

# RWMC

原環センター  
2020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年度は、新型コロナウイルス感染症まん延の影響を受け、様々な困難に直面しましたが、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、当センターが実施した調査研究の概要を紹介するとともに、学会等での発表・海外情報の発信の実績など当センターの一年間の活動状況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 高橋 彰



## 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.....	15
3. 回収可能性技術高度化開発.....	21
4. 沿岸部処分システム評価確証技術開発.....	26
5. TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発.....	33
5-1 事業の全体概要.....	33
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.....	35
5-3 陰イオン核種に対する閉じ込め技術の開発.....	42
5-4 廃棄体からの核種溶出モデルの高度化.....	46
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.....	50
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.....	54
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.....	63
7. 使用済燃料の多様化を考慮したシナリオ評価.....	65
8. HIP (熱間等方圧加圧) 法による TRU 廃棄物の新しい処理・固化技術 の研究.....	66
9. 多様な核燃料サイクル条件を考慮したバックエンド対策の最適化 に関する研究.....	68
10. その他の地層処分に関する調査研究.....	69
III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	71
1. 放射性廃棄物海外総合情報調査.....	71
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.....	73
2-1 事業の全体概要.....	73
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.....	75
2-3 人材育成プログラムの実施・作成.....	81
3. その他の放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	84
IV. 国際交流.....	85
V. 資料.....	86
1. 講演会、セミナー、研究発表会.....	86
2. 論文、学会発表等.....	87
3. 刊行物.....	92
4. ホームページへの海外最新情報の掲載.....	93
5. 委員会一覧.....	95

# 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、既存の浅地中処分に適さないものが存在する。これら低レベル放射性廃棄物については、大断面の地下空洞型処分施設に処分する方法（以下、「中深度処分」という。）で処分の事業化が検討されてきている<sup>1)</sup>（図-1）。

現在、中深度処分の安全規制については、パブリックコメント等を経て、規則等の改正や審査ガイドの策定が行われた状況にある<sup>2)</sup>が、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る方向にある<sup>3)</sup>。

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、場を乱すことなく、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 ヶ年の予定で、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。

なお、本事業は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「令和 2 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）」により、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東電設計株式会社の 2 機関が共同で実施したものである。

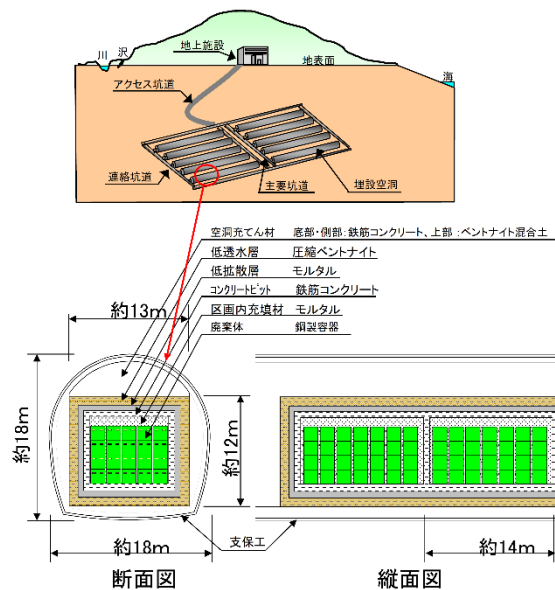


図-1 中深度処分の概念図<sup>1)</sup>

### ◇2020 年度の成果<sup>4)</sup>

本事業は、中深度処分 で求められる調査技術の高度化を狙いとして実施するもので、次の二つの大項目を掲げている。

- I 中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化
- II 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

この大項目の下で、複数の研究開発テーマを設け、開発を進めることとした。本事業の全体フローを図-2 に示す。初年度となる 2020 年度は、いずれの研究開発テーマについても今年度を含めて複数年にわたる事業の全体計画を策定するとともに、具体的な技術開発や研究開発に着手した。

以下に、2020 年度の成果の概要を示す。

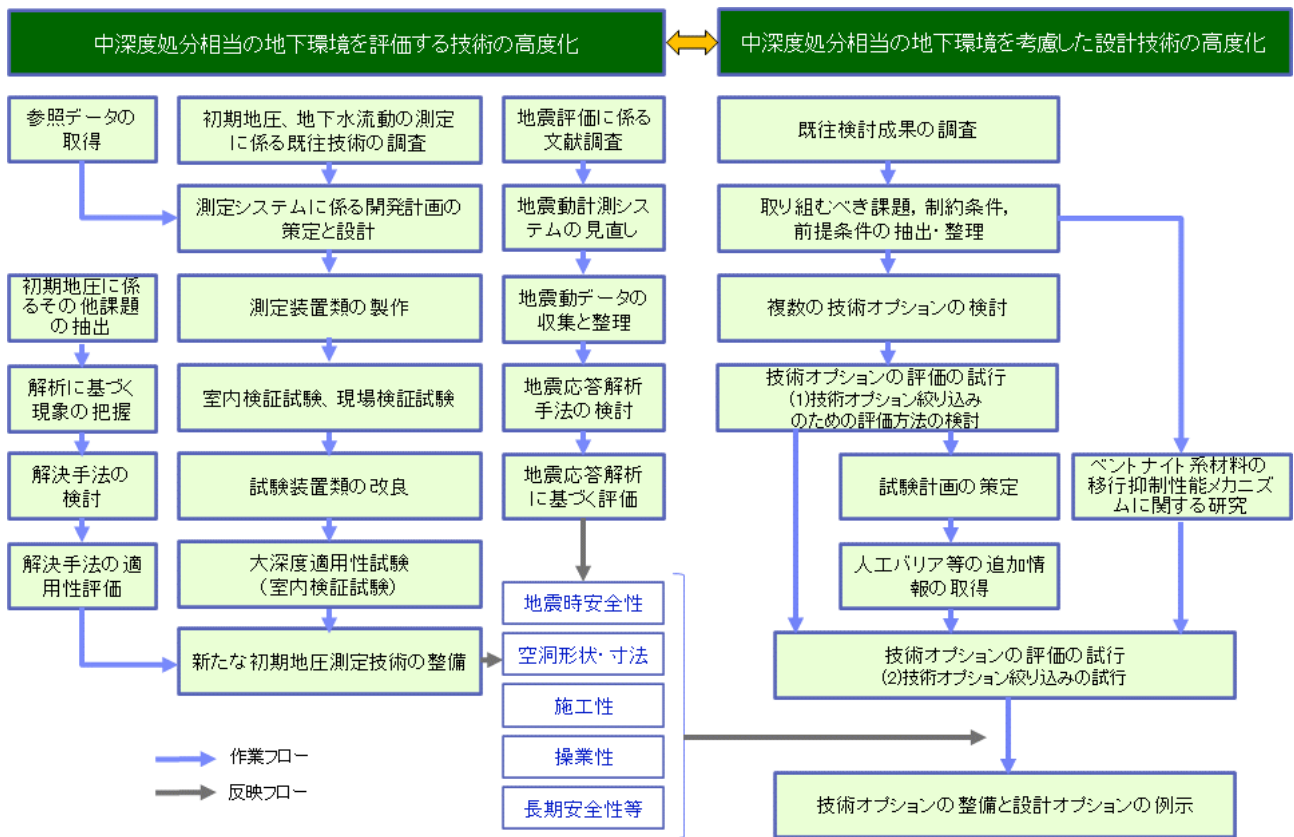


図-2 本事業の全体フロー

(1) 中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化

1) 初期地圧測定技術の高度化開発

中深度処分施設の設置深度に応じた3次元の初期地圧を極力、場を乱すことなく、かつ、効率的に測定できる方法として、応力解放法に着目し、我が国に広く分布する堆積軟岩へ適用可能な測定技術として整備することとした。まず、初期地圧測定等に係る既往技術の調査を行い、それに基づき課題を抽出した。その上で、技術課題の解決に向けた5ヵ年全体計画を策定した。加えて、既往技術の精査、有識者からの聞き取りを踏まえて、孔壁ひずみ法や孔底ひずみ法を改良するなど、開発計画で対象とする候補を選定し、測定システムの概念設計を行った。

開発する初期地圧測定装置のコンセプトは、以下のとおりである。

- ・ 地上から1本の鉛直ボーリングで3次元の初期地圧測定を行う
- ・ 対象とする岩盤：堆積軟岩
- ・ 対象とする深度：地表からの深さ 200m 程度  
(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設計深度に対応できることを念頭に置き設定)

- ・ これらの条件のもとでコストパフォーマンスも考慮しつつ高い測定精度を求める
- 開発上の課題として、大深度下での計器設置面の整形技術（パイロット孔削孔あるいは孔底整形）やその洗浄技術、大深度・地下水下での計器の設置技術（軟岩対象の接着材料の選定を含む）が特に重要であると考えられたため、それらの解決方法や検証方法等に着眼して検討を行った。

以上を踏まえて、孔底ひずみ法と孔壁ひずみ法の両方の測定手法を兼ね備えた「円錐孔壁ひずみ法」を開発目標とし、概念設計を実施した。円錐孔壁ひずみ法の概念設計図を図-3に示す。

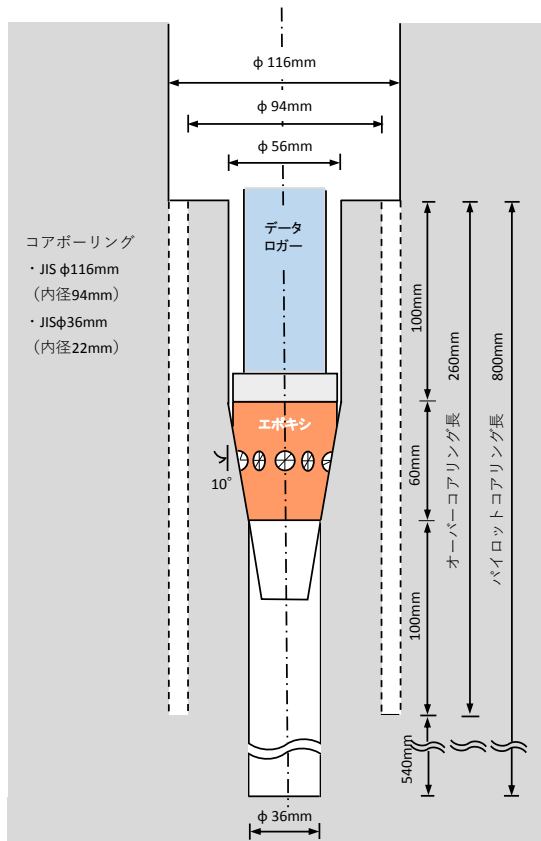


図-3 円錐孔壁ひずみ法のご概念設計図

また、初期地圧測定技術の開発に付随した技術課題を抽出した上で、岩盤状態の想定及びメカニズムを考慮した解析手法の選定について検討した。

＜技術課題＞

- ・堆積軟岩においては、三軸圧縮試験の荷重載荷に伴い、岩石内部の粒子間の空隙に圧縮が生じる。その後、最終的に破壊に至る過程では、拘束圧が先行履歴応力より大きいと延性的な挙動（ひずみ硬化挙動）を、拘束圧が先行履歴応力より小さいと脆性的な挙動（ひずみ軟化挙動）を示し、後者の場合は、供試体にせん断面が形成される。このせん断面は、微視的な亀裂が発生、進展して、亀裂が繋がることによって形成されると考えられる。
- ・軟岩における地圧測定のオーバーコアリング時の既往測定事例では、薄肉部（図-3中のストレインセルとオーバーコアリングの間の岩盤）で亀裂が発生しており、この現象は、室内試験と同様に微子亀裂が発生、進展した可能性が考えられる。
- ・地圧測定技術を適用する軟岩の深度は 200m

であることから、先行履歴応力は大きく、固結度が高いものと想定される。オーバーコアリング時には、薄肉部で応力が解放されるため、拘束圧が低下し、薄肉部が薄い場合には応力集中が生じて、室内試験の供試体のように薄肉部にせん断面が形成される可能性があり、微子亀裂の発生、進展が生じると測定結果に影響を与えることが懸念される。

＜岩盤状態の想定＞

- ・考慮すべき岩盤状態として、「亀裂の発生・進展」、「ひずみの局所化」、「塑性化」がある。

＜メカニズムを考慮した解析手法の選定＞

- ・「ひずみの局所化」、「塑性化」は FEM（有限要素法）、DEM（個別要素法）双方で表現可能であるが、「亀裂の発生・進展」は FEM では困難である。そこで、DEM を主な解析手法として適用し、目的に応じて FEM を補助的に採用する。

さらに、初期地圧測定に係る技術開発における参照データとするため、現場試験フィールド（青森県六ヶ所村）にてボーリング掘削を実施し、原位置試験並びに室内試験により地質、地盤、水理等のデータ取得や調査を行った。ボーリング調査、原位置試験の項目と数量を、表-1、表-2 に示す。

表-1 ボーリング調査、原位置試験数量表

項目	数量
ボーリング掘削 径 76mm オールコア	130m
コア観察、柱状図	130m
ボーリング孔閉塞	130m
温度検層	125m
キャリバー検層	125m
密度検層	125m
PS 検層（サスペンション法）	125m
ポアホールカメラ（BTV）観察	125m
透水試験	3回
初期地圧測定（水压破砕法）	4箇所以上

表-2 室内試験数量表

項目	試験数量 (2岩種×3)	1試験当りの 供試体数	供試体 数量
物理試験	6	8	48
一軸圧縮試験	6	1	6
圧裂引張試験	6	1	6
三軸圧縮試験 (CUバー)	6	4	24
三軸超音波速度測定	6	1	6
動的変形試験 (繰返し三軸試験)	6	1	6
熱物性試験 (熱伝導率)	6	1	6
熱物性試験 (比熱)	6	1	6

次年度は基本設計として、接着剤、ひずみ計、掘削ツール及びひずみ計挿入・設置ツールについては基礎実験を通じて、また、孔内洗浄方法及び孔内状況確認方法についてはこれまでの知見を参考にするとともに有識者へのヒアリング等も行い、初期地圧測定装置の開発を進める予定である。

## 2) 地下水流動評価技術の調査

地下水流動評価技術（計測・測定及び解析技術）について、国内外の低レベル及び高レベル放射性廃棄物処分に係る既往の関連技術の調査を行い、我が国における中深度処分への適用を考慮した場合の現状分析と課題の抽出・整理を行った。実施にあたっては、原子力規制委員会により整備が進められている第二種廃棄物埋設事業の規制基準（特に中深度処分（L1））における要求事項と原子力学会の学会標準や土木学会の技術検討の既往成果を十分に考慮し、さらには高レベル放射性廃棄物地層処分に向けての関連技術等も参考にし、目的、想定される調査目標並びに処分事業の時間的変遷と測定・計測・解析の必要箇所・エリア等を想定し、それらへ適用可能な現状技術を分類・整理するとともに、適用に向けての技術課題等を考察した。

調査検討した項目を以下に示す。

- ① 中深度処分の規制基準等における検討状況と要求事項の調査・整理
- ② 放射性廃棄物処分に係る地下水流動調査・評価技術に関する文献情報の収集・分類・整理
- ③ 不均質性を考慮した地質環境モデル及び水理地質構造モデルのモデル化手法に関する文献調査
- ④ 中深度処分に係る地下水流動の調査・評価の方法論と技術に関する調査・検討
- ⑤ 中深度処分事業展開と規制要求を考慮した地下水流動の調査・評価の実施項目及び技術的要件等の検討
- ⑥ 地下水流動調査・評価に関する今後の技術課題の抽出と技術開発の方向性の概略検討

## 3) 地震時影響評価技術の検討及び地震動観測

これまでに行われた地震動観測とそれに基づく諸検討<sup>5)</sup>から、現状の課題として以下が挙げられた。

- ・現在の地震計の配置では、空洞周辺の緩み領域の影響を含んだ地震動を観測している可能性があるが、解析手法でその影響を考慮していない。
- ・周辺岩盤では、地震動の周波数に依存した減衰が生じている可能性があるが、解析手法でその影響を考慮していない

2次元解析用の入力地震動作成のための1次元解析では、試験空洞で取得した地震動を入力波として採用してきたが、その妥当性が明確にされていない。

これらの課題に対して、既往文献調査により対応策を検討した結果、地震計の配置の見直し及び解析手法の高度化等による対応策が有効であると判断された。

そこで、検討した対応策をもとに、地下空洞施設の地震時挙動の定量的な評価（再現性の向上）を目的とした実施計画を立案した。

地震時影響評価技術に係る課題と対応策の概要を、図-4に示す。

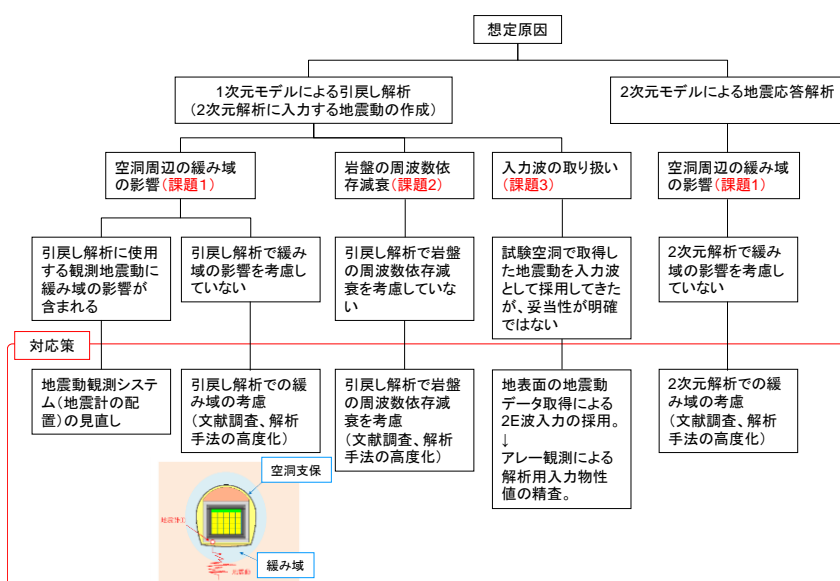


図-4 地震時影響評価技術に係る課題と対応策の概要



(2) 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

1) 既往検討成果の調査と技術オプションの検討

技術オプションの検討に資する基盤情報の整備を目的として、放射性廃棄物処分施設の設計における考え方等に係る既往検討成果の調査を実施した。まず、国際的な考え方を整理するために、国際原子力機関 IAEA の安全基準、国際放射線防護委員会 ICRP の勧告を調査した。次に、ALARA の概念を導入している国に着目して、諸外国における放射性廃棄物処分に対する規制について調査した。その上で、現在整備が進められている中深度処分に対する規制基準類を調査し、要求事項を

整理した。さらに、我が国における中深度処分と類似の処分概念に関する既往の検討成果を、ALARA や BAT の概念の取り込み方や設計オプションの絞り込み方法に着目して調査した (図-5)。

技術オプションの検討は、施設設計の観点と安全性の観点から行った。施設設計の観点からの検討では、人工バリアに求められる機能に基づき網羅的にオプションを抽出する方法と、絞り込み方法の考え方について検討するとともに、客観性の観点からここでの絞り込み評価に有効と考えられる AHP 手法による試行を実施した。これらの検討を踏まえて、次年度以降の検討で中心とする設計オプションを抽出した (図-6)。

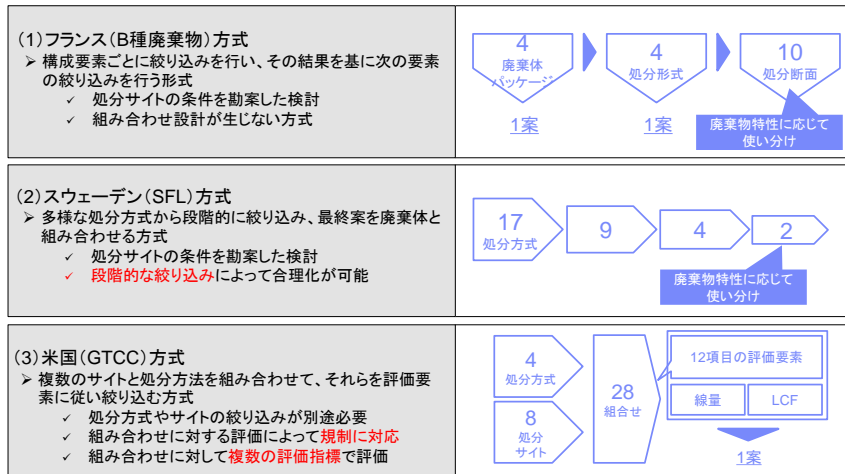


図-5 海外における設計オプションの絞り込み事例

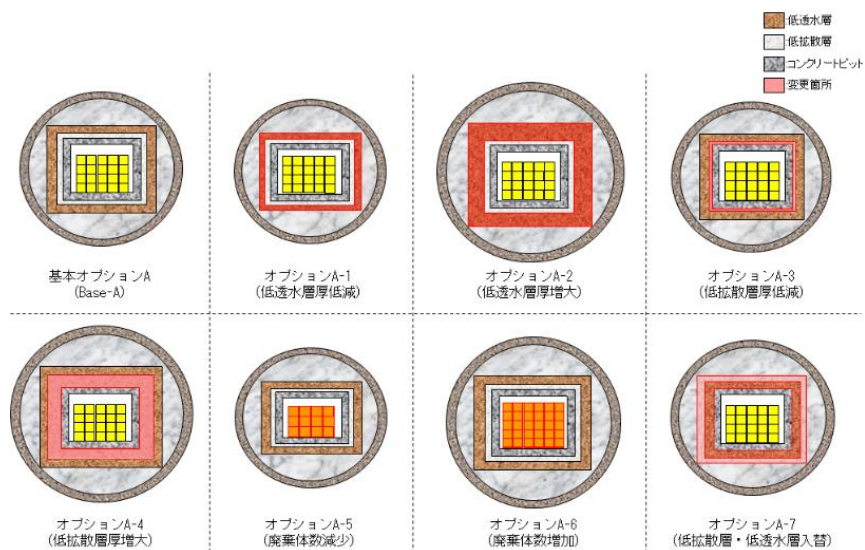


図-6 次年度以降の検討で中心とする設計オプション

また、安全性の観点からの検討では、設計オプションを総合的に選択する際の判断指標とすることを念頭に、感度解析を実施した。人工バリアの組み合わせに係る感度解析では、移流による核種移動の抑制機能に期待する低透水層と、拡散による核種移動の抑制機能に期待する低拡散層の組み合わせの影響と指標の適性を評価するために、図-7 に示す A~E の 5 ケースを対象に、核種移行モデルを用いて放射性核種の移行率や系内に残存する放射エネルギーを算出した。評価結果を図-8 に示す。一連の検討から、人工バリアの構成として「廃棄体-低拡散層-低透水層-天然バリア」が核種閉じ込め性の観点から最も有効であること、評価指標としては天然バリア出口や人工バリア出口のフラックスの変動幅を比較することが有効であることを明らかにした。

併せて、次年度に向けて、適切な技術オプションを選択するための方法論を具体化することを

目的として、性能の指標を導出するための課題の具体化と対処方法案へのアプローチについて整理した（図-9）。

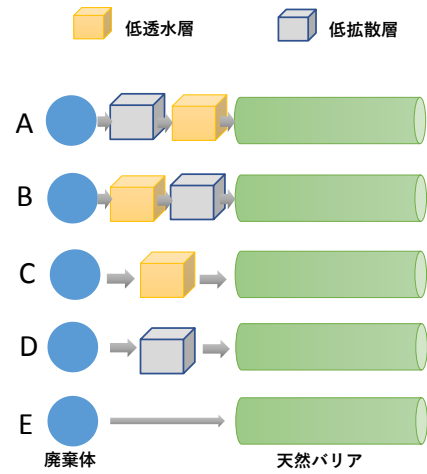


図-7 人工バリア構成の組み合わせ

指標案	天然バリア出口での移行率	人工バリア出口での移行率	核種の残存量	備考
特徴	変動幅は天然バリアに強く依存	変動幅は天然バリアへの依存性は小さいが、短半減期の核種がピークを支配する	10 万年後の結果は、どのケースも変化なし、結果は 100 万年後	( )内は変動幅  最大値 ↑ 対数 対数 ↓ 対数 最小値 最小値に関する考え方は多様性あり
ケース A	-7~-7.6(0.6)	-2.6~-7.4(4.8)	-1.7~-2.8(1.1)	
ケース B	-7~-7.3(0.3)	-2.6~-6.5(3.9)	-1.7~-2.8(1.1)	
ケース C	-7(-)	-2.1(-)	-3.0(-)	
ケース D	-7~-7.1(0.1)	-1.7~-4.4(2.7)	-2.8~-3.3(0.5)	
ケース E	-7.0(-)			

図-8 核種移行モデルによる評価結果

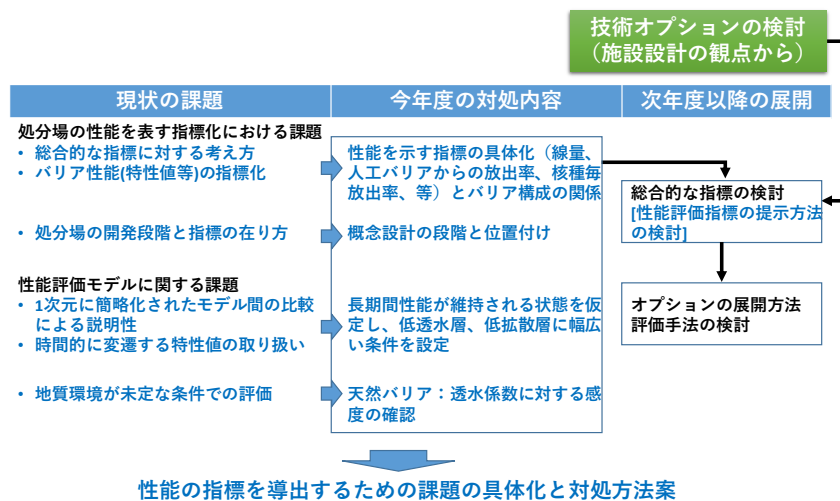


図-9 性能の指標を導出するための課題の具体化と対処方法案

2) 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

締固め土の透水係数は、締固め後の乾燥密度が最大となる最適含水比（点 A）のやや湿潤側（点 C）で極小値を取ることが実験的事実として経験的に知られている（図-10）。本研究は、中深度処分において重要な人工バリアの一つに位置づけられるベントナイト混合土を対象に、安全性担保に係る説明性の向上と合理的な配合設計に資するために、この現象のメカニズム「最適含水比の湿潤側で最小透水係数が発現されるメカニズム」の解明を試みようとするものである。

事業の初年度となる 2020 年度は、まず、関連文献の調査及び有識者へのヒアリングを実施し、本研究を進める上での論点と課題を整理した。さらに、最小透水係数発現メカニズム解明の手順と説明方法案について検討した（図-11）。これらを受けて、2020 年度並びにその次年度以降の研究計画を策定した上で、ベントナイト混合土の室内締固め-透水試験等の各種試験を開始した。

また、可視化手法が本研究でのメカニズム解明に資すると考え、実体顕微鏡による土粒子間隙構造観察に加え、水の浸透挙動の確認を目的とした

中性子イメージング実験<sup>6)</sup>を試行し、その実験手法の適用性について検討した。

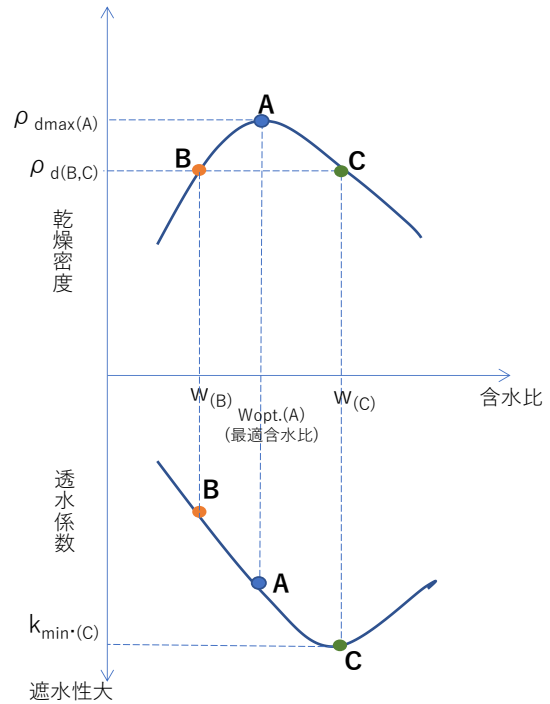


図-10 締固め土における含水比と乾燥密度・透水係数の関係

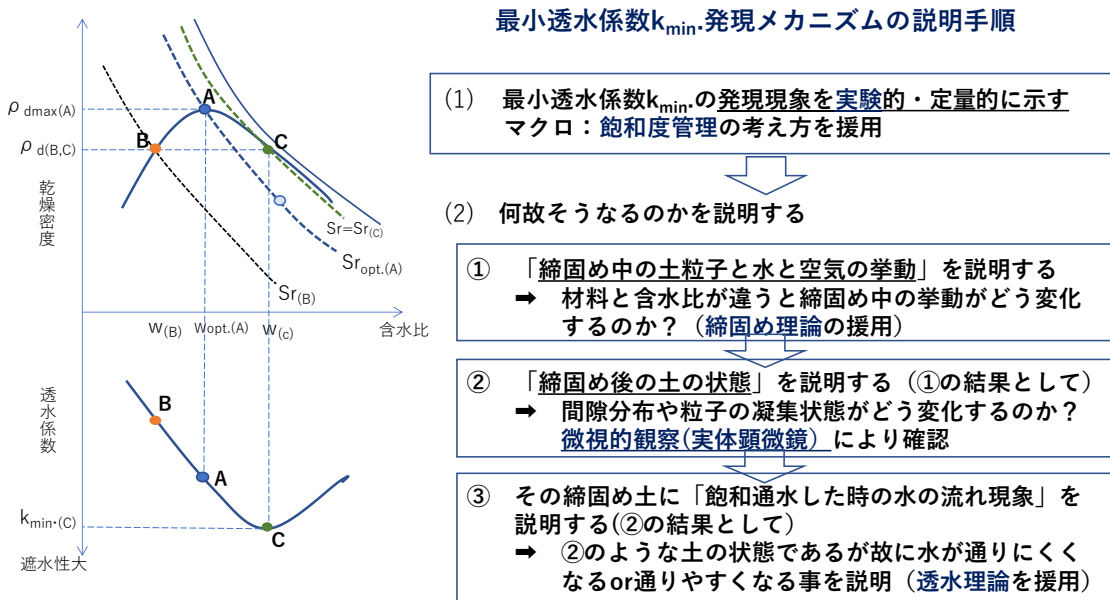


図-11 最小透水係数発現メカニズム解明の手順と説明方法案

- 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) 令和3年第35回原子力規制委員会（令和3年9月29日）資料2「第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る関係規則等の改正及び中深度処分に係る審査ガイドの策定」、原子力規制庁
- 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2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、2021
- 5) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成27年度～平成31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 地下空洞型処分施設機能確認試験 報告書、2020
- 6) <https://ja.wikipedia.org/wiki/中性子イメージング>、<https://www.jsns.net/facilities> など

## 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) 浅地中ピット処分対象廃棄体の製作及び検査方法の整備に関する調査

浅地中ピット処分対象廃棄体（ドラム缶形態）製作方法及び検査方法に関する標準本体及び附属書の原案を作成するとともに、日本原子力学会標準委員会 LLW 廃棄体等製作・管理分科会の審議への支援などを行った。

### (2) 中深度処分施設の埋設後管理標準に関する調査（2020 年度）

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。

### (3) 中深度処分の安全評価手法標準の改定に関する調査（2020 年度）

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) L1 廃棄体の遠隔製作技術の実証試験計画策定に関する検討

L1 廃棄体製作各段階における既往研究の成果と課題を整理し、各段階で要求される技術要件を検討するとともに、L1 廃棄体の標準的な製作方法骨子案の記載項目の検討を行った。

(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）ならびにセメント系材料や岩盤等の複数の材料で構成されており、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化し、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評価するための技術の開発とその妥当性の確認が重要となる。

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技術の開発と確証を目指し、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・ブロック方式において、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境界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、緩衝材定置直後から再冠水するまでの期間を対象として、緩衝材の流出挙動の把握及び抑制するための工学的対策の具体化に向けた、ブロック方式における施工時に存在する緩衝材と孔壁の隙間に対する処理方法（施工技術オプション）の開発・整備を進めている。

また、人工バリアとして緩衝材に長期的に期待する機能は緩衝材の飽和後に発揮されるものであり、緩衝材の長期的な性能の評価は、完全飽和、密度均一を前提として行われている。しかし、施工直後から飽和に至るまでのプロセスを経た緩衝材の密度分布は、飽和後にも残存する可能性が報告されている<sup>1)</sup>。再冠水に至る迄の過渡期における緩衝材の変遷挙動は、地下水の浸潤に伴う膨潤圧の発生や透水性の変化等に加え、孔内湧水環境や施工時の孔壁との隙間を要因とする浸潤・膨潤・閉塞の不均質性及び隙間の閉塞プロセス等の影響を受ける。飽和までの期間に緩衝材の状態がどの

ように変遷するかを把握し、過渡期を経た飽和後の緩衝材の密度分布を確からしく予測することは、その後の長期にわたる緩衝材の機能の評価に重要となる。そのため、初期の許容可能な緩衝材の流出を考慮した緩衝材の飽和プロセスの評価技術の整備にも取り組んでいる。

なお、本事業は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「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（JPJ007597）（ニアフィールドシステム評価確証技術開発）」により、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ものである。

#### ◇2020年度の成果<sup>2)</sup>

##### (1)事業の概要

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・ブロック方式に適用する隙間処理方法として、隙間未充填オプション、ケイ砂充填オプション、ペレット充填オプションの3つの施工技術オプションを対象として緩衝材の流出特性に係る技術情報の整備を進める。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、解析ドメインのスケールアップや多次元化ならびに試験データとの比較・改良といった段階的な拡張に取り組む。

##### (2)緩衝材の流出を抑制する工学的対策の具体化

ここでは2020年度に実施した隙間未充填オプションに関する地下原位置での流出試験の結果、及び処分孔の環境条件を踏まえた施工技術オプションの選択に資する各施工技術オプションの判断指標や今後の試験計画に関する検討結果について述べる。

##### 1)原位置試験

幌延深地層研究センターの深度350m調査坑道に掘削した試験孔を使用して、緩衝材の定置から処分坑道の埋め戻しまでの期間を想定した自然





## 2) 施工技術オプションの選択に資する評価指標案の整理と試験計画の立案

### ① 隙間未充填オプション

上述した原位置での流出試験結果を踏まえ、原位置で取得可能なパラメータ（処分孔と周辺岩盤との水頭差、孔内湧水量）を本オプション選択（隙間の閉塞条件）に係る評価指標案とした。また、隙間の閉塞までの緩衝材の流出量が、緩衝材の性能維持の面で許容される量（以下、「許容流出量」という。）であることも評価指標に加える。

今後は、隙間の閉塞条件、および隙間の閉塞に至るまでの流出量について、室内試験による定量的なデータ取得、及び原位置試験による現象理解等により評価指標を検討し、整備を進める。

### ② ケイ砂充填オプション

2019年度の原位置試験<sup>4)</sup>ならびに2019年度と2020年度の室内要素試験では、緩衝材の流出濃度は流量の大小に関わらず低濃度で推移した。緩衝材の流出量が低濃度に維持されれば、流出濃度と流量（湧水量）により流出量の定量的な評価ができる可能性がある。また、ケイ砂を充填することで緩衝材界面の境界条件（湧水環境）を制御できる可能性があることから、本オプションでは緩衝材の流出量の定量化（モデル化）を指向し、得られる定量値を評価指標として許容流出量と比較できるような整理を進める。

今後は、緩衝材の流出量が低く維持される流量範囲を室内試験で把握し、流出量の評価方法（モデル）を検討する。加えて、2019年度のケイ砂を充填した原位置試験<sup>4)</sup>で確認した、緩衝材の膨潤圧の発生に伴い、孔壁を加圧したためと推察される湧水量の増加傾向について、原位置での原因確認試験も行いつつ施工オプションとしての整備を進める。

### ③ ペレット充填オプション

2017年度の原位置試験<sup>5)</sup>より、試験孔の壁面が湧水で濡れている場合、隙間への均質なペレットの充填に課題が示され、施工品質を確保するための施工面での工夫の必要性が示唆された。一方、室内要素試験では、隙間にペレットを充填することで緩衝材の流出量抑制効果が確認された。

今後は、ペレットの仕様（粒度・表面コーティング等）の整理、および均質かつ効率的な施工方法の具体化、ならびに流出量の評価手法についての検討から着手する。

## (3) 緩衝材の飽和プロセスを対象とした解析手法の構築

### 1) 実施概要

2020年度から2022年度までの3カ年の開発計画では、これまでに開発した小型の試験体サイズ（解析ドメイン）を対象とした解析手法をベースとして、図-3に示す段階的な拡張を行い、実規模スケールにおける緩衝材の乾燥密度分布を予測する手法の構築を行う。

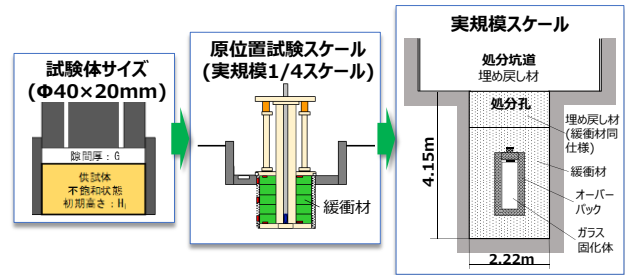


図-3 段階的な解析モデルの拡張

### 2) 試験体サイズでの力学解析手法の検証

解析手法には、土骨格の変形と間隙水圧の流れを連成して解く土/水連成有限要素解析手法を用いており、ベントナイト緩衝材の力学応答を表現するため、土骨格の変形を支配するモデルとして塑性膨潤の概念を取り入れた弾塑性構成モデルを採用した。ベースとなる弾塑性構成モデルは、飽和状態にある地盤材料の力学挙動表現に広く用いられている修正 Cam-clay モデルであるが、塑性膨潤の概念を取り入れることにより、緩衝材に用いられるベントナイト（あるいは、その混合土）に特有の膨潤挙動を再現できる。

