JAEA-Review
2010-073

JAEA-Review

地層処分研究開発成果とりまとめ：CoolRep H22

CoolRep H22: Synthesis Report on R&D Results on Geological Disposal up to 2009

（編）梅木 博之　日置 一雅　大澤 英昭　藤田 朝雄
柴田 雅博　牧野 仁史　岩月 輝希　竹内 真司　石丸 恒存

(Eds.) Hiroyuki UMEKI, Kazumasa HIOKI, Hideaki OSAWA, Tomoo FUJITA
Masahiro SHIBATA, Hitoshi MAKINO, Teruki IWATSUKI
Shinji TAKEUCHI and Tsuneari ISHIMARU

地層処分研究開発部門

Geological Isolation Research and Development Directorate

February 2011

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構　研究技術情報部　研究技術情報課
〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

JAEA-Review　2010-073

地層処分研究開発成果とりまとめ：CoolRep H22

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門

（編）梅木　博之，日置　一雅[+1]，大澤　英昭[+1]，藤田　朝雄[+2]
柴田　雅博[+2]，牧野　仁史[+1]，岩月　輝希[+3]，竹内　真司[+1]
石丸　恒存[+5]

(2010 年 12 月 14 日　受理)

独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下，JAEA）は，国が示した中期目標や関連する計画・方針に従って定めた JAEA の中期計画（平成 17 年 10 月 1 日～平成 22 年 3 月 31 日）に基づき，平成 21 年度までに進めてきた地層処分の研究開発の成果を取りまとめた CoolRepH22 を作成し，平成 22 年 3 月に地層処分研究開発部門ホームページ上で公開した。本稿では，これまでに JAEA 地層処分研究開発部門のホームページで公開した CoolRepH22 の内容を示す。

東京事務所（駐在）：〒100-8577　東京都千代田区内幸町 2-1-8
+1 研究開発統括ユニット
+2 地層処分基盤研究開発ユニット
+3 幌延深地層研究ユニット
+4 東濃地科学研究ユニット

JAEA-Review 2010-073

CoolRep H22: Synthesis Report on R&D Results on Geological Disposal up to 2009

(Eds.) Hiroyuki UMEKI, Kazumasa HIOKI[+1], Hideaki OSAWA[+1], Tomoo FUJITA[+2], Masahiro SHIBATA[+2], Hitoshi MAKINO[+1], Teruki IWATSUKI[+3], Shinji TAKEUCHI[+1] and Tsuneari ISHIMARU[+4]

Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Uchisaiwai-cho, Chiyoda-ku, Tokyo

(Received December 14, 2010)

The Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has been performing research and development on geological disposal technology of high level radioactive waste. At the end of fiscal year 2009, the Geological Isolation Research and Development Directorate of JAEA made publicly available the 'CoolRep H22', which is a web-based report that summarizes the R&D results, on its website.

This document reports the contents of CoolRep H22.

Keywords: Geological Disposal Technology, High-level Radioactive Waste, CoolRep

---

+1 Reaearch and Development Integration Unit
+2 Geological Isolation Research Unit
+3 Horonobe Undergaround Research Unit
+4 Tono Geoscience Research Unit

目　次

1. はじめに---------- 1
2. CoolRep の概要---------- 1

【付録】

Ⅰ 地層処分のセーフティケースを支援するための知識ベース
Ⅱ 深地層の科学的研究カーネル
Ⅲ 工学技術カーネル
Ⅳ 性能評価研究カーネル
Ⅴ TRU 廃棄物カーネル

Contents

1. Introduction---------- 1
2. Summary of CoolRep---------- 1

【Appendix】

Ⅰ Knowledge Base Suppoting Development of Safety Case of Geological Disposal
Ⅱ Kernel of Geoscience Study
Ⅲ Kernel of Repository Engineering Technology
Ⅳ Kernel of Performance Assessment Methods
Ⅴ Kernel of TRU

1. はじめに

独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下，JAEA）は，国が示した中期目標や関連する計画・方針に従って定めたJAEAの中期計画（平成 17 年 10 月 1 日～平成 22 年 3 月 31 日）[1)]に基づき，地層処分技術に関する研究開発として，地層処分研究開発およびその基盤となる深地層の科学的研究を進め，地層処分の安全確保の論拠を支える知識ベースを適切に管理するためのJAEA知識マネジメントシステム（JAEA Knowledge Management System; JAEA KMS）[1]を開発するとともに，平成 21 年度までに進めてきた地層処分の研究開発成果と取りまとめたCoolRepH22[2,3]を作成し，平成 22 年 3 月末に地層処分研究開発部門ホームページで公開を開始した[4]。本稿では，平成 22 年 6 月に開催した平成 22 年度報告会「地層処分知識マネジメントシステムの開発－知と技の伝承への挑戦－」までに，ウェブで公開したCoolRepH22 の内容を示す。

2. CoolRep の概要

CoolRep は，ウェブサイト上のレポートであり，セーフティケースの作成に資する知識基盤を提供するという観点から研究開発の最新の状況や今後の研究開発の方向性などを提示して，ステークホルダー等の要求に応じて，地層処分に関連する知識や情報をスムーズに提供することを目指したものである。この目的のため，CoolRepH22 は，以下のように構成した。

- セーフティケースを念頭において作成した「本文」（地層処分のセーフティケースを支援するための知識ベース；付録Ⅰ）。
- 研究開発分野ごと（深地層の科学的研究；付録Ⅱ，性能評価研究；付録Ⅲ，工学技術；付録Ⅳ，TRU廃棄物；付録Ⅴ）の中期計画期間中の研究開発の成果の概要を示した「カーネル」[5]。
- 「本文」及び「カーネル」から，ハイパーリンクを介して接続される個々の研究開発成果（例えば，より詳細な技術的情報を提供する報告書，ビデオやアニメーションなどの可視化支援資料，レビューや品質保証に関するすべての資料，関連するウェブサイトなど）

---

1 JAEA KMS ホームページ（http://kms1.jaea.go.jp/kmsif/kms_login.html）を参照。

2 膨大な知識を従来のような大量の紙ベースの文書として取りまとめるのではなく，最新の知識工学や情報工学の技術を活用することで環境に優しい（紙資源を節約する）形態で展開することから，「クールビズ」をもじって CoolRep と命名したもの。平成 22 年 3 月までに取りまとめられた研究開発成果を CoolRepH22 と呼ぶ。

3 CoolRep H22 ホームページ（http://kms1.jaea.go.jp/CoolRep/）を参照。

4 地層処分研究開発部門ホームページ（http://www.jaea.go.jp/04/tisou/toppage/top.html）を参照。

5 カーネルは Knowledge Element incorporating Requirement, Novelty, Experience and Limitations（KERNEL）の略語。

このような構造と技術的深さに応じたハイパーリンクの階層化により，ステークホルダーがそれぞれの立場から必要とする情報の提供，要約の中の関連する場所（テキスト文書）から技術的な情報へのアクセスすることにより，「見たいものがすぐに見られる」ことによる理解の効率化などを可能とした。

平成22年に，JAEA地層処分研究開発部門ホームページで公開したCooRep H22については，付録Ⅰ～Ⅴに示す[6]。

なお，カーネルについては，今後，「知識マネジメントシステム」及び「品質マネジメントシステム」を新たに作成していく計画である。

6　報告書の参考文献に設定したリンクは，JAEA 地層処分研究開発ホームページで CoolRep H22 を公開した時点でのリンク先を示している。

付録Ⅰ　地層処分のセーフティケースを支援するための知識ベース

第１章　中期計画報告書の位置づけ

原子力の利用によって生じる放射性廃棄物を最終的に処分するため，世界各国において技術的な取り組みが半世紀以上にわたって進められてきました。これら廃棄物の中で原子力発電に伴って発生する，放射能レベルが高く，半減期の長い放射性核種を含む廃棄物に対しては，地層処分が，科学的に適切で，最も現実的な選択肢であるという国際的な合意（NEA Common Objective）の下，各国の国情に合わせて様々な地層処分の概念が開発され，その実現に向け大きな努力が払われてきました。しかし一方では，こうした技術的な合意があるからといって，直ちに社会的な受容に結び付かないため，地層処分の事業は必ずしも計画通りに進んでいないのが多くの国における現状です（各国の実施主体： POSIVA, SKB, BfS / DBE, ANDRA, Nagra, NDA, NWMO, USDOE など）。

このような状況を変えていくためには，何にもまして，地層処分の必要性と事業開始の緊急性が社会的に認識されるとともに，これを安全に実施することが可能であるという技術的な裏付けが明快に示され，理解される必要があります。こうした認識や理解を深めるうえで，地層処分事業を，その対象となる廃棄物を生み出す原子力発電からもたらされる恩恵や，制度的な管理の下で地上に保管されている現在の状況と対比して論ずるということも重要であると考えられています。

本書は，日本原子力研究開発機構（以下，「原子力機構」と呼びます）が中期計画（原子力機構中期目標，中期計画）にしたがって平成 21 年度までに進めてきた地層処分の研究開発の成果を取りまとめて示し，日本で安全な地層処分を実現するための科学技術的基盤がすでに存在し，それをより確かなものとするための努力が続けられていることを明らかにすることを目的としたものです。

近年，地層処分の安全性に関してセーフティケースの概念が広く用いられるようになってきました（NEA Confidence Report, NEA Safety Case Brochure, NEA Safey Case Symposium, IAEA WS-R-4 など，3.1 節）。この概念は特に地層処分の長期にわたる安全性の立証に関わるものであり，これを作成し信頼のあるものとしていくために，地質環境調査や処分場設計，安全評価を中心として多様な知識を用いることが必要となります。こうした知識を提供するものとして，本書の取りまとめにあたっては，セーフティケースの作成を支援するという観点で研究開発成果の構造化を図りました。

また，地層処分に関する国民的な理解と信頼の構築を図るため，地層処分に関心をもつ人々が本書に含まれる情報に容易にアクセスできるように，印刷物として固定化された従来の技術報告書とは異なる，ウェブサイト上に情報を展開する方法（1.2 節）をとることにし，このよ

うな文書の形式を「CoolRep（クールレプ）」（1.2.2 節）と名付けました。この方法をとることにより，地層処分事業の全期間を通じて，研究開発や科学技術の進歩によって得られる新たな知見を継続して取り入れ，常に最新の情報を提供できる「活きた文書」となることを目指しています。本書はその出発点として，上述のとおり，平成 22 年 3 月公開時点で内容を固定したものであり，これを CoolRepH22 と呼ぶことにします。

報告書を取りまとめるにあたっては，原子力委員会（原子力政策大綱，政策評価部会報告書「原子力政策大綱に示している放射性廃棄物の処理・処分に関する取組の基本的考え方に関する評価について」），原子力安全委員会（「原子力の重点安全研究計画」，「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（以下，「最終処分法」と呼びます）に基づく最終処分基本方針と最終処分計画，国の審議会／委員会（総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会放射性廃棄物小委員会放射性廃棄物処分技術ワーキンググループ報告書，総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会報告書「放射性廃棄物処理・処分に係る規制支援研究計画（平成２２年度～平成２６年度）」について」），地層処分基盤研究開発調整会議（HLW 全体計画，TRU 廃棄物全体計画）等で議論された研究開発のあり方を念頭に，特に以下のような点に留意しました（順不同）。

- 国民の理解の促進（地層処分の必要性と緊急性，安全確保の考え方，技術的課題に対する取り組みの進捗状況や将来の見通しに関するわかりやすい説明）
- 地層処分事業計画に即した研究開発成果の提供
- 安全規制策定のニーズに沿い，規制の科学的合理性を向上させるための新たな科学技術的知見の創出及びその円滑な活用と着実な反映
- 研究開発や技術開発の全体像の提示
- 知見・技術の移転や伝承のための適切な仕組みの提示
- 技術データに関する国際的な水準での品質保証
- 将来の原子力計画を見通した研究の着実な推進（適切な研究ゴールの設定）

CoolRep は新たな試みであり，多くの人々に地層処分について関心を持っていただき，またその関心にお応えしていくことによって，地層処分技術に対する社会的受容性獲得の一助として，対話促進のための共通の土台となることを目指しています。このため，今後も改良を加えるとともに内容の充実を図り，利用される方にとって役に立つものとなるよう努力を続けていきたいと考えています。

1.1 はじめに

1.1.1 放射性廃棄物管理の展望

今日，環境に影響を及ぼす可能性のあるプロジェクトに関しては，何らかの形で，費用対便益の観点からその正当性を調べるとともに他の選択肢との比較を行う戦略的環境アセスメント（SEA）（例えば，L.E.F. Bailey, 2007）が検討されるようになってきています。放射性廃棄物の処分についても，現在，そして将来の原子力技術の利用に関わる便益が処分というプロジェクトの正当性を立証するものとして検討されることが必要と考えられます。最初に述べたように，放射能レベルが高く，半減期の長い放射性核種を含む廃棄物に対しては，地層処分が，科学的に適切で，最も現実的な選択肢であるという国際的な合意がありますが，例えば，長期貯蔵といった選択肢をも考慮した，放射性廃棄物管理（radioactive waste management）全体の最良な方策についても論じられることが重要です（NEA Timing of High-level Waste Disposal, NEA Roles of Storage in the Management of Long-lived Radioactive Waste）。

a）過去，現在及び将来の原子力利用

国際的な動向

原子力の商業利用は 1960 年代から 70 年代においてその将来を大いに期待され，急速に広まりました。原子炉の固有の安全性が強調され，経済的にも有利なものとされました。その一方で，当時は施設の廃止措置や放射性廃棄物の処分など，バックエンド対策については，課題として認識され地道な研究開発は行われてきたものの，現実的な課題としてはそれほど重要視されてはいませんでした。

1980 年前後の米国スリーマイル島と旧ソ連チェルノブイリの原子力発電所の事故を契機とした原子炉の安全性への懸念の広がりによって，原子力発電への公衆の信頼は低下し，原子力利用を拡大する計画は減速されることとなりました。原子力利用計画を有する多くの国で原子力発電という選択肢の見直しが行われ，実際に段階的廃止を決めたケースもあります。しかし，ここ数年来，原子力の復興の兆しが顕著（「原子力ルネサンス」）（電事連 原子力発電四季報第 31 号（2005 年 7 月）特集「原子力ルネッサンス～米国原子力発電のいま～」，電気新聞・海外原子力取材班著の「原子力ルネサンスの風－海外最新レポート」（2006/03/03 出版）など）となってきています。その引き金となった大きな要因は，化石燃料の利用による地球温暖化の問題です。これは，原子力がより魅力的になったというより，他の選択肢が原子力に比べてより受け入れがたいものとなったという側面もあると考えられます。第一世代の原子炉の時代に比べて，原子力に関する科学技術は大いに進歩しており，その安全性や信頼性はより高いものとなっています。また，建設や運転に関する総費用もより確実に推定することができるようになりました。今後世界人口が増加を続け，開発途上国での生活レベルの向上に対する要求が急激に増加して主要な天然資源が枯渇に近づくような状況と資源消費の結果として想定される気

候変動への懸念を考えると，原子力が世界規模でエネルギー供給に大きく貢献できる可能性があることは疑いの余地がありません（経済産業省「原子力立国計画」など）。

日本における原子力利用

人口が多く都市化が進み，科学技術に立脚した産業が発展している一方でエネルギー資源に乏しい日本では，原子力発電が重要な役割を果たしています（原子力委員会決定「成長に向けての原子力戦略の策定について」，資源エネルギー庁「原子力発電推進強化策」）。日本ではすでに原子力産業および研究開発のインフラが整っており，世界的にみて原子力平和利用の先頭を走るとともに，他の国への原子力施設や機器の供給において重要な役割を果たしています。日本の原子力開発は，他の国と比べてスリーマイル島とチェルノブイリの原発事故の影響を受けなかったとはいえ，ここ十数年は，国民の信頼を損なうような出来事も生じています（原子力安全・保安院事故トラブル情報）。こうした事態に対して全力をあげて対策が講じられ，その経験はより安全な原子力の利用のために活かされています。

国のエネルギー保障における原子力の重要な役割を考慮して，日本は先進的な原子炉と核燃料サイクルの開発に積極的に取り組んできています（原子力政策大綱，経済産業省原子力立国計画など）。ウラン輸入への依存度を減らすため，原子力利用の柱として使用済燃料を再処理して回収したウランやプルトニウムをリサイクルする政策を堅持しており，また，高速増殖炉の開発を進めるための広範な研究開発プログラムを進めています。これによって，燃料となる核分裂性物質の増殖とリサイクルを可能とし，ウラン鉱石単位量当たりのエネルギー出力を大幅に増大させることを目指しています。このような先進的な原子炉は，単に発電ばかりではなく，例えば燃料としての水素の生産や海水の淡水化などへの利用についても考えられています。近い将来においては引き続き核分裂が原子力発電の主流ですが，核融合に関しても積極的に研究開発を進めており，商業利用が可能になれば直ちに導入することが計画されています（原子力政策大綱，ITER）。

b) バックエンド対策の必要性

原子力の開発・利用が世界的規模で進むにつれ，すでに発生している放射性廃棄物やこれからも発生し続ける放射性廃棄物への懸念がますます大きくなってきており，原子力ルネサンスの現実性に関する議論において重要な視点の一つとなっています。SEA の観点からいえば，原子力の賛否は他の選択肢と比較して行われる必要があり，このためには考えられる原子力利用シナリオに応じて発生する全ての廃棄物の種類や量（これは，「インベントリー」と呼ばれます）（2.1.1 節）とそれらに対する対策の妥当性についての評価が求められることになります。同時に，他の選択肢によって発生する廃棄物の評価も必要となり，原子力以外の選択肢についての廃棄物に関する情報が十分に検討される必要があります（例えば，化石燃料による温室効果ガスや，多量の放射性物質を含むような廃棄物（TENORM 廃棄物など）。一方，原子力の利用によって，すでに発生している放射能レベルが高く，半減期の長い放射性核種を含む廃棄

物への対策を講じることが不可欠です。これに関しては前述の通り，地層処分が最も実現可能性が高い選択肢であることが国際的に認められています。

今後も含め，想定されるインベントリー（2.1.1 節）に基づき，発生量の低減化，リサイクル，解体，処分といった観点から，廃棄物管理のために可能な選択肢を明らかにし，これらを技術的観点や社会的観点から比較検討する必要があります。

日本では，固体廃棄物を放射能レベルに応じて浅地中処分（トレンチ処分，コンクリートピット処分），余裕深度処分，地層処分に分けた処分方法が考えられており，このうち高レベル放射性廃棄物（HLW）や長寿命放射性核種を含む TRU 廃棄物の一部については，地層処分を行うこととしています（2.1.1 節, TRU 廃棄物カーネル）。このように様々な放射性廃棄物に応じて幅広い処分の概念が存在しており，将来の変化を考慮しても，放射性廃棄物管理の体系を全体的に最適なものとしていくための十分な柔軟性を有しているということができます。

これまでに，日本でも地層処分が成立することを示すため，幅広い地質環境を念頭に置いて，高レベル放射性廃棄物を対象とした典型的な処分概念の成立性提示を中心に地層処分研究が行われてきました（第 1 次取りまとめ，第 2 次取りまとめ，　平成 17 年取りまとめ）。2000 年に「最終処分法」が制定されてからは，こうした研究開発成果を拡張しつつ，地層処分事業の実施主体である原子力発電環境整備機構（以下，「NUMO」と呼びます）によって，処分候補地の地質環境条件に応じた処分場概念を構築するための方法論の検討（NUMO-TR-04-01, NUMO-TR-04-03）が進められています。また，原子力機構などの関係機関によって，TRU 廃棄物の地層処分に関する研究開発（TRU 廃棄物処分概念検討書，TRU-2 報告書，TRU 廃棄物カーネル）の取りまとめも行われています（1.1.2 節）。

将来，先進的な核燃料サイクルが導入された場合に発生が見込まれる廃棄物も視野に入れた全体的な放射性廃棄物管理のあり方に関する検討も開始されています（METI 公募事業「先進処分概念」報告書, 2008，METI 公募事業「先進処分概念」報告書, 2009）。これについては，1.1.3 節で述べることにします。

c) パブリックアクセプタンスの重要性

これまで多くの広報活動が行われてきたにもかかわらず，放射性廃棄物の処分に対しては，多くの人々が不安を抱いているということは事実です。地層処分では，他では類をみない極めて長い期間にわたる安全性が求められ，注意深く選定された処分地に建設される地層処分場について，多くの科学技術分野の最新の知見を総動員して安全性が確保できることを実証しこれを説明する努力がなされてきたにもかかわらず，しばしば，「単なる投棄」と誤解され，地層処分は技術的に未熟で危険なものだと受け取られる場合もありました。こうした傾向は，日本を含め，多くの国において見られています。このため，各国において，放射性廃棄物の処分計画を社会的な合意を得ながら段階的に進めるという考え方（例えば, NEA Geological Disposal, NEA Progress, NEA Safety Case Brochure, NEA Stepwise Approach, NEA RWM

Programmes, NEA Common Objective, The National Academies 2003, IAE WS-R-4 など）が取り入れられ，処分計画の可逆性や廃棄物の回収可能性（NEA Reversibility, IAEA Nuclear Energy Series/nes brochure）についてもこのような観点から検討が続けられています。

日本の地層処分事業計画において，処分場候補地の選定にあたり公募という方法が採られているのも，計画を進めるためには地域社会の受容が鍵となるとの認識に基づいたものです（NUMO 公募関係資料）。技術的な判断に基づき実施側が適切な処分場の候補地を指定するという進め方ではなく，処分場誘致の社会的意義や影響に係る議論等を含めた地域社会との対話を経て，最終的な決定は地域に委ねるというアプローチです。しかし，これまでの経緯により立地を推進するためには公募による方法だけでなく，国が前面に立った取り組みの必要性が指摘され，地域の意向を尊重しつつ，国が文献調査の実施を申し入れるという方法も取り入れられることとなりました（経済産業省最終処分基本方針改定）。こうした取り組みが機能するためには，対話に参加するステークホルダー（様々な定義が与えられていますが，ここでは，国際機関などの議論で用いられている，「実施主体や規制機関，地域住民，政策決定者，専門家，一般公衆を含む関心のある人々」を用いることにします）（NEA Stakeholder Confidence）が地層処分に関する一般的な背景情報，特にその必要性と緊急性および安全性を支える論拠について十分な情報の提供を受け，これを理解したうえで意思決定に臨むことができるような仕組みが必要です。ステークホルダーとの対話を支援することは，国及び廃棄物管理にかかわる機関（実施主体と規制関連機関の両者：原子力安全委員会「特定放射性廃棄物処分に係る安全規制の許認可手続と原子力安全委員会等の関与のあり方について（中間報告）」など）の責務であると同時に，研究開発の成果も含め関連する技術情報を広く提供しようとする本書の重要な役割の一つでもあります。

1.1.2 日本の地層処分計画の推移

日本の地層処分計画は，サイトを特定せず，日本で観察される幅広い地質環境を対象として処分概念の実現可能性を検討する研究開発を主体とした段階を経て，事業段階へと進んできています。事業段階における研究開発は，これまでに蓄積された技術の信頼性をさらに高めて，複数の処分候補地の適切性を相互に比較検討したり，ある候補地でどのように処分を実施して行くかを検討したりするといった，地域を限定した処分概念の評価を行うための技術基盤を発展させることを特徴とします。

このような技術基盤は，候補地を選定するための意思決定や，処分場建設・操業時の許認可申請等の基礎となるものであり，可能な技術的選択肢それぞれの特徴を捉え，できるだけ実際に即した評価が行えるようにする必要があります。例えば安全評価に伴う不確実性を検討する際に，あまりに保守的な仮定やモデル，データだけを用いると，異なる選択肢間の相違を明らかにすることができず，現実的な評価が困難になってしまうことも予想されます。このような

場合には，現象により忠実で，しかも適切であることが保証されたモデルやデータベースが必要となります。

地層処分概念における種々の選択肢の評価において，長期的な安全性の確保は最も大きな課題であり，安全規制の要件への適合性を示すことが不可欠です。さらに地層処分事業（処分予定地の選定・評価，処分場の建設・操業・閉鎖）を進めるうえでの安全性についても明示されなければなりません。さらに，地層処分の経済性や処分場の一般的な環境影響といった面でも十分に検討され，評価されることが重要となります。勿論，経済性が安全性に優先されることはありませんが，長期にわたり過剰な安全性を求めることは避けるべきとする議論もあります（NEA LTSC WS proceedings など）。

地層処分事業のように，技術的側面と社会的側面が複雑に関係し，一世紀にもわたる長期的なプロジェクト（NUMO 公募関係資料）を円滑に推進するためには，多様な制約条件を適切にバランスさせる必要があります。このような作業は簡単なものではありませんが，地層処分事業のように社会的な合意の形成に透明性が求められる分野では，特にこの作業について明快な説明が求められるものと考えられます。地層処分事業に関わる多くの重要な意思決定には，技術的な側面のみならず社会経済的な側面などにおける判断が含まれ，これらを踏まえた意思決定が幅広い関係者，特に候補地の関係自治体と住民にとって納得でき信頼の置けるものとなることが不可欠です。

地層処分事業を進めるうえで，ステークホルダーが行うべき重要な意思決定やその前提となる要件が何かを事前に明らかにし，関連する課題についての情報を整備しておくための明確な管理方法の確立が急務となります。このような方法として，NUMO では「要件管理システム（RMS: Requirements Management System）」の適用について検討を開始しています（例えば NEA EBS 2004, NEA EBS 2007, NUMO-TR-04-03, NUMO-TR-07-01, NUMO-TR-07-02 など）。RMS の活用により，ある意思決定を行うために充足されるべき多様な要件を念頭に置き，要件充足のトレードオフについて，透明性をもって説明することが可能となり，研究開発の成果は，意思決定と要件充足を支援するための根拠として関連付けられることとなります。また，意思決定の経緯や結果を単に記録するだけでなく，その意思決定がなされた前提条件の変更の履歴，さらに必要に応じて意思決定の再考を促すような機能を提供することも可能です。

このように，多様な要件を充足したうえでの意思決定の過程を追跡できるようにするとともに，意思決定（特に技術面）の根拠となる様々な評価に用いられる研究開発の成果や「知識」の品質が保証されなければなりません。すでに述べたように，他に類をみない長い期間を対象とした安全性が示されることが，地層処分事業を開始する社会的な意思決定の前提となります。こうした意思決定は，処分候補地の選定から処分事業の終了まで段階的に進められることとなり，ある段階における意思決定の際には，常にその基礎となっている過去の意思決定について，最新の知見に照らして再確認が行なわれることになります（NEA Stepwise Approach, NRC 2003, One step at a time: The staged development of geologic repositories for high-level radioactive waste, ISBN 978-0309087087）。

このためには，地層処分に関わる多様で学際的な「知識」を，常に最新の知見を取り入れながら更新・管理し，求められる意思決定に対して信頼の足るものとしていく必要があります。標準化された製品を生産するために開発された品質マネジメントは十分に確立されたシステム（IAEA Safety Guide GS-G-3.4）ですが，この方法論を，上述したように多様で大量の情報が関係する地層処分の知識の品質保証にそのまま適用することの難しさは，各国のこれまでの経験で示されています（JAEA QA ワークショップ）。品質保証の原則もこれと同様，多様で大量の情報が関係する地層処分事業計画に適用することは容易ではありません。このため，日本の地層処分事業計画に即した「知識マネジメントシステム（KMS: Knowledge Management System）」を導入することが有効と考えられています（平成 17 年取りまとめなど）。

2007 年の「核原料物質，核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（以下，「原子炉等規制法」と呼びます）の改正と最終処分法の改正により，最も放射能レベルの高い高レベル放射性廃棄物だけでなく，地層処分が適当と考えられる TRU 廃棄物（最終処分法では「第二種特定放射性廃棄物」と規定。「地層処分低レベル放射性廃棄物」，あるいは「地層処分対象 TRU 廃棄物」とも呼ばれ，本書では単に「TRU 廃棄物」と記します）についても地層処分事業の対象となりました（NUMO 公募関係資料改訂版 2009）。TRU 廃棄物の地層処分に関する一般的な実現可能性の評価はすでに実施（TRU 廃棄物処分概念検討書，TRU-2 報告書）されていますが，高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する第 2 次取りまとめに対して行われたような国際レビューを含む技術的評価などにより，今後さらに信頼性を高めていくことが重要です。さらに，安全規制に関して，すべての放射性廃棄物の処分に共通して重要と考えられる事項の検討が進められており，これによって地下に処分することが必要な廃棄物を適切に分類し評価するプロセスに関する原則の確立が図られています（原子力安全委員会「放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について」）。また，持続可能な原子力利用計画を進めていくためには，将来の先進的な核燃料サイクルも視野に入れた包括的なバックエンドの評価を検討することが不可欠であり，高レベル放射性廃棄物の地層処分だけでなく他の廃棄物も含めた放射性廃棄物管理の体系を検討していくことが重要になると考えられます。

これらの点も念頭に置き，地層処分事業における意思決定を支援するための品質の確保された「知識」を提供していくことが求められます。

1.1.3 将来の目標設定に対する準備

前節では，処分場のセーフティケース（NEA Safety Case Brochure, IAEA WS-R-4, 1.2 節）の作成にあたって，将来求められることになると考えられる課題について概観しました。こうした課題には，日本に限らず国際的に共通なものも含まれ，必要となる具体的な研究開発は，それぞれの国の地層処分実施計画の進め方や進捗状況に応じて優先順位が決められることになります。また，研究開発計画は地層処分事業の進捗状況に柔軟に対応できることが重要です。

日本においては，まず地層処分事業の第一歩として処分場建設の候補地を選定することが最も優先される目標とされています（原子力政策大綱，最終処分法）。候補地の選定に関しては，NUMO によって 2002 年から公募（NUMO 公募関係資料）が開始されています。事業計画によれば（経済産業省関連法令集，NUMO 事業計画），今後数年のうちに応募区域の適合性を判断し候補地を絞っていくこととなっています。この選定プロセスの初期の段階では，限られた情報を基に応募区域の適否を判断することが求められ，また，複数の応募区域があった場合にはそれらの順位づけに関する意思決定を行なうことが想定されます。これらの判断や意思決定を支援するために，こうした局面で必要になると予想される経済的，人的資源の増加も念頭に置き，研究開発計画を最適化することによって，その段階で十分な信頼性を有するセーフティケースを作成し，不適切な候補地を選定する，あるいは，適切な候補地を誤って排除する，リスクを最小限に抑えるための技術的基盤を，あらかじめ整えることが重要となります。

次に重要なことは，候補地の特徴を考慮して，高レベル放射性廃棄物の処分だけでなく，TRU 廃棄物の処分（高レベル放射性廃棄物との併置処分，あるいは単独の処分）も含めたセーフティケースの構築を可能とし，その信頼性を高めるために技術的基盤を拡張することです（TRU 廃棄物カーネル）。

さらに，放射性廃棄物全体を視野に入れた包括的な管理に関する検討についても念頭に置いておくことが必要です。このことはすでに述べましたが，原子力ルネサンスを支えるために不可欠であり，また，こうした全体的な放射性廃棄物の取り扱いの必要性は IAEA の安全原則 SF-1 においても示されています。

1.1.4. 本書のメッセージ

「科学技術的な観点からは，日本における高レベル放射性廃棄物の長期的な安全対策として，地層処分の概念を実現することが可能である」という総合的な見通しを，場所を特定することなく全国を視野においた一般的な研究開発の結果に基づいて示したのが第 2 次取りまとめです。このような一般的な研究開発は，TRU 廃棄物の処分についても実施され，同様に日本において TRU 廃棄物の安全な処分が実施可能であるとの見通しが得られています（TRU 廃棄物処分概念検討書，TRU-2 報告書）。

2000 年以降，地層処分の事業段階を迎え，実施主体や規制機関，原子力機構を含めた関連研究機関において，当該分野における上記の見通しを一層確実なものとしていくため，適切な役割分担の下（原子力委員会「原子力政策大綱」，経済産業省 HLW 全体計画，経済産業省 TRU 廃棄物全体計画，原子力安全委員会「原子力の重点安全研究計画」），主に，以下に示すような観点から研究開発が継続されています（深地層の科学的研究カーネル，工学技術カーネル，性能評価研究カーネル，TRU 廃棄物カーネル，KMS カーネル，QMS カーネル）。

- 候補地点の地質学的・地球化学的・水理学的・地理学的・社会学的・経済学的といった条件の考慮
- 場所が特定された場合，その場所の条件（上記）に合わせた地層処分概念の最適化
- 処分場閉鎖後の安全性だけでなく，処分場の建設・操業期間の安全性を確保するための要件や建設における実際的な制約条件の包括的な考慮
- 「情報の非対称性」の問題認識－すべての関心のあるステークホルダーへの積極的な情報提供
- ステークホルダーがそれぞれの関心に応じた的確な情報を踏まえた上で意思決定に参加できるよう支援
- 地域の要求に応じて，安全性に対する裕度を犠牲としない範囲で事業計画の変更を許容する柔軟性の確保
- 処分事業の進展につれて爆発的に増加すると予想される関連情報を迅速かつ的確に管理する革新的な「知識マネジメントシステム」（JAEA KMS）の導入

原子力機構は，研究開発の成果を，CoolRep（1.2.2 節）という，新しい方法によって，統合的な報告書（中期計画報告書（CoolRepH22））として取りまとめ，以下のような機能によって，地層処分の実施と安全規制に関わる機関をはじめ，地層処分に関心のあるステークホルダーに技術的な基盤を提供し，それぞれの意思決定を支援することを目指すこととしました。

- 性能評価の技術的内容（性能評価研究カーネル）だけでなく安全性を支援する論拠も含めた，安全に関わる基本的な議論の全体像に容易にアクセスできる手段の提供（すべての重要な情報や文書とハイパーリンク）
- 現実的なプログラムにおいて避けられない基本的なトレードオフの明確化（例えば，操業安全性と閉鎖後安全性のバランス）
- 読者の求めるレベルに応じ，明快で正確かつ整合のとれた情報の提示を可能とする方法によってセーフティケースを支援するすべての技術的な材料を階層的に提供
- 求められるレベルの品質の確保とレビューの履歴へ容易にアクセス可能な品質マネジメントシステムの装備
- フィードバック機能による双方向の対話の促進

CoolRep による文書化はなお開発途上にあり，上記研究開発の目標の実現に向けた努力の一環です。これまでのところ，この試みに対する国内外の専門家の関心や評価は高く，こうしたアプローチの必要性は放射性廃棄物だけでなく，先端技術分野に共通するものであるとの認識が急速に広まりつつあるといえます（JAEA KMS ワークショップ，JAEA QA ワークショップ，KMS カーネル，QMS カーネル）。

1.2 本報告書の範囲と目標

本書は，地層処分に関するセーフティケース（NEA Safety Case Brochure, NEA Safey Case Symposium, IAEA WS-R-4, JAEA セーフティケースワークショップ）の作成やレビューを支

援し，こうした支援が日本の地層処分事業計画における将来のマイルストーンに対しても，役に立つものであり続けるために必要な研究開発を明らかにすることを目的として，整えるべきツールや情報を概観する初めての報告書です。すでに述べたように，地層処分事業における前提条件の下に，ある段階におけるセーフティケースが十分な信頼性を有するための技術基盤を提供するためには，多くの学術分野に関わる多量の知識を継続して取り扱っていくことが重要であり，このための新たなアプローチが必要とされています。この報告書ではこの点について，ステークホルダー間のより幅広いコミュニケーションと対話を実現するために採用した新しい方式を提案しています（1.2.2 節）。

1.2.1. セーフティケースの作成に必要な知識

セーフティケースの作成には，極めて長期に及ぶ地層処分の安全性を立証するための多面的な作業を必要とします。このような作業には，計算に基づく処分後の遠い将来にわたる潜在的な放射線影響の定量的な評価（性能評価あるいは安全評価）が含まれます。将来を正確に予測することは不可能であるため，地層処分の安全性を論ずるうえで重要と考えられ，科学的に合理的なものとして予想される処分システムの将来の状態をもれなく包含するように，代表的なシナリオが作成され，性能評価はシナリオに沿ったシミュレーション計算によって実施されます。過去の一般的な研究開発段階で行われた検討に比較して，このような評価は，特定の処分候補地を対象として行われることが必要であり，また，地層処分概念の異なる選択肢のそれぞれの長所や短所を明らかにすることができるような現実性を備えていることが重要になると考えられます。

セーフティケースの構築にあたっては，こうした処分概念の現実的な特徴を損なわないように作られる解析計算用のモデルが妥当なものであることを示す証拠を整える必要があります（例えば，NEA Safety Case Brochure, NEA Safey Case Symposium, IAEA WS-R-4，種々のナチュラルアナログの利用）。このような証拠には，誤差や不確実性の評価とその評価の過程に対する品質マネジメントも含まれます。このように，セーフティケースの作成には，地層処分の技術的知識が駆使され，研究開発はこのような知識を産み出すことが目的です。

最近では，閉鎖後の長期安全性だけに注目するのではなく，処分地選定から処分場の建設，操業を経て閉鎖に至るまでの段階において安全性に影響すると考えられる因子をセーフティケースの中で包括的に考慮するという傾向が強くなっています（例えば IAEA Draft Safety Guide DS355, USDOE, JAEA セーフティケースワークショップなど）。これは，一世紀にも及ぶ地層処分事業の様々な局面で遭遇するトレードオフや最適化を可能とすることが重要であるとの考えによるものです。

本報告書では，特に，

- 地層処分事業の実施主体が，段階的に進める処分候補地における地質環境調査によって質的・量的に増大する情報に応じ，進歩する科学技術的知見を踏まえて，処分場の設計仕様を最適化していく作業過程に役立つ，
- 規制機関が，処分場の安全性について，透明性をもった方法で規制上の要件への適合性を評価することに資する，
- その他のステークホルダーが，地層処分事業の実施に関わる技術的・社会的な基礎を確認でき，意思決定のプロセスと結果に確信を与える，

ような知識基盤を提供することを目的として，「セーフティケース」を閉鎖後の安全性を立証するという側面だけでなく，より広義に捉えることとします。

地層処分事業に関わる段階的な意思決定にセーフティケースを適切に持ち込むためには，討論モデル（JAEA KMS 討論モデルエディタ）と定型化された方法に基づきトップダウンに展開された RMS が有効と考えられます。本書では，それぞれのアプローチに関する長所と短所を考慮して，これらを有効に利用することについて論じています。これらを通じて地層処分事業を開始するまでにどのような意思決定が必要となるかを明らかにすることは比較的容易ですが，処分事業を最適な方法で進めることを支援するためのツールやデータベースの開発，さらには，専門家の知識を有効に利用するための方法論の開発は，より難しいテーマであるといえます。

原子力機構が現在開発を進めている KMS（JAEA KMS）の主要な目的は，このテーマに取り組むことにあります（KMS カーネル）。KMS の背景については，他のツールやデータベース，知識創造の方法，経験の保持に関して実施されている研究開発に沿って記述することにします。
また，こうした開発の現状を概観するとともに，操業システムや処分事業実施の手順を確立することに資する作業についても概要を述べることにします。

1.2.2. 次世代のコミュニケーション技術の実証としての CoolRep

a）基本的概念

各国の地層処分計画を支える多様な科学技術分野のデータベースは指数関数的に成長を遂げてきました。これらの情報は，それぞれの計画の進展に応じ，繰り返し実施される全体システム性能評価において，あるいは地層処分実施に関わる許認可手続きの一部として，利用され統合されてきました。従来，こうした情報の大部分はハードコピーの形で提供・利用され，少人数の専門家によって統合されたうえで，その結果は技術報告書として取りまとめられてきました。しかし，最近では，関連する情報量が従来のアプローチでは取り扱えないほど膨大なもの（YMP 許認可関連文書の例）になったために，概要報告書でさえ分冊化が必要となるほど大きな分量となっており，場合によっては分冊，章や節ごとに異なるチームによって執筆される

ようになってきています。こうした多分野にわたる大量の情報を管理するという課題については後段で触れますが，ここには，取りまとめの結果をマネジメント可能な方法で提示するという，別の課題も存在します。

爆発的に増加する情報源の追跡は，先進的な情報技術（IT）によって可能となっており，上記の課題は，旧来の紙ベースではなく，IT を利用することで解決できると考えられます。それゆえ，本書はコンピュータネットワーク上に情報を展開し，最新のソフトウェアによって利用可能な，あるいはインターネットを介してアクセス可能な多数のコミュニケーション設備（インフラ）を利用できるようにしています。

本書の基本的な目標は，利用者が求める技術的質と量に応じて，欲しい情報に迅速にアクセスするインターフェースとして機能することです。主に情報を提供することが目的ですが，将来的には，利用者との双方向のやりとりによって，注文に応じた出力（オンデマンド情報）を提供できるようにしていくことも可能であろうと考えています。また，少なくとも，ある程度の対話を双方向リンクやブログによって進めることを，今後比較的早い時期に実現可能とする計画です。

本書の作成にあたっては，上記目標を重視し，特に技術的な内容に関しリンク先の情報を重複して記述することは最小限に止めています。他の公開文書の内容を説明するために新たなテキストを作成することはせず，可能な限り直接該当箇所にリンクできるようにしています。これによって，品質マネジメントをより効率的なものとすることも可能です。例えば，他で作成された公開文書が専門家によるレビューを受けていれば，ここでレビューのプロセスを繰り返す必要はなくなります。一方，品質マネジメントの重要性に鑑み，内部で作成された成果物に関する品質の記録には必要に応じて利用者がアクセスできるようにしています（QMS カーネル）。

地層処分の事業期間を通じて，意思決定を行う様々な局面で，その材料として本書を利用できるようにするため，予め定められた期限毎にその内容を固定し登録を行っていくこととします。現時点では，原子力機構の中期計画期間の研究開発成果の取りまとめとして本書の内容を凍結しています（これを CoolRepH22 と呼ぶことにします）。しかし，本書の真髄は，新しい知識の蓄積や地層処分事業計画に関する環境条件の変更に対応して絶えず進化する「活きた文書」たることです。本書が採っているモジュラー型の構造は更新を容易にし，自律的な変更管理システムによって，すべての変更を記録するとともに，ある変更が行なわれた場合には影響が及ぶ関連箇所をすべて表示することが可能となるようにする計画です。

b) 本書の利用法について

本書は，CoolRep のホーム画面にアクセスし，画面に示されたインストラクションやラベルに従って様々な方法で利用することができます。CoolRep の本文は，CoolRepH22 として掲載

されており，より詳細な研究開発成果の技術情報は，分野ごとに作成されている次のようなカーネル（KERNEL: Knowledge Elements incorporating Requirements, Novelty, Experience and Limitations） にホーム画面から直接，または CoolRepH22 からのハイパーリンクでアクセスすることによって得られます。

- 深地層の科学的研究カーネル
- 工学技術カーネル
- 性能評価研究カーネル
- TRU 廃棄物カーネル
- KMS カーネル
- QMS カーネル

CoolRep やカーネルからは，JAEA KMS にもリンクが張られており，個々のデータベースや文献情報など最も基礎となる情報，討論モデルと関連する知識ベースにアクセスし，これらを利用することが可能です。

また，CoolRep のホーム画面の左側の領域には，地層処分に馴染みのない利用者の参考となる背景や基礎的な知識を提供しています。ここでは，将来的には利用者の意見や質問を受け付け，質問には関連する専門家などから直接回答を行うようにしていくことを考えています。

第 2 章　技術的背景

地層処分の安全性を示すという取り組みに特徴的な課題の一つは，多岐にわたる学問分野の知見を利用しなければならないということです。このような知見は，地層処分に関する概念の開発，処分地選定，処分施設の設計・建設・操業，そして，特に閉鎖後の長期安全性の立証といった様々な局面で用いられ，物理学，化学，地質学，数学といった理学や，原子力，土木，金属，機械といった工学分野にとどまらず，微生物学や経済学にも関連します。また，コミュニケーション論や倫理学，法学などにも及びます。これは，地層処分において安全性を考慮すべき時間スケールが長期にわたるということばかりではなく放射性物質を扱うものであるということから，一般公衆の関心が極めて高く敏感に受け止められるプロジェクトであるということによるものといえます。

こうした様々な分野の知見を情報として統合し，地層処分の安全性を「立証」（NEA Safety Case Brochure，IAEA DS355，1.2.1 節）することが，技術的に大きな課題となります。さらに，その結果を取りまとめ，多様なステークホルダー（NEA Stakeholder Confidence）に納得されるよう透明性をもって提示していくというということは，より大きな課題であるといえます。

2.1　日本における放射性廃棄物管理

2.1.1　放射性廃棄物の発生源と分類

放射性廃棄物の管理について考える際には，人体も含め，ほとんどの物質には多かれ少なかれ天然の放射性物質が含まれていることを理解しておく必要があります。人やその生活環境への影響という観点から管理を必要とする放射性廃棄物は限られ，こうした管理を行う上で重要となるのは，廃棄物に含まれている放射性同位元素の種類と濃度，放射性崩壊に関する性質です。

日本の放射性廃棄物はその大部分が原子力発電に伴って発生しますが，医療や産業，研究活動などからも発生します。

原子力発電で放射性廃棄物が発生する主な過程には，以下のようなものがあります（核燃料サイクルと放射性廃棄物）。

- ウランの分離，精製及び濃縮
- 核燃料の製造
- 原子炉の運転，改修及び廃止措置
- 使用済燃料の再処理

・廃棄物の調整，パッケージ化及び貯蔵

（注：ウラン採鉱と鉱石の取り扱いは海外で実施；過去に実施された，人形峠鉱山におけるウラン採鉱による鉱滓及び捨て石と東濃鉱山での調査試掘による捨て石は，鉱山保安法の下に管理され，放射性廃棄物には含まれない（放射性廃棄物の区分と発生及び廃棄物等安全条約報告書））

日本はすべての使用済核燃料を再処理し，回収したウランとプルトニウムを再利用する政策（原子力政策大綱）をとっており，回収されたウランとプルトニウムは，MOX 燃料として既存の原子力発電所で利用するというプルサーマル計画（経済産業省資源エネルギー庁　原子力政策の現状について）が進められているところです。また，将来において回収されたウランとプルトニウムは，高速増殖炉の燃料として利用されることとなります。放射性廃棄物の管理に関しては，核燃料サイクルの確立という長期的な観点から，日本全体として発生する放射性廃棄物のインベントリーと特性を把握することが重要です（1.1.1 節 b））。

発生源も考慮した放射性廃棄物のインベントリーに基づき，廃棄物をそれぞれに適した処分方法によって分類することができます。日本では，行政上「高レベル放射性廃棄物（HLW: high level waste）」－再処理によって発生するガラス固化体－と，それ以外のすべての廃棄物を包含する「低レベル放射性廃棄物（LLW: low level waste）」に分類（経済産業省資源エネルギー庁放射性廃棄物 HP）し，HLW については地層処分が，また LLW については含まれる放射性核種の種類や濃度（原子力安全委員会「低レベル放射性個体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について」）に応じて，以下のような処分方法が適用されます（経済産業省資源エネルギー庁　処分の方法）。

・浅地中処分（トレンチ処分）
・浅地中処分（コンクリートピット処分）
・余裕深度処分
・地層処分

放射性廃棄物の埋設事業の安全規制を含む原子炉等規制法は，処分の対象となる廃棄物に含まれる放射性物質の濃度によって，処分の形態を「第一種廃棄物埋設」と「第二種廃棄物埋設」に分類して規定しています。これらのうち前者は地層処分，後者は浅地中処分や余裕深度処分に相当します。地層処分を行う放射性廃棄物としては，最終処分法で，「第一種特定放射性廃棄物」及び「第二種特定放射性廃棄物」（両者を合わせて「特定放射性廃棄物」と呼びます）が規定されています。

地層処分事業は，一世紀にも及ぶプロジェクトであり，処分後の制度的な管理（IAEA WS-R-4，NUMO 公募関係資料）も含めればさらに長い期間にわたる事業となる可能性があります。現行の最終処分計画では，平成 33 年ごろまでに発生することが見込まれる廃棄物の総量を対象としています（最終処分の基本方針と最終処分計画の 2008 年の改定，NUMO 公募関係資料）

が，今世紀末頃までに発生する廃棄物インベントリーを考慮しておくことは必ずしも非現実的ではないと思われ，これにより，SEA との関連においても，最適化の問題を議論することが可能となります。1.1.1 節で述べたように，将来の原子力発電に対する需要の伸びと先進的核燃料サイクル技術の開発に，発電効率とリサイクル量の改善などを考慮し，発生する放射性廃棄物の種類や量がどのようになるかを検討しておくことが重要です。

今のところ，特定放射性廃棄物を長期にわたって安全に処分できる方法として地層処分が最も可能性が高い方法とされており，また，これを実現するうえでは，地層処分場の設計と実施方法の高度化を期待する余地や廃棄物の処理方法の進歩を考慮する余地も十分に残されています（METI 公募事業「先進処分概念」報告書, 2008，METI 公募事業「先進処分概念」報告書, 2009）。将来のエネルギー及び環境の保全に関するシナリオと科学技術の進歩に関する予測に基づいて，こうした余地を検討するために必要となる長期的な研究開発の要件を明らかにすることも可能であると考えます。

2.1.2　地層処分事業の戦略と関連する機関

上述したように，日本では，「特定放射性廃棄物」の地層処分は法律（最終処分法）によって規定され，最終処分計画を 5 年おきに見直すことが省令として定められています（経済産業省 HP）。この法律には，特定放射性廃棄物の地層処分に対する基本的な事項が規定されており，これらには，処分地の選定（地質環境の長期安定性の重要性など），処分の概念（300m 以深に埋設することなど），処分事業計画の進め方（候補地の自治体の意見を尊重した段階的な意思決定など）が含まれています。

高レベル放射性廃棄物の処分については，これまでに様々な案が検討されてきましたが，国際的に現在最も有望な方法と考えられているのは地層処分です（NEA Basis，第 2 次取りまとめ別冊「地層処分の背景」，2.2 節など）。日本でも，地層処分について研究開発を進め，その技術的な成果に基づいて最終処分法が制定されました。法律によって，特定廃棄物の地層処分が規定されているという事実は，地層処分という選択肢に特化して技術的対策を考えるということを意味していますが，処分地を選定することや，選定された地質環境に対して適切な地層処分場を設計するという観点では多様な選択肢の可能性が残されています。

地層処分事業計画には多くの機関が関わっています。政府として事業の推進に関する基本的な方針を示すのは原子力委員会の役割であり，一方，原子力安全委員会は安全規制の方針を示すこととされています。実際に事業を推進，規制両面で監督する行政機関は，それぞれ経済産業省に属する資源エネルギー庁と原子力安全・保安院です。NUMO は，最終処分法に基づく認可法人として 2000 年に設立された地層処分の実施主体であり，特定放射性廃棄物の地層処分のための処分地を選定し，処分場を建設・操業する役割を有しています。様々な協議や国際的な事例を踏まえて，NUMO は日本全国の自治体を対象とした公募による処分地選定を行う

方針を決定しました。また，応募のあった区域において，最終処分法に従い，許認可にいたる地質環境調査を段階的に進めることとしています（NUMO 公募関係資料，資源エネルギー庁 HP ）。最終処分法改正に伴う，最終処分の基本方針と最終処分計画の 2008 年の改定では，総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会放射性廃棄物小委員会の審議を受けて，処分地選定への国のより積極的な関与が明記され，公募とともに，国による調査の申し入れも合わせることとされました。

地層処分の事業計画において，実施主体と規制機関がそれぞれの役割を果たせるよう，独自の専門性・人材とインフラを有する多くの研究開発機関や大学等が，関連する多様な分野で支援を行っています。こうした研究開発機関や大学等によって提供される基盤情報については，技術的に正しく，客観的なものであることが保証されれば，実施主体を支援するものとして作られたものだとしても，規制機関も含め全体として共通に利用するということが基本的な考え方となっています（原子力安全委員会「原子力の重点安全研究計画（第 2 期）の策定について」，原子力安全・保安部会放射性廃棄物安全小委員会報告書「「放射性廃棄物処理・処分に係る規制支援研究計画（平成 22 年度～平成 26 年度）」について」）。この考え方は，基本的な知識を，それを利用する立場によらずできる限り独立に準備して共通に用いることにより，実施主体と規制機関との間の論点として検討すべき課題を，両者の見解が異なる領域に限定することができるという利点を有しています。原子力機構は，地層処分の研究開発に関し一貫して中心的な役割を担ってきており，今後も実施主体と規制機関のみならず多様なステークホルダーや広く国民全体を対象として，客観的な立場で技術的基盤（情報）を提供していきます。

2.1.3 中期計画報告書の主眼

現在，NUMO では，応募があれば直ちに，調査区域を特定した文献調査に基づき処分事業の最初の段階（処分予定地の選定）を開始できるよう準備が整えられています（NUMO 公募関係資料，「概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠」，「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性」）。また，これと並行して，原子力安全委員会や原子力安全・保安院では，原子力安全基盤機構等の研究開発機関の支援を得て，地層処分事業計画の安全規制と指針類の策定作業が進められています。原子力機構は，地層処分事業の実施，規制両面を支援するため，多様な利用者が容易にアクセスできる放射性廃棄物の地層処分に関する日本全体の知識ベース（KB）を整備し提供することとしています（原子力機構中期目標，中期計画）。知識ベースの開発にあたっては，その内容と品質を容易に評価することができ，さらに日々更新される知見を遅滞なく取り込んで進化するものを目指しています。また，地層処分事業計画の段階目標に対応した意思決定に利用しようとすると，進化し続ける知識ベースを意思決定の作業が行われる特定の期間，一時的に凍結（フリーズ）して固定させる機能が求められます（これについては，3.2 節でさらに議論します）。知識ベースは，当該分野の専門家ではない利用者にも，技術的な厳密性と矛盾しないように注意しながら，理解しやすい表現で的確な情報を提供できるようにしていくことが必要です。

原子力機構の中期計画においては，知識ベースに関するこれらの要件を勘案してその目標を定めています。また，知識ベースには情報の提供のみならず，利用者との双方向のコミュニケーションを通じて地層処分事業に関する理解を深めることができるような役割が期待されていると認識し，利用者の要望に応じて，提供する技術情報の詳細度やフォーマットを変更できるような柔軟な構造をもつように配慮しています。

2.2 地層処分プロジェクトの歴史と目標

日本における地層処分の計画は，その端緒となった研究開発の開始からすでに 30 年を経ています（第２次取りまとめ別冊，NUMO-TR-04-01）。この間における様々な状況の変化を理解しておくことは，これまでの活動により得られた社会的な受容や技術的な知見などが，現在及び将来の状況においてどの程度適用できるかを考えるうえで重要です。

2.2.1 日本における高レベル放射性廃棄物処分の成立性に関する一般的（ジェネリック）な研究

初期の研究開発は，高レベル放射性廃棄物の地層処分の概念が，日本においても成立することの技術的見通しを示すことを目的として，原子力機構の前身である，動力炉・核燃料開発事業団（JAEA の歴史）が中核となって進められました。この段階では，他の国（主に米国，またカナダや一部ヨーロッパ諸国）と比較してこの分野での日本の経験は浅く，また，地質学的にみて日本が変動帯に位置するという点が特に留意すべき課題として認識されていました。

このため，地層処分の実現可能性に関し，日本が独自に行った最初の総合的な評価として 1992 年に公表された「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術報告書－平成 3 年度－」（以下，第 1 次取りまとめと呼びます）では，安全確保の役割の主眼を地質環境に置く（例えば，ドイツや米国のような岩塩層や地下水が少ない地質環境）のではなく，例えば，スウェーデン，スイス，カナダと同様に人工バリアの性能に置く処分概念が検討されました。また，特定の処分候補地を対象とせず，一般的な地質環境を地層処分の（主に水理学的な）視点から「結晶質岩」と「堆積岩」に区分し，それぞれについて頑健な人工バリアを構築する地層処分概念の検討が行われました。これらの地層処分概念では，人工バリアの一翼を担うベントナイトを材料とした緩衝材が，地下水の透水性を抑制する効果や小規模な岩盤運動に対する力学的な緩衝効果を長期間にわたって発揮することに期待しています。一方，オーバーパック（炭素鋼，チタン，銅を候補材料として検討）には，地層処分後初期の，廃棄物の放射能のレベルが高く発熱量が大きい期間，確実に放射性核種を閉じ込めることが期待され，このような期間における詳細な安全評価をほとんど不要とし，評価をより簡潔なものとすることが可能となるものと考えられています。また，諸外国における地層処分の安全確保の概念と共通な項目については，海外の協力機関との間でデータを共有することによって信頼性を担保し，また，頑健な人工バリア概

念の採用によって，当時として十分な信頼性をもつ合理的なセーフティケースを作成することが可能となりました（NEA IPAG 報告書）。

第 1 次取りまとめ以降の研究開発では，人工バリアの長期的な性能を定量的に表現するためのモデルの改良が進められるとともに，日本の深部地質環境に関する調査により実測値に基づくデータベースの拡充が図られるなど，地層処分システム全体に関する理解が進みました。1999 年に公表された 2 度目の取りまとめである「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 次取りまとめと呼びます）は，このような研究開発の成果を統合して地層処分の実施や安全規制の策定に資する技術的基盤を提供し，日本における地層処分の計画を研究開発の段階から，事業として実施する段階へと進めるための意思決定に重要な役割を果たしました。

この間，取り扱った知識ベースの増大は，第 1 次取りまとめ報告書と第 2 次取りまとめ報告書の分量の差としても如実に現れていますが，第 1 次取りまとめとの一貫性を維持するため，処分概念は第 1 次取りまとめと第 2 次取りまとめで基本的に同じであり，システムの理解の促進によって改良が行われたのは比較的小さな点（オーバーパックの厚さ，緩衝材の組成と厚さなど）に限られています。この時期，特に，処分場の設計や建設などについても現実的な技術課題が日本や海外における研究において指摘されるようになってきましたが，原子力機構では，定量的な解析評価の主眼を制度的管理終了後の長期安全性に置き，操業時の安全性や実用性については既存の技術に関する検討を中心に進めました。第 2 次取りまとめは，日本の地層処分における重要なマイルストーンとして，国内のレビューと共に，OECD/NEA による国際的なレビューを受けています（原子力委員会バックエンド対策専門部会レビュー報告書など）。

第 2 次取りまとめに示された技術的な基盤に基づいて最終処分法が制定され，NUMO が設立されました。NUMO は地層処分事業を進めるにあたり，第 2 次取りまとめで示された処分概念を参照仕様（レファレンス）としています（NUMO-TR-04-01, NUMO-TR-04-03）。処分候補地選定を進めるうえで NUMO が考慮しなければならない要件は，第 1 次取りまとめや第 2 次取りまとめにおけるものとは異なっていますが，原子力機構の知識ベースは NUMO の業務の基盤として欠かせないものとなっています。NUMO は，第 2 次取りまとめにおいて評価された人工バリアの基本構成要素について，応募区域の地質環境条件に適合する処分概念を開発するために整備した「処分場概念カタログ」のなかで，地質環境条件に応じたその適用可能性などを検討しています（NUMO-TR-04-03）。同様に，第 2 次取りまとめで蓄積された地質環境に関するデータベースは，応募地域の評価や選定を行うための考慮事項（NUMO-TR-04-02, NUMO-TR-04-04）を明らかにするため，また，処分概念の設計用ツールの試解析のための代表的なサイト環境条件を設定するために利用されています（NUMO-TR-04-01, NUMO-TR-04-03）。

NUMO の活動と並行して，原子力機構は第 2 次取りまとめ以降も基礎的な知識を蓄積し，5 年間にわたる成果を平成 17 年取りまとめとして取りまとめました。以前の二つの報告書とは

異なり，平成 17 年取りまとめの目標は日本全国を対象とした一般的な研究開発の成果が，NUMO の進める地層処分事業や安全規制機関による安全指針類の策定に資するため，知識ベースとしてどのように更新，展開されつつあるのかを示すことでした。平成 17 年取りまとめでは，このような知識量の指数関数的な増加によって，その利用が容易ではなくなってきたことを考慮し，定型化された知識マネジメントシステムの概念を開発しました。これについては，以下 3.2 節で述べることにします。

2.2.2 日本における高レベル放射性廃棄物以外の地層処分対象廃棄物に関する研究

上述したように，日本における地層処分の研究開発は，主に高レベル放射性廃棄物を対象として進められてきました。この間，放射能レベルの低い廃棄物の浅地中処分についても着実な進展がありました（日本原燃六ヶ所埋設事業）。このような廃棄物は高レベル放射性廃棄物と異なり，発生量はずっと大きいものの，処分に先立って冷却のための貯蔵を必要とせず，また，基本的に既存技術での対応により，技術開発が急務になることもありませんでした。実際，放射能レベルが低いことから考慮すべき評価期間も相対的に短く，この意味では，安全評価における技術的な難しさもそれほど大きなものではありませんでした。

諸外国の定義ではいわゆる中レベル放射性廃棄物に属し，発熱が少なく，高レベル放射性廃棄物ほど放射能レベルが高くはないものの，地層処分することが適切な廃棄物として「地層処分対象の TRU 廃棄物」（TRU-2 報告書）が存在し，高レベル放射性廃棄物のように均質ではなく発生する体積も大きいのが特徴です。このため，高レベル放射性廃棄物の処分概念のような，廃棄体一体ごとに頑健な人工バリアを構築しようとすると，材料間の両立性や処分スペースといった面で制約が生ずる可能性もあると考えられます。

1990 年代末，当時の動力炉・核燃料開発事業団（原子力機構の前身）では，電気事業者，再処理事業者や他の研究機関と協力して，このような TRU 廃棄物の安全な地層処分の実現可能性に関する予備的な評価を行ない，第 1 次 TRU 報告書として取りまとめました（TRU 廃棄物処分概念検討書）。この報告書の取りまとめにあたっては，特に地質環境条件の設定など，第 2 次取りまとめで準備された知識ベースの多くが利用されました。TRU 廃棄物処分概念検討書では，その組成や放射性核種の含有量，これらに基づく人工バリアのデザインによって，廃棄物を四つのグループに分類しています。より放射能レベルの低い廃棄物に対する日本や諸外国における浅地中処分施設の操業経験などに基づき，TRU 廃棄物の地層処分場の設計は，コンクリートで被覆された大規模空洞を基本としています。より放射能レベルが高く，半減期が長く，地質環境で移動しやすい放射性核種の含有濃度が高い廃棄物に対しては，第 2 次取りまとめでの経験や諸外国の設計事例に基づいて，人工バリアにベントナイト緩衝材が付加されています。

TRU 廃棄物処分概念検討書によって，四つのグループの廃棄物が基本的に安全に処分可能であることが示されるとともに，TRU-2 報告書によってその可能性がさらに確かなものとされる

とともに高レベル放射性廃棄物との併置処分の検討などが行われていますが, TRU 廃棄物の処分概念の評価は高レベル放射性廃棄物の処分概念の評価に比べて一般に複雑であり，引き続き検討が必要ないくつかの重要な課題が明らかにされるとともに関連する研究開発が進められてきています（TRU 廃棄物カーネル）。

2.2.3 国際的視点

これまでに述べたような日本における地層処分研究開発の歴史は，この分野における国際的な進展が映し出されたものであるとも言えます。諸外国の先導的な地層処分事業計画においても，地層処分に関する検討は，おしなべて最も放射能レベルの高い廃棄物（高レベル放射性廃棄物：諸外国では，ガラス固化体だけでなく使用済燃料も含む）に関する長期の安全性に焦点が当てられてきました。こうした検討は，サイトを特定しない一般的な（ジェネリックな）もの，あるいは特定の地質環境に対する限られた情報に基づくものであり，したがって，特定の候補地点を対象とした綿密な地質環境調査から得られる実際の条件を用いたものと異なった，不確定要素を多く含むものでした。

過去二十年以上にわたって, 地層処分システムに関する専門的な理解は国際的に大きく進み，人工バリアの設計は理想化されたものからより現実的なものへと最適化されるとともに，従来安定で変化しないと仮定されていた地質環境の長期的な変動が考慮されるようになってきました（YMP の TSPA の変遷；スウェーデンにおける後氷期のテクトニクス的変動など；NEA Safey Case Symposium，2007）。このように処分事業計画の最適化の一環として特定の処分地に見合った適切な処分システムを設計するという作業が急速に重要性を帯びてきているにもかかわらず，高レベル放射性廃棄物の地層処分に関していえば，処分地の選定に時間を要している例が多く（原環センター，諸外国の高レベル放射性廃棄物処分等の状況），これが作業を具体的に進めることができない要因の一つとなっています。

日本同様，世界的にみても，地層処分対象の TRU 廃棄物に対しては，以前はあまり注意が払われていませんでした。唯一の例外は 1999 年から操業を開始した米国の WIPP（Waste Isolation Pilot Plant）です。ただし，この処分場には原子力の国防利用によって発生した放射性廃棄物のみを対象とした特別の安全規制が適用されており，また，岩塩層への処分のため，その技術的な経験という意味では日本に適用できるものは多くはありません。

概して，日本における地層処分事業計画は，処分地選定に向けた進捗，高レベル放射性廃棄物や TRU 廃棄物に関連した技術的な課題への対応，主要な作業における定型化された品質保証の面で，国際的に最も進んだレベルにあるとする国際的な評価が得られています。また，処分地選定に対する公募方式の採用（NUMO 公募関係資料）や，柔軟性のある処分場概念や処分地選定上の考慮事項の開発（NUMO-TR-04-01 及び NUMO-TR-04-03, NUMO-TR-04-02 及び NUMO-TR-04-04），定型化した RMS（NUMO-TR-07-01 及び NUMO-TR-07-02）や KMS

の導入（平成 17 年取りまとめ，JAEA KMS ワークショップ）といった先端的な取り組みが行われている分野もあります。

国際協力については極めて初期の段階からその重要性が強く認識され，研究開発が当時最も進んでいた諸国（例えば，スイスやスウェーデン）との間で継続されてきました。このような国際協力はその後大きく進展し，最近では日本が主導的な役割を果たすようになってきています。こうした国際協力は，全体的には欧米を中心に進められてきましたが，近年，東アジアにおいても地層処分に関する積極的な取り組みが開始されており，これらの国々にとって日本が一つのモデルとして役に立つよう，協力関係を強化しているところです。

2.2.4　日本の地層処分事業において考慮すべき諸条件

日本の地層処分事業計画においては，処分地選定を開始した当初から，処分候補地を公募によって選定（NUMO 公募関係資料）するという方法を取っており，これは国際的にみて大きな特徴となっています。諸外国において，近年このような類似の選定方法を取っている例（スウェーデン SKB, 英国 NDA など）がみられるものの，公募によって処分候補地となる可能性のある地質環境の多様さと地質構造運動の活発性という観点では日本の比ではありません。実施主体や規制機関には，事業を進めるうえで，このような条件を前提とした適切な技術的対応が求められることになります。また，このことは，国民全体にとっても大きな関心事となるものです。

従来の地層処分計画の進め方では，まず処分概念を開発し，それに見合った処分地を選定するという考え方が取られてきました。これに対し NUMO は，上記のような前提条件を考慮し，想定される多様なサイト条件に対応して，地層処分場の概念を開発するという考え方を採用し（NUMO-TR-04-01 及び NUMO-TR-04-03），それを支援するための方法として，構造化アプローチ（NSA：NUMO Structured Approach）を提案しています（NUMO-TR-07-01 及び NUMO-TR-07-02）。このアプローチでは，個々の処分候補地の特徴を明らかにして候補地間の相違を適切に把握できるようにするだけでなく，ある候補地に対して考えうる処分場概念の設計の選択肢を一貫した方法で比較検討し，より適切なものを選ぶことができるようにする必要があります。このことは，処分地選定のプロセスを支えるための知識ベースに大きく影響します。また，このようなアプローチを具体的に適用する際には，RMS の導入が有効とされています。RMS は，複雑な技術的意思決定を容易にするだけでなく，意思決定過程の文書化や追跡性をより高めることにも役立ちます。このことは，NUMO に求められている地層処分事業の公開性と透明性という観点から極めて重要であり，地元自治体を含む様々なステークホルダーとの対話促進，ひいてはパブリックアクセプタンスの獲得の鍵となるものと考えられます。

的確で迅速な意思決定は，複数の処分候補地点間の優先度を評価し，最終的に処分場の建設・操業のための許認可を申請する一つの候補地点を選定するまでの，地層処分事業計画の主要な

段階目標において不可欠なものです。許認可までに規制機関がどのような形で具体的に関与するかについては検討が行われているところですが，原子力安全委員会はこのプロセスに積極的に関わることを表明しています（「特定放射性廃棄物処分に係る安全規制の許認可手続と原子力安全委員会等の関与のあり方について（中間報告）」）。

特に，処分候補地における地質環境調査の開始にあたり，実施主体による安全性の説明が十分に行われることが不可欠であることに加えて，地元住民にとっては，規制機関が安全性に関する技術的な専門家として重要な役割を果たすことになります。このため，規制機関は，ステークホルダーとの対話を効果的に行うために，幅広い信頼性と技術的な能力を兼ね備える必要があります（原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会「放射性廃棄物処理・処分に係る規制支援研究計画（平成 22 年度～平成 26 年度）」について」）。

規制者の役割は，安全性を確認し公表することが基本ですが，処分事業の持続可能性という倫理的な原則に照らして，得られる便益に比して不必要な資源投入を求めることは避けるといった点にも配慮することが求められます。さらには，将来世代を現世代と同等のレベルで防護するという世代間の公平性に対する倫理的要件を実際に適用する方法について，実施主体及びステークホルダーが納得する形で，安全規制上の明確な適合基準として示すことが必要です。こうした規制者の一般的役割については，国際的な場で議論が進められており（NEA 規制者の役割に関する文書，NEA LTSC WS proceedings），各国の実情に合わせた具体化のための取り組みが行われています。

安全規制の策定に関しては，すべての原子力利用，特にすべての放射性廃棄物処分に関する一貫した取り扱いが指向されることも念頭に置いておく必要があります(原子力安全委員会「放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について」, IAEA GSR Part 5)。一方，施設設計上の基本概念は同様であっても，放射能の減衰という観点で浅地中処分では制度的管理が有効ですが，このような管理が，放射能レベルが高い放射性廃棄物の地層処分において不必要に求められることのないよう，関係者は留意しておくことが重要であるといえます。

以上のような，現時点で地層処分事業に関して考慮しておくべき条件は，原子力機構が，地層処分に関わる多様なステークホルダーを支援するという目的のもとに進めている研究開発における技術的能力や成果の現状を分析するための視点として重要です。

第 3 章　安全性の立証

放射性廃棄物の地層処分については，他の廃棄物の処分と比べて非常に長い時間（例えば数十万年あるいはそれ以上）にわたる安全性が論じられます。また，処分場の操業期間中についても，他の原子力施設と同様，従来の鉱山や土木構造物とは異なる，放射線防護上の安全性が求められます。操業期間中の安全性を確保しつつ，閉鎖後の極めて長期間にわたる安全性を保証するという新しい要件に応えることは，処分場の立地や処分システムの設計だけでなく，安全性を示すための方法論の確立という観点からも重要な課題です。このように，地層処分システムの開発では，安全性を確保するために，多様な要件を考慮することが必要になります。このためには，技術的な視点だけでなく，社会経済学的あるいは倫理学的な視点を持ってバランスのよい安全性の確保を図ることが重要です。こうしたバランスを取るための議論は，ステークホルダーとの対話においても重要であるとする認識が急速に広がりつつあります（NEA Stakeholder Confidence）。

3.1　セーフティケースの定義と日本における適用

前節で述べたように，安全評価においては，当初，処分後の長期安全性の評価に焦点が当てられてきました。このため，処分システムの将来の変遷に関する仮想的なシナリオを取り扱うための数学モデルを主たる対象として安全評価（あるいは性能評価と呼ばれます）の方法論が開発されてきました（NEA Collective Opinion）。しかし，次第に，不均質な天然の地層と人工的な構造物を組み合わせて構築され，極めて長期の時間スケールを対象とする地層処分システムの安全性には避けられない不確実性があることを考慮すると，地層処分の安全性に対する確信を深めるためには，安全評価の結果によって安全基準への適合性を示すだけではなく，様々な論拠によってこれを強化することが重要と考えられるようになりました（NEA IPAG, NEA Confidence Report, NEA Safety Case Brochure）。このような認識に基づいてセーフティケースの概念が現れ，特にヨーロッパの地層処分実施計画を中心として広く採用されることとなりました。セーフティケースの概念は，基本的な安全評価の枠を超えたものであり，共通に合意された厳密な定義は確立されていません。しかし，セーフティケースの概念が意味することの有効性は，日本の規制機関や実施主体によっても認識されており（原子力安全委員会，原子力安全・保安院，NUMO-TR-04-03，原子力委員会政策評価部会報告書），日本の放射性廃棄物処分事業計画に関する固有の条件を勘案して，ステークホルダー間で共有できる定義の確立が急務と考えられます（JAEA セーフティケースワークショップ）。また，可能であれば，地層処分だけでなく浅地中処分など他の処分施設へも統一的に適用できるような定義を行うことが望ましいと考えられます。セーフティケースの定義については，今後も議論が続けられる必要がありますが，本書ではその出発点として，現時点で考えうる提案を行っています。この提案を前提として，セーフティケースの作成とレビューを支援するための知識ベースの現状を提示することとします。

3.1.1 セーフティケースという用語の背景

初期の性能評価では，地層処分システムを，一般化あるいは簡略化された地質環境と理想的な人工バリアから構成されると見なし，地層処分によって長期的な安全性を確保することが技術的に実現可能であることを示すことを目的としていました。特に，大きな安全裕度を見込んだ人工バリアの設計や性能評価における「保守的な」仮定は，低レベル放射性廃棄物に比べ，ガラス固化体や使用済燃料など分量の小さい高レベル廃棄物を対象とした地層処分の長期安全性を保証するうえで有効なものでした。しかし，地層処分の安全評価の結果に対する確信を十分に高め，広範な社会的受容の確立を目指すうえでは，このようなアプローチを，例えば以下のような点を考慮して，より発展させる必要があることが次第に明らかになってきました（NEA Safety Case Brochure, NUMO-TR-04-01，第２次取りまとめなど）。

- 地層処分システムの安全評価に用いるモデルの能力には制限があり，人工バリアや地質環境を忠実に表現しようとすると，十分ではありません。
- 知識ベースが拡充し地層処分に関する理解が進むにつれて，統合的なシステム評価は複雑になり，そのレビューや品質の保証は煩雑で難しくなります。
- 特に地層処分システムに固有の自然環境の変動性，ならびに知識の不足や将来に対する予見不能性による不確実性が混在するような条件下では，その方法は極めて複雑なものとなります。
- 操業時の安全性に関する直接的な評価が含まれておらず，また，長期の安全性に対する操業プロセスの影響が綿密に検討されていません。

より重要なことは，地層処分事業計画が受容されるためにはステークホルダーが意思決定に参加することであり，性能評価という極めて技術的なアプローチが，ステークホルダーの要求に見合ったものではなかった（理解するのが困難であった＝説得力を持ち得なかった）という点であると思われます。

定量的な性能評価の結果を多面的な分析によって補う（results in perspective）（NEA IPAG, AECL，NDA, NUMO-TR-04-01 など）という傾向が高まってきたのはこのような課題に対する取り組みの一環でした。これらの報告書では，数学的な解析結果を様々な側面から補完的に解説し，幅広いステークホルダーに理解されやすいものとなるような工夫が行われています。具体的には，異なる地質環境を対象とした地層処分システムに対する安全評価結果の相互比較，ナチュラルアナログの利用，処分場からの放射性核種の移動量と天然に存在する放射性核種の地下での移動量との比較といったものが含まれています。こうして，欧米諸国におけるセーフティケースの概念は，安全評価結果とこれを「支援する論拠」とを組み合わせたものとして発展してきました。

3.1.2　セーフティケースの国際的な定義

地層処分の安全性検討の対象である極めて長期間にわたるシステムの挙動を詳細に予測することは困難であり，処分場の安全性を数学的な方法で厳密に証明することはできません。しかし，長期間にわたって安定と考えることのできる深部の地質環境と安全性に余裕のある人工バリアを組み合わせたシステムが，合理的に想定される将来の状態変化の範囲を網羅した幅広い「シナリオ」に対して安全であることを評価し，それが受け入れられるものであるかどうかを判断することは不可能ではありません。このような性能評価の作業は，数学モデルに基づく計算の結果と，規制機関によって定められる定量的な安全基準とを比較することによって客観的に行われます。この過程で，用いるモデルが現実的なものであり，想定されるシナリオの範囲が十分なものであることを示す一連の論拠によって性能評価の妥当性が補完されます。しかし，計算による評価や論拠に伴う不確実性を完全に取り除くことはできないため，性能評価に基づいて作成されるセーフティケースが信頼に足る，受け入れることができるものかどうかについては，なお主観的な判断の余地が残ります。このような判断とそれに基づく意思決定は，ステークホルダーの関与のもとに行われることが不可欠であることが広く認識されています（NEA Stakeholder Confidence，NUMO 公募関係資料など）。

以上に述べたように，放射性廃棄物処分の分野におけるセーフティケースという用語（注：この言葉は，他の産業分野でも用いられていますが定義は異なっています。）の示すところについては，前述の「安全評価結果の多面的分析に関する報告書」にその端緒を見て取ることができます。実際，1994 年の Kristallin-I 性能評価を支援するために Nagra が取りまとめた報告書「Kristallin-I: Results in perspective」には，「性能評価の結果に関する信頼を確かなものとするという作業には，その結果の妥当性と重要性について幅広い検討が含まれる」と記載されています。

IAEA の地層処分に関する安全基準文書（IAEA WS-R-4）では，「セーフティケースは，地層処分施設の安全性とその安全性の信頼度を記述，定量化，立証するための論拠と証拠を統合したものである」と定義されています。NEA Confidence Report では，「セーティケースは，処分場開発計画のある段階において，処分場の長期安全性を支持するための論拠を収集したものである。セーフティケースは安全評価の結果とそれに対する信頼性の記述を含む。また，未解決の課題に言及し，将来の段階でこれらを解決するための作業方針を明示することが必要である。」という定義がなされています。ここでは，セーフティケースを地層処分後の長期安全性に焦点を当てて論じていますが，NEA Safety Case Brochure では，IAEA の上記文書の定義と同じ表現となり，操業時をも含んだものとなっています。

セーフティケースについては各国の関係機関においても，それぞれの定義が行われています（Nagra 02-05 など）。いずれにせよ，セーフティケースの重要な役割は，ステークホルダー

の対話のための共通の土台を提供し，段階的にその信頼性を高めていくことにあるということができます。

3.1.3 日本の地層処分計画に沿ったセーフティケースの拡張

日本において，放射性廃棄物の地層処分に関してセーフティケースという語が用いられるようになったのは，2000 年前後のことです（第 2 次取りまとめ英語版）。例えば，NUMO（NUMO-TR-04-03）では，安全性に関する様々な言葉を定義しており，セーフティケースについては，「セーフティケースとは，処分場の安全性を支持する論拠を収集して，操業時及び閉鎖後の段階に対して作成されるものである。セーフティケースは安全評価の結果とそれに対する信頼性の記述を含む。また，未解決の課題については，将来これらを解決するための作業方針を明示することが必要である。社会的な受容を醸成するためには，作成したセーフティケースを鍵となるステークホルダーに説明することが不可欠である。」としています。NUMO の定義では，二つの重要な点，すなわち，地層処分場の操業時の安全性も対象としていること，主要なステークホルダーの意思決定への参加，が強調されています。これは，応募地域の自治体やその周辺地域のコミュニティを支援することが公募方式による処分地選定を成功させるうえで不可欠な要素であるとの認識によっています。

セーフティケースの開発については，原子力機構の平成 17 年取りまとめにおいても議論しています。平成 17 年取りまとめでは，地層処分場の統合的な安全評価を実施する作業において，知識の品質とその流れを管理するために必要なプロセスがより詳細に分析されました。この報告書は，3.2 節で述べる KMS（KMS カーネル）の基礎となるとともに，本 CoolRep の書式の原型を示唆するものでした。

性能評価では処分場の閉鎖後の長期安全性に焦点を当てますが，処分場がどのように立地，建設，操業，閉鎖されるかは，処分システムの長期的な安全性能と深く関係することから，閉鎖までの手順を切り離して考えることはできません。このことはサイト調査の初期の段階から明らかで，例えば深層ボーリングを含む調査方法を用いるにあたって，一般にボーリングの数を増やせば適切な評価技術を用いることによってサイトの理解は進み，地層の天然バリア機能の不確実性は低減すると考えられます。しかし，ボーリング孔自体が地下水の移行経路となる可能性があり，その数が増えると地質環境が本来的に有する地層処分にとって好ましい性質を損なうことも考えられることから，孔数の増加による天然バリア機能の劣化と不確実の減少とはトレードオフの関係となります。また，資金面だけでなく時間，専門家の人的制約の観点から，投下すべき「資源」が得られる知識の価値に見合ったものとなる必要があります。

地層処分の長期安全性は，処分場の建設・操業・閉鎖の方法とも密接に関係します。長期安全性の解析の出発点において，人工バリアは品質が保証された方法でその仕様を満たすように製作され，処分場に定置されることが前提となります。過去の性能評価においては，この前提

は必ずしも十分に吟味されていませんでしたが，いくつかの国において地層処分計画が実施の段階に近づくにつれて，このように重要な仮定の正当性を透明性のある方法によって示すことが必要となってきています（OECD/NEA, Engineered Barrier Systems (EBS) in the Safety Case）。処分場の設計にあたっては，地下の作業環境，プロジェクト実施上の条件（例えば，廃棄物パッケージの定置速度），品質モニタリング，操業時の擾乱に対する修復作業などによって生ずる制約を考慮する必要があります。現実的な定置システムをとろうとするために要求される手段が，人工バリアに保証される品質に影響する可能性もあり，また，これまでの理想的状態を想定して実施された性能評価では考慮されていなかった，例えば，以下のような処分場の構成要素を取り扱う必要が生ずることも考えられます。

- 排水システム
- トンネル支保工およびボーリング孔のケーシング
- ボーリング孔のキャップやプラグ
- 処分場の閉鎖にあたって撤去された後も，設置による影響が残される可能性のある一時的なインフラ：換気・電源供給・通信・モニタリングに関連する設備など
- 使用後その場に廃棄される可能性のある付帯設備：搬送用レール，引き上げ板，輸送用シェルなど

処分場の操業を容易にするための要件と，長期安全性を説明する論拠を頑健で単純明快なものとするために用いられる，例えば不確実性に対する安全評価上の保守的簡略化といった要件との間にはトレードオフの関係が生ずることも考えられます。種々の技術的選択肢を，例えば多属性効用分析（MAA: multi-attribute analysis）のような方法で評価する場合には，経済性，環境影響，パブリックアクセプタンスといったすべての要件を考慮しておくことが有効であると思われます。詳細で厳密な取扱いではないにしても，地層処分事業計画の初期の段階からこれら要件を明示的に取り込んでおくことは評価の包括性を確保し，処分場の設計に関する研究開発の偏りを避けるうえで役にたちます。

