

# RWMC

原環センター  
2016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発電所等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。この技術年報は、2016年度(平成28年度)に実施した調査研究等の内容をご紹介しますとともに、国際交流や国際会議・学会等での発表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. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究.....	1
1. 地下空洞型処分施設機能確認試験.....	1
2. 諸外国の極低レベル放射性廃棄物の廃棄物確認技術等に関する調査.....	3
3. 諸外国の低レベル放射性廃棄物埋設施設の設計に係る調査.....	5
4. その他の管理処分に関する調査研究.....	7
II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究.....	9
1. 処分システム工学確証技術開発.....	9
1-1 事業の全体概要 .....	9
1-2 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック.....	11
1-3 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材.....	15
1-4 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築.....	19
1-5 モニタリング関連技術の整備.....	23
2. 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発.....	27
2-1 事業の全体概要 .....	27
2-2 地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発－実証試験.....	28
2-3 地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発－回収可能性の 維持についての検討 .....	35
3. 沿岸部処分システム高度化開発.....	39
4. TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発.....	44
4-1 事業の全体概要 .....	44
4-2 ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上.....	46
4-3 炭素 14 長期放出挙動評価.....	49
4-4 ナチュラルアナログ調査.....	52
4-5 人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア評価の初期条件の設定.....	58
4-6 ガス移行連成挙動評価手法の開発.....	64
5. 搬送・定置設備の設計フローの構築及び概念設計.....	68
6. 諸外国等における地層処分事業に係る社会科学的研究に関する調査.....	70
7. ハル・エンドピースの地層処分に向けた廃棄物データの整備に関する 研究計画の検討 .....	72
8. 先進的核燃料サイクル技術の地層処分概念への影響検討.....	73
9. 理解促進活動の視点等を組み込んだ研究開発方法論の検討.....	75
III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	77
1. 放射性廃棄物海外総合情報調査.....	77
2. 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査.....	79
3. 安全規制及び安全基準に係る内外の動向調査.....	83
4. 福島第一原子力発電所事故で発生する廃棄物等の処理処分に関する 検討 .....	85

5. その他の放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	86
IV. 国際交流 .....	87
V. 資料 .....	89
1. 講演会・セミナー等 .....	89
2. 論文投稿、学会発表等 .....	90
3. 刊行物 .....	96
4. ホームページへの海外最新情報の掲載.....	97
5. 委員会一覧 .....	102

# 1. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

## 1. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

### 1. 地下空洞型処分施設機能確認試験

#### ◇事業の概要

原子力発電所等の運転及び解体に伴って発生する低レベル放射性廃棄物中には、埋設時点の放射能濃度がコンクリートピット処分対象廃棄物に比べ2オーダー程度高い廃棄物が存在する<sup>1)</sup>。

このため、これら廃棄物については、公衆との離隔距離を確保し、かつ、長期にわたり放射性物質の移行抑制を図るため、地下70m以深に設置した圧縮ベントナイト（以下、「低透水層」という。）等の人工バリアを備えた施設に埋設すること、また、施設閉鎖後は、施設の長期的な安定性の見通しを得るため、300～400年程度、モニタリング等の能動的管理を実施することが想定されている<sup>2)</sup>。

これらを背景とし、本事業では、平成27年度から5年間程度の期間で、平成26年度までに構築した実規模施設も活用し、埋設施設の閉鎖後の長期的な管理に資するため、人工バリアや周辺岩盤の長期に亘る機能確認方法の確立を目的とした検討を実施する。以下に平成28年度の成果を記す。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

#### ◇平成28年度の成果<sup>3)</sup>

##### (1)機能確認試験計画の検討

埋設施設が想定通りに機能していること、また、埋設施設の構造安定性の早期低下や施設浸入水量の増加に繋がる兆候の有無を確認するため、再冠水過程を含む埋設施設閉鎖後の300～400年間程度を対象に、埋設施設の力学挙動やセメント系人工バリア等（低拡散層、コンクリートピット、吹付けコンクリート）の変質についてシミュレーション解析等を実施した。また、人工バリア等の挙動をその性能/機能を極力阻害せず、長期使用性（センサー部に電気・電子部品を含まず、電源不要）に優れ、分布計測も可能な計測技術として、光ファイバーセンサーを選定し、その耐久性等の室内試験を実施した。これらの結果を踏まえ、実規模施設を活用した機能確認試験計画（案）を策定した。

##### 1)埋設施設挙動のシミュレーション解析

再冠水に伴う低透水層の膨潤変形および膨潤圧によるセメント系人工バリアへの影響に着目し、処分坑道横断面全周から地下水が均等に施設に浸入するケース（参照ケース）、低透水層までの距離が短い埋設施設の底部1か所からのみ地下水が浸入し低透水層が偏膨潤するケース（比較ケース）について、施設に残留する気相の影響を考慮した解析を実施した。

その結果、参照ケース・比較ケース共、低透水層の膨潤に伴う、セメント系人工バリアの性能低下の可能性はないが、比較ケースで、低透水層底部の膨潤によりセメント系人工バリアが上方に5cm程度変位する可能性があることが示唆された。

また、上記の解析結果を踏まえ、1区画（15m）毎に分割打設され、施工目地を有する総延長120mのセメント系人工バリアをモデル化し（図-1参照）、処分坑道長さ方向で、底部低透水層または側部低透水層（片側のみ）が局所的に膨潤した場合の低拡散層に生じる引張応力、施工目地の目開き量を評価した。

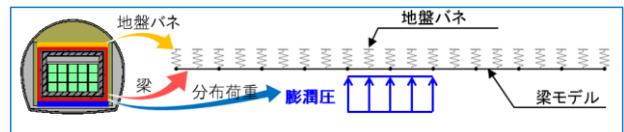


図-1 処分坑道の長さ方向の解析モデル

その結果、偏膨潤位置が処分坑道長の中央の場合で、偏膨潤する範囲が30m、60mの場合には、低拡散層の引張強度（ $4.44\text{N/mm}^2$ ）を超える引張応力が発生し（図-2参照）、ひび割れが発生する可能性があることが確認された。

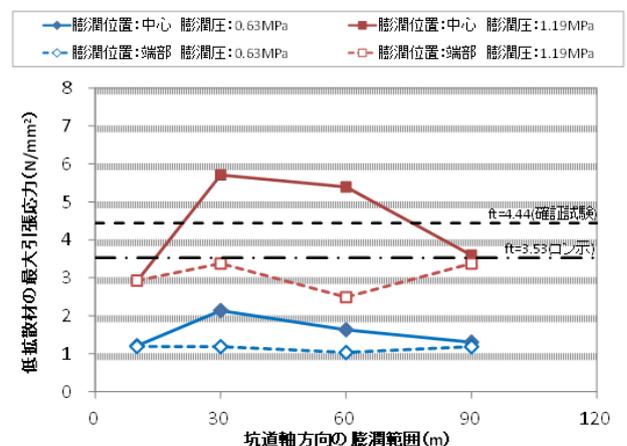


図-2 低拡散層の引張応力（側部偏膨潤時）

また、この場合、施工目地の合計目開き量が 11mm (側部) ~12mm 程度 (底部)、目地一箇所当たりで最大 3mm 程度発生する可能性があることが確認された。

2) セメント系人工バリア等の化学的変質

低透水層の偏膨潤や埋設施設浸入水量の増加等に繋がる、吹付けコンクリートの強度低下や空隙増大の可能性等を確認するため、吹付けコンクリートやセメント系人工バリアについて、埋設施設閉鎖後の特性変化について解析を実施した。解析では、EDZ、吹付けコンクリートの水みち (ひび割れ) 及び高硫酸イオン濃度の地下水を考慮しないケース 1 とそれらを考慮するケース 2 について実施した。

その結果、空洞アーチ部の吹付けコンクリートで固相 Ca 濃度の低下が見られたことから、低透水層の偏膨潤は空洞アーチ部に近接する側部低透水層で比較的生じやすいものと考えられた。なお、解析結果は、施工から 12 年程度経過した試験空洞の吹付けコンクリートのコア分析結果と比較的よい一致を示したが、吹付けコンクリートの Ca 溶脱状況が接触する岩盤の拡散係数等に依存するため、解析精度の向上には、岩盤状態をさらに精緻化する必要があることを確認した。

3) 計測方法の検討

埋設施設で想定される塩分・高 pH・放射線の各環境下で光ファイバーセンサーの劣化を促進させ、その機械的・光学的特性の変化を評価するため、市販品の中から選定した光ファイバーを用い、図-3 のフローに従い、試験を開始した。

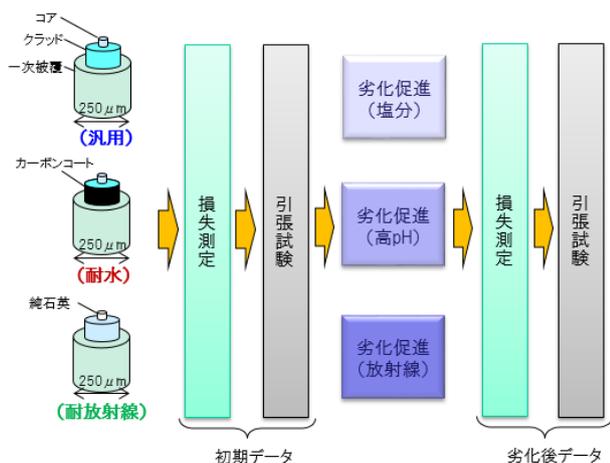


図-3 光ファイバーの試験フロー

4) 機能確認試験計画の策定

埋設施設挙動のシミュレーション解析の結果等を踏まえ、再冠水過程で最も特性が変化する低透水層に着目し、低透水層の偏膨潤やそれに伴うセメント系人工バリアへの影響を光ファイバーセンサーにより確認するための試験計画を検討した。試験実施場所は、既設計測器の活用が可能なこと、将来の実処分施設や地下模擬処分施設での機能確認の見通しを直接的に確認し易いこと等から実規模施設とし、光ファイバーセンサーによる、低拡散材の既存ひび割れ幅の微小変動の計測、低拡散材やコンクリートピットのひずみ分布計測、長距離伝送実証等の計画案を策定した。

(2) 実規模施設の地震時挙動等の評価

底部低透水層の沈下量や周辺岩盤の変位量等の計測を実施し、施設構造等が安定していることを確認した。セメント系人工バリアについてもひび割れ観察を実施し、既存ひび割れの幅増大や進展、新規ひび割れ発生のないことを確認した。

また、地震については、本年度、12 回観測したが、最大加速度は 6.3gal (試験空洞底盤) と非常に小さいものであった。加えて、周辺岩盤の固有振動数 (数 Hz と小さい) に近い入力地震動を用いた地震応答解析を実施し、実規模施設が周辺岩盤の変形に追従した動きをする傾向はあるものの、低振動数の地震動が実規模施設の振動特性に与える影響は小さいことを確認した。

- 1) 電気事業連合会、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、平成 27 年 2 月 12 日 (平成 28 年 8 月 23 日一部改訂)
- 2) 原子力規制委員会決定、炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について、平成 28 年 8 月 31 日
- 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 28 年度 管理型処分技術調査等事業 地下空洞型処分施設機能確認試験報告書、2017

1. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

2. 諸外国の極低レベル放射性廃棄物の廃棄物確認技術等に関する調査

◇事業の概要

本調査では、トレンチ処分対象廃棄物の廃棄物確認方法の整備に資するため、諸外国の極低レベル放射性廃棄物に対する廃棄物確認制度や廃棄物確認技術の調査・整理を目的として、表-1 に示す国・処分場を対象に、諸外国の極低レベル放射性廃棄物に関する以下の調査を実施した。

- ・ 廃棄物確認に関する制度の調査
- ・ 廃棄物確認に関する実施方法の調査
- ・ 廃棄物確認技術に関する調査
- ・ 我が国のトレンチ処分対象廃棄物の放射能濃度確認における、技術的な重要事項の整理

表-1 調査対象国及び処分場

調査対象国	処分場等
フランス	モルヴィリエ処分場
イギリス	クリフトンマーシュ処分場
スウェーデン	フォルスマルク発電所内埋立処分場
フィンランド	オルキルオト処分場

なお、本事業は、原子力規制委員会原子力規制庁の委託により実施したものである。

◇平成 28 年度の成果

(1) 廃棄物確認に関する制度の調査

調査対象国における極低レベル放射性廃棄物の廃棄物確認または廃棄物受入れに関する規制要件について調査し、規制要件が記載された関係法令とその概要、調査対象国における廃棄物区分について整理した。整理した結果の一例を表-2 及び表-3 に示す。

表-2 イギリスにおける廃棄物確認に関する制度の調査結果

法律	政令	執行機関
1965 年原子力施設法 (NIA65)	1971 年原子力施設令 (SI 1971/381)	ONR
1993 年放射性物質法 (RSA93)	イングランド及びウェールズでは 2010 年環境許可規則 (EPR10)	EA, SEPA 等

表-3 スウェーデンにおける廃棄物区分の調査結果

名称	定義	処分先 取り扱い時の条件	廃棄物の例
高レベル廃棄物 (HLW)	・使用済燃料 ・熱出力 >2 kW/m <sup>3</sup> ・半減期 31 年超の長寿命核種を相当量含む	使用済燃料処分場 (SKB 社施設; 2011 年に立地・建設許可を申請。安全審査中)	・使用済燃料を封入したキャニスタ
長寿命低中レベル廃棄物 (LLW-LL)	・半減期 31 年超の長寿命核種を相当量含む ・長寿命核種の含有量が所定の制限値 (=既存の処分場 SFR の許可条件で設定されている値) を超えるもの	長寿命廃棄物処分場 (SFL, SKB 社の将来施設)	・炉内構造物 ・BWR 制御棒
短寿命中レベル廃棄物 (ILW-SL)	・半減期 31 年未満の短寿命核種を多く含む ・廃棄体線量率 < 500 mSv/h ・長寿命核種の含有量が所定の制限値 (=既存の処分場 SFR の許可条件で設定されている値) を超えないもの	短寿命廃棄物処分場 (SFR, SKB 社施設) ・輸送時において、閉じ込めに関する要件を満たす特別輸送容器が必要	・原子炉浄化系統のイオン交換樹脂
短寿命低レベル廃棄物 (LLW-SL)	・半減期 31 年未満の短寿命核種の含有量が少ない ・廃棄体線量率 < 2 mSv/h ・長寿命核種の含有量が所定の制限値 (=既存の処分場 SFR の許可条件で設定されている値) を超えないもの	短寿命廃棄物処分場 (SFR, SKB 社施設) ・輸送時において、遮蔽対策が不要	・イオン交換樹脂 ・スラッジ/フィルター助剤 ・金属腐蝕体
短寿命極低レベル廃棄物 (VLLW-SL)	・半減期 31 年未満の短寿命核種の含有量が少ないもの ・廃棄体線量率 < 0.5 mSv/h ・長寿命核種の含有量が限定的であるもの	地表埋立て (shallow land burial)	・布地、プラスチック、紙 ・空気フィルター ・金属廃材、ケーブル類
クリアランス廃棄物	・放射性核種のクリアランス規程を満たすもの	-	-

(2) 廃棄物確認に関する実施方法の調査

調査対象処分場について、規制機関や埋設事業者がそれぞれ行う、廃棄物確認の内容を調査した。廃棄物確認の内容としては、廃棄物の確認項目、確認内容、判断基準、(全数確認や抜き取り確認などの) 確認頻度やその設定根拠について調査し、整理を行った。また、廃棄物発生者と埋設事業者が同一である場合、廃棄物の特性に係るデータの信頼性を担保するための実施体制や実施内容についても調査し、整理を行った。整理した調査結果の一例を表-4 に示す。

表-4 フィンランドにおける廃棄体確認技術に関する調査結果

実施者/時期	確認項目	確認内容	判断基準	確認頻度
TVO 社 / 貯蔵または処分のため先立ち	・放射エネルギー ・表面線量率 (その他の確認項目については不明)	・パッケージ化された廃棄物中の重要な核種の放射エネルギー ・廃棄体の表面線量率	2000 年の STUK 文書において、廃棄物中の重要核種毎の放射エネルギー上限や表面線量率の基準の情報が記載されているが、TVO 社による資料は非公開のため不明	処分のため先立ち、発電所において処分される廃棄体全数を検査 (処分場での検査は無し)

(3) 廃棄物確認技術に関する調査

調査対象処分場における放射性廃棄物の評価対象核種のうち、H-3、C-14、Cl-36、Ca-41、Co-60、Ni-63、Sr-90、Cs-137、Eu-152、Eu-154 及び全 α 核種の汚染形態 (表面汚染、放射化等)、核種ごとの放射能濃度の評価方法やその設定方法を調査した。また、評価方法や設定方法に関する規制機関の妥当性評価の有無を調査した。妥当性評

備を行っている場合は、妥当と判断した根拠を調査し、妥当性評価を実施していない場合は、実施していない理由を調査した。さらに、(2)で調査した廃棄物の確認項目のうち、有害な空隙、耐埋設荷重及び表面線量当量率が含まれている場合は、これらの項目を確認するための具体的な方法、判断基準及びその設定根拠について整理した。整理した調査結果の一例を表-5に示す。

表-5 フランスにおける廃棄物確認技術に関する調査結果

試験対象となる廃棄体	試験項目	試験方法	備考
全廃棄体	表面汚染	ISO7503に準拠	
	線量率	・国際標準または分析機関の手法	・廃棄物発生者が申告した値との比較 ・輸送に関する規制による判断基準： $<2\text{mSv/h}$
・廃棄体受入れ時の検査にて不具合が認められた場合 ・これまで十分に検証されていない廃棄体	非破壊検査 ガンマ線スペクトロメトリー	・校正済みの機器の使用 ・廃棄体の回転 ・十分な計測時間 ・国際標準または分析機関の手法	・放射線リスクを考慮し、スケールアップファクターの設定は行われない。 ・受入検査時の輸送に関する規制による判断基準： $<2\text{mSv/h}$
	非破壊検査 中性子測定	・国際標準または分析機関の手法	・中性子を放出する核種の存在が疑われる場合
	破壊検査 液体シンチレーション	・H-3とC-14を対象とする。 ・脱ガスと気泡の捕獲	・作業者に対する潜在的影響が疑われる場合
	破壊検査 放射線化学分析	・化学的分光分析 ・ガンマ線スペクトロメトリー ・国際標準または分析機関の手法	
	非破壊検査 内視鏡観察	・充填（気泡率）、閉じ込め（廃棄物の位置、コンディショニング）の確認	・空隙の最小化と密度の最大化 ・ドラム缶や充填処理が行われた金属容器等の密閉型の廃棄体では、空隙率は5%以下（隅角部は3%以下）
破壊検査 均質性の管理	均質性の確認		
破壊検査 内部構造を持つ廃棄体に関する管理	廃棄物の位置、気泡率、割れなどの確認		

(4) 我が国のトレンチ処分対象廃棄物の放射能濃度確認における、技術的な重要事項の整理

技術的な重要事項の整理に当たっては、調査対象国の極低レベル放射性廃棄物の定義を確認した上で、すべての対象国の極低レベル放射性廃棄物が、概ね我が国のトレンチ処分対象廃棄物相当にあたることを確認し、放射能濃度確認における技術的な重要事項については、処分場ごとに以下の項目について整理を行った（表-6参照）。

- ・廃棄物確認に関する制度
- ・廃棄物確認の実施方法
- ・廃棄物の特性データの信頼性
- ・放射能濃度の評価方法
- ・有害な空隙、耐埋設荷重、表面線量当量率

廃棄物発生者と埋設事業者が異なるフランス及びイギリスの場合には、埋設事業者による放射

能濃度の確認は、廃棄物発生者から申告された情報に不整合などがある場合やこれまで十分に検証が行われていない廃棄体などの場合に補完的な位置づけで行われている。これらの例では、ガンマスペクトロスコーピーなどを用いて、放射能濃度の確認・検証が行われているため、廃棄物発生者により放射能濃度が正確に評価されること、核種に関する適切な情報が提供されることが重要であると考えられる。

廃棄物発生者と埋設事業者が同じであるスウェーデン及びフィンランドの場合には、同じ組織の異なる部門が廃棄体の作成、処分を行うことになるため、社内に適切な品質管理体制を持つことが重要である。また、定期的に外部の第三者機関によるレビューを受けるなどして、品質管理体制などが適切に運用されているかなどの確認を受けることも必要であると考えられる。

表-6 調査対象国の処分場の状況（抜粋）

対象処分場	モルヴィエ処分場（フランス）	クリフトンマーシュ処分場（イギリス）	フォルスマルク発電所内埋立処分場（スウェーデン）	オルキルト低中レベル放射性廃棄物処分場（フィンランド）
廃棄物確認に関する制度	・環境法典第L542-12条（2016年7月25日改定） ・2016年1月20日付のオープン原の地方官命令（アレテ）第2016-020-0003号	・2010年環境許可規則（EPR10） ・浅地中処分施設：許可要件に関するガイダンス（GRA） ・放射性物質規制：環境原則	・「原子力施設の安全性に関する放射線安全機関の規則及び一般勧告」（SSMFS 2008:1） ※処分段階前まで適用、処分については個別の許可条件にて規定	・「低中レベル放射性廃棄物の処分前管理と原子力施設の廃止措置」（STUK YVL D.4） ・「原子力廃棄物の処分」（STUK YVL D.5）
廃棄物確認の実施方法	規制当局：県地方長官、公害・危険防止局（DPPR） 項目： ①規則の遵守状況 ②処分場敷地中の貯蔵建屋内の廃棄物の確認 判断基準： ①規定事項の遵守 ②輸送に関わる規制に基づく規制きい値 内容： ①県地方長官命令による規定事項及び内部手順等の規則・規定事項 ②輸送容器の表面汚染、廃棄体の線量率、破損 頻度： ①年1回 ②抜き打ち検査（数回/年、2015年は3回） 埋設事業者：放射性廃棄物管理機関（ANDRA） 項目： ①廃棄体の放射線学的検査、目視検査、書類検査 ②非破壊試験、破壊試験 判断基準： ①廃棄物発生者による線量率申告値との整合、事前受入認定書との整合 ②廃棄物受入基準の順守 内容： ①廃棄体の表面汚染、線量率の測定、事前受入認定書との照合、廃棄物追跡明細書、廃棄体の識別ファイルとバーコードの確認 ②非破壊試験：ガンマ線スペクトロメトリー、中性子測定 破壊試験：均質性の検査、内部構造（空隙率等）、廃棄体容器の厚さ、サンプル採取による化学的スペクトロメトリーとガンマ線スペクトロメトリー、H-3、C-14、Rnの脱気試験 頻度： ①受入時全数検査 ②受入時全数検査にて矛盾がある場合、前年の不遵守、新規受入れ	規制当局：環境規制機関（EA） 項目：廃棄物の放射能濃度 判断基準：環境許可規則に準拠 内容：埋設事業者からの処分量等に関する書類の確認、3か月に1回、処分量に関する埋設事業者からの報告、半年に1回程度のサイトでの書類の監査。 頻度：全数 埋設事業者：SUEZ社 項目： ①廃棄物ストリーム、廃棄物の特性評価やパッケージ方法など ②廃棄物パッケージの損傷、漏えい、変色、腐食など ③線量率 判断基準： ①申請書との整合（必要な情報が含まれているかどうか） ②目視検査で異常がないかを確認 ③受入基準に準拠 内容： ①廃棄物発生者が提出した申請書の確認（受入前） ②目視検査や線量計で測定（受入時） ③ガンマ線スペクトロメトリーの実施（年に1回程度） 頻度： ①全数 ②全数 ③代表的なサンプル	規制当局：放射線安全機関（SSM） 項目：廃棄体の数、核種含有量、廃棄物データに関する情報 判断基準：許可条件に準拠 内容：許可申請書の記載内容を確認（処分前）、処分後も定期的に作業過程の監査を実施している（廃棄体の放射線測定は実施していない）。 頻度：全数 埋設事業者：フォルスマルク発電会社（FKA社） 項目： ①表面線量 ②放射能濃度 判断基準： ①廃棄物の表面線量が0.3 mSv/h以上ものを除く（製造時）、廃棄体の表面線量が0.5 mSv/h以下（処分時） ②廃棄体の放射能濃度が300 kBq/kg以下（処分時） 内容： ①線量計で測定 ②ガンマ線スペクトロメトリーで測定 頻度： ①全数 ②全数	規制当局：放射線・原子力安全センター（STUK） 項目： 判断基準：許可条件に準拠 内容：廃棄物確認に関するマニュアル等の書類の確認。 頻度： 埋設事業者：テオリス・ヴォイマ社（TVO社） 項目：表面線量 判断基準：表面線量率がピッチューメン廃棄物の場合0.8 Sv/h以下、その他の廃棄物の場合0.1 Sv/h以下 内容：線量計で測定 頻度：全数

1. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

3. 諸外国の低レベル放射性廃棄物埋設施設の設計に係る調査

◇事業の概要

本調査では、諸外国の低レベル放射性廃棄物の埋設施設（一部極低レベル放射性廃棄物の埋設施設を含む）の設計について調査・整理することを目的とし、表-1 に示す国・放射性廃棄物の埋設施設を対象に、以下の調査を実施した。

- ・ 処分対象となる放射性廃棄物に関する調査
- ・ 埋設施設の設計及びその効果に対する調査
- ・ 埋設施設の設計の変遷に関する調査
- ・ その他（設計の選定における利用可能な最善の手法の活用、及び設計に起因するトラブルに関する事例の調査）

表-1 調査対象国及び埋設施設

調査対象国	処分場等（対象廃棄物）
米国	WCS テキサス処分場 （低レベル放射性廃棄物）
英国	低レベル放射性廃棄物処分場 （低レベル放射性廃棄物）
フランス	オープン処分場 （低レベル放射性廃棄物）
	モルヴィリエ処分場 （極低レベル放射性廃棄物）
スウェーデン	フォルスマルク発電所内埋立処分場 （極低レベル放射性廃棄物）

なお、本事業は、原子力規制委員会原子力規制庁の委託により実施したものである。

◇平成 28 年度の成果

(1) 処分対象となる放射性廃棄物に関する調査

各埋設施設の設計及びその効果を理解するうえでの前提となる、各埋設施設で処分されている放射性廃棄物の分類（発生場所、発生源等）、処分量、放射能濃度等について調査し、取りまとめた。

処分対象となる放射性廃棄物には、様々なものが含まれているが、今回調査対象とした埋設施設は、低レベル放射性廃棄物または、極低レベル放射性廃棄物であるため、共通するものとしては、原子力発電所の運転や廃止措置から発生する放

射性廃棄物などが挙げられる。

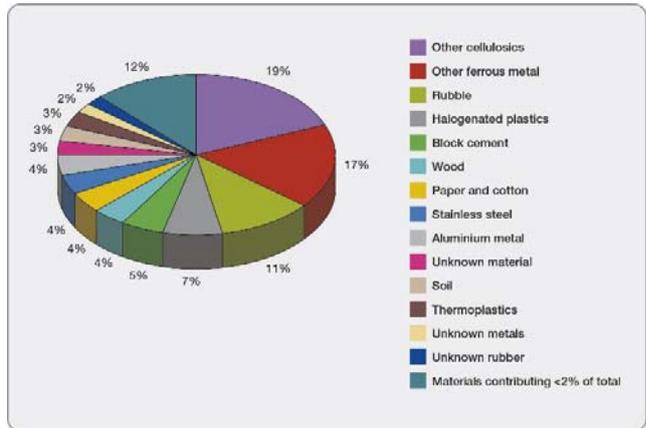


図-1 2008年3月末までに英国の低レベル放射性廃棄物処分場のポルト 8 に設置された主な放射性廃棄物（体積比）

(2) 埋設施設の設計及びその効果に対する調査

調査対象の各埋設施設がどのような設計であるかについて、事業許可申請書、セーフティケース及び規制機関のレビューレポート等を対象に調査した。具体的には、埋設施設の立地場所、使用部材、埋設地の寸法及び埋設する廃棄物の性状について調査した。また、設計が何を考慮して選定したものであり、その設計により期待される効果についても調査した。

調査対象である各埋設施設のうち、英国の低レベル放射性廃棄物処分場では、コンクリートピットの設計、底部ライナー及び覆土の構成・各層の設計、などについて調査した。これらの設計において期待されている効果の主な点としては、浸出液の効果的な排水、雨水の制御、地下水の廃棄物への接触を防ぐことであり、廃棄物の隔離を適切に行うことである。

図-2 に英国の低レベル放射性廃棄物処分場の覆土層の構成、表-2 に米国の WCS テキサス処分場の各設計要素における、設計における考慮事項、性能目標及び具体的な設計内容をまとめたものを示す。

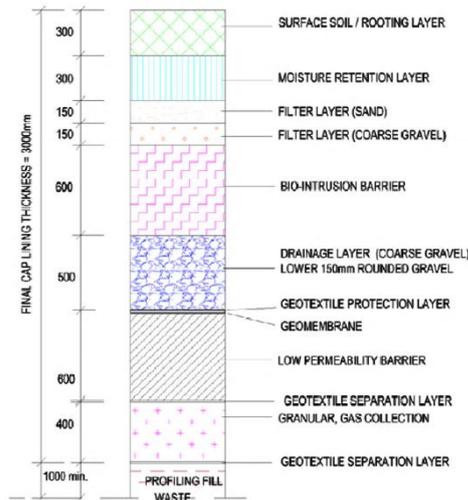


図-2 英国の低レベル放射性廃棄物場の覆土構成

表-2 WCS テキサス処分場（米国）の設計及びその効果に対する調査の整理

設計での考慮事項 (§336.729)	性能目標	具体的な設計内容
(a) サイト設計の主要点は、長期間の隔離を行うことと、サイト閉鎖後の能動的補修を続ける必要性を避けることを目指さなければならない。	<ul style="list-style-type: none"> <li>一般公衆の防護</li> <li>人間侵入</li> <li>閉鎖後の安定性</li> </ul>	立地場所、底面ライナーシステム、側面傾斜ライナーシステム、カバーシステム、モジュラー・コンクリート・キャニスタ (MCC)
(d) カバーは、実行可能な限りで水の浸入を最小限にし、埋設した廃棄物から地表水あるいは浸透水を離し、かつ地表における地質学的プロセスや生物活動による劣化を防ぐように設計しなければならない。	<ul style="list-style-type: none"> <li>一般公衆の防護</li> <li>閉鎖後の安定性</li> </ul>	カバーシステム
(e) 地表の形は、将来において能動的補修を必要とする侵食が生じないような速度と勾配で処分ユニットから外へ地表水を排水できるようにしなければならない。	<ul style="list-style-type: none"> <li>一般公衆の防護</li> <li>人間侵入</li> <li>閉鎖後の安定性</li> </ul>	底面ライナーシステム、側面傾斜ライナーシステム、カバーシステム
(f) 処分サイトは、貯蔵中における廃棄物と水の接触、処分中における廃棄物と現存水との接触及び処分後の廃棄物と現存水あるいは浸透水との接触をできる範囲で最小限にするように設計しなければならない。	<ul style="list-style-type: none"> <li>一般公衆の防護</li> <li>人間侵入</li> <li>閉鎖後の安定性</li> </ul>	底面ライナーシステム、側面傾斜ライナーシステム、カバーシステム、モジュラー・コンクリート・キャニスタ (MCC)
(g) 陸地処分施設の設計は、実行可能な限りにおいて、地震や地震などの地質現象に加えて、ハリケーン、竜巻、暴風雨、洪水の影響を含む地域の気象条件に起因する危険性に対する防護手段を組み込むべきである。	<ul style="list-style-type: none"> <li>一般公衆の防護</li> <li>人間侵入</li> <li>操業安全</li> <li>閉鎖後の安定性</li> </ul>	底面ライナーシステム、側面傾斜ライナーシステム、カバーシステム

(3) 埋設施設の設計の変遷に関する調査

埋設施設の設計が過去に変更されていた場合、その変更の変遷及び変更の理由について調査した。調査結果の1つとして、英国の低レベル放射性廃棄物処分場の例が挙げられる。同処分場では、

当初トレンチにおいて処分を行っていたが、雨水浸透を最低限に抑え、浸出液の管理を改善するために、ポルトでの処分に変更した。

(4) その他（設計の選定における BAT の活用、及び設計に起因するトラブルに関する事例の調査）  
埋設施設の設計を選定するにあたり、「利用可能な最善の手法 (BAT)」を用いているかについて、事業許可申請書、セーフティケース及び規制機関のレビューレポート等を対象に調査した。また、埋設施設において、過去に設計に起因するトラブルが報告されていた場合、そのトラブルの概要、対処方法及びトラブルを踏まえた設計への反映状況について調査した。以下に設計に起因したトラブルとその処理事例を示す。

英国の低レベル放射性廃棄物処分場では、1976年以前に3度の火災が記録されている。これらは、1961年10月、1964年12月及び1967年11月に起こったもので、それぞれ2日から7日