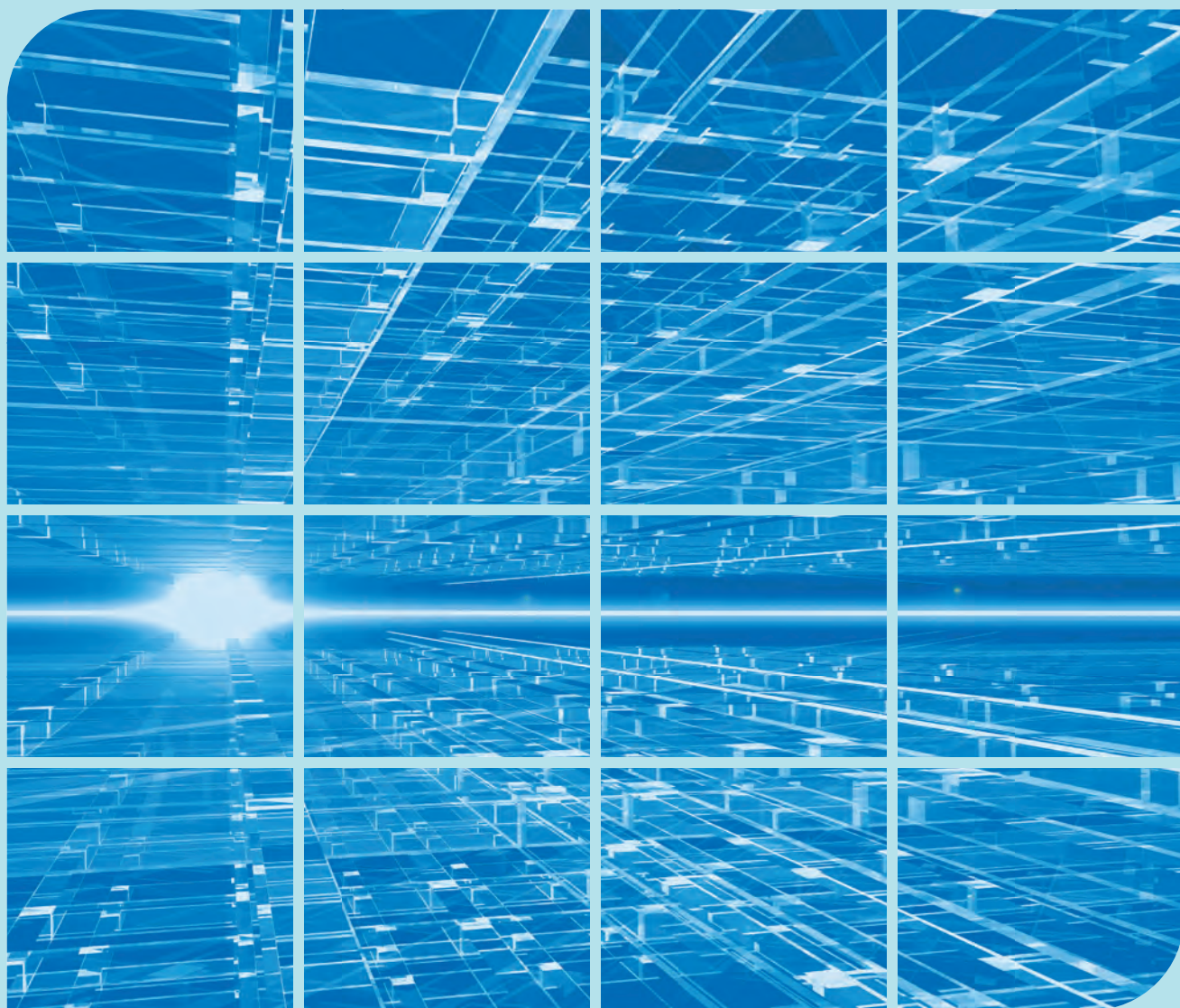


RWMC

原環センター
2022年度 技術年報



公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

ご あ い さ つ

当センターは、1976年の設立以来、産業界、学協会、官界などの幅広いご支援を得て、放射性廃棄物に特化した我が国唯一の中立的調査研究機関として、低レベルから高レベルに至る放射性廃棄物の処理・処分に関する調査研究活動を行ってまいりました。

近年は、高レベル放射性廃棄物やTRU廃棄物を対象とした地層処分や廃炉等に伴う放射性廃棄物を対象とした中深度処分に係る工学的な技術の調査研究に力を注いでいます。また、海外の研究機関、処分事業実施機関等との国際的なネットワークで収集した放射性廃棄物に関する各国の政策、制度、事業の進捗状況、研究開発動向等の膨大な情報を分析・加工し、我が国各界の利用の便に供する情報センターの役割も担っています。

原子力利用や放射性廃棄物の最終処分に関する様々な議論が行われていますが、当センターは、原子力技術分野に関わる一員としての立場を認識し、社会から求められる調査研究やそれら成果の普及に積極的に取り組んでいます。

2020年2月に始まった新型コロナウイルス感染症まん延の影響は、2022年度も継続し、様々な制約に直面しましたが、調査研究等を着実に実施することができました。この技術年報は、当センターが2022年度に実施した調査研究の概要を紹介するとともに、論文投稿・学会等での発表、講演会・セミナー・研究発表会の開催、刊行物、海外情報の発信などの成果普及活動を取りまとめたものです。

本技術年報を通じて、当センターの活動をご理解いただければ幸いです。

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター
理事長 武 谷 典 昭

目 次

I. 低レベル放射性廃棄物の処分に関する調査研究.....	1
1. 地下空洞型処分調査技術高度化開発.....	1
2. その他の低レベル放射性廃棄物処分に関する調査研究.....	9
II. 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する調査研究.....	11
1. ニアフィールドシステム評価確証技術開発.....	11
2. 地層処分施設閉鎖技術確証試験.....	17
3. 回収可能性技術高度化開発.....	23
4. 沿岸部処分システム評価確証技術開発.....	31
5. TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発.....	35
5-1 事業の全体概要.....	35
5-2 廃棄体パッケージの閉じ込め性能に係る試験と評価.....	37
5-3 陰イオン核種に対する閉じ込め技術の開発.....	43
5-4 廃棄体からの核種溶出モデルの高度化.....	50
5-5 ニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化 ーナチュラルアナログによる緩衝材の長期安定性の検証ー.....	56
5-6 廃棄体由来の発生ガスに関する現象解析モデルの妥当性検討.....	62
6. 廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究.....	68
7. 使用済燃料の多様化を考慮したシナリオ評価.....	71
8. 固化体のハイブリッド化及び処分概念・安全評価に関する検討.....	72
9. 高安全・核セキュリティ及び低廃棄物処分負荷を同時達成する中小型 軽水炉に関する研究.....	73
10. その他の地層処分に関する調査研究.....	75
III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	77
1. 放射性廃棄物海外総合情報調査.....	77
2. 放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等 に関する業務.....	79
2-1 事業の全体概要.....	79
2-2 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の進捗管理・成果のとりまとめ等 ..	81
2-3 人材育成プログラムの実施・作成.....	88
3. その他の放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	91
IV. 国際交流.....	93
V. 資料.....	94
1. 講演会、セミナー、研究発表会.....	94
2. 論文投稿、学会発表等.....	95
3. 刊行物.....	104
4. ホームページへの海外最新情報の掲載.....	105
5. 委員会一覧.....	106

1. 低レベル放射性廃棄物の処分に関する調査研究

1. 地下空洞型処分調査技術高度化開発

◇事業の概要

我が国においては、これまでの原子力発電の利用に伴って既に多種多様な放射性廃棄物が発生しており、その処分対策を着実に進める必要がある。このうち、原子炉施設や再処理施設等の運転と解体から発生する低レベル放射性廃棄物の一部には、長期にわたり比較的高い放射能が残存し、現行の浅地中処分に適さないものが存在する。このような低レベル放射性廃棄物のうち、放射能レベルの比較的高い廃棄物については、一般的な地下利用に対して十分余裕を持った深度（地下 70m 以深）に埋設する処分方法（中深度処分）が検討されている¹⁾（図-1）。

中深度処分の安全規制については、規則等の改正や審査ガイドの策定が行われ、処分施設は、侵食等を考慮しても、10 万年後の将来にわたって地表から 70 メートル以上の設置深度が確保できること、また、設置深度の地下水流動等も考慮し、複数の技術オプションの中から最適な組合せを選択して施設設計することが求められている^{2),3)}。

これら検討状況を踏まえると、大断面の地下空洞の掘削可能性を評価するため、初期の設置深度として地表から百数十メートル程度までを想定し、設置深度毎の初期地圧を極力、天然バリアを乱すことなく、かつ、効率的に測定できる基盤技術の開発等、地下環境を把握するための技術整備が必須となる。また、掘削可能な地下空洞の形状・寸法、地下環境、人工バリアの長期的な安全性等を考慮し、複数の技術オプション（多様な選択肢）の実効性を確認することが必要である。

本事業は、これらの中深度処分固有の課題を踏まえ、2020 年度から 5 か年の予定で、大規模な坑道や地下空洞型処分施設などを建設する上で必要となる、岩盤にかかる初期地圧の三次元的な分布を測定する技術の開発を始めとした中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化開発を行うと共に、最適な施設設計を支援するための手法の検討を始めとした中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化開発を行うも

のである。

本事業は、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターと東電設計株式会社の 2 機関が共同で実施している。5 か年事業の 3 年目に当たる 2022 年度は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「令和 4 年度低レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業（JPJ010897）（地下空洞型処分調査技術高度化開発）」として実施し、当センターでは以下の項目について検討した。

- 大深度 3 次元初期地圧測定技術の開発
- 地下水流動評価技術の調査
- 地震動観測
- 技術オプションの検討
- ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究

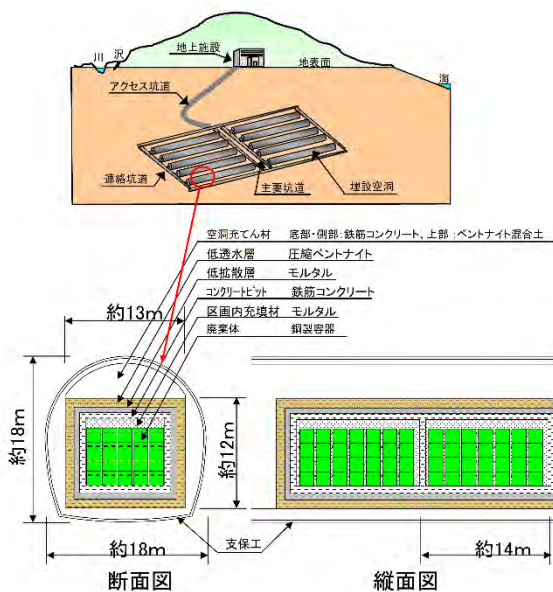


図-1 中深度処分の概念図¹⁾

◇2022 年度の成果⁴⁾

(1) 大深度 3 次元初期地圧測定技術の開発

中深度処分施設の地下空洞の断面形状寸法は、設置深度での初期地圧に依存すること、地下空洞の断面形状寸法は、人工バリア、支保工や処分坑道配置等の設計に影響を与えることから、初期地圧の情報は中深度処分施設の最適な設計を目指すために必須であり、特に施設設置深度での 3 次元の初期地圧は、空洞の掘削方向や形状を設計する際に非常に重要な情報となる。そこで、堆積軟岩を対象に、鉛直孔（深度 200m 程度まで）で、3 次元初期地圧を測定することを目

的として、応力解放法の一つである円錐孔底ひずみ法と孔壁ひずみ法を応用した「円錐孔壁ひずみ法」(図-2)の開発を進めている。

2022年度はまず、円錐孔壁ひずみ法の測定手順①～⑨について検討を進め、各ステップの方法や留意点を整理した上で、試験装置の詳細設計と製作を行った。

- ①測定深度以浅までの掘削
- ②センタリングガイドケーシングの挿入
- ③パイロットボーリング
- ④孔内洗浄
- ⑤孔内観察
- ⑥接着剤注入
- ⑦貼付装置挿入、ストレインセルの設置
- ⑧接着後貼付装置回収、オーバーコアリング
- ⑨コア回収、感度試験

円錐孔壁ひずみ法を実用化するにあたり最も重要な項目の一つとなるストレインセルの接着に関しては、ストレインセルの接着性能や接着方法について室内検証試験により検討を進めた。接着剤注入装置を設計、試作した上で、図-3に示す接着剤注入装置による円錐孔壁への接着剤の注入手順をトレースし、動作性に問題が無いことを確認した。併せて、接着剤候補として2種類(HIC接着剤、エポキシ樹脂接着剤)を選定し、経時的な物性変化等を室内試験により検討した。両者ともそれぞれ優れた特徴を有していることから、2023年度の追加検討により最終選定を行

うこととした。

更に、青森県六ヶ所村の現場フィールドにて、初期地圧測定に係る一連の作業性の確認を主目的とした浅深度現場検証試験を実施した。浅深度現場検証試験における現場調査数量は、表-1に示すとおりである。設計・製作を進めている測定装置とその測定方法・手順に大きな問題はなく開発の方向性が妥当であることが確認されるとともに、より堆積軟岩に適した接着剤の選定など、今後に向けての改良点を明らかにすることができた。

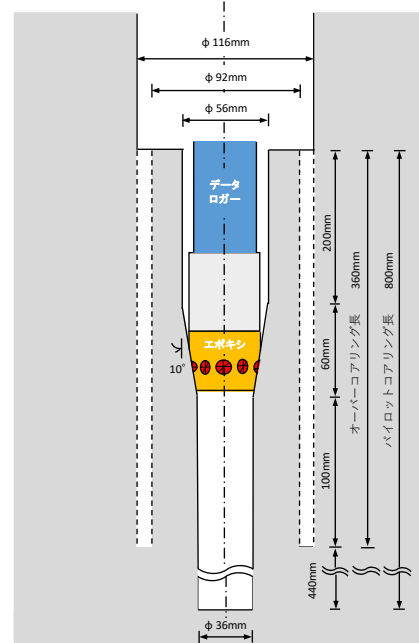


図-2 円錐孔壁ひずみ法の概念図

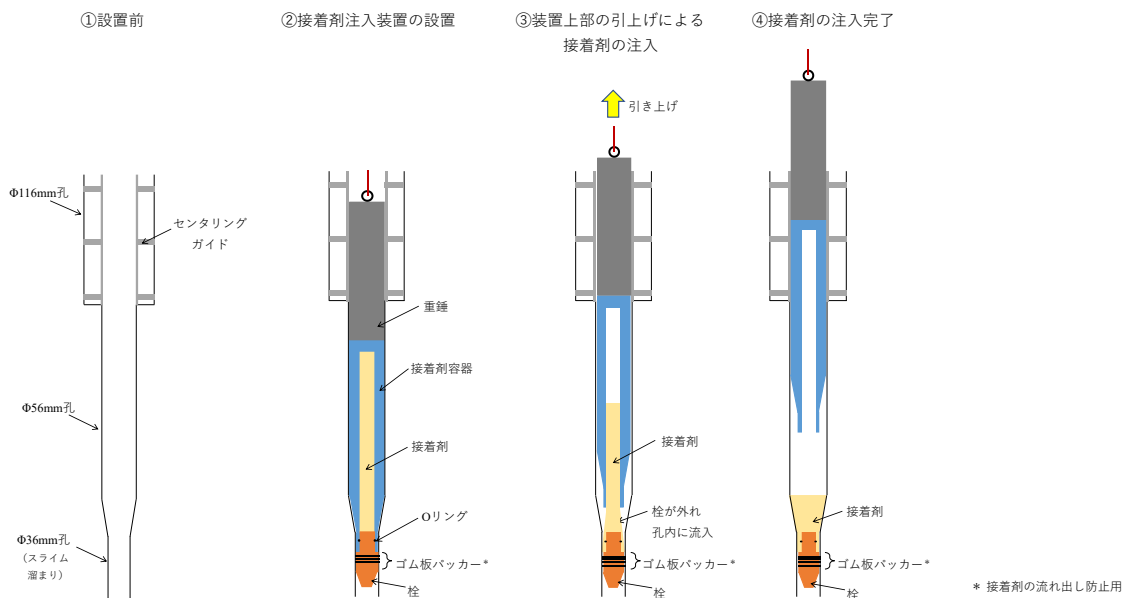


図-3 接着剤注入装置による円錐孔壁への接着剤の注入手順

表-1 浅深度現場検証試験における現場調査数量

項目	数量	
	現場試験孔 (φ116mm)	湧水圧確認孔 (φ66mm)
ボーリング掘削	6m	10m
コア観察、柱状図	6m	10m
ボーリング孔閉塞	6m	10m
現場試験・ 感度試験試料採取	2箇所 (円錐部深度： 1.9m、5.2m)	-
湧水圧確認	-	1回

(2) 地下水流動評価技術の調査

中深度処分に関わる規制基準が近年改訂整備されたことを受けて、それらに対応するために必要な技術のうち、特に地下水流動評価に係る要求事項の再整理とそれらへの対応に必要な重要技術項目の抽出、現状での技術開発状況の調査・整理並びに今後の技術的課題の検討・整理を行った。具体的な項目は次のとおりである。

- ・長期の地質環境の変動・処分場環境の変遷に

伴う地下水流動・地下水環境の変化に関わる調査・解析・評価手法や不確実性評価
 ・地下水等モニタリング・放射線監視モニタリングに関わる地下水環境の監視測定モニタリング技術

それらの調査結果をもとに、図-4 に示すように、中深度処分の新規規制基準における地下水流動評価に関連する要求事項への対応を処分事業の段階的展開も考慮して実施するために求められる地下水流動・流況の調査・解析・評価や、地下水環境の監視・測定モニタリングに必要な調査・測定・試験・解析及び評価技術を体系的に整理するとともに、それらを“技術マップ”として概略的な取りまとめ作成を行った。この技術マップでは、地下水流動の調査・解析・評価と地下水等の監視測定モニタリングという技術分類毎に、大項目、目的、抽出した技術項目、対象場所、適用時期、関連規制基準、現状技術の具体例・技術情報、出典、今後の技術課題の項目にて表形式にとりまとめた。

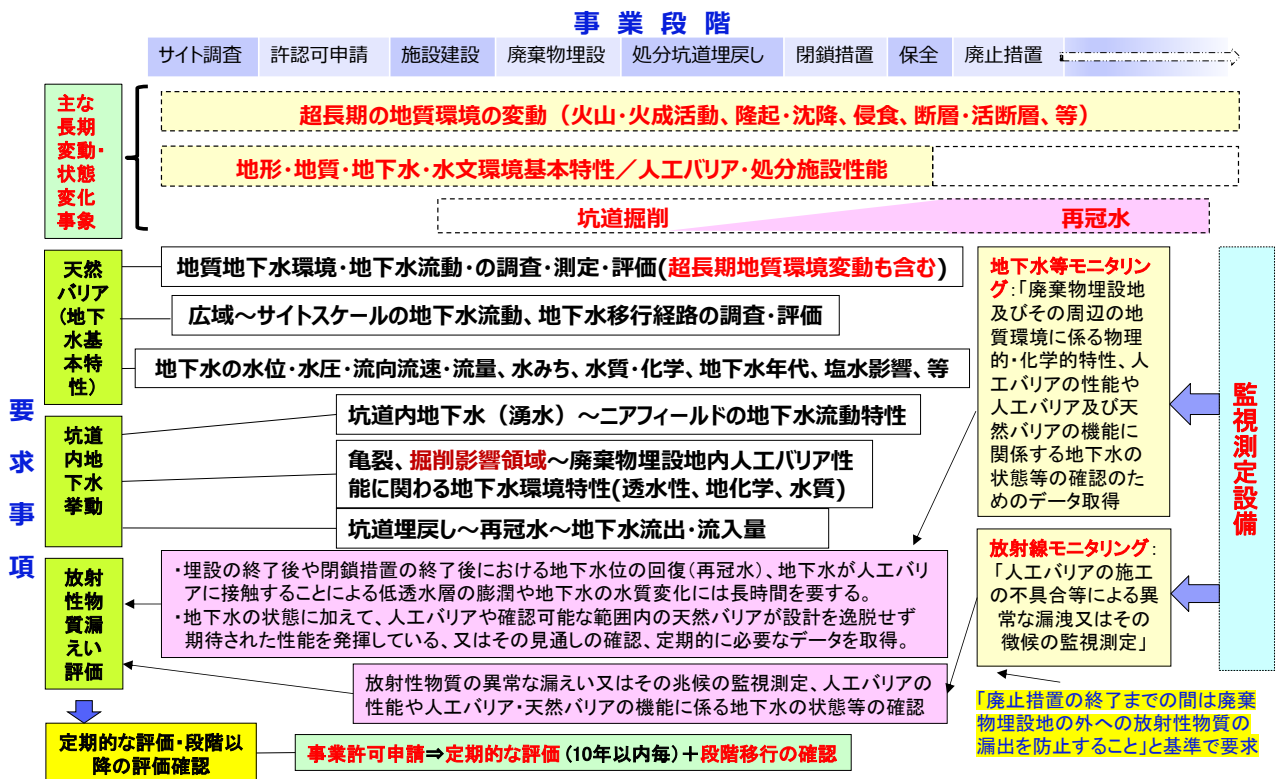


図-4 事業展開と規制要求を考慮した地下水流動評価に係る重要事項の抽出・展開イメージ

本調査研究の結果、今後に向けての主要な技術課題として次のものが抽出された。

- ・地下水流動の調査評価について、地質・地下水環境の基本特性の調査・解析・評価技術とともに、地下施設の設計と安全評価に関わる地下施設レイアウト設定方法並びに地下水年代測定や塩水影響を考慮した地下水流動の調査・解析評価手法の高度化やデータ整備が地層処分研究等で進んではいるが、今後は地層処分対象の深い深度に比べて浅地中～中深度での複雑な地質・地下水環境条件にも十分に適用可能な手法・技術として高度化・確証を図っていくことが求められる。
- ・掘削影響～埋戻し・再冠水による坑道・廃棄物埋設等の処分環境への影響については、JAEA 瑞浪超深地層研究所における貴重な研究事例等を踏まえ、調査と解析による評価が有効であることが示されているが、今後、中深度処分で想定される対象岩種、地質・地下水環境や処分施設の設計・埋戻し方法等に対応した方法論を、調査・試験・解析による検討を更に充実させて確立していくことが重要である。
- ・長期の地質環境の変動（隆起・沈降・侵食・海水準変動、等）とそれに伴う地下水流動状態の変遷は超長期にわたる事象であり、様々な不確実性も伴う。そのため、事業許可申請～処分実施段階～廃止措置までの事業実施の各段階を通じて、調査・観測によるデータの拡充と解析・評価等の検討を繰り返し実施していくことにより、不確実性を低減し、安全性確保に係る評価結果の信頼性をより確かなものとしていく必要がある。今後、中深度処分特有の条件を想定して、品

質保証的な観点も含めて不確実性の評価手法の方法論として適用性の確立が重要である。

- ・地下水等モニタリング及び放射線モニタリングの実施は、非常に長期にわたる期間が想定されるため、処分事業の進展に対応して、処分施設の坑道内、廃棄物埋設地やその周辺の地質・地下水環境、処分施設・人工バリアの状態、地下水の流動・放射性物質の漏えいやその徴候等の監視・測定を適切にかつ合理的に実施可能とするため、方法論と適用技術を早期に確立することにより、今後の中深度処分事業の安全確保への信頼性向上と円滑な推進につなげていくことが課題である。
- ・地下水等モニタリングを合理的に実施可能とするために、監視測定設備の具体的な概念を明確にするとともに、地下水等モニタリングとして必要なデータを事業段階ごとに変化する処分場環境に対応した形で長期的かつ安定的に取得できる技術を高度化・開発することが求められる。

(3) 地震動観測

地下空洞施設の地震時挙動に関する分析評価に資することを目的として、青森県六ヶ所村の日本原燃株式会社構内にて試験空洞底盤、実規模施設及び地表面に計4台の地震計を設置して、地震動観測を行っている（図-5、図-6）。

- ①試験空洞斜路の底盤上
- ②実規模施設の底部コンクリートピット上
- ③実規模施設の手前部コンクリートピットの上部
- ④地表面（①のほぼ直上）

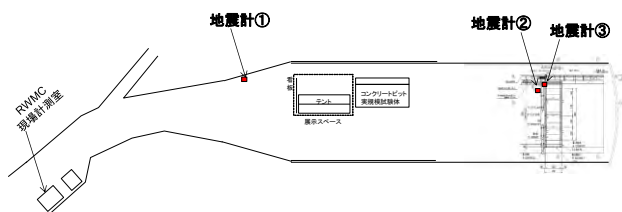


図-5 地下の地震計（①、②、③）の設置位置平面図



図-6 地震計④の設置状況

2022年度は、トリガ値の1Galを超えて記録された表-2に示す9地震の地震動データを取得した。観測された地震動の加速度の最大値は、表-3に示すとおりである。なお、水平の試験空洞軸方向がX、水平の試験空洞軸直角方向がY、鉛直方向がZである。

表-2 データ取得した地震の諸元

No	地震の発生日	震央地名	深さ(km)	マグニチュード	六ヶ所の震度
1	2022年4月28日	青森県東方沖	53	4.7	震度1
2	2022年5月23日	青森県東方沖	24	5.6	震度1
3	2022年6月10日	浦河沖	67	4.9	震度1
4	2022年7月2日	宗谷海峡	324	5.9	震度2
5	2022年7月6日	青森県東方沖	58	4.6	震度1
6	2022年7月22日	青森県三八上北地方	86	5.3	震度2
7	2022年9月13日	青森県東方沖	54	5.1	震度2
8	2022年11月17日	青森県東方沖	64	5.0	震度2
9	2023年1月16日	青森県東方沖	46	4.5	震度1

表-3 観測された地震動の加速度の最大値

(上から X、Y、Z)

No	地震の発生日	地震計①(Gal)	地震計②(Gal)	地震計③(Gal)	地震計④(Gal)
1	2022年4月28日	1.7	3.0	3.4	25.9
		2.4	2.6	2.9	24.6
		1.5	2.6	2.7	10.9
2	2022年5月23日	1.2	1.5	1.6	8.9
		1.4	1.5	1.5	7.6
		1.0	1.0	1.0	4.0
3	2022年6月10日	1.3	1.7	1.9	6.0
		1.2	1.3	1.3	7.8
		0.8	0.8	0.8	3.1
4	2022年7月2日	1.2	1.5	1.6	7.9
		1.9	1.8	1.8	9.3
		1.9	2.1	2.2	7.1
5	2022年7月6日	1.5	1.7	1.8	6.0
		1.4	1.4	1.4	8.1
		1.1	1.0	1.0	5.2
6	2022年7月22日	4.6	5.2	5.2	18.7
		6.6	5.3	5.5	26.6
		3.1	5.1	5.2	16.2
7	2022年9月13日	1.9	2.0	2.1	14.6
		2.9	2.8	3.1	24.1
		2.5	2.6	2.7	10.2
8	2022年11月17日	2.7	3.2	3.4	17.2
		3.4	3.4	3.6	18.0
		1.9	2.5	2.5	7.5
9	2023年1月16日	1.6	2.1	2.3	11.0
		1.6	1.8	1.8	12.0
		1.2	1.8	1.8	6.5

(4) 技術オプションの検討

中深度処分に係る規制基準では、規制期間終了後にわたって放射性物質の移動を抑制する機能の観点から、以下に示す廃棄物理設地の設計を選定するプロセス(設計プロセス)を示すことを要求している。

- ・ 廃棄物理設地の設置場所に係る選択肢の設定
- ・ 人工バリアの設計等に係る選択肢の設定
- ・ 設計の選択肢の中からの最終的な設計の選定

このうち、二つ目の項目を中心に、その考え方や手順について検討し、それをできるだけ具体化した形で示すことにより、人工バリアの設計等に係る選択肢をどのように設定するかについての一つの考え方を提案した。なお、最終的な設計の選定のためには、複数の人工バリア案と複数の配置案の組み合わせによる複数の処分システムを選定した上でそれらを比較検討することが求められているが、中深度処分についてはサイトが未選定であることから、天然バリア性能を3水準仮設定することで対処することとし、人工バリアの設計に係る選択肢の部分に比重を置いた。

検討ではまず、安全機能の整理として中深度処分事業における段階を閉鎖措置前と閉鎖措置後に大別した上で要求される機能を整理し、細分化した機能とそれを担保する構成要素(廃棄体容器/人工バリア/天然バリア)を対応付けた。

並行して、天然バリアと人工バリアの代表的因子を明らかにし、長期の安全確保(被ばく線量の観点からその成立条件を評価するために、感度解析を実施した。感度解析のモデルの考え方を図-7に示す。また、感度解析結果の一例として、人工バリアの透水係数の違いが被ばく線量に及ぼす影響をケース②(天然バリアの透水係数が比較的低い)とケース③(天然バリアの透水係数が比較的高い)の比較で示したものを図-8に示す。なお、感度解析では、人工バリアの劣化を考慮し、人工バリア性能に時間変化を与えたケースも含めた。

閉鎖措置前については、特に建設・操業時の安全確保には、地震対応を含めて多段に定置された廃棄体の傾き・倒れへの備え及び建設・操業時の作業性を確保するための高空間線量の低減の観点から構造体としてのコンクリートピットの設置が有効であることを示した。閉鎖措置後については、一連の感度解析結果に基づき、天然バ

リア性能の差異に応じて必要となる人工バリア構成を明らかにした。

これらの結果に基づき、要求される機能と構成要素を再整理することにより、天然バリア性能に応じた人工バリアの設計等に係る選択肢を設定した。一例として、天然バリアの透水係数が

1×10^{-8} m/s 以上のケースを対象に、機能と構成要素の相関を再整理した結果を図-9 に示す。

以上のアプローチを通じて、人工バリアの設計等に係る選択肢をどのように設定するかについて、考え方の一例を示した。

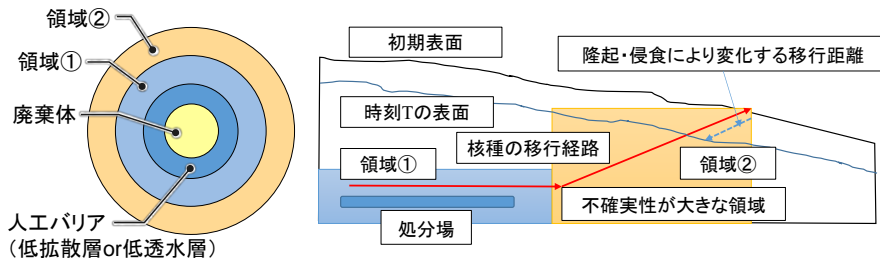


図-7 感度解析のモデルの考え方

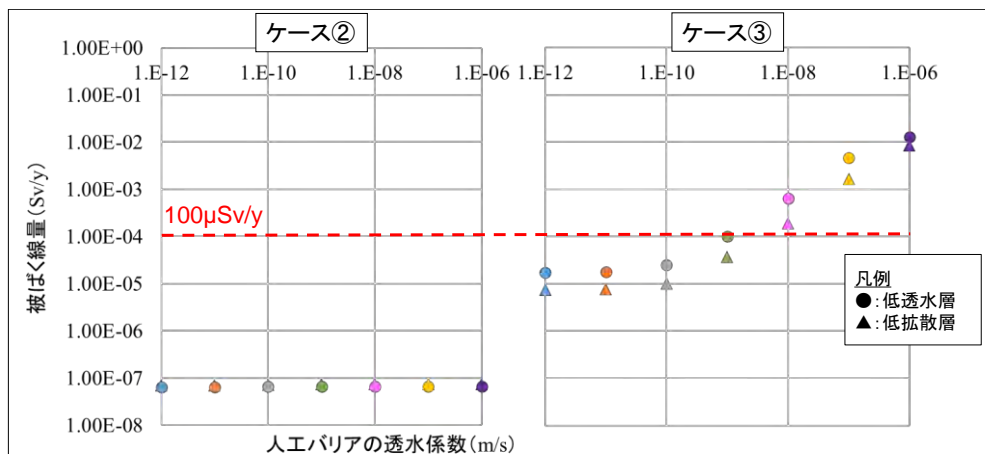
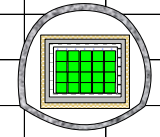


図-8 感度解析結果の一例

段階	機能		構成要素							
			廃棄体容器	岩盤 透水係数: 1E-8以上	区内充填材	コンクリートピット	低拡散層	低透水層	空洞	空洞内充填材
閉鎖措置前	閉じ込め	廃棄体からの放射性物質の漏洩の防止	○			○		○		
	遮蔽	放射線の遮蔽	○		○	○	○			
	作業安全	空間・力学的安定性の確保				○				
閉鎖措置後	移行抑制	放射性物質の収着(核種収着性)		○				○	○	
		拡散による移行を抑制(低拡散性)		△				○	※ 低透水層による 拡散増維持	
		処分施設を通過する地下水流量を抑制(低透水性)		△					○	
		卓越した移行経路の防止								○
	溶出抑制	溶出の抑制		○						
		廃棄体と地下水の接触の防止		○						
	隔離	隔離距離の確保		○						○
		容易な人間侵入の抑制		○						○
自然現象からの著しい影響からの防護			○							

低拡散層と低透水層が共に必要



区内充填材+コンクリートピット+低拡散層+低透水層

図-9 要求される機能とそれを担保するための構成要素 (天然バリアの透水係数が 1×10^{-8} m/s 以上の場合)

(5) ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究

人工バリアに係る技術オプションを検討する上で未知の領域が大きいベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムを知ることは、長期の性能評価の説明性向上及び設計の合理化に大いに役立つ。そこで、2022年度は、初年度に策定した5か年計画に従い、実験A～実験Dを通じて土質材料の透水特性に関するデータの取得、及びメカニズムの評価を進めた。実験Aは、最も基本的な情報を得るための室内締固め-透水試験である。実験Bは、締固め土の透水係数が締固め時の乾燥密度と飽和度の関数として表現できるものと仮定し、それを確認するための実験である。実験Cは電子顕微鏡による締固め土の構造観察、実験Dは中性子イメージング実験となる。実験Aからは母材に混合した細粒土（珪砂粉、木節粘土、カオリン、ベントナイト）の種類や混合率の違い等が締固め特性と透水特性に及ぼす影響が、実験Bからは締固め時の乾燥密度と飽和度の違いが透水特性に及ぼす影響が、実験データとして取得された。また、実験Cと実験Dからは透水特性を規定する主要な因子の一つと考えられている空隙構造に係る画像データを得た。表-4に2022年度までに実施した室内試験の一覧を示す（実験Dは除く）。前年度までに取得したものを含めて、これまでに取得したデータを

整理・分析した。一例として、実験Aのうち、1Ec締固め試料を対象とした透水試験結果を整理したものを図-10に示す。同図上の締固め試験結果を見ると、母材に細粒土（珪砂粉、木節粘土、カオリン、ベントナイト）を混合した場合は締固め密度がいずれも増加しているが、非膨潤性の材料を添加した場合に比べ、膨潤性のベントナイトを混合した場合、乾燥密度の増加量が少なく、ベントナイト混合率が大きいとその傾向がより顕著になっている。同図下の透水試験結果を見ると、母材⇒非塑性細粒土混合⇒高塑性細粒土混合⇒膨潤性細粒土混合⇒その混合率の増加、の順に、透水係数がそのオーダーを変えながら変化している様子を確認できる。また、同じ母材であっても粒度調整材は乾燥密度に対応した高い遮水性を発揮していることも見て取れる。全ての材料で、透水係数は乾燥側よりも湿潤側のほうが小さくなっており、これまでよく知られている土質材料に係る実験事実である「最小透水係数 k_{min} が最適含水比のやや湿潤側で発現する」という傾向も、さほど顕著ではないものの概ね確認できる。木節粘土やカオリンを混合した材料では、他に比べて乾燥側と湿潤側の透水係数の差がより大きくなっており、その傾向は膨潤性ベントナイトを混合すると再び顕著でなくなるなど同図より判別できる。

表-4 2022年度までに実施した室内試験一覧（実験A、実験B、実験C）

実験種別	供試土	実験条件	数量	概要
段階的解明実験 (実施済)	A. 購入砂（単粒母材）	0.2Ec, 1Ec, 4.5Ec締固め試験	18	
		$\lambda k \cdot \varepsilon k$ 実験	16	1Ec締固め6点含む
	B. 購入砂+10%珪砂粉	0.2Ec, 1Ec, 4.5Ec締固め試験	18	
		$\lambda k \cdot \varepsilon k$ 実験	16	1Ec締固め6点含む
段階的解明実験 (今年度実施)	D. 購入砂+10%カオリン	0.2Ec, 1Ec, 4.5Ec締固め試験	18	
		$\lambda k \cdot \varepsilon k$ 実験	16	1Ec締固め6点含む
	E. 購入砂+10%木節粘土	0.2Ec, 1Ec, 4.5Ec締固め試験	18	
		$\lambda k \cdot \varepsilon k$ 実験	16	1Ec締固め6点含む
F. 粒度調整母材	0.2Ec, 1Ec, 4.5Ec締固め試験	18		
	$\lambda k \cdot \varepsilon k$ 実験	16	1Ec締固め6点含む	
実務ターゲット実験 (実施済)	C. 購入砂+10%ベントナイト	0.1Ec, 1Ec, 4.5Ec締固め試験	18	
		$\lambda k \cdot \varepsilon k$ 実験	12	評価には1Ec締固め6点含む
実務ターゲット実験 (今年度実施)	G. 購入砂+30%ベントナイト	0.1Ec, 4.5Ec締固め試験	12	1Ec6点は既実施
		$\lambda k \cdot \varepsilon k$ 実験	12	評価には既実施の1Ec締固め6点含む
力学試験	D. 購入砂+10%カオリン	一次元圧縮（圧密）試験	6	含水比3水準×2（不飽和・飽和）
			6	
	F. 粒度調整材（ダムコア<2mm）	6		
化学試験	ベントナイト（Na型・Ca型）・カオリン	TG-DTA（熱分析）計測	3	3供試体×含水比変化
		ζ 電位計測	3	
顕微鏡観察（長期透水試験後）	C. 購入砂+10%ベントナイト	JGS0312A ₁ 実験終了供試体	6	昨年度実施済供試体
	G. 購入砂+30%ベントナイト	JGS0312A ₁ ・ ε_k 実験終了供試体	12	今年度終了次第実施
顕微鏡観察 (材料混合・締固め過程)	C. 購入砂+10%ベントナイト	混合・加水・漉混ぜ・静的締固めの各過程で顕微鏡観察	適宜	・含水比を乾燥⇒最適⇒湿潤で変化 ・混合（団粒化）の観察と撮影 ・締固め前⇒締固め後の撮影 ・混合順序の違いの影響も検討
	D. 購入砂+10%カオリン			

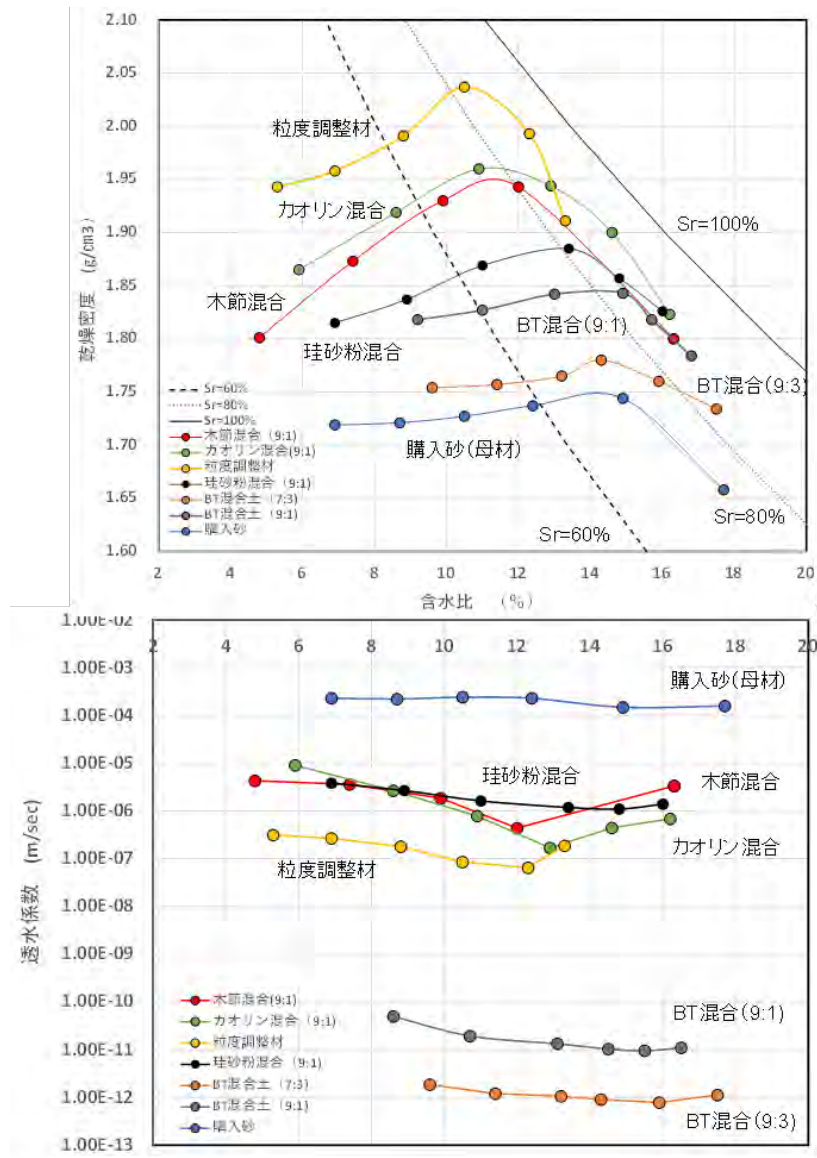


図-10 実験 A (1Ec 締固め-透水試験) の結果

2022 年度までに、実験 A～実験 D を通じて土質材料の透水特性に関する貴重な実験データを蓄積することができた。2023 年度は、ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムの分析・評価を進める予定である。

- 1) 第 2 回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合（平成 27 年 2 月 12 日）資料 2-1「原子力発電所等の廃止措置及び運転に伴い発生する放射性廃棄物の処分について」、電気事業連合会
- 2) 第二種廃棄物埋設の廃棄物埋設地に関する審査ガイド、原子力規制委員会、令和 4 年 4 月 20 日
- 3) 平成 30 年第 22 回原子力規制委員会（平成 30 年 8 月 1 日）資料 3「中深度処分等に係る規制基準等の策定について－第二種廃棄物埋設に係る事業許可基準規則等の骨子案の事業者との意見交換の実施－」、原子力規制庁
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター、東電設計株式会社、令和 4 年度 低レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業 地下空洞型処分調査技術高度化開発 報告書、2023

2. その他の低レベル放射性廃棄物処分に関する調査研究

その他、低レベル放射性廃棄物の浅地中処分、中深度処分に関する以下の調査研究を行った。

(1)L1 廃棄体の乾燥特性データ取得及び充填必要性検討に関する業務委託

L1 廃棄体製作各段階で要求される技術要件を踏まえ、乾燥実証試験の試験条件や試験装置仕様等の検討を行った。また、砂充填の必要性の有無を判断するための技術知見を再整備した。

(2)L2/4 号輸送処分兼用容器の製作及び製作方法等に関する検討

飛散率の検証に必要な模擬廃棄体の落下試験用の L2 角型容器製作に向けて、容器の基本設計を行った。また、標準化に向けて O リングの長期健全性にかかる評価等を行った。

(3)中深度処分の安全評価手法標準の改定支援業務助勢 I

中深度処分の安全評価手法標準に関して、L1 新規制基準の検討状況を考慮し、学会標準のより適正な改定に資することを目的として、調査、検討、学会審議支援などを行った。

(4)中深度処分施設の埋設後管理標準の改定支援補助業務

埋設後管理標準に関して、L1 新規制基準の検討状況を考慮し、学会標準のより適正な改定に資することを目的として、調査、検討、学会審議支援などを行った。

(This page(p10) is intentionally kept blank.)