地層処分場が十分に安全であるという許認可上の要件を満たしていることを示すためのすべての論拠を統合するという観点からも，セーフティケースの定義を拡張しておくことが有効と思われます。地層処分の十分な安全性は，処分候補地の選定，処分候補地における地質環境調査，処分場の建設，操業，閉鎖／制度的管理，制度的管理終了後という地層処分のすべての段階で的確に保証されることが必要です。ここで重要なことは，「十分な」安全性であるということです。これは，すべての人間活動において絶対的な安全性を確保することは不可能であると同時に，処分事業を進めるうえでは，実施計画の各段階間での，また安全性と他の要件との間でのトレードオフを行いながら最適化を図っていくことが必要であるとの認識（2.2.4 節）に基づいています。したがって，日本におけるセーフティケースの定義を，知識ベースを考える上での前提条件として，この報告書では以下のように提案することにします。

「セーフティケースは，地層処分がその全段階において十分に安全であることを示すための論拠を統合したものである。セーフティケースは，安全評価の結果に基づく安全基準への適合およびその信頼性を明示的に提示する。地層処分事業の主要な段階における意思決定に，その都度最新のセーフティケースが使用され，事業の段階が進展するにつれ，セーフティケースは補強･更新される。地層処分の実施には社会的受容の醸成が極めて重要であるとの認識に立ち，セーフティケースには，関連する技術的な専門家のみならず主要なステークホルダーにとって，重要となる基本的な課題について説明し，理解を得るために必要と考えられるすべての論拠が含まれる。」

原子力産業界全体においては，従来より，安全を他のすべてに優先させるという考え方に基づき行動する，いわゆる「安全文化（safety culture）」の確立が強調されています。これは非常に重要なことですが，地層処分においては，処分場閉鎖後のシステムの長期的な安定性に大きく影響する要因は一般に極めて限定的であり，施設の設計にあたっては，十分な安全の確保を図るうえで，過度の保守性を避け，経済性や資源の有効利用といった観点に配慮することも必要です。

地層処分の長期安全性を，費用やパブリックアクセプタンス等の他の要件と整合させることは非常に難しいテーマであり，これについて日本ではこれまでほとんど報告が見あたりません。これは，地層処分の必要性と緊急性がこれまで十分に理解されてこなかったことも一因であると思われます。これは現実の一断面であり，環境法の中でしばしば引用される「環境のための最良の慣行（Best Environment Practice）」あるいは「利用可能な最良の技術（Best Available Technology）」の要求として認識されているものです。例えば NUMO によって述べられているように，処分場を開発するために投入する資源は処分によってもたらされる可能性のある危険性とバランスのとれたものとするべき（NUMO-TR-07-01，NUMO-TR-07-02）という，持続可能性に関する倫理的な原則に基づくものでもあります。

このような包括的な取り扱いは，事業計画をより柔軟性のあるものとし，変化しうる種々の前提条件に対応するうえで有効なものであり，特に処分地選定を公募と申し入れの併用によって進める日本にとっては重要です。例えば，十分な安全性を示すという一つの要件に対し，それを人工バリアと天然バリアの安全機能をどのように組み合わせて達成するかは，処分候補地の条件に応じて変化させることができます。

3.1.4　実施主体と規制機関の役割

地層処分のセーフティケースに関する実施主体と規制機関の役割は，国際的な議論において，一般的に次のように考えられています（IAEA Draft Safety Guides DS355, NEA Safety Case Brochure）。

セーフティケースを作成する責任は基本的に実施主体にあるとされています。しかし，3.1.2 節及び 3.1.3 節で述べたように，セーフティケース作成のための前提条件は規制機関が示す安全指針等によって与えられることになります。また，セーフティケースが十分なものであることに関する最終的な判断は一般に規制機関の責任とされていますが，そこに至る過程では主要なステークホルダーの判断にも影響を受けることになると考えられます。以下においてさらに議論するように，セーフティケースには，このような合意を如何に形成するかという戦略が含まれます。

規制機関は，ステークホルダーとの十分な対話を通じて，安全目標と指針の策定を行うことになります（NEA 規制者の役割に関する文書）。実施主体によって作成されたセーフティケースを規制機関が評価する際には，規制への適合性を評価する基準が予め明らかにされていれば，より透明性の高いものとすることができます。このためには，セーフティケースによって地層処分システムが単に定量的な性能目標を満足していることを判断するための基準を示すだけではなく，支援として用いられる論拠が十分なものであることをどのように判断するかが明らかにされることが重要です。しかし，こうした十分性についての判断にあたっては，社会的受容という点で主観的な要素が必然的に含まれ，規制機関，実施主体，その他関係するステークホルダーの間での合意形成が重要となります。

定量的な安全評価の実施とレビューのプロセスは，複雑で多様な学際的情報を扱うことから簡単な作業ではありません。これを支援するうえで，関連する研究開発機関や大学等が，それぞれに応じた主要な役割を果たすことが重要です。こうした役割を果たすにあたって，規制を支援する組織が，事業の実施とは独立していることが重要ですが，日本においても経験を積んだ専門家や特別なインフラが限られていることを考えれば，研究資源の浪費は避けなければなりません。この意味で，実施主体と規制機関の双方によって，共通の資源として事前に合意することができるような，技術レビューによって品質が保証された材料に基づく共有可能な知識ベースを開発することは意義深いものであるといえます。これについてはさらに 3.2.2 節で論ずることにします。

3.2　安全戦略

セーフティケースの開発にあたっては，まず「安全戦略」が検討されます（NEA Safety Case Brochure）。初期の安全評価において，この言葉は，解析の対象とするバリアシステムの主要な構成要素を説明する際によく用いられました（最近では，「安全性の主柱（pillars of safety）」と呼ばれることもあります。(例えば Nagra 02-05，Posiva 2005-01，Posiva 2008-05）。安全戦略が，セーフティケースの開発を目的としていることからすると，これを「処分事業の段階目標に応じて，すべてのステークホルダーの要求を満足しながら効果的かつ効率的にセーフティケースを作成するための技法」（セーフティケースに関する ITC コース，JAEA KMS ワークショップ）と定義することが適切と考えられます。安全戦略によって，

- 計画全体に関する管理の構造や手続き
- 処分地選定プロセス
- 処分場概念開発
- 性能／安全評価

に関する要件や前提条件，アプローチなどが明らかにされることが必要（NEA Safety Case Brochure）であり，重要な要素として，プロジェクトに関連する組織としての信頼性の確保と，計画管理のためのツール開発をあげることができます。

3.2.1 組織の信頼性確保が果たす主要な役割

上記の定義に従えば，安全戦略は，セーフティケースを作成する実施主体やこれをレビューする規制機関，関連する研究開発機関などの組織構造，さらには組織文化のあり方に影響を及ぼすことになると考えられます。このことは，関連するすべてのステークホルダーとのコミュニケーションを重視した NUMO のセーフティケースの定義（3.1.3 節；NUMO-TR-04-03）が公開性や透明性を確保するための組織構造や文化に関わっているということと合致するものです。さらに，NUMO が言及（NUMO-TR-07-01，NUMO-TR-07-02）しているように，処分事業の安全性を保証するための論拠を開発するうえで，組織とその職員の信頼性は重要な要素となります。

技術的なプロジェクトの推進にあたる組織が社会的な信用を獲得するためには，それに関わる職員が社会人として適切な意識と，職務にふさわしい力量を備えていることが不可欠であるといえます。職員の学問的な資質はその基盤として重要ですが，地層処分プロジェクトを進めていくためには，これらに加えて幅広い経験と，技術的な内容をステークホルダーに説明し理解してもらうコミュニケーション能力が求められます（NEA Stakeholder Confidence）。このような経験や能力は，長期間の OJT（実地訓練）によって蓄積することができますが，産業界や学会の研修プログラム，特定テーマの教育コースなどを通じて，より体系的なものとすることが可能になると考えられます（例えば，ITC など）。

世界的にみても，原子力産業を支えてきた世代の専門家が引退の時期を迎えつつある状況においては，このような世代が暗黙知として有する知識や経験を保存・維持することが求められています。経験を積んだ人材が計画に携わっていることは本質的に重要なことであり，さらにこのことが，広く社会に認知され評価される必要があります。NUMO はすでに公開性に関する方針（NUMO 公募関係資料）を打ち出していますが，この方針を実現するためには明確なコミュニケーション戦略とすべての職員に公開性を奨励する「コミュニケーション文化」が必要となります。すべての関連機関の技術系職員について，国内外の学術雑誌や学会などへの論文投稿や発表を通じた科学技術的専門家としての信頼獲得だけでなく，専門分野における幅広い知見とバランス感覚に基づく自信の構築，さらにはコミュニケーションを通じてより幅広い相手に対して自らの仕事の内容を直接伝えることが求められます。これまで日本ではあまり普及していませんが，諸外国の処分計画においては，技術系職員と一般公衆との対話を確立する

この種の努力が双方にとって有益なものであると認められています（例えばスウェーデン，フィンランド，スイス，カナダ，米国，英国などの活動）。

処分事業の推進は社会的にも影響の大きい事業であり，特に処分地選定や処分場の設計，許認可に関わる意思決定は，地域のステークホルダーにとって重大な関心事となります。意思決定過程にはステークホルダーが参加することが極めて重要ですが，主要な意思決定の多くは技術的な要素を含んでいることから，技術的議論に専門家ではないステークホルダーが加わるのは無理がある場合もあります。したがって，こうした技術的議論の内容をわかりやすく伝え，特に主要な意思決定に関しては，明確で透明性をもった過程によって行われるようにするための努力が不可欠であるといえます。こうした努力は，主に実施主体や規制機関によってなされるものの，意思決定に際しては，関連研究機関に蓄積された技術的知見を取り込むこととなり，これらの知見が十分論拠のあるものであることを追跡して，確認できるようになっている必要があります。

このような追跡性と透明性をもって技術的知見を取り扱うための作業は，例えば，要件管理システム（RMS）や討論モデル（argumentation model）などで形式化された方法（3.2.2 節参照）を用いることによって，より効果的に実施することができると考えられます。

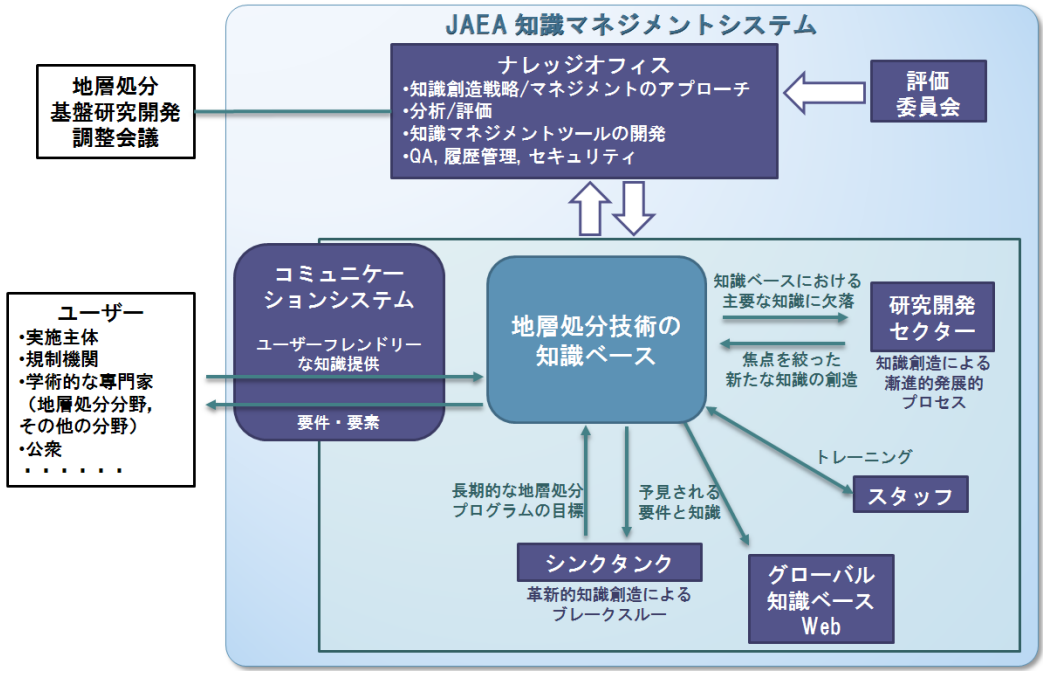
また，こうした作業では，多様で急激に増大する情報やデータを取り扱うことが必要であり，プロジェクトを効果的に管理するためには，経験を積んだ職員と洗練されたツールが必要とされます。こうした経緯から，原子力機構では知識マネジメント（KM）の適用を立案しました（平成 17 年取りまとめ，NEA Safey Case Symposium）。作業の信頼性を確保するためには，先端的な技術を駆使した現実的な知識マネジメントシステム（KMS）の運用が，セーフティケースの作成やレビューに関わる職員，関係研究機関において知識を生産する職員に受け入れられ，すべてのステークホルダーがこれにアクセス可能となることが必要です。これが，KMS 利用の入り口となるという本書のもう一つの目標です（JAEA KMS）。

ここで，知識マネジメントの一要素である品質保証（QA:Quality Assurance），また，主要な地層処分関連機関における品質マネジメントシステム（QMS: Quality Management System）（IAEA GS-G-3.4）の導入の重要性について強調しておきたいと思います。これは組織文化の一要素であり，安全に関わる活動すべてに関して，利用者にとって容易な方法で運用される必要があります。このことから，本書では，その作成過程の品質マネジメントに公開性と透明性をもたせ，内容の追跡・監査を容易に行うことができるようにすることを目指しています（QMS カーネル）。

3.2.2　ツールの開発と日本の放射性廃棄物知識ベース（KB）

以上に述べたことが，JAEA KMS 概念の開発の直接的な背景です（KMS カーネル）。平成 17 年取りまとめに示したように，この研究開発プロジェクトの目的は，実施主体によるセーフティケースの作成と規制機関によるそのレビューを支援し，セーフティケースの信頼性をさらに高めるために必要な研究開発を明らかにするとともに，関連するステークホルダーの意思決定への参加を支援するための方法論，ツール及びデータベースを整備することです。このような目的に対して，急速に発展しつつある分野である知識工学や IT，人工知能の最先端の技術を利用するという，こうした最先端の技術を必要とする他分野の先端的プロジェクトと同様の基本的な目標がすでに描かれています。

下図に開発している JAEA KMS の概念（KMS カーネル）を示します。ナレッジ・オフィスは，単に新しいツールの開発や KMS を実現するための組織論的な検討を行うだけでなく，メタ分析や全体を俯瞰した包括的な品質保証を含む，データの総合的な解析や評価を包括的に支援する機能を担います。KMS の要素として，さらに二つの特徴的な点について触れておきます。一つは，テーマを絞ったトレーニングと経験伝承フレームを通じた暗黙知の表出化による管理（KMS カーネル），もう一つは，シンクタンクアプローチによる将来の変化や要件に関する予見的分析です（KMS カーネル）。地層処分事業に関連する多様な知識とこれに対応して求められる管理方法が分析し，どのような管理機能が，少なくとも部分的には自動化可能かといった検討を行ってきています（KMS カーネル）。



JAEA KMS の概念図

3.3 処分事業実施のための構造化

安全戦略の内容全体に影響する要素の一つは，法律で定められている段階的な地層処分場の立地プロセス（最終処分法）です。2.2.4 節で述べたように NUMO のアプローチは，まず処分概念を固定してこれに適する処分候補地を選定するという従来の進め方に対し，処分候補地の条件にあわせた最適な処分システムを構築するという特徴を有します。計画立案の段階から段階的な意思決定によって社会的な受容を高めていくという現代の新しい環境アセスメントの潮流にも沿ったものです。

3.3.1 基本原則

最終処分法では，文献に基づく調査（文献調査），地表からの調査（概要調査），地下施設を利用した詳細な調査（精密調査）という三つの段階を経て処分地を選定するというプロセスが規定されています（最終処分法，NUMO 公募関係資料）。NUMO は，日本全国の自治体を対象として公募方式によってこれを進めており，処分場として本来的に不適切な地域を除くための要件を解説した文書（NUMO-TR-04-02, NUMO-TR-04-04）と特定の処分候補地に対して処分場概念を適合させるための設計のオプションを概括的に論じた文書（NUMO-TR-04-01, NUMO-TR-04-03）を公表しています。こうした文書に基づけば，処分事業の基本的なプランとしては，応募のあったすべての処分候補地に対して，まず上述した除外要件を適用し，これをクリアしたものを対象として第一段階の文献に基づく適切性の検討が行われます。次に，文献調査の対象となった地域から，概要調査，精密調査を行うべき処分候補地が段階的に絞りこまれていくことになります。最後の段階である精密調査の対象とする候補地点の中から最終的な処分候補地（最終処分施設建設地）が決定されます。

このような候補地を絞るプロセスにおいてなされる意思決定は，技術的な判断だけでなく社会経済的な判断にも基づくものであり，段階が進むにつれて技術面における判断の比重はより高くなっていくと考えられます。このため，NUMO は，このような意思決定は明確な方法で行われるべきであり，特に処分候補地間で地質学的条件やその他の情報基盤などが大きく異なるような場合には，これらの候補地を地質環境調査の初期の段階で比較する様な場合には十分な注意が必要であるとしています（NUMO-TR-07-01 及び NUMO-TR-07-02 ）。

こうした条件の下での意思決定を支援するため，構造化アプローチ（NSA: NUMO Structured Approach －NUMO-TR-07-01 及び NUMO-TR-07-02 ）が開発されています。

これは，処分候補地に対して共通の参照用設計（レファレンスデザイン）や地質環境調査計画を持つのではなく，候補地の異なる条件に対して，地質環境調査や処分場概念（NUMO-TR-04-01, NUMO-TR-04-03）開発を行うための共通の方法論を提供しようとするものです。このアプローチをより効果的に適用するためには，処分候補地に関する様々な制約条

件を考慮したうえで最適化を行う過程を，透明性をもって実施することを可能とする RMS を用いることが有効とされています。セーフティケースは処分地の選定を行ううえで重要な手段の一つですが，社会的受容の程度，放射性廃棄物の輸送の容易さといった他の要素とのバランスを考慮することが必要です。

さらに，サイト選定への規制機関の関与について議論が進められている（「特定放射性廃棄物処分に係る安全規制の許認可手続と原子力安全委員会等の関与のあり方について（中間報告）」；原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会報告書「「放射性廃棄物処理・処分に係る規制支援研究計画（平成２２年度～平成２６年度）」について」）ことにも留意しておくことが必要です。また，地方自治体や地域のステークホルダーが，例えば多属性効用解析（MAA）のような方法（例えば NUMO-TR-04-03）を通じて，処分候補地の属性の比較に対してできるだけ寄与できるような環境を整えていくことについても考慮することが重要と考えられます。

3.3.2　処分地選定

深部地質環境条件の安定性は，地層処分のセーフティケース全体の基礎となるものであり，地層処分に適切な候補地の選定は，安全戦略の重要な要素の一つです。また，適切な処分候補地の選定を，実際の地質環境における深地層の研究施設で得られる知見などをもとに，公正で透明性の高い方法によって行うことは社会的受容の醸成にとって不可欠なものです。

日本では，処分候補地における地質学的な長期的変動によってもたらされると考えられるリスクを明らかにすることが重要と考えられています。日本は環太平洋変動帯に位置（第２次取りまとめ，NUMO-TR-04-02，及び NUMO-TR-04-04）しており，地殻の変動が活発な地域です。そのため，処分候補地の選定にあたっては，現在火山活動や断層運動が認められないということのみならず，将来にわたってもそれらの活動の可能性が十分に小さいことを示すことが重要です。また，著しい隆起／侵食が生じていないことや鉱物資源などが存在しないといった条件も重要となります。鉱物資源などの存在に関しては，処分場が建設されることによってその開発ができなくなる，あるいは，将来，処分場の存在が忘れられた場合には，人間が偶然，処分場に侵入するような事態が生ずる確率を高める可能性があるといった観点から注意が必要な特性です。さらに，法律（最終処分法）で定められている少なくとも地下 300m 以深に，処分場を安全に建設できることが必要です。このため，非常に柔らかい軟岩や角礫化が進んだ岩盤が支配的な地域は除外されることもありえます。

処分候補地における地質環境調査計画の初期の段階では，応募された候補地内で処分場建設が可能と考えられる地質環境を選定し，その過去の履歴を明らかにすることによって起こりうる将来の変遷が推定されます。除外要件（NUMO-TR-04-02 及び NUMO-TR-04-04）をクリアしている候補地に対しては，この作業によって，処分場設計を実現するうえでの制約条件とな

りうる主要な因子を決定するとともに，操業時及び長期の安全性を評価するために必要なパラメータの測定が行われます。

処分地選定は段階的に進められ，対象とする地質環境や実施される原位置での作業に適した地質環境調査の方法論と調査技術が用いられなければなりません（JAEA Research 2007-043, JAEA Research 2007-044, 深地層の科学的研究カーネル，JAEA-Research 2008-085，METI 公募事業「地質環境総合評価技術」報告書, 2008，METI 公募事業「地質環境総合評価技術」報告書，2009）。文献調査段階では，リモートセンシングに基づく情報（例えば，マルチスペクトル衛星画像など）を利用することも可能です。文献調査では，応募地域に関する初期の地質環境モデルを構築（深地層の科学的研究カーネル，JAEA KMS ISIS）することが目的の一つですが，その地域に限った局所的なデータベースには限界があり，過去の調査事例に基づき類似の地層に関するデータベース（例えば日本国内あるいは場合によっては諸外国の研究あるいは建設プロジェクトの参照）によってデータを推定し補完を行う（ISIS 事例ベース）ことが必要になるかもしれません。

地質環境調査の初期の段階においても，通常「地質環境情報統合（geosynthesis）」と呼ばれる作業によって分析・統合することが必要な，広い範囲にわたる大量のデータを取り扱う必要があります。文献調査の結果，次の段階での概要調査で予定されていた処分候補地の数を上回る数の応募地域が残されたような場合には，地質環境情報統合の結果は，引き続き調査を行うべき候補地を選別するための検討に利用できると考えられます。

こうして選定された候補地それぞれに対して，地質環境情報統合の結果に加え，考えられる処分場のデザインとその性能を検討した結果を総合して，次の段階の原位置で実施する調査の目標と優先順位を明確にし，概要調査のための計画が適切に作成されることとなります。

最近では，諸外国の地層処分計画において見られるように，このような地質環境情報統合の作業は，間断なく向上する調査技術の能力によってもたらされる「情報爆発（information explosion）」のため，以前に増して難しいものとなってきています。日本においては，公募方式による処分地選定を行うための技術基盤を整えておくという目的から，諸外国と比べても地質環境情報統合の作業は，より複雑なものとなると予想されます。実際，公募方式では，異なる地質環境を有するいくつかの候補地に対して地質環境調査を並行して実施することが必要となる可能性があり，また，実際に応募が行われないと対象とする地質環境を特定することができません。さらに，地質環境調査のスケジュールも念頭に置いておく必要があります。

過去の地質環境情報統合のプロジェクトは，地表及び空中探査，深層ボーリング，物理探査，その他の調査手法によって得られる情報（水理，地球化学，土地利用，生物圏など）の取扱いにおいて，専門家の判断に大きく依存していました。これらの作業の結果は，データファイルとともに膨大な報告書にまとめられています。このような作業においては，データの取り扱い

のプロセスを表現するための有効な手法として統合化データフローダイアグラムが利用されています（深地層の科学的研究カーネル，JAEA 統合化データフロー）。この方法では，測定値や観測結果を，処分場の設計や性能評価に利用されるデータベースや地質構造図に変換する過程が追跡できるようになっています。しかし，このダイアグラムには，受動的な一方向の情報の流れが示されているだけであり，経験を積んだ専門家チームが行う地質環境情報統合作業のほんの一部を表現しているにすぎません（深地層の科学的研究カーネル，JAEA-Research 2008-085，METI 公募事業「地質環境総合評価技術」報告書, 2008，METI 公募事業「地質環境総合評価技術」報告書, 2009，NEA AMIGO-3 paper）。

原位置における地質環境調査を進めるうえでは，複数の，そして時には対立する要件を十分に認識しておくことが重要です。現在の状態だけでなく将来の地質環境の変遷に関する情報をあわせて整備するとともに，こうした調査によって，地層処分システムの天然バリア機能としての役割をもつ処分候補地の地質環境の特性を損なわないようにする必要があります。この要件が満たされていることを確認するうえでは，地質環境調査の実施や処分場の建設・操業が行われる前の地質環境条件のモニタリングを調査計画に含めることが不可欠です。

調査結果はできるだけ詳細に記述されなければなりません。この観点では，現代的な技術である 4 次元モデルを用いて記述することが最良と考えられ，これによってすべての調査情報を 3 次元的に統合して示すとともに，将来の変遷を推定するシナリオを開発するための基礎となる過去の履歴を取りまとめておくことが有効です。調査の詳細度は，処分候補地のバリア機能への擾乱を最小限に抑えるという要件，調査費用に対する制約，調査に関わる作業者のリスクを最小限にするという要件などを考慮して決定する必要があります。上述の要件間にはトレードオフがありますが，従来は，主に専門家の経験的判断に基づき，これらを考慮したうえで，調査内容や方法を決定してきました。この過程を追跡するのは容易ではなく，その内容を理解するのは手間のかかる作業でした。しかし，技術的な知識を有するステークホルダーだけでなく，技術的な知識をもっていないステークホルダーに対して，このようなトレードオフがどのようなもので，最適な調査方法はどのようなものであるべきかを透明性をもって説明することが重要と考えられます。

トレードオフは，より技術的なレベルでは，異なる学術的な分野からの競合する要求によって，原位置での調査作業に関する時間的制約の中で日常的に直面する問題です。地質環境調査結果を利用する処分場の設計や性能評価に携わる作業者によって，求めるデータの品質のレベルが必ずしも同じではありません。このことは，取得すべきサンプル数と得られるデータの品質とのバランスの決定に影響を及ぼします。

以上に述べた様々な問題を念頭に置いて現在開発を進めている解決法（サイト特性調査情報統合システム、これを「ISIS（Information Synthesis and Interpretation System）」と名付けています）（JAEA-Research 2008-085，METI 公募事業「地質環境総合評価技術」報告書,

2008, METI 公募事業「地質環境総合評価技術」報告書, 2009, 深地層の科学的研究カーネル, JAEA KMS ISIS）では，知識工学の技術を利用し，専門家の判断で行われる分析・検討プロセスを，定型化した方法によって支援できるよう，地質環境情報統合のためのツールとして高度化することを目指しています。地質環境情報の統合は，基本的には，情報マネジメントと意思決定の過程を組み合わせたものであるということができます。現在の技術レベルでは，地質環境調査に関して完全に自動化可能と考えられる意思決定過程はほとんどありませんが，意思決定をすべき時期を明らかにし，意思決定を支援する関連情報を提供するとともに，問題解決のヒントとなるような過去の経験事例を参照できるようにするための計算機ベースのエキスパートシステムを開発することは可能であり，実際，すでに作成を行っています（深地層の科学的研究カーネル）。このツールでは，すべての決定過程と結果が記録されるため，地質環境調査が進むにつれて，経験に関する事例ベースは時間とともに蓄積され，取扱われる情報の量がさらに大きくなる後段の調査段階の作業では，より有効に機能するようになるといえます。

3.3.3　処分場の設計

NUMO は，幅広い視点から処分候補地の条件に適合した処分施設の開発を行うため，次のような「処分場概念（Repository Concept）」を導入しています（NUMO-TR-04-01）。

「処分場概念は，

- 地上及び地下施設，人工バリアの設計とレイアウト，
- 建設，操業，閉鎖，モニタリング，
- 操業時及び閉鎖後長期間の安全性，
- 環境，社会経済的影響，

といった点を考慮して検討を行う必要がある。立地点に適合した処分場概念の開発のための基本的な進め方や具体的な方法論については次のような視点が重要となります。

- 長期的な地層処分事業の各段階に対応して段階的に詳細化されるサイト環境の情報を反映することが可能であること。
- サイト環境条件に応じた設計とそれに対する性能評価が可能であること。
- 最新の科学技術的な知見を反映できること。
- 処分場概念の種々のオプションを考慮することが可能であること。」

（「私たちは，「処分場概念」を用いて，対象とする候補地の条件に適合した処分施設の地表及び地下のすべての構成要素の設計概念と処分施設を建設・操業し，最終的に閉鎖する方法を表すこととしています。また，「処分場概念」には，操業時安全性および閉鎖後の長期安全性，社会経済的な要因が考慮されています。この概念は，事業計画が，処分地選定のための地質環境調査から建設・操業の許認可へと進むにつれて時間的に変化するダイナミックなものです。実際，操業期間においても，それによって得られた経験やその間の技術的な進歩を取り入れて引き続き進化させることが可能です。」（英語原文からの訳）（NUMO-TR-04-03））

この定義は，2.2 節で述べたように，高レベル放射性廃棄物処分の成立性に関する一般的（ジェネリック）な研究開発で得られた経験を利用しつつ，公募方式というアプローチに沿って，応募された処分候補地の条件に処分場の設計を適合させるという目的に適ったものです。また，段階的な処分地選定プロセスによって処分候補地に関する理解が徐々に深化していくということとも調和します。

諸外国の計画における処分場の設計に比較して，操業の方法に関する詳細な検討と安全性，社会経済的な因子を重視している点は日本の計画の特徴といえます。これは，NSA（NUMO-TR-07-02）の基礎として用いられている，処分場の設計を処分候補地に適合させるというプロセスが反映されたものです。ある特定の処分候補地に対して適合しうる設計の幅を評価するために，以下のような「設計因子（Design Factors）」が導入されています（NUMO-TR-04-01 及び NUMO-TR-04-03）。

- 長期安全性：閉鎖後のセーフティケースの頑健性
- 操業安全性：建設，操業，閉鎖及び施設の廃止措置に関わる従来の安全性と放射線学的な安全性
- 工学的実現可能性／品質保証：要求される品質レベルに合致する建設技術及び操業技術の基本的な実現可能性
- 工学的信頼性：境界条件（例えば，廃棄体の定置速度）に照らした実行性と操業時の擾乱に対する頑健性
- サイト特性調査／モニタリング：サイト特性調査とモニタリングによって取得するデータに関する技術的要件を満たすために必要な作業や活動
- 回収可能性：定置された廃棄体の回収に関する難易性
- 環境影響：処分場の設置に関連するすべての環境影響の程度
- 社会経済的影響：費用や主要なステークホルダーの受容に寄与する因子

（ここで挙げた因子は独立ではなく相互に関連していることに注意）

これらの設計因子は，異なる設計要素や操業手順の比較，あるいは処分場の設計全体の比較に用いることが可能です（NUMO-TR-04-03）。前者では，MAA のような方法を用いることによって比較のプロセスをより透明性のあるものとすることができます。一方，後者は，RMS を利用することによって，比較の作業をより円滑に実施することが可能です。

このような因子の導入は処分場の設計過程を複雑なものとしますが，工学的な設計作業を，地質環境調査及び安全評価（あるいは性能評価）の両者と，体系化された方法によって統合するという観点で有効な方法です。最適な処分場を開発するうえでは，設計因子すべてを考慮することが必要と考えられますが，候補地が明確となっていない段階での予備的検討作業では，安全性と工学的視点を含む最初の四つの因子に注目して実施することが有益と考えられます（METI 公募事業「先進処分概念」報告書, 2008, METI 公募事業「先進処分概念」報告書, 2009, NEA EBS Tokyo Workshop）。

2.2 節で記したように，TRU 廃棄物処分に関する概念の開発は，高レベル放射性廃棄物の処分概念を追随する形で進められてきており，ここで述べた手法が同じように適用可能です。最初の段階として，高レベル放射性廃棄物の場合と同様（NUMO-TR-04-03），これまでに検討された一般的な研究開発の成果を分析し概念カタログ（NUMO-TR-04-03）として整理することが有効と考えられます。処分候補地に適合した処分場の設計を検討するうえでは，上記の設計因子をそのまま用いることが可能です。ただし，種々の設計の選択肢について，各設計因子に対する長所と短所を検討する作業を支援するための研究開発が必要となります。このような研究開発を行うにあたっては TRU 廃棄物の特性とそれに対応した人工バリアのオプションについてより理解を深めることが求められます。次に，こうした理解に基づいてより現実的な安全評価モデルを作成し処分場の設計全体を比較するための技術基盤を構築することが必要です。廃棄物の特性が多岐にわたることから，TRU 廃棄物の処分に関するこのような作業は，高レベル放射性廃棄物に比べて複雑なものとなると考えられますが，高レベル放射性廃棄物に関して進行中の研究開発によって整えられる技術的基盤を利用することが可能です。

高レベル放射性廃棄物と TRU 廃棄物に対して，最適な処分概念を開発するための信頼できる技術的基盤を，並行して確立することが重要です。一方，高レベル放射性廃棄物と TRU 廃棄物を併置処分することによって，廃棄体搬入用の坑道などのインフラを共通に利用し，環境影響や建設・操業等の費用を最小にする方法も提案され，技術的な実現可能性が示されています（TRU-2 報告書）。日本の場合，こうした併置処分による便益が，追加的に必要となる技術的な対応を凌ぐものであるかどうかについて，技術的及び社会経済的観点からより注意深く検討を行うことが必要です（長半減期低発熱性放射性廃棄物の地層処分の基本的考え方）。2.1 節で検討したように，地下への処分が必要なすべての放射性廃棄物の統合的マネジメントに関するこのような全体システムの分析（METI 公募事業「先進処分概念」報告書，2008，METI 公募事業「先進処分概念」報告書，2009）は，1.1.1 節で触れた地層処分における SEA の観点からも重要な要素であるといえます。

3.3.4 性能評価

NUMO の定義した処分場概念（3.3.3 節，NUMO-TR-04-01 及び NUMO-TR-04-03）には，長期安全性を論ずるための性能評価が含まれていますが，これは，上述した処分場の工学技術に関する諸活動（設計や，建設・操業及び閉鎖に関する計画など）を支援するための解析評価とは必ずしも同じものではなく，切り離して論ずるのが一般的です（NEA EBS Workshop 2004，NEA EBS Workshop 2005）。これら二つの活動に関わる技術者や使用するツールは異なりますが，両者の間で緊密な連携が必要であり，特に，用いる知識ベースは一貫したものでなければなりません（この点で，共通の知識ベースと知識マネジメントシステムが存在することは有効です）。

処分事業に関して，ステークホルダーに共通する要求の一つは，処分場が安全に建設・操業されることです。作業員と周辺住民に対する危険要因は，共に安全基準を満たしたうえで，他の制約も考慮しつつ可能な限り低減する必要があります。周辺住民にとって最大の懸念は放射線の被ばくに関連したものであり，これを引き起こす可能性のある種々の要因と，処分場の建設のような大規模な土木工事に固有の要因（主たるものは交通量の増加と重量物の移動に伴う従来型の危険要因）が必ずしも明確に区別されて認知されているわけではないことが指摘されています。

いずれにせよ，すべての設計の選択肢に対し，体系的な一貫した方法による分析を行い，様々な事故に関するリスクを明らかにするとともに，事故の発生確率あるいは発生した場合の対策を示すことが必要です。このような分析は，設計ベースの通常の操業状態と処分場の長い操業期間中に生ずる可能性のある外的な擾乱（例えば，地震，洪水，社会的な事件などの発生時）の双方に対して行われなければなりません。

3.1 節において強調したように，実際の処分事業では，操業時の安全性を最大にする一方で，処分場が与えられた性能目標（例えば，年間約 1 千本の廃棄体パッケージの定置（最終処分計画），品質保証要件への適合など）を満たすという要件が併存し，トレードオフの関係を避けることはできないと考えられます。こうした要件は処分事業の社会経済的な実現可能性や事業終了後の安全性とも関係しています。したがって，実現可能性に関する評価は操業時の安全性と直接結びつけて実施する必要があります。

こうしたトレードオフの検討では，閉鎖後の安全性についても評価し，処分事業全体を見通した最適化を行うことが必要です。例えば，地層処分概念の実現可能性検討を目的として実施する性能評価では，地質環境や人工バリアについて簡略化を行い，保守的な仮定の下で，処分場の閉鎖時点から計算を開始します。一方，最適化のための分析にあたって使用するモデルは，安全かつ現実的な方法によって構築されたすべての処分場構成要素ならびに建設や操業中に生ずるすべてのプロセスの影響を考慮した，より現実的なものでなければなりません。現実性を重視することは非常に重要です。処分場の建設・操業が行われる期間中の作業員に対する測定可能な実際のリスクと，遠い将来の人間に対する仮想的なリスクをバランスよく考慮して，後者のリスクの意味を十分に議論したうえで，ステークホルダーにとって納得のいくリスクレベルに抑えることが重要です。

処分地選定の段階が進むにつれて，処分候補地の地質環境や将来の状態変化に関する情報の詳細化，処分場の設計の具体化が図られ，性能評価はこれらを踏まえて，より厳密な方法によって環境影響や操業方法，社会経済的な因子との関係を直接的に検討することができるようにしていく（例えば，回収可能性の維持や長期モニタリングなどの影響を考慮できるようなモデルの開発など）ことが重要と考えられます。

設計の初期段階の検討では，これらの因子は簡単な代表的パラメータ（例えば，岩盤掘削量，排水量，廃棄物パッケージあたりの人工バリアの費用など）によって評価することができます。こうした代表的パラメータを用いることにより，主要な論点は安全性と工学的な現実性にあるとしても，上述した因子を実際に考慮していることを示すことが可能です。しかし，精密調査地区の選定までには，異なる処分場デザインの選択肢に対してこれらの因子を定量的に評価するために，より詳細な解析が必要となると考えられます。このような解析は処分候補地の特性に強く依存するものですが，解析を行うためのツールやデータベースの開発には時間を要するため，応募があった場合に直ちに対応できるよう速やかにこれを開始する必要があるといえます。

すべての性能指標に関する詳細な解析に基づく処分事業の最適化は，実施主体の役割であり，安全性と環境影響に関する評価結果は，規制機関によって厳密にレビューされる必要があります。操業安全性と閉鎖後の長期安全性，さらには実行性や費用といった他の実施上の制約の間のトレードオフについては，規制上何らかの指針が与えられなければならないと考えられ，国際的にも議論が進められています（NEA LTSC WS proceedings, RF Tokyo WK）。

この観点からも，技術基準に基づいて合意され，適切なピアレビューを経た，共通の評価ツールとデータに関する知識ベース（KMS カーネル）を構築することは有効であるといえます。これは，意思決定プロセスにおけるステークホルダーとの合意に基づく，主観的な要素を含む評価結果の解釈とは切り離して行うことができます。

3.4　中期計画報告書の役割

3.1 節で述べたように，現時点における日本の地層処分事業計画において重要と考えられることは，セーフティケースを，関係者が合意できるものとしてより厳密に定義することです。3.1.3 節で提案した定義は，様々な議論（JAEA セーフティケースワークショップ）を経て今後改良していくことが必要ですが，本書で提供する様々な内容は，セーフティケースを定義するという目標に関して，そこに含まれるべきことを考える際に，考慮しておくべき課題とこれに対する知識基盤の現状を明らかにしようとするものです。さらに，国が申し入れるという方法が加えられましたが，処分地選定が公募によって進められるという日本固有のケースに対し，処分事業計画を処分候補地の諸条件に適合させていくための活動について概観しました。これを通じて，処分候補地の地質環境条件に関する理解の進展，科学技術の進歩，あるいは社会経済的な制約条件の変更などによって生ずる境界条件の変化に対応可能な柔軟性を維持しつつ計画を最適化するために，大量の情報の流れを管理することが必要であり，ここに解決すべき技術的課題が存在することを明らかにしました。また，地層処分事業を進めることに対する社会的な受容を醸成していくためには，この管理のプロセスが透明性を有し，関連するすべての機関の信頼できるスタッフによって実施される必要があることを述べました。これによってステークホルダーが主要な意思決定を行うための材料を提供できるようにすることが必要です。

次章においてさらに議論するように，実施主体と規制機関が共通に受け入れることができ，専門家以外の人々にとっても容易にアクセス可能な知識ベースは，上記作業を行ううえで非常に有効であると考えられます。このことを実証するためにも，ここで提案している一般的な知識マネジメントシステムの概念は，速やかに運用段階に移行する必要があります。また，構築されるシステムが，すべての想定される利用者にとって容易にアクセスでき，また，受け入れられるものとなるよう，インターフェースの開発を行う必要があります。本書が採用している新しい書式は，このような新技術の導入によって知識へのアクセスを改良することが可能であることを具体的に示すものです。

将来において必要と考えられる性能評価の方法論やツール，データベースは，既存の技術の高度化など，今後開発を行なわなければならないものもあり，論証モデルや RMS といった方法によって優先度を明確にした，重点的な研究開発計画を策定することが重要です。本章ではこうした研究開発に含まれるべきテーマを明らかにしました。次章では，これらのテーマについて個々に必要となる作業内容と優先順位を，想定されるすべての KMS 利用者からのニーズという観点から検討を行います。

第 4 章　安全性の定量化

4.1　地層処分の安全性に関わる様々な側面

従来の多くの産業分野における安全評価は，過去の事例に基づく要素が大きな割合を占めていますが，高レベル放射性廃棄物や TRU 廃棄物を処分した実例は諸外国においても極めてまれであり，また，地層処分場閉鎖後の長期間にわたる安全性について実経験を積むことは不可能です。このため，処分場の立地，建設，操業，閉鎖，その後の長期における状況を予測的に扱う多様なモデルによって安全評価解析が行われます。こうしたモデルには必ず不確実性が伴い，予測結果を遠い将来に外挿するにしたがい，一般にその不確実性は増大します。このような不確実性の取り扱いは，安全評価の目的に依存します。例えば，安全評価上の保守性を導入することによって行われるモデルの簡略化は，規制上の性能指針への適合性を実証するという目的で，不確実性を取り扱うための合理的な考え方です。一方，複数の処分候補地や処分場設計デザインの比較やシステムの最適化にあたっては，不確実性をできるだけ低減した，より現実的な評価が求められます。評価の考え方やそれに応じたモデルの適用法に関する，このような二つの側面は，共にセーフティケースの要素となり，適切に使い分けられることが重要です。

4.1.1　長期安全評価の役割

これまで，地層処分の安全評価における主要な取り組みは，処分場閉鎖後の長期間を対象に，比較的単純なモデルを用いて計算を行うことでした。これは，所期の性能目標に対して地層処分システムの基本的な実現可能性を示すという観点では，適切な方法であるといえます。しかし，このような取り組みにおいても，例えば十万年，あるいはそれ以上といった，長期間にわたる地層処分システムの環境の変遷の予測は，特に日本のように地質学的な変動が著しい国においては，大きな課題となります。3 章に述べたように，処分地選定において変動が著しい地域を除外することによってこうした問題を最小化する，あるいは，特に高レベル放射性廃棄物の地層処分に関し，地質環境の変化がシステム全体の性能に与える影響が小さくなるよう，頑健（robust）な人工バリアを設計する，といった対策がとられてきました。人工バリアの頑健性の概念は，高レベル放射性廃棄物地層処分のセーフティケースにおいては重要なものです。長期的な変動が処分システムに著しい影響を与えないように，注意深く選定された候補地点の地質環境条件下では，オーバーパックが所期の性能を維持することにより，初期の放射能の 99%以上が減衰するまで，廃棄物を完全に閉じ込めることができます。その後，地下水が廃棄物に接したとしても，ガラス固化体の溶解速度が非常に小さいことや，厚い緩衝材が放射性核種の地下水による移行を遅延させることなどによって，廃棄物に含まれる放射能の大部分が，時間とともに人工バリア内で減衰し消滅していくこととなります（例えば第 2 次取りまとめ概念の安全機能）。

地層処分の概念においては，こうした頑健で強力な人工バリアの存在にもかかわらず，半減期の長い放射性核種のいくつかは最終的に人工バリア外に移行し，いずれは生物圏に至ると想定します。地層処分された廃棄物に含まれる放射性核種の主要な移行媒体は地下水であり，この観点から，候補地の特性は，その場所の地下水の動きと放射性核種の移行特性（例えば第 2 次取りまとめ），処分後のシステム全体の経時的変化などに関するモデルによって表現されます。

安全評価における現象のモデル化にあたって，地層処分の実現可能性を検討するために概略の安全性を評価する場合には，考えうる将来の時間変化を網羅的に代表するいくつかの単純化されたシナリオを想定するという方法があります。しかし，システムの変化をより忠実に表現し現実的な解析とするためには，この方法は不十分であり，処分場の規模や時間的な変化に応じて，システムのすべての主要な要素をモデルに取り入れるようにすることが必要となります。これには，単により高度なモデルを適用するだけでなく，それに応じて拡張されたデータベースやモデル自体を，できるだけ検証（verification）／確証（validation）（IAEA Safety Glossary 2007 Edition）するための事例研究が必要であると考えられます。

現実的な解析では，科学的な知見に基づき最も可能性が高いと判断される重要なシナリオを対象とするとともに，特に地層処分システムの主要な性能に影響を与えるような他のシナリオも考慮することが必要です。このようなシナリオについては，地層処分の実現可能性に関する概略の安全評価とは異なり，過度な保守性の導入を避け，リスク論的な考え方に立って，シナリオで想定される事象が発生する可能性と，そのシナリオによって生ずる処分の影響の双方を勘案することが重要です。これまで，処分の影響が規制上の安全基準に対してはるかに小さいことが明らかな場合には，こうしたシナリオに対し，しばしば過度に保守的なモデルを用いて評価を行う傾向がありました。すべての放射性廃棄物の処分に対して，このようなアプローチで取り扱おうとすると，通常，高レベル放射性廃棄物地層処分の場合ほどに頑健な人工バリアを想定しない他の廃棄物の処分に対しては，システムの安全機能が過小評価され概念の成立性を適切に評価できないということにもなりかねません。このためには，より現実的な評価を行うことができるような評価手法を構築しておくことが重要です。

長期的な事象に関するシナリオの開発にあたっては，評価の時間枠が重要です（NEA LTSC WS proceedings）。これまでのところ，高レベル放射性廃棄物の処分に関しては，安全評価を打ち切る（カットオフ）時期については，「線量が最大となる時期まで評価を行う」というのが基本的な考え方として示されています（原子力安全委員会高レベル放射性廃棄物の処分に係わる安全規制の基本的考え方-第 1 次報告）。諸外国の例では，カットオフが短かすぎると受け入れられず，長すぎると，合理的とは考えられない時間スケールに対して無理な評価を行うことになりかねないといった問題が浮き彫りとなっています。この問題の本質に関わる一側面は，長期的な安全性に関する倫理的，道徳的な課題（NEA LTSC WS proceedings など）にあると

考えられており，これらは過去における規制の例では，多くの場合，考慮されていませんでした。

安全評価の時間枠に関わる事項として，日本において一般的な地質学的プロセスである隆起・侵食の取り扱いは，典型的な例であるといえます。将来における隆起量が小さいと考えられる処分候補地を選定し，開始の時点においては適切な深度に処分したとしても，極めて長い時間のうちには，隆起・侵食によって廃棄物が地表に近接することが計算上ありえます（第 2 次取りまとめ）。現在進められている，低レベル廃棄物の余裕深度処分に関する安全審査の基本的考え方に関する議論（原子力安全委員会「低レベル放射性廃棄物埋設に関する安全規制の基本的考え方（中間報告）」）では，こうした隆起・侵食を考慮したシナリオに対して，安全評価の時間枠としては，線量の最大値が現れるまでという考え方がとられています。

地層処分の場合，余裕深度処分に比して深度が大きく，長期間のうちに，仮に隆起・侵食によって処分場が地表に近接するとしても，その時点においては放射性崩壊により放射能が減少して高レベル放射性廃棄物（あるいは TRU 廃棄物）の危険性は低下していると考えられ，これに類似した天然の現象として，ウラン鉱床が侵食作用を受けることを考えることができます。この場合には，地層処分開始後の長期における隆起・侵食により地表に接近した処分場による環境への影響は，現在ウラン鉱床の侵食といった自然過程が生じているような地域で観測される影響と同レベルものであると考えることができます。セーフティケースにおいては，安全評価の解析に基づく線量計算の結果のみならず，このような天然の類似現象を安全性の傍証として用いることも，有効と考えられています（NEA Safety Case Brochure）。

また，モデル解析によって算出される放射性核種の移行量を，人間（場合によっては，人間以外の生物に対しても）への被ばく線量に変換するプロセスについても，考えておく必要があります。人間の活動や生活の様式は，特に遠い将来においては，性能評価の解析に用いられる他の処分システム構成要素と比較して，一般に予測が非常に難しいとされています。このため，通常は候補サイトにおける現在の条件を様式化（IAEA EMRAS など）し，これに，考えられる将来の気候変化が地圏－生物圏インターフェース（GBI：Geosphere - Biosphere Interface）や食物連鎖へ及ぼす影響を考慮したいくつかの変動ケースを加えた，生物圏モデル（IAEA EMRAS，第 2 次取りまとめなど）が用いられます。最近の百年における人間の生活様式や生物活動の変化から，何万年も先の将来を想定することは困難です。このことが，地層処分システムの長期の安全評価において，数学的なモデルを用いた遠い将来に対する線量計算結果だけでなく，放射性物質の地下水中濃度や移行率など，他の性能指標を考慮する理由の一つとなっています。

議論すべき特別な種類のシナリオとして，地層処分場への人間侵入に関するものがあります。これは，基本的には規制の中でその取扱いについて指針が示されるべきものであるとされています。現行の地層処分システムでは，進歩し続ける科学技術をもってしても，将来の人間の侵

入を完全に防ぐような設計は困難であると考えられています。このため，安全規制上は，偶然に生ずる種々の行為による処分場機能の低下や損傷（例えば，ボーリングや採鉱，地熱開発などに起因）が生じないようできるだけ対策を講じておくことが重要であるとされており，いくつかの典型的な状況を想定したシナリオに対して計算を行い，これに基づいて安全性を判断するといった方法が採られます。（米国 YMP 基準：40CFR197，10CFR63，原子力安全委員会「余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方（案）」など）。また，特に廃棄物の放射能レベルが高い期間を対象として，このような活動によるリスクを最小化するための対策が考えられています（標識の設置，記録の保存など）。

以上に述べたような点について，性能目標に対する意思決定や，相容れない要件間のトレードオフを考える場合には，技術的な検討に加えて倫理的課題を考察する必要があり，このような作業においては，様々なステークホルダーの意見を念頭に置く必要があります。

4.1.2 建設・操業・閉鎖

すでに述べたように，地下深部における大規模な施設の建設や廃棄物を処分するための操業は危険を伴う作業であり，原子力施設の建設や操業と比較しても，作業員に重大な危害を及ぼすような事故災害が発生する可能性が小さいとはいえません。特に処分場の建設期間においては，建設の速さと費用と，安全性を確保するための対策（先進的な掘削方法の適用，ロックボルトやグラウト，支保や覆工の施工など）との間でいかにバランスをとるかという問題が生じます。また，処分坑道の建設や，廃棄物を運搬しそこに定置するための手順の策定にあたっては，作業員の安全のためにとられる対策が閉鎖後のシステムの長期安全性には悪影響を与える可能性があり，これらの間でのバランスに配慮することも重要となります。

多くのステークホルダーにとって，原子力施設である処分場の建設・操業期間中の様々な事故に関する主要な関心事は，こうした事故がいずれは放射性物質の放出につながるのではないかという懸念であると考えられます。放射性廃棄物が，注意深い設計により適切にパッケージ化されていれば，通常の操業時にこのような懸念が現実化する確率を極めて低いレベルにすることが可能です。ただ，こうした安全解析を行うための方法論は存在するものの，日本で採用される設計や条件に対応したデータベースを整備することが必要であり，これを用いた安全解析の結果はステークホルダーに共有されることが重要です。例えば，浅地中処分の指針である「放射性廃棄物埋設施設の安全審査の基本的考え方」では，安全対策として地震に対する設計上の考慮や火災・爆発，電源喪失に対する考慮について言及するとともに，技術的にみて想定される異常事象が発生するとした場合においても，過度の放射線被ばくをもたらさないことを要求していますので，こうした内容を参考に地層処分施設の建設・操業時の安全を確保するようにすることが重要であると考えられます。一方，処分場閉鎖後の長期安全性に関しては，「十分な安全性」を達成するための手段とは何か，また，規制への適合性をいかに実証するのかということについて明らかにすることが基本的な課題であるといえます。

高レベル放射性廃棄物の処分に関しては，過去十年以上にわたり，日本の地層処分概念において人工バリアの重要な要素であると考えられている緩衝材の性能を保証するうえで，処分場の建設・操業段階が与える影響に対して多くの関心が払われてきました（第 2 次取りまとめ）。緩衝材の主要な成分であるベントナイトは，高 pH 領域で変質する可能性があり，初期の設計検討では，廃棄物を定置する場所の近傍では，セメントやコンクリートを使用しない，あるいは使用量を制限するといった方針が採られました。しかし，日本における地下の建設作業では，力学的安定性の確保と地下水の流入を抑制するため，セメントやコンクリートがほぼ必然的に使用されているのが実状です。また，廃棄物の固化やパッケージ化のためにセメントが使用される場合もあります（地層処分相当の TRU 廃棄物）。セメントに代わる材料を用いる可能性もありますが，費用がかさむうえ，使用実績が乏しいことに起因する様々な難点があります。一つの解決策として低アルカリ性セメントを用いる可能性もありますが（工学技術カーネル），こうした材料はなお開発段階にあり，操業時及び長期に要求される性能を提供できるかどうかについて現在，日本においても試験研究が行われています。いずれにせよ，セメント材料の使用については，地下水の水質等も考慮しつつ，対象とする処分場概念に対して注意深く検討し，最適な解決策を探すことが重要です。

NUMO の構造化アプローチや計画中の RMS の適用（NUMO-TR-04-03, NUMO-TR-07-01, NUMO-TR-07-02）によって，処分場の設計に関する要件や検討項目が多面的に分析されつつあります。こうした検討を行っていくうえで，異なる選択肢の評価や選好順序を決定するには，ステークホルダーの参加も重要と考えられます。モニタリングや回収可能性の取り扱いはその好例といえます。

地層処分場の建設・操業事業の開始にともない，それが仕様通りに行われていることを確認したり，周辺環境への影響を評価することを目的として，種々のモニタリングが実施されます。廃棄物と主要な人工バリアの定置の際には，モニタリングは品質保証プログラムの重要な要素となるものであり，これは処分後のセーフティケースの土台をなすものです。また，廃棄物が品質保証プログラム通りに定置されないこともありうるとの保守的な想定から，定置の手順は逆戻り可能で，品質要求基準を満たしていないことが判明した場合には，それらを，回収も含め再定置できることも示される必要があります。別の課題としては，定置後のモニタリングと，これに対応して，場合によっては処分後に廃棄物を回収可能とする施設の設計を挙げることができます。

浅地中処分を行う施設では，閉鎖後の制度的な管理が安全確保に重要な役割を果たす場合もありますが，処分の概念は，こうした閉鎖後の制度的な管理がなくても，長期間にわたって安全性が確保できるようにすることを基本としています（IAEA WS-R-4，原子力安全委員会「余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価の考え方（案）」など）。仮にモニタリングを行うとしても，適切に設計された地層処分施設に擾乱を与えることなく，想定される時間ス

ケール(例えば数百年)にわたって安全性に関わるすべての要素について計測を続けることは，現在の技術では困難であると考えられます。一方で，廃棄物の定置後，社会的な要求に応じてモニタリングを実施することも考えられます。この場合には，いくつかの比較的容易に計測可能なパラメータ（例えば処分場下流の地下水水質）に絞ってモニタリングを行う，あるいは，安全性と直接関係するようなパラメータ（例えばオーバーパック表面の腐食）を測定する，といった選択肢が生ずることになりますが，後者では，操業のプロセスをより難しいものとし，人工バリアに擾乱を与え，長期安全性を損なう可能性があります。

これまでに各国で提案されている処分概念に関して言えば，難しさの程度や費用，作業者へのリスクは異なるものの,処分後の廃棄物の回収は原理的には可能です(NEA Reversibility)。しかし，回収のプロセスを容易にするための付加的な対策を講ずると，必然的に定置の手順は複雑となり，したがって操業時及び閉鎖後安全性を低下させる可能性が大きくなると考えられます。起こりそうもない低確率事象に対して，どの程度まで回収可能性を実際に対策として維持すべきかどうかは，検討を必要とする問題です。

モニタリングや長期間の回収可能性の維持に関する意思決定は，処分場閉鎖のプロセスや閉鎖後の制度的管理に関わる課題にも関係しています。技術的な観点からいえば，地質環境に対する擾乱を最小限に止め，作業者の安全性を確保しなければならない地下施設の維持期間を短縮するために，処分場はできる限り速やかに閉鎖を完了すべきと考えられます。閉鎖後の制度的管理については，記録の保存や処分場に擾乱を与えるような活動（例えば，深層ボーリングなど）の制限に留めることが可能ですが，こうした管理項目は，地域住民の安心のために求められる対策との間でバランスが取られることが必要です。

4.1.3　安全評価：原子力機構 知識ベース(JAEA KB)で利用可能な資源

JAEA KB には，日本の計画においてこれまでに実施されてきた高レベル放射性廃棄物及び TRU 廃棄物の地層処分の成立性に関する一般的（ジェネリック）な安全評価作業の成果，全国を対象とした地質環境研究と地下研究施設における詳細な情報，その他国内外の主要な研究開発成果を順次関連づけていく予定です。このような情報の大部分は，これまでに報告書の形で取りまとめられています（第 1 次取りまとめ，第 2 次取りまとめ，平成 17 年取りまとめ，TRU 廃棄物処分概念検討書及び TRU-2 報告書）が，JAEA KB では，こうした研究開発の成果をより容易かつ迅速にアクセス可能な電子媒体によって提供することを目指しています。これによって，データベースの更新や拡張を，リアルタイムで継続的に行うことができ，履歴管理やデータベースの保存の自動化，品質チェックの部分的自動化が可能となると考えられます（KMS カーネル）。

こうした体系的な知識基盤を整備することは，国の方針（原子力政策大綱）として示されていますが，過去における統合性能評価に関する豊富な経験を有する原子力機構が，このような

知的資源を開発するのは合理的であると考えられます（高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画）。知識ベースは，主に地層処分事業の実施と規制の双方に役立つ資源として，また他のステークホルダーには，有効な総合的情報源として整備していく計画です。知識ベースに含まれる内容は，次のようなものです（KMS カーネル）。

- 地層処分概念の開発と評価：種々の地質環境条件に対応した人工バリアのデザイン，レイアウトモデル，必要なインフラ，建設・操業・閉鎖手順と使用される材料の特性に関するデータベース
- シナリオ解析手法とデータベース：シナリオ開発の手順，FEP（処分場を特徴づける個々の特質（Features），事象（Events）及びプロセス（Processes）を総称して，頭文字をとり FEP と呼びます）リストと内容の記述，種々のシナリオに関する一般的例示
- 影響評価解析手法とデータベース：過去のフィージビリティ研究に用いられた多種多様なモデル，計算コード及び関連するデータベースと，最適な処分概念の検討のためにこれらを更新，拡張したもの
- 幅広い計算結果とその解釈：過去のプロジェクトにおいて実施された一般的（ジェネリック）で，比較的簡単な多数の計算結果の報告書（高度化されたモデルのベンチマークや，より複雑なシステムに関する説明を支援するための基礎的情報として利用可能）
- 不確実性／感度解析手法：確率論的コードやその他不確実性の要因と伝播を評価するための手法（例えば，定性的方法，ファジー理論など）。
- 品質保証手順とモデルやデータの検証・確証のためのテスト用サンプル：誤差と不確実性の検査手順とレビュー手順，検証に利用する数値計算結果や解析解，実験室，フィールドおよびアナログのデータを用いた確証のためのテスト用サンプル

以下，これらの知識ベース要素について述べます。

4.2 処分場概念の開発と評価

NUMO は，幅広い視点から処分場概念（Repository Concept）を定義（NUMO-TR-04-03, 3.3.3 節）しており，これはセーフティケースの技術的基礎をなすものです。処分場概念は，対象となる候補地の特性による制約を受けます。候補地の特性は，処分事業の計画が進み調査が進展するにつれて，より明確に把握されます。こうした処分候補地の特性の把握に関する努力は，許認可までの期間に限らず，許認可後の建設・操業時においても継続されます（NUMO-TR-04-03，原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会報告書など）。したがって，処分場概念の開発は継続的なプロセスであり，サイト特性調査，設計及び安全評価の各作業が，規制指針やステークホルダーの意見を考慮しつつ繰り返し実施されます。

4.2.1 地質環境条件

処分候補地の地質環境条件は、地域に固有のものです。候補地の選定に先立ち，処分場概念開発のための方法論などの開発に必要な材料を提供するため，JAEA KB には全国レベルの文

献調査に基づく一般的な日本の地質データや応募地域の特性をモデル化するための調査技術や評価の方法論が準備されています。後者に関しては，原子力機構や他の機関によって，地表からの調査や地下研究施設（過去においては既存の鉱山を利用したいわゆる「第一世代」の施設，現在は「第二世代」と呼ばれる専用の地下研究施設（例えば，瑞浪超深地層研究所計画，幌延深地層研究計画などが建設されています））における研究開発が進められてきました。

このようにして取得されたデータ以外にも，日本国内や諸外国における地質環境調査に関わる経験が知識ベースに取り込まれています。これらは，候補地の選定に際して，概要調査や精密調査の計画を立案する際に役に立つものです。これまでのところ，こうした経験は主に文書の形で取りまとめられていますが，これらを電子化することによって，情報への迅速なアクセスが容易となります。現在進めている知識マネジメントシステムの開発では，これに止まらず，作業者自身の記憶として蓄積され文書化されることのなかった経験知（このような知識は暗黙知と呼ばれます）を引き出すことをも目的としており，「ISIS）」プロジェクト（深地層の科学的研究カーネル，KMS カーネル）を通じて，最新の知識工学的技術の適用性の検討を行っています。多様な地質環境情報を統合（geosynthesis）するという複雑な作業に用いられる暗黙知を，黒板システムやエキスパートシステムを介して利用できるようにすることにより，地質環境調査の作業プロセスの構築と実行を支援することが可能となっています。こうした支援には三つの異なるモードを考えることができます。

- 特定の候補地に対する調査の計画や，特に，この種の作業では頻繁に生ずる予期せぬ事態への対応を最適化するために，過去の経験を統合すること
- 地質環境調査から得られる大量の情報をリアルタイムで管理する作業を支援すること；データの傾向の分析や予想との乖離を明確にするための統計的検定，対応案の提示を自動的に行うこと
- 地質環境モデル（SDM：Site Descriptive Model）とこれに基づく設計や性能評価に必要なモデルとデータベースの連続的な更新を行うため，特に，予期せぬ事態が生じた場合には迅速にこれを行うために，調査によって得られたアウトプット情報を統合すること

地質環境情報の統合では，調査の対象となる処分候補地のデータだけではなく，日本や諸外国において，同様な地質環境条件を有する他の地域の情報を補完的に利用できるようにしておくことが，有効であると考えられます。これは，特定の処分候補地に関する情報が限られ，その場所での調査活動にも制限があるような，処分地選定の初期段階には特に重要と考えられます。また，処分候補地の長期的な変遷に関わる調査や，発生の可能性が低いと考えられる事象やプロセスの発生とそれらの影響を評価する場合には，処分地選定の段階にかかわらず，常に必要なことであるといえます。

4.2.2　高レベル放射性廃棄物処分場の設計

第 2 次取りまとめに示された基本的な処分場の設計は，日本における高レベル放射性廃棄物処分の実現可能性を示すという目的に対しては，十分適切なものであることはすでに述べたとおりです（1.1.4 節，第 2 次取りまとめ，NUMO-TR-04-01, NUMO-TR-04-03, 3.3.3 節）。

ガラス固化体は一般に地下水に溶解しにくく，基本的に均一に分布して取り込まれた放射性核種が，一定の割合で少しずつ放出されるという安全上有利な特性を有しています。特に，ガラス固化体が厚い鋼製オーバーパック内に初期の発熱の大きい期間完全に閉じ込められ，引き続き酸化還元条件が緩衝されることによって接触した地下水が確実に還元性に維持されるような場合には，放射性核種の放出は，さらに溶解度による制限を受けます。オーバーパックを取り巻くベントナイトの緩衝材は，溶解した放射性核種の移動を拡散のみに制限するとともに，地下水中のコロイドを濾過し，力学的及び化学的な緩衝機能と放射性核種を収着する特性をもっています（第 2 次取りまとめ，性能評価研究カーネル）。各国の処分プログラムにも採用されている，このような多重バリアシステムの考え方は，非常に強力かつ効果的な放射性核種の閉じ込め機能を有しています。

第 2 次取りまとめの地層処分概念は，最終処分計画（特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画）で示されているような廃棄体埋設定置の作業速度が求められる処分場に対しては，必ずしも効率的なものではありません。地下の試験場における経験（NEA EBS Tokyo Workshop）に基づけば，こうした概念は実験規模では実現可能ではあるものの，実際には第 2 次取りまとめ安全評価では考慮されていない多くの人工バリア要素を必要とし，操業に関する頑健性やコスト，あるいは環境影響の観点から最適化されたものとはなっていない可能性が考えられます。しかし，ガラス固化体／鋼製オーバーパック／ベントナイト緩衝材という基本的なバリアを共有する多数の代替概念が存在し，これらによってより適切な処分概念を検討することができると考えられます（NUMO-TR-04-01，NUMO-TR-04-03 など）。この場合にも同様に，特定の処分候補地に対して処分場の設計を最適化するうえで，様々な対立する要件間のトレードオフが必要となる可能性があることを理解しておく必要があります。処分場設計の最適化は，こうしたトレードオフを考慮して段階的に進められることになります。

JAEA KB には，NUMO によって開発された「処分場概念カタログ」（NUMO-TR-04-03）を拡張した「処分概念データベース」（METI 公募事業「先進処分概念」H19 報告書,METI 公募事業「先進処分概念」H20 報告書,工学技術カーネル）が含まれる計画です。NUMO の場合，このような幅広いオプションを考慮することは，公募によって候補地が明らかになる前の作業の対象として拡張された第 2 次取りまとめ処分概念のバリエーションを検討するというだけでなく，特定の地質環境条件に対し，より革新的な材料や操業方法（例えば，不活性なオーバーパック被覆材，高アルカリ性や高塩濃度条件に鈍感な緩衝材，低アルカリコンクリートによる支保工など）の使用までも見据えておくという観点からも重要です。このような情報は，

NUMO が処分システムの最適化を検討する際に，また，選定された参照用設計（レファレンスデザイン）に対して，より好ましい代替案があるかどうかを規制機関やその他のステークホルダーと議論する際にも重要となります。

4.2.3 TRU 廃棄物処分第２次報告書における処分場の設計

TRU-2 報告書では，異なる TRU 廃棄物グループに対応してそれぞれ，人工バリアの基本デザインを想定し，処分の実施可能性が示されていますが，技術的な信頼性をさらに高めるために，個々のバリアの構成要素あるいはこれらの組み合わせに対する要件をより明確に定義することや，主要な廃棄物の発生や廃棄物の調整，パッケージ化のプロセス（例えば，移動しやすい長寿命核種である I-129 の濃度が高い廃棄物代替固化技術など）について，研究開発が進められているところです（TRU 廃棄物カーネル）。こうした検討を踏まえ，種々の処分概念（廃棄物，パッケージング，廃棄物のグループ化，人工バリア構成要素，処分場の設計など）について，包括的かつ現実的な処分場閉鎖後の性能評価と，建設・操業・閉鎖に関する安全性及び実施可能性の評価とに基づく厳密な比較検討を可能とする技術的基盤を，整備していくことが重要です。

現在進められている TRU 廃棄物処分場の高度化に関する研究開発の成果は，JAEA 知識ベースに取り込まれる予定です。TRU 廃棄物処分場に関する設計を支援する処分概念カタログの作成や，特定の処分候補地に対して設計オプションの比較を行なうためのツールやデータベースを含む，最適化のための統合的なアプローチの開発にあたっては，定型化された知識マネジメントの手続きに則って対応することが有効と考えられます。この手続きには，討論モデル（argumentation model ）（JAEA KMS, KMS カーネル）を構築することによって作業を構造化することや，エキスパートシステムによる技術的な問題への対応，より幅広いステークホルダーを考慮する場合には，例えば多属性効用解析（MAA: multi-attribute analysis）といった最適化手法を用いた意思決定を行う，といったことが考えられます。これを可能とするには，処分後の安全性だけではなく，操業面，環境影響分析，コスト評価などを含めた解析を，高レベル放射性廃棄物の処分と同様に進めていくことが重要と考えられます（TRU 廃棄物カーネル）。

4.3 シナリオ解析

従来の安全評価で最初に行われる作業はシナリオの開発と解析であり，これは，過去三十年間にわたり，ガラス固化体及び使用済燃料の地層処分の長期の安全性に関する多くの研究の焦点とされてきたものです。しかし，セーフティケースを完結させるためには，処分場操業時の安全性を評価するための技術的基礎を提供し，処分事業の段階が長期の性能に及ぼす影響をより厳密に把握する必要があることから，シナリオ解析作業を，地質環境調査に始まる処分場の開発に関わる幅広い活動を対象としたものに拡張して行うことが必要となります。

4.3.1　一般的アプローチ

シナリオ解析は，処分システムの安全性に関わる構成要素をもれなくとらえると同時に，現実的な作業量で安全基準への適合性を示すシミュレーション計算が可能となるようなレベルで，処分システムの将来の変遷を記述することです。また，こうした記述においては，あるシナリオから派生したシナリオ群，あるいはそのシナリオとは別種のシナリオを設定することによって，将来の不確実性について考慮しておくことも必要です。

初期の安全評価では，処分システムを要素に分解し，それぞれの要素の特徴や振る舞いを組み合わせてシステム全体の将来像を描くという，要素還元主義に基づいたボトムアップなアプローチが主流でした。このアプローチでは，処分場を特徴づける個々の特質（Features），事象（Events）及びプロセス（Processes）（これらを総称して，頭文字をとり FEP と呼びます）を明らかにし，これらを適切に組み合わせ，関係づけを行なうことによってシナリオが導出されます。こうした組み合わせは膨大なものとなるため，シナリオの数を取り扱い可能な範囲とするために，この作業過程では多くの場面で専門家の判断による取捨選択が行われることになります。地層処分システムに関する理解が進み，それに応じて FEP の数が増えると，この作業は次第に困難となるため，最近では，システムの安全機能に着目したトップダウンアプローチが用いられ，専門家の判断によって設計された安全機能の観点からシステムを理解し，シナリオの要素は，より処理が容易なスーパーFEP（Nagra 02-05）のような形で取り扱われる傾向にあります。

シナリオ開発のプロセスには，討論モデル（KMS カーネル）など，知識工学的な方法がうまく適合します。知識工学的な方法は，シナリオ開発のための作業を支援し，また，透明性を高めることにより，規制者のレビューや他のステークホルダーによる理解を容易なものとするうえで有効なものとなります。

4.3.2　シナリオと解析ケースの導出

セーフティケースで考慮するシナリオの範囲とその詳細度は，個々の処分候補地に関する知識の増加や規制上の要件がより明確になることに伴い，変化していくと考えられます。JAEA 知識ベースは，以下の内容を順次取り込み，これを提供することを通じてシナリオ解析の作業を支援することを目指しています。

- 高レベル放射性廃棄物及び TRU 廃棄物の地層処分に関し，その技術的実現可能性を検討するため，過去に実施された一般的な研究開発におけるシナリオ解析の経緯と結果の記録
- 日本のプロジェクト，国際機関及び各国の処分計画で実施された安全評価から得られた全体版及び個別（地質環境あるいは廃棄物に特化）版 FEP リスト
- 日本における廃棄物とその状態に関する FEP の記述と特性

- FEP の相互関係に関する過去の検討で用いられたツール（第 2 次取りまとめ，平成 17 年取りまとめ，性能評価研究カーネル）

現在，このような材料は処分場閉鎖後の評価に限られていますが，閉鎖前の段階を含むように拡張することを考えています。詳細な FEP の記述は，第 2 次取りまとめの処分概念に対して最も充実したものとなっていますが，TRU 廃棄物処分概念（TRU 廃棄物カーネル）や他の処分概念に関するリストが十分なものであり，関連する記述も適切なものであることを確認しつつ，拡張を計画しているところです。

これまでに，シナリオの一部に対して討論モデルを適用することにより，知識工学的な方法をシナリオ開発に適用するための方法論が一部例証されているものの，シナリオ開発全体への包括的な適用には至っていません（KMS カーネル，JAEA KMS 討論モデルエディタ）。こうした知識工学的な方法を適用するかどうかにかかわらず，知識ベースを用いて，シナリオ開発を進めるうえで本質的なものとなる，地層処分場の構成要素とそれらの相互作用及び長期的変遷に関する基本的な理解を促進することが可能です。いずれにせよ，シナリオ解析に関しては，処分システムの理解とそれを統合するための方法論について引き続き開発を進めるとともに，NUMO や規制機関との間で開発の優先度について議論を行っておく必要のある領域であるといえます。特に，安全評価におけるシナリオの十分性の定義に関する指針と，セーフティケースの中で，関係する要件が規制に適合していることを実証するための指針が示されることが重要となります。余裕深度処分に対しては，安全評価上考慮すべきシナリオについて審議が進められており（原子力安全委員会「余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方（案）」），地層処分にも参考になるものと考えられます。

第 5 章　知識ベースの概要

JAEA における知識マネジメントプロジェクトは，平成 17 年取りまとめに示した提案に基づいて開始されました。知識マネジメントのツールや中心となる知識ベースは，ユーザーインターフェースや検索エンジンとともに，なお開発の途上にあります。すでに構成要素のいくつかについては個々にテストを行っています（JAEA KMS ワークショップ，部門意見交換会）が，すべてのシステム機能が利用可能となるまでには，なお多くの研究開発が必要です。このプロジェクトは極めて先導的なものですが，知識工学分野の先端的技術を適用し，試行錯誤を重ねることによって，初期における自律的プロセスの制限を克服し，計画された機能をもった知識マネジメントシステムに成長する可能性は大きいと考えられます。

5.1　JAEA_KMS/KB のまとめ

5.1.1　セーフティケースの作成支援の拡大の必要性

地層処分のセーフティケースを構成する多量の情報を取り扱うためにパラダイムシフトが必要であるという議論は，日本だけでなく国際的なテクニカルコミュニティにおいてもますます認識されつつあります（部門意見交換会，JAEA KMS ワークショップ）。また，地層処分計画が，候補地を特定しない，一般的（ジェネリック）な研究の段階から，処分地選定や処分場の建設といった事業の段階に移行するのに伴い，セーフティケースには，処分場閉鎖後の安全性に関するより現実的な評価や，閉鎖後安全性と操業時の安全性や実現性，費用，パブリックアクセプタンスに影響を及ぼす因子との関係に関する議論が必要となることについても認められているところです。知識マネジメントによって，必要とされる材料と利用可能な材料とのギャップを明らかにするとともに，こうしたギャップを新たな知識生産によって埋め，地層処分事業計画の段階目標において確実に利用可能となるよう，優先順位の高い知識の獲得を行うことが可能となります。知識マネジメントを利用しつつ，処分計画における今後の段階目標に間に合わせるため，一般的（ジェネリック）な段階と比較して，より的確に要件に応えるための研究開発をいかに調整するかが，重要な課題となります。

5.1.2　KM による支援の拡張の必要性

一連のツールのうちのいくつかは，基本的な知識マネジメントの範疇での利用にとどまらないよう，拡張する必要があります。セーフティケースの構築とレビューのためには処分システムの十分な理解が必要であることから，最も基本的な側面として考慮しなければならないものの一つは，人材養成のための素材とアプローチであるといえます。

日本には，地層処分事業計画に関連する特定の技術分野のスペシャリストは多数存在するものの，地層処分全体を俯瞰する視野をもったジェネラリストの数は限られており，その大部分

は近々引退を迎える世代に属しています。したがって，若い世代に知識を伝承することが緊急の課題となっています。このためには，従来の方法（例えば，複雑なプロジェクトへの参加，指導者による支援など）とともに，先進的な知識工学的方法（例えば，エキスパートシステムなど）を利用することが有効であると考えられます。

知識マネジメントシステムに開発のために，現在進めている先駆的な研究には次のようなものが含まれています（KMS カーネル）。

- 洗練された検索エンジン／自律的な知識生成機能の開発
- 知的データベースマネジメント機能（例えば，レビューや統合のためのエキスパートシステムなど）の開発
- 先進的コミュニケーションインターフェースの開発

こうした研究においては，可能な限り，他の分野への適用を目的として開発された先端的な IT 手法の利用を行っていますが，上述のような機能を実現して提供するためにはさらに多くの努力が必要であると考えられます。

コンピュータ技術によって多くのことが実施可能となっており，より現実感の高いものを継続して目指していくことが重要といえます。あわせて，実際の地下環境に関する情報を納得のいくように伝達するため，実規模の実証プロジェクトも計画されています。日本及び世界各国における経験（NEA EBS Project 4th WK, NEA INTESC; etc）に基づけば，これらのプロジェクトが，関心のあるグループが簡単に訪問できるような地下の施設において実施されれば，見る者の直感に訴える多大な効果を生むことが知られています。現在計画中の上記実証プロジェクトでは，メッセージをできるだけ明確に伝える方法等について検討が進められています。

5.1.3 利用可能な付加的リソース

本報告書は，知識コミュニケーションのための現代的アプローチを体現するような電子的フォーマットによって作成されています。利用者は，それぞれが好むインターフェースを選択して関心のある特定の情報に迅速に到達し，将来的にはニーズに応じた出力をリアルタイムでオン・デマンドに得ることができるように計画しています。また，従来の方法では行うことができなかったレベル（例えば，実際にコードを用いて計算を実施することなど）で，体験的に知識に関わることが可能となっています（JAEA KMS）。

5.1.4　セーフティケースを提示するための種々の方法

本書の主要な目的は，地層処分のセーフティケースの作成，レビューあるいは説明のために利用可能な資源を提示することです。本書は要約版の形式によってその概要を述べており，階層的に組み込まれたリンクを介して必要なレベルの技術的詳細が提供されるようになっています（CoolRep）。他の表現方法として，討論モデルによるセーフティケースの構築例が示されています（JAEA KMS）。

5.1.5　対話の促進

機能の実証を主たる目的としたものですが，ユーザーとの対話を開始するため，ブログと討論フォーラムという二つの方法を事例的に提供しています（CoolRep）。今後は，例えば，会議や実験，シンクタンクなど，ユーザーが質問やコメントを行うことによって参加機会を得るようなイベントのライヴストリーミング，といった方法の導入が考えられます。

5.2　背景情報

CoolRep を，図解やビデオ，アニメーションを含む他の文書へのアクセスを提供するという目的で使用することに関しても例示しています（CoolRep）。こうした文書に，例えば目的に沿った講義用教材のパッケージを加えることによって，多くの利用者グループに対して利用価値を高めることが可能であると考えています。

第 6 章　結論と今後の方向性

極めて長期にわたる地層処分の安全性の説明は，今日，セーフティケースと呼ばれる概念に基づいて行われるということが広く認識されつつあります。セーフティケースは，段階的に進められる地層処分プロジェクトにおいて繰り返し作成され，ある段階から次の段階に進むための意思決定を行う際の主たる材料となるものです。この意味で，地層処分に関わるステークホルダー間の合意形成のためのプラットフォームということができます。

セーフティケースがステークホルダーに理解され，受け入れられるものとなるには，その論証の隅々にわたり，意思決定の判断に必要なレベルで信頼に足るものであることが必要です。このためには，確かな科学技術的知識が適切に用いられていなければなりません。地層処分の研究開発は，こうした知識基盤を適切に整え，これによって地層処分の安全性に対する信頼性を高めることを目的としている，ということができます。

原子力機構では，国が示した中期目標や関連する計画・方針に従って定めた原子力機構の中期計画（平成 17 年 10 月 1 日～平成 22 年 3 月 31 日）に基づいて，地層処分技術に関する研究開発を進め，その成果を包括的な報告書と地層処分の安全確保の論拠を支える知識ベースとして取りまとめるにあたり，CoolRep と名付けた新たなアプローチと方法論を用いることとしました。

セーフティケースを展開する文書は，多くの学問分野の多量の知識が関わる複雑な構造となります。また，処分事業や研究開発が進むにつれ，データや情報は多様化・大量化し，これらを駆使する安全評価の情報統合プロセスや方法論も加速度的に高度で複雑なものとなっています。原子力機構において，新たに先進的な知識マネジメントシステム（JAEA KMS）を開発していることの一つのねらいは，こうした地層処分における情報の爆発的な増加に対応するためです。

CoolRep は，セーフティケースに資する知識基盤を提供することを目的としてウェブサイト上に展開する報告書形式で，JAEA KMS とリンクさせることにより地層処分に関連する情報を積極的に発信するとともに，ステークホルダーの要求に応じて知識や情報を提供することを可能とするようにしています。また，CoolRep は，知識ベースを含む知識マネジメントシステムの進展に応じ，時間とともに進化する「生きた文書」です。本書は，現中期計画期間までの研究開発の具体的成果を CoolRep 形式で取りまとめた CoolRepH22 として，1.1.4 節に述べたようなメッセージを発信するものです。

CoolRep の方法論はなお開発途上にありますが，最新の情報技術や知識工学の技術を利用することにより実現可能であるとの結論に至っています。JAEA KMS と合わせた本書の公開によって幅広い利用を開始し，利用者の要望を反映しながら，引き続き方法論やツールの改良・

高度化を図るとともに，地層処分研究開発による継続的な知識の創出，拡充，更新に貢献していく計画です。

付録Ⅱ　深地層の科学的研究カーネル

1. はじめに

深地層の科学的研究では，地下の岩盤や地下水の性質を調べ，火山活動などの天然現象の特徴や影響を評価することを通じて，地層処分に適した場所が日本にも広く存在しているという見通しを示してきました。現在は，地層処分の場となる深地層の環境を調査するための技術をさらに強化し，信頼性を高めていくための研究開発を進めています。

1.1　深地層の科学的研究とは

深地層の科学的研究は，地下深部の地質環境（岩盤と地下水）を，地層処分という観点から調べ解明していく研究です。日本で地層処分の研究開発が開始されてまもなく，「地層処分を進めていくのであれば，まず地層処分の場となる深地層の環境をしっかりと理解することが先決である」という考え方から生まれた研究領域で，すでに 20 年以上の歴史があります（原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会，1989）。地層処分の長期的な安全性を確保するうえで，地質環境には，処分場として選んだ場所が長期にわたって十分に安定であること（地質環境の長期安定性）と，その場所の岩盤とそこに含まれる地下水の物理的・化学的性質（地質環境の特性)が, 人工バリアを設置する環境および天然バリアとして適切であることが求められます。そのため，深地層の科学的研究は大きく，地質環境の長期安定性に関する研究と地質環境の特性に関する研究からなります。地質環境の長期安定性に関する研究では，地下深部の地質環境に影響を及ぼす可能性のある天然現象に注目して，それらの特徴や影響の大きさなどを把握することが重要であり，処分地を選定する際には，火山活動や隆起・侵食といった天然現象によって地層処分システムの性能が損なわれることのないような場所を選ぶことが前提となります。地質環境の特性に関する研究においては，人工バリアを設置する場の条件や天然バリアとしての機能を左右する地下水の動きや水質，岩盤の特性などを把握することが重要であり，地層処分を実施する際には，そのような地質環境の条件に応じて人工バリアや処分施設を設計することにより，人工バリアと天然バリアを組み合せた多重バリアとしての最適化が図られます。

深地層の科学的研究の前半に当たる平成 12 年頃までは，日本で安全な地層処分が実現できるかどうかを確かめることを目標に，地球科学や土木工学などの分野に蓄積されている文献情報の分析や鉱山の地下坑道を利用した調査などを行いました。その結果をもとに議論を重ね，外部専門家の意見も聴きながら深地層の解明に努めました。10 年以上に及ぶ地道な研究開発の結果，火山や活断層などによって地層処分システムが重大な影響を被る可能性のある地域は限定されており，そのような変動の激しい場所を避けて安定な地質環境を選定できる見通しが立ちました。また，一般的に深地層の環境は酸素を含まない強い還元状態にあり，地下水がほとんど動かないため，地層処分システムにとって好ましい条件にあることもわかりました。日本にも地層処分に適した場所が広く存在している－着実に研究開発を続けていけば日本でも地層処分ができる－という確信が得られたわけです。このような深地層の科学的研究の成果は，他の研究分野の成果と統合して，地層処分研究開発の第 1 次取りまとめ（動力炉・核燃料開発事

業団, 1992）や第 2 次取りまとめ（分冊 1）として公開しました。とくに，平成 11 年に公開した第 2 次取りまとめは，日本で安全な地層処分が実現できる見通しを科学的な根拠をもって示した報告書として位置づけられるもので，国際機関や国の評価によっても，その技術的な信頼性が確認されました（原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会, 2000）。この第 2 次取りまとめを技術的な拠り所として，平成 12 年には，地層処分事業の進め方を定めた法律が制定され，事業の実施主体である原子力発電環境整備機構（NUMO）が設立されました。

平成 12 年以降の事業段階における研究開発は，第 2 次取りまとめが示した地層処分の技術的信頼性をさらに高め，国民・社会の理解を得ながら，NUMO が行う地層処分の事業や国が行う安全規制の段階的な進展に先んじて，必要となる技術の基盤を整備・強化していくことを目標に進めています。深地層の科学的研究においては，第 2 次取りまとめで示したような地質環境の調査・評価技術を実際の地質環境に適用することを通じて，その実用性や信頼性を確認していくことが重要な課題です。ここで，地質環境の調査・評価技術とは，処分地の選定や処分場の設計･性能評価の検討に必要となる地質環境情報を取得するための調査機器や調査方法，あるいは得られたデータを用いて地質環境の空間的な分布や長期的な変化を推定しモデル化するための解析・評価手法です。

地質環境の長期安定性については，地震・断層活動や火山活動，隆起・侵食といった天然現象を対象に，過去の変動の記録・履歴を調査する技術や，その結果に基づいて将来の変化を予測し，地質環境への影響を評価する技術を整備するため，野外調査を中心とした事例研究を進めています（2.4）。地質環境の特性については，地下深部の岩盤や地下水の性質などを把握するための調査・評価技術の整備をめざして，日本の地質環境を代表する結晶質岩と堆積岩を対象に，2 つ深地層の研究施設計画を進めています（2.2）。深地層の研究施設は，地下数百 m の深さに坑道を掘削して，深地層の岩盤や地下水の様子を直接的に調べるための総合的な研究施設で，一般には地下研（地下研究所）と呼ばれます。そこでは，まず地上からの調査によって地下の状態や坑道を掘った際の影響を予測したうえで，実際に坑道を掘って地上からの予測結果と比較しながら，坑道周辺の状況を観察していきます。掘削した坑道の中では様々な実験や観測を行い，深地層の環境をさらに詳しく調べます。また，深地層の研究施設の建設を通じて，地下坑道などの施設を適切に設計・施工し，安全に維持管理していく技術（深地層の工学技術）の整備をあわせて進めています（2.3）。

深地層の研究施設は実際の処分場ではありませんので，そこで取得したデータ自体に意味はありません。大事なことは，これまでに開発されてきた技術を組み合せることによって，必要なデータが取得でき，そのデータを使って地層処分システムの設計や安全性の検討ができることーその信頼性を保証することです。そのためには，調査－予測－検証のプロセスを何度も繰り返しながら，理解の程度と必要な調査との関係や地層処分技術全体としての適用性を確認していくことが重要です。これを実践することを通じて，地質環境の調査を最適化していく（調査機器や手法の現場合わせを行いながら，さまざまな状況に応じて調査全体をオーダーメイドで仕上げていく）技術や経験・ノウハウが蓄積されていきます。このような観点から，調査全

体を俯瞰しながら個別の成果を統合し，総合的な調査評価技術として整備・体系化していくことが，事業段階における深地層の科学的研究の重要な課題です（2.1）。

NUMO が行う処分地選定のための調査は，法律に基づき，文献調査，概要調査，精密調査と段階的に進められます。このうち，文献調査や概要調査のための技術基盤は第 2 次取りまとめやその後の研究開発により整備されてきました。現在は，その次の段階である精密調査，とくに，その前段である地上からの精密調査の段階に必要となる技術基盤の整備･強化を目標に，２つの深地層の研究施設計画を中心とした深地層の科学的研究を進めています。

参考文献：

1. 原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会：“高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の重点項目とその進め方”（1989）.
2. 動力炉･核燃料開発事業団：“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－”, PNC TN1410 92-081 (1992).
3. 核燃料サイクル開発機構：“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”, JNC TN1400 99-021 (1999).
4. 原子力委員会原子力バックエンド対策委員会：“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” (2000).