ベントナイト緩衝材の飽和プロセス（隙間充填と均一化過程）の解析には、有限要素解析コード DACSAR<sup>6),7)</sup>を用いた。本検討で用いるコードは、この解析コード群の一つである DACSAR-I<sup>8)</sup>をベースとして、不飽和状態にあるベントナイト緩衝材の力学特性を表現するためのアップデートを施したものである。

図-4に解析対象となるプロセスの概念図を示す。初期状態ではベントナイト供試体は不飽和状態であり、上部に隙間が設けられている。この隙間に水が供給され、ベントナイトに浸潤することで供試体が膨潤して隙間を充填する。隙間が充填された後も供試体内部での間隙水の移動は起こるため部分的な体積変化が生じるが、全体の体積は一定であることから、ある領域が膨潤すれば他

の領域は圧縮されることになる。この膨潤過程における押し合い圧し合いによる変形と乾燥密度や応力の分布を解析によって追跡する。

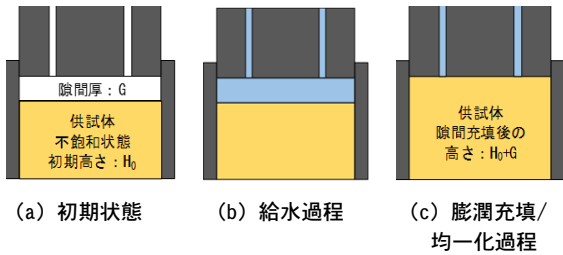


図-4 解析の対象となるプロセスの概念図

2020年度は、試験体サイズにおける解析手法の検証を実施するために、試験データの取得を開始し、再現解析を実施した。

解析手法の検証のための小型セル試験の装置、試験条件及び隙間閉塞の条件等を変えた試験ケースを図-5に示す。なお試験には蒸留水を使用した。今後、膨潤圧等が定常状態となるまで膨潤圧や測圧等のデータを取得した後に、試料を解体して乾燥密度分布等を測定する予定である。

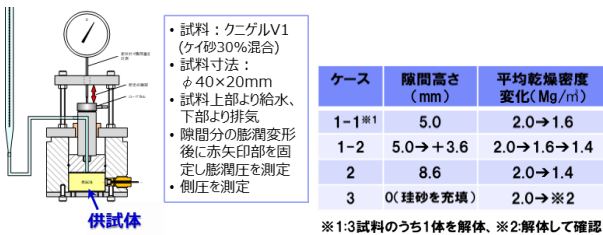


図-5 試験装置の概略図と試験ケース

小型セル試験の再現解析は、図-5に示した試験条件及び試験ケースに基づいて実施した。解析結果の1例を図-6に示す。供試体が隙間を充填したのち平衡状態に至ると、供試体内の乾燥密度は吸水面に近い側から、低密度領域、遷移領域、高密度領域に大別される分布となる。今後、試験データ

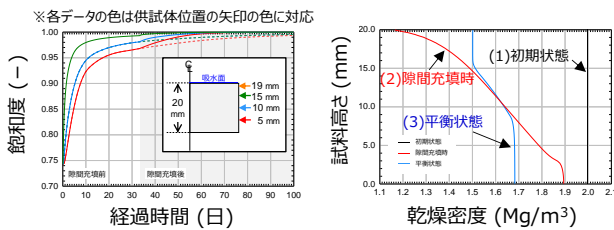


図-6 軸方向膨潤の解析結果(ケース1-1)

と再現解析結果を比較して解析手法の検証を行うと共に、必要に応じパラメータの見直し等を進める予定である。

#### (4)まとめ

懸置き・ブロック方式の緩衝材の定置から再冠水までの過程における緩衝材の流出対策として、緩衝材と孔壁の隙間の処理方法(施工技術オプション)の選択に資する緩衝材の流出特性等の整備に向けて、3つのオプション(隙間未充填、ケイ砂充填、ペレット充填)について、原位置試験や室内試験の結果やこれまでの成果に基づき、緩衝材の流出特性に関する判断指標案や今後の試験計画を取りまとめた。緩衝材の飽和プロセスを対象とした再冠水後の乾燥密度分布を予測するため解析手法の構築では、実規模サイズへの段階的な拡張計画に基づき、2020年度は試験体サイズにおける解析手法の検証を進めた。今後は、引き続き検証作業を実施し、加えて原位置試験スケールに拡張した検討を進める予定である。

- 1) 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証技術開発(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.
- 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 ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書, 2021
- 3) 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 -, 2021.
- 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, 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 ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書, 2020.
- 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 処分システム工学確証技術開発(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.
- 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) 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, 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 ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書, 2020
- 8) 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<sup>1)</sup>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“製造・施工技術に係る品質保証体系及びモニタリング技術の整備”に取り組んでいる。

坑道シーリングに関わる施工技術の整備では、多様な地質環境条件や処分場設計オプションに柔軟に対応できる“埋め戻し材の材料バリエーション”や“施工技術オプション”の整備に向けて、ベントナイトの種類と混合率及び模擬掘削土の種類と最大粒径などをパラメータとした室内試験及び埋め戻し材の施工試験等を実施した。

製造・施工技術に係る品質保証体系及びモニタリング技術の整備では、人工バリアを含む地下構成要素の品質保証体系の構築に向けて、諸外国の先行検討事例の調査を行い、製造・施工プロセス管理やモニタリングを包含した品質保証体系の全体枠組みの構築に関する考え方を整理した。また、埋め戻し材を先行検討事例として、品質保証及び性能確認に必要な計測技術の適用性確認のための要素試験を実施するとともに、モニタリングに関する共通基盤技術として、無線給電技術の高度化に向けた要素試験を実施した。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「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（JPJ007597）（地層処分施設閉鎖技術確証試験）」として、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・資金管理センターの2機関が共同で実施したものである<sup>2)</sup>。

### ◇2020年度の成果<sup>2)</sup>

#### (1)埋め戻し材の特性を踏まえた施工技術オプションの整備

##### 1)埋め戻し材の材料データの取得

埋め戻し材の透水係数を確認するために、表-1に示す材料を用いて模擬掘削土の最大粒径、掘削土の破碎時に発生する細粒分を模擬した微粉末の有無、締固めエネルギーをパラメータとしてイオン交換水と人工海水を用いた透水試験を実

表-1 透水試験に用いた埋め戻し材の材料構成

ベントナイト	模擬掘削土	
	岩種	最大粒径
クニゲル V1 (混合率 15%)	玄武岩 (混合率 85%)	5mm (砕砂粗目) 2.5mm (砕砂細目) 微粉末 (破碎微粒分を模擬)

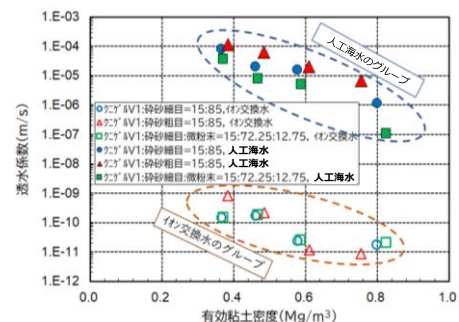


図-1 透水係数と有効粘土密度の関係

施した。模擬掘削土には、入手が容易な玄武岩を用いた。

透水試験の供試体は、締固めエネルギー4.5Ecの95%及び1Ecの95%、85%、75%の締固め度で作製した。透水試験の結果から求めた透水係数と有効粘土密度の関係を図-1に示す。埋め戻し材に要求される透水係数は、現状では概ね $1.0 \times 10^{-8}$  m/s以下とされている<sup>3)</sup>。混合率15%のクニゲルV1と模擬掘削土（最大粒径5mm）の混合土の透水係数は、今回の締固めエネルギーに対してイオン交換水のケースで $10^{-11} \sim 10^{-9}$  m/s、人工海水のケースで $10^{-7} \sim 10^{-4}$  m/sであり、イオン交換水のケースでは十分な透水係数が得られた。人工海水のケースでも既往の知見と同様に、有効粘土密度の増加とともに透水係数が低下しており、ベントナイト混合率の増加などにより埋め戻し材に要求される透水係数が確保できる見通しが得られた。

#### 2)施工技術オプションの整備

15%程度のクニゲルV1と模擬掘削土の混合土で埋め戻し材に要求される透水係数が確保できる見通しが得られたことから、多様な地質環境条件や処分場設計に柔軟に対応できるように、埋め戻し材の施工技術オプションの整備を進めている。本事業では、実際の坑道の埋め戻し後にサンプリングなどの破壊的な検査を必要とせず、材料製造から施工の工程を管理することで施工後の品質を確保するプロセス管理手法を構築することを指向する。以下に記載する各施工方法によ

表-2 撒き出し・転圧工法に用いた埋め戻し材の配合

	小計	ペントナイト	砕砂	碎石	加水
乾燥質量(kg)	1,073	161	365	547	—
水分量(kg) (含水比(%))	97	14 (8.7)	23 (6.4)	13 (2.3)	47
材料投入量(kg)	1,123	175	388	560	47
仕上がり量(kg)	—	1,170			



(a) 模擬坑道の外観 (b) タンデムローラーの転圧状況

図-2 模擬坑道の外観及び施工試験の状況

る施工試験等を通じて得られた知見は、プロセス管理の管理項目、指標などの設定に反映した。

### ①撒き出し・転圧工法

施工試験は図-2(a)に示す模擬坑道（天端までの高さ及び坑道幅ともに5 m）内で実施した。転圧機械には、坑道の空頭制限を考慮して高い施工速度が期待できる4t タンデムローラー（図-2(b)）及び坑壁近傍の施工には1.5t 小型振動ローラーを用いた。施工試験に用いた材料を表-2に示す。ペントナイト（クニゲル V1）の混合率は15%とし、模擬掘削土には最大粒径20 mmの玄武岩を用いた。

施工試験における透水係数（イオン交換水）の目標値は $1 \times 10^{-9}$  m/sとして、埋め戻し材の目標乾燥密度を $1.81 \text{ Mg/m}^3$ に設定した<sup>4)</sup>。撒き出し厚さと転圧回数をパラメータとした予備試験の結果から、撒き出し厚さ30 cm、転圧回数6回に設定して、合計13層（施工機械の空頭制限から決定）の転圧施工試験を実施した。施工試験後に測定した乾燥密度を図-3に示す。タンデムローラーで施工した範囲の乾燥密度は $1.32 \sim 1.92 \text{ Mg/m}^3$ であり、目標乾燥密度を下回る箇所が見られた。乾燥密度のばらつきが大きかった原因としては、撒き出し厚さが30 cmと厚かったため、転圧後の層表面の不陸（表面の凹凸）が大きく、転圧による締固めエネルギーが埋め戻し材に均一に負荷されなかったこと、表面の凹凸により砂置

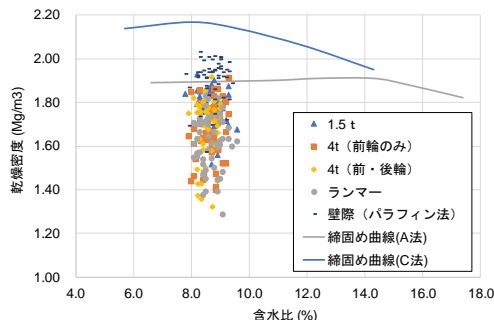


図-3 転圧施工後の乾燥密度の測定結果

表-3 小規模模擬坑道吹付け試験条件

ペントナイト	最大粒径 (mm)	含水比 (%)	材料供給量 (kg/sec)	連続施工量 (kg)
クニゲル V1 (15%)	2.5mm	10.4(最適)	1.00	3,000 (目標)
		7.4	1.25	
	5mm	9.4(最適)	1.50	
		6.4%	1.25	

換法による密度測定に誤差が生じたことなどが考えられた。このことから、不陸の発生を低減できる撒き出し厚さの適切な設定が施工プロセス管理上の重要な管理項目の一つであることが示唆された。

### ②吹付け工法

連続的に吹付け施工が可能な材料条件及び吹付け機械の制御条件を把握するために、模擬掘削土の最大粒径、埋め戻し材の含水比及び吹付け機への材料供給速度をパラメータとして吹付け箱を用いた予備試験を実施した。その結果から、目標とする乾燥密度が得られ、且つ、施工した材料のリバウンド量及びホースの閉塞ができるだけ少なくなる条件を選定し、スケールアップした小規模模擬坑道試験（表-3、図-4）を実施した。

試験結果を表-4に示す。4ケースのうち3ケースにおいて施工試験の途中で吹付けホースが閉塞したため試験を終了した。含水比が大きいほどホースの閉塞が生じやすくなるが、施工した埋め戻し材のリバウンド率は抑制されることが確認できた。また、最大粒径が大きい方がホースの閉塞は生じにくい傾向を示したが、リバウンド率は大きくなった。この結果から、吹付け工法では、適切な含水比の設定と最大粒径の選択が材料製造プロセス上の重要な管理項目となる。吹付けにより付着した埋め戻し材の乾燥密度については、試験ケース間での差は小さく、すべてのケースで

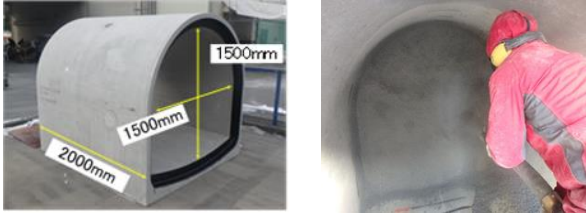


図-4 小規模模擬坑道及び吹付け施工試験状況

表-4 小規模模擬坑道吹付け試験結果

最大粒径 含水比	連続施工 量 <sup>*</sup> (kg)	吹付け付 着量(kg)	リバウ ンド率 (%)	乾燥 密度 (Mg/m <sup>3</sup> )
2.5mm 10.2%	553	1,483	15.6	1.888
2.5mm 7.2%	2,811	2,000	27.4	1.902
5mm 9.4%	2,874	2,056	22.7	1.902
5mm 6.4%	3,611	2,430	42.5	1.913

※連続施工量＝閉塞までの材料投入量・閉塞時ホッパ内残量



図-5 要素試験用スクリー装置

目標とする乾燥密度を上回った。

### ③スクリー工法

前年度に検討したスクリー装置の概念設計を基に<sup>4)</sup>、図-5に示すスクリー単体の要素試験装置を製作して埋め戻しの要素試験を行った。スクリーの外径は29.79 cm、ピッチは19 cm、長さは400 cm(ホッパ込み)である。試験に用いた混合土(埋め戻し材の配合)は表-5のとおりであり、碎石の最大粒径は20 mmである。スクリーによる移送性を確保するために、混合土の含水比は自然含水比(今回使用した材料では2.8%)とした。透水試験の結果、目標として設定した透水係数 $1 \times 10^{-9}$  m/sを達成するためには、この配合では乾燥密度 $1.5 \text{ Mg/m}^3$ 程度が必要となる(表-6)。

要素試験では、施工初期を模擬してスクリー先端から埋め戻し材を高さ75 cm及び150 cm落下させるケース(図-6(a))と、施工途中を模擬し

表-5 スクリュー工法で使用した埋め戻し材の配合

	ケゲルV1	ケゲルGX	碎石	砕砂
配合比(%)	5	10	45	40
含水比(%)	7.3	11.5	0.8	2.3

表-6 スクリュー工法で使用する材料の透水試験結果

締固め度 (%)	乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	有効粘土密 度(Mg/m <sup>3</sup> )	透水係数 (m/s)
100	1.928	0.722	7.38E-11
90	1.735	0.565	1.40E-10
80	1.542	0.445	2.14E-10



(a)落下ケース



(b)先端埋め込みケース

図-6 スクリュー工法要素試験実施状況

て先端を埋め戻し材に30 cm埋め込んで埋め戻し材を押し出すケース(図-6(b))を実施した。落下ケース及び先端埋め込みケースにおける乾燥密度(かさ密度)の最小値は、それぞれ $1.663$ と $1.653 \text{ Mg/m}^3$ であった。また、先端埋め込みケースにおける埋め戻し材の前面斜面の勾配角は $36 \sim 39^\circ$ 程度であり、粒径の大きい碎石が斜面を滑落し、下方に蓄積する傾向が見られた。スクリー工法では、このような材料分離につながる現象を抑制する方法を検討し、プロセス管理手法に反映する必要がある。

### ④ブロック工法

ブロック成型可能な埋め戻し材の材料条件及び成型圧力を把握するために、静的締固め試験を実施した。試験ケースを表-7に示す。碎石及び砕砂の最大粒径は20 mmと5 mmとして、試験には内径100 mm、高さ180 mmのモールドを用いた。

試験結果の一例として、ベントナイト混合率15%、成型圧力20 MPaにおける、模擬掘削土の碎石と砕砂の割合をパラメータとした静的締固め試験の結果を図-7に示す。同図から、碎石と砕砂の割合が乾燥密度に及ぼす影響は小さいことがわかった。同様に、ベントナイト混合率15%、碎石34%及び砕砂51%の混合割合の模擬掘削土に

表-7 静的締固め試験ケース

ベントナイト 混合率 (%) (ケゲル V1)	模擬掘削土混合率 (%)		成型圧力 (MPa)
	砕石	砕砂	
15	0	85	全ケース共通 5,10,20,30,40
	34	51	
	51	34	
	17	68	
30	0	70	
	42	28	

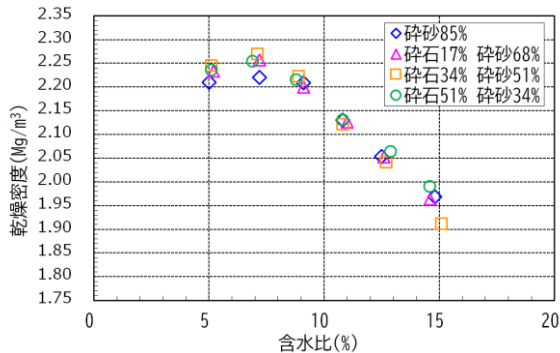


図-7 静的締固め試験結果の例  
(ベントナイト 15%、成型圧力 20 MPa)

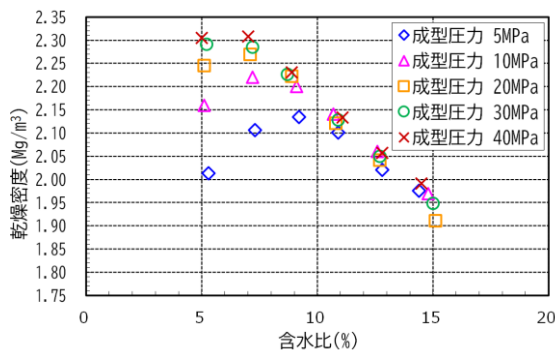


図-8 静的締固め試験結果の例  
(ベントナイト 15%、砕石 34%、砕砂 51%)

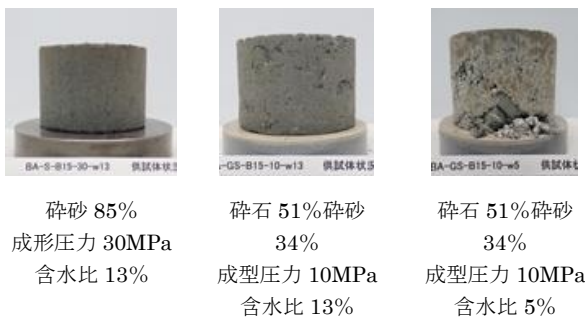


図-9 静的締固め試験後の試験体の外観  
(ベントナイト 15%)

における、成型圧力をパラメータとした静的締固め試験の結果を図-8 に示す。乾燥密度に及ぼす成

型圧力の影響は、低含水比の領域で大きく、高含水比の領域で小さかった。

ベントナイト混合率 15%における静的締固め試験後の試験体の外観を図-9 に抜粋して示す。砕石の割合、成型圧力、含水比の違いにより、試験体の外観に違いが見られ、脱型後の試験体形状を維持できない条件も確認された。今回の締固め試験の結果から、ブロック成型可能な材料条件と成型圧力の範囲が把握できた。今後は、サイズの大きなブロックの製作試験を実施し、ブロック成型可能な材料条件や成型圧力等をプロセス管理手法に反映する。

(2) 製造・施工技術に係る品質保証体系及びモニタリング技術の整備

1) 品質保証・性能確認プログラムの具体化検討  
閉鎖後の能動的な管理に依存しない地層処分では、閉鎖時に長期の安全性を確保した地層処分システムが構築されたことを示す「閉鎖の判断」が重要となる。地層処分事業が先行する諸外国では、施設の最終閉鎖の判断に資する取組として、“品質保証”や“性能確認”、“モニタリング”などをキーワードとした取組が見受けられる。そのような動向を踏まえ、本事業では、わが国における処分場の閉鎖の判断に資する取組の具体化に向けて、以下に示す2つのプログラムに分けて検討を進めている。

- 品質保証プログラム (地下構成要素の施工品質の確保に関する取組)
- 性能確認プログラム (地下構成要素の変遷挙動を評価する性能評価の入力情報を取得する取組)

品質保証プログラムについて、本事業では、人工バリアを含む地下構成要素の施工後の現物確認を最小化する製造・施工プロセス管理手法を主体としたプログラムを指向する。製造・施工プロセス管理手法は、材料製造及び施工の各段階で適切な品質管理を実施して品質を保証する方法であり、わが国の一般産業分野でも取り入れられつつある工法規定方式などに類似した考え方である。そのためには、事前の試験等により管理項目や管理基準値を設定して、その妥当性を実証試験等によって確認しておく必要がある。そこで、本年度はスウェーデンのSKBおよびスイスのNagraにおける実証試験等の取り組みについて調査し

た。SKB と Nagra とともに実証試験に向けて要素試験、段階的にスケールアップした試験、個々の要素を組み合わせた試験などを段階的に実施する研究開発に取り組んでおり、実証試験で得られた課題を設計や施工方法等に反映して研究開発が進められている。この開発ステップは本事業における地上の模擬坑道を用いた埋め戻し材の実規模施工試験とそれに向けた各工法の要素試験、小規模施工試験などの取り組みとも整合する。実規模施工試験は、実証試験に向けた研究開発のための課題を明確にすることも目的の一つとなる。

性能確認プログラムについては、プログラムで得るべき情報は性能評価の入力情報となることから、性能評価に関する体系的な取りまとめがなされているフィンランドの Posiva における性能評価方法を調査し、性能確認プログラムで取得する情報とその取得方法について整理した。性能確認プログラムで取得すべき情報は、性能評価の項目（地下構成要素の性能に影響を及ぼす変遷挙動やプロセス）、評価指標（性能評価の項目における指標となるパラメータ）、評価方法（それぞれの評価指標に対する評価方法）、入力データ（評価に用いられるデータ）といった項目で整理することができた。また、入力データの取得方法については、以下のように分類できる。

- ・ 事前の試験（実規模、中規模、室内規模）
- ・ 数値解析
- ・ 既往の知見（文献等の既往研究成果）
- ・ 操業期間中のモニタリング等

今後は、これまでに調査した諸外国の品質保証プログラム及び性能確認プログラムに類する取り組みを参考にして、わが国における地下構成要素の性能評価及びこれまでの研究開発成果を整理したうえで、両プログラムの具体化を進める。

## 2) 人工バリアを含む地下構成要素の状態把握に係る関連ハード技術の高度化

品質保証プログラム及び性能確認プログラム並びに、これらのプログラムの適用性を事前確認するための実証試験等に必要な計測技術について、埋め戻し材を先行検討事例として研究開発を進めている。埋め戻し材には「坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないこと」が求められている<sup>3)</sup>。埋め戻し材は、適切に設定された乾燥密度などの施工目標値を満足するように施工され

表-8 埋め戻し材の配合比率

材料	配合重量比	含水比
	(%)	(%)
砕石 1005	35	1.1
砕砂	50	2.3
クニゲル GX	8	11.5
クニゲル V1	7	7.3
計	100	3.0

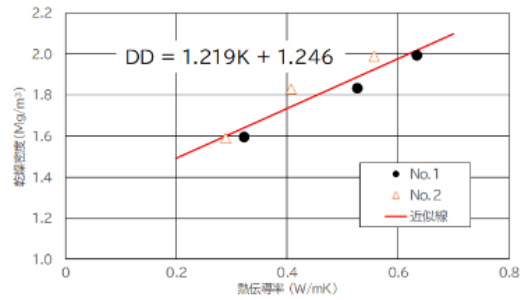


図-10 熱伝導率と乾燥密度の関係

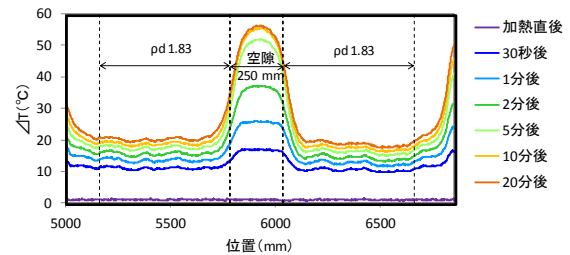


図-11 加熱式光ファイバで測定した温度変化量と空隙位置の関係

ることになるが、施工後の自重沈下や地下水の浸潤に伴う圧密によって坑道天端に隙間が生じる可能性がある。このような隙間に対しては、事前の施工試験等でその容積を把握して、埋め戻し材の設計（ベントナイト混合率の設定など）に反映することで地下水の浸潤にともなうベントナイトの膨潤により隙間を閉塞させることができる。例えば、坑道天端の隙間を模擬した要素試験により、埋め戻し材への水の浸潤にともない坑道天端に作用する圧力を計測し、埋め戻し材の乾燥密度と膨潤圧の関係から坑道天端における乾燥密度の適切性を判断することなどが考えられる。これらの現象に対する計測技術の適用性を確認するために、光ファイバなどを用いた要素試験を実施した。また、計測技術の共通基盤技術として無線給電技術に関する要素試験も実施した。

### ①埋め戻し材の乾燥密度測定の要素試験

埋め戻し材の乾燥密度の分布計測への加熱式光ファイバの適用性を確認するために、表-8 に示す配合の埋め戻し材を用いた要素試験を実施した。

試験土槽に 1.6、1.8、2.0 Mg/m<sup>3</sup>の乾燥密度に調整した試料を準備し、加熱式光ファイバで測定した温度の変化量から求めた熱伝導率と乾燥密度の関係を図-10 に示す。加熱式光ファイバにより求めた熱伝導率の増加にともない乾燥密度は単調に増加する傾向が確認でき、碎石を含む埋め戻し材に対しても加熱式光ファイバを用いることで乾燥密度の分布計測が実施できる見通しが得られた。

### ②坑道天端の隙間計測の要素試験

坑道天端の隙間計測への加熱式光ファイバ及びケーブル TDR (Time Domain Reflectometry) の適用性を確認するために、表-8 に示した埋め戻し材を用いた要素試験を実施した。長さ 180 cm、深さ 15 cm、幅 15 cm の試験土槽の底盤部と中央に加熱式光ファイバとケーブル TDR を設置し、幅 25、50、100 cm の隙間をあけて埋め戻し材を充填して、充填部と空隙部での計測値の違いを確認した。測定結果の一例として、空隙幅 25 cm において加熱式光ファイバで測定した温度変化量と空隙位置の関係を図-11 に示す。加熱式光ファイバ及びケーブル TDR とともに隙間のおおよその位置と長さを把握することができた。加熱式光ファイバに比べてケーブル TDR の隙間の位置に関する計測精度が低かったが、坑道天端の隙間計測に両計測技術を適用できる見通しが得られた。

### ③埋め戻し材の膨潤により発生する圧力計測に関する要素試験

埋め戻し材と坑道天端の間の隙間がベントナイトの膨潤により閉塞して適切な乾燥密度になることを確認するための計測技術として、膨潤時の圧力分布計測に対する光ファイバの適用性を確認する要素試験を実施した。光ファイバの出力値には、圧力に起因するひずみだけでなく、温度や設置時のひずみが含まれるため、出力値から圧力に起因するひずみだけを抽出できるように被覆厚の異なる 2 本の光ファイバケーブルを用いた。今回の要素試験では、適切な被覆材やその厚

さの組合せを把握するために、複数の光ファイバをゴム等のシートで挟んで加圧した。その結果、同一加圧シート面に設置した 4 本の光ファイバのひずみの差分と圧力の関係には正の相関関係が見られた。また、ケーブル径の差の増加にともないひずみの差分が大きくなる傾向が見られ、圧力に対する感度が高くなったことから、径の異なる 2 本の光ファイバケーブルを適切に組み合わせることで圧力を計測できる見通しが得られた。

### ④処分環境を想定した無線給電技術に関する要素試験

処分施設における柔軟なモニタリング戦略の策定に資するため、プラグなどの鉄筋を含む構造物を介した無線給電システムの給電効率の向上を目的とした要素試験を実施した。要素試験では、給電コイル間に設置した鉄筋のメッシュ間隔を 100~300 mm の範囲で変化させて給電効率を測定した。その結果、メッシュ間隔が大きいほど給電効率が向上し、特に 100 mm と 200 mm における給電効率の差が大きかった。このことから、鉄筋のメッシュ間隔が一定の値を下回ると給電効率が大きく低下すると考えられるため、鉄筋のメッシュ間隔を適切に設定することで給電効率の低下を抑制した無線給電が可能であることがわかった。

- 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 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 地層処分施設閉鎖技術確証試験 報告書、2020
- 3) 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—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—、TR-20-03、2021
- 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、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 地層処分施設閉鎖技術確証試験 報告書、2020



### 3. 回収可能性技術高度化開発

#### ◇事業の概要

2015年5月に改定された特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（以下、「基本方針」という。）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<sup>1)</sup>。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）では、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<sup>2)</sup>。

- ・回収可能性に関わる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。

これらに関して、本事業では後述する(1)～(3)の3つの個別課題に展開して研究開発を進めている。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「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（JPJ007597）（回収可能性技術高度化開発）」として、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の2機関が共同で実施したものである。

#### ◇2020年度の成果<sup>3)</sup>

回収可能性という技術的課題に対して、レファレンス設計に対して回収技術を整備しておく、或いは、回収の容易性を新たに設計に考慮するという2つの技術的アプローチ（対応方針）が適用し得ることが国際的に共有されている。基本方針で新たに導入された回収可能性に関して、1)技術的対応の考え方や方針の具体化、2)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関する調査研究、更には、3)回収の技術的実現性の提示などが、わが国の当面の技術課題となる。

このような課題に対して、「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」における検討を経て、当面の技術検討の枠組みとして、特に上記1)と2)の課題に対応した定量化すべき

技術情報として、①安全性への影響（操業安全性・閉鎖後長期の安全性）、②回収の容易性（回収作業時間）、③回収可能性の維持期間、④回収可能性に係る費用の4項目を挙げている<sup>4)</sup>。

これらの項目は、回収可能性の維持期間を長くする（より将来の世代に意思決定の柔軟性を確保する）というメリットに対して、安全性、回収の容易性、費用というトレードオフの関係があることを示している。特定の設計に対する回収技術の見通しが得られれば②の回収作業時間を定量化することができる。また、特定の設計に対して①を定量化できれば安全性に有意な影響を及ぼさない期間として（更に②の回収作業時間を加味して）③を定量化できる。これらを定量化することで、基本方針の要求課題への対応のみならず、回収容易性の設計への反映の有無等を含めた技術的アプローチの具体化にも資することとなる。

上記の①～③の関係は模式的に図-1のように整理でき、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”を表現している。同図には、安全性の観点で、可逆性・回収可能性に係る2つのシナリオが包含されていることに留意されたい（政策変更して全量回収する場合、回収せずに最終閉鎖する場合）。また、回収作業に掛かる費用、回収容易性を考慮した設計への見直しに伴う建設・操業費用、回収可能性の維持期間中の維持管理費用といったものが、合理的に継続される範囲の判断に考慮されることとなる。

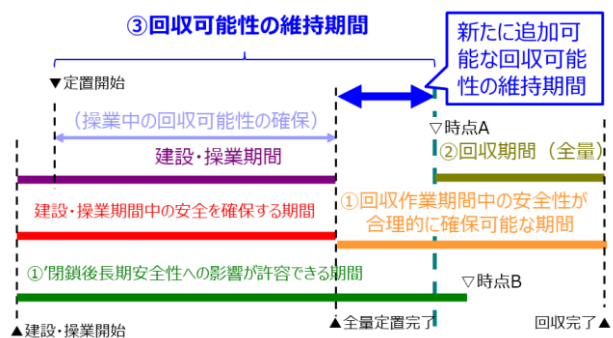


図-1 回収可能性が維持されている状態の模式図

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、ならびに、安全性への影響の定量化に向けた（図-1の①①）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つを

個別課題として設定し、以下を研究開発の出発点（前提）として取り組んでいる。

○対象概念／設計：NUMO 包括的技術報告書<sup>4)</sup>に示される、

- ・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）

○回収可能性維持の状態：処分坑道が埋め戻され、端部に力学プラグが設置された状態

#### (1)HLW 廃棄体回収技術の高度化

上記の状態から、定置された廃棄体を回収する際の一連の作業として、a)埋め戻された坑道の再解放（力学プラグや埋め戻し材の除去、b)廃棄体を拘束する土質系材料の除去（緩衝材や隙間充填材の除去）、c)廃棄体の坑道外への搬出が挙げられる。1本の処分坑道に複数の廃棄体が一定間隔で定置される概念であれば、a)の後に、b)とc)の作業を繰り返すこととなる。2019年度までの前フェーズまでに、b)に対応する技術となるオーバーパック回収時の緩衝材除去技術<sup>5)</sup>およびPEM回収時の隙間充填材の除去技術<sup>6)</sup>について、b)とc)の繰り返し作業の1断面（1体の廃棄体の回収作業）を対象とした実規模での実証試験をとおして、その技術的実現性が確認されている。一方、廃棄体1体あたりの除去作業に約70時間を要したことから（4万本の全量回収に300年強を要する）、施策としての更なる信頼感の醸成や長期に及ぶ回収作業期間中の安全性に関する不確実性の低減等のために、回収作業の更なる迅速化が望まれる。この課題に対して、回収工程の分析を基に“各作業の所要時間の定量化”、“作業上のボトルネックの抽出”を行い、迅速な回収作業に向けた技術開発に着手した。

##### 1)処分孔縦置き方式の回収技術の高度化

NUMOの包括的技術報告書<sup>4)</sup>で5～10本の処分坑道での並行作業が示唆されているように、回収作業も複数の処分坑道での並行作業が可能であることに留意しつつ、公共建築工事積算基準等を基に算出した処分坑道1本の再掘削に要する時間と、処分坑道1本に定置されたオーバーパック全数（ここでは131体）の回収に要する時間のバランスを考慮して、b)の目標値を20時間/体未満に設定した。

高度化する技術の対象として、過年度に開発した緩衝材除去システム<sup>5)</sup>をベースに、塩水を用い

た“ウォータージェット方式”に改良することとした。課題として、ノズルの種類や配置、噴射条件、スラリー・スラッジとなった緩衝材の処分孔からの効率的な吸引排出、塩水リユース設備の能力向上等が挙げられる。これらの課題に対して、次年度より噴射条件の設定と除去効率、除去したスラリー・スラッジの性状、スラリーの沈降試験による固液分離能などを把握するための要素試験の実施、除去装置の改良設計・製作を行い、2022年度に塩水ウォータージェットによる除去時間の短縮の見通しを得るための開発計画を策定した。

##### 2)処分坑道横置き・PEM方式の回収技術の高度化

a)～b)の作業に相当する1本の処分坑道の隙間充填材除去（全長に渡り除去）を行い、その後にPEMを順次搬出する工程を仮定した。c)におけるPEM搬出装置の移動速度を1km/hとした場合に要する時間を加味し、前述した処分孔縦置き方式の回収技術の高度化目標時間と同等となる隙間充填材の除去時間の目標値として5時間/未満を設定した。

前フェーズで実施した機械的除去技術による試験では、除去装置への付着や装置の閉塞により除去効率が極端に低下した。除去対象である隙間充填材の特性は、乾燥密度、配合比、混合する掘削ズリの性状、さらには地下水の浸潤による含水比の変化が関連するが、これらが機械的除去の効率に及ぼす影響を把握することが重要である。今後具体化される隙間充填材の仕様に対する除去技術の汎用性の確保にも留意して、柔軟かつ適切な技術の選択および装置化に向けた情報の蓄積が必要である。

これらの課題に対し、次年度より、隙間充填材の除去に関連するパラメータ（切削抵抗値、付着力）と一般的な土質材料のパラメータ（一軸圧縮強度やコーン指数等）との相関について整理を行い、除去効率に対して支配的となる隙間充填材のパラメータの抽出を行う。次に切削機構および排土機構を模擬した小型試験をとおして隙間充填材の除去に適する機構を選定、それらを組み合わせることで除去効率を確認する。以上のように、2022年度に機械的除去技術による除去時間の短縮の見通しを得るための開発計画を策定した。

(2)回収の容易性を高めた設計オプションの開発

前述した回収方法（技術、装置など）の高度化開発で目標時間を達成しても一定の回数作業時間が必要となる。回収可能性の維持期間の決定の際に、基本方針が求める地元等の意見として更なる迅速化が期待されるような状況に留意して、回収時間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ている。前フェーズまでに、現行の2つの概念を対象とした回収工程の分析をとおして、回収の迅速化に資する可能性のある技術的方策（設計に反映し得る要素）を整理した<sup>6)</sup>。これらの技術的方策を組み合わせることで、回収の容易性を効果的に向上させた設計オプションの構築が期待できる。その際、回収の容易性向上のみならず、設計開発で考慮すべき他の設計因子（閉鎖前の安全性、閉鎖後長期の安全性、工学的成立性、経済的合理性）<sup>4)</sup>の観点からの評価を行い、設計オプションとしての成立性を確認する必要がある。

上記に留意した設計オプション（案）の構築に際しては、前述した“(1)HLW 廃棄体回収技術の高度化”での回収工程の分析においても時間を要する作業として抽出された“a)埋め戻された坑道の再解放”、“b)廃棄体を拘束する土質系材料の除去”を基軸として、複数の設計オプション案を作成した。以下に現行の2つの概念をベースとした場合の懸念事項と成立性の評価結果の一例を示す。

