NUMO-TR-24-03

技術開発成果概要 2023

2024 年 10 月
原子力発電環境整備機構

2024 年 10 月　初版発行

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

〒108-0014　東京都港区芝 4 丁目 1 番地 23 号　三田 NN ビル 2 階
原子力発電環境整備機構　技術部
電話 03-6371-4004（技術部）　FAX 03-6371-4102

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Science and Technology Department
Nuclear Waste Management Organization of Japan
Mita NN Bldg. 1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan

©原子力発電環境整備機構
（Nuclear Waste Management Organization of Japan）　2024

NUMO-TR-24-03

技術開発成果概要 2023

2024 年 10 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 四次元地質環境モデルの構築技術の妥当性確認.....6
2.1.2 物理探査技術に関する知見及び適用事例の収集.....10
2.1.3 ボーリング試験による地質環境データ取得技術の実証.....14
2.1.4 断層を対象とした水理・応力場に係る調査・評価技術の構築.....18
2.1.5 レーザー光を用いた地下水水質計測装置の開発.....23
2.1.6 ボーリング孔閉塞技術に係る技術開発.....27
2.1.7 サイト調査におけるデータ管理方法に関する検討.....32
2.2 処分場の設計と工学技術の体系的な整備.....35
2.2.1 放射線分解生成物によるオーバーパックの腐食量評価技術の高度化.....37
2.2.2 セーフティケースにおけるナチュラルアナログの活用方法の検討.....39
2.2.3 坑道の耐震性評価手法の整備 -軟岩について-.....43
2.2.4 銅コーティングオーバーパックの耐食性に対する施工不良の影響検討.....47
2.2.5 銅コーティングオーバーパックの製作技術の開発.....50
2.3 閉鎖後長期の安全性の評価に関する技術の高度化.....53
2.3.1 ガラス変質層による溶解速度の低減現象に係る根拠情報の拡充.....55
2.3.2 セメント系材料と緩衝材との相互作用による長期変質挙動の検討.....62
2.3.3 ベントナイトコロイド影響評価に用いるデータ取得.....65
2.3.4 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手法.....71
2.3.5 地下浅層から地表環境を考慮した生活圏評価モデルの構築（その２）.....76
2.3.6 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.....81
2.3.7 サイト調査を反映した核種移行パラメータ設定の方法論の検討及びデータ拡充.....85
2.3.8 不均質場における三次元解析ビッグデータの機械学習.....87
2.4 技術マネジメント.....92
2.4.1 幌延国際共同プロジェクトへの参画.....93
2.4.2 セーフティケースのコミュニケーションに関する検討.....99
第３章 おわりに.....102

第1章　はじめに

我が国における地層処分技術の開発は，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地層処分実施主体である原子力発電環境整備機構（以下，「NUMO」という）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，我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[1]」（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[2]」（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。

2020年11月から開始した北海道の寿都町及び神恵内村の文献調査においては，このようにして蓄積してきた技術基盤を活用して調査を行うとともに，「文献調査段階の評価の考え方（案）」を作成した。本案が国の審議会及び意見公募を経て，国の資料として公表（2023年11月）された「文献調査段階の評価の考え方」に基づき，文献調査報告書（案）を取りまとめ公表し[3]（2024年2月），数回の審議会の審議の意見を反映して修正しとりまとめた[4]（2024年8月）。

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て取りまとめた「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（以下，「包括的技術報告書」という）については，日本原子力学会によるレビュー結果[5]等を踏まえ改訂した包括的技術報告書[6]を2021年2月に公表している。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[7]が2023年1月，その日本語翻訳版[8]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」といった評価とともに，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

1 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）
2 NUMOホームページ（https://www.numo.or.jp/technology/technical_plan/pdf/TR-23-01.pdf）
3 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）
4 経済産業省ホームページ
（https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/radioactive_waste/005.html）
5 日本原子力学会ホームページ（https://www.aesj.net/sp_committee/com_numo）
6 NUMOホームページ（https://www.numo.or.jp/technology/technical_report/tr180203.html）
7 OECD/NEAホームページ（https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_77138/the-nuclear-waste-management-organization-of-japan-s-pre-siting-safety-case-based-on-the-site-descriptive-model-an-international-peer-review-of-the-numo-safety-case）
8 OECD/NEAホームページ（https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_82280/-numo）

ーで示された提言等について，これをどのように活かしていくかについて取りまとめ，NUMO ホームページ上に公表している[9]（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」を加えて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専門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を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，技術開発成果を個別の技術報告書（NUMO-TR シリーズ）に取りまとめるほか，上記の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 主催のオンライン説明会等を活用し，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，地層処分に関わり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の四分野における技術開発の現状や動向を概略的に把握していただくために，2021 年度から作成しているものであり，2023 年度の成果を簡潔に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。

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：西崎　耀，藤木美千代，村上義揮，矢口　悟）

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

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

・腐食防食学会
公益社団法人 腐食防食学会，Japan Society of Corrosion Engineering

・原子力学会
一般社団法人 日本原子力学会，Atomic Energy Society of Japan

・JAEA
国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構，Japan Atomic Energy Agency

・NUMO
原子力発電環境整備機構，Nuclear Waste Management Organization of Japan

海外機関（国名）

・GTS
Grimsel Test Site，グリムゼル岩盤試験サイト（スイス）

・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）

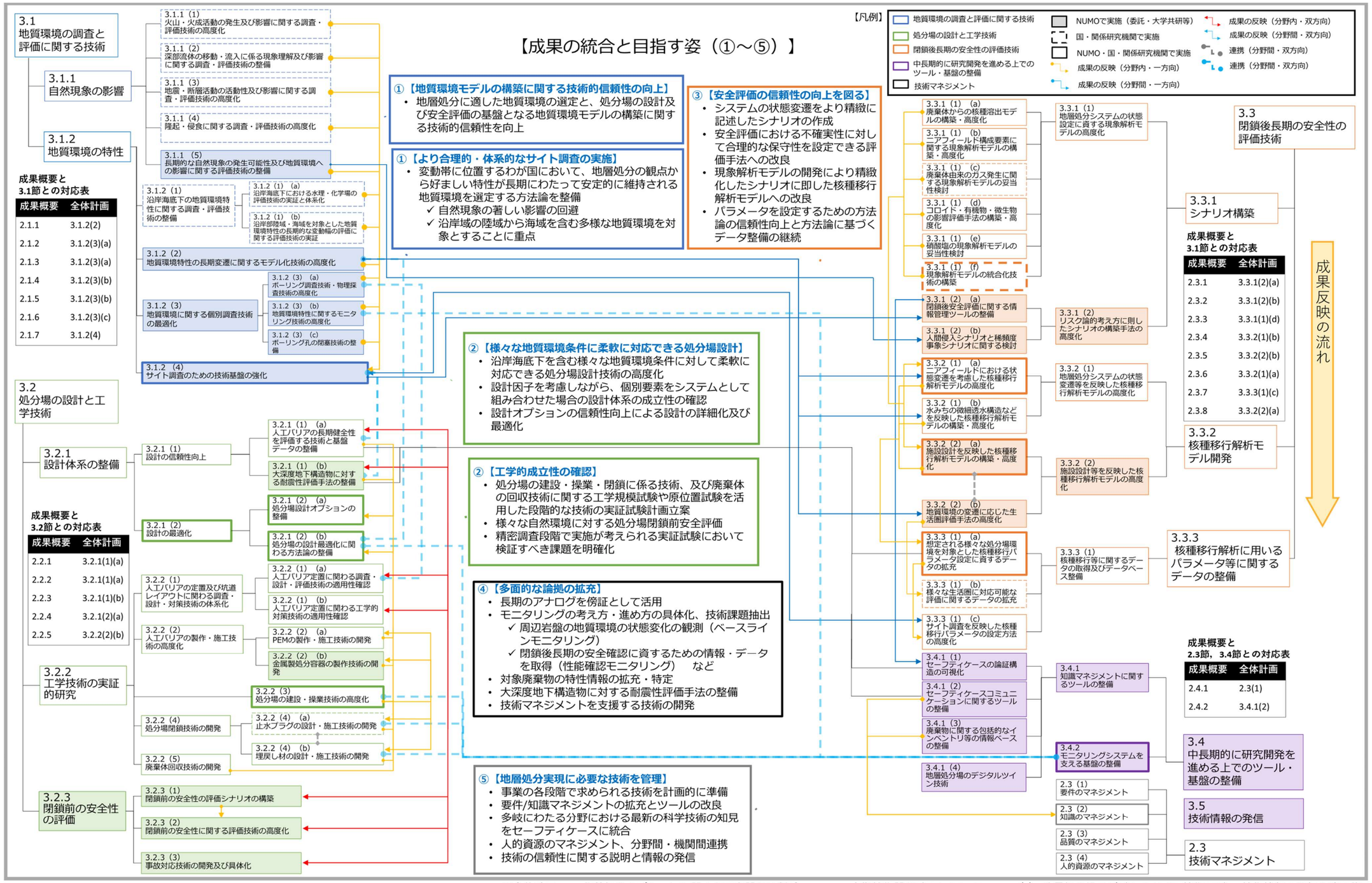
・NWS
Nuclear Waste Services，原子力廃棄物サービス（英国）

・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，廃棄物管理会社（英国）

・SKB
Svensk Kürnbrünslehantering AB，スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（スウェーデン）



※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。　NUMO中期技術開発計画において、3.4.1（4） 地層処分場のデジタルツイン技術及び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の調査と評価に関する技術の信頼性を向上させる観点から，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るとともに，サイト調査を見据えて，地上物理探査，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整備に関する技術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反映させることを目的として，自然現象の発生の可能性とその形態，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整備に向けた実施計画を策定した。長期にわたる地形の変化や気候・海水準変動等に伴う地表から地下深部までの地質環境特性の三次元空間分布とその長期的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，構築したモデルの妥当性確認方法やモデルに内在する不確実性の評価方法に関する検討を実施した（2.1.1 参照）。

地質環境に関わる個別調査技術については，Nagra との共同研究を通じて，各種物理探査手法の適用性やそれらの計画立案，品質管理等に関する最新の技術的知見を収集した（2.1.2 参照）。また，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の計画を策定し，着手した（2.1.3 参照）。個別調査技術のうちモニタリング技術に関しては，地震に伴う断層の変位とその変位が周辺岩盤に及ぼす影響の計測技術と測定されたデータを解析的に評価するためのシミュレーション技術の整備を目的とした LBNL との共同研究において，断層の変位・間隙水圧・地震波等の観測装置による連続観測を継続した（2.1.4 参照）。また，採水を伴わずにボーリング孔内の地下水の水質を測定する装置の開発を目的として，東京大学との共同研究により，レーザー光を用いた地下水水質計測装置の開発に着手した（2.1.5 参照）。国際的に共通の課題となっている，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（旧 RWM））及び Nagra と，協定に基づく国際協力，及び Nagra との共同研究を実施し，閉塞材や金属プラグの原位置性能確認試験を実施した（2.1.6 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を，海外情報を参考にして整理するとともに，データベースシステムの整備計画を具体化した（2.1.7 参照）。

2.1.1　四次元地質環境モデルの構築技術の妥当性確認

尾上 博則　吉田 芙美子　髙畑 祐美　高林 佑灯　三枝 博光

原子力発電環境整備機構

1.　背景・目的

包括的技術報告書においては，日本の代表的な三岩種（深成岩類，新第三紀堆積岩類，先新第三紀堆積岩類）を対象として，地質構造の幾何形状や水理特性などの三次元的な空間分布を表現した地質環境モデルを構築するとともに，構築したモデルに基づき処分場の設計や安全評価を実施した。この一連の検討を通じて，数万年以上の長期間にわたる地層処分システムの安全機能をより現実に即して論ずるためには，水理場や化学場といった地質環境特性の状態変遷を推定するための地質環境モデルの構築技術を整備することが課題として示された。

本技術開発では，地下深部から地質圏－生活圏インターフェイス（Geosphere-Biosphere Interface : 以下，「GBI」という）までの地質環境特性の状態変遷と GBI の時間変化を考慮した処分場の設計や閉鎖後長期の安全評価に資することを目的として，隆起・侵食による長期的な地形変化や気候・海水準変動などに伴う地表から地下深部までの地質環境特性の状態変遷を表現することができる四次元地質環境モデル（三次元空間に時間軸を考慮したモデル）を構築するための方法論に係る検討を進めている（図 1）。これまでに，全国規模で収集した地質環境特性データ（NUMO，2021）を用いて，三岩種がそれぞれ分布する仮想的な場，及び河川水系の変遷を伴う広域的な地形変化や三岩種が混在する地形・地質構造条件を考慮した，より複雑な地質環境を想定した検討を通じて，四次元地質環境モデルの構築技術を整備してきた（尾上，2022；松岡ほか，2022；NUMO，2023）。また，上記の検討を通じて整備した四次元地質環境モデルの構築技術の妥当性を確認することを目的として，事例的な検討対象として体系的な情報やデータが利用可能な地域（以下，「事例検討地域」という）において，蓋然性が高いと考えられる条件で 100 万年程度以前の過去から現在までの地形・地質環境の長期変遷に基づくモデル化・解析を実施した。このモデルを用いた解析結果が事例検討地域で取得されている実測値と整合的であったことから，さらに事例検討を進め信頼性を高めていく必要があるものの，これまでに整備した四次元地質環境モデルの構築技術が地形・地質環境の長期変遷のモデル化に適用可能であることを確認した（NUMO，2024）。

四次元地質環境モデルは，数十 km といった大規模な空間スケール，かつ 100 万年といった長期の時間スケールを考慮する必要があるため，モデルの妥当性を確認するうえでは，そのモデルに設定した地質環境特性に関する不確実性に加えて，その地質環境特性の長期変遷に関わる解釈や仮定など，モデル化における条件設定に関する不確実性をどのように評価するかが重要となる。そのため，2023 年度からは，利用可能な既存の地質環境データを用いた四次元地質環境モデルの妥当性・適用性の確認事例の蓄積，及び四次元地質環境モデルの不確実性を評価するための方法論の整備に関する検討を実施している。

2.　主な成果

本技術開発では，四次元地質環境モデルに内在する不確実性を OECD/NEA（2012）に示された，安全評価における不確実性の分類（シナリオ，モデル及びデータの 3 種類）に区分した。具体的には，「シナリオの不確実性」は地質環境の長期変遷の概念に係る不確実性であり，「モデルの不確実性」は解析モデルの要素分割サイズといった概念の数値化に係る不確実性，「データの不確実性」は物性

値や境界条件などの設定に係る不確実性である。

2023 年度は，四次元地質環境モデルに内在する重要な不確実性要因を抽出するための感度解析を行うために，JAEA（2017）に示された地質環境特性の長期変動のモデル化作業に伴う不確実性とその発生要因の整理結果を参考に，不確実性の区分に応じて四次元地質環境モデルに反映する不確実性要因を整理した（表 1）。このうち，「シナリオの不確実性」である地形変遷の概念については，地下水流動解析結果に大きな影響を与えることが想定される，地形及び地質・地質構造の変動パラメータに着目した。変動パラメータの設定に大きく関わる隆起量あるいは沈降量といった変動の大きさと，その開始時期に関する不確実性要因を考慮して地形・地質構造の長期変遷が異なる 2 つの概念モデルを構築した。また，「データの不確実性」である地表環境の変遷については，既往文献（Spratt and Lisiecki 2016；Lisiecki and Raymo, 2005）に示された海水準変動曲線に基づき，その時期的な変動幅や周期の違いを考慮して，約 100 万年前から現在までの海水準変動パターンを複数設定した（図 2）。

3. 包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書（NUMO，2021）の本編 3.5.2 項に示されているとおり，地質環境特性とその長期変遷に係る今後の取り組みの 1 つとして，地質環境特性の長期変遷モデルを構築する技術の高度化が挙げられている。本技術開発を通じて得られる四次元地質環境モデルの構築技術とその妥当性確認に係る方法論は，処分場の設計及び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，その考え方や手順等に関する包括的技術報告書の更新について適宜検討する。

4. 今後の展開

今後は，2023 年度に整理した不確実性要因（表 1）を考慮した感度解析を実施し，それらの要因が地下水の塩分濃度分布や地下水の移行時間・移行距離といった解析結果に及ぼす影響の程度を把握するとともに，四次元地質環境モデルによる地下水の塩分濃度や地下水年代等の観測値の再現性に関する評価を行う。それらの結果に基づき，地質環境の長期変遷に係る不確実性を評価するための考え方や手順を，四次元地質環境モデルの構築技術として整理するとともに，そのモデルに内在する不確実性の低減に有効なデータや調査項目などに関する技術的知見を整理する。

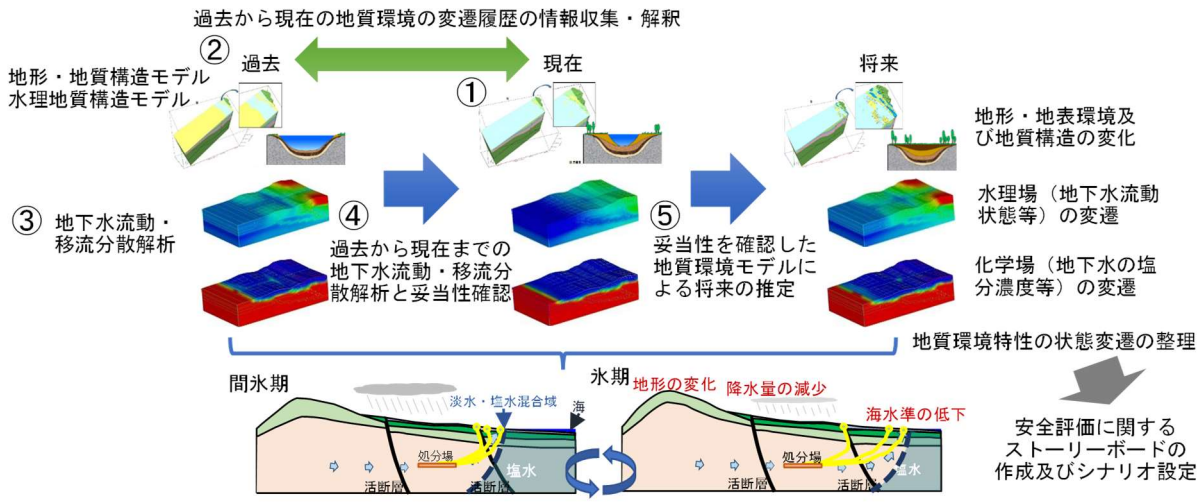


図 1　四次元地質環境モデルの位置付けと構築に係る基本的な考え方

①現在の地質環境特性の情報を収集・解釈し，現在を対象とした地形・地質構造モデル及び水理地質構造モデルを構築，②過去から現在までの地質環境の変遷履歴に係る情報を収集・解釈し，その結果に基づく，過去の代表時間断面を対象とした地形・地質構造モデル及び水理地質構造モデルを構築，③上記①及び②で構築したモデルを用いた飽和－不飽和状態における非定常の三次元地下水流動・移流分散解析（地形の形状や上部境界条件の連続的な変化を考慮した解析）を実施，④上記③の解析結果が地下水の水圧・塩分濃度分布や地下水年代の観測値を再現できていることを確認し，解析に反映した過去から現在までの地質環境の変遷の妥当性を確認，⑤上記④で妥当性が確認された過去から現在までの地質環境の変遷に基づき将来の地質環境の変遷を推定，並びにそれを考慮した地下水流動・移流分散解析により，将来の水理場・化学場の変遷を推定。

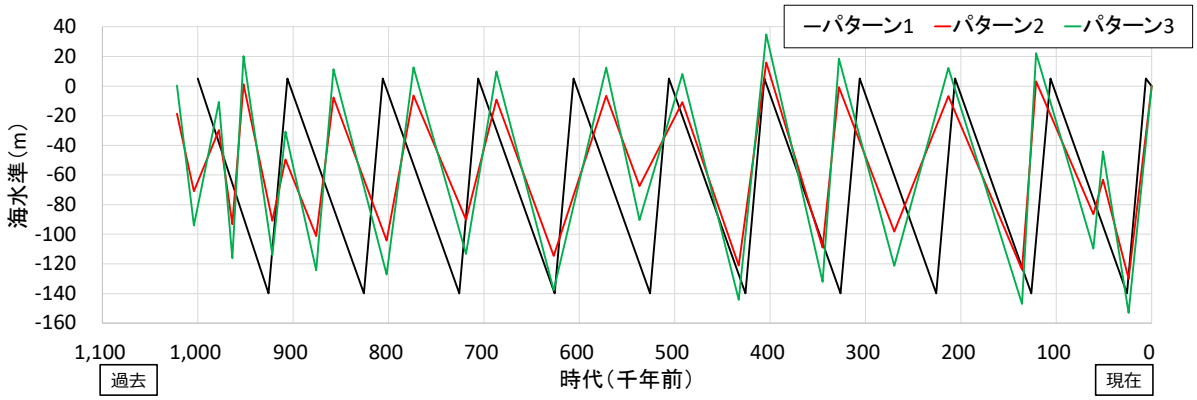


図 2　約 100 万年前から現在までの海水準変動パターン

海水準変動パターンは，Spratt and Lisiecki (2016) 及び Lisiecki and Raymo (2005) に基づき設定。パターン 1：海水準変動曲線を単純化し，一定の海水準の変動幅と周期を設定，パターン 2：海水準変動曲線の時期的な変動幅や周期の違いを反映して設定，パターン 3：パターン 2 の不確実性を考慮し，海水準の変動幅が最も大きくなるように設定

表 1　四次元地質環境モデルに反映する不確実性要因

不確実性の区分	不確実性要因	モデルへの反映方法
シナリオ	地形変遷の概念	山地の発達時期の違い
	地質環境の変遷	古環境（約 100 万年前の地下水の塩分濃度分布）の違い
モデル	数値モデルの離散化	モデル領域の要素分割サイズの違い
データ	水理地質構造の水理特性	断層の透水性の違い
		地層の透水性の違い
	水理地質構造の物質移行特性	地層の分散長の違い
		マトリクス拡散の考慮の有無の違い
	地表環境の変遷	海水準の変動幅や周期の違い
		降雨涵養量の変動幅や周期の違い

参考文献

JAEA(2017) : 平成 28 年度地層処分技術調査等事業　地質環境長期安定性評価確証技術開発　報告書.

Lisiecki, L.E. and Raymo, M.E. (2005)：A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic δ18O records, Paleoceanography, Vol. 20, PA1003.

松岡稔幸，三枝博光，尾上博則，髙畑祐美，高林佑灯 (2022) : 処分場の閉鎖後安全評価のための四次元地質環境モデル構築技術の整備の取り組みについて，日本地球惑星科学連合 2022 年大会，HCG24-P05.

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) (2023)：技術開発成果概要 2021，NUMO-TR-22-02，pp. 5-7.

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，pp. 113-117.

OECD/NEA (2012)：Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, ISBN 978-92-64-99190-3.

尾上博則 (2022)：NUMO における地質環境のモデル化技術の高度化に向けた取組み状況，放射性廃棄物処分技術の最新動向に関する総合シンポジウム，土木学会エネルギー委員会，https://committees.jsce.or.jp/enedobo/node/91（2024 年 7 月 1 日閲覧）.

Spratt, R. M. and Lisiecki, L. E. (2016)：A Late Pleistocene sea level stack, Climate of the Past, Vol. 12, pp. 1079-1092.

2.1.2　物理探査技術に関する知見及び適用事例の収集

松岡 稔幸

原子力発電環境整備機構

1.　背景・目的

概要調査では，サイトの特性を評価するために様々な物理探査手法の適用が想定されることから，各種物理探査手法の適用性やそれらの計画立案，品質管理・品質保証などに関する最新の技術的知見やノウハウを拡充しておくことが必要である。このため，日本と同様に造山帯に位置し複雑な地質構造を有するスイスにおいて長年の研究開発やサイト選定調査などの多くの実務経験を有する Nagra と共同研究を実施し，物理探査手法に関する技術的知見の拡充を図った。具体的には，処分地選定調査において二次元，三次元地震探査を主とした物理探査を通じて，調査計画の立案，データの処理・解釈，品質管理，規制機関からの要請に基づく対応などの豊富な経験を有する Nagra の知見に基づき，NUMO が電中研・横須賀地区で実施した二次元物理探査のデータ処理・解釈（NUMO，2024）の妥当性や Nagra が実施した各種物理探査に関する知見を取得する。

2.　主な成果

(1) NUMO が電中研・横須賀地区で実施した二次元物理探査のデータ処理・解釈の妥当性

NUMO が示した電中研・横須賀地区を対象とした物理探査におけるデータ処理（NUMO，2024）の手順に関して，品質管理・品質保証上主要な部分について，Nagra の実施手順との比較を含めた Nagra の専門家のレビューを実施し，Nagra の実施手順と一致していることを確認できた。さらに，Nagra からの主な知見として，以下を取得し，今後の概要調査等における品質管理・品質保証における重要な着眼点を把握した。

- 電中研・横須賀地区における 3 本の測線は非常に短い。例えば，測線長 500 m に対して半分の 250 m までの深度であればデータを解釈することが可能であるが，それよりも深い深度については信頼性が低いことに留意が必要である。特に東西方向の測線は短く，深度 200 m 以下は解釈が可能なデータが得られていないと推察される。
- 測線長が短いことから，特に上述した深度 250 m よりも深部のマイグレーション（地層の起伏の形状や断層の位置・傾斜の把握をより正確に行うための処理）が適切に実施できていない傾向（マイグレーション処理に特有の半円弧状のイメージ画像）が認められ，深部の地質構造解釈においては注意が必要である。
- データ処理においては，浅部風化層の影響の補正（Static correction）が特に重要であり，補正の妥当性を確認するために，電中研・横須賀地区内で別途沖積層の厚さが取得されている場合は，沖積層の厚さと二次元物理探査のデータ処理結果の整合性確認が推奨される。Nagra におけるデータ処理時の品質管理では，特に浅部風化層の影響の補正を重要視している。

(2) Nagra が実施した物理探査の計画立案，調査の実施，データの処理・解釈

Nagra が実施した物理探査の計画立案，調査の実施，取得したデータ処理・解釈に係る技術的知見及び適用事例に関する情報を取得した。

a) 計画立案

Nagra は，三次元地震探査の実施に先立って，2011 年～2012 年に総測線長 305 km の 20 測線（測

線長数 km～数十 km）の二次元地震探査を実施し，それらの測線は，主要な地質構造の走向・傾斜を考慮しつつ，既存の測線を補完する形（既存の測線と測線の間）で探査測線を設定している。この際，既存の測線は，受振点間隔が 50 m～60 m であるのに対して，Nagra が新たに実施した探査では受振点間隔を 30 m に設定し高解像度化を図った。また，チューリッヒ北東部ではオパリナス粘土の分布深度が 300 m と浅いところに分布していることから，より高密度に受振点間隔を 10 m に設定している。計画立案時には，特に必要な深度の情報が得られる測線長や配置となっているかを確認することが重要である。

Nagra では 2015 年～2017 年に，3 つの候補地（ジュラ東部，北部レゲレン，チューリッヒ北東部）に対して，二次元地震探査では把握することが難しい三次元での詳細な地質構造を把握するために三次元地震探査を実施している。探査の規模は，ジュラ東部で 92.6 km^2，北部レゲレンで 91.2 km^2，チューリッヒ北東部で 63 km^2（データ取得仕様は表 1）であり，探査範囲は，北部と南部の断層帯を包含する形で設定している。三次元地震探査を実施するために 3 つの地域で約 4,000 名の土地所有者と接触し，約 98 %の土地所有者から受振点と発震点の設置の許可を得ている。また，北部レゲレンの探査範囲の一部はドイツ領内であるが，ドイツ連邦政府及び地元自治体の了承が得られたため，探査を実施することができた。三次元地震探査の発震点と受振点の最大オフセット距離は，2 km 程度であり，この距離は，探査対象深度をカバーできることを考慮して設定したものである。

大深度ボーリング孔を利用した地震探査として，ウォークアウェイ VSP 探査を実施している。大深度ボーリング孔は三次元地震探査の測線上もしくは近傍に設定しており，スイスの規制機関（Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate：ENSI）からは，地震探査結果とボーリング調査の地質情報を詳細に対比し，地震探査結果の妥当性が確認できるように，3 つの候補地において，それぞれ最低 1 つのウォークアウェイ VSP 探査を実施することを要求された。ウォークアウェイ VSP 探査の計画策定においては，三次元でのウォークアウェイ VSP 探査の検討も行ったが，ボーリング孔周辺に多くの発破点を必要とするとともに，各発震点における浅部風化層の影響の補正に関する課題があったことから，二次元のウォークアウェイ VSP 探査を実施した。

このほか，Nagra では，第四紀層を対象とした，受振点間隔を 2.5 m，発震点間隔を 2.5 m とした高解像度二次元探査と受振点間隔を 1 m，発震点間隔を 2 m とした超高解像度二次元 S 波探査を実施している。これらの探査は，断層帯の浅部の構造把握，上部風化層の構造把握，氷河による侵食シナリオに係る情報の取得を目的としたものである。

b) 調査の実施

二次元・三次元地震探査及び VSP 探査のデータ取得時の品質管理においては，その後のデータ処理に大きく影響が及ぶことから，毎日の探査開始前における，すべての探査装置（起震車，受振器など）の動作確認が重要である。Nagra におけるデータ取得時の品質管理は，探査の委託先とは別の委託先が実施している。

Nagra の三次元地震探査では，起震車（バイブレータ車）を用いることを基本とし，起震車が入ることができない森林内では発破を利用した。ウォークアウェイ VSP 探査においても発震測線上の発震点を補うために一部で発破を使用している。森林内においては，測線測量時に GPS が正常に稼働しないことがあり，その場合は，GPS が正常に稼働している箇所の間で補完することで対応している。また，北部レゲレンでの測定では，チューリッヒ国際空港への航空機の離着陸ノイズがデータに混入していたことから，発破震源での測定については，航空機の飛行していないタイミングで測定することでデータの品質管理を行っている。

c) データの処理・解釈

データ処理は Nagra からの委託先が実施している。委託先企業によりデータ処理の種類に対する得意・不得意があることから，三次元地震探査のデータ処理では，ポーランドやイスラエルなどの 5 社程度がデータ処理を分担して実施している。このように複数の委託先にまたがる業務では，各社のデータ処理結果を次のデータ処理へ適切に受け渡すことが重要であり，Nagra がその役割を担っている。委託成果報告書では，各社におけるデータ処理の項目と手順及びそこでの結果などを詳細に記載し，他社に引き継ぐことが可能なようにしている。

Nagra では，データ処理の品質確認は外部専門家に依頼し，他の調査結果との整合性や地質学的解釈の妥当性などの確認は Nagra の地質の専門家が実施している。外部専門家は，委託先が実施したデータ処理内容の確認や技術的な検討事項について Nagra へ助言を行っており，Nagra の物理探査の専門家はその助言を踏まえてデータ処理の見直しへ反映している。

三次元地震探査のデータ処理は，2 つのフェーズ（QLP 2016~2017：Quick look processing（速報データ処理），ReP 2019~2021：Refinement processing（詳細データ処理））で実施している。これは，データ処理における品質管理では，浅部風化層の影響の補正が重要であり，QLP では地表近くの補正に課題があったことから，その詳細解析に時間を要するため，2 つのフェーズに区分している。

第四紀層を対象とした高解像度二次元探査と超高解像度二次元 S 波探査は，断層帯の浅部での構造把握に役立った。また，氷河による侵食地形の形状を明らかにでき，その結果は，その後のボーリング調査計画の立案時に役立つものであった。

二次元・三次元地震探査の結果として得られる断面の解釈には，ボーリング孔と対比するため，NUMO が電中研・横須賀地区を対象に実施していることと同様に，音波検層と密度検層から合成地震記録を作成している。この際，音波と密度の検層記録の品質管理が重要であり，ケーシング区間やキャリパー検層による孔壁の凹凸状況と検層記録の対比や検層間の深度のずれについて確認を行っている。合成地震記録は地震探査結果と比較可能な往復走時に変換する必要があるが，Nagra では VSP 探査のチェックショット記録を往復走時に使用している。合成地震記録の往復走時が正しいかどうかの品質管理の方法は，弾性波速度のギャップの大きな地層境界からの反射面が地震探査結果と合成地震記録でずれていないことで確認している。また，合成地震記録による地震探査結果の解釈では，検層の最初と最後（孔口と孔底）の記録や，傾斜した孔データ，地震探査結果の両端付近，断層部は，解釈の信頼性に影響するため，使用を避けている。また，反射面の Multiple（多重反射：地層間で反射を繰り返す偽像）の有無については，数値シミュレーションによる特定が役立っている。

地震探査の結果の垂直分解能から，Nagra による三次元地震探査における断層の検出限界は垂直変位 10 m 程度であった。

地震探査の結果は，3 つの候補地間の比較時における基盤情報として，地質構造，処分場として利用可能な領域の評価に用いられた。

3. 包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書（NUMO，2021）の付属書 3-11（調査技術シート（本文））に記載されている適用事例を本稿で取得した知見や適用事例に基づき適宜更新する。

4. 今後の展開

今後は，取得した調査計画立案やデータ処理・解釈に係る知見に基づき，物理探査に係る一連の手順や品質管理・品質保証のための要求事項を整理し，概要調査開始までに品質管理の体系を構築する。また，引き続き，各種物理探査技術に関する知見及び適用事例の収集を継続する。

表 1　三次元地震探査のデータ取得仕様

探査地域	データ取得仕様
ジュラ東部	受振測線間隔：120 m 受振点間隔：30 m 発震測線間隔：150 m 発震点間隔：30 m 発震点数：222 点/km^2
北部レゲレン	受振測線間隔：150 m～180 m 受振点間隔：30 m 発震測線間隔：210 m 発震点間隔：30 m 発震点数：159 点/km^2
チューリッヒ北東部	受振測線間隔：120 m 受振点間隔：30 m 発震測線間隔：150 m 発震点間隔：30 m 発震点数：222 点/km^2

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－付属書 3-11 調査技術シート（本文），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，pp. 13-19.