1.2 研究開発の経緯

研究の初期の段階では，対象とする地域や岩石を特定することなく幅広く研究開発を進め，地層処分の技術的信頼性を示すことが求められていました（原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会, 1984）。そのため，わが国の岩石および地下水の性質（**地形別動水勾配分布図**；**透水量係数分布図**；**地下水の地球化学特性**；**岩盤の諸特性統計量**）や地震・断層活動，火山活動，隆起・侵食などの天然現象の特徴（**活断層分布図**；**第四紀火山分布図**；**侵食速度分布図**）などを全国レベルで理解するため，地球科学の各分野に蓄積されている情報の収集・整備を進めました。また，既存の情報は地層処分の研究開発に活用する目的で取得されたものではなく精度の高い情報は限られているため，ウラン系列核種を中心とした物質の長期挙動を理解するための東濃ウラン鉱山を活用したナチュラルアナログ研究，立坑掘削による影響を理解することなどを目的とした堆積岩を対象とした研究，広域的な地下水の流れやその性質を理解することを目的とした東濃ウラン鉱山周辺での広域地下水流動研究や釜石鉱山における結晶質岩を対象とした研究を進めるとともに，天然現象の特性や規則性・地域性などを理解するため，現象が顕著な地域を対象として事例的に地質環境の長期安定性に関する研究を実施し，そこで起こっている現象などをより詳細に理解してきました。

そして，平成 11 年に，これらの研究開発成果を「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－そして，平成 11 年に，これらの研究開発成果を「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）として集約しました（第 2 次取りまとめ 分冊 1）。第 2 次取りまとめでは，「わが国においても，地層処分の観点から，地震・断層活動や火山活動，隆起・侵食といった天然現象を考慮しても，十分に安定な地質環境が広く存在すること」，「わが国における地質環境の一般的な傾向として，深部地下水は動きが遅く還元的な状態にあるため，物質を溶解・運搬する能力が低く，また，処分場を建設するうえで，地温が十分に低く応力の偏りが小さい深部岩盤がわが国にも広く存在し得ること」，「地下水を介して物質が動く際に鉱物への収着や微小空隙中への拡散により物質が抑制されること」などを示しました。これにより，第 2 次取りまとめでは，地震・断層活動や火山活動，急激な隆起・侵食が予想される地域を除けば，将来十万年程度の期間にわたって，地層処分システムに期待される機能を有する地質環境がわが国に広く存在すると結論づけました。

これらの結果については，国において，地層処分の技術的信頼性が示されているとともに，処分予定地の選定と安全基準の策定に資する技術的拠り所となることが示されていると評価されました（原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会, 2000）。また，第 2 次取りまとめ以降の研究開発の課題については，上記の国の評価（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」（原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会, 2000）で，以下のものがあげられました。

・工学技術や安全評価と関連付けた地表から地下深部までの調査の体系化
・深地層の研究施設等を活用した深部地質環境データの蓄積
・深地層の研究施設等を活用した建設・操業・閉鎖技術の実証試験
・実際の場所の特性を精度よく再現できるモデルの確立
・実際の地質環境条件を適切に考慮した設計，シナリオに基づく評価
・緩慢な天然現象による地質環境の長期にわたる変化を考慮した評価
・科学的合理性のある範囲での地下水シナリオの設定

これらの課題に応えていくため，第 2 次取りまとめ以降の研究開発では，実際の地質環境への適用を通じて，あるいは現実の地質環境条件に基づいて，技術の信頼性を確認していくこと，また，現象への理解をさらに深め，データの蓄積やモデルの改良を進めて，処分システムの長期的安全性を評価する手法を確立することにより，地層処分技術の信頼性をさらに向上させることが重要となりました。

そのため，核燃料サイクル開発機構（現，日本原子力研究開発機構）は，第 2 次取りまとめ以降の研究開発に関し，「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 つの研究開発目標を設定しました（核燃料サイクル開発機構研究開発課題評価委員会, 2001；日本原子力研究開発機構の研究開発目標と課題）。そしてこ

れら 2 つの研究開発目標に対して，深地層の科学的研究では，以下の研究開発を進めることにしました。

(1)「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」
- 地質環境特性に関する研究
- 深地層における工学技術の開発

(2)「地層処分システムの長期挙動の理解」
- 地質環境の長期安定性に関する研究
- ナチュラルアナログ研究

地質環境特性に関する研究は，第 2 次取りまとめまでに整備してきた地質環境の調査技術や評価手法を，深地層の研究施設等の実際の地質環境に適用していくことを通じて，地質環境の特性として重要な地下水の動きや性質，岩盤の熱・力学特性，岩盤中での物質の挙動，坑道掘削が周辺の岩盤に与える影響などに関する深部地質環境への理解を深めながら，これを体系的に調査・解析・評価するための技術基盤を整備していくことを目的としています。そのため，結晶質岩と堆積岩を対象とした 2 つの深地層の研究施設計画（結晶質岩・淡水系地下水を対象とした瑞浪超深地層研究所計画；岐阜県瑞浪市，堆積岩・塩水系地下水を対象とした幌延深地層研究計画；北海道幌延町）と広域地下水流動研究（岐阜県東濃地域）を進めました（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_4）。深地層の研究施設計画は，いずれも大きく 3 段階から構成しています。まず第 1 段階として，地上からの調査によって，地下の状況や坑道を掘削した際の変化を予測します（地上からの調査研究段階）。第 2 段階は，坑道を掘削しながら，第 1 段階の予測結果を確かめるとともに，坑道周辺の状況などを予測していきます（坑道掘削時の調査研究段階）。第 3 段階では，第 2 段階の予測結果を確かめながら，坑道を利用して様々な試験を行います（地下施設での調査研究段階）。このように，調査研究を段階的に進めることにより，地下深部の地質環境についての理解を深めながら，これを体系的に調査・解析・評価するための技術基盤を整備していく計画です。

深地層における工学技術の開発は，深地層の研究施設において地下施設を設計・施工・維持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』を設置するための工学技術の基盤を整備していくことを目標としています。そのため，2 つの深地層の研究施設計画において，地下施設の設計や施工方法の検討を行いました（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_5）。

地質環境の長期安定性に関する研究は，将来十万年程度の天然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価する観点から代表的な活断層や火山等を事例に調査・研究を進めてきました。特に，第 2 次取りまとめやその評価を通じて課題とされた，非火山地域における地熱メカニズムの解明，確率論的アプローチによる単成火山活動の予測モデルの開発，変動地形の不明瞭な活断層の評価手法の整備，隆起・侵食や海水準変動を考慮した地形変化シミュレーション技術の開発などを優先課題として研究を進めました（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_3）。また，地質環境

の長期安定性に関する研究の成果の一部をデータベースとして取りまとめ公開しました（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）。

ナチュラルアナログ研究では，東濃ウラン鉱床を対象とした調査研究により，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理解することを通じて，地層処分の長期安全性を傍証する情報や具体的な評価に寄与できるような科学的根拠を蓄積しました。特に，隆起・侵食や断層運動などの天然現象がウラン鉱床の長期保存に及ぼした影響や，ウラン系列核種の地質環境中での移動・遅延特性と影響要因の分析を進めました（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_4.4）。

そして，平成 17 年，第 2 次取りまとめ以降の研究開発は 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，実施主体による計画の推進や安全規制に関する議論等，研究開発を取り巻く国内外の状況が変化しつつあることから，第 2 次取りまとめ以降の 5 年間の研究開発成果を取りまとめました（「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ」，以下，平成 17 年取りまとめ）（平成 17 年取りまとめ 分冊 1）。平成 17 年取りまとめでは，深地層の科学的研究など，個々の分野の研究成果を取りまとめるとともに，今後の研究開発の方向性として，深地層の科学的研究などで蓄積される知識基盤を，実施主体や安全規制機関がより活用しやすいように構造化していくことが必要であることを示しました（平成 17 年取りまとめ 知識化）。このように平成 17 年取りまとめでは，核燃料サイクル開発機構における研究開発成果を整理し，日本原子力研究所と統合して発足する新たな独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下，原子力機構）に引き継ぎました。

参考文献：

1. 原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会：“放射性廃棄物処理処分方策について（中間報告）”, 昭和 59 年 8 月 7 日（1984).
2. 核燃料サイクル機構機構：“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”, JNC TN1400 99-021 (1999).
3. 原子力委員会原子力バックエンド対策委員会：“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” (2000).
4. 原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会：“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）” (2000).
5. 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）：“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」”, JNC TN1440 2001-008 (2001).
6. 核燃料サイクル開発機構：“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”, 4, JNC TN1400 2005-014 (2005).
7. 核燃料サイクル開発機構：“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”, 5, JNC TN1400 2005-014 (2005).

8. 核燃料サイクル開発機構：“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”, 3, JNC TN1400 2005-014 (2005).
9. 核燃料サイクル開発機構：“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”, 4.4, JNC TN1400 2005-014 (2005).
10. 核燃料サイクル開発機構：“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”, JNC TN1400 2005-014 (2005).
11. 核燃料サイクル開発機構：“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－”, JNC TN1400 2005-020 (2005).

1.3 中期計画における研究開発

原子力機構の第 1 期中期計画（平成 17 年 10 月～平成 22 年 3 月）の研究開発は，実施主体による処分事業と，国による安全規制の両面を支える技術を知識基盤として整備すること，これらの成果を地層処分の安全確保の考え方や評価に係る様々な論拠を支える知識ベースとして体系化することを大きな目的に進めてきました（日本原子力研究開発機構, 2009）。深地層の科学的研究については，これまで進めてきた地質環境特性に関する研究，深地層における工学技術の開発，および地質環境の長期安定性に関する研究の 3 つを進めています。なお，東濃ウラン鉱床を活用したナチュラルアナログ研究は所期の目的を達成したため平成 15 年度末に終了しました。広域地下水流動研究に関しても主要な調査研究は終了し，現在は，瑞浪超深地層研究所の研究所用地周辺の地下水の流れや水質のモニタリングを行っています。

地質環境特性に関する研究では，2 つの深地層の研究施設計画において，第 1 段階の調査研究の成果を取りまとめました（三枝ほか, 2007；太田ほか, 2007）。また，第 2 段階の調査研究を進め，これらによって得られる地質環境データを，第 1 段階で構築した地質環境モデル（地質・地質構造，地下水流動，地球化学，物質移動，岩盤の熱・力学）による予測結果と対比することにより，地上からの調査技術やモデル化手法の妥当性の評価を進めました（西尾ほか, 2009a-1；2009a-2；西尾ほか, 2009b；西尾ほか, 2009c-1；2009c-2；松井ほか, 2006a；松井ほか, 2008；中山ほか, 2008）。平成 21 年度末時点で，瑞浪超深地層研究所では 2 本の立坑の掘削（深度 460m程度）と水平坑道（予備ステージ：深度 100，200，300，400m，研究アクセス坑道：深度 300m など）の掘削（瑞浪超深地層研究所計画の現状）を，幌延深地層研究所では換気立坑（深度 250m まで）および東立坑（深度 210m 程度まで）とそれらを連結する水平坑道（深度 140m）の掘削（幌延超深地層研究所の現状）を行っています。実施主体が行う精密調査で必要となる調査技術の開発や安全規制の指針・ガイドラインの策定へ反映していくことが目的です。後述する地質環境の長期安定性に関する研究の成果とあわせ，地質環境特性の長期変化（地下水流動や地球化学など）についても解析手法の検討を行ってきています。

これらの研究開発で行ってきた各分野（地質・地質構造，地下水流動，地球化学，物質移動，岩盤の熱・力学，地質環境特性の長期変化）の調査評価技術の開発の成果の概要を，本カーネルでは，以下の項目で示しています。なお，地質環境特性の長期変化に関する調査評価技術の開発は，その他の分野の調査データと精度が異なることなどから区分して扱うこととしています。また，後述する地質環境の長期安定性に関する研究の成果とあわせ，地質環境特性の長期変化（地下水流動や地球化学など）について解析手法の検討を行っているものです。

2.2 地質環境特性調査評価技術の開発

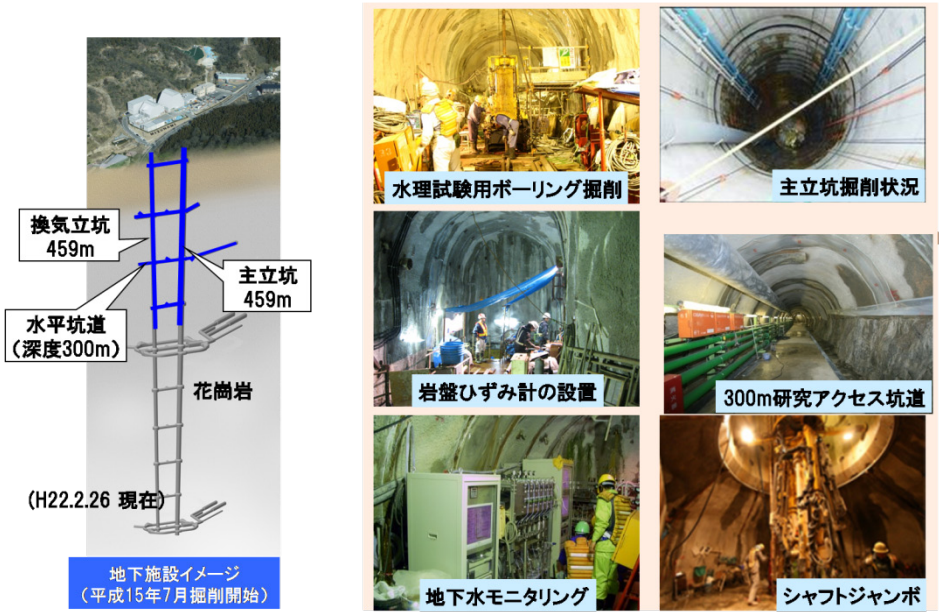
2.2.1 地質・地質構造に関する調査評価技術の開発
2.2.2 地下水流動特性に関する調査評価技術の開発
2.2.3 地球化学特性に関する調査評価技術の開発
2.2.4 物質移動特性に関する調査評価技術の開発
2.2.5 岩盤の熱・力学特性に関する調査評価技術の開発
2.2.6 地質環境特性の長期変化に関する調査評価技術の開発

深地層における工学技術の開発では，2 つの深地層の研究施設計画の第 1 段階で行った地下施設の設計・施工計画に基づき，第 2 段階において立坑および水平坑道の掘削を進め，第 2 段階で取得した支部部材の変位などの計測結果や注入したグラウト剤の効果や地質環境に与えた影響などの計測結果に基づき，設計や施工技術などの評価を行ってきています。また，地下施設の建設に伴うリスクの評価の一つの方法として情報化施工技術やリスクマネジメントシステムの開発を行っています。

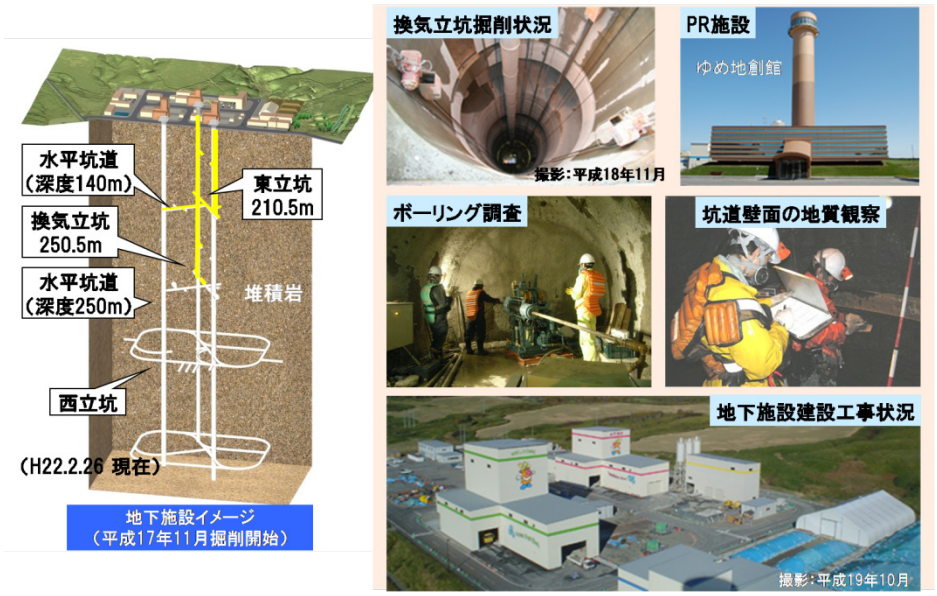
これらの研究開発で行ってきた調査評価技術の開発成果の概要を，本カーネルでは，以下の項目で示しています。

2.3 深地層における工学技術の開発

瑞浪超深地層研究所計画の現状



幌延深地層研究所計画の現状



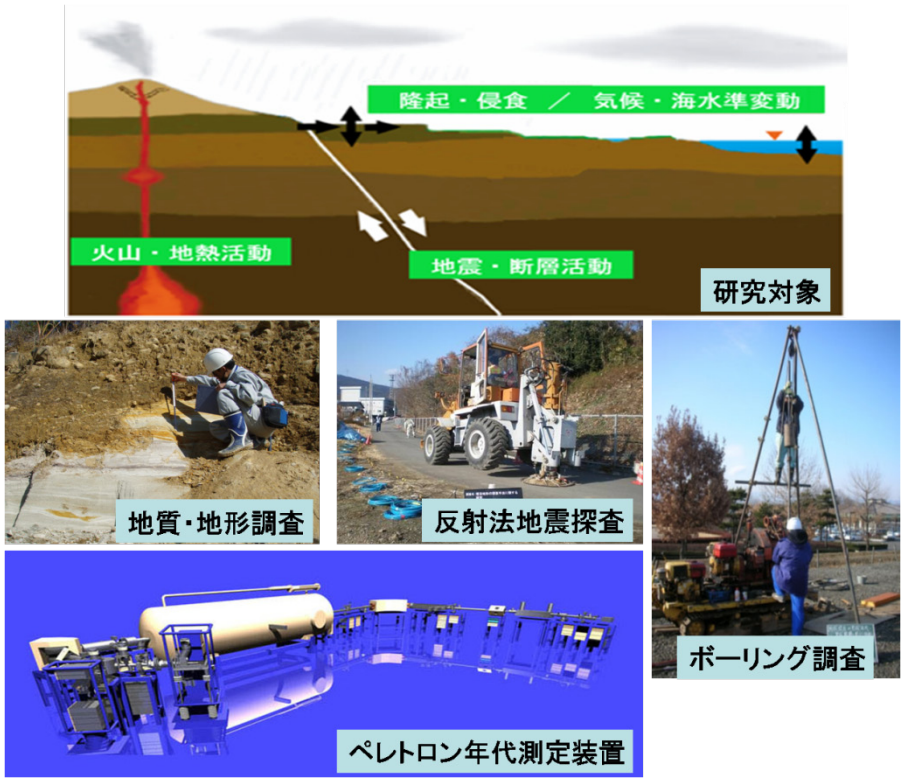
地質環境の長期安定性に関する研究については，地震・断層活動，火山・地熱活動および隆起・侵食といった現象を対象に，概要調査等に必要となる，①過去の天然現象の記録や現在の状況を調査するための体系的な技術の整備（調査技術の開発・体系化），変動シナリオを考慮した安全評価の基盤となる，②将来の天然現象に伴う地質環境条件の変化を予測・評価するための手法の整備（長期予測・影響評価モデルの開発）のほか，③最先端の機器分析装置等を用

いた放射年代測定や鍵層の高分解能同定法等による編年技術の開発（年代測定技術の開発）を進めてきました（野原ほか, 2008a；野原ほか, 2008b；草野ほか, 2009）。

これらの研究開発で行ってきた調査評価技術の開発成果の概要を，本カーネルでは，以下の項目で示しています。

2.4 地質環境の長期安定性調査評価技術の開発
2.4.1 地震・断層活動に関する調査評価技術の開発
2.4.2 火山・熱水活動に関する調査評価技術の開発
2.4.3 隆起・侵食/気候・海水準変動に関する調査評価技術の開発
2.4.4 年代測定技術の開発

地質環境の長期安定性に関する研究



さらに，上記のように行ってきた調査評価技術の開発を，実施主体が行う処分地選定の過程で実施される概要調査および精密調査の計画立案や調査評価や，安全規制機関が行う地質環境調査結果の品質や妥当性の確認に活用できるようにするため，2 つの深地層の研究施設計画などの特定の地質環境（瑞浪超深地層研究所：結晶質岩/淡水系，幌延深地層研究所：堆積岩/塩水系）を対象とした調査解析を通じて地質環境（地質・地質構造，地下水流動，地球化学，物

質移動，岩盤の熱・力学，地質環境の長期変化）を総合的に理解しつつ，地質環境の調査評価技術の体系化を行ってきています（資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2006；2009）。

また，これら特定の地質環境を対象としてその適用性を確認してきた調査評価技術が，わが国の多様な地質環境を対象とした場合，どのように活用することが可能なのかといった検討も行いつつ，地質環境の計画立案や調査評価の手順やそれらに活用されている専門家の技術的ノウハウを体系的に整備することが必要になります（資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2006；2009）。そのため，深地層の研究施設計画では，第 1 段階の調査研究において，安全評価や地下施設の設計の観点から調査・評価すべき重要な地質環境の特性やプロセスの理解を，その必要性，工程，経済性から合理的に進めるための一連の調査・データの解釈・モデル化・解析を統合する手法（地質環境情報統合手法）を適用するとともに，不確実性評価手法の構築や複数の分野（地質，岩盤力学，水理，地下水の地球化学）にまたがるボーリング調査技術の開発を行っています。さらに，わが国の多様な地質環境を考慮しつつ，一連の地質環境調査の進展によって変化する情報の質や量に対応して調査計画の立案や実施を，これまでの調査研究で得た経験・ノウハウを活用しつつ支援するメカニズムとそれを行うためのコンピュータシステムの開発を行ってきています（大澤ほか, 2008）。これらの研究開発で行ってきた調査評価技術の開発の成果の概要を，本カーネルでは，以下の項目で示しています。

2.1　総合的な調査評価技術の開発

2.1.1 多様な地質環境を対象とした調査評価技術

2.1.2 特定の地質環境を対象とした調査評価技術

なお，これらの研究開発は，国の基盤研究開発に関する全体計画とも整合性をとって進めています（資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2006；2009）。

参考文献：

1. 日本原子力研究開発機構：“独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画（中期計画）（平成 17 年 10 月 1 日～平成 22 年 3 月 31 日）（平成 21 年 7 月 1 日変更許可）” (2009).
2. 三枝博光ほか：“超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第 1 段階）研究成果報告書”, JAEA-Research 2007-043 (2007).
3. 太田久仁雄ほか：“幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）研究成果報告書　分冊「深地層の科学的研究」”, JAEA-Research 2007-044 (2007).
4. 西尾和久ほか：“超深地層研究所計画年度報告書; 2005 年度”, JAEA-Review 2008-073 (2009a).
5. 西尾和久ほか：“超深地層研究所計画年度報告書; 2006 年度”, JAEA-Review 2009-001 (2009b).
6. 西尾和久ほか：“超深地層研究所計画年度報告書; 2007 年度”, JAEA-Review 2009-002 (2009c).

7. 松井裕哉ほか：“幌延深地層研究計画平成 17 年度調査研究成果報告”, JAEA-Research 2006-073 (2006).
8. 松井裕哉ほか：“幌延深地層研究計画平成 18 年度調査研究成果報告”, JAEA-Research 2007-092 (2008).
9. 中山雅ほか：“幌延深地層研究計画平成 19 年度調査研究成果報告”, JAEA-Research 2008-074 (2008).
10. 野原壮ほか：“地質環境の長期安定性に関する研究年度報告書（平成 17 年度）”, JAEA-Research 2007-087 (2008a).
11. 野原壮ほか：“地質環境の長期安定性に関する研究年度報告書（平成 18 年度）”, JAEA-Research 2008-062 (2008b).
12. 草野友宏ほか：“地質環境の長期安定性に関する研究年度報告書（平成 19 年度）”, JAEA-Research 2009-022 (2009)
13. 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画” (2006).
14. 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 20 年度版）” (2009).
15. 大澤英昭ほか：“「地質環境総合評価技術高度化開発; 次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発」平成 19 年度成果報告書(受託研究)”, JAEA-Research 2008-085 (2008).

1.4 CoolRepH22 本文との関係

CoolRepH22 本文では，2000 年以降，地層処分の事業段階を迎え，実施主体や規制機関，原子力機構を含めた関連研究機関において，当該分野における第 2 次取りまとめで示した見通し「科学技術的な観点からは，日本における高レベル放射性廃棄物の長期的な安全対策として，地層処分の概念を実現することが可能である」を一層確実なものとしていくため，以下に示す①～⑦の観点から研究開発が継続されていること示しています（CoolRepH22 本文 1.1.4 メッセージ）。

①候補地点の地質学的・地球化学的・水理学的・地理学的・社会学的・経済学的といった条件の考慮
②場所が特定された場合，その場所の条件（上記）に合わせた地層処分概念の最適化
③処分場閉鎖後の安全性だけでなく，処分場の建設・操業期間の安全性を確保するための要件や建設における実際的な制約条件の包括的 な考慮
④「情報の非対称性」の問題認識－すべての関心のあるステークホルダーへの積極的な情報提供
⑤ステークホルダーがそれぞれの関心に応じた的確な情報を踏まえた上で意思決定に参加できるよう支援

⑥地域の要求に応じて，安全性に対する裕度を犠牲としない範囲で事業計画の変更を許容する柔軟性の確保
⑦処分事業の進展につれて爆発的に増加すると予想される関連情報の迅速かつ的確に管理する革新的な「知識マネジメントシステム」の導入

深地層の科学的研究の研究開発課題は，候補サイトの選定や候補サイトの地質環境を把握するために必要となる調査評価技術の開発とそれらの経験･ノウハウを蓄積していくことであり，一義的には上記の①の観点に焦点をあてた研究開発です。ただし，上記の②および③の観点を念頭におき，処分事業や安全規制の進展に応じて必要となる技術を段階的に整備するとともに，処分場の設計や安全評価技術との連携に心がけた研究開発を行っています。また，④～⑦の観点に配慮し，本研究の成果の体系化や知識ベース化を進めています。

2. 深地層の科学的研究の成果の概要

2.1 総合的な調査評価技術の開発

2.1.1 多様な地質環境を対象とした調査評価技術の開発

目的：（資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構，2006 ； 2009）

一連の地質環境調査の進展によって変化する情報の質や量に対応して調査計画の立案や実施やその結果の評価および品質管理を支援するシステムを開発（サイト特性調査情報統合システム（ISIS: Information Synthesis and Interpretation System）と呼称）(注1)。

経緯：

従来，調査計画の妥当性・透明性の確保，分野間の専門家のコミュニケーションの促進などを目的として，地質環境調査から処分場の設計・安全評価までの一連の情報の流れを示す「統合化データフローダイアグラム」（統合化データフローダイアグラムの例）を用いて，地質・地質構造，地下水流動特性，地球化学特性，熱・力学特性，物質移動特性の情報を統合する手法（地質環境情報統合手法：geosynthesis methodology）の適用を，2 つの深地層の研究施設計画で試行してきた（2.1.2；三枝ほか, 2007；太田ほか, 2007）。この手法によりプロジェクトを担当した専門家が経験・ノウハウを蓄積することはできたが，調査計画の内容や必要に応じた変更とそれらの判断根拠を部外の専門家が理解することは容易ではなく，計画策定や変更に関わる経験やノウハウといった知識を共有するには至らなかった(注2)。これらを背景とし，こうした知識を部外の専門家も含めて汎用的に利用可能とし，専門家の判断などに基づく意思決定過程を可能な限り明示することにより，一連の地質環境調査をより効果的に進めるための計画立案や変更，調査の実施やその結果の評価および品質管理を支援するシステム（ISIS）の開発を，平成 19 年度から開始した（大澤ほか, 2008）。

平成 21 年度の成果：

地質環境総合評価技術の開発は，2 つの深地層の研究施設計画，国の基盤研究開発として進めている沿岸域プロジェクト，および国内外の事例を対象とした地質環境調査評価の分析・整理と，それらに基づくエキスパートシステムの構築から構成される。平成 19 年度から当面 5 年間の計画で，地質環境調査評価の経験・ノウハウや判断根拠の分析・整理を段階的に進めながら，それらをエキスパートシステムに組み込む予定である。これまでに，経験・ノウハウや判断根拠の分析方法およびエキスパートシステム化に必要なツールの開発を行うとともに，地下水の地球化学に関する調査の実施やその評価の一部を例としたルールベース化，国外の事例を対象としたトラブルへの対処方策などの事例ベース化を試行してきている（大澤ほか, 2008；日本原子力研究開発機構, 2009）。平成 20 年度までに行ってきた内容は，下記の通りであるが，平成 23 年度までには，一連の地質環境調査の進展によって変化する情報の質や量に対応して調査計画の立案や実施を支援するメカニズムとそれを支援するコンピュータシステムとして，これまでの研究開発の成果全体を統合する計画である。

・決定木（注 3）および真理表（注 4）を用いた地質環境調査評価の経験・ノウハウや判断根拠の分析手法ならびにエキスパートシステム化に必要なツール（ルールベース，事例ベースとそれらを蓄積するために必要なインターフェース機能など）を開発（大澤ほか, 2008）。
・瑞浪超深地層研究所計画の個々の調査手法を事例に，エキスパートシステムを試作（2.2.3；エキスパートシステム）し，上記のツールを原子力機構内（例えば，新入職員の教育など）で試用。
・英国，フィンランド，スウェーデンにおけるトラブルへの対処方策などの経験・ノウハウを対象とした事例ベース化を試行（ISIS 事例ベース）。

今後の課題：

・概要調査計画立案支援に向け，地質環境モデルの構築とそれを活用した地質環境調査計　画立案の経験・ノウハウを体系化し，エキスパートシステム化。

・実施主体や安全規制機関を含む様々なユーザーによる試用を通じた，エキスパートシステムの有効性の確認と改良。

注 1：本開発は，経済産業省資源エネルギー調査受託事業「地質環境総合評価技術高度化開発」において実施している。

注 2：統合化データフローダイアグラムは，一連の地質環境調査により取得されたデータが，その後の解析，モデル化を介して，性能評価や地下施設の設計に必要とされる情報にどのような流れで反映されるのかを示している。しかし，本ダイアグラムの流れで実際に行われた調査計画の決定や必要に応じた変更とそれらの判断根拠は，このダイアグラムには示されていない。また，報告書などにも，専門家が暗黙的に行った判断の根拠までは示していない。ISIS は，それらの判断根拠などを，様々な知識工学の表現方法を用いて具現化することを目指したものである。

注 3：意思決定の判断の繰り返しを[もし・・・ならば(if)という判断の課題に対し，yes あるいは no の場合，どのように判断するのか(then)]を，樹形図状に示したもの。

注 4：いくつかの命題を合成して新しい命題を作ったとき，もとの命題の真偽と合成命題の真偽との関係を示す表のこと。これにより，真理表で，A と B の命題に対する真偽と，A と B の合成命題の真偽が真理表に表現されることにより，If・・・then のルールにおいて合成命題の真偽を選択することを可能にすることができる。

参考文献：

1. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画” (2006).
2. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 20 年度版）” (2009).
3. 三枝博光ほか：“超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第 1 段階）研究成果報告書”, JAEA-Research 2007-043 (2007).
4. 太田久仁雄ほか：“幌延深地層研究所計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）研究成果報告書　分冊「深地層の科学的研究」”, JAEA-Research 2007-044 (2007).
5. 大澤英昭ほか：“「地質環境総合評価技術高度化開発；次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発」平成 19 年度成果報告書(受託研究)”, JAEA-Research 2008-085 (2008).
6. 日本原子力研究開発機構：“平成 20 年度 地層処分技術調査等委託費地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発 報告書” (2009).

2.1.2 特定の地質環境を対象とした調査評価技術の開発

目的：（資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2006；2009）

・結晶質岩，堆積岩を対象として，各岩盤の特徴や性質を考慮した地上からの調査により地質・地質構造，地下水流動特性，地球化学特性，物質移動特性，熱・力学特性およびそれらに関わるプロセスなどを把握し，それらに基づいて地質環境モデルを構築するための一連の調査・解析手法に関する知見の蓄積，ならびに構築した分野間の地質環境モデルの整合性を提示する際の論理や判断根拠の整理と蓄積。
・上記の複数の分野にまたがる調査・解析手法の合理化。
・地下施設建設時の一連の調査・解析手法の有効性の確認，知見の蓄積。

参考文献：

1. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画” (2006).
2. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 20 年度版）” (2009).

(1)結晶質岩

平成 17 年までの成果：

広域地下水流動研究および瑞浪超深地層研究所計画の地表からの調査研究段階(第 1 段階)，ならびに研究坑道の掘削を伴う研究段階（第 2 段階）において，地質環境情報統合手法，不確実性評価手法を構築するとともに，複数の分野にまたがるボーリング調査技術の経験・ノウハウや判断根拠を蓄積した（平成 17 年取りまとめ 分冊 1）。

平成 21 年度までの成果：

広域地下水流動研究および超深地層研究所計画の第 1 段階の調査研究において，地層処分の観点から重要な地質環境の特性やプロセスの理解に向けた一連の地質環境の調査・解析の流れを示す統合化データフローダイアグラムを作成するとともに，これに基づき調査・解析・評価を実施し，その過程で経験・ノウハウや判断基準を蓄積してきた。その際，空間スケール（リージョナルスケール[数十 km×数十 km，深さ 10km 程度]，ローカルスケール[数 km×数 km，深さ数 km 程度]，サイトスケール[数百 m～数 km×数百 m～数 km，深さ 2～3km 程度]，ブロックスケール[数十 m～数百 m×数十 m～数百 m，深さ数百 m～1km 程度]）（三枝ほか, 2007_2.2.2.(1)）を設定して進めてきた（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_図 4.2.1-2）。

そして，調査の進展（段階）に伴う情報の種類および量と地質環境の理解度との関係を，調査段階ごとに繰り返し評価するアプローチを，当該計画の第 1 段階の調査研究における既存情報～ボーリング孔間を対象とした調査・解析・評価を通して実践し，地質環境の理解度の変遷（例えば，全水頭分布のばらつきの変遷）の理解や課題の抽出を進め，それらにより不確実性評価手法の適用性を確認してきた（平成 17 年取りまとめ 分冊 1；三枝ほか, 2007_3.2.6）。また，統合化データフローダイアグラムを用いた地質環境情報統合手法を適用することにより，処分システムの設計および性能評価に必要とされる地質環境情報を取得可能なこと，それらのデータ・情報を核種移行解析にフィードバックできることを確認した（牧野ほか, 2005）。

さらに，計画立案，ならびに掘削，地質学的調査，岩盤力学調査，水理学的調査，および採水調査の個別要素技術を複合的に組み合わせ，必要性，工程，および経済的な観点からデータを合理的に取得する体系的なボーリング調査技術とその品質保証体系を整備した（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_4.2.6(2)；三枝ほか, 2007_3.3.3～3.3.9）。本ボーリング調査技術については，超深地層研究所計画の第 1 段階でその適用性を確認した（N.Nakano et al., 2003；K.Ota et al., 2004；魚住ほか, 2005）。ボーリング調査計画の手順を試行的にルールベース化した（大澤ほか, 2008）。

これらは，概要調査および精密調査の計画立案，その実施と取得された情報の解析・評価を支援する手法となる。

今後の課題：

・結晶質岩を対象とした，第 2 段階および第 3 段階の調査研究における地質環境情報統合手法の適用性の確認, ならびに性能評価へフィードバックする手法の確認, 関連する知識の蓄積。

参考文献：

1. 核燃料サイクル開発機構 ：“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”, JNC TN1400 2005-014 (2005).
2. 三枝博光ほか ：“超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第 1 段階）研究成果報告書”, JAEA-Research 2007-043, 2.2.2, p.13 (2007).
3. 三枝博光ほか ：“超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第 1 段階）研究成果報告書”, JAEA-Research 2007-043, 3.2.6, pp.128-158 (2007).
4. 牧野仁史ほか ：“地質環境の調査から物質移行解析にいたる一連の調査・解析技術－２つの深地層の研究施設計画の地上からの調査研究段階（第 1 段階）における地質環境情報に基づく検討－”, JNC TN1400 2005-021 (2005).
5. 核燃料サイクル開発機構 ：“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”，図 4.2.1-2, pp.4-9, JNC TN1400 2005-014 (2005).
6. 核燃料サイクル開発機構 ：“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”, JNC TN1400 2005-014, 4.2.6(2), pp.4-85～4-90 (2005).
7. 三枝博光ほか ：“超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第 1 段階）研究成果報告書”, JAEA-Research 2007-043, 3.3.3～3.3.9, pp.181-194, (2007).
8. K. Nakano et al. : “Working Program for MIZ-1 Borehole Investigations”, JNC TN7400 2002-008 (2003).
9. K. Ota et al. : “An Overview of the MIZ-1 Borehole Investigations during Phase I/II”, JNC TN7400 2004-001 (2004).
10. 魚住ほか ：“超深地層研究所計画における試錐調査（MIZ-1 号孔）”, JNC TJ7440 2005-091 (2005).
11. 大澤英昭ほか ：“「地質環境総合評価技術高度化開発; 次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発」平成 19 年度成果報告書(受託研究)”, JAEA Research 2008-085 (2008).

(2)堆積岩

平成 17 年までの成果：

幌延深地層研究計画の地上からの調査研究段階（第 1 段階）として平成 13～14 年度に「研究所設置地区（主たる調査研究の展開場所，2～3km 四方程度の領域）選定のための調査」の一環として既存文献調査・空中物理探査・地上物理探査・地表地質調査・ボーリング調査を実

施し，その結果に基づいて，技術的要件・社会要件・環境要件を考慮した研究所設置地区の選定を実施した（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_4.3）。平成 14～17 年度には，「研究所設置地区およびその周辺における調査研究」の一環として実施した既存文献調査・地上物理探査・地表地質調査・ボーリング調査の結果に基づいて，地質環境情報統合手法および複数の分野にまたがるボーリング調査技術の経験・ノウハウや判断根拠を蓄積した（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_4.3）。

平成 21 年度までの成果：

第 1 段階の調査研究および H17 年から開始した地下施設建設時の調査研究（第 2 段階）において取得された情報に基づき，概要調査段階の‘地区’領域から‘サイト（施設立地）’領域の選定手法（対象岩盤や制約条件の考え方など）を整理した（太田ほか, 2007_3）。この考え方は，自治体全区域から地下施設建設地の選定に至るまでの絞込みの考え方に反映可能である。

また，堆積岩を対象とした地質環境特性調査・評価技術として，既存文献調査，空中・地表からの調査およびボーリング孔を利用した調査の経験に基づき，地層処分の観点から重要な地質環境特性やプロセスについて概略的に把握し，堆積岩の特徴を考慮した地質環境（地質構造，岩盤水理，地球化学，岩盤力学）モデル化手法を構築した。その過程で，調査の組合せ方やデータの解釈などに関する技術的知見を要素技術として整理した。また，その経験を踏まえ，「調査」→「データの解釈」→「モデル化・解析」→「地層処分の観点から重要な地質環境の特性やプロセスの理解」を合理的に進めるためのノウハウや判断基準を蓄積した。そして，統合化データフローダイアグラムを用いた地質環境情報統合手法を適用することにより，堆積岩環境において設計および性能評価に必要とされる地質環境情報を統合可能なこと，それらのデータ・情報を核種移行解析にフィードバックできることを確認した（牧野ほか, 2005；藤田ほか, 2007）。

さらに，堆積岩環境において計画立案，ならびに掘削，地質学的調査，水理学的調査，採水調査の個別要素技術を組み合わせ，品質管理されたデータを合理的に取得する体系的なボーリング調査技術を整備した（太田ほか, 2007_3）。本手法については，幌延深地層研究所計画の第 1 段階におけるボーリング調査でその適用性を確認した（松井ほか, 2007；松井ほか, 2006）。

くわえて，地下施設建設時の調査研究においては，掘削影響領域の調査に必要な観測機器・手法などの要素技術開発を進めるとともに，情報化施工への反映として地質環境条件を踏まえた坑道展開方法などについて検討を開始した（岩月ほか, 2009）。

今後の課題：

・堆積岩を対象とした，第 2 段階および第 3 段階の調査研究における総合的な地質環境調査技術の開発，ならびに性能評価へのフィードバックする手法の確認とその知識の蓄積，情報化施工，処分技術への反映。

参考文献：

1. 核燃料サイクル開発機構 ：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 - 平成 17 年取りまとめ－分冊 1　深地層の科学的研究 - ”, JNC TN1400 2005-014, 4.3, pp.4-93～4-156 (2005).
2. 太田久仁雄ほか ：“幌延深地層研究所計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）研究報告書　分冊「深地層の科学的研究」”, JAEA-Research 2007-044, 3, pp.17-42 (2007).
3. 牧野仁史ほか ：“地質環境の調査から物質移行解析にいたる一連の調査・解析技術－２つの深地層の研究施設計画の地上からの調査研究段階（第 1 段階）における地質環境情報に基づく検討－”, JNC TN1400 2005-021 (2005).
4. 藤田朝雄ほか ：“幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）研究成果報告書　分冊「地層処分研究開発」”, JAEA-Research 2007-045 (2007).
5. 松井裕哉 ：“幌延深地層研究計画 地上からの調査研究段階における深層ボーリング調査とその実績”, JAEA-Technology 2006-054 (2007).
6. 松井裕哉ほか ：“堆積岩を対象とした地上からの深層ボーリング孔掘削事例”, JAEA-Technology 2006-052 (2006).
7. 岩月輝希ほか（2009）：“幌延深地層研究計画における第 2 段階の調査研究計画（H20-21）”, JAEA-Research 2009-002 (2009).

2.2 地質環境特性調査評価技術の開発

2.2.1　地質・地質構造に関する調査評価技術の開発

目的：（資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2006；2009；核燃料サイクル開発機構, 2002；核燃料サイクル開発機構, 1998）

・結晶質岩，堆積岩を対象として，各岩盤の特徴や性質を考慮した地上からの調査により地質・地質構造をモデル化するための一連の調査・解析手法に関する知見の蓄積。
・地下施設建設時の一連の調査・解析手法の有効性の確認，知見の蓄積。

参考文献：

1. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構 ：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画” (2006).
2. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構 ：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 20 年度版）” (2009).
3. 核燃料サイクル開発機構 ：“超深地層研究所地層科学研究基本計画”，核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2001-018 (2002).
4. 核燃料サイクル開発機構 ：“深地層研究所（仮称）計画”, JNC TN1410 98-002 （1998）.

(1)結晶質岩

平成 17 年までの成果：

亀裂性の結晶質岩を対象とした広域地下水流動研究（動力炉・核燃料開発事業団, 1997）および超深地層研究所計画（核燃料サイクル開発機構, 2002）の第 1 段階の調査研究に基づき，各空間スケールおよび各調査段階において把握される地質・地質構造を示すとともに，地質環境とその不連続構造を把握するための一連の調査・解析手法を提示した（平成 17 年取りまとめ 分冊 1；三枝ほか, 2007）。

平成 21 年度の成果：

超深地層研究所計画の第 1 段階の調査研究における既存情報～ボーリング孔間を対象とした調査・解析・評価（ステップ 0～ステップ 4）（三枝ほか, 2007）を通じて，調査の実施から概念モデル，数値モデル（地質構造モデル）の構築・更新および段階的な調査に基づく地質構造に関する理解度の向上について事例的に示すとともに，それらの過程で得られた調査・解析・評価に関する知見を整備した（三枝ほか, 2007）。これらは，地層処分予定地選定における概要調査および精密調査で対象とされる地質環境の特徴との類似性や相違性を考慮することにより，概要調査および精密調査（地上からの調査）における計画立案やその実施において，地質環境とその不連続構造を把握するための調査・解析手法とそれらに必要な経験・ノウハウを提示するものとなっている。また，一連の調査・解析・評価の過程において整備された個別の調査・評価技術については以下があげられる。

・リニアメントと地表地質調査の組み合わせによる不連続構造の推定技術，地質構造や不連続構造の分布などを精度良く把握するための物理探査技術やそれらの組み合わせ，ならびに三重管ワイヤーライン工法によるボーリングコアの採取率向上，物理検層を用いた割れ目帯の抽出技術（三枝ほか, 2007）。

・ボーリング孔の亀裂データと断層や基盤岩地形との関連性に着目した花崗岩中の空間的な亀裂密度分布の推定手法（栗原ほか, 2008），異なるスケール間に認められる亀裂分布の法則性・相互関係（空間的相関構造やスケール則など）が考慮可能なマルチスケールでの亀裂分布のシミュレーション技術（小池ほか, 2008）。
・段階的な調査に基づく地質構造の不確実性を定量的に評価するためのベイズ法などを利用した不確実性評価技術（A. Martin ほか, 2005；天野ほか, 2008）。
・アナログ実験や数値シミュレーションを用いて地質構造発達プロセスを復元し，断層分布の空間的な予測や不確実性を補完する技術
・これまでに適用した個々の調査・解析における品質保証体系（三枝ほか, 2007；松岡ほか, 2009）。

また，第 2 段階の調査研究では，坑道の壁面調査や立坑掘削振動を利用した逆 VSP 探査，壁面調査からより詳細に実施された断層や亀裂の分布や性状調査の結果などから，第 1 段階で予測した地質構造モデルの妥当性の確認を継続するとともに，これらに基づき地上からの一連の調査・解析手法を検証することとしている。

今後継続する第 2 段階および第 3 段階の調査研究を通じて，精密調査（地下施設での測定・試験等）における計画立案やその実施において，施設の設計および性能評価に必要な地質構造の三次元分布（岩盤の地質学的不均質性および移行経路として重要な構造）を把握するため，以下に示す調査・解析手法とそれらに必要な経験・ノウハウを提示していくよう，計画立案を進めている。

・坑道周辺の不連続構造の分布・性状の把握を目的とした地質学的・地球物理学的調査・解析
・上記のデータに基づく地質構造モデルの構築

今後の課題：

・第 1 段階で予測した地質構造モデルの妥当性を評価し，その結果に基づく一連の調査・解析手法の評価を実施するとともに，坑道周辺のより詳細なスケール（ブロックスケール）での不連続構造の調査・解析手法の整備とそれらの適用による経験・ノウハウの整備。

参考文献：

1. 動力炉・核燃料開発事業団：“広域地下水流動研究基本計画書”, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN7020 98-001 (1997)．
2. 核燃料サイクル開発機構：“超深地層研究所地層科学研究基本計画”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2001-018 (2002).
3. 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性う廃棄物の地層層分技術に関する知識基盤の構築 - 平成 17 年取りまとめ - 分冊 1 深地層の科学的研究”, JNC TN1400 2005-014 (2005).
4. 三枝博光ほか：“超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第 1 段階）研究成果報告書”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-043 (2007).
5. 栗原新ほか：“花崗岩体上部に発達する低角度亀裂の空間分布特性と地質学的解釈－瑞浪超深地層研究所周辺の土岐花崗岩からの知見－”, 資源・素材学会誌, Vol.124, N.12, pp.710-718 （2008）.
6. 小池克明ほか：“広域的な地質構造･物性分布の空間モデル作成と有効性の検証－東濃地域における亀裂分布を主としたケーススタディー”, 資源・素材学会誌, Vol.124, No.12, pp.700-709 （2008）.
7. A. Martin ほか：”Geoscientific Studies in the Mizunami Underground Research Laboratory -A method for evaluating uncertainty of fault distribution-”, 地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会予稿集, G018P-021 （2005）.

8. 天野健治ほか：“超深地層研究所計画 研究坑道の掘削を伴う研究段階(第 2 段階)の現状(2)断層分布の把握を目的とした効果的な調査アプローチの検討”，日本原子力学会 2008 年春の年会, I22 （2008）.
9. 松岡稔幸ほか：“次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発－国内外の沿岸域における物理探査・ボーリング孔での検層技術を対象としたノウハウ・判断根拠等の分析・整理－”，物理探査学会第 121 回（平成 21 年度秋季）学術講演会論文集, P-2 （2009）.

(2)堆積岩

平成 17 年までの成果：

幌延深地層研究計画の第 1 段階において，平成 13～14 年度に行われた「研究所設置地区（主たる調査研究の展開場所，2～3km 四方程度の領域）選定のための調査」と，平成 14～17 年度の「研究所設置地区およびその周辺における調査研究」の一環として実施した既存文献調査・地上物理探査・地表地質調査・ボーリング調査の結果に基づいて，堆積岩分布地域を対象とした数十キロメートル～数百メートル四方の複数の空間スケールにおける地質構造モデルの構築手法に関する技術的知見を蓄積した（平成 17 年取りまとめ 分冊 1）。

平成 21 年度までの成果：

平成 13 年度から始まった幌延深地層研究所計画の第 1 段階および平成 17 年度から始まった第 2 段階の調査研究に基づき，以下に示す調査・解析手法を整備した。これらは，概要調査および精密調査（地上からの調査）において，地質環境の特徴の類似性や相違性を考慮することにより，堆積岩を対象とした調査計画立案やその実施時に必要となる調査・解析手法とそれらに必要なノウハウを提示するものとなっている。

・塩分濃度の異なる地下水が存在しかつ岩質が均質な堆積岩において，数キロメートル～数十キロメートルスケールの透水性構造(断層など)の三次元分布や水理特性を把握するための，電磁探査，地震探査，地表踏査およびボーリング調査手法（石井ほか, 2006a）。
・割れ目が地下水の主要な移動経路となっている可能性がある堆積岩において，数百メートル（～数キロメートル）スケールの透水性構造（断層など）の三次元分布や水理特性を把握するための，地表地質調査やボーリング調査・解析手法（石井ほか, 2006b）。
・上記スケールにおいて，ボーリング調査（コア観察・孔壁画像検層・流体検層）結果に基づく割れ目の開口性･連続性･連結性解析手法と地質構造モデルの構築手法(舟木ほか, 2009)。
・断層の成長メカニズムを考慮した岩盤力学的応力計算に基づく，高透水性構造の空間分布の調査・解析手法（E.Ishii et al., 2008）。
・シリカ鉱物の続成作用に基づく背斜構造の成長開始時期の調査･解析手法(石井ほか, 2008)。

今後継続する第 2 段階の調査研究では，坑道内における壁面調査やボーリング調査により地層の岩質や割れ目の分布などの調査を行い，水理学的情報と合わせて，第 1 段階で予測した地

質構造モデルの妥当性の検証を継続するとともに，地上からの一連の調査・解析手法（特に堆積岩の岩質・続成作用や応力履歴と関連付けた数百メートル四方の空間スケールの地質構造モデル構築手法）を整備する（岩月ほか, 2009）。

また，第 2 段階および第 3 段階の調査研究を通じて，精密調査時の施設設計および性能評価に必要な，坑道掘削や湧水抑制対策により生じる岩盤物性変化や物質移動場の概念を把握するため，以下の調査･解析手法とそれらに必要なノウハウを提示していくよう（岩月ほか, 2009），計画立案を進めている。

・坑道周辺の掘削影響領域や湧水抑制対策領域の地質学的プロセス・メカニズムを把握するための地質調査・解析手法。
・坑道周辺の物質移動経路の幾何学的特徴を把握するための地質観察，原位置試験（トレーサー試験など），室内試験手法。

今後の課題：

・地上からの調査技術に基づいて予測した地質構造モデルの妥当性確認による一連の調査・解析手法の適用性の明示。
・坑道周辺の詳細スケールの物質移動経路の調査・解析手法の整備とそれらの適用に関わるノウハウの整備。
・岩質・続成作用や応力履歴に基づく評価対象領域全体における物質移動経路の調査・解析手法の整備。

参考文献：

1. 核燃料サイクル開発機構 ：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 - 平成 17 年取りまとめ－分冊 1　深地層の科学的研究 - ”, JNC TN1400 2005-014, pp.4-93～4-156 （2005）.
2. 石井英一ほか ：“北海道北部，幌延地域における大曲断層の三次元分布と水理特性”，地質学雑誌, 112, pp.301-314 （2006a）.
3. 石井英一ほか ：“新第三紀珪質岩における断層の解析事例”，応用地質，47，pp.280-291（2006b）.
4. 舟木泰智ほか ：“新第三紀堆積岩中の割れ目は主要な水みちとなり得るか？”，応用地質，50, pp.239-248 （2009）.
5. E., Ishii et al. ：“Relationship between fault growth mechanism and permeability variations with depth of siliceous mudstones in northern Hokkaido, Japan”, Journal of Structural Geology, doi: 10.1016/j.jsg.2009.10.012 (2009).
6. 石井英一ほか ：“北海道北部，大曲断層近傍の背斜成長の開始時期”，地質学雑誌, Vol. 114, pp. 286-299 （2008）.
7. 岩月輝希ほか ：“幌延深地層研究計画における第 2 段階の調査研究計画（H20-21）”，JAEA-Research 2009-002（2009）.

2.2.2　地下水流動特性に関する調査評価技術の開発

目的：（資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2006；2009；核燃料サイクル開発機構, 2002；核燃料サイクル開発機構, 1998）

・結晶質岩，堆積岩を対象として，各岩盤の特徴や性質を考慮した地上からの調査により性能評価および施設の設計に必要な地下水流動特性に関する一連の調査・解析手法に関する知見の蓄積。
・地下施設建設時の一連の調査・解析手法の有効性の確認，知見の蓄積。

参考文献：

1. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画” (2006).
2. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 20 年度版）” (2009).
3. 核燃料サイクル開発機構：“超深地層研究所地層科学研究基本計画”，核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2001-018 (2002).
4. 核燃料サイクル開発機構：“深地層研究所（仮称）計画”, JNC-TN1410 98-002（1998）.

(1)結晶質岩

平成 17 年までの成果：

結晶質岩を対象とした広域地下水流動研究および超深地層研究所計画の第 1 段階における文献や現場での調査と，それに基づく各空間スケール（2.1.2(1)節）の水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析などを通じて，調査・解析手法の整備とそれらに必要な経験・ノウハウを整理した（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_4.2；太田ほか, 2005；三枝ほか, 2007_2-3）。

平成 21 年度までの成果：

広域地下水流動研究および超深地層研究所計画の第 1 段階における現場調査と，それらに基づく水理地質構造モデルの構築や地下水流動解析などを調査段階ごとに繰り返し行うことを通じて（ローカルスケール： 大山ほか, 2005a；大山ほか, 2005b；尾上ほか, 2005a；尾上ほか, 2005b；尾上ほか, 2007a，サイトスケール： 大山ほか, 2005c；尾上ほか, 2005c；尾上ほか, 2005d；尾上ほか, 2007b），以下に示す調査解析手法とそれらに必要な経験・ノウハウを整備した。これらは，地層処分事業における概要調査および精密調査（地上からの調査）のための計画の立案や実施において，地下水の流束や移行経路などを把握するための調査・解析手法とそれらに必要な経験・ノウハウを提示するものとなっている。

・地下水の涵養域から流出域までを包含する数 km 四方以上の調査・解析領域（ローカルスケール）の設定手法（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_4.2；太田ほか, 2005；三枝ほか, 2007_2~3）。
・ローカルスケールおよびサイトスケールにおいて，動水勾配分布や岩盤中の透水性分布の把握，および地下施設における地下水流入量の予測を行うための段階的な調査・解析手法（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_4.2；太田ほか, 2005；三枝ほか, 2007_2~3）
・各空間スケールにおける個別の調査・解析手法とそれらの品質保証体系（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_4.2；太田ほか, 2005；三枝ほか, 2007_2~3）

第 1 段階の調査研究に基づいて蓄積された調査・解析手法に関する経験・ノウハウは，ルールベースおよび事例ベースとして整理している（大澤ほか，2008；日本原子力研究開発機構，2009）。

これらの調査・解析手法の妥当性は，現在行われている第 2 段階の知見に基づいて評価される。第 2 段階の調査研究では，地下施設の建設に伴う地下水圧や湧水量などの地下水流動場の変化に関するデータを連続的に取得し，その結果と地下水流動解析結果との比較を通じて，第 1 段階で構築した水理地質構造モデルの妥当性（特に，水理学的連続性など）を確認するとともに，必要に応じた更新を行う。現在，そのための方法論を整備するための調査研究として，これまでの水理地質構造モデルの解釈の進展に伴う地下水流動解析結果への影響を整理している。

今後，第 2 段階および第 3 段階の調査研究を通じて，地層処分事業における精密調査に相当する地上からの調査計画，および地下施設での調査試験計画の立案や実施において，施設の設計および性能評価に用いる水理地質構造モデルの構築や地下水流動特性の把握を行うための調査・解析手法の整備を目的として，以下に示す項目とそれらに必要な経験・ノウハウを提示するよう，計画立案を進めている。

・地下施設の建設に伴う地下水圧や湧水量などの地下水流動場の変化を把握するための調査の考え方。
・地下水流動の変化に関するデータを用いた水理地質構造モデルの妥当性確認および更新の考え方。
・水理地質構造モデルの妥当性確認と更新，前段階に適用した手法の有効性確認といったフィードバック的評価に基づく地上からの調査・解析・評価技術の構築。

今後の課題：

・第 2 段階および第 3 段階の調査研究における地下水流動特性に関する調査・解析・評価の方法論の整備，ならびにそれらに関わる経験・ノウハウや判断根拠などの整備。
・第 2 段階で取得される情報に基づく，水理地質構造モデルの妥当性確認およびその更新に関わる方法論の整備。
・個別の調査・解析技術などの整備。

参考文献：

1. 核燃料サイクル開発機構 ：“高レベル放射性廃棄物の地層層分技術に関する知識基盤の構築 - 平成 17 年取りまとめ - 分冊 1 深地層の科学的研究”, JNC TN1400 2005-014, 4.2, pp.4-8～4-92 (2005).
2. 太田久仁雄ほか：“東濃地域における地上からの地質環境の調査・評価技術”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-023 (2005).
3. 三枝博光ほか：“超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第 1 段階）研究成果報告書”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-043, 2～3, pp.11-203 (2007).
4. 大山卓也ほか：“ローカルスケールにおける地下水流動解析－ローカルスケールでの地下水流動特性評価およびサイトスケールにおけるステップ 0 の地下水流動解析の境界条件の設定－”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-004 (2005a).
5. 大山卓也ほか：“ローカルスケールにおける地下水流動解析－サイトスケールにおけるステップ 1 の地下水流動解析の境界条件の設定－”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-005 (2005b).
6. 尾上博則ほか：“ローカルスケールにおける地下水流動解析－サイトスケールにおけるステップ 2 の地下水流動解析の境界条件の設定－”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-003 (2005a).
7. 尾上博則ほか：“ローカルスケールにおける地下水流動解析－サイトスケールにおけるステップ 3 前半の地下水流動解析の境界条件の設定－”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-011 (2005b).
8. 尾上博則ほか：“ローカルスケールの地下水流動解析－サイトスケールにおけるステップ 4 の地下水流動解析の境界条件の設定－”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-035 (2007a).
9. 大山卓也ほか：“繰り返しアプローチに基づくサイトスケールの水理地質構造のモデル化・地下水流動解析（ステップ 0 および 1）”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-008 (2005c).
10. 尾上博則ほか：“繰り返しアプローチに基づくサイトスケールの水理地質構造のモデル化・地下水流動解析（ステップ 2）”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-006 (2005c).
11. 尾上博則ほか：“繰り返しアプローチに基づくサイトスケールの水理地質構造のモデル化･地下水流動解析（ステップ 3 前半)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-012 (2005ｄ).
12. 尾上博則ほか：“繰り返しアプローチに基づくサイトスケールの水理地質構造のモデル化・地下水流動解析（ステップ 4）”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-034 (2007b).
13. 大澤英昭ほか：“「地質環境総合評価技術高度化開発; 次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発」平成 19 年度成果報告書(受託研究)”, JAEA Research 2008-085 (2008).

14. 日本原子力研究開発機構：“平成 20 年度 地層処分技術調査等委託費地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発 報告書” (2009).

(2)堆積岩

平成 17 年までの成果：

幌延深地層研究計画の第 1 段階の調査研究において，文献や現場での調査結果に基づき，50km 四方程度の領域（幌延町全域）および研究所設置地区とその周辺を対象とした空間スケールの水理地質構造モデルを構築し，地下水流動解析に関わる調査・解析手法を整備するとともに，それらに必要なノウハウを整理した（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_4.3；藤田ほか, 2007；太田ほか, 2007_4.2）。

平成 21 年度までの成果：

幌延深地層研究計画の第 1 段階の現場調査と，それらに基づく水理地質構造モデルの構築や地下水流動解析などを通じて，以下に示す調査解析手法とそれらに必要なノウハウを整備した。これらは，地層処分事業における概要調査および精密調査時の計画立案やその実施において，堆積岩の特徴を考慮して地下水の流束や移行経路などを把握するための調査・解析手法とそれらに必要なノウハウを提示するものとなっている。

- 表層から地下深部までの地下水流動系を含む数 km 四方以上の解析領域（ローカルスケール）の設定手法（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_4.3；藤田ほか, 2007；太田ほか, 2007_4.2）。
- ローカルスケールおよびサイトスケールにおいて，動水勾配や透水性の分布の把握，および地下施設への地下水流量を予測するための段階的な調査･解析手法（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_4.3；藤田ほか, 2007；太田ほか, 2007_4.2）
- 各空間スケールにおける地層の堆積過程などを考慮したモデル化手法やそのためのデータの解釈など個別の調査･解析手法と，解析に用いる透水係数などの調査結果の品質保証体系（平成 17 年取りまとめ，分冊 1_4.3；藤田ほか, 2007；太田ほか, 2007_4.2）

第 1 段階の調査研究に基づいて蓄積された調査・解析手法に関する経験・ノウハウは，ルールベースおよび事例ベースとして整理している（大澤ほか, 2008_3.4；日本原子力研究開発機構, 2009）。

今後継続する第 2 段階の調査研究では，地下施設の建設に伴う地下水圧や湧水量などの地下水流動場の変化に関するデータと地下水流動解析結果との比較を通じて，第 1 段階で構築した水理地質構造モデルの妥当性を確認し，必要に応じてモデルを更新する（岩月ほか, 2009）。また，そのための方法論を整備するため，これまでの水理地質構造モデルの更新に伴う地下水流動解析結果の改良点を整理していく。

また，第 2 段階および第 3 段階の調査研究を通じて，精密調査時の施設設計および性能評価に必要な技術として，坑道近傍の地下水流動特性や物質移行特性を把握するための調査・解析手法の整備を目的として以下の項目を提示するよう，計画立案を進めている。

・坑道近傍を対象とした水理地質構造のモデル化および表層水理調査やボーリング孔を利用した長期観測結果などに基づく地下水流動解析結果と地下水の湧水量等との比較，モデル更新過程の提示。
・坑道近傍における水理・物質移行試験を想定した水理特性や地下水流動場に関する感度解析，調査試験計画への反映および試験結果等との比較。

今後の課題：

・第 2 段階および第 3 段階の調査研究における地下水流動特性を把握するための調査・解析・評価の方法論の整備およびそれらに関わる経験・ノウハウや判断根拠などの整備。
・第 2 段階で取得される情報に基づく，水理地質構造モデルの妥当性確認およびその更新に関する方法論の整備。

参考文献：

1. 核燃料サイクル開発機構 ：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 - 平成 17 年取りまとめ－ 分冊 1 深地層の科学的研究 - ”, JNC TN1400 2005-014, 4.3, pp.4-93-4-156 （2005）.
2. 藤田朝雄ほか ：“幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第 1 段階)研究成果報告書 分冊「地層処分研究開発」”, JAEA-Research 2007-045 (2007).
3. 太田久仁雄ほか ：“幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第 1 段階)研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」”, JAEA-Research 2007-044, 4.2, pp.59-89 (2007).
4. 大澤英昭ほか ：“「地質環境総合評価技術高度化開発; 次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発」平成 19 年度成果報告書”, JAEA-Research 2008-085, 3.4, pp.113-178 (2008).
5. 日本原子力研究開発機構 ：“平成 20 年度 地層処分技術調査等委託費地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発 報告書” (2009).
6. 岩月輝希ほか ：“幌延深地層研究計画のおける第 2 段階の調査研究計画（H20-21）”, JAEA-Research 2009-002 (2009).

2.2.3　地球化学特性に関する調査評価技術の開発

目的：（資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2006；2009；核燃料サイクル開発機構, 2002；核燃料サイクル開発機構, 1998）

・結晶質岩，堆積岩を対象として，各岩盤の特徴や性質を考慮した地上からの調査により岩盤中の地球化学特性を精度良く把握し，その分布，形成機構などをモデル化するための一連の調査・解析手法に関する知見の蓄積。
・地下施設建設時の一連の調査・解析手法の有効性の確認，知見の蓄積。

参考文献：

1. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画” (2006).
2. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 20 年度版）” (2009).
3. 核燃料サイクル開発機構：“超深地層研究所地層科学研究基本計画”，核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2001-018 (2002).
4. 燃料サイクル開発機構：“深地層研究所（仮称）計画”, JNC-TN1410 98-002 (1998).

(1)結晶質岩

平成 17 年までの成果：

結晶質岩中の淡水系地下水を対象とした広域地下水流動研究（動力炉・核燃料開発事業団, 1997）および超深地層研究所計画（核燃料サイクル開発機構, 2002）の第 1 段階における調査結果に基づき，研究坑道掘削以前の地球化学状態を把握し（T.Iwatsuki et al., 2002a；阿島ほか, 2006），それらに用いたボーリング孔における採水調査・分析手法や解析手法を例示した（平成 17 年取りまとめ, 分冊 1_4.2.4(4)(iii)）。これらの調査を通して得られた地表からの調査時における品質管理の知見を整理した（三枝ほか, 2007_3.2.4(4)；古江ほか, 2005；井岡ほか, 2006a）。また，二次鉱物を対象とした調査を地球化学環境の変遷の推定に適用し，pH や酸化還元環境，地下水水質の長期変遷に関する調査手法を提示した（井岡ほか, 2006b；Iwatsuki et al., 2002b；水野ほか, 2005）。

平成 21 年度までの成果：

広域地下水流動研究および超深地層研究所計画の第 1 段階を通して，調査の進展に伴う地下水の地球化学特性の理解度の変遷を確認するとともに，それらに基づき研究坑道掘削以前の地球化学環境を概念モデルおよび数値モデルとして記述するために有効であった以下の調査・解析手法を整備した（三枝ほか, 2007_3.2.4(4)）。これらは，後述する幌延地域での堆積岩の事例でも適用可能な汎用性のある技術であり，地層処分事業の概要調査および精密調査（地上か

らの調査）における計画立案やその実施において，地下水の地球化学特性を把握するための調査・解析手法とその指針を提示するものとなっている。

・地表からのボーリング調査における品質管理方法。
・現在の水質分布の把握に資するための可視化技術。
・水質形成プロセスを把握するための M3 解析手法 （阿島ほか, 2006；M. Laaksoharuju et al., 1999）。
・核種移行を律速する重要な要素である pH および酸化還元環境を把握するための熱力学的解析手法。
・pH および酸化還元環境の長期的な変遷を把握するための鉱物を対象とした解析手法（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_4.2.4(4)(iii)）。
・溶存成分に関する異なる複数の調査手法（多変量解析，マスバランス解析，熱力学解析など）（阿島ほか, 2006；三枝ほか, 2007_3.2.4(4)）や品質管理基準の下で得られたデータの品質評価手法 （水野ほか, 2007）。

第 1 段階の調査研究に基づき蓄積された解析・モデル化に関する経験・ノウハウはルールベースおよび事例ベースとして整理され，エキスパートシステムを構築している（エキスパートシステム）。なお，これらの調査・解析手法は，現在行われている第 2 段階の知見に基づき妥当性が評価される。

また，第 2 段階では，研究坑道掘削が地球化学的環境に与える影響を把握するための調査研究において，以下の調査・解析手法の適用を試みている。
・研究坑道内および地表からのボーリング孔等を利用した水質モニタリング技術
・研究坑道掘削の影響を示す概念モデルの構築方法および研究坑道掘削の影響を定量的に示すための数値解析方法

なお，グラウトやコンクリート等の人工材料が地球化学環境に与える影響については，研究坑道内からの湧水等を対象にしたモニタリングを実施し検討している。これまでに，グラウトやコンクリート等の影響により，pH やカルシウムイオン濃度が施工当初は上昇し，その後は一定期間を経て上昇前の値へと低下することがわかってきている。

さらに，第 3 段階のための準備として，物質移行に影響を与えるとされるコロイドの定性・定量的評価のために原位置で地下水を限外ろ過する手法の検討を行っている。一般的に，結晶質岩中の淡水系地下水においては，コロイドの濃度は低いことが想定されるため，コロイドを効率的に捕集し，化学的，物理的な特性を把握することが課題となるため，以下の知見の整理を進めている。

・原位置における地下水の化学的状態を保持しつつ多くのコロイドを捕集するために必要な被圧，嫌気状態での限外ろ過技術と品質管理手法（青木ほか, 2009）。

今後の課題：

今後継続する第 2 段階および第 3 段階の調査研究を通じて，精密調査（地下施設での測定・試験等）における計画立案やその実施において，施設の設計および性能評価に必要な地球化学特性（pH，塩濃度，酸化還元環境），それらの長期的な変動幅および地下環境の持つ緩衝能を把握するための，以下に示す調査・解析手法とそれらに必要な経験・ノウハウを提示する計画である。

- 研究坑道掘削が周辺の地質環境に与える地球化学的な影響を把握するための定量的数値解析手法の開発。
- 地層処分の長期的時間スケールにおいて，地球化学環境の変動を定量的に把握するための数値解析手法の開発。
- 地球化学環境の形成に寄与する微生物を含めた複合反応を把握するための調査手法，解析技術の開発。
- 原位置における緩衝能試験方法の開発と実施。

参考文献：

1. 動力炉・核燃料開発事業団 ：“広域地下水流動研究基本計画書”, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN7020 98-001 (1997).
2. 核燃料サイクル開発機構 ：“超深地層研究所地層科学研究基本計画”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2001-018 (2002).
3. T. Iwatsuki et al. : “Hydrochemical baseline condition of groundwater at the Mizunami underground research laboratory(MIU) ”, Appl. Geochem., 20, pp.2283-2302 (2002a).
4. 阿島秀司ほか ：“多変量解析による瑞浪超深地層研究所周辺の地下水化学モデルの構築”, 応用地質, 第 47 巻, pp.120-130 (2006).
5. 核燃料サイクル開発機構 ：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 - 平成 17 年取りまとめ - 分冊 1 深地層の科学的研究”, JNC TN1400 2005-014, 4.2.4(4)(iii), pp.4-69～4-71 (2005).
6. 三枝博光ほか :“超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第 1 段階）研究成果報告書”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-043, 3.2.4(4), pp.91-92 (2007).
7. 古江良治ほか ：“深層ボーリング孔を用いた地球化学調査の課代に対する試み”, 応用地質, 第 46 巻, pp.232-236 (2005).
8. 井岡聖一郎ほか ：“深層ボーリング孔を用いた岩盤中の地下水の採取方法 –地下水の酸化還元状態の把握のために–”, 日本水文化学会, 第 36 巻, pp.181-190 (2006a).
9. 井岡聖一郎ほか ：“電極表面連続研磨器具付き白金電極を用いる水溶液酸化還元電位の安定測定”, 分析化学, 第 55 巻, pp.793-797 (2006b).

10. T. Iwatsuki et al.：“Isotopic and morphological features of fracture calcite from granitic rocks of the Tono area, Japan: a promising palaeohydrogeological tool”, Appl. Geochem., 17, pp.1241-1257 (2002b).
11. 水野崇ほか：“深部地下環境の長期安定性に関する解析例”, 第15回環境地質学シンポジウム論文集, pp.51-54 (2005).
12. M. Laaksoharuju et al.：“Multivariate Mixing and Mass-balance (M3) calculations, a new tool for decoding hydrogeochemical information”, Appl. Geochem., 14, pp.861-871 (1999).
13. 水野崇ほか：“地下水の地球化学調査に関わるデータ品質評価手法の提案”, 地下水学会, 49, pp.139-152 (2007).
14. 青才大介ほか：“超深地層研究所における地下水の地球化学に関する調査研究　-地下水の地球化学環境を保持したろ過手法に関する技術開発-”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Testing 2009-003 (2009).

(2)堆積岩

平成17年までの成果：

幌延深地層研究計画の第1段階の調査研究において，堆積岩中の塩水系地下水を対象とした地上物理探査，ボーリング孔を利用した調査技術を構築した。また，地下施設建設前の地下水の地球化学特性を把握し，その形成プロセス・メカニズムの解析手法を構築した（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_4.3.4～4.3.5）。

平成21年度までの成果：

幌延深地層研究所計画第1段階の調査研究および平成17年度から始まった第2段階の調査研究に基づき，以下に示す調査・解析手法を整備した。これらは，地層処分事業の概要調査および精密調査（地上からの調査）における計画立案やその実施において，堆積岩の特徴を考慮した地下水の地球化学特性を把握するための調査・解析手法とその指針を提示するものとなっている。

・沿岸域の堆積岩において特徴的な化石海水の分布やガス組成を把握するための，岩盤比抵抗分布の調査（電気探査）やボーリング孔を利用した採水調査手法，可視化ソフトウェアによる地下水水質の空間分布と地質構造や地下水流動状態との関連性を解析評価する手法を整備（岩月ほか, 2009a；國丸ほか, 2007；岩月ほか, 2009b）。
・多変量解析やマスバランス解析と鉱物データを用いた熱力学解析を併用した水質形成プロセス解析手法を整備（太田ほか, 2007；K.Hama et al., 2007）。

第1段階の調査研究に基づき蓄積された解析・モデル化に関する経験・ノウハウはルールベースとして整理され，エキスパートシステムを構築している（エキスパートシステム）。

第 2 段階以降の調査研究では，第 1 段階における水質分布予測結果を確認することで，解析手法の妥当性を評価するとともに，研究坑道掘削が地球化学的特性に与える影響を把握するため，以下の調査・技術開発を実施している。

・坑道内地下水モニタリング装置の開発
・坑道周辺の地下水の pH，酸化還元電位，水質変化の解析手法の整備

また，第 2 段階および第 3 段階の調査研究を通じて，精密調査における計画立案やその実施時の施設設計および性能評価に必要な技術として，人工材料の周辺や埋め戻しに伴う施設周辺の地球化学的特性の変化を把握するため，以下に示す調査・解析手法とそのノウハウを提示するよう計画立案を進めている。

・坑道周辺岩盤の生物化学特性の調査・解析手法（日本原子力研究開発機構, 2009）。
・操業段階における地下水の地球化学特性変化やそのメカニズムを理解するために必要な調査機器と調査手法。
・坑道埋め戻しとそれに伴う再冠水後の地球化学環境を評価するための試験・観測技術とそのモデル化手法。

今後の課題：

・堆積岩・塩水系地下水環境において，施設建設・操業・閉鎖段階で一連の地下水の地球化学的特性の変化を理解するための基盤技術の整備。
・施設周辺の地球化学的特性の短期的および長期的な変化やその要因を把握するためのモデル化手法の開発および知識の蓄積。

参考文献：

1. 核燃料サイクル開発機構 ：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 - 平成 17 年取りまとめ－分冊 1　深地層の科学的研究 - ”, JNC TN1400 2005-014, 4.3.4～4.3.5, pp.4-147～4-156 （2005）.
2. 岩月輝希ほか ：“幌延深地層研究計画のおける第 2 段階の調査研究計画（H20-21）”, JAEA-Research 2009-002 (2009a).
3. 國丸貴紀ほか ：“幌延深地層研究計画における地下水，河川水及び降水の水質分析”, JAEA-Data/Code 2007-015（2007）.
4. 岩月輝希ほか ：“北海道幌延地域における深部地球化学環境の長期変遷シナリオの構築”, 地学雑誌, 118(4), pp.700-716 （2009b).
5. 太田久仁雄ほか ：“幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第 1 段階)研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」”, JAEA-Research 2007-044, pp.90-108 (2007).

6. K.Hama et al. : “The hydrogeochemistry of argillaceous rock formations at the Horonobe URL site, Japan”, Physics and Chemistry of the Earth, 32, pp.170-180 (2007).
7. 日本原子力研究開発機構 : “平成 20 年度 地層処分技術調査等委託費地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発 報告書” (2009).

