



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—

—地層処分技術の知識化と管理—

2005年9月22日

核燃料サイクル開発機構

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

電話: 029-282-1122 (代表)
ファックス: 029-282-7980
電子メール: jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2005

要 約

第2次取りまとめ以降のサイクル機構の研究開発については、「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の全体計画」（以下、「全体計画」という）が5年の節目を迎え、深地層の研究施設計画が第1段階から第2段階へ移行しつつあること、研究開発を取り巻く国内外の状況が大きく変化していることなどを勘案すれば、その成果を一旦取りまとめ、全体計画で示した個々の研究開発課題に対する達成度と今後の課題を明らかにするとともに、今後行うべき研究開発の方向性を合わせて提示することは意義のあることである。

このためサイクル機構では「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年度取りまとめ—」（以下、「H17取りまとめ」という）として、これを行うこととした。H17取りまとめは、「深地層の科学研究」、「処分技術の信頼性向上」、「安全評価手法の高度化」の3つの分野における研究開発研究開発の進捗を記述した3つの分冊レポートと、これらの研究成果に基づいて知識基盤の構造化を試みた知識化レポートで構成されている。

本書は、地層処分計画の進展のなかで研究開発を捉え、成果を技術基盤として統合するとともに将来の研究開発の優先順位を明らかにするための新たな視点として知識管理（knowledge management）に注目し、「地層処分技術の知識基盤の開発と管理」と題する報告書（知識化レポート）として作成したものである。第2次取りまとめの成果に加え、上記分冊レポートに示された研究開発成果を処分事業と安全規制を支える技術基盤としてより確かなものとするができるよう、必要な科学技術情報を構造化し継続的に最適化していく（知識基盤化）ための考え方を提示することに主眼をおいた。

地層処分の長期安全性確保のための科学技術的基盤は、長期間にわたる事業全体に対する信頼を支えるうえで必須なものであり、最新の研究開発成果を取り込みつつ知識として統合し、これを継続的に管理するための枠組みを整えることが重要である。このような地層処分技術に関する知識は、実施主体や規制機関などのステークホルダーが、安全性を示す様々な論拠や地層処分計画の種々の時間断面において行う意思決定に用いられる。

本報告書では、安全確保策の長期性と事業の長期性という特徴を考慮して地層処分技術を体系的に開発していくため、関連するデータ、情報、知識をセーフティケース概念に基づいて構造化することにより地層処分計画の進展に応じて継続的に管理するための方法論について論じている。

段階的に進められる処分計画において、計画を次段階に進めるかどうかの意思決定のための鍵となる入力情報となることがセーフティケースの本質的な役割である。セーフティケースは、その時点での科学技術的知識を統合することによって段階的に作成され信頼性が高められる。セーフティケースの作成における様々な情報の統合作業を通じて、サイト調査、処分場設計、システムの安全評価に関わる担当者間の対話が促進される。

閉鎖前の処分場や他の原子力施設と異なり閉鎖後の処分場に関するセーフティケースの作成が特徴的な作業であること理由は、主に、閉鎖後においてはモニタリングやそれに基づく修正活動の可能性が制限されること、安全性の評価期間の長さ起因する不確実性を伴うことである。閉鎖後の処分場の安全評価が対象とする空間的・時間的スケールによって、処分場やその周辺環境の特性、時間的変遷に大きな不確実性を伴うことが不可避であり、このことは意思決定において常に念頭に置かれる必要がある。

セーフティケースの作成を行うためには適切なマネジメントが重要であり、種々の情報の統合化や文書化のための適正な専門的知識と能力が必要となる。サイトの調査によって処分場の設計や安全評価のための情報が提供され、構築された処分システムの安全評価から処分

場の設計やサイト選定へのフィードバックが行われる。こうした相互の連携による反復過程は、処分場のプランニングや開発にとって不可欠であり、これを適切に管理することが求められる。このような反復過程によってセーフティケースは処分計画を通じて恒常的に信頼性を高めていく必要があり、このためには専門家集団が継続的に関与しその技術的内容について確認を行うことが必要である。このような観点から関連する科学技術的な知識の管理を行うことは極めて重要である。

上記背景から、地層処分事業の実施と安全規制の策定に必要な科学技術基盤を知識として管理していくため、知識の構造化の視点としてセーフティケースの概念を用いることを提言した。セーフティケースの概念については、現在も国際的に議論が行われており、本書では基本的に OECD/NEA における検討に基づきつつ、知識管理の目的や範囲に応じて拡張を行っている。地層処分に関連するデータや情報、知識を、セーフティケースの一般概念に示されている構成要素ごとに相互の関係も含めて構造化し、これら知識の内容をセーフティケースの作成という観点での価値を含めた形式によって記述するという知識管理の方法論を示した。具体的には、セーフティケースの一般的構成要素である、「目的と文脈」、「安全戦略」、「安全評価基盤」、「証拠、解析及び論拠」、に沿って知識項目をそれらの集合体に整理し、これらの関係性を緩やかに把握するような構造化を行った。また、これらを用いた「セーフティケースへの統合」を行うための知識について、論証構造を階層的な主張の関係として例示したテンプレートとして捉える方法を示した。

この考え方にに基づき、第 2 次取りまとめとそれ以降サイクル機構において進められてきた研究開発成果を対象として、具体的に知識ベースを構築していくための基本的な枠組みの検討を行った。

セーフティケースの「目的と文脈」、「安全戦略」については、わが国の地層処分計画がどのような考え方と意思決定に基づいて進められてきたかを整理することによって、今後セーフティケースが作成される際に、知識として提供できるようにしておくことが重要であることから、計画の変遷をセーフティケースの作成という観点でたどり主要な事項を明らかにした。例えば、原子力発電環整備機構が公募によるサイト選定を進めるうえでサイトの環境条件に柔軟に対応するため、種々の処分場概念のバリエーションを考慮し技術的な検討が進められていることや、安全規制策定に向けて種々の具体的な議論が進められていることは、これらの技術的基盤を提供する役割を担う研究開発機関として今後行うべき知識管理の枠組みと具体的な知識ベースの内容の検討にあたって留意すべき点である。

「安全評価基盤」と「証拠、解析及び論拠」については、技術的な知識という点で最も大きな比重を占め、第 2 次取りまとめや 3 つの分冊レポートに示されたそれ以降の研究開発の成果は、これらの要素を構成する知識の集合体としての一般的階層構造に従って整理することができる。また、「セーフティケースへの統合」に関する知識については、セーフティケースの一般的な論証構造のテンプレートの例を示しており、このような構造化に従って、第 2 次取りまとめや 3 つの分冊レポートに示したそれ以降の研究開発によって得られた知識を分類整理するとともに、テンプレートを構成する種々の「主張」とこれを支持するために必要な論拠との関係を論じた。これによって現在利用可能な知識ベースとともに今後整えていくべき知識の分野を明らかにしている。この検討にあたっては、第 2 次取りまとめ以降の研究開発を取り巻く状況の変化、特に上述したような原子力発電環整備機構によって示された技術開発の枠組みなどを念頭に置いた。このような地層処分技術に関する知識の構造化と現状の知識に関する分析は、今後、具体的な知識ベースを開発していくうえで起点となるものである。

一般に、実際にセーフティケースを作成する実施主体やこれを評価する規制機関においては、種々の意思決定に対する要件管理システム (requirement management system) が不可欠であり、科学技術基盤としての知識ベースと管理システムの開発にあたっては、要件管理

と相互補完的に機能するように進めることが肝要である。上述したアプローチは、知識管理システム (knowledge management system) を直接、実施主体や規制機関の要件管理システムに関係づけるうえで便利であると考えられる。

高レベル放射性廃棄物対策に関しては、技術的な観点から地層処分が現在最も理にかなったものであることが国際的に認められており、これまでの研究開発から技術的に可能であると考えられている。一方、地層処分は、通常システムとは異なり、これまでに経験のない長期間を対象とした受動的な安全系に基づくシステムであることから、その安全性について感覚的にとらえることが困難という側面も有している。このためには、意思決定に関与する様々なステークホルダーに対し、「情報の非対称性」を念頭に置いてセーフティケースの内容を分かりやすく説明することが極めて重要なテーマとなる。また、理解しやすいセーフティケースの構造を与えるような処分場概念の構築、安全評価の方法論に関する科学的基礎の例示などにも取り組んでいく必要がある。上述した知識管理においてはこのような課題についても念頭においておくことが重要である。また、地層処分事業の長期性の観点から、地層処分に関わる専門家を糾合し人材育成の機能を確保するという観点でも本報告書で指向している地層処分技術の知識管理は重要な役割を果たす。これらの点についても今後の方向性として言及した。

目 次

1. はじめに	1-1
1.1 第2次取りまとめ以降の研究開発方針	1-1
1.2 サイクル機構の研究開発計画	1-2
1.2.1 全体計画の作成	1-2
1.2.2 全体計画に沿った研究開発の実施	1-4
1.3 H17取りまとめの位置づけと構成	1-6
1.4 本書の目的と構成	1-7
参考文献	1-8
2. 地層処分技術の知識化	2-1
2.1 地層処分の技術的特徴	2-1
2.1.1 多重バリアシステムに基づく受動的な安全系	2-1
2.1.2 地層処分の安全評価と不確実性	2-2
2.2 地層処分計画の進め方	2-4
2.2.1 段階的なアプローチと意思決定	2-4
2.2.2 セーフティケースの一般概念	2-7
2.2.3 研究開発の役割	2-14
2.3 地層処分技術に関する知識管理	2-15
2.3.1 意思決定のための知識管理	2-15
2.3.2 セーフティケース概念に基づく知識基盤の構造化	2-19
2.4 まとめ	2-27
参考文献	2-29
3. 知識ベースの開発	3-1
3.1 知識ベースの構造化	3-1
3.1.1 レベル1の主張と関連する知識ベース	3-3
3.1.2 レベル2の主張と関連する知識ベース	3-4
3.1.3 レベル3の主張と関連する知識ベース	3-5
3.1.4 レベル4の主張と関連する知識ベース	3-10
3.1.5 レベル5の主張と関連する知識ベース	3-15
3.1.6 レベル6の主張と関連する知識ベース	3-18
3.2 今後必要な研究開発	3-19
3.3 知識管理システム	3-20
3.4 まとめ	3-21

参考文献	3-22
4. まとめと今後の方向性	4-1
付録 1. 分冊 1「深地層の科学的研究」要約	付-1(1)
付録 2. 分冊 2「工学技術の開発」要約	付-2(1)
付録 3. 分冊 3「安全評価手法の開発」要約	付-3(1)
用語の説明	付-4(1)
略語集	付-5(1)

目 次

図 1.2-1	全体計画の 2 つの研究開発目標と研究開発項目の展開	1-3
図 1.3-1	H17 取りまとめ報告書の構成	1-6
図 2.1-1	定量的な安全評価における主要な作業手続き	2-3
図 2.2-1	セーフティケースの構成要素	2-9
図 2.3-1	意思決定のネットワークの形式化した表現	2-18
図 2.3-2	セーフティケースを支える知識の階層	2-20
図 2.3-3	知識構造の表現形式	2-21
図 2.3-4	セーフティケースの目的と文脈に関する知識構造	2-21
図 2.3-5	安全戦略に関する知識構造	2-23
図 2.3-6	安全評価基盤に関する知識構造	2-24
図 2.3-7	証拠, 解析及び論拠に関する知識構造	2-25
図 2.3-8	セーフティケースの論証構造のテンプレート例	2-27
図 3.1-1	概要調査地区を選定するために作成されるセーフティケースに対する議論と情報の流れ	3-3
図 3.1-2	第 2 次取りまとめにおける処分概念と安全機能	3-7
図 3.1-3	鉄の腐食に関する実験室やナチュラルアナログのデータ	3-9
図 3.1-4	天然放射性核種のフラックスの算出方法において考慮した場, 物質および物質移動プロセスの体系	3-12
図 3.1-5	第 2 次取りまとめの安全評価で用いられた計算コードとデータベース	3-13
図 3.1-6	地質環境条件 (THMC: 温度-水理-力学-地球化学) の変化に関する知見・データの収集・整理の作業例	3-14
図 3.1-7	グリムセルテストサイトにおける核種移行試験	3-15
図 3.1-8	安全評価基盤を作成するための体系的な枠組み: 地質統合 (geosynthesis) の一例	3-17
図 3.1-9	SDB の開発: JNC-SDB の更新前後でのデータ充足状況の変化	3-18

表 目 次

表 3.1-1	サイトの地質環境の長期安定性に関する知識	3-4
表 3.1-2	処分場概念の安全性と実際性に関する知識	3-5
表 3.1-3	処分場概念の頑健性に関する知識	3-5
表 3.1-4	サイトの構造モデルに関する知識	3-6
表 3.1-5	処分場の建設と操業の実現可能性／安全性に関する知識	3-6
表 3.1-6	主要な安全バリアの性能に関する知識	3-7
表 3.1-7	長期安全性の実証に関する知識	3-8
表 3.1-8	システムの頑健性に関する知識	3-9
表 3.1-9	リザーブ FEP の選定と分析に関する知識	3-10
表 3.1-10	システムの柔軟性に関する知識	3-10
表 3.1-11	評価すべきシナリオの検討に関する知識	3-11
表 3.1-12	線量／リスクの評価結果に関する知識	3-11
表 3.1-13	評価結果に関する種々の検討，補完的な指標の適用に関する知識	3-12
表 3.1-14	モデル，計算コード及びデータの適切性に関する知識	3-12
表 3.1-15	安全裕度に関する知識	3-13
表 3.1-16	What-if シナリオに関する知識	3-14
表 3.1-17	安全性に対して負に作用する FEP や不確実性に関する知識	3-15
表 3.1-18	シナリオ開発に関する知識	3-16
表 3.1-19	品質保証に関する知識	3-16
表 3.1-20	モデルの簡略化に関する知識	3-17
表 3.1-21	モデルやデータの裏付けに関する知識	3-18

1. はじめに

1.1 第2次取りまとめ以降の研究開発

わが国においては、資源の有効利用の観点から原子炉から取り出された使用済み燃料を再処理し、ウランやプルトニウムを回収した後に発生する高レベル放射性廃棄物対策として、これをガラス固化し冷却のための貯蔵を経て深部の安定な地層に処分（地層処分）するとの方針の下、技術的可能性について幅広い地質環境を対象として研究開発が進められてきた（原子力委員会、1976 など）。

核燃料サイクル開発機構（以下、「サイクル機構」という）は前身である動力炉・核燃料開発事業団（以下、「動燃事業団」という）以来、中核的研究開発機関として、2つの技術報告書（動力炉・核燃料開発事業団、1992；核燃料サイクル開発機構、1999）をまとめ、わが国においても高レベル放射性廃棄物の地層処分が技術的に可能であることを示した。特に、1999年に公表した技術報告書「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—」（以下、「第2次取りまとめ」という）を技術的な基盤として、2000年6月には「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（平成12年、法律第117号）（以下、「最終処分法」という）が公布され、また、安全規制の策定に関する議論が進められてきている（原子力安全委員会、2000、2004；総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会、2003）。

最終処分法は、高レベル放射性廃棄物の最終処分を計画的かつ確実に実施することを目的として制定され、処分実施主体の設立、最終処分費用の確保・拠出制度の確立、3段階の処分地選定プロセス（文献調査に基づく概要調査地区の選定、ボーリング調査など地上からの調査に基づく精密調査地区の選定、地上および地下での詳細な調査に基づく最終処分施設建設地の選定）等をその主要な内容としている。最終処分法に従い2000年10月に実施主体である原子力発電環境整備機構（以下、「原環機構」という）が設立された。

最終処分法に基づき、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」（通商産業省、2000a）（以下、「基本方針」という）と「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」（通商産業省、2000b）が示された。このうち、基本方針には、事業段階における研究開発について、実施主体や国および関係機関の役割が述べられている。処分の安全な実施、経済性や効率性の向上等を目的とする技術開発は実施主体が担い、国とその関係機関は、最終処分の安全規制、安全評価のために必要な研究開発や深地層の科学的研究等の基盤的な研究開発及び地層処分技術的信頼性の向上に関する技術開発等を積極的に進めていくことが必要であるとされている。「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画（平成12年）」（原子力委員会、2000）（以下、「原子力長計」という）においても、基本方針を踏襲して関係機関の役割が示され、特に、サイクル機構等は、これまでの研究開発成果に基づき、深地層の研究施設、地層処分放射化学研究施設（QUALITY）等を活用し、今後とも地層処分技術的信頼性の確認や安全評価手法の確立に向けて研究開発を着実に推進することが必要であるとされた。

さらに、総合資源エネルギー調査会原子力部会は、原子力長計を具体化するための検討を行い、「原子力の技術基盤の確保について」（総合資源エネルギー調査会原子力部会、2001）（以下、「原子力部会報告書」という）の中で、サイクル機構は、これまでの研究開発成果を踏まえ、今後ともその研究開発施設等を活用し、深地層の科学的研究、実測データの着実な蓄積とモデル高度化による地層処分技術的信頼性向上と安全評価手法の高度化に向けて研究開発を着実に推進することを求めている。

以上のように、第2次取りまとめまで、わが国全体の研究開発を集約してきたサイクル機構は、第2次取りまとめ以降の新たな研究開発の枠組みの中で、それまでの研究開発の経験や充実した研究施設を活かし、地層処分技術的信頼性の確認や安全評価手法の確立に焦点を

あてた研究開発を進めるという役割を与えられてきた。

2005年10月に、サイクル機構は日本原子力研究所との統合により日本原子力研究開発機構となる。「原子力二法人の統合に関する報告書」(文部科学省原子力二法人統合準備会議、2003)において、新法人は、わが国における地層処分技術に関する研究開発の中核的役割を担うことが期待されており、事業と規制の両面を支えるわが国全体としての技術基盤を構築していくことが求められるといえる。

1.2 サイクル機構の研究開発計画

第2次取りまとめ以降の役割に沿った研究開発を効率的かつ効果的に進めるため、サイクル機構では「国の研究開発全般に共通する評価の実施方法の在り方についての大綱的指針」(内閣総理大臣、1997)に沿って、取り組んでいる研究開発課題についての外部評価を実施するため研究開発課題評価委員会を設置し、その評価を受けて研究開発計画を作成している。

1.2.1 現在の全体計画

現在の研究開発計画は、2001年に「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の全体計画」(以下、「全体計画」という)として作成されたものである(核燃料サイクル開発機構研究開発課題評価委員会(廃棄物処理処分課題評価委員会)、2001)。処分事業のスケジュールなどを勘案し長期的視点を念頭に置きつつ、5年程度の研究開発計画を作成し適宜見直しを行うものとしている。これらの研究開発を進めるにあたっては、処分事業や安全規制の双方へ基盤的な情報を反映していくという観点から、課題評価委員会の評価結果に示されたように独立性、主体性をもって進めていくことに留意している

全体計画では、上記基本方針や原子力長計、原子力部会報告書で示されたサイクル機構の役割を果たすため、国による第2次取りまとめの評価で示された技術開発課題(原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会、2000)や安全規制の基本的考え方に示された検討項目(原子力安全委員会、2000)を勘案し、図1.2-1に示すように、「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」と「地層処分システムの長期挙動の理解」という2つの目標を設定した。前者については、深地層の研究施設における各調査研究段階で、地質環境の調査・評価技術、地下施設の建設・維持等に関わる工学技術、実際の地質環境情報に基づく設計・安全評価手法それぞれの適用性を確認することとした。一方、後者については、事例研究や深地層の研究施設及びナチュラルアナログを利用した地質環境の長期的変遷の理解、地層処分基盤研究施設(ENTRY)やQUALITYを中心とした設計や安全評価に関するデータの蓄積と現象理解によるモデルの高度化、およびシステムの挙動をより現実的に評価し理解を深めるための総合的予測・評価手法の整備・高度化を行うこととしている。

この2つの目標を達成するために展開される研究開発項目を、従来からの研究開発の枠組みを勘案し新たに設定した「深地層の科学的研究」、「処分技術の信頼性向上」、「安全評価手法の高度化」という3つの分野における研究開発課題として明らかにしている。

「深地層の科学的研究」の分野には、岐阜県瑞浪市及び北海道幌延町における2つの深地層の研究施設計画で進められている研究開発、日本全国を対象とした事例研究、諸外国の研究機関との共同研究などが含まれている。これらによって、実際の地質環境を対象とした調査技術や評価手法、情報の統合に関する技術的実証や、地下施設を建設し維持・管理するうえで必要となる安全で実際的な工学技術の検討が行われてきた。また、地層処分システムの長期挙動を理解するうえで、変動帯に位置するわが国においては特に重要である地質環境の長期安定性に関する研究を継続するとともに、ウラン鉱床を利用したナチュラルアナログ研究を実施している。2つの深地層の研究施設については別途計画を作成し、課題評価委員会に図るなど適宜評価を受けてきている(核燃料サイクル開発機構研究開発課題評価委員会(廃

棄物処理処分課題評価委員会)，2000)。2005 年度は，深地層の研究施設計画における第 1 段階（地上からの調査研究段階）から第 2 段階（坑道掘削時の調査研究段階）への移行期にあたっている。

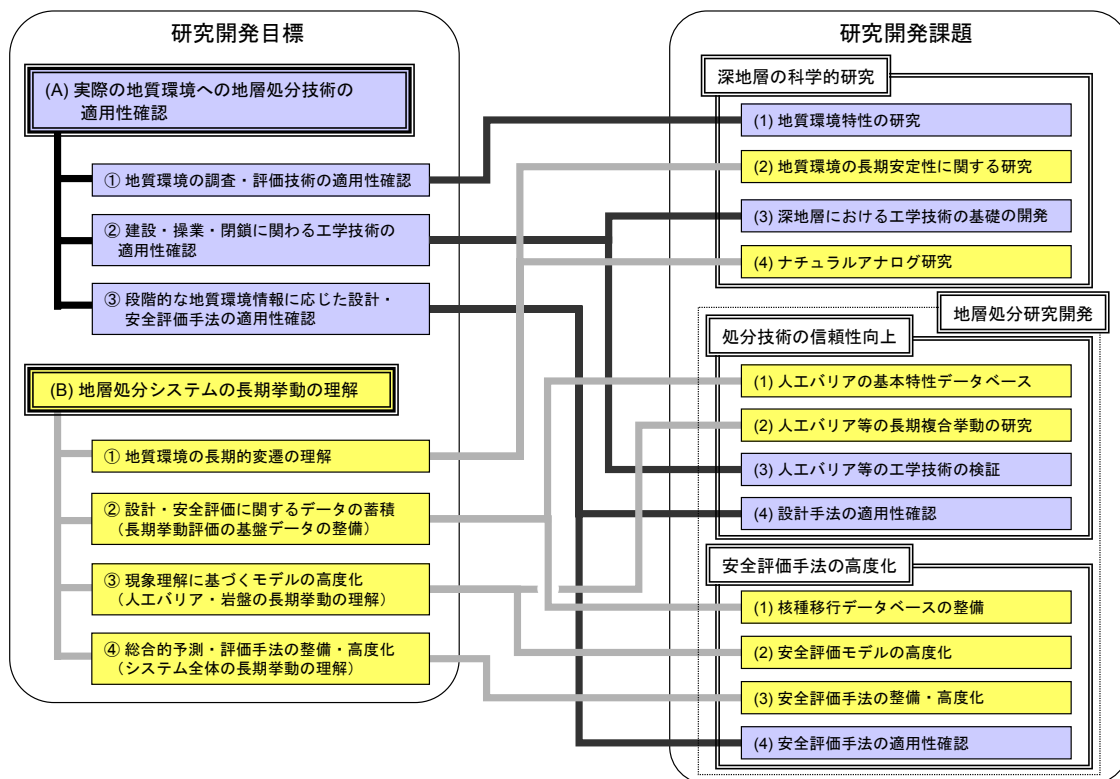


図 1.2-1 全体計画の 2 つの研究開発目標と研究開発項目の展開

地層処分にに関する工学技術（「処分技術の信頼性向上」）に関する分野では，処分場を構成する主要な材料や構造の地下環境での長期挙動の理解，処分場の設計に用いる計算コードやデータの適用可能性などの検討を進めてきた。そのため，ENTRY での工学試験による炭素鋼オーバーパックなどの腐食挙動や緩衝材の基本特性に関するデータベースを整備するとともに，温度，水理，力学，地球化学条件が複雑に変化する処分初期の遷移状態におけるニアフィールドの挙動を評価するために，国際共同研究なども活用して熱-水-応力-化学連成モデルの開発などを実施している。また，ナチュラルアナログ研究により，人工バリア材料の長期挙動に関するデータの蓄積と評価手法の妥当性確認を行ってきた。さらに，海外の地下研究施設を活用した閉鎖技術の開発や低アルカリ性セメントの開発，深地層の研究施設における地上からの調査で得られた地質環境情報に基づく設計手法の適用性確認などを進めた。

安全評価に関連する研究開発（「安全評価手法の高度化」）では，第 2 次取りまとめのような全体システムの解析評価を実施することではなく，将来特定のサイトにおいてこうした評価を行うために必要となるアプローチや，評価ツールとしてのモデル，データベースを開発することに主眼を置いている。このため，安全評価のモデル体系の適用性に関する検討は部分的なものにとどまっている。より注力したのは，サイトの条件に即した処分場の安全性の定量的評価に用いるための方法論やモデル，データベースの開発である。こうした方法論の開発には，火成活動による変動シナリオの作成に伴う不確実性，天然バリア中における核種移行の定量化に用いる概念モデルやパラメータに伴う不確実性の影響度の検討を挙げることができる。モデルの開発においては，特定の人工バリアや天然バリアの挙動をできるだけ忠

実に表現できるようにすることを目標に、実験室やフィールドにおける試験結果を再現するための計算コードの改良を行うことが主眼となっている。データベースに関しては、安全評価において放射性核種の放出や移動を定量化するために用いられるパラメータ（溶解度、系に応じた分配係数など）の決定に必要な元素毎のデータ（熱力学データ、経験的収着係数）の蓄積と評価が主要な研究対象となっている。このようなデータの取得にあたっては QUALITY を利用するとともに経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA）で進められているプロジェクトとの連携を図っている。

1.2.2 研究開発を取り巻く状況

図 1.2-1 に示すように多岐にわたる専門領域を含む研究開発を全体目標に沿って管理するうえで、例えば第 2 次取りまとめで実施されたような成果の集約、統合を行うことが効果的である。第 2 次取りまとめにおいてはこのような統合を、全体システムの安全評価によって実施し、課題の抽出を行っている。サイクル機構における第 2 次取りまとめ以降の研究開発の成果は、図 1.2-1 の右側に示された個々の研究開発分野ごとにまとめ、2001 年度以降、「年報」として公表している（核燃料サイクル開発機構、2002, 2003, 2004）。これらは、第 2 次取りまとめの 3 つの分冊と同様な構造としており、それぞれの分野における進捗と残された課題は比較的容易に明らかにすることができる。

一方、全体計画に沿って第 2 次取りまとめ以降の研究開発を進めていく過程においても、実施主体による計画の推進や安全規制に関する議論、地層処分に関する国際的な議論に進展があった。

原子力安全委員会では、2000 年の安全規制の基本的考え方で示した処分地に要求される環境要件のあり方に基づき、「高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階で考慮すべき環境要件について」（原子力安全委員会、2002）（以下、「環境要件」という）を取りまとめた。これは、概要調査地区を選定する際に文献調査によって明らかに処分地として不適切な地域を除外するための要件を示したもので、文献調査で十分な評価ができない場合には、概要調査やそれ以降の調査で再評価しなければならない。また、放射線障害防止の観点から、低レベル放射性廃棄物から高レベル放射性廃棄物にわたる放射性廃棄物処分全般についての安全規制を考えていく上で共通する事項を取り上げ、国際的な動向等を参考に入れ、わが国の今後の検討の方向性を示している（原子力安全委員会、2004）。

総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会の下に設置された廃棄物安全小委員会では、高レベル放射性廃棄物処分の安全規制の在り方や安全規制の内容について検討を進め、安全規制の基盤確保についての審議結果を報告書として取りまとめている（総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会、2003）。この報告書では、安全規制制度の検討に先立ち、今後調査を進めるべき研究課題と、研究を実施して規制機関を支援する体制についての提言が行われている。

原環機構では、最初のマイルストーンである概要調査地区の選定に向け、2001 年 11 月に処分地選定プロセスの透明性確保と地域との共生の観点から、公募による選定の考え方を示し、概要調査地区等を選定する方法や時期などを含め選定手順の基本的考え方を公表した（原子力発電環境整備機構、2001）。これに基づき、2002 年 12 月に日本全国の市町村を対象に「高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域」の公募が開始された。公募にあたり、市町村の応募に向けた検討資料として、「応募要領」（原子力発電環境整備機構、2002a）、「処分場の概要」（原子力発電環境整備機構、2002b）、「概要調査地区選定上の考慮事項」（原子力発電環境整備機構、2002c）及び「地域共生への取組み」（原子力発電環境整備機構、2002d）が示されている。このうち「概要調査地区選定上の考慮事項」（原子力発電環境整備機構、2002c）には、原子力安全委員会の示した環境要件が反映されている。また、「処分場の概要」や「概要調査地区選定上の考慮事項」の技術的根拠となる報告書をそれぞれ

れ公開している（原子力発電環境整備機構，2004a, 2004b; NUMO, 2004a, 2004b）。特に，今後の事業計画の段階的な進展に応じて，各段階で得られたサイトの環境条件に関するデータや情報を適切に反映しサイトに適合した処分場概念を開発していくためのアプローチを構築するとともに，その具体的な方法論について検討が行なわれている（原子力発電環境整備機構，2004a; NUMO, 2004a）。この検討においては，第2次取りまとめを技術的な基盤とし，閉鎖後の長期安全性の確保に加え，実用的な観点からより総合的に評価を行い，処分場概念の最適化を図っていくことの重要性が示されている。

関係する研究開発機関では，サイクル機構と同様，上記の国の方針や計画に従い処分事業や安全規制に資する技術基盤の強化を目的とした研究開発が進められてきている。こうしたサイクル機構を含む関係機関の取り組みについて，体系的かつ中長期的な視点でわが国全体の研究開発計画を検討していく必要性も認識されている。これに対応するため，サイクル機構と経済産業省資源エネルギー庁が進める調査事業を実施している関係機関は，共同作業等を通じ，実施主体や規制関係機関との情報交換，大学の有識者などとの意見交換を行ってきた。その成果は，今後の研究開発の体系化や効率化に向けた議論等に資することができるよう，「研究開発全体マップ」としてまとめられている（原子力環境整備促進・資金管理センター，2005）。こうした議論を経て，2005年7月には，資源エネルギー庁の統括の下，国の基盤的研究開発¹⁾を進める関係機関による「地層処分基盤研究開発調整会議」（資源エネルギー庁原子力政策課放射性廃棄物対策室，2005）が組織され，関係研究機関がわが国全体としてどのように研究開発を進めるべきかについて検討を行う基盤が整えられた。この会議体には，原環機構や原子力安全・保安院及びその関係研究機関がオブザーバーとして参加することになっている。

国際的には，「地層処分計画における段階的アプローチ」や「セーフティケース」に関する議論が活発に行われ，その重要性が広く認識されてきた（OECD/NEA, 2005）。地層処分計画は数十年以上の長い期間を要するため，世代間の公平性の観点から，計画を一気に進めるのではなく，段階的に意思決定のプロセスを踏みながら進めていくという考え方（段階的アプローチ）が提案されている（OECD/NEA, 1995）。また，このようなアプローチにおいて各段階で行われる意思決定のための材料の中心をなすものとして，セーフティケースの概念が重要視されてきている。セーフティケースとは，地層処分の長期的な安全性とその信頼性のレベルについての記述や定量化及びそれらを保証するための議論や証拠を統合したものと定義される（IAEA and OECD/NEA, 2004）。セーフティケースは基本的には処分事業の実施主体によって作成され，規制当局など意思決定に関わる利害関係者にとって満足のいくものとなることが要求される。それぞれの段階で地層処分システムの理解度や利用可能な技術情報のレベルは異なることから，各段階で構築されるセーフティケースは，関連する研究開発分野の最新の技術や知見を取り込み，論理的な合理性をもって相互に関係付けられていくことが必要であるとともに，処分計画全体を通じて常に信頼性を高めていくことが要求される。このため，研究開発によってセーフティケースに供給される科学技術情報の強化は，実施側，規制側を問わず，長期間にわたる処分事業全体に対する信頼を支えるうえで不可欠なものとなる。このような観点から OECD/NEA では，放射性廃棄物の地層処分でのセーフティケースの目的と一般的な内容を取りまとめ，報告書として公表している（OECD/NEA, 2004）。また，段階的アプローチに従い処分計画を実際に進めるうえで，意思決定に関する可逆性と廃棄物の回収可能性を確保することの重要性が認識されてきており，国際的な議論において，回収可能性に関する技術開発は今後も継続すべきこと，特にその技術的な信頼性を高めるための実証が重要であること，また回収可能性の考慮は主に閉鎖前の期間を対象とし，技術開発もこの期間に焦点を置くべきことが提言されている（OECD/NEA, 2001）。

1) わが国の高レベル放射性廃棄物地層処分に関する地層処分計画を円滑に進めるため，処分事業と安全規制の技術基盤の強化，及び国民理解の増進に資することを目的として国が行う基盤的な研究開発（原子力環境整備促進・資金管理センター，2005）

以上のような、国内外の最近の動向については、今後、サイクル機構（日本原子力研究開発機構）が進める研究開発を考えるうえで念頭においておく必要がある。

1.3 H17 取りまとめの目標と構造

上述したように、多岐にわたる研究開発を管理するうえで報告書の作成を通じて成果を集約することは重要であり、全体計画が5年の節目を迎え、深地層の研究施設計画が第1段階から第2段階へ移行しつつあること、研究開発を取り巻く国内外の状況が大きく変化していることなどを勘案すれば、第2次取りまとめ以降進めてきた研究開発成果を一旦取りまとめ、全体計画で示した個々の研究開発課題に対する達成度と今後の課題を明らかにするとともに、今後行うべき研究開発の方向性を合わせて提示することは意義のあることである。

このためサイクル機構では「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年度取りまとめ—」（以下、「H17取りまとめ」という）として、これを行うこととした。H17取りまとめは、図1.3-1に示すように研究開発の進捗を記述した3つの分冊レポートと、これらの研究成果に基づいて知識基盤の構造化を試みた知識化レポートで構成される。

分冊レポートは、図1.2-1に示した全体計画で展開している「深地層の科学的研究」、「処分技術の信頼性向上」、「安全評価手法の高度化」の3つの分野における研究開発成果を取りまとめたものである（付録参照）。このため、目次構成を図1.2-1の研究開発課題に対応させている。これらは、第2次取りまとめにおける分冊の構成にほぼ相当するものである。記載にあたっては、第2次取りまとめとの対比によって、その後の知見の充足、新たな課題、第2次取りまとめでは対象としていなかった領域での知見の取得を明示することにより、研究開発の進捗を明らかにすることとした。

一方、地層処分計画の進展のなかで研究開発を捉え、成果を技術基盤として統合するとともに将来の研究開発の優先順位を明らかにするための新たな視点として知識管理（knowledge management）に注目し、「地層処分技術の知識基盤の開発と管理」と題する報告書（知識化レポート）を作成した。第2次取りまとめの成果に加え、上記分冊レポートに示された研究開発成果を処分事業と安全規制を支える技術基盤としてより確かなものとすることができるよう、必要な科学技術情報を構造化し継続的に最適化していく（知識基盤化）ための考え方を提示することに主眼をおいた。知識化レポートは、わが国における地層処分の技術的成立性を示した第2次取りまとめの「総論レポート」とは大きく異なっている。

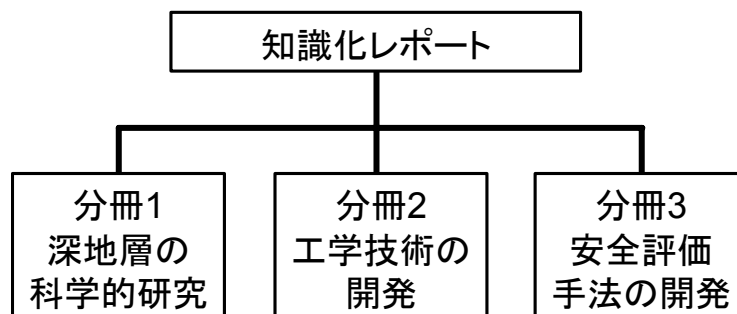


図 1.3-1 H17 取りまとめ報告書の構成

1.4 本書の目的と構成

上述したように本書は、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の成果を地層処分の科学・技術に関する知識として構造化し、あわせて研究開発の優先順位を明らかにすることを目的として行う知識管理に関するアプローチを概観したものである。合わせて4つの章から構成されており、各章における内容は、以下のとおりである。

第2章では、地層処分事業の実施と安全規制の策定に必要な科学技術基盤を知識として管理していく必要性について述べた後、知識を構造化するための視点としてセーフティケースの概念を用いることを提言している。セーフティケースの概念については、現在も国際的に議論が行われており、ここでは基本的にOECD/NEAの報告書(OECD/NEA, 2004)に基づきつつ、知識管理の目的や範囲に応じて拡張を行っている。

第3章では、第2章で示した知識構造に従って、主に第2次取りまとめや分冊で示した研究開発成果をセーフティケースの作成に必要な要素に対応させることにより、現在利用可能な知識ベースとともに今後整えていくべき知識の分野を明らかにしている。これにあたっては、1.2.2で述べた研究開発を取り巻く状況の変化、特に原環機構によって示された技術開発の枠組みなどを念頭に置いている。

第4章では、今後の方向性について述べ、リレーショナルデータベースを用いて知識管理を実施していくための計画案を示している。このようなアプローチは、知識管理システム(knowledge management system)を直接、実施主体や規制機関の要件管理システム(requirement management system)に関係づけるうえで便利であると考えられる。要件管理システムは、必要とされる知識を明らかにするうえでより詳細な技術的評価を可能にし、将来の研究開発の計画に方向を与えることができる。主要なステークホルダー²⁾である実施主体や規制機関によるいわば正式な要件に見合うように知識管理を行うことは必要ではあるが十分ではない。本章では、それほど厳密ではないが求められる要件、他のステークホルダー(例えば、政策決定者や一般公衆)を支援するための要件、組織スタッフの専門性の維持、将来予見されるような要件、科学技術における大きな進展の可能性などを念頭においた知識管理の必要性について言及している。

²⁾ 意思決定プロセスにおいて何らかの役割を有する行為者、機関、団体あるいは個人(OECD/NEA, 2000)

参考文献

動力炉・核燃料開発事業団 (1992): "高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成3年度－", 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN1410 92-081.

