

－2022 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、2022 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、機構の技術開発に関する評議員会による評価・提言の内容を報告する。

評価・提言にあたっては、前年度と同様、技術開発に係る取組みを事業計画書の目次を基に、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。事業計画書の「Ⅲ 1.（4）長期に亘る事業展開を見据えた情報収集」、「Ⅲ 2. 包括的技術報告書の国際レビューへの対応と情報発信」及び「Ⅲ 4. 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、「Ⅲ 1.（2）処分場の設計と工学技術の体系的な整備」と「Ⅲ 3. 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、以下のとおり技術開発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。

実効的な「評価・提言」の取りまとめをすることを目指し、2022 事業年度業務実施結果（別紙参照）に基づく評価に加え、上述 4 つのカテゴリ各々に関する進捗等を機構職員の説明から確認する技術開発評価委員会（以下、「評価委員会」という。）（2023 年 4 月 4 日開催）と、全てのカテゴリに関連する重要技術である数値解析モデルの開発に関わる整備戦略、実施体制、事例等に焦点を当てた評価委員会（2023 年 3 月 8 日開催）を開催し取りまとめを行った。

事業計画 目次		評価カテゴリ
Ⅲ 技術開発		
1. 計画的な技術開発の推進		
（1）地質環境の調査・評価技術及びモデル化技術の高度化	→	技術開発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	→	技術開発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	→	技術開発③ 閉鎖後長期の安全評価
（4）長期に亘る事業展開を見据えた情報収集	→	技術開発④ 技術マネジメント
2. 包括的技術報告書の国際レビューへの対応と情報発信	→	
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）知識マネジメント及び人材の育成・確保に係る取組み	→	
（2）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	→	
（3）概要調査の実施能力等の向上に係る取組み	→	
（4）国際連携・貢献の着実な推進	→	

■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、技術開発が地層処分の安全確保に対する信頼性を継続的に高めるという長期的な課題に挑戦するものであり、直ちに成果を得られるものではない課題を含むことを理解したうえで、上述 4 つの評価カテゴリーに関する進捗は良好であり、事業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 つの評価カテゴリーそれぞれに対し留意事項を抽出し、それらを整理して以下の評価と提言を行う。

2. 評価カテゴリーごとの評価・提言

（1）技術開発① 地質環境の調査・評価

本カテゴリーの評価対象となる 2022 年度の技術開発は、(i)地質環境に関わる個別調査技術の最適化に向けた技術開発と適用性の確認、(ii)地質環境特性の長期的な変化のモデリング技術の高度化、(iii)長期的な自然現象の発生に関する安全評価シナリオの設定——を実施項目とする業務である。

これらの実施において機構は、専門性の高い国内外の組織との共同研究を推進しつつ、原位置試験や、試験のための装置開発を進め技術開発の効率化を図っており、評議員会は、個々の開発項目について事業計画に沿っておおむね着実に成果を挙げていると評価する。外部組織との共同研究では、ここ数年間はコロナ禍の影響による止むを得ない遅延があったが、2022 年度において、その遅れを機構の「地層処分事業の技術開発計画」に示した本来の計画に近い状況まで回復できたものと判断する。

次年度以降の活動に向けた留意事項として、実施項目 (iii) の安全評価シナリオに関して次の点を指摘する。

- ・解析に用いた海水準変動曲線は単純化しているので、できるだけ過去 100 万年の評価を行っている研究報告に近づけることが望ましい。
- ・将来予測における不確実性の取扱いの考え方について注意深く示すことが必要である。例えば、氷期一氷期サイクルが同じ間隔で起こると仮定しているが、必ずしもそうとは思えない事例もある。
- ・隆起沈降速度が一様ではなく時間によって変化する場合は、シミュレーション結果に影響が出るので、確認が必要である。
- ・四次元地質環境モデルの不確実性を評価するため感度解析を実施するとのことだが、具体的な方法が見えた方がよい。
- ・地下水流動解析コードは多数あるが、その中から一つのコードを選定した理由を明確に示すべきである。
- ・四次元地質環境モデルの説明において、過去・現時点・将来とは各々いつを指すのかが不明瞭で、時間軸としてどの程度の長さを念頭に置いているかが分かり難い。
- ・四次元地質環境モデルの時間軸を諸外国と同様に将来 100 万年と置いているが、我が国は変動帯に位置しているので、地質環境の推移について欧米とは異なる独自の設定とすることを考えても良いのではないか。

四次元地質環境モデルの構築においては、将来 100 万年という超長期の時間をターゲットとしており、モデルの根幹となる物理的・化学的記述や数理方程式が正しくても、長期の将来予測に対して、用いるパラメータや自然環境という境界条件に、時間的かつ空間的な不確実性が内包される。そ

の点についてモデルによる予測においては十分な配慮が必要である。この不確実性への対処において、以下の2点について検討することを提言する。

- 将来100万年という時間設定に対して、ある程度合理的な評価が可能な時間域と、不確実性が大きくなる時間域に対して評価方法にどのように違いを持たせるのか、また、異なる方法で得た結果をどのように繋いで説明していくのか、考え方を整理しておくこと。
- 地質環境については、調査が進展しても場やその時間変化に関する理解・解釈を一意に決めることは容易ではない。特に我が国の地質環境は複雑で多様であり、検討する地質条件範囲も多岐に及ぶことから、地質環境モデルを構築するための技術開発を効率的に進めるには、将来の長期変化を引き起こす主要な因子をモデルの感度解析等から洗い出し、調査・評価の重点を絞り込みながら行うこと。

上記の提言は機構だけでなく関係研究機関に対する問題提起でもある。機構は関係研究機関との共同研究を通じて問題点を反芻・整理し、それを基に関係研究機関、学会などとの連携・情報交換の場を積極的に設け、問題の共有と解決を図ることが重要である。

(2) 技術開発② 処分場の設計と工学

本カテゴリーの評価対象となる2022年度の技術開発は、(i)人工バリアの設計に関する技術の信頼性向上に資する科学技術的基盤の拡充、(ii)サイト環境条件に応じた設計の柔軟性を確保するための設計オプションの開発・整備、(iii)人工バリアの製作・施工に関する工学的成立性の確認を目的とした段階的な実証試験、(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。

本カテゴリーについて評議員会は、個々の設計オプションの長所・短所を分析したうえで必要な研究課題が抽出され、着実に成果が得られていると評価する。緩衝材(ベントナイト)の高温特性に関する試験において、機構担当者が失敗に直面しつつも原因を分析し対策を講じていることを評価する。失敗は決してマイナスではなく、経験知の蓄積、機構の財産と捉えるべきであると考えられる。

次年度以降の活動に向けた留意事項として、次の点を指摘する。

- ・地下水の塩分濃度がスイスなどに比べて高い場所が多いと考えられる我が国において、塩分濃度が一定のレベルを超えて高い場合にはベントナイトの膨潤性が低下することが懸念され、今回の報告でも海水に対して施工するベントナイトの乾燥密度を高めて対応することが必要という結果が得られている。塩分濃度も含め、我が国において考えられる種々の処分環境を現実に即して捉え、その範囲に対して適正な材料や施工方法を検討していることを整理して示すことが必要である。
- ・オーバーパックに対して幾つかの材料施工オプションが検討されているが、どのオプションがどの環境に適しているかという整理があると、開発の動機が明瞭になる。
- ・ベントナイトの高温特性を調べる装置において、養生時に配管の割れを経験したとのことであるが、ベントナイトに吸着していたガスが一気に放出したことが、一つの可能性として考えられるため確認すること。
- ・上記装置にステンレスとチタンという異種金属の接合部があり、それによる腐食についても注意が必要である。
- ・装置ごと、圧力計と温度計を備えるオートクレーブに入れてしまえば、圧力計配管を引き出さずに済み、配管割れのリスクを大きく低減することが可能である。
- ・オーバーパックやベントナイトだけでなく、処分場の建設に不可欠と考えられるコンクリート系材料に対して、特に、坑道にコンクリート製の支保を施工した場合の劣化過程の理解をさらに進めることが必要である。

- ・コンクリート系材料の劣化過程の理解においては、坑道を開放している閉鎖前の期間と、閉鎖後の期間では環境条件が著しく変わるので、閉鎖後を対象とした長期安全評価の場合とは異なった評価が必要である。

今後、概要調査、精密調査と事業が進展すれば、それに応じてサイトの環境条件がより詳細に明らかにされた時に、その環境に適した設計案が提示できることが重要であり、提示したオプションに合理性があることを示すために、評議員会は次の事項を検討することを提言する。

- 地質環境と設計オプションとの関連性を示し、幅広い環境条件に対応可能なオプションを開発していることをより明示的に示すこと。

(3) 技術開発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 2022 年度の技術開発は、(i) 現実的なモデル開発、(ii) 感度解析に基づくモデルの単純化、(iii) モデルの検証／妥当性の確認、(iv) 不確実性解析——に取り組むものである。

評議員会は、2022 事業年度業務実施結果、特に

- ・目標とする「より現実的な条件に適合した解析」に対し、実際に用いた条件、例えば海水準変動パターンがどの程度現実的なのか、
- ・用いた数値解析モデルの持つ特性が使用目的に適っているかどうかを確認し、適正な対応がなされているか、
- ・廃棄体の放射能インベントリ（全含有核種）推定に際し、発生元の事業者との情報交換が進んでいるか、

などについて確認するとともに、大規模な数値解析計算に対して、得られた結果の妥当性確認や品質保証の仕組みについて議論した。

評議員会は、「閉鎖後長期の安全評価」のカテゴリーに対して、人工バリアから周辺の天然バリアを含む数 km 超におよぶ巨大な解析領域を対象に、現状のマシンパワーで解かねばならないという要求に対して、単純化や並列化などの様々な工夫を重ね、一連の解析手順を整えることができたものと評価する。また、計算負荷の大きさから、計算業務の一部を外部委託せざるを得ない状況にありながらも、機構職員の解析技術が日々向上していることも確認した。

次年度以降の活動に向けた留意事項として、次の点を指摘する。

- ・計算に関する情報は自作なのか、あるいは外部機関から提供を受けたものなのか、を明らかにし、機構が当該情報を活用する場合に情報の出自に対して留意する事が重要である。
- ・シミュレーション結果を示す際には、その「前提条件」を網羅的に提示しなければならない。評価委員会においてはこれまで計算コードの信頼性についての点検が先行されたが、「前提条件」についての機構からの説明は十分とは言えなかった。今後概要調査等に進んだ場合には「前提条件」の議論は急増すると思われるが、計算コードの信頼性に係る議論とは異なり、データに基づく客観的な技術論とともに、専門家による主観的な判断の両面を考慮する必要があると考えられる。機構は、このような議論を今後の評価委員会で行うことができるよう取り組む必要があるのではないと思われる。
- ・海水準変動について、氷期－間氷期サイクルは一般に 9 割が氷期、1 割が間氷期と言われており、今回利用した周期曲線は必ずしも現実的とは言えないので、但し書きをつける方が良い。
- ・海水準変動を 1 万年ごとのステップに区切るのではなく、連続で解析できるようにすれば、変動パターンの周期性に関する感度解析が容易に行えるようになる。このことに独自のノウハウを持てば、国際的にプレゼンスを高めることにも繋がる。

- ・廃棄体の放射能インベントリの推定方法の前提条件が、実際に発生するであろうものと同じとは限らないので、発生元への確認が必要である。
- ・三次元の粒子追跡解析にコストがかかるとのことだが、二次元解析が有用。どのような亀裂が移行経路に寄与するのかを知るうえで、例えば、最小の割れ目以下では移行経路として無視できるなどの情報が二次元の予察的解析から得られれば意味がある。また、亀裂場の解析において、場の特徴的な亀裂が解析から抽出できれば、その情報を基に原位置で採るべきデータを調査の側に提案することも考えられる。
- ・大型の計算を外部委託せざるを得ない状況下では、事前の試算・事後の検算などに小ぶりで軽快な支援ソフトが役に立つと考えられる。機構が扱う課題は新規の研究要素が多くあり、支援ソフトを内製化するよう努力すれば人材の育成にも繋がり、かつ、そのソフトを望むユーザーも多方面に居るはずである。すでに、内製化を目指すための人材も育ちつつあり、支援ソフトによる新人教育、業務の効率化等、大規模計算だけではできない活用方法が考えられる。

以上を踏まえ、評議員会は、巨大かつ複雑な計算体系を対象とした評価を行うことに対して、さらに信頼性を向上させるために以下の2点を検討することを提言する。

- 大きな計算を強調しすぎると、コンパクトな計算でチェックできるものまで複雑化してしまうことになりかねないので、最初に、現象を支配する主要因が何であるかを十分把握したうえで計算を実行すること。
- 実際には複雑な境界条件の経時変化を簡略化せざるを得ないとしても、その設定が保守的評価となるように、計算の単純化、合理化が適正か否かの確認をさらに強力に進めること。

(4) 技術開発④ 技術マネジメント

本カテゴリーの評価対象は、“技術開発全体の舵取り”というべきものであり、(i) 計画的な技術開発の推進、(ii) 包括的技術報告書の国際レビューへの対応と情報発信、(iii) 事業を推進する技術マネジメントの強化——という業務である。

評議員会は、機構が地層処分研究開発調整会議（以下、「調整会議」という。）などを通じて、機構のみならず日本全体として課題を解決する方向性を主導的に定めていること、概要調査などを見据えた次年度以降の活動に必要な技術的情報を整理・準備していること、人材育成にも鋭意努力していること、などを確認した。このことから、技術マネジメントは有効に機能しているものと評価する。

次年度以降の活動に向けた留意事項として、次の点を指摘する。

- ・我が国に足りない技術については技術基盤を効率的に強化するため、国内外における技術移転を推進することも必要である。海外との業務において委託という手段もあるが、重要な技術は我が国のノウハウとして蓄積することも重要である。
- ・概要調査の準備として適用を検討している斜坑ボーリング技術は、国内に実施できる事業者をさがすことは難しい。リニア新幹線や石油備蓄の事業では、海外からの技術導入や国内での新規技術開発を行う事業者が存在した。これらの技術の地層処分への適用が難しいならば、機構が独自に技術を保有することを考えてはどうか。
- ・技術レポート等は日本語だけでなく、英語で執筆し公表することも必要であり、英文でない海外からの情報提供やユーザーになってもらうチャンスを逃している可能性がある。
- ・職員の海外派遣によって折角得た情報を暗黙知とするのではなく、知識マネジメントシステムに具体的に取り込むことにより、さらに有効な情報活用が期待できる。

- ・人材育成については、セミナーのような、与えられたプログラムを短期かつ形式的にこなすようなものになっていないか懸念がある。人材育成は時間がかかるものであり、参加者自ら考える力が付いているかどうかを十分確認しながら進めて欲しい。
- ・対話活動とも関連することだが、2023年3月に、幌延の深地層研究センターの活動が漫画になり、幌延町のホームページで公開されている。プロが描くので非常にうまく表現されており、情報が伝わりやすいと感じた。
- ・腐食防食学会主催特別シンポジウムの取組み、金属学、微生物学、地球科学及び原子力工学の専門家等で構成される様々な委員会の設置・諮問、ナチュラルアナログ研究における地質（鉱物学）及び地球科学の専門家等との協働、産業界や大学との協力連携の強化など、分野を跨る活動は、技術開発のマネジメントの良好事例として評価し、今後とも継続を期待する。
- ・工学・設計分野において設計オプションの合理性を示すうえで、地質環境や安全評価との密接な連携が今後ますます必要となる。その際、分野が異なると知識や認識のギャップがあることを承知し、さまざまな知見・経験を基にした効果的な議論の場を積極的に設け、共通認識を醸成していくことが重要である。

また、評議員会は情報発信に関しては定常的な活動が行われていると評価するが、新しい視点やこれまでになかった方向からの取組みも必要であると考え、以下の2点を提言する。

- SNSによる情報発信は有効な手段であることは確かであるが、漫画による情報発信も視覚的に判りやすく、処分に関しても国内に事例がある。複雑な技術情報をどう視覚化するかを含め、漫画化を検討してはどうか。
- 処分を業務とする機関数は少なく、その分様々な経験や技術情報の蓄積は限定される。国外への情報発信を盛んにすれば、逆に、国外からの情報流入もより期待できるので、機構の成果である技術レポート等は人工知能（AI）を活用するなどして英文化し公表してはどうか。

3. まとめ

評議員会からの提言の骨子を下表にまとめて示す。

表 各評価カテゴリーの提言の骨子

評価カテゴリー	提言の骨子
地質環境の調査・評価	時間軸を考慮した四次元地質環境モデルの開発においては、将来の地質環境は時間とともに不確実性が大きくなるので、評価方法もそれに整合させるよう考え方を整理しながら検討を進めること。
処分場の設計と工学	安全性、実現性及び経済性の観点から有望な設計オプションの選定と実証においては、幅広い地質環境と処分場設計オプションとの関係性を明確化すること。
閉鎖後長期の安全評価	より現実的な条件に適合した解析手法の開発においては、前提条件を網羅的に十分吟味しつつ、巨大かつ複雑な計算体系の数値解析に対する信頼性を確保すること。
技術マネジメント	技術情報の発信について、これまでと同様の努力を継続強化しつつ、発信方法を工夫すること。

以上

—2022 事業年度業務実施結果等にかかる機構からの説明— (3) 技術開発

<目次>

○業務実施結果・自己評価・今後の取組み . . . 1～36ページ

・技術開発① . . . 1～6ページ

・技術開発② . . . 7～23ページ

・技術開発③ . . . 23～29ページ

・技術開発④ . . . 29～36ページ

【技術開発①】地質環境の調査・評価

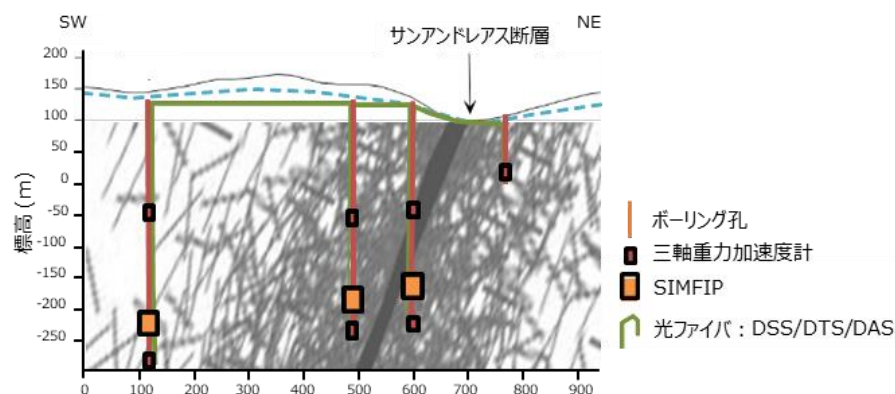
1. 計画的な技術開発の推進

(1) 地質環境の調査・評価技術及びモデル化技術の高度化

【業務実施結果】

1) 将来の自然現象の発生とそれが処分後の地質環境に与える影響を評価する技術の高度化

- ・ 明らかな活断層を避けた後に、ボーリング孔や坑道の掘削において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た。
- ・ 2022年度は、LBNL 担当者と議論を重ね、ボーリング孔の掘削地点を選定するとともに、ボーリング孔の掘削、ボーリング孔を用いた原位置試験及び採取するコア試料を用いた室内試験の計画を策定した。計画に基づき、サンアンドレアス断層を対象とした4孔（掘削長：各200m程度）のボーリング孔の掘削や物理検層等の孔内試験を実施するとともに、開発した断層の変位・間隙水圧・地震波等の観測装置の孔内への設置及び作動確認試験を実施し、観測装置が正常に作動していることを確認した（図①-1）。



図①-1 サンアンドレアス断層を対象とした原位置試験のための
ボーリング孔レイアウトのイメージ

- ・ 新型コロナウイルス感染症対策の影響により試験実施場所の選定に時間を要したこと、米国エネルギー省（以下、「DOE」という。）による原位置試験計画に対する承認手続きや地権者との交渉等に時間を

要したことにより、2021 年度完了予定のボーリング孔の掘削から観測装置の作動確認試験までの作業を 2022 年度に完了した。その結果、連続観測の開始を 2023 年度に変更した。これに伴い、これまでに開発した解析技術と観測データを用いたシミュレーションによる断層周辺の地質環境の変化に関する評価についても 2023 年度に開始することとした。

2) 長期的な自然現象の発生に関する安全評価シナリオの設定

- ・ 自然現象の著しい影響を回避するように選定したサイトにおいて、これらの自然現象の発生の可能性に関する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 万年を超える期間を対象に、自然現象の発生に関する安全評価シナリオを設定するための評価技術の整備を進めた。その一つとして深部流体に着目し、地層処分システムへの流入の発生可能性やその影響に関する情報の収集・整理を実施した。
- ・ 自然事象による地層処分システムへの影響の評価における確率論的評価手法の適用に関する情報収集を進め、有識者との意見交換を通じて同手法の適用性に関する技術開発計画の検討に着手した。

3) 地質環境特性の長期的な変化のモデリング技術の高度化

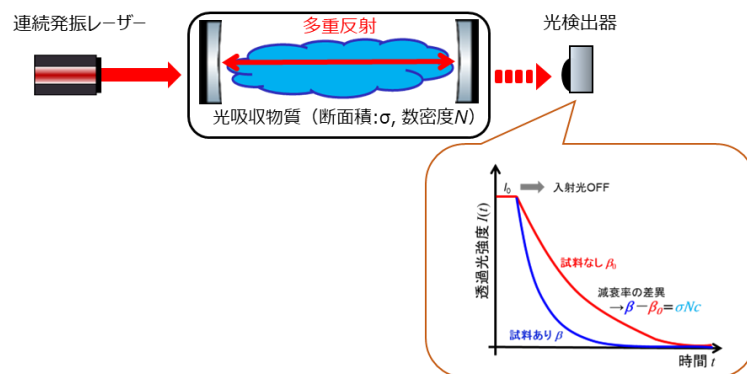
- ・ 自然現象の著しい影響を回避したサイトについて、長期にわたる地形の変化や気候・海水準変動等に伴う地表から地下深部までの水理場や化学場といった地質環境特性の三次元空間分布とその長期的変化を表現し、処分場の設計や安全評価に反映することができる、現実的な地質環境のモデル化（四次元地質環境モデル）技術の整備を目的として業務を進めた。
- ・ 過年度までの検討では、包括的技術報告書で検討対象母岩とした新第三紀堆積岩類、深成岩類及び先新第三紀堆積岩類が分布する仮想の場を対象として、四次元地質環境モデルの構築技術を整備した。2022 年度は、事例検討地域における 100 万年程度以前の過去から現在までを対象とした四次元地質環境モデルの構築を行い、地下水の水質や地下水年代データの実測値との比較を行い、それらが整合的であることが確認できたことから、整備したモデル構築技術が地質環境特性の長期的な変化のモデル化に適用可能であることを確認した。また、将来の地質環境特性の時間的な変化を推定するにあたっての課題として、大規模な空間スケールかつ長期の時間スケールを対象としたモデル化・解析に係る不確実性評価の考え方の整備を抽出した。
- ・ 四次元地質環境モデルを用いた処分場の設計や安全評価を事例的に検討するため、2021 年度までに構築した仮想の場を対象とした四次元地質環境モデルに基づき、処分場の地下施設設置可能領域の選定、ストーリーボード（地層処分システムの状態変遷及びそれを踏まえた安全機能の発揮の仕方等を表現するもの）の作成に資するための情報の整理を実施した。
- ・ 過年度の検討結果及び上記の結果に基づき、四次元地質環境モデルを構成する地形・地質構造モデルや水理地質構造モデルの構築に係る作業手順や留意点、並びに四次元地質環境モデルの妥当性確認の考え方やモデル構築結果を処分場の設計及び安全評価に反映する方法を整理した。

4) 地質環境に関わる個別調査技術（地上物理探査やボーリング調査、地下水等のモニタリング、ボーリング孔の閉塞等に関する技術）の最適化に向けた技術開発と適用性の確認

- ・ 一般財団法人 電力中央研究所（以下、「電中研」という。）との共同研究により、電中研・横須賀地区において膨潤性を有する脆弱な地層を挟在する岩盤を対象としたボーリング孔掘削、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、大深度ボーリング実証試験を 2019 年度から実施している。大深度ボーリング実証試験においては、海外のサイト調査の事例や幌延深地層研究計画における地質環境調査の事例に係る知見等を参考に選択・適用した掘削方法や試験手法によるデータ取得や、それを用いたデータの解釈・解析を実施した。2022 年度は、それらの体系的な成果について、委託業務に関する最終成果報告会を実施するとともに、共同研究報告書に取りまとめ、プロジェクトを完了した。
- ・ ボーリング調査の一環として実施する室内試験に関する品質管理・品質保証手法の整備を目的として、付加体堆積岩を対象とした地質環境情報の整備の一環として取得した岩石コア試料を用いた室内拡散

試験を、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実施し、スイスの規制機関によって認められている品質管理・品質保証手法と、機構のそれとの比較検討を行い、両者の違いを明らかにするとともに、機構の品質管理・品質保証手法の改善点を抽出した。

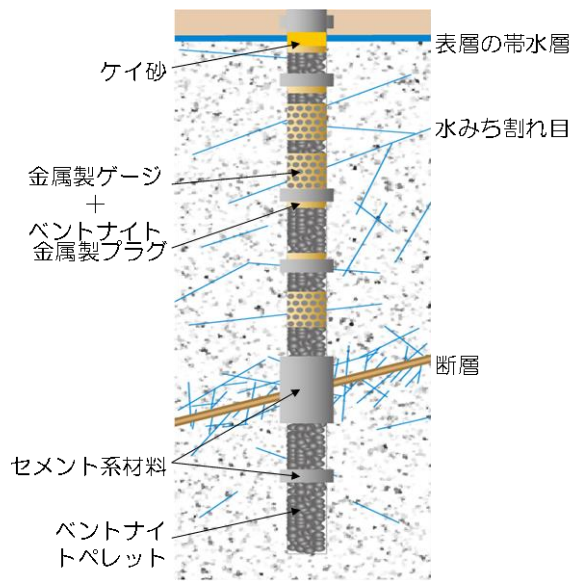
- これまでの大深度ボーリング実証試験において、課題として残されていた大孔径のボーリング孔を利用した孔内水圧破碎試験及び室内応力測定に関し、新たに電中研・横須賀地区において、孔内水圧破碎試験及び室内応力測定を行うためのボーリング試験計画の策定を行った。試験に適した地層が出現するボーリング孔掘削の地点を、電中研担当者及び Nagra 専門家との議論を通じて選定し、試験計画を立案して仕様書を策定した。多くの企業が参画するボーリング調査に関する契約方法の検討に時間を要したことから、2023 年度に開始することに変更した。
- 電中研・横須賀地区において、過去に取得した物理探査データを最新の解析手法を用いて再解析することにより、その解析手法の適用性の評価を実施しており、2023 年度にその成果を取りまとめる。
- サイトの地質環境の初期状態や地下施設の建設に伴う状態変化の把握等を目的として、数十年規模の耐久性を念頭においた地下水モニタリング技術の高度化に向けた検討を継続した。具体的には、地下水の水圧・温度を計測しつつ採水が可能な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の本体及び構成部品（パッカー、光ファイバーセンサーケーブル等）の設計を実施した。また、光ファイバーセンサーケーブル、パッカー及び採水口を試作し、各構成部品を組み合わせた性能確認試験を実施し、実規模でのモニタリングに使用可能な装置の設計・製作に必要な情報を取得した。光ファイバーセンサーケーブルの製造過程における技術課題への対応や、パッカー及び採水口の試作に必要な資材の調達に時間を要したため、契約期間を変更した。
- 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を実施した。具体的には、レーザー吸収分光法（図①-2）を用いた小型・可搬な地下水中の核種同位体分析モニタリング装置に必要な要素技術の設計及び開発に着手し、初期段階としてメタンガスをターゲットとして分析装置の要求仕様の明確化及び測定装置の設計・製作を実施するとともに、装置の性能確認を実施した。その結果、地下水中に含まれると想定される微量なメタン分子を検出することができた。



図①-2 共振器強化型レーザー吸収分光法のイメージ

- 国際的な課題となっている、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、国際協力に係る協定に基づく情報交換を継続した。また、この情報交換の結果を踏まえて、ボーリング孔内に金属プラグを設置する装置の開発を継続するとともに、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に閉塞材（ベントナイトペレット）を設置し、膨潤試験を継続した。なお、金属プラグの製作に必要な資材の調達に時間を要したため、

2022 年度に実施する予定としていた金属プラグやベントナイトペレットの施工方法を検討するための試験は、2023 年度に開始することとした。



図①-3 ボーリング孔の閉塞方法の概念図

5) 安全・品質に関する管理能力の向上や、地質環境に係る科学的知見の拡充

- ・ サイトでの地質環境調査により取得するデータの管理について、その具体的な考え方を整理するとともに、データ管理のためのデータベースの運用方法やデータベースシステムの改善計画に資するために、海外実施主体の先行事例について情報収集を実施し、機構のデータベースシステムとの共通点や相違点を明らかにした。
- ・ 先新第三紀付加体堆積岩類を対象とした地質環境情報の整備の一環として実施した、原位置試験や室内試験の結果、包括的技術報告書における地質環境モデルに設定した地質環境特性データが妥当であることを確認するとともに、それらを技術報告書として取りまとめた。
- ・ 電中研・横須賀地区における大深度ボーリング実証試験、及び先新第三紀付加体堆積岩類を対象とした地質環境情報の整備に関する現場作業で得た、安全・品質管理に関する経験やノウハウ、人材育成面での成果について、事例やそこから得られる教訓を取りまとめて技術部内に共有するとともに、仕様書作成・運用ガイドに反映した。

【自己評価・今後の取組み】

(自己評価)

- ・ 2022 年度の業務を通じて、以下に示す知見を蓄積することができた。これらの知見及び現場作業で得た安全・品質管理に関する経験については、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。また、抽出した課題については、当該業務に関する今後の技術開発として、地層処分研究開発調整会議（以下、「調整会議」という。）が策定する我が国の 2023 年度以降の地層処分研究開発全体計画（以下、「全体計画」という。）に反映した。
 - － 断層を対象としたボーリング調査計画立案に関する知見、及び崩壊しやすい断層部におけるボーリングの孔壁の状況を考慮した孔内試験の方法等の知見
 - － 四次元地質環境モデル構築時の留意点等の知見、及びモデルの妥当性を確認するうえでの課題の抽出
 - － 電中研・横須賀地区における大深度ボーリング実証試験に適用した掘削技術や孔内試験技術の有効性に関する知見

- 2021 年度までに実施した水理・力学特性に関する室内試験に加え、拡散試験に関する岩石コア試料のサンプリングから試験結果取得までの一連の手順や品質管理・保証手法に係る知見
- 実規模での光ファイバーセンサーケーブルを用いたモニタリング装置の設計・製作に必要な知見
- レーザー吸収分光法を適用した、ボーリング孔内で適用可能な核種同位体分析モニタリング装置を製作できる見通しを確認
- 金属プラグの拡張・設置方法や原位置試験方法に関する知見
- データの管理方法やデータベースの運用方法に関する知見
- ・以下の点において工程遅延が発生した。これらについては、当該業務に関する今後の技術開発計画における実施内容や工程を工夫し、概要調査以降の地質環境調査・評価に遅延なく反映できるようにする。
 - 地震に伴う断層の変位とその変位が周辺岩盤に及ぼす水理－力学連成現象の影響の評価技術に関して、試験実施場所の選定や地権者との交渉等の長期化に伴い、1 年程度の遅延が発生
 - 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に関して、契約方法の検討の長期化に伴い、6 ヶ月程度の遅延が発生
 - 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の開発において、装置の試作機の製作時に発生した止水性能に係る不具合への対応、及び資材調達期間の長期化に伴い、7 ヶ月程度の遅延が発生
 - ボーリング孔の閉塞技術の整備に関して、金属プラグの製作に必要な資材の調達期間の長期化に伴い、6 ヶ月程度の遅延が発生

(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、以下のとおり進める。
 - サンアンドレアス断層を対象に掘削したボーリング孔に設置したモニタリング装置による、断層の変位、間隙水圧等の連続観測を開始し、装置の耐久性を確認するとともに、観測データを用いたシミュレーションによる断層及び断層周辺の地質環境の変化に係る解析・評価を実施する。
 - 長期的な自然現象の発生に関する安全評価シナリオを設定するための評価技術の整備に向け、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、具体的な技術開発の実施方法を検討する。
 - 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する。
 - 電中研・横須賀地区における大深度ボーリング実証試験の一連の成果、及び付加体堆積岩を対象とした地質環境情報の整備の一環として実施した原位置試験や室内試験の結果を日本地球惑星科学連合'23 年大会等において発表する。
 - 2022 年度に作成したボーリング試験計画に基づき、電中研・横須賀地区において、新規ボーリング孔の掘削、孔内水圧破碎試験及び室内応力測定等を実施し、その結果を踏まえたこれら試験手法の最適化を図る。その際、Nagra との共同研究において蓄積した室内試験に関する手順や品質管理・保証手法に係る知見を反映する。
 - 過去の物理探査データの再解析結果に基づき、最新の解析手法の適用性を評価する。また、国内外における調査事例に基づき、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の拡充を図る。
 - 実規模での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、その適用性を確認するとともに、採水を伴わないレーザー光を用いた地

下水水質モニタリング手法の開発を継続する。

- 閉塞材の原位置での性能確認や、深部のボーリング孔内へのプラグの設置方法、ボーリング孔内への閉塞材の運搬・設置方法等の検討を継続する。
- サイトでの地質環境調査と併行して実施するデータ管理方法について、電中研・横須賀地区における新規ボーリング孔の掘削や試験等を用いた試運用において検討し、その結果に基づき、今後のデータベースの改善計画を策定する。

地質環境の調査・評価：学会等での講演リスト（8件）

発表先	タイトル	著者 (NUMO 職員の所属名は省略)
日本地球惑星科学連合 2022年大会	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	松岡稔幸、三枝博光、尾上博則、高畑祐美、高林佑灯
2022年度土木学会第77 回年次学術講演会	高温高压環境が水中不分離性コンクリートの硬化物性と鉱物組成に与える影響	中嶋翔平 ¹ 、取達剛 ¹ 、山野泰明 ¹ 、向 俊成 ¹ 、瀬尾昭治 ¹ 、國丸貴紀、西尾光 1) 鹿島建設
	ひずみ速度を交互に切り替える圧縮試験による岩石の載荷速度依存性の評価	小野正樹 ¹ 、羽柴公博 ² 、瀬尾昭治 ³ 、石橋正祐紀 ³ 、國丸貴紀、佐藤稔 ⁴ 、西本壮志 ⁴ 1) 応用地質 2) 東京大学 3) 鹿島建設 4) 電中研
	熱伝導率計測による岩石の水分拡散係数の算定 - 軟岩の不飽和浸透特性評価 (その3) -	榊利博 ¹ 、小松満 ¹ 、國丸貴紀、長谷川琢磨 ² 、瀬尾昭治 ³ 、栗原啓丞 ³ 1) 岡山大学 2) 電中研 3) 鹿島建設
	岩石試料の保水性試験 - 軟岩の不飽和浸透特性評価 (その4) -	小松満 ¹ 、榊利博 ¹ 、國丸貴紀、長谷川琢磨 ² 、瀬尾昭治 ³ 、栗原啓丞 ³ 1) 岡山大学 2) 電中研 3) 鹿島建設
土木学会 エネルギー委員会主催 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	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り組み状況	尾上博則
2022 International High Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM2022 conference)	Validation of the Sampling Methodology of Statistical Fracture Network Realizations for Three-Dimensional Nuclide Transport Analysis	Fumiko Yoshida, Hiroyuki Umeki, Hiromitsu Saegusa, Kazuaki Mitsuyama ¹ , Hirokazu Takahashi ¹ , Wataru Haneishi ¹ , Hiroyasu Takase ¹ 1) QJサイエンス
令和4年度日本応用地質学会 研究発表会	割れ目ネットワークモデルにおける割れ目長さを考慮した透水量係数分布の推定	石橋正祐紀 ¹ 、田川陽一 ¹ 、並川正 ¹ 、尾上博則 1) 鹿島建設

地質環境の調査・評価：論文・NUMO-TR のリスト（2件）

発表先 (TR の場合は No.)	タイトル	著者 (NUMO 職員の所属名は省略)
Chemical Geology	Modern and fossil seawater identification using ground- and pore-water dating from the western coast of the Miura Peninsula, Japan 【原著論文】	長谷川琢磨 ¹ 、中田弘太郎 ¹ 、富岡祐一 ¹ 、近藤浩文 ¹ 、國丸貴紀、Russell Alexander ² 1) 電中研 2) Bedrock Geosciences
NUMO-TR-22-01	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】	横田秀晴、後藤淳一、大城遥一、國丸貴紀、西尾光、松岡稔幸、三枝博光

【技術開発②】 処分場の設計と工学

1. 計画的な技術開発の推進

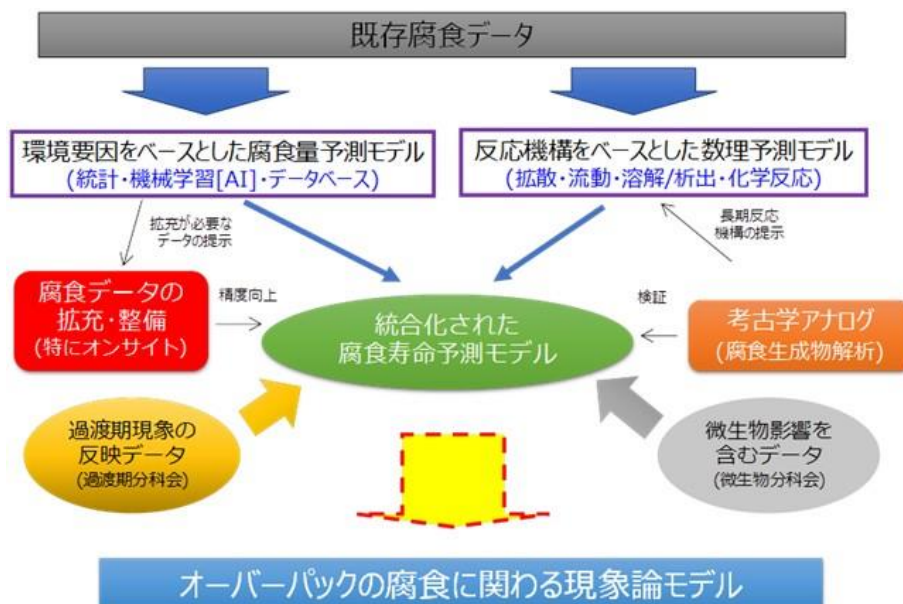
(2) 処分場の設計と工学技術の体系的な整備

【業務実施結果】

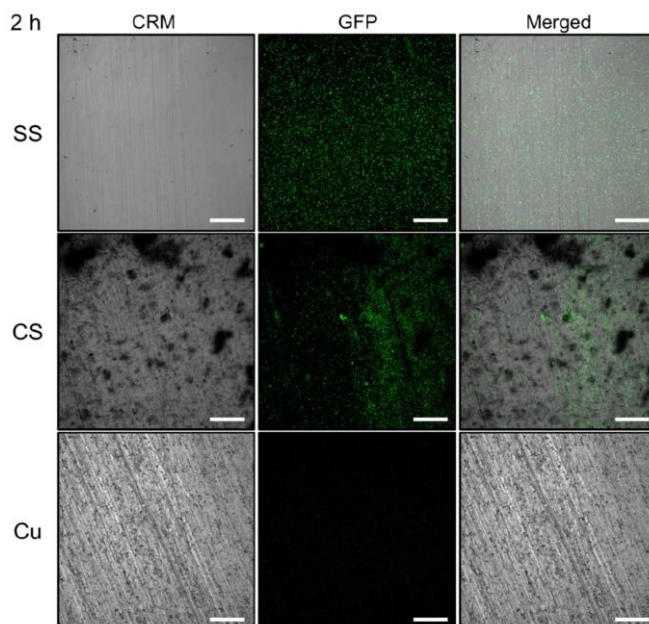
1) 人工バリアの設計に関する技術の信頼性向上に資する科学技術的基盤の拡充

- 沿岸海底下を含む我が国の多様な地質環境条件と多様な廃棄物を考慮した頑健な人工バリアの仕様と、適切な人工バリア材料を合理的に設定するための科学技術的基盤の整備に取り組んだ。
- 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）の長期腐食寿命評価に関しては、室内試験及び国際共同研究を通じた原位置試験により、腐食評価に係る試験データの拡充に引き続き取り組むとともに、腐食防食技術の専門家の助言をいただきながら、最新の科学的知見に基づく長期腐食寿命評価技術の検討を進めた。成果を以下に示す。
 - － （公社）腐食防食学会（以下、「学会」という。）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（以下、「検討委員会」という。）において検討を継続した。この検討委員会では、金属製処分容器の長期腐食寿命評価において重要となる4つのテーマ（i. 廃棄体定置後から緩衝材の再冠水に至るまでの温度、水分量及び放射線などの腐食環境が過渡的に変化する期間における腐食、ii. 微生物活動による腐食、iii. 長期腐食寿命評価モデルの高度化、iv. 処分環境を模擬した腐食試験技術の信頼性の確保）について、それぞれ分科会を設置し、最新の科学的知見の話題提供を受けて、取り組むべき課題について議論を行っていただいた。例えば、
 - ✓ テーマ i に関しては、最新のラジオリシス解析の事例として、放射線分解生成物による腐食加速の原因物質となる過酸化水素の生成が、溶存イオンの種類と量によって異なることなどを話題提供いただいた。この知見は、放射線分解生成物による腐食の防止に必要な放射線遮蔽代の設定にあたって利用することが期待できる。
 - ✓ テーマ ii に関しては、学会主催で特別シンポジウムを開催し、土壌環境における微生物腐食の国際標準の検討経緯や留意事項について話題提供いただくとともに、防食技術の地層処分への適用の可能性について地層処分の専門家と防食技術の専門家がパネル討論を行い、微生物腐食対策として適用可能な防食技術について意見交換した。
 - ✓ テーマ iii に関しては、炭素鋼の腐食速度が時間とともに低下するという試験結果に関して、金属表面を覆う錆層内の酸化性物質移行現象の理解が重要であること、また、大気腐食の評価に機械学習を適用した事例について話題提供を受け、機械学習を適用する場合の留意事項について意見交換した。これらの成果を地層処分に反映していくためには、地層処分の環境条件で取得された腐食試験データの更なる拡充が課題として挙げられた。また、腐食寿命評価モデルの検証においては、金属製考古学遺物のアナログ事例を比較対象として活用することも有効とされた。これらの議論の結果は長期腐食寿命評価モデルの開発のアプローチとして取りまとめられた（図②-1 参照）。
 - ✓ テーマ iv に関しては、地層処分に特有な腐食試験として、低酸素環境下で圧縮ベントナイト中に金属試験片を埋め込んだ腐食試験技術の標準化について議論し、今後、複数の機関で試験を実施し、試験手順の妥当性を確認することが必要とされた。
 - － 検討委員会では、上述の分科会と並行して、4つのテーマに関連した課題の解決につながる研究を公募し、6件の研究課題を採択した。例えば、微生物の四次元可視化技術により、金属表面における微生物の付着挙動の違いの定量評価が可能となり、銅の微生物に対する抗菌性と付着挙動の関係の理解が進んだ（図②-2 参照）。また、炭素鋼-亜鉛の電極対を用いた犠牲防食（イオン化傾向の高い亜鉛が炭素鋼よりも優先的に腐食することで、炭素鋼の腐食進行を防止

する防食技術)の試験では、微生物共存下のベントナイト中でも犠牲防食が有効である見通しを得た。この他、鉄製考古学遺物の詳細な分析に基づく腐食メカニズムと埋設環境との関係に関する研究、極低線量率照射下でのラジオリシスによる腐食への影響の評価、不飽和緩衝材中の銅の応力腐食割れ評価、ベントナイト中の銅の腐食に対する黄鉄鉱の酸化による影響など、長期腐食寿命評価に資する成果を得た。



図②-1 腐食寿命評価モデルの開発のアプローチ

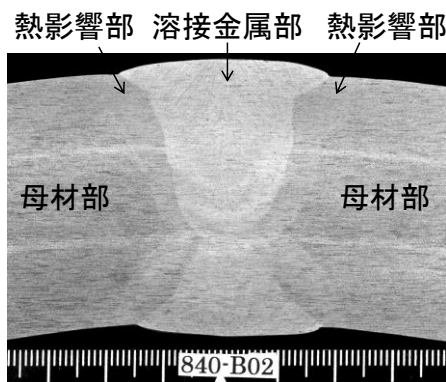


CRM : 金属表面画像、GFP 細菌分布 (緑色の傾向発色部) Merged: CRM と GFP の合成画像。SS : ステンレス鋼、CS : 炭素鋼、Cu : 銅
図②-2 種々の金属表面への微生物付着に関する研究成果例 (筑波大尾花助教提供)

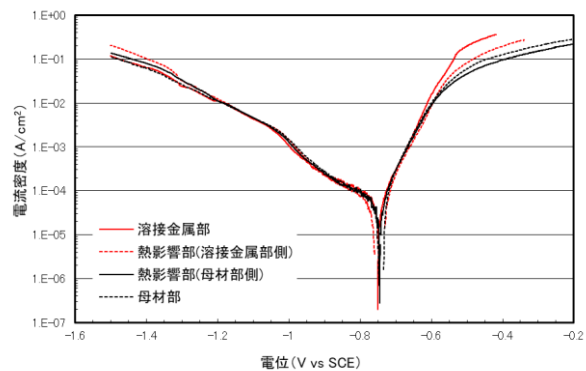
- 金属製処分容器の候補材料である鍛鋼、鋳鋼、板巻鋼管及び銅 (銅コーティング材も含む) の長期腐食試験データの拡充に引き続き取り組んだ。得られた成果は以下のとおりである。
 - ✓ 炭素鋼については、包括的技術報告書の設計でリファレンス材料とした鍛鋼に加え、鋳鋼を対象とした還元環境における最長 10 年の試験を国立研究開発法人 日本原子力研究開発

機構（以下、「JAEA」という。）との共同研究において継続して実施している。これまでに得られている3年までの腐食試験の結果では、鍛鋼及び鋳鋼の腐食速度は同程度であることが示されている。

- ✓ 炭素鋼オーバーパックの代替製造方法として検討の対象としている板巻鋼管は、圧延鋼を曲げ加工し、継ぎ目を溶接して製造される。製造した板巻鋼管の溶接継ぎ目と母材の耐食性の相違に着目した腐食試験を委託業務にて実施した。図②-3に示すように、溶接継ぎ目部は溶接金属部とその周囲の母材の金属組織が溶接時の熱影響により変化した熱影響部から構成される。図②-4に示すようにそれぞれの部位のみを対象とした分極試験を実施し、材料の腐食特性を表す分極曲線を取得した。その結果、分極曲線の形状は溶接金属部、熱影響部及び母材部ではほぼ同じとなった。また、大気を試験溶液に吹き込んで実施した浸漬腐食試験を実施したところ、上述の分極曲線に差は見られなかったものの、腐食減肉量は溶接金属部が高くなるという傾向が得られた。腐食減肉量に差がある原因は、母材部と溶接金属部の化学組成に起因するものと考えられる。
- ✓ 銅-炭素鋼の複合材に対しては、銅耐食層の一部が欠損した場合に考えられる、銅と炭素鋼間のガルバニック腐食（異種金属が接触した状態で腐食する場合に、相対的にイオン化傾向が高い金属が優先的に溶解する現象）について、大阪公立大学との共同研究を実施した。専用の腐食試験カラムを用いて圧縮ベントナイト中に銅電極と炭素鋼電極のガルバニック対を埋め込んで、浸漬溶液に酸素濃度(0~100%)の異なるガスを吹き込んで電極間のガルバニック電流を測定した。ガスの酸素濃度が高いほど、大きなガルバニック電流が流れるが、アルゴンガスを吹き込んだ酸素濃度が0%の時のガルバニック電流は炭素鋼の腐食による電流を下回っており、ガルバニック腐食が停止したことを示している。このことから、処分場の閉鎖後長期に想定される溶存酸素濃度が低い環境においては、異種金属間のガルバニック腐食は起こりにくく、銅耐食層の一部が欠損していたとしても、炭素鋼が銅よりも優先的に溶ける現象は起こりにくいと考えられる。低酸素濃度環境でのガルバニック腐食は起こりにくいものの、炭素鋼の水素発生型の腐食は進行するため、銅耐食層の欠損部の腐食寿命評価方法の検討を今後も継続する。



図②-3 板巻鋼管の溶接部の構造



図②-4 溶接金属部、熱影響部と母材部の腐食特性を表す分極曲線

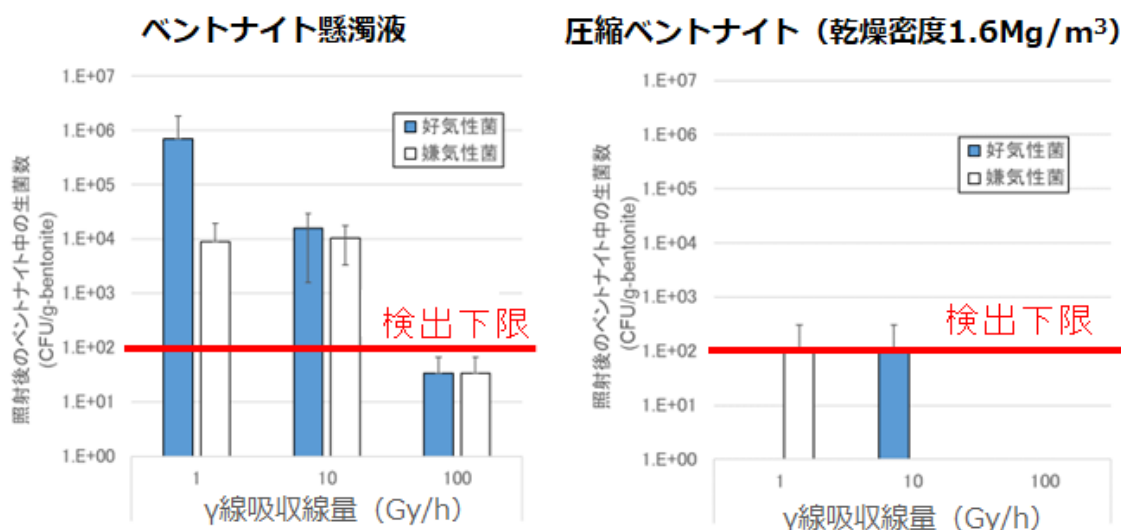
- 緩衝材や埋戻し材の主要材料であるベントナイトについては、JAEA及び電中研との共同研究などを通じて、室内実験によるデータの拡充を進め、引き続き科学技術的基盤の整備に取り組んだ。以下に主な成果を示す。
 - ガラス固化体を封入したオーバーパックを埋設後に、ガラス固化体の発熱に伴って、オーバーパック近傍の緩衝材が高温環境にさらされることが、処分場閉鎖後長期の緩衝材の性能にどのような影響を与えるかを検討するために、緩衝材として適用可能性を有すると考えられる国内産ベン

トナイト (NUMO-TR-21-02 参照) のうち 3 種類を対象として、100℃を超える条件で加熱されたベントナイト (以下、「高温履歴ベントナイト」という。) の透水性や膨潤性などの特性を加熱前のベントナイトの特性と比較した。特性の比較にあたり、沿岸部における塩水あるいは内陸部における淡水といった想定される環境での影響を検討するために、イオン交換水及び人工海水を用いて室内実験を実施した。200℃で 90 日間加熱養生した高温履歴ベントナイトの透水性は、加熱前のベントナイトと同程度の値であったが、膨潤性はいずれの場合においても低下しており、人工海水においてはより低下した。イオン交換水の結果に基づけば、膨潤性は低下するものの、高温履歴ベントナイトであっても、緩衝材の設計要件である自己シール性への影響は無視できる程度であった。人工海水においては、乾燥密度を高める、ペレット等充填材で隙間を充填することで膨潤性の低下を補うことが可能であると考えられる。今後も継続してデータを取得し、高温履歴とベントナイトの膨潤性の関係について調査する予定である。また、実験を進める過程で、高温履歴の付与において耐熱容器と圧力計を接続する配管が破損する事象の発生や、膨潤変形試験において高温履歴を付与したベントナイトの膨潤変形の定常化に当初見通しを超えて時間を要する事象の発生などの多くの教訓を、今後の実験計画へ反映する。

- ー 緩衝材に期待される機能の一つである金属製処分容器の腐食に影響を与える微生物活動の抑制に関し、ベントナイト中に存在している微生物の代謝、増殖などの活動について調査及び試験により知見を継続的に整備している。2020 年度までの研究において、上述の 3 種類の国内産ベントナイトを対象に微生物の種類と存在量、及び増殖活性について調べ、金属の腐食を促進することが報告されている硫酸塩還元菌を含む数種類の微生物がベントナイト中に存在しているが、一般的な土壌と比較して存在量は少ないことを示した。また、深度 500m の平均的な地温に相当する 30℃の条件において、微生物の活動に必要な栄養源を添加した環境では、ベントナイトを圧縮成型する際の乾燥密度が高いほど微生物の増殖が抑制されるという結果を得た。2021～2022 年度の研究では、廃棄体を埋設した後に想定される高温環境あるいは放射線環境といった地層処分環境において、ベントナイトの乾燥密度を高くすることによる微生物活動の抑制効果を調べた。
 - ✓ 乾燥密度を高めることによる抑制効果を検討するため、微生物の活動性が高くなる粉末ベントナイト (クニゲル V1[®]) を試験溶液に分散させた試験 (以下、「ベントナイト懸濁液」という。) を実施し、圧縮成形したベントナイト (以下、「圧縮ベントナイト」という。) を用いた試験結果と比較した。
 - ✓ ベントナイト懸濁液を用いた試験では、放射線 (γ線) の吸収線量率¹が高いほど、微生物の増殖が抑制されるが、最大 100 Gy/h の照射条件でも死滅にまでは至らなかった。同じ吸収線量率の条件で実施した圧縮ベントナイト (クニゲル V1[®]、乾燥密度 1.6 Mg/m³) を用いた試験に対しては、微生物が検出下限未満となった (図②-5 参照)。放射線の照射を伴わない試験では、乾燥密度が高くなるにつれて微生物の量が減少し、乾燥密度が 1.5 Mg/m³以上の条件では、乾燥密度が高い条件でも微生物の量は低いまま変わらなかった。以上の試験結果から、乾燥密度が 1.5 Mg/m³以上の条件でベントナイトを圧縮成形し、高い密度を維持することは、微生物の増殖の抑制に効果的であると考えられる。
 - ✓ そのメカニズムについて、既往の関連研究の調査結果に基づくと、冠水時にベントナイトの土粒子が膨潤することで、微生物の増殖に必要な空間となる緩衝材の粒子間隙が小さくなること、圧縮ベントナイト中の間隙水は活量が低く、微生物の代謝、増殖に必要な水分が不足すること、緩衝材中では大きな分子量の分子は拡散しにくくなるため、栄養源の供給が制限されることなどが考えられる。これらの検討成果について、金属学、微生物学、地球化学及び原子力工学の専門家で構成される委員会を設置して諮問したところ、「緩衝材の乾燥密度を高めることが微生物腐食の抑制に効果的であることは試験結果から認められる。しかし、

¹ 試料の設置位置における空気の吸収線量率として、試験条件を設定したもの。

緩衝材の膨潤が完了するまでの期間は、緩衝材とオーバーパックの界面に隙間が存在し、上述の試験とは異なる環境となるため、微生物が増殖する可能性がある。緩衝材が膨潤する前の状態や、緩衝材の施工方法に起因する乾燥密度の不均一性の微生物増殖活性への影響について、「継続して検討が必要でないか」という意見をいただいた。指摘された課題については、今後の研究計画に反映する。



図②-5 放射線照射による微生物活性の変化

- 緩衝材の長期健全性の評価のための室内試験は、現在 10 年程度の期間を対象として実施されているが、地層処分を対象とする時間スケールに比してこのような試験を実施する期間には限界がある。このため、廃棄物埋設後の放射性物質の挙動や人工バリアの腐食・変質など、地層処分システムに対し長期間において想定される現象と類似した、自然界で過去に生じた現象（以下、「ナチュラルアナログ²」という。）を調査し、できるだけ長期にわたる室内試験の結果と併せて、緩衝材の長期健全性を説明するための技術的根拠とする取組みを進めた。ナチュラルアナログの調査は、海外の実施主体や国内外の研究機関との共同研究として実施している。以下に主な成果を示す。
 - 国際共同研究プロジェクト KiNA (Kiruna Natural Analogue の略、参加機関：Nagra、スウェーデン Svensk Kärnbränslehantering AB (以下、「SKB」という。)、フランス Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (以下、「ANDRA」という。)、カナダ Nuclear Waste Management Organization (以下、「NWMO」という。)、フィンランド Posiva 及び機構)においては、スウェーデンのキルナ鉱山で見つかった鉄鉱床とベントナイト層が接触した事例を対象にベントナイトの鉄による長期的な変質現象に関する研究を実施している。キルナ鉄鉱床を構成する磁鉄鉱は炭素鋼の代表的な腐食生成物の一つでもあり、この事例は緩衝材中に埋設された炭素鋼製オーバーパックが腐食した状態のナチュラルアナログ事例と考えることができる。
 - ✓ 鉱山より入手した岩石試料を北海道大学との共同研究で分析した結果、鉄鉱床とベントナイト層は 3 億年近く接触しているにも関わらず、膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトの鉄含有量の増加はわずかであり、既報の室内試験で観察されたような膨潤性のスメクタイトが、非膨潤性のバーチェリンに変化するような鉱物学的な変質は認められなかった。
 - ✓ 室内試験の結果とナチュラルアナログの分析結果が異なる原因については、室内試験では炭素鋼の腐食を加速するために鉄粉や短く切断した針金など比表面積が高い材料が用いられていることから、腐食が急速に進んで界面の間隙水の pH が一時的にアルカリ性の条件に

² https://www.jaea.go.jp/04/tisou/yogo/yougo_na.html

なった結果、スメクタイトの溶解も促進されバーチェリン化が進行したためではないかと考えられる。キルナ鉱山の事例では、長期間磁鉄鉱が熱力学的に安定な条件にあり、ベントナイト形成後も間隙水の pH の変化がなかったためではないかと考えられる。このことは、オーバーパックの腐食で表面が腐食生成物である磁鉄鉱で覆われた状態になれば、接触している緩衝材の変質が起りにくいことを示唆している。これを検証するため、今後キルナ鉱山の岩石試料の分析に加え、室内試験との比較を継続して実施していくとともに、地球化学モデリング解析を実施して、オーバーパックの腐食が進み表面が磁鉄鉱で覆われた状態になるまでにベントナイトがどの程度変質するかについて検討を進める。

- ー 国際共同研究プロジェクト IBL (International Bentonite Longevity の略、参加機関：NWMO、フィンランド地質調査所 (Geologian tutkimuskeskus (以下、「GTK」という。)) 及び機構³) に参画し、国内のベントナイト鉱床を用いた研究を実施している。この事例は、緩衝材の設計要件のうち、断層変位に対する物理的緩衝性、緩衝材の流出特性、及び微生物の増殖抑制効果に関するナチュラルアナログとして研究対象となっている。2020年に機構が参画以降、世界的な新型コロナウイルスの流行とその対策のため、岩石試料の採取が延期されてきたが、2022年度は同感染症対策の緩和後に試料採取を再開できるよう準備を進めた。

2) サイト環境条件に応じた設計の柔軟性を確保するための設計オプションの開発・整備

- TRU 等廃棄物処分場の設計オプションの開発・整備として、TRU 等廃棄物の処分に PEM 方式⁴ (Prefabricated Engineered Barrier System Module: 以下「TRU-PEM」という。)を適用した処分概念の検討に取り組んだ。以下に、主な成果を示す。
 - ー TRU-PEM の開発のうち、PEM 容器について、海外の放射性廃棄物処分場で実用化されている処分容器を調査した。調査した既製品の容器の中から、規格に基づいた製造が可能で寸法、積み上げ時の耐荷重性、及び積載荷重の点から適用可能な容器を PEM 容器の候補とし、検討の対象とした。PEM 容器は、処分場閉鎖後の緩衝材への地下水の浸透を妨げないように有孔の容器 (有孔率 11%) を想定した。
 - ー 廃棄体パッケージ容器については、包括的技術報告書で操業時の閉じ込め性を考慮した角型の廃棄体パッケージ容器の設計例を示したが、構造健全性の更なる向上を目的として、複数のドラム缶あるいはキャニスタを収納可能な円筒型廃棄体パッケージ容器の開発にも取り組んでいる。これらの廃棄体パッケージ容器を PEM 容器内に緩衝材とともに収納し TRU-PEM として組み立てることを想定し、緩衝材の設計を実施した。緩衝材の設計要件のうち、物理的緩衝性に関して、廃棄体パッケージ容器の腐食膨張に伴う緩衝材に発生する圧密反力により同容器が破損しないことを条件として、緩衝材の乾燥密度を変数とした力学応答解析を実施し、緩衝材の仕様を検討した。緩衝材の乾燥密度を 1.7 Mg/m^3 以下とすることで、埋設後数百年程度の期間にわたり廃棄体パッケージ容器の耐食性と構造健全性の両方を確保できる見通しを得た (図②-6 参照)。これらの検討結果に基づいて、緩衝材の設計要件である低透水性、コロイドろ過能、微生物腐食の抑制などを総合的に満足する TRU-PEM の緩衝材の乾燥密度として 1.6 Mg/m^3 を設定した。
 - ー 上記緩衝材の仕様に基づく円筒型廃棄体パッケージ容器を対象に、図②-7 に示すような TRU-PEM の集積配置方法を検討した。コンクリートによる緩衝材の劣化への影響を抑えるため 1 段目に PEM 容器に埋戻し材を充填した台座を設置し、作業時の安全性、効率性や経済合理性の観点から、自走式の定置装置で 4 段の PEM を積む構造とした (図②-7 参照)。PEM 間の隙間への充填材の施工は想定していないが、処分坑道に所定数の TRU-PEM の設置が完了した後に、TRU-PEM と処分坑道壁面

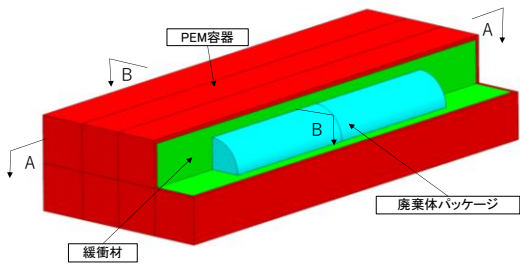
³ 2023 年度から機構の共同研究機関として北海道大学及び JAEA も参加予定

⁴ 金属製処分容器及び緩衝材で構成される人工バリアを地上施設で鋼製容器内に一体化して組み立てた人工バリアモジュールを PEM という。また、PEM を地下施設に搬送して定置する人工バリアの施工方法を PEM 方式という。

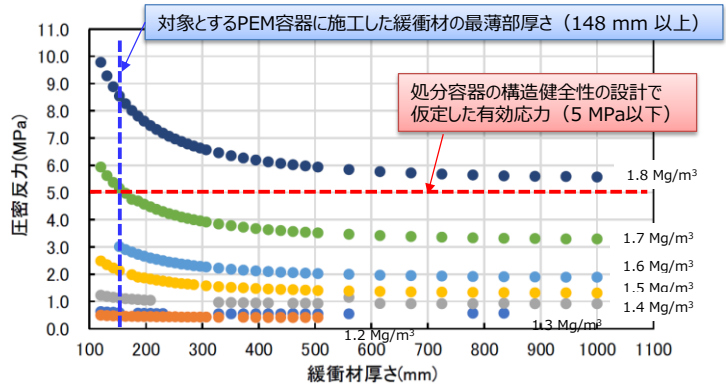
間の空間を、ベントナイトと掘削土を1:1で混合した材料で埋め戻すものとし、吹き付けベントナイト工法による埋戻し装置の概念設計も実施した。

- 処分坑道を埋め戻した後から、処分場の閉鎖を経て10,000年間の期間を対象に、緩衝材が再冠水に要する時間、及び緩衝材の温度の変化を熱-水連成解析により試算した。解析においては、処分坑道周辺の岩盤（深成岩類を想定）は均一な透水性を有するものとして、処分場の閉鎖後に設置深度に相当する水頭が作用する結果、処分坑道の壁面から吹付けコンクリート、埋戻し材を地下水が浸透し、緩衝材を含水膨潤させる過程を解析した。処分場の閉鎖後に、集積した配置の上部の緩衝材は20年程度で飽和度が100%に達するのに対し、坑道の中央に位置する緩衝材では飽和度が95%に達するのに1,100~1,400年、100%に達するまでには2,400~2,800年を要するという結果となった。緩衝材の最高温度は発熱量が高いグループ2廃棄物であっても最高45℃程度であった。今後、PEM容器の構造を詳細に検討し、PEM容器間の地下水の浸透性を考慮するなど、様々な水理条件を想定した計算を行い、TRU-PEMを適用した処分システムの設計を改良するとともに、閉鎖後の安全評価を実施する際の状態設定に反映する。

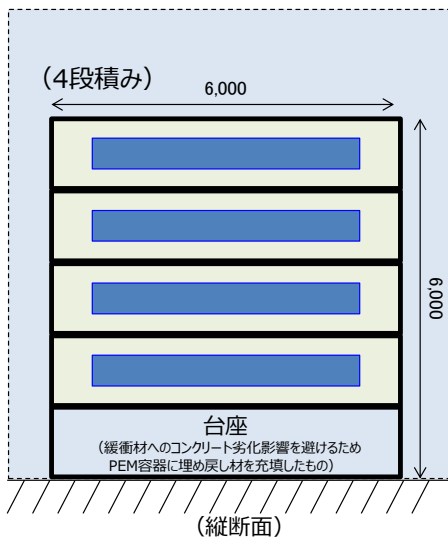
○TRU-PEM構造モデル



○力学応答解析モデル



図②-6 TRU-PEM 用緩衝材の力学応答解析結果の例

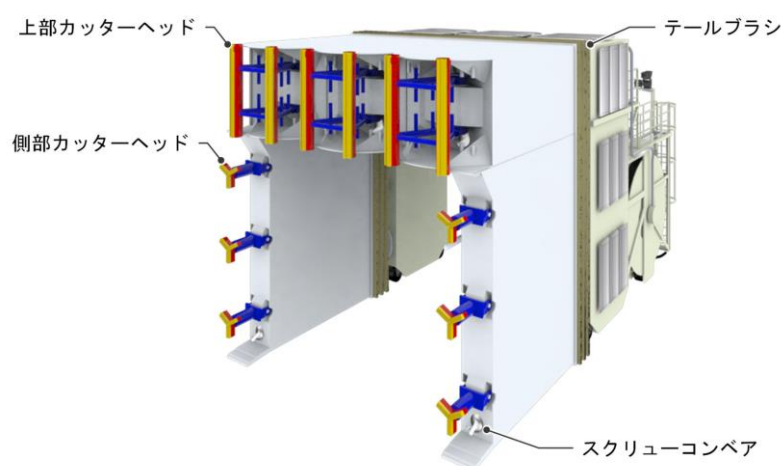


図②-7 TRU-PEM の集積方法の検討例

- TRU等廃棄物の回収について、包括的技術報告書で提示した処分概念に対しては、廃棄体パッケージを損傷することなく、廃棄体パッケージ間の隙間に充填される硬化モルタルを、150 mm という狭

隘で、かつ最大7 m程度の深さまで遠隔操作により除去する技術の検討が必要であることを示した。このため、放射線環境下での作業という点で類似性のある原子力発電所の解体作業で実績を有する除去方法を調査し、上記課題への適用性の評価を行った。また、TRU-PEMの回収方法についても検討した。以下に主な成果を示す。

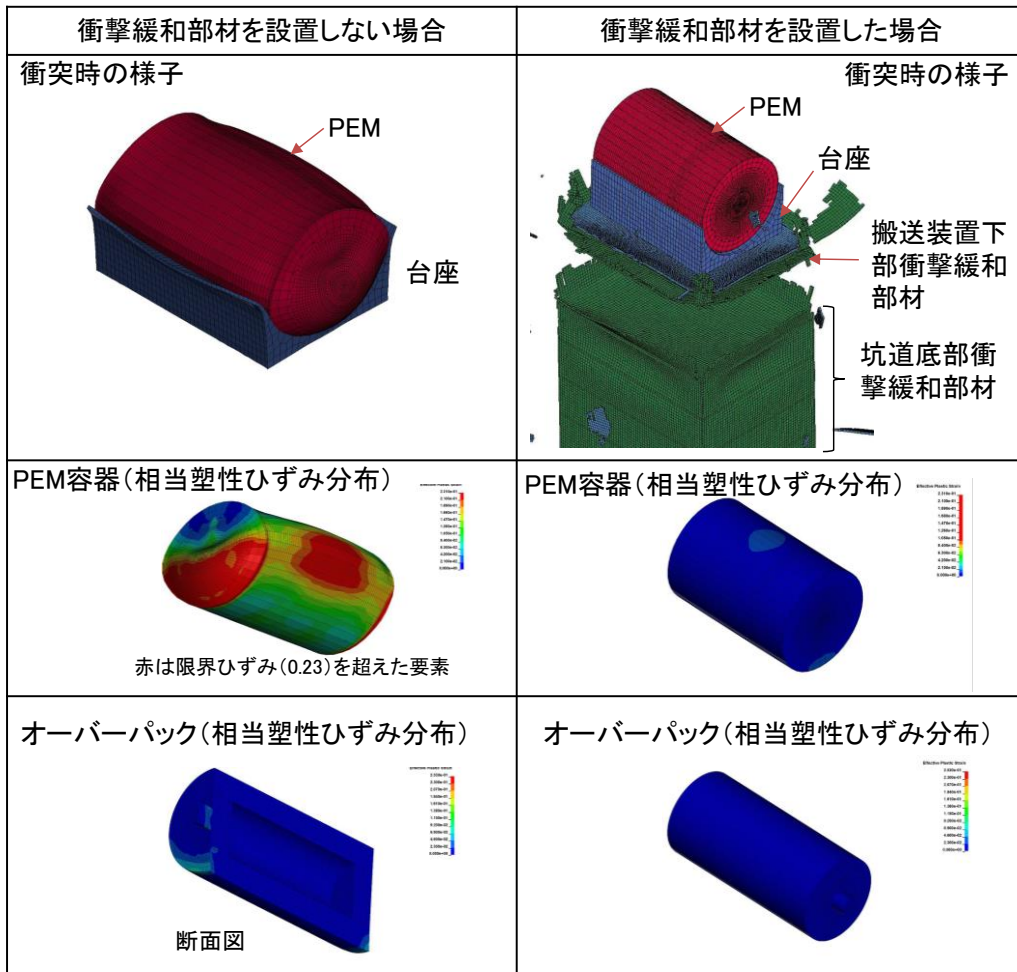
- ー 既存技術のうち、ウォータージェットは狭隘な廃棄体パッケージ間の硬化したモルタルの除去作業に適用可能と考えられるものの、廃棄体パッケージ容器を破損することなく150 mmの隙間で7 m深さに対して適用可能であるかについては、実証試験により確認する必要がある。
- ー 図②-7に示したTRU-PEMの処分概念ではTRU-PEM間にモルタルを充填しないことから、硬化モルタルの除去という課題は生じない。処分坑道を埋め戻した状態に対しては、高レベル放射性廃棄物のPEMに対して実証試験が行われている埋戻し材の除去技術（機械的掘削とウォータージェットによる流体を用いた除去技術の組み合わせ）を適用した装置概念（図②-8参照）により回収が可能である見通しを得た。



図②-8 TRU-PEM用門型埋戻し材除去装置の概念図

- 地質環境条件に応じて、処分場の建設・操業・閉鎖プロセスにおける周辺公衆及び作業従事者の安全性と設計の合理性について最適化を図るため、処分区画のレイアウト、坑道の掘削（建設）・廃棄体の定置（操業）・埋戻し（閉鎖）時の換気・排水等に関する設計技術の高度化、及びアクセス坑道の設計オプションの整備に取り組んだ。
 - ー 2021年度までに、沿岸域を対象に開発された深成岩類及び新第三紀堆積岩類の四次元地質環境モデル（【技術開発①】1.（1）参照）を用いて、沿岸域（沿岸内陸部、沿岸海底下）や内陸部で地下施設設置可能領域が広い条件、あるいは沿岸域で地下施設設置可能領域が狭い条件といった様々な条件を設定して、地下施設レイアウトの設計を試行した。この試行結果に基づいて、地形や河川の長期的時間変化による地下深部の地下水流動への影響、将来の海進・海退（隆起・侵食の効果も含む）の影響、また、検討対象となる母岩の形状や大きさに加え、地上施設との配置関係も考慮した地下施設レイアウトの検討が可能となるように、包括的技術報告書で示した設計技術の高度化を図った。2022年度は検討成果を論文に取りまとめて講演するなど成果の公表に努めた。
 - ー 包括的技術報告書では、オーバーパックに封入したガラス固化体やPEM、TRU等廃棄物の廃棄体パッケージを、車両を用いて螺旋型斜坑により搬送する方法を検討した。この方法の設計オプションとして、立坑または直線斜坑を使って廃棄体を搬送する装置とシステムの検討を2021年度より実施している。

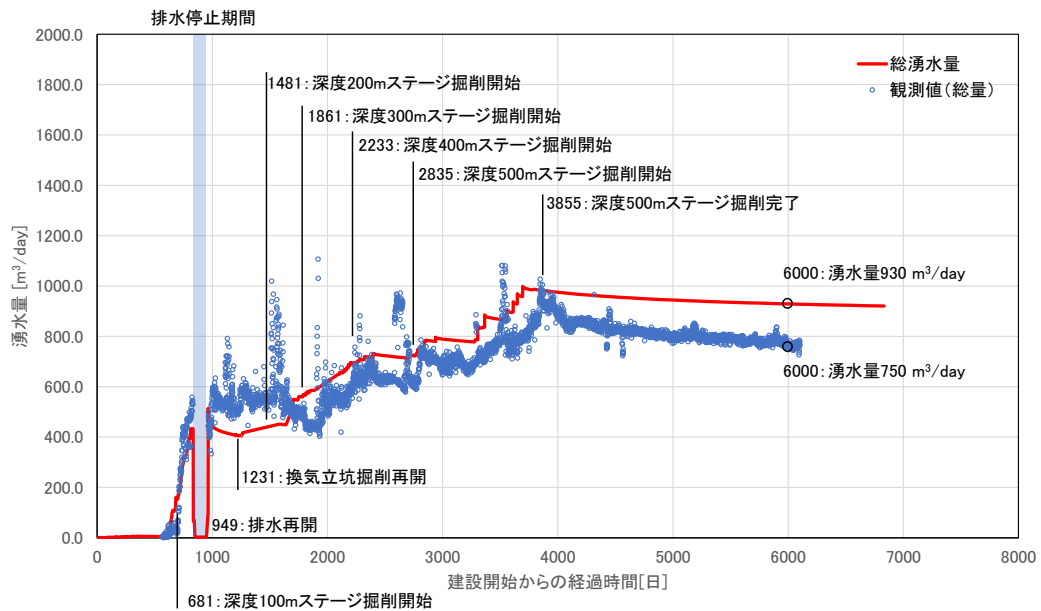
- ✓ 立坑エレベータ方式（ドイツ BGE-TEC の事例）あるいは直線斜坑をケーブルカー方式（フランス ANDRA の事例）で搬送するシステムの情報を入手し、アクセス坑道内の搬送システムの概念設計を実施した。
- ✓ 搬送装置の動力部を地上に設置することで、火災の発生源となる可燃物（搬送車両の内燃機関、電池及びタイヤ）をアクセス坑道内に持ち込む量を可能な限り低減できる方法を検討した。また、新規の概念として空気カプセル搬送方式の概念検討にも取り組んだ。
- ✓ これらの方法は、螺旋斜坑を車両で搬送する方法と比較すると、落下や逸走などの異常時の衝突衝撃により廃棄物が破損する可能性が高くなることが考えられるため、各搬送方式について、落下あるいは逸走の防止対策として多重かつ多様なブレーキの設置、こうした防止対策が機能しなかった場合の衝突衝撃力の緩和対策として、既製品を参考に鋼製の衝撃緩和部材を設置するなどの安全対策を検討したうえで、事故シナリオをイベントツリーとしてまとめ、4) 閉鎖前の安全性の評価に係る取組みに反映した。
- ✓ 安全対策として検討した衝撃緩和部材の有効性を評価するために、イベントツリー分析の中で立坑底部の床（斜坑であれば坑道端部の壁）への衝突時の速度が最も大きくなるケースを対象に衝突解析を実施し、オーバーパックあるいは廃棄体パッケージ容器の破損の可能性について評価した。質量が最も大きい高レベル放射性廃棄物 PEM を対象に、衝突速度が最も速くなる立坑での落下について解析した。衝撃緩和部材がない場合には、PEM 容器及び緩衝材は大きく変形し破損するが、内部の炭素鋼オーバーパックは一部が塑性変形するものの、限界ひずみを超える領域が内部にまで広がり貫通することはなかった（図②-9 左列参照）。衝撃緩和部材を底部に設置した場合について、これを高さ 1 m の中空の鋼製箱を 4 段積み重ねた形状でモデル化して同様の解析を実施したところ、2 段目の緩和部材までは破断するまで変形するが、PEM 容器及び緩衝材の変形は大幅に軽減され、オーバーパックには塑性ひずみが発生しないという結果となった（図②-9 右列参照）。搬送物である PEM に衝突時に作用した荷重と比較したところ、衝撃緩和部材を設置しない場合には約 36 GN であった荷重が設置した場合には 0.14 GN まで減少しており、衝撃緩和部材の有効性が確認できた。これらの成果を今後のアクセス坑道の設計に反映する予定である。



図②-9 立坑落下時(落下高さ 500 m)時の衝突解析結果(搬送物: PEM)

- 地下施設的设计オプションの有効性を定量的に比較する評価技術の整備の一環として、アクセス坑道、連絡坑道、主要坑道、及び処分坑道からの坑内湧水量と、坑内湧水が周辺の地質環境に与える影響を評価するための解析技術の検討に継続的に取り組んだ。
- 2021年度までに、市販の地下水流動解析コード HydroGeoSphere® (Aquanty社、以下、「HGS」という。)が、坑内湧水量を指標とした処分場の設計レイアウトの比較検討や、回収可能性の維持方法の比較検討に適用できることを示し、HGSを用いた坑内湧水量解析技術の信頼性を確保するため、その検証 (verification) と妥当性確認 (validation) (以下、「V&V」という。)に取り組んできた。
 - スウェーデンのエスポ地下岩盤研究施設の建設時における坑内湧水量及び周辺の観測用ボーリング孔内の地下水圧のモニタリングデータに対し、HGSによる解析技術を適用した解析結果が観測結果を概ね再現できることから、この解析技術が妥当なものであると判断した。
 - 同地下研究施設は、透水性の高い断層や割れ目を伴う深成岩類に建設されたという点で、国内で想定される検討対象母岩に類似の特性を有していたが、地表にまで岩盤が露出しており、国内で観察されるような上部に堆積岩類を伴う深成岩類とは地質構造が異なっている。このため、上述の地質構造を有する瑞浪超深地層研究所の建設時の坑内湧水量及び観測用ボーリング孔のモニタリングデータを表現することを目的とした地下水流動解析の先行研究を参考に、HGSを用いた坑内湧水解析技術の妥当性確認に取り組んだ。図②-10に示すように、解析結果は観測結果を概ね再現している。また、別の地下水流動解析コード (Dtransu-3D・EL)を用いた先行研究の解析結果ともよく一致している。

- この他、HGS の開発元が公表している検証結果の分析、HGS 以外の解析コードを用いた水平坑道に対する湧水量評価によるコード間の比較も過年度に実施しており、上述の地下研究施設を用いた妥当性確認も含めて、HGS を用いた解析技術の V&V による技術的信頼性を示す根拠を整備した。HGS を用いた坑内湧水量の解析評価を機構内部で実施可能となるよう、HGS の導入及び計算環境を整備し、2017 年度から取り組んできた技術開発を完了した。V&V が達成されていることの判断基準については、規制基準などの議論の動向も含め、機構全体として引き続き検討を行う。



図②-10 HGS を用いて算出した地下研究施設からの坑内湧水量の解析値と観測値の比較

- 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、遠隔操作化・自動化技術について、国内外の最新技術に係る情報収集を継続するとともに、経済協力開発機構／原子力機関 (OECD/NEA) の EGRRS (Expert Group on the Application of Robotics and Remote Systems in the Nuclear Back-End) に参画し、遠隔操作化・自動化技術の地層処分事業への適用におけるベンチマーキング、規制対応、コスト便益分析に対する課題を整理した。

3) 人工バリアの製作・施工に関する工学的成立性の確認を目的とした段階的な実証試験

- PEM 方式のより効率的な製作技術の実用化に向け、小規模での要素技術の実証試験として高圧プレス機 (2,000 t) を用いた緩衝材ブロックの静的締固め試験 (図②-11 参照)、ロボットアームを用いた PEM 容器の蓋接合試験 (図②-12 参照) を実施した。以下に主な成果を示す。
 - 静的締固め試験では、製作過程で PEM 容器と緩衝材の間に隙間が生じないように、含水調整したベントナイトを容器内でプレスするという方法を適用した。試験は 3 種類の国内産ベントナイトを対象として実施し、所定密度の緩衝材製作に必要なプレス力と緩衝材ブロックの径・厚さ比との関係をベントナイトの種類に応じて求めるとともに、試験結果から①3 種類の国内産ベントナイトに対して必要となる成形圧力、②混練機械の仕様 (容量など) といった、実規模スケールの緩衝材製作を実施する際の装置の要件を整理した。
 - PEM 容器の蓋接合試験では、遠隔操作による接合が可能であることを確認し、品質管理において重要となる締付けトルク値や接合に要する時間などを管理項目として整理した。
 - 以上の実証試験を通じて明らかになった課題や品質管理上重要な知見は、今後段階的にスケールアップする実証試験の計画立案に反映する。



図②-11 緩衝材プレス試験状況



図②-12 PEM 蓋接合試験状況

- オーバーパックについては、炭素鋼オーバーパックと銅-炭素鋼複合材のオーバーパックとして銅コーティングオーバーパックの製作技術の開発に継続して取り組んだ（表②-1 参照）。以下に主な成果を示す。

表②-1 オーバーパックの製作に係る技術開発の整理表

	母材 厚さ	胴体部	溶接 深さ	蓋接合部
	炭素鋼	NUMO-SCの 仕様	・鍛鋼 ・鋳鋼	NUMO-SCの 仕様
合理化による 仕様		・板巻鋼管 ・シームレスパイプ	合理化による 仕様	・電子ビーム溶接 ・レーザービーム溶接 ・ねじ接合※
銅-炭素鋼複合材 (銅部)	・電気メッキ ・クラッド鋼	【NWMO方式】	・冷間溶射 ・FSW (Friction Stir Welding)	【NWMO方式】

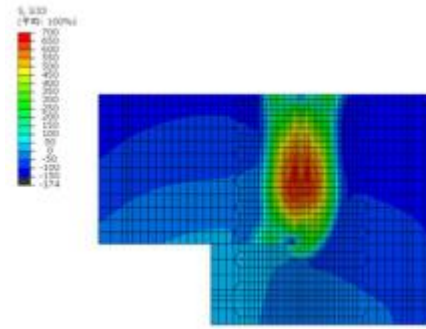
※ 銅-炭素鋼複合材の炭素鋼部に適用

注) 2022年度技術開発実施項目を下線で示す。それ以外の項目は、過年度までに研究機関等で技術開発が実施された項目を示す。

- 炭素鋼オーバーパックについては、溶接部の残留応力の低減を目的として蓋接合部への電子ビーム溶接技術の適用性について検討した（図②-13 参照）。残留応力が最も低い溶接条件を見出すため、入熱量、溶接速度、溶接深さをパラメータとする7条件を設定して試験を実施するとともに、溶接部の断面形状と溶接時に測定した温度履歴をもとに、溶接部への入熱領域及び入熱量を模擬した残留応力解析を実施した（図②-14 参照）。その結果、残留応力は入熱量、溶接速度にはあまり敏感ではないが、溶接深さに対しては、必要最小深さとする場合に比して母材全厚とした場合に表面付近の残留応力が最大 50%低下した。



図②-13 電子ビーム溶接試験装置



図②-14 残留応力分布図の例（溶接部近傍）

ー 銅コーティングオーバーパックについては、銅コーティング技術の適用性の検討と蓋接合技術の開発に取り組んだ。以下に主な成果を示す。

- ✓ NWMO との共同研究で進めている銅コーティング技術の適用性の検討では、機構が適用を検討している板巻鋼管を対象に、これまでに NWMO が開発した母材部の電気メッキ技術、炭素鋼の蓋溶接技術及び蓋溶接部の冷間溶射技術を適用した製作試験を実施した。その結果、電気メッキ技術については NWMO で用いられているものと同様な施工条件が適用可能であるが、蓋溶接技術と冷間溶射技術については、板巻鋼管の特性に応じた施工条件の改良が必要であることがわかった。なお、本試験の実施においては、機構職員が約 6 ヶ月間現地に出張し、日本への技術の展開を目的として、現地での試験立会と NWMO 専門家との協働作業を通じた銅コーティング技術とその品質管理手法を修得した（図②-15、図②-16 参照）。



図②-15 試験立会状況（電気メッキ試験）

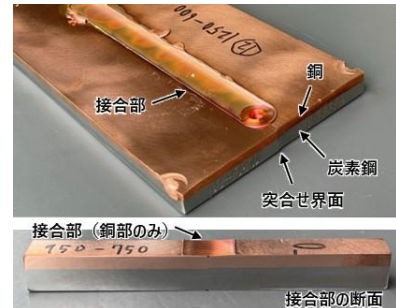


図②-16 試験立会状況（冷間溶射試験）

- ・ NWMO との共同研究で進めている銅コーティングオーバーパック製造技術に関連して、蓋接合部の代替技術として、内側炭素鋼部のねじ込み接合と、外側銅電気メッキ層の摩擦攪拌接合（FSW: Friction Stir Welding）を組み合わせた技術について、機構独自に適用性の確認を継続して進めた。
 1. ねじ込み接合試験では、接合部の構造健全性、ねじの緩みにくさ、ねじ締結容易性等を考慮したねじ込み接合部の構造を設計し、発電用原子力設備規格を準用した応力解析により、ねじ込み接合部の構造健全性が確保されることを確認した。試験体によるねじ込み接合試験を通じて（図②-17 参照）、噛み込みが生じず、容易に緩まないねじ込み接合部を製作し、銅コーティング部の摩擦攪拌接合が可能となる隙間のない接合部であることを確認した。
 2. FSW 試験については、大阪大学と秋田大学との共同研究において、2022 年度は NWMO の電気メッキ技術を適用して作製した電気メッキ鋼板を用いた試験を実施し（図②-18 参照）、電気メッキ層に接合欠陥が生じず、強度及び耐食性が母材と同等となる接合部の形成が可能であることを確認した。



図②-17 ねじ込み接合試験（左：接合前、右：接合後）



図②-18 FSW 試験

4) 閉鎖前の安全性の評価

- 処分場の建設・操業期間中に発生する可能性のある地震、津波といった自然現象等に起因する火災、水没、電源喪失等の異常事象について、国内外の原子力施設や関連する施設等での事例を分析し、事故の未然防止、事故対応及び復旧、安全評価手法などについての技術的知見の拡充に取り組んだ。以下に主な成果を示す。
 - － 2021年度までに原子力施設確認に対する指針類を参考に、処分場の建設・操業において想定することが必要と考えられる地震、津波といった自然現象を抽出し、地上施設内で発生する可能性がある廃棄物の落下、施設火災などの異常事象の発生（事象の重畳も含む）とどのような関係にあるかについてイベントツリー手法を用いて分析した。2022年度は、図②-9に示したようなアクセス坑道（立坑）内で廃棄物を搬送中の落下事象の発生可能性について知見を得るために、国内のエレベータの事故事例（原因、安全装置作動の有無等）について、公開資料の調査を実施した。
 - － また、What-if study⁵として、放射性物質が漏えいした場合の影響を検討するため、上述のイベントツリーの中から、①ガラス固化体が破損するケース、及び②地上施設に保管中にアスファルト固化体に火災が延焼するケースを取り上げ、放射性物質の大気拡散を考慮した評価を機構内でも実施できるよう解析技術を整備した。

【自己評価・今後の取り組み】

（自己評価）

- 我が国の多様な地質環境条件を考慮した様々な実験や検討を通じて、人工バリアの設計において科学技術的基盤となるデータの蓄積と知見の拡充を進めることができた。例えば、金属製処分容器の腐食に影響を与える緩衝材の候補材料であるベントナイト中の微生物の活動に関して、地層処分場における放射線環境下や高温環境下を模擬した室内実験において、ベントナイト懸濁液中では微生物の存在が確認されたことから、こうした条件においても、緩衝材の乾燥密度を高めた圧縮ベントナイトを用いることによって微生物の増殖を抑制することが適切と考えられるという結果や、天然の場で数億年にわたり磁鉄鉱と接触していた近傍のベントナイトにおいて、鉄含有量の増加はわずかであり、鉱物学的な変質は観察されなかったというナチュラルアナログ事例などは、人工バリアの設計で考慮すべき長期的な性能に対する技術的信頼性の向上に貢献する成果を得たものであるといえる。
- サイト環境条件に応じた設計の柔軟性を確保するという観点から、TRU-PEMを対象とした緩衝材の仕様設定や回収技術の検討、地下施設レイアウトの試行やアクセス坑道における搬送設備の検討など、設計オプションの整備を進め、これらオプションの技術的成立性を確保できる見通しを得ることができた。これらの成果は、サイト環境条件に応じた設計の最適化及び詳細化に向けた準備に資するものである。
- 人工バリアの製作・施工性については、PEM方式を対象とした緩衝材ブロックの静的締固め試験、PEM容器の蓋接合試験、オーバーパックの接合部を対象とした電子ビーム溶接試験、ねじ接合試験及び銅

⁵ https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/pdf/012_s04_00.pdf

コーティング層の摩擦攪拌接合試験など、人工バリアの設計オプションに対する製作・施工に係る要素技術の実証試験を通じて、工学的成立性に関する技術的信頼性を高めることができた。これらの成果を、安全審査に向けて段階的に規模を拡大して実施する実証試験に反映し、それらを通じて工学的成立性をさらに確かなものとしていく。

- ・ 処分場閉鎖前の安全性に関する取組みでは、包括技術報告書で課題としていた地震などの自然現象に起因して処分場で発生する異常事象の抽出を進めるとともに、仮に廃棄体の閉じ込め機能が喪失するケースも想定し、これを自ら解析評価するための技術インフラの整備を進めた。これらの成果は、今後の処分場の設計や安全対策の検討に反映し、閉鎖前の処分場の安全性の向上に資する。

(今後の取組み)

- ・ これまでに蓄積された人工バリアや地上・地下施設の設計に必要な試験データと知見をさらに拡充し、処分場を構成する要素の性能に関わる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って、処分場に要求される機能を設計により確保する技術の信頼性を向上させる取組みを継続する。また、蓄積したデータや情報、知識について、品質を確保して体系的に管理するためのデータベース開発に取り組む。
- ・ サイトの地質環境などに適した処分場の設計に向け、包括的技術報告書に示した設計の方法論に基づく設計体系を継続して整備する。特に、対象となるサイトが特定されていない段階やサイト選定の初期の段階において、沿岸海底下を含む我が国の多様な地質環境と地質環境情報に対応できるように、設計の柔軟性及び材料調達の高多様性を確保すべく、人工バリア代替材料を含む設計オプションを整備する取組みを継続する。
- ・ 処分場の建設・操業・閉鎖に係る技術、廃棄体の回収技術について、これまでの研究開発によって実現性が高いと判断される技術を中心に、引き続き個別要素技術の実証的研究を進め、工学的成立性を確認していく。国内外の地下研究施設やモックアップ施設を活用して、規模を拡大しながら段階的に実証的な試験を実施することで、実際の地質環境条件や作業環境における技術の実現性や信頼性向上のための課題を明らかにする。また、これらの実証的試験を通じて、個別要素技術の開発成果を統合したシステムとしての成立性に関する検討や、品質管理手法の構築を進めるとともに、精密調査段階で考えられている地下調査施設での実証試験計画の立案に向けた準備にも着手する。
- ・ 処分場閉鎖前の安全性に対する信頼性の向上の観点から、包括的技術報告書で検討した処分場の設計及び安全対策の検討成果を出発点とし、地震や津波といった外部事象を考慮して安全評価シナリオの網羅性を高めるとともに、操業安全対策の効果を定量的に把握するための評価技術の高度化を進める。また、確率論的安全評価手法の適用性に関する検討や、仮に事故が生じた場合の対応に関する検討と具体的に適用可能な技術の開発に引き続き取り組む。

3. 処分場の設計検討

【業務実施結果】

- ・ NEA-METI URL Workshop(11/1-3、幌延)において、地下研究施設を用いた最適化に関する研究開発ニーズについて発表した。
- ・ 掘削土量の最小化に向けて、1つの処分孔にガラス固化体を2体埋設することを想定した熱解析や核種移行解析等を事例的に実施し、最適化の考え方を資料としてまとめた。

【自己評価・今後の取組み】

(自己評価)

- ・ 処分場の設計に関する最適化にあたって考慮すべき様々な指標を検討するとともに、これらをバランスさせながら包括的に最適化を行う考え方を整理し、その成果の一部を公表するとともに資料としてまとめた。

(今後の取組み)

- ・ これまでに整理した最適化の考え方にに基づき、様々な要件や地質環境に応じて、安全性や環境影響などの多面的な観点から設計を最適化する手法の開発に引き続き取り組む。

処分場の設計と工学：学会等での講演リスト（22件）

発表先	タイトル	著者 (NUMO 職員の所属名は省略)
Clay Conference 2022	Applicability of different bentonites as buffer material for geological disposal in Japan	Yoichi Yamamoto, Takahiro Goto, Shingo Yokoyama, Yasutaka Watanabe ¹ , Misato Shimbashi ¹ , Masakazu Chijimatsu ¹ , Ayumu Ito ² , Shinya Tachibana ³ 1) 電中研 2) 安藤ハザマ 3) 神戸大学
	Study of critical density to prohibit microbially influenced corrosion in various domestic bentonites in Japan	Goto Takahiro, Satoru Suzuki, Yoshito Kitagawa, Toru Nagaoka ¹ , Shinichi Hirano ¹ , Tokihiro Kurita ¹ , Shingo Yokoyama ¹ , Yasutaka Watanabe ¹ , Misato Shimbashi ¹ 1) 電中研
	Analysis of re-saturation process of PEM for high level radioactive waste disposal	Satoru Suzuki, Takahiro Goto, Shin Sato ¹ , Motoki Moriiwa ¹ , Shuichi Yamamoto ¹ , Tomoyuki Shimura ¹ 1) 大林組
	Swelling characteristics and permeability of bentonites of various effective montmorillonite dry densities and exchangeable cation compositions	Yasutaka Watanabe ¹ , Shingo Yokoyama ¹ , Misato Shimbashi ¹ , Yoichi Yamamoto, Takahiro Goto 1) 電中研
	Numerical simulation of swelling pressure test on different types of unsaturated bentonite	Shinji Ito ¹ , Shinya Tachibana ¹ , Atsushi Iizuka ¹ , Yasutaka Watanabe ² , Yoichi Yamamoto 1) 神戸大学 2) 電中研
	Measurement of water potential and thermal conductivity of various bentonite mixed soils	Ayumu Ito ¹ , Masakazu Chijimatsu ² , Yoichi Yamamoto, Takahiro Goto, Yasutaka Watanabe 1) 安藤ハザマ 2) 電中研
	Diffusion processes of anions in compacted bentonite evaluated from the activation energy	Shinichiro Uematsu ¹ , Takahiro Goto, Satoru Suzuki, Toru Nagaoka ² , Nako Watanabe ¹ , Tamotsu Kozaki ¹ 1) 北海道大学 2) 電中研
8th International workshop on long-term prediction of corrosion in nuclear waste systems (LTC2022)	Study of microbial viability in various bentonite materials in Japan and impact on the corrosion assessment	Satoru Suzuki, Toru Nagaoka ¹ , Shin-ichi Hirano ¹ , Takahiro Goto, Yusuke Ogawa, Yoichi Yamamoto, Yoshito Kitagawa 1) 電中研
	Electrochemical behaviour of copper-coating materials in compacted bentonite for geological disposal of HLW in Japan	Shuhei Nagata, Yusuke Ogawa, Satoru Suzuki, Hiroyuki Inoue ¹ , Peter G. Keech ² 1) 大阪公立大学 2) NWMO
	Corrosion studies on a cast steel overpack for high-level radioactive waste disposal in Japan	Yusuke Ogawa, Satoru Suzuki, Naoki Taniguchi ¹ , Ayami Kitayama ¹ Manabu Kawasaki ² , Hiroyuki Suzuki ³ , Rieko Takahashi ³ 1) JAEA 2) 検査開発 (株) 3) (株) NESI

発表先	タイトル	著者 (NUMO 職員の所属名は省略)
令和 4 年度土木学会全国大会	飽和させた締固めベントナイトを用いた膨潤圧測定に関する留意点	渡邊保貴 ¹ 、吉川絵麻 ¹ 、横山信吾 ¹ 、新橋美里 ¹ 、山本陽一、後藤考裕 1) 電中研
	高液固比条件において 200°C で加熱養生した Na 型ベントナイトの鉱物学的変化	吉川絵麻 ¹ 、渡邊保貴 ¹ 、横山信吾 ¹ 、新橋美里 ¹ 、山本陽一、後藤考裕 1) 電中研
第 69 回材料と環境討論会	地層処分における金属製処分容器の長期腐食寿命評価の取り組みについて	鈴木覚、長田柊平、小川裕輔、北川義人、西方篤 ¹ 1) 東京工業大学
	グリムゼル地下研究施設の原位置における腐食試験の紹介	長田柊平、小川裕輔、鈴木覚
鉱物新活用研究会 2022 シンポジウム	地層処分におけるベントナイトオプションの検討～検討の概要～	山本陽一
日本原子力産業協会 輸送・貯蔵専門調査会 第 114 回輸送・貯蔵専門調査会定例会合	NUMO の取組み – 処分場の設計と工学技術の開発を中心に –	北川義人
第 65 回粘土科学討論会	地層処分におけるベントナイト緩衝材の流出挙動に関する評価方法の開発	根本脩平、鈴木覚、後藤考裕、尾上博則
	キルナ鉱山におけるベントナイトのナチュラルアナログ国際共同研究について	Satoru Suzuki, Takahiro Goto, Tsutomu Sato ¹ , Ryosuke Kikuchi ¹ , Tatusya Fujimura ¹ , Tsubasa Ohtake ¹ , Patrik Sellin ² , Daniel Svensson ² , H. Albert Gilg ³ , Ulf B. Andersson ⁴ , Raphael Schneeberger ⁵ , Olivier X ⁵ . Leupin, Simon Norris ⁶ , W. Russell Alexander ⁷ , Nicolas Michau ⁸ 1) 北海道大学 2) SKB 3) TU Munich 4) LKAB 5) Nagra 6) NWS 7) Bedrock Geosciences 8) ANDRA
	ベントナイトの長期圧密挙動に関する検討	後藤考裕、山本陽一、高山裕介 ¹ 1) JAEA
関西原子力懇談会 放射性廃棄物処分に関する技術動向調査委員会	地層処分における処分場設計の基本的な考え方と技術開発に関する取組みの現状等	山本陽一、小川裕輔
2022 International High Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM2022 conference)	Case studies of the repository layout design for the virtual SDMs	鈴木覚、市村哲大、北川義人
	Development of the repository layout options for the HLW disposal in Japan	市村哲大、鈴木覚、山本陽一

【技術開発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】

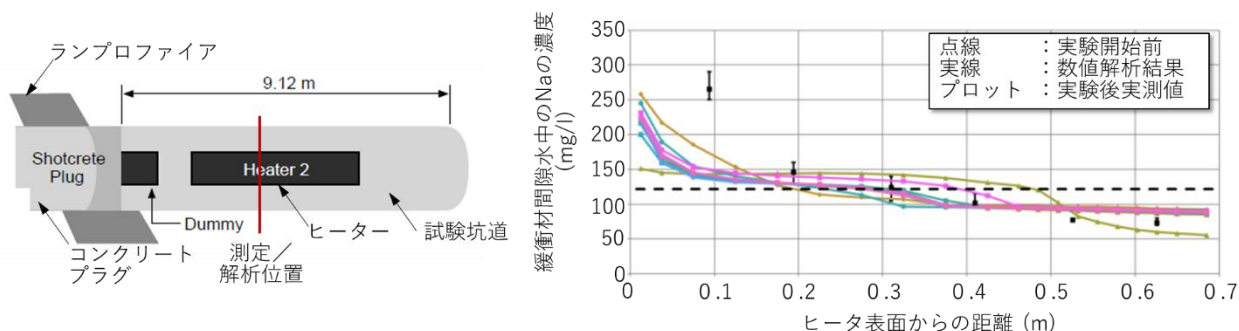
1) ガラス固化体からの核種溶出モデルの高度化

- ・ガラスの溶解現象について、大学との共同研究を推進し、ガラスに接触する溶液中の Si 濃度を一定に制御して複数の温度条件下で溶解挙動を調べるための室内試験を実施し、溶液中の Si 濃度変化の影響を排除した溶解速度の温度依存性（温度が高いほど溶解速度が増加する）データを取得した。このようなデータは、今後、ガラス溶解速度モデルの改良に資する。また、変質層によるガラスの溶解挙動への影響に関する根拠情報の整備を目的として、分子動力学シミュレーションにより変質層の分子構造を

推定し、空隙中の物質移行特性を評価する手法の開発を進めた。加えて、JAEA との共同研究では、試験期間が 10 年を超えるガラスの長期溶解試験を継続した。

2) ニアフィールド構成要素に関する現象解析モデルの高度化

- ニアフィールドの構成要素を対象とした変質挙動（鉄 - ベントナイト相互作用、セメント - ベントナイト相互作用）に関する現象の理解を深めるために、JAEA との共同研究による長期の室内試験（試験期間：10 年以上）を継続した。また、これらの変質挙動を現象に即して取り扱う現象解析モデルで考慮する必要があると考えられるプロセスについて、個別プロセスごとにそのモデル上の取扱いに関する妥当性を確認するための取組みを進めた。具体的には、セメント - ベントナイト相互作用については、変質鉱物の生成プロセスに関する室内試験データとモデルによる解析結果を比較し、試験方法と解析モデルの両面から改良を行いながら検討を進めた。この結果、解析モデルにおける変質鉱物の種類が試験と一致した一方、変質鉱物の生成量は解析モデルと試験で一致しなかった。変質鉱物の生成に関する複数のモデルパラメータを不確実性の範囲で個々に変動させて解析を実施したものの試験結果を再現できず、複数のモデルパラメータを同時に変動させる感度解析の必要性が課題として特定された。この検討成果を日本地球化学会の 2022 年度年会で報告した。鉄 - ベントナイト相互作用については、ベントナイトの化学反応プロセスの妥当性確認に用いるために、変質鉱物の生成に関するデータ取得を行った。また、【技術開発②】 1. (2) で述べた、スウェーデンのキルナ鉱山における国際共同プロジェクトと連携して検討を行っており、鉄鉱床とベントナイト鉱床は 3 億年近く接触しているにも関わらずベントナイトの変質が接触面近傍に限定的であり、ベントナイトの鉄による変質が接触面近傍に限定されるという現象解析モデルによる解析結果の傍証を得た。
- GTS において、ベントナイト緩衝材の温度を最高 200°C とする条件で実施する原位置試験に基づき熱-水-応力-化学（以下、「THMC」という。）連成挙動に関する評価研究を行う国際共同プロジェクト HotBENT（High Temperature Effects on Bentonite Buffers）に引き続き参加し、処分場の閉鎖後から再冠水に至るまでの過渡的な期間を対象としたニアフィールドの THMC 状態変遷を取り扱うための解析技術の高度化に取り組んだ。2022 年度は、原位置での加熱実験におけるモニタリングを継続し、原位置の温度やベントナイト中の水分量等に関するデータの取得を行った。また、HotBENT の実験結果を用いて、最高温度が 100°C を超える THMC 連成現象の解析モデルの妥当性に関する検討を行う準備として、2021 年度に 100°C 以下の条件での緩衝材の TH（熱-水）連成挙動評価への適用に対する妥当性を確認した解析モデルについて、100°C 以下の条件における THC（熱-水-化学）連成現象、及び 200°C 以下の条件における TH（熱-水）連成現象への適用に対する妥当性の評価を行った。また、2021 年度に獲得した成果は米国原子力学会主催の国際会議（International High-Level Radioactive Waste Management、2022 年 11 月開催）において発表した。



図③-1 THC（熱-水-化学）連成現象に対する原位置試験結果と数値解析結果の比較の例
左：FEBEX 原位置試験の概念図 右：THC 連成解析結果と試験結果の比較

3) コロイドの影響評価手法の高度化

- 核種移行挙動に影響を及ぼす可能性のあるベントナイトコロイドのふるまいに関する理解を深めるために、JAEA との共同研究において、室内でのベントナイトコロイドの生成試験を継続し、Na と Ca の濃度を指標として概略の生成条件を把握することができた。
- 母岩割れ目におけるコロイドによる核種の移行モデルの構築を目的とした、岩石 - ベントナイトコロイド - 元素 (Sr) の三元系におけるコロイド移行挙動のデータ取得に向けて、岩石 - ベントナイトコロイドおよび岩石 - 元素 (Cs, Sr) の 2 種類の二元系における移行実験を開始し、コロイド及び元素の

移行データを取得した。

- ・GTSにおいて、ベントナイトコロイドの生成・移行挙動評価に関する国際共同プロジェクトCFM(Colloid Formation and Migration)に引き続き参加し、原位置試験によるベントナイトコロイドの移行に関するデータを取得した。

4) 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

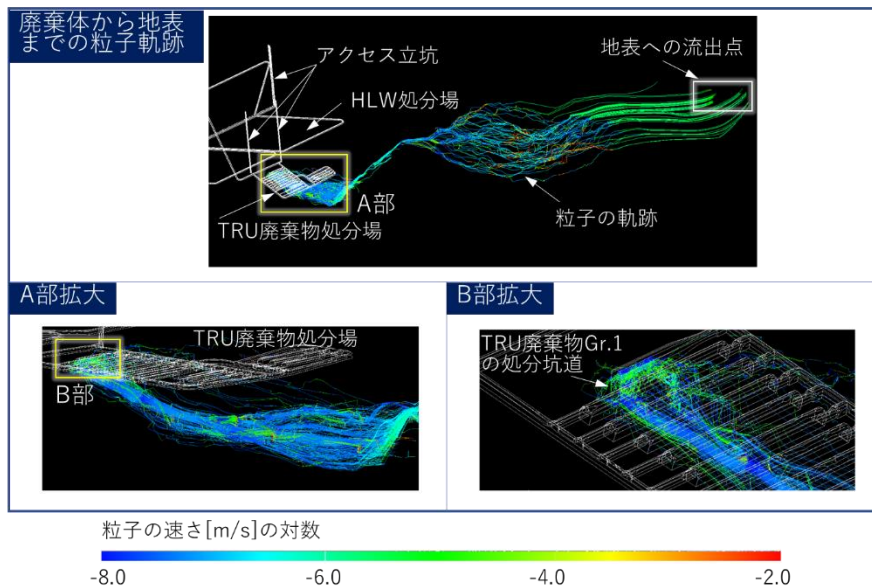
- ・現象の理解に基づき、地質環境条件や設計仕様を反映して、核種移行解析モデルをより現実的なものとして高度化するための技術開発を継続した。その一環として、GTSにおけるセメント系材料中の核種移行挙動評価に関する国際共同プロジェクトCIM(Carbon-14 and Iodine-129 Migration in Cement)に参加し、原位置における放射性同位体を用いたトレーサー循環試験を開始してトレーサーの移行挙動に関するデータの取得を進めた。
- ・TRU等廃棄物処分場における廃棄体近傍のセメント系材料の状態変遷(溶脱やセメント水和物の変質)を考慮した解析モデルの高度化に向け、2021年度までに取得したセメント系材料試料の溶脱試験で得られたデータと既往の反応輸送解析モデルの比較を行った。これにより得られた解析モデルの高度化に関する課題解決に向け、室内におけるセメント硬化体の溶脱実験の実施計画を策定した。また、セメント硬化体の主成分であるケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)が温度の影響により変質したトバモライト(結晶性C-S-Hの一種)へのSrの収着に関するデータ取得の実施計画を策定した。なお、IとCsの収着に関するデータ取得を2021年度までに完了した。

5) 水みちの微細透水構造等を反映した核種移行解析モデルの高度化

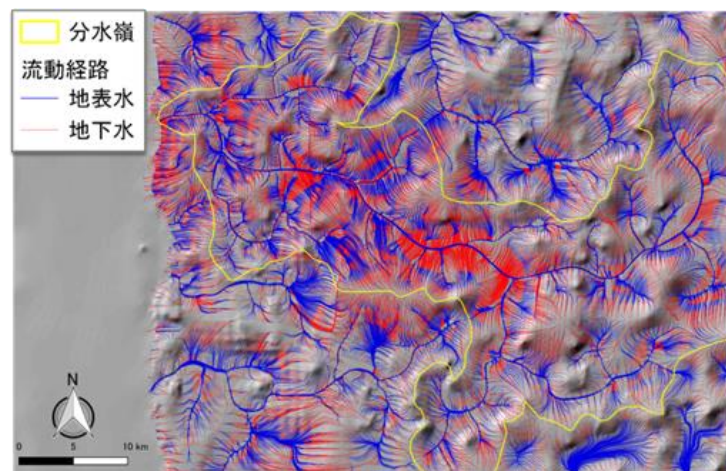
- ・母岩中の核種の拡散・収着に関する現象理解の深化と既往の解析モデルの妥当性の確認に資することを目的として、GTSにおける核種の母岩への拡散挙動評価に関する国際共同プロジェクトLTD(Long-Term Diffusion)に参加し、原位置において天然の割れ目中において母岩気質部(マトリクス)への拡散が生起する系においてトレーサー試験を実施し、試験データを取得した。
- ・地下水流動解析モデルの妥当性確認のための方法論の構築を目的として、瑞浪超深地層研究所で取得された公開データを用いた割れ目系岩盤のモデル化・解析を実施した。モデル化・解析では、百m規模の空間スケールを対象に、透水性の空間的不均質性の概念化やモデル化条件が異なる複数の水理地質構造モデルを構築した。構築したモデルを用いて地下水流動解析及び移流分散解析を実施し、湧水量、地下水の水圧及び塩化物イオン濃度といった観測データの再現性確認を通じて、概念化やモデル化条件の違いが及ぼす影響の程度を例示した。また、解析長期安全性の評価指標となる地下水の移行特性については、その妥当性を直接確認するための実測値が取得できないため、上記で実施した地下水流動解析及び移流分散解析の結果(湧水量、地下水の水圧及び塩化物イオン濃度)が地下水の移行特性の妥当性を確認するための代替指標となり得ることの確認を目的として、構築したモデルを用いて粒子追跡線解析を実施した。その結果、ばらつきはあるものの坑道の区間湧水量と粒子の移行時間には、湧水量が多い区間ほど移行時間が小さいという相関性が認められた。このことから、湧水量の再現性が高い区間における地下水の移行時間の推定結果は、その信頼性が高いと考えられ、坑道の区間湧水量は地下水の移行時間を推定するためのモデルの妥当性確認に有効な代替指標となることが示唆された。

6) 施設設計等を反映した核種移行解析モデルの高度化

- ・処分場の設計仕様や母岩の不均質性を考慮し、ニアフィールドにおける現実的な核種移行評価のために開発して包括的技術報告書で適用した三次元水理・物質移行解析モデルPartridgeについては、2021年度までの改良によって広域スケール(数十km×数十km程度)に適用可能となっており、これを用いて、地表を含む広域スケール(数十km×数十km程度)に対して地質環境の時間変遷を考慮した物質移行解析を行い、その結果に基づいて単純化した核種移行解析モデルを構築した。開発においては、【技術開発①】1.(1)で構築した四次元地質環境モデルに対し、【技術開発②】1.(2)で設計した処分場を対象として、地質環境やパネル配置等の設計仕様に関する情報を踏まえて核種移行解析を行い、その結果の分析を、地質環境のモデル化—処分場設計・閉鎖後長期の安全評価の担当者と連携を取りつつ進めた。
- ・四次元地質環境モデルを対象とした核種移行解析と統合的な生活圏評価を可能とするために、生活圏評価手法の高度化に取り組んだ。具体的には、現実的な地形のモデル(【技術開発①】1.(1)で開発した四次元地質環境モデルの地表のモデルを使用)の地下浅層から地表の環境に対して、土地利用の設定と水循環解析を行い、核種移行プロセスと被ばくプロセスを反映した生活圏評価モデルの作成手法を構築した。



図③-2 地表を含む広域スケールに対する地質環境の時間変遷を考慮した物質移行解析結果の例



図③-3 現実的な地表モデルに対する地下浅層から地表の水循環解析結果の例(流線軌跡図)

7) 廃棄体の放射能インベントリ推定手法の高度化

- 原子炉の形式、使用済み燃料の燃焼履歴等の情報を反映した廃棄体の放射能インベントリ分布推定のための方法論の構築を開始し、ガラス固化体と TRU 等廃棄物グループ 2（ハル等圧縮体）を対象として放射能インベントリの分布の推定手法を構築した。

8) 処分場の状態に対応した核種移行パラメータの設定技術の整備

- 安全評価上重要かつ処分場の状態（温度状態、地下水中の炭酸濃度やセメント系材料に起因する高アルカリ環境など）に影響を受けやすい核種の移行パラメータについて、JAEA との共同研究により試験データを拡充した。これらの取組みについて、日本地球惑星科学連合 2022 年大会（2022 年 5 月開催）の招待講演にて発表した。

9) 生活圏評価のためのサイト環境に応じた核種移行パラメータの設定技術の整備

- 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所（以下、「量研機構」という。）との共同研究において、生活圏評価で重要となる核種に対し、移行パラメータである土壌の収着分配係数の取得を継続した。さらに、2020 年度に作成した、土壌の収着分配係数を取得するための試験手順書（案）について、2021 年度より一般社団法人 日本保健物理学会（以下、「保健物理学会」という。）に設けていただいたレビュー委員会において、委員より頂いたコメントに対応して手順書を更新し、妥当であるとの評価を得た。

【自己評価・今後の取組み】

(自己評価)

- ・安全評価シナリオをより現実的に構築するうえで重要となる、地下水を介したニアフィールド構成要素の相互作用による長期変質などを考慮した処分場の状態設定及び関連する現象を表現する現象解析モデルの妥当性の確認に資する室内及び原位置試験データの蓄積を継続し、シナリオ作成に関する技術的信頼性の向上に資する成果が得られたものと考えている。緩衝材の最高温度が200°Cに達する原位置実験(HotBENT)のデータを用いたTHMC連成解析モデルの開発に向け、まず熱-水連成解析モデルの妥当性の確認を通じて、現在の緩衝材の設計上限温度(100°C)を超える条件における状態変遷を推定するための技術の整備を進めており、処分場設計の柔軟性の向上に貢献することが期待できる。
- ・処分場構成要素とニアフィールド母岩中の地下水との相互作用によるTHMC条件の変化やそれを考慮した核種移行現象に関するより現実的なモデル化を進め、技術的信頼性の向上に資する取組みを進めることができた。
- ・ニアフィールドの母岩を対象とした、核種移行解析モデルに対する妥当性確認の方法論の構築に関して、原位置試験データを用いた試行を通じて、留意点や有効な指標を整理することができ、今後、実際のサイトを対象として当該モデルの妥当性確認の準備を進展させることができた。
- ・生活圏を含めた広域スケールを対象とした、地質環境の時間変遷を考慮可能な核種移行解析モデルの構築に向けて、地質圏と生活圏ともにサイトスペシフィックな安全評価を進めるための技術開発を計画通り実施している。
- ・廃棄体の放射能インベントリについて、使用済燃料に関する諸情報のばらつきを考慮して、放射能インベントリの分布を設定する手法の整備を進めることにより、処分場閉鎖前及び閉鎖後の安全性評価の信頼性向上に資することができた。
- ・核種移行パラメータについて、JAEAとの共同研究を利用し、想定される様々なサイト環境条件の空間的不均質性や時間的変遷を反映して核種移行パラメータを設定する方法論を構築するためのデータを取得し、より現実即した安全評価の信頼性向上に寄与する成果が得られた。また、生活圏評価において重要となる土壌の分配係数について、量研機構との共同研究により引き続きデータベースの整備を着実に進めることができた。2020年度に作成した試験のための手順書について専門家のレビューを受け、そこでのコメントに対応し、その妥当性が確認された。これにより、品質を確保して必要なデータを取得することが可能となるとともに、複数の機関で分担してデータを取得する際にも品質をそろえることが可能となることから、安全評価の信頼性に貢献する成果であると評価している。

(今後の取組み)

- ・ニアフィールドを対象とした処分場の状態変遷に係る現象の理解に資する試験データを継続的に蓄積するとともに、これを反映したシナリオの構築と実データに基づく現象解析モデルの妥当性の評価を進める。また、現象解析モデルを適用した解析結果に対する、モデルやパラメータに存在する不確実性に起因する解析結果への影響を定量的に把握するための手法の検討を進める。
- ・地質環境条件間、設計オプション間の相違による処分場の性能の比較を可能とするため、地質環境条件や設計オプションの特徴やそれらの時間変遷を考慮して処分場の状態設定を行うための技術開発と、この技術によって設定された状態を反映することが可能な核種移行解析モデルの開発を継続する。併せて、シナリオやモデル、データに関する不確実性を考慮し、合理的な保守性を確保して簡略化した核種移行解析モデル(システム評価モデル)の開発を行う。
- ・熱力学、収着・拡散といった核種移行解析に必要なデータベースについて、引き続きデータの拡充による信頼性の向上を図る。土壌の分配係数については、今後、国の基盤研究においてデータの拡充が実施されることになっており、機構のニーズを適切に反映できるよう、また、その成果を適切に反映できるよう密に情報を交換しながら、データベースの整備を推進する。また、保健物理学会のレビューを受けた土壌の収着分配係数を取得するための試験手順書(案)について、機構の技術報告書として公表した後、学会における標準化を検討する。

閉鎖後長期の安全評価：学会等での講演リスト（16件）

発表先	タイトル	著者 (NUMO 職員の所属名は省略)
2022 Glass and Optical Materials Division Annual Meeting (GOMD 2022) 主催：The American ceramic society	R&D program of operational model of long-term performance for vitrified High-level Radioactive Waste	松原竜太, 石黒勝彦, 藤崎淳, 石田圭輔, 稲垣八穂 ¹ , 大窪貴洋 ² , 三ツ井誠一郎 ³ , 岩田孟 ³ , 関根伸行 ⁴ 1)九州大学 2)千葉大学 3)JAEA 4) (株) NESI
日本地球惑星科学連合 2022 年大会	放射性廃棄物の地層処分場の閉鎖後安全評価における放射性核種の移行挙動理解の重要性	浜本貴史, 石田圭輔, 藤崎淳
2022 International High Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM2022 conference)	Model development of coupled THMC processes for a geological repository at higher temperature region	田窪勇作, 高山裕介 ¹ , Andres Idiart ² , 田中達也 ³ , 石田圭輔, 藤崎淳 1)JAEA 2)AMPHOS21 Consulting S.L. 3) (株) 大林組
日本原子力学会 2022 年秋の大会	地層処分におけるガラス固化体性能評価の信頼性向上に向けた取り組み (1) 全体概要	松原竜太, 石田圭輔, 藤崎淳, 稲垣八穂 ¹ , 大窪貴洋 ² , 岩田孟 ³ 1)九州大学 2)千葉大学 3)JAEA
	地層処分におけるガラス固化体性能評価の信頼性向上に向けた取り組み (2) 模擬ガラス固化体 P0798 の溶解速度評価：溶存 Si 濃度及び pH の影響	江上立樹 ¹ , 稲垣八穂 ¹ , 横山礼幸 ¹ , 来海寿宏 ¹ , 有馬立身 ¹ , 出光一哉 ¹ , 松原竜太 1)九州大学
	地層処分におけるガラス固化体性能評価の信頼性向上に向けた取り組み (3) アルミノホウケイ酸塩ガラス溶解で生じるゲル層の原子構造の解明：実験とシミュレーションによる研究	大窪貴洋 ¹ , 松原竜太 1)千葉大学
	炭酸共存下でのモンモリロナイトへの Zr, Np (IV) の吸着分配係数の評価	石寺孝充 ¹ , 浜本貴史, 岡崎充宏 ² , 山田良英 ² , 戸村努 ² 1)JAEA 2) 検査開発 (株)
	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 (1) エスポ岩盤研究所で取得された調査データを用いた検討事例	尾上博則, 三枝博光, 田中達也 ¹ , 石田圭輔, 藤崎淳, 澤田淳 ² 1) 大林組 2) 日本原子力研究開発機構
	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 (2) 瑞浪超深地層研究所で取得された調査データを用いた検討事例	羽根幸司 ¹ , 尾上博則, 石橋正祐 ¹ , 田部井和人 ¹ , 並川正 ¹ , 田川陽一 ¹ , 三枝博光, 石田圭輔, 藤崎淳, 澤田淳 ² 1) 鹿島建設 2) 日本原子力研究開発機構
日本放射化学会 第 66 回討論会	水田土壤中ウランの土壌 - 土壌溶液間分配係数に関する考察	田上恵子 ¹ , 内田滋夫 ¹ , 鄭建 ¹ , 浜本貴史, 瀧谷早苗 1) 量研機構
NEA RWMC Workshop on Developing Safety Cases for Various Radioactive Waste Disposal Facilities - Needs and Challenges of RWMC Organisations	Safety case model/computer code development and testing approach: the key challenges	Keisuke Ishida, Fumiko Yoshida, Hiromitsu Saegusa, Kiyoshi Fujisaki, Hiroyuki Umeki
	Quantification of radionuclide migration in Japanese Safety Cases: current status and future challenges	Takafumi Hamamoto, Keisuke Ishida, Kiyoshi Fujisaki, Katsuhiko Ishiguro, Hiroyuki Umeki
日本地球化学会 第 69 回年会	高アルカリ条件における緩衝材の変質挙動：パッチ式反応試験とモデル化	市川希, 浜本貴史, 笹本広 ¹ , 市毛悟 ¹ , 川喜田竜平 ¹ , 藤崎 淳 1) JAEA

発表先	タイトル	著者 (NUMO 職員の所属名は省略)
日本保健物理学会 第 1 回 放射性廃棄物の管理・処分に係る人文・社会科学的視点からの考察に関する専門研究会	地層処分による安全性の確保とセーフティケース	石田圭輔
日本保健物理学会 2022 年度企画シンポジウム	NUMO 事業での土壌分配係数関連活動の背景と動向	浜本貴史
第 38 回「バックエンド」夏期セミナー ポスターセッション	4 価ウラン-炭酸-モンモリロナイト系の収着挙動評価	津田基秀 ¹⁾ , 佐々木隆之 ¹⁾ , 小林大志 ¹⁾ , 浜本貴史, 石田圭輔 1) 京都大学

閉鎖後長期の安全評価：科学雑誌等への寄稿（1 件）

発表先	タイトル	著者 (NUMO 職員の所属名は省略)
日本原子力学会誌「ATOMΣ」Vol. 64, No. 7：日本原子力学会，連載講座	オールジャパンで取り組む地層処分のいま 第 5 回処分場閉鎖後の安全評価（その 5）	石田圭輔，三ツ井誠一郎 ¹⁾ 1) JAEA

【技術開発④】技術マネジメント

1. 計画的な技術開発の推進

(4) 長期に亘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検討状況に関する最新動向の把握

- NEA の IGSC (Integration Group for the Safety Case) の会合や IGSC 主催の多様な処分施設に対するセーフティケース開発に関するワークショップ (2022 年 7 月開催) への参加等を通じて、諸外国における最新のセーフティケースの開発状況や国際的に議論されている課題 (例えばセーフティケースによる技術的信頼性の提示とステークホルダーとのコミュニケーションのあり方、膨大な知識の伝承方法等) の把握などを行った。これらの成果は、包括的技術報告書の国際レビューへの対応や、2023 年度以降の全体計画の策定に反映した。

2) 地層処分に関する規制基準の把握

- 2022 年度の重点対象として、北米 (米国、カナダ) の規制全般における基準等及び他の諸外国における安全評価の規制基準等の調査を実施した。
- 原子力規制委員会 (Nuclear Regulation Authority、以下「NRA」という。) の「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」(2022 年 8 月決定) (以下、「考慮されるべき事項」という。) に関連して、「火山の発生メカニズム等に関する意見聴取会合」の内容を把握するとともに、火山以外の自然事象に関する諸外国の基準情報を整理した。また、考慮されるべき事項の公表にあたって開催された事業者ヒアリングに対応し、機構の所見を表明した。
- 以上の規制動向に関する情報は、地質環境の調査・評価技術、処分場の設計と工学技術、閉鎖後長期の安全評価技術の開発や全体計画 (令和 5 年度～令和 9 年度) の策定において適宜考慮した。
- 規制上の取扱いが明確となっていない大深度地下構造物の耐震性評価手法に関して、これまでに行った検討によって明らかにした課題やその解決のための取組みを整理し、2023 年度以降の技術開発計画をまとめた。

【自己評価・今後の取組み】

(自己評価)

- 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の検討状況に関する最新動向や技術課題を継続的に把握できており、これにより、包括的技術報告書の国際レビュー (次節 2.1) 参照) への国際動向を踏まえた的確な対応、技術開発への反映、2023 年度以降の全体計画における課題の確認などを行うことができた。
- NRA の事業者ヒアリングにおいて、NRA からは今後適宜意見交換を実施することが重要との趣旨のこ

ントがあった。地層処分に関する NRA との初めての意見交換であったが、NRA とのコミュニケーションの観点から進展であるということが出来る。

(今後の取組み)

- ・引き続き、国際機関の活動に積極的に参加することや海外実施主体との情報交換を密に行い、海外における最新のセーフティケースの検討状況を把握し、今後のセーフティケース開発に反映していく。
- ・地層処分に関する国内外の規制基準等の動向を継続して把握するとともに、技術開発成果等に関して必要な場合には NRA との意見交換の機会を探る。
- ・大深度地下構造物の耐震性評価手法に関しては、2023 年度以降計画的に技術開発を進める。

2. 包括的技術報告書の国際レビューへの対応と情報発信

【業務実施結果】

1) 包括的技術報告書レビュー対応と情報発信

- ・2021 年 11 月から開始された NEA による包括的技術報告書の国際レビューは、2022 年 6 月に東京において NEA によるワークショップが開催され、その最終日に公開セッションとして中間的な審議結果がレビュー委員長から報告された。その後、レビューの結果を取りまとめた報告書（以下、「レビュー報告書」という。）ドラフトの内容に関する事実確認や表現の精査などを経て、2023 年 1 月に NEA のウェブサイトにおいてレビュー報告書が公表された。機構は、レビュー過程における国際レビューチームからの質問や、レビュー報告書ドラフトの内容の事実確認に対応するとともに、レビュー報告書公表についてプレスリリースを行い、情報発信を行った。また、2023 年春公表を目途にレビュー報告書の日本語翻訳版の作成が NEA により進められた。
- ・レビュー報告書に記載された推奨事項について、直近に取り組むべき課題については全体計画（令和 5 年度～令和 9 年度）に反映した。
- ・包括的技術報告書の内容について、保健物理学会「放射性廃棄物の管理・処分に係る人文・社会科学的視点からの考察に関する専門研究会」等における講演や、国際会議等における発表等を行い、幅広い専門家への情報発信を継続的に実施した。
- ・包括的技術報告書は、一般社団法人日本原子力学会（以下、「原子力学会」という。）バックエンド部会から 2022 年度の業績賞を受賞した。

2) 地層処分の安全確保の考え方に関するわかりやすい情報の発信

- ・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、さまざまな説明会・勉強会等における技術的な説明などを引き続き行った。
- ・地層処分システムの時間的な変遷と安全評価の考え方について、動画等を活用して視覚的に伝える説明資料の作成を進めた。

3) 幅広い専門家の理解促進に向けた地層処分技術や安全性に関するコミュニケーションに関する検討

- ・原子力学会に「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、以下、「特別専門委員会」という。）を設置していただき、その議論に参加するとともに協働して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）に対し、学術分野が異なる専門家間の認識のずれを共有し、これを解消し専門家間の理解促進を図るための具体的な方法として、これらの概念や用語の解説を「語彙基盤」としてまとめた。

【自己評価・今後の取組み】

(自己評価)

- ・包括的技術報告書の国際レビューの結果として、機構は、特定の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を得ることができた。また、今後セーフティケースを段階的に発展させていくことに向けて有益な推奨事項を多く得ることができた。これらは、日本における地層処分の技術的信頼性の確認と、今後その信頼性をさらに高めていくための技術開発の方向性を明確にするという観点で有益である。
- ・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一層の質の改善と量の

増大を図っている。対話の場等において技術的な質問に対して丁寧な説明を心がけ、理解の進展が見られている。さらに、一般の方にとって理解が難しい長期安全評価について、わかりやすい資料の拡充を進めることができています。

- ・地層処分技術や安全性に関するコミュニケーションに関する検討では、特別専門委員会に参加した分野の異なる委員により活発な議論が行われるとともに、さらに委員以外の物理探査、放射線技術学・放射線教育、原子力工学、公共政策の専門家を招聘した議論にも繋げることができた。

(今後の取組み)

- ・国際レビューのコメントに対する機構の対応を取りまとめて国内外に発信するとともに、これらを反映して作成される国の全体計画（令和5年度～令和9年度）や、全体計画に沿って今後機構が策定する「地層処分事業の技術開発計画」（以下、「中期技術開発計画」という。）に基づいて技術基盤のさらなる信頼性向上と次期セーフティケース開発に向けて着実に技術開発を実施していく。
- ・説明会等への参加を継続し、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」という観点で恒常的に振り返りを行いながら、情報発信の内容の検討、説明の仕方や資料改善・拡充、職員の説明スキル向上に引き続き取り組む。
- ・地層処分技術や安全性に関するコミュニケーションに関する検討では、特別専門委員会と協力しながら「語彙基盤」を利用した説明を様々な機会で行い、得られた知見によって「語彙基盤」のさらなる工夫と改善に繋げる。そのため、特別専門委員会での検討成果・知見を基に、各委員にも「語彙基盤」を利用した周囲の専門家への関心喚起・理解促進にご協力をいただき、機構が様々な専門家とコミュニケーションを行うための機会創出を図る。

4. 事業を推進する技術マネジメントの強化

(1) 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) 産業界や大学との協力・連携の強化

- ・廃棄体受入基準（Waste Acceptance Criteria、以下、「WAC」という。）の整備を進めるため、地層処分対象廃棄物発生者（日本原燃株式会社（以下、「JNFL」という。）及び JAEA）との情報交換を実施し、放射能インベントリ等の廃棄物特性の把握に必要な情報等の整備に関する課題やこれらに対する取組みについて共有した。

2) 要件マネジメント・知識マネジメントの仕組みと支援ツールの開発・整備

- ・事業を規定する要件とこれを満たすために必要な知識の整備を、事業の時間軸に沿って具体化し、効率的に要件マネジメント・知識マネジメントを行うことを目的としたロードマップの枠組みを作成した。
- ・討論モデル（Argumentation model）という立論・反論の連鎖による論証構造を可視化する表現方法を用いて、包括的技術報告書を構成する要件－主張－論拠－根拠情報の相互関係の可視化に関する取組みを2021年度に引き続き実施した。
- ・NEAが実施する知識マネジメントに関する国際プロジェクト WP-IDKM（Working Party on Information, Data and Knowledge Management）への参加を継続し、機構の取組みを発信して各国の地層処分専門家からの反応や示唆を得るとともに、長期の事業を見据えた知識・情報・データの継承・保管やセーフティケースのデジタル化、処分場閉鎖後の記憶継承、これらに対する最新デジタルツールの活用といったDX推進等に関する取組みについて、国際的な最新動向を把握した。

3) 関係機関と協働した若手技術者対象の合同研修会の企画・実施

- ・国の支援も受け、関係5機関と協働して実践的で専門的な合同研修（3日間、幌延深地層研究センター地下研究施設見学含む。14名受講、講師7名参加。）を企画・実施し、機構からは入構2～3年目の職員を中心に4名が参加した。

【自己評価・今後の取組み】

(自己評価)

- ・廃棄体ごとに発生者と情報交換を行うことにより、廃棄物の具体的な特性に関する情報の把握や検討を進めることができた。
- ・事業の段階に応じた要件設定と知識整備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の要件及び知識のマネジメントにとって重要なツールである。2022年度は、SKBとの共同研究を通じて、スウェーデンにおけるサイト選定から許認可までの経験を共有しながらロードマップの枠組みや盛り込むべき内容について明確にし、2023年度以降のロードマップ策定と運用に向けた基盤を作成することができた。

- NEAのWP-IDKMにおける主要な4テーマに対して設置されているワーキンググループそれぞれに技術部職員計6名が参加することで、機構が中長期的に取り組むべき知識マネジメントの課題に関して諸外国の検討状況を包括的に把握しながら着実に取組みを進めている。
- 関係5機関による合同研修は、各機関の専門家によって様々な観点から地層処分に関する知識を提供できる貴重な機会であり、若手世代の効果的学習と共通的な知識形成に大きく貢献している。こうした取組みは、人材育成面のほか、関係機関との連携強化の観点からも有益である。

(今後の取組み)

- JFNLとの情報交換を継続して実施しWACの整備を進める。
- 事業の段階に応じた要件設定と知識整備に関するロードマップの策定と運用を進める。また、要件マネジメント・知識マネジメントの効果的・効率的な運用に向けてDXの導入を検討する。
- 関係5機関による研修や人材育成方策の検討は2023年度も継続して実施する。人材育成方策の検討にあたっては、大学や学会との連携、海外の関係機関との協力についても視野に入れる。

4. 事業を推進する技術マネジメントの強化

(2) 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) 技術開発業務全般の品質保証プロセスの改善

- 技術開発業務におけるこれまでの開発における品質管理上の要件（目標設定や実現方法等）整理の状況、工程管理の実績及び技術開発成果の確認等を通じて得た教訓を踏まえ、今後実施する業務に対して、さらに要件を明確化・具体化すべき事項を整理し、業務に反映した。
- 業務実施にあたって、技術開発成果の品質に影響を与える可能性のある事象を定期的に監視し、その状況の迅速な共有を徹底することで、技術開発成果の品質低下の未然防止及び影響緩和に取り組んだ。

2) 外部の意見等を踏まえた技術開発の取組みに関する継続的な自己評価と改善

- 技術開発及び対話活動の各評価委員会からいただいた、技術開発及び文献調査に関する「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（9月：国内外委員合同、12月：国内委員のみ）でいただいた助言を踏まえ、包括的技術報告書の国際レビューコメントへの対応、2023年度以降の技術開発への取組みの方向性、調整会議を通じた全体計画（令和5年度～令和9年度）に関する検討を進めた。

3) 全体計画（令和5年度～令和9年度）の検討及び中期技術開発計画の策定

- 2023年度以降の我が国の研究開発計画を策定するため、調整会議第7回会合（6/6）において機構の技術開発の現状を紹介するとともに、国及び関係研究機関と協力して全体計画（令和5年度～令和9年度）案を取りまとめ、同会議の第8回会合（8/10）、第9回会合（11/10）及び第10回会合（2/20）に付議し有識者と議論を行った（全体計画は2023年3月に公表）。

【自己評価・今後の取組み】

(自己評価)

- 技術開発業務全般の品質保証プロセスの改善については、外部調達を含む技術開発業務の品質管理に関するこれまでの知識、経験を要領書類に整理することで、暗黙知の形式知化を進めることができた。
- 全体計画（令和5年度～令和9年度）の取りまとめにあたっては、全体計画（平成28年度～令和4年度）に基づく各機関における研究開発の現状や成果、包括的技術報告書の国際レビュー、処分事業の進展などを考慮し、機構の技術開発評価委員会の評価・提言や技術アドバイザー委員会のご助言なども踏まえて、国や関係研究機関と協力し、機構が主導して今後取り組むべき課題を整理するとともに、これらの課題に取り組むため、今後もセーフティケースの作成に資するという観点から研究開発を管理するという考え方にに基づき、調整会議における議論や有識者のご意見を反映して全体計画案を作成した。

(今後の取組み)

- ・策定された全体計画（令和5年度～令和9年度）を基に、機構の中期技術開発計画を策定する。
- ・技術開発業務実績から得られる教訓を適宜収集・整理し、業務へ適切に反映するため、業務全般の品質保証体系の強化を継続することで、中期技術開発計画に基づく技術開発の着実な実施を支援する。
- ・解析業務品質保証プロセス整備の一環として着手している、解析コードの検証に用いる解析解の収集・整理を継続する。

4. 事業を推進する技術マネジメントの強化

(3) 概要調査の実施能力等の向上に係る取組み

【業務実施結果】

1) 概要調査への準備

- ・機構の部門を横断して概要調査の準備に関する検討会議が設置され、概要調査実施において必要な技術的観点からの検討を行い、前提条件の整理、実施工程案の検討、体制案の検討及びそれらに基づく課題の抽出・整理を行った。

2) 地域の自然環境調査と土地利用制限の検討

- ・文献調査の対象となる地域に関して、国土利用計画法に基づく5地域区分（都市地域、農業地域、森林地域、自然公園地域、自然保全地域）の指定、5地域区分ごとの個別規制法等による土地の利用制限について文献に基づいて一般的に整理した。さらに、5地域区分に共通する土地利用規制の主なものとして、景観、文化財及び国土防災等に関する土地の利用制限、並びに利用に際して必要となる許可・届出等の手続きについて整理した。

【自己評価・今後の取組み】

(自己評価)

- ・概要調査実施工程案の検討を通じて、現地調査に着手するまでの技術部の要員計画案を策定できた。また、部門を横断した議論を通じて、概要調査実施に向けた機構全体の課題の整理を進めることができた。
- ・文献調査の対象となる地域に関して、5地域区分ごとの個別規制法等による土地の利用制限及び利用に際して必要となる許可・届出に関し、文献情報に基づいて一般的に整理することができた。特に、国立・国定公園や都道府県立自然公園の指定地域に関する事項及び保護林指定に関する事項について詳細に整理できた。

(今後の取組み)

- ・これまでの検討で特定した課題を考慮し、概要調査実施工程を詳細化しつつ、調査業務と技術開発業務を並行して進めるための組織体制を検討する。さらに、これを踏まえて、概要調査の枠組みなどを検討する。
- ・今後は、自然環境に係わる様々な条件をさらに調査・分析し、概要調査実施に際して考慮すべき自然環境への具体的な配慮事項等に係る検討を実施する。

4. 事業を推進する技術マネジメントの強化

(4) 国際連携・貢献の着実な推進

【業務実施結果】

1) 国際機関プロジェクトへの参加・国際貢献と国際動向の把握

- ・NEA等の国際機関が実施する15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、国際会議（EAFORM等）における我が国の地層処分事業の講演などを行い、国際動向の把握と国際貢献を行った。

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	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	
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)	放射性廃棄物管理およ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
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り組みの検討
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の課題の検討
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の実施

・様々な共通のテーマ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、最新の知見を取得した (詳細は評価カテゴリー【技術開発①】～同【技術開発③】を参照)。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、準備会合への参画を経て、3つのタスク (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) への参加意向を JAEA へ連絡した。

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	断層およ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【1.(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【1.(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【1.(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【1.(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【1. (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【1. (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【1. (3) 3)参照】
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【1. (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【1. (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【1. (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【1. (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【1. (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【1. (2) 1)及び(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【1. (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 NEA 等の国際機関の活動、並びに各国の実施主体との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、国際協力の推進及び取得したデータの解釈や解析コードに対するベンチマークを進めるなどにより、我が国の地層処分に関する技術的信頼性の向上に寄与することができた。

(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や Horonobe International Project 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知見や技術・経験の共有を進め、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、国際会議等において、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（7件）

発表先	タイトル	著者 (NUMO 職員の所属名は省略)
EGKM SECOND PLENARY MEETING (OECD/NEA)	KM system development in Japan	江橋健, 西川将吾, 草野由貴子
第 38 回 バックエンド夏期セミナー	放射性廃棄物の処理処分のこれまでと現在	梅木博之
一般社団法人 エンジニアリング協会 地圏科学技術研究会令和 4 年第 2 回研究会	高レベル放射性廃棄物処分の進捗状況及び今後の動向について	兵藤英明、高橋徹治
原子力学会原子力発電部会 第 17 回「原子力発電技術」夏期セミナー	放射性廃棄物の地層処分	林隆正
日本原子力学会バックエンド部会	地層処分業の進め方	市川希
EAFORM 2022	Status of Geological Disposal Program in Japan	藤山哲雄
第 36 回日韓原子力専門家会合	Overview of current status of geological disposal program in Japan	吉村公孝

技術マネジメント：論文のリスト（7件）

発表先	タイトル	著者 (NUMO 職員の所属名は省略)
日本原子力学会誌「ATOMΣ」Vol. 64, No. 7: 日本原子力学会, 連載講座	オールジャパンで取り組む地層処分のいま 第 7 回地層処分計画における「セーフティケース」【総説】	梅木博之, 藤山哲雄, 朽山修 ¹ 1) 原子力安全研究協会
日本原子力学会バックエンド部会部会誌「バックエンド研究」Vol. 29, No. 1	なぜ 地層処分なのか? —セーフティケースの役割【総説】	草野由貴子
	セーフティケースへの情報統合—NUMO 包括的技術報告書を例として【総説】	藤山哲雄
	地層処分事業の進め方【総説】	吉田英美子
日本原子力学会バックエンド部会部会誌「バックエンド研究」Vol. 29 No. 2	地層処分事業に係る技術開発の取組みの現状【総説】	林隆正
原子力年鑑 2023 日刊工業新聞社	高レベル放射性廃棄物等の地層処分事業の近年の取組み【総説】	渡部隆俊
雑誌「エネルギーレビュー」2022 年 8 月号	地層処分の安全性：適地の要件と技術【総説】	渡部隆俊

以上