2.2.4 物質移動特性に関する調査評価技術の開発

目的 : （太田ほか, 2001 ; 資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2006 ; 2009 ; 核燃料サイクル開発機構, 2002 ; 核燃料サイクル開発機構, 1998）

・結晶質岩，堆積岩を対象として，各岩盤の特徴や性質を考慮した地上からの調査により物質の移行・遅延プロセスとそのプロセスが生じる場の構造を把握し，物質の移行・遅延に関わるデータの取得手法とモデル構築手法に関する知見の蓄積。
・地下施設建設時の一連の調査・解析手法の有効性の確認，知見の蓄積。

参考文献 :

1. 太田久仁雄ほか :“結晶質岩を対象とした放射性核種の移行・遅延モデルの構築と妥当性評価”, サイクル機構技法, No.11, pp.119-128 (2001).
2. 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構 : “高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画” (2006).
3. 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構 : “高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 20 年度版）” (2009).
4. 核燃料サイクル開発機構 : “超深地層研究所地層科学研究基本計画”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2001-018 (2002).
5. 核燃料サイクル開発機構 :“深地層研究所（仮称）計画”, JNC TN1410 98-002 （1998）.

(1)結晶質岩

平成 17 年までの成果 :

超深地層研究所地層科学研究基本計画(核燃料サイクル開発機構, 2002)に記載された物質移動現象とその場の把握およびそのために必要な技術の開発を実施した。岩盤の収着・拡散特性の把握については, 深層ボーリング（魚住ほか, 2005）のコアを用いた室内試験より, JNC-SDB 収着データベース（澁谷ほか, 1999 ; 陶山ほか, 2004）や釜石鉱山の栗橋花崗閃緑岩（核燃料サイクル開発機構, 1999）を対象として推定した収着係数ならびに拡散係数の妥当性を確認した（太田ほか, 2005）。物質移動場の把握については，空隙構造とその広がりに関するデータのほか，深層ボーリングコアを用いた割れ目近傍のウラン系列核種（238U，234Th，230Th）

の分布プロファイルの評価により，瑞浪層群および花崗岩中の物質移動場の構造特性・空隙構造特性の値や範囲を推定した（太田ほか，2005）。コロイド／有機物／微生物の影響の把握については，深層ボーリングで採水した地下水試料の掘削水による汚染率が数～数十%と詳細な現存量調査を行うためには高いなど，品質確保されたデータの取得には課題が残った（太田ほか, 2005）。

平成 21 年度までの成果：

超深地層研究所計画の第 2 段階は，研究坑道の掘削に伴い水理学的・地球化学的擾乱が大きいと考えられ，実際の地下での物資移動試験や長期の採水調査にとって適切な環境とは言いがたい（三枝ほか，2007_3.2.6(4)）。したがって，先行する海外の地下研究施設を利用した共同研究の成果や，超深地層研究所計画で得られたデータを用いて行われた物質移行解析（核燃料サイクル開発機構，2005）などの成果に基づき，第 3 段階の研究計画の策定を行った（三枝ほか, 2007）。

今後継続する第 2 段階および第 3 段階の調査研究を通じて，精密調査（地下の調査施設での測定・試験等）における計画立案やその実施において，施設の設計および性能評価に必要な物質の移行・遅延プロセスとそのプロセスが生じる場を把握するための，以下に示す調査・解析手法とそれらに必要な経験・ノウハウを提示するよう，計画立案を進めている。

・原位置における物質移動試験（割れ目，マトリックス）。
・室内における物質移動試験。

今後の課題：

・地下水による物質の移行・遅延に関するデータの取得・解析・評価を通して，第 1，第 2 段階で推定した物質の移行・遅延プロセスとそのプロセスが生じる場の構造の妥当性の確認。
・コロイド／有機物／微生物の評価に関する，地下における条件を極力維持した地下水試料の採取と，その解析を通した第 1，第 2 段階の推定結果の妥当性の確認。

参考文献：

1. 核燃料サイクル開発機構 ：“超深地層研究所地層科学研究基本計画”，核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2001-018 (2002).
2. 魚住直己ほか：“超深地層研究所計画における試錐調査（MIZ-1 号孔）”，核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7440 2005-091 (2005).
3. 澁谷朝紀ほか：“核種のイベントおよび岩石に対する収着データベース”，核燃料サイクル開発機構, JNC TN8410 99-050 (1999).
4. 陶山忠宏ほか：“JNC 収着データベース（JNC-SDB）の更新：1998 年～2003 年までに公開された文献データの追加”，核燃料サイクル開発機構, JNC TN8410 2003-018 (2004).
5. 核燃料サイクル開発機構 ：“釜石原位置試験総括報告書”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7410 99-001 (1999).

6. 太田久仁雄ほか：“東濃地域における地上からの地質環境の調査・評価技術”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-023 (2005).
7. 三枝博光ほか：“超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第 1 段階）研究成果報告書”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-043, 3.2.6(4), p.145 (2007).
8. 核燃料サイクル開発機構：“地質環境の調査から物質移行解析にいたる一連の調査・解析技術”, JNC TN1400 2005-021 (2005).

(2)堆積岩

平成 17 年までの成果：

幌延深地層研究計画における第 1 段階で得られた地質環境情報と岩芯試料(ボーリングコア)を用いて拡散係数や収着分配係数，透水係数などの物質移動特性に関する情報や知見を蓄積すると共に，基質部の拡散係数については，深度や地層（声問層および稚内層）のバリエーションに起因する間隙率の違いを考慮することにより，第 2 次取りまとめにおいて分類した新第三紀堆積岩（泥岩・凝灰岩類）に対する拡散係数と間隙率との関係に適合することを示し，間隙率の関数として拡散係数を表現できることを確認した（平成 17 年取りまとめ 分冊 3；下茂ほか, 2004）。併せて，亀裂が存在する場合，新第三紀の堆積岩においても亀裂が物質移動特性に与える影響が大きい可能性があることを示した（性能評価カーネル 2.2.7）。また，第 1 段階で取得した地質環境情報とそれまでに取得された物質移動特性に関するデータに加えて，それまでに構築された JNC-SDB 収着データベース（澁谷ほか, 1999；陶山ほか, 2004）や DDB 拡散係数データベース（H.Sato, 1999）などを活用して，幌延地域を事例とした地質環境中での地下水による物質移行に関する解析を行い，地質環境調査から物質移行解析に至る一連の安全評価手法を試行すると共に，物質移行解析におけるモデルやパラメータの設定や設定根拠，パラメータの感度や解析のノウハウなどを整理した（性能評価カーネル 2.2.7；核燃料サイクル開発機構, 2005）。

平成 21 年度までの成果：

幌延深地層研究計画の第 1 段階においては，地質環境における地下水による物質移行・遅延評価として，様々な調査で得られた情報に基づき物質移行解析に用いるパラメータ（移行経路における実流速，移行距離，間隙率，密度など）を設定し，物質移行解析におけるこれらのパラメータの感度や解析のノウハウを整理すると共に，地質環境調査へのフィードバックを行ってきた。その結果，

・ 稚内層および声問層は極めて高い遅延効果を示す。
・ 稚内層では，割れ目帯が優勢な移行経路として機能する可能性がある。

ことなどが分かり，地下水による物質移行モデル（多孔質媒体や亀裂媒体など）の設定にお

いては，割れ目帯の分布や水理特性情報を考慮し，総合的に判断する必要があることを示した（性能評価研究カーネル 2.2.7；太田ほか, 2007）。

また，ボーリングコアを用いて地層処分システムの安全評価上重要な元素に対する収着・拡散などの物質移行･遅延プロセスに関わる室内試験を行い，データの蓄積と現象解明に加えて，モデル構築を進めた（性能評価研究カーネル 2.2.4；平成 17 年取りまとめ 分冊 3；下茂ほか, 2004）。これらの一連の調査研究は，地層処分事業の概要調査および精密調査における地上からの調査段階での計画立案やその実施において，以下に示すような，性能評価に必要な物質移行モデルや物質移行解析に用いるパラメータに加えて，堆積岩における物質移行場での収着・拡散などの物質移行・遅延特性を把握するための調査・解析手法とそれらに必要な経験・ノウハウを提示するものとなっている。

・地下水による物質移行モデルを記述するために必要となる地質環境情報とモデル化手法。
・地下水による物質移行・遅延特性の測定手法と物質移行解析におけるパラメータ設定方法。
・地下水による物質移行解析結果の評価と地質環境調査へのフィードバック手法。

第 2 段階においては，幌延の地質環境への安全評価手法の適用性を確認するにあたり，調査研究過程で得られた新たな地質環境情報に加えて，ボーリングコアや地下水試料を用いた物質移動特性やそれらに影響を及ぼすと考えられている有機物/コロイド，微生物などに関する情報や知見の蓄積を進めると共に，原位置でのデータ取得技術や定量評価手法の整備を進めた（性能評価研究カーネル 2.2.4；2.2.5；2.2.6；石寺・黒澤, 2007；石寺ほか, 2008；日本原子力研究開発機構, 2008；日本原子力研究開発機構, 2009）。また，有機物/コロイド，微生物が物質移行に及ぼす影響についても予察的な検討を進めた（性能評価研究カーネル 2.2.5；日本原子力研究開発機構, 2008；日本原子力研究開発機構, 2009）。一方，第 1 段階で課題として挙げられた物質移行モデルの考え方については，物質移行モデルと解析対象となるスケールとして分類した（H.Kurikami et al., 2008）。

今後継続する第 2 段階および第 3 段階の調査研究を通じて，地層処分事業の精密調査（地下の調査施設での測定・試験等）における計画立案やその実施において，施設設計および性能評価に必要な以下に示す調査・解析手法とそのノウハウを提示するよう，計画立案を進めている（性能評価研究カーネル 2.2.4；2.2.5；2.2.6；2.2.7）。

・物質移行経路における地下水の（実）流速や溶解度，収着分配係数，拡散係数などの物質移行・遅延特性のプロセス・メカニズムや特性値とその不確実性に関わる調査技術
・原位置における物質移行・遅延プロセス・メカニズムに関わる有機物/コロイド，微生物などの調査・解析技術

今後の課題（性能評価カーネル 2.2.4；2.2.5；2.2.6；2.2.7）：

・第 2 段階および第 3 段階の調査研究において地質環境情報と地下水による物質移動特性に関するデータや知見の蓄積を進めると共に，それらの情報や知見ならびにこれまでに開発され

ている物質移行・遅延に係る熱力学・収着・拡散データベース（熱力学データベース）を活用して，幌延地域を事例とした物質移行解析を行い，地質環境調査から物質移行解析に至る一連の安全評価手法の適用性を確認する。また，各段階での物質移行解析におけるモデルやパラメータの設定や設定根拠，パラメータの感度や解析のノウハウなどを整理し，地下水による物質移行に関わる調査・解析技術を体系化する。

・有機物/コロイド，微生物が物質移行・遅延プロセスに及ぼす影響評価や物質移行・遅延プロセス・メカニズムに関わる収着・拡散，有機物/コロイド，微生物の挙動を理解するための室内試験と原位置での調査を進めると共に，原位置調査・解析技術を開発する（岩月ほか, 2009）。

参考文献：

1. 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－　分冊 3　安全評価手法の開発－”, JNC TN1400 2005-016 (2005).
2. 下茂道人ほか：“亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象に関する研究(Ⅱ)”, JNC TJ8400 2004-011 (2004).
3. 澁谷朝紀ほか：“核種のイベントおよび岩石に対する収着データベース”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8410 99-050 (1999).
4. 陶山忠宏ほか：“JNC 収着データベース（JNC-SDB）の更新：1998 年～2003 年までに公開された文献データの追加”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8410 2003-018 (2004).
5. H. Sato：“Diffusivity Database (DDB) for Major Rocks: Database for the Second Progress Report”, JNC TN8400 99-065 (1999).
6. 核燃料サイクル開発機構：“地質環境の調査から物質移行解析にいたる一連の調査・解析技術”, JNC TN1400 2005-021 (2005).
7. 太田久仁雄ほか：“幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）研究成果報告書　分冊「深地層の科学的研究」”, JAEA-Research 2007-044 (2007).
8. 石寺孝充・黒澤精一：“幌延堆積岩中の核種の拡散係数の取得”, 日本原子力学会 2007 年秋の大会，予稿集, p.494 (2007).
9. 石寺孝充ほか：“幌延堆積岩類への Cs+の収着に及ぼす K+の影響”, 日本原子力学会 2008 年秋の大会，予稿集, p.685 (2008).
10. 日本原子力研究開発機構：“平成 19 年度地層処分技術調査等委託費　高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム化学影響評価高度化開発報告書” (2008).
11. 日本原子力研究開発機構：“平成 20 年度地層処分技術調査等委託費　高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム化学影響評価高度化開発報告書” (2009).
12. H. Kurikami et al.：“Scale Effect and Heterogeneity of Hydraulic Conductivity of Sedimentary Rocks at Horonobe URL Site”, Physics and Chemistry of the Earth 33, pp.S37-S44 (2008).
13. 日本原子力研究開発機構：“熱力学・収着・拡散データベース, 2005-2009”

14.岩月輝希ほか：“幌延深地層研究計画における第 2 段階の調査研究計画（H20-21）”, JAEA-Research 2009-002 (2009).

2.2.5 岩盤の熱・力学特性に関する調査評価技術の開発

目的：（資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2006；2009；核燃料サイクル開発機構, 2002；核燃料サイクル開発機構, 2001）

・結晶質岩，堆積岩を対象として，各岩盤の特徴や性質を考慮した地上からの調査により施設の設計および性能評価に必要な物理・力学特性（熱特性含む）に関する一連の調査・解析手法に関する知見の蓄積。
・地下施設建設時の一連の調査・解析手法の有効性の確認，知見の蓄積。

参考文献：

1. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画” (2006).
2. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 20 年度版）” (2009).
3. 核燃料サイクル開発機構：“超深地層研究所地層科学研究基本計画”，核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2001-018 (2002).
4. 核燃料サイクル開発機構：“深地層研究所（仮称）計画　地表から行う調査研究（第 1 段階）計画”，核燃料サイクル開発機構, JNC TN1410 2001-001 (2001).

(1)結晶質岩

平成 17 年までの成果：

結晶質岩を対象とした瑞浪超深地層研究所計画では，ローカルスケールおよびサイトスケールにおける物理・力学特性，初期応力状態および地下の温度環境データを把握する技術を整備した（平成 17 年取りまとめ 分冊 1）。また，これらのデータをもとにしたモデル化手法や掘削影響予測解析手法を整備した（平成 17 年取りまとめ 分冊 1）。

平成 21 年度までの成果：

第 1 段階（三枝ほか, 2007）では，調査対象領域となる瑞浪超深地層研究所用地およびその周辺に分布する土岐花崗岩の物理・力学特性，初期応力状態などを把握した。また，これらのデータをもとに岩盤力学モデルを構築（松井ほか, 2000）するとともに，三次元的な応力分布や研究坑道を掘削する際に発生すると考えられる坑道周辺岩盤の掘削影響領域の分布とその物理・力学特性を解析により推定することを試みた（瀬野ほか, 2008）。これら一連の調査研究

は，地層処分事業の概要調査および精密調査（地上からの調査）における計画立案やその実施において，以下に示すような，施設の設計および性能評価に必要なサイトスケールにおける岩盤の物理・力学特性や初期応力状態を把握するための調査・解析手法とそれらに必要な経験・ノウハウを提示するものとなっている。

・地表からのボーリングおよびコアを用いた室内物理・力学試験手法。
・地表からのボーリングおよびコアを用いた初期応力測定手法。
・岩盤力学モデルの構築手法。
・三次元的な応力場の評価手法。
・坑道周辺岩盤の掘削影響評価解析手法。

また，第 2 段階においては，研究坑道周辺岩盤（深度 100m および 200m）の物理・力学特性および初期応力状態に関する調査を実施するとともに，立坑掘削に伴う立坑周辺岩盤の力学挙動に関する調査を行っている。これらは，精密調査（地下施設での測定・試験等）における計画立案やその実施において，施設の設計および性能評価に必要な坑道周辺岩盤の物理・力学特性や初期応力状態などを把握するための，以下に示す調査・解析手法の確認とそれらに必要な経験・ノウハウを提示するものとなる。

・坑道からのボーリングおよびコアを用いた室内物理・力学試験手法。
・坑道からのボーリングおよびコアを用いた初期応力測定手法。
・立坑周辺岩盤の掘削影響評価手法。

今後の課題：

・第 2 段階における，第 1 段階の岩盤力学モデルによる予測の妥当性の確認。
・第 2 段階，研究坑道を利用した研究段階（第 3 段階）における，第 1 段階で用いた坑道周辺岩盤の掘削影響評価手法およびその評価結果の妥当性の確認。
・第 3 段階の調査研究における試験実施計画の策定。

参考文献：

1. 核燃料サイクル開発機構 ：“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 (2005).
2. 三枝博光ほか ：“超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第 1 段階）研究成果報告書”，日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-043 (2007).
3. 松井裕哉ほか ：“MIU-3 号孔における力学特性調査結果及び正馬様用地における土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデル”，核燃料サイクル開発機構, JNC TN7420 2001-001 (2000).
4. 瀬野康弘ほか ：“超深地層研究所計画における岩盤力学に関する調査研究　年度報告書（2006 年度）”，日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2008-084 (2008).

(2)堆積岩

H17 年までの成果：

幌延深地層研究計画の第 1 段階においては，深層ボーリングを用いて力学特性に関するデータを取得し，研究所設置地区の岩盤力学概念モデルを構築した。研究所設置地区に分布する珪質岩に関しては，比熱容量・線膨張係数・熱伝導率などの基礎的な諸物性を取得した（太田ほか, 2007_4.4）。

H21 年度までの成果：

幌延深地層研究計画の第 1 段階の調査研究において，ボーリング孔を利用して力学特性（初期地圧，弾性・変形係数）の深度分布を，また，取得されたコアを用いて力学特性（弾性係数，強度（圧縮，引張），ポアソン比），物理特性（みかけ比重，有効間隙率，含水比，弾性波速度），熱特性の深度分布を把握した（丹生屋ほか, 2005；丹生屋ほか, 2006；真田ほか, 2008；松井ほか, 2005）。さらに，掘削影響解析や地下施設設計に資するために，各種拘束圧下での力学特性評価試験を行い，微視的な構造観察結果や同地域の堆積履歴を踏まえて結果を評価した（真田ほか, 2009a）。室内試験で得られる力学特性，物理特性等の品質管理については，JIS（日本工業規格），ISRM（岩の力学連合会），JGS（地盤工学会）の基準に準拠し実施した。そして，初期地圧測定については，複数の応力測定法（AE 法，DSCA 法，水圧破砕法，ブレイクアウト法）を適用し，その妥当性について検討するとともに，造構作用や孔壁破壊などの観察結果からこの地域の応力状態について解析した（真田ほか, 2009b）。また，室内試験で得られた力学特性情報を反映した岩盤力学モデルを構築し，坑道掘削影響の予測解析を行った（真田ほか, 2010）。
これら一連の調査研究は，地層処分事業の概要調査および精密調査（地上からの調査）における計画立案やその実施において，以下に示すような，施設の設計および性能評価に必要なサイトスケールにおける岩盤の物理・力学特性や初期応力状態を把握するための調査・解析手法とそれらに必要な経験・ノウハウを提示するものとなっている。（太田ほか, 2007_4.4）。

・地表からのボーリングおよびコアを用いた室内物理・力学的試験手法。（丹生屋ほか, 2005；丹生屋ほか, 2006；真田ほか, 2008）
・地表からのボーリングおよびコアを用いた初期応力測定手法（真田ほか, 2009b）
・岩盤力学モデルの構築手法。（丹生屋ほか, 2005；丹生屋ほか, 2007；真田ほか, 2008）
・坑道周辺岩盤の掘削影響評価解析手法（真田ほか, 2010）。

第 2 段階においては，第 1 段階の調査結果に基づき設定した力学特性，特に初期地圧に関する知見の詳細化を主な目的として深度 140m，250m において水圧破砕法やブレイクアウト法による初期応力評価を実施した（中村ほか, 2009）。そして，坑道の掘削に伴う周辺岩盤の諸特性の変化を把握するための掘削影響試験を実施した。

また，岩盤の力学特性の長期モニタリング技術として，光ファイバー式の岩盤変位計を開発し，その性能確認試験を開始している（柏井ほか, 2009a；柏井ほか, 2009b）。今後継続する第 2 段階および第 3 段階の調査研究では，精密調査（地下の調査施設での測定・試験等）時の施設設計および性能評価に資するため，以下の調査・解析手法とそのノウハウを提示していくよう，計画立案を進めている。

・坑道周辺の堆積岩の力学特性・物理物性値分布の調査・解析手法。
・坑道周辺の掘削影響領域の調査・解析手法。

今後の課題：

・第 2 段階および第 3 段階の調査研究で取得される力学特性，初期地圧の空間分布の把握，関連する知識の蓄積。
・第 2 段階および第 3 段階の調査研究における地下深部から掘削するボーリング孔を利用した力学特性や掘削影響の調査技術の開発およびそれらに必要な知識の蓄積。
・熱－水－応力連成解析に用いる熱・応力特性のパラメータの取得（岩月ほか, 2009）。

参考文献：

1. 太田久仁雄ほか：“幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）研究成果報告書分冊「深地層の科学的研究」”, JAEA-Research 2007-044, 4.4, pp.109-136 (2007).
2. 丹生屋純夫ほか：“研究所設置地区選定のための HDB-1，2 孔における岩盤力学的調査”, JNC TN5400 2005-012 (2005).
3. 丹生屋純夫ほか：“HDB-3～8 孔における岩盤力学的調査結果及び研究所設置地区の岩盤力学的概念モデル検討”, JAEA-Research 2006-086 (2007).
4. 真田祐幸ほか：“HDB-9～11 孔における岩盤力学的調査結果及び研究所設置地区の岩盤力学的概念モデル更新”, JAEA-Research 2008-069 (2008).
5. 松井裕哉ほか：“設計技術（地下施設設計，人工バリア設計，閉鎖設計）の実際の地質環境条件への適用性評価”, JNC TN5400 2005-004 , pp.42-49 (2005).
6. 真田祐幸ほか：“堆積履歴が幌延地域に分布する珪質岩の力学的特性や微視的構造変化に及ぼす影響”, Journal of MMIJ, Vol.125, pp.521-529 (2009a).
7. 真田祐幸ほか：“幌延地域に分布する珪質岩に対する幾つかの岩盤応力測定法の適用性と推定された応力状態”, Journal of MMIJ, Vol.125, pp.530-539 (2009b).
8. 真田祐幸ほか：“幌延深地層研究計画におけるひずみ軟化挙動と物性の深度依存性を考慮した三次元立坑逐次掘削解析”, JAEA-Research 2009-050 (2010).
9. 中村隆浩ほか：“幌延深地層研究センター換気立坑 140m 試錐座における初期応力測定”, JAEA-Research 2009-004 (2009).
10. 柏井善夫ほか：“光ファイバー式岩盤内変位計の開発,2”, JAEA-Technology 2008-046 (2009a).

11.柏井善夫ほか：“光ファイバー式岩盤内変位計の開発,3”, JAEA-Technology-2008-047 (2009b).
12.岩月輝希ほか：“幌延深地層研究計画における第 2 段階の調査研究計画（H20-21）”, JAEA-Research 2009-002 (2009).

2.2.6 地質環境特性の長期変化に関する調査評価技術の開発

目的：（資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2006；2009）

・結晶質岩，堆積岩を対象として，各岩盤の特徴や性質を考慮した地上からの調査により，過去から現在までの主に隆起・沈降・侵食／気候・海水準変動の発生様式・規則性などを把握し，地下地質環境特性の長期変化を記述するための一連の調査・解析手法に関する知見の蓄積。

参考文献：

1. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画” (2006).
2. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 20 年度版）” (2009).

(1)結晶質岩

平成 17 年までの成果：

隆起・沈降や侵食・堆積などによる地形変化と降水量変化などの気候変動が地質環境に及ぼす長期的な影響を概括的に理解するため，東濃地域を事例として，将来 10 万年程度の期間に想定される地形変化をモデル化するとともに，その結果および気候変動を考慮した地下水流動解析を実施し，地下水流動特性の長期変化に対する影響因子を抽出した（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_3.3.1；H.Saegusa et al., 2009）。

平成 21 年度までの成果：

地下水流動特性に対する影響因子の一つとして地形変化に着目し，東濃地域を事例に，主要な山地や平野の発達過程を考慮して，それぞれの時代における広範囲の古地形を概略的に復元した。また，古地形の変遷と他の影響因子である涵養量の変化や断層の水理特性を考慮した地下水流動解析を実施し，地下水流動特性の過去から現在までの長期変化に与える影響を概括的に評価した（尾上ほか, 2009a）。この結果，地形変化や気候変動に伴う涵養域から流出域までの地下水流動系が変化する範囲が，大規模な断層で囲まれた領域に留まっていることが示された。次に，この大規模断層に囲まれた領域において，断層の水理地質構造の違い（断層の連続

性）が地下水流動特性に与える影響を確認するとともに，古地形や古気候に関する情報を現地調査によって取得し，東濃地域の土岐川流域の地形が形成され始めた時期からの概括的な古地形と氷期・間氷期における涵養量を推定し，それらを考慮した地下水流動解析を実施した（尾上ほか, 2009b）。また，現在の温暖期とは異なる氷期の気候変動を考慮するために必要とされる日本全国および海外の高緯度地域の蒸発散量データについて文献資料を用いて整理した（K.Yasue et al., 2008）。これらの一連の調査研究は，地上からの調査段階における計画立案やその実施において，以下に示すような，性能評価に必要なシナリオや概念モデルの構築とともに，地質環境特性の長期変化を記述するための調査・解析手法とそれらに必要な経験・ノウハウを提示するものとなっている。

・地下水流動解析領域の絞り込み方法。
・地下水流動特性の長期変化への影響因子の抽出手法。
・地下水流動特性の長期変化の傾向や幅を推定するために必要となるデータセットおよび調査・解析の考え方。

今後の課題：

・地質環境特性の長期変化を考慮した性能・安全評価手法の開発を念頭に置き，現在から将来にわたる地質環境特性の長期変化を記述するための一連の調査・解析・評価技術の整備。
・地下水の水質・同位体を用いた地球化学的アプローチによる地下水流動解析結果の妥当性を示す方法の検討。
・隆起・侵食／気候・海水準変動に伴う地質環境特性の長期変化について，シナリオに応じた発生の可能性と変動幅を示すとともに，それらの不確実性（あるいは確度）を併せて示す手法の構築。

参考文献：

1. 核燃料サイクル開発機構 ：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ— 分冊1「深地層の科学的研究」”, JNC TN1400 2005-014, 3.3.1, pp.3-58 (2005).
2. H.Saegusa et al.：“Numerical assessment of the influence of topographic and climatic perturbations on groundwater flow conditions”, In Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Crystalline Rock, edited by Nuclear Energy Agency, Workshop Proceedings Manchester, United Kingdom 13-15 November 2007, Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), pp.269-276, ISBN 978-92-64-06056-2, Paris (2009).
3. 尾上ほか ：“過去から現在までの長期的な地形変化が地下水流動特性に与える影響の解析的評価の試み”, 日本原子力学会和文論文誌, 8, pp.40-53 (2009a).

4. 尾上ほか：“実データに基づく過去数十万年の古地形及び古気候の推定手法の整備”，土質工学セミナー報告会（地盤工学会）（2009b).
5. K.Yasue et al.：“Study for Evaluation of the Influence of Long-term Climate Change on Deep Groundwater Flow Conditions: integration of paleo-climatology and hydrogeology”, Proceedings of 36th IAH Congress, October, 2008 Toyama, Japan. pp.1590-1596 (2008).

(2)堆積岩

平成 17 年までの成果：

幌延地域を事例として，既存情報を用いた調査・解析により隆起の傾向と速度および汀線位置の変遷の概略を把握し，地上からの調査段階で取得すべきデータを抽出するとともに，既存情報を用いた調査，地表調査および地上からのボーリング孔を利用した調査・解析により，幌延地域における地殻歪速度と侵食速度の概略を把握した。これらの知見により，時間スケールごとに適切と考えられる地殻歪速度の算出方法を提示するとともに，岩石・鉱物の化学組成等を指標として侵食速度を算出するための調査・解析の流れを作業フローとして整備した（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_3.2.1）。

平成 21 年度までの成果：

地層処分は，人工バリアと天然の地層を適切に組み合わせたシステムによって数万年以上にも及ぶ極めて長い時間スケールの安全を確保しようとするものである（資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2006；2009）。このため，第 1 段階においては，外挿法や類推法などを組み合わせ，数万年以上の期間に及ぶ地質環境特性の長期変化を記述するための調査・解析手順を整備した（太田ほか, 2007_4.5；T.Niizato et al., 2009）。また，この手順（基本フロー）に基づき，幌延地域を事例として，段階的に空間スケールを区切りながら調査を進める際の考え方を整理するとともに，調査の種類と組み合わせ，取得するデータの種類および異なる分野間で得られたデータの統合など，一連の調査・解析における合理的なデータの流れを具体化した統合化データフローダイアグラムを構築した（太田ほか, 2007_4.5；T.Niizato et al., 2009）。第 1 段階の調査研究では，統合化データフローダイアグラムに従って段階的に調査・解析を実施し，幌延地域で過去に生起した天然現象の発生様式や規則性を把握した（太田ほか, 2007_4.5；T.Niizato et al., 2009）。また，同地域のような沿岸域・堆積岩分布地域において地質環境特性の長期変化を記述する際に考慮すべき天然現象を抽出し，それら天然現象とその影響を整理した地質環境特性の長期変化に関する概念モデルを構築した（太田ほか, 2007_4.5；T.Niizato et al., 2009）。これらの一連の調査研究は，地上からの調査段階における計画立案やその実施において，以下に示すような，性能評価に必要なシナリオや概念モデルの構築とともに，地質環境特性の長期変化を記述するための調査・解析手法とそのノウハウを提示するものとなっている。

・対象地域において生じる可能性の高い地質環境特性の長期変化を描くために必要となるデータセットおよびそれらデータを取得するための調査や解析項目。
・概念モデルとして地質環境特性の長期変化を描くためのデータの統合手順と概念モデルの構築に至る合理的な一連の調査・解析の流れ。
・対象地域の地形学的・地質学的特徴を考慮して調査・解析を段階的に進める際の空間スケールの設定方法。
・氷期-間氷期の 1 サイクルである 10 万年程度の期間および対象地域における地史を踏まえて設定される時間スケールを対象として地質環境特性の長期変化を記述する際に必要となるデータセットおよび調査・解析項目の設定の考え方。

第 2 段階においては，第 1 段階で構築した概念モデルに基づいて，幌延地域で過去に生起した天然現象による影響を考慮して地下水流動解析および移流・分散解析を実施するための数値解析技術の開発を進めるとともに（今井ほか, 2009），第 1 段階の調査研究を通じて得られた地質環境データを使用して感度解析的に数値解析を実施し，幌延地域で現在に引き続く陸化が開始される約 150 万年前以降の期間を対象として，地下水の流動特性（全水頭）および地下水中の塩分濃度の長期変化の概略を記述した（T.Niizato et al., 2009；今井ほか, 2009）。また，第 2 段階における研究坑道掘削時の地質観察で取得したデータ等に基づいて，第 1 段階で作成した概念モデルの妥当性の確認を進めている。さらに，主に第 1 段階における地上からの調査で実施した気候変動，地形変化および地質構造の変遷に係る調査・解析を対象として，調査・解析の手順と調査手法を選択する際の考え方を整理するとともに，調査・解析を進める際の判断根拠やノウハウなどの経験的な知識を知識工学の手法を用いて分析・整理することにより（日本原子力研究開発機構, 2009），これまでの調査研究で得た知識のエキスパートシステム化を進めている。

今後の課題：

・将来の天然現象とそれに起因する地質環境特性の長期変化を考慮した性能・安全評価手法の開発を念頭に置き，沿岸域・堆積岩分布域において， 現在から将来にわたる地質環境特性の長期変化を記述するための一連の調査・解析・評価技術の整備
・天然現象が地質環境に与えるインパクトやそれに対する岩盤の頑健性（緩衝能力）を推定するための調査・解析・評価技術の整備

参考文献：

1. 核燃料サイクル開発機構 ：“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」”, 3.2.1, pp.3-5-3～26, JNC TN1400 2005-014 (2005).
2. 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構 ：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画” (2006).

3. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 20 年度版）” (2009).
4. 太田久仁雄ほか：“幌延深地層研究所計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）研究報告書 分冊「深地層の科学的研究」”, JAEA-Research 2007-044, 4.5, pp.137-195 (2007).
5. T. Niizato et al.：“Synthesizing Geoscientific Data into a Site Model for Performance Assessment: A Study on the Long-term Evolution of the Geological Environment in and around the Horonobe URL, Hokkaido, Northern Japan”, In Proceedings of AMIGO-3 Workshop on Approaches and challenges for the use of geological information in the safety case, OECD/NEA, Nancy, France 15-18 April 2008, pp.222-234 (2009).
6. 今井久ほか：“地下水流動に対する地質環境の長期的変遷の影響に関する研究”, JAEA-Research 2009-001 (2009).
7. 日本原子力研究開発機構：“平成 20 年度 地層処分技術調査等委託費地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発 報告書” (2009).

2.3 深地層における工学技術の開発

目的：（核燃料サイクル開発機構東濃地科学センター, 2001；平成 17 年取りまとめ 分冊 1_5；資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2006；2009）

・結晶質岩，堆積岩において得られた地質環境情報に基づいて，地下施設を設計・施工していくことを通じて，地層処分に反映可能な基盤技術として「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を確立する。

参考文献：

1. 核燃料サイクル開発機構東濃地科学センター：“超深地層研究所地層科学研究基本計画”, JNC TN7410 2001-018 (2001).
2. 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成 17 年取りまとめ— 分冊 1 「深地層の科学的研究」”, JNC TN1400 2005-014, 5, pp.5-1～5-44 (2005).
3. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画” (2006).
4. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 20 年度版）” (2009).

(1)結晶質岩

平成 17 年までの成果：

第 2 次取りまとめで示された既往の地下施設の設計手法（第 2 次取りまとめ 分冊 2_4.2.1～4.2.2.3.5）を準用し，研究対象である土岐花崗岩を対象とした既往の調査結果（松井ほか, 2000）および研究所用地における浅層・深層ボーリング調査結果に基づき瑞浪超深地層研究所の研究坑道の設計を実施し，その仕様や施工計画等を策定した（三枝ほか, 2007_4）。

平成 21 年度までの成果：

瑞浪超深地層研究所計画の第 2 段階として，研究坑道の掘削（平成 21 度末時点で，研究坑道は深度 400m（堆積岩部約 180m，花崗岩部 220m）（掘削状況）中に実施している計測結果等の分析評価を行い，既往の地下施設設計手法，湧水抑制対策手法，リスクマネジメントシステムなどの有効性の評価を進めている。また，掘削ずりや排水の定期的な分析，騒音・振動測定により周辺環境への影響のモニタリングを進めている。これにより，地下施設の設計，施工の手順や技術の適用性，リスク評価の流れやその判断基準が明確になり，精密調査に向けて行われる地下施設の設計，施工計画や建設時の安全確保の検討、建設の実施を支援するものとなっている。

・研究坑道掘削において，研究坑道掘削予定箇所付近で存在が想定されていた断層が主立坑部沿いに出現することは、設計時に想定しなかったものの，設計時に設定した支保部材が変状を生じるような事象が確認されないことから（納多ほか, 2009；第 2 次取りまとめ 分冊 2_4.2.1～4.2.2.3.5）で示した既往の地下施設設計手法が幅広い岩盤状況の違いに対応可能な大きな安全裕度を有する方法であることを確認するとともに、その誤差による掘削工事への影響を最小化しつつ合理的な設計・施工を行う上ではパイロットボーリング調査が必要との知見を蓄積。加えて，既存の施工技術の有効性を評価（納多ほか, 2009）。
・両立坑の深度 180m 付近からのパイロットボーリング調査結果（鶴田ほか, 2009-1；2009-2）や深度 300m 研究坑道掘削前の先行ボーリング調査結果に基づきプレグラウチング（深度 300mまでの花崗岩部）を行い，既往のグラウチング技術により 1,000l/min を超える大量湧水を合理的・経済的に抑制可能であることを実証。また，施工対策技術の一つとして，ポストグラウチング試験（堆積岩部）（久慈ほか, 2009）を実施しその有効性を確認。
・主立坑沿いの断層の出現，湧水抑制対策などの突発事象によるリスクを最小化しつつ合理的・効率的な地下施設の設計・施工を行う上では、掘削地点の先行的なボーリング調査が非常に効果的であることを改めて確認。
・リスクの評価の流れや判断基準，リスクの各要因の関係などの知識を抽出・整備し，地上からの調査結果に基づき地下施設建設プロジェクトに内包されるリスクを網羅的に抽出しその影響度を評価して判断の支援を行うリスクマネジメントのフローを構築（納多ほか, 2009）。

今後の課題：

・より深部の研究坑道掘削を対象とした工学技術（設計施工計画技術，掘削技術，施工対策技術および安全を確保する技術）の有効性の確認。
・湧水およびそれ以外の突発事象（山はね，高抜け（黒崎ほか, 2008-1；2008-2；2008-3；2008-4），高差圧が空洞安定性に及ぼす影響）とその対策に関する技術の開発。

参考文献：

1. 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 - 分冊 2 地層処分の工学技術”, JNC TN1400 99-022, 4.2.1～4.2.2.3.5, pp.IV-206 – IV-252 (1999).
2. 松井裕哉ほか：“MIU-3 号孔における力学特性調査結果及び正馬様用地における土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデル”, JNC TN7420-2001-001 (2000).
3. 三枝博光ほか：“超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第 1 段階）研究成果報告書”, JAEA-Research 2007-043, 4, pp.204-237 (2007).
4. 納多　勝ほか：“瑞浪超深地層研究所計画における工学技術に関する検討（平成 19 年度）”, JAEA-Technology 2009-009 (2009).
5. 鶴田忠彦ほか：“瑞浪超深地層研究所計画における立坑内からのパイロットボーリング調査報告書”, JAEA-Research 2008-098 (2009).
6. 久慈雅栄ほか：“瑞浪超深地層研究所・換気立坑における堆積岩部を対象としたポストグラウチング試験施工とその評価”, JAEA-Research 2008-095 (2009).
7. 黒崎幸夫ほか：“超大深度立坑における高抜け崩落機構に関する調査・解析（委託研究）”, JAEA-Research 2008-066 (2008).

(2)堆積岩

平成 17 年までの成果：

第 2 次取りまとめで示された既往の地下施設の設計手法（第 2 次取りまとめ 分冊 2_4.2.1～4.2.2.3.5）を準用し，堆積岩を対象とした既往の調査結果（日本原子力研究開発機構, 2007_5）および研究所用地における浅層・深層ボーリング調査結果（日本原子力研究開発機構, 2007_5）に基づき施設設計を実施し，研究坑道の仕様や施工計画等を策定した（松永ほか, 2005）。

平成 21 年度までの成果：

幌延深地層研究所計画の第 2 段階として，研究坑道の掘削（掘削状況）を通して，計測結果等の分析評価を行い，既往の地下施設設計手法，リスクマネジメントシステムなどの有効性の評価を進めている。また，掘削ずりや排水の定期的な分析，騒音・振動測定により周辺環境への影響のモニタリングを進めるとともに，研究坑道の建設（例えば，吹付コンクリートなどの

工学材料）が地質環境に与える影響に関する研究も開始している。これらは，以下のように地下施設の設計，施工の手順や技術の適用性を明確にし，精密調査に向けて行われる地下施設の設計，施工計画やその実施に向けての安全確保の検討，およびそれらの実施を支援するものとなっている。

・研究坑道掘削において，設計時に設定した支保部材が変状を生じるような事象が確認されないことから，第 2 次取りまとめで示した既往の地下施設設計手法（第 2 次取りまとめ，分冊 2_4.2.1～4.2.2.3.5）が堆積岩に対応可能な安全裕度を有する方法であることを確認。
・実施設計（松永ほか，2005）に基づき，堆積軟岩を対象とした計測計画ならびに情報化施工プログラム（森岡ほか，2007；山崎ほか，2008）を策定し，取得した計測データを分析して既設支保の健全性と坑道の安定性評価ならびに実施設計の妥当性を確認。
・支保工の材料として用いるセメントによる間隙水の高アルカリ影響を緩和するための低アルカリ性セメント（HFSC）を開発し，地下施設の建設で要求される強度を得られることや HFSC を用いた鉄筋コンクリートの耐久性を確認（松田ほか，2008；中山ほか，2009a；中山ほか，2009b；小林ほか，2009a；小林ほか，2009b）。
・坑道掘削に伴い発生する湧水対策のための技術開発の一環として，低アルカリ性のグラウト材料の原位置試験計画を作成（日本原子力研究開発機構，2009）。
・地下施設における坑内火災時の立坑模型実験結果を踏まえて，火災時の通気網解析手法を構築。

今後の課題：

・より深部の研究坑道掘削を対象とした工学技術（設計施工技術，掘削技術，施工対策技術および安全を確保する技術）の有効性確認。
・湧水および岩盤変状とその対策に関する技術開発。
・研究坑道の建設（例えば，グラウト，支保工などの人工材料）などが周辺の地質環境に与える長期的な影響とそれを適切に解析・評価するための技術を体系的に整備。
・リスク評価の流れや判断基準，リスクの各要因の関係などの知識を抽出・整備し，その影響度を評価して判断支援を行うリスクマネジメントのフローを構築。

参考文献：

1. 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性　－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－　分冊 2 地層処分の工学技術”, JNC TN1410 99-022, 4.2.1～4.2.2.3.5, pp.Ⅳ-206-Ⅳ-271 (1999).
2. 日本原子力研究開発機構：“幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）研究成果報告書　分冊「深地層の科学的研究」”, JAEA-Research 2007-044, 5, pp.317-340 (2007).
3. 松永浩一ほか：“幌延深地層研究計画　地下施設実施設計　－設計報告書－　（核燃料サイクル開発機構　契約業務報告書）”, JNC TJ5410 2005-002 (2005).

4. 森岡宏之ほか：“幌延深地層研究計画における立坑掘削時の計測計画及び情報化施工プログラム”, JAEA-Research 2007-050 (2007).
5. 山﨑雅直ほか：“幌延深地層研究計画における水平坑道掘削時の計測計画及び情報化施工プログラム”, JAEA-Research 2008-068 (2008).
6. 松田武ほか：“幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメントの適用性に関する研究（Ⅰ）（委託研究）”, JAEA-Research 2007-089 (2008).
7. 中山雅ほか：“幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメントの適用性に関する研究（Ⅱ）（委託研究）”, JAEA-Research 2009-035 (2009a).
8. 中山雅ほか：“幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメントの適用性に関する研究（Ⅲ）（委託研究）”, JAEA-Research 2009-036 (2009b).
9. 小林保之ほか：“高レベル放射性廃棄物処分施設への低アルカリ性セメントの適用性に関する研究（その１）－セメント系材料の適用部位と要求性能－（共同研究）”, JAEA-Research 2008-112 (2009a).
10. 小林保之ほか：“高レベル放射性廃棄物処分施設への低アルカリ性セメントの適用性に関する研究（その２）－低アルカリ性セメントに関する既往の知見の整理と基礎物性の把握－（共同研究）”, JAEA-Research 2009-013 (2009b).
11. 日本原子力研究開発機構：“平成 20 年度地層処分技術調査等委託費　高レベル放射性廃棄物処分関連　地下坑道施工技術高度化開発　報告書” (2009).

2.4 地質環境の長期安定性調査評価技術の開発

2.4.1　地震・断層活動に関する調査評価技術

目的：（日本原子力研究開発機構, 2009；資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2006；2009）

・断層の発達履歴・活動性に関する調査技術の整備
・地震・断層活動の影響を予測・評価するためのモデルの開発

平成 17 年までの成果：

第 2 次取りまとめまでは，主に天然現象の全国規模での基盤情報整備のため，後期更新世（約 13 万年前）以降の断層変位地形に着目し，日本全国を対象とした 4 万分の 1 の空中写真判読作業に基づいた 200 万分の 1 日本列島活断層図を作成した（200 万分の 1 活断層図編纂ﾜｰｷﾝｸﾞｸﾞﾙｰﾌﾟ, 2000）。また，活断層の分布と地殻の水平歪速度の地域的な特徴を提示した（野原ほか, 2000）。さらに，既存の音響地殻断面図等に基づき，第四紀以降に活動したと考えられる日本周辺海域の約 750 の断層を抽出した（徳山ほか, 2001）。この他，釜石鉱山における地下坑道を利用した地震観測等に基づき，地表に比べ地下では揺れが小さいことや地震動に伴う地下水変化等の特徴を提示した（I.Shimizu, et al., 1996；K.Ishimaru et al., 1997）。

平成 17 年取りまとめでは，概要調査において必要な活断層の調査や断層活動の長期的影響の評価に研究成果を反映していくため，変動地形が不明瞭な地域において未確認の活断層が存在する可能性の高い範囲を特定するための調査手法の適用事例と，逆断層の三次元的な分布（断層活動の影響範囲）および過去数十万年程度の断層発達プロセスを明らかにするための調査手法の適用事例を提示した（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_3.3.3）。

平成 21 年度までの成果：

第 2 次取りまとめ以降の課題となった断層の発達履歴や活動性に関する調査技術の整備を進め，事例研究によりそれらの適用性を確認するとともに，地震・断層活動の影響を予測・評価するためのモデルの開発を進めた。これにより，第 2 次取りまとめの時の長期的安全性の確保における活断層の扱いに関する考え方を補強するとともに，概要調査において必要な（NUMO, 2004），以下に示す調査技術および長期予測･影響評価モデルを提示できるものとなっている。

・断層から最終処分施設までの離間距離等を合理的に設定するための調査技術として，逆断層帯における分岐断層（前縁断層）や撓曲構造の発達プロセス，および横ずれ断層帯における断層破砕帯や変形帯の分布やその発達履歴を把握するための調査手法について，反射法地震探査や地形・地質調査等に基づく一連の調査手法と解析手法の適用事例（逆断層帯：横手盆地東縁断層帯，横ずれ断層帯：跡津川断層帯，阿寺断層帯）を提示（K. Kagohara et al., 2009；椿原ほか, 2006；丹羽ほか, 2008；丹羽ほか, 2007；K.Ishimaru et al., 2008；石丸ほか, 2008；今泉ほか, 2006；小坂ほか, 2008）。

・地下深部での岩石破壊により発生すると考えられる水素ガスを地表部（断層露頭等）で簡便に測定できる手法を考案するとともに（K.Shimada et al., 2008），水素ガスやマントル起源のヘリウム等の観測・解析といった地球化学的手法が，従来の地形・地質学的，地球物理学的な手法に基づく活断層の認定やその活動性の評価を補完する技術として有効であるとの見通しを提示（K.Umeda et al., 2009；K.Umeda et al., 2008；石丸ほか, 2009；丹羽ほか, 2008b；黒澤ほか, 2008）。

・断層周辺の岩盤の変形領域や地形変化の範囲を推定する手法として，既存の地殻変動等の数値解析プログラムを用いて断層変位が生じた際の断層周辺の地殻の上下変動量等の解析を行い（適用事例：中央構造線），現地データとの比較により解析結果の妥当性を検討し，数値解析手法の適用性と有効性を確認（高田ほか, 2009；丹羽ほか, 2007）。

今後の課題（梅田ほか, 2010）：

・変動地形が不明瞭な断層および伏在断層，地下深部の震源断層の確認等に係わる調査技術の開発。
・坑道掘削時に遭遇した断層の活動性の評価手法の構築。
・断層活動に伴う将来の地質環境特性（温度，水理，力学，化学，幾何形状；THMCG）の変化を考慮したシナリオ解析に反映することを目的とした，断層活動の発生の可能性と変動幅，およびそれらの予測に伴う不確実性（あるいは確度）を推定する手法の構築。

・超長期（数万年以上）での地殻変動の開始時期や変動傾向の概括的な評価技術やプレート運動の変化に伴うテクトニックな環境の変動を考慮した地質環境特性（THMCG）の変動幅を推定する手法の構築。

参考文献：

1. 日本原子力研究開発機構：地質環境の長期安定性に関する研究 年度計画書（平成 21 年度）", JAEA-Review 2009-028 (2009).
2. 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画” (2006).
3. 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 20 年度版）” (2009).
4. 200 万分の 1 活断層図編纂ﾜｰｷﾝｸﾞｸﾞﾙｰﾌﾟ：“200 万分の 1 日本列島活断層図”, 活断層研究, 19, pp.3-12 (2000).
5. 野原 壮ほか：“活断層 GIS データを用いた地殻の歪速度の推定”, 活断層研究, 19, pp.23-32 (2000).
6. 徳山英一ほか：“日本周辺海域の中新世最末期以降の構造発達史”, 海洋調査技術, 第 13 巻, 第 1 号, pp.27-53 (2001).
7. I.Shimizu et al.：“Earthquake-related ground motion and groundwater pressure change at the Kamaishi Mine”, Eng. Geol., 43, pp.107-118 (1996).
8. K.Ishimaru et al.：“Groundwater pressure changes associated with earthquakes at the Kamaishi Mine, Japan -A study for stability of geological environment in Japan”, Proc. 30th Int. Geol. Congr., 24, pp.31-41 (1997).
9. 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－分冊 1　深地層の科学的研究“, JNC TN1400 2005-014, pp. 3-84～3-97 (2005).
10. 原子力発電環境整備機構：“概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠”, NUMO-TR-04-02, pp.19-21 (2004).
11. K. Kagohara et al.：“Subsurface geometry and structural evolution of the eastern margin fault zone of the Yokote basin based on seismic reflection data, northeast Japan”, Tectonophysics.doi:10.1016/j.tecto.2009.02.007 (2009).
12. 楮原京子ほか (2006)：“横手盆地東縁断層帯・千屋断層の形成過程と千屋丘陵の活構造”, 地学雑誌, 115, pp.691-714 (2006).
13. 丹羽正和ほか：“圧縮性ステップにおける破砕帯の構造 －岐阜県飛騨市の跡津川断層西部の例－”, 地質学雑誌, 114, pp.495-515 (2008).
14. 丹羽正和ほか：“岐阜県東部, 阿寺断層の周辺に発達する NE-SW 系断層の特徴”, 日本地質学会第 114 年学術大会講演要旨, 276 (2007).

15.K.Ishimaru et al.：“Effects of earthquakes and faulting on the deep geological environment in Japan based on case studies”, 2008 East Asia Forum on Radwaste Management Conference (2008).
16.石丸恒存ほか：“地質環境の長期安定性に係わる断層研究－断層周辺の破砕帯分布と特徴に関する検討－”, 日本地球惑星科学連合大会予稿集(CD-ROM), G121-P001 (2008).
17.今泉俊文ほか：“秋田県・千屋断層の陸羽地震断層露頭”, 活断層研究, 26, pp.71-77 (2006).
18.小坂英輝ほか：“横手盆地東縁断層帯の後期鮮新統～更新統のフィッション・トラック年代”, 地学雑誌 pp.851-862 (2008).
19.K.Shimada et al.：“Rapid and Simple Measurement of H2 Emission from Active Faults Using Compact Sampling Equipments”, Resource Geology, 58, 2, pp.196-202 (2008).
20.K.Umeda et al.：“Helium isotopes as a tool for detecting concealed active faults”, Geochem. Geophys. Geosyst., 10, Q08010, doi:10.1029/2009GC002501 (2009).
21.K.Umeda, et al.：“High 3He emanations from the source regions of recent large earthquakes, Central Japan”, Geochem. Geophys. Geosyst., 9, Q12003, doi:10.1029/2008GC002272 (2008).
22.石丸恒存ほか：“活断層および地質断層における断層ガス放出に関する調査事例”, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, G122-011 (2009).
23.丹羽正和ほか：“断層破砕帯における水素ガスの移行経路の検討”, 日本地球惑星科学連合大会予稿集(CD-ROM), C204-003 (2008).
24.黒澤英樹ほか：“断層活動に伴う水素ガス発生の検討－立坑発破･岩石破壊験の結果－“, 日本地質学会第 115 年学術大会講演要旨, 173 (2008).
25.高田圭太ほか：“横ずれ断層活動に伴う周辺岩盤の歪と縦ずれ分布パターンによる地表変形　－四国の中央構造線活断層系を事例とした数値解析－”, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, G122-P003 (2009).
26.丹羽正和ほか：“横ずれ断層活動に伴う歪－応力変化とそれに伴う地表の変形の特徴－徳島県の中央構造線活断層系における例－”, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, T155-P004 (2007).
27.梅田浩司ほか：“高レベル放射性廃棄物の地層処分における断層研究の現状と今後の展望”, 月刊地球, 32, pp.52-63 (2010).

2.4.2 火山・熱水活動に関する調査評価技術

目的：（日本原子力研究開発機構, 2009；資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2006；2009）

・火山・熱水履歴および地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術の整備
・地熱活動の影響を予測・評価するためのモデルの開発

平成 17 年までの成果：

第 2 次取りまとめでは，主に天然現象の全国規模での基盤情報整備のため，火山・火成活動の記録が残されている地質や火山地形を対象とした現地調査や年代測定による事例研究に基づき，これらの活動履歴を整理し（第四紀火山カタログ委員会, 1999），日本では火山活動は過去数十万年程度にわたり限られた地域で繰り返し起こっていること（第 2 次とりまとめ 分冊 1_2.4），地温の上昇などの火山活動に伴う影響は個々に違いがあるものの，火山からの距離によって限定できるとの知見（第 2 次とりまとめ 分冊 1_2.4）を提示した。

平成 17 年取りまとめでは，概要調査において必要な火成活動の調査や火山活動の長期的影響の評価に研究成果を反映していくため，テフラ降灰層準の認定手法や地下深部のマグマ・高温流体を検出するための調査技術や，火山発生を確率論的アプローチによって評価するための手法，熱水活動などの影響評価モデルを提示するとともに，全国レベルでの天然現象の情報の収集・整備として「坑井温度プロファイルデータベース」（坂川ほか, 2004），「温泉地化学データベース」（浅森ほか, 2003）を作成，公表した（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_3.3.2）。

平成 21 年度までの成果：

第 2 次取りまとめ以降の課題となった火山・熱水履歴および地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術の整備を進め，事例研究によりそれらの適用性を確認するとともに，地熱活動の影響を予測・評価するためのモデルの開発を進めた。これにより，概要調査において必要な（NUMO, 2004），以下に示す調査技術および長期予測・影響評価モデルを提示できるものとなっている。

・更新世中期までの火山（適用事例：むつ燧岳）を対象に，多量屈折率地質解析法（RIPL 法）による火山活動史の編年を事例的に行うことにより，RIPL 法がテフラを用いた鮮新統～第四系の編年に適用可能な手法であることを確認（梅田ほか, 2004；梅田ほか, 2008）。
・熱水等による影響の有無を確認するための調査技術として，熱水活動の開始時期の把握について，K-Ar 年代，FT 年代，TL 年代等を組み合わせた一連の調査手法の適用事例（紀伊半島）を提示（K. Umeda et al., 2007a；花室ほか, 2008）。
・地下深部のマグマ・高温流体等の存在の有無を確認するための調査技術として，地震波トモグラフィー，地磁気・地電流法（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手法を提示（適用事例：鳴子

火山，飯豊山地，能登半島等）（浅森ほか, 2005；K. Umeda et al., 2007b；K. Umeda et al., 2009）。

・比抵抗構造解析技術として観測データの自動スタッキング法を開発し（根木ほか, 2007a；根木ほか, 2007b），観測データの不確実性評価手法（根木ほか, 2005）を提示。さらに，これまで海域の影響により正しい比抵抗構造の推定が困難であった沿岸域を対象にした解析技術として，三次元比抵抗構造解析手法の適用性を確認（適用事例：能登半島，三瓶山）（K. Umeda et al., 2009；根木ほか, 2009）。

・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手法として，火山分布，活動開始年代に基づく空間統計学的手法による確率分布モデルに地球物理データ（地震波速度構造，地殻熱流量）をベイズ法で結合した multiple inference モデルを構築し，火山地域を事例（東北日本，伊豆日本）にモデルの妥当性を確認（A.J. Martin et al., 2003；A.J. Martin et al., 2004）。

・地下深部からの熱の影響を評価する手法として，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（坂川ほか, 2005），Magma2002 を用いた火山性の地熱地帯（適用事例：雲仙火山，鳴子火山）での解析結果と地質，地球物理データとの比較・検討を行い，シミュレーションの妥当性を確認（齋藤ほか, 2007；齋藤ほか, 2008）。

今後の課題：

・鮮新世から前期更新世を対象としたテフラの編年技術の確立

・火山・地熱活動に伴う将来の地質環境特性（温度，水理，力学，化学，幾何形状；THMCG）の変化を考慮したシナリオ解析に反映することを目的とした，火山・地熱活動の発生の可能性と変動幅，および予測に伴う不確実性（あるいは確度）を推定する手法の構築。

・超長期（数万年以上）での地殻変動の開始時期や変動傾向の概括的な評価技術やプレート運動の変化に伴うテクトニックな環境の変動を考慮した地質環境特性（THMCG）の変動幅を推定する手法の構築。

参考文献：

1. 日本原子力研究開発機構：“地質環境の長期安定性に関する研究 年度計画書（平成 21 年度）”, JAEA-Review 2009-028 (2009).
2. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画” (2006).
3. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 20 年度版）” (2009).
4. 第四紀火山カタログ委員会：“日本の第四紀火山カタログ”，火山, 44, pp.285-289 (1999).
5. 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－分冊 1　わが国の地質環境”. JNC TN1400 99-021, 2.4, pp.II-54～112 (1999).

6. 坂川幸洋ほか：“日本の坑井温度プロファイルデータベース”, 地震 第 2 輯, 57, pp.63-67 (2004).
7. 浅森浩一ほか：“温泉地化学データベースの作成（データ集）”. JNC TN7450 2002-003 (2003).
8. 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－ 分冊 1 深地層の科学的研究”, JNC TN1400 2005-014, 3.3.2, pp.3-71～3-98 (2005).
9. 原子力発電環境整備機構：“概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠”, NUMO-TR-04-02, pp.19-21 (2004).
10. 梅田浩司ほか：“RIPL 法によるテフラ降灰層準の認定と最新の噴火活動の推定”, 月刊地球, 26, pp.395-400 (2004).
11. 梅田浩司ほか：“フィッション・トラック年代によるむつ燧岳の活動年代の再検討”, 岩石鉱物科学, 37, pp.131-136 (2008).
12. K. Umeda et al.：”Thermochronology of non-volcanic hydrothermal activity in the Kii Peninsula, Southwest Japan: evidence from fission track dating and helium isotopes in paleo-hydrothermal fluids, Radiation Measurements”, 42, pp.1647-1654, doi:10.1016 / j.radmeas.2007.09.013 (2007).
13. 花室孝広ほか：“紀伊半島南部, 本宮および十津川地域の温泉周辺の熱水活動史”, 岩石鉱物科学, 37, pp.27-38 (2008).
14. 浅森浩一ほか：“地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術について”, 原子力バックエンド研究, 11, pp.147-155 (2005).
15. K. Umeda et al.：“Multiple lines of evidence for crustal magma storage beneath the Mesozoic crystalline Iide Mountains, northeast Japan, J”. Geophys. Res., 112, B05207, doi:10.1029/2006JB004590 (2007).
16. K. Umeda et al.：“Heat source for an amagmatic hydrothermal system”, Noto Peninsula, Central Japan, J. Geophys. Res., 114, B01202, doi:10.1029/2008JB005812 (2009).
17. 根木健之ほか：“MT 法スペクトル･データの効果的なスタッキング方法”, 物理探査学会学術講演会講演論文集, 116, pp.176-179 (2007).
18. 根木健之ほか：“MT 法データのロバスト・スムージング手法の開発とスタッキングへの応用”, 物理探査学会学術講演会講演論文集, 117, pp.195-198 (2007).
19. 根木健之ほか：“MT 法データの信頼性評価に関する一考察”, 物理探査学会学術講演会講演論文集, 112, pp.223-226 (2005).
20. 根木健之ほか：“沿岸域における三次元比抵抗構造解析”, 物理探査学会学術講演会講演論文集, 120, pp.169-172 (2009).
21. A.J. Martin et al.：“Probabilistic methods for estimating the long-term spatial characteristics of monogenic volcanoes in Japan”, Act. Geophysica. Polonica. 51, pp.271-289 (2003).

22.A.J. Martin et al.：“Modeling long-term volcanic hazards through Bayesian inference: An example from the Tohoku volcanic arc, Japan”, J. Geophys. Res., 109, B10208, doi: 10.1029/2004JB003201 (2004).
23.坂川幸洋ほか：“熱移流を考慮した日本列島の熱流束分布と雲仙火山を対象とした熱・水連成シミュレーション”．原子力バックエンド研究, 11, pp.157-165 (2005).
24.齋藤龍郎ほか：“雲仙火山下の熱水活動シミュレーション”，日本地球惑星科学連合大会予稿集, G121-P010 (2007).
25.齋藤龍郎ほか：“熱水系シミュレーションによる鬼首・鳴子火山下のマグマ溜りの構造と定置年代の推定”，日本地球惑星科学連合大会予稿集, V170-012 (2008).

2.4.3 隆起・侵食/気候・海水準変動に関する調査評価技術

目的：（日本原子力研究開発機構, 2009；資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2006；2009）

・古地形・古気候の復元調査技術の整備
・地形変化・気候変動の影響を予測・評価するためのモデルの開発

平成 17 年までの成果：

第 2 次取りまとめでは，主に天然現象の全国規模での基盤情報整備のため，隆起・侵食/気候・海水準変動の記録が残されている段丘などの地形や堆積物を対象に事例研究や既存知見の整理を行い（第 2 次とりまとめ 分冊 1_2.5），地域ごとにある一定の傾向で隆起・沈降運動が数十万年間継続している場合が多いこと，十万年オーダーでは下刻量は隆起量と近い値となること，過去約 70 万年間は約 10 万年周期の気候・海水準の変動が卓越し，海水準変動の振幅は 100m を超えていることなど（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_3.3.1）を提示した。

平成 17 年取りまとめでは，概要調査以降において必要な隆起・侵食/気候・海水準変動に関する調査や地形変化に伴う地質環境の長期的影響の評価に研究成果を反映していくため，幌延地域を事例とした隆起・侵食に係る調査手法の適用性の確認と調査手法の提示を行うとともに，地形変化シミュレーション技術の開発と地形変化および気候変動を考慮した地質環境特性（温度，水理，力学，化学，幾何形状；THMCG）の変化を推定するためのモデル化・解析手法の開発を開始した（平成 17 年取りまとめ 分冊 1_3.3.1）。また，最新の知見を踏まえて日本全国を対象とした隆起速度図や地すべり地形分布図を整備した（藤原ほか，2005；柳田ほか，2005）。

平成 21 年度までの成果：

第 2 次取りまとめ以降の課題となった地殻変動の速度と様式を把握する調査手法の開発，様々な天然現象および地質などを考慮した地形変化のモデル化手法の開発に基づき，古地形・

古気候の復元調査技術の整備を進めるとともに，地形の変化をモデル化する際の支援ツールとなる地形変化シミュレーション技術の開発，地形変化および気候変動を考慮した地質環境特性（THMCG）の変化幅を推定するためのモデル化・解析手法の開発を進めた。これにより，第2次取りまとめの時の長期的安全性の確保における隆起・侵食/気候・海水準変動の扱い方の考え方を補強するとともに，概要調査において必要な（NUMO, 2004），以下に示す調査技術および長期予測・影響評価モデルを提示できるものとなっている。

・内陸部の隆起速度を把握する調査手法として，河成段丘発達モデルに基づく段丘面の比高から隆起速度を推定する方法（テラスーテラス法；TT 法）の適用性と有効性を確認（適用事例：土岐川流域，鏑川流域等）（田力ほか, 2008；田力ほか, 2009；田力ほか, 2010）。また，これらの研究を通じて，河成段丘の高度分布に基づき活断層の位置を精度良く特定するための手法を提示（田力ほか, 2009）。
・地質環境特性（THMCG）の変化幅を推定する上で必要な古地形と古気候の情報を取得する調査技術として，地形・地質調査とボーリングコアを用いた堆積相解析，植物片等を用いた古気候調査等を組み合わせた一連の調査手法の有効性を確認（適用事例：濃尾平野，大湫盆地等）（佐々木ほか, 2006；守田ほか, 2006；山口ほか, 2005；丹羽ほか, 2009）。
・地形変化をモデル化する手法として，斜面で生産された土砂が河川により運搬・堆積する現象に基づいて万年オーダーの地形変化を大局的に表現できる基本プログラムを開発し，地質分布，堆積速度，隆起速度，礫径等の現地データを考慮した地形変化シミュレーション・プログラムの整備を継続（三箇ほか, 2008；H.Saegusa et al., 2009）。
・地形変化および気候変動が地質環境特性（THMCG）に与える影響を把握するためのモデル化・解析手法の適用事例（飛騨山地～濃尾平野周辺）を提示（K. Yasue et al., 2008；尾上ほか, 2009）。

今後の課題：

・河成段丘が発達していない内陸部など，既存の手法が適用できない地域の隆起速度を算出する手法の開発。
・現地データや地形変化シミュレーション技術などを総合的に用いた古地理変遷のモデル化手法の開発。
・隆起・侵食／気候・海水準変動に伴う将来の地質環境特性（温度，水理，力学，化学，幾何形状；THMCG）の変化を考慮したシナリオ解析に反映することを目的とした，隆起・侵食／気候・海水準変動の変化幅，および予測に伴う不確実性（あるいは確度）を推定する手法の構築。
・超長期（数万年以上）での地殻変動の開始時期や変動傾向の概括的な評価技術やプレート運動の変化に伴うテクトニックな環境の変動を考慮した地質環境特性（THMCG）の変動幅を推定する手法の構築。

参考文献：

1. 日本原子力研究開発機構：“地質環境の長期安定性に関する研究 年度計画書（平成 21 年度）”, JAEA-Review 2009-028 (2009).
2. 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画” (2006).
3. 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 20 年度版）” (2009).
4. 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－ 分冊 1 わが国の地質環境”. JNC TN1400 99-021, 2.5, pp.II-113～192 (1999).
5. 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成17年取りまとめ－ 分冊 1 深地層の科学的研究”, JNC TN1400 2005-014, 3.3.1, pp.3-58～3-70 (2005).
6. 藤原 治ほか：“地層処分からみた日本列島の隆起・侵食に関する研究”, 原子力バックエンド研究, 11, pp.113-124 (2005).
7. 柳田 誠ほか：“日本列島の地すべり地形–分布図からの考察–”, 駒沢地理, 41, pp.61-77 (2005).
8. 原子力発電環境整備機構：“概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠”, NUMO-TR-04-02, pp.19-21 (2004).
9. 田力正好ほか：“庄内川（土岐川）流域の河成段丘と地形発達”, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, Q139-P006 (2008).
10. 田力正好ほか：“植物珪酸体分析に基づく段丘地形の形成環境の復元：利根川支流, 鏑川流域の例”, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, Q145-P008 (2009).
11. 田力正好ほか：“河成段丘の高度分布から推定された, 岩手・宮城内陸地震の震源断層”, 地震 2, 62, pp.1-11 (2010).
12. 佐々木俊法ほか：“東濃地方内陸小盆地埋積物の分析による過去 30 万年間の古気候変動”, 第四紀研究, 45, pp.275-286 (2006).
13. 守田益宗ほか：“東海地方の中間温帯における中期更新世以降の植生変遷—内陸小盆地堆積物の花粉分析から—”, 季刊地理学, 58, pp.123-139 (2006).
14. 山口正秋ほか：“ボーリングコアの粒度組成と堆積速度からみた木曽川デルタの微地形と堆積過程”, 第四紀研究, 44, pp.37-44 (2005).
15. 丹羽雄一ほか：“濃尾平野西部の上部完新統に残された養老断層系の活動による沈降イベント”, 第四紀研究, 48, pp.339-349 (2009).
16. 三箇智二ほか：“河床縦断形のシミュレーション”, 地形, 29, pp.27-49 (2008).
17. H. Saegusa et al.：“Numerical assessment of the influence of topographic and climatic perturbations on groundwater flow conditions”, In Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Wasete: Application to

Crystalline Rock, edited by Nuclear Energy Agency, Workshop Proceedings Manchester, United Kingdom 13-15 November 2007, Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), pp.269-276, ISBN 978-9-26406-057-9, Paris (2009).

18. K. Yasue et al.：“Study for Evaluation of the Influence of Long-term Climate Change on Deep Groundwater Flow Conditions: integration of paleo-climatology and hydrogeology”, Proceedings of 36th IAH Congress, October, 2008 Toyama, Japan. pp.1590-1596 (2008).
19. 尾上博則ほか：“過去から現在までの長期的な地形変化が地下水流動特性に与える影響の解析的評価の試み”. 日本原子力学会和文論文誌, 8, pp.40-53 (2009).

2.4.4 年代測定技術の開発

目的：（日本原子力研究開発機構, 2009）

・天然現象の活動履歴や変動の傾向・速度を精度良く把握する上で必要となる放射年代データを得るため，加速器質量分析装置，希ガス質量分析装置などを用いた最新の年代測定技術の開発・整備

平成 17 年までの成果：

平成 9 年にペレトロン年代測定装置（加速器質量分析装置）を導入し，14C 年代測定技術を構築。炭質物や貝，方解石，地下水試料等の実試料の前処理および 14C 年代測定（約 6 万年前まで）のルーチン化を行った。

平成 21 年度までの成果：

ペレトロン年代測定装置については，14C 年代測定を継続し，その測定精度を向上した。また，低温の熱履歴を把握するために有効な(U-Th)/He 年代測定システムの構築を開始し，実用化した。感度法を用いることでより若い年代（数万～数十万年前）の測定が可能となった K-Ar 年代測定システムを導入し，断層の充填物を対象とした年代測定技術の開発を進めている。これにより，天然現象の活動履歴や変動の傾向・速度を精度良く把握する上で必要となる年代測定技術の実用化の見通しを提示できるものとなっている。

・地質試料の年代の測定を可能とするために必要なペレトロン年代測定装置について，放射性炭素の安定的な測定を継続し（石丸ほか, 2008），装置改善により測定精度の向上（誤差約 1.0%から約 0.5%に向上）を図るとともに（鈴木ほか, 2009；齋藤ほか, 2008；鈴木ほか, 2008），ベリリウム同位体の試験測定を行い，ベリリウム同位体測定の実用化の見通しを確認。

・断層の充填物から成因ごとに分離した粘土鉱物の年代測定を行うために必要な K-Ar 法による年代測定技術を導入するため，アルゴンについては希ガス用質量分析装置によって，カリウムについてはフレーム光度法によって定量が可能なシステムを構築（山崎ほか, 2009）。
・低温の熱履歴把握を可能とするため，閉鎖温度の低い年代測定手法である(U-Th)/He 法による年代測定システムを構築し，本手法によるジルコンを用いた単粒子年代測定を実用化（K. Yamada et al., 2008）。四重極型質量分析計を用いることでより分析精度を向上させ，ジルコンに比べてヘリウム含有量の低いアパタイトを用いた単粒子年代測定の実用化に着手。

今後の課題：

・超長期（数万年以上）の予測評価に伴う不確実性の幅の信頼を向上させることを目的に，断層の活動性や隆起／侵食速度の評価を行うための編年技術の開発と年代測定の精度の向上。

参考文献：

1.日本原子力研究開発機構：“地質環境の長期安定性に関する研究 年度計画書（平成 21 年度）”, JAEA-Review 2009-028 (2009).
2.石丸恒存ほか(2008)：“JAEA ペレトロン年代測定装置の現状と研究活用の例”，第 1 回 JAEA タンデトロン AMS 利用報告会論文集, JAEA-Conf 2008-003, pp.17-20 (2008).
3.鈴木元孝ほか：“JAEA-AMS-TONO の現状，第 21 回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」報告集”, JAEA-Conf 2008-012, pp.19-22 (2009).
4.齋藤龍郎ほか：“JAEA-AMS-TONO の現状”，第 11 回 AMS シンポジウム Abstracts，名古屋大学年代測定総合研究センター日本 AMS 協会, 1 (2008).
5.鈴木元孝ほか：“14C 年代測定用標準試料前処理におけるバックグランド値の改善”，第 11 回 AMS シンポジウム Abstracts，名古屋大学年代測定総合研究センター日本 AMS 協会, 31 (2008).
6.山崎誠子ほか：“東濃地科学センターにおける K-Ar 年代測定システムの現状”，2009 年質量分析学会同位体比部会, P-26 (2009).
7.K. Yamada et al.：“New (U-Th)/He dating systems and ages in Japan Atomic Energy Agency”, Geochim. Cosmochim. Acta, 72, A1050 (2008).

3 まとめ

I.

ここで行っている研究開発の目的は，セーフティケースの一つの論拠となる地質環境の長期安定性について，その調査計画立案やその実施において必要となる手順や手法を整備することによって，地層処分システムの設計や安全評価を支援することです。また，実際の地下施設の建設をとおして，施設の設計および施工技術を整備するとともに，地下施設建設の安全性を確保するための技術を整備することです。

II.

第 2 次取りまとめや平成 17 年取りまとめで焦点が当てられてきた，幌延，瑞浪あるいはその他の地質環境での適用事例の整備だけでなく，段階的なサイト選定過程において必要となる地質環境調査計画立案および調査実施の手順の整備に焦点をあてています。

III.

2 つの深地層の研究施設を利用した地質環境特性に関する研究，および地質環境の長期安定性に関する研究において適用してきた地質環境調査評価技術の成果が知識基盤として蓄積されるとともに，それらに基づき，地上からの地質環境調査計画立案および調査実施の手順やそれに必要な経験（暗黙知）がエキスパートシステムとして可視化されてきています。また，坑道掘削中の地質環境調査や，事例サイトを対象とした地質環境の長期安定性に関する研究に基づく経験・ノウハウも成果として蓄積されてきています。

IV.

CoolRep 本文のメッセージを具体的にしていくため，深地層の科学的研究では，第 2 次取りまとめに比してより実際の地質環境を対象とした調査評価手法の適用，先進的な知識マネジメント手法の適用による処分場の設計や安全評価との関係の明確化，ユーザーの実際の地質環境における調査計画立案や実施の支援に視点をおいた知識の整備と，より幅広いステークホルダーへ説明するための KMS やエキスパートシステムによる可視化などを行ってきています。

V.

2 つの深地層の研究施設計画（第 2 段階および第 3 段階）および事例サイトを対象とした地質環境の長期安定性に関する研究において蓄積する経験・ノウハウを，セーフティケースと関連させつつ, 実施主体の行う地層処分事業の概要調査および精密調査の計画立案, 調査の実施や，安全規制機関による地質環境調査結果の品質および妥当性の確認などを支援するよう知識を構造化し，ユーザーに活用しやすい形態で提供することが（エキスパートシステムを含む），今後の重要な課題の一つです。

VI.

今後，処分地選定などによる処分事業の進展により，安全規制機関による安全性に関する要件も具体化されます。研究開発は，地層処分技術の信頼性のより一層の向上のため，最新の科学的知見を取り入れつつも，安全規制機関の要件やそれによる実施主体の要求事項に応じてその課題の優先順位を明確にしながら進めることになります。これらの議論は国の基盤研究開発調整会議で行われ，全体計画が適宜改訂されます。JAEA では，開発中の知識マネジメントシステムを介して，情報の共有・議論や研究開発課題の可視化や具体化を支援していきます。

付録Ⅲ 工学技術カーネル

1. はじめに

処分場の工学技術では，我が国の幅広い地質環境に対して人工バリアや処分施設を適切に設計・施工する技術を示してきました。現在は，事業および規制への反映に向けたこれらに関わる基盤技術の開発を進めています。

1.1 処分場の工学技術とは

処分場の工学技術に関する研究開発は，人工バリアを含む処分場施設の構築に必要となる設計，建設，操業，閉鎖などの技術や，構築された人工バリアを含むニアフィールド環境において熱－水－応力－化学連成挙動などの処分場閉鎖後の長期挙動の評価の前提となる初期条件を設定するために必要となるモデルやデータベースなどを対象としています。

人工バリアと処分施設の設計，建設，操業，閉鎖などに関しては，安全性を実現するための信頼性の高い人工バリアならびに処分施設についての設計要件や，これらが現実的な工学技術によって合理的に構築できることを示してきており，これらに関わる最新の技術を示すことが求められます。また，処分場の地質環境と地層処分システムの状態を監視し安全性を確認するため，建設開始から閉鎖に至るまでの各段階において取得すべき情報，計測方法等を技術的に検討し，処分場の管理に関する技術的基盤を整えることも求められます。

このため，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必要があります。

1.2 研究開発の経緯

日本原子力研究開発機構（以下，「原子力機構」という）は前身である核燃料サイクル開発機構（以下，「サイクル機構」という）および動力炉・核燃料開発事業団時代以来，中核的研究開発機関として，わが国の幅広い地質環境を対象とした 2 つの包括的研究開発報告書[「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成 3 年度－」（以下，「第 1 次取りまとめ」という），「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）]を取りまとめ，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ました。特に，1999 年に公表した第 2 次取りまとめは，わが国の地層処分計画が，それまでの基礎的な研究開発の段階から事業の段階へと移行するための技術的基盤となったものであり，処分場の工学技術に関しては，わが国において想定される地質環境に柔軟に対応して，

安全確保に必要なや人工バリアや処分場施設を現状の工学技術を組み合わせた合理的な方法により設計，製作・施工できることが示されました。

これらの結果については，国において，我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性が示されているとともに，処分予定地の選定と安全基準の策定に資する技術的拠り所となることが示されていると評価され，このことから，第 2 次取りまとめは地層処分の事業化に向けての技術的拠り所となると判断されました（原子力委員会原子力バックエンド対策委員会, 2000）。また，第 2 次取りまとめ以降の研究開発の課題については，処分場の建設に向けて信頼性をさらに向上するために，以下のものがあげられました。

・オーバーパックの腐食や緩衝材の変質に関する詳細な研究
・溶接部の信頼性を確保するための検査技術についての検討
・深地層の研究施設等における建設・操業・閉鎖の実規模実証試験
・地質環境の調査技術との連携した建設･操業時の計測･観測システムの構築

これらの課題から，第 2 次取りまとめ以降の研究開発では，実際の地質環境への適用を通じて，あるいは現実の地質環境条件に基づいて，技術の信頼性を確認していくこと，また，現象への理解をさらに深め，データの蓄積やモデルの改良を進めて，処分システムの長期的安全性を評価する手法を確立することにより，地層処分技術の信頼性をさらに向上させることが必要となりました。

そのため，第 2 次取りまとめ以降の研究開発に関し，「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 つの研究開発目標を設定しました（地層処分研究開発部門パンフレット；サイクル機構研究開発課題評価委員会, 2001）。これら 2 つの研究開発目標に対して，工学技術の開発では，以下の研究開発を進めることにしました。

(1) 「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」
・人工バリア等の工学技術の検証
・設計手法の適用性確認
(2) 「地層処分システムの長期挙動の理解」
・人工バリアの基本特性データベース
・人工バリア等の長期複合挙動の研究

このような個別の研究課題に対して毎年の進捗報告（核燃料サイクル開発機構, 2001； 核燃料サイクル開発機構, 2002；核燃料サイクル開発機構, 2003）やこれらを統合した 5 年間の取りまとめ（平成 17 年取りまとめ）（核燃料サイクル開発機構, 2005）を行ってきました。

人工バリア等の工学技術の検証では，閉鎖技術に関する研究においてプラグの原位置試験を通じたデータ取得，評価モデル開発を進めるとともに閉鎖シナリオ評価手法や基礎試験に基づく海水系地下水条件での埋め戻し材の性能を確認しています。また，人工材料の開発では，低アルカリ性セメントを対象に性能試験や品質確認を行うとともにモデル解析による pH 低下挙動の評価の見通しを得ています。

設計手法の適用性確認では，堆積岩系岩盤として，稚内層硬質頁岩が分布する幌延の深地層の研究所用地を，また，結晶質岩系岩盤として，土岐花崗岩が分布する瑞浪の研究所用地を対象とした事例研究を通じた処分施設や人工バリアの試設計等を行いました。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ています。

人工バリアの基本特性データベースでは，炭素鋼オーバーパックの腐食挙動のうち，腐食生成物堆積による影響，セメント影響，溶接部の腐食速度に関わるデータを示すとともにアルカリ環境での腐食評価手法を提案しました。チタンについては，還元性環境でのデータを，銅については，酸化性環境でのデータを提示しました。さらに，地質環境条件に対する材料の選定方法に関する基礎情報を整理しました。緩衝材については，海水系地下水条件下での飽和水理特性，膨潤特性，力学特性データの取得し，これまでの成果も含めて，データベースとして公開しました。また，熱物性や力学物性測定手法についての標準化に関わる基盤情報の整備を進めました。また，人工バリアの性能保証に関する基盤情報やモニタリング技術に関する情報を整理しました。

人工バリア等の長期複合挙動の研究では，選定された緩衝材のクリープモデルを用いたオーバーパックの自重沈下解析結果を提示するとともに，岩盤と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みました。岩盤の力学的変形挙動に関する研究では，幌延の稚内層硬質頁岩を対象とした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ました。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，X 線 CT 法を用いた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等のデータの蓄積を行いました。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，概略的評価を行いました。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ました。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を評価するとともに，X 線 CT 法による選択的移行経路の形成によるガス移行挙動を確認しました。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，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を確認しました。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を進め，1,000 年規模のデータを取得しました。

2000 年以降の諸外国の工学技術に関わる研究開発では，スウェーデンやベルギーで示されている廃棄物を一体化したスーパーコンテナ（Anttila P, et al., 2008；Van Humbeeck H, et al., 2008）に代表される新たな人工バリア概念の研究，セメントのベントナイトへの影響の観点からグラウトやプラグ材料を対象とした低アルカリ性セメントのような新材料の研究（Vogt C, et al., 2009；Posiva, 2006），ガスの通過による緩衝材中の永久的な移行経路の形成に関わる様々なガス移行関する研究（Van Geet M, et al., 2008；Davy C A,et al., 2009），回収可能性を考慮した処分場の設計（Andra, 2005；IAEA, 2009）等，地層処分の実施に向けた具体的な研究が進められることが特徴的です。

1.3　中期計画における研究開発

原子力機構では，5 年を単位とした中期計画によって研究開発を進めています。現行の中期計画（平成 17 年 10 月 1 日～平成 22 年 3 月 31 日までの期間）（日本原子力研究開発機構, 2005）においては，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という国の政策に応えるため，実施主体である NUMO による地層処分事業と，国による安全規制の両面を支える技術を知識基盤として整備するために，「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」を進めてきました。処分場の工学技術に関する研究開発は，「工学技術の信頼性の向上」，「人工バリア等の長期挙動に関わるモデルの高度化とデータの拡充」を進めるため，実際の地質環境条件への適用性に焦点を当てた研究開発を進めてきました。このようなテーマについては，地層処分研究開発に関する全体計画（資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構，2009）に基づいて地層処分基盤研究開発調整会議の他の機関と調整して具体的な研究開発を進めました。

人工バリア等の基本特性データの拡充およびデータベースの開発においては，オーバーパックおよび緩衝材に関わる最新の基本特性データや得られた知見を整備するとともにデータベースの拡充を行っています。また，腐食寿命評価手法または腐食代の評価手法，緩衝材の膨潤圧試験等の試験方法の標準化（案）を整備しています。さらに，地層処分システムの長期的安全性の観点から人工バリアの性能保証に関する基盤情報の整備を行っています。

これらの研究開発で行ってきた成果の概要を本カーネルでは，以下の項目で示します。

2.1. 人工バリア等の基本特性データの拡充およびデータベースの開発
2.1.1　オーバーパックの基本特性
2.1.2　緩衝材の基本特性
2.1.3　人工バリアの性能保証に関する基盤情報整備

人工バリア等の長期複合挙動に関する研究においては，処分場設計の自由度の拡張や設計ならびに性能評価における不確実性の低減に資するために，処分環境における人工バリアの長期的な健全性の評価する手法の整備を行っています。具体的には，緩衝材の長期力学挙動，流出・

侵入挙動，変質・劣化挙動，ガス透気回復挙動，せん断応答挙動，熱－水－応力－化学連成挙動に関わる体系的なデータ取得,現象の理解および評価モデル／解析コードを開発しています。また，このような室内試験データに基づく長期評価の信頼性を向上させるため，ナチュラルアナログ研究も活用しています。

これらの研究開発で行ってきた成果の概要を本カーネルでは，以下の項目で示します。

2.2. 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究
2.2.1 緩衝材の長期力学挙動評価技術
2.2.2 緩衝材の流出・侵入挙動
2.2.3 人工バリアの変質・劣化挙動
2.2.4 熱－水－応力－化学連成挙動
2.2.5 ガス透気回復挙動
2.2.6 人工バリア性能の維持限界条件
2.2.7 ナチュラルアナログ研究

工学技術の信頼性向上では，処分場の建設技術（設計手法，長期性能の考え方），閉鎖技術，支保工材料，グラウト技術に関する材料開発や原位置試験も含めた実証試験に関する検討を進めました。処分場の建設技術では，処分場に特化した技術開発項目である多連設坑道としての設計方法の確立や，処分場の建設段階における一連の処分場での作業が処分場の長期性能に与える影響について整理しています。閉鎖技術では，閉鎖要件の検討や閉鎖材料のデータの拡充等を行っています。支保工材料では，低アルカリ性セメントの高強度性，施工性，低アルカリ性，耐久性の検討を行っています。また，グラウト技術では，処分場に適用可能な材料特性，施工性，分布確認手法，影響評価技術の開発を進めてきました。

これらの研究開発で行ってきた成果の概要を本カーネルでは，以下の項目で示します。

2.3. 工学技術の信頼性向上
2.3.1 建設技術
(1) 設計手法
(2) 長期性能の考え方
2.3.2 閉鎖技術
2.3.3 支保工材料
2.3.4 グラウト技術

1.4　CoolRep H22 本文との関係

CoolRep 本文では，2000 年以降，地層処分の事業段階を迎え，実施主体や規制機関，原子力機構を含めた関連研究機関において，当該分野における第 2 次取りまとめで示した見通し「科学技術的な観点からは，日本における高レベル放射性廃棄物の長期的な安全対策として，地層処分の概念を実現することが可能である」を一層確実なものとしていくため，以下に示す①～⑦の観点から研究開発が継続されていること示しています（CoolRepH22 本文_1.1.4）。

① 候補地点の地質学的・地球化学的・水理学的・地理学的・社会学的・経済学的といった条件の考慮
② 場所が特定された場合，その場所の条件（上記）に合わせた地層処分概念の最適化
③ 「処分場閉鎖後の安全性」だけでなく，処分場の建設・操業期間の安全性を確保するための要件や建設における実際的な制約条件の包括的な考慮
④ 「情報の非対称性」の問題認識－すべての関心のあるステークホルダーへの積極的な情報提供
⑤ ステークホルダーがそれぞれの関心に応じた的確な情報を踏まえた上で意思決定に参加できるよう支援
⑥ 地域の要求に応じて，安全性に対する裕度を犠牲としない範囲で事業計画の変更を許容する柔軟性の確保
⑦ 処分事業の進展につれて爆発的に増加すると予想される関連情報の迅速かつ的確に管理する革新的な「知識マネジメントシステム」（JAEA KMS）の導入

処分場の工学技術の研究開発課題は，事業の柔軟性（サイト条件への適合性および安全性，回収可能性の維持などの社会的要請への対応）を向上させるための先進的な処分概念や新材料の開発，建設，操業時の安全性や品質管理手法の開発に向けた基盤技術の開発とそれらの経験・ノウハウを蓄積していくことであり，一義的には上記の②③の観点に焦点をあてた研究開発です。ただし，上記の①の観点を念頭におき，地下研を利用した具体的な地質環境から得られた情報を対象とした工学技術の適用性に関わる研究開発も行っています。特に堆積岩は一般的にその成因からなる物性値の異方性や低強度といった特性を持つこと，また，海水系地下水を用いた人工バリア特性データの拡充が必要であるため，幌延の地質環境特性を用いた研究を重点的に進めてきています。また，④～⑦の観点に配慮し，本研究の成果の体系化や知識ベース化を進めています。

参考文献：

1. 動力炉・核燃料開発事業団：“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－”, PNC TN1410 92-081 (1992).
2. 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－”, JNC TN1400 99-020～024 (1999).