原子力安全委員会(2000): 高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について (第1次報告), 平成12年11月6日.

原子力安全委員会 (2002): 高レベル放射性廃棄物の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について, 平成14年9月30日.

原子力安全委員会 (2004): 放射性廃棄物の安全規制における共通的な重要事項について, 平成16年6月10日.

原子力発電環境整備機構 (2001): 特定放射性廃棄物処分の概要調査地区等の選定手順の基本的考え方について, 官報, 号外第238号, 平成13年11月8日.

原子力発電環境整備機構 (2002a): 応募要領, 高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公募関係資料－1.

原子力発電環境整備機構 (2002b): 処分場の概要, 高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公募関係資料－2.

原子力発電環境整備機構 (2002c): 概要調査地区選定上の考慮事項, 高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公募関係資料－3.

原子力発電環境整備機構 (2002d): 地域共生への取組み－地域と事業を結ぶために－, 高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公募関係資料－4.

原子力発電環境整備機構 (2004a): "高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性－「処分場の概要」の説明資料－", 原子力発電環境整備機構, NUMO-TR-04-01.

原子力発電環境整備機構 (2004b): "概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠-「概要調査地区選定上の考慮事項」の説明資料-", 原子力発電環境整備機構, NUMO-TR-04-02.

原子力委員会 (1976): 放射性廃棄物処理処分対策について, 昭和51年10月8日.

原子力委員会 (2000): 原子力の研究, 開発及び利用に関する長期計画 (平成12年), 平成12年11月24日.

原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会(2000): 我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価, 平成12年10月11日.

原子力環境整備促進・資金管理センター (2005): "高レベル放射性廃棄物地層処分に関する研究開発全体マップの整備", 原子力環境整備促進・資金管理センター, RWMC-TRJ-04005-1.

IAEA and OECD/NEA (2004): Geological Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series, Draft Safety Requirements DS154, International Atomic Energy Agency, Vienna (Status: Out for comment by Member States).

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

核燃料サイクル開発機構 (2002): "高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成13年度報告－", 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 2002-003.

核燃料サイクル開発機構 (2003): "高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発

－平成 14 年度報告－”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 2003-004.

核燃料サイクル開発機構 (2004): “高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成 15 年度報告－”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2004-007.

核燃料サイクル開発機構研究開発課題評価委員会 (廃棄物処理処分課題評価委員会) (2000): “平成 12 年度研究開発課題評価 (中間評価) 報告書，課題評価「深地層の研究施設における研究計画」－主に超深地層研究所計画第 2 段階の計画案について－”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 2000-010.

核燃料サイクル開発機構研究開発課題評価委員会 (廃棄物処理処分課題評価委員会) (2001): “平成 13 年度研究開発課題評価 (中間評価) 報告書，課題評価「高レベル放射性廃棄物地層処分研究の全体計画」”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 2001-008.

文部科学省原子力二法人統合準備会議 (2003): “原子力二法人の統合に関する報告書”，平成 15 年 9 月 19 日.

内閣総理大臣 (1997): 国の研究開発全般に共通する評価の実施方法の在り方についての大綱的指針，内閣総理大臣決定，平成 9 年 8 月 7 日.

NUMO (2004a): “Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environment”，Nuclear Waste Management Organization of Japan, NUMO-TR-04-03.

NUMO (2004b): “Evaluating Site Suitability for a HLW Repository, Scientific Background and Practical Application of NUMO’s Siting Factors”，Nuclear Waste Management Organization of Japan, NUMO-TR-04-04.

OECD/NEA (1995): The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal, A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee of the OECD / Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA (2000): Stakeholder Confidence and Radioactive Waste Disposal, Workshop Proceedings, OECD, Paris.

OECD/NEA (2001): Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste, Reflections at the International Level, OECD / Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA(2004): Post-closure Safety Case for Geological Repositories, Nature and Purpose, OECD / Nuclear Energy Agency, ISBN 92-64-02075-6.

OECD/NEA (2005): Geological Repositories: Political and Technical Progress, Workshop Proceedings, Stockholm, Sweden, 8-10 December 2003, ISBN: 92-64-00830-6.

資源エネルギー庁原子力政策課放射性廃棄物対策室 (2005): “高レベル放射性廃棄物処分に関する基盤的研究開発の動向について”，第 33 回原子力委員会資料第 2 号，平成 17 年 8 月 30 日.

総合資源エネルギー調査会原子力部会 (2001): 原子力の技術基盤の確保について，平成 13 年 6 月.

総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会 (2003): “高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて”，総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会報告書，平成 15 年 7 月 8 日.

通商産業省 (2000a): 特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針を定めた件，平成 12 年 10 月 2 日，通商産業省告示第 591 号.

通商産業省 (2000b): 特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画を定めた件，平成 12 年 10 月 2 日，通商産業省告示第 592 号.

2. 高レベル放射性廃棄物地層処分に関する技術の知識化

地層処分プロジェクトは、多岐にわたる多量の科学技術的な情報によって支えられており、また、プロジェクトを進める中で必要となる新たな情報を継続的に創出していかなければならない。このような地層処分技術³⁾に関連する情報をこの報告書では一括して「知識」と呼んでいる⁴⁾。

本章では、様々な研究分野が関連する統合技術としての地層処分技術の知識化について述べる。ここで、知識化とは、地層処分に関する技術を体系化された知識基盤として構築することを意味している。知識管理 (knowledge management) は、このような知識化のために行う管理のことである。知識管理の重要な役割の1つは、地層処分技術に関する知識基盤を構造化することである。これによって、知識基盤を品質が保証された利用しやすいものとし、また、不足している知識に対し研究開発の焦点をあてて新たな知識を産み出すことができるようにする。

知識基盤を構造化するには、これを利用する立場から種々の方法が考えられる。例えば、利用者自身が厳密な方法によって要件管理システム (requirements management system - RMS) を整えていれば、要件管理の構造を、これを支えるための知識基盤の構造として自動的に適用することが可能である。要件管理システムとは、ある計画やプロジェクトを進めるうえで求められる全ての要求や条件を管理するための体系である。

ここでは、セーフティケースの概念に基づいて地層処分の知識基盤を構造化する方法について論ずる。セーフティケースの作成は実施主体が行う重要な作業であり、規制側がこれを評価することによって、地層処分計画の段階的な進め方における意思決定の重要な材料とされる。また、セーフティケースの作成には地層処分技術に関する知識の殆どが関連している。このため、処分事業の実施と規制の策的に資することを目的に進める地層処分技術に関する研究開発の成果を、わが国全体の知識基盤として構築していくという目的に対しては、上述したような利用者による構造化された要件が明らかにされていない、あるいは検討過程にあるような場合であっても、その構造化を行うための視点として合理的なものと考えることができる。

以下では、まず、知識化の対象となる地層処分技術が有する特徴的な点について説明する。次にこのような特徴を踏まえて、地層処分計画を進めるにあたって適用される段階的なアプローチに基づく意思決定プロセスについて述べ、この意思決定プロセスにおいて重要な判断材料となるセーフティケースの一般的概念について触れる。こうした背景に立ち、地層処分技術に関連する知識を、セーフティケース概念を視点として構造化し知識基盤として体系化していくための考え方を提示する。

2.1 地層処分の技術的特徴

2.1.1 多重バリアシステムに基づく受動的な安全性

放射性廃棄物の管理はこの数十年の間にますます重要な領域となってきた。各国の様々な取り組みに加え、国際原子力機関 (International Atomic Energy Agency (IAEA), 以下「IAEA」という) や OECD/NEA のワーキンググループにおける議論の焦点の1つとなっている。処分とは、放射性廃棄物管理の最終的措置として、回収の意図をもたず放射性廃棄

3) 「地層処分技術」という語は、地層処分を行うために必要となるすべての科学技術的要素を包含したものと用いている。

4) 2.3.1 で述べるように、データや情報、知識は、厳密な区別を行うことなく一括して「知識」と表現する。

物を人間の生活環境に影響の及ぶおそれのないように隔離することである。放射性廃棄物の処分は、これまでの工学的プロジェクトと比較して、安全性を考慮する必要のある時間スケールが極めて長期にわたるという点で大きく異なるということが広く認識されている。

IAEAの基本原則（IAEA, 1995）でも論じられているように、特に、放射能が減衰しながらも数万年以上といった長期間にわたって存続する高レベル放射性廃棄物の処分に関しては、人間が関与する能動的な管理方法を前提としてこれを保証することはできないと考えられている。したがって、その処分においては、モニタリングや処分施設の維持、あるいは制度的管理など人間が積極的に関与する手段に依存しない受動的な（passive）システムによって処分場を閉鎖した後の長期安全性を確保することが基本となっている。

地層処分は、このような技術的な要求を満たし、また倫理的観点（IAEA, 1995; OECD/NEA, 1995）に配慮して将来の世代の健康や環境に害を与えないことが確信できるような方法として、さらに、社会の持続的発展を可能なものとする解決法として最も現実的なものとして受け入れられている。この方法は、また、国際的な法制上の観点からも受け入れられるものとされている（IAEA, 1997）。こうした背景に基づいて、その実現に向け各国で努力が続けられており、いくつかの国の計画には近年大きな進展が認められる（OECD/NEA, 1999a, 2005）。

一般に地下深部は長期間にわたって安定で、地表に比べて人間活動や自然現象の影響を受けにくい、還元性の環境にあり腐食や溶解が進みにくい、物質を運ぶ媒体となり得る地下水の動きが極めて遅いといった特徴を有し、高レベル放射性廃棄物の安全な隔離に適しているといえる。また、地下深部は、人間による意図的な侵入の可能性を大きく制限するとともに、不注意による人間の侵入の可能性を極めて低いものに抑えることができる。

このような地下深部の特徴を利用し、さらに人工的な防護系を組み合わせる多重バリアシステムが構築される。多重バリアシステムは地層処分場の最も重要な特徴の一つであり、各国の処分概念に取り入れられている考え方である。処分場は閉鎖後、長期間にわたって安全に機能するように設計された受動的なシステムに移行する。それぞれのバリアが有する安全機能は完全に独立に働くわけではないが、一つのバリアの欠陥がシステム全体の長期安全性に対して重大な影響を及ぼすことにならないように安全機能の冗長性に格別の配慮がなされる。多重バリアシステムの構成要素やそれぞれの要素がもつバリアの相対的な重要性は、処分概念によって異なる。このようなシステムによって高いレベルの安全性が確保されると考えられるものの、公衆の間には長期間にわたる安全性についての懸念が存在しており、地層処分計画は、慎重に、段階を踏んで、主要なステークホルダーの信頼を獲得しつつ公開性と透明性のある意思決定を行いながら進められる（2.2.1 参照）。

2.1.2 地層処分システムの安全評価と不確実性の管理

地層処分システムの性能の評価は、計算モデルを用いた定量的な解析を含む体系的な安全評価によって行われる（OECD/NEA, 1991）。直接的な性能の実証ができない、極めて長期間—例えば数十万年から百万年—にわたる閉鎖後の処分システムに関する解析を実施するための手段を提供することがモデリングの主要な役割である。また、地層処分システムの重要な要素である天然バリアとして大きな空間領域を占める地層の特性を調査によって詳細に把握することについては限りがあり、この観点からもその特性を表現するためのモデリングが必要となる。このようなモデルを用いた「予測」に基づく安全評価が地層処分技術を最も特徴づけるものであるといえる。ここで、「予測」とは、将来の人間への影響を言い当てるのではなく、地層処分の安全性の判断材料を提供するためのものである。

モデルは、安全評価の手続きの中で開発され、それが持っている意味、適用条件などの解釈が付される（図 2.1-1）。安全評価の中で最初に行われる作業には、処分場の場としての性質（Features）と安全性能に影響を及ぼすと考えられる種々の事象（Events）及びプロセス

(Processes) (Features, Events, Processes を総称して FEPs と称する) によって分析され特性付けられるシステムの記述が含まれる。FEP のリストには、システムに関して可能性のあるものはすべて網羅するように作成される。システムを完全に特性付けることやその将来挙動を正確に予測することは本来不可能であり、FEP リストの役割は、FEP の組み合わせによって作成されるシナリオによって、システムに生ずると考えられるすべての変遷を捉えることができるようにすることである。ここで注意すべき点は、すべての可能な FEP の組み合わせを評価することは実際的でなく、また有効でもない。シナリオを開発する目的は、FEP リストによって抜け落ちがないことを確認しつつ、システムの性能を包絡するようないくつかの組み合わせを明らかにすることである。

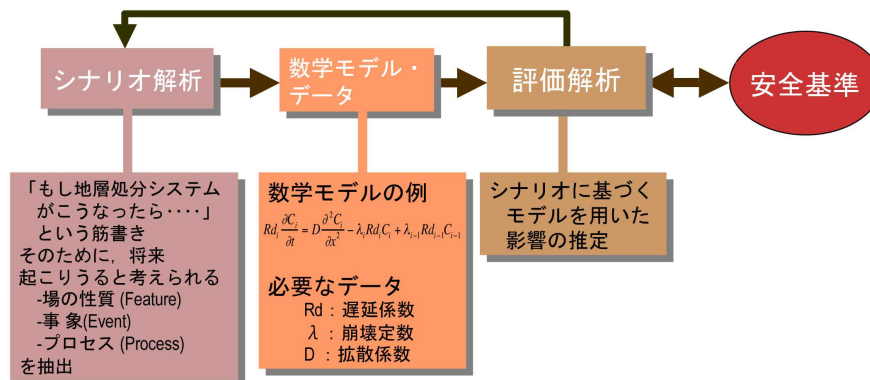


図 2.1-1 定量的な安全評価における主要な作業手続き (核燃料サイクル開発機構, 1999)

処分場の場としての性質 (Features) と安全性能に影響を及ぼすと考えられる種々の事象 (Events) 及びプロセス (Processes) を考慮して、システムの将来の挙動に関するシナリオを描く。次に、シナリオに従ってシステムに関連する長期的な現象を表現するため、物理・化学的な法則に基づいた数学モデルの開発と必要なデータの整備が行われる。最後にモデルとデータを用いた影響解析による予測を行ってシステムの性能を推定した後、これを安全規制のために定められた指針や基準と比較して安全性を判定する。一般にこのような安全規制上の指針や基準によって、将来にわたる放射線影響の防護レベルが線量あるいはリスクとして示される。

次に選定されたシナリオに対して、そこに含まれている物理的、化学的現象を定量的に表現するためのモデルが開発される。影響解析では、開発されたモデルを用いて、与えられたシステム要素の特性や初期・境界条件の下にシステムの挙動に関する計算が行われる。対象とするすべてのシナリオに対する影響解析の結果は、定められた安全基準や指針と比較され、安全性が論じられる。地層処分の多重バリアシステムを構成する要素は、天然の地層と人工バリアである。このような安全評価の作業を行うためには、要素間の相互作用も含めたシステム要素の長期的挙動を把握するため、サイトの環境条件や人工バリア材料に関する情報やデータ、システムに生起すると考えられる様々なプロセスに関する科学的な知見などが必要である。したがって様々な科学技術的分野の知見を総合した学際的な取り組みに基づく研究開発が不可欠である。

地層処分システムに関する科学的な理解度や情報、データには不確実性が伴う。特に長期間にわたる、大きな不均質空間領域を含むシステムを対象とすることから、安全評価に用いるモデルやデータベースが、例えばシステム特性の時間変化の直接的な表現といった点に関してかなり精緻なものになったとしても、実際の処分システムに比較すれば、明らかに相当な簡略化が行われたものにとどまっている。従って、モデル開発に関わる様々な作業において不確実性が生じ、安全評価においてはこうした不確実性を分析しておくことが極めて重要である (例えば, OECD/NEA, 1991)。データの不確実性に関しては、感度解析や確率論的アプローチによってある程度考慮することが可能である。一方、モデルの不確実性に関して

は、代替モデルあるいはそのモデルのバリエーションによって検討することが可能である。これらに比べ、シナリオに伴う不確実性の評価は容易ではないが、想定されるシステムの変遷を包絡するようにシナリオが設定されていることを確かなものとするという観点で、極端な（あるいは物理的にはありえないような）”what-if”シナリオを含めるといった対応を行うことが可能である。

不確実性を完全に排除することは不可能である。こうした不確実性を念頭に置いたうえで、安全性を判断するという観点から、安全評価の過程や論拠が信頼に足るものとなるようにすることが必要である。このためには、予測に用いるシナリオ、モデル、データについて十分議論が尽くされているかどうか重要となる。

地層処分プロジェクトでは、一般に初期の段階においてはシステムの記述に関して大きな不確実性を伴うが、サイトの調査が進み処分場の設計がより詳細に行われるようになるに従って不確実性は低減していく。また、広い意味での科学技術の進歩によってシステムの理解が進むことによっても不確実性は小さくなる。したがって、安全評価は、次節で述べる地層処分の段階的な進め方において、サイト特性調査や処分場の工学技術に関する計画へのフィードバックを行うとともに必要な研究開発を明らかにしながら繰り返し実施され、これによって安全評価の結果に対する信頼性は反復的に高められていくことになる。

処分場の建設や操業中の安全性に関しても同様に、このような基本的アプローチを採ることができる。しかし、この場合には、事故が発生すればそれまでの対策や安全評価の妥当性を直接的に検証し、これによって建設や操業の作業手続きやそれに関する安全評価のアプローチをさらに改良していくことができる点が異なっている。

2.2 地層処分計画の進め方

地層処分プロジェクトは、世界的にみると、公衆の懸念などにより、計画の遅れや計画を振り出しに戻すといった状況が生じている。このような事態に対して、最近十年ほどの間に特筆すべき2つの傾向が顕著に認められるようになった。より着実に、段階的に計画を進めるというアプローチとシステムの安全性の実証（demonstration）に関するより幅広いアプローチの開発である。

2.2.1 段階的なアプローチと意思決定

公衆の懸念に応えるために、近年、地層処分に関する倫理的側面がよりいっそう考慮されるようになった（例えば、OECD/NEA, 1995, 2005; IAEA, 1995）。特に、国家的（あるいは国際的な）事業として実施され、長期的なリスクを伴うようなプロジェクトについては、世代内及び世代間の公平性に配慮することが課題として取り上げられている（OECD/NEA, 1995）。

原子力発電の恩恵は広く享受されているのに対し地層処分プロジェクトは限られた地域の問題であり、処分場の候補サイトを巡ってはNIMBY（not in my back yard）と呼ばれる現象が共通に認められている。こうした拒否反応は、サイト選定から処分場の閉鎖までに数十年を要するという事業の長期性と閉鎖後の長期間に対する安全性への懸念によってさらに強められるものとなっている。処分場閉鎖後の長期間に対する高いレベルでの安全性について技術的な専門家の間には合意が存在しているものの、非専門家には一般によく理解されていないのが現状である。

永続的な貯蔵では、監視と長期間にわたる責任を必要とし、そのためには安定した社会が長期間存続することを前提としたうえで将来世代に対する負担を残す。このため長寿命放射性廃棄物についての将来世代に対する現世代の責任は、最終処分という対策を採ることによ

ってよりよく果たすことができると結論づけられている。

一方、一度地層処分プロジェクトを開始するという意思決定を行うと元に戻れないのではないかという懸念についても言及されている（例えば、KASAM, 1988）。このことは、世代間の公平性に関して、将来世代に問題を先送りしないというだけでなく、放射性廃棄物対策に関する将来世代の意思決定の自由を奪わないように配慮すべきという議論に結びついている。

適切に立地、設計、建設、操業、閉鎖、廃止措置がなされた地層処分場は、受動的なシステムによって安全性を確保することを意図したものであり、将来の人々に対して追加的な行動や資源の配分を求めることなく、社会の持続可能性を満たすという要求に見合った方法である。一方、放射性廃棄物の回収は、処分場が閉鎖された後であっても技術的には不可能なことではないという事実は、地層処分が将来の選択肢に対して決定的な制約とはならないことを意味している。

上述したような倫理的側面での議論を通じ、主要な問題は、地層処分の実現可能性と安全性に関する技術的な合意（NEA, 1999a）と公衆の懸念との間に溝が存在しているということであるということができる。このような状況は原子力安全全般に通ずるものとして、「情報の非対称性」理論に基づく議論も行われている（鈴木, 2003）。この状況を改善するための一つの方法が、地層処分プロジェクトを着実に段階を踏んで進め、関連する自治体が技術的な課題を十分に理解し、実施主体や規制機関に関する信頼性を高めることができるようにすることである（このようなアプローチは、**step-wise approach or staged approach** と呼ばれる）。各段階において、その段階における不確実性を念頭に次段階に進むことへの意思決定が行われ、次段階では不確実性の低減とともに安全性が高められ、将来への負担は次第に軽減されていくが、段階を踏むことにより重要な意思決定はそれを必要とする時期に居合わせる世代に委ねられる。

段階的なアプローチをより効果的なものとする方法として、

- 主要な懸念がどこに存在しているのかを明らかにし、これを解決するためにどのような方策が採られているかについて、関心のあるすべての団体と対話を行うことに焦点をあてたコミュニケーションのプログラム
- 各段階の意思決定に関する明確で透明性のあるプロセス
- 新たな技術的知識の獲得や政治社会学的な条件の変更に対応して意思決定を可逆なものとするためのオプションの提示
- 技術的な正当性に関わらず公衆の懸念に応えるため処分概念を修正できるような柔軟性（例えば、モニタリングの実施や可逆性・回収可能性（例えば、OECD/NEA, 2001a）の維持など）

を挙げることができる。

地層処分計画の段階的なアプローチにおける個々の段階は、例えば、文献調査と処分概念開発、予備的なサイト調査、最終的なサイトの選定、許認可、処分場の建設、操業、閉鎖といったプロジェクトの大きなマイルストーンによって設定することが可能である。実際上の制約から、これらの段階に数年から数十年を要することもあり、それぞれについてさらに細かく段階設定が行われることも考えられる。地層処分計画の初期における重要な意思決定点としては、処分する放射性廃棄物のタイプや量の定義、母岩と工学システムの概念の選定、研究開発に対する一般的な要件、調査を行うためのサイトの選定などが挙げられる。このうち特にサイトの選定に関しては、社会的受容性の観点も含め一般に大きな意思決定を伴う。サイトが特定され、予備的な工学システム概念が定義されると、以降の意思決定の内容は、地上及び地下の調査に関するより詳細な企画立案へと移行する。このようなプランには、主

要なシステム要素の技術的な実現可能性の実証，デザインの選択肢からの選定，地下施設のレイアウトの最適化などが含まれる。さらに，計画が進むと，建設や操業，そして最終的には閉鎖のために必要な法律上，あるいは規制上の承認へと焦点が移っていく。

段階的に地層処分を実施するというプロセスは，これを支援する技術開発プログラムの観点からも都合がよい。それぞれの段階で繰り返し行われるサイト特性調査や処分場の設計，安全評価からのフィードバックによって，研究開発の方向性を改善しサイトに適した処分場を設計することができる。このような評価のサイクルは，処分場の操業が開始された後においても継続することによって，そこで得られる経験に基づき処分場をさらに最適なものとすることが可能である。

研究開発計画は，技術的な要求に焦点をあてたものであるが，技術的な専門家ではないステークホルダーとの対話に努め，こうしたステークホルダーの要求に適切に応えるものとしていく必要がある。高レベル放射性廃棄物処分場は現段階では存在しておらず，処分システムの全体像を描き切るのは難しい。このため，非専門家の聴衆を対象とした長期間にわたる実証試験の実施の必要性についても検討を行うことが求められる。

米国研究評議会（National Research Council；以下，「NRC」という）は，処分場開発における建設，操業，閉鎖，閉鎖後の各段階を通じてどのように段階設定を行うかを一般的に検討しユッカマウンテン計画（Yucca Mountain Project）への適用性について論じている（NRC, 2003）。段階設定の方法論として，プロジェクトの計画を固定化した線形的段階設定（linear staging）について検討を行ったうえで，処分計画にとってより有効なアプローチとして，線形的段階設定に比べより柔軟な適応型段階設定（adaptive staging）を推奨している。適応型段階設定においては各段階の最後に再評価を行うことが強調されており，このような再評価にあたっては，新たに得られた知識に照らして，過去の意思決定の変更，次段階の計画通りの推進，あるいはプロジェクトの改良を可能とする選択肢を用意しておくことが必要であるとされている。計画の推進者は意思決定ポイントにおいて，

- その時点までに得られた情報の体系的な整理，統合，評価及び適用，
- 以前の段階への回帰を含む次段階に関するオプションの明確化，
- オプションとの比較を含む地層処分システムの安全評価に関する検討と更新，
- 新たに見出された知見の透明性をもった公開，
- 利害関係者との対話の確保，
- 上記すべての点に基づく次段階の内容の決定，
- 意思決定内容とその理由の周知，普及，

を行う必要があることを示している。適応型段階設定の考え方は，例えば可逆性や回収可能性（NEA, 2001a）の観点から，国際的な考え方もも整合したものである。第1章で述べたように，わが国においては最終処分方によって，サイト選定を段階的に進めることが明示されており，また，これに応じて安全規制が段階的に整備されることになっている（原子力安全委員会, 2000）。このような地層処分計画の進め方は，これまでに述べたような国際的な議論と軌を一にするものである。

2.2.2 セーフティケース：一般概念、目的と意味

(1) セーフティケースの定義

前節において強調したように、安全性の実証（demonstration）は、処分プロジェクトに関する社会的な受容を得ていくうえで鍵となる要素である。このためには、2.1.2 で述べた安全評価を実施することが必要であるが、すべてのステークホルダーの要求に応えるには十分ではない。セーフティケース（safety case：安全性を保証するための論拠）と呼ばれる、より広い意味での実証が求められる。セーフティケースは、前節で論じた地層処分プロジェクトの段階的な進め方に対応して変遷していくものである。したがって、セーフティケースはそれぞれの段階の最後に行われる意思決定において考慮される重要な因子であり、これによって、

- 次段階に進むうえで、十分な信頼性を持って安全性が実証されているか、
- 以降の段階においてどのような対策をとれば残された不確実性を低減し、セーフティケースをより強化することができるか、

といった点についての評価が行われる。

ここで注意が必要なのは、セーフティケースという用語や概念は、放射性廃棄物分野に限らず広く用いられているが、学術用語として標準化されたものでなく、その要素やどのようにこれを文書化するかといった方法についても完全に合意が得られている訳ではない。処分場閉鎖後の安全性に関するセーフティケースに限っても、最新数年かに多くの定義が提案されている。例えば OECD/NEA の議論では、

“... a collection of arguments, at a given stage of repository development, in support of the long-term safety of the repository. A safety case comprises the findings of a safety assessment and a statement of confidence in these findings. It should acknowledge the existence of any unresolved issues and provide guidance for work to resolve these issues in future development stages ...”

と定義されている（OECD/NEA, 1999b）。この定義にあるように、もし「未解決の課題（unresolved issues）」が存在するのであれば、例えば「条件付セーフティケース（conditional safety case）」という用語の方がより適切と考えられる。

閉鎖後のセーフティケースにおいては、少なくとも閉鎖後のシステムの挙動に影響を与えるという観点で、処分場の建設や操業に関する考察を含めておく必要がある。このことから、原理的には同様のアプローチによって、閉鎖前の期間に対するセーフティケース（pre-closure safety case）を含むように拡張することが可能である（例えば、Vieno and Ikonen, 2005）。

処分場閉鎖前の安全性については、他の原子力施設などと同様、処分場の閉鎖という明確に定められた施設の最終点までを対象として評価を行えばよい。一方、閉鎖後の安全性については、評価の最終点がそれほど明確に設定されているわけではなく、各国の計画においても、どの程度の期間を対象に安全性を評価する必要があるのか、また、どのような尺度によって評価を行うのかについては考え方に大きな差がある（例えば、最近の米国EPAの評価、EPA, 2005）。しかし、いずれの場合にも、地層処分場の安全性の実証を行うべき期間が極めて長期間（閉鎖後1万年から「全期間」）にわたり、このことが閉鎖後の処分場に対するセーフティケースの作成に特徴的な課題となっている。閉鎖前と異なり、閉鎖後においてはモニタリングやそれに基づく修正活動の可能性が制限されること、安全性の評価期間の長さ起因する不確実性を伴うことを念頭においてセーフティケースの作成を行う必要がある。

2.2.1 で触れた NRC の報告書（NRC, 2003）では、

“... to mean the integrated collection of all arguments that the implementer produces to demonstrate safety of the repository to all interested parties. Iterative assessment of the

safety case is the fulcrum around which decisions are made. ...”

とされ、セーフティケースは処分場の開発計画に関する段階的アプローチに沿って繰り返し作成され評価されることから、実施主体の活動に方向性を与える管理ツールとしても機能することが強調されている。

最近行われたより一般的な概念としての議論（OECD/NEA, 2004a）においては、国際的により受け入れやすいものとして以下のような IAEA の定義が引用されている。この定義では、特に安全評価（2.1.2 参照）との対比においてセーフティケースが論じられており、また、非常に一般的であることから、このまま閉鎖前の段階にも適用することが可能である。

Box 1: Definitions of safety assessment and the safety case

From: IAEA/NEA draft Safety Requirements for Geological Disposal, DS154, 2004[6].

Safety assessment is the process of systematically analysing the hazards associated with the facility and the ability of the site and designs to provide the safety functions and meet technical requirements.

The safety case is an integration of arguments and evidence that describe, quantify and substantiate the safety, and the level of confidence in the safety, of the geological disposal facility.