2.1.3　ボーリング試験による地質環境データ取得技術の実証

林 隆正　國丸 貴紀

原子力発電環境整備機構

1.　背景・目的

概要調査では，調査対象の地質環境や社会的制約条件などを考慮したうえで物理探査やボーリング調査などの地質環境調査・評価技術を適切に組み合わせ，地下施設の設置場所の選定，地下施設の設計，安全評価などに必要な地質環境データを取得することが重要となる。この概要調査を確実に実施するために，既存の地質環境調査・評価技術の有効性，妥当性，課題などの確認を行うとともに，NUMO が概要調査を的確に行うためのマネジメント能力の向上を図りつつ，国内の次世代技術者の育成を継続的に行う必要がある。

そこで NUMO は，電中研との共同研究として，電中研・横須賀地区において地上物理探査及び大深度ボーリング調査（YDP-1，YDP-2，YDP-3，YDP-a 及び YDP-4）を主体とした実証研究を 2006 年度から 2021 年度にかけて実施した。

この結果，破砕質で脆弱な膨潤性の特徴を有する葉山層群を対象に，従来のボーリング孔の掘削技術と比較して高いコアの回収率を確保し，安定したボーリング孔を掘削できる技術を整備することができた。また，ボーリング孔を利用した物理検層及び水理試験を実施した結果，当該技術を保有する国内の会社により，地層処分事業の観点から要求される品質に対してばらつきが生じることが確認された。加えて，YDP-4 では，葉山層群と比較して硬質な地質で高透水性のある三浦層群が出現しなかったことで，以下の課題が示された。

- 岩盤の応力測定に係る体系的な調査・評価技術の整備
  - 水圧破砕試験については，地盤工学会によりその試験方法が提唱されている（地盤工学会，2020）。しかし，地盤工学会が水圧破砕試験の実施について推奨するボーリング孔の掘削孔径（約 76～96 mm）に対し，NUMO が行うボーリング調査では掘削孔径が 6-1/4 インチ（約 160 mm）と，大孔径のボーリング孔を利用する。このため大孔径のボーリング孔に対応した水圧破砕試験の有効性確認が必要となる。この水圧破砕試験は脆弱な葉山層群には適用できないことから，葉山層群と比較して硬質な三浦層群で実施する必要がある。
    - コア試料による調査・評価技術は，水圧破砕試験のような原位置試験が困難な場合の代替手段になるものであるため，上記の水圧破砕試験の有効性確認とあわせて，コア試料を用いた岩盤の応力測定に係る各種調査・試験方法の有効性，適用性，課題などを確認する必要がある。
- 流体検層に関する評価・解析技術の有効性確認
  - 割れ目が多い地質構造では，ボーリング孔を利用した流体検層による水みちの検出だけでなく，これを応用して割れ目の透水性を推定する解析技術が重要となる。
- 水理試験に関する品質管理やマネジメント方法などの高度化
  - 水理試験装置の課題の抽出や，試験効率及び試験精度の把握，試験データの解析・評価に必要なデータ管理方法などの確認を実施する必要がある。

以上の背景及び目的を考慮して，本件で実施するボーリング試験（YDP-5）では，電中研・横須賀地区において葉山層群と比較して透水性が高く，硬質な地質である三浦層群を対象に，ボーリング孔

を利用した水圧破砕試験及びコアを用いた応力測定の体系的な整備を主な目的として実施する。また，これまでに実施したボーリング孔を利用した物理検層，流体検層，水理試験などで確認された品質管理のばらつきの低減に向けた方法の検討や試験実施者に求められる力量の抽出などを行うとともに，本業務を通じてNUMOが概要調査を的確に行うためのマネジメント能力の向上，及び国内の次世代技術者の育成を行うものである。

本稿では，上記の課題を解決するために策定したボーリング実証試験の計画の概要を示す。

2. 主な成果

上記の課題解決，目標の達成のため，海外のサイト調査の事例や幌延深地層研究計画，これまでの電中研・横須賀地区での大深度ボーリング実証試験における地質環境調査の事例に係る知見や課題などを踏まえて，以下のようにYDP-5のボーリング試験計画を策定した。

- ボーリング孔掘削位置の設定
  - 本業務の目的を達成するためには，三浦層群が分布する場所で実施することが必要不可欠である。YDP-1及びYDP-2では深度20～30 m付近から三浦層群が発達している（図 1）。YDP-3はYDP-1及びYDP-2から約100 mの位置にあるが，沖積層の下位に葉山層群起源の二次堆積物が出現している。以上を踏まえ，葉山層群起源の二次堆積物の分布は想定されず，三浦層群が地表近傍に出現すると推定できる位置として，YDP-5の掘削位置はYDP-1及びYDP-2に隣接する位置とした。
- ボーリング掘削計画の策定（図 2）

想定される地質分布と，本件で適用する各種試験の成立性や品質の確保を考慮したボーリング孔掘削計画を策定した。

  - 選定したボーリング孔掘削位置では，三浦層群とその下位の葉山層群との境界深度が約GL-220 mと推定される。このことを踏まえ，ボーリング孔は，ボーリング孔を利用した試験を考慮した余掘り長を含めてGL-220 mまで掘削する。
  - ボーリング孔掘削は，直径80 mm以上のコアを取得できる掘削孔径で行い，6-1/4インチ（約160 mm）のボーリング孔径で仕上げる。
  - コア回収率100 %を目標とした掘削工法を選択するとともに，安定したボーリング孔に仕上げることを考慮した掘削泥水を選定する。
- ボーリング調査計画の策定
  - ボーリング孔沿いの地質を詳細に把握するために必要なコアの回収作業方法や，コアの写真撮影方法，コア記載方法を定めた。
  - 水圧破砕試験や水理試験の実施深度を選定することを目的とした物理検層の項目を選定するとともに，それらに使用する検層器の仕様を明確にした。具体的には，孔径（キャリパー検層），比抵抗・自然電位検層，密度検層，中性子検層，自然ガンマ線検層，温度検層，音波検層，孔壁画像（比抵抗型及び超音波型）検層 を選定した。
  - 水理試験位置の選定，地下水の流出入点の把握，水みちとなる構造の透水性の推定を行うことを目的に，流体電気伝導度検層及び温度検層を行うこととし，それらに使用する検層器の仕様や作業手順などを明確にした。
  - 水理試験に用いる機器類の仕様や，作業手順などを明確にした。
  - 岩盤の応力測定に係る各種調査・試験方法の有効性・適用性を確認するために，水圧破砕試験に加えて，二重ビットコアリングによる二重解放変形法，コアを用いた室内試験としてASR法

（Anelastic Strain Recovery），DSCA 法（Differential Strain Curve Analysis），DCDA 法（Diametrical Core Deformation Analysis），AE 法（Acoustic Emission），DRA 法（Deformation Rate Analysis），接線ヤング率法，音弾性法（Acoustic Elasticity; Ultrasonic），及びひずみ速度を交互に切り替える圧縮試験（一軸・三軸）を実施することとし，調査・試験方法の有効性，適用性，課題などを確認することとした。

- 岩盤の応力測定に係る各種調査・試験に用いる機器類の仕様や，作業手順などを明確にした。

上記のような計画策定を経て，電中研・横須賀地区におけるボーリング試験（YDP-5）に着手した（2023～2024 年度の 2 か年計画）。なお，このボーリング試験は，電中研との共同研究（2023 年～2025 年の 3 か年計画）として進めている。

2024 年 2 月に現場作業を着手，同年 3 月よりボーリング孔掘削を開始しており，2024 年 3 月までに表層ボーリング（表層～深度 10 m）において，三浦層群の出現を確認している。

3. 包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書（NUMO，2021）の本編 7.2.1 項（ 評価基盤の整備）に示した，自然現象の影響や地質環境特性を把握するための調査・評価技術の体系的な整備，実証試験などを通じた技術の適用性確認とサイトが明らかになった場合に実際に技術を利用するにあたっての留意点の把握に対応するものである。今後，本業務における孔内水圧破砕試験，コア室内試験などから得られる成果は，各調査技術の概要や原理，適用範囲などの最新情報を整理した調査技術シート（付属書 3-11）に反映することを検討する。

4. 今後の展開

2024 年度において，計画に沿ってボーリング孔を掘削し，水理試験，水圧破砕試験及び室内応力試験を始めとした各種試験を実施する（図 2）。各試験の装置や方法の適用性を確認するとともに，試験手法の最適化に資する知見を整理する。

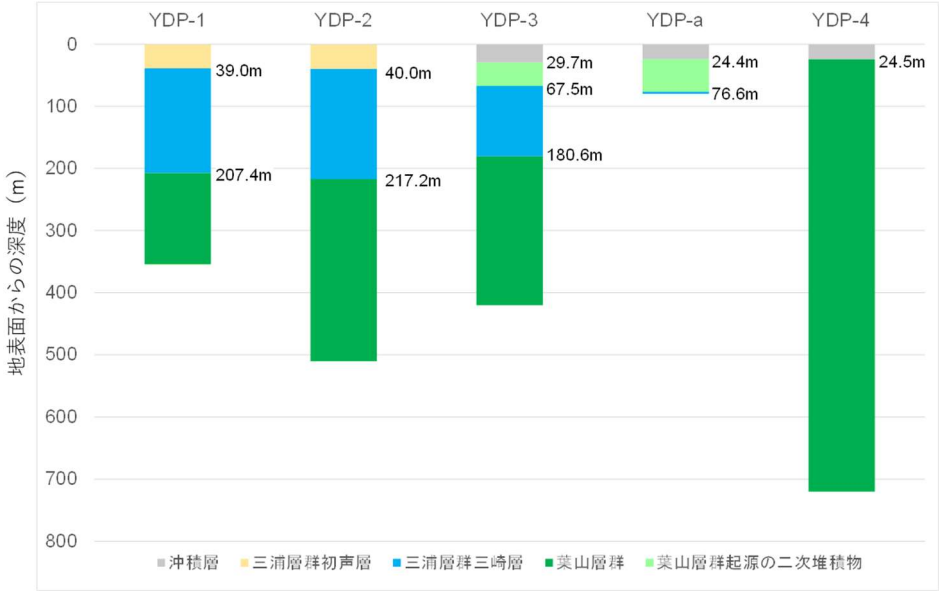


図 1　既存のボーリング孔における地質柱状図及び地層境界の深度

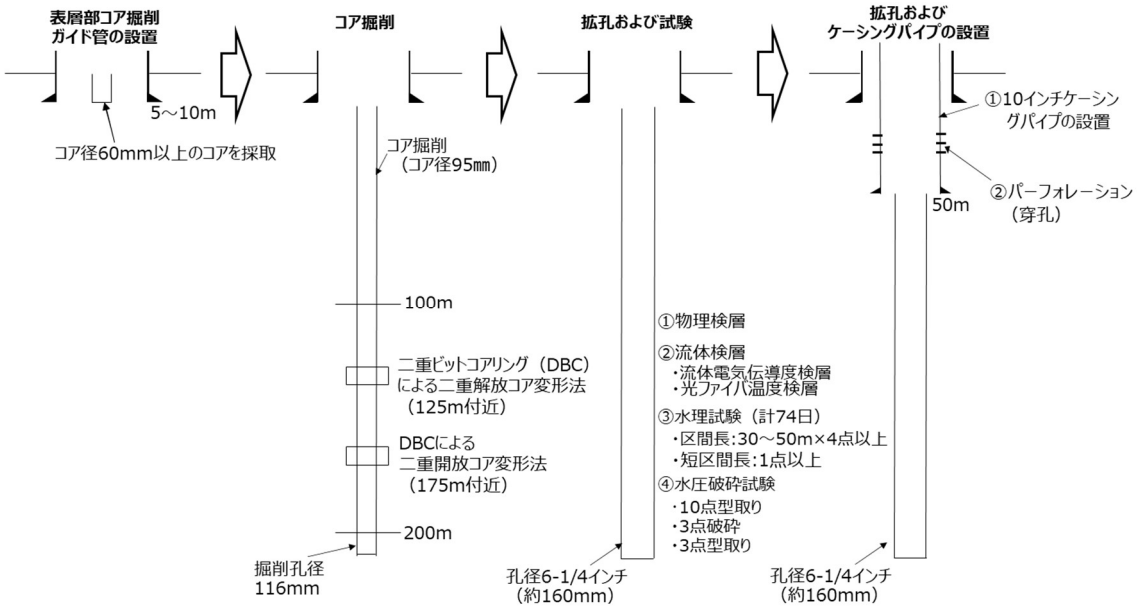


図 2　YDP-5　掘削の手順及びボーリング孔を利用した試験の項目（計画）

参考文献

地盤工学会（2020）：新規制定地盤工学会基準・同解説 水圧破砕法による初期地圧の測定方法（JGS3761-2017）.

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.

2.1.4　断層を対象とした水理・応力場に係る調査・評価技術の構築

吉田 芙美子[1]　國丸 貴紀[1]　Guglielmi Yves[2]

[1]原子力発電環境整備機構，[2]ローレンス・バークレー国立研究所（米国）

1.　背景・目的

地質環境調査や地下施設建設中におけるボーリング孔，地下坑道の掘削時に，活動性が不明瞭な断層に遭遇することが想定される。そのような断層が地震活動等によって活動した場合，地震活動に伴う断層変位や，断層変位が周辺岩盤の水理学的・力学的特性に与える影響を把握することは，安全性や経済性などを考慮した地下施設のレイアウトや工学的対策といった合理的な検討を行ううえで不可欠となる。このため，本共同研究は，断層の変位や，断層及びその周辺における水理学的・力学的特性の変化をモニタリングにより直接観測するとともに，これら水理－力学連成現象を解析的に評価することが可能なシミュレーション技術の整備を行い，処分場閉鎖後の長期的安全性を確保するうえで前提となる閉鎖前地質環境の変動を把握することを目的とする。

NUMO と LBNL は，LBNL が開発している断層の間隙水圧，変位，地震波形などを断層の極近傍で計測可能な SIMFIP（The Step-Rate Injection Method for Fracture In-situ Properties）と呼ばれるモニタリング技術に着目し，上述の目的に応じた改良や，長期観測を見据えた装置の適用性・耐久性の確認を行うための共同研究を 2016 年度から行っている。加えて，地震・断層活動に伴う断層及び断層周辺の地質環境特性の変化を評価するための水理－力学連成解析コード（FLAC3D 及び 3DEC）の改良を理論・数値解析の両面から進めており，モニタリング装置で取得されるデータを利用した水理－力学連成現象に関するシミュレーション技術の高度化及びその妥当性確認を実施している。

2.　主な成果

2023 年度初めから年末にかけ（2023/4/1～2023/12/31），以下の項目に分けて共同研究を実施した。

- タスク 1：プロジェクト管理と計画策定

  本共同研究プロジェクトの協力者（Santa Cruz 大学，USGS：United States Geological Survey，MIT：Massachusetts Institute of Technology など）と協力して複数回の対面会議を通じてタスクを整理した。この中で浅部の地質構造を把握する可能性を考慮し，光ファイバーを用いた弾性波探査（DAS：Distributed Acoustic Sensing）の実施について検討することとした。2023 年 10 月には，NUMO の担当者が LBNL を訪問し，現地のモニタリング装置の現状を確認，また研究内容の進捗及び今後の計画について議論した。

- タスク 2：DORSA（DOwnhole Robotic Stress Analyzer）の適用性・耐久性確認

  2021 年から 2022 年における前フェーズでは，SIMFIP を，クリープ挙動を示す断層の長期観測に耐えられるよう改良した DORSA を開発し，サンアンドレアス断層の断層帯内に設置した。2022 年 10 月以降，DORSA は SIMFIP の観測項目と同様の連続モニタリングを開始し，今フェーズでは，DORSA の有効性，適用性，耐久性を確認するための 2 年間の長期観測に入っている。ここでは，地震波の通過によって引き起こされる断層変位だけでなく，局所的なクリープ現象，気象変化（地表における気温の変化や浅部帯水層の水位変動）によって引き起こされる変位など，さまざまな種類の変位を測定できると期待される。この長期観測から得られるデータセットをタスク 4 のモデリングタスクへ引き渡し，モデル化技術の有効性及び妥当性を確認する。図 1 に，DORSA から約 20 km 離れた位置で発生したマグニチュード 4.4 の地震がサンアンドレアス断層

の変位と水位変化（圧力変化）を引き起こしたときのDORSAによる観測データを示す。

これまでのところ，長期観測は機器の故障等なく遂行されており，断層帯を横切る現在のDORSAの位置は最適であると判断され，2024年1月から少なくとも6か月間は現在位置に維持することとした（図 2）。また，DORSAによる水圧応答測定性能をテストするとともに，さらに断層帯の透水係数を推定するために，揚水試験（水位回復試験）を実施した（図 2，図 3）。その結果，断層帯の透水係数は2×10^{-7}(m/s)，比貯留係数は10^{-4}(1/m)と推定された。この試験は断層帯の透水性の時間変化をモニタリングするために 2 か月ごとに繰り返され，最終的にはそれらをDORSAで測定された断層変位と関連付けることとしている。

- タスク3：原位置試験

原位置試験の目的は，(i) 活断層あるいは非活断層に対する機器応答の違いを比較すること，(ii) 応力の臨界状態に近い断層の動的トリガーを調査すること，及び (iii) 本研究で開発された新しいアプローチを，断層の基本的な挙動に関して同じ分野で実施されている他の多数の既往研究と比較することである。原位置試験の実施内容には月一回行われるDORSAのメンテナンス作業も含まれる。2023年12月末にDORSAクランプシステムに異常（収縮）が発生し，2024年1月初めに修復された。この収縮の要因は，地表のクランプ用圧力ラインにリークが生じたことによるものである。

2023年度は，DORSAの設置現場近くの道路に生じている変形を測定する手法を開発した。この道路はDORSAの設置されている断層の表層位置に当たるため，道路変形の時間的変化は，深度68 mにおけるDORSAの観測値と比較することができる。この測定を毎月繰り返し，変形の定量値を取得する。

2023年12月には米国のNeubrex社と協力し光ファイバーひずみ測定装置を導入した。この装置による観測データを簡易処理した結果，歪みが生じている位置は地質から観測される断層の位置と一致する可能性があることがわかった。最も明白な歪み変化は，サンアンドレアス断層と最も接近しているNW1孔の底部で見られた。観測データのより高度な処理を進めており，DORSAの変位測定の結果と比較される予定である。

DORSAで検出された地震現象と主な水理学的現象の類似性は常に記録されており，2023年度にはDORSA信号をUSGSで検出された地震に自動的に関連付けるよう一連のワークフローを作成した。2024年1月には，局所的な気象データを取得するため気象観測所を敷地内に設置した。

- タスク4：水理－力学連成現象に関するシミュレーション技術の高度化

このタスクでは，タスク3で得られるサンアンドレアス断層での原位置観測データを使用して，断層の水理－力学連成現象をモデル化する。ここでは，広域スケールの水理モデル（50 kmスケール），小スケールの詳細な水理－力学連成現象のモデル（250 mスケール），中間規模の簡易的な多孔質媒体の動的な弾性モデル（10 kmスケール）を使った数値解析の三段階のアプローチをとる。

2023年度は原位置を含む10 kmスケールにおける断層帯構造と応力変動の3次元モデルの作成を開始した。この3次元モデルを基に，検出された地震とDORSAの間の方向/距離，DORSAの設置されている断層と地震波との角度を推定した。さらに，USGSの検出記録にはあるがDORSAでは検出されていない地震を比較・検討した。

また，DORSA観測値を使用して，小規模スケールで断層の水理－力学応答の物理をモデル化する。2023年4月に発生した地震により引き起こされたDORSAの変位と間隙水圧変化の解析を始め，さらに3DECコードを使用した250 m×250 m×250 mの局所的な断層モデルの構築を開始

した。

3. 包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書（NUMO，2021）の本編 7.2.3 項（本報告書で示したセーフティケースの目的に対する適合性）で記載しているモニタリング技術開発の必要性に基づき，本課題は進めている。2. で示した成果や今後得られる成果も見込んで，事業期間全体を見据えたモニタリングの考え方と進め方を具体化し，包括的技術報告書へ追記することを検討する。

4. 今後の展開

タスク 1～5 について，今後の展開を以下に示す。

- タスク 1：プロジェクト管理と計画策定

  2023 年度の成果について報告書を作成する。定期的な会議を通じて本共同研究に参画する専門家間での情報共有及び工程管理などを継続する。

- タスク 2：DORSA の適用性・耐久性確認

  数カ月単位の短期計画では，2024 年 2 月に新たな水位回復試験を実施する。年単位の長期計画では，DORSA の改善に着手する。具体的には，室内試験でテストされた DORSA の性能と比較するため，原位置における DORSA の性能に関する統計分析に焦点を当てる。また，現在のところ不安定に見える DORSA クランプシステムの長期安定性の改善を図る。

- タスク 3：原位置試験

  2023 年度の実施内容を継続する。データ処理を行い，DORSA に記録された主要な地震事象を定義・分離する。シミュレーションに関するタスク 4 に使用できるよう，主要な検出地震のデータファイルのフォーマット化を行う。また，地震発生後の受動モニタリングではなく，事象が発生した場合にデータを能動的に取得可能なモニタリングの機構について，その実現可能性を検討する。

- タスク 4：水理－力学連成現象に関するシミュレーション技術の高度化

  地質環境モデルの感度解析を実施・継続する。具体的には，250 m スケールモデルを用いた水理－力学連成解析を継続する。さらに，広域スケールにおける水理－力学解析のため 50 km スケールモデルの構築を開始する。

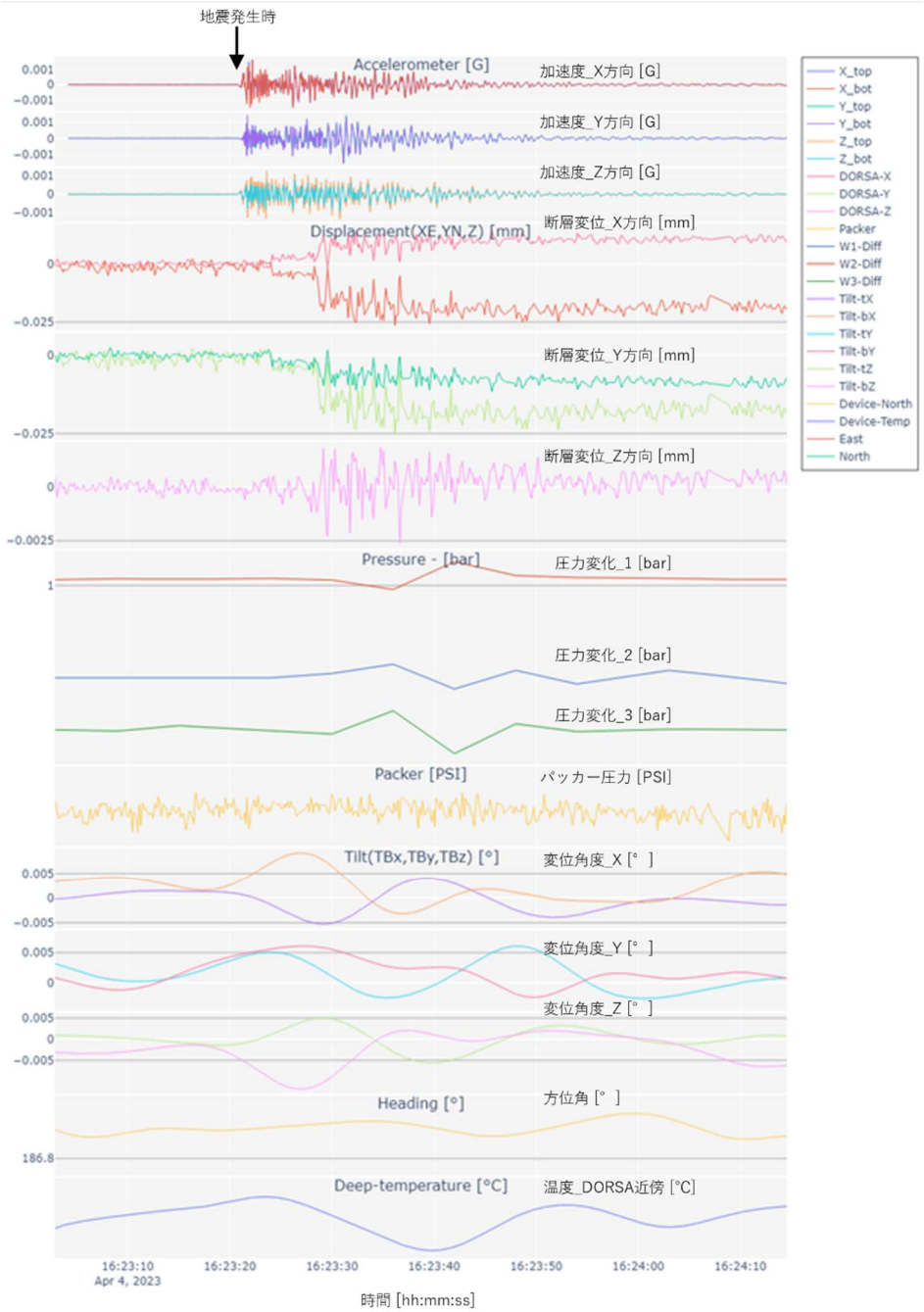


図 1　2023 年 4 月に発生した地震時の DORSA による観測データの例

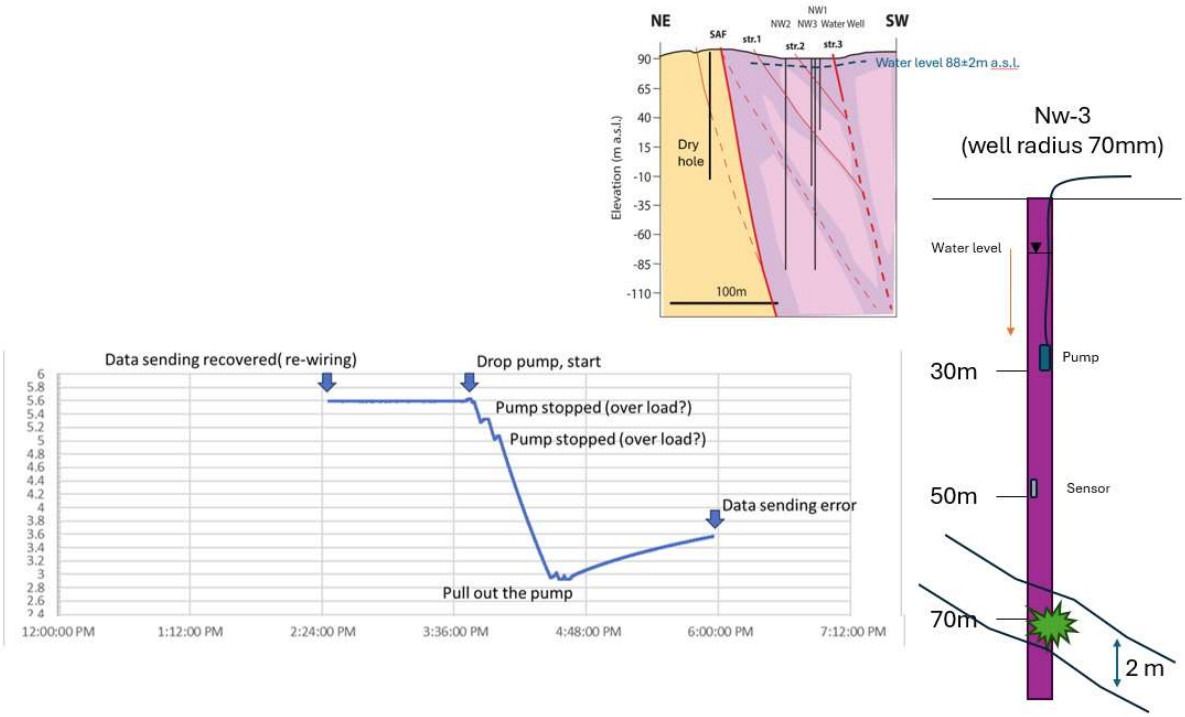


図 2　DORSA 設置位置（上及び右：NW3 孔の深度 68 m）と断層帯の透水係数を推定するために NW3 孔で実施された揚水試験の例（左）

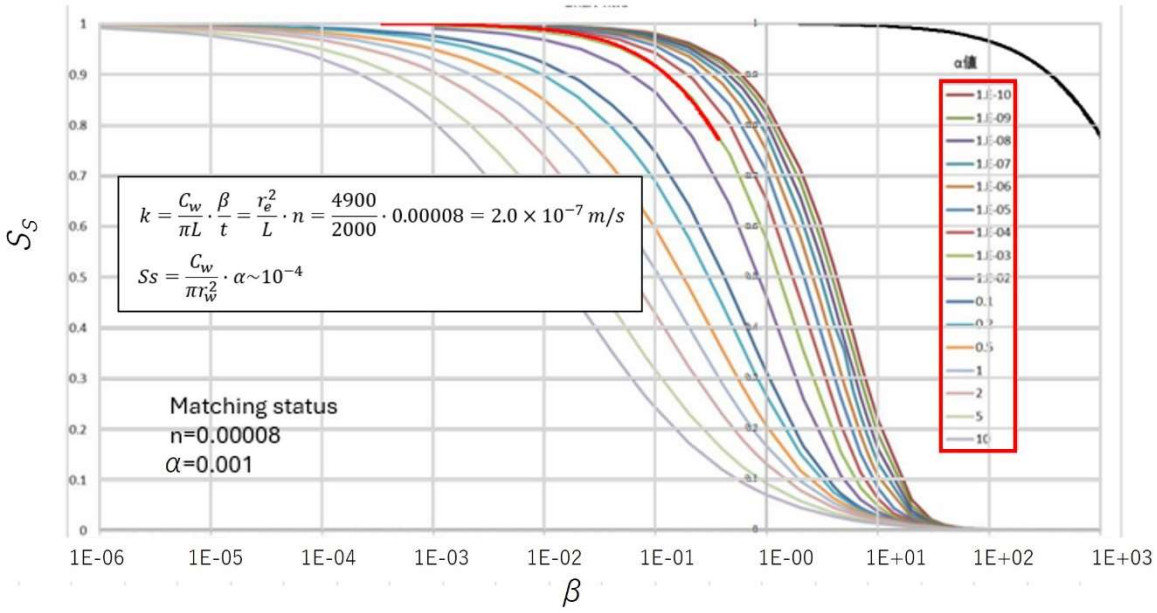


図 3　水位回復曲線（赤線）と理論曲線のフィッティングから推定された断層の透水係数
透水係数の算定に必要な係数 α と n を実測値と理論曲線とをフィッティングすることによって求め，これらの係数を用いて透水係数と比貯留係数を導出

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.

2.1.5　レーザー光を用いた地下水水質計測装置の開発

吉田 芙美子[1]　國丸 貴紀[1]　寺林 稜平[2]　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

地層処分事業において，地下水の水圧，水質，温度等をモニタリングすることは，処分場建設前の自然状態における地質環境を把握し，地下施設建設等に伴うこれらの変化を把握するうえで重要である。従来，地下水の水質分析（一般水質，同位体比，溶存ガスなど）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手法が一般的であった。そのため，地下水を採水することなくボーリング孔内やその近傍で直接分析することができれば，地下水を採水する時間，水圧変化や大気などによる地下水水質への影響の低減，及び水圧や水質の連続的な変化の把握等が可能となり，コストの削減やデータの信頼性の向上に寄与できると考えられる。

また，処分した放射性廃棄物に含まれる核種（例えば，地下環境で移動性が高い ^{129}I や ^{14}C 等）を本技術により測定できれば，処分場閉鎖後の閉じ込め性能の状況を確認することが可能となると期待される。本共同研究は，東京大学との共同研究として地下水中に含まれる特定の放射性核種の濃度を，地下水試料を地上で採水することなく，ボーリング孔内（原位置）で動作可能な可搬型の同位体分析モニタリングシステムを整備することを最終目標として実施するものである。

2022 年度の東京大学との共同研究では，地下水中からの分離の容易さ，レーザー吸収分光による測定可能性等の観点から，メタンガスをターゲット分子として選定し，安定メタン同位体分子種（$^{12}CH_4$・$^{13}CH_4$）について共振器強化型レーザー吸収分光法（Cavity ringdown spectroscopy: 以下「CRDS」という）を用いて測定する分光システムを開発した（Terabayashi et al.，2024）。この研究開発により，地下数百メートルの厳環境下（地下水中での計測，高水圧条件，高温条件）における測定性能評価と装置製作・改良までを実施できる見通しを得た。

これらを踏まえて 2023～2025 年度は，高レベル放射性廃棄物の処分において重要な（モニタリング対象と考えられる）核種の一つであるヨウ素核種，あるいは塩素系同位体分子測定のための装置開発を目的として，メタンガス分析装置開発で得られた知見を基に，新規の装置開発と厳環境下に対応できる装置改良に取り組む。具体的には各年度に分けて図 1 に示した研究を実施する。

2.　主な成果

2023 年度は，以下の三つのテーマを設定し研究を実施した。

①　装置小型化に関する検討

2022 年度に構築したメタンガス安定同位体分析装置を基に，その基幹部である光共振器セルをボーリング孔内に挿入が可能な程度にまで小型化することを目指した。このため，まずボーリング孔内に設置する他のモニタリング装置との組み合わせを考慮し，地下 1,000 m 程度の環境下でも動作できる耐圧性容器に格納できるよう，格納容器の大きさは内径 ϕ35～40 mm，外径 ϕ50 mm を仕様条件に設定した。長さ方向（深度方向）には裕度があるため，1～5 m を想定した。

設計した小型セルの概要を図 2 に示す。また，基幹部である光共振器用ミラー保持チャンバー部の概要を図 3 に示す。光共振器部セルは外径 ϕ38 mm の円筒状ミラー保持チャンバー一対と外径 3/8 インチのステンレス製配管（外径 ϕ9.53 mm）で構成され，共振器長約 1 m である。共振器長を長くすると検出感度が上がるため，今後の必要に応じて，中央のステンレス配管等を変更する

ことにより共振器長を変更できるように設計した。また，高温環境下を想定し，熱膨張による共振器長の変化を抑制するために低熱膨張金属材料であるインバーを用いた 4 本のロッドを配管と平行に配置した。本設計と共振器を構成するミラーマウントの自作により，最大外径φ38 mm を達成でき，内径φ40 mm の耐圧容器内に格納できる見通しを得た。

② ヨウ素/塩素放射性核種分析に向けた分子種・吸収遷移の検討

本研究では，半導体レーザー光源・光学素子の入手性と光学調整のしやすさの観点から，ヨウ素分子（I_2）を測定対象と決定し，既往研究を踏まえて，特に 600～700 nm をターゲット波長と選定した。この波長帯のヨウ素分子吸収は，レーザー工学においてレーザーの絶対周波数参照として広く利用・研究されており（例えば Gläser, M.，1986），その吸収線位置についてはデータベース化が進められている。一方，その相対吸収強度についての情報は十分でないことが分かり，放射性核種を含むヨウ素分子の吸収については，2024 年度以降の分光実験結果と計算による予測を組み合わせて，600～700 nm の広波長域から，より狭範囲のターゲット波長を選定する必要のあることが明らかとなった。

そのため放射性ヨウ素を含む I_2 分析に向け，600～700 nm 帯で CRDS 装置の構築を行うための要素部品の調達・準備を行った。CRDS 装置の構成部分は（a）分光用レーザー光源，(b）光共振器とガスセル，(c）レーザー輸送系，(d）光スイッチと信号処理系，(e）試料導入系に分けられる。このうち，特に（a)，(b)，(d）について 2024 年度の実験に先立って準備を進めた。(c）については 2024 年度以降の実験に合わせて構築を進める予定である。(e）については③に記述する。

③ 地下水試料の前処理系に関する検討

②の結果を受けて，地下水中からターゲット核種（ヨウ素）を取り出す方法として，対象分子に変換した後に，吸収分光装置に導入するための前処理方法について検討した。I_2 を CRDS によって測定するためには，溶液中（地下水中）のヨウ素イオンを酸化して I_2 として取り出す必要がある。酸化法としては塩素ガス，次亜塩素酸ナトリウム，塩酸，硝酸などを用いる方法があるが，これらは刺激性のガスなどが発生する可能性がある。そこで，刺激性のガスが発生しない，希硫酸を用いた電気分解による酸化法を用いて，NaI 溶液から I_2 溶液を調製する方法による予備実験を行った。

また，水中からターゲットとなるヨウ素分子を取り出す方法も併せて検討した。2022 年度のメタンガスを対象とした分析については疎水性メンブレンフィルターを採用・検討したが，ヨウ素の場合，プラスチック等への吸着及び酸化作用があるため，疎水性メンブレンフィルターを用いることは適切ではないと考えられる。そこで，溶液からヨウ素分子を分離，固体として取り出し，さらに気体として CRDS によって測定するため，ガラス製の器具を用いた凍結・真空移動法を考案し，電気分解と凍結乾燥を組み合わせた方法を提案した。さらに，ガラス製の凍結・真空移動装置を設計・製作した。

3. 包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書（NUMO，2021）の本編（7.2.3 項）で記載しているモニタリング技術開発の必要性に基づき，本課題は進めている。2. に示した成果や今後得られる成果も見込んで，事業期間全体を見据えたモニタリングの考え方と進め方を具体化し，包括的技術報告書へ追記することを検討する。

4. 今後の展開

今年度の成果をもとに，研究期間 2 年目である 2024 年度は以下を実施する。

① 小型化セルを使った高温環境下での動作試験：地下深度の高温・高圧環境を想定し，2. の①で

構築した小型光共振器セルの温度を 80℃程度まで上昇させてその動作確認を行い，必要に応じて装置の改良を実施する。

② ヨウ素放射性核種分析に向けたレーザー吸収分光装置の構築：ヨウ素放射性核種を含む対象分子の分析を念頭としたレーザー吸収分光装置を構築する。また，その動作確認を行う。

③ 溶液試料前処理系の構築：2023 年度の検討をもとに，水中からヨウ素分子を取り出す試料前処理系の構築を行う。

	2023 年度	2024 年度	2025 年度
装置小型化等の検討			
1-1 小型化	→		
2-1 高温動作試験		→	
レーザー分光装置の構築と性能評価			
1-2 対象分子・ターゲット吸収検討	→		
2-2 吸収分光装置開発		→	
3-1 安定同位体標準試料分析実証			→
溶液試料前処理系の開発			
1-3 前処理法の検討	→		
2-3 溶液試料の前処理系の構築		→	
3-2 溶液試料中安定同位体測定実証			→

図 1　研究計画

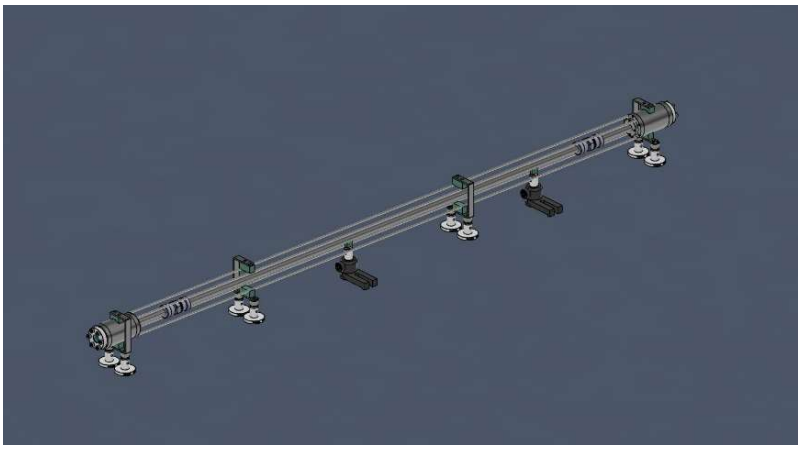


図 2　小型光共振器セル外観

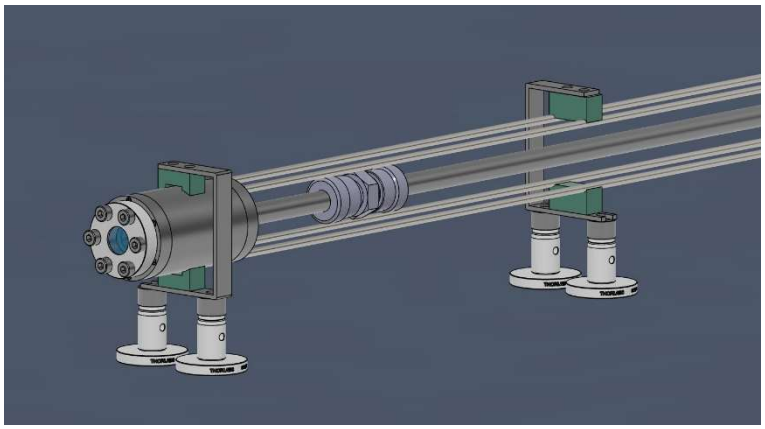


図 3　光共振器用ミラー保持チャンバー部

参考文献

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 Instruments, 95, 043005.

Gläser, M. (1986)：An Improved He-Ne Laser at λ = 612 nm, Stabilized by Means of an External Absorption Cell, Metrologia, 23, 45.

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.

2.1.6　ボーリング孔閉塞技術に係る技術開発

大城 遥一　西尾 光　國丸 貴紀

原子力発電環境整備機構

1.　背景

近年，SKB 及び Posiva では，サイト調査において地上から掘削したボーリング孔の一部が処分場地下施設の建設領域に近接することから，ボーリング孔が地下水や核種などの短絡経路となる可能性があり，これらのボーリング孔を確実に閉塞することが，事業を進めるうえで喫緊の課題となっている。また，これらのボーリング孔は，閉鎖後長期の安全性の観点での影響だけでなく，サイト調査中に掘削したボーリング孔が異なる水理特性を有する地質構造を連結させ，地下水流動場に影響を及ぼすことなども想定され，サイト調査の早い段階からボーリング孔の閉塞技術が必要となる可能性が指摘されている。

このような背景から SKB 及び Posiva に加え，現在サイト調査を実施中の Nagra やこれからサイト調査を開始する NWS などにおいても，SKB 及び Posiva が検討してきたベントナイト，セメント，礫や砂などの閉塞材をサンドイッチ状に設置する概念（図 1）に基づき，ベントナイト，セメント系材料，金属製プラグ（ブリッジプラグ）などを利用した体系的な閉塞技術の整備を進めている。特に，閉塞材をボーリング孔の深部に運搬して設置する技術，ボーリング孔周辺のダメージゾーンの閉塞や閉塞材の設置区間の確実な設定のためのブリッジプラグの設置技術，ボーリング孔を確実に閉塞したことを示すための品質管理・保証の方法などの検討を進めている。

2.　目的及び実施内容

国際的に合意が得られつつあるボーリング孔の閉塞方法の概念（図 1）に基づき，本技術開発は，NUMO が今後実施する様々なボーリング調査後に，掘削されたボーリング孔を確実に閉塞する技術を整備することを目的として実施するものである。具体的には，閉塞材として検討してきた国産のベントナイトペレット（クニゲル V1）を対象に，グリムゼル岩盤試験場においてボーリング孔を利用した性能確認試験を行い，閉塞材としての有効性を確認するとともに，ブリッジプラグの設置ツールの設計及び試作と性能確認試験を実施するものである。

3.　主な成果

(1) グリムゼル岩盤試験場におけるベントナイトペレットの性能確認試験

グリムゼル岩盤試験場には，上下に掘削された二つの坑道（トンネル）をつなぐように 2 本のボーリング孔（SET1 及び SET2）が掘削されており（図 2，図 3），これらのボーリング孔は，上下両端からパッカーや試験機器などが設置でき，かつ様々な試験条件の設定が可能なボーリング孔となっている。また，SET1 は垂直なボーリング孔で，深さ 11 m，直径 162 mm である。SET2 も同様に垂直なボーリング孔で，深さ 4.2 m までは直径 162 mm，それ以深は直径 86 mm となっている。

これらの既存のボーリング孔を利用したベントナイトペレットの性能確認試験の開始前に，ベントナイトペレットの設置予定区間における岩盤の透水性を把握するために，水理試験を実施した。その結果 SET1 では透水係数が 1.4×10^{-12} m/s，SET2 では 4.9×10^{-12} m/s であった。

その後，これら 2 本のボーリング孔に，両端をパッカーで閉鎖した一定の体積内に，ベントナイトペレットの形状を考慮して最大の充填密度となるように，異なる 4 種類のサイズのベントナイト

ペレットを充填した。それぞれのボーリング孔に設置したベントナイトペレットの乾燥密度は，SET1 では 1.21 Mg/m^3，SET2 では 1.15 Mg/m^3 であった。また，2 本のボーリング孔のうち 1 本には，電熱線と光ファイバー温度センサを設置し，閉塞材の熱伝導率からベントナイトペレットの飽和過程における飽和度の変遷を確認することとした。

ベントナイトペレット設置後，閉塞材内部に空気が入らないように水で満たしたうえで，上部パッカーを膨張させ，ベントナイトペレットの飽和過程のモニタリングを実施した（図 4）。モニタリング期間は約 1 年半であり，光ファイバー温度センサによる熱伝導率のモニタリングデータから，この期間において，ベントナイトペレットが十分に飽和したことが確認できたことから，光ファイバー温度センサなどを設置していないボーリング孔におけるベントナイトペレットも同様に飽和していると判断した。

ベントナイトペレットが飽和したことを確認した後，閉塞区間の透水性を把握するために水理試験を実施した。水理試験では，閉塞区間の下側から注水し，閉塞区間の水圧変化やそれを通過した水圧応答の有無を測定した。その結果，SET1 の閉塞区間の透水係数は 2.1×10^{-12} m/s，SET2 では 5.2×10^{-12} m/s であった。また，閉塞区間を通過する水圧応答は観測されず，閉塞材の透水性は周辺岩盤よりも小さいことが明らかとなった。

⑵ ブリッジプラグ設置方法に関する実規模試験

ブリッジプラグは，閉塞材（ベントナイトペレットやセメント系材料など）を所定の深度に設置し，閉塞材を設置する区間体積を設定するために利用するとともに，ボーリング孔掘削時にその周辺に生じるダメージゾーンの連続性を遮断するためのものである。このためブリッジプラグは，ボーリング孔の地下深部において，確実にボーリング孔の孔壁に圧着する必要がある。

ブリッジプラグの技術開発について，NUMO は，Nagra 及び NWS との放射性廃棄物処分分野におけるサイト調査用ボーリング孔の閉塞のための技術開発に関する情報交換及び共同研究についての協力協定に基づき，ブリッジプラグの技術開発を先行かつ独自で進めている NWS の知見を踏まえ，NUMO 及び Nagra との共同研究としてブリッジプラグの開発を実施することとした。

ブリッジプラグに利用する金属材料については，銅合金の中では強度が低いものの，ボーリング孔内で想定される圧力には十分耐えることができる無酸素リン合金銅を選定した。無酸素リン合金銅は強度が低いため，ブリッジプラグをボーリング孔へ設置する際に変形が生じやすく，よりボーリング孔の孔壁の凹凸に沿って圧着させることができるというメリットを有している。さらに，銅については，地層処分事業での利用を考慮して腐食性能が十分検証されており，耐腐食性の観点からも有効な材料であると判断した。

本試験で構築したブリッジプラグの設置方法は，薄型の銅製の円筒チューブを軸方向に圧力を与えることにより，蛇腹状につぶれることによって軸方向のエネルギーを吸収してチューブが変形し，チューブの直径が増加して孔壁に圧着するものである。

製造したブリッジプラグ（図 5）と設置ツールの試験を実施した。試験は水平位置でボーリング孔を模した内径 159 mm の鋼管を用いて実施した。ブリッジプラグは当初の想定の通り変形したが，ブリッジプラグから設置用のツールを取り外すことができなかった。これは設置ツールの強度不足により一部の部品に変形が生じたことが原因であることが判明した。これにより，一部部品の素材変更を行うとともに荷重の伝達を改善するために部品の位置の調整を行うなどして最終設計に反映させた。

4.　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）に記載した課題である。今後，上記の検討結果を踏まえてボーリング孔の閉塞技術について付属書等としてまとめることを検討する。

5.　今後の展開

これまでの検討により，ベントナイトペレット（クニゲルV1），セメント系材料，ブリッジプラグなどを用いてボーリング孔を確実に閉塞できる見通しが得られた。今後は，閉塞材とその運搬装置であるダンプベイラー及びブリッジプラグとその設置ツールについて，ボーリング孔を利用した実規模の実証試験を実施することによって，体系的なボーリング孔閉塞技術を構築する予定である。

一方で，閉塞材であるベントナイトペレットについては，地下水との接触による膨潤により閉塞材の運搬装置（ダンプベイラー）からの発出不良となるおそれがある。これへの対応として，ベントナイトペレットの膨潤開始を数時間程度抑制するための膨潤抑制剤の選定，及び膨潤抑制剤をコーティングしたペレットの性能確認試験を実施しており，上記の実規模試験に反映させる予定である。

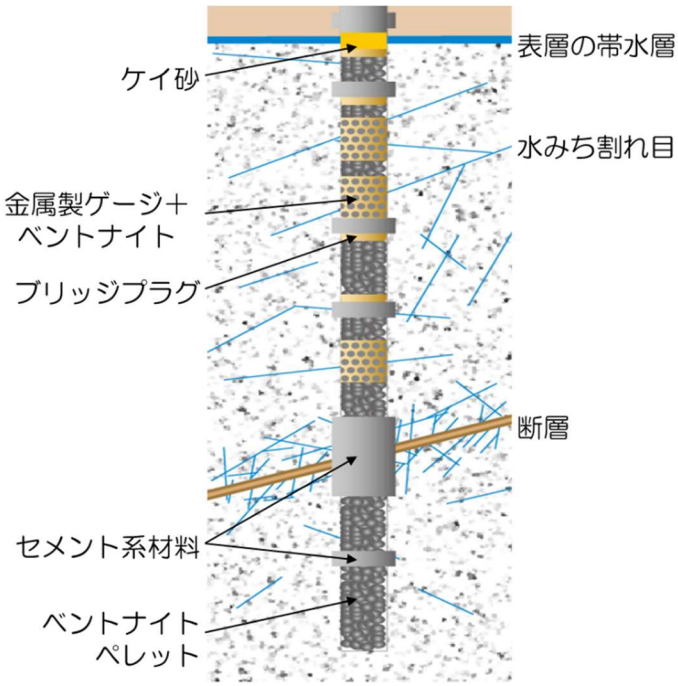


図 1　閉塞材をサンドイッチ状に設置してボーリング孔を閉塞する方法概念図（(SKB，2010）を基に作成）

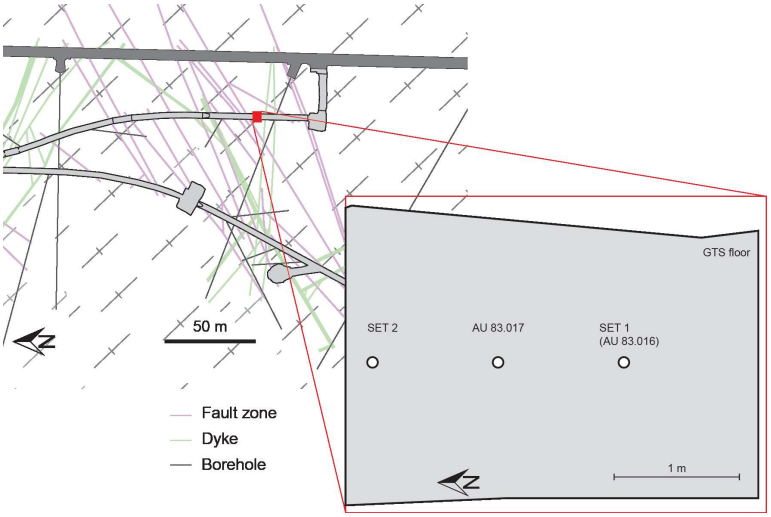


図 2　SET1 及び SET2 の位置（水平断面図）

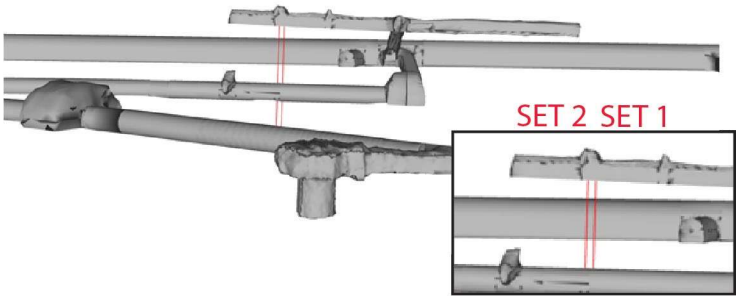


図 3　SET1 及び SET2 の位置（立体図）

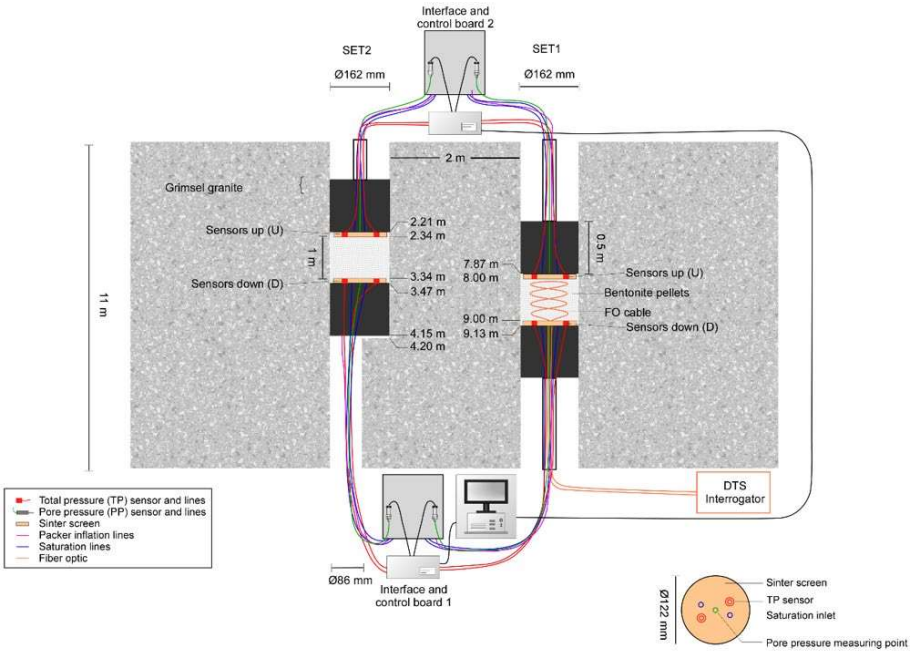


図 4　閉塞材・モニタリング機器設置概念図

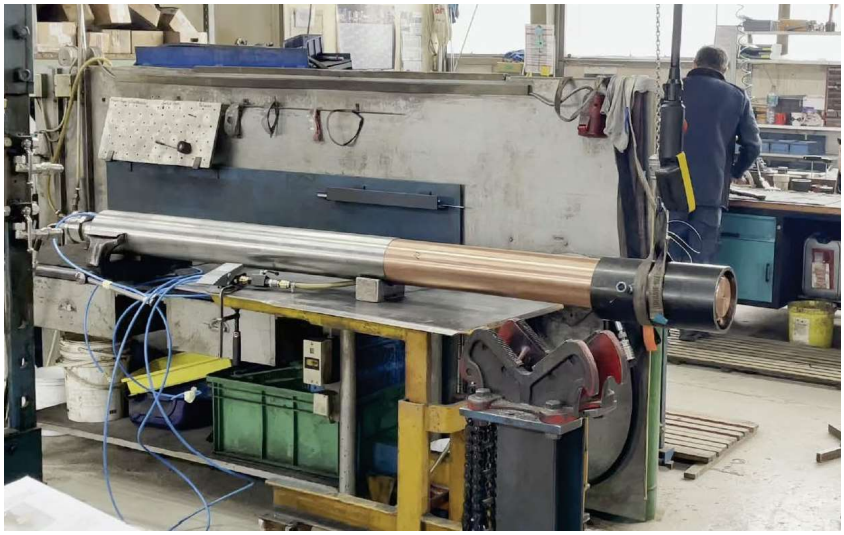


図 5　ブリッジプラグ性能確認試験状況

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.

SKB (2010)：Fud-program 2010, ISSN 1104-8395, September 2010.

2.1.7　サイト調査におけるデータ管理方法に関する検討

西尾 光　大城 遥一

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を評価するために，各種の調査・試験を実施する。具体的には，地表踏査，物理探査，ボーリング調査，室内試験に加えて地下調査施設で調査を実施し，様々なデータを取得する。また，これらのデータを用いた地質環境モデルの構築結果も併せて蓄積する。これらの調査結果やモデルの構築結果などのデータは，長期間にわたる事業期間中，保存することが求められている（原子力規制委員会，2022）。

データを管理するうえでは，データの管理方法を整理するとともに，データを透明性，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ためのデータマネジメントシステム（以下，「システム」という）を設計・構築する必要がある。このシステムは，データの作成者とそのユーザーがデータの登録，保存，表示を容易に実施できる機能とともに，適切なアクセス権限の設定による保護策を講じることができる機能を整備しておく必要がある（IAEA, 2023）。また，長期間にわたりデータを検索可能にし，利用するためには適切なメタデータを付与することが重要となっている（OECD/NEA，2018）。

そのため，NUMO では継続的にサイト調査におけるデータ管理方法に関する情報収集とその結果に基づく管理方法の整理に関する検討を進めている。2023 年度は既にサイト調査を実施している SKB 及び Nagra におけるデータ管理方法や運用・開発中のシステムについての情報を収集した。また，SKB とは今後の NUMO のサイト調査におけるデータ管理手法やシステム化について議論を実施し，それらの結果を踏まえて，NUMO におけるシステムの整備計画をより具体化した。

2.　主な成果

2.1　SKB 及び Nagra におけるデータ管理手法や運用・開発中のシステムに係る情報の収集

SKB 及び Nagra へのヒアリングを実施し，データ管理手法や運用・開発中のシステムに係る情報を収集した。両機関から収集した主な情報を以下にまとめる。

- ボーリング調査結果やモニタリング，地質環境モデルなど取り扱うデータの種類に応じて異なるシステムを構築しているが，それらのシステムを統合あるいは単一のインターフェイスから各システムのデータを検索できるようにリンクを貼るといった方法が採用されている。
- モニタリングデータに係るシステムでは，現地から配信されるリアルタイムデータの閲覧に加えて，地下水の水圧であれば気圧による補正といった任意の条件によるデータの表示やダウンロードを行うことができる。さらに，モニタリング装置のメンテナンス等で生じた欠測期間については，その説明を時系列グラフ内に表示することが可能である。
- 試料やボーリング孔，データの名称（ID）については，将来的なデータ量の拡大にも対応でき，かつシステムでの管理のしやすさも考慮して，対象物の頭文字，地域ごとのコード，などを組み合わせて設定している。
- データ管理において，ユーザーがデータを見つけやくする検索可能な情報の提供や品質管理に係る事項を記載する項目として，メタデータを重視している。

- データの登録・更新・削除時に，調査やデータ管理に係る担当者・責任者などによる確認を行う必要があるが，人事異動等での変更や複数人による確認行為の省力化・多重化を行うことを見越して，システム開発を行う必要がある。
- データ共有の迅速性を確保する観点から，速報値を取り扱う領域をシステム内に構築することが有効である。
- システム開発においては，ユーザーへのヒアリングを通じてニーズの抽出を行い，UX（ユーザーエクスペリエンス：ユーザーがシステムの使用を通じて得られた体験）の向上を図ることが有効である。
- データの利用状況などを追跡する機能やデータの検索結果をグラフや地図上で表示する機能などの工夫が重要である。

2.2　システムの整備計画の具体化

SKB 及び Nagra との議論の結果を踏まえて，NUMO のサイト調査におけるデータ管理の中核となるシステムの整備計画を具体化した（図 1）。システムに必要となる機能（データ登録や検索，ダウンロードなど約 90 項目）や非機能（システムの性能や規模，応答速度など約 240 項目）の整理を進めた。併せて，類似するシステム開発の経験を有する企業等の関係者にヒアリングを実施し，システムの実現可能性を調査した。

システムを整備することにより，データとその関連情報の透明性，信頼性，追跡性，検索性，保護（損傷防止），情報セキュリティを確保するとともに，次の効果が期待できる。

- UX の最適化により利用するユーザーの業務の円滑化
- 手書き書類も含めた全文検索による検索作業の業務効率化
- 適切に体系化されたファイルの名称，バージョン管理によりデータの検索の容易化
- 調査計画の立案，調査の実施，結果の解釈で取り組むデータ管理のフレームワークとしての役割の発揮
- クラウドのリージョンの二重化による災害や障害時の対応を強化
- データの属人化を防ぎ，FAIR（Findable，Accessible，Interoperable，Re-usable）（FORCE11，2016）原則に沿ってデータを共有する
- データのねつ造・改ざんの防止
- 各種モニタリング装置との連携

3.　包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書の付属書 3-12（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）（NUMO，2021）のとおり，地質環境調査・評価における品質に関連するすべての情報を追跡性・網羅性をもってデータベース化することが可能となるよう引き続き検討し，システムを構築する。

4.　今後の展開

2024 年度に検討する要件定義及び基本設計に基づき，システムの詳細設計・開発を着実に進める。システムの運用開始後はデータの拡充とともに，最新の技術的知見に基づきながら継続的にシステムの改善を図り，データを後世につないでいく。

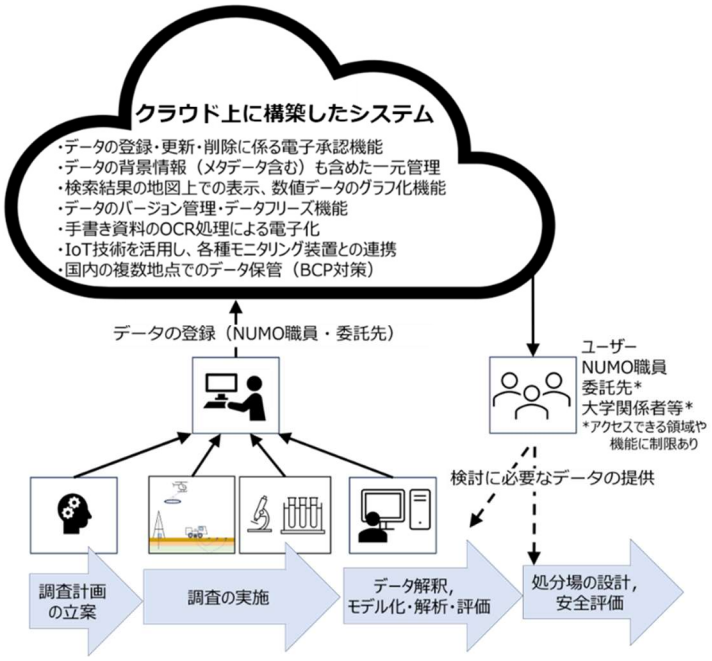


図 1　システムの整備計画の具体化

参考文献

FORCE (2016)：The FAIR Data Principles, https://force11.org/info/the-fair-data-principles/ (2024 年 7 月 2 日閲覧).

IAEA (2023)：The Management of Site Investigations for Radioactive Waste Disposal Facilities [IAEA Preprint].

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).

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－付属書 3-12 地質環境調査およびモデル構築にかかわる品質マネジメント，NUMO-TR-20-03.

OECD/NEA (2018) : Managing Information and Requirements in Geological Disposal Programmes, NEA/RWM/R(2018)2.

2.2　処分場の設計と工学技術の体系的な整備

人工バリアの設計・施工に関する技術の信頼性を向上させるため，沿岸海底下を含む我が国の多様な地質環境条件と処分対象となる廃棄物の特性を考慮した人工バリアの材料や仕様の合理的な設定に資する科学技術的基盤の整備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）の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設置していただいた長期腐食寿命評価技術検討委員会と，その分科会（過渡期腐食分科会，腐食評価モデル分科会，微生物腐食分科会，腐食試験技術分科会）での検討を継続した。過渡期腐食分科会の検討に関連して，JAEA 及び大学との共同研究を通じて，過渡期における金属腐食試験技術の開発に取り組んだ（2.2.1 参照）。また，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「圧縮粘土材料中における浸漬試験方法（仮題）」の作成を進めている。過年度までに作成された規格素案に示された試験方法が試験者に依らず適切に実施可能であることの確認を目的として，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）を実施するため，試験に必要な物品の調達等の準備を進めた。この取組みは 2024 年度まで継続する計画であり，成果については次年度以降に報告する。

緩衝材や埋戻し材の主要材料となるベントナイトについては，現在の設計上の制限温度 100℃を超えた温度領域での特性を把握するため，複数の国産ベントナイトを対象として室内試験によるデータ取得を進めた。具体的には，100℃を超える高温履歴を受けることにより膨潤性や透水性などの性能がどのように変化するかを確認している。また，緩衝材の長期健全性を説明するための技術的根拠の整備の一環として，ナチュラルアナログ研究に取り組んでいる。オーバーパックの腐食生成物によるベントナイトの変質現象に関するナチュラルアナログとして，スウェーデンの鉄鉱石鉱山において磁鉄鉱（Fe_3O_4，オーバーパックの腐食生成物の一つ）が天然ベントナイトに接触している事例の研究を，大学との共同研究により進めた。昨年度に実施した現地採取試料の分析では粘土鉱物の変質は観察されなかったことを受け，そのメカニズムの解明に資するため，接触界面の状態が異なる複数の試料の分析を開始した。地下水による緩衝材の流出現象に関するナチュラルアナログとして，国内のベントナイト鉱山においてベントナイトと河川が接触している事例を対象とした研究を，国際共同プロジェクト IBL（International Bentonite Longevity）及び大学との共同研究により進めた。昨年度までに河川の流水下でも天然ベントナイトが浸食されていないことが観察されており，このメカニズムを解明するため，JAEA との共同研究による現地で採取した天然ベントナイトを用いた流出試験の準備を進めた。これらを含めた国内でのナチュラルアナログ研究に関する最新情報の集約を目的に，「人工バリアの長期健全性及び天然バリア中の物質移行特性に関する傍証材料としてのナチュラルアナログの活用方法」と題したワークショップを JAEA 及び大学と共同で開催し，ワークショップにおいて得られた情報を NUMO-TR として取りまとめた（2.2.2 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の共同研究により進めた。これまで，大深度における地下岩盤中の一般的な坑道は，耐震設計が必要とされておらず，定まった耐震設計手法が存在しない。地層処分のための地下施設は，地震時においても高い安全性が求められる原子力関連施設であることから，建設，操業期間中における坑道の耐震設計手法の整備が必要と考え，耐震設計に必要な岩の繰返し強度，変形特性に係るデータの取得を進めた（2.2.3 参照）。

設計の柔軟性を確保すべく，設計オプションの安全性と実現性の向上，さらには実用化に向けた効率性の改善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，異種金属接触による腐食現象の理解を深めるため，大学との共同研究により，圧縮ベントナイト中での炭素鋼の腐食促進を電気化学的に検討した（2.2.4 参照）。オーバーパックの製作技術の高度化においては，2017 年度に開始した NWMO との共同研究により，炭素鋼容器に対し，母材は電気メッキ，蓋接合部は冷間溶射により銅コーティングする方法の開発を継続し，電気メッキの処理速度の向上，冷間溶射装置の位置制御精度の向上に関する研究を進めた。さらに，NWMO との共同研究で開発を進めている冷間溶射に比べて，銅コーティングオーバーパックの接合工程を効率化できる可能性のある摩擦攪拌接合技術の開発を，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，接合可能な条件の特定を進めた（2.2.5 参照）。

2.2.1　放射線分解生成物によるオーバーパックの腐食量評価技術の高度化

小川 裕輔[1]　長田 修平[1]　鈴木 覚[1]　佐藤 智徳[2]　大谷 恭平[2]　五十嵐 誉廣[2]
山本 正弘[3]　阿部 博志[3]　渡邉 豊[3]

[1]原子力発電環境整備機構，[2]日本原子力研究開発機構，[3]東北大学

1.　背景・目的

ガラス固化体から発生する放射線は，地下水の放射線分解を引き起こし，過酸化水素等の酸化性化学種が生成して腐食に影響を及ぼす可能性がある。包括的技術報告書においては，放射線環境下における腐食試験結果に基づき，放射線による腐食速度の加速が無視し得る条件となる遮蔽厚さを求めて，オーバーパックの設計に用いた（NUMO，2021）。このような方法とは異なり，放射線分解により発生する酸化性化学種の量を化学計算（以下，「ラジオリシス解析」という）により評価し，発生した酸化性化学種がすべて腐食により消費されると仮定して，腐食深さに換算して腐食代を設定する方法もある。この方法により放射線影響に対処する場合，包括的技術報告書で採用した方法と比較して，オーバーパックの必要厚さを最大で5割程度削減できる可能性があり，オーバーパックの軽量化によるハンドリング時の安全性向上やコスト削減などの効果が期待できる。

この方法を適用する場合には，緩衝材間隙水の成分組成を対象としたラジオリシス解析を実施する必要があるが，緩衝材間隙水には多様な化学種が含まれるため複雑な反応となり，解析結果の解釈が困難となることが想定される。したがって本検討では，緩衝材間隙水を対象としたラジオリシス解析の結果の解釈に資するデータを得るため，緩衝材間隙水に含まれる個別の化学種に対する放射線分解への影響を調べた。

2.　主な成果

水溶液の放射線分解過程は，水和電子（e_{aq}^-），OH ラジカル，H ラジカル，H_2O_2，H_2，H^+等のプライマリー生成物の生成と，その後に起こるプライマリー生成物同士及びプライマリー生成物とその他の溶質との二次反応からなる（勝村，2009）。プライマリー生成物の収率を表す G 値（単位エネルギーあたりのプライマリー生成物の生成または消滅量）及び二次反応の反応速度定数については，数多くの実験又は推定によって求められており，そのデータセットが公開されている（例えば，NIST ホームページ）。これらのデータセットを用いて，任意の水溶液中の放射線分解プロセスを化学計算コードにより計算することができる（勝村，2009）。本研究では，ラジオリシス解析に汎用物理シミュレーションソフトウェア COMSOL Multiphysics を用いた。

地下水には様々な化学種が含まれるが，2023 年度は HCO_3^-，CO_3^{2-}，Cl^-，Br^-，SO_4^{2-}，HS^-，I^-及び溶存酸素濃度の放射線分解への影響を評価した。その他の化学種の影響については次年度以降に検討する。各化学種の濃度は包括的技術報告書で示した緩衝材間隙水での濃度を含む範囲，溶存酸素濃度は 0～8 ppm（大気に接する水の溶存酸素濃度）とした。ラジオリシス解析結果の例として，図 1（a）に HCO_3^-，図 1（b）に I^-による水溶液中の過酸化水素（酸化性化学種の一つ）の濃度への影響を示す。HCO_3^-については，当該濃度及び溶存酸素濃度が高くなるにつれて過酸化水素濃度が上昇するが，I^-については，同様に溶存酸素濃度が高くなるにつれて過酸化水素濃度が上昇する一方で，I^-濃度が 10^{-5} mol/L 以上では，当該濃度が高くなるにつれて過酸化水素濃度が低下する結果となった。I^-は OH ラジカルとの反応性が高いため，OH ラジカルが優先的に消費されることにより，溶液中の水素濃度が増加し，水素と過酸化水素の再結合反応が促進されたためと考えられる。その他，CO_3^{2-}，

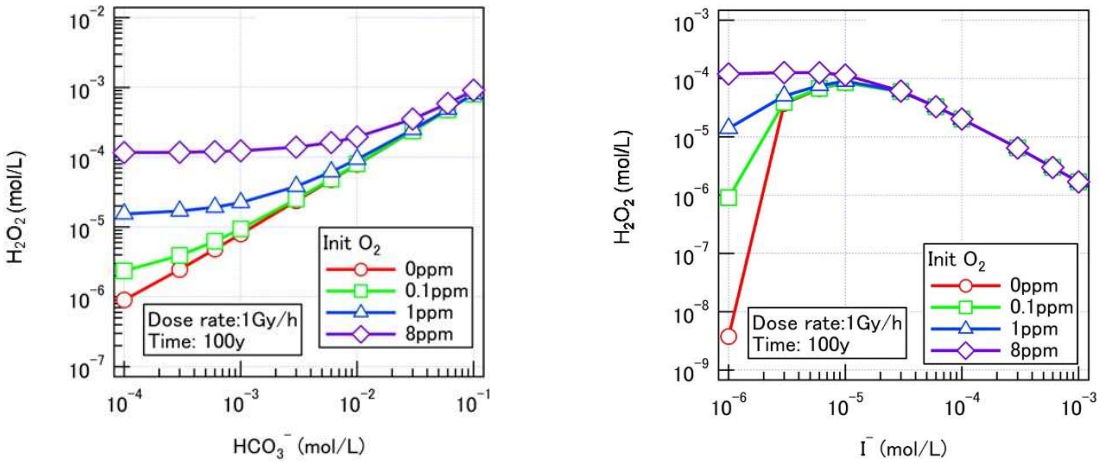
Cl^-，Br^-についてはHCO_3^-と同様な挙動を示し，SO_4^{2-}，HS^-については，包括的技術報告書で示した緩衝材間隙水における濃度範囲では，過酸化水素濃度への影響は無視できる結果となった。

3. 包括的技術報告書への影響

今後，ラジオリシス解析に基づく腐食代設定の検討を継続し，その適用性が確認できた場合には，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），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）に反映する。

4. 今後の展開

緩衝材間隙水の成分に含まれる化学種のうち，今回のラジオリシス解析の対象としていないその他の化学種の影響についても同様に調べたうえで，今後実施する緩衝材間隙水の成分組成を対象としたラジオリシス解析の結果の解釈に活用する。



(a) HCO_3^-の過酸化水素濃度に対する影響　　(b) I^-の過酸化水素濃度に対する影響

図 1　ラジオリシス解析結果の例

参考文献

勝村庸介 (2009)：軽水炉プラントの水化学 第 4 回 水化学の基礎―放射線化学，日本原子力学会誌，Vol. 51，No. 6，pp. 490-494.

NIST(National Institute of Standard and Technology) ホームページ：NDRL/NIST solution kinetics database on the web，https://kinetics.nist.gov/solution/（2024 年 2 月 28 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.

2.2.2　セーフティケースにおけるナチュラルアナログの活用方法の検討

藤田 和果奈　鈴木 覚　後藤 孝裕

原子力発電環境整備機構

1.　背景・目的

NUMO が 2021 年に取りまとめた包括的技術報告書において，アナログ事例は地層処分システムの長期的な安全性の傍証として重要な要素を担っている。アナログ事例とは，地層処分システムに対して類似性を有する自然現象（ナチュラルアナログ），考古学的な事物（考古学アナログ），及び産業的な事物（産業アナログ）の総称であり，アナログ事例を自然科学的な手法で研究することをアナログ研究と呼ぶ（藤田ほか，2024）。アナログ事例の有用性は，その事物・現象が経た長い時間にある。地層処分事業が対象とする数万年という安全確保の期間は，室内実験や原位置試験が扱える範囲を超えてしまうため，アナログ事例は地層処分システムの安全性の説明を補強する多面的な論拠のひとつとして活用されている（NUMO, 2021；Reijonen et al.，2023）。

NUMO のアナログ研究への取り組みの考え方を図 1 に示す。アナログ事例はセーフティケースの技術的信頼性に資する基盤情報の一部であるだけではなく，セーフティケースを用いて幅広いステークホルダーとコミュニケーションする際の重要なツールとなり得る。このため，アナログ事例を数多く収集し，「アナログカタログ」としてデータベース化すること，また，データベースを活用してステークホルダーの関心に応じたより効果的なアナログ事例の選定をできるよう準備を進めている。

データベースに収録するアナログ事例には，①地層処分システム全体を傍証する事例（例えば，オクロの天然原子炉やシガーレイクのウラン鉱山など）や，②バリア機能の一部を傍証する事例（例えば，ローマ時代の鉄くぎや自然界における高アルカリ水とベントナイトの反応など）が考えられる。これらをセーフティケースの文脈に沿って選定し，体系的に整理することで，地層処分事業に適したデータベースの構築が可能となる。

このような考え方に基づいて，2023 年度はセーフティケースの基本的な考え方である安全機能を基軸として，アナログ事例の構造化に取り組んだ。また，最新のアナログ事例の情報を収集するために，ナチュラルアナログ研究ワークショップを開催し，国際共同研究を通じた新規のアナログ事例の調査にも継続して取り組んでいる。ワークショップでは，セーフティケースにおけるアナログ事例の活用方法の改善点についても，アナログ研究に携わる専門家から広く意見を募り，今後の NUMO のアナログ研究の方向性を取りまとめた。

2.　主な成果

安全機能を基軸としたアナログ事例の取りまとめの考え方に基づいて，最新のアナログ研究の成果をデータベースに取り入れるため，ナチュラルアナログ研究ワークショップを開催した。ワークショップには，国内の研究機関，大学，民間企業等の技術者及び研究者ら 27 名，オンライン参加者 42 名，合計 69 名が出席し，アナログ事例を対象とした最新の研究成果など 13 件の講演をいただいた。これらの講演内容について，設計上考慮すべき現象を抽出するために活用されている FEP（放射性廃棄物の地層処分の安全評価において，処分場の閉鎖後の安全に関する要因を，地層処分システムの各構成要素の特性（Feature）や，特性に影響を与える事象（Event），地層処分システムの時間的変遷の過程（Process）に分けたリスト）を介して，地層処分システムにおける安全機能，構成要素，設計要件と

の関係をまとめた（藤田ほか，2024，表 2-1）。本報告書では，包括的技術報告書において階層的に整理された，処分場の安全機能に対応する設計要件とアナログ事例の関係を，包括的技術報告書 7 章で取り上げられているアナログ事例を例として図 2 に示した。

ワークショップに加えて，NUMO は人工バリアの長期健全性に関するアナログ事例を充実させることを目的として，新規アナログ事例の研究にも取り組んでいる。具体的には，鉄ーベントナイト相互作用，緩衝材の流出，微生物腐食の抑制，及び物理的緩衝性など，緩衝材の安全機能に関するアナログ事例の研究が挙げられる。例えば，鉄ーベントナイト相互作用に関するアナログ事例の研究では，鉄腐食生成物の一つであるマグネタイトとベントナイトが数億年にわたり接触した事例を調査したほか（NUMO, 2022），物理的緩衝性に関しては，断層近傍に存在する天然のベントナイト層の変形の様子を調査している（Reijonen, 2024）。これらの成果についても，今後データベースに取り込むことを予定している。

3. 包括的技術報告書への影響

ワークショップ及び新規のアナログ事例の調査を通じて，包括的技術報告書（NUMO，2021）の付属書 7-5（ナチュラルアナログ事例）に収録したアナログ事例に最新の情報を追加することが可能となった。また，FEP を介して多重バリアシステムの安全機能とアナログ事例を関連づけるといった試みにより，包括的技術報告書の 4.4 節（人工バリアの設計）や付属書 4-4（オーバーパックの設計要件と評価項目の設定），4-14（緩衝材の設計要件と評価項目の設定），4-20（廃棄体パッケージの設計要件と評価項目の設定）に示した設計要件の充足性の論拠となるアナログ事例，及び 6.3.1 項（処分場閉鎖後のシステムとしてのふるまい）や付属書 6-9（安全機能への影響分析表）とアナログ事例の関係が明確になった。これらの成果は，セーフティケースの信頼性の向上に資するものであり，今後の検討成果も踏まえ，包括的技術報告書へのアナログ事例の記載方法を検討する。

4. 今後の展開

2024 年度は，（1）アナログカタログ作成において必要な最新の国内外に存在するアナログ事例の統合（2）安全評価に用いられている現象評価モデルの検証と妥当性評価におけるアナログ事例の活用，（3）幅広いステークホルダーに訴求するナラティブベースの表現方法の確立を目的として，海外の専門家も招いてワークショップを開催する。また，国際共同研究を通じて新規のアナログ事例の調査に継続して取り組んでいく。

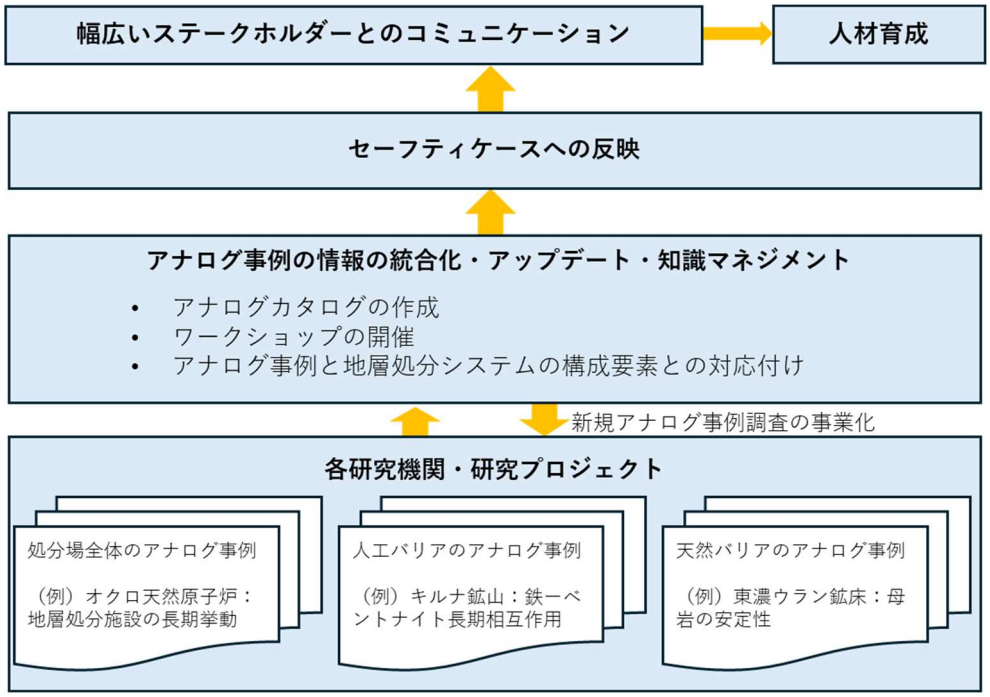


図 1　アナログ研究を対象としたNUMOの取り組み

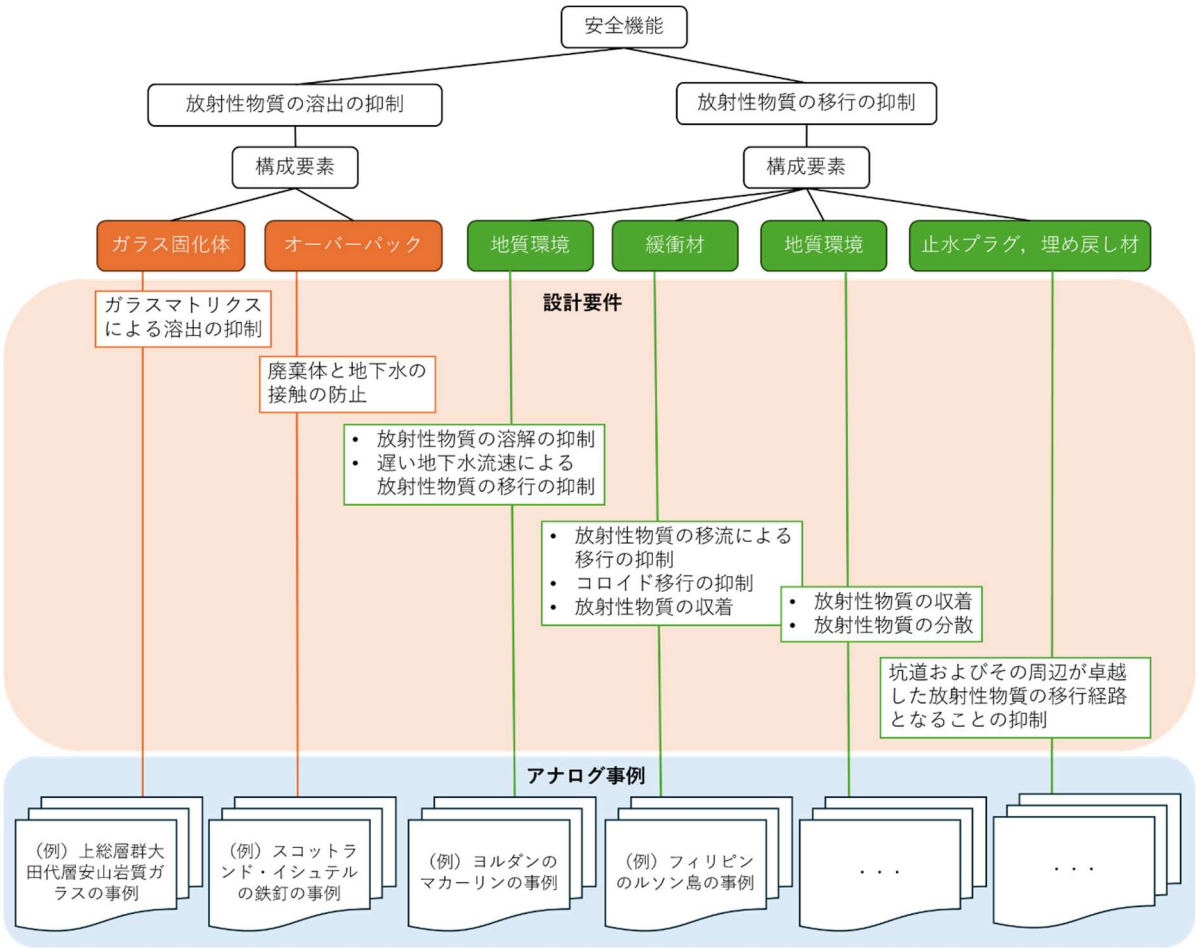


図 2 地層処分システムの安全機能，構成要素，設計要件と対応するアナログ事例

参考文献

NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021)：包括的技術報告書：わが国における安全な地層処分の実現，NUMO-TR-20-03.

NUMO(原子力発電環境整備機構) (2022)：技術開発成果概要 2021，NUMO-TR-22-02.

藤田和果奈，鈴木覚，森千穂，佐藤努 (2024)：2023 年度ナチュラルアナログ研究ワークショップ開催報告，NUMO-TR-24-02.

Reijonen, H. M., Alexander, W. R. and Norris, S. (2023)：Resilience in knowledge management – the case of natural analogues in radioactive waste management. Process Safety and Environmental Protection, 180, pp.205-222.

Reijonen, H. M. (2024)：International Bentonite Longevity (IBL) project: recent results. Natural Analogue Working Group workshop, Zadar, Croatia. https://natural-analogues.com/nawg-workshops/nawg-17-2023-croatia/317-reijonen-ibl-project-recent-results/file.

2.2.3　坑道の耐震性評価手法の整備　-軟岩について-

レ アン ゴク[1]　窪田 茂[1]　及川 大夢[2]　野原 慎太郎[2]　石丸 真[2]　岡田 哲実[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

地層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いる。これらの坑道は現在の山岳トンネルと同様に，新オーストリアトンネル工法（New Austrian Tunneling Method：NATM）を掘削方法として想定している（NUMO，2021）。この工法は，切羽付近の地山が自立することを前提として発破，機械または人力により掘削し，支保工を構築することにより内部空間を保ちながら，トンネルを建設する工法である。地層処分場の坑道は，掘削方法も含め，坑道断面の構造が一般的な山岳トンネルと類似しているため，これまでの山岳トンネルの設計手法（土木学会，2016）を参考に岩盤条件に対応した標準的な支保パターンを選定し，空洞安定性の評価結果も踏まえて坑道の設計を実施してきた（NUMO，2021）。また，山岳トンネルは周辺の岩盤と一体となって揺れるため，一般に耐震性に優れていること等の理由から耐震設計が必要とされておらず，このため定まった耐震設計手法が存在していないのが実状である。しかし，地層処分場の地下施設においては，放射性廃棄物を搬送し坑道内に定置するが，この際に地震によって坑道が損傷すると，搬送中あるいは定置した放射性廃棄物に損傷を与える可能性が想定される。このような地震による坑道の損傷を防止するためには，坑道の耐震性の確保が必要である。このため，地層処分場の地下施設の耐震性確保を目的として，NUMO と電中研は共同で図 1 に示すように 3 つの課題に取り組んでいる。

本共同研究は，2023 年度～2027 年度の 5 か年の計画で実施しているものであり，図 1 に示す課題①及び課題②の検討において，我が国に広く分布すると考えられる岩盤の代表例として，岩盤の強度は大きいが割れ目の影響が支配的な硬岩，及び岩盤の強度が小さく坑道の掘削時に緩みが発生しやすい軟岩を対象として弾性波速度や一軸圧縮強さなどの必要な力学特性を取得する。2023 年度は，硬岩に関しては割れ目を模擬する試験体の製作方法の検討を行い，軟岩に関しては力学特性などに関する基礎的なデータの取得を行った。本報告では，軟岩に関するデータの取得状況について報告する。なお，軟岩の検討用材料として，一軸圧縮強さが 10 MPa 程度で，岩盤の力学試験の研究材料としても利用実績が豊富であり，かつ市販品として入手が容易な凝灰岩（大谷石）を使用した。

2.　主な成果

岩盤の力学特性は，岩石の構造に起因する異方性に依存することから，図 2 に示すように，大谷石の岩盤ブロックから，天地・南北・東西方向にコアリングし，直径 50 mm，高さ 100 mm の円柱供試体を各方向 3 本ずつ作製した。大谷石には，暗灰色または淡青色の軟質な礫（以下，「ミソ」という）が含まれており，ミソの形状は構造的な異方性の指標となり得る。このため，医療用 X 線 CT 装置を用いて供試体の CT 画像を撮影し，図 3 に示す方法でミソの形状を画像処理により定量化することで岩石試料内の構造的異方性を調べた。供試体の縦断面天地方向と南北方向の CT 画像を図 4 に示す。CT 画像は密度が小さいほど黒く表示しており，密度が周囲よりも相対的に低いミソ部分を黒く表示している。

画像処理によりミソ部を抽出し，各ミソの面積を算出し，各断面におけるミソが占める割合（礫率）を算出した。その結果，全ての供試体で礫率は 7～10 %の範囲にあり，コアリングの方向による礫率

の違いは認められなかった。この程度の礫率であれば，試料の強度特性に与える影響は小さいとされている（谷，2006）。抽出したミソを楕円近似した画像の一例を図 5 に示す。ミソを近似した楕円の扁平率や長軸が，供試体の軸方向に対してなす角度などを算出した。その結果，楕円の長軸の方向は，コアリングの方向によって異なっていた。横軸を楕円の長軸が水平軸となす角度とした度数分布図を図 6 に示す。天地方向の供試体では，供試体の軸に直交する方向のミソが相対的に多く，南北及び東西方向の供試体では，供試体の軸に平行な方向のミソが相対的に多く含まれていることが分かった。このようにコアリングの方向によって，ミソを近似した楕円の長軸の方向が異なっており，供試体は構造的異方性を有する。

弾性波速度計測及び一軸圧縮試験（単調載荷）を実施した結果をそれぞれ図 7，図 8 及び図 9 に示す。図 7 及び図 8 に示すように，弾性波速度及び一軸圧縮強さは，コアリングの方向による顕著な異方性は確認されなかった。図 9 に示すように，一軸圧縮強さの 50 %を超える範囲（$q/q_u \geq 0.5$）では，コアリングの方向による接線ヤング率の違いは比較的小さかったものの，一軸圧縮強さの 20% 以下の範囲（$q/q_u \leq 0.2$）では，接線ヤング率に顕著な差が見られた。接線ヤング率は，天地方向の供試体が 2500～3000 MN/m^2 程度，南北及び東西方向の供試体が 4000～5000 MN/m^2 程度であり，コアリングの方向によって異なっている。その要因は大谷石の X 線 CT 画像から抽出した岩石内の構造的異方性に関連すると示唆された。なお，一軸圧縮試験後の供試体破片を用いて試験時の含水比を測定したところ，いずれも 23～24 %の範囲にあり，供試体の含水状態はおおむね同程度であり，上述の結果は含水状態の違いによるものではないことも確認した。

以上のように，弾性波速度計測及び一軸圧縮試験の結果，弾性波速度及び一軸圧縮強さはコアリングの方向による顕著な異方性は確認されなかったが，一軸圧縮試験の初期段階（一軸圧縮強さの 20 % 以下の範囲）において，接線ヤング率に異方性が確認されており，試験に用いた岩石試料の構造的異方性がその要因として示唆された。これらの結果を，今後の三軸圧縮試験に使用する岩石コアの選定及び解析モデルの整備に反映する。

3. 包括的技術報告書への影響

2023 年度の成果を包括的技術報告書（NUMO，2021）の坑道の設計（4.5.2 項）に反映することを検討する。本共同研究で開発する地震時における岩盤及び支保工の応力・ひずみ状態の解析モデルは，地震時の坑道の空洞安定性に対する信頼性の向上に資するものと期待でき，今後共同研究で得られる成果も踏まえ，包括的技術報告書への記載方法を検討する。

4. 今後の展開

今後は地震時に繰返し荷重を受ける岩盤の力学特性を明らかにするため，三軸圧縮試験（単調載荷，繰返し載荷）も実施して，初期の接線ヤング率の異方性が，坑道の耐震性評価に影響を与えるかどうかを検討する。

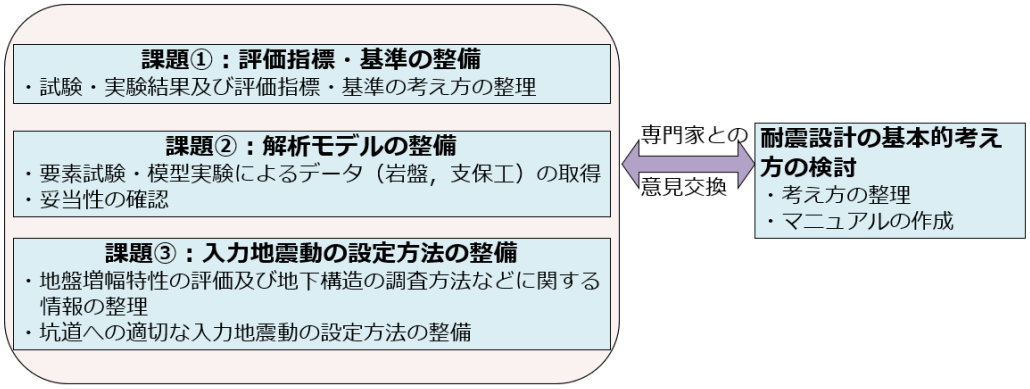


図 1　坑道の耐震性評価手法の整備における課題と取組み

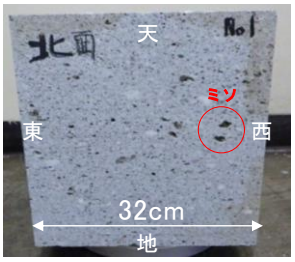


図 2　大谷石の岩盤ブロック（細目）

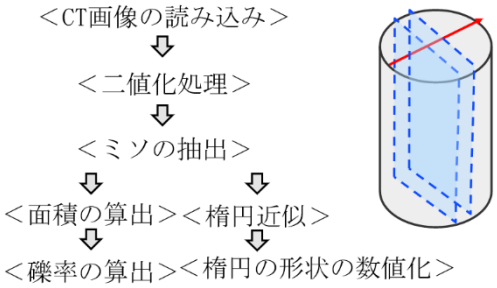
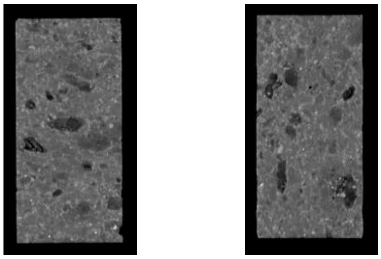
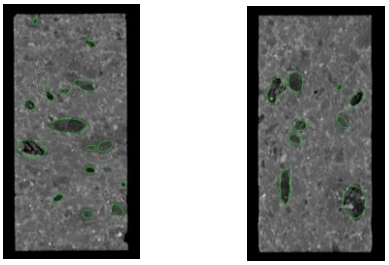


図 3　構造的特徴の数値化のフロー



(a) 天地方向　(b) 南北方向

図 4　供試体の X 線 CT 画像



(a) 天地方向　(b) 南北方向

図 5　抽出したミソを楕円近似した画像

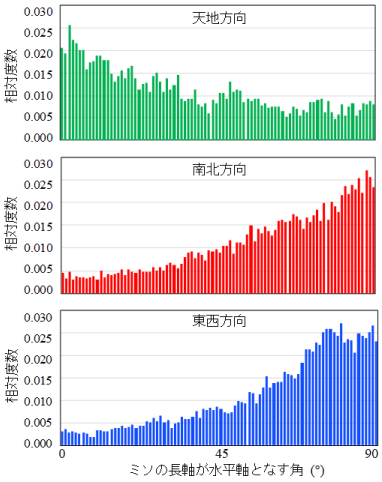


図 6　ミソの長軸が水平軸となす角の度数分布

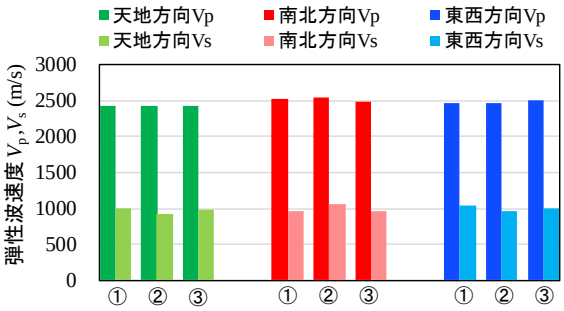


図 7　各供試体の弾性波速度計測結果

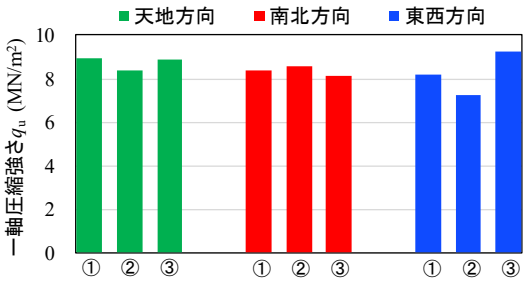


図 8　各供試体の一軸圧縮強さ

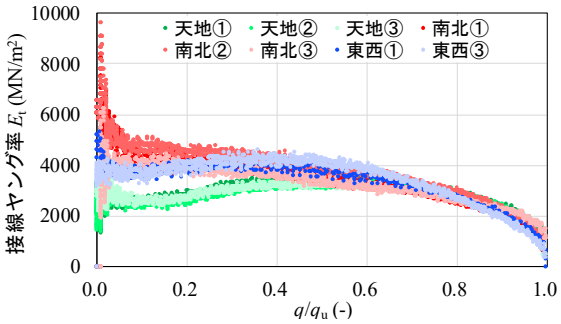


図 9　応力レベルに応じた接線ヤング率

参考文献

土木学会 (2016)：トンネル標準示方書「山岳工法」・同解説

NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021)：包括的技術報告書：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.

谷和夫 (2006)：原位置岩盤三軸試験によって評価された大谷石のせん断強さの位置づけ，材料，55 巻，5 号，pp.483-488.

2.2.4　銅コーティングオーバーパックの耐食性に対する施工不良の影響検討

長田 柊平[1]　小川 裕輔[1]　鈴木 覚[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

1.　背景・目的

高レベル放射性廃棄物であるガラス固化体は，金属製のオーバーパックに封入され，ベントナイト製の緩衝材とともに地下深部に埋設される計画である。NUMO は，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，炭素鋼製耐圧容器に銅耐食層を被覆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。銅コーティングオーバーパックは，カナダの地層処分事業の実施主体である NWMO が 2012 年より開発を進めており，NUMO は 2017 年度から共同研究として同開発に参画し，我が国の地質環境への適用性について検討を進めている。

銅コーティングオーバーパックは，炭素鋼容器の表面に主に電気めっき法により数 mm の厚さで銅耐食層を形成させることにより製作する。蓋接合部は，放射性廃棄物を挿入してから炭素鋼部分を溶接した後，その表面を冷間溶射により銅耐食層を形成する計画である（詳細については「2.2.5 銅コーティングオーバーパックの製作技術の開発」参照）。

銅は，大気中の酸素と反応し腐食するが，地下深部のように酸素がない環境では熱力学的に安定であり，炭素鋼のように地下水と反応する可能性が低いとされているが，地下水中の硫化物イオンとの反応により腐食する。このため，地層処分環境における腐食量の評価では，操業中に地下に持ち込まれ残存する酸素による腐食に加え，硫化物イオンなどによる腐食を考慮する必要がある。考慮が必要な化学種の内，最も腐食速度への寄与が高いと推察される硫化物イオンに関しては，火山の周辺や硫黄分の多い温泉の周辺を除けば，我が国の地層処分の環境で想定する硫化物イオン濃度は，1×10^{-7} mol/L である（Suzuki et al.，2020）。この条件における，最大腐食深さは 1,000 年で 0.210 mm，10 万年で 0.211 mm となる。銅耐食層の厚さが 3 mm とすると，腐食によってオーバーパックが貫通する可能性は低いと考えられる（Suzuki et al.，2020）。

このように，我が国の地質環境に対しても，銅コーティングオーバーパックにより長期間の閉じ込めを期待できるが，耐食性の評価に伴う不確実性によっては，腐食が想定よりも早く進展する可能性がある。例えば，①地下水組成の時間による変化，②微生物活動による硫化物イオン濃度の上昇及び③施工不良や検査不良に伴う銅耐食層の欠損等が不確実性として考えられる。①及び②の不確実性に関して，地下深部においては，地下水中の硫酸塩を還元する能力を有する微生物の活動により，仮に地下水中の硫酸イオンがすべて硫化物イオンに還元されるとしても，硫化物イオンは最高で 1×10^{-4} mol/L 程度となり，この場合の最大腐食深さは 1,000 年で 0.22 mm，10 万年で 1.1 mm となる。3 mm の銅耐食層では硫化物イオン濃度が高い場合でもオーバーパックが貫通する可能性は低いと考えられる（Suzuki et al.，2020）。③の不確実性については，銅と炭素鋼の界面で異種金属接触腐食が発生し，溶存酸素濃度が高いほど炭素鋼の腐食速度が大きくなるという結果が示されている（Standish et al.，2018）が，我が国の地質環境を想定した検討が必要である。このため，本技術開発では③の施工不良や検査不良の不確実性を対象とする。

施工不良や検査不良に対しては，製造後の検査により欠損の有無を確認し，銅耐食層が欠損している場合には，補修することにより銅耐食層の健全性を確保することは可能と考えられる。しかしながら，検査漏れなどにより，銅耐食層が欠損したまま埋設した場合を想定すると，埋設後に銅耐食層欠

損部の炭素鋼素地が腐食し，やがて腐食による貫通孔が発生すると考えられる。このような状況では，銅耐食層と炭素鋼素地間で異種金属接触腐食が発生し，貫通孔の進展に影響を与える可能性がある。

これらの背景から，本技術開発は，発生可能性は低いと考えられるものの，銅耐食層が欠損した場合の腐食シナリオを構築するために，処分環境下における銅－炭素鋼間の異種金属接触腐食現象について検討している。2022 年度は，緩衝材中における異種金属接触腐食の傾向をとらえるため，酸素濃度を変化させた環境で銅と炭素鋼の間に流れるガルバニック電流を比較した。その結果によると，低酸素環境において異種金属接触腐食は起こりにくいという結果を得た（NUMO, 2024）。2023 年度は，銅耐食層が欠損した場合の腐食シナリオを検討するため，圧縮ベントナイト中で銅と接触した炭素鋼の腐食速度を測定し，炭素鋼の腐食速度に対する異種金属接触腐食の影響を検討した。

2. 主な成果

圧縮ベントナイト中における異種金属接触時の炭素鋼の腐食速度を求めるため，分極測定によって腐食電流を算出した。分極測定は，専用の試験カラムに 1 対の Cu 電極と Fe 電極を圧縮ベントナイト中ともに埋め込み，1 対の電極を 1 日間接触させた後に実施した。測定は埋設後初期の有酸素環境を想定して，室温及び 80℃で実施し，常時大気を吹き込んだ。また，異種金属接触腐食が発生していない場合の Fe 電極の腐食速度を算出するため，Fe 電極の分極を室温で測定した。

測定結果を図 1 に示す。Fe 電極と Cu 電極の分極曲線との交点の電流密度が，原理上，ガルバニック電流密度（異種金属接触時の炭素鋼の腐食速度）を表す。室温でのガルバニック電流密度及び Fe 電極の腐食電流密度はそれぞれ 4×10^{-5} A/cm²，2×10^{-6} A/cm²を示した。本試験条件において，銅欠損部に露出した炭素鋼素地は異種金属接触腐食機構により 20 倍程度腐食が促進する可能性が示唆された。80℃でのガルバニック電流密度は 1×10^{-4} A/cm²を示し，室温よりも異種金属接触腐食の影響が大きくなる。

2022 年度の成果として報告しているが，低酸素環境におけるガルバニック電流密度と Fe 電極の電流密度を比較すると，両者は同程度の電流密度を示しており（NUMO，2024），異種金属接触腐食は発生せず，水の還元によって炭素鋼の腐食が進行することが示唆された。

これらの試験結果も踏まえて，施工不良などに伴う，銅耐食層の欠損時の腐食シナリオについて検討する。既往の銅－炭素鋼複合材料の評価事例に基づくと，異種金属接触腐食は銅と炭素鋼の界面に沿って進展することが報告されている（Standish et al.，2018）。その様子を図 2 に模式的に示した。操業によって持ち込まれた酸素が残存する期間は，銅耐食層と炭素鋼素地の界面に沿って主にガルバニック腐食が進行し，界面に鉛直方向の炭素鋼の腐食は，界面よりは遅く進行するものと想定される。残存酸素が消費された以降は，異種金属接触腐食は停止し，水の還元による炭素鋼の腐食が進展するものと想定される。ここで示した腐食シナリオについて検証するため，ベントナイト中に銅耐食層が一部欠損した試験片を埋め込んだ腐食試験を 2023 年度から開始している。

3. 包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書（NUMO，2021）では，炭素鋼を対象としたオーバーパックの設計，閉鎖後長期の安全性評価を実施してきたが，今後，代替材料である銅を対象としたセーフティケースを整備する場合には，構築する腐食シナリオに応じて，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）及び 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）に該当する項目に反映する。

4. 今後の展開

銅耐食層が一部欠損し炭素鋼素地が露出した状態を模擬した試験片を圧縮ベントナイト中に埋め込んだ腐食試験を 2024 年度まで継続し，腐食シナリオを検証する。

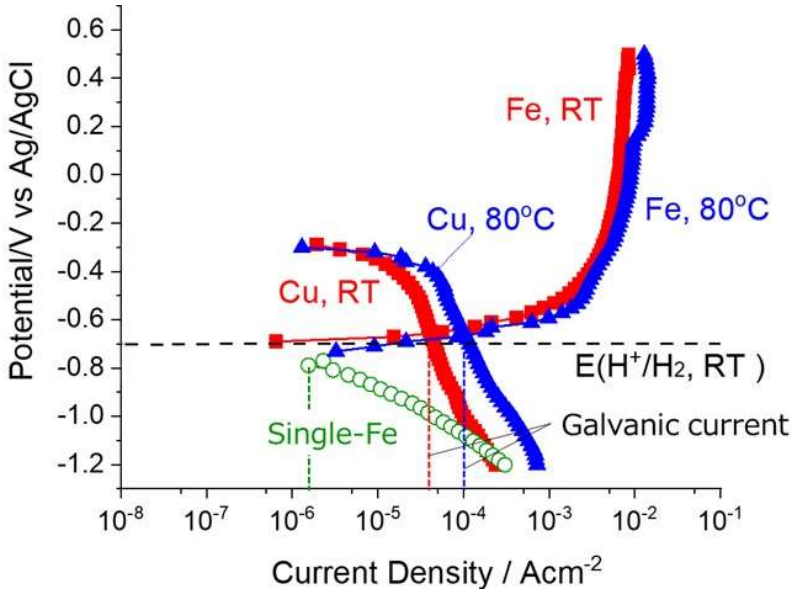
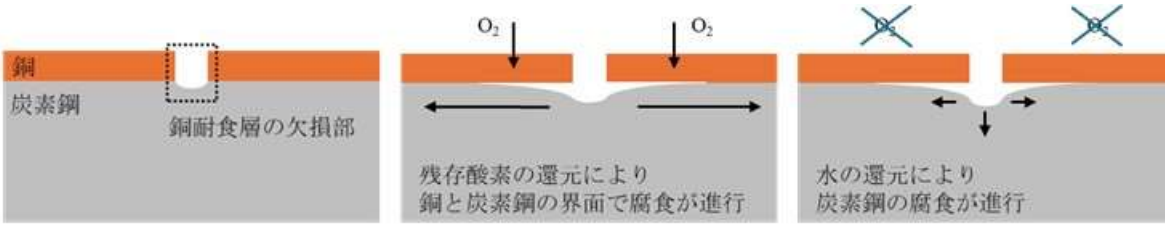


図 1　Cu 電極と Fe 電極接触後の各電極及び Fe 電極単独の分極挙動



(a) 銅耐食層が欠損した状態の模式図　(b) 有酸素環境での腐食の模式図　(c) 低酸素環境での腐食の模式図

図 2　銅耐食層が欠損した銅コーティングオーバーパックの腐食形態

参考文献

NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021)：包括的技術報告書：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) (2024)：技術開発成果概要 2022，NUMO-TR-24-01，pp.40-43.

Suzuki, S., Ogawa, Y., Giallonardo, J. and Keech, P. G. (2020)：The design of copper-coating overpack for the high-level radioactive waste disposal concept in Japan, Materials and Corrosion, Vol.72, Issue 1-2, pp.94-106.

Standish, T. E., Zagidulin, D., Ramamurthy, S., Keech, P. G. and Noël, J. J. (2018)：Synchrotron-Based Micro-CT Investigation of Oxic Corrosion of Copper-Coated Carbon Steel for Potential Use in a Deep Geological Repository for Used Nuclear Fuel, Geoscience 8, No.10, 360.

2.2.5　銅コーティングオーバーパックの製作技術の開発

小川 裕輔[1]　鈴木 覚[1]　Peter G. Keech[2]　藤井 英俊[3]　森貞 好昭[3]　宮野 泰征[4]

[1]原子力発電環境整備機構，[2]核燃料廃棄物管理機関（カナダ），[3]大阪大学，[4]秋田大学

1.　背景・目的

我が国の多様な地質環境や長い事業期間中における科学的な進歩等に対応して，処分場の設計を柔軟に進められるよう，様々な処分概念や設計オプションを整備しておくことが重要である（NUMO, 2021）。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に関しては，炭素鋼オーバーパックに加え，炭素鋼製耐圧容器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。銅コーティングオーバーパックの製作方法には2種類の候補があり，NWMOにより開発が進められている，炭素鋼容器の表面を電気めっきにより銅コーティングし，蓋接合部の炭素鋼部分を溶接した後，その上部を冷間溶射により銅コーティングする方法（図 1）（以下，「NWMO方式」という）と，炭素鋼容器の表面を電気めっきまたはクラッドにより銅コーティングし，蓋接合部の炭素鋼部分を機械的に接合した後，銅接合部は摩擦攪拌接合する方法（図 2）（以下，「NUMO方式」という）がある。

NWMO方式についてNUMOは，2017年度からNWMOとの共同研究により製作技術の開発を行っている。2023年度は，同方式製作技術の実証及び各種製作条件の最適化を目的として，2018年度から実施している複数体の実規模銅コーティングオーバーパックの連続製造試験を継続した。

NUMO方式のうち，炭素鋼接合部については，2022年度までに，ねじ込み接合部の設計，有限要素解析による構造健全性の評価，ねじ込み接合部の試作及び締結試験を行い，基本的な成立性について確認した。銅接合部の摩擦攪拌接合に関しては，2020 年度から大阪大学及び秋田大学との三者共同研究により技術開発を行っており，2022 年度までに，平板状の銅クラッド鋼板及び電気めっき鋼板を用いた摩擦攪拌接合試験を実施し，銅部の剥離や空洞状の接合欠陥等の発生なく接合可能な条件を確認した。2023 年度は，実機の形状を想定した円筒形の銅クラッド鋼管を用いた摩擦攪拌接合試験により，健全な継手が得られる接合条件を検討した。

2.　主な成果

NWMO方式による銅コーティングオーバーパックの製造方法については，連続製造試験において，2018 年度から合計して 17 体の銅コーティングオーバーパックを試作した（図 3）。試作を通じて，電気めっきや冷間溶射の付着品質，銅の純度，機械的性質等を向上させ，それらの品質を確保するための各種製作条件の許容範囲を特定できたことから，2023 年度をもって連続製造試験を完了した（NWMO，2024）。

NUMO 方式については，銅クラッド鋼管を用いて摩擦攪拌接合試験を行い，接合ツールの回転速度や接合速度，荷重条件を適切に制御することで，銅部の剥離や空洞状の接合欠陥の発生がなく，均一なビード形状でほぼバリのない摩擦攪拌接合が可能であることを確認した（図 4）。ただし，継手特性を最適化するための接合条件の許容範囲については引き続き試験により確認する必要がある。

3.　包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書（NUMO，2021）では，炭素鋼を対象としたオーバーパックの設計，閉鎖前の安全性評価，閉鎖後長期の安全性評価を実施してきたが，今後，代替材料である銅を対象としたセーフティケースを整備する場合には，本技術開発で構築した銅コーティングオーバーパックの蓋接合部の構造及び取得した物性値を，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），5.4.2 項（異常状態シナリオに基づく閉じ込め機能に対する影響評価）及び 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）に該当する項目に反映する。

4.　今後の展開

NWMO 方式については，2018～2023 年度にわたって実施した連続製造試験の成果を報告書として取りまとめる。

NUMO 方式については，円筒形の銅クラッド鋼材を用いた摩擦攪拌接合試験を継続し，品質を確保するための接合条件の許容範囲を特定する。その後，炭素鋼部のねじ込み接合と銅部の摩擦攪拌接合を一連の作業として組み合わせて行い，蓋接合に係る作業工程全体の成立性を確認する。

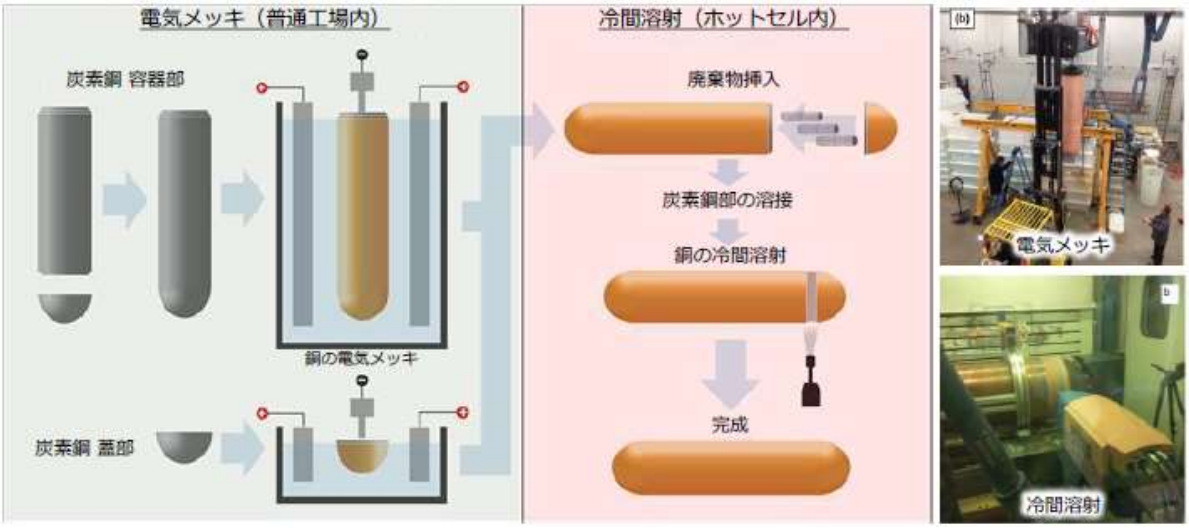
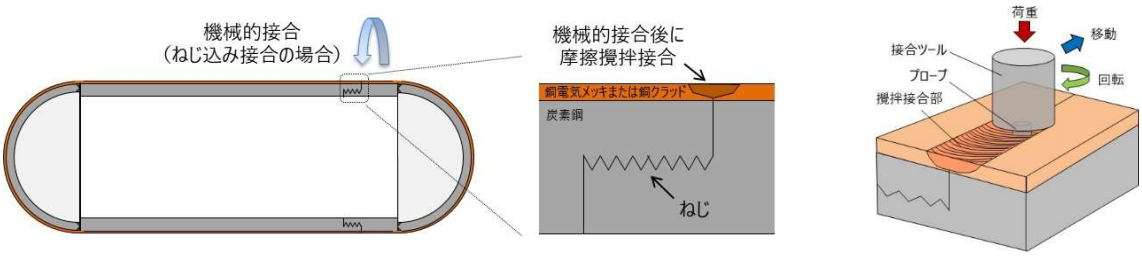


図 1　NWMO 方式による製作方法（NWMO，2016；2017；2018 を編集）



(a) 製作方法の概念　　(b) 摩擦攪拌接合の模式図

図 2　NUMO 方式による製作方法

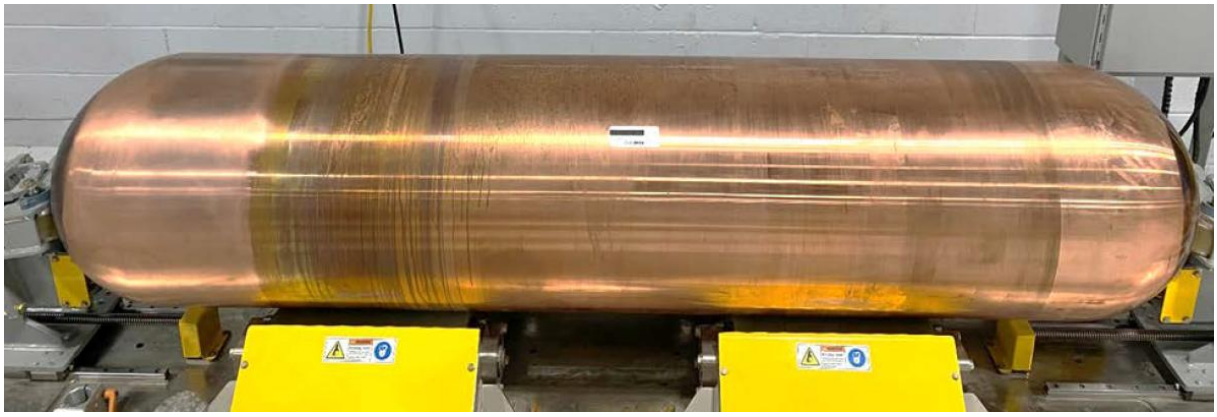


図 3　連続製造試験において試作した銅コーティングオーバーパックの例（NWMO，2024）

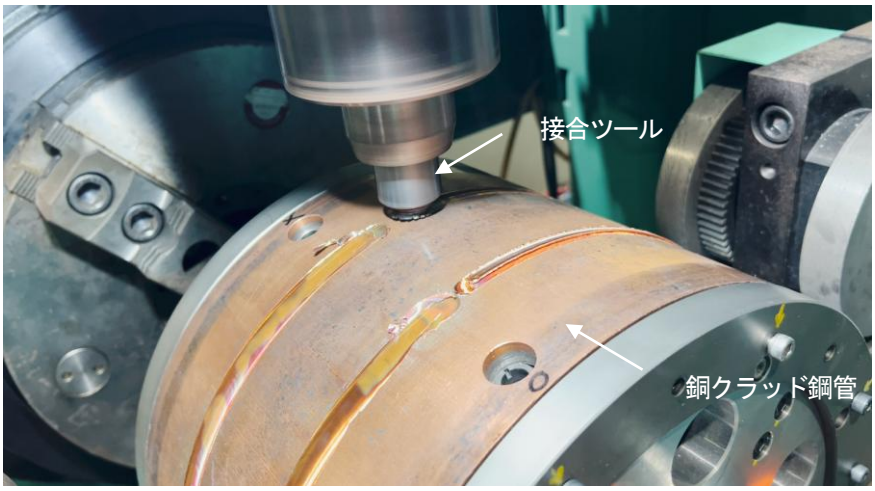


図 4　銅クラッド鋼管に対するスターインプレート法[1]による摩擦攪拌接合試験の様子

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.

NWMO (2016)：Technical Program for the Long-Term Management of Canada's Used Nuclear Fuel －Annual Report 2015，NWMO TR-2016-01.

NWMO (2017)：Technical Program for the Long-Term Management of Canada's Used Nuclear Fuel －Annual Report 2016，NWMO TR-2017-01.

NWMO (2018)：Postclosure Safety Assessment of a Used Fuel Repository in Sedimentary Rock，NWMO TR-2018-08.

NWMO (2024)：Technical Program for the Long-Term Management of Canada's Used Nuclear Fuel －Annual Report 2023，NWMO TR-2024-01.

1　スターインプレート法は，部材間の接合ではなく，単一部材を攪拌（Stir）する方法である。2 つの部材をほぼ隙間なく突き合わせていれば，摩擦攪拌接合にあたって，突合せ接合とスターインプレートで条件はそれほど変わらないため，適切な接合条件の探索を行う初期段階でよく用いられる手法である。鋼管部材の突合せ接合を適切な品質で行うには，摩擦攪拌接合技術の開発だけでなく，部材の突合せ自体を精度良く行う必要があるため，これについては次フェーズの試験で対応する。

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，これに基づき構築した処分場に埋設されている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，放射線学的影響を把握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を開始した。

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熱的（Thermal），水理的（Hydrological），力学的（Mechanical），化学的（Chemical）（以下，「THMC」という）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以下を実施した。

- 処分場の環境を反映したより現実的なガラス固化体の長期溶解挙動評価モデルの構築を目的として，JAEA や大学との共同研究を活用し，ガラスの長期溶解データ取得等を継続するとともにガラス固化体とオーバーパックの間隙水における化学反応を取り扱うモデルの構築に着手した（2.3.1 参照）。
- 処分坑道等に使用されるセメント系材料の緩衝材への影響評価に用いる反応輸送解析モデルの構築に向け，モデルで取り扱う化学反応と物質移行プロセスに関する長期室内試験を継続するとともに，試験データと解析結果の比較を通じてモデルの信頼性向上に向けた課題を抽出した（2.3.2 参照）。
- 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 との共同研究や GTS における国際共同研究プロジェクト（CFM : Colloid Formation and Migration）への参画を通じて室内及び原位置試験データを取得した（2.3.3 参照）。
- 廃棄体定置後からニアフィールドが再冠水するまでの過渡的な期間に対し，ニアフィールドにおける THMC 状態変遷を評価するため，段階的に連成解析技術を整備しており，GTS における高温環境下でのベントナイト緩衝材の再冠水挙動評価のための原位置試験（HotBENT : High Temperature Effects on Bentonite Buffers）へ継続的に参画しデータを取得するとともに，THM 連成解析技術の整備を開始した。成果については次年度以降に報告する。
- 充填鉱物を含む複雑な構造（微細透水構造）である単一割れ目内の核種移行挙動を平行平板で簡略化した核種移行解析モデルの妥当性確認とより現実的なモデル開発に向けて，GTS における放射性トレーサー溶液を用いた天然の割れ目中の原位置核種移行試験を実施する国際共同プロジェクト（LTD : Long Term Diffusion）へ引き続き参画し，原位置データを取得している。データの取得完了後，妥当性確認を実施予定であり，この成果は次年度以降に報告する。
- 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開始した。これまで，実用的な作業フロー案を作成し，これに沿ってモデル構築やそれを用いた数値解析といった試行を行った（2.3.4 参照）。

シナリオに基づく核種移行解析モデルに関して，サイトスペシフィックな生活圏評価に向け，地表環境の空間的不均質性や時間変遷といった特徴をより詳細に反映した評価解析技術の開発を段階的に実施している。2022 年度までに構築した地下浅層を含む地表環境の空間的不均質性を反映した核

種移行及び被ばくプロセスを表現した生活圏評価モデルを解析コード GoldSim に数値解析モデルとして実装し解析が実施可能な計算環境を整えた（2.3.5 参照）。また，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に使用されるセメント系材料の状態変遷をより直接的に反映して核種移行解析を実施するため，その状態変遷を現象に即して定量的に取り扱う反応輸送解析モデルの整備を実施している。具体的には，浸漬試験によりセメント系材料の溶脱挙動に関するデータを取得し，これを用いて包括的技術報告書で用いたモデルについてセメント系材料の溶脱現象をより確からしく評価可能となるよう改良した（2.3.6 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収着分配係数（以下，「Kd」という），実効拡散係数（以下，「De」という），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（沿岸域や高温領域など）に着目して，多様な地質・地下水条件や処分場の状態変遷を反映したデータの拡充を実施した（2.3.7 参照）。また，将来の調査に向けて構築したボーリング調査で取得したデータを用いた Kd や De の設定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（整然相）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（2.3.7 参照）。

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 PFLOTRAN 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，機械学習を適用して解析を高速処理するための手法の構築を開始した。具体的には，処分場のパネルスケール（約 1km×約 1km×約 200m）を対象とした粒子追跡解析により機械学習に利用するデータを整備し，これを用い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（2.3.8 参照）。

2.3.1　ガラス変質層による溶解速度の低減現象に係る根拠情報の拡充

松原 竜太[1]　上野 吹佳[1]　岩田 孟[2]　稲垣 八穂広[3]　大窪 貴洋[4]

[1]原子力発電環境整備機構，[2]日本原子力研究開発機構，[3]九州大学，[4]千葉大学

1.　背景・目的

地層処分場の閉鎖後長期の安全評価で実施する核種移行解析では，地下水に対するガラス溶解速度に基づき核種の溶出速度を設定する。ガラス溶解・変質挙動は地質環境及び人工バリア材料の変質状態により決定される環境条件（接触する地下水水質，温度環境等）に依存する。特に概要調査段階以降のサイト選定に向けた安全評価ではサイト特有の地質環境に関する情報の蓄積に伴い，それに応じて設計した処分場の環境条件，その条件下で生じるプロセスを考慮してガラス溶解・変質挙動を予測するため，様々な環境条件に対応可能なガラス溶解モデル（図 1）の開発を進めている。ガラス固化体近傍で生じる現象のうちガラス溶解速度に影響を及ぼす現象として，①ガラス固化体を構成するケイ酸（以下，「Si」という）の溶出に伴いガラス固化体とオーバーパック間における間隙水（以下，「間隙水」という）中の溶存 Si 濃度が高くなるとガラスと間隙水との間での化学親和力が低下し，ガラスから Si が溶解しにくくなる現象，②ガラス表面に形成したゲル層（ガラス変質層の構成領域の一つ）がガラス溶解を抑制する現象（例えば，Grambow and Müller，2001；Gin，2001），③ガラス表面に析出層（ガラス変質層の構成領域の一つ）としてケイ酸塩鉱物が沈殿する現象（例えば，Michelin et al.，2012；Fleury et al.，2013；Debure et al.，2016），④オーバーパック表面に生成した鉄腐食生成物や緩衝材への溶存 Si の収着・拡散（例えば，Godon et al.，2013；Mitsui et al.，2009）等により間隙水中の溶存 Si 濃度が低下してガラス溶解を促進する現象が考えられる。これらの現象によるガラス溶解速度への影響を定量的に評価するガラス溶解モデルの開発に向けて，変質層がガラス溶解速度を抑制または促進させる影響の把握を目的とした人工バリア材料成分の共存（オーバーパック由来の Fe イオン等）や様々な地下水成分（Mg イオン等）を考慮した水質条件下のガラス溶解・変質挙動の把握（日本原子力研究開発機構との共同研究（以下，「JAEA 共研」という），2016 年～），ガラス溶解・変質挙動の溶液条件・温度依存性の把握（九州大学との共同研究（以下，「九大共研」という），2020 年～），ゲル層によるガラス溶解・変質挙動への影響要因を分子構造から推定する手法構築（千葉大学との共同研究（以下，「千葉大共研」という），2020 年～）に取り組んでいる。これらの 2022 年度末までの成果は下記のとおりである（NUMO，2024）。

- JAEA 共研：①～③に着目し，Fe イオンまたは Mg イオンの溶存下におけるガラス溶解・変質挙動の時間変化を調べるため，低酸素環境かつ溶存中の Fe イオンまたは Mg イオンの溶存状態を長期間（約 10 年）維持できるよう，試験手法の改良を行い，長期試験の一部として試験期間 0.5 年，Fe イオンまたは Mg イオン溶存条件の試験を開始（図 2）
- 九大共研：①～③に着目し，ガラス溶解・変質挙動の溶存 Si 濃度依存性を評価するため，模擬廃棄物ガラスに接触させる溶液条件及び温度を一定に制御できる試験装置（図 3）を用いて，包括的技術報告書で設定した間隙水（NUMO，2021）に基づき 4 試験条件（表 1 の No.7～10）のデータを取得
- 千葉大共研：②に着目し，分子動力学シミュレーションによるゲル層の分子構造モデル作成手法及びゲル層中の水の移行シミュレーション手法を構築し，ゲル層中における水分子の拡散係数を評価

2023 年度は，JAEA 共研ではガラス溶解・変質挙動に関する長期試験を継続するとともに，間隙水中で生じる物質移行・化学反応プロセスを反映した数値解析モデルの構築に着手した。九大共研では溶存 Si 濃度や pH の条件を変化させた試験によりガラス溶解速度データを拡充した。千葉大共研ではゲル層を対象として水分子の移行・変質挙動の数値解析に着手した。

2. 主な成果

JAEA 共研では，①～③に着目し，模擬廃棄物ガラスを $FeCl_2$ 溶液または $MgCl_2$ 溶液に浸漬させた試験系（図 2 参照）における長期間のガラス溶解試験（最大 10 年を想定）を継続し，それぞれ 6 ヵ月浸漬させた試料の分析を進めた。その結果，異なる溶液条件で規格化浸出量に大きな違いは見られなかった。浸出試験後のガラスの分析では，Fe 溶液では複数の Fe ケイ酸塩鉱物等，Mg 溶液では複数の Mg ケイ酸塩鉱物や Mg-ハイドロタルサイト等が確認された。また，「1.背景・目的」に示したガラス溶解速度に影響を与える現象のうち，①～③に着目したガラス溶解速度評価モデルの開発に着手した。後述する九大共研で得られたガラスに接する溶液中の Si 濃度とガラス溶解速度との関係を利用して，間隙水中の溶存 Si 濃度に対応した Si 溶出速度を設定し，間隙水中の Si 濃度は，ガラス固化体からの溶出した Si に加えて，緩衝材由来の地下水成分 Si を考慮し，それらとオーバーパックの腐食に伴い表面に蓄積した鉄腐食生成物（マグネタイト）由来の Fe イオンとが速やかに反応し平衡状態になると仮定した熱力学平衡計算で算出することとした。Si 溶出速度の設定は解析コード GoldSim（GoldSim Technology Group，2021）で処理し，間隙水中の熱力学平衡計算は解析コード PHREEQC（Parkhurst and Appelo，2013）で処理するプロトタイプモデルを構築した（図 4）。

九大共研では，①～③に着目し，溶液中の Si 濃度や pH，温度条件に応じたガラス溶解速度の大きさ及び変質層（ゲル層，析出層）の形態に関するデータを取得している。今年度は 2023 年度に設定した試験条件（表 1 の No.7～10）についてのガラス溶解速度の測定評価データを拡充した。具体的には，溶存 Si 濃度が飽和濃度に近い条件や包括的技術報告書で設定した間隙水の pH6.4～9.8 を想定し，溶液中 Si 濃度 100 [ppm]の条件におけるガラス溶解速度データ（図 5，表 1 の No.7）と pH7 におけるガラス溶解速度データ（図 6，表 1 の No.8～10）を拡充した。

千葉大共研では，②に着目し，様々な元素から構成されるゲル層中の水分子の移行・変質挙動を解析するための出発点として単純組成（ケイ素，酸素）のゲル層の分子構造モデル（図 7）を作成し，ゲル層中の細孔壁面に分布するケイ素と細孔内に存在する水との化学的相互作用（水素結合の形成と破壊）を反映した分子動力学計算を行い，ゲル層中における物質の移行経路となる細孔の構造（孔径や連結性等）と水分子の拡散係数との関係を分析した（Hatori et al.，2024）。ゲル層の含水率が大きい場合は相互に接続した細孔が多くなり水分子が移動するための経路が増えることで拡散移行が容易となることや，含水率が小さい場合は孤立した細孔の形成や細孔内の水分子が細孔壁面のシラノール基（Si-OH）と水素結合（Si-H 結合，O-H 結合）を形成することで水分子の拡散移行が制限されることが分かった。

3. 包括的技術報告書への影響

ガラス溶解速度へのオーバーパック由来の Fe イオンの影響や，ガラス表面における変質層の形成によりガラス溶解を抑制または促進の影響を定量的に示すことは，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るとともに，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。今後の技術開発で得られる上記①～④等の現象理解により，包括的技術報告書（NUMO，2021）の本編の 6.3 節（シナリオの作成と解

析ケースの設定）の変動ケースの設定（6.3.3 項（1））に記載したガラス固化体の溶解に及ぼす影響に関する不確実性を低下させることができるため，今後，同報告書の記述内容の更新を検討する。

4. 今後の展開

JAEA 共研では，模擬廃棄物ガラスを $FeCl_2$ 溶液または $MgCl_2$ 溶液に浸漬させた長期試験を継続するとともに，得られたデータを用いてプロトタイプモデルの妥当性確認を行う。加えて，ゲル層の構造に応じたゲル層中の物質移行挙動（上記②）や，溶存 Si の鉄腐食生成物や緩衝材への収着（上記④）等の現象を反映するためモデルを改良する。九大共研では，日本で想定される間隙水水質に対応するガラス溶解速度データの拡充を行う（上記①～③）。千葉大共研では，単純組成（ケイ素，酸素）のゲル層を対象としたゲル層中の水の移行シミュレーション手法について，多成分系のゲル層を対象とした手法へ改良する（上記②）。

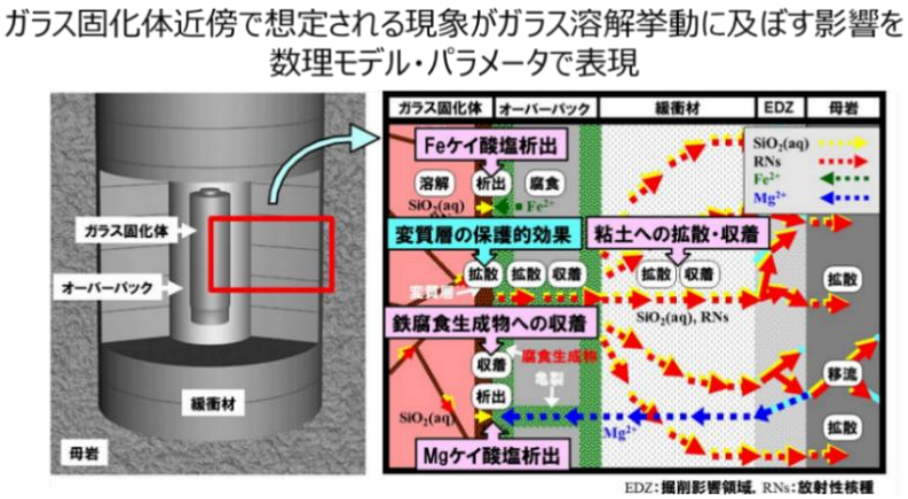


図 1　ガラス溶解モデルの概念図（柴田ほか，2015）

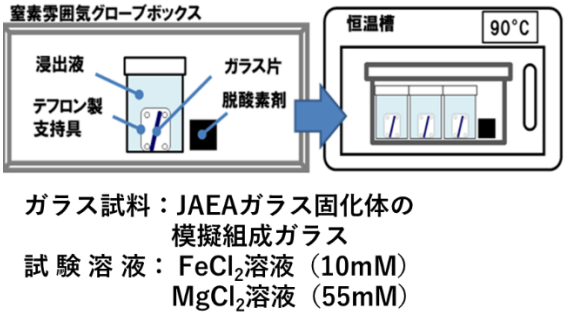


図 2　長期間のガラス溶解・変質挙動を調べるための静的試験装置の概略

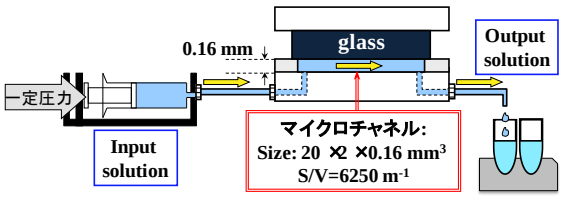


図 3　溶液条件・温度を一定に制御可能なマイクロチャンネル流水試験装置の概略

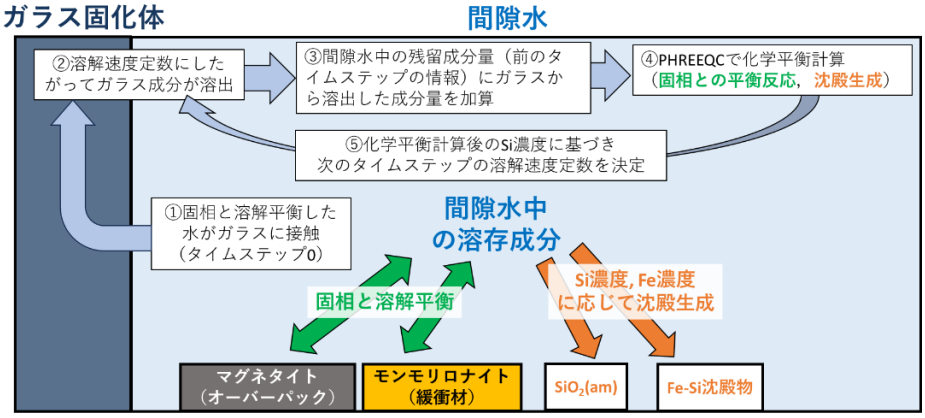
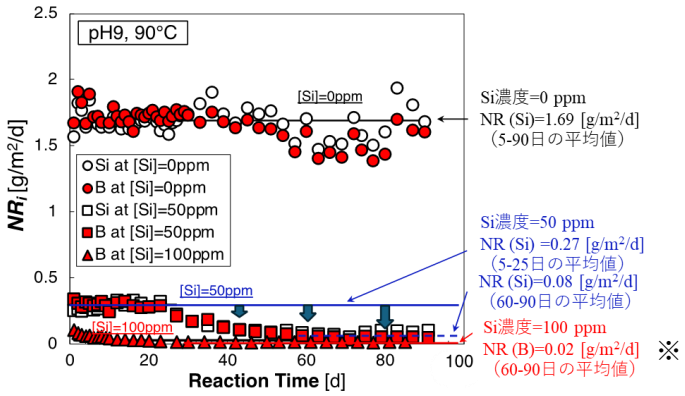


図 4　間隙水水質に応じたガラス溶解速度の計算過程
（①②③⑤の計算処理は GoldSim で，④の計算処理は PHREEQC で行う）

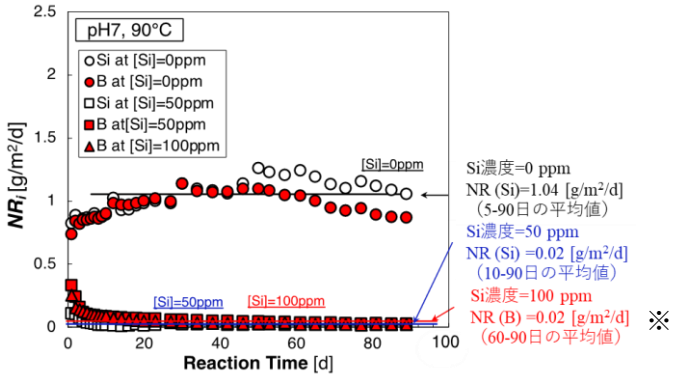


$$NR(i)\ [\mathrm{g/(m^2 d^1)}] = \frac{C_i}{f_i}\frac{V}{S}\frac{1}{\Delta t}$$

$NR(i)$	：元素 i の溶解速度 [g/(m²d¹)]
C_i	：反応溶液中の Si の濃度 [g/m³]
f_i	：反応前ガラス固化体中の Si の重量分率 [-]
V	：反応後溶液サンプリング体積 [m³]
S	：反応表面積 [m²]
Δt	：反応時間（サンプリング時間）[d]

※　Si の溶解速度が測定下限（～0.01 [g/m²/d]程度）以下となったため，B の溶解速度をガラス溶解速度とし，その他の試験では Si の溶解速度をガラス溶解速度と評価した。

図 5　Si 及び B の溶解速度（NR(Si)，NR (B)）の経時変化
（pH9，90℃，Si 濃度=0，50，100ppm，反応期間 90 日）



※　Si の溶解速度が測定下限（～0.01 [g/m²/d]程度）以下となったため，B の溶解速度をガラス溶解速度とし，その他の試験では Si の溶解速度をガラス溶解速度と評価した。

図 6　Si 及び B の溶解速度（NR(Si)，NR (B)）の経時変化
（pH7，90℃，Si 濃度=0，50，100ppm，反応期間 90 日）

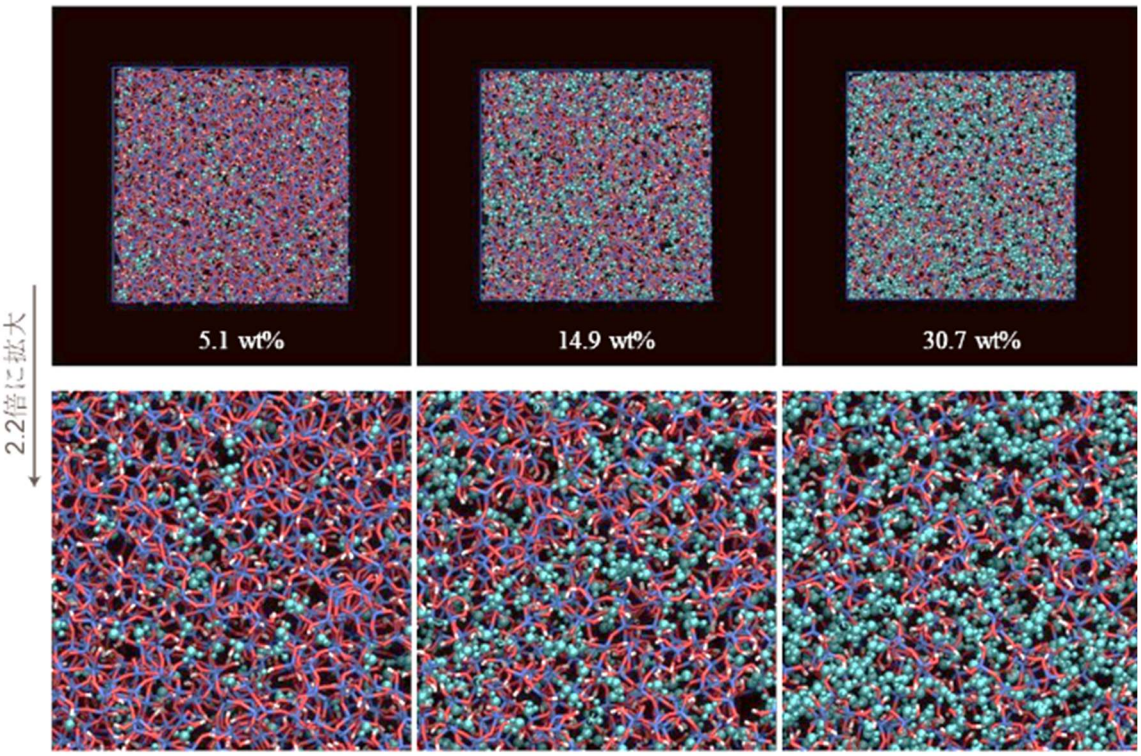


図 7　様々な含水率[wt%]におけるゲル層の
分子構造モデル
（上の図は全体図，下の図は上の図の 2.2 倍拡大図。色のついた棒はシリケートネットワークの Si-O 結合と O-H 結合を表す。シアン色の球と棒は水分子を表す。）

表 1　ガラス溶解試験の条件・ガラス溶解速度

試験 No	pH	Si 濃度	温度	試験期間	ガラス溶解速度　※1	実施年度
No.1	pH9	0 ppm	50℃	90 日	0.048 g/m^2/d	2022 年度
No.2	pH9	0 ppm	70℃	90 日	0.39 g/m^2/d	2022 年度
No.3	pH9	0 ppm	90℃	90 日	1.69 g/m^2/d	2021 年度
No.4	pH9	50 ppm	50℃	23 日 ※2	0.0013 g/m^2/d	2022 年度
No.5	pH9	50 ppm	70℃	90 日	0.015 g/m^2/d	2022 年度
No.6	pH9	50 ppm	90℃	90 日	0.08 g/m^2/d　※3※4	2022 年度
No.7	pH9	100 ppm	90℃	90 日	0.02 g/m^2/d　※3	2023 年度
No.8	pH7	0 ppm	90℃	90 日	1.04 g/m^2/d	2023 年度
No.9	pH7	50 ppm	90℃	90 日	0.02 g/m^2/d	2023 年度
No.10	pH7	100 ppm	90℃	90 日	0.02 g/m^2/d　※3	2023 年度

※1　試験 No. 7 及び No. 10 では Si の溶解速度が測定下限（～0.01 [g/m^2/d]程度）以下となったため，B の溶解速度をガラス溶解速度とし，その他の試験では Si の溶解速度をガラス溶解速度と評価した。

※2　試験開始後 23 日目にガラス試料が破損したため，23 日以降のガラス溶解速度は測定できなかった。

※3　ガラス溶解速度が試験期間中に低下した後，ほぼ一定値に近付いた試験期間 60～90 日の平均値。

※4　試験期間中にガラス溶解速度が低下する前の試験期間 25 日までの平均値は 0.3 [g/m^2/d]。

参考文献

Debure, M., Windt, D. L., Frugier, P., Gin, S. and Vieillard, P. (2016)：Mineralogy and thermodynamic properties of magnesium phyllosilicates formed during the alteration of a simplified nuclear glass, Journal of Nuclear Materials, 475, pp.255-265.

Fleury, B., Godon, N., Ayral, A. and Gin, S. (2013)：SON68 glass dissolution driven by magnesium silicate precipitation, Journal of Nuclear Materials, 442, pp.17-28.

Gin, S. (2001)：Protective effect of the alteration gel: a key mechanism in the long-term behavior of nuclear waste glass, Material Research Society Symposium Proceedings, 663, pp.207-215.

Godon, N., Rebiscoul, D. and Frugier, P. (2013)：SON68 Glass Alteration Enhanced by Magnetite, Procedia Earth and Planetary Science, 7, pp.300-303.

GoldSim Technology Group (2021)：GoldSim User's Guide, Version 14.0.A.

Grambow, B. and Müller, R. (2001)：First-order dissolution rate law and the role of surface layers in glass performance assessment, Journal of Nuclear Materials, 298, pp.112-124.

Hatori, T., Matsubara, R., Inagaki, Y., Ishida, K. and Ohkubo, T. (2024)：Geometrical and chemical effects of water diffusion in silicate gels: Molecular dynamics and random walk simulations. Journal of the American Ceramic Society.

Michelin, A, Burger, E., Rebiscoul, D. Neff, D., Bruguier, F., Drouet, E., Dillmann, P. and Gin, S. (2012)：Silicate Glass Alteration Enhanced by Iron: Origin and Long-Term Implications, Environmental Science & Technology, 47, pp.750-756.

Mitsui, S., Makino, H., Inagaki, M. and Ebina, T. (2009)：Impact of Silicon Migration through Buffer Material on the Lifetime of Vitrified Waste, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.1193, pp.397-404.

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) (2024)：技術開発成果概要 2022，NUMO-TR-24-01，pp. 104-108.

Parkhurst, D. L. and Appelo, C. A. J. (2013)：Description of input and examples for PHREEQC version 3－A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, Chapter A43, p. 497.

柴田雅博，澤田淳，舘幸男，牧野仁史，若杉圭一郎，三ツ井誠一郎，北村暁， 吉川英樹，小田治恵，石寺孝充，陶山忠宏，畑中耕一郎，仙波毅，瀬尾俊弘，亀井玄人，黒澤進，後藤淳一，澁谷早苗，後藤考裕，窪田茂，稲垣学，守屋俊文，鈴木覚，石田圭輔，西尾光，牧内秋恵，藤原啓司 (2015)：概要調査段階における設計・性能評価 手法の高度化（その 3）－NUMO-JAEA 共同研究報告書（2013 年度），JAEA-Research 2014-030.

2.3.2　セメント系材料と緩衝材との相互作用による長期変質挙動の検討

小池 彩華[1]　田窪 勇作[1]　安楽 総太郎[2]　川喜田 竜平[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）で示した地層処分場の設計（図 1）では，人工バリアの一つである緩衝材はセメント系材料と接する。セメント系材料から溶出する高アルカリ成分は，緩衝材中のモンモリロナイトの溶解と二次鉱物の生成やイオン交換反応といった変質現象を引き起し，緩衝材に期待する安全機能に悪影響を及ぼす可能性がある。この時生じる現象としては，①モンモリロナイトの溶解/変質鉱物の沈殿，②モンモリロナイトのイオン交換反応，③鉱物組成変化に伴う間隙率の変動に伴う物質移動特性の変化，④緩衝材中における物質の拡散が考えられる。これらに対して，①鉱物の溶解/沈殿は反応速度論，②化学種分配及びモンモリロナイトのイオン交換反応は平衡論，③物質移動特性の変化は間隙率と実効拡散係数の関係式，④拡散は緩衝材中の濃度差を起因とした拡散方程式に従うとした。包括的技術報告書（NUMO，2021）においては，①②を考慮した化学反応モデルと③④を考慮した物質移行モデルを組み合わせることで反応輸送解析モデルを構築し，その時点で利用可能な最新の知見に基づき，実証されているモンモリロナイトの溶解速度式の中から溶解が早いと考えられる Marty 式を用いるなど，安全評価上の保守性を確保するように評価した。この解析モデルのさらなる信頼性向上に向け，室内試験による現象理解の深化とそれを踏まえた実現象をより忠実に表現するための解析モデルの改良を 2016 年度から進めている。セメント系材料と緩衝材の相互作用は，実際の処分場環境における複数の現象が複合的に生起することになるが，まず関連する個別の現象に着目して①と②に着目したバッチ変質試験，①②に加えて③についても着目した圧縮したベントナイト試料を用いての通水試験，①～④を対象としてセメント系材料と緩衝材の接触を模擬した接触試験を実施した。こうした現象の理解においては長期間の試験データが重要になることから，定期的に試験データを取得しながら，最長 10 年程度までの試験を想定している。各試験期間で取得する実験結果とモデルによる解析結果の比較を行い，段階的に解析モデルの実現象に対する整合性を確認し，必要に応じて改良を行う。本検討は JAEA との共同研究で実施している。

これまで，セメント系材料由来の高アルカリ環境を想定し，高 pH 溶液中（pH 12.5，13）にベントナイト粉末試料を浸漬させたバッチ変質試験（図 2）を実施してきた。2022 年度は，試験期間 2 年までの試料中のモンモリロナイトの変質量を分析した結果と，包括的技術報告書（NUMO，2021）で示した化学反応モデルを用いた解析結果を比較することで，化学反応モデルの妥当性確認を行った（NUMO，2024）。試験では試験期間 2 年経過後でも試料中にモンモリロナイトが 7 割程度残存していることが確認されたが，解析では 2 年経過後にはモンモリロナイトが 1 割程度残存する結果となった。この要因として，モンモリロナイトの変質による生成が確認されたフィリップサイトについて，解析ではフィリップサイトの生成速度式として沸石類鉱物であるローモンタイトと共通の生成速度式を利用しており，これによりフィリップサイトの生成を過剰に評価している可能性が考えられた。2023 年度はバッチ変質試験，通水試験，及び接触試験に対するデータ取得を継続するとともに，バッチ変質試験を対象とした解析モデルにおいて，フィリップサイト生成速度式のパラメータを変化させることで，モンモリロナイトの変質量への感度を確認した。

2.　主な成果

バッチ変質試験，通水試験，及び接触試験を継続的に実施し，以下のようにセメント系材料による緩衝材の変質評価に資するデータを拡充した。

- バッチ試験については，高 pH 溶液にベントナイト粉末試料（クニゲル V1，クニピア F）を 5 年間浸漬させたバッチ変質試験試料について，モンモリロナイト含有量，鉱物組成，溶液組成のデータを拡充した（図 3）。
- 通水試験については，試験体系・試験条件を決定するための予備試験において圧縮ベントナイト（クニゲル V1）に高 pH 溶液を通水し，膨潤圧や透水係数の変化に関するデータを拡充した。
- 接触試験については，普通ポルトランドセメントペースト硬化体（W/C＝55％）と圧縮ベントナイト（クニゲル V）を 3.5 年間 50℃の環境で接触させた試料に対する，モンモリロナイト含有量分布，鉱物組成分布，濃度分布，空隙率分布等のデータを拡充した。

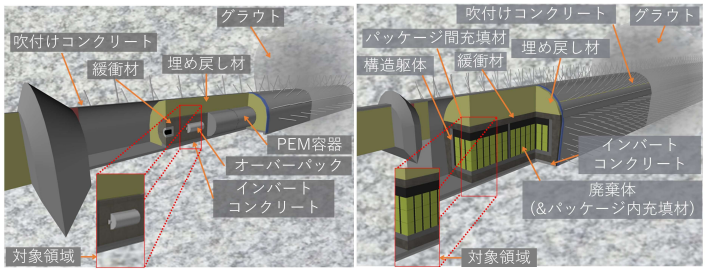
また，2022 年度に解析上の課題として抽出された，フィリップサイトの生成速度式を対象にモンモリロナイトの変質量への感度解析を行った。包括的技術報告書（NUMO，2021）で使用した化学反応モデルにおいては，フィリップサイトの生成速度式は，沸石類鉱物であるローモンタイトと共通の生成速度式を利用している。生成速度式は反応比表面積，溶解定数，飽和指数のみで構成されており，いずれのパラメータも，今回の感度解析の範囲内ではモンモリロナイトの溶解に有意な感度を持たないことを確認した。今後は，フィリップサイトの生成挙動に関する知見を収集し，解析上の取り扱いについて検討する予定である。例えば，フィリップサイトの生成速度式の取り扱いについて，現在の解析ではフィリップサイトの生成は溶解と同じ速度で進行し，過飽和に達した場合必ず沈殿が生じるといった仮定に基づいているが，フィリップサイトは 50℃以上で生成される（小田，2005）ことから，鉱物生成に係る環境因子を含めた速度論的な解析上の取り扱いを反映できるように改良することで，試験結果と解析結果の差異が低減される可能性がある。

3. 包括的技術報告書への影響

セメント系材料が緩衝材に及ぼす相互作用による状態変遷の評価は，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・高度化に記載された課題であるとともに，OECD/NEA による国際レビュー（OECD/NEA，2023）でも必要性を指摘された課題である。包括的技術報告書（NUMO，2021）の本編 6.3.2 項（シナリオの作成）の（3）（i）（a-c）①ニアフィールドスケールにおける緩衝材の有する安全機能の維持について，本検討によって得られる緩衝材の長期変質挙動を踏まえたうえで変質の進展を評価し，同報告書の記述内容の更新を検討する。

4. 今後の展開

今後は，バッチ変質試験，通水試験，及び接触試験を継続して長期試験データを拡充するとともに，異なる条件（クニゲル V1 や溶液条件の異なる試料等）での結果についても比較を行うことで，今後拡充すべきデータを検討し，現象に即したモデルの開発を継続する。



a）HLW 処分場　　b）TRU 等廃棄物処分場

図 1　処分場の構成要素（NUMO，2021 に加筆）

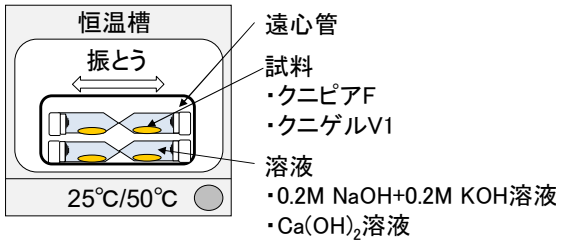


図 2　バッチ変質試験概要

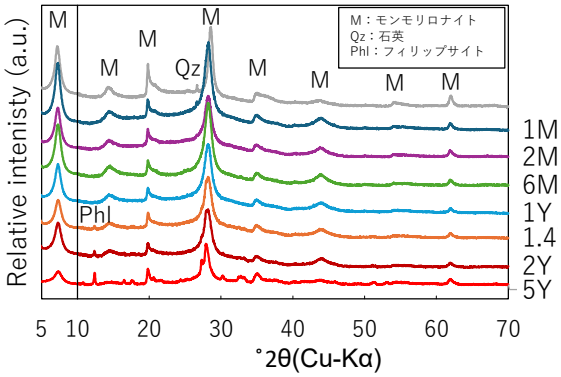


図 3　バッチ変質試験における XRD 分析

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) (2024)：技術開発成果概要 2022，NUMO-TR-24-01.

OECD/NEA (2023)：The Nuclear Waste Management Organization of Japan's Pre-siting Safety Case Based on the Site Descriptive Model，NEA/RWM/R(2022)2.

小田治恵，佐々木良一，David, S.，Randolph, C. A.，本田明 (2005)：緩衝材の鉱物学的長期変遷シナリオ，JNC TN8400 2005-020.

2.3.3　ベントナイトコロイド影響評価に用いるデータ取得

松原 竜太[1]　浜本 貴史[1]　石寺 孝充[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，かつ安定に存在する場合には，コロイドに取り込まれた核種の移行を考慮した安全評価が必要となる（図 1）。このため，NUMO は，コロイドが生成し，安定に存在する地下水水質を明確化するとともに，コロイドが共存する条件での核種移行を定量的に評価するための核種移行モデルの構築に取り組んでいる。

コロイドの安定性，生成条件の明確化については，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，コロイドが生成し，かつ安定に存在しうる地下水水質を明確に把握するため，コロイドが溶液中に安定に存在する溶液条件等を調べる試験（図 2）（以下，「コロイド安定性評価試験」という）と，圧縮ベントナイトからのコロイドの生成挙動を調べる試験（図 3）（以下，「コロイド生成試験」という）を，JAEA との共同研究（以下，「JAEA 共研」という）により実施している。また，スイスのグリムゼル試験サイトにおいて実施されている国際共同プロジェクト CFM（Colloid Formation and Migration：以下，「CFM」という）（2016 年～）へ参加し，CFM で実施されている天然の割れ目中に定置した圧縮ベントナイトからのコロイド生成挙動を調べる試験（in-rock Bentonite Erosion Test：以下，「i-BET」という）を共同で実施している。この i-BET で得られるデータを活用し，JAEA 共研で得られた試験結果の実際の地質環境への適用性を検討する予定である。

コロイド共存下での核種移行モデルの構築については，JAEA 共研によりコロイド共存下での岩石模擬亀裂中の核種移行試験を実施し，基礎データの拡充と解析手法の構築を進めるとともに，CFM で実施されている天然の割れ目を対象としたコロイド共存下での核種移行試験（図 4）（Long-term In situ Test：以下，「LIT」という）の結果等を活用し，コロイド共存下での核種移行モデルの改良，実際の地質環境への適用性の検討に取り組んでいる。

2.　主な成果

（1）コロイド安定性・生成条件の明確化

コロイド安定性評価試験では，コロイドを溶液中に分散させて溶液中のコロイド濃度の経時変化を観察し，コロイドが沈殿せず溶液中に安定に分散する条件を検討している（図 2）。本試験は，地下水中で代表的な 1 価，2 価の陽イオンである Na イオン，Ca イオンが共存する溶液条件を対象とし，それらのイオンの濃度をパラメータとして実施している。2022 年度までに，Na 濃度 2.0×10^{-2} mol/L 以下では，概ね Ca 濃度 1.1×10^{-4} mol/L 以下の範囲でコロイドが安定に存在することを明ら

かにした（NUMO，2023；NUMO，2024）。2023 年度は，コロイドが安定に存在可能な上限の Na 濃度及び Ca 濃度を詳細に把握するため，Na 濃度 1.0×10^{-3}～2.0×10^{-2} mol/L，Ca 濃度 5.0×10^{-5}～2.0×10^{-4} mol/L の範囲で試験を実施し，Na 濃度及び Ca 濃度とコロイドの安定性の関係をより詳細に整理した（図 5）。

コロイド生成試験では，装置の中心部に圧縮ベントナイトを配置し，その周囲の模擬亀裂中に侵入したベントナイトからのコロイド生成挙動を評価している（図 3）。本試験では，圧縮ベントナイトが地下水との接触により Ca 型化した場合のコロイド生成挙動を調べるため，Ca 型の圧縮ベントナイト試料を使用し，コロイド安定性評価試験でコロイドが安定に存在することを確認した Na 濃度 1.0×10^{-2} mol/L において試験（表 1）を実施している。これまでに取得した 140 日程度までの試験データからは，コロイドの生成は確認されなかった。

CFM において実施している i-BET では，天然の割れ目中に外国産の Na 型ベントナイト（圧縮ベントナイト）を定置し，圧縮ベントナイトの含水状況等をモニタリングするとともに，圧縮ベントナイト周囲の天然割れ目中から地下水を採取してコロイド濃度を測定し，圧縮ベントナイトから生成したコロイド量の時間変化に関するデータを取得している。試験は 2019 年度より実施しており，2023 年度も継続してこれらのデータを取得している。

(2) コロイド共存下核種移行モデルの構築

コロイド共存下での核種移行モデルの構築に向けた基礎データの拡充のため，JAEA 共研では，表面が平滑な 2 つの岩石試料を用いて模擬亀裂を作製し，コロイド共存下での模擬亀裂中のトレーサーの移行挙動を観察する試験を実施している（図 6）。2023 年度は，試験手法の確立に向けてコロイド共存下での非放射性同位体の Sr 及び Cs の移行挙動に関するデータを取得した。

CFM の LIT では，2013～2018 年度に，放射性トレーサー（^{45}Ca，^{75}Se，^{99}Tc，^{137}Cs，^{233}U，^{241}Am，^{238}Pu，^{242}Pu，^{237}Np）を封入したガラスバイアルを埋め込んだ圧縮ベントナイトを天然の割れ目中に設置し，地下水の流れにより生成するコロイドへの核種の収着挙動や割れ目中の移行挙動を調べる試験（図 4）を実施した。その結果，割れ目中へのトレーサーの移行が確認されず，圧縮ベントナイト中にトレーサーが留まっている可能性があることから，2023 年度は，圧縮ベントナイト及び母岩割れ目を含む試験系の一部を坑道からオーバーコアリングにより採取し，分析を実施した。オーバーコアリングした試料を分析した結果，トレーサーはベントナイト中を僅かに拡散移行したのみで，割れ目中にトレーサーの移行が確認されなかった原因は，圧縮ベントナイト中にトレーサーが留まっていたためであることを確認した。

3. 包括的技術報告書への影響

コロイドの安定性・生成条件の把握と，コロイドによる核種移行挙動への影響を評価するための手法を構築することは，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るとともに，OECD/NEA による国際レビュー（OECD/NEA，2023）でも必要性を指摘された課題である。包括的技術報告書（NUMO，2021）の本編 6.3.2 項（シナリオの作成）では，基本シナリオにおいて，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。本技術開発で取得したコロイドの安定条件に基づくと，包括的技術報告書（NUMO，2021）と同様の地下水組成であれば同様の結論となる。今後の技術開発で得られるコロイド生成条件やコロイド共存下の核種移行挙動に関する現象理解を踏まえて，サイトが特定された際のコロイドによる核種移行挙動への影響の取り扱い方について，同報告書の記述内容の更新を検討する。

4.　今後の展開

(1) に関して，JAEA 共研では，コロイド生成試験を継続してデータを拡充し，溶液中の Na 濃度，Ca 濃度やベントナイトの状態（Na 型，Ca 型）等，圧縮ベントナイトからコロイドが生成する条件を明確化する。CFM の i-BET では，ベントナイト試料の質量減少やベントナイトの膨潤による亀裂への侵入状況，コロイド生成挙動に影響を与える陽イオン組成の変化などを分析するため，試験終了後に行うオーバーコアリングの計画策定及び分析を進める。

(2) に関して，JAEA 共研では，コロイド共存下での岩石模擬亀裂中のトレーサー移行試験を継続し，基礎データを拡充するとともに，トレーサー移行挙動を解析するための解析コードの選定等を実施し，コロイド共存下での核種移行解析手法の構築を進める。CFM では，コロイドへの核種の収着挙動や割れ目中の移行挙動を調べられるようにトレーサーの添加方法などの試験手法改良を進める。

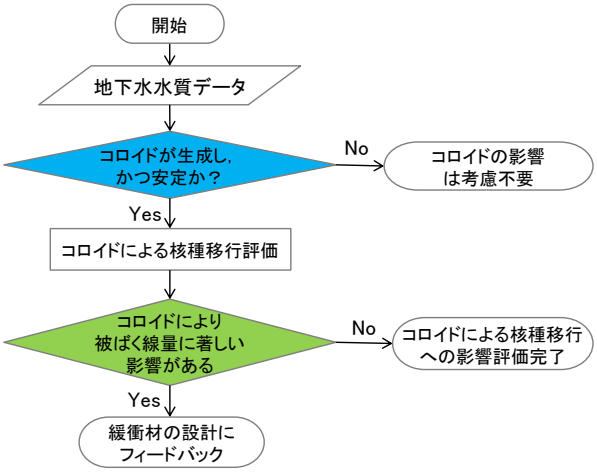


図 1　コロイド影響の評価フロー（案）

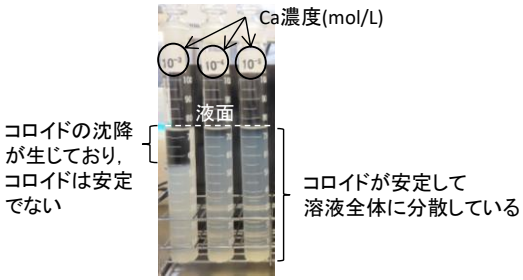


図 2　コロイド安定性評価試験

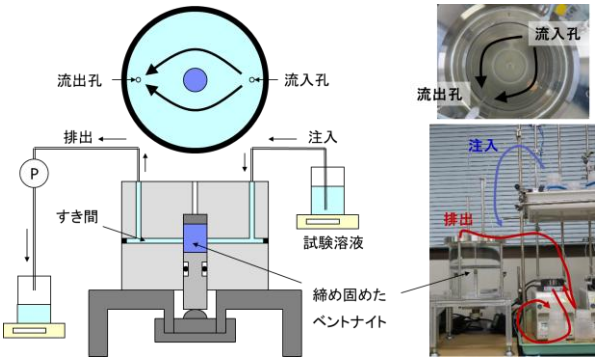


図 3　コロイド生成試験に用いる試験装置の概略図

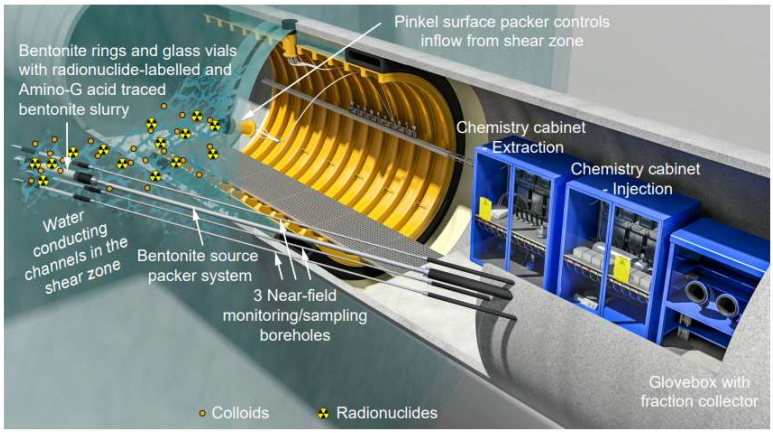


図 4　天然の割れ目を利用したコロイド共存下での放射性トレーサー移行試験の概念図
(Schlickenrieder et al., 2017)

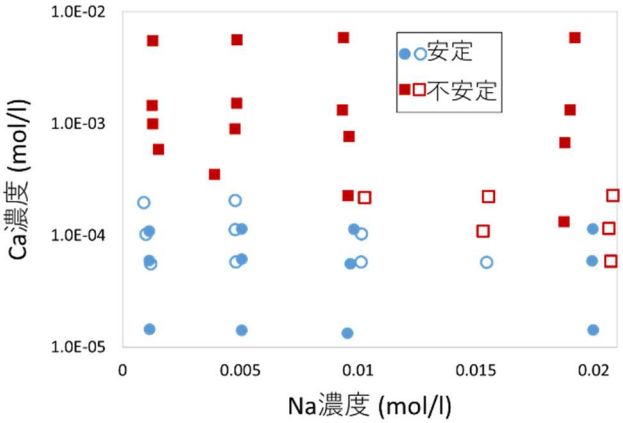


図 5　Na 及び Ca 濃度とベントナイトコロイドの安定性の関係
（●■：2022 年度の試験結果，○□：2023 年度の試験結果）

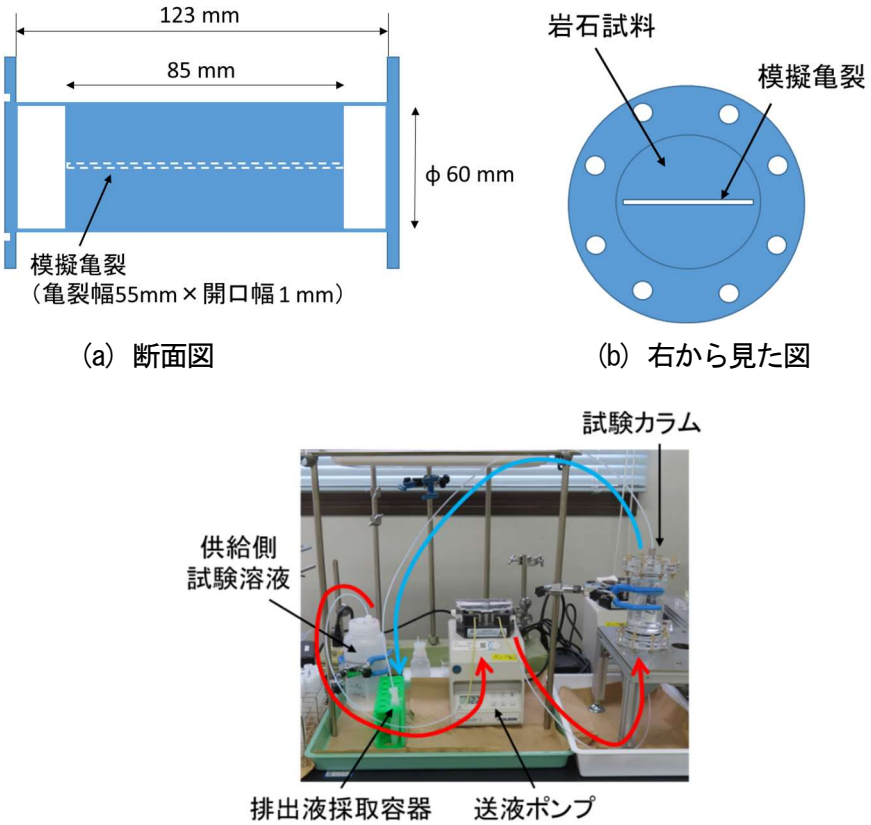


図 6　模擬亀裂中のコロイド移行試験装置

表 1　コロイド生成試験の条件

ベントナイト	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）	0.024 ml/min （5×10^{-6} m/s 程度）
試験溶液	NaCl 0.01 mol/l，pH9 付近
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.

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) (2023)：技術開発成果概要 2021，NUMO-TR-22-02，pp. 58-60.

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，pp. 104-108.

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－，p. 24.

Schlickenrieder, L.， Lanyon, G.W.， Kontar, K. and Blechschmidt, I. (2017)：Colloid Formation and Migration Project: Site instrumentation and initiation of the long-term in-situ test， Nagra Technical Report NTB 15-03.

SKB (2010)：Buffer and backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site， SKB Technical Report TR-10-47.

2.3.4　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手法

尾上 博則[1]　吉田 芙美子[1]　浜本　貴史[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

地層処分事業においては，地質環境の調査・評価を通じて構築され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，開放系であるとともに岩盤中に分布する断層や割れ目等によって水理学的に不均質である。また，調査によって得られる情報は評価領域の空間的な広がりに対して限定的なものであるため，このような不均質性を有する割れ目系岩盤を対象とした地下水流動・物質移行評価結果の信頼性を示すためには，調査データの解釈，境界条件や水理・物質移行パラメータの設定といったモデル化・解析の作業過程に内在する不確実性を評価したうえで，構築した水理地質構造モデルの妥当性を確認することが重要である（例えば，Lanyon et al.，2021）。こうした割れ目系岩盤の水理学的不均質性をモデル化する方法としては，原位置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する割れ目ネットワークモデル（Discrete Fracture Network model：以下，「DFN モデル」という）といった確率論的な手法が適用される場合が多い（例えば，Selroos et al.，2022）。DFN モデルは，割れ目特性の確率分布から統計的なサンプリングによって，割れ目のネットワークをモデル化するものである。この DFN モデルのような確率論的な手法で構築される水理地質構造モデルの妥当性は，地下水流動・物質移行解析によって求められる地下水流動特性値あるいは物質移行特性値と原位置で取得したデータとを比較することで確認する。しかしながら，その比較に用いることが可能な原位置データは極めて限られるため，その考え方や手順といった方法論を整備する必要がある。

このため，NUMO は JAEA との共同研究により，不均質性を有する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，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，モデル化・解析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；江崎ほか，2023；並川ほか，2023a；尾上ほか，2023；石橋ほか，2023；並川ほか，2023b；田川ほか，2023；羽根ほか，2023；NUMO，2024）。

2023 年度からは，割れ目系岩盤の割れ目を対象とした水理地質構造モデルの妥当性確認に係る検討事例の蓄積及び方法論の整備に資するための課題の抽出を目的として，エスポ地下岩盤研究所で取得された調査試験データを用いた検討を開始した。2023 年度は，水理地質構造モデルの妥当性確認のための実用的な手法・考え方のワークフロー（図 1）を作成するとともに，そのワークフローに沿った試行として「概念化」までを実施した。なお，本技術開発を進めるにあたっては，NUMO が参加している SKB 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/）”の枠組みを活用した。

2.　主な成果

本技術開発では，エスポ地下岩盤研究所で実施された国際共同プロジェクト（TRUE Block Scale Project；Andersson et al.，2002）で取得された調査試験データを用いて，エスポ地下岩盤研究所の深度 450 m 坑道周辺岩盤において「構造 20」と呼ばれている不連続構造を対象としたモデル化・解析を実

施する。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不連続構造である。2023 年度は，構造 20 を事例としたモデル化・解析の目的を，「ニアフィールドスケールの地下水流動特性を評価するための実用的な水理地質構造モデルとして，100m 規模の断層・割れ目が有する様々な不均質特性をより単純化したモデルを構築する方法論を示すこと」と設定し，水理地質構造モデルの妥当性確認のための実用的な手法・考え方のワークフローを作成し，そのワークフローに沿った構造 20 の水理地質構造の概念を整理した。

ワークフローの作成にあたっては，地下水流動解析の手順や考え方に関する国内外の既往の知見（例えば，長谷川，2006；JAEA・電中研，2019）や Lanyon et al.（2021）において提唱されたモデルの評価・検証に向けたフレームワークを参考にした。作業ステップの全てを網羅的に記述すると複雑なフローとなり汎用性を損なうことから，水理地質構造モデルの構築・妥当性確認を実施するために想定される作業のうち，解析作業の内容に関わらず一般性があると想定されるものを抽出したうえで，意思決定や繰り返しの有無といった個々の作業の流れや関係性を整理することで，ワークフローを作成した（図 1）。

構造 20 を対象としたコア観察，BTV（Borehole Television）観察及び孔間水理試験の結果などのデータの分析から，当該構造は内部構造が不均質な弱部が破砕（開口）した割れ目帯のようなものであると考えられる（図 2）。この不均質な割れ目帯中の空隙が連続する箇所が主要な水みちとなることで，構造 20 内で連続した開口部を通じて地下水流動が生じているものと仮定し，水理地質構造の概念を検討した。そして，構造 20 における主要な水みちとその周辺の割れ目帯に着目し，それらについて，離散的な割れ目分布や一枚の不連続構造で表現するといった異なる表現方法やそれらを組み合わせることで，複数の概念を構築した（図 3）。

3. 包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書（NUMO，2021）の本編 2.5.2 項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特性値や物質移行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。本技術開発を通じて得られる水理地質構造モデルの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水理地質構造モデルの信頼性を確保するうえで有効な知見となり得るため，本技術開発の成果の信頼性が確認されれば，包括的技術報告書の水理地質構造モデルの作成にあたっての基本的知識として追記する。

4. 今後の展開

今後は，2023 年度に作成したワークフローに沿って構造 20 を対象としたモデル化・解析，不確実性の抽出，モデルの妥当性確認の試行を継続する予定である。また，水理地質構造モデルの妥当性確認のためのより実用的な方法論の整備に資するためにモデル化・解析の目的の具体化を図るとともに，どの程度の精度で実測値と整合すれば水理地質構造モデルが目的に適した妥当性なものと言えるのか，といったより定量的な評価に向けた検討を進める。

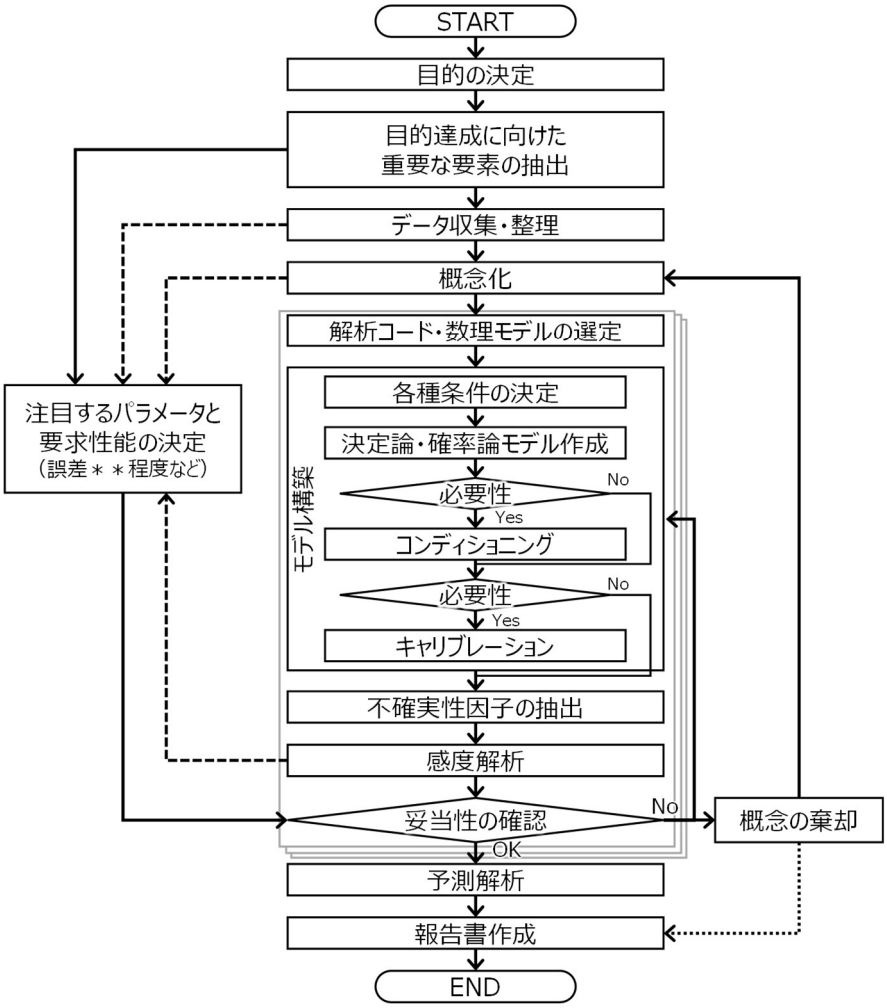


図 1　モデル構築・妥当性確認のための実用的なワークフロー

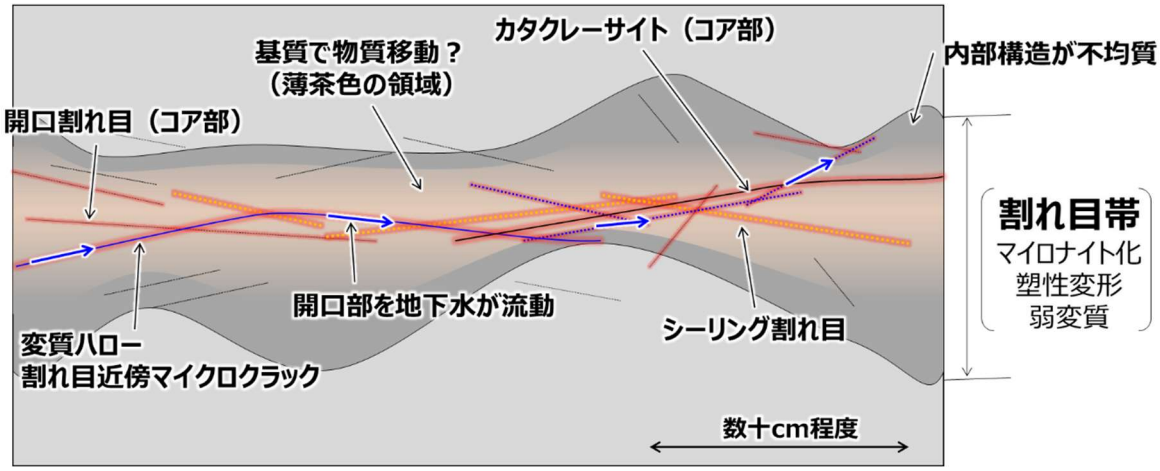


図 2　構造 20 の地質構造の概念（亀裂面に対して直交する断面の概念図）

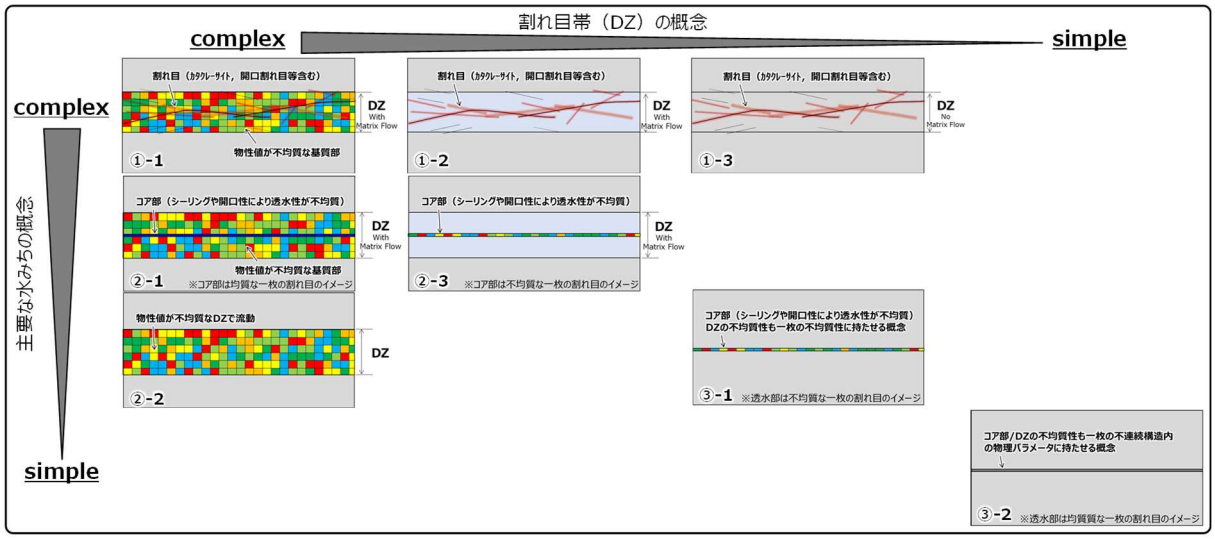


図 3　構造 20 の水理地質構造概念の整理（亀裂面に対して直交する断面の概念図）

本図は左上ほど複雑な水理地質構造の概念であり，右下ほど単純な水理地質構造の概念として整理。図中の①-1～①-3 は，離散的な割れ目分布が主要な水みちと仮定した概念。図中の②-1～②-3 は，1 枚の不連続構造または割れ目帯全体が主要な水みちと仮定した水理地質構造の概念。図中の③-1，③-2 は，1 枚の不連続構造が主要な水みちと仮定した水理地質構造の概念を示す。

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.

江崎太一，石橋正祐紀，田川陽一，並川正，羽根幸司，升元一彦，尾上博則，三枝博光，石田圭輔，藤﨑淳，澤田淳 (2023)：原位置調査データを用いた DFN モデルのコンディショニングに関する検討(その 1)，土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会，CS12-06.

羽根幸司，尾上博則，石橋正祐紀，江崎太一，田川陽一，田部井和人，並川正，三枝博光，石田圭輔，澤田淳 (2023)：地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認手法の整備に係る検討事例 (5) 割れ目のモデル化概念の違いが地下水流動・物質移行特性評価に与える影響，日本原子力学会 2023 年秋の大会，1D13.

長谷川琢磨（2006）：地下水流動解析のガイドラインに関する調査，地下水学会誌，Vo.48, No.2, pp.75-86.

石橋正祐紀，尾上博則，江崎太一，田川陽一，田部井和人，並川正，羽根幸司，三枝博光，石田圭輔，澤田淳 (2023)：地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認手法の整備に係る検討事例 (2) 低透水性割れ目のモデル化方法の違いが地下水流動評価に与える影響，日本原子力学会 2023 年秋の大会，1D10.

JAEA(日本原子力研究開発機構)，電中研(電力中央研究所) (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（岩盤中地下水流動評価技術高度化開発）.

Lanyon, G.W., Davy, P., Dershowitz, W. S., Finsterle, S., Gylling, B., Hyman, J. D., Neretnieks, I. and Uchida, M. (2021)：Pragmatic Validation Approach for Geomechanics, Flow, and Transport Models in Fractured Rock Masses, DFNE 21-2369.

並川正，石橋正祐紀，江崎太一，田川陽一，羽根幸司，升元一彦，尾上博則，三枝博光，石田圭輔，

藤﨑淳，澤田淳 (2023a) : 原位置調査データを用いた DFN モデルのコンディショニングに関する検討(その 2)，土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会，CS12-07.
並川正，尾上博則，石橋正祐紀，田川陽一，田部井和人，羽根幸司，三枝博光，石田圭輔，澤田淳 (2023b)：地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認手法の整備に係る検討事例 (3) 割れ目のコンディショニング方法の違いが地下水流動評価に与える影響，日本原子力学会 2023 年秋の大会，1D11.
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) (2023)：技術開発成果概要 2021，NUMO-TR-22-02，pp. 5-7.
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，pp. 113-117.
尾上博則，三枝博光，石田圭輔，澤田淳，石橋正祐紀，江崎太一，田川陽一，田部井和人，並川正，羽根幸司 (2023)：地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認手法の整備に係る検討事例 (1)全体概要，日本原子力学会 2023 年秋の大会，1D09.
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.
田川陽一，尾上博則，石橋正祐紀，江崎太一，田部井和人，並川正，羽根幸司，三枝博光，石田圭輔，澤田淳 (2023)：地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認手法の整備に係る検討事例 (4) 割れ目ネットワークモデルに基づく等価不均質連続体モデルの構築，日本原子力学会 2023 年秋の大会，1D12.

2.3.5　地下浅層から地表環境を考慮した生活圏評価モデルの構築（その 2）

上野 吹佳　越後谷 浩二　石田 圭輔　草野 由貴子　浜本 貴史

原子力発電環境整備機構

1.　背景・目的

地層処分場閉鎖後の安全評価においては，処分場に埋設された放射性核種が長期間のうちに地下水により人工バリアや地質環境を経て人間の生活圏に運ばれるという想定によって生ずる放射線学的影響を推定する。このため，生活圏に流入した放射性核種がどのようにふるまい，最終的に人間が受ける線量を算出するためのモデル（以下，「生活圏評価モデル」という）が必要となる。

生活圏評価モデルは，放射性核種の生活圏への流入口となる地圏環境と生活圏のインターフェイス（Geosphere-Biosphere Interface：以下，「GBI」という），気候，地理・地形，表層水理，土壌，生物相といったサイトの地表環境や人間の生活様式などによって記述される生活圏システムを数理的にモデル化したものである。一般的にこうしたモデル化には，生活圏システムの構成要素のうち放射性核種の主要な移行経路となるものを，ある一定の容積を有する区画（以下，「コンパートメント」という）として表現し，各コンパートメント内及びコンパートメント間の物質移動プロセスを解析する方法（以下，「コンパートメントモデル」という）が用いられる。

特定のサイトを対象としない生活圏評価を行った包括的技術報告書（NUMO，2021）においては，地形と気候，処分場の地下施設の位置，想定される GBI の組み合わせによって日本で考えられる生活圏システムを類型化し，地質環境などの空間的不均質性を単純化して取り扱った生活圏システムを対象にコンパートメントモデルを作成している。実際のサイトを対象とした生活圏評価においては，その場所の地理・地形，表層水理（地表水系や浅層地下水流動系，それらの交流関係），土地利用などの地表環境や人の生活様式を反映し，これらの空間的不均質性を考慮して生活圏システムを記述したうえで，これに基づき核種移行プロセスや被ばくのグループを設定し，核種移行プロセスを表現したコンパートメントモデルや被ばくプロセスモデル（これらのモデルを以下，「生活圏評価モデル」という）を作成する必要がある。

本技術開発では，仮想的なサイトを対象として，気候や地形，地質，それらに密接に関連する土地利用などの生活様式を含む地表環境を表現したモデル（以下，「地表環境モデル」という）を構築したうえで，核種の主たる移行媒体である地下水・地表水の流動系の評価に基づいた生活圏システムを記述する技術と，この生活圏システムを対象として生活圏評価モデルを構築する技術の整備を目的としている。2022 年度までに，これまでに整備した先新第三紀堆積岩類の沿岸域を対象とした四次元地質環境モデル（NUMO，2024）を対象として，国際的に提案されている生活圏評価の方法論（以下，「BIOMASS」という）に従って生活圏評価モデルを構築した。なお，BIOMASS は IAEA による IAEA-BIOMASS-6（IAEA，2003）の公表以降，その後の検討の最新版である BIOMASS 2020：Interim report（Lindborg，2018）に示された方法論を用いた。2023 年度は構築した生活圏評価モデルを用いて線量への換算係数（Dose Conversion Factor：以下，「DCF」という）を算出できるように，生活圏評価における使用実績（GoldSim ホームページ）を有する解析コード GoldSim に数値解析モデルとして実装し，DCF へ影響が大きいパラメータの抽出などに必要な解析が実施可能な計算環境を整備する。

2.　主な成果

GoldSim は，核種移行プロセスを表現したコンパートメントモデルや被ばくプロセスモデルについて，各コンパートの関係や被ばくプロセスの関係を視覚的に容易に認識して実装できるグラフィカル

ユーザーインターフェースを有する。また，GoldSim は，生活圏評価モデルのように多数のパラメータを有する非線形システムにおいて，結果に重要なパラメータを抽出するために有効なモンテカルロシミュレーションの機能が実装されている。これらの特性を生かし，複雑な生活圏評価モデルを実装した。具体的な実装例を図 1 に示した A 地区を対象として示す。生活圏評価モデルで記述した核種移行に関する，コンパートメントモデルを図 2 に，これを GoldSim に実装した数値解析モデルを図 3 に示す。コンパートメントモデル間の青い矢印が水の流れを示しており，河川間の矢印は上流から下流への流れ，河川から水田・畑地への矢印では灌漑（かんがい）による水の移行プロセスモデルが実装されている。赤い矢印は固相（土壌）の移行を示しており，河川と各土壌で洪水・侵食による固相の移行プロセスモデルが適切に実装されている。また，各土壌は表層土壌と下部土壌に分かれ，河川には河川底部の堆積層が定義されており，涵養（かんよう）・湧出や沈殿・再浮遊により，それぞれ地質環境における表層部に相当するコンパートメントとの物質の移行プロセスモデルが実装されている。次に，A 地区の米農家被ばくグループを例に，被ばくプロセスモデルの実装例を示す。生活圏評価モデルで記述した被ばくプロセスモデルを図 4 に，これを GoldSim に実装した数値解析モデルを図 5 に示す。図 5 の A_Rice_Farmer と表現されている米農家被ばくグループに対して，水の摂取による内部被ばく，土壌からの外部被ばくなど，生活圏評価モデルで図示された被ばくプロセスごとに DCF を算出したうえで，各プロセスによる DCF の合計値を算出できるように実装されている。また，モンテカルロシミュレーションの機能を活用するために，各パラメータの値について一様分布の幅として入力可能なエクセルファイルを作成した。エクセルファイルに入力した幅の中で値が一様分布，又は値の対数が一様分布する形で GoldSim が発生させたランダムな値を数値解析モデルに入力して解析を行い，DCF の分布を算出することを可能とした。

3. 包括的技術報告書への影響

包括的技術報告書（NUMO，2021）の本編 6.3 節（シナリオの作成と解析ケース），本編 6.4 節（核種移行解析と線量評価）について，本技術により，評価対象となる地域の地理・地形，表層水理（地表水系や浅層地下水流動系，それらの交流関係），土地利用などの地表環境や人の生活様式を反映し，これらの空間的不均質性を考慮して生活圏評価を行うことが可能となったことから，包括的技術報告書で想定された処分場システムのふるまい，シナリオと解析ケース，及びそれに基づく解析方法との比較などを行ったうえで，同報告書に新たな生活圏評価の方法として記載することを検討する。

4. 今後の展開

包括的技術報告書（NUMO，2021）における閉鎖後長期の安全評価では，評価期間において 1 つの GBI に核種が流入し続けるとして評価している。処分場のスケール（数 km×数 km）及び評価期間の時間スケールを踏まえると，廃棄体が埋設される位置の違いや広域流動系，地表水理系の時間変化などにより，GBI が時間・空間的に変化する可能性が考えられる。このため，実装した数値解析モデルを用いて，様々な試行を行い，生活圏評価における GBI の取扱いの考え方を整理する。また，試行を通じて，DCF へ影響が大きいパラメータを抽出しサイトの調査項目反映する手法の検討や，地表環境の長期時間変遷に対応した生活圏評価モデルの構築方法の検討などについて技術開発を進める。

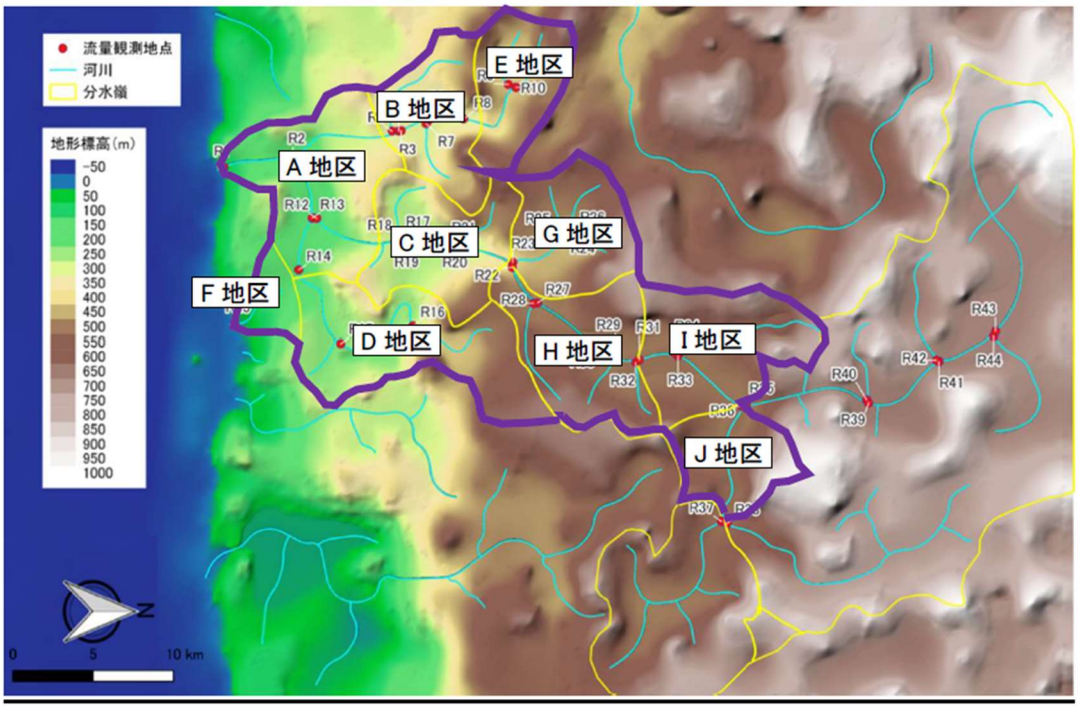


図 1　生活圏評価モデル作成において想定した仮想地域

（複雑な地下水流動系を有し多様な土地利用が内包されている太紫線内を対象に 2022 年度は生活圏評価モデルを構築）

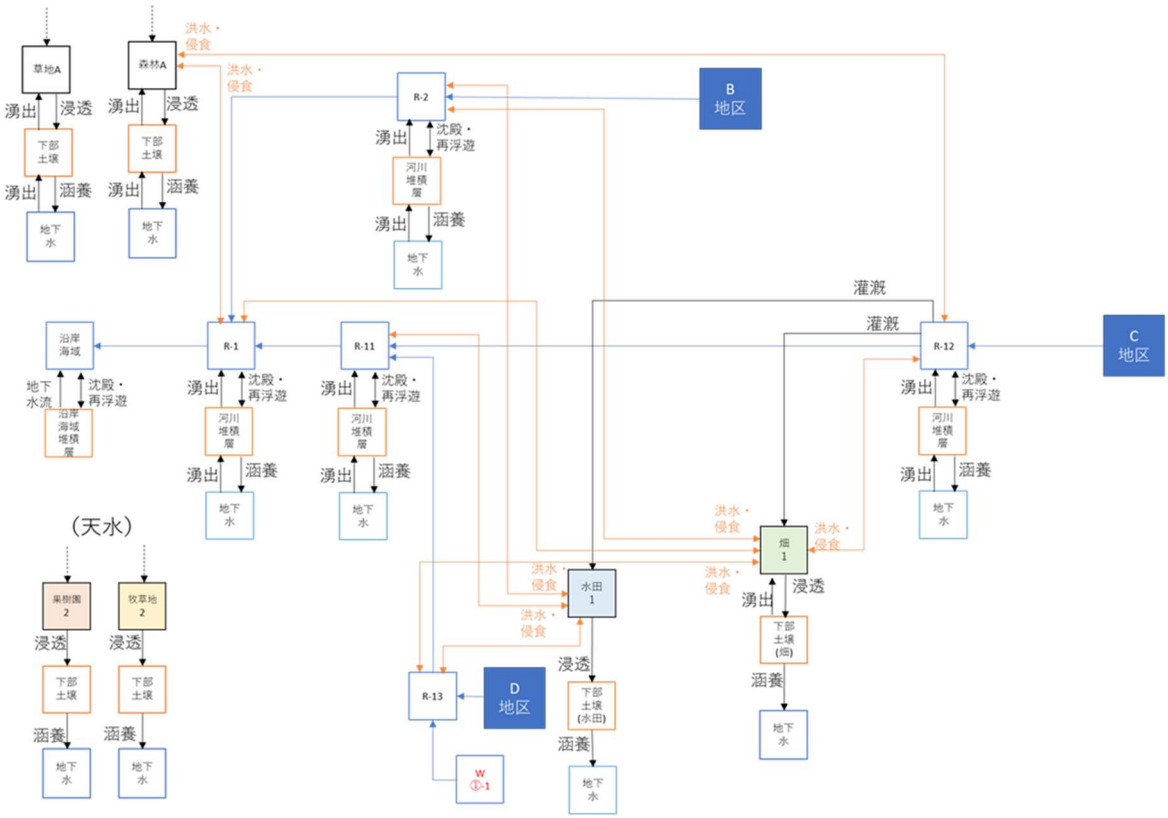


図 2　A 地区の核種移行プロセスのコンパートメントモデル

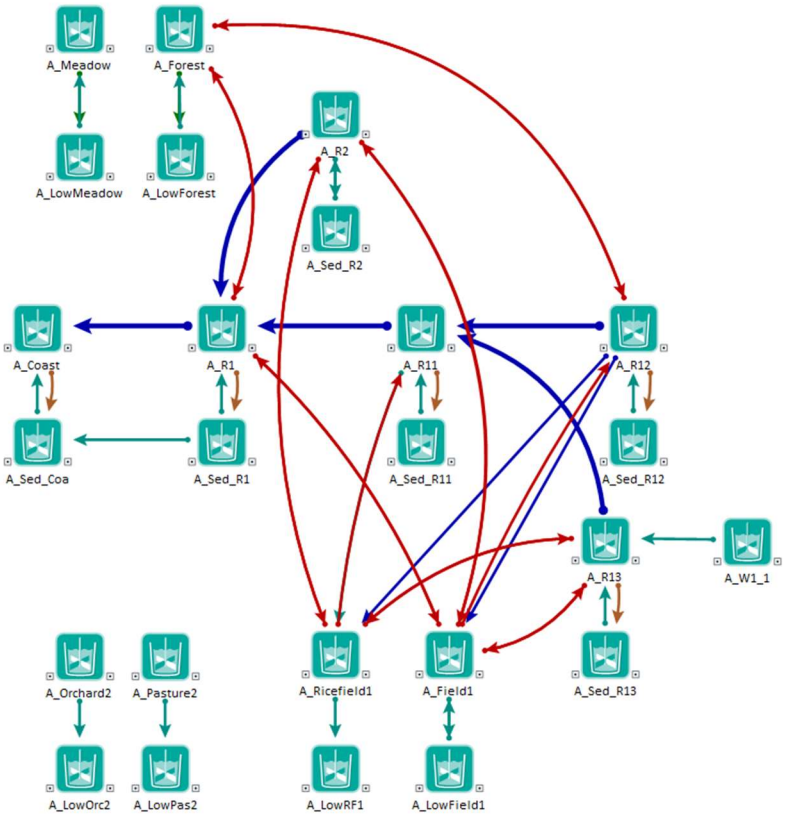


図 3　GoldSim を用いて実装した A 地区の核種移行プロセスに関する数値解析モデル

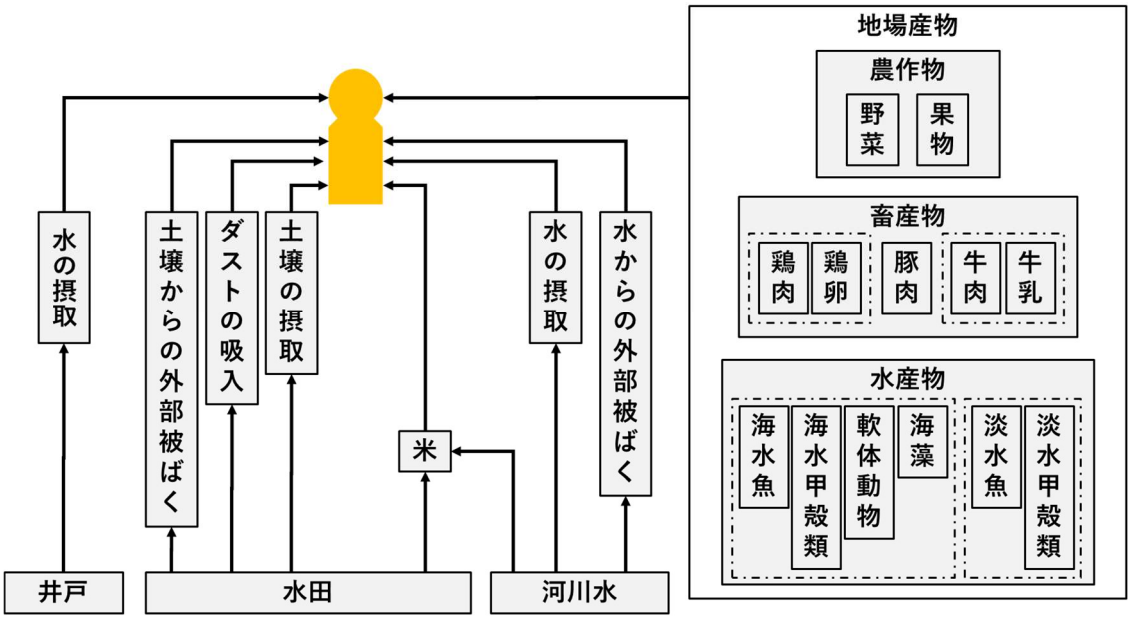


図 4　A 地区の米農家被ばくグループの被ばくプロセスモデル

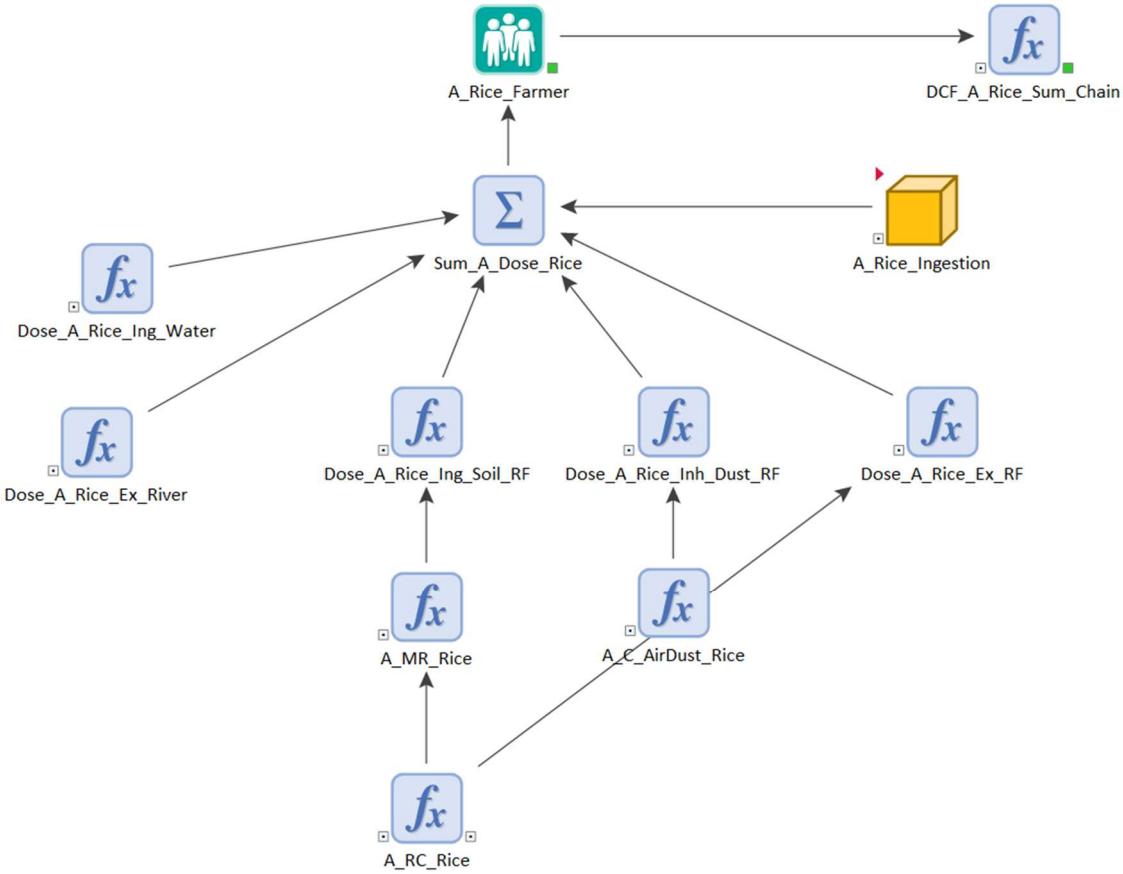


図 5　GoldSim を用いて実装した A 地区の米農家の被ばくプロセスモデルに関する数値解析モデル

参考文献

GoldSim ホームページ：Human Health Risk Assessment and Disease Transmission Modeling - GoldSim, https://www.goldsim.com/Web/Applications/Areas/EnvironmentalSystems/HumanHealthRisk/#PostClosureSafetyAssessmentNearSurfaceDisposalFacilities,（閲覧日 2024 年 7 月 16 日).

IAEA (2003)："Reference Biospheres" for Solid Radioactive Waste Disposal，IAEA-BIOMASS-6.

Lindborg, T (2018)：BIOMASS 2020: Interim report，R-18-02.

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) (2024)：技術開発成果概要 2022，NUMO-TR-24-01.

2.3.6　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[1]　田窪 勇作[1]　三原 守弘[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，2021a）で示した TRU 等廃棄物処分場の設計では，各廃棄体パッケージ内や処分坑道の構造躯体内側に定置された廃棄体パッケージ間にセメント系材料が充填される。処分場閉鎖後，充填されたセメント系材料は廃棄体から溶出した核種の移行を抑制する機能（例えば，低透水性や低拡散性など）を持つと考えられるが，安全評価においては，充填されたセメント系材料の長期的な状態変遷に関する不確実性に対応するため，透水性については処分場閉鎖直後から砂と同程度（1.0×10^{-5} m/s）の透水性を付与して核種移行解析を実施している。こうした安全評価上の保守的な取り扱いをより合理性のあるものとし，地層処分システムの性能をより確からしく評価することを目的として，セメント系材料の状態変遷を評価可能な反応輸送解析モデルの構築を JAEA との共同研究により進めている。

2018 年度から，CsI 溶液に 5 体のセメント系材料試料を浸漬させ，一定期間ごとに試料を取り出し試料中の生成固相や元素分布等を分析する試験を実施した。この試験で生じている現象としては，①CsI 溶液との接触によるセメント系材料からのアルカリ成分の溶脱，②間隙水の pH の変動に伴う固相の溶解/沈殿，③間隙率の変動に伴うセメント系材料の物質移行特性の変化，④間隙水中や CsI 溶液中における物質の拡散が考えられる。これらに対して，①CsI 溶液へのアルカリ成分の溶脱を平衡論で取扱い，②セメント系材料に含まれる固相の溶解/沈殿反応については速度論を考慮し，③セメント系材料の間隙率と実効拡散係数について既往関係式（Mihara and Sasaki，2005）を適用し，④セメント系材料中と CsI 溶液中の物質移行を溶存物質の濃度差に起因した拡散方程式に従うとした概念モデルを構築した。包括的技術報告書（NUMO, 2021a）において，この概念モデルに基づき①～④を考慮したモデルを構築し，本検討では比表面積と熱力学データベース（GWB20.dat（v1.2））を最新の知見に基づき更新したものを使用した。反応輸送解析モデルの一次元での解析体系については，セメント系材料 1 体あたりの CsI 溶液の体積比に基づいて CsI 溶液領域の大きさを設定し，境界条件はセメント系材料と CsI 溶液との界面を除き，反射境界を与えた（NUMO，2024）。このモデルを解析コード MINARET（MINeral Alteration due to REactive Transport）（NUMO，2021b）に実装した。この時，セメント系材料中及び CsI 溶液中における拡散現象については，間隙水が電気的に中性な状態となるよう化学種ごとに拡散係数を設定することはせず，電荷が中性である化学種（HTO）の自由水中の拡散係数（Dw（T）$=2.27\times10^{-9}$ m^2/s）をすべての化学種に適用した。

上記の反応輸送解析モデルの妥当性を確認するため，解析と浸漬試験におけるセメント系材料の分析により得られた溶脱領域を比較したところ，解析結果は試験データよりも溶脱領域を過小に評価した（NUMO，2024）。これは，浸漬試験に用いた試験容器の形状や試験期間中の試料の取出し手順等の試験条件を解析においては単純化して取り扱ったため，試料中の Ca イオンの移行挙動に重要な，浸漬溶液と試料との境界における Ca 濃度について，浸漬試験の状態を解析では表現できていなかったことが一因として考えられた（NUMO，2024）。このため，2023 年度では浸漬溶液と試料との境界における Ca 濃度を管理することにより，試験条件を解析へ反映させることが容易な試験体系を新たに構築し，これを対象とした試験結果と解析結果を比較して，2022 年度までに構築した反応輸送解析モデルの数理モデルに対する妥当性を確認した。

2. 主な成果

(1) 試験体系の改良に関する検討

試料と浸漬溶液の境界における Ca 濃度を一定に保つ（2.0 mg/dm^3）ために，試料と接触する浸漬溶液を常時交換する試験体系を構築した（図 1)。試料については，2022 年度までと同様に一次元でモデル化することを念頭に，直方体に形成した試料の 5 面にエポキシ樹脂を塗布し，1 面を暴露した（図 2)。この試験体系を用いて，浸漬期間が 14，28，63 日の普通ポルトランドセメントペースト硬化体（W/C=55％で作製）を対象に電子線マイクロアナライザー（EPMA)，走査電子顕微鏡（SEM)，X 線回折装置（XRD）の分析を行い，解析との比較に用いる接水面からの Ca 濃度の分布やセメント水和物の存在状況を評価した。

(2) 浸漬試験結果との比較による反応輸送解析モデルの妥当性確認

（1）の試験体系に合わせて図 3 に示す解析体系を構築した。境界条件は試料と浸漬溶液が接触する端面については Ca 濃度を 2.0 mg/dm^3 として固定境界とし，反対側の端面については反射境界とした。2022 年度に実施したパラメータ（自由水中の化学種の拡散係数，間隙水中の化学種の拡散係数，セメント系材料の間隙率，ポルトランダイトの平衡定数（log K)，比表面積及び溶解速度定数）に関する感度解析から，反応輸送解析を行ううえでは，自由水中の化学種の拡散係数とポルトランダイトの平衡定数に高い感度を持つことから，これらのパラメータに対する不確実性の考慮が重要であることが明らかとなっている。このため，自由水中の化学種の拡散係数については電荷が中性である HTO の自由水中の拡散係数（Dw（T）＝2.27×10^{-9} m^2/s）とセメント系材料を構成する主要な元素である Ca イオンの自由水中の拡散係数（Dw（Ca）=7.93×10^{-10} m^2/s）の 2 種類の値を全ての化学種に設定して解析を行った。また，溶脱現象に重要なポルトランダイトの平衡定数については，JAEA のデータベース（JAEA，2018）に格納している値（22.8±0.3）について，誤差の幅を考慮して解析を行った（logK=22.5, 22.8, 23.1 を設定)。

図 4 に 63 日浸漬させた試料の分析結果と解析結果の比較を示す。EPMA 分析結果から算出した Ca 濃度分布に対して，Ca イオンの自由水中の拡散係数を設定した解析結果は試験結果における溶脱領域とよく一致していることが確認できた。また，解析結果は XRD 分析で確認したセメント水和物の分布や SEM 観察で確認した間隙率分布についても，整合していることも確認された。このことから，本技術開発で整備した反応輸送解析モデルを用いて，拡散係数と平衡定数の不確実性の範囲内でのパラメータ設定で解析を行うことにより，セメント系材料の溶脱範囲をより確からしく評価することが可能となり，構築した反応輸送解析モデルの数理モデルが妥当であることが示された。

3. 包括的技術報告書への影響

本技術開発におけるセメント系材料の溶脱現象に関する反応輸送解析モデルの妥当性の確認は，包括的技術報告書（NUMO，2021a）の本編 6.6.2 項（信頼性向上に向けた取り組み ）の（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）に示された課題である。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，セメント系材料に関する現行の保守的な透水係数のより確からしい値への更新や更新した透水係数を用いた線量評価結果等について，付属書等にて取りまとめたうえで包括的技術報告書本編の記述内容の更新を検討する。

4.　今後の展開

3.に記載したより確からしいセメント系材料の透水係数を用いた線量評価を行うため，線量評価において実施する核種移行解析において，セメント系材料の状態変遷を反映する方法について検討する。具体的には，処分場環境下でのセメント系材料の状態変遷を評価し，状態に応じたパラメータ設定を核種移行解析に用いるランダムウォーク粒子追跡解析コード Partridge（NUMO，2021b）に反映する方法について検討する。

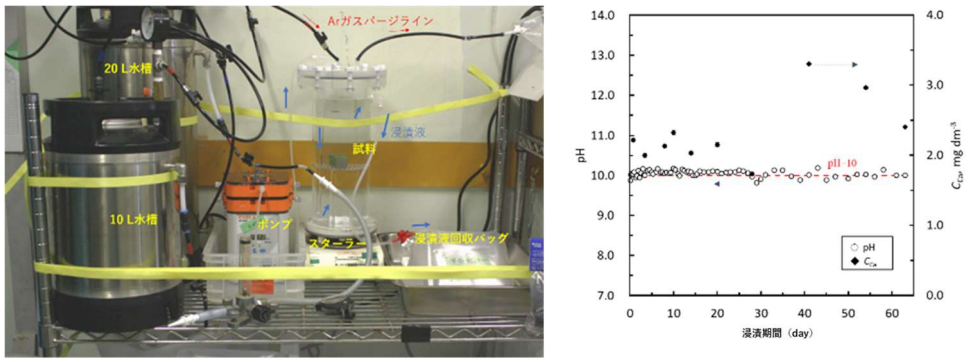


図 1　流通型浸漬試験装置の概略（左）と浸漬液の pH 及び Ca 濃度(C_{Ca})の時間変化（右）

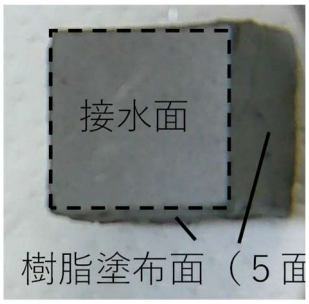


図 2　試料外観

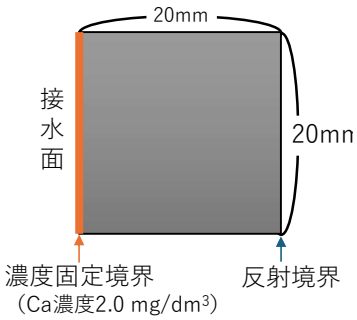


図 3　解析体系

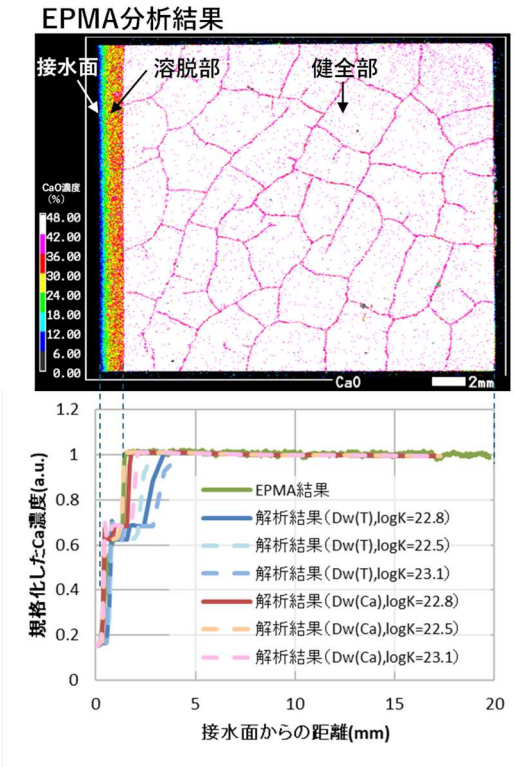


図 4　63 日浸漬した試料の分析結果と解析結果の比較

参考文献

JAEA(日本原子力研究開発機構) (2018)：平成 29 年度　高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する

技術開発事業処分システム評価確証技術開発　報告書.
Mihara, M. and Sasaki, R. (2005)：Radio-nuclides Migration Datasets (RAMDA) on Cement, Bentonite and Rock for TRU Waste Repository in Japan, JNC-TN8400-2005-027.
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－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) (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－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－ 付属書 6-12 鎖後長期の安全評価に用いる解析コードの信頼性確保にかかわる情報の整理，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.

2.3.7　サイト調査を反映した核種移行パラメータ設定の方法論の検討及びデータ拡充

浜本 貴史[1]　小池 彩華[1]　石寺 孝充[2]　岩田 孟[2]　深津 勇太[2]　種市 やよい[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

地層処分場の閉鎖後長期の安全評価において実施する核種移行解析のパラメータ設定に関して，包括的技術報告書（NUMO，2021）においては，これまでに報告されている収着分配係数や拡散係数の実測値に基づいて構成された JAEA のデータベースを参照して設定する手法を示した。この過程で，日本国内の地質環境に応じたパラメータの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の確保に配慮し，移行遅延性能を低く見積もってパラメータを設定した。概要調査段階以降においては，サイト調査により得られる地質環境等の情報を用い，処分場の空間的な広がりに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うえで，そのサイトの特徴を反映して核種移行パラメータを設定することが必要となる。このため，サイト調査により得られる地質環境に関する情報等と，既存のデータベースやパラメータ値の推定モデルを組み合わせ，包括的にこれを行うための手法の構築が重要である。

本検討は，JAEA との共同研究により，このようなパラメータ設定手法の構築を目的として実施しているものである。検討にあたっては，包括的技術報告書（NUMO，2021）の作成過程で明らかになった地質環境に応じた設定に必要なデータが不十分なパラメータ（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））を試験により継続的に取得し，多様な地質環境特性に応じた値を設定可能とすることで，安全評価における技術的信頼性を向上させる。2023 年度は，線量評価への影響の大きな核種を対象に，45℃以上の地温環境における溶解度，高炭酸濃度地下水や温度影響下における緩衝材への Kd，セメント系材料への Kd，Ca 型化した緩衝材中の De についてデータの拡充を図るとともに，原位置試料を利用した母岩に対する核種移行パラメータの設定手法の整備を進めた。

2.　主な成果

- 幅広い温度における核種の溶解度設定：処分場の幅広い温度条件における Se の溶解度を評価するため，60℃及び 90℃のデータを拡充し，75℃のデータ（Doi et al.，2016）及び 2021 年度に取得した 45℃のデータ（Yoshida et al.，2023）と組み合わせることで，45～90℃におけるより確からしい溶解度を設定可能とした。さらに，3 価アクチノイド元素の溶解度の温度依存性に資するデータ取得のため，アナログ元素である Sm を用いた溶解度実験を開始した。
- 高炭酸濃度地下水や幅広い温度における緩衝材の Kd 設定：還元条件・高炭酸共存下において錯体を形成し Kd が低下すると考えられる Tc（4 価）や温度依存性の報告例が少ない Am を対象に，緩衝材の主成分であるモンモリロナイトへの Kd の取得を開始した。
- セメント系材料の Kd 設定：TRU 等廃棄物の廃棄体パッケージ間充填材や廃棄体パッケージ内充填材等に使用されるセメント系材料の構成鉱物を対象に，TRU 等廃棄物処分場の線量評価上重要な元素である Cs，Sr，I の Kd を取得した。
- Ca 型化した緩衝材中の De：Ca 型に変化した緩衝材中の De を設定することを目的に，データが不十分な 2 価の陽イオンの拡散データを取得するため，Sr をトレーサーとした拡散試験を開始した。1 価の陰イオンの拡散データについて，I をトレーサーとして De を取得した。

・ 原位置試料を利用した核種移行パラメータ値の設定手法の構築：包括的技術報告書で構築してきたDe設定手法（NUMO，2021）の原位置試料への適用性を確認するため，核種が地下水中で取りうるイオン価の代表的なトレーサーとしてHDO（中性イオン），I（1価の陰イオン），Cs（1価の陽イオン），Ni（2価の陽イオン），Eu（3価の陽イオン）を選択し，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）に対する拡散試験を開始した。これまでに拡散データが取得できたIの試験データから，付加体堆積岩を構成する泥岩や砂岩の混在状況や間隙構造等の岩石の特性によってDeが異なる可能性が示唆された。包括的技術報告書のDe設定手法では，岩石の特性によるDeの変化を考慮していないことから，これらの影響を評価することにより，付加体堆積岩類に対するDe設定手法が高度化できる可能性が明らかになった。

3. 包括的技術報告書への影響

溶解度，Kd，Deのデータ拡充及び付加体堆積岩類に係わる科学的知見の拡充は，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。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，Kd，De設定を更新するとともに，今後の技術開発で得られる付加体堆積岩類に対するDe設定手法について付属書等としてまとめることを検討する。

4. 今後の展開

線量評価への影響が大きな核種を対象に，データが十分に整備されていない地質環境条件におけるデータの拡充を進める。拡充したデータについては，将来の安全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，こうしたデータの活用が容易になるよう，品質が保証されたデータとしてJAEAデータベースに格納する。加えて，今後，これらのデータ拡充に伴うパラメータ設定値の変更による線量評価への影響を確認していく。さらに，原位置試料を利用した核種移行パラメータ値の設定手法の構築に関して，付加体堆積岩試料を対象としてDeとKdの実測値を拡充し，得られるデータと包括的技術報告書で示した設定手法による設定値との比較，検討を行うことにより，概要調査段階以降の安全評価に適用するサイト調査結果を反映した核種移行パラメータ値の設定手法を段階的に構築していく。

参考文献

Doi, R., Uchikoshi, K. and Beppu, H. (2016)：The $FeSe_2$(cr) solubility determined by solubility experiments of Se co-existing with Fe, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 53, Issue 10, pp.1554-1562.

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.

Yoshida, Y., Kitamura, A. and Shibutani, S. (2023)：Solubility of $FeSe_2$(cr) at 318 K in the presence of iron, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 60, Issue 8, pp.900-910.

2.3.8　不均質場における三次元解析ビッグデータの機械学習

浜本 貴史　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，線量評価に用いる核種移行解析モデルを構築するために，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：1m 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。これまでに，NUMO は，ランダムウォーク粒子追跡解析コード Partridge を利用して，海水準変動や隆起・侵食による地質環境の変遷や人工バリアの変質を反映して，パネルスケール～広域スケールまでの入れ子モデルを用いた粒子追跡解析を行うための技術を整備した（NUMO，2024）。この技術により解析を行う場合，多数の異なる入れ子モデルにおいて廃棄体すべてを対象とした解析を行うことは計算負荷が大きいことから，作業効率を向上することが可能な補完的技術の整備が課題である。さらに，出力されるデータの量は膨大なことから，粒子追跡解析結果を評価するために人間が理解しやすい情報を抽出することが可能な処理技術の整備が課題である。

このため，機械学習を活用して，これら 2 つの課題に対応可能な解析技術の整備を進めている。具体的には，少量の粒子追跡解析結果（少数の廃棄体を対象とする解析など）を教師データとして，処分場全体の解析結果を予測評価するための技術（以下，「予測評価ツール」という）や，多数の解析結果を類似した属性を有するグループに分類（クラスター分析）し，グループ間の特徴を分析する技術（以下，「クラスター分析ツール」という）の整備を進めた。

2.　主な成果

包括的技術報告書（NUMO，2021）における深成岩類高レベル放射性廃棄物処分場（竪置き・ブロック方式）の処分パネルを対象として，母岩に存在する割れ目の特徴を割れ目ネットワークモデルで表現し，その中に設計仕様に即した処分場を設置した三次元モデルを用いて粒子追跡解析を行い，この結果を用いて，予測評価ツールとクラスター分析ツールを開発した。計算時間短縮のため，処分坑道距離と処分坑道本数をそれぞれ 2 分の 1 の規模として処分パネルの上流約 100 m と下流・側方約 300 m の母岩を含む解析体系を使用し，この処分パネルから半数の廃棄体を対象とした（図 1）。

（1）粒子追跡解析の予測評価ツールの開発

予測対象として，処分場の閉じ込め性能の指標となる解析体系の境界面における粒子の移行率（以下，「移行率」という）を設定した。これを目的変数とし，少数の廃棄体の粒子追跡解析結果を教師データとして予測するツールを開発した。予測評価ツールで用いる説明変数としては，これまでの粒子追跡解析に関する成果（NUMO，2021 など）を踏まえ，移行率に影響を及ぼすパラメータと考えられる，亀裂の数，亀裂の半径や透水量係数に関する統計量（最大値，最小値，平均値，標準偏差，尖度，歪度）と，廃棄体から下流側端面までの距離を設定した。本ツールで用いる機械学習の手法は，教師あり学習の回帰問題に一般的に用いられており（Bishop，2008），亀裂媒体中の物質移行の予測に適用された実績（Zhu et al.，2023）を有するニューラルネットワークを選択した。

上記の予測評価ツールによる移行率の予測結果と粒子追跡解析による計算結果の比較を図 2 に示す。図 2（a）では，予測評価ツールにより移行率を再現できたものを示している。このように解析結果をよく再現できた廃棄体は，対象とした廃棄体（878 体）の 98％であった。一方，全体の 2%に該当する図 2（b）に示す廃棄体の例では，早期（オーバーパックの閉じ込め機能が喪失し核種の移行が開始した後 1,000 年経過以前）に粒子がモデル端面に到達するという粒子追跡解析結果が得られたが，予測評価ツールではこの早期の移行率を再現できなかった。これは，挙動が異なるデータ群をまとめて学習に用いたことにより，移行率の挙動が平均的なものについてはよく再現できるものの，特異なものについては予測精度が低下するツールとなっていることに起因する。このことから，クラスター分析ツール等によって学習データを分類して学習する方法（Miller and Soh，2015）の適用が課題として抽出された。

さらに，予測評価ツールを用いた移行率の算出をより効率的に実施するためには，教師データを取得するための計算負荷の低減が重要である。このため，移行率を再現できた廃棄体（図 2（a）に該当する廃棄体）についても，必要な予測精度を維持しつつ教師データ量を最適化することが課題である。

(2) クラスター分析ツールの開発

粒子追跡解析によって得られる情報は，廃棄体をソースタームとして移行する核種を模した膨大な数の粒子の座標情報や速度である。この情報を用いて粒子の移行挙動を分析するための 2 種類のクラスター分析を行うツールを整備した。

処分場は，割れ目の位置や規模，坑道の位置に関して空間的な不均質性を有することから，廃棄体の定置位置ごとに粒子の移行挙動が異なると想定される。本件においては，各廃棄体の移行率の時間変化（図 2 参照）に対して定義した説明変数（移行率の最大値など）に対して，データ間の距離によるクラスター分析アルゴリズムである k-means 法（Macqueen，1967）を適用し，廃棄体を定置位置ごとに分類する。上述の解析結果に対して適用した結果，移行率によって廃棄体の定置位置を 4 種類のクラスターに分類することができた（図 3（a））。分類した廃棄体の定置位置を処分パネル上に可視化したところ，同じクラスターに属する廃棄体が近傍に位置すること，近傍の亀裂や隣接する坑道の影響によってクラスター間の移行率の差異が生じることを分析できることから，分類が適切に行われていると考えられた（図 3（b））。

粒子の移行挙動を支配する移行経路の情報は，粒子追跡解析の結果に基づいて線量評価に用いる核種移行解析モデルを構築するうえで必須である。このため，粒子の軌跡に対してデータ密度によるクラスター分析アルゴリズムである DBSCAN（Ester et al.，1996）を適用して粒子が移行する経路を分類する。上述の解析結果のうち比較的移行時間が短い廃棄体 6 体に対して移行経路を対象としたクラスター分析を適用した結果，3 種類のクラスター（図 4 中オレンジ，青，赤の点群）に分類することができた。クラスターを描画すると，半径と透水量係数の両者が大きな亀裂と重なったことから，適切に移行経路が分類され，主要経路を識別できることが確認できた（図 4）。

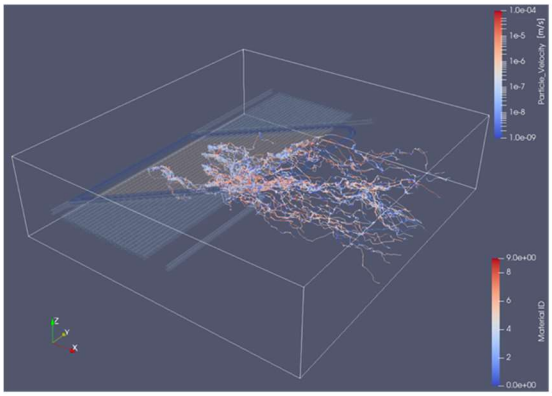
3. 包括的技術報告書への影響

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，本技術により，廃棄体から地表を含む地質環境までの核種移行挙動を 2022 年度までに開発した粒子追跡解析技術により評価して構築した核種移行解析モデルを適用できるようになる。この技術を深化させることにより，処分システムの特徴をより反映した線量評価が可能になる。今後，既存の解析技術との相互補完関係を整

理したうえで，本技術を適用した線量評価を包括的技術報告書に記載することを検討する。

4. 今後の展開

2. (1) で述べた予測精度の改善のため，クラスター分析ツールによって教師データを分類し，各クラスターについて予測評価ツールによる学習と予測を行う手法の開発に取り組む。また，教師データ量の低減のため，学習データ量と予測精度との関係の分析等を通じて予測評価ツールの改良を図る。改良後は，本技術を実際に線量評価に適用するための検証を進めていく。



構成要素	透水係数[m/s]	実効拡散係数[m²/s]
吹付支保工	1×10^{-5}	8×10^{-10}
排水溝	1×10^{-5}	4×10^{-9}
坑道埋め戻し材	5×10^{-12}	3×10^{-10}
緩衝材	1×10^{-12}	3×10^{-10}
廃棄体	1×10^{-12}	4×10^{-9}
母岩	3×10^{-8}	9×10^{-13}

割れ目パラメータ	分布
透水量係数 (m²/s)分布	対数正規分布（対数平均：-9.0, 標準偏差：2.0）
割れ目の半径分布	べき乗分布（べき指数：4.0, 最小半径：4m，最大半径：564.2m）
割れ目の方向分布（方位角／傾斜（deg.），フィッシャー係数，比率）	フィッシャー分布 セット1：171/85, 7.77, 0.40 セット2：80/87, 7.50, 0.29 セット3：203/1, 8.44, 0.31
三次元割れ目密度 (m²/m³)	0.535

その他パラメータ	
粒子数	2500個/廃棄体
動水勾配	0.05

図 1　予測評価ツールとクラスター分析ツールを開発するための粒子追跡解析と解析パラメータ

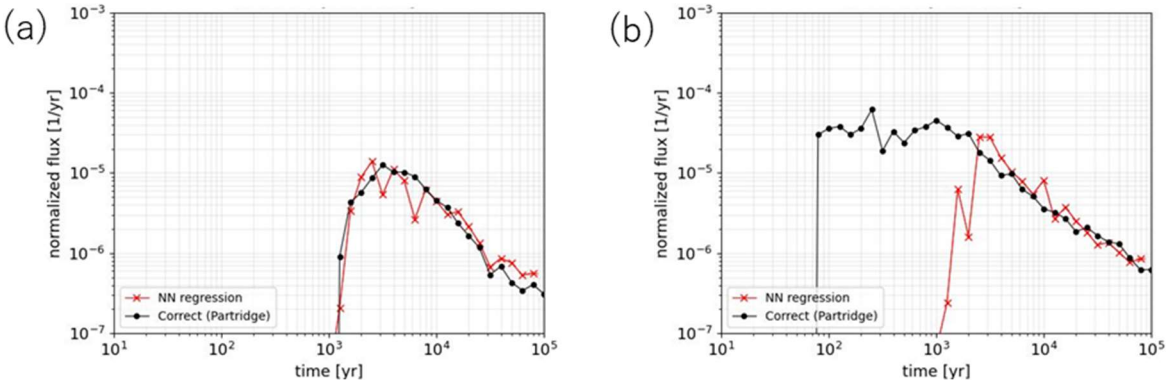


図 2　予測評価ツールによる移行率の予測の例
（a：予測精度が高い廃棄体，b：早期の移行率の予測精度が低い廃棄体）

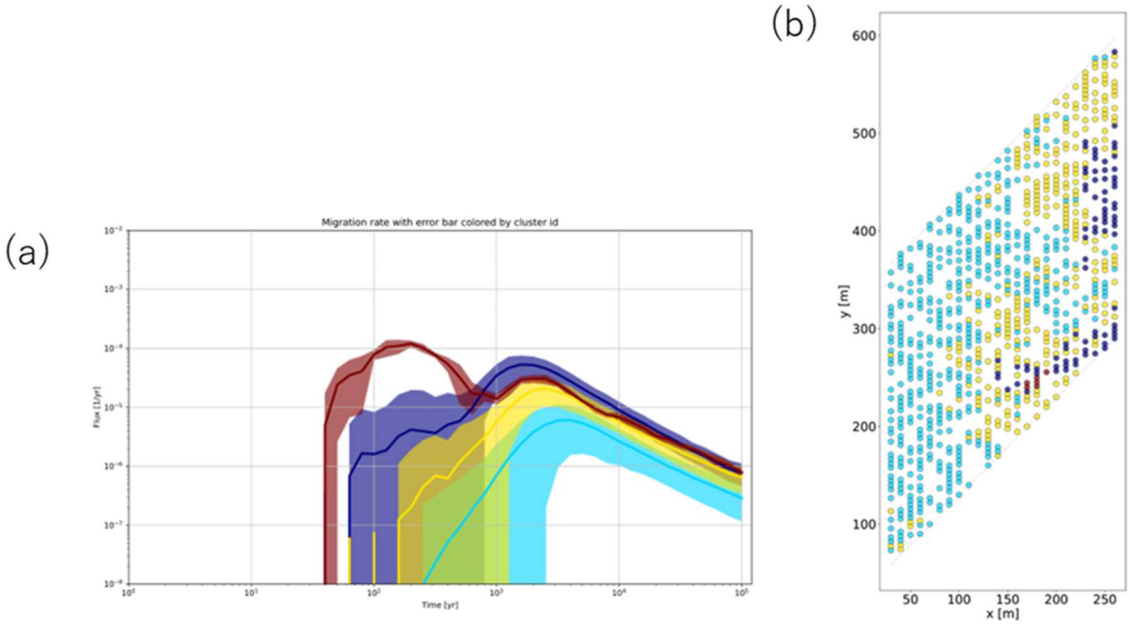


図 3　クラスター分析ツールによる各廃棄体を対象としたクラスター分析の例
（a：クラスターごとに色分けした移行率の時間変化，b：各クラスターに属する廃棄体の処分パネル上の位置）

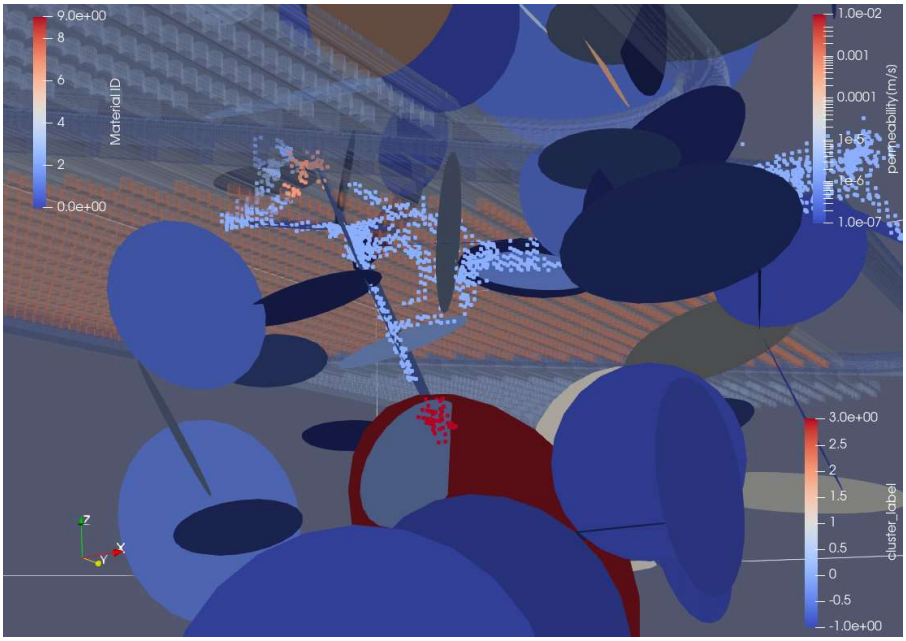


図 4　クラスター分析ツールによる各粒子の移行経路を対象としたクラスター分析の例

参考文献

Bishop, C. M. (著)，元田浩，栗田多喜夫，樋口知之，松本裕治，村田昇 (監訳) (2008)：パターン認識と機械学習 上，初版第 10 刷，丸善出版株式会社, pp.225-226.

Ester, M., Kriegel, H., Sander, J. and Xu, X. (1996): A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise, Proceedings of the Second International Conference on Knowledge

Discovery and Data Mining (KDD-96), AAAI Press, pp. 226–231.
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.
Macqueen, J. (1967)：Some methods for classification and analysis of multivariate observations, Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability, University of California Press, pp. 281-297.
Zhu, C., Wang, J., Sang, S. and Liang, W. (2023)：A multiscale neural network model for the prediction on the equivalent permeability of discrete fracture network, Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 220, Part B.
Miller., L. D. and Soh, L. K. (2015)：Cluster-Based Boosting, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 27, No. 6, pp. 1491-1504.Mill.

2.4　技術マネジメント

将来の概要調査業務の円滑な実施と概要調査計画の策定に向けて，現地調査，法令で定められた要件等に対する適合性の評価，技術的な観点からの検討に関する実施内容を整理した。また，概要調査の実施能力を高めるため，多様な地質環境特性を対象とした調査・評価技術の適用性確認を行ったほか，調査に係るデータの品質管理手法を整備した（2.1 参照）。さらに，調査を実施するために必要な資源の明確化及び実施体制案の作成とその精査を進めた。地域の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）の手段に応じた環境配慮計画の検討を進めるとともに，希少動植物の生息分布の調査方法を一般的な情報を基に検討し，実施内容を整理した。

知識マネジメントについては，事業の各段階で扱う要件及びこれを満たすために必要となる知識を体系的に管理するためのマネジメントシステムを構築するため，事業の各段階に必要となる知識と要件の整備に関するマイルストーンを明確にしたロードマップ案を作成した。また，知識の効果的な活用を支援するデジタル技術を活用したツールの開発・整備に向けて，OECD/NEA の国際プロジェクト WP-IDKM（Working Party on Information, Data and Knowledge Management）などの関連する国際会議等に出席し，諸外国の状況を把握するとともに，取り組むべき課題を明確化した。

人材育成については，地層処分に関連する複数の関係機関（JAEA，電中研等）と協働して，国の事業として開催された，機構及び関係機関の若手技術者を対象とした専門的な合同研修に継続して参加したほか，ベテラン職員による若手職員への OJT により，地層処分技術に関する知見の継承を進めた。人材確保については，幅広い分野の技術者に関心を持っていただけるよう，地層処分事業の魅力を広く発信するほか，インターンシップや学校訪問等により，事業の進展に応じて各段階で必要となる技術者の確実かつ計画的な採用につながる取組みを継続した。

国の全体計画に沿って，機構が分担する技術的課題について，NEA による包括的技術報告書への国際レビューの提言，機構の評議員会からの提言，技術アドバイザリー委員会における助言等を踏まえて，事業の現状と今後の進展に適切に対応するための技術開発の基本的考え方を整理し，中期技術開発計画を策定した。また，技術開発成果の品質・信頼性の向上を目的とした品質保証プロセスの体系的な考え方の整理を継続的に実施した。

国際連携・貢献については，地層処分プロジェクトに関する 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（NWS，Nagra，NWMO，SKB）や研究機関（LBNL 等）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最新の知見を取得した。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幌延国際共同プロジェクト（NEA-JAEA Joint International Project，“Horonobe International Project”（HIP））については，2023 年 4 月に協定書へ署名し，３つの課題（物質移行試験，処分技術の実証と体系化，実規模の人工バリアシステム解体試験）への参画を通じて，技術力向上及び人材育成に取り組んだ（2.4.1 参照）。

また，セーフティケースに関するコミュニケーションについて，異なる学術分野の専門家間で生じやすい理解のギャップを解消する方法を検討するため，日本原子力学会に特別専門委員会を設置していただき，「閉じ込めと隔離」，「地質環境」，「セーフティケース」及び「安全評価」の 4 つの語について，歴史的背景や意味の解説及びコミュニケーション上の配慮事項等を「語彙基盤（地層処分の言葉）」としてまとめていただいた（2.4.2 参照）。

2.4.1　幌延国際共同プロジェクトへの参画

江橋 健　吉田 芙美子　尾上 博則　浜本 貴史　市村 哲大　レ アン ゴク　中安 昭夫　田窪 勇作

原子力発電環境整備機構

1.　背景・目的

幌延国際共同プロジェクトでは，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，(2)処分技術の実証と体系化，(3)実規模の人工バリアシステム解体試験を実施している。これら 3 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より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 月に協定書へ署名し，各タスクの会合や運営委員会へ参加している。なお，参加機関は 8 か国 11 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，岩盤中の亀裂ネットワークモデル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），我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，1 つ 1 つの亀裂中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），それらの亀裂を組み合わせた三次元の亀裂ネットワーク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，影響領域により生じる損傷領域が水みちとなることを防ぐための止水プラグ等を提示した。今後は，実際の地下環境に対するこれらの技術や手順の適用性と課題を明らかにしておくことが必要である。これにより，力学的弱部や湧水量が多い箇所を避けた坑道掘削計画の立案や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が期待できる。

(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初期状態の設定や人工バリア材料の初期性能評価においては，人工バリアとその周辺岩盤の THMC 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，3 つの地質環境モデルと 2 つの地下水組成に対して，人工バリアとその周辺岩盤の THMC の状態を評価

した。今後は，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必要である。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

各タスクにおける機構の主な取組みを以下に記す。

(1) 物質移行試験

今年度は，幌延深地層研究センターで取得されている既存の調査研究成果（Ishii. et al., 2011 ; Ishii., 2017 ; Ishii., 2018 ; 宮川，2021 ; 佐藤ほか，2017 ; 酒井・早野，2021），及び本タスクの検討対象領域境界付近に掘削した 4 孔のボーリング孔の調査結果に基づき，三次元物質移行モデルの構築のための基礎情報となる検討対象岩盤（声問層）の水理地質構造の概念モデルを作成した（図 1）。この概念モデルは，今後本タスクで実施する原位置調査や室内実験などで得られる情報に基づいて更新する予定である。また，原位置調査の進捗に応じて試験条件を設定するための多数の予測解析や，重要なパラメータを導出するための感度解析などを効率的に実施できるよう，Partridge を外部のスーパーコンピューターで実行可能な計算環境を整備した。さらに，新たに整備した計算環境を用いて，包括的技術報告書（NUMO，2021）における地質環境モデル及び TRU 廃棄物の物質移行モデルを用いた解析を実施し，包括的技術報告書の解析結果との比較検討を実施した。その結果，両者はおおむね同様の破過曲線を計算できることを確認した（図 2）。

(2) 処分技術の実証と体系化

今年度は，解析手法を確認するため，新第三紀の珪質泥岩で構成される稚内層中に掘削された深度 350 m 調査坑道（図 3）のうち，亀裂の観察が実施された試験坑道 3 を検討対象として空洞安定性解析を実施し，解析で得られた掘削影響領域と観察で得られた結果（Aoyagi，2018）を比較した。図 3 に示すように，試験坑道 3 は，試験坑道 2 及び試験坑道 4 の間に位置しており，試験坑道 2,3,4 の順に掘削されていた。そのため，隣接する坑道の掘削による影響も考慮するため，試験坑道 3 に加え，試験坑道 2 及び試験坑道 4 もモデル化した解析を実施した。その結果を図 4 に示す。坑道壁面の岩盤表面からの掘削影響領域の幅は試験坑道 4 を掘削する前の結果では約 0.63m であり，試験坑道 3 を掘削した直後の観察結果である最大幅 0.6 m（Aoyagi，2018）とほぼ一致した。一方，坑道底版側の掘削影響領域の幅は亀裂の観察結果（1.6 m）と比較して，解析結果では 0.65m と小さかったため，今後も解析モデルも含めた解析手法の確認を継続する。なお，本検討では試験坑道 4 を掘削した後，掘削前の掘削影響領域の幅（0.63 m）と比較して，試験坑道 3 の掘削影響領域の幅が 0.74 m とより大きく，隣接する坑道の掘削による影響が示唆された。

(3) 実規模の人工バリアシステム解体試験

今年度は，人工バリア性能確認試験においてヒーター停止後に温度が 23℃まで下降した条件におけるモニタリングデータが参加機関に共有され，そのデータに関する解釈と議論を行った。

3. 包括的技術報告書への影響

物質移行試験については，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，幌延国際共同プロジェクトの成果に基づき，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。

処分技術の実証と体系化については，幌延国際共同プロジェクトの成果に基づき，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，掘削影響領域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。

実規模の人工バリアシステム解体試験については，幌延国際共同プロジェクトの成果に基づき，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，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

深度 250 m に広がる声問層を対象として，岩盤の水理地質調査，トレーサー試験，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とともに，これらのデータに基づき構築した三次元物質移行モデルを用いて Partridge による試解析を実施する。また，JAEA から提供された情報を用いて他の参加機関とともにベンチマークテストを実施し，Partridge を検証するとともに，声問層を対象とした岩盤の収着分配係数及び実行拡散係数の設定を試行する。加えて，Partridge を用いて構築する物質移行モデルの妥当性確認に関する検討を実施する。

(2) 処分技術の実証と体系化

深度 350m 調査坑道を対象とした掘削影響領域の解析手法の確認を継続する。加えて，深度 500m に広がる稚内層を対象とした掘削影響領域の予測解析と，深度 500m の試験坑道を掘削後に実施する掘削影響評価試験を通じて拡充される実際の地質環境条件のデータなどを活用して，予測解析の妥当性を評価する。また，包括的技術報告書（NUMO，2021）で設定した地下施設のレイアウトなどの設計要件に対する判断指標と基準の適用性や課題を明らかにする。この際，JAEA や諸外国の機関との比較も行う。

(3) 実規模の人工バリアシステム解体試験

引き続き，モニタリングデータに関する情報収集を進めるとともに，人工バリア性能確認試験の解体試験計画の策定に貢献する。さらには，解体後に得られるデータを用いて，人工バリアとその周辺岩盤の THMC の状態評価技術の妥当性確認を行う。

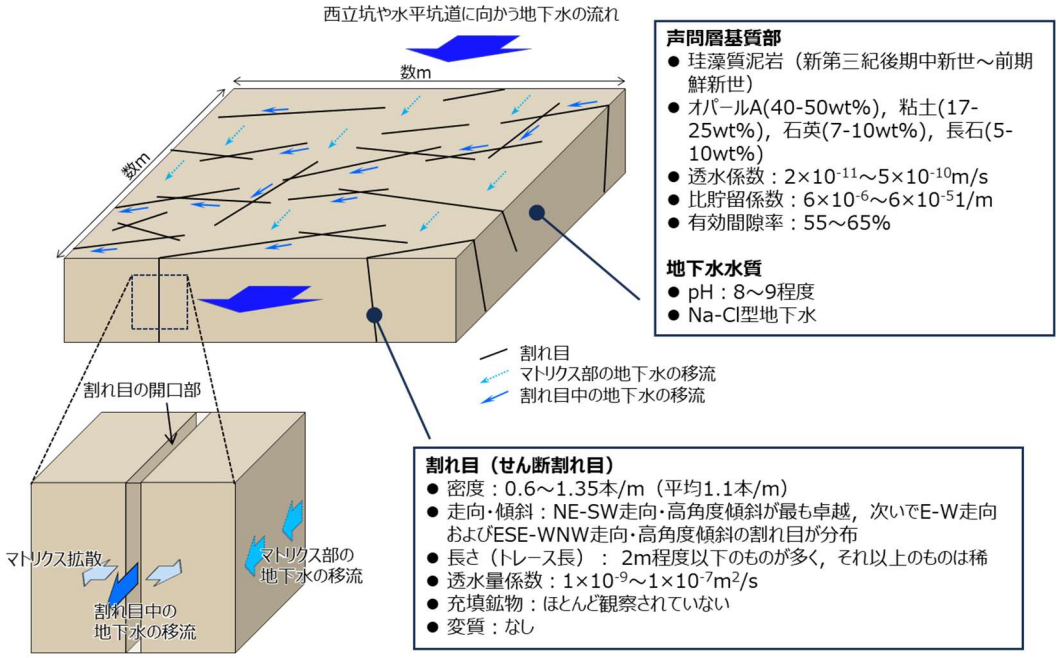


図 1　声問層の水理地質構造の概念モデル（例）

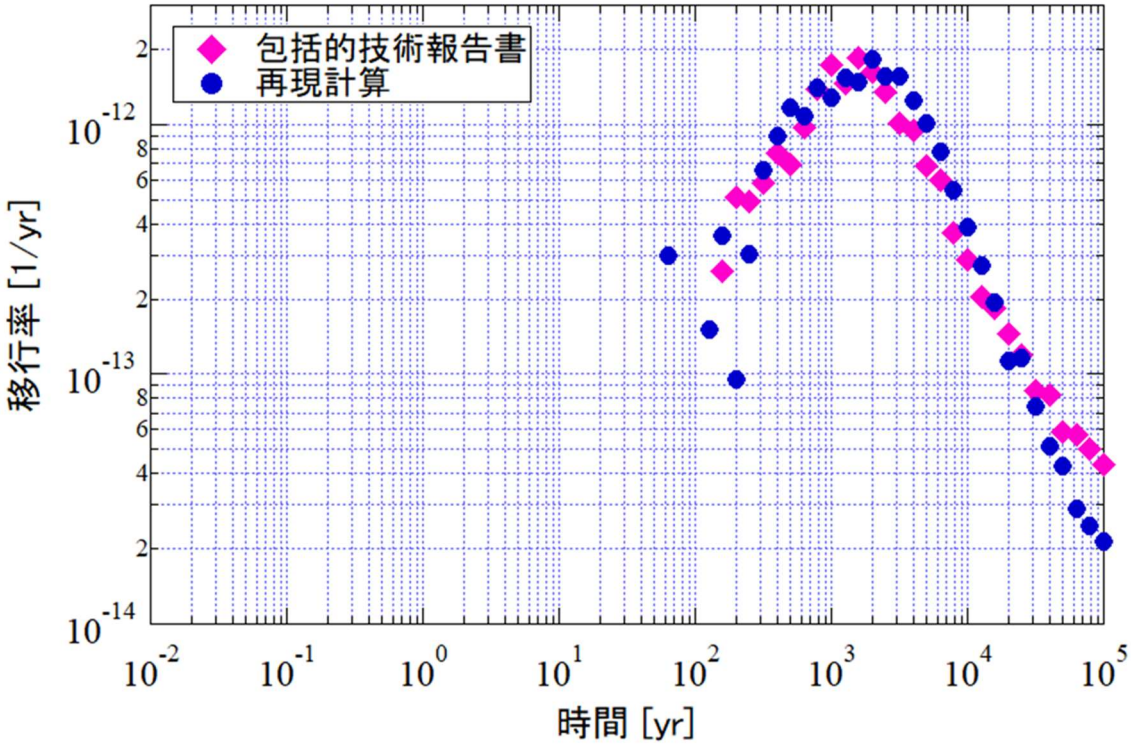


図 2　スーパーコンピューターを用いた再現解析の結果

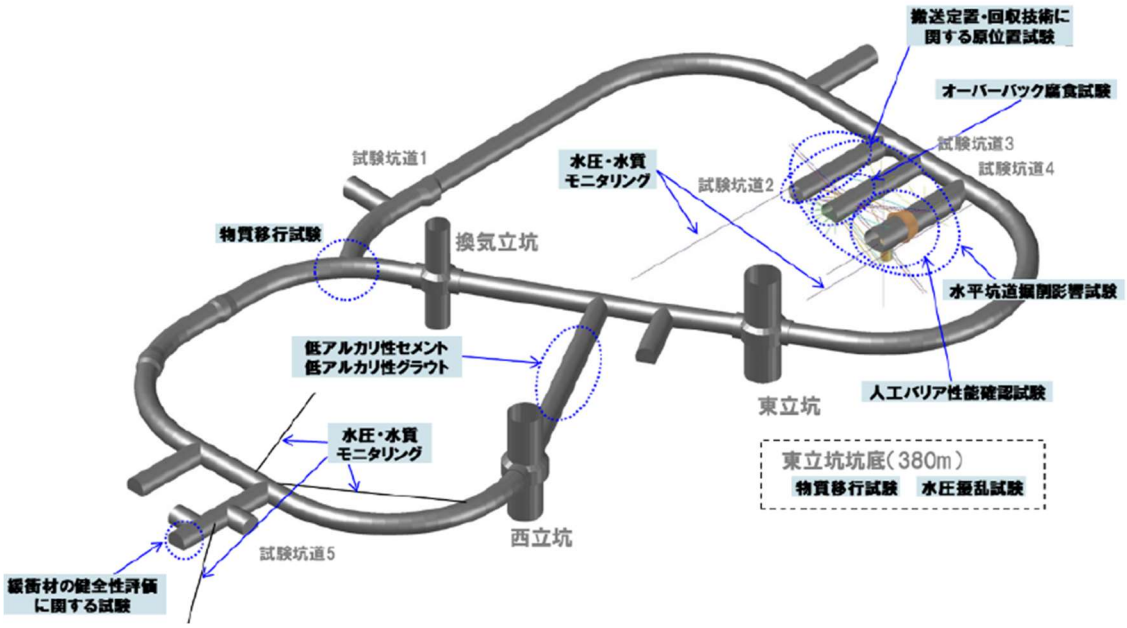


図 3　掘削完了の深度 350 m 調査坑道（JAEA, 2019）

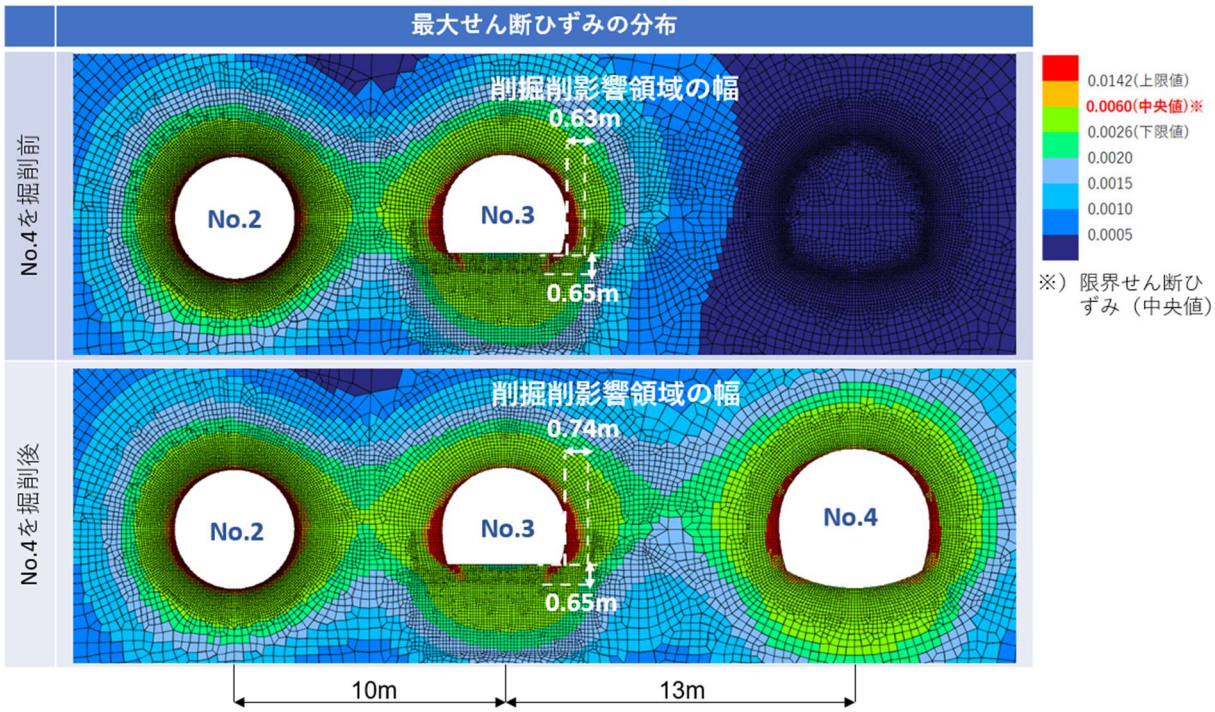


図 4　掘削影響領域の幅

参考文献

Aoyagi, K., Ishii, E. (2018) : A Method for Estimating the Highest Potential Hydraulic Conductivity in the Excavation Damaged Zone in Mudstone. Rock Mechanics and Rock Engineering.

Ishii, E., Sanada, H., Funaki, H., Sugita, Y. and Kurikami, H. (2011) : The relationships among brittleness, deformation behavior, and transport properties in mudstones: An example from the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan. Journal of Geophysical Research; Solid Earth, 116, doi:10.1029/2011JB008279.

Ishii, E. (2017) : Estimation of the highest potential transmissivity of discrete shear fractures using the ductility index. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 100, pp 10-22.

Ishii, E. (2018) : Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single borehole investigations. Water Resources Research, 54, pp 3335-3356, doi:10.1029/2018WR022556.

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) (2019) : 幌延深地層研究計画平成 30 年度調査研究成果報告, 令和元年 7 月.

宮川和也 (2021) : 幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質データ（2021 年度）, JAEA-Data/Code 2021-021.

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.

佐藤稔紀, 笹本 広, 石井英一, 松岡稔幸, 早野 明, 宮川和也, 藤田朝雄, 棚井憲治, 中山 雅, 武田匡樹, 横田秀晴, 青柳和平, 大野宏和, 茂田直孝, 花室孝広, 伊藤洋昭 (2017) : 幌延深地層研究計画における坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第 2 段階：深度 350m まで）研究成果報告書, JAEA-Research 2016-025.

酒井利啓, 早野 明 (2021) : 幌延深地層研究計画　深度 380m までの立坑および調査坑道における坑道壁面の地質観察により取得したデータの統合・整理, JAEA-Data/Code 2021-010.

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.

2.4.2　セーフティケースのコミュニケーションに関する検討

古崎 敦也　髙橋 美昭

原子力発電環境整備機構

1.　背景・目的

地層処分のセーフティケース（Safety Case）は，好ましい地質環境を選定し，これに適合するように適切に設計された処分場が，その建設・操業・閉鎖の期間とともに閉鎖後の長期間にわたって，放射性廃棄物を人間の生活環境から安全に隔離し閉じ込めることを説明するものである（例えばOECD/NEA，2013）。セーフティケースは様々な学術分野の多岐にわたる膨大な情報，データ，知識を統合して作成され，全体像を把握することは地層処分に深く関わっている技術的専門家にとっても容易ではない。特に，セーフティケースの中核をなす処分場の閉鎖後長期の安全性に関する議論については，時間的・空間的な予測に関する独特の方法論（性能評価あるいは安全評価）が用いられ，科学技術的な知識とともに，安全性を判断するという作業プロセスについて理解することが必要となる。また，地層処分の安全評価という文脈で使用される概念や専門用語には，他の科学技術分野では用いられない，あるいは意味合いが異なるものもあり，これらに起因して専門家間でもすれ違いや誤解（理解のギャップ）が生じ，セーフティケースに関するコミュニケーションや議論を行うことが困難となる場合もある。

セーフティケースは，技術的な専門家間だけの議論にとどまらず，社会が地層処分の安全性について理解し，この事業を進めるうえで必要な意思決定を行うための材料としても重要であることから，これを活用して技術的専門家以外の様々なステークホルダーといかにコミュニケーションを進めるかは，国際的にも大きな課題となっている（例えばOECD/NEA，2017）。この課題を解決するためにも，一般の方々の地層処分に対する信頼性の認知に大きな影響力を持つ専門家間でセーフティケースに係る概念や用語について，共通的な理解を得る必要がある。

サイトが特定されていない段階のセーフティケースとして作成した包括的技術報告書（NUMO，2021）の外部レビュー（日本原子力学会，2019）においては，異なる学術分野の技術的専門家間の理解のギャップを解消しつつ，レビューの結果が統合的な報告書として取りまとめられている。その議論の過程などを分析することがコミュニケーションの改善に資すると考え，セーフティケースに関するコミュニケーションにおいて，異なる学術分野の専門家間で生じやすい理解のギャップを解消する方法について，日本原子力学会に検討いただいた。

検討にあたっては，日本原子力学会内に上記のレビューに携わった技術的専門家や，科学技術社会学，言語学の専門家からなる「地層処分のセーフティケースに係る様々なステークホルダーを対象とした理解促進に関する方法の検討」特別専門委員会（表 1：以下，「委員会」という）を設置していただいた（設置期間：2021 年 9 月～2024 年 3 月）。

2.　主な成果

これまでの検討において，地層処分のセーフティケースを構成する語彙に関連して専門家間の理解のギャップが生じている，あるいは生じる可能性があると考えられる用語・概念を網羅的に挙げ，その要因を類型化した。その中から代表的なものを選定し，まずIAEAなどの国際的な機関の定義に基づく説明から出発し，異なる専門分野の委員間での議論を通じてギャップが生じる点を特定，これを解消するために必要と考えられる説明を加えて再度ギャップを特定し，解消するためにさらに説明を

加えるというプロセスを，委員間でギャップがなくなったと考えられるまで繰り返し，必要と考えられる説明の全体像を把握する作業を行った。この方法に基づき，「閉じ込めと隔離」，「地質環境」，「セーフティケース」及び「安全評価」の 4 つの語について，歴史的背景や意味の解説及びコミュニケーション上の配慮事項等を「語彙基盤（地層処分の言葉）」（https://www.aesj.net/uploads/com_safetycase2023goikiban.pdf）（以下，「語彙基盤」という）として取りまとめていただいた。地層処分と比較的接点の少ない専門家や言語学，科学技術社会学の専門家を含む委員会の議論に基づいて，様々な学術分野の専門家の視点を考慮して取りまとめられた語彙基盤は，地層処分に深く関わっている専門家では考えが及ばない指摘も含まれており，様々なステークホルダーとのコミュニケーションに資するものと考えられる。

2023 年度は，読者が個々の目的や関心に応じて語彙基盤を活用できるよう，文章中の語から，その語の説明に移動できるハイパーリンクと索引を作成することで，語彙基盤の読みやすさ，検索性を向上させた。加えて，日本原子力学会原子力安全部会員及びバックエンド部会員に対して語彙基盤を活用したセーフティケースをめぐる安全に関する説明を試行し，その結果を踏まえて更なる語彙基盤の記載内容の改良を行った。

語彙基盤には，様々なステークホルダーとのコミュニケーションを想定し，以下のような階層的な整理によって詳細化した解説※1 と，説明における留意点※2 を記載している。

・まずこれだけは：ごく簡潔に，最低限の定義記載を中心とした説明
・少し詳しく：丁寧にきちんと伝えるための説明　※1
・ここに注意：一般的なイメージ，誤解，他分野での使われ方等の説明，
　　専門家でない方へ説明する際の留意点・心構え　※2

さらに，語彙基盤を取りまとめる過程において委員会等で議論があった様々なステークホルダーとのコミュニケーションにおいて特に留意すべき共通的な事項を総括し，セーフティケースをめぐる安全に関するコミュニケーションを改善する方法について，「語彙基盤（地層処分の言葉）を用いた安全コミュニケーションの提案」（https://www.aesj.net/uploads/com_safetycase2023goikibanhuzoku.pdf）として附属資料の位置付けで取りまとめていただいた。この中で，様々なステークホルダーとの間に生じる理解のギャップについては，地層処分における特有のコンテキスト（文脈や背景）の基に説明される用語や概念を，各人の既存の知識や経験等に基づく言葉の理解のフレームワークであるメンタルモデルを通じて認識することが，ギャップの生じる原因の一つであると示唆された。このため，安全に関するコミュニケーションを改善するためには，コミュニケーションを図る相手のメンタルモデルは地層処分特有のコンテキストを基に形成されたものとは異なることに配慮し，地層処分における特有のコンテキストを十分に説明したうえで，用語や概念を説明することが重要であると提案された。

3.　包括的技術報告書への影響

日本原子力学会「NUMO 包括的技術報告書レビュー」特別専門委員会によるレビューにおいて，「包括的技術報告書を用いて，地層処分の専門家以外の科学技術コミュニティやさらにはその他の人々とのコミュニケーションを進めていく場合には，地層処分に特徴的な考え方の説明が，特に地層処分には馴染みのない科学技術者に地層処分の理解を求めるうえで有効となるのではないかと思われる」との指摘がなされている（日本原子力学会，2019）。さらに OECD/NEA によるレビューにおいても，様々なステークホルダーとのコミュニケーションの重要性について指摘があり，NUMO がこの問題をできるだけ早く検討することが推奨されている（OECD/NEA，2023）。これらレビューにおける指摘も踏まえて検討した本成果は，包括的技術報告書本編 7.3 節（セーフティケースに関する信

頼性構築（Confidence building））において，セーフティケースに関するステークホルダーとのコミュニケーション（7.3.3 項）の取り組みの一つとして反映することを検討する。

4. 今後の展開

今後は語彙基盤を公共的かつ中立的な特性を有する日本原子力学会から公開することで，地層処分事業に対して様々な立場や意見を有する専門家及び一般の方々にも読んでいただけることを目指す。

また，地層処分に馴染みの薄い専門家が集う学協会やシンポジウム等において，委員会委員と引き続き協働しながら公表された語彙基盤を活用し，セーフティケースをめぐる安全に関するコミュニケーションを実践することで，異なる学術分野の専門家の間での共通的な理解の促進を図る。

表 1 「地層処分のセーフティケースに係る様々なステークホルダーを対象とした理解促進に関する方法の検討」特別専門委員会委員

2024 年 3 月現在

	氏名（敬称略）	所属・役職
主査	佐々木 隆之	京都大学 工学研究科 原子核工学専攻 教授
幹事	若杉 圭一郎	東海大学 工学部 応用化学科 教授
委員	小林 大志	京都大学 工学研究科 原子核工学専攻 准教授
〃	小山 倫史	関西大学 社会安全学部 教授
〃	寿楽 浩太	東京電機大学 工学部 人間科学系列 教授
〃	田中 牧郎	明治大学 国際日本学部 教授
〃	半井 健一郎	広島大学 先進理工系科学研究科 教授
〃	廣野 哲朗	大阪公立大学 理学研究科 地球学専攻 教授
〃	松島 潤	東京大学 新領域創成科学研究科 環境システム学専攻 教授
〃	安江 健一	富山大学 都市デザイン学部 地球システム科学科 准教授

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.

OECD/NEA (2013)：The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories, NEA/RWM/R(2013)1.

OECD/NEA (2017)：Communication on the Safety Case for a Deep Geological Repository, NEA No.7336.

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.

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2024年5月公表の「技術開発成果概要2022」に続き，NUMOが2023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と興味・関心の高まりに通じることを期待する。特に将来の地層処分事業を担う次世代の若者や学生にとって，地層処分事業に関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し，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がより円滑に進むよう，今後も工夫と改善に取り組んでいきたい（2.4.2参照）。

2023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）の初年度（1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のために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)