3. 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会 ： “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 (2000).
4. 地層処分研究開発部門パンフレット ：“日本原子力研究開発機構の研究開発目標と課題”
5. サイクル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） ：“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の地層処分技術に関する研究開発の全体評価」”, JNC TN1440 2001-008 (2001).
6. 核燃料サイクル開発機構 ：“平成 13 年度報告”, “平成 14 年度報告”, “平成 15 年度報告”
7. 核燃料サイクル開発機構 ： “高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－”, JNC TN1400 2005-020, 014～016 (2005).
8. Anttila P, Autio J, Berghall J, Borgesson L, Eriksson M, Hagros A, Halvarsson B, Johansson E, Kotola R, Parkkinen I, Ronnqvist P-E and Sanden T：“KBS-3H design description 2007”. Report POSIVA 2008-01, Posiva Oy, Olkiluoto, Finland (2008).
9. Van Humbeeck H, Bastiaens W, De Bock C and Van Cotthem：“A Experimental programme to demonstrate the viability of the supercontainer concept for HLW, Proceedings of International Conference on Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository”. 16-18 June 2008, Prague (2008).
10. Vogt C, Lagerblad B, Wallin K Baldy F Jonasson J-E：“Low pH self compacting concrete for deposition tunnel plugs”. SKB Report R-09-07, Waste Management Co (SKB), Stockholm, Sweden (2009).
11. Posiva：“Expected Evolution of a Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto”. Report POSIVA 2006-05 (2006).
12. Van Geet M, Bastiaens W, Volckaert G, Weetjens E, Sillen X, Gens A, Villar M V, Imbert Ch, Filippi M and Plas F.：“Installation and evaluation of a large-scale in situ shaft seal experiment in Boom Clay”. Science & Technology Series n° 334, Andra, pp.95-109 (2008).
13. Davy C A, Skoczylas F, Lebon P and Dubois, T (2009).：“Gas migration properties through a bentonite/argillite interface”. Applied Clay Science, 42 (3/4), pp.639-648.
14. Andra：“Dossier 2005 Argile. Tome: Architecture et gestion du stockage geologique”. Andra, Chatenay-Malabry, France (2005).
15. IAEA ： “Geological disposal of radioactive waste: Technological implications for retrievability”. IAEA Nuclear Energy Series No.NW-T-1.19 (2009).
16. 日本原子力研究開発機構 ： “独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画（中期計画）” (2005).
17. 資源エネルギー庁, （独）日本原子力研究開発機構 ：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画”, 2009 年 7 月 (2009).

2. 処分場の工学技術の成果の概要

2.1 処分場の工学技術の成果の概要

2.1.1 オーバーパックの基本特性

目的:

- オーバーパックは，人工バリアの構成要素であり，1000 年間にわたってガラス固化体に地下水が接触することを抑止し，地圧などの外力からガラス固化体を保護するための容器である。オーバーパックには，基本材料として炭素鋼を，代替材料としてチタンおよび銅を想定している。これらの材料のうち，処分サイトにおける環境条件に対して短期破損に至るような腐食現象が生じない材料を選定する必要がある。
- 炭素鋼オーバーパックについては，その長期信頼性向上およびオーバーパック設計や材料選定の具体化・最適化へ資することを目的として腐食データの拡充を行う。更に，幌延を例とした環境条件に対するデータの取得とそれに基づく腐食量の評価を行う。以上により得られたデータは，既存のデータと併せてデータベース化するとともに，腐食寿命評価手法または腐食代の評価手法として体系的に整備する。
- 代替オーバーパックのうち，チタンについては，水素脆化寿命評価の信頼性向上を目的として，長期浸漬試験データなどを拡充し，銅については局部腐食データなどの拡充と地下水条件に対する適用条件を提示する。

平成 17 年までの成果：

- 炭素鋼オーバーパックの短期破損をもたらす可能性が指摘されている現象として，マグネタイトによる腐食加速，セメントによる高 pH 環境での局部腐食について実験的な検討を行った。前者については腐食加速メカニズムとしてマグネタイト中の 3 価鉄による腐食が主に生じていることを明らかにし，オーバーパックの短期破損には至らないことを示した（N. Taniguchi, 2003a；谷口ほか, 2000；谷口ほか, 2005）。後者についてはアルカリ性環境での孔食，すきま腐食の進展を実験的に調べ，短期破損に至る顕著な腐食局在化は生じないことを示すとともに平均腐食深さから最大腐食深さを推定する手法を提示した（Taniguchi, 2003b；谷口ほか, 2003）。更に，低酸素濃度下での浸漬試験を継続し，試験期間 4 年間までのデータをとりまとめ，圧縮ベントナイト中の長期的な腐食速度を提示した（N. Taniguchi, 2004；谷口ほか, 2004）。
- チタンオーバーパックについては低酸素濃度環境下での実験データを取得し（鈴木ほか, 2006；鈴木ほか, 2003a；鈴木ほか, 2004；鈴木ほか, 2005），これに基づいて水素脆化寿命の評価手法を提示した（谷口ほか, 2006）。銅オーバーパックについては信頼性の高い寿命評価手法の構築に資するため，酸化性環境下での腐食形態や腐食進展挙動の検討（川崎ほか, 2002；川崎ほか, 2003），低酸素濃度環境下での硫化物による腐食への影響（川崎ほか, 2004）など基礎データを取し，環境条件と腐食形態，腐食速度の関係を明らかにした。

平成 21 年度までの成果：

- 炭素鋼オーバーパックについては，低酸素濃度環境下での浸漬試験を継続し，試験期間 10 年間までのデータを取りまとめ，腐食生成物皮膜の形成挙動の違いによる腐食速度への影響を明らかにした（谷口ほか, 2008a；谷口ほか, 2008b）。また，第 2 次取りまとめにおいて考慮した腐食モードを対象に，TIG 溶接，MAG 溶接，電子ビーム溶接によりそれぞれ接合された溶接試験体から切り出された試験片を用いて溶接部の耐食性を検討し，母材との耐食性の違いを示した（H. Mitsui, et. al, 2008；Y.Yokoyama, et. al, 2008；三井ほか, 2006a；三井ほか, 2006b；横山ほか, 2008）。また，材料因子のひとつとして材料中不純物による，不動態化への影響，低酸素濃度下での腐食速度への影響を調べ，ケイ素(Si)による不動態皮膜破壊，リン(P)よる低酸素濃度下での腐食促進の作用などを明らかにした（谷口ほか, 2009）。幌延を例とした地下水条件での炭素鋼の腐食挙動については幌延地下水および模擬地下水を用いて実験データを取得し，既往の寿命評価手法の適用性を確認した（谷口ほか, 2006；谷口ほか, 2010）。さらに，オーバーパックの設計に関わる試験結果をデータベース化し，基本構造の検討，主要データの入力を行った（谷口・中村, 2008；谷口・中村, 2010）。
- チタンオーバーパックについては低酸素濃度環境下での浸漬試験を継続しており，今後データベースに反映する予定である。また，水素脆化寿命評価についてはデータを拡充するとともに既存の知見と併せて現状の評価結果を取りまとめ，水素脆化による亀裂進展が生じる条件，脆化を確実に防ぐ工学的対策を提示した（谷口ほか，2007）。銅オーバーパックについては酸化性環境下での局部腐食，低酸素濃度環境下での硫化物による腐食挙動を検討し，電気化学的手法により孔食の生起条件を提示した（川崎ほか，2009；川崎ほか, 2008）。また，硫化物による腐食データを拡充し，硫化物濃度に対する銅の適用条件，硫化物濃度と寿命の関係を提示した（N.Taniguchi and M. Kawasaki, 2008；谷口ほか, 2007；谷口ほか, 2009）。チタン，銅についても試験データ，寿命評価手法を体系化し，データベースへ反映する作業を進めている。

今後の課題：

- 溶接部の耐食性，材料中成分や金属組織による腐食への影響など材料因子による影響に関するデータを拡充し，オーバーパック設計に反映する。
- 皮膜形成による腐食抑制効果など腐食メカニズムを明らかにし，寿命評価上設定された腐食速度の妥当性，信頼性を向上させる。
- 幌延を例とした地下水環境での腐食データ拡充，原位置試験に向けた腐食モニタリング手法の整備を行う。
- 代替オーバーパックについてはチタン，銅の溶接部の耐食性，銅の局部腐食，応力腐食割れ挙動，材質の影響などデータを拡充し，データベースに反映するとともに，オーバーパック設計に反映させる。

参考文献：

1. N. Taniguchi：“Effect of Magnetite as a Corrosion Product on the Corrosion of Carbon Steel Overpack”. Proceedings of an International Workshop on Prediction of Long Term Corrosion Behavior in Nuclear Waste Systems, EFC No.36, pp.424-438 (2003a).
2. 谷口直樹, 本田明, 川崎学, 舛形剛：“腐食生成物としてのマグネタイトによる炭素鋼オーバーパックの腐食への影響”, JNC TN8400 2001-001 (2000).
3. 谷口直樹, 建石剛, 福留和幸, 西村務, 川上進：“マグネタイト共存下における炭素鋼の腐食に伴う水素発生挙動”, JNC TN8400 2005-014 (2005).
4. N. Taniguchi, M. Kawasaki, S. Kawakami and H. Suzuki：“Propagation behavior of localized corrosion of carbon steel in alkaline environment”, Proc. Of 13th APCCC, H-06 (2003b).
5. 谷口直樹, 川崎学, 川上進, 鈴木治雄：“弱アルカリ性およびアルカリ性環境における炭素鋼オーバーパックの局部腐食進展挙動”, JNC TN8400 2003-016 (2003).
6. N. Taniguchi, M. Kawasaki, S. Kawakami and M. Kubota：“Corrosion Behaviour of Carbon Steel in Contact with bentonite under anaerobic condition”, Proc. of the 2nd International Workshop on “Prediction of Long Term Corrosion Behaviour in Nuclear Waste Systems”, pp.24-34 (2004).
7. 谷口直樹, 川崎学, 川上進, 久保田満：“還元性雰囲気における緩衝材中での炭素鋼の腐食挙動”, JNC TN8400 2003-040 (2004).
8. 鈴木宏幸, 谷口直樹：“低酸素濃度下におけるチタンの腐食速度と水素吸収挙動”, 材料と環境, 第 55 巻, pp.485-494 (2006).
9. 鈴木宏幸, 谷口直樹, 川上進：“還元性環境下におけるチタンの腐食速度と水素吸収挙動-Ⅰ”, JNC TN8400 2003-003 (2003).
10. 鈴木宏幸, 谷口直樹, 川上進：“還元性環境下におけるチタンの腐食速度と水素吸収挙動-Ⅱ”, JNC TN8400 2003-042 (2004).
11. 鈴木宏幸, 谷口直樹, 川上進：“還元性環境下におけるチタンの腐食速度と水素吸収挙動-Ⅲ”, JNC TN8400 2005-003 (2005).
12. 谷口直樹, 鈴木宏幸, 油井三和, 中西智明, 中山武典, 舛形 剛, 建石 剛：“低酸素濃度環境におけるチタンオーバーパックの水素脆化挙動”. 第 53 回材料と環境討論会講演集, D-303 (2006).
13. 川崎学, 谷口直樹, 川上進：“炭酸塩水溶液およびケイ砂混合ベントナイト中における純銅のアノード分極挙動”, JNC TN8400 2002-016 (2002).
14. 川崎学, 谷口直樹, 川上進：“大気吹込み下での模擬地下水中における純銅の腐食速度と腐食局在化”, JNC TN8400 2003-041 (2004).
15. 川崎学, 谷口直樹, 川上進：“硫化物を含む人工海水中における純銅の腐食挙動評価”, JNC TN8400 2004-027 (2005).
16. 谷口直樹, 川崎学, 内藤守正：“緩衝材中における炭素鋼の腐食挙動の実験的検討-I 10 年間の浸漬試験結果に基づく腐食進展挙動の検討”, JAEA-Research 2008-011 (2008).

17. 谷口直樹, 川崎学, 内藤守正 ：“緩衝材中における炭素鋼の腐食挙動の実験的検討-Ⅱ 10年間浸漬試料の腐食生成物分析結果”, JAEA-Research 2008-108 (2008).
18. H. Mitsui, R. Takahashi, H. Asano, N. Taniguchi and M. Yui：“Susceptibility to Stress Corrosion Cracking for Low-Carbon Steel Welds in Carbonate-Bicarbonate Solution Corrosion”, vol.64, No.12, pp.939- 948 (2008).
19. Y. Yokoyama, H. Mitsui, R. Takahashi, H. Asano, N. Taniguchi and M. Naito：“Corrosion Behavior of Weld zone of Carbon Steel Overpack for HLW Geological Disposal”, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. vol. 1124, pp.463-471 (2008).
20. 三井裕之, 谷口直樹, 大槻彰良, 川上進, 朝野英一, 油井三和 ：“オーバーパック溶接部の耐食性評価に関する研究 2(共同研究)”, JAEA-Research 2006-031 (2006).
21. 三井裕之, 高橋里栄子, 谷口直樹, 大槻彰良, 朝野英一, 油井三和 ：“オーバーパック溶接部の耐食性評価に関する研究 3(共同研究)”, JAEA-Research 2006-080 (2006).
22. 横山裕, 三井裕之, 高橋里栄子, 谷口直樹, 朝野英一, 内藤守正, 油井三和 ：“オーバーパック溶接部の耐食性評価に関する研究 4(共同研究)”, JAEA-Research 2008-072 (2008).
23. 谷口直樹, 鈴木宏幸, 内藤守正 ：“炭酸塩水溶液および人工海水における炭素鋼の腐食挙動に及ぼす材料中不純物元素の影響”, JAEA-Research 2009-068 (2009).
24. 谷口直樹, 甲川憲隆, 前田一人 ：“幌延地下水環境における炭素鋼の腐食挙動の予察的検討”, JAEA-Research 2006-051 (2006).
25. 谷口直樹, 鈴木宏幸, 内藤守正 ：“高 pH 化した海水系地下水環境における炭素鋼の局部腐食進展挙動”, JAEA-Research 2009-066 (2010).
26. 谷口直樹, 中村有夫 ：“オーバーパックデータベースの基本構造の検討”, JAEA-Data/Code 2008-032 (2008).
27. 谷口直樹, 中村有夫 ：“オーバーパックデータベースの作成”, JAEA-Data/Code 2009-022 (2010).
28. 谷口直樹, 鈴木宏幸, 中西智明, 中山武典, 舛形剛, 建石剛 ：“低酸素濃度下におけるチタンオーバーパックの長期水素吸収挙動と水素脆化の検討”, 材料と環境, 第 56 巻, pp.576-584 (2007).
29. 川﨑学, 谷口直樹, 内藤守正 ：“炭酸塩を含む知オス処分模擬環境における純銅のアノード分極挙動と皮膜破壊電位の検討”, 材料と環境, 第 58 巻 pp.386-394 (2009).
30. 川崎学, 谷口直樹, 内藤守正 ：“炭酸塩水溶液中における純銅のアノード分極挙動”, JAEA-Research 2008-012 (2008).
31. N. Taniguchi and M. Kawasaki：“Influence of Sulfide Concentration on the Corrosion Behavior of Pure Copper in Synthetic Seawater”, Journal of Nuclear Materials, vol.379, pp.154-161 (2008).
32. 谷口直樹, 川崎学, 内藤守正 ：“低酸素濃度環境における純銅の腐食挙動に及ぼす硫化物の影響と銅オーバーパック寿命の超長期化の可能性”, JAEA-Research 2007-022 (2007).
33. 谷口直樹, 川崎学, 内藤守正 ：“硫化物を含む人工海水における純銅の応力腐食割れ挙動に及ぼす電位と材質の影響”, JAEA-Research 2008-118 (2009).

2.1.2 緩衝材の基本特性

目的：

- 緩衝材は，人工バリアを構成する粘土系の材料であり，オーバーパックと岩盤の間に充填され，地下水の浸入や地下水による放射性物質の移動を抑制するものをいう。さらに岩盤の変位による力学的な影響を物理的に緩衝する働きや，地下水の水質を化学的に緩衝する働きをもつ。
- 特定の地質環境条件における緩衝材の設計や人工バリアの長期挙動評価，および地層処分システムの安全評価上，種々の環境条件やベントナイト系材料を対象に幅広くデータを整備しておくことが必要であることから，常に最新の知見に基づいた緩衝材の基本特性に関するデータベースを提示する。また，試験手法が定められていない膨潤圧試験などの試験方法の標準化（案）を提示する。

平成 17 年までの成果：

特定の地質環境条件を考慮し，海水系地下水条件下における緩衝材の基本特性データを充実させ，幌延などを例とした緩衝材の設計要件に関する検討を実施（核燃料サイクル開発機構, 2005；松井ほか, 2005）するとともに，設計等に必要となるデータベース（Kikuchi, H. et al., 2005；菊池・棚井, 2004；日本原子力開発機構）を整備し，Web 上に公開した。また，第 2 次取りまとめにおける緩衝材のリファレンス仕様（ベントナイト 70wt%＋ケイ砂 30wt%，乾燥密度 1.6Mg/m3）を対象に海水系地下水条件下におけるブロック隙間充てん性能について評価し，設計要件の一つである「自己シール性」に関わるデータの拡充を図った（核燃料サイクル開発機構, 2005）。さらに，緩衝材の膨潤特性に関する測定手法の標準化に向け，供試体のスケール効果に関するデータの取得を実施した（核燃料サイクル開発機構, 2005）。

平成 21 年度までの成果概要：

緩衝材基本特性の測定手法の標準化に関わる基盤情報の整備として，電力中央研究所との共同研究によりベントナイト系材料を用いた透水試験，膨潤試験および熱特性試験手法の現状把握ならびに標準化に向けた課題の整理を行った。具体的には，文献調査によりこれまでの実験手法の問題点を抽出し，データのばらつきに影響を与える要因を整理した。また，緩衝材の圧縮成型方法の違いによる密度のばらつき，供試体寸法の違いによる膨潤圧への影響に関するデータを取得した。圧縮成型方法による密度のばらつきに関しては，圧縮成型時における治具内の空気を抜けやすくすることで密度のばらつきを抑制できることがわかった（棚井・菊池, 2009）。供試体寸法による膨潤圧の影響に関しては，供試体寸法の直径と高さの比（以下，縦横比という）で整理したした場合，供試体の縦横比に比例して膨潤圧が増加するという傾向が得られた（棚井・菊池, 2008）。なお，これらの成果を技術報告書として取りまとめた。

支保工コンクリートの劣化によって溶出される高アルカリ溶液が緩衝材に与える影響を考慮し，健全な緩衝材に高アルカリ溶液を供給した場合の基本特性データの取得や Ca 型化させた

ベントナイトの基本特性データの取得を目的とした試験に着手した。具体的には，これまでに行われた研究事例を整理するとともに，海水系地下水条件下でのセメント浸出液を模擬するため，人工海水や NaCl 溶液に水酸化カルシウムを添加して透水試験を行い，イオン強度と透水係数の関係で整理できることを示した（菊池・棚井, 2007；日本原子力研究開発機構, 2007）。

今後の課題：

緩衝材基本特性試験手法の標準化に関する検討の結果抽出された課題に対するデータの取得を継続する。また，セメントの影響を考慮した高アルカリ溶液を用いた実験による緩衝材の基本特性データの取得を進める。さらに，MX-80 など海外産ベントナイトに関するデータなどを含め，緩衝材基本特性データベースを更新していく。

参考文献：

1. 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築　－平成 17 年取りまとめ - 分冊 2 工学技術の開発”, JNC TN1400 2005-015 (2005).
2. 松井裕哉，棚井憲治，川上進，佐藤稔紀，西村繭果，青柳茂男，藤田朝雄，谷口直樹，菊池広人，松本一浩，油井三和：“設計技術（地下施設設計，人工バリア設計，閉鎖設計）の実際の地質環境条件への適用性評価”, JNC TN5400 2005-004 (2005).
3. Kikuchi, H., Tanai, K., Yui, M.：“Database Development of Fundamental Properties for the Buffer Material in Japan”. Proceeding of International Conference on Nuclear Energy System for Future Generation and Global Sustainability (GLOBAL 2005), Paper No. 238 (2005).
4. 菊池広人，棚井憲治：“緩衝材の基本特性データベース”, JNC TN8450 2003-010 (2004).
5. 棚井憲治，菊池広人：“緩衝材の膨潤応力測定手法に関する現状と課題”，日本原子力学会「2008 年秋の大会」, pp. 722 (2008).
6. 棚井憲治，菊池広人：“供試体の作製方法による試料の不均一性に関する検討”，土木学会第 64 回年次学術講演会, CS5-047, pp. 227-228 (2009).
7. 菊池広人，棚井憲治：“塩水条件下におけるセメント影響を考慮した圧縮ベントナイトの透水特性”，日本原子力学会「2007 年秋の大会」, p.571 (2007).
8. 日本原子力研究開発機構：“地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 18 年度報告－”, JAEA-Review 2007-050 (2007).
9. 日本原子力研究開発機構：“緩衝材基本特性データベース”, http://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/

2.1.3　人工バリアの性能保証に関する基盤情報整備

目的：

- 人工バリアの性能保証とは，地層処分システムの長期的安全性の観点から，人工バリア等の処分施設を構成する各要素（オーバーパック，緩衝材，埋め戻し材，プラグ，坑道，処分孔）に関する性能を保証することをいう。ここでは国が策定する人工バリアに関わる安全基準，指針等に資するため，その具体的な評価ツールを提示することを目的とする。

平成 17 年までの成果：

- 処分場を構成する各要素を対象として，性能保証項目を試案として示すとともに，これらを評価するためのモデル，データベース，実験方法などに関する現状を明らかにした（オーバーパック，緩衝材（川上ほか, 2003），埋め戻し材，プラグ，坑道，処分孔（杉田ほか, 2003））。
- 人工バリアの施工に関わる定置精度について，処分システムの長期的安全性に対する影響の有無を確認するため，緩衝材と処分孔とその間の隙間を模擬した実験を行い，緩衝材の隙間膨潤に起因する密度の不均質化の発生は，小さいことを確認（杉田ほか, 2002）した。

平成 21 年度までの成果概要：

- 埋め戻し材，緩衝材の基本特性（膨潤特性，力学特性，透水特性），埋め戻し材の変形・変質の長期挙動に関する現象（流出，岩盤への侵入），コンクリート材料によるアルカリ影響（緩衝材，岩盤の変質・劣化，オーバーパックの腐食挙動），岩盤の力学的変形挙動について，それぞれの項目で確認する具体的内容，評価方法（実験による確認により評価がなされるもの，実験式およびデータベースから推定されるもの，モデル計算により導出するもの）の種類，研究の概要およびこれらの研究の最新の結果（川上ほか, 2006）を示した。

今後の課題：

- 幌延での人工バリア精度に関わる原位置試験に向けて，緩衝材などの他の項目で検討される隙間充填性に関わるデータや人工バリアの定置技術に関する知見に基づき，幌延の原位置試験で検討すべき項目を整理する。

参考文献：

1. 川上進，杉田裕，栗原雄二，神徳敬，谷口直樹，油井三和，棚井憲治，柴田雅博，本間信之：“高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア等の性能保証に関わる研究の進め方と反映先”, JNC TN8400 2002-026 (2003).
2. 杉田裕，栗原雄二，川上進，神徳敬，油井三和：“高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア等の性能保証に関わる研究の進め方と反映先（その 2）”, JNC TN8400 2003-015 (2003).

3. 杉田裕，菊池広人：“人工バリアにおける緩衝材の隙間膨潤挙動に関する基礎試験”，JNC TN8430 2002-003 (2002).
4. 川上進，藤田朝雄，油井三和：“埋め戻し材，プラグ，坑道および処分孔等の性能保証項目に関わる評価ツールの現状”, JAEA-Research 2006-015 (2006).

2.2 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

2.2.1 緩衝材の長期力学挙動

目的：

- 緩衝材の長期力学挙動評価技術とは，人工バリアの埋設後，オーバーパックの自重沈下や腐食膨張，周辺岩盤のクリープ変形等によって緩衝材に生じる応力を長期間にわたり評価する解析技術をいう。
- 人工バリアの長期間にわたる力学的安定性を評価可能とする為，緩衝材/岩盤応力連成モデル・コードを整備し，ニアフィールド全体を実現象に近い状態でシミュレート可能とする 3 次元連成解析手法を提示する。また，降水/海水系地下水条件下における緩衝材/岩盤応力連成評価に用いるパラメータ設定の考え方のノウハウを取りまとめる。

平成 17 年までの成果：

降水系地下水条件における緩衝材長期力学挙動評価手法として，人工バリアの 2 次元解析モデルを構築するために，粘性土の既存構成モデルの体系化を通じて関口-太田モデルおよび足立-岡モデルのふたつを選定した（重野ほか, 2002）。圧密試験や三軸圧縮試験等の要素試験を行ってふたつの構成式の解析パラメータを設定し，試験結果とシミュレーション結果の比較により，ふたつの構成モデルの適用性を確認し，解析パラメータの設定に関する留意点を整理した（重野ほか, 2003）。オーバーパックの腐食膨張を模擬した模型試験を実施し，構成モデルおよびパラメータの適用性を確認した（高治ほか, 2003）。さらに，この評価手法を用いて，オーバーパックの自重沈下と腐食膨張を考慮したシミュレーション解析を実施し，人工バリアの長期力学挙動を評価した結果，オーバーパックおよび緩衝材の力学的安全性に問題がないことを確認した。

降水系地下水条件において適用性が示された構成モデルの海水系地下水条件への適用可能性を確認するための準備として，幌延の深地層の研究施設計画で採取された地下水および人工海水を用いて要素試験データを取得し，構成モデルの解析パラメータを設定した（高治ほか, 2004）。

平成 21 年度までの成果：

緩衝材の長期力学挙動評価解析を実施した結果，100,000 年の評価期間において緩衝材のコロイドフィルトレーション機能，拡散場維持機能，自己シール性等の安全評価上期待される機能は担保されることが明らかとなった（高治ほか, 2005）。また，関口-太田モデルおよび足立

-岡モデルのパラメータ設定に関して考え方を整理し，緩衝材の圧密などの変形挙動を評価するパラメータとせん断などの応力状態を評価するパラメータそれぞれを適切に設定することにより，緩衝材の長期力学挙動を表現可能であるとの見通しが得られた（西村ほか, 2006）。

緩衝材と岩盤の力学的相互作用を考慮した連成モデルの構築に向けて，3 次元の緩衝材/岩盤応力連成モデル・コード（MuDIAN）を構築し，岩盤クリープやコンクリート支保工の劣化を考慮した長期挙動解析を実施した（重野ほか, 2007）。また，海水系地下水条件下における解析パラメータ設定のための試験データの拡充を目的とした要素試験を継続しており，緩衝材データベースに反映している。

緩衝材の構成モデルの高度化として，ベントナイトの膨潤挙動を評価可能とする構成モデルのために周面摩擦を考慮した圧密試験を実施した。また，緩衝材/岩盤応力連成評価に用いるパラメータ等のデータベースを拡充するため，埋め戻し材の要素試験を実施した（齋藤ほか, 2009）。連成モデルの精度向上を目的とし，解析メッシュの分割数や，解析ステップの時間刻みが解析結果に与える影響について検討を行なった（齋藤ほか, 2009）。これらのノウハウ情報は緩衝材/岩盤応力連成評価に用いるパラメータ設定の考え方として取りまとめている。

今後の課題：

- 緩衝材/岩盤応力連成評価に用いるパラメータ等のデータベースを整備するため，埋め戻し材の要素試験データや海水系地下水条件下における緩衝材の要素試験データの拡充を継続する。
- 降水/海水系地下水条件下における緩衝材/岩盤応力連成モデル・コードに用いる解析パラメータ設定の考え方に関するノウハウ情報を取りまとめる。
- 構築した緩衝材/岩盤応力連成モデル・コードを用いて，幌延深地層の研究施設計画における原位置試験の予測解析を実施し，試験の仕様設計に資する情報として取りまとめる。

参考文献：

1. 重野喜政，並河務，高治一彦 ：“緩衝材長期挙動構成モデルの検討”, JNC TJ8440 2002-004 (2002).
2. 重野喜政，並河務，高治一彦 ：“緩衝材長期力学挙動構成モデルの検討（Ⅱ）”, JNC TJ8440 2003-002 (2003).
3. 高治一彦，重野喜政，下河内隆文，白武寿和，田村博邦 ：“緩衝材長期力学挙動構成モデルの検討（Ⅲ）”, JNC TJ8440 2003-007 (2003).
4. 高治一彦，重野喜政，下河内隆文 ：“幌延の地下水環境下におけるベントナイト混合材料の力学特性に関する研究”, JNC TJ5400 2003-007 (2004).
5. 高治一彦，重野善政，下河内隆文，平井卓，白武寿和 ：“緩衝材長期力学挙動の信頼性向上”, JNC TJ8440 2004-011 (2005).
6. 西村繭果，棚井憲治，高治一彦，平井卓，白武寿和 ：“緩衝材長期力学挙動評価モデルのパ

ラメータ設定に関する検討”, JAEA-Research 2006-036 (2006).
7. 重野善政，高治一彦，西村繭果，棚井憲治：“コンクリート支保の劣化を考慮したニアフィールドの長期力学的挙動の検討（その 1）－コンクリート支保劣化の力学モデル－”，土木学会平成 19 年度全国大会第 62 回年次学術講演会（CD-ROM）CS5-052 pp.261-262
8. 西村繭果，重野善政，高治一彦，棚井憲治：“コンクリート支保の劣化を考慮したニアフィールドの長期力学的挙動の検討（その 2）－処分孔竪置き方式における解析的検討－”，土木学会平成 19 年度全国大会第 62 回年次学術講演会（CD-ROM）CS5-052 pp.261-262
9. 西村繭果，棚井憲治，高治一彦，重野善政，下河内隆文：“ニアフィールドの長期力学連成解析手法の構築”, JAEA-Research 2007-004 (2007).
10. 齋藤雄也，棚井憲治，高治一彦，重野善政，下河内隆文：“ニアフィールドの長期力学連成解析手法の構築(Ⅱ)”, JAEA-Research 2009-065

2.2.2 緩衝材の流出・侵入挙動

目的：

- 緩衝材の流出／侵入挙動とは，以下のふたつから成る現象をいう。
  －緩衝材が持つ膨潤性により，人工バリア周辺の岩盤割れ目への侵入が長期にわたり継続した場合に，緩衝材自体の密度が低下する現象（侵入現象）。
  －また，この侵入現象とともに，地下水流れによる緩衝材からのコロイドの生成によって，それらが放射性核種を収着する場合には，核種の移行を助長する現象（浸食現象）。
- 処分環境における人工バリアの長期的な健全性を評価するための評価手法を構築するとともに，本事象の発生条件等を明らかにし，評価手法・ノウハウ情報として取りまとめ，それら最新の知見により，設計ならびに性能評価における不確実性を低減させる。侵入現象については，拡散によるモデル化を基本ベースとして，改良を図りつつより現実的な評価手法を構築し，長期的な予測評価の精度を向上させる。浸食現象については，緩衝材からのコロイド生成条件の明確化ならびに生成量の定量的な把握を行い，サイト選定上の留意事項ならびに，コロイド影響評価モデルにおける有用な情報として反映する。

平成 17 年までの成果：

人工バリアの長期的な健全性を評価するために，緩衝材の流出／侵入挙動に関して，試験データの拡充を進め，それらの知見の整理ならびに評価手法の適用性について検討した。緩衝材の岩盤亀裂内への侵入現象については，初動の侵入速さに関するデータの整備（松本・棚井, 2003）と，降水系地下水と海水系地下水に大別した水質の違いによる挙動の把握を実施し，海水系地下水条件下では本事象が顕著ではないと判断できることを示唆した（松本・棚井, 2004）。また，侵入現象の評価手法に用いるベントナイトの物性データの整備を進め，評価手法の適用性検討を行った（松本ほか, 2005a）。一方，地下水流れに伴う緩衝材の浸食現象については，流速と浸食コロイド量との関係データの拡充を進め，コロイド生成の可能性がある流速環境に関するデータの整備を進めた。また，浸食現象は，降水系地下水条件において留意するべき事

象であることを示唆した（松本ほか, 2005b）。

平成 21 年度までの成果：

- 緩衝材の流出／侵入挙動に関する基盤となるデータを取りまとめ（Tanai, K and Matshimoto, K, 2008），緩衝材基本特性データベースにより公開した（日本原子力研究開発機構緩衝材基本特性データベース）。現実的な地質環境条件を考慮した侵入挙動を把握するために，実際の岩盤亀裂の性状を踏まえた実験手法に関して検討を行った（松本・棚井, 2007）。侵入現象をより詳細に把握する手法として非破壊検査技術を適用したベントナイトの密度分布データの取得（松本・棚井, 2008），ならびに侵入現象モデルの入力データの整備を進め，評価手法の妥当性・適用性について検討を行った。その結果，実際の侵入現象では，既存のモデル化で用いられている物性パラメータ以外に評価上影響する要因が含まれていることが推測され，現状の物性パラメータによる侵入現象のモデル化には限界があることが示された（松本・棚井, 2010）。
- 放射性核種の移行を助長することが想定されるコロイドのうち，とくに緩衝材を起源として生成するベントナイトコロイドを対象に，実験的にその生成可能性や生成量についてデータの取得を行った。その結果，流速の低下にともないコロイド粒子径が小さくなること，コロイド生成量が減少することなど，ベントナイトコロイドの生成に流速依存性があることを把握した（松本ほか, 2009）。

今後の課題：

- 侵入現象の評価手法に関して，現象を表現し得るパラメータの検討を進めるとともに，実験結果に基づく適用性の確認を繰り返し行い，評価精度の向上とモデルの最適化を図りつつ，人工バリア埋設後の長期的な健全性評価に最新の知見を提供し，緩衝材設計の妥当性の確認に反映していく。
- コロイドの生成条件に関するデータの充足ならびに信頼性を向上させ，地下水流速と浸食コロイド量との関係式を得るなどして，性能評価研究ならびに緩衝材の設計に反映していく。
- 以上の情報を統合化し，人工バリアの長期健全性評価ならびに緩衝材設計の知識として集約していく。

参考文献：

1. 松本一浩，棚井憲治：“ベントナイト緩衝材の流出特性の評価(Ⅱ)”, JNC TN8400 2003-006 （2003）.
2. 松本一浩，棚井憲治：“緩衝材の流出／侵入特性”, JNC TN8400 2003-035 （2004）.
3. 松本一浩，棚井憲治，菅野毅，岩田裕美子：“拡散モデルを用いた侵入現象による緩衝材密度変化の事例解析”, JNC TN8400 2005-009 （2005）.
4. 松本一浩，棚井憲治：“緩衝材の流出／侵入特性(Ⅱ）－幌延地下水(HDB-6 号孔)を用いた緩衝材の侵入特性評価－”, JNC TN8400 2004-026 （2005）.

5. Tanai, K. and Matsumoto, K.：“A Study of Extrusion Behavior of Buffer Material into Fractures”, Science & Technology Series No.334, Andra (2008).
6. 日本原子力研究開発機構 ：“緩衝材基本特性データベース”
7. 松本一浩，棚井憲治 ：“緩衝材の侵入試験に関する今後の計画”，日本原子力学会「2007 年秋の大会」予稿集，放射性廃棄物処分と環境, J35, p.572.
8. 松本一浩，棚井憲治 ：“X 線 CT スキャナによる亀裂内侵入ベントナイトの密度測定に関する適用性”，原子力バックエンド研究, Vol.15 No.1, pp.27-35 （2008）.
9. 松本一浩，棚井憲治 ：“緩衝材の侵入現象モデルに関する適用性の確認”，JAEA Research 2009-070 （2010）.
10. 松本一浩，飯島和毅，棚井憲治 ：“緩衝材の浸食現象評価 －ベントナイトコロイドの生成挙動－”, JAEA Research 2008-097 （2009）.

2.2.3 人工バリアの変質・劣化挙動

目的：

- 緩衝材（ベントナイト）の長期変質とは，処分後の緩衝材（ベントナイト）が曝される環境条件（温度，溶液組成など）により，主要構成鉱物であるスメクタイトの層間陽イオンの交換やスメクタイトの鉱物学的変化，また溶性ケイ酸などの沈殿によるセメンテーション等が生じること。このような変質に伴い，緩衝材の諸特性に影響が生じる。
- 第 2 次取りまとめ時点での課題でもあった緩衝材とオーバーパック材料との相互作用について，体系的なデータ取得，熱力学的な評価等を実施し，変質・劣化の予測を行うためのモデルや手法を開発する。
- 処分場設計の自由度を担保する上での検討にあたり必要な緩衝材最高温度が 100℃を上回る場合の緩衝材特性に関する既往データを整備する。
- セメント支保工の利用に伴う緩衝材とセメントの相互作用に関しては，TRU 廃棄物処分研究における成果（TRU カーネル）を反映する。

平成 17 年までの成果：

緩衝材とオーバーパック材料との相互作用に関しては，以下の成果が得られた。

- 低酸素濃度／海水系条件で炭素鋼と接触した圧縮ベントナイト：クニゲル V1（試験期間 4 年，80℃）および低酸素濃度／蒸留水系で鉄粉と反応した粉末ベントナイト：クニピア F（試験期間 6 年，室温）の変質評価（藤島ほか, 2002；笹本ほか, 2003）を行った。その結果，試験後のベントナイトに含まれるスメクタイトのイオン型の変化（Na 型→Fe 型）は確認されたが，鉱物学的な変質は認められず，第 2 次取りまとめで想定した変質シナリオの妥当性が支持された。
- Fe 型化の長期的な進展を予察的に評価するため，オーバーパックの腐食に伴い生じた Fe イオンの緩衝材中への拡散と緩衝材中での化学反応を考慮した連成が可能な手法を開発（柴田・陶山ほか, 2003）した。

・ Fe によるスメクタイトの変質に関わる現象理解を深めるため, Fe 型化スメクタイトを出発物質とし，高温（250℃）での変質加速試験も行い，生成可能性のある二次鉱物に関する情報も取得（陶山ほか, 2006）した。

平成 21 年度までの成果概要：

緩衝材とオーバーパック材料との相互作用に関しては，より長期における試験データを拡充するとともに，試験条件や温度等をパラメータとした体系的な試験により，鉄共存下でのスメクタイトの鉱物学的変質の機構，生成条件等を明らかにした。また，これらの試験結果の解釈に基づくモデル化や長期的な変質評価のための手法も開発した。以下に成果をまとめる。なお，以下の成果の一部は，経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業の成果である。

・ 低酸素濃度／海水系条件で炭素鋼と接触した圧縮ベントナイト：クニゲル V1（試験期間約 10 年，80℃）および低酸素濃度／蒸留水系で鉄粉と反応した粉末ベントナイト：クニピア F（試験期間約 10 年，室温）の変質評価（陶山ほか, 2008；笹本・陶山, 2009）を行った。その結果，いずれの場合もスメクタイトの鉱物学的な変質は認められなかった。
・ 鉄共存下でのスメクタイトの変質に関して，文献調査により変質に影響を与えると考えられる主要因を抽出し，それらをパラメータとした体系的な試験により，鉄共存下でのスメクタイトの鉱物学的変質の機構，生成条件等を概略的に把握した（日本原子力研究開発機構, 2008；日本原子力研究開発機構, 2009）。
・ 室内試験結果の熱力学的／速度論的な解釈を行い，変質反応のモデル化を行うとともに，モデルを用いて仮想的な地質環境／人工バリア仕様に基づく鉄ーベントナイト相互作用による長期的な変質評価のための解析手法を開発した（日本原子力研究開発機構, 2010）。

100℃を超える温度条件の検討に関しては，以下の成果が得られた。

・ 処分場設計の自由度を担保する上での検討にあたり必要と考えられる 100℃を超える条件での緩衝材特性（膨潤性や透水性）に関する既往データを文献調査により収集，整備するとともに簡易的なデータベースを作成した（日本原子力研究開発機構, 2009；日本原子力研究開発機構, 2010）。

今後の課題：

・ 緩衝材とオーバーパック材料との相互作用に関しては，長期的な変質評価のために開発したモデルや手法の妥当性検討を行うとともに，緩衝材の安全機能への影響予測を目標とした長期変質評価を行う。
・ 100℃を超える温度条件の検討に関しては，変質挙動に関するデータの蓄積，100℃を超える温度を経験した緩衝材領域に対する処分システム設計上および安全評価上の取扱方法を検討する。

参考文献：

1. 藤島敦，久保田満，金　善永，根本一昭，柴田雅博，佐藤努：“低酸素条件下で鉄と接触したベントナイトの特性評価”，第 44 回粘土科学討論会講演要旨，pp.68-69 （2000）．
2. 笹本広，陶山忠宏，柴田雅博：“鉄粉－ベントナイト反応に関わる室内試験”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-047 （2003）．
3. 柴田雅博，陶山忠宏：“緩衝材の鉄型化に関する予察解析”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-007 （2003）．
4. 陶山忠宏，柴田雅博，笹本広：“鉄型化ベントナイトの水熱試験－低酸素雰囲気での高温条件下における鉄型化ベントナイトの変化の同定－”，原子力機構研究開発報告書，JAEA-Research 2006-064 （2006）．
5. 陶山忠宏，上野健一，笹本広：“炭素鋼と 10 年間接していた圧縮ベントナイトの変質挙動調査”，原子力機構研究開発報告書，JAEA-Data/Code 2008-007 （2008）．
6. 笹本広，陶山忠宏：“鉄－ベントナイト反応に関わる実験的検討―室内における 10 年程度の試験後試料の分析結果－”，原子力機構研究開発報告書，JAEA-Research 2009-039 （2009）．
7. 日本原子力研究開発機構：“平成 19 年度　地層処分技術調査等委託費　高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム化学影響評価高度化開発　報告書（平成 20 年 3 月）”（2008）．
8. 日本原子力研究開発機構：“平成 20 年度　地層処分技術調査等委託費　高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム化学影響評価高度化開発　報告書（平成 21 年 3 月）”（2009）．
9. 日本原子力研究開発機構：“平成 21 年度　地層処分技術調査等委託費　高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム化学影響評価高度化開発　報告書（平成 22 年 3 月）”（2010）．

2.2.4　熱-水-応力-化学連成挙動

目的：

- 熱-水-応力-化学連成挙動とは，人工バリアおよびその周辺岩盤からなるニアフィールドにおいて，廃棄体からの放熱，人工バリア内への地下水の浸潤，緩衝材の膨潤による応力の発生，間隙水組成の変化など，熱的，水理学的，力学的および化学的プロセスが相互に影響を及ぼし合う現象をいう。
- 人工バリアを中心とする化学的変遷を考慮したニアフィールド長期健全性評価を行うため，化学現象から他の現象への連成に関する既存データを収集し整理するとともに，海水系および軟岩系（コンクリート支保工の影響による）の熱－水－応力－化学連成挙動解析のためのモデルの構築とパラメータの設定を行う。また，工学規模の人工バリア試験や，国際共同研究の活用による連成解析モデルの検証・確証を実施するとともに，幌延等の具体的地質環境における熱－水－応力－化学連成挙動解析を実施し適用事例の拡充や原位置試験に向けた検討を図る。さらに，室内試験や工学規模試験を通じて，計測技術の適用性・長期耐久性など原位置試験へ向けた実験的検討を行う。

平成 17 年までの成果：

人工バリアの設計評価や性能評価の信頼性向上のため，間隙水化学などの化学的変遷を考慮したニアフィールド長期健全性評価に向け，第 2 次取りまとめにおいて再冠水時の人工バリア挙動評価に用いた熱-水-応力連成解析コードをベース（第 2 次とりまとめ）に，化学現象を組み込んだプロトタイプ・コードを構築し（伊藤ほか, 2001），予察解析により，温度勾配が形成された緩衝材中で間隙水濃度が上昇することを確認した（A. Ito, et al., 2003）。また，国際共同研究 DECOVALEX（C-F.Tsang, et al., 2009）を活用し，アメリカのユッカマウンテンにおける坑道規模加熱試験対象とした解析や，第 2 次取りまとめの処分場レイアウトを用いた人工バリアを中心とするニアフィールドの熱-水-化学連成解析を実施し，緩衝材最高温度，再冠水時間および緩衝材の pH など，第 2 次取りまとめで示された結果との整合性を確認した（伊藤ほか, 2004）。

開発したプロトタイプ・コードの確証のためのデータ取得を目的として，工学規模の人工バリア試験を実施し，熱-水-応力-化学連成挙動に関するデータを取得した（鈴木ほか, 2004；小田ほか, 2005）。

ニアフィールドで発生する熱-水-応力-化学連成現象の確認技術（モニタリング技術）について，国際機関や欧米各国および国内の情報に基づき，処分場閉鎖前における人工バリアの性能確認に関する基本的な考え方を整理するとともに，計測項目・技術について整理を行った（千々松ほか, 2004；千々松ほか, 2005）。

平成 21 年度までの成果：

熱-水-応力連成解析モデルの高度化に向けた取り組みとして，不飽和状態におけるガスの溶解や地球化学反応における速度論モデルの導入などを行うとともに，工学規模の人工バリア試験を実施し，廃棄体を模擬した発熱体の昇降温時の再冠水挙動に関する確証（藤崎ほか, 2008；H. Suzuki, et al., 2009）や，化学現象に関するデータを取得し解析事例を蓄積した（K. Fujisaki, et al., 2006；鈴木ほか, 2009）。さらに，平成 19 年度以降，経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業である処分システム化学影響評価高度化開発において，発熱したオーバーパック表面で生じる可能性のある塩の濃縮・析出現象を評価するための物質移行モデルの改良や，緩衝材の保水形態を考慮した不飽和間隙水化学反応モデルを導入した（日本原子力研究開発機構, 2007；日本原子力研究開発機構, 2008）。さらに，コンクリート支保の高アルカリ溶液による人工バリアに対する化学的影響や，化学現象から他の現象への連成に関する既存のデータ収集とパラメータ設定を行い，膨潤応力や変形に関する連成モジュールを追加し，熱-水-応力-化学連成挙動解析モデルとして取りまとめた（M. Kimura, et al.）。

開発された連成解析モデルを具体的な地質環境へ適用しモデルの適切性を評価するため，国際共同研究 DECOVALEX において，スイス・グリムゼル研究所で実施された坑道規模加熱試験（FEBEX）を対象としたベンチマークテスト（J. Birkholzer, et al., 2008）や，スイス・モ

ンテリー試験サイトにおける坑道周辺での水理場の変化に関するベンチマークテスト（中間ほか，2009）を，また，幌延深地層研究所の地質環境データを用いた坑道周辺での間隙水化学の変化に関する解析（鈴木ほか, 2009）等の事例を蓄積している。

本検討を通じて得られたノウハウ情報については，熱-水-応力-化学連成解析コードを実施主体や他の研究機関で使用できるようにするため，熱-水-応力-化学連成モデルの説明や解析する際に必要となる入力データおよび文献資料や解析事例を統合化した知識としてデータベース化（熱-水-応力-化学連成挙動数値実験システム）を進めている（日本原子力研究開発機構）。
熱-水-応力-化学連成現象確認のための計測技術開発としては，原子力環境整備促進・資金管理センターとの共同研究による光ファイバー技術の開発を実施するとともに（日本原子力研究開発機構, 2008），工学規模の人工バリア試験を活用し，人工バリア設置環境を模擬した条件下において，光ファイバー技術を含む計測技術の適用性を把握するためのデータを蓄積中である。

以上，熱－水－応力－化学連成挙動解析モデル開発における開発方針，検証・確証方針（室内試験，工学規模試験および原位置試験の位置づけ），計測技術開発および国際共同研究などの研究開発の現状を取りまとめ，専門家の評価に供した（T. Fujita, et al.）。

今後の課題：

幌延深地層研究計画の第三段階で実施する予定の人工バリア試験に向けた検討として，原位置試験における人工バリア仕様や計測計画に反映するために，URL 掘削段階で取得される地質環境データに基づいた予備解析を実施する。
また，人工バリア試験に向けたモニタリング技術高度化研究として，光ファイバーを中心とした計測技術開発について，人工バリア設置環境での適用性を確認するとともに，原位置試験で考慮すべき事項，確認すべき項目などを整理する。
以上を取りまとめ，幌延深地層研究所での原位置における人工バリア試験計画として取りまとめる。

参考文献：

1. 核燃料サイクル開発機構 ：“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”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 99-022 (1999).
2. 伊藤彰，川上進，油井三和 ：“熱-水-応力-化学連成挙動研究の現状と今後の計画”，サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2001-028 (2001).
3. A. Ito, M. Yui, Y. Sugita, S. Kawakami ：“A Research Program for Numerical Experiments on the Coupled Thermo-Hydro-Mechanical and Chemical Processes in the Near-Field of a High-Level Radioactive Waste Repository”, Proceedings of the GeoProc 2003 International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geo-systems ： Fundamentals, Modelling, Experiments & Applications, PART1, pp.346-351 (2003).

4. C-F.Tsang, O.Stephansson, L.Jing, F.Kautsky：“DECOVALEX Project: from1992 to 2007”, Environmental Geology, Vol.57,No.6, pp.1221-1237 (2009).
5. 伊藤彰, 川上進, 油井三和：“高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールドの熱-水-応力-化学連成モデル／解析コードの開発”, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-032 (2004).
6. 鈴木英明, 伊藤彰, 吉田泰, 陶山忠宏, 川上進, 笹本広, 油井三和：“熱-水-応力連成試験設備(COUPLE)における熱-水-応力-化学連成試験(I)”, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-033 (2004).
7. 小田好博, 鈴木英明, 川上進, 油井三和：“熱-水-応力連成試験設備(COUPLE)における熱-水-応力-化学連成試験(Ⅱ)”, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2004-024 (2005).
8. 千々松正和, 今井久, 佐々木肇, 茂呂吉司：“人工バリア性能確認に関する基盤情報取得方法の調査研究”, サイクル機構技術資料, JNC TJ8400 2003-090 (2004).
9. 千々松正和, 福留和人, 浦野和彦, 今井久, 佐々木肇, 雨宮清：“人工バリア性能確認に関する基盤情報取得方法の調査研究(II)”, サイクル機構技術資料, JNC TJ8400 2004-027 (2005).
10. 藤﨑淳, 鈴木英明, 藤田朝雄：“熱-水-応力連成試験設備(COUPLE)を用いた室内試験結果に基づく熱-水連成モデルの信頼性確認”, JAEA-Research 2008-020 (2008).
11. H. Suzuki, S. Nakama, M. Kimura and T. Fujita：“Development of a Coupled Thermal-Hydraulic Model for Near-Field Behavior of High-Level Radioactive Waste Repository”, Proceedings of 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, N12P1364 (2009).
12. K. Fujisaki, H. Suzuki, T. Fujita, A. Ito and Y. Oda：“Experimental Studies on the Coupled THMC Processes by COUPLE Equipment”, Proceedings of the GeoProc2006 International Symposium : 2nd International Conference on Coupled Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Processes in Geosystems and Engineering (2006).
13. 鈴木英明, 藤﨑淳, 藤田朝雄：“緩衝材の地球化学プロセスに着目した熱-水-化学連成挙動に関する工学規模の人工バリア試験と解析評価”, 原子力バックエンド研究論文集, Vol.16, No.1 (2009).
14. 独立行政法人日本原子力研究開発機構：“平成 19 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム化学影響評価高度化開発報告書” (2008).
15. 独立行政法人日本原子力研究開発機構：“平成 20 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム化学影響評価高度化開発報告書” (2009).
16. M. Kimura, S. Nakama, H. Suzuki and T. Fujita：“Development of Prototype Numerical Model of Coupled Thermo - Hydro - Mechanical - Chemical Processes in the Near-Field of a High-Level Radioactive Waste Repository”, Impact of Thermo-Hydro-Mechanical- Chemical (THMC) processes on the safety of underground radioactive waste repositories, EC-TIMODAZ-THERESA THMC conference (2009).

（in press）
17. FEBEX
18. J. Birkholzer, J. Rutqvist, E. Sonnenthal and D. Barr：“DECOVALEX-THMC Project Task D Long-Term Permeability/Porosity Changes in the EDZ and Near Field due to THM and THC Processes in Volcanic and Crystalline-Bentonite Systems Final Report”, SKI Report 2008:45, pp.155-163 (2008).
19. 中間茂雄，藤田朝雄：“高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールド連成解析，国際共同研究「DECOVALEX-2011」における解析例”，日本原子力学会 2009 秋の大会予稿集，M55 （2009）.
20. 鈴木英明，木村誠，藤田朝雄：“坑道掘削に伴う地下水の水理および水質変化に関する解析評価，－幌延深地層研究計画における水平坑道掘削影響試験の予察解析－”，JAEA-Research 2008-110 (2009).
21. 独立行政法人日本原子力研究開発機構：“平成 21 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム化学影響評価高度化開発報告書” (2010) .（in press）
22. 日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター：“高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する性能評価及びモニタリング技術高度化研究（共同研究）”，JAEA-Research 2008-060 RWMC-JRJ-08001 (2008).
23. T. Fujita, H. Suzuki, S. Nakama and M. Kimura：“Comprehensive strategy of coupled thermo-hydro- mechanical-chemical modeling for evaluation of long-term behaviour in the near-field in JAEA”, Impact of Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical (THMC) processes on the safety of underground radioactive waste repositories, EC-TIMODAZ-THERESA THMC conference (2009). （in press）

2.2.5 ガス透気回復挙動

目的：

- オーバーパックの候補材料の一つである炭素鋼の腐食で発生する水素ガスの影響を定量的に評価することを目的として，緩衝材の透気特性データを取得しデータベースとして取りまとめるとともに，ガス移行挙動評価手法を提示する。

平成 17 年までの成果：

- ガス移行モデル開発に関する国際共同研究（GAMBIT-Club）において構築した応力連成ガス移行モデルを導入するとともに，改良型 TOUGH2 モデルと合わせて，試験結果のシミュレーションによりその適用性を確認した。また，改良型 TOUGH2 モデルを用い，炭素鋼オーバーパックの腐食速度をパラメータとしたニアフィールド解析を行い，腐食速度が 10μm y-1 以下であれば，オーバーパックと緩衝材間のガスの蓄積による緩衝材や岩盤などへの力学的な影響は小さいこと，ガスの移行に伴う間隙水の排水量は少ないことから汚染水の移行の促進といった影響は小さいことを確認した（平成 17 年取りまとめ；松井

ほか, 2005）。

- ガス移行メカニズムをより詳細に理解し，モデルの改良・高度化に資するため，X 線 CT 法を利用した新たな実験手法の検討を行った。その結果，圧縮ベントナイトの相対的な変化から選択的移行経路の形成に関する情報の取得が可能であることを確認した（Tanai, K, et al., 2006 ）。

平成 21 年度までの成果：

- 特定の地質環境条件を踏まえ，海水系地下水条件下における緩衝材の透気特性データの拡充を進めるとともに，幌延深地層研究所 HDB-6 号孔，HDB-10 号孔および PB-V01 により採取したコアを用いたガス移行試験を実施し，有効浸透率や絶対浸透率に関するデータを取得した。また，緩衝材を対象としたガス移行試験のデータベースを構築し，平成 21 年 3 月末に Web 上で公開した（棚井, 2009；日本原子力研究開発機構, “緩衝材”基本特性データベース”）。さらに，応力連成ガス移行のモデル化に関しては，実規模スケールでの解析において，ガスがベントナイト層に侵入した直後より解析が実質的に進まなくなるといった課題に対する改良を行うとともに，試験結果との比較検討を実施しモデルの適用性検討を行った。

今後の課題：

- 緩衝材や岩石を対象としたガス移行特性データの拡充，ならびに応力連成ガス移行モデルの改良を継続し，ガス移行影響評価解析に必要なノウハウ情報として取りまとめる。さらに，ガス移行データベースを更新していく。

参考文献：

1. 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築　－平成 17 年取りまとめ－”, JNC TN1400 2005-015 (2005).
2. 松井裕哉，棚井憲治，川上進，佐藤稔紀，西村繭果，青柳茂男，藤田朝雄，谷口直樹，菊池広人，松本一浩，油井三和：“設計技術（地下施設設計，人工バリア設計，閉鎖設計）の実際の地質環境条件への適用性評価”, JNC TN5400 2005-004 (2005).
3. Tanai, K. and Yui, M.：“A Study on Gas Migration Behavior in Buffer Material using X-ray CT Method”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 932 (2006).
4. 棚井憲治：“緩衝材中ガス移行試験データベース”, JAEA-Data/Code 2008-028 (2009).
5. 日本原子力研究開発機構：“緩衝材基本特性データベース”, http://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/

2.2.6 ナチュラルアナログ研究

目的：

- 処分場サイトの選定プロセスにおける地上からの調査段階で見落とす可能性のある規模の断層ずれ（マグニチュード 6.5 以下の地震に伴うものに相当）に焦点をあて，それが仮に人工バリアを直撃することを想定した場合に，人工バリアが力学的にどのような挙動を示すかを，縮尺模型を用いた実験と，数値モデルによるシミュレーション解析によって把握することを目的としている。
- なお数値モデルは，装置の機械的制約から実験ではカバーできない範囲に対しての補完に加え，実験前の緩衝材の飽和に要する時間的制約（4~6 ヶ月）から規定される試験回数の問題に対しても，異なるシステム要素の特性の違いなどを計算機上で容易に変更表現できることから，試験条件の一部を変更する場合や新たな条件での実験前の予察解析に対しても効力を発揮する。

平成 17 年までの成果：

H3 レポート（動力炉・核燃料開発事業団, 1992）に基づく人工バリア仕様の縮尺約 1/20 スケールからなる断層模擬試験装置を用いて，最大せん断速度 100mm/sec，最大せん断変位 40mm（緩衝材厚さの 80%に相当）までの断層ずれを模擬した人工バリアせん断試験を実施した。数値解析に用いる緩衝材の構成モデルとして，異なるふたつの構成モデルを取り上げ。その適用性を検討した結果，修正 Cam-clay モデルによってオーバーパックに作用する応力などを概略的に評価できることが明らかとなった。また実験を通じ，上記条件での断層ずれに対して，腐食していないオーバーパックは力学的に安定（試験により，破断はもとより，視覚的な変形もない）であるとの結果が得られた（平井ほか, 2003）。

平成 21 年度までの成果：

引き続き断層模擬試験装置を用いて異なる条件の断層ずれを想定したせん断試験を行い，オーバーパックの力学的安定性のみならず，数値モデルの精度向上に向けたデータの拡充を進めた。シミュレーション解析（Mayuka Nishimura, et al., 2006）により，緩衝材の周囲岩盤の透水性を適切に評価することの重要性に関わる知見を得た。また，解析の精度を上げ，縮小模型から実規模のスケールへの外挿を可能とするため，せん断速度をパラメータとした試験データの拡充を進め，その影響について検討している。さらに，現状の数値モデルは，最大せん断変位の半分程度までの変位に対するシステム挙動をうまく表現できていることから，オーバーパックに作用する応力を概略評価することが可能（齋藤ほか, 2008；Morimasa Naito, et al., 2008；Morimasa Naito, et al., 2009；Yuya SAITO, et al., 2009）となった。

今後の課題：

- せん断速度をパラメータとしたせん断試験データの拡充を継続する。また，解析により，せん断位置やせん断面の角度等の違いが作用する影響についても検討し，解析パラメータ

の設定の考え方を整理するとともに，実規模スケールへの拡張を考慮した人工バリアを対象とする評価解析に必要なノウハウを取りまとめる。

参考文献：

1. 動力炉・核燃料開発事業団：“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－”, PNC TN1410 92-081 (1992).
2. 平井卓，棚井憲治，菊池広人，鈴木英明，高治一彦，大沼敏：“断層ずれに伴う人工バリアの力学的挙動評価”, JNC TN8400 2003-009 (2003).
3. Mayuka Nishimura, Takashi Hirai, Kenji Tanai, and Mikazu Yui：“A Study of Mechanical Effect of Simulated Fault Movement on Engineered Barrier System”, Mat.Res.Soc.Symp.Proc.932, pp.227-234 (2006).
4. 齋藤雄也，棚井憲治，菊池広人，平井卓，西村繭果：“断層ずれに伴う人工バリアの力学的挙動評価(Ⅱ)”, JAEA-Research 2008-010 (2008).
5. Morimasa NAITO, Yuya SAITO, Kenji TANAI and Mikazu YUI.：“Experimental study on the effects of fault movement on the engineered barrier system”, 16th International Conference on Nuclear Engineering (2008).
6. Morimasa NAITO, Yuya SAITO, Kenji TANAI and Mikazu YUI：“Experimental Study on the Effects of Fault Movement on the Engineered Barrier System”, Journal of Power and Energy Systems, Vol.3, No.1, pp.158-169 (2009).
7. Yuya SAITO, Mayuka NISHIMURA, Takashi HIRAI, Kenji TANAI and Morimasa NAITO：“Evaluation of mechanical effects of the fault movement on the engineered barrier system”, the 12th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (2009).

2.2.7　緩衝材の長期力学挙動

目的：

- ナチュラルアナログ研究とは，廃棄物埋設後の放射性核種の挙動や人工バリア材料の腐食・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研究することをいう。
- 古代の遺跡などから発掘される鉄遺物や銅鐸，地下に埋設された古い鋳鉄管などは，人工バリアの候補材料である金属と類似しているため，これらの地下での長期的な変化を調べることにより，人工バリア中で生じ得る現象の確認および，評価方法の妥当性を確認することができる（原子力委員会, 1997；平成17年取りまとめ）。
- 考古学的遺跡からの出土金属の事例データを拡充し，室内試験データに基づく評価の信頼性を向上させる。例えば，鉄遺物を用いたデータ取得として，考古学的遺跡からの出土した鉄剣等を用いた事例研究，腐食に対する微生物影響研究を継続して実施する。また，銅遺物についてのデータ取得として，出土した銅遺物を用いて，土壌試料などの埋設環境状

況分析を行うとともに，土壌中での腐食量の概略的評価を行う。

平成 17 年までの成果：

オーバーパック候補材料の一つである炭素鋼について，その 1,000 年間の腐食量として設定されている約 40mm の腐食代についての傍証を得た。数百年から 1,000 年規模の埋設期間を有する約 40 点の鉄製遺物を試料として，X 線 CT 測定を実施し鉄の腐食量を求めた。その結果第２次取りまとめで想定された 1,000 年後の腐食量が 10 倍以上保守的であることを事例的に確認した。（Yoshikawa, et al., 2008a）。

平成 21 年度までの成果概要：

- 鉄遺物を用いたデータ取得として，分析の候補となる考古学的遺跡からの出土金属の事例の調査を実施した。つくば市小田地区の国指定史跡である小田城より発掘された鉄遺物の「鋤」を含有する土壌固体試料を用いて鉄の腐食量を調査した。酸化環境の腐食事例であったが，出力の異なる X 線 CT 装置間の比較（林ほか, 2008）や，埋設環境を保持した試料採取方法の適用性検討（Yoshikawa, et al., 2009）を実施など，基本的な試料採取，分析手法の整備を実施した。また，低酸素雰囲気での長期腐食事例として，奈良県大和 6 号墳より出土し，保管されていた鉄ていを用いた腐食評価を実施し，低酸素条件での長期腐食量評価についてデータの充実を行った。（Yoshikawa, et al., 2008b）。
- 銅遺物を用いたデータ取得として，平成 19 年に長野県柳沢遺跡より出土した銅鐸を対象にした調査を実施中である。銅遺物が埋設されていた埋納坑内土壌中の Cu 等の化学成分の濃度等を測定し，周辺土壌の分析結果とともに銅遺物の腐食量推定の基礎データとして整理している。

今後の課題：

- 処分環境と整合性のある，数百年から約千年程度の期間，低酸素濃度の環境に埋設されていた考古学的金属製品の調査を継続し腐食事例を蓄積する。
- 銅遺物についての評価手法の整理と，事例の蓄積を実施し，それらの結果を地中における金属の長期安定性評価へ反映させる。

参考文献：

1. 原子力委員会：“原子力バックエンド対策専門部会報告書”, 原子力委員会（1997）.
2. 核燃料サイクル開発機構：“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 年の取りまとめ－”, JNC TN1400 2005-020 (2005).
3. H. Yoshikawa and M. Yui：“APPLICATION OF ARCHAEOLOGICAL ANALOGUES FOR A REPOSITORY SAFETY CASE：ARGUMENTS SUPPORTING THE WASTE CONTAINER LIFETIME”, in “Safety Cases fir Deep Geological Disposal of Radioactive Waste：Where Do We Stand ? ”, Symposium Proceedings Paris, France 23-25 January 2007, OECD/NEA (2008a).

4. 林真紀，吉川英樹：“大型鉄遺物の X 線 CT 測定法の比較”, JAEA-Research 2008-024 (2008).
5. H. Yoshikawa, S. Lee and T. Matsui：“A Sampling Method and Data Evaluation of Archaeological Sample to Support Long-Term Crrosion Prediction”, CORROSION, Vol.65, No.4, pp.227-232 (2009).
6. H. Yoshikawa, E. Gunji and M. Tokuda.：“Long term stability of iron for more than 1500 years indicated by archaeological samples from the Yamato 6th tunulus”, J. Nuclear Materials, Vol.379, pp.112-117 (2008b).

2.3 工学技術の信頼性向上

2.3.1 建設技術

（1）設計手法

目的：

- 設計手法とは，地下 300m 以深に地層処分場を構築するために必要な設計方法をいう。特に処分場は，多数の坑道を並列に配置する従来あまり例のない構造物である。これらの設計は，従来の単一トンネルモデルによる設計方法および二次元弾塑性 FEM 解析で可能であるが，より経済性，信頼性向上を図れる多連設坑道モデルの設計方法へと設計方法を進化させることが必要である。また，処分場は，建設から閉鎖までおよそ 100 年近く供用されることが想定されている。この期間は，ニアフィールド岩盤（周辺岩盤）の長期安定性評価を行う際の初期の 100 年間であり，この期間を対象として評価モデルを検証し，評価手法を更新していくことが，その後の長期にわたる安全評価の信頼性を向上させることに繋がる。
- 地層処分場を設計するために，従来に例を見ない多連設坑道の設計方法を確立し，将来にわたる力学的な挙動予測の信頼性向上を図る。

平成 17 年までの成果：

第 2 次取りまとめにおいてコンプライアンス可変型構成方程式を坑道周辺岩盤の長期挙動予測手法として用いているが，この手法の信頼性向上のために実際の軟岩を使って検証した。その結果，破壊時間の推定は，試験体のバラツキが影響するものの，ほぼ推定通りであった。また，坑道を模擬した室内実験によりゆるみ領域を定量的に求めた（井上・野田, 2002）。水理・温度条件をパラメータとしたコンプライアンス可変型構成方程式を用いて幌延堆積岩を評価した結果，幌延堆積岩は乾燥繰返しに対して強度低下を起し易く，乾燥後の浸水によって潜在亀裂に沿って割れるなど，小さな含水比の変化に対しても敏感に反応する可能性があることが示唆された。また，コンプライアンス可変型構成方程式の定数の算出には，強度特性のほぼ等しい試験体を多数用意する必要があるが，試験体のバラツキが大きく難しいため，少ない試験体での簡便的な算出法を提案した。加えて試験体のバラツキがコンプライアンス可変型構成方程式の定数に誤差を与え，破壊到達時間に大きく影響を与えることが分かった（井上・南, 2003）。

幌延堆積岩における熱や乾燥などの試験条件の異なる場合のコンプライアンス可変型構成方程式の定数を算出し，その結果をもとに算出したクリープ寿命と実測のクリープ寿命の比較検討を行った。その結果，定数算出には潜在的なクラックを含まない箇所を限定して試験体を採取することが重要との知見を得た（井上ほか, 2004）。廃棄体からの熱の影響が幌延堆積軟岩の力学挙動に及ぼす影響に関する検討をするために 80℃と 20℃においてコンプライアンス可変型構成方程式の定数を算出し，試験体のクリープ試験結果と比較した。その結果，力学的特性が揃った試験体を多数用意できれば，1 オーダー以内で寿命予測が可能性であるとの感触を得た。幌延を条件とした岩盤の掘削時解析および長期力学的挙動予測解析では，前者において深度や研究坑道の配置方向の違いにより安定性に差が生じること，後者においては条件により安定性に差が生じるものの，変形や緩み領域の発生が時間経過とともに徐々に収束して行く傾向は変わらないこと，地山強度比が掘削時および長期の安定性の目安になることを示した（吉野ほか, 2005）。また，ニアフィールド岩盤の長期安定性評価手法に関する研究の基本となる幌延深地層研究計画の堆積軟岩の基本的物性値や強度回復特性などの室内実験を実施しデータを蓄積（大久保, 2005）した。

地表からの調査段階における調査データに基づき処分場の設計を，第 2 次取りまとめで示した考え方や手法に基づき試行し，地表からの調査段階における設計上の留意点として，多連設坑道設計においては，従来の弾塑性解析に加え，ひずみ軟化やクリープを考慮した検討の必要性，情報化施工による適切な支保工，補助工法の選定の必要性，処分孔のクリープを考慮した評価の必要性と無支保で安定しない時の対応策検討の必要性，地質環境ごとの地震影響検討の必要性などを提言（松井ほか, 2005）した。

平成 21 年度までの成果：

坑道周辺岩盤の長期にわたる力学的な挙動の予測に関する既存の検証事例に対してコンプライアンス可変型構成方程式の適応性を検証し，幌延の深地層研究施設の 140m坑道におけるコンプライアンス可変型構成方程式による検証計画を取りまとめた（平本ほか, 2007）。第 2 次取りまとめでは，坑道周辺岩盤の局所的な破壊挙動に着目した設計方法（ルーム・アンド・ピラー法）が行われていたが，処分パネル規模での掘削影響領域（Excavation Disturbed Zone 略して EDZ）の挙動に関しては十分に検討されていなかった。そこで処分パネル規模での EDZ の挙動を把握するために新たに多連設坑道の設計手法を提案（平本ほか, 2008a）した。緩衝材の膨潤圧とオーバーパックの腐食膨張圧がニアフィールド岩盤の長期安定性に与える影響を検討した結果，従来の膨張圧を考慮しない設計方法は保守側の結果を与えることを示した（平本ほか, 2008b）。新たに提案した多連設坑道の設計手法について設計上の留意点として，多連設坑道モデルの解析領域の取り方，塑性領域が広範囲に発生する場合の対応策を整理（林ほか, 2009）するとともに支保工および補助工法の塑性領域抑制効果（林ほか, 2010）についてまとめた。さらに多連設坑道の設計手法として取りまとめる準備を進めている。

コンプライアンス可変型構成方程式の信頼性向上に関しては，幌延の深地層研究施設 140m

坑道の掘削シミュレーションを実施し，現地計測結果と比較することで長期岩盤挙動予測に向けた考え方を整理中である。
ニアフィールド岩盤の長期安定性評価手法に関する研究の基本となる幌延の深地層研究施設の堆積軟岩の基本的物性値や強度回復特性などの室内実験を実施しデータを蓄積するとともに，判明した強度回復特性現象を岩盤の長期力学挙動予測に反映させる準備を進めている（平本ほか, 2008c；大久保ほか, 2009；林ほか, 2010）。

今後の課題：

- 幌延深地層研究施設の 140m坑道で実施している実際の計測データ（岩盤変位，支保工応力など）を長期にわたって比較しパラメータを同定することで，堆積岩におけるニアフィールド岩盤の長期力学挙動予測手法の信頼性向上を図るとともに，岩の強度回復特性などの新たな知見を長期力学挙動評価手法に組み込み，モデルのより一層の高度化，詳細化を図る。以上の知見を統合化して多連設坑道の設計手法として取りまとめる。

参考文献：

1. 井上博之，野田兼司：“軟岩を対象とした長期岩盤挙動研究”，JNC TJ8400 2002-011 (2002).
2. 井上博之，南浩輔：“軟岩の長期力学的変形挙動研究”, JNC TJ8400 2002-061 (2003).
3. 井上博之，吉野尚人，宮野前俊一，水谷和彦，野田兼司：“軟岩の長期力学的挙動研究（Ⅱ）”, 原子力バックエンド研究, JNC TJ8400 2004-005 (2004).
4. 吉野尚人，宮野前俊一，井上博之，梨本裕：“軟岩の長期安定性に関する検討”， JNC TJ8400 2005-004 (2005).
5. 大久保誠介：“ニアフィールド岩盤の長期安定性評価手法に関する研究”，JNC TJ8400 2004-018 (2005).
6. 松井裕哉，棚井憲次，川上進，佐藤稔紀，西村繭果，青柳茂男，藤田朝雄，谷口直樹，菊池広人，松本一浩，油井三和：“設計技術（地下施設設計，人工バリア設計，閉鎖技術）の実際の地質環境条件への適用性評価”, JNC TN 5400 2005-004 (2005).
7. 平本正行，小林保之，青柳茂男，宮野前俊一，森田篤：“ニアフィールド岩盤の長期力学挙動予測評価手法の信頼性向上に関する検討”, JAEA-Research 2007-003 (2007).
8. 平本正行，小林保之，中間茂雄，水谷和彦，森田篤：“地層処分施設における多連設坑道の設計手法に関する検討”, JAEA-Research 2008-001 (2008a).
9. 平本正行，小林保之，青柳茂男，宮野前俊一，森田篤：“ニアフィールド岩盤の長期力学挙動予測評価手法の信頼性向上に関する検討（II）－緩衝材の膨潤圧とオーバーパックの腐食膨張圧がニアフィールド岩盤の長期安定性に与える影響に関する検討－”, JAEA-Research 2008-013 (2008b).
10. 林克彦，小林保之，平本正行，水谷和彦，森田篤：“地層処分施設における多連設坑道の設計手法に関する検討（II）”, JAEA-Research 2009-016 (2009).
11. 林克彦，岸裕和，小林保之，水谷和彦，森田篤：“地層処分施設における多連設坑道の設計

手法に関する検討（III）”, JAEA-Research 2009-056 (2010).
12. 平本正行，小林保之，大久保誠介：“岩石の強度回復特性・一般化応力緩和挙動に関する研究（委託研究）”, JAEA-Research 2008-002 (2008c).
13. 大久保誠介，林克彦，小林保之，平本正行：“岩石の強度回復特性・一般化応力緩和挙動に関する研究（II）（委託研究）”, JAEA-Research 2008-106 (2009).
14. 林克彦，岸裕和，小林保之，武部篤治，大久保誠介：“岩石の強度回復特性・一般化応力緩和挙動に関する研究（III）”, JAEA-Research 2009-058 (2009).

（2）長期性能の考え方

目的：

地層処分施設(以下，「処分場」という)には，処分後数万年にわたり人工／天然バリアによる廃棄物の隔離性能が求められることから，処分場建設の際に用いられる工学材料が長期間にわたり処分場の性能に有意な影響を及ぼさないことが求められる。このため，工学材料が，処分場の性能に与える影響について評価する。

H21 年度までの成果：

フィンランドで計画されている地層処分場の実施主体である POSIVA 社が進める地下特性調査施設（ONKALO）計画を例に処分場の安全評価に影響すると考えられる工学材料(19 項目)と影響低減方法の抽出・整理を行った。

また，上記の工学材料と幌延で地下研究施設の建設に用いられている材料とを比較し，処分場の長期的な性能維持の観点から留意すべき事項，今後の検討課題を整理(山田ほか, 2007)した。これらを踏まえ，処分場の長期的な性能に与える影響が大きいと評価されたセメント系材料に関する対策を提示した。これらのうち代替方法については，地下施設における普通ポルトランドセメントと低アルカリ性セメントの適用範囲について検討した結果を示した。

今後の課題：

処分場に残置される工学材料と代替材料については，今後の検討を要する。これらについては，以下に示す処分場の長期的な性能への影響評価とその対策が課題となる。

・除去または代替できずに残置した工学材料(鋼材など)の影響評価
・処分場閉鎖時に充填されない排水設備(暗渠など)の影響評価
・セメントおよびコンクリートの急硬材および他の有機物含有添加物の影響評価
・代替材料(低アルカリセメント，無機繊維など)の更なる開発
・低アルカリセメントの溶脱特性(閉鎖後の挙動評価)の検討

参考文献：

1. 山田勉，平本正行，小林保之，油井三和，佐藤治夫，松井裕哉：“処分場建設の際に持ち込

まれる材料の長期性能評価の観点からの留意点”, JAEA-Review 2007-008 (2007).