安全評価（safety assessment）は、処分場の立案、建設、操業を経て閉鎖前まで反復的に実施され、セーフティケースを開発し継続的に更新していくために用いられる。セーフティケースとは、処分場の安全性を定量化し立証するための証拠、解析、議論の統合体である。

IAEAの定義に示されているように、安全評価はより限定的なプロセスであり、システムが安全であることを前提としている訳でない。安全評価とは、処分システムが時間とともに徐々にではあるが不可避免的に劣化するとの想定に基づき、その潜在的な危険を現在の知識に基づいて客観的に評価することである。安全評価はセーフティケースの主要な要素であり、あるサイトに応じて設計された処分場が人間やその環境に許容できない不利益をもたらすことはないという議論を支えるために実施される。言い換えれば、安全評価が地層処分システムの安全性のレベルを示すことに主たる目的があるのに対し、セーフティケースでは安全評価によって示される定量的な評価も含め、システムの安全機能がいかに構築されているか、それがどのように機能するかを十分な証拠とともに説明することに焦点が当てられていることができる。このことは、特に地層処分の長期的な安全性に関する信頼性（confidence）を得る事が極めて重要な課題であることと関係している。

段階的に進められる処分計画の進展に伴って、資源の利用という観点から一般に重要性が増していく意思決定を支えるものとして、セーフティケースは時間とともにより包括的で厳密なものとなる。同様に意思決定における要件についても、

- プロジェクトに対する評価が信頼のおけるものであること、
- その段階の目標が達成されていること、
- 懸案事項や今後の課題が特定され、その対策が明らかになっていること

を示すために次第により厳密なものとなっていく。

詳細なセーフティケースは許認可など処分場計画の主要な意思決定点において必要となる。サイト選定を経て行われる処分場の建設や操業、閉鎖に関する許認可は、実施主体の作成するセーフティケースが、適用される基準や要求に見合ったものであることが規制当局によって認められることによってはじめて与えられる。また、このような意思決定においては、公衆の信頼を得ることも極めて重要な要素になりつつある。このため、セーフティケースは構造化された一連の文書によって提示される必要がある。一方、それほど詳細でない技術評価や安全評価は実施主体内での立案や意思決定の支援のために用いられる。プロジェクトの各段階において閉鎖後の安全性を明示的に検討することを確かなものとするうえで、セーフティケースを用意することを訓練し、科学技術的レビュー、規制当局によるレビューあるいは非専門家による評価のためにセーフティケースを説明することは不可欠である。

(2) セーフティケースの構成要素と作成手順

処分場に対するセーフティケースは、時間的に変化する可能性のある、現実的あるいは計画に固有の種々の制約条件⁵⁾ (OECD/NEA, 1997) によって与えられる枠組みの中で作成される。したがってセーフティケースの作成手続きは、処分場の計画それぞれによって、また一つの計画内で変わり得るものである。しかし、閉鎖後のセーフティケースに対し、一般的な構成要素は、図 2.2-1 のように整理されている (OECD/NEA, 2004a)。

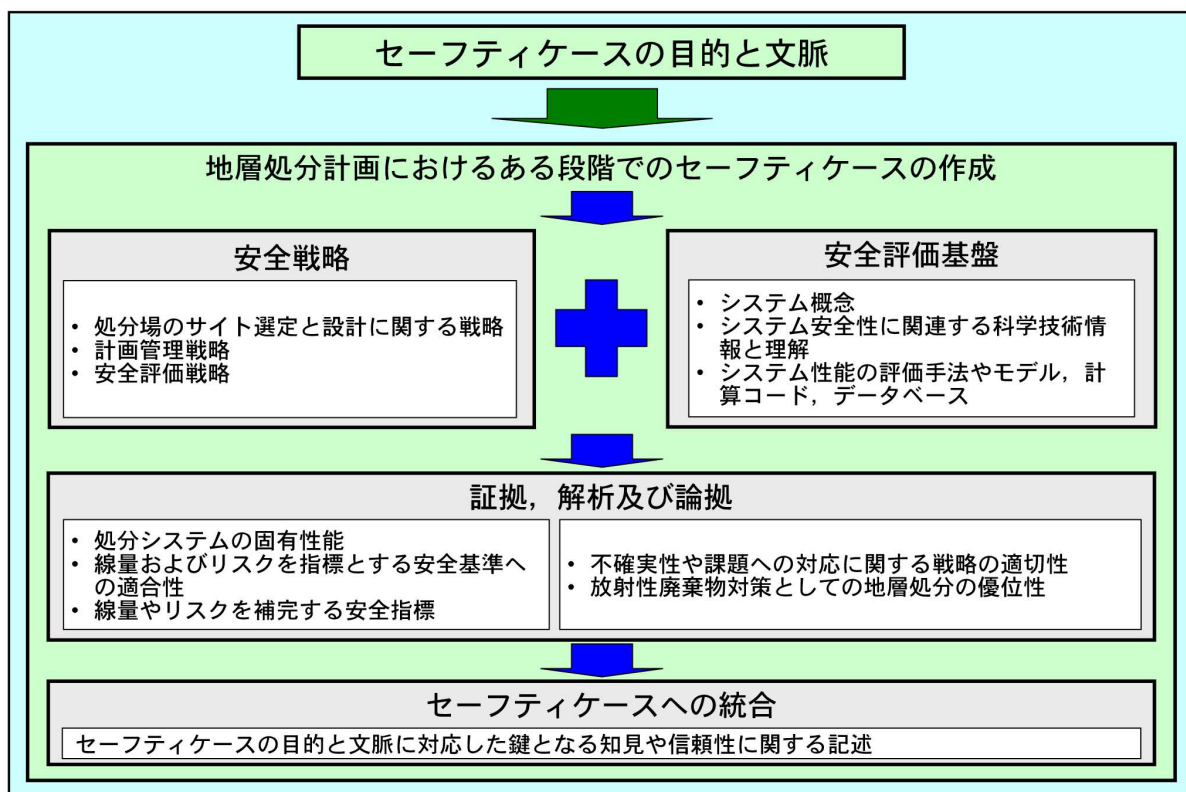


図 2.2-1 セーフティケースの構成要素 (OECD/NEA, 2004a)

5) 現実的な制約条件 (practical constraints) とは、処分場開発計画のあるステージにおいて適用されるものと定義されており、例えば廃棄物管理技術 (オーバーパック製造技術など) があげられる。一方、計画に固有の制約条件 (programme constraints) は放射性廃棄物管理計画全体に適用される条件で、自国で発生した廃棄物は自国内の処分場に処分するといった法規制上の要件などがその例である。

①目的と文脈 (purpose and context)

まず、処分計画の概要とセーフティケース作成の目的となっている段階あるいは意思決定点について明示する必要がある。これによって、作成されたセーフティケースの達成度や残された不確実性の重要性を判断するための文脈が設定される。

②安全戦略 (safety strategy)

安全戦略とは、安全な処分を達成するために採用する上位のアプローチを指し、計画管理、処分場のサイト選定と設計及び安全評価のための戦略を含む。地層処分計画は、好ましい管理と工学的原則や実践を行うことができるような管理戦略を指向するものであり、予期しないサイト特性や技術的な困難あるいは不確実性に対応できるようにするための段階的なプランニングや実施過程における十分な柔軟性を維持することが必要である。また、科学的理解や工学的な技術の進展を適切に取り込めるようにしておくことが重要である。

一般に、サイト選定や設計のための戦略は、多重バリア概念の適用 (2.1.1 参照) を含む、頑健性を確保し不確実性を最小化するような原則に立脚するものである。安全評価のための戦略には、安全評価によって安全性に関する不確実性を適切に捉え、これを表現したうえで解析するとともにその影響について調べることができるようにすることが求められる。

プロジェクトの目標を達成するうえで適切な安全戦略が採られていることを示すことは、セーフティケースの重要な要素であり、セーフティケースの文書化にあたって記述される必要がある。安全戦略の適切性を示すことに関しては、組織やスタッフの能力に関する保証、安全文化の確立といった要素も含まれる。

③安全評価基盤 (assessment basis)

安全評価基盤は、安全評価を行うための情報や解析ツールの集合体である。安全評価基盤には、処分システム (設定された処分場と地質環境条件) の記述、システム安全性の評価に関連する科学技術データや知識、システム性能の評価のための手法やモデル、計算コード、データベースが含まれる。2.1.2 で述べたように、閉鎖後の安全性に関する定量的な評価にあたっては、モデリングというアプローチが採られるため、このための方法論、モデル、計算コード及びデータベースは主要な要素となる。システム要素の安全機能の記述においては、それぞれの要素がどのような時間枠において期待されているのかが明らかとなるようにすることが重要である。安全評価の質や信頼性は安全評価基盤の質や信頼性に依存する。セーフティケースの詳細な提示のための安全評価基盤の議論には、その構成要素の質や信頼性を保証するための証拠や検討結果が含まれる必要がある。

④証拠、解析及び論拠 (evidence, analyses and arguments)

各国の規制においてはほとんどの場合、線量あるいはリスクを指標とする安全基準が与えられている。従って、規制当局のレビューを目的として作成されるセーフティケースには、これらの指標に対し、数学的な解析やある程度定性的な議論を用い処分システムに想定される一連のシナリオを対象とした評価が含まれる。

処分場の性能を解析し長期間にわたる安全性を示す作業は、2.1.2 で述べたように安全評価によって行われ文書化される必要がある。安全評価では、処分場から放射性核種が移行すると想定されるような状況はどのようなものか、またその発生の可能性はどの程度か、仮に放射性核種の移行が生じた場合、人間と環境にどの程度の影響を及ぼす可能性があるかといった点について検討を行う。この際、処分場サイトの有する地質学的な特徴や設計された安全機能が、放射性核種の移行低減に如何に寄与するかについて明らかにする必要がある。このため、必要なデータの収集とともにモデル開発が行われ、安全性に関する解析が実施される。安全評価は、地層処分計画の中で繰り返し行われ、これによってセーフティケースの改良が行われる。

安全評価では、システム全体の安全性のレベルを明らかにするだけでなく、人工バリアや天然バリアに関する個別の性能についても評価が行われる。このような評価は、プロジェクトが進み、これらのバリアの特性がより明確にされるにしたがって、より不確実性の少ない厳密なものになっていく。バリアの性能やある特性に対する性能の感度に関する情報は、繰り返し行われる処分計画全体の最適化プロセスの一環として、サイト特性調査や処分場の設計にフィードバックすることができる。段階的なアプローチに基づいて計画を進めていくうえで、このような最適化に関する証拠が主要なマイルストーンにおいて示される必要がある。

セーフティケースの頑健性を高めるためには、多面的な証拠 (multiple lines of evidence) (たとえば、OECD/NEA, 2002, 2004b) を準備し単一の論拠に基づく安全性の議論を補完することが重要である。このような補完的なタイプの証拠や議論には、放射性廃棄物管理オプションとしての地層処分の優位性に関する一般的な証拠、サイトや処分場デザインの固有の性能⁶⁾に関する証拠 (例えば、ナチュラルアナログなど)、線量やリスクを補完するような安全指標、不確実性や残された課題への対応に関する戦略の適切性に関する議論が含まれる。

⑤セーフティケースへの統合 (synthesis)

一般に、次段階の計画策定や実施に進むための意思決定を正当化するため、セーフティケースによって安全な地層処分場を構築する可能性に関する適切な信頼性が得られていることが表明される。信頼性に関する記述 (a statement of confidence) は、上述した解析や証拠、論拠に基づいて、原則的にはセーフティケースの作成者である実施主体によって行われる。セーフティケースのレビューを行う者は、そのセーフティケースに示された推論が適切なものとして信ずるに足るものかどうか、その信頼性を作成者と共有できるかどうかについて判断しなければならない。このような判断を行うために、上述した利用可能な安全性を示すための証拠、解析及び議論が統合され、セーフティケースとして提示される。これによって、計画の次段階に進むことの正当性を信頼できるものとする必要がある。この意思決定には、暗黙のうちに、現段階のすべての目標が達成されていること、また将来の段階における計画が適切なものであることについて同意することが含まれている。安全性に関する信頼性が十分でないとは判断された場合には、必要に応じ、安全戦略、サイトや処分場デザインの選定、あるいは安全評価手法に関する見直しが行われる。

すでにセーフティケースの定義に関する議論において述べたように、処分計画の初期の段階においては、サイトの特性や処分場の性能に関して大きな不確実性を伴っている。このことは、セーフティケースを、実施主体が設定する条件に基づく予備的なものとして受け取る必要があることを意味している。規制者は、したがって、このような条件が理に適ったものかどうか、また、プロジェクトの後段において明確にされることについて確信を持つに足る基盤があるかどうかについて判断を行うことが求められる。このため、セーフティケースを「条件付き」のものとし、将来の明確化に対する要件を付して受け入れるということが考えられる。

セーフティケースに関する信頼性というのは、より厳密な形式に沿って論じられる基準への適合性に比較して、本来、定性的 (あるいは「曖昧」な) 属性である。基準への適合性は、正式な許認可において示される必要があるが、セーフティケースに関する信頼性については、すべてのステークホルダーによって計画期間を通じて求められるものである。例えば、処分場が安全であるという結論を導いている議論が明瞭でよく整理されていれば、そのことだけでも信頼性は向上する。

安全性に関する論拠は、その中で含まれる不確実性に言及されているとしても、それ自体

6) 適切なサイト選定と工学的な対策によって処分場が本来的に備えるように意図された安全機能は、「固有の性能」と呼ばれる。

で信頼のおけるものとならなければならない。この観点から、あるバリアが明確に定義されていない場合、他のバリアを強く支えるような多面的な証拠を用意することが重要である。適応型段階設定によるアプローチでは、例えば、プロジェクトの初期段階において工学的に過剰な対策を施した人工バリアを考えておき、計画が進んだ段階で最適化を行うといった方法を採用することができる。実際、適切に段階設定が行われた計画においては、安全戦略とセーフティケースは、主要なプロジェクトの意思決定点においてセーフティケースがすべてのステークホルダーに受け入れられることを目指して繰り返し変遷する。

上述したように、セーフティケースは、安全評価に含まれるような定量的な解析だけでなく、処分場の安全性能の評価におけるデータや不確実性などの包括的な分析、例えば人工物や天然に見られる類似現象のような他の独立した証拠にもとづく考察を含むものである（このような多面的な議論は“multiple lines of arguments”と呼ばれる）。セーフティケースが意思決定の材料となることを考えれば、これによって、すべての利害関係者に透明性のある理解しやすい形で、安全性がどのように達成されているか、システムの動きに関する科学的知識の限界がもたらす不確実性にどのように対処しているかなどが説明されることが必要である。

セーフティケースの説明の対象となる聴衆には、規制担当者、政策決定者、公衆、実施主体内の個別分野の専門家などが含まれ、どのような議論や解析に重きを置くかは、説明対象となる聴衆の関心や技術的な知識レベルを考慮して決める必要がある。このため階層的な文書作成が必要になると考えられ、これらの文書間の整合性を維持することが重要となる。

説明すべきセーフティケースの内容は一意に定まったものとなっていないなければならないが、種々の聴衆に対する異なるレベルの詳細度に対応した「表現」を用いることが可能である。しかし、すべてのレベルにおいて科学技術的に健全な基盤と実際に実施された研究開発に立脚した説明であることが必須である。同時に、聴衆の要求に柔軟に応ずることが可能となるような枠組みを維持しておくことが重要である。過度の単純化は、根拠のない過剰な安全性の喧伝となる可能性があり十分な注意を要する。セーフティケースの文書化にあたって注意すべき基本的な留意点として、

- 透明性 — セーフティケースは、対象とする聴衆の機関あるいは個人としての安全性に関する意思決定に資するという目的に照らし、明快にわかりやすく説明されなければならない。
- 追跡性 — 主要な報告書やその補助文書によって、段階的な意思決定プロセスやより技術的な専門性を有する聴衆に対し、すべての鍵となる仮定、データ及びその基盤情報を追跡できるようにしておくことが必要である。
- 公開性 — 作成された文書は、公衆も含め全てのステークホルダーに利用できるようにする必要がある。プロジェクトの初期の段階においては、ある種の情報には大きな不確実性が伴うことは避けられず、この点も含め、残された課題やその他処分システムにおいて合理的に達成すべき信頼性に影響を与えるような因子について十分な議論を尽くしたうえで、セーフティケースを支えている情報については基本的にすべて公開することが重要である。
- 専門家によるレビュー — 内外の専門家によるセーフティケースのレビューは、作成者自身だけでなくより幅広い科学技術コミュニティにおいてその信頼性を向上するための有効な手段である。

が挙げられる。

(3) セーフティケースの信頼性

セーフティケースの作成にあたっては、地層処分計画の進展に伴って蓄積される情報（例

えばサイトの地質環境)や最新の科学的知見を取り込むことによって信頼性の評価と強化を反復的に進める必要がある。安全性に関する信頼性の議論は、適切なサイトの選定と処分場の設計に基づいて地層処分システムの固有の性能を確保することに関して、またそのシステム性能を評価するための方法論及び評価結果について行われる必要がある。このような議論には、例えば提案された処分システムの概念、地層処分システムに関するデータや知識、安全評価手法、性能評価モデル、性能評価解析の手続き、デザインやサイト調査へのフィードバック、それぞれについての信頼性が含まれる (OECD/NEA, 2002)。

セーフティケース作成の開始にあたり、基本となるのは、安全性にとって最も重要なプロセスやパラメータを明らかにすることである。この作業は、上級の専門家の知識に負うところが大きい、例えば感度解析や不確実性解析の手法を利用することが可能である。

不確実性の取り扱いは地層処分プロジェクトにとって極めて重要である。すでに述べたように、初期の段階においては、こうした不確実性が予備的なセーフティケースの立脚する仮定を規定する可能性もある。鍵となる不確実性を低減していくためのプロセスを確立し、少なくともプロジェクトの安全性に関する上位の議論についてはその正当性を確かなものとするができるようにすることが重要である。

セーフティケースの全体的な信頼性は、それを支援する科学技術的な理解の質と不可分であり、このことは、科学技術的な理解の基となる研究開発計画の成果に依存する。したがってこのような研究開発には、

- 新たな展開、特にプロジェクトの進行に伴って重要なサイトの特性に関する理解が大きく変化するような可能性に 대응することができよう柔軟性を有していること
- 理解を深めるうえで、全ての利用可能な情報のソースを効果的に利用できるよくなっていること、例えば、従来の研究室や地下研究施設における試験、モデル化やアナログを利用するアプローチなどが適切に組み合わせられていること
- 厳密な品質管理システム (quality management system) の下に、研究の成果やその他の情報が追跡可能な文書としてまとめられていること

といった性質が備わっていることが重要である。

品質管理は、特に基礎的な科学研究への適用に関して、極めて興味深い重要なテーマであると認識されている。セーフティケースを支援する全てのデータは、例えば限られた時間と予算という現実的な制約の中で実施されるサイト特性調査のような活動に関して軋轢を生ずることがあるとしても、最新の知見を反映したものであると同時に品質指針に基づいて生成されたものであることが保証されることが必要である。また、測定データから安全評価に直接利用されるような「上位レベル」の情報の生成過程は、明確に定義されるとともに十分な監査を受けられるようにしておくことが求められる。

安全評価の手法、モデル、計算コード及びデータベースは明瞭かつ論理的に文書化される必要がある。これらの信頼性に関する論拠には、付随する品質管理システムが含まれ、このようなシステムによって、

- アプローチが論理的、明瞭かつ体系的であること
- 評価が監査可能な枠組みの中で実施され、監査が効果的に機能していること
- アプローチは反復的な過程を通じて継続的に改良されていること
- アプローチは専門家によるレビューを受けていること
- 安全評価の実施者に、関連するすべての情報が得られたままに伝えられるよう、研究や

サイト調査の計画に関わる者との間に効果的なコミュニケーションが成立していること

- シナリオや計算ケースが、処分システムの性能に影響を及ぼす主要な不確実性に言及していることを確かなものとするために、感度解析が実施されていること
- 評価を行うシナリオに含むべき FEPs (2.1.2 参照) を取捨選択するための適切な基準が設定されていること
- 評価に含まれる FEPs が国際的な FEP リストと比較検討されていること (OECD/NEA, 2000)
- シナリオ, モデル, データの選定に関わる証拠が, フィールドや室内実験, 理論的な研究を含む様々なソースから得られていること, また, 可能な場合には特定のシナリオやモデル及びパラメータ値の選択を支持するために多面的な議論がなされていること
- 数学モデルは, 十分に確立された物理, 化学的原則, あるいは評価に関連した条件 (例えば空間的, 時間的スケール) においてその適用性に関し実験的な裏づけが得られているような経験則に基づいていること
- 計算コードは監査可能な枠組みの中で開発され, 例えば解析解や他のコードとの比較によって厳密 (verification) に検証されていること, また, 実験や自然条件のシミュレーションによってできるだけ確証 (validation) が行われていること
- 不確実性の取り扱いに関し明確な戦略と方法が存在していること

が保証されることが必要である。

2.2.3 研究開発の役割

すでに述べたように, 地層処分計画を段階的に進めていく過程でセーフティケースの信頼性を恒常的に高めるために, 適切な研究開発を行うことが必要である。処分場の開発に必要な数十年以上といった時間スケールにわたり, 研究開発を通じた技術的な蓄積を継続していく必要がある。これによって,

- 実施主体が地層処分計画の各段階において安全評価や不確実性の評価を含む包括的な科学技術的検討や解析を行う
- 規制者が科学的, 技術的に徹底したレビューを行うとともに指針類や要件を策定する

ための科学技術的な基盤を提供する。

総合的な研究開発計画の作成にあたっては, 重要な不確実性を低減しセーフティケースの信頼性を向上しながら, 処分計画を実際に支援していくために, 事業の長期性を念頭においておく必要がある。現在の段階において直ちに必要となる成果を得るための努力と, 情報や経験を得ようとする長い時間を要し将来において必要となると予想されるもの—例えば処分場の操業に必要な工学技術の開発—に現在から傾けておく努力とのバランスをとることが求められる。また, 科学技術的な理解を最新のものとしていくための, より基礎的な研究開発も必要である。さらに, 経験を有する質の高い人的資源を維持できるよう, 配慮することが重要である。

このようにして作成される研究開発計画は, 地層処分計画における変更 (例えば, 予測することが難しい政治社会的条件の変化に伴う変更) や基礎的な科学的技術に関する急速な進歩に対応できるよう, 柔軟なものである必要がある。また, 研究開発計画によって, 放射

性核種の挙動の理解を目的とした施設や地下の試験施設など、地層処分技術を開発、テストするための重要な基盤設備をどのように整えていくかを明らかにすることも必要である。

処分場を構築するための実際的な研究開発と、地層処分システムに関するより基礎的な理解に貢献するための研究開発を分けて考えることは意味のあることと思われる。後者については、それが十分に品質を保証した方法によって、実施主体や規制機関とは独立した研究機関によって実施されれば、その成果は実施主体、規制機関、両者に共通の資源として供することが可能である。

その有効性を最大なものとするため、研究開発計画には、

- 個々の研究開発の目的が明確となるように構造化されていること
- 包括的に文書化されていること
- 十分に品質保証が行われていること
- 不確実性を明らかにしこれを管理するための明確なプロセスを有すること
- 全てのステークホルダーが内容を知ることができること

が求められる。

ある段階におけるセーフティケースにおいては、重要な不確実性と関連付けて、それらに対する、特に研究開発において取られるべき対策やアクションが示される必要がある。次段階以降、このような対策が実施されることにより、セーフティケースの信頼性が高められる。これは、安全戦略に関する重要な側面である不確実性の管理（uncertainty management）である。知識の不足に関する不確実性は、研究に投資することによって低減することが可能である。また、サイト選定や処分場のデザイン、建設に関する投資によって、不確実性を排除、あるいはその影響を低減することが可能である。

意思決定の内容によっては、考慮する必要のない不確実性もある。例えば、遠い将来の人間の食生活に関する不確実性は、意思決定においてそれほど関連性が高いものであるとは考えにくい。安全評価によって、安全性を損なうような可能性がないことを示すことができるような不確実性もある。しかし、ある段階でのセーフティケースにおいては、安全性を損なう可能性のあるすべての不確実性や例えば処分場のデザインオプションに関する残された課題について、将来の段階における研究開発計画や計画管理戦略を通じて適切に対処することができることを示す必要がある。

廃棄物管理に携わる多くの機関が、現在利用可能あるいは容易に達成できると考えられる技術を適用して考えられている処分システムの実現可能性を実証することを目的として、地上の研究施設や地下研究施設を使用した研究計画を有している。地下研究施設の開発は、単に技術の研究開発や実証のみではなく、セーフティケースで用いられている科学的な記述や説明に関する基礎が存在していることを実際に体験できるようにすることによって、セーフティケースの信頼性の向上に寄与することができるものと考えられている（例えば、OECD/NEA, 2001b）。

2.3 地層処分技術に関する知識管理

2.3.1 意思決定のための知識管理

2.2 節において、セーフティケースが意思決定のための重要な判断材料となり、その作成にあたっては、様々な科学技術的なデータや情報、知識や経験が必要であることを概観した。また、こうした必要性に見合うように研究開発計画を立案することについて議論を行った。しかし、地層処分を行うための施設の構築はこれまでに経験のないものであり、多くの新し

い課題を含んでいる。特に、従来の建設関連のプロジェクトから移転することができる経験は極めて限られている。こうした建設関連のプロジェクトでは、通常、長い時間をかけて開発され、仕様に見合うような信頼性を得るための品質保証や試験を行うことが可能であるとともに問題が生じた場合には修復を行うことができるような技術を適用して製作される素性のはっきりした製品やハードウェア部品が利用される。また、通常の工学プラントでは、システム全体をハードウェアとして実現した後においても、保守・運転を実施しながら経験を積んで技術的な改良を加えることができる。このようなプロセスは、例えばオーバーパックの製作のように部分的には地層処分に適用することが可能であるものの、多く人工バリアや天然バリアが同時に働き、長期間にわたって安全機能を発揮する必要がある地層処分システム全体に対しては、明らかに適用できない。また、こうしたバリアの中には、モニタリングを行うことができない、あるいはその特性を十分に把握できないものも存在する。システム全体の機能についてモニタリングを行うことは時間を限ったとしても不可能である。仮にモニタリングが可能であったとしても問題が生じた場合に修復作業を行うことは実際的ではない。

こうした課題に対応するため、ここでは、既存の知識管理の枠組みに基づく、形式に則ったアプローチを提案する。ここで、「知識」という語は、地層処分プロジェクトを支える全ての科学技術（社会科学、経済学、医学などを暗に内包している）を示す広範な意味で用いている。これは、さらに、共通的知識（**common knowledge**：例えば、地質学、水理学、地球化学、物理学、化学、材料科学、土木工学、資源工学、原子力工学など、個々の学問分野で確立されている知識）、一般的な廃棄物管理の知識（**generic waste management knowledge**）及びプロジェクトに特有の知識（**project-specific knowledge**）に分類することができるが、プロジェクトを進めるうえで全てのタイプの知識が利用される。

これまで、地層処分技術の要素をデータや情報、知識、経験といった形態で表現してきたが、これらは知識管理の分野では、例えば次のように区別されて説明されている（例えば、紺野, 2002）。

- 一般にデータは文字などの記号や数値で表され、情報の構成要素となるが、それだけでは意味を持たない「素」な状態。一方、情報はデータの集合であると同時に構成されることで作成者の意図が与えられるもの。情報の場合は、作成者の主観性よりも客観性や正確性が重視される。情報はなんらかの媒体によって表現されるため複写したり、空間を超えて伝播・流通させることが可能。
- 知識は、物事や事象の本質についての理解や信条、あるいはメンタルモデルと考えることができ、情報を認識し行動に至らしめる「秩序」。知識は、人間が「事象・現象の経験」と「信条・信念への思念」を融合する中から生まれるもの
- データ、情報、知識の違いは、この順に「意味のレベル」と「行動の意思決定に役立つ度合い」が大きくなること

意思決定という行為を考える場合、データや情報、知識が総合的に用いられる。しかし、データや情報を獲得、参照することで知識が付加されたり、訂正されたりすることもあり、また知識が伝わる過程で断片化し情報になることもある。したがって、データ、情報、知識の境界は必ずしも確定的なものではなく、状況や時間的に変化するものであると言える。このような知識の流動化により、知識体系をいったん構築すればそれで終わりということではなく、変化し続ける知識を捉え、活用する技術を提供する必要がある。また、個々の人間が世界をどのように認識するかということも知識を考えるうえで重要な因子である。こうした主観化した知識を様々な角度から検討し、相互に比較することによって、社会で共有し活用するための努力が重要である。これらの点は、地層処分については特に顕著である。

上記の議論から、また、本書の目的から考えても、地層処分技術をデータ、情報、知識として厳密に区別することはあまり重要ではなく、一括して「知識」と呼ぶこととして差し支

えないと考えられる。

また、地層処分に関する技術を知識基盤として構築することを「知識化」と呼ぶこととした。「知識基盤」とは、地層処分計画を進めるうえで必要となる全ての科学技術的な知識を体系的に取りまとめたものである。「知識管理 (knowledge management)」は、このような知識化のために行う管理のことであり、知識に関する開発、統合、品質保証、コミュニケーション、維持・記録保存といった全ての側面を意味する語として用いている。「知識管理システム (knowledge management system)」とは、このような知識管理の体系を示す。知識管理の重要な役割の1つは、地層処分技術に関する知識基盤を品質が保証された利用しやすいものとし、また、不足している知識を明らかにするとともにこの領域に対して研究開発の焦点をあてることによって新たな知識を産み出すことができるようにすることを目的として、知識基盤を構造化することである。

知識管理は、特定のプログラムやプロジェクトの要件（このような要件はそれ自体、要件管理システムによって開発され、構造化される）によって規定される動的なプロセスである。上述したように知識は静的なものではなく、科学の進歩に合わせて時間的に変遷する。また、経験は個々の専門家に付随するものであり、これもまた時間とともに蓄積されていく。こうした経験は、それを有している専門家が退くときには、より若い世代に確実に継承されることが必要である。こうした知識の伝承の重要性は原子力産業全体で認識されており、地層処分の分野でも実際に国際研修センター (ITC: School of Underground Waste Storage and Disposal (<http://www.itc-school.org/>)) などの活動につながっている。

理想的には、知識は客観的なものであり、価値観とは独立したものであるが、実際には関係する個々の専門家の意見や文化的な環境などによって影響を受ける。特に、いくつかの技術的な専門分野が相互に関係するような新しい領域においてはその傾向が強い。したがって、知識管理の重要な側面は、概念やデータの不確実性に関するより標準化された評価に加え、このような個人の価値間に基づく偏りについて評価を行うことである。

サイクル機構では、知識管理を行うことによって、全てのステークホルダーの要求に応え、また全てのステークホルダーが利用できるような共通の資源として地層処分技術の知識基盤を用意することを目指している。これによって、不足している知識を明らかにし、これらを補うように研究開発を進める（このようなプロセスを「知識開発」と呼ぶ）。この際、必要とされる時期に求められる知識を利用できるように、明らかとなっている要件のリストを基に将来の要件を予見することも必要である。

知識化された地層処分技術（すなわち知識基盤）の内容は、「知識ベース (knowledge base)」として具体化される（知識ベースの開発については、第3章に述べる）。知識管理には、構造化された知識ベースを作成するための、多様な情報ソースを適切に操作する作業が含まれる。このような構造化にあたっては、最終的な利用形態だけでなく、ステークホルダーに含まれる実施主体や規制機関、学術的な専門家、政治家、一般公衆など、利用者の技術的なレベルを勘案しておく必要がある。

知識ベースを役に立つものとするためには明確に構造化される必要がある。構造化を行うための効果的な方法は、利用者の要件に関係付けることである。全てのプロジェクトに対し、その計画に沿って、時間的に変化する階層的な要件を明らかにすることが可能である。こうした要件には、法律や安全規制、地域の要求（安全対策など）といった政治社会的な側面に関するものや人工バリアの設計に関わる詳細なレベルの技術的要件など、様々なものが含まれる。要件は相互に関連性をもつとともに、地層処分計画の進展や社会の変化などによってダイナミックに変化する。この作業が要件管理システムによって明確に実施されていれば、明らかにされている要件に即してほぼ自動的に知識ベースを構造化することが可能である（図 2.3-1）。プロジェクトの展開は、原理的に意思決定のネットワークによって表すことができる。それぞれの意思決定は、ある要件に対する結果であり、これは知識ベースとそれ以

前の意思決定に基づいて行うことができる。この概念は理論的には明確なものであるが、実際にこれをどのように行うかは今後の課題である。

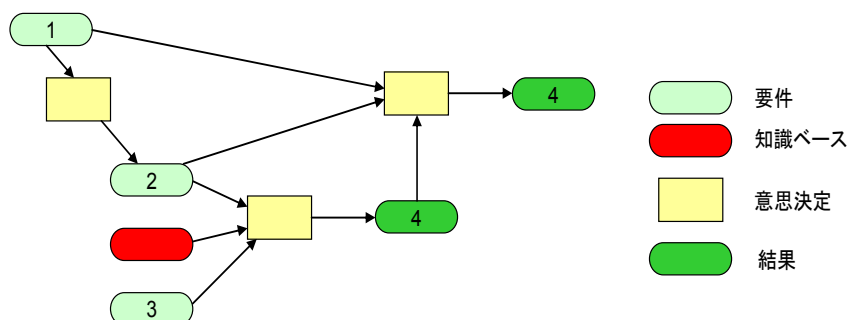


図 2.3-1 意思決定のネットワークの形式化した表現

相互に関連する種々の意思決定はネットワークを構成する。要件は意思決定の枠組みを与え、様々な要件に対して意思決定が行われる。初期の意思決定には政策レベルで行われるものが含まれる場合がある（例えば、原環機構の事業計画を規定している条件—高レベル放射性廃棄物を対象、地下 300m 以深への地層処分、など（原子力発電環境整備機構、2004）。しかし、これに続く意思決定は技術的な要素が大きくなり、このための適切な知識ベースを必要とする。

これまでに地層処分プロジェクトの有する新規性を述べてきたが、複雑で、技術革新や社会政治学的な条件の変化に直面する可能性のある長期的プロジェクトにおいて多量のデータや情報のフローを管理するという問題は、地層処分に限ったものではない。そのよい例は、20～30 年の計画期間とその倍の操業期間を持つようなプロジェクトにおいて要件管理システムの価値が示されている航空産業に見ることができる。巨大な航空機の製作と運用には、極めて大量の要素部品やプロセスが関与し、これらが安全性と密接に関係している。このような例から、地層処分に関する上記の問題も解決できないものではないといえる。

以上から、ここで提案した概念には次のような要素が含まれることになる。

- 要件管理システムは、意思決定プロセスを規定し文書化するものとして位置づけられる。
- 要件管理システムと対を成す知識管理システムは、要件の内容やそれが求められる時期に応じて、意思決定を支援するために必要な全ての知識を確保する。
- 要件管理システムや知識管理システムに加えて、その品質を確保するための品質管理システムが必要である。

この概念は、すでに述べたセーフティケースの開発を行うことを目的とした明確で透明性のあるプロセスを定義するための考え方と両立するものである（OECD/NEA, 2004a）。このことはすでに原環機構において認識され、処分場の構築を行うための構造化アプローチの一環として、上述したシステムの導入が計画されている（NUMO, 2004; Kitayama et al., 2005）。

要件の内容を明らかにするのは、知識ベースの最終利用者である。規制機関と実施主体が行う意思決定のプロセスは異なったものであり、したがって要件の内容やその管理システムも異なるものとなる。このことは、仮に求められる知識ベースが同じであったとしても生じうる。例えば、実施主体は、安全を第一としつつ環境面への配慮を行いながら、予算や効率面で合理的なものとなるよう最適化し、建設や操業が実際的に行われるようプロジェクトを進める必要がある。一方、規制側にとっては、操業中に生ずる擾乱や、安全性あるいは環境面への影響に、より注目することが必要である。

他の産業活動と比較して放射性廃棄物の処分は社会の関心が高くその反応も敏感である。したがって、関心のある一般公衆に対して知識を伝達することは極めて重要である。この問題は、実施主体、規制機関共通のものであり、そのための特別な要件管理システムを必要とすると考えられる。このような知識の伝達過程で、仮にプロジェクトのある点に関して異なった説明が行われた場合、知識ベースの作成者は、客観的な立場から確定した事実と見解とを区別しながら、知識の内容について改めてレビューを行うことが求められる。

以上に述べたような多岐にわたる役割を果たすため、知識ベースと知識管理システムには一般に次のような属性が求められる。

- 網羅性（様々なステークホルダーの求めに応じられるような地層処分技術に関する総合的知識の提供）
- 自律性（知識形成プロセス（データから情報、知識を創生するメカニズム）、自己修復機能を有すること）
- 信頼性（十分な品質保証、知識ベースに関する一貫性と整合性）
- 更新性（最新の知識内容の提供と管理システムの導入）
- 公開性（アクセス可能性、利便性）
- 保存性（履歴管理、次世代への伝承、セキュリティ）

サイクル機構（新法人）がこのような知識管理の中核的役割を担うためには、研究開発機関としての中立性を確保することが重要である。また、その最初のステップとして、これまでに行ってきた研究開発の成果を分析するとともに今後必要となる知識や要件について検討を行うことが必要である。そのうえで、従来の成果を知識化し、これを管理するためのシステムの開発を進めることが必要である。

2.3.2 セーフティケース概念に基づく知識基盤の構造化

2.2.2節で述べたように、地層処分の安全性に関する論拠全体を示す概念として定義されるセーフティケースは、関連する科学技術的知識を統合して作成され、意思決定を行うための材料を提供するものであると同時に事業全体を通じてその信頼性を恒常的に高めていくものである。したがって、実施主体や規制機関などの利用者によって要件が明確とされていない現段階においては、知識基盤の構造化を行う視点としてセーフティケースの概念を用いることは合理的であり有効と考えられる。

セーフティケースには、階層的に構造化され、相互に関係するいくつかの要素が含まれている（図2.2-1）。さらに、これらの要素にはそれぞれに関係して行われる作業の集合が含まれている。このような要素やそこに含まれる作業の境界や関係性は、一般的な議論のレベルではすべてを精密に規定することは難しく曖昧さを含んでいる。また、プロジェクトの進行に伴って時間的に変化する。しかし、知識基盤の構造化の考え方を説明する目的に対しては図に示された構造で十分役に立つ。知識基盤に関する詳細な検討が進む過程で、さらに詳細な構造化の視点（例えば学問分野（物理、化学、地質学など）や研究開発のアプローチ（フィールド観察、実験、現象論的モデリングなど））の導入による構造化が行われることも考えられる。実際的な視点として、海外や国際機関によって産み出された知識とわが国における知識といった分類が行われることもあり得る。

セーフティケースを支える階層的な知識は、模式的に図2.3-2のように表すことができる。最上位の主張（claim）は、実施主体の観点からは「システムは安全である」というものであり、処分計画が到達している段階で用いられる条件に基づいたものである。規制機関にとっては、この上位の主張は、例えば「次段階に進むうえでこのセーフティケースと用いられて

いる条件は受け入れることができる」となる。この主張の下には、順序付けられた要件の集合が存在し意思決定の枠組みを規定している。知識ベースはこれらの意思決定のためのインプットを提供する。これらのインプットは、それ自体、下位に行けば行くほど技術的に詳細となり最終的には測定データや理論的に確立した基本的な知識に行き着くような、いくつかの階層によって構造化されている。下位の知識を統合し上位の知識を産み出すようなプロセスには、一般にルールとして分類される知識統合（synthesis）を含んでいる（図では「推論ルール」としている）。このようなプロセスも一種の知識であり、実際には専門家の意見に基づく場合が多い。

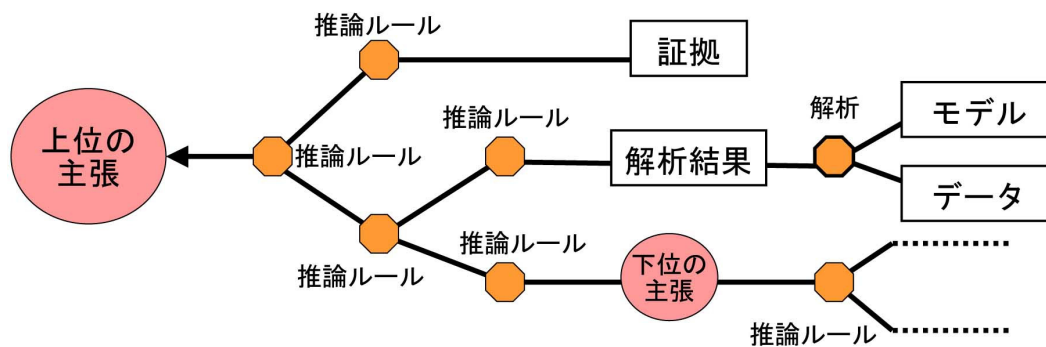


図 2.3-2 セーフティケースを支える知識の階層

以下では、2.2.2で述べたセーフティケースの一般的概念と構成要素（図2.2-1）に基づき、地層処分技術に関する知識の一般的構造を、その相互関係を考慮しながら具体的に検討する。このため次のような整理を行う。