処分孔垂直置き方式をベースとした、回収容易性を高めた設計オプションとして、坑道の再解放時の作業量の低減に繋がる“坑道の短尺化”を検討した。包括的技術報告書に示される廃棄体定置間隔は、隣接する処分孔の力学的干渉の観点から3D(6.66m)となっているが、表-1に示す熱解析の結果から、処分坑道間の距離も考慮すれば、処分孔中心間距離をD(隣接処分孔が接した状態)に縮めても、緩衝材の最高到達温度が100℃を下回る組合せがあり得ることが分かる。同表から、処分孔中心間距離をDに固定した場合、熱的に成立する坑道中心間距離は包括的技術報告書に示される坑道間距離(12m)よりも長くする必要がある。但し、その影響は数mの主要坑道の延長に伴う搬送距離の増加に留まり、回収作業の迅速化の観点では廃棄体一体当たりの坑道掘削量を現行の概念に対して半分程度に低減できる見通しを得ることができる。このオプションの成立性の見

通しを得るには、近接処分孔の掘削技術、処分孔壁の補強等の補助工法（ケーシング設置など）の技術的実現性を確認する必要がある。

処分坑道横置き・PEM方式をベースとした、回収容易性を高める設計オプションとして、隙間充填材を省いた円形小断面坑道への定置方式を検討した。

表-1 処分坑道間隔の違いによる緩衝材の最高温度

処分孔中心間距離 (m)	坑道中心間隔 (m)	最高温度 (°C)	最高温度発生時期 (年)
3D(6.66) <sup>※1</sup>	12 <sup>0)</sup>	84.1 <sup>0)</sup>	10 <sup>0)</sup>
D(2.38) <sup>※2</sup>	12	103.8	30
D(2.38) <sup>※2</sup>	24	81.9	12
D(2.38) <sup>※2</sup>	100	78.3	5

※1：現行の概念（新第三紀堆積岩類 地下500m）<sup>4)</sup>

※2：本事業における処分孔径（ケーシング等での補強を想定）

本オプションは回収時の隙間充填材の除去作業そのものの省略に繋がるが、回収せずに処分場を閉鎖した場合は空間が残存するため、閉鎖後長期の安全性に及ぼす影響に留意する必要がある。そこで、PEM内の緩衝材が均一膨潤し、残存する空間を埋めたと仮定し、緩衝材の設計要件を満足する有効粘土密度と隙間の幅を計算した(図-2)。緩衝材の設計要件のうち、最も高い有効粘土密度を要求する“自己修復性を有する下限(塩水、Ca型化) 1.18Mg/m<sup>3</sup>”に着目した。緩衝材を乾燥密度1.7 Mg/m<sup>3</sup>で製作した場合、許容隙間幅は91mmとなり、隙間充填材を省略した設計オプション(案)が成立する見通しを得た。一方で、この幅では前フェーズまでに開発したエアベアリング方式の搬送定置・回収装置の適用は困難であり、搬送定置・回収時に重量物であるPEMの移動を補助する技術の開発や狭隘な処分坑道の建設技術が必要となる。

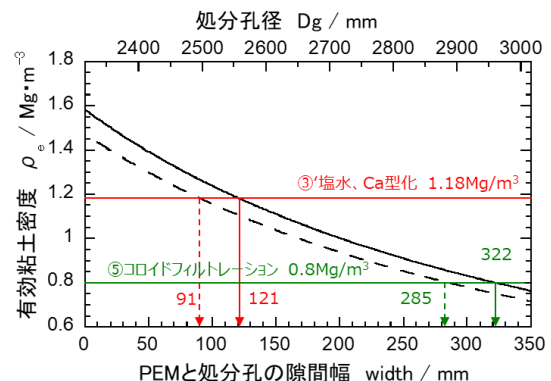


図-2 PEM周囲に残存する隙間の許容値<sup>5)</sup>  
(実線：乾燥密度 1.8Mg/m<sup>3</sup>、点線：乾燥密度 1.7Mg/m<sup>3</sup>)

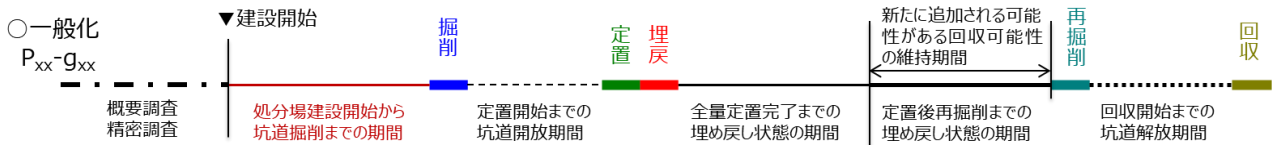


図-3 ある処分坑道に着目した時間スケール  $T_0$  の詳細

このように、回収の容易性の観点から作成した設計オプション（案）の実現に向け、閉鎖後長期の安全性に加え、操業期間中の安全性や施工性（施工技術の適用性）などの多様な観点からオプションの成立性を確認し、技術的成立性を確保するための技術開発を進めていく必要がある。

### (3) 回収可能性維持に伴う影響の定量化手法の整備

既述のように回収作業を含む操業期間中の安全性への影響の定量化では、建設・操業期間中からの地下構成要素の状態や機能の変遷を扱う必要があるため、レファレンスとした処分孔竖置き方式の建設・操業工程を分析し、時間・空間スケールの把握、処分施設の構成要素の整理を行った。時間スケールについては、包括的技術報告書に示される閉鎖後長期の安全評価における時間スケール ( $T_1 \sim T_4$ )<sup>4)</sup> を踏まえ、「 $T_0$ : 建設開始から回収完了までの期間」を新たに設定した。建設・操業は区画によって時間差があるため、地下施設における特定の処分坑道の状態で一般化した時間スケール ( $T_0$ ) を図-3 に示す。

空間スケールについては、安全評価における“広域スケール”から“ニアフィールドスケール”までの4つの空間スケールに加えて、地下施設の構成要素と使用材料の個々が扱えるように細分化した。

回収可能性の維持に伴い影響を受ける対象ごとに、時間・空間スケールに関する整合性を確認できるようにする表現方法として、ストーリーボード作成方法を導入することとした。操業期間中（回収作業中）の安全性への影響に関するストーリーボードは、坑道の空間安定性や廃棄体の健全性のように対象が個別の要素／材料レベルで明確であるため、レファレンスの工程分析結果に基づき、時間スケール ( $T_0$ ) を中心に、材料の時間変化から構成要素の機能の時間変化を記述する計画を策定した。閉鎖後長期の安全性への影響のストーリーボードは、上記の時間スケール ( $T_0$ )

に関する操業期間中（回収作業中）の安全性への影響に関するストーリーボードを引き継ぐ形で整理を進め、通常の操業で考慮されている事象との差分を明確化する計画である。

以上の計画に基づき、次年度より、回収可能性の維持に伴う影響に関するストーリーボードを操業期間中／閉鎖後長期の双方について整理を進め、その上で、回収可能性を維持した場合に特有となる影響項目、検討対象とすべき事象の優先度や新たに追加検討すべき事象の有無や重要度の整理を行う。その結果として抽出される個別の影響評価技術について、汎用評価技術の適用（経験則を含む）、試験・調査等による現象データの拡充、新たな評価技術の開発など、必要な技術開発に取り組む。

### (4) 地層処分実規模試験施設を活用した情報発信

これまで処分孔竖置き方式の工学技術の開発・整備状況として緩衝材定置試験装置、緩衝材除去システムを来館者に公開してきた。もう一つの現行の候補概念である処分坑道横置き・PEM方式の技術開発状況を発信するため、2019年度までに幌延深地層研究センターでの地下施設で実際に使用した隙間充填装置、搬送定置・回収装置の移設作業を実施した。合わせてPEM方式の説明として実寸大モックアップの設置、補助資料として、装置や試験の解説パネルや映像資料、説明マニュアル等の更新を実施した。今後、現行の2概念に対する技術開発の動向について、更新した本施設を活用した情報発信を行うとともに、来館者からのコメントを収集し、効果的な情報発信のあり方についても検討を進めていく。

- 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) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成28年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する研究開発事業（可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書（第3分冊）、2017

- 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
- 4) 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、2021.2
- 5) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成26年度高レベル放射性廃棄物等事業（地層処分回収技術高度化開発）報告書、2015
- 6) 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（可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書、2020

## 4. 沿岸部処分システム評価確証技術開発

### ◇はじめに

高レベル放射性廃棄物等の地層処分については、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<sup>1)</sup>。また、このような整理に至る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、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、さらに信頼性を高めることが重要である”と結論付け、技術の高度化に向けて取り組むべき課題とその方向性が示されている<sup>2)</sup>。

原子力発電環境整備機構（NUMO）は、2021年2月に包括的技術報告書<sup>3)</sup>を公開し、ジェネリックな環境での地層処分の実現性が示され、第4章の処分場の設計と工学技術では、処分場の設計について、所要の安全機能を確保するための設計の考え方や方法論や想定される建設・操業・閉鎖の手順、およびそれらに適用する技術の工学的な実現性が示された。沿岸部環境に関しては、海水相当の地下水等を中心として包括的に実現性が示され、今後、多様な地下水に対応すべく、データの拡充が望まれるものと考えられる。

2015年度から開始した沿岸部処分システム高度化開発では、これまでの地層処分に関する研究開発の成果を整理し、再検討が必要な課題などを抽出・整理すると共に<sup>4)</sup>、研究会にこれらの成果を提供して議論を支援した。当センターでは、2016年度以降の3年間において、工学技術の高度化に向け、設計や施工等のエンジニアリングや操業中の安全確保への反映、及び閉鎖後の長期挙動評価への反映の観点から、海水や海水を希釈した塩水等での人工バリア材料（オーバーパック、緩衝材及びセメント系材料）に関する劣化や変質に関する現象の把握と各種特性等のデータを拡充し、総合的な評価方法に関する塩水環境下におけるニアフィールド領域での処分システムの成立性に係る手法を検討し提示した<sup>5)</sup>。

2019年度からの本事業において、当センターではこれまでの成果等も踏まえ、既存情報等による我が国の沿岸部に賦存する地下水の水質における、

坑道に用いられる材料の、坑道建設から再冠水に至るまでの変質機構や材料の特性への影響の定量化とその対策技術に関して、セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充及び緩衝材の機能変化に係るデータの拡充を行う。また、地質環境の調査技術を用いた沿岸部の広域的なベースライン情報と連携した水理解析によって、処分場建設に伴う浅部地下水と深部地下水の混合や湧水等への影響など、水理場の影響を踏まえた処分場の成立性評価に関する手法を整備するとともに、上記の個別材料の変質挙動に係る知見を組合せた、再冠水に至る期間を対象とした性能評価手法の基盤整備を行う。

本事業は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「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（JPJ007597）（沿岸部処分システム評価確証技術開発）」により、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・資金管理センターの3機関が共同で、沿岸部における地層処分技術に関する2つの技術分野の技術開発（地質環境の調査技術、工学技術）を実施したものである。当センターは、一般財団法人電力中央研究所と共に工学技術を担当した。以下に、当センターが担当した工学技術の高度化について、2020年度に実施した内容を示す。

### ◇2020年度の成果<sup>6)</sup>

#### (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ることが検討されている<sup>3)</sup>。一方で、セメント系材料は地下水や海水などとの反応により変質することが知られており、主な変質として、水和鉱物の溶脱や膨張性の二次鉱物の生成などが想定される<sup>7)</sup>。また、それらの影響により、セメント系材料は機械的特性や物質移行特性の変化、ひび割れの発生などが起こると考えられる。そのため、沿岸部における処分場の建設・操業～閉鎖後の再冠水に至る期間における処分システムの成立性は、空洞安定性などに関する評価のために、沿岸部に特有な地下水化学環境を念頭に置いたセメント系材料の化学変質に伴う機械的強

度の変化に関する挙動を把握することが必要である。

2018年度までの検討では、人工海水やその希釈水へのセメントペースト試料の浸漬試験を実施し、化学変質挙動および機械的特性に関するデータを取得して知見を整理してきた<sup>5)</sup>。その結果、塩水の化学組成によって生成する二次鉱物などの化学変質挙動が異なること、それにより機械的強度の変化が異なることが確認された。

そこで、2019年度からの本事業では、セメント系材料の配合や地下水の組成から機械的特性の変化を推定するための知見を拡充するために、地下水組成、化学変質挙動と機械的特性の関連に関する以下の試験を実施して体系的に整理することとした。

- ・コンクリートやモルタル中の化学変質が主に起こるセメントペースト試料を用いた地下水の組成、化学変質挙動と機械的挙動の関係を把握する試験。
- ・現実的な材料(コンクリート、モルタルなど)、沿岸部における現実的な処分場の地下環境条件(セメント系材料の岩盤との接触部付近での地下水流動など)での化学変質挙動と機械的挙動の関係を把握する試験。

2020年度は、2019年度に地下水の組成、コンクリートの種類、試験方法を文献より調査して試験計画を検討した成果を踏まえ、地下水の組成の類型化、試料の初期状態の分析を実施し、各試験の試料の浸漬等を開始した。

### 1) 沿岸部地下水の類型化

沿岸部地下水は、これまでに沿岸部で採取し分析した地下水のデータを、海水や希釈した海水の組成を基準として14種類に類型化し、セメント系材料の変質挙動への影響を踏まえ9種類にグループ化した(海水系5グループ、降水系4グループ)。地下水のグループ化した結果の一例を図-1に示す。

### 2) セメント系材料の化学変質と機械的特性に関する予備的検討

検討対象は処分場で使用が検討されているセメント系材料を調査した結果から、吹付けコンクリートと覆工コンクリートとした<sup>8)</sup>。各コンクリ

ートのペースト部分に相当するセメントペースト試料をグループ化した9種類の組成をもとにした模擬地下水に浸漬してEPMA(電子線プローブマイクロアナライザ)により断面の元素分布を測定して変質の傾向を把握した。その結果、人工海水や希釈した人工海水組成に比べてSO<sub>4</sub>濃度が高い地下水では、試料内部のCa溶脱領域へのSO<sub>4</sub>浸透が確認された。特にSO<sub>4</sub>濃度が高くかつCl濃度が低い降水系の地下水では、エトリンサイト等の膨張性化合物の生成が原因と考えられる膨張も確認されるなど、変質が顕著にみられた。今後は、確認された化学的な変質挙動について詳細に確認していくと共に、化学的な変質が特徴的な地下水組成での浸漬試験を行い、化学変質挙動と機械的特性の関連を分析や測定により把握していく予定である。

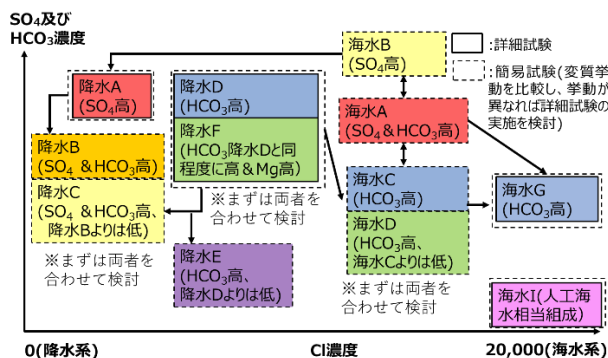


図-1 SO<sub>4</sub>及びHCO<sub>3</sub>に着目した地下水の類型化の結果

### 3) 現実的な材料及び条件における化学変質と機械的特性に関する検討

コンクリート試料の接液面への二次鉱物の生成挙動を確認するため、吹付けコンクリート、セグメント及び現場打設コンクリートの現実的な地下水との接触条件を模擬した試験を開始した。吹付けコンクリートでは、岩盤壁面との隙間を地下水が移動すると考えられるため、動的条件を模擬できるフローズルー試験(図-2)を、セグメント及び現場打設コンクリートでは、低透水の裏込め材や遮水シートの処置が施されるため、コンクリートに接触する地下水の流動が比較的遅い条件を模擬できる浸漬試験をそれぞれ開始した。本検討では、今後、試料の変質領域の鉱物相や組成分布の分析、空隙構造や微小領域の硬度の測定を行ない、2)の結果と関連付けて取りまとめる予定である。

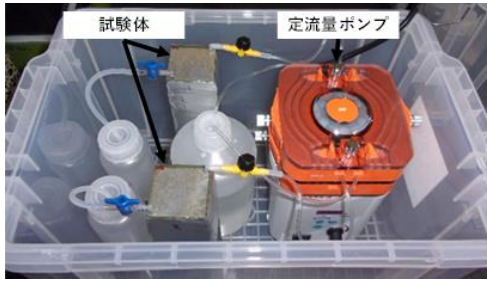


図-2 フロー試験の状況

(2) 緩衝材の機能変化に係るデータの拡充

これまでに実施した緩衝材の機能変化に関するデータ取得において、再冠水時の変質、膨潤、流出等に関して、蒸留水、海水相当イオン強度を持つ NaCl 溶液および CaCl<sub>2</sub> 溶液を用いた試験が行われ、緩衝材の挙動把握がなされた。しかし、沿岸部の地下水の多様な組成を踏まえると、沿岸部に賦存する地下水組成に応じたイオン強度やイオン種の緩衝材の機能への影響に関するデータは少なく、これらのデータを拡充・整備し、塩水環境下の、緩衝材機能を予測・評価する必要がある。そのため、本事業では系統的に地下水中の溶存陽イオンのベントナイトの膨潤性、透水性および化学的変質への影響を把握し、多様な塩水系地下水の組成に対する緩衝材の挙動を評価するためのデータの拡充を目的とした。2019年度より、溶存陽イオンの緩衝材の膨潤量への影響や高イオン強度でのイオン交換選択性に関する試験及びイオン交換挙動の解析の方法論の検討を開始した<sup>8)</sup>。

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

2020年度は、Ca<sup>2+</sup>イオンと Mg<sup>2+</sup>イオンの影響を把握するために、通水溶液をイオン強度 0.5 の CaCl<sub>2</sub>溶液、および MgCl<sub>2</sub>溶液とし、ケイ砂 30wt% 混合のベントナイト試料の乾燥密度を 1.2Mg/m<sup>3</sup>、1.6Mg/m<sup>3</sup>、2.0Mg/m<sup>3</sup>の3水準として最大膨潤率を測定した。また、イオン強度の影響を把握するために、NaCl 溶液のイオン強度が 0.025 から 0.2 の範囲の6水準の場合の最大膨潤率を測定した。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。

イオン強度 0.5 の各陽イオンの水溶液を通水した場合の最大膨潤率は、緩衝材乾燥密度が同じであれば、陽イオン種によらずほぼ同等であり、

イオン強度 0.5 程度では、イオン種が異なっても最大膨潤率がほぼ同じと見做すことができることがわかった。

NaCl 溶液を対象にイオン強度を変化させた試験の結果を過去の結果<sup>8)</sup>も含め、図-3に示す。イオン強度が 0.2 までの間で、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いことが確認された。今後は他の陽イオン (K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) のイオン強度と最大膨潤率の関係を確認する予定である。

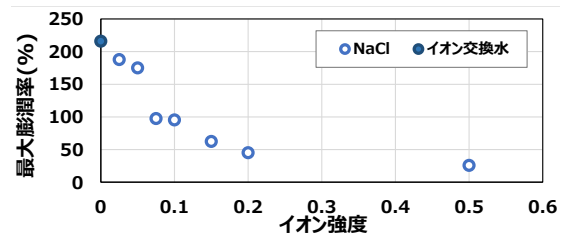


図-3 イオン強度と最大膨潤率の関係

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

本試験では、有効モンモリロナイト乾燥密度 0.88Mg/m<sup>3</sup>及び 1.27Mg/m<sup>3</sup>に圧縮した Na 型モンモリロナイト (クニピア F) を用い、イオン強度 0.5 の KCl 溶液を通水して、イオン交換反応試験を行った (図-4)。排水の分析によりイオン交換反応の進行が確認され、イオン交換の速度は乾燥密度に依存することがわかった。また、同条件で試験を2回実施することにより、試験の再現性が良いことも確認できた。試験結果を用いて既往の方法でモンモリロナイトにおける Na<sup>+</sup>と K<sup>+</sup>のイオン交換選択係数の導出を試みたが、イオン交換の終点の見極めが選択係数に与える影響が大きく、選択係数の誤差が大きい可能性があることが懸念された。

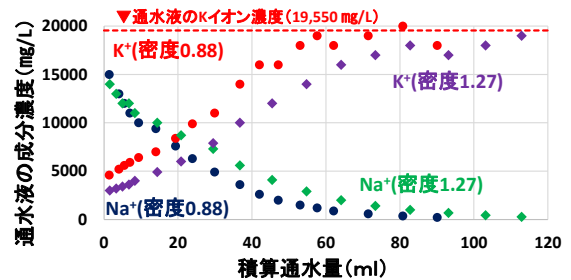


図-4 イオン交換反応の進行過程 (供試体の乾燥密度: 0.88Mg/m<sup>3</sup>及び 1.27Mg/m<sup>3</sup>)



今後、溶液を2成分系にするなどの条件で改善して試験を実施し、イオン交換選択係数を算出する予定である。

### 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

圧縮ベントナイトのイオン交換挙動の解析方法を検討するにあたり、考慮が必要な可能性があるモンモリロナイト層間（以下、層間とする）と粒子間隙の間でのイオン交換挙動や溶液の移動の差異の影響に関して検討した。これらの検討のために、基本モデル（層間と粒子間隙いずれもイオン交換があり溶液が移動可能）<sup>8)</sup>、2サイトモデル（基本モデルで、層間と粒子間隙でイオン交換選択係数が異なると仮定）、及び可動水-不動水モデル（2サイトモデルで、層間は粒子間隙とのみ溶液が移動と仮定）を用い、HP1 (HYDRUS 1D-PHREEQC)<sup>9)</sup>により飽和-不飽和浸透流下の物質移行・地球化学解析を実施した。解析の対象は、Na型ベントナイトにCaCl<sub>2</sub>溶液を通水したカラム試験<sup>10)</sup>である。Na-Ca間のイオン交換選択係数は0.69<sup>11)</sup>とし、2サイトモデルでは、粒子間隙は0.69、層間は0.09と仮定した<sup>6)</sup>。解析による排水中のイオン濃度の経時変化を図-5に示す。これらのモデルの差異が、イオン交換の進行に関わる解析結果に影響することを確認した。今後は、上述2)節の試験の再現解析を試み、今年度行ったモデルの考慮も含め、解析手法の改良を検討する。

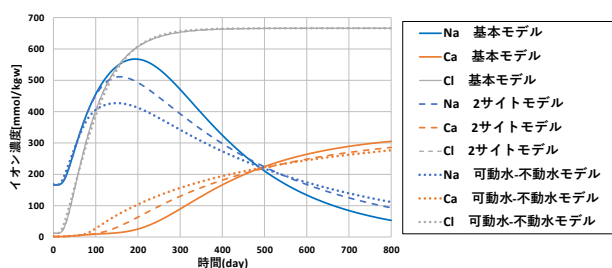


図-5 解析結果（排水濃度）

### (3) 再冠水に至る期間を対象とした性能評価手法に係る基盤整備

沿岸部での処分場の工学的成立性を示すには、構築されるニアフィールド（以下、NFという）領域の性能が設計・施工を通して担保されることを示すことが重要である。これまでに、先行検討事

例であるフィンランド POSIVA 社の評価体系<sup>12)</sup>を参考に、わが国の沿岸部における建設から再冠水完了までの、NF 領域での処分システムの成立性を示す性能評価を含む評価体系の大きな流れを提示した<sup>5)</sup>。ここで性能評価とは、地質環境を含む処分システムの構成要素に関する短期～長期の変遷挙動（状態や機能の変化）について分析・評価を実施し、性能目標の達成を確認することを意味する。

本事業では、わが国の沿岸部における建設・操業から再冠水に至る期間を対象とした性能評価手法の体系化を目的とする。

沿岸部では、降水系地下水、海水系地下水、これらの混合地下水などの異なる化学組成の地下水が分布している可能性があるため、処分場の位置によっては、坑道の埋め戻しまでの地下水の引き込みにより、NF 領域の地下水の化学組成が変化する可能性がある。化学組成が変化すると性能評価の結果に影響を与える可能性があることから、沿岸部の性能評価を実施するために、多様な地下水の引き込みを考慮した NF 領域の地下水の化学組成の経時変化を求める水理解析技術を整備する必要がある。

性能評価の中で解析的な評価をする場合は、地質環境調査より作成されるSDM(地質環境モデル)を用いる。SDMの情報の精度によって、性能評価の結果が変わる可能性があり、性能評価を精度よく実施するには、前もって性能評価に用いる情報やその詳細度を地質環境分野へのリクワイアメントとして提示することが必要となる。

上記を踏まえ、本検討では、わが国における沿岸部の性能評価手法を体系的に整備した手順書素案の作成、処分場への地下水の引き込みによる地下水の化学組成変化を把握する水理解析手法の整備、これらの検討を元にした地質環境分野のサイト調査へのリクワイアメントの抽出やその方法を示すこととした。

2019年度は、性能評価手法手順書素案作成に向けた基盤情報の調査の結果、性能評価は大きく前提条件の確認、評価期間の設定、性能評価項目の選定、評価の実施、評価結果の記載の5つのステップで構成されていることを示した。また、水理解析手法の整備については、沿岸部の性能評価に必要な3次元の水理解析を実施するにあたり、考慮すべき水理地質構造や地下水の分布や特性

に関する要因について二次元解析により予備的に検討し、高透水層（薄層、断層）を遠方にある海水より高濃度な化石海水の処分場への引き込みの要因として抽出した。

2020年度は、2019年度までの検討成果を踏まえ、緩衝材を例とした性能評価手法の手順書素案の作成、水理解析技術の整備、地質環境調査へのリクワイアメントの導出を実施した。以下に、これらの成果を示す。

### 1) 性能評価手法の体系化

2019年度に提示した性能評価の流れに従い、わが国の沿岸部における処分場の性能評価の前提条件、緩衝材を例とした性能評価項目、性能評価方法に関する国内外の情報を調査し、一連の流れに沿って整理した。

本検討で扱う性能評価の前提条件として対象となる処分場は、汀線から海側 15 kmの海底面（EL. -135m）から 500mの深さで塩淡境界より海側に位置し、その地質環境は第三紀堆積岩類を想定した。化石海水等の組成の異なる地下水は処分場がある地層の下方に一様に分布すると仮定した。処分場は縦置きブロック方式、パネル型 6 区画の処分場とし、操業期間（坑道開放期間）は約 60 年とした。アクセス坑道については、廃棄体搬送用、作業従事者及び作業機器の移動、掘削土搬出用、給排気用の 3 本の斜坑立坑を想定し、勾配は最大 7 度坑道同士の離間距離は 3D 以上とした。以上の処分場の条件は後述する水理解析モデルの設定に反映した。

性能評価項目の選定について、2019年度までの諸外国調査結果から、その選定方法の詳細に関する記載は少ないものの、各国が制定した FEP (特質 (Feature), 事象 (Event), プロセス (Process) の包括的なリスト) から性能評価項目の抽出をしていることが分かった。そのため、2020年度は OECD/NEA が示している国際的な FEP からわが国における沿岸部の性能評価の条件に照らし合わせて緩衝材の性能評価項目を抽出した。Posiva 社が Posiva FEP の妥当性確認のために実施している国際 FEP スクリーニングを参考に、5 つのスクリーニング（(1)スクリーニングの出発点となる包括的な FEP リストの設定、(2)緩衝材に関連する因子を選択、(3)本事業の検討対象に限定、(4)緩衝材に関する FEP に限定、(5)性能評価項目の

抽出) で構成される性能評価項目の抽出フローを設定した(図-6)。

上記のスクリーニングをした結果、9 つの性能評価項目(緩衝材の熱変質、緩衝材の化学変質、緩衝材の塩濃縮、緩衝材の圧密沈下（オーバーバックの沈下）、緩衝材の再冠水挙動（不飽和化/再飽和）、緩衝材のパイピングエロージョン、緩衝材の膨潤性の低下、ガス以降による緩衝材内の水みち形成、緩衝材の変形）が抽出された。

抽出された性能評価項目のうち、緩衝材の再冠水挙動とパイピングエロージョンを対象に性能評価手法を国内の評価事例などから調査した。調査の結果、いずれの評価方法も試験と解析を併用して実施されていた。例えば、再冠水挙動は THMC の複雑な連成現象であり、地下水の緩衝材への浸潤やそれに伴う膨潤による隙間のシーリング、乾燥密度の均質化等は、地下水の塩水濃度の影響を受けることが知られている。その評価手法の課題として、室内での要素試験や地下環境の実規模試験（既往のデータ活用や不足データの拡充）、これらの試験結果を再現できる連成解析コードの活用や開発、また、使用する物性値の蓄積・整備が挙げられる。

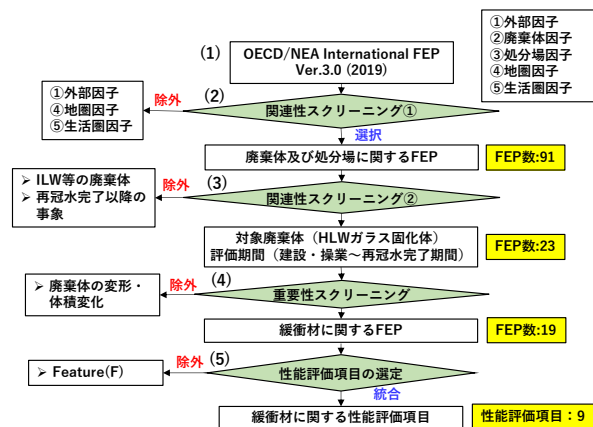


図-6 緩衝材の性能評価項目抽出フロー

### 2) 水理解析技術の整備

沿岸部における性能評価に必要な水理解析技術を整備するため、組成の異なる地下水の引き込みによる処分場の水質変化に着目し、それに関わる影響要因の影響度合いを密度流解析によって把握した。また、上記の検討で実施した水理解析の手順を基に、性能評価のための水理解析技術として整理した。

組成の異なる地下水の引き込みによる処分場

の水質変化について、既往文献を踏まえて整理した結果、影響要因として、組成の異なる地下水の水質や分布に関する要因の塩淡境界、化石海水、地下水の引き込み範囲に関する要因の施設掘削、高透水性の水理地質構造及び難透水性の水理地質構造を抽出した。そのうちの化石海水及び施設掘削について、密度流解析によって処分場の水質変化に関わる項目の影響度合いを把握した。なお、処分場は既知の塩淡境界を避けて建設される可能性が高いとし、施設掘削の影響の検討では処分場は塩淡境界から 1km 以上離れた位置に設定している。

化石海水の影響は、2次元軸対象解析で処分場に引き込む地下水の塩分濃度経時変化について検討した。岩盤の透水係数は一様に  $2 \times 10^{-9} \text{m/s}$  とし、現海水は処分場周辺に、化石海水は処分場下方に分布するとした。化石海水の濃度は、現海水との比濃度 1.1 と 2.0 とした 2 パターン、化石海水の処分場からの距離を 10、30、50、70、100m の 5 通りの条件を組み合わせた。解析期間は、操業期間（坑道開放期間）の 60 年間とした。

その結果、化石海水の比濃度が 1.1 と 2.0 では、処分場に引き込む地下水の塩分濃度経時変化を現海水と化石海水の比濃度差で正規化して整理すると、差異がなかった。また、化石海水の処分場からの距離が 50m 以下の場合、処分場に化石海水を引き込み、70m 以上の場合には引き込まなかった。

施設掘削の影響は斜坑のモデル化の有無に注目し、NUMO-SC の新第三紀堆積岩の SDM<sup>3)</sup> を基に作成した解析モデルに処分場周辺の上部泥岩層の透水係数を  $2 \times 10^{-9} \text{m/s}$  と  $2 \times 10^{-8} \text{m/s}$  とした 2 通りの条件を組み合わせ、3次元解析で引き込み範囲について検討した。解析期間は、操業期間（坑道開放期間）の 60 年間とした。

上部泥岩層の透水係数が  $2 \times 10^{-9} \text{m/s}$  の場合は、施設掘削（斜坑モデルの有無）の処分場への地下水の引き込み範囲への影響がなかったが（図-7）、 $2 \times 10^{-8} \text{m/s}$  の場合は、斜坑下方で斜坑ありの方が斜坑なしよりも地下水の引き込み範囲が水平方向に小さくなった（図-8）。これは、上部泥岩層が斜坑周辺にも分布し、上部泥岩層の透水係数が高いほど、斜坑ありの方が斜坑なしよりも斜坑周辺の圧力水頭の低下量が大きく、処分場周辺の動水勾配を低下させるためである。

また、斜坑ありにおいて、上部泥岩層の透水係数が  $2 \times 10^{-8} \text{m/s}$  の場合は  $2 \times 10^{-9} \text{m/s}$  の場合よりも、処分場への地下水の引き込み範囲は、水平方向には約 4 倍、処分場の上側には約 10 倍、処分場の下側には約 5 倍となった。緩衝材の性能に影響する地下水組成の変化を把握するために、地下水の引き込み範囲への影響の観点から処分場周辺の岩盤の透水係数は重要と考えられた。なお、化石海水の濃度や距離、施設掘削の影響の程度は、地質や水理の環境、処分場の配置等により変わるため、今後評価する地質や処分場の設計に合わせた影響の分析が必要である。

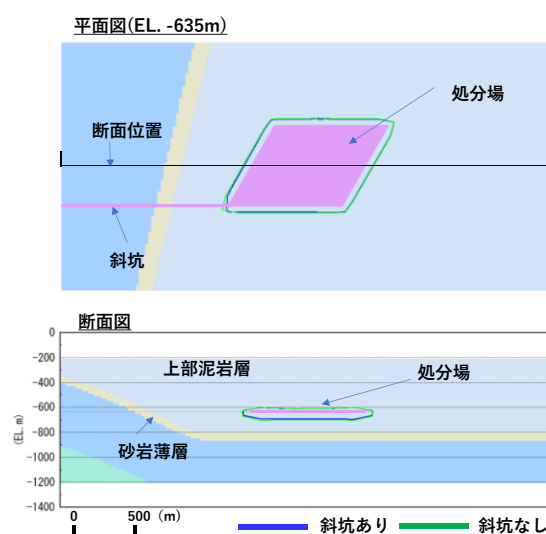


図-7 地下水の引き込み範囲（上部泥岩層の透水係数  $2 \times 10^{-9} \text{m/s}$ ）

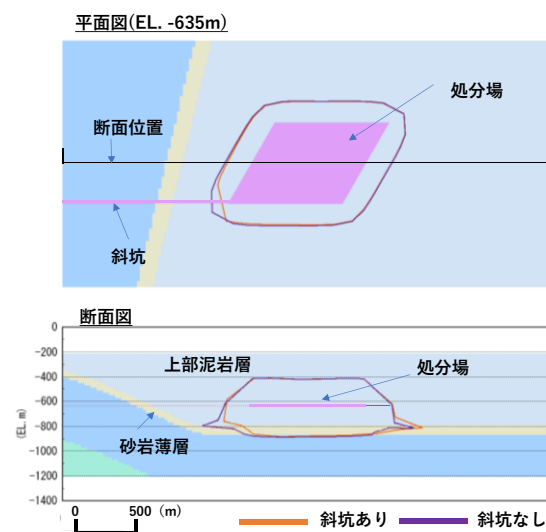


図-8 地下水の引き込み範囲（上部泥岩層の透水係数  $2 \times 10^{-8} \text{m/s}$ ）

### 3) 地質環境調査へのリクワイアメントの導出

1) で抽出された 9 つの性能評価項目について、沿岸地層処分において着目すべき項目を整理し、そのうち、水理解析と関連した地質環境調査へのリクワイアメントを導出する一連の流れを把握するために、地下水組成の変化への影響に着目して検討した。その結果、2 種類のリクワイアメントが導出された。一つ目は人工バリアの性能に直接的に関連するもので、例えば緩衝材の膨潤に影響する地下水組成（塩分濃度）である。二つ目は、間接的なリクワイアメントであり、例えば処分場に引き込まれる地下水が緩衝材の膨潤に影響する組成への変化を防ぐため、処分場周辺の地下水の組成と分布、特に処分場と組成の異なる地下水の距離や処分場周辺の透水係数である。2020 年度の検討はあくまで仮設定した条件での評価結果であり、段階に応じて詳細な情報を組み合わせるなど反復的な検討を通じてより確実なリクワイアメントの導出ができる。

### (4) まとめ

沿岸部における再冠水に至る過程までの処分場の成立性の評価に関わる構成部材の性能について、セメント系材料と緩衝材に関して沿岸部の地下水の組成の影響に着目した試験により検討を進めた。今後も系統的な試験データの取得を進め、取りまとめていく予定である。性能評価手法については、緩衝材を対象に一連の流れを示し、水理解析は処分場に引き込む地下水の水質の変化に着目し影響要因を整理した。これらの性能評価及び水理解析の検討より得られた成果は、今後の本事業内の分野間連携の取り組みに反映していく予定である。

- 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の技術的課題に関する研究会、とりまとめ、2016
- 3) 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
- 4) 産業技術総合研究所、日本原子力開発機構、電力中央研究所、原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 27 年度地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書、2016
- 5) 産業技術総合研究所、日本原子力開発機構、電力中央研究所、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 沿岸部処分システム高度化開発 平成 27 年

- 度～平成 30 年度取りまとめ報告書、2019
- 6) 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 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 沿岸部処分システム評価確証技術開発 成果報告書、2021
- 7) 土木学会、コンクリートの化学的浸食・溶脱に関する研究の現状、2003
- 8) 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、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 沿岸部処分システム評価確証技術開発 成果報告書、2020
- 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, 113 pp., 2010.
- 10) 日本原子力開発機構、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 ニアフィールドシステム評価確証技術開発 成果報告書、2019
- 11) 核燃料サイクル開発機構、電気事業連合会 TRU 廃棄物処分概念検討書、JNC-TY1400 2000-001、2000
- 12) Posiva, "Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Synthesis 2012 " POSIVA 2012-12、2012