II. 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する調査研究

1. ニアフィールドシステム評価確証技術開発

◇事業の概要

人工バリアと近傍の岩盤を含めたニアフィールドと称される領域は、人工バリアであるオーバーバック（金属）と緩衝材（粘土）並びにセメント系材料や岩盤等で構成されており、それらの変質や材料間の相互作用等により状態は時間とともに変遷し、バリア構成要素の安全機能や核種移行挙動に影響を与える可能性がある。そのため、人工バリアの状態や性能の変遷挙動を確からしく評価するための技術の開発が望まれる。

本事業では、ニアフィールド構成要素の状態等の変遷を評価するための技術の開発と確証を進めており、当センターは「緩衝材の流出現象及びその後の飽和プロセスにおける挙動」に関する研究開発に取り組んでいる。

処分孔縦置き・ブロック方式では（処分坑道の埋戻しまでの間、上部を自由界面とする場合）、緩衝材の設置後に処分孔の上端よりも周辺岩盤の水位が高い場合に、緩衝材ブロックと孔壁の隙間を流れる孔内湧水の排出とともに緩衝材が流出する可能性が懸念されている。本事業では、緩衝材の流出が懸念される期間（定置直後から処分坑道の埋戻しが完了するまで）を対象として、緩衝材ブロックの定置時に生じる孔壁との隙間に対する処理方法（施工技術オプション）に応じた緩衝材の流出挙動の把握及びそれら施工技術オプションの流出抑制対策としての効果を定量的に評価するための技術の開発・整備を進めている。

また、緩衝材の閉鎖後長期の性能評価では密度均質であることを前提として評価が行われている。既往の報告によれば、試験結果において隙間へ緩衝材が膨潤した後に有効粘土密度は均質化が進む傾向があり、完全に均質化するとは言い切れないものの、試験期間を長くすれば均質化の程度はさらに増加すると予想されている¹⁾。一方、限定的ではあるが過年度の室内試験をとおして、緩衝材の密度分布が飽和後も残存する可能性が示唆されている²⁾。緩衝材の密度分布の残存は、必ずしも処分

施設の長期の安全性に影響するとは限らないが、影響の程度を評価するためには、飽和過程における緩衝材の状態変遷を把握し、飽和後の緩衝材の密度分布を確からしく評価することが重要である。そのため本研究では、飽和プロセスにおける緩衝材の状態変化を評価するための技術の整備を進めている。

なお、本事業は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構及び公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターが共同で実施した経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（JPJ007597）（ニアフィールドシステム評価確証技術開発）」の当センターの担当分である。2022年度が2018年度からの5か年計画の最終年度であることから、5か年の研究開発の成果を取りまとめた^{3),4)}。

◇2018～2022年度の成果^{2),3)}

(1) 検討項目

当センターは、本事業では、次の2項目の検討を進めた。

- 1) 緩衝材の流出を抑制する工学的対策の具体化
- 2) 緩衝材の飽和プロセスを対象とした解析手法の構築

1)では、縦置き・ブロック方式の施工技術オプションの1つとして、3つの隙間処理技術オプション（隙間未充填、ケイ砂充填、ペレット充填）を先行検討対象として、緩衝材の許容流出量を見積もるための流出量評価方法の整備を進めた。2)では、2019年度までに構築した、小型供試体サイズを対象とした緩衝材の浸潤・膨潤プロセスに伴う隙間閉塞挙動に関する力学解析技術（飽和後の密度分布を示す解析手法）をベースに、解析領域のスケールアップや解析モデルの多次元化、解析結果と試験結果の比較、入力パラメータの見直し等を行い、解析手法の段階的な高度化を進めた。

(2) 緩衝材の流出を抑制する工学的対策の具体化

- 1) 緩衝材流出特性の評価手法（方法論）の開発

実事業において処分孔環境に応じて適切な隙間処理技術オプションを選択できることを目的として、3つの隙間処理技術オプションからの選択（比較評価）を行う際の判断指標や適用範囲の

設定に関する考え方の整理及び緩衝材の流出量を評価するモデル（以下、「流出量評価モデル」という。）の開発・整備手順（方法論）を構築した。

流出量評価モデルは、隙間処理技術オプションの選択における比較評価での活用を念頭に、操業時に取得可能なパラメータ（処分孔内外水頭差 H 、処分孔内湧水量 Q 、緩衝材の流出が懸念される期間 t ）を主な引数とした関数 $M_{BENT}(t, H, Q)$ として表現することを目指して、以下の6つの開発ステップによる開発手順を構成した。

- Step1: イオン交換水を用いた室内要素試験による緩衝材界面を切り出した微小領域モデル（以下、「ベースモデル」という。）の構築
- Step2: 室内工学規模（中規模）試験によるスケール効果を考慮したベースモデルの拡張
- Step3: 室内要素試験による実環境効果（水質等）を考慮したベースモデルの拡張
- Step4: 室内工学規模（中規模）試験によるスケール効果及び実環境効果（水質等）を考慮したベースモデルの拡張（拡張モデル）
- Step5: 原位置工学規模（中規模）試験によるスケール効果及び実環境効果（水質、幾何形状等）を考慮した拡張モデルの補正
- Step6: 原位置工学規模（中規模）試験の実証結果を用いた拡張モデル（Step1～5）の比較、適用性の評価、ならびに実事業（精密調査段階以降）への適用性確認への展開

上記の手順で流出量評価モデルを開発することで、候補サイトの地下環境に即した流出量評価モデルを迅速かつ合理的に整備することが可能となる。また、現在の研究開発段階において、室内要素試験により構築したベースモデルの工学規模／実規模ならびに実環境への拡張性が確認できれば、実事業段階では室内要素試験によりベースモデルを整備することで原位置実環境に適用可能な拡張モデルへと展開することができる。このような流出量評価モデルを隙間処理技術オプション毎に整備することで、実際の処分孔環境に個々のオプションを適用した場合の緩衝材流出量の定量的な予測が可能となり、許容される緩衝材の流出量との関係から適切なオプションを選択することが可能となる。

2) 方法論の適用性の確認（流出量評価モデルの開発と原位置への適用性の確認）

候補サイトが決まっていない現段階では、流出量評価モデルの与条件である緩衝材ブロック等の設計仕様、原位置で測定可能なサイトに依存したパラメータ等は全て未知である。そこで本研究では、幌延深地層研究センターの地下施設（以下、「幌延 URL」という。）を例題として、前記 1) に示した評価手法（開発手順）の方法論としての適用性を確認するために、ケイ砂充填オプションと隙間未充填オプションを対象に、開発ステップのうち Step1、Step3、Step5 を先行的に実施した。Step1 では、これまで、室内試験は定流量での給水（流量が一定になるように水圧は増減）により実施されてきた。本検討では、原位置での地下水の挙動を鑑み、水頭差を一定（流量はバルブの開きを一定として試験中の隙間の状態により変化）にした定水位での給水により室内試験を実施した。また、本来、竖向きの緩衝材境界面の微小領域を対象とした試験を実施するべきだが、多数の試験ケースを実施する必要がある、竖向きによる目詰まりの回避や大量の通水液の確保の観点から、試験セル（緩衝材境界面）を横向きとし、且つイオン交換水を用い、Step3 では、実環境の効果（竖向き、水質）を補正することとした。Step5 では、幌延 URL350m 調査坑道（試験坑道 5）に設けられた試験孔を活用した原位置工学規模（中規模）スケール試験（以下、「原位置実規模 1/4 スケール試験」という。）のデータを用いた。

本報告では、ケイ砂充填オプションについて実施した内容を①から③に要約する。

① 室内要素試験に基づくベースモデルの構築（Step1）

室内要素試験では、図-1 に示す試験セルを横向きとした装置を用いて緩衝材表面に作用する水頭差（0.5、1.0、2.0m）と初期流量（1、10、20mL/min）を制御パラメータとした定水位条件による試験を実施し、緩衝材の累積流出量（g）、ベントナイト濃度（mg/L）、流量（mL/min）、膨潤圧（kPa）の経時変化に係るデータを取得した。本試験では、ケイ砂 30wt% のベントナイト混合土を圧縮成形した緩衝材（乾燥密度 1.9Mg/m³、高さ 200mm、幅 200mm、奥行 20mm）の上部に高さ 20mm の隙間（隙間にはケイ砂を充填）を設け、その隙間にイオン交換水を通水した。

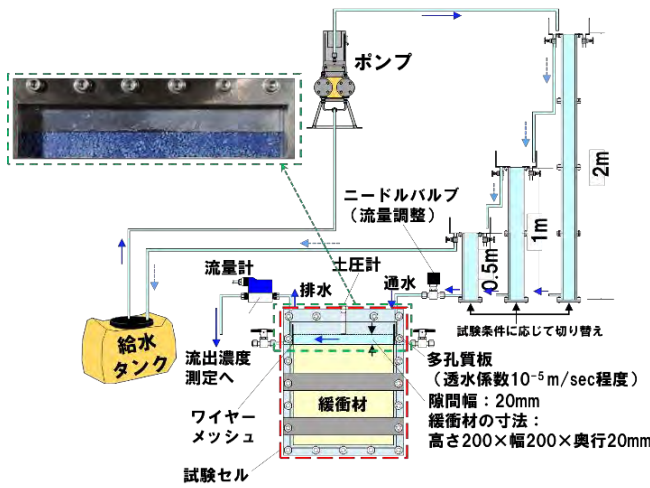
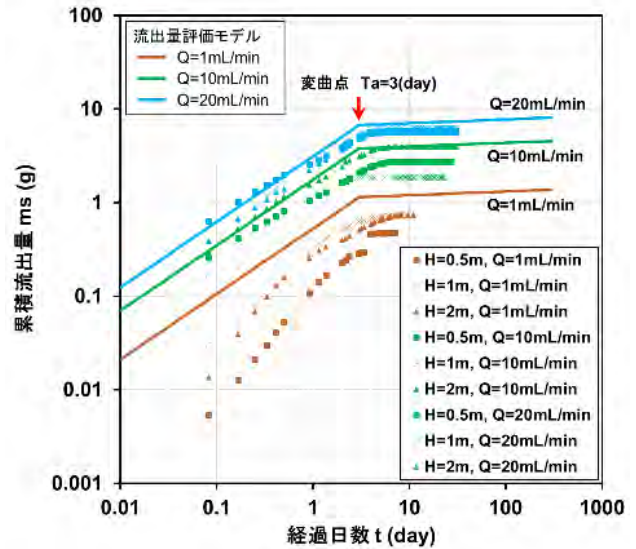


図-1 室内要素試験の装置概要

本試験において緩衝材の流出は試験開始直後に集中し、その後は漸増する傾向を示した(図-2)。このような傾向は試験パラメータの違いによらず試験開始後約3日(同図の変曲点 T_a)を境とした前後の挙動として示されている。ケイ砂充填オプションでは、このような傾向は当初想定していなかったが、後述する原位置中規模での物理挙動とは異なる影響の一つとして、通水直後に分散した緩衝材の微細粒分がそのまま試験系の外に流出するような流路長の違い等が影響している可能性が示唆された。

試験結果に基づく定式化では、変曲点 T_a を境に単調増加区間と漸増区間に分けて、べき関数による表現を試みた(事業成果報告書にはシグモイド関数による表現の試行結果も掲載しているので参照されたい³⁾)。

べき関数($m_s = at^\beta$)において、 m_s は緩衝材の累積流出量、 t は緩衝材設置後の経過日数、 α, β はべき関数の定数を示す。緩衝材の累積流出量 m_s の引数は、流量 Q (mL/min)、水頭差 H (m)、時間 t (day)、変曲点 T_a (day)が挙げられるが、本試験で設定したパラメータの範囲では、累積流出量 m_s は流量 Q と高い相関を示すこと、及び各ケースで $T_a = 3$ (day)に収束することより、流量 Q と時間 t に引数を限定して、図-2に示すベースモデルを構築した。



流出量評価モデル(べき関数):ケイ砂充填オプションの場合

$$0 < t < T_a \quad m_s(t, Q) = (0.136Q + 0.393)t^{0.7}$$

$$T_a \leq t \quad m_s(t, Q) = \frac{(0.136Q + 0.393)T_a^{0.7}}{T_a^{0.04}} t^{0.04}$$

図-2 緩衝材の流出量評価モデル(べき関数)

②室内要素試験による実環境効果(水質等)を考慮した評価モデルへの拡張(Step3)

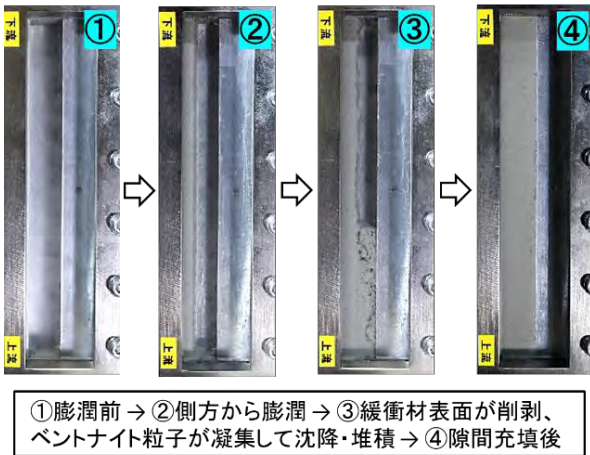
Step3では、実環境(幌延URL)の原位置実規模1/4スケール試験による適用性確認(Step5)を見据え、図-1の試験装置を用いて試験セルを竖向きにした試験による重力補正、塩水系の幌延地地下水の水質を模擬した地下水(以下、「幌延模擬地下水」という。)を用いた試験による水質補正を検討して、ベースモデルに実環境効果を考慮した拡張を試みた。

竖向きの試験では、横向きの試験と比べて2倍程度の流出量が確認され、その要因として、通水口付近(ケイ砂を充填した隙間の下側)における、ケイ砂の間隙の微細粒分の沈降による目詰まりに伴う流路断面の流速分布の違いや、それによるケイ砂の間隙への微細粒分の分散状態の違いなどが想定された。

幌延模擬地下水を用いた横向きの試験では、緩衝材の流出はゼロとなった。その要因として、幌延模擬地下水の水質(イオン種、イオン濃度、pH等)の影響により“微細粒分”の凝集、団粒化(図-3:隙間未充填オプションの試験結果より)が生じたことが考えられる。幌延模擬地下水を用いた竖向きの試験でも、緩衝材の流出はゼロとなり、本試験系では水質による補正值の定量化には至

らなかった。

これらの結果から、室内要素試験に用いた装置の構造（下流に設置したメッシュフィルタによる目詰まり等）や要素面積のサイズ等に改善すべき課題が残されている可能性も示唆された。



①膨潤前 → ②側方から膨潤 → ③緩衝材表面が削剥、ベントナイト粒子が凝集して沈降・堆積 → ④隙間充填後

図-3 塩水による緩衝材の凝集・団粒化現象（隙間未充填オプションの試験より）

③原位置実規模 1/4 スケールへの適用性の確認 (Step5)

Step5 では、原位置実規模 1/4 スケール試験（試験孔の孔径 580mm、深さ 1,590mm）により自然湧水環境での緩衝材の流出特性を把握し、Step3 で得られた拡張モデルの適用性について検証した。

本試験は、図-4 の概要図に示すように中空円柱状の緩衝材ブロック（外径 540mm、内径 210mm、高さ 500 mm、初期乾燥密度 1.92 Mg/m^3 ）を試験孔内に定置後、緩衝材ブロックと孔壁との隙間幅 20mm にケイ砂を充填し、その隙間を流れる地下水を試験孔外に設けた釜場に排水し、地下水流量や緩衝材の流出量を計測できる機構とした。

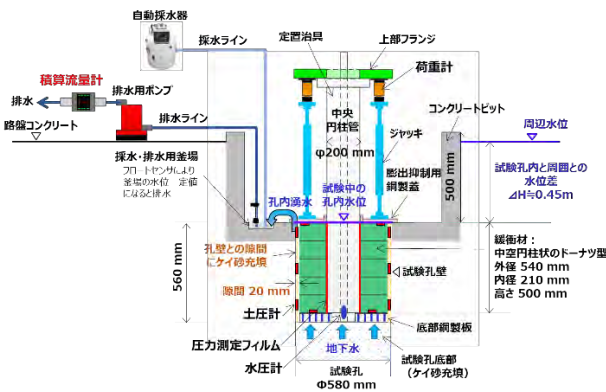


図-4 原位置実規模 1/4 スケール試験の概要図

図-5 に原位置実規模 1/4 スケール試験における累積流出量の試験結果（赤線）と流出量評価モデル（前記①のベースモデルに②の補正及びスケール効果を加えた拡張モデル）による評価結果（緑線）を示す。なお、流出量評価モデルによる評価では、前記②の結果を踏まえて、水質補正は考慮せず、重力補正を2倍とした。スケール効果については、室内要素試験及び原位置試験で使用した緩衝材が水に接する面積比から212倍とした。また、モデルによる評価結果と試験結果の評価期間は、NUMOの包括的技術報告書⁵⁾（以下、「NUMO-SC」という。）に示される新第三紀堆積岩類における処分坑道の埋戻しまでの期間を参考に284日を設定した（坑道の埋戻しにより処分孔から坑道への地下水の流れはなくなり流出は停止するとして評価期間は設定）。

流出量評価モデルは、室内要素試験のデータセットに基づくモデル式であるため、モデルの予測結果は、試験結果よりも数日経過した段階 ($T_a = 3\text{day}$) まで立ち上がった後に漸増を維持する挙動を示した。一方、原位置試験で測定されている累積流出量は、試験初期から線形に増加する傾向を示したため、開始直後に立ち上がる流出量評価モデルの流出挙動とは異なる傾向を示した。そのため、坑道埋戻しまでの評価期間における流出量評価モデルの累積流出量は、原位置試験結果に基づく回帰直線により推定した累積流出量に比べ、約2.7倍と過大な傾向を示すが、前記①で示唆された室内試験装置の流路長等が影響した可能性及び前記②で示唆されたベントナイト粒子の凝集や団粒化を踏まえた水質の影響に留意すれば、両者の差は縮まる可能性がある。なお、原位置試験結果に基づき線形外挿で推定した284日の流出量 (725g) は緩衝材ブロックの0.4%である。また、流出前の緩衝材ブロックの平均乾燥密度 1.76Mg/m^3 （隙間に充填したケイ砂の間隙を緩衝材が充填することも考慮した値）に対し、流出後は 1.75Mg/m^3 である。原位置試験の予測モデルによる284日の流出量 ($1,927\text{g}$) は、同様に1.0%と 1.74Mg/m^3 である。そのため、ケイ砂充填オプションにおける流出量は、緩衝材の性能が十分維持できる範囲と考えられる。

また、隙間未充填オプションにおける原位置試験結果に基づき線形外挿で推定した284日の流出量は $2,453\text{g}$ 、原位置試験の予測モデルによる284

日の流出量は 17,786g、NUMO-SC の予測方法（定流量条件）による 284 日の流出量は 263,697g であった（詳細は報告書参照）。本検討では、定水位条件による流出試験に基づいて評価方法を構築したことで、NUMO-SC の予測方法に対して 1 オーダー程度、流出量の予測値が試験値に近づいており、より現実的な緩衝材の流出評価手法を示すことができた。

ケイ砂充填オプションの原位置試験の結果と予測結果の差を特徴付けるベースモデルの初期の増加傾向については、室内要素試験固有の影響（通水初期の流出量の増加の要因となる装置のスケールや構造など）に加え、比較対象とした原位置実規模 1/4 スケール試験の試験数の少なさ（試験結果の再現性の検証）といった課題も残されており、これらへ改善や対応が望まれるものの、緩衝材の流出特性の評価手法（方法論）としての一定の見通しを得ることができた。

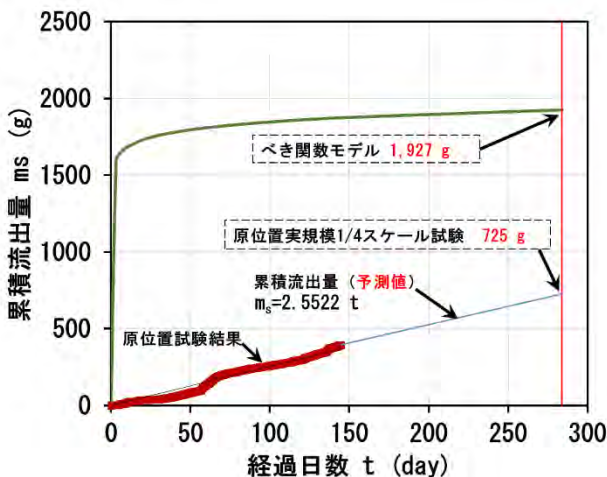


図-5 流出量の評価モデルと原位置試験結果との比較

(3) 緩衝材の飽和プロセスを対象とした解析手法の構築

既に述べたように、縦置き・ブロック方式における施工技術オプションのうち隙間未充填オプションでは、緩衝材の流出や膨潤等により、緩衝材内部の密度分布に不均質が残存する可能性がある。本研究では、緩衝材の不飽和状態から飽和に至る過程における力学的な変化を表現し、乾燥密度分布等の変遷を定量的に評価できる力学解析手法の構築に取り組んでいる。

本フェーズでは、解析手法の構築に向けて、解析体系を小型試験体スケールから実規模1/4スケールへと段階的に拡張し、各段階で試験結果との比較検証により解析手法の適用性を確認しつつ、高度化を進めてきた。

1) 小型セル試験を対象とした解析手法の検証

不飽和状態からの力学挙動を再現できる基礎的な解析手法の構築に向けて、小型試験体スケールの膨潤挙動の再現解析を実施した。解析対象は、不飽和の緩衝材供試体（ケイ砂 30%混合クニゲル V1、初期寸法：直径 40mm、高さ 20mm）が、上面からの給水に伴う膨潤により上部の隙間（5mm）を充填する過程とした。解析コードには、土/水連成有限要素法解析コード群 DACSAR[®]を用いた。

まず、飽和状態を初期条件とした解析を実施し、隙間充填挙動と乾燥密度の変遷を表現できることを確認した。続いて、不飽和状態のベントナイトに適用可能な弾塑性構成モデルの実装により DACSAR-I⁷をアップデートし、それを用いて不飽和状態を初期条件とした解析を実施した。解析結果と試験結果を比較すると、側圧に見られるピーク値と膨潤速度に顕著な差異が見られたが、不飽和状態の力学応答に関連するパラメータや不飽和水分特性に関するパラメータをキャリブレーションすることで、いずれも試験結果と概ね整合する結果が得られた。

上記の解析により得られた乾燥密度分布の変遷を図-6 に示す。緩衝材が 20 日程度で隙間を充填し、平衡に至った後も乾燥密度分布に不均質が残る解析結果が得られた。この平衡後の乾燥密度分布は試験結果と概ね整合した。

以上のように、小型試験体スケールにおける不飽和から飽和に至る過程の緩衝材の膨潤挙動と乾燥密度分布の変遷を定量的に評価することが可能となり、不飽和状態からの力学挙動を再現できる基礎的な解析手法を構築した。

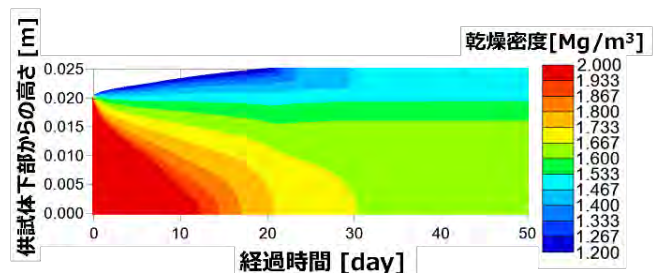


図-6 緩衝材の乾燥密度分布の変遷

2) 実規模 1/4 スケールへの拡張

解析体系の多次元化やスケールアップに向けて、解析体系を実規模 1/4 スケールへと拡張し、前記(2)の一環として実施した原位置実規模 1/4 スケール試験への適用性を確認しつつ、解析手法の高度化を検討した。まず、一次元軸対称モデルで解析を実施し、透水係数などのパラメータの見直しを経て、試験で得られた応力分布等の力学挙動を概ね再現できることを確認した。続いて、二次元軸対称モデルで解析を実施し、試験結果との比較、検証により一次元解析と同様に力学挙動を概ね再現できることを確認したものの、平衡時における緩衝材内部の膨潤圧の分布が試験結果と異なる傾向を示した。この要因の1つとして、孔壁と緩衝材との界面における摩擦の影響が考えられた。そこで、摩擦の有無による解析結果への影響を確認するために、摩擦を考慮した境界条件で解析を実施した。

膨潤圧(側圧)の解析結果を図-7 (a) (b)に示す。摩擦を考慮しない場合(a)には、緩衝材上部の側圧が最大となるが、摩擦を考慮した場合(b)には、中央部の側圧が最大となり、試験結果(図-7 (d))と同様の傾向が再現された。

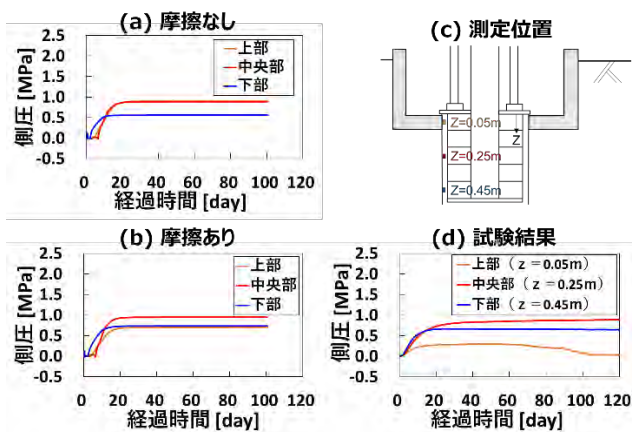


図-7 側圧の経時変化

また、図-8 に示すように飽和後の乾燥密度分布についても、試験結果と概ね整合する傾向が見られ、実規模 1/4 スケールにおいても原位置試験(原位置実規模 1/4 スケール試験)の膨潤挙動及び乾燥密度分布の傾向を概ね再現することができた。今後は、より現実的な条件での摩擦係数の取得や緩衝材内部の残留空気圧のモデル化等による解析手法の高度化が期待される。

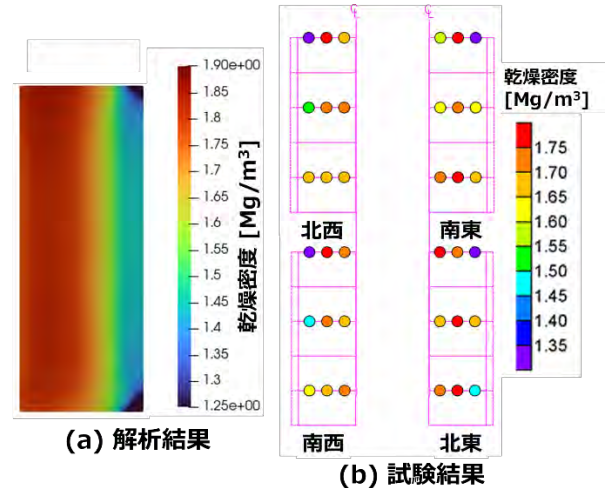


図-8 乾燥密度分布

- 1) 土木学会エネルギー委員会低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会、余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方、2008
- 2) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 処分システム工学確認技術開発(第 2 分冊) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築-緩衝材、2018
- 3) 日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、令和 4 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 ニアフィールドシステム評価確認技術開発報告書、2023
- 4) 日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 ニアフィールドシステム評価確認技術開発 平成 30 年度~令和 4 年度 取りまとめ報告書、2023
- 5) 原子力発電環境整備機構、包括的技術報告書 わが国における安全な地層処分の実現-適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築-、NUMO-TR-20-03、2021
- 6) Iizuka, A. and Ohta, H., A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundations, Vol.27, No.3, pp.71-87, 1987
- 7) Takeyama, T., Tachibana, S. and Furukawa, A., A finite element method to describe the cyclic behavior of saturated soil, International Journal of Material Science and Engineering 2 (1), pp. 20-25, 2015

2. 地層処分施設閉鎖技術確証試験

◇事業の概要

本事業では、地層処分研究開発に関する全体計画¹⁾の処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備を踏まえて、坑道シーリングに関わる施工技術の整備及び処分場の最終閉鎖の判断に資する高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発を進めた。

坑道シーリングに関わる施工技術の整備では、埋戻し材の材料特性データの拡充、転圧工法及び吹付け工法による施工試験、スクリー工法及びブロック工法に関する要素試験等を実施し、多様な地質環境条件や処分場設計オプションに対して埋戻し施工方法を柔軟に選択できるように施工性や施工品質に関する基盤情報を整備した。

高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発では、人工バリアを含む地下構成要素の品質保証体系の整備に向けた考え方を整理し、その素案を整備した。また、地下構成要素の品質管理及び性能確認のための計測やモニタリング技術に関する共通基盤技術として、無線伝送システムの長期運用性を確認するとともに無線給電システムの概念設計方法を整備した。

なお、本事業は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構及び公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターが共同で実施した経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（JPJ007597）（地層処分施設閉鎖技術確証試験）」の当センターの担当分である。2022年度が2018年度からの5か年計画の最終年度であることから、5か年の研究開発の成果を取りまとめた^{2),3)}。

◇2018～2022年度の成果^{2),3)}

(1)坑道シーリングに関わる施工技術の整備

1)埋戻し材の材料特性データの拡充

埋戻し材には低透水性を確保するためのベントナイトに加え、材料の調達しやすさや経済性の観点から、坑道の掘削に伴い大量に発生する掘削土を利用することが想定されている。そのため、ケイ砂及び複数の岩種のコンクリート用の砕石2005と砕砂を掘削土の代用材（以下、模擬掘削土）

として模擬掘削土の種類と最大粒径、ベントナイトの種類と混合率が埋戻し材の性能に与える影響を把握するために締固め試験及び透水試験を実施した。使用材料と試験条件を表-1及び表-2に示す。ベントナイトにはクニゲルV1（Na型）とクニボンドRW（Ca型）の2種類を用いた。

表-1 使用材料

ベントナイト		模擬掘削土	
Na型	Ca型	ケイ砂	砕石・砕砂 最大粒径20mm
クニゲルV1	クニボンドRW	3号 6号	流紋岩、安山岩、玄武岩、花崗岩、砂岩、凝灰岩、珪藻土、泥岩

表-2 試験条件

ベントナイト混合率 (%)	締固めエネルギー	試験項目
5,15,30,50 (Na型) 15,30,40,50 (Ca型)	Ec、2Ec、4.5Ec	締固め試験 透水試験

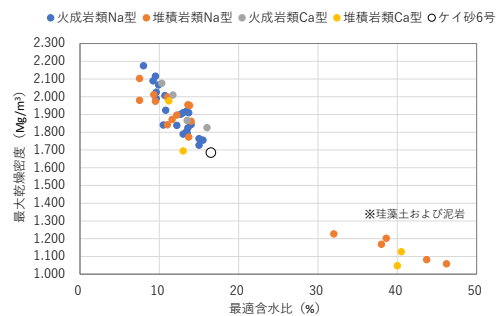


図-1 埋戻し材の最大乾燥密度と最適含水比の関係

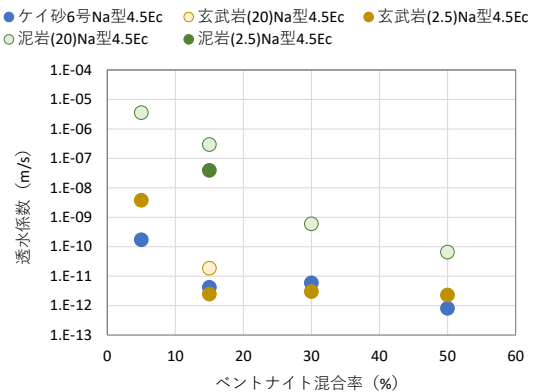


図-2 透水係数とベントナイト混合率の関係

主な試験結果を図-1及び図-2に示す。例えば、泥岩などの空隙率が高い岩種では、締固め時の破碎により透水係数が高くなると考えられること、模擬掘削土の最大粒径が透水係数に影響を及ぼすことなど、埋戻し材に掘削土を利用する際に留

意すべき項目を把握することができた。模擬掘削土やベントナイトの条件が埋戻し材の性能に及ぼす影響を整理した結果を表-3に示す。

表-3 材料条件が埋戻し材の物性に及ぼす影響

		締固め性	透水性
模擬掘削土	岩種	空隙率が高い(脆い)岩種においては、締固め時の破砕性等の影響により締固め性が低く、透水係数が高くなる	
	最大粒径	最大粒径が大きい場合、最大乾燥密度が若干高く、透水係数が若干高い	
	粒度	締固め試験のC法では微粉末の混合により最大乾燥密度が若干高くなる。(A法では影響は小さい)	イオン交換水条件下では模擬掘削土の微粉末の影響は小さい
ベントナイト	種類	同じ混合率の場合、Na型と比べてCa型の締固め性は低い	同じ混合率の場合、Na型と比べてCa型の透水係数は高い
	混合率	Na型：混合率30%で最大値 Ca型：15%で最大値	混合率の増加に伴い透水係数は小さくなる

2) 埋戻し施工技術オプションの整備

① 模擬坑道における埋戻し施工試験

埋戻し材の施工品質及び施工速度などの施工情報を取得するために、図-3に示す模擬坑道(高さ5m、幅5mの馬蹄形)において、転圧工法と吹付け工法で汎用機を用いた施工試験を実施した。施工試験では、埋戻し材の乾燥密度の分布計測と自重沈下などにより坑道上部に生じる可能性のある隙間検知のための計測技術の適用性についても確認した。



図-3 模擬坑道の外観

模擬坑道内の施工範囲を図-4に示す。模擬坑道の高さ約1.9mまでを転圧工法により埋め戻した後(図中の灰色部分、2021年度に実施)、空頭制限により転圧機が接近できない坑道側壁の近傍(橙色部分)を吹付け工法(低密度)、その内側(黄色部分)を転圧工法で埋め戻した。その後、坑道端部の壁面から1.5mの範囲の坑道上半部

(紫色部分)を吹付け工法(高密度)で埋め戻した。図-5に施工試験の状況を示す。

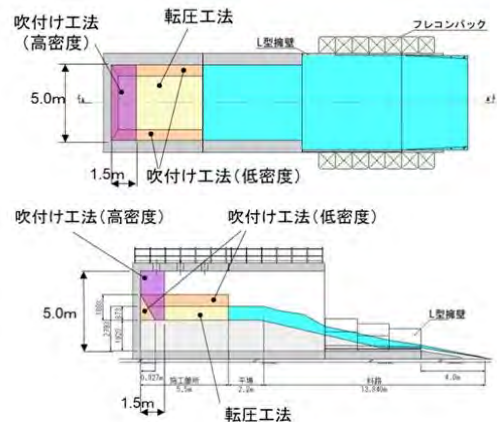


図-4 転圧工法及び吹付け工法による埋戻し施工範囲



図-5 転圧工法及び吹付け工法の施工試験状況

○ 埋戻し材の材料仕様及び施工方法

施工試験で使用した埋戻し材の材料仕様を表-4に示す。埋戻し材の含水比は、締固め試験等の結果を踏まえて、転圧工法では9%、吹付け工法(高密度)では13%、吹付け工法(低密度)では8.5%とした。各工法の主な施工仕様を表-5に示す。今回の施工試験では、埋戻し材に要求される透水係数を 1×10^{-9} m/s以下に設定した。

表-4 埋戻し材の材料仕様(質量%)

工法	ベントナイト (クニゲルV1)	模擬掘削土(玄武岩)	
		砕石	砕砂
転圧工法	15%	51%	34%
吹付け工法	15%	0%	85%

*砕石の最大粒径：20 mm、砕砂の最大粒径：5 mm

表-5 転圧工法及び吹付け工法の主な施工仕様

工法	施工仕様
転圧	転圧機：1.5t 小型振動ローラ、撒出し厚：250 mm、 転圧回数：2回(無振動) + 6回(振動)
吹付け (低密度)	ノズル操作：機械、吹付け圧：0.3~0.4 MPa、 材料供給量：5.4 kg/10sec
吹付け (高密度)	ノズル操作：機械、吹付け圧：0.7 MPa、 材料供給量：15.0 kg/10sec

○施工試験結果

転圧工法及び吹付け工法における施工後の埋戻し材の透水係数と乾燥密度の関係を図-6 と図-7 に示す。施工試験の結果、転圧工法と吹付け工法により、設定した要求品質(透水係数 1×10^{-9} m/s)を満足する埋戻し材の坑道全断面施工が可能なことを確認した。転圧施工後の埋戻し材の透水係数は、施工試験結果と室内試験結果が概ね整合する結果が得られた。一方で吹付け施工では、室内試験結果よりも施工試験結果の透水係数が小さかった。吹付け施工では、吹付け面に材料が付着せず落下する現象(リバウンド)が発生し、粒径の大きい砕砂はリバウンドしやすい傾向にある。そのため、吹付け面に付着した埋戻し材のペントナイト混合率が相対的に増加したことで施工試験結果の透水係数が小さくなった。

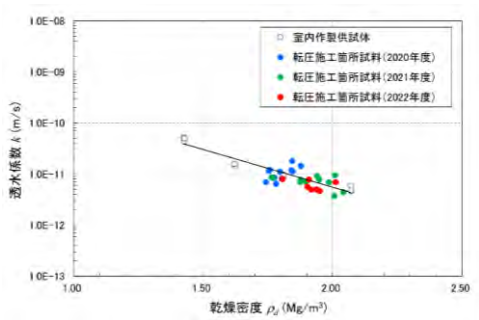


図-6 乾燥密度と透水係数の関係(転圧工法)

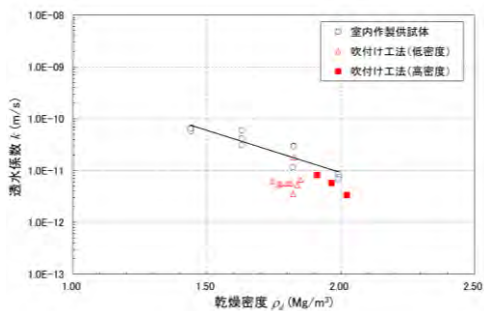


図-7 乾燥密度と透水係数の関係(吹付け工法)

施工試験の結果から得られた施工情報の一例を表-6 に示す。乾燥密度の標準偏差をみると、転圧工法に比べて吹付け工法では乾燥密度のばらつきが小さかった。また、施工速度は、転圧工法では埋戻し材の撒出し・敷均しの影響が大きく、吹付け工法ではリバウンド率及びリバウンド回収時間の影響が大きかった。さらに、転圧工法では最大粒径 20mm の掘削土が使用可能であり、吹付け工法に比べて掘削土の適用範囲が広がった。

吹付け工法では、粒径の大きな掘削土の多くはリバウンドすることから、最大粒径 20mm の使用は困難であった。また、埋戻し材の含水比が施工品質に及ぼす影響が大きいため、転圧工法に比べて含水比の管理が重要であった。

表-6 施工試験で取得した施工情報の一例

評価項目案	転圧工法	吹付け工法(高密度)
施工可能範囲	坑道下半部	坑道全断面
乾燥密度(標準偏差)	1.78~2.11 Mg/m ³ (0.072)	1.92~2.03 Mg/m ³ (0.034)
透水係数	$1.8 \times 10^{-11} \sim 3.6 \times 10^{-12}$ m/s	$3.4 \times 10^{-12} \sim 8.3 \times 10^{-12}$ m/s
施工速度	1.04 m ³ /h 主な影響要因: 撒出し、敷均し	0.56 m ³ /h 主な影響要因: リバウンド材の回収
原位置施工管理	原位置での施工管理が必須 (撒出し厚さ、転圧回数など)	原位置での施工管理が必須 (吹付け厚さ、リバウンドなど)
掘削土の適用範囲(最大粒径)	最大粒径 20 mm 以下	最大粒径 5 mm 以下 (リバウンドを考慮)
使用材料の柔軟性	材料含水比の施工品質への影響は小	材料含水比の施工品質への影響は大
施工による環境影響	転圧機による 振動・騒音	吹付け機による 騒音・粉塵

○埋戻し施工における計測技術の適用性確認

埋戻し材の乾燥密度分布計測には、加熱式光ファイバによる分布型温度センシング法(active Distributed Temperature Sensing、以下、aDTS法)、坑道と埋戻し材の隙間検知には、フィード線をセンサとした時間領域反射率測定法(Time Domain Reflectometry、以下、ケーブル TDR 法)を用いた。

aDTS 法による乾燥密度分布計測では、事前に埋戻し材の乾燥密度と熱伝導率の関係を把握しておき、施工試験後の埋戻し材を加熱した時の温度上昇量から熱伝導率を算出して、乾燥密度を推定することができる。加熱式光ファイバの設置状況を図-8 に示す。また、転圧及び吹付け(高密度)施工後の乾燥密度分布を図-9 と図-10 に示す。なお、図には施工直後及び解体時のサンプリング試料から求めた乾燥密度も併せて示した。

aDTS 法で推定した乾燥密度は、転圧工法、吹付け工法ともにサンプリング試料の乾燥密度と概ね整合しており、埋戻し材の乾燥密度分布計測技術としての適用性は高いと考えられる。ただし、転圧施工部分の一部では、aDTS 法とサンプリング

による乾燥密度の値に 0.2Mg/m^3 程度の差がみられた。その原因としては、粗粒分（転圧では最大粒径 20mm ）が埋戻し材と加熱式光ファイバケーブルの密着度を低下させたことにより、aDTS法で計測される温度上昇量の波形のS/N比を低下させた可能性が考えられる。



(a) 転圧施工部分 (b) 吹付け施工部分
図-8 加熱式光ファイバの設置状況

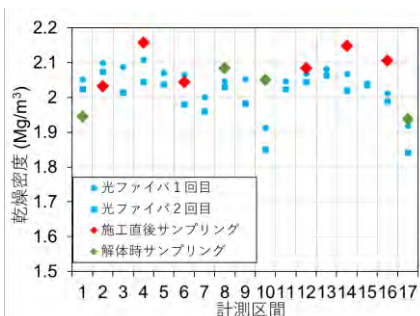


図-9 転圧施工部分の乾燥密度分布

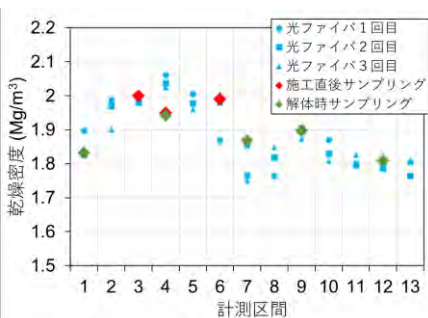


図-10 吹付け（高密度）施工部分の乾燥密度分布

隙間検知技術では、坑道天端の横断方向にフィーダ線を設置し、吹付け施工前後の誘電特性の違いから隙間発生の有無を確認した。施工試験終了から2か月後と4か月後のケーブルTDR法による計測結果（電圧反射係数）を図-11に示す。施工完了から2か月及び4か月経過後の電圧反射係数の波形は埋戻し材に覆われた状態よりも大きくなっている部分があり、部分的に坑道天端に空隙が発生している可能性が示唆された。埋戻し材の解体時にビデオスコープ等で坑道天端の埋戻し材の状態を観察したところ（図-12）、ケーブルTDR法で空隙が検知された位置の付近には、幅が8~15mm程度の間隙が確認された。こ

の間隙が生じた原因としては、埋戻し材の自重による沈下、乾燥収縮などが考えられるが、施工試験で隙間の幅を確認しておくことにより、実際の坑道における施工では坑道天端付近のペントナイト混合率を高めるなどの対策で膨潤により隙間を閉塞させることができると考えられる。

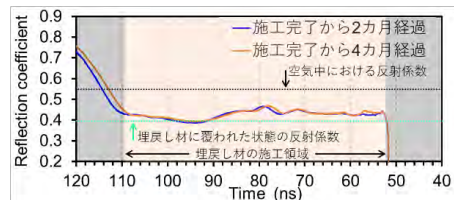


図-11 ケーブル TDR による計測結果

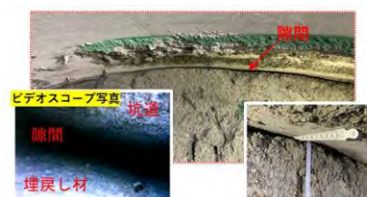


図-12 解体時の隙間確認の状況

3) 埋戻し施工の効率化に向けた検討

転圧工法や吹付け工法と比べて施工効率（施工管理の容易性、施工速度など）の向上が期待できるスクリー工法（スクリーフィーダを用いて埋戻し材を坑道に充填する工法）及びブロック工法（埋戻し材をブロック成型して坑道に positioning する工法）について、要素試験等を実施して埋戻し工法としての適用性の見通しを得た。

スクリー工法の要素試験の実施状況と試験結果等から得られた主な成果を図-13及び表-7に示す。最初に文献等の調査結果を基にスクリー工法による施工装置の概念設計を行ったうえで、スクリーフィーダによる搬送性及び充填性などを確認するための要素試験を実施した。搬送性については、スクリーの回転数と搬送量の関係を要素試験で把握して、スクリーフィーダ1本あたりの搬送能力を確認した。充填性については、機械仕様、充填範囲及び使用材料の適用範囲などのデータを取得したうえで、2本のスクリ



図-13 土槽充填性試験の状況

ューフィーダーにより天端部や隅角部を充填するためのスクリー配置及び回転方向の影響などを把握した。

表-7 主な成果と課題（スクリー工法）

項目	成果
搬送性	スクリー回転数と搬送量の関係を把握し、1本あたりの搬送能力 4.24 m ³ /h を確認。主要坑道の推定施工量 52 m ³ /h（スクリー14本）。
土槽内充填性確認（1本）	施工（機械）仕様（回転数、後退速度等）、スクリー1本の充填範囲（高さ、幅）及び使用材料の適用範囲（5 mm 以下）を設定。かさ密度管理（3D 画像計測システム）の適用性確認（狭隘空間）。
土槽内充填性確認（2本）	埋戻し材料が回転慣性により回転方向へ押し込まれる事象を確認。天端部、隅角部を隙間なく充填するためのスクリー配置、回転方向の影響を把握。

ブロック工法の試験結果から得られた主な成果を表-8 に示す。埋戻し材ブロックの製造・設計仕様に関する基礎データを取得するために、成型圧力や配合などの製造仕様をパラメータとした静的締固め試験を実施して、製造仕様とブロックの品質（乾燥密度、透水係数など）の関係を把握したうえで、図-14 に示す小型ブロック（300mm×300mm×100mm）を製造してブロック内の乾燥密度のばらつきを確認した。また、大型のブロックを対象とした施工方法としてフォークリフトによる定置方式を選定し、想定される施工工程から施工速度を概算した。さらに、坑道壁面とブロック間などの隙間への対処方法を検討するために、埋戻し材ブロックの膨潤特性に関するデータを取得した。

表-8 主な成果と課題（ブロック工法）

開発項目	成果
ブロック製造・設計仕様に関するデータ取得	ブロック製造仕様（成型圧力、ペントナイト混合率など）とブロック品質（乾燥密度、透水係数など）の関係を取得。
ブロック製造試験（小型）	小型ブロックの製造性を確認。（ブロック内部のバラツキ：乾燥密度は±0.1 Mg/m ³ 程度、含水比は±1%程度）
実寸大ブロックを対象とした施工方法の検討	実寸大ブロックを想定した定置方式として、フォークリフトによる定置方式を選定。施工速度の予備的検討を実施。（約 9 m ³ /h、32 秒/個）（ブロックサイズ：35×60(30)×50 cm）
坑道壁面とブロック間などの隙間処理方法の検討・試験の実施	埋戻し材の鉛直方向への膨潤変形率は水平方向の約 1.6 倍。（二方向膨潤変形試験）埋戻し材の膨潤後の発生圧力、有効粘土密度などのデータを取得（自己シール性試験）



図-14 小型ブロックの外観

(2) 高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発

1) 製作・施工技術に係る品質保証体系の整備

第一種廃棄物埋設に関する安全規制では、核燃料物質等による放射線の被ばく管理に関する定期的な評価を実施することが求められている⁴⁾。この評価では、最新の技術的知見を踏まえた性能評価及び安全評価を実施して、規制への適合性を判断することになると考えられる。したがって、人工バリアを含む地下構成要素の製作・施工に係る品質や施工後の状態などの情報を取得するための取組が重要となる。

そのため、本事業では、地下構成要素の品質保証体系を整備するための考え方を整理するとともに、定期的な評価に必要な情報を取得するための取組を施工時と施工後の段階に分けて、次の2つの取組として品質保証体系の素案を整備した。

品質管理プログラム：地下構成要素の仕様を満足する製造・施工を実施し、施工品質を把握するための取組

性能確認プログラム：定期的な評価における性能評価に必要な情報を取得するための取組

これらの取組で一定の役割が期待される原位置測定やモニタリングは原位置での作業負荷を増大させるため、本事業では原位置測定やモニタリングを最小化する方向でプログラムの素案を整備した。

品質管理プログラムについては、材料製造及び施工のプロセスにおける品質管理で品質を保証することを指向して、北欧やわが国の検討結果などを踏まえて、地下構成要素の製造・施工プロセス管理手法の素案を整備した。

原位置測定やモニタリングを最小化した性能確認プログラムでは、操業前の取組が重要となる。例えば、地下構成要素の仕様は、概要調査及び精密調査段階で測定される環境要因（地下構成要素を変遷させる地質環境特性）に対して、空間的及び時間的な変動の幅を考慮した設計データに基づき設定されることになると考えられる。この設

計用データは、性能評価用のデータとしても利用することができるため、操業期間中に定期的に環境要因を測定しておくことで、性能評価の入力情報を更新することができる。そのため、地下構成要素の設計要件、評価項目、安全評価で使用されているパラメータから地下構成要素のバリア性能を変化させる可能性がある環境要因などを原位置測定・モニタリング項目の案として整理したうえで、性能確認プログラムの素案を整備した。

本事業で整備した品質管理プログラムと性能確認プログラムの素案は、今後、関係者間で品質保証体系について議論をするための基礎となるものであり、地層処分事業の進捗に応じて適切に更新していく必要がある。

2) 地下構成要素を対象とした計測関連技術の整備

地下構成要素の品質管理や性能確認のためには、施工直後の品質確認及び施工後の状態変遷の把握のためのデータ取得が必要となるが、測定データの伝送やセンサなどへの電力供給に有線ケーブルを使用する場合、ケーブルの存在が地下構成要素の性能に影響を及ぼすことが懸念されている。そのため、計測技術の補助ツールとして無線技術の成立性及び長期運用性を確認した。

①無線伝送システムの長期運用性の確認

2014年度から幌延深地層研究センターの地下坑道で実施されている人工バリア性能確認試験では、緩衝材と埋戻し材の中に設置した一部の土圧計と間隙水圧計に無線でデータを送信するための送信機が接続されている⁵⁾。送信機から送られた測定データは、コンクリートプラグの外側に設置された受信器を介して継続的にPCに保存されている。データ送信の頻度と電池容量の関係から、送信機の設計寿命は10年程度である。2014年度の試験開始から2022年度末の時点でも継続的にデータが取得できており、無線伝送システムにより8年間以上のデータ送信が可能であることを確認した。

②無線給電システムの概念設計方法の整備

電源ケーブルを用いずに計測機器に電力を供給する無線給電システムの概念設計方法の整備に向けて、2014年度から給電効率に関する要素試

験などに取組んできた。地下環境への適用性の観点から、給電方式には磁界共振結合方式を採用することとして、給電効率に影響を与える要因(①コイルの設置方式(送電-受電コイルの組合せ)、②コイルの設置位置(偏角/偏心、コイル径)、③送電-受電コイル間の介在物(ベントナイト、水/塩水、プラグ内の鉄筋))をパラメータとした要素試験により各パラメータと給電効率の関係を整理したうえで無線給電システムの概念設計方法を整備した。この概念設計方法に基づいて、幌延深地層研究センターで実施されている人工バリア性能確認試験を例題として図-15に示すシステム構成で概念設計を実施した。緩衝材や埋戻し材中に設置されたセンサの消費電力に要素試験で得られた送受電コイル間の給電効率を乗じ、電源部分で必要な電力量を算出した。整備した概念設計方法により、無線給電システムの仕様を設定することができたが、原位置での給電効率に影響を及ぼす複数の影響因子の相互作用などについては、今後の要素試験等で確認して概念設計方法に反映する必要がある。

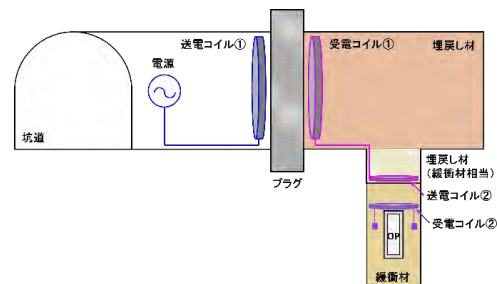


図-15 無線給電システムの配置例

- 1) 地層処分研究開発調整会議、地層処分研究開発に関する全体計画(平成30年度~令和4年度)、2020
- 2) 日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 地層処分施設閉鎖技術確認試験 報告書、2023
- 3) 日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 地層処分施設閉鎖技術確認試験 取りまとめ報告書、2023
- 4) 核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第一種廃棄物埋設の事業に関する規則、平成二十年経済産業省令第二十三号、2008
- 5) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成26年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確認技術開発 報告書(第3分冊)モニタリング関連技術の整備、2015

3. 回収可能性技術高度化開発

◇事業の概要

特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針¹⁾（以下、「基本方針」）では、安全な管理が合理的に継続される範囲内で施設の最終閉鎖までの可逆性・回収可能性を確保することとし、併せて、回収可能性を維持した場合の影響等について調査研究を進めることとしている。また、地層処分研究開発に関する全体計画（平成30年度～令和4年度）²⁾では、高レベル放射性廃棄物廃棄体（以下、「HLW 廃棄体」）の回収可能性を確保する技術の整備として、次の2つの項目を挙げている。

- ・回収可能性の技術的実現性を示すため、設計オプションとして整備する処分概念に対応した廃棄体回収技術の開発と段階的な技術実証
- ・回収可能性を維持した場合の影響等に関する評価技術や対策技術の整備

地層処分事業への可逆性・回収可能性の導入という施策に対する社会の信頼感を高めるため、回収手順や技術の具体化、及び試験による実現性の提示、並びに基本方針に示された回収可能性を維持した場合の影響等についての課題に着実に取り組んでいく必要がある。

本事業では、上述した回収可能性に係る技術的課題に取り組み、施策に対する社会の信頼感の更なる醸成に資することを目的としている。

なお、本事業は、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター及び国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が共同で実施した経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（JPJ007597）（回収可能性技術高度化開発）」の当センターの実施分である。2022年度が2020年度からの3か年計画の最終年度であることから3か年の研究開発の成果を取りまとめた^{3), 4)}。

◇2020～2022年度の成果^{3), 4)}

研究開発における具体的な課題の設定や、今後具体化される概念や処分場設計に対する成果の拡張性を確保するため、出発点（前提）となる回収可能性が維持された処分場を以下のように設定した。

- ・前提とする処分場の定置概念：NUMO 包括的技術報告書⁵⁾に示された2つの定置概念（以下「現行

の2概念」)

処分孔縦置き・ブロック方式（パネル型）

処分坑道横置き・PEM^{*}方式（デッドエンド型）

※PEM：Pre-fabricated Engineered barrier system Module の略

- ・回収時の地下施設の状態：処分坑道が埋め戻され端部に鉄筋コンクリート製の力学プラグが設置された状態（以下「状態 B」という）、且つ、廃棄体は定置時の健全性が確保されている状態

過年度の事業において、外部有識者で構成する「可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に関わる検討会」を設置し、可逆性・回収可能性に関する多面的な検討を実施した⁶⁾。この検討会で整理された技術的フレームワークを踏まえ、基本方針に示される“安全な管理が合理的に継続される範囲”について、安全性と回収作業期間の関係として図-1のように整理した。

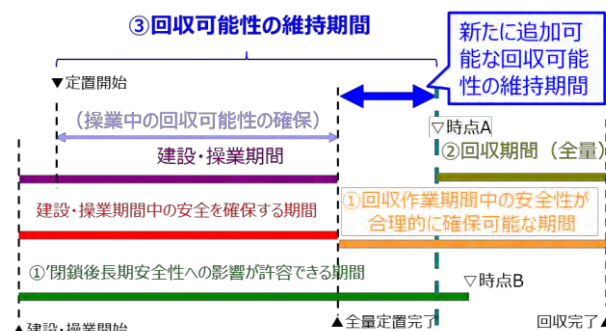


図-1 回収可能性が維持されている状態の模式図

本事業では、回収の容易性（回収作業時間）の向上（図-1の②の短縮）に対応する(1)廃棄体回収技術の高度化と、(2)回収の容易性を高めた設計オプションの開発及び安全性への影響の定量化（図-1の①と①'）に対応する(3)回収可能性維持に伴う影響の定量化手法の整備の3項目を個別課題として設定した。以下に各課題の成果を整理する。

(1) HLW 廃棄体回収技術の高度化

回収作業の技術的実現性、「全体回収作業に要する期間（図-1の②）」の短縮及び期間の定量化に資する技術情報の提示に向けて、現行の2概念を対象に、廃棄体の回収作業の具体化、及び適用可能な回収技術の整備を進めた。

1) 回収作業の技術的実現性に関する考え方

回収手順と技術（手法、装置、設備、など）の整備状況を整理することで、現時点における回収作業の技術的なシステムとしての実現性を提示する。

現行の2概念の状態Bの処分場から廃棄体1体を回収して地上で保管するまでの一連の作業手順や個別作業の内容を具体化し、以下に示す3つの大工程に整理した。なお、回収時の坑道再開時の作業安全性（図-1中の①）は確保されているものとし、作業環境の再構築に要する作業は除外している。

手順1：処分坑道の再開放

力学プラグの撤去と埋戻し材の再掘削の2つの作業を設定した。鉄筋コンクリート造の力学プラグの撤去は、建築物の解体技術のうち横向き作業が可能な工法の応用が考えられる。また、ベントナイトと掘削ブリの混合土である埋戻し材は、坑道掘削と同様の手法で撤去が可能と判断した。

手順2：廃棄体の回収

再開放後の処分坑道から廃棄体を回収して坑底施設まで搬出するため、廃棄体を拘束する土質材料の除去、及び除去後の廃棄体の搬出の2つの作業を設定した。廃棄体のハンドリングに対して容器の健全性が確保されている前提では、定置作業の逆動線で廃棄体の搬出が可能と考えられる。一方、縦置き方式の緩衝材除去や横置き・PEM方式の隙間充填材（土質材料）の除去作業は、廃棄体への機械的な影響への考慮が必要となる作業であることから、回収特有の技術として抽出した。

手順3：地下⇒地上への搬出

坑底施設から地上施設までは、操業時の地下への搬入の逆動線で搬出が可能と考えられる。本事業で対象とする回収は、将来世代が選択した代替管理方策への転換の一環であることから、回収した廃棄体の受入れや一次保管などに要する地上施設は、回収実行前に予め整備されていると仮定した。

このように技術実証等が望まれる回収特有の技術もあるものの、一連の作業手順と技術には実現性が見通しがある。また、全量の回収は、廃棄体1体の回収作業を反復することで、技術的には可能と考えられる。

2) 回収作業に要する時間の定量化

回収作業に要する時間は、廃棄体1体の場合には前述の個別作業ごとの作業時間の和となるが、複数の廃棄体の回収作業では、作業動線等を念頭に置いた合理化の視点を加えた手順と作業時間（期間）の定量化手法について検討する必要がある。処分坑道縦置き方式の場合、先行して処分坑道全体を再開放し、その後に回収作業を実施する。処分坑道横置き・PEM方式の場合は、隙間充填材の除去を先行して実施する。このような個別作業の集約により、処分坑道単位で装置の入替えが省略でき、作業時間の短縮が期待できる（図-2）。

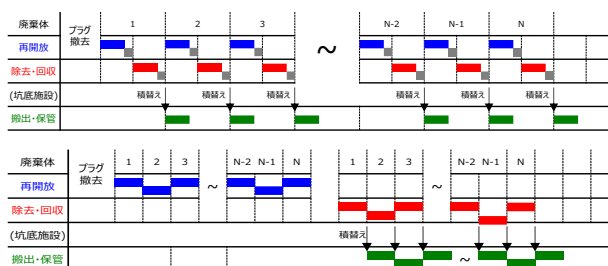


図-2 処分坑道内での作業の集約による合理化の例

状態Bの処分坑道からの回収手順は、処分坑道の再開放⇒廃棄体の回収の順となるため、1本の処分坑道では再開放を終えるまで廃棄体の回収に着手できないが、複数本の処分坑道を対象とすれば再開放と回収を別の坑道で同時かつ独立して行うことができる。図-3は処分場を均等に6区画に分けた場合のタイムラインの例である。このように、「全体回収作業に要する期間」は、再開放に要する時間×（区画数+1）で見積もることができる。

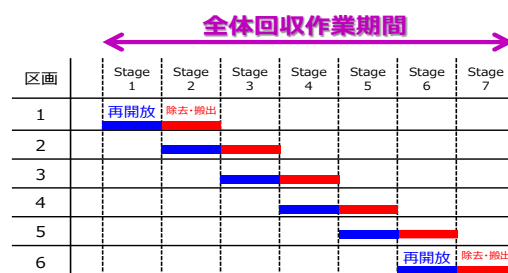


図-3 処分場全体の作業合理化の例（区画数=6）

図-3の各作業時間（期間）は、合理化した作業手順を実行する技術（回収への適用が見込まれる既存技術）の能力（カタログ値など）や工事積算基準などを参考に定量的に見積もることができる。

3) 本事業で整備する技術と目的

定置済みの廃棄体周囲の土質材料の除去は回収に特有の作業であり、技術的実現性の確認及び作業時間の見積りに必要な技術情報の整備が必要である。現行の2概念に対して、前フェーズまでに第一段階の技術開発として、除去作業の技術的実現性を示した^{7),8)}。本フェーズでは、一定の期間内に回収作業を完了する技術の提示を目的とした第二段階の技術開発に着手し、廃棄体の全量回収に要する時間の算出に資する技術情報を整備した。

オーバーパック（以下、「OP」）への機械的な損傷を防ぐ緩衝材の除去方法として、流体的除去を選定した。これまでに、塩水を用いた緩衝材除去システム（噴射・吸引設備、塩水リユース設備、遠隔操作設備）を整備し、フルスケールの緩衝材除去試験によって除去作業の技術的実現性を示した。一方で、電解質溶液による緩衝材のスラリー化促進効果を除去原理としたこの方式では、OP 1体当たりの除去作業に約 78 時間を要する見込みとなっている⁷⁾。これに対して、状態 B の処分坑道からの回収作業の工程分析によって設定した 20 時間以内を目安に、除去作業を迅速化する技術開発を実施した。

除去作業を迅速化する方策として、除去原理をウォータージェット（以下、「WJ」）による切削に変更した。OP 周囲の緩衝材の除去は、噴射・吸引設備の噴射リングを揺動・下降させて行うため、0.6MPa から 20MPa に増圧した場合の運転パラメータの設定が重要である。そこで、作用水の性状、噴射ノズルの種類、ノズルからの離隔、ノズルの移動速度等の噴射条件をパラメータとした噴射要素試験を実施し、WJ の噴射条件と除去幅や深さの関係を整理した。整理結果を踏まえ、OP 把持部周囲の緩衝材は直射ノズル斜め噴射、OP 側部はトルネードノズル下向き噴射とし、噴射リング、揺動・下降装置を製作した⁹⁾。

緩衝材除去試験は、土間上に模擬処分孔として設置した鋼製円筒容器内にフルスケールの模擬人工バリアを構築して実施した。除去対象となる緩衝材は撒出し転圧工法で施工し、乾燥密度は平均 1.607 Mg/m³、飽和度 80%、OP 把持部周囲には純ベントナイト製のペレットを充填した。なお、本試験は WJ による緩衝材除去の迅速化に主眼を置いた要素試験として実施した（使用する塩水の

供給及び除去生成物の処理が作業速度に影響しないよう、塩水リユース設備は併用せずに実施）。

図-4 に、緩衝材の除去部上端深度と経過時間の関係を示す（赤線：計画、黒線：試験結果）。鉛直方向への進行は、トルネードノズルの下方噴射によるものであり、前述の噴射要素試験の結果より、計画値は 28.4mm/分と見積もった。図中の水平部分は、直射ノズル斜め噴射で把持部周囲を除去している区間であるが、把持部露出までの区間で計画と実績に乖離が見られる。この原因として、直射ノズルから放出される WJ の太さが計画よりも細く、把持部上部の緩衝材の切削に時間を要した。また、把持部周囲に充填したベントナイトペレット部は浸潤の程度によって一体化、あるいは流動的な挙動を示すため、確実にスラリー化させるための噴射条件の工夫が必要である。

除去作業終了後、OP の引き上げ（回収）が可能であることを確認した（図-5）。

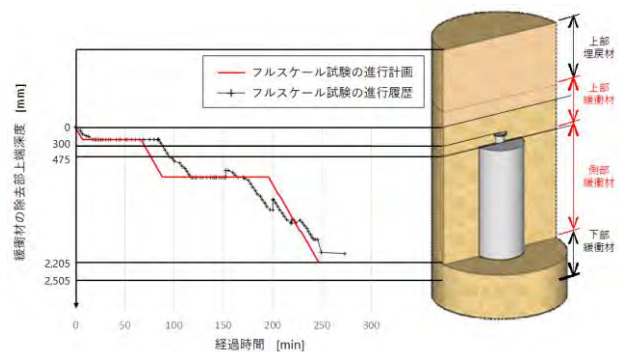


図-4 緩衝材の除去部上端深度と経過時間の関係



図-5 緩衝材除去後に実施した OP 引き上げ試験

以上のように、WJ の導入によって目標の 20 時間を大幅に下回る 5 時間程度で除去作業を実施できる見通しを得た。

過年度の緩衝材除去システムの整備結果⁷⁾及び

本フェーズの WJ 噴射要素試験の結果より、流体的除去技術として、塩水+低圧噴射、塩水+高圧噴射、真水+高圧噴射の3つの技術的選択肢が示された。今後、各方式に対応したベントナイトスラリーを処理する塩水リユース設備の合理化などを進めることで、限られた地下空間での緩衝材除去システムの運用上の柔軟性を高めていくことが重要である。

処分坑道横置き・PEM方式の回収技術については、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター地下研究所（以下、「幌延URL」）地下350mの試験坑道において、機械的除去技術（小型バックホウとオーガアタッチメント（φ20cm）の組合せ）によりPEMと坑壁間の隙間充填材除去の地下実証試験を行った。その結果から試算されるPEM 1体当たりの除去時間は約68時間であった⁸⁾。これに対して、状態Bの処分坑道からの回収作業の工程分析によって設定したPEM 1体あたり5時間以内を目安に、隙間充填材の除去作業を迅速化する技術開発を実施した。

機械的除去技術を、処分坑道内での隙間充填材の除去作業を連続して行うシステムとして整備するため、機械的除去作業の工程を細分化し、後続するPEMの回収時に求められる状態などを設定し、必要な要件（作業・機能など）を定義した。要件を満足する隙間充填材除去システムの装置構成として先頭部から、隙間充填材を切削・排土、除去生成物の捕集、処分坑道外へ除去生成物を搬出するための車両等への積込といった一連の機構を念頭に置き、処分坑道内に定置されている複数のPEMに対して連続して除去作業が実施できるように、装置の外形はPEMを跨ぐ構造とした。このような装置構成に対して、既存のコンポーネントを要求機能に合わせて適切に選択し、システム化することが重要である。本フェーズでは、装置前方で隙間充填材を切削・排土する部分を中心に、技術開発を実施した。

隙間充填材を切削・排土する部分については、一般土木分野におけるトンネル掘削技術の調査から、自由断面方式と固定断面方式を選定した。この2方式を対象として、隙間充填材と同仕様のベントナイト混合土を切削する要素試験を実施し、除去生成物が小さく後続の排土が容易、PEM周囲の限られた空間での作業性等の観点から自由断面方式を選択した⁹⁾。この方式による除去生成

物は細かく解砕されており、バキューム方式による吸引排土が可能であると考えられた。

自由断面方式の切削とバキューム方式の吸引排土を組み合わせたもの（以下「除去ユニット」という）を、前述の装置前方に取り付けることとして、除去ユニットには切羽での隙間充填材の切削と除去生成物の捕集に適した横回転型のドラムカッターを選択した（図-6）。横回転型の場合、除去生成物は下部から手前側に排出されるため、除去生成物を捕集する吸引アタッチメントを図-7の様に取付け、吸引排土後に分離タンクで固形物として回収する仕組みである。



図-6 切削部（ツインカッター、軟岩掘削用）

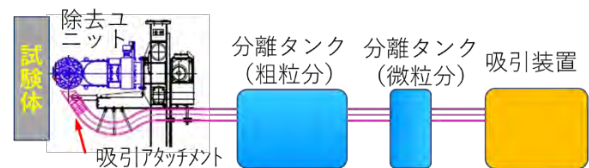


図-7 切削・排土部、分離・回収部の概要

除去ユニットによる切削効率の確認、装置化に向けた課題抽出のため、除去ユニットの機能確認試験を実施した。粘土（隙間充填材）用のピックを装着したドラムカッターの既製品は無いため、軟岩用のもので代用し、機械的な切削に係るデータを取得した。切削試験に用いた隙間充填材模擬材は、ベントナイト:ケイ砂=50%:50%、平均乾燥密度1.66Mg/m³、飽和度93%であり、撒き出し転圧工法で施工した。ドラムカッターが単位時間当たり除去・排出する除去生成物の体積は、ドラムカッターの幅、カッターの切込み深さ、送り量（移動速度）、切削による土量変化率の積で算出される。これらを切削パラメータとして、バキューム方式の吸引排土の能力の範囲内で組合せを変え、分離タンクでの除去生成物の回収量、路盤への落下量、カッターへの除去生成物の付着量、除去生成物の土量変化率等のデータを取得した。試験の結果、除去ユニットから排出される除去生成物は1ユニットあたり約15m³/hとなった。PEM 1体あたりの隙間充填材を除去した際に発生す

る除去生成物の体積は約 90m³ (PEM 周囲の隙間充填材部分の体積 41.1m³、土量変化率 2.19) であることから、除去装置の前方に除去ユニットを2つ搭載すれば、目標時間である5時間を達成できる見通しが得られた。

機械的除去システムの構成及び除去ユニット機能確認試験の結果を踏まえ、隙間充填材除去装置の概念設計を実施した。図-8 に示す概念設計案では、PEM を跨ぐ構造の中に、一連の機能を集約している。左右に1セットずつ配置した除去ユニット (白、黄) がカッターガイドレール (水色) 上を走行し、カッターガイドレール自体が上下左右への移動と前方へ傾斜することで、PEM 周囲の隙間充填材を馬蹄形状に除去する。発生した除去生成物は吸引によって捕集された後に、分離タンク (紫) で固形分を分離し、装置後方から排出される。

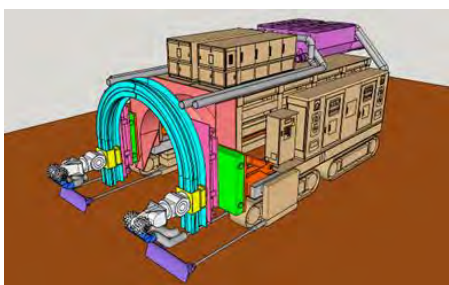


図-8 隙間充填材除去装置の概念設計案

粘土用の代用として使用した軟岩掘削用の横回転型ドラムカッターによる試験では、付着による作業性の低下が発生した。この結果より、連続作業性の向上に資する以下の知見を得た。

- ・ドラムに装着するピックの改良：軟岩用のポイントアタック型のピックの切削原理は、点荷重による破碎である。隙間充填材の飽和度が低い領域では有効だが、高飽和度で延性的な変形挙動を示す領域ではピック自体の動きによるむしり取りになる。隙間充填材の強度が軟岩と比べて低いことを考慮し、飽和度に対して適用範囲が広い粘土用のピックの開発が望まれる。
- ・除去生成物を排出する経路の単純化：切り屑は回転軸上のピックホルダー間の空間 (チップポケット) を通って排出される。軟岩用のドラムカッターのチップポケットは入り組んだ形状であることから除去生成物が詰まり易いと考えられるため、排出路の単純化など、隙間充填材用のピック配置に工夫が必要である。

除去効率の低下の要因となる隙間充填材の外力に対する変形挙動は、隙間充填材の性状、特に飽和度が大きく依存している。一方、定置済みの廃棄体回収時の飽和度は、場の地下水環境や定置後の経過時間に依存する。このような多様な環境条件に対する機械的除去技術の適用性や除去効率の評価に資するため、隙間充填材の配合率や密度、飽和度を変化させた供試体に対して、刃を貫入させる一次元の室内試験を実施した。この結果、切り屑に亀裂が生じずに連続的になる延性的な挙動から、せん断やき裂発生によって不連続になる脆性的な挙動まで、様々な切削パターンとなることが明らかになった。また、除去生成物の大きさや付着のし易さに関連する切削パターンを室内試験で取得し、土質材料の状態を示すパラメータで整理することで、大規模な除去試験を行う前に除去効率を推測できる可能性が示唆された。粘土用ドラムカッターの開発を効率的に進めるためには、土質材料の物性値と切削パターンの関係についての知見を拡充することが重要である。

(2) 回収容易性を高めた詳細設計オプションの開発

回収手順の合理化や、技術の高度化開発で目標時間を達成しても一定の回収作業時間が必要となる。更なる迅速化が望まれるような状況に留意して、回収時間 (図-1 の②) を更に短縮することが可能な詳細設計オプションの開発を進めた。

状態 B の坑道の再開放期間が掘削したズリ (除去する埋戻し材又は隙間充填材) を地上まで搬出する能力 (アクセス立坑の容量) に依存するとすれば、図-3 の工程による全体回収作業期間も同様に搬出能力に依存する。そのため、回収作業期間を短縮する方策の1つとして、搬出能力の向上 (立坑の増設、斜坑の活用、など) あるいはズリ発生量自体の削減 (坑道長の短縮、坑道断面の縮小) が考えられる。

処分孔縦置き方式の処分坑道長さは隣接する処分孔同士の間隔から新第三紀堆積岩類の場合 $3d$ (d : 処分孔径≒人工バリア外径) と設定されている⁵⁾。一方、廃棄体からの熱影響の観点では、人工バリア同士が接触した d でも成立することを確認している¹⁰⁾。すなわち、処分孔壁を補強する補助工法を用いて廃棄体ピッチを d とすることで、再開放に要する期間を 1/3 程度に短

縮できる可能性がある。この設計オプションでは、現行の豎置き方式の回収と作業手順や技術は共通である。

現行の処分坑道横置き・PEM方式は、処分坑道の長手方向に対してPEMが直列で定置されている。直列定置の場合、処分坑道長さはPEM長さ×定置数であり、掘削ズリを削減するには坑道断面を縮小する必要がある。しかしながら作業空間が狭くなり、操業時のPEMの定置や隙間充填作業、回収時の機械的除去技術による隙間充填材の除去などの作業性の低下が懸念される。そこで、図-9に示すような、回収時の坑道再開放が不要となる詳細設計オプション：横置き・PEM方式（狭隘断面坑道定置型）の実現性について検討した。

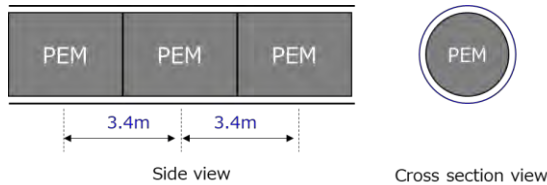


図-9 横置き・PEM方式（狭隘断面坑道定置型）

閉鎖後長期の安全性への影響については、人工バリアの機能の確保の観点から検証した。PEM周囲の隙間の残置については、鋼殻内の緩衝材が均一に膨潤（膨出）して埋めると仮定した場合、緩衝材に要求される乾燥密度を維持できる許容幅は、緩衝材の初期乾燥密度が $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$ の場合は約9cmとなった¹⁰⁾。また、PEM周囲の空気層の存在が廃棄体の発熱の放熱に与える影響については、処分坑道同士を適切な離隔で設置することで、緩衝材の制限温度である 100°C 未満を満足できることを、熱伝達解析で確認した¹⁰⁾。以上より、PEM周囲の空間の存在は許容できる見通しがある。

建設・操業の技術的実現性については、狭隘断面坑道の建設技術、及び狭隘坑道内でのPEMの搬送技術の観点から検討した。現行概念のPEMの外径2,260mmに許容できる幅を加えた2.5m程度の内空のトンネルを施工する技術として、ドリルカッター工法、大口径推進工法、マイクロTBM、プッシュ・ミーリング工法、レイズボーリング工法などがあるが、これら既往技術を処分場が建設される大深度岩盤に適用させるための技術開発が必要である。閉鎖後長期の安全性の観点から許容できる数cmの空間幅では、2019年度までに整備したエアベアリング方式の搬送装置が適用でき

ない⁸⁾。そこで、PEMを引き摺り（摺動）によって移送する装置の概念設計を行った。図-10に概念設計（案）を示す³⁾。この装置は、アウターフレームとインナーフレームから構成されており、アウターフレームには推進／牽引時に坑道の天端に反力をとる突っ張り機構（TBMのグリッパーに相当）が備わっている。アウターフレームとインナーフレームを交互に動かし、尺取虫のように処分坑道内を移動する。坑道内での定置は推進動作（押し込み）、回収は牽引動作（引っ込み）となる。

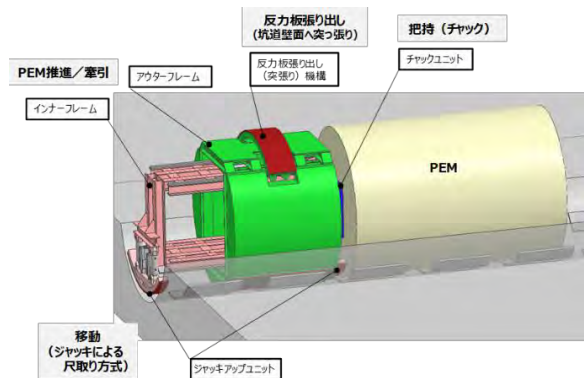


図-10 狭隘断面坑道での定置装置の概念設計（案）

以上のように、処分坑道スケールではあるが、これらの詳細設計オプションの実現性について技術的な見通しを得た。今後は、建設・操業、回収作業の具体化や技術的課題の抽出に向けて、複数の処分坑道を束ねた区画スケールでの実現性の検討に拡張していく必要がある。これまでの検討は回収可能性（回収容易性）の観点からの検討であるが、地層処分の実現性を複数の観点¹¹⁾から多面的に検討していくことが重要である。

(3) 回収可能性維持に伴う影響の定量化手法の整備

操業期間中及び閉鎖後長期の双方の安全性が確保されるように設定される回収可能性の維持期間（施設を最終閉鎖せずに維持する期間）において、回収可能性の維持に伴う安全性への影響の定量化手法の整備に向けて、ストーリーボードを用いて、定量化すべきシナリオ及び定量化手法を整理するとともに、技術課題のとりまとめを行った。

昨年度までに、本フェーズ当初に作成した全体開発計画に基づき、本検討におけるレファレンスとなる建設・操業工程の分析、処分場構成要素の

抽出と機能の整理を実施し、その結果を用いて、処分場構成要素に要求される機能に影響を与えるプロセスを抽出し、「地下構造物の安定性及び供用性」に着目した処分システムの状態変遷に関わる知見を集約したストーリーボード（第1段階のストーリーボード）を作成した⁹⁾。2022年度は、さまざまな分野の専門家との議論に基づき、処分場の変遷において重要なプロセスを抽出・整理し、第1段階のストーリーボードを改善するとともに、専門家からの意見を参考に定量化すべきシナリオの抽出、定量化手法を含めた技術課題を整理した（図-11）。

第1段階のストーリーボードは、敢えて重要度による分類は行わず、さまざまな分野の専門家の意見を参考に、プロセスの追加・削除を実施するとともに、多くの専門家が共有可能な分かり易い表示への変更などの改善を進めた。地下構造物は多くの要素が統合されたものであり、要素ごとのTHMCが相互に影響すること、また、要素ごと或いはTHMCごとにスケールが異なることから、1つのシナリオとして表現するためには、複数のプロセスの変遷を統合する必要があるため、特定の要素のプロセスの変遷をサブシナリオと定義し、ストーリーボード及び専門家の意見を参考に区分別、時間別に74のサブシナリオを抽出した。

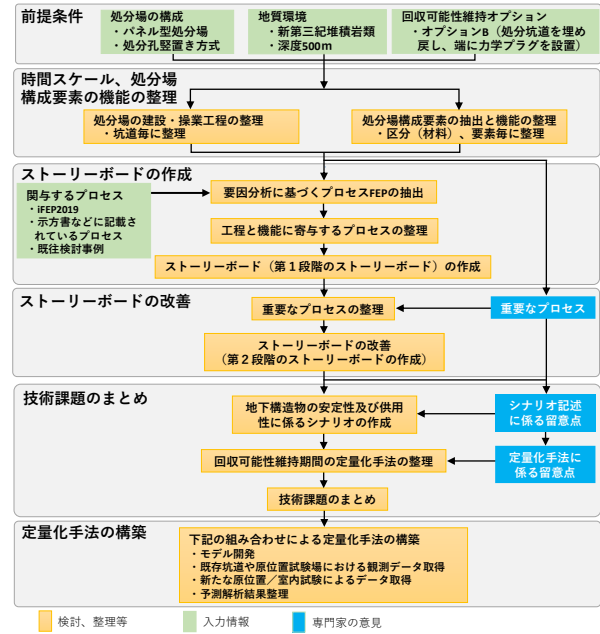


図-11 ストーリーボード検討フロー

また、サブシナリオの定量化においては、「類似条件での経験・知見の活用」や「解析的手法の適用」が必要になることを提示するとともに、専門家との議論を参考に個別のプロセス及び個別評価の統合化に向けて課題を整理した。特に、吹付けコンクリートの熱収縮を起因とする鋼製支保工やロックボルト腐食の進行の評価や、ロックボルトの支保工としての効果の定量化や経年変化など、幾つかの検討課題が残されていることが分かった。

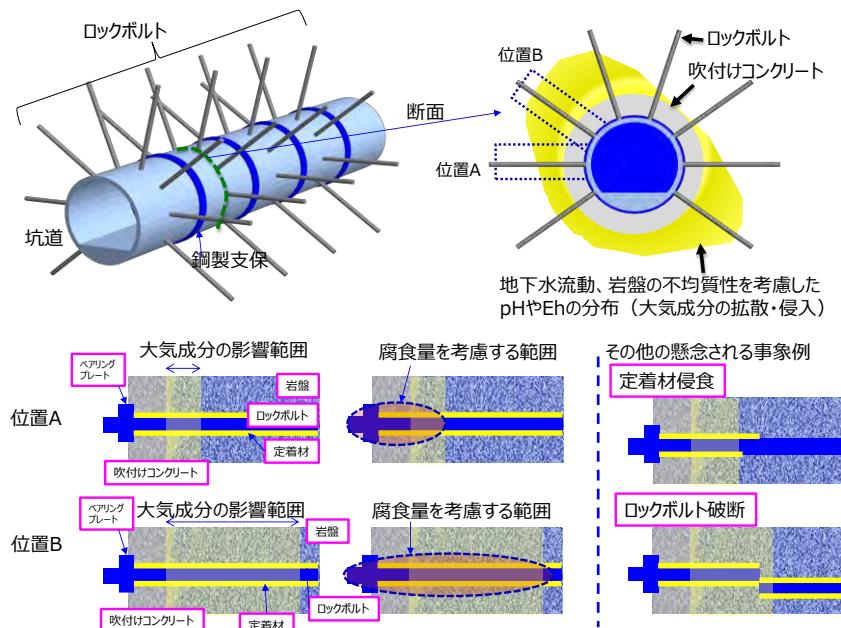


図-12 坑道内のロックボルトの定量化のイメージ

例えば、坑道に複数本敷設されるロックボルトの腐食を定量化する場合には(図-12)、ロックボルトの敷設位置ごとに地下水流動などの水理環境や、岩盤の不均質性を考慮した大気成分の拡散・侵入による pH や Eh の分布などの化学環境が異なることから、ロックボルトごとに腐食量を定量化する必要がある。

この場合、それぞれ敷設位置の環境条件を設定するための評価領域のスケールダウンと詳細スケールにおける金属の腐食評価結果から1本のロックボルトに着目した評価が必要となる。さらに、坑道の力学的安定性は、坑道に敷設される複数のロックボルトの腐食量によって評価される。その他、環境条件によっては地下水による定着材の侵食や外力と腐食の複合作用によるロックボルトの破断などの懸念事象についても評価する必要がある。これらの状況を考慮した1つの手法による力学的な定量化は難しいため、スケールごとに異なる定量化結果を統合することが不可欠となる。

以上のように、回収可能性の維持に伴う影響について、地下構造物の安定性及び供用性の定量化手法の整備に向けて、昨年度に作成したストーリーボードを改善するとともに、それを用いて定量化すべきプロセスをサブシナリオの形式で整理し、定量化にあたっての課題を抽出することができた。

今後、地下構造物の安定性及び供用性に向けた定量化手法の構築に向けて、サブシナリオごとに「類似条件での経験・知見の活用」や「解析的手法の適用」による定量化手法の具体化を行っていくとともに、さらに、専門家との議論で抽出された個別のプロセスにおける課題解決を図っていく。

(4) 地層処分実規模試験施設を活用した情報発信

本フェーズにおいて、2010 年度に開館した地層処分実規模試験施設の大規模改修、及び2019 年度までに幌延深地層研究センターの地下の試験坑道で実証試験として実際に使用した処分坑道横置き・PEM 方式を対象とした搬送・定置や回収技術の開発に関わる装置の展示を開始した(図-13)。

本施設は来館者から直接意見を聞くことができる貴重な場として、今後も来館者との対話記録の蓄積を継続して施設の運用に活用していく予

定である。また、地層処分事業への関心が高まっていることも踏まえ、発信者側と来館者との双方の視点に留意した情報発信へ繋がるような工夫を検討し、引き続き運営を行っていく。



図-13 施設の展示状況

- 1) 最終処分関係閣僚会議、特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針(令和5年4月28日閣議決定)、2003.
- 2) 地層処分研究開発調整会議、地層処分研究開発に関する全体計画(平成30年度～令和4年度)、2020 地層処分研究開発調整会議、地層処分研究開発に関する全体計画(平成30年度～令和4年度)、2020
- 3) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(回収可能性技術高度化開発)報告書、2023.
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(回収可能性技術高度化開発)3 年間の取りまとめ報告書、2023.
- 5) 原子力発電環境整備機構、包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現、NUMO-TR-20-03、2021.
- 6) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発)報告書(第3分冊)、2018.
- 7) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成26年度(地層処分回収技術高度化開発)報告書、2015.
- 8) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成31年度(可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発)報告書、2020.
- 9) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(回収可能性技術高度化開発)報告書、2022.
- 10) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和2年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(回収可能性技術高度化開発)報告書、2021.
- 11) 原子力環境整備促進・資金管理センター、地層処分施設的设计・操業技術の最適手法に関する研究, RWMC-TRJ-20001, 2021.

4. 沿岸部処分システム評価確証技術開発

◇事業の概要

高レベル放射性廃棄物等の地層処分について、国は2017年7月に科学的特性マップを公表し、海岸からの距離が短い範囲を「輸送面でも好ましい」として示している¹⁾。また、このような整理に至る過程で、沿岸部の特性や技術的対応の可能性については、「沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会」（以下、「研究会」）において議論が進められた。2016年の研究会のとりまとめでは、「今後、技術の高度化に引き続き取り組むことで、更に信頼性を高めることが重要である」として、技術の高度化に向けて沿岸部で想定される種々の地下水条件下でのデータ拡充等の取り組むべき課題とその方向性が示された²⁾。

そこで、2019年度からの本事業において、当センターでは、処分場建設に伴う浅部と深部の地下水の混合や湧水等への影響に係る水理場の解析技術、処分場の成立性の評価手法に関する整理を進めた。加えて、既存情報等から我が国の海底下の地下水の水質の幅を整理し、坑道建設に必要な材料を対象に、その地下水の水質での再冠水に至るまでの期間の変質機構や機能変化に関するデータの拡充及び定量化を行なっている。

2022年度は、セメント系材料および緩衝材の沿岸部における地下水による影響を考慮した機能等の変遷についてのデータの取得や解析手法の検討を実施し、現象理解とそれに基づくデータ拡充や評価手法の整備を進めた。

なお、本事業は、国立研究開発法人産業技術総合研究所、一般財団法人電力中央研究所及び公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターが共同で実施した経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（JPJ007597）（沿岸部処分システム評価確証技術開発）」の当センターの担当分である。

◇2022年度の成果³⁾

- (1)セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充
処分場においてセメント系材料は、処分坑道や

アクセス坑道の支保工や底盤などの構成部材に使用され、各坑道の空洞安定性や止水性を保つ機能を担うことが期待されている。しかし、それらのセメント系材料は、岩盤側からの地下水との接触によって化学変質とそれに伴う力学的特性の変化が懸念されているものの、その現象に関する知見については、

- ・セメント系材料の地下水による化学変質に関するデータはあるが、それに伴う強度変化に関するデータは少ない。
- ・人工海水やそれを希釈した溶液でのデータはあるが、沿岸部の多様な組成に対応するデータは少ない。

といった課題がある。

そこで、本事業では、沿岸部に特有な地下水化学環境を念頭に置き、処分場の設計に資する情報としてセメント系材料の化学変質と力学的特性に関するデータを拡充し体系的に整理するとともに、解析的な化学変質の予測と強度推定手法の構築を進めている。

検討項目とその関係を図-1に示す。

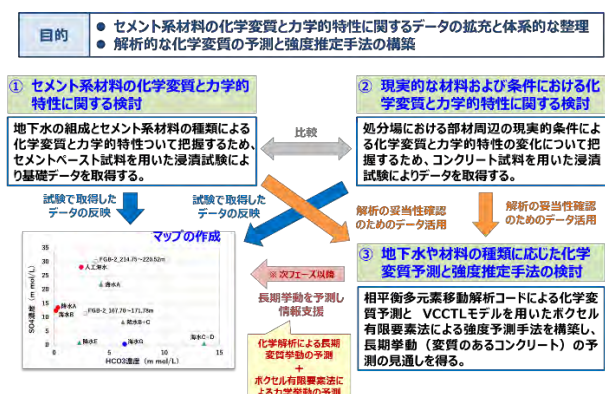


図-1 検討項目とその関係

2022年度は、引き続き試験によるデータの取得及び解析コードの構築、整備を実施した。

- 1)セメント系材料の化学変質と力学的特性に関する検討
坑道の支保工に使用される吹付けコンクリートとセグメント（予め地上で製作した部材を坑道内で組み立てて覆工を構築するためのコンクリート部材）を対象とし、これらのコンクリート内で地下水による化学変質に関わる構成要素であるセメントペーストを使用した浸漬試験を行い、

そのデータからコンクリートの化学変質と力学的特性の関係の整理を進めている。

2022年度は、沿岸部の深度が異なる同一ボーリング孔の2種類の実地下水で10か月間浸漬試験を実施した。この試験結果と人工海水及び模擬地下水に3か月浸漬した結果を用いて、地下水組成とセメントペーストの力学的特性（硬度）との関係を整理した。図-2に示すように、コンクリートの力学的特性に影響を与える地下水成分の中から、コンクリートの力学的特性の低下の要因となる SO_4 と化学変質を抑制する可能性のある HCO_3 に着目してマップ化することで、力学的特性の低下は、 HCO_3 の共存によって SO_4 の影響を抑制する傾向であることを確認した。

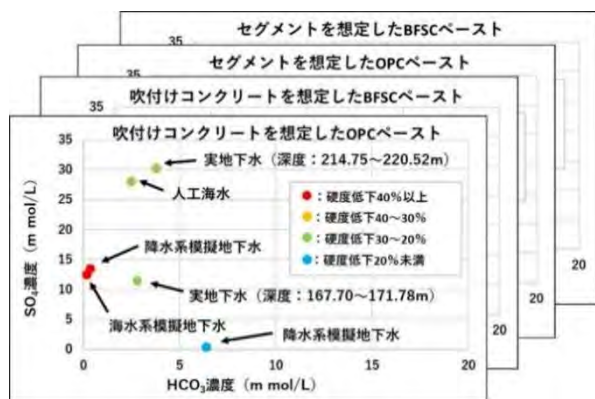


図-2 地下水組成 (SO_4 及び HCO_3)とセメント系材料（セメントペースト）の力学的特性の関係

2) 現実的な材料及び条件における化学変質と力学的特性に関する検討

コンクリートや実環境を模擬した条件での化学変質や力学挙動のデータは少ないことから、吹付けコンクリートについては動的条件を模擬したフロースルー試験を、セグメントについては接触する地下水の流動が遅い条件を模擬した浸漬試験をそれぞれ実施した。

コンクリート試料の化学変質や力学的特性の変化は、セメントペーストに比べて遅くなっている。表面近傍の SO_4 濃度は、浸漬時間の経過に伴って高くなっているが、 HCO_3 の共存によって SO_4 の浸透を抑制する傾向を確認した。

3) 地下水や材料の種類に応じた化学変質予測と強度推定手法の検討

化学変質の予測手法について、相平衡計算と物

質移行計算を連成した相平衡多元素移動解析コード⁴⁾を使用して、沿岸海底下の地下水とコンクリートの化学反応による変質解析を実施して検討した。現実的な材料の浸漬試験で実施したコンクリートと地下水成分との反応を解析し、コンクリートの表層部に二次鉱物が析出していない試験水準の化学成分の分布が再現できることを確認した。コンクリートの表層部に二次鉱物が析出している試験水準については、解析結果の方が化学成分の移動が速くなる結果となり、化学変質の進展に保守的な結果となった。

コンクリートの強度の推定手法については、まず健全なコンクリートで検討した。アメリカ国立標準技術研究所が開発したモデル⁵⁾を用いてセメントの水和反応をモデル化し、セメントペースト中の未水和鉱物や水和物の3次元空間分布情報をもとに、非線形有限要素法を適用しセメントペーストの強度予測を行った。また、そのセメントペーストと細骨材の3次元空間分布からモルタルの強度予測を、そのモルタルと粗骨材の3次元空間分布からコンクリートの強度予測を実施した。セメントペースト、モルタル及びコンクリートの圧縮強度の試験結果と予測結果とは、おのおの場合について概ね一致していたことから、本手法の強度推定への適用性を確認することができた。

(2) 緩衝材の機能変化に係るデータの拡充

再冠水時の変質、膨潤、流出等に関する緩衝材（ベントナイトとケイ砂の混合土）の機能変化については、これまで、蒸留水、海水相当のイオン強度を持つ NaCl 溶液及び CaCl_2 溶液を用いた試験によってデータの取得がなされ、それらを緩衝材の設計に反映するための手法が構築されてきた⁶⁾。しかし、沿岸部における多様な地下水組成を踏まえると、イオン強度やイオン種 (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) による影響に関するデータは少なく、塩水環境下での緩衝材の機能を予測・評価するためには、これらのデータを拡充・整備する必要がある。

本事業では、2019年度より緩衝材の設計要件のうち地下水中の溶存陽イオンの影響が大きい自己シール性を対象として、イオン強度やイオン種が、膨潤性やイオン交換挙動に及ぼす影響を系統的に把握し、多様な塩水環境下での緩衝材の

機能を評価するための以下の試験・検討を進めている。

- ・緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握試験
- ・高イオン強度での圧縮ベントナイト中におけるイオン交換選択性に関する試験
- ・イオン交換挙動の解析手法に関する検討

1) 緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握試験

2021年度までに、 Na^+ 以外の陽イオン種や複数のイオン種でのイオン強度の影響を検討するため、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} を対象にそれぞれ KCl 、 CaCl_2 、 MgCl_2 の溶液でイオン強度 0.025、0.1、0.2、0.5 に対して、ケイ砂 30wt% 混合のベントナイト試料（クニゲル V1、乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ 、以降の試験も同一試料条件）を対象とした膨潤量試験を実施した。加えて、主要陽イオン以外の微量の陽イオン及び多種の陰イオンが含まれる場合の影響や試験から得られた最大膨潤率の予測の妥当性を確認するため、駿河湾で採取した沿岸部実地下水（深度 168~172m、イオン強度 0.28）についても膨潤量試験を実施した。なお、供試体の直径は 60mm、高さは 5mm であり、上載圧は 10kPa 未満である。

試験の結果、陽イオン種によらずイオン強度が 0.2 まで増加するまでに最大膨潤率が急激に低下し、イオン強度 0.2 以上では変化が小さくなり、既往の研究⁷⁾ 同様、イオン強度の平方根に反比例することがわかった。

2022年度は、2021年度に引き続き、 Na^+ 以外の陽イオン種の影響の検討や試験の再現性を確認するため、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} を対象にイオン強度 0.025、0.1 を対象とした膨潤量試験を実施した。また、複数のイオン種を含む溶液のイオン強度の影響を検討するため、 Na^+ と Ca^{2+} 、 Na^+ と Mg^{2+} を対象にそれぞれ $\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ (Na-Ca) 混合溶液と $\text{NaCl}-\text{MgCl}_2$ (Na-Mg) 混合溶液について、イオン強度 0.025、0.1 を対象とした膨潤量試験を実施した。さらに、2021年度と同様に、新たに駿河湾で採取した沿岸部実地下水（深度 214~220m、イオン強度 0.73）についても膨潤量試験を実施した。

2022年度実施した KCl 、 CaCl_2 、 MgCl_2 、Na-Ca 混合溶液、Na-Mg 混合溶液、沿岸部実地下水及び 2021 年までの成果も含めた試験結果を図-3 に示

す。この図から、再現性の確認においては、同一水準でばらつきはあるものの、これまでと同様に、陽イオン種によらずイオン強度 0.2 までに最大膨潤率が急激に低下し、最大膨潤率がイオン強度の平方根に反比例する傾向が確認できた。ただし、イオン強度が 0.025 から 0.2 の範囲においては、最大膨潤率は、 Na^+ と比較して Ca^{2+} 、 Mg^{2+} と K^+ は小さく、これらはばらつきがあるものの違いを示したことから、イオン種ごとに特性を整理する必要があることもわかった。今後は、この傾向に関して、供試体の固相分析等によりイオン交換の状態を確認すること等で原因を検討すると共に、これまでの成果を踏まえ、陽イオンの種類やイオン強度などが、ベントナイトの膨潤率に与える影響を系統的に把握し、多様な塩水環境下での緩衝材の膨潤性能の評価方法について検討を進める予定である。

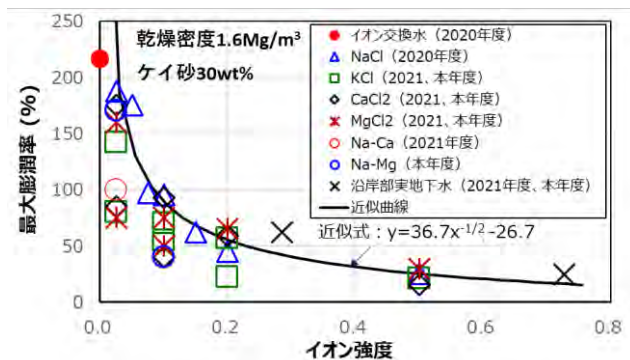


図-3 イオン強度と最大膨潤率の関係

2) 圧縮ベントナイトを用いた高イオン強度でのイオン交換挙動に関する試験

沿岸部で想定される高イオン強度の地下水中の陽イオンの圧縮ベントナイト中でのイオン交換挙動に関する知見は少ない。そのため、圧縮成形した Na 型モンモリロナイト（クニピア F）を対象に高イオン強度の塩溶液を用いた通水試験を実施し、圧縮モンモリロナイトにおけるイオン交換反応の予測解析における入力パラメータに資するようにイオン交換選択係数の検討を進めている。

2021年度までに、圧縮系のイオン交換選択係数とイオン強度の関係を把握するために、イオン強度 0.25、0.5 の KCl と NaCl (K-Na) 混合溶液を用いた通水試験を実施し（モンモリロナイト乾燥密度 $1.0\text{Mg}/\text{m}^3$ ）、K と Na (K/Na) のイオン交換選択係数を取得した。2022年度は、引き続きイオン

強度 0.125 の K-Na 混合溶液で通水試験を実施し、イオン交換選択係数を取得した。また、CaCl₂ と NaCl (Ca-Na) 混合溶液 (イオン強度 0.5) でも通水試験を実施し、Ca と Na (Ca/Na) のイオン交換選択係数を取得した。図-4 にイオン交換選択係数とイオン強度の関係を示す。

圧縮系の K/Na のイオン交換選択係数は、イオン強度に依存して大きくなる傾向が確認された。また、Ca/Na のイオン交換選択係数は、1.58 (2 回の平均値) となり K/Na の約 8 倍の結果が得られた。この原因については今後検討する予定である。加えて、Mg と Na (Mg/Na) のイオン交換選択係数に関するデータも取得する予定である。

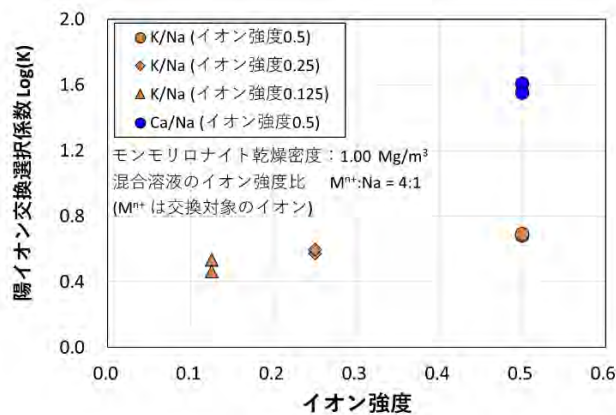


図-4 圧縮系における K/Na および Ca/Na のイオン交換選択係数とイオン強度の関係

3) 圧縮ベントナイトにおけるイオン交換挙動の解析方法の検討

2022 年度は、これまでに圧縮系モンモリロナイトでのイオン交換反応を対象として検討を進めてきた予測解析手法について、その妥当性や課題を把握するために、駿河湾で採取された沿岸部実地下水での通水試験の再現解析を実施した。入力するイオン交換選択係数には 2) で取得した圧縮系における K/Na 及び Ca/Na のイオン交換選択係数を設定した。ただし、Mg/Na のイオン交換選択係数は、既往の分散系で取得された値⁸⁾を設定した。使用した解析コードは、2021 年度と同様に、飽和・不飽和浸透流、移流・分散、イオン交換反応の連成解析が可能な HP1⁹⁾を含む HYDRUS-1D¹⁰⁾を用いた。

図-5 に通水試験後のモンモリロナイトの吸着陽イオンの当量分率の解析結果及び試験結果を示す。各陽イオンの吸着量の大小関係は解析結果と試験結果で整合するものの、Mg や Ca の当量分

率に差異が見られ、十分な再現性は得られなかった。今後、通水試験で得る予定の Mg/Na のイオン交換選択係数を解析へ適用する等しつつ、本解析手法の検討を進める予定である。

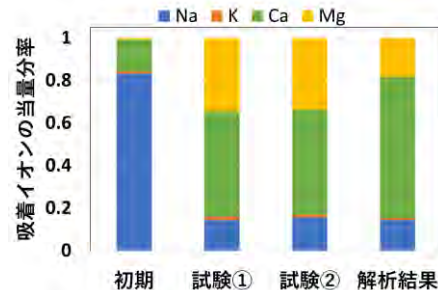


図-5 吸着陽イオン当量分率の解析及び試験結果 (沿岸部実地下水の通水試験)

- 1) 資源エネルギー庁、科学的特性マップ、2017
- 2) 沿岸海底下等における地層処分技術的課題に関する研究会、とりまとめ、2016
- 3) 産業技術総合研究所、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所、令和 4 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 沿岸部処分システム評価検証技術開発 成果報告書、2023
- 4) Hosokawa, Y., Yamada, K., Johannesson, B., Nilsson, L.-O.: Development of a multi-species mass transport model for concrete with account to thermodynamic phase equilibria, Materials and Structures, vol.44, pp.1577-1592, 2011.
- 5) Bullard, J. W., Bentz, D., Garboczi, E., Ferraris, C., Martys, N., & Stutzman, P.: Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2009.
- 6) 原子力発電環境整備機構、包括的技術報告書 わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築—、NUMO-TR-20-03、2021
- 7) 佐藤努、粘土基礎講座 I—粘土の特性と利用—、粘土科学, No. 41, Vol.1, pp.26-33.
- 8) 小田治恵、柴田雅博、ベントナイト-水相互作用の実験とモデル化、JNC TN8400-99-032, 1999.
- 9) Jacques, D., and J. Šimůnek, Notes on HP1-a software package for simulating variably-saturated water flow, heat transport, solute transport and biogeochemistry in porous media, HP1 Version 2.2, SCK·CEN-BLG-1068, Waste and Disposal, SCK·CEN, Mol, Belgium, pp.113, 2010.
- 10) Šimůnek, J., M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, and M. Th. van Genuchten, The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.17, HYDRUS Software Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, 2013.

5. TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発

5-1 事業の全体概要

使用済燃料の再処理等により発生する放射能レベルの高い TRU 廃棄物の地層処分については、2015 年 5 月の「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」²⁾の改定や 2017 年 7 月の「科学的特性マップ」³⁾の公表を受け、地層処分の国民理解や地域理解のための対話活動が進められる中で、併置処分の可能性も踏まえたうえで、安全性の検討や工学技術の開発について、高レベル廃棄物の地層処分における検討と連携をとりつつ進めていくことが重要である。

TRU 廃棄物（図-1 参照）は、その性状に基づいて以下の 4 グループに区分される¹⁾。天然バリア等に対する収着性に乏しい放射性のヨウ素や炭素などが多く含有される点、廃棄物に含まれる硝酸塩や有機物、金属の腐食等により発生するガスによる人工バリアの機能や核種移行特性への影響や硝酸塩と有機物との混在により発熱特性を有する点等、高レベル放射性廃棄物とは異なる特徴がある。

- グループ 1 廃銀吸着材：燃料溶解工程等のオフガス系で、主にヨウ素 129 を捕集したフィルター材
- グループ 2 ハル・エンドピース：使用済燃料のせん断・溶解工程で発生する、被覆管及び上下のタイプレートを圧縮成形した金属廃棄物
- グループ 3 低レベル濃縮廃液：使用済燃料の溶解液からの、ウラン、プルトニウム抽出工程で発生する低レベル濃縮廃液を固化したもの
- グループ 4 その他の廃棄物

また、TRU 廃棄物の処分概念は定置方法や人工バリアの構成要素について、高レベル放射性廃棄物の処分概念とは異なる。高レベル放射性廃棄物に比べ発熱量の小さい TRU 廃棄物では、処分の効率性の観点から、大断面の処分坑道に廃棄体パッケージを集積配置する処分方法（集積配置型）が検討されている。集積配置型の人工バリアは廃棄体パッケージ、充填材、構造躯体、緩衝材等で構成され、セメント系材料が処分坑道の支保工に加え、容器内及び容器間の充填材等で多くの構成要素に使用される。

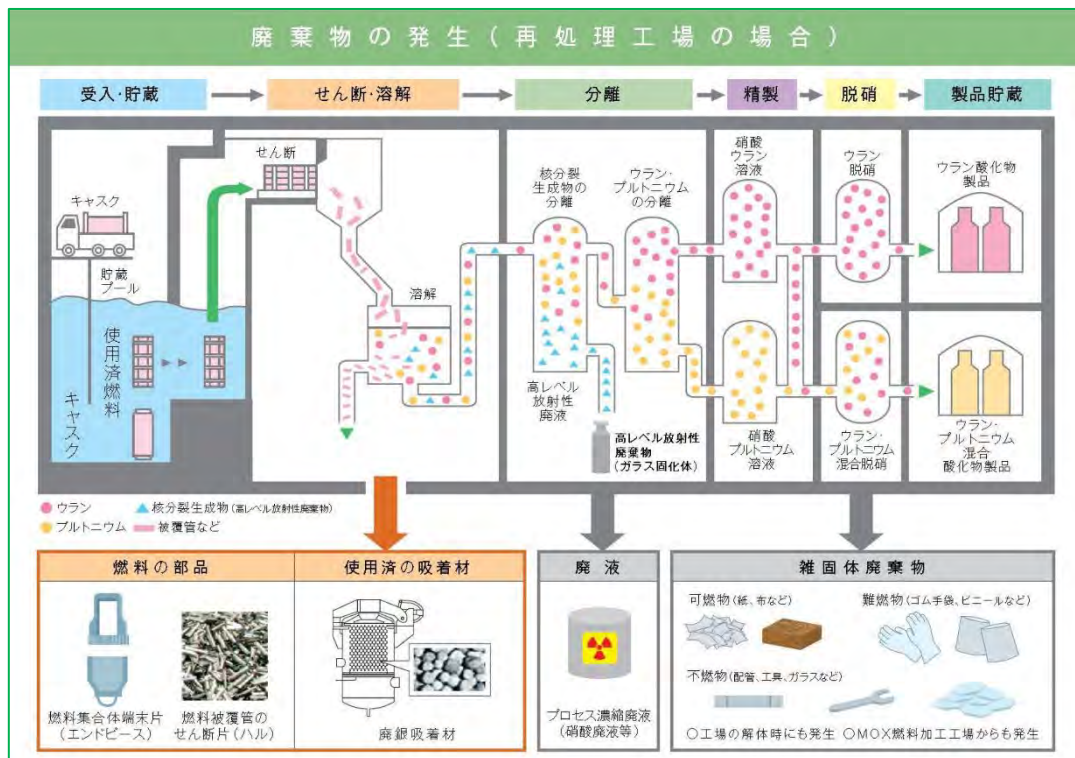


図-1 使用済燃料の再処理工程と発生する TRU 廃棄物¹⁾

本事業は、2020年3月に策定された「地層処分研究開発に関する全体計画（平成30年度～令和4年度）」⁴⁾に課題として示された、TRU 廃棄物の処理・処分に関わる、人工バリアの閉じ込め機能の向上、坑道閉鎖前の安全性の評価に向けた技術開発及び地層処分システムの状態設定のための現象解析モデルの高度化を対象に課題の解決に向けた技術開発を実施するものである。

本事業で検討する研究課題は、前述したように TRU 廃棄物が多様な特徴を有する廃棄体であるため広範囲にわたる。これに加え、廃棄物発生から廃棄体化の工程、建設・操業～坑道閉鎖前の期間、そして坑道閉鎖後の長期の安全性の評価が必要な期間まで、各課題が対象とする時間スケールも異なる。各研究課題がどのグループの TRU 廃棄物に由来するか、廃棄物からニアフィールドまでのどの領域のどの時間スケールを対象としているのかを、課題間での連携と併せて図-2に示す。

本事業は公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターと国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の2機関が共同で実施している。5か年の事業の最終年度に当たる2022年度は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（JPJ007597）（TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発）」として実施し、当センターで

は以下の項目について検討し、2022年度及び5か年の成果を取りまとめた^{5),6)}。

- 廃棄体パッケージの閉じ込め性能に係る試験と評価
- 陰イオン核種に対する閉じ込め技術の開発
- 廃棄体からの核種溶出モデルの高度化
- ニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化－ナチュラアナログによる緩衝材の長期安定性の検証－
- 廃棄体由来の発生ガスに関する現象解析モデルの妥当性検討

個別の実施内容と5か年の成果の詳細は、以下の各項（II-5-2からII-5-6）で述べる。

- 1) 資源エネルギー庁 Web Site「放射性廃棄物のホームページ」、http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/tru/tru01.html
- 2) 資源エネルギー庁、特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針、平成27年5月22日閣議決定、2015
- 3) 資源エネルギー庁、科学的特性マップ、2017
- 4) 地層処分研究開発調整会議、地層処分研究開発に関する全体計画（平成30年度～令和4年度）、令和2年3月改訂、2000
- 5) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和4年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発報告書、2023
- 6) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和4年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 5か年成果報告書、2023

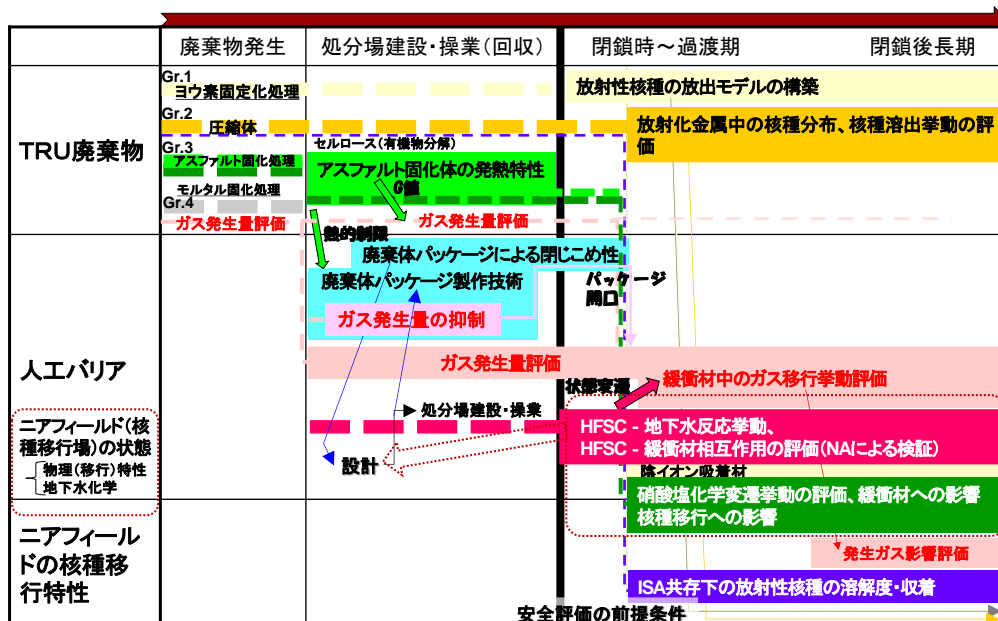


図-2 TRU 廃棄物及び処分場の構成要素と本事業の研究開発項目

5-2 廃棄体パッケージの閉じ込め性能に係る試験と評価

◇事業の概要

TRU 廃棄物の地層処分の実施にあたり、廃棄体パッケージには、製作性や耐食性、構造健全性に加え、操業中及び回収を維持する期間の安全性の観点から閉鎖後 300 年程度の放射性物質の閉じ込め性能を持たせることが設計要件として求められている。「包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイト選定に向けたセーフティーケースの構築—」（以下、「包括的技術報告書」という。）では廃棄体パッケージ B としてその概念が示されている¹⁾。また、これらの設計要件に対しては、実証的な試験を実施し、工学的成立性や安全性の向上を図る必要があるとしている。

そのため、本事業では、廃棄体パッケージの設計要件を満たすために必要な製作技術を提示することを目的に、2018 年度～ 2022 年度にかけて以下の項目について検討した。

(1) 廃棄体パッケージの製作技術の整備

応力腐食割れ（SCC）対策である溶接後熱処理（PWHT）の施工や、ガス発生低減対策を施したプレキャスト製セメント系内部充填材を適用した角型形状の廃棄体パッケージの製作性に関する実証的な確認。

(2) 廃棄体パッケージの長期性能評価

処分深度に相当する静水圧や内部ガス圧の増加などを考慮した構造健全性の評価や容器溶接部の腐食データの取得。

(3) 操業中の異常事象に対する廃棄体パッケージの堅牢性の評価

操業期間中の異常事象を対象とした廃棄体パッケージの堅牢性評価のためのデータの取得。

◇2018 年度～2022 年度の成果²⁾⁻⁶⁾

(1) 廃棄体パッケージの製作技術の整備

1) 廃棄体パッケージの製作性確認試験

2018 年度から実施してきた角型形状の廃棄体パッケージの製作技術に関する要素試験や構造健全性評価の結果を踏まえ、2021 年度より図-1 に示す実規模の角型廃棄体パッケージの製作性

確認試験を実施し、各工程における製作性を確認した。

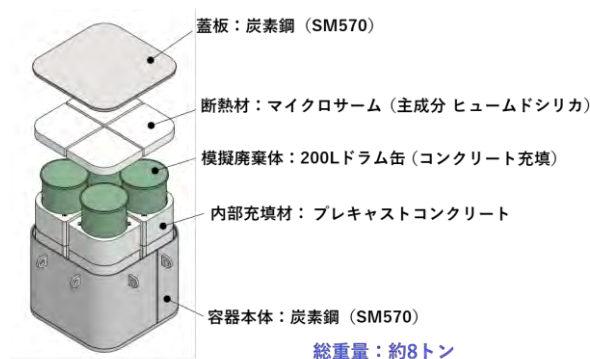


図-1 角型廃棄体パッケージの概要

容器本体の製作については、曲げ加工と溶接組立の際に、スプリングバックや溶接熱による反り、変形が懸念された。これらの課題に対して、図-2 に示すようにストロングバックや突っ張り棒といった変形防止のための治具を取り付け、さらに、溶接時に局所的に高温にならないように開先形状を最適化することで、溶接時の熱ひずみによる変形を防止し組立精度を確保できた。

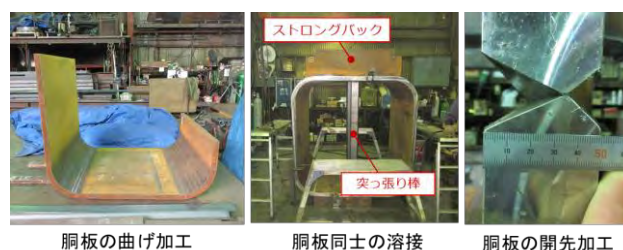


図-2 容器本体の製作状況

容器に収納する内容物（内部充填材、模擬廃棄体、断熱材）は、遠隔操作を想定した上で人手を介して実施し、いずれの部材も干渉なく安定して挿入し設置できることを確認した（図 3）。



図-3 廃棄体及び断熱材の設置状態

蓋接合の溶接方法については、2021 年度までに電子ビーム溶接、レーザ・アークハイブリッド

ド溶接、タングステン不活性ガス溶接（以下、TIG 溶接とする）について要素試験を実施し、それぞれ遠隔施工による適用性を確認した上で、他の溶接方法に比べ溶接品質が優れている TIG 溶接を採用した。溶接施工状況を図-4 に示す。



図-4 溶接施工状況

蓋溶接後の超音波探傷試験については、2021 年度の検討結果から、容器側面側から接触媒質を用いて探傷するフェーズドアレイ法を用いた。試験は、遠隔施工時に反映するための留意点を抽出するため、図-5 に示すように、手動走査をガイドするジグを用い、エンコーダによって探触子位置を取得することで実施した。



図-5 超音波探傷試験の状況

超音波探傷試験の結果、溶接欠陥と思われるエコーは確認されなかったものの、検査部位である溶接部の表面状態（研削処理部、打痕部分、スパッタ付着部分）によっては、エコーに若干の乱れが発生することが確認された。このことから、容器製作時に、探触子走査面にあたる部位を目視検査し、必要に応じてグラインダー等による面加工が必要になること、また、蓋溶接時に容器側面の探触子走査面にスパッタを付着させないような溶接施工が必要となることなどの留意点を得た。

蓋溶接部の残留応力を低減する目的で実施する溶接後熱処理(PWHT)の施工については、2019 年度にパネルヒータを用いた方法により試験を実施し、保温材の設置が必須となること、内面

側の温度が最高で 438℃～538℃まで到達すること、施工時間が長くなることなどの課題が抽出された。そのため、2020 年度では、高周波誘導加熱コイルを用いた方法で試験を実施し、目標通りの加熱が可能であることを確認した。また、PWHT 施工時の廃棄体への熱影響を低減するため、容器内部の廃棄体上部の空間に断熱材を設置することとし、候補材の中から最も断熱性能が優れた Promat 社製の「マイクロサーム」を選定した。この断熱効果を確認するため、2021 年度に実施した伝熱解析結果より、廃棄体の最高到達温度が 150℃であることを確認し、アスファルト固化体に対する熱的制限値として設定した 195℃より低く抑えられる見通しを得た。

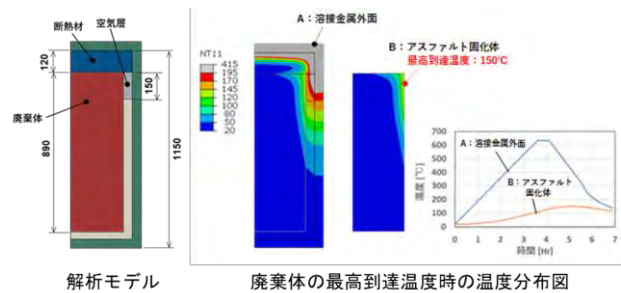


図-6 断熱材を設置した場合の伝熱解析の結果

加熱方法については、製作性確認試験では設備的な問題や全周の温度調整に関する技術的な問題から、図-7 に示すように蓋溶接部全周を 2 回に分けて加熱する方法を採用した。また、PWHT 施工時の廃棄体への熱影響について、容器内部の温度状態を把握するため、溶接部、模擬廃棄体上面・側面、内部充填材上面・側面に熱電対を取り付け（図-8）、施工中の温度履歴を取得した。

温度履歴から、容器内部の模擬廃棄体の最高到達温度は、1 回目の PWHT 施工では 163℃で、2 回目の PWHT 施工では 155℃であった。1 回目、2 回目ともに最高到達温度は模擬廃棄体の側面であり、伝熱解析で得た 150℃よりは若干高いものの、いずれの場合も、廃棄体の熱的制限値として設定した 195℃より低いことを確認した。

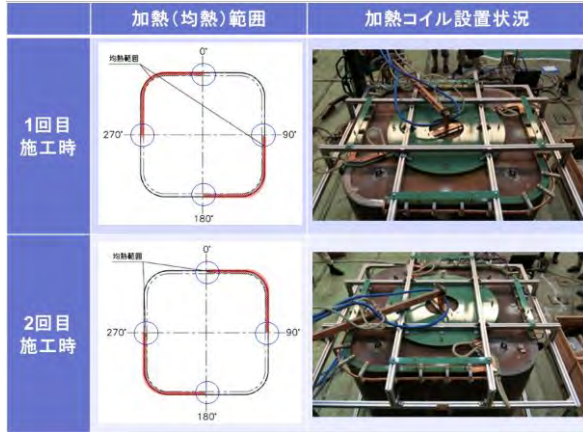


図-7 加熱コイルの設置位置

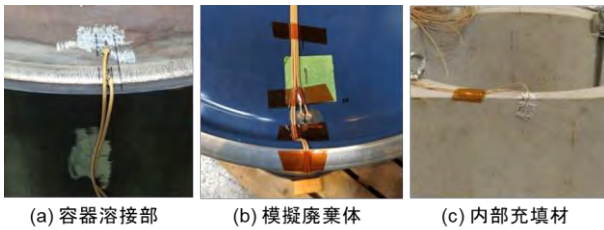


図-8 加熱コイルの設置位置

溶接部の最高到達温度については、図-9 に示すように、1 回目も 2 回目も加熱範囲の幾つかの測定点で目標とした JIS に基づいた PWHT 施工条件の保持温度（595～635℃）に到達しなかった。このように、高周波誘導加熱を用いた PWHT の施工性については、測温箇所によって保持温度のバラツキがあり、保持温度内での最高到達温度の管理について課題が残った。

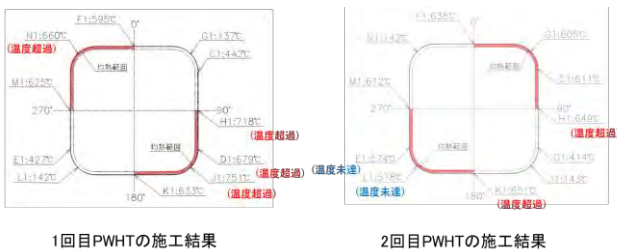


図-9 PWHT 施工時の溶接ビード上の温度

次に、PWHT 施工による溶接残留応力の低減効果を検証するため、ASTM E837-13a 規格に従い、穿孔法を用いて溶接後と PWHT 施工後の蓋溶接部の残留応力を計測した。

計測値については、応力腐食割れの原因となるのは主に表面付近の引張残留応力であるため、表面から深さ 0.225mm の値を採用した。残留応力の測定位置を図-10 に、残留応力計測結果を

表-1 にそれぞれ示す。

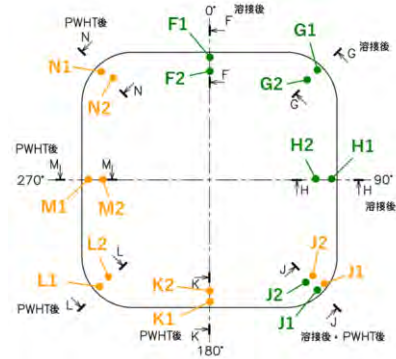


図-10 残留応力計測位置

表-1 残留応力計測結果

部位	位置	最大主応力		σ_x	σ_y	最大主応力方向	
		MPa	MPa				
溶全部	直線部	F1	242	-197	230	-185	-9
		H1	268	-208	267	-207	-3
	コーナー部	G1	221	-256	215	-250	-6
母材部	直線部	F2	126	118	124	119	-28
		H2	314	139	140	313	-86
	コーナー部	J2	260	226	226	259	-85
		J1	245	210	218	237	-61

(a) 蓋溶接後の計測結果

部位	位置	最大主応力		σ_x	σ_y	最大主応力方向	
		MPa	MPa				
溶全部	直線部	K1	334	-660	334	-660	0
		M1	548	-514	547	-513	-2
	コーナー部	L1	218	-130	218	-130	-1
母材部	直線部	N1	314	-95	305	-85	-9
		K2	161	-3	160	-2	-5
	コーナー部	M2	261	29	255	35	-9
		L2	205	-66	205	-66	-2
溶全部	コーナー部	J1'	450	9	450	9	2
母材部		J2'	-21	-89	-21	-89	0
			156	-90	156	-90	0

(b) PWHT後の計測結果

表中の σ_x は溶接線方向、 σ_y は溶接線の直交方向の応力で、プラスが引張応力、マイナスが圧縮応力を表す。最大主応力方向は溶接線方向を 0° として、 $+90 \text{ deg}$ または -90 deg は直交方向である。なお、本来、PWHT 施工による効果を確認するには同一部位において溶接後と PWHT 後の測定結果の比較が望ましいが、穿孔法による応力解放の影響を避けるため、ここでは容器の右半分（F、G、H、J）を溶接後、左半分（K、L、M、N）を PWHT 後の測定位置とした。したがって、溶接後と PWHT 後の測定結果を比較するにあたり、溶接後の残留応力は、左半分も右半分と同等の残留応力が発生しているものと仮定した。

この仮定の下、溶接後の母材部の残留応力を見ると、 σ_y は直線部及びコーナー部ともに引

張の残留応力であったが、PWHT 後では引張の残留応力がキャンセルされ、また、部位によっては圧縮の残留応力が付与されていた。ただし、 σ_x の引張の残留応力は、PWHT の施工によって逆に増減が大きくなり、残留応力にムラがある状態となったため、溶接線方向の引張残留応力の改善については課題を残す結果であった。

2021 年度から開始した実規模廃棄体パッケージの製作性確認試験では、容器の組立から PWHT 施工に至る各工程の製作性や施工性について実証的に確認できたことに加え、実際に製作することで新たな知見や留意点、さらに今後の廃棄体パッケージの製作技術の向上に反映し得る成果を得た。

遠隔施工性については、装置の開発までは着手しなかったものの、遠隔を想定して人手を介して施工することで、実際に遠隔で操作する場合に装置に求められる機能や設備的な問題点を明確にできた。

2) 廃棄体パッケージ内部充填材の仕様の検討

セメント材料による内部充填材については、放射線分解による内部充填材からの水素ガス発生量に関する基盤情報となるよう、これまでの試験で取得したデータを整理し、図-11 に示す内部充填材の製作フローを構築した。

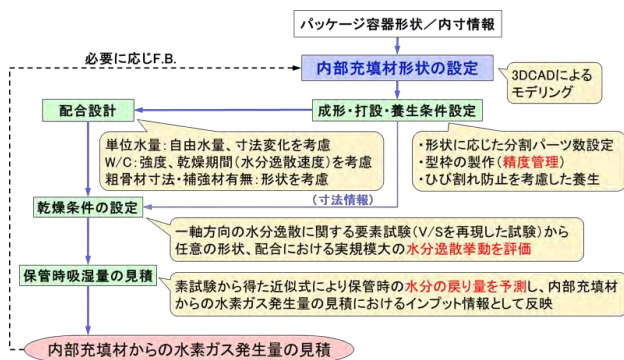


図-11 内部充填材の製作フロー

内部充填材の製作においては、廃棄体パッケージ容器の形状及び寸法の情報に基づき内部充填材の形状が決定され、この形状から施工可能な配合や養生条件及び乾燥条件が設定される。2021 年度までの結果から、放射線分解による水素ガスの発生に対するセメント系材料中の自由水量の影響が大きいことが分かり、水素ガス発生量の低減には、自由水量の抑制が効果的であ

ることを見出した。そのため、乾燥工程を経た後の水分量及び保管時の吸湿水分量を把握することで、水素ガス発生量を見積もることが可能となり、さらに、この見積もった水素ガス発生量から廃棄体パッケージ内の圧力上昇に及ぼす影響を把握できることが分かった。

(2) 廃棄体パッケージの長期性能評価

1) 内部充填材からの水素ガス発生量の評価方法

セメント系材料による内部充填材は、含有される水分の放射線分解によって水素ガスが発生する。そのため、閉鎖後長期の間、廃棄体パッケージの閉じ込め性能を維持するためには、この水素ガス発生量を考慮した容器の設計が重要となる。

そこで、2021 年度までに実施した試験により得られた知見に基づき、水素ガス量を推定する手法を構築し、内部充填材から発生する水素ガス量及び水素ガス発生に伴う廃棄体パッケージ内の圧力上昇について計算した。計算したケースは、内部充填材を乾燥前、乾燥後、吸湿後のコンクリートにした場合の 3 ケースと、高強度高緻密コンクリート⁷⁾を 8 日間封緘養生した場合の 1 ケースの計 4 ケースとした。

算出するための前提条件を以下に示す。

- ・ 廃棄体パッケージは、金属容器内に充填材を設置した後に、その内部に廃棄体を収納する構造とする。廃棄体の上部の空間には、PWHT 施工による熱影響を低減するため、断熱材を設置する。各材料の内部には空間を持たず、各材料間のすき間のみが空間となる。
- ・ 蓋溶接で密閉される前の圧力は 1 気圧 (0.101325 MPa) とし、発生した水素ガス分だけが圧力上昇に寄与する。
- ・ 内部充填材が吸収するエネルギーは γ 線のみとし、廃棄体からの吸収線量を算出する。
- ・ 廃棄体パッケージが密封されるタイミングを廃棄体作製後 25 年目とし、24 年目までに発生する水素ガスは廃棄体パッケージ外に放出されると仮定する。
- ・ 環境温度は 25℃ 一定と仮定し、廃棄体パッケージ内の圧力は、理想気体の状態方程式を用いて算出する。

この前提条件を踏まえ、500 年経過後まで計

算した結果を図-12 に、50 年後、100 年後、300 年後の圧力上昇値を表-2 に示す。

300 年後のパッケージ内の圧力上昇は、内部充填材を乾燥前のコンクリートにした場合では約 0.016 MPa、乾燥後吸湿したコンクリートにした場合では約 0.008 MPa であり、吸湿を考慮したとしても、乾燥工程を設けることが廃棄体パッケージの圧力上昇の抑制に有効であることが分かった。なお、高強度高緻密コンクリートにした場合では、約 0.002 MPa の圧力上昇と、更に低い結果であった。

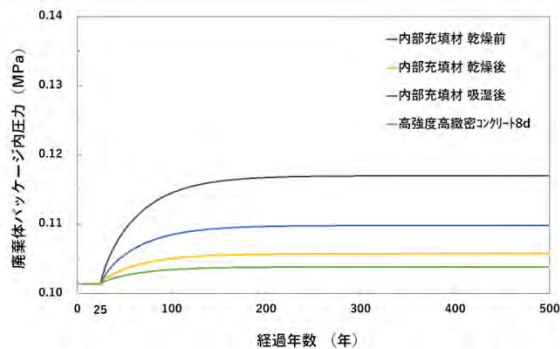


図-12 内部充填材からの水素ガス発生による廃棄体パッケージ内の圧力

表-2 残留応力計測結果

ケース	内部充填材			高強度高緻密 コンクリート 8d
	乾燥前	乾燥後	乾燥後吸湿	
密封前 [24 年後]	0.101325	0.101325	0.101325	0.101325
50 年後	圧力値	0.109119	0.103508	0.105542
	圧力上昇値	0.008	0.002	0.004
100 年後	圧力値	0.114485	0.105011	0.108445
	圧力上昇値	0.013	0.004	0.007
300 年後	圧力値	0.116936	0.105697	0.109771
	圧力上昇値	0.016	0.004	0.008

本事業で製作した実規模廃棄体パッケージでは、内部充填材の量も少ないことから、内部充填材から発生する水素ガスによる圧力上昇への影響は小さく、内部充填材の製作時に乾燥処理を実施すること、もしくは高強度高緻密コンクリートを適用することで、廃棄体パッケージの圧力上昇を抑制することができることが示された。

2) 廃棄体パッケージ容器溶接部の腐食挙動評価

パッケージ B においては、設計要件として構造健全性に加え耐食性が求められる。そのため、溶接技術の妥当性とその品質を評価するための

知見を整備することを目的に、溶接部の浸漬試験を実施し検討してきた。

実規模廃棄体パッケージの製作確認試験では、容器に使用する鋼材及び蓋溶接方法がそれぞれ SM570、TIG 溶接となり、この仕様に関する腐食データを取得するため、酸化性雰囲気による浸漬試験を実施した。試験条件を表-3 に示す。

表-3 浸漬試験条件

試験条件	
試験片	SM570、TIG溶接
試験温度	80°C
試験溶液	①人工海水 (海水系地下水を想定) ASTM規格人工海水 ②人工淡水 (希薄な地下水を想定) 2.5mM-NaHCO ₃ + 2.5mM-NaCl溶液
浸漬期間	90日、180日、360日

腐食試験用の試験片については、実際の状態を模擬するため、溶接ビードが上面になるように試験片を切断加工した。この試験では、実際の容器の状態を模擬するため溶接表面側は研磨などの表面処理は行わず、試験片には圧延工程時に発錆した酸化被膜（以下、黒皮という。）が付着したままの状態、腐食生成物が自然堆積した影響を取り入れることを目的に評価面を上面にした平置き状態で試験を実施した。試験装置の概要を図-13 に示す。

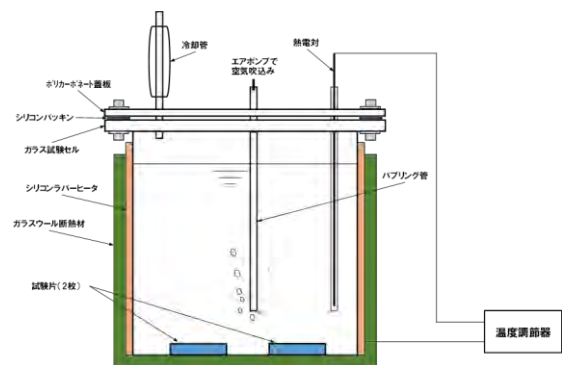


図-13 浸漬試験装置

試験終了後の試験片の外観は、人工海水を用いた試験については、180 日までは比較的均一な全面腐食を呈していたが、360 日では均一な全面腐食の進展に加え局部腐食が発生していた。人工淡水を用いた試験については、180 日までに熱影響部のあたりに溶接線に沿った腐食溝及び腐食孔が発生し、360 日ではさらに進展していた。

人工海水と人工淡水の浸漬後（脱スケール後）の試験片を顕微鏡で観察した（図-14）。腐食溝は深さ方向に傾斜になっていたため、最深部の深さ測定は不可能であったが、180日までは人工淡水では深さ1mm程に達する腐食溝や腐食孔が発生し、360日までは人工海水、人工淡水ともに深さ2mm程に達する腐食溝や腐食孔が発生していた。

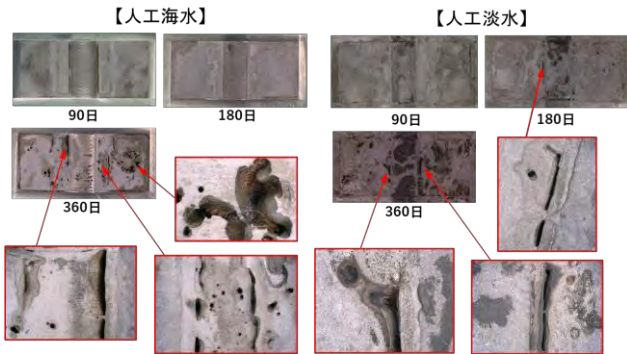


図-14 浸漬後（脱スケール後）の試験片

本試験の結果から、酸化性雰囲気下での溶接部の腐食挙動は、人工海水及び人工淡水ともに、ある一定の浸漬期間を経ると腐食溝や腐食孔が点在し、その深さは1年間の浸漬で2mm程にも達することを確認した。とくに腐食溝に関しては、溶接線に沿って母材部と熱影響部の境界に発生する傾向が見られ、開先形状に沿って深さ方向に進展するという特徴であった。表面の黒皮の影響については、黒皮部においても腐食孔が発生していたことから、180日以上耐食層としての機能は期待できず、むしろ腐食生成物の堆積や微細なクラックの存在による素地とのガルバニック腐食の可能性についても留意しておく必要があることが分かった。今後の課題として、腐食溝の深さ方向の進展について、より長期の浸漬試験による確認と、その対策についても検討する必要がある。

(3) 操業中の異常事象に対する廃棄体パッケージの堅牢性の評価

廃棄体パッケージは、操業中の安全性確保の観点から、地層処分場において搬送中に落下した場合でも放射性物質の閉じ込め性能を維持することが求められる。ここでは、将来的により詳細な落下解析や落下試験を実施することを想定し、試験条件の設定に資するための情報を得

ることを目的に、落下事象を対象とした予備解析を実施した。

解析モデルは、容器は本体、蓋、溶接部、及び未溶着部を一体とし、容器本体と蓋の溶接部は完全溶込みしているものとした。

落下姿勢は、図-15に示すように、容器に対して厳しい条件を想定し、「辺からの落下」及び「頂点からの落下」の2ケースとした。

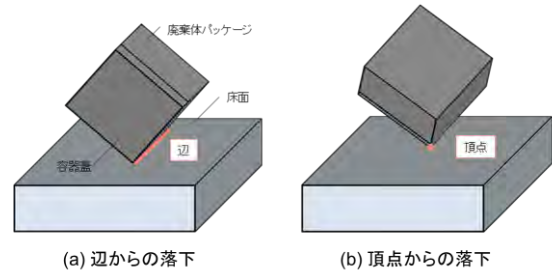


図-15 落下姿勢

落下高さを8mと仮定し解析した結果、辺からの落下の方が頂点からの落下に比べて応力拡大係数が大きく、応力状態が厳しい落下姿勢であることが分かった。この予備解析の結果を踏まえ、実際の形状を反映した解析モデルによる詳細な検討が今後の課題である。

- 1) 原子力発電環境整備機構、包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現一適切なサイト選定に向けたセーフティーケースの構築一、NUMO-TR-20-03、2021
- 2) 原子力環境整備促進・資金管理センター、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成30年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発 報告書、2019
- 3) 原子力環境整備促進・資金管理センター、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発 報告書、2020
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、令和2年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2021
- 5) 原子力環境整備促進・資金管理センター、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、令和3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2022
- 6) 原子力環境整備促進・資金管理センター、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2023
- 7) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成17年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査一人工バリア長期性能確認試験一 報告書、2006

5-3 陰イオン核種に対する閉じ込め技術の開発

◇事業の概要

TRU 廃棄物の地層処分安全評価において、ヨウ素 129 (以下、I-129)、塩素 36 (以下、Cl-36)、セレン 79 (以下、Se-79) など、地下深部の還元性雰囲気において陰イオンの形態をとり、かつ長半減期の核種の影響が大きいことが示されている¹⁾。

これらのうち、I-129 は主に再処理施設のオフガス系から、AgI の形態で回収される。

AgI は還元性雰囲気では易溶性であるため、安全評価においては瞬時放出成分とされることに加え、I-129 は人工バリア材や岩盤への吸着性が乏しく長半減期(半減期 1570 万年)であることから、地質媒体の水理特性(透水性、動水勾配など)によって、安全評価における影響の程度が大きく変化する。このような安全評価における不確実性を低減するとともに、その影響を低減するための目標として下記①及び②を設定し、HIP 固化技術と BPI ガラス固化技術に絞り込み、開発を実施している²⁾⁻⁹⁾。

- ①ヨウ素固定化処理プロセスにおけるヨウ素回収率 95%以上(未回収のヨウ素からの最大被ばく線量を小さくするように設定)
- ②固化体からのヨウ素放出期間 10 万年以上(特に水理条件が悪い場合でも I-129 からの最大被ばく線量を瞬時放出よりも約 1 桁低減可能なヨウ素放出期間に相当)

両固化技術ともに、年単位での浸出試験の結果によって、ヨウ素の溶出を加速する地下水成分(アルミナ HIP 固化体においては HS⁻、BPI ガラス固化体においては炭酸イオン)の影響を強く受ける場合を除いて、目標を達成可能な見込みを得ている。一方で、ヨウ素が 10 万年という長期間にわたりゆっくりと放出されることを保証するためには、ヨウ素の放出に係る現象を正確に把握するとともに、その現象が継続することを示すこと、及びそのモデル化が必要である。

その他の陰イオン核種に関しても、I-129 と同様に長半減期であり且つ地質媒体及び人工バリアにおける移行遅延効果が小さいため、その対策が必要と考えられている。このような核種を対象にした吸着材の探索はこれまでも実施されたが、

地層処分における環境特性(酸化還元電位、pH、温度など)の多様性やその変化に適応できる吸着材の開発には至らなかった¹⁰⁾。

近年になって、水処理や土壌処理等の分野で、陰イオンを対象とした処理剤が開発され、一部は商品化されている¹¹⁾ことから、最新の技術に関する調査結果に基づいて、地層処分に適用できる可能性が考えられた候補材料を対象に吸着試験に着手し、2021 年度に選定した、セメント影響を想定したアルカリ性の環境への適用可能性のある吸着材を対象に、容器間の充填材や緩衝材、埋め戻し材への混合を念頭に、セメント系からの浸出水及びベントナイトとの平衡水での吸着試験を実施し、処分場への適用可能性について検討した⁹⁾。

◇2018 年度から 2022 年度の成果¹²⁾

(1)HIP 固化技術

HIP 固化は廃銀吸着材をマトリクス材料とともに直接 HIP (Hot Isostatic Pressing) 処理して、ヨウ素を AgI の形態でマトリクスに閉じ込める技術である。これまでに、アルミナ HIP 固化体からのヨウ素の溶出は、時間の 2 分の 1 乗に対して直線的に増加していくこと、及びその直線の傾きは HS⁻濃度が高い場合により大きくなることが分かっている⁷⁾。また、浸漬後の固化体内部の未溶出部と溶出部のヨウ素の濃度が大きく異なり、未溶出部内部のヨウ素濃度は一様であった。

これらのことから、HS⁻と AgI との反応は、HS⁻の供給が律速となっていること、並びに、アルミナ HIP 固化体からのヨウ素の溶出が、内在する粒界や空隙を通じた地下水の内部への浸透及び AgI の溶解によって生じた I⁻の外部への拡散によることを推定し、ヨウ素の溶出トレンドを基に、アルミナ HIP 固化体からのヨウ素の溶出現象を、図-1 のようにモデル化し、式 (1) によって時刻 t までのヨウ素溶出量 Mt を算出することができることを確認した⁹⁾。

$$\frac{M_t}{A} = \sqrt{(2C_{ini} - C_s)D \cdot C_s \cdot t} \quad \dots \text{式 (1)}$$

ここで、C_{ini} は固化体内部の未溶出部(地下水が到達していない領域)のヨウ素濃度を、C_s は溶解フロントの液相側のヨウ素濃度を、A は固化体の接液面積を、D は拡散係数を、それぞれ示す。

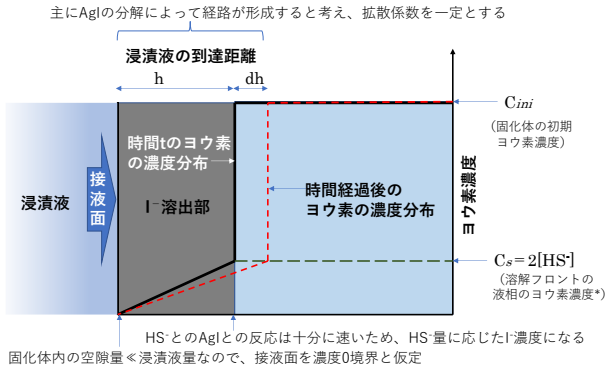


図-1 アルミナ HIP 固化体のヨウ素溶出挙動の現象モデルの模式図

*: ヨウ素の濃度プロファイルから未反応部表面に達したHS⁻は速やかにAgIと反応するものと仮定した。

図-2は、固化体からのヨウ素の溶出量を式(1)の右辺に対して両対数でプロットしたものであり、その傾きからDを求めることができる。この拡散係数は、浸漬液からのHS⁻の浸透と、未溶出部表面で溶出したヨウ素の拡散を含む拡散係数として算出される。

ここで、Dを除く各変数は、環境条件や固化体の形状から既知であり、Dを求めることができれば、固化体のサイズを調整することによって、時刻 t までのヨウ素の溶出量及び固化体の寿命を制御できる可能性を確認した⁹⁾。

図-2では、●、◆及び▲のグループ(pHが高く、マトリクスであるアルミナの溶解が速いと考えられるグループ)と、◆及び■のグループ(低pHやCaの影響によってアルミナの溶解が抑制されるグループ)とで、得られるDに違いがある可能性が示されている。一方、HS⁻の濃度は、Dの値に直接影響を与えておらず、ヨウ素の溶出量の違いは、Csの差異による接液面との濃度勾配の差が反映されたものと考えた。これらの結果から、Dに影響を及ぼす因子はアルミナの溶解に伴う空隙構造の変化であると考え、PHREEQCを用いて算出したα-アルミナの溶解度(図-3)と、Dとの関係を図-4のように整理した¹²⁾。

データ数が少なく、バラツキが大きいが、α-アルミナの溶解度と浸漬試験の結果から得られるDとの間の相関が明らかになった。

ここで得られるDは、浸漬液の性状を反映させた拡散係数の値であるため、これを用いることによって、アルミナ HIP 固化体からのヨウ素の溶出に影響を及ぼすアルミナの溶解(空隙構造の変化)

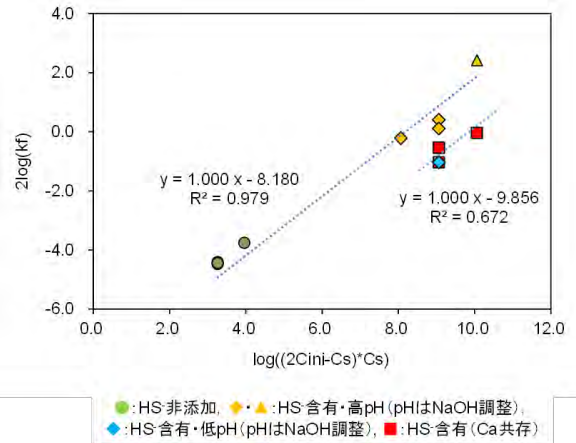


図-2 アルミナ HIP 固化体のヨウ素溶出量と式(1)の右辺との関係

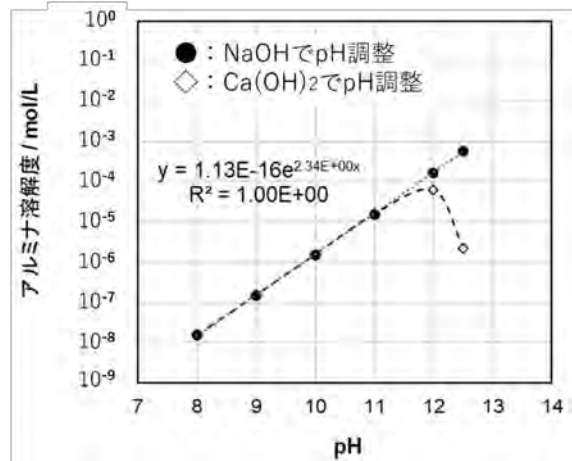


図-3 PHREEQCによるアルミナ溶解度の計算結果

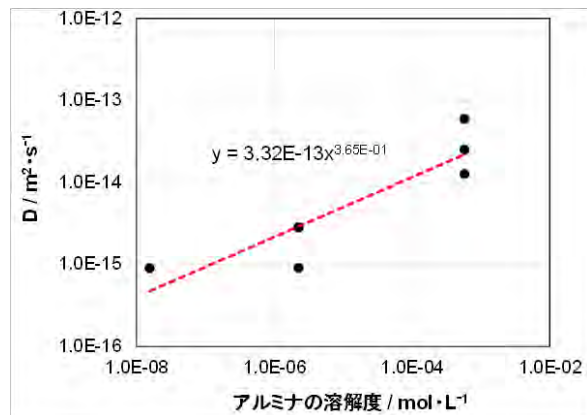


図-4 アルミナの溶解度と算出されたDの関係

と、HS⁻との反応によるAgIの分解の加速とを考慮した固化体寿命の評価、及び任意時間までのヨウ素の溶出量の算出を可能とすることができた。

(2)BPI ガラス固化技術

BPI ガラス固化技術は、鉛とホウ素を主成分とする低温熔融ガラスの成分としてヨウ素を取り込み、均質に固化する技術である。

2018年度以降は、BPI ガラス固化体（以下、ガラスという。）からのヨウ素溶出モデルの構築を課題としている⁵⁾。

これまでに、X線光電子分光法、B-11核磁気共鳴スペクトル法及び中性子線回折等を用いた固化体の分析結果に基づいて構築したガラスの微細構造をもとに設定したパラメータを用いて、長期間のヨウ素の溶出挙動をモンテカルロ法によって再現できることが分かっている⁸⁾。

このことは、ガラスの溶解過程及び溶解に伴うヨウ素の溶出過程が長期的に変化しなければ、将来にわたってヨウ素の溶出挙動を再現できることを示している。

Geochemist's Work Benchを用いた地球化学解析結果からは、ガラスの溶解によって表面に析出物を形成する可能性のある地下水成分として、炭酸及び重炭酸、HS⁻、リン酸が抽出され、推定された析出相はそれぞれ、ハイドロセルサイト及びセルサイト、ガレナ、鉛アパタイトであった。この結果は、浸漬試験の結果とも一致した⁵⁾。

種々の浸漬液を用いた浸漬試験の結果から、ガラスからのヨウ素の溶出挙動は浸漬液に含まれる成分によって異なり、ヨウ素の規格化浸出率がホウ素のそれと同等となる条件と、ヨウ素の規格化浸出率がホウ素のそれに対して抑制的となるケースとが存在することが分かった⁵⁾。

また、概ね 10^{-3} mol/l を下回る低濃度の塩水及び、純水への浸漬時を除いて、液相の鉛の濃度は、検出下限値と同等かそれを下回る値であった。

このことから、ガラスの主要な骨格をなす成分のうち、ホウ素の溶出が優先的に起こり、さらに鉛と浸漬液の成分との反応によって析出物が生じる際に、鉛近傍に配位するヨウ素が放出されるというヨウ素の溶出過程をとる可能性が考えられた。

そのため、鉛との反応が予測される成分を含まない、NaCl 溶液への浸漬を行い、浸漬後のガラスの観察及び分析を行ったところ、低濃度のケースで、ガラス表面に薄い析出物層が生成することが分かった⁸⁾。この析出物（図-5）の特性X線分析を実施したところ、粒状の析出物（図中のC）が

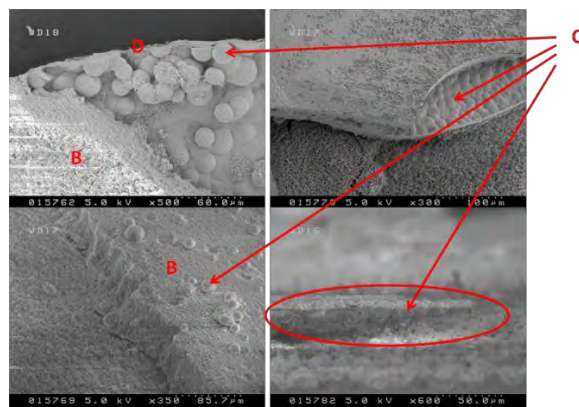


図-5 NaCl 溶液に浸漬したガラス表面の析出相

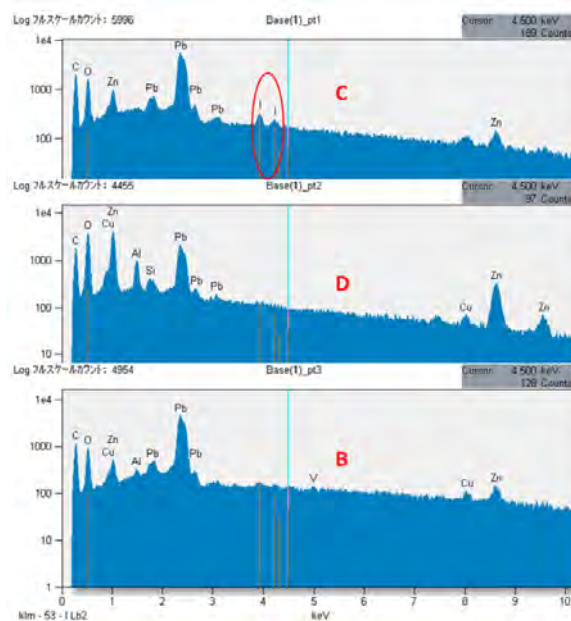


図-6 ガラス表面の析出相の特性X線分析の結果

ヨウ素と鉛との化合物であり、その他の析出物（図中のB及びD）は、ガラスに含まれる鉛、亜鉛等と浸漬液由来の塩素などからなる化合物であることが明らかになった¹²⁾。

鉛と浸漬液成分との化合物の析出が想定されない、NaCl 溶液への浸漬でも、ヨウ素の浸出量が少なかったことは、図-7に示すように 10^{-3} mol/l を下回る低濃度の塩水では、ガラスの溶解量が多く、鉛とヨウ素との化合物の溶解度を越えた結果として、ヨウ素の規格化浸出量がホウ素のそれを下回ったことによるものと考えた。

また、以下に説明するガラス中のPb-O及びB-O結合の共有結合性の比較から、Pb-O結合の共有結合性が低く、B-O結合と比較して水和によって切断されやすいことから、上述のホウ素が

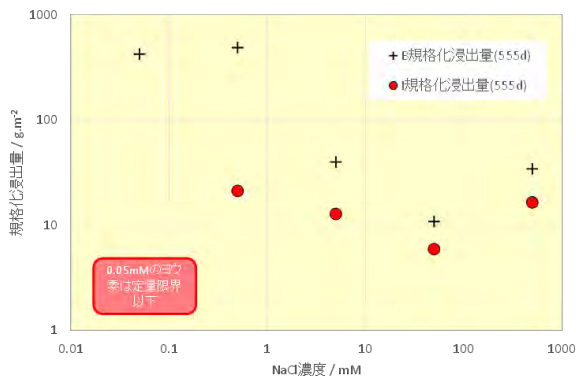


図-7 浸漬期間 555 日における浸漬液の NaCl 濃度とホウ素及びヨウ素の規格化浸出量の比較

優先的に溶出するという仮説が成立しないことが明らかになった。

2020 年度までに分子動力学法などによるエネルギー計算を精度高く実施できるように、非現実的な配位構造等が含まれないように改良した、BPI ガラスの構造モデル⁸⁾から、局所構造を分子あるいはイオン状態のクラスターとしてモデル化し、その理論計算から、Pb-O 及び B-O の各結合様式及び結合エネルギーを評価した。

その結果の例として、図-8 に共有結合性の指標である有効共有結合電荷 (BOP, bond overlap population) と結合距離との関係の例¹²⁾を示す。

Pb-O 結合の BOP 値は、概ね 0.1 から 0.3 に分布があり、B-O 結合 0.5~1.0 と比較して小さい値をとることから、ガラス中の B-O 結合と比較して、Pb-O 結合の共有結合性が低いことが明らかになった。

一般に共有結合性の高い結合と比較して、それが低い結合の方が水和によって切断されやすく、また、ガラスの微細構造モデル⁸⁾では、B-O-B 結合の頻度は低く、B-O-Pb 結合の頻度が高いことを考え併せると、上述の、ホウ素の溶出が優先的に起こり、さらに鉛と浸漬液の成分との反応によって析出物が生じる際に、鉛近傍に配位するヨウ素が放出されるというヨウ素の溶出過程をとる可能性は極めて低く、ガラスの微細構造の骨格をなす鉛とホウ素と及びそれらの近傍に配位するヨウ素がほぼ同時に溶出するものと考えられた。

このとき、鉛と浸漬液成分との化合物の析出が想定されない、NaCl 溶液への浸漬でも、鉛の濃度が検出下限値と同等かそれ以下であったのは、低 NaCl 濃度では鉛とヨウ素との化合物の析出が起

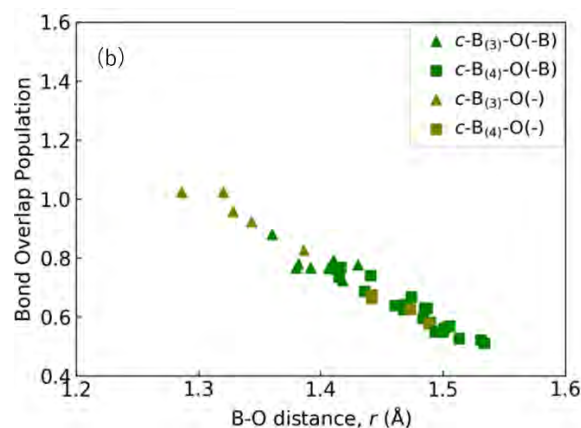
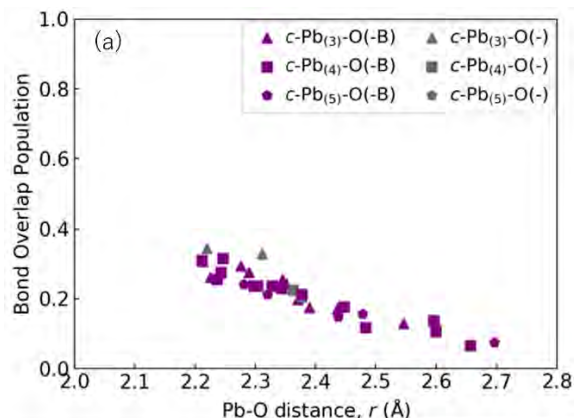


図-8 ガラス中のクラスターに含まれる Pb-O 結合(a)及び B-O 結合の有効共有結合電荷の関係の例

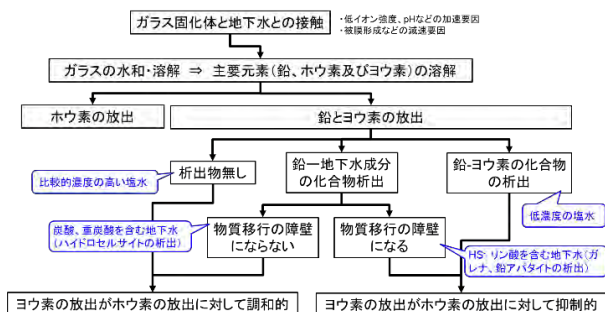


図-9 BPI ガラス固化体からのヨウ素の溶出現象モデル

きること、及び、高 NaCl 濃度ではガラスの溶解量が小さいことに起因するものと考えられた。

これまでに述べた結果から、ヨウ素の溶出挙動と浸漬液の組成との関係を整理した (図-9)。

(3)陰イオン吸着剤

陰イオン吸着材については、2020 年度に実施した調査で抽出した吸着材を対象に、処分場で想定されるアルカリ環境の吸着試験でも有望な結果を得られた吸着材 3 種⁹⁾ (吸着材 A : Bi 系、吸着材 B : Mg, Al 系、及び吸着材 C : 鉄系・アルカリ

金属系複合化合物)に加え、2021年度に実施した地下水の液性(化学環境)と鉱物の吸着性に関する調査で、ハロゲンに対する吸着性が見込まれたエトリンサイト(Aft)及び、モノサルフェート(AFm)⁹⁾を対象に、地層処分への適用を考え、TRU廃棄物の処分坑道の断面図において、吸着材を配置することが可能なセメント系材料への混合あるいはセメント系材料と他の材料とのすき間等への充填、緩衝材への混合を考え、セメント平衡水(Ca(OH)₂の溶解平衡であるRegion2相当)及びセメント平衡水とベントナイトとが平衡に達した際の間隙水(以下、ベントナイト平衡水という)での吸着試験を実施するとともに、第2次TRUレポートで示されたTRU廃棄物のグループ1(廃銀吸着材)の処分坑道の概念¹³⁾を対象に、簡易な核種移行解析によって、陰イオン核種の人工バリアからの放出を抑制するために必要なベントナイト系材料及びセメント系材料の分配係数を算出し、吸着材が有効に機能を発揮するための条件を検討した。

図-10及び図-11にセメント平衡水及びベントナイト平衡水を用いた平衡吸着試験の結果得られた、各吸着材への陰イオンの分配係数をそれぞれ示す。

図から分かるように各陰イオンに対して、セメント平衡水及びベントナイト平衡水の各環境において高い吸着性を示す吸着材があることが明らかになった。また、ベントナイト平衡水中での各吸着材への吸着性は、Aft及びAFmを除き、セメント平衡水中でのそれと比較して全体に低かったが、これは、ベントナイト平衡水はセメント平衡水と比較し、SO₄²⁻濃度が高く、吸着対象イオンと競合したことが要因と考えられ、その組成にSO₄²⁻を含むAFm及びAftではその影響が小さかったためと考えられた。

陰イオン吸着材の処分場への適用に当たって、吸着材に求められる性能を見積もるために、第2次TRUレポートで示されたTRU廃棄物のグループ1(廃銀吸着材)の処分坑道の概念¹³⁾を対象とし、ヨウ素と同グループ1の核種量を、その他の陰イオン核種と同グループ2の核種量をそれぞれ与え、GoldSim及びGoldSim組み込みの核種移行モジュールを用いて、セメント系材料及びベントナイト系材料の吸着分配係数をパラメータとした感度解析を実施した。

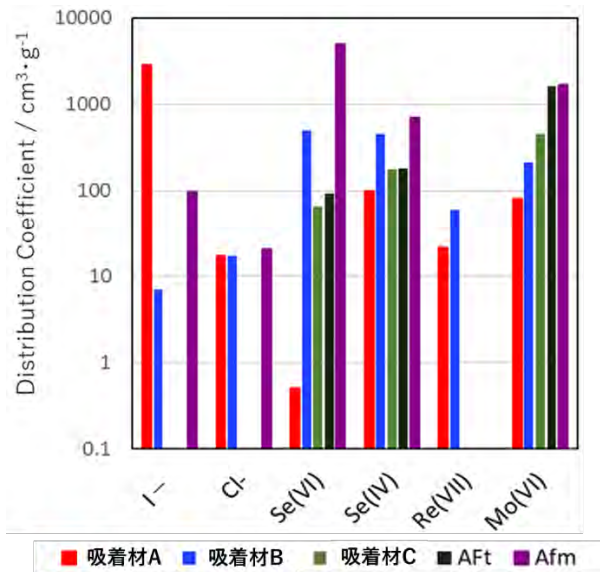


図-10 セメント平衡水での吸着平衡試験で得られた各吸着材への分配係数

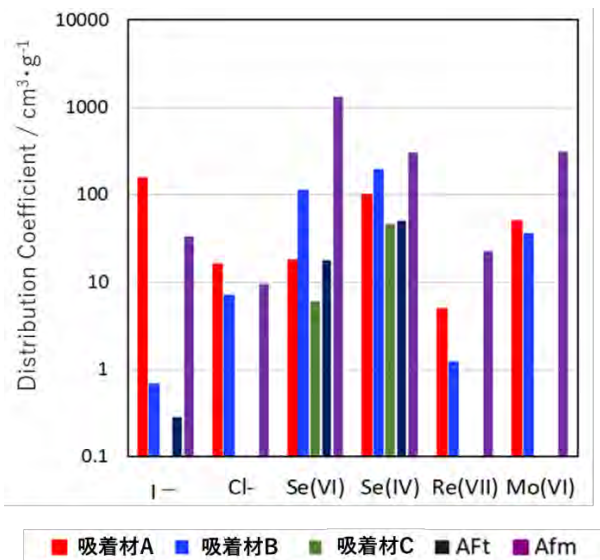


図-11 ベントナイト平衡水での吸着平衡試験で得られた各吸着材への分配係数

その結果、廃棄体領域(セメント系材料)及び緩衝材領域(ベントナイト系材料)のいずれかに、10⁻³ m³/kg以上の吸着分配係数が見込めれば、掘削影響領域に供給される陰イオン核種のフラックスの1桁以上の低減が可能であることが分かった。

この値は、領域全体に対しての値である。これをもとに、セメント系材料やベントナイト系材料に対して混合する吸着材に求められる分配係数を算出した。

セメント系材量及びベントナイト系材量のお

のおのに対して混合できる混合材量の上限に対して、吸着材の粒径が小さく比表面積が大きいことなどの影響を考慮して、混合できる吸着材量を、セメント系材料及びベントナイト系材料に対してそれぞれ 0.1% 及び 1.5% と設定した。このとき、各吸着材に求められる分配係数は、セメント系材料に混合する吸着材に対して $10^0 \text{ m}^3/\text{kg}$ を、ベントナイト系材量に混合する吸着材に対して $10^{-1} \text{ m}^3/\text{kg}$ を、それぞれ超える値であることが必要なことが分かった。

この結果と前述の吸着試験の結果とを見比べると、いずれの陰イオン核種に対しても、この条件を満足する吸着材を選定できる可能性があることが示された。

ただし、この数値は、緩衝材への砂混合率やセメント系材料への混合材の配合上限を基に算出したものであるため、それらの設定によっては、性能を発揮するために、吸着材により高い分配係数を要求される場合もあることに留意が必要である。また、本吸着試験の結果は、平衡水を媒体としたものであり、地下水成分やセメント系材料、緩衝材の固相の影響を考慮するため、より現実的な系での吸着試験等が必要である点にも留意が必要である。

◇陰イオン核種に対する閉じ込め技術の開発の今後の課題

ヨウ素固定化処理技術については、これまでに固化体の製造条件や固化体の基本的な性能が、目標である放出期間（10 万年）及び製造工程でのヨウ素捕集率（95% 以上）を満足することが確認されており⁴⁾、この 5 年間は、ヨウ素の放出挙動の予測モデルの構築に注力してきた。

その結果、アルミナ HIP 固化技術に関しては、還元性地下水による AgI の分解によって放出されたヨウ素が、マトリクスであるアルミナの粒界及び粒間を経路とした拡散によって放出される現象に対して、 HS^- による AgI の分解の加速や、アルカリ環境によるアルミナマトリクスの溶解（拡散経路となる空隙構造の変化）を加味したヨウ素溶出モデルによって、任意時間までのヨウ素の溶出量の予測を可能とした。

また、BPI ガラス固化技術に関しては、ガラスの溶解の素反応に変化がなければ、短期的な溶解挙動からより長期のヨウ素の溶出を予測可能である

ことを示した⁸⁾。それと併せて、ヨウ素の溶出に係るガラスの溶解が、特定の成分の溶出から進展するのではなく、各成分が一様に溶出することで起きるものと推定されることを、浸漬後のガラス表面近傍の分析及び、ガラスの微細構造に基づく各結合の結合様式の解析から示した¹²⁾。

また、これまでに実施した種々の浸漬試験の結果に基づいて、両固化体の処分場の化学環境への適用性範囲をマップ化した⁹⁾。

これらによって、TRU 廃棄物の地層処分にヨウ素固定化技術を適用する際の技術の選択や、安全評価において必要となる、地質（地下水）環境に応じたヨウ素放出のソースタームを提供することを可能にした。これらの成果によって、水理環境が良好でない場合にも、ヨウ素の線量が目安である $10 \mu\text{Sv}/\text{y}$ を超えず、また水理環境が良好な場合にはより低減できる技術があり、必要に応じて対策を講じることによって I-129 の影響を抑制し、地層処分を安全に実施することができるという説明が可能となった。

今後は、BPI ガラスからのヨウ素放出の素反応の継続性や、ヨウ素の放出が時間の $1/2$ 乗に比例することの理論的説明が残された課題である。

陰イオン吸着材の開発に関しては、近年開発され、実用化された吸着材を中心に、地層処分に於ける陰イオン対策として適用可能性のあるものに対して吸着試験を実施した。その結果から、処分場で想定されるセメント系材料やベントナイト系材料への混合によって性能を発揮する可能性のある吸着材が複数存在することを示した。加えて、TRU 廃棄物の地層処分において、陰イオン核種の影響を抑制するために吸着材に求められる性能を提示した。今後、より現実的な条件での性能確認が必要ではあるが、TRU 廃棄物の処分場の設計や要求に応じた吸着材及びその利用方法の選択の可能性を示すことができたと考えている。

- 1) 原子力発電環境整備機構、包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－、NUMO-TR-20-03、2021
- 2) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 16 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査 ヨウ素固定化技術調査報告書、2005
- 3) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 18 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査 ヨウ素固定化技術調査報告書、2007
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 24 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物処分技術ヨウ素・炭素

処理・処分技術高度化開発－平成 19 年度～平成 24 年度の取りまとめ報告書－、2013

- 5) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書（第 1 分冊）－ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上－、2018
- 6) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、平成 30 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発 報告書、2019
- 7) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、平成 31 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発 報告書、2020
- 8) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和 2 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2021
- 9) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和 3 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2022
- 10) 地層処分基盤研究開発調整会議、地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～令和 4 年度）、2020
- 11) たとえば <http://www.amec.jp/product/index.html>
- 12) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和 4 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2023
- 13) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物処分技術検討書、JNC-TY1400 2005-013, FEPC TRU TR2-2005-2, 2005

5-4 廃棄体からの核種溶出モデルの高度化

◇事業の概要

本事業は、使用済燃料の再処理過程で発生するハル等（ジルカロイ製の燃料被覆管であるハル、ステンレス鋼製のエンドピース等）を収納した廃棄体（以下、ハル等廃棄体）に含まれる炭素 14（以下、C-14）の長期的放出挙動の評価に関する信頼性向上を目的として、2004 年度に開始した。研究は大きく 3 つの項目に分類される。第一に C-14 インベントリの合理的設定方法の検討、第二に放射化金属からの C-14 放出挙動評価、第三に放出挙動評価の補完試験としての金属の腐食速度評価等のコールド試験である。

フェーズ 1（2004 年度～2006 年度）では、ジルカロイやステンレス鋼の諸特性に関わる情報収集等を行い、試験計画の立案を行うとともに、基礎試験を実施し、一部のデータを取得した¹⁾。

フェーズ 2（2007 年度～2012 年度）では、C-14 のインベントリについて、炉型（PWR、BWR）や燃料型式、さらには材料に応じて、詳細にインベントリを評価した。同時に C-14 の分析手法の見直しを行い、沸騰水型原子炉（BWR）の照射済み被覆管を用いた 10 年間にわたる溶出試験を開始した²⁾。

フェーズ 3（2013 年度～2017 年度）では、長期的な C-14 の放出挙動の調査（ジルカロイのホット試験及び長期腐食試験）に加え、ジルカロイの長期腐食モデルの検討、ステンレス鋼の長期腐食モデルの調査、C-14 の化学形態の調査、さらに、欧州原子力共同体（EURATOM）の共同研究である CAST（Carbon14 Source Term）プロジェクトへ参画等

により国際的な情報共有・調査を実施した³⁾。

フェーズ 4（2018 年度～2022 年度）では、上述の成果や課題を受け、実廃棄物のデータが報告されていないエンドピースの特性評価に注力した研究開発を実施した。特に、エンドピースの核種溶出挙動の評価のためには、原子炉の上下端部における不均質な中性子束分布を考慮した詳細な核種分布の評価が必要である。そこで、エンドピース（BWR 下部タイプレート）から採取位置の異なる試料を切り出し、全溶解させて核種インベントリ分布のデータを取得するとともに、試験片からの核種溶出データを取得するための溶出試験を開始した。また、解析精度の向上を目指して三次元モデルを使用した核種生成量解析を実施した。並行して、ハルについても溶出試験を継続し、長期の核種溶出データを取得するとともに、核種分布に関わる諸因子の基礎的検討を実施した。

なお、C-14 に関わる課題として挙げられている内容のうち、金属の腐食挙動、酸化膜からの核種溶出モデル、C-14 の化学形態評価と化学形態に基づいた移行挙動・シナリオ等については、次フェーズ以降の課題と位置づけている。

◇2018 年度～2022 年度の成果⁴⁾⁻⁸⁾

(1) エンドピース中の核種インベントリ分布評価

エンドピースとしては、代表性等の諸条件を考慮し、BWR 高燃焼度 9×9 燃料（STEP3 A 型）の部材を選定した（図-1）。平均燃焼度は 35.0 GWd/tHM であり、高燃焼度 9×9 燃料の信頼性実証試験のため、福島第二原子力発電所 1 号機で先行的に装荷・燃焼されたものである⁹⁾。

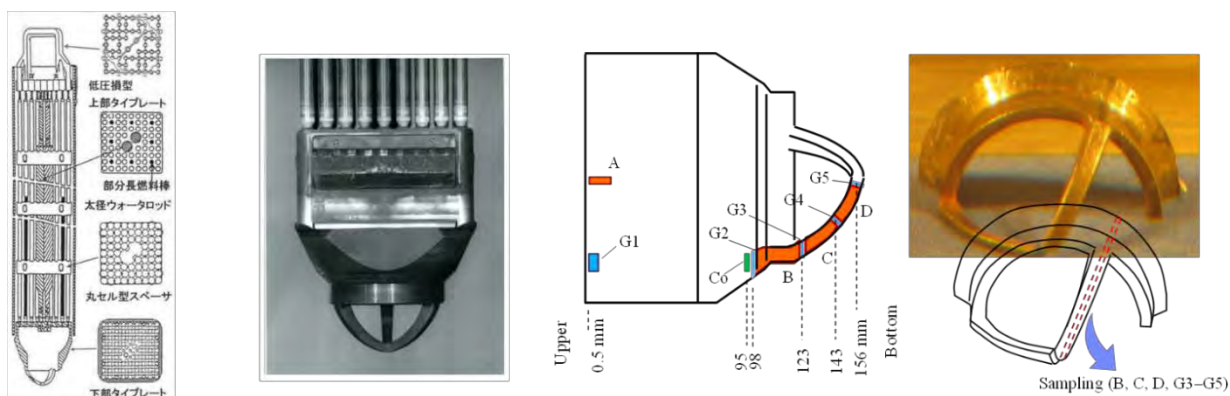


図-1 燃料集合体の構造とエンドピース（下部タイプレート）の外観および試料採取位置

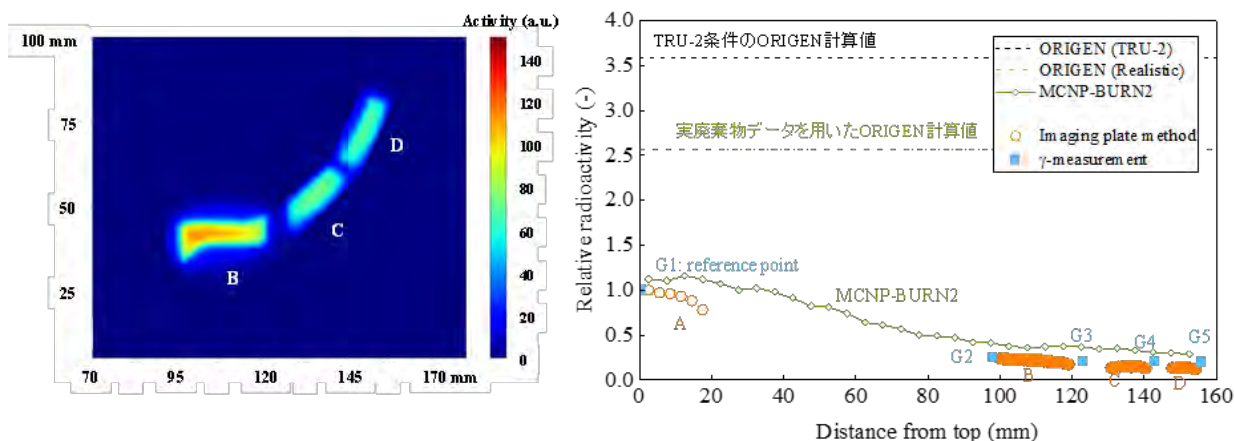


図-2 下部タイププレート中の Co-60 分布：イメージングプレート法による Co-60 強度分布（左）解析結果と分析結果の比較（シャットダウン時の放射能に正済み）（右）

図-1 に示すように、下部タイププレートから採取位置の異なる試料を採取した。採取箇所 B, C, D はイメージングプレート（以下、IP: Imaging Plate）法、G1-G5 はガンマ線測定（Ge 半導体検出器）による Co-60 分析位置である。

Co-60 と同様に、C-14 及び C1-36 についても位置の異なる試料を採取して分析に供した。これらの核種は純ベータ核種であり、液体シンチレーションカウンタ（以下、LSC: Liquid Scintillation Counter）のような通常的手法では分析精度に課題がある¹⁰⁾⁻¹²⁾。そこで、本研究では C-14 や C1-36 の極低濃度分析が可能な加速器質量分析法（以下、AMS: Accelerator Mass Spectrometry）について検討し、実分析に利用した。AMS としては、東京大学タンデム加速器研究施設（以下、MALT）を用いた¹³⁾。

また、放射化による核種生成量を解析的に評価するため、TRU-2¹⁴⁾で用いられている簡易的な手法である ORIGEN2¹⁵⁾と、詳細な解析モデルであるモンテカルロ燃焼解析コード MCNP-BURN2¹⁶⁾を用いたシミュレーションを実施した。

図-2 に Co-60 の分析結果及び解析結果を示す¹⁷⁾。IP 法では放射能の相対的な強度情報は得られるが、直接的な定量評価は困難であるため、G1 位置でのガンマ線測定の値を基準として規格化した。図-2 に示すように、Co-60 濃度は下部タイププレートの上部、すなわち燃料に近い部分が高く、下方向へ離れるにしたがって低下した。この分析結果は MCNP-BURN2 による解析で良く再現さ

れている。さらに、分析値と解析値の比 (E/C) は 0.57 から 0.89 の範囲であり、特に燃料に近い位置で一致していることから、MCNP-BURN2 による解析には十分な精度があると考えられる。一方、ORIGEN2 による解析結果は、下部タイププレートの燃焼度や不純物組成 (Co-59 濃度) を反映させることである程度改善するものの、分析結果との乖離があり、Co-60 生成量が過大に評価される結果となった。

次に LSC 及び AMS による下部タイププレート中の C-14 分析結果と、MCNP-BURN2 により解析的に評価した C-14 三次元分布を図-3 に示す。解析結果は、C-14 の親元素となる窒素不純物 (N-14) の分析誤差を考慮し、最大及び最小値を併記している。分析値は LSC と AMS 法の両方で概ね良い一致が見られた。C-14 濃度は Co-60 と同様に、燃料に近い下部タイププレートの上側で高く、下側で低下する傾向が認められる。C-14 濃度の解析結果は分析値の傾向を再現しているが、不純物の誤差の範囲で一致するところまでには至らなかった。一方で、ORIGEN2 の解析結果については Co-60 と同様に実際の条件（燃焼度や親元素である窒素濃度）をインプットデータとして使用することで、分析値に近づくことが確認できるが、分析結果との乖離があり、C-14 生成量が過大に評価される結果となった。これらの結果から、中性子照射量を詳細に計算した MCNP-BURN2 の解析精度が ORIGEN2 と比較してより高いことが示された。

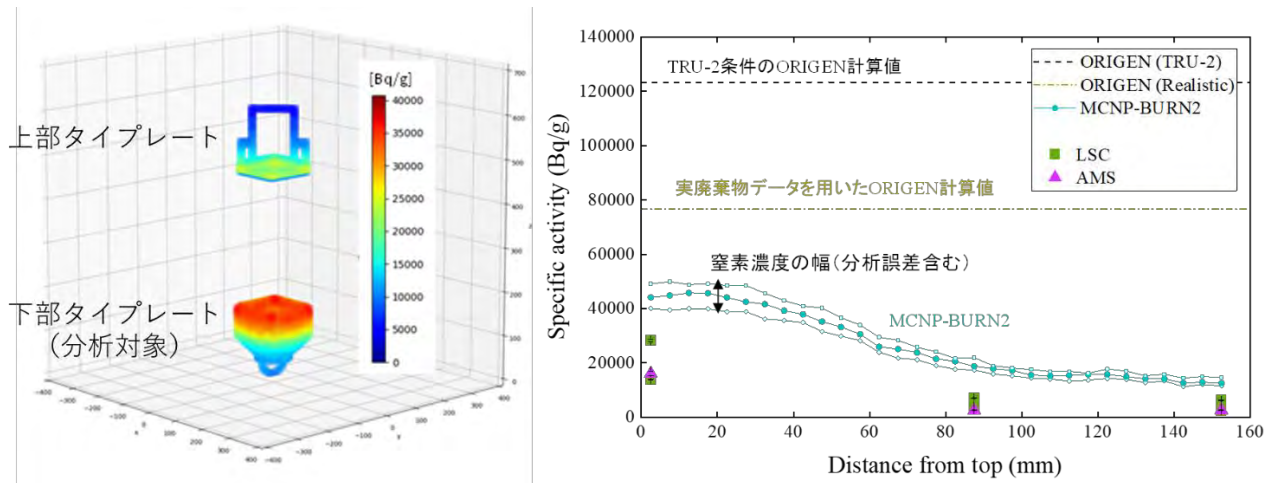


図-3 MCNP-BURN2によるエンドピース中のC-14三次元濃度分布(左)および下部タイプレート中のC-14分析結果と解析結果の比較(右)

C1-36については、放射化計算を行うための不純物情報が十分でないことから、解析との比較は行わず、放射能の分析結果のみを表-1に示す。下部タイプレート中のC1-36濃度は、放射線計測としては低バックグラウンドで検出感度が高いPico-β¹⁸⁾を用いても検出下限以下であったが、AMSでは良好な精度で定量可能であることが示された。

(2) エンドピース溶出試験

エンドピース溶出試験に用いる容器は、ステンレス製の密閉外容器とPEEK(ポリエーテルエーテルケトン樹脂)製の内容器から成る二重構造とした(図-4)。エンドピース(下部タイプレート)から4検体分の試料(1検体当たり4試料、合計16試料)を採取し、研磨等により高さ19mm、幅10mm、厚さ0.5mm程度となるように加工し、各試料について寸法検査、質量測定を実施した。窒素雰囲気下で溶出試験容器に試料と浸漬液(水酸化ナトリウム溶液:pH12.5、ORP-250mVに調整)を封入し、溶出試験を開始した(2020年度)。

エンドピース溶出試験で採取する試料(液相、気相、溶出試験片など)に含まれるC-14はごく僅かであり、LSCのような放射線測定による分析では定量下限以下となる可能性がある。そこで、溶出試験に必要な分析の事前検討として、AMSによるC-14放射能濃度分析の検出限界について検討した。

大理石の認証標準物質からDead Carbon(太古に形成されたためC-14の減衰が十分に進行しそ

の濃度が極めて低く無視できるレベルの炭素)溶液を調製し、固形化処理したブランク試料を5試料作成してAMSで測定し、C-14分析の実効的な検出限界を評価した(表-2)。同表より、AMSにおけるC-14放射能分析の検出限界を 6.2×10^{-4} Bq/試料と評価した。この結果は、LSCによるC-14放射能濃度の検出限界値である0.1 Bq/試料よりも2桁程度高く、AMSによるC-14放射能濃度分析の有効性を確認した。

表-1 C1-36分析結果の比較

試料番号 (距離)	³⁶ Cl分析値	
	Pico-β (Bq/g)	AMS (Bq/g)
G1 (0.5 mm)	$< 8.51 \times 10^{-2}$	$1.81 \times 10^{-2} \pm 1.63 \times 10^{-4}$
G2 (98 mm)	$< 8.64 \times 10^{-2}$	$3.69 \times 10^{-3} \pm 5.53 \times 10^{-5}$
G5 (156 mm)	$< 1.06 \times 10^{-1}$	$2.70 \times 10^{-3} \pm 5.67 \times 10^{-5}$

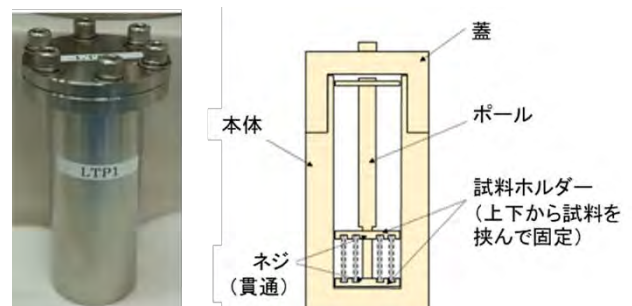


図-4 ステンレス製外容器(左)およびPEEK製内容器(右)

表-2 AMSによるブランク試料の測定結果

試料名	Bq/試料
Blank1	3.6×10^{-4}
Blank2	8.2×10^{-5}
Blank3	1.4×10^{-4}
Blank4	9.0×10^{-5}
Blank5	3.5×10^{-4}
平均	2.0×10^{-4}
3 σ	4.1×10^{-4}
検出限界 (=平均 + 3 σ)	6.2×10^{-4}

(3) 溶出モデルの構築

TRU-2¹⁴⁾におけるエンドピースの溶出モデルでは、形状は薄膜（厚さ 340 μm ）、比表面積は約 0.8 m^2/kg 、核種分布は均一（ORIGEN2 で評価）、腐食速度は一定（0.02 $\mu\text{m}/\text{y}$ ）、及び溶出挙動は腐食の進行と調和的であると仮定されている。このような複数の保守的な仮定に対して、本研究では以下の観点から溶出モデルを高度化し、溶出率の保守性低減が安全評価における被ばく線量の評価結果に及ぼす影響について検討した。

- ①TRU-2：最も保守的なモデル
- ②3D 構造モデル：下部タイプレートの形状（厚み）を三次元で反映させることで、現実的な表面積を反映させたモデル
- ③3D 核種分布モデル：②の 3D 構造モデルに加え、MCNP-BURN2 による三次元構造中の核種分布を反映させたモデル
- ④現実モデル：③の 3D 核種分布モデルに加え、ステンレス鋼の長期的な腐食速度（約 0.4 nm/y ）¹⁹⁾を反映させたモデル

各溶出モデルによる C-14 溶出率の評価結果を図-5 に示す。ここで溶出率は、溶出した全 C-14 を初期インベントリと経過年数で除した値（Bq/Bq/y）であり、半減期による減衰を考慮していることから、参考として C-14 の減衰曲線も併せて示す。①TRU-2 モデルの C-14 溶出率が最も高く、8500 年で溶出が終了する。その間の C-14 の減衰効果はほとんど認められない。②3D 構造モデルでは溶出率が 1 桁程度低下している。これは初期の比表面積が TRU-2 では保守的な値（0.8 m^2/kg ）であるのに対し、3D 構造の反映によ

り現実的な値（0.1 m^2/kg ）が適用されたためと考えられる。次に、③3D 核種分布モデルでは溶出率をさらに 1/3 程度低減できる効果が認められる。これは MCNP-BURN2 による現実的な解析により核種インベントリを低減できたためと考えられる。最後に、④現実モデルでは溶出率をさらに 1/40 程度低減できる効果が認められる。これは腐食速度を 0.02 $\mu\text{m}/\text{y}$ から現実的な 0.4 nm/y とした効果が大きく表れたためと考えられる。以上をまとめると、④現実モデルでは当初の①TRU-2 モデルと比べて、溶出率を 1/1000 程度に低減させる効果があることが分かる。

図-5 中の④現実モデルにおける下部タイプレートの残存率（灰色）と C-14 減衰曲線との比較から、下部タイプレートは半減期 5,730 年の C-14 よりもはるかに長寿命であることが分かる。また、下部タイプレート中における C-14 の減衰の様子を図-6 に示す。これらの結果から、C-14 は下部タイプレートから溶出する前に消滅し、外部への溶出が極めて少ないことが示唆される。

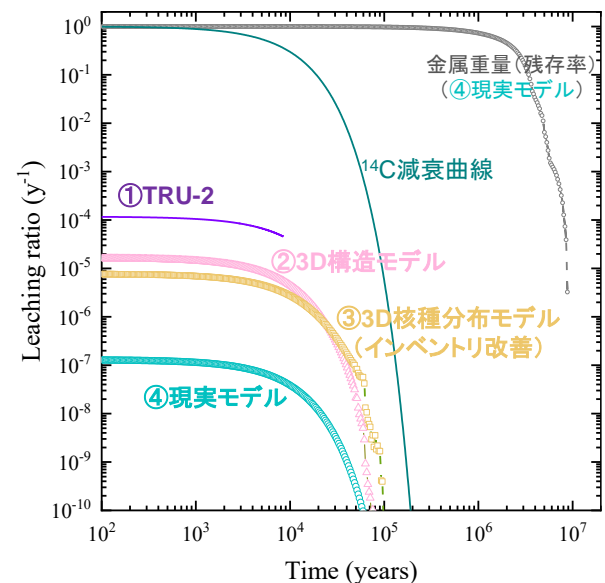


図-5 下部タイプレートからの C-14 溶出率（溶出モデル①～④を適用した場合）

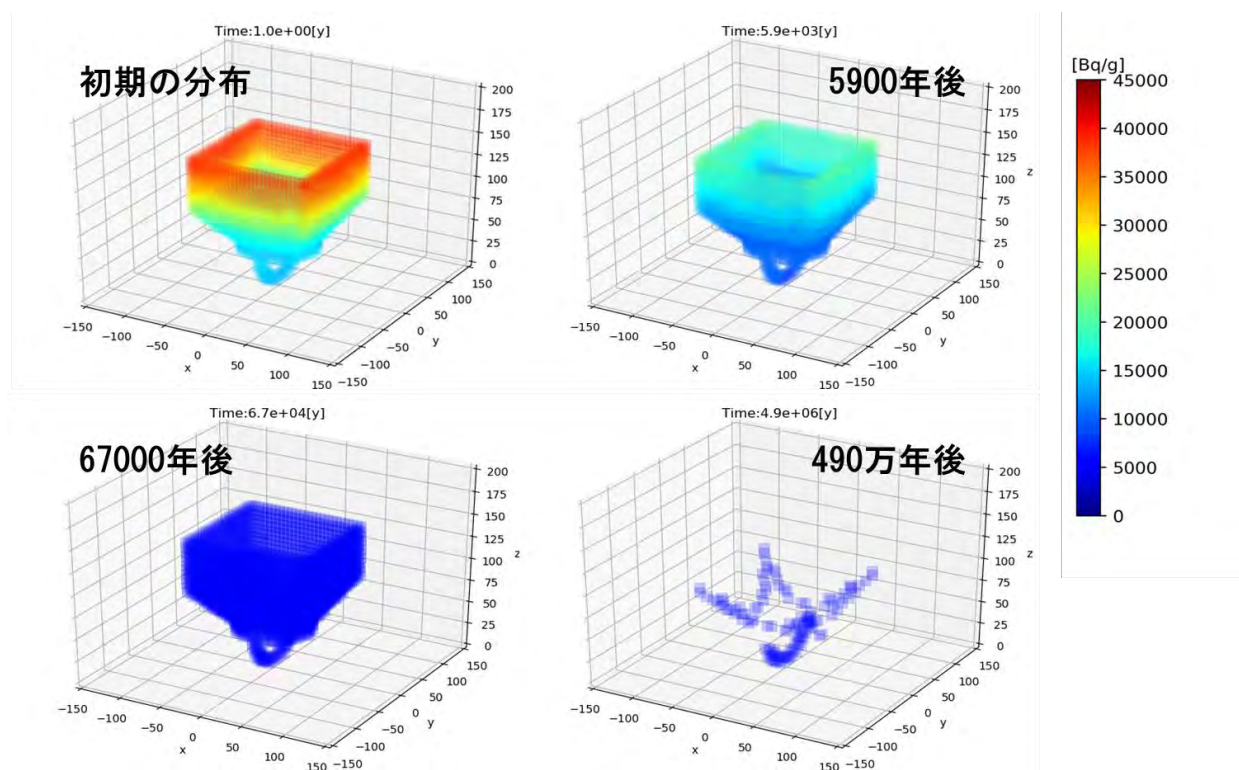


図-6 下部タイププレート中のC-14 残留放射能分布 (④現実モデル)

C-14 溶出率の保守性低減が安全評価におけるC-14 被ばく線量に及ぼす影響を考察するため、TRU 廃棄物処分安全評価 (地下水シナリオ) に対し、上述の溶出モデル (①～④) で評価したC-14 溶出率を反映させた。核種移行解析は、汎用的シミュレーションソフトウェアGoldSim²⁰⁾を用い、核種移行に係わる処分概念や溶出率以外のパラメータはTRU-2¹⁴⁾におけるグループ2のものを使用した。被ばく線量の評価結果を図-7 に示す。このとき、C-14 による被ばく線量曲線 (①～④) は、リファレンスである①TRU-2 モデルの最大被ばく線量の値を基準として規格化した。最大被ばく線量は各溶出モデルの溶出率に依存し、①TRU-2 モデルに比べて②3D 構造モデルで0.14、③3D 核種分布モデルで0.073、④現実モデルで0.001 に低下する結果が得られた。このことから、より現実的なC-14 溶出モデルを適用することで、安全評価におけるC-14 被ばく線量の評価値を大幅に低減できることが分かった。

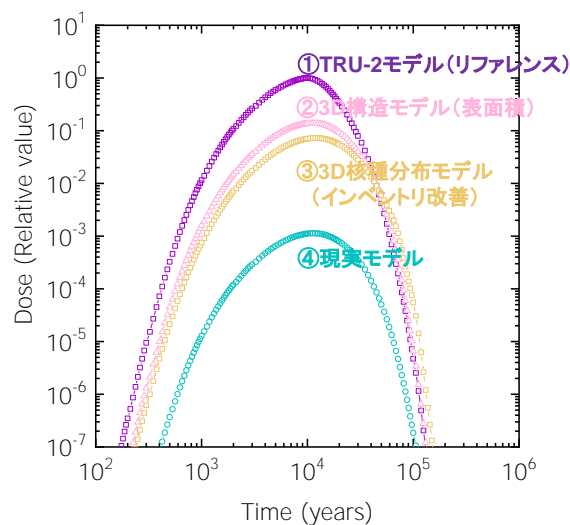


図-7 下部タイププレート中のC-14 による被ばく線量の評価結果 (溶出モデル①～④を適用した場合)

(4) 今後の展開

ハル等廃棄体に含まれる廃棄物のうちエンドピースに注目し、実際に炉内で照射された部材から得られた実測データやより詳細な手法による核種生成量解析に基づき、核種インベントリや核種溶出率に関する特性を評価して来た。

前項では、成果の総括のひとつとして、従来の TRU-2¹⁴⁾での C-14 溶出モデルの保守性が、「3D 構造」、「3D 核種分布」及び「現実的な腐食速度」といった因子を導入することにより大幅に低減される可能性があることを示せた。これらのうち「3D 構造」及び「3D 核種分布」については、それらの効果は限定的ではあるが、初期条件として比較的小さい不確実性の下で導入することができると考えられる。一方、「現実的な腐食速度」については、金属腐食の長期に亘る評価についての不確実性を伴うものの、その効果は顕著であり、C-14 の溶出前の消滅(核種閉じ込め性)を促進することが確認された。

これらの成果を踏まえて、次段階では、長期における金属腐食とそれに伴う核種溶出挙動のさらなる解明を主要課題のひとつとして位置付けることとした。さらには、C-14 の核種溶出モデルを構成する重要な要素として、溶出化学形態の評価にも注力して取り組んで行く計画である。

- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発報告書(第 3 分冊) -C-14 の放出挙動等に関するデータの取得-、2008
- 2) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 24 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物処分技術ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発-平成 19 年度~平成 24 年度のとりまとめ報告書、2013
- 3) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書(第 2 分冊) -炭素 14 長期放出挙動評価-、2018
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、平成 30 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発 報告書、2018
- 5) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、平成 31 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発 報告書、2019
- 6) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和 2 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2020
- 7) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和 3 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2021
- 8) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和 4 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2022
- 9) 原子力安全基盤機構、平成 18 年度高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実証成果報告書、2007
- 10) Yamaguchi, T., Tanuma, S., Yasutomi, I., Nakayama, T., Tanabe, H., Katsurai, K., Kawamura, W., Maeda, K., Kitao, H. and Saigusa, M.: A Study on Chemical forms and Migration Behavior of Radionuclides in HULL Waste, Proceedings of ICEM1999, September, Nagoya, Japan, 1999
- 11) Yamashita, Y., Tanabe, H., Sakuragi, T., Takahashi., R., and Sasoh, M.: C-14 release behavior and chemical species from irradiated hull waste under geological disposal condition, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1665, pp. 187-194, 2014
- 12) Sakuragi, T., Yamashita, Y., Akagi., M., and Takahashi., R.: Carbon 14 distribution in irradiated BWR cladding and released carbon 14 after aqueous immersion of 6.5 years, Procedia Chemistry 21, pp. 341-348, 2016
- 13) 東京大学タンデム加速器研究施設 MALT、加速器紹介、<http://malt.um.u-tokyo.ac.jp/introductionj.html>
- 14) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物処分技術検討書-第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-、JNC TY1400 2005-013、FEPC TRU-TR2-2005-02、2005
- 15) Croff, A.G.: ORIGEN-2: A versatile computer code for calculating the nuclide compositions and characteristics of nuclear materials, Nucl. Technol. 62, pp. 335-352, 1983
- 16) Ando, Y., Yoshioka, K., Mitsuhashi, I., Sakurada, K., and Sakurai, S., Proc. the 7th International Conference on Nuclear Criticality Safety ICNC2003, October 20-24, Tokai, Ibaraki, Japan, 2003.
- 17) Sakuragi, T., Nakai, Y., Yamamoto., S., Kume, N., Sugita, T., Yamashita., Y., and Ueda, H.: Radionuclide distribution in irradiated BWR tie plate, MRS Advances 8, pp. 250-254, 2023
- 18) 富士電機株式会社 製品紹介 <https://www.fujielectric.co.jp/products/radiation/servy/beta.html>
- 19) Sakuragi, T., Yoshida, S., Kato., O. and Tateishi., T.: Study of stainless steel corrosion by hydrogen measurement under deoxygenated, low-temperature and basic repository conditions, Progress in Nuclear Energy 87, pp. 26-31, 2016
- 20) GoldSim Player User's Guide <https://media.goldsim.com/Documents/Manuals/Player.pdf>

5-5 ニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化—ナチュラアナログによる緩衝材の長期安定性の検証—

◇事業の概要

TRU 廃棄物の地層処分施設は、構造材や充填材として使われるセメント系材料、緩衝材として使われるベントナイト系材料、廃棄体パッケージの容器として使われる鉄鋼材など、複数の材料によって構成される。処分施設において、普通ポルトランドセメント(OPC)をベースとしたセメント系材料を用いた場合には、 Na_2O の溶出によって、ニアフィールド環境が、pH13を超える高アルカリ性環境となり、緩衝材の主成分であるベントナイトの物理的・化学的性質を変えるため、緩衝材の長期性能に影響を与える可能性がある。

本事業では、高アルカリ性環境の形成を抑制するために OPC に比べて浸出液の pH が低い HFSC (Highly Fly-ash contained Silica-fume Cement)^{1), 2)}と緩衝材との相互作用について、その天然での長期の類似現象(ナチュラアナログ。以下 NA)がみられる環境で直接的な証拠を取得して、アルカリ変質に係る反応プロセスを明らかにすることで、実験によって確認できるよりも長期間での構成要素の挙動評価の確からしさ、信頼性を向上させるとともに、そのモデル化に必要な情報を示すことを目的として、検討を進めている³⁾。

高アルカリ性環境下でのベントナイトの長期挙動の第1フェーズのNAの調査は、フィリピンのルソン島北西部のベントナイト鉱床がある Saile 鉱山において2007年度に開始した⁴⁾。Saile 鉱山では、自生するベントナイトと pH11 を超えるアルカリ地下水との長期にわたる相互作用によって明確な変質層の生成を確認した。アルカリ変質が生じていても Fe, Mg に富むスメクタイトなどの二次鉱物が密度の高い領域を形成し空隙を閉塞すること(クロッキング)により変質領域は数 mm に限定され、大部分のベントナイトが未変質のまま残存していた。一方で、この NA サイトでは既にアルカリ地下水の供給が停止しているため、相互作用によるアルカリ変質反応の痕跡は観察できるが、アルカリ地下水がベントナイトに浸出していた当時の環境条件や反応時間が明確でないため、溶解—沈殿—結晶化に至る変質プロ

セスの評価が困難であった。

そのため、2015年度からは現在もアルカリ性地下水が苦鉄質の堆積物から浸出しているフィリピンのパラワン島中部の Narra 地区を新しい NA サイトとして調査を進め、Saile 鉱山の NA サイトと同様の二次鉱物である Fe, Mg に富むスメクタイトがみられることを明らかにした。2017年度までの前フェーズで実施した Narra 地区の NA サイトの試料分析により得られたデータから、Fe, Mg に富む環境でのアルカリ変質によりスメクタイト系二次鉱物が生成し、これが物質移行を抑制することで、変質反応の進展が抑えられているものと考えられる。

本事業では、さらなる試料分析に基づき二次鉱物の組成や産状等アルカリ変質プロセスに係る事象の現象の理解をすすめ、類似事例の先行研究や地球化学計算による検討結果とも併せて考えることによって、アルカリ変質によりスメクタイト化に進む環境要因を特定する。そして、これらの検討結果から TRU 処分場のベントナイトのアルカリ環境下での長期挙動の NA 情報としてとりまとめた。

◇2018年度～2022年度の成果^{3), 5)-8)}

(1)パラワン島 Narra 地区の NA サイトの概要

Narra 地区の NA サイトでは、パラワンオフィオライトの基盤岩の断裂系からのアルカリ性(pH > 11)の裂か水が、当サイトのアルカリ源泉地点から河川系扇状地様の緩慢な傾斜に沿って表層部を流下し、ルーズな炭酸塩沈殿物が地表に分布している。その下位に Fe, Mg を含むスメクタイトに富む苦鉄質の鉄屑性堆積物が形成されている。

地質や水理場の既存情報から、当 NA サイトは屑屑性堆積物がアルカリ地下水と長期間接触する地球化学的な環境であるといえる。ベントナイトのアルカリ変質を直接観察することはできないものの、高アルカリ環境に加え、温度が高く、酸化還元電位が低いことは、このアルカリ地下水が TRU 廃棄物の地層処分環境で、セメント系材料として HFSC を用いた場合に想定される間隙水との類似性を示しており、アルカリ変質プロセスのうち特に二次鉱物の生成を直接観察できる NA サイトと考えられた。

(2) NA 試料の分析・微細構造の観察

Narra 地区の NA サイトにおいて、堆積年代の異なる 4 か所のトレンチの試料を分析した。

偏光顕微鏡や走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察から、Fe, Mg に富む碎屑性堆積物は主要構成鉱物として、蛇紋石 (serpentine: Srp) や斜方輝石 (orthopyroxene: Opx) 等が含まれており、二次鉱物を産状に則して整理すると、以下の 4 種類に大きく分けられる。

- ① Fe-rich Fe・Mg-Silicate Hydrate (FMSH): 鉱物片の周囲に付着あるいは空隙を充填するように分布する褐色～濃褐色の基質 (図-1a, b の左側)。化学組成の特徴として Fe に富む Fe サポナイトあるいはノントロナイトに近い組成を持つが、スメクタイトの構造式からは Ca がやや過剰に含まれるもの。
- ② Mg-rich FMSH: 蛇紋石あるいは蛇紋石化している頑火輝石 (Enstatite: Ens) の周囲や亀裂

に沿って分布する淡褐色～黄褐色の部分 (図-1a, b の右側および c, d)。化学組成の特徴として、Mg に富むサポナイトに近い組成を持つが、Ca がやや過剰に含まれるもの。

- ③ C-S-H: 針状結晶が外周から内部に向かって放射状に集合した組織。隙間の多い構造で、外周の一部あるいは全体がより密な方解石でセメンテーションされている (図-1e, f)。Ca/Si は 0.74~0.82 前後。トレンチ 2, 3 でみられる。
- ④ FMCASH: トレンチ 2 のみでみられる、C-S-H の近辺に見られる斑状に淡褐色を呈する部分 (図-1e, f)。反射電子像のコントラストが一樣でなく、化学組成も Ca に富む部分から Fe, Mg に富む部分が混在していることから、C-S-H と FMSH 系二次鉱物が細かく混合していると考えられる。

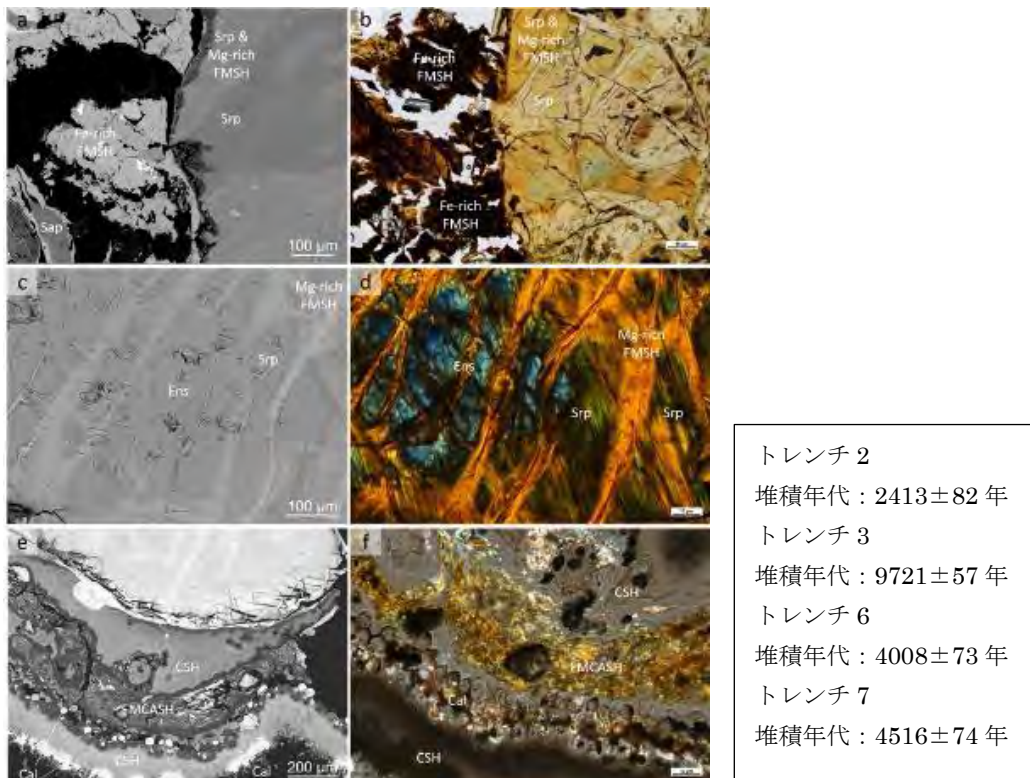


図-1 Narra 地区のトレンチの堆積年代と採取した NA 試料の二次生成物の典型的な産状

これらの二次生成物について電子線プローブ X 線マイクロアナライザ (EPMA) による組成分析を実施し、Fe-Mg-Al および Si-(Na+Ca)-(Mg+Fe+Al) の三角ダイアグラム上にプロットし

た (図-2)。

全ての試料において共通する傾向として、岩片・鉱物片間を充填している基質部分はやや Fe に富む傾向にあり、一方で岩片・鉱物片そのもの

が置換している部分は Mg に富む傾向に分かれている。後者は基質と異なり、変質する前の頑火輝石や蛇紋石の化学組成や構造を一部引き継いでいると考えられる。また、図-2 の Si-(Na+Ca)-(Mg+Fe+Al) のダイアグラムから、岩片・鉱物片を置換している部分は、基質部分と比較して、スメクタイトの化学組成と比べて Si がやや乏しく、蛇紋石の化学組成に少し近い組成を示す。この

ことから、蛇紋石が一部残存していることが示唆される。トレンチ 2 では、トレンチ 6 およびトレンチ 7 と異なり、C-S-H が産している点で異なる。この C-S-H と FMSH 系の二次鉱物が混在した結果として、FMCASH と分類したグループで基質と C-S-H の組成を端成分とする範囲に広く分布する傾向が確認される。

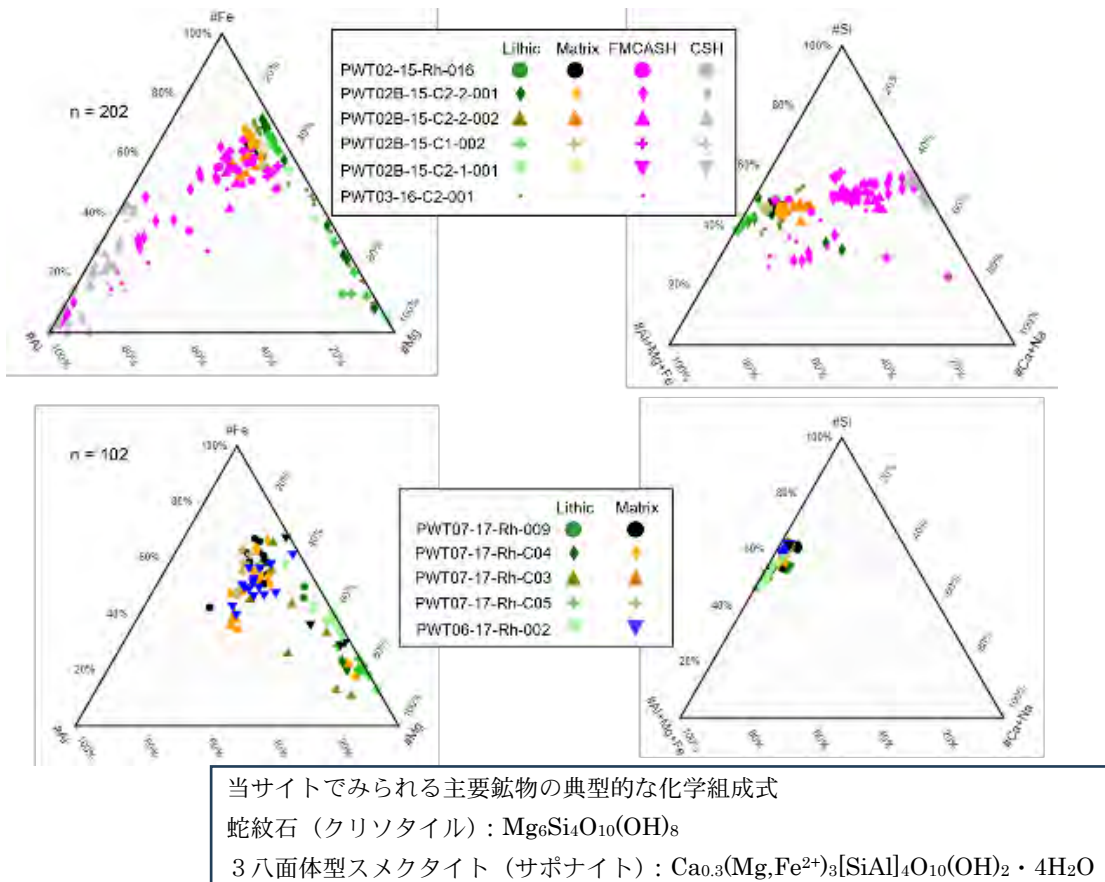


図-2 FMSH 系二次生成物の化学組成 (上図 : トレンチ 2, 3、下図 : トレンチ 6, 7)

(3) 地球化学モデリングによるアルカリ環境下の二次鉱物生成の評価

アルカリ水から生成が見込まれる二次鉱物の地球化学モデリングによる計算を、高アルカリ源泉とかんらん石が反応するケース、蛇紋岩堆積物と反応中のアルカリ浸出水(トレンチ 2, トレンチ 7) から生成するケースの 2 ケースについて、The Geochemist's Workbench (GWB) の React を使用し、GWB のデフォルトとなっている「thermo」、フランス地質調査所発行の「ThermoddemV1.10_15Dec2020」、日本原子力研

究開発機構発行の「GWB19v12」の 3 つの異なる熱力学データベースを用いて実施した。

高アルカリ源泉とかんらん石との反応で生じる二次鉱物の計算では、データベースによって生成が予測される二次鉱物種に僅かな違いは見られるものの、Fe や Mg を含む層状ケイ酸塩 (サポナイトや低温の蛇紋石 (Chrysotile) など) の生成が見込まれる点で一致している。一方で、ペントナイトのアルカリ変質実験等で広く認められる沸石類は Narra 地区の水質では生成が期待されない。

トレンチ浸出水における二次鉱物の飽和指数・各元素の安定相の計算からは、「Thermoddem V1.10_15Dec2020」と「GWB19v12」の間では多くの鉱物種について飽和指数の傾向は類似していること、サポナイト、ノントロナイトについては生成と溶解の傾向がデータベース間で少し異なることを確認した。安定相については、データベースに多少の差は見られるものの、MgやFeを含む層状ケイ酸塩が安定相として生成する点で類似していることが分かる(図-3)。

NAで確認したFe-ケイ酸塩鉱物やMg-ケイ酸塩鉱物の準安定相の熱力学データについては、M-S-Hは近年整備されつつあるものの、スメクタイト系二次鉱物の前駆体とみられるF-S-Hやケイ酸塩鉱物の熱力学データは十分ではなく、今後整備が必要と考えられる。

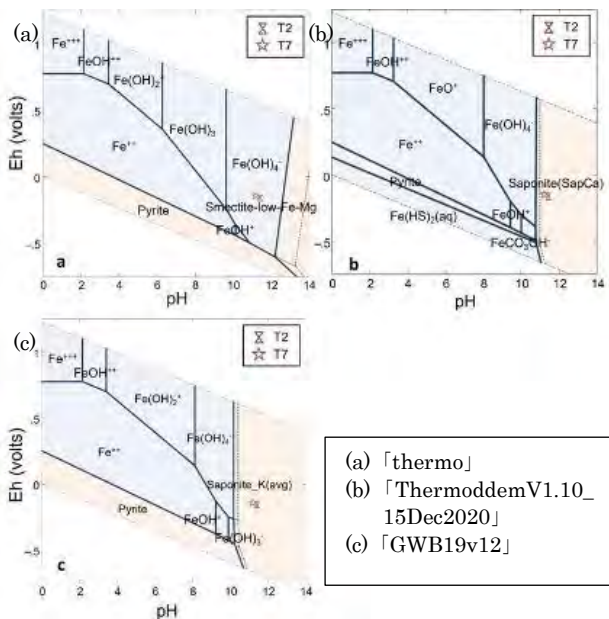


図-3 Na-Mg-Al-Si-K-Ca-Fe-Cl-O-H系におけるFeのpH-Eh図

(4) アルカリ変質プロセス

Narra 地区でみられる FMSH 系二次鉱物について、産状と化学組成の特徴はトレンチ 7 浅部とトレンチ 2 では一致していることから、堆積年代の若いこれらの堆積物中では一次鉱物である蛇紋石や直方輝石 (Opx) を Mg に富む FMSH が置換したり、Fe に富む FMSH が岩片間の空隙に新たに沈殿したりする反応が現在も進行中だと考えられる。また、典型的なスメクタイトの組成式と比べて Ca 過剰な組成であること、また、この Ca

は TEM による微細構造観察から層間に交換性陽イオンを含むもののほか、骨格にも含まれ、四面体サイトが不完全な準安定相であることが想定される。

トレンチ 7 では、浅部から深部に向かって、前述した Ca 過剰且つ四面体サイトの Al、Si が少ない FMSH 系二次鉱物がよりスメクタイトの理想式に近い組成への変化が見られる一方で、基質と変質鉱物片に分かれた産状には変化がないことが分かっている。このことから、Fe に富む FMSH から Fe に富むスメクタイト (Fe-rich Smectite) (3 八面体の鉄サポナイト) に、Mg に富む FMSH から Mg に富むスメクタイト (Mg-rich Smectite) (3 八面体のサポナイト) にシフトしていることが示唆される。

Shimbashi et al. (2020)⁹⁾では、炭素の安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) に基づき、Narra 地区の堆積物の深部においては過去に海水の混入があったことを指摘している。アルカリ地下水と比べて酸化的な海水と堆積物が反応した場合は、 Fe^{3+} を主体とするノントロナイトが形成されやすいことが推測される。トレンチ 7 浸出水の水質での鉱物の飽和指数の計算からは、現在の浸出水単体ではノントロナイトは形成しづらく、その形成には海水の混合が必要だと考えられる。オフィオライト起源の堆積物の形成過程から、堆積物が浅い沿岸域で堆積したと考えられ、 $\delta^{13}\text{C}$ の分析結果からも海水影響が示唆される。このことから、河川系扇状地の扇端に位置するトレンチ 6 や 7 でノントロナイトの組成に近いスメクタイトがみられるのは、海水とアルカリ浸出水との混合によって形成されたためと考えるのが妥当である。

これまでの知見¹⁰⁾に加え、本事業におけるパラワン島 Narra 地区の NA の鉱物の産状から推測したアルカリ変質プロセスとルソン島 Saile 鉱山のアルカリ変質プロセスとを図-4 にまとめた。

アルカリ変質反応の初期では、C-S-H の形成と Fe に富む FMSH の形成が岩片間の空隙で同時に進行することで FMCASH のような両者が細かく混在した産状が形成されたと考えられ、この FMSH がスメクタイトの前駆体であり、時間とともに結晶化していくとみられる。C-S-H はトレンチ 2 及びトレンチ 7 の浸出水の水質からは生成が期待できないことから、Ca の供給がなくなること

で C-S-H はしだいに溶解していくことが予想される。

なお、Saile 鉱山では、ベントナイトとアルカリ地下水との相互作用によるアルカリ変質が観察されたが、そのアルカリ変質帯が 5mm 程度であったのは、玄武岩ガラス等から供給される Fe^{2+}

を使って、スメクタイト系の鉄粘土鉱物(図-4 の鉄サポナイトやノントロナイト)等の二次鉱物が密度の高い領域を形成(クロッキング)して変質を抑制していたためであることが、様々な分析や産状観察から示唆された⁴⁾。

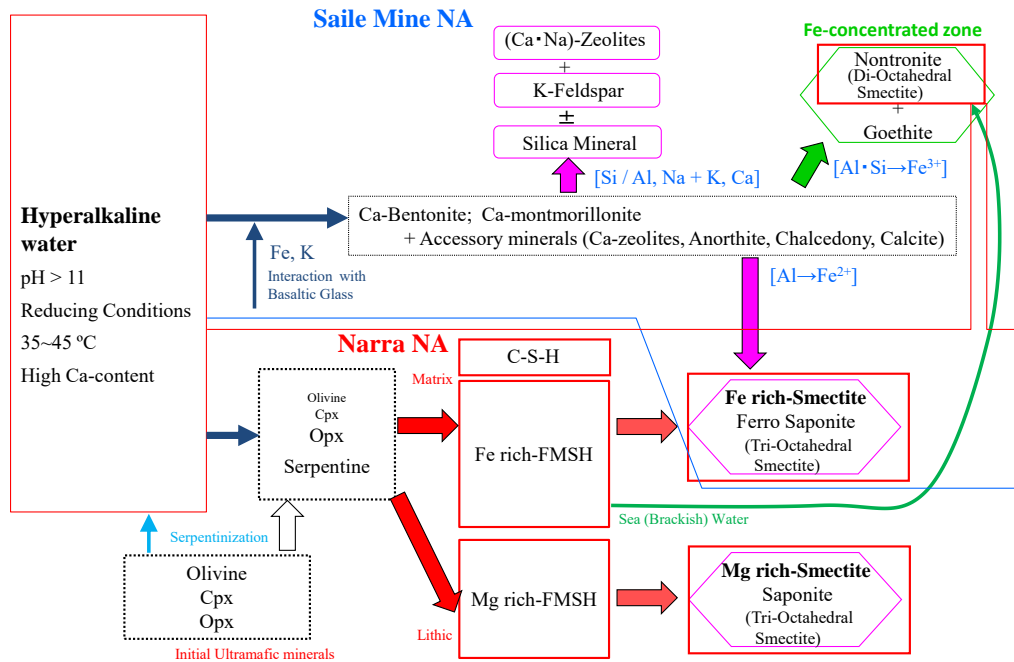


図-4 Narra 地区の NA におけるアルカリ変質プロセス (Saile 鉱山の NA と併記)

(5) 緩衝材の長期安定性の検証に係るフィリピンの NA のまとめ

Narra 地区では、オフィオライト起源のアルカリ地下水との相互作用に伴う粘土鉱物等のアルカリ変質が生じており、Fe イオンの影響を受け Fe, Mg に富むスメクタイト系の二次鉱物が生成している。それゆえ、Narra 地区の NA サイトは、同じくオフィオライト起源のアルカリ地下水とベントナイト鉱床との相互作用がみられた Saile 鉱山では観察できなかったアルカリによる変質(特に二次鉱物の生成)プロセスの詳細、環境条件、反応時間が直接観察できるサイトである。

両者の NA の共通点は、同様のオフィオライト起源のアルカリ地下水との相互作用に伴うアルカリ変質において、Fe イオンの影響を受け Fe, Mg に富むスメクタイト系の二次鉱物が生成していることである。そのため、クロッキングにも寄与しうるスメクタイトの生成において最も影響

が大きいのは Fe イオンの存在であると考えられる。

フィリピンの NA サイトと類似する環境での M-S-H やスメクタイトの生成や合成実験に関する文献調査の結果¹¹⁾⁻¹⁶⁾から、スメクタイト化に反応が進む要因は、

- ・鉄の存在
- ・アルカリ
- ・酸化環境 > 還元環境

であることが報告されており、これはパラワン島 Narra 地区でのアルカリ変質におけるスメクタイト化が進んだ環境要因とも整合している。

本事業の検討により、アルカリ変質プロセスについては、上記のように空隙に Fe に富む非晶質の FMSH を形成し、それが Fe に富むスメクタイトに結晶成長すること、環境条件としては、Fe イオンが必須であり、HFSC と同等の pH11 程度で高 Ca 濃度のアルカリ環境であること、反応時間として 2,400 年程度(トレンチ 2 底部の堆積年

代)ではまだ結晶化途上のFMSHであるが、4,000年程度(トレンチ6,7底部の堆積年代)でスメクタイトに近い状態まで結晶成長することを、根拠となる様々なデータに基づき明らかにすることができた。

単純系の試験結果から、ベントナイトのアルカリ変質ではスメクタイトのゼオライト化が起こることが一般的に知られている。処分場のような複雑系ではこれとは異なる変質反応として、当NAサイトのようにMgや特にFeに富む環境ではモンモリロナイトとは異なるサポナイトやノントロナイトのようなFe, Mgに富むスメクタイト系の二次鉱物の生成が推測される。

現在の処分概念では構造材や充填材として多量のセメント系材料の使用に加え、海水の影響を受けた地下水には比較的高濃度のMgイオンが含まれること、また、炭素鋼などの鉄系材料を還元環境で使用しているため、間隙水への相当量の Fe^{2+} の含有も予想される。本事業の知見は、TRU廃棄物の処分環境とのアナロジーという観点で、このような環境でのベントナイトを主成分とする緩衝材の健全性(変質はするが微量)を示す長期挙動の根拠データとして利用できる。

一方、現象解析モデルへの反映という観点で、現状のGWBによる地球化学計算でも、パラワン島Narra地区の地下水環境ではスメクタイト(還元環境ではサポナイト)が安定相であることが示されたが、当サイトで観察されたFMSHとC-S-Hの共沈やFMSHのスメクタイト化を化学計算で再現することは現状ではできなかった。このようなスメクタイト化の変質プロセスを予測できるようにするために、二次鉱物の前駆体とみられるF-S-Hやケイ酸塩鉱物(とりわけFeを含む固溶体)の熱力学データの整備が今後必要である。

- 1) 入矢桂史郎、新村亮、久保博、黒木泰貴、人工バリア材の変質に関する研究、動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書、PNC ZJ1201 97-001、1997
- 2) 三原守弘、入矢桂史郎、根山敦史、伊藤勝、シリカフェウムを混合したセメントペーストの浸出試験とモデル化、放射性廃棄物研究、3巻2号、pp.71-79、1997
- 3) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、平成30年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU廃棄物処理・処分に関する技術開発 報告書、2019
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成24年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査 多重バリアの長期安定性に関する

基礎情報の収集及び整備 平成19年度~24年度の取りまとめ報告書、2013

- 5) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU廃棄物処理・処分に関する技術開発 報告書、2020
- 6) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和2年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2021
- 7) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2022
- 8) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2023
- 9) Shimbashi, M., et al., Formation of natural silicate hydrates by the interaction of alkaline seepage and sediments derived from serpentinized ultramafic rocks at narra, Palawan, The Philippines, Minerals, 10(8), 719, 2020
- 10) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU廃棄物処理・処分高度化開発 平成25年度~平成29年度取りまとめ報告書、第4章ナチュラルアナログ調査、2018
- 11) Nishiki, Y. et al., Precipitation of magnesium silicate hydrates in natural alkaline surface environments, Clay Science, 24(1), 1-13, 2020
- 12) Pozo, M. et al., An Overview of Authigenic Magnesian Clays, Minerals, 8(11), 520, 2018
- 13) Besselink, R. et al., Mechanism of saponite crystallization from a rapidly formed amorphous intermediate, Crystal Growth & Design, 20(5), 3365-3373, 2020
- 14) Nied, D., et al., Properties of magnesium silicate hydrates (M-S-H), Cem. Concr. Res., 79, 323-332, 2016
- 15) Gainey, S.R. et al., Clay mineral formation under oxidized conditions and implications for paleoenvironments and organic preservation on Mars, Nature Communications, 8, Article number 1230, 2017
- 16) Sakuma, H., et al., Synthesis of Ferrian and Ferro-Saponite, Implications for the structure of (Fe, Mg)-smectites synthesized in reduced conditions, American Mineralogist, 107(10), 1926-1935, 2022

5-6 廃棄体由来の発生ガスに関する現象解析モデルの妥当性検討

◇事業の概要

TRU 廃棄物の処分場では、廃棄物とその周辺に存在する水分の放射線分解及び廃棄物等の金属の還元性雰囲気での腐食による水素ガスの発生並びに有機物の分解及び微生物の活動による炭酸ガスなどの発生が想定される。ガスの発生による懸念事項として、蓄圧に伴う緩衝材の力学安定性の低下及びガスの移行による処分場内の汚染水の押出しに伴う核種移行の加速が挙げられている。

このため、「TRU 廃棄物処分技術検討書 - 第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ -」（以下、第 2 次 TRU レポート）¹⁾では、処分場で生じるガス発生、人工バリア（特に応力場の影響を受ける可能性の高い緩衝材）中のガス移行挙動及び力学挙動の予測が必要とされている。原子力発電環境整備機構（NUMO）の「包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築—」（以下、包括的技術報告書）においても TRU 廃棄物特有の課題の一つとしてガス発生が人工バリア等に与える影響を挙げており、評価技術の開発を進めることとしている。そのため、緩衝材の力学挙動と連成したガス移行評価モデルの開発が必要である。

先行事業では緩衝材などの人工バリアを対象とした気・液の移行特性及び力学特性などの材料特性データ取得を目的とした各種要素試験及びその解析的評価により、気液二相流解析モデルを構築してきた^{2),3)}。結果として下記の課題を抽出した。

- ①これまでの各種要素試験で取得した材料特性データ及び評価モデルの実スケールへの適用性の確認
- ②実スケールにおいてより現実的なガス移行場の環境（ガス発生量、変質など）を設定したうえで、既往検討により適用性の確認された材料特性データ及び評価モデルを用いたガス影響評価
- ③最新の人工バリア候補材料に対する材料特性データの拡充

また、2017 年度末に地層処分研究開発調整会議で策定された「地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～令和 4 年度）」⁴⁾では、これま

で実施した各種要素試験とその解析的評価をもとに取得したバリア材のガス移行特性及び力学特性とそれらをもとに構築した評価モデルの処分場の安全評価への適用性を処分坑道の小型モックアップ（三次元拡大系供試体）を用いたガス移行試験などにより確認すること、既往検討により適用性の確認された現象解析モデルを用いた解析評価の試行により、核種移行挙動へのガス影響を検討することが示されている。

一方、「包括的技術報告書」では TRU 廃棄物の処分の最新のセーフティケースにおいて人工バリアとして緩衝材を用いる場合、緩衝材の設計要件として、低透水性、自己修復性などが挙げられており、それらの設計要件を満たす仕様とすることで所定の機能が発揮され、核種移行抑制に対する閉鎖後長期の安全性が確保できるとされている⁵⁾。

以上の背景を踏まえ、本事業では、ガス移行挙動が処分場の性能に及ぼす影響を評価可能な現象解析モデルの構築を目標とする。この目標を達成するためには、①自己修復が起きるか否かを評価できること②その後のガス移行挙動を評価できること③緩衝材製作・施工時及びその後の変質やガス圧の影響によって力学的不均衡が生じたときに発生する緩衝材内の不均一性がガス移行に与える影響を評価できること④ガスの移行が処分場の核種の移行に及ぼす影響の程度を評価できることが必要である。そのために TRU 廃棄物の処分場における発生ガスについて、人工バリアの状態を考慮したより現実的なガス移行場の環境を設定したうえで、核種移行挙動に対する発生ガスの影響を評価する。「包括的技術報告書」で対象とする処分坑道断面例を図-1 に示す。

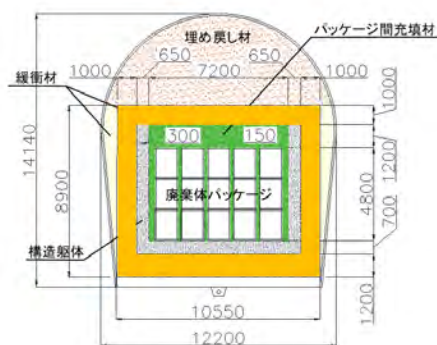


図-1 対象とする TRU 廃棄物の処分場の処分坑道断面例（深成岩、先新第三紀堆積岩類における廃棄物グループ 2 の例）⁵⁾

◇2018年度～2022年度の成果⁶⁾⁻¹⁰⁾

(1) ガス移行挙動を評価するためのツール、評価手法の検討・構築

より現実的なガス移行挙動の評価手法を開発するため、小規模モックアップ試験によりデータを取得し、試験結果の再現解析を通して一次要素試験により取得した気液二相流パラメータの適用性の確認を行った。

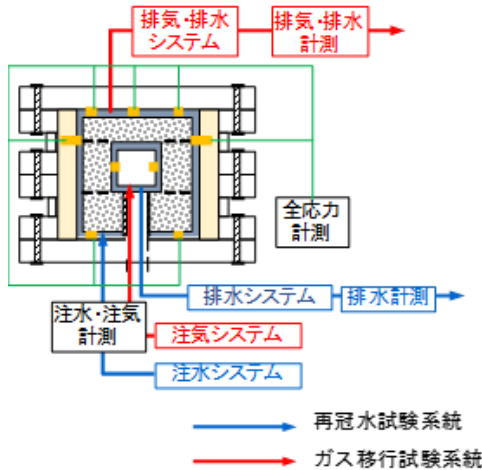


図-2 モックアップ試験装置のシステムイメージ

本検討では GETFLOWS と CODE_BRIGHT の2つの解析コードを用いた。

GETFLOWS は汎用地圏流体シミュレータとして開発されてきたコードであり、多くの分野で実績を有しているが、ベントナイト系緩衝材が大きなガス圧を受けた際の応力変形のような力学影響を考慮することができない。CODE_BRIGHT は力学連成二相流解析コードであり、有効応力解析が可能であり力学影響を評価できる。ガス移行挙動評価には、一次要素試験結果の GETFLOWS による逆解析で取得した気液二相流パラメータを用い、CODE_BRIGHT による小規模モックアップ試験の再現解析を実施し、現実的なパラメータを適用することの有効性を確認した。

小規模モックアップ試験は、以下の手順で実施した。

- ・注水により試験体を飽和させる再冠水試験の後、破過が生じるまでガスを注入する (1回目) ガス移行試験
- ・破過を経験した試験体への注水により再飽和させガスを注入する (2回目) 再破過試験

ガス侵入によるベントナイト材料の破過においては、ガス圧、水圧及びベントナイトの膨潤圧の関係で破過進展が決定されると考えられている¹¹⁾。

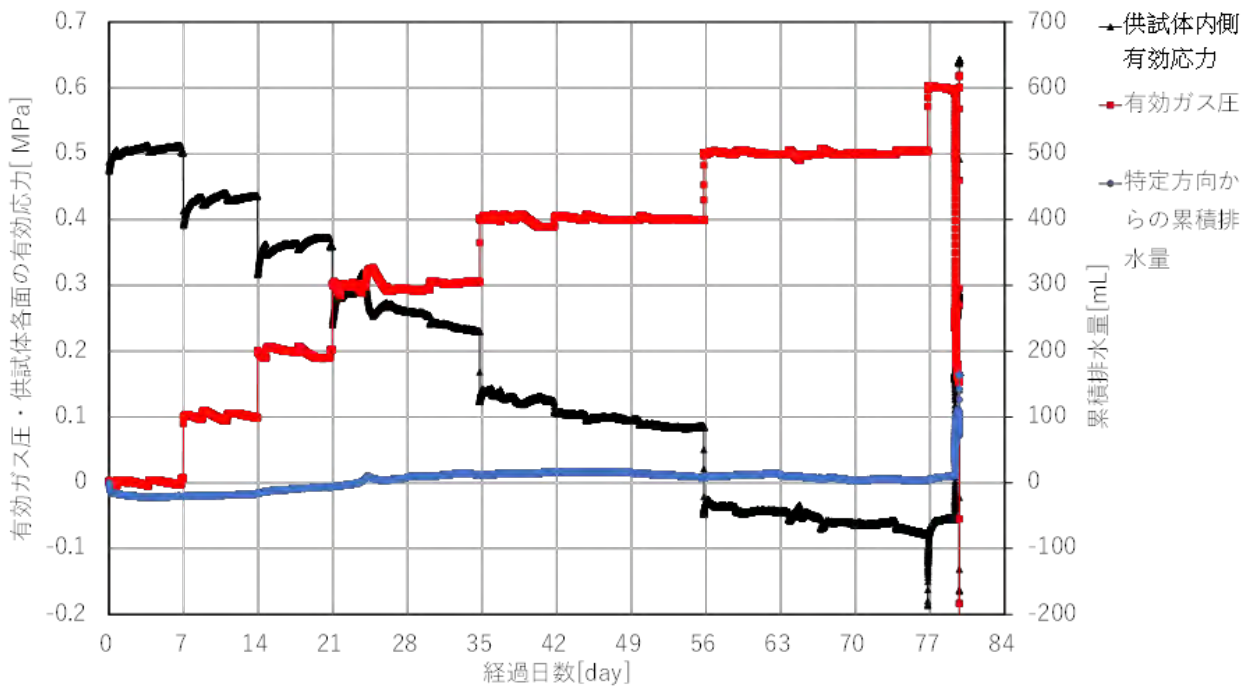


図-3 モックアップ再破過試験における有効ガス圧および有効応力の変化

モックアップ試験での破過圧は 1 回目のガス注入時、再破過試験時ともに 0.6MPa であった（背圧 0.2MPa、膨潤圧 0.5MPa 程度）。一次元要素試験²⁾での破過圧は 1.2MPa 以上であり、モックアップ試験結果と比較すると背圧と膨潤圧の和の倍以上の大きさである（一次元要素試験条件：背圧 0.1MPa、膨潤圧 0.5MPa 程度）。これはモックアップ試験系の方が体積拘束が少なくガスが伝播しやすいことに起因していると考えられ、モックアップ試験の方が処分場への適用性が高い二相流特性を示していると思われる。

モックアップ試験での 1 回目のガス注入時、再破過試験時ともに同じ破過圧であったことから、一度破過を経験した試験体を再冠水させるという理想的な状況においてではあるが、破過発生による緩衝材への水みちの形成等が生ずることはなく緩衝材の自己シール性が機能したことが確認できた。また、試験終了後は、試験体を解体して試験体に欠陥等が生じていないことを確認した。今後モックアップ試験の試験回数を重ね、破過圧、自己修復性ともに再現性の有無の確認や現象理解を進める必要がある。

小規模モックアップ試験におけるガス移行試験の工程では、立方体である試験体の 5 つの面（前・後・左・右の各側面と頂面）からの排水量や排気量を観測した。観測した試験体からの排水量には各面ごとにばらつきがあり、破過に関しても 1 回目のガス注入時、再破過試験時ともに同一方向から生じるといった方向に偏りが見られる結果となった。試験体は均質となるように作成したが、実際には微小な密度のばらつきや施工継ぎ目など透気経路として選択される弱部が試験系のスケールアップに伴い顕在化した結果と考えられる。この現象は実処分場においても同様に起こり得ると推定され、弱部が顕在化していない要素試験から得られた材料の透過特性をモデル上に均質に与えて評価することは現象に則したものではないと考えられる。

一次元要素試験により取得した気液二相流パラメータによるモックアップ試験での累積排水量の再現解析により、以下の過程を経てモックアップ試験に適用可能なパラメータを同定した。一次元要素試験により取得したパラメータでは、モックアップ試験結果の再現性はあまり良好ではなかった。そのため、モックアップ試験の結

果得られたデータに対して逆解析を行い、モックアップ試験に適用するパラメータを同定した。その際、二相流パラメータには高飽和度領域における気相の相対浸透率の動きを大きく表現できる Grant モデルを適用することで試験結果を良好に再現できた。三次元の試験体系の試験結果は限られており、解析モデルの精度向上には試験データの蓄積が必要である。

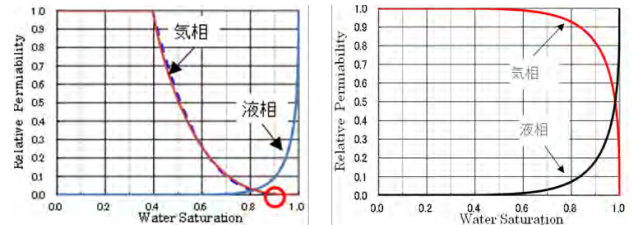


図-4 気相の二相流パラメータの比較
（左図：従来モデル、右図：Grant モデル）

(2) ガス影響を考慮した核種移行評価

実処分場において発生ガスの移行が核種の移行に及ぼす影響の程度を現実的に評価するため、ガス発生量の定量評価及びそれをソースタームとしたガス移行解析、その結果を受けてのガス影響を考慮した核種移行解析といった一連の解析を実施した。最新の知見や設定条件を整理し、ガス発生挙動（発生時期、発生速度）を現実的に評価すべくガス発生量定量評価手法を構築した。具体的には、廃棄体パッケージの開口等の処分場において時系列的に発生するイベントの設定や水の放射線分解のトリガーとなる α 線/ β 線/ γ 線の飛程の相違の考慮といった点を第2次 TRU レポートでの評価と比較し更新した。本手法による廃棄体グループ 2 を対象としたガス発生量評価結果をソースタームとしたガス移行解析評価を実施し、その結果を基とした核種移行解析を実施した。

1) ガス発生量の定量評価手法の構築及びガス発生量評価

ガス発生機構としては、水の放射線分解と金属材料の嫌気性腐食による水素ガスの発生を対象とし、評価期間としては廃棄物発生を T=0 年 (y) とし T=10,000 y までとし、評価対象とする領域としては廃棄体/廃棄体パッケージ/人工バリアとした。廃棄体グループ 2 を対象とした経時的なガス発生量を評価した結果、全体の

傾向として、水の放射線分解によるガス発生量が金属腐食によるガス発生量よりも卓越する。

T=325 y に発生量が大きく増加するのは、廃棄体パッケージが開口すると設定した T=325 y に外部から地下水が流入し、その時点で初めてキャニスタ内にも地下水が流入し、その α 線及び β 線による放射線分解が開始されることによるものである。金属腐食については、初期は廃棄体パッケージモルタル中の自由水を消費しながら、廃棄体パッケージを主要因としたガス発生機構となっているが、処分場閉鎖と設定した T=50 y からは人工バリア材による金属腐食が、T=325 y 以降はキャニスタ内に流入した地下水による廃棄物（ハル、エンドピース）の腐食が追加されることとなる。このように本手法では処分場において時系列的に発生するイベントを反映した評価となっている。

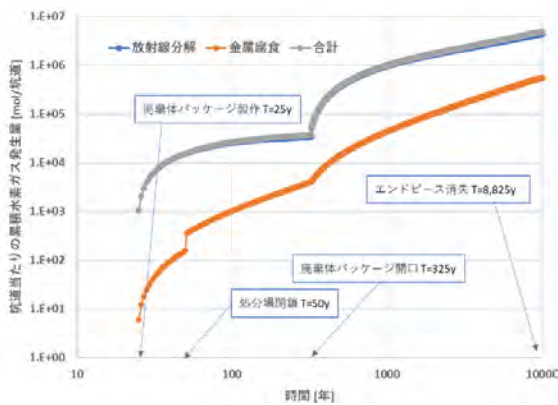


図-5 水素ガス発生量評価結果

2) 発生ガス影響を考慮した核種移行解析

実処分場を想定し、ガス発生量評価結果をソースタームとしたガス移行解析を実施し、ガスによる押し出し排水量を評価した。解析には小規模モックアップ試験の再現解析と同様に応力連成二相流解析コード CODE-BRIGHT を用いた。小規模モックアップ試験で得られた知見を反映し、ガス発生量評価で設定したイベントに沿ったものとなるよう解析手法及び解析条件を整備した。

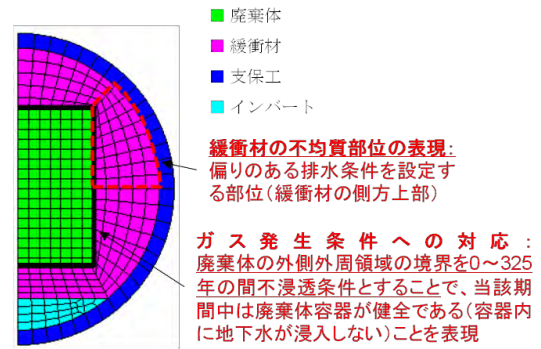


図-6 解析モデルの概要

解析に設定する境界条件として、解析モデルの支保工外側を深度 500m 相当の静水圧分布にするとともに、廃棄体領域に設定する境界条件では T=325 y におけるパッケージ開口の設定に沿ったものとし、T<325 y では不浸透条件とした。小規模モックアップ試験では偏りのある排水挙動が観測されたことを考慮し本解析でも図示した部分に他部分よりも透水しやすくなる力学パラメータセットを適用した。

緩衝材からの押し出し排水量の経時変化を評価した結果を図-7 に示す。緩衝材からの排水流量は廃棄体パッケージの健全性が損なわれると設定した T=325y ごろにピークが見られた。既往検討¹²⁾における実処分場を想定したガス移行解析の評価結果と比較すると、10,000 年時点での累積排水量とピーク時の排水流量（排水速度）はともに本検討の方が小さかった。これは解析のソースタームとしているガス発生量をより現実的に評価したことによる影響が大きい。

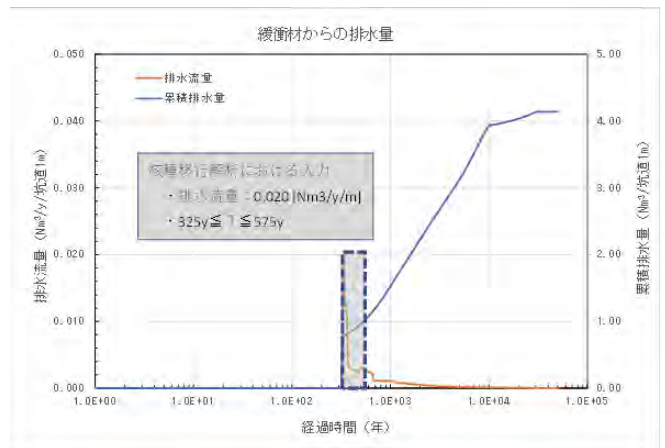


図-7 押し出し排水量評価結果

ガス移行解析結果を基にガス影響を想定した核種移行解析を行った。ガス発生量評価においてはパッケージの開口等の処分場において時系列的に発生するイベントを反映した評価を行った。それに合わせ、廃棄物が発生する時点を核種移行解析における始点とし、核種漏洩開始は廃棄体パッケージ開口に伴う T=325y と設定した。

ガス影響を核種移行解析に反映するにあたって、以下に記すようにしてガス移行解析結果を解釈し解析条件の設定に反映させた。ガス影響を考慮した核種移行解析では、通常は拡散支配の条件下で緩慢に移行する緩衝材中での核種の移行が透気によってどのような擾乱を受けるかに注目して評価モデルを構築した。本検討における設定では、ガスは緩衝材中に透気経路を形成して透気し、その透気経路を通じて汚染水も排水されるとした。ただし、一旦形成された透気経路は透気後に内部のガス圧が低下するため、緩衝材の膨潤性によって閉塞し透気前の緩衝材による拡散移行の場が再形成されるものとした。

ガス移行解析の結果として得られた排水速度及び累積排水量の反映に関して、汚染水は一時的に形成された透気経路から全て流出するものと保守的に捉え条件設定し、汚染水の水利条件としても保守的な条件となることを満足させた。

EDZ (掘削損傷領域) 外側での核種移行率評価結果を図-8 に、比較のためのガス影響を考慮しない場合の評価結果を図-9 に示す。EDZ 外側での核種移行率に注目した場合、ガス影響を考慮したケースでは T=325 y にピークが立ち上がった後に 500 年~1,000 年程度の「肩」となる平坦部が生じている。この「肩」は、ガスの破過時に透気経路を通じて緩衝材から漏洩する核種に由来するものである。

一連のガス影響評価による結果として、緩衝材層は一時的に破過し、破過が終了するまでの期間、ガスによる影響で人工バリア外側境界の放射能濃度が大きくなる可能性を示すものである。

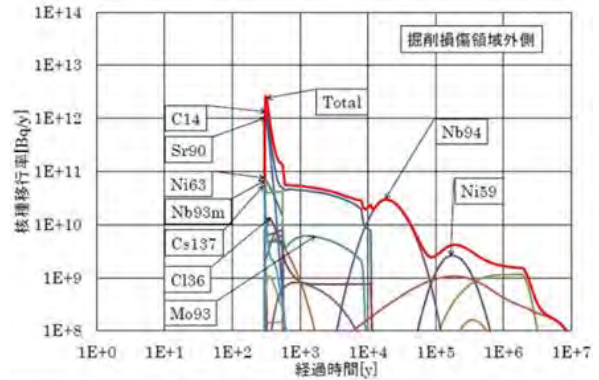


図-8 EDZ 外側での核種移行率評価結果

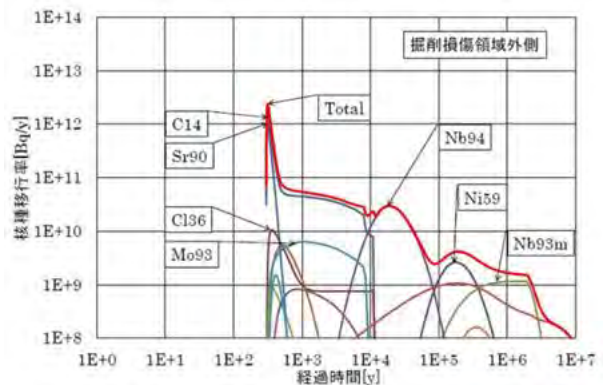


図-9 比較のためガス影響なしの核種移行率評価結果

(3) 長期変遷を考慮したガス移行場の状態評価

ガス移行場の状態設定に資する検討として、緩衝材の移行特性に関する構成則のうち、ベントナイトの透水係数モデルに関する検討を実施した。モンモリロナイト粒子を円板状粒子で模擬したモンテカルロ法を用いた構造解析⁶⁾の移行特性評価への適用性を、空隙特性量(空隙率、屈曲度、比表面積)の算出¹³⁾及びそれら空隙特性量を Kozeny-Carman 式(以下、KC 式)に代入することによる透過率の評価を通して確認した。これまで球形に近い形状の粒子層中の透水性を表すモデルとして、KC 式が用いられてきた。一般的な KC 式は空隙特性量(空隙率、屈曲度、比表面積)を用いて次式で表される。

$$k = \frac{f^3}{ct^2(1-f)^2(S_v)^2} \quad \dots \text{式 (1)}$$

円板粒子層のマクロな構造が変化することによって各空隙特性量や透過率がどのように変化するかについて調査し、文献の実験結果と比較することで当評価手法の妥当性を確認した。

砂層、粘土層、混合層を模した粒子構造に関しても数値解析を実施し、KC 式により評価した透過率を空隙率について整理し、文献の実験結果と比較することにより砂-粘土層の統一的な透水モデル構築の可能性について検討した。

砂層を模した球充填層の解析結果に関して実験結果とのよい一致が得られた。KC 式は球形に近い形状の粒子層中の透水性を表すモデルとして用いられてきた経緯があり、この結果に関しては妥当な結果と判断した。さらに粘土層を模した円板粒子層の解析結果に関して KC 式で評価したにも関わらず、実験結果とのよい一致が得られた。本解析結果より、KC 式中の空隙特性量である屈曲度、比表面積それぞれに関して、空隙率をパラメータとした構成式として表し、KC 型の透水モデル中の各空隙特性量の構成式に代入することにより、砂層、粘土層に関わらず統一的な透水モデル式を構築できる可能性が示唆された。

球-円板混合層に対しても同様に透過率を算出した結果、値の範囲としてはよい一致が得られたが、実験結果とは空隙率に対する透過率の変化の傾向が異なる結果となった。この差異の原因としては、実際の透水実験のほとんどは粘土と砂の比率ではなく、圧密(体積変化)により空隙率を変化させており、解析における条件設定が実験における操作と異なることが一因であると考察した。

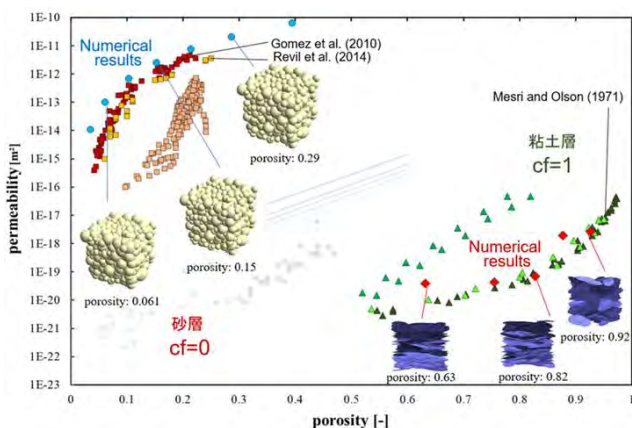


図-10 砂層及び粘土層の透過率に関する計算結果と文献との比較

- 1) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物処分技術検討書 -第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-、2005
- 2) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 24 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 平成 19 年度~24 年度取りまとめ報告書、2013
- 3) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 平成 25 年度~29 年度取りまとめ報告書、2018
- 4) 地層処分基盤研究開発調整会議、地層処分研究開発に関する全体計画(平成 30 年度~令和 4 年度)、2020
- 5) 原子力発電環境整備機構、包括的技術報告書 わが国における安全な地層処分の実現-適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築-、NUMO-TR-20-03、2021
- 6) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 30 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分にに関する技術開発報告書、2019
- 7) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 31 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分にに関する技術開発報告書、2020
- 8) 原子力環境整備促進・資金管理センター、令和 2 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2021
- 9) 原子力環境整備促進・資金管理センター、令和 3 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2022
- 10) 原子力環境整備促進・資金管理センター、令和 4 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書、2023
- 11) 田中幸久、廣永道彦、飽和した Ca 型ベントナイト混合土のガス移行特性評価、電力中央研究所研究報告：N13011、2012
- 12) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発報告書(第 5 分冊)-ガス移行連成挙動評価手法の開発-、2017
- 13) K. Ishiyama, K. Yamamoto, S. Harada, T. Yagi, Tortuosity of Internal Pore Space in Variously-Structured Platelet Particles, Transport in Porous Media, TIPM-D-23-00032R1

6. 廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究

◇事業の概要

原子力利用において放射性廃棄物の管理は不可欠であるが、処分対象となる廃棄物の量と性状は発電及びそれ以降の核燃料サイクルの諸条件に依存する。同時に、それは処分場のサイズや長期の放射線安全に影響する。放射性廃棄物の減容・有害度低減に関して核種の分離・変換技術の研究が進められているが、廃棄物処分の負荷低減に向けた現実的、且つ有効な対策を講じるためには、発電から廃棄物処分までの分野横断的な視点からのプロセス評価を行うと共に、その効果を評価する指標を持つことが求められる¹⁾。

本事業では、放射性廃棄物の発熱と毒性の点からマイナーアクチノイド(MA)、特にアメリシウム(Am)に着目し、その70~90%程度の分離(これを簡素化MA分離という)に留意した²⁾⁻⁴⁾。そして以下の点を目的としてその効果、影響を評価した⁵⁾⁻⁹⁾。

- ・核燃料サイクル条件の多様化を念頭に、原子力システムの貢献度と負荷を考慮した廃棄物処分における環境影響の定量的な評価を行うと共に評価指標を導出する。
- ・核種分離、ガラス固化、地層処分などバックエンド領域を含む核燃料サイクル全体の諸量評価を可能とする計算プログラムを開発する。
- ・溶媒抽出法におけるMA分離メカニズムの検証による分離プロセスの成立性を提示すると共に、簡素化MA分離を前提として工学的に実現可能な分離プロセスを提示する。
- ・核種分離と連動してMAリサイクルを行う高速炉システムにおける廃棄物特性に留意して、多様な前提条件に対応しうる高速炉燃焼計算モデルを高度化する。

なお、本事業は、文部科学省の令和元年度の公募型研究である国家課題対応型研究開発推進事業の中の原子力システム研究開発事業 JPMXD0219209423の助成を受けて実施したものであり、安全基盤技術研究開発と放射性廃棄物減容・有害度低減の2つの課題募集分野の内、後者に属し、4年間の研究である^{10),11)}。最終年度の成果を以下に示す。

◇2022年度の成果

(1) 廃棄物処分における環境影響評価研究

1) 評価及び評価指標の導出(原環センター)

多様な核燃料サイクル条件に基づくガラス固化体地層処分の環境影響を、MA分離割合に留意して検討した。処分システム負荷は廃棄物量(処分場面積)と動的及び静的の2つの放射線影響、MA分離負荷は分離回収に必要な溶媒抽出段数と回収MAの高速炉装荷を考慮したMAストック量、そして高速炉炉心負荷は希土類元素(RE)を随伴する回収MAを燃料として装荷した高速炉炉心特性、以上3領域の負荷を6クライテリアに分類し、負荷のスコア化とクライテリアの重み配分をパラメータとした条件組合せの優位性を多基準分析の手法を用いて比較した。この多基準分析の手順に基づき環境影響評価指標を階層化して提示した。代表的な多基準分析手法である加重総和法とコンコーダンス分析により、処分システム負荷の重みとMA分離及び高速炉炉心の重みを均等にした場合、UO₂燃料由来ガラス固化体処分に関してはMA70%分離、MOX燃料由来ガラス固化体処分に関してはMA90%分離が優位性を有することを提示した。

2) 諸量の評価(東京工業大学)

多様な核燃料サイクル条件の下でのMAリサイクルシナリオを検討し、高速炉を念頭に置いて新型炉導入におけるMA核変換の効果(MAの消費、ストック及び処分量)等のMA諸量評価手法を開発した。MA平衡期リサイクルでのMAビルドアップの傾向から、高速炉導入によるMA総量削減の効果は、PWR-UO₂燃料サイクルよりもPWR-MOX燃料サイクルの方が高く、PWR-UO₂+FR-MOX燃料サイクルでは高速炉炉心のMA含有率向上が、またPWR-MOX+FR-MOX燃料サイクルでは高速炉の出力分担向上がより効果的であることを見出した。

そして、これらの結果に基づき、国際原子力機関(IAEA)が進めているNuclear Fuel Cycle Simulation System(NFCSS)¹²⁾コードのバックエンド領域の計算機能向上に対して、高レベル放射性廃棄物の崩壊熱及び放射性毒性評価のための計算式を提示した。

(2) Am 分離プロセスの工学的設計研究

1) 分離メカニズムの検証 (東京工業大学)

前年度までに調査した MA 及び RE 抽出に関する抽出平衡関係、抽出速度式を用いて、ミキサセトラ抽出器を想定した単段の MA/RE 分離挙動を評価し、簡素化 MA 分離の妥当性、成立性を検証した。単段での簡素化 MA 分離は抽出速度の影響を強く受けることから、ミキサセトラ単段での連続プロセスよりも単段のバッチ式での簡素化 MA 分離の方が組成が安定し、工学適用性が高い可能性を指摘した。また、工学適用時には抽出器の選定、抽出器の運転条件への留意が必要であることをまとめた。

2) 諸量評価に基づく分離度に対応した分離プロセスの構築 (日本原子力研究開発機構)

2021 年度までの成果を基に、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が開発した MA 分離プロセスである「SELECT プロセス¹³⁾」の MA/RE 相互分離工程について PARC-MA コード¹³⁾によるプロセスシミュレーションを行った。計算においては、分離段数 4 段から 16 段における最も回収率が高い条件と製品 MA の純度が高い条件の把握に留意した。その結果、MA/RE 相互分離工程の分離段数を従来の 40 段から 16 段まで合理化しても、Am 回収率 90% の条件において十分な性能を有していることが明らかとなった。また、高速炉による RE 随伴回収 MA の核変換評価との連携から、分離段数 6 段(UO₂ 燃料の場合)あるいは 10 段(MOX 燃料の場合)までの合理化の可能性を確認した。廃棄物処分負荷に留意した評価により、MA 分離プロセスの中で工程の巨大化が懸念される MA/RE 相互分離工程についてその簡素化の可能性を示すことで、社会実装を視野に入れたプロセス構成を確立した。

(3) 多様な前提条件に対応する高速炉燃焼モデルの高度化 (北海道大学)

前年度に理論的枠組みを構築した高速炉炉心燃焼モデルの代理モデルの開発を行い、その予測精度を定量的に評価した¹⁴⁾。また、このモデルを用いて、移行期における燃料中の TRU 組成の変動が高速炉の炉心・廃棄物特性に与える影響の評価を網羅的な条件のもとで行った。さらに、MA 回収率と RE を随伴する MA 純度の違いが高速炉の炉

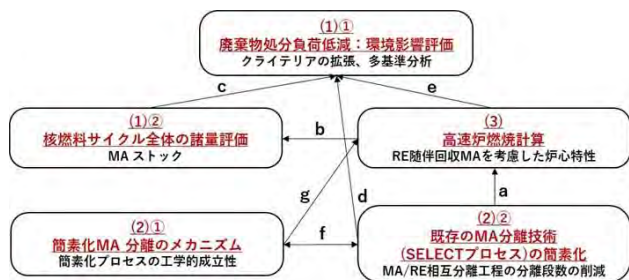
心特性に与える影響の評価として、SELECT プロセスに対して与えられた 8 ケースの抽出条件のそれぞれについて、移行期 (LWR-UO₂、LWR-MOX) 高速炉と平衡期高速炉の炉心特性の評価を行い、新たに一括炉心性能評価指標を設定して、再処理の簡素化条件と炉心性能との対応を整理・評価した。

◇2019～2022 年度の研究のまとめ^{15), 16)}

4 年間にわたる本研究では、核燃料サイクル条件の多様化と簡素化 MA 分離の導入をキーワードとして、解析的な手法を用いて、原子力システムの貢献度と負荷を考慮した廃棄物処分における環境影響の定量的評価を行うと共に評価指標を導出した。また、原子力システムのバックエンド領域の物量評価が可能となるよう、既存の諸量評価計算コードの機能向上を行うと共に核燃料サイクルにおける多様な処理処分条件を考慮した諸量評価、及びバックエンド領域における各種の負荷を評価する Excel 計算プログラム及びデータセットを整備した。簡素化 MA 分離に関しては、MA 分離メカニズムに基づく簡素化プロセスの工学的成立性の見直しを検討、評価すると共に、既存の MA 分離プロセス (SELECT プロセスの MA/RE 相互分離工程) の分離段数の大幅な削減可能性を提示した。さらに、回収 MA の燃料装荷など多様な前提条件に対応する高速炉利用を想定し、炉心特性評価のための燃焼計算について簡易モデルを作成した。

本研究における分野横断型の連携と統合の構造を図-1(a~g は各研究項目をつなぐ具体的な評価結果、知見)に示す。研究項目(1)①での各研究項目の成果の集約に基づき、①分野横断型評価の方法論、②核燃料サイクル条件多様化の下での技術オプションの提示、③簡素化 MA 分離の定義とその優位性、の 3 点について見解をまとめた。

以上に加えて、各研究項目間の連携を深めると共に、燃料サイクル全体を俯瞰した客観的、分野横断的な視点から研究を進めるために、外部評価委員会を設置して研究の進捗と課題を共有すると同時に、炉、燃料サイクル、廃棄物処分に関する議論を継続して実施した。



- a. Am回収率、MA純度/RE随伴
- b. 高速炉炉心特性 / FR-SF組成
- c. 諸量評価 / MAストック
- d. MA分離段数の削減
- e. 高速炉炉心特性 / 反応度(一括炉心性能評価指標)
- f. 簡素化MA分離プロセスの妥当性、代替技術の可能性
- g. 先進的再処理法の適用可能性

図-1 分野横断型研究における連携とその統合

- 1) 21世紀後半に向けた廃棄物管理の選択肢：Pu利用推進と環境負荷低減型地層処分に関する研究、(1)～(6)、日本原子力学会 2018年春の年会、予稿集 3011～3016
- 2) K. Kawai et al., High burn-up operation and MOX burning in LWR; Effects of burn-up and extended cooling period of spent fuel on vitrification and disposal, J Nucl Sci Technol. Vol.55, No.10, 1130-1140, 2018
- 3) 21世紀後半に向けた廃棄物管理の選択肢：Pu利用推進と環境負荷低減型地層処分に関する研究、(15)、日本原子力学会 2020年春の年会、予稿集 2D04
- 4) E. Minari et al., Evaluation of the technical options of radioactive waste management for utilization of MOX fuel:thermal impact of minor actinide separation with geological disposal of high-level waste, J Nucl Sci Technol. Vol.58, No.10, 1123-1133, 2021
- 5) 廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究、(1)～(4)、日本原子力学会 2021年春の年会、予稿集 3J01～3J04
- 6) 廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究、(5)～(9)、日本原子力学会 2022年春の年会、予稿集 1H05～1H09
- 7) H. Asano, R. Hamada, T. Sakuragi et al., Study on advanced nuclear energy system based on the environmental impact of radioactive waste disposal- An integrated cross-disciplinary approach to diversifying nuclear fuel cycle conditions-, Proc. International Conference on Radioactive Waste Management: Solutions for a sustainable Future, IAEA, November 1-5, 2021
- 8) R. Hamada, H. Asano and T. Sakuragi, Environmental impact of radioactive waste disposal in advanced nuclear energy systems; Radiation impact evaluation of nuclide migration and human intrusion for geological disposal considering nuclear fuel cycle conditions, Proc. International Conference on Radioactive Waste Management: Solutions for a sustainable Future, IAEA, November 1-5, 2021
- 9) H. Kato, G. Chiba and H. Asano, Study on the fast

reactor system characteristics in the transition period from LWR to FR, Proc. International Conference on Radioactive Waste Management: Solutions for a sustainable Future, IAEA, November 1-5, 2021

- 10) 令和元年度国家課題対応型研究開発推進事業「原子力システム研究開発事業」の公募開始について https://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/1416513.htm
- 11) 令和元年度「原子力システム研究開発事業」募集要項 https://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/_icsFiles/afielddfile/2019/05/22/1416513_01.pdf
- 12) Nuclear Fuel Cycle Simulation System: Improvements and Applications, IAEA-TECDOC-1864, IAEA, 2019
- 13) BAN, Y., et al., "Minor Actinides Separation by N, N, N', N', N'', N'' -Hexaocetyl Nitrilotriacetamide (HONTA) Using Mixer-settler Extractors in a Hot Cell", Solvent Extraction and Ion Exchange, **37** 7, 489 - 499, 2019
- 14) J. Fan and G. Chiba, Development and verification of fast reactor burnup calculation module FBBurner in code system CBZ, J Nucl Sci Technol. Vol.58, No.12, 1269-1287, 2021
- 15) 廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究、(10)～(14)、日本原子力学会 2023年春の年会、予稿集 2I10～2I14
- 16) Study on nuclear energy system considering environmental load reduction of waste disposal in diversification of nuclear fuel cycle conditions, (1)～(5), The International Symposium on Zero-Carbon Energy Systems (IZES), 11-13 January, 2023, Tokyo Institute of Technology, Japan

7. 使用済燃料の多様化を考慮したシナリオ評価

◇事業の概要

本事業は、高レベル放射性廃棄物ガラス固化体の基盤技術開発について、使用済燃料や再処理条件の多様化を考慮すると共に、地層処分を含めた核燃料サイクル全体の合理化を図るためのシナリオを検討し、合理的な技術オプションや課題を抽出することを目的に2019年度から開始した。

現在、我が国において、使用済燃料は一定期間冷却後に再処理され、発生する高レベル廃液はガラス固化後に地層処分される予定である。現状、六ヶ所再処理工場にて年間約1,000本のガラス固化体の製造を想定している。一方、原子力発電所の稼働に関しては、より効率的な燃料利用の点から、高燃焼度化、プルサーマルによるプルトニウムの利用促進が進められている。高燃焼度燃料や使用済MOX燃料から発生する廃液もガラス固化する必要があるが、従来のガラス固化体に比べて不純物（モリブデン、白金族元素等）や長寿命かつ発熱性の高いマイナーアクチニド（MA）が多く含まれる。そのため、再処理やガラス熔融のプロセス、ガラス固化体の特性、ガラス固化体の発生本数とそれに伴う処分場面積等に対して影響を与える可能性がある。これらの課題は、燃料から再処理、ガラス固化、処分まで幅広い技術分野を横断することから、原子力利用のシナリオを適切に設定し、シナリオに基づいて全体最適化の観点からサイクル諸条件の組合せや関連性を検討することが有効かつ重要と考えられる。従って本事業では、ガラス固化体の地層処分を前提とした多様な核燃料サイクル条件を考慮したシナリオの評価に資する国内外の情報を調査、分析、整理し、シナリオを論拠としてガラス固化体の特性や地層処分への影響について検討するものである。

◇2022年度の成果

2022年度は、高燃焼度UO₂燃料およびMOX燃料を対象とし、多様な燃料サイクルオプションの最適化に向けて、ガラス固化及び地層処分に対する影響や課題等について検討した。

(1)シナリオ検討に基づくサイクル条件多様化評価システムの検討

第6次エネルギー基本計画に基づいた原子力利用のシナリオについて検討した。これまでに発生した使用済燃料だけでなく、今後の使用済燃料発生量も予測し、燃焼度や冷却期間等の条件について複数の再処理シナリオを仮定して詳細に検討した。検討結果はガラス固化体の充填率等に活用し、廃棄物発生量や処分場の評価に反映させた。

(2)再処理、ガラス固化、地層処分に関する情報調査

国内外におけるMOX利用および使用済MOX燃料対策に関連した再処理、ガラス固化、地層処分に関する研究開発、事業、政策の状況を調査し、(1)のシナリオの論拠や蓋然性に反映させた。

(3)パラメータスタディによるガラス固化体高充填化オプションの検討

MOXガラス固化体の発熱低減対策として、使用済UO₂燃料の混合を適用したガラス固化体（UO₂/MOX混合ガラス固化体）やMA分離を適用したガラス固化体について、地層処分への適合性を検討した。

①UO₂/MOX混合ガラス固化体

使用済UO₂燃料と使用済MOX燃料との各混合条件におけるガラス固化体の発熱量と緩衝材温度への影響を評価した。評価の際、発熱核種のビルドアップを考慮し、使用済燃料の冷却期間の違いによるガラス固化体の発熱量への影響を含めた検討を行った。

②MA分離を適用したガラス固化体

MAの分離割合をパラメータとして、ガラス固化体の発熱量と緩衝材温度への影響を評価し、処分場面積低減の観点で廃棄物充填率の最適化条件について整理した。評価の際、燃焼度や冷却期間の違いによるガラス固化体の発熱量への影響を含めた検討を行った。

本成果は経済産業省資源エネルギー庁「令和4年度放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術の基盤研究事業（JPJ010599）」の一部である。

8. 固化体のハイブリッド化及び処分概念・安全評価に関する検討

◇事業の概要

本事業では、福島第一原子力発電所における汚染水処理で発生した2次廃棄物の安定固化や廃棄体化研究に対する、最終処分とその安全評価等、社会実装に関する検討を行う。汚染水処理やデブリ処理で発生する固化が難しく長半減期で低収着性のため長期の被ばく線量を支配するヨウ素(I)と、潜在的有害度が高く長期的な発熱源かつ α 核種であるマイナーアクチノイドを含めたアクチノイドに特に注目し、前者はAgI、I-アパタイト、アクチノイドを模擬した希土類元素(RE)はアパタイトやモナザイトといった鉱物に固化する。これらを1次固化体とし、詳細な合成手法と固化体の構造、物性、浸出性、耐放射線性、表面物性変化等を最新の材料科学の観点・手法を用いた実験、計算アプローチにより徹底理解する。この1次固化体を稠密かつ耐食性に優れ、特性評価モデルに実績を有するSUSやジルカロイといったマトリクス材料中に熱間等方圧加圧法(HIP)等で固定化し、廃棄体をハイブリッド固化体とする。これにより核種の閉じ込めの多重化に加え、安全評価に必要な長期評価モデルの信頼性も向上させた実効性・実用性のある廃棄体とする。1次固化体とマトリクスとの相互作用を理解した上で、マトリクスの耐食性、環境、他の人工バリア構成等を考慮した処分概念を具体化する。潜在的有害度及び核種移行の観点から処分後の被ばく線量評価を行い、安全な廃棄体化手法及び処分方法を構築することを目的とする。以上によりこれから現実的な課題として廃棄体の合理的な処分の社会実装に向けた検討を本事業の目的としている。そのうち、本研究では固化体のハイブリッド化とハイブリッド固化体に適した処分概念の検討、さらに処分後の安全評価の実施を目的とする。

本事業は、文部科学省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業(福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価(JPJA21P21460873))」の一部である。

◇2022年度の成果

(1)ハイブリッド固化体の検討

昨年度のハイブリッド化に適した金属マトリクス材料の調査結果及びリファレンス固化体の合成結果に基づいて、本年度は金属マトリクスとして耐食性だけではなく処分の安全評価へ短時間で実装できる材料選定という観点から、エンドピースと呼ばれる構造材に使用されるステンレス鋼(SUS)を選定した。次に、1次固化体として複数の廃棄物を選定した。昨年度は、ヨウ素化合物のうち一般的な環境において安定性に優れるヨウ化銀(AgI)等を1次固化体のリファレンスとして用いたが、粉末状のAgIを使用したため比表面積が大きく、マトリクス金属との相互作用や固化体内での1次廃棄物の連結性が懸念された。連結性によりマトリクス腐食が不均一となると調和溶出モデルの適用が困難になることから、本年度に用いる粉末状の1次廃棄物(ヨウ素アパタイト等)は等量の充填率でも連結性を抑制できるように造粒しハイブリッド固化した。なお、1次廃棄物としてヨウ素吸着材であるALPS酸化セリウム及びALPS銀ゼオライトは元々粒状であるので、そのままの状態での固化した。

粉末冶金法のひとつである熱間等方圧加圧法(HIP)でハイブリッド固化体を合成した結果、1次固化体はおおむね単分散し、SUSマトリクス中に閉じ込められていた。マトリクス部も焼結性が高く空隙や欠陥のないインゴット状であったことから、目的とするハイブリッド固化体が製造できたことが確認できた。

(2)処分概念・安全評価の検討

ハイブリッド固化体の寿命を金属マトリクスの腐食速度を用いたシミュレーションモデル(セルオートマトン法)で検討した。その結果、1次固化体含有率(ここでは空隙と仮定)が高いほど寿命は低下し、SUSの非常に低い腐食速度(0.02 $\mu\text{m}/\text{y}$)から予想されるように、数百万年スケールの固化体寿命となる可能性が示された。今後、このシミュレーションの結果等を参考に処分後の核種移行を評価することで、ハイブリッド固化体の処分概念や安全評価について具体的に検討する予定である。

9. 高安全・核セキュリティ及び低廃棄物処分負荷を同時達成する中小型軽水炉に関する研究

◇事業の概要

本研究では、事故耐性燃料としてケイ化物燃料（シリサイド、 U_3Si_2 ）を使用する中小型軽水炉*の成立性を、使用済燃料再処理で発生する回収ウランと分離・変換技術における主要な回収対象であるマイナーアクチノイド（MA）の燃焼を前提として、炉心の燃焼特性と放射性廃棄物処分を含む原子燃料サイクル全体の諸量計算により評価する。これにより、今後の原子力利用に対して、事故耐性燃料を利用する中小型軽水炉により、①高い固有の安全性、②高い核セキュリティ、③使用済燃料再処理に由来する回収ウランの利用、④放射性廃棄物処分において発熱と放射性毒性の点で留意される MA の消費を同時に可能とする新型原子炉の実現性を提示する。

ケイ化物燃料の特徴とそれを用いる炉心特性からは、中小型軽水炉の高中性子経済性、高安全性、回収ウラン・回収 MA の高付加価値資源利用、高核不拡散・核セキュリティが期待される。モジュールタイプの炉による海外展開を想定した評価を行うことも本研究の大きな特徴である。

以上より、本研究では以下の2項目を実施する。

- (1) 回収 U-MA ケイ化物燃料を用いた中小型軽水炉の炉心開発
- (2) 廃棄物処分負荷低減につながる回収 MA・回収 U の諸量評価

1年目の2022年度は両項目について、既往研究成果との関係性、評価対象と評価条件に関する調査と予備的解析を行って研究の方向性を確定した。2年目はそれぞれの項目毎に定量的な評価を行い、総合評価を行う。

◇2022年度の成果

(1) 炉心開発

運転期間と燃料交換方式が異なる2つのタイプのPWR中小型軽水炉—オンサイト燃料交換型炉（標準型）と可搬型炉（長期運転型）—を想定して燃料設計条件と燃料集合体仕様を設定し、2次元ピンセルモデルを用いて中性子輸送及び燃

焼計算を行ない、燃焼反応度の時間変化からケイ化物燃料におけるU濃縮度、MAあるいはAm-241の添加の影響を把握した。回収Uを利用する場合はU-236の含有割合が増加することからU濃縮度を高める必要がある。また同燃料の核的安全性評価としてドップラー係数と減速材温度係数を評価した。ケイ化物燃料及び回収U利用ケイ化物燃料、そしてMAあるいはAm-241添加燃料ではいずれも負のドップラー係数が得られること、またケイ化物燃料の減速材温度係数は、U酸化物燃料よりも負に大きくなることを確認した。核セキュリティ性についてはケイ化物燃料の核不拡散性評価として、不正利用価値（Attractiveness）評価を行い、U燃料へのケイ素の含有やMAあるいはAm-241の添加は不正利用価値を低くする効果があることを確認した。さらに、使用済ケイ化物燃料の再処理技術についてフランスでの既往研究の調査を行い、その再処理に関して既往の技術を援用するとしても基本的な抽出特性、AlやSiが分離プロセスに与える影響に加えて、その後段の廃棄体製造とその処分（長期安定性、安全性等）、物量評価を連結させた検討が重要であることを確認した。

(2) 諸量評価

評価対象とする2つのケイ化物燃料中小型軽水炉（標準型と長期運転型）について回収Uと回収MAの利用に留意した燃料条件を設定した。核燃料サイクル諸量評価のための計算コードは、燃料製造から高レベル放射性廃棄物地層処分までのマスバランス評価が可能で専用のwebsiteで公開されているNMB4.0^{1), 2)}を利用することとし、設定した燃料条件への同コードの対応状況をユーザーマニュアル、試算、コード開発者との協議により確認した。諸量評価上最重要となる使用済燃料の核種組成については、炉心開発から提供された核種断面積データを基にNMB4.0での燃焼計算を行うためのデータセットを準備した。これを基に炉心開発での燃焼計算（MVP-BURN）と比較する予備解析を行った。各核種の断面積の燃焼度依存性、及び核種の基底状態と励起状態の区別を考慮した結果、設定した燃料条件において良い精度で計算できることを確認した。そして、資源エネルギー庁の公開資料³⁾の原子力利用シナリオを基に、NMB4.0を用いて、リ

ブレース炉を全てケイ化物燃料中小型軽水炉とし、その際に利用する回収 U の量をパラメータとして、発電設備容量と回収ウラン貯蔵量を西暦 2100 年まで算出した。また、地層処分負荷低減の観点から設定した燃料条件を用いて、現行と同じ使用済燃料の再処理及びガラス固化条件の下での地層処分場における、緩衝材の最高温度やガラス固化体の潜在的放射性毒性を MA 分離割合をパラメータとして評価し、70%あるいは90%程度の MA 分離の効果を確認した。

以上により実施項目である(1)と(2)について、2 年目に行う炉心開発と諸量評価の定量評価に必要なデータと解析手法について見通しを得た。

* 中小型軽水炉：小型モジュール炉は、SMR と呼ばれ一般に 300 MWe 以下の原子炉を指し、700 MWe 以下の原子炉は中型炉を指す⁴⁾。

- 1) NMB code:Fuel cycle integrator
<https://nmb-code.jp/>
- 2) 岡村知拓, 西原健司 他, NMB4.0 ユーザーマニュアル,
JAEA-Data/Code 2021-016, March 2022
- 3) 2050 年カーボンニュートラルの実現に向けた検討、資源エネルギー庁, 令和 2 年 12 月 21 日
- 4) IAEA-TECDOC-1485, Status of innovative small and medium sized reactor designs 2005, IAEA, March 2006

10. その他の地層処分に関する調査研究

その他、高レベル放射性廃棄物、TRU廃棄物の地層処分に関する以下の調査研究を行った。

(1) 高安全・核セキュリティ及び低廃棄物処分負荷を同時達成する中小型軽水炉に関する研究

事故耐性燃料の一つであるケイ化物燃料を中小型軽水炉に装荷した場合の炉心核熱特性、核不拡散性、使用済燃料再処理、及び放射性廃棄物負荷低減効果を定量評価する2か年計画の初年度として、既往研究成果の調査と関連特性に関する予備解析を行った。

(2) 代替粘土材料を用いた埋戻し材料の小規模施工試験

国の基盤研究や原子力発電環境整備機構(NUMO)の技術開発で整備される埋戻し材の材料特性に係る基盤情報を補完・拡充することを目的として、代替粘土系材料(非膨潤性粘土材料)の埋戻し材としての適用性の評価に取り組んでいる。2021年度までの取組をとおして材料としての見通しが得られたことを踏まえ(期待する透水性能が得られる可能性)、施工性の確認に向けて、2022年度からの3か年計画で混合土の材料条件等をパラメータとした小規模な施工試験に着手した。

(3) 緩衝材及び埋戻し材を対象とした再冠水過程の評価

地層処分場の過渡期における性能評価の精度の向上に向けて、再冠水過程における緩衝材と埋戻し材の浸潤状況の把握及び浸透解析の妥当性の確認に資する実験データを取得・整備する計画である。3年計画の初年度である2022年度は、横置きPEM方式に着目して、PEM容器のバリエーション(設計仕様の違いによる浸潤環境/境界条件の違いやフィルタや多孔質媒体の有無)に留意しつつ、試験計画及び室内要素試験装置の設計を行った。

(4) ガス発生量の低減が可能な廃棄体パッケージ充填材の調査

廃棄体パッケージの内部充填材について、後打設方式での施工を前提とした、放射線分解による

ガス発生量の低減が可能な内部充填材の候補材料を選定し、これまでに得られている物性等のデータを調査するとともに、内部充填材として適用可能性を確認するにあたり必要な試験項目等を整理した。また、従来の低レベル放射性廃棄物の固化処理に利用されているポルトランドセメントをはじめとするセメント系材料と比較して、より発生量の低減できる可能性のある廃棄物の固型化材の候補材料について情報を収集した。

(5) 白金族元素(PGM) マネジメントを中心とした核燃料サイクル・ガラス固化に関する研究

核燃料サイクルの全体最適化・分野横断研究として、高レベル放射性廃液からPGM分離を技術オプションとしたMOX燃料、再処理、MA分離、ガラス固化、地層処分の影響について概念検討を行った。

(6) 高レベル放射性廃棄物等の安定化・高含有固化技術の研究

高レベル放射性廃液の仮焼体を用いた高含有固化方法について、模擬仮焼体の作製と粉末冶金法を利用した固化体の試作を行った。

(This page(p76) is intentionally kept blank.)

III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

1. 放射性廃棄物海外総合情報調査

◇事業の概要

放射性廃棄物（高レベル放射性廃棄物のほか、中・低レベル放射性廃棄物や原子力事故で発生した放射性廃棄物も含む。）の処分に係る技術情報として、国際機関における合意形成文書等の検討・策定状況、欧米やアジアの諸外国における処分政策や制度、研究開発、サイト選定（選定基準を含む）、処分事業・技術評価等の状況、法制度についての情報・データを収集し、原典、背景情報、主要文献の翻訳等から構成される総合的なデータベースとして整備を行うとともに、収集した情報等に基づいてホームページ、技術情報冊子等を通じて外部に向けて発信し、関係者間での情報共有と知識普及、幅広い国民各層への理解促進を図った。

なお、本事業は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「平成30年度放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物海外総合情報調査）（国庫債務負担行為に係るもの）」により実施したものである。

◇2022年度の成果¹⁾

(1) 諸外国における廃棄物処分の現状に関する海外情報の収集と総合的なデータベースの整備

欧米諸国の高レベル放射性廃棄物等の情報については、フィンランド、スウェーデン、フランス、スイス、英国、米国、カナダ、ドイツ、ベルギー、スペイン、ロシア等を中心に、各国の処分実施主体等からの直接的な情報収集も活用しつつ、法制度の整備状況、サイト選定のプロセス、選定基準、許認可申請・発給の状況、処分技術情報、情報提供・広報、社会的意思決定方策、地域振興方策、資金確保関係、関係する訴訟等の情報を収集した。アジア諸国に関しては、韓国、中国、台湾における放射性廃棄物処分の関連情報として、法制度の整備状況とともに、処分概念、サイト選定等の技術情報、資金確保関連、地域振興方策等の情報を収集した。さらに、原子力発電規模

が小さい国々で検討されている国際共同処分の状況に関する情報の収集を行った。

以上の調査に加えて、その他の個別情報の調査として、海外主要国における放射性廃棄物処分の関連法規制の詳細や、各国関係機関が発行する主要報告書等の調査を行った。

また、国際機関として、経済協力開発機構／原子力機関(OECD/NEA)、国際原子力機関(IAEA)、欧州連合(EU)等を対象とした最新動向を調査した。

以上の調査により得られた情報に加え、関連する法規制文書や関連報告書等をデータベースとして整備するとともに(図-1)、データベースの維持・管理、改良や機能拡充等を実施した。



図-1 データベース管理システムの画面例
(海外機関との情報交換協定等により限定的な利用形態を取っている)

(2) 情報の整理・発信・普及

上記(1)でデータベースとして整備した各種情報等を活用して、国の政策立案に必要な情報の取りまとめを行うとともに、一般への情報提供、関係者間での情報共有、知識普及を目的として、ウェブサイト、技術情報冊子等を整備した。

ウェブサイト「諸外国での高レベル放射性廃棄物処分」(https://www2.rwmc.or.jp)では、諸外国での進捗状況の理解を深めることを目的として、原子力発電の動向や使用済燃料／高レベル放射性廃棄物の発生や貯蔵など、処分前管理に関する情

報を充実させた（図-2）。

上記のウェブサイトにおいては、諸外国における地層処分計画と技術開発、処分事業に関わる制度・実施体制、処分地選定の進め方と地域振興、処分事業の資金確保、安全確保の取り組み・コミュニケーションの観点から最新情報と解説を掲載した。また、『海外情報ニュースフラッシュ』として、諸外国の高レベル放射性廃棄物処分を中心としたニュース記事を22件掲載した（記事タイトルの一覧は、資料V-4を参照）。



図-2 ウェブサイト「諸外国での高レベル放射性廃棄物処分」の閲覧イメージ
<https://www2.rwmc.or.jp>

技術情報冊子の整備として、①『諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について（2023年版）』（図-3：左）と②『諸外国における放射性廃棄物関連の施設・サイトについて（2023年版）』（図-3：右）の2種類の資料を作成した。

技術情報冊子①（2023年2月発行）は、諸外国における高レベル放射性廃棄物の地層処分の進捗状況に関する情報を体系的に整理・解説するこ

とにより、地層処分の理解促進に資することを目的とした資料である。誰でも利用できるように難しい表現をできるだけ避け、諸外国の状況や多様な取り組みがわかるように配慮している。具体的には、地層処分概念や施設設計、処分事業の計画や進捗のみならず、法制度、資金確保、サイト選定の進捗や地域振興などの幅広い観点から、当該国での地層処分事業の特徴について解説している。2023年版では、主要8カ国（フィンランド、スウェーデン、フランス、スイス、ドイツ、英国、カナダ、米国）の各々を各編とした構成として、また、中国、韓国、ロシアの地層処分に関する動向を短く解説したページを付録としてまとめ、2022年末時点の最新情報を反映して作成した。

技術情報冊子②（2023年3月発行）の改訂では、欧米8カ国（フィンランド、スウェーデン、フランス、スイス、ドイツ、英国、カナダ、米国）に、中国、韓国、ロシアを短く解説したページを加え、低中レベル放射性廃棄物を中心とした放射性廃棄物の管理概要や処分関連施設・サイトの概要に関する情報を最新化した。また、各国における放射性廃棄物の区分、放射性廃棄物処分の方針、処分の実施体制の項目を新たに設けて解説を加え、記載内容を充実させた。

これら2つの冊子のPDF版をウェブサイト「諸外国での高レベル放射性廃棄物処分」に掲載した。



図-3 2022年度に整備した技術情報冊子

- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成30年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物海外総合情報調査報告書（2022年度分）、2023

2. 放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務

2-1 事業の全体概要

我が国では、原子力発電の利用に伴って既に放射性廃棄物が発生しており、その処理処分対策を着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物の地層処分や TRU 廃棄物をはじめとする低レベル放射性廃棄物の処理処分等に係る政策立案や研究開発については、国や関係機関、処分実施主体等が適切な役割分担のもとで進めていくことが重要である。また、地層処分事業は 100 年規模で継続されるものであり、長期にわたる人材の確保・育成が重要となる。

これらの背景を踏まえて、本事業では、高レベル放射性廃棄物の地層処分を中心とした萌芽的・先進的な研究開発を実施し、地層処分実施主体が将来処分事業を進めるにあたり必要な知見を整備することを目的としている。なお、本事業は、萌芽的・先進的な研究開発の実施などを通じた幅広い分野の研究者・技術者の人材育成に資することを念頭に 2019 年度から 2022 年度までの 4 か年で実施してきたものである。

具体的な実施内容は、以下の 2 つである。

- ▶ 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の進捗管理・成果の取りまとめ等
- ▶ 人材育成プログラムの作成・実施

以降に上記の 2 項目の実施内容の概要を示す。

(1) 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の進捗管理・成果の取りまとめ等

本事業では、大学等の研究機関に委託した地層処分に関する萌芽的・先進的かつ重要な研究開発テーマの実施に関する進捗管理と成果の取りまとめや所定の研究開発資金の配賦を実施している。具体的には、2020 年度に選定し、2021 年度から 2 か年で次の 7 つの研究開発テーマについて、地層処分に係る地質環境、工学技術、安全評価等の専門的な知識を有する委員からなる評価委員会を設置し、研究テーマの実施状況についてチェックアンドレビューを行うとともに、研究期間の最終年度にあたる 2022 年度では、この 2 か

年の研究内容の取りまとめを行った。

- ①沿岸部に近接して施工された処分パネルの掘削時から操業時までの健全性評価に関する研究（研究者：山口大学 林 久資）
- ②長期的変質現象を考慮したベントナイト系緩衝材の自己修復性評価手法の構築およびベントナイトの膨潤特性における膠結作用に伴う年代変化の定量評価（研究者：早稲田大学 伊藤 大知）
- ③化学的変質によるベントナイトの性能劣化が天然バリアの物性に及ぼす影響評価とそのモデル化（研究者：鳥取大学 河野 勝宣）
- ④ベントナイトのセメンテーション現象のナチュラルアナログ研究（研究者：北海道大学 菊池 亮佑）
- ⑤粘土鉱物におけるアクチノイド系列放射性核種についての吸着・脱離特性および存在状態の解明（研究者：筑波大学 向井 広樹）
- ⑥数値解析と実測に基づく結晶質岩体を対象とした亀裂部一岩体基質部の複合的地下水理構造モデルの構築（研究者：京都大学 久保 大樹）
- ⑦隆起・侵食の評価技術の高度化：(U-Th)/He 年代測定法の年代標準試料の探求（研究者：日本原子力研究開発機構 福田 将真）

各研究の進捗管理のために評価委員会を年 2 回開催し、第 1 回（第 2 四半期）では年間計画を、第 2 回（第 4 四半期）では研究成果を確認した。各研究開発テーマと 2022 年度成果の概要及び 2 か年の取りまとめは 2-2 を参照のこと。

(2) 人材育成プログラムの作成・実施

地層処分事業の着実な遂行に向けては、研究開発分野と地層処分の実施主体ともに、地質学、土木工学や放射線化学等、幅広い専門的な知識を有する人材（ジェネラリスト）が必要不可欠である。しかし、我が国の当該分野におけるジェネラリストの育成プログラムは存在しない。このため、本事業では、長期にわたる地層処分事業を、研究開発と事業実施の両側面から支える人材を育成するプログラムの調査・作成を実施するが目的である。

具体的には、以下の方針などに従い、地層処分

に係る講習会や研修会の実施、人材育成プログラムの更新を繰り返し行い、4か年の事業実施期間中に、学習資料や学習指導要領のような形式の最終的な人材育成プログラムを作成した。

- ▶ 講習会や研修会は年間 3～4 日程度実施した（受講者数としては、20～40 名を想定）。
- ▶ 毎年度、講習会や研修会の結果についてアンケート等により理解度等を把握し、その結果に基づき問題点の洗い出し、解決策を立案した。
- ▶ 上記結果や実施内容に関する有識者委員会からの助言に基づき、個々に専門性を有する受講者に対する最適なジェネラリスト育成プログラムを作成・改善した。

本事業の初年度であった 2019 年度には、以下の機関の有識者からなる「地層処分スキルアップ研究会」を設置し、検討を開始した。

- ▶ 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）
- ▶ 国立研究開発法人産業技術総合研究所（AIST）
- ▶ 一般財団法人電力中央研究所（CRIEPI）
- ▶ 原子力発電環境整備機構（NUMO）
- ▶ 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター（RWMC）

2019 年度には、地層処分スキルアップ研究会の構成機関の講師の派遣等の協力を得たうえで、座学を中心とした 3 日間にわたる集中型の人材育成セミナーを開催した。地層処分研究開発の主要 3 分野である、地質環境調査、工学技術、安全評価をカバーする講義に加え、技術コミュニケーションに関する招待講演やグループワークで構成したもので講師を含め約 60 名が参加した。

2019 年度のセミナーへの参加者及び講師などから得たフィードバックから、各分野の若手専門家は自身の研究成果と他分野との関係性を俯瞰する能力や機会を欲しており、他分野の専門家の話を「聞く」だけでなく「会話」寄りの直接的な意思疎通を通じて学ぶやり方を好む傾向が見られた。



図-1 グループワークの様子

2019 年度のセミナーの結果を踏まえ、地層処分の専門家となるべき人材は、各分野の地層処分事業との関連性や異分野間連携の必要性への理解が必須であるとの考えから、2020 年度からは、以下の 2 つの方針で実施していくこととした。

1. 類似の教材や取り組みが存在しないと考えられる、地層処分に関する知識習得だけでなく、その活用能力等を養う教材の作成
2. 異なる背景・専門分野を有す受講者間で意見交換・議論等を行うことにより、セミナーテーマだけでなく、異なる分野間の協働等について能動的な学習を可能とする、受講者が十数名程度の小規模のセミナーの開催（図-1）

2020 年度には、地下水（地質環境）をテーマとした人材育成セミナーを開催した。2021 年度は、テーマを地下研究施設での研究開発に変えて、アクティブラーニング形式でのセミナーをオンライン形式で開催した。また、引き続き教材の開発を進めた。

2022 年度は、安全評価技術をテーマとして、JAEA の幌延深地層研究センターの見学を含めたセミナーを開催した。また、教材については試作版を完成させた。2022 年度の実施内容の詳細及び 2019 年度から 4 年間の成果概要は 2-3 を参照のこと。

なお、本事業は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「平成 31 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務）（国庫債務負担行為に係るもの）」により実施したものである。

2-2 萌芽的・先進的かつ重要な研究開発の進捗管理・成果のとりまとめ等

◇2022 年度の成果¹⁾

(1) 進捗管理・成果のとりまとめ等

2020 年度に選定し、2021 年 4 月より 2 か年の予定で研究を開始した 7 件の研究開発テーマについて、進捗管理と成果の取りまとめや所定の研究開発資金の配賦を実施した。具体的には、大学等の有識者で構成される評価委員会を設置し、2022 年度の研究開発内容・進捗状況に関するチェックアンドレビューを中間報告（9 月）及び 2 か年の研究成果報告（2 月）の 2 回、オンライン会議形式にて実施した。また、研究実施者との間で電子メールや対面会議による意見交換等を行うことによる進捗管理も実施した。さらに各研究テーマについて 2 年間の研究成果の概要を総括資料として取りまとめた。

各研究テーマの概要と 2022 年度の成果概要を以下に示す。

1) 沿岸部に近接して施工された処分パネルの掘削時から操業時までの健全性評価に関する研究（研究者：山口大学 林 久資）

地層処分施設の坑道は閉鎖までに数十年の期間にわたり維持管理が必要であり、また施設が沿岸部に建設された場合は地下水の塩分が影響を及ぼす可能性がある。本研究は、地層処分施設の処分坑道を対象とし、塩水系地下水を伴う空洞内湧水の影響も含めた地下空洞と処分施設の力学的な長期安定性を解明することを目的とする。

2022 年度は、塩水系地下水によってトンネルの鋼製支保工が腐食減耗した際の影響を把握するために、鋼製支保工の減耗を模擬した載荷実験を行った。また、鋼製支保工の減耗が坑道安定性に及ぼす影響の把握を目的として、軟岩地山内に建設される処分坑道を模擬した坑道の掘削解析及び減耗を考慮した鋼製支保工の応力解析を実施した。さらに、沿岸海底下等に処分場が建設される場合の坑道内附帯設備及び覆工（支保工）などへの塩害の程度を明らかにするために、高湿度・塩分環境下での処分施設に用いられる可能性があるレールに対する腐食試験（恒温恒湿腐食試験）を実施した。

鋼製支保工の減耗を模擬した載荷実験については、減耗の影響を考慮して H 型鋼の下フランジ厚さが異なる鋼製支保工とコンクリートの合成構造物を対象として載荷実験を実施した。その結果、最も健全な鋼製支保工の状態において終局耐力が最大となり、下フランジの厚さが小さくなるにつれ、終局耐力も低下した。塩害腐食によって下フランジが 1/2 まで減耗した場合、健全な鋼製支保工と比べ耐荷力が約 6 割に低下することが示唆された。

鋼製支保工の減耗による坑道安定性への影響に関する数値解析の結果については、減耗の程度が顕著なほど鋼製支保工の内縁側・外縁側の圧縮応力が卓越すること、またその傾向は地山等級が低下するほど顕著になることが明らかとなった。また、地山等級が良好な場合や鋼製支保工が健全な場合には、鋼製支保工は地山からの荷重を軸力によって受け持つ一方で、地山等級が低下した場合や鋼製支保工が不健全な場合には、鋼製支保工に対して、軸力に加えて曲げモーメントが発生することが示唆された。

塩害に関するレールを対象とした腐食試験（恒温恒湿腐食試験）では、レールのさび厚の測定及び減耗量の測定を行った。その結果、日平均飛来塩分量 $0.2\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ の条件で塩分を噴霧したレールは、すべての測定箇所において概ね経時的に平均さび厚が増大し、レールの頭頂部、脚部、腹部の順に平均さび厚が大きくなる結果が得られた。レールの減耗量を調査した結果、塩分を噴霧したレールは、実験開始から 173 日経過後に約 $30\sim 35\mu\text{m}$ 腐食減耗した。その一方で、塩分を付着させないケースでは約 $10\mu\text{m}$ 以下の減耗量にとどまる結果となった。本研究では、鋼製の材料としてレールを用いた実験を行ったが、今後は鋼製支保工の腐食減耗による影響について検討することが課題である。

本研究では、地下坑道と同様の工法で施工される道路トンネルの維持管理状態が周辺の地質の種類、土かぶり厚さ、経年などと相関があることを明らかにし、さらに地下施設で使用される鋼製支保工が腐食減耗した場合に耐荷力が低下する可能性を明らかにした。今後は沿岸部に建設される地下施設において、塩水系地下水が地下施設の鋼材腐食に及ぼす影響をより定量的に評価するとともに、それが沿岸部地下に建設される坑道安

定性に及ぼす影響を統合的に明らかにすることが課題となる。

2) 長期的変質現象を考慮したベントナイト系緩衝材の自己修復性評価手法の構築及びベントナイトの膨潤特性における膠結作用に伴う年代変化の定量評価（研究者：早稲田大学 伊藤大知）

本研究では、ベントナイト系緩衝材の膠結作用（こうけつきよう：セメンテーション）^{*}に伴う変質現象をベントナイト鉱床の生成過程の一部とみなし、ベントナイト原鉱石を用いて、緩衝材の膠結作用に伴う変質とそれに伴う特性変化を定量的に評価する。さらに、それらを考慮した緩衝材の自己修復性評価手法を構築・提案することを目的とする。

^{*}シリカ等のベントナイトの含有鉱物が溶解し、間隙内で再結晶化して土粒子同士を固着させる現象。

2022年度は、白崎産、・細越産、・黒石産の3種類のベントナイト原鉱石を対象として、不攪乱供試体の膨潤圧及び膨潤変形率について追加計測を実施した。また、月布産、Ten Sleep（アメリカ合衆国ワイオミング州）産、劉房子（中華人民共和国吉林省）産原鉱石を対象として、地質年代に代わる代替指標の模索の一環として、非破壊力学試験である弾性波試験を実施した。膠結作用のメカニズムの追究に向けては、これまでの月布産原鉱石の不攪乱試料に加えて、2022年度は新たに月布産原鉱石の再構成試料や、Ten Sleep産、及び地質年代の古い劉房子産原鉱石の不攪乱試料・再構成試料について薄片試料を作製し、走査電子顕微鏡（SEM）観察を通して粒子構造や含有鉱物の観点から考察を行った。さらに、以上の成果を統合し、自己修復性評価手法の高度化について検討した。

白崎産、細越産、黒石産の不攪乱供試体の膨潤圧試験の結果、すでにデータが得られている再構成供試体と比較して、膨潤圧特性が膠結作用の影響により約 1/2 以上低下することが明らかとなった。この結果はこれまでに実施した Na 型ベントナイト原鉱石の膨潤特性の結果と同様の傾向となった。また、膨潤変形特性については、特に白崎産、細越産原鉱石の不攪乱試料において一次元膨潤変形率が著しく低くとどまる傾向が見ら

れた。

月布産、Ten Sleep産、劉房子産の3種類の原鉱石を対象とした弾性波試験の結果、P波・S波速度のいずれも再構成供試体と比較して不攪乱供試体の方が速く、不攪乱供試体の内部構造が緻密であることを示す結果が得られた。しかし、3種類の供試体の弾性波速度と年代や膨潤特性の間で明確な相関がみられなかったことから、弾性波速度は地質年代に代わる代替指標の候補とはならないことが示唆され、今後他の代替指標を模索することが課題となる。

不攪乱試料・再構成試料の薄片試料についてSEM観察とエネルギー分散型X線分光法（EDS）分析を行ったところ、粒子・鉱物構造として不攪乱供試体の方がマイクロ・マクロの両方の視点で見ても緻密であることが示された。また、EDS分析による元素マッピングの結果から、膠着物質としてシリカ系鉱物が有力であることが示唆された。

膨潤特性実験結果に基づき、時間経過による緩衝材中における膠結作用の発生等の緩衝材の状態変化シナリオと、本研究で得られた拘束圧－乾燥密度の関係を組み合わせることで、膠結作用に伴う特性低下を考慮した緩衝材の自己修復性評価手法を提案した。本手法を基に、緩衝材の自己修復性に関する長期的な膠結作用を考慮した設計が可能となる。

3) 化学的変質によるベントナイトの性能劣化が天然バリアの物性に及ぼす影響評価とそのモデル化（研究者：鳥取大学 河野 勝宣）

地層処分において、岩盤亀裂へのベントナイト系材料の侵入現象により岩盤の透水性などが大きく変化し、長期安定性に影響を与える可能性がある。本研究では、岩盤亀裂へのベントナイト系材料の侵入量を予測し、また、それに対する地下水の化学成分の影響を明らかにすることを目指した。特にベントナイト系材料の劣化に伴う岩盤亀裂充填性のモデル化を行う。さらに、人工バリアと天然バリアの相互作用関係から、化学的作用によるベントナイトの性能劣化と岩盤の亀裂閉塞による性能向上の関係性を明らかにすることを目的とする。

2022年度は、ベントナイトの膨潤特性と透水特性に及ぼす化学的作用の影響を明らかにするために、各種溶液環境下における膨潤・充填性同

時試験及び透水試験を昨年度に引き続き実施し、ベントナイトの膨潤圧、隙間充填量及び透水係数を取得した。また、長期的な岩盤へのベントナイト侵入挙動を予測するための岩石亀裂充填性モデルの構築を行った。さらに、化学的作用を促進させたベントナイトで充填された亀裂を含む岩石の透水試験を行った。

膨潤・充填性同時試験及び透水試験については、NaCl 水溶液 (1.0 または 0.6 mol/L) 及び国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 (JAEA) 幌延深地層研究センターで採取された地下水を用いて試験を行った結果、いずれも精製水に浸漬させた条件と比較してベントナイトの膨潤圧と侵入距離が小さくなることが分かった。そのため、これらの地下水環境下では、亀裂等の隙間をベントナイトが充填する効果は小さくなることが示唆された。また、膨潤・充填性同時試験より得られた結果から、ベントナイトの平衡膨潤圧、亀裂侵入距離、亀裂開口幅と材料に依存する比例定数の間には、非常に強い相関関係があることがわかった。

ベントナイト試料の透水試験では、各種溶液に浸漬させたベントナイトの透水係数は、精製水に浸漬させたベントナイトに比べて高くなることが分かった。このことから、ベントナイト系材料が地下水の化学的作用の影響により、透水性が上昇するとともに、接触する地下水の水質によってその劣化度合いが異なることが示唆された。

ベントナイト試料の岩石亀裂充填性のモデルの改良については、経時変化する外部膨潤圧及び侵入流体 (ベントナイト) の粘度を、それぞれ時間の経過とともに指数関数的に上昇または低下するように定式化することで、侵入量予測に関する支配方程式に組み込むことを試みた。解析的検討を行った結果から、地層処分における長期的なベントナイトの侵入は、亀裂中のベントナイトの封入流体吸収・拡散に起因する挙動と考えられた。このことから、構築した閉口流路内の流体侵入に関する支配方程式が、地層処分における亀裂中のベントナイトの長期的な侵入挙動を表す可能性があることが示唆された。

化学的作用を促進させたベントナイトで充填された亀裂を含む岩石の透水試験では、幌延泥岩及び万成花崗岩試料を用いて、ベントナイト試料で充填された亀裂を含む岩石の透水試験を実施した結果、岩石の種類によらず各種溶液浸漬ベ

ントナイトで充填された亀裂を含む供試体の透水係数は、いずれも巨視亀裂を含む供試体よりも小さい値を示した (図-1)。この原因として、透水性の低下は巨視亀裂がベントナイトによりシーリングされたことによるものと考えられた。これらの結果から、亀裂を有する岩石の透水性は高いものの、割れ目が緩衝材 (ベントナイト) でシーリングされることで透水性が低下すること、またその低下度合いが地下水の化学的作用の影響によって異なることが示唆された。

本研究では、化学的作用によるベントナイトの性能劣化 (主に膨潤特性、透水性、亀裂侵入特性) を実験的に明らかにするとともに、ベントナイトの性能劣化と岩盤の亀裂閉塞による性能向上の関係性の一端を明らかにした。今後、亀裂に侵入したベントナイトの密度分布のより詳細な物性評価等を検討することにより、緩衝材の特性変化による天然バリアの透水性変化に関するシナリオ構築や数値解析に基づく長期変遷の予測シミュレーションの精度向上に資することが期待できる。

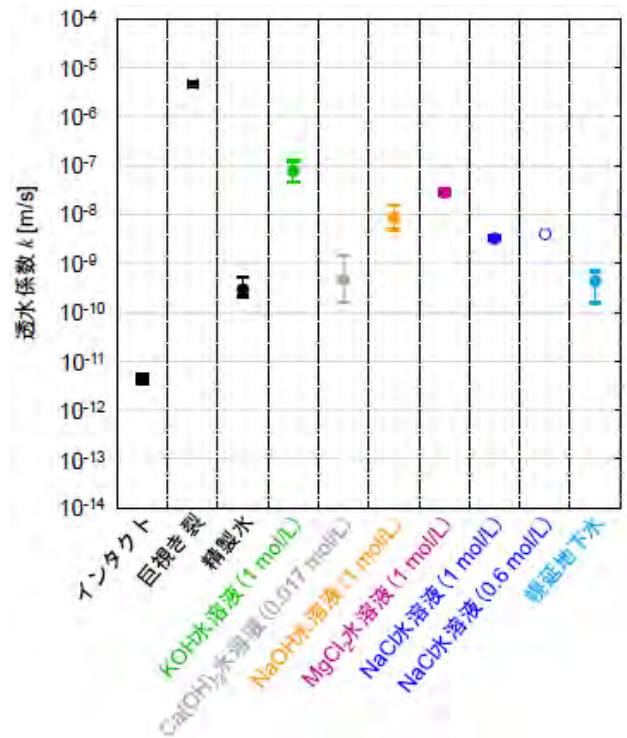


図-1 各種溶液浸漬ベントナイトで充填された亀裂を含む万成花崗岩の透水試験結果

4) ベントナイトのセメンテーション現象のナチュラアナログ研究（研究者：北海道大学 菊池 亮佑）

人工バリアの一つとして考えられているベントナイト緩衝材中に含まれる膨潤性のモンモリロナイト鉱物は、地層処分場の環境において、粒子同士の固着が進行する現象、すなわちセメンテーションが発生し、膨潤性などの物性に影響を及ぼす可能性が考えられる。本研究では、山形県月布鉱山から得られる複数のベントナイト原鉱石を、長期間天然環境においてセメンテーションを被った緩衝材のアナログ物質としてとらえ、ベントナイト原鉱石のセメンテーション物質の同定とその多様性を調査し、膨潤圧低下といった基本特性に影響を与えるメカニズムやセメンテーションの進行過程について検証を行うことを目的とする。

2022 年度は月布鉱山の周辺における同一のベントナイト層内での不均質性の評価を行うために、ベントナイト原鉱石のサンプリングを追加実施し、セメント物質の成因を推定するために採取した試料の鉱物学的分析を実施した。また、鉱物組成の分析と併せて、各ベントナイト原鉱石に含まれる鉱物の産状・組織を観察した。さらに、鉱物組み合わせ、カソードルミネッセンス法による分析、微量元素の組成や酸素水素同位体比からベントナイトの経験温度や出発物質である火山灰の化学組成の推定について検討した。

月布鉱山周辺で採取したベントナイト原鉱石について X 線回折分析、偏光顕微鏡・走査型電子顕微鏡観察を行った結果、天然の同一のベントナイト層内でも上盤側から下盤側にかけて沸石相の変化やモンモリロナイト量の変化が確認された。特に下盤側ではモンモリロナイト量が少なく、空隙が目立ち、その一部が方解石によって充填されている組織が見られた。原鉱石を加圧酸分解し微量元素を質量分析した結果、ベントナイト層間及び層内で微量元素のパターンは類似した結果となったことから、層内のモンモリロナイト量や空隙等の違いは出発物質の火山灰の化学組成ではなく、構成粒子の粒径や、堆積後に反応する海水との混合率に影響されている可能性が示唆された。

ベントナイト原鉱石の大部分を占めているモンモリロナイトと、粗大な石英粒子とは別に存在

しているシリカ微粒子について、その粒子の起源や形成メカニズムを明らかにするために、粗粒石英及びシリカ微粒子を対象にカソードルミネッセンス法による測定を行った（図-2）。その結果、火山岩由来の粗粒石英と異なり、シリカ微粒子はより低温の続成過程において形成されたことが示唆された。

経験温度の推定のために必要な情報である酸素同位体比について、同位体測定のために酸素を効率的に CO ガス化するため、フッ素化合物との反応性を向上させる検討を行った。7 種類のフッ素化合物による CO ガスの発生効率・収率や作業性を考慮した結果、NaF が最も適していることが分かった。改良した測定の結果、スメクタイトについては酸素の収率が 90% 前後まで向上したものの、石英の測定や正確な酸素同位体比の測定には、更なる反応性の向上が今後の課題となった。

本研究により、ベントナイト原鉱石を固結させている普遍的なセメント物質は、モンモリロナイト中に短鎖状あるいはクラスター状に産する微細なシリカ粒子であり、そのようなシリカ微粒子がより低温の続成過程において形成されたことが示唆された。今後は、これらの原鉱石を用いた物性試験を実施することにより、セメント物質の量比や種類の違いによる緩衝材に期待される諸性能（膨潤圧・透水性など）に与える影響を定量的に評価することが課題である。

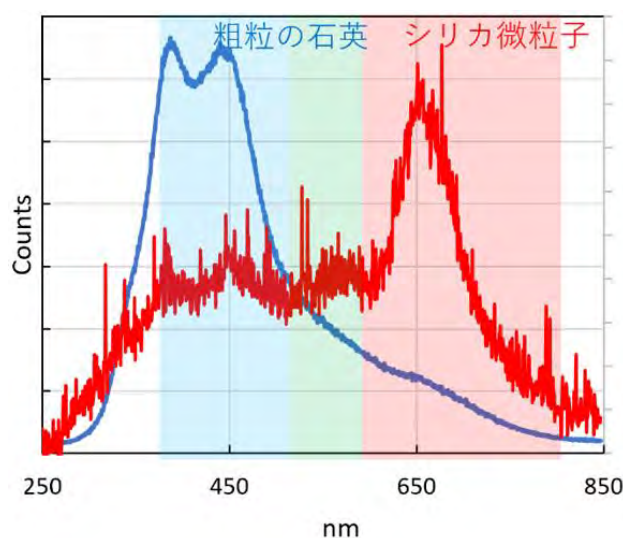


図-2 ベントナイト原鉱石中の粗粒石英とシリカ微粒子のカソードルミネッセンススペクトル

5) 粘土鉱物におけるアクチノイド系列放射性核種についての吸着・脱離特性及び存在状態の解明 (研究者: 東京大学 高橋 嘉夫) *

*本研究テーマは 2020 年度に筑波大学に所属していた向井広樹氏が提案・応募し、選考を経て採択され、2021 年度から向井氏が研究を実施していたが、2022 年度に向井氏が東京大学へ異動し、諸事情により研究代表者が変更となった。

高レベル放射性廃棄物の地層処分に關して、ガラス固化体に含まれている核種の中でアメリシウム (Am-241)、ネプツニウム (Np-237) といった潜在的有害度が高いアクチノイド系列の放射性核種の環境中での挙動に關する既往研究は比較的限られている。本研究ではアクチノイド系列放射性核種の環境中での挙動について理解するため、特に各種の粘土鉱物におけるこれらの元素の吸着・脱離能や存在状態について明らかにすることを目的とする。

2022 年度は、Am のアナログとしてユウロピウム (Eu) を用いて、粘土鉱物における Eu の脱離挙動を明らかにするために、多様な電解質溶液を用いて Eu の脱離実験を行った。また、Eu の粘土鉱物における詳細な分布について直接的に明らかにするために、Eu を比較的高濃度で吸着 (10^{-3} mol/L) させた粘土鉱物試料を対象として、電子プローブマイクロアナライザ (EPMA) 及び透過型電子顕微鏡 (TEM) による観察・分析を行った。さらに放射性核種 (Eu-152) を用いて、黒雲母を対象として極低濃度下 (10^{-7} mol/L) で Eu の吸着脱離実験を行った。

Eu を吸着させた各粘土鉱物に対して脱離試験を実施した結果、カオリナイトが他の粘土鉱物に比べてはるかに高い脱離率を示し、また、ハイドロバイオタイトが特に低い脱離率を示した。また、0.1mol/L KCl、0.1mol/L シュウ酸の順番による逐次脱離実験では、最初の 0.1mol/L KCl による Eu の脱離はカオリナイトが大きく、ハイドロバイオタイトからの脱離は特に低い結果となった。0.1mol/L シュウ酸の場合は、カオリナイトとモンモリロナイトからほぼすべての Eu が脱離し、黒雲母、ハイドロバイオタイトからも 80~90% 程度の Eu が脱離した。

Eu を吸着させた粘土鉱物を EPMA で元素マッピングしたところ、pH6.5 における吸着では、黒雲母の場合は、粒子の端付近に Eu が濃集している様子が見られた。一方で、ハイドロバイオタイト

では、黒雲母のように端に濃集していることに加えて、粒子内部まで Eu が侵入している様子が見られた。しかし、pH8.5 付近での吸着の場合では、Eu はハイドロバイオタイト粒子内部には侵入せず表層にのみ濃集していることが明らかとなった。

同様に Eu を吸着させた粘土鉱物を TEM で観察し、走査透過型電子顕微鏡-エネルギー分散型 X 線分光法 (STEM-EDS) で元素分析を行ったところ、黒雲母の場合は、粒子端部においてはおよそ Eu が均質に検出された。また、ハイドロバイオタイトの元素マッピングの結果から K と Eu が逆相関していることがわかった。ハイドロバイオタイトは、黒雲母とバーミキュライトの規則的混合層を形成するため、Eu は特にバーミキュライト層の層間に選択的に侵入していることが示唆された。

Eu-152 を用いた、黒雲母を対象とした極低濃度下で Eu の吸着脱離実験の結果、Eu を pH 6.5 で黒雲母に収着させたところ、オートラジオグラフィ画像から、およそ粒子の端部を中心に Eu-152 がよく濃集していることがわかった。このことから、極低濃度下の Eu の吸着挙動は、Eu 濃度が高い条件での EPMA や STEM-EDS で観察された吸着実験結果と調和的であり収着サイトが変わらないことが示唆された。

本研究により、各種粘土鉱物における Eu の存在状態について多くの知見を得ることができたが、今後は実際に Am-241、243 といったアクチノイド核種を用いて Eu との挙動を比較することが課題である。また、放射性核種の移行について予測する上で鉱物の収着サイトでの長期的な吸着挙動や、地下 300 m 以深での圧力条件下での吸着挙動について知見を得ることも課題となる。

6) 数値解析と実測に基づく結晶質岩体を対象とした亀裂部-岩体基質部の複合的地下水理構造モデルの構築 (研究者: 京都大学 久保 大樹)

地層処分施設周辺の地下水流動の把握に係る地下水理構造モデルでは、断層や透水性亀裂が重視されるが、長期の時間スケールを対象とする場合に、マイクロクラックや鉱物粒界で生じる岩体基質部の透水性が広域地下水流動に及ぼす影響については不明な点が多い。本研究は、亀裂部と岩体基質部の水理特性を統合した水理構造モデルを構築することを目的とする。特に亀裂構造が

重要な要素となる結晶質岩体を対象とし、亀裂モデリング手法の開発と、岩体基質部における透水性の定量化手法を数値解析と実測を通して実施する。

2022年度は、岩体基質部の水理特性を明らかにするために、2021年度に改良したパーミアメーターを用いて JAEA 瑞浪超深地層研究所で採取されたボーリングコアを対象として浸透率の測定を行った。また、亀裂モデルと水理試験データの統合による水理構造モデルの構築を行った。さらに、構築された水理構造モデルを用いて広域地下水流動解析を実施し、対象地域の既知の情報と比較することにより妥当性の検証を行った。

瑞浪地域のボーリングコアのパーミアメーターによる浸透率測定については、ひとつのコア試料につき10~20点の計測を実施した。得られた浸透率を透水係数へ変換し、3D スキャナを用いたコア試料の体積測定と乾燥重量から求めた計測密度を比較したところ、両者は負の相関を示した。この結果から、密度が大きい=空隙が少なく浸透率が小さいという一般的な解釈と合致する結果が得られ、また、パーミアメーターによるコア試料の複数点の浸透率測定によって、ボーリングコア全体の代表的な浸透率をある程度妥当に示すことができることが示唆された。

亀裂モデルと水理試験データの統合による水理構造モデルの構築については、ボーリングコアが採取された瑞浪超深地層研究所のMIU-2、3、4号孔を対象として、既存のボーリング検層データ（岩石・亀裂密度）と水理試験データに実測データを加え、重回帰分析を行うことで、岩石密度と開口亀裂密度を説明変数として透水係数を求める回帰式を得た。この回帰式を、岩石密度・開口亀裂密度の空間分布モデルに適用することにより、亀裂・岩体基質部の構造を統合した複合的かつ広域的な地下水理構造モデルを構築することができた。

水理構造モデルを用いた広域地下水流動解析については、物理検層データと水理試験値を用いた重回帰式から得られた透水係数分布モデルを用いて、瑞浪地域を対象として地下水流動解析を実施した。その結果、北→南方向のセル間流量を抽出し表示したモデル分布は、対象地域の標高分布に基づいて推定される北東部から南方向への主要な流動方向と整合した結果となった。また月

吉断層の東側を境界としてその連続性が遮断されていることから、断層が遮水性境界として機能していることが示唆された。一方、月吉断層西側の深部は比較的大きい南方向の流動が確認できたが、今回の検討により、断層下部側に存在する多数の空隙を持つ領域が流路を形成し、影響していることが明らかとなった。

本研究により、比較的取り扱いの容易なプローブ型浸透率測定器によるボーリングコアの浸透率測定の有効性が示され、かつ取得が容易な岩石密度との組み合わせによってより大きなスケールの透水係数取得に活用できる可能性を示した。これらの手法は概要調査段階で取得できる水理地質情報の高密度化に寄与することができ、特にコストや用地確保の課題の大きい詳細ボーリング調査本数の削減につながることを期待される。

7)隆起・侵食の評価技術の高度化：(U-Th)/He年代測定法の年代標準試料の探求（研究者：日本原子力研究開発機構 福田将真）

地層処分において、地質環境の長期安定性の評価は、将来の処分サイトの選定やリスク評価等の観点で重要である。したがって、長期安定性評価に貢献可能な調査手法や評価技術の開発及び高度化が望まれる。特に隆起・侵食評価手法の一つとなりうる熱年代法の内、ジルコン(U-Th)/He法（以降、ZHe法）は、様々な地質体に対して適用可能であり、閉鎖温度（鉱物中の測定対象元素の出入りがない状態となった温度）が200~160℃程度で、従来の手法よりも低温である特徴を持つ。対象となる年代の範囲は数十万年~千万年スケールであり、比較的低温での冷却履歴が推定可能であることから、断層運動や隆起侵食などの温度変化を伴う幅広い地球科学的現象の推定に応用可能である。一方でHe法は年代標準試料が国際的にも未確立の状態である。本研究では、年代標準試料の候補として期待される複数のジルコン試料に対して、He年代分析に基づいて個々の粒子年代のばらつきを定量的に評価することで年代標準試料としての適性を検証し、ジルコンHe法（ZHe法）の年代標準試料の確立を目的とする。

2022年度は、標準試料の候補6試料の内、前年度に分析した2試料以外の4試料(MtDromedary、OD-3、鷲走ヶ岳月長石流紋岩(WSF1)、濃飛流紋岩

(Site-43)) について、1 試料当たり 30 粒子程度のジルコンを精選して ZHe 年代分析を実施した。また、昨年度において分析し、標準試料としての適性が高いと見込まれている歌長流紋岩 (TRG04-21) の試料について、JAEA での分析も含めて複数の研究機関におけるデータ比較を通して信頼性を検証するラウンドロビンテストのための追加試料採取を行った。さらに、ZHe 年代のばらつきの要因を解明するために、単粒子年代と放射線損傷や幾何学パラメータ (粒径など) との相関関係について検討した。

4 試料の年代分析の結果、Mt. Dromedary: 95.34 ± 2.37 Ma、OD-3: 29.76 ± 2.44 Ma、WSF1: 17.77 ± 1.05 Ma、Site-43: 50.59 ± 2.93 Ma の年代値が得られた (Ma は百万年、また誤差範囲は 95% 信頼区間を示す)。サンプルごとの単粒子年代のばらつきを示す MSWD (Mean Square of Weighted Deviates) 値は、それぞれ、1.24、12.1、5.38、5.67 であった。OD-3 については MSWD 値が 10 を上回っており、単粒子年代のばらつきは大きいと判断された。

有力な年代標準試料候補の TRG04-21 の追加試料採取については、同一の地点の露頭で 100 kg 程度のサンプリングを実施し、その内 21 kg 程度の地質試料について鉱物分離を行った。その結果、1.154 g のジルコンを抽出でき、十分量を確保した。JAEA の分析装置の不具合のため追加の ZHe 分析は実施できなかったが、今後、JAEA での分析とともに、国外の研究機関に送付し分析条件の異なるラボ間での年代の均質性を評価することが課題である。

年代のばらつきの要因について考察するため、ジルコン粒子の放射線損傷及び粒径と単粒子年代との相関関係について検討したところ、両者とも有意な相関が無かったため、ばらつきについては試料特有の熱履歴などの別の要因である可能性が示唆された。

以上の結果から、候補 6 試料の中で、歌長流紋岩から分離した TRG04-21 が ZHe 年代標準試料として最も適当であり、次いで Mt. Dromedary についても適性が認められた。今後は詳細な化学組成分析や包有物の特定などの評価を含めて、標準試料ジルコンとしての適性についても検討を深めていくことが課題である。

- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 31 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務 報告書 (2022 年度分)、2023

2-3 人材育成プログラムの実施・作成

◇2022 年度の成果¹⁾

本事業は 2019 年から 4 か年計画で実施した。2020 年度～2022 年度の 3 か年においては、以下の 2 つの項目を実施した。

- ▶ 独学のための教材の作成
- ▶ アクティブラーニング形式を取り入れた人材育成セミナーの開催

以下に、「独学のための教材の作成」及び「アクティブラーニング形式を取り入れたセミナーの開催」に関する 2022 年度の成果をまとめ、4 年間の成果及び今後の課題を示す。

(1) 独学のための教材の作成

地層処分に係る独学のための教材作成については、2020 年度に、以下の 2 種類を作成することとして検討を開始した。

- ① 地層処分に関するリテラシー育成教材（以下、リテラシー教材）
なぜ地層処分をするのか、どのように地層処分を進めるのか、どのように安全性を示すのか、どのように処分場を受け入れてもらうのかなど、地層処分事業全般について説明できる素養の育成を目的とした内容
- ② 地層処分に関するポータル教材（以下、ポータル教材）
地質環境特性、工学技術、安全評価等の地層処分技術に関して、ジェネラリストとして把握しておくべき重要な専門的知識を抽出した内容

2020 年度には、これら 2 種類の教材の骨子や内容の検討、リテラシー教材のコンテンツの作成を行った。また、2021 年度には、リテラシー教材のコンテンツを継続して検討するとともに、使用者の学習意欲が継続するようなデザインや内容面での仕組みの検討を行った。

4 年間の事業の最終年度にあたる 2022 年度は、内容的に類似の資料が存在しないリテラシー教材作成の優先度が高いと考えられたため、リテラシー教材の完成を優先して実施した。具体的には、内容の更なる精査を行ったほか、2021 年度に実施した、使用者の学習意欲が継続するようなデザ

インや内容面での仕組みの検討結果を全てのページに適用した。さらに、教材の各章に確認テストを作成した。確認テストは、穴埋め問題、○×問題と記述式問題の 3 種類の形式で作成した。

最終的に、合計で 11 の学習項目で構成される（表-1）、ページ数約 200 ページの試作版を作成した。また、試作版の印刷用の版下を作成するとともに、50 部の印刷版を作成した。

表-1 教材（試作版）の学習項目（ジャンル）と狙い

ジャンル	設定の狙い
1. 日本における放射性廃棄物の特徴	日本で発生する放射性廃棄物の種類とその発生源について理解する
2. 放射性廃棄物対策：地層処分選択の背景	地層処分が選択されてきた背景と経緯を学ぶ
3. 日本における放射性廃棄物の処分形態	日本で発生する放射性廃棄物の種類に対応した処分形態について学ぶ
4. 地層処分の安全原則と規制・規準類	地層処分の安全性確保に係る安全原則や規準類について、国内外の報告書の概要を学ぶ
5. 地層処分の安全確保方策と安全評価	多重バリアシステムの概要、その性能を定量的に評価する安全評価の流れ、安全評価からセーフティケース構築への展開について学ぶ
6. 地層処分の実現性に関する報告書	これまでに公表されてきた国内外の代表的な地層処分の実現性に関する報告書について、その概要を学ぶ
7. NUMO 包括的技術報告書－適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築－	NUMO が 2021 年に公表した「包括的技術報告書」の内、本編に属する記述概要を学ぶ
8. 地層処分の段階的な進め方	地層処分の段階的な進め方と意思決定に係る国際機関の報告書、わが国での段階的な取り組みについて学ぶ
9. 地層処分固有の取り組み	閉鎖後長期の安全確保に関する、地層処分固有の取り組みについての概要と現状を学ぶ
10. 地層処分に対する信頼	科学技術的及び社会的な視点からの信頼感の醸成に関する国内外の取り組みについて学ぶ
11. 諸外国における地層処分事業の経緯	地層処分計画を進める各国の挫折、計画の凍結、成功例などから得られる教訓について学ぶ

(2) 人材育成セミナーの開催

2019 年度に開催した人材育成セミナーから得た教訓に従い、2020 年度からの 3 か年において、受講者が主体的に参加し受講者間に対話が促される講義・グループワークを行うアクティブラーニング形式のセミナーを開催する計画とした。また、セミナーのテーマを地質環境調査、工学技術、安全評価技術と変え、セミナーとしての成立性、ジェネラリスト育成に対する効果などを比較検討することとした。2020 年度は地質環境（地下水）、2021 年度は工学技術をテーマとして検討したが、結果として地下研究施設での研究開発をテーマに開催した。

2022 年度は、タイトルを「ソースタームで学ぶ！～地質・設計・安全評価～」とし、安全評価技術をテーマとして、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、JAEA）の幌延深地層研究センターの見学を含み、北海道稚内市を主会場として、2022 年 10 月 3 から 5 日の日程で、関係機関から 14 名の受講者を得て開催した。このセミナーでは、安全評価の対象廃棄物をガラス固化体から使用済燃料の直接処分に代える、また受講者にわかりやすい地質環境特性の異なる海外事例を題材とすることにより、処分場の設計や地質環境との関わりを多面的に考えてもらうこととした。また、座学（講義）の間に『学びを深めるコーナー』の時間を設定し、用意した問題や作業を組み込むことで、能動的に学び、対話的に思考する時間を意識的に設定した（図-1 参照）。

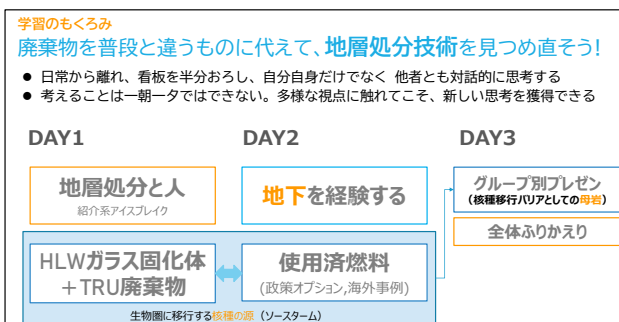


図-1 セミナーのもくろみ及び3日間のプログラム構成

セミナーの 2 日目には、JAEA の幌延深地層研究センターの地上及び地下施設の見学を行った（図-2）。



図-2 幌延深地層研究センター地下施設見学の様子

セミナー開催後の受講者アンケートからは、安全評価の報告書ではなかなか理解できない内容であったという意見や母岩（処分サイト）の違いにより、地質環境特性が変わることを意識して進める必要があることを理解できたなどの意見があり、概ね肯定的な評価が得られた。また、グループワークからは、専門性の違いによる着眼点の差を感じたなどの意見があり、異なるバックグラウンドを持つ専門家とのコミュニケーションを体験し、その重要性や難しさの理解が進んだと考えられる。このことは、受講者が将来、異分野の専門家とうまく協働していけるよう努めることにつながる経験となったと考えられ、設定したセミナーのねらいは概ね達成されたと考えられる。

◇4 年間の成果

(1) 独学のための教材の作成

地層処分に関するリテラシー育成教材に関しては、2022 年度までに試作版を完成した。この教材は、地層処分事業に関わる若手研究者などが知っておくべき知識をまとめたもので、これらの知識が一つにまとまっている既存の教材・資料はなく、利用価値のある教材となっていると考えられる。ただし、作成過程では、確認テストやコンテンツがユーザーのレベルに合っているのかなど判断をしつつ試行版の完成に至った。このため、完成版作成に向けた今後の課題としては、内容や確認テストの問題の適性の評価を実施することが挙げられる。想定されるユーザー層によるレビューを行い、結果に基づいて改訂など行う必要がある。

(2) 人材育成セミナーの開催

2020 年度からの 3 か年は、以下の要素で構成

されるアクティブラーニング形式のセミナーを開催してきた。アンケート結果からは、アクティブラーニングを取り入れたセミナーに関して、他分野の専門家との議論や意見交換を経験することで、他分野との協働の重要性等の気付きを与えるなどの効果が確認できた。以下に当センターが実施してきたセミナーで重要と考えられる構成要素を示す。

①アイスブレイク（自己紹介）

以降のプログラムに積極的に参加できるよう、自己紹介も兼ね、受講者自身の研究テーマ等を紹介

②座学

テーマに関する基礎知識を提供するための講義。単に講義だけを行うのではなく、演習やグループワークを間に挟み講義を続けるなどすることで集中力の維持や理解度の向上が期待できる。

③グループワーク

セミナーのテーマに関してグループ内のメンバーで議論を実施。「グループ内で議論し考えるテーマ」は抽象的なものではなく、具体的な問題とするほうが議論が活発になる。また、バックグラウンドの異なるメンバーとの意見交換が可能となるようメンバー構成は工夫することが重要。

④見学

セミナーテーマに関連のある研究施設や地下施設など、セミナーで扱うデータが実際に取得された場所・施設を見学することで、テーマの理解向上につながる。

また、2020年度からテーマを地質環境調査技術（地下水）、工学技術（地下研究施設）、安全評価技術と変えてセミナーを実施してきた。わが国での地層処分事業のステージを踏まえた場合、処分事業のスタートである地質環境調査技術、または最終的なアウトプットである安全評価技術がプログラムを組みやすい可能性があると考えられる。

工学技術は範囲が広く、他分野との関連の議論が難しく、また、技術の採用・不採用等にはコストとの兼ね合いなども関係してくる。このため、テーマとするには克服すべき課題が多く、今後

継続して検討していくことが重要である。

さらに、受講者からのアンケート結果からは、地層処分に関連する内容であったとしても、実際の業務に直接関係しないテーマについては学習機会が乏しく、また、他の分野の地層処分関係者との交流の機会が少ないと感じる人が多いことが分かった。このような若手研究者・技術者に対して、他の分野の専門家との対話により異分野コミュニケーションの重要性を経験的に理解するような既存の取り組みはほとんどなく、本事業におけるセミナーは継続して実施していく価値のあるものと考えられる。

一方で、4年間のセミナー開催からは課題も明らかとなった。例を挙げると、セミナーの時間が短かったという意見は常にみられたものであり、より充実したセミナーとするためには改善が必要な点であると考えられる。長期にわたり、受講者を拘束できないことを考えると、座学部分などのセミナーの一部をeラーニング化して、事前に受講してもらうなどの対応が必要と考えられる。

- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成31年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務 報告書（2022年度分）、2023年

3. その他の放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

その他、以下の放射性廃棄物全般に共通する調査研究等を行った。

(1) 規制要件を中心とした海外情報の収集と考え方の整理

地層処分の安全性に関する事業者の自主的な目標・基準の考え方を整理することを目的として、2020年度から3か年の計画で、事業化が進んでいる諸外国の規制要件等の情報を収集・整理した。2022年度は、米国及びカナダを対象として、規制要件の変遷を整理しつつ、サイト調査段階で重要度の高い立地要件、処分施設の設計に係る規制要件及び事業者による自主基準等を調査した。また、上記2カ国を含む9カ国を対象として、地層処分施設の安全評価手法や放射線防護基準に関する要件等について調査を行い、調査により得られた詳細な情報をもとに、原子力発電環境整備機構（NUMO）と共同で、わが国における基準の策定に資すると考えられる事項を整理した。

(2) 放射性廃棄物基本情報体系化調査

国内外の放射性廃棄物に係る基本情報を収集して体系的に整理するとともに、収集した情報に基づいて「放射性廃棄物ハンドブック（2022年度版）」を作成した。

(This page(p92) is intentionally kept blank.)

IV. 国際交流

放射性廃棄物の処理処分は、我が国のみならず世界各国共通の課題であり、協力して進めることが重要である。このため原環センターでは、海外の放射性廃棄物処分の研究機関、処分事業実施機関等と包括的な協力協定を締結し、この国際的なネットワークを活用し、放射性廃棄物に関する各国の政策、制度、事業の進捗状況、研究開発動向等に関する情報の収集・交換、研究協力等を行っている。

2022年度は、新型コロナウイルス感染症まん延のため、Web会議を中心として、実施中の研究に関する技術情報の意見交換や新規プロジェクトへの参加の可能性などの情報交換を行った。

(1) 情報交換・研究協力を行っている海外機関

放射性廃棄物管理分野における相互協力に関して、現在までに当センターとの間で協定あるいは覚書を締結している海外機関は下表のとおりである。

表-1 協力協定／情報交換覚書を締結している海外機関

国	機関名
フランス	放射性廃棄物管理機関 (ANDRA)
スイス	放射性廃棄物管理共同組合 (NAGRA)
フィンランド	ポシヴァ社 (Posiva Oy) / Posiva Solutions 社
スウェーデン	スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社 (SKB 社) / SKB インターナショナル社
ドイツ	連邦放射性廃棄物機関 (BGE) / BGE Technology 社
スペイン	放射性廃棄物管理公社 (ENRESA)
ベルギー	ベルギー原子力研究センター (SCK CEN)
ロシア	ロシア科学アカデミー (RAS)
英国	原子力廃止措置機関 (NDA)
韓国	韓国原子力環境公団 (KORAD)
台湾	(財) 核能科技協進會 (NuSTA)
韓国	韓国原子力研究所 (KAERI)
中国	中国核工業集团公司地質・中国ウラン工業株式会社 (CNNC / CNUC)

(2) スイス グリムゼル試験場での国際共同研究に関する情報収集

スイスの放射性廃棄物管理共同組合 (NAGRA) が運営する、グリムゼル試験場にお

いて実施中の国際共同研究の運営委員会 (ISCO) にオンラインで出席し、最新の共同研究の内容および計画に関する情報を収集した。

(3) 核燃料サイクルシミュレーションに関する IAEA との共同作業

廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究 (文部科学省原子力システム研究開発事業 JPMXD02 19209423 の助成を受けたもの) における核燃料サイクル諸量評価において、国際原子力機関/IAEA の公開コード/NFCSS (Nuclear Fuel Cycle System Simulation) に、放射性廃棄物の崩壊熱、放射性毒性、核種分離、処分場廃棄体専有面積などの計算機能を拡張した。2020年度に締結した同機関原子力局との核燃料サイクルシステムシミュレーション研究に関する実務協定 (Practical Arrangements) に基づき、計算機能拡張の成果を 2022年2月の NFCSS Consultancy Meeting で紹介した。2023年1月の技術打合では再処理工程での核種分離、及び廃棄物の崩壊熱と放射性毒性に関する計算機能追加による評価結果を、本原子力システム研究での最終成果として紹介した。また、IAEA が進めている NFCSS 機能向上で用いるデータシートの内容確認とコメント提供を行った。

(4) OECD/NEA が事務局を担う国際共同プロジェクトへの参画

経済協力開発機構／原子力機関 (OECD/NEA) が事務局を担う国立研究開発法人日本原子力研究開発機構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への参加に係る協定が国内外の関係組織の手続きを経て 2023年2月に発効した。今後、①物質移行試験、②処分技術の実証と体系化、③実規模の人工バリアシステム解体試験の3つのタスク (研究大項目) のもとで各種の個別研究が計画されている。当センターは、協定締結に至るまでの各種準備会合やワークショップをとおして関係組織と情報交換や研究計画の具体化に向けた検討を進めた。今後は上記の②と③のタスクを中心に、参加する関係組織とともに研究を進める。

V. 資料

1. 講演会、セミナー、研究発表会

	講演会等概要	開催日	会場
講演会	第1回原環センター講演会「使用済燃料の多様化を考慮した廃棄物減容化と地層処分の負荷低減に関する研究」 桜木 智史 (FE・BE イノベーション研究部)	2022年 6月30日	原環センター (対面) 及びオンライン開催
	第2回原環センター講演会「ガラス固化体の性質とその長期評価に向けた課題と取り組み -I-129の代替固化を例に-」 講演1 TRU 廃棄物の地層処分とガラスとの関わり 大和田 仁 (地層処分バリアシステム研究開発部長) 講演2 ガラスの特性と構造の理解に向けて -廃棄物のガラス固化体から始めた非晶質構造解析- 紅野 安彦 氏 (岡山大学 学術研究院 環境生命科学学域 准教授) 講演3 放射性ヨウ素固定化ガラスの構造モデリングと局所構造評価に関する研究 長尾 正昭 氏 (岡山大学 大学院環境生命科学研究科 博士後期課程2年)	2022年 8月10日	原環センター (対面) 及びオンライン開催
	第3回原環センター講演会「スウェーデンとフランスでの地層処分計画への国民的な合意獲得」 佐原 聡 (技術情報調査部) 江藤 次郎 (技術情報調査部)	2023年 1月20日	原環センター (対面) 及びオンライン開催
	第4回原環センター講演会「中深度処分の規制基準策定の経緯と考え方」 青木 広臣 氏 (原子力規制庁 原子力規制部 研究炉等審査部門 主任技術研究調査官)	2023年 2月17日	原環センター (対面) 及びオンライン開催
セミナー	第1回原環センターセミナー 「放射性廃棄物処分の安全評価の基礎Ⅰ」 枋山 修 氏 (公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問)	2022年 5月26日	京都アカデミアフォーラム in 丸の内
	第2回原環センターセミナー 「放射性廃棄物処分の安全評価の基礎Ⅱ」 枋山 修 氏 (公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問)	2022年 7月29日	京都アカデミアフォーラム in 丸の内
	第3回原環センターセミナー 「放射性廃棄物処分の安全評価の基礎Ⅲ」 若杉 圭一郎 氏 (東海大学 工学部 応用化学科 教授)	2022年11月22日	京都アカデミアフォーラム in 丸の内
研究発表会	2022年度原環センター研究発表会 1. 研究発表 「地層処分における地下構成要素の品質保証体系について考える-何をモニタリングするか?」 川久保 政洋 (地層処分工学技術研究開発部) 2. 特別講演 「これからのテロと武力攻撃に備えて-未然防止と国民保護の課題」 宮坂 直史 氏 (防衛大学校 総合安全保障研究科・国際関係学科 教授)	2022年12月13日	星陵会館ホール (対面) 及びオンライン開催

2. 論文投稿、学会発表等

(1)論文

No.	題 目	原環センター著者	掲載誌等
1	Numerical analysis on the axial and radial swelling of unsaturated compacted bentonite	林大介、石井智子	International Journal of GEOMATE, April 2022, Vol.22, Issue 92
2	Optimization of waste management of mixed oxide fuel in light-water reactors: Evaluation of the effectiveness of blending spent UO ₂ and mixed oxide fuels in reprocessing	朝野英一	Annals of Nuclear Energy Volume 169, May 2022, 108926
3	Effect of bond valence sum on the structural modeling of lead borate glass	桜木智史、大和田仁	Journal of Non-Crystalline Solid Volume 592, 15 September 2022, 121751
4	Research project of hybrid waste solidification of various wastes generated by Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: an overview	桜木智史、浜田涼、朝野英一	Proceedings of FDR2022 FDR2022-1038
5	Effective/rapid immobilization of radionuclides from Fukushima Decommissioning by spark plasma sintering process	浜田涼、朝野英一、桜木智史	Proceedings of FDR2022 FDR2022-1041
6	Composite waste form for immobilization of radionuclides from Fukushima decommissioning by powder metallurgy hot isostatic pressing	桜木智史、浜田涼、朝野英一	Proceedings of FDR2022 FDR2022-1024
7	Potential methods to reduce the thermal impact of vitrified waste from spent mixed oxide fuel on geological repositories	浜田涼、桜木智史、朝野英一	MRS Advances, Volume 8, 274-277 (2023)
8	Radionuclide distribution in irradiated BWR tie plate	桜木智史、植田浩義	MRS Advances, Volume 8, 250-254 (2023)
9	Simulating the carbon distribution in zirconium alloy spent fuel cladding	桜木智史	MRS Advances, Volume 8, 285-289 (2023)
10	Characteristics of iodine-bearing silver-impregnated alumina sorbents and their direct solidification <i>via</i> hot isostatic pressing	桜木智史	Frontiers in Chemistry, Volume 11 (2023)

(2)学会発表等

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
1	地下空洞型処分施設に係る技術開発について	藤原啓司	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 2022/5/17
2	TRU 廃棄物の地層処分におけるガス発生の影響に関する研究開発	藤井直樹、八木翼	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 2022/5/17
3	Hydro-mechanical-chemical analysis of engineered barrier considering the correlation of porosity and swelling index	八木翼	Clay Conference 2022 2022/6/13～16
4	Effects of sand-based gap filling on buffer-material erosion	石井智子	Clay Conference 2022 2022/6/13～16
5	Swelling and homogenization of unsaturated bentonite specimen with an initial axial gap - Experimental study	林大介	Clay Conference 2022 2022/6/13～16
6	Swelling and homogenization of unsaturated bentonite specimen with an initial axial gap - Numerical investigation	石井智子	Clay Conference 2022 2022/6/13～16
7	福島第一原子力発電所由来の難固定化核種のハイブリッド固化と安全性評価に関する研究 (1)プロジェクト概要とスコープ	桜木智史、浜田涼、朝野英一	第 11 回環境放射能除染研究発表会 2022/8/24～25
8	福島第一原子力発電所由来の難固定化核種のハイブリッド固化と安全性評価に関する研究 (2)放電プラズマ焼結(SPS)を用いたハイブリッド固化体の迅速固化処理	桜木智史、浜田涼、朝野英一	第 11 回環境放射能除染研究発表会 2022/8/24～25
9	福島第一原子力発電所由来の難固定化核種のハイブリッド固化と安全性評価に関する研究 (3)ハイブリッド HIP 固化による難固定核種の閉じ込め技術の検討	桜木智史、浜田涼、朝野英一	第 11 回環境放射能除染研究発表会 2022/8/24～25
10	福島第一原子力発電所由来の難固定化核種のハイブリッド固化と安全性評価に関する研究 (4)処分概念及び安全評価の予備検討	浜田涼、桜木智史、朝野英一	第 11 回環境放射能除染研究発表会 2022/8/24～25
11	放電プラズマ焼結 (SPS) 法によるシンロック固化体の迅速固化処理	桜木智史、浜田涼、朝野英一	第 11 回環境放射能除染研究発表会 2022/8/24～25

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
12	Challenge of Novel Hybrid-waste-solidification of Mobile Nuclei Generated in Fukushima Nuclear Power Station and Establishment of Rational Disposal Concept and its Safety Assessment	桜木智史、浜田涼、朝野英一	第6回福島第一廃炉国際フォーラム 2022/8/28～29
13	地層処分における照射済みエンドピースからの核種放出挙動評価 (3)イメージングプレート法を用いた放射能分布測定	桜木智史、植田浩義	日本原子力学会 2022 年秋の大会 2022/9/7～9
14	福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価 (1)全体概要	桜木智史、浜田涼、朝野英一	日本原子力学会 2022 年秋の大会 2022/9/7～9
15	福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価 (2)放電プラズマ焼結(SPS)を用いたハイブリッド固化体の合成および微構造評価	桜木智史、浜田涼、朝野英一	日本原子力学会 2022 年秋の大会 2022/9/7～9
16	福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価 (3)金属マトリクスを用いたヨウ素閉じ込めハイブリッド HIP 固化体の作製	桜木智史、浜田涼、朝野英一	日本原子力学会 2022 年秋の大会 2022/9/7～9
17	福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価 (4)理論計算によるハイブリッド固化体の電子状態および構造特性の解析	桜木智史、浜田涼、朝野英一	日本原子力学会 2022 年秋の大会 2022/9/7～9
18	福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価 (5)処分概念及び安全評価の予備検討	浜田涼、桜木智史、朝野英一	日本原子力学会 2022 年秋の大会 2022/9/7～9
19	TRU 廃棄物の廃棄体パッケージの開発 (1)全体概要	藤井直樹、大和田仁、丸山紀之、坂本浩幸、関口博司	日本原子力学会 2022 年秋の大会 2022/9/7～9
20	TRU 廃棄物の廃棄体パッケージの開発 (2)廃棄体パッケージ内充填材のガス発生評価	坂本浩幸、藤井直樹、大和田仁	日本原子力学会 2022 年秋の大会 2022/9/7～9
21	TRU 廃棄物の廃棄体パッケージの開発 (3)セメント系材料における水の存在形態が水素ガス発生に及ぼす影響	坂本浩幸、藤井直樹、大和田仁	日本原子力学会 2022 年秋の大会 2022/9/7～9

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
22	TRU 廃棄物の廃棄体パッケージの開発 (4)コンクリートの放射線分解による水素ガスの発生に関する検討	坂本浩幸、藤井直樹、 大和田仁	日本原子力学会 2022 年秋の大会 2022/9/7～9
23	放射性廃棄物の減容化に向けたガラス 固化技術の基礎研究 (100) MOX ガラス固化体の処分場面積 低減に対する MA 分離と高充填化の効果	浜田涼、桜木智史、 朝野英一	日本原子力学会 2022 年秋の大会 2022/9/7～9
24	締固めたベントナイト混合土の遮水性 発現メカニズムに関する検討	広中良和	土木学会 2022 年度全国大会 第 77 回年次学術講演会 2022/9/14～16
25	中性子イメージング実験装置による土 の締固め～飽和浸透時挙動の可視化の 試み	広中良和	土木学会 2022 年度全国大会 第 77 回年次学術講演会 2022/9/14～16
26	回収技術の高度化開発（その 1）： 回収技術の開発方針	小林正人、江守稔	土木学会 2022 年度全国大会 第 77 回年次学術講演会 2022/9/14～16
27	回収技術の高度化開発（その 2）： 塩水 WJ による緩衝材除去速度の向上	岡田裕之介、小林正人	土木学会 2022 年度全国大会 第 77 回年次学術講演会 2022/9/14～16
28	回収技術の高度化開発（その 3）： スラリーの処理に係る沈降試験	岡田裕之介、小林正人	土木学会 2022 年度全国大会 第 77 回年次学術講演会 2022/9/14～16
29	回収技術の高度化検討（その 4）： 隙間充填材の乾式除去技術の整備	小林正人、八木啓介	土木学会 2022 年度全国大会 第 77 回年次学術講演会 2022/9/14～16
30	回収技術の高度化検討（その 5）： 土質材料の特性が機械的除去に及ぼす 影響	八木啓介、小林正人	土木学会 2022 年度全国大会 第 77 回年次学術講演会 2022/9/14～16
31	模擬坑道における埋め戻し材の転圧施 行試験	川久保政洋、長澤寛和	土木学会 2022 年度全国大会 第 77 回年次学術講演会 2022/9/14～16
32	模擬坑道における埋め戻し材の巨視的 透水係数の検討	川久保政洋	土木学会 2022 年度全国大会 第 77 回年次学術講演会 2022/9/14～16

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
33	放射性廃棄物処分場の坑道天端を模擬したスクリーフィーダーによる実規模埋め戻し実験	川久保政洋、深谷正明	土木学会 2022年度全国大会 第77回年次学術講演会 2022/9/14～16
34	埋め戻し材ブロックにおける自己シール性評価方法の検討	川久保政洋、八木啓介	土木学会 2022年度全国大会 第77回年次学術講演会 2022/9/14～16
35	分布型光ファイバ圧力センサの開発に向けた加圧試験による検討	川久保政洋、 市川恭子、宇田俊秋	土木学会 2022年度全国大会 第77回年次学術講演会 2022/9/14～16
36	光ファイバによる圧力分布の計測技術の開発に向けた解析的検討	川久保政洋、 市川恭子、宇田俊秋	土木学会 2022年度全国大会 第77回年次学術講演会 2022/9/14～16
37	Composite waste form for immobilization of radionuclides from Fukushima decommissioning by powder metallurgy hot isostatic pressing	桜木智史、浜田涼、 朝野英一	International Topical Workshop on Fukushima Decommissioning Research (FDR2022) 2022/10/14～16
38	使用済燃料の長期冷却による発熱低減と高充填化による減容及びガラス固化体特性への影響評価	桜木智史、浜田涼、 朝野英一	日本セラミック協会 ガラス部会放射性廃棄物分 科会 第4回放射性廃棄物固化体 討論会 2022/10/20
39	ガラス固化体の発熱特性に基づいた廃棄物減容と処分場面積の合理化に対する緩衝材の含水比の影響	浜田涼、桜木智史、 朝野英一	日本セラミック協会 ガラス部会放射性廃棄物分 科会 第4回放射性廃棄物固化体 討論会 2022/10/20
40	Radionuclide Distribution in Irradiated BWR Tie plate	桜木智史、植田浩義	MRS2022 Fall Meeting & Exhibit, Symposium EN08 - Scientific Basis for Nuclear Waste Management 2022/11/27～12/2
41	Simulating Distribution of Carbon in Spent Fuel Cladding of Zirconium Alloys	桜木智史	MRS2022 Fall Meeting & Exhibit, Symposium EN08 - Scientific Basis for Nuclear Waste Management 2022/11/27～12/2

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
42	The methodologies to reduce the thermal impact of vitrified waste from spent MOX fuel on geological repository	浜田涼、桜木智史、朝野英一	MRS2022 Fall Meeting & Exhibit, Symposium EN08 - Scientific Basis for Nuclear Waste Management 2022/11/27~12/2
43	Study on nuclear energy system considering environmental load reduction of waste disposal in diversification of nuclear fuel cycle conditions; (1) Evaluation of repository footprint and radiation effects in vitrified waste disposal using simplified MA separation	浜田涼、朝野英一、桜木智史	International Symposium on Zero-Carbon Energy Systems, IZES 2023/1/10~12
44	Study on nuclear energy system considering environmental load reduction of waste disposal in diversification of nuclear fuel cycle conditions; (2) Impact of MA Separation and Recycle on the Material Balance of Nuclear Fuel Cycle	朝野英一、桜木智史、浜田涼	International Symposium on Zero-Carbon Energy Systems, IZES 2023/1/10~12
45	Study on nuclear energy system considering environmental load reduction of waste disposal in diversification of nuclear fuel cycle conditions; (3) Simplification of MA Separation Process	朝野英一、桜木智史、浜田涼	International Symposium on Zero-Carbon Energy Systems, IZES 2023/1/10~12
46	Study on nuclear energy system considering environmental load reduction of waste disposal in diversification of nuclear fuel cycle conditions; (4) Impact of the Spent Fuel Reprocessing Conditions on Fast Reactor Neutronics Property	朝野英一、桜木智史、浜田涼	International Symposium on Zero-Carbon Energy Systems, IZES 2023/1/10~12

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
47	Study on nuclear energy system considering environmental load reduction of waste disposal in diversification of nuclear fuel cycle conditions; (5) Environmental impact assessment of nuclear energy system and selection of nuclear fuel cycle options using cross-disciplinary approach and Multi-criteria Analysis	朝野英一、桜木智史、浜田涼	International Symposium on Zero-Carbon Energy Systems, IZES 2023/1/10~12
48	地層処分環境における陰イオン核種の移行遅延に適した無機陰イオン吸着材の選定	大和田仁	日本原子力学会 関東・甲越支部 第16回学生研究発表会 2023/2/28
49	含水酸化硝酸ビスマス及び Mg-AI 層状複水酸化物による塩化物イオンの吸着挙動	大和田仁	日本原子力学会 関東・甲越支部 第16回学生研究発表会 2023/2/28
50	含水酸化硝酸ビスマス及び Mg-AI 層状複水酸化物によるヨウ化物イオンの吸着挙動	大和田仁	日本原子力学会 関東・甲越支部 第16回学生研究発表会 2023/2/28
51	X線 CT を用いた in-situ での緩衝材膨潤過程の密度分布測定	林大介	日本原子力学会 2023 春の年会 2023/3/13~15
52	放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術の基盤研究 (110)使用済燃料の多様化を考慮したガラス固化体の廃棄物充填率の最適化検討と処理・処分の負荷軽減に係わるシナリオ評価	桜木智史、浜田涼、針貝美樹、朝野英一	日本原子力学会 2023 春の年会 2023/3/13~15
53	廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究 (10)高速炉使用済 MOX 燃料由来のガラス固化体の処分場面積および被ばく線量の検討	浜田涼、朝野英一、桜木智史、針貝美樹	日本原子力学会 2023 春の年会 2023/3/13~15
54	廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究 (11)多様な核燃料サイクル条件に対する MA 諸量評価プログラムの開発	朝野英一	日本原子力学会 2023 春の年会 2023/3/13~15
55	廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究 (12)簡素化 MA 分離プロセスの構築	朝野英一、桜木智史、浜田涼	日本原子力学会 2023 春の年会 2023/3/13~15

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
56	廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究 (13)回収 MA 燃焼を念頭に置いた高速炉炉心特性の評価	朝野英一	日本原子力学会 2023 春の年会 2023/3/13~15
57	廃棄物処分の環境影響を基点とした原子力システム研究 (14)原子力システムの環境負荷低減に関する分野横断型評価	朝野英一、桜木智史、 浜田涼	日本原子力学会 2023 春の年会 2023/3/13~15
58	福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価 (6)プロジェクト進捗とハイブリッド固化体への放射線照射影響と浸出挙動について	桜木智史、浜田涼、 針貝美樹、朝野英一	日本原子力学会 2023 春の年会 2023/3/13~15
59	福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価 (7)ハイブリッド固化体の閉じこめ性能に及ぼす合成プロセスの影響評価	桜木智史、浜田涼、 針貝美樹、朝野英一	日本原子力学会 2023 春の年会 2023/3/13~15
60	福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価 (8)放電プラズマ焼結 (SPS) 法を用いたシンロック固化体の迅速固化技術の開発	針貝美樹、桜木智史、 浜田涼、朝野英一	日本原子力学会 2023 春の年会 2023/3/13~15
61	福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価 (9)放射光 XAFS による固化体の化学状態と局所構造解析	朝野英一、桜木智史、 浜田涼、針貝美樹	日本原子力学会 2023 春の年会 2023/3/13~15
62	福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価 (10)ヨウ素を閉じ込めたハイブリッド固化体の安全評価	針貝美樹、浜田涼、 桜木智史、朝野英一	日本原子力学会 2023 春の年会 2023/3/13~15

(3)解説・講演等

No.	題 目	著 者	発表先
1	フィンランドにおける最終処分地選定 処分場のある未来を候補自治体はどう 考えたか	佐原聡	エネルギーレビュー Vol.499 2022年8月号
2	TRU 廃棄物処分場での発生ガスの影響 に関する技術開発 ガス移行の評価手法及びガス影響低減 対策技術の開発	藤井直樹、八木翼	日本原子力学会誌 ATOMOΣ 11月号 Vol.64, No.11, p28~32 (2022)
3	緩衝材の流出現象と工学的対策 処分場の設計や施工の技術オプション の整備にむけて	林大介	日本原子力学会誌 ATOMOΣ 11月号 Vol.64, No.11, p33~37 (2022)
4	地層処分事業等の国際的な動向	稲垣裕亮	原子力年鑑 2023 P170-P176

3. 刊行物

No.	刊行物名	主な内容	発行日
1	原環センタートピックス№142	「大地変動の時代」に役立つ地球科学としなやかな生き方	2022年6月
2	原環センタートピックス№143	使用済燃料の多様化を考慮した廃棄物減容化と地層処分の負荷低減に関する研究	2022年9月
3	原環センタートピックス№144	ガラス固化体の性質とその長期評価に向けた課題と取り組み－I-129の代替固化を例に－	2023年1月
4	原環センタートピックス№145	これからのテロと武力攻撃に備えて－未然防止と国民保護の課題	2023年4月
5	原環センター2021年度 技術年報		2022年12月

4. ホームページへの海外最新情報の掲載

原環センターのウェブサイト「諸外国での高レベル放射性廃棄物処分」(<https://www2.rwmc.or.jp>)において、以下の海外情報ニュースフラッシュ記事を掲載した。

[各タイトル記事内容は上記の URL にアクセスしてください。]

No	掲載日	タイトル
1	2022/5/11	米国で環境保護庁（EPA）が廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）の4度目の適合性再認定を決定
2	2022/5/26	追記）フィンランドで新規原子炉建設と最終処分場の拡大に関する原則決定について経済大臣が提案〔2010年4月27日既報〕
3	2022/6/22	カナダ核燃料廃棄物管理機関（NWMO）が候補2サイトの技術的な有望性を示した報告書を公表
4	2022/6/23	追記）米国の連邦議会で2022会計年度の放射性廃棄物処分関連の歳出法案を審議〔2021年8月2日既報〕
5	2022/7/7	英国で4例目となるテッドルソープ GDF コミュニティパートナーシップが設立
6	2022/7/15	フランス政府が地層処分場の公益宣言（DUP）を発出
7	2022/7/21	韓国の低中レベル放射性廃棄物処分センターで第2段階処分施設の建設開始へ
8	2022/7/29	フランスで国家評価委員会（CNE）が第16回評価報告書を公表
9	2022/8/1	韓国産業通商資源部が「高レベル放射性廃棄物研究開発ロードマップ（案）」を公表
10	2022/8/4	追記）ドイツでコンラッド処分場の操業開始の遅延を公表-2027年前半の操業開始見込み - 〔2018年3月12日既報〕
11	2022/8/17	カナダ核燃料廃棄物管理機関（NWMO）が候補サイト選定を2024年に延期
12	2022/8/30	追記）カナダで天然資源省が放射性廃棄物政策の見直しに向けた関与プロセスを開始〔2020年11月20日追記〕
13	2022/9/13	スイスでNAGRAが北部レゲレンを地層処分場サイトとして提案
14	2022/9/20	追記）米国でエネルギー省（DOE）が使用済燃料の中間貯蔵施設の同意に基づくサイト選定計画を再始動〔2021年12月7日既報〕
15	2022/9/22	追記）米国でエネルギー省（DOE）が使用済燃料の中間貯蔵施設の同意に基づくサイト選定計画を再始動〔2021年12月7日既報〕
16	2022/10/31	米国の廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）で地下処分施設の第7パネルでの設置が完了
17	2022/12/2	ロシアのエニセイスキーで地下研究所の立坑の建設を開始
18	2022/12/6	ベルギーで高レベル及び長寿命の放射性廃棄物の地層処分方針を法制化
19	2022/12/8	フィンランドの使用済燃料処分場の建設状況：最初の処分坑道の掘削等が完了
20	2022/12/22	追記）スウェーデン政府がSKB社の短寿命低中レベル放射性廃棄物処分場拡張計画を承認〔2021年12月24日〕
21	2022/12/27	ドイツで連邦放射性廃棄物機関（BGE）がサイト選定手続き第1段階のサイト地域提案が2027年となる見通しを表明
22	2023/1/18	フランスで放射性廃棄物管理機関（ANDRA）が地層処分場（Cigéo）の設置許可申請書を政府に提出

5. 委員会一覧

分野区分	研究件名	委員会名称	審議事項
I. 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に 関する調査研究	ニアフィールドシステム 評価確証技術開発	ニアフィールドシステム 評価確証技術開発委 員会	人工バリアとその設置などにより影響を受けると考えられる人工バリア近傍の岩盤とを合わせた領域（ニアフィールド）を対象とした品質/健全性評価手法に関する調査結果等の審議
	回収可能性技術高度化開 発	回収可能性技術高度化 検討委員会	回収技術の高度化、回収維持の影響の定量化、並びに回収容易性を高めた概念に係る検討、成果等の審議
	地層処分施設閉鎖技術確 証試験	地層処分施設閉鎖技術 確証試験委員会	処分場の閉鎖後に坑道や掘削影響領域が水みちとなることを防止するための坑道シーリング技術の整備に向けた研究開発等に関する審議
	TRU 廃棄物処理・処分技術 高度化開発	TRU 廃棄物処理・処分技 術開発検討委員会	TRU 廃棄物の地層処分における人工バリアの閉じ込め機能の向上に関する技術開発、地層処分システムの状態設定のための現象解析モデルの高度化に関する計画、実施方法、成果等の審議
	沿岸部処分システム評価 確証技術開発	沿岸部処分システム高 度化開発評価委員会	沿岸部固有の環境を踏まえた概要調査段階で必要となる地質環境の調査・工学の技術開発に関する研究計画、実施方法、結果の評価等に関する審議
	廃棄物処分の環境影響を 基点とした原子力シス テム研究	廃棄物処分の環境影響 を基点とした原子力シ ステム研究に関する外 部評価委員会	廃棄物影響の指標、諸量評価システム、MA 簡素化分離プロセス、高速炉システム等原子力システムを俯瞰した研究に関する審議
II. 低レベル放射性 廃棄物の処分に 関する調査研究	地下空洞型処分調査技術 高度化開発	地下空洞型処分調査技 術高度化開発検討委員 会	地下環境の把握や最適な施設設計を支援するための技術整備に関する審議
III. 放射性廃棄物全 般に共通する調 査研究等	放射性廃棄物に係る重要 な基礎的技術に関する研 究調査の支援等に関する 業務	地層処分スキルアップ 研究会	人材育成プログラム・セミナーの内容の検討等
		評価委員会	採択した萌芽的・先進的な研究開発テーマに関する研究計画、研究成果等の審議

原環センター 2022年度 技術年報

2023年11月発行

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター
〒104-0044 東京都中央区明石町6番4号
ニチレイ明石町ビル12階
TEL 03-6264-2111(代表)
FAX 03-5550-9116
URL <https://www.rwmc.or.jp/>

本誌の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、
企画部（kikaku@rwmc.or.jp）までお問い合わせください。