- セーフティケースの構成要素を特徴づける内容を「知識項目」として明らかにする。知識項目は関連する知識の集合である。
- 知識項目は、関連性を考慮して階層的に構造化する。上位の知識項目は、より分解された下位の知識項目から構成される。
- それぞれのレベルで相互に関連性の高い知識項目は知識の集合体として取りまとめておく。この知識の集合体の最上位に位置する構造として、図2.2-1に示したセーフティケースの構成要素を対応させる。

知識項目の抽出にあたっては、セーフティケースの一般概念を論じたOECD/NEAの報告書（OECD/NEA, 2004a）を初め、第2次取りまとめや各国で作成された安全評価報告書、国際的なプロジェクトの成果などを参考にしている。上述したように、知識項目の相互関係はその内容によって様々な形態を有し、また、このような関係性は、セーフティケースがどのように作成されるかに依存して、また知識の時間的変遷に伴って変化する。現段階では、知識の構造化にあたって、その関係性を緩やかな表現によって包括的に示しておくことが重要であると考えられる。このため次のような整理を行う。ここでは、図2.3-3に示すような表現形式を用いることにする。このような関係は、すでに論じたように、要件が明確となるにつれて、また処分計画が進むにつれてより形式化されたものとなっていく。

(1) セーフティケースの目的と文脈に関連する知識構造

セーフティケースの作成にあたっては、最初にその目的や文脈を明確に示しておく必要がある。目的や文脈には、処分計画全体の概要や、現在どの段階にあるのか、意思決定を行う必要な時期は何時なのかといったことが含まれ、セーフティケースが意思決定においてどのように用いられるのかが明らかにされるとともに未解決のまま残された不確実性に対する重

要度が判断されることになる。これによって、必要となる知識ベースの内容やレベルが規定される。

セーフティケースが適切かどうかは、処分計画とその実施における各段階での文脈において判断され、次の段階へ進むことの意味決定がなされる。セーフティケースの目的や文脈についての記述には、一般に以下のものが含まれる。

- 現在到達している段階
- 処分場の地質環境についての要件をどのように調査し確認していくか
- 人工バリアの製作、施工をどのように行っていくか
- 処分場をどのように建設、操業、閉鎖していくのか
- これら一連の手続きをどのように管理し、またそれを進めていくうえで制約となる計画・上あるいは実用上の要因をどのように取り扱うか

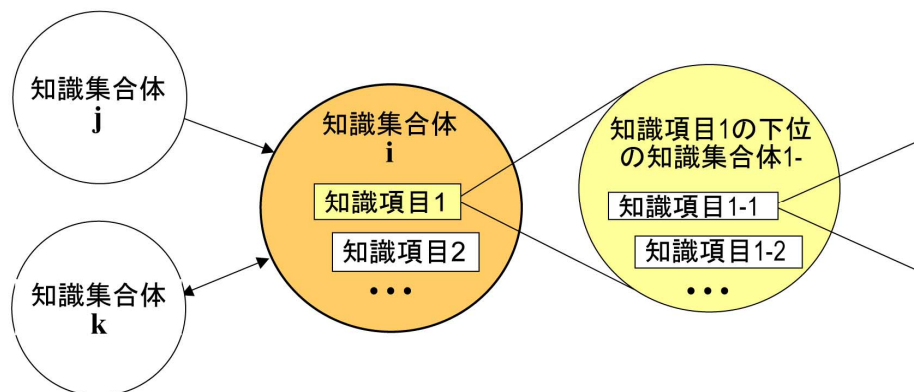


図 2.3-3 知識構造の表現形式

□ は知識項目を示す。知識項目のあるレベルでの集合体はこれらの知識項目を○で囲んで示す。知識集合体の中に含まれている知識項目はなんらかの相互関係を有する。知識集合体間の関係は矢印（→ は一方向の、↔ は双方向の関係）で示す。なお、知識項目間においてもその関係性が明らかでない場合（例えばセーフティケース概念の定義からそのように関係付けられ得るもの）については、同様に矢印で表しておくことにする。

すでになされている、あるいは今後採られる重要な意思決定、意思決定後に採られる次の行為、意思決定プロセスにおける種々の機関の役割などについても記載されることが望ましい。図2.3-3の表現形式でセーフティケースの目的と文脈に関する知識構造を示したものが、図2.3-4である。

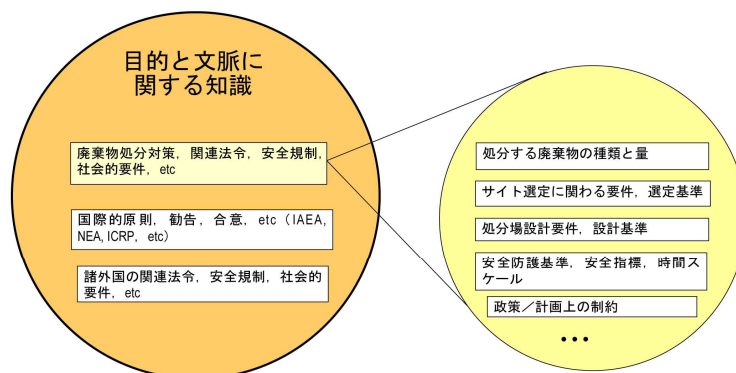


図 2.3-4 セーフティケースの目的と文脈に関する知識構造

セーフティケースの目的や文脈は、基本的にはそれぞれの国における放射性廃棄物対策や適用される法律や規制体系、体制などに規定される。また、その背景として国際放射線防護委員会（International Committee on Radiological Protection (ICRP)）、以下ICRPという）IAEAやOECD/NEAなど国際的な原則や勧告、合意事項などを念頭においておくことが重要である。わが国のように、現段階で安全規制が定められていない場合には、こうした国際機関の勧告や諸外国の関連する情報を参考とすることができる。

(2) 安全戦略に関する知識構造

地層処分の安全性を確保するために策定される安全戦略はセーフティケースを作成するうえで不可欠なものである。安全戦略には、処分場計画の立案やその実施、処分場のサイト選定や設計、安全評価など必要となる様々な作業全体を管理するための戦略が含まれる。

安全戦略は、与えられた「目的と文脈」の下、すでに述べたように地層処分計画全体を管理する「計画管理戦略」とこれに基づいて進める「処分場のサイト選定と設計に関する戦略」と「安全評価戦略」によって構成される。計画管理戦略に関する知識に関しては、常に技術的に正当な原則に基づきこれを実践するような管理方針の採用や、不確実性の管理と最新の科学技術の取り込みを可能とする計画の柔軟性の考え方、戦略がその内容となる。段階的アプローチはその基本となるものである。こうした知識は、各国における具体的な計画の考え方や国際的な原則論などを参考にすることができる。

処分場のサイト選定と設計に関する戦略においては、将来長期間にわたって安全性を確保するうえで、不確実性に対して頑健な（robust）システムを構築するための原則や考え方が含まれる。ロバストなシステムとは、

- 複雑で理解が難しい、あるいは特性化が困難な特質や現象がないこと
- 品質管理が容易であること
- 処分場や地質環境あるいはシステム外での要因（地質学的または気候学的な現象など）によって安全性を損なう可能性のある現象が発生しない、あるいは安全性を損なうような潜在的な不確実性が存在しない、またはこうした現象や不確実性に対して感度が鈍いこと

である。多重バリアシステムの採用はこのための考え方である。また、サイト選定やデザインによって不確実性を低減するための考え方や方法論に関する知識が関連する。

安全評価戦略では、不確実性の解析と評価を含む安全評価の進め方に関する戦略を示し、そのためのシナリオやモデル開発、データ設定の考え方やアプローチ、方法論を提示する。これらには、例えば決定論的評価の採用などがある。また、それらの妥当性を示すための多面的な証拠や論拠を評価するためのアプローチを示す。例えば、システムの性能に影響を与えるプロセスはすべて考慮したうえで、セーフティケースの記述にあたっては、長期耐食性の廃棄物容器や安定的な母岩の性質など、処分場とその周辺環境が有する安全機能に関連した十分な理解がなされ、信頼のおける、限られた数のプロセスや特質に重点をおく一方、潜在的な安全性を脅かすようなプロセスや特質は、評価において必ず考慮に入れるという考え方が挙げられる。

以上に加え、コミュニケーション戦略が重要な要素となる。これはOECD/NEA (OECD/NEA, 2004a) の議論では、セーフティケースの構成要素として採り上げられていないが、ステークホルダーの理解や信頼を得ていくうえで重要な役割を果たす。これは、安全戦略という上位の知識に含まれる知識項目として検討を行うことに値するものと考えられる。

安全戦略に関する知識構造は、図2.3-5のように考えることができる。

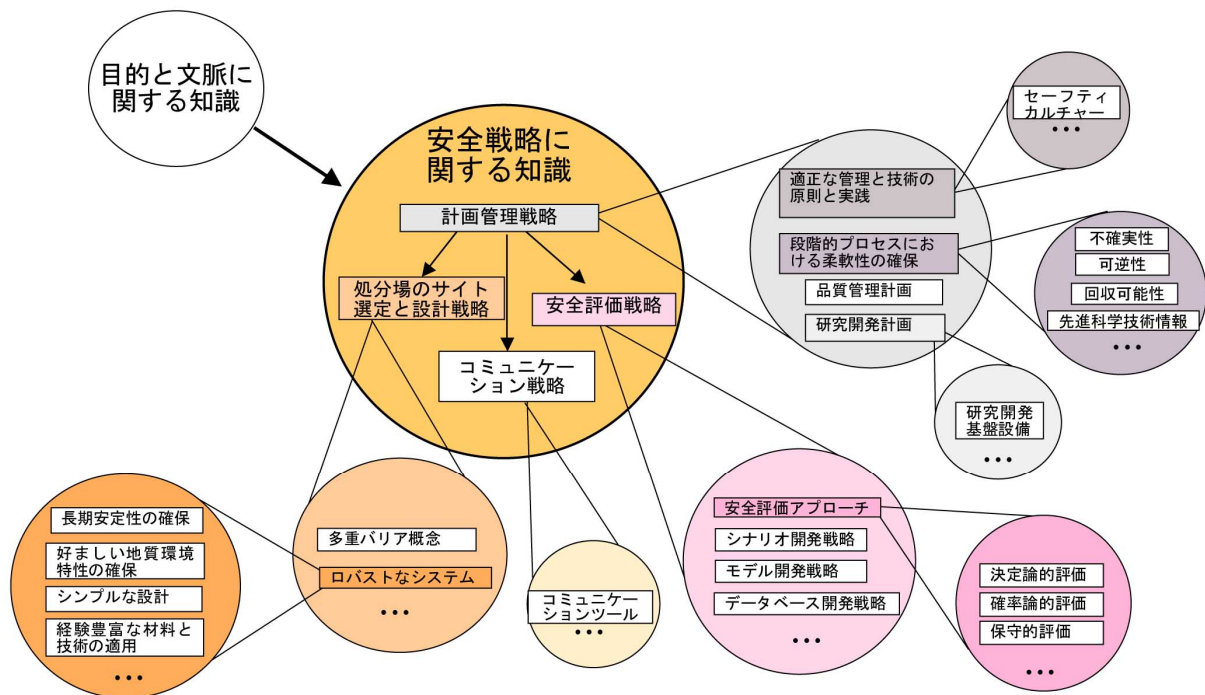


図 2.3-5 安全戦略に関する知識構造

(3) 安全評価基盤に関する知識構造

安全評価基盤の構成要素は、「システム概念」、「システム安全性に関する科学技術情報と理解」、「システム性能の評価手法、モデル、計算コード、データ」である。システム概念に関しては、システム要素である地質環境と処分場（人工バリアと地上及び地下施設）の記述とこれを行うための関連する手法や調査技術などの知識が必要である。また、処分計画の進捗度に依存するが、事業の実施や閉鎖後の安全性に影響を与える範囲での処分場の建設、操業、閉鎖及びモニタリングと制度的管理などの手続き、さらに工学的仕様どおりの製作を確保するための品質保証などが含まれる。

セーフティケースで記述される処分システムの構成要素には、母岩や周辺の地質環境、処分場サイト周辺の地表の環境、廃棄物インベントリ、人工バリア、処分場レイアウトやデザインに関する特徴、閉鎖に向けたたとえばシーリングの配置などの施工が含まれる。それぞれについて一般に以下の点が示される。

- 幾何形状や構成材
- 安全機能（例えば、廃棄物への地下水の接触にはかなりの時間を要し、その結果、廃棄物の劣化も遅れることや、地下水の好ましい地球化学的性質が維持されることなど）
- 期待される性能や時間的変遷に関する一般的記述（例えば、ある安全機能が喪失するまでの期間）

また緩衝材中の最大温度といった設計上の制約条件や設計基準も含まれる。これらシステム概念に関連した知識の内容となる。

安全評価で対象とするシステムは、実際に実現することが可能であることを示しておく必要がある。そのためには以下のような記述が必要であり、これらに関連した知識を管理する必要がある。

- 安全評価で想定する地質環境特性を支持するために実施されようとしている、あるいは実施されたサイト特性調査の手続き

- 廃棄物を含む工学的特質が設計どおりに仕様を満足しているかどうかを確かなものとするための品質保証手続きや廃棄物の受入基準
- 選定されたサイトにおいて実際に施設が稼働（建設，操業，閉鎖）するかどうかの評価

提示された処分システムの長期的な安全機能を把握するために、そこで生起すると考えられる安全性に関わる現象に関する科学技術の情報や理解を知識として整理しておく必要がある。こうした情報や理解は、整合性があり、根拠が確かなものであること、セーフティケースの目的に対して適切であることが特に重要である。また、関連するいかなる不確実性についても、可能な限り定量化あるいはバウンディングし、例えば時間の経過とともにそれがどのように変化するかを把握することが重要である。システムの安全性にとって正負両面がFEPを捉える必要がある。

安全評価を行うためには、これらの科学技術的な知識に基づいて、解析を行うためのシナリオやモデル、データが準備されなければならない。これらの開発手法や作成されたシナリオ、モデル、データベースなどが知識の内容となる。安全評価の質と信頼性は、安全評価基盤の質と信頼性に左右される。安全評価基盤に関する議論や、その構成要素の質と信頼性をサポートする証拠や議論の提示（2.2.2(3)参照）は、セーフティケースを提示するうえでの核心部分を構成する。安全評価基盤に関する知識構造は、図 2.3-6 のように考えることができる。

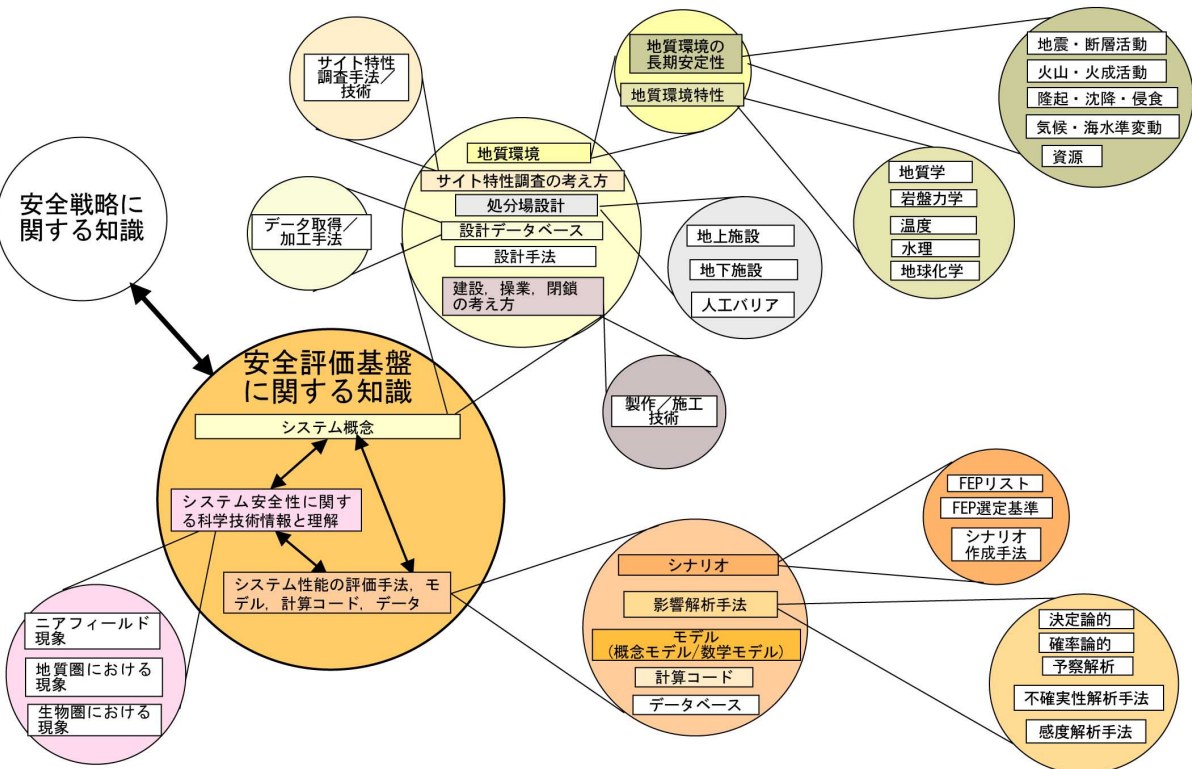


図 2.3-6 安全評価基盤に関する知識構造

(4) 証拠，解析及び論拠に関する知識構造

安全戦略を念頭に、準備された安全評価基盤に基づいて安全評価が実施される。安全評価では、作成されたシナリオに沿ったモデルとデータを用いた解析が行われ、基準と比較されて安全性を判断する基本的な材料となる。安全評価では、考慮すべき様々なシナリオに対応して解析が行われ結果として線量やリスクが算出される。併せて対象としている地層処分システムが長期間にわたって安全性を確保することについての信頼性を示すための多面的な証

拠や論拠が準備される。

このような証拠や論拠の材料としては、安全評価自体の信頼性に関するものやシステムの頑健性、固有性能を示すためのもの、遠い将来の線量やリスクの推定に伴う不確実性への対処を行うための補完的安全指標の適用（例えば、IAEA, 1994）などが含まれる。

システムの固有性能に関しては、天然ウラン鉱床や他のアナログの存在（例：地層の長期安定性、緩衝材としてのベントナイトの利用）、熱力学に関する議論（例：キャニスタ材として利用される銅についての深部地下水環境下での安定性）、堆積岩中の安定同位体のプロファイル、地下水の年代および古水理地質学的情報（例：緩慢な地下水の動きと地質環境の長期安定性）などが証拠や論拠として挙げられている（OECD/NEA, 2003）。

補完的安全指標に関しては、地表の環境への放射性核種の移行率を指標とした場合には、天然の放射性核種フラックスと比較することができる。また、廃棄物が有する放射線学的な毒性は天然のウラン鉱床が有する毒性との比較が可能であり、放射性物質が処分場とその周辺に支配的に存在あるいは減衰することの動きを追跡するうえで有効となる。

廃棄物対策オプションとしての地層処分の優位性に関する一般的な証拠もセーフティケースに含まれることがあり、その証拠の例としては、適切な地層の存在や自然システムからの観察などが挙げられる。このような議論は、セーフティケースの一部として地層処分の代替オプションを追求することではなく、適切なサイト選定と設計が行われた処分場での地層処分が十分な思慮に基づいて行われていることを提示することを目的としている。

以上のような証拠や論拠がセーフティケース作成の直接的な材料となる。このような安全評価の信頼性や多面的な証拠に関する知識がここで構造化しておくべきものである（図 2.3-7）。

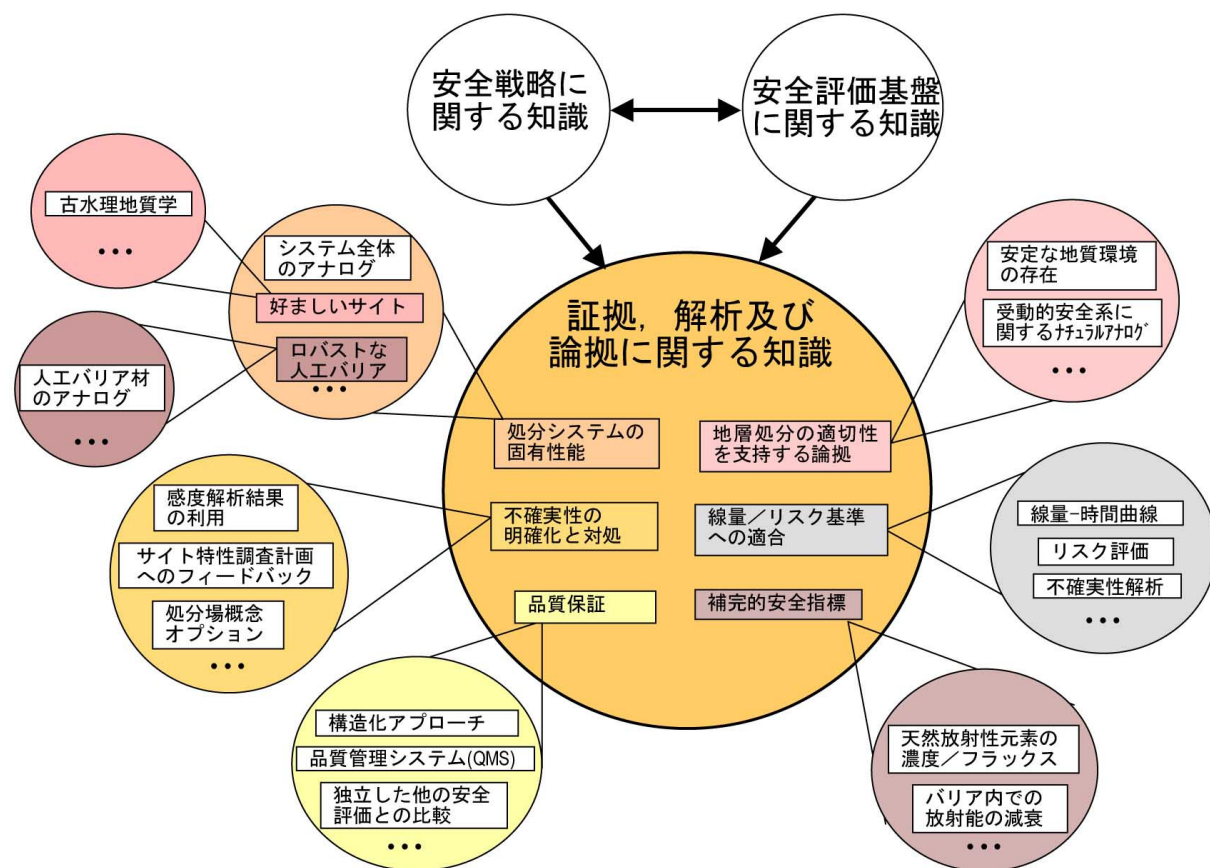


図 2.3-7 証拠, 解析及び論拠に関する知識構造

(5) セーフティケースへの統合に関する知識構造

以上で述べたセーフティケースの要素に関連する知識を全体的に用いて、セーフティケースへの統合が行われる。統合のプロセスにおいては、図2.3-2に模式的に示したようなセーフティケースの論証構造が厳密に構築される。この作業は、決められた方法に従って比較的簡単に作業を進めることができる部分もあるが、全体として極めて複雑であり基本的には経験に基づく知識（ヒューリスティクス）を蓄積することが必要である。

このような関連する様々な知識をセーフティケースへ統合するためのプロセスは知識の一種であり、例えば図2.3-8のような形（テンプレート）としてこれを表現することが可能と考えられる。このテンプレートは、図2.2-1に極めて抽象的なレベル示された一般的なセーフティケースの論証構造を、この図に付随してOECD/NEA（OECD/NEA, 2004a）によって議論されている、証拠や論拠を用いて具体的にセーフティケースを作成していくための論証構造に沿って変換した一例である。実際、このような論証構造は、要件（図中、各boxによって提示）あるいは主張の論理的なつながりとして表すことができ、意思決定における知識の役割（2.3.1参照）をより明確に示すものとなっている。

この図によって、最下層にあるシステムの理解が極めて重要であり、セーフティケース作成の基礎となることがわかる。これより上位の要件は基本的に、プロジェクトや安全戦略、またセーフティケースの目的に依存する。図2.3-8は、この意味では一般的なものである。

例えば、第2次取りまとめの段階にこの図を適用すると、最上位の主張は、「わが国においても、適切なサイトを選定し既存の技術に基づいて、長期間にわたり安全な処分システムを構築することが可能である」ということになる。ここでは、計画がジェネリックな段階であること、したがって、長期的な安全性に主眼が置かれていることが背景にある条件として留意される必要がある。

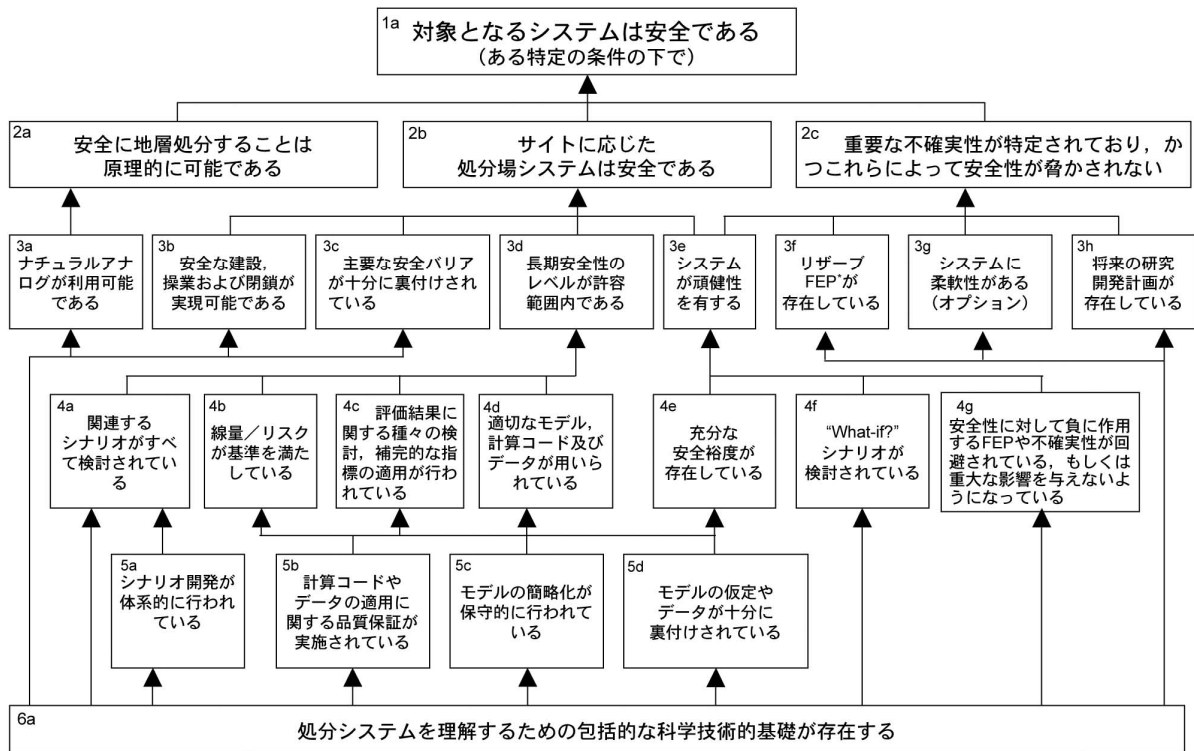
図の第2のレベルについては、第2次取りまとめの場合、地層処分の実現可能性を論ずることが目的であったため、地層処分のオプションとしての優位性に関する主張は必ずしも議論される必要はない（実際には、国際的な議論や各国の状況に基づいて何故地層処分が選択されたかについて議論が行われている）。したがって、このレベルの主張は、例えば

- わが国において地層処分に適切な地質環境が存在し、現在の技術によってサイト特性調査を実施することが可能である
- 想定される幅広い地質環境に対して性能に余裕を持たせた（頑健な）人工バリアを適用することによって高いレベルの安全性を確保することができる
- 不確実性が明らかにされ、これらによって実現可能性や安全性に大きな疑問が生じることはない

となる。

このように、主張を下位のより詳細なレベルに順に辿っていくことにより、プロジェクトあるいはある計画段階に対応したよりスペシフィックな論証構造を定義することができる。テンプレートをこのように用いることによって、セーフティケースを作成するためにはどのような論拠や証拠が必要であるかを概略的に把握し、これによって必要となる知識の種類や不足して知識などを明らかにし、知識管理の方向性を示唆することができる。

次章では、第2次取りまとめとH17取りまとめに示された技術的知見を基に、概要調査地区が選定される次段階に対して、このテンプレートを適用し上記の議論を行う。



*リザーブFEP：システムの安全性に寄与するが、安全評価にあたっては考慮せず保留しているFEP

図2.3-8 セーフティケースの論証構造のテンプレート例

2.4 まとめ

本章では、安全確保策の長期性と事業の長期性という特徴を考慮して地層処分技術を体系的に開発していくため、関連する多量のデータ、情報、知識（これらを一括して「知識」と呼んだ）をセーフティケース概念に基づいて構造化することにより地層処分計画の進展に応じて継続的に管理するための方法論について論じた。

段階的に進められる処分計画において、計画を次段階に進めるかどうかの意思決定のための鍵となる入力情報となることがセーフティケースの本質的な役割である。セーフティケースは、その時点での知識を統合することによって段階的に作成され信頼性が高められる。セーフティケースの作成における様々な情報の統合作業を通じて、サイト調査、処分場設計、システム安全評価に関わる担当者間の対話が促進される。

科学技術的な知識基盤は、長期間にわたる事業全体を支えるうえで必須なものであり、最新の研究開発成果を取り込みつつ知識として統合し、これを継続的に管理するための枠組みを整えること—すなわち知識管理システムを構築すること—が重要である。このような地層処分技術に関する知識基盤は、実施主体や規制機関などが、安全性を示す様々な論拠や地層処分計画の種々の時間断面において行う意思決定に用いられる。

知識基盤の構造化にあたっては、利用者によって定義される要件の構造を念頭においておく必要がある。例えば、利用者自身が厳密な方法によって要件管理システムを整えていれば、要件管理の構造を、これを支えるための知識基盤の構造として自動的に適用することが可能である。現段階では、こうした構造化された要件が明らかとなっておらず、ここではセーフティケースの概念に基づいて地層処分の知識基盤を構造化する方法について提案した。セーフティケースの作成は実施主体が行う重要な作業であり、規制側がこれを評価すること

によって、地層処分計画の段階的な進め方における意思決定の重要な材料とされる。また、セーフティケースの作成には地層処分技術に関する知識の殆どが関連している。このため、処分事業の実施と規制の策的に資することを目的に進める地層処分技術に関する研究開発の成果を、わが国全体の知識基盤として構築していくという目的に対しては、その構造化を行うための視点としてセーフティケースの概念を利用することは合理的と考えることができる。

セーフティケースは従来の安全評価を中心として展開される概念であり、すでに指摘されているように、それを様々なステークホルダーに説明する際に特別の配慮を要する。これは、第一義的に実施主体がこれを構成するものと考えられており、その意味で他のステークホルダーの関わりは受身的なものであることを示唆しているといえる。この観点から知識管理の一環としてのコミュニケーションの重要性に言及し、知識管理の対象として取り込むことを提案した。セーフティケースを作成する過程自体に、関係するステークホルダーが積極的に参加しているという満足感あるいは安心感（意思決定過程が納得できるという意味で）を得ることができるような仕組みの必要性も指摘（鈴木、2005）されており、今後、知識管理を進めていくうえで検討を行うべき重要な分野である。

参考文献

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－”, 原環機構技術資料, NUMO-TR-04-01.

IAEA (1994): “Safety Indicators in Different Time Frames for the Safety Assessment of Underground Radioactive Waste Repositories”, First Report of the INWAC Subgroup on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal, IAEA-TECDOC-767.

IAEA (1995): The Principles of Radioactive Waste Management, International Atomic Energy Agency, Safety Series No. 111-F, Vienna, Austria.

IAEA: Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (1997).

KASAM (Swedish National Council for Nuclear Waste) (1988): “Ethical Aspects on Nuclear Waste”, SKN Report 29, April 1988, SKN, Stockholm, Sweden.

Kitayama, K., Umeki, H., Ueda, H., McKinley, I.G. and Kaku, K. (2005): A structured approach for stepwise tailoring of repository concepts to volunteer sites, Proc. ICEM'05: 10th Int. Conf. Environmental and Radioactive Waste Management, Sep. 4-8, 2005, Glasgow, Scotland, to be published.

紺野登 (2002): ビジュアル ナレッジマネジメント入門, 日経文庫 964.

NRC (2003): One Step at a Time, The Staged Development of Geologic Repositories for High-level Radioactive Waste, Committee on Principles and Operational Strategies for Staged Repository Systems, Board on Earth and Life Studies, National Research Council of the National Academies, the National Academy Press, Washington, D.C.

NUMO (2004): "Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environment", Nuclear Waste Management Organization of Japan, NUMO-TR-04-03.

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

OECD/NEA (1995): The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal, A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee of the OECD / Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA (1997): Lessons Learnt from Ten Performance Assessment Studies, OECD / Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA (1999a): Progress towards Geologic Disposal of Radioactive Waste: Where do We Stand? An International Assessment, OECD / Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA (1999b): Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories, Its Development and Communication, OECD / Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA (2000): Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste: An International FEP Databases, OECD / Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA (2001a): Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste, Reflections at the International Level, OECD / Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA (2001b): The Role of Underground Laboratories in Nuclear Waste Disposal programmes, OECD / Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA (2002): Establishing and Communicating Confidence in the Safety of Deep Geologic Disposal, Approaches and Arguments, OECD / Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA (2003): The Handling of Time Scales in Assessing Post-closure Safety of Deep Geological Repositories, Workshop Proceedings, April 2002, OECD, Paris.

OECD/NEA (2004a): Post-closure Safety Case for Geological Repositories, Nature and Purpose, OECD Nuclear Energy Agency, ISBN 92-64-02075-6.

OECD/NEA (2004b): Geological Disposal: Building Confidence Using Multiple Lines of Evidence, First AMIGO Workshop Proceedings, Yverdon-les-Bains, Switzerland, 3-5 June 2003, OECD / Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA (2005): Geological Repositories: Political and Technical Progress, Workshop Proceedings, Stockholm, Sweden, 7-10 December 2003, OECD / Nuclear Energy Agency, Paris, France.

鈴木篤之 (2003): 巻頭言 “「情報の非対称性」理論に学ぶ”, 日本原子力学会誌, Vol.45, No.5.

鈴木篤之 (2005): “コミュニケーション的理性”, 平成 16 年版原子力安全白書, 編集後記, 原子力安全委員会.

Vieno, T. and Ikonen, A.T.K. (2005): Plan for Safety Case of Spent Fuel Repository at Olkiluoto, Posiva 2005-01.