2.3.2 閉鎖技術

目的：

- 閉鎖技術とは，地下施設を地上から隔離するため，竪置き方式の場合の処分坑道，連絡坑道，アクセス坑道およびボーリング孔を適切に，閉鎖要素（埋め戻し材，プラグ，グラウト）を用いて処置するために必要な設計・施工技術をいう。
- 実際の地質環境における閉鎖技術の適用性を確認するために，閉鎖要件，埋め戻し材および止水プラグ材料のデータベース，原位置実規模試験計画案および調査等で使用した長孔に対する止水性確保に関わる建設工事や施工実績等の既存情報を整備し，基盤情報として取りまとめる。

平成 17 年までの成果：

処分場の閉鎖性能に影響を与える要因を分析するために，閉鎖システムを対象とした水理解析および Fault ツリー分析を行い，閉鎖シナリオを提示した（杉田ほか, 2003）。埋め戻し材の隙間充填性能に着目した基礎試験の実施し，埋め戻し材概念について検討した（菊池ほか, 2003）。また，カナダの結晶質岩の地下研究所の地下 450m で実施した処分坑道の閉鎖技術の一つであるプラグに関する実規模原位置試験において，プラグの低透水性を確認するとともに，試験結果に対して物質移行挙動をシミュレーションすることにより，EDZ が支配的移行経路となることを確認した（藤田ほか, 2007a）。

平成 21 年度までの成果：

閉鎖要件の検討として，結晶質岩を対象に処分場で考えられる閉鎖に関わる事象を抽出し，その事象が発生する部位，要件およびその対策について整理するとともに，カナダの結晶質岩の地下研究所で実施した粘土プラグに関する実規模原位置試験から得られた知見と個々の閉鎖要素の設計で検討すべき課題をノウハウ情報（藤田ほか, 2007b）として取りまとめた。処分場に存在すると考えられる構成要素を設定し，上述の原位置で取得されたデータに基づく物性値を考慮した水理解析を実施した結果，コンクリートプラグの透水性，動水勾配の方向，粘土プラグの設置数および位置は，処分場全体の地下水流動および通過流量等に大きく影響することが示され，地層処分システムに求められる閉鎖性能の考え方として取りまとめた（杉田ほか, 2005；Fujita, T., et al., 2006；杉田ほか, 2007）。

埋め戻し材および止水プラグ材料のデータベースに関しては，埋め戻し材のスメクタイト含有率をパラメータとした透水，膨潤，圧密データを取得し，緩衝材データベース（日本原子力研究開発機構緩衝材基本特性データベース）の拡充の準備を進めている。

原位置実規模試験計画案の検討に関しては，上述の結晶質岩における性能要件を参考に，堆

積岩における閉鎖性能を確認するための試験計画立案に向けたプラグの構造・特性や埋め戻し材，EDZ の大きさや物性をパラメータとした解析を実施し，原位置で確認すべき閉鎖技術項目を今後公表する予定である。
長孔の止水に関わる既存情報の整備に関しては，国内外の既存情報の整備を行い，そこで示された手法の一つである粘土グラウトに関して浸透特性の向上を目的とした微粉砕化による室内試験データを取得し，グラウトデータベース（日本原子力研究開発機構グラウトデータベース）に反映する準備を進めている。

今後の課題：

- 堆積岩における閉鎖要素の性能要件というノウハウ情報を取りまとめることを目的に幌延深地層研究計画における第 3 段階で実施予定の閉鎖要素試験に用いる仕様を検討するとともに，試験計画の詳細化を図る。
- 引き続き埋め戻し材のスメクタイト含有率をパラメータとした，基本特性試験を継続し，それらの結果を緩衝材データベースへ反映させる。
- 以上のノウハウ情報およびデータベースを統合化した閉鎖設計技術という知識として集約していく。

参考文献：

1. 杉田裕，川上進，油井三和，牧野仁史，澤田淳，栗原雄二，三原守弘 ：“高レベル放射性廃棄物地層処分における閉鎖性能に関する検討”, JNC TN8400 2003-010 (2003).
2. 菊池広人，棚井憲治，杉田裕 ：“海水系地下水条件下における埋め戻し材特性に関する基礎試験”, JNC TN8430 2003-008 (2003).
3. 藤田朝雄，杉田裕，升元一彦，風間秀彦 ：“結晶質岩における粘土プラグの閉鎖性能に関わる原位置試験および解析評価”，原子力バックエンド研究, Vol.14, No.1, pp.13-30 (2007a).
4. 藤田朝雄，須山泰宏，戸井田克 ：“結晶質岩における閉鎖要素に期待すべき性能要件”, JAEA-Research 2007-021 (2007b).
5. 杉田裕，高橋美昭，浦上学，北山一美，藤田朝雄，川上進，梅木博之，油井三和，宮本陽一 ：“処分システムに求められる閉鎖性能の考え方－坑道交差部における水理解析－”, JNC TN8400 2005-016, NUMO-TR-05-02 (2005).
6. Fujita, T., Sugita, Y., Takahashi, Y. ： “HYDRAULIC CALCULATION OF CLAY-BASED BACKFILL AND PLUG FOR THE INTERSECTIONS OF TUNNELS IN THE GEOLOGICAL REPOSITORY FOR HLW”, Australian Geomechanics, Vol.41, No.4, pp.89-95 (2006).
7. 杉田裕，高橋美昭，浦上　学，北山一美，藤田朝雄，油井三和 ：“処分システムに求められる閉鎖性能の考え方　－処分場パネル規模の水理に関する試解析－(研究報告)”, JAEA-Research 2007-023 (2007).
8. JAEA：“緩衝材基本特性データベース”
9. JAEA：“グラウトデータベース”

2.3.3 支保工材料

目的：

- 低アルカリ性セメントとは，普通ポルトランドセメント(以下 OPC)を用いたコンクリートの存在に起因する，最終処分施設周辺地下水の pH の上昇がもたらす周辺岩盤や緩衝材への影響を軽減させることを目的に開発されているセメント系材料である。
- JAEA ではセメント硬化体もしくはコンクリート硬化体の純水浸出液の長期的な pH を 11 以下にすることを目標に，シリカフューム(以下 SF)およびフライアッシュ(以下 FA)を用いた低アルカリ性セメント HFSC (Highly Fry-ash contained Silica-fume Cement)を開発している（三原ほか, 1999）。
- 本研究は，HFSC を最終処分施設における支保工材料として適用するために必要とされる，高強度性，施工性，低アルカリ性，耐久性を実証することを目的とする。

平成 17 年までの成果：

- 第 2 次取りまとめ以降，HFSC の高強度性，施工性，低アルカリ性，耐久性(特に鉄筋コンクリートにおける低腐食性)の側面から，HFSC における結合材中の SF 量，OPC 量，FA 量の最適な配合について検討すると共に，重量比で OPC：SF：FA=40：20：40%とした HFSC424 を選定した。具体的には下記のとおりである。
- 高強度性について，HFSC424 が幌延の深地層の研究施設の基本計画時の設計基準強度をほぼ満たす（入矢ほか, 2003a）ことを確認するとともに，施工性について，HFSC424 を用いて模擬トンネルにおいて吹付け施工試験を実施し，OPC と同等の吹付け施工性を有することを確認（入矢ほか, 2002a）した。
- 低アルカリ性については， HFSC424，HFSC226 ともに，ペースト粉体の浸漬試験において pH が 11 以下に低下する事を確認した（入矢ほか, 2001）。一方，HFSC コンクリートがベントナイトに及ぼす長期的な影響に関する解析を実施した（入矢ほか, 2004）。
- 耐久性に関しては， HFSC226 の場所打ち鉄筋コンクリート供試体を海中および飛沫帯で暴露し（入矢ほか, 2003a），3 年後までの塩化物イオン浸透量，および鉄筋腐食に関するデータを取得し，鉄筋の腐食膨張に起因するひび割れの発生予測を実施した（入矢ほか, 2005）。また，HFSC424，HFSC325，HFSC226 の場所打ち鉄筋コンクリート供試体における鉄筋腐食試験を行い，塩化物イオン浸透量，および鉄筋腐食に関するデータを取得し，鉄筋の腐食膨張に起因するひび割れの発生予測を実施した（入矢ほか, 2002b；入矢ほか, 2003b）。結果，HFSC では，コンクリートに 0.2mm 以上のひび割れが存在すると鉄筋が腐食すること，ひび割れが存在しなくても pH が概ね 11.5 を下回る HFSC226 では塩化物イオンが 0.1kg/m^3 以下でも鉄筋が腐食することを確認し，腐食膨張によりコンクリートにひび割れが発生する可能性があることを確認した。
- 諸外国の動向として，カナダの AECL では，プラグ用の OPC25%，SF25%，シリカフラワー50%の低熱高流動コンクリートを開発し，実大の坑道閉塞工を施工した。このコンク

リートの pH は約 10 であり，結果的に低アルカリ性を満足する（Gray M N. and Shenton B S., 1998）。

平成 21 年度までの成果：

- 高強度性および施工性について，吹付けコンクリートの設計基準強度（松永ほか，2005）を満たす配合の選定方法を提示し（小林ほか，2007），原位置試験計画の案を提起（小林ほか，2007）した。それをもとに，室内試験結果から配合を提示する（松田ほか，2008）とともに，原位置施工試験における施工性，支保工性能，コンクリートおよび周辺環境の化学的影響の各分野の試験項目を整理し，（松田ほか，2008）吹付けコンクリートの品質管理項目を提示（中山ほか，2009a）した。その上で，コンクリート製造プラントや実機を用いた地上での吹付け施工試験により強度と施工性を確認し，幌延の深地層の研究施設の深度 140m の西側調査坑道の掘削過程において原位置施工試験を実施し，材料の実用性を確認した（日本原子力学会誌, 2009）。
- 場所打ちコンクリートについて，配合の選定方法と試験項目を提示した上で，2 種類の設計基準強度を満足する配合を選定し，室内試験で強度と施工性を確認するとともに，断熱温度上昇量および収縮量に関するデータを取得した（中山ほか，2009b）。
- 低アルカリ性に関しては，浸漬試験の対象に HFSC424 吹付けコンクリートコアを追加（小西ほか，2006）し，測定を継続中である（中山ほか，2009b）。また幌延の深地層の研究施設の周辺地下水を模した海水系地下水に対する溶脱試験を開始した（中山ほか，2009b）。
- 耐久性に関しては，6 年間暴露した鉄筋コンクリート供試体（入矢ほか，2003a）の，塩化物イオン浸透量，および鉄筋腐食に関するデータを取得し，鉄筋の腐食膨張に起因するひび割れの発生予測を実施した（小西ほか，2006）。
- さらに，電力中央研究所との共同研究において，セメント系材料の適用部位と要求機能を整理する（小林ほか，2009a）とともに，既往の知見について整理し，低アルカリ性セメントの適用上の課題を示した（小林ほか，2009b）。
- そして，原子発電環境整備機構は電力中央研究所と共同で，モルタルペーストにおける初期物性および硬化体物性，および耐久性に関する試験，そして繊維補強コンクリートの特性試験を行い，HFSC と電力中央研究所が開発した，セメントの配合を調整して低 pH を実現する LAC 等を比較した。さらに，最終処分施設に供するセメント系材料としての適用性評価を行うための要求機能を提示した。（植田ほか，2008）
- 諸外国でも低アルカリ性セメントの開発が進められるようになった。
- アメリカでは，十分な強度発現があり，ウランの移動の可能性が低く，処分場の環境における耐久性が高く，70 日後に水酸化カルシウムが消失し，かつ骨材との付着性能に優れる OPC40%，高炉スラグ(以下 BFS)30%，FA25%，SF5%の配合を底版および吹付けコンクリートの配合として選定した（European Commision, 2007）。
- フランスの ANDRA では，SF,FA, BFS の添加率を変えた 10 種類の配合の pH 低下を調査し，関係式を求めた。その上で 3 種類の配合を選定して低アルカリ性セメントに関する試験を行い，OPC37.5%，SF32.5%，FA30%の配合と OPC20%，SF32.5%，BFS47.5%の 2

種類の配合において，1 年後の細孔溶液の pH が 11.7 まで低下することを確認した（European Commision, 2007）。

- ヨーロッパの 13 の機関が参加した ESDRED でも低アルカリ性セメントの開発が行われ，OPC60%，SF40%の配合の場合，pH が約 10.5 まで低下することを確認した（European Commision, 2007）。また，低アルカリ性セメントを用いた吹付け施工試験が，スウェーデンのエスポ試験場およびスイスのハーゲルバッハ試験場で行われ，一般的な湿式吹付けコンクリートと同等の圧送性と吹付け施工性を有することを確認した（European Commision, 2007）。

今後の課題：

- 施工性については，幌延の深地層の研究施設の立坑の掘削過程において HFSC 場所打ちコンクリートの原位置施工試験を実施し，場所打ちコンクリートへの適用性を実証することが望まれる。
- 低アルカリ性については，幌延の深地層の研究施設に施工された HFSC コンクリート支保工において，吹付けコンクリートおよびその周辺の岩盤のコア，および地下水を採取し，ポゾラン反応による HFSC の pH 低下，地下水による溶脱，および二次鉱物の生成に関する情報を取得する。その結果をもとに HFSC コンクリートが周辺環境に及ぼす長期的な影響を推定し，影響を評価するためのモデルを構築することが望まれる。
- 耐久性については，幌延の深地層の研究施設に施工された HFSC コンクリート支保工における，ひび割れおよび錆び汁の発生などの変状の有無を調査していき，変状が発生した場合，それらの変状の原因を推定し，影響を評価するためのモデルを構築することが望まれる。
- 一方，国外においては，OPC60%，SF40%の低アルカリ性セメントを選定した ESDRED の最終報告書（European Commision, 2009）において，減水剤および急結材の安全評価への影響，吹付けコンクリートにおけるワイヤーメッシュと鋼製補強繊維の腐食および長期的な pH の挙動の把握が課題として提示されている。また，低アルカリ性セメントコンクリートの乾式吹付けへの適用，OPC60%，SF40%の低アルカリ性セメントコンクリートにおける収縮，寒冷地での凍結融解に対する抵抗性などのコンクリートの耐久性も課題として挙げられている。

参考文献：

1. 三原守弘，入矢桂史郎：“放射性廃棄物処分用セメント系材料”，特許公報，第 2941269 号 (1999).
2. 入矢桂史郎，三上哲司，竹田宣典，秋好賢治：“幌延深地層研究センターにおけるコンクリート材料の施工性に関する研究(III)概要版”, JNC TJ5400 2003-002 (2003a).
3. 入矢桂史郎，三上哲司，秋好賢治，上垣義明：“幌延深地層研究センターにおけるコンクリート材料の施工性に関する研究(II)”, JNC TJ8400 2002-013 (2002).
4. 入矢桂史郎，三上哲司，安岡哲治，上垣義明：“幌延深地層研究センターにおけるコンクリ

ート材料の施工性に関する研究", JNC TJ1400 2001-004 (2001).
5. 入矢桂史郎, 田島孝敏, 納多勝 :"幌延深地層研究センターにおけるコンクリート材料の施工性に関する研究(IV)", JNC TJ5400 2003-008 (2004).
6. 入矢桂史郎, 栗原雄二, 納多勝 :"幌延深地層研究センターにおけるコンクリート材料の施工性に関する研究(V)", JNC TJ5400 2004-003 (2005).
7. 入矢桂史郎, 藤井健介, 久保博, 上垣義明 : "低アルカリ性コンクリートの実用性試験および変質評価", JNC TJ8400 2002-038 (2002b).
8. 入矢桂史郎, 藤井健介, 田島孝敏, 竹田宣典, 久保博 : "低アルカリ性コンクリートの実用性試験および変質評価(II)", JNC TJ8400 2003-062 (2003b).
9. Gray M N. and Shenton B S. : "Design and Development of Low-Heat, High-Performance, Reactive Power Concrete", The International Symposium on High-Performance and Reactive Power Concrete, Sherbrooke PQ, Canada. (1998).
10. 松永浩一, 田村彰教, 村川史朗, 西山誠治, 青木七郎, 布施正人, 輿三智彦, 高橋剛弘 :"幌延深地層研究計画 地下施設実施設計－設計報告書－", JNC TJ5410 2005-002 (2005).
11. 小林保之, 山田勉, 中山雅, 松井裕哉, 松田武, 小西一寛, 入矢桂史郎, 納多勝 :"低アルカリ性セメントを用いたコンクリートに関する原位置試験計画案", JAEA-Review 2007-007 (2007).
12. 松田武, 納多勝, 入矢桂史郎, 小西一寛, 中山雅, 小林保之 : "幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメントの適用性に関する研究", JAEA-Research 2007-089 (2008).
13. 中山雅, 小林保之, 松田武, 納多勝, 入矢桂史郎, 竹田宣典 : "幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメントの適用性に関する研究(II)", JAEA-Research 2009-035 (2009a).
14. "低アルカリ性セメントを用いた地下施設の本格的な施工に成功－安全な地層処分実現に向けた新技術の実証", 日本原子力学会誌, 51-12, pp.8 (2009b).
15. 中山雅, 小林保之, 野口聡, 三浦律彦, 納多勝, 入矢桂史郎, 人見尚 : "幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメントの適用性に関する研究(III)", JAEA-Research 2009-036 (2009b).
16. 小西一寛, 中山雅, 三原守弘, 吉田泰, 入矢桂史郎, 秋好賢治, 納多勝 : "幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメントを用いた吹付けコンクリートの施工性に関する研究", JAEA-Research 2006-040 (2006).
17. 小林保之, 山田勉, 内藤守正, 油井三和, 中山雅, 佐藤治夫, 西田孝弘, 廣永道彦, 山本武志, 杉山大輔, 西内達雄 :"高レベル放射性廃棄物処分施設への低アルカリ性セメントの適用性に関する研究（その 1）－セメント系材料の適用部位と要求機能－", JAEA-Research 2008-112 (2009a).
18. 小林保之, 山田勉, 内藤守正, 油井三和, 中山雅, 佐藤治夫, 西田孝弘, 廣永道彦, 山本武志, 杉山大輔, 西内達雄 :"高レベル放射性廃棄物処分施設への低アルカリ性セメントの適用性に関する研究（その 2）－低アルカリ性セメントに関する既往の知見の整理と基礎物性の把握－", JAEA-Research 2009-013 (2009b).
19. 植田浩義, 兵頭英明, 鈴木覚, 廣永道彦, 山本武志, 西田孝弘, 西内達郎, 杉山大輔 :"低ア

ルカリ性セメントの処分場における長期適用性に関する検討” (2008).
20. European Comission：“Proceedings of the third Low pH Workshop Paris June 13-14, 2007”, ESDRED Deliverable D4 of Module 5, WP2 Supporting Documents of Second Training Workshop (2007).
21. European Comission ： “ESDRED ： Project Final Summary Report and Gloval Evaluation of the Project”, ESDRED Deliverable D6 of Module 6, WP4 (2009).

2.3.4 グラウト技術

目的：

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては，処分後の放射性物質の移行を天然のバリア(岩盤)と人工のバリア(オーバーパック，緩衝材)により抑制し，長期にわたる安全性を確保する。このバリアシステムを形成するにあたり，日本の地質は割れ目が多く，地下処分施設建設(以下，「処分場」という)にあたり湧水が多く発生することが想定されるため，グラウトによる湧水抑制は必要不可欠なものである。本技術開発では，処分場建設における特有の条件(高水圧対応，グラウト材料の低アルカリ性など)に対応するグラウト技術開発，およびグラウト後の長期的な影響評価技術の開発を行う。

平成 21 年度までの成果：

グラウト技術開発の取り組みには，要素技術開発と原位置適用性試験の枠組みを設けた。まず，グラウト技術に関する国内外の文献調査ならびに国際ワークショップに基づき，検討課題を抽出した。要素技術開発では，グラウト材料の開発とグラウト注入技術の開発に焦点をあて研究に取り組むこととした。原位置適用性試験では，開発した材料，装置・機器の適用性を評価し，また，グラウト浸透範囲を把握するためのグラウト浸透モデルの適用性の評価，グラウト後にグラウトの分布範囲を把握するための調査方法に関する検討を実施することとした。さらに，岩盤に注入されたグラウトの長期的影響を評価する技術の開発にも取り組むこととした。

グラウト材料の開発では，低アルカリ性セメント系グラウト，また，代替材料として溶液型グラウト，超微粒子球状シリカグラウトの開発を行い，各材料の基本的な特性を室内試験により把握した。低アルカリ性セメント系グラウトについては，グラウト材料として適切な性能を有する最適配合を明らかにした。(日本原子力研究開発機構，2008；日本原子力研究開発機構，2009)

グラウト注入技術の開発では，地下深部の高水圧環境下においてグラウト注入を実施するための装置・機器として，流量圧力制御装置(高圧対応バルブ)，グラウトポンプ，高圧対応パッカーの試作・室内試験などによる機能確認を実施した。(日本原子力研究開発機構，2008；日本原子力研究開発機構，2009)

また，国内のトンネル建設実績に関する調査結果を踏まえ，高水圧場においてグラウトを実施するための標準的な注入仕様を提示し，処分場の坑道種別ごとにグラウトを効率的に実施するための工法について整理した。(日本原子力研究開発機構, 2009)

グラウト注入技術の検討に関連して参照した国内外の施工事例について，データベースを構築し，Web 公開した。(日本原子力研究開発機構, 2008；日本原子力研究開発機構, 2009)

原位置適用性試験については，幌延深地層研究施設の深度 250m 水平坑道大型試錐座においての実施に向け，グラウト試験孔配置，調査・試験の実施手順などに関する試験計画を検討した。(日本原子力研究開発機構, 2009)

グラウト浸透モデルについては，国内外の既存モデルの調査に基づき，Gustafson & Stille モデルを抽出し，室内試験によりモデルの妥当性を確認し，瑞浪超深地層研究所におけるグラウト施工事例の再現性に関する評価を実施した。(日本原子力研究開発機構, 2008；日本原子力研究開発機構, 2009)

グラウト分布確認技術について，瑞浪超深地層研究所建設工事で実施したプレグラウト工事（深度 200m 避難所周辺）を対象とし，グラウト材浸透範囲や透水性の低減効果を把握評価する上で既往の技術の有効性を確認した。この調査により，物理探査手法では比抵抗トモグラフィー，グラウト材の着色と岩芯採取および地質観察の組み合わせによる調査がグラウトの分布範囲の把握には有効であり，注入法と回復法を組み合わせた透水試験はグラウト後の岩盤の透水性評価に有効なことを示した。また，この検討を踏まえ，プレグラウト工事の効果を評価するためのフロー図を提示した。（日本原子力研究開発機構, 2008）

グラウト材が地質環境におよぼす化学的影響については，上記調査後に既存の水圧・水質モニタリングシステムをボーリング孔に設置し観測を開始するとともに，モニタリング装置を用いた定期的な地下水の採水・分析を実施した。（日本原子力研究開発機構, 2009）

グラウト影響評価技術について，低アルカリ性セメント系グラウトが水和・硬化現象の過程で，どのようにセメント成分が浸出し地下水の pH を変化させるのかについて，原型となる水和・浸出モデルを構築した。同モデルを用いて，低アルカリ性セメント浸出実験結果を解釈し，目標値である pH<11 となる時間を推定し，普通ポルトランドセメント含有量は 65wt.%以下であることが必要なことも示した。（日本原子力研究開発機構, 2008；日本原子力研究開発機構, 2009）

また，結晶質岩のような不均質な亀裂性媒体を対象に，グラウトの劣化に伴い生じる高 pH 溶液による岩盤変質の評価手法を開発した。また，瑞浪超深地層研究所の避難所周辺を対象としたパーティクル・トラッキング法を用いた水理解析を行い，掘削に伴う水理場による物質移

動の変遷から，グラウトの影響を概略的に推測した。さらに，瑞浪超深地層研究所の条件を参考に，亀裂に流入する溶液の pH の経時変化について，一次元での化学反応・物質移行モデルを用いた試解析を行い把握した。さらに，亀裂中の二次鉱物による充填状況を普通ポルトランドセメントと低アルカリ性セメントで比較し，1,000 年程度の期間に見られる傾向を確認した（日本原子力研究開発機構, 2008；日本原子力研究開発機構, 2009）。

また，変質生成物の熱力学データ(二次鉱物として想定される沸石類および CSH 鉱物)や高 pH 条件での鉱物の溶解速度データ(Ca 長石の溶解速度に関する pH や温度依存性)の整備を実施した。さらに，高 pH 条件での岩石の微量変質鉱物を把握するため，顕微赤外分光および顕微ラマン分光の測定を行い，CSH 鉱物と推定される鉱物同定の見通しを得た。（日本原子力研究開発機構, 2008；日本原子力研究開発機構, 2009）

今後の課題：

グラウト材料に関し，代替材料について基本的特性を室内試験により評価し，グラウト材料として適切な最適配合を選出する。

幌延深地層研究所深度 250m に位置する大型試錐座において原位置適用性試験を実施し，これまで検討した低アルカリ性セメント系グラウト材料，高圧対応機器，グラウト浸透モデル等に関する原位置への適用性を評価する。

グラウト材料開発にあたり実施した材料の基本特性に関する室内試験結果を集約し，データベース化し，既公開の施工データベースに加え，グラウトデータベースとして Web 公開する。

グラウト分布確認技術に関しては，グラウト材の化学的影響の把握のため地下水の水圧・水質モニタリングおよび定期的な採水・分析を継続するとともに，特に結晶質岩を対象とした分布確認技術に関する標準化について検討する。
グラウトによる岩盤の長期影響評価において必要となる評価手法およびデータベースを整備する。また，普通ポルトランドセメントと低アルカリ性セメントの比較によるグラウト材料の適用性検討の考え方やそれに基づく具体例を提示する。

参考文献：

1. 日本原子力研究開発機構：“平成 19 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連，地下坑道施工技術高度化開発報告書（平成 20 年 3 月)”.
2. 日本原子力研究開発機構：“平成 20 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連，地下坑道施工技術高度化開発報告書（平成 21 年 3 月)”.

3. まとめ

I.

中期計画期間（平成 17 年以降～平成 21 年度）の処分場の工学技術に関する研究開発では，「工学技術の信頼性の向上」，「人工バリア等の長期挙動に関わるモデルの高度化とデータの拡充」を進めるため，地層処分研究開発に関する全体計画に基づいて地層処分基盤研究開発調整会議の他の機関と調整して，実際の地質環境条件への適用性に焦点を当てた研究開発を進めてきました。

II.

CoolRep 本文のメッセージを具体化していくため，処分場の工学技術の研究開発課題では，事業の柔軟性（サイト条件への適合性および安全性，回収可能性の維持などの社会的要請への対応）を向上させるための先進的な処分概念や新材料の開発，**建設**，**操業**時の安全性や品質管理手法の開発に向けた基盤技術の開発とそれらの経験・ノウハウを蓄積してきました。特に，場所が特定された場合，その場所の条件（地質学的，地理的，社会政治学的条件）に合わせた地層処分概念の最適化と地層処分後だけでなく処分場の建設・操業期間の安全性を確保するための要件や建設における実際的な制約条件の包括的な考慮に焦点をあてた研究を進めてきました。

III.

人工バリア等の基本特性データの拡充およびデータベースの開発においては，これまでに取得されてきた人工バリアに関わる基本特性データを拡充するとともに，それが事業および規制が使えるようにデータベースとして公開してきました。人工バリア等の長期複合挙動に関する研究においては，処分場設計の自由度の拡張や設計ならびに性能評価における不確実性の低減に資するために，処分環境における人工バリアの長期的な健全性の評価するための体系的なデータ取得，現象の理解および評価モデル／解析コードを開発しました。工学技術の信頼性向上では，処分場の建設と閉鎖段階において必要となる材料や設計手法を，地層処分の長期性能の観点から整理し，具体的な知識ベースとして提示しました。

IV.

今後の研究開発では，処分候補地が特定された場合に，その場所の条件に合わせた地層処分概念の最適化や処分場の建設・操業期間の安全性を確保するため，データベースの拡充や設計・施工手法，ニアフィールドの長期挙動評価手法に関わる技術と知識を高めていくとともに，安全規制機関による安全性に関する要件に応じて，研究課題の優先順位を明確にしながら進めることが重要になります。特に強度が低い堆積岩や海水系地下水環境における設計・施工技術や処分場の建設から閉鎖後まで含めた各段階におけるニアフィールドで発生する挙動の評価手法の検証を進めてきています。これらの議論は国の基盤研究開発調整会議で行われ，全体計画が適宜改訂されます。原子力機構では，その議論に沿った処分場の工学技術を着実に進展させるとともに，開発中の知識マネジメントシステムを介して，他分野および他機関との情報の共有・

議論や研究開発課題の可視化や具体化を支援することで，わが国での地層処分研究の発展に寄与していきます。

付録Ⅳ 性能評価研究カーネル

1. はじめに

1.1 性能評価研究とは

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，その性能について判断を行うことを指します(注1)。性能評価を実施する際の一般的な方法論は，まず地層処分システムの場の特徴や特質と安全性に影響を及ぼす可能性があると考えられる事象やプロセスを考慮して，システムの将来挙動を描きます。これをシナリオとよびます。次に，シナリオにしたがってシステムの長期的な挙動と核種の移行挙動を定量的に評価するために，物理・化学的な法則や実験等による知見に基づいたモデルの開発と必要なデータの整備が行われます。最後にモデルとデータを用いた影響解析を行ってシステムの性能を推定します。

このため，性能評価研究では，安全性に係わる現象についての理解，モデル化，データ整備を行うとともに，それらを統合してシステム性能評価を行うための手法の開発が必要になります。

注 1: 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わるものである場合には，性能評価は安全評価と同義になります。本カーネルで対象とする研究は，対象と基準の置き方により性能評価にも安全評価にも活用できることから，本カーネルでは両者については特に明確な使い分けはしないこととしました。

1.2 研究開発の経緯

日本原子力研究開発機構（旧動力炉・核燃料開発事業団，旧核燃料サイクル開発機構）（以下，原子力機構）では，これまで 20 年以上にわたって，性能評価分野の研究開発を行ってきており，安全性に係わる現象についての理解，モデル化，データベース開発を行うことで核種移行解析の基盤を整えるとともに，それらを統合した性能評価を行うためのシナリオ構築とシステム性能評価の手法の開発，およびこれらを用いた評価の試行など多くの研究を，地質環境条件および処分場の設計と整合を図りつつ実施してきました（動燃事業団, 1992；核燃料サイクル開発機構, 1999a；核燃料サイクル開発機構, 1999b；核燃料サイクル開発機構, 2005）。

性能評価分野の研究開発の成果は，平成 11 年 11 月に公開した「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－」（以下，第 2 次取りまとめ）に反映され，日本において高レベル放射性廃棄物の地層処分を安全に行うことが基本的に可能であることを示すために用いられました（核燃料サイクル開発機構,

1999a）。第 2 次取りまとめでは，長期的に安定で好ましい条件を備えた地下深部の地質環境に，適切に設計された処分場の仕様に基づいて構築される地層処分システムを対象に安全評価を行いました（核燃料サイクル開発機構, 1999b）。評価にあたっては，体系的なシナリオ開発を進め，シナリオにしたがって，とくにニアフィールドに重点をおいて，現象により即したモデルの開発とデータの整備をその時点での最新の知見を活用して行い，さらに，開発された個々のモデルやデータを統合し，線量を指標として地層処分システム全体の安全性を評価するための安全評価モデルの基本体系を整えました。そのうえで，構築した安全評価手法を用い，わが国の幅広い地質環境と処分場仕様の多様性，地質環境の変動を想定したシナリオやモデル，データの不確実性を考慮し，地層処分システムの安全性を総合的に評価した結果，廃棄物が人間環境に及ぼすと想定される影響は，諸外国で提案されている安全基準に示された防護レベルを下回ることを確認しました。

第 2 次取りまとめの結果については，国において「我が国における地層処分の技術的信頼性が示されていると判断できる」と評価され，性能評価については「場所を特定しない現段階において，我が国の地質環境や現状技術を前提条件として，ニアフィールド性能を中心に地層処分システムの安全性を評価する手法が整備されており，かつ解析評価の結果から地層処分の安全性が確保できる見通しが示されていると判断できる」と評価されました（原子力委員会原子力バックエンド対策委員会, 2000）。また，第 2 次取りまとめ以降の研究開発の課題として，上記の国の評価や「安全規制の基本的考え方」（原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会, 2000）において，以下のものがあげられました。

・工学技術や安全評価と関連付けた地表から地下深部までの調査の体系化
・深地層の研究施設等を活用した深部地質環境データの蓄積
・深地層の研究施設等を活用した建設・操業・閉鎖技術の実証試験
・実際の場所の特性を精度よく再現できるモデルの確立
・実際の地質環境条件を適切に考慮した設計，シナリオに基づく評価
・緩慢な天然現象による地質環境の長期にわたる変化を考慮した評価
・科学的合理性のある範囲での地下水シナリオの設定

これらの課題から，第 2 次取りまとめ以降の研究開発では，実際の地質環境への適用を通じて，あるいは現実の地質環境条件に基づいて，技術の信頼性を確認していくこと，また，現象への理解をさらに深め，データの蓄積やモデルの改良を進めて，処分システムの長期的安全性を評価する手法を確立することにより，地層処分技術の信頼性をさらに向上させることが必要となりました。

上記課題を踏まえ，原子力機構は，第 2 次取りまとめ以降の性能評価分野の研究として，

第 2 次取りまとめでの安全性の評価を支えまた発展させるための核種の移行評価やシステム性能評価に関わる手法，モデル，データベースの拡充と更新を進めました。

平成 17 年度までは，平成 13 年に策定した「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の全体計画」（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）に基づき下記の目標を設定し，性能評価分野では特に下線部に係る研究開発を進めました。

(A) 実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認
①地質環境の調査・評価技術の適用性確認
②建設・操業・閉鎖に関わる工学技術の適用性確認
③段階的な地質環境情報に応じた設計・安全評価手法の適用性確認
(B) 地層処分システムの長期挙動の理解
①地質環境の長期変遷の理解
②設計・安全評価に関するデータの蓄積（長期挙動評価の基礎データの整備）
③現象理解に基づくモデル高度化（人工バリア・岩盤の長期挙動の理解）
④総合的予測・評価手法の整備・高度化（システム全体の長期挙動の理解）

この中では，第 2 次取りまとめで用いた溶解度，収着，拡散などの核種移行パラメータの拡充やデータベースの更新・公開など（研究開発課題：(1)核種移行データベースの整備）を上記(B)②と関連付けて実施し，また第 2 取りまとめ以降の課題とされた重要現象の理解とモデル化および実際の地質環境の特徴のモデルへの反映など（研究開発課題：(2)安全評価モデルの高度化）を上記(B)③と関連付けて実施しました。さらに，システム性能評価については，評価の透明性やわかりやすさを向上させること，不確実性の適切な取り扱いを可能にすること，を目標とした手法の検討（研究開発課題：(3)安全評価手法の整備・高度化）を上記(B)④と関連付けて実施するとともに，上記(A)③と関連付けて核種移行パラメータの設定，モデル化，システム性能評価などの技術の実際の地質環境条件への適用性についての事例検討（研究開発課題：(4)安全評価手法の適用性確認）を行いました。

これらの成果は，「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, 2005）として取りまとめました。

参考文献：

1. 動燃事業団：“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－”, PNC TN1410 92-081 (1992).

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

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

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

5. 原子力委員会原子力バックエンド対策委員会：“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” (2000).

6. 原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会：“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）” (2000).

7. 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）：“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の地層処分技術に関する研究開発の全体計画」”, JNC TN1440 2001-008 (2001).

1.3　中期計画における研究開発

平成 17 年取りまとめ以降の研究開発は，実施主体による処分事業と，国による安全規制の両面を支える技術を知識基盤として整備すること，またこれらの成果を地層処分の安全確保の考え方や評価に係る様々な論拠を支える知識ベースとして体系化することを大きな目的として進めてきました（**中期計画**）。中期計画では下記の全体的な目標を設定しました。この中で，性能評価研究では，これまでの研究開発を発展的に継承しつつ，特に下記の目標の中で下線で示した部分に重点をおいた研究開発を，地層処分基盤研究施設（ENTRY）（**地層処分基盤研究施設（ENTRY）ホームページ**）や地層処分放射化学研究施設（QUALITY）（**地層処分放射化学研究施設（QUALITY）ホームページ**）を活用し，また深地層の研究施設計画（**東濃地科学センターホームページ**；**幌延深地層センターホームページ**）の成果を活用しつつ進めました。

① 工学技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化のために，人工バリア等の長期挙動や核種の移行等に関わるモデルの高度化を図り，データを拡充するとともに，評価に必要となるデータの標準的取得方法を確立する。
② 地質環境データ等を考慮した現実的な処分システム概念の構築手法や全体システムモデルを整備するとともに，掘削深度を考慮して，設計，安全評価手法の深部地質環境での適用性

確認を行う。

まず，システム性能評価手法に関しては，具体的な地質環境を対象とした評価作業を支援する技術と知見を整えるために，個別現象に係るモデルやデータベースなどの技術基盤の体系化とその適用に関する手法・手順の整備，またシステム性能評価において重要となるシナリオの構築や不確実性の取り扱いの透明性やわかりやすさの向上に重点を置いた研究開発を進めてきました。これは，上記目標②に向けた研究であり，実施主体が特定の候補サイトに関する安全評価を実施することや，安全規制機関による評価結果のレビュー，さらにはステークホルダーによる候補サイトやそこでの処分場の設計が安全評価にどのような影響をもたらすかに関する理解を支援することを意図したものです。

2.1 システム性能評価に係る手法の開発

また，システム性能評価の基盤となる安全性に係わる現象についての理解，モデル化，データベースについては，十分な科学的知見やデータに基づくものとすることに重点をおき，性能評価で考慮する主要な現象の区分に基づいて下記の研究項目を設定し開発を進めてきました。これは，上記目標①に向けた研究であり，現象理解を深めることで，評価で用いるパラメータの設定やモデルの簡略化などが妥当であることをより確実に示していくこと，与えられる地質環境条件の差異，設計のオプションさらにはそれらに関する情報の不確実性がシステム性能にどの程度の影響を及ぼすかをより詳しく示すこと，などが可能となります。また，データ取得方法のレビューと手法の標準化，データの品質を考慮したデータベースの構築などにより，評価結果の信頼性に直結する基礎的なデータの品質をより高いものとしていくことができます。

2.2.1 地下水・間隙水化学
2.2.2 ガラスの溶解
2.2.3 放射性元素の溶解・沈殿および熱力学データベース整備
2.2.4 緩衝材および岩盤中の核種の収着・拡散およびデータベース整備
2.2.5 コロイド，有機物の影響
2.2.6 微生物の影響
2.2.7 岩盤中の水理・物質移行評価
2.2.8 生物圏評価

これらの研究は，「高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画」（資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2006；資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2009）と整合したのもとなっています。

また，経済産業省資源エネルギー庁からの受託事業として，軽水炉サイクルシステムから先進サイクルシステムまでを対象とした先進的な地層処分概念の開発と性能評価のための技術の開発（日本原子力研究開発機構, 2008a；日本原子力研究開発機構, 2009a；日本原子力研究開発機構, 2010a）（2.1），また，処分システムの長期性能に影響を及ぼす可能性がある放射線の影響，微生物の影響，バリア間の複合作用等の化学環境（熱，水，応力，化学），核種移行場（圧密体）に係わる不確実性要因などの定量的な影響評価のための技術の開発（日本原子力研究開発機構, 2008b；日本原子力研究開発機構, 2009b-1；2009b-2；日本原子力研究開発機構, 2010b）（2.2.4；2.2.5；2.2.6；工学技術カーネル_2.1.1；2.2.3；2.2.4）を進めています。

参考文献：

1. 日本原子力研究開発機構：“独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画（中期計画）（平成 17 年 10 月 1 日～平成 22 年 3 月 31 日）（平成 22 年 3 月 30 日変更許可）” (2010).
2. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画” (2006).
3. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 20 年度版）” (2009).
4. 日本原子力研究開発機構：“平成 19 年度　地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連　先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発報告書” (2008a).
5. 日本原子力研究開発機構：“平成 20 年度　地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連　先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発報告書” (2009a).
6. 日本原子力研究開発機構：“平成 21 年度　地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連　先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発報告書” (2010a).
7. 日本原子力研究開発機構：“平成 19 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム化学影響評価高度化開発報告書” (2008b).
8. 日本原子力研究開発機構：“平成 20 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム化学影響評価高度化開発報告書” (2009b).
9. 日本原子力研究開発機構：“平成 21 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム化学影響評価高度化開発報告書” (2010b).

1.4 CoolRepH22 本文との関係

CoolRepH22 本文では，地層処分の事業段階を迎え，実施主体や規制機関，原子力機構を含めた関連研究機関において，第 2 次取りまとめで示した見通し「科学技術的な観点からは，日本における高レベル放射性廃棄物の長期的な安全対策として，地層処分の概念を実現することが可能である」を一層確実なものとしていくための研究開発の 8 つの観点を示しています（CoolRepH22 本文_1.1.4）。

この観点と照らし合わせると，性能評価分野の研究は，その全ての研究項目（2.1；2.2.1；2.2.2；2.2.3；2.2.4；2.2.5；2.2.6；2.2.7；2.2.8）において，具体的な地質環境条件への適用に留意していることから，「候補地点の地質学的・地球化学的・水理学的・地理学的・社会学的・経済学的といった条件の考慮」や「場所が特定された場合，その場所の条件（上記）に合わせた地層処分概念の最適化」の観点と関係します。また，国内外の最新の情報や技術の反映を含めた現象理解の深化とそれに基づくモデルやデータの質・量の向上を図り，その体系的な整備を進めていることから，「ステークホルダーがそれぞれの関心に応じた的確な情報を踏まえた上で意思決定に参加できるよう支援」や「地域の要求に応じて，安全性に対する裕度を犠牲としない範囲で事業計画の変更を許容する柔軟性の確保」および「処分事業の進展につれて爆発的に増加すると予想される関連情報を迅速かつ的確に管理する革新的な「知識マネジメントシステム」（JAEA KMS）の導入」の観点と関係します。さらに，処分場の設計との整合が重要となるシステム性能評価に係る研究（2.1）は，「処分場閉鎖後の安全性だけでなく，処分場の建設・操業期間の安全性を確保するための要件や建設における実際的な制約条件の包括的な考慮」の観点に関係します。

2. 性能評価研究成果の概要

2.1 システム性能評価に係る手法の開発

目的：

具体的な地質環境条件を対象とし，また処分事業の進展に伴う地質環境の調査や処分システムの設計検討に係る情報の変遷に対応して，地層処分システムが長期間にわたって安全であることを示すシステム性能評価の一連の方法論を整備する。具体的には，性能評価シナリオを透明性や追跡性を確保しつつ構築するとともに，合理的かつ分かりやすく提示する技術の整備，シナリオ，モデル，データといった様々な不確実性とその影響を評価・分析する技術の整備，および地質環境調査からのデータやそれに基づく地質環境モデルに応じた核種移行解析を実施するための統合的な技術と方法論の整備を行う。さらに，それらの具体的な適用事例の蓄積を図る。

平成 17 年までの成果：

第 2 次取りまとめでは，シナリオについては，国際的なコンセンサスが得られている体系的なアプローチ（OECD/NEA, 1991）を踏襲しながら，地層処分システムの挙動を記述する包括的な FEP（Feature(特質)，Event(事象)，Process(プロセス)）を作成し，わが国における一般的な地質環境条件とレファレンスシステムの想定および一般的な科学的知見に基づいて FEP のスクリーニングを行ったうえで，それらの相関関係を整理することで，主に性能評価上の保守性を重視した基本シナリオおよび変動・接近シナリオの設定例を提示した。この基本シナリオに従って，基準とする「レファレンスケース」を設定するとともに，シナリオのバリエーション，および評価モデルやデータの不確実性を取り扱う複数の核種移行解析ケースを設定しシステム性能を評価した。

平成 17 年までは，第 2 次取りまとめでの一般的な地質環境条件を対象とした検討に対し，具体的な地質環境が与えられた場合の地質環境の調査・評価から核種移行解析に至る一連の作業について，その実施のための手法と手順を例示した（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_5；牧野ほか, 2005）。具体的には，瑞浪および幌延の深地層の研究施設計画における地上からの調査研究段階で得られた情報を参考にしながら，核種移行解析の基本的な要素となる以下の個々の作業について，第 2 次取りまとめにおいて示した評価手法を基盤としつつ，利用可能な情報が限られる場合の実施方法を具体化した。

- 地下水流動解析の結果として得られる移行経路情報について，その核種移行解析における複数の取り扱いの可能性の提示，および各取り扱いに応じた核種移行モデルの提示と選定（2.2.7）
- 核種移行解析で用いる遅延に係る特性パラメータの設定の基盤情報として必要となる地下水・間隙水組成の設定（2.2.1）
- 人工バリア中核種移行解析で重要となる遅延に係る特性パラメータの設定（第 2 次取りまとめと同様の方法で設定）
- 天然バリア中核種移行解析で重要となる遅延と移流に係る特性パラメータの設定（2.2.4；2.2.7）

そのうえで，利用可能な情報が限られることに起因するモデルやデータの不確実性の取り扱いに留意しつつ，それらを一連の流れに沿ってつなげた評価を実際に試行することで，第 2 次取りまとめで示した評価手法が適用可能であることを確認した。さらに，地下水流速や分配係数などの核種移行遅延効果に与える影響が大きいパラメータのうち，分配係数については調査の初期の段階からボーリングコア試料などを使ったデータ取得を行うことがパラメータ値の不確実性の評価に有効であることが示された。一方，地下水流速の設定に必要な水理学的有効間隙率や亀裂開口幅などに関する調査の項目や数量は地上からの調査段階などの調査の初期の段階では限定されるため，これらのパラメータ値については，不確実性を適切に評価するために必要な地質環境の調査・評価や性能評価研究に反映すべき項目を提示するとともに，既存情報

などに基づいて推定する方法論を実例とともに示した。

シナリオについては，第 2 次取りまとめの経験や国際レビューにおける指摘（OECD/NEA, 1999（専門部会資料仮訳））への対応として，FEP の整備からシナリオ構築までの一連の作業の効率化とともに，追跡性や透明性といった品質保証の観点を重視したシナリオの構築手法として，FEP の相関関係をマトリクス形式で整理するとともに，FEP と安全機能の関係を階層化して整理することで網羅性と効率を向上させる手法を考案した（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_4.1.1）。また，第 2 次取りまとめ時点では，現実性よりも保守性に重点を置いた簡略化した取り扱いとしていた天然現象（火山・地熱活動，地震断層活動，隆起・侵食／沈降・堆積，気候・海水準変動）に起因するシナリオについては，天然現象の特徴とそれによる影響の伝播に関する地球科学的な知見を熱，水理，力学，化学の変化に着目して整理することで，システム条件の変化を具体化し核種移行解析のモデルやパラメータの設定へとつなげていく分野横断的な知見の整理手法を考案し，火山・地熱活動に対する試行を通じてその有効性を示した（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_4.1.2；川村ほか, 2005）。

不確実性評価技術については，データ不確実性評価として，複数の統計的分析手法を利用した感度解析技術を整備し，核種移行解析の出力に対して影響の大きい入力パラメータの種類や条件範囲などを効率的に評価できるようにした。また，モデル不確実性に関しては，第 2 次取りまとめではその遅延効果を保守的に無視した掘削影響領域での核種移行および遅延を評価可能な代替的なモデルを構築した（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_4.2.2；4.2.3；Wakasugi et al., 2000；仲島・牧野, 2006；若杉ほか, 2004）。

平成 21 年度までの成果：

平成 17 年以降は，システム性能評価の実施に必要な様々な個別技術の具体的な地質環境への適用，さらにそれらの体系的な適用を可能としていくために，地質環境の調査・評価と核種移行解析との連携，不確実性の評価，シナリオ構築のそれぞれの技術の継続的な拡充と具体的な地質環境への適用事例の蓄積を図った。またその中では，複数の個別技術を相互補完的に組み合わせる試み，また地質環境の調査・評価（深地層の科学的研究カーネル）や処分概念の工学技術（工学技術カーネル）とのインタラクションの促進に係る検討を試みた。

地質環境の調査・評価と核種移行解析の連携については，性能評価の観点から処分対象とする適切な母岩や処分深度を検討する際に着目すべき指標として地下水移行時間等を検討した。そのうえで，処分場規模，パネル規模，廃棄体規模のそれぞれのスケールを対象に，実測データやそれに基づき構築される水理地質構造モデルを用いた指標の定量化を目的として，幌延の深地層の研究施設計画の成果を事例として，利用可能なデータや水理地質構造モデルの変遷とそれら指標の変化の関係を分析することで，指標の不確実性低減の観点から期待される地質環境の調査・評価の進め方等を具体化する試みを開始した。

また，処分場の合理化・最適化の検討のための設計研究との連携強化に向けて，処分場デザインの変化に柔軟に対応可能な核種移行モデルの開発に着手した（Murakami and Ahn, 2008a；Murakami and Ahn, 2008b）。このモデルでは，核種の移行挙動を確率的に表現することで，デザインの変化への対応性と計算効率の向上を図る。

不確実性評価技術に関しては，処分システムの安全裕度の定量的な提示およびその頑健性を高めることに寄与する因子を抽出していくための手法を構築した。具体的には，母岩のバリア性能を極めて低く見積もったケースを仮定し，その仮定の下で安全性を人工バリアにより確保するために重要となる因子およびその定量的条件（例えば，ガラス溶解速度やオーバーパック寿命）を評価する手法を，これまでに開発してきたモンテカルロシュミレーション技術と統計的な感度解析技術を組み合わることで構築した（江橋ほか, 2008；江橋ほか, 2009）。この手法により，多様な条件を有する現実の地質環境における天然バリアの性能と人工バリアの性能の相互補完的な関係の整理に資する情報が得られるとともに，それらを地質環境の調査・評価や人工バリア設計に係る研究にフィードバックすることで処分システム全体の頑健性の向上や合理化・最適化に係る議論を効率的に進めることが可能となった。

シナリオに関しては，効率性，わかりやすさ，事業の展開への対応などの多様な観点からの取組みを行ってきた。まず，平成 17 年までに検討したシナリオ構築の効率性と網羅性を両立させる手法については，その適用手順を具体化するとともに，その中で最も重要かつ煩雑となる多数の FEP の相互関係の整理と図化の作業の効率化に重点を置いた支援ツールを構築し，公開した（牧野ほか, 2007；原子力機構地層処分研究開発部門ホームページ_FepMatrix）。また，シナリオで記述される，処分システムの安全性に影響を与えることが懸念される事象の影響を，事象と安全機能および核種移行解析上のパラメータとの連鎖として具体性をもってわかりやすく表示し（大井ほか, 2008），さらに不確実性評価技術として開発した感度解析的手法を組み合わせることで，影響の重要度をその連鎖に沿って分析・評価する手法を構築した。具体的な事例として火山・地熱活動からガラス固化体の溶解速度に至る連鎖に適用し，その連鎖の定量的な議論において重要となる情報（例えば，地下水温度と地下水組成）を明らかにするとともに，定量的な情報が得られない状況においても，安全性を満足するための保守的な目安を示すことによって，懸念事象の生起による安全性への影響の見通しが提示できることを示した（大井ほか, 2009；Ohi et al., 2009）。さらに，事業の進展に伴って更新される地質環境に関する情報や設計オプションの変更に対応した新たなシナリオを，前段階での評価と整合性を保ちながら分かりやすく効率的に構築する手法として，変更点に起因して変化する安全機能を整理することで，シナリオを部分的に更新していく手法を構築した（稲垣・蛯名, 2008）。この手法を第 2 次取りまとめでは想定していなかった普通ポルトランドセメントを用いた坑道支保を想定した場合に適用し，支保領域での核種移行の考慮や掘削影響領域の通過地下水流量変化などの更新すべき部分の抽出とそれに基づくシナリオの部分的更新が効率的に行えることを確認した（稲垣・蛯名, 2009）。天然現象に起因するシナリオについては，平成 17 年までに検討した基本的手順を実務的な作業ステップとして具体化し（川村ほか, 2007），作業ステップ

に沿った天然現象の特徴の分類・整理，性能評価への影響の伝播の具体化といった一連の作業を進め，影響評価の概念モデルを構築した（川村ほか, 2008；川村ほか, 2009；Kawamura et al., 2008）。これらにより，評価対象とする場の想定や得られる情報に応じて，具体的な影響解析ケースの設定までを行う基盤が整備され，例えば，隆起・侵食については，深度だけではなく，地表環境や地形変化のパターンに応じた解析ケースを例示した（江橋ほか，2009；Miyahara et al., 2009）。さらに，サイト選定や工学的対策により回避することが前提となっているシナリオが発生したと仮定した場合（what if）の性能評価上の取り扱いに関しても，断層影響を例として，仮定の導出から解析ケースの設定，核種移行解析に至るまでの一連の手順を示した（Miyahara et al., 2008）。

なお，放射線量やリスク以外の補完的指標に関しては，評価指標と密接に関係する研究である生物圏評価（2.2.8）において記述する。

さらに，平成 19 年度より，軽水炉サイクルシステムから先進サイクルシステムまでを対象とした先進的な地層処分概念と性能評価技術を具体化することを目的 として，処分概念の適用性の検討を性能評価の観点を取り込みつつ実施する技術，多様な地質環境条件や処分概念に対応した性能評価の実施を支援する評価コードと関連知識の統合技術および潜在的課題の抽出を支援する技術，処分に係る最適化問題を設定し解法する技術，ならびに放射性廃棄物処分を廃棄物管理の観点からサイクル側との関係も含めて包括的に検討していくための，先進サイクルシステムから生ずる可能性のある廃棄物特性の評価技術，それら廃棄物を対象にした処分概念，性能評価，最適化の検討を行うための技術，についての開発を進めている。なお，本研究は経済産業省からの受託事業において実施された（日本原子力研究開発機構, 2008；日本原子力研究開発機構，2009；日本原子力研究開発機構，2010；Makino et al., 2009a；Makino et al., 2009b；Matsumoto et al., 2009；Makino et al., 2009c；Makino et al., 2009d）。

これらの成果によって，処分事業の進展に伴い必要となる広範なシステム性能評価に係る技術の体系化に向けて，地質環境の調査・評価から得られる情報の変遷に対応した核種移行解析の進め方や不確実性の取り扱い方法の具体化，シナリオ構築技術の拡充およびシナリオと評価手法の関連付けの強化などが図られた。これらは，システム性能評価の実施および地質環境の調査や処分システムの設計などの他分野との効果的な相互連携に資する技術として，処分事業に反映可能と考えられる。また，これらの成果は，システム性能評価の透明性や追跡性を向上させるものであり，品質保証および専門家の合意形成の支援の観点からも有効なものとなっていると考える。さらに，将来のサイクルシステムを視野に入れた放射性廃棄物処分に関する包括的検討を開始したことで，長期的な原子力利用を支える観点からも重要な情報の提示が可能となった。

今後の課題：

具体的な地質環境を対象として，調査の進展に伴う利用可能な情報の量と質の変遷が，シナ

リオ構築，システム性能評価で用いるモデルやパラメータの設定にどのように影響し，また不確実性低減にどのように利用できるかについて，深地層の研究施設計画から得られる情報などを参考に具体的な事例を蓄積することで，処分事業の進展に適用可能な技術および知識として体系的に整備する。

地質環境の時間変化やそれに応じた処分システムの長期変遷といった評価期間が長くなるにつれて増大する不確実性についても，システム性能評価の観点から評価・分析し合理的に評価に取り込んでいくための技術を整備する。
事業の進展に伴って重要となると考えられる，候補サイトでの地質環境や処分システムのオプションの違いの影響のシステム性能評価の観点からの定量的な比較について，その実現に必要な現実的な評価モデルおよびその適用技術を整備する。

参考文献：

1. OECD/NEA：“Review of Safety Assessment Methods, A Report of the Performance Assessment Advisory Group of the Radioactive Waste Management Committee”, OECD Nuclear Energy Agency (1991).
2. 牧野仁史，澤田淳，前川恵輔，柴田雅博，笹本広，吉川英樹，若杉圭一郎，小尾繁， 濱克宏，操上広志，國丸貴紀，石井英一，竹内竜史，中野勝志，三枝博光，竹内真司，岩月輝希，太田久仁雄，瀬尾俊弘：“地質環境の調査から物質移行解析にいたる一連の調査・解析技術 ―２つの深地層の研究施設計画の地上からの調査研究段階（第１段階）における地質環境情報に基づく検討―”, JNC TN1400 2005-021 (2005).
3. OECD/NEA：“OECD/NEA International Peer Review of the Main Report of JNC’s H12 Project to Establish the Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Report of the OECD/NEA Nuclear Energy Agency International Review Group”, NEA/RWM/PEER(99)2 (1999). (専門部会資料仮訳)
4. 川村淳，牧野仁史，梅田浩司，瀬尾俊弘，石丸恒存，大澤英昭：“高レベル放射性廃棄物処分における天然現象影響評価技術の高度化”，サイクル機構技報, No.28, pp.53-64 （2005）.
5. K. Wakasugi, E. K. Webb, H. Makino, Y. Ishihara, Y. Ijiri, A. Sawada, T. Baba, K. Ishiguro and H. Umeki：“A Trial of Probabilistic Simulation for Reference Case in the Second Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan”, Proceedings of the 5th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM5, Osaka, 2000.11.27-12.1), Vol.4, pp.1469-1475 (2000).
6. 仲島邦彦，牧野仁史：“決定木分析を用いた核種移行解析結果の感度分析の検討(II)”, JAEA-Data/Code 2006-013(2006) .
7. 若杉圭一郎，牧野仁史，小尾繁：“核種移行解析における掘削影響領域のモデルバリエーションに関する検討”，原子力バックエンド研究, Vol.10, No.1-2, pp.21-30 (2004).
8. H. Murakami and J. Ahn：“Development of Geologic Repository Models for Design and

Decision Making", proceedings of 16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC), P16P1212 (2008a) .

9. H. Murakami and J. Ahn："Development of Compartment Models for Radionuclide Transport in Repository Region", proceedings of 2008 International High-Level Radioactive Waste Conference, Las Vegas (USA) (2008b).
10. 江橋健, 小尾繁, 大井貴夫："人工バリアと天然バリアのパラメータに関する感度解析－高レベル放射性廃棄物の地層処分性能評価への包括的感度解析手法の適用－", JAEA-Research 2008-019 (2008) .
11. 江橋健, 小尾繁, 大井貴夫："高レベル放射性廃棄物地層処分における性能評価パラメータの安全裕度評価方法の例示", 原子力バックエンド研究 Vol.15 No.2, pp.99-115 (2009).
12. 牧野仁史, 川村淳, 若杉圭一郎, 大久保博生, 高瀬博康："高レベル放射性廃棄物地層処分安全評価のシナリオ解析のための計算機支援ツールの開発", JAEA-Data/Code 2007-005（2007）.
13. 大井貴夫, 稲垣学, 川村淳："シナリオの重要度をわかりやすく提示可能なシナリオ解析手法の整備", JAEA-Research 2008-023 （2008）.
14. 大井貴夫, 稲垣学, 川村淳, 江橋健："放射性廃棄物の地層処分の安全性に影響を与える懸念事象の相対的重要度把握のための体系的評価手法の有用性の例示", JAEA-Research 2008-111 （2009）.
15. T. Ohi, M. Inagaki, M. Kawamura and T. Ebashi："A Systematic Approach to Evaluate the Importance of Concerns Affecting the Geological Disposal of Radioactive Wastes", Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXII, Mat. Res. Soc. Sym. Proc., Vol.1124, pp.407-412 (2009).
16. 稲垣学, 蛯名貴憲："処分環境や設計オプションに対応した性能評価手法の構築（１）", JAEA-Research 2008-022（2008）.
17. 稲垣学, 蛯名貴憲："処分環境や設計オプションに対応した性能評価手法の構築（２）", JAEA-Research 2008-114（2009）.
18. 川村淳, 大井貴夫, 牧野仁史, 梅田浩司, 新里忠史, 安江健一, 河内進, 石丸恒存, 瀬尾俊弘, 蛯名貴憲, 宮原要, 中司昇, 茂田直孝："高レベル放射性廃棄物地層処分に係わる天然現象影響評価に関する研究計画書", JAEA- Review 2006-039 (2007) .
19. 川村淳, 大井貴夫, 新里忠史, 安江健一, 常盤哲也, 丹羽正和, 島田耕史, 黒澤英樹, 浅森浩一, 河内進, 江橋健, 北村暁, 石丸恒存, 牧野仁史, 梅田浩司, 瀬尾俊弘："高レベル放射性廃棄物地層処分における天然現象影響評価に関する研究", JAEA-Research 2008-018 (2008).
20. 川村淳, 江橋健, 牧野仁史, 新里忠史, 安江健一, 大井貴夫："高レベル放射性廃棄物処分における隆起・侵食/沈降・堆積に起因するシナリオの検討", JAEA-Research 2008-119 (2009).
21. M. Kawamura, K. Yasue, T. Niizato, T. Tokiwa, T. Ebashi, T. Ohi, H. Makino, T. Ishimaru and K. Umeda："Study on Perturbation Scenario for Uplift and Denudation in

Performance Assessment of a HLW Disposal System", 2008 East Asia Forum on Radwaste Management Conference, 5A (2008).

22. 江橋健, 川村淳, 稲垣学, 小尾繁, 柴田雅博, 板津透, 仲島邦彦, 宮原要 : "仮想的な堆積岩分布域における地層処分の地下水シナリオを対象とした隆起・侵食の影響評価手法の例示", JAEA-Research 2008-117 (2009).
23. K. Miyahara, M. Inagaki, M. Kawamura, T. Ebina and I. G. Mckinley : "Disruptive effects on a HLW repository due to uplift-erosion in the distant future", Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXIII, Mat. Res. Soc. Sym. Proc., Vol.1193, pp.177-184 (2009).
24. K. Miyahara, M. Inagaki, M. Kawamura and T. Ebina : ""What-if?" Calculations to Illustrate Fault-Movement Effects on a HLW Repository", Proceedings of International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas, Nevada, September 7-11, 2008, pp.593-599 (2008).
25. 日本原子力研究開発機構 : "平成 19 年度　地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連　先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発報告書" (2008).
26. 日本原子力研究開発機構 : "平成 20 年度　地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連　先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発報告書" (2009).
27. 日本原子力研究開発機構 : "平成 21 年度　地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連　先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発報告書" (2010).
28. H. Makino, H. Umeki, K. Hioki and I. G. McKinley : "The Challenge of Development of a Holistic Waste Management Approach to Support the Nuclear Renaissance", WM2009 Conference, March 1-5, Phoenix, AZ. (2009a).
29. H. Makino, H. Umeki, Y. Ochi, K. Hioki, H. Okubo, M. Matsumoto, O. Sato, S. Masuda and I.G. McKinley : "Supporting Development of Practical Designs for a Japanese HLW Repository", Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXIII, Mat. Res. Soc. Sym. Proc., Vol.1193, pp.673-680 (2009b).
30. M. Matsumoto, O. Sato, H. Okubo, H. Makino, Y. Ochi, K. Hioki, H. Umeki, S. Masuda and I.G. McKinley : "Application of Formal Knowledge Engineering Approaches to Develop a Design Catalogue for a Japanese HLW Repository", Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXIII, Mat. Res. Soc. Sym. Proc., Vol.1193, pp.681-688 (2009).
31. H.Makino, K.Hioki, H.Umeki, H.Yang, H.Takase and I.G. McKinley : "Practical application of the KMS:1) total system performance assessment", Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management ICEM'09, October 11-15, 2009, Liverpool, UK. (2009c).
32. H.Makino, K.Hioki, H.Umeki, S.Tachibana, H.Takase and I.G. McKinley : "Challenges for the JAEA KMS: fostering inventive design and problem solving", Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste

Management ICEM'09, October 11-15, 2009, Liverpool, UK. (2009d).

2.2 放射性核種の移行に係わる現象理解とデータベース開発

2.2.1 地下水・間隙水化学

目的：

与えられた地質環境条件および処分システム設計条件に対して，核種移行パラメータの設定において基盤的情報となる地下水組成および緩衝材間隙水組成の推定手法の構築，ならびにその適用の手順や留意事項を提示する。

平成 17 年までの成果：

第 2 次取りまとめにおいては，地下水化学については，我が国の地下水組成に関する文献情報をもとに，核種移行パラメータの設定において重要な特性（例えば，pH, Eh，炭酸濃度等）に着目し，地下水を類型化した。また，化学平衡論に基づく地下水水質形成モデルを構築し，地質環境を特定しない一般的な地下水水質（降水系地下水と海水系地下水）を設定した（Yui et al., 2004）。緩衝材間隙水化学については，バッチ試験に基づいた間隙水化学モデルを構築し，そのモデルを適用して圧縮ベントナイト中の間隙水水質を設定した（モデルの圧縮系への適用性には課題もあるが，圧縮ベントナイト中での pH 直接測定結果との整合を確認したうえで適用した）（小田ほか, 1999）。

第 2 次取りまとめ以降は，それまでの場所を特定しない一般的な地質環境条件を対象にした検討に対し，具体的な地質環境条件が与えられた場合に，設計・性能評価で用いる地下水水質および間隙水水質の設定を行うために，深部で採水され地表で測定された地下水データの信頼性評価手法およびそれに基づく深部地下水水質推定手法を構築した。また，地質環境の調査・評価から核種移行解析に至る一連の手法開発（2.1）の一環として，瑞浪や幌延の地上からの調査研究段階における地質環境調査で得られた情報に基づき，上記手法を用いて物質移行解析の起点となる地下水水質の設定を試行するとともに，地下水データの不足への対処等を含む具体的な手法の適用手順を例示した（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_3.2；牧野ほか, 2005）。
さらに，間隙水水質の時空間変化を把握するための測定手法を検討し，時空間変化に関わるデータを取得するとともに，変化の要因を間隙水化学モデルに基づき解釈し，現象理解を深めた（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_3.2；磯貝ほか, 2004）。

平成 21 年度までの成果：

平成 17 年以降は，具体的な地質環境を対象とした地下水水質および間隙水水質の設定を行うための技術や情報およびそれらを適用する一連の手順の体系化に向けた整備を進めた。

具体的には，地下水水質の設定において必要となる深部地下水の実測データ，その分析結果，およびモデル評価等から得られる多様な地球化学情報を総合的に評価し統合することで，より

合理性の高い水質設定を可能にするための作業フローを作成した（日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金管理センター, 2006）。この作業フローの中では特に重要な技術的検討項目として，①地球化学特性の空間分布の不確実性の評価，②地球化学特性の長期的変遷の評価，③地表で得られた地下水化学実測値の深部地質環境条件への補正，および④地下水化学への掘削影響と評価，の４つを設定し，これらのうち③および④については，諸外国における先行事例に基づいた技術情報の整理を行うとともに，幌延を例にした試験的・解析的な検討を進めることで，最新技術の蓄積とそれを参考とした具体的な地質環境を対象とした適用手法の例示を行った（日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金管理センター, 2006；日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金管理センター, 2008；Sasamoto et al., 2007）。

間隙水化学については，平成 17 年までの蒸留水や人工海水を用いたベントナイト－地下水反応試験に基づき構築した間隙水化学モデルに対し，より複雑な実際の地下水（幌延の深部地下水）を用いた懸濁系での試験を実施しモデルの適用性を検討した。その結果，固液比が比較的小さい条件では試験結果とモデルの整合は良好であるが，固液比が大きくなるに従いその差が大きくなる傾向があること，またその相違の原因として試験溶液からの脱ガスの影響や潜在的には溶存有機物・微生物による影響も示唆され，これらにより，実際の地下水のような複雑な溶液を対象とした場合のモデルの適用範囲，および試験実施上の留意事項を具体的に示した（磯貝・笹本, 2010）。

これらの成果により，具体的な地質環境が与えられた場合の地下水・間隙水化学を設定する上でのアプローチやモデルの適用範囲等が具体化され，設計・性能評価上必要な水質を設定する上で重要となる技術基盤が整備された。

今後の課題：

地球化学情報の統合化作業フローに従い，具体的な適用例の検討が不十分な技術的検討項目について，国内外の既存文献あるいは地下研究施設での実測データ等の知見・情報に基づいた適用事例の拡充・整理を行う。
地下水組成や緩衝材間隙水組成を設定する上で考慮すべき不確実性要因とその影響幅について，核種移行パラメータ設定への影響と関連づけた整理を行う。

複雑な溶液および圧縮系でのベントナイト－地下水反応試験の手順や手法の改良，およびそれら試験研究を通じての既存モデルの適用範囲の確認と適用性向上のためのモデルの改良・高度化を行う。

参考文献：

1. M. Yui, H. Sasamoto and R. C. Arthur：“Geostatistical and geochemical classification of groundwaters considered in safety assessment of a deep geologic repository for high-level radioactive wastes in Japan”, Geochemical Journal, Vol. 38, No.1, pp.33-42

(2004).
2. 小田治恵, 柴田雅博, 油井三和 ：“地層処分研究開発第 2 次取りまとめにおける緩衝材間隙水化学の評価”, JNC TN8400 99-078 (1999).
3. 牧野仁史, 澤田淳, 前川恵輔, 柴田雅博, 笹本広, 吉川英樹, 若杉圭一郎, 小尾繁, 濱克宏, 操上広志, 國丸貴紀, 石井英一, 竹内竜史, 中野勝志, 三枝博光, 竹内真司, 岩月輝希, 太田久仁雄, 瀬尾俊弘 ：“地質環境の調査から物質移行解析にいたる一連の調査・解析技術－2 つの深地層の研究施設計画の地上からの調査研究段階（第 1 段階）における地質環境情報に基づく検討－”, JNC TN1400 2005-021 (2005).
4. 磯貝武司, 神徳敬, 笹本広 ：“圧縮ベントナイト中の間隙水測定手法の検討”, 原子力バックエンド研究, 11, No.1, pp.29-36 (2004).
5. 日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金管理センター ：“高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する性能評価技術高度化研究”, JAEA-Research 2006-091 (2006).
6. 日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金管理センター ：“高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する性能評価及びモニタリング技術高度化研究”, JAEA-Research 2008-060 (2008).
7. H. Sasamoto, M. Yui and K. Hama ：“A preliminary interpretation of groundwater chiemsitry in the Horonobe area”, Water-Rock Interaction, Bullen & Wang (eds), pp.385-389 (2007).
8. 磯貝武司, 笹本広 ：“幌延地下水を用いたベントナイト－地下水反応試験－バッチ試験の結果とモデル化－”, JAEA-Research 2009-059 (2010).

2.2.2 ガラスの溶解

目的：

幅広い地質環境条件（地下水化学，地下水流量等）や人工バリア材料との相互作用を考慮して，より現実的なガラスの長期溶解と核種浸出に関する知見を拡充し，それらの現象理解に基づく評価手法を提示する。

平成 17 年までの成果：

第 2 次取りまとめのレファレンスケースにおける溶解速度は，溶存ケイ酸濃度が飽和に達した条件での長期溶解速度データに基づき保守的に設定し，表面積は，固化体製造時およびオーバーパック腐食生成物の応力による割れの影響を考慮し，幾何学形状の 10 倍と保守的に仮定した。また，二次鉱物の生成による溶解反応の促進の可能性を考慮し，溶解速度をレファレンスケースの 10 倍とするデータ不確実性ケースを設定した。

第 2 次取りまとめ以降は，ガラス表面の変質層の形成がガラス溶解や核種浸出の長期挙動に与える影響について，実験データやナチュラルアナログ研究を拡充するとともに，それらの研究成果に基づき，水和変質を考慮したモデルを構築し，第 2 次取りまとめで用いたモデルとパ

ラメータおよびその評価結果の保守性を示した（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_3.3.1；Mitsui and Aoki, 2001；Inagaki et al., 2006；Yamaguchi et al., 2006；Yoshikawa et al., 2005）。

平成 21 年度までの成果：

平成 17 年以降は，ガラスの長期溶解挙動について，環境条件や人工バリア材料との相互作用の影響に着目し，現象の理解およびそれに基づくモデル化を行うための基盤整備を進めた。環境条件の影響については，液性および温度等の環境条件の制御が可能なマイクロリアクタ流水試験法を開発し，これらの環境条件を変数として組み込んだ溶解速度モデルの構築に活用した（Inagaki et al., 2009；Makigaki et al., 2009）。人工バリア材料である緩衝材との相互作用については，現実的に起こりえる溶存ケイ酸の緩衝材中の移行の影響を考慮した評価を行い，ガラス固化体の溶解速度が低下することにより，全量溶解にかかる時間が第 2 次取りまとめのレファレンスケースに比べ長くなるとともに（7 万年→80 万年），人工バリアからの可溶性核種の最大移行率が低下する可能性を示した（Mitsui et al., 2009）。

核種浸出については，実ガラスを用いた浸出試験により，可溶性核種がガラス固化体の変質に伴って生成する二次鉱物へ取り込まれることを確認し，可溶性核種がガラス固化体の溶解と調和的に浸出するとした第 2 次取りまとめでの取り扱いが保守的である可能性を示した（藤原ほか, 2007）。

この他，ガラスの溶解速度に関する既存の知見の全体像を把握できるように，公開情報を調査・整理し，「ガラスの溶解に関するデータベース」（ガラス DB）として整備した（林ほか, 2005；林ほか, 2008）。

以上の研究成果により，溶解速度モデルの高度化に必要となるデータ取得手法の整備，人工バリア材料との相互作用を考慮した評価手法の提示，核種浸出に関する知見の拡充を行うことができた。また，ガラス DB を整備，公開することで，処分事業や国の安全規制を支援するツールを提供することができた。

今後の課題：

「ガラスの溶解に関するデータベース」については，広く利用できるように日本原子力研究開発機構　地層処分研究開発部門ホームページで公開する。変質層の保護的効果およびオーバーパックとの相互作用によって形成する可能性のある鉄ケイ酸塩鉱物等の二次鉱物生成による溶存ケイ酸の消費の影響についての理解を深め，これらの現象を考慮したガラス溶解モデルを構築し，より現実的な評価手法を提示する。

核種の非調和的浸出挙動のメカニズムの理解を深め，それに基づく核種浸出モデルの高度化を行う。

参考文献：

1. S. Mitsui and R. Aoki：“Effect of a siliceous additive on aqueous alteration of waste glass with engineered barrier materials”, Journal of Nuclear Materials, vol.298, 1, pp. 184-191 (2001).
2. Y. Inagaki, A. Shinkai, K. Idemitsu, T. Arima, H. Yoshikawa and M. Yui：“Aqueous alteration of Japanese simulated waste glass P0798: Effects of alteration-phase formation on alteration rate and cesium retention”, Journal of Nuclear Materials, vol.354, pp.171-184 (2006).
3. K. Yamaguchi, Y. Inagaki, T. Saruwatari, K. Idemitsu, T. Arima, H. Yoshikawa and M. Yui：“Kinetics of Aqueous Alteration of P0798 Simulated Waste Glass in the Presence of Bentonite”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management (Mat. Res. Soc. Symp. Proceedings vol.932), pp.385-392 (2006)
4. H. Yoshikawa, K. Futakuchi, M. Hiroki and M. Yui：“Natural analogue of nuclear waste glass in a geologic formation-Study on long-term behavior of volcanic glass shards collected from drill cores-”, Proceedings of the International Symposium NUCEF 2005 February 9-10, 2005 Techno Community Square RICOTTI, Tokai-mura, Ibaraki-ken, JAPAN , JAERI-Conf 2005-007, pp.259-263 (2005).
5. Y. Inagaki, S. Mitsui, H. Makigaki, K. Idemitsu, T. Arima, T. Banba and K. Noshita：“Measurement of HLW glass dissolution/alteration kinetics by using micro-reactor flow-through test method”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management (Mat. Res. Soc. Symp. Proceedings vol. 1193), pp.219-228 (2009).
6. H. Makigaki, Y. Inagaki, K. Idemitsu, T. Arima, S. Mitsui, T. Banba and K. Noshita：“Measurement of initial dissolution rate of P0798 simulated HLW glass by using micro-reactor flow-through test method”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management (Mat. Res. Soc. Symp. Proceedings vol. 1193), pp.307-314 (2009).
7. S. Mitsui, H. Makino, M. Inagaki and T. Ebina：“Impact of Silicon Migration through Buffer Material on the Lifetime of Vitrified Waste”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management (Mat. Res. Soc. Symp. Proceedings vol. 1193), pp.397-404 (2009).
8. 藤原健壮, 小原幸利, 菊地博, 小田倉誠美, 黒羽光彦 ：“実高レベル放射性廃棄物ガラスを用いた浸出試験”, 日本原子力学会 2007 年秋の大会予稿集, I13, p.394 (2007).
9. 林真紀, 佐竹憲治, 吉川英樹, 油井三和 ：“ガラスの溶解速度データベースの構築”, JNC TN8400 2005-008 (2005).
10. 林真紀, 笹本広, 吉川英樹 ：“ガラスの溶解に関するデータベースの改良”, JAEA-Data/Code 2008-008 (2008).

2.2.3 放射性元素の溶解・沈殿および熱力学データベース整備

目的：

溶解度計算に用いる基盤情報となる熱力学データベース（TDB）の信頼性向上，および与えられた地質環境条件での性能評価に用いる放射性元素の溶解度の体系的な設定手法を提示する。

平成 17 年までの成果：

第 2 次取りまとめでは，核種移行解析用の溶解度パラメータを，当時の最新の知見に基づき整備した熱力学データベース（JNC-TDB）（Yui et al., 1999）および溶解度制限固相に関する現象理解等に基づき，また我が国での一般的な地質環境条件を類型化して想定された地下水条件（2.2.1）を対象に，熱力学的平衡論に基づく溶解度計算と利用可能な溶解度実測値とを組み合わせることで設定した。

平成 17 年までは，第 2 次取りまとめにおいて課題とされた熱力学データの信頼性向上のために，核種移行解析上重要であるもののデータ充足の必要性が指摘された 4 価アクチニドやセレンなどの重要元素の溶解度等の実験データを取得するとともに（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_2.1；Kitamura and Kohara, 2002；Kitamura and Kohara, 2004；Kitamura et al., 2004；Fujiwara et al., 2003；Fujiwara et al., 2005；藤原ほか, 2004），JNC-TDB の更新に向けて変更が必要なデータ等を明らかにするための作業の一環として，それら実験値から得られた最新の熱力学データを JNC-TDB のデータと比較するなどの分析を進めた。また，経済協力開発機構原子力機関(OECD/NEA)において進められている TDB プロジェクトに積極的に参加し，信頼性の高い TDB を整備するための国際的なレベルでの専門的知識や技術を蓄積した。あわせて，TDB の利用環境の整備として，JNC-TDB や OECD/NEA の TDB を各種地球化学計算コード用フォーマットに変換し原子力機構の HP で公開した（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_2.1；熱力学・収着・拡散データベースホームページ；吉田・笹本, 2004；吉田・柴田, 2005）。さらに，溶解度設定で重要となる溶解度制限固相のより現実的な設定に向けて，アクチニド(IV)酸化物の 90℃における非晶質から結晶質への変遷（Rai et al., 2000），およびラジウム（第 2 次取りまとめにおいて簡易的な共沈モデルを用いて溶解度を評価）やアクチニド(IV)（Rai et al., 2004）の共沈／固溶体の生成による溶解度の制限に関して実験を通じた知見の蓄積を図った（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_3.3.2）。

平成 21 年度までの成果：

平成 17 年以降は，与えられた地質環境条件に対して，より現実的な溶解度の設定を行えるようにするために，基盤情報の信頼性の向上と技術の体系化に向けての作業を，値の誤差や不確実性の取り扱いの明示などの不確実性評価の観点，および熱力学データの選定経緯に係る透明性や追跡性の確保などの品質保証の観点を重視しつつ進めた。

これらの一連の作業の中では，最も重要な基盤情報となる熱力学データベースの品質向上を

最優先課題として取り組み，JNC-TDB を最新の研究成果を取り込みつつ性能評価上重要な溶存化学種や固相のデータを中心に更新する形で JAEA-TDB を完成させた。JAEA-TDB は，JNC-TDB と比べて主に以下の特長を有する：

- TDB の信頼性や透明性の向上のために，OECD/NEA の TDB プロジェクトが作成した品質保証のためのガイドラインに加え，モデルや化学アナログを用いたデータの拡充を，そのデータの信頼性を確保しつつ実施するためのガイドライン（Kitamura et al., 2010a）を作成し，それに沿って更新作業を実施した。
- 地層処分対象の TRU 廃棄物の性能評価にも適用できるように，対象とする元素数を JNC-TDB の 21 から 25 に拡大した。また，TRU 廃棄物中に含まれる有機物との錯生成に関する熱力学データ（Rai et al., 2009）等を新たに選定し追加した（三原, 2010）。
- JNC-TDB が公開された 1999 年以降に公開された OECD/NEA の TDB 選定値を，その信頼性を確認した上で取り込むとともに，JNC-TDB 選定値についても，新規文献が公開されているものについてはレビューを行い，必要に応じ熱力学データの再選定を行った（Kitamura et al., 2010a；北村ほか, 2009；Kitamura et al., 2010b；藤原ほか, 2010a；藤原ほか, 2010b；土井ほか, 2010；吉田・北村, 2010a；吉田・北村, 2010b；Rai et al., 2008）。
- 熱力学データの選定値の信頼性の判断や不確実性評価のための重要な情報となる誤差を付与した。
- 実験による 4 価アクチニド元素等の熱力学データの取得（Fujiwara and Kohara, 2007）を継続するとともに，これまで熱力学データが存在していなかった，ケイ素等を配位子として含む 4 価アクチニドの溶解度（Rai et al., 2008）やセレンの酸化還元反応における標準電極電位（土井・油井, 2009）の結果などを TDB 整備に反映させた。
- TDB 利用環境の拡充として，JAEA-TDB とあわせて OECD/NEA の最新の TDB を各種地球化学計算コード用フォーマットに変換し，原子力機構 HP で公開した（吉田・北村, 2007）。

また，より現実的な溶解度の設定に向けて，方解石等に対するラジウム等アルカリ土類金属の取り込みについての実験的研究に基づき固溶体モデル（Yoshida and Yoshikawa, 2009；Yoshida et al., 2008）を開発するとともに，処分環境におけるラジウムの濃度を評価した（Yoshida et al., 2009）。その結果，人工バリアでのラジウム濃度は第 2 次取りまとめに比べ高く評価されるものの，天然バリア中のラジウム（Ra-226）濃度はトリウム（Th-230）との放射平衡で規定され，第 2 次取りまとめと同程度の核種移行率となることを示した。

これらにより，核種移行解析で用いる溶解度の導出における最も重要な基盤情報である熱力学データの信頼性の確保と拡充，熱力学データ導出に係る検討経緯の追跡性と透明性の向上などにより，専門家およびステークホルダーの合意形成を支援することが可能となった。

今後の課題：

溶解度測定の標準的手法（考慮すべき環境（入力）条件，作業手順，判断内容等）の確立を

行う。

JAEA-TDB で誤差が評価されていない熱力学データへの誤差の付与を行うとともに，平成21 年までは対象としなかった地球化学反応に関する熱力学データの更新作業を実施する。また，熱力学データの誤差を溶解度計算結果に反映させる手法・手順の整備や，JAEA-TDB の熱力学データの導出で用いた活量補正モデル（SIT 法）の地球化学計算コードへの組み込み方法を検討し，熱力学データの導出と整合した活量補正法を用いて，与えられたイオン強度での溶解度計算がより正確に行えるような環境を整備する。

TDB を用いた溶解度計算時に必要となる溶解度制限固相の設定について，客観性および追跡性が明確になるような手法を確立する。

以上の成果を取り込みながら，具体的な地質環境条件やそのシナリオに応じた変遷が与えられた場合に柔軟に対応可能な溶解度設定手法の体系化を進める。

参考文献：

1. M. Yui, J. Azuma and M. Shibata：“JNC thermodynamic database for performance assessment of high-level radioactive waste disposal system”, JNC TN8400 99-070 (1999).
2. A. Kitamura and Y. Kohara：“Solubility of Np(IV) in carbonate media”, J. Nucl. Sci. Technol., Suppl. 3, pp.294 – 297 (2002).
3. A. Kitamura and Y. Kohara：“Carbonate complexation of neptunium(IV) in highly basic solutions”, Radiochim. Acta, 92, pp.583 – 588 (2004).
4. A. Kitamura, M. Shibata and H. Kitao：“Solubility measurement of iron-selenium Compounds under reducing conditions”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 807, pp.609 – 614 (2004).
5. K. Fujiwara, H. Yamana, T. Fujii and H. Moriyama：“Determination of uranium(IV) hydrolysis constants and solubility product of UO2・xH2O”, Radiochim. Acta, 91(6), pp.345 – 350 (2003).
6. K. Fujiwara, H. Yamana, T. Fujii, K. Kawamoto, T. Sasaki and H. Moriyama：“Solubility of uranium(IV) hydrous oxide in high pH solution under reducing condition”, Radiochim. Acta, 93(6), pp.347 – 350 (2005).
7. 藤原健壮，小原幸利，森孝司：“Np(IV)水和酸化物の溶解度積”, JNC-TN8400 2004-021 (2004).
8. 吉田泰，笹本広：“OECD/NEA で整備された熱力学データベース利用環境の整備（その 1）― Np および Pu の熱力学データ―”, JNC-TN8400 2003-027 (2004).
9. 吉田泰，柴田雅博：“OECD/NEA で整備された熱力学データベース利用環境の整備 （その 2)― Tc, U, Np, Pu, Am およびAuxiliary の熱力学データの更新―”, JNC-TN8400 2004-025 (2005).

