

技術開発成果概要 2025



2026 年 9 月
原子力発電環境整備機構

2026 年 9 月 初版発行

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

〒108-0014 東京都港区芝 4 丁目 1 番地 23 号 三田 NN ビル 12 階

原子力発電環境整備機構 技術部

メール：gijutsu_info@numo.or.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Science and Technology Department

Nuclear Waste Management Organization of Japan

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

©原子力発電環境整備機構

(Nuclear Waste Management Organization of Japan) 2026

技術開発成果概要 2025

2026 年 9 月
原子力発電環境整備機構

目次

第1章 はじめに	1
第2章 技術開発成果の概要	5
2.1 地質環境の調査と評価に関する技術	5
2.1.1 長期的な自然現象の確率論的評価手法の高度化（その2）中間成果	7
2.1.2 レーザー光を用いた地下水水質計測装置の開発	13
2.1.3 ボーリング孔の閉塞技術の開発（2025年度）	16
2.1.4 サイト調査におけるデータ管理方法に関する検討 - データマネジメントシステムの詳細設計 -	21
2.2 処分場の設計と工学技術の体系的な整備	25
2.2.1 「圧縮ベントナイト中における炭素鋼の浸漬試験方法」の標準化に向けた 技術的根拠の整備	26
2.2.2 坑道の耐震性評価手法の整備に関する共同研究	29
2.2.3 銅コーティングオーバーパックの摩擦攪拌接合技術の開発	34
2.2.4 地層処分建設・操業の遠隔化・自動化への取り組み～Smart DGR 構想～	38
2.3 閉鎖後長期の安全性の評価に関する技術の高度化	41
2.3.1 緩衝材の流出とコロイド生成による影響の評価	43
2.3.2 TRU 廃棄物処分場に使用するセメント系材料の状態評価に関する検討	47
2.3.3 地下水流動・物質移行モデルの妥当性評価手法の検討	53
2.3.4 予測評価ツールとクラスター分析ツールの高度化	59
2.3.5 核種移行解析に関するデータセットの設定手法に関する検討	64
2.4 技術マネジメント	70
2.4.1 幌延国際共同プロジェクトを活用した技術の実証	72
第3章 おわりに	81

本書で用いる各機関・組織・プロジェクト名の略称

国内機関

- ・電中研
一般財団法人 電力中央研究所, Central Research Institute of Electric Power Industry
- ・原子力学会
一般社団法人 日本原子力学会, Atomic Energy Society of Japan
- ・腐食防食学会
公益社団法人 腐食防食学会, Japan Society of Corrosion Engineering
- ・JAEA
国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency

海外機関（国名）

- ・IAEA
International Atomic Energy Agency, 国際原子力機関（オーストリア）
- ・LBNL
Lawrence Berkeley National Laboratory, ローレンス・バークレー国立研究所（米国）
- ・Nagra
Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 放射性廃棄物管理共同組合（スイス）
- ・NWMO
Nuclear Waste Management Organization, 核燃料廃棄物管理機関（カナダ）
- ・NWS
Nuclear Waste Services, 原子力廃棄物サービス（英国, 旧 RWM）
- ・OECD/NEA
Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency, 経済協力開発機構／原子力機関（フランス）
- ・Posiva
Posiva, ポシヴァ社（フィンランド）
- ・RWM
Radioactive Waste Management, 放射性廃棄物管理会社（英国）
- ・SKB
Svensk Kärnbränslehantering AB, スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（スウェーデン）

国際プロジェクト（実施場所又は本拠地）

- ・GTS
Grimsel Test Site, グリムゼル岩盤試験サイト（スイス）
- ・HIP
Horonobe International Project, 幌延国際共同プロジェクト（日本）

第1章 はじめに

原子力発電環境整備機構（以下、「NUMO」という）は、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」に従って、最終処分施設建設地選定のための段階的な調査を進めるとともに、必要な技術開発を実施している。

段階的な調査については、2020年11月に北海道の寿都町及び神恵内村において文献調査を開始した。国が公表した「文献調査段階の評価の考え方¹」に基づき、文献調査報告書（案）を取りまとめて公表した²（2024年2月）。さらに、数回の国の審議会での意見を反映し、修正・取りまとめた³（2024年8月）。その後「北海道寿都郡寿都町及び北海道古宇郡神恵内村における文献調査の報告書及び要約書（以下、「文献調査報告書等」という）」を作成し、寿都町長及び神恵内村長へ提出するとともに文献調査報告書等の縦覧・説明会の開催・意見書の提出に関する公告を実施した（2024年11月）。寿都町、神恵内村をはじめ北海道内の21の自治体で文献調査報告書等に関する説明会を実施し（2024年11月～2025年3月）、2025年4月に文献調査報告書等の縦覧及び意見募集を終了した。

2024年4月には佐賀県の玄海町議会本会議で文献調査の受入れを求める請願書が採択された。これを受けて、翌月に国から文献調査の実施を求める申入れがあり、町長がこれを受諾する意向を表明した。2024年6月からNUMOは玄海町における文献調査を開始した。

2026年3月には国が小笠原村長に対し東京都小笠原村南鳥島での文献調査の実施に関する申入れを行い、翌月「これまでに出示された様々な意見を尊重したうえで、国が文献調査を実施するか否かを判断すべきである。」とする村からの回答⁴を踏まえ、経済産業大臣より文献調査を実施する判断が示された。これを受け、2026年5月からNUMOは小笠原村南鳥島における文献調査を開始した。

地層処分技術の開発については、国及び関係研究機関が進める研究開発と、その成果等を取り入れてNUMOが実施する技術開発によって進められている。これらを進めるうえで、わが国全体の開発計画として5年ごとに「地層処分研究開発に関する全体計画⁵」（現行の計画期間は令和5年度～令和9年度（以下、「全体計画」という））が取りまとめられている。NUMOはこれを受けて、中期的な計画として「地層処分事業の技術開発計画⁶」（現行の計画期間は2023年度～2027年度（以下、「中期技術開発計画」という））を作成し、これらに沿って国や関係研究機関との適切な役割分担と協力のもと、国内外の関係研究機関、大学及び海外の地層処分実施主体との共同研究や地下研究施設を活用した国際共同プロジェクト等への参画、国内の産業界への委託を通じ、最終処分事業の安全な実施、経済性及び効率性の向上等を目的とする技術開発を進めている。このように、NUMOは研究開発を通じて得られた国内外の英知を統合して最新の科学的知見を反映させ、地層処分を安全に実施するための技術基盤を築いている。

NUMOは2018年11月に処分場の立地サイトを特定しない段階におけるセーフティケースとし

1 経済産業省ホームページ(https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/radioactive_waste/20231102_literature.html)

2 経済産業省ホームページ

(https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/radioactive_waste/geological_disposal/001.html)

3 経済産業省ホームページ (https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/radioactive_waste/005.html)

4 東京都小笠原村ホームページ

(<https://www.vill.ogasawara.tokyo.jp/wp-content/uploads/sites/2/2026/04/95c6152ee48fcabbdfa577826eb610e9.pdf>)

5 経済産業省ホームページ (https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/chiso_shobun/pdf/20230324_1.pdf)

6 NUMO ホームページ (https://www.numo.or.jp/technology/technical_plan/pdf/TR-23-01.pdf)

て「包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－（レビュー版）」と題する技術報告書を取りまとめた。その後、この技術報告書は、日本原子力学会によるレビュー結果⁷等を踏まえ改訂し、2021年2月に公表⁸している（以下、「包括的技術報告書」という）。公表後は、その内容を広く社会に向けて発信するとともに、様々な専門家等とのコミュニケーションに取り組んでいる。また、国際社会に向けて同報告書の英語版を公開し、技術的妥当性や技術的信頼性について経済協力開発機構／原子力機関（以下、「OECD/NEA」という）に国際レビューを依頼した。そのレビュー結果を取りまとめた報告書⁹が2023年1月、その日本語翻訳版¹⁰が2023年5月にOECD/NEAのウェブサイト上に公表されている。国際レビュー報告書では、「NUMOは具体的なサイトでの評価に使用される方法論とツールを含めて国際的な慣行と整合したセーフティケースを開発するための能力と成熟度を有している」、「日本の地質環境を考慮して地層処分の実現可能性を示す要素が実証されている」ことなどが評価された。また、今後セーフティケースを段階的に発展させていくための提言などが示されている。NUMOはOECD/NEAのレビューで示された提言等について、これを着実に活かしていくための対応を取りまとめ、NUMOホームページ上に公表している¹¹（2023年6月）。

以上のように、個々の研究開発や技術開発成果を統合してセーフティケースを作成する過程や、セーフティケースの外部レビューからは、地層処分事業の進展に応じて計画的かつその段階において必要な技術を開発するための多くの貴重な示唆を得ている。これらを通じて明らかとなった技術開発上の課題については適宜、国の全体計画やNUMOの中期技術開発計画に反映させ、地層処分の安全な実施にとって主要な三つの技術分野（「2.1 地質環境の調査と評価に関する技術」、「2.2 処分場の設計と工学技術の体系的な整備」、「2.3 閉鎖後長期の安全性の評価に関する技術の高度化」）と、「2.4 技術マネジメント」を加えた計四つの分野において、個々の取組みを具体的に示している。NUMOは、これらの取組みにおいて技術分野内及び分野間でどのように連携し、それらの成果を中期技術開発計画の最終年度までに統合して安全な地層処分の実現に反映させるのかに留意しつつ、個々の技術開発間の関係性が見える化しながら技術開発に取り組んでいる（図1参照）。

NUMOは、長い事業期間における将来の科学技術の進歩や社会的条件の変化などに適合させていくことへの対応が必要であることを考慮し、技術開発成果を個別の技術報告書（NUMO-TRシリーズ）に取りまとめ、包括的技術報告書の更新に反映させていく。さらに、各種の学協会や学術雑誌・科学雑誌への投稿や、様々な研究会・講演会、NUMO主催説明会等を活用し、これらの成果を広く社会に発信していく。

本書は、こうした情報発信の一環として2021年度から作成しているものである。地層処分に関わるの深い専門家や地層処分の科学的・技術的根拠に関心の高い方々などを対象に、セーフティケースへ統合していくことを目的として進めている上記四つの分野における技術開発の現状や動向を概括するとともに、2025年度の成果及び包括的技術報告書の更新への反映を取りまとめたものである。

今後も年度ごとに同様の報告を継続して公表し、地層処分に関する技術開発の動向や取り組むべき課題等について最新の情報を提供していく計画である。

7 日本原子力学会ホームページ (https://www.aesj.net/sp_committee/com_numo)

8 NUMO ホームページ (https://www.numo.or.jp/technology/technical_report/tr180203.html)

9 OECD/NEA ホームページ (https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_77138/the-nuclear-waste-management-organization-of-japan-s-presenting-safety-case-based-on-the-site-descriptive-model-an-international-peer-review-of-the-numo-safety-case)

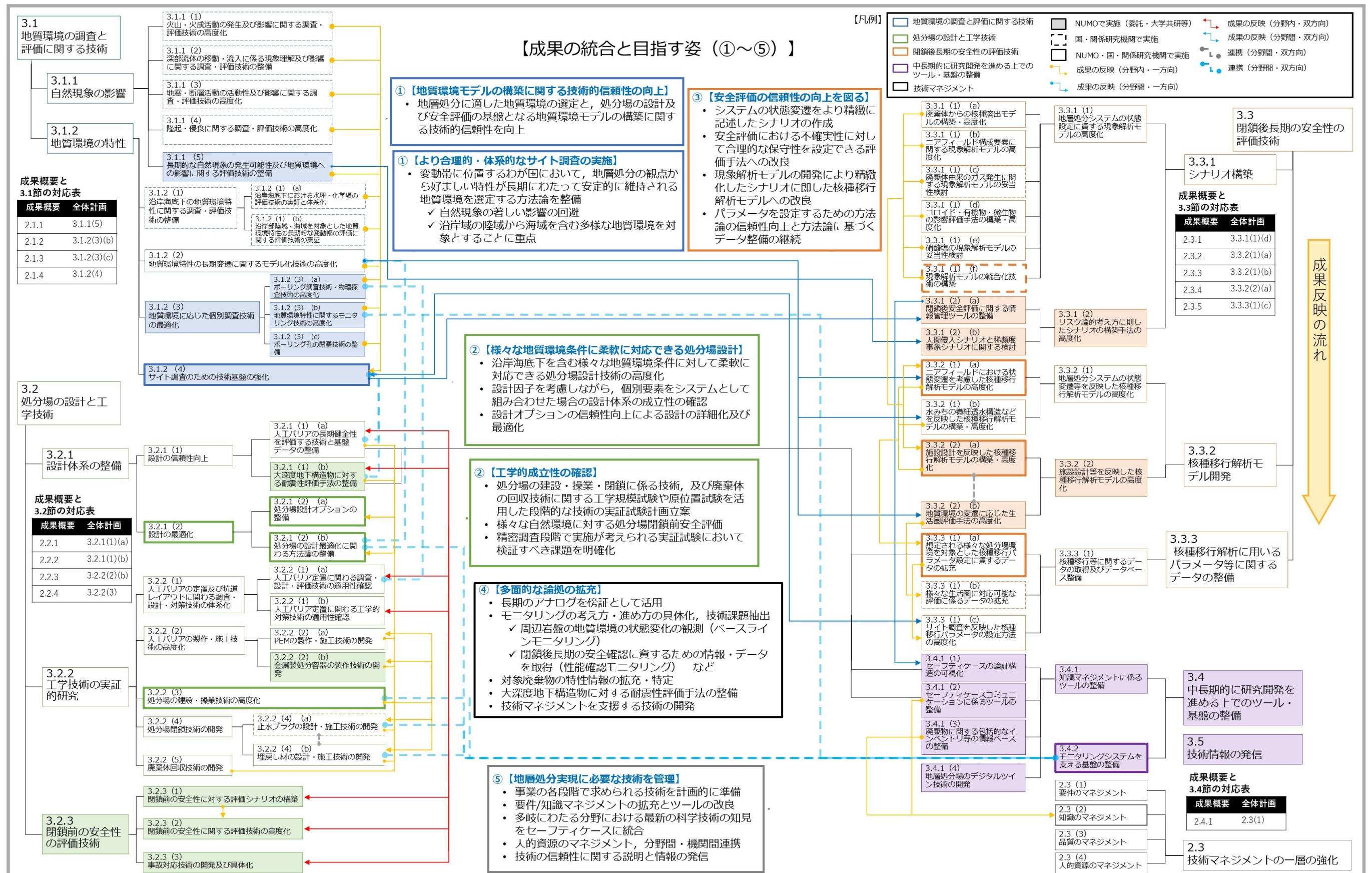
10 OECD/NEA ホームページ (https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_82280/-numo)

11 NUMO ホームページ (https://www.numo.or.jp/technology/technical_report/pdf/20230606_houkatsu_neareviewhoukoku.pdf)

地層処分事業の実現にあたっては、技術開発によって、地層処分システムとその将来にわたる時間的変遷に関する空間的・時間的不確実性を把握し、継続的に不確実性を低減していくことで技術的な信頼性を向上させていくことが重要である。NUMOは、中期技術開発計画に従い、科学技術的な視点での信頼性（technical reliability）を高め、それを基盤として地層処分の安全性に関する様々なステークホルダーの納得感（confidence）をさらに向上させるため、今後も技術開発に継続的に取り組んでいく。

最後に、本書の作成にあたり、共同研究や委託等を通じて技術開発に関わっていただいた関係研究機関や大学、企業等の関係者には、多大なご支援・ご協力をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表する。

（編集：西尾 光，藤木 美千代，地井 桐理子，大木 鈴々音，村上 義揮）



※全体計画 3.5 代替処分オプションに関する研究開発は割愛。 中期技術開発計画において、3.4.1 (3) 廃棄物に関する包括的なインベントリ等の情報ベースの整備、3.4.1 (4) 地層処分場のデジタルツイン技術の開発及び3.5 技術情報の発信を追記修正。

図 1 全体計画と各取組みの相互関係図

第2章 技術開発成果の概要

2.1 地質環境の調査と評価に関する技術

地層処分に適した地質環境を選定するため、調査と評価に関する技術の信頼性向上が重要である。このため、地層処分場に著しい影響を及ぼすと考えられる自然現象の長期的な発生可能性とその影響を予測・評価する技術や、地質環境特性の長期変遷をモデル化する技術等の高度化を進めた。また、実際のサイト調査を見据え、日本の多様な地質環境に対応可能な物理探査、ボーリング調査、地下水等のモニタリングといった調査技術の適用性確認や、ボーリング孔の閉塞技術の開発に継続して取り組んだ。

具体的には、自然現象の著しい影響を回避したサイトにおいて、不確実性がより大きくなると考えられる将来 10 万年程度を超える期間を対象とした安全評価シナリオの設定に資する技術開発を進めた。その一環として、自然現象の発生可能性とその形態、それに伴う地質環境の状態変化を定量的に評価する技術の高度化に向け、国内外の専門家との協働体制を構築した。さらに、火山・火成活動及び岩盤変形の発生から影響伝播に至るシナリオの設定や日本列島背弧側を対象としたケーススタディに着手した（2.1.1 参照）。長期にわたる地形の変化や気候・海水準変動等に伴う地質環境特性の時間的・空間的な変化を表現するために技術開発を進めている四次元地質環境モデルについては、モデル構築技術やその適用性確認に関する検討結果を技術報告書（NUMO-TR-25-04）として外部に情報発信した¹。

地質環境にかかわる個別調査技術のうち物理探査技術については、学術論文の収集・分析等を通じて最新の各種物理探査手法の適用可能条件や適用限界、品質管理の考え方等を整理した。ボーリング調査技術については、電中研との共同研究により、電中研・横須賀地区においてボーリング孔を用いた孔内試験及び関連する室内試験に関する方法論や手法の最適化を目的としたボーリング試験を実施し、各種手法の有効性及び適用性の確認に資するデータを取得した。また、この現場作業を通じて、今後の現地での調査・評価を見据えた安全、品質及び工程の確保に関する職員のマネジメント能力向上を図った。モニタリング技術に関しては、数百 m～1,000 m 級のボーリング孔を用いた断層変位及び地下水の水圧・水温・水質のモニタリングに関する技術開発を進めた。このうち、LBNL との共同研究においては、サンアンドレアス断層を事例にボーリング孔内で断層変位・間隙水圧の連続観測を継続した。その結果、断層活動に伴う断層周辺岩盤の水理・応力場への影響の調査・評価技術としてのモニタリング装置の有効性・耐久性を確認した。また、その結果に基づきモニタリング精度を向上させるための検討に着手した。さらに、東京大学との共同研究においては、ボーリング孔内若しくはボーリング孔近傍で分析可能な可搬型の核種同位体分析モニタリングシステムの整備に向けて、有効と考えられる溶液の前処理方法を用いてヨウ素安定同位体のレーザー吸収分光装置による分析の実証を行い、構築した前処理方法がレーザー吸収分光装置による安定同位体比分析に適用可能であることを確認した（2.1.2 参照）。

地表から掘削したボーリング孔が地下水流動や核種移行の短絡経路等となる可能性への対策として、効果的にボーリング孔を閉塞するための技術の整備に向け、NWS 及び Nagra との協定に基づく国際協力、及び Nagra との共同研究を継続した。また、ベントナイト系材料の閉塞材については、水中において数時間程度の膨潤抑制機能を有するコーティングを施したベントナイトペレットを製造し、室内試験によって膨潤圧及び水理特性の把握を行うとともに、ボーリング孔深部まで閉塞材を運

¹ NUMO ホームページ (https://www.numo.or.jp/technology/technical_report/pdf/NUMO-TR-25-04.pdf)

搬する装置（ダンプベイラー）については、模擬発出試験を実施し、閉塞技術の整備に資するデータを取得するとともに、今後の課題を抽出した（2.1.3 参照）。

サイトでの地質環境調査により取得するデータなどの具体的な管理の考え方に関する海外実施主体の知見の収集を継続するとともに、サイト調査で取得するデータ、構築した地質環境モデル及び関連情報を一元的に管理するためのデータマネジメントシステムの詳細設計を実施した（2.1.4 参照）。

2.1.1 長期的な自然現象の確率論的評価手法の高度化（その2）中間成果

後藤 淳一 三枝 博光 高林 佑灯 佐々木 嘉月 上野 吹佳

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

NUMO では、2004 年から 2014 年にかけて、将来 10 万年程度を超える期間における火山・火成活動や断層活動などの自然現象の発生とそれに伴う地質環境への影響を確率論的に評価する ITM (International Tectonics Meeting) -TOPAZ (Tectonics Of Potential Assessment Zones) 手法を開発し、その成果を技術報告書や国際専門誌に公表し一定の評価を得た (Chapman et al., 2009a; NUMO, 2016; Jaquet et al., 2017 など)。一方、変遷シナリオ (将来 10 万年以降のプレート運動の変化に伴い生じる広域的な事象やそれらに伴い生じるサイト周辺の地域的な事象の変遷に関するシナリオ) の設定根拠や、専門家の意見集約 (Expert Elicitation; 以下、「EE」という) による確信度の設定方法などに課題が残った。今後の特定サイトを対象としたセーフティケース構築における安全評価への反映に向けて、これまでの ITM-TOPAZ 手法に、新たに火山ハザード評価等に適用され始めたベイジアンネットワーク (以下、「BN」という) やランダムフォレストなどの手法 (例えば, Aspinall et al., 2023; INL, 2024) を取り入れ、より説明性の高い手法 (ITM-TOPAZ-2 手法) として高度化することを目的として、2024 年度に検討を開始した。

2024 年度は上記手法の適用に携わった海外専門家とともに、ITM-TOPAZ-2 手法の基本的な枠組み (作業の流れ) を構築し、地点を特定しないジェネリックな影響伝搬シナリオ (隆起・沈降などの緩慢なプロセスやマグマ貫入・噴出などの突発的な事象の発生から地層処分システムに影響が及ぶまでのシナリオ) の設定及び BN モデルの試作などを行った (後藤ほか, 2025a, 2025b, 2026)。

本検討 (長期的な自然現象の確率論的評価手法の高度化 (その2)) では、2025～2026 年度の 2 年間で、(1) EE 手法における課題・教訓等の調査、(2) 専門家体制の構築、(3) 手法の高度化及びケーススタディ、(4) 手法の実用化に向けた検討及び理解促進活動を計画している。ここでは、2025 年度に実施した (1) ～ (3) の検討状況 (中間成果) について報告する。

2. 主な成果

(1) EE 手法の課題・教訓等の調査

(2) 及び (3) に先立ち、ITM-TOPAZ 手法の重要な要素である EE の適用・運用における課題・教訓について、海外・国内の適用事例に関する文献調査や実施経験者への聞き取り調査を行った。その結果、主な EE 手法 (SSHAC 手法, Cooke 法, ベイズ法など) にはそれぞれ特長と課題があり (表 1)、結果に求められる精度やプロセスの透明性の度合い、利用可能な情報の量などに応じて選択することが重要であることが分かった。また、その運用に際しては、適切な専門家の選定と役割分担、早期からのデータセットの共有、専門家間の共通理解の形成、認知バイアス (先入観など) の回避が重要であることが分かった。

(2) 専門家体制の構築

(1) の結果を踏まえて、(3) の実施に向けた専門家体制を構築した。海外専門家については、

2024 年度からの火山 2 名、岩盤変形 2 名、地層処分・確率論 2 名、及びそれらの専門家の協力者数名の体制とした。国内専門家については、専門分野、経歴、本手法との関連性などを考慮して、火山 4 名、岩盤変形 5 名、安全評価・確率論 3 名を新たに招聘した。これらの国内専門家を対象に第 1 回ワークショップを開催し、本手法開発の背景・目的・実施方針などに関する説明・議論を行い、認識の共有を図った。

(3) 手法の高度化及びケーススタディ

2024 年度に試作した火山活動や岩盤変形に関するジェネリックな影響伝搬シナリオや BN モデルについて、それらに入力する情報の分析とモデル化、起因事象の空間密度分布や発生確率の推定に用いるランダムフォレスト法、地層処分システムへの影響の発生確率の推定に用いる「サイトセンタード・アプローチ」に関する検討を進めた。さらに、国内・海外専門家の参加による第 2 回ワークショップを開催し、個々の手法の長期的な自然現象の確率論的評価への適用性や、ITM-TOPAZ-2 手法の枠組みへの取り込み方法などに関する検討結果について共有するとともに、2026 年度に専門家の協働体制により手法の高度化やケーススタディを本格的に進めるにあたっての課題と対応策の確認を行った。以下に火山活動を例に、個々の手法に関する検討結果の概要を述べる。

【入力情報の分析とモデル化】

影響伝搬シナリオや BN モデルの構築に必要な岩脈や火道に関する調査事例の情報を分析した。例えば、米国ユタ州のサンラファエル火山地域では、処分深度に相当する地下 800m の深さにあった岩脈等が地表に露出しており、岩脈の方向、長さ、幅、火道周辺の破碎・変質の範囲などの情報を得ることができた。日本では、例えば大峠火山岩体（中部地方）の岩脈群の調査事例を参照し、岩脈の方向、長さ、幅の分布範囲などの情報を把握することができた。このような情報に基づき、岩脈貫入・火道形成プロセスに関する概念モデルを提示した（図 1）。

【ランダムフォレスト法の試行】

ランダムフォレスト法は、米国アイダホ国立研究所における確率論的火山ハザード評価（INL, 2024）での適用実績がある決定木を用いた機械学習法であり、ITM-TOPAZ 手法によるカーネル法などの確率評価結果、スラブ深度、地殻構造、地震波速度構造、重力異常、ひずみ速度分布などの様々な情報を取り込んだより客観的・包括的な評価が期待できる。本手法について、日本のテクトニクスや火山・火成活動に対する適用性を確認するため、過去に実施した九州地方を対象としたケーススタディ（Chapman et al., 2009b）で作成したデータセットを用いて解析を試行した。その結果、第四紀火山に関連する各種の地球物理学的データや、各種の確率論的評価手法による第四紀火山の空間密度分布を統合し、それらのデータや評価手法における不確実性を全て取り込んだ空間密度分布マップを作成することができ、今後の特定地点を対象としたケーススタディに適用できる見通しを得た。

【サイトセンタード・アプローチの検討】

一般の火山ハザード評価では、特定の火山における過去の活動履歴、噴出物の分布、将来の推定噴火規模に基づき、噴火などの現象が起こった場合の影響の発生可能性を評価する「火山中心アプローチ」を採用している。一方、原子力施設などのハザード評価では、評価地点（サイト）を中心とした一定範囲内で起こり得る全ての火山活動に伴う影響の発生確率を評価する「サイトセンタード・アプローチ」が導入され始めている（Connor et al., 2023）。この手法の概要を以下に示す（図

2)。まず、サイト周辺に一定間隔の格子点を設定し、各点において起因事象（ここでは、新たなマグマ供給源の発生）が生じた場合に、サイトに影響が及ぶ（例えば、サイトに岩脈が到達する）確率を、当該事象の観察データやシミュレーションなどを基に関数（確率分布）設定して算出する。次に、確率0以上となる領域（これをハザードフットプリントと呼ぶ）内の格子点について、各点における起因事象の発生確率とランダムフォレスト法又はその他手法により推定した起因事象の空間密度分布とを掛け合わせ、それら全ての格子点の値を合算する。最後に、その値に広域的な火山・火成活動イベントの発生確率（再来頻度）を掛け合わせることで、当該サイトを中心としたハザードの発生確率が求まる。今後、このアプローチの ITM-TOPAZ-2 手法への導入について検討することとした。

3. 包括的技術報告書の更新への反映

包括的技術報告書（NUMO, 2021）の本編 3.5.2 項（今後の取り組み）に、自然現象の発生とその影響に係る今後の取組みの一つとして、長期的な自然現象の発生可能性とその地質環境への影響に係る評価技術の高度化を挙げている。将来 10 万年程度を超える期間は、自然現象の発生とその地質環境への影響に関する将来予測の不確実性がより大きくなると考えられる。本検討の成果は、閉鎖後長期の安全評価の信頼性を高めるうえで有効な知見となり得るため、今後、包括的技術報告書を更新する際に反映することを検討する。

4. 今後の展開

2026 年度は、2025 年度の成果を踏まえて、サイトセンタード・アプローチを含む BN モデルの構築方法などの地点を特定しない汎用的な検討を通じて ITM-TOPAZ-2 手法を高度化するとともに、日本列島背弧側を対象としたケーススタディを実施し、一連の手法としての適用性の確認及び改善を図る（図 3）。併せて、特定のサイトを対象とした処分地選定段階において、同手法を活用していくための実用化に向けた検討を行う。

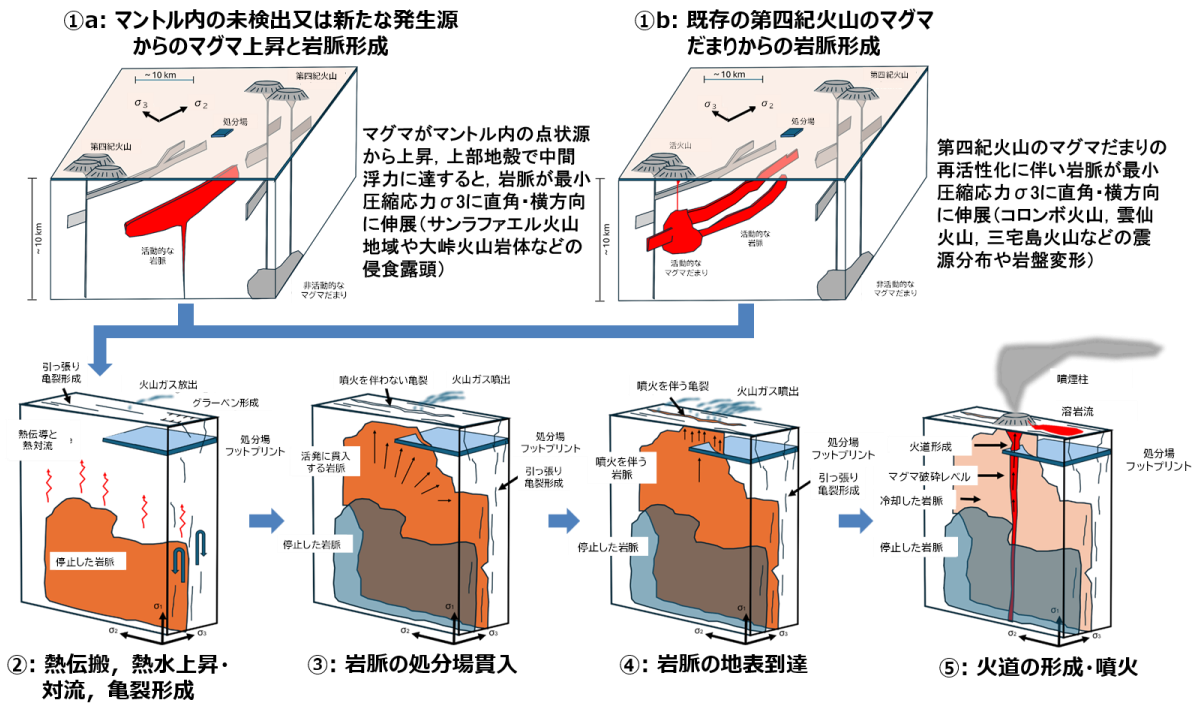


図 1 岩脈貫入・火道形成プロセスに関する概念モデル

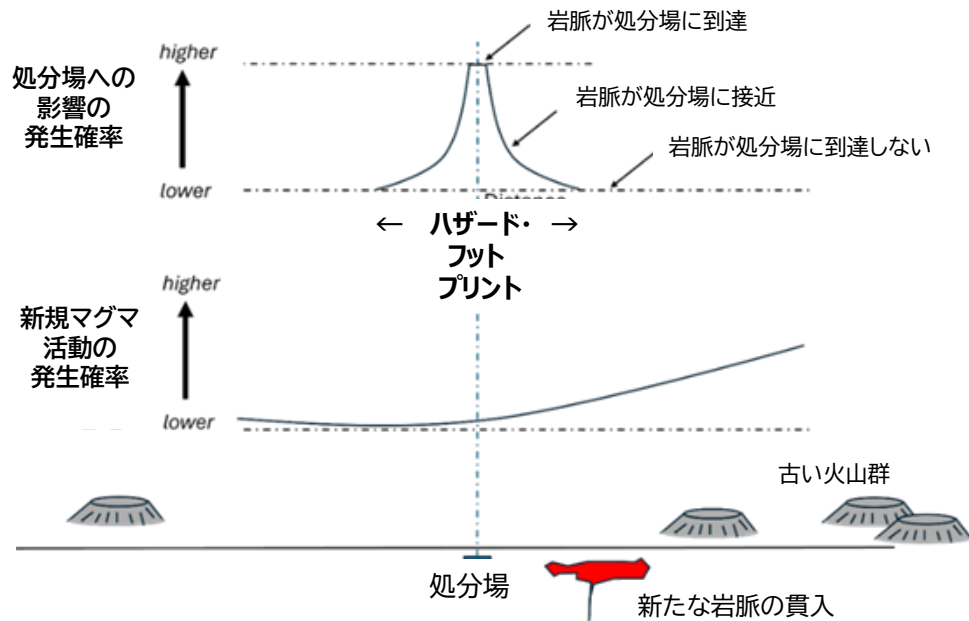


図 2 「サイトセンタード・アプローチ」の概念図

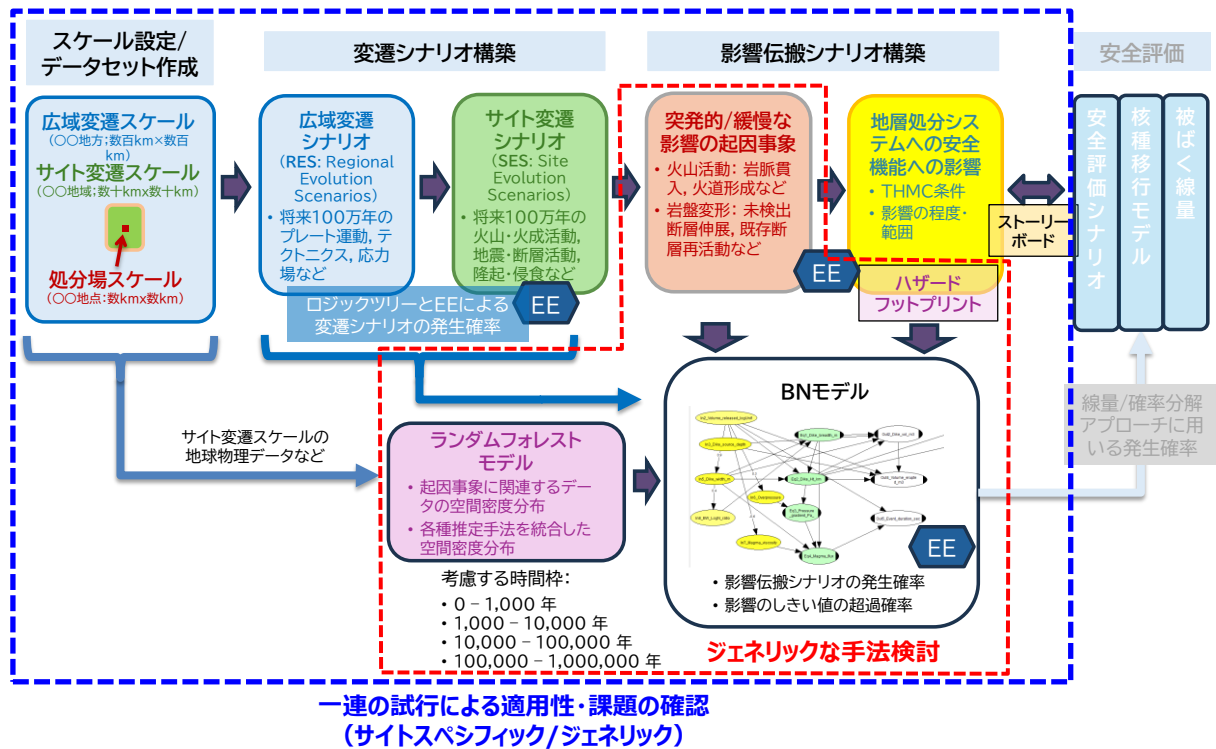


図 3 ITM-TOPAZ-2 手法の流れ (改訂版) と 2026 年度の検討範囲 (赤・青破線)

EE手法	概要	特長 (メリット)	課題 (デメリット)
SSHAC手法	専門家同士の入念な討議に基づきコミュニティとしての合意を形成	- データ・モデルの網羅性, 意思決定プロセスの客観性・透明性, 品質を確保 - 米国原子力規制当局による運用手続き (SSHAC手法) が整備済み - 海外で広く認知され適用実績が豊富	- 入念な討議に要する労力, 時間, 費用 - 既知のモデルや十分なデータの存在が前提 (長期予測への適用性) - 高度なファシリテーションスキルを有する進行役の選定, 人材の確保
Cooke法	事前質問により各専門家の統計学的な信頼性を評価, それを意見に反映したうえで統合	- 専門家の信頼性に応じた意見の重み付けに基づく正確な予測や意思決定が可能 - 専門家の意見の数値化による客観的で精度の高い評価が可能 - 意思決定プロセスの透明性, 意見の偏りの影響の軽減 - 技術予測, リスク評価, 政策決定など, さまざまな分野での適用実績	- 専門家の信頼性評価と意見の重み付けに対する専門家の理解 - 専門家の信頼性評価のための事前質問の設定方法 - 専門家の信頼性評価と重み付けに関する高度な専門知識と経験を有する人材の確保
ベイズ法	ベイズ理論に基づき既存の情報に新たな情報を組み合わせて意見を更新	- 意見のばらつきを確率分布として定量化し意思決定の精度や透明性を向上 - 情報量が限られる場合でも事前確率を活用することで精度の高い推論が可能 - 新たなデータが得られるごとに確率を更新し柔軟な意思決定が可能 - 医療診断やリスク評価など, 大きな不確実性を伴う問題に対する適用実績	- 結果に大きな影響を及ぼす事前確率の適切な設定 - 情報量の増大に伴う計算負荷, 時間, 費用の増大 - ベイジアンネットワーク構築に関する高度な専門知識と経験を有する人材の確保

表 1 主な EE 手法の概要, 特長, 課題

参考文献

Chapman, N., Apted, M., Beavan, J., Berryman, K., Cloos, M., Connor, C., Connor, L., Susan, E., Jaquet, O., Kiyosugi, K., Litchfield, N., Mahony, S., Smith, W., Sparks, S., Stirling, M., Villamor, P. and Wallace, L. (2009a): Development of methodologies for the identification of volcanic and tectonic hazards to potential HLW repository sites in Japan - Summary Report -, NUMO-TR-09-03.

- Chapman, N., Apted, M., Beavan, J., Berryman, K., Cloos, M., Connor, C., Connor, L., Hasaka, T., Jaquet, O., Kiyosugi, K., Litchfield, N., Mahony, S., Miyoshi, M., Smith, W., Sparks, S., Stirling, M., Villamor, P., Wallace, L., Goto, J., Miwa, T., Tsuchi, H. and Kitayama, K. (2009b) : Development of methodologies for the identification of volcanic and tectonic hazards to potential HLW repository sites in Japan - The Kyushu Case Study -, NUMO-TR-09-02.
- Connor, C., Connor, L., Diez, M. and Connor, M. (2023) : Spatial density and volcanic hazard models for INL probabilistic volcanic hazard assessment, INL/RPT-23-71022.
- 後藤淳一, 田窪勇作, 三枝博光, 稲倉寛仁, 河村秀紀 (2025a) : 地層処分の安全評価に向けた長期的な自然現象の確率論的評価手法の高度化, 日本地質学会第 132 年学術大会講演要旨集, T8-O-2.
- 後藤淳一, 田窪勇作, 三枝博光 (2025b) : 長期的な自然現象の確率論的評価手法の高度化, 技術開発成果概要 2024, NUMO-TR-25-03, pp.6-10.
- 後藤淳一, 三枝博光, 高林佑灯, 佐々木嘉月, 上野吹佳, 稲倉寛仁, 河村秀紀 (2026) : ITM-TOPAZ-2 : 超長期の自然現象の確率論的評価手法の高度化, 日本地球惑星科学連合 2026 年大会講演要旨, SVC44-07.
- INL(アイダホ国立研究所)(2024) : Idaho National Laboratory Site-wide SSHAC Level 3 Probabilistic Volcanic Hazards Assessment, Battelle Energy Alliance Report, INL/RPT-24-78997.
- Jaquet, O., Lantuéjoul, C. and Goto, J. (2017): Probabilistic estimation of long-term volcanic hazard under evolving tectonic conditions in a 1 Ma timeframe, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 345, pp.58-66.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2016) : TOPAZ Project Long-term Tectonic Hazard to Geological Repositories - Toward practical application of the ITM-TOPAZ methodology -, NUMO-TR-16-04.
- NUMO(原子力発電環境整備機構)(2021) : 包括的技術報告 : わが国における安全な地層処分の実現 - 適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築 -, NUMO-TR-20-03.

2.1.2 レーザー光を用いた地下水水質計測装置の開発

草野 由貴子¹ 吉田 芙美子¹ 寺林 稜平² 堀 勝行² 野尻 雄幸² 張 超² 國丸 貴紀¹
長谷川 秀一²

¹原子力発電環境整備機構, ²東京大学

1. 背景・目的

地層処分事業の概要調査及び精密調査においては、処分場建設前の自然状態における地質環境のベースラインを把握したうえで、地震・断層活動や地下施設建設等に伴う地質環境の変化を把握することが重要であり、地下水の水質もモニタリング対象となる。それに関連して、処分場への廃棄体定置後に、人工バリアを含む処分場全体の閉じ込め機能が所定の性能を発揮し、放射性核種の漏洩が発生していないことを確認するために、地下水中に含まれる廃棄体由来の放射性核種をモニタリングする可能性が考えられる。一般的に、地下水の水質分析は、ボーリング孔内の原位置（封圧採水）や地上で地下水を採水し、実験室において分析する。しかし、このような方法は現地での採水や実験室での分析などに多くの時間や費用を要することから、ボーリング孔内若しくはボーリング孔近傍において、迅速かつ効率的に分析結果を得ることが可能なモニタリング技術が整備されることが望ましい。特に、廃棄体由来の核種のうち、地質環境中での移動性が高いと考えられる ^{129}I や ^{14}C 等を本技術により測定することができれば、処分場の閉じ込め機能の確認に資すると考えられる。

NUMO では、東京大学との共同研究として地下水中に含まれる ^{129}I 及び ^{14}C を分析可能な可搬型の核種同位体分析モニタリングシステムの整備を最終目標として、2022 年度から共同研究に取り組んでいる。2022 年度の共同研究では、共振器強化型レーザー吸収分光法（Cavity ring-down spectroscopy : 以下、「CRDS 法」という）を用いて、炭素安定同位体を含むメタン分子 ($^{12}\text{CH}_4$, $^{13}\text{CH}_4$) を用いて測定するレーザー吸収分光装置を開発した (Terabayashi et al., 2024)。また、2023 年度以降は、ボーリング孔内への装置設置を想定し、2022 年度に開発したレーザー吸収分光装置の光共振器セルの小型化及び 80 °C の環境での動作確認を行った。併せて、廃棄体由来の放射性核種のうち地質環境中での移動性が高いとされる ^{129}I の分析装置の開発を念頭に、水試料中から I_2 を抽出するための前処理方法の検討と、ヨウ素安定同位体測定のための CRDS 法によるレーザー吸収分光装置の構築にかかわる検討を進めた。前処理方法の検討においては、NaI 溶液中のヨウ化物イオンを酸化して発生した I_2 をクロマトグラフィー用抽出カートリッジにより捕集する方法が有効であることを確認した。また、実験用ヨウ素分子参照セルを用いたヨウ素安定同位体比の分析を通じて、構築した CRDS 法によるレーザー吸収分光装置がヨウ素安定同位体測定に有効であることを確認した (李ほか, 2025)。

これらの成果を踏まえ、2025 年度には、溶液前処理系で抽出し、レーザー吸収分光装置に導入した試料ガスのヨウ素安定同位体分析を実証した。

2. 主な成果

前処理系からレーザー吸収分光装置への I_2 導入のために、溶液試料から抽出した I_2 を捕集したカートリッジをテフロンチューブに繋ぎ、テフロンチューブから先をインレットバルブ、ニードルバルブを介して、レーザー吸収分光装置に接続した。インレットバルブとニードルバルブ間及びレーザー吸収分光装置内を真空状態にしたうえで、インレットバルブとニードルバルブを順次開放して、レー

ザー吸収分光装置内に試料ガスを導入した後、試料ガス中の吸収スペクトルを測定した。

その結果、 $^{127}\text{I}_2$ の吸収波長に対応する明瞭なピークが測定されたことから、上記の方法で溶液試料から抽出された I_2 をレーザー吸収分光装置に導入可能であることが確認された。また、分析結果からは、 I_2 だけでなく水の吸収波長に対応するピークも確認された。これは、試料ガス中には I_2 に加えて水も含まれていたためと考えられるが、それらのピークが $^{127}\text{I}_2$ の吸収波長に干渉していないことから、試料ガス中に水が含まれている場合でも I_2 の分析が可能であることが確認された。

さらに、濃度の異なる10mLのNaI溶液（1～20 μM ）を用いて、 I_2 の抽出及びレーザー吸収分光装置での分析を行った結果、レーザー吸収分光装置で計測された吸収スペクトルとNaI溶液濃度との間には正の相関がみられた（Bernard et al., 2026）。この結果から、構築した前処理系及びレーザー吸収分光装置が溶液中のヨウ素安定同位体の定量分析の可能性が示された（図 1）。

3. 包括的技術報告書の更新への反映

本共同研究は、包括的技術報告書（NUMO, 2021）の本編 2.3.3 項（事業期間中の回収可能性の確保、環境保全、モニタリングの考慮）に示している、処分場の操業・閉鎖における放射線安全に関するモニタリングの実施に向けた検討に対応するものである。本共同研究で得られた成果は、廃棄体定置後における地質環境中の放射線モニタリング方法の検討や技術の開発において、有効な知見となり得る。そのため、今後の検討成果を踏まえ、同報告書の該当箇所におけるモニタリング項目やそれに適用可能なモニタリング技術などについて、更新・反映することを検討する。

4. 今後の展開

2026年度は、地下水中にヨウ素イオンとして存在する ^{129}I 及びメタンとして存在する ^{14}C を対象としたモニタリング技術の整備に向けて、2022年度から実施してきた研究の成果を踏まえつつ、地下水中からのヨウ素イオン（ ^{127}I 、 ^{129}I ）及びメタン（ $^{12}\text{CH}_4$ 、 $^{13}\text{CH}_4$ 、 $^{14}\text{CH}_4$ ）抽出のための地下水前処理方法、CRDS法を含むレーザー光を用いた分析方法の実現可能性について検討する。そのうえで、ボーリング孔内若しくはボーリング孔近傍でのモニタリング装置開発の実現に向けた課題や改良点の抽出を行う。

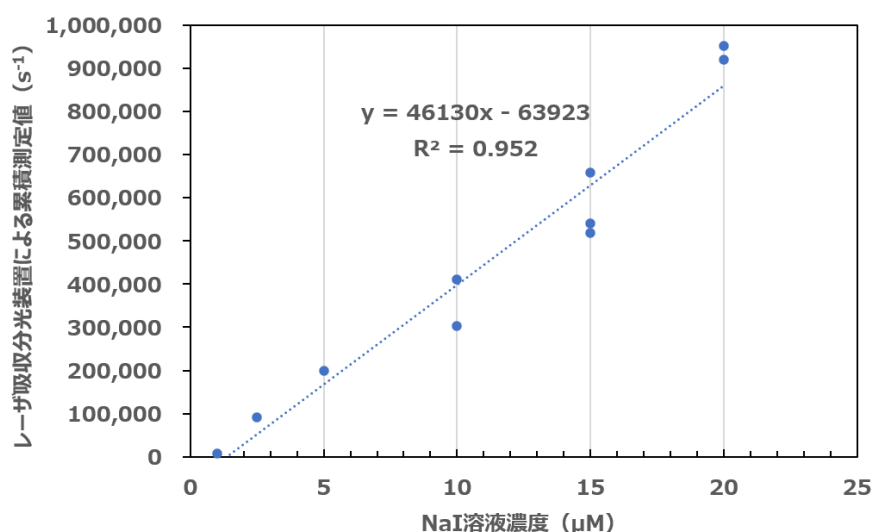


図 1 NaI 溶液濃度とレーザー吸収分光装置で計測された吸収スペクトルの関係

参考文献

- Bernard, L., Li, M., Hasegawa, S., Zhang, C., Terabayashi, R. and Yoshida, F. (2026) : Development of a Cavity Ring-Down Spectroscopy Instrument for Iodine Isotope Analysis, 日本原子力学会 2026 年春の年会, 2B10.
- 李梦麟, 寺林稜平, 张超, 吉田英美子, 草野由貴子, 長谷川秀一 (2025) : Quantitative analysis of iodine isotopes in groundwater using Cavity Ring-down spectroscopy, 日本原子力学会 2025 年秋の大会, 1D03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－, NUMO-TR-20-03.
- Terabayashi, R., Yoshida, F., Kunimaru, T. and Hasegawa, S. (2024) : A cavity ringdown spectrometer for methane isotope analysis using a 1.65 μm distributed feedback diode laser with fiber optical feedback loop, Review of Scientific Instrument, Vol. 95 (4) 043005(2024), doi: <https://doi.org/10.1063/5.0198238>.

2.1.3 ボーリング孔の閉塞技術の開発（2025 年度）

斎 宏行 遠藤 稜尚 高橋 美昭 國丸 貴紀

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

地上からの調査において掘削されたボーリング孔は、将来、地下深部と地表を短絡する放射性核種の移行経路となる可能性がある（図 1）。また、これらの孔が低透水性の地層や断層を挟んで水頭差が大きい場合に、それらをボーリング孔によって貫通してしまうと、地下水流動場に擾乱を生じさせるおそれも指摘されている。このため、SKB や Posiva 等では、地上からの調査により掘削されたボーリング孔について、核種移行の短絡経路とならないよう適切に閉塞するとともに、地下水流動場の擾乱を抑制し、水理場や化学場をボーリング掘削前の自然状態に近い状態へ回復させることを目的として、以下のようなボーリング孔閉塞技術の体系的整備が進められている（Nagra, 1989; Posiva, 2014; NWS, 2018; SKB, 2018）。

- 1) ボーリング孔の掘削深度やケーシングプログラム等に関する情報の記録の重要性
- 2) ボーリング孔内における残置物の撤去方法の開発
- 3) ボーリング孔周辺における掘削影響領域の対処方法の開発
- 4) 地下水流動解析及び物質移行解析に基づく閉塞材の要求性能の設定
- 5) 要求性能に基づく閉塞材の組成及び閉塞方法の開発
- 6) 実証試験による体系的な閉塞技術の確立

また、NUMO においては、このような海外におけるボーリング孔の閉塞技術の整備状況を踏まえ、ボーリング孔を確実に閉塞するために必要な主に国産材料を用いたボーリング孔閉塞材（セメント、ベントナイトなど）及びその運搬・設置機材の整備を進めている。具体的には、NUMO と NWS 及び Nagra は、それぞれの取組みについて共有し、ボーリング孔閉塞に係る共通の課題解決に効果的に取り組むために、「ボーリング孔閉塞に係る国際共同プロジェクト」として 3 国間協定を締結し、当該技術開発に関する情報交換及び共同研究を実施している。これまでの検討により、ベントナイトペレット、セメント系材料、金属製プラグ（ブリッジプラグ）等を組み合わせることで、ボーリング孔内を周辺母岩と同程度の透水性となるように閉塞できる見通しが得られている。

2025 年度は、Nagra の GTS での実施を計画しているボーリング孔閉塞技術に係る実証試験を見据えた準備として、膨潤抑制（遅延）のためのコーティングを施したベントナイトペレットを製造し、このベントナイトペレットの膨潤特性や水理特性を把握した。ベントナイトペレットをボーリング孔の深部まで運搬する装置であるダンプベイラーについては、GTS 坑道内での利用を考慮し、GTS 坑道の高さに対応し、分割・組立可能な構造に改造をした。

2. 主な成果

(1) コーティングベントナイトペレットの製造

閉塞材であるベントナイトペレットについては、これまでの検討において、ボーリング孔の深部

へ運搬・定置する過程でベントナイトペレットが地下水に接触すると膨潤し、ダンプベイラーから発出できなくなる事象が確認されていた。運搬から発出までの実際の施工サイクル等を考慮すると、5 時間程度は膨潤を遅延させる必要があると考えた。これを実現するため、国産の Na 型ベントナイトであるクニゲル®V1 を 100% 使用した高密度（乾燥密度は約 1.85 Mg/m^3 ）の球状ペレット（直径約 4 mm）に、既往のコーティング技術を適用して膨潤を一定時間抑制できるコーティングベントナイトペレットを製造した。

コーティングベントナイトペレットの表面処理には、（坂本ほか，2025）の検討に基づき、ポリビニルアルコール（以下、「PVA」という）をコーティング剤として用いて製造した。この PVA をコーティングしたベントナイトペレットを水中に浸漬し、ダンプベイラーを模擬した装置を利用した発出試験を実施した結果、コーティングベントナイトペレットが固着して発出が困難であった。

そこで、コーティングベントナイトペレットの離型性の向上、コーティングしたペレット同士の付着性の低減、及び膨潤抑制の確実性を向上させるために、PVA コーティングの外層にシェラックをコーティングし、その表面にタルクを塗布する多重層的なコーティング構造を有するベントナイトペレット（坂本ほか，2026）を製造した（図 2）。さらにベントナイトペレットの膨潤抑制効果を高め、ダンプベイラーからの発出性を高めるために、 120°C で 2 時間の加熱処理を行い、シェラックの熱硬化を施した。その結果、ベントナイトペレットの膨潤抑制効果を高め、ダンプベイラーを模擬した装置からの発出性を高めることができた。

なお、ダンプベイラーを模擬した装置を用いた簡易な室内試験において、製造したコーティングベントナイトペレットを充填した装置の底蓋を解放させた後に装置を引き上げたところ、ペレットが自然落下により発出することを確認した。

さらに、製造したコーティングベントナイトペレットを用い、イオン交換水中での浸漬試験を実施した結果、5 時間後のペレットの直径は、浸漬前後を比較すると 1 割程度の増加があった。また、24 時間後には明確な膨潤が確認された。かさ密度は、コーティング部を除くベントナイト成分のみで 0.99 Mg/m^3 となった。さらに、飽和透水試験においては、透水係数は約 $3.5 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ という結果となり、JAEA の「緩衝材基本特性データベース」(<https://www.jaea.go.jp/04/tisou/database/bmdb/index.html>) のデータの乾燥密度と透水係数の関係におおよそ整合することを確認した。

(2) ダンプベイラーの改造

ダンプベイラーは、地上からアウターチューブ内（PQ ロッド内）に送水し、アウターチューブ内を加圧することにより、ダンプベイラー内のピストンを作動させる。また、所定の圧力でダンプベイラー下部のフラッパー（蓋）のシャープピンを破断させ、先端部を開放してダンプベイラーから閉塞材（コーティングベントナイトペレット）を発出する機構である。

GTS の坑道高さを考慮した長さ制限（約 4 m）に対応するため、全長約 7 m のダンプベイラーを分割・組立可能な構造とし、ねじ接続によるモジュール化を実現した。また、インナーチューブとペレットハウジングの一体組立を可能とする専用治具を開発することにより、制約空間での施工性を向上させた。

改造後のダンプベイラーについては、模擬ボーリング孔（直径 151 mm、長さ 11 m の鋼鉄製のパイプ）を設置し、作動確認試験を実施した。作動確認試験は、ベントナイトペレットを使用しない試験とベントナイトペレットを使用した試験を行った。前者の試験では、改造したダンプベイラーが所期の性能（所定圧力での下蓋の開放やピストンの作動）を有することを確認した。

(3) ベントナイトペレットの発出試験

ベントナイトペレットを使用した発出試験では、水とベントナイトペレットとの接触時間（静置時間）の影響が確認された。具体的には、ベントナイトペレットを用いた作動確認試験では、ダンプベイラー内にコーティングベントナイトペレットと水道水を満たして2時間静置した場合、ピストンとベントナイトペレットが接触した近傍でベントナイトペレットの団粒化が生じ、摩擦抵抗の増大により発出が途中で停止した。

次に、ベントナイトペレットの静置時間を2時間確保したうえで、ピストンをベントナイトペレットに接触する直前で停止させ、自然落下のための時間を設けたが、全量発出は確認できなかった。一方、水道水中の浸漬時間を0.5時間に短縮した場合は、ベントナイトペレットの全量発出に成功した。しかしながら、0.5時間は、実際のボーリング孔の閉塞作業におけるベントナイトペレットの運搬から発出までに必要な時間として不十分であると考えられる。

PVA - シェラック - タルクによる多層コーティングを行ったベントナイトペレットは、ダンプベイラーを模擬した装置での発出は確認できたものの、実際のダンプベイラーと模擬ボーリング孔を利用した試験においては、実作業に必要な時間を確保しつつ安定した発出性能を確保するための条件についての検討課題を認識した。

このように、本業務において、閉塞材及び閉塞材の運搬に関する技術要素について、実証的な知見を蓄積し、ボーリング孔閉塞技術の実用化に向けた重要な知見を得た。

3. 包括的技術報告書の更新への反映

本技術開発は、包括的技術報告書（NUMO, 2021）の本編3.5.2項（今後の取り組み）及び本編4.5.7項（3）（地下施設の閉鎖）に記載した課題に対応するものである。本技術開発で得られたボーリング孔閉塞技術は、ボーリング孔を介した地下水・核種移行の抑制を通じて、閉じ込めに関する安全機能の確保に資すると考えられる。そのため、今後の検討成果も踏まえ、同報告書の該当箇所におけるボーリング孔閉塞技術の記載について、更新・反映することを検討する。

4. 今後の展開

今後は、閉塞材及びその運搬装置であるダンプベイラー、さらにブリッジプラグとその設置ツールについて、実際のボーリング孔を用いた実証試験を実施し、体系的なボーリング孔閉塞技術の構築を進める予定である。

一方、閉塞材であるベントナイトペレットについては、実際のボーリング孔の条件を想定し、現場作業に必要な時間的余裕を確保しつつ、ダンプベイラー内から安定した発出性能を維持することが求められる。この課題を踏まえ、本技術開発を継続し、GTSで計画している実証試験に反映させる方針である。また将来的に、ボーリング孔閉塞技術に関する国際ワークショップ等を開催し、国際的な信頼性を備えた技術として取りまとめる予定である。

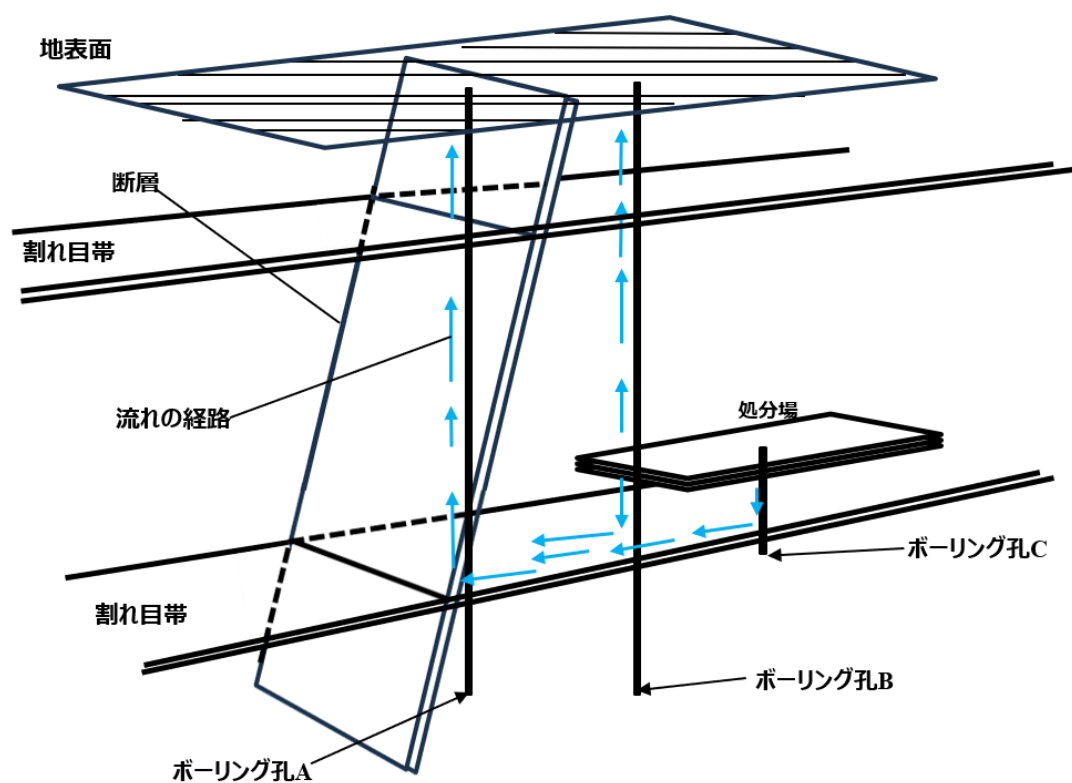


図 1 ボーリング孔を介した放射性核種の短絡経路の概念図 (Pusch et al., 2016) を基に作成

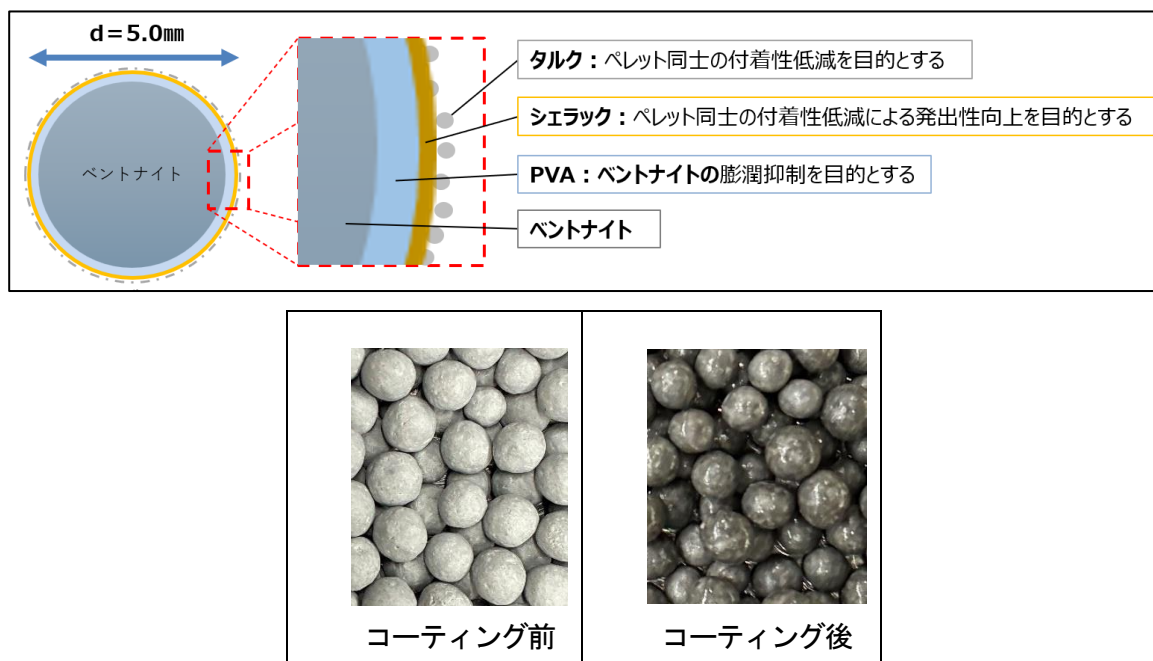


図 2 コーティングベントナイトペレットの断面図 (イメージ) 及び写真

参考文献

- JAEA : 緩衝材基本特性データベース, <https://www.jaea.go.jp/04/tisou/database/bmdb/index.html>, (2026 年 9 月 10 日閲覧) .
- Nagra (1989) : Bohrlochversiegelung: Konzept und Machbarkeitsnachweis, NTB 89-26, June 1989.
- NWS (2018) : Sealing Deep Site Investigation Boreholes:Phase 2 Final Report, Contractor Report to NWS, January 2018.
- Posiva (2014) : Closure of the Investigation Boreholes:Posiva Working Report 2012-63, November 2014.
- Pusch, R., Mohammed, H.M., Knutsson, S., Ramqvist, G. and Liw, L. (2016) : Fracking - Prevention of Leakage of Oil and Gas from Abandoned Holes in Consolidated Rock, Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, Vol. 6, No. 1, pp. 19-27.
- 坂本嵩延, 沖原光信, 中島均, 齋藤亮, 檜原拓之 (2025) : ベントナイトペレットへの水溶性材料のコーティングについて, 令和 7 年度土木学会全国大会第 80 回年次学術講演会.
- 坂本嵩延, 沖原光信, 根本浩史, 中島均, 齋藤亮, 高橋美昭, 遠藤稜尚, 斎宏行 (2026) : ベントナイトペレットへのコーティングによる膨潤抑制と発出性向上に関する研究, 令和 8 年度土木学会全国大会第 81 回年次学術講演会.
- SKB (2018) : Sealing of investigation boreholes:Full scale field test and large-scale laboratory tests, TR-18-18, December 2018.

2.1.4 サイト調査におけるデータ管理方法に関する検討 － データマネジメントシステムの詳細設計 －

西尾 光 古崎 敦也 斎 宏行

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

処分地を選定するためのサイト調査では、特定放射性廃棄物を長期にわたって人間の生活環境に有意な影響を与えないよう隔離し、閉じ込めるために必要な地質環境条件を備えたサイトかどうかを確認するため、各種の調査・試験を段階的に実施する。地表踏査、物理探査、ボーリング調査、室内試験に加えて、地質環境モデルの構築や数値解析等が進展するにつれて、長期間にわたり膨大かつ多様なデータが取得・生成される。

これらの調査・試験で取得したデータ及び地質環境モデル構築結果、並びにメタデータや品質管理記録を含む関連情報は、サイト調査から処分地の建設・操業を経て、閉鎖に至るまでの長期の事業期間にわたり、透明性、信頼性、追跡性、検索性、保護及び情報セキュリティを確保しつつ一元的に管理する必要がある。このため、データの作成者及び利用者が登録・保存・表示を容易に行えるとともに、適切なアクセス権限の設定により必要な保護策を講じられるデータマネジメントシステムが求められる。IAEA（2024）も同様な点を指摘しており、原子力規制委員会（2022）においても、各調査段階で得られた情報を長期間保存する必要性が示されている。

これらを踏まえて、NUMO では、サイト調査で用いるデータマネジメントシステムとして、「サイト特性評価支援システム（Geo-Synthesis Support System：以下、「G3S（ジースリーエス）」という）」の開発を進めている（図 1）。2024 年度には、G3S の要件定義及び基本設計を実施した（NUMO, 2024）。2025 年度は、これらの成果を踏まえて 2027 年 3 月の稼働開始を目指した詳細設計を実施しており、その内容を報告する。

2. 主な成果

G3S をサイト調査から地層処分事業全体にわたり信頼して利用できる情報基盤として確立することを目標に、実装を見据えた詳細設計を行った。主な成果を以下の 6 つの観点で整理する。

① 全体構造

- ・ 長期にわたり段階的に増加するデータを安定的に管理するために、将来的な改修や機能追加に柔軟に対応可能なシステム構造とした。
 - システム全体は、ユーザーが操作する「プレゼンテーション層」、処理内容を実行する「アプリケーション層」、データを保存・管理する「データ層」の三つに分けた三層構造とすることで、各層の役割分担を明確化した。
 - 各層が必要以上に依存し合わない疎結合（パーツ同士のつながりを最小限に抑える設計）とすることで、機能追加や仕様変更を行う際に、他の部分へ影響が広がりにくい構成とした。これにより、将来の段階的な改修を前提とした長期利用に適した柔軟性の高い全体構造とした。

② 実行基盤

- ・ サーバーを自前で保有・管理する方式ではなく、必要な計算資源や保管領域を外部サービスとして利用するクラウドサービスを採用した。実行基盤としては、現時点では Amazon

Web Services (AWS) 上での稼働を前提とする構成とした。

- ・ 計算処理の実行方式として、処理単位を小さくまとめて実行するコンテナ方式と、必要なときだけ自動的に処理が起動・終了するサーバレス方式を組み合わせ、処理内容に応じてシステム側で使い分け可能な設計とした。

③ データの保管及び整理

- ・ 測定値や属性情報など、数値や項目を表形式で管理するデータについては、リレーショナルデータベース（表と項目の関係で管理するデータベース方式）を用い、PostgreSQL（調査データや申請・承認等の業務プロセスを管理）及び MariaDB（後述する Nextcloud のメタデータを管理）で管理する設計とした。
- ・ 報告書や画像など表形式に収まりにくいデータについては、ファイルをそのまま保管しやすいオブジェクトストレージ（Amazon Simple Storage Service）に格納する構成とした。
- ・ このようにデータの性質に応じた保管方式を採用することで、大容量のデータを含む多様なデータを無理なく一体的に管理できる情報基盤を構築した。

④ バージョン管理及び品質の確保

- ・ サイト調査から地質環境モデルの構築、安全評価に至る各段階では、評価に用いたデータのバージョンや範囲を明確にし、後からその妥当性を検証できることが重要である。このため、G3S では、評価や検討の単位として意味を持つ「データセット」の概念を導入し、体系的な管理を行う設計とした。
- ・ データセットは、特定の目的に用いられるデータの集合として定義し、どの評価にどのデータが用いられたかを明確に追跡可能とした。
- ・ さらに、評価や意思決定の根拠となるデータの状態を確定させるため、データフリーズ（ある時点でのデータの状態を固定する仕組み）を設計に取り入れた（図 2）。データフリーズが行われたデータセットは、その後更新される元データとは独立して参照できるようにし、評価結果と当該時点のデータとの対応関係が時間の経過とともに不明確になることを防ぐ構成とした。

⑤ 利便性及び操作性

- ・ 長期にわたり多分野のユーザーが関与するサイト調査では、理解の齟齬を低減する観点から、システムの使い勝手も重要な技術要素となる。そのため、地質、地下水、地球化学、自然環境など、専門分野の異なる利用者が共通の操作感で利用できることを重視し、画面構成や操作の流れを統一した設計とした。
- ・ 地図情報を扱う GIS を活用し、調査地点の位置情報と測定値や属性情報を結び付けて検索できる機能を整備した。
- ・ 検索結果やデータの傾向を把握しやすくするため、グラフ作成機能を整備し、視覚的なデータ探索を可能とした。
- ・ これにより、専門分野の異なる利用者間においても、データの解釈や確認作業を共通の視点で進めることが可能となり、業務の効率化に寄与することが期待される。

⑥ 外部連携及び運用性

- ・ 異なる組織間でのデータ授受を想定し、登録対象のファイルと地図ファイルとの紐づく属性情報等を記録した「リンクファイル（登録対象ファイルとその関連情報を対応付けたファイル）」による一括登録方式により、効率的かつ確実なデータ登録を可能とした。
- ・ 所定の権限を有する組織間のファイル受け渡し手段として、Nextcloud（オープンソースの

ファイル共有基盤）を用いた機能を整備し、データ流通の効率化を図った。

- ・ 性能や信頼性、セキュリティといった非機能要件について具体化し、AWS のマネージドサービスを活用することで、冗長化、自動バックアップ、監視・ログ管理を一体的に設計した。
- ・ クラウド上の情報・データのバックアップを実施するため、国内の地理的に離れたデータセンターへのバックアップ機能を組み込み、自然災害を含む非常時においてもデータを保全可能な運用体制を整備した。

3. 包括的技術報告書への反映

包括的技術報告書（NUMO, 2021）の本編 3.5.2（今後の取り組み）に示した、セーフティケースの構築にあたり、地質環境の調査・評価、地質環境モデルの構築、設計及び安全評価に用いる科学的・技術的情報、手法、モデル及びデータベースを評価基盤として体系的に整理し、その妥当性や信頼性を後から検証可能な形で示すという課題に対応するものである。G3S により、評価プロセスとデータとの関係を体系的に整理・提示できるようになることで、規制機関や社会に対する説明力の強化が期待される。そのため、今後の検討成果も踏まえ、地質環境調査及びモデル構築にかかわる品質マネジメントについて、付属書 3-12 に反映することを検討する。

4. 今後の展開

システム稼働に向けて、G3S の実装、各種機能の単体テストや結合テスト等を進める。また、今後の機能拡充として、AI 技術を活用したメタデータ登録支援機能、RAG（大量の文書やデータから根拠を探し出し、回答候補を生成する仕組み）による高度検索機能及び利用サポート用 AI エージェントの導入を検討する（図 3）。

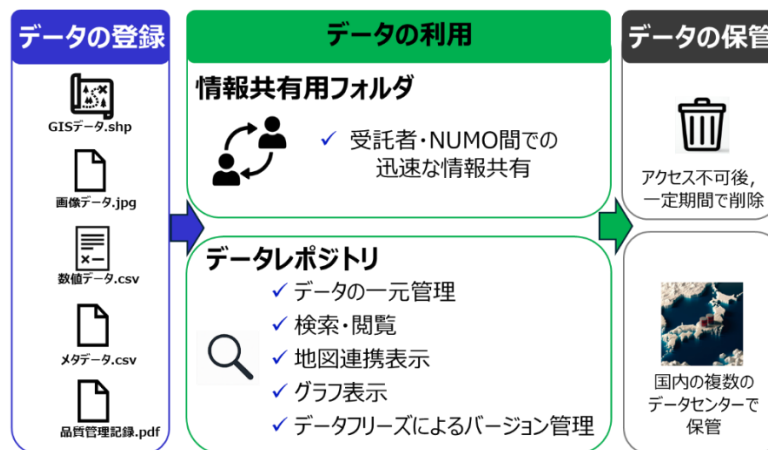


図 1 データの登録、利用、保管の一連の流れにおける G3S の位置づけ

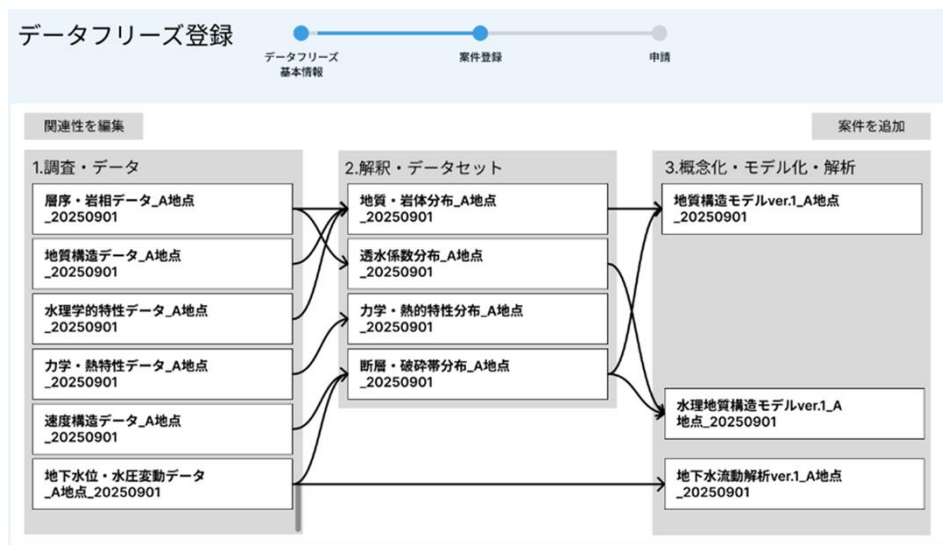


図 2 データリリースされたデータの関連性の表示イメージ

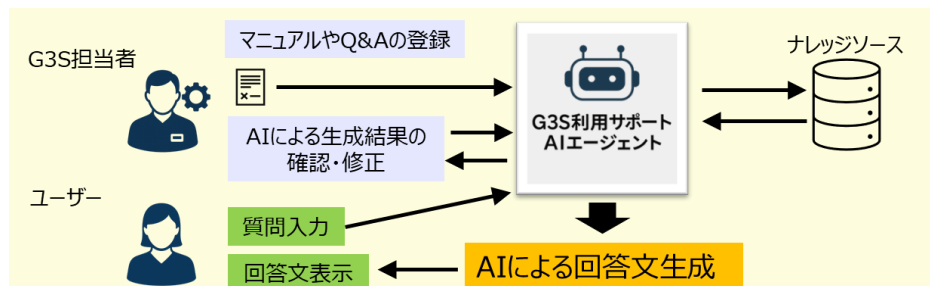


図 3 G3S 利用サポート AI エージェントのイメージ

参考文献

- 原子力規制委員会(2022)：特定放射性廃棄物の最終処分における概要調査地区等の選定時に安全確保上少なくとも考慮されるべき事項（原規規発第 2208241 号 原子力規制委員会決定）。
- IAEA(2024)：Management of Site Investigations for Radioactive Waste Disposal Facilities, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.40.
- NUMO(原子力発電環境整備機構)(2021)：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構)(2025)：技術開発成果概要 2024，NUMO-TR-25-03.

2.2 処分場の設計と工学技術の体系的な整備

わが国の多様な地質環境条件に柔軟に対応した処分場設計を可能とするため、人工バリアを構成する材料の特性把握と長期健全性評価のための技術基盤の整備を進めるとともに、地下施設の設計・施工に関する評価手法の高度化、設計オプションの実現性向上、さらには将来の建設・操業を支える技術の検討に継続的に取り組んだ。

人工バリアを構成する金属製処分容器（ガラス固化体のオーバーパック及び TRU 等廃棄物の廃棄体パッケージ容器の総称）については、長期耐食性に係る評価技術の信頼性向上のため、腐食防食学会に委託して「長期腐食寿命評価技術検討委員会」を設置し、処分容器の長期腐食寿命評価に関する諸課題について、専門家による検討を継続して実施した。腐食防食学会では、金属製処分容器に関する腐食試験の品質確保のため、学会規格「圧縮粘土材料中での浸漬試験による炭素鋼の腐食減量測定方法」を発行した。作成された規格案に示された試験方法について、ラウンドロビン試験（複数の試験者により同一の方法で行う試験）を実施し、異なる試験機関で実施しても、統計的に同じ試験結果が得られることを確認した（2.2.1 参照）。

地下施設の設計・施工に関する技術の信頼性を向上させるため、大深度地下坑道に対する耐震性評価手法の整備を電中研との共同研究により継続して進めた。坑道の耐震性評価に関しては、地下深部の坑道を模擬できるよう地山強度比を調整した人工岩盤を用いて遠心載荷模型振動試験を実施し、建設及び操業期間中の地下深部坑道の地震時変形挙動を再現できる見通しを得た。また、吹付けコンクリートについては、若材齢時の応力履歴が硬化後の力学特性に及ぼす影響が小さいことを確認し、既存解析モデルの適用可能性を確認した（2.2.2 参照）。

設計オプションに関しては、設計の柔軟性を確保する観点から、その安全性と実現性の向上を目的とした開発を継続している。長期的な耐食性を高めるオプションとして銅を耐食層とするオーバーパック（銅コーティングオーバーパック）について、2017 年度に開始した NWMO との共同研究により製造方法の開発を進めてきたが、炭素鋼容器に対し、電気メッキにより製造する方法について、実規模大で繰り返し実証試験を行い、実現可能であるとの見通しを得て、本共同研究を終了した。また、蓋接合部については摩擦攪拌接合技術の適用性の評価を、大学との共同研究により進めた。これまでに要素試験として平板の銅コーティング材を用いた摩擦攪拌接合試験により接合条件を確認したうえで、実機の形状を想定した円筒形の銅コーティング材を用いた試験により、円筒容器に対しても摩擦攪拌接合法が適用可能である見通しを得つつある（2.2.3 参照）。

わが国では生産年齢人口の減少により、地層処分事業の長期的な建設・操業に必要な熟練技術者の確保や技術継承が課題となる。このため NUMO では、遠隔化・自動化を中核とする「Smart DGR」構想の具体化に向けた検討を進めている。諸外国の地層処分分野では遠隔・ロボットシステムや BIM（Building Information Management）・デジタルツインの導入が進み、鉱山分野では Smart Mining、土木・建設分野では NATM（New Austrian Tunneling Method）の遠隔操作化・自動化が進展している。これらの知見は、地層処分事業の安全性、施工品質、持続可能性の向上に有益である（2.2.4 参照）。

2.2.1 「圧縮ベントナイト中における炭素鋼の浸漬試験方法」の標準化に向けた技術的根拠の整備

長田 柊平¹ 田窪 勇作¹ 鈴木 寛¹ 井上 博之²

¹原子力発電環境整備機構, ²大阪公立大学大学院

1. 背景・目的

高レベル放射性廃棄物を封入するオーバーパックの腐食寿命評価では、残存酸素及び放射線分解により生成する酸化性化学種を酸化剤とする腐食と低酸素環境における水素発生型腐食及び微生物腐食を考慮する (NUMO, 2021)。このうち、低酸素環境における水素発生型腐食の評価は、圧縮したベントナイト中に金属試験片を埋め込んだ状態で浸漬する腐食試験により、試験前後における試験片の質量減量を平均腐食深さに換算し、浸漬時間との関係から長期の腐食速度を算定する。このような低酸素環境下における腐食速度は、大気中の腐食と比較して、極めて遅いため、長期の腐食速度の評価には、精度よく測定するための試験方法が必要である。

このような試験は、低酸素環境を維持するための設備が必要であること、地層処分分野以外でのニーズが少ないことから、標準化が十分になされておらず、各研究機関が独自にノウハウの蓄積を進めてきた。この結果、同一の試験条件及び材料を用いても結果 (JAEA, 2013; RWMC, 2013) が異なることがあり、また結果の違いの原因が、誤差によるものか、あるいは試験者の力量によるものなのか、明らかになっていない。

今後、NUMO は、サイトの地質環境の調査を進める過程で、その地質環境特性を踏まえた腐食試験を実施し、その結果に基づいてオーバーパックを設計する必要がある。そのため、民間の試験機関も含む複数機関において品質を確保した腐食試験が実施できるよう、標準化された試験手法の整備が急務である。

このような背景から、腐食試験方法の腐食防食学会規格（以下、「学会規格」という）を制定することを目的として、2021 年度に長期腐食寿命評価検討委員会の下に、腐食試験技術分科会を立ち上げ、試験片及びベントナイトの準備、ベントナイトへの試験片の埋込み、ベントナイトへの試験溶液の含浸、浸漬試験、試験片取出し後の処理に至る一連の標準的な手順を検討し、図 1 のとおりまとめた。本書では、この標準試験法の試験手順により腐食速度を精度よく求められるかを確認するため、3 箇所の民間試験機関で実施したラウンドロビン試験の結果を報告する。

2. 主な成果

ラウンドロビン試験は、測定者の技量を含めた測定方法及び測定装置の信頼性を検証するため、複数の試験機関に同一試料を配付して測定を行い、得られた結果のばらつきを評価する試験である。本件では、標準試験法の試験手順の妥当性及び再現性を確認するため、3 箇所でのラウンドロビン試験を 2024 年度と 2025 年度の 2 回に分けて実施した。1 回目の試験では試験手順の妥当性確認を目的に、試験機関と独立した専門家が試験状況を確認しながら実施し、2 回目の試験では再現性確認を目的に各試験機関が独立して実施した。

腐食試験は、炭素鋼試験片を圧縮ベントナイト中に埋め込み、人工海水を含浸させた状態で、 80 ± 5 °C の低酸素雰囲気下で 180 日間実施した。試験後、圧縮ベントナイトから取り出した試験片の

腐食生成物を除去し、試験前後の質量減少量に基づいて腐食速度を算出した。

腐食試験の結果を図 2 に示す。図 2 に示した 1 回目と 2 回目の試験データは、試験実施機関や試験時期が異なるものの、測定方法及び測定条件は同一である。試験で得られたこれらの腐食速度データに対して有意差を検定した結果、両者に差は認められなかった。そこで、これらのデータを同一母集団から得られたものとみなし、統計学的手法により解析した結果、ばらつきが正規分布に従うことを確認した。図 2 に示した 30 点の腐食速度データは、 $0.196 \sim 0.221 \text{ kg m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ の範囲にあり、2 回の試験の標準偏差 (σ) は、平均値の 3 % であった。

次に、腐食速度の σ を尺度として、本試験で採用した標準試験法の試験手順の妥当性や再現性を分析する。規定された試験法の手順に不備がある場合には、偶然誤差では説明できない系統誤差に起因する外れ値が生じると考えられる。一般に、測定データが外れ値であるかどうかは、測定値の σ との比較により評価される。本試験で得られた平均腐食速度は、1 点を除き平均値からの偏差が $\pm 2\sigma$ 以内であった。このことから、JIS Z 8405:2021 の基準を援用し、測定結果に外れ値は含まれておらず、本試験で採用した標準試験法の手順に不備はないと腐食試験技術分科会で判断された。また、ラウンドロビン試験条件下で得られた 3σ の値は平均値の 10 % 未満であった。既往の大気腐食の促進試験に関するラウンドロビン試験結果 (Suga et al., 2005) では、 3σ が平均値の 32 % ~ 100 % であることから、本試験法は質量減少法による腐食速度測定として高い再現性を有するといえる。

以上より、標準試験法の妥当性や再現性が学会より確認され、これを技術的根拠として、学会規格「JSCE S 2502 圧縮粘土材料中における炭素鋼の腐食減量測定方法」(腐食防食学会, 2025) が策定された。

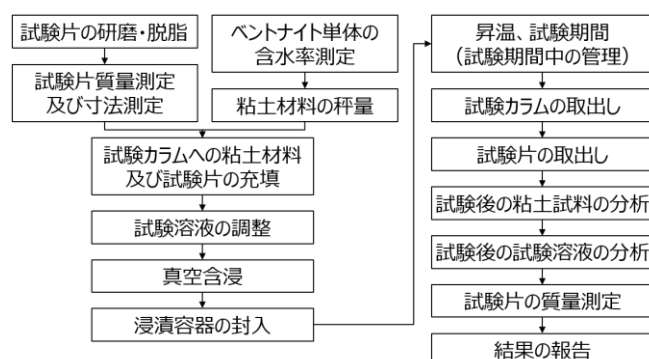


図 1 標準化した試験手順のフローチャート

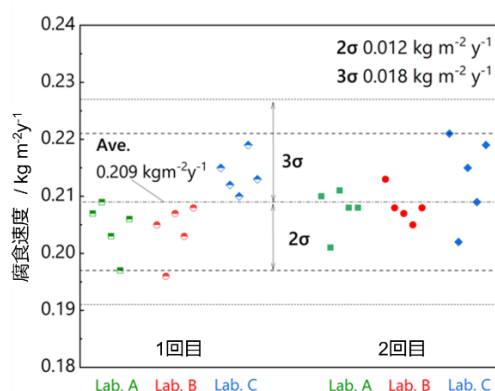


図 2 ラウンドロビン試験の結果

3. 包括的技術報告書の更新への反映

本業務は、包括的技術報告書 (NUMO, 2021) の本編 4.8.3 項 (今後の取り組み) に基づく取り組みである。包括的技術報告書 (NUMO, 2021) の腐食量評価に用いた腐食試験方法を包含した学会規格が策定されたことにより、当該試験データの信頼性が高まった。なお、学会規格の策定は、人工バリアの仕様例の設定や腐食量評価を見直すものではない。

今後、学会規格を用いた腐食試験で得られる試験データを踏まえ、包括的技術報告書 (NUMO, 2021) の本編 4.4.1 項 (高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリアの設計) に示した低酸素環境下での緩衝材中における炭素鋼の平均腐食深さに関する知見を拡充し、腐食量評価の技術的根拠の充実を図る。

4. 今後の展開

今後は、NUMO が主体となって、本規格の利用拡大を図るため、学会規格の ISO 化を推進する。引き続き、本件の取組みを通じて、腐食寿命評価技術の信頼性向上に資する技術開発を推進する。

参考文献

腐食防食学会 (2025) : 圧縮粘土材料中における炭素鋼の腐食減量測定方法, JSCE S2502:2025.

JAEA(日本原子力研究開発機構) (2013) : 平成 24 年度地層処分技術調査等事業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—6 ヶ年研究成果の取りまとめ—.

NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—, NUMO-TR-20-03.

RWMC(原子力環境整備促進・資金管理センター) (2013) : 平成 24 年度 地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発 遠隔操作技術高度化開発 人工バリア品質評価技術の開発 モニタリング技術の開発 平成 19 年度～平成 24 年度の取りまとめ報告書.

Suga, S. and Suga, S. (2005): Report on the Results from the ISO/TC 156/WG 7 International Round Robin Test Programme on ISO 9227 Salt Spray Tests, The Surface Finishing Society of Japan, Vol. 56, pp.28-31.

2.2.2 坑道の耐震性評価手法の整備に関する共同研究

レ アン ゴク^{1, *1} 上田 達也¹ 及川 大夢² 石丸 真² 岡田 哲実² 山野井 悠翔² 宮川 義範²

¹原子力発電環境整備機構, ²電力中央研究所

1. 背景・目的

処分場の地下施設は、アクセス坑道、連絡坑道及び処分坑道など、役割の異なる坑道群で構成されており、これらの坑道については、現在の山岳トンネルと同様の設計及び掘削方法を想定している（NUMO, 2021）。地層処分と中深度処分では対象とする深度は異なるものの、地下施設の建設・操業期間中における坑道の安定性を確保する観点は共通しており、中深度処分にかかわる規制基準においても、「廃棄体の受入れから坑道を閉鎖するまでの間における一定の耐震性」が必要とされている（原子力規制庁, 2022）。しかし、一般的な道路や鉄道トンネルを対象としたトンネル標準示方書（土木学会, 2017）及びトンネルの地震被害と耐震設計（土木学会, 2023a）によれば、山岳トンネルは、周辺地山と一体となって挙動するため、耐震性に富む構造物であり、地表の構造物に比べて地震の影響が少なく、これまで坑口や破碎帯の周辺などの特殊な区間を除き、耐震性の検討事例は少なく、標準的な耐震性評価手法が整備されていない。

このような背景から、NUMO は、地層処分事業の地質環境条件、坑道の役割及び施工方法を考慮した標準的な耐震性評価手法の整備が重要であると考え、2023 年度から電中研との共同研究を実施している。本技術開発においては、課題を①地震時における岩盤及び支保工の応力-ひずみ関係の解析モデル整備、②入力地震動の設定方法の信頼性向上、③評価指標と基準の整備に分類し、既存の解析手法や試験方法の地層処分の地質環境への適用性について検討している。本報告は、これらの課題のうち、①解析モデル整備について検討成果を報告する。

解析モデルの整備においては、坑道を構成する岩盤及び支保工に関して、既存の解析モデルの適用性を検討するとともに、解析に必要となる岩盤及び支保工の力学特性を取得している。2024 年度は、岩盤については電中研が開発した解析モデル（石丸ほか, 2017）、及び吹付けコンクリートについては打設コンクリート用の解析モデル（Maekawa et al., 2003）の適用性について検討を進めた。また、三軸試験により岩盤の静的及び動的変形特性を取得するとともに、乾式工法で製造した吹付けコンクリートの力学特性を取得した（NUMO, 2025）。

2025 年度は、解析モデルの適用性についてさらに検討を進めるため、解析の比較対象となる試験として、坑道の掘削時から地震時までの一連の過程を再現可能な「遠心載荷模型振動試験」を実施し、坑道周辺の地震動の加速度時刻歴と坑道の内空変位を取得した。これらの結果を数値解析結果と比較することにより、解析モデルの適用性を確認する。吹付けコンクリートについては、湿式工法で製造した吹付けコンクリートの力学特性を取得し、実際の施工環境と同様に、掘削によって発生した地山変形を受けながら硬化した場合と、地山変形がない条件で硬化した場合の吹付けコンクリートの力学特性を比較した。

*1現所属：鹿島建設（株）

2. 主な成果

(1) 遠心载荷模型振動試験の実施結果

本研究の遠心载荷模型振動試験は、地下深部の岩盤と同等の地山強度比（岩盤の一軸圧縮強さを土被り圧で除したもの）になるよう、応力状態を遠心力により再現しつつ、模擬地震動を载荷する試験である。本研究では、模擬坑道を有する地盤模型を遠心力場において加振することで、地下深部で地震動を受けた坑道及び周辺岩盤の変形挙動を再現した。実際の坑道では、掘削によって周辺岩盤に緩み領域が発生し、その状態で地震動が作用することで、さらに緩み領域が拡大し、坑道内部に変位が生じると考えられる。本試験の手順を以下に示す。

- ① 地下深部の坑道を模擬した地盤模型を製作
- ② 遠心载荷を開始し、遠心加速度の増大に合わせて模擬坑道内部に設置したゴム製馬蹄形チューブ内の空気圧を増すことで、模擬坑道の変形を防止しながら、目標の遠心加速度（85G）まで载荷し、地下深部の応力状態を模擬
- ③ 遠心载荷状態で、ゴム製馬蹄形チューブ内の空気を抜き、坑道掘削による岩盤の応力解放を模擬。内空変位が一定になるまで遠心载荷状態を保持
- ④ 内空変位が一定になった後、遠心载荷状態で模擬地震動を入力し、坑道周辺の応答加速度及び模擬坑道内の内空変位を計測

地盤模型の製作においては、地下深部の岩盤に施工された坑道を再現するために、地山強度比が 1.4 の条件となるように石灰石微粉末、石灰石砕砂に早強ポルトランドセメント、AE 減水剤を混合した人工岩の配合を調整した。また、模擬坑道の断面は馬蹄形とし、幅及び高さを 100mm とした。土槽内における模擬坑道設置位置での最大遠心加速度は、装置能力の限度となる 85G とした。遠心载荷模型振動試験の相似則に基づき、この模擬坑道を実物に換算すると、坑道幅及び高さがそれぞれ 8.5 m の馬蹄形坑道に相当する。なお、この試験では、支保工は設置していない。図 1 に地盤模型の形状及び寸法、並びに加速度計・変位計の計測位置を示す。

掘削時の応力解放と模擬地震動を入力する過程においては、図 1 に示す加速度計・変位計で、坑道周辺の応答加速度や内空変位の経時変化を計測した。模擬地震動の水平加速度は、実物換算の加速度振幅を模型底面（ACH0）において、 0.45 m/s^2 から 4.56 m/s^2 まで 4 段階で増加させて入力した。図 2 に、第 1 段階（ 0.45 m/s^2 ）及び第 4 段階（ 4.56 m/s^2 ）の各計測点における水平加速度を例示する。いずれの加振段階においても、加速度振幅は模型の底面から地表面に向かって増幅する傾向を示し、特に第 4 段階では、その傾向が顕著になった。

図 3 に、掘削時（内圧除荷時）及び模擬地震動入力時の坑道の内空変位の計測結果を示す。坑道の鉛直方向及び水平方向の内空変位は、坑道が収縮する側（負の値）に大きくなり、加速度振幅の大きな模擬地震動を入力した第 3 段階及び第 4 段階の加振後は、坑道の変形が一層進展することが確認された。実物換算すると、最大の水平変位は約 160mm（坑道幅の約 1.8%）であった。山岳トンネル設計施工指針（鉄道建設・運輸施設整備支援機構，2023）に示される空洞安定性の条件では、許容される変位は坑道幅の 1.5% 以下とされている。本結果はこれを上回っているが、支保工を設置しない本試験では坑道の変形が進展しやすいと推察でき、坑道の安定性を維持するためには支保工の設置が必要と考えられる。

このように、遠心载荷模型振動試験により、地下深部に掘削された坑道に対して、地震動が作用し

た際の変形挙動が再現可能であることを確認できた。これにより、電中研が開発した解析モデルを用いた数値解析結果と比較することで、岩盤に対する耐震性評価手法の妥当性（Validation）を確認できる見通しが得られた。

(2) 吹付けコンクリートの試験結果

2024 年度は、乾式工法により施工した吹付けコンクリート供試体の力学特性を取得したが、今年度は、乾式工法と同様に一般的な施工方法である湿式工法により施工した供試体の力学特性を取得した。なお、吹付けコンクリートは、掘削直後に施工するため、地山変形を受けながら硬化することとなる。このような応力履歴を受けた吹付けコンクリートの力学特性が、応力履歴を伴わない場合とどの程度異なるかについて試験を実施した。吹付けコンクリートのブロックを対象としたクリープ載荷を最短で材齢 9 時間の若材齢から 27 日まで実施した後、JIS A 1108 を参照して、材齢 28 日に圧縮強度試験（単調，繰返し）及び割裂引張試験を実施して硬化後の圧縮強度，ヤング係数及び割裂引張強度への影響を評価した。クリープ載荷を行わない供試体も併せて製造し，クリープ載荷したものと比較した。これらの試験手順を図 4 に示す。

図 5 にクリープ載荷パターン（A, B, C1, C2）を示す。パターン A はクリープ係数の取得を目的としており，材齢 7 日から 5 MPa の一定応力を与えた。パターン B は，材齢 9～10 時間から材齢 7 日まで段階的に応力を 5 MPa まで上昇させ，材齢 7 日以降は一定応力を与えた。パターン C は，B よりもさらに厳しい条件として，若材齢時の応力を 2 倍としたケース C1 と，硬化後（材齢 14 日）にもう一段階 15 MPa まで応力が増大するケース C2 の 2 ケースを設定した。

図 6 に圧縮強度，ヤング係数及び割裂引張強度を示す。各クリープ載荷パターンの平均値の差異は小さく，無載荷の供試体の計測結果とほぼ同じであった。このように，最大 15 MPa までの圧縮応力履歴の範囲では，応力履歴が硬化後の力学特性に与える影響は軽微であることが示された。

また，繰返しの圧縮強度試験から得た応力-ひずみ関係に基づいて，ピーク後の繰返し時の剛性低下率（破壊パラメータ）を算出した結果を図 7 に示す。同図にコンクリート標準示方書（土木学会，2023b）にも反映されている打設コンクリート用に開発された解析モデル（Mackawa et al., 2003）も併せて示す。図 7 より，クリープ載荷の有無にかかわらず，コンクリート標準示方書に示される打設コンクリート用の解析モデルと良好に一致し，この解析モデルが，掘削によって発生した地山変形を受けながら硬化した吹付けコンクリートにも適用可能であることが示された。

3. 包括的技術報告書の更新への反映

本技術開発は，包括的技術報告書（NUMO，2021）の本編 4.5.2 項（坑道の設計）に関する検討である。本共同研究で適用性を評価している地震時における岩盤及び支保工の応力-ひずみ関係の解析モデルは，同項の（4）（坑道の耐震安定性）における検討内容の信頼性向上に資すると期待できる。

4. 今後の展開

2025 年度までの検討により，岩盤の応力-ひずみ関係にかかわる解析モデルの妥当性確認に必要な試験方法として，地山強度比を試験条件とする遠心載荷模型振動試験が有効であるとの見通しが得られた。今後は，2026～2027 年度にかけて試験数を拡充し，解析モデルの適用性確認を進める。吹付けコンクリートについては，引張耐性の向上を目的として，繊維補強材の適用に関する検討にも取り組む。また，岩盤-吹付けコンクリートを統合した解析を可能とするため，これらの部材間の境界（ジ

ョイント要素) の力学特性の取得にも取り組む。なお、本報告では取り上げなかった「入力地震動の設定」及び「評価指標と基準類の整備」についても、今後、引き続き検討を進める。これらの成果は、大深度地下における坑道の耐震性評価マニュアルの検討に反映する計画である。

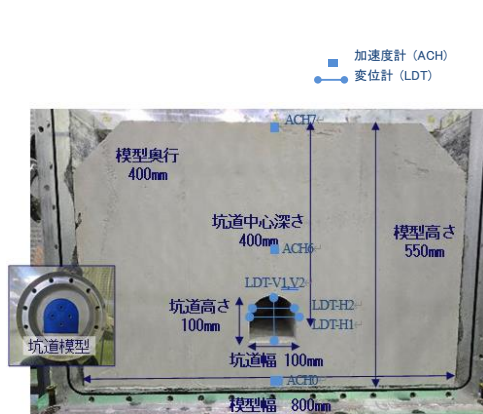


図 1 地盤模型の寸法

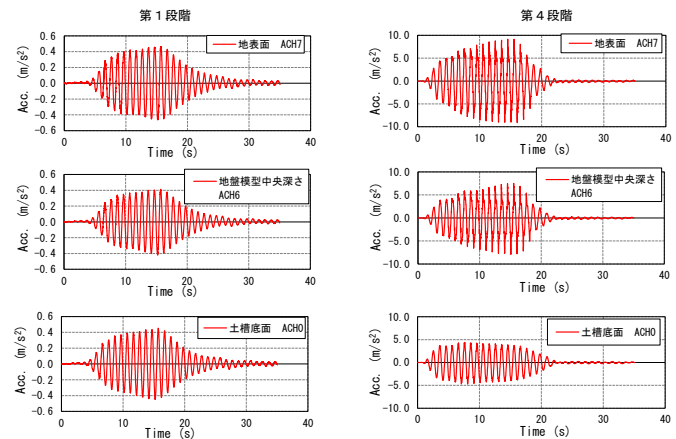


図 2 水平加速度時刻歴（実物換算）

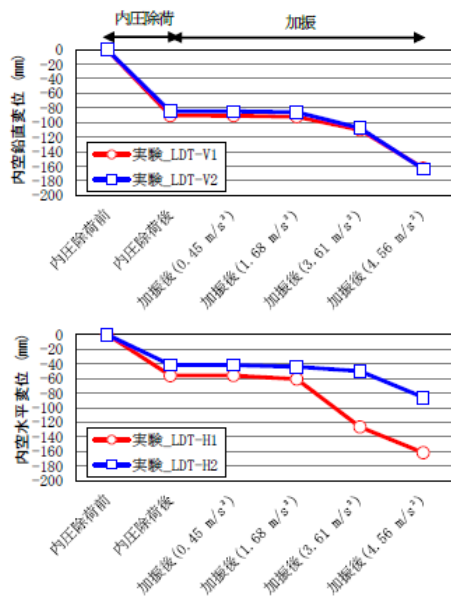


図 3 内空変位の計測結果（実物換算）

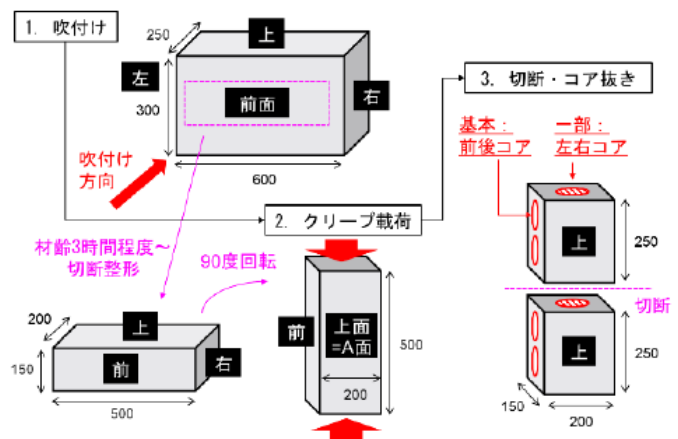


図 4 試験手順

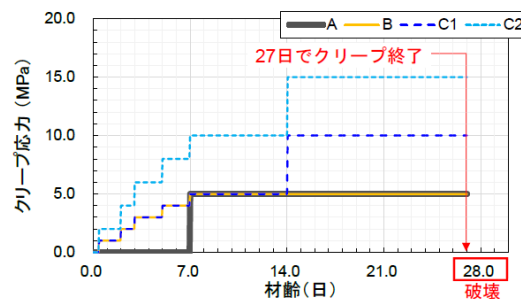


図 5 クリープ载荷パターン

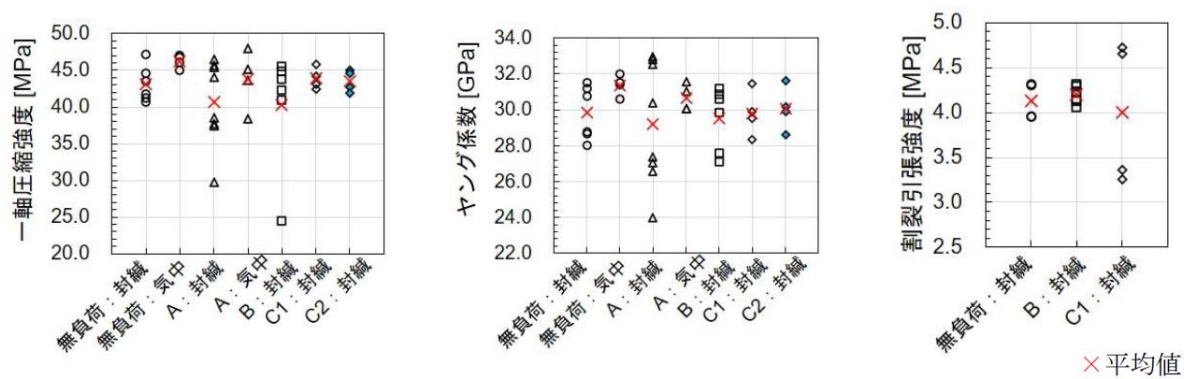


図 6 材齢 28 日の力学試験結果

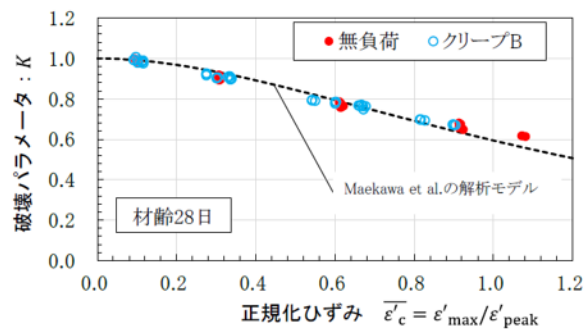


図 7 ピークひずみで正規化した片振幅
ひずみと破壊パラメータの関係 (材齢 28 日)

参考文献

- 土木学会 (2017): トンネル標準示方書「共通編」・同解説/「山岳工法編」・同解説 (2016 年制定).
- 土木学会 (2023a): トンネルの地震被害と耐震設計-山岳・シールド・開削トンネル-, トンネルライブラリー第 33 号.
- 土木学会 (2023b): コンクリート標準示方書「設計編」 (2016 年制定).
- 原子力規制庁 (2022): 中深度処分の規制基準の背景及び根拠, NRA 技術ノート.
- 石丸真, 岡田哲実, 中村大史, 河井正, 風間基樹 (2017): 軟岩のせん断破壊後の強度変形特性 のモデル化と斜面の地震時すべり安定性評価への適用, 土木学会論文集 C (地圏工学), 73 巻, 1 号, pp.23-38.
- Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H. (2003): Nonlinear mechanics of reinforced concrete, CRC Press Taylor and Francis Group.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021): 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー, NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2025): 技術開発成果概要 2024 NUMO-TR-25-03.
- 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (2023): 山岳トンネル設計施工指針.

2.2.3 銅コーティングオーバーパックの摩擦攪拌接合技術の開発

市村 哲大¹ 小林 正人¹ 鈴木 覚¹ 山田 琢登^{2*} 宮野 泰征² 森貞 好昭³ 藤井 英俊³

¹原子力発電環境整備機構, ²秋田大学, ³大阪大学

1. 背景・目的

NUMO は、包括的技術報告書 (NUMO, 2021) において、縦置き・ブロック方式及び横置き・PEM 方式に炭素鋼製オーバーパックを適用した処分場概念を示した。そのうえで、国の全体計画に基づき、地層処分事業の進展に対応しつつ、技術的信頼性の継続的な向上を図ることを基本として技術開発を進めている。こうした方針は、将来の科学的知見の進展や規制動向にも適切に対応する観点からも重要であり、複数の設計オプションを整備しておくことが求められる。

こうした背景のもと、NUMO では高レベル放射性廃棄物を封入するオーバーパックの設計オプションとして、炭素鋼製オーバーパックに加え、オーバーパックの長期寿命の信頼性を高めることを目的として、炭素鋼製耐圧容器の表面に銅を耐食層としてコーティングしたオーバーパック (以下、「銅コーティングオーバーパック」という) の技術開発を進めている (図 1)。2020 年度から 2024 年度までに、①炭素鋼接合部の機械的接合方法の検討及び構造設計、②実機の銅コーティングオーバーパックに対して、外径及び炭素鋼母材の厚さを縮小した簡易な円筒型試験体を対象に銅コーティング層の摩擦攪拌接合条件の特定、③接合終端部に生じる接合ツールの引抜き穴の除去方法の検討を実施し、主要な要素技術が成立する見通しが得られつつある (NUMO, 2025)。

本書では、2024 年度までに確認した①～③までの要素技術を踏まえ、2025 年度に実施した銅コーティングオーバーパックの胴部及び蓋部の製造時に想定される寸法公差 (真円度の偏差、接合部の段差・隙間) が摩擦攪拌接合品質に与える影響の評価の検討成果について取りまとめる。

2. 主な成果

2025 年度の検討では、摩擦攪拌接合時に想定される形状誤差を考慮した条件に基づき、真円度の偏差を有する簡易の円筒型試験体を用いて接合品質を確認するとともに、試験体の固定条件及び位置関係を調整することにより段差及び隙間を再現した条件でも評価を行い、継手の健全性を評価した。

真円度の偏差については、接合ツールに作用する荷重を一定に保持する荷重制御を適用することで、円筒型試験体の真円度の偏差により接合ツールと母材との相対位置が変化する場合でも、接合ツールの押込み量が自動的に補正されるため、設定した荷重を維持した状態で接合を継続できることが確認された。外観観察及び断面評価の結果を図 2 及び図 3 に示す。図 2(a) 及び (d) では接合部の外周付近に凹凸状の付着物が確認されるが、これは接合部の塑性流動に伴って排出されたバリであり、表面欠陥を示すものではない。特に図 2(d) に示す接合終端部では、接合始端側の接合時に試験体が予熱された状態となるため、入熱量の増加に伴い材料の塑性流動性が高まり、バリの排出量が増大したものと考えられる。一方で、外観観察及び断面評価の結果、表面欠陥及び内部欠陥の発生は認められず、実施工条件に近い形状誤差が存在する場合でも健全な継手形成が可能であることを示した。

接合部における段差及び隙間の影響については、それぞれの条件における欠陥発生傾向を整理し、実施工で想定される形状誤差が摩擦攪拌接合品質に及ぼす影響を評価した。その結果、段差による接

*1 現所属：大阪大学大学院

合欠陥は、摩擦攪拌接合時に材料の塑性流動が阻害されるような段差の位置条件となる場合に発生しやすい傾向があった。一方、隙間の影響については、評価した範囲（最大 2.0 mm）において内部欠陥は認められなかった。

加えて、図 4 に示す接合部のビッカース硬さ分布より、接合中心近傍では硬さの局所的な低下が生じていたが、いずれの隙間量においても硬さ分布の傾向に明確な差は認められなかった。このことから、本検討で評価した範囲では、硬さ分布に及ぼす隙間の影響は限定的であることが示唆された。

このように、形状誤差を含む条件下においても、摩擦攪拌接合により健全な接合部を形成できる見通しが得られた。

3. 包括的技術報告書の更新への反映

本検討は、包括的技術報告書（NUMO, 2021）本編 4.8.3 項（今後の取り組み）の (1)(i) 人工バリア代替材料と設計オプションの整備に対応するものである。包括的技術報告書では、炭素鋼製オーバーパックを例示したが、本技術開発により、銅コーティングオーバーパックを設計オプションとして選択することが可能となり、オーバーパックの腐食代を低減できることなどによる合理化が期待できる。今後は、包括的技術報告書の本編 4.4.1 項（高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリアの設計）で設定したオーバーパックの設計要件を満足するように銅コーティングオーバーパックの仕様を設計したうえで、炭素鋼製オーバーパックからの寸法・重量等の変更を踏まえ、付属書 4-30 及び付属書 4-66 におけるオーバーパックを地下施設への搬送・定置に用いる車両や装置の放射線遮蔽などの設計について更新が必要となる。加えて、これらの設計の変更が地層処分システムの状態と安全機能に与える影響について、6.3.1 項（処分場閉鎖後のシステムとしてのふるまいに関する記述）において炭素鋼製オーバーパックとの腐食挙動の違いを踏まえた閉鎖後の安全性の評価に対して成果の反映を検討する。

4. 今後の展開

本検討で得られた摩擦攪拌接合条件の最適化及び銅コーティングオーバーパックの胴部及び蓋部の製造で許容される寸法公差に関する知見を踏まえ、今後は実機スケールを想定した試験体への適用を進め、接合品質のさらなる最適化に向けた検討を進める必要がある。また、接合部の機械特性評価や長期的な性能評価を拡充し、信頼性の確認を進めるとともに、接合プロセスの自動化に向けた装置・制御技術の高度化を検討する。これにより、銅コーティングオーバーパックへの摩擦攪拌接合技術の実機適用に向けた技術基盤の確立を図る。

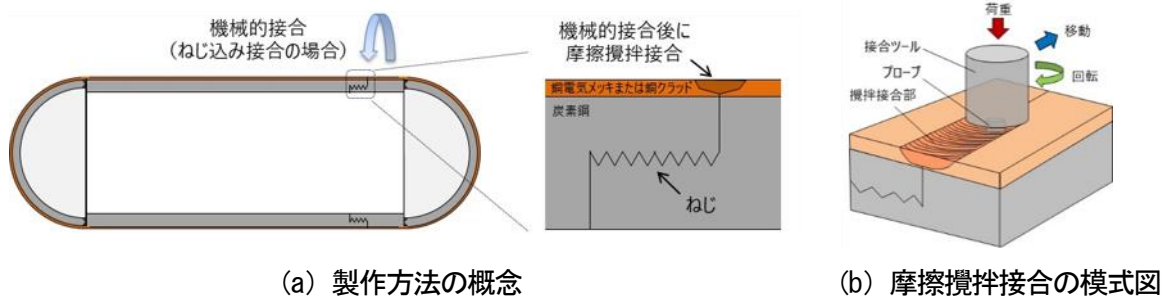


図 1 銅コーティングオーバーパックスの製作方法

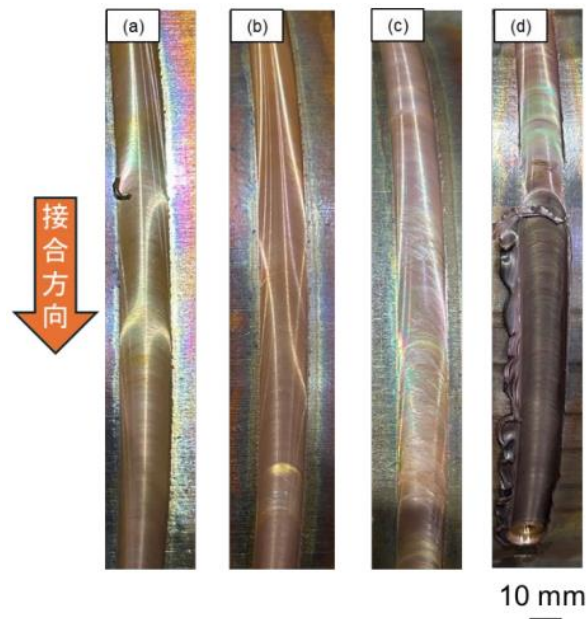


図 2 接合部の外観

((a) 接合開始 0° ~ 90° 部分 (b) 接合開始 90° ~ 180° 部分 (c) 接合開始 180° ~ 270° 部分
(d) 接合開始 270° ~ 360° 部分)



(a) 断面マクロ観察

(b) 断面ミクロ観察
左図(a)の1の範囲を拡大

図 3 接合部の断面観察結果

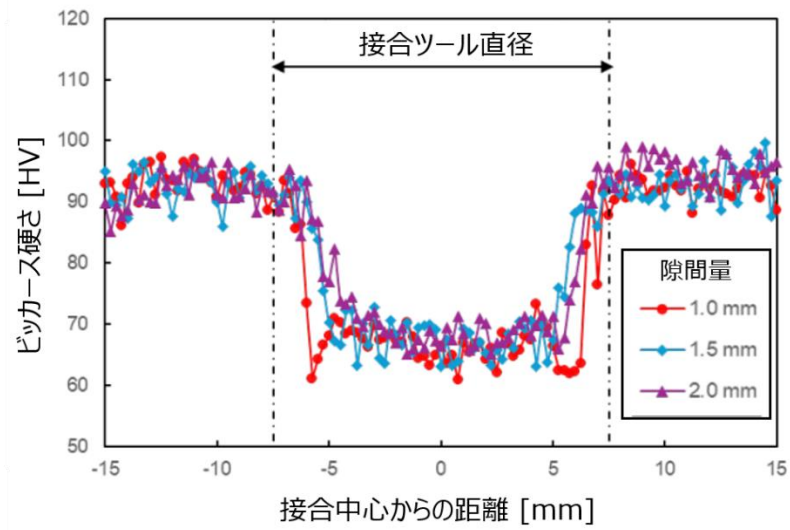


図 4 突合せ部の初期隙間量を変化させた場合のビッカース硬さ分布

参考文献

- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021)：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2025)：技術開発成果概要 2024，NUMO-TR-25-03.

2.2.4 地層処分建設・操業の遠隔化・自動化への取組み～Smart DGR 構想～

小林 正人 市村 哲大 鈴木 覚

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

わが国では生産年齢人口が今後 30 年間で約 30 %減少すると予測されており（内閣府，2025），熟練技術者の確保が将来的に課題となると想定されている。地層処分事業は，文献調査から処分場の閉鎖まで約 100 年を要する長期の事業である。将来にわたり処分場の安全かつ安定的な建設・操業を継続するためには，技術継承や施工品質の確保の観点から，熟練作業員への依存を低減し，遠隔化・自動化を中核とする施工・操業システムを構築していく必要がある。

このような方向性は，内閣府が提唱する Society 5.0 の考え方とも整合する。Society 5.0 では，サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合し，データや AI，ロボット等を活用して，経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会の実現が目指されている（内閣府ホームページ）。建設・操業の分野においても，こうした考え方のもとで，現場情報のデジタル化・統合，遠隔操作，自動化，さらにはデジタルツインを用いた計画・施工・管理の高度化が進められている。地層処分事業においても，地下施設の建設，廃棄体定置，操業管理等に BIM（Building Information Management）（三次元モデルに設計・施工・維持管理の情報を統合し，プロセス全体で活用する手法）やデジタルツイン（現実の設備や構造物を仮想空間に再現し，実データと連携して状態監視や予測，最適化に活用する技術）を活用するとともに，各工程の遠隔化・自動化を進め，安全性，施工品質，持続可能性を高めることが重要である。このような取組みとして，NUMO は，「Smart DGR（Deep Geological Repository）構想」を提唱し，地層処分に必要となる技術の開発・実証と段階的導入を見据えた検討を進めている。

本報告では，Smart DGR 構想の背景として，諸外国の検討状況，国内のエンジニアリング及び建築・土木分野における取組みを概説し，今後の技術開発の方向性について述べる。

2. 主な成果

・諸外国の動向： 地層処分を含む原子力分野において，安全性確保のための作業の遠隔化・自動化は，諸外国に共通する課題である。OECD/NEA では，原子力のバックエンド分野における遠隔・ロボットシステムの適用に関する専門家グループ：EGRRS（Expert Group on the Application of Robotics and Remote Systems in the Nuclear Back-End）が組織され，NUMO も 2019 年設立時から参加している。EGRRS では，事業の初期から遠隔・ロボットシステムの導入を前提とした処分場の設計を採用すること，システム導入のための効率的な事業認可プロセスを整備すること，及び導入する技術を実証することが重要とされている（OECD/NEA，2025）。また，各国の地層処分実施主体は，遠隔操作システムの導入や BIM・デジタルツインの整備に着手している（例えば，Prinz and Westphal, 2024）。

・鉱山分野の動向： 地層処分の地下施設構造と類似性を有し，坑道展開や坑内作業，遠隔操作といった地層処分と共通分野を含む資源開発技術（坑道掘り）の分野では，採鉱プロセスに対して，人工知能，ビッグデータ，ネットワーク，三次元モデリングといった ICT（Information and Communication Technology）の活用が進められている。これにより，操業の効率化・最適化を通じて，可採埋蔵量の増加が図られている（川村，2021）。この枠組みは Smart Mining と呼ばれており，操業の遠隔化・自動化，プロセスの効率化・最適化を DX（Digital Transformation）により実現するものであり，地層処

分事業への DX 導入を検討する上でも参考となる。

・土木・建設分野の動向： 道路など一般のトンネルの施工技術の一つである NATM (New Austrian Tunneling Method) では、穿孔・発破からロックボルト打設までの各工程の機械化・自動化を実現しており (例えば、女賀ら, 2025), 建設業界における自動施工技術等の普及・促進による省人化や安全性の向上に向けた取組みが積極的に進められている (国土交通省, 2024; 2025)。また、機械掘削方式の一つである TBM (Tunnel Boring Machine) による施工は、掘削工程全体の機械化が可能であり、地山の緩みを比較的抑えられ、切羽での直接作業を伴わない特徴を有する。

地層処分事業の地下施設は、小断面、短尺、デッドエンド、多接続といった特徴を有する。TBM による施工速度は発破工法と比べ速いとされており、また、発破工法と比較して周囲の岩盤のゆるみを抑制できる可能性がある。このため、地下施設の建設に TBM の導入を検討しているが、TBM の小口径化、坑道掘削後の TBM 盛替え作業の合理化、地下空間における付帯設備の配置の工夫、さらに施工技術と坑道設計のバランスを踏まえた成立性の検討などが、技術課題と考えられる。

また、トンネルの施工では、各種センサによる運転・掘削データのリアルタイム取得と活用を基盤として、施工管理のデジタル化、遠隔監視・運転支援、さらにはデジタルツインを活用した施工状況の可視化や意思決定支援など、データ駆動型の施工システムの高度化が進展している。

このように、地層処分の海外実施主体においても遠隔操作システム、事業へのデジタル技術の導入が進められている。また、処分場の地下施設と類似の坑道展開を有する鉱山分野や処分場建設に必要な掘削技術を有する建設・土木分野では、現場情報のデジタル化・統合、遠隔操作、自動化、さらにはデジタルツインを用いた計画・施工・管理の高度化が進められている。これらの知見は NUMO が進める Smart DGR 構想の具体化に有益である。

3. 包括的技術報告書の更新への反映

本検討は、包括的技術報告書 (NUMO, 2021) の本編 4.8.3 項 (今後の取り組み) に基づいた検討である。本技術開発により、包括的技術報告書の本編 4.4.3 (人工バリアの施工および廃棄体の定置方法)、4.5.7 (地下施設の建設・操業・閉鎖に関する工学技術) 及び 4.7.2 (回収方法) に示した施工品質の向上、作業安全性の向上、放射線防護に対する遠隔化・自動化技術の確立に寄与する。

4. 今後の展開

地層処分事業を持続可能なものとするため、Smart DGR 構想を具体化していく必要がある。安全かつ合理的な処分場建設技術の確立に向け、国内外の技術ヒアリングを通じて技術動向を把握するとともに、坑道掘削事例を調査・収集し、作業安全上のリスク低減対策に関する知見の体系化を進める。また、建設・操業技術の開発体制の構築に向けた準備を行い、遠隔化・自動化を含む技術実証試験計画を策定する。さらに、地層処分事業への DX 導入の在り方を具体化し、BIM やデジタルツインの活用を通じて技術開発を効果的に進める。

参考文献

川村洋平 (2021) : Society 5.0 時代の資源開発学, 環境資源工学, 第 68 巻, 第 1 号, pp.19-21.

国土交通省 (2024) : i-Construction 2.0 ~建設現場のオートメーション化~.

国土交通省 (2025) : 第 1 回山岳トンネルの自動化施工等活用促進に向けた有識者会議.

内閣府ホームページ : 第 5 期科学技術基本計画で提唱した Society 5.0 のコンセプト,

https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html (2026 年 9 月 11 日閲覧) .

内閣府 (2025) : 令和 7 年版高齢社会白書.

女賀崇司, 青柳隆浩, 山岸隆史 (2025) : 神岡試験坑道におけるトンネル自動化施工技術の実証, 令和 7 年度土木学会全国大会, VI-1204.

NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告 : わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—, NUMO-TR-20-03.

OECD/NEA (2025) : Supporting the implementation of Robotics and Remote Systems in the Nuclear Back-End, NEA/RWM/R(2024)3.

Prinz, I. and Westphal, S. (2024) : BIM - Taking collaboration in mining to a new level, Mining Report Glückauf, Germany, 160 (1), 2024.

2.3 閉鎖後長期の安全性の評価に関する技術の高度化

閉鎖後長期の安全性の評価技術は、地層処分システムの長期的なふるまいをシナリオとして記述したうえで、これに基づき設計した処分場に埋設された放射性廃棄物に含まれている核種が人間の生活圏へ移行する挙動を表現した核種移行解析モデルを用いて解析することで、放射線学的影響を評価するためのものである。この技術の信頼性を向上させるため、「2.1 地質環境の調査と評価に関する技術」と「2.2 処分場の設計と工学技術の体系的な整備」に関する研究開発成果を適宜考慮しつつ、現象理解の深化を目的とした現象解析モデルの高度化、地層処分システム全体を対象とした核種移行解析モデルの高度化及び核種移行に用いるパラメータ等の拡充を継続的に取り組んだ。加えて、安全評価に用いる計算負荷が高い数値解析に対して、機械学習を適用して解析を高速処理する手法の整備に取り組んだ。

シナリオを記述するための処分場閉鎖後の長期間における地層処分システムの状態変遷やこれを考慮した核種移行評価に関する技術の高度化を目的として、緩衝材から生成したベントナイトコロイドに核種が収着することによる母岩の核種移行遅延性能への影響を評価する手法の構築に向け、JAEA との共同研究を通じて室内試験データ取得を継続するとともに、ベントナイトコロイドの生成挙動を定量的に評価するための数値解析技術の開発を開始した（2.3.1 参照）。

シナリオに基づく核種移行解析モデルに関して、施設設計の仕様や人工バリアの状態変遷などといった地層処分システムの特徴をより詳細に反映した評価解析技術の開発を目的とした次に示す技術開発を実施した。TRU 等廃棄物処分場に設置される廃棄体パッケージ間及び廃棄体パッケージ内の充填材等を使用されるセメント系材料の状態変遷をより忠実に反映した核種移行解析に基づく線量評価を実施するため、セメント系材料の状態変遷を評価し、これに基づき記述したシナリオに基づく三次元地下水流動・粒子追跡解析を用いて構築した核種移行解析モデルと核種移行パラメータのデータセットにより線量評価を行った（2.3.2 参照）。割れ目系岩盤の割れ目ネットワーク構造のモデル化とその妥当性確認に係る方法論を整備するための検討を実施しており、SKB の国際プロジェクト“SKB Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes”で提供されるエスガ地下岩盤研究所で得られた調査試験データを用いたモデル化・解析を通じて、水理地質構造モデルの構築及びその実用的な妥当性確認のワークフローを更新するとともに、更新したワークフローが水理地質構造モデルの不確実性を評価するうえで有効な手順になっていることを確認した（2.3.3 参照）。また、安全評価の信頼性向上及び処分場設計の最適化に資するため、2022 年度までに構築したランダムウォーク粒子追跡解析コード Partridge と処分場の詳細な仕様を反映できるよう改良した PFLOTTRAN を統合して開発した高解像度かつ大スケールの三次元不均質場における核種移行解析技術について、機械学習の適用を検討した。具体的には、処分場のパネルスケール（約 1 km×約 1 km×約 200 m）を対象とした粒子追跡解析に対して、教師あり学習による廃棄体をソースタームとした粒子の移行挙動を予測する評価ツールと教師なし学習による多数の粒子の挙動を類型化するためのクラスター分析ツールを構築した。2025 年度は、粒子の移行挙動に関する予測精度の向上を目的として、これら二つのツールを組み合わせた予測手法を開発した（2.3.4 参照）。

核種移行解析に用いるパラメータ設定については、核種移行解析に必要なパラメータである高温領域の溶解度の設定に用いるデータが十分に整備されていない環境に着目してデータの拡充を行った。拡散試験を用いた緩衝材の収着分配係数（以下、「Kd」という）の効率化を目的として、バッチ法で取得した試験データを利用して Kd を設定するための試験データの拡充を行った。また、原位置試料を用いたパラメータ設定に向け、室内試験で取得したデータから Kd や実効拡散係数（以下、「De」

という)を設定する手法の適用範囲を広げるため、核種移行に関するデータや知見が少ない先新第三紀付加体堆積岩を対象として De 設定を実施し、同設定手法の改良点を抽出した (2.3.5 参照)。

2.3.1 緩衝材の流出とコロイド生成による影響の評価

周藤 優子¹ 上野 吹佳¹ 松原 竜太¹ 石寺 孝充² 江口 綾乃²

¹原子力発電環境整備機構, ²日本原子力研究開発機構

1. 背景・目的

緩衝材を構成する圧縮ベントナイトと地下水の接触により生成した微粒子（ベントナイトコロイド：以下、「コロイド」という）は母岩への収着性が低いため、コロイドが廃棄体から溶出した核種を取り込んで移行することにより、母岩中の核種移行を促進させる可能性がある。コロイドの生成は地下水の水質に依存し、包括的技術報告書（NUMO, 2021）における地層処分場の閉鎖後長期の安全評価（以下、「安全評価」という）では、海外産ベントナイトのデータを用いた SKB の知見（SKB, 2010; Birgersson et al., 2009）に基づき、全国規模で収集されたデータにより設定したモデル地下水水質ではコロイドが生成せず、核種の移行促進は生じないとしている。ただし、サイトが特定されれば、原位置の地下水水質を考慮してコロイドの生成可能性を改めて評価する必要がある。また、コロイドが生成し、かつコロイドが溶液中で沈殿や凝集せずに分散した状態を維持（以下、「安定」という）する場合は、コロイドを介した核種の移行を考慮した安全評価が必要となる（図 1）。この安全評価の実施に向けた技術開発として、NUMO はコロイド生成挙動の評価に取り組んでいる。

2024 年度までに、地層処分への使用が想定される国内産のベントナイトを対象として、亀裂構造・地下水流動を模擬的に再現した装置に設置した圧縮ベントナイト（クニピア F）からのコロイドの生成挙動を調べる試験（図 2）（以下、「コロイド生成試験」という）により、コロイドが生成する条件を評価するため以下のデータを取得した。

- ・ Na 型の圧縮ベントナイトを対象とし、 Na^+ のみが含まれる溶液を流速がない条件でベントナイトに接触させた場合、Na 濃度 $2.4 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ 以下の条件でコロイドが生成
- ・ Ca 型の圧縮ベントナイトを対象とし、 Ca^{2+} のみが含まれる溶液を流速がない条件でベントナイトに接触させた場合、包括的技術報告書で設定したモデル地下水中で最も低い Ca 濃度である $2.3 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ においても、コロイドが生成しないことを確認
- ・ Ca 型の圧縮ベントナイトを対象に、 Na^+ のみを含む溶液が二つの異なる流速条件（表 1 の条件 b, c）で、ベントナイトに接触する場合、140 日程度の間、両条件ともにコロイドが生成しないことを確認
- ・ Na 型の圧縮ベントナイトを対象に、 Ca^{2+} のみを含む溶液がベントナイトに接触する場合、 Ca^{2+} 濃度が $5 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ でコロイドが生成することを確認

2025 年度は、Ca 型の圧縮ベントナイトを用いた試験を継続するとともに、Na 型の圧縮ベントナイトを対象に接触溶液の Ca^{2+} 濃度を変えて試験を実施し、ベントナイトからのコロイド生成挙動の評価に必要なデータ拡充を行った。

2. 主な成果

2025 年度は、Na 型の圧縮ベントナイトと、包括的技術報告書に示したモデル地下水のうちコロイドが安定に存在しない可能性を有する Ca 濃度 $5 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ と同様に、コロイドが安定に存在しない

Ca 濃度 8×10^{-4} mol/L の接触溶液を用いて試験（表 1 の条件 a）を開始し、定期的に装置からの排出液を分析した。210 日程度経過しても排出液中にコロイドの生成は確認されなかった。これまでに得られたコロイドの安定条件に係る試験データに基づく、排出液中の Ca 濃度（ $\approx 7 \times 10^{-4}$ mol/L）はコロイドが安定に存在しない Ca 濃度に該当する。排出液中の Ca 濃度は接触溶液濃度実測値である 7.5×10^{-4} mol/L に対し 5×10^{-5} mol/L 程度低下し、排出液中の Na 濃度は 1×10^{-4} mol/L 程度である（図 3）。 Na^+ と Ca^{2+} の価数を踏まえると、Na 型ベントナイト中の Na が Ca と交換したことが示唆される。このため、模擬亀裂中に侵入したベントナイトの端面付近で、ベントナイト中の Na と Ca の交換により Na 型ベントナイトがコロイドの生成しづらい Ca 型に変化し、コロイドが生成しなかったと考えられる。

2024 年度から継続している Ca 型に調整した圧縮ベントナイトと Na 濃度 1.0×10^{-2} mol/L の接触溶液を用いた試験（表 1 の条件 b）及び、流量の影響を確認するために条件 b に対して接触溶液の流量のみを 4 倍に設定した試験（表 1 の条件 c）を継続した。排出液の分析結果から、ベントナイト中の Ca と接触溶液中の Na が交換していることがわかり、540 日程度経過しても排出液中にコロイドの生成は確認されなかった（図 4, 5）。また、条件 c の排出液は条件 b と比較し約 1/4 程度の濃度で推移しており、条件 c の流速は条件 b の 4 倍に設定していることから、ベントナイト端面から放出される Ca 量は、試験条件の範囲において流速によらずおおむね一定であると考えられる。

3. 包括的技術報告書の更新への反映

コロイドの安定条件・生成条件の把握、及びコロイドによる核種移行挙動への影響を評価する手法の構築は、包括的技術報告書（NUMO, 2021）の本編 6.6.2 項（信頼性向上に向けた取り組み）に記載した課題であり、OECD/NEA による国際レビュー（OECD/NEA, 2023）においても必要性が指摘されている。同報告書の本編 6.3.2 項（シナリオの作成）では、地下水組成の観点からコロイド生成を考慮しないとしている。本技術開発でコロイドの生成挙動とその影響要因、コロイド生成時の核種移行挙動を明らかにすることで、より現実的な現象理解に基づくシナリオ作成を実施できることからシナリオの信頼性を向上させることができる。

4. 今後の展開

コロイド生成試験について、圧縮ベントナイトからのコロイド生成挙動の評価手法を構築するため、引き続き条件を拡充してデータの取得を行うとともに、亀裂中に侵入した圧縮ベントナイト中の Na, Ca 濃度分布の取得を行う。また、コロイド生成試験結果及び取得した Na, Ca 濃度分布をもとに、シミュレーションソフトウェアを使用した試験結果の数値解析モデルを構築し、コロイド生成挙動の分析を進める。

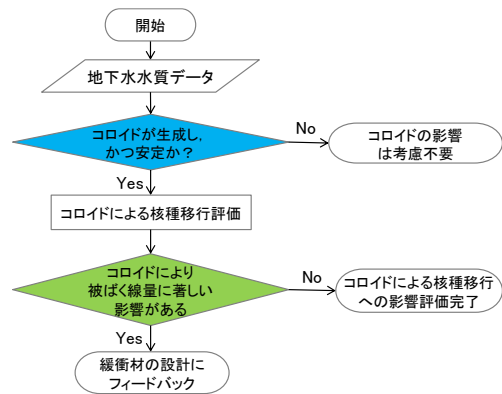


図 1 コロイド影響の評価フロー（案）

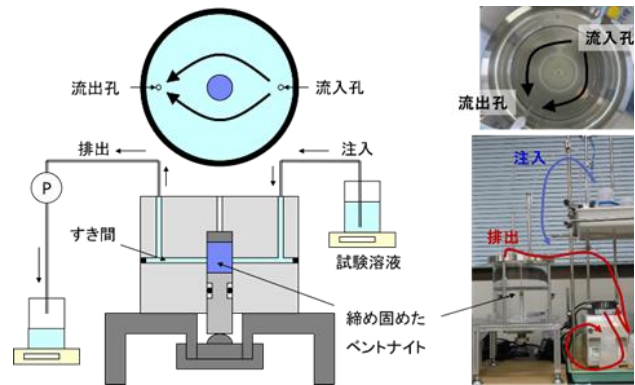


図 2 コロイド生成試験に用いる試験装置の概略図

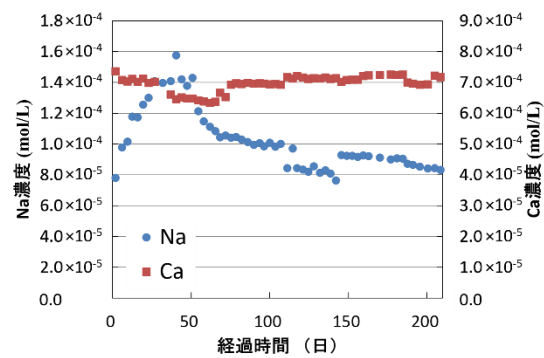


図 3 条件 a における排出液中の Na, Ca の濃度変化

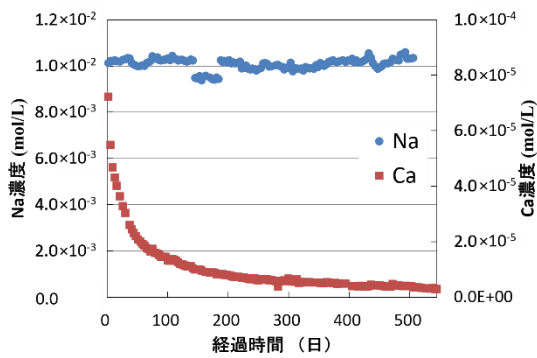


図 4 条件 b における排出液中の Na, Ca の濃度変化

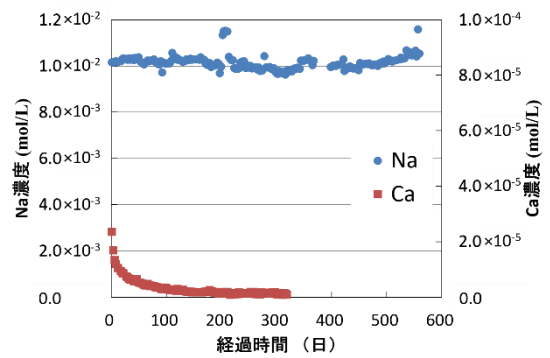


図 5 条件 c における排出液中の Na, Ca の濃度変化

表 1 ベントナイトコロイド生成試験の条件

	条件 a	条件 b	条件 c
開始年度	2025 年度	2024 年度	2024 年度
ベントナイト	カルサイト除去 Na 型クニピア F (乾燥密度 1.6 Mg/m ³)	カルサイト除去 Ca 型クニピア F (乾燥密度 1.6 Mg/m ³)	カルサイト除去 Ca 型クニピア F (乾燥密度 1.6 Mg/m ³)
流量 (流速)	2.4×10^{-2} mL/min (5×10^{-6} m/s 程度)	2.4×10^{-2} mL/min (5×10^{-6} m/s 程度)	9.6×10^{-2} mL/min (2×10^{-5} m/s 程度)
試験溶液	CaCl ₂ 8×10^{-4} mol/L	NaCl 1.0×10^{-2} mol/L	NaCl 1.0×10^{-2} mol/L
試験雰囲気	大気中の二酸化炭素の溶解により pH が低下することを防ぐため、酸素濃度 1 ppm 以下の窒素雰囲気下で実施。		

参考文献

- Birgersson, M., Börgesson, L., Hedström, M., Karnland, O. and Nilsson, U. (2009) : Bentonite erosion. Final report, SKB Technical Report TR-09-34.
- COMSOL Multiphysics® ホームページ : COMSOL Multiphysics® モデリングソフトウェア , <https://www.comsol.jp/> (2026 年 5 月 20 日閲覧) .
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告 : わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－, NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2025) : 技術開発成果概要 2024, NUMO-TR-25-03.
- OECD/NEA(2023) : 原子力発電環境整備機構 (NUMO) による「地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケース」－NUMO セーフティケースの国際ピアレビュー－, NEA/RWM/R(2022)2, p. 35.
- SKB (2010) : Buffer and backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site, SKB Technical Report TR-10-47.

2.3.2 TRU 廃棄物処分場に使用するセメント系材料の状態評価に関する検討

小池 彩華 石田 圭輔

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

包括的技術報告書（NUMO, 2021a）では、TRU 等廃棄物処分場の構造躯体内側において、廃棄体パッケージ内や廃棄体パッケージ間にセメント系材料が充填され、処分場閉鎖後は、廃棄体から溶出した核種の移行を抑制する性能が期待されている。セメント系材料は、長期的な変質や亀裂発生等に関する科学的知見等の不足に起因した不確実性を有していることから、包括的技術報告書に示した安全評価では、セメント系材料が有する収着機能は既往の実測データ（JAEA-SDB）に基づく保守的な収着分配係数を設定し、透水性は処分場閉鎖直後から砂と同程度（ 1.0×10^{-5} m/s）を与え（NUMO, 2021b）、核種移行解析を実施している。NUMO では、地層処分システムの安全性の評価をより合理的なものとするため、セメント系材料の状態変遷をより現実的に反映した核種移行解析モデルの構築を SKB との共同研究により進めている。あわせて、本モデルの妥当性確認に資するデータを取得するため、スイスの GTS における国際共同プロジェクト（CIM : Carbon-14 and Iodine-129 Migration in Cement）にてセメント系材料中への核種の移行に関する原位置試験データの取得を継続している。

本検討では、セメント系材料の状態変遷をより現実的に反映した核種移行解析モデルの構築を目的に、包括的技術報告書に則ったシナリオ作成及びこれに基づく核種移行解析モデルの構築を段階的に進めている。評価対象は、深成岩類・TRU グループ 3・低 Cl 濃度地下水とした。これらの条件は、包括的技術報告書の TRU 等廃棄物処分場の安全評価では、セメント系材料を含む処分場の閉じ込め性能を保守的に設定した結果、閉鎖後数十年程度で線量の立ち上がりが確認された条件であり、セメント系材料の状態変遷が安全評価結果に及ぼす影響を確認する観点から、本検討の評価対象として選定した。

2024 年度までは、包括的技術報告書（NUMO, 2021c）のシナリオに対し、最新の科学的知見の反映や、処分坑道を対象とした現象解析について構造躯体内側の状態設定をより確からしく評価した結果を反映した。なお、構造躯体内側の状態に影響を及ぼす事象として、セメント系材料と地下水との反応（溶脱）、鉄筋の腐食膨張、微生物影響の三つの現象が挙げられ（SKB, 2023a）、溶脱と金属の腐食膨張の影響を現象解析により評価した。また、包括的技術報告書では、構造躯体が物質の移行を遅延させる可能性を有していたため、その状態変遷を評価対象とし、構造躯体内側は対象としなかったが、本検討では構造躯体内側を含めた処分坑道全体を対象とした。

一方、セメント系材料の透水性は、処分場閉鎖後直後は健全なセメント系材料として低い値を有し（ 1×10^{-9} m/s）、その後、地下水との接触面から進行する溶脱や、構造躯体に使用される鉄筋の腐食膨張に起因する亀裂の発生に伴い、段階的に変化した。また、腐食膨張による亀裂発生は、移行経路を形成し安全機能を低下させる可能性があるが、セメント系材料の持つ自己治癒機能（人見・片岡, 2011）により閉塞する可能性が高いと評価された。微生物影響は、セメント系材料の溶脱に伴い形成される高 pH 環境では活性が低下するため（SKB, 2023b）、限定的と評価した。以上を踏まえ、生じる可能性が最も高いと想定される基本シナリオでは、セメント系材料の亀裂は閉塞し、地下水との反応に伴う変質（溶脱・沈殿）によりセメント系材料の物質移行特性が変化するとした。また、基本シナリオ

に対する不確実性を考慮した変動シナリオでは、金属の腐食膨張により発生した亀裂が閉塞せず、核種の移行経路となること、セメント系材料の変質に伴い物質移行特性が変化するとした。

上記のシナリオ作成を行ったうえで、基本シナリオを対象に、MINARET (Quintessa ホームページ) を用いた反応輸送解析により地下水と鉱物の反応による変質範囲を取得し、包括的技術報告書と同様の方法を用いて、核種移行解析モデルの構築を行い、線量評価を実施した (NUMO, 2025)。また、変動シナリオを対象に、腐食膨張による亀裂発生についてはQPAC-MACBECE (JAEA・原環センター, 2019) を用いた水 (H) -力学 (M) -化学 (C) 解析 (以下、「H-M-C 解析」という) により、亀裂の発生位置及び亀裂発生時期を取得した (図 1)。

2025 年度は、変動シナリオを対象として、核種移行解析モデルの構築及び線量評価を実施した。

2. 主な成果

(1) 変動シナリオにおける解析ケースの設定

包括的技術報告書では、シナリオに基づき解析ケースを設定し、これに基づき実施した地下水流動・粒子追跡解析を使用して構築した核種移行解析モデルを用いて線量評価を実施している。本検討では、セメント系材料に発生し閉塞することがない亀裂を地下水流動・粒子追跡解析における三次元幾何学形状モデルにおいて、明示的にモデル化するケースと、亀裂の影響を考慮してセメント系材料の透水係数や実効拡散係数といった物質移行に係るパラメータの値を変化させるケースとして、以下の解析ケースを設定した。

- ・ 解析ケース①: 亀裂を解析モデル上に明示的に反映させるケースとし、亀裂部には高い透水量係数を設定した。マトリックス部には NUMO (2025) で実施した反応輸送解析で取得した空隙率の時間変化に基づき、地下水との反応 (溶脱・沈殿) に伴う物質移行特性の変化を反映した透水係数及び実効拡散係数を設定した。さらに、腐食の進行に伴い亀裂が段階的に発生・進展することを考慮し、前述の H-M-C 解析により得られた亀裂発生時期に基づき、処分場閉鎖後 500 年に貫通亀裂が 1 本発生、1500 年後に貫通亀裂が 3 本発生、5000 年後にこれらの亀裂が肥大化するように設定した。なお、5000 年までは廃棄体パッケージ内は健全な状態を維持するものとした。このため、廃棄体パッケージ内モルタル部の物質移行特性の変化は地下水との反応 (溶脱・沈殿) の影響のみを考慮した。亀裂は高透水性を有するものとして設定するとともに、廃棄体との交差が最大となる配置とすることで、物質移行への影響が最大となる条件を設定した。また、亀裂本数に対する感度解析を実施し、移行率への感度が一定となる十分な亀裂本数 (3 本) を設定した。

- ・ 解析ケース②: SKB (2013) では、亀裂を有するコンクリートの巨視的な透水係数を、亀裂の透水量係数と亀裂密度で表現する方法が構築されている。また、SKB (2023b) では、コンクリートの劣化段階ごとに実験データに基づく巨視的な透水係数を設定しており、両者の値は同等の値になる。日本においては劣化コンクリートの透水係数に関する実験データが十分に整備されていないため、本ケースでは、上記の亀裂の透水量係数と亀裂密度に基づき、解析ケース①と等価な水理・物質移行パラメータを解析モデルに一樣に与えた。

(2) 粒子追跡解析モデルの構築

前節で設定した二つの解析ケースに基づき、セメント系材料の変質時期と亀裂発生時期を踏まえ

て水理・物質移行パラメータを設定した（表 1）。解析ケース①及び②それぞれについて、三次元幾何学形状モデルを構築し、表 1 に示したパラメータを用いて、包括的技術報告書（NUMO, 2021b）で示した処分坑道の設計仕様を反映したニアフィールドスケール（約 100 m×約 100 m×約 100 m）を対象に三次元地下水流動・粒子追跡解析を実施した。

解析に用いる三次元幾何学形状モデルでは、構造躯体や埋戻し材などの人工物は、いずれの解析ケースにおいても均質な多孔質媒体モデル（Continuous Porous Medium：以下、「CPM」という）として表現し、母岩部分は割れ目ネットワークモデル（Discrete Fracture Network Model：以下、「DFN」という）として表現した。ただし、解析ケース①では、人工物のマトリックス部分は CPM として扱いつつ、亀裂部分のみを高透水性を有する離散的要素としてモデル化した。母岩については、包括的技術報告書と同様に、深成岩類における割れ目密度等の情報を用いて確率的に割れ目を発生させた DFN を作成した。

作成した三次元幾何学形状モデルを対象に、地下水流動解析コード FEMWATER（WES, 1994）を用いて水理場を算出し、その結果に基づき、非収着性トレーサーを用いたランダムウォーク法による粒子追跡解析コード Partridge（NUMO, 2011）を用いて物質移行解析を実施した。

上記手順で算出した処分坑道から 100 m 地点に位置する観測面における移行率を、包括的技術報告書における同一観測面での結果とあわせて図 2 に示す。亀裂を明示的に考慮した解析ケース①と、巨視的な等価透水係数を設定した解析ケース②の結果を比較したところ、解析ケース②の移行率のほうがやや高いが、両者の差は小さく、亀裂の表現方法によらず同程度の評価結果が得られた。また、包括的技術報告書の結果と比較して、セメント系材料の透水性の変化や設計仕様の反映により、核種の移行挙動をより現実的に評価することで、移行率の最大値が約 4 分の 1 まで低下した。

(3) 線量評価結果

解析ケース②の移行率を用いて、包括的技術報告書（NUMO, 2021c）と同様の手法で線量評価を実施した。核種移行解析モデルの構築にあたっては、対象核種、インベントリ、天然バリアの物質移行特性（収着分配係数等）及び生活圈モデルは包括的技術報告書と同様の設定、人工バリアの物質移行特性は表 1 と同様の設定とし、複数の一次元平行平板モデルを重ね合わせたマルチチャンネルモデルの透水量係数とチャンネル確率は、保守的な解析結果である解析ケース②の移行率を用いて算出した。核種移行解析で得られる核種移行率を線量へ換算する際には、包括的技術報告書の基本ケースで適用した農作業従事者の換算係数を使用した。算出した線量評価結果を、2024 年度に実施した基本シナリオ（NUMO, 2025）の線量評価結果とあわせて図 3 に示す。包括的技術報告書において砂程度の透水性を仮定した解析では、数十年程度で線量の立ち上がりが確認されていた（図 3 左図灰色破線）。これに対し、2024 年度に対象とした基本シナリオでは、セメント系材料の状態変遷を考慮することで線量の立ち上がりが低減されることを確認した（図 3 左図）。本年度対象とした変動シナリオにおいても同様に線量の立ち上がりは低減され、最大線量はめやす線量を大幅に下回っているが（図 3 右図）、基本ケースと比較するとその値は高くなり、算出時期も早くなっていることを確認した。これは、亀裂が閉塞しないことにより、核種の移行挙動が速くなったためと考えられる。

3. 包括的技術報告書の更新への反映

包括的技術報告書の本編 6.6.2 項（信頼性向上に向けた取り組み）の（1）（ii）ニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化と（3）（i）ニアフィールドにおける状態変遷を考慮した核種移行解析モデルの構築に記載された課題に対応するものである。包括的技術報告書の本編 6.4.1 項（基本ケースに対する核種移行解析と線量評価結果）の（2）（v）（a）③-セメント系材料の透水性における、保守性を考慮した透水係数のより現実的な値への更新や、更新した値に基づく線量評価結果を用いた付属書 6-13、6-14、6-24、6-25、6-26 の更新を検討する。

4. 今後の展開

本検討において、セメント系材料の持つ核種の移行抑制機能をより現実的に表現した評価手法を整備した。今後は、CIM により取得される原位置拡散試験データを用いて、本手法における溶脱部の拡散評価に関する妥当性確認を進める。また、本技術開発の成果を技術報告書として取りまとめ、SKB 等の外部機関によるレビューを通じて、解析結果の信頼性向上を図る。

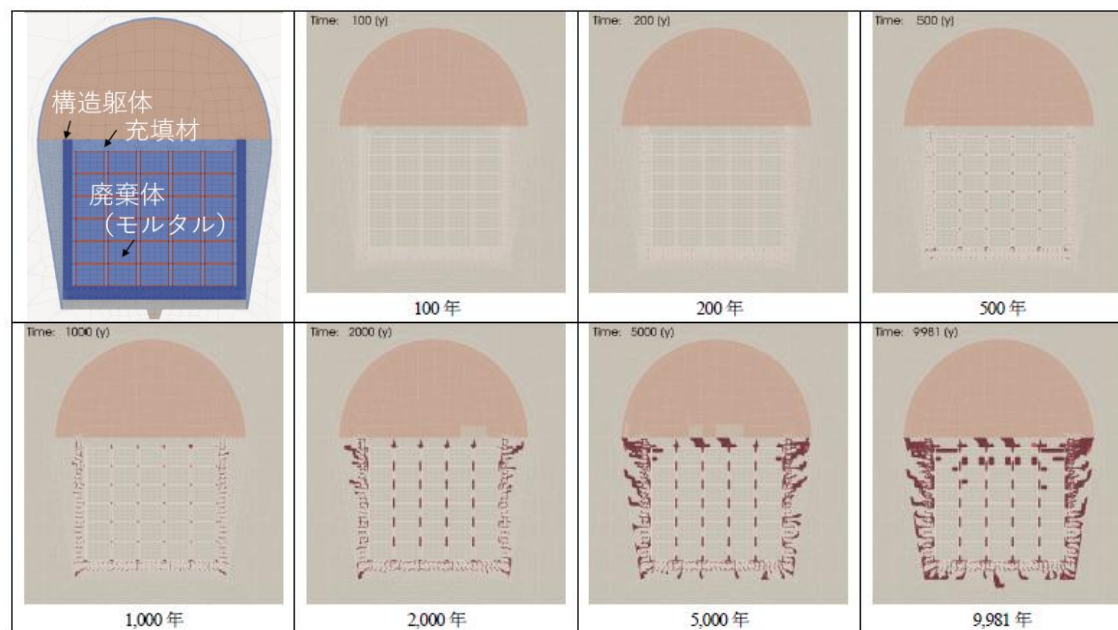


図 1 TRU 廃棄物処分場 (Gr. 3) 深成岩を対象とした応力解析による要素状態の経時変化
(赤の表示は Mohr-Coulomb 基準で破壊判定となった箇所：ひび割れが生じうる状態)

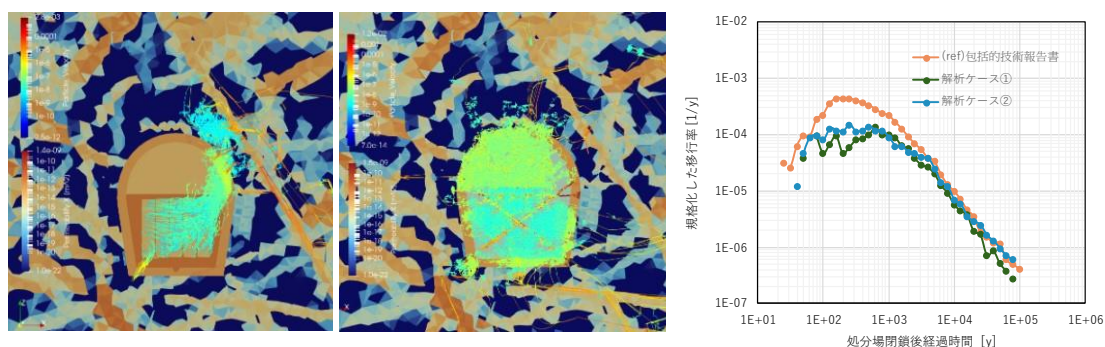


図 2 粒子追跡解析結果

(左：解析ケース①，中央：解析ケース②，右：坑道から 100 m 地点における規格化した移行率)

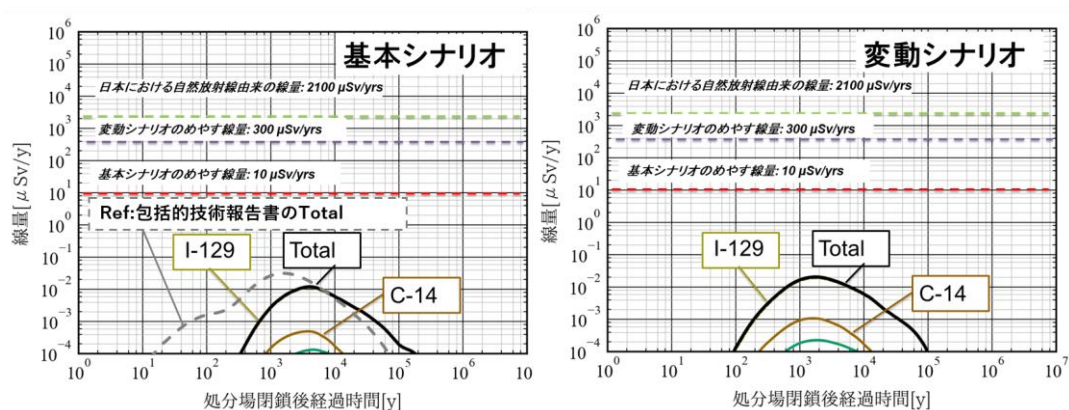


図 3 深成岩類・TRU グループ 3・低 Cl⁻ 濃度地下水の線量評価結果

(左：基本シナリオの解析結果，右：変動シナリオの解析結果)

表 1 水理解析及び粒子追跡解析で用いる処分坑道の構成要素の水理特性

	処分場閉鎖後の経過時間 [y]	構造躯体		廃棄体パッケージ間 充填材		廃棄体パッケージ内 充填材		亀裂
		透水係数 [m/s]	実効拡散 係数[m/s]	透水係数 [m/s]	実効拡散 係数[m/s]	透水係数 [m/s]	実効拡散 係数[m/s]	
包括的技術 報告書	0-100,000	1.0×10^{-5}	8.0×10^{-10}	1.0×10^{-5}	8.0×10^{-10}	1.0×10^{-5}	8.0×10^{-10}	-
解析ケース①	0-500	1.0×10^{-9}	5.8×10^{-12}	1.0×10^{-9}	1.7×10^{-11}	1.0×10^{-9}	1.7×10^{-11}	-
	500-1,500	1.0×10^{-9}	5.8×10^{-12}	1.0×10^{-9}	1.7×10^{-11}	1.0×10^{-9}	1.7×10^{-11}	1.0×10^{-5}
	1,500-3,000	7.0×10^{-9}	3.2×10^{-11}	1.0×10^{-9}	1.7×10^{-11}	1.0×10^{-9}	1.7×10^{-11}	1.0×10^{-5}
	3,000-5,000	7.0×10^{-9}	3.2×10^{-11}	1.2×10^{-9}	2.0×10^{-11}	1.2×10^{-9}	2.0×10^{-11}	1.0×10^{-5}
	5,000-100,000	7.0×10^{-9}	3.2×10^{-11}	1.2×10^{-9}	2.0×10^{-11}	1.2×10^{-9}	2.0×10^{-11}	1.0×10^{-3}
解析ケース②	0-500	1.0×10^{-9}	5.8×10^{-12}	1.0×10^{-9}	1.7×10^{-11}	1.0×10^{-9}	1.7×10^{-11}	-
	500-1,500	1.4×10^{-7}	5.8×10^{-12}	6.4×10^{-8}	1.7×10^{-11}	1.0×10^{-9}	1.7×10^{-11}	
	1,500-3,000	5.3×10^{-7}	3.2×10^{-11}	2.3×10^{-7}	1.7×10^{-11}	1.0×10^{-9}	1.7×10^{-11}	
	3,000-5,000	5.3×10^{-7}	3.2×10^{-11}	2.3×10^{-7}	2.0×10^{-11}	1.2×10^{-9}	2.0×10^{-11}	
	5,000-100,000	5.3×10^{-5}	3.2×10^{-11}	2.1×10^{-4}	2.0×10^{-11}	2.1×10^{-4}	2.0×10^{-11}	

参考文献

- 人見尚, 片岡弘安(2011): ひび割れ導入モルタルの X 線 CT による自己治癒過程の研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1.
- JAEA(日本原子力研究開発機構), RWMC(原子力環境整備促進・資金管理センター) (2019): 平成 30 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 ニアフィールドシステム評価確証 技術開発 報告書.
- NUMO(原子力発電環境整備機構)(2011): 地層処分事業のための 安全評価技術の開発 (Ⅱ) -核種移行解析モデルの高度化, NUMO-TR-10-10.
- NUMO(原子力発電環境整備機構)(2021a): 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー, NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構)(2021b): 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー 附属書 6-14 ニアフィールドスケールにおける三次元地下水流動・粒子追跡解析, NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構)(2021c): 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー 附属書 6-13 核種移行解析モデル, NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2025): 技術開発成果概要 2024, NUMO-TR-25-03.
- Quintessa ホームページ: MINARET, <https://www.quintessa.org/software/custom-software/minaret> (2026 年 6 月 11 日閲覧) .
- SKB(2013): Flow and transport in fractures in concrete walls in BMA – Problem formulation and scoping calculations, SKB R-13-51.
- SKB(2023a): Post-closure safety for SFR, the final repository for short-lived radioactive waste at Forsmark. Radionuclide transport and dose calculations, PSAR version, SKB TR-23-09.
- SKB(2023b): Post-closure safety for SFR, the final repository for short-lived radioactive waste at Forsmark. Engineered barrier process report, PSAR version, SKB TR-23-04.
- WES(U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station) (1994): FEMWATER Reference Manual.

2.3.3 地下水流動・物質移行モデルの妥当性評価手法の検討

廣田 翔伍¹ 尾上 博則¹ 吉田 芙美子¹ 周藤 優子¹ 三枝 博光¹ 石田 圭輔¹ 澤田 淳²

¹原子力発電環境整備機構, ²日本原子力研究開発機構

1. 背景・目的

地層処分事業における地質環境の調査・評価においては、調査の進展に応じて構築・更新する水理地質構造モデルを用いて地下水流動・物質移行解析を行い、その結果を処分場の設計や閉鎖後長期の安全評価に反映する（NUMO, 2021）。地下水流動や物質移行の場となる地質環境は、厳密な境界条件を設定できない開放系であり、また、岩盤中に分布する断層や割れ目等によって水理学的な不均質性を有している。さらに、調査によって得られる情報は評価対象である地質環境の空間的な広がりに対して限定的なものである。このため、モデル化・解析に必要となる水理・物質移行特性値の空間分布や境界条件を完全に把握することは難しい。

割れ目系岩盤においては、岩盤中に離散的に分布する割れ目が主要な水みちとなる。このような割れ目系岩盤における処分地選定のためのサイト調査では、確率論的な割れ目ネットワーク（Discrete Fracture Network；以下、「DFN」という）を適用した地下水流動及び物質移行の評価事例が多く報告されている（例えば、Selroos et al., 2022）。この手法では、原位置のボーリング調査、露頭観察、坑壁観察などの限られた調査の結果に基づいて、割れ目の大きさや方向性、透水量係数といった特性を確率分布で表現し、それに基づき割れ目ネットワークを生成する。このように構築された水理地質構造モデルは、調査データやその解釈、境界条件や水理・物質移行特性値の設定などに不確実性が含まれるため、その信頼性をいかにして示すかが重要な課題となっている（Oreskes et al., 1994; Chapman et al., 2015）。水理地質構造モデルの信頼性を示すためには、構築したモデルが利用目的に適合しているかの観点（「fit for purpose」として知られる概念：例えば、Beven and Lane, 2022）から、モデル構築過程に内在する不確実性を評価したうえで、その妥当性を確認することの重要性が指摘されている（例えば、Hartley, 2022; Lanyon et al., 2024）。

上記の課題を踏まえて、NUMO は JAEA との共同研究により、割れ目系岩盤を対象とした水理地質構造モデルの妥当性確認の考え方を整理するとともに、この考え方に基づき国内外の地下研究所で取得された調査データを用いたモデル化・解析を通じて、その作業過程に内在する解析結果に影響を及ぼす不確実性因子の抽出や、水理地質構造モデルの妥当性確認を行うために有効な調査項目の考え方について検討を進めている（NUMO, 2023; Hirota et al., 2025）。具体的には、NUMO が参加している SKB 主催の国際プロジェクト“SKB Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes (<https://skb.se/taskforce/>)”の枠組みを活用し、2023 年度から、「実測値との比較によって、処分坑道（や処分孔）から任意の場所までの地下水移行時間を評価するために用いる水理地質構造モデルの妥当性を示すための方法を具体的な事例とともに提示すること」を目的として、調査試験データの量や種類が異なる 2 種類のデータセット（以下、一部の調査試験データが格納されたものを「データセット A」という。また、データセット A に使用しなかった調査試験データを追加してデータを拡充したものを「データセット B」という。）を用いた検討を進めてきた。データセットは、エスボ地下岩盤研究所で実施された国際共同プロジェクトである TRUE Block Scale Project; (Andersson et al., 2002) で取得された、同研究所の深度 450 m 坑道周辺の岩盤において「構造 20」と呼ばれている不

連続構造を対象とした調査試験で取得されたデータにより構成されている。なお、本検討でモデル化・解析の対象とした構造 20 は、地下坑道周辺の地下水流動や物質移行などの挙動に大きな影響を及ぼしていると考えられる 100 m スケールの規模を有する不連続構造である。

2025 年度は、データセット A を用いて 2023 年度から実施してきたモデル化・解析を踏まえて、水理地質構造モデルの構築及びその実用的な妥当性確認のワークフロー（以下、「ワークフロー」という）を更新した（図 1）。また、データセット B を用いて、更新したワークフローに沿って「概念化」から「モデル構築」までのモデル化・解析を試行した。

2. 主な成果

(1) ワークフローの更新

2025 年度のワークフローの更新点を図 1 中に赤字で示す。更新点は以下の 3 点である。

- ・ 「不確実性の取扱」については、作業の効率化を図るため、「データの収集・整理」及び「概念化」の段階で不確実性因子を整理・リスト化し、以降の作業を通じてリストを更新する
- ・ 「モデリング戦略の決定」については、収集・整理したデータに基づき、「概念化」と「解析コード・数理モデルの選定」を行った段階で、「モデル構築」において実施する作業項目と、モデル化・解析で利用可能かつモデルの不確実性を低減するうえで有効と考えられるデータを決定する
- ・ 「感度解析」については、モデルの感度構造を把握したうえで「モデル構築」や「妥当性確認」を効率的に実施できるように、モデル構築の初期段階（図 1 中、「感度解析(1)」）と、モデル構築終了後（図 1 中、「感度解析(2)」）のそれぞれで感度解析を実施する

(2) 更新したワークフローに沿ったモデル化・解析の試行

構築するモデルの目的「処分坑道のパイロット孔を想定したボーリング孔と構造 20 との交差位置から構造 20 に沿って流れる地下水の移行時間を評価すること」に対して、モデルの評価指標（モデルの目的を達成するうえで最も有用な情報となり得る指標）を「構造 20 と交差するボーリング孔から発出された粒子が構造 20 のモデルの外側境界に到達するまでの時間（advective groundwater travel time）」とするとともに、原位置での実測が比較的容易、かつ上記のモデル評価指標である地下水移行時間との間に一定の相関関係（尾上ほか，2024）があると考えられる湧水量に着目し、モデルの妥当性確認指標（妥当性確認において実測値との比較を行う指標）を、「構造 20 との交差部からボーリング孔への湧水量」と設定し、モデル化・解析を試行した。

湧水量を妥当性確認指標として、データセット A に基づき構築した DFN モデル及びデータセット B を用いたワークフローの各作業段階（決定論・確率論モデル作成段階、コンディショニング段階、キャリブレーション段階）で構築した DFN モデルを用いた解析により推定した湧水量と、ボーリング孔で実施した流体検層（Rouhiainen and Heikkinen, 2001）で得られた実測値との比較を行った（図 2）。

データセット A（図 2 中の 2024 感度解析モデル）とデータセット B（図 2 中の 2025 初期モデル）の比較の結果、2025 初期モデルの方が 2024 感度解析モデルに比べて DFN モデルのリアライゼーション間のばらつきが低減されていることが示された。これはデータセット B で割れ目の幾何学特性の情報が増加したこと、及び水理学特性の情報が追加されたことで、DFN モデルに考慮

した割れ目の幾何学的・水理学的特性について、より現実に近い統計量を設定することができたためと推察される。

データセット B を用いた各作業段階で構築した DFN モデル（図 2 中の 2025 初期モデル及び 3 種類の 2025 修正モデル）を用いた解析での湧水量の推定結果について比較すると、2025 初期モデルに対して、ワークフローの中のコンディショニングからキャリブレーションといった作業段階の進展に伴って実測値の再現性の向上及び DFN モデルのリアライゼーション間のばらつきが低減する傾向が認められる。特に、幾何学的コンディショニング（構造 20 と交差する割れ目の幾何学的特性（割れ目の本数、位置及び方位）を、実測値を再現するように調整）及び水理学的コンディショニング（水理試験の試験区間に分布する割れ目の透水量係数の合計が実測値と整合するように調整）によって実測値の再現性が大きく向上しており、またばらつきも低減していることが分かる。

このことは、調査試験データに基づく割れ目の幾何学的・水理学的コンディショニングが、DFN モデルを用いた湧水量の予測の不確実性を低減させるうえで有効な作業項目であることを示唆しており、その作業を行うために必要なコア記載データやボアホールテレビ観察データ、水理試験・流体検層データを原位置で取得することの重要性が確認できた。また、ワークフローの作業段階の進展に伴う DFN モデルの信頼性向上の変化を定量的に可視化することで、適用したワークフローが水理地質構造モデルの不確実性を評価するうえで有効な手順になっていることを示すことができた。

一方で、キャリブレーション（揚水孔が構造 20 の中心部に近く、かつ観測孔の数が比較的多い水圧応答試験データを用いて、全ての観測孔における水圧低下量の再現性が最も高い割れ目の透水量分布を調整。具体的には、観測孔毎に得られた水頭低下量の中央値と実測値の差分の二乗を目的関数とし、目的関数が最小値となる透水量係数分布の対数平均値 μ と対数標準偏差 σ を逆解析）実施後の修正モデルにおいては、それ以前のモデルと比較して実測値の再現性がわずかに低下した。この要因を分析するために、観測孔毎に算出した目的関数のコンター図と目的関数が最小値となる透水量係数分布の対数平均及び対数標準偏差を図 3 に整理した。図 3 からは、KI0025F03 孔、KI0025F 孔、KI0023B 孔、KI2563A 孔に着目した目的関数のコンターは同様の傾向を示しているが、KI0025F02 孔及び KA2511A 孔に着目した目的関数のコンターは上記の観測孔とは異なる傾向を示すことが確認できる。このことは、構造 20 の水理学的特性が空間的な不均質性、もしくは異方性を有していることを示唆しており、そのような不均質性や異方性を反映できるように概念モデルを更新することでモデルの信頼性が向上する可能性がある。

3. 包括的技術報告書の更新への反映

包括的技術報告書（NUMO, 2021）の本編 2.5.2 項（品質マネジメント）に示されているとおり、処分場の設計や閉鎖後長期の安全評価の品質を保証するためには、その設計や評価のインプットとなる地下水流動や物質移行に係る特性値を推定するために用いる水理地質構造モデルの信頼性を確保することが重要となる。また、既存の水理・物質移行モデルの妥当性を確認するための手法の開発と試験データの整備は、包括的技術報告書（NUMO, 2021）の本編 6.6.2 項（信頼性向上に向けた取り組み）の「(3) (ii) 水みちの微細透水構造などを反映した核種移行解析モデルの構築・高度化」に記載された課題である。本検討を通じて得られる水理地質構造モデルの構築・妥当性確認に係る方法論は、処分場の設計や閉鎖後長期の安全評価に用いる地下水流動・物質移行モデルの信頼性の向上に資すると考えられる。そのため、包括的技術報告書を更新する際には、本検討の成果であるモデル構築・

妥当性確認に係る方法論の適用を検討する。

4. 今後の展開

2026年度はワークフローに沿った構造 20 のモデル化・解析の試行を継続する。具体的には、構造 20 とその他の 100 m 規模の水理学的な不連続構造の交差部の水理学的特性に着目した感度解析を行う。また、実施したモデル化・解析作業を通じて、モデルの妥当性確認に係る方法論として妥当性確認指標の許容範囲や基準を設定するための考え方について整理・検討を行う。

これらの作業を通じて得られた知見をもとに、ワークフローの更新やモデルの不確実性を低減させるうえで有効な調査データやモデル構築手法に係る検討を行うとともに、2023 年度から継続して実施してきた技術開発の成果として、割れ目系岩盤を対象とした水理地質構造モデルの妥当性確認の方法論を取りまとめる。

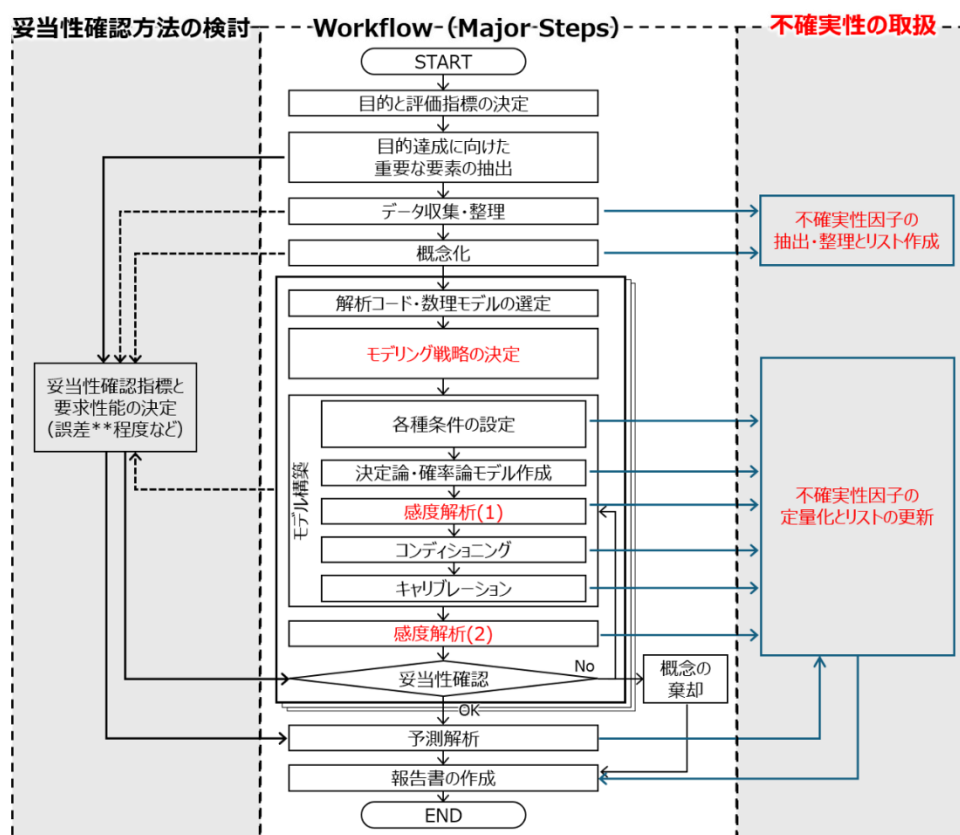


図 1 更新したモデル化・解析ワークフロー

(2025 年度に更新した内容を赤字で示す。図中の「コンディショニング」とは、調査で取得した水理地質構造の幾何学的特性や透水性などの情報に合うようにモデルの一部を校正する作業を示す。図中のキャリブレーションとは、水圧や湧水量などの観測データをより適切に再現できるようにモデルのパラメータを現実的な範囲内で調整する作業を示す。)

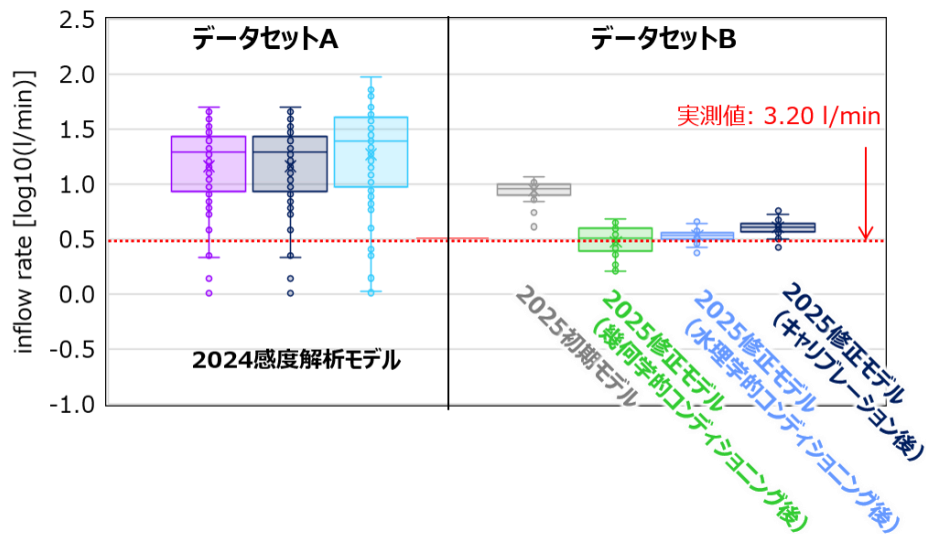


図 2 利用可能なデータの増加及びワークフローの進展に伴う妥当性確認指標のばらつきと実測値の再現性の変化

(2024 感度解析モデルは 2024 年度にデータセット A に基づき構築したモデルであり、構造 20 とその他の 100 m 規模の割れ目の交差部の透水性に着目した感度解析結果を示す (左から構造 20 内部の割れ目と比較して交差部を低透水性、同程度の透水性、高透水性と設定したケース。))

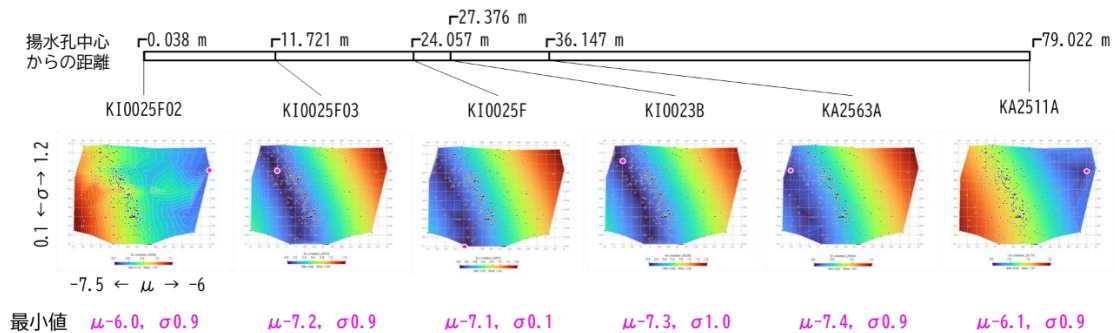


図 3 観測孔毎に算出した目的関数のコンター図と最小値の比較
(KI0025F02 は揚水孔を、それ以外の孔名は観測孔を示す。図中 μ は対数平均値, σ は対数標準偏差を示す。)

参考文献

- Andersson, P., Byegård, J., Dershowitz, B., Doe, T., Hermanson, J., Meier, P., Tullborg, E. L. and Winberg, A. (2002) : Final report of the TRUE Block Scale project, SKB, TR-02-13.
- Beven, K., and Lane, S. (2022) : On (in)validating environmental models. 1. Principles for formulating a Turing-like Test for determining when a model is fit-for purpose, Hydrological Processes, vol.36, Issue10.
- Chapman N., Bath A., Geier J., Stephansson O., (2015) : The disposal site and underground construction. STUK-TR 17. Helsinki 2015. 14 pp + 100 pp + 20 pp.

- Hartley, L. (2022) : Summary of Prediction-Outcome Exercises (2017-2021) on the Discrete Fracture Network (DFN) Model for the Olkiluoto Bedrock, Posiva Working Report 2021-22.
- Hirota, S., Onoe, H., Saegusa, H., Ishibashi, M., Tagawa, Y., Hane, K., Sawada, A. (2025) : A Study on Development of a Methodology to Validate Groundwater Flow Models in Fractured Rock, 19th International Conference on Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere Migration 2025, PC4-1.
- IAEA (2022) : IAEA Nuclear Safety and Security Glossary Terminology Used in Nuclear Safety, Nuclear Security, Radiation Protection and Emergency Preparedness and Response, ISBN 978-92-0-141822-7, pp. 218-219, <https://www.iaea.org/publications/15236/iaea-nuclear-safety-and-security-glossary>.
- Lanyon, G.W., Davy, P., Dershowitz, W. S., Finsterle, S., Gylling, B., Hyman, J. D., Neretnieks, I. and Uchida, M. (2024) : White paper essays on model validation, Task 10 of SKB Task Force GWFTS – Validation approaches for groundwater flow and transport modelling with discrete features, SKB, TR-22-04.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－, NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2025) : 技術開発成果概要 2024, NUMO-TR-25-03, pp. 105-111.
- Rouhiainen P., and Heikkinen P. (2001) : Difference flow measurements in borehole KI0025F02 at the Äspö Hard Rock Laboratory, Äspö Hard Rock Laboratory International Progress Report IPR-01-46.
- Selroos, J. O., Ivars, D. M., Munier, R., Hartley, L., Libby, S., Davy, P., Darcel, C. and Trinchero, P. (2022): Methodology for discrete fracture network modelling of the Forsmark site. Part 1 - concepts, data and interpretation methods, SKB R-20-11.

2.3.4 予測評価ツールとクラスター分析ツールの高度化

吉田 芙美子 永井 翔 石田 圭輔

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

サイトの地質環境特性に応じて設計した処分場の閉鎖後安全評価においては、地表を含む地質環境と地下の処分施設からなる処分システムの構成要素の特徴や空間スケールの違い（廃棄体：1 m 程度～生活圏：数十 km 以上）とともに、それらの時間変遷（10 万年程度以上の時間スケールを対象）を考慮して、廃棄体から生活圏までの核種の移行挙動を解析するモデルを構築する必要がある。包括的技術報告書における閉鎖後長期の安全評価では、三次元地下水流動・粒子追跡解析コード Partridge を用いて、廃棄体と周辺母岩を含むニアフィールドスケール（100 m 程度 × 100 m 程度 × ～100 m 程度）を対象に設計仕様を忠実に反映した三次元粒子追跡解析を実施している（NUMO, 2021）。これを出発点として、三次元モデルにおける核種移行評価技術の高度化を目指し、三次元粒子追跡の解析対象をパネルスケール（1 km × 1 km × 数百 m）、処分場スケール（数 km × 数 km × 数 km）、さらに数十 km 規模の広域スケールへと拡張してきた（NUMO, 2024）。スケール拡張の技術開発においては、米国の複数の国立研究所に所属する開発チームが開発した大型計算機を用いた並列計算の利用を想定した地下水流動・反応輸送コード PFLOTRAN（Hammond et al, 2011; Hammond et al, 2014）の導入や、モデルのスケールごとに異なる空間分解能をもつネスト構造を採用した。これにより、処分坑道及びアクセス坑道周辺のパネルスケールで高い解像度を維持しつつ、生活圏を含む広域スケールまで解析スケールを拡張し、広域スケールでの三次元核種移行挙動を評価できる技術を整備した。

一方で、広域スケールにおける 40,000 体の廃棄体を対象とする解析の場合、費用及び計算時間の観点から一回の計算を実行するにも大きな負荷がかかる。したがって、この技術を用いて、設計最適化のための設計オプションの比較や地質環境の不確実性の評価を目的として、多数の繰り返し計算を実施することは現実的ではない。また、出力される膨大なデータの分析も煩雑かつ複雑な作業となる。これらの課題に対し、機械学習を活用して予測評価ツールとクラスター分析ツールを 2024 年度までに開発した（NUMO, 2025a）。予測評価ツールは、一部の解析結果を学習データとして用い、残りの廃棄体の核種移行挙動を推定し計算負荷の低減を目指すものであり、クラスター分析ツールは、移行挙動の類似性に基づいて廃棄体を分類し、代表的挙動を抽出することで解析数の削減及び核種移行挙動の理解向上を図るものである。開発した両ツールをパネルスケールに適用した結果、三次元モデル下端での粒子移行率の時間変化を表した破過曲線について、下端に早く到達する粒子の割合（早期の移行率）に予測のない本来の移行率と予測移行率との間に齟齬があるものの、合理的な移行率予測が可能となり、さらにクラスター分析により移行挙動を支配する主要因の特定や粒子が集中する移行経路の抽出が可能となるなど、解析とそれに続く挙動の分析の効率化が実現された。なお、上記の早期移行率に齟齬のある問題は課題として取り上げ、2025 年度に解決に向け取り組んだ。

本業務では、これら両ツールの開発の過程で明らかとなった課題の解消と広域スケールへの適用を目指し、両ツールの改良を図ることを目的とする。加えて、広域スケールの地下水流動解析の過程で NUMO が改良を加えた PFLOTRAN を、オリジナルの PFLOTRAN のメインソースコードへと統合を図る。

2. 主な成果

本業務では、(1) 予測評価ツール及びクラスター分析ツールを用いた予測精度の向上、(2) 2026 年度に計画している広域スケールへのツール改良に先立つ予備解析、(3) 改良した PFLOTRAN のメインソースコードへの統合作業を実施した。

(1) 予測評価ツール及びクラスター分析ツールを用いた予測精度の向上

2024 年度に開発した予測評価ツールは、早期移行率の予測精度が低いこと及び早期移行率において不自然なピークが現れることが課題として挙げられていた (図 1 の左図)。そこで、予測評価ツールとクラスター分析ツールを組み合わせ、少数の廃棄体の解析結果から全廃棄体の核種移行挙動を高精度に予測する手法を確立した (図 2)。具体的には、図 2 に示すように、①パネル内からランダムに選択した廃棄体について Partridge を用いて粒子追跡解析を実施し学習データを取得する。②得られた少数の学習データに基づき、予測評価ツールを用いて残りの廃棄体からの移行率を予測して全廃棄体からの移行率を得る。続いて、③予測評価を含む全廃棄体からの移行率を、粒子移行挙動の観点からクラスター分類する (ここでは 4 グループに分類)。その後、④クラスターごとに再度予測評価を実施し、各クラスターからの移行率を合算して全廃棄体からの移行率を得る。⑤Partridge で計算した本来の移行率と比較し、予測結果との乖離がある場合、学習データを増やすことを検討し、③から④の手順を繰り返す。この手法により、クラスターごとに予測評価を実施することで学習データのばらつきが抑えられ、図 1 の右図に示すように予測精度の向上を実現できた。さらにここでは④までの段階で⑤の手順を踏まずとも学習データ数を解析対象の廃棄体の 1 割程度まで削減することができた。

(2) 2026 年度に計画している広域スケールへのツール改良に先立つ予備解析

包括的技術報告書で示した深成岩類における高レベル放射性廃棄物処分場 (堅置き・ブロック方式) を対象として、2024 年度に作成した広域スケールの三次元モデル (NUMO, 2025b) を用いて五つの HLW の処分パネルをモデル化した。これを対象とした地下水流動解析により取得した水理場を用いて、廃棄体定置位置の端及びその中点の計 9 点 (図 3 の番号に示す位置) の廃棄体をソースタームとする粒子追跡解析を実施した。解析結果を基に廃棄体の位置や地質構造に応じた粒子の移行経路や移行速度の分布を評価し、広域スケールにおける移行挙動の廃棄体定置位置との相関を分析した。その結果、廃棄体の定置位置により地表に到達するまでの移行率のピーク時刻や量が変化するなどの相関性が確認された (図 3)。この分析結果を踏まえ、学習データに用いる解析対象数の削減に向け、図 4 に示すように、パネル内及びパネル間に予測評価を実施する一連の作業手順を構築した。

(3) 改良した PFLOTRAN のメインソースコードへの統合

NUMO は 2024 年度までに、亀裂性媒体のような異方性をもつ水理場の解析と降雨の多い日本の気候条件に即した設定が可能となるよう、PFLOTRAN に非対角項成分をもつ透水係数テンソルの導入と涵養境界条件を新たに追加する改良を実施した。PFLOTRAN では水理、化学、熱輸送の解析に有限体積法を採用し (Hammond et al, 2011; Hammond et al, 2014)、オブジェクト指向型の Fortran

2003 で書かれたソースコードを公開している (<https://pflotran.org/>)。改良したコードは開発チームの審査・承認を経て、承認済みの一部がメインソースコードへ統合される。これまでに、NUMOが改良したコードのメインソースコードへの統合要請を行い、開発チームより要請のあったコードの修正を行いつつ、統合に向けた作業を進めている。

3. 包括的技術報告書の更新への反映

本検討は、包括的技術報告書 (NUMO, 2021) の本編 6.6.2 項 (信頼性向上に向けた取り組み) に示されている、施設設計などを反映した核種移行解析モデルの高度化の課題に対応するものである。本検討を通じて得られた成果は、包括的技術報告書の本編の 6.4 節 (核種移行解析と線量評価) について、処分システムの特徴をより現実的に反映したモデルにおける核種移行を検討するための有効な知見となり得る。また、処分場の最適化を目指してオプションを比較検討するにあたり、本技術が有効な手段となり得る。このため、今後の検討成果を踏まえ、同報告書の該当箇所における処分システムの特徴をより反映した核種移行解析の記載について、更新・反映することを検討する。

4. 今後の展開

本業務により、パネルスケールにおけるクラスター分析と予測評価ツールの二つを組み合わせた手法により、学習データとして廃棄体全体の 1 割程度を用いることで精度よく廃棄体全体の解析結果を予測可能とした。本業務の成果を踏まえて、今後は、評価スケールを広域スケールへ拡張する改良に取り組む。また、機構の改良した PFLOTTRAN コードをメインソースコードへと統合する作業を継続する。これらの取り組みにより、広域スケールまでの三次元粒子追跡解析技術の高度化を進め、地層処分における安全評価の効率化を図る。

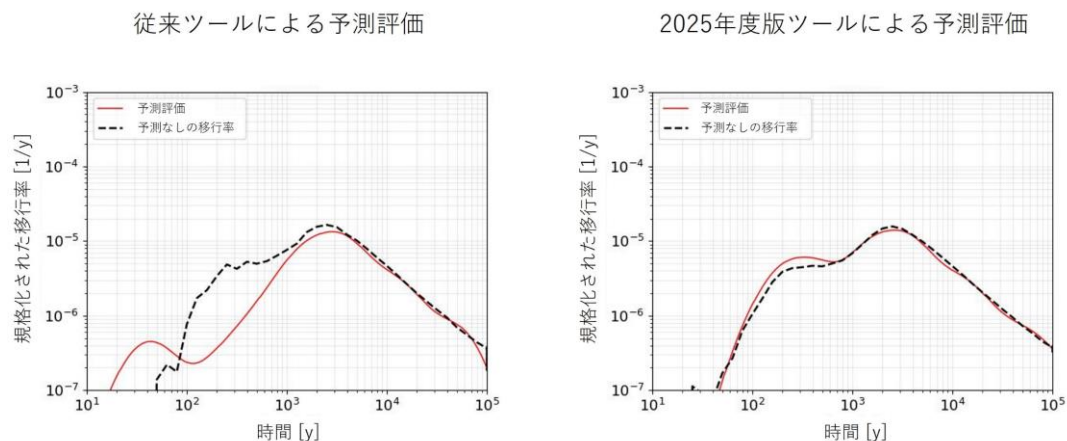


図 1 予測精度の定量的評価の比較に用いた予測評価結果

(左：従来ツール，右：2025 年度版ツール。赤色の実線が予測評価結果，黒色の破線が全廃棄体からの Partridge 平均移行率。従来ツールによる予測評価では，全 966 廃棄体の内 770 体 (8 割) を学習させ，196 体 (2 割) を予測対象とした。2025 年度の予測評価では 100 廃棄体を学習させ，全 966 廃棄体 (学習廃棄体 100 体を含む) を予測対象とした。)

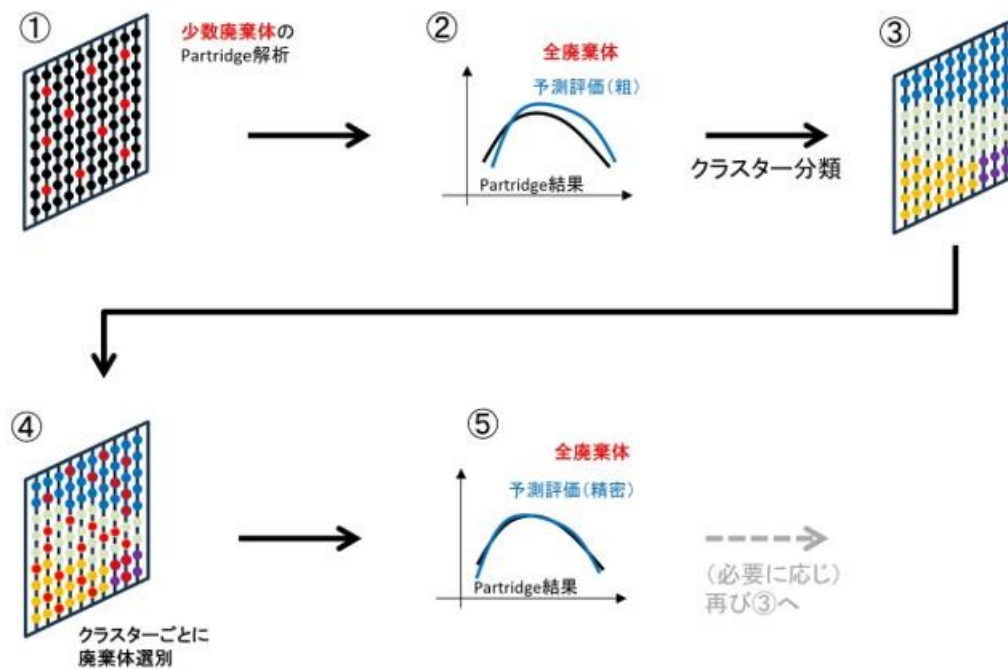


図 2 クラスター分析ツールとの連携による予測評価の効率化手法

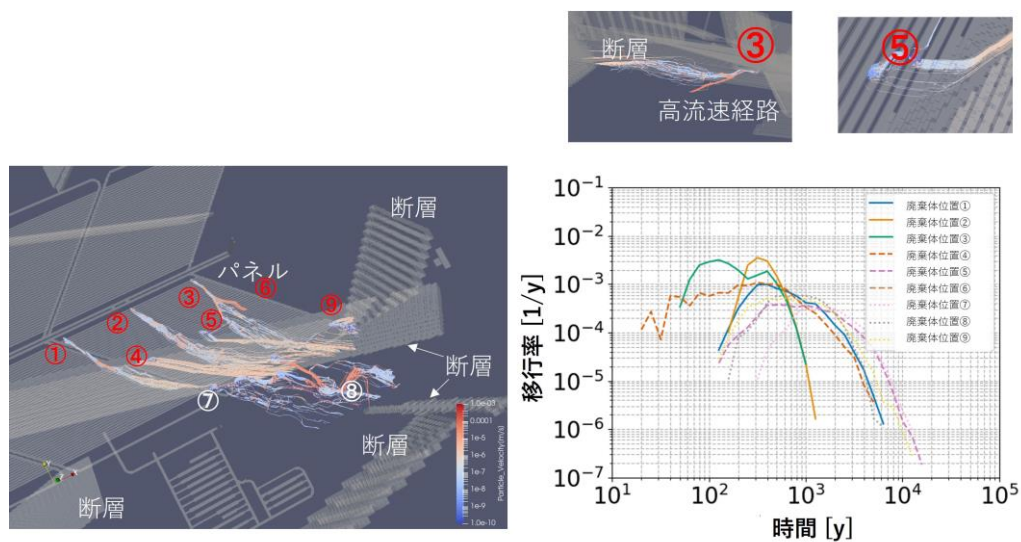


図 3 粒子軌跡と移行率の相関

(初期依存性の大きいパネル#5 の例, 四端の廃棄体とその中点に位置する廃棄体を ①から⑨で番号付け。右下図は 9 廃棄体それぞれからの破過曲線を示す。)

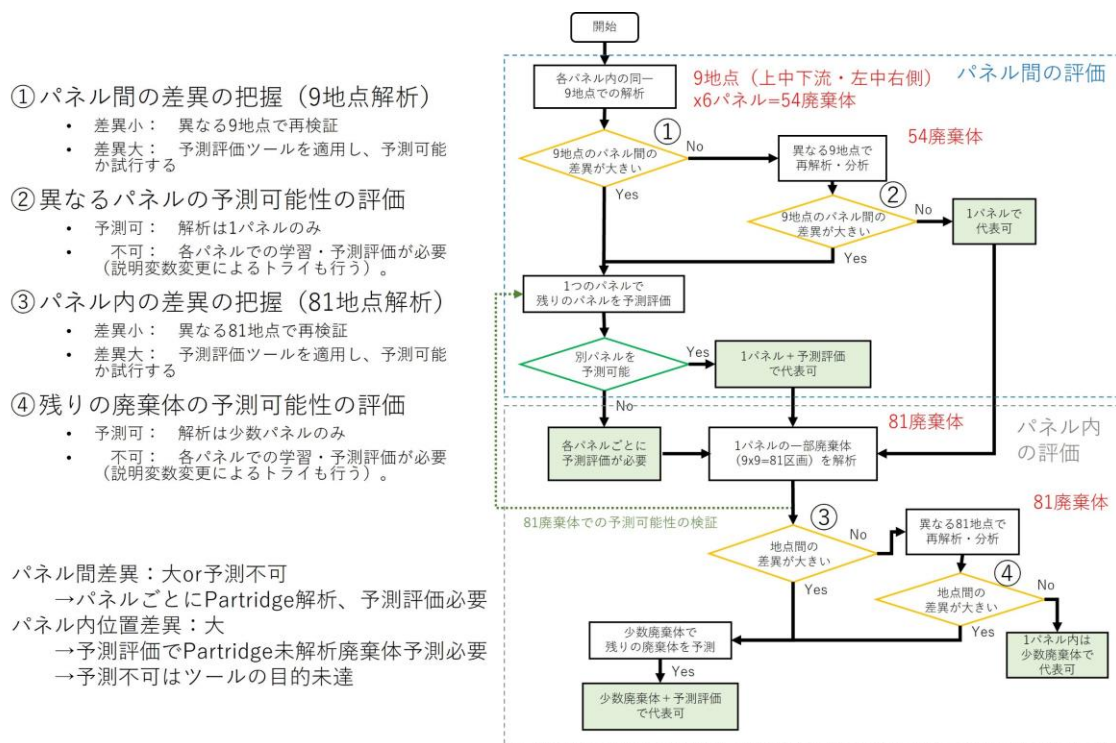


図 4 広域スケールモデルにおけるツール適用に向けた解析手順

参考文献

- Hammond G. E., Lichtner P. C. and Mills R. T. (2011) : PFLOTRAN: Reactive Flow and Transport Code for Use on Laptops to Leadership-Class Supercomputers, Groundwater Reactive Transport Models. Bentham Science Publishers.
- Hammond G. E., Lichtner P. C. and Mills R. T. (2014) : Evaluating the performance of parallel subsurface simulators: An illustrative example with PFLOTRAN, Water Resources Research, vol.50, pp208-228. doi 10.1002/2012WR013483.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－, NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2024) : 技術開発成果概要 2022, NUMO-TR-24-01.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2025a) : 技術開発成果概要 2024, NUMO-TR-25-03, pp. 118-123.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2025b) : 地質環境の長期変遷を考慮した四次元地質環境モデルの構築技術の整備, NUMO-TR-25-04.

2.3.5 核種移行解析に関するデータセットの設定手法に関する検討

上野 吹佳¹ 小池 彩華¹ 西川 将吾¹ 石寺 孝充² 岩田 孟² 種市 やよい² 野中 麻衣²

¹原子力発電環境整備機構, ²日本原子力研究開発機構

1. 背景・目的

包括的技術報告書 (NUMO, 2021) では、地層処分場の閉鎖後長期の安全評価における核種移行解析で使用するパラメータである溶解度や収着分配係数、拡散係数に関し、実測値に基づいて整備された JAEA のデータベースを参照して設定する手法を示した。一方、パラメータ設定に必要な実測値が十分ではない元素については、安全評価上の合理的な保守性を考慮し、移行遅延性能を低く見積もったパラメータを設定した。今後の調査段階においては、サイトの特徴を反映した安全評価が必要であることから、サイト調査により得られる地質環境等の情報を用いて処分場の空間的な広がり起因する不均質性や、時間的変遷に伴う地質環境特性の不確実性を考慮したデータセットを効率的に設定し、核種移行解析を実施することが必要となる。

本検討は、サイト調査段階で取得できるデータと既存のデータベースやパラメータの推定モデルを組み合わせたデータセットの設定を行うための手法の構築、及び手法の効率化を目的として、JAEA との共同研究により実施している。2024 年度までに、地質環境特性に対応したパラメータ設定 (溶解度、収着分配係数 (以下、「Kd」という)、実効拡散係数 (以下、「De」という)) に必要なデータ拡充として、ベントナイトの Kd, De のデータ整備を完了した。2025 年度は、溶解度の温度依存性データの拡充、ベントナイトの Kd 設定の効率化、及びサイト調査で取得できる情報を反映したパラメータ設定手法の整備・改良を継続している。具体的には、以下に示すテーマについて検討を行った。

(1) 溶解度の温度依存性

包括的技術報告書では、核種移行解析に使用する溶解度は熱力学データが充実している 25 °C の条件下で熱力学平衡計算によって設定した。処分場では幅広い温度条件が想定されることから、溶解度の温度依存性をより現実的に考慮して溶解度を設定するため、複数の異なる温度条件における溶解度試験データの拡充が必要である。

(2) 圧縮ベントナイトの Kd 設定への粉末ベントナイトを用いたバッチ試験の利用方法の検討

包括的技術報告書においては、圧縮ベントナイトを用いた拡散試験により取得した評価対象核種の見かけの拡散係数と、同核種の自由水中の拡散係数から推定した評価対象核種の De により Kd を算出し、核種移行解析のデータセットとして設定している。これにより廃棄体周囲に設置される圧縮ベントナイトの性能を確からしく評価可能と考えられるが、長期の試験時間を要する。一方で、バッチ法による粉末ベントナイトを使用した収着試験は、試験時間が短くかつ試験条件の制御が容易である他、様々な試験条件で Kd を取得した既往の知見が豊富である。このため、圧縮ベントナイトの Kd 設定の効率化に向け、バッチ法による収着試験で得られたデータの効率的な利用方法を構築することが重要である。そこで、圧縮ベントナイトを用いた収着試験と粉末ベントナイトを使用したバッチ法による収着試験を行い、取得された Kd を比較することで、圧縮ベントナイトと粉末ベントナイトの Kd の適用性、利用可能性の検討を行う必要がある。

(3) 原位置試料を利用した核種移行パラメータの設定手法の構築

包括的技術報告書では、サイトを限定しない仮想的な地質環境モデルを対象とし、核種移行パラメータ設定方法を整備してきた。サイト調査においては、採取した岩石試料を用いた室内試験や調査で得られた地下水組成等に基づく核種移行パラメータ設定が必要である。

2. 主な成果

(1) 溶解度の温度依存性

2024 年度までは、温度環境の違いによる 3 価アクチノイドの溶解度の違いを評価するため、3 価アクチノイドと化学的性質が類似しているサマリウムを用い、45 °C、60 °C、75 °C、90 °C の条件で溶解度試験を実施し、溶解度の温度依存性を評価した。

2025 年度は地下水条件の一つとして想定される炭酸共存下での温度依存性を評価するため、炭酸共存下における 45 °C、60 °C の温度条件で過飽和法によるサマリウムの溶解度実験を開始した（図 1）。また、ウランなどの 4 価アクチノイドの溶解度の温度依存性の評価に向け、ジルコニウム、トリウムの水酸化物及び酸化物固相への温度影響に関する文献調査を実施し、その概要と取得されている熱力学データを整理した。これにより、4 価アクチノイド元素の溶解度の評価に資する情報を取得した。

(2) 圧縮ベントナイトの Kd 設定への粉末ベントナイトを用いたバッチ試験の利用方法の検討

2024 年度までは、圧縮ベントナイトを用いた収着試験（図 2）と粉末ベントナイトを用いたバッチ試験で得られた Kd の比較のため、1 価の陽イオンの代表としてセシウムを対象とした二つの試験で Kd を取得し、2 価の陽イオンの代表としてストロンチウムを対象に粉末ベントナイトを用いたバッチ試験での Kd を取得した。

2025 年度は、ストロンチウムを対象に圧縮ベントナイトを用いた収着試験により Kd を取得した。これらの試験データの比較により、圧縮ベントナイトを用いた収着試験により取得した Kd が、粉末ベントナイトを用いたバッチ試験により取得した Kd と比較して、同等または高い傾向にあることを確認した（図 3）。

(3) 原位置試料を利用した核種移行パラメータの設定手法の構築

Kd の設定では、2024 年度までに整備したサイト調査で得られた情報に基づくパラメータ設定手法の適用性検討を目的として、東京電力リニューアブルパワー株式会社神流川発電所の地下トンネル内において採取した先新第三紀付加体堆積岩（NUMO, 2022）を対象に Kd 設定を試行した。この試行により岩石試料の粒径依存性の確認が課題として抽出された。

2025 年度は、粒径の異なる二種の岩石試料を用いた収着試験を実施し、核種による粒径依存性の違いを評価した。対象核種は真性コロイド形成の有無により、岩石試料内部の間隙への侵入挙動が異なることを考慮し、真性コロイドを形成しないセシウムと形成する鉛を選択した。セシウムの Kd は粒径依存性が見られず、鉛の Kd は粒径が小さい試料ほど大きくなる傾向が示された（図 4）。

De の設定では、2024 年度までに包括的技術報告書に基づく De 設定手法を適用し、先新第三紀付加体堆積岩を対象とした拡散試験を実施した。その結果、拡散挙動に影響を及ぼす岩石内部構造の不均質性の評価が、原位置試料を使用した De 設定に係る課題として抽出された。

2025 年度は、Kd と同様にサイト調査で得られた情報に基づくパラメータ設定を行う一連の手法

を整備するため、取得情報が限定される段階を想定した設定手法について、評価対象核種の **De** 設定に使用する代表核種の選定、試験溶液の設定、岩石特性の評価に関する基本的な考え方と、不確実性への対応方針を整理した（表 1）。**De** 設定に使用する核種としては、一般的に負に帯電している鉱物表面との静電的相互作用により保守的な **De** の値を与えると考えられる陰イオンを選定する、間隙構造を考慮した上で **De** を設定する等の方針を示した。また、2024 年度に抽出した課題への対応及び設定手法における **De** の不確実性へ対処するため、間隙構造と **De** の関連性を評価する手法を検討した。拡散試験に使用した先新第三紀付加体堆積岩について、X 線 CT を使用した三次元的な間隙構造を取得すると共に（図 5）、岩石内部の鉱物組成や拡散した元素の状態を示す元素濃度分布を取得することで、岩石の間隙構造と元素の拡散挙動の関連性の検討に資する情報を得た。

3. 包括的技術報告書の更新への反映

様々な地質環境条件に対応した溶解度や緩衝材に対する **Kd** についてのデータ拡充、及びサイトから取得される岩石試料を用いたパラメータ設定手法の構築は、包括的技術報告書の本編 6.6.2 項（信頼性向上に向けた取り組み）に記載した課題であるとともに、日本原子力学会レビュー（日本原子力学会、2019）でも必要性を指摘された課題である。以上を踏まえ、本技術開発により、包括的技術報告書の本編 6.4.1 項（基本ケースに対する核種移行解析と線量評価結果）及び 6.4.2 項（変動ケースに対する核種移行解析と線量評価結果）における溶解度、緩衝材に対する **Kd** のデータセットを更新すること、データが不十分であった付加体堆積岩類の **Kd** と **De** のデータセットを更新することを検討する。

4. 今後の展開

（1）溶解度の温度依存性

炭酸共存下におけるサマリウム（**Sr**）の溶解度の温度依存性に関するデータを拡充する。拡充したデータについては、将来の適合性審査への活用を念頭に、引き続きデータの品質を保証するために成果を論文として公表する。また、本研究で取得したデータが品質の保証されたデータとして活用が容易になるよう、試験で得られたギブスの自由エネルギーなどのデータや温度評価式を JAEA データベースに格納する。

（2）圧縮ベントナイトの **Kd** 設定への粉末ベントナイトを用いたバッチ試験の利用方法の検討

セシウム（**Cs**）とストロンチウム（**Sr**）を対象とした二種の収着試験における **Kd** の違いの要因となるメカニズムの検討を進める。さらに、緩衝材中の **De** の設定を合わせて検討することで、与えられた地下水水質を考慮した上で、緩衝材中の核種の収着・拡散現象を適切に表現するパラメータの設定方法を検討する。

（3）原位置試料を利用した核種移行パラメータの設定手法の構築

Kd については取得した試験結果や収着メカニズムの分析を通して、粒径依存性が核種ごとに異なる要因を分析する。

サイト調査段階における **De** の設定手法については、拡散試験に使用できる試料や地下水水質、岩石特性の情報が増えた場合に、より信頼性の高い **De** を設定するための手法を整理する。また、整理した手法を実際に実施する際の具体的な作業手順についても検討を進める。拡散試験による

De 設定における課題である岩石試料の不均質性評価については、取得した X 線 CT 画像や元素マッピング結果を用いて拡散挙動と岩石内部の構造の関連性を分析する。

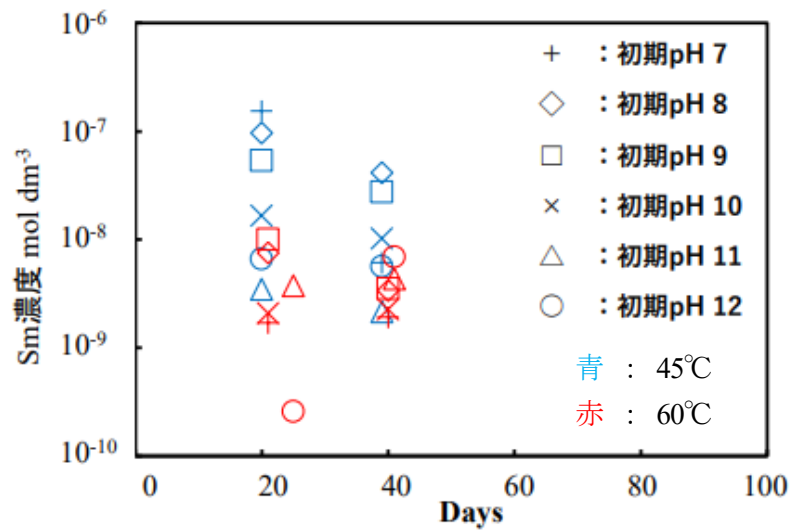


図 1 溶解度試験における試験溶液の反応時間とサマリウム濃度
(青 : 45 °C, 赤 : 60 °C 炭酸濃度 : 1×10^{-3} mol/L)

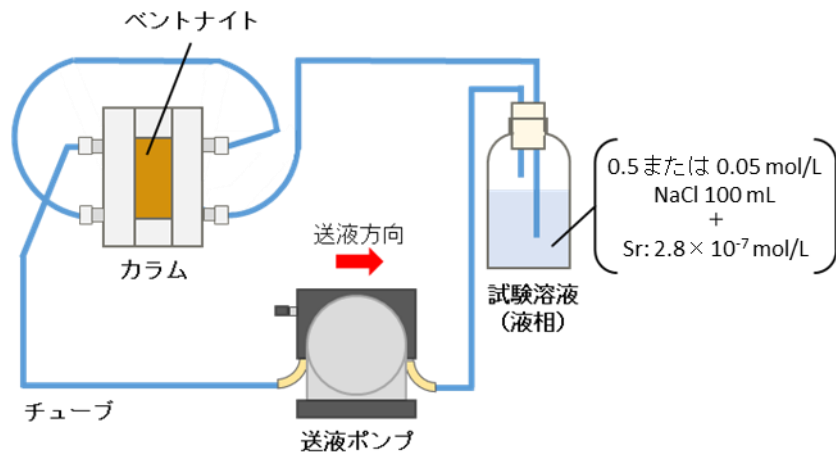


図 2 圧縮ベントナイトを用いた収着試験による Kd 取得のための試験装置
(試験溶液を圧縮ベントナイト表面に接触・循環させ、試験溶液の濃度減少から Kd を算出)

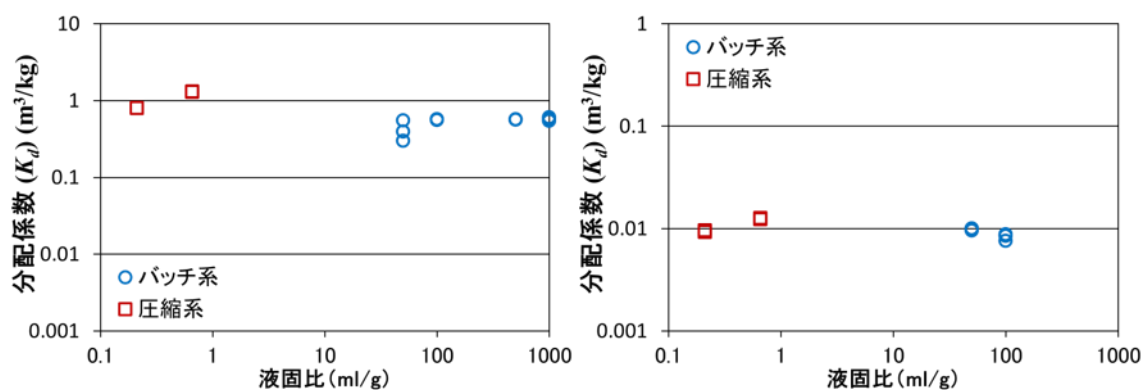


図 3 ストロンチウムの収着分配係数の液固比依存性 (Na 型ベントナイト)
(左 : NaCl 濃度 0.05 mol/L 右 : NaCl 濃度 0.5 mol/L)

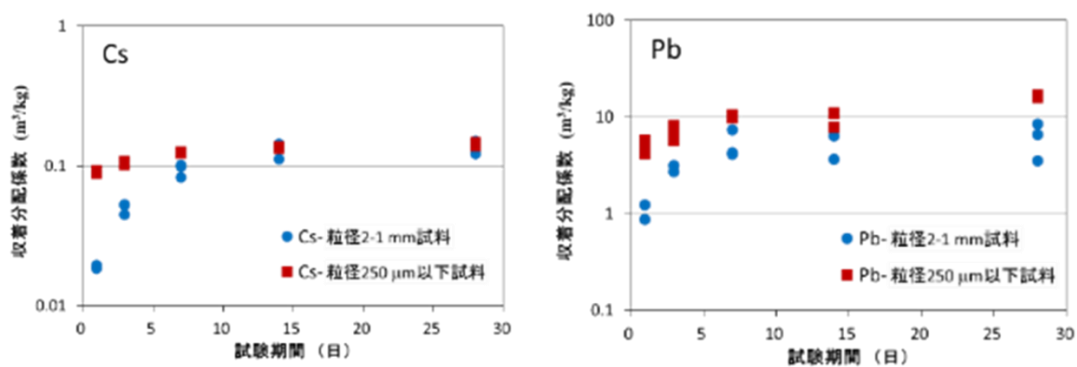


図 4 セシウムと鉛を用いた収着試験における, K_d の岩石試料の粒径依存性

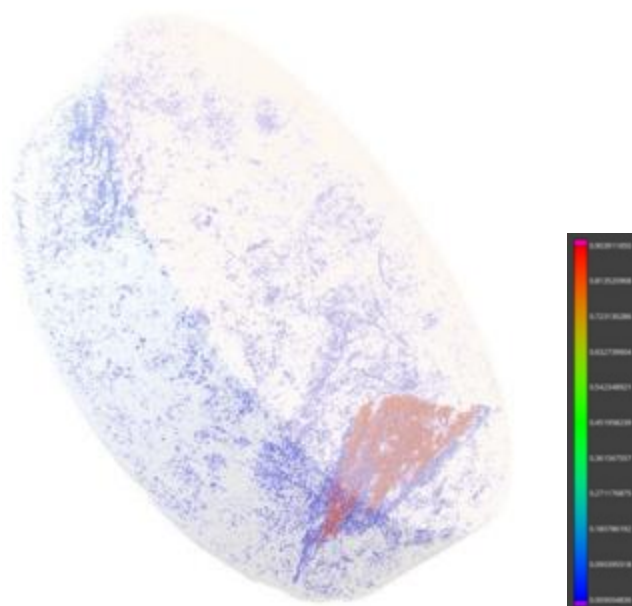


図 5 X 線 CT 画像の内部構造解析を元に作成した付加体堆積岩試料の 3D 画像 (砂泥互層)
(色がついている部分は空隙または亀裂を示す)

表 1 取得した岩石試料や情報が少ない概要調査初期段階を想定した室内試験に基づく
De 設定手法の整理結果

	設定に向けた基本的考え方	限られた試料と情報による設定に生じる不確実性への対応方針
設定に使用する核種	・固相との静電的相互作用が考慮される岩石では、陰イオン核種の De が低くなる ・固相との静電的相互作用の小さい岩石では、電荷によって De は変化しない ・そのため、陰イオンの De により、保守的な設定が可能。代表的な陰イオンとしてヨウ化物イオンを選定	・静電的相互作用により最も De が低くなる陰イオンにより De を設定することで、静電的相互作用の有無などの不確実性によらず、保守的な設定値を与える
試験溶液の設定	・調査地域の地下水の情報に基づいた模擬地下水によりパラメータを取得する ・地下水水質の情報が少ない場合は、代表的な陽イオン (Na, Ca) 濃度をできる限り原位置地下水に合わせる	・調査地域の地下水水質の情報を可能な限り反映することで不確実性を低減
岩石特性の評価	・間隙率が最も重要な特性であることから、間隙率に着目して評価を行う。また、X 線 CT 分析及び X 線回折分析等による特性評価により類似した構造の岩石を選定して模擬試料として利用する	・実測値の点数が多い場合 De と間隙率の関係に基づいて設定することで、岩石試料の特性ごとに生じるパラメータの不確実性を低減する ・実測値の点数が少ない場合 調査地域地下と同一種もしくは類似した種類の岩石の実測値から設定することで、不確実性を低減

参考文献

- 日本原子力学会 (2019) : 「NUMO 包括的技術報告書」 レビュー報告書.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告 : わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－, NUMO-TR-20-03.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2022) : 先新第三紀付加体堆積岩類における地質環境特性データの取得, NUMO-TR-22-01.

2.4 技術マネジメント

処分事業を推進していくためには、事業の各段階で体制、仕組みを整備しながら、求められる技術を適切に準備し、利用可能な状態にしていくことが重要である。また、地層処分技術が信頼に足るものであることについて、広く一般公衆からの理解を得ることが不可欠である。このことを踏まえ、2025年度は、概要調査を想定した体制整備、国際連携・国際貢献の推進、地層処分技術に関する情報発信の強化、技術開発成果の品質向上に関する取組み、知識マネジメント基盤の強化に取り組んだ。

概要調査計画の策定と将来の概要調査業務の円滑な実施に向けて、「文献調査段階の評価の考え方」(資源エネルギー庁、2023)¹を参考に、法令で定められた要件等への適合性を評価するための指標の設定やその確認の仕方に関する考え方、これに基づく現地調査や技術的な観点からの検討に関する実施内容の整理を2024年度に引き続き進めた。また、概要調査の実施能力を高めるため、2.1で述べた技術開発を通じて、汎用的な概要調査の実施内容や手順を具体化するとともに、個別調査技術の品質・安全・工程等の管理ノウハウを技術的知見として蓄積した。また、現地調査で必要となる資機材の要求性能等についても整理を進め、多様な地質環境条件に対応し、高品質・高精度のデータ取得が可能な原位置水理試験装置や地下水採水試験装置の設計を段階的に進めた。自然環境調査に関しては、現地調査(物理探査、ボーリング調査等)を実施する際の環境配慮項目や、希少動植物の生息分布に関する調査の実施内容について、一般的な情報を基に2024年度に引き続き整理を進めた。

国際連携及び国際貢献については、OECD/NEA, IAEA, 放射性物質環境安全処分国際協会(EDRAM)といった国際機関等の活動に継続的に参加し国際動向の把握と国際貢献を行うとともに、海外の地層処分事業の実施主体や研究機関との共同研究の実施や国際共同プロジェクトへの参加を通じて、技術力向上を図った。特に、OECD/NEAとJAEAによる幌延深地層研究センターの地下研究施設を活用したHIPについては、三つの課題への参画を通じて、技術力向上に取り組んだ(2.4.1参照)。さらに、2024年度までに取り組んだ成果に関する報告書を共同で作成し、OECD/NEAのホームページ²で公表された。

また、引き続きGTSをはじめとする国際共同研究プロジェクト等への参画やNagra, LBNL, SKB等との共同研究を通じて海外の先行研究や取組み事例等の知見を収集し、機構の技術開発に反映した。

地層処分技術に関する情報発信については、論文発表、学会発表、技術報告書公表等を通じて技術力を訴求するとともに、学会でのブース展示や、関わりの少ない学協会での講演や寄稿などを通じて学協会との接点を拡大した。また、OECD/NEA主催の「Symposium on Information, Data and Knowledge Management for Radioactive Waste: Challenges Across All Timescales」(神奈川県横浜市)をホスト機関として支援するとともに、データマネジメントシステムの概要等について、NUMOの取組みを発信した。さらに、一般の方々に向けて、「10年以上にわたる地層処分場の安全性」に関する動画の公表³、「地層処分技術を考えるシンポジウム2025」の開催(北海道札幌市)、マスコミを介した情報発信(北海道新聞デジタルへの記事掲載、論説委員や記者の皆様への情報提供)などを通じて、情報に接する機会(チャンネル)を拡大した。

技術開発成果の品質向上に係る取組みについては、「中期技術開発計画」に基づく技術開発の計画的な推進とその成果の品質及び信頼性の向上を図るため、技術開発業務全般の品質保証プロセスに関する体系的な考え方の整備を実施した。

¹経済産業省 ホームページ (https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/radioactive_waste/pdf/20231102.pdf)

²OECD/NEA ホームページ (https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2025-11/nea_ne_2025_20.pdf)

³NUMO 公式 YouTube チャンネル (<https://www.youtube.com/watch?v=cLKl3HzQ3nE>)

技術開発業務の品質保証プロセスの整備として、不適合事象等の管理方法を定めた「不適合等管理要領書」とその運用を定めた「不適合等管理マニュアル」について、原子力事業者が実施している CAP⁴ の考え方を参考に、現在の機構の状況に適合する方針、運用開始に向けた方向性を整理し、改訂版を施行した。さらに、CAP 会合を毎週 1 回開催し、改訂した要領書やマニュアルに基づく不適合管理を実施した。また、影響度と再発可能性に基づくグレード分類を導入し、グレードに応じた管理を行う仕組みを開始した。これにより、自ら気付き、改善する意識の醸成につながった。

また、解析業務の品質向上に向けて、先行原子力事業者で活用実績のある「原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン」⁵ の考え方に則した「外部委託における解析業務の品質管理ガイド」を制定、施行し、次年度以降に外部委託で実施する安全評価をはじめとする各種解析の品質確保を図ることとした。

さらに、評議員会による評価・提言及び技術アドバイザリー委員会等の意見を踏まえ、技術開発の取組みについて継続的な自己評価と改善を進めた。

知識マネジメント基盤の強化については、現在の技術の成熟度、技術開発の担当機関、技術開発の反映先についてステークホルダー間の共通認識をより醸成しやすくするため、技術開発ロードマップの策定に着手し、作成の考え方の整理を進めた。

⁴ Corrective Action Program の略。原子力事業者で採用されている取組みの一つであり、課題の抽出、不適合の識別・管理、優先順位付け、原因分析、是正措置などを体系的に行う仕組み

⁵ JANSI（日本原子力技術協会）（2010）：原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン，JANSI-GQA-01，第 1 版。

2.4.1 幌延国際共同プロジェクトを活用した技術の実証

浜本 貴史 吉田 芙美子 レ アン ゴク¹ 西川 将吾 小池 彩華 村上 義揮 田窪 勇作 永井 翔

原子力発電環境整備機構

1. 背景・目的

HIP では、OECD/NEA 協力の下、JAEA 幌延深地層研究センターの地下研究施設を活用し、先進的な安全評価技術や工学技術に関わる研究開発の成果を最大化することを目的として、(1) 物質移行試験（タスク A）、(2) 処分技術の実証と体系化（タスク B）、(3) 実規模の人工バリアシステム解体試験（タスク C）を実施している²。各タスクの原位置試験の実施場所を図 1～図 3 に示す。これら三つのタスクはいずれも国際的に重要な課題である。また、地下研究施設における試験計画から得られたデータの解釈やそれらを用いた解析などを行い、諸外国の機関との議論を通じて国際的なレベルで技術の適用性とその信頼性を確認することは、事業者としての技術力向上及び人材育成の観点から価値が高い。このため、NUMO は、国際共同プロジェクトの利点を最大限に活用して、実サイトの精密調査段階における試験を合理化すること及び国際的に価値の高い成果の創出に貢献することを目的として、2023 年 4 月から、各タスクや運営委員会へ参加している。なお、2025 年度における参加機関は 7 か国の 10 機関である。

(1) 物質移行試験

フィンランドの規制機関は、実施主体に対して、岩盤中の不連続亀裂ネットワークモデル（Discrete Fracture Network モデル、以下「DFN モデル」という）の信頼性を操業の許認可までに評価することを要求しており（STUK, 2015）、わが国でも同様な要求が想定される。これまでの研究開発により、一つ一つの割れ目における物質移行モデルの妥当性は試験結果との対比により示されているものの（例えば、JAEA・RWMC, 2023）、それらの割れ目を組み合わせた三次元の DFN モデルを用いた物質移行モデルの妥当性を提示するまでには至っていない。このため、国内の地下研究施設における原位置試験結果を用いて、三次元の物質移行モデルの構築技術を整備するとともに、NUMO が開発した三次元核種移行解析コード（以下、「Partridge」という；NUMO, 2011）の検証と、このコードを用いて構築する三次元物質移行モデルの妥当性やその適用限界を確認することは重要である。加えて、それらの結果を踏まえて、必要であればモデル構築技術や解析コードの改良へとつなげることも重要である。

(2) 処分技術の実証と体系化

包括的技術報告書（NUMO, 2021）では、岩盤の変形量、湧水量、化学環境などの岩盤の特性を予測する技術や処分坑道に関する一連の設計手順、掘削により坑道周辺に生じる掘削損傷領域（以下、「EDZ」という）が水みちとなることを防ぐための止水プラグなどを提示した。これらの技術や手順などについては、実際の地下環境に対しての適用性とその課題を明らかにすることが、今後の実サイトの精密調査段階における計画の立案や試験の合理化に向けて重要である。

¹ 現所属：鹿島建設（株）

² JAEA 幌延深地層研究センターホームページ（https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/status/hip/project_hip2.html）

特に、空洞の力学安定性が、坑道の支保工仕様や止水プラグなどの設計、並びに施工時の安全性及び合理化などに大きく関わることから、実際の試験坑道を対象とした数値解析と原位置試験結果との比較を通じて、解析モデルの精度向上や設計手順の合理化を行っていくことが重要である。

(3) 実規模の人工バリアシステム解体試験

長期の安全評価におけるニアフィールドの状態変遷評価においては、人工バリアとその周辺岩盤の熱—水—応力—化学の状態を評価することが必要である。包括的技術報告書では、三つの地質環境モデルと二つの地下水組成に対して、人工バリアとその周辺岩盤の熱—水—応力—化学の状態を評価した。今後は、解体試験によって取得する試験データとの比較評価を通じて、実際の地下環境に対するこれらの評価技術の適用性と課題を明らかにしておくことが重要である。これにより、実サイトの精密調査段階における試験の合理化に資することとなる。

2. 主な成果

各タスクにおける NUMO の主な取組みを以下に記す。なお、2024 年度末までのフェーズ 1 で得られた成果は OECD/NEA の報告書として公表された (NEA, 2025)。

(1) 物質移行試験

サイト I (図 1) で実施した 1 回目のトレーサー試験について、2024 年度に Partridge を使って非収着性トレーサーであるウラニンの破過曲線の再現解析を実施したが、2025 年度は Partridge と他の解析コードとの違い (Partridge の特徴) を考察した。Partridge の最も大きな特徴は、収着や拡散・移流といった実現象を粒子の動きの支配方程式として直接に組み込んでいる点である。この結果、再現解析から得られる (試験結果に合わせ調整する) パラメータは拡散係数、収着分配係数のように、物理現象に直結するパラメータとなり得る。一方で、他のコードの支配方程式では亀裂とマトリクス中の濃度変化を取り扱っているため、ダルシー流速や分散長など巨視的な物理量が主要パラメータとなる。図 4 の比較結果からわかるように、Partridge の解析結果は他の解析コード (COMSOL Multiphysics (COMSOL ホームページ)) と比較して実測データの再現性が高く、この Partridge の高い適用性は支配方程式の違いが影響しているものと考えられる。

続いて、サイト I における 2 回目のトレーサー試験について、2 回目と同様、Partridge を用いて再現解析を実施した (図 5)。ここでは非収着性・収着性トレーサーの破過曲線を再現するよう、実効拡散係数 (D_e)、収着分配係数 (K_d)、マトリクス拡散深さを導出した。導出結果を室内試験の結果と比較した結果、そのパラメータ値の多くが室内試験結果のオーダーの範囲に含まれるものの、収着性トレーサーの K_d については、解析により導出された値は室内試験値よりも一桁から二桁程度小さいことが明らかとなった。この理由として、原位置試験で実施された流速の大きい条件下ではトレーサーが亀裂とマトリクス界面で接触する時間が短く、収着が十分に進行しなかったことが考えられ、その結果、原位置試験データを用いて導出した収着分配係数と室内試験から得られた収着分配係数との間で乖離が生じた可能性がある。本解析により原位置試験からのパラメータ推定と室内試験との差異が明らかとなり、今後の検討 (室内試験データの妥当性評価等) に資する有益な知見が得られた。

(2) 処分技術の実証と体系化

2025 年度は、深度 500 m における試験坑道 9 の掘削及び原位置試験・観察が行われた。掘削に伴う応力再配分により、坑道周辺岩盤では EDZ が形成されるとともに、周辺岩盤の変形を支持する吹付けコンクリートにも応力が発生する。このことを踏まえ、解析手法の適用性を確認するために、施工時の仕様を反映した予測解析に基づき、ボアホールテレビ (BTV) 観察で推定した EDZ の広がり及び吹付けコンクリートの応力の計測値との比較を行った。

図 6 に試験坑道 9 の解析結果を示す。岩盤に設定した引張強度に対し Safety Factor が 1.0 を下回った領域を EDZ とした。EDZ の幅は、側壁で 1.3 m と評価され、BTV 観察に基づく EDZ の幅 (1.4 ~ 3.1 m) よりも小さい結果となった。一方、吹付けコンクリートの応力は、応力計測位置に対応する解析値で最大 18 MPa となり、観測された最大値 15 MPa に対して安全側の評価が得られた。

以上より、本解析は吹付けコンクリートの応力については安全側の評価が得られたが、EDZ の再現には改善が必要である。

(3) 実規模の人工バリアシステム解体試験

2024 年度より引き続き、人工バリア性能確認試験のモニタリングデータが参加機関に共有され、モニタリングされた緩衝材や埋戻し材の温度分布変化や飽和度分布変化の結果に基づき、2026 年度より開始する解体試験実施計画案の策定に議論を通じて貢献した。また、2025 年度に開始した室内要素試験（膨潤圧試験、膨潤変形試験、浸潤試験、温度勾配下水分拡散試験）を対象に解析評価のベンチマークテストを各参加機関で実施した。NUMO は浸潤試験と温度勾配下水分拡散試験に関して、米国サンディア国立研究所をはじめとする複数の研究機関の共同開発によって作成されたオープンソースの熱—水連成／熱—水—化学連成解析コードである PFLOTTRAN (Hammond et al., 2014) を用いて解析し、特に等温条件下の浸潤試験に関しては、測定データと解析結果の間で水分分布の傾向が一致することを確認した（図 7）。温度勾配下水分拡散試験に関しては、測定データの傾向を再現する解析結果が得られた一方で、主に低温領域において実験結果と解析結果との差異が確認された。温度勾配による水の拡散移動に起因した、不飽和膨潤による乾燥密度の経時変化やそれに伴う水分保持曲線等の水理特性の変化が影響していると考えられる。今後、これらの水理特性に関わるパラメータを経時変化に応じて段階的に更新しながら解析することや、熱—水—力学連成解析の適用等により、温度勾配下での水の拡散移動に起因する経時変化の影響を考慮することが課題である。

3. 包括的技術報告書の更新への反映

2. (1) 物質移行試験は、包括的技術報告書 (NUMO, 2021) の本編 6.6.2 項（信頼性向上に向けた取り組み）の (3) (ii) 水みちの微細透水構造などを反映した核種移行解析モデルの構築・高度化に対応する。包括的技術報告書 (NUMO, 2021) では Partridge が長期安全性評価に大きな役割を果たしており、この解析コードやモデルの信頼性を補強する根拠として、HIP の成果に基づき、本編 6.4.1 項（基本ケースに対する核種移行解析と線量評価結果）及び付属書 6-14（ニアフィールドスケールにおける三次元地下水流動・粒子追跡解析）を更新することを検討する。

2. (2) 処分技術の実証と体系化は、包括的技術報告書 (NUMO, 2021) の本編 4.8.3 項（今後の取り組み）の (2) (i) 処分場の設計技術の向上、及び (ii) 処分場建設の安全性を確保する技術の高度化に対応する。HIP の成果に基づき、本編 4.5.2 項（坑道の設計）及び付属書 4-34（高レベル放射性

廃棄物処分場における処分坑道の空洞安定性の評価)において、EDZ の幅や透水性に関する予測解析及び地下施設の設計要件に対する判断指標と基準 (NUMO, 2021) を実際の地下施設に適用した事例として追記することを検討する。

2. (3) 実規模の人工バリアシステム解体試験は、包括的技術報告書 (NUMO, 2021) の本編 6.6.2 項 (信頼性向上に向けた取り組み) の (1) (ii) ニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化に対応する。HIP の成果に基づき、本編 6.3.1 項 (処分場閉鎖後のシステムとしてのふるまいに関する記述) において、特にニアフィールドにおける再冠水過程に関して、処分場閉鎖後のシステムとしてのふるまいを記述する際の論拠として追記することを検討する。

4. 今後の展開

(1) 物質移行試験

2024 年度に構築した DFN モデルと 2025 年度に推定した水理特性・物質移行パラメータを基に、Partridge を使って、サイト I で実施予定の亀裂ネットワークを対象としたトレーサー試験の再現解析、及びサイト I とは異なる領域 (サイト II: 場所については計画中) で実施するトレーサー試験の予測解析などを実施する。さらに、2025 年度以降に実施する岩盤の水理地質調査、トレーサー試験、オーバーコアリング、サイト II の選定やレイアウト、室内試験等の試験計画の策定と取得されたデータの解釈に関する国際的な議論に引き続き貢献する。

(2) 処分技術の実証と体系化

EDZ の再現について岩盤のモデル選定や物性値のばらつきは解析結果に大きく影響することから、今後は岩盤の室内試験データとの整合性を踏まえ、適切な解析モデルの選定及び岩盤の物性のばらつきを考慮した検討を進める。また、2026 年度以降に実施する深度 500 m の試験坑道の埋戻し、止水プラグ設置といった一連の施工技術の実証に関しても、引き続き議論に貢献する。

(3) 実規模の人工バリアシステム解体試験

引き続き、人工バリアシステムの解体試験や試料分析に関する計画の策定に貢献する。また、室内試験を対象としたベンチマークテストで適用性を確認した連成解析技術を用いて、モニタリングデータや解体後に得られるデータと連成解析結果との比較評価を実施し、人工バリアとその周辺岩盤の熱—水—応力—化学の状態評価に関する解析技術の妥当性確認を行う。

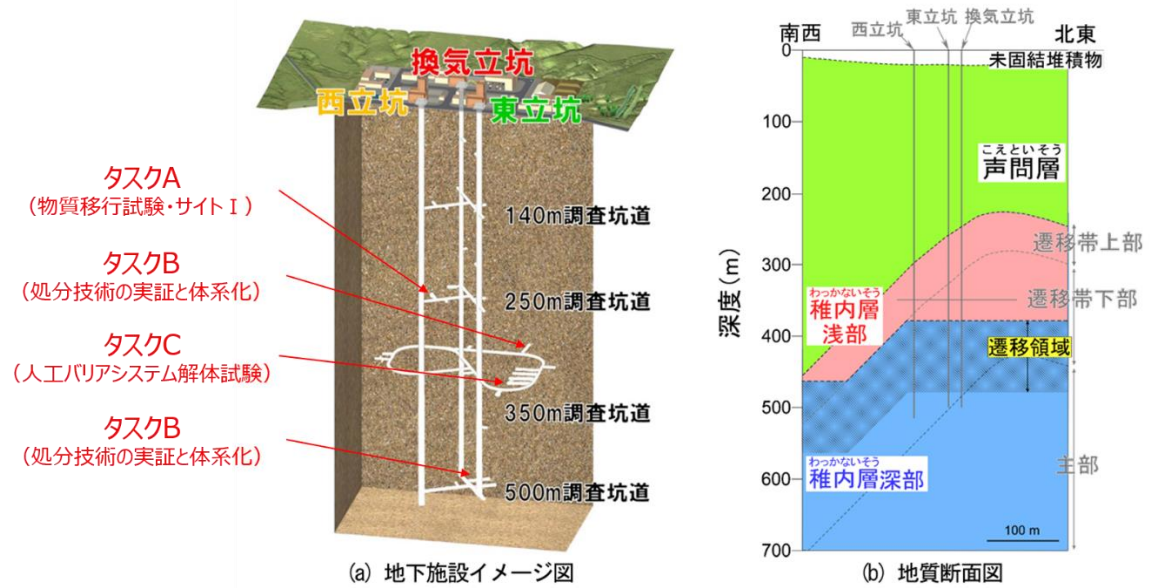


図 1 幌延深地層研究センターにおける原位置試験実施場所（JAEA, 2026 の図に追記）

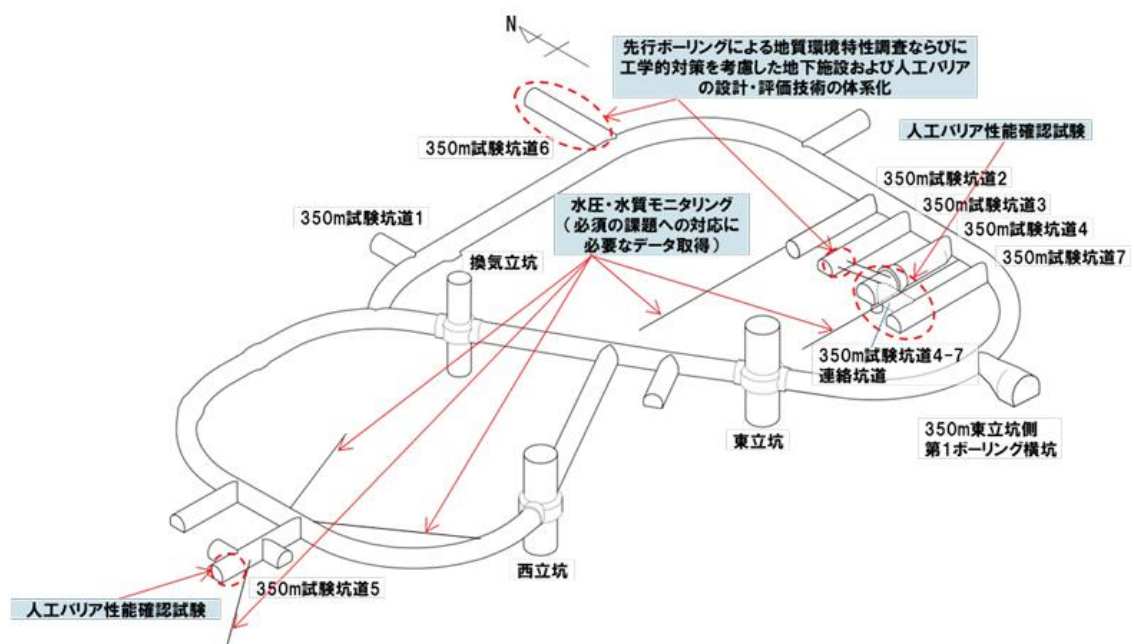


図 2 350 m 試験坑道における主な調査研究の実施場所（JAEA, 2026）

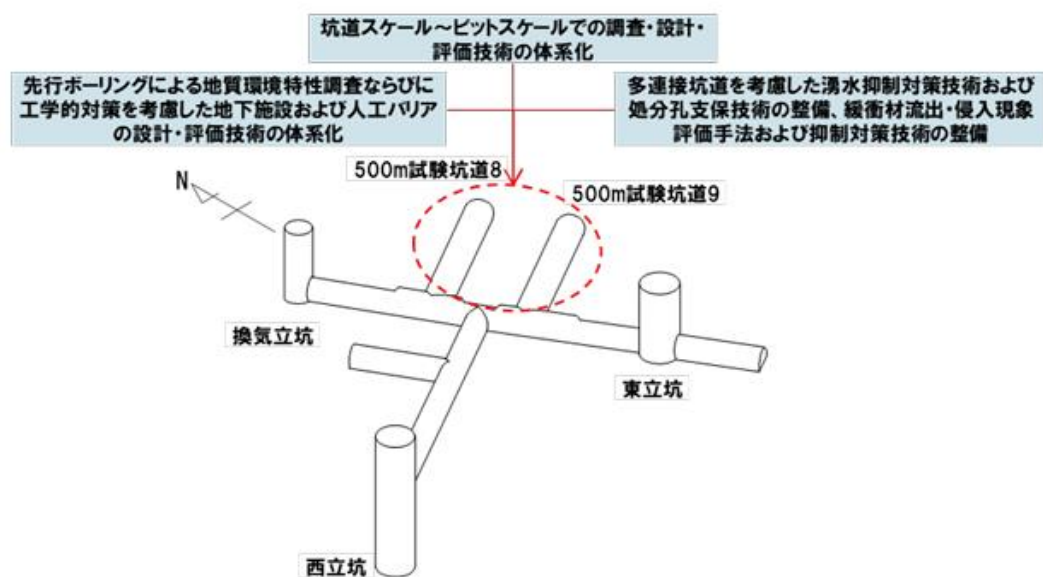


図 3 500 m 試験坑道における主な調査研究の実施場所（JAEA, 2026）

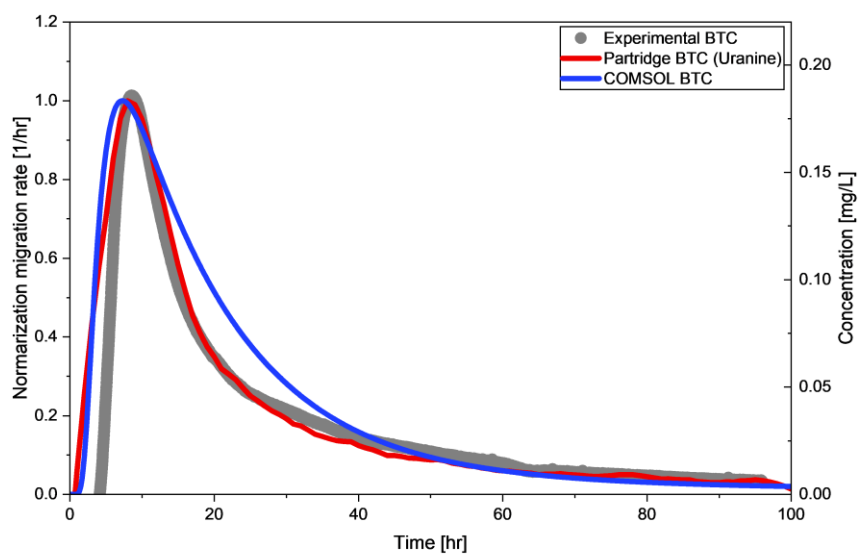


図 4 サイト I における 1 回目のトレーサー試験結果と他のコードを用いた解析結果の比較
（10 分のパルス注入条件における BTC（Breakthrough curve）：破過曲線）

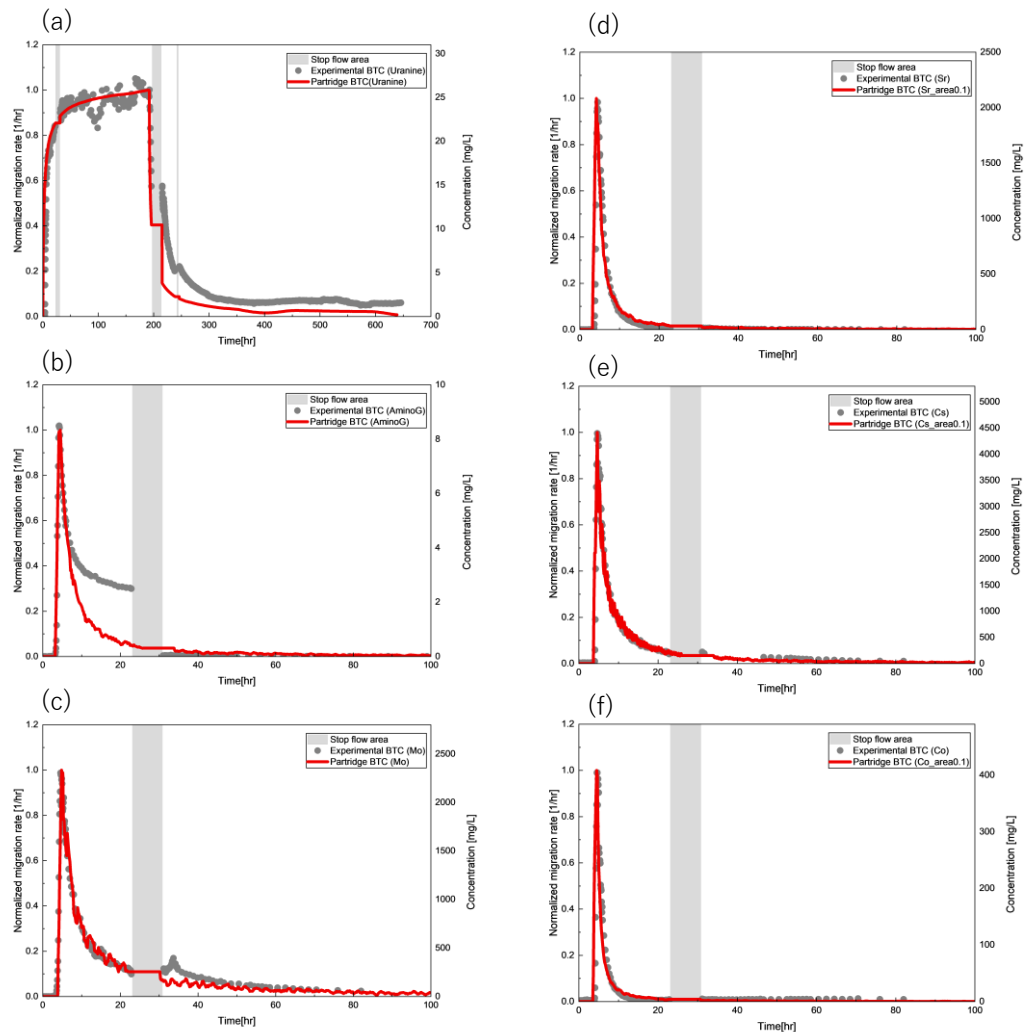
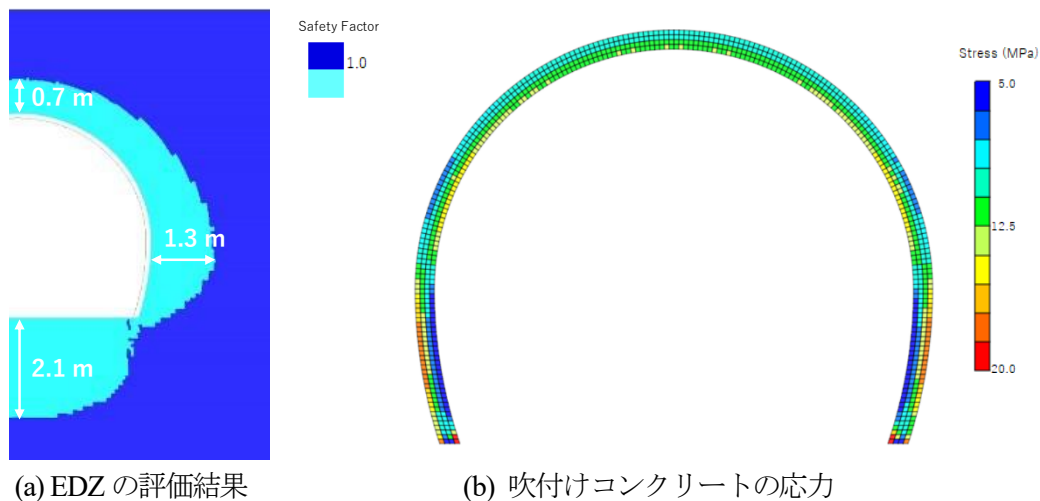


図 5 サイト I における 2 回目のトレーサー試験の結果と解析結果

((a)ウラニン, (b)アミノ G 酸, (c)モリブデン, (d)ストロンチウム, (e)セシウム, (f)コバルト)

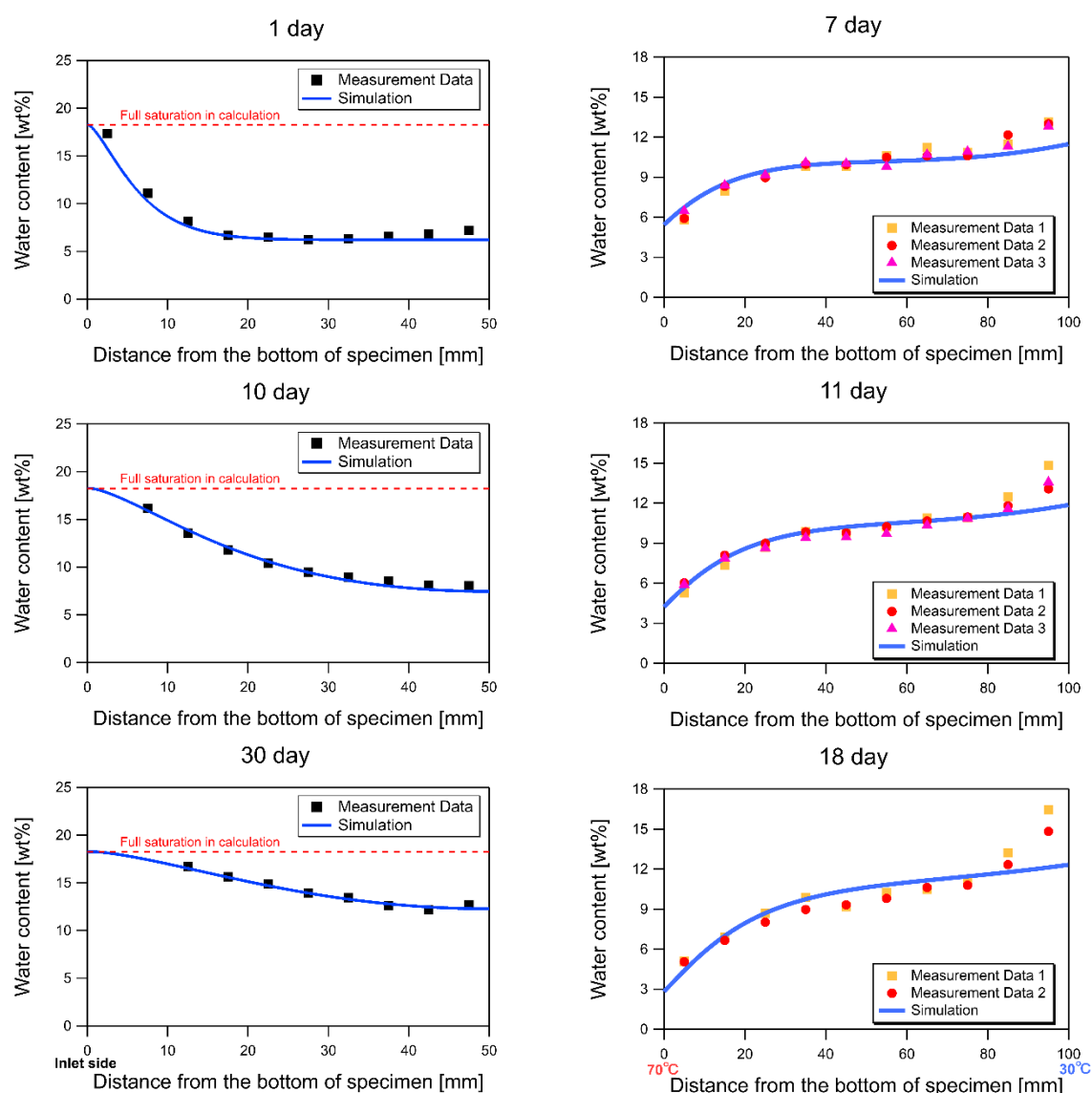
注) 各図には実測 BTC と解析結果を示す。(a)ウラニンは 8 日間のパルス注入条件, その他のトレーサーは 1 時間のパルス注入条件で実施した試験結果である。



(a) EDZ の評価結果

(b) 吹付けコンクリートの応力

図 6 空洞安定性解析に基づく解析結果



浸潤試験

温度勾配下水分拡散試験

図 7 浸潤試験と温度勾配下水分拡散試験に関する解析結果

(浸潤試験の結果(左図))については、初期の乾燥密度に基づいて算出した飽和度が100 % (赤い点線で図示) 以下の測定データを示す。横軸左端が注水側である。温度勾配下水分拡散試験に関する各グラフ(右図)のプロットは複数回の測定データを示す。横軸左端が高温(70 °C)、横軸右端が低温(30 °C)の温度条件である。)

参考文献

- COMSOL ホームページ : COMSOL Multiphysics® シミュレーションソフトウェア, <https://www.comsol.jp/comsol-multiphysics> (2026 年 6 月 12 日閲覧).
- Hammond, G. E., Lichtner, P. C. and Mills, R. T. (2014) : Evaluating the performance of parallel subsurface simulations: An illustrative example with PFLTRAN, *Water Resources Research*, vol. 50, pp. 208-228.
- JAEA(日本原子力研究開発機構), RWMC(原子力環境整備促進・資金管理センター)(2023) : ニアフィールドシステム評価確証技術開発, 平成 30 年度～令和 4 年度取りまとめ報告書, 令和 5 年 3

月.

JAEA(日本原子力研究開発機構)(2026)：幌延深地層研究計画 令和 7 年度調査研究成果報告，令和 8 年 7 月.

NEA (2025) : NEA Horonobe International Project – HIP Interim report for Phase 1 (February 2023 – March 2025), NEA/RWM/R(2025)4, OECD Publishing.

NUMO(原子力発電環境整備機構) (2011)：地層処分事業のための安全評価技術の開発（Ⅱ）－核種移行解析モデルの高度化－， NUMO-TR-10-10.

NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021)：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－， NUMO-TR-20-03.

STUK (2015) : STUK's review on the construction license stage post closure safety case of the spent nuclear fuel disposal in Olkiluoto, STUK-B 197 / NOVEMBER 2015.

第3章 おわりに

地層処分技術の開発を継続的に進めるため、本書では2025年10月公表の「技術開発成果概要2024」に続き、NUMOが2025年度に実施した個々の技術開発やその成果の概要を簡潔に紹介した。NUMOの技術開発は、国内外の研究機関や大学、海外の地層処分実施主体との共同研究や地下研究施設を活用した国際共同プロジェクト等への参画のほか、国内の産業界に外部委託して進めている。本書で示した成果の概要が、NUMOの技術的取組みに対する幅広い理解の促進や興味・関心の向上につながることを期待する。特に将来の地層処分事業を担う学生や若手世代にとって、地層処分事業にかかわる技術開発の魅力を伝える一助になることを願っている。また、本書を通じて技術情報を積極的に公開するとともに、様々な分野のステークホルダーとのコミュニケーションの円滑化に向けて、今後も工夫と改善に取り組んでいきたい。

2025年度は、国の全体計画（令和5年度～令和9年度）及びNUMOの中期技術開発計画（2023年度～2027年度）の第3年度（3年目）である。NUMOは、引き続きこれらの計画に沿って具体的な技術開発に取り組む一方で、当該年度の成果をセーフティケースの信頼性向上に向けて活用していく。

NUMOは、今後も関係研究機関、大学及び産業界と積極的に協力するとともに、国際協力をより一層進め、安全な地層処分の実現に向けて、より信頼性の高い技術の開発に取り組んでいく。

原子力発電環境整備機構
(略称：原環機構)

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)