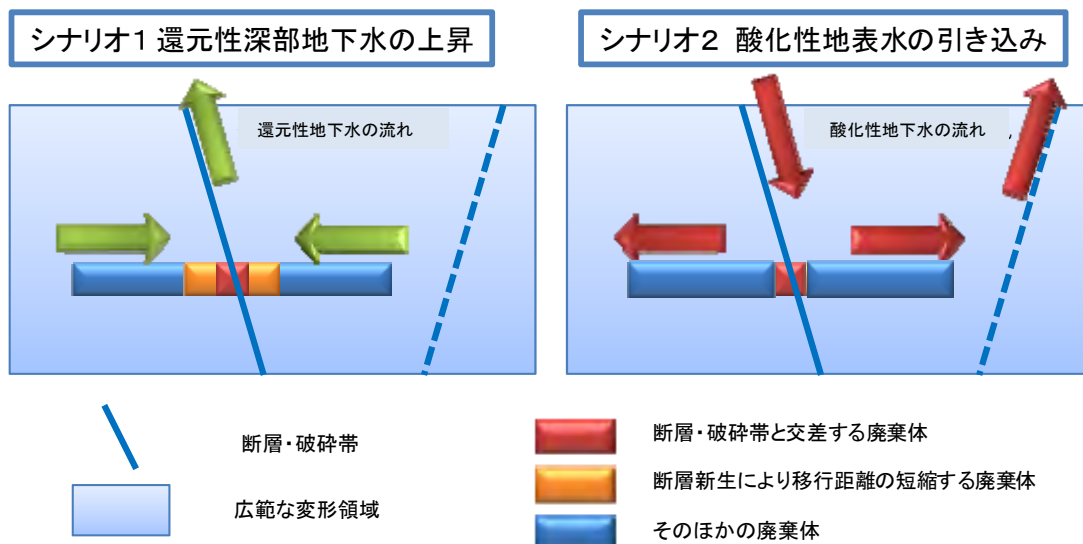


図 7.3.2-4 断層活動の影響に関するシナリオの概念

以上の二種類のシナリオ、および断層との位置関係に応じた廃棄体区分について、安全評価上、地層処分システムがどのように変遷するかを設定した（表 7.3.2-10）。また、断層活動の影響に関する安全解析を試行した結果を参考資料1に示す。

ここでは、長期安全性を議論する際に考慮すべき自然現象との一つである断層活動を例として、これらの著しい影響に関するシナリオ構築手法について検討した。これにより、実際のサイトの特徴を考慮して自然現象がシステムに与える影響を仮想的に評価するための出発点を整備した。

表 7.3.2-10 処分場を横断する新たな断層が生じた場合の安全評価上の変遷を整理した例

		断層新生直後の現象	その後の定常的変遷
		<p>廃棄体の破壊・緩衝材のせん断 温度上昇 核種の溶解・散逸</p> <p>断層変位 熱水対流 岩石のせん断 卓越流路形成 角礫 割れ目の形成 透水性上昇 細粒破砕物</p>	<p>再活動 定常流れ (上昇流の場合) 定常流れ (下降流の場合) 酸素の緩衝材への拡散 鉄鉱物などによる還元 ダメージゾーン 岩石-地下水反応 角礫の変質 ダメージゾーン の拡大 細粒破砕物の変質 断層ガウジの生成 透水性低下</p>
シナリオ 1 (還元性深部地下水の上昇)	断層と交差する廃棄体	<p>熱：断層摩擦発熱により 300℃以上まで上昇（数分間） 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</p>	<p>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</p>
	それ以外の廃棄体	<p>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：-</p>	<p>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</p>
シナリオ 2 (酸化性地表水の引き込み)	断層と交差する廃棄体	<p>熱：断層摩擦発熱により 300℃以上まで上昇（数分間） 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</p>	<p>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</p>
	それ以外の廃棄体	<p>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：-</p>	<p>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</p>

7.3.2.4 FEPに基づくシナリオ構築手法およびFEP情報の整備

7.1.3 および 7.2.1 で述べたように、状態設定やシナリオ作成では、安全機能を基軸として構築したシナリオ構築に対して、FEP（7.1.3 参照）を抽出して、それらの相互関係を考慮しながらシナリオの十分性を確保する。FEPは、人工バリアと天然バリアの長期的な変遷を設定する上での基盤となるものである。従来のFEPに基づくシナリオ構築手法では、以下の点が課題となっていた。

- ・ リスト化した個々のFEPの相関関係には、複数の起因事象の発生に伴う影響が混在し、相関関係を整理し、理解することが困難な場合が多い
- ・ 選定したシナリオと考慮されるFEPとの関係（範囲）が不明瞭なケースが存在する
- ・ シナリオの設定に至る科学的知見や専門家判断の追跡性の確保

また、FEPに関する情報は、データベースとして格納することが重要であるとともに、得られた知見を反映して継続的に更新する必要がある。

そこで、この課題に対して、神崎ほか（2009）は、FEPリスト作成から、シナリオ構築に至るまでの作業フロー（図 7.3.2-5）を策定するとともに、作業フローに基づきFEP情報をFEPデータベースとして取りまとめている。さらに、地層処分低レベル放射性廃棄物については、第2次TRUレポートで用いられたFEPに関する情報が、包括的FEPリストに基づいて整理されている（電事連・JNC, 2005b）。

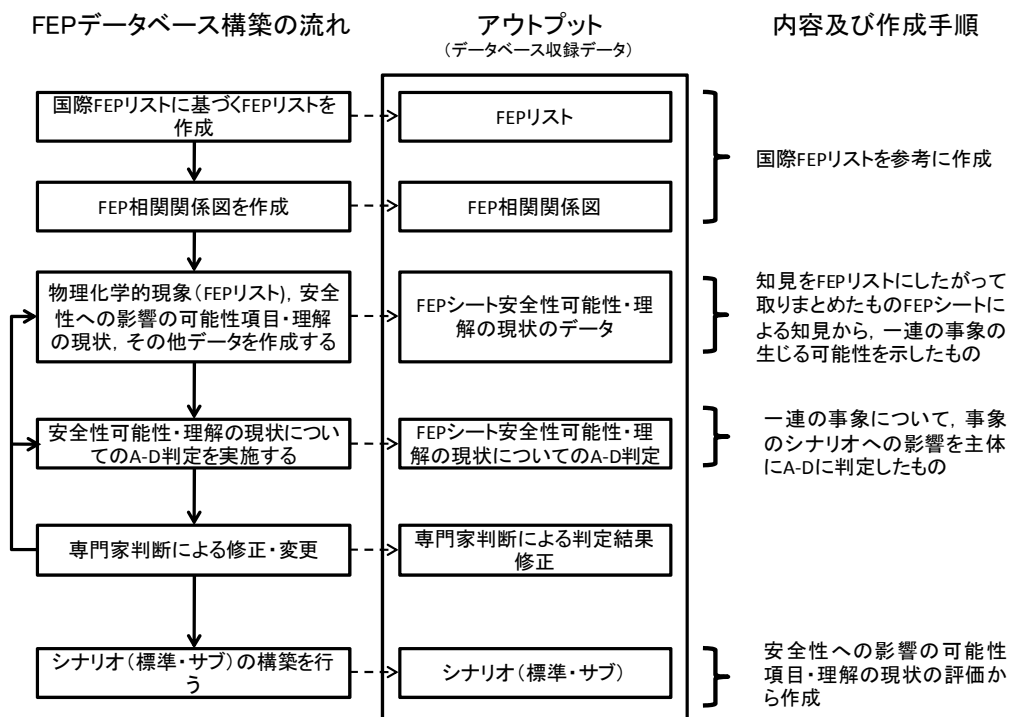


図 7.3.2-5 FEP リスト構築からシナリオ構築までの作業フロー

(出典：神崎ほか，2009)

以上のことから、長期変遷を考慮してシナリオを構築するための基盤情報として、FEPに基づくシナリオ構築手法およびFEPに関するデータベースが整備された。

7.3.3 モデルの開発に関する取り組み

ここでは、NUMO および基盤研究開発機関が進めてきたモデルの開発のうち、7.3.1 に示した四つの点に直接関連する技術開発成果として、以下の項目に関する概要について記述する。

- ・ 地質環境および地表環境の変遷を考慮した核種移行解析モデルの高度化
- ・ 母岩の不均質性および設計のオプションを考慮した核種移行解析モデルの高度化
- ・ 核種移行解析モデルにおける計算手法の効率化

7.3.3.1 地質環境および地表環境の変遷を考慮した核種移行解析モデルの高度化

(1) 背景と目的

7.3.2.1 で述べたように、沿岸域では、処分場周辺での塩淡水境界の移動に伴う地下水水質や流向・流速の変化が生じるとともに、GBI の位置や環境条件も時間とともに推移することが特徴である。このため、不均質な母岩中での卓越した移行経路の分布という内陸部と共通の課題に加えて、これらの沿岸域の特徴を考慮した核種移行解析を行うことが必要となる。

一方、空間的不均質性を考慮した各位置・各時刻の流動条件や地下水水質に対応した核種移行特性をそのまま入力条件として用いた核種移行解析は極めて複雑なものとなり、種々の影響因子や変動要因の影響を明確にすることが困難となる。

以上の点を踏まえ、沿岸域の特徴をより現実的に即して取り込むための技術基盤を整備することを目的として、以下のような場の変遷を考慮した核種移行解析手法を開発した (NUMO, 2011d)。

- ・ 地質環境の変遷を考慮した核種移行解析
- ・ 地表環境の変遷を考慮した生物圏評価

(2) アプローチ

沿岸域の環境変遷に対応した核種移行解析の手順を図 7.3.3-1 に示す。

(i) 前提条件の設定および GBI の環境変遷の把握

沿岸域では、塩淡水境界に起因する密度流が発生する可能性があることから、処分場領域の代表点での地下水流向・流速および地下水水質の時間変化は、極めて複雑な挙動を示す (例えば、太田ほか, 2007)。このため、このような複雑な場の特徴を核種移行解析に取り込むためには、地下水流向・流速および地下水水質の時間的な変化をそのまま核種移行解析の入力情報として用いることは合理的ではない。従って、安全評価上の保守性を確認しつつ、複雑な挙動を単純化して核種移行解析や生物圏評価の前提条件とすることが必要がある。

7.3.2 に示したように、気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に伴い、沿岸域にある処分場領域内は、処分場領域内の代表点が陸域または海底下に属するか、地下水水質が塩水・淡水であるかによって表 7.3.3-1 の 4 パターンに区分することができる。

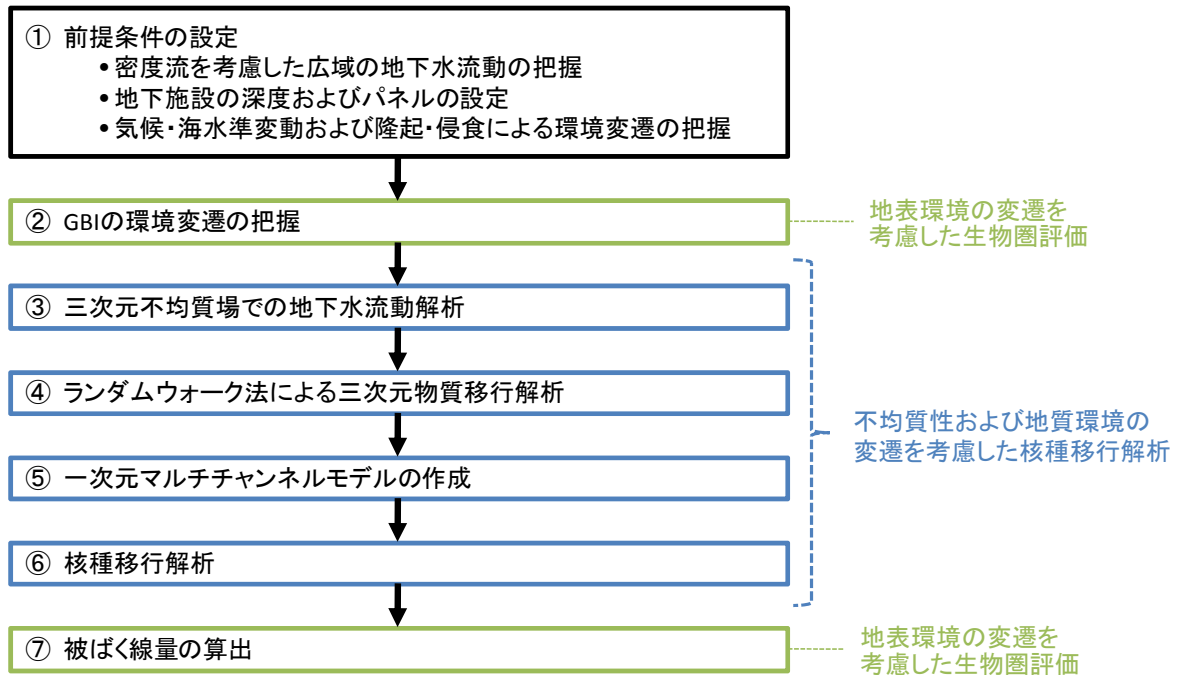


図 7.3.3-1 沿岸域の環境変遷に対応した核種移行解析の手順の例

表 7.3.3-1 地下水の塩分濃度と汀線との位置関係による区分

区分番号	塩分濃度と位置
a	海底下の塩水域
b	陸側の塩水域
c	海底下の淡水域
d	陸側の淡水域

そこで、まず、当該地域での気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷の類型化を行い、処分場領域内の代表点ごとに、核種移行の場のタイプがどの時期に切り替わるかを明らかにする。

次に、該当する環境変遷パターンにおいて生じる核種移行の場のタイプごとに、以下の情報を抽出する。

- 処分場領域内の代表点ごとの地下水の流向および流速（最大値）
- 処分場領域内の代表点ごとの代表的な地下水水質（塩分濃度）
- 処分場領域内の代表点ごとの GBI

GBI の環境変遷の把握においては、GBI の範囲を把握し、環境の変遷（海底／陸域）についての時間区分を行う。

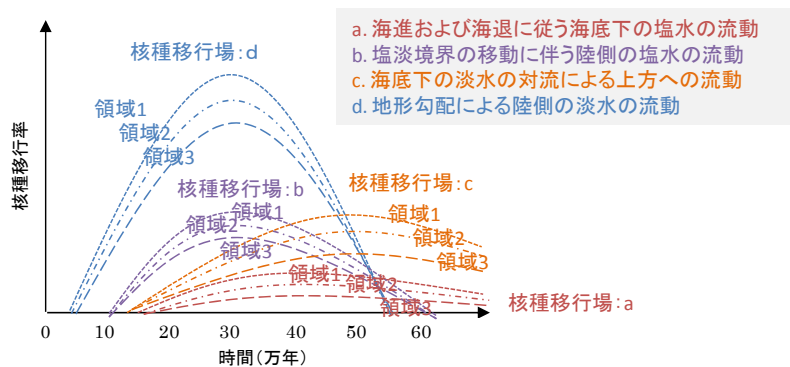
(ii) 変遷する地質環境における核種移行解析技術

不均質場での三次元水理解析では、前提条件として設定した各時間・空間区分に対応して、それぞれ不均質場におけるニアフィールドを対象とする。次に、三次元水理解析の結果に基づき、ニア

フィールドの三次元物質移行解析を行う。この三次元物質移行解析結果に基づき、核種移行に関する一次元マルチチャンネルモデルを作成する。これらの手順の詳細は、7.3.3.2 に示す(Wakasugi et al., 2008 : NUMO, 2011d)。

核種移行解析においては、作成した一次元マルチチャンネルモデルを用いて、それぞれの核種移行の場が現在から将来にわたって継続することを仮定した計算を個別に行い、それぞれ対応する GBI への核種移行率を算出する。さらに、各代表点に対して、核種移行の場が切り替わる時期に対応して各 GBI への核種移行率を切り替えて合算する。模式図を図 7.3.3-2 に示す。

① 処分場周辺で予想される複数の流動場それぞれについての核種移行解析を個別に実施する



② 処分場内の位置ごとに異なる「場のタイプの転換時期」に応じてこれら4種類の核種移行解析結果のうち該当するものを採用し継ぎ合わせる

	期間1	期間2	期間3	期間4	期間5	期間6	期間7	期間8	期間9	期間10
領域1	a	a	a	b	a	d	c	d	c	d
領域2	a	a	a	b	a	b	a	d	c	d
領域3	a	a	a	b	a	b	a	b	c	d

③ 各時期ごとにそれぞれの GBI への核種移行率を積算し、当該時点での GBI の環境条件に対応する生物圏での被ばく線量を算出する

(領域 1~3 は図 7.3.2-3 に例示したような母岩領域を表す)

図 7.3.3-2 沿岸域の環境変遷に対応して核種移行率を算出するイメージ

(iii) 変遷を考慮した生物圏評価技術

沿岸域の生物圏では、GBI の時間変化を考慮して、被ばく線量を算出するための換算係数を算出する。

沿岸域での環境変化を考慮した生物圏評価技術を構築するに当たって、Biosphere Model Validation Study (BIOMOVs II, 1996) の第2フェーズで開発されている生物圏評価のための様式化アプローチを用いる。この手法は、IAEA の生物圏モデリングと評価手法 (BIOMASS) (IAEA, 2003) や BIOCLIM プロジェクト (BIOCLIM, 2004) のもとで開発され、種々の事例への適用を通じて検証・改良が行われてきたものである。ここでは、このアプローチに基づき、以下の手順について記述する。

- ・ 生物圏評価のための評価条件の設定
- ・ 着目する生物圏の特定
- ・ 被ばくグループの想定
- ・ 生物圏モデルの構築と評価の実施

生物圏評価のための評価条件の設定では、評価の目的、評価の指標、評価の考え方、地層処分システム、サイト条件、ソースタームおよび GBI、評価の時間スケール、社会条件に関する仮定の各項目を決定する。

次に、着目する生物圏の特定では、生物圏とその変遷をどのように解析に取り込むかを決定する。BIOMASS で提案されている以下の三段階から成る手順に従い決定する。

- Step1：評価背景に記載された情報に基づいて生物圏に含めるべき構成要素を系統的に特定し、その妥当性を検討する。
- Step2：評価背景に基づいて、生物圏の変化を考慮すべきかどうかを判断する。生物圏の変化を扱うことが必要となった場合、将来の生物圏の経時的変化を整理し、生物圏への影響を記述する。
- Step3：各シナリオにおいて生物圏の変化を表す手法を選択する。

これらの段階を経て、沿岸域における生物圏モデルでは、気候変動による人間活動への影響、海水準変動および隆起・侵食による GBI の変遷を取り入れる。また、変遷としては、気候変動と GBI の変遷を取り入れたケース、陸域が GBI であるケース、海底が GBI であるケースなどを考慮する。

被ばくグループの想定では、BIOMASS のリスト (IAEA, 2003) を参照し、潜在的に被ばくグループとなり得る人間活動のタイプを抽出して、評価対象を設定する。BIOMASS では、生物圏に含まれる種々の媒体のそれぞれに関連する人間活動を分類している (IAEA, 2003)。このようなアプローチに基づき、沿岸域において線量が最も高くなり得るグループを想定した場合、海洋環境（潮間帯を含む）を利用する漁業従事者グループと臨海部の土地を使って放牧を行う農業従事者グループを想定する。将来の気候変動によって、次第に寒冷化する時期には、農業システムの変化やそれに伴う食生活や移住率の変化が農業従事者グループに生じると想定する。また、被ばく経路として、吸入、外部被ばく、および種々の食品（畜産物、魚介類、海藻・藻）の摂取を想定する。これらの被ばく経路は、GBI の位置の変遷や、気候変動などによって影響を受けると想定する。

生物圏モデルの構築と評価の実施では、前項までの検討結果に基づき、生物圏を構成するコンパートメント（主要な生物圏構成要素を、それぞれ一定の容積を有する区画としてとらえたもの）およびこれらの間の核種移行を設定する。本検討の設定例を図 7.3.3-3 および図 7.3.3-4 に示す。これらに基づき、生物圏評価を実施するとともに、生物圏評価結果の分析を行う。

処分場領域が陸側の淡水域にある場合には潮間帯堆積層が GBI となり、それ以外の場合には沿岸海底堆積層（無酸素層）が GBI となる。線量換算係数の算出に当たっては、個々の核種および崩壊系列の親核種について一定の GBI への移行率を設定することによって被ばく線量を計算し、それらの比率として被ばく線量換算係数を算出する。GBI ごとに算出する核種移行率に対して、被ばく線量換算係数を適用することにより、全体システムについての安全解析の結果を得る。

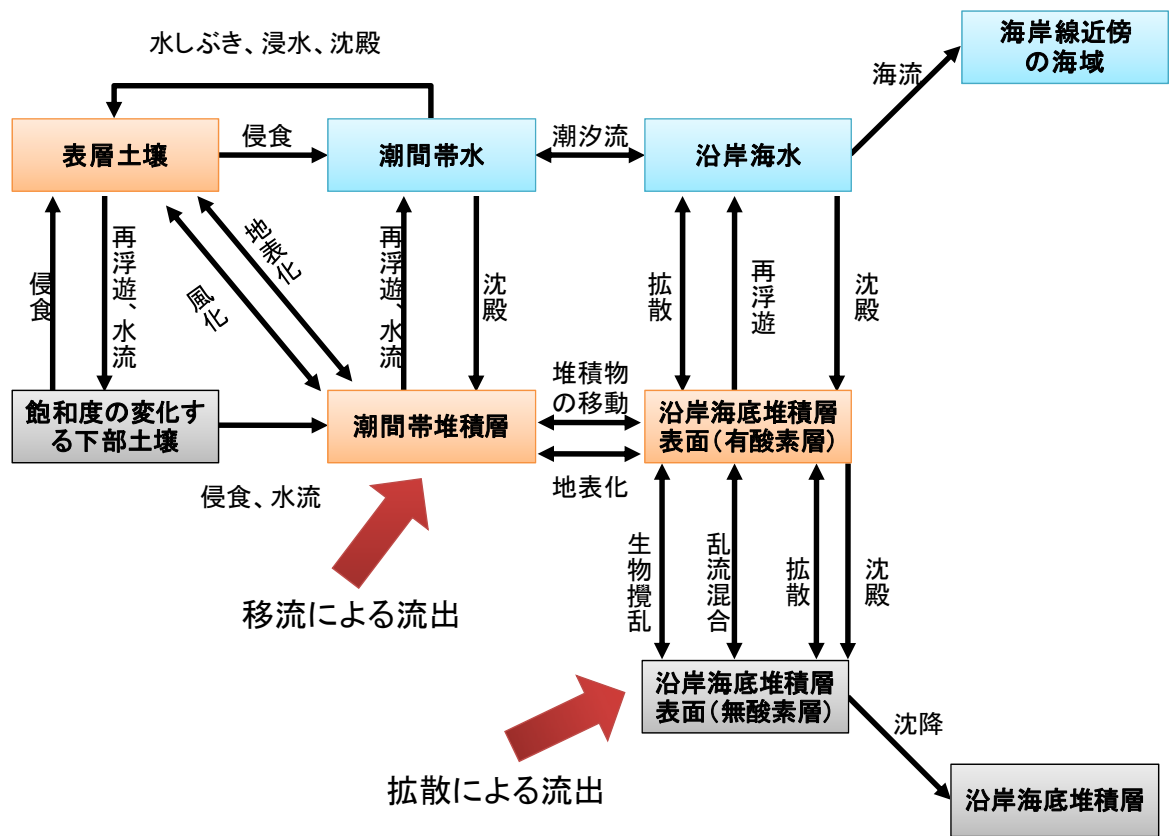


図 7.3.3-3 GBI が沿岸海底堆積層および潮間帯堆積物である場合の生物圏内の核種移行に関する概念モデルの例

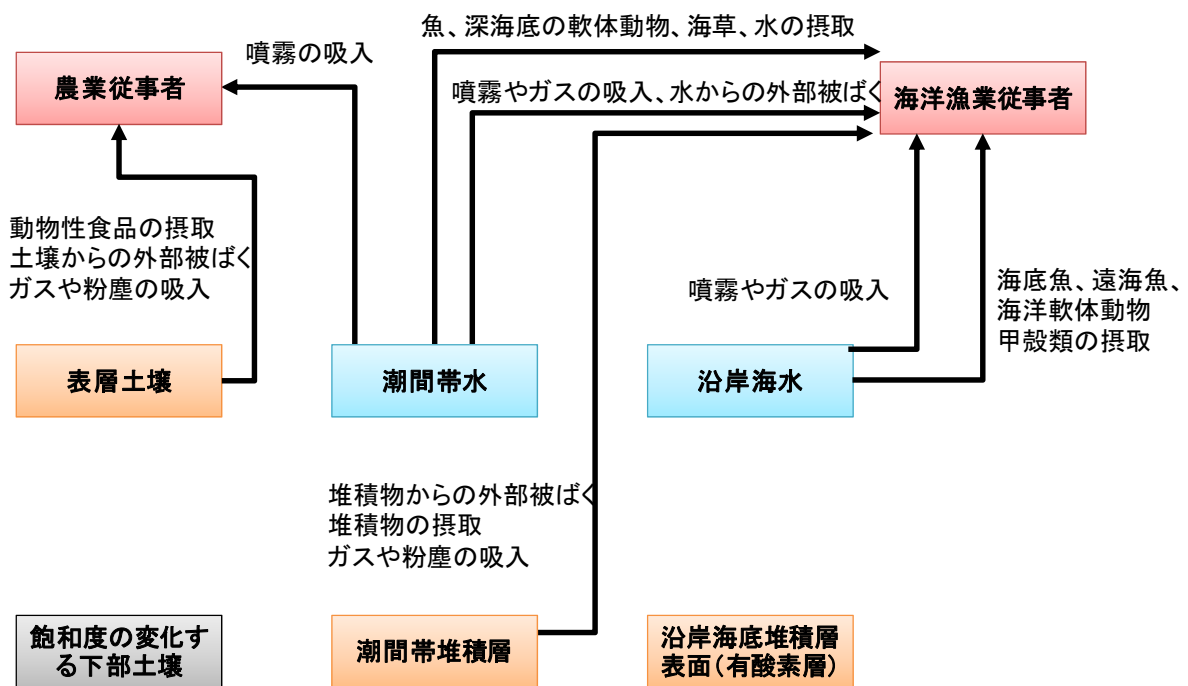


図 7.3.3-4 被ばく経路に関する概念モデルの例

(3) 例題への適用

前述のモデル化手法に従って、隆起・侵食および気候・海水準変動などの自然現象によって生じる沿岸域での環境変遷を考慮した安全解析を試行した（参考資料2：NUMO，2011d）。

これらの検討により、不均質場を取り入れた核種移行解析技術、将来の環境変遷を考慮に入れた沿岸域におけるシナリオ構築技術、処分場周辺の広域場とその環境変遷を考慮に入れた生物圏評価技術などの技術基盤に基づき、これまでの安全評価では適用が困難であった沿岸域の処分場での環境変遷を考慮した安全解析が可能となった。

7.3.3.2 母岩の不均質性および設計のオプションを考慮した核種移行解析モデルの高度化

(1) 背景と目的

段階的に進められる地層処分事業では、さまざまな不確実性や制約条件への対応に配慮して、複数の設計オプション（パネル／坑道配置方法、廃棄体定置方式など）を検討する。設計オプションを適切に絞り込むためには、設計オプション間の相違を、安全性、経済性など、さまざまな観点から評価することが必要である。ここで、性能評価の観点から設計オプション間の差異を評価する場合、既存の一次元モデルでは、人工バリアや地下施設の三次元的形状および周囲の岩盤の不均質性が保守的に単純化されるため、定量的な差別化が困難な状況であった。

そこで、設計オプションの違いを性能評価の観点で評価するための技術基盤を整備することを目的とし、人工バリア／地下施設の形状や周囲の岩盤の不均質性を考慮するための手順およびツールを開発した（Wakasugi et al., 2008：NUMO，2011d）。

(2) アプローチ

(i) 概要

母岩の不均質性や人工バリアの三次元的形状といった設計オプションに起因する複雑な核種移行経路を適切に考慮するための手順を開発した（図 7.3.3-5）。この手順を具現化するツールとして、三次元不均質場核種移行解析ツール Partridge（Particle tracking in deep geological environment）を開発した。

前提条件の設定

前提条件として、三次元水理解析や三次元物質移行解析の対象となる解析領域を設定し、人工バリアなどの構造物の寸法や形状、それらの配置を設定する。それらに基づき、構造物の形状情報を含んだ三次元のメッシュデータを作成する。

三次元水理解析

三次元水理解析では、水理条件としての不均質場および境界条件を設定し、定常状態の三次元地下水流動解析を行う。

不均質場の設定においては、母岩中の亀裂を再現するために、個々の亀裂の位置、方向、大きさ、透水量係数などを設定し、三次元亀裂ネットワークを作成する。次に、三次元亀裂ネットワークと三次元メッシュデータを前提として、透水係数場を作成する。

さらに、解析領域に対して水頭やダルシー流速に関する境界条件を設定し、作成した透水係数場を用いた三次元地下水流動解析（定常）を実施する。地下水流動解析から得られる圧力分布やダルシー流速分布に基づき、実流速分布を計算し、次のステップにおける物質移行解析の入力データと

する。

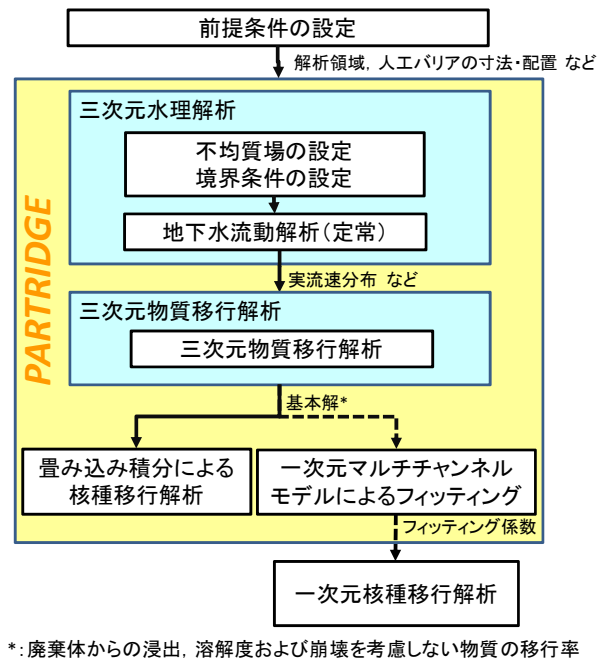


図 7.3.3-5 母岩の不均質性および人工バリアの三次元形状を考慮した核種移行解析の手順

三次元物質移行解析

三次元物質移行解析では、水理解析から得られた実流速分布に加えて、各媒体での分配係数や拡散係数などの物質移行データに基づき、初期に廃棄体に配置した保存性トレーサの粒子に関して、物質移動解析を行う。多数の粒子について移行解析を行うことにより、各位置での物質の移行率に関する基本解（廃棄体からの浸出、溶解度および崩壊を考慮しない物質の移行率）を得ることができる。

畳み込み積分による核種移行解析

三次元物質移行解析において得た各位置における物質移行率の基本解は、放射性崩壊や溶解度を考慮しておらず、また、廃棄体からの浸出期間を考慮せずに瞬時放出を仮定した移行率を表すものである。そこで、この物質移行率の基本解と廃棄体からの浸出率を畳み込み積分する。この際、核種の放射性崩壊や溶解度制限放出の効果も同時に組み込むことによって、廃棄体からの核種浸出率や放射性崩壊、溶解度を考慮した、各位置における核種移行率を算出する。

一次元マルチチャンネルモデルによるフィッティング

ここでは、三次元物質移行解析結果を近似する一次元マルチチャンネルモデルを作成する。これにより、三次元の解析を模擬する計算時間の短いモデルが整備され、多数の解析ケースに対応可能となる。ここで用いる一次元マルチチャンネルモデルは、掘削影響領域の地下水流量が異なる複数の人工バリアが成すマルチチャンネルと、透水量係数が異なる複数の母岩亀裂が成すマルチチャンネルによって構成されるモデルである。そして、作成した一次元マルチチャンネルモデルを用いて、

複数の核種に関する核種移行解析を行う。

なお、不均質場の作成および三次元物質移行解析については、独立した解析や知見との比較検証を行い、その妥当性を確認している (NUMO, 2011d)。

(3) 例題への適用

上述のモデル化技術を例題に適用した事例を参考資料 3 に示す (NUMO, 2011d)。具体的には、複数の不均質場を想定し、三次元水理解析および三次元核種移行解析を実施するとともに、廃棄体の豎置きと横置きに起因する性能評価上の違いや、坑道と直交する断層と廃棄体との離隔についても検討した。

これらの検討により、多様な地質環境のもとで設計オプションの違いを性能評価の観点から評価できるようになった。

7.3.3.3 核種移行解析モデルにおける計算手法の効率化

安全評価においては、長期変遷を考慮して設定したシナリオに基づき、さまざまな解析ケースを設定して核種移行解析を行う。このため、解析作業や計算時間を効率化することは有効である。ここでは、基盤研究開発機関および NUMO が進めてきた以下の技術開発の概要について記述する。

- ・ データの不確実性を統計論的に取り扱うための核種移行解析モデルの開発
- ・ 地層処分システムの応答特性を容易に把握するための近似解析解の導出

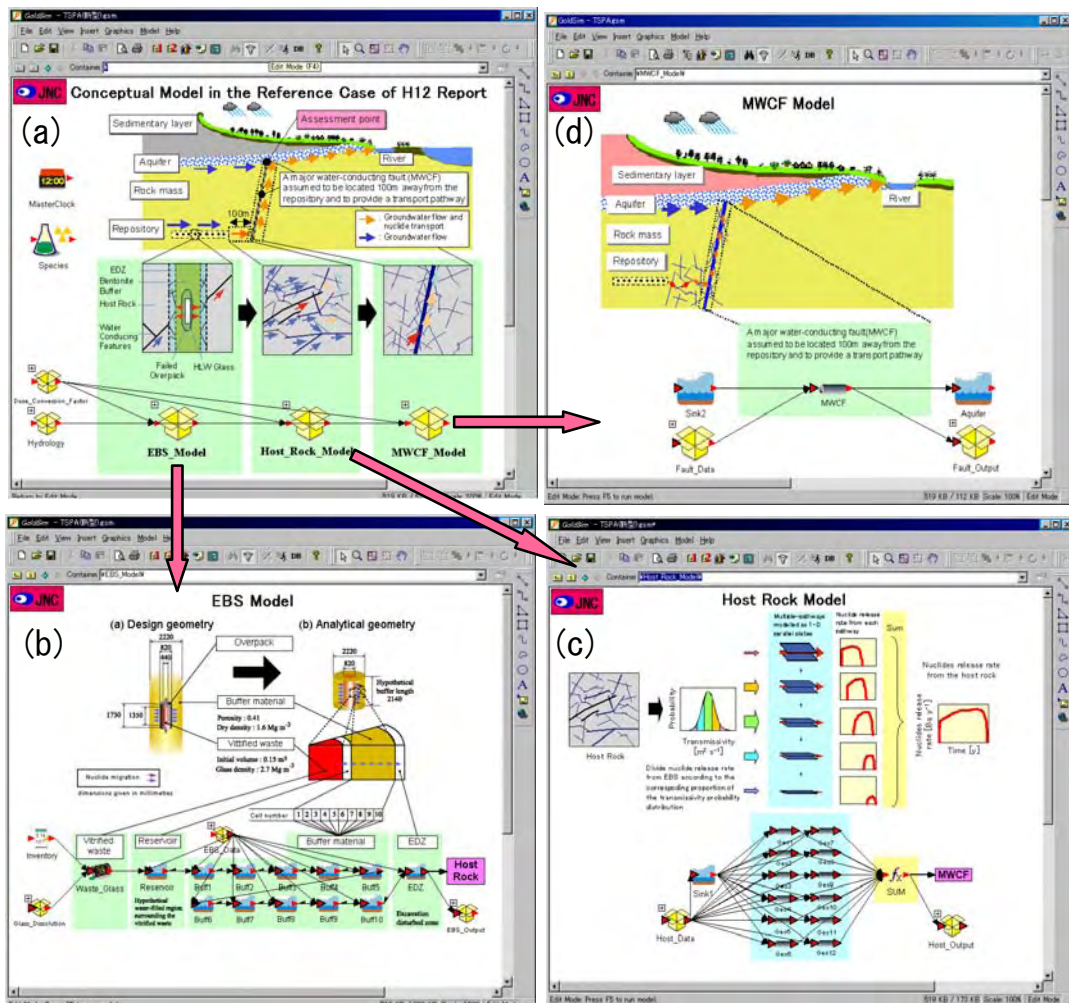
(1) データの不確実性を統計論的に取り扱うための核種移行解析モデルの開発

事業の安全評価では、安全解析の結果のみならず、モデルやデータの不確実性が結果に与える影響を把握し、地質環境の調査・評価および処分場の設計にフィードバックすることが重要である。

第2次取りまとめにおいては、決定論的な計算手法（一つのパラメータに一つの値を設定する方法）が採用され、個々の不確実性の影響を個別に評価した。このような決定論的な計算手法では、個々の不確実性の取り扱いと解析結果との対応がわかりやすいという利点がある一方で、複数の不確実性を同時に考慮した組み合わせが適切であることを示すことが難しいという課題がある。

この課題に対しては、データセットの幅からランダムにサンプリングする統計論的な手法が有効であることから、データの不確実性の影響を網羅的かつ効率的に把握するための核種移行解析モデルが開発されている (Wakasugi et al., 2000 : JNC, 2005)。モデル構築においては、諸外国の安全評価において使用された実績 (例えば, U.S.DOE, 1998) を有する汎用的なソフトウェアである GoldSim が用いられている (図 7.3.3-6)。開発されたモデルによる統計論的な計算手法の結果を図 7.3.3-7 に示す。図 7.3.3-7 では、第2次取りまとめにおけるレファレンスケースとシステム性能の総合的評価に対する線量の最大値をプロットしており、統計論的な計算手法の結果が決定論的な計算手法の結果の上限値とほぼ等しいことがわかる。これにより、決定論的な計算手法と統計論的な計算手法を相互補完的に用いることにより、不確実性の取り扱いに対する信頼性と効率を向上させることができる。なお、諸外国の安全評価においても、決定論的な計算手法以外に統計論的な計算手法を用いている場合も多く (例えば, Nagra, 2002 : SKB, 2006)、事業段階では安全評価の目的に応じてこれらを組み合わせて使用する。

さらには、統計論的な計算手法の結果に対して、複数の統計手法を組み合わせることにより、計算結果に与える影響が大きいパラメータが抽出されている(表 7.3.3-2)。表 7.3.3-2 では、影響が大きいパラメータとして透水量係数分布の平均値が抽出されている。このような情報は、事業段階において不確実性を効果的に低減するという観点から、調査計画の立案に反映することが可能である。なお、地層処分低レベル放射性廃棄物および生物圏評価についても類似の検討が進められている(電事連・JNC, 2005a : Ohi et al., 2007 : JNC, 2005)。



(a) 概念モデル, (b) 人工バリア, (c) 母岩, (d) 断層

図 7.3.3-6 Goldsim を用いた核種移行解析モデルの画面
(出典 : JNC, 2005)

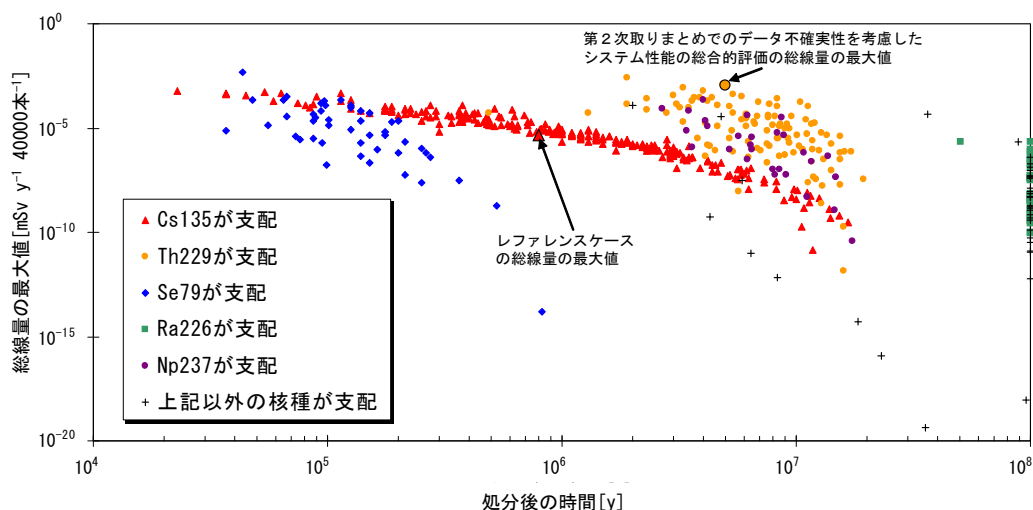


図 7.3.3-7 統計的な解析結果の例
(若杉ほか, 2002 を一部修正)

表 7.3.3-2 統計的な解析結果から影響が大きいパラメータを抽出した例
(若杉ほか, 2002 を一部修正)

順位	全リアライゼーション**	クラスタ1	クラスタ2	クラスタ3
1	透水量係数の平均値 (正)	透水量係数の平均値 (正)	透水量係数の平均値 (正)	透水量係数の平均値 (正)
2	岩盤に対するCsの分配係数 (負)	岩盤に対するCsの分配係数 (負)	マトリクス拡散深さ (負)	マトリクス拡散深さ (負)
3	マトリクス拡散深さ (負)	マトリクス拡散深さ (負)	岩盤に対するCsの分配係数 (負)	岩盤に対するUの分配係数 (負)
4	マトリクス拡散寄与面積率 (負)	マトリクス拡散寄与面積率 (負)	マトリクス拡散寄与面積率 (負)	岩盤に対するThの分配係数 (負)
5	-	ガラスの溶解速度 (正)	Npの溶解度 (正)	岩盤に対するCsの分配係数 (負)

*: 正の相関は当該パラメータの増加により総線量の最大値が増加し、負の相関は当該パラメータの増加により総線量の最大値が減少することを示す。

** : 5番目以降のパラメータの感度は無視できるほど小さい。

(2) 地層処分システムの応答特性を容易に把握するための近似解析解の導出

地層処分低レベル放射性廃棄物には、多様な種類の廃棄物が含まれ、個々の廃棄物の特徴を詳細に検討し、安全性を確保する必要がある。また、「TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画」(資源エネルギー庁・JAEA, 2006)において、幅広い地質環境に柔軟に対応するための代替技術が示されており、これらの代替技術を活用することも視野に入れて、安全確保の頑健性の向上を図ることとしている。そこで、地層処分低レベル放射性廃棄物については、前項までに述べた解析技術による詳細な定量的検討を行うのに先立ち、個々の放射性廃棄物の特徴に対して、代替技術を含めた適切な工学的対策を対応付けることにより、幅広い地質環境特性における安全確保の方策を明らかにすることが当面の課題となる。

このため、NUMO では、地層処分システムの応答特性を容易に把握するための近似解析解を導出し(図 7.3.3-8)、地層処分システムの頑健性の向上を目的とした検討を行っている(NUMO, 2011a)。このような感度解析の結果から、例えば、廃銀吸着材のセメント混練固化体などのグループ 1 廃棄

物に含まれる I-129 は、極めて長寿命であり、また、岩石への吸着による移行遅延がほとんど生じないため、天然バリアの性能に期待することができず、人工バリアからの放出率を制限することが必要となることが示されている。なお、図 7.3.3-9 より、グループ 1 廃棄物に含まれる I-129 に対しては、一定溶出率が大きい場合においても、充填材の分配係数 (Kd) を大きくすることによって人工バリアからの放出率を制限可能であることを把握できる。NUMO は、このような検討をほかのパラメータや廃棄体グループなどのさまざまな条件に対して行い、地層処分低レベル放射性廃棄物のシステムの頑健性を確保する上で重要と考えられる安全機能やパラメータの整理を行っている (NUMO, 2011a)。

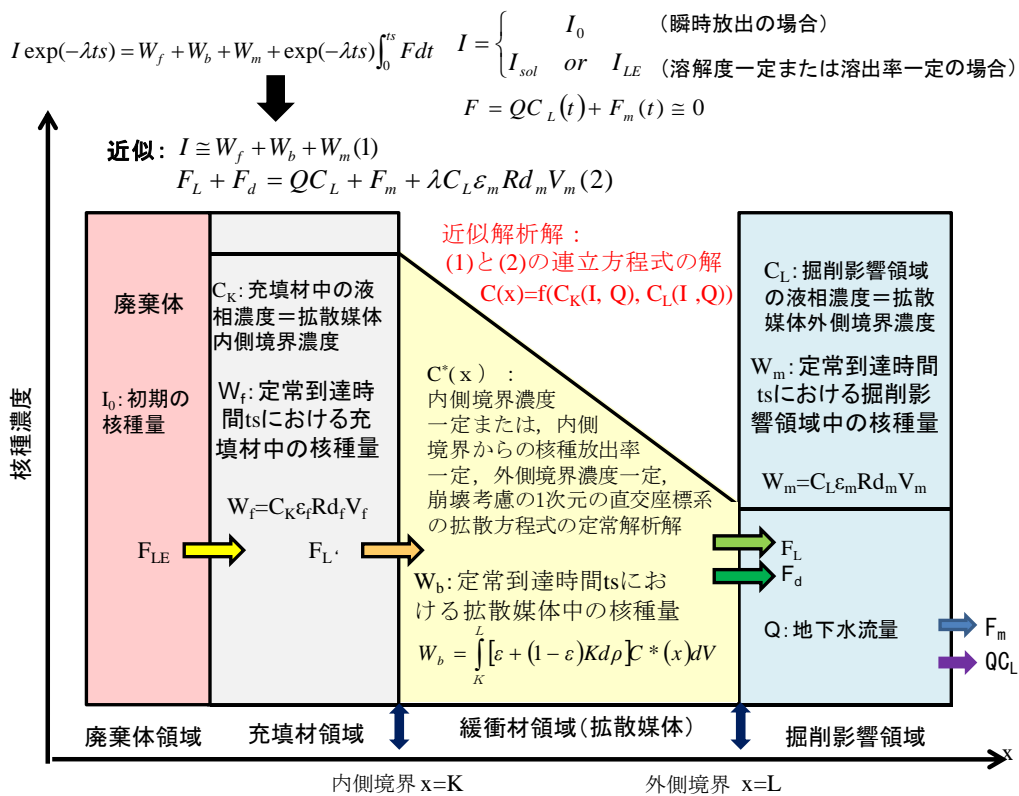


図 7.3.3-8 近似解析解を導出する概念
(出典: NUMO, 2011a)

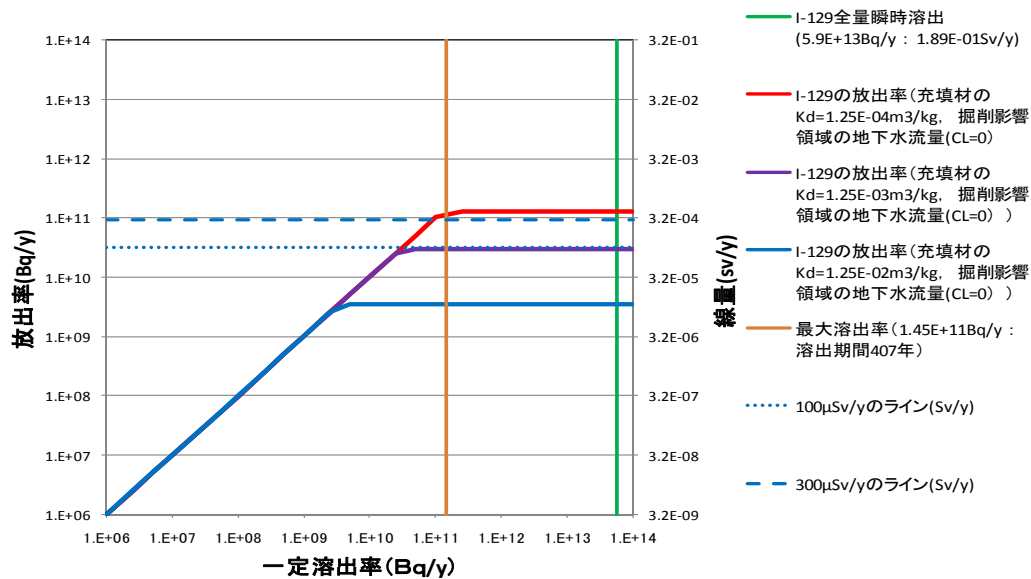


図 7.3.3-9 グループ1 廃棄物における I-129 に対する工学的対策の
効果についての感度解析結果の例
(出典：NUMO, 2011a)

7.3.4 データセットの整備に関する取り組み

安全評価の信頼性を確かなものとするためには、より現実的なモデルの開発に加え、対象とするシナリオやモデルに対応して、データセットを適切に設定することが必要となる。7.2.3 で述べたように、安全評価で用いるパラメータは多岐にわたるものである。今後、NUMO が実施する安全評価においては、サイトが有する地質環境特性に対応したデータセットが必要となる。

ここでは、基盤研究開発機関が進めてきたデータセットの整備に関する成果のうち、7.3.1 に示した四つの点に直接関連する技術開発成果として、以下の項目に関する概要について記述する。

- データの整備
- データセットの設定手法
- 地層処分低レベル放射性廃棄物に関する検討状況

7.3.4.1 データの整備

基盤研究開発機関は、核種移行解析に関するパラメータに関する以下のデータベースや調査データを公開している。NUMO は、データセットを作成する際の基盤情報として、これらを用いる。

- 熱力学データベース (JAEA-TDB) : 放射性元素および地球化学元素に関する熱力学データベースを種々の地球化学コード (PHREEQC など) で利用可能なフォーマットで整備したもの (Kitamura et al., 2010)
- 収着データベース (JAEA-SDB) : 国内外の文献から抽出されたベントナイトや岩石などに対する分配係数データを整理したものであり、また、指定された条件に該当するデータの検索やデータ群に対する回帰分析などの処理を行う機能を有する (館ほか, 2009 : 図 7.3.4-1)
- 拡散データベース (JAEA-DDB) : 文献から抽出されたわが国に分布する種々の岩石などに対

する実効拡散係数データを整備したもの（栃木・館，2009；栃木・館，2010）

- ・ ガラスの溶解に関するデータベース（GlassDB）：文献より，ガラス，ガラス組成，試験法，溶液，共存物，成分，変質生成物，試験条件，試験結果などに関する情報を集約したもの（林ほか，2005）
- ・ 環境移行データ：わが国の風土，農業活動などを反映した環境移行パラメータとして，水田・畑土壌での核種の動きやすさ（Kd）や農作物への核種の移行割合（TF）に関するパラメータを集約したもの（放医研，2008，2009，2010）

独立行政法人
日本原子力研究開発機構
核種移行データベース
Nuclide Migration Database

取得データベース
Sorption Database

データ表示 クリア グラフ表示 English 終了

トップページ(検索画面)

■ 元素 ■

Gr-1

<input type="checkbox"/> Ac	<input checked="" type="checkbox"/> Am	<input type="checkbox"/> Bi	<input type="checkbox"/> Cm	<input type="checkbox"/> Cs	<input type="checkbox"/> Nb	<input type="checkbox"/> Ni	<input type="checkbox"/> Np	<input type="checkbox"/> Pa	<input type="checkbox"/> Pb	<input type="checkbox"/> Pd	<input type="checkbox"/> Po
<input type="checkbox"/> Pu	<input type="checkbox"/> Ra	<input type="checkbox"/> Sb	<input type="checkbox"/> Se	<input type="checkbox"/> Sm	<input type="checkbox"/> Sn	<input type="checkbox"/> Tc	<input type="checkbox"/> Th	<input type="checkbox"/> U	<input type="checkbox"/> Zr		

Gr-2

<input type="checkbox"/> Ag	<input type="checkbox"/> Ba	<input type="checkbox"/> Ca	<input type="checkbox"/> Ce	<input type="checkbox"/> Cl	<input type="checkbox"/> Co	<input type="checkbox"/> Eu	<input type="checkbox"/> Fe	<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> Mn	<input type="checkbox"/> Mo	<input type="checkbox"/> Na
<input type="checkbox"/> Nd	<input type="checkbox"/> Ru	<input type="checkbox"/> Sr	<input type="checkbox"/> Zn								

■ 固相グループ ■

<input type="checkbox"/> Basaltic rocks	<input checked="" type="checkbox"/> Bentonite (Clay minerals)	<input type="checkbox"/> Cementitious materials	<input type="checkbox"/> Granitic rocks
<input type="checkbox"/> Mudstone (Sedimentary rocks)	<input type="checkbox"/> Other minerals	<input type="checkbox"/> Sandstone	<input type="checkbox"/> Tuff

■ 詳細検索条件設定 ■ 画面更新

固相
BAS_MINER
BENTONITE
bentonite
bentonite/quartz(10:90)
Ca-bentonite

溶液種類
0.01M CO3/0.01M Tris
0.01M NaClO4
0.06M NaCl
0.10M NaCl
0.1M Na-ClO4

pH		
Eh(mV)		
イオン強度(mol/L)		
温度(℃)		
液固比(mL/g)		
反応時間(日)		
初期濃度(mol/L)		

分離方法 遠心分離 ろ過分離 限外ろ過 未ろ過 その他

雰囲気/酸化還元条件 大気条件 雰囲気制御条件 その他

図 7.3.4-1 収着データベースの検索画面

（出典：館ほか，2009）

このうち，収着・拡散データベースについては，実験条件や手法の信頼性あるいは情報の追跡性などのさまざまな品質のデータが混在していることを勘案して，以下の判断基準から構成されるガイドラインを策定するとともに，各データの信頼度評価を進めている（Ochs et al, 2008）。

- ・ クライテリアⅠ：文献の記載情報の網羅性・追跡性
- ・ クライテリアⅡ：実験方法や条件の信頼度
- ・ クライテリアⅢ：関連するデータ相互間の整合性

データの信頼性評価を行うための評価フローと基準を図 7.3.4-2 に示す。まず，クライテリアⅠ

を適用し、信頼性の評価を行う上で必要な情報を網羅していないものについては除外する。次に、必要な情報を網羅しているデータに対しては、クライテリアⅡに関する項目（図 7.3.4-2）について専門家が評価を行う。クライテリアⅡの赤字で示した項目は、特に重要な基準として最初に評価がなされ、基準を満たさない場合には、信頼度不十分（unreliable）としてデータが整理される。そして、クライテリアⅡに照らして信頼性を有するとみなせるデータ群について、類似したデータを同時にプロットして、データ相互間の整合性を確認する。これらの手続きを踏むことにより、高い信頼性を有するデータを効率的に抽出して、データの傾向を把握することやデータセットを設定することが可能となる。

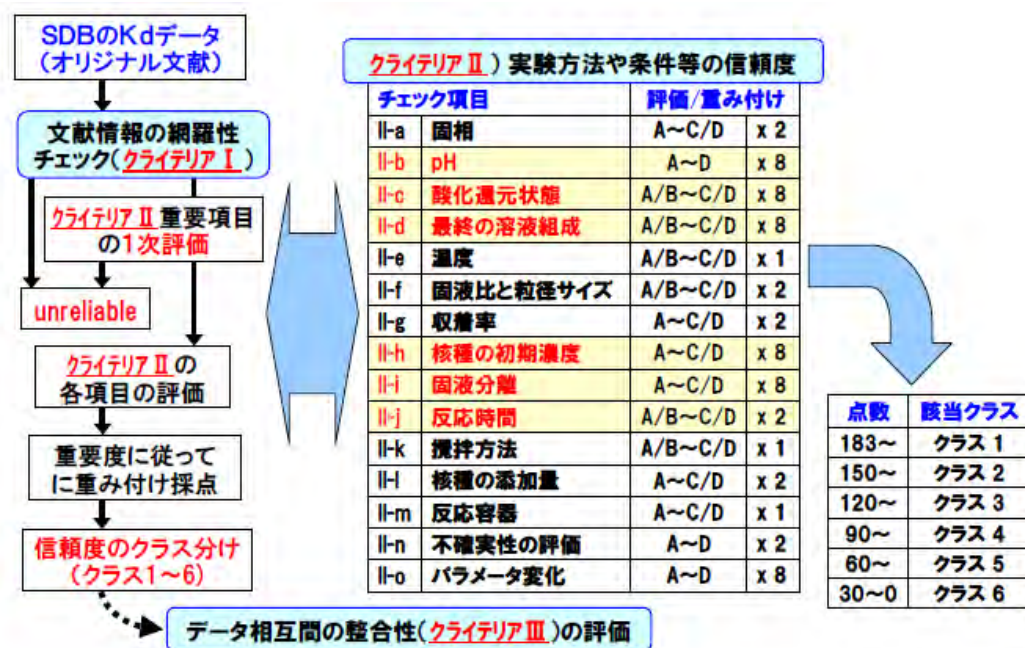


図 7.3.4-2 収着分配係数の信頼度評価のガイドラインの概要 —評価フローと基準—
(出典：館ほか，2009)

7.3.4.2 データセットの設定手法

第2次取りまとめにおける核種移行解析のためのデータセットの設定では、まず、熱力学データベースを用いて、地下水と岩石との反応および地下水と緩衝材との反応を計算することによって、それぞれ、地下水水質および間隙水水質を設定した。次に、この結果に基づき放射性元素の溶解・沈殿に関する熱力学データベースを用いて溶解度や化学種分布を推定した。また、間隙水水質や地下水水質を考慮しつつ、見かけの拡散係数（Da）やバッチ収着試験における Kd の実測値データから安全評価に用いる分配係数値を設定し、さらに、実効拡散係数（De）の実測値などから緩衝材および岩盤中の実効拡散係数値を設定した。

第2次取りまとめ以降、パラメータ設定の信頼性を向上させるため、データベースに含まれる個別データの信頼度評価を踏まえ、環境条件の違いを補正する手法の検討も進められている（Ochs et al, 2008）。具体的には、一定以上の信頼性を有する分配係数データを抽出した後、これらのデータが取得された実験条件と安全評価の対象として想定している地質環境条件との間の差異について補正する（図 7.3.4-3）。このような補正において着目すべき要因は、元素によっても異なる。例えば、Cs

の場合には、CEC（陽イオン交換容量）、粘土鉱物含有量、および共存イオンであり、また、アクチニウムの場合には、固相の表面特性に関連した pH 依存性や、溶液中での化学種分布となる。このため、着目すべき要因の違いを考慮して、補正するための変換係数を導出する。このような補正手法は、Cs および堆積岩に対して適用し、粘土鉱物としてイライト含有率、また、共存イオンとして Na イオン濃度を考慮した変換係数を用いることにより、実験値と概ね整合的な値が導出できることが示されている（Ochs et al, 2008）。

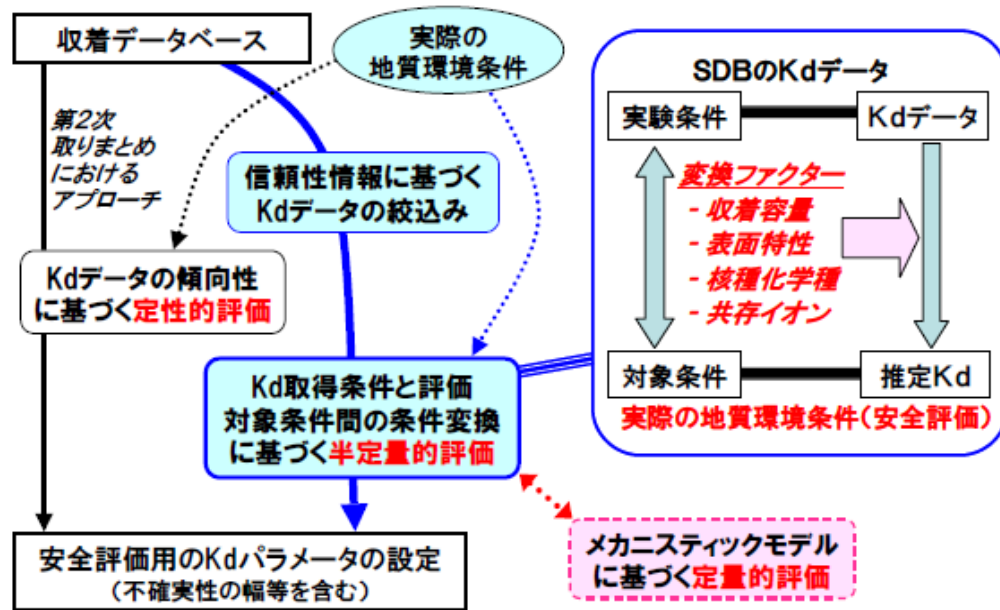


図 7.3.4-3 到着データベースと条件変換法によるパラメータ設定のイメージ
(出典：館ほか，2009)

7.3.4.3 地層処分低レベル放射性廃棄物に関する検討状況

第2次 TRU レポートの核種移行解析モデルは、移流、拡散、分散に基づく溶存物質の移動と、平衡論的に評価された沈殿（溶解度）、媒体への収着を考慮して構築されている（Mihara and Sasaki, 2005：以下、RAMDA という）。核種移行パラメータとしては、このモデルに沿って、核種の濃度を決定する溶解度、分子拡散を表す実効拡散係数および収着分配係数を設定している。

このうち、セメント系材料に対する元素の収着分配係数は、普通ポルトランドセメントを用いたバッチ法による試験結果に基づいた値が設定されている。レファレンスケースの解析に用いた各グループの収着分配係数は、以下の考え方に基づいて設定されている（Mihara and Sasaki, 2005）。RAMDA では、セメント系材料の収着分配係数をセメント系材料の変質領域の区分（pH の変化に応じて Region I および II, III を設定）ごとに設定している。

- ・ グループ 1：RAMDA の Region I および II の最小値を用いる。ただし、ヨウ素については、廃棄体の核種量が全量充填材中に溶解するとその濃度は、0.1mol/l と非常に高濃度となることから、 10^6 mol/l より高濃度領域における収着分配係数の低下を考慮した。収着分配係数の低下の考慮においては、初期濃度を変えて測定したセメントペーストに対するヨウ素の収着試験結果（加藤ほか，2001）から、高濃度におけるヨウ素

の収着分配係数を低濃度の収着分配係数の値の10分の1とした。

- ・ グループ2:RAMDA の Region I および II の最小値および有機物影響に基づく収着分配係数低減係数を考慮して設定した。

第2次 TRU レポートでは、OPC ペーストを用いた収着試験の実測値に基づいて収着分配係数が設定されており、それ以外のセメント系材料や骨材の種類などは考慮されていない。そのため、セメント系材料の組成や OPC 以外の材料の使用を考慮することにより収着性の向上が期待できるので、廃棄体グループごとの重要核種について適切なセメント系材料を検討し、期待できる収着分配係数を検討した。セメント系材料の人工バリア材としての成立性を判断するためには、核種の収着性以外にも、①力学的安定性、②化学的安定性、③施工性などの要件を総合的に判断し、適切な材料選定を行う必要があるが、重要核種に対応してセメント系材料を最適化することで収着性の向上が期待できる可能性がある。しかし、現状では、人工バリアの成立性を判断するまで検討が至っていないため、第2次 TRU レポートと同様の評価パラメータを用いることが妥当と判断している (NUMO, 2011a)。

また、硝酸塩が充填材および緩衝材に及ぼす影響については、第2次 TRU レポートの性能評価において、硝酸塩影響が不可避であることを仮定して核種の収着分配係数が設定されている。現在、鉍物による硝酸塩還元現象の解明や微生物による硝酸イオン変遷スキームの詳細化が進められているが、研究開発途上であり、定量的な安全評価結果を得るまでは至っていない。そこで、現状では、第2次 TRU レポートと同様の取り扱いとすることが妥当と判断している (NUMO, 2011a)。

NUMO は、上述のように、感度解析から得られた重要因子 (安全機能やパラメータ) や関連する事象などに対して、第2次 TRU レポート以降に更新された知見を含めて再整理している (NUMO, 2011a)。

以上のことから、安全評価におけるデータセットを設定する上で必要な基盤となる技術が強化された。

7.3.5 今後の課題

前節までに、第2次取りまとめ以降、NUMO および基盤研究開発機関が取り組んできた技術の整備状況を概説した。

今後は、これらの技術の整備状況と、「地層処分技術開発ニーズの整理～精密調査地区選定に向けて～」(NUMO, 2010)などを踏まえて具体的な技術課題を抽出する。具体的な例として、NUMO および基盤研究開発機関にとって、特に優先度が高い安全評価に関する技術開発課題を表 7.3.5-1 に示す。そして、課題優先度を設定した上で、各課題を着実に解決していき、長期安全性評価技術の継続的な信頼性向上に努める。

なお、候補サイトが具体化されていない現段階では、NUMO が準備すべき安全評価のための体系は、多様な地質環境およびさまざまな設計オプションに適用可能なものとして開発することが必要となる。ここで、個別の課題ごとにそれぞれ適切と考えられる安全評価手法を準備し、その事例の蓄積によって安全評価体系を構築するというアプローチは効率的ではなく、また、事例間の整合性を確保することが困難であるために品質管理上も好ましいものではない。そこで、類型化された地質環境、異なる処分概念オプションなどの観点から必要となる安全評価手法を抽出し、さらに、こ

これらの間の共通点や相違点を分析することによって必要な要素技術を体系化するという目的指向の取り組みが有用である。

表 7.3.5-1 安全評価に関する技術開発課題と設定理由（特に優先度が高いもの）
(NUMO, 2010 を編集)

技術開発課題	設定理由
<ul style="list-style-type: none"> ・ 蓋然性に基づくシナリオ構築技術の整備 ・ 安全規制から示されるシナリオの枠組みに即したデータ設定技術の開発（例：最尤値の設定） 	<p>安全規制の動向やバリア機能の現実的な性能把握などの観点から、蓋然性の高いシナリオを評価するため</p>
<ul style="list-style-type: none"> ・ 蓋然性に基づく地質環境の長期的変遷を考慮したシナリオ構築技術の整備 ・ 地質環境の多様性や地質環境の長期的変遷を考慮したファーフィールドの特性評価技術の整備（例えば、海水準変動を考慮した水理特性など） ・ 地質環境の多様性や長期的変遷を考慮した地表付近の地質環境特性（例えば、風化帯の特性）評価技術の整備 ・ 地表環境の長期的変遷を考慮した生物圏、被ばくグループの評価技術の開発 ・ 地質環境の長期的変遷を考慮した水理・核種移行モデルの整備 ・ 地表環境の長期的変遷を考慮した生物圏モデルの開発（含、GBI の取り扱い） ・ 地質環境条件や長期的変遷を考慮した性能評価データ設定の標準化と検証（データベースおよび実測データの使い方、地下研究施設での方法論の検証など） 	<p>安全規制の動向やバリア機能の現実的な性能把握などの観点から地球環境の長期変遷を考慮した閉鎖後長期の安全性を評価するため</p>
<ul style="list-style-type: none"> ・ サイト調査—安全評価の連携 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 地質環境モデルの情報（移行経路情報・水理特性などの長期的変遷など）の安全評価への取り込みに関する技術 ➢ サイト調査により安全評価の不確実性を効率的に低減させるための技術の整備 ・ 設計—安全評価の連携 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 性能評価の観点からの設計オプションの絞り込みに必要な評価技術の整備 ➢ 閉鎖前の安全性と閉鎖後の安全性を包括的に評価するための技術の整備 ・ 地下研究施設を活用した「安全評価—サイト調査—設計」の連携の実証 	<p>段階的に増える地質環境の情報を活用し、効率的な不確実性の低減および安全に対する信頼性の向上を実現するため、地質環境の調査・評価、工学的対策、安全評価が有機的に連携できるようにするため</p>

7.4 まとめ

本章では、実際のサイトにおける地層処分システムの長期安全性を段階的に評価していくため、セーフティケースと安全評価との関係、不確実性の取り扱い、各事業段階における安全評価の役割などの基本的な考え方を示した。さらに、シナリオ構築、モデルの開発・設定およびデータセットの整備に対する具体的な進め方を示した。また、第2次取りまとめ以降、基盤研究開発機関およびNUMOが、長期安全性の観点から、多様な地質環境や設計オプションをより現実に即して評価するために進めてきた個別技術についても取りまとめた。以下に、主要な個別技術の進展についてまとめる。

(1) シナリオ構築手法の整備

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

(2) モデルの整備

地質環境の多様性と長期変遷への対応として、地下水の流れと水質の変遷を考慮して、天然バリア中の核種移行と生物圏を評価するためのモデル化技術を整備した。また、さまざまな設計オプションをより現実に即して評価できるようにするため、三次元の核種移行解析モデルを開発した。さらには、データセットに分布を与えた統計論的な核種移行解析モデルや、統計論的な評価結果に対して影響が大きいパラメータを抽出する方法などが開発されている。これらの成果により、さまざまな安全解析のニーズに対応するための技術基盤が拡充され、モデルの選定における技術的な選択肢が拡充した。

(3) データセット設定技術の整備

長期安全性評価の信頼性を確保するためには、地質環境の多様性や長期変遷、およびさまざまな設計オプションを考慮した上で、データセットを適切に設定することが重要である。第2次取りまとめ以降、基盤研究開発機関では、データセットを設定するための基盤情報として、核種移行解析に用いるさまざまなデータベース（熱力学、収着、拡散、ガラスの溶解などに関する各データベース）の開発・更新や生物圏評価に用いる環境移行データの整備が進められている。さらには、整備されたデータベースを用いたデータセットの設定手法についても検討が進められた。これらの成果により、核種移行解析を行う際に必要となる基盤的情報が強化された。

以上のことから、地層処分事業における長期安全性評価技術の信頼性が一段と向上した。

参考資料1 断層活動の影響に関する安全解析の例

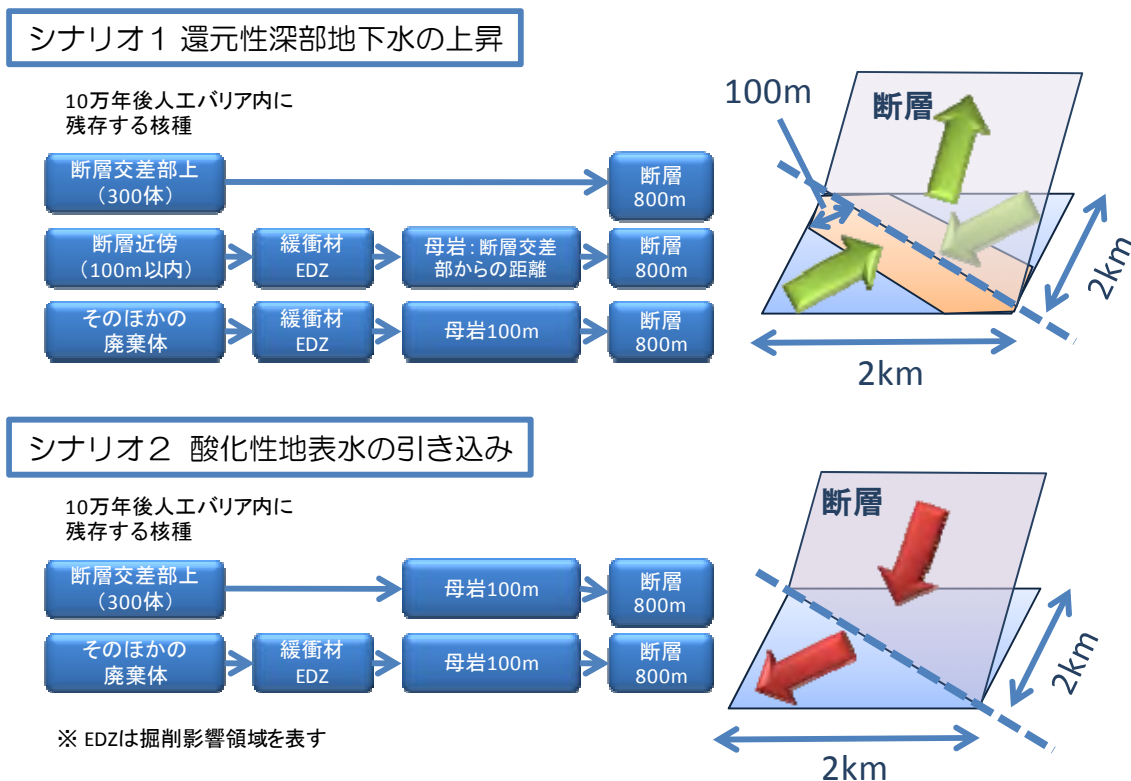
7.3.2.3 では、自然事象の著しい影響を仮想的に評価できるようにすることを目的として、断層活動を例としてシナリオ構築手法を示すとともに、将来新たな断層が処分場を直撃するという仮想的な状況を想定した二つのシナリオを示した。ここでは、この二つのシナリオに基づく安全解析を行った結果を例示する（NUMO, 2011c）。

1. 概念モデル

断層発生前の核種移行モデルとしては、第2次取りまとめのレファレンスケースと同一のモデルおよびデータセットを用いる。また、断層発生以前の核種移行距離は、いずれの廃棄体についても、第2次取りまとめレファレンスケースにて想定された100mと想定する。

断層発生後における核種移行モデルの概念図を参考図 1-1 に示す。

シナリオ1においては、新生断層と交差する廃棄体および人工バリアは断層発生時にその機能を喪失するものとし、廃棄体および人工バリア中の核種は瞬時に断層に至るものとする。断層と交差しない廃棄体はその健全性を維持するものと仮定する。また、新生断層から100m以内にある廃棄体については母岩中の移行距離が短縮することとし、それ以上離れた廃棄体については母岩中の移行距離は100mのまま不変であるとする。なお、シナリオ1では断層および母岩中の地下水は還元性であるものとする。



参考図 1-1 断層発生後の核種移行モデルの概念図

シナリオ2では、新生断層を通じて深部に下降した地表水が地下施設を通過してほかの既存の透水性断層などに至り、そこから地表に向かうものとする。新生断層と交差する廃棄体および人工バ

リアは断層発生時にその機能を喪失するものとし、廃棄体および人工バリア中の核種は瞬時に母岩に至るものとする。断層と交差しない廃棄体はその健全性を維持するものと仮定する。ここで、断層割れ目帯と交差するものも含め全ての廃棄体について核種移行距離は 100m と仮定する。シナリオ 2 では母岩および断層中の地下水は酸性性であるものと仮定する。

どちらのシナリオにおいても、断層活動直後の過渡的な地下水流動は数日から数か月程度の短期的なものであるため無視できるものとする。また、その後の地下水流動の変化は応力場の変化による間隙水圧の変化ではなく、断層活動に伴う岩盤の透水性の変化によるものとし、広域的な動水勾配も初期の値に復帰するものと仮定する。発生した断層からの距離に基づいて廃棄体を区分し、区分ごとに核種移行経路を定義する（参考表 1-1 および参考表 1-2）。被ばく線量は、それぞれの区分について廃棄体 1 体あたりの核種移行率に廃棄体数と線量換算係数を乗ずることによって算出する。なお、生物圏は断層発生による影響を受けないものと仮定し、断層発生の前後で同一の線量換算係数を用いる。解析コードは、GoldSim（GoldSim Technology Group, 2010）を用いる。

参考表 1-1 シナリオ 1 における廃棄体区分

	断層からの距離	廃棄体数
断層と交差する廃棄体	0m	300
核種移行距離を短縮する廃棄体	0m—10m	264
	10m—20m	560
	20m—30m	556
	30m—40m	551
	40m—50m	548
	50m—60m	544
	60m—70m	539
	70m—80m	536
	80m—90m	532
90m—100m	527	
それ以外の廃棄体	100m 以上	34543

参考表 1-2 シナリオ 2 における廃棄体区分

	断層からの距離	廃棄体数
断層と交差する廃棄体	100m	300
それ以外の廃棄体	100m	39700

2. 解析ケースとデータ

自然現象の著しい影響については、適切なサイト選定によって回避することが事業の基本的な考え方である。自然現象の将来予測については、外挿法を中心として、これまでさまざまな議論がなされ、わが国では、「過去数 10 万年程度の地質学的記録をもとに、将来 10 万年程度の推論は可能である」との合意がある（JNC, 1999b；土木学会, 2006）。また、10 万年を超える将来の地質環境の変遷や自然現象の発生に係る予測の精度は、事象ごと、地域ごとに異なるものである。以上を踏まえ、ここでは、新たな断層は 10 万年後に生じるものと仮定する。

断層の透水性は、断層を構成する構造ごとに異なることが一般的に知られている。多くの建設工

事の事例や研究開発事例などを収集し、参考表 1-3 のように断層の構造ごとの透水係数の範囲を整理した。

断層発生後の核種移行解析においては、断層・破碎帯および周辺の広範な変形領域が母岩に比べてどれだけ大きい透水性を有するかが重要となるが、本解析では、参考表 1-3 の結果から、断層・破碎帯の透水性は母岩の約 1,000 倍程度、また、周辺の広範な変形領域の透水性は母岩の約 10 倍程度と設定する。

参考表 1-3 断層の各構造における透水係数に関する情報のまとめ

区 分	断層の構造	透水係数 (m/sec) の範囲
断層・破碎帯	ガウジ部	$10^{-14} \sim 10^{-7}$
	破碎部	$10^{-10} \sim 10^{-5}$
広範な変形領域	マイロナイト 割れ目発達部	$10^{-13} \sim 10^{-6}$
母 岩	—	$10^{-13} \sim 10^{-8}$

*区分および断層の構造は、(吉田ほか, 2009) に基づき設定

主要な解析条件を参考表 1-4~1-6 に示す。

以下では、断層・破碎帯および広範な変形領域の水理特性について、不確実性を考慮してそれぞれ複数のケースを想定し、それらを組み合わせることで解析ケースを設定した。

それぞれのシナリオに対して、断層発生前後の溶解度、分配係数および母岩中核種移行距離を設定した(参考表 1-4)。断層・破碎帯について、断層ケース 1 では断層の透水係数として母岩平均透水係数より 2 桁高い値を設定し、断層ケース 2 では第 2 次とりまとめの断層に相当する透水係数を設定した。広範な変形領域については、次の二つのケースを設定した。広範な変形領域 1 では透水量係数分布は断層新生前(第 2 次取りまとめレファレンスケースの母岩)と同一とし、亀裂頻度のみ 10 倍とした。広範な変形領域 2 では、透水量係数分布は断層新生前(第 2 次取りまとめレファレンスケースの母岩)の 10 倍、亀裂頻度は断層新生前と同一とした。

なお、シナリオ 1 で主要な核種移行経路となる新生断層とシナリオ 2 における既存の断層では水理特性が異なる可能性も考えられるが、ここでは、簡単化のため同等と仮定した。

上記のシナリオと断層・破碎帯、広域な変形領域を組み合わせることにより、解析ケースを設定し(参考表 1-5)、各解析ケースに対する水理パラメータを設定した(参考表 1-4)。線量換算係数については、断層発生の前後ともに第 2 次取りまとめのレファレンスケースにおける線量換算係数を用いた。

参考表 1-4 シナリオ 1, シナリオ 2 の安全解析の条件

	溶解度および分散係数		母岩中核種移行距離		
	断層新生前	断層新生後	断層新生前	断層新生後	
シナリオ 1	第 2 次取りまとめの レファレンスケース		すべての 廃棄体 : 100m	断層割れ目帯と交差 する廃棄体 (300 体)	0m
				断層近傍の廃棄体	各廃棄体から 断層までの 距離
				そのほかの廃棄体	100m
シナリオ 2	第 2 次取りまとめのレファレンス ケース	酸化性条件 の値	すべての廃棄体 : 100m		

参考表 1-5 解析ケース

解析ケース番号	シナリオ	断層・破碎帯	広範な変形領域 (亀裂特性)
1-1	シナリオ 1	断層ケース 1	広範な変形領域 1
1-2			広範な変形領域 2
1-3		断層ケース 2	広範な変形領域 1
1-4			広範な変形領域 2
2-1	シナリオ 2	断層ケース 1	広範な変形領域 1
2-2			広範な変形領域 2
2-3		断層ケース 2	広範な変形領域 1
2-4			広範な変形領域 2

参考表 1-6 各解析ケースにおける水理パラメータの設定値

解析ケース番号		断層・破碎帯の透水係数	広範な変形領域の亀裂透水量係数 (幾何平均)	広域的な動水勾配
シナリオ 1	1-1	$6.4 \times 10^{-8} \text{m/s}$ ※1	$10^{-9.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※3	0.01
	1-2		$10^{-8.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※4	
	1-3	$1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ※2	$10^{-9.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※3	
	1-4		$10^{-8.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※4	
シナリオ 2	2-1	$6.4 \times 10^{-8} \text{m/s}$ ※1	$10^{-9.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※3	
	2-2		$10^{-8.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※4	
	2-3	$1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ※2	$10^{-9.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※3	
	2-4		$10^{-8.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※4	

※1：母岩平均透水係数より2桁高い値

※2：第2次取りまとめの断層に相当する値

※3：断層新生前（第2次取りまとめレファレンスケースの母岩）と同じ透水量係数分布で亀裂頻度のみ10倍

※4：断層新生前（第2次取りまとめレファレンスケースの母岩）と同じ透水量係数分布の10倍（亀裂頻度は同一）

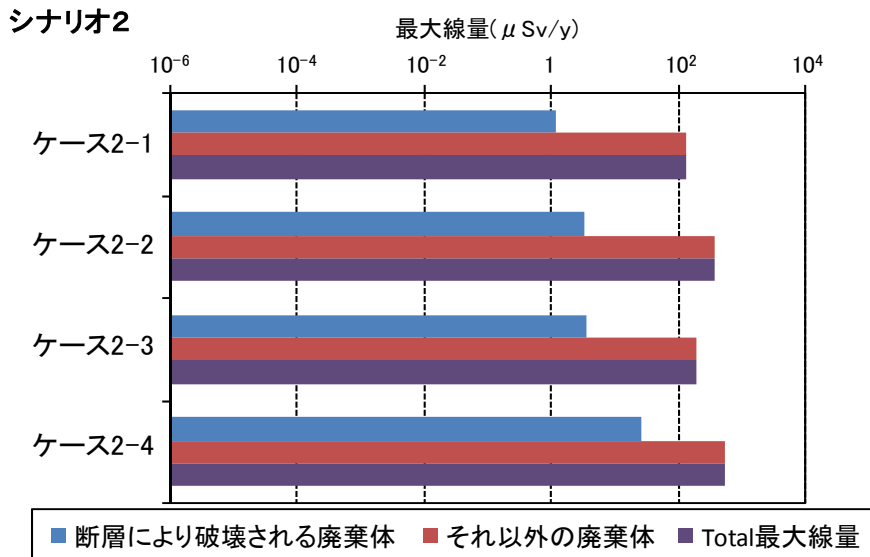
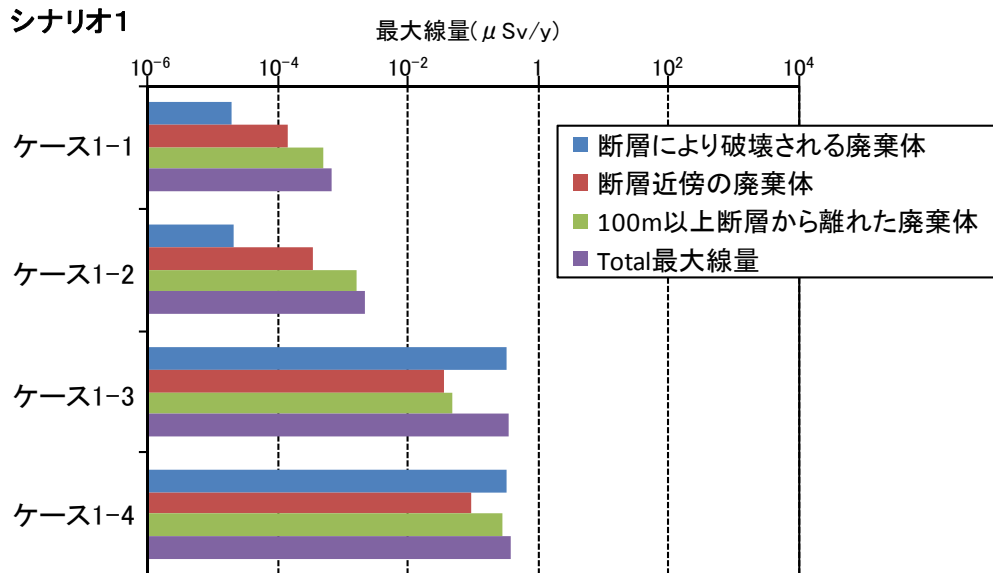
3. 解析結果

解析結果の例を参考図 1-2 に示す。これらの結果から、安全解析において着目した不確実性要因の感度を次のようにまとめる。

- ・ シナリオ 1 ではいずれのケースにおいても最大被ばく線量が $1\mu\text{Sv/y}$ 程度であるが、シナリオ 2 ではいずれのケースにおいても最大被ばく線量が $100\mu\text{Sv/y}$ 以上となっており、地下水の酸化還元状態が大きな感度を有することが分かる。
- ・ 断層活動直後に生じる最大被ばく線量は、ケース 1-3 およびケース 1-4 を除いて、断層活動の直接的な影響を受けないそのほかの廃棄体（広範な変形領域）によって支配される傾向にある。
- ・ シナリオ 1 においては、断層によって破壊された廃棄体からの放射性物質が断層に直接流入するために断層の透水係数は大きな感度を示すのに対して、シナリオ 2 においては、いずれの廃棄体においても広範な変形領域中で一定の核種移行距離が確保されているため、断層の透水係数の感度は小さい。
- ・ 広範な変形領域のモデルの感度は顕著なものではなく、断層新生による影響が亀裂頻度の上昇をもたらすものであっても、あるいは亀裂開口幅の増大をもたらすものであっても、平均透水係数が一定であれば影響の大きさはほぼ同じになるものと考えられる。

以上の安全解析の結果より、第2次取りまとめと同様の地質環境を想定して10万年以降に処分場を直撃するような断層が新生することを想定しても、断層により破壊などの直接的な影響を受ける

廃棄体数が限られること、加えて、断層の直撃を受けない大多数の廃棄体についても一定以上の地層処分システムの安全機能が保持されることを示唆している。ただし、これらの解析結果は、ベースとなる地質環境特性に依存するものであり、今後は、実際のサイトの特徴を考慮して同様の解析を行う。また、断層活動が地層処分システムに与える影響については、関連する知見や事例が限られることから、専門家との議論を通じてコンセンサスを得ながら進めることが肝要である。



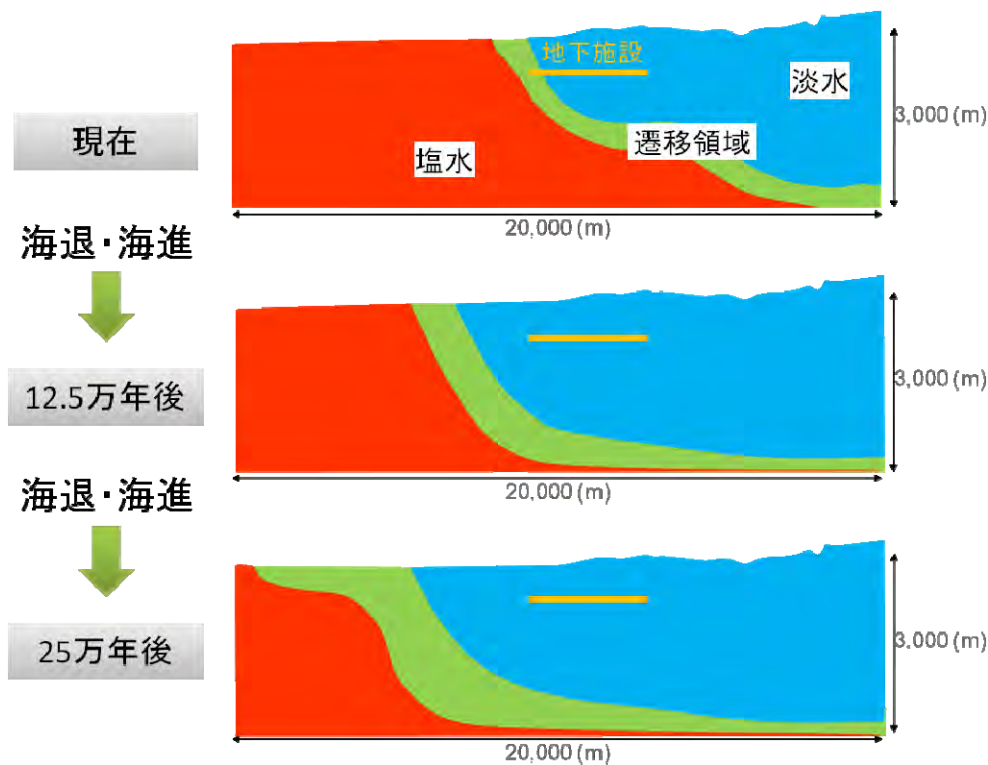
参考図 1-2 新生した断層活動の影響解析の結果

参考資料2 沿岸域の環境変遷を考慮した安全解析の例

7.3.3 では、沿岸域の特徴をより現実に即して取り込むための核種移行解析および生物圏評価の手順を示した。ここでは、この手順を仮想的な地質環境に対して適用し、核種移行解析および生物圏評価を例示的に実施した内容を記述する (NUMO, 2011d)。

1. 前提条件の設定

沿岸域では、海水準変動および隆起・浸食に伴って地形と地下水中の塩分濃度分布が変化すると考えられ、これらの環境変遷は核種移行解析に影響を与えるものである。将来の塩分濃度分布は密度流解析によって推定することが可能である。ここでは、仮想的に参考図 2-1 のような地下水化学環境の変遷を考慮した。12.5 万年の周期で海進・海退を繰り返すことを想定している。

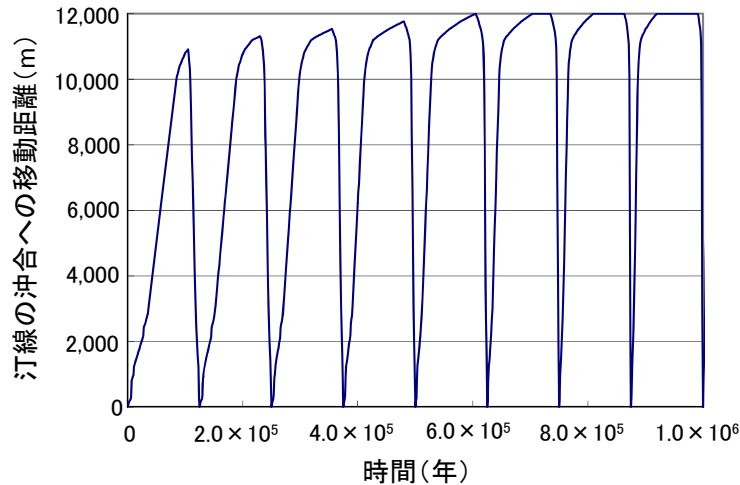


参考図 2-1 沿岸域における地下水化学環境の変遷の例

他方、隆起・侵食に関しては、隆起速度を平均 0.3mm/y と設定し、陸域では隆起と同じ速度で侵食が進行すると仮定した。なお、ここでは、簡単化のため、隆起・侵食に伴う処分深度の現象は考慮しないと仮定した。このため、実際の海水準の移動は、上図のようなサイクルを繰り返しつつ、長期的には隆起・侵食による地形変化の影響を受けながら変遷して行くものと考えられる。また、これと対応して、地下の塩淡水境界も気候変動による周期的変化と隆起・侵食による地形変化の双方の影響を受けつつ変化する。

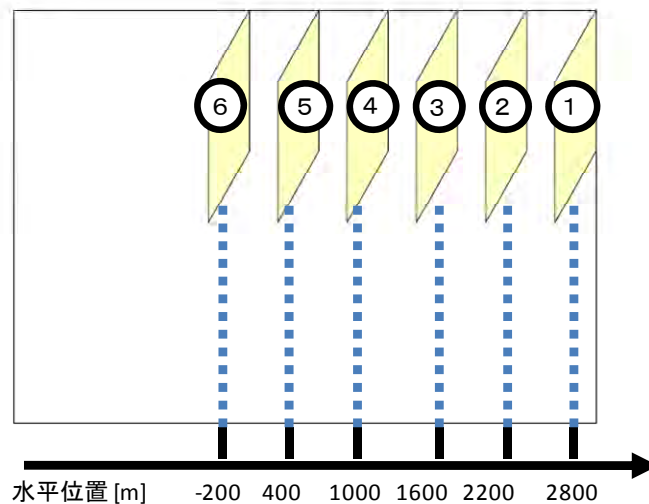
地形変化と海水準変動により、参考図 2-2 のように汀線が移動することを仮定した。現在の陸域および汀線付近の海底が、海域では隆起によって、今後ほとんどの期間、海水面よりも上にあるため隆起と侵食がほぼ相殺するのに対して、沖合では海底下にあり隆起のみが生じる期間が長い

海側の地形勾配は徐々に減少する。このため、海水準の低下に対応して海退時には汀線がより沖合にまで移動する。一方、現在の陸域は継続して陸域であり続け、その間、隆起と侵食の相殺によって地形が変化しないために、海進時の汀線の位置は変化せず、汀線の移動距離および移動速度は時間とともに増大する傾向がある。



参考図 2-2 汀線の移動

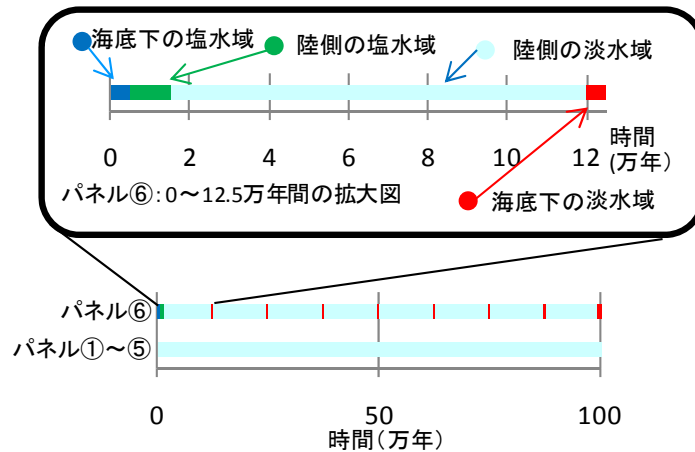
廃棄体を定置する処分パネルは、現在の海水準を基準から 800m の深度に、参考図 2-3 に示すレイアウトで六つの処分パネルを置くことを仮定した。この図では、水平位置は現在の汀線を基準とし、負の水平位置は現在海底下にあることを表す。ここで、処分場の位置については、沿岸域を対象とした安全解析の技術を確認する上で有用性を確認するため、処分場のレイアウトに対して海水準変動に起因する塩分濃度の水平方向の変化が顕著である点を仮定した。



参考図 2-3 処分パネルレイアウト

上記の各処分パネルは参考図 2-4 に示すような環境変遷をたどると設定した。最も海側の処分パネル (パネル 6) は、初期は海底下の塩水域であるが、後に陸側の塩水域となり、さらに陸側の淡水域となる。このパネルは、海底下の塩水という現在の場が出発点であり、次の海退時の汀線の移

動に追従できないために陸域に塩水が取り残された場となり、その後、一定期間を経た後に陸域における淡水の流れの場となるが、引き続き海進に際して淡水が海底下に取り残される。それ以降は、ほとんどの期間は陸域の淡水の流れの場となるが、海進時に短期間海底下に淡水が取り残される状況が生じ、また陸域に戻るといふ変遷を約 12 万年周期で繰り返すこととなる。そのほかのパネル (1～5) は常に陸側に位置し、常に淡水環境下となる。

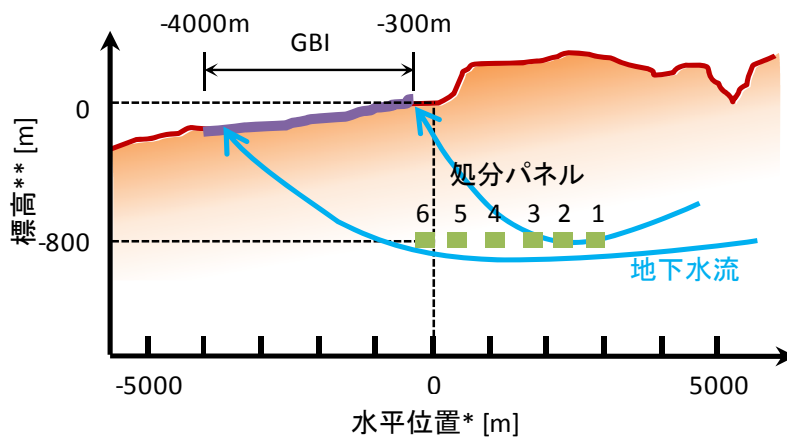


参考図 2-4 各処分パネルにおける環境変遷

処分パネルでの地下水流動場としては、最も海寄りの処分パネル以外のすべての処分パネルにおける地下水流動は時間によらず海側に向かって一定の流速 (10^3 m/y オーダー) であると仮定した。

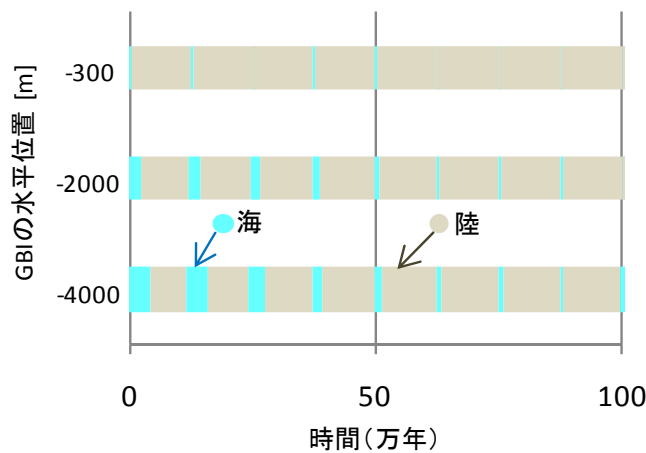
2. GBI の環境変遷の把握

前項で述べたように、沿岸域に位置する仮想サイトでは、約 12 万年の周期で汀線が 10km 以上にわたり移動する。その結果、地下施設を設置する岩盤の透水性に応じて塩淡水境界の移動に遅れが生じ、その程度によって GBI (地下施設から核種が生物圏に到達することを想定する位置) の変遷パターンが変化する。ここでは、GBI は、現在の汀線から 300m～4,000m 沖合の範囲に位置するとした (参考図 2-5)。参考図 2-2 に示した汀線の移動に基づき、この範囲における GBI の環境変遷を抽出した (参考図 2-6)。この場合、GBI は海水準変動に応じて陸域および海底の間で推移する。



*)水平位置は現在の汀線位置を0mとし、陸側を正とした。
 **)標高は現在の海水準を0mとした。

参考図 2-5 地下水流動の外観と GBI



参考図 2-6 GBI の環境変遷

3. 三次元物質移行解析

処分パネル周辺の母岩は先新第三紀堆積岩であり、参考資料3に例示した硬岩タイプ3に分類されると想定し、三次元不均質場を設定した。7.3.3.2で述べた三次元核種移行解析モデルを用いて、想定した地質環境における三次元地下水流動解析および三次元物質移行解析を行い、人工バリア外側境界および天然バリア下流側境界（ここでは坑道からの距離100mと仮定）における移行率の時間変化を算出した（NUMO, 2011d）。

4. 一次元マルチチャンネルモデルの作成

三次元物質移行解析からの移行率の基本解と一次元モデルからの移行率との差が最小となるように、EBS フィッティング係数を算出した（NUMO, 2011d）。また、続いて、EBS フィッティング係数と同様な考え方で、母岩亀裂の透水量係数の重み分布（NBS フィッティング係数）を調整し、三次元物質移行解析の母岩からの移行率を近似した（NUMO, 2011d）。

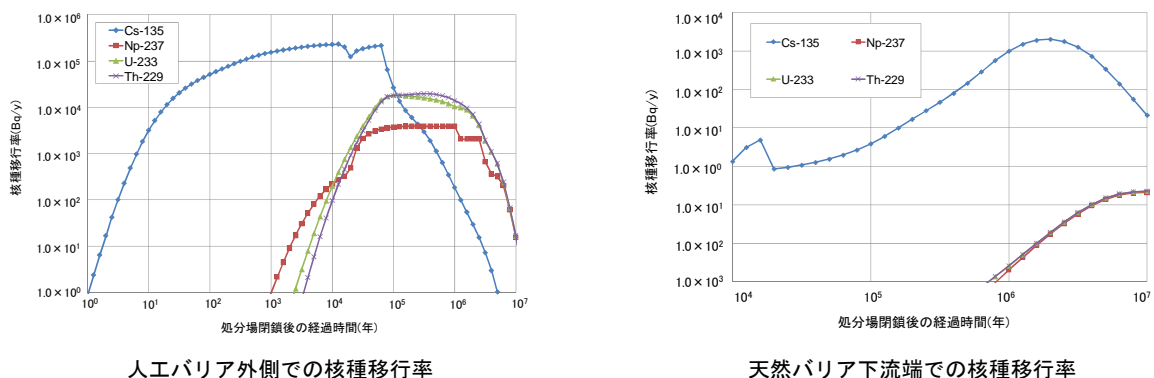
5. 核種移行解析

上記のようにして作成した一次元マルチチャンネルモデルを用いて核種移行解析を実施した (NUMO, 2011d)。

データセットは、第2次取りまとめにおいて設定されたもののうち、降水系および海水系地下水、先新第三紀堆積岩などのデータを用いた。対象核種は、第2次取りまとめにおける種々の解析ケースにおいて、最大被ばく線量に寄与した核種である Cs-135 および Np 系列とした。すでに述べたように、ここでは6個の処分パネルのうち、最も海側の処分パネルのみ環境変遷が生じており、変動の生じる時期に対応して入力データセットを切り替えた。

核種移行解析を行った結果を参考図 2-7 に示す。核種移行解析結果の特徴は、以下のようにまとめることができる。人工バリアからの核種移行率は、100 万年後までにはほぼ最大値 (Np 系列の場合は定常値) に到達している。また、人工バリア外側境界における Cs-135 と Np-237 の移行率の最大値が最も海寄りの処分パネルで摂動している様子が見られ、これは 1.5 万年後に水質が海水系から降水系へと変化することに対応している。さらに、天然バリア下流端の Cs-135 移行率の最大値は約 100 万年経過時点で生じているのに対して、Np 系列の移行率が最大値に到達するのはおよそ 1,000 万年後である。

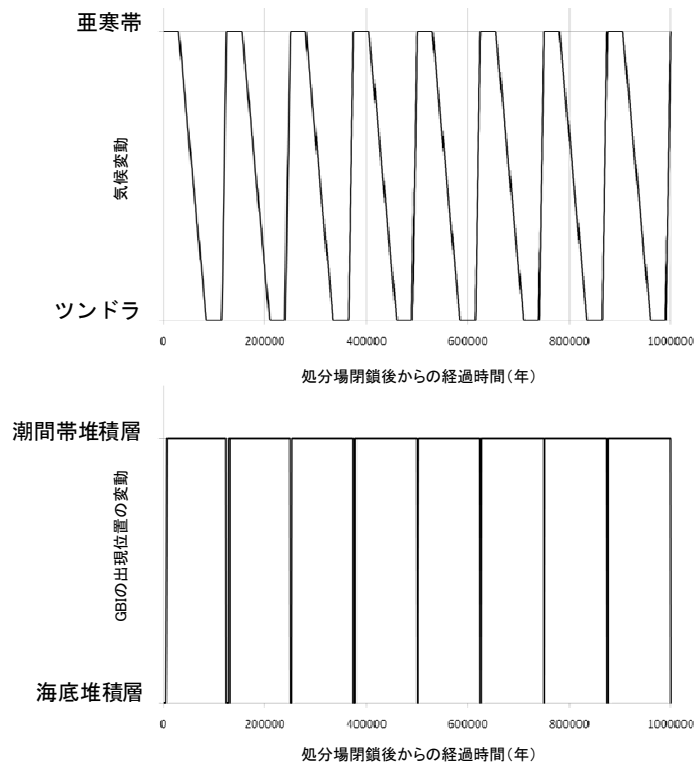
最も海寄りの処分パネルでは初期の地下水水質が塩水であり、母岩および緩衝材における Cs の分配係数は淡水の場合の 1/10 程度であるため、塩水環境である 1.5 万年の間に天然バリア下流端において最大値の 1/1,000~1/100 程度の核種移行率が生じている。



参考図 2-7 廃棄体一体当たりの核種移行率 (最も海寄りの処分パネル)

6. 被ばく線量の算出

核種移行率をもとに被ばく線量の算出を行うため、7.3.3.1 で述べた環境変遷を考慮した生物圏モデルを用いた。具体的には、以下のような環境変遷をモデルに取り入れた。生物圏各構成要素に関して想定すべき将来の変遷を記述することが必要であるが、ここでは、人間活動に影響を与えると考えられる気候変動 (亜寒帯→ツンドラ→冷温帯…) と、生物圏への核種の流入に関する GBI の変遷 (海底堆積層→潮間帯堆積層→海底堆積層…), 海域と陸域間の核種移行率に影響を与える海水準変動速度を考慮した。このうち、気候と GBI の環境変遷を参考図 2-8 に示す。



参考図 2-8 気候（上）および GBI（下）変化の時期についての長期変遷

このような生物圏モデルを用いて、汎用の生物圏評価コードである AMBER に支配方程式と各種パラメータを入力して生物圏評価を行った (NUMO, 2011d)。この評価では、個々の放射性核種および崩壊系列の親核種の GBI への移行率を仮定して、各被ばくグループに与える線量を算出し、被ばく線量換算係数とした。

このように、前出のシナリオにおける環境条件と核種移行場のタイプおよび不均質場における廃棄体の区分に従って GBI ごとに算出する核種移行率に対して被ばく線量換算係数を設定し、核種移行解析の結果に乗じることによって、全体システムについての安全評価結果を得る。

参考図 2-9 に、天然バリア下流端での核種移行率に対して、GBI の切り替わりを考慮して、期間ごとに設定した換算係数を用いて被ばく線量を算出した結果を例示した。GBI は海水準変動に応じて変化し (-300m~4,000m の範囲)、参考図 2-6 に示したように位置によって環境が海底と陸域の間で切り替わる時期も異なることから、GBI の範囲の両端 (-300m および 4,000m) における切り替わり時期を用いた解析をそれぞれ行った。

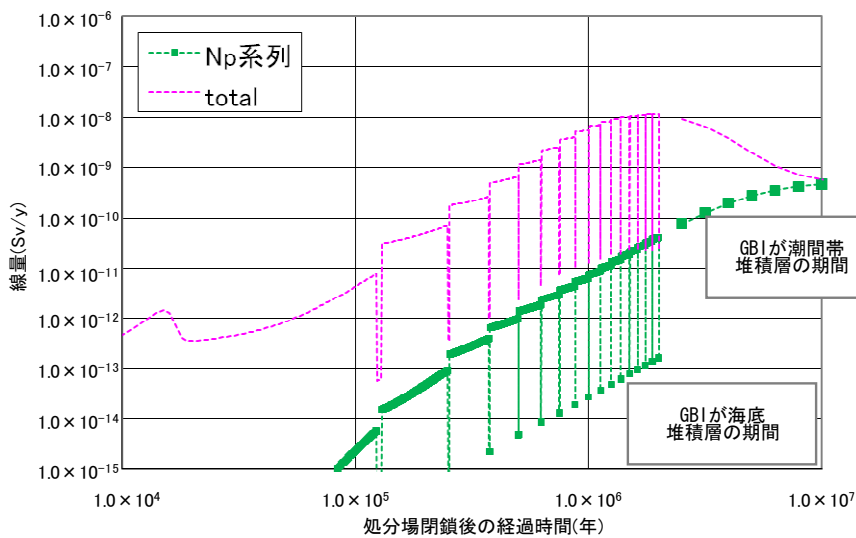
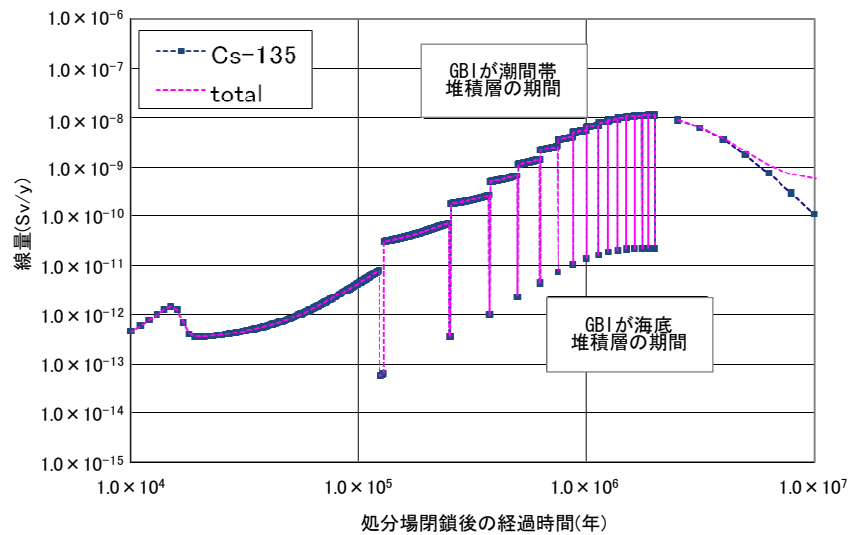
また、各図において、マーカー (Cs-135 については紺色の正方形, Np 系列については緑色の正方形) を付けた部分が該当する GBI に対応する被ばく線量であり、赤色の点線が各核種による被ばく線量の総和を示す。なお、いずれのケースにおいても農業従事者の被ばく線量が海洋漁業従事者を 1 桁程度上回る結果となったため、ここでは、前者についての算出結果のみを示す。

これらの解析結果の主要な特徴およびケース間の差異は以下のようにまとめることができる。

- GBI が海底（海底堆積層）に位置する期間の被ばく線量は、GBI が陸域（潮間帯堆積層）に

位置する期間よりも 2 桁程度以上小さく、また、GBI が海底から陸域に推移した直後には、前述の核種を保持している海底堆積層の陸化による被ばく線量の増大が生じている。

- GBI の環境切り替わり時期の影響は、初期の 10 万年程度の期間においては顕著であるが、それ以降の期間では必ずしも大きくない。
- 100 万年後までの期間においては、Np 系列による被ばく線量は Cs-135 に比して小さく、総線量への寄与は無視し得る程度である。



参考図 2-9 GBI の環境変遷を考慮した被ばく線量の算出結果

(GBI の環境変遷時期を最も海側の地点 (現在の汀線から沖合に 300m) で代表した場合)

参考資料 3 三次元核種移行モデルの例題への適用

7.3.3.2 では、母岩の不均質性および処分場の設計を考慮した核種移行解析モデルを示した。ここでは、この核種移行モデルを、さまざまな例題へ適用した内容について述べる。具体的には、複数の母岩、廃棄体の縦置きと横置きの違い、坑道と直交する断層と廃棄体との離隔について検討した結果について述べる (NUMO, 2011d)。

1. 複数の母岩への適用

母岩の透水性は地層処分システムの性能に影響を及ぼすものとして最も重要性の高いものの一つである。従って、断層や破碎帯などの出現頻度の異なる高透水性構造が分布するために、スケールごとに平均的な透水性が異なり、スケールによらず一つの透水係数値によって代表することは適切ではない。例えば、透水性がほぼ一様に 10^{-9} m/s の岩盤と、 10^{-10} m/s 程度の健全部と数 10m 間隔で分布する 10^{-7} m/s 程度の破碎帯を有する巨視的平均透水係数 10^{-9} m/s の岩盤とでは天然バリアとしての安全性能は大きく異なる可能性がある。そこで、健全部、ブロックスケール、各スケール、処分パネルスケールごとの平均透水係数を定義する。本検討で考慮した不均質透水係数場の例を岩種ごとに参考表 3-1 に示す。

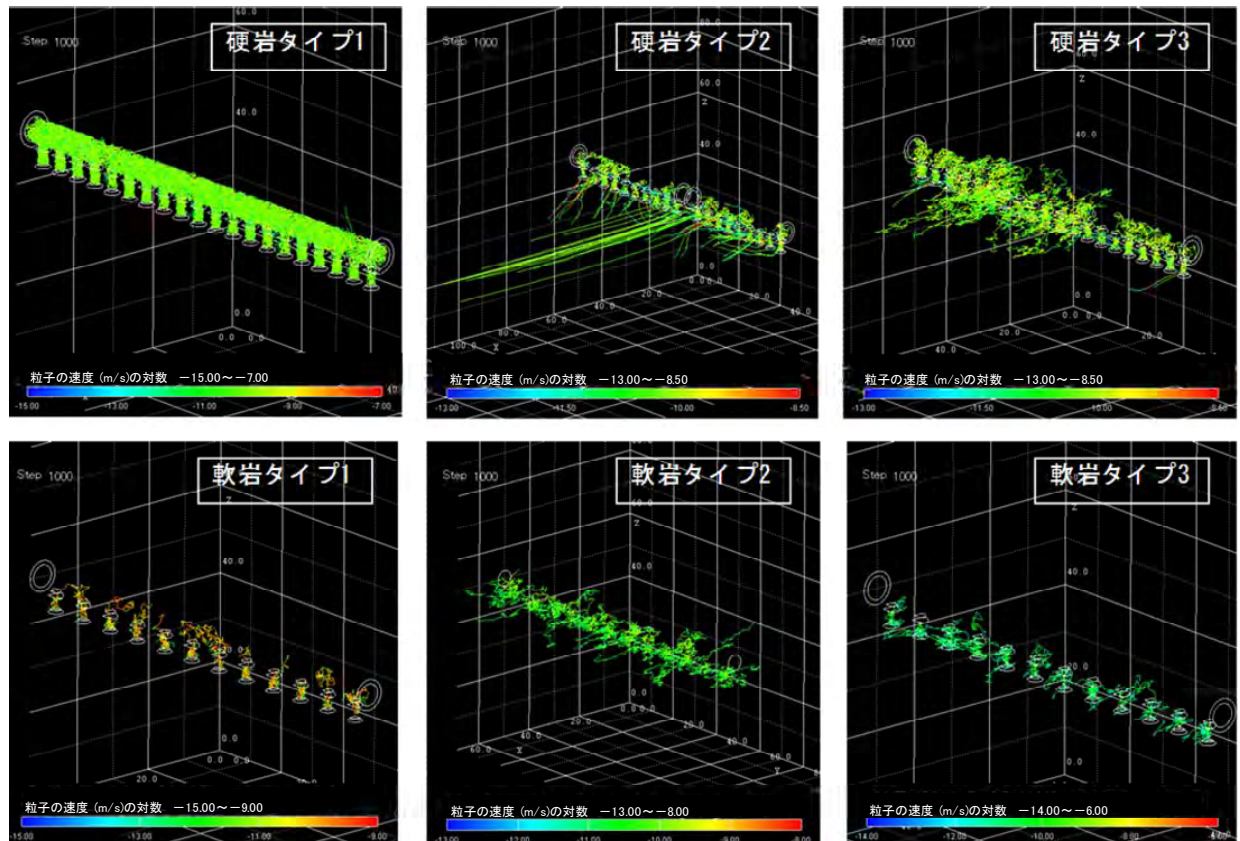
参考表 3-1 試行で想定した不均質透水係数場の例

岩種	タイプ	マトリクス透水性 (亀裂透水性)	平均透水係数 (m/s)			該当する地質環境の事例	モデル	備考
			健全部	ブロックスケール	処分パネルスケール			
結晶質岩 堆積硬岩 (硬岩)	1	低 (低)	10^{-10}	10^{-10}	10^{-8}	第2次取りまとめレファレンス	亀裂	難透水性のマトリクスおよび等方的で低頻度かつ低透水性の亀裂ネットワークがランダムに分布している
	2	低 (高)	10^{-8}	10^{-7}	10^{-7}	花崗岩		個々の亀裂の透水性が高く、ブロックスケールではより高透水性の断層が分布している
	3	低 (低)	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	付加体		個々の亀裂の透水性は低いが頻度が極めて高く明瞭な異方性を示す。
堆積軟岩 (軟岩)	1	低 (低)	10^{-10}	10^{-10}	10^{-9}	新第三紀堆積軟岩 (深部)	亀裂 または 多孔質	地圧のために亀裂 (等方的/低頻度) は閉塞しマトリクス部も圧密されている
	2	高 (低)	10^{-8}	10^{-8}	10^{-7}	新第三紀—第四紀砂岩 + 凝灰岩	多孔質	亀裂は極めて低頻度のため平均透水係数にはほとんど寄与しない
	3	高 (高)	10^{-8}	10^{-8}	10^{-7}	新第三紀堆積軟岩 (浅部)	亀裂 および 多孔質	マトリクス部の層理面および亀裂が開いているためいずれも一定の透水性を示す。ブロックスケール以上では透水性の高い割れ目帯が含まれる

* 透水係数の数値はいずれもおよその数値でありオーダーを表現したものである

上述した 6 種類の岩種それぞれにおける核種移行挙動の特徴を比較することを目的として、三次元核種移行解析モデルを用いて解析を行った。

6種類の岩種に対して算出したダルシー流速場（NUMO, 2011d）に基づき、各要素に含まれる亀裂中の実流速およびマトリクス中の流速を推定し、核種移行解析を行った。ここで、粒子は放射性壊変しないCs同位体であるとし、緩衝材およびそれぞれの母岩での分配係数を仮定して各ケースにおいて合計10万個程度を24体のガラス固化体内に入力して、その後の挙動を解析した。少数（100個）の粒子をランダムに抽出し、10万年後までの軌跡を描画した結果を参考図3-1に示す。軌跡の色は、各タイムステップにおける粒子の移動速度を表現している。



参考図 3-1 各岩種に対応した少数の粒子軌跡（各ガラス固化体でパルス入力：10 万年後）

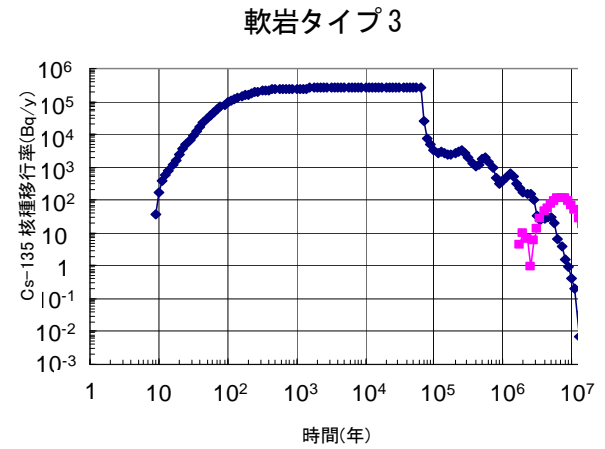
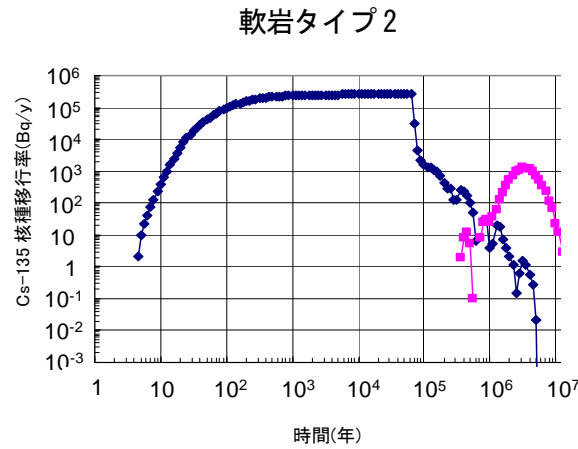
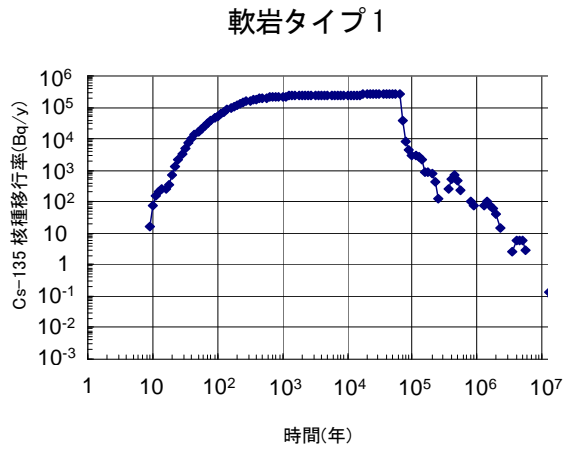
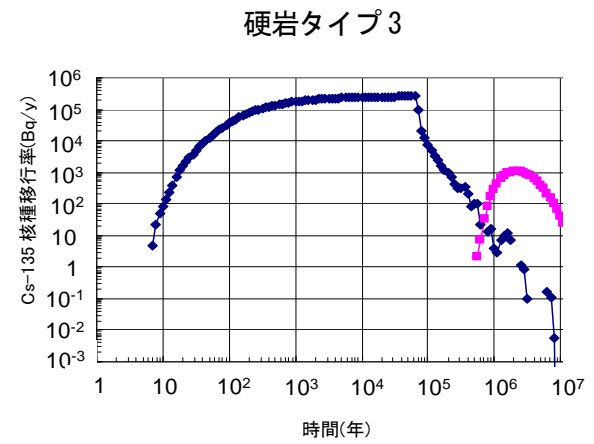
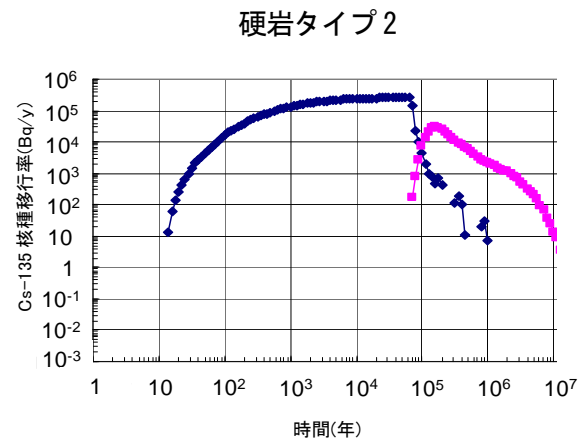
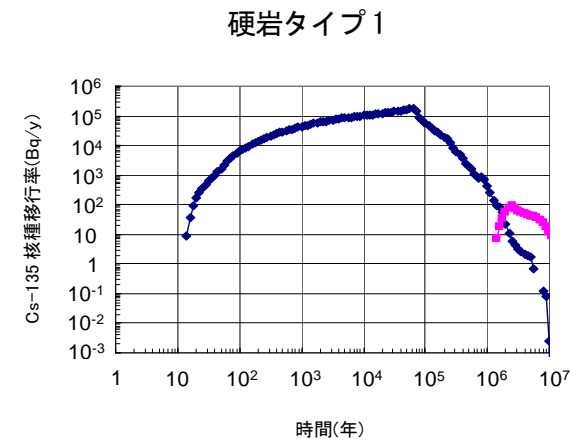
硬岩タイプ1では、亀裂頻度が低いために母岩の透水性が小さく、また、空隙率および実効拡散係数も小さいために、緩衝材および上部坑道埋め戻し材中の核種移行の方が周辺の母岩中の核種移行よりも顕著に速く、各粒子は、緩衝材および埋め戻し材の内部を拡散によりランダムに移行する（緩衝材および埋め戻し材の内部が粒子軌跡によって充たされていることと対応する）。そして、10万年後には、坑道と交差する少数の透水性亀裂に沿って母岩中を移行する粒子の軌跡がいくつか見ることができ（上部坑道から斜め上方に移行する軌跡群）。これに対して、透水性亀裂の頻度が顕著に高い硬岩タイプ2およびタイプ3では、各処分孔においてこれらの亀裂との交差部が存在していることからガラス固化体から緩衝材に至った核種は上部坑道に拡散する以前に処分孔から亀裂へと移行している。また、硬岩タイプ2では、坑道中央部で幅5mの高透水性断層と直交しているために、断層内での粒子の移動が卓越して生じているのに対して、硬岩タイプ3では、複雑な形状で分布する割れ目帯に沿って母岩中の卓越した核種移行経路が生じていることが分かる。低透水性の均質連続体である軟岩タイプ1では、坑道近傍は母岩中でも拡散支配の場であり、粒子は等方的に

広がっている。また、粒子は10万年後でも坑道の直近に留まっている。一方、マトリクスが透水性であり顕著な移流が生じている軟岩タイプ2およびタイプ3ではマトリクス内を拡散でランダムに移行する粒子軌跡が時間とともに地下水流動方向（左側）に徐々に推移していることが分かる。解析領域内に含まれる24体のガラス固化体中に時刻0で入力した約10万個の粒子のその後の挙動は、それぞれの不均質場における拡散—移流方程式の基本解とみなすことができる。そこで、ソースタームとして、第2次取りまとめレファレンスケースと同様に、ガラス固化体の浸出率律速（溶解期間7万年）を仮定してこの基本解に対する畳み込み積分を行い、さらに、Cs-135の半減期（約230万年）に対応した減衰の係数を乗ずることによって、同じく、人工バリア外側境界および解析領域下流端でのCs-135の移行率を算出することができる。

上述した手法によって各岩種についてのCs-135の人工バリア外側境界および解析領域下流端での移行率を算出した結果を参考図3-2に示す。

いずれの岩種においてもCs-135の人工バリア外側での核種移行率に顕著な差異は認められない。これは、Cs-135の放出率がガラス固化体からの浸出率で規定されていること、および人工バリア外側の地下水流速の感度が顕著ではない範囲にあるためである。一方、解析領域下流端での移行率には、以下に述べるような特徴を把握することができる。

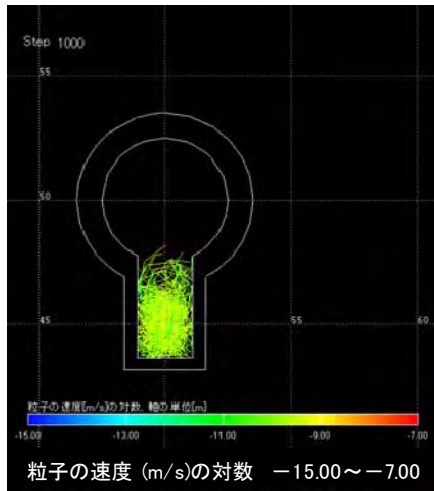
- ・ 低透水性の均質な連続体である軟岩タイプ1では、下流端での移行率は極めて小さい（ガラス固化体1体当たりの移行率が 10^3 Bq/y以下であるため図中には表示されていない）。
- ・ 亀裂の頻度が低く透水量係数も比較的小さい硬岩タイプ1および低透水性のマトリクスに規定された軟岩タイプ3における最大移行率はいずれも 10^2 Bq/y程度であるが、ピークの出現時期は亀裂の影響の顕著な硬岩タイプ1の方が早い。
- ・ 硬岩タイプ3と軟岩タイプ2における最大移行率はいずれも 10^3 Bq/y程度であるが、ピークの出現時期は亀裂を含む硬岩タイプ3の方が若干早い。
- ・ 硬岩タイプ2は、中央の大規模な断層のために顕著に最も高い被ばく線量（ 10^4 Bq/y程度）を示し、また、断層を経路とした核種移行率とそのほかの部分のより遅く小さい核種移行率とが重なりあっているものと推定される。



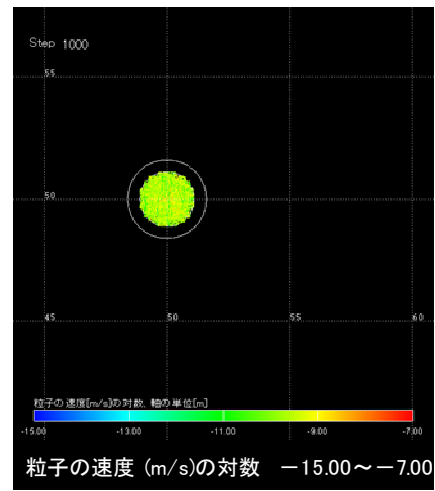
参考図 3-2 Cs-135 移行率（ガラス固化体 1 体当たりの平均）の時間変化
 （青色のプロットは人工バリアからの核種移行率を、ピンク色のプロットは母岩からの核種移行率を示す。）

2. 縦置きと横置きの比較

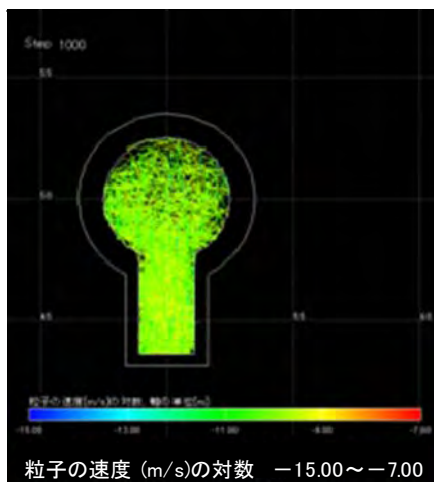
第2次取りまとめの安全評価において想定した岩盤においては、緩衝材中の拡散による核種移行の方が岩盤中のマトリクス拡散も考慮した平均的な移動よりも速いものである。このため、横置きの場合には、ガラス固化体から放出された核種はまず緩衝材中に貯留される（参考図 3-3）。この時点での緩衝材間隙水中での核種濃度は、可溶性の核種（Cs-135 など）の総インベントリが緩衝材中で収着分配平衡にあるものとして算出した空隙水中濃度とほぼ等しいものである。



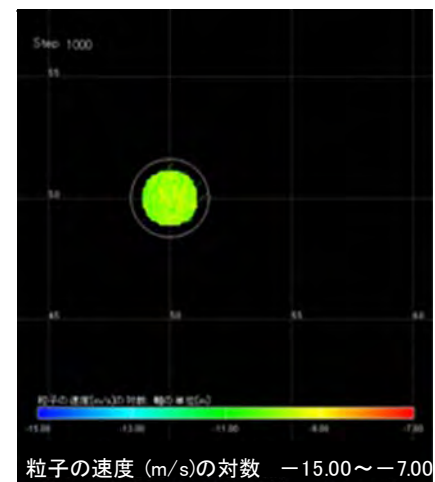
(a) 縦置き (1,000 年)



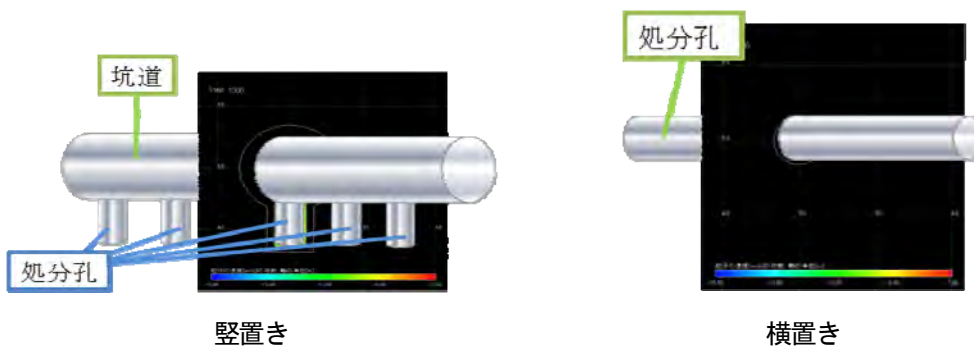
(b) 横置き (1,000 年)



(c) 縦置き (1 万年)

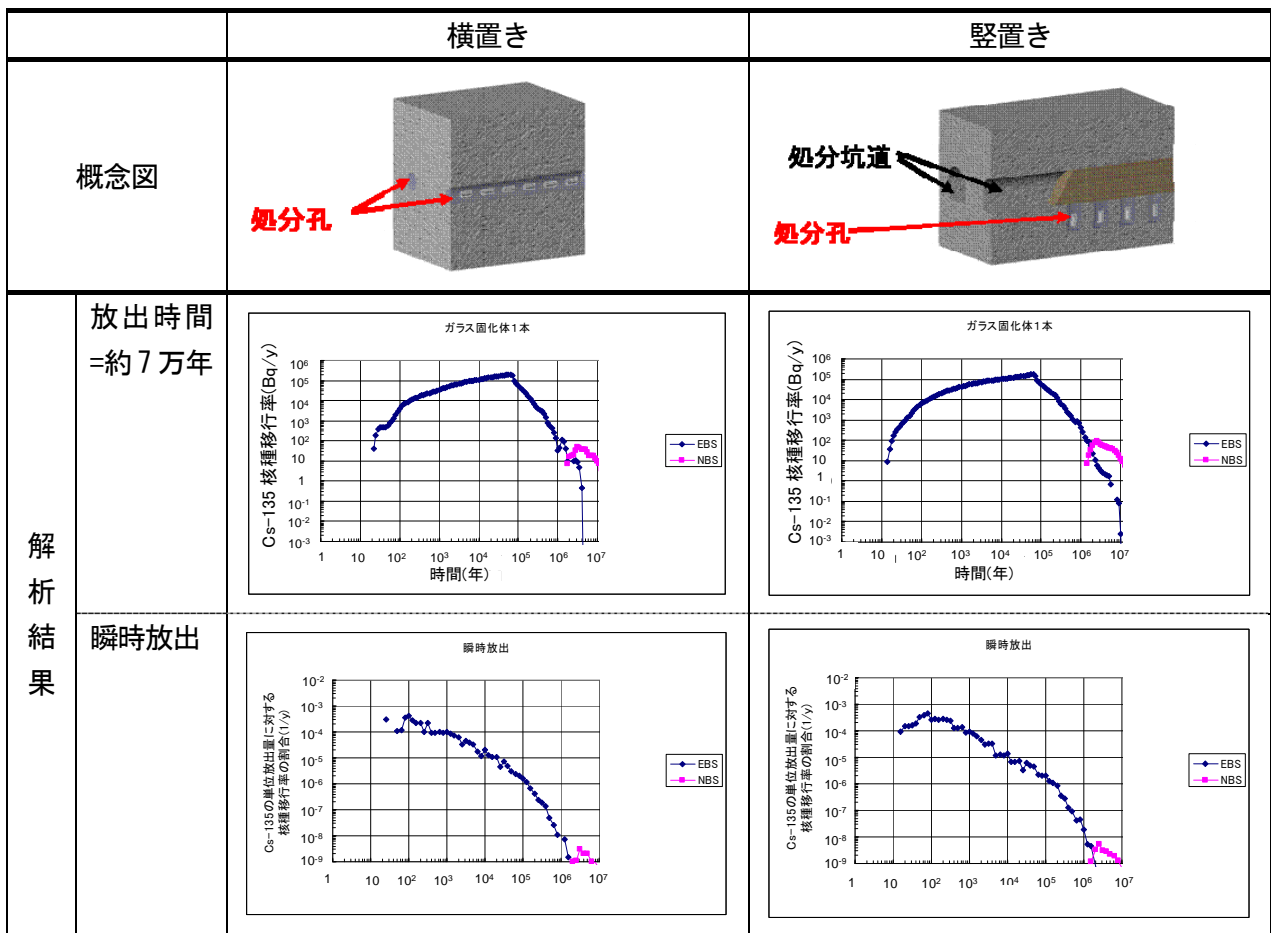


(d) 横置き (1 万年)



参考図 3-3 ニアフィールド内の Cs-135 の軌跡 (硬岩タイプ 1)

その後、時間をかけて岩盤中に移行していくが、この岩盤中への核種移行率の最大値は上記の緩衝材中の核種濃度によって影響を受ける。このような観点からは、縦置きの場合には、処分孔内の緩衝材に加えて上部坑道内に埋め戻し材が存在し、かつ、後者の体積が支配的であるために、この場合の緩衝材中濃度は横置きの場合よりも顕著に低減されるはずである。しかしながら、実際には、縦置きの場合に廃棄体から移行する核種が上部坑道内の埋め戻し材に至るまでには長期間を要し、周囲の母岩への核種移行はそれ以前に生じるために、縦置きの場合にも、周辺母岩への核種移行率は処分孔内の緩衝材中の収着を考慮した平衡濃度によって規定される。そして、第2次取りまとめの設計では、縦置きの場合も横置きの場合も廃棄体一体当たりの緩衝材体積は同等であることから、母岩への核種移行率の最大値を規定する緩衝材空隙水中の分配平衡の核種濃度もほぼ等しい。このため、ほぼ同等の岩盤を想定したケースにおいて算出された人工バリアからの核種移行率の最大値は縦置きおよび横置きの場合でほぼ等しいという結果を得ている（参考図 3-4 参照）。このような設計オプションに対応した核種移行挙動の定量的な比較とその解釈は、本項で述べる詳細な核種移行解析手法を用いることの重要なメリットの一つである。

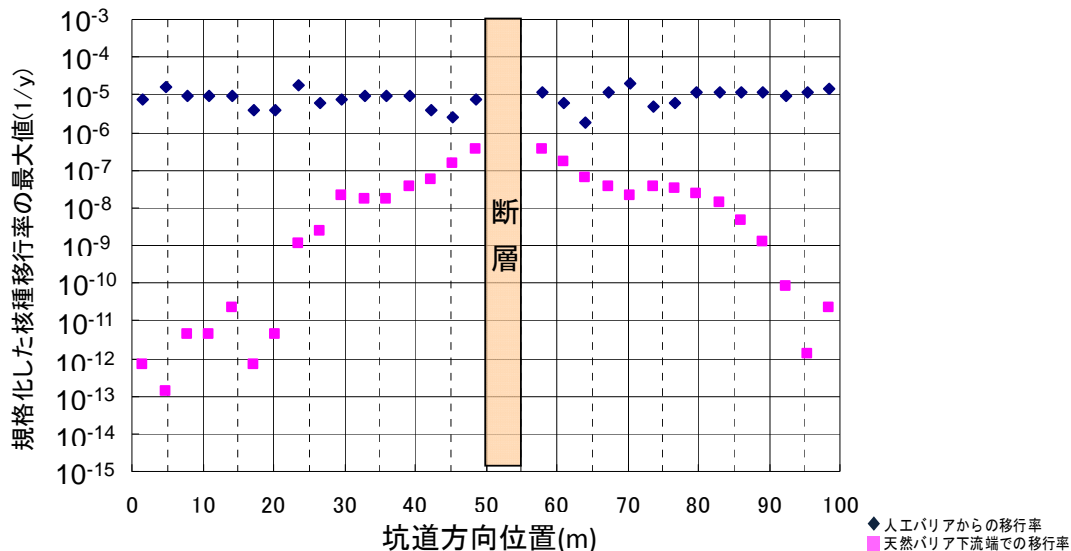


(◆: EBS (人工バリア) からの核種移行率の割合, ■: NBS (母岩) からの核種移行率の割合)

参考図 3-4 縦置きおよび横置きの核種移行率の比較

3. 断層からの離隔に関する知見（硬岩タイプ2の場合）

坑道の中央部で直交する幅 5m の高透水性断層を有する硬岩タイプ 2 の解析領域下流端での Cs-135 の移行率は、この断層のために最も高い移行率 (10^4Bq/y 程度) を示し、また、断層を経路とした核種移行率とそのほかの健全部のより小さい核種移行率とが重なりあっているものと推定される。そこで、解析対象領域に含まれる約 30 体の廃棄体それぞれから移行した核種の人工バリアおよび下流端での移行率の最大値（パルス入力に対するものであり、畳み込み積分は行っていない）を比較した。断層直近の廃棄体からの移行率の最大値は十分離れた廃棄体よりも 2 桁程度大きく、また、断層の集水域に対応して約 30m 以内にある廃棄体からの核種移行率の最大値には有意な影響があることが分かった。また、Np-237 についても同様の解析を行い、解析対象領域に含まれる約 30 体の廃棄体それぞれから移行した核種の人工バリアおよび下流端での移行率の最大値（パルス入力に対する）を比較した結果を参考図 3-5 に示す。この比較結果より、断層直近の廃棄体と断層から十分離れた廃棄体間の移行率最大値の差は約 6 桁に達しており、断層の影響がより顕著であることが分かる。



参考図 3-5 Np-237 移行率最大値（パルス入力に対する）の廃棄体依存性（硬岩タイプ2）

一方、坑道および掘削影響領域にベントナイトプラグによる止水工を施した場合でも母岩中の透水性亀裂のために坑道と断層をつなぐ短絡路が多数存在しており、止水工の効果は有意なものとはならないことが分かった。

参考文献

- ANDRA (2005) : Dossier 2005 Argile.
- BIOCLIM (2004) : Development and Application of a Methodology for Taking Climate-Driven Environmental Change into Account in Performance Assessments. BIOCLIM Deliverable pp.D10-12.
- BIOMOVS II (1996) : Development of a Reference Biospheres Methodology for Radioactive Waste Disposal, BIOMOVS II Technical Report No. 6, published on behalf of the BIOMOVS II Steering Committee by the Swedish Radiation Protection Institute, Sweden.
- 電事連 (電気事業連合会)・JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005a) : TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02..
- 電事連 (電気事業連合会)・JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005b) : TRU 廃棄物処分技術検討書 根拠資料集, FEP 辞書.
- 電中研 (電力中央研究所) (2005) : 核燃料サイクル関係推進調整等(放射性廃棄物等広報対策等－放射性廃棄物処分におけるセーフティケースに関する社会的受容性調査).
- 土木学会 (2006) : 精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方, 土木学会原子力土木委員会地下環境部会.
- 土木学会 (2008) : 余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方, 土木学会エネルギー委員会低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会.
- 江橋健, 小尾繁, 大井貴夫 (2009a) : 高レベル放射性廃棄物地層処分における性能評価パラメータの安全裕度評価方法の例示, 原子力バックエンド研究, Vol.15, No.2, pp.99-115..
- 江橋健, 川村淳, 稲垣学, 小尾繁, 柴田雅博, 板津透, 仲島邦彦, 宮原要 (2009b) : 仮想的な堆積岩分布域における地層処分の地下水シナリオを対象とした隆起・侵食の影響評価手法の例示, JAEA-Research 2008-117.
- Ebashi, T., Ishiguro, K., Wakasugi, K., Kawamura, H., Gaus, I., Vomvoris, S., Martin, A. J. and Smith, P. (2010) : Trends in Scenario Development Methodologies and Integration in NUMO's Approach, Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM2010), ICEM2010-40124.
- ENSI (2009) : Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis, Erläuterungsbericht zur Richtlinie, ENSI G-03.
- European Commission (1995) : Review on development of methodologies for modeling with uncertainty and variability : Munvar project, EUR1617EN, 1995.
- 藤原治, 柳田誠, 三箇智二, 守屋俊文 (2005) : 地層処分からみた日本列島の隆起・侵食に関する研究, 原子力バックエンド研究, vol. 11, No. 2, pp.113-124.
- Fukuchi, T., Yurugi, J., and Imai, N. (2007) : ESR detection of seismic frictional heating events in the Nojima fault drill core samples, Japan. Tectonophysics, Vol.443, pp.127-138.
- GoldSim Technology Group (2010) : GoldSim User's Guide.
- 原子力安全委員会 (2004) : 放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について.
- 原子力安全委員会 (2010) : 余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する技術資料 (案), 原子力安全委員会放射性廃棄物廃止措置専門部会.

- 原子力委員会 (1997) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について, 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会.
- 長谷川琢磨, 田中靖治, 馬場保典, 五十嵐敏文 (2004) : Aspo Hard Rock Laboratory 建設に伴う地下水流動の変化に着目した解析モデルの検証, 土木学会論文集, No. 757/III-66, pp.189-202.
- 林真紀, 佐竹憲治, 吉川英樹, 油井三和 (2005) : ガラスの溶解速度データベースの構築, JNC TN8400 2005-008.
- 放医研 (放射線医学総合研究所) (2008) : 平成 19 年度放射性廃棄物共通技術調査等委託費, 放射性核種生物圏移行評価高度化調査.
- 放医研 (放射線医学総合研究所) (2009) : 平成 20 年度放射性廃棄物共通技術調査等委託費, 放射性核種生物圏移行評価高度化調査.
- 放医研 (放射線医学総合研究所) (2010) : 平成 21 年度放射性廃棄物共通技術調査等委託費, 放射性核種生物圏移行評価高度化調査.
- IAEA (1995) : The Principles of Radioactive Waste Management, IAEA, Safety Series No. 111-F, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2003) : “Reference Biospheres” for Solid Radioactive Waste Disposal : Report of BIOMASS Theme 1 of the BIOSphere Modelling and ASSEssment (BIOMASS Programme). IAEA-BIOMASS-6, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2005) : Natural activity concentrations and fluxes as indicators for the safety assessment of radioactive waste disposal, Results of a coordinated research project, IAEA-TECDOC-1464, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2007) : Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection 2007 edition, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2009) : Disposal of Radioactive Waste, Draft Specific Safety Requirements No.SSR-5 DS354 Draft4, International Atomic Energy Agency.
- ICRP (2000) : Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long lived Solid Radioactive Waste, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 81, Pergamon Press, Oxford and New York.
- 稲垣学, 加藤智子, 吉田英爾, 小山田潔, 深谷友紀子, 鈴木祐二, 大井貴夫 (2007) : 表層での水理・物質移行を考慮した生物圏における評価に関する検討, JAEA-Research 2007-029.
- 稲垣学, 蛭名貴憲 (2009) : 処分環境や設計オプションに対応した性能評価手法の構築 (2), JAEA-Research 2008-114.
- Ishiguro, K., Ueda, H., Wakasugi, K., Sakabe, Y., Kitayama, K., Umeki, H. and Takase, H. (2007) : EBS Modelling for the Development of Repository Concepts Tailored to Siting Environments, Engineered Barrier Systems(EBS)in the Safety case: The role of modeling, Workshop proceeding La Coruna, 24-26 August 2005, OECD/NEA.
- Ishimaru, T. and Shimizu, I. (1997) : Groundwater pressure changes associated with earthquakes at the Kamaishi Mine, Japan: A study for stability of geological environment in Japan, Proc. 30th International Geological Congress, Vol.24, pp.31-41.
- 板津透, 稲垣学, 加藤智子, 鈴木祐二, 小山田潔, 江橋健, 川村淳, 蛭名貴憲, 宮原要 (2009) : 表層環境を考慮した生物圏評価手法の構築に関する検討, JAEA-Review 2009-015.
- JAEA (日本原子力研究開発機構) (2009) : 平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 地層処分共通技術

調査 地質環境総合評価技術高度化開発.

JAEA (日本原子力研究開発機構) (2010a) : KMS, http://kms1.jaea.go.jp/kmsif/kms_login.html. (参照 2010年4月19日)

JAEA (日本原子力研究開発機構) (2010b) : KMS, http://kms1.jaea.go.jp/PAIRS/PAIRS_info.html. (参照 2010年4月19日)

JAEA (日本原子力研究開発機構) (2010c) : カーネル【性能評価研究】, http://kms1.jaea.go.jp/CoolRep/images/stories/Kernel%20Seinohyouka_0613.pdf. (参照 2010年4月19日)

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

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

JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—分冊 3 安全評価手法の開発, JNC TN1400 2005-016..

神崎裕, 武田聖司, 木村英雄 (2009) : 高レベル放射性廃棄物処分における地下水移行に係わる安全評価のシナリオ構築のための FEP データベース (受託研究), JAEA-Data/Code 2009-011.

加藤大生, 嶺達也, 三原守弘, 大井貴夫, 本田明 (2001) : セメント系材料に対する核種の収着データベースの整備, JNC-TN8400 2001-029.

加藤智子, 鈴木祐二, 牧野仁史, 内田雅大, 宮本陽一, 内藤守正, 若杉圭一郎, 奥山茂, 浦上学, 石黒勝彦, 北山一美 (2005) : 生物圏データの重要度に関する検討, NUMO-TR-05-01, JNC TN1400 2005-024.

加藤智子, 鈴木祐二 (2008) : 地層処分生物圏評価における感度解析による重要パラメータの抽出に関する検討, JAEA-Research 2008-021.

Kato, T., Suzuki, Y. and Ohi, T. (2009) : Development of the methodology on priority of element-specific biosphere parameters for geological disposal applicable to any proposed repository site, Jpn. J. Health Phys., 44 (1), pp.72-79.

川村淳, 大井貴夫, 新里忠史, 安江健一, 常盤哲也, 丹羽正和, 島田耕史, 黒澤英樹, 浅森浩一, 河内進, 江橋健, 北村暁, 石丸恒存, 牧野仁史, 梅田浩司, 瀬尾俊弘 (2008) : 高レベル放射性廃棄物地層処分における天然現象影響評価に関する研究, JAEA-Research 2008-018.

Kawamura, M., Yasue, K., Niizato, T. and Tanikawa, S. (2010) : Development of Methodology to Construct a Generic Conceptual Model of River-Valley Evolution for Performance Assessment of HLW Geological Disposal, ICM2010-40137, October 3-7, 2010, Tsukuba, Japan.

川村淳, 江橋健, 牧野仁史, 新里忠史, 安江健一, 稲垣学, 大井貴夫 (2010) : 高レベル放射性廃棄物処分における性能評価のための隆起・侵食に起因する地質環境条件変化の評価方法の検討, 応用地質, 第51巻, 第5号, pp.229-240.

Kessler, J., H. and McGuire, R., K. (1999) : Total System Performance Assessment for Waste Disposal Using a Logic Tree Approach, Risk Analysis, Vol.19, 5, pp.915-931.

Kitamura, A., Fujiwara, K., Doi, R., Yoshida, Y., Mihara, M., Terashima, M. and Yui, M. (2010) : JAEA thermodynamic database for performance assessment of geological disposal of high-level radioactive

- and TRU wastes, JAEA-Data/Code 2009-024.
- 小尾繁, 稲垣学 (2010) : Goldsim による核種移行パラメータの時間変化を考慮した地層処分核種移行解析モデルの構築, JAEA-Data/Code 2010-006.
- Kurikami, H., Suzuki, S., Wakasugi, K., Ueda, H., Ishiguro, K., Tsuchi, H., Kaku, K., Gaus, I. and Vomvoris, S. (2009) : Study on strategy and methodology for repository concept development for the Japanese geological disposal project, NUMO-TR-09-04.
- 牧野仁史, 川村淳, 若杉圭一郎, 大久保博生, 高瀬博康 (2007) : 高レベル放射性廃棄物地層処分安全評価のシナリオ解析のための計算機支援ツールの開発, JAEA-Data/Code 2007-005.
- 牧野仁史, 澤田淳, 前川恵輔, 柴田雅博, 笹本広, 吉川英樹, 若杉圭一郎, 小尾繁, 濱克宏, 操上広志, 國丸貴紀, 石井英一, 竹内竜史, 中野勝志, 三枝博光, 竹内真司, 岩月輝希, 太田久仁雄, 瀬尾俊弘 (2005) : 地質環境の調査から物質移行解析にいたる一連の調査・解析技術 — 2つの深地層の研究施設計画の地上からの調査研究段階 (第1段階)における地質環境情報に基づく検討—, JNC TN1400 2005-021.
- Mihara, M. and Sasaki, R. (2005) : Radio-nuclides Migration Datasets (RAMDA) on Cement, Bentonite and Rock for the performance assessment of TRU Waste Repository in Japan, JNC-TN8400 2005-027.
- Miyahara, K. and Kato, T. (2007) : “Illustration of HLW repository performance: using alternative yardsticks to assess modeled radionuclide fluxes”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXI, MRS Symposium Proceedings, Vol.1107, pp.673-680.
- Miyahara, K., Inagaki, M., Kawamura, M. and Ebina, T. (2008) : “What-if?” Calculations to Illustrate Fault-Movement Effects on a HLW Repository, Proceedings of International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas, Nevada, September 7-11, 2008, pp.593-599.
- Miyahara, K., Inagaki, M., Kawamura, M., Ebina, T. and I. G. McKinley (2009) : “Disruptive effects on a HLW repository due to uplift-erosion in the distant future”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXIII, Mat. Res. Soc. Sym. Proc., Vol.1193, pp.177-184.
- Murakami, H. and J. Ahn (2008a) : Development of Geologic Repository Models for Design and Decision Making, proceedings of 16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC), P16P1212.
- Murakami, H. and J. Ahn(2008b) : Development of Compartment Models for Radionuclide Transport in Repository Region, proceedings of 2008 International High-Level Radioactive Waste Conference, Las Vegas, Nevada, September 7-11, 2008.
- Nagra (2002) : Project Opalinus Clay: Safety Report, Nagra Technical Report 02-05, Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Neyama, A., Ishihara, Y. and Fusaeda, S. (1998) : Quality Assurance Program with Computer-Oriented Management System for Performance Assessment, Proc. of the 1998 International High-Level Radioactive Waste Management Conference.
- 日本原子力学会 (2006) : 【標準委員会 技術レポート】 収着分配係数の測定方法—浅地中処分のバリア材を対象としたバッチ法の基本手順及び深地層処分のバリア材を対象とした測定の基本手順—, AESJ-SC-TR001:2006.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2004) : 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性—「処分場の概要」の説明資料—, NUMO-TR-04-01.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2010) : 地層処分技術開発ニーズの整理, ～精密調査地区選定に向けて～, NUMO-TR-10-02.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011a) : 地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安

- 全性, 「処分場の概要」の説明資料, NUMO-TR-10-03.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011b) : 地層処分の要件管理技術, NUMO-TR-10-12.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011c) : 地層処分事業のための安全評価技術の開発 (I) : シナリオ構築技術の高度化, NUMO-TR-10-09.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011d) : 地層処分事業のための安全評価技術の開発 (II) : 核種移行解析モデルの高度化, NUMO-TR-10-10.
- Ochs, M., Kunze, S., Saito, Y., Kitamura, A., Tachi, Y. and Yui, M. (2008) : Application of the Sorption Database to Kd -setting for Horonobe Rocks” , JAEA-Research 2008-017.
- OECD/NEA (1983) : Long-Term Measurement of High-Level Radioactive Waste; The meaning of a Demonstration, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (1991a) : Can Long-term Safety be Evaluated? A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee, OECD/Nuclear Energy Agency, and the International Radioactive Waste Committee, IAEA endorsed by the Experts for the Community Plan of Action in the Field of Radioactive Waste Management, CEC, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (1991b) : Review of Safety Assessment Methods, Disposal of Radioactive Waste, A Report of the Performance Assessment, Advisory Group of the Radioactive Waste Management Committee, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (1997) : Lessons learnt from Ten Performance Assessment Studies, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2000a) : Regulatory Review of Assessments of Deep Geologic Repositories: Lessons Learnt, OECD/Nuclear Energy Agency..
- OECD/NEA (2000b) : Features, Events and Processes (FEPs)for Geological Disposal of Radioactive Waste, An International Database, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2000c) : OECD/NEA International Peer Review of the Main Report of JNC's H12 Project to Establish the Technical Basis for HLW Disposal in Japan, OECD Nuclear Energy Agency International Review Group, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2001) : Scenario Development Methods and Practice, An Evaluation Based on the NEA Workshop on Scenario Development, May 1999, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2002) : Establishing and Communicating Confidence in Safety Case of Deep Geologic Disposal: Approaches and Arguments, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2004a) : Post-closure Safety Case for Geological Repositories - Nature and Purpose-, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2004b) : Safety of Disposal of Spent Fuel, HLW and Long-lived ILW in Switzerland, An international peer review of the post-closure radiological safety assessment for disposal in the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland, ISBN 92-64-02063-2, OECD/Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2004c) : Management of Uncertainty in Safety Cases and the Role of Risk, Workshop Proceedings, Stockholm, Sweden, February 2-4, 2004, OECD Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2008) : Safety Cases for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand?, Symposium Proceedings, Paris, France, 23-25 January 2007, OECD/Nuclear Energy Agency.
- 大井貴夫, 稲垣学, 川村淳 (2008) : シナリオの重要度をわかりやすく提示可能なシナリオ解析手法

の整備, JAEA-Research 2008-023.

- Ohi, T., Takase, H., Inagaki, M., Oyamada, K., Sone, T., Mihara, M., Ebashi, T. and Nakajima, K. (2007) : Application of a comprehensive sensitivity analysis method on the safety assessment of TRU waste disposal in JAPAN. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXX (Mater. Res.Soc. Symp. Proc. Vol. 985), Boston, Massachusetts, U.S.A, November 27-December 1, 2006, pp.129-134.
- Ohi, T., Inagaki, M., Kawamura, M. and Ebashi, T. (2009) : A Systematic Approach to Evaluate the Importance of Concerns Affecting the Geological Disposal of Radioactive Wastes” , Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXII, Mat. Res. Soc. Sym. Proc., Vol.1124, pp.407-412.
- ONDRAF/NIRAS (2001) : Technical Overview of SAFIR-2: Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2, ONDRAF/NIRAS Report NIRON2001-05E, Belgium..
- Osawa, H., Hioki, K., Umeki, H., Takase, H. and McKinley, I. (2009) : Use of the safety case to focus KMS applications, Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Management ICEM'09, 2009.
- POSIVA (2008) : Safety Case Plan 2008, Posiva 2008-05, Finland.
- Ross, T.J., Booker, J.M. and Prkinson, W.J.(2002) : Fuzzy logic and probability applications ; Bridging the gap, Society for industrial and applied mathematics, Philadelphia, 2002.
- 資源エネルギー庁・JAEA (日本原子力研究開発機構) (2006) : TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画.
- SKB (2006) : Long-term safety for KBS-3repositories at Forsmark and Laxemar - a first evaluation, Main Report of the SR-CAN project, SKB Technical Report TR-06-09, SKB, Stockholm, Sweden..
- Smith, G and Kato, T. (2010) : International Collaboration in Assessment of Radiological Impacts Arising from Releases to the Biosphere after Disposal of Radioactive Waste into Geological Repositories, Journal of the Korean Nuclear Society, Nuclear Engineering and Technology, Vol.42, No.1, pp.1-8.
- 鈴木祐二, 加藤智子, 牧野仁史, 大井貴夫 (2006) : TRU 廃棄物処分に特有な放射性核種を考慮した生物圏評価データセットの整備と線量への換算係数の算出, JAEA-Data/Code 2006-011.
- 舘幸男, 栃木善克, 陶山忠宏, 齋藤好彦, Ochs, M., 油井三和 (2009) : 地層処分安全評価のための核種の収着・拡散データベースシステムの開発, JAEA-Data/Code 2008-034.
- 舘幸男, 四辻健治, 陶山忠宏, M. Ochs, 油井三和 (2010) : 地層処分安全評価のために現象論的収着・拡散モデル/データベースの開発ーベントナイト系プロトタイプモデル/データベースの開発ー, JAEA-Research 2009-069.
- 高瀬博康, 稲垣学, 須山泰宏 (2006) : 地質環境条件の空間的不均質性に応じた施設レイアウト等の工学的対策によるシステム全体性能の改善の可能性について, 原子力バックエンド研究, Vol.13, No.1, pp.13-22.
- 高瀬博康, 稲垣学, 野口俊英 (2007) : 幌延深地層研究計画における不確実性を考慮した安全評価手法の検討 (委託研究), JAEA-Research 2007-066.
- 谷口直樹, 川崎学, 内藤守正 (2008) : 緩衝材中における炭素鋼の腐食挙動の実験的検討ー I , -10年間の浸漬試験結果に基づく腐食進展挙動の検討, JAEA-Research 2008-011.
- 栃木善克, 舘幸男 (2009) : 緩衝材及び岩石中での核種の拡散データベースの整備, JAEA-Data/Code 2008-035.
- 栃木善克, 舘幸男 (2010) : 緩衝材及び岩石中での核種の拡散データベースの整備ー海外の緩衝材データの拡充とその活用法ー, JAEA-Data/Code 2009-029.

- Umeki, H., Sakabe, Y., Ueda, H., Takahashi, Y., McKinley, I.G., Takase, H., Shimbo, H. and Ijiri, Y. (2004) : Managing uncertainty on site characteristics for the design of a high-level radioactive waste repository, 3rd Asian Rock Mechanics Symposium, Contribution of Rock Mechanics to the New Century, November 30 , December 2, 2004, Kyoto, Japan.
- U.S.DOE (1998): Viability Assessment of a Repository at Yucca Mountain, U. S. Department of Energy Office of Civilian Radioactive Waste Management, DOE/RW-0508.
- U.S.NRC (2003) : Yucca Mountain Review Plan, NUREG-1804, Revision 2, US Nuclear Regulatory Commission.
- U.S.NRC (2009) : 10 CFR Part 63 - DISPOSAL OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTES IN A GEOLOGIC REPOSITORY AT YUCCA MOUNTAIN, NEVADA.
- Wakasugi, K., Webb, E. K., Makino, H., Ishihara, Y., Ijiri, Y., Sawada, A., Baba, T., Ishiguro, K. and Umeki, H. (2000) : A Trial of Probabilistic Simulation for Reference Case in the Second Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan, Proceedings of the 5th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM5, Osaka, 2000.11.27-12.1), Vol.4, pp.1469-1475.
- 若杉圭一郎, 小尾繁, 牧野仁史 (2002) : モンテカルロシミュレーションによる高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価に対するデータ不確実性解析, サイクル機構技報, No.14, JNC TN1340 2001-010, pp.149-160.
- 若杉圭一郎, 牧野仁史, 小尾繁 (2004) : 核種移行解析における掘削影響領域のモデルバリエーションに関する検討, 原子力バックエンド研究, Vol.10, No.1-2, pp.21-30.
- Wakasugi, K., Ishiguro, K., Kitayama, K., Takase, H., Noguchi, T., Shizawa, A. and Hane, K.(2008) : Development of performance assessment methodologies to evaluate differences among repository design options, 2008 East Asia Forum on Radioactive Waste Management Conference, 20-23 October 2008, Tokyo, Japan.
- Wibberley, C.A.J. and Shimamoto, T. (2003) : Internal structure and permeability of major strike-slip fault zones: The Median Tectonic Line in Mie Prefecture, southwest Japan: Journal of Structural Geology, v. 25 pp. 59-78.
- 吉田英一, 大嶋章浩, 吉村久美子, 長友晃夫 (2009) : 断層周辺に発達する割れ目形態とその特徴—阿寺断層における ‘ダメージゾーン’ 解析の試み—, 応用地質, 第 50 巻, 第 1 号, pp.16-28, 2009, J. Japan Soc. Eng. Geol., Vol.50, No.1, pp.16-28, 2009.