3. 知識ベースの開発

セーフティケースは地層処分の安全性を主張するための論拠を包括する一般的概念であり、処分計画全体を通じて恒常的に信頼性を高めていくものとされている。第2章で述べたように、このようなセーフティケースが本質的に有する性格は、知識ベースの開発にとって有効な基本的枠組みを与える。これまで地層処分の研究開発は、1989年の原子力委員会放射性廃棄物専門部会報告書で示された三つの研究分野である「地質環境条件の調査研究」、「処分技術の研究開発」、「性能評価研究」に沿って進められ、第2次取りまとめにあたってはこれらの基盤となる「地層科学研究」が設定されていた。各分野の成果は、第2次取りまとめのような包括的な技術報告書によって適宜統合され、地層処分技術としての全体像が示されてきた。

本章では、第2章に述べた考え方に基づき、研究開発成果を体系的に管理するための知識ベースの構造化に関するより具体的な例を示し、これがわが国の高レベル放射性廃棄物地層処分プロジェクトに対してどのように適用されるのかを説明する。このため、地層処分計画の次のマイルストーンである概要調査地区の選定においてセーフティケースを作成するという仮定の下に、想定される要件に対し、第2次取りまとめやH17取りまとめによって得られている技術的知識を対応付けることを試みる。これによって、現在不足している知識を明らかにするとともに、今後の研究開発の方向性を探るうえで有益な指針を与えることが可能である。また、すでに述べたように原環機構が開発を開始した要件管理システム (Kitayama, et al., 2005) に対しても有益な情報を提供できるのではないかと考える。しかし、概要調査地区選定の段階においても、地質環境などに関して得られる情報は限られており、第2次取りまとめで示された一般的なレベルでのセーフティケースと大きな差はないと考えられることを注意しておく。この意味では、サイトスペシフィックでより厳密なセーフティケースが必要となるのは、さらに後の段階（例えば、精密調査地区の選定段階）であるということができる。

3.1 知識ベースの構造化

図 3.1-1 は、前章の図 2.3-8 をわずかに変更したものであり、概要調査地区の選定にあたって作成されるセーフティケースに対して適用するためのテンプレートの例である。以下では、テンプレートに含まれている主張について、最上位の層から最下層まで順にレベル 1 からレベル 6 と呼ぶこととする。

一般的に作成された図 2.3-8 に比較して、いくつかの重要な相違がある。レベル 1 の主張は特定の候補となる概要調査地区に対する主張となり明らかに異なったものとなっている。その他の相違のうち、最も重要な要素は、レベル 2 における、地質環境の長期安定性に関する議論である。わが国の地層処分計画にとって地質環境の長期安定性は、最終処分法においても要件が示されている重要な事項であり、これを受けて原環機構では選定のための考慮事項（原子力発電環境整備機構, 2002）を明確に定義するとともに公開している。この選定基準によって、概要調査地区は文献調査の結果（例えば、活断層の存在など）に基づいて不適切なサイトが除外される。

他の大きな違いは、システムの理解に関する主張（レベル 6）が一般的な理解に関する部分とサイトスペシフィックな部分という 2 つの要素に分割されている。これは、複数の候補地点を区別し、それぞれに対応するセーフティケースを作成することができるようにするためである。また、サイトスペシフィックな特徴の比較に焦点をあてることができるようにするためである。

レベル 2 から 5 の他の要素については変更がなく、これまでの議論からそれほど大きく異

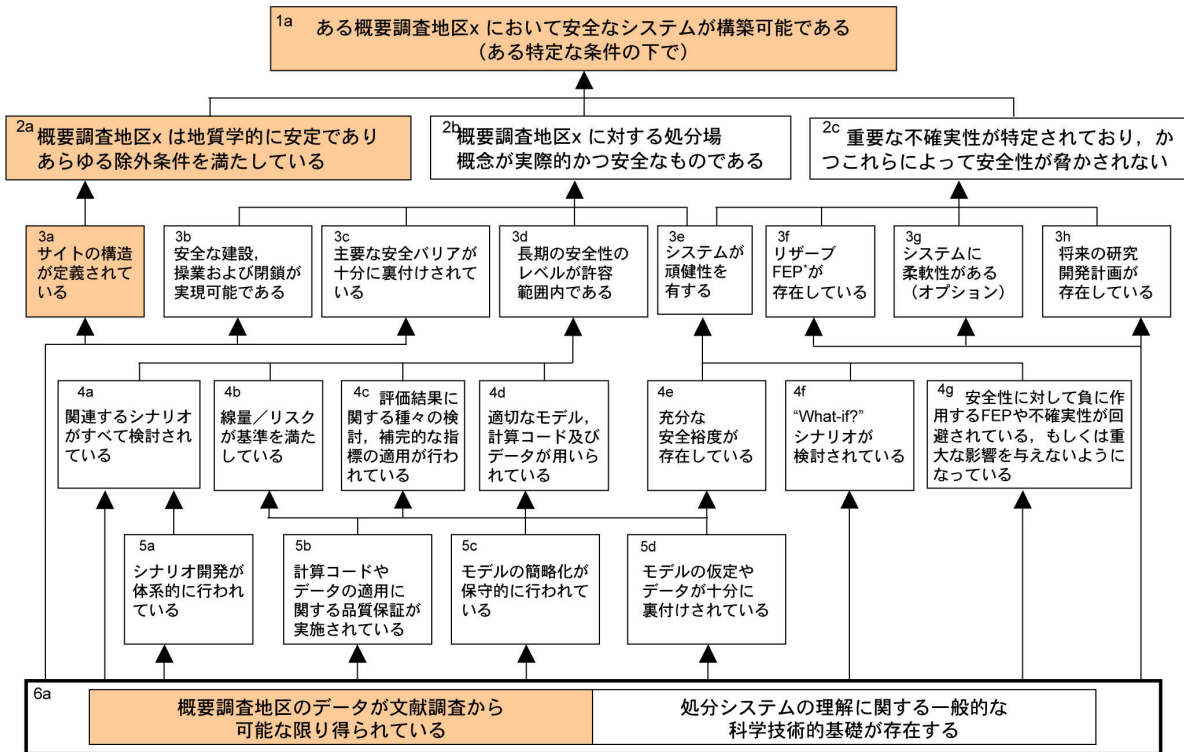
なる要素はないものの、第2次取りまとめと比較すれば、より実際面からの検討が重視されるとともに処分計画に影響を与えるような重大な不確実性が存在しないといった点に注意が払われる。

以下3.1.1から3.1.6では、このテンプレートを適用して、個々に示されている主張（あるいは要件）を支援するうえで、どのような知識が必要となるかを検討する。この検討はレベル1から順にトップダウンに行う。これは上位の主張に必要な情報ほど重要性が高いからである。ある主張に対して必要になる知識は、2.3.2で述べた知識構造にしたがって、さらに細分化して説明される場合もある。必要な知識のうち、すでに準備されているものがどの程度あるかについては、第2次取りまとめやH17取りまとめの成果を対応させることによって明らかにすることができる。このように報告書内容と要件との対応を付けることは、今後、例えば知識管理システムを文書ベースの関係データベースによって開発していく（3.3節参照）とすれば、その基礎を与える方法として便利である。

上記検討において、図3.1-1との関係が分かりやすいように、図3.1-1に示したそれぞれの主張にはレベルに対応した数字とアルファベットを組み合わせた記号（例えば、1aなど）を付してある。また、第2次取りまとめとH17取りまとめに関連して利用できる知識について示した表3.1-1から表3.1-21については、報告書の単位ごとに表すこととし、次のような略号を用いている。

- 第2次取りまとめ
 - －総論レポート（核燃料サイクル開発機構, 1999a）：OR
 - －分冊1（核燃料サイクル開発機構, 1999b）：V12-1
 - －分冊2（核燃料サイクル開発機構, 1999c）：V12-2
 - －分冊3（核燃料サイクル開発機構, 1999d）：V12-3

- H17取りまとめ
 - －分冊レポート1（核燃料サイクル開発機構, 2005a）：V17-1
 - －分冊レポート2（核燃料サイクル開発機構, 2005b）：V17-2
 - －分冊レポート3（核燃料サイクル開発機構, 2005c）：V17-3



*リザーブFEP：システムの安全性に寄与するが、安全評価にあたっては考慮せず保留しているFEP

図 3.1-1 概要調査地区を選定するために作成されるセーフティケースに対する議論と情報の流れ

ここで示されている階層は主張あるいは要件と考えることができ、それぞれがそれを支援するための知識を必要とする。

3.1.1 レベル1の主張と関連する知識ベース

システムの安全性に関するレベル1の主張（図 3.1-1, 1a）に関しては、目的と文脈が明確に定義される必要があり、このための知識が必要である（図 2.3-4）。この場合には、

- 目的は、現在の知識（及びそれを合理的と考えられる範囲で拡張したもの）に基づいて概要調査地区として技術的に明らかに不適切と考えられるサイトを排除すること
- 文脈や境界条件は、最終処分法等に沿って規定
- サイトは全て応募によるもの
- サイトの調査は文献調査によってのみ実施、したがって仮定したものは将来の調査によって確認されるという条件付き
- システム概念のモデルは、上記仮定に基づいて設定、ただしこれは予備的なものであってサイトの条件についてより理解が進めば修正
- 建設や操業段階に対する実際的な検討は詳細に行われず、安全性の検討は概略のレベル
- 閉鎖後の長期的安全評価はサイトやシステム概念について利用可能な仮定に基づく概略的なレベルで実施

といった想定が可能である。

したがって、作成されるセーフティケースは予備的なものであり、様々な条件が付されたものとなる。また、現段階で安全規制やその適合性の検討に関する指針は示されておらず、

このことはセーフティケースの厳密性にとっては大きな制約となる。不確実性の程度と重大さが重要な役割を演じるが、サイト条件の複雑さや文献情報に限るという制約の下ではこれらを前もって予測するのは困難である。

安全性に関するレベル1の主張に関しては制約の多いものにならざるを得ないが、この段階でセーフティケースの作成を試みることは、2.2.2で述べたように条件付きでの安全性を具体的に示すという意味で価値がある。また将来より厳密にセーフティケースを作成するうえで重要となるサイトスペシフィックな課題を明らかにするという点でも価値がある。

このようなセーフティケースに関する制約を除けば、レベル1の主張はレベル2の議論によって得られるインプットによって直接的に支持される。

3.1.2 レベル2の主張と関連する知識ベース

レベル2の3つの主張のうち、概要調査地区の地質環境が長期的に安定であるという主張は最も重要であり明確に規定された受容基準が存在する。

(1) 地質環境の安定性 (2a)

公開されている除外条件に関する地図（原子力発電環境整備機構、2002）に基づき明確な手続きによって、明らかに不適切なサイトは以降の検討の対象から除外することができる。この場合には、セーフティケースを作成するための努力は不要である。明らかに不適切と判断されなくとも、サイトの長期安定性に疑問が生じるような文献情報が得られるような場合もある（例えば図2.3-6に属する知識）。このような疑問がどの程度のものかを評価するためには、活断層や火山、隆起／侵食、天然資源の存在に関する全国あるいは広域のデータベースが必要となる。これらはすでに整備されており、新たな知見が得られれば更新され最新の情報が提供されるようになっている（表3.1-1）。また、原環機構によって日本の複雑なテクトニクス条件に関する概念的な理解も大きく進展し不確実性の低減に貢献していることも知識として重要である（例えば、Apted et al., 2004）。

表 3.1-1 サイトの地質環境の長期安定性に関する知識

知識項目	第2次取りまとめ	H17 取りまとめ
地震／断層活動	OR / V12-1	V17-1
火山／火成活動	OR / V12-1	V17-1 / V17-3
隆起／侵食	OR / V12-1	V17-1
天然資源の存在	OR / V12-1	V17-1
除外条件に関する地図	原環機構（2002）	
テクトニクスに基づく理解	例えば Apted et al.（2004）	
サイト環境条件の統合	現時点では利用できず	

(2) 処分場概念の安全性と実際性 (2b)

「処分場概念は安全で実際的なものである」という主張は、ある程度は文献に基づくサイトスペシフィックなデータ（図2.3-6に属する知識）を用いた解析によって支持される。しかし、このようなデータは限られたものであり、第2次取りまとめのわが国における地層処分の実現可能性に関する基本的な主張に用いられた知識ベースから、そのサイトへの適合性に関する確認を経たうえで、参照用データを作成することになると考えられる。この手続きは、関連する世界の処分場プロジェクトとの比較へと拡張することも可能である。

この主張には明らかに不確実性を伴い、このため、サイト条件に適した概念の開発という考え方が導入される。表3.1-3に処分場概念の安全性と実際性に関して利用できる知識につ

いて示す。

表 3.1-2 処分場概念の安全性と実際性に関する知識

知識項目	第2次取りまとめ	H17 取りまとめ
わが国における地層処分の実現可能性	OR / V12-2 / V12-3	
諸外国の事例	OR	
諸外国の事例の更新	現時点では利用できず	
サイトに則した処分場概念	原環機構 (NUMO, 2004)	
サイトスペシフィックな統合	現時点では利用できず	

(3) 不確実性の安全性への影響 (2c)

「不確実性が安全性を脅かすようなことはない」という主張に関する議論は、不確実性に対するシステム全体の頑健性に集約される (図 2.3-5, 2.3-6, 2.3-7 に属する知識)。この観点から、人工バリアの健全性を維持するため、安定性の他に地質環境に関するわずかな要件が適用されるだけの頑健な人工バリアシステムに力点を置いた第2次取りまとめの概念を特に参照することができる。この場合、上記(2)と同様、第2次取りまとめの地質環境に関する条件設定と対象となっているサイトのスペシフィックな条件との比較を行う必要がある。議論を強化するうえで、原環機構は処分場デザインのオプションを考慮することによって幅広い地質環境を許容できる可能性を示しており、この検討はここでの議論を強化するために用いることができると考えられる。表 3.1-3 に処分場の頑健性に関して利用できる知識を示す。

表 3.1-3 処分場概念の頑健性に関する知識

知識項目	第2次取りまとめ	H17 取りまとめ
人工バリアの頑健性に力点を置いたアプローチ	OR	
頑健性に向けた設計	原環機構 (NUMO, 2004)	
サイトスペシフィックな統合	現時点では利用できず	

3.1.3 レベル3の主張と関連する知識ベース

レベル3には、8つの主張が存在している。これらは安全評価の結果と強く関連している。従って、多くの課題は、証拠、解析及び論拠 (図 2.3-7) に関する知識を組み合わせで論じられるものである。

(1) サイトの構造モデル (3a)

「サイトの構造が明らかにされている」という主張は、文献調査の結果から得られた情報を統合することによって検討される (図 2.3-6 に属する知識)。統合のための手続きに関する信頼性は、特に瑞浪と幌延における深地層の研究施設計画の中でこれまでに実施されてきた研究や現在進行している研究の成果に基づいて議論することができる。サイトの構造モデルも十分性という観点では限られたものとなる。この場合、全国を対象としたGISデータベースから類似のサイトの情報を得て、これを外挿するといった方法を用いることが考えられる。表 3.1-4 にサイトの構造モデルに関して利用可能な知識をまとめる。

表 3.1-4 サイトの構造モデルに関する知識

知識項目	第2次取りまとめ	H17 取りまとめ
方法論と経験: ・ 一般的 ・ 深地層の研究施設	OR / V12-1	V17-1 V17-1
サイトスペシフィックなデータベース	現時点では利用できず	
補完的に利用可能な全国を対象としたデータベース	「地理情報システム」	

(2) 処分場の建設と操業 (3b)

処分場の建設に関する基本的な実現可能性に関する主張は、過去の一般的な研究によって得られた知識に基づくことが可能である。しかし、この場合も第2次取りまとめで設定されている条件と対象となっているサイトのデータを比較し、この知識の適用可能性を検討しておくことが必要である。操業に関しては、第2次取りまとめで示された簡単な検討を説明に利用することが可能である。しかし、サイトスペシフィックな検討という意味では適用できない。したがって、建設や操業時の安全性に関する議論は、不確実性を明らかにするために設定された検討に焦点をあてたものとなる。

これらの検討の一部はすでに開始されており（例えば、原子力環境整備促進・資金管理センター、2003）、今後も研究開発が継続される。表 3.1-5 に処分場の建設と操業の実現可能性／安全性に関して利用可能な知識をまとめる。

表 3.1-5 処分場の建設と操業の実現可能性／安全性に関する知識

知識項目	第2次取りまとめ	H17 取りまとめ
建設に関する基本的な実現可能性	OR / V12-2	
建設の経験（地下研究施設を含む）		H17-1
サイト固有のデータベース	現時点では利用できず	
建設時の安全性の解析	現時点では利用できず	
操業時の安全性の解析	現時点では利用できず	
人工バリア定置の実用性	例えば、原環センター（2003）	

(3) 主要な安全バリア (3c)

主要な安全バリアに関する議論は、地質環境の情報が限られることから必然的に人工バリアに焦点をあてたものとなる。このような議論は、主に第2次取りまとめの幅広い知識ベースと、H17 取りまとめによって補完された、第2次取りまとめでの課題に対する新たな知識や最新の知識に基づいて行うことができる（図 2.3-7 に属する知識）。図 3.1-2 に第2次取りまとめにおける処分概念と期待される安全機能を示す。このような理解は、ナチュラルアナログ研究によって補完することができる（図 2.3-7 に属する知識）。ただし、ナチュラルアナログについては対象となるサイトとの関連性を明確にしておく必要がある。また、例えば支保工やグラウトなど、サイトスペシフィックに必要な材料がある。これらについては、主要なバリア機能への影響に関して検討を行っておく必要がある。表 3.1-6 に主要な安全バリアの性能に関して利用可能な知識を示す。

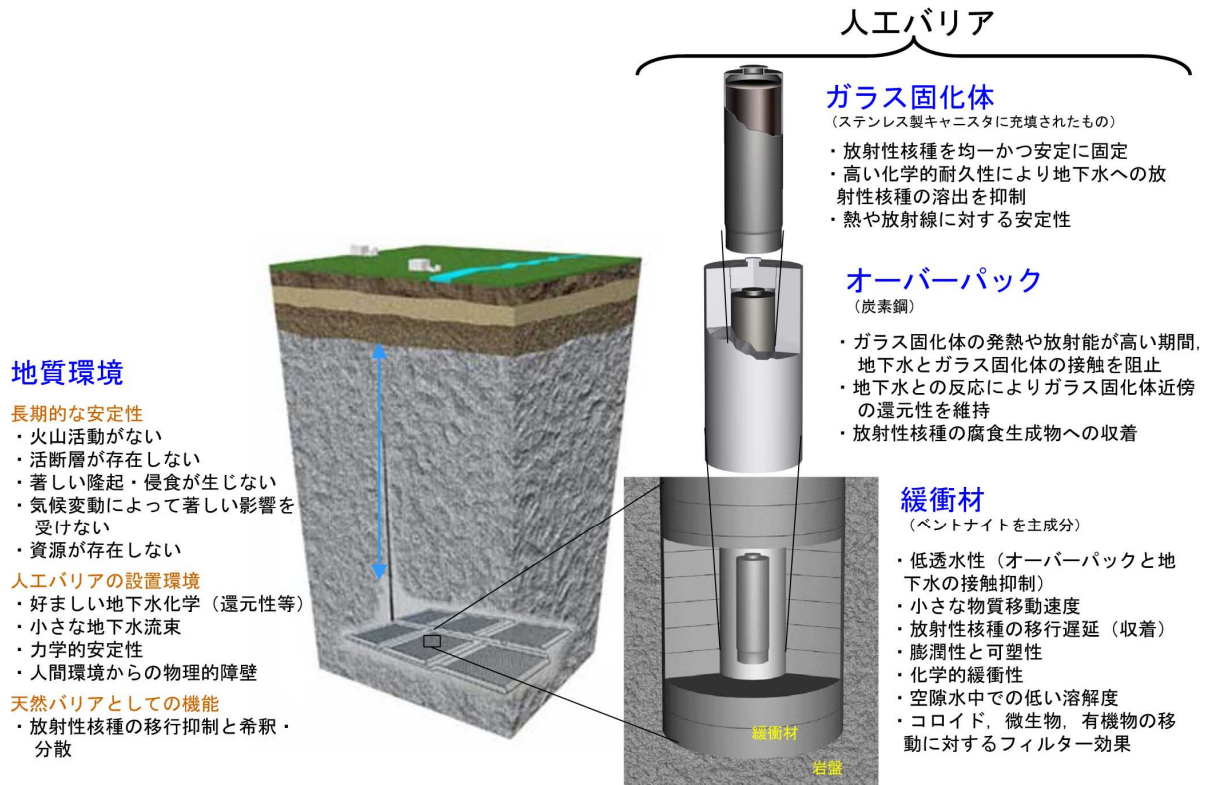


図 3.1-2 第 2 次取りまとめにおける処分概念と安全機能

表 3.1-6 主要な安全バリアの性能に関する知識

知識項目	第 2 次取りまとめ	H17 取りまとめ
人工バリア材の特性	OR / V12-2	V17-2
人工バリア性能	OR / V12-2 / V12-3	V17-2 / V17-3
天然バリア性能	OR / V12-1 / V12-3	V17-1 / V17-3
アナログ	OR / V12-1 / V12-2 / V12-3	V17-1 / V17-2 / V17-3
サイトスペシフィックに導入される材料の影響	V17-2, R&D programme	
サイトスペシフィックなデータベース	現時点では利用できず	

(4) 長期安全性のレベル (3d)

長期安全性のレベルが受け入れられるものであるかどうかに関する議論は、サイトスペシフィックな解析(図 2.3-6, 2.3-7 に属する知識)に依存し、予め予測しておくことはできない。結果が得られた際には、これを第 2 次取りまとめの結果と比較し、整合性の観点から議論することが可能と考えられる。サイトが類似点を有していれば、諸外国における安全評価の結果と比較することもできる。

このテーマは、3.1.3(5)及び(6)、3.1.4(3)の議論と密接に関連している。リザーブ FEP を動員 (3.1.3(5)) することは、戦略的な利点がある。特に、地層処分場の立地に適していると考えられるが、条件が殆ど把握されていないようなサイトに対しては有効である。これらのリザーブ FEP については、十分な定量化が行うことが可能ではなくとも、安全評価の中に取り込むことはでき、また、研究開発計画の要素とするかどうかを明らかにすることができる。

この意思決定は、知識ベースの関連する別の要素についての整備状況と主要なステークホ

ルダの懸念に関する評価によって実施主体によって行われる。表 3.1-7 に長期安全性の実証に関して利用可能な知識を示す。

表 3.1-7 長期安全性の実証に関する知識

知識項目	第2次取りまとめ	H17 取りまとめ
第2次取りまとめの性能評価	OR / V12-3	
諸外国の事例	OR / V12-3	
サイトスペシフィックな解析	現時点では利用できず	
諸外国の事例の更新	現時点では利用できず	
リザーブFEPを動員するオプション	R&D programme	

(5) システムの頑健性 (3e)

システムの頑健性に関する主張も、安全評価、不確実性や what-if シナリオの評価において行われる解析に強く依存している。すでに述べたように (3.1.3(4)参照) 頑健性を支えるための議論とリザーブ FEP のバランスは、変更することができる。

頑健性の議論は、深部地質環境に置かれた人工バリアの性能に焦点をあてたものとなる。人工バリアの頑健性に関する議論は、第2次取りまとめに示され一部 H17 取りまとめで確認されているように、よく知られた材料を用いていることや豊富なデータベース、ナチュラルアナログに基づいて行われる。第2次取りまとめにおいて明らかにされた課題については関連する情報が利用可能となっているが、さらに検討が必要と考えられるものもある(例えば、ガス移行、有機物/微生物の影響など)。図 3.1-3 にオーバーパック材として考えられている鉄の腐食に関するデータを示す。実験室における地下環境を模擬した腐食のデータから、性能を評価するための保守的な腐食速度が設定され、この保守性は多くのナチュラルアナログデータによって支持されている。

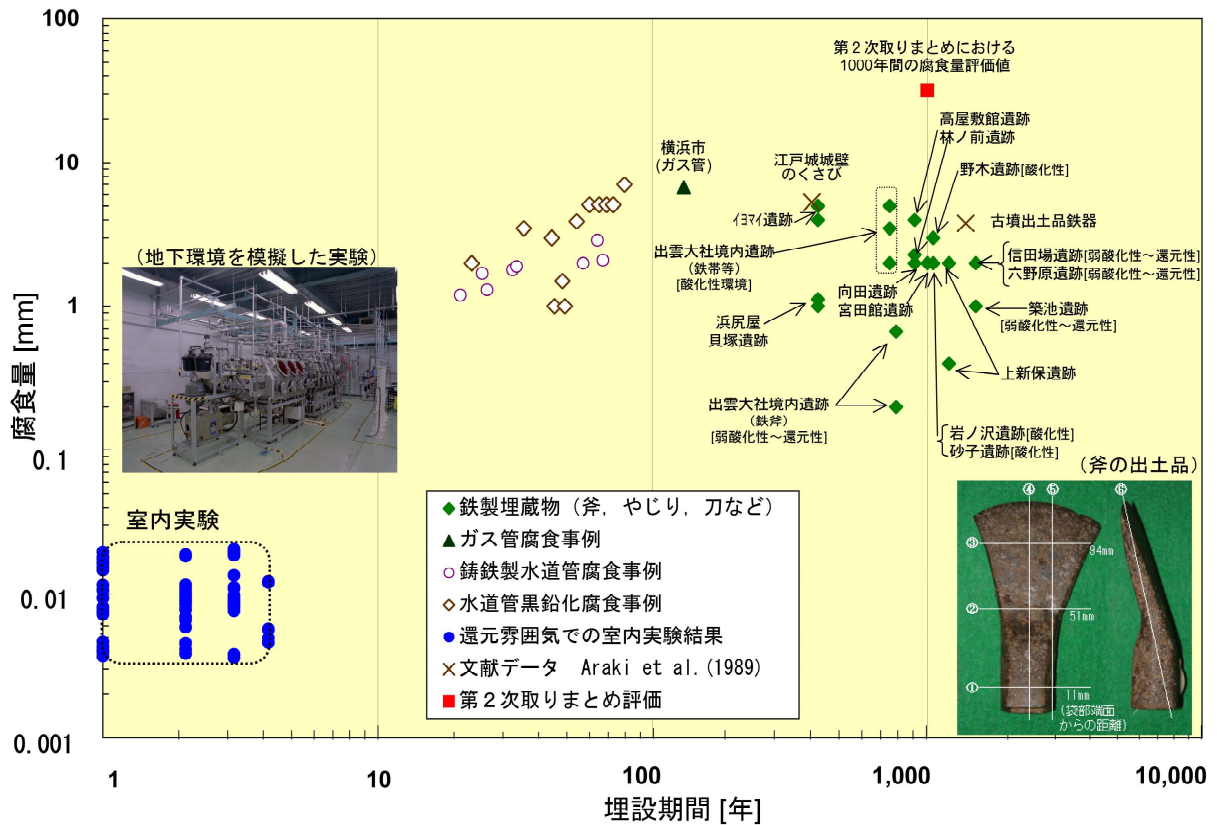


図 3.1-3 鉄の腐食に関する実験室やナチュラルアナログのデータ

(ここで用いたデータは、第2次取りまとめ、H17取りまとめに示されているもの)

サイトの条件については、人工バリアの頑健性に影響を与えるような課題が生じているかどうかを確認するための評価を行っておくことが必要である。表 3.1-8 にシステムの頑健性に関して利用可能な知識を示す。

表 3.1-8 システムの頑健性に関する知識

知識項目	第2次取りまとめ	H17 取りまとめ
人工バリアの頑健性 (概念)	OR / V12-3	
広範囲にわたるデータベース	V12-2 / V12-3	V17-2 / V17-3
未解決の課題 (部分的)	OR / V12-1 / V12-2 / V12-3	V17-1 / V17-2 / V17-3
サイトスペシフィックな安全評価	現時点では利用できず	
サイトスペシフィックな感度解析	現時点では利用できず	
未解決の課題についてさらに明確化	R&D programme	

(6) リザーブ FEP (3f)

サイトの特性調査が進むまで、天然バリアに関する FEP を詳細に特定するのは不可能である。したがって、リザーブ FEP の存在に関する分析がこの主張に関する主要なインプットとなる。しかし、すでに述べたように、直ちにあるいは将来動員する見込みがある場合には、それらの FEPs をリザーブとして定義するかどうかに関して戦略的な選択が存在する。特に、

人工バリアには、安全評価を強化するような可能性がかなり存在している（例えば、オーバーパックの寿命に関する現実的な分布、共沈など）。これらの FEPs を動員するうえでは、相応の研究開発が必要であることを再度指摘しておく。リザーブ FEPs のリストは第 2 次取りまとめに基づいて作成することができ、その適用性に関してはサイトスペシフィックな特性に照らして確認することが必要である。表 3.1-9 にリザーブ FEP の選定と分析に関して利用できる知識を示す。

表 3.1-9 リザーブ FEP の選定と分析に関する知識

知識項目	第 2 次取りまとめ	H17 取りまとめ
出発点となる FEP リスト	OR/V12-3	
リザーブ FEP を動員することの価値の評価	R&D programme	
サイトスペシフィックな FEP	現時点では利用できず	

(7) システムの柔軟性 (3g)

第 2 次取りまとめには、材料、処分場のデザインやレイアウトに関して幅広いオプションが示されており、サイト条件に対して柔軟に対応することができるように配慮されている。これは、原環機構によって引き継がれ、第 2 次取りまとめの基本的な人工バリアに基づいて幅広い拡張が行われるとともに、デザインを与えられたサイト環境条件に適したものとするためのプロセスについて検討が行われている。

これまでのところ、第 2 次取りまとめの概念の適用限界については厳密に確立されていない。しかし、適用限界に近いようなサイト（例えば、非常に狭いサイト、候補母岩が極めて深部あるいは浅いところに存在するサイトなど）に対して顕在化すると考えられる。表 3.1-10 にシステムの柔軟性に関して利用可能な知識をまとめる。

表 3.1-10 システムの柔軟性に関する知識

知識項目	第 2 次取りまとめ	H17 取りまとめ
第 2 次取りまとめの概念オプション	OR/V12-2	H17-2
代替デザインオプション	原環機構 (NUMO, 2004)	
各オプションの適用限界	R&D programme	
境界条件を与えるサイトスペシフィックな条件	現時点では利用できず	

(8) 将来の研究開発計画 (3h)

課題を明らかにしその回答を得るための研究開発計画の信頼性は、要件管理システムに基づく構造化された処分実施計画（原環機構）と知識管理システム（サイクル機構 - 新法人）によって高められると考えられる。このような計画は、例えば本節で明らかにした全ての課題に留意し、安全性に対する重要性和地層処分計画の各段階との関連性の観点でこれらを効率的に対応する。

3.1.4 レベル 4 の主張と関連する知識ベース

このレベルの主張は、安全評価の結果によって上記レベル 3 を支援するものであり、評価モデルとデータベースから導出される。第 2 次取りまとめで用いられている手順とツールに

については、国際的なレビュー（OECD/NEA, 1999）を受け、その時点では最先端をいくものであったといえることができる。従って、レベル4におけるセーフティケースを支えるための鍵となる課題は、第2次取りまとめからの技術的な進展あるいは特定のサイトの特性によって、安全性に関する知識（データ、科学技術的理解、モデル、解釈など）に疑問が生ずる、あるいはより強化されるといった変化があるかどうかである。このレベルでの議論に関係する主要な知識は、「安全評価基盤」に関するもの（図 2.3-6）及び「証拠、解析及び論拠」に関するもの（図 2.3-7）である。

(1) 評価すべきシナリオ（4a）

ここで重要なことは、シナリオ開発プロセスやサイト特性データ（特にサイトの変遷モデル）に基づき、サイト特性によって頑健な人工バリアシステムを破壊する可能性のあるシナリオが想定されるかどうかを議論することである。

このような議論にとって、第2次取りまとめにおける経験は有益である。また、サイト変遷モデルを検討するためには、文献データとこれを補完する広域あるいは全国レベルでの情報が必要となる。表 3.1-11 評価すべきシナリオの検討に関して利用可能な知識を示す。

表 3.1-11 評価すべきシナリオの検討に関する知識

知識項目	第2次取りまとめ	H17 取りまとめ
方法論と経験:	OR / V12-3	V17-3
地域／全国レベルでの補完的なデータベース	地理情報システム	
サイトの時間的変遷モデル	現時点では利用できず	

(2) 線量／リスクの評価結果（4b）

現段階で安全基準は策定されていないので、関連する知識として諸外国における議論が参考となる。このような議論は変遷しており、更新された知識を利用する必要がある。下位のレベルで行われるサイトスペシフィックな解析によって計算された線量やリスクの値は、第2次取りまとめの結果と比較して計算結果の妥当性や結果の相違の原因などについて検討を行うことが重要である。表 3.1-12 に線量／リスクの評価結果に関して利用可能な知識を示す。

表 3.1-12 線量／リスクの評価結果に関する知識

知識項目	第2次取りまとめ	H17 取りまとめ
わが国の規制に関する概要	OR / V12-3	
第2次取りまとめの線量／リスク表示による結果	OR / V12-3	

(3) 評価結果に関する種々の検討、補完的な指標の適用（4c）

この議論も、第2次取りまとめの作業を背景としたサイトスペシフィックな解析に基づいて行われる。関連する他の安全評価結果との比較については、更新が必要と考えられる。

第2次取りまとめ以降、天然に存在するウランの濃度やフラックスと比較するためのモデル化研究が行われている（図 3.1-4）。表 3.1-13 に評価結果に関する種々の検討、補完的な指標の適用に関して利用可能な知識を示す。

表 3.1-13 評価結果に関する種々の検討, 補完的な指標の適用に関する知識

知識項目	第2次取りまとめ	H17 取りまとめ
評価結果に関する種々の検討, 補完的な指標	OR / V12-3:	V17-3
安全評価の更新	現時点では利用できず	

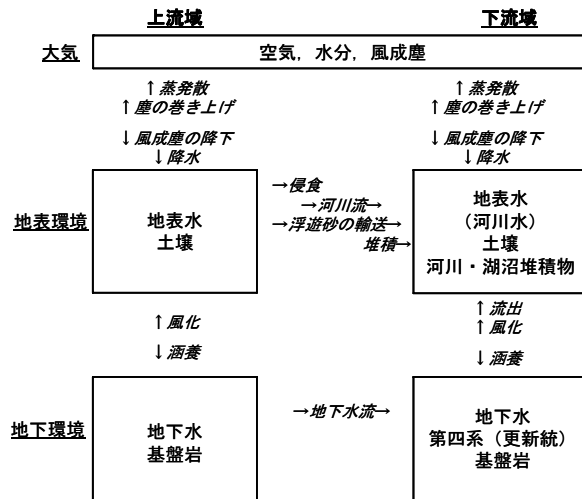


図 3.1-4 天然放射性核種のフラックスの算出方法において考慮した場, 物質および物質移動プロセスの体系 (核燃料サイクル開発機構, 2005c)

注: ボックスは物質存在の場を, 矢印はボックス間を繋ぐ物質移動プロセスとその方向を示す。イタリック体は物質移動プロセス名を示す。

(4) モデル, 計算コード及びデータの適切性 (4d)

解析の実施に関しては, 専門家によってレビューが行われている第2次取りまとめのモデル体系 (図 3.1-5) と同じものを用いて行われることが考えられる。ここで議論しておく必要があるのは, このモデル体系に関する一般的な改良, データベースの更新, サイトスペシフィックなモデルの導入などである。表 3.1-14 にモデル, 計算コード及びデータの適切性に関して利用可能な知識を示す。

表 3.1-14 モデル, 計算コード及びデータの適切性に関する知識

知識項目	第2次取りまとめ	H17 取りまとめ
モデル体系, 計算コード, データベース	OR / V12-3	V17-3
サイトスペシフィックなモデル	現時点では利用できず	
モデル体系の更新	現時点では利用できず	

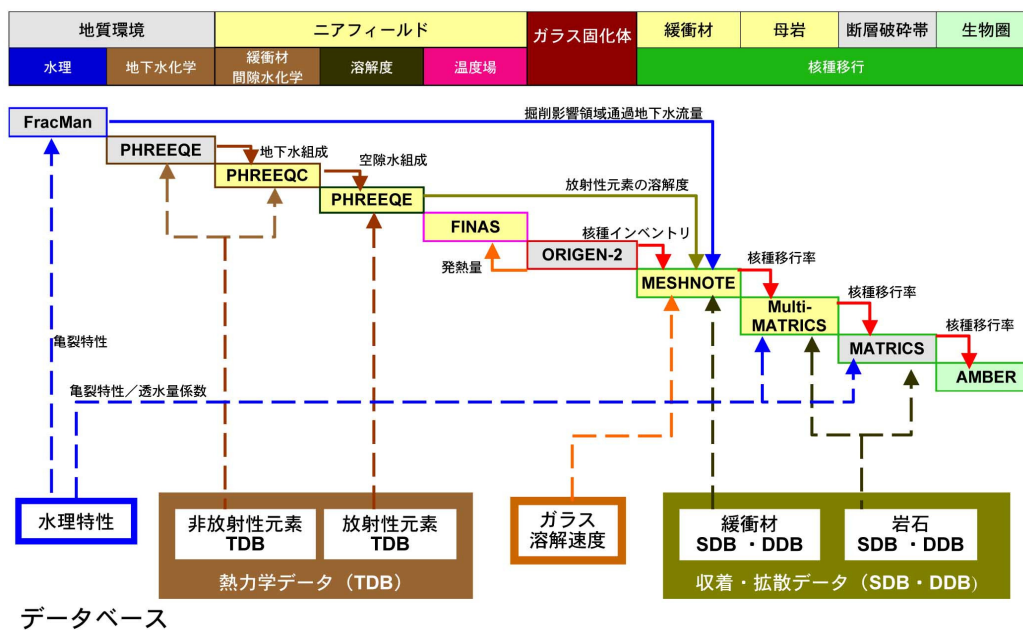


図 3.1-5 第 2 次取りまとめの安全評価で用いられた計算コードとデータベース

(5) 大きな安全裕度の存在 (4e)

上記 3.1.3(4), (5)及び(6)に対して議論したように、安全裕度に関する程度は、サイトスペシフィックな解析に加え、安全戦略にも依存する。サイトにおける大きな不確実性を有する事象に対しては、個々の人工バリア特性の詳細な理解に基づく評価において持ち込まれる保守性に関する議論が重要である。

多くのサイト因子が安全性に貢献しているが、線量に影響を及ぼす主要な属性は地下水の生物圏までの移行時間と希釈率である。このうち、どちらかが第 2 次取りまとめ同様、あるいはより良好なものであれば、安全裕度の議論は天然バリアに拡張される。表 3.1-15 に安全裕度に関して利用可能な知識を示す。

表 3.1-15 安全裕度に関する知識

知識項目	第 2 次取りまとめ	H17 取りまとめ
一般的な人工バリアの安全裕度	OR	
ガラス固化体	V12-3	V17-3
オーバーパック	V12-2 / V12-3	V17-2
ベントナイト	V12-2 / V12-3	V17-2 / V17-3
サイトスペシフィックな安全裕度	現時点では利用できず	

(6) What-if シナリオ (4f)

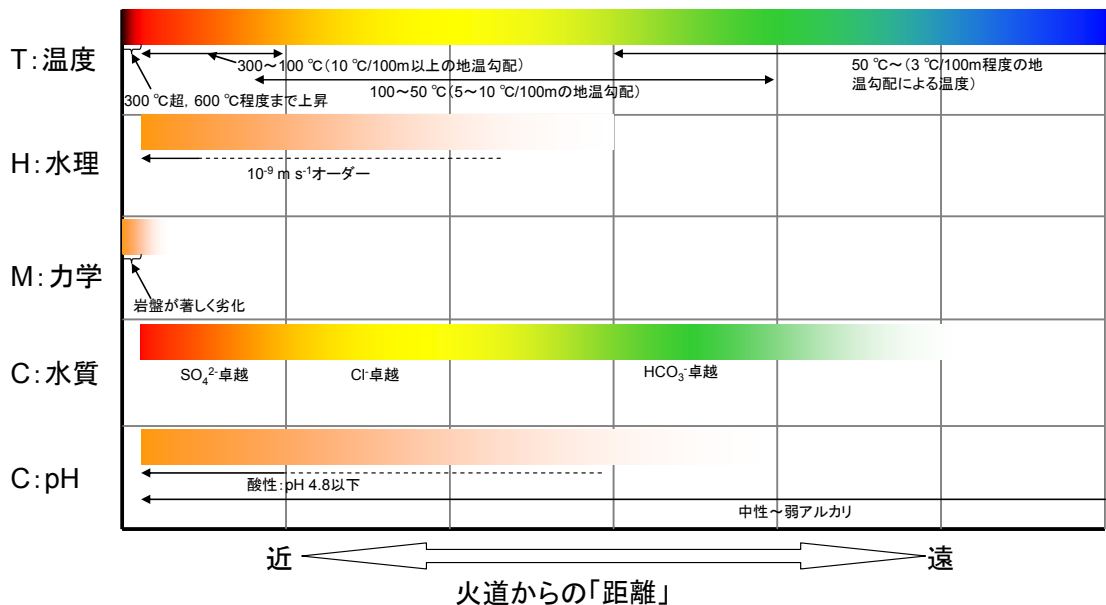
what-if シナリオは、高度に様式化された表現であり、多くの場合、サイトの影響を殆ど受けない。そのため第 2 次取りまとめにおいても検討が行われている (例えば、天然バリアが存在しないという仮定、ただし生物圏における希釈は考慮されている)。

主要な仮想的シナリオ (例えば、火山活動、断層活動、隆起/侵食、人間侵入など) は議論されることになれば、実質的に what-if シナリオである (ただし、人間侵入に関しては特別の配慮が必要)。システムの理解に関する第 2 次取りまとめ以降の進展は、議論に取り入れ

ることができる（図 3.1-6, H17 取りまとめ分冊レポート 3）。また、もし妥当なものであることが示されれば、シナリオはよりサイトスペシフィックなものに改良される（例えば、地形など）。表 3.1-16 に what-if シナリオに関して利用可能な知識を示す。

表 3.1-16 What-if シナリオに関する知識

知識項目	第 2 次取りまとめ	H17 取りまとめ
基本的な what-if シナリオ	OR / V12-3	
理解の進展 火山／火成活動 断層活動 隆起／侵食		V17-1 / V17-3 V17-1 V17-1
サイトスペシフィックな what-if シナリオ	現時点では利用できず	



留意点: 変化については、その距離における最大値を表示。但し、例外的なデータも多いことに留意。

図 3.1-6 地質環境条件（THMC：温度－水理－力学－地球化学）の変化に関する知見・データの収集・整理の作業例（核燃料サイクル開発機構, 2005c）

(7) 安全性に対して負に作用する FEP や不確実性 (4g)

人工バリアに関しては、第 2 次取りまとめ以降、設計によって安全性に対して負に作用する FEP や不確実性を排除するための、あるいは安全性への影響が小さいということを示すための検討が行われているが、基本的には第 2 次取りまとめに基づいてこれらを議論することができる。サイトスペシフィックな解析によって、重要と考えられる課題を明らかにしておく必要がある（例えば、ガス、高濃度の塩水、コロイドなど）。これらは直ちに議論されるか、今後の研究開発課題として取り上げることになる。図 3.1-7 に第 2 次取りまとめからの理解の進展の一例として核種移行に関する原位置試験の結果を示す。この結果から、コロイドによる移行の可能性が示唆されている。表 3.1-17 に安全性に対して負に作用する FEP や不確

実性に関して利用可能な知識を示す。

表 3.1-17 安全性に対して負に作用する FEP や不確実性に関する知識

知識項目	第 2 次取りまとめ	H17 取りまとめ
安全性に対して負に作用する人工バリアに関する FEP の分析	OR / V12-3	
安全性に対して負に作用する FEP の理解の進展 コロイドの影響 有機物の影響 微生物の影響 ガス発生 高 pH ブルーム		V17-3 V17-3 V17-3 V17-2 V17-2 / V17-3
安全性に対して負に作用するサイトスペシフィックな FEP	現時点では利用できず	
安全性に対して負に作用するサイトスペシフィックな FEP の明確化作業	R&D programme	

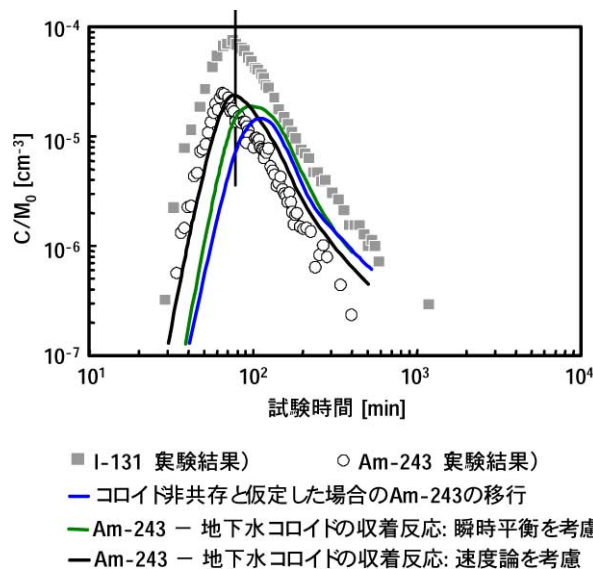


図 3.1-7 グリムセルテストサイトにおける核種移行試験（核燃料サイクル開発機構, 2005c）

3.1.5 レベル 5 の主張と関連する知識ベース

このレベルには、モデルと関連するデータベースの開発に関する主張が含まれる。これらに関連する知識は、「安全評価基盤」（図 2.3-6）に属するものである。

(1) 体系的なシナリオ開発（5a）

シナリオ開発のプロセスは実質的にはサイトに依存しないものであり、第 2 次取りまとめにおいて確立され評価がなされた方法論が存在する。これは、概要調査地区の選定にあたっての解析に対しても、最近の国際的な進捗（特に包括的な FEP リスト）と併せて適用することが可能と考えられる。原環機構では、より動的なシナリオの記述について検討することを示唆（NUMO, 2004）しており、これを行うためには今後新たなアプローチを開発していく必要がある。表 3.1-18 にシナリオ開発に関して利用可能な知識を示す。

表 3.1-18 シナリオ開発に関する知識

知識項目	第2次取りまとめ	H17 取りまとめ
シナリオ開発手法	OR / V12-3	V17-3
手法／FEP リストの更新	現時点では利用できず	
次世代の動態シナリオの開発	R&D programme	

(2) 総合的な品質保証 (5b)

これは極めて重要な要求であり、「安全戦略」(図 2.3-5) や「証拠, 解析及び論拠」(図 2.3-7) に属する知識が関係する。原環機構では品質管理システムの検討を行っている。当面、品質に関する議論は、内部あるいは外部のレビュープロセスに焦点をあてたものとなる。表 3.1-19 に品質保証に関して利用可能な知識を示す。

表 3.1-19 品質保証に関する知識

知識項目	第2次取りまとめ	H17 取りまとめ
品質保証対策	OR / V12-2 / V12-3	V17-3
原環機構の品質管理指針	現時点では利用できず	

(3) モデルの簡略化 (5c)

これは、対象となるシステムに対して基本的なモデル体系が適切なものかどうかを議論するうえで、極めて重要なものである。また、基本的な理解の内容を安全評価に用いるモデルやパラメータに変換するプロセスが明確で論理的に矛盾していないことを検討するうえで重要である。人工バリアに関しては、第2次取りまとめによって十分な基盤が提供されており、その後の研究開発によって拡張されている。

天然バリアに対しては、第2次取りまとめにおいて、核種移行モデルを導出するための基本的プロセスの検討が行われた。しかし、フィールドでの観察や測定から、安全評価モデルやデータベースを作成するまでの明確なプロセスを確立することが必要である。このために、「地質統合 (geosynthesis)」の手法(図 3.1-8, H17 取りまとめ分冊レポート 1) が開発され、地下研究施設のサイトに適用されている。この手法は、応募のあったサイトに対するモデルの簡略化の議論を支援するために用いることができる。

第2次取りまとめに述べられているように、生物圏については、放射性核種の移行を極めて様式化して表現したものであることは認識されているが、信頼性構築の観点からは、できるだけ実際のサイトに沿った表現となるようにすることが重要である。今後、一般的な生物圏モデルをサイトの環境条件に合わせていくための作業が求められる。表 3.1-20 にモデルの簡略化に関して利用可能な知識を示す。

表 3.1-20 モデルの簡略化に関する知識

知識項目	第2次取りまとめ	H17 取りまとめ
人工バリアの安全評価モデルの基盤	OR / V12-2 / V12-3	
第2次取りまとめ以降のシステムの理解 ソースターム オーバーパック破損 ニアフィールド核種移行		V17-3 V17-2
ファーフィールドのモデル化のための基盤	OR / V12-1 / V12-3	V17-1 / V17-3
地質統合アプローチの実証		V17-1
生物圏モデルの正当化	OR / V12-3	
サイトスペシフィックな地質統合	現時点では利用できず	
サイトスペシフィックな生物圏モデル	R&D programme	

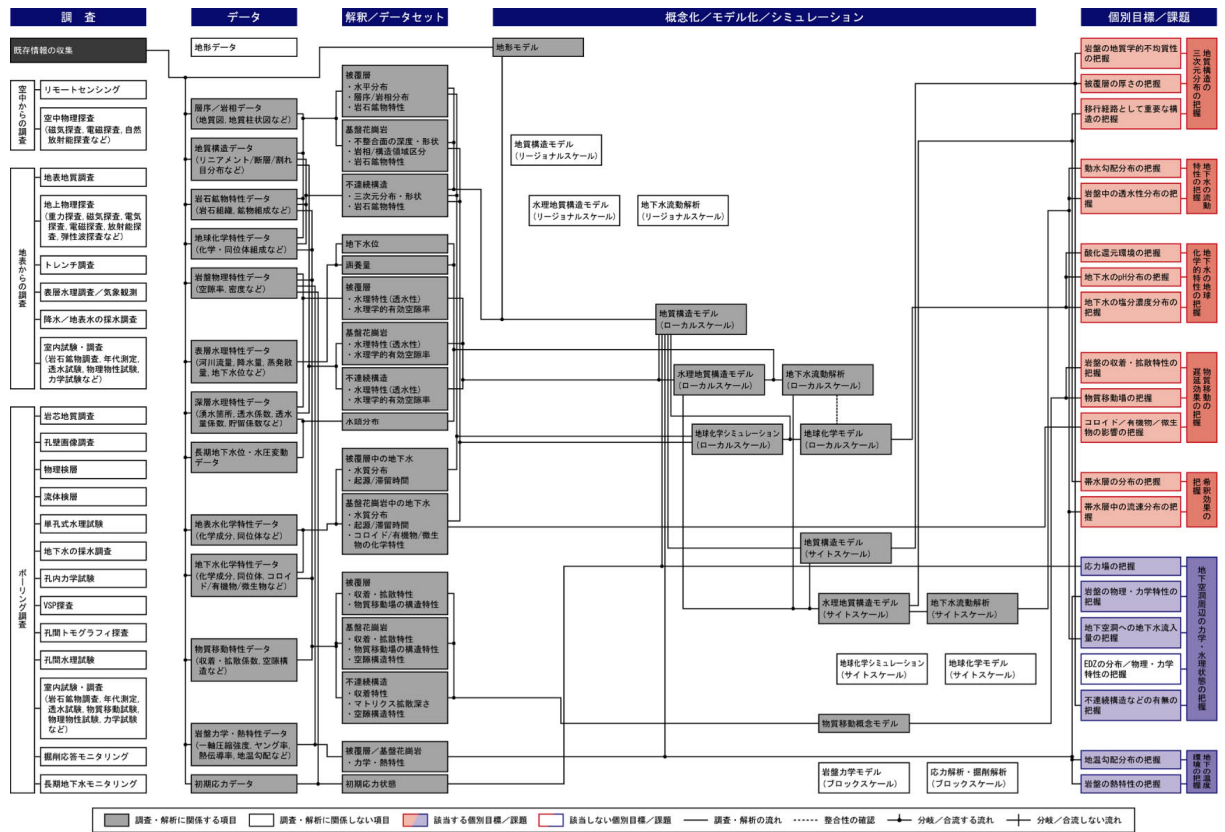


図 3.1-8 安全評価基盤を作成するための体系的な枠組み：地質統合 (geosynthesis) の一例 (核燃料サイクル開発機構, 2005a)

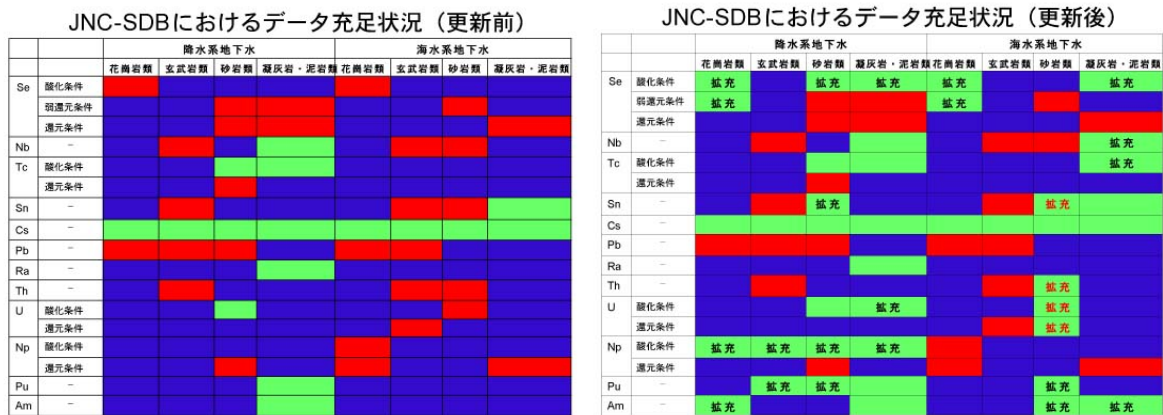
(4) モデルやデータの裏付け (5d)

第2次取りまとめのモデルやデータについては、十分に文書化されている。しかし、これらの内容は最新の知見を取り込んで更新していく必要がある。サイクル機構は一般的あるいは準一般的データに力点を置いて、モデルやデータベースの開発を行うための研究開発計画を継続しており、これらの成果は知識の強化に貢献している。図 3.1-9 (H17 取りまとめ分

冊レポート 3) にこのような研究開発の一例を示す。特に第 2 次取りまとめで想定したような特性の範囲外にあるようなサイトを評価するためには、このような知識基盤をさらに拡張していくことが必要となる。表 3.1-21 にモデルやデータの裏付けに関して利用可能な知識を示す。

表 3.1-21 モデルやデータの裏付けに関する知識

知識項目	第 2 次取りまとめ	H17 取りまとめ
基本的なモデルとデータによるサポート	OR / V12-2 / V12-3	
サポートするモデルの更新		V17-1
データベースの更新		V17-2 / V17-3
サイトスペシフィックな適用性についての検討		V17-1 / V17-2



(a) 第 2 次取りまとめ時点

(b) 第 2 次取りまとめ以降

図 3.1-9 SDB の開発 : JNC-SDB の更新前後でのデータ充足状況の変化

(核燃料サイクル開発機構, 2005c)

(緑 : データ数多い, 青 : 一部データ不足, 赤 : データ不足, 赤字の補充はアルカリ環境でのデータ増加を示す)

3.1.6 レベル 6 の主張と関連する知識ベース

最下層のレベル 6 (6a) には、すべての生データや、理解や知識の整合性をテストするための研究モデル (research model) などの基本的なモデルが含まれる。セーフティケースの観点からの要件は、

- サイトに関する知識ベースが十分なものとなっている (文献から得られると考えられる重要な知識が見落とされていない)
- 一般的な知識ベースが包括的なものとなっている (第 2 次取りまとめ, H17 取りまとめ以降の新たな進展で、重要なものは網羅されている)

である。網羅性 (completeness) を証明することは容易ではなく、知識管理を進めるうえで取り組むべき目標である。地層処分のような一般公衆の関心が高い分野では、安全性に限らず知識基盤の欠陥が重大な信頼失墜を招くことに留意すべきである。

関連する知識には、セーフティケースの作成に直接用いられることがない多くの知識が含まれているが、安全戦略 (図 2.3-5) によって求められるように、これらの知識はより幅広い

信頼性を得るためには欠くことのできないものである。

以上の検討を通じ、概要調査地区の選定に資することを目的としたセーフティケースは、サイトスペシフィックなデータが限られていることから、第2次取りまとめの知識に大きく依存することがわかる。精密調査地区の選定においては、より厳密なセーフティケースが求められ、これに応じて第2次取りまとめから相当進んだ知識ベースが構築される必要がある。

3.2 今後必要な研究開発

セーフティケースに対する要件を分析することによって、多くの知識領域の現状について検討することができ、今後研究開発を集中すべき不足している知識を明らかにすることが可能となる。しかし、これだけでは十分ではなく、地層処分プロジェクトを進めていくうえでは、新たな要件に対応して知識を開発するための計画を必要とする。知識管理システムとして統合していくための原理は、求められる基本的な知識はセーフティケースの作成に必要な知識と多くの場合共通であるということであった。しかし、知識の利用者それぞれの立場から特に重要な要件を検討することによって、セーフティケースに基づいた知識管理システムで見落とししている可能性のある知識分野を明らかにしておくことが重要である。

①実施主体にとって特に重要と考えられる要件

いくつかのサイトを並行して調査するような必要性が生じる可能性や、安全性のほかに時間的制約や予算といった計画上の制約を考慮する必要があり、これらは例えば次のような領域に関する知識を必要とする。

- 最新のサイト調査技術
- 最新の建設技術
- 処分候補地における地下研究施設の設計プラン
- 実地的な操業技術やその最適化

これらは明らかにすでに述べた知識と重複している部分がある。しかし、費用対効果の観点、さらには信頼性を確保するという観点から最適な手法を開発するという要件に対しては新たな知識を必要とする。このような観点からの研究開発は、すでに実施主体である原環機構によって開始されている（原子力発電環境整備機構，2004；NUMO，2004）。

②規制機関にとって特に重要と考えられる要件

短期的には、規制機関の目標は安全規制の策定である。この観点からは、

- 安全規制を策定するための考え方
- 規制への適合性を示すための考え方

に関する知識が求められる。前者に関しては国際的な考え方や各国の規制に関する調査とわが国への適用に関する評価を行う必要がある。特に国際的な合意が得られていない、評価の時間枠と遠い将来の期間に対する性能指標などに関する知識が重要となる。後者については国際的に見てもこれまで十分な議論が行われていない。明確に定義された規制への適合性を判断するプロセスは、実施主体、規制機関共通の知識である。

原子力安全委員会によって、上記のような観点も含め、新法人の研究開発への期待が示されている（原子力安全委員会安全研究専門部会，2005）。これは研究開発によって産み出す知識への要件として明確に示されたものであり、今後知識管理を進めていくうえで考慮すべき重要な領域である。

③他のステークホルダーにとって特に重要と考えられる要件

その他のステークホルダーとして、学術的な専門家、政治家、一般公衆などの要件についても検討を行っておくことが重要である。放射性廃棄物処分については、前章で触れたように、これらのステークホルダーとの間に、いわゆる“情報の非対称性”が顕著に存在していることに留意し、いかにコミュニケーションを進めるかが重要な要件となる。コミュニケーションの重要性については、すでに 2.3.2 において指摘し、コミュニケーション戦略を知識項目として加え、知識管理の対象として取り上げている。しかし、セーフティケースに関する理解という観点だけではなく、これらのステークホルダーの様々な要求、懸念などを明らかにしていくような双方向のコミュニケーションメカニズムを知識管理システムの導入と同時に確立していくことが重要である。

3.3 知識管理システム

地層処分技術には多岐にわたる多くの知識が関連し、これを効率的に管理していくためには計算機ベースのシステムを開発することが不可欠である。2.3.1 節で述べたように、この問題は地層処分の分野に限られたものではなく、利用可能と考えられるソフトウェアパッケージも存在している。地層処分に関わる知識については、様々なタイプが存在し、体系的かつ形式的な理論の枠組みの中で知識を組織することが可能となっている部分（物理・化学的理論：核種崩壊、物質移動理論など）と実際的で経験的な部分（ヒューリスティクス：一部の地質学的判断など）が複合的に存在している。こうした知識の複雑な相互関係を考えると、リレーショナルデータベースによるアプローチが適切なものではないかと考えられる。また、文書ベースの管理を行えば、第 2 次取りまとめや H17 取りまとめに示されているような大きな知識基盤を扱ううえで有効と考えられる。

新法人において地層処分技術の知識管理を進めていくうえで適切と考えられるソフトウェアに求められる一般的属性としては、

- 運用と維持が容易
- セキュリティの確保
- 内容の変更に伴う全体的な整合性と両立性の自動確認機能
- 自動的な知識創出機能（推論機能、データマイニングなど）
- 様々なユーザーに対する利便性
- 時間的な変遷に対する柔軟性
- 長期間の支援保証
- 同様のプロジェクトにおける十分な使用実績

などが挙げられる。しかし、このようなツールは知識管理システムの基礎を与えるだけであり、関連する知識の多様性と膨大な量を考えれば、それだけでは十分ではない。以下の点に留意する必要がある。

- 制度的な枠組み：知識管理を効率的に行うためには、知識を開発する研究者がインプットとなる知識を提供できるような制度的枠組みが必要である。知識管理システムには多くのユーザーが存在している。これらのユーザーが知識の提供者になる場合もある。また、他の機関から提供される研究開発成果もある。全体としての整合性を確保するためには、十分な管理体制をとることが重要である。このような管理には十分な経験が必要となる。
- 経験や「暗黙知」（例えば、野中・紺野，2003）の管理：人的資源という観点からは、地層処分プロジェクトには幅広い経験を有した多くのスタッフを必要とする。こうした経験豊富な人材を雇用することは現在の原子力産業全体に難しくなりつつあり、こうした人

材養成のプログラムが極めて重要である。地層処分が必要となる学際的な経験は、他の分野から移転することが難しく、例えば地下研究施設における総合的な研究開発プロジェクトの重要な役割の1つはこのような経験の場を提供することである。このような研究開発の場を確保することも知識管理の側面である。

3.4 まとめ

第2章において提案した高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識ベース全体の構造化に関する考え方について、概要調査地区選定を支援するためのセーフティケースの作成を一例として具体的に検討を行った。ここで検討の対象とした知識は、サイクル機構の第2次取りまとめとH17取りまとめ及び原環機構の報告書など限られた範囲のものであるが、このような試行によって、十分な知識が存在しており最新の情報への更新だけでよいような知識分野と要件とのギャップが大きく新たに知識を開発していく必要のある領域についての示唆を得ることができた。このようなギャップのある知識に関しては、今後の研究開発計画において優先度を上げることが望まれる。

知識管理システムは、全ての利用者にとって共通の資源であり、基本的な理解や関連する用語などの不整合を最小化し混乱をきたさないようにすることが重要である。知識管理システムは、理想的には要件管理システムとのインターフェースを有することによって利用者の要求に応じてインプットを提供することができるように構造化することができる。しかし、多様な利用者（あるいはステークホルダー）との対話によって柔軟に知識を提供することも可能である。効率的な管理機能を実現するために、計算機ベースのシステムの導入を図っていく。

知識管理システムは、適切な品質管理システムの基に運用されることが必要である。この報告書の範囲を超えているが、このような品質管理システムの開発は極めて重要であり興味深いテーマである。基本的に、品質管理システムには、

- 適切であること：真に重要な領域に焦点をあてたものとなっている
- 受容されていること：関係者間に努力を払う価値のあるものであるという合意が存在する
- 適用可能であること：抽象的な概念ではなく、実際に適用でき求める品質が確保されるといった性質を有することが求められる。

包括的な管理システムの重要性の一方で、限られた個別の領域では、品質が保証された小規模なデータベースの方がより価値が高いという点にも留意しておく必要がある。

質の高いスタッフやトレーニングプログラムによって経験を保存するという要件に応えることについても指摘した。このことは地層処分研究開発において中核的役割を果たすことが期待されている新法人の重要な役割の一つである。

参考文献

Apted, M., Berryman, K., Chapman, N., Cloos, M., Connor, C., Kitayama, K., Sparks, S. and Tsuchi, H. (2004): "Locating a Radioactive Waste Repository in the Ring of Fire", EOS, Volume 85, Number 45, pp.465 and 471, 9th November 2004, Transactions, American Geophysical Union.

野中郁次郎, 紺野登 (2003): 知識創造の方法論, 東洋経済新報社.

原子力安全委員会安全研究専門部会 (2005): “日本原子力研究開発機構に期待する安全研究”, 平成17年6月.

原子力環境整備促進・資金管理センター (2003): 平成 14 年度 地層処分技術調査等 遠隔操作技術高度化報告書.

原子力発電環境整備機構 (2002): 概要調査地区選定上の考慮事項, 高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公募関係資料-3.

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-”, 原環機構技術資料, NUMO-TR-04-01.

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

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”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 99-021.

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

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

核燃料サイクル開発機構 (2005a): “高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築-平成 17 年取りまとめ-分冊 1 深地層の科学的研究-”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 2005-014.

核燃料サイクル開発機構 (2005b): “高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築-平成 17 年取りまとめ-分冊 2 工学技術の開発-”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 2005-015.

核燃料サイクル開発機構 (2005c): “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-”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 2005-016.

Kitayama, K., Umeki, H., Ueda, H., McKinley, I.G. and Kaku, K. (2005): A structured approach for stepwise tailoring of repository concepts to volunteer sites, Proc. ICEM'05: 10th Int. Conf. Environmental and Radioactive Waste Management, Sep. 4-8, 2005, Glasgow, Scotland, to be published.

NUMO (2004): "Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environment", Nuclear Waste Management Organization of Japan, NUMO-TR-04-03.

4. まとめと今後の方向性

わが国における高レベル放射性廃棄物の地層処分計画は、第2次取りまとめまでの幅広い地質環境を対象としたジェネリックな研究開発から事業段階に進み、現在、原環機構によって公募方式によるサイト選定が進められている。H17取りまとめは、候補サイトが具体的となる文字通りのサイトスペシフィックな状態への移行期におけるサイクル機構の研究開発の現状を示すものである。この観点から、3つの分冊レポートには第2次取りまとめ以降、従来のジェネリックな研究開発の延長として進められてきた個別の研究領域の成果をまとめている。一方、本書では、このような現在までの研究開発の成果を再整理し、また今後の研究開発の内容やその方向性や優先順位を明らかにするための新たな視点を示している。

地層処分に関する科学技術的基盤は、長期間にわたる事業全体に対する信頼を支えるうえで必須なものであり、最新の研究開発成果を取り込みながらこれを継続的に管理するための枠組みを整えることが重要である。将来、応募のあった特定の地域において、段階的な進め方によるサイトの調査が実施され、その地質環境条件に即した処分場概念が構築されるようになれば、それを支えるための研究開発にもパラダイムシフトが生ずる。こうした状況への対応も含め、2005年10月に発足する新法人には、今後、実施主体や規制機関をはじめとし、地層処分計画に関心のある政策決定者や学術的な専門家、一般公衆など様々なステークホルダーに対して、技術的な基本となる知識を継続的に開発、管理し、提供していく役割が求められる。

このような役割を果たすため、本書では地層処分技術に関する知識を体系的に開発、管理するための考え方を示した。一般に知識管理のための体系は、これによって提供される知識の利用者が実施する要件管理体系と関連付けて開発される。具体的な要件の内容が体系的に示されていない現段階においては、このような知識の体系的管理にあたり、地層処分の計画において意思決定の重要な要素であり関連する知識を網羅的に用いて作成（あるいはレビュー）されるセーフティケースの概念を適用することが合理的であると考えられる。このため、セーフティケースの一般的な概念に含まれる要素に基づいて関連する個々の知識を構造化するための枠組みを明らかにした。また、これらの個別の知識のセーフティケースへの統合に関し、セーフティケースの一般的論証構造に含まれる「主張（あるいは要件）」をテンプレートとして例示した。

地層処分計画の中で時間的に変化するセーフティケースの構造的変化と必要となる知識の変化は、テンプレートの構造を変化させることによって対応することができる。一例として、概要調査地区の選定に資するためのセーフティケースへの要件を示すテンプレートに対して、第2次取りまとめやH17取りまとめによって開発された知識を分類、整理することにより、現在利用可能な知識と今後開発すべき知識がどのようなものであるかを分析している。

上述した考え方やアプローチに従って知識の体系化を行うことにより、新法人における研究開発の計画作成、優先順位付け、統合化、品質保証、成果の文書化や保存を構造的に行うことが可能となる。また、構築する知識の体系に他機関の研究開発成果や諸外国における成果、より広範な科学技術における進歩を取り込むことにより、地層処分計画を支援するために必要となるすべての技術的知識を統合することができる。このことは、新法人に期待されている研究開発の中核的役割を果たしていくうえで極めて重要な点である。

新法人の研究開発計画におけるパラダイムシフトとして具体的に考えられるものとして以下の点を挙げるができる。

- 課題に即したボトムアップな研究開発から要件に沿ったトップダウンな研究開発への移行

- 長期にわたる地層処分計画において求められる要件を念頭に置いた研究開発の実施
- 第2次取りまとめのような、わが国における地層処分の技術的可能性の提示という研究開発の視点から、すべての関連するステークホルダーに客観的な知識基盤を提供するという視点への移行、これに伴う文書化やコミュニケーションのためのアプローチの変更
- 知識の開発に過度の負担をかけることなく、知識の利用者の要求に適切に応えることを目的とした厳密な品質保証システムの段階的な適用（鍵となる研究領域への合理的な資源投入）

こうした変化によって今後の研究開発の焦点も自ずと変化する。例えば、従来の長期的な安全性に加え処分場の建設や操業時の安全性の検討、知識の重要な要素としての「経験」の表出化と伝承及び次世代の専門家の育成、「シンクタンク」を利用した予測される要件の将来的変化の検討などが重要となると考えられる。

現在は、処分場の候補となる具体的なサイトや体系的な要件が明らかとなっておらず、研究開発を進めるうえでは想定される様々な地質環境条件に柔軟に対応できるような枠組みを確立しておくことが重要である。また、上述したようなパラダイムシフトを念頭において研究開発を進めることができるようにしておくことが必要である。ここで提案した知識基盤構築のためのアプローチは、こうした観点から有効なものとする。今後は、このようなアプローチに従って実際に知識ベースを開発し、これまでサイクル機構において蓄積されてきた技術的な遺産を新法人に適切に引き継ぐとともに実施主体や規制機関をはじめとする様々なステークホルダーの利用に資する計画である。また、開発される知識基盤は高レベル放射性廃棄物に限らず、他の廃棄物の処分にとっても有益な知識を提供するものとする。

付録 1. 分冊 1「深地層の科学的研究」要約

第 2 次取りまとめ以降、サイクル機構では、地層処分技術に関する研究開発の「全体計画」を 2001 年度に策定し、これに沿って、処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化を目指した「地層処分研究開発」と、その基盤となる「深地層の科学的研究」を進めてきた。全体計画では、「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」と「地層処分システムの長期挙動の理解」という大きく 2 つの研究目標を設定した。「深地層の科学的研究」においては、上記の 2 つの研究目標の達成に向けて 4 つの研究課題、すなわち「地質環境特性の研究」、地質環境の長期安定性に関する研究、「深地層における工学技術の基礎の開発」、および「ナチュラルアナログ研究」を設定して調査研究を展開した。分冊 1 では、この「深地層の科学的研究」の第 2 次取りまとめ以降の進捗を示した。

分冊 1 は、全 6 章の構成とし、第 1 章「はじめに」と第 2 章「深地層の科学的研究の役割」に続き、第 3 章で「地質環境の長期安定性に関する研究」、第 4 章で「地質環境特性の研究」と「ナチュラルアナログ研究」、第 5 章で「深地層における工学技術の基礎の開発」について報告する。第 6 章の「おわりに」では、第 3 章から 5 章の研究成果を簡潔にまとめるとともに、今後の研究課題について記した。

以降、「深地層の科学的研究」における 4 つの研究課題ごとに分冊 1 における報告の要点をまとめ、末尾に今後の研究の展開について簡単に記す。

地質環境特性の研究

「地質環境特性の研究」について、第 2 次取りまとめまでは、東濃地科学センターが中心となって、その周辺での広域地下水流動研究、釜石鉱山における結晶質岩の研究を実施してきた。第 2 次取りまとめ以降は、主に 2 つの深地層の研究施設計画において研究を進めており、「結晶質岩を対象とした研究」と「堆積岩を対象とした研究」に分けられる。前者については、東濃地科学センターが超深地層研究所計画および広域地下水流動研究として、また後者については、幌延深地層研究センターが幌延深地層研究計画として進めている。

本研究は、深地層の研究施設計画の全体目標の 1 つである「深部地質環境の調査・解析・評価技術の開発」を目指したものであり、これは、「全体計画」に示した第 2 次取りまとめ以降における研究開発の大目標の 1 つである「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」の基盤となる部分である。具体的には、深地層の研究施設等における調査研究を段階的に進めながら、これまでに整備してきた地質環境の調査技術や評価手法などを実際の地質環境に適用していくことを通じて、その信頼性や適用性などを確認していく。その過程で、地質環境への理解や取得する地質環境情報の精度の向上を図りつつ、地質環境モデルの検証や調査・評価技術の改良を進め、段階ごとに、実際の地質環境に適用可能な技術として体系化していく。この体系化においては、調査によるデータ取得からモデル化や解析作業を経た評価に至るまでの、地質環境を理解するための一連の方法論を例示することに重点をおきつつ、あわせて、その過程で得られた経験（失敗例を含む）やノウハウをできるだけ知識化して提示することを目指す。これは、処分事業や安全規制を支える技術基盤としての厚みを与えるものと考えている。

〔結晶質岩を対象とした調査研究〕

東濃地域における結晶質岩を対象とした調査研究では、地層処分にとって重要な地質環境特性を段階的に理解するために、4 つの空間スケール（リージョナル、ローカル、サイト、ブロック）を設定した。さらに、ローカルおよびサイトスケールでは安全評価および地下施設的设计・施工への成果の反映を見据えて調査研究の個別目標と課題を設定した。この個別

目標と課題に向けて、繰り返しアプローチを適用して様々な調査研究を進めてきた。

リージョナルスケール：ローカルスケールの研究実施領域を設定するために、深部地下水の涵養域から流出域までの地下水流動系に注目し、既存情報に基づく後背地形と大規模な不連続構造を考慮した解析領域の異なる数段階の地下水流動解析を実施した。この結果、瑞浪超深地層研究所付近の深部地下水の流動系が推定でき研究実施領域を設定した。また、この妥当性については後述するローカルスケールの調査研究を通して確認できつつある。

ローカルスケール：ローカルスケールの調査研究は、リージョナルスケールの調査研究で予測した深部地下水の流動系および研究実施領域の設定の妥当性を実際の調査結果などにに基づき評価すること、安全評価や地下施設の設計を見据えて設定した個別目標と課題の解決に向けて深部地質環境を段階的に理解し地質環境モデルの信頼性を向上していくこと、さらに、地下研究施設の設置場所を中心としてより詳細に地質環境を理解していくためのサイトスケールの解析領域や境界条件を設定することに重点をおいて調査研究を展開した。

ここでの調査研究は、①既存情報を用いた調査・解析、②空中および地表からの調査・解析および、③ボーリング孔を利用した調査・解析の3段階に区分した。これらの段階を経て、上述した地質環境モデルの構築と更新を行い地下水の流動経路を再評価しつつサイトスケールの解析領域などを設定した。加えて、地質環境モデルの信頼性向上に向けて、例えば地下水流動解析結果と地球化学モデルの整合性などについて考察した。

以上の調査研究の過程で得た知見は、実際の地質環境を対象とした経験に基づく体系的な方法論の一端として、上記の3つの段階ごとに調査から反映先にいたるデータの流れを系統的に記述した統合化データフローを提示した。この他、ここでの調査研究を通して得られた主な知見を以下に記す。

- ・基盤花崗岩中の高角度の不連続構造を把握するためには高密度電気探査が有効である。
- ・リニアメントの長さ別頻度分布から、基盤花崗岩中の不連続構造の空間的な分布頻度を推定することが可能である。
- ・ローカルスケールでの地下水流動解析結果の妥当性を確認するためには、地下水の流動方向に沿ったボーリング調査を行い、水圧や水質分布に関する情報を取得することが効果的である。
- ・地下水流動に大きく影響を与える不連続構造の把握のためには、地下水流動の主流動方向にほぼ直交する断層の水理特性を調査することが必要である。

サイトスケール（ブロックスケールを包含）：サイトスケールの調査研究は、ローカルスケールの調査研究を踏まえ、個別目標と課題の解決に向けて、より精緻に深部地質環境を段階的に理解し地質環境モデルの信頼性を向上していくことに重点をおいた。特に、地下水流動に大きく影響を与えている断層などの不連続構造、岩盤中の透水性と水みちとなる構造、地球化学特性、岩盤力学特性の分布に注目した。加えて、データ、モデルおよび解析結果に含まれる不確実性についても注目し、その幅の低減に向けた調査研究の進め方についても検討した。

ここでの調査研究はローカルスケールと同様に、①既存情報を用いた調査・解析、②空中および地表からの調査・解析および、③ボーリング孔を利用した調査・解析の3段階に区分した。これらの段階を経て、地質構造、水理地質構造、地球化学、岩盤力学および物質移動（概念）の各モデルの構築と更新を行い、地下水流動解析により研究所用地周辺の地下水移行経路を推定するとともに、応力・掘削解析などにより地下空洞周辺の力学・水理状態を予測した。

以上の調査研究の過程で得た知見は、実際の地質環境を対象とした経験に基づく体系的な方法論の一端として、上記の3つの段階ごとに統合化データフローとして提示した。また、第2段階以降の検討課題を抽出し整理した。この他、ここでの調査研究を通して得られた主

な知見を以下に記す。

- ・地下水流動に影響を及ぼす可能性のある不連続構造を抽出するためには、その透水異方性に着目した地下水流動解析を実施し、不連続構造が動水勾配分布に及ぼす影響などを評価することが有効である。
- ・水理地質構造のモデル化にあたっては、トレース長に着目した不連続構造のスクリーニングが必要である。
- ・地質学的調査などにより同定された不連続構造の中から水理学的に重要な水みちを精度よく把握するためには、電気伝導度検層が有効である。
- ・局所的な応力場を把握するためには、ボーリング孔における水圧破碎試験などの原位置試験が有効である。

〔堆積岩を対象とした調査研究〕

幌延深地層研究センターの第1段階の調査研究は、大きく「研究所設置地区（主たる調査研究の展開場所、2～3 km 四方程度の領域）選定のための調査」と「研究所設置地区およびその周辺における調査研究」の2つに分けられる。「研究所設置地区選定のための調査」においては、研究所設置地区の選定のための要件などを設定し、段階的な調査により研究所設置地区を選定した。「研究所設置地区およびその周辺における調査研究」においては、結晶質岩を対象とした調査研究と同様に、安全評価および地下施設の設計・施工への調査研究成果の反映を念頭に置いた調査研究の個別目標と課題を設定し、段階的な調査・研究を展開した。以下に、第1段階の4年目である2004年度までに得られた主な成果について記す。

研究所設置地区選定のための調査：研究所設置地区の選定にあたっては、研究の対象となる地層と地下水が存在すること（地質環境要件）、安全に地下施設を建設でき、研究環境を確保できること（安全要件）を基本的要件と考えた。また、基本的な要件に加えて、調査・研究のための許認可や用地取得が容易なこと（社会的要件）、調査研究の展開や施設建設において有利であること（地形要件）、道路状況および土地利用状況を考慮して調査研究を進めた。ここでの調査研究は、①既存情報を用いた調査・解析、②空中からの調査・解析、③地表からの調査・解析、④ボーリング孔を利用した調査・解析の順序で段階的に実施することにより研究所設置地区を絞り込み、上記の要件に照らして最終的に幌延町北進地区に研究所設置地区と研究所用地を選定した。ここでの調査研究を通して得られた主な知見を以下に記す。

- ・調査研究の対象となる地層と地下水が存在すること（地質環境要件）を概略的に判断するためには空中物理探査（空中電磁探査、磁気探査、放射能探査）が有効である。
- ・しかしながら、大規模断層のような不連続構造の位置を特定するまでに十分な情報が取得できるとは言えない。
- ・地上物理探査や地表地質調査は、空中物理探査や既存の地質情報の妥当性の確認を行うための重要な情報を提供しうる。

研究所設置地区およびその周辺における調査研究：ここでの調査研究においては、安全評価や地下施設の設計を見据えて設定した個別目標と課題の解決に向けて、研究所設置地区とその周辺を対象に①既存情報を用いた調査・解析、②空中および地表からの調査・解析および、③ボーリング孔を利用した調査・解析に区分した段階的な調査研究により深部地質環境を効率的に理解すること、さらに情報量の増加とともに地質環境モデルを更新し、その信頼性を向上していくことに重点をおいて調査研究を展開している。上述した調査研究により得られた主な知見を以下に記す。

- ・既存情報を用いた調査・解析段階において、地下水流動解析を感度解析的に実施することで、パラメータの重要度が把握できるとともに、地下水流動方向や流速の概略的な値を示すことができる。
- ・異常高圧が存在する可能性のある堆積岩地域では、地下水の流動方向に大きな影響を与えることから、地質学的観点からの異常高圧の原因究明を優先的に行う必要がある。

- ・幌延地域のような地下深部に塩水系地下水が存在する場では、混合が重要な地下水水質形成プロセスの1つと考えられるので、表層水の水質に関する情報が重要となる。
- ・水理特性の観点で、幌延地域の岩盤は、亀裂性岩盤と多孔質とみなされる岩盤の特性を合わせ持つ。
- ・結晶質岩、堆積岩に関わらず、あらかじめ亀裂性岩盤であることを視野に入れて調査・解析を実施することが、効果的な調査計画策定に役立つと考えられる。
- ・幌延地域のように塩水系地下水を有する場においては、塩化物イオンの挙動を地下水流動解析と併せて検討することで、地下水流動特性の理解に役立つ。
- ・ただし、塩水系地下水の分布（塩淡境界を含む）は、長期的な地質環境変化の影響を強く受けているため、地球化学特性を含めた地質環境の長期安定性に関する調査・評価と整合するような解析の実施が必要である。
- ・岩盤力学特性については、幌延で対象とするような均質性の高い岩盤では、既往の物理検層・応力測定や標準的な室内試験の組み合わせにより、地質環境が有する特徴を考慮した物性分布や応力場の把握が可能であると考えられる。
- ・岩盤力学特性のうち変形特性に関しては、コア試験結果と物理検層結果からおおむね原位置岩盤のそれを把握することが可能で、特に一軸圧縮試験は、安価・短時間で実施できるため、可能な限り多点で実施しておくことが調査対象岩盤の特長を早期に捉え次段階の調査を合理化する観点から望ましい。

地質環境の長期安定性に関する研究

「地質環境の長期安定性に関する研究」について、第2次取りまとめまでは、地層処分に適した安定な地質環境がわが国にも広く存在し得るとの見通しを得るため、関連する地球科学の分野に蓄積された情報や知見を分析するとともに、過去の天然現象に認められる傾向や規則性に基つき、将来の活動の可能性や変動の規模などを検討した。

第2次取りまとめ以降の研究開発については、従来から進めてきた全国レベルでのデータの蓄積や個別現象・メカニズムの解明といった学術的な研究を継続する一方で、概要調査地区等の選定や安全規制に必要な調査技術や評価手法の整備に重点をおいて研究を進めることとした。当面の研究開発では、①調査技術の開発・体系化、②長期予測・影響評価モデルの開発および、③研究情報基盤の整備の3つの目標を設定し、隆起・侵食／気候・海水準変動、火山活動、地震・断層活動に関連するそれぞれの研究課題に取り組んでいる。

〔調査技術の開発・体系化〕

「調査技術の開発・体系化」では、天然現象に関する過去の記録や現在の状況を調査するための体系的な技術の整備を進めている。現段階では、最終的な体系化に向け、主に個別の要素技術の開発や既存の調査技術の適用性の確認などを進めており、「隆起・沈降量などに関する調査技術」、「侵食速度に関する調査技術」、「第四紀の火山・地熱活動などの調査技術」、「地下深部のマグマ・高温流体などの調査技術」、「地下の活断層に関する調査技術」の5つの研究課題について取り組んでいる。

隆起・沈降量などに関する調査技術：北海道北部における事例研究を通じて、沿岸域の隆起量や旧汀線の変遷や地殻水平短縮量を推定するための技術についての検討を行った。その結果、過去数～数十万年程度の時間スケールでは、海成段丘を指標とした垂直変動量や地下地質構造断面図を用いた地殻水平歪速度の解析などといった地質学的手法が測地学的手法に比べて有効であることを確認した。

侵食速度に関する調査技術：ボーリングによって得られた堆積岩中の自生鉱物を利用して埋没深度や削剥量を推定するとともに、古地温勾配と最大埋没時期から現在までの年代を用いて数十万年以上のオーダでの侵食速度を計算する方法を提示した。

第四紀の火山・地熱活動などの調査技術：肉眼では識別できないテフラ降灰層準を認定する方法(RIPL法)によって、更新世中期までの火山の同定が可能であることを示すとともに、岩石や鉱物を用いた熱年代学的手法が古地温・熱水系の復元に有効な方法であることを示した。

地下深部のマグマ・高温流体などの調査技術：地震波トモグラフィー、MT法などの地球物理学的手法に加えて、希ガス同位体などを指標とした地球化学的手法を組み合わせた体系的な調査技術を提示した。また、紀伊半島南部の非火山性温泉の熱源は、沈み込むスラブの脱水に由来する深部流体であることを明らかにした。

地下の活断層に関する調査技術：顕著な地表地震断層を伴わずに、過去数十万年以降繰り返し活動した活断層を「地下の活断層」と定義し、これらの分布を調査するための方法について検討した。その結果、リニアメントの抽出と地震データおよびDEMデータの解析などによって、「地下の活断層」の存在の可能性やその方向を推定することができる見通しを得た。

〔長期予測・影響評価モデルの開発〕

「長期予測・影響評価モデルの開発」では、将来の天然現象に伴う地質環境条件の変化を予測・評価するための手法の整備を図るため、現象の発生頻度を空間統計学的に求める方法や現象のプロセスを考慮した数値シミュレーション技術などの開発を進めている。現段階では、「三次元地形変化モデル」、「火山活動等の長期予測モデル」、「熱水活動等の影響評価モデル」、「断層活動の影響評価モデル」の4つの研究課題に取り組んでいる。

三次元地形変化モデル：隆起・侵食、断層活動などに伴う地形変化を予測するため、従順化モデルによるシミュレーション技術を開発するとともに、地下水流動モデルとの結合を図り、東濃地域を事例に将来の地下水流動の変遷について検討を行った。

火山活動などの長期予測モデル：新たに火山の発生する可能性を確率論的アプローチによって評価するため、カーネル関数による空間モデルや最近隣接法による時空間モデルなどを構築するとともに、独立単成火山群（東伊豆単成火山群、神鍋・扇ノ山単成火山群）を事例にモデルの適用性などについて検討を行った。

熱水活動などの影響評価モデル：地下深部からの熱流束（熱エネルギー）や流体の上昇速度を評価するため、実際に測定された坑井温度プロファイルについて複数の解析方法を適用し、解析方法の違いによる熱流束の見積もりの誤差などについて検討した。また、マグマ溜り周辺岩盤の熱や地下水理などの変化を計算するための解析コード(Magma2002)を開発した。

断層活動の影響評価モデル：断層活動によって引き起こされる周辺岩盤の力学的、水理学的影響を予測・評価するため、断層活動に伴う地下水流動の変化モデルと逆断層帯の三次元構造発達モデルの開発に向けた基盤情報の整備を進めた。

〔研究情報基盤の整備〕

「研究情報基盤の整備」については、上記の「調査技術の開発・体系化」「長期予測・影響評価モデルの開発」の基盤となる最新の学術的知見やそれを支える最先端の観測・分析技術に関する情報の収集・整備を進めている。また、次世代の調査技術として地下深部の高分解能の探査技術やモニタリング技術についての基盤的な研究を進めている。

このうち、全国レベルでの天然現象の情報の収集・整備については、第2次取りまとめ以降についても引き続き実施し、「最近約10万年間の隆起速度分布図」、「地すべり地形分布図」、「坑井温度プロファイルデータベース」、「温泉地化学データベース」を新たに作成し、学術雑誌などを通じて公表した。また、天然現象を考慮した安全評価に必要な変動シナリオや物質移行解析の前提となる一般的かつ現実的な現象のプロセスに関する情報や地質環境条件（力学、熱、地下水理、水質など）の変化などに関するデータを整備するためのデータベ

ースのプロトタイプを作成した。

地下深部の高分解能の探査技術やモニタリング技術については、精密制御定常信号システム（アクロス）の研究開発を進めており、これまでに、弾性波と電磁波の送受信システムとデータの解析手法を構築し、高分解能と探査深度の向上に必要な、高い信号対雑音比の信号観測を実現している。

深地層における工学技術の基礎の開発

第2次取りまとめ以降に開始した2つの深地層の研究施設計画は、実際の地質環境への適用を通じて地質環境を調査・解析・評価する技術の信頼性や適用性を確認していくことが大きな目標である。一方で、得られた地質環境情報に基づき地下の研究坑道を設計・施工していくことを通じて、地層処分に特有の『情報の取得や技術の実証を目的とした地下施設』を設置・維持するための工学技術の基盤を確立していくことも重要な目標である。ここに、地下施設建設そのものは目的ではなく、地質環境を理解するための調査手段であり、また深部の地質環境下での試験を行う場に到達するための手段である。このような深地層の研究施設での研究坑道の設計、施工および維持管理を通じて培われた技術や経験は、実際の処分事業において、処分地選定に向けた最終段階の調査（精密調査）での掘削の際に活用されることになる。また、本研究で得られた成果は、処分施設の設計・施工や人工バリアなどに関する工学技術の開発にも寄与する。

〔瑞浪超深地層研究所〕

瑞浪超深地層研究所では、岐阜県瑞浪市明世町を設置場所として2本の立坑によるアクセス方式を採用した地下1,000mに到達する地下施設の建設を2003年7月に開始した。地下施設の設計は、地下施設の建設深度が深いこと、また坑道のレイアウトが複雑で入坑者も多様となることなどに留意し、第1段階の調査研究により得られる地質環境情報を基に、地震時を含めた空洞安定性の評価、突発事象対策、通気網解析に基づく防災の検討、安全対策などを主要な課題として実施した。設計の妥当性については、地下施設建設時に取得される情報や第3段階において実施する原位置試験によって最終的に評価する。現時点における設計の成果は、以下のとおりである。

空洞安定性評価と支保設計：第2次取りまとめの手法を踏襲し、地表からの調査結果に基づいて地山区分を行い、この区分に応じて物性値を設定して、トンネル標準示方書を参考に支保を仮設定した。これに対して二次元および三次元有限要素解析により各坑道の力学的安定性を評価するとともに、支保発生応力が許容応力を満足することを確認し、設計としての支保を確定した。

耐震設計：瑞浪地域の特徴を考慮して、歴史地震、周辺の活断層、東海地震および東南海地震を震源と想定して地震波を作成し、これに対して第2次取りまとめの手法を踏襲して立坑および覆工コンクリートの許容応力度を照査した。さらに、大深度立坑の特徴を考慮して鉛直地震動についても検討を行い、耐震性を確認した。

計測結果の設計・施工計画へのフィードバック技術（情報化施工）：観察、計測および解析による地山評価を組み合わせた具体的なフィードバックフロー図を作成した。地質観察については、複数の岩盤分類法を適用して立坑壁面の地質状況を評価するうえで最適な方法を検討している。

突発湧水に対する対策技術：基本的には地上へ排水しなければならないこと、および、周辺環境への影響を最小限にとどめるという本計画の理念を考慮して、グラウトによる止水を基本とし、その計画を立案した。突発湧水や大量出水が発生した後での対応には期間と予算が多くなるのが想定されるため、プレグラウト（事前のグラウト）を実施することとし

た。

深地層の研究施設計画を推進するうえで最も重要な安全対策：入出坑，火災，環境および通信システムと通気網解析を組み合わせた統合管理システムを構築するとともに，立坑の特徴を考慮したリスクマネジメント手法を活用することにより，リスクを抽出し，安全対策に反映している。

地下施設の建設は，全体を大きく3段階（坑口上部工，坑口下部工，一般部掘削）に分けて施工している。瑞浪超深地層研究所用地の造成工事を2002年7月より開始し，引き続き2003年7月より坑口上部工，2004年4月より坑口下部工，2005年2月に一般部掘削に着手した。また，施工の進捗に合わせて，坑道壁面の地質観察，湧水量測定，各種計測（岩盤変位，支保工応力）を実施し，設計・施工へのフィードバックを行っている。また，掘削工事に伴う周辺環境への影響調査として，水文調査（河川流量調査，地下水位調査），騒音・振動調査，水質・底質調査を工事開始前から継続して実施している。

〔幌延深地層研究センター〕

幌延深地層研究計画の第1段階では，地下深部で遭遇する様々な現象を考慮した坑道の安全確保，坑内環境の維持のために必要となる対策工（支保工の選定など），施工管理方法について検討した。また，これらの成果を踏まえ，第1段階の調査研究で得られた地質環境情報を基に，2005年度より建設を開始する立坑によるアクセス方式を採用した深度約500mの地下施設の設計を行った。

設計・施工計画の検討：施設を安全に建設・維持するための空洞安定性評価や防災対策（可燃性ガス対策，坑内作業環境，火災など）だけでなく，研究に資するための各種データを取得することを考慮した。さらに，一般の人々が深地層を体験する場であることも考慮に入れた。

空洞安定性の検討：2003年度までに地下施設予定位置近傍で実施したボーリング調査で得られた力学試験結果などに基づいて解析条件を設定し，空洞安定性の検討を行った。地下施設の空洞安定性の検討では，割れ目の影響を考慮した評価を加え，ボーリングコアで柱状となる岩盤において乾燥や外的荷重により顕在化する潜在割れ目（ヘアークラック）に対しても強度・変形特性の低減する可能性があるとして地山区分および岩盤物性値を設定し，完全弾塑性モデルを用いた二次元有限要素法による予測解析を行った。

防災対策：可燃性ガスの発生が見込まれる坑内の研究・作業環境や入坑者の安全を確保するために，可燃性ガス対策，坑内作業環境対策，火災時対策，坑内情報管理システムなどの検討を行った。

ナチュラルアナログ研究

「ナチュラルアナログ研究」では，地層処分の長期安全性を傍証する情報の体系化や具体的な評価に寄与できるような科学的根拠の整備を目指し，東濃ウラン鉱床を利用して，ウラン系列核種を中心とした物質の長期挙動やこれを取り巻く地質環境の変遷を解明するための研究を進めている。第2次取りまとめまでにおいて，地質環境中でのウラン系列各種に注目した研究を行い，放射性核種は地質環境中に長期間にわたって保持されることを定性的に示した。第2次取りまとめ以降のナチュラルアナログ研究においては，東濃ウラン鉱床を事例の場として，「地質環境が有する放射性核種保持機能の定量化」と「保持機能に影響を及ぼす主要因子の抽出」を主要な目的として研究を進めてきた。それぞれの目的に対するこれまでの主な成果を以下に簡潔に記す。

地質環境が有する放射性核種保持機能の定量化：東濃ウラン鉱床を胚胎する土岐夾炭累層中の地下水組成に基づいて，ウランの長期的な溶解度を検討した。その結果，主要な溶解度

制限固相は $\text{UO}_2(\text{am})$ であり、その溶解度には pH、酸化還元電位および炭酸ガス分圧が影響することが明らかになるとともに、長期的なウランの溶解度が非常に低い範囲にあったことを確認した。

物質移動に影響を及ぼす主要因子の抽出：地質環境特性に関わるデータの取得、影響解析用のデータセット案の作成、影響解析、核種移行に影響を及ぼす主要な要因の抽出、という一連の作業を通じて、ウラン鉱床の移行／保持に影響を及ぼす主要な要因の抽出を行ってきた。影響解析の結果とウラン鉱床中のウラン量およびウラン鉱床の形成年代を比較することによって、ウラン鉱床形成に重要な影響を及ぼした要因として、地下水の流動様式が挙げられることを確認した。

なお、東濃鉱山の坑道内での研究は 2003 年度末をもって終了し、現在は、地表からの調査を主体に研究を進めている。

今後の研究の展開

「地質環境特性の研究」については、2 つの深地層の研究施設計画が第 1 段階から第 2 段階へ移行する時期を迎えており、H17 取りまとめを 1 つの礎として、第 1 段階の終了後速やかにその研究成果を総括し報告書として取りまとめていく。深地層の研究施設計画を中心とした今後の調査研究においては、「実際の地質環境に適用可能な体系的な技術の提示」の信頼性をより高めていくために、段階的に進められる深地層の研究計画に沿って地質環境を理解するための一連の方法論の詳細化とその評価を重ねつつ、あわせて、その過程で得られた経験（失敗例を含む）やノウハウをできるだけ知識化して提示していく。

「地質環境の長期安定性に関する研究」では、「調査技術の開発・体系化」において概要調査開始前までに天然現象に関する過去の記録や現在の状況を調査するための個別の調査技術の適用性の確認を進めつつ、信頼性の高い総合的かつ体系的な調査手法の構築に向けて研究を進める。「長期予測・影響評価モデルの開発」では、それぞれの天然現象に応じた予測手法の検討や個別のシミュレーション技術の開発を進めるほか、予測結果の検証方法を検討していく。また、「研究情報基盤の整備」では、天然現象を考慮した安全評価に必要となる地球科学に関する最新の知見のほか、天然現象に伴う地質環境条件（力学、熱、地下水理、水質など）の変化に関するデータを重点的に整備していく。

「深地層における工学技術の基礎の開発」においては、第 1 段階の地質環境情報を基に実施した地下施設の設計結果を第 2 段階以降に得られる計測データなどに基づき確認・評価していく。なお、瑞浪超深地層研究所では 2003 年 7 月に地下施設の建設に着手しており、は 8 月末現在、2 本の立坑は深度約 150m まで到達している。今後、2009 年度までに、地下 500 m 程度までの立坑を掘削したうえで、当該深度に試験用の水平坑道を展開して坑道内での調査研究を開始する計画である。また、2010 年代前半頃には、深度 1000m 程度に至る地下施設が完成する見込みである。幌延深地層研究センターにおいては、2005 年度後半に立坑掘削に着手し、2006 年度より掘削機を用いた本格掘削を開始する。2009 年度までに、3 本の立坑のうち、換気立坑を深度 500m まで完成し、東立坑（主立坑 2 本のうちの 1 本）を地下 300 m 程度まで掘削する計画である。また、2010 年代前半頃には、深度 500m 程度に至る地下施設が完成する見込みである。

「ナチュラルアナログ研究」では、ウラン系列核種の挙動と地質環境条件の関係を明確にすることを目指して、地殻変動などによって生じる地質環境の変化がウラン鉱床の長期にわたる保存に及ぼした影響の評価や、微生物などがウラン系列核種の移行・遅延に及ぼす影響の評価を引き続き行っていく。

付録 2. 分冊 2「工学技術の開発」要約

本報告書は、第2次取りまとめ以降の処分事業や安全規制に関する動向を踏まえ、核燃料サイクル開発機構が実施してきた工学技術の研究開発の成果を取りまとめたものである。その内容は、核燃料サイクル開発機構が課題評価委員会による評価を受けながら策定した「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の全体計画」（以下、「全体計画」という）に示された目標および課題に対応したものになっている。

全体計画で示された第2次取りまとめ以降の処分技術の信頼性向上に関する目標は、これまで整備してきた地層処分に関連する様々な技術や手法を、実際の地質環境へ適用することを通じて、その信頼性を確認していくこと（「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」）および処分システムに関連する現象への理解を深め、評価の信頼性を高めていくこと（「地層処分システムの長期挙動の理解」）である。第2次取りまとめ以降の処分技術開発については、人工バリアと周辺岩盤を含むニアフィールド環境における長期的な個別現象や連成現象の理解向上により、処分システムの長期性能に関する評価の信頼性向上に焦点を当てて研究を進めた。そのため、地層処分基盤研究施設（ENTRY）での工学試験や国際共同研究により、炭素鋼オーバーパックの腐食挙動や緩衝材の基本特性に関するデータベースの整備、熱-水-応力-化学連成モデルの開発などを進めるとともに、ナチュラルアナログ研究により人工バリア材料の長期挙動に関するデータの蓄積と評価手法の妥当性確認を進めた。また、海外の地下研究施設を活用した閉鎖技術の開発や低アルカリ性セメントの開発などの工学技術開発を進めた。さらに、深地層の研究施設を対象とした地表からの調査段階における地質環境条件の設定に基づく設計手法の適用性確認を行った。これら、個別課題に対する研究の遂行により、個別の設計手法やデータベースについて常に最新の知見が取り込まれ、最新技術への更新が可能となる。第2次取りまとめと異なり工学技術関連の全分野を網羅的にカバーするのではなく、工学技術の基盤として、設計に関わる人工バリア等の長期挙動評価のための現象理解、モデル開発、データベース開発、閉鎖技術に関わる検証や材料開発などの中から、重要な課題を選択して実施している。

本報告書は、全6章から構成されている。第1章は全体計画に基づく目標および課題、ならびに研究の進め方を示している。第2章（人工バリアの基本特性データベース）、第3章（人工バリア等の長期複合挙動に関する研究）、第4章（人工バリア等の工学技術の検証）、第5章（設計手法の適用性確認）の各項目においては、課題を設定した背景、第2次取りまとめ以降の進捗と事業・規制への反映、今後の課題について記述した。課題を設定した背景においては、どのように第2次取りまとめの課題、国際的動向、事業・規制のニーズ等を考慮して課題を設定したかを記述した。第2次取りまとめ以降の進捗と事業・規制への反映においては、各課題において得られた成果の処分技術および事業・規制における位置づけや反映点について記述した。また、最後に今後の課題として、次のフェーズで取り組むべき課題について記述した。第6章では、第2次取りまとめ以降の研究の進捗および事業・規制への反映点を要約した。

以下に、第2次取りまとめ以降の進捗を中心に各項目の概要を述べる。

人工バリアの基本特性データベース

オーバーパックの基本特性に関する研究では、炭素鋼の腐食挙動のうち、腐食生成物堆積による影響については、腐食生成物としてマグネタイトによる腐食加速に起因するオーバーパックの短期破損の懸念は小さいことを示した。セメント影響についてはpHが13以上で不動態化する可能性があることを示すと同時にアルカリ環境での腐食評価手法を提案した。同じく、溶接部の腐食速度については母材と同程度であることを確認した。代替オーバーパックの腐食挙動では、チタンについては、還元性環境での実験データの取得により、長期の水素

吸収・脆化の傾向を把握し、水素脆化寿命の評価手法を提案した。同じく、銅については、酸化性環境での実験データを取得し、腐食形態や酸素、硫化物の影響について腐食挙動の傾向性を把握した。さらに、現状の知見に基づき、地質環境条件に対する炭素鋼、チタン、銅といった材料の選定方法に関する基礎情報を整理した。

緩衝材の基本特性に関する研究では、海水系地下水条件下を模擬した飽和水理特性、膨潤特性、力学特性データの取得、関係式の一般化やデータ集の公開、データベース管理システムの一部を構築した。また、熱物性や力学物性測定手法について検討し、手法の違いによる影響を確認するとともに、標準化に関わる基盤情報に寄与する知見が得られた。

人工バリアの性能保証に関する基盤情報整備では、設計段階における保証項目（案）（何を保証するのか）、評価方法（どのように保証するのか）、評価ツール（モデル、データベース、実験方法）の開発状況を整理した。また、人工バリア性能確認のためのモニタリング技術に関する情報や人工バリアの定置精度に関わる実験データに基づく知見が得られた。

人工バリア等の長期複合挙動研究

緩衝材の力学的変形挙動に関する研究では、既存のクリープ・モデルの体系的比較を行い、2つの評価モデルを選定するとともに、パラメータ設定手法を提示した。また、実験によりこれら2つのモデルが緩衝材構成モデルとして適用性を有していることを確認した。新たに選定されたモデルを用いてオーバーバックの自重沈下解析を行なった結果、第2次取りまとめより変形は大きくなったが、事例検討では、コロイドろ過性や自己シール性は維持されており安全評価上は問題にはならないことが示された。さらに、緩衝材-岩盤の長期力学的変形挙動に関する連成モデル構築に取り組んだ。

岩盤の力学的変形挙動に関する研究では、評価手法の検証のため地圧現象がナチュラルアナログ的手法として有望であることを示した。幌延の研究所用地に分布する稚内層硬質頁岩を対象として、力学変形挙動評価に関する基本データを取得し、内圧効果により力学的な安定性が期待できることを示した。掘削後早期に支保工などの工学的対策で内圧を与えることで長期の力学的安定性を改善可能であることがわかった。また、堆積岩に見られる自己回復特性は、空洞周辺の剛性が低下した領域の力学・透水特性が長期的に回復する可能性を示唆している。

緩衝材の流出・侵入挙動に関する研究では、海水系地下水条件等を考慮したデータを整備するとともに、海水系地下水条件での影響は顕著ではないことが示された。また、流出現象を評価する拡散モデルの信頼性向上を目的として、X線CT法を用いて模擬亀裂中に侵入したベントナイトの密度分布やベントナイトの粘度を測定した。その結果、X線CTを用いた亀裂中の密度分布測定がモデルの検証に有効であることを示すとともに、モデルの適用性確認を実施した。また、ベントナイトコロイドの発生が海水系地下水条件では顕著でないことも示した。

人工バリアの変質・劣化挙動に関する研究では、セメント影響、鉄の腐食生成物による影響等に関する緩衝材の長期安定性評価フローを作成し、概略的評価を行った。セメント影響については、現段階では支保工材料として低アルカリ性セメントを推奨した。また、鉄の腐食生成物による影響については実験的研究もを行い、その影響は顕著ではないことを示した。

熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究では、化学現象を取り込んだ熱-水-応力-化学連成解析コードのプロトタイプを開発し、ユッカマウンテンの坑道規模加熱試験や連成室内試験により検証を進めた。本コードを用いて第2次取りまとめでの条件に対する解析を実施し、緩衝材の最高温度、再冠水時間や間隙水のpHに関して比較評価を行い、第2次取りまとめの評価の妥当性を確認した。また、処分環境で懸念される塩の蓄積に関する解析を実施して、顕著な影響はないことを確認した。本解析コードの開発によりニアフィールド環境の数値実験の基盤が構築された。

緩衝材のガス透気回復挙動に関する研究では、海水系地下水がガス移行に与える影響は、降水系地下水の場合に比べ、それほど顕著でないことを示した。これにより降水系、海水系両地下水でのガス透気回復挙動に関する概略的な評価が可能となった。緩衝材中のガス移行挙動を直接観察するためX線CT法の適用性を確認し、選択的移行経路の形成によるガス移行挙動を確認した。X線CTを用いた可視化試験とガス移行モデルによる解析との比較検討により、モデルの妥当性を示すことができた。これにより、X線CTを用いた密度分布測定がガス移行モデルの検証に有効であることを示した。

人工バリアせん断応答挙動に関する研究では、人工バリアの1/20の模型を用いて、緩衝材厚さの80%にあたる変位のせん断試験を行ない、土圧や間隙水圧を実測し、既存モデルによりせん断時の緩衝材の力学的挙動の傾向性を表現できることがわかった。なお、オーバーパックは緩衝材中で回転し、損傷を受けていないことを確認した。

炭素鋼オーバーパックのナチュラルアナログ研究では、考古学的試料の調査が進み、1,000年規模のデータが取得された。また、弱酸化性から還元性環境での1,000年程度の考古学試料の研究結果より、第2次取りまとめにおける炭素鋼オーバーパックの腐食評価が保守的であることを事例的に示した。

人工バリア等の工学技術の検証

閉鎖技術に関する研究では、カナダの地下研究施設において施工されたプラグの閉鎖性能に関する検証データを取得し、低透水性を確認するとともに、解析によって、閉鎖性能を評価するモデルを開発することができた。花崗岩等岩盤性能が良好な場合、掘削影響領域が支配的な核種移行経路になることが示された。また、閉鎖システムを対象とした水理解析やFaultツリー分析による閉鎖シナリオ評価手法を提示した。さらに、海水系地下水条件での埋め戻し材の隙間充填性能に着目した基礎試験を実施した。その結果、塩水環境下でも降水環境下と同様、ズリを基本とする埋め戻し材料に粘土を含有することにより、十分にシーリング性能が確保できることがわかった。

人工材料の開発では、支保工材料として普通セメントを用いた場合の高アルカリブルームによる緩衝材や岩盤の変質を避けるため、代替材料として低アルカリ性セメントの開発を進めた。低アルカリ性セメントとしては、普通ポルトランドセメントに、シリカフェームやフライアッシュなどを添加したHighly Fly-ash contained Silica-fume Cement (以下、「HFSC」という)を用いた検討を進めた。普通ポルトランドセメント、シリカフェーム、フライアッシュの混合率を変え性能試験や品質確認を行なった。以下、普通ポルトランドセメント、シリカフェーム、フライアッシュの混合率が各々40%、20%、40%の場合の低アルカリ性セメントをHFSC424と呼ぶ。検討の結果、HFSC424を用いたコンクリートは、施工に必要な流動性や支保強度を確保でき、その適用性が確認された。また、HFSC424を用いたモルタルは、粉体を水中浸漬することによりポゾラン反応が促進され、pHの低下は高温では速いが常温では遅く、目標とするpH11以下になるには長時間を要することがわかったが、モデル解析によるpH低下挙動の評価に見通しを得た。

設計手法の適用性確認

深地層の研究用地の地質環境条件を対象とした事例研究により、処分場の全体設計フローの検討、地上からの調査段階における地質環境条件に関する設計用入力データの設定、処分施設や人工バリアの試設計等を行った。堆積岩系岩盤の一例として、稚内層硬質頁岩が分布する幌延の深地層の研究用地を、結晶質岩系岩盤の一例として、土岐花崗岩が分布する瑞浪の研究用地をそれぞれ対象とし、処分孔設置方式に関する検討を行った。検討対象深度は、力学的に処分孔の空洞安定性が確保されることなどから、幌延では450m、瑞浪では1,000mを設定した。これらの検討結果に基づき、第2次取りまとめの設計手法の適用性、改

良点、推奨すべき手法や地上からの調査段階における留意点を整理した。

処分場の全体設計フローの検討では、施設設計、人工バリア設計および埋め戻し材設計といった相互の複雑な関係を考慮し、影響因子と影響度合いについて検討を行った。検討の結果、第2次取りまとめの設計フローとの違いとしては、埋め戻し材や緩衝材の仕様設定上重要な処分坑道の支保工設計、処分孔への支保工の可否を考慮した空洞安定性評価および埋め戻し材設計を人工バリア設計の上位に配置したことなどが上げられる。

地上からの調査段階における地質環境条件に関する設計用入力データは、各研究所用地のボーリング調査による地質環境特性に基づき設定した。密度や熱特性については、幌延のような多孔質の堆積岩の場合、間隙率の密度依存性が見られることから、深度依存性の相関式より入力データを求めた。瑞浪の結晶質岩については、深度依存性が見られないことから、同じ層の平均値を採用した。力学特性については、岩盤等級に関する岩盤モデルを作成し、ボーリング調査で得られたデータを岩盤等級ごとに低減し、物性値を設定した。初期応力比は、深度によらずほぼ一定であったため、それらの平均値を採用した。水理特性に関しては、設定深度近傍の透水試験結果により透水係数を、地下水流動解析により動水勾配を設定した。地下水化学特性に関しては、水質の深度依存性、鉱物情報に基づく熱力学解析による補正を踏まえ設定した。

処分施設の試設計では、低アルカリ性コンクリートの設計用物性値を設定するとともに、上記の見直した設計フローに基づき処分孔、処分坑道の空洞安定性評価、離間距離の検討について第2次取りまとめと同程度の概略設計を行い、第2次取りまとめの設計手法の適用性確認を行った。また、幌延、瑞浪の深地層の地下研究施設計画で検討している耐震検討、メタンガスの湧出量に関する検討、防災コンセプトの研究、情報化施工などについても、処分場設計において不可欠なものと考え、その検討例を提示した。

人工バリアの試設計では、緩衝材およびオーバーパックスの設計手順の考え方を整理するとともに、個別設計フローを構築し、各研究所用地の地質環境条件の入力データをもとに試設計を行った。その結果、第2次取りまとめ仕様で十分対応可能であることがわかった。また、岩盤や緩衝材の長期力学挙動、緩衝材の流出・侵入挙動などの長期健全性に関する評価を行い、第2次取りまとめ仕様の人工バリアは長期にわたり健全であることを確認した。

閉鎖設計では、埋め戻し材や止水プラグに関わる設計要件と地質環境条件の留意点などを整理するとともに、概略的な設計フローの構築を行った。埋め戻し材については、基本特性試験や海外での検討例を参考に設計フローに基づき、幌延、瑞浪の地質環境の特徴により適した閉鎖材料の仕様例を示した。

以上の検討を通じて提示された第2次取りまとめの設計手法の適用性、改良点、推奨すべき手法について主なものを以下に整理する。

- ・ 処分場の全体設計フローに関してオーバーパックス、緩衝材、埋め戻し材といった個別設計と施設設計の相互関係を整理し、より現実的な設計フローを提示した。
- ・ 空洞の力学的安定性評価では、経験的手法による標準支保パターンに基づく空洞安定性評価や情報化施工を考慮した現実的な評価指標を提案した。
- ・ 幌延の深地層の研究所用地に分布する堆積岩は強度が小さく、異方圧下、多孔質という特徴をもつため、第2次取りまとめと同様な空洞安定性評価・支保設計に加えて、岩盤が異方的な応力状態にある場合の長期安定性、建設、操業期間を対象とした岩盤の長期変形挙動、多孔質な岩盤である場合に考慮すべき掘削直後の水-応力連成現象などについても必要に応じて設計に反映することを提案した。
- ・ 地山強度比の小さい堆積岩の地下深部における処分孔では、定置までの岩盤クリープ挙動を考慮した場合、安定性が保てない可能性が高いため、処分孔（無支保）の安定性を評価する際には、弾完全塑性解析に加え、建設・操業中の岩盤のクリープ挙動を考慮した評価を実施しておく必要がある。

- ・ 瑞浪の深地層の研究用地に分布する土岐花崗岩は、異方圧を受けているものの、強度が大きく力学的安定性が見込める結晶質岩であることから、第2次取りまとめと同様の弾完全塑性解析による設計が可能である。また、結晶質岩は、力学的に不連続面の影響が支配的になる場合があるため、潜在する割れ目の状況を調査で把握し、不連続面を考慮した評価・設計を実施し、設計の妥当性について確認することを提案した。
- ・ 人工バリアの設計については、第2次取りまとめにおいて示された考え方が適用可能である。また、人工バリアの長期健全性評価に関しては、第2次取りまとめ以降のモデルの改良や入力パラメータの充足により手法そのものの信頼性の向上が図られ、今回の検討によってその手法が適用可能であることが分かった。

次に、地上からの調査段階における留意点について、地質環境調査、施設設計、人工バリア設計、閉鎖設計などの観点から主なものについて以下に記述する。

- ・ 地質環境調査では、コンクリート支保工の化学的安定性から、処分施設に使用できる支保工材料に限られる場合には、その支保工材料で空洞が安定する地質環境が分布するか否かについて調査する必要がある。結晶質岩を対象とした場合、処分坑道を展開する深度として、割れ目など不連続面の影響が比較的少ない健全な岩盤が分布するか否かを調査する必要がある。地下水化学に関するデータに関しては、大気との接触などが避けられない場合が多いため、地下水水質の熱力学的解析結果や鉱物に関する情報などを総合的に考慮した補正が重要である。
- ・ 施設設計（空洞安定性、支保設計、坑道離間距離）では、地上からの調査段階だけでは、廃棄体を定置する地下深部の幅広い地質環境を詳細に理解することは難しく、段階を追った地質環境の理解を行っていく必要がある。そのため、情報化施工等により随時設計を更新してゆくとともに、設計の段階では、建設・操業で取得されるデータと直接比較できるパラメータ（例えば、内空変位など）を重視して評価する必要がある。また、堆積岩の場合、二重支保を採用することで支保工厚を低減することは可能であるが、二重支保は岩盤をある程度緩ませる考え方であるため、掘削影響領域を含め安全評価への影響に関する検討が必要である。
- ・ 人工バリア等の設計では、オーバーパック、緩衝材および埋め戻し材の設計に際して、相互に関連している項目の影響度合いを十分考慮し、地質環境条件を踏まえて影響が大きい設計因子を重点的に検討することにより合理的な設計が可能となる。また、地質環境条件と安全機能との関係を整理すること、例えば、緩衝材の流出・侵入現象の影響に関しては、海水系地下水条件では顕著ではなく、降水系地下水条件で重要であることなどを整理する必要がある。
- ・ 閉鎖設計では、地下水のイオン強度によっては、埋め戻し材の仕様に大きく影響を及ぼすことが考えられる。特に、海水系地下水条件の場合、埋め戻し材のベントナイト配合率について自己シール性に係わるデータの拡充が必要である。

今後に向けて

今後は、地層処分のセーフティケースの作成に必要な地質環境や処分場の設計に関するデータや情報、専門家の判断根拠などを知識としてわが国共通の資源とするため「知識ベース」の構築を行う。このため、地層処分基盤研究施設において、深地層の研究施設計画を中心とする深地層の科学的研究から得られる地質環境データや長期安定性に係わる知見も考慮し、特に海水系環境や軟岩系岩盤における処分場の設計の信頼性を向上できるよう、人工バリア等の長期挙動等に関わる基礎的データの拡充、モデルの改良、データベース開発を進める。また、評価に必要なデータ取得手法の標準的方法を提案し、関連機関の成果の統一化に資する。さらに、以上の成果と深地層の研究施設計画における研究成果を総合的に用いて、深地層の研究施設計画で得られた地質環境データに基づく設計手法の適用性確認を行う。

付録3. 分冊3「安全評価手法の開発」要約

本報告書は、第2次取りまとめ以降処分事業や安全規制に関する動向を踏まえ、核燃料サイクル開発機構が実施してきた安全評価手法の開発の成果を取りまとめたものである。その内容は、核燃料サイクル開発機構が課題評価委員会による評価を受けながら策定した「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の全体計画」（以下、「全体計画」という）に示された目標および課題に対応したものになっている。

全体計画で示された第2次取りまとめ以降の安全評価手法の高度化に関する目標は、これまで整備してきた安全評価に関連する様々なモデルや手法を、実際の地質環境へ適用することを通じて、その信頼性を確認していくこと（実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認）および処分システムに関連する現象への理解を深め、評価の信頼性を高めていくこと（地層処分システムの長期挙動の理解）である。第2次取りまとめ以降の安全評価手法の高度化については、以下の4つの課題について取り組むこととした。

①核種移行のデータベース整備

核種移行パラメータについては、第2次取りまとめで使用した溶解度、吸着、拡散などの核種移行パラメータの信頼性向上および拡充を目的とし、還元雰囲気、炭酸系でのアクチノイド元素の溶存化学種の明確化、海水系や堆積岩系を対象としたデータの拡充などを行うこととした。また、透明性を高めるためにデータベースを定期的に更新・公開することとした。

②安全評価モデルの高度化

安全評価モデルの高度化については、重要現象の理解とモデル化を通じて安全評価解析の信頼性を向上させるため、亀裂中の水理・物質移行現象、堆積岩中の水理・物質移行現象、ガラスの長期溶解挙動、核種の溶解現象、核種の吸着・拡散現象、コロイドなどの影響評価について現象理解を進め、個別現象モデルを開発・改良することとした。また、実際の地質環境の重要な特徴のモデルへの取り込みを図るため、水理地質構造モデルと生物圏評価モデルについて必要な検討・改良を行うとともに、深部地下水の水質予測の信頼性を高めるために、地下水水質のモデル化について検討することとした。

さらに、不確実性の取扱い技術を向上させるため、不均質性が重要となる地下水流動の分野において、堆積プロセスを考慮した地質構造推定技術、地下水流動解析結果の不確実性定量化技術や原位置トレーサー試験より得られる水理・物質移行特性値の不確実性について検討することとした。

③安全評価手法の整備・高度化

安全評価の信頼性を確保するためには、モデルやデータの信頼性を高めるだけでなく、追跡性、透明性やわかりやすさなどを確保すること、不確実性が適切に取り扱われていること、評価者と研究者や調査担当者との間で適切なコミュニケーションが確保され評価の品質が保証されていることなどが必要とされている。こうした課題に対処するために、シナリオ解析技術、天然現象影響評価技術、不確実性評価技術の技術開発、技術情報の統合技術の開発に取り組むこととした。

④安全評価手法の適用性確認

安全評価手法の適用性確認については、データ整備、現象理解・モデル化、安全評価手法の個別技術について、改良した技術を実際の地質環境に適用することにより、実際の地質環境を対象とする場合の留意点・課題の抽出を行うとともに、地質環境の調査・評価から物質移行解析に至る一連の評価の中で、評価項目間の重要な接続部分における作業手順の開発と試行を行うこととした。

なお、本報告書で取扱う課題は、第2次取りまとめと異なり安全評価関連の全分野を網羅

的にカバーするのではなく、安全評価の基盤として現象理解、モデル開発、データベース開発、手法開発などの中から、重要な課題を選択して実施している。

本報告書は、全6章から構成されている。第1章は全体計画に基づく目標および課題と研究の進め方を示している。第2章（核種移行データベースの整備）、第3章（安全評価モデルの高度化）、第4章（安全評価手法の整備・高度化）、第5章（安全評価手法の適用性確認）の各項目においては、課題を設定した背景、第2次取りまとめ以降の進捗と事業・規制への反映、今後の課題について記述した。課題を設定した背景においては、どのように第2次取りまとめの課題、国際的動向、事業・規制のニーズなどを考慮して課題を設定したかを記述した。第2次取りまとめ以降の進捗と事業・規制への反映においては、各課題において得られた成果の安全評価および事業・規制における位置づけや反映点について記述した。また、最後に今後の課題として、次のフェーズで取り組むべき課題について記述した。第6章では、第2次取りまとめ以降の研究の進捗および事業・規制への反映点を要約した。

以下に、第2次取りまとめ以降の進捗を中心に各項目の概要を述べる。

核種移行データベースの整備

放射性元素の熱力学データベースの整備については、アクチニドIV価の水酸化炭酸錯体やアモルファス含水酸化物の溶解度積や加水分解定数などの熱力学データを取得し、既存データとの比較などを踏まえ、その信頼性の向上を図った。また、放射性元素の熱力学データベース（JNC-TDB）について、最新の経済協力開発機構・原子力機関の熱力学データベース（OECD/NEA TDB）も含めて、各種地球化学計算コードに対応したフォーマットに変換し、透明性、客観性の確保などの観点から外部公開ホームページ上で一般に公開した。本データベースへの国内外の利用者登録は、2005年7月時点で300名を突破しており、利用者からの指摘に対する改訂も行なっている。

収着・拡散データベースの整備については、幅広い地質環境への適用性を考慮して、セシウム、セレン、スズなどの海水系環境などにおける堆積岩に対する収着データを拡充した。また、核種の収着データベース（JNC-SDB）についても、JNC-TDBと同じく、透明性、客観性の確保などの観点から外部公開ホームページ上で一般に公開した。利用者登録数は熱力学データベースに同じである。また、1998～2003年に公開された収着データ約1,200件を追加、更新した。データ数が増えたことにより、セシウム、アメリカシウムなどの元素の分配係数のイオン強度やpHに対する依存性がより明確になり、イオン交換や表面錯体反応といったメカニズム推定に有効なものとなった。さらに、2万件を超える収着データの信頼度付与のための指標を作成した。核種の収着データベース開発などにより、社団法人日本原子力学会標準化委員会の活動の一環で行われている深地層の分配係数の測定方法の標準化作業に汎用的な条件や方法などの基盤情報が提供できた。

安全評価モデルの高度化

岩盤中水理・物質移行モデルの高度化については、地上からの調査段階で必要となる地下水流動解析の信頼性向上に資するモデル化技術の整備として、以下の成果が得られた。

- ・データの少ない広域とデータの多い処分場近傍領域を同時に解析するために、亀裂ネットワークモデルと連続体モデルを接続した「入れ子式モデル」を開発するとともに、その有効性を確認した。
- ・間隙水圧データから地下深部の透水係数を推定する技術を、幌延地域で観測されている間隙水圧データに適用し、稚内層で観測された高い間隙水圧は、稚内層あるいはその上位の声間層の上部に低透水性の地層が存在することに起因する可能性が示唆され、本手法を用いることにより、対象地域の地下水流動に影響を及ぼす可能性がある要因を抽出し、調査や解析にフィードバックできる可能性が示された。
- ・水理と地下水水質変化を統一的にモデル化するために、ケモメトリックス法とバックワー

ドトラッキングを組み合わせることで地下水の端成分の混合割合の時間変化をモデル化する手法を開発し、スウェーデンのエスポ地下研究施設周辺地域における坑道掘削に伴う水質変化の予測解析に適用した。その結果、本手法が水理地質構造モデルの信頼性の確認とともに、間隙率の補正にも有効であることが分かった。

- ・ 定量的知見だけでなく定性的な地質学的データなども考慮することがモデルの信頼性向上に有効であるため、堆積プロセスを考慮して堆積岩中の不均質な堆積構造を再現することにより地質構造モデルの不確実性を推定する手法を開発した。
- ・ 水理解析から物質移行解析に受け渡す重要情報となる移行経路長は、透水係数の不均質性の影響を受けるため、移行経路長などの不確実性を確率有限要素法を用いて評価する手法を提案するとともに、モンテカルロ法との比較・検討を行った。

また、結晶質岩・堆積岩について安全評価上重要となる亀裂を対象とした水理・物質移行の現象理解に関して以下の成果が得られた。

- ・ 1 ケースではあるが亀裂交差部と交差部周辺の亀裂の透水性を測定し、亀裂交差部は周辺の亀裂より透水性が高く、移行経路となりうることを示した。
- ・ 亀裂充填物質の拡散係数を測定し、移流間隙と接する岩石基質部に拡散するだけでなく、亀裂充填物質を介して亀裂面全体からマトリクス拡散が起きうる可能性があることを示した。また、トレーサー試験に基づき安全評価で用いるパラメータを解釈するに当たっては、亀裂充填物質の影響を考慮する必要性があることを示した。
- ・ 原位置トレーサー試験からパラメータ値とその不確実性を推定する手法を開発した。
- ・ 新第三紀堆積岩中の亀裂の影響を、コアを用いた室内試験で評価し、間隙率の異なる堆積岩で亀裂が移行経路になり得る場合とそうでない場合があることが示され、実際のサイトでは亀裂の影響を確認する必要性があることが示唆された。また、物質移行開口幅と透水量係数の相関性については、第2次取りまとめの知見が堆積岩においても利用可能であることを示した。

地下水・間隙水水質形成モデルのうち、地下水水質に関しては、幌延の深地層の研究施設計画や茂原地域においてボーリング孔から採水され地表で測定された地下水データに基づき、地下深部での pH, Eh などの値を熱力学的手法により推定し、地表からの調査段階において深部地下水水質を測定することが困難な場合の推定方法を提示した。間隙水水質に関しては、圧縮ベントナイト中の間隙水の pH の時空間変化を直接測定する技術を開発した。また、セメントに起因して発生する高アルカリ溶液とベントナイトの変質を検討する際に必要な鉱物などに関する熱力学データベースを整備した。

現象論的核種移行モデルの開発のうち、ガラスの長期浸出挙動では、変質鉱物として pH11 以上では方沸石、pH11 以下ではスメクタイトの生成が確認され、方沸石生成の場合はガラス溶解が加速されることがわかった。核種の溶解現象では、溶解度制限固相の変遷について、トリウムに引き続き、ウランについても溶液中において非晶質含水酸化物の結晶性酸化物への変化が確認され、第2次取りまとめにおける溶解度制限固相の設定が保守的であることが示された。また、固溶体モデルの開発について、ネプツニウム IV 価とウラン IV 価が混合したアモルファス含水酸化物の溶解挙動が理想固溶体モデルで表現できることを示した。さらに、ラジウム（バリウム）とカルシウムが混合した炭酸塩の共沈挙動について、元素分配比の方解石沈殿速度依存性を取得するとともに、ラジウム（バリウム）の溶解挙動が、非理想系の固溶体モデルにより解釈できることを示した。収着拡散挙動では、収着メカニズムに基づくモデルの妥当性を確認するとともに、現状では適用可能な元素には制限があるものの、環境条件に対応した分配係数値の推定および環境条件の変化に対する感度の予測が可能となった。さらに、緩衝材中の微細間隙構造中における各イオンの移行経路などに関する現象理解が進んだ。

コロイド、有機物および微生物のうち、コロイド影響に関する研究では、原位置地下水中的コロイド特性（濃度・粒径分布）などを評価した。圧縮ベントナイトによるコロイドフィ

ルター効果を均質化モデルにより検討し、コロイドろ過に必要な有効粘土密度を計算した。セシウムのコロイドに対する収着性は粉末状ベントナイトより大きいことを確認した。さらに、亀裂性媒体と多孔質媒体の両方に適用可能であり核種のコロイドへの収着速度を考慮できる核種移行計算コードを開発し、海外の地下研究施設における原位置試験においてその有効性を確認した。有機物の影響に関する研究では、実際の地下水中の有機物の同定と濃度測定を行った。圧縮ベントナイトへの有機物透過特性を調査し、蒸留水条件に比べ人工海水条件下では透過しやすいことを確認した。有機物と核種の相互作用については、トリウム、ネプツニウム IV 価と有機物の相互作用について錯生成定数を取得した。また、トリウムは溶液中の炭酸濃度がある程度以上の場合には有意に錯体を形成しないことを確認した。微生物影響に関する研究では、微生物がコロイド的挙動をする場合、微生物濃度によっては核種移行が促進される可能性があることを示した。

生物圏評価モデルの高度化については、実際の地表環境の特徴を考慮するため、希釈などの効果に大きく係わる地質環境と生物圏とのインターフェース (GBI) を実際の地表環境に応じて設定するための着眼点や考え方、および設定上考慮すべき要因を把握するための調査項目を概略的に検討した。また、海域を GBI としたモデル、下部土壌を GBI としたモデル、気候変動を考慮したモデルなどを拡充した。さらに、実際のサイトにおいて、パラメータの重要度と設定状況に基づき優先的に取得すべきデータを絞り込む手順を作成した。線量およびリスク以外の安全指標としての天然放射性核種の濃度とフラックスについて、基盤的情報としてわが国における天然放射性核種の濃度とフラックスのデータを収集・整理するとともに、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を例示した。

安全評価手法の整備・高度化

シナリオ解析技術については、シナリオ解析において重要である反面複雑で時間を要する主要な原因となっていた FEP の相関関係の整理に対して、FEP の相関関係をマトリクス形式で表現することに加え、安全機能という結果側の視点からの階層的整理を行うことにより構造化するとともに、計算機上に展開することにより、相関関係の十分性の確保、作業の効率化、および作業の追跡性・透明性の確保を可能とする技術を開発した。

天然現象影響評価技術に関しては、地質学的知見をより合理的に評価に反映することにより過度の保守性を排除可能とするとともに、整合性・追跡性についても確保可能な作業フレームを整備した。

不確実性評価技術のうち、パラメータの分布設定技術については、誘出法を用いた分布設定手順の検討および試行から、分布設定手順を具体化するとともに、留意点として、パラメータの変動要因について専門家間で情報を共有することが重要であるとの知見を得た。データ不確実性の影響の定量化については、複数のデータの不確実性が同時に存在する場合の影響をモンテカルロシミュレーションで評価可能な核種移行解析モデルを開発するとともに、決定論的な手法と確率論的な手法を相互に補完的に用いることにより、不確実性評価の信頼性と効率を向上させることができる見通しを得た。感度分析技術については、従来の重回帰分析に加えて、クラスタ分析、判別分析、決定木分析などの手法を、分析の目的に応じて使い分けること、および組み合わせることでその有効性を提示した。モデルの不確実性の影響の定量化については、第 2 次取りまとめの段階で、簡略化したり、安全側の観点からあえて効果を見逃していたプロセスの検討として、掘削影響領域での移行遅延や、ガラス溶解に対するガラスの割れの影響について評価を行い、これらの現象の現実的評価がシステム性能の頑健性を示す上で有効となる見通しが得られた。

技術情報の統合技術については、広範囲におよぶ地層処分の各研究要素間で技術情報の共有を図ることにより、調査・設計・安全評価の整合性を確保し、評価の信頼性の向上を図るため、技術情報を利用しやすい形で統合的に管理することが可能なシステム (技術情報統合システム: JGIS) を構築した。

安全評価手法の適用性確認

実際の地質環境を対象とした、地質環境の調査・評価から物質移行解析に至る一連の作業の枠組みを整理した。また、実際の地質環境を対象とした物質移行解析の大きな特徴のひとつである、地下水流動解析から得られる移行経路情報を物質移行モデルに反映する方法について検討し、複雑なモデルと簡略化したモデルを構築するとともに、簡略化したモデルで複雑なモデルを近似する手法を提示した。

安全評価手法を個別に深地層の研究施設計画や海外の地下研究施設における実際の地質環境データに対して適用した結果、実際の地質環境を対象とする際の留意点・課題について以下の事項を提示した。

地下水流動評価のうち、補完モデルとしての入れ子式モデルについては、適用結果と亀裂ネットワークモデルを構築する上での留意点・課題として、流体検層による水みちの透水量係数の測定精度の検討、亀裂の長さを設定する際のフラクタル特性データの活用などを示した。実測されたデータから水理パラメータを推定する手法については、幌延の深地層の研究施設計画のボーリング孔で観測された間隙水圧から地下深部の透水係数の推定を行い、留意点として、断層部分の透水係数の設定（高透水性部と低透水性部からなるサンドイッチ構造、あるいは低透水性部のみの一層構造）が地層の透水係数の推定値に影響を与えることを示した。水理地質構造モデルの信頼性を確認する上で、地下水水質変化との整合性を確認する手法については、留意点として、地下水水質の初期状態の把握とその後の変動の把握が重要であることなどを示した。堆積岩の地質構造を推定する技術の開発については、堆積プロセスおよび圧密プロセスを考慮して堆積岩の堆積構造を推定するうえでの留意点として、入力パラメータの設定にあたって、初期条件や堆積作用に影響する要因について堆積学的知見に基づき慎重な検討を行う必要があることを示した。

地下水水質の設定については、地下水水質を熱力学的解析に基づき補正する手法を検討し、留意点・課題として、地下水水質を推定するうえでの鉱物情報の取得の重要性や微生物影響などを含めた評価の必要性について述べた。

物質移行のための解析モデルの選定およびパラメータ設定に関しては、間隙率の異なる新第三紀堆積岩における卓越した水みちとして、亀裂の重要性が異なることが示唆されたことから、実際のサイトにおいて亀裂が岩石の透水性に与える影響を確認することを留意点として示すとともに、原位置での亀裂の連結性についても検討する必要性を今後の課題として示した。結晶質岩については、留意点として、トレーサー試験から安全評価に用いる物質移行パラメータを解釈する際には、亀裂中の充填物質への拡散が短期的には卓越するため、その影響を考慮した解釈を行う必要性を示した。

分配係数の設定に際しては、留意点として、岩石と地下水水質の把握が重要であり、特に後者については天然有機物の把握が重要であることを指摘した。また、実際の地質環境を対象とする際には、得られるデータが限られる可能性があり、そのような場合に既存の収着データベースを基に分配係数を推定する手法を示した。

コロイド、有機物の影響評価を行う際には、留意点として、地下水中における濃度、安定性、移行性、核種収着性・錯形成能およびそれらの不可逆性の5つの特性を評価する必要があること、地下水中のコロイド特性は地下水流速や Eh, pH などの影響を受けやすいため、できるだけ地下深部の環境を乱さずに地下水を採取する必要があること、また、有機物についても、コロイドレベルの大きさを持つ有機物が存在する可能性があるため、コロイドと同様に擾乱の小さい手法で地下水を採取する必要があることを述べた。

シナリオ解析については、留意点として、地質環境に対する理解が十分でない段階においては、地質環境条件などを一義的に定めることができないことが想定されるため、そのような場合には複数の地質環境条件のそれぞれに対してシナリオを設定し、不確実性として評価

できるようにしておく必要性和、このような課題に対応可能なシナリオ構築手法を整備したことを述べた。

不確実性評価については、パラメータ分布の設定技術、データ不確実性の影響の評価技術、重要な不確実性の抽出技術が整備され、今後実際の調査・研究にフィードバックすることが課題であることを述べた。

生物圏評価については、調査により得られる情報に応じて GBI 候補を絞り込むことの手順について検討を行い、今後深地層の研究施設計画で行われる調査を活用して検討することが今後の課題であることを述べた。

技術情報統合システムの開発については、実際の地質環境を対象とした調査・研究の進展に伴う技術的な情報の増大や複雑化への対応の実績の蓄積を図ることが課題であることを述べた。

今後に向けて

今後、地層処分のセーフティケースの作成に必要な地質環境の調査、処分場の設計および安全評価に関するデータや情報、および専門家の判断根拠などを知識という形でわが国共通の資源とするために、安全評価に関する技術基盤の強化を進めるとともに、知識の拡充と具体化、統合化の方法論の開発およびそれに基づく知識ベースの構築を進める。

安全評価に関する技術基盤の強化については、地層処分基盤研究施設や地層処分放射化学研究施設などの研究施設において、核種移行などに関するデータの拡充、現象理解の深化に基づくモデルの高度化を図る。また、安全評価への反映の筋道を明らかにしながら個別研究課題を進めるとともに、それらの連携を強化し、総合技術としての安全評価技術を向上させる。さらに、これらの技術の開発・整備に、深地層の研究施設計画で得られる地質環境データなどを活用していくとともに、全体システムモデルの整備も図りながら、個別の技術のみならず安全評価技術全体としての深部地質環境での適用性確認を行う。

知識の統合化に関する方法論の開発および知識ベースを管理する知識マネジメントシステムの開発と整合をとりつつ、上述のデータ、モデル、手法、それらの適用性などの安全評価に関する技術的成果、および深地層の科学的研究の成果やすでに開発を進めている熱力学データベースなどを知識として整理し、それらを知識ベースとして体系化する。これにより、事業の進展に応じて研究開発成果や科学技術的進歩を反映した最新の知識を提供することを可能とする。また、関係機関の研究開発成果もこの知識ベースに統合し、地層処分技術に関する研究開発における中核機関としての役割を果たす。

用語の説明

安全機能

地層処分の長期的な安全性を確保するために多重バリアシステムが有する機能。第2次取りまとめでは、ガラス固化体に期待する安全機能、緩衝材に期待する安全機能および母岩に期待する安全機能を整理している。

安全評価

地層処分システムが安全上受け入れられるものか否かを判断するため、システムの将来挙動の予測を踏まえた人間とその生活環境への影響に関する解析結果を放射線の影響を表す適切な線量などの指標を用いて示し、安全基準と比較する。なお、安全評価において実施する一連の解析を安全評価解析という。

H17取りまとめにおいては、安全評価および性能評価に関係する研究全般を総称して安全評価という表現を用いている。

なお、性能評価とは、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、その性能について定量的に評価することをいう。解析の対象が地層処分システム全体で、比較の基準が安全性に関するものである場合には、性能評価は安全評価と同義である。(原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会報告書(1997)に一部加筆)

FEP

地層処分システムに影響を及ぼすと考えられるシステムの特質(Feature)、そこで生ずる事象(Event)や過程(Process)をいう。

オーバーパック

ガラス固化体を包み込み、ガラス固化体に地下水が接触することを防止し、地圧などの外力からガラス固化体を保護する容器。人工バリアの構成要素の一つ。候補材料は炭素鋼などの金属である。(原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会報告書(1997)から引用)

概要調査地区

応募区域及びその周辺地域についての文献調査結果に基づき原環機構が選定する地区をいう。概要調査地区では、ボーリング調査、地表踏査、物理探査等の地表からの調査(概要調査)が行われる。(原子力発電環境整備機構「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性」(2004)から引用)

可逆性 (reversibility) と回収可能性 (retrievability)

「可逆性」とは、処分場開発計画全体の中のどの段階においても、プランや実施自体に関するある特定のステップやいくつかのステップを元に戻すことが可能であることを意味する。また「回収可能性」とは、定置された廃棄物を物理的に元に戻すことができる可能性を意味する。(OECD/NEA報告書(1995)から引用)

緩衝材

オーバーパックと岩盤の間に充填し、地下水の浸入や放射性物質の溶出・移行を制御するもの。さらに岩盤の変位を物理的に緩衝するクッションの働きや、地下水の水質を化学的に緩衝して変化を抑える働きをもつ。人工バリアの構成要素の一つ。候補材料はベントナイト

などの粘土である。(第2次取りまとめから引用)

建設・操業・閉鎖

建設は、廃棄物定置のための地下施設(地下坑道群)と地上施設を構築することを指す。操業はガラス固化体の受け入れ、廃棄体や緩衝材の搬送・定置、さらにその後に行われる処分坑道、主要坑道の埋め戻し作業を指す。閉鎖は、連絡坑道、アクセス坑道およびボーリング孔を埋め戻し、さらに地上施設の解体・撤去を指す。(原子力発電環境整備機構「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性」(2004)から引用)

コロイド

溶存状態(分子)よりも大きく懸濁状態よりも小さな粒子サイズを有する物質の状態。コロイド粒子は 10^{-6} ~ 10^{-3} mm(1nm~1 μ m)の大きさを持ち、水などの液体中に浮遊し、容易には沈まない。(IAEA: Radioactive Waste Management Glossary (2003) Edition から引用)

最終処分施設

高レベル放射性廃棄物の地層処分(最終処分)を行うために必要な、ガラス固化体の搬送用の設備、埋設用の坑道、人工バリア(ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材の総称)を含む一群の施設をいう。(原子力発電環境整備機構「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性」(2004)から引用)

最終処分施設建設地

精密調査により地層の物理的及び化学的性質が最終処分施設の設置に適していることが明らかになった精密調査地区内において、最終処分施設を建設しようとする地点をいう。(原子力発電環境整備機構「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性」(2004)から引用)

人工バリア

ガラス固化体、オーバーパック及び緩衝材の総称。多重バリアシステムの構成要素の一つ。(第2次取りまとめから引用)

精密調査地区

概要調査地区での概要調査の結果に基づき原環機構が選定する地区をいう。精密調査地区では、最終処分施設建設地の選定に向けて、地表からのさらに詳細な調査及び地下の特性などを調べるために地下に調査施設を建設しての調査(精密調査)が行われる。(原子力発電環境整備機構「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性」(2004)から引用)

地層処分

放射性物質を生物圏から長期にわたり隔離するため、放射性廃棄物を深地層(通常は数百m、あるいはより深部)に埋設すること。(IAEA: Radioactive Waste Management Glossary: (2003) Edition から引用)

地層処分システム

適切な地質環境の下に多重バリアシステムを構築することによって、処分された高レベル放射性廃棄物による影響が将来にわたって人間とその生活圏に及ばないようにするための仕組み。(原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会報告書(1997)から引用)

天然バリア

放射性物質を閉じ込める機能を期待し、安定で地層処分に好ましい条件をもつ地下深部の岩盤をいう。処分場（多重バリアシステム）の構成要素の一つ。（原子力発電環境整備機構「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性」の説明資料から引用）

ナチュラルアナログ

廃棄物埋設後の放射性核種の挙動や人工バリアの腐食・変質など、地層処分システムにおいて想定される現象と類似した、自然界で過去に起こった長期的変化に関する現象をさす。

火山から噴出した火山ガラス、古代の遺跡などから発掘される銅鐸、地下に埋設された古い鉄管などは、人工バリアの候補材であるガラスや金属に類似しているため、これらの地下での長期的な変化を調べることで、人工バリア中で生じ得る現象の確認および、評価方法の妥当性をチェックすることができる。また、天然の放射性核種を含むウラン鉱床などは、地層処分システム全体のナチュラルアナログの研究の場として利用できる。（原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会報告書（1997）から引用）

ニアフィールド

人工バリアとその設置などにより影響を受けると考えられる人工バリア近傍の岩盤とを合わせた領域。（原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会報告書（1997）から引用）

物質移動／物質移行

環境中における物質の移動（あるいは移行）。物質移動には、移流（地下水や空気などの流体の動きによる物質の移動）、拡散（当該物質の濃度の高い領域から低い領域への濃度勾配による物質の移動）、収着（⇒「収着」を参照）などの自然現象（例えば、地下水による放射性核種の移行）が含まれ、人間による物質の意図的な移動（例えば、放射性廃棄物の輸送）はこれには該当しない。（IAEA：Radioactive Waste Management Glossary（2003）Editionから引用）

保守性

地層処分システムの性能評価あるいは安全評価を行う際、安全性に対する判断をより厳しく行うように、解析の前提条件や使用するデータをより安全側に見積もること、モデルの前提や使用するデータをより安全側に見積もることにより、安全性に関する判断を厳しく行えるような性格に保つことをいう。（第2次取りまとめから引用）

モニタリング

周辺環境や、施設からの排気や排水中の放射能のレベルなどを測定することをいう。例えば、地下水位の測定、排気筒から放出される放射性物質濃度の測定などがある。（原子力発電環境整備機構「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性」（2004）から引用）

略 語 集

ENTRY	ENgineering-scale Test and Research FacilitY (地層処分基盤研究施設)
IAEA	International Atomic Energy Agency (国際原子力機関)
ICRP	International Commission on Radiological Protection (国際放射線防護委員会)
NRC	National Research Council (米国研究評議会)
OECD/NEA	Organization for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency (経済協力開発機構/原子力機関)
QUALITY	QUantitative Assesment Radionuclide Migration Experiment FaciLITY (地層処分放射化学研究施設)