## 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 TRU 廃棄物（図-1 参照）の中には、放射能レベルが高く地層処分が必要なものがあり、地層処分の対象となるものをその性状に基づいてグループ分けすると、以下の4グループに区分される<sup>3)</sup>。

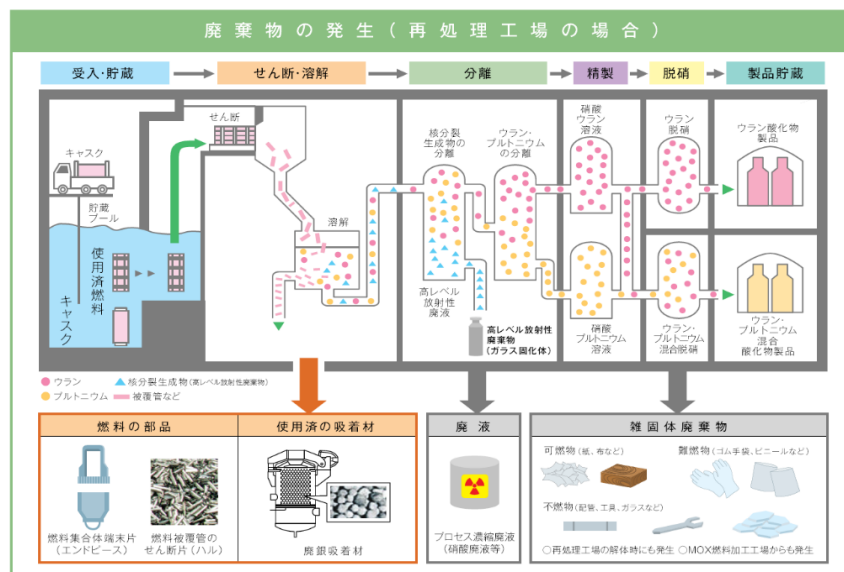
- グループ 1 廃銀吸着剤：燃料溶解工程等のオフガス系で、主にヨウ素 129 を捕集したフィルター
- グループ 2 ハル・エンドピース：使用済燃料をせん断、溶解した後に残る金属部材を圧縮成形したもの
- グループ 3 濃縮廃液：使用済燃料の溶解液から、ウラン、プルトニウムを抽出する際に発生する低レベル濃縮廃液を固化したもの
- グループ 4 その他の廃棄物

2015年5月に国の「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」<sup>1)</sup>が改定され、2017年7月に「科学的特性マップ」<sup>2)</sup>が公表されたことを受けて、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、これまで高レベル放射性

廃棄物に比べ注目度が低かった TRU 廃棄物の地層処分の安全性にも一般公衆の関心が高まりつつあり、TRU 廃棄物固有の様々な課題についての取り組みの重要性はより高まっている。

TRU 廃棄物には、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、多様な形態の廃棄物が存在し、有機物の分解や金属の腐食等によるガスの発生、硝酸塩の存在や有機物との混在による影響など、高レベル放射性廃棄物とは異なる特徴がある。また、処分を効率的に行う観点から、大口徑の処分坑道にドラム缶やキャニスタ等を数体まとめて収納した容器を集積配置する処分方法が考えられている<sup>3)</sup>。そのため、処分坑道の空洞安定性を維持するための支保工や、容器内及び容器間の充填材等に、セメント系材料を多量に使用するなど、高レベル放射性廃棄物の処分概念と異なる工学的対策を用いた人工バリアにより、長期的な核種移行の抑制が期待されている。

本事業は、このような TRU 廃棄物の処分事業における固有の課題を踏まえ、「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）」に示された、TRU 廃棄物処理・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目的とするものである。



出典：総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会放射性廃棄物小委員会報告書（平成18年9月）をもとに作成

図-1 使用済燃料の再処理工程と発生する TRU 廃棄物<sup>3)</sup>

本事業の実施にあたっては、地層処分を支える幅広い科学技術分野の知識を有することを前提として、既往の研究開発等の成果を適切に取り込むとともに、分野横断的な連携及び成果の体系的な統合が必要となる。このため、現在までに TRU 廃棄物に関わる研究開発等に従事してきた、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 機関が共同で事業に取り組む。各組織に蓄積されている知識、経験等を相互補完的に利用し、かつ融合することによって、多様な形態の廃棄物が存在する TRU 廃棄物に関わる処理・処分技術の課題を網羅し、事業全体としての総合的な高いレベルの成果を創出する。

本事業で検討する研究課題は、前述したように TRU 廃棄物が多様な形態の廃棄物であるがゆえに図-2 に示すように広範囲にわたる。これに加え、廃棄物の廃棄物化処理過程、埋設作業～坑道閉鎖前の期間、そして坑道閉鎖後の長期の安全性評価期間まで、極めて対象とする時間スケールも異なる。このような様々な課題に対し、平成 30 年度から検討を開始し、平成 31 年度<sup>4)</sup>までの 2 カ年の成果と課題を踏まえ、5 カ年事業の後半 3 カ年で取り組む課題を見直した。

5 カ年事業の 3 年目に当たる 2020 年度は経済

産業省資源エネルギー庁の委託事業「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 (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た。

- 廃棄物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
- 廃棄物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—
- 廃棄物由来の発生ガスに関する現象解析モデルの妥当性検討

個別の実施内容及びとりまとめの詳細については、以下 (II-5-2 から II-5-6) の各項で述べる。

- 1) 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
- 2) 資源エネルギー庁、科学的特性マップ、2017
- 3) 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](http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/tru/tru01.html)
- 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 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

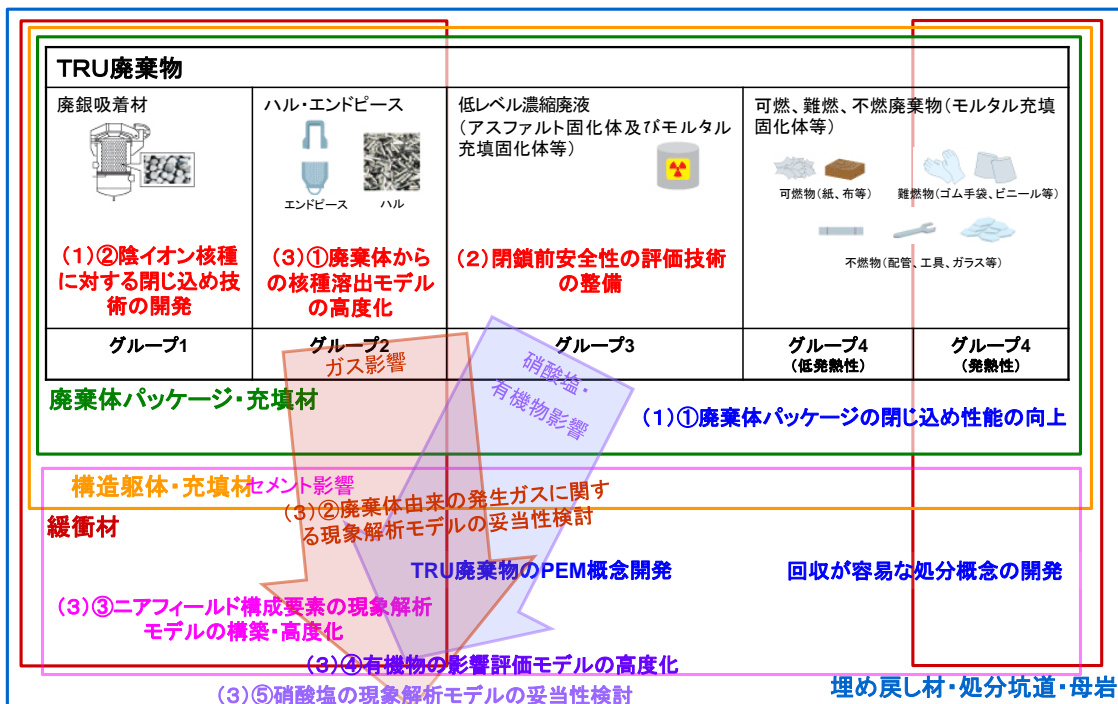


図-2 TRU 廃棄物及び処分場の構成要素と本事業の研究開発項目

## 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

操業中の安全性と閉鎖後 300 年を目安として放射性物質の閉じ込め性能が期待できる廃棄体パッケージについて、製作性や構造健全性に係る事項を実証的な試験により確認して、工学的成立性、安全性（操業時、閉鎖時）の向上を図る必要がある。

本事業では、廃棄体特性や環境要因等を考慮し、廃棄体パッケージの設計に関する課題と設計における設計要件や評価項目を満たすことを考えて、図-1 に示す全体計画において以下の検討項目を設定して、2018 年度<sup>1)</sup>より検討を開始した。

#### ①廃棄体パッケージの製作技術の整備

応力腐食割れの原因となる残留応力の低減と廃棄体への熱影響の低減が可能な遠隔蓋接合技術やパッケージ内の充填材に残存する水分の放射線分解による水素ガスの発生を抑制する技術を開発して、実規模廃棄体パッケージを製作し、それらの技術を実証的に確認する。

#### 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を行う。

#### 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て、廃棄体パッケージの堅牢性の評価のためのデータを取得する。

2020 年度は、図-1 に示す実施計画に沿って、以下の内容を実施した。

#### ①廃棄体パッケージの製作技術の整備

##### (1)廃棄体パッケージ容器の製作方法の検討

開発した蓋接合技術についての遠隔製作性を考慮した溶接方法及び残留応力低減方法の構築に必要な要素試験及び解析。

##### (2)廃棄体パッケージ内充填材の仕様の検討

水素ガス発生抑制の方法や発生量の見積もり方法(G 値)を検討するため、セメント系材料からの水素ガス発生量に関する試験によるデータの拡充と、水素ガス発生とパッケージ内の圧力上昇の関係についての検討。製作性や施工性に関しては、要素試験等による知見の拡充と、想定される製作工程でのパッケージ内充填材の製作及びパッケージ内充填材の製作方法の条件の整理。

#### ②廃棄体パッケージの長期性能評価

##### (3)閉鎖後の廃棄体パッケージ容器の健全性評価

熱影響を考慮した 2 重蓋構造について、策定した廃棄体パッケージの健全性評価手法に基づき、想定される環境での内圧、外圧等に対する破損評価。

##### (4)廃棄体パッケージ容器溶接部の腐食挙動評価

溶接部の浸漬試験による腐食等に関するデータの取得。

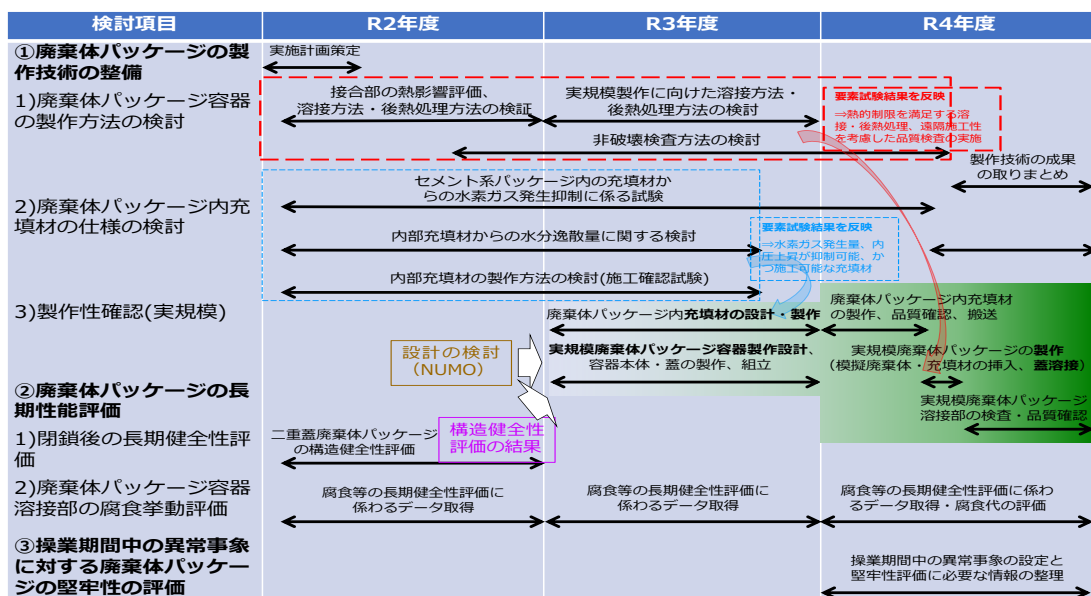


図-1 廃棄体パッケージの設計、課題および本検討項目の関連

◇2020 年度の成果<sup>2)</sup>

(1) 廃棄体パッケージ容器の製作方法の検討

検討の対象とする廃棄体パッケージ B<sup>3)</sup>は、図-2 に示す様に鋼製の容器と蓋、内部充填材(セメント系材料等)及び廃棄体で構成される。

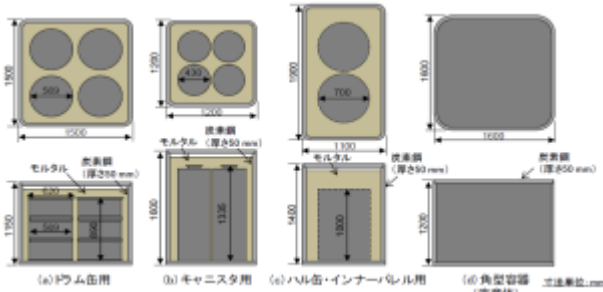


図-2 廃棄体パッケージ B の概略図<sup>3)</sup>  
(容器厚さ 50mm)

2019 年度までの検討により、溶接後熱処理(以下、PWHT とする)施工時の廃棄体の熱的制限を満足するためには、容器内部への断熱材の設置や PWHT 時の入熱低減などの必要性が示された。そこで、容器高さ及び断熱材適用の有無をパラメータとし、PWHT 施工箇所である蓋溶接部と廃棄体との距離が適切となるように設定することで、廃棄体の熱的制限を満足することを検討することとした。また、溶接深さを最小限にすることによって熱処理温度の最小化を検討するために、2重蓋構造に対して必要な変更(溶接深さ 10 mm、下向き溶接)を加え、以下の 3 点の検討を進めることとした。

- 溶接及び残留応力低減処理の検証(実機適用性の検討)
- 蓋接合技術に対する熱影響評価
- 廃棄体パッケージの製作性に係る検討

変更点を反映した 2 重蓋構造の廃棄体パッケージを図-3 に示す。

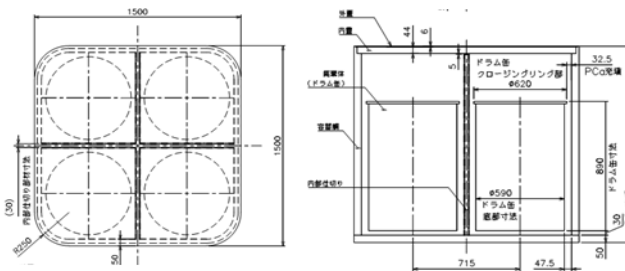


図-3 2 重蓋構造 (2020 年度基本構造)

1) 溶接及び残留応力低減処理の検証(実機適用性の検討)

熱的制限を考慮した 2 重蓋構造に対して、溶接方法の実機適用性の検討と試験を実施した。溶接方法は、2 重蓋構造における溶接効率の向上と遠隔での施工性向上のために、ノンフィラー TIG 溶接の適用性を確認した。

要素試験(図-4)により溶接時の温度や継手性能に問題ないことを確認した。さらに実機と同様の蓋部形状で重ね部検証試験(図-5)を実施し、溶接シーケンス全般を確認した。なお、この試験では開始直後の溶け落ちやクレータ割れ等の課題が抽出されたが、それに対する改善策として、開先位置の見直しや予熱アーク設定の見直し、電極交換頻度を検討した。

溶接電流(実行)	235~245A
アーク電圧	23.1 V
溶接速度	4~5 cm/min
溶接法/溶接姿勢	GTAW/下向き
溶接材料	なし
シールドガス	He
層層	1層 1パス



図-4 ノンフィラー TIG 溶接: 溶接条件(左)と断面マクロ(右)

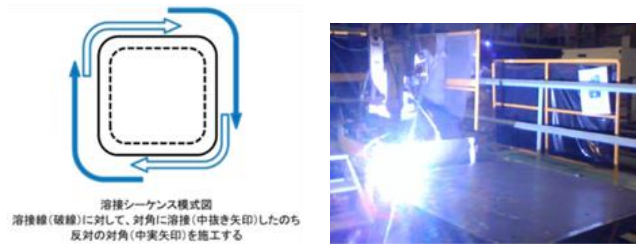


図-5 重ね部検証試験の状況

次に、遠隔施工を想定した熱処理方法として高周波誘導加熱コイルによる局部 PWHT 試験を実施した(図-6)。その結果、昇温・冷却速度の上限付近で施工できることを確認し、加熱時間・冷却時間ともにヒータ加熱(2019 年度に検討)より大幅に短縮でき、容器内面側(廃棄体に近い側)の最高到達温度をヒータ加熱と比べて 100℃程度低く抑えられることを確認した。



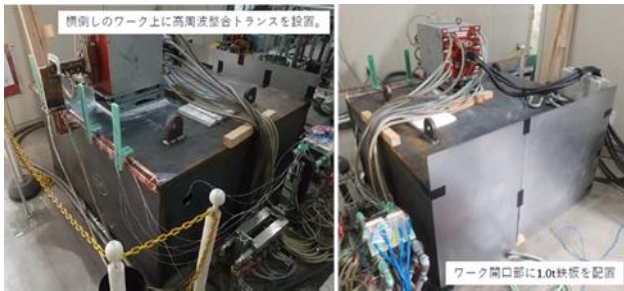


図-6 高周波誘導加熱による局部PWHT試験

## 2) 蓋接合技術に対する熱影響評価

蓋接合工程（特に溶接後のPWHT時）での熱影響について、温度計測結果からモデル化した入熱条件での伝熱解析を実施した（図-7）。

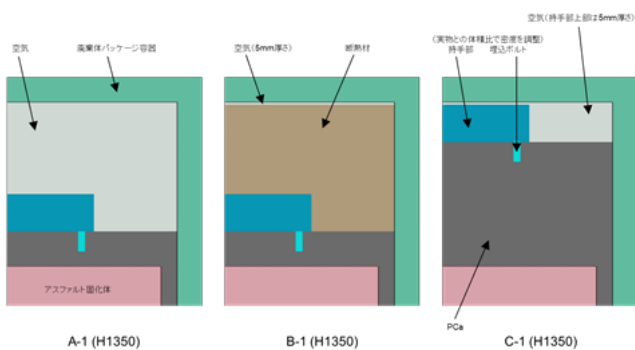


図-7 伝熱解析モデル：廃棄体上部の構造ケース別

その結果、現状の容器サイズでは廃棄体温度がアスファルト固化体の熱的制限以上となったが、容器高さを高くし、PWHT時のふく射の影響を低減させる構造（内部充填材または断熱材を配置）で、制限温度以下に抑えることを確認した（図-8）。

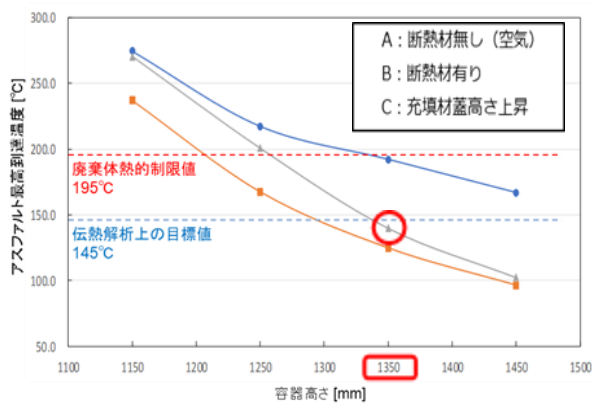


図-8 伝熱解析結果（PWHT時）

## 3) 廃棄体パッケージの製作性に係る検討

廃棄体パッケージの処分場における全体製作手順（図-9）を洗い出し、各項目で遠隔作業に必要な装置及び治具の形状の概念検討を実施した（図-10）。今後は実機に向けた詳細な検討が必要である。

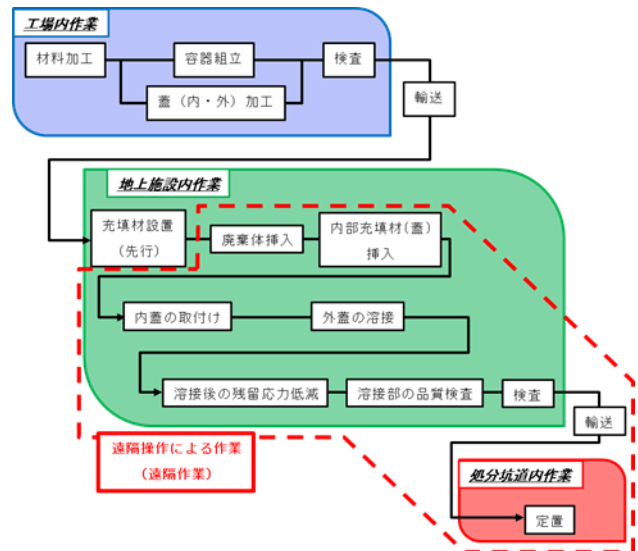


図-9 遠隔施工性を考慮した2重蓋構造の容器構案

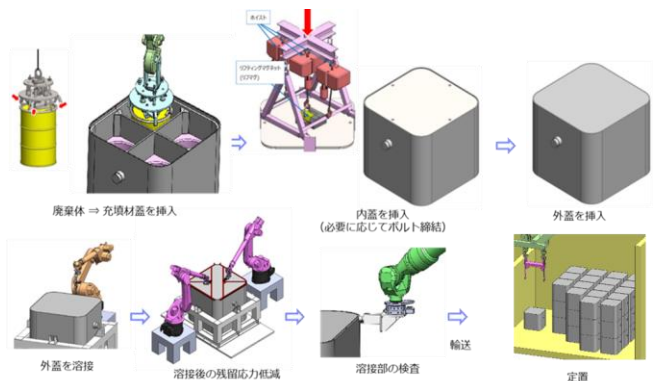


図-10 廃棄体パッケージ製作手順の概念検討

## (2) 廃棄体パッケージ内充填材の仕様の検討

セメント系材料を対象とした内部充填材の技術開発検討課題としては、廃棄体からの放射線に起因する水の分解による水素ガス発生量の抑制、ガス発生に伴う内圧上昇の低減及び水素ガス生成収率に関する知見拡充がある。また、仕様の具体化と製作を視野に入れた要素試験による施工性、製作性や物性の確認及び廃棄体パッケージの製作時にセメント系材料にかかる熱の影響把握などがある。

平成31年度までに、セメント系材料からの放

射線分解による水素ガス発生に関する挙動の概略を把握するため、種々のセメントペーストを用いて水素ガス発生量に関する試験を実施し、乾燥による自由水量を低減することで水素ガス発生量を低減できることを確認した。また、仕様の具体化と製作を視野に入れた物性や施工性などを確認するために、暫定配合を設定して 60cm 角のコンクリート試験体を作製し、製作性や施工性に関するデータを取得した。

1)セメント系材料からの水素ガス発生抑制及び見積もり方法に関する検討

モルタル及びコンクリートからの水素ガス発生量に関する知見の拡充を目的に、自由水量や配合が異なるモルタルやコンクリート試料からの水素ガス発生量を測定し、それらの違いが水素ガス発生に及ぼす影響を確認した。

モルタル及びコンクリートにおいても、セメントペースト同様に乾燥により自由水量を低減することで、水素ガス発生量を抑制できることが確認されたが、骨材やセメント種類、骨材量などの配合の違いが水素ガス発生量に及ぼす影響に関しては、今回の試験結果からは明確に確認できなかった。

平成 31 年度までに取得したセメントペースト及びモルタルを用いて測定した水素ガス発生量の全データと今年度の結果を併せて、自由水量及び全水分量（自由水量+結合水量）と水素ガス発生量との関係を図-11 に示す。

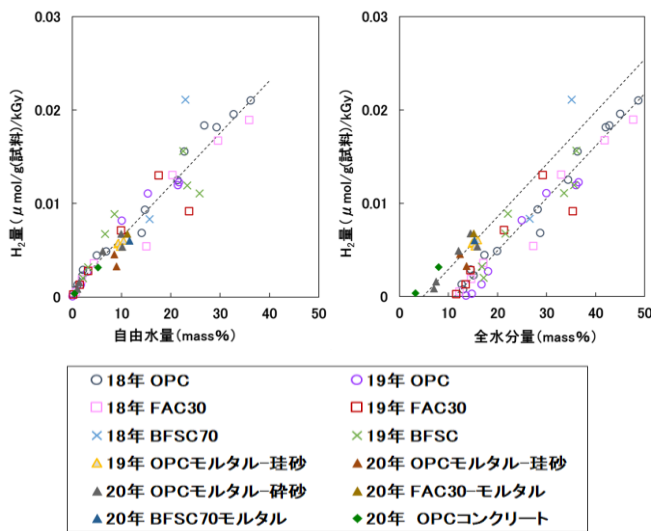


図-11 自由水量及び全水分量（自由水量+結合水量）と水素ガス発生量との関係

以上の結果より、水素ガス発生には自由水量の寄与が支配的であると考えられる。自由水量と水素ガス発生量の関係からコンクリートの水素ガス発生量を予測できる可能性があることから、今後はコンクリート配合（モルタル含む）でのデータを蓄積して検討する必要がある。

2)廃棄体パッケージ内充填材の施工性及び製作性に関する検討

平成 31 年度までに内部充填材に求める設計要件（機能）を整理し、どの機能が必要とされても対応できるよう各組立手順での各機能に関する知見を幅広く試験により取得してきた。廃棄体パッケージ B の内部充填材に求める安全機能として、容器内で廃棄体が移動しないこと及び内圧制限（水素ガス発生量の低減）に重点を置くこととし、プレキャスト方式を選定して検討した。

今年度は、プレキャスト方式により工学規模（室内試験で実施可能な範囲）で内部充填材のモックアップ試験体を製作し、施工性及び製作性、水素ガス発生量の低減に係るデータを取得した。

施工性については、内部充填材の狭隘部における最小すき間幅が想定廃棄体パッケージの形状から 30mm となるため、試験体製作では狭隘部を模擬するとともに、事前に 30mm の狭隘部への充填を想定した試験に基づき選定した配合条件で充填性を確認した。成形後の試験体の外観観察の結果から、補強材（ワイヤーメッシュ）の有無、配合条件の違い（繊維教材の有無）によらず充填不良などの箇所はなく、懸念された狭隘部への充填もできていることが確認された。試験体の打設高さは、製作時のハンドリングや乾燥時の水分の抜けやすさを加味して分割で製作することを想定し、廃棄体パッケージの想定高さ（900mm）の半分程度（470mm）とした。図-12 に製作した試験体の外観を示す。

内部充填材の含水率をどの程度に設定するかは、内圧制限の基礎となる水素ガス発生量が基準となるが、内圧（水素ガス発生量）の目安が設定されていない現時点では、任意の乾燥期間における水分逸散量を予測する手法を構築することが望まれる。理想的な一次元拡散に近い条件の 10×10×40cm の試験体より得られた一次元の見かけの拡散係数を用いて、水分逸散量の推定を行った。その結果、配合及び乾燥温度条件がおおよそ

決定した時には、10×10×40cm の試験体などを使用して見かけの拡散係数を取得することで、現在検討しているパッケージ内充填材の形状の容積/表面積比の範囲の水分逸散量を、概ね推定することが可能であることを確認した。



図-12 製作した試験体の外観

### (3) 閉鎖後の廃棄体パッケージ容器の健全性評価

廃棄体パッケージの熱影響低減のために導入を検討している 2 重蓋構造の溶接部の構造健全性の確保と、今後、実規模製作確認試験で製作する廃棄体パッケージの製作設計への反映を目的として、操業期間中及び埋設後に廃棄体パッケージに負荷される内圧及び外圧などに対して、溶接部における破損の有無を有限要素解析により評価した。

解析における破損の有無の判断は、破損モード（塑性崩壊、弾塑性破壊、脆性破壊）を想定し、それぞれの破損モードに対応した破壊の駆動力（応力や応力拡大係数等）と材料の強度（引張強さ、降伏強度、破壊靱性等）の関係から破損の有無が判断される。

塑性崩壊は構造物断面で生じる延性破壊で、破壊する断面における平均的な応力が破壊の駆動力になる。一方、塑性破壊と脆性破壊では切欠きや欠陥などを起点として、亀裂が発生・進展する。塑性崩壊による破損の評価は、モデルに対する弾塑性有限要素解析による崩壊解析結果から、外圧または内圧を負荷した場合の代表変位（代表節点（モデル全節点の中で一番大きな変位が生じた節点）での変位）と圧力との関係から 2 倍勾配法によって崩壊荷重を決定し、材料強度との比較から判断する。

有限要素解析は全体の 4 分の 1 をモデル化したメッシュで行い、境界条件は、図-13 により荷

重として内圧または外圧を負荷した。外圧を付与する場合は、底面を含む外面全体に付与した。内圧を付与する場合は、外蓋と内蓋が密着されていない 2 重蓋構造では、外蓋部分と本体部分に圧力を付与した（図-13(a), (c)）。一方で、相対的に薄い外蓋に内圧が集中することを避けるために、外蓋と内蓋を一体とした蓋（一体型蓋）構造では、図-13(d)に示すように溶接部以外は内蓋及び本体で圧力を受けることになる。

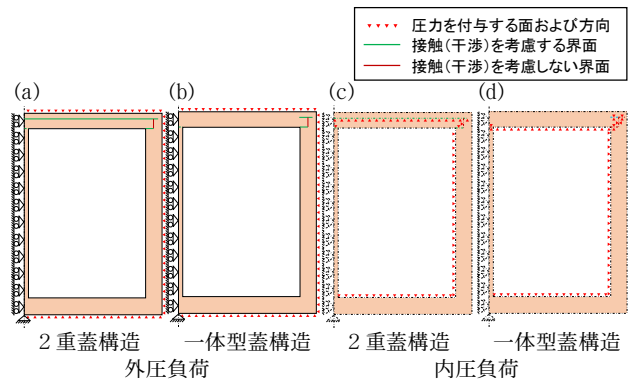


図-13 境界条件

2 重蓋構造の外蓋厚さ 10 mm、容器高さ 1250 mm、降伏強度  $S_y$  が 200MPa のモデルに対する 2 重蓋構造の境界条件（図-13(a), (c)）の弾塑性有限要素解析結果から、外圧または内圧を負荷した場合の崩壊荷重に到達した近傍のステップにおける Mises 相当応力の等高線図を図-14（外圧負荷）と図-15（内圧負荷（変形を 10 倍して表示））に示す。外圧を負荷した場合は、蓋部と胴部の変位が相対的に大きくなり、最終的に蓋部において最大変位が発生した。内圧を負荷した場合は、外蓋部に大きな変形が生じ、その他の部位では変形は見られなかった。

図-16 には、外圧または内圧を負荷した場合の代表変位と圧力との関係を示す。この条件を基準に、蓋構造、降伏強度、内面高さの条件を変えて解析を実施し耐圧性への影響を調べた。

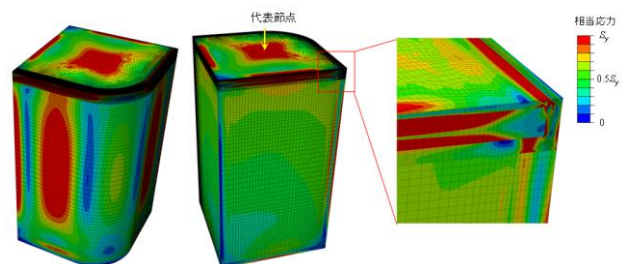


図-14 Mises 応力分布（外圧負荷）

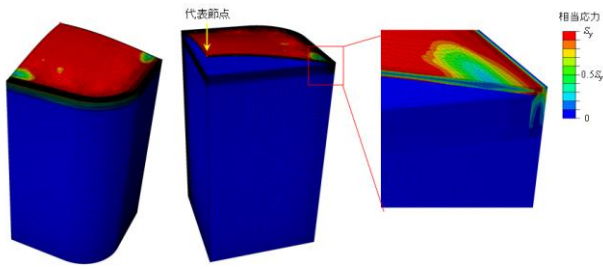


図-15 Mises 応力分布 (内圧負荷)

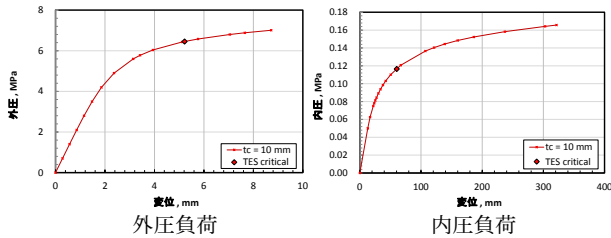


図-16 代表変位と圧力の関係

外圧負荷に対しては、上蓋と下蓋が密着されていない2重蓋構造に対して、一体型蓋構造とすることにより降伏強度は増加した。鋼材の降伏強度については、それが変化した場合の結果を図-17に示す。処分深度 1000m に相当する静水圧を 10MPa と想定すると、板厚 50mm の SM400 材を用いた場合、その降伏強度  $S_y$  が 215MPa であるので外圧に対する耐圧性は厳しく、廃棄体パッケージ容器の設計においては、板厚を厚くする、あるいは降伏強度の高い鋼材を用いるなどの改善が必要となることを示唆している。内面高さについては、崩壊荷重に及ぼす影響は見られないことを確認した。

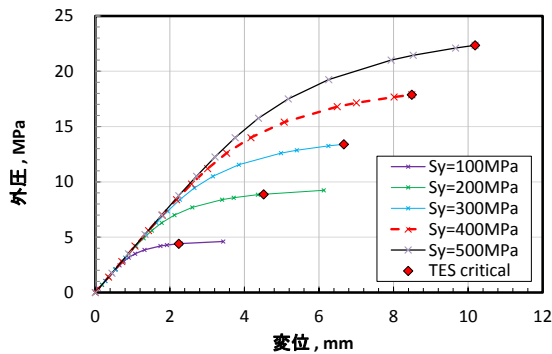


図-17 崩壊解析 (外圧負荷) に及ぼす降伏強度の影響

内圧負荷に対しては、2重蓋構造の耐圧性が著しく劣るため、一体型蓋構造の境界条件で降伏強度を変えた解析を実施した。その結果を図-18に

示す。図-18 の降伏強度  $S_y=200\text{MPa}$  の結果と図-16 右図との比較から、2重蓋構造から一体型蓋構造にすることにより内圧に対する耐荷重が 1 桁増加していることがわかり、外圧負荷に比べると内圧負荷の方が2重蓋構造と一体型2重蓋構造の耐圧性の差が顕著に表れることがわかる。放射線量が高くガス発生量が多いと見込まれる廃棄物の場合には、密着が不十分な2重蓋構造では内圧に対する耐圧性が厳しいため、一体型構造を採用するなどの内圧の対策は不可欠である。内面高さについては、外圧負荷と同様に、崩壊荷重に及ぼす影響は見られないことを確認した。

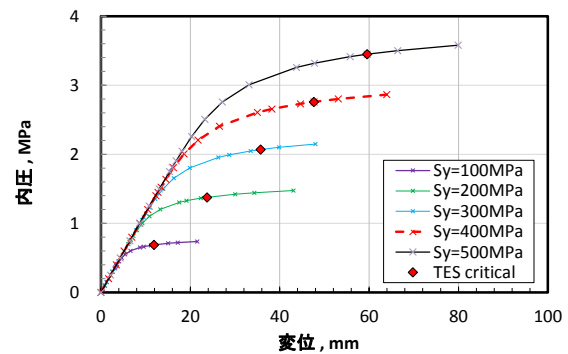


図-18 崩壊解析 (内圧負荷) に及ぼす降伏強度の影響

#### (4) 廃棄体パッケージ容器溶接部の腐食挙動評価

閉鎖後 300 年程度の放射性物質の閉じ込め性能が期待されるパッケージ 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。NUMO-SC では、廃棄体パッケージ容器の耐食性として、炭素鋼母材の平均腐食深さが 0.3mm、腐食深さの不均一性を考慮した場合の最大腐食深さを 5.3mm とし、300 年程度の期間で貫通孔が発生しないと評価されている。

本事業では、蓋の溶接部の腐食挙動やメカニズムを確認して、既往の腐食寿命等の長期挙動評価をより信頼性の高いものにすると共に、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とした浸漬試験について検討してきた。しかしながら、昨年度の検討において、TRU 処分環境下を想定して、pH11 程度に調製した弱アルカリ性の水溶液条件で酸化性雰囲気での全面腐食試験を実施したが、マスキング部ですき間腐食が認められたため腐食データは得ることができなかった。

そこで、これまでに TIG 溶接部、MAG 溶接部の

腐食データが得られている酸化性雰囲気、pH8.5の人工海水及び人工淡水の水溶液条件で、蓋板の溶接方法の候補である LAH 溶接部及び EB 溶接部の腐食データを取得すること目的とした全面腐食試験を実施した（表-1）。

表-1 腐食試験条件

試験溶液	試験片		試験温度	浸漬期間	試料数
人工海水 【ASTM D1141用真】	SM材EBW溶接	SM材LAH溶接	80℃	90日	n=各3
	SM材EBW溶接	SM材LAH溶接		360日	
人工淡水 NaCl 2.5E-3 mol NaHCO <sub>3</sub> 2.5E-3 mol	SM材EBW溶接	SM材LAH溶接		90日	
	SM材EBW溶接	SM材LAH溶接		360日	