10. D. Rai, D. A. Moore, C. S. Oakes and M. Yui：“Thermodynamic model for the solubility of thorium dioxide in the Na+-Cl--OH--H2O system at 23 °C and 90 °C”, Radiochim. Acta, 88(5), pp.297 – 306 (2000).
11. D. Rai, N. J. Hess, M. Yui, A. R. Felmy and D. A. Moore：“Thermodynamic and solubility of (UxNp1-x)O2(am) solid solution in the carbonate system”, Radiochim. Acta., 92(9-11), pp.527 – 535 (2004).
12. A. Kitamura, K. Fujiwara, R. Doi, Y. Yoshida, M. Mihara, M. Terashima and M. Yui：“JAEA thermodynamic database for performance assessment of geological disposal of high-level radioactive and TRU wastes”, JAEA-Data/Code 2009-024 (2010a).
13. D. Rai, M. Yui, D. A. Moore and L. Rao：“Thermodynamic model for ThO2(am) solubility in isosaccharinate solutions”, J. Solution Chem., 38(12), pp.1573 – 1587 (2009).
14. 三原守弘：“JAEA-TDB における有機物関連の熱力学データの整備”, JAEA-Review 2009-060 (2010).
15. 北村暁, 桐島陽, 斉藤拓巳, 澁谷早苗, 杤山修, 油井三和：“高レベルおよび TRU 廃棄物地層処分の性能評価のための JAEA 熱力学データベース：コバルトおよびニッケルの熱力学データ選定”, JAEA-Research 2009-037 (2009).
16. A. Kitamura, K. Fujiwara and M. Yui：“JAEA thermodynamic database for performance assessment of geological disposal of high-level and TRU wastes: Refinement of thermodynamic data for trivalent actinoids and samarium”, JAEA-Review 2009-047 (2010b).
17. 藤原健壮, 北村暁, 油井三和：“高レベルおよび TRU 廃棄物地層処分の性能評価のための JAEA 熱力学データベース：4 価トリウム，ウラン，ネプツニウム，プルトニウムの熱力学データの再選定”, JAEA-Review 2009-059 (2010a).
18. 藤原健壮, 北村暁, 油井三和：“高レベルおよび TRU 廃棄物地層処分の性能評価のための JAEA 熱力学データベース：IV 価ジルコニウムの熱力学データの再選定”, JAEA-Review 2009-058 (2010b).
19. 土井玲祐, 北村暁, 油井三和：“高レベルおよび TRU 廃棄物地層処分の性能評価のための JAEA 熱力学データベース：セレンの熱力学データ選定”, JAEA-Review 2009-051 (2010).
20. 吉田泰, 北村暁：“Sr および Ra の液中化学種および固相種の熱力学データの検討”, JAEA-Review 2009-080 (2010a).
21. 吉田泰, 北村暁：“Pb の水酸化物錯体および塩化物錯体の熱力学データの検討”, JAEA-Review 2009-065 (2010b).
22. D. Rai, M. Yui, D. A. Moore, G. J. Lumetta, K. M. Rosso, Y. Xia, A. R. Felmy and F. N. Skomurski：“Thermodynamic model for ThO2(am) solubility in alkaline silica Solutions”, J. Solution Chem., 37(12), pp.1725 – 1746 (2008).
23. K. Fujiwara and Y. Kohara：“Hydrolysis constants of tetravalent neptunium by using solvent extraction method”, Radiochim. Acta, 96(9-11), pp. 613 – 616 (2007).

24. 土井玲祐，油井三和 ：“Se(IV)/Se(VI)の標準電極電位に関するサイクリックボルタンメトリーによる実験的研究”，原子力バックエンド研究, 16(1) (2009).
25. 吉田泰，北村暁 ：“OECD/NEA で選定された熱力学データの利用環境の整備（その 3)― Ni, Se, Zr および 有機物配位子の熱力学データベースファイルの作成 ―”，JAEA-Data/Code 2007-009 (2007).
26. Y. Yoshida and H. Yoshikawa ： “Estimation of Ra concentration in High-level radioactive waste disposal system”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 1124, pp.413-420 (2009).
27. Y. Yoshida, H. Yoshikawa and T. Nakanishi：“Partition coefficient of Ra and Ba in calcite”, Geochemical Journal, 42(3), pp.295 – 304 (2008).
28. Y. Yoshida, T. Nakazawa, H. Yoshikawa and T. Nakanishi：“Partition coefficient of Ra in gypsum”, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 280(3), pp.541 – 545 (2009).

2.2.4 緩衝材および岩盤中の核種の収着・拡散およびデータベース整備

目的：

与えられた地質環境条件での緩衝材中および岩盤中での核種の収着・拡散パラメータの体系的な設定手法を提示する。このために，その基礎となる信頼性の高いデータ取得手法と現象論的モデルおよびデータベースを構築する。

平成 17 年までの成果：

第 2 次取りまとめでは，幅広い地質環境条件を対象として，収着・拡散データの実測値の調査・取得，それらのデータベース化（澁谷ほか, 1999；Sato, 1999）を行い，これに基づき，我が国の一般的な地質環境条件に対する収着パラメータ（収着分配係数）および拡散パラメータ（拡散係数）を設定した。この際，緩衝材については，実際の処分環境で想定すべき圧密状態での実測値を重視する観点から主に拡散データをもとに収着・拡散パラメータを設定し，岩盤については，岩種や地下水条件等が類似する系で取得されたバッチ収着試験のデータから収着パラメータを，拡散試験のデータから拡散パラメータを設定した。

第 2 次取りまとめ以降，緩衝材や岩石を対象に重要核種の収着・拡散データの取得を，特に支配的な収着反応や拡散メカニズムの確認やモデルの適用性確認に主眼をおいて実施した（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_3.3.3，例えば，Xia et al., 2006；Sato and Suzuki, 2003）。収着データベースについては，最新データの拡充と JNC-SDB の日本原子力研究開発機構　地層処分研究開発部門ホームページでの公開および検索機能の提供などの利用環境整備を進めたほか(陶山・笹本, 2004)，データベースに含まれる収着データの信頼度評価手法の開発という国際的にも例のない取り組みを開始した。また，収着・拡散モデルの開発については，OECD/NEA の収着プロジェクト/フェーズⅡ(OECD/NEA, 2005)に参加して熱力学的収着モデルの国際的

な最新の知見と課題を共有化した(神徳ほか, 2004)ほか, 圧縮ベントナイト中の間隙水や核種収着挙動の基礎的理解に対して分子動力学計算手法が有効となる可能性を示した(鈴木・河村, 2001)。また，地質環境の調査・評価から核種移行解析に至る一連の手法開発（2.1）の一環として，岩石に対する収着分配係数の設定を，第 2 次取りまとめと同様の収着データベースを用いる手法に加え，対象地域の岩石に対する実測値や収着モデルによる環境条件依存性を考慮して行う手法を例示した（牧野ほか, 2005）。

平成 21 年度までの成果：

平成 17 年以降は，より信頼性の高い核種移行パラメータの設定を行うことのできる方法論の構築を目指し, その方法論的基盤となる, ①実験によるデータ取得, ②実測値データベース, ③現象論的モデルおよびデータベース，のそれぞれについて，特に，圧密系での複雑な収着・拡散の複合現象の理解とそれに基づく各現象に関するデータの整合的評価，および実際の地質環境条件への柔軟な対応を重視しつつ，後述する研究開発を実施した。なお，①と③の一部については，平成 19 年度より経済産業省からの受託事業の一環として実施された（日本原子力研究開発機構, 2008；日本原子力研究開発機構, 2009-1；2009-2；日本原子力研究開発機構, 2010）。

実験によるデータ取得については，圧密系の信頼性の高いデータを多様な核種／環境条件下で取得可能な手法として，拡張型 Through-diffusion 法（複数の濃度変化を取得し，その同時解釈によってパラメータを効率的かつ高精度で導出する手法)を構築した(Tachi et al., 2009a)。緩衝材については，この手法によって，Cs と I の収着／拡散データの塩濃度依存性を精度良く取得し，さらにその傾向性を説明可能なモデルとして熱力学的収着モデルと狭隘間隙表面の電気的相互作用を考慮した拡散モデルを組み合わせた収着・拡散統合モデルを構築した(Tachi et al., 2009a)。さらに，これら実験／モデル化手法の Np(V)などのより高収着性で複雑な化学種への適用可能性を示した(Tachi et al., 2010)。その他，高アルカリ環境などの多様な環境条件での拡散データを取得した(Ishidera et al., 2008）。岩石については，幌延の堆積岩試料を対象に，緩衝材と同じ実験手法の適用により Cs，I 等の塩濃度依存性データを取得し，バッチ系と圧密系での収着データの整合性を確認するとともに，これら一連のデータが，岩石試料に含まれる粘土鉱物(スメクタイトおよびイライト)が収着・拡散に支配的に寄与すると仮定したモデルによって解釈可能なことを示した(Tachi et al., 2009b； Tachi et al., 2009c)。その他，幌延の堆積岩を対象に，Cs の収着に及ぼす共存イオン影響評価(石寺ほか, 2008)，X 線 CT を用いた間隙構造分析(Takahashi et al., 2009)などモデル化のための基礎情報の蓄積を図った。

実測値データベースについては，過去のデータベース（JNC-SDB など）に対して，情報の量と質を拡充するとともに，利用性を向上させるための検索や結果処理の機能等を大幅に拡充したうえで，それらをリニューアルする形で平成 20 年度末に JAEA-SDB/DDB として日本原子力研究開発機構　地層処分研究開発部門ホームページで公開した(舘ほか, 2009； 熱力学・収着・拡散データベースホームページ)。ここで収着データベース（JAEA-SDB）においては，

様々な条件・手法で得られた信頼度の異なる膨大なデータ群から信頼性の高いデータを効率的に抽出できるようにするため，個々のデータの信頼度評価を，原子力学会標準(日本原子力学会, 2006a ； 日本原子力学会, 2006b)等も参考に独自に策定したデータ信頼度評価のガイドラインに基づいて実施した(Ochs et al., 2007；Saito et al., 2008；Ochs et al., 2010)。この信頼度評価の結果は，データベースに付加することで効率的かつ追跡性のある形で利用できるようにした(舘ほか, 2009)。さらに幌延の環境条件を対象とした収着パラメータの設定という実際的な適用を通じて，これら情報と機能の有効性を確認した(Ochs, et al., 2008)。一方，拡散データベース（JAEA-DDB）については，従来国内岩石に限定していた対象に緩衝材を加え，さらに種々の緩衝材条件で取得された拡散データを部分モンモリロナイト密度で整理することで統一的に取扱えるようにするとともに，データの信頼性に係わる情報を付加するなどして，拡散データを有効利用できるようにした(栃木・舘, 2009； 栃木・舘, 2010)。なお，平成 21 年度末の段階で，収着データベースは約 28,000 件の収着分配係数，拡散データベースは約 2,400 件の拡散係数を含んでいる。

さらに，核種移行解析で用いるパラメータ設定を支援するツールを整えることを目的として，現象理解に基づく収着・拡散モデルおよびそのモデルの基本定数を集約したデータベースの体系的な整備（現象論的モデル／データベースの開発）を開始した。これまでに，その最初のステップとして，一貫性と整合性のあるモデル基本定数導出のアプローチを構築するとともに，それに従って主要な核種／環境条件での収着・拡散データを対象としたモデル基本定数の導出と検証を行い，現象論的モデル／データベースのプロトタイプを構築した(舘ほか, 2010)。本開発においては，OECD/NEA の収着プロジェクト(OECD/NEA Sorption Project ホームページ)との連携および国際ワークショップの開催などを通じて最新の国際動向や国際的な専門家の知見を開発計画に反映した(Tachi and Yui, 2010)。

これらの成果によって，収着・拡散パラメータ設定の基盤となる①データ取得手法，②実測値データベース，③現象論的モデル／データベースのそれぞれについて信頼性と実用性の高い手法が整備され，今後の処分事業や安全規制の各段階に応じて，これらの手法の適切な組合せによる収着・拡散パラメータの設定が可能になると考える。また，データベース開発におけるデータの信頼性評価，情報の追跡性や透明性の向上に係る成果は，今後の処分事業や安全規制における品質保証や合意形成の観点からも有益な情報となることが期待される。これらの一連の技術や情報を活用したパラメータ設定手法については，別途知識マネジメントシステムの開発で構築してきたコミュニケーションツールの試行の中で，その妥当性の確認や更なる検討課題についての議論を行った。

今後の課題：

データ取得手法の高収着性核種を含む多様な核種／条件への適用，実測値データベースおよび現象論的モデル／データベースに関する情報や適用事例の充実など，これまでに構築してきた一連の技術基盤の信頼性向上を図るとともに，収着・拡散パラメータの設定と不確実性の評

価の事例を深地層の研究施設計画との連携等を通じて蓄積しつつ，実際の地質環境により実践的に対応していくための体系的な方法論として整備していく。

参考文献：

1. 澁谷朝紀，柴田雅博，陶山忠宏：“核種のベントナイトおよび岩石に対する収着データベース”, JNC TN8410 99-050 (1999).
2. H. Sato：“Diffusivity Database (DDB) for Major Rocks: Database for the Second Progress Report”, JNC TN8400 99-065 (1999).
3. X. Xia, G. Kamei, K. Iijima, M. Shibata, T. Ohnuki and N. Kozai：“Selenium Sorption in a Sedimentary Rock/Saline Groundwater System and Spectroscopic Evidence”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIX, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 932, pp.933-942 (2006).
4. H. Sato and S. Suzuki：“Fundamental study on the effect of an orientation of clay particles on diffusion pathway in compacted bentonite”, Applied Clay Science, 23, pp.51-60 (2003).
5. 陶山忠宏，笹本広：“JNC 収着データベース(JNC-SDB)の更新：1998 年～2003 年までに公開された文献データの追加”, JNC TN8410 2003-018 (2004).
6. OECD/NEA：“NEA Sorption Project. Phase II: Interpretation and Prediction of Radionuclide Sorption onto Substrates Relevant for Radioactive Waste Disposal Using Thermodynamic Sorption Models”, By Davis, J. , Ochs, M. , Olin, M. , Payne, T. and Tweed, C., OECD-NEA, Paris (2005).
7. 牧野仁史，澤田淳，前川恵輔，柴田雅博，笹本広，吉川英樹，若杉圭一郎，小尾繁，濱克宏，操上広志，國丸貴紀，石井英一，竹内竜史，中野勝志，三枝博光，竹内真司，岩月輝希，太田久仁雄，瀬尾俊弘：“地質環境の調査から物質移行解析にいたる一連の調査・解析技術 ―２つの深地層の研究施設計画の地上からの調査研究段階（第１段階）における地質環境情報に基づく検討―”, JNC TN1400 2005-021 (2005).
8. 神徳敬，柴田雅博，吉田泰，陶山忠宏：“岩石およびベントナイトに対する核種の収着モデルの検討（OECD/NEA Sorption Project）”, JNC TN8400 2003-048 (2004).
9. 鈴木覚，河村雄行：“分子動力学法によるスメクタイトに対する Sr の収着構造の研究”, サイクル機構技報, No.13, pp.65-75 (2001).
10. Y. Tachi, K. Yotsuji, Y. Seida and M. Yui：“Diffusion of Cesium and Iodine in Compacted Sodium Montmorillonite Under Different Saline Conditions”, In: Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXIII, Mat. Res. Soc. Sym. Proc., Vol.1193, pp.545-552 (2009a).
11. Y. Tachi, T. Nakazawa, M. Ochs, K. Yotsuji, T. Suyama, Y. Seida, N. Yamada and M. Yui：“Diffusion and sorption of neptunium(V) in compacted montmorillonite：effects of carbonate and salinity”, Radiochimica Acta (2010).
12. T. Ishidera, S. Miyamoto and H. Sato：“Effect of Sodium Nitrate on the Diffusion of Cl-

and I- in Compacted Bentonite", Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol.45, pp.610-616 (2008).

13. Y. Tachi, Y. Seida, R. Doi, X. Xia and M. Yui："Sorption and Diffusion of Cs in Horonobe- URL's Sedimentary Rock：Comparison and Model Prediction of Retardation Parameters from Sorption and Diffusion Experiments", In: Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXII, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1124, pp.573-579 (2009b).
14. Y. Tachi, Y. Seida, K. Yotsuji and M. Yui："Ionic diffusion and retardation in Horonobe sedimentary rock: Clay-based model approach", Geochimica et Cosmochimica Acta, 73(13) Supplement 1, A1302 [Goldschmidt Conference 2009 Abstracts] (2009c).
15. 石寺孝充, 黒澤精一, 木部智："幌延地域に分布する堆積岩類への Cs の収着に及ぼすイライト含有率及び K の影響", 原子力学会 2008 秋の大会　予稿集, L45 (2008).
16. H. Takahashi, Y. Seida and M. Yui："3D X-Ray CT and Diffusion Measurements to Assess Tortuosity and Constrictivity in a Sedimentary Rock", Diffusion fundamentals III Conference Abstract (2009).
17. 舘 幸男, 栃木善克, 陶山忠宏, 齋藤好彦, M. Ochs, 油井三和："地層処分安全評価のための核種の収着・拡散データベースシステムの開発", JAEA-Data/Code 2008-034 (2009).
18. 日本原子力学会："収着分配係数の測定方法－深地層処分のバリア材を対象とした測定の基本手順：2006", （社）日本原子力学会, AESJ-SC-F008:2006 (2006a).
19. 日本原子力学会："【標準委員会　技術レポート】収着分配係数の測定方法－浅地中処分のバリア材を対象としたバッチ法の基本手順及び深地層処分のバリア材を対象とした測定の基本手順－", （社）日本原子力学会, AESJ-SC-TR001:2006 (2006b).
20. M. Ochs, Y. Saito, A. Kitamura, M. Shibata, H. Sasamoto and M. Yui："Evaluating and Categorizing the Reliability of Distribution Coefficient Values in the Sorption Database", JAEA-Technology 2007-011 (2007).
21. Y. Saito, M. Ochs, S. Kunze, A. Kitamura, Y. Tachi and M. Yui："Evaluating and Categorizing the Reliability of Distribution Coefficient Values in the Sorption Database (2)", JAEA-Technology 2008-018 (2008).
22. M. Ochs, T. Suyama, S. Kunze, Y. Tachi and M, Yui："Evaluating and Categorizing the Reliability of Distribution Coefficient Values in the Sorption Database (3)", JAEA-Data/Code 2009-021 (2010).
23. M. Ochs, S. Kunze, Y. Saito, A. Kitamura, Y. Tachi and M. Yui："Application of the Sorption Database to Kd -setting for Horonobe Rocks", JAEA-Research 2008-017 (2008).
24. 栃木善克, 舘幸男："緩衝材及び岩石中での核種の拡散データベースの整備", JAEA-Data/Code 2008-035 (2009).
25. 栃木善克, 舘幸男："緩衝材及び岩石中での核種の拡散データベースの整備－海外の緩衝材データの拡充とその活用法－", JAEA-Data/Code 2009-029 (2010).
26. 舘幸男, 四辻健治, 陶山忠宏, M. Ochs, 油井三和："地層処分安全評価のための現象論的収

着・拡散モデル/データベースの開発－ベントナイト系プロトタイプモデル/データベースの開発－", JAEA-Research 2009-069 (2010).
27. Y. Tachi and M. Yui (Eds.) : "Proceedings of the international workshop on mechanistic understanding of radionuclide migration in compacted / intact systems", JAEA-Review 2009-073 (2010).
28. 日本原子力研究開発機構 : "平成 19 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム化学影響評価高度化開発報告書" (2008).
29. 日本原子力研究開発機構 : "平成 20 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム化学影響評価高度化開発報告書" (2009).
30. 日本原子力研究開発機構 : "平成 21 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム化学影響評価高度化開発報告書" (2010).

2.2.5　コロイド，有機物の影響

目的：

核種移行に及ぼすコロイドおよび有機物の影響評価に必要な技術の整備と体系化を図るとともに，それらを用いて，影響が顕在化する条件の明確化，性能評価における取り扱い方法の具体化を行う。

平成 17 年までの成果：

第 2 次取りまとめでは，コロイドが核種移行に及ぼす影響を，核種－コロイド相互作用を瞬時・線型・可逆と仮定した簡略なモデルを用い，またコロイド濃度およびコロイドへの核種の収着分配係数は文献値に基づき推定することで概略的に評価し，コロイド影響による線量の増加は数倍程度と見積もった。有機物については，定性的な検討からその影響は大きくないと評価した。ただし，影響の詳細な検討は，今後の具体的な地質環境での研究に依るとした。

第 2 次取りまとめ以降は，第 2 次取りまとめでの簡略なモデルによる影響評価や定性的な検討に対して，具体的な地質環境における影響を定量的に評価することを目的とした技術の整備を進めた（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_3.4.1）。まず，コロイド影響が顕在化に至る要件を整理し，その要件に沿った検討として，比較的単純な実験系において，コロイドの安定性と移行性(Kuno et al., 2002；上田ほか, 2002；黒澤, 2005），コロイドへの核種の収着特性（可逆/不可逆の判断を含む）に関するデータ取得と理論的モデルの検討（飯島ほか, 2004a）を実施した。また，コロイド影響を，核種－コロイド－岩石間の相互作用の反応速度も考慮して評価可能な核種移行計算コード（COLFRAC-MRL）の開発（上田ほか, 2004；Kurosawa et al., 2004；黒澤ほか, 2004a；黒澤ほか, 2004b）を行った。有機物についても，実地下水中の天然有機物濃度測定（亀井, 2000），有機物の緩衝材透過特性測定（飛塚ほか, 2005），および核種との相互作用に関する試験の実施とモデル化の検討（上田ほか, 2000；飯島ほか, 2004b)などを進め，具体的な地質環境に対応した影響評価に必要な個別技術を整備した（平成 17 年取りまと

め 分冊 3_3.4.2）。これらにより，限られた条件ではあるが，コロイド等が共存する状況での核種の移行挙動を，実測データに基づき，また，反応速度を考慮しつつ計算コードにより定量的に評価することが可能になった。

平成 21 年度までの成果：

平成 17 年以降は，具体的な地質環境が与えられた際の性能評価に適用できるよう，それまでに進めてきたコロイドおよび有機物の影響評価に必要な個別技術をより発展させるとともに，それらを体系的に組合せて適用することで，影響が顕在化する可能性のある環境条件を定量的に示した。

コロイドについては，具体的には，まず，地下水中のコロイドの存在と濃度を定量的に把握するために，人工バリア起源で存在する可能性が高いベントナイトコロイドについて，コロイドの安定性を決定する粒子間相互作用力の塩濃度依存性を調べるとともに（黒澤ほか, 2006），コロイド粒子径やコロイド生成量の流速依存性を調べ，コロイドの生成挙動と生成速度に関するデータを取得した(松本ほか, 2009；工学技術カーネル_2.2.2）。また，高 pH プルームにより母岩から生成する可能性のあるシリカコロイドについて，生成・沈着挙動および速度に関するデータを取得した（Kokubun et al., 2008；Niibori et al., 2009）。さらに，地下深部から採取された実地下水を対象とした天然コロイド濃度等の特性評価を行い，地下水採取や測定にともなう擾乱要因を整理し，その改善策を提示した（久野・笹本, 2008）。次に，より実際の地質環境に近い地下水－コロイド－岩石の 3 元系での核種のバッチ収着試験を実施し，Cs を対象としたデータ取得の標準的手法を整備（久野ほか, 2009）するとともに，鉱物への収着データを用いて核種のコロイドへの収着分配係数を推定できる収着モデルを整備した（Iijima et al., 2008；飯島ほか, 2009）。さらに，亀裂媒体中でのコロイド－岩石間の相互作用データをコロイド移行試験により取得した（Kuno et al., 2009）。得られた実測データ，モデル等を体系的に組み合わせることで，核種移行においてコロイド影響が顕在化に至る際のコロイド濃度，収着分配係数，コロイドからの脱離速度定数，地下水流速等の条件を定量的に示した（久野・笹本, 2010）。また，これらの知見は，スイス・グリムゼル試験場で実施中の国際共同研究 Colloid Formation and Migration (CFM)プロジェクト（Grimsel Test Site ホームページ）において，今後実施予定の原位置コロイド生成・核種移行試験の設計に役立てられる。

有機物については，実地下水から採取された天然有機物を対象とした有機物特性の測定（Terashima et al., 2008），核種－天然有機物の相互作用試験（寺島ほか, 2009）を実施し，それらの知見に基づき，熱力学的計算への適用を念頭において広範な地質環境条件に適用可能な核種－天然有機物相互作用モデルを検討した （Kitamura et al, 2010）。また，岩石中での核種の移行挙動への影響を把握するために，天然有機物共存下における堆積岩中の核種の拡散データを取得（Seida et al., 2009）し，拡散挙動に対しては比較的低分子量の有機物の影響が重要であることを明らかにした。これらの有機物影響に関する研究は，平成 19 年度より経済産業省からの受託事業の一環として実施された（日本原子力研究開発機構, 2008；日本原子力

研究開発機構, 2009-1；2009-2；日本原子力研究開発機構, 2010）。一方，緩衝材中については，天然有機物共存下における緩衝材中の核種移行試験結果に基づき，天然有機物が緩衝材中を移行しうる分子量，イオン強度および乾燥密度を定量的に評価するとともに，核種の複数の化学種の拡散挙動を核種－有機物相互作用を考慮して定量的に評価できる拡散モデルを整備し，得られた実測データ，モデル等を体系的に組み合わせることで，核種移行において有機物影響が顕在化に至る際の有機物分子量，地下水のイオン強度等の条件を定量的に示した（Iijima et al., 2009）。

これらの成果は，コロイドおよび有機物が核種移行に有意な影響を与える環境条件を提示するとともに，文献値あるいは実験的に取得した地質環境条件に対応した特性データを用いて，コロイドおよび有機物の影響を考慮した定量的な核種移行解析を実施するための技術基盤の整備となるものであり，あわせて品質保証および専門家の合意形成を支援し得るものになると期待される。

今後の課題：

コロイドおよび有機物の特性評価に関しては，原位置における天然コロイドの特性を，擾乱を抑え信頼性の高いデータを取得する手法の開発を行うとともに，低濃度条件下での核種の真性コロイドの生成挙動および移行挙動の評価を III・IV 価アクチニドを中心として進める。

コロイドおよび有機物と核種との相互作用評価については，3 元系相互作用モデルの実地下環境への適用性確認，影響顕在化に至る条件を満たす重要な核種－コロイドや核種－有機物の組合せの抽出およびこれらの組合せを対象とした相互作用データの拡充とデータベース化を進める。

コロイドおよび有機物の影響の定量的評価については，原位置試験結果の解析等を通して COLFRAC-MRL の実地下環境への適用性を確認する。

さらに，具体的な地質環境条件に応じたコロイドおよび有機物の影響を考慮しつつ核種移行解析を実施するための一連の手法を系統的に示したガイダンスの作成を進める。

参考文献：

1. Y. Kuno, G. Kamei and H. Ohtani：“Natural Colloids in Groundwater from a Bentonite Mine - Correlation between Colloid Generation and Groundwater Chemistry -”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 713, pp.841-848 (2002).
2. 上田真三，黒澤進 ：“地下水中に存在するコロイドの特性評価に関する研究”, JNC TJ8400 2001-052 (2002).
3. 黒澤進 ：“高レベル放射性廃棄物地層処分システムにおける核種移行評価に及ぼすコロイド影響に関する研究－第 2 次取りまとめ以降の検討－”, JNC TN8400 2005-007 (2005).

4. 飯島和毅, 増田嗣也, 戸村努 : “ベントナイトコロイドに対する Cs の収着挙動”, サイクル機構技報, 23, pp.51-61 (2004a).
5. 上田真三, 久野義夫 : “核種移行に関する基礎データ構築手法の検討および個別モデルの高度化に関する研究”, JNC TJ8400 2003-065 (2004).
6. S. Kurosawa, M. Ibaraki, M. Yui, S. Ueta and H. Yoshikawa : “Experimental and Numerical Studies on Colloid-Enhanced Radionuclide Transport, -The Effect of Kinetic Radionuclide Sorption onto Colloidal Particles-”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 824, pp.473-478 (2004).
7. 黒澤進, 茨木希, 上田真三, 油井三和, 吉川英樹 : “亀裂性岩盤中の核種移行に及ぼすコロイドへの核種収着速度の影響－実験と数値解析－”, 原子力和文論文誌, 3, pp.249-256 (2004a).
8. 黒澤進, 茨木希, S. James, 油井三和, R. Alexander : “グリムゼル岩盤試験場におけるコロイドと核種の移行遅延実験に関する解析”, JNC TN8400 2004-016 (2004b).
9. 亀井玄人 : “茂原ガス田の地下水中有機酸”, JNC TN8400 2000-030 (2000).
10. 飛塚早智子, 菊池広人, 松本一浩, 飯島和毅, 佐藤治夫 : “高イオン強度における圧縮ベントナイトに対する有機物の透過試験”, JNC TN8400 2005-019 (2005).
11. 上田真三, 加藤博康, 黒澤進, 中澤俊之 : “核種移行評価データの信頼性確認-本編-”, JNC TJ8400 2000-002 (2000).
12. 飯島和毅, 飛塚早智子, 小原幸利 : “Np(IV)とフミン酸の錯生成挙動”, JNC TN8400 2004-005 (2004b).
13. 黒澤進, 水上雅史, 佐藤久夫, 野澤純, 辻本恵一, 栗原和枝 : “コロイドプローブ原子間力顕微鏡による NaCl 水溶液中のモンモリロナイト粒子の相互作用力の測定”, 日本原子力学会和文論文誌, 5, pp.251-256 (2006).
14. 松本一浩, 飯島和毅, 棚井憲治 : “緩衝材の浸食現象評価－ベントナイトコロイドの生成挙動－”, JAEA-Research 2008-097 (2009).
15. H. Kokubun, Y. Niibori, K. Iijima and H. Mimura : “Deposition Rates of Colloidal Silicic Acid onto the Surface of Silicate Mineral”, Proc. of the 16th Pacific Basin Nuclear Conference, Paper No. P16P1154 (2008).
16. Y. Niibori, Y. Kasuga, H. Kokubun, K. Iijima and H. Mimura : “Dependence of the dynamic behavior of supersaturated silicic acid on the surface area of the solid phase”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 1124, pp.319-324 (2009).
17. 久野義夫, 笹本広 : “地下水中のコロイドの特性評価に及ぼす水質擾乱影響の予察的検討”, JAEA-Research 2008-016 (2008).
18. 久野義夫, 諸岡幸一, 笹本広, 油井三和 : “コロイドが存在する状態での核種の分配挙動の確認手法の検討”, 原子力バックエンド研究, vol.15, No.2, pp.117-129 (2009).
19. K. Iijima, Y. Shoji and T. Tomura : “Sorption behavior of americium onto bentonite colloid”, Radiochim. Acta, 96, pp.721-730 (2008).
20. 飯島和毅, 中田弘太郎, 戸村努, 飛田実, 鈴木康之 : “溶液－ベントナイトコロイド－花崗

岩の三元系における Cs・Am(III) の収着分配”, 日本原子力学会 2009 年春の年会 D17 (2009).
21. Y. Kuno and H. Sasamoto : “Migration behavior of bentonite colloids through a fractured rock”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 1124, pp.581-586 (2009).
22. 久野義夫, 笹本広 : “岩石亀裂中でのコロイドに助長された核種移行に関する解析検討”, JAEA-Research 2009- 071 (2010).
23. M. Terashima, S. Nagao, T. Iwatsuki, Y. Sasaki, Y. Seida and H. Yoshikawa : “Structural Characteristics of Deep Groundwater Humic Substances in Horonobe Area”, Hokkaido, Japan, Abstract for the 41th Meeting of the International Humic Substances Society (2008).
24. 寺島元基, 長尾誠也, 岩月輝希, 佐々木祥人, 清田佳美, 吉川英樹 : “北海道幌延地域の深部地下水から分離・精製した溶存腐植物質に対する Eu(III)の結合特性”, 日本腐植物質学会第 25 回大会, S-3 (2009).
25. A. Kitamura, K. Fujiwara, R. Doi, Y. Yoshida, M. Mihara, M. Terashima and M. Yui : “JAEA Thermodynamic Database for Performance Assessment of Geological Disposal of High-level Radioactive and TRU Wastes”, JAEA-Data/Code 2009-024 (2010).
26. Y. Seida, Y. Tachi, A. Kitamura, T. Nakazawa and N. Yamada : “Influence of Humic Acid on Se and Th Sorption on Sedimentary Rock”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1124, pp.567-572 (2009).
27. 日本原子力研究開発機構 : “平成 19 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム化学影響評価高度化開発報告書” (2008).
28. 日本原子力研究開発機構 : “平成 20 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム化学影響評価高度化開発報告書” (2009).
29. 日本原子力研究開発機構 : “平成 21 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム化学影響評価高度化開発報告書” (2010).
30. K. Iijima, S. Kurosawa, M. Tobita, S. Kibe and Y. Ouchi : “Diffusion behavior of humic acid in compacted bentonite: Effect of ionic strength, dry density and molecular weight of humic acid”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1124, pp.263-270 (2009).

2.2.6　微生物の影響

目的：

深部地質環境における微生物特性，活性，移行挙動，およびそれらが人工バリアの腐食・変質や核種の移行挙動に及ぼす可能性のある影響を抽出するとともに，それら影響の定量的な評価技術を整備する。

平成 17 年までの成果：

第２次取りまとめでは，その段階での国内外の研究成果（吉川ほか, 1995a；吉川ほか, 1995b）

を取りまとめ，飽和圧縮ベントナイトのろ過効果等により人工バリア中での微生物の移行が阻害され，生息や活動が制限されることにより微生物による処分システムへの影響は無視できるほど小さいと判断した。しかし，詳細な検討は具体的な地質環境条件を対象として研究することとした。

第 2 次取りまとめ以降は，処分システムに対する微生物影響の可能性を洗い出すとともに（吉川ほか, 1999），深部地質環境において存在が実測された微生物とその特性（村上ほか, 1999a；村上ほか, 1999b；青木, 1999）に基づくと微生物がコロイド的な移行挙動をすると考えられることから，コロイド移行評価コード COLFRAC-MRL（2.2.5）を用いて微生物の移行挙動の予察的な評価を行い，コロイド移行と同様な取り扱いが可能であるとの知見を得た（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_3.4.2；黒澤ほか, 2004）。また，地下水化学への影響を介した微生物の核種移行への影響を評価するために，性能評価上重要な地下水化学の特性の一つである酸化還元電位に対して影響を及ぼす可能性のある微生物を整理するとともに，それらを酸化還元電位に対応した代謝群に分類することで影響を定量化するモデルを構築し，それに基づく微生物影響評価コード（MINT）のプロトタイプの開発を行った（Tochigi et al., 2007）。

平成 21 年度までの成果：

平成 17 年までに進めてきた微生物影響の可能性の検討を，性能評価で考慮する特性・プロセスへの影響のレベルで詳細化し，検討の優先性の高いものとして，地下水化学に対する影響，バイオフィルムなどによる核種の収着挙動に対する影響と，微生物代謝による代謝生成物の金属腐食に対する影響を絞り込んだ（Yoshikawa et al., 2009）。微生物が地下水化学に与える影響については，平成 17 年までに開発した微生物影響評価コードのプロトタイプでは考慮できる反応が微生物－地下水相互作用に限定されていたことから，より現実的に微生物－地下水―鉱物の相互作用を考慮した微生物影響評価ができるように汎用的な地球化学計算コード PHREEQC を用いることにした。また，微生物影響評価コードへの入力パラメータとして必要となる微生物量，種類，活性などの一連の微生物特性に関するデータの取得技術については，近年の微生物の各種分析手法の構築や地下微生物についての微生物データの充実を踏まえ，信頼性の高いデータを得るための定量手法として，培養法，リアルタイム PCR 法，複合定量法の 3 方法を比較・検討し，それらの組合せを含めた体系的な微生物量の評価手法を提示した。なお，本研究は平成 19 年度より経済産業省からの受託事業の一環として実施された（日本原子力研究開発機構, 2008；日本原子力研究開発機構, 2009-1；2009-2；日本原子力研究開発機構, 2010）。

以上の成果により，性能評価への影響の観点から着目すべき微生物活動を明確にし，その影響評価のアプローチを具体化することができた。また，それらの影響を考慮した性能評価を実施するための技術および情報の基盤が整備された。

今後の課題：

微生物に固有な要因として微生物の集合体であるバイオフィルムやバイオコロイドの核種移行に対する影響を評価するため，より現実的なモデル構築とそれに基づく定量的な解析を可能とするためのコードの改良・整備を継続して行うとともに，実際の地質環境（国内外の地下研究施設等）を対象にしたデータ取得とコードの適用性確認を行いつつ実践的な影響評価手法として整備していく。

特に，バイオフィルムは，核種移行に顕著な影響を及ぼす可能性が否定できないことから重要性が高いと判断しているものの，現状では試験実施や評価方法の難しさから地層処分に適用可能な研究事例が乏しい。そのため，基盤的な試験・分析・評価技術の開発も含めた，現象理解の向上と評価技術の確立が必要と考える。

参考文献：

1. 吉川英樹，福永栄，油井三和，三原守弘：“地層処分システムにおける微生物の影響について(1)－還元環境に対する微生物の耐性に関する実験－”，放射性廃棄物研究，1(2), pp.199-212 （1995a）.
2. 吉川英樹，川上泰，福永栄，岡野誠司，藤木喜市，本谷益良，油井三和，朝野英一：“地層処分システムにおける微生物の影響について(2)－微生物の栄養源と透過性について－”，放射性廃棄物研究, 1(2), pp.213-230 （1995b）.
3. 吉川英樹，嶺達也，三原守弘：“地層処分システムにおける微生物の影響について”，月刊海洋，号外 No.19, pp.116-123 （1999）.
4. 村上由記，岩月輝希，長沼毅：“深部地下環境における微生物生態系”，月刊海洋，号外 No.19, pp.108-115 （1999a）.
5. 村上由記，長沼毅，岩月輝希：“深部地下環境における微生物群集－東濃地域を例として－”，日本原子力学会バックエンド部会誌, 5(2), pp.59-65 （1999b）.
6. 青木和弘：“サイクル機構における深部地下水中の微生物調査について”，月刊海洋，号外 No.19, pp.124-133 （1999）.
7. 黒澤進，佐々木良一，上田真三，吉川英樹：“COLFRAC を利用した性能評価に及ぼす微生物の影響に関する評価”, JNC TN8400 2004-012 (2004).
8. K. Tochigi, H. Yoshikawa and M. Yui：“Modeling Studies on Microbial Effects on Groundwater Chemistry”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXX, pp.575-280 (2007).
9. H. Yoshikawa, M. Inagaki and I. Miyasaka：“Development of scenario analysis and database for quantitative analysis of microbial effects on the repository performance”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXIII, pp.375-380 (2009).
10. 日本原子力研究開発機構：“平成 19 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム化学影響評価高度化開発報告書” (2008).
11. 日本原子力研究開発機構：“平成 20 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物

処分関連　処分システム化学影響評価高度化開発報告書” (2009).
12. 日本原子力研究開発機構 ：“平成 21 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム化学影響評価高度化開発報告書” (2010).

2.2.7　岩盤中の水理・物質移行評価

目的：

地質環境の特徴や調査の進展に応じた岩盤中の水理・物質移行評価を行うための，現象および影響要因に関する理解の向上とモデル化，ならびに関連技術等の体系的整備を行う。

平成 17 年までの成果：

第 2 次取りまとめでは，室内試験や原位置試験等から得られたデータに基づき，三次元亀裂ネットワークモデルや連続体モデル等の詳細評価，およびそれを基盤に構築したより簡便な一次元平行平板の重ね合わせモデルを用いて天然バリアの核種移行遅延性能を評価した。

平成 17 年までは，実際の地質環境での処分場領域を対象とした水理・物質移行モデル構築手法として，調査が進むにつれて生じるデータの粗密や地下水流動評価で着目している領域の大きさの違いに柔軟に対応するために，領域ごとに水理地質構造モデルの解像度を変えた入れ子式によるモデル化手法を開発した（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_3.1.1.1）。また，幌延地域で取得されたデータを活用して堆積プロセスに着目したモデル化手法を開発することで，地上からの調査段階などの調査数量が限られた段階においても堆積岩中の不均質構造を推定することが可能となった（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_3.1.1.4）。さらに，水理地質構造モデルの不確実性の評価について，幌延地域や海外の地下研究施設で計測されたデータを用いて構築した水理地質構造モデルについて，不均質な水頭分布データや地下水水質データなどの異なる種類のデータを複合的に活用することで不確実性が低減できることを例示した（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_3.1.1.2；3.1.1.3；伊藤ほか, 2004）。

水理地質構造モデルを用いた地下水流動評価により抽出される地下水や物質の移行距離や移行時間といった核種移行評価に必要な移行経路情報に関しては，移行経路情報の不確実性を水理地質構造モデルのモデルパラメータ値の不確実性（透水係数の分散など）から定量的に求めることができる手法を開発した（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_3.1.1.5）。さらに，実際の地質環境で取得されたデータに基づく水理地質構造モデル構築から物質移行評価に至る一連の手法開発の一環として，深地層の研究施設計画や広域地下水流動研究で取得されたデータを活用して構築した水理地質構造モデルに基づき，移行経路情報を評価する手法を例示した（2.1）。

亀裂を対象とした水理・物質移行特性の室内試験や原位置試験等によるデータ取得・評価については，自然の亀裂を含む大型岩石試料（50cm スケール）を対象とした透水トレーサー試験データの取得に加えて，単一亀裂や亀裂交差部の亀裂開口幅の分布を定量的に計測する手法

の開発により，亀裂の水理・物質移行特性から亀裂内の微細な構造までの一連の評価手法を整備した（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_3.1.2.1；3.1.2.2；吉野ほか, 2003；鐵ほか, 2004）。また，新第三紀の堆積岩を対象とした透水トレーサー室内試験手法を整備し，試験データを取得した結果，新第三紀の堆積岩においても亀裂が水理・物質移行特性に与える影響が大きい可能性があること示した（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_3.1.3）。さらに，原位置で実施したトレーサー試験から実流速や分散長などをその不確実性とともに定量的に評価できる手法を構築した（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_3.1.2.4；澤田ほか, 2003；井尻ほか, 2004）。この手法は，不確実性を低減するために必要なトレーサー試験方法の改良にも活用することができる。

亀裂を対象とした水理・物質移行モデルの高度化については，亀裂内充填鉱物や透水量係数の不均質性などを考慮したより現実的な概念モデルを提案した（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_3.1.2.3）。これは，原位置トレーサー試験結果に対する現実的な地質構造の影響を考慮したより適切な評価，さらにはより単純化した性能評価モデルやそこで用いるパラメータ値の保守性の評価に向けての基盤となる。

平成 21 年度までの成果：

具体的な地質環境を対象とした水理・物質移行評価の実施に向けて，平成 17 年までの研究を継続しつつ，関連する情報と技術の拡充と体系化に向けた整備を図った。その際，地質環境の調査・評価の結果に基づいた水理・物質移行特性の評価に関する主要な手順をフロー図として整理しつつ（日本原子力研究開発機構, 2010），その各項目について具体的な調査や評価手法の検討を進めた。

具体的な地質環境を対象とした地下水流動評価に用いられる水理地質構造モデルの構築に関して，幌延深地層研究計画で取得されたデータを活用して各ボーリングで観測された水頭分布だけではなく，塩分濃度や温度プロファイルや河川流量といったデータが，数キロメートルから数十キロメートルスケールを対象とした水理地質構造モデルの不確実性の低減に有効となる可能性があることを具体的な事例で示した（Karasaki et al., 2009）。この成果は，実際の地質環境を対象に構築する水理地質構造モデルの不確実性を低減させる実務的な留意点として活用できる。また，日本より先行している外国の処分候補地や地下研究施設で取得されたデータを活用して，水理地質構造モデルの不確実性を定量的に評価するとともに，そのモデルを用いて導かれる移行経路情報の不確実性を評価する手法の構築に向けた研究を進めている（SKB, 2008；SKB, 2009）。

沿岸地域では塩水と淡水の密度差に起因した塩水楔現象が地下水流動に影響を与える。この現象はダルシー則に基づく浸透流に加えて移流分散と淡水と海水の密度差に起因した密度流を考慮する必要のある複雑な連成問題である（Karasaki et al., 2006）。その塩水楔現象の評価に用いられる数値解析コードの検証に必要な実験データとして，塩水と淡水の遷移帯における塩水濃度の分布を定量的に計測可能な室内試験手法を開発し（高須・前川, 2007；佐藤ほか,

2009a），塩水の分散の影響に関する数値解析の検証が可能となった。

物質移行特性の評価に必要なパラメータに関する検討としては，地下水流速を求めるためのパラメータである水理学的有効間隙率を，ボーリング調査で取得できる透水に寄与する亀裂の頻度と透水量係数から推定する手法を整理した。これは，地上からの調査段階のようにデータが限定されている段階でも水理学的有効間隙率を推定できる手法であり，東濃地域の地上からのボーリング調査データを用いた適用事例を併せて示した（澤田ほか, 2007）。

より現象に即した岩盤中の水理・物質移行評価を可能とするためのデータ取得・評価および理解の向上として，地下水流速の推定に必要な亀裂開口幅の設定手法に関して，精密な測定や試験制御が可能な室内試験の利点を生かした，実験と数値解析を組み合わせた研究を進めている。一般に，亀裂を対象とした地下水流動や物質移行の評価には，亀裂を一次元の平行平板に近似したモデルが用いられる。しかしながら，実際の亀裂は亀裂面が複雑に凸凹の形状を呈しているため，地下水の流動や物質移行に寄与する場となる亀裂の開口部は不均質に分布する。この場合，平行平板で近似したモデルに用いる等価な亀裂開口幅の値をどのように決定するかが課題となる。第 2 次取りまとめにおいても，理想的な平行平板で検証されている透水量係数と亀裂開口幅の相関則（三乗則）ではなく，トレーサー試験などに基づく経験則（物質移行に寄与する開口幅が透水量係数の平方根に比例する）を適用している。このような課題解決に向けて，実際の亀裂の幾何学的形状を精密計測することで不均質な亀裂形状特性データを取得した（鐵・澤田, 2008；澤田・鐵, 2009）。そのデータを用いた数値解析と透水トレーサー試験データとの比較から，不均質な亀裂表面形状やそれに起因する不均質な亀裂開口幅分布が亀裂内の水理特性と物質移行特性に与える影響が異なり，物質移行を評価するためにはより局所的な経路の連続性を考慮する必要性があることを示した（澤田ほか, 2010）。また，亀裂開口幅分布が亀裂内の水理特性と物質移行特性に与える影響を詳細に検討するために，亀裂開口幅分布，トレーサー試験時の亀裂内トレーサー濃度分布の経時変化などの定量的データを計測する手法として，亀裂の透明レプリカ試料を用いた光学的計測手法（佐藤・澤田, 2008a；佐藤・澤田, 2008b；佐藤・澤田, 2010；Sawada and Sato, 2010）や X 線 CT を用いた計測手法（佐藤ほか, 2009b）を開発した。これらの手法で取得されたデータは，不均質な表面形状と開口幅を有する亀裂内での移流・分散現象についての現象論的な詳細な理解の基盤となるとともに，それらの現象を対象とした数値解析コードの検証データとして有効である。さらに，不均質に分布する開口幅のデータから局所的には三乗則が成り立つと仮定して透水量係数の分布を推定して亀裂の等価な透水特性を評価する手法の検証（岸田ほか, 2010）にも活用できる。

新第三紀の堆積岩中の亀裂が水理・物質移行特性に与える影響については，室内試験による透水特性や物質移行特性に関する試験データを拡充した。その結果，幌延地域の新第三紀の堆積岩の亀裂の場合，物質移行に寄与する亀裂開口幅と透水量係数の相関性が，上述の第 2 次取りまとめで用いた経験則と三乗則の間に分布することが示された（下茂ほか, 2007；下茂ほか, 2008；下茂ほか, 2009；下茂ほか, 2010）。

このような知見は，第 2 次取りまとめの段階に比べれば比較的大きな試料や領域を対象としたものを含んでいるが，実際の評価で対象とするより大きなスケールに直接的に適用可能かどうかというアップスケール問題については，原位置試験との連携を含めた継続的な検討が必要となる。そのための，幌延深地層研究計画などを利用したより大きなスケールを対象とした試験方法を整理した（下茂ほか, 2010）。

以上の成果により，具体的な地質環境を対象とした水理・物質移行評価の実施手順を整備するとともに，その手順の個別の項目について具体的な調査や評価を実施するための技術および情報の基盤を整理した。

今後の課題：

水理地質構造モデルの構築，地下水流動評価に基づく移行経路情報の評価，それらの不確実性の評価については，これまでに構築してきた各手法や国内外の地下研究施設のデータを活用した検討事例を基盤として，また二つの深地層の研究施設計画などで取得されたデータを活用した継続的な適用事例の蓄積を通じて，実際の地質環境に対応可能な体系的かつ実践的な方法論として整備していく。特に，不確実性の評価については，水理地質構造モデルやパラメータ設定値の不確実性の評価と，それらの不確実性が核種移行評価に必要な移行経路情報の評価に与える影響の双方の視点から総合的な検討を進め，さらに調査の進展に応じた繰り返しの検討と調査へのフィードバックを実現できる体系が必要となる。

水理・物質移行に関する特性データの取得・評価やモデル化については，亀裂開口幅分布が亀裂内の水理特性と物質移行特性に与える影響を様々なパターンの亀裂を対象とした試験データと数値解析の分析により明らかにしていくこと，また，アップスケール問題については，室内試験と深地層の研究施設計画とを有機的に連携させた試験研究を進めることが特に重要となる。

参考文献：

1. 伊藤一誠，唐崎建二，畑中耕一郎，内田雅大：“間隙水圧観測結果を用いた逆解析による堆積岩地域の水理地質構造把握：幌延深地層研究計画サイトへの適用”，応用地質，45 巻，3 号, pp.125-134 （2004）.
2. 吉野尚人，佐藤久，内田雅大：“亀裂状媒体水理試験設備（LABROCK）による天然亀裂内の透水・物質移行特性評価”，サイクル機構技報, No.18, pp.51-58 （2003）.
3. 鐵桂一，澤田淳，内田雅大：“亀裂交差部に沿った方向の透水特性の評価”，サイクル機構技報, No.23, pp.63-70 （2004）.
4. 澤田淳，井尻裕二，畑明仁，細野賢一，吉野尚人：“原位置トレーサ試験より得られる核種移行パラメータ値の不確実性評価”，サイクル機構技報, No.18, pp.39-49 （2003）.
5. 井尻裕二，畑明仁，細野賢一，澤田淳：“原位置トレーサ試験により得られる核種移行パラ

メータ値の不確実性について", 土木学会論文集, No.778／Ⅲ-69, 85-97 （2004）.
6. 日本原子力研究開発機構 : "平成 21 年度地層処分技術調査等委託費地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発" (2010).
7. K. Karasaki, K. Ito, Y. Wu, M. Shimo, A. Sawada, K. Maekawa and K. Hatanaka : "Uncertainty reduction of hydrologic models using data from surface-based investigation", Proceedings, TOUGH Symposium 2009 (2009).
8. SKB : "Äspö Hard Rock Laboratory Annual report 2007", SKB Technical Report, TR-08-10, p. 141 (2008).
9. SKB : "Äspö Hard Rock Laboratory Annual report 2008", SKB Technical Report, TR-09-10, p. 132 (2009).
10. K. Karasaki, K. Ito and K. Maekawa : "Simulation of salt water intrusion", Proceedings, TOUGH Symposium 2006 （2006）.
11. 高須民男, 前川恵輔 :"多孔質媒体中水理・物質移行現象可視化装置（小型 MACRO）の開発及び予察試験結果", JAEA-Technology 2006-061 （2007）.
12. 佐藤久, 高須民男, 澤田淳 :"小型 MACRO による塩水侵入試験の光学的手法を用いた塩水濃度分布の定量的評価", JAEA-Research 2008-105 （2009a）.
13. 澤田淳, 竹内真司, 三枝博光, 天野健治 : "亀裂性岩盤におけるボーリング調査に基づく水理学的有効間隙率の設定について", 第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.273-278 （2007）.
14. 鐵桂一, 澤田淳 : "研削により測定した 50cm スケール岩体中の天然亀裂の形状に関する研究", JAEA-Research 2008-079 （2008）.
15. 澤田淳, 鐵桂一 :"50cm スケールの花崗岩試料の研削による亀裂形状計測について", 第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.266-271 （2009）.
16. 澤田淳, 佐藤久, 鐵桂一, 坂本和彦 : "岩石試料の研削による亀裂形状計測データを用いた透水トレーサー試験の評価", 第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.54-59 （2010）.
17. 佐藤久, 澤田淳 : "単一亀裂を対象とした光学的手法によるトレーサー移行計測データに基づく物質移行評価", 第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.263-268 （2008a）.
18. 佐藤久, 澤田淳 : "光学的手法による単一亀裂内測定データに基づく水理物質移行特性評価手法の検討", JAEA-Research 2008-067 （2008b）.
19. 佐藤久, 澤田淳 : "不均質な開口幅分布を有する単一亀裂の光学的手法による計測とその透水特性評価", 土木学会論文集 （2010）（投稿中）.
20. A. Sawada and H. Sato : "A study of hydraulic properties in a single fracture with in-plane heterogeneity: An evaluation using optical measurements of a transparent replica", Journal of the Korean Nuclear Society, Nuclear Engineering and Technology (2010).
21. 佐藤晃, 有水拓人, 米村拓峰, 澤田淳 :"X 線 CT 法による亀裂内トレーサー移行プロセスの可視化と分析", Journal of MMIJ, vol. 125, p.146-155 （2009b）.

22. 岸田潔，澤田淳，佐藤久，音田慎一郎，細田尚：“三乗則成立条件下での局所レイノルズ数による透水挙動の評価”，第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.288-292（2010）．
23. 下茂道人，熊本創，前川恵輔：“亀裂を有する軟岩の水理・物質移行特性データの取得・解析”, JAEA-Research 2007-016 （2007）．
24. 下茂道人，熊本創，唐崎健二，佐藤久，前川恵輔，澤田淳：“亀裂を有する堆積岩の水理・物質移行評価のためのデータ取得・解析”, JAEA-Research 2008-029 （2008）．
25. 下茂道人，熊本創，唐崎健二，佐藤久，澤田淳：“亀裂を有する堆積岩の水理・物質移行評価のためのデータ取得・解析（Ⅱ）”, JAEA-Research 2008-101 （2009）．
26. 下茂道人，熊本創，伊藤章，唐崎健二，澤田淳，小田好博，佐藤久：“亀裂を有する堆積岩の水理・物質移行評価のためのデータ取得・解析（Ⅲ）”, JAEA-Research 2009-060 （2010）．

2.2.8 生物圏評価

目的：

与えられた地表環境条件に対応した生物圏評価モデルの構築，および同モデルで用いる生物圏評価パラメータの設定を行うための方法を整備する。

平成 17 年までの成果：

第 2 次取りまとめでは，IAEA BIOMASS プロジェクトにおいて提唱されたレファレンスバイオスフィアの構築アプローチ（IAEA, 2003a）を参考に，わが国の幅広い地表環境や生活様式等を考慮して，地表環境での核種の移行と被ばく経路を様式化して表現した生物圏評価モデルを作成した。環境条件，生活様式等に関連するパラメータについてはわが国の統計資料を参考に，元素の移行等に関するパラメータは諸外国の性能評価報告書等を参考に設定した。なお，地質環境と生物圏とのインターフェース(GBI)の取り扱いに関しては，代表的なモデルとして，帯水層での希釈や移行遅延の寄与を無視し GBI を河川と仮定したが，不確実性の検討の一環として，帯水層を含め他の構成要素（例えば，深井戸や沿岸海域）を GBI とする場合についてもモデルを整備した。これにより，核種移行率を線量に変換するための「線量への換算係数」を整備した。

第 2 次取りまとめ以降は，実際に地表環境が特定された場合に，その特徴に対応可能となる生物圏評価モデルとパラメータを体系的に整備することを目的として，GBI の候補や，GBI 設定に影響を与える不確実性要因を地質環境の特徴と関連付けて整理するとともに，多数の生物圏評価パラメータの中から重要度の高いパラメータを特定するための手順を構築し，その適用により河川流量や分配係数，農作物への移行係数等の重要性を特定することでデータの充足度等の分析を効率的に実施できるようになった（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_3.5）。

一方，地表環境の時間的変遷に関しては，第 2 次取りまとめでの温暖気候の想定に対して，生物圏評価において気候変動の影響を考慮するための簡便なモデル化手法として，冷帯気候や

ツンドラ気候での降水量の減少に着目し，灌漑水量，浸透／流出量，食物摂取のパラメータを変更することで取り扱う方法を構築し，温暖気候の場合に比べてほとんどの核種において線量への換算係数が低下する傾向にあること，また，それが灌漑水量や浸透／流出量の減少による表面土壌中の核種濃度の減少に関係することを示した（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_3.5）。

地層処分の安全評価は考慮すべき時間スケールが非常に長いことから，生物圏評価で想定する将来の人間の生活環境や様式について，その不確実性が問題となる。その対処方法の一つとして，不確実性が増大する時期（例えば 1 万年以降）において，放射線量やリスク以外の補完的安全指標（以下，補完的指標）の適用が考えられている。補完的指標としては，放射性核種の濃度やフラックス，移行時間等が挙げられており（IAEA, 2003b），特に，放射性核種の濃度やフラックスを指標とした評価事例については，IAEA の専門家会議においても議論されている（IAEA, 2002）。第 2 次取りまとめでは，天然に存在する放射性核種の濃度やフラックスを，性能評価の結果得られた核種の河川中濃度や地下水中濃度もしくはフラックスと比較することにより，安全指標としての適用性を例示した。

第 2 次取りまとめ以降は，第 2 次取りまとめ段階で整備が不足していた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・整理し，情報を充実させた。さらに，水循環が物質循環の基本となることから，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検討し，実際の地質・地表環境に対して天然放射性核種のフラックスを検討する際には，場の特性を踏まえた集水域・評価領域・物質移行プロセスの設定および関連するデータの収集が重要となることを明らかにした（平成 17 年取りまとめ 分冊 3_3.5）。これら情報は，IAEA の国際共同研究で報告することにより広く利用可能な形とした（IAEA, 2005）。

平成 21 年度までの成果：

平成 17 年までの研究を発展させ，地表環境が特定された際の生物圏評価モデルの構築およびパラメータの設定のための技術の整備，体系化を図った。

具体的には，第 2 次取りまとめ段階では未着手であった帯水層等の表層環境での水理・物質移行に着目し，その現象の生物圏評価への取り込みに向けて，地下深部から利水環境への地下水の放出地点の推定に係る考え方とその調査段階に応じた変遷の整理，および利水環境での希釈・分散効果を評価するための水収支の推定に必要なデータ一覧の整理を行った（稲垣ほか, 2007）。さらに，上記を踏まえたより具体的な検討として，環境分野で用いられている表層環境での水理・物質移行の評価手法を用いて，幌延の深地層の研究施設計画などで得られた幌延地域の表層環境に関する情報を参考にした水理・物質移行解析を試行することで，環境分野の評価手法を地層処分の検討に適用するにあたっては，解析モデル設定における平面的範囲の設定や生物圏構成要素（河川や湖沼，海洋）や境界条件の設定の違いに特に留意すべきであることを明らかにした（板津ほか, 2009）。生物圏評価パラメータの設定については，感度解析的手法等を導入したパラメータの重要度分類を実施（加藤・鈴木, 2008）するとともに，その成

果をパラメータ設定手順の検討に反映し，特定の地表環境条件に対応したパラメータを，パラメータの重要度，データベースの整備状況，データ入手可能性等を考慮しつつ設定する実用的な手順を構築し，これを第 2 次取りまとめで用いた生物圏評価パラメータセットに対して適用することで，今後更新が必要となるパラメータを明らかにした（Kato and Suzuki, 2007；Kato et al., 2009；Smith and Kato, 2010 ）。また，更新が必要なパラメータの設定に必要となるデータについては，「高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画」（資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2006；資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2009）の枠組みに沿って（独）放射線医学総合研究所と協力しつつ，わが国で取得されたデータを反映した新たなデータベース整備のための手順を示し（加藤ほか, 2009），これに基づく更新作業を実施中である。その他の生物圏評価パラメータセットの更新作業としては，第 2 次取りまとめで用いた旧法令に基づく線量換算係数を，ICRP1990 年勧告（ICRP, 1990）を反映した現行法令に基づく実効線量係数に更新し，高レベル放射性廃棄物および TRU 廃棄物処分の生物圏評価対象核種に対する線量への換算係数を算出した（鈴木ほか, 2006）

さらに, 上記の表層環境での水理･物質移行の取り扱いや生物圏パラメータの設定を含めた，実際の環境条件を反映した生物圏評価モデル構築のための総合的な作業フローを作成するとともに，フローに示される各作業の実施に利用可能な文献・統計等の情報項目を整理した（板津ほか, 2009）。

地表環境の時間的変遷に関しては，高レベル放射性廃棄物処分の生物圏評価対象核種以外の TRU 廃棄物処分に特有な放射性核種についても, 気候変動による影響を生物圏モデルに取り入れた場合，その影響がどの程度のものとなるかを把握することを目的として，平成 17 年までの検討に準拠して，冷帯気候とツンドラ気候のふたつの気候状態を想定して生物圏モデルを構築し線量への換算係数を算出した（鈴木ほか, 2006）。

一方，補完的指標については，平成 17 年までは表層における水循環等の物質移行に着目していたことに対して，処分場下流の断層破砕帯から帯水層への地下水の流出点における，処分場からのフラックスと天然の放射性核種のフラックスを比較することにより，表層での希釈水量等の不確実性を排除した形での評価が可能となった（Miyahara and Kato, 2007）

これらの成果により，生物圏評価モデルの構築や評価で用いるデータセットの導出に地表環境の特徴を反映する技術や手順の整備，およびそれに係る作業経緯の透明性・追跡性の確保が図られ，品質保証および専門家の合意形成を支援するものとなっている。また，補完的安全指標としてのフラックスの適用性検討により，人間の生活様式等の仮定により生じる不確実性を含む放射線量やリスクを補完し，安全確保に関する理解を深めるために必要な情報を提供するための方策を提示した。

今後の課題：

上記の作業フローを用いたモデル構築およびパラメータ設定の，幌延の深地層の研究施設計

画等で得られた情報等に基づく試行を通じて，生物圏評価技術を実際の環境条件に対応可能な体系的かつ実践的な方法論として整備する。

また，我が国の特徴を反映した生物圏評価パラメータ設定のためのデータベース整備を，「高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画」（資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2009）の枠組みに沿った他機関との協力のもと継続する。

さらに，これまで考慮していなかった地表環境の時間変遷に関しては，国際機関が提言する原則や諸外国等の検討事例の整理結果（宮原・加藤, 2006；加藤, 2010）に基づき，生物圏評価における将来の地表環境や人間の生活様式の変遷の取り扱いに関するアプローチを提示するとともに，それに基づく評価を地質環境の長期安定性に関する研究成果等も反映しつつ試行する。

参考文献：

1. IAEA：“"Reference Biospheres" for solid radioactive waste disposal”, IAEA-BIOMASS-6 (2003a).
2. IAEA：“Safety indicators for the safety assessment of radioactive waste disposal, Sixth report of the Working Group on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal”, IAEA-TECDOC-1372 (2003b).
3. IAEA：“Issues relating to safety standards on the geological disposal of radioactive waste”, Proceedings of a specialists meeting held in Vienna, 18–22 June 2001, IAEA-TECDOC-1282 (2002).
4. IAEA：“Natural activity concentrations and fluxes as indicators for the safety assessment of radioactive waste disposal, Results of a coordinated research project”, IAEA-TECDOC-1464 (2005).
5. 稲垣学，加藤智子，吉田英爾，小山田潔，深谷友紀子，鈴木祐二，大井貴夫：“表層での水理・物質移行を考慮した生物圏における評価に関する検討”，JAEA-Research 2007-029（2007）.
6. 板津透，稲垣学，加藤智子，鈴木祐二，小山田潔，江橋健，川村淳，蛯名貴憲，宮原要：“表層環境を考慮した生物圏評価手法の構築に関する検討”, JAEA-Review 2009-015（2009）.
7. 加藤智子，鈴木祐二：“地層処分生物圏評価における感度解析による重要パラメータの抽出に関する検討”, JAEA-Research 2008-021（2008）.
8. T. Kato and Y. Suzuki：“Extended biosphere dataset for safety assessment of radioactive waste geological disposal”, Proceedings on the International Symposium on Environmental Modeling and Radioecology, Rokkasho, Aomori, Japan, October 18-20, 2006, ISBN 978-4-9980604-9-9 C3040, pp.336-339 (2007).
9. T. Kato, Y. Suzuki and T. Ohi：“Development of the methodology on priority of element-specific biosphere parameters for geological disposal applicable to any

proposed repository site." Jpn. J. Health Phys., 44(1), pp.72-79 (2009).
10. G. Smith and T. Kato："International Collaboration in Assessment of Radiological Impacts Arising from Releases to the Biosphere after Disposal of Radioactive Waste into Geological Repositories", Journal of the Korean Nuclear Society, Nuclear Engineering and Technology, Vol.42, No.1, pp.1-8 (2010).
11. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画” (2006).
12. 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 20 年度版）” (2009).
13. 加藤智子，鈴木祐二，田上恵子，石川奈緒，内田滋夫，稲垣学，宮原要：“地層処分生物圏評価用データベース更新の進め方について”，日本原子力学会 2009 年春の年会予稿集 D21（2009）.
14. ICRP：“1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”, ICRP Publication 60, Annals of the ICRP, Vol.21, No.1-3, Pergamon Press, Oxford (1990).
15. 鈴木祐二，加藤智子，牧野仁史，大井貴夫：“TRU 廃棄物処分に特有な放射性核種を考慮した生物圏評価データセットの整備と線量への換算係数の算出”, JAEA-Data/Code 2006-011（2006）.
16. 板津透，加藤智子，稲垣学，鈴木祐二：“表層環境を考慮した生物圏評価手法の構築に関する検討”，日本原子力学会第 24 回バックエンド夏期セミナー資料集（2009）.
17. K. Miyahara and T. Kato：“Illustration of HLW repository performance: using alternative yardsticks to assess modeled radionuclide fluxes”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXI, MRS Symposium Proceedings, Vol.1107, pp.673-680 (2007).
18. 宮原要，加藤智子：“地層処分の安全規制に関する動向 - 原則，基準と適合性に関する主な論点を中心に - ”, JAEA-Review 2006-030 （2006）.
19. 加藤智子：“地層処分性能評価における生物圏の変遷および将来の人為的行為の様式化に関する考え方の国際的な動向整理”, JAEA-Review 2009-052 （2010）.

3. まとめ

I.

性能評価研究は，安全性に係わる現象についての理解，モデル化，データベース開発を行うとともに，それらを統合してシステム性能評価を行うための手法を整えることで，地層処分システム全体あるいはその要素である個別システムが有する機能について解析した結果を適切な基準と比較し，その性能について判断を行うための技術と知見を整備することです。

II.

中期計画期間（平成 17 年以降～平成 21 年度）の性能評価研究では，具体的な地質環境を対象とした評価作業を支援する技術と知見を整えること，またデータ取得方法のレビューと手法の標準化，データの品質を考慮したデータベースの構築などにより，評価結果の信頼性に直結する基礎的なデータの品質をより高いものとすることなどに焦点をあてています。

III.

上記研究において，その成果の知識ベース化を目指して実施してきたことにより，個別の研究課題についての技術や知見およびその適用のノウハウ等の具体化が進みました。また，個別の技術を組み合わせて実際の地質環境条件に適用していくなどの高度な応用についても，深地層の研究施設計画の成果などを活用した事例検討などを通じてその経験が蓄積されてきており，実施上の留意点や今後さらに適用性を高めていくために必要な研究課題なども明らかとなってきています。

IV.

また，性能評価研究では，CoolRep H22 本文のメッセージを具体的にしていくために，実際の地質環境を対象とした評価手法の適用，研究開発の進展により増加する多様な技術情報のデータベース等による構造的整理，さらにはデータ取得やデータベース構築における品質管理の具体化などを行ってきています。

V.

性能評価研究において取得され蓄積される経験（暗黙知）を含む知識を，セーフティケースと関連させつつ，実施主体の行う地層処分事業の安全性の評価や，安全規制機関による評価結果のレビューなどを支援できるように構造化し，ステークホルダーを含むユーザーに活用しやすい形態で提供することが今後の重要な課題の一つです。

VI.

今後の研究開発では，地層処分技術の信頼性のより一層の向上のため，最新の科学的知見を取り入れつつ着実に技術と知識を高めていくとともに，処分地選定などの処分事業の進展により具体化される実施主体の要求事項および安全規制機関による安全性に関する要件に応じて，研究課題の優先順位を明確にしながら進めることが重要になります。これらの議論は国の基盤研究開発調整会議で行われ，全体計画が適宜改訂されます。原子力機構では，その議論に沿った性能評価研究を着実に進展させるとともに，開発中の知識マネジメントシステムを介して，他分野および他機関との情報の共有・議論や研究開発課題の可視化や具体化を支援することで，わが国での地層処分研究の発展に寄与していきます。

付録Ⅴ TRU 廃棄物カーネル

1. はじめに

1.1 用語と定義

“TRU (Transuranic)” (あるいは“TRU 廃棄物 (Transuranic waste)”) という語は，放射性廃棄物管理分野において国際的にも用いられているが，他の廃棄物分類と比べこの分類に属する廃棄物の範囲は，国によってかなり開きがある。元々この言葉は，主に核兵器開発のための再処理から生ずる，超ウラン核種を相当量含む廃棄物に対して用いられた。こうした超ウラン核種は一般に半減期が長く，特にアルファ粒子を放出するため，放射線学的な影響に留意して特別な対策が必要と考えられたが，当初の処分方法は，現在この分類に属する廃棄物に対して考えられている方法に比べると，略式のものであった (Hanford trench disposal)。

高レベル放射性廃棄物ガラス固化体以外に，原子力発電を目的として実施される核燃料サイクル，すなわち再処理や燃料加工の施設の操業や解体の過程で，地層処分することが適切と考えられる超ウラン核種を含有する放射性廃棄物が発生する。これらの中には，半減期が長く地下水によって移動しやすい放射性核種（例えば，C-14，Cl-36，Se-79，Cs-135，I-129 など）を含むものもある。

医療や産業，研究活動の結果として生じる放射性廃棄物のなかにも超ウラン核種を含有するものがある。そのなかにはアルファ核種濃度が高く，核燃料サイクル施設の操業や解体に伴って発生する超ウラン核種を含む放射性廃棄物の処分方策に準じた処分方策が必要とされるものがある（原子力委員会,2000, 超ウラン核種を含む放射性廃棄物処理処分の基本的考え方について，原子力委員会,1998, RI・研究所等廃棄物処理処分の基本的考え方）。

その由来が明瞭な高レベル放射性廃棄物ガラス固化体や使用済み燃料（SF）と異なり，地層処分の対象となる TRU 廃棄物を他の中低レベル放射性廃棄物から区別するための一般的な方法はなく定義が必要である。現在世界で唯一操業中の地層処分場である米国 WIPP に処分される廃棄物（WIPP definition of TRU wastes）の場合には，「原子番号 92 より大きな半減期が 20 年以上のアルファ放射体が 100 nCi/g（約 3 MBq/kg）を超えて含まれる廃棄物」と定義されている。アルファ放射体に着目したものではあるが，超ウラン核種の全濃度を科学的根拠に基づいて明らかにすることが難しい場合には，放射線学的影響が同等の代表的 長半減期アルファ放射体（例えば Ra-226）の濃度によって分類されている。

対照的にスイスでは，同様な TRU 廃棄物を長半減期中レベル放射性廃棄物として，単純に「非高レベル放射性廃棄物」（スイスでは，高レベル放射性廃棄物とはガラス固化体と SF の両方を意味する：Nagra HP）のうち深地下への地層処分が必要と考えられるものという，より実用的な定義がなされている。浅地中処分 （IAEA WS-R-1 Safety Requirements Near Surface Disposal of Radioactive Waste）に対する基準に適合せず，地層処分が必要かどうかは，廃棄物

受け入れ手順（“Endlagerfahigkeitsbescheinigung” (廃棄物受け入れ基準に関する文書 explanation of waste acceptance procedures)）に示されている簡単な安全評価に基づいて決定される。

最近の廃棄物の分類に関する仕組み KEV（**KEV document**）では，処理後の廃棄物でアルファ線の放射能レベルが 20 kBq/g を超えるようなものとして ATA という廃棄物分類を定義し，アルファ放射体の含有量が直接的に考慮されるようになっている。ただし，これは処分方法と直接関係しておらず，ATA のすべてが高レベル放射性廃棄物とともに地層処分される必要があるということではない。ATA に属する主要な廃棄物は，原子力発電所の運転や，MIR（**MIR waste**）と呼ばれる医療や産業，研究に伴って発生する廃棄物である。

こうした廃棄物の分類や処分の方法に対する受け入れ基準は各国様々である（**IAEA GS-G-3.4** ; **IAEA GSG-1** ; **ANDRA** ; **Nagra** ; **NDA** ; **NUMO** ; **NWMO** ; **ONDRAF/NIRAS** ; **Posiva** ; **SKB** ; **USDOE** など）。

日本では，放射性廃棄物は，発電用原子炉からの使用済み燃料の再処理の過程で分離，ガラス固化された高レベル放射性廃棄物と，それ以外の「低レベル放射性廃棄物」とに大きく分類されている。後者には，高レベル放射性廃棄物ガラス固化体以外のすべての放射性廃棄物が属し，原子力発電所や核燃料サイクル施設の運転や廃止措置，医療・産業・研究等に伴って発生する廃棄物が含まれる（**原子力環境整備促進・資金管理センター**）。低レベル放射性廃棄物のうち，原子力発電所の運転，解体に伴って発生するものを「発電所廃棄物」，医療・産業・研究等に伴って発生する廃棄物を「研究施設等廃棄物」，また，ウランの精錬，精製，濃縮，燃料加工に関わる放射性廃棄物を「ウラン廃棄物」と呼ぶ。

核燃料サイクル施設から発生する低レベル放射性廃棄物には，量の多少にかかわらず超ウラン核種が含まれているものや半減期の極めて長い核種（例えば I-129）を多量に含むものがあり，原子力委員会ではこれを「超ウラン核種を含む放射性廃棄物」（**原子力委員会**）と呼んでいる。これによれば，日本における「TRU 廃棄物」の定義は「再処理施設及び MOX 燃料加工施設の運転・解体に伴い発生する超ウラン核種を含む放射性廃棄物」である。このため，原子力政策大綱（**原子力委員会**）では，「超ウラン核種を含む放射性廃棄物」の略称として「TRU 廃棄物」を用いている。また，この廃棄物については「長半減期低発熱放射性廃棄物」（**原子力委員会**）と置き換えて用いられる場合もある。

放射性廃棄物処分事業の安全規制については，「核原料物質，核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（以下，原子炉等規制法という；**原子炉等規制法**）の改正によって，放射性物質の含有量（**原子力安全委員会**，**原子力安全・保安院**）に従って「第一種埋設」（地層処分）と「第二種埋設」（浅地埋設や余裕深度処分）の区分が設定されている。一方，「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（以下，最終処分法 という；**最終処分法**）の改正により，地層処分の対象が高レベル放射性廃棄物ガラス固化体だけでなく TRU 廃棄物（第二種特定放射性廃棄物；**最終処分法**）にも拡張された。日本における地層処分の実施主体である原子力発電環境整備機構（以下 NUMO という）は，地層処分が必要な TRU 廃棄物を「地層処分低レベル

放射性廃棄物」（**NUMO 公募関係資料**）と呼んでいる。また，従来 TRU 廃棄物の地層処分に関する研究開発においては，TRU 廃棄物処分技術検討書 -第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-（TRU-2 報告書，以下 **CoolRepH22** 本文に準拠し，「TRU-2 報告書」と記す。**第 2 章**）に見られるように，「地層処分対象 TRU 廃棄物」と称している。

本カーネルでは，地層処分の対象となる TRU 廃棄物を「**地層処分 TRU 廃棄物**」と呼ぶこととし，NUMO が事業として実施する TRU 廃棄物の地層処分について，関連する研究開発成果を概観するが，この対象となる TRU 廃棄物は TRU-2 報告書で提示された区分に基づいて分類されるものとする。

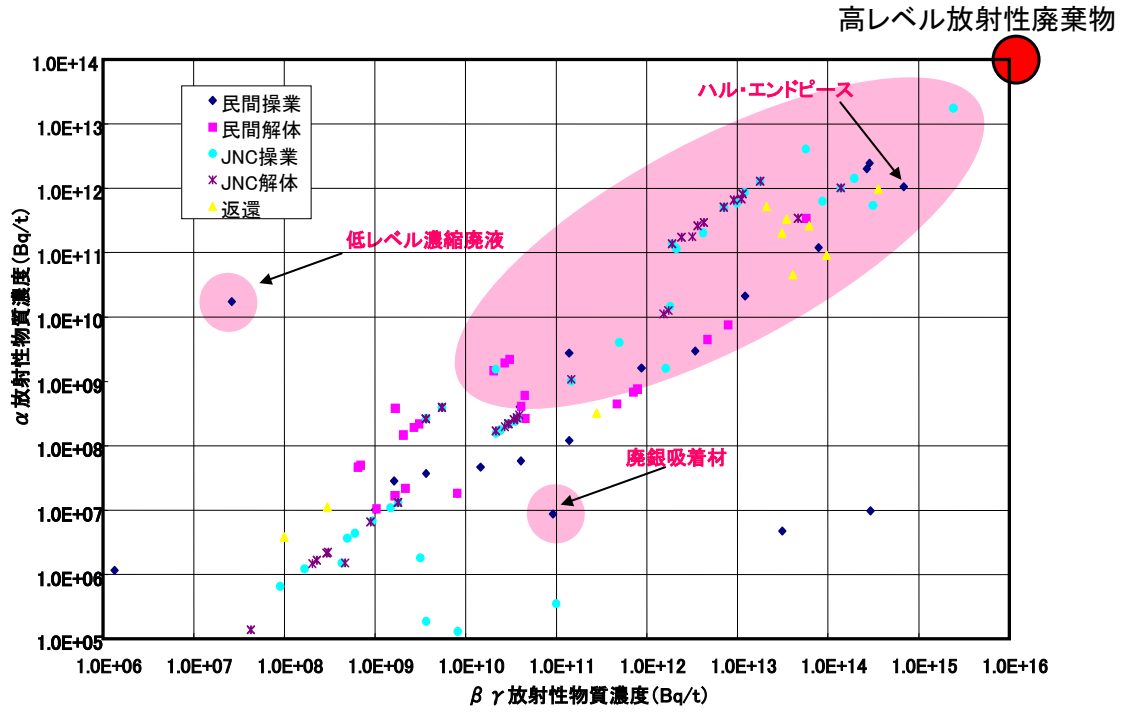


図 1-1　TRU 廃棄物の放射性物質濃度の分布と「地層処分 TRU 廃棄物」の分布範囲（着色部分）。TRU-2 報告書第 2 章の図 2.3-1 に加筆。

参考文献：

1. 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 : TRU 廃棄物処分技術検討書—第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ JNC TY1400 2005-013 FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).

2. 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会 : 超ウラン核種を含む放射性廃棄物処理処分の基本的考え方について　平成 12 年 3 月 23 日 (2000).

3. 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会 : RI・研究所等廃棄物処理処分の基本的考え方について 平成 10 年 5 月(1998).

4. 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会 : 超ウラン核種を含む放射性廃棄物処理処分の基本的考え方について　平成 12 年 3 月 23 日 (2000).

5. 原子力委員会 : 原子力政策大綱　平成 17 年 10 月 11 日 (2005).

6. 原子力委員会 : 長半減期低発熱放射性廃棄物の地層処分の基本的考え方―高レベル放射性廃棄物との併置処分等の技術的成立性―平成 18 年 4 月 18 日 (2006).

7. IAEA : SAFETY STANDARDS SERIES Near Surface Disposal of Radioactive Waste, REQUIREMENTSNo. WS-R-1 (1999).

8. IAEA : IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. The Management System for the Disposal of Radioactive Waste. Safety Guide No.GS-G-3.4 (2008).

9. 原子力安全委員会 : 低レベル放射性個体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について　平成 19 年 5 月 21 日 (2007).

1.2 TRU-2 報告書における参照インベントリ

TRU-2 報告書では，アルファ線とベータ線及びガンマ線に基づく放射能レベルという二つの軸に基づいて TRU 廃棄物が示されている（図 1-1, **TRU-2 報告書 第 2 章の図 2.3.1**）が，処分の長期的安全性という観点からは，核種の半減期と地下での移動性が重要となることに注意が必要である。

TRU-2 報告書では処分方法に対応して特定の核種の濃度上限値を算出（表 1-1, **TRU-2 報告書 第 2 章の表 2.4.1-2**）し，これに基づいてそれぞれの処分形態に応じた TRU 廃棄物の**インベントリ**を推定している。その後，上述したように，**原子炉等規制法**と**最終処分法**の改正があり，また，余裕深度処分に対する上限値（**原子力安全委員会**，**原子炉等規制法施行令**）が示されるといった動きがあり，他方，事業化の観点からは，改正された最終処分法にしたがって，「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」（**最終処分基本方針**）や「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」（**最終処分計画**）が改定された。NUMO は，改定された最終処分計画に基づく地層処分 TRU 廃棄物のインベントリに従って処分事業を進めている。

表 1-1　廃棄体の処分区分に用いた濃度

核種	コンクリートピット処分		余裕深度処分	
	政令値×1/10（10μSv/y 相当）	追加（10μSv/y 相当）	政令値×1/10（10μSv/y 相当）	追加（10μSv/y 相当）
C-14	3.7×10^{9}	－	5.2×10^{13}	－
Cl-36	－	－	1.0×10^{10}	－
Co-60	1.11×10^{12}	－	－	－
Ni-59	－	2.9×10^{10}	－	－
Ni-63	1.11×10^{11}	－	－	－
Sr-90	7.4×10^{9}	－	－	－
Zr-93	－	1.5×10^{10}	－	1.8×10^{12}
Mo-93	－	7.8×10^{8}	－	－
Nb-94	－	1.1×10^{9}	－	－
Tc-99	－	1.9×10^{7}	8.2×10^{10}	－
Ag-108m	－	4.1×10^{8}	－	－
I-129	－	2.1×10^{7}	－	3.1×10^{9}
Cs-137	1.11×10^{11}	－	－	－
Np-237	－	－	1.3×10^{9}	－
全 α	1.11×10^{8}	－	－	1.0×10^{9} *1

*1：一応の区分目安値

このようなインベントリの評価を行う場合，放射性核種の濃度の観点だけでなく，上述したように，放射性核種の地下での移動性や，特に，より深度が大きい処分方法では半減期が重要な要素となる。

さらに，どの時期までに発生するものを考慮の対象とするかについて示すことが必要である。高レベル放射性廃棄物ガラス固化体の場合には，最終処分計画において 2020 年頃までに発生する本数が試算されている（**最終処分基本方針及び計画**）。高レベル放射性廃棄物ガラス固化体は 30 から 50 年間冷却のために中間貯蔵されることから，2020 年に発生するガラス固化体は 2070 年までには処分されることになる。TRU-2 報告書作成当時には TRU 廃棄物の処分に関する国の計画は明示されておらず，六ヶ所村に建設された商業用再処理施設と MOX 燃料加工施設の寿命を 40 年と仮定し，実効的なインベントリとして 2050 年までに発生する廃棄物を考慮するとともに処分場の閉鎖時期を 2060 年に設定している（**TRU-2 報告書**）。こうした仮定は，TRU-2 報告書の目的である一般的（ジェネリック）な技術的実現可能性の評価においては合理的なものである。しかし，次節に示すように，TRU 廃棄物のインベントリは，現在の日本の原子力利用計画に沿って，より広範な視点から検討しておくことも重要であると考えられる 。

TRU-2 報告書では，TRU 廃棄物の参照体積は，処分方法に応じて表 1-2（**TRU-2 報告書の第 2 章 表 2.4.2-1**）のように与えられている。これらの廃棄物の中には，まだ発生していないものもあるので，この表は「モデルインベントリ」とみなされるべき性格のものではあるが，表に示された余裕深度処分と地層処分による処分量はほぼ同じであることを前提に，処分の長

期安全評価上重要となる核種のインベントリについてみれば，TRU 核種を含むアクチニド元素のインベントリが地層処分で一般に 3 桁ほど高くなっているのに比べ，長半減期の核分裂生成物（fission products：ウランやプルトニウムなどが原子炉内で核分裂の結果生じた核種，以下 FP という）である Cs-135 や I-129 では約 2 桁，Se-79 では約 1 桁，Cl-36 や C-14 ではほぼ同じとなっている。処分の安全評価において推定される線量では，こうした長半減期 FP が支配的となる（図 3-1，**TRU-2 報告書の「要約」の図 7**；**HLW 第 2 次取りまとめ**；**NUMO-TR-04-01**）。

TRU-2 報告書の公表以降，原子炉等規制法と最終処分法の改正（**原子炉等規制法**；**最終処分法**）が行われたため，処分場の設計等にあたっては両法への適合性に留意することが重要である。

表 1-2　処分区分ごとの廃棄体発生量

廃棄物分類	コンクリートピット処分	余裕深度処分	地層処分	計
民間再処理操業廃棄物	24,175	13,215	13,060	50,450
民間 MOX 操業廃棄物	492	61	369	922
民間再処理解体廃棄物	36,647	6,974	639	44,260
民間 MOX 解体廃棄物	491	1,250	263	2,004
JNC 再処理操業廃棄物	10,388	3,410	4,488	18,286
JNCMOX 操業廃棄物	0	14	1,293	1,307
JNC 再処理解体廃棄物	7,238	256	1,051	8,544
JNCMOX 解体廃棄物	0	25	2,020	2,045
返還低レベル放射性廃棄物（COGEMA）	0	0	937	937
返還低レベル放射性廃棄物（BNGS）	9,000	0	2,520	11,520
合計	88,431	25,205	26,640	140,274

表 1-3　処分区分ごとの主要核種の放射性物質量

核種	放射性物質量（Bq）		
	コンクリートピット処分	余裕深度処分	地層処分
H-3	7.4×10^{13}	4.5×10^{14}	7.1×10^{17}
C-14	1.3×10^{12}	3.4×10^{14}	5.7×10^{14}
Cl-36	7.5×10^{8}	5.6×10^{12}	8.8×10^{12}
Co-60	5.9×10^{12}	6.5×10^{17}	1.6×10^{18}
Ni-59	1.8×10^{10}	1.4×10^{15}	7.2×10^{15}
Ni-63	1.6×10^{12}	2.1×10^{17}	1.2×10^{18}
Se-79	1.1×10^{9}	8.6×10^{10}	2.7×10^{12}
Sr-90	6.8×10^{14}	2.2×10^{15}	5.9×10^{17}
Zr-93	3.2×10^{10}	1.5×10^{14}	3.1×10^{14}
Nb-94	4.0×10^{8}	1.2×10^{14}	2.6×10^{15}
Mo-93	7.5×10^{7}	4.5×10^{12}	5.2×10^{13}
Tc-99	2.2×10^{11}	8.0×10^{11}	6.6×10^{14}
Pd-107	2.8×10^{8}	3.3×10^{9}	5.5×10^{11}
Ag-108m	1.7×10^{8}	3.8×10^{12}	2.1×10^{12}
Sn-126	1.3×10^{10}	2.3×10^{10}	6.1×10^{12}
I-129	6.7×10^{9}	1.5×10^{11}	5.2×10^{13}
Cs-135	4.3×10^{9}	1.4×10^{10}	3.4×10^{12}
Cs-137	9.5×10^{14}	3.0×10^{15}	7.6×10^{17}
Pu-241	2.9×10^{14}	3.2×10^{15}	5.7×10^{17}
Am-242m	2.1×10^{11}	2.4×10^{11}	6.2×10^{13}
全 βγ	5.0×10^{15}	4.6×10^{18}	1.7×10^{19}
U-233	2.6×10^{4}	5.0×10^{9}	4.7×10^{9}
U-234	4.9×10^{8}	1.7×10^{9}	1.7×10^{12}
U-235	4.3×10^{7}	6.9×10^{7}	1.1×10^{11}
U-236	7.5×10^{8}	1.0×10^{9}	1.2×10^{12}
U-238	6.2×10^{8}	9.2×10^{8}	1.1×10^{12}
Np-237	5.3×10^{9}	1.3×10^{9}	2.4×10^{12}
Pu-238	7.1×10^{12}	1.1×10^{13}	1.7×10^{16}
Pu-239	6.3×10^{11}	1.1×10^{12}	2.4×10^{15}
Pu-240	9.9×10^{11}	1.7×10^{12}	3.2×10^{15}
Pu-242	4.1×10^{9}	6.6×10^{9}	1.1×10^{13}
Am-241	2.4×10^{12}	3.0×10^{12}	6.1×10^{15}
Am-243	5.6×10^{10}	6.7×10^{10}	2.1×10^{14}
Cm-244	5.7×10^{12}	7.8×10^{12}	9.4×10^{15}
Cm-245	7.4×10^{8}	8.7×10^{8}	9.8×10^{11}
全 α	1.7×10^{13}	2.5×10^{13}	3.9×10^{16}

参考文献：

1. 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 : TRU 廃棄物処分技術検討書―第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ JNC TY1400 2005-013 FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).
2. 原子力安全委員会 : 低レベル放射性個体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について　平成 19 年 5 月 21 日 (2007).
3. 経済産業省 :「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」及び「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」の改定について　平成 20 年 3 月 14 日　News Release (2008).
4. 核燃料サイクル開発機構 : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性―地層処分研究開発第 2 次取りまとめ―　分冊 3 地層処分システムの安全評価　JNC TN1400 99-023 (1999).
5. NUMO : 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性―「処分場の概要」の説明資料―, NUMO-TR-04-01 (2004).

1.3　現在の日本の原子力発電計画に基づく TRU 廃棄物管理の展望

日本では，二酸化炭素発生量削減という観点も含め，原子力の利用をさらに進めることとしている（原子力委員会「原子力政策大綱」；経済産業省「原子力立国計画」）。原子力政策大綱（原子力委員会）では，今世紀を通じた長期的視点に立って，使用済み燃料のリサイクルによる減損ウランも含めたウラン資源の最大限の利用の一環として，高速（増殖）炉の着実な導入のシナリオが描かれている。このような見通しに基づけば，先進的な再処理プロセスの導入なども考慮して 2050 年，さらには今世紀末までに発生すると考えられる TRU 廃棄物のインベントリを検討しておくことが重要である。日本原子力研究開発機構（以下，原子力機構という）では，こうした将来の先進サイクルの導入によって想定される放射性廃棄物のインベントリを推定するためのツールやデータベースの開発に着手（Makino et al., 2009a ; Miyamoto et al., 2006 ; Umeki, et.al., 2007 ; 経済産業省公募事業平成 19 年度先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発報告書 ; 同平成 20 年度報告書）しており，現在の日米原子力協力（JNEAP）の一環としてこれを進めている。これは，TRU-2 報告書で示された TRU 廃棄物に関する処分事業プランに対するオプションを検討し計画の最適化を図るうえでも有効な基盤を提供するものとなる。

参考文献：

1. 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 : TRU 廃棄物処分技術検討書―第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ JNC TY1400 2005-013 FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).
2. 原子力委員会 : 原子力政策大綱　平成 17 年 10 月 11 日 (2005).

3. 経済産業省 : 原子力立国計画　平成 18 年 8 月 8 日 (2006).

4. Makino, H., Umeki, H., Hioki, K. and McKinley, I. G. : The Challenge of Development of a Holistic Waste Management Approach to Support the Nuclear Renaissance, Proc. WM2009 Conference, March 1-5, 2009, Phoenix, AZ, USA (2009a).

5. Miyamoto, Y., Umeki, H., Ohsawa, H., Naito, M., Nakano, K., Makino, H., Shimizu K. and Seo, T., Key R&D Activities Supporting Disposal of Radioactive Waste : Responding to the Challenges of the 21st Century, Nuclear Engineering and Technology, Korean Nuclear Society, Vol.38, No.6, p.505-534 (2006).

6. Umeki, H., Naito, M., Makino, H., Osawa, H., Nakano, K. and Miyamoto, Y. : "ESTABLISHING PRIORITIES FOR HLW R&D IN THE 21ST CENTURY", 15th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE15-10204 (2007).

7. 日本原子力研究開発機構 : 平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 先進的地層処分概念･性能評価技術高度化開発報告書　平成 20 年 3 月 (2008).

8. 日本原子力研究開発機構 : 平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 先進的地層処分概念･性能評価技術高度化開発報告書　平成 21 年 3 月 (2009).

2. 種々の処分概念オプション

高レベル放射性廃棄物ガラス固化体と同様，地層処分 TRU 廃棄物の処分概念は，地下 300m 以深の安定した地質環境に処分するというものである（最終処分法；資源エネルギー庁 HP)。NUMO で現在考えられている処分概念は，TRU-2 報告書（TRU-2 報告書，第 3 章）に示されたものが基本となっている（NUMO 公募関係資料)。しかしながら，この処分概念は，以下のような点で高レベル放射性廃棄物ガラス固化体の処分概念と異なっている。

- 地層処分 TRU 廃棄物は，可溶性で移動性の高い I-129 や C-14 などの核種を含む幅広い放射性濃度分布を示す。また，その性状はセメント固化体，アスファルト固化体，金属圧縮体等と多種多様である上に，中には廃溶媒，ウェスなどの有機物や硝酸塩を含む（経済産業省「TRU 廃棄物の地層処分について考えてみませんか」）ことを特徴とする。
- このような廃棄物を対象とし，含まれる主要核種の種類や化学物質に起因する処分後のシナリオを考慮して，4 つの廃棄体グループを設け，それぞれのグループの特徴に応じた人工バリア概念を採用するとともに，グループごとに異なる区画に埋設する。
- 高レベル放射性廃棄物ガラス固化体に比較して発熱量が低いので，坑道内に廃棄物を集積させる処分が可能である。一方，大空洞集積の場合には，廃棄体や構造躯体・充填材としてのセメントが多量に処分場に持ち込まれることになる。

参考文献：

1. 電気事業連合会･核燃料サイクル開発機構 : TRU 廃棄物処分技術検討書―第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ JNC TY1400 2005-013 FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).
2. 経済産業省 : TRU 廃棄物の地層処分について考えてみませんか 平成 20 年 4 月 (2008).

2.1 地層処分 TRU 廃棄物の分類と人工バリア設計

上述のように地層処分 TRU 廃棄物の核種濃度や物理，化学的特性は多様であり，これらを適切なグループに分類しようとすると実際上いくつかの制約がある。廃棄物の操作性や輸送という観点からは，廃棄物表面での放射線量率が重要な因子となる。例えば，WIPP ではこの観点から廃棄物を「直接操作廃棄物」と「遠隔操作廃棄物」に分類している（WIPP 廃棄物情報)。放射線量率が高い場合には崩壊熱による発熱を伴う場合が多く，熱的な観点からも操作性や処分施設への定置にあたって特別の配慮が必要となる可能性がある。このことは余裕深度処分においても考慮されている（原子力安全委員会放射性廃棄物・廃止措置専門部会，余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方(案) ；JNFL HP)。このような高い放射線量は，主に半減期の短い放射性核種に起因したものであり，例えば図 2-1 に示されているように，TRU 廃棄物のうち比較的高線量率のハル・エンドピース廃棄物では処分を行う前に 20

年程度貯蔵すれば，発熱量は約 1 桁低減する。貯蔵期間の延長は処分概念の検討にあたって一つの方策となりうるものの，安全性や経済性等，種々の観点から合理的なものであることが十分に検討される必要がある（例えば，**NEA Roles of Storage in the Management of Long-lived Radioactive waste** など）。

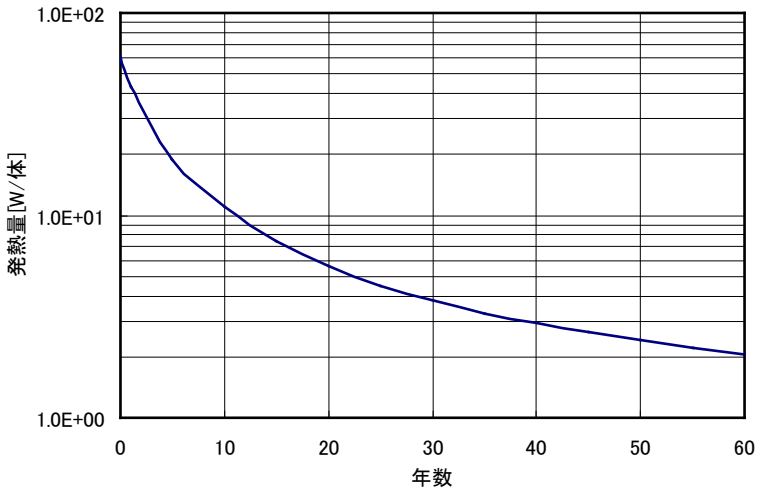


図 2-1　ハル・エンドピース廃棄体の発熱量経時変化（**TRU-2 報告書第 2 章の図 2.5.2-1**）

TRU-2 報告書ではグループ分けに関する様々な検討が行われ，グループを特徴づけるものとして次のような指標が用いられている。

- 地下での移動性の高い放射性核種（I-129 及び C-14）の含有濃度
- 発熱性
- 化学物質の含有（特に硝酸塩）

この結果，地層処分 TRU 廃棄物は以下の 4 つのグループに分類されている。

- グループ 1：廃銀吸着材（ヨウ素フィルター）
- グループ 2：ハル・エンドピース（発熱性で C-14 を多く含む）
- グループ 3：硝酸塩含有廃棄物
- グループ 4：その他

TRU-2 報告書では，廃棄物は異なるグループごとにハンドリングされ，それぞれに対応して設計された人工バリアとともに定置されるものとされている。TRU-2 報告書のような設定は，

閉鎖後の安全評価を容易なものとするという点では有効であるが，処分システム性能や費用等の尺度も含めてグループ化や分類について検討されてはいない。これらの尺度も含めて別のグループ化や分類を検討することは，誤った部分的最適化を避けるためにも重要である（McKinley et al., 2001 ; **Umeki, 2009** ; etc）。また，処分候補地の条件や貯蔵期間の設定による熱影響低減などのオプションも，グループ分類に対する重要な前提条件であり検討に含めるべきものである。地層処分 TRU 廃棄物を対象とした処分概念の最適化の検討も試みられている（McKinley et al., 2001 ; **Umeki, 2009**）。

既述のように，現在，NUMO では最終処分計画に基づくインベントリに従って，処分候補地に適合した処分場の設計や性能評価に向けた準備を進めている（**1.2 節**）。こうした検討では，TRU-2 報告書の人工バリア概念を出発点としつつ，個々の人工バリア要素の実際の効果や考えられるオプションについて詳細な評価を行うことが求められ，これを可能とするためのより高度なツールやデータベースの開発が必要となる。これについては，**5.2 節**で述べる。

参考文献：

1. 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 : TRU 廃棄物処分技術検討書―第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ JNC TY1400 2005-013 FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).
2. 原子力安全委員会放射性廃棄物・廃止措置専門部会 : 余裕深度処分の管理機関終了以後における安全評価に関する考え方(案)　平成 22 年 1 月 21 日 (2010).
3. NEA : The Roles of Storage in the Management of Long-lived Radioactive Waste, Practices and Potentialities in OECD Countries, Radioactive Waste Management, NEA No.6043, Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development, ISBN 92-64-02315-1 (2006).
4. McKinley, I.G., Kawamura, H., Neall, F., Ando, K. : Repository design optimisation for longlived ILW, Sci. Basis Nucl. Waste Manag., XXIV, 843-850 (2001).
5. Umeki, H.. : Holistic assessment to put mobile radionuclides in perspective, International Workshop on Mobile Fission and Activation Products in Nuclear Waste Disposal, MOFAP Workshop 2007, OECD (2009).

2.2　種々の地質環境に適合した処分場設計

NUMO では，応募のあった地層処分候補地点に適合した処分場設計を行うためのアプローチ（NUMO 構造化アプローチ）を開発している（**NUMO-TR-04-03** ; **NUMO-TR-07-01(J)** ; **NUMO-TR-07-02(E)** ）。NUMO 構造化アプローチは当初ガラス固化体の処分を念頭に開発され，閉鎖後の安全性だけでなく，操業時安全性や工学的な実用性，環境影響，社会的受容といった

側面を総合的に検討する「設計因子」の導入といった，世界的にみて最新の知見が盛り込まれている。ここで用いられている一般的な原理は，地層処分 TRU 廃棄物に対しても適用可能であるが，高レベル放射性廃棄物ガラス固化体の処分に比して廃棄物や人工バリア設計が多様であるといったことなどから，今後国際的なレベルで検討すべき課題も存在する。

日本では，地層処分候補地として，まず，活断層や火山・火成活動，著しい隆起・侵食が認められない安定な地質環境であることが求められる。また，将来，人間が処分場の存在を認知できず誤って処分場に侵入する可能性をできる限り低減するために，天然資源が賦存しているような地域は除外される。このような処分地としての除外要件については，改正前の**最終処分法**や原子力安全委員会の指針（概要調査地区選定の環境要件）等に基づき，NUMO によって提示された「概要調査地区の選定に関する考慮事項」において「法定要件に関する事項」（**NUMO 公募関係資料 NUMO-TR-04-04**）として提示されている。これらの除外要件は，当初ガラス固化体の処分を対象として作成されたものであるが，地層処分 TRU 廃棄物の処分候補地が有する条件も同じであり，2008 年の最終処分法の改正（**最終処分法**）にあたって内容の変更は行われていない。

上記 NUMO の考慮事項では，「法定要件に関する事項」を満たす候補地の適切性を相互に比較するため，「付加的に評価する事項」（**NUMO 公募関係資料 NUMO-TR-04-04**）が示されている。これについても，地層処分 TRU 廃棄物の処分に関して，その内容はガラス固化体の処分候補地に対するものと基本的に同じであり変更は行われていない。しかし，高レベル放射性廃棄物に比して発熱密度が小さい地層処分 TRU 廃棄物の処分概念として，TRU-2 報告書で示されているような大空洞への処分を考える場合には，工学的実用性や建設・操業の面から，処分場を設置する**母岩**の力学的特性がより重要となる可能性（**TRU-2 報告書，第 3 章**）がある。大空洞への処分概念の場合，300m 以深に設置されるとはいえ，操業時の地震対策について設計上，特に注意が必要である。

また，大空洞への処分概念については，岩盤の局所的水理特性が平均的水理特性と大きく異なる場合には，地下水対策が大きな課題となる可能性がある。さらに，TRU-2 報告書から引き続いて検討が必要なものとして，地層処分 TRU 廃棄物処分場に持ちこまれる多量のセメントに起因する**高 pH プルーム**の**母岩**への影響を挙げることができる。天然バリアの性能評価の観点から，現在のところ淡水系条件を主とした亀裂の発達した花崗岩に対して試験が進められている（**TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発　平成 18 年度報告(亀井ほか, 2007), JAEA Research 2007-067**，**19 年度報告(亀井ほか, 2008)　JAEA Research 2008-082** 及び **20 年度報告(亀井ほか, 2010), JAEA Research 2009-046**）。今後，種々の岩石や地下水環境でのデータ蓄積が必要である。ガスが多量に発生する可能性がある場合にも，その母岩への影響を検討しておくことが重要である（例えば，原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 13 年度　地層処分経済性向上調査　人工バリア・天然バリアガス移行挙動の評価　報告書 (2002)；原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 18 年度　地層処分技術調査等　人工バリア・天然バリアガス移行挙動評価報告書 (2007)）。

以上のような点を実際に検討するためには処分候補地の条件や処分場設計の特徴を考慮した詳細な感度解析が必要であるが，地層処分 TRU 廃棄物に関する一般的な「付加的に評価する事項」においても留意することが重要と考えられる。

TRU-2 報告書でレファレンスとして示されている人工バリア設計や処分場レイアウトは力学的検討及び施工性に基づいて行われ，これに対して，特にセメントを材料とする主要な処分システムの外側を取り囲むベントナイトバリアなど，各バリアの有効性に関して様々な観点から検討が行われている（**TRU-2 報告書第 3 章**）。高 pH プルームに対しベントナイトの性能が長期間にわたって維持されることを示すのは重要な課題であるが（**NUMO-TR-04-05**），この問題に関する TRU-2 報告書の評価では，種々の不確実性のために，非常に大きな幅を持った結果が得られている。また，このようなベントナイトバリアを品質が保証された方法で敷設することが実際に可能かどうかについてはさらに検討が必要である。

参考文献：

1. 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 : TRU 廃棄物処分技術検討書―第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ JNC TY1400 2005-013 FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).
2. NUMO : Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environment, NUMO-TR-04-03 (2004).
3. NUMO : 段階的な事業推進における構造化アプローチと要件管理, NUMO-TR-07-01 (2007).
4. NUMO : The NUMO Structured Approach to HLW Disposal in Japan, NUMO-TR-07-02 (2007).
5. NUMO : 概要調査地区選定上の考慮事項（分冊－2）(2009).
6. 亀井玄人ほか : TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発　平成 18 年度報告 JAEA Research 2007-067 (2007).
7. 亀井玄人ほか : TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発　平成 19 年度報告 JAEA Research 2008-082 (2008).
8. 亀井玄人ほか : TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発　平成 20 年度報告 JAEA Research 2009-046 (2010).
9. 原子力環境整備促進・資金管理センター : 平成 13 年度　地層処分経済性向上調査　人工バリア・天然バリアガス移行挙動の評価　報告書 (2002).
10. 原子力環境整備促進・資金管理センター : 平成 18 年度　地層処分技術調査等 人工バリア・天然バリアガス移行挙動評価報告書 (2007).
11. NUMO : Proceedings of the International Workshop on Bentonite-Cement Interaction in Repository

Environments, NUMO-TR-04-05 (2004).

2.3 諸外国における設計との比較

地下水で飽和している岩盤を対象としたTRU廃棄物地層処分場の設計（Nagra, 1985）では，初期にはバリアとしてベントナイトが考慮されていたが，セメントに起因する高アルカリプルームによるベントナイトの変質を考慮し，極めて透水性の低い岩盤を対象とした処分概念（例えば **Entsorgungsnachweis** ; **Nagra NTB 02-05**）などでは可能であれば除かれる傾向にある。この観点からは，亀裂性の結晶質岩等に対しては，**ハイドロリックケージ**を利用した概念（例えば，**SKB TR-99-28** ; **NUMO-TR-04-03** ; Umeki, et al., 2003）も検討に値すると考えられる。すでに述べた（**1.1 節**）ように，地層処分の対象となるTRU廃棄物も各国で異なり，このことも処分場の設計に影響を及ぼす。地層処分TRU廃棄物を分類する場合には，有機物質を多量に含む廃棄物と他の廃棄物との相互作用を排除することに注意が向けられるようになっている（**2.1 節** ; **Nagra NTB 02-02** ; **Nagra NTB 02-05** ）。その他，異なる廃棄物を大空洞内に適切に配置して処分することにより性能を最適化するといった設計オプションに関する概念検討なども行われている（McKinley et al., 2001 ; **Umeki, 2009**）。

TRU-2 報告書ではそれほど強調されていないが，地層処分 TRU 廃棄物に関してはガスの発生について特に注意が払われている。主要なガスの発生源は，金属の還元環境下での腐食と有機物質の微生物分解である。これらは，廃棄物パッケージや人工バリアの設計において考慮され，使用する金属容器の最小化，透気性の高いグラウトの使用あるいは通気孔の設置といった方法が考えられている。

このような設計概念やこれを評価するためのモデルについては，大規模**原位置試験**(Grimsel地下研究施設での国際共同研究プロジェクト **Gas Migration Test (GMT)**)の中で検討されている（例えば，原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 18 年度　地層処分技術調査等　人工バリア・天然バリアガス移行挙動評価報告書 (2007)）。

参考文献：

1. 電気事業連合会･核燃料サイクル開発機構 : TRU 廃棄物処分技術検討書―第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ JNC TY1400 2005-013 FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).
2. Nagra : Project Gewähr 1985; Nuclear waste management in Switzerland: Feasibility studies and safety analyses, Nagra Project Report NGB 85-09 (1985).
3. Nagra : Feasibility demonstration for HLW disposal. Nagra Bulletin No.35 ‘Entsorgungsnachweis’ (2004).

4. Nagra : Project Opalinus Clay Safety Report National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), TECHNICAL REPORT 02-05 (2002).

5. NUMO : Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environment, NUMO-TR-04-03 (2004).

6. Umeki, H., Masuda, S. and McKinley, I.G. : Advanced repository concepts required for a volunteering approach to site selection, GLOBAL 2003: Topical Meeting of the 2003 ANS/ENS International Winter Meeting, Nov.16-20, 2003, New Orleans, LA, USA (2003).

7. Nagra : Projekt Opalinuston Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle, TECHNISCHER BERICHT 02-02 (2002).

8. McKinley, I.G., Kawamura, H., Neall, F., Ando, K. : Repository design optimisation for longlived ILW, Sci. Basis Nucl. Waste Manag., XXIV, 843-850 (2001).

9. Umeki, H.. : Holistic assessment to put mobile radionuclides in perspective, International Workshop on Mobile Fission and Activation Products in Nuclear Waste Disposal, MOFAP Workshop 2007, OECD (2009).

10. 原子力環境整備促進・資金管理センター : 平成 18 年度　地層処分技術調査等 人工バリア・天然バリアガス移行挙動評価報告書 (2007).

3. 日本の地層処分事業計画における前提条件

すべての放射性廃棄物を考慮した統合的管理体系が大きな利点を有することは国際原子力機関（IAEA）（**Louvat et al.,2005, IAEA Safety Guide GSG-1**）によって支持された国際的な合意となっている。日本においても，こうした観点から，原子力安全委員会によって種々の放射性廃棄物の処分に関して共通的に重要な事項についての検討が行われ報告書（**原子力安全委員会「共通的重要事項」**）が公表されている。TRU 廃棄物の地層処分事業計画に関してもこのことを念頭に置いておくことが重要である。特に高レベル放射性廃棄物ガラス固化体の地層処分や余裕深度処分に関する安全規制の議論（**原子力安全委員会特定放射性廃棄物処分安全調査会「環境要件」**；原子力安全・保安院「地層処分の安全規制のあり方」，**「規制支援研究」**）に留意し，それらとの整合性に配慮することが必要である。

参考文献：

1. Louvat, D., Metcalf, P.E., Jova Sed, L. and Rowat, J. : A common framework for the management and disposal of radioactive waste., Safety of Radioactive Waste Disposal., Proc. of an International Conf. Tokyo, 3-7 Oct. 2005 IAEA, AEN NEA (2005).
2. 原子力安全委員会 ： 放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について，平成 16 年 6 月 10 日 (2004).
3. 原子力安全委員会 特定放射性廃棄物処分安全調査会 ： 高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について 第 62 回原子力安全委員会資料第 4-2 号 (2002).
4. 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会 ： 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について 平成 20 年 1 月 18 日 (2008).
5. 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 ： 放射性廃棄物規制支援研究ワーキンググループ（第 1 回）-配付資料 2008 年 11 月 11 日 (2008).

3.1 公募による処分地の選定

NUMO は，高レベル放射性廃棄物の処分事業計画において公募による処分地の選定を進めることとし，この方針は最終処分法の改正（**最終処分法**）によって地層処分 TRU 廃棄物が処分事業対象に加えられた後においても変わっていない（**NUMO 公募関係資料**）。応募を行う場合，高レベル放射性廃棄物ガラス固化体あるいは地層処分 TRU 廃棄物のどちらか，あるいは両方を受け入れるという選択の余地が残されている。また，立地を推進するためには公募による方法だけでなく国がより積極的に関与することの重要性も指摘され，国が候補地を推薦するという

方法も併用されることになっている（廃棄物小委報告書；最終処分基本方針及び計画）。このような制約条件のもとに想定される様々な状況に対し，NUMO は明確な基準によって処分候補地としての適性に関する判断を行う必要がある。研究開発計画はその成果によって，こうした判断を支援することができるようにすることが重要である。

参考文献：

1. 原子力発電環境整備機構 ： 概要調査地区選定上の考慮事項（分冊－2） (2009).

2. 総合資源エネルギー調査会　原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会 ： 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について　平成 20 年 1 月 18 日 (2008).

3. 経済産業省 ： 「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」及び「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」の改定について　平成 20 年 3 月 14 日　News Release (2008).

3.2　高レベル放射性廃棄物地層処分や余裕深度処分との連携

処分地の選定と処分候補地における地質環境調査に関しては，TRU 廃棄物の地層処分は，高レベル放射性廃棄物の地層処分と多くの共通点がある。また，余裕深度処分とは人工バリア設計と安全評価に関して共通点が多い。

前者の連携についていえば，従来，日本では高レベル放射性廃棄物の地層処分の研究開発が先導的に進められてきており，TRU 廃棄物の地層処分に関する技術的なレベルを高レベル放射性廃棄物と同等なものとするまでに要する時間が鍵となる。特に，特定の処分候補地に適合した TRU 廃棄物地層処分場の設計を行うための技術と現実的な閉鎖後の安全評価に基づく処分候補地間の比較評価を行うための技術を，その重要性を増すと予想される至近のマイルストーンである概要調査地区の選定において，また精密調査地区の選定（5.1 節参照）においても，利用可能なものとするためには，研究開発資源を集中的にこれらの開発に投資することが必要であると考えられる。精密調査地区の選定にあたっては，安全な建設や操業のために要求される品質レベルの実用性や，種々の処分場設計オプションについて操業段階で想定される擾乱に起因するリスクや影響を評価することが重要となると予想される。これらの評価では，高レベル放射性廃棄物の地層処分と共通するものが多々ある（例えば，地上施設，アクセス坑道，輸送，擾乱シナリオなど）が，廃棄物のハンドリングや人工バリアなどの詳細に関しては TRU 廃棄物の地層処分概念に特有なものが多く存在する。

TRU-2 報告書で実施された比較的単純な安全評価（図 3-1）によって推定された TRU 廃棄物の地層処分システムに起因する線量は，高レベル放射性廃棄物の地層システムに関する事例（図 3-1；HLW 第 2 次取りまとめ）と比較して高いものとなっている。この傾向は諸外国の安全評価でも経験されていることである（例えば，Entsorgungsnachweis；Nagra NTB 02-05）。このこ

とは，使用済み燃料中に含まれる放射性核種のうち，線量評価上の寄与が比較的大きくなる傾向のある I-129 や C-14 が，高レベル放射性廃棄物でなく TRU 廃棄物として選択的に回収されるという再処理工程に起因している。また，TRU 廃棄物の地層処分システムの評価にあたり，高レベル放射性廃棄物処分の安全評価手法を踏襲することが，必ずしも有効な評価方法となるとは限らないということを示唆している。従って，地層処分 TRU 廃棄物の処分候補地選定に向けては，その技術的基盤が，将来の意思決定に必要な科学的知見を十分に提供できるように注意深い研究開発を続ける必要がある。

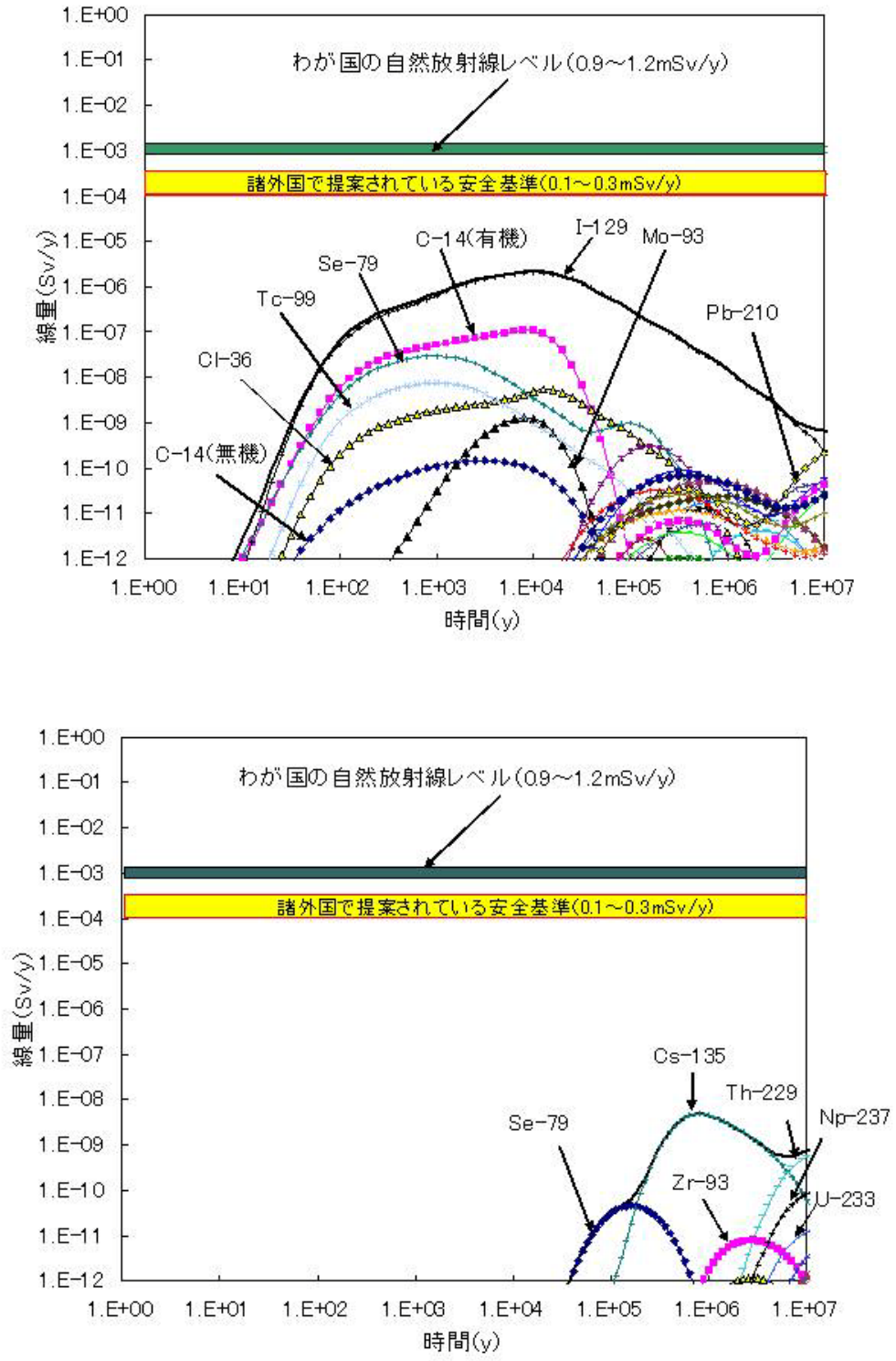


図 3-1　地層処分 TRU 廃棄物（上）と高レベル放射性廃棄物（下）処分の参照条件における線量評価結果の比較

地層処分 TRU 廃棄物の特性や人工バリア設計は，余裕深度処分と類似性があり，技術情報や知見を相互に共有することは有益である。地層処分 TRU 廃棄物に関するセーフティケース（**NEA Safety Case Brochure** ; **IAEA WS-R-4** ; **CoolRepH22 本文 1.2.1 節**）では，地層処分に振り分けるプロセスが有効であることが明確に説明されることが必要である。これは戦略的環境影響評価（SEA: Strategic Environmental Assessment）のプロセスとしても重要である（**CoolRepH22 本文 1.1.1 節**）。地層処分 TRU 廃棄物は，最終処分法に基づく政令（**最終処分法施行令**）における「第二種特定放射性廃棄物」として，「物」や「対象核種の放射能濃度（下限値）」に基づき規定されている。他方，原子炉等規制法でも，「第一種廃棄物埋設」の対象となる放射性廃棄物を「対象核種の放射能濃度（下限値）」によって定めている（**原子炉等規制法施行令**）が，その値は最終処分法に規定されたものより高くなっている。

参考文献：

1. 核燃料サイクル開発機構 ： わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 —地層処分研究開発第 2 次取りまとめ— 分冊 3 地層処分システムの安全評価 JNC TN1400 99-023 (1999).
2. Nagra : Feasibility demonstration for HLW disposal. Nagra Bulletin No.35 ‘Entsorgungsnachweis’ (2004).
3. Nagra : Project Opalinus Clay Safety Report National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), TECHNICAL REPORT 02-05 (2002).
4. NEA : POST-CLOSURE SAFETY CASE FOR GEOLOGICAL REPOSITORIES Radioactive Waste Management ISBN 92-64-02075-6 (2004).
5. 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 : TRU 廃棄物処分技術検討書—第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ JNC TY1400 2005-013 FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).
6. IAEA : IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. Geological Disposal of Radioactive Waste. Safety Requirements No.WS-R-4 (2006).

3.3 オプションとしての併置処分

NUMO の公募資料（**NUMO 公募関係資料**）に示されているように，高レベル放射性廃棄物と地層処分 TRU 廃棄物を併置処分するオプションが検討されている。このオプションはインフラを共通に用い，資源を有効利用するという観点から利点があるが，こうした観点のみならず，**1.3 節**に述べたように 21 世紀を通じて発生すると予想される種々の放射性廃棄物も視野にいれた併置処分概念について技術的な検討を行って置くことは有益であると考えられる。

現在考えられている地層処分 TRU 廃棄物と高レベル放射性廃棄物の併置処分に関して，検討を行う必要がある重要な因子は，①高レベル放射性廃棄物からの熱による TRU 廃棄物施設のセメントの核種収着性（以下，**収着分配係数** Kd）の低下，②TRU 廃棄物からの有機物による高レベル放射性廃棄物の溶解度上昇や Kd の低下，③TRU 廃棄物処分施設からの硝酸塩による高レベル放射性廃棄物の溶解度上昇，Kd 低下，及びオーバーパックの金属腐食，④TRU 廃棄物及び施設からの高アルカリ性地下水による高レベル放射性廃棄物のベントナイト緩衝材の変質，オーバーパックの金属腐食，及びガラスの溶解速度の上昇である。

TRU-2 報告書では，これらの因子が相互に影響を及ぼさない程度に両廃棄物処分場を離して設置すれば併置処分が成立するとの考えのもとに検討がなされている。最も離隔距離を要するのは炭素鋼オーバーパックの腐食条件の観点から硝酸塩の影響であるとされ，参照条件のもとでは 300m の離隔が必要とされた（**TRU-2 報告書，6 章**；原子力委員会「併置処分等の技術的成立性」報告書）。硝酸塩影響については，地層中での硝酸塩の化学的変遷挙動や，高レベル放射性廃棄物に含まれる核種の溶解度上昇や Kd 等についての知見拡充が必要であり，研究が進められている（**経済産業省公募事業平成 19 年度硝酸塩処理・処分技術高度化開発報告書**；**同平成 20 年度報告書**）。

同様に，高アルカリ性地下水の影響範囲についても，高レベル放射性廃棄物の緩衝材変質，金属腐食及びガラス固化体の溶解の観点から検討されており，同じく参照条件のもとでは 30m の離隔が必要とされた（**TRU-2 報告書，6 章**；**原子力委員会　長半減期低発熱放射性廃棄物処分技術検討会，長半減期低発熱放射性廃棄物の地層処分の基本的考え方-高レベル放射性廃棄物との併置処分等の技術的成立性-**)。しかしこれらの影響範囲は実際の地質環境条件ごとに異なると考えられる。ヨルダンの Maqarin では河谷の斜面近傍に天然セメントが存在し，そこから高アルカリ性地下水が数百 m にわたり堆積岩中を流下している(Alexander,W.R. and Smellie,J.A.T, 1998)。この事例では広範囲にわたって高 pH セメント水の影響が認められるが，この一因としては，天然セメントを通過し，その下位の堆積岩層を流下する地下水の速度が大きいことが考えられる。しかし，影響範囲は pH 低下の効果をもたらす鉱物とアルカリ性溶液の反応速度と地下水の移動速度との関係によって決まることから，今後さらに速度論的データや知見の蓄積が重要であることが示唆される。

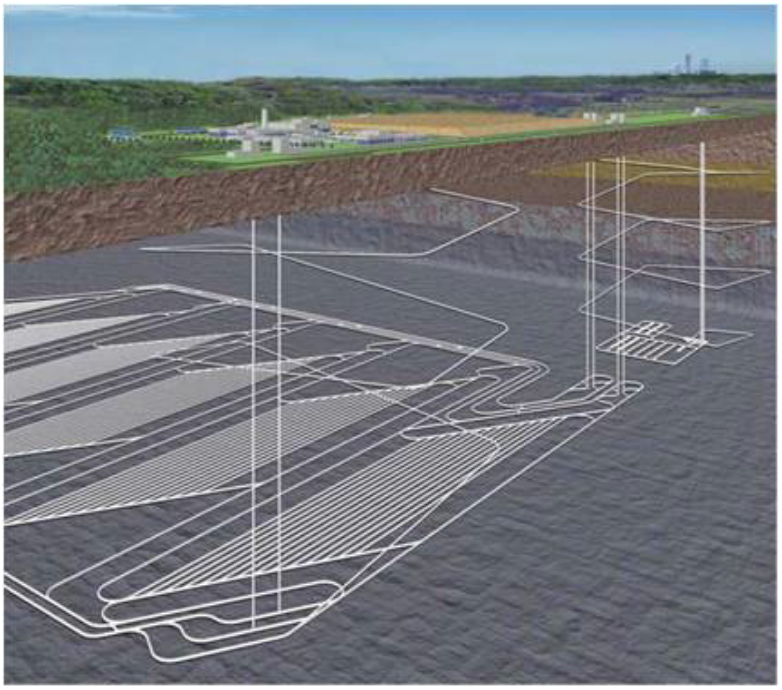


図 3-2　地層処分（併置処分）の概念図（NUMO 公募関係資料）

参考文献：

1. 原子力発電環境整備機構 ： 処分場の概要, 放射性廃棄物の地層処分事業について　分冊 - 1（2009）.

2. 電気事業連合会･核燃料サイクル開発機構 : TRU 廃棄物処分技術検討書―第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ JNC TY1400 2005-013 FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).

3. 原子力委員会 ： 長半減期低発熱放射性廃棄物の地層処分の基本的考え方―高レベル放射性廃棄物との併置処分等の技術的成立性―平成 18 年 4 月 18 日 (2006).

4. 亀井玄人ほか : TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発　平成 19 年度報告 JAEA Research 2008-082 (2008).

5. 亀井玄人ほか : TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発　平成 20 年度報告 JAEA Research 2009-046 (2010).

6. Alexander, W. R. and Smellie, J. A. T. : Maqarin Natural Analogue Project ANDRA, CEA, NAGRA, NIREX and SKB Synthesis Report on Phases I, II, and III., Nagra NPB 98-08 (1998).

3.4　地層処分事業としての要件とそのトレードオフ

TRU-2 報告書では閉鎖後の安全性に焦点を当てて地層処分概念の技術的可能性について検討が行われたが，実際に処分事業を進めるうえでは他の因子についても考慮することが必要である（NUMO-TR-04-01 ; NUMO-TR-04-03）。多くの場合，こうした因子に関する各要件の中で，

それらのトレードオフを検討する必要が生ずる。最も典型的な例は，処分候補地における地質環境調査や処分場の建設・操業時に現在の世代（主に作業者）に対して発生する可能性がある比較的大きなリスクと，仮に生ずるとしても数十万年先の将来世代に対して推定される僅かな仮想的リスクとの間で求められるバランスである。具体的には，セメント系材料（ポルトランドセメントを使用した材料のことで，コンクリートやセメントモルタルなどの総称）の使用を挙げることができる。セメント系材料は，土木・建築の分野で，建設材料として幅広く使用されており，数多くの使用実績を有する材料である。しかし，セメント系材料を多量に使用した処分施設を閉鎖すると，施設周辺の地下水が長期にわたり高アルカリ性に保たれ，人工バリア材料のベントナイトや周辺の岩盤の長期挙動に影響を及ぼす可能性がある。これにより，処分施設閉鎖後における安全評価の不確実性の幅が大きくなることが懸念される。セメント系材料の使用については，安全評価の観点からその使用量や使用するセメントの種類などを十分に検討することが重要である。

他の重要な例として，処分場の深度を挙げることができる。処分候補地の条件に大きく依存するが，一般的な傾向としては深度が大きくなるにしたがって閉鎖後の長期安全性が増す一方，処分場の建設・操業期間におけるリスクも増加し，費用や環境影響も大きくなる。これらの間のバランスは注意深く検討されることが必要である。

NUMO では意思決定プロセスに地域住民の参加を得ることとしており，意思決定が受容されるために，安全性や環境影響に関する技術的な制約をステークホルダーの要求とバランスさせる必要が生ずる可能性がある。この観点で重要となるのは，長期モニタリングや将来問題が生じた場合に備え回収可能性を維持しておくといったことである。地層処分に関する処分場閉鎖後の長期モニタリングは技術的な意味があるものではなく，回収可能性の維持と組み合わせたシステムの直接的なモニタリング（例えば閉鎖時期の延長）は処分場閉鎖後の長期安全性に悪影響を及ぼす可能性がある（例えば，**IAEA-TECDOC-1187**；**IAEA-TECDOC-1208**；**IAEA NW-T-1.19**；**IAEA-TECDOC-1323**；**NEA R&R** など）。とはいえ，モニタリング装置の維持や長期的なアクセスルートを確保するといった社会的な要請があれば，研究開発によって，費用の低減だけでなく，環境影響や作業者へのリスク，長期安全性への悪影響を最小限にとどめるような技術的な選択肢の検討を行うことが必要である。

参考文献：

1. 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―「処分場の概要」の説明資料―NUMO-TR-04-01(2004).

2. NUMO : Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environment, NUMO-TR-04-03 (2004).

3. IAEA : Retrievability of high level waste and spent nuclear fuel IAEA-TECDOC-1187(2000).

4. IAEA : Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste IAEA-TECDOC-1280(2001).

5. IAEA : Geological Disposal of Radioactive Waste : Technological Implications for Retrievability No. NW-T-1.19 (2009).

6. IAEA : Institutional framework for long term management of high level waste and/or spent nuclear fuel IAEA-TECDOC-1323 (2002).

7. NEA : Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste Reflections at the International Level Radioactive Waste Management (2001).

4. セーフティケースのための技術基盤の概要

TRU 廃棄物の地層処分に関するセーフティケースの作成にあたって，まず安全戦略を明確にする必要がある。この安全戦略は，これまでに述べたことから，高レベル放射性廃棄物処分や余裕深度処分に関する安全戦略と類似した点を有する一方，特に廃棄物分類とインベントリ，処分地選定戦略，処分概念と閉鎖後安全性にとって鍵となる構成要素，操業時安全性に関連した特徴的な課題を含んでいると考えられる。また，前節で論じたように，事業の実施におけるトレードオフについて考慮するとともに，事業計画を最適化するための方法について検討することが必要である。

4.1 処分地選定と候補地における地質環境調査

セーフティケースの主要な要素の一つは,「長期間にわたって放射性廃棄物を人間と環境から隔離し，人工バリアが機能を発揮できる安定な地質環境において処分が実施されること」を示すことである。これまでに実施された，日本における幅広い地質環境を考慮した仮想的な地質環境における地層処分の安全評価（TRU-2 報告書の参照条件での評価）によれば，TRU 廃棄物地層処分の最大線量値の出現時期は処分後約 1 万年で高レベル放射性廃棄物（約 80 万年）に比べて早い。しかし，その最大線量値は高レベル放射性廃棄物のそれに比して 2 桁高く，この値が高レベル放射性廃棄物の最大線量程度に低下するには，約 100 万年を要する（図 3-1)。このことからも，TRU 廃棄物の地層処分に対しても地質環境の長期的な安定性に対して十分に配慮することが必要である。

また，TRU-2 報告書で示されたセーフティケース(**TRU-2 報告書**)では，母岩の核種移行特性が最大線量に大きく影響するが，TRU 廃棄物処分場に存在する多量のセメントに由来する高アルカリ性溶液が，母岩を変質させることにより，この母岩の核種移行特性が経時的に変化することに留意する必要がある。TRU-2 報告書では，周辺母岩については，その影響は施設近傍に留まり，核種移行経路全体に対する顕著な負の影響は生じないとされた（**TRU-2 報告書　第 4 章**)。その後も評価の信頼性向上のため，この課題に対する研究が継続して進められている（**TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発　平成 18 年度報告(亀井ほか, 2007), JAEA Research 2007-067**，**19 年度報告(亀井ほか, 2008)　JAEA Research 2008-082** 及び **20 年度報告(亀井ほか, 2010), JAEA Research 2009-046**)。今後も，多様な地質環境へ対処するため，引き続きデータ，知見の拡充を図ることが評価の信頼性向上のために必要である。

前述のように天然バリア本来の特性が大きく変化する可能性があることから，高レベル放射性廃棄物における処分地選定と候補地における地質環境調査の要件に加えて，天然バリアの特性変化が最小となるような母岩特性（**4.3 節**)，あるいは工学的対策によってこうした変化を最小なものに抑えることが可能な母岩特性（**4.2 節**）がどのようなものか等の要件を検討することが重要であると考えられる。この検討を適切に行うためにも，システムに影響する現象の理解をさらに進めていく必要がある。

参考文献：

1. 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 : TRU 廃棄物処分技術検討書―第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ JNC TY1400 2005-013 FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).

2. 亀井玄人ほか : TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発　平成 18 年度報告 JAEA Research 2007-067 (2007).

3. 亀井玄人ほか : TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発　平成 19 年度報告 JAEA Research 2008-082 (2008).

4. 亀井玄人ほか : TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発　平成 20 年度報告 JAEA Research 2009-046 (2010).

4.2　処分場設計と工学技術

図 4-1 に示す TRU 廃棄物地層処分の概念設計と処分場レイアウト（原子力委員会　長半減期低発熱放射性廃棄物処分技術検討会，長半減期低発熱放射性廃棄物の地層処分の基本的考え方-高レベル放射性廃棄物との併置処分等の技術的成立性-)は，一連の処分坑道群に標準化された廃棄物パッケージを埋設するというものである。これらの坑道の形状は静的安定性や地震応答を考慮した岩盤力学解析に基づいて決められている（TRU-2 報告書　第 3 章 3.2.2)。

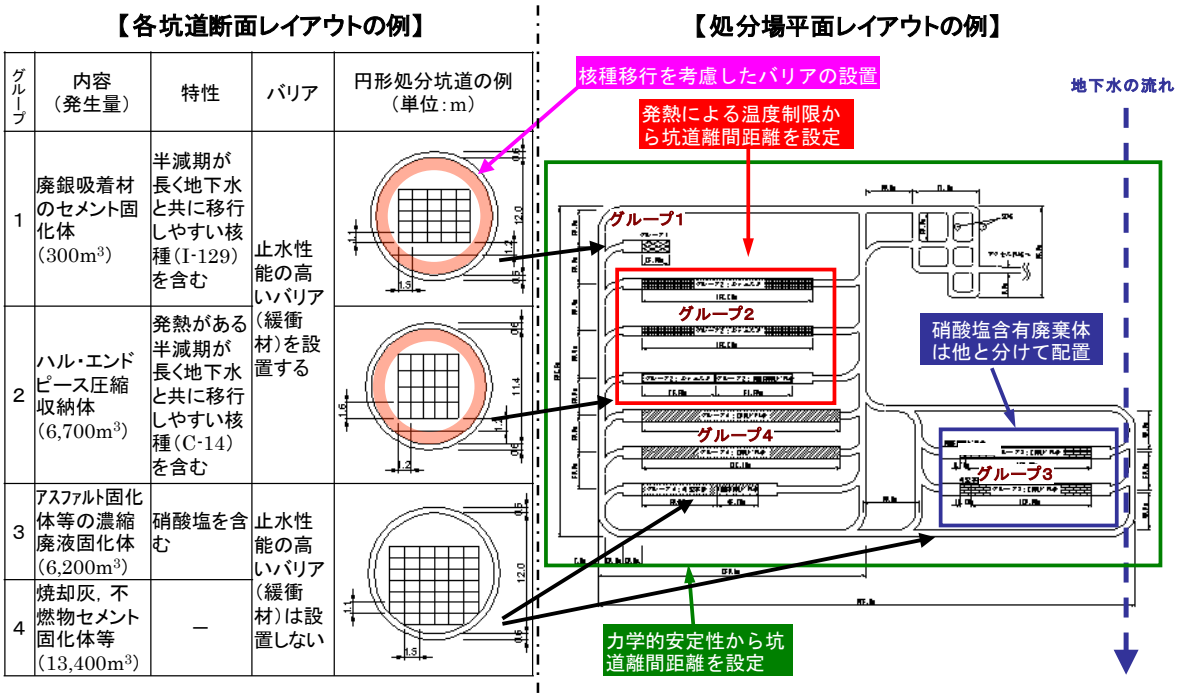


図 4-1　地層処分 TRU 廃棄物の処分場レイアウトと処分概念の例
（原子力委員会　長半減期低発熱放射性廃棄物処分技術検討会，長半減期低発熱放射性廃棄物の地層処分の基本的考え方-高レベル放射性廃棄物との併置処分等の技術的成立性-，2006）

特定の地点に適合した概念設計を検討するためにはより綿密な設計プロセスが必要である（Umeki, 2009）。このプロセスは以下のような項目を統合して進められる。

(a) 処分事業に関するスケジュールと廃棄物の発生シナリオ
(b) 廃棄物特性の把握と分類
(c) 処分のための廃棄物の調製とパッケージ化の仕様
(d) 処分空洞設計とレイアウト
(e) 付加的に必要となるインフラの決定（被覆，床面，排水，換気，プラグ，シールなど）
(f) 建設，操業，閉鎖の手順の概要（品質保証を含む）

このような設計プロセスはまだ存在していないが，原子力機構が開発している知識ベースは，その構築を支援することが可能である。その際，すでに他で適用を行い，有効性が実証されている知識工学的ツールを利用すればより円滑に進めることができるものと期待される（KMS カーネル）。

現在，先進サイクルによって発生すると考えられる廃棄物に関して研究（Makino et al., 2009a ; 経済産業省公募事業報告書）が進められており，これによって項目(a)の検討を開始するための

基礎が提供されている。しかし，この研究は，地層処分が必要な「低レベル放射性廃棄物」に対する用語や要件を明確にしたうえで，さらに検討を続けることが必要である（1 節）。この研究は，項目(b)と(c)に対しても基礎となるものである。これを考慮して，TRU-2 報告書で示された技術的内容は，廃棄物の分類とパッケージのオプションに関するより幅広い検討やシステムの全体性能の観点からこれらの長所及び短所を評価するツールの改良を行うために拡張される必要がある（4.3 節）。

項目(b)と(c)に基づいて，項目(d)，(e)，(f)を含む処分場設計の主要なプロセスを開始することが可能となる。これら三つの項目は相互に関連し，処分候補地の地質環境に依存する。特に処分地選定の初期段階では地質環境に関する不確実性が大きく，このこともこれらの項目に影響を及ぼす。これらの項目に関する技術的なオプションは，様々な因子を考慮し明瞭で透明性のある方法によって比較検討される必要がある（例えば，多属性効用分析（MAA）の利用）。処分事業の初期段階ではこのような検討は主に専門家の判断に委ねられるが，少なくとも精密調査地区の選定時期までには，操業時と閉鎖後の安全性に関して現実的かつ定量的な評価が必要になると考えられる（4.3 節参照）。

参考文献：

1. 原子力委員会 ： 長半減期低発熱放射性廃棄物の地層処分の基本的考え方―高レベル放射性廃棄物との併置処分等の技術的成立性―平成 18 年 4 月 18 日 (2006).

2. 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 ：TRU 廃棄物処分技術検討書―第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ JNC TY1400 2005-013 FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).

3. NEA : Mobile Fission and Activation Production Nuclear Waste Disposal, Workshop Proceedings La Baule, France 16-19 January 2007, Nuclear Science, NEA No.6310, Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development, ISBN 978-92-64-99072-2 (2009).

4. Makino, H., Umeki, H., Hioki, K. and McKinley, I. G. : The Challenge of Development of a Holistic Waste Management Approach to Support the Nuclear Renaissance, Proc. WM2009 Conference, March 1-5, 2009, Phoenix, AZ, USA (2009a).

4.3 安全評価（閉鎖後，建設・操業）

高レベル放射性廃棄物の地層処分と対比したときの TRU 廃棄物の地層処分の特徴は，深部地質環境において地質学的時間の中で達成された化学的安定状態に，その状態から遠い物質（セメント系材料及び硝酸塩）を多量に持ち込むため，地層処分システム内に大きなエネルギーギャップが発生することである。自然の摂理として，地層処分システム内では，このエネルギーギャップを駆動力としてセメント系材料或いは硝酸塩と深部地下環境由来の物質(緩衝材及び

岩石)及び地下水とが反応し，深部地下本体の環境条件やバリア性能等を変化させながら，新たな化学的安定状態に向かって変化していく。

したがって，TRU 廃棄物の地層処分の安全評価は，経時的に変化する場の中での核種移行を解析しなければならないこととなる。この変化は化学的現象，力学的現象及び物質輸送特性変化に跨る複合的現象として起こる。また，個々の現象が，正負のフィードバックループを内包する非線形の関連性で結び付けられており，複合的現象を要素分解して個々を評価しても，要素の集合体であるシステムを評価したことにはならない。このため，これらの非線形の関連性を表現できる連成解析が必要とされる。

TRU-2 報告書における閉鎖後の安全評価（**TRU-2 報告書,第 4 章 4.4.2**）では多数の関連するプロセス（例えば，セメントの浸出，ベントナイトや母岩の高 pH 溶液による変質，ガスやコロイド形成，アスファルト固化体の劣化など）が考慮されている。このうちコロイドについてはセメント間隙水では形成されないという結果となっている。また，ベントナイト緩衝材については I-129 に富むグループ 1 廃棄物や，C-14 に富むグループ 2 廃棄物に対して設置が考えられているが，これは，これらの核種の移行について人工バリア内部を拡散支配の場とするためである。緩衝材については 10 万年程度の健全性が期待できる可能性があるという評価結果となっているが，情報の不完全性に起因する大きな不確実性を内包しているため，今後，評価の信頼性向上を目的とする，知見の拡充が必要である。

また，TRU-2 報告書では，亀裂性媒体に対するセメント影響も，単に間隙率と透水係数のみを亀裂性媒体にあわせた等価多孔質媒体として取り扱われている（例えば **TRU-2 報告書，第 4 章 4.4.3**）など，TRU-2 報告書執筆時点での情報で可能な評価が行われたにすぎず，不均一性等の亀裂性媒体の特徴が，変質の影響評価に十分に反映されていない可能性がある。亀裂性媒体あるいは地下水が選択的な経路を流れるような岩盤を考えなければならない場合には，変質領域とその放射性核種の移行への影響が局所的なものとなり，TRU-2 報告書の解析で設定されているような単純なミキシングタンクによる人工バリア外側境界や天然バリアの取り扱いとは様相を異にすることに注意が必要である。

以上のようなことから，処分場設計のオプションの比較のために必要な現実的な解析を行ううえで TRU-2 報告書の評価ツールでは限界がある。したがって，

- 人工バリアと周辺母岩の変質領域に焦点を当てた処分システムの時間的変化に関する包括的なシナリオの開発
- 人工バリア複合現象の評価を目的とした個別プロセスモデルの連成化
- 廃棄物パッケージや人工バリア構成物の種々の組み合わせを検討可能とする解像度で関連する人工バリア構成要素を表現するための多次元モデルの開発
- 従来の処分場設計に対する代替設計案（例えば，ハイドロリックケージ概念など）の定量的評価のためのモデル開発

・ 検証や確証などモデルの評価の信頼性向上のための方法論の構築（例えば，長期大規模原位置試験，ナチュラルアナログなど）

といったことが，優先的に取り組まれるべき研究開発課題として考えられる。こうしたモデル開発は挑戦的な作業であるが，余裕深度処分のためのモデル開発の経験（例えば，**Yamakazi, H. and Sasaki, T., 2009** など）やクラウドコンピューティングなど最新の計算技術（**KMS カーネル**）を利用することが可能と考えられる。

参考文献：

1. 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 : TRU 廃棄物処分技術検討書―第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ JNC TY1400 2005-013 FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).

2. OECD : Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste Management（2009）.

4.4 セーフティケースを支援するための種々の論拠

多様なステークホルダーにセーフティケースが受容されるためには，定量的評価だけでなくこれを補完する幅広い定性的論拠が必要とされることは広く認識されている（**CoolRepH22 本文 1.2.1 節**）。このような補完的論拠は特に処分事業初期段階において，事業計画や候補地に応じた安全性の説明を行ううえで有効なものとなりうることから，これらを優先的に準備することが重要と考えられる。廃棄物が余裕深度処分の場合と類似であり，余裕深度処分のために準備される論拠は TRU 廃棄物の地層処分事業の信頼構築のうえでも有効になると思われる。

実証試験やアナログ研究もこうした論拠として重要である。これらは原理的に前節で論じたモデルの検証や確証における要件と同じものであるが，TRU 廃棄物の多様性に起因した複雑さのため，わかりやすい論拠を開発することは容易ではない。この観点から，優先的に取り組むべき課題は，TRU 廃棄物地層処分システムの主要な安全機能に関わる考古学的アナログあるいはナチュラルアナログを見つけることであると考えられる。

その他の論拠としては，すでに NUMO において重要な課題として取り組まれている（**NUMO HP**）組織としての信頼構築（**NEA　safety case brochure**）を挙げることができる。多様な廃棄物を対象としてシステムが複雑となる TRU 廃棄物の地層処分では，システム全体の安全性を理解したジェネラリストによる品質のレビュー（**JAEA QA ワークショップ**）がセーフティケースを支援する論拠として特に重要となり，このようなジェネラリストの存在や人材育成の仕組みを有していることが，組織としての信頼構築にとって重要である。こうした品質保証に関する課題は，JAEA KMS プロジェクト（**KMS カーネル**）においても取り組まれており，暗黙知の表出化や伝承を目的とした，トレーニングや教育プログラム，エキスパートシステムなどの

知識工学的技術の利用について検討が行われている。

参考文献：

1. NEA：Post-Closure Safety Case for Geological Repositories, Nature and Purpose, Radioactive Waste Management, NEA No.3679, Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development, ISBN 92-64-02075-6 (2004).

5. 今後の優先的に取り組むべき研究開発

研究開発の主要な目標は一言でいえば TRU 廃棄物の地層処分に関する知識ベースを高レベル放射性廃棄物と同じレベルにすることである。これは，すでに述べたように廃棄物が多様であることから挑戦的な課題であり，段階的に進められる処分地選定の進捗に応じた研究開発の実施，他の低レベル放射性廃棄物に関する研究開発や国際協力の利用といったことが重要となる。

5.1 段階的に進められる事業に即した研究開発

NUMO は高レベル放射性廃棄物の地層処分事業に関する基本的なスケジュール（**NUMO 安全確保構想 2009**）を示しており，これは TRU 廃棄物の地層処分に対しても適用されるとしている。この NUMO 安全確保構想 2009 によれば，今後 20 年間程度の期間における主要なマイルストーンとして

- 概要調査地区を選定（文献調査の段階）
- 精密調査地区を選定（概要調査の段階）
- 処分施設建設地の選定（精密調査の段階）

を行い，事業許可申請を行うとされている。

また，この安全確保構想によれば，概要調査地区選定段階での主要な実施事項は，①概要調査地区選定上の考慮事項への適合性の確認，②サイトの地質環境特性に応じた概略的な処分場概念の構築，③精密調査地区選定上の考慮事項の作成，④概要調査計画の作成とされている。

同様に，精密調査地区選定段階では①精密調査地区選定上の考慮事項への適合性確認，②レファレンス処分場概念（含むセーフティケース）の構築，③処分施設建設地選定上の考慮事項の作成，④精密調査計画（地上からの調査）の作成，⑤安全審査基本指針への適合性を確認，⑥セーフティケースの構築を行うこととされている。

さらに処分施設建設地選定段階のうち，地上からの調査では，①精密調査計画書（建設計画・地下調査施設での調査）の作成，②事業許可申請に向けた安全性の予備的検討，③処分施設建設地選定上の考慮事項への適合性の予備的確認，④環境調査及び環境影響評価，⑤セーフティケースの更新とされ，引き続く地下調査施設での調査では，①処分施設建設地選定上の考慮事項への適合性確認，②処分場の基本設計（建設・操業・閉鎖を含む），③地下調査施設での調査・試験，④事業許可申請書の作成，⑤環境調査及び環境影響評価，⑥セーフティケースの更新となっている。

一方，地層処分基盤研究開発調整会議においては，NUMO や安全規制機関のニーズに基づく研究開発の課題が検討されている（**TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計**

画)。5.2 節にその内容について記す。

参考文献：

1. 原子力発電環境整備機構 ：安全確保構想 2009 安全な地層処分の実現のために NUMO-TR-09-05 (2010).

2. 資源エネルギー庁　日本原子力研究開発機構 ：TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画 平成 20 年度版 (2009).

5.2　主要な技術課題

TRU-2 報告書では，日本におけるジェネリックな地質環境での TRU 廃棄物地層処分の実現可能性が提示されると同時に課題も示されている。これを踏まえて，国の地層処分基盤調整会議において課題の整理がなされ，「全体基本計画」（TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画）として，各研究機関が取り組むべき研究課題が明らかにされている。原子力機構では，担当する課題について，これまでの成果を毎年技術報告書として取りまとめるとともに（TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発 平成 18 年度報告(亀井ほか, 2007), JAEA Research 2007-067，19 年度報告(亀井ほか,2008), JAEA Research 2008-082 及び 20 年度報告(亀井ほか, 2010) ， JAEA Research 2009-046)，資源エネルギー庁公募事業の受託研究として行っている硝酸塩に係る課題については，別途報告書を作成している（経済産業省公募事業平成 19 年度硝酸塩処理・処分技術高度化開発報告書 ; 同平成 20 年度報告書)。また，セメント影響については,水酸化物イオンのソースタームとしても重要となるセメント変質挙動の研究や，ベントナイト緩衝材及び岩石のアルカリ性条件における変質挙動の検討を実施している。さらに，これらの変質現象の力学的側面を表現するためのモデル開発も進めている。

一方，工学的対策により TRU 廃棄物地層処分の安全評価に伴う不確実性を低減させるため，代替技術の検討も行われている。具体的には，硝酸塩影響に対する硝酸イオンの分解除去技術の開発，セメント影響に対する低アルカリ性セメントの開発，線量評価上，支配的な核種となる I-129 と C-14 については固定化技術や長期閉じ込め技術が，それぞれ担当する各研究機関によって検討されている（低アルカリ性セメント関連論文 ; 経済産業省公募事業平成 19 年度硝酸塩処理・処分技術高度化開発報告書 ; 同平成 20 年度報告書 ; 経済産業省公募事業平成 19 年度ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発報告書(第 1 分冊) ; 同平成 19 年度報告書(第 2 分冊) ; 同平成 19 年度報告書(第 3 分冊) ; 同平成 20 年度報告書(第 1 分冊) ; 同 20 年度報告書(第 2 分冊) ; 同平成 20 年度報告書(第 3 分冊))。

実施主体である NUMO によって TRU 廃棄物地層処分に関し公募資料（NUMO 公募関係資料）が公開されており，今後，その背景となる技術報告書が作成されることとなっている（NUMO

安全確保構想 2009)。このためにも知識ベース（関連する高レベル放射性廃棄物や他の低レベル放射性廃棄物の知識ベースも含む）の現状を把握し，事業計画に即した段階的な目標との比較によって，研究開発の課題を明らかにすることが重要である。

NUMO ではこうした観点で研究開発へのニーズの検討（TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画 ; Ishiguro, K., et al., 2007）を行っているところであり，これを待って，今後更に議論を行う必要があるものの，原子力機構としては，現時点で，表 5-1 に例示するような評価ツールやデータベースの開発が重要と考えている。これらに関連する研究開発とその優先度は，これらのモデルやデータベースがいつ必要になるか，また開発にどの程度の時間が必要かという観点から決まる。とくに，加速を行うことができないような試験は，十分な時間をかけて実施することが必要であることに留意する必要がある。

さらに，これまで進めてきた研究開発の経験に基づけば，原子力機構としては以下のような課題が重要になると考えている。

- 事業計画に沿った安全戦略やセーフティケースの技術的基盤の開発手順の明確化
- 設計の最適化手法ー高レベル放射性廃棄物に対して実施されたような処分場構成要素のカタログ作成（NUMO-TR-04-03 ; 経済産業省公募事業平成 19 年度先進的処分概念・性能評価技術高度化開発報告書 ; 同平成 20 年度報告書 ; Makino et al., 2009b ; Matsumoto, M., et al., 2009）による作業の効率化
- 次世代性能評価モデルー処分候補地の条件を反映した種々の設計オプションを比較可能な現実的モデルの開発

上記三つの課題に同時に対応するためには，検証や確証によって品質保証された先進的な評価ツールやデータベースを着実に開発していくことが重要である。

表 5-1　TRU 廃棄物地層処分における技術課題に必要なモデル，
データベースとその適用及び確認の例

検討対象	シナリオ/モデル	データベース	適用	妥当性確認のための試験等
日本全体としての廃棄物発生量	原子力エネルギー利用シナリオに基づく廃棄物発生シナリオ及び廃棄物発生量評価モデル	National inventory の開発・発生率 DB	廃棄物発生量の把握と発生量予測	既存の廃棄物発生量に基づく検証
建設・操業安全性	事故シナリオ及び建設･操業安全性評価モデル	建設/操業手順，建設/操業安全 FEP，想定事故と対処マニュアル，事故事例ベース	処分場概念オプションに関する現実的な評価（設計，処分候補地）	－
閉鎖後システム挙動	閉鎖後システムの変遷シナリオ及びシステムの変遷挙動評価モデル	SDM，処分バリアの変遷に関する知識ベース，TDB，KDB 及び鉱物変遷シナリオ，物質輸送パラメータ変遷 DB	影響解析の基礎(核種移行の場の評価) 設計オプションの比較（事業初期）	実験室／地下研究施設における長期試験 サブシステムに関するナチュラルアナログ（特に高アルカリ条件）
廃棄物固化体の劣化挙動	廃棄物固化体の劣化モデル	種々の固化体の劣化メカニズムと速度	廃棄体技術オプションの比較評価のための現実的なソースタームの開発	実験室／地下研究施設における長期試験 廃棄物固化体に関するナチュラルアナログ（特に高アルカリ条件）
核種移行挙動	核種移行モデル（液相，コロイド及び気相移行）	時間的変遷を考慮した SDM に対応した人工バリア及び天然バリア中での時間依存 3 次元移行パラメータ（地下水及びガス） 核種／コロイド／ガスと，移行経路の変遷（高 pH プルームや微生物の影響を含む）	処分概念や処分候補地オプションの比較の基礎となる天然バリアからの現実的な核種移行率の設定	地下研究施設における長期物質移動試験 溶質／ガス／コロイド移行に関するナチュラルアナログ（特に高アルカリ条件）
生物圏での核種挙動/被ばく	TRU 廃棄物地層処分固有の影響を考慮した生物圏モデル	放射性ガスなどを念頭に置いた生物圏相互作用パラメータ	安全基準値と比較するための潜在的な線量の評価	生物圏アナログ（例えば Poços de Caldas）

参考文献：

1. 資源エネルギー庁　日本原子力研究開発機構 : TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画 平成 20 年度版 (2009).
2. 亀井玄人ほか : TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発　平成 18 年度報告 JAEA-Research 2007-067 (2007).
3. 亀井玄人ほか : TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発　平成 19 年度報告 JAEA-Research 2008-082 (2008).

4. 亀井玄人ほか : TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発　平成 20 年度報告 JAEA-Research 2009-046 (2010).

5. 日本原子力研究開発機構 : 平成 19 年度ＴＲＵ廃棄物処分技術 硝酸塩処理・処分技術高度化開発 報告書 平成 20 年 3 月 (2008).

6. 日本原子力研究開発機構 : 平成 20 年度ＴＲＵ廃棄物処分技術 硝酸塩処理・処分技術高度化開発 報告書 平成 21 年 3 月 (2009).

7. Mihara, M., Iriya, K. and Torii, K. : Development of Low-alkaline Cement Using Pozzolans for Geological Disposal of Long-lived Radioactive Waste. Doboku Gakkai Ronbunshuu F Vol.64 No.1, 92-103 (2008).

8. 原子力環境整備促進・資金管理センター : 平成 19 年度地層処分技術調査等委託費　TRU 廃棄物処分技術　ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発報告書　第 1 分冊　～第 3 分冊 平成 20 年 3 月(2008).

9. 原子力環境整備促進・資金管理センター : 平成 20 年度地層処分技術調査等委託費　TRU 廃棄物処分技術　ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発報告書　第 1 分冊　～第 3 分冊 平成 21 年 3 月(2009).

10. 原子力発電環境整備機構 : 安全確保構想 2009 安全な地層処分の実現のために NUMO-TR-09-05 (2010).

11. 資源エネルギー庁　日本原子力研究開発機構 : TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画 平成 20 年度版 (2009).

12. OECD : Engineered Barrier Systems (EBS) in the Safety Case　The Role of Modelling - Workshop Proceedings, La Coruña, Spain 24-26 August 2005 Radioactive Waste Management (2007).

13. NUMO : Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environment, NUMO-TR-04-03 (2004).

14. 日本原子力研究開発機構 : 平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発報告書　平成 20 年 3 月 (2008).

15. 日本原子力研究開発機構 : 平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発報告書　平成 21 年 3 月 (2009).

16. Makino, H., Umeki, H., Ochi, Y., Hioki, K. Okubo, H., Matsumoto, M., Sato, O., Masuda, S. and McKinley, I.G. : "Supporting Development of Practical Designs for a Japanese HLW Repository", Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXIII, Mat. Res. Soc. Sym. Proc., Vol.1193, pp.673-680 (2009b).

17. Matsumoto, M., Sato, O., Okubo, H., Makino, H., Ochi, Y., Hioki, K., Umeki, H., Masuda, S. and McKinley, I.G. : "Application of Formal Knowledge Engineering Approaches to Develop a Design Catalogue for a Japanese HLW Repository", Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXIII, Mat. Res. Soc. Sym. Proc., Vol.1193, pp.681-688 (2009).

5.3 必要となるインフラや資源：国際協力の可能性

前節の表で概観した多くの開発課題は処分候補地固有のものではなく，諸外国との協力が可能なものである。特に廃棄物の多様性や処分場設計に関する領域が共通のテーマとなりうると考えられる。研究開発の効率化と信頼性を向上させるうえで，こうした国際協力を行うことは有効である。

NUMO や原子力機構ではすでに多くの国際協力を実施しており，これらは上記課題に関する国際協力に対する基礎を提供することができる。例えば，原子力機構は岩盤へのセメント影響の観点からスイスのグリムゼル地下研究施設において花崗岩を対象に高アルカリ性溶液の影響を評価する国際共同研究プロジェクト LCS(**Long-term Cement Studies**)プロジェクトに参加しており，TRU 廃棄物の地層処分研究の成果も，本プロジェクトに反映している（**TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発　平成 18 年度報告(亀井ほか, 2007), JAEA Research 2007-067**，**19 年度報告(亀井ほか, 2008), JAEA Research 2008-082** 及び **20 年度報告(亀井ほか, 2010), JAEA Research 2009-046**）。また，EU 等で実施されている国際共同研究プロジェクト（例えば，**EU CORDIS website**）に参加するという方法も考えられる。こうした国際協力を検討するうえでも，課題や研究開発の優先順位を早期に明確にすることが重要である。

参考文献：

1. 亀井玄人ほか : TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発　平成 18 年度報告 JAEA-Research 2007-067 (2007).

2. 亀井玄人ほか : TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発　平成 19 年度報告 JAEA-Research 2008-082 (2008).

3. 亀井玄人ほか : TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発　平成 20 年度報告 JAEA-Research 2009-046 (2010).

6. まとめ

TRU 廃棄物の地層処分に関する分野は，日本全体としての知識ベースの拡充を行っていくべき重要な分野であることは明らかである。この際，ステークホルダーとの円滑なコミュニケーションのため，最初に述べたように用語論やオントロジーを明確に説明しておくことが肝要である。高レベル放射性廃棄物と同レベルで地層処分システムに関する理解を可能とすることは挑戦的な作業であり，特に余裕深度処分など他の処分事業との連携，事業計画のニーズに沿った優先順位の明確な実効的研究開発計画の作成等が有効なものとなると考えられる。国際協力も効果的な手段である。

TRU 廃棄物の地層処分は対象とする廃棄物が多様であり，技術的に複雑である。プロジェクト全体を統括する適切なマネジメントが不可欠であり，開発中の JAEA KMS はこうしたマネジメントを支援し，暗黙知の共有化と伝承を介した次世代の人材育成にも貢献するものと考える。

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度(a)，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率(b)	（数字の） 1	1
比透磁率(b)	（数字の） 1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン(b)	rad	1 (b)	m/m
立体角	ステラジアン(b)	sr(c)	1 (b)	m^2/m^2
周波数	ヘルツ(d)	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		m kg s^{-2}
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	m^{-1} kg s^{-2}
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	m^2 kg s^{-2}
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	m^2 kg s^{-3}
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	m^2 kg s^{-3} A^{-1}
静電容量	ファラド	F	C/V	m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m^2 kg s^{-3} A^{-2}
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m^2 kg s^{-2} A^{-1}
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	kg s^{-2} A^{-1}
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m^2 kg s^{-2} A^{-2}
セルシウス温度	セルシウス度(e)	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m^{-2} cd
放射性核種の放射能(f)	ベクレル(d)	Bq		s^{-1}
吸収線量，比エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m^2 s^{-2}
線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量	シーベルト(g)	Sv	J/kg	m^2 s^{-2}
酸素活性	カタール	kat		s^{-1} mol

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m^{-1} kg s^{-1}
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m^2 kg s^{-2}
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s^{-2}
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m^{-1} s^{-1}=s^{-1}
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m^{-1} s^{-2}=s^{-2}
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s^{-3}
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m^2 kg s^{-2} K^{-1}
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m^2 s^{-2} K^{-1}
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m^2 s^{-2}
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s^{-3} K^{-1}
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	m^{-1} kg s^{-2}
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s^{-3} A^{-1}
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	m^{-3} sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} sA
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} sA
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s^{-2} A^{-2}
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m^2 kg s^{-2} mol^{-1}
モルエントロピー，モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	kg^{-1} sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m^2 s^{-3}
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m^4 m^{-2} kg s^{-3}=m^2 kg s^{-3}
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2$ sr)	m^2 m^{-2} kg s^{-3}=kg s^{-3}
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	m^{-3} s^{-1} mol

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}$ J
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}$N
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St=1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb=1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal=1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G=1Mx\ cm^{-2}=10^{-4}T$
エルステッド(c)	Oe	1 Oe ≙ $(10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R=2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています