

－2023 事業年度業務実施結果に対する評価・提言－ （3）技術開発

■はじめに

評議員会は、2023 事業年度業務実施結果（本資料別紙参照）に対し、評議員会としての評価・提言を取りまとめるよう原子力発電環境整備機構（以下、「機構」という。）理事長から諮問を受けたことを踏まえ、以下のとおり、機構の技術開発に係る評議員会による評価・提言の内容を報告する。

本資料では、技術開発に係る取組みを事業計画の目次を基に、関連性等を考慮して評価のためのカテゴリ（以下、「評価カテゴリ」という。）を設定した。事業計画の「V1. (4)長期にわたる事業展開を見据えた情報収集」、「V2. 包括的技術報告書¹等を活用した情報発信」及び「V4. 事業を推進する技術マネジメントの強化」の(1)から(4)を合わせて一つの評価カテゴリ「技術マネジメント」を設けた。また、「V1. (2)処分場の設計と工学技術の体系的な整備」と「V3. 処分場の設計検討」とを合わせて一つの評価カテゴリ「処分場の設計と工学」とすることにより、以下のとおり評価カテゴリを①から④の評価カテゴリを設定して、評価・提言を取りまとめた。

事業計画 目次		評価カテゴリ
V 技術開発		
1. 計画的な技術開発の推進		
（1）地質環境の調査・評価技術の高度化	→	① 地質環境の調査・評価
（2）処分場の設計と工学技術の体系的な整備	→	② 処分場の設計と工学
（3）閉鎖後長期の安全性の評価に関する技術の高度化	→	③ 閉鎖後長期の安全評価
（4）長期にわたる事業展開を見据えた情報収集	→	④ 技術マネジメント
2. 包括的技術報告書等を活用した情報発信		
3. 処分場の設計検討		
4. 事業を推進する技術マネジメントの強化		
（1）概要調査に向けた実施体制の検討及び実施能力等の向上に係る取組み	→	
（2）知識マネジメント及び人材の育成・確保に係る取組み	→	
（3）技術開発の着実な推進、成果の品質・信頼性の向上に係る取組み	→	
（4）国際連携・貢献の着実な推進	→	

¹ 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－ 要約；NUMO-TR-20-01、概要編；NUMO-TR-20-02、本編・付属書；NUMO-TR-20-03

■評議員会による評価・提言（技術開発）

1. 全般的な評価・提言

評議員会は、上述 4 つの評価カテゴリに関する進捗は良好であり、国の「地層処分研究開発に関する全体計画（令和 5 年度～令和 9 年度）」及びそれを受けた機構の「地層処分事業の技術開発計画（2023 年度～2027 年度）－中期技術開発計画－」に沿って着実に成果を挙げているものと評価する。次年度以降のより良い成果につながるよう、4 つの評価カテゴリそれぞれに対し評価と提言を行う。

2. 評価カテゴリごとの評価・提言

① 地質環境の調査・評価

本カテゴリの評価対象となる 2023 年度の技術開発は、(i)地質環境に係る評価技術の整備及びモデル化技術の高度化、(ii)地質環境に関わる個別調査技術の最適化、(iii)分野横断的な連携強化、(iv)情報・データ・知識に関する DX の推進に関する検討、を実施項目とする業務である。

評議員会は、個々の開発項目についておおむね着実に成果を挙げていると評価する。特に、地質環境特性の長期変遷に関するモデル化技術については、年々高度化しており、四次元地質環境モデル（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水理場や化学場といった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し、処分場の設計や安全評価に反映することができる、現実的な地質環境のモデル）についても検討時の着目点は適切であり、モデル化の方向性は妥当であると評価する。第三紀層のみからなり、様々な調査が進んでいて多くのデータがあり地質構造も変形過程も比較的単純である幌延地域を例として検討した結果は説得力がある。

次年度以降の活動に向け、以下を提言する。

- ・ 技術開発評価委員会の委員からは、「物理探査データの解析の妥当性の確認が、どのようになされたのか」、「例えば、「不確実性の評価手法」というのは具体的にはどのようなものなのか」といった具体的内容について質問があり、個別に回答を受けた。このような専門家からも関心の高い事項について、今後も丁寧な説明、回答を期待したい。
- ・ 四次元地質環境モデルのように超長期の地質環境の変遷をシミュレーションする困難な課題に挑戦する姿勢は高く評価する。一方で、そのモデル化にあたってはシナリオやパラメータ設定などの不確実性が大きく難しい課題であることから、構築したモデルの妥当性をどのように確認するのか、また得られた結果をどう解釈し安全評価につなげていくのか、十分な検討が必要と思われる。
- ・ 光ファイバーセンサーケーブルに付帯する技術に関しては、世界中で加速度的な進歩がみられるため、機構もより能動的に取り組むべきである。具体例を挙げると、近年では DAS (Distributed Acoustic Sensing) による物理探査により、地盤内の可視化技術が進歩している。この技術は広域の地層探査に有用であり、機構においても活用の余地があると考えられる。
- ・ 四次元地質環境モデルと生活圏評価モデルは関連性が深いため、両者の検討を連携させながら行うことで具体的な説明性を高める必要がある。その際、表層近くの水理と、その深部地下水の水理の関係性について、現実的な影響の程度やパターンを把握し、モデルに反映させる必要があると考える。
- ・ 深部流体に関する情報の整理、地域性を考慮した火山や断層活動の発生確率の評価に係るケーススタディはリスクを避けるために重要な検討課題である。
- ・ 確率論的手法の導入は必要としても、その結果に基づいてどのように安全評価シナリオを設定するかを明確にする（蓋然性の程度に応じた安全評価シナリオの設定方法を検討する）こと。
- ・ 先進的な技術、研究開発の分野であり、成果は学術講演会での発表のみならず、国際的な発信を強化していくことを前回に続き提言する。国際的なジャーナルにインパクトのある論文を掲載し、国際的なプレゼンスを示すことは、技術力の高さを示すこと、信頼性を得ることに繋がると思われる。

- ・ 「四次元地質環境モデルを使うとこのようなことが可能である」といった内容の科学トピックスを機構が提供し、新聞、テレビでのニュースを通じて人々の関心と理解を深めること。
- ・ ボーリング孔の閉塞技術は原位置での確認が不可欠であるため、海外機関との共同研究だけでなく、我が国でも原位置試験を行い、技術を蓄積すること。

② 処分場の設計と工学

本カテゴリーの評価対象となる 2023 年度の技術開発は、(i)設計の信頼性向上、(ii)処分場設計オプションの整備、(iii)工学技術の実証的研究、(iv)閉鎖前の安全性の評価及び(v)処分場の設計検討、である。

評議員会は、個々の開発項目についておおむね着実に成果を挙げていると評価する。具体的には、緩衝材（ベントナイト）の高温特性、及びベントナイトの止水性能に関する長期間にわたるデータ蓄積などは、取組みの方向性や成果が望ましいものであると評価する。また、幅広い地質環境に対応して設計オプションを整備していることの事例として、改良型 PEM（Prefabricated Engineered Barrier System Module：以下「PEM」）の技術開発成果、及び銅コーティングオーバーパックの成立性について、我が国で想定される地質環境との関係について説明がなされ、昨年度の評議員会の提言に対応して、優れた成果を挙げている。

次年度以降の活動に向け、以下を提言する。

- ・ 公益社団法人腐食防食学会と連携した、標準化（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）、継続的な議論、新規アプローチの提示などの取組みは、当該分野の継続的な研究力の強化につながるものとして重要な成果であるといえる。引き続き上記のような取組みを行い、機構の技術開発に活かしていただきたい。
- ・ 銅コーティングオーバーパックの技術開発に関して、銅は将来的にレアメタル化する可能性が経済産業省の見解でも示されている。将来的な調達上のリスクにも留意すべきである。
- ・ 炭素鋼製オーバーパックの技術開発に関して、過去には、鋳鋼に着目した開発を実施していた。様々な鉄材料を対象として技術開発の状況は年々変わっており、良い方向に向かっているとは思いますが、過去の研究開発成果と現在の研究開発の目的との関係性について、技術的意義を明確にするとともに一般の方に誤解を生じないように説明する必要がある。技術開発の前進には苦労譚が多いが、そこを説明できれば、読者に興味と共感を持ってもらえるのではないかと。
- ・ 改良型 PEM については、人工バリアの厚さや乾燥密度などの設計の技術的根拠を準備し、説明できるようにしておくべきである。
- ・ 設計オプションをはじめとする個々の技術開発成果が着実に得られていると評価するが、人々の持つ地層処分の技術的な成立性に対する漠然とした不安を取り払うためにも、学会講演や技術資料などに留まることなく、広報資料など多面的な手段を用いて、より一層の情報発信を行うことを提言する。特に PEM 方式による放射性廃棄物の埋設や銅コーティングオーバーパックなどの最新の設計オプションの開発成果を早い段階から積極的に情報発信することを望む。

③ 閉鎖後長期の安全評価

本カテゴリーの評価対象となる 2023 年度の技術開発は、(i)処分場の時間的変遷を考慮した廃棄体から生活圏に至る核種移行評価手法の整備、(ii)地下深部環境における地下水流動・物質移行解析モデルの妥当性確認手法の整備、(iii)地下深部から生活圏に至る広域スケールを対象とした核種移行評価のための解析技術の構築、(iv)核種移行の解析に用いるパラメータ設定、(v)閉鎖後長期の安全性の評価に関する業務効率性向上、である。

評議員会は、個々の開発項目についておおむね着実に成果を挙げていると評価する。特に地表近傍における核種移行と被ばくプロセスを表現する「生活圏評価モデル」に関する技術開発成果を高く評価する。また、各種数値解析や AI の活用などの、世界でも最先端に位置するチャレンジングな技術開発に取

り組んでおり、これらを広く学会でアピールすることは、地層処分分野の魅力を次世代の研究者に伝えることに繋がると推察される。加えて、海外機関などとの共同研究を通じて機構の立ち位置を確認し、相互の強みを活かして知識、技術を高度化させていく体制が作れていると判断する。

次年度以降の活動に向け、以下を提言する。

- ・ 技術開発評価委員会の委員からは、「評価モデルの検証方法」、「機械学習の学習データ数や特徴量の数」といった具体的内容について質問があり、個別に回答を受けた。このような専門家からも関心の高い事項について、今後も丁寧な説明、回答を期待する。
- ・ 四次元地質環境モデルと生活圏評価モデルは関連性が深いため、両者の検討を連携させながら行うことで地層処分による安全確保に対する信頼性を高める必要がある(2.①参照)。
- ・ 反応輸送解析などは基本的に適用分野が広い。地層処分の分野で積み上げている知見と、他分野におけるそれとの共通性等を整理し、ベンチマーク等で協力していくことができれば、分野横断的に学際的で継続的な議論、新規アプローチの提示などが可能となる。加えて、次世代研究者への反応輸送解析を開発する分野に対する魅力向上に寄与するものと推察される。
- ・ 深部の地下水流動と、地表近傍の地下水流動の関係性についてデータに基づいたシナリオの検討が必要ではないか(2.①参照)。日本は典型的な火山国である。過去に大規模な噴火が度々起こり、基盤岩の上部に火山灰が幾重にも堆積し上部の比較的厚い地層を形成している場合も想定される。中でも、玄武岩の火山灰(スコリア)の堆積では堆積後の風化に伴い不透水性の粘土層が形成され、深部と地表近傍の地下水流動を緩やかに隔絶している場合も想定される。その隔絶の程度やパターンを評価し整理することが重要で、サイトごとのその役割の大小は概要調査以降の展開に関するキーポイントの一つではないかと考える。
- ・ 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構やスイスのグリムゼル試験場等で機構職員が共同研究プロジェクトに参加し成果を挙げていることは評価できる。一方で、地層処分の取組みは長く続くことから、将来に向けて間断なく若い研究者がバックエンドの分野に加わり続けることが欠かせない。そのためには、大学の関係する研究室と共同研究を進め、指導する教員と学生が共に地層処分研究に係る機会を後押しする必要がある。機構職員の研究水準の向上と大学における若い研究者の育成に向けた取組みをしっかりと並行して進める必要がある。その場合、公益財団法人原子力安全研究協会や公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、一般財団法人エネルギー総合工学研究所といった関連組織の協力を得ながら進めることも効果を高めるうえで選択肢の一つと考える。
- ・ 地層処分施設的设计上、放射性核種が地表付近に移行してきたとしても、その濃度は極めて低く、そのリスクは許容できる範囲に大幅に低減されているが、地表付近の核種移行評価は被ばく線量の評価に必要であり、一般の方も生活圏である地表の評価を重視する傾向があるため、重要な技術開発項目である。
- ・ 炭酸イオンと炭酸水素イオン濃度が比較的高い地下水の場合は、ベントナイト中で廃棄体パッケージを構成するコンクリートから溶脱したカルシウムイオンと地下水中の炭酸イオン/炭酸水素イオンがカルサイトを形成する可能性があり、その場合、カルサイト形成部のコンクリート側では強アルカリ性の領域が、その反対側では弱アルカリ性の領域が形成される可能性がある。仮にこの状況が発生した場合、高 pH 側では緩衝材の変質が懸念される。こういった過程はサイトに依存するが、炭酸イオン/炭酸水素イオンが存在するケースは少なくないと考えられることから、このような過程の成立性の有無についてより詳細な検討が必要である。
- ・ 現象をより確からしく取り扱う数値解析モデルを、保守性を確保しながら簡略化し、線量などの処分施設の性能を評価するための数値解析モデルを構築することのだが、簡略化の過程において保守性が確保されていることの確認が重要。この確認方法として、エキスパートジャッジだけに頼るのではなく、何らかの指標による定量評価を導入することも考えられるのではないかと。

- ・ 地層処分の検討を行ううえでは、閉鎖後長期の気候変動を考慮する必要があるため、古気候学のデータの適用や解釈も重要になると考える。
- ・ 被ばく影響の評価は数万年から数十万年後にわたるので、この間には、1 から数回の氷期、間氷期を経る。したがって、今後 120m 程度の海水準の低下と上昇が生じる。また、氷期には平均気温が約 10℃低下して現在の鹿児島市が札幌市程度の平均気温になるとも言われている。これらのことから、今後の評価では、評価に係る多くの項目から成る前提条件をリストアップし、条件の設定について丁寧に説明をしてから評価手法や評価結果の説明をすることが重要である（2. ①の四次元地質環境モデルにも関連）。また、発生の可能性の小さい条件も考慮した保守的評価の中で地下水が深地中から断層に沿って上昇し、帯水層に入る時点での核種濃度と処分後の経過時間についても、地層処分システム全体の機能に関する把握の中で生活圏評価の位置づけを伝えるうえで重要であると考えます。
- ・ 深部流体に関して、地震発生時、深部流体が急速に移動した例が存在する。処分場に断層が新たに形成されるというのは稀頻度事象ではあるが、断層に沿って流体（地下水）が急速度で移動するという現象が仮に発生した場合、これまでの定常状態での地下流動では把握できない事態が生ずるので、引き続き最新知見の調査と安全評価に与える影響等の検討をお願いしたい。また、今後ともこうした新たな科学的知見が現れる可能性は高いので、こうした分野における新たな科学的進展を絶えず視野に収めつつ、技術開発を進めていただきたい（2. ①の四次元地質環境モデルにも関連）。
- ・ 火山や断層の発生確率であるが、これらを調査地域のような狭い範囲のみを対象に求めることは困難なので、ITM-TOPAZ 手法などのシナリオの起こりやすさを評価可能な手法を用いて、全国的な規模での発生確率マップを作成し、これを用いて調査地域における火山や断層の発生確率を評価することが合理的と思われる。ただし、この分野での確率評価の精度には問題が大きく、火山や断層の発生確率をどのように安全評価に活かすのか、さらなる検討が必要である。
- ・ GoldSim（物質移行解析コード）や PHREEQC（地球化学反応解析コード）等の汎用解析コードの利用が進むよう、機構で整備した関連データセットを公開して一般的な活用を促進すること。
- ・ 単純な系で再現可能であっても複雑な系では多様な因子が相互に影響しあい、それぞれの因子に対し概念モデル、数理モデル、パラメータ、解析体系が適切に用いられているのか否かを見極めることは大変困難なことであるが、今後も数値解析の妥当性確認を継続して取り組むこと。

④ 技術マネジメント

本カテゴリーの評価対象となる 2023 年度の機構業務は、(i) 長期にわたる事業展開を見据えた情報収集、(ii) 包括的技術報告書等を活用した情報発信、(iii) 事業を推進する技術マネジメントの強化、である。

評議員会は、個々の項目についておおむね着実に成果を挙げていると評価する。具体的には、国際的な繋がりを維持し、交流している点、原子力規制委員会等の関係機関と多数回にわたり意見交換を繰り返している点、地層処分事業の進展に伴いますますます重要になっている情報発信に前向きに取り組んでいる点について高く評価できる。

次年度以降の活動に向け、以下を提言する。

- ・ 処分概念などを直接説明することも重要だが、例えば「緩衝材の厚さはなぜこの厚さと密度が必要なのか」といったことを、一般の方の知識と結び付けて説明することも重要ではないか。
- ・ 機構の研究開発の成果は一般の方にほとんど伝わっていないため、一般の方の視野視線を取り入れて情報発信を行っていく必要がある。プレスリリースによりメディアに対して成果を公表し、関心を持ったメディアが記事化することで、一般の方の理解を深めることができれば、猜疑心、恐怖感、不安が減るのではないかと思う。地層処分を進めていく技術者が自信を持てるよう、機構の技術開発の成果をより広く発信していくことを期待する。

- ・ 学会でブースを展示することや、機構との共同研究に関与した学生をリクルートするなど、学生と接点を持つことが効果的だと推察される。
- ・ 海外に派遣するキャリアパスを示すことや、地層処分事業の社会的意義を伝えることなどで、学生に夢を持たせることも大事。人材育成の観点では、電力会社では人材育成にコストをかけ、博士号を取得させる例もある。
- ・ 学生に研究する機会を与え、地層処分事業の面白さを感じてもらうことが効果的だと思う。いろいろな機関にそのような機会を持ってもらい、合同で発表会を行い学生同士で切磋琢磨してもらうことで、学生に志望してもらえないのではないか。
- ・ 情報発信などにも共通することであるが、地層処分の枠組みを超えて、他の分野にも技術開発業務で関与していくことで、世間や産業界からの認知も向上する。また、情報発信の観点では、海外では、普通の成果であっても様々な分野とリンクさせることや、背景や期待を記載することで研究の意義を示すこと等により読者の目を引き、その成果がより価値の高いものとしてアピールしている事例もあり、そのように成果の意義を分かりやすく上手にアピールする取組みも有効だと考えられる。
- ・ 事業が次の段階に進む等の業務環境の急な変化に対して、電力会社や関係機関から要員の支援を期待するというのとは一つのコネクションではあるが、必ずしも地層処分の専門的な知識を有する方が集まるわけではなく、また短期で離れてしまう可能性があると思定される。このような方々に活躍いただけるように短期でスキルを身に付けてもらうよう育成する仕組みは、要員確保のために機構として有しておかなければならないものである。
- ・ 機構で身に着けた技術力、スキルが地層処分事業以外でも活用でき、国際的に活躍できる人材になれる、というアピールができれば魅力の向上にもつながるのではないかと。
- ・ 関連分野並びに周辺分野の技術者、研究者を内外から巻き込んで国際的なワークショップやシンポジウムを開催することは、周辺分野の技術者、研究者との議論を深めるのに役立ち、地層処分分野のプレゼンスも高まると考えられる。
- ・ 若い人に当該分野に入っていただくことは理想ではあるが、シニア人材が長く活躍できる方策を併せて考える必要がある。
- ・ 地層処分の学際的で高度な技術開発成果は多様な分野での展開可能性がある。地層処分の技術的成果を、特に技術の社会実装という観点でより進んでいる環境分野などの他分野で実証していくことは規制プロセスにおける機構の技術の信頼性向上に繋がる。また異分野の技術との融合を図ることでイノベーションを起こし、安全性向上や認知度、魅力度向上につながる。最終処分法や機構の規程、細則などによる規定との関係で難しい面もあると思われるが、そのような視野をもって学会や産業界とのネットワークを構築するとよいのではないかと。
- ・ 地層処分に関する技術情報、特に「長期の閉じ込め」に理解を得る方向で情報発信していただきたい。そのためには、日常の市民生活に身近なものに焦点を当て、端的に説明をすることも一つの選択肢であると考えられる。自然界で地質学的時間スケールやそれに準じた時間スケールで閉じ込めてきた身近な事例を集めて整理し、市民向けの技術情報の発信に取り組んではどうか。
- ・ 機構として取り組むべき最終処分事業を確実に実施することを優先したうえで、将来の核燃料サイクル事業の最終処分事業に及ぼす影響が、最終処分事業にとって困難な課題として顕在化することにならないよう、核燃料サイクル全体にわたるチームを作り、処分に柔軟に対処できるような体制づくりが求められる。こうした他の分野も巻き込んだ取組みを機構が牽引できるよう、人材育成の観点からの取組みを継続すること。
- ・ 「放射性廃棄物を地下深くに隔離して閉じ込めるのに、漏えいを前提としてシミュレーションするのはなぜか」といった、非専門家の方々から頻りに発せられる疑問に答えていくための情報発信の仕方は、評議員からの関心も高いことから、今後も関係者で連携を取りつつ、良い成果を上げられるように取り組むこと。

- ・ 諸外国の実施機関で積極的に実施されている例を参考として、成果を積極的に公表すること。外部が成果を引用することは機構の技術力を証明することにも繋がる。ただし、引用を促すには英語化が必須であると考える。

以 上

—2023 事業年度業務実施結果等に係る機構からの説明— (3) 技術開発

<目次>

○業務実施結果・自己評価・今後の取組み . . . 1～31ページ

・評価カテゴリ① 地質環境の調査・評価 . . . 1～7ページ

・評価カテゴリ② 処分場の設計と工学 . . . 7～13ページ

・評価カテゴリ③ 閉鎖後長期の安全評価 . . . 13～22ページ

・評価カテゴリ④ 技術マネジメント . . . 23～31ページ

評価カテゴリ① 地質環境の調査・評価

1. 計画的な技術開発の推進

(1) 地質環境の調査・評価技術の高度化

【業務実施結果】

1) 長期的な自然現象の発生可能性及び地質環境の状態変化に関する評価技術の整備

- ・地層処分サイトは、地層処分システムの安全機能に著しい影響を及ぼす可能性のある自然現象の発生を回避するように選定する。こうしたサイトに対し、予測に付随する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における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、不確実性も考慮して安全評価シナリオの設定に反映するための定量的評価技術の整備を目的とした検討を進めた。
- ・2023 年度は、2022 年度までに実施した諸外国の安全評価シナリオ構築及びその発生可能性や影響評価に関する事例等について調査、収集した情報、及び国内外有識者との意見交換に基づき、以下に示す課題の抽出及びそれを実施するための計画を策定し、2024 年度の業務委託に向けた準備を実施した。

- －安全評価シナリオ設定への反映という観点からの深部流体に関する情報の整理
- －地域性を考慮した火山や断層活動の発生確率の評価に係るケーススタディ
- －上記を踏まえた専門家との意見交換による理解促進

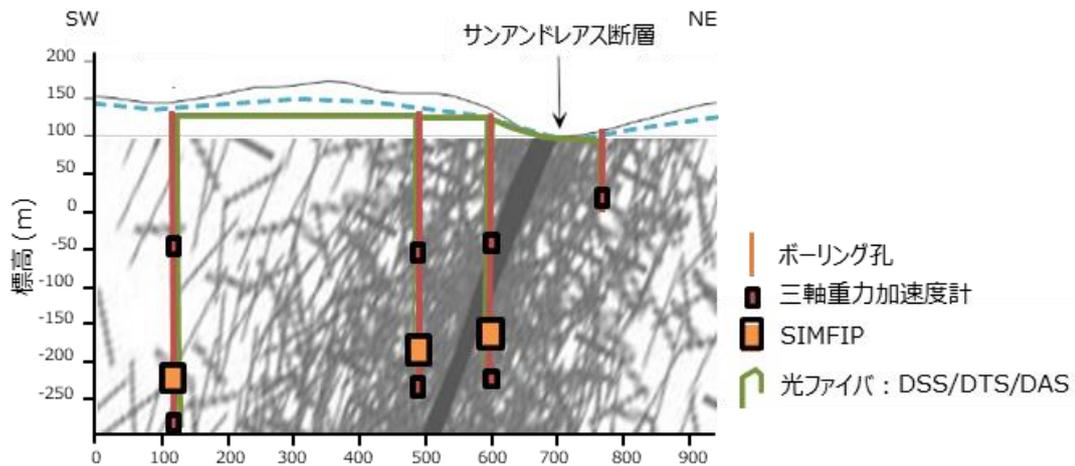
2) 地質環境特性の長期変遷に関するモデル化技術の高度化

- ・自然現象の著しい影響を回避したサイトについて、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水理場や化学場といった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し、処分場の設計や安全評価に反映することができる、現実的な地質環境のモデル化（四次元地質環境モデル）技術の整備を目的とした検討を進めた。
- ・地質環境特性の長期変遷に関する公開情報が整備されている地域（以下、「事例検討地域」という。）における地質環境データを用いて、これまでに整備した地質環境特性の長期変遷に関する四次元地質環境モデルの構築技術を適用した以下の検討を開始した（2023～2024 年度の 2 か年計画）。
 - －不確実性を考慮した四次元地質環境モデルの構築及び解析を行って、地質環境特性の変遷過程に関するモデルの解析結果に及ぼす不確実性要因の影響の把握
 - －モデルによる地下水の水質や年代等の観測値の再現性に関する評価
 - －上記のモデル化やそれを用いた解析作業を通じて、モデルに内在する不確実性の評価手法を考慮した四次元地質環境モデルの構築技術の高度化とその妥当性確認

- ・ 2023 年度は、事例検討地域を対象とした地層境界の不確実性による推定隆起量の違いに着目した地形、地質構造モデルの構築、及びそれを用いた水理地質構造モデルの構築及び地下水流動、移流分散解析を実施した。具体的には、地形や地質構造の変遷の不確実性要因に関する具体的な事象（地形発達侵食や堆積過程など）を抽出したうえで、事例検討地域における水理、物質移行特性及び気候、海水準変動に係る不確実性を考慮した地下水流動、移流分散現象に関する感度解析を実施した。

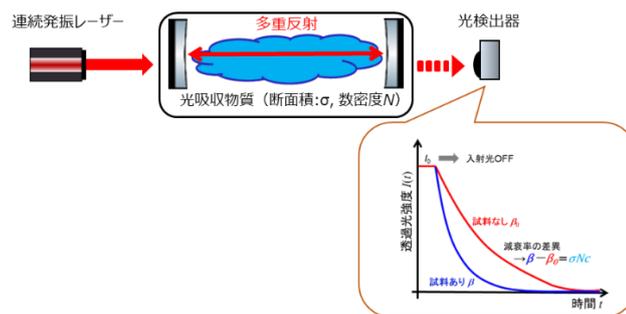
3) 地質環境に関わる個別調査技術の最適化（物理探査技術、ボーリング技術、モニタリング技術、ボーリング孔の閉塞技術）

- ・ 最新の物理探査データ解析手法に関する適用性確認を目的として、一般財団法人 電力中央研究所（以下、「電中研」という。）の横須賀地区における共同研究により過去に取得した物理探査データ（二次元反射法地震探査、VSP 探査、電磁探査）（2006～2010 年度）を用いた最新の解析技術による再解析を実施した。主な成果は以下のとおり。
 - － ノイズ除去等の前処理や地層の傾斜等を考慮可能な最新の解析技術を適用することによって、これまでに存在を把握していなかった地層が不連続となる境界面の存在を解明（昨年度までのボーリング試験において事前に想定した三浦層群が確認されなかったことの原因を確認）
 - － 再解析に適用した最新の解析技術の適用性、有効性及び現地調査に向けたデータの取得方法や測線配置方法といった物理探査手法に関する知見を整理
- ・ 今後サイト調査における物理探査計画に反映することを目的として、スイス放射性廃棄物管理共同組合（以下、「Nagra」という。）との共同研究を通じて、上記再解析に用いたデータを取得した過去の物理探査に関する計画立案や、データ取得及び解析、結果の解釈に関する手順や品質管理、品質保証の考え方の改善点等を整理した。また、諸外国における堆積岩及び結晶質岩を対象とした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、品質保証等に関する最新の技術的知見やノウハウを整理した。
- ・ 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、ボーリング試験に着手した（2023～2024 年度の 2 か年計画）。このボーリング試験においては、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等を踏まえて、仕様の作成や契約方法の検討、費用積算などを実施した。具体的には、大孔径のボーリング孔を利用した孔内水圧破碎試験及び室内応力測定を行うための試験計画の策定を行った。
- ・ ボーリング孔や坑道の掘削において活動性が明らかでない断層に遭遇した際には、その活動性を考慮した工学的対策の検討や、再活動に伴う透水性の変化を考慮した核種移行解析に基づく安全評価を実施する。それらの信頼性向上に資するため、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を観測するためのモニタリング装置の開発、及びこの観測結果に基づく断層や断層周辺の水理力学連成現象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て、米国ローレンスバークレー国立研究所（以下、「LBNL」という。）との共同研究を進めている。2023 年度は、2022 年度にサンアンドレアス断層を対象として掘削した 4 孔（掘削長：各 200m 程度）のボーリング孔に設置した断層の変位、間隙水圧、地震波等の観測装置（図①-1）による連続観測を継続した（2023～2025 年度の 3 か年計画）。これまでの主な成果は以下のとおり。
 - － 断層が定常的なクリープ挙動で変位している状況や、サイトの周辺で生じた地震に伴う断層の変位、地震波形などが観測できていることを確認
 - － 観測区間の設定に必要なパッカーの拡張圧の変動が変位観測に与える影響を低減するための対応が必要であることを確認



図①-1 サンアンドレアス断層を対象とした断層の変位、間隙水圧、地震波等の連続観測のイメージ

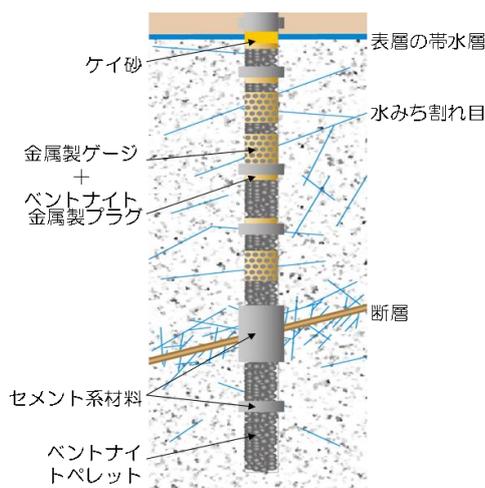
- ・ 採水を伴わずにボーリング孔内の地下水の水質を測定する装置の開発を目的として、東京大学との共同研究を実施している（2023～2025年度の3か年計画）。2023年度は、レーザー吸収分光法（図①-2）を用いた地下水中の同位体分析モニタリング装置に必要な要素技術の検討及び処分事業を目的とした計測に要求される技術課題の抽出を実施した。具体的には、小型化したメタンガス同位体分析装置（ $^{12}\text{CH}_4$ 、 $^{13}\text{CH}_4$ ）の設計、製作及び装置の性能確認を実施した。



図①-2 共振器強化型レーザー吸収分光法のイメージ

- ・ 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（図①-3）を整備するため、英国原子力廃棄物サービス（以下、「NWS」という。）（旧英国放射性廃棄物管理会社（RWM））及びNagraと、協定に基づく国際協力（2019～2027年度）を継続した。またこの国際協力での情報交換や議論の結果を踏まえたNagraとの共同研究を実施した。主な進捗は以下のとおり。
 - － 金属製のブリッジプラグの設置装置の設計、試作を完了し、作動性能を確認
 - － ブリッジプラグ設置装置の作動確認及びベントナイト閉塞材の膨潤状況を確認するための実規模試験の計画策定
 - － スイスのグリムゼル試験場（Grimsel Test Site、以下、「GTS」という。）におけるボーリング孔を用いた国産閉塞材（ベントナイトペレット）の性能確認試験により、膨潤後の閉塞材が十分な止水性能（ 10^{-12}m/s 以下）を有していることを確認
- ・ ボーリング孔の閉塞に使用するベントナイトペレットを、ボーリング孔内の深部まで運搬する際に、水中での膨潤発生を遅延させる必要性が確認されたことから、ベントナイトペレットを溶解性物質でコーティングする技術の検討を開始した（2023～2024年度の2か年計画）。主な進捗は以下のとおり。

- ーベントナイトペレットが有する特性（膨潤特性や水理特性など）及び地下水質や人体などへの影響を考慮して、10種類のコーティング剤候補材を選定
- ー選定したコーティング剤候補材を用いたコーティング方法の検討や、コーティングしたベントナイトペレットの膨潤状況などを確認



図①-3 ボーリング孔の閉塞方法の概念図

4) 地質環境に係る科学的知見の拡充とその情報収集のための分野横断的な連携強化

- ・ 1)～3)に関する委託業務や共同研究、及びそれらに関連した設計、安全評価担当者との議論、関連分野の学会参加などを通じて、各実施項目への設計、安全評価からのニーズの明確化や、成果の反映先や反映時期、反映方法などの確認を継続した。

5) 技術開発成果の情報・データ・知識に関する DX の推進に関する検討

- ・ サイトでの地質環境調査により取得するデータやコア試料などの管理に必要な知見やノウハウを、これらに関する経験を有する Nagra 及びスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（以下、「SKB」という。）といった海外実施主体から収集した。
- ・ 電中研・横須賀地区におけるボーリング試験を事例として、現地調査を想定した調査、試験実施中の一連のデータ登録作業を模擬した試行のために、データ管理に適用するためのデータ登録標準様式を整備した。
- ・ 2024 年度からのデータベースシステム開発に向けた準備として、データベースシステムの機能要件及び非機能要件（システム性能、拡張性など）に関する情報を市場調査により収集した。

【自己評価・今後の取組み】

（自己評価）

- ・ 2023 年度の業務を通じて、以下に示す成果を挙げることができ、大きな問題なく計画を進めることができている。これらの成果は、特定サイトの地質環境調査、評価及びモデル化に関する計画策定等に反映する。
 - ー＜長期的な自然現象の発生可能性及び地質環境の状態変化に関する評価技術の整備＞諸外国の安全評価シナリオ構築及びその発生可能性や影響評価に関する事例等について調査、収集した情報及び国内外有識者との意見交換の結果に基づき、検討内容を抽出し、2024 年度委託業務の仕様書を作成したことで契約関連手続きに着手することができた。
 - ー＜地質環境特性の長期変遷に関するモデル化技術の高度化＞広域スケール（数十 km×数十 km×数 km）の将来数十万年程度の期間を対象とした四次元地質環境モデル構築技術の妥当性、適用性確認、

及びモデルに内在する不確実性の評価手法の整備に向け、地形や地質構造の変遷及び気候、海水準変動の不確実性要因と、それに基づく感度解析の実施方法に関する知見を蓄積した。

- <地質環境に関わる個別調査技術の最適化>物理探査データの最新の解析技術（例えば、ノイズ除去等の前処理や地層の傾斜等を考慮可能な最新の解析技術）の適用性や有効性、物理探査手法の有効的な組み合わせ方法に関する知見を蓄積するとともに、データの品質管理、品質保証の考え方に関する事例を収集した。また、ボーリング技術については、電中研・横須賀地区でのボーリング試験の仕様策定を通じて、各種孔内試験や室内試験の有効的な組み合わせ方法に関する知見を整理した。モニタリング技術については、地震に伴う断層の変位、間隙水圧、地震波を連続観測するためのモニタリング装置の所期の機能が正常に作動していることを確認した。また、レーザーを利用した原位置分析測定法におけるメタンガス分析装置の小型化に関する見通しを得ることができた。ボーリング孔の閉塞技術については、ブリッジプラグ設置装置の実規模試験への適用見通しを得るとともに、国産閉塞材の原位置での性能を確認することができた。さらには、ベントナイトペレットの水中での膨潤を遅延させるためのコーティング剤候補材を選定し、その適用性を確認するための検討を開始した。
- <技術開発成果の情報・データ・知識に関する DX の推進に関する検討>現地調査を想定した調査、試験実施におけるデータ登録作業試行のための準備や、データベースシステム開発に向けた情報収集を計画どおりに進め、2024 年度委託業務の仕様書を作成し、契約関連手続きに着手することができた。

以上により、国の「地層処分研究開発に関する全体計画（令和 5 年度～令和 9 年度）」（以下、「全体計画」という。）及びそれを受けた機構の「地層処分事業の技術開発計画（2023 年度～2027 年度）－中期技術開発計画－」（以下、「中期技術開発計画」という。）に沿って着実に業務を実施しているものと評価する。

（今後の取組み）

- ・ 地層処分の観点から好ましい特性が長期にわたって安定的に維持される地質環境を選定するためのサイト調査を、より合理的、体系的に実施するための方法論の整備に向け、処分場の設計及び安全評価における技術開発の進展を踏まえて、国の全体計画及び機構の中期技術開発計画に沿って以下のとおり進める。
- <長期的な自然現象の発生可能性及び地質環境の状態変化に関する評価技術の整備>長期的な自然現象の発生可能性及び地質環境の状態変化に関する評価技術の整備に向け、確率論的評価の枠組みの構築や使用情報の収集、専門家ワークショップを実施する。
- <地質環境特性の長期変遷に関するモデル化技術の高度化>不確実性を評価するための方法論を含めた四次元地質環境モデルの妥当性や実際の地質環境への適用性に関する検討の継続とモデル化技術の高度化に関する検討を実施する。
- <地質環境に関わる個別調査技術の最適化>今後の取組みは以下のとおり。
 - 電中研・横須賀地区においてボーリング孔を掘削し、孔内水圧破碎試験及び室内応力試験を始めとした各種試験を実施し、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。
 - 断層の変位、間隙水圧、地震波等の観測を継続し、装置の有効性や耐久性を確認するとともに、取得したデータを用いて、断層及び断層周辺の地質環境の変化（水理－力学連成現象）に関する解析、評価のための水理、力学連成解析コードの妥当性を確認する。
 - レーザー吸収分光法を用いたモニタリング装置の開発については、ボーリング孔設置に向けた小型化及び地下深部の高温、高压条件に適合可能な装置の設計、試作を実施するとと

もに、ヨウ素分子の同位体分析や地下水中からのヨウ素分子分離技術に関する検討を実施する。

- ▶ 数十年規模の耐久性を有する光ファイバーセンサーケーブルを用いた地下水モニタリング装置を設計、製作し、それを用いた実証試験により、適用性を確認する。
- ▶ ボーリング孔の閉塞技術に係るブリッジプラグの設置装置の作動確認、及びベントナイト閉塞材の膨潤状況を確認するための実規模試験を実施する。

ー<技術開発成果の情報・データ・知識に関するDXの推進に関する検討>サイトでの地質環境調査により取得するデータ等を管理するためのデータベースシステムの開発に向け、システムに求める機能（データ登録機能や検索機能など）を整理する機能要件定義書や、性能や規模等を整理する非機能要件定義書を策定するとともに、基本設計を実施する。

地質環境の調査・評価：学会等での講演リスト（14件）

発表先	タイトル	著者(機構職員の所属は省略)
日本地球惑星科学連合 2023年大会	高レベル放射性廃棄物等の処分地選定に係るボーリング調査技術の実証研究(1)研究計画策定とマネジメント	後藤淳一、松岡稔幸、西尾光
	高レベル放射性廃棄物等の処分地選定に係るボーリング調査技術の実証研究(2)膨潤性を示す破砕質泥岩のボーリング孔掘削・試験	西尾光、後藤淳一、松岡稔幸
	高レベル放射性廃棄物等の処分地選定に係るボーリング調査技術の実証研究(4)岩盤の物理・力学・熱特性等の調査・評価技術	西本壮志 ¹ 、佐藤稔 ¹ 、後藤淳一 1)電中研
	高レベル放射性廃棄物等の処分地選定に係るボーリング調査技術の実証研究(6)コア試料を用いた室内試験の品質管理・品質保証	松岡稔幸、西尾光、後藤淳一、 Vomvoris Stratis ¹ 、Pechstein Armin ¹ 、 Reinicke Andreas ¹ 1)Nagra
	先新第三紀の付加体堆積岩類における地質環境特性データの拡充	横田秀晴、大城遥一、後藤淳一、國丸貴紀、西尾光、松岡稔幸、三枝博光
土木学会全国大会 第78回年次学術講演会	低アルカリ性を有するセメント系材料の高温環境下における硬化物性に関する一考察	向俊成 ¹ 、取達剛 ¹ 、山野秦明 ¹ 、中嶋翔平 ¹ 、瀬尾昭治 ¹ 、國丸貴紀、西尾光 1)鹿島建設(株)
	ベントナイトペレットの充填性および止水性能の確認	松本聡碩 ¹ 、小林一三 ¹ 、瀬尾昭治 ¹ 、國丸貴紀 1)鹿島建設(株)
	大深度ボーリングケーシングに敷設した光ファイバケーブルによる地質環境モニタリング	瀬尾昭治 ¹ 、今井道男 ¹ 、石橋正祐紀 ¹ 、安達正浩 ¹ 、長谷川琢磨 ² 、岡本駿一 ² 、國丸貴紀、岸田欣増 ³ 、山内良昭 ³ 、小久保達生 ³ 1)鹿島建設(株)、2)電力中央研究所、3)ニュープレクス(株)

発表先	タイトル	著者(機構職員の所属は省略)
	概要調査の段階におけるボーリング調査の実証 (その1) —コア観察結果に基づく地質学的特徴—	堀尾淳 ¹ 、清水洋平 ¹ 、瀬尾昭治 ² 、石橋正祐紀 ² 、濱田崇臣 ³ 、濱田藍 ³ 、近藤浩文 ³ 、國丸貴紀、西尾光 1)(株)ダイヤコンサルタント(現:大日本ダイヤコンサルタント(株))、2)鹿島建設(株)、3)電力中央研究所
	概要調査の段階におけるボーリング調査の実証 (その2) —大深度ボーリング孔で実施した脆弱層を対象とする水理試験—	森川佳太 ¹ 、岩竹要 ¹ 、山下正 ¹ 、瀬尾昭治 ² 、石橋正祐紀 ² 、三好貴子 ² 、長谷川琢磨 ³ 、岡本駿一 ³ 、國丸貴紀、西尾光 1)(株)ダイヤコンサルタント(現:大日本ダイヤコンサルタント(株))、2)鹿島建設(株)、3)電力中央研究所
	概要調査の段階におけるボーリング調査の実証 (その3) —詳細な水理試験解析による水理パラメータの不確実性低減事例—	岩竹要 ¹ 、森川佳太 ¹ 、細谷真一 ¹ 、瀬尾昭治 ² 、石橋正祐紀 ² 、三好貴子 ² 、長谷川琢磨 ³ 、岡本駿一 ³ 、國丸貴紀、西尾光 1)(株)ダイヤコンサルタント(現:大日本ダイヤコンサルタント(株))、2)鹿島建設(株)、3)電力中央研究所、
日本地質学会 第130年学術大会	先新第三紀付加体堆積岩類に関する地質環境特性データの拡充	横田秀晴、大城遥一、後藤淳一、國丸貴紀、西尾光、松岡稔幸、三枝博光
日本物理学会 第78回年次大会(2023年)	共振器強化型吸収分光法に基づくメタン分子の近赤外振動回転遷移観測	寺林稜平 ¹ 、吉田英美子、國丸貴紀、長谷川秀一 ¹ 1)東京大学
物理探査学会 創立75周年記念行事	高レベル放射性廃棄物等の処分地選定における物理探査技術の現状	松岡稔幸

評価カテゴリー② 処分場の設計と工学

1. 計画的な技術開発の推進

(2) 処分場の設計と工学技術の体系的な整備

【業務実施結果】

1) 設計の信頼性向上

＜人工バリアの長期健全性を評価する技術と基盤データの整備＞

- ・人工バリアの諸現象に関する理解の深化と不確実性の低減を図ることによる処分場の設計に関する信頼性向上の取組みとして、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）の腐食や緩衝材の変質現象等に関する試験、ナチュラルアナログ事例の収集を進めた。
- ・金属製処分容器については、金属材料の長期的な耐食性評価の信頼性向上に向けて、2020年度から公益社団法人腐食防食学会に設置していただいた「長期腐食寿命評価技術検討委員会」（以下、「検討委員会」という。）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。

- 主要な取組みの一つとして、腐食試験技術分科会では、金属製処分容器に関する腐食試験の品質確保のため、腐食防食学会規格「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。2022年度までに規格素案を作成しており、2023年度は、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、機構から民間企業への委託により進めた。
- 過渡期腐食分科会では塩濃縮環境下での腐食現象、腐食評価モデル分科会では腐食速度の地下水組成依存性、微生物腐食分科会では腐食性微生物の活動条件等について議論を進めた。
- 検討委員会の活動の一環として、大学や研究機関等を対象に、金属製処分容器の耐食性評価の信頼性向上に資する研究を公募し、検討委員会による審査を経て、2023～2025年度の3年間の計画で8件の研究テーマ（例：AIを用いた腐食モデル評価、金属表面における腐食性微生物の四次元可視化技術等）を採択し、研究を開始した。
- ・ 緩衝材については、地下施設の占有面積の縮小等、処分場の設計に柔軟性を持たせるため、現状100℃と設定している上限温度を超えた場合のベントナイトの特性データの取得を進めた。試験条件によっては、膨潤率が低下する傾向が見られ、今後も継続的に体系的な特性データの取得に取り組む。
- ・ 人工バリアの長期健全性に関するナチュラルアナログ研究として、以下について実施した。
 - 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場所の研究を、北海道大学との共同研究により進めた。2022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、2023年度は、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場所を対象とした研究を、国際共同プロジェクト IBL（International Bentonite Longevity）及び北海道大学との共同研究により進めた。2022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、2023年度は、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。
- 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とし、「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国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という。）及び北海道大学と共同で開催し、計69名（対面：26名、オンライン：43名）が参加した（図②-1）。ワークショップにより得られた情報はNUMO-TRとして取りまとめ公表する。



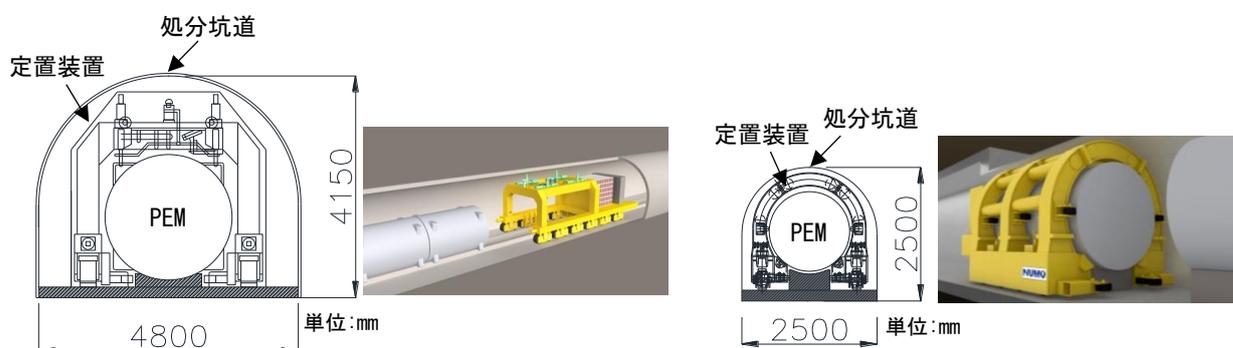
図②-1 ワークショップの様子

<大深度地下坑道に対する耐震性評価手法の整備>

- ・ 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、これに関する電中研との3か年の共同研究に着手した。段階的な取組みとして、2023年度は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) 処分場設計オプションの整備

- ・ 我が国の多様な地質環境条件に柔軟に対応して処分場の設計が可能となるように、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。2023年度は、搬送定置作業の安全性及び効率性の向上のためにオーバーパック及び緩衝材の厚さ等を変更して軽量化した改良型 PEM (図②-2) を対象に、搬送、定置、埋戻しの実現可能性や、閉鎖後長期の安全性の検討結果について、NUMO-TR としての取りまとめを進めた。



包括的技術報告書で示した PEM

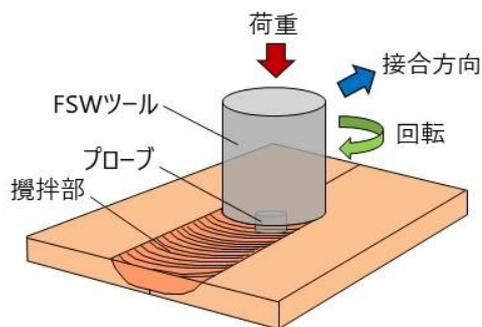
軽量化した改良型 PEM

図②-2 包括的技術報告書において示した PEM と軽量化した改良型 PEM の比較

- ・ 坑道を開放維持することで回収可能性を確保する期間において、湧水の影響による地下水位の低下等、地質環境への影響を低減するための検討を進めた。2022年度までに、地下水流動解析コード HydroGeoSphere®が国内外の地下研究施設で観測された坑内湧水量を再現できることを確認した。2023年度は、坑内湧水量への寄与が大きい地質環境パラメータを特定するための感度解析を行い、解析結果に基づいて、湧水量に着目した地下施設のレイアウト設計や建設、操業、閉鎖において考慮すべき事項を整理した。

3) 工学技術の実証的研究

- ・ 人工バリアの製作、施工技術の高度化については、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）の製作技術の開発を進めた。
 - － 2017年度に開始したカナダ核燃料廃棄物管理機関（以下、「NWMO」という。）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た。2023年度の主な取組みとして、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。
 - － 上記 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、大阪大学、秋田大学との共同研究により進めた。2020年度から2022年度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を行ったが、2023年度からは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（図②-3）。



摩擦攪拌接合の概念



摩擦攪拌接合後の銅コーティング材

図②-3 摩擦攪拌接合試験の様子

- ・ 処分場の建設、操業、閉鎖に関する技術の改良や高度化の検討に資するため、建設現場の見学や企業へのヒアリングを通じて、遠隔操作化、自動化技術や ICT (Information and Communication Technology)、DX の適用に関する国内外の最新知見を収集した。また、経済協力開発機構／原子力機関 (以下、「OECD/NEA」という。) の EGRSS (Expert Group on the Application of Robotics and Remote Systems in the Nuclear Back-End) に参画し、地層処分事業における遠隔操作化、自動化技術の適用に関するベンチマーキング、規制対応、費用便益分析を行う上での課題を整理した。

4) 閉鎖前の安全性の評価

- ・ 高レベル放射性廃棄物及び TRU 等廃棄物の受入・検査・封入施設を対象に、重大事故の発生に関する複合的な事象を含むシナリオの構築を行い、安全対策 (事故の未然防止、事故対応策及び復旧策) に関する概念的な検討を実施した。また、協力協定に基づくドイツ連邦放射性廃棄物機関 (BGE) との情報交換会において、アクセス坑道の搬送設備を対象とした安全対策に関する情報を収集した。

【自己評価・今後の取組み】

(自己評価)

- ・ <設計の信頼性向上> オーバーパックに関しては、公益社団法人腐食防食学会に設置された検討委員会とその分科会における腐食寿命評価に関する継続的な議論、特に試験技術分科会における腐食試験方法の規格化に向けた検討及びラウンドロビン試験の準備を進めることにより、長期腐食寿命評価に関する不確実性低減や腐食試験技術の信頼性向上に資する取組みを行うことができた。新規の研究者を含む 8 件の公募研究を採択し、研究を開始したことで、腐食寿命評価における課題に対して新たなアプローチを提示できるようになっただけでなく、処分容器を対象とした次世代の腐食の専門家を増やし、将来にわたる持続的な技術者の確保にも寄与した。緩衝材については、高温環境での特性データの取得により、100℃を超える環境を考慮して処分場を柔軟に設計するための基盤の構築に資することができた。建設、操業期間中の地下坑道における耐震性評価についても、岩の繰返し強度、変形特性に係るデータ取得を開始し、坑道の安定性に関する信頼性向上に向けた検討を進めた。
- ・ <処分場設計オプションの整備> オーバーパック及び緩衝材の厚さ等を変更して軽量化した改良型 PEM、坑道開放期間の湧水量の評価における感度の高いパラメータの検討を通じて、地下施設のレイアウト設計、建設、操業、閉鎖に関するオプションの整備を進めた。
- ・ <工学技術の実証的研究> 銅コーティングオーバーパックの製作技術として、電気メッキの処理速度向上や、摩擦攪拌接合の適用による蓋接合工程の効率化に向けた研究を通じて、オーバーパックの製作技術に関する実現性向上に資することができた。
- ・ <閉鎖前の安全性の評価> 重大事故の発生に関する複合的な事象を含むシナリオの構築と当該シナリオに基づく安全対策の概念的な検討により、閉鎖前安全性の評価に関する信頼性の向上に貢献した。

- ・ 以上により、国の全体計画及び機構の中期技術開発計画に沿って着実に業務を実施しているものと評価する。

(今後の取組み)

- ・ 以下のとおり、国の全体計画及び機構の中期技術開発計画に沿って引き続き技術開発を進める。
- ・ <設計の信頼性向上> オーバーパックについては、公益社団法人腐食防食学会に設置された検討委員会とその分科会における腐食寿命評価に関する議論を継続し、特に腐食試験技術分科会で作成中の腐食試験に関する規格素案の信頼性を検証するため、規格素案に基づくラウンドロビン試験を開始する。緩衝材については、100℃を超える高温環境での体系的な特性データの整備を基盤研究機関と連携して継続する。ナチュラルアナログ研究については、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や地下水によるベントナイトの流出現象のメカニズム解明のための分析及び試験を継続する。建設、操業期間中の地下坑道における耐震性評価に関する技術開発については、支保工の繰返し変形特性に関するデータの取得、これを用いた坑道の耐震性評価の実施、解析モデルの妥当性確認に必要な坑道模型による振動実験を進める。これらの成果は将来の処分場の設計に反映する。
- ・ <処分場設計オプションの整備> 改良型 PEM に関する検討成果の取りまとめを継続し、NUMO-TR として公表する。また、湧水影響評価については、2023 年度に整理した考慮すべき事項に基づき、湧水影響を考慮に入れた地下施設レイアウトの設計を試行する。これらの成果については、サイトの地質環境等に合わせた将来の処分場の設計に反映する。
- ・ <工学技術の実証的研究> 銅コーティングオーバーパックの製作技術に関して、NWMO との共同研究で進めている電気メッキの処理速度向上、冷間溶射装置の位置制御精度の向上に関する取組みを継続する。大阪大学、秋田大学との共同研究で進めている摩擦攪拌接合技術の開発については、円筒形の銅コーティング材を用いた接合試験を継続し、接合可能な条件の範囲を体系的に整理する。これらの成果については、精密調査段階での実証試験計画に反映する。
- ・ <閉鎖前の安全性の評価> What-if シナリオとして放射性物質が漏洩することを想定した評価シナリオを作成し、当該シナリオに基づく定量的な影響の評価技術の整備に取り組む。評価の結果は、各種施設において必要となる安全対策の検討に反映する。

3. 処分場の設計検討

【業務実施結果】

- ・ 様々な要件や地質環境に応じて柔軟に設計するため、その考え方と設計オプションの認知度を高めるための進め方を検討するとともに、様々な因子を考慮した設計の最適化を目的として各オプションを相互比較するための考え方に関する論文の目次と骨子案に関する検討を進めた。

【自己評価・今後の取組み】

(自己評価)

- ・ 設計オプションの認知度を高めるための進め方を案として具体化するとともに、設計オプションを比較するための考え方を論文の骨子としてまとめた。
- ・ 以上により、国の全体計画及び機構の中期技術開発計画に沿って着実に業務を実施しているものと評価する。

(今後の取組み)

- ・ これまでに整理した考え方に基づき、地質環境への影響を最小にする等の特定の目的に沿って設計を最適化する手法の開発に取り組むとともに、論文の作成を進める。

処分場の設計と工学：学会等での講演リスト（18件）

発表先	タイトル	著者（機構職員の所属は省略）
土木学会全国大会 第78回年次学術講演会	国内産ベントナイトの静的締固め特性に関する試験検討	山本陽一、後藤考裕、渡邊保貴 ¹ 、吉川絵麻 ¹ 、小栗光 ² 、伊藤歩夢 ² 、山田淳夫 ² 1) 電力中央研究所、2) (株)安藤ハザマ
	高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材の静的締固め試験（その1）	高橋拓麻、山本陽一、北川義人、沖原光信 ¹ 、竹内伸光 ¹ 、戸栗智仁 ¹ 1) 清水建設(株)
	高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材の静的締固め試験（その2）	竹内伸光 ¹ 、沖原光信 ¹ 、戸栗智仁 ¹ 、山本陽一、北川義人、高橋拓麻 1) 清水建設(株)
	PEM方式を適用したTRU等廃棄物の人工バリア設計（その1）	鈴木覚、山本陽一、小川裕輔、後藤考裕、高橋拓麻
	PEM方式を適用したTRU等廃棄物の人工バリア設計（その2）	志村友行 ¹ 、佐藤伸 ¹ 、高松亮佑 ¹ 、森岩寛稀 ¹ 、鈴木覚、山本陽一、後藤考裕、高橋拓麻 1) (株)大林組
	PEM方式を適用したTRU等廃棄物の人工バリア設計（その3）	佐藤伸 ¹ 、高松亮佑 ¹ 、森岩寛稀 ¹ 、志村友行 ¹ 、鈴木覚、山本陽一、後藤考裕、高橋拓麻 1) (株)大林組
日本粘土学会 第66回 粘土科学討論会	スウェーデン・キルナ鉱山における鉄-ベントナイト相互作用に関するナチュラルアナログ研究	根本脩平、鈴木覚、後藤考裕、藤村竜也 ¹ 、菊池亮佑 ¹ 、大竹翼 ¹ 、佐藤努 ¹ 、Raphael Schneeberger ² 、Ulf B. Andersson ³ 1) 北海道大学、2) Nagra、3) Luossavaara-Kiirunavaara Aktiebolag
	高温、放射線照射がベントナイト中の微生物活性に及ぼす影響	後藤考裕、根本脩平、鈴木覚、北川義人
	地層処分におけるベントナイト研究	根本脩平
溶接学会 2023年度秋季全国大会	炭素鋼オーバーパックの電子ビーム溶接部における残留応力の溶接条件依存性	小川裕輔、鈴木覚、根本脩平、藤社進 ¹ 、本間信之 ¹ 、田辺祥大 ¹ 、高倉大典 ² 1) (株)IHI、2) (株)IHI 検査計測
	コンター法を用いたオーバーパック蓋部模擬溶接試験体の残留応力測定	高倉大典 ¹ 、藤社進 ² 、本間信之 ² 、小川裕輔、鈴木覚、根本脩平 1) (株)IHI 検査計測、2) (株)IHI
腐食防食学会 第70回 材料と環境討論会	地層処分環境でのFe/Cuのガルバニック腐食挙動	相馬佑紀 ¹ 、井上博之 ¹ 、長田柊平 1) 大阪公立大学
	圧縮ベントナイト中でのAl電極のアノード分極挙動への溶液pHの影響	太田恵輔 ¹ 、井上博之 ¹ 、長田柊平 1) 大阪公立大学

発表先	タイトル	著者(機構職員の所属は省略)
	長期腐食寿命評価技術検討委員会の取組みについて	西方篤 ¹ 、鈴木覚 ² 、長田柊平、小川裕輔 1) 東京工業大学
	地層処分事業における金属腐食に関する技術開発の取組みについて	鈴木覚、小川裕輔、長田柊平、北川義人
	オーバーパック溶接部の酸素吹込み条件における耐食性評価—板巻鋼管に関する検討—	長田柊平、小川裕輔、鈴木覚
腐食防食学会 材料と環境 2023	高レベル放射性廃棄物用処分容器へのアルミニウム被覆の適用に関する基礎的研究	井上博之 ¹ 、川崎爽香 ² 、太田恵輔 ¹ 、相馬佑紀 ¹ 、長田柊平 1) 大阪公立大学、2) 大阪公立大学大学院 (現、クボタ(株))
DECOVALEX2023 (Coupled Processes in Radioactive Waste Disposal Symposium)	Influence of re-saturation process considering differences in host rock of PEM for high level radioactive waste disposal THM analysis	佐藤伸 ¹ 、鈴木覚、後藤考裕、森岩寛稀 ¹ 、山本修一 ¹ 、志村友行 ¹ 1) (株)大林組

処分場の設計と工学：論文リスト（2件）

発表先	タイトル	著者(機構職員の所属名は省略)
大阪大学 接合科学研究所 令和4年度 共同研究成果報告書	銅複合オーバーパックへの摩擦攪拌接合適用に向けた検討	宮野泰征 ¹ 、鈴木覚、小川裕輔 1) 秋田大学
地盤工学ジャーナル	約2.7～4年の長期圧密試験によるベントナイトの二次圧密特性	高山裕介 ¹ 、山本陽一、後藤考裕 1) JAEA

評価カテゴリー③ 閉鎖後長期の安全評価

1. 計画的な技術開発の推進

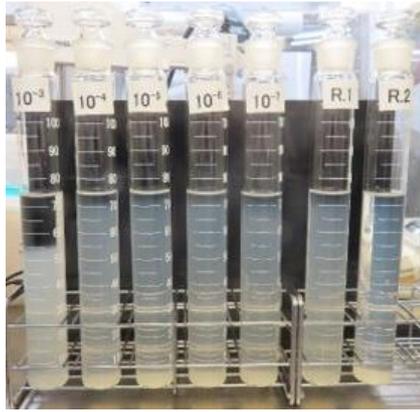
(3) 閉鎖後長期の安全性の評価に関する技術の高度化

【業務実施結果】

1) 処分場の時間的変遷を考慮した廃棄体から生活圏に至る核種移行評価手法の整備

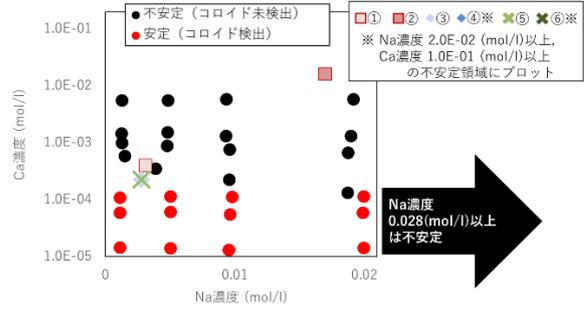
- ・ 処分場近傍の環境条件を反映した、より現実的なガラス固化体の長期溶解挙動評価モデルの構築に向け、2022年度から室内試験によるデータ拡充や分子動力学計算による変質層中の物質移行シミュレーション技術の開発を継続している（下記「ー」の箇条書き参照）。2023年度からガラス固化体とオーバーパックの間隙水におけるガラス固化体からの溶出成分の移行と、オーバーパックに由来する鉄イオンとの沈殿、溶解反応を取扱い可能なモデル構築に向け、機構自ら物質移行解析コード GoldSim と化学反応解析コード PHREEQC を連成させた数値解析モデルの開発に着手しプロトタイプを構築した。これらの技術開発を併行して効率的に進めるため、九州大学—JAEA—千葉大学—機構のガラス共同研究合同会議（2023年度は3回、事務局は機構）で報告、議論し成果の統合を進めた。
- ー九州大学との共同研究において、様々な条件（共存イオン、イオン濃度、pH、温度、反応時間）におけるガラス溶解速度と、ガラス表面に形成され溶解速度を律速する変質層の物性データの取得を2022年度から継続（2022年度まで10条件、2023年度：13条件）

- JAEA との共同研究において、2018 年度から開始しているモデルの妥当性確認に使用する長期溶解試験（最長 10 年）によるデータ取得を継続（12 条件）
- 千葉大学との共同研究において、変質層中の物質移動挙動を理解するため、2022 年度までに構築した単純組成の変質層中 (SiO_2) における H_2O の拡散挙動を分子動力学シミュレーションで推定する方法について、より現実的な変質層（B や Na 等を含む SiO_2 ）に適用するための改良
- ・ 処分坑道等を使用されるセメント系材料の溶脱成分による緩衝材の変質と、これに伴う所期性能への影響を定量的に取り扱うため、緩衝材とセメント系材料の接触界面における相互作用に関する反応輸送解析モデルを構築している。このモデルの信頼性向上のため、2018 年度から開始している化学反応と物質移行プロセスに関する 3 種類の長期室内試験（ベントナイト粉末を用いたバッチ試験、圧縮ベントナイトを用いた通水試験、セメント系材料と圧縮ベントナイトを接触させた接触試験）を継続している。このうち接触試験（試験期間 3 年）の試料について変質領域の鉱物組成や元素分布等を分析し、反応輸送解析モデル（解析コード MINARET を使用）の解析結果と比較することで、モンモリロナイトの溶解速度に関するパラメータの設定方法やゼオライトの生成に関する数値モデルの変更など、モデルの信頼性向上に向けた課題を抽出した。本テーマは JAEA 共同研究として実施しており、JAEA の専門家との意見交換を踏まえながら、機構自ら数値解析を実施した。
- ・ 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り、コロイドへ収着していない場合と比べて母岩の核種移行遅延性能が低減する可能性がある。この現象を適切に解析評価モデルに取り入れるため、以下のようにコロイドの生成過程に関する室内試験と、単一割れ目を模擬した試験体（以下、「模擬割れ目」という。）を用いたコロイド共存下におけるトレーサー移行試験に着手した。また、GTS においてベントナイトコロイドの原位置生成、移行試験を実施する国際共同プロジェクト CFM (Colloid Formation and Migration) に引き続き参画しデータを取得した。
- 異なる Na イオン濃度と Ca イオン濃度を組み合わせた溶液を用いたバッチ試験を行い、コロイドが地下水中で安定的に存在する Na イオン濃度と Ca イオン濃度の領域を把握（図③-1 参照）
- コロイド生成と地下水流速の関係を把握することを目的として、Ca 型ベントナイト及び Na 型ベントナイトを対象に、上記試験で取得したベントナイトコロイドが安定的に存在する Na イオンと Ca イオン濃度の領域を設定した試験条件で異なる流速条件に対するコロイド生成試験に着手
- GTS の岩石試料により製作した模擬割れ目を対象とした Sr と Cs の安定同位体を用いたコロイド共存下のトレーサー移行試験に着手
- ・ 安全評価に用いる地層処分場システムの状態を現実的に設定することを目的として、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、ニアフィールドの THMC ((Thermal (熱的) - Hydraulic (水理学的) - Mechanical (力学的) - Chemical (化学的)) 場の変遷を評価するための解析技術の開発を段階的に実施している。2022 年度までに TH/THC 連成解析技術を整備した。2023 年度は THM 連成解析技術の整備を目的として、ベントナイトの再冠水に伴う乾燥密度の変化を取り扱えるように、TH/THC 連成解析用に適用した解析コード PFLOTRAN（公開コード）と力学解析コード MACBECE (JAEA で開発された公開コード) との間で相互に入出力情報の授受を可能とするインターフェースを整備した。段階的に整備しているモデルの妥当性確認を目的として、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（処分坑道を想定した試験系において廃棄体を模擬したヒーターを 200°C まで加熱する実規模試験）を実施する国際共同プロジェクト HotBENT に引き続き参画し、データ（温度、相対湿度、間隙圧、全圧、膨潤度及び電気抵抗率に関する時間変化）を継続的に取得した。整備している数値解析モデルを用いた計算を機構自ら実行可能とするため、計算機環境を整備した。この環境を活用して、整備した数値解析モデルを用いて JAEA の室内浸潤試験を対象とした解析を行い、他の解析コード (THEMES と TOUGH2) の解析結果との比較を行った。



包括的技術報告書で設定した地下水水質

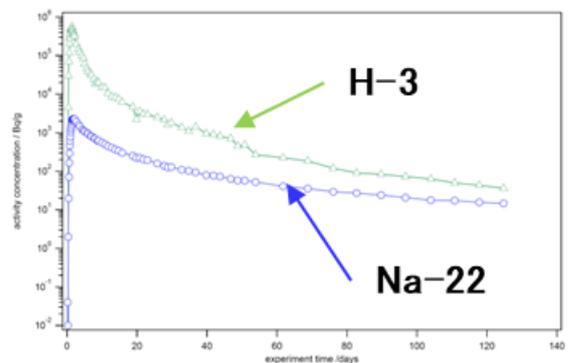
母岩	深成岩類		新第三紀堆積岩類		先新第三紀堆積岩類	
地下水	低Cl濃度	高Cl濃度	低Cl濃度	高Cl濃度	低Cl濃度	高Cl濃度
Na (mol/L)	3.1E-03	1.7E-02	2.8E-03	2.2E-01	2.8E-03	2.2E-01
Ca (mol/L)	4.0E-04	1.6E-02	2.3E-04	3.5E-03	2.3E-04	3.5E-03
凡例No	①	②	③	④	⑤	⑥



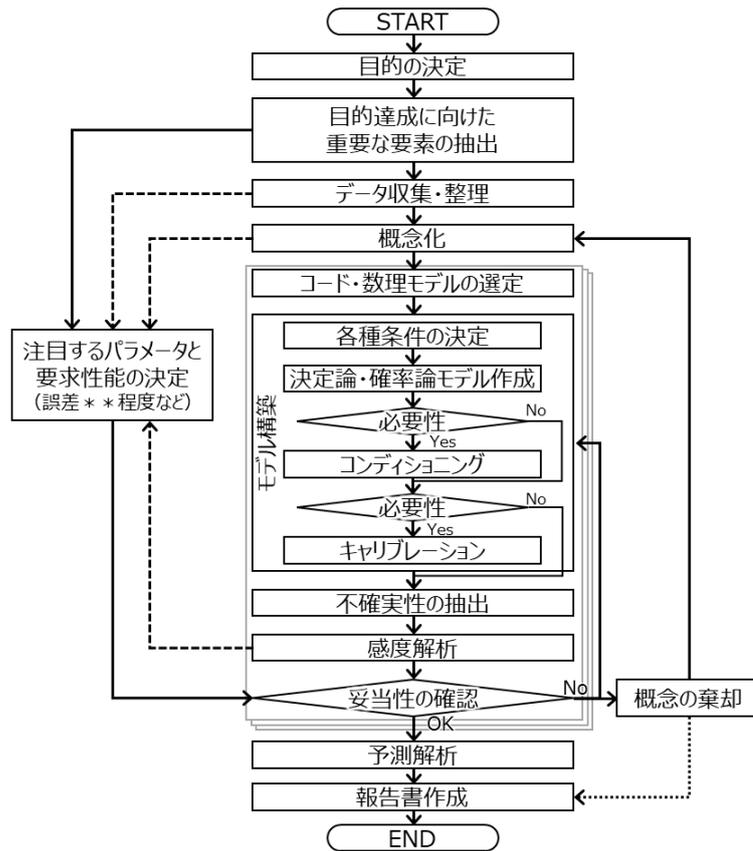
図③-1: コロイドが地下水中で安定的に存在する Na イオン濃度と Ca イオン濃度を把握するための試験 (左図: 試験の写真、右図: 試験結果)

2) 地下深部環境における地下水流動・物質移行解析モデルの妥当性確認手法の整備

- 母岩に期待する安全機能の性能に対する信頼性を向上させるためには、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を確認するとともにより現実的なモデル開発を進めていくことが重要である。2023 年度は、この検討に使用する試験データの取得を目的として、GTS における放射性トレーサー溶液（トリチウム水、Na-22、Ba-133、Cs-134）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) へ引き続き参画した (図③-2 参照)。
- 割れ目系岩盤の割れ目ネットワーク構造のモデル化とその妥当性確認に係る方法論を整備するための検討を開始した。2023 年度は、性能評価に用いる地下水流動モデル及び物質移行モデルの構築や解析のための手法に関する信頼性向上を目的として組織された国際的なフォーラムである”SKB Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes” から提供される情報やエスポ地下岩盤研究施設におけるデータセットを用いて、実用的な作業フロー案を作成した (図③-3 参照)。また、作業フロー案に沿って実際にモデルの構築やそれを用いた数値解析を試行し、2024 年度に計画しているモデル化に影響を及ぼす主要な要因の抽出やそれらに伴う不確実性の定量的評価の方法など妥当性確認のための方法論の構築を進めるための準備を完了した。



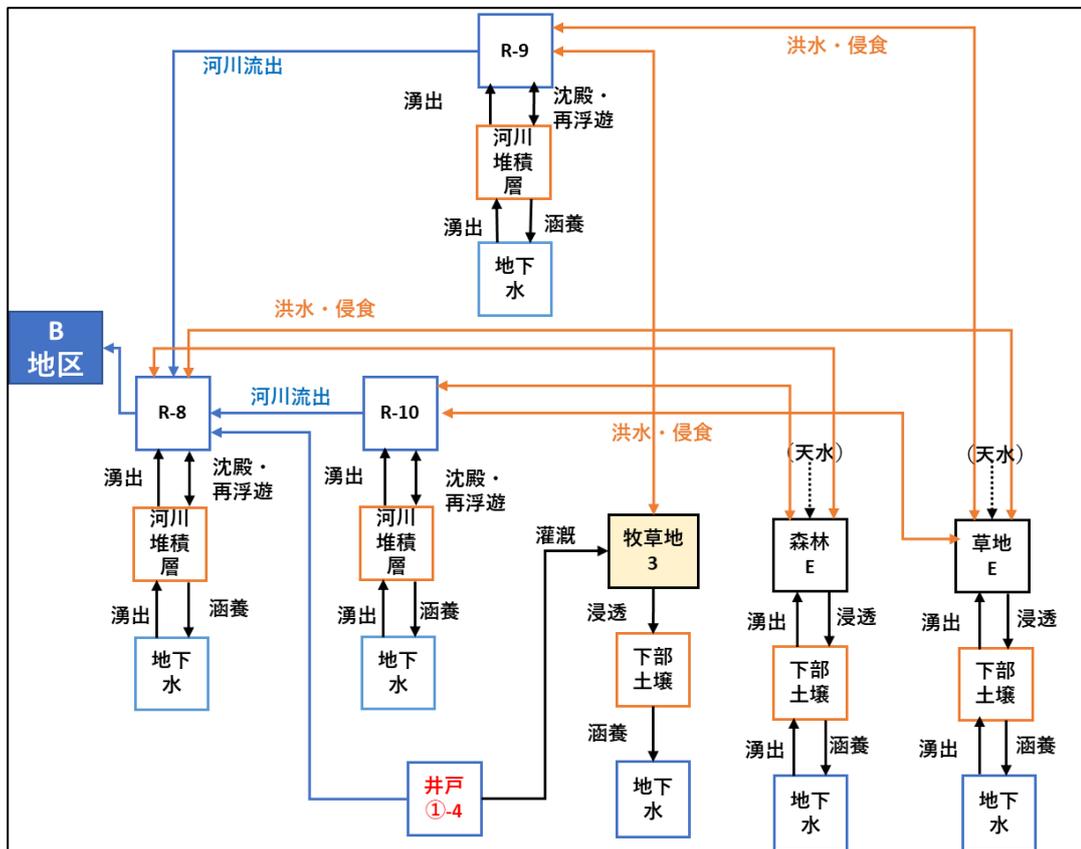
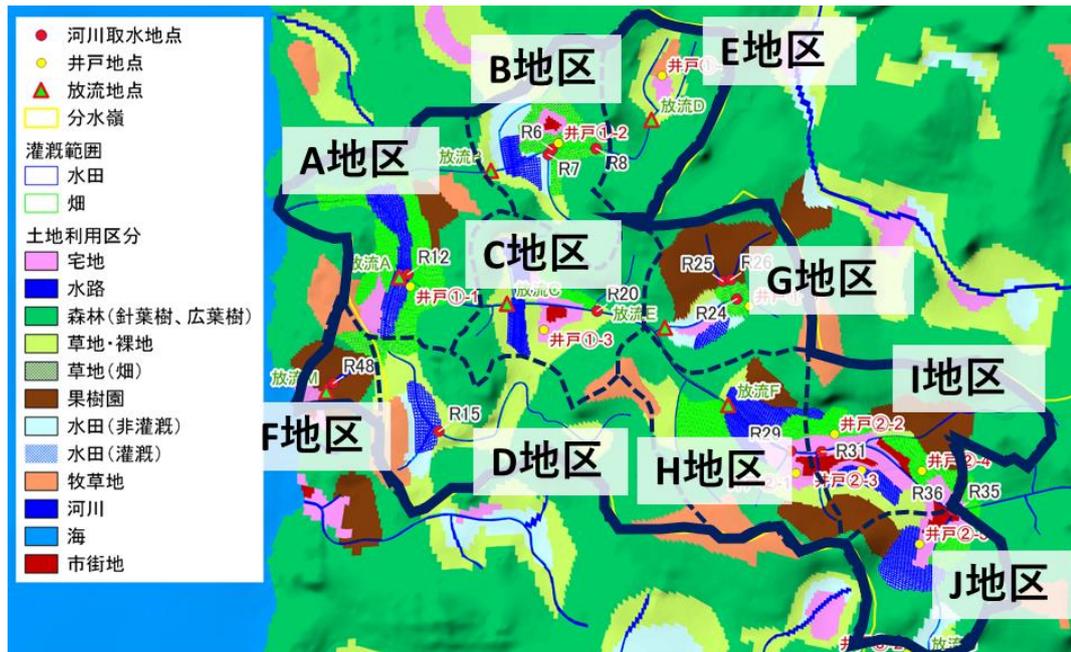
図③-2 LTD における原位置試験の様子 (左) と原位置試験で得た破過曲線 (130 日まで) (右)



図③-3 モデルの構築、妥当性確認に係る作業フロー案

3) 地下深部から生活圏に至る広域スケールを対象とした核種移行評価のための解析技術の構築

- ・ 包括的技術報告書においては地質環境や地表環境、それらの時間変遷を極めて単純化した一般的な生活圏評価を実施している。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、①1. (1)2)「地質環境特性の長期変遷に関するモデル化技術の高度化」で作成した四次元地質環境モデルを対象として、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構築（図③-4 参照）し、2023年度はこの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。
 - ・ 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以下のとおり実施した。
 - － 浸漬試験によりセメント系材料の溶脱挙動（試料中の溶脱領域、溶脱領域中の鉱物組成など）に関するデータ取得
 - － 取得したデータとセメント系材料の溶脱現象を取り扱い可能な反応輸送解析モデル（解析コード MINARET を使用）を用いた解析結果との比較を通じたモデルの改良
- 上記 2 項目は JAEA との共同研究の一環であり、数値解析については JAEA の専門家との意見交換を踏まえながら機構自ら実施した。
- － GTS におけるセメント系材料中の核種移行挙動評価のための原位置試験（放射性トレーサー（C-14、I-129、Cl-36、Ba-133、Cs-134 及びトリチウム水）を含む試験溶液を用いた循環試験）を実施する国際共同プロジェクト CIM(Carbon-14 and Iodine Migration in Cement) に引き続き参画し、反応輸送解析モデルの改良に資するデータを取得



図③-4 仮想的地域を対象とした四次元地質環境モデルの地表環境に対する生活圏評価モデルの概要（上図：評価対象地域、下図：評価対象地区のE地区における核種移行プロセスのモデル）

4) 核種移行の解析に用いるパラメータ設定

- 核種移行解析に必要なパラメータ（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）に留意して多様な地質、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（下記参照）。

- 炭酸共存条件における緩衝材の Kd 設定を目的として、炭酸錯体を形成する元素 (Np(IV)、Tc(IV)) のモンモリロナイトに対する Kd を取得 (Np(IV)の取得条件：pH 8~12、炭酸化学種濃度 0.1、0.5 (mol/l)、Tc(IV)の取得条件：pH 8~12、炭酸化学種濃度 0.025、0.2 (mol/l))
- 処分場の温度環境に応じた緩衝材の Kd 設定を目的として、温度依存性のデータが十分ではない Am を対象に、モンモリロナイトに対する Kd を取得 (pH 5~11、温度 25、50、80 (°C))
- ベントナイトが Ca 型化した緩衝材中の De について、データが十分に得られていない 2 価の陽イオン (Sr²⁺を使用) と、Na 型ベントナイトと De が異なると考えられる陰イオン (I⁻を使用) に対し、圧縮ベントナイト中の De を取得 (Sr 濃度：1×10⁻⁵~5×10⁻⁴ (mol/l)、I 濃度：1×10⁻⁴ (mol/l)、ベントナイト乾燥密度：1.0~1.4 (Mg/m³)、CaCl₂濃度：0.01~0.5 (mol/l))
- セメント系材料に含まれる鉱物 (ポルトランドイト、ケイ酸カルシウム水和物、モノサルフェイト) を対象に、1 価の陽イオン (Cs⁺を使用) と 2 価の陽イオン (Sr²⁺を使用) の Kd を取得 (Cs 濃度：1×10⁻⁷ (mol/l)、Sr 濃度：3×10⁻⁵ (mol/l))
- 再処理工程で発生する硝酸塩を含む廃棄物 (TRU 等廃棄物グループ 3) に由来する硝酸塩と有機物の共存下における人工バリア材料の Kd 設定を目的として、I-129 の取着と競合する可能性のある NO₃⁻ を考慮した、I⁻及び IO₃⁻のセメント系材料に含まれる鉱物 (ケイ酸カルシウム水和物) に対する Kd を取得 (硝酸塩濃度：0~1 (mol/l)、I 及び IO₃⁻濃度：1×10⁻⁴ (mol/l))
- 処分場の温度環境に応じた溶解度設定を目的として、温度依存性を考える必要がある元素である Am や Cm に対し、化学アナログである Sm を用いた溶解度試験を実施 (過飽和法と未飽和法、温度：60、90 (°C)、pH：4~13)
- ・ 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 De や Kd の設定手法の適用範囲を広げるため、2023 年度は、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) を対象として鉱物学的分析、表面分析、空隙構造分析やコアサンプルを用いた De 取得を実施し、同設定手法の改良点を抽出 (整然相中の基質、岩塊を構成する岩種とその存在比の考慮) した。

5) 閉鎖後長期の安全性の評価に関する業務効率性向上

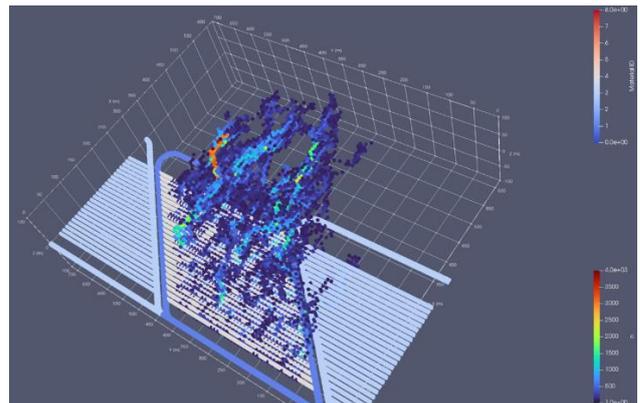
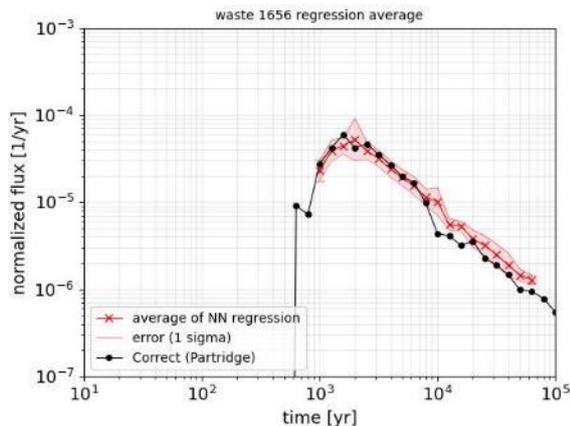
- ・ 特定のサイトにおける調査段階以降のセーフティケースの構築では、地質環境調査によって得られるサイトの条件に基づいて、処分場設計及び安全評価を実施し、その結果を調査にフィードバックしながら作業を進めることが求められる。地質環境調査、処分場の設計、安全評価の間で授受されるデータや情報とそれらの変更管理を确实かつ一貫性をもって実施することがセーフティケースの信頼性を確保するうえで不可欠である。このような情報管理及び変更管理を确实に実現するために、2021 年度に包括的技術報告書に示した閉鎖後長期の安全評価の基本手順のうち「シナリオの作成と解析ケースの設定」に関する情報を透明性と追跡性を確保して一元的に管理することが可能なツール (以下、「情報管理ツール」という。) のプロトタイプを作成した。2023 年度は、プロトタイプに対し、安全評価の基本手順の「線量評価」に関する変更管理と安全評価の更新結果に基づき包括的技術報告書の修正箇所を変更管理するための機能の追加を目的として、②1. (2) 2 「処分場設計オプションの整備」に示した改良型 PEM を対象に実施した閉鎖後長期の安全性の評価やプロトタイプの試用を通して情報管理ツールへの追加要件やプロトタイプの改善点の抽出を行った (以下 a~h)。
 - a. 安全評価で使用される量的データ、質的データ、及びこれらの組み合わせから成るデータセット、メタデータの格納
 - b. 数値解析の入出力ファイル及び解析ファイルの格納
 - c. Microsoft Word 形式で記載された包括的技術報告書の文章の分割
 - d. 分割した包括的技術報告書の文章の格納
 - e. 量的データ、質的データ、データセット、メタデータ、入出力ファイル、解析ファイル、

包括的技術報告書の文章の関係付け

- f. 量的データ、質的データ、データセット、メタデータ、入出力ファイル、解析ファイル、包括的技術報告書の文章間の関連性をリスト形式やフローチャート形式等で表示し、内容の編集が可能なユーザーインターフェース
- g. 機能 a、b、d において格納する情報のバージョン管理
- h. 機能 a、b、d において格納する情報のキーワード検索

・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、ランダムウォーク粒子追跡解析コード Partridge と改良した 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を 2022 年度までに構築した。この技術を用いた解析は計算負荷が大きいこと、出力されるトレーサーの移行挙動に関する解析結果が膨大となりその分析に多大な労力が必要となることから、解析と結果の分析を効果的、効率的に実施するため、機械学習を用いた解析技術の開発を以下のとおり進めた。

- －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を実施し、機械学習に利用するデータを整備
- －この学習データを用いて、教師あり学習による廃棄体をソースタームとしたトレーサーの移行挙動の予測評価ツール案を構築（図③-5 左図参照）
- －同学習データを用いて、教師なし学習による多数のトレーサーの挙動を類型化するためのクラスター分析ツール案を構築（図③-5 右図参照）



図③-5 予測評価ツール（案）（左図：パネルスケールにおける 1 廃棄体に対する適用例（●で示した正解データに対し、×はツールによる予測評価結果（赤色の領域は学習に用いた乱数に起因する予測値の幅）とクラスター分析ツール（案）（右図：パネルスケールにおける 878 廃棄体に対する適用例（各粒子の移行経路を分析し、数多くの粒子が通る領域を抽出して分類（赤い領域は特に粒子密度が高い）

【自己評価・今後の取組み】

（自己評価）

- ・ニアフィールドや地質圏に対するシナリオ構築や核種移行解析に用いる数値解析モデルの妥当性確認や高度化に必要な室内試験と原位置試験データの拡充、解析結果と拡充したデータとの比較を通じた数値解析モデルの改良点の抽出、調査段階におけるモデルの妥当性確認の作業フロー案等の作成により、安全評価の信頼性向上に資する成果を得た。
- ・地表環境の空間的不均質性を反映した生活圏評価モデルを解析コード GoldSim に実装し、これを用いた感度解析などによって、地下深部から地表へ到達した核種の流出点の違いや生活圏に関するパラメータの値による評価結果への影響を三次元的に分析することが可能となった。これにより、将来における、サイトの特徴を反映した生活圏評価の基盤を構築した。

- ・ 将来の核種移行パラメータ設定で必要となる基礎データについて、十分に整備されていない沿岸域などを対象とするデータを拡充した。また、これまでに整備したボーリング調査で取得した情報、データを用いた母岩の核種移行パラメータの設定方法について、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）に適用し、改良点を抽出した。これらの成果により、調査結果に基づく核種移行パラメータ設定の信頼性向上に寄与した。
- ・ 大規模、複雑な数値解析を、機械学習により効果的、効率的に実施するための技術の整備を着実に進めた。また、地質環境調査、処分場の設計、安全評価の間で授受される大規模なデータや情報の管理を確実にを行うための情報管理ツールについて、プロトタイプを試運用や改良型 PEM を対象とした安全評価を通じて、より実効的なものに改良していくための具体的な計画を作成することができた。これらにより、安全評価における大規模解析と膨大な情報の管理への対応について見通しを得た。
- ・ 上記技術開発を通じて、以下のように人材育成に貢献した。
 - － JAEA との共同研究において、JAEA の専門家との意見交換を踏まえながら、数値解析を機構自ら実施し、物理化学的な現象の理解、数値解析における留意点（例えば、要素数や要素のサイズ、解析のタイムステップ等）に関する知見を習得した。また、いくつかの室内試験については、JAEA の地層処分基盤研究施設（ENTRY）において JAEA の指導の下、機構自ら試験体の準備を行い、試験の実施や試験結果と解析結果を比較するうえでの留意点（例えば、結果の比較における実験誤差の考慮や、試験体系のモデル化の考え方など）や安全管理（例えば、実験前の安全教育や実験の際の安全ルールなど）に関する知見を習得した。
 - － 改良型 PEM を対象とした安全評価においては、包括的技術報告書の作成に関わっていない若手職員を積極的に関与させることにより、シナリオ作成から線量評価までの安全評価の一連の手順や具体的な作業について学習する機会を設定した。
- ・ 以上により、国の全体計画及び機構の中期技術開発計画に沿って着実に業務を実施しているものと評価する。

（今後の取組み）

- ・ シナリオ構築や核種移行解析に用いる数値解析モデルの妥当性確認や高度化に必要となる室内試験と原位置試験データの拡充を引き続き実施するとともに、2023 年度に明らかとなった課題について数値解析モデルの改良を進める。
- ・ 2023 年度に GoldSim へ実装した生活圏評価モデルを用いて、地下深部から地表へ到達した核種の流出点や生活圏に関するパラメータ値の違いによる評価結果への影響を感度解析により分析し、モデルやパラメータの改良点やサイト調査における重要な調査項目を検討する。また、サイトの地質環境に関する時間変遷を反映した生活圏評価技術の開発計画を検討する。
- ・ TRU 等廃棄物を対象としてセメント系材料の状態変遷をより直接的に反映した現実的な評価を実施するため、これまでに整備した反応輸送解析技術と処分場仕様を表現可能な粒子追跡解析技術を用いて、TRU 等廃棄物の核種移行解析モデルの構築を試行し、TRU 等廃棄物処分場の詳細な核種移行解析に関する課題を抽出する。
- ・ 沿岸海底下での処分場建設を念頭に、地下水流動が緩慢で拡散によって物質の移動が支配されるような場（以下、「拡散場」という。）を対象とした核種移行解析モデルの構築を実施する。具体的には、包括的技術報告書に示した核種移行解析モデルの構築方法に従い、ニアフィールドスケール（約 100m × 約 100m × 約 100m）を対象とした Partridge による解析結果に基づいて GoldSim を用いた簡略化した核種移行解析モデルを作成する。
- ・ 核種移行パラメータを設定するための基礎データについて、引き続き十分に整備されていない沿岸域などを対象としてデータを拡充する。また、2023 年度に明らかとなったボーリングで取得したデータを用いた母岩の核種移行パラメータの設定方法の課題について改良を進める。

- ・安全評価における大規模数値解析の効率化を目標に実施している機械学習を利用した技術の開発や情報管理ツールの開発を進める。

閉鎖後長期の安全評価：学会等での講演リスト（19件）

発表先	タイトル	著者（機構職員の所属は省略）
第60回アイソトープ・放射線研究発表会	農耕地土壌における塩素の土壌-土壌溶液間分配係数について	田上恵子 ¹ 、浜本貴史、澁谷早苗、石田圭輔、内田滋夫 ¹ 1)量研機構
日本原子力学会 2023年秋の大会	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	尾上博則、三枝博光、石田圭輔、澤田淳 ¹ 、石橋正祐紀 ² 、江崎太一 ² 、田川陽一 ² 、田部井和人 ² 、並川正 ² 、羽根幸司 ² 1)鹿島建設（株）、2)JAEA
	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	石橋正祐紀 ¹ 、尾上博則、江崎太一 ¹ 、田川陽一 ¹ 、田部井和人 ¹ 、並川正 ¹ 、羽根幸司 ¹ 、三枝博光、石田圭輔、澤田淳 ² 1)鹿島建設（株）、2)JAEA
	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	並川正 ¹ 、尾上博則、石橋正祐紀 ¹ 、田川陽一 ¹ 、田部井和人 ¹ 、羽根幸司 ¹ 、三枝博光、石田圭輔、澤田淳 ² 1)鹿島建設（株）、2)JAEA
	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	田川陽一 ¹ 、尾上博則、石橋正祐紀 ¹ 、江崎太一 ¹ 、田部井和人 ¹ 、並川正 ¹ 、羽根幸司 ¹ 、三枝博光、石田圭輔、澤田淳 ² 1)鹿島建設（株）、2)JAEA
	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	羽根幸司 ¹ 、尾上博則、石橋正祐紀 ¹ 、江崎太一 ¹ 、田川陽一 ¹ 、田部井和人 ¹ 、並川正 ¹ 、三枝博光、石田圭輔、澤田淳 ² 1)鹿島建設（株）、2)JAEA
	シリカ溶存溶液条件での模擬ガラス固化体P0798の溶解速度評価：長期挙動	横山礼幸 ¹ 、稲垣八穂広 ¹ 、有馬立身 ¹ 、松原竜太 1)九州大学
	地層処分システムの空間的不均質性および時間変遷に応じた核種移行評価技術の構築	石田圭輔、藤崎淳、三枝博光、尾上博則
	原位置試験データを用いた再冠水過程の熱-水-化学連成現象のモデル開発	田窪勇作、高山裕介 ¹ 、Andres Idiart ² 、戸谷成寿 ³ 、石田圭輔、藤崎淳 1)JAEA、2). AMPHOS21 CONSULTING S.L.、3)（株）大林組
	地表近傍の環境の空間分布を反映した生活圏評価モデルの構築	草野由貴子、石田圭輔、浜本貴史、斉藤泰久 ¹ 、深谷友紀子 ² 1)パシフィックコンサルタンツ（株）、2)日本エヌ・ユー・エス（株）
	セメント系材料の状態設定に用いる反応輸送解析モデルの妥当性確認	小池彩華、石田圭輔、浜本貴史、三原守弘 ¹ 1)JAEA

発表先	タイトル	著者 (機構職員の所属は省略)
土木学会全国大会第78回年次学術講演会	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)	江崎太一 ¹ 、石橋正祐紀 ¹ 、田川陽一 ¹ 、並川正 ¹ 、羽根幸司 ¹ 、升元一彦 ¹ 、尾上博則、三枝博光、石田圭輔、藤崎淳、澤田淳 ² 1)鹿島建設 (株)、2)JAEA
	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)	並川正 ¹ 、石橋正祐紀 ¹ 、江崎太一 ¹ 、田川陽一 ¹ 、羽根幸司 ¹ 、升元一彦 ¹ 、尾上博則、三枝博光、石田圭輔、藤崎淳、澤田淳 ² 1)鹿島建設 (株)、2)JAEA
日本粘土学会第66回粘土科学討論会	締め固めたベントナイトから生成するコロイドの安定性に関する研究	浜本貴史、石寺孝充 ¹ 、松原竜太 1)JAEA
Sumglass 2023 (3rd Summer School on nuclear and industrial glasses for energy transition)	Structure and Dynamics of Hydrous Silicate Gels by Molecular Dynamics Calculations	羽鳥拓真 ¹ 、大窪貴洋 ¹ 、松原竜太、石田圭輔 1)千葉大学
Sumglass 2023 (3rd Summer School on nuclear and industrial glasses for energy transition) 日本セラミックス協会ガラス部会放射性廃棄物分科会第5回放射性廃棄物固化体討論会	Predicting alteration layers volume for the glasses with various glass composition	萱野琉輝 ¹ 、大窪貴洋 ¹ 、松原竜太、石田圭輔 1)千葉大学
	分子動力学計算による含水ケイ酸塩ガラス中での水の拡散挙動モデリング	羽鳥拓真 ¹ 、大窪貴洋 ¹ 、松原竜太、石田圭輔 1)千葉大学
日本セラミックス協会ガラス部会放射性廃棄物分科会第5回放射性廃棄物固化体討論会 ICRP International Symposium Satellite Event	ガラス構造データを利用したガラス溶解モデルの開発	萱野琉輝 ¹ 、大窪貴洋 ¹ 、松原竜太、石田圭輔 1)千葉大学
	Application of ICRP recommendations to the assessment of post-closure radiological safety in geological disposal	石田圭輔

閉鎖後長期の安全評価：論文のリスト (1件)

発表先	タイトル	著者 (機構職員の所属は省略)
Journal of Environmental Radioactivity	Assessment of soil-soil solution distribution coefficients of global fallout ²³⁷ Np and ²³⁹ Pu in Japanese upland soils	鄭建 ¹ 、田上恵子 ¹ 、内田滋夫 ¹ 、澁谷早苗、石田圭輔、浜本貴史 1)量研機構

評価カテゴリー④ 技術マネジメント

1. 計画的な技術開発の推進

(4) 長期にわたる事業展開を見据えた情報収集

【業務実施結果】

1) 海外のセーフティケースの最新動向、規制基準の考え方や整備状況等に関する情報収集

- ・ OECD/NEA の IGSC (Integration Group for the Safety Case) や WP-IDKM EGSSC (Working Party on Information, Data and Knowledge Management / Expert Group on a Data and Information Management Strategy for the Safety Case) の活動への参加や海外実施主体の発信情報 (Posiva によるセーフティケースの説明会等) を通じて、諸外国における最新のセーフティケースの開発状況の把握を継続した。
- ・ 国際機関や原子力規制委員会等の規制基準に関連する情報把握を継続的に実施した。原子力規制庁の研究開発部門と面談を行い、包括的技術報告書を説明するとともに技術的観点からの意見交換を実施した (計 5 回)。また、2023 年 11 月に開催された ICRP (International Commission on Radiological Protection) 国際シンポジウムのサテライトイベント (日本原子力学会バックエンド部会主催、東京) では、ICRP メンバー、原子力規制庁、日本原燃株式会社とともにパネルディスカッションに参加し、ICRP の動向や包括的技術報告書における ICRP 勧告の適用の紹介、意見交換等を実施した。

2) 事業の段階的進展に対応したセーフティケースの更新に向けた技術開発課題等の整理

- ・ セーフティケースの開発を着実に進めることができるようにしていくため、包括的技術報告書をベースとして、調査段階のセーフティケース目次案をジェネリックな観点で作成した。
- ・ セーフティケースに反映するため、想定される処分対象廃棄体の特性に係る情報の信頼性向上を目的として、再処理事業者等との放射能インベントリに関する意見交換を通じて技術開発課題を整理し、2024 年度における取組みについての計画を検討した。

【自己評価・今後の取組み】

(自己評価)

- ・ OECD/NEA の活動に積極的に参加すること等を通じて、海外のセーフティケース検討状況に関する最新動向や技術課題を継続的に把握した。これらの知見は、2023 年度～2027 年度の中期技術開発計画における課題の確認などに反映した。
- ・ 目次案を明確にすることにより、調査段階においてセーフティケースを構築するための基本形を提示した。
- ・ 包括的技術報告書を説明し技術的観点から意見交換を実施することにより、NRA の研究開発部門との間で、今後の技術開発課題やその背景に関する理解の共有化を図ることができたものと考えられる。また、ICRP サテライトイベントの意見交換を通じて、包括的技術報告書の安全評価で適用した機構の考え方に基づく評価基準が、ICRP の考え方と整合であることを確認した。
- ・ 処分対象廃棄体のインベントリについては、再処理事業者等とのコミュニケーションにより、課題への取組みを効果的に進めることができている。
- ・ 以上により、国の全体計画及び機構の中期技術開発計画に沿って着実に業務を実施しているものと評価する。

(今後の取組み)

- ・ 引き続き、OECD/NEA のセーフティケースに関連する活動 (IGSC や WP-IDKM/EGSSC に関連する活動、特に 2024 年 10 月に開催されるセーフティケースシンポジウム等への論文投稿など) に積極的に参加

するとともに海外実施主体との情報交換を密に行うことにより、海外における最新の状況を把握し、今後のセーフティケース開発に反映していく。

- ・引き続き、規制基準に関連する国内外の情報把握を実施するとともに、再処理事業者等と連携した取り組みや NRA との面談による意見交換等を継続していく。

2. 包括的技術報告書等を活用した情報発信

【業務実施結果】

1) 技術開発成果の分かりやすい情報発信

- ・全国的な対話・広報活動及び文献調査を進める地域との対話活動において、広報素材の作成や SNS 等における技術情報の発信、様々な説明会、勉強会等における技術的な説明などを引き続き行った。
- ・長期安全性評価の考え方について、「放射性廃棄物を地下深くに隔離して閉じ込めるのに、漏洩を前提としてシミュレーションするのはなぜか」といった非専門家の方々から頻りに発せられる疑問における論点を明確にするとともに、それらの論点に沿って説明するための文脈を整理した。広報部門と連携し、この文脈を動画により視覚的に伝えるための構成案を作成した。
- ・年間の外部発表計画（学会発表、国際会議、共研報告書、論文投稿、専門誌寄稿等）に沿って、幅広い学術分野の様々な機会を活用し技術開発成果等 62 件を発表（新規 2 学会含む）。
- ・学会発表等の技術開発成果をタイムリーに発信するため、広報部と連携し機構のホームページに技術開発トピックスを新設した。

2) セーフティケースに係る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及び関連する知識ベースの構築

- ・機構が客観的な評価を受けながら技術的信頼性の向上に取り組んでいることを社会に発信するため、2023 年 6 月に OECD/NEA から包括的技術報告書に対するレビュー報告書の日本語翻訳版が公表（英語版は 2023 年 1 月に公表）されたことに合わせて、レビュー結果に関するオンライン報告会を開催した（外部の参加者約 200 名）。報告会においては OECD/NEA によるレビュー結果の概要の説明とともにレビューコメントに対する機構の今後の対応を紹介し、これらの内容、報告会当日の映像と質疑応答、説明会後にお寄せいただいたご質問に対する回答を合わせて機構ホームページに掲載した。
- ・一般社団法人日本原子力学会（以下、「原子力学会」という。）「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（2021 年 9 月～2024 年 3 月）の議論に参加、協働し、セーフティケースの説明で重要な概念や用語（例えば、「閉じ込めと隔離」、「地質環境」、「安全評価」、「セーフティケース」など）について、学術分野が異なる専門家間の認識の違いを共有し、専門家間の理解促進に資する具体的な方法や説明に必要な概念、用語に関する解説を「語彙基盤（地層処分の言葉）」として取りまとめた。取りまとめに当たっては、原子力学会バックエンド部会-安全部会合同の勉強会などにおいて、様々な分野の専門家に語彙基盤を用いた説明を行うといった試行を通じて得られた知見を反映した。こうした活動を総括し、「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」を作成した。

【自己評価・今後の取組み】

（自己評価）

- ・広報部及び地域交流部と連携し、地層処分の技術的な説明機会や媒体について継続的に質的改善と量的拡大を図っている。「対話型全国説明会」や文献調査対象自治体における対話の場等での技術的な質問への対応を通じて、技術部職員の説明力の向上と経験の蓄積が進んでいる。また、一般の方にとって理解が容易ではない長期安全性評価について、理解を深めてもらうための資料の拡充を進めた。

さらに、機構ホームページへの技術開発トピックスの新設により、技術開発成果をタイムリーに発信するための環境を整えた。

- ・ 包括的技術報告書の国際レビューの結果について、オンライン報告会を開催し、報道機関、研究機関、大学関係者、民間企業等から約 200 名にご参加いただいた。レビューコメントへの機構の今後の対応、報告会当日の映像や質疑応答などの機構ホームページへの掲載を通じて包括的技術報告書の内容や信頼性について社会に発信することができた。今後の技術開発やセーフティケースへの反映に関する方向性を明確にした点は有益である。
- ・ 原子力学会特別専門委員会における異なる分野の専門家による議論や勉強会への参加を通じて、地層処分に関する専門家間の議論のすれ違いや誤解が生じる要因とそれへの対応策等の検討を進め、専門家間での効果的なコミュニケーションに関するノウハウを含むツールを構築した。
- ・ 以上により、国の全体計画及び機構の中期技術開発計画に沿って着実に業務を実施しているものと評価する。

(今後の取組み)

- ・ 技術情報の発信及び様々な説明会、勉強会等における技術的な説明を継続し、参加者へのヒアリングを積み重ねることなどによって、発信した情報が「相手に伝わったか」という観点で情報発信の内容の見直し、説明の仕方や資料改善、拡充、機構職員の説明スキルの向上に引き続き取り組む。
- ・ 長期安全性評価を平易に説明する動画の作成に取り組むとともに、技術開発トピックスの更新を継続的に実施する。
- ・ 作成した「語彙基盤」を活用し、原子力学会特別専門委員会に参加された委員の協力を得て様々な学術分野の専門家との安全コミュニケーションを進めて、それぞれの専門分野における専門家の関心喚起、セーフティケースに関する理解促進を図る。

4. 事業を推進する技術マネジメントの強化

(1) 概要調査に向けた実施体制の検討及び実施能力等の向上に係る取組み

【業務実施結果】

1) 実施体制を含めた調査計画の検討及び運用面の整備

- ・ 調査計画策定に向けた準備として、特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律に定められた要件への適合性の評価や、安全性の見通しが得られる場所を選定するための技術的な実施事項、方法、現地調査における適用技術や調査項目等の整理を進めた。
- ・ 様々な仮定を含む前提条件を設定したうえで、以下について一般論として具体的検討を進めた。
 - － 現地調査（物理探査、ボーリング調査等）工程
 - － 現地調査結果の評価に関する技術的検討の実施工程
 - － 必要な資機材や人員等のリソース、実施体制
- ・ 現地調査に必要な資機材については、国内で利用可能な数量等の調査を継続した。

2) 現地調査に向けた実施能力の向上と調査に係るデータの品質管理手法の整備

- ・ 評価カテゴリー【①地質環境の調査・評価】に示した技術開発を通じて、物理探査技術やボーリング技術、モニタリング技術、ボーリング孔の閉塞技術に関して、調査計画立案からデータ取得、解析、評価、品質管理、品質保証に資する知見を蓄積した。また、現地調査での適用に向け、これまでに整備した地質環境のモデル化、解析技術について妥当性、適用性を確認するための取組みを開始した。

3) 自然環境調査に関する土地利用制限及び環境影響評価に関する検討

- ・ 将来、現地調査（物理探査、ボーリング調査等）の方法に応じた自然環境への配慮が必要になることから、文献等による一般的な情報を基に希少動植物の生息、生育状況の調査方法等の検討を進めた。

【自己評価・今後の取組み】

（自己評価）

- ・ 1)については、調査の目標、方針、実施項目、内容、設定した前提条件下での工程や体制、リソースの具体化を図ることで、将来の計画策定に向けた準備を着実に進めた。
- ・ 2)については、技術開発業務を通じて現地調査の実施に必要な技術的能力の向上や知見の蓄積を図るとともに、今後解決すべき技術的課題を明確にしている。
- ・ 3)については、文献等による一般的な情報を基に、将来におけるボーリング等の現地調査計画の策定に必要な希少動植物の生息、生育状況の調査範囲、内容を整理することができた。
- ・ 以上により、国の全体計画及び機構の中期技術開発計画に沿って着実に業務を実施しているものと評価する。

（今後の取組み）

- ・ 調査計画策定に向けた準備については、以下のとおり取り組んでいく。
 - － 地質環境のモデル化、解析技術の妥当性、適用性確認等、現地調査の信頼性向上に資する技術開発の継続
 - － 現地調査から地質環境の理解とモデル化、処分場の設計、安全評価に至る一連の技術的検討内容の案の整理
 - － 技術的検討内容の案に対する外部専門家のレビュー
 - － 現地調査予定地やその近傍において希少動植物の生息、生育が確認された場合の配慮事項（具体的な保護、保全策）に関する検討
- ・ 調査の実施、運営に向けた体制の準備については、電中研・横須賀地区でのボーリング技術実証試験の現場管理を通じて機構職員の技術力向上を図るとともに、調査計画担当職員と技術開発担当職員の連携を通じて調査実務に通じる若手人材の育成を継続する。そのうえで、必要に応じて外部機関からの支援により調査実務経験を有する人材を補強することを含めて、実施体制の整備を計画的に進める。

（2）知識マネジメント及び人材の育成・確保に係る取組み

【業務実施結果】

1) 要件・知識をマネジメントする仕組みの構築と知識活用を支援するツールの開発

- ・ 事業のどの時点までにどのような要件への対応と知識の整備を行うのかを明確にし、確実な対応、整備に向けた計画的な技術開発を可能とするマネジメントの仕組みの構築に取り組んでいる。今年度は、SKB との共同研究を通じて、仕組みの構築方法の検討とロードマップ案の作成を実施した。また、NEA/WP-IDKM/EGKM (Nuclear Energy Agency / Working Party on Information, Data and Knowledge Management/Expert Group on Knowledge Management for Radioactive Waste Management Programmes and Decommissioning)の全体会合への参加を通じて、知識管理に関する国際動向の把握を行った。
- ・ 特定のサイトを対象としたセーフティケース作成への反映を念頭に、大量かつ多様な情報、データ、知識（IDK）を効率的に取り扱っていくためのデジタルツールに必要な機能を検討するとともに、NEA/WP-IDKM/EGSSCの全体会合において機構の取組み（性能評価情報管理ツール）を説明した。また、NEA/WP-IDKM/EGAR (Expert Group on Archiving for Radioactive Waste Management Activities)及びNEA/WP-IDKM/EGAP (Expert Group on Awareness Preservation)の会合への参加を通じて、記録の保存及び閉鎖後の記録認知に関する国際動向の把握を行った。

2) 研修やOJT等による人材育成と技術者の計画的な採用

- ・ 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターを中心として関係機関と機構で企画した地層処分分野の人材育成を目的とする関係機関と機構との合同研修に、機構からは 8 名が参加した。
- ・ 機構若手職員の経験蓄積と人的ネットワークの形成を目的として長期出張を開始 (OECD/NEA、2023 年 5 月より 2 年間の予定) した。
- ・ 力量管理との関連付けに基づく機構技術部職員の研修とその有効性評価による研修計画策定へのフィードバックを実施するとともに、2023 年度の力量評価を行った。
- ・ 総務部との協働により、インターンシップ (5 日間コース)、1day 職場体験、学校訪問を実施した。

【自己評価・今後の取組み】

(自己評価)

- ・ 要件と知識の管理に関するロードマップは、今後、技術部各グループが連携してサイト選定を適切に進め、セーフティケースとして論拠を統合していくために重要なツールである。2023 年度は、SKB との共同研究を通じてスウェーデンの経験を反映しながらロードマップの作成方法を明確にし、2024 年度以降のロードマップ運用に向けた基盤を整えた。
- ・ NEA/WP-IDKM/EGSSC の全体会合で機構における取組みを説明して意見を聴取するとともに、WP-IDKM の各種会合への参加を通じて国際機関における最新の議論を把握しながら、機構における要件、知識のマネジメントを中長期的視点に立って進めている。
- ・ 人材育成や計画的な採用に向けた各種取組みは、予定どおり計画的に進めている。
- ・ 研修受講後に実施する有効性評価に基づくフィードバックにより力量管理と研修との連携を強化した。
- ・ 以上により、国の全体計画及び機構の中期技術開発計画に沿って着実に業務を実施しているものと評価する。

(今後の取組み)

- ・ 要件と知識に関するロードマップの作成と運用を進める。また、適用するデジタルツールに必要な機能を踏まえ、性能評価情報管理ツールの改良を進める (評価カテゴリー③ 1. (3)5 「閉鎖後長期の安全性の評価に関する業務効率性向上」参照)。
- ・ NEA/WP-IDKM における活動や各種会合に引き続き参加する。
- ・ 人材育成や計画的な採用に向けた取組みについては、引き続き改善を図りながら実施していく。

(3) 技術開発の着実な推進、成果の品質・信頼性の向上に係る取組み

【業務実施結果】

1) 「中期技術開発計画」に基づく技術開発の着実な推進と技術開発業務の品質保証プロセスの整備

- ・ 国の全体計画に沿って機構が分担する技術的課題への取組みについて、OECD/NEA による包括的技術報告書国際レビューで示された提言やそれに対する機構の対応 (2. 「包括的技術報告書等を活用した情報発信」参照)、技術アドバイザー委員会における助言、評議員会による「評価・提言」等を反映しつつ、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、公表した。
- ・ 技術開発成果の品質、信頼性向上のため、機構規程類の制改訂内容を踏まえつつ、2022 年度までの調達プロセスの実績から得られた教訓等を、技術部の品質保証体系下の要領書等に反映した。

2) 技術開発の取組みについての継続的な自己評価と改善

- ・ 技術開発及び文献調査に関する評議員会からの「評価・提言」への対応を取りまとめ業務に反映した。

- ・ 技術アドバイザー委員会（2023年9月：国内外委員合同、2023年5月、12月：国内委員のみ）でいただいた助言を踏まえ、2024年度以降の技術開発への取組みの方向性と中期技術開発計画に関する検討を進めた。

【自己評価・今後の取組み】

（自己評価）

- ・ 中期技術開発計画については、国の全体計画公表後、OECD/NEAによる国際レビューの提言への対応や「文献調査段階の評価の考え方（案）」に関する国の審議会での議論の反映等、今後の技術開発で留意すべき事項が連続的に生じ、それら最新動向を適切に反映しつつ策定を行うことができた。
- ・ 運用実績から得られた教訓等に基づく要領書等の改善により、技術開発業務の品質、信頼性向上とともに、機構職員の改善意識向上に寄与した。
- ・ 以上により、国の全体計画及び機構の中期技術開発計画に沿って着実に業務を実施しているものと評価する。

（今後の取組み）

- ・ 国の全体計画及び機構の中期技術開発計画に従い、成果の統合と優先すべき重要課題を明確化しながら着実に実施する。
- ・ 実務で得られる教訓を適宜反映し、技術開発業務や調査業務の品質保証体系の強化を継続する。

（4）国際連携・貢献の着実な推進

【業務実施結果】

1) 国際機関の活動への参加による地層処分事業に関する国際動向の把握と国際貢献

- ・ OECD/NEA等の国際機関が実施する16の委員会やワーキンググループ活動への参加（表④-1参照）、海外実施主体との情報交換と協力協定の更新、原子力発電の導入計画がある国における地層処分に関する講演などを行い、国際動向の把握と国際貢献を継続的に進めた。

表④-1 機構が参加する国際機関の委員会等

会議体、委員会、作業部会等	主な検討項目
EDRAM (International Association for Environmentally Safe Disposal of Radioactive Materials)	各国の地層処分実施主体における共通の課題の検討等
国際原子力機関（IAEA）関連	
TWG-WATEC (Technical Working Group on Radioactive Waste Management and Technologies)	放射性廃棄物の管理技術に関する IAEA への助言
URF Network (Underground Research Facilities Network for Geological Disposal)	地下研究所の利用に関する経験の共有、共通の課題の検討等
OECD/NEA 関連	
RWMC (Radioactive Waste Management Committee)	放射性廃棄物管理に関する知見の共有・共通の課題の検討等
RIDD (Expert Group on Building Constructive Dialogues between Regulators and Implementers in Developing Disposal Solutions for Radioactive Waste)	地層処分事業における実施主体と規制機関の効果的な対話のあり方の提示
FSC (Forum of Stakeholder Confidence)	ステークホルダーとの信頼関係を構築するための方法の検討
EGRRS (Expert Group on the Application of Robotics and Remote Systems in the Nuclear Back-end)	放射性廃棄物管理及び廃止措置におけるロボット及びリモートシステムの適用検討
WP-IDKM (Working Party on Information, Data and Knowledge Management)	情報・データ・知識のマネジメントに関する共通の課題の検討

会議体、委員会、作業部会等	主な検討項目
WP-IDKM/EGKM (Expert Group on Knowledge Management for Radioactive Waste Management Programmes and Decommissioning)	長期の事業期間における世代間での知識継承の取組みの検討
WP-IDKM/EGSSC (Expert Group on a Data and Information Management Strategy for the Safety Case)	セーフティケースに関わるデータ等の管理方法の検討
WP-IDKM/EGAR (Expert Group on Archiving for Radioactive Waste Management Activities)	事業に関する記録の保存方法の検討
WP-IDKM/EGAP (Expert Group on Awareness Preservation after Repository Closure)	処分場閉鎖後長期における記録・知識・記憶の継承のための方法の検討
IGSC (Integration Group for the Safety Case)	セーフティケース開発に関する共通課題の検討
IGSC/EGOS (Expert Group on Operational Safety)	操業時安全に関する技術課題の検討
IGSC/Clay club	粘土質岩やベントナイトに関する技術課題の検討
IGSC/Crystalline club	結晶質岩に関する技術課題の検討

2) 国際共同プロジェクトへの参画や共同研究を通じた技術的成果や経験の共有

- 様々な共通的主题に対して、海外の実施主体や研究開発機関等との共同研究（表④-2-1）や国際共同プロジェクト（表④-2-2）を継続し、成果を共有するとともに最新の技術的知見を獲得した（詳細は評価カテゴリー①～③参照）。
- 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国際共同プロジェクト（NEA Joint International Project - Horonobe International Project）については、協定書への署名を行い、運営委員会と3つのタスク会合への参加及び幌延深地層研究センターにおけるボーリング調査の実施状況の確認を通じて、プロジェクトの推進体制の整備と成果の創出へ貢献した。

表④-2-1 海外実施主体との共同研究実績

共同研究先	主な技術開発課題
米国 LBNL	断層及び断層破砕帯における水理・力学的挙動に関する調査・評価技術の開発【評価カテゴリー①1. (1) 1参照】
スイス Nagra	地質環境データの品質評価手法の高度化【評価カテゴリー①1. (1) 4参照】
ドイツ BGE-TEC	放射性廃棄物の搬送システム及び定置装置の安全設計【評価カテゴリー②1. (2) 2参照】
カナダ NWMO	オーバーパックの銅コーティング技術の開発【評価カテゴリー②1. (2) 3参照】
スウェーデン SKB	知識マネジメントシステムの開発【4. (1) 2参照】

表④-2-2 国際共同プロジェクトへの参加実績

プロジェクト名	主な技術開発課題
Nagra Grimsel Test Site MaCoTe (Material Corrosion Test)	原位置における金属材料の腐食挙動把握【評価カテゴリー②1. (2) 1参照】
Nagra Grimsel Test Site HotBENT (High Temperature Effects on Bentonite)	150℃を超える高温条件下での緩衝材熱変質に関する知見・データ取得【評価カテゴリー③1. (3) 2参照】
Nagra Grimsel Test Site CFM (Colloid Formation and Migration)	コロイド移行挙動に関する知見・データ取得【評価カテゴリー③1. (3) 3参照】

プロジェクト名	主な技術開発課題
Nagra Grimsel Test Site CIM (Carbon-14 and Iodine Migration in Cement)	セメント系材料中における放射性核種の収着挙動に関する知見・データ取得【評価カテゴリー③1. (3) 4) 参照】
Nagra Grimsel Test Site LTD (Long-Term Diffusion)	母岩中のマトリクス拡散に関する知見・データ取得【評価カテゴリー③1. (3) 5) 参照】
Nagra-NWS-NUMO ボーリング孔閉塞技術開発プロジェクト	堆積岩を対象としたボーリング孔閉塞技術の開発【評価カテゴリー①1. (1) 4) 参照】
SKB Aspo 岩盤研究所国際共同研究プロジェクト	エスポ地下岩盤研究所の情報と成果の利用【評価カテゴリー①1. (1) 5) 参照】
月布ベントナイト ナチュラルアナログ	月布ベントナイト鉱山を対象とした緩衝材の長期安定性に関するナチュラルアナログの情報取得【評価カテゴリー②1. (2) 1) 参照】
キルナ鉱山ナチュラルアナログプロジェクト	キルナ鉱山における鉄-ベントナイト接触部を対象とした緩衝材長期安定性に関するナチュラルアナログの情報取得【評価カテゴリー②1. (2) 1) 及び評価カテゴリー③1. (3) 2) 参照】
BIOPROTA プロジェクト	生活圏に関するモデル構築やデータ整備に関する情報・知見の収集【評価カテゴリー③1. (3) 9) 参照】
幌延国際共同プロジェクト	地下研究施設を活用した物質移行試験、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の実施とデータ取得

【自己評価・今後の取組み】

(自己評価)

- IAEA 及び OECD/NEA 等の国際機関の活動、各国の実施主体との協力協定の更新（3 機関）及び共同研究を当初の計画から大きく遅延することなく進め、国際協力による情報、データの取得や解釈、解析コードに対するベンチマークなどを進めることにより、地層処分に関する技術的信頼性の向上に寄与した。
- 以上により、国の全体計画及び機構の中期技術開発計画に沿って着実に業務を実施しているものと評価する。

(今後の取組み)

- 引き続き、国際機関の活動や海外の地下研究所を活用した共同研究、幌延国際共同プロジェクトを含む国際共同プロジェクト等に参加し、地層処分事業に関わる国際動向の把握、国際的に議論されている最新の課題や関連する知見や技術、経験の共有を進め、機構職員の人材育成も含めた技術的能力の向上を図るとともに国際貢献に努める。また、海外実施主体との情報交換、国際会議等における技術開発成果等の情報発信を積極的に実施していく。

技術マネジメント：学会等での講演リスト（1 件）

発表先	タイトル	著者(機構職員の所属は省略)
MIGRATION 主催 Migration2023	OVERVIEW OF THE JAPANESE RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL PROJECT	小池彩華、石田圭輔、加来謙一

技術マネジメント：論文のリスト（3件）

発表先	タイトル	著者(機構職員の所属は省略)
Rock Mechanics Bulletin (Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering 中国岩盤力学学会)	Current status of the geological disposal programme and an overview of the safety case at pre-siting stage in Japan	藤山哲雄、加来謙一
株式会社千代田テクノロジー FBNews 放射線安全管理総合情報誌 第566号	地層処分における安全確保の考え方について	上野吹佳、石田圭輔
原子力バックエンド研究 Vol.30 No.2 講演再録	長期間を対象とした高レベル放射性廃棄物の管理におけるバリデーション・性能担保の考え方	梅木博之

以 上