90日浸漬後の外観写真を図-19に示す。

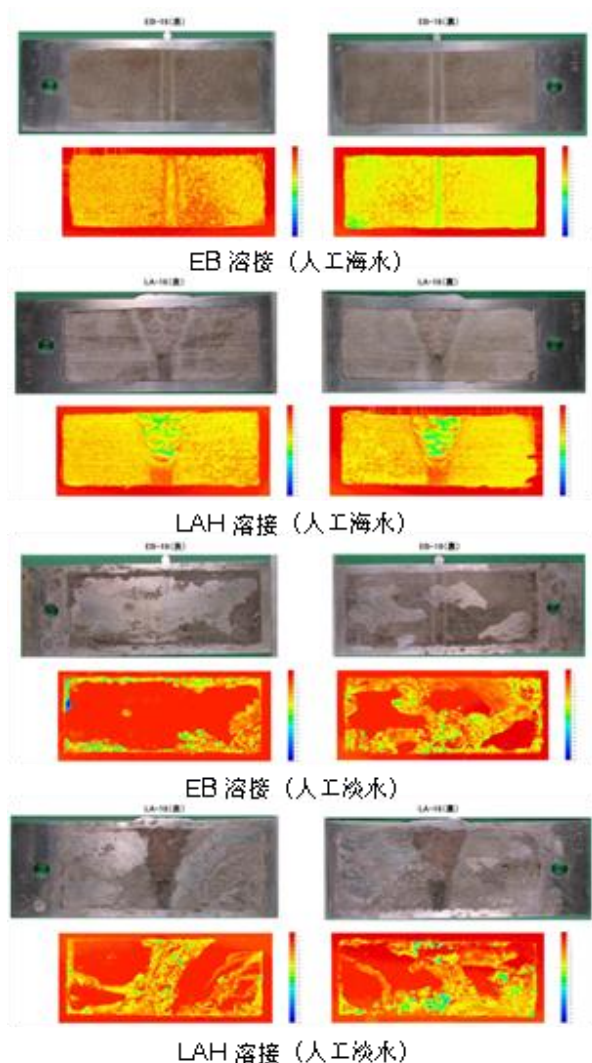


図-19 90日浸漬試験後の外観写真

外観の腐食状態に関しては、人工海水では全面的に均一に腐食しているが、人工淡水では不均一に腐食している。また、人工海水の LAH では溶接

部（アーク部）が選択的に腐食している様子が見受けられる。最大腐食深さでは、人工海水で 150～200 μm 程度、人工淡水で 400 μm 程度であった。

一方、重量測定による平均減肉量（表-2）では、人工海水の方が人工淡水のものよりやや大きい値を示すが、溶接方法の違いによる減肉量は明確には示されなかった。

表-2 90日浸漬試験後重量測定による平均減肉量

浸漬溶液	EBW試験片			LAH試験片		
	No.	減肉量 (mm)	平均 (mm)	No.	減肉量 (mm)	平均 (mm)
人工海水	EB-14	0.089	0.088	LA-14	0.097	0.095
	EB-15	0.084		LA-15	0.098	
	EB-16	0.090		LA-16	0.090	
人工淡水	EB-17	0.079	0.077	LA-17	0.074	0.078
	EB-18	0.077		LA-18	0.087	
	EB-19	0.074		LA-19	0.073	

今回の試験結果から、LAH 溶接部及び EB 溶接部の浸漬期間 90 日における水溶液条件の違いによる腐食データが取得できた。なお、浸漬期間 360 日の試験は現在進行中であり、2021 年 9 月に終了予定となっている。

- 1) 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
- 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、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
- 3) 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－（レビュー版）、NUMO-TR-18-03、2018

### 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、かつ半減期の長い核種の影響が大きいことが示されている<sup>1)</sup>。

これらのうち、I-129 は主に再処理施設のオフガス系で銀吸着材によって、AgI の形態で回収される。AgI は還元性雰囲気では容易に分解し、ヨウ素を放出すること、ヨウ素は人工バリアおよび地質媒体への吸着がほとんど見込めないことなどから、その対策として地層処分において I-129 による被ばく線量の低減を可能とし、さらに長期性能評価において不確実性が小さく、さらに経済性にも有効なヨウ素固定化技術を開発し、我が国の幅広い地質環境条件に柔軟に対応することのできる代替技術として、①固化体からのヨウ素放出期間 10 万年以上(特に地質条件が悪い場合でも I-129 からの最大被ばく線量を現行よりも約 1 桁低減可能なヨウ素放出期間に相当)、②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)の 2 点を目標として固化体の開発を進め、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、ヨウ素をマトリクスに AgI の形態で閉じ込める HIP 固化技術と、ヨウ素を鉛とホウ素を主成分とする低温熔融ガラスに均質に固化する BPI ガラス固化技術に絞り込み、開発を実施している<sup>2)-7)</sup>。

両固化技術ともに、年単位での浸出試験では、浸出挙動を把握しており、ヨウ素の放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<sup>-</sup>、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、ヨウ素の放出が 10 万年という長期間にわたることを説明するためには、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、ヨウ素 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(酸化還元電位や、pH、温度など)の多様性やその変化に適用できる吸着材の開発には至らなかった<sup>9)</sup>。

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<sup>10)</sup> ことから、最新の技術について調査するとともに、有力な技術があればその適用性について検討を加えることとした。

#### ◇2020 年度の成果<sup>8)</sup>

##### (1)HIP 固化技術

これまでに、アルミナ HIP 固化体からのヨウ素の放出は、時間の 2 分の 1 乗に対して直線的に増加していくことが、浸漬試験によって示されている。また、その直線の傾きは HS<sup>-</sup>濃度が高い場合により大きくなることが分かっている<sup>7)</sup>。

この挙動がより長期間継続することを確認するとともに、ヨウ素放出挙動のモデル化方針を確認することを目的に、浸漬試験を継続し、ヨウ素の放出量の変化を観察したところ、図-1 に結果の例を示す通り、これまでに得られた結果と同様、時間 t の 2 分の 1 乗に対して直線的にヨウ素の規格化浸出量が増加した。

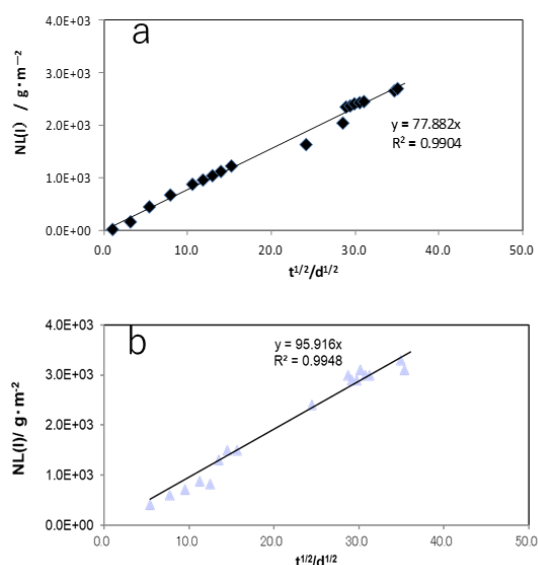


図-1 (a) [HS<sup>-</sup>] = 3×10<sup>-4</sup> mol/dm<sup>3</sup>及び(b) [HS<sup>-</sup>] = 3×10<sup>-2</sup> mol/dm<sup>3</sup>のアルカリ (pH=12.5)浸漬液への浸漬試験結果

ここで規格化浸出量 NL は、 $NL = (C/f) / (S/V)$  で表され、C は溶液中の対象元素の濃度、f は固化体中の対象元素の含有率、S は固化体表面積、V は溶液体積である。

HIP 固化体からの長期的なヨウ素放出挙動に関しては、2018 年度までに、セルオートマトン法を用いて浸漬試験で得られた放出挙動のトレンドを再現できることを示したが、規格化浸出量の絶対値まで再現することはできなかった。また、その再現には、解析で仮定したパラメータの設定を最適化する必要があるが、パラメータ数が多く、またその条件も複雑であるため、その設定の根拠となる情報の整備が困難と考えられた。

そのため、これまでに得られた空隙構造及び固化体内部の Ag の存在状態 (HS の浸透した領域では AgI が分解し、 $Ag_2S$  が生成している) 及びヨウ素の放出トレンドから推定される拡散挙動によるヨウ素の放出を加味した、より単純な放出モデル構築が必要と考えた。

今後、長期的なヨウ素放出挙動に関する説明性の確保に向けて、ヨウ素放出の現象モデル及びその再現が可能な数学モデルの構築を模索していく。

## (2) BPI ガラス固化技術

これまでの研究開発によって均質なガラスの製造に関する基礎的な技術は確立されており、現在のフェーズでは、BPI ガラス固化体 (以下、ガラスという) からのヨウ素の放出が 10 万年という長期間にわたることを説明し、ガラスの性能を評価するためのヨウ素放出モデルの構築を課題としている<sup>5)</sup>。

これまでに、XPS (X 線励起光電子スペクトル分析)、NMR (核磁気共鳴スペクトル分析)、XAFS (X 線吸収微細構造分析) などによって取得した BPI ガラスの各成分の配位構造に関するデータに基づいて、リバースモンテカルロ法によって構築したガラスの微細構造をもとに、各元素間の結合パラメータを仮定したうえで、ガラスの溶解によるヨウ素の放出挙動をモンテカルロ法によって解析したところ、約 800 日までの浸漬試験結果を再現できることがわかっている。

この際に使用したパラメータを変更せずに、2019 年度から 2020 年度にかけて取得した 2000 日までの試験結果の再現を試みたところ、図-2 に

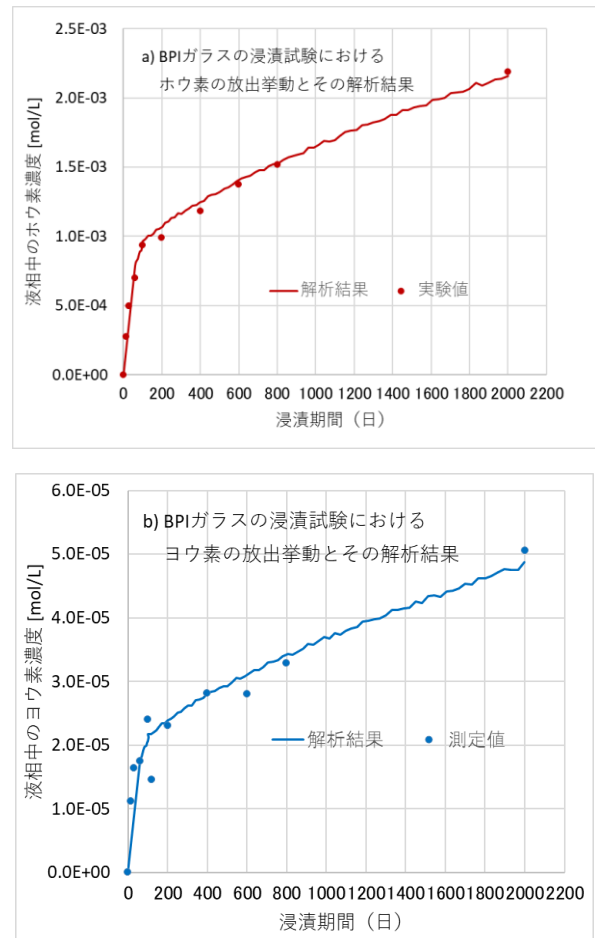


図-2 2000 日までの浸出挙動予測と浸漬試験の結果

示す通り、解析結果は試験結果をよく再現できていた。このことは、ガラスの溶解過程および溶解に伴うヨウ素の放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放出挙動を再現できる可能性を示している。

これまでの浸漬試験の結果および浸漬後の固相分析の結果から、図-3 に示すように、ヨウ素の放出挙動は、表面に鉛と液相成分とが反応して生成した変質層を形成し、ヨウ素とホウ素とが調和的に溶出するグループと、ガラス表面の変質層が極めて薄いか生成せず、ヨウ素の溶出がホウ素の溶出と比較して小さいグループとに大別されることがわかっている。

いずれのグループでも液相の分析において鉛の濃度は検出下限値を下回っており<sup>5)</sup>、また、変質層を形成するグループでは、変質層の厚さと、ホウ素の規格化浸出率から算出されるホウ素溶出部の厚さとがほぼ等価である<sup>7)</sup>ことがわかって

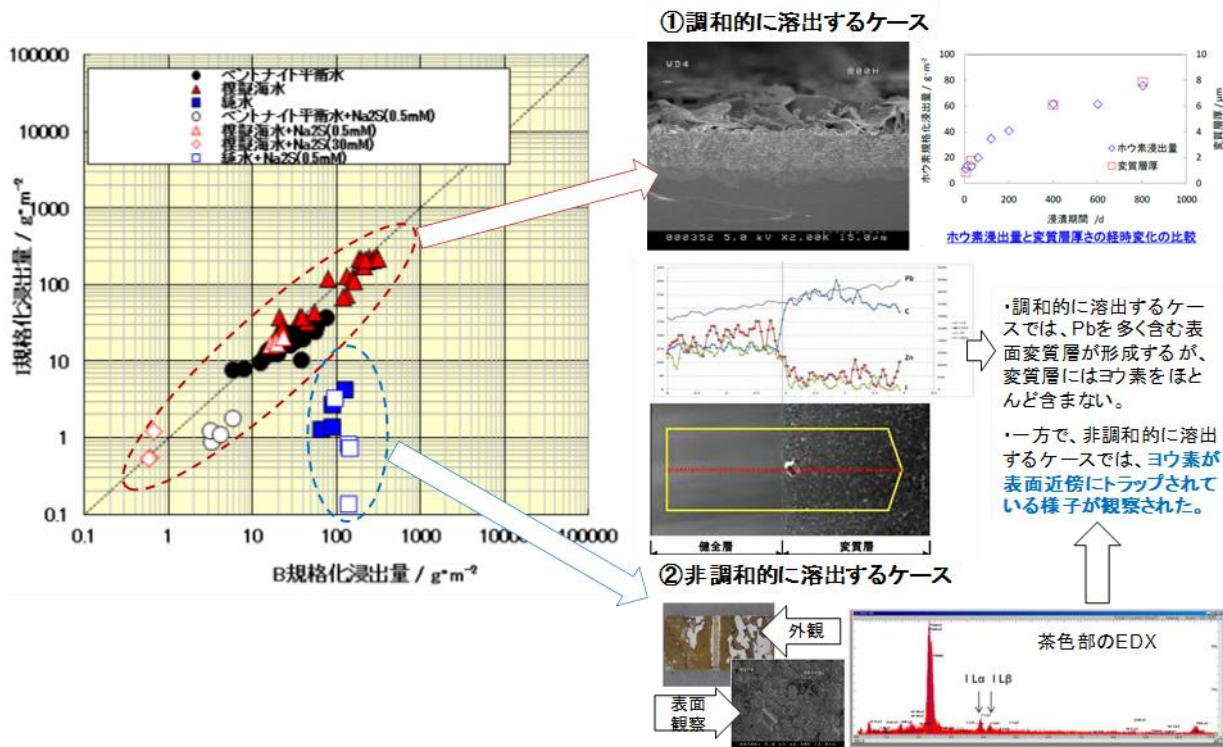


図-3 これまでの浸漬試験におけるヨウ素及びホウ素の規格化浸出量の関係と浸漬後のガラスの状態

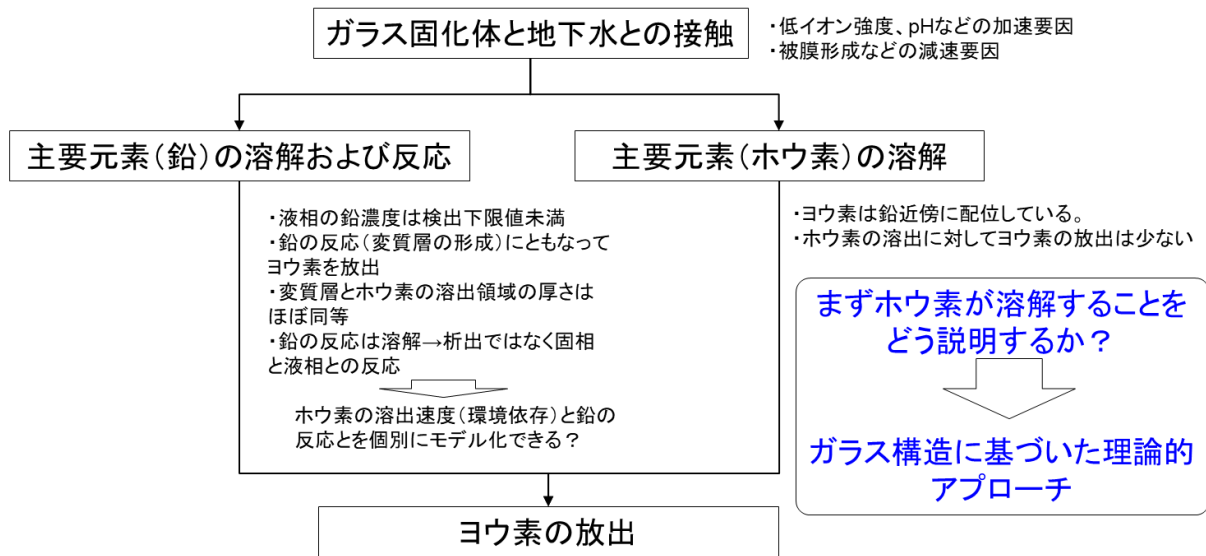


図-4 これまでの浸漬試験におけるヨウ素及びホウ素の規格化浸出量の関係と浸漬後のガラスの状態

いる。また、マイクロリアクタを用いた試験でも表面に変質層が生成することから、変質層を生成する反応が、ガラス表面での溶解反応と比較して速い反応であることが推察された<sup>5)</sup>。

これらの結果に基づいて、BPI ガラスからのヨウ素の放出に係る現象を図-4 のように推定し、

それぞれの反応及びその継続性を検証するための試験計画を立案した。

### (3)陰イオン吸着剤

事業概要で述べたように、水処理や土質改良などの分野で、近年陰イオンの固定や除去に関する



技術が開発され、商品化されているものがあることから、最新の技術について調査し、地層処分への適用性が見込まれる技術の探索を開始した。

2020年度は、過去30年間の論文誌等および近年製品化された陰イオンを対象とする吸着材、イオン交換材について調査し、それらのpH、Eh等の液性への適用範囲をMAP化して、有望技術の抽出を試みた。近年の技術開発によって、弱アルカリ性や、高イオン強度の環境など、これまで適切な吸着材がないとされていた領域に適用できる可能性のある技術も散見されたことから、今後、それらのうち処分場の地下水環境およびその長期的な変化に着目して適用可能性のあるものを選択し、吸着試験等によってその性能を確認していくこととした。

- 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、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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 地層処分研究開発に関する全体計画（平成30年度～平成34年度）、地層処分研究開発調整会議、2018
- 10) たとえば <http://www.amec.jp/product/index.html>

## 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廃棄体（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）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などのコールド試験（想定される処分環境温度 30℃～80℃での腐食試験）である。

事業を効率よく確実に進めるため、研究フェーズを区切って実施してきた。フェーズ 1（2004 年度～2006 年度）では、ジルカロイ被覆管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<sup>1)</sup>。

フェーズ 2（2007 年度～2012 年度）では、それまで PWR に関してのみ評価例のあった 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、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ている<sup>2)</sup>。

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、国際的な情報共有・調査を実施した<sup>3)</sup>。特に、欧州の共同研究である CAST（Carbon14 Source Term）プロジェクトへ参画することで、研究開発を合理的に遂行し、放射化金属や C-14 の安全評価に関わる最新の成果や課題を共有した。

以上のようなこれまでの調査研究では、ハル等廃棄体において C-14 インベントリの多くを含むハルに注力した検討を行ってきた。一方、エンドピースについては、国内にて、これまでに実廃棄物の分析評価を行った事例がない。そのため、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ている。特に、従来の検討では、金属廃棄物からの核種溶出は、金属中の核種分布を考慮せず、均一な核種濃度による評価に基づいていることから、エンドピース中の核種分布を評価することを目的とし、詳細な核種分析や解析評価を実施する。さらに、エンドピース（BWR 下部タイププレート）の試料を浸漬させることで核種溶出データを取得する。また、ハルについてはこれまでに継続している溶出試験により、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する。

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る。

### ◇2020 年度の成果<sup>4)</sup>

#### (1) 窒素分析手法の検討

C-14 の親元素である窒素の材料中の濃度は放射化計算のインプットとして重要である。2020 年度は窒素の分析手法について、エンドピースの材料であるステンレス鋼への適用性を検討した。2019 年度<sup>5)</sup>に文献調査からリストアップした分析手法のうち、グロー放電発光分析法（JIS K 0114:2018。以下、GD-OES）、並びに、鉄及び鋼窒素定量法（JIS G 1228:1997）に規定されている不活性ガス融解－熱伝導度法を用いて、未照射試料の分析を行い、測定精度を比較した。前者は予定するホット施設内において、利用できる設備の制約がある中で実施見込みのある分析手法であり、その測定精度を評価するために、一般的でより精度の高い後者を併せて実施することとした。

GD-OES 装置用の板状の標準金属試料の入手が困難であったため、粒状等の標準金属試料を用いた不活性ガス融解－熱伝導度法による測定を介して、GD-OES 装置用の板状金属試料中の窒素濃度を定量した。定量した窒素濃度に基づき、GD-OES による窒素検量線を作成した結果、ステンレス鋼やジルカロイに対する GD-OES の定量下限値は 150ppm 程度と推定された。

C-14 の実測値と放射化計算値の比較により、

各材料中の窒素濃度は、エンドピースの材料であるステンレス鋼で数百 ppm、ハルの材料であるジルカロイで数十 ppm(材料規格から 80ppm 以下)と想定されるため、GD-OES を用いた窒素定量に関しては、エンドピースへの適用見込みはあるが、ハルの窒素定量は困難であることが確認された。

## (2) イメージングプレート法による核種分布評価の検討

エンドピース内の C-14 などの核種分布を評価するため、イメージングプレート (以下、IP) を用いた測定方法を検討して来た。本手法は、C-14 以外の Co-60 などの核種から発生する  $\beta$  線、 $\gamma$  線にも感度を有するが、放射化計算・解析評価を考慮することで核種分布の評価を行うことを想定している。2020 年度は、高い放射能を持つ大型の実試料の測定に向け、短時間露光を可能にする露光方法及び露光装置を検討、試作し、具体的な測定手法について検討した。

想定される大型試料に対する露光時間を 5 秒 (約 340MBq の放射能を持つ大型試料に対して IP の輝度が最大値の半分程度となる時間) と想定し、想定露光時間より短い 1 秒程度で露光時間の設定が可能な装置を検討する。露光時以外は試料からの放射線の影響を受けないようにするために必要な仕様を設定し装置設計を行った。露光時以外は、鉛遮蔽体の下に IP を配置しておき、露光時に水平移動と垂直移動を組み合わせた動作を行うことで、試料設置台に設置した試料に下側から軽く押し付ける構造とした。

図-1 に試作した露光装置を示す。本写真は露光前 (IP 設置台が収納状態) のものであり、IP や試料は示されていない。露光の際は、試料を試料設置台 (写真中の黄色膜) 上に設置しておき、専用ソフトによるモータ制御で IP 設置台を動作させ、IP を試料の下部に移動、固定して、IP を露光させる。

本装置を用いた放射線測定の検証として RI 線源の測定を実施したところ、露光時間と輝度の間に線形性が確認でき、IP の移動や、試料の設置などの影響を受けずに、露光時間に応じた測定ができることを確認した。放射能の高い大型試料に対して、試料設置作業などの時間を確保しつつ、短時間の露光を行うことが可能である。

また、露光時間を管理することで、放射能が異なる複数の試料を別々に測定した場合であっても、同一基準で輝度情報を比較することが可能であり、全体の放射能分布の推定も可能となると考えられる。今後は、IP 法により照射済み試料中の核種分布を実測し、解析で求めた核種分布と比較検討を行う予定である。

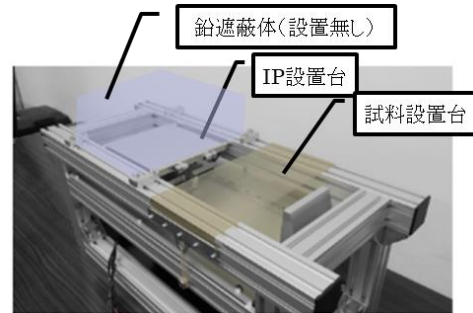


図-1 IP 露光装置の外観

## (3) 核種分布に関わる諸因子の基礎的検討

ハル中の炭素濃度分布に関しては、運転中の温度勾配下での炭素の熱拡散によって、炭素濃度分布が不均一になる可能性がある。基礎検討としてジルコニウム中の炭素拡散係数を取得し、溶存酸素の影響について検討したところ、溶解酸素濃度の増加につれて、炭素拡散係数が小さくなるという傾向があった。今後、ジルコニウム中の炭素の熱輸送データを取得するなどして、検討を進める必要があるが、その際、ジルコニウム中の炭素の拡散係数はジルコニウム中の溶解酸素の影響により 1~2 桁程度低下することを考慮する必要があると考えられる。

## (4) 解析による核種分布評価

核種の生成及び溶出挙動の評価を行うために、燃料集合体の構造材のモデル化、複数の手法による照射条件の再現、並びに、核種生成量の解析を実施して来た。2019 年度までにエンドピースとして下部タイプレートの三次元モデル化を実施し、モンテカルロシミュレーションにより中性子照射量の位置依存性の解析を行った<sup>5)</sup>。2020 年度は、2019 年度に作成した下部タイププレートに加えて上部タイプレートの三次元モデル化を行った。また、下部タイププレートについては解析精度を向上させるために、運転履歴を反映したモンテカルロ燃焼解析を実施した。さらに、今後の溶出挙動評価に、向けて、三次元核

種分布から溶出挙動評価を行うための基礎的な検討を行った。

モンテカルロ燃焼解析により求められた核種濃度分布は、図-2 に示す C-14 及び Co-60 の例のように、燃料に近いほど高く、離れるほど低下する傾向が見られる。

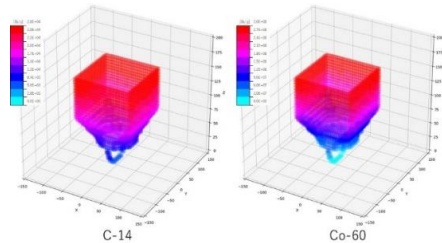


図-2 下部タイププレートの核種濃度分布解析結果

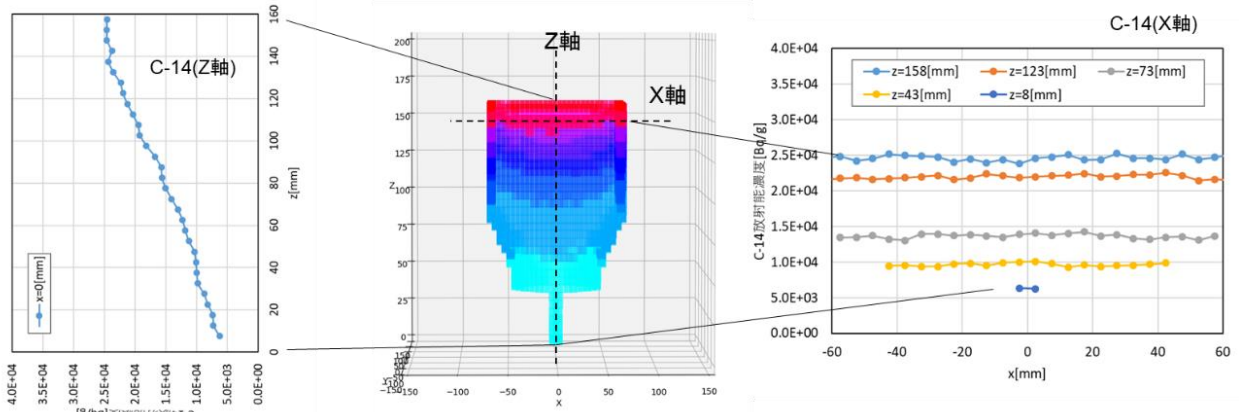
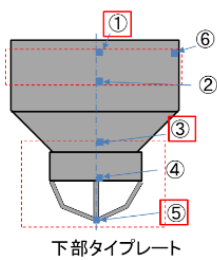


図-3 下部タイププレートの核種濃度分布の評価

表-1 各解析手法の概要

項目	解析手法(使用した解析コードの名称)		
	ORIGEN2.2	MCNP6.1	MCNP-BURN2
解析手法の分類	燃焼解析	モンテカルロ解析	モンテカルロ燃焼解析
燃焼計算	全体の平均値を計算	計算しない	中性子束分布を考慮
発生する中性子	一定値	一定値	核分裂計算により評価
照射される中性子束分布	一定値	減速による分布を再現	減速による分布を再現
中性子エネルギースペクトル	一定値	一定値	核分裂計算により評価
運転履歴	運転、冷却日数を反映	反映しない	運転、冷却日数を反映



下部タイププレート

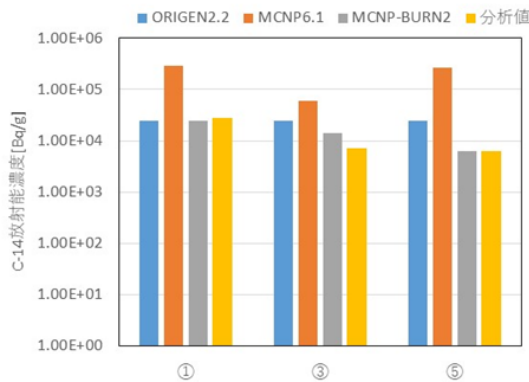


図-4 C-14 濃度の解析値と分析値の比較

核種濃度分布の評価として、図-3 中央に示す断面における Z 軸及び X 軸に関する C-14 の分布を、それぞれ、図-3 左及び右に示す。Z 軸方向では燃料からの距離が離れるほど核種生成量が低下する傾向が見られるが、X 軸方向では大きな差がみられないことが確認できた。

また、核種濃度の解析値と実際の下部タイププレートから得られている分析値の比較検討を行った。解析値としては、上記のモンテカルロ燃焼解析に用いた手法以外に、これまでの検討で用いたより簡易的な 2 手法も含めて、表-1 に示す 3 つの解析手法について比較した。

図-4 に、C-14 濃度の解析値と分析値<sup>5)</sup>について下部タイププレートの 3 点 (図-4 上の①、③及び⑤) において比較した結果を示す。解析値は分析値より大きな値となる傾向が見られるが、その差異は解析手法により大きく異なっている。

ORIGEN2.2 による評価結果は、中性子束の分布を考慮せずにエンドピース全体の平均値を計算するため、3 点とも同じ値である。下部において分析値との差が大きいことから、設定した中性子束が上部での値に近かったものと考えられる。また、MCNP6.1 による評価結果は、他の手法によ

るものと比較すると分析値より大きな値を示す傾向が見られる。MCNP では核種の生成や壊変の計算が行われないことが、このような傾向を示した一因であると考察される。なお、ここでの核種生成量は MCNP6.1 で計算した中性子束及び反応断面積から簡易的に評価している。

これらに対して、MCNP-BURN2 では中性子束分布と核種の生成や壊変の両方が考慮されており、解析値が最もよく分析値を再現する結果となった。簡易的な評価と比較して、モンテカルロ燃焼解析による評価により核種生成量の予測精度が改善されたものと考えられる。

#### (5) エンドピースの溶出試験

2019 年度<sup>5)</sup>までに試験対象となるエンドピースを照射履歴等から選定し、試料の加工方法や容器について具体的に検討を行うなど、溶出試験の計画を立案し、2020 年度は、計画に基づいて溶出試験を開始した。長期試験を想定して溶出試験体は 4 検体とし、溶出試験容器の作製、溶出試験試料の調製及び溶出試験の仕込みを実施した。

溶出試験容器は、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 (図-5) から成る二重構造とした。エンドピースから 4 検体分の溶出試験試料を切断し、研磨等により調製するとともに、各試料について寸法検査、質量測定を実施した。溶出試験容器に溶出試験試料を浸漬液 (水酸化ナトリウム溶液 : pH12.5、ORP-250 mV に調整) とともに窒素雰囲気下で封入後、溶出試験を開始した。溶出試験容器への封入後の様子を図-6 に示す。今後、放射化計算による核種分布評価を反映しながら金属腐食速度に応じた核種溶出挙動の経時変化を表す溶出モデルを構築し、取得した長期溶出データと比較検討することが重要である。

#### (6) 高感度分析手法に関する調査

放射化金属中のアニオン核種や溶出する C-14 の化学形態の分析評価を想定して、高感度分析手法である加速器質量分析 (以下、AMS) に着目しながら、関連する調査を実施した。ハル等廃棄体に含まれる C-14 や C1-36 等のインベントリ分析、並びに、溶出試験の溶出液分析に対する AMS の適用性を調査するとともに、溶出液中の

C-14 を目的の化学形態に分離・分画する手法についての検討項目を整理した。さらに、化学成分の分離操作後の試料を AMS 測定する上で必要となる同位体希釈操作の条件について整理するとともに、放射線測定に対する AMS 測定の優位性を定量化し、効率的な実験の進め方について検討した。調査結果から、ハル等廃棄体中の核種のインベントリやハル・エンドピースからの溶出核種等の高感度分析を実施できる見込みが得られたので、今後、AMS 等を用いた高感度分析手法の適用を図る。

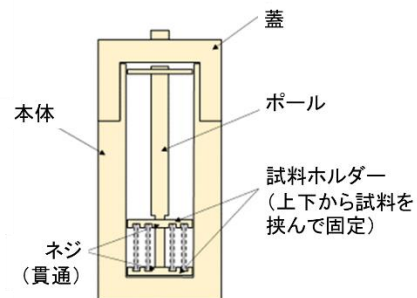


図-5 PEEK製の内容器



図-6 溶出試験容器への封入後の様子

- 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、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、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

## 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—ナチュラル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において構造材や充填材としてセメント系材料を用いた場合にはニアフィールド環境が高アルカリ性となる可能性がある。高アルカリ性環境は、ベントナイト緩衝材の物理的・化学的性質を変え、その長期性能に影響を与える可能性がある。そのため、本事業では、高アルカリ性環境の形成を抑制するために普通ポルトランドセメント (OPC) に比べて浸出液の pH が低くなる先進的なセメント系材料の一つとして開発された HFSC (Highly Fly-ash contained Silica-fume Cement)<sup>1),2)</sup> と緩衝材との相互作用について、ナチュラルアナログ (NA) により、長期挙動の直接的な証拠を取得してアルカリ変質に係る現象理解を進め、ベントナイト系緩衝材の現象解析モデルの高度化に資する情報を整理することを目的とし、平成 30 年度より検討を進めている<sup>3),4)</sup>。

NA による緩衝材の長期安定性の検証では、TRU 廃棄物処分場の人工バリアシステムを構成するベントナイト系緩衝材の HFSC 使用によるアルカリ環境下での長期挙動のナチュラルアナログによる根拠として示すために、フィリピンパラワン島の Narra 地区ナチュラルアナログ試料の分析により、アルカリ環境下での変質反応プロセス (反応時間とスメクタイト化率、スメクタイト化に係る沈殿→結晶化の生成・進展プロセス) を明らかにするとともに、特にこの NA でみられる Fe、Mg に富むスメクタイト系二次鉱物が生成する環境条件を明らかにするとともに、人工バリアシステムの現象解析モデルを補完するための情報として取り纏める。

### ◇2020 年度の成果<sup>5)</sup>

#### (1) 調査概要

ルソン島北西部の Saile 鉱山の NA では<sup>6)</sup>、天然でのベントナイトと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を確認したが、アルカリ変質が生じていても Mg-Fe ス

メクタイト系粘土鉱物などの二次鉱物による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鉱床が未変質のまま残存していることが確認された。ただし、Saile 鉱山の NA サイトでは既にアルカリ地下水の供給は止まっているため、相互作用によるアルカリ変質反応後の痕跡は観察できるが、過渡的な変質プロセスが不明であり、過去に浸出していたアルカリ地下水の地球化学特性やその反応時間も明確でないという課題があった。

そのため、現在もアルカリ性地下水が流出しているパラワン島中部の Narra 地区において詳細な試料分析等による調査を実施している。

パラワン島の Narra 地区の NA はベントナイト層ではなく苦鉄質の砕屑性堆積物が分布し、高アルカリ環境 (pH > 11) での反応により Mg、Fe に富むスメクタイト (3 八面体型のサポナイトや 2 八面体型のノントロナイト) を生成する環境である。このような高アルカリ環境下における Fe、Mg に富むスメクタイト系二次鉱物の生成が、先の Saile 鉱山の NA でみられるベントナイトのアルカリ変質プロセスと類似していることから、ベントナイトでも同様の変質反応が生じる可能性が高いことが示唆された。

2020 年度は、Mg、Fe を含むアルカリ溶液から M-S-H 組成の沈殿物を経て Mg、Fe に富むスメクタイトが生成する一連の変質プロセスが生じていたことを確認するために、XRD 及び XRF によるバルク分析と EPMA 及び TEM による鉱物の産状観察、鉱物組成分析及び元素分布の分析を実施し、結晶化の進んだスメクタイトとの比較などにより産状や組成の違いを明らかにして、変質プロセスに係る鉱物学的・化学的特性を評価した。

#### (2) ナチュラルアナログ試料とその地質環境

これまでに、アルカリ溶液から MSH (結晶性が低い Fe を含む FMSH 組成) が C-S-H を伴って共沈し、これが時間とともに結晶化しスメクタイト化が進むことを確認しているが<sup>4)</sup>、C-S-H の見られないトレンチ 7 (図-1 参照、底部の堆積年代: 4516±74 年) でも同様のアルカリ変質プロセスで説明できるか確認すること、また、トレンチ 7 のみで確認できた降下火山灰起源の白色砂質堆積物層にみられる Al に富むスメクタイトのアルカリ環境下での反応や安定性を調べるこ

を目的として、トレンチ 7 の反応時間が短い浅部の苦鉄質岩起源の堆積物、底部の苦鉄質岩起源の堆積物及び白色砂質堆積物の試料を選定し、SEM 及び EPMA による観察・化学組成分析を行った。さらに、FIB-SEM によって加工した薄膜試料を TEM 及び STEM で観察した。



※黄矢印に挟まれた層が降下火山灰起源の白色砂質堆積物

図-1 分析試料のサンプリング位置（トレンチ 7）

### (3) NA 試料の微細構造の観察

#### 1) 二次鉱物の微細構造

トレンチ 7 の浅部の試料（PWT07-17-Rh-009（以下 009））と底部の試料（PWT07-17-Rh-C03（以下 C03））を対象に TEM による観察を行った。

浅部と底部の比較から、浅部の試料は結晶化度が低く Ca 過剰な組成を示すのに対して、深部の試料は非晶質部分が少なく、層状の粘土鉱物が大部分を占めている。また、過剰な Ca も確認されない。トレンチ 2 の C-S-H を伴う低結晶なスメクタイト様の層状鉱物においても Ca 過剰な組成が見られていることから、これは低結晶物質に共通する特性であると思われる。

層状部分と非晶質部分の化学組成の差がより明確に分かる STEM による微細構造の観察結果から、図-2 に示す浅部(009)の非晶質部分は層状部分と比較して相対的に Fe と Si が少なく、Mg と Ca、C に富んだ組成をしており、主要陽イオン組成については層状部分と非晶質部分で若干異なっている。また、層状部分の化学組成をスメクタイトの構造式に当てはめて計算すると  $\text{Ca}_{0.44}(\text{Mg}_{0.38}\text{Fe}_{1.39}\text{Al}_{0.10})_{1.86}[\text{Al}_{10.15}\text{Si}_{3.85}]_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  となり、Ca 過剰の組成となる。

一報、図-3 に示す底部(C03)の基質は浅部と比べて層状部分がより密で非晶質部分が少なく、Ca が過剰な部分が認められない。

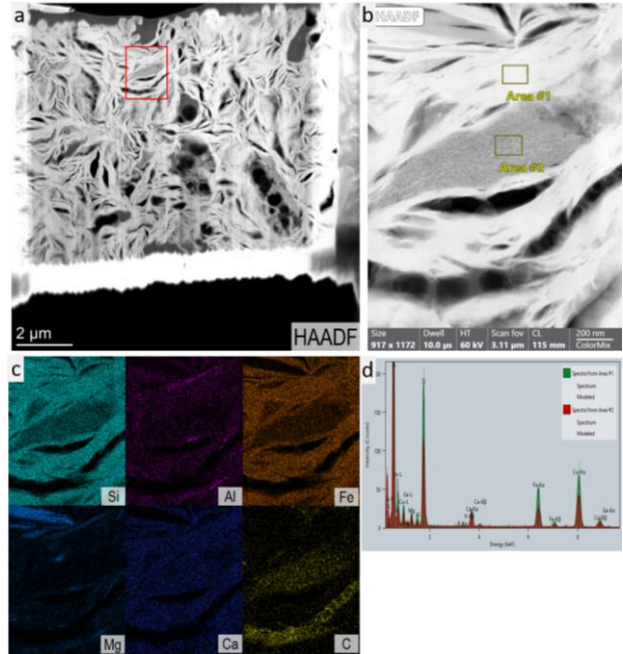


図-2 浅部の試料（PWT07-17-Rh-009）の STEM による微細構造の観察結果

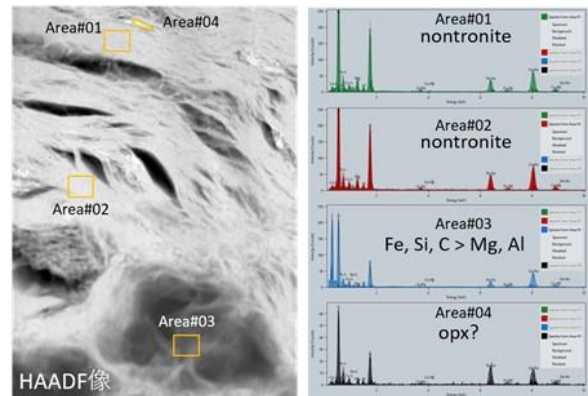
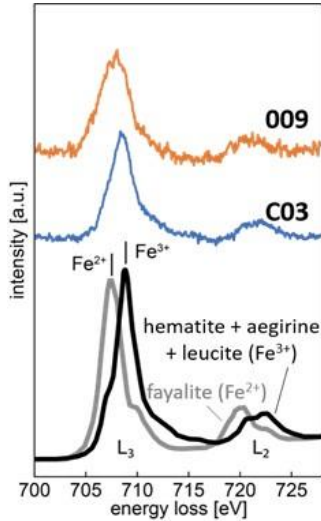


図-3 深部の試料（PWT07-17-Rh-C03）蛇紋岩岩片周囲の二次鉱物の STEM による微細構造の観察結果

これらの観察結果から、岩片の間を充填している基質中のスメクタイトは数百 nm の幅で緩く凝集・積層しているものの、全体としてはランダムな方向に広がってネットワーク状の構造を持っている。一方で、岩片を置換しているタイプのスメクタイトはオリジナルの岩片由来の劈開や粒子の輪郭をかなり残しており、置換前の結晶学的方位の影響を強く受けたトポタキシャルな成長をしていることが想定される。

基質として存在している Fe に富んだスメクタイト中の Fe の価数を判別するために電子エネルギー損失分光（EELS）による分析を行った。009 及び C03 の EELS スペクトル（図-4）は、高エネ

ルギー損失側に寄った左右非対称の形状をした Fe L<sub>3</sub> 端のピークを示した。スペクトルのピーク形状から、2 試料とも 2 価よりも 3 価が主体であると推定される。



Fe<sup>2+</sup>のみ、Fe<sup>3+</sup>のみの参考試料のスペクトル<sup>7)</sup>を併せて表示  
図-4 Fe L 端付近の電子エネルギー損失分光パターン

底部の C03 には石英、斜長石、火山ガラス等で構成される降下火山灰起源の白色砂質部分が存在するため、その部分を STEM で観察・分析した (図-5)。図-5 の HAADF 像から、火山ガラスの界面が蜂の巣状を呈することが明瞭に分かる。ガラス中心から周囲に向かって主要元素のプロファイルを確認すると、周囲に向かって K と Ca、Al の減少と Si の増加が確認される。堆積した際の火山ガラスの組成が均一であったと仮定すると、長期間にわたって周囲溶液と反応した結果、アルカリと Al の溶出が起これ、相対的に Si が界面付近で増加したと考えられる。

火山ガラス周囲に分布する Al、Si に富むスメクタイトとみられる二次鉱物は、モンモリロナイト単体ではなく、Fe・Mg-rich スメクタイトと Al、Si に富む非晶質物質が混在しているものと考えられる。

#### (4) フィリピン NA におけるアルカリ変質プロセスに係る二次鉱物の形成

トレンチ 7 の 4 試料で観察されたスメクタイト及びスメクタイトに近い組成を持つ二次鉱物の化学組成を、Fe-Al-Mg 及び Si-(Al+Mg+Fe)-(Ca+Na) の 2 種類の三角ダイアグラムとして図-6 に示す。

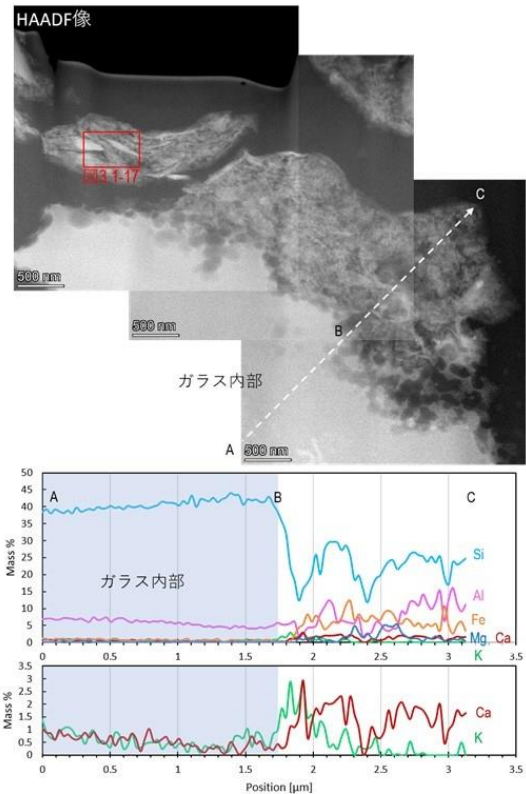


図-5 深部の試料 (PWT07-17-Rh-C03) の火山ガラスと二次鉱物界面の STEM 観察及び分析

蛇紋岩由来の岩片を置換している二次鉱物は、Fe/Mg 比にバラつきが認められるものの、全体として Fe よりも Mg に富んだサポナイト寄りの組成を示す。また、一部の分析点では Si に対する Al+Mg+Fe の値が高く、Si-(Al+Mg+Fe)-(Ca+Na) ダイアグラム上でスメクタイトの範囲から蛇紋石の範囲にはみ出しているものが見られる。これは前項で述べた通り、完全にスメクタイト化するに至っておらず、スメクタイト化前の蛇紋石あるいは蛇紋石化を免れた一次鉱物の組成が一部残っていることが考えられる。

岩片周囲に分布する二次鉱物は、特に C03 で Al/Fe 比が高い点が数点見られるものの、全体として Fe に富んだ組成をしている。岩片を置換している二次鉱物と比べると組成のバラつきが小さいが、これは岩片を置換している二次鉱物と比べて、変質前の岩片の化学組成による影響が小さいことが要因として考えられる。



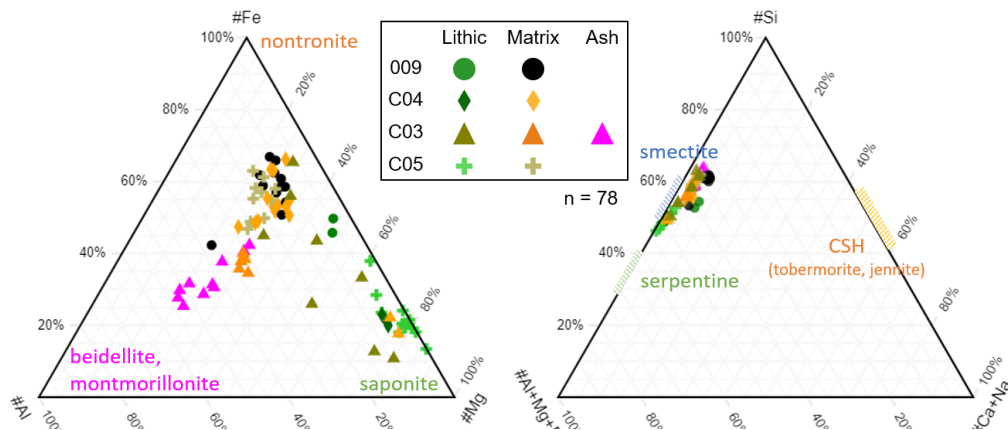


図-6 二次鉱物の化学組成

また、基質のノントロナイトの生成について、Shimbashi et al. (2020)<sup>8)</sup> は炭素同位体  $^{13}\text{C}$  の分析から、Narra 地区の深部の堆積物における海水の影響を指摘している。このことから、アルカリ湧水と比べて酸化的な海水と堆積物との反応した場合は、 $\text{Fe}^{3+}$  を主体とするノントロナイトが形成されやすいことが想定される。

表層で形成された際に 2 価だった鉄が埋没に伴って 3 価に変化するとは考えにくいことから、深部の C03 のノントロナイトの形成には現在のアルカリ湧水だけでなく、過去に反応した海水の影響を大きく受けている可能性がある。ただし、形成に関与した水の組成変化はあったとしても 009 と C03 を含め 4 試料における産状が非常に類似していることから、その沈殿過程は似たものであったと推察される。

また、岩片周囲を充填しているノントロナイトと岩片そのものを置換しているサポナイトには、産状と化学組成に大きな違いが見られるため、これらが同時並行で形成されているのかについては検証が必要である。アルカリ地下水での Fe の化学形態の評価からは、Fe の安定相としてサポナイトが形成されることが示唆されているが、現地地で測定された地下水組成に Fe の 2 価/3 価の情報がないため、ノントロナイトの沈殿/溶解が進むのかについては判断が出来ない。ただし、深度の深い試料に見られるノントロナイトの形成に海水が寄与していたと仮定した場合でも、数千年オーダーにわたるアルカリ地下水との反応においてノントロナイトは恐らく溶解せず安定して存在し得ると考えられる。

後研究が進められるべき点として、①MSH に加

えて FSH が時間経過や温度によりどのように変質・結晶化が進むのか、②それらがスメクタイト化する条件は何か、③FSH や MSH、さらには Ca、Mg、Fe が混ざったシリケート水和物の熱力学的データベースの拡充などが挙げられる。

- 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、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
- 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 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
- 6) 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
- 7) Garvie, L. A. J., Zega, T. J., Rez, P., & Buseck, P. R.: Nanometer-scale measurements of  $\text{Fe}^{3+}$ /Sigma Fe by electron energy-loss spectroscopy: A cautionary note. *American Mineralogist*, 89(11-12), 1610-1616, 2004.
- 8) Shimbashi, M., Yokoyama, S., Watanabe, Y., Sato, T., Otake, T., Kikuchi, R., Yamakawa, M. and Fujii, N.: 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), 1-24, 2020.

## 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、廃棄物及びその周辺に存在する水分の放射線分解、廃棄物等の金属の還元性雰囲気での腐食などによる水素などのガスの発生が想定される。ガスの発生による懸念事項として、ガスの蓄圧に伴う緩衝材の力学安定性の低下及びガスの蓄圧・移行による施設内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、第2次 TRU レポート<sup>1)</sup>では、処分場で生じるガス発生及び人工バリア（特に応力場の影響を受ける可能性の高い粘土系材料が候補となっている緩衝材）中のガス移行挙動及び力学挙動の予測が必要となることが示されており、その影響を評価するための連成評価モデルの開発が必要である。

これまでの検討<sup>2)-9)</sup>では、緩衝材などの人工バリアを対象とした、水・ガス移行特性及び力学特性などの材料特性データの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、力学連成気液二相流解析が可能なモデルを構築してきた。

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、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手法の構築
- 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が発行した「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）」<sup>10)</sup>では、これまでに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現象解析モデルの、実施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、適用性を確認し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、NUMOの「包括的技術報告書（レビュー版）」<sup>11)</sup>では、TRU 廃棄物処分の最新のセーフティケースにおいては、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。

以上より、本事業では、最新のセーフティケースにおいて、廃棄体由来の発生ガスの人工バリア内での挙動の解析的評価により、

- ・ 発生ガスの蓄圧による破過が生じた場合でも、緩衝材の自己修復機能が発揮されれば、核種移行に対する緩衝材の閉鎖後長期の安全性が担保されること（核種移行挙動に対するガス影響が有意なものではないこと）
- ・ 再冠水及び発生ガスの蓄積、移行挙動に伴う緩衝材の変形挙動が人工バリア全体の力学安定性に有意な影響を及ぼさないこと
- ・ 廃棄体由来の発生ガスの、緩衝材中の移行挙動が、処分施設における核種移行挙動及び人工バリアの力学安定性に有意な影響を与える条件を特定すること

が評価可能なツールを開発することを目的とし、TRU 廃棄物処分施設における廃棄体由来の発生ガスについて、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、核種移行や力学的挙動に対するガス移行挙動の影響を評価可能なモデル・解析手法を構築するための検討を実施する。

検討対象とする最新のセーフティケースで対象とする処分坑道断面例を図-1に示す。

また、表-1に本事業の実実施計画を示す。

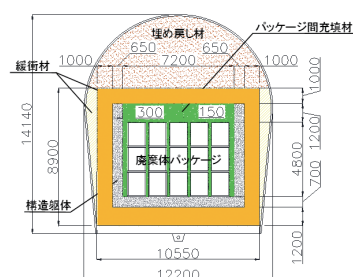


図-1 対象とする TRU 廃棄物処分施設の処分坑道断面例（深成岩、先新第三紀堆積岩類における廃棄物グループ2の例）<sup>10)</sup>

表-1 本事業の5か年の内後半3か年の実施計画

調査研究項目	令和2年度	令和3年度	令和4年度
<b>■ 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</b> 1) 処分坑道の力学連成ガス移行評価モデルの高度化（モックアップ試験、他）	モックアップガス移行試験、再破過試験、解体調査 再冠水挙動、ガス移行挙動の解析評価（アップスケーリングの適用性確認）		成果取りまとめ
	要素試験特性値の評価	力学連成ガス移行挙動評価	移行場の状態変化を考慮したTRU処分施設のガス移行解析
			評価手法
<b>■ より現実的なガス移行場の環境等の設定に関する検討</b> 2) 長期変遷を考慮したガス移行場の状態設定評価	試験データに基づく現象のモデル化および解析手法の適用性確認		緩衝材性能 押出し水量
	化学変質力学挙動相互連成解析コードの適用性確認	人工バリアの状態変遷のケーススタディ	ガス移行場への影響評価
3) 核種移行を考慮したガス移行影響評価モデルの構築（ガス発生挙動評価、他）	ガス発生量評価のケーススタディ	ガス移行との連携等によるガス発生量評価	ガス発生量
		ガス発生/ガス移行/核種移行評価の相互関連の整理	核種移行へのガス影響評価

◇2020年度の成果<sup>13)</sup>

(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

本検討では、前述のとおり、①これまでの各種要素試験等により取得した緩衝材の二相流パラメータ等の材料特性データや評価モデルの、実施設を対象としたガス移行挙動評価への適用性を確認すること（アップスケーリング）、②材料特性データおよび評価モデルを再評価すること、を目的とし、要素試験から規模を拡大した三次元系の小規模モックアップによる再冠水試験およびガス移行試験とそれらの解析評価を行うこととしている。

2020年度は、2019年度までに再冠水を確認した供試体を用いてガス移行試験とその解析評価を行った。

a. 小規模モックアップによるガス移行試験

2019年度再冠水を確認したモックアップ試験装置に対してガス移行試験を実施し、取得データを経時変化グラフとして整理するとともに、グラフ上の変化を物理的な挙動として解釈するこ

とで、供試体内のガス移行挙動を考察した。さらに、ガス注入と同時に観測される供試体からの累積排水量については、予測されるよう破過直前の急増を捉えることで、破過に至るまでの詳細な供試体挙動を評価した。

モックアップ試験装置を用いた、ガス移行試験のシステムイメージを図-2に示す。

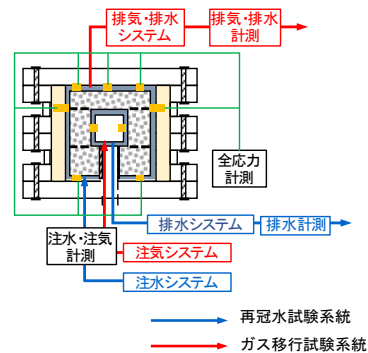


図-2 再冠水・ガス移行試験装置のシステムイメージ

再冠水を確認した供試体に対して+0.1 MPa/週（7日）の昇圧ペースにて供試体内側からガス圧を載荷し、ガスの排出（破過）が観測されるまでガス注入を継続した。有効ガス圧が

0.6MPa に到達した 42 日経過後更にその 2 日後（44 日経過後）に供試体左面からの排水が卓越（急増）し破過が生じた。このような排水の卓越（急増）が観測されたのは、有効応力がゼロとなる条件時に、特定の間隙が連結することで、間隙水がガス圧によって一気に押し出されたこ

とが要因の一つであると考えられる。取得データの内、供試体の左側面付近に着目したものを図に示した。さらに、その後の試験結果より、右側面・前側面有効応力変化量の経時変化も同傾向で左側面を追従しており、各側面から破過が生じた可能性を示唆している。

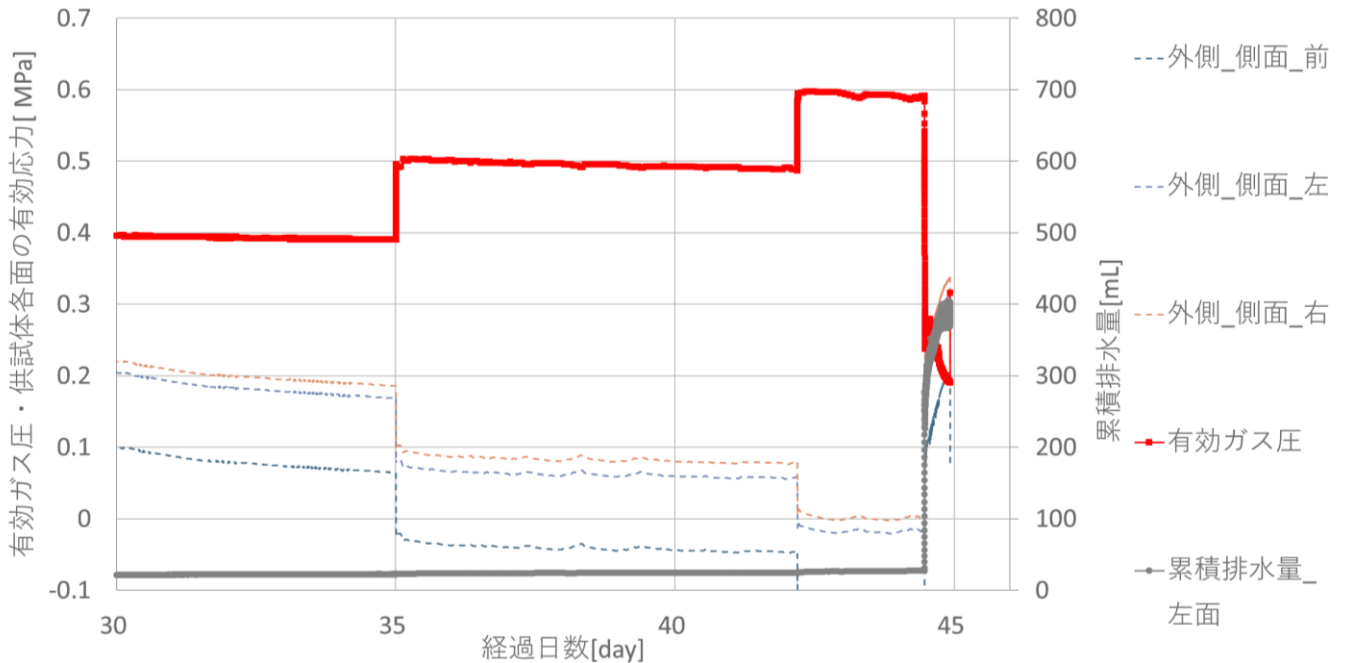


図-3 ガス移行試験取得データ（供試体左側面付近）

b. 小規模モックアップガス移行試験の解析評価  
 ガス移行試験の計測データ等を用いて、当該試験の再現解析評価を実施するとともに、再現性を向上させるための課題を整理した。ガス移行試験では、五つの面からの排水量や排出ガス量が観測されており、面ごとにばらつきが大きい結果が得られている。そこで、ベントナイトのパラメータを逆解析により同定していくに当たり、頂部と側部（前部、後部、左部、右部）の格子モデルを構築し、各エリアは均質と仮定し、面ごとのデータを個別に用いたパラメータを同定した。パラメータ同定後、モックアップ試験系のフル三次元モデルを作成し、同定されたパラメータを各エリアに与え、再現解析を実施した。また、逆解析によるパラメータ同定に先立ち、2019 年度検討において実施された、モックアップ試験と同一材料を用いた要素試験の再現解析によって同定されたパラメータを適用し、モックアップ試験の再現可能性を検討した。

累積排水量の予測解析値と実測値とを比較したものを図に示す。実測された累積排水量が負の値となっている後面を除き、いずれの面においても計算された累積排水量は過小評価する結果となった。

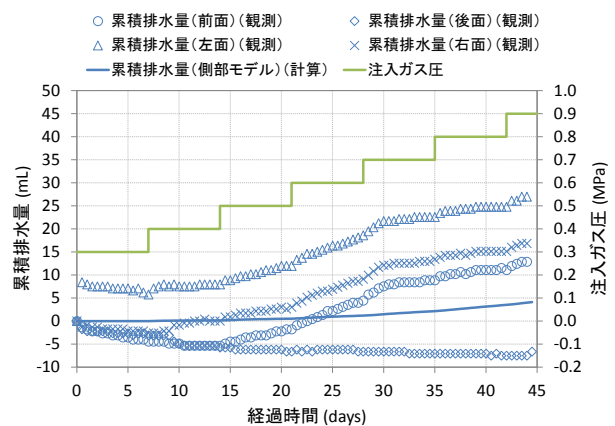


図-4 要素試験同定パラメータによる累積排水量再現比較

これらの結果の違いについては、数 cm 程度の要素試験と数 10cm スケールのモックアップ試験での供試体の締固め度合いや不均質性の違いなどが要因の 1 つとして考えられる。

当該試験の再現解析評価を実施した。面ごとのデータを個別に用いた頂部と側部の格子モデルによる、各エリアのパラメータ同定を行った。後部（第 3 面）については、実測されている累積排水量がマイナスであるため、試験開始直後から 10mL 程度の排水が観測され最も排水量が多

い左部（第 2 面）との累積排水量を合算し、

逆解析によるパラメータの同定を実施した。同定されたパラメータの内、相対浸透率と毛細管圧力曲線を図に示す。

比較のために、2019 年度検討において実施された、モックアップ試験と同一材料を用いた要素試験の再現解析によって同定された 2 つのパラメータ A、B についても示している。ほとんど同程度の 2 相流曲線が得られる結果となっていることが分かる。

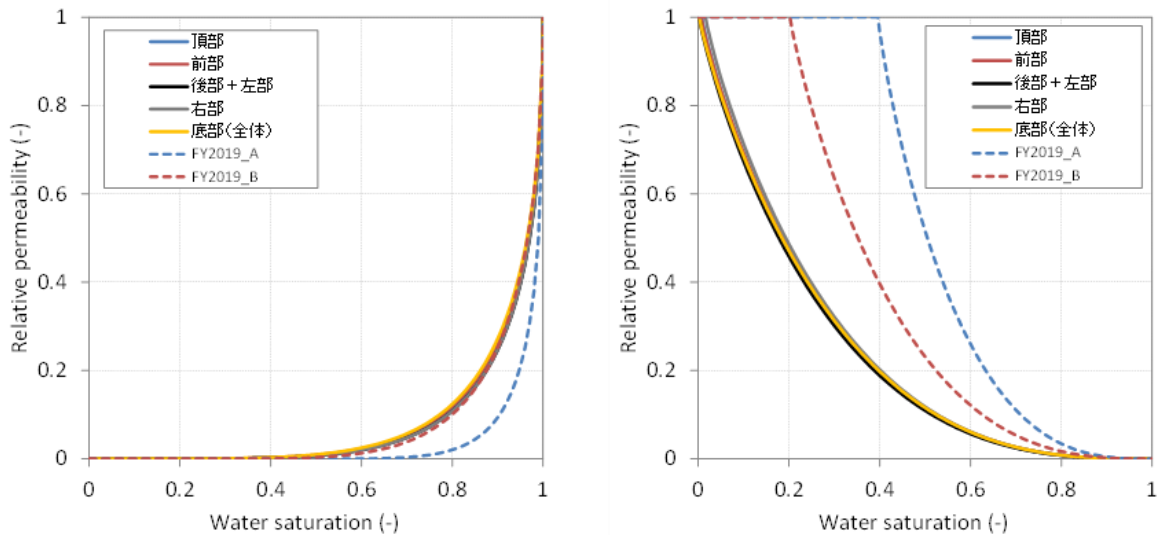


図-5 再現解析により同定した相対浸透率

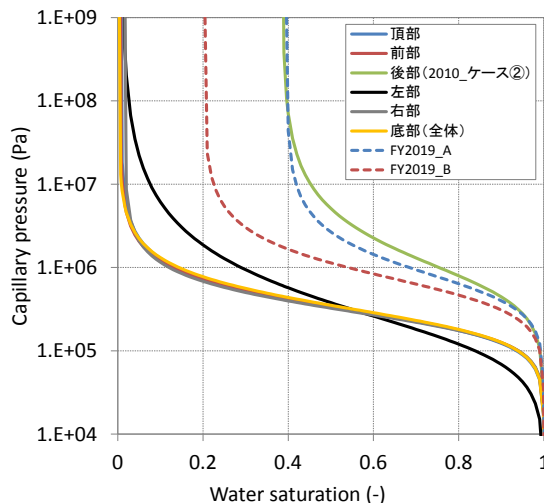


図-6 再現解析により同定した毛細管圧力曲線

次に、逆解析評価により同定されたパラメータをフル三次元モデルの区分した領域にそれぞれ適用し再現解析を実施した。累積排水量の再現結果を図に示す。各エリア個別に同定したパラメータを適用することによって、全体の累積

排水量は実測データと良く整合する結果を得ることができていることが分かる。2021 年度は、小規模モックアップ試験におけるガス注入再破過試験の実施および供試体の解体調査を実施する予定である。

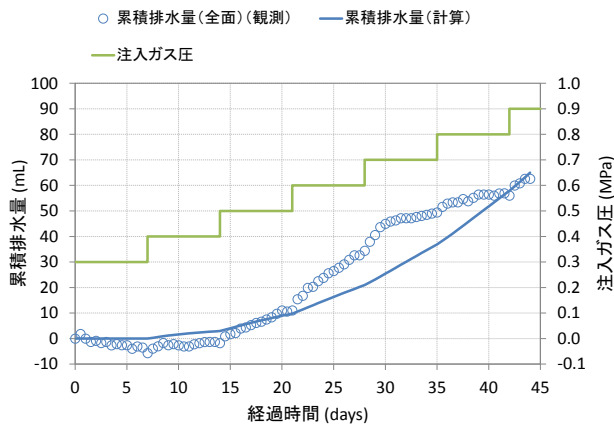


図-7 同定したパラメータによる累積排水量再現解析結果

(2) 現実的なガス移行場の環境等の設定に関する検討

本検討では、ガス移行挙動評価に影響を与える事象として、①閉鎖後長期の処分場におけるガス移行場の状態を、セメント系材料から生じる高アルカリ水と緩衝材との接触による化学変質とそれに伴う力学影響の観点から評価してガス移行挙動評価に反映するための検討および、②ガス発生挙動について、最新の知見やより現実的な評価条件を設定して経時的な定量評価を行うこととしている。

2020年度は、2019年度までの二次鉱物生成に関する試験データの拡張と現象モデルへの反映、力学試験による緩衝材の限界状態のモデル化、1次元の人工バリア系での HMC 連成解析の適用

性評価及び具体的な条件でのガス発生挙動の経時的な定量評価を踏まえ、力学試験による緩衝材の限界状態のモデル化の継続、ベントナイトの構成則に対する試験結果の反映及び反映の有無が解析結果に及ぼす影響の確認、ガス発生量評価のケーススタディを実施した。

a. 長期変遷を考慮したガス移行場の状態設定

本検討では、ガス移行解析に適用するための処分場の閉鎖後長期を想定したガス移行場の状態を HMC 連成解析による人工バリアの長期変遷の解析結果に基づいて設定することを目的に、以下の内容を実施した。

- 1) 緩衝材の力学挙動（飽和後のせん断挙動）の試験による確認とモデル化の継続
- 2) ベントナイトの構成則に対する試験結果の反映
- 3) 試験結果の構成則への反映の有無が解析結果に及ぼす影響の確認

上記 1)では、ベントナイト系材料の化学変質に伴う物質移行・力学特性の変化を HMC 連成解析の力学解析に反映する際に有用な知見を得ることを目的に、ベントナイトの非排水せん断挙動を試験により確認し、その結果に基づきベントナイトの乾燥密度やモンモリロナイト含有量等と限界状態線の関係としてモデル化する。2020年度はモンモリロナイト含有率 80%のケースをせん断試験によりデータを取得した。

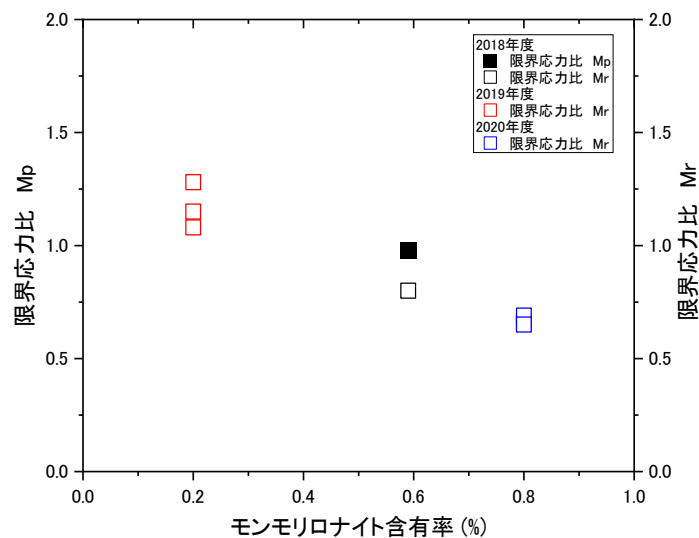


図-8 2019年度まで及び2020年度試験結果

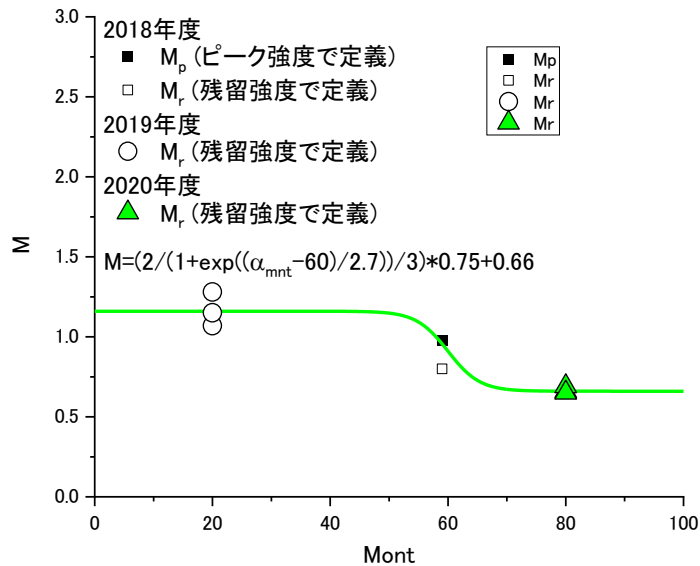


図-9 モンモリロナイト含有率と限界応力比の関係

2019年度までの試験結果および限界状態線等によるモデル化手法の知見に基づき、モンモリロナイト含有率の影響について考察してモデル化を行った。図-8に試験により得られたモンモリロナイト含有率とベントナイトの限界応力比の関係を示す。2018年度の結果はピーク強度と残留強度の2通り、2019年度、2020年度は残留強度の限界状態線の勾配（限界応力比）を示す。モンモリロナイト含有率が増加すると限界応力比は低下する傾向があることが分かった。この低下割合を関数で近似することについて検討し、

モンモリロナイト含有率とベントナイトの限界応力比の関係を図-9のような関数で近似した。

上記2)では、一般的な粘性土の構成則である修正カムクレイモデルをベースとしつつ、2020年度までに実施した、ベントナイトの挙動に関する試験結果を反映させることで、ベントナイト系人工バリアの挙動を模擬する構成則を高度化した。試験結果から限界応力比  $M$  がモンモリロナイト含有率に依存することが示唆されている。

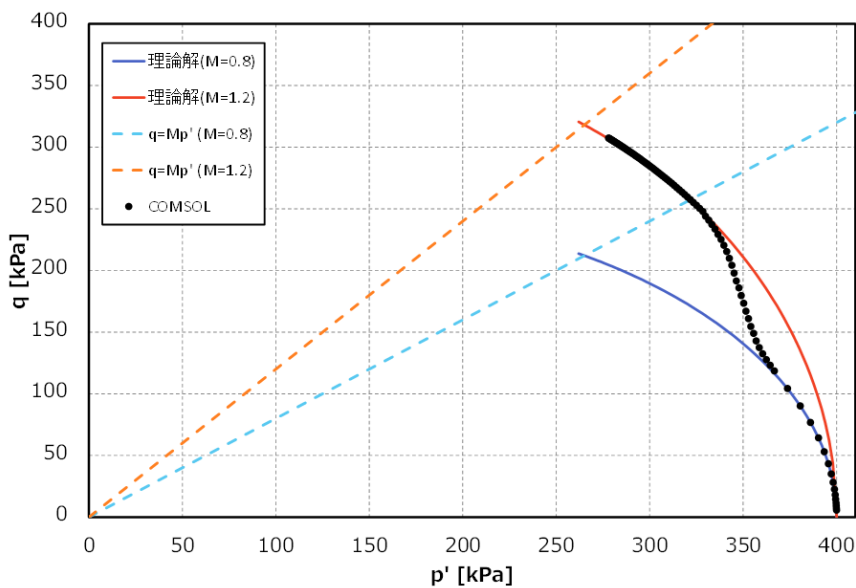


図-10 解析中に限界応力比が変化する解析例

人工バリアの長期変遷を予測する観点からは、モンモリロナイトの溶解や他の鉱物が溶解・析出することで緩衝材中のモンモリロナイト含有率が変化すると、力学特性が変化し、地下水の止水性や化学反応の起こりやすさに影響することになるため、解析中に限界応力比  $M$  が変化するような解析方法を、解析コード COMSOL による HMC 連成解析モデルにて試解析を実施した。図-10 にその解析例を示す。

上記 3) では、ベントナイト系人工バリアの複雑な力学的挙動を表現できる構成則を構築するための検討として、試験結果の反映の有無が解析結果に及ぼす影響を調べた。試験結果の反映の有無が解析結果に及ぼす影響を調べるため、解析中にモンモリロナイトが溶解して含有率が低下し、限界応力比が変化する効果を考慮する解析と考慮しない解析を実施した。本解析では解析中にモンモリロナイトが溶解するとし、設

定した解析時間 1 年のうち、解析初期にはモンモリロナイト含有率が 80% であり、解析終了時には 20% となるものとした。これにより限界応力比  $M$  は解析中に 0.66 から 1.16 に変化することになる。さらに比較のため解析中に限界応力比  $M$  が 0.66 のまま変化しない解析も行った。

限界応力比が変化する解析と変化しない解析それぞれにおける主な応力を図に示す。それぞれの解析について有効応力、せん断応力、間隙水圧全応力の圧力を示しており、実線は解析中に限界応力比  $M$  を変化させた解析、破線は限界応力比  $M$  を変化させない解析の結果である。どちらの解析も、非排水せん断によって有効応力の圧力が低下し、せん断応力が上昇し、間隙水圧が上昇、全応力の圧力が上昇するという傾向は共通しているが、せん断応力の値や間隙水圧の値は限界応力比の変化に伴って 2 つの解析の間で違いが生じた。

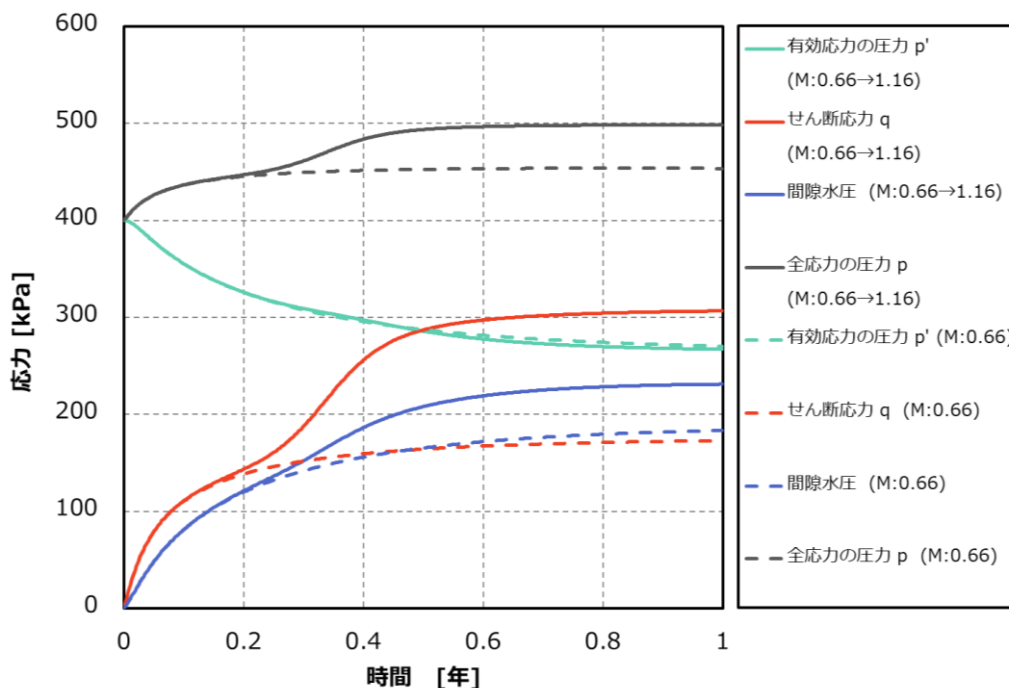


図-11 各解析における主な応力の比較

#### b. ガス発生量評価のケーススタディ

本検討では、より現実的なガス移行挙動評価を行うためのガス発生挙動（発生時期、発生量）の経時的な定量評価を行うとともに、将来のガス移行評価に基づく核種移行評価に向けての準備を行うこととしている。2020 年度は 2019 年度構築したガス発生挙動評価の方法論に基づき、

その際の条件設定を「基本条件設定」とした場合に、実現可能性がありガス発生への影響が大きいと考えられる「代替条件設定」を抽出し、ガス影響による不確実性の程度の幅を概略把握するために、ガス発生量のケーススタディを行った。設定した解析ケースの全体像を示す。



表-2 解析ケースの全体像

解析ケース		内容	
No.	ケース名	説明	主な条件変更
0	標準ケース	標準となる条件設定。	(2019年度の設定)
1	廃棄体パッケージ仕様の変更	現在、本事業で検討中の代替仕様の廃棄体パッケージの条件で評価を行う。	・充填モルタルの水分含有比
2	より現実的な金属腐食速度	現在、本事業で検討中の金属腐食モデルの高度化の成果を用いる。	・金属材料の腐食モデル/速度
3	容器寿命の代替設定	キャニスタ及び廃棄体パッケージの寿命について、より長期的な設定が可能と仮定して評価を行う。	・容器/廃棄体パッケージの開口時期
4	より現実的な過渡変遷	閉鎖後初期の過渡変遷における再冠水/飽和度のより現実的な検討結果を、ガス発生評価に反映する	・水分量 (経時変化) ・濡れている金属の割合

本項ではこれら解析ケースのうち、充填モルタル中の水分含有比をパラメータとした解析ケース 1 についてのガス発生量評価結果を示す。充填モルタル中の水分含有比に関しては、本事業にて別途実施した<sup>12)</sup>、水素ガス発生量の低減を目的とした、複数種類のセメント材料中の自由水量を乾燥によって減少させる試験の測定結果を参考に決定した。2019 年度構築したガス発生挙動評価における評価期間については、処分場閉鎖からパッケージ開口までを 300 年に設定しており、その間は水の放射線分解や金属材料の嫌気性腐食によるガス発生は廃棄体パッケージモルタルの自由水を消費して進行する。解析ケース 1 の設定は、換言すれば廃棄体パッケージ開口前における、水の放射線分解と金属の嫌気性腐食で水を消費する際の自由水の枯渇の可能性に関わるケース設定である。2019 年度の基

本状態設定における充填モルタル中の水分含有比 21wt% の場合と解析ケース 1 の設定の内の 1 つである 0.1wt% の場合のガス発生量評価結果をそれぞれ図-12 及び図-13 に示す。後者においては自由水が処分場閉鎖後直ちに枯渇するため、水の放射線分解、金属の嫌気性腐食による水素ガス発生が停止し、パッケージ開口までの期間のガス発生量が基本状態設定よりも 1 オーダー以上抑えられる結果となった。本ケース同様に、実現可能性を考慮し抽出した他ケースについてもガス発生量の評価を実施し、各事象のガス発生への影響の幅を把握した。本検討で得られるガス発生量評価の結果は、現在高度化を実施しているガス移行挙動評価へのインプットデータとして受け渡し、発生から移行までを考慮したガス影響評価を実施する。

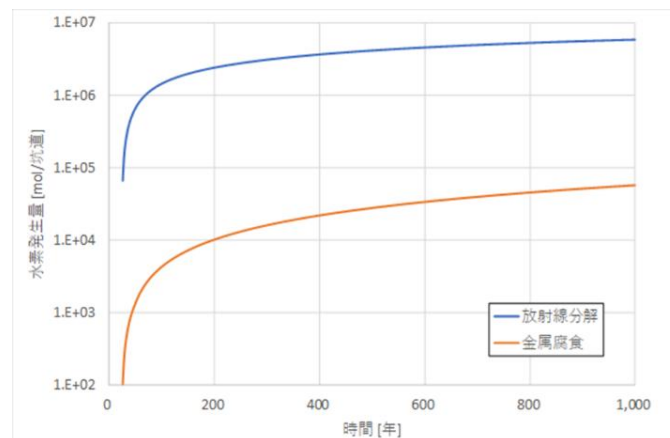


図-12 水分含有比 21wt% ガス発生量評価結果

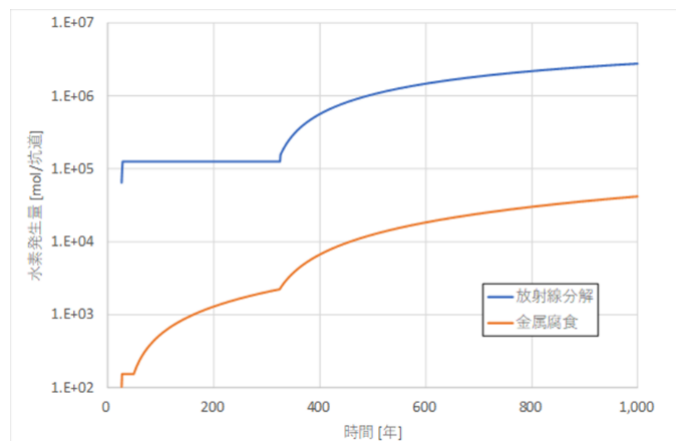


図-13 水分含有比 0.1wt%ガス発生量評価結果

- 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 ー第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発 取りまとめー、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 25 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)ーガス移行連成挙動 評価手法の開発ー、2014
- 4) 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 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書(第 5 分冊)ーガス移行連成挙動 評価手法の開発ー、2015
- 5) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 27 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)ーガス移行連成挙動 評価手法の開発ー、2016
- 6) 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)ーガス移行連成挙動 評価手法の開発ー、2017
- 7) 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 5 分冊)ーガス移行連成挙動評価手法の開発ー、 2018
- 8) 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
- 9) 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・処分に関する技術開発 報告書、2019
- 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) 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ー適切なサイトの選定 に向けたセーフティケースの構築ー、 NUMO-TR-20-03、 2020
- 12) 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・処分に関する技術開発 報告書、2020
- 13) 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

## 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

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、評価指標の導出を目指すこと、また、高燃焼度化、MOX 燃料利用、使用済燃料貯蔵期間長期化などを念頭に、環境負荷低減への寄与と実現性の視点を含めた現実的な MA 核種分離プロセスを提示すること、さらに、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評価に基づき、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ことを目的とした本事業は、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 JPMXD02 19209423 の助成を受けて実施するものであり、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 年間の予定で研究を行う<sup>1), 2)</sup>。

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<sup>3)</sup>。

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 (簡素化 MA 分離) を前提として、地層処分場の小型化 (面積削減) の実現に繋がる原子力システムを念頭に、廃棄物処分の環境影響、Am の分離プロセス、及び高速炉の燃焼モデルについて研究を進めている<sup>4)</sup>。2 年目の成果を以下に示す。

### ◇2020 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)

UO<sub>2</sub> 燃料由来のガラス固化体のインベントリ計算、処分後の核種移行解析とそれに基づく被ばく線量評価、人間侵入シナリオに基づくボーリングコア観察による被ばく線量評価を実施して、地層処分における発熱と放射線影響 (動的と静的) の定量評価を行い、本研究の着眼点である環境負荷低減の実現につながる、70% 及び 90% の簡素化 MA 分離を前提とする核燃料サイクル条件の組合せを提示した。

##### ② 諸量の評価 (東京工業大学)

国際原子力機関 (IAEA) が公開している Nuclear Fuel Cycle Simulation System (NFCSS)<sup>5)</sup> から得られる燃料サイクル中の核種インベントリ計算結果を活用して放射性廃棄物の崩壊熱と放射性毒性を求めるための Excel プログラム用データベースを作成し、PWR/UO<sub>2</sub> 使用済燃料の崩壊熱と放射性毒性について、最新の ORIGEN コードによる計算とのベンチマークを実施し、わずかな誤差での一致を確認すると共に、同燃料の再処理工程での U と Pu の 99.5% 回収時の高レベル放射性廃液の崩壊熱と放射性毒性の計算を実施した。

#### (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)

前年度に実施した MA 分離用抽出剤とフローシートに関する調査結果に基づき、湿式法での MA 分離に関する熱力学データや抽出平衡式を用いて簡素化 MA 分離における MA 分離率と希土類元素 (RE) の随伴率を定量的に比較、検討した。また、乾式再処理による簡素化 MA 分離の可能性、適用性を既往研究成果に基づいて評価した。

##### 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)

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<sup>6)</sup>」において、特に分離が難しい MA/RE 相互分離工程についてプロセスシミュレーションを行い、Am 回収率 99.9% と 70% では、溶媒抽出段数は 40 段と 4 段程度と、その回収率によって MA 分離プロセスの大幅な合理化が可能であることを示した。

(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）

前提条件の一つとして高速炉燃料への RE 随伴割合に着目した既往研究の調査、情報整理を行うと共に、高速炉炉心燃焼計算ツールに RE 随伴のオプションを組み込んで炉心燃焼計算を実施した。また軽水炉使用済燃料から高速炉に供給される燃料中の TRU 核種の組成割合に着目した高速炉炉心燃焼計算を行って、これらの前提条件が高速炉の炉心と燃焼後の廃棄物特性に与える影響を評価した。また本研究で使用している高速炉炉心燃焼計算用 CBZ/FRBurner モジュールの国際ベンチマーク問題への適用を継続して行い信頼性向上を推進した。

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。

- 1) 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](https://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/1416513.htm)
- 2) 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](https://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/_icsFiles/afielddfile/2019/05/22/1416513_01.pdf)
- 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、(1)～(6)、日本原子力学会 2018 年春の年会、予稿集 3011～3016
- 4) 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
- 5) Nuclear Fuel Cycle Simulation System: Improvements and Applications, IAEA-TECDOC-1864, IAEA, 2019
- 6) 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

## 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され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が想定されている。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、再処理やガラス溶融のプロセス、ガラス固化体の特性や発生本数、更には地層処分へ影響する可能性がある。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。

### ◇2020年度の成果

2020年度は、使用済燃料のうち、プルサーマル利用によるMOX燃料を主な対象とし、ガラス固化及び地層処分に対する影響、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

エネルギー基本計画や原子力利用の動向調査に基づいた原子力利用について、2019年度に引き続き複数のシナリオを検討した。また、燃焼計算等による使用済燃料の核種インベントリ、ガラス固化体の発熱率、処分場面積等を評価した。その際、従来のガラス固化条件（廃棄物含有率等）や処分場概念を仮定することで、MOXガラス固化体の発熱の低減に有効なマイナーアクチニド（MA）の分離や、UO<sub>2</sub>燃料との混合の技術開発目標を検討した。

#### (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た。また、使用済燃料の燃焼度について詳細に調査し、(1)のシナリオの論拠や蓋然性に反映させた。

#### (3)課題の抽出、整理

ガラス固化体の均質性や製造工程においてモリブデン（Mo）や白金族元素の含有率が課題となる。(1)で検討したMOXガラス固化体について、ガラス固化体の廃棄物含有率との関係からMoおよび白金族元素の含有率を評価した。特に、ガラス固化体の発熱低減対策として検討したMA分離やUO<sub>2</sub>/MOX混合を適用させた場合について、今後の技術開発課題であるマトリクスの改良や溶融炉の運転技術等のガラス固化技術の高度化の観点から情報を整理した。

#### (4)MOX燃料利用の情報整備

MOX燃料由来の模擬高レベル廃液の組成について検討するため、MOX燃料の燃焼条件等について調査した。燃焼計算を実施し、使用済MOX燃料中に生成するMoや白金族元素の生成・減衰を考慮し、模擬廃液の適切な組成を提示した。

本成果は経済産業省資源エネルギー庁「令和2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. HIP（熱間等方圧加圧）法による TRU 廃棄物の新しい処理・固化技術の研究

### ◇事業の概要

再処理施設の操業にともない発生する廃銀吸着材は TRU 廃棄物の地層処分ではグループ 1 に分類されている<sup>1)</sup>。廃銀吸着材によって回収されるヨウ素 129（以下、I-129）は、半減期が 1570 万年と長く、人工バリア等への収着性が低いことから、地層処分の安全評価における重要核種である。当センターでは、経済産業省からの受託事業において、I-129 による被ばく線量の低減の観点からヨウ素固定化技術を開発し、我が国の幅広い地質環境条件に柔軟に対応することのできる技術開発を行っている<sup>2), 3)</sup>。しかし、現在のところ実用化が期待できる固化技術のマトリクスとしては、セラミック及びガラスの 2 つに限られている。また、それぞれの固化体は処分環境に対する適性の範囲があることから、技術オプションの確保、さらには幅広い環境に適用できる固化技術の開発が期待される。

一方、ハル・エンドピースは、使用済みのジルカロイ製の被覆管（ハル）等からなる廃棄物である。圧縮処理され処分される予定であり、TRU 廃棄物の地層処分ではグループ 2 に分類されている<sup>1)</sup>。当センターでは、経済産業省からの受託事業において、処分環境におけるジルカロイの腐食挙動の評価に関する研究開発を実施している<sup>2), 4)</sup>。

本研究では、グループ 1 の廃銀吸着材を安全に処分するための代替技術の開発とともに、グループ 2（ハル・エンドピース）と材料特性を共有化することで、グループ間の処理方法及び安全評価技術開発の合理化も期待できることから、ジルカロイハルの HIP 処理によるヨウ素固定化方法の開発を目的として実施する。なお、被覆管については、資源の有効利用の観点で古くから再利用することが検討されていることから、金属マトリクスとして活用することで、資源・廃棄物有効の活用を図る効果も期待できる。

### ◇2020 年度の成果

本年度は、昨年度までに文献<sup>5)</sup>を参考にして作製した固化体の分析を行い、ヨウ素のジルコニウ

ムマトリクスへの閉じ込め性について検討した。固化体は Nb 製のカプセル内に Zr 粉末を封入し、中央にジルカロイ被覆管を、さらにその内部に模擬廃銀吸着材を充填した。1350℃、175MPa、3 時間で HIP 処理を行ったものである。図-1 に HIP 処理した固化体の断面を示す。中央の黒色部分が模擬廃銀吸着材、その周囲が Zr である。昨年度の成果である目視による観察では、固化体全体は収縮しており、Zr マトリクスはバルク状の金属塊に変化していることが確認できている。

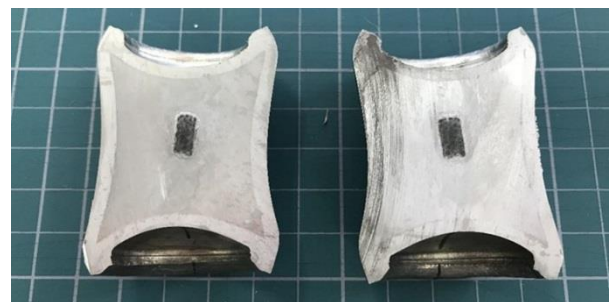


図-1 ジルコニウム HIP 固化体の断面写真

本年度の分析結果として、図-2 に固化体断面の Zr マトリクスの組織観察結果を示す。金属結晶の成長が確認される。また、空隙が存在しない健全なバルク状であることが確認できた。

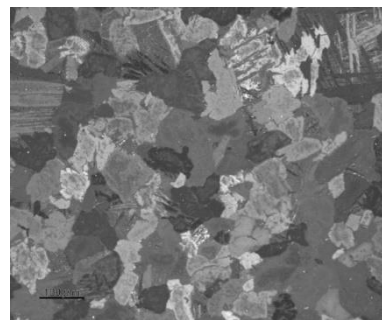


図-2 ジルコニウム HIP 固化体の断面の金属組織観察

図-3 に固化体断面の EPMA 分析結果を示す。ヨウ素はもとの廃銀吸着材の位置に存在し、ヨウ化銀以外の形態と予想されるが、Zr マトリクスに閉じ込められていることが確認できる。マトリクスは緻密なバルク状であるため、Zr 粉末の HIP 処理により、ヨウ素の理的な閉じ込めに成功し、当初の目的を達したことが確認できた。今後、Zr 結晶方位等の評価により、より高精度に固化体の特性を評価することが可能と考えられる。

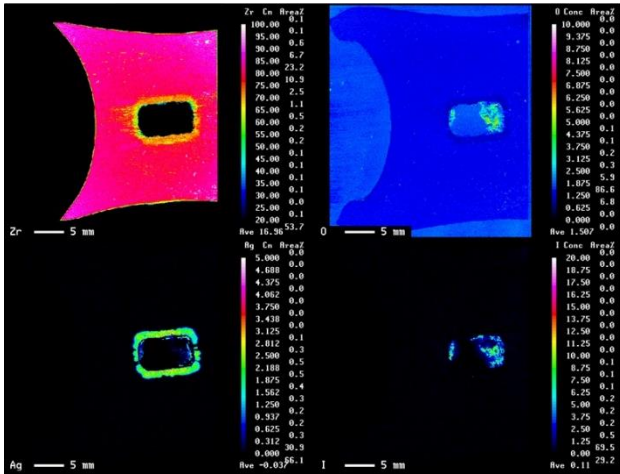


図-3 ジルコニウム HIP 固化体の断面の元素分布 (EPMA)

- 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ー第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめー、2005
- 2) 公益財団法人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ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発 平成 19 年度～24 年度取りまとめ報告書、2013
- 3) 公益財団法人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)ーヨウ素 129 対策技術の信頼性向上ー、2018
- 4) 公益財団法人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)ー炭素 14 長期放出挙動評価ー、2018
- 5) E. R. Vance, D. S. Perera, S. Moricca, Z. Aly, B. D. Begg, J. Nucl. Mater. **341**, 93-96, 2005

## 9. 多様な核燃料サイクル条件を考慮したバックエンド対策の最適化に関する研究

### ◇事業の概要

本事業では、放射性廃棄物の処分の観点から、今後の原子力利用の様々な形態について調査を実施している。2018年度までにフランス原子力・代替エネルギー庁（CEA）の2012年報告書に着目した内容調査・分析と多様な燃料サイクル条件が地層処分に及ぼす影響に関する評価結果に基づく今後の原子力利用における留意事項の分野横断的整理を行った。2019年度は上記を継続し、核燃料サイクルの多様性と地層処分システムの成立性や燃料に始まるサイクル諸条件の変動と組合せの多様性、選択肢となる技術条件と処分場の負荷に及ぼす影響範囲等の検討から、バックエンド対策の最適化に資する技術選択肢の提示を試みることを目的とした検討を行った。

2020年度は、引き続き、核燃料サイクルシナリオの具体化として、我が国の原子力利用と燃料サイクルが直面している状況、課題を俯瞰した、MOX燃料利用におけるガラス固化と地層処分への負荷に関する検討を行った。また、廃棄物処分の負荷低減に有効なバックエンド対策として候補となり得る選択肢の検討、さらに、利用する原子炉の多様性やPu利用推進に関して高速炉利用を想定し、廃棄物特性の評価を実施した。その他、外部資金獲得への試みや、2020年度の本事業の成果の一部を日本原子力学会2020年秋の年会および2021年度春の年会等において報告した。

### ◇2020年度の成果

#### (1)燃料サイクルシナリオの具体化

我が国の原子力利用と燃料サイクルが直面している状況、課題を俯瞰して、燃料、再処理、MOX、使用済燃料貯蔵、ガラス固化、地層処分に係るパラメータを設定し、核燃料サイクルのシナリオを検討した。具体的には、ガラス固化体の定置方式による処分場面積の比較検討や、UO<sub>2</sub>-MOX混合によるMOXガラス固化体の処分場面積の低減について検討した。これにより、技術オプションの適用とその効果に対する評価精度を高め、シナリオの信頼性の向上を図った。

#### (2)技術オプションの提示

廃棄物処分の負荷低減に有効なバックエンド対策として候補となり得る選択肢の技術的条件、効果、課題に関する知見を整理した。重要な技術オプションとして、放射性ヨウ素の固化方法について検討した。

#### (3)燃料サイクルの多様化

利用する原子炉の多様性、再処理システムの高度化、ガラス固化技術の高度化、地層処分の柔軟性等の取り込みについての検討として、特に、Pu利用の推進とそれによる廃棄物管理への影響、効果を検討するために、高速炉を利用するサイクルにおける廃棄物特性を核計算により把握し、時間軸における評価を行った。また、高速炉燃焼モデルと処分場の熱解析モデルの連携システム化について検討した。

#### (4)日本原子力学会 2020年秋の年会および2021年度春の年会での研究発表

2018年春の年会、2019年春の年会および2020年春の年会に引き続き、2020年度に実施した本事業の成果の一部を、以下の表題にて一般セッション/放射性廃棄物処理及び放射性廃棄物と環境のセッションにおいて発表した。

「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」

(17) バックエンドプロセスにおける時間因子と廃棄体定置方式の組合せによる処分負荷低減に関する研究

(18) UO<sub>2</sub>-MOX混合ガラス固化体による処分負荷低減に関する研究

#### (5)国際会議 Glass Meeting 2020 での研究発表

国際会議 WM2020（2020年12月7日～10日、16日～18日、オンライン開催）において口頭発表を行った。

表題：Vitrification and geological disposal of high-level radioactive waste: Integrated approach for their technical options and optimization of nuclear fuel cycle system

発表者：T. Sakuragi



## 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) 代替粘土系材料を用いた埋め戻し材に関する研究

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め戻し材の基本特性に係る基盤情報を補完・拡充することを目的として、代替粘土系材料と模擬掘削土として碎石・砕砂 (深成岩類、堆積岩類) や一般購入土などを用いた混合土の締固め試験と透水試験を実施し、埋め戻し材としての適用性を確認するためのデータを取得した。また、地層処分施設の設計・操業技術の最適化手法に関する検討を進め、最適化に取り組む際の考え方や方法論について取りまとめた。

### (2) 地下の拘束条件下での鉄の腐食膨脹に関する情報収集

地層処分等で想定される、地下での地圧・水圧や緩衝材の膨潤圧等で拘束され、かつ周囲の空隙がほとんど無い条件下での鉄系材料の腐食速度に関しては、これまでほとんど取得されていない。本研究では、拘束条件下での鉄系材料の腐食について調査し、その影響について再検討することを目的として、調査の進め方、対象等についての検討を開始した。

### (3) TRU 等廃棄物の地層処分実現に向けた研究課題の調査

TRU 等廃棄物の地層処分に関して、多様な地質環境に応じた設計、製造、施工技術の適切かつ迅速なオプション選択及び柔軟性を高めることへの貢献を目的として、研究課題の整理を進めるための関連する既存情報の整理を行った。

(This page(p70) 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。

##### ◇2020年度の成果<sup>1)</sup>

(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41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(2021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(2021年版)』(図-3:右)の2種類の資料を作成した。

技術情報冊子①(2021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。2021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、2019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(2021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 2020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(2020年度分)、2021

## 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おいて、国や関係機関、処分実施主体等の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、本調査では、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するとともに、その結果について処分実施主体が将来処分事業を進めるに当たり必要な技術基盤として整備することを目的としている。また、本事業は、萌芽的・先進的な研究開発の実施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平成 31 年度から 4 カ年程度で実施しているものであり、2020 年度はその 2 年目にあたる。

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実施・作成

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、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について、大学等の研究機関に委託し実施するための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、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）で選定し、2020 年度までの 3 か年で実施した以下の 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有識者委員会を設置し、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った。

- ・ ジオポリマー技術による人工バリア構築のための基礎的検討（研究者：北海道大学 胡桃澤 清文）
- ・ 新規析出促進法によるベントナイト緩衝材中の二次鉱物が拡散および透水挙動に与える影響評価（研究者：電力中央研究所 田中真悟）
- ・ 結晶質岩形成時に内包された割れ目発生・分布の潜在性の解明（研究者：山形大学 湯口貴史）
- ・ 飽和度の変化に伴う堆積岩の変形異方性と放射性廃棄物の合理的な埋設方法に関する研究（研究者：埼玉大学 富樫陽太）
- ・ メタンをエネルギー源とした微生物生態系の地質環境への影響評価（研究者：東京大学 鈴木庸平）
- ・ ナチュラルアログ手法による締固めたベントナイトの膨潤特性・自己シール性能の年代変化に関する評価（研究者：早稲田大学 王海龍）
- ・ 断層周辺の地下水流動特性および物質移行特性に関する包括的研究（研究者：日本原子力研究開発機構 渡辺勇輔）

有識者委員会については、年 2 回実施し、各委員会において、年間計画（第 1 四半期中の実施を目的）、事業の成果（第 4 四半期中に実施）を確認した。

2020 年度は、これらの 7 件の研究開発テーマの実施期間の最終年度に当たるため、3 年間の研究成果の最終的なとりまとめを行った。

各研究開発テーマの 2020 年度の実施内容等は 2-2 を参照のこと。

#### (2) 人材育成プログラムの実施・作成

地層処分事業の着実な遂行に向けては、研究開発分野並びに地層処分の実施主体とともに、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、研究開発並びに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、以下などの方針に従い、地層処分に係る講習会や研修会等の実施、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する。

- 講習会や研修会は年間3～4日程度実施すること（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を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、解決策を立案すること。
- 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改善すること。

本事業の初年度であった2019年度には、上記方針に従い、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）

また、2019年度には、「地層処分スキルアップ研究会」での議論に基づき、同研究会の構成機関の講師の派遣等の協力を得たうえで、人材育成セミナーを開催した（図-4）。同セミナーは、講師を含め約60名の参加で、地層処分の主要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、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。



図-4 2019年度に開催した人材育成セミナーの様子

2020年度は、4か年の実施期間中の2年目にあたるため、2019年度の実施内容を踏まえ、地層処分にかかる教材の作成を開始するとともに、アクティブラーニング形式を取り入れた、受講者が10名程度の小規模の人材育成セミナーを開催した。

2020年度の実施内容等の詳細は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

### ◇2020 年度の成果<sup>1)</sup>

#### (1) 進捗管理・成果のとりまとめ等

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）で選定した 7 件の研究開発テーマに対して、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、2020 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）及び最終報告（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オンライン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 3 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 2020 年度の成果概要を以下に示す。

#### ① ジオポリマー技術による人工バリア構築のための基礎的検討（研究者：北海道大学 胡桃澤清文）

本研究は、放射性廃棄物処分施設の人工バリアの一部として、ジオポリマー硬化体の適用が可能かどうかの基礎的検討を行う。特に強度などの機械的特性、収着性能、溶出特性、及び物質移動特性について定量的に明らかにすることを目的としている。

2020 年度は、ジオポリマー硬化体の機械的特性や物質移行特性に優れた適切な配合を検討した。メタカオリン及びアルカリ刺激剤の配合条件を検討し作製した硬化体について、圧縮強度を測定するとともに、作製した試験体のキャラクターゼーションや、硬化体内部の水分の状態分析や塩化セシウム溶液に浸漬させた拡散試験も行った。

異なるアルカリ刺激剤を用いてジオポリマー硬化体を作製し、各種物性試験とその微細構造測定を行ったところ、異なるアルカリ刺激剤を用いた場合、圧縮強度などの物性が異なる結果となった。これらの物性の違いは形成される微細構造に起因することを明らかにした。

試験体を塩化セシウム溶液に浸漬して拡散試験を行った結果、セシウムの見かけの拡散係数はおよそ  $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  のオーダーとなった（図-1）。一方で、塩化物イオンは全く浸透していない結果となった。塩化セシウムの吸着試験においても、セシウムは特にナトリウムを刺激剤とした試料で最も吸着量が多くなったが、塩化物イオンは全く吸着しなかった。

今後、塩化セシウム以外のイオンの吸着挙動や拡散挙動を明らかにすることや海水系での溶脱特性、及び処分においてジオポリマーと一緒に用いられる可能性のあるセメント系材料やベントナイトなどの接触面における特性変化を明らかにすることが課題である。

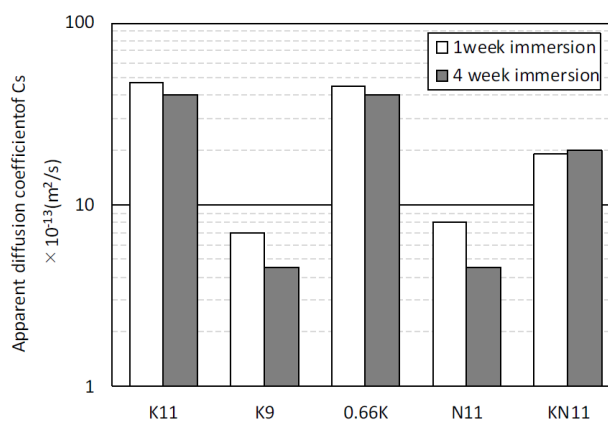


図-1 各硬化体のセシウムの見かけの拡散係数（横軸の K11、K9・・・はサンプル名称を示す）

#### ② 新規析出促進法によるベントナイト緩衝材中の二次鉱物が拡散および透水挙動に与える影響評価（研究者：電力中央研究所 田中真悟）

緩衝材の変質は反応が極めて緩慢であるため、現実的な実験期間での緩衝材の長期変質評価が困難であることから、新たな手法により緩衝材に及ぼす二次鉱物の影響を評価する。具体的には、電場により様々な析出形態で二次鉱物を析出させた変質緩衝材を調製し、それを用いた拡散試験及び透水試験から、析出量や析出形態の違いが緩衝材の拡散係数及び透水係数に与える影響を明らかにすることを目的とする。

2020 年度は、昨年度に見出した初期濃度条件で、電場により二次鉱物の析出形態（析出量、位置など）が異なる変質緩衝材を調製し、得られた変質試料を用いて透過拡散試験を行った。また、

定水位法による透水試験を行い、緩衝材中の二次鉱物が透水係数に与える影響を検討した。

変質緩衝材の調製については、ベントナイト試料中の炭酸カルシウム析出量を制御して調整できる手法を確立した。作成した変質試料を用いて、重水とヨウ化物イオンをトレーサーとした循環型システムによる透過拡散試験を行った。その結果、炭酸カルシウムの析出により、緩衝材中の重水及びヨウ化物イオンの実効拡散係数が低下し、特にヨウ化物イオンがより析出の影響を受けた。

炭酸カルシウムが析出した緩衝材を用いて透水試験を実施した結果、炭酸カルシウムの析出量が少ない場合は、析出がない場合と比較して透水係数が低下したが、析出量が多い試料の場合は析出がない場合より透水係数が大きくなった。ベントナイト試料中に炭酸カルシウムが析出することにより、析出による空隙の閉塞、モンモリロナイトの膨潤性変化、ベントナイトのひび割れなどの、透水性に影響を及ぼすいくつかの現象が表れる可能性が考えられる。今回の試験結果については、析出量が少ない場合は空隙が閉塞される効果が透水性低下に寄与し、析出量が多い場合は析出した炭酸カルシウムがモンモリロナイト粒子間を接着するセメンテーション効果が大きくなることでベントナイトの膨潤性が低下し、さらに膨潤性を失ったことによりひび割れが生じて透水性が大きくなる現象となったことが考えられる。この考察については、さらなる多角的な検討により検証することが今後の課題となる。

### ③結晶質岩形成時に内包された割れ目発生・分布の潜在性の解明(研究者:山形大学 湯口貴史)

本研究は、花崗岩体の冷却過程に将来的に割れ目を形成する要因が存在していると考えられることに着目し、岩石学的現象の理解を深め、花崗岩体中の現在の割れ目分布に加えて、将来的な割れ目発生の潜在性(将来的な発現の有無)を評価する手法を構築することを目的とする。すなわち、顕微鏡で観察されるマイクロスケールの割れ目が、肉眼で観察され物質移動に大きく寄与するラージスケールの割れ目の種として働くのではないかという作業仮説を検討する。なお、本研究において、マイクロスケールの割れ目とは結晶質岩の鉱物内に認められる初生の割れ目を言い、およそ 10E0cm 以下の顕微鏡で観察可能なスケール

のものを言う。一方、それに対応させたラージスケールの割れ目とは岩体冷却後の構造運動によって生成したもので、通常、およそ 10E0cm 以上の鉱物単体を超えるサイズのものと言う。

2020 年度は、過年度に取得した、黒雲母の緑泥石化、斜長石の変質それぞれの変質パラメータを用いて、変質パラメータと花崗岩のラージスケール割れ目との関連性を検討した。また、顕微鏡レベルのマイクロスケール割れ目の定量的評価手法を構築し、得られたマイクロスケール割れ目とラージスケール割れ目、変質パラメータとの関連性を検討した。最後に花崗岩体中の現在の割れ目分布と将来的な割れ目発生の潜在性の評価手法について考察を行った。その結果、黒雲母の緑泥石化・斜長石の変質それぞれの変質パラメータとラージスケール割れ目は正の相関性を有することを確認した。

顕微鏡レベルのマイクロスケール割れ目の定量的評価手法について、電子顕微鏡を用いた化学組成像の画像解析によりマイクロスケール割れ目の面積分率を取得することができた。マイクロスケール割れ目の面積分率と変質パラメータの関連性について検討したところ、変質パラメータと微小空隙には正の相関があることが確認できた。この結果は、変質の程度がマイクロスケール割れ目の面積に支配されていることを示唆する。以上の結果を基にラージスケール割れ目とマイクロスケール割れ目との関係を検討したところ、ラージスケール割れ目が大きくなるにつれて微小空隙の面積分率と変質パラメータが大きくなる傾向を示した。このことは、マイクロスケール割れ目が、物質移動に大きく寄与するラージスケール割れ目の種として働く可能性を示唆する。

これらの結果から、マイクロスケール割れ目を経路とした熱水流動により熱水変質がもたらされ、その後、このマイクロスケール割れ目を種として、除荷や断層活動によりラージスケール割れ目が発達するメカニズムを提案した。

マイクロスケール割れ目を通路とした熱水変質メカニズムの把握やラージスケール割れ目の生成条件を検討することで、地下水流動や物質移行の経路となる将来的な割れ目発生の潜在性の評価手法を構築することが今後の課題である。



④飽和度の変化に伴う堆積岩の変形異方性と放射性廃棄物の合理的な埋設方法に関する研究  
(研究者：埼玉大学 富樫陽太)

地層処分施設の建設・作業中においては、トンネル周囲の岩盤の含水状態は飽和しているとは限らず、特に堆積岩の場合にはライニングを用いたとしても掘削された坑道に大気が流入して岩盤の不飽和が進むことが懸念される。本研究は、掘削後の壁面からの流出・蒸発に伴って不飽和状態に移行する堆積岩の異方的な力学挙動を詳細に把握し、異方性を考慮した高レベル放射性廃棄物の埋設方法へと応用することを目的とする。そのために、室内試験やスイス・モンテリ岩盤研究所における現地計測を通して、飽和度によって変化する堆積岩の変形異方性を詳細に特定することを試みる。

2020年度は堆積岩の透水性、保水性を調べるために、ベレア砂岩と田下凝灰岩を用いたフローポンプ式による透水試験を行った。また、処分坑道の飽和度分布を推定するための、熱伝達境界を導入した非線形偏微分方程式(リチャーズ式)の厳密解の導出を行った。さらに、処分坑道の変形特性を把握するために、飽和度の変化に伴う異方性の主軸の回転を表現した有限要素法解析(FEM)を行った。また、スイスのモン・テリ岩盤研究所で測定された透気現象の測定結果をシミュレートするための、透気現象の厳密解を導出して固有透気係数を取得する方法の開発を行った。

透水試験の結果、ベレア砂岩では $10^{-7}$  m/s程度の透水係数であり、層理面のZ方向の透水係数は、他の方向よりも1/5程度小さかった。一方で、田下凝灰岩の透水係数は $10^{-11}$  m/s程度であり、透水係数の異方性は見られなかった。

リチャーズ式の厳密解に関しては、水分量の変化が滑らかな熱伝達境界を取り入れた厳密解を導出した。検証のために、乾燥収縮実験で測定した飽和度変化をシミュレーションしたところ、実験結果を精度よく再現することができた(図-2)。

異方弾性FEM解析については、堆積岩の変形異方性のモデル化に用いられる面内等方弾性体を用い、異方性の主軸の回転を表現できるパラメータを導入した上で、パラメータを変化させた異方弾性FEM解析を実施した。その結果、異方弾性の変化によって坑道の変形特性が明確に変化することを示すことができた。

スイスのモン・テリ岩盤研究所における透気現象のシミュレーションについては、線形化した透気の支配方程式の厳密解を用いて、現地計測をシミュレーションした結果、ボーリング孔内の気圧挙動を再現することができた。

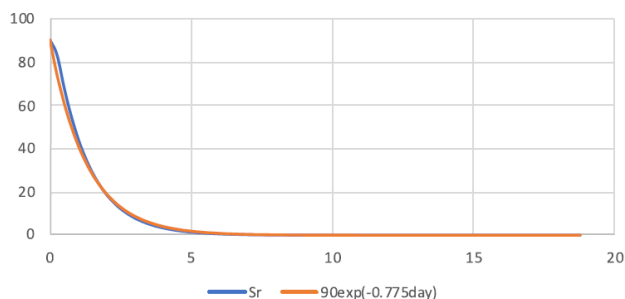


図-2 リチャーズ式厳密解を用いた乾燥変形実験(飽和度変化)のシミュレーション(青：厳密解、オレンジ：実測値の非線形最小二乗回帰曲線、なお、縦軸は飽和度(%)、横軸は時間(日)を示す)

⑤メタンをエネルギー源とした微生物生態系の地質環境への影響評価(研究者：東京大学 鈴木庸平)

近年の研究により地下深部にも微生物が多く生息することが明らかとなり、地層処分においては、核種移行に影響を及ぼす地下の酸化還元環境の形成に、微生物活動が大きく関わっていることが考えられるようになってきている。本研究は、地下環境を模擬した室内高圧試験により、メタン酸化古細菌による酸化剤の利用選択性や代謝速度、形成される化学環境の評価を行うと共に、酸化剤の代謝反応が放射性核種の移行に与える影響についての知見を得ることを目的とする。

2020年度は、瑞浪超深地層研究所及び幌延深地層研究センターから採取した地下水を用い高圧培養した後の試料中の溶存無機炭酸の同位体測定、懸濁物中に含まれる粘土鉱物と地下水深度に対応する岩石コアの粘土鉱物を解析した。さらに、各高圧培養サンプル中の微生物細胞数測定、DNAを用いた微生物群集構造解析を実施した。

幌延深地層研究センターから採取した地下水を用い、 $^{13}\text{C}$ で標識したメタンを添加した系での培養試験後、溶存無機炭素の安定同位体を測定した結果、培養後に無機炭素の $^{13}\text{C}$ の割合が増加したため、微生物によってメタン酸化が進行したことが示唆された。また、高圧条件と常圧条件で培養試験をした結果、地下の高圧環境に生息するメ

タン酸化を行う微生物は低圧条件では活性が下がることが示唆された。さらに、様々な酸化剤を添加して比較実験を行ったところ、酸化剤を添加しなかった系でメタン酸化がより進んでいた。このことから、元々の地下水に含まれる懸濁物がメタン酸化代謝における電子受容体として重要な役割を果たしていることが示唆された。

瑞浪超深地層研究所の地下水を用いた培養実験も実施した結果、幌延深地層研究センターの地下水を用いた培養実験と比較してメタン酸化が進行していなかったため、幌延深地層研究センターの地下水に含まれる微生物がよりメタン酸化活性が高いことが示唆された。

培養実験における微生物の群集組成を明らかにするために 16SrRNA 遺伝子解析を実施した結果、培養期間を通じて嫌氣的メタン酸化古細菌の *Methanoperedenaceae* が存在していることが確認され、培養期間を通じて嫌氣的メタン酸化が進行したことが示唆された。

本研究の結果、地下のメタン酸化古細菌の活動を調べることで、核種移行の遅延がもたらされる還元的な地下水環境の形成について評価できる可能性が示唆された。

⑥ナチュラルアログ手法による締固めたベントナイトの膨潤特性・自己シール性能の年代変化に関する評価（研究者：早稲田大学 王海龍）  
本研究は、地質年代が1千万年程度～1.5億年程度のベントナイト原鉱石を用いるというナチュラルアナログ研究手法に基づき、締固めたベントナイトの膠結作用による膨潤特性・自己シール性の年代変化を定量的に評価し、放射性廃棄物処分場におけるベントナイト系緩衝材の仕様設計に反映させる手法を提案することを目的とする。

2020年度は、月布産、アメリカ産、中国産のベントナイト原鉱石試料を粉碎した粉末を締固めることで作製した再構成供試体の膨潤圧試験、一次元膨潤変形試験を実施した。また、昨年度に試験方法を構築し月布産原鉱石を用いて適用性を確認した XRD・膨潤圧連携試験について、アメリカ産・中国産原鉱石の不攪乱・再構成供試体に対して試験を実施した（注：不攪乱供試体は、原鉱石を粉碎等せず各種試験用のサイズにカットして成型した供試体）。さらに、原鉱石における

セメンテーションのメカニズム解明に向けて、薄片試料を作製して電子顕微鏡で観察し、微視的構造について考察した。

月布産、アメリカ産、中国産の3種類のNa型ベントナイト原鉱石（Na/Ca比はそれぞれ4.2、2.1、3.0）から作製した再構成供試体の膨潤圧、膨潤変形特性については、月布産原鉱石では膨潤圧・膨潤変形特性に関して再構成供試体の粒径による影響はほぼ見られなかったのに対し、アメリカ産・中国産原鉱石では粒径が大きくなるほど、膨潤圧・膨潤変形特性が低下する傾向がみられた（図-3は中国産ベントナイトの膨潤試験結果）。月布産原鉱石（地質年代約1千万年前）は、アメリカ産（同約1億年前）・中国産原鉱石（同約1.5億年前）より生成が新しい。原鉱石の具体的な生成環境にもよるが、膨潤性・膨潤変形特性の違いは、原鉱石の地質年代が古くなることに伴うセメンテーションの影響（モンモリロナイトあるいはモンモリロナイト周囲にある随伴鉱物が、時間が経過するにつれて変質し、モンモリロナイト粒子間を接着したような状態になること）が一つの要因であることが推察された。

粉末を締め固めた再構成供試体と、不攪乱供試体では、膨潤圧と膨潤変形特性は、それぞれ不攪乱供試体の方がより小さくなったが、月布産ベントナイトの低下幅はアメリカ産・中国産より小さかった。この結果からも、膨潤圧・膨潤変形特性に対するセメンテーションの影響は年代が古くなるほど強まるということが示唆された。

アメリカ産・中国産原鉱石の不攪乱供試体と再構成供試体を対象として、XRD・膨潤圧連携試験を実施した結果、前述の膨潤圧試験と同様、不攪乱供試体の膨潤圧は再構成供試体に比べて低くとどまる結果が得られるとともに、モンモリロナイト底面間隔については大きな差異がないことが分かった。

3種類のNa型ベントナイト原鉱石から薄片試料を作製し、偏光顕微鏡及び走査型電子顕微鏡を用いて土粒子の微視的骨格構造について評価した結果、モンモリロナイト、石英、斜長石、黄鉄鉱などの鉱物が同定された。

また、得られた結果の適用として、オーバーパックの腐食に伴うガスの破過を想定したシナリオを想定し、本研究で得られた膨潤圧・膨潤変形試験結果と緩衝材の設計乾燥密度を踏まえた、緩

衝材の自己修復性評価手法のひな形を作成した。

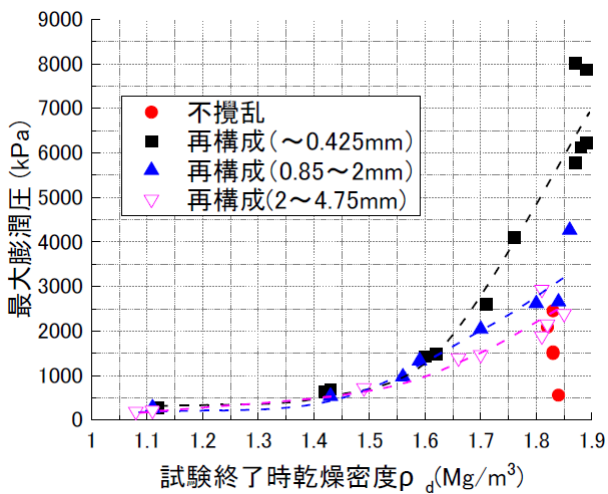


図-3 中国産ベントナイトの再構成供試体と不攪乱供試体の試験終了時の供試体乾燥密度と最大膨潤圧の関係

⑦断層周辺の地下水流動特性および物質移行特性に関する包括的研究 (研究者：日本原子力研究開発機構 渡辺勇輔)

本研究は、地下水流動や物質移行を遅延・抑制する構造(バリア)としての断層の機能を把握し、断層周辺の物質移行特性を精緻に評価する手法を構築することを目的とする。そのため、断層によって形成されるコンパートメント構造などの地質構造を考慮した地下水流動解析・物質移行解析や、断層活動によって変質した岩石への元素収着試験を実施する。

2020年度は、断層の内部構造(断層ガウジ、ダメージゾーン)に応じた水理特性が地下水流動に及ぼす影響を検討した。また、断層の周囲のガウジやダメージゾーンの鉱物組成が母岩と異なることで生じる収着作用が物質移行に及ぼす影響を定量的に把握するため、仮想的な水理地質モデル(仮想モデル)と実在する断層周辺の水理地質モデル(実在モデル)を用いた地下水流動解析と反応輸送解析を行った。仮想モデルを用いた解析は、地下水流動や物質移行に対して断層が及ぼす一般的な影響の知見を得るため、実在モデルを用いた解析はモデル構築や解析結果の妥当性を検証するために実施した。なお、実在モデルは地下水の現地計測データが利用できる岐阜県瑞浪市瑞浪超深地層研究所の主立坑断層を対象とした。断層周辺岩石の元素収着特性については、収着デ

ータをさらに拡充した。また、収着した元素がその後の地下水流動により脱離されることを想定した脱離試験を実施した。

瑞浪超深地層研究所で採取された断層周辺岩石を粉碎した試料への元素収着特性については、昨年度まで実施したセシウム(Cs)、ユウロピウム(Eu)に加えて、バリウム(Ba)をトレーサーとして用いた収着試験を実施した。BaはCsやEuと比較すると分配係数が小さく、また、地下水と同様のpH、イオン強度条件では容易に脱離することが確認された。脱離試験の結果から、Csは粘土鉱物であるイライトやスメクタイトへの強い親和性のため、固相に強く固定され脱離されにくいことが確認された。EuはpHが低い条件ではBaと同様に粘土鉱物への収着は比較的弱いと考えられるが、一般的な地下水条件であるpH7~9付近の水では加水分解により、EuがBaより脱離しにくいことが示唆された。収着試験で得られたパラメータは物質移行解析に用いた。

地下水流動解析については、仮想モデルを用いた解析では、複数の断層とそれに蓋をするようなキャップロックが存在するようなコンパートメント構造の水理特性、及びコンパートメント領域に対するキャップロックの広がりや地下水流動に及ぼす影響について検討した。その結果、コンパートメント領域内部から外部に向かう地下水流動に対してキャップロックの広がりや大きな影響を及ぼすことが明らかになった。

実在モデルを用いた解析では、地下水流動解析及び粒子追跡解析を行った。また、断層部分に収着に寄与する粘土鉱物(イライト)を設定し、収着性トレーサーの長期的な移行推定を行った。粒子追跡解析の結果、地下水は断層にほぼ並行な方向に流動することが示され、地下水流動を断層が支配しているものと考えられた。一方で、地下水の流動経路は、粘土鉱物を設定したグリッドを通過しなかったことから、反応輸送解析では収着の影響を確認できなかった(図-4)。

これらの結果から、複数の断層が存在する場合でも、それに蓋をするようなキャップロックが存在するような地下構造領域では地下水流動が抑制される可能性が示唆された。また、今後は実在する断層で解析によって地下水流動経路となることが明らかとなったダメージゾーンを対象として、粘土鉱物が核種移行に及ぼす影響を明らかにする

ことが課題である。

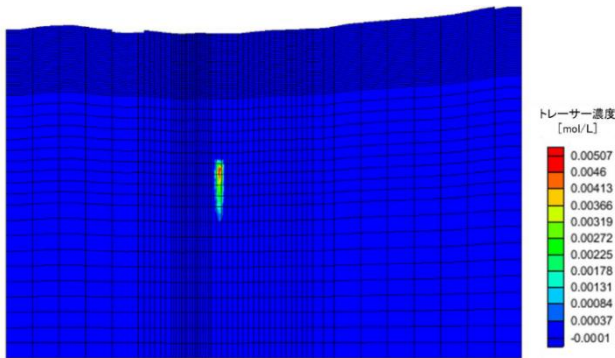


図-4 断層に分布する粘土鉱物による収着を考慮した反応輸送解析の結果（注入開始から1000年後の収着性トレーサー（セシウムイオン）の濃度分布）。地下水流動と同様にトレーサーは注入点より断層とほぼ平行な下方向に移行している。

## (2) 新規研究テーマの選定

2018年度に選定した研究テーマについては2020年度で終了するため、2021～2022年の2カ年で実施する新たな萌芽的・基礎的研究テーマを、2021年4月から研究を開始できるように、2020年度に選定した。具体的には2018年度と同様に、地層処分の技術的信頼性に資する、主に4つの分野（地質環境、工学技術、性能評価、代替オプション）を対象として萌芽的・基礎的研究テーマ及び研究実施者を公募した。選定においては地層処分関連分野・有識者等で構成される選考委員会を設置し、当該委員会での審査により、以下の7件の研究テーマを選定した。

- ・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（山口大学 林 久資）
- ・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（早稲田大学 伊藤 大知）
- ・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（鳥取大学 河野 勝宣）
- ・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（北海道大学 菊池 亮佑）
- ・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（筑波大学 向井 広樹）

- ・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（京都大学 久保 大樹）
- ・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（JAEA 福田 将真）

- 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（2020年度分）、2021

## 2-3 人材育成プログラムの実施・作成

### ◇2020 年度の成果

2020 年度においては、まず、本事業で作成する人材育成プログラムの対象となるジェネラリストについての再整理を行った。再整理においては、ジェネラリストの中にもレベルの違いがあると考え、レベル1~4までを設定した。また、人材育成に資する既存の講座などの整理、本事業との重複の検討等を行い、本事業においては、残りの3か年において、以下の2つの内容を実施していくこととした。

- レベル1を対象とした教材の作成
- レベル2を対象としたセミナーの開催

さらに、2019年度のセミナーから得られた教訓から、セミナーでは、受講者が受け身ではなく、能動的に学ぶことができるよう、アクティブラーニングの手法を用いることとした。

以下に、「レベル1を対象として教材の作成」及び「レベル2を対象としたセミナーの開催」に関する2020年度の実施内容をまとめる。

#### (1)教材の作成

地層処分に係るレベル1のジェネラリスト育成のための教材作成については、内容に応じ、以下の2種類を検討することとした。

##### ①地層処分に係る包括的知識

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地層処分に係る専門的知識

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重要な専門的知識を抽出した内容

また、教材の作成においては、上記の2種の教材に含むべき学習項目(ジャンル)をまず設定し、各学習項目に関する狙い、理解すべき内容、情報の出典等を整理した“学習指導要領”を作成した(表-1)。また、教材の仮のフォーマットとしては、A4サイズで上部に図表を入れ、下部にその説明

を入れる形として案の作成を進めた。

表-1 教材の学習項目(ジャンル)と狙い

ジャンル	設定の狙い
1. 放射性廃棄物の特徴	我が国で発生する放射性廃棄物の書類と特徴を包括的に理解する。
2. 処分形態	我が国で設定している処分形態・区分の考え方や事例を理解する。
3. 地層処分の選択	地層処分が選択されてきた背景と理由を理解する。
4. 地層処分の進め方	地層処分事業の段階的な進め方と意思決定のあり方を理解する。
5. 地層処分の倫理的側面と安全原則	地層処分分野固有の倫理観と安全原則の関係を理解する。
6. 地層処分の安全確保の示し方	長期の安全性を示唆する安全評価という評価手法を理解する。
7. 地層処分固有の取組	極めて長期の安全性への対応、学際的な側面を理解する。
8. 地層処分に対する信頼感の醸成	コンフィデンス・ビルディングに不可欠な要素を理解する。
9. 地層処分の実現性に係る報告書	地層処分分野のバイブルともいわれる報告書の概要を理解する。
10. 地層処分の社会的側面	リスク・コミュニケーション、社会の受入れに関する方策を理解する。
11. 地層処分計画における各国の挫折と成功例	各国の進め方から教訓を理解する。

作成した“学習指導要領”及び仮のフォーマットに基づき、包括的知識に関する教材の第1案の作成を行った結果、合計で140ページ以上となった。今後、外部有識者によるレビュー等を行い、改訂を実施し最終化していく計画である。

また、専門的知識に関する教材については、既存の資料などとの重複する部分が多くなると考えられるため、教材を作成するのではなく、各項目を学習するための既存資料の紹介、容易なアクセスなどを可能とする資料(学習のための入口)を作成することとした。

## (2) 人材育成セミナーの開催

昨年度（2019年度）には、講師を含め約60名の参加で、地層処分の主要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、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を組み込んだ2019年度人材育成セミナーを開催した。2019年度の人材育成セミナーは、参加者の満足度・理解度などからは一定の成果があったと考えられる一方で、以下の課題も明らかとなった。

- 講義が主体で参加者が受け身となるため、教育の効果に疑問
- 地層処分の主要3分野（地質環境調査、工学技術、安全評価）を広く対象とした場合、3日間の日程でもスケジュールが過密
- 3日間講師や参加者を拘束することが困難

2020年度の人材育成セミナーは、昨年度のセミナーからの教訓を活かすために、実サイトでの調査・実験の様子の見学などを組み入れ、地層処分事業に対して専門家の知的好奇心を引き付けて伸ばすため、受け身ではなく、主体的に参加し参加者間で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とした（図-1～4）。また、地層処分に関する知識の習得を主目的とするのではなく、異なる分野の専門家が対話を行うことによって、地層処分に関する自身の考えを深めるとともに、異分野との相互理解や協働の必然性、地層処分全体像の理解の重要性に気付くことができることを目的として設定し、これに沿ったプログラムを作成した。

このため、沿岸部処分システム評価確証技術開発事業において、今年度、駿河湾地域で新たなボーリング掘削を行う計画であった（国研）産業技術総合研究所に協力を求め、駿河湾地域での地下水流動に焦点を当てたセミナーを計画した。このセミナーの対象は、地層処分の特定分野に専門性を有する若手（キャリア5年程度）とした。

セミナーには、関係機関から合計12名が参加し、2020年12月21日から23日の3日間の日程でボーリングの掘削現場のある静岡県富士市において、以下の構成で「地質環境モデル（SDM）の構築に向けて～地下水データをみる・よむ・とく～」と題して開催した。

### ①前振り

前振りでは、本事業における人材育成の説明、ジェネラリストの定義・必要性などを説明。

### ②座学（図-1）

地下水モデルの作成などを題材としたグループワークのための基礎知識を提供。プロジェクションマッピングやビデオ画像などを用いた説明を実施。



図-1 プロジェクションマッピングを用いた説明の様子

### ③エクスカッション（地形、海域、ボーリングサイトの見学）（図-2）

富士山から駿河湾へと至る地形、海域の見学、ボーリング実施サイト・ボーリングコアの見学を実施



図-2 ボーリングサイトでのコアの見学

#### ④演習

地下水のサンプルを採取し、重炭酸滴定（濃度測定）を実施（図-3、4）。



図-3 湧水の採集の様子



図-4 重炭酸滴定の様子

#### ⑤総合学習（グループワーク）

地下水のモデル作成と作成したモデルを用いた議論を実施。異分野の専門家がグループ内外でのコミュニケーションを通じ、協働の重要性やコミュニケーションの難しさを理解することを企図。

#### ⑥振り返り（グループワーク）（図-5）

セミナーの最後に全体の振り返りを行い、それぞれの参加者がそれぞれの考えをまとめることを支援。



図-5 セミナーのグループワークの様子

- 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（2020年度分）、2021年3月

### 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カ年の計画で、事業化が進んでいる諸外国の規制要件等の情報を収集・整理している。2020年度は、北欧のフィンランド及びスウェーデンを対象として、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か国を含む9か国を対象として、サイト選定段階で考慮された点や絞り込み方法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（2020年度版）」を作成した。

#### (3) 不確実性を考慮した将来費用の推定手法に関する研究

処分事業の将来費用の推定において、フランスやスウェーデンでは、不確実性を考慮した手法を取り入れており、確率分布の形で費用の幅を推定している事例がある。そのような費用推定方法の基礎的な理解を得るために、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB社）が採用している「逐次の原則（Successive Principle）」に関する文献を収集して分析に着手した。



## 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。

2020年度は、新型コロナウイルス感染症まん延のため、対面での会議は開催できなかったが、Web会議で、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)
中国	中国核工業集团公司 / 中国ウラン工業公司 (CNNC / CNUC)
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)

### (2) SKB インターナショナル社との研究協力に関する情報交換 資源エネルギー庁の委託事業「ニアフィール

ドシステム評価確証技術開発」及び「地層処分施設閉鎖技術確証試験」の実施について、研究協力者である SKB インターナショナル社との情報交換を行った。

### (3) 炭素 14 のソースタームに関する国際共同研究の後継プロジェクトに関する情報交換

HORIZON2020 の枠組みにおいて実施された CAST (CARbon-14 Source Term) プロジェクトの後継プロジェクトの計画策定が進められている。後継プロジェクトの実施計画、当センターが提供可能な情報及び関連する研究課題について、コーディネーターである NAGRA との情報交換を行った。

### (4) 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の諸量評価に関しては、国際原子力機関/IAEA の公開コード/NFCSS (Nuclear Fuel Cycle System Simulation) を利用して、放射性廃棄物の崩壊熱、放射性毒性、特定核種の分離、処分場での廃棄体専有面積やレイアウト評価などの計算機能の拡張を目指している。2020年度は、同機関原子力局と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) を締結し、キックオフ会議を開催 (Web 会議) して機能拡張の手順、核燃料サイクルシナリオの構成、廃棄物処分における負荷評価などについて情報交換を実施した。今後、本協定に基づき計算手法とその結果に関する技術打合せを継続していく。

## 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回講演会「高レベル放射性廃棄物の地層処分の概要と最近の取り組み」 富森 卓 氏 (原子力発電環境整備機構 地域交流部 専門部長)	2020年 9月 8日	オンライン 開催
	第2回講演会「なぜ「世代間の倫理」が問われるのか? - 歴史的背景、そして哲学的問題点 -」 滝口 清榮 氏	2020年11月12日	オンライン 開催
	第3回講演会「原環センターにおける中深度処分に関する研究開発について」 藤原 啓司 (低レベル廃棄物処分研究開発部) 広中 良和 (低レベル廃棄物処分研究開発部)	2021年 3月31日	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」 朽山 修 氏 (公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問)	2020年10月23日	オンライン 開催
	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」 朽山 修 氏 (公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問)	2020年11月20日	オンライン 開催
	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 原子力工学科 特任教授)	2020年12月 8日	オンライン 開催
研究発表会	2020年度原環センター研究発表会 1.研究発表 「原環センターの調査研究の現状について」 田中 俊彦 (常務理事) 2.特別講演 「原子力エネルギーの利用に関する国際機関の働き」 森田 深 氏 (経済協力開発機構/原子力機関 (OECD/NEA) 事務次長上級補佐官)	2021年 1月12日	オンライン 開催

## 2. 論文、学会発表等

### (1)論文

No.	題 目	原環センター著者	発 表 先
1	Experimental approach for understanding the dynamic behaviors of bentonite buffer piping erosion	石井智子、川久保政洋	Mechanical Engineering Journal Vol.7 No.3, 2020
2	Reduction of the Waste Occupied Area by Nuclide Separation and Horizontal Emplacement of the Waste Packages	朝野英一	Proceedings of the Waste Management 2020 Conference, March 8-12, 2020, Phoenix, Arizona, USA
3	A Study of a Monitoring Program for Intermediate Depth Disposal of Low-Level Radioactive Waste	藤原啓司、脇寿一、 広中良和、寺田賢二	Proceedings of the Waste Management 2020 Conference, March 8-12, 2020, Phoenix, Arizona, USA
4	Formation of natural silicate hydrates by the interaction of alkaline seepage and sediments derived from serpentized ultramafic rocks at Narra, Palawan, the Philippines	山川稔、藤井直樹	Minerals,10(8), 719, 2020

## (2)学会発表等

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
1	不飽和ベントナイト供試体の吸水膨潤による隙間充填過程シミュレーション	林大介、石井智子	第 55 回地盤工学研究発表会 2020/7/21～23
2	TRU 廃棄物の地層処分におけるガス移行挙動	八木翼、大和田仁、 深谷正明	日本原子力学会 第 36 回バックエンド夏期セミナー 2020/8/6
3	球-円板混合系の平衡構造における空隙特性の定量評価	林大介	日本混相流学会 混相流シンポジウム 2020 2020/8/21～23
4	鉛ホウ酸塩系ガラスにおける逆モンテカルロ構造モデルの局所構造の再現性評価	桜木智史、大和田仁	日本セラミック協会 第 33 回秋季シンポジウム 2020/9/2～4
5	地下環境における長距離無線伝送技術の適用性の検討	川久保政洋、蓮井昭則	土木学会 2020 年度全国大会 第 75 回年次学術講演会 2020/9/9～11
6	地下空洞型処分施設におけるモニタリング項目の計測実現性確認 (5) - 地下空洞型処分施設機能確認試験 (その 21) -	広中良和、藤原啓司、 脇寿一、寺田賢二	土木学会 2020 年度全国大会 第 75 回年次学術講演会 2020/9/9～11
7	放射性廃棄物処分施設からのイオン溶出挙動に関する検討 - 地下空洞型処分施設機能確認試験 (その 22) -	広中良和、藤原啓司、 脇寿一、寺田賢二	土木学会 2020 年度全国大会 第 75 回年次学術講演会 2020/9/9～11
8	地下空洞型処分施設への適用に向けた光ファイバセンサーの敷設方法と圧力計測の検討 - 地下空洞型処分施設機能確認試験 (その 23) -	藤原啓司、脇寿一、 広中良和、寺田賢二	土木学会 2020 年度全国大会 第 75 回年次学術講演会 2020/9/9～11
9	実規模施設における人工ひび割れ試験時の光ファイバセンサーによるひび割れ検知 - 地下空洞型処分施設機能確認試験 (その 24) -	広中良和、藤原啓司、 脇寿一、寺田賢二	土木学会 2020 年度全国大会 第 75 回年次学術講演会 2020/9/9～11
10	地下水分析による中深度処分施設の機能確認方法の検討 - 地下空洞型処分施設機能確認試験 (その 25) -	広中良和、藤原啓司、 脇寿一、寺田賢二	土木学会 2020 年度全国大会 第 75 回年次学術講演会 2020/9/9～11
11	光ファイバセンサー技術を活用した中深度処分施設における機能確認方法の検討 (2) - 地下空洞型処分施設機能確認試験 (その 26) -	広中良和、藤原啓司、 脇寿一、寺田賢二	土木学会 2020 年度全国大会 第 75 回年次学術講演会 2020/9/9～11

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
12	撒き出し・転圧工法による坑道の埋め戻しに関する小規模施工試験	川久保政洋、阿部孝行	土木学会 2020年度全国大会 第75回年次学術講演会 2020/9/9～11
13	幌延 URL におけるベントナイト系充填材の除去回収実証試験 流体的除去技術（ウォータージェット方式）	白瀬光泰、小林正人	土木学会 2020年度全国大会 第75回年次学術講演会 2020/9/9～11
14	幌延 URL におけるベントナイト系充填材の除去回収実証試験 機械的除去技術（オーガ方式）	白瀬光泰、小林正人	土木学会 2020年度全国大会 第75回年次学術講演会 2020/9/9～11
15	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 （79）高燃焼度 $\text{UO}_2$ 燃料から発生する廃棄物の減容及び地層処分の負荷影響に関するシナリオ評価	桜木智史、朝野英一	日本原子力学会 2020年秋の大会 2020/9/16～18
16	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 （17）処分場面積削減に対するバックエンドプロセスの時間因子と廃棄体定置方式の組合せに関する研究	桜木智史、朝野英一	日本原子力学会 2020年秋の大会 2020/9/16～18
17	Vitrification and geological disposal of high-level radioactive waste: Integrated approach for their technical options and optimization of nuclear fuel cycle system	桜木智史	Glass Meeting 2020 2020/12/7～10 2020/12/16～18
18	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）廃棄物処分における環境負荷と核燃料サイクル条件	朝野英一、桜木智史、 浜田涼	日本原子力学会 2021年春の年会 2021/3/17～19
19	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 （2）環境影響評価指標導出に向けた地層処分に （3）核燃料サイクルの諸量評価のための NFCSS コードの適用可能性	浜田涼、桜木智史、 朝野英一	日本原子力学会 2021年春の年会 2021/3/17～19
20	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 （3）核燃料サイクルの諸量評価のための NFCSS コードの適用可能性	朝野英一	日本原子力学会 2021年春の年会 2021/3/17～19
21	廃棄物処分の環境影響を基点にした原子力システム研究 （4）環境負荷評価を基にした MA 分離プロセスの簡素化	朝野英一	日本原子力学会 2021年春の年会 2021/3/17～19

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
22	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 (18) UO <sub>2</sub> -MOX 混合ガラス固化体による処分負荷低減に関する研究	桜木智史、浜田涼、朝野英一	日本原子力学会 2021 年春の年会 2021/3/17~19
23	鉛ホウ酸塩系ガラスの逆モンテカルロ構造モデルにおける局所構造評価	桜木智史、大和田仁	日本セラミックス協会 2021 年年会 2021/3/23~25

### (3)解説・講演等

No.	題 目	著 者	発 表 先
1	「深地層の研究施設におけるこれまでの成果と今後への期待」 原環センターにおける深地層の研究施設を活用した研究開発について	小林正人	日本原子力学会誌 ATOMOΣ Vol.62 2020年4月号 P191-194
2	可逆性を担保する回収可能性に関する技術的対応と性能評価に向けた工学技術の役割 ～ (1) 回収可能性に対する技術的対応のあり方～	江守稔	日本原子力学会誌 ATOMOΣ Vol.62 2020年6月号 P323-327
3	可逆性を担保する回収可能性に関する技術的対応と性能評価に向けた工学技術の役割 ～ (2) より確からしい性能評価に向けた工学技術の役割～	江守稔	日本原子力学会誌 ATOMOΣ Vol.62 2020年7月号 P389-394
4	地層処分事業等の国際的な動向	稲垣裕亮	原子力年鑑 2021 P175-182

### 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№134	カナダにおける放射性廃棄物処分事業の進捗と地域対話	2020年6月
2	原環センタートピックス№135	最終処分場の選定に高知県東洋町の教訓を生かせるか	2020年9月
3	原環センタートピックス№136	なぜ「世代間の倫理」が問われるか？－歴史的背景そして哲学的問題点－	2020年12月
4	原環センタートピックス№137	原子力エネルギーの利用に関する国際機関の働き	2021年3月
5	原環センター2019年度 技術年報		2020年11月
6	原環センター技術報告書 RWMC-TRJ-20001 地層処分施設の設計・操業技術の最適化手法に関する研究		2021年3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	2020/4/1	カナダ核燃料廃棄物管理機関 (NWMO) が 2020～2024 年の実施計画書を公表
2	2020/4/2	ドイツで連邦放射性廃棄物機関 (BGE) がアッセ II 研究鉱山からの放射性廃棄物の回収計画を公表
3	2020/4/21	ベルギー放射性廃棄物・濃縮核分裂性物質管理機関 (ONDRAF/NIRAS) が高レベル放射性廃棄物及び長寿命低・中レベル放射性廃棄物の長期管理方針に関する国家計画案への意見聴取を開始
4	2020/5/12	米国で中間貯蔵パートナーズ (ISP) 社による中間貯蔵施設の建設・操業に係る環境影響評価が進行
5	2020/5/27	追記) 韓国で使用済燃料管理政策の見直しが本格化 [2019 年 6 月 6 日既報]
6	2020/6/8	カナダの使用済燃料処分場のサイト選定の状況－サウスブルース自治体での将来ビジョンづくりの取組
7	2020/6/17	スウェーデンで原子力活動法改正：処分場閉鎖後の責任を国に移管する旨を明確化
8	2020/6/18	スイスで UVEK が 21 の調査候補地点に対するボーリング許可発給を完了
9	2020/6/29	追記) カナダ OPG 社の低・中レベル放射性廃棄物の地層処分場建設プロジェクトが代替サイト検討へ [2020 年 2 月 5 日既報]
10	2020/7/15	英国のドーンレイサイト及び低レベル放射性廃棄物処分場のサイト許可会社が原子力廃止措置機関 (NDA) の完全子会社へ
11	2020/7/15	ロシア・セベルスクに計画中の浅地中処分場に対して立地・建設許可が発給
12	2020/7/17	追記) 米国で 2021 会計年度の予算要求－ユッカマウンテン計画の膠着状態を傍観せずに代替の解決策を開発するとの方式を表明 [2020 年 2 月 12 日既報]
13	2020/7/28	フランスで国家評価委員会 (CNE) が第 14 回評価報告書を公表
14	2020/8/4	追記) 米国で廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) の操業が再開 [2017 年 1 月 18 日既報]
15	2020/8/4	追記) フランスで国家討論委員会 (CNDP) が地層処分場プロジェクトに関する情報提供・公衆参加を監督する保証人を任命 [2017 年 11 月 16 日既報]
16	2020/8/17	追記) 米国で 2021 会計年度の予算要求－ユッカマウンテン計画の膠着状態を傍観せずに代替の解決策を開発するとの方式を表明 [2020 年 2 月 12 日既報]
17	2020/8/18	英国で RWM 社が地層処分に関連する研究を支援する研究サポートオフィスを立ち上げ
18	2020/8/18	フィンランドで TVO 社が極低レベル放射性廃棄物の地表埋め立て処分に関する環境影響評価計画書を提出
19	2020/8/25	スイスで NAGRA が高レベル放射性廃棄物のキャニスタ封入施設の立地オプションを比較する報告書を公表
20	2020/8/27	ドイツでサイト選定手続きの第 1 段階の中間報告書提出及び公衆参加手続きに関するスケジュールが公表
21	2020/9/7	ロシア・オジョルスクに計画中の浅地中処分場に対して立地・建設許可が発給

No	掲載日	タイトル
22	2020/9/15	追記) ドイツで処分の安全要件及びサイト選定時の予備的安全評価の要件を定める政令案が公表〔2019年7月22日既報〕
23	2020/10/2	ドイツでサイト選定手続き第1段階の中間報告書が公表ー地質学的な基準・要件を満たす「サイト区域」を選定ー
24	2020/10/2	追記) 米国で2021会計年度の予算要求-ユッカマウンテン計画の膠着状態を傍観せずに代替の解決策を開発するとの方式を表明〔2020年2月12日既報〕
25	2020/10/5	フランスのエコロジー移行省が「放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する国家計画」(PNGMDR)改定案に関する公開協議を開催
26	2020/10/15	スウェーデンのエストハンマル自治体議会が使用済燃料処分場の受け入れ意思を議決
27	2020/10/16	追記) 米国でNRCがユッカマウンテン処分場建設についての再開後の安全審査を終了し、残予算の用途を決定〔2016年11月10日既報〕
28	2020/10/19	追記) カナダの使用済燃料処分場のサイト選定の状況ーカナダ核燃料廃棄物管理機関(NWMO)がヒューロン=キンロス・タウンシップを除外〔2020年1月29日既報〕
29	2020/11/4	ドイツでサイト区域専門会議のキックオフ会合が開催ーサイト選定手続きにおける公衆参加の開始ー
30	2020/11/6	追記) 韓国で使用済燃料管理政策の見直しが本格化〔2019年6月6日既報〕
31	2020/11/9	英国カンブリア州のコーブランド市が調査エリアの特定に向けてワーキンググループを設置
32	2020/11/11	追記) 米国で2021会計年度の予算要求ーユッカマウンテン計画の膠着状態を傍観せずに代替の解決策を開発するとの方式を表明〔2020年2月12日既報〕
33	2020/11/12	フランスの放射性廃棄物管理機関(ANDRA)が公益宣言(DUP)に関する公開ヒアリング向け資料を公表
34	2020/11/20	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
35	2020/12/3	追記) 米国で中間貯蔵パートナーズ(ISP)社による中間貯蔵施設の建設・操業に係る環境影響評価が進行〔2020年5月12日既報〕
36	2021/1/8	イタリアで原子力施設管理会社(SOGIN)が極低レベル及び低レベル放射性廃棄物処分場の候補サイトを示したマップを公表
37	2021/1/18	英国カンブリア州のアラデル市が調査エリアの特定に向けてワーキンググループを設置
38	2021/2/9	カナダ原子力安全委員会(CNSC)が放射性廃棄物の管理に関する規制文書を公表
39	2021/3/4	フィンランド・ポシヴァ社が統合機能試験のための処分坑道掘削を開始
40	2021/3/31	フランスの放射性廃棄物管理機関(ANDRA)が地層処分プロジェクトの社会経済評価報告書を公表
41	2021/3/31	韓国で使用済燃料管理政策再検討委員会が政府に対する勧告を公表

## 5. 委員会一覧

分野区分	研究件名	委員会名称	審議事項
I. 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
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	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
	多様な核燃料サイクル条 件を考慮したバックエン ド対策の最適化に関する 研究	多様な核燃料サイクル 条件を考慮したバック エンド対策の最適化検 討委員会	多様な核燃料サイクル条件の 地層処分、バックエンド対策 等の審議
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	
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	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

	業務	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
		選考委員会	萌芽的・先進的な研究開発テーマの選考

## 原環センター 2020年度 技術年報

---

2022年1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](mailto:kikaku@rwmc.or.jp)）までお問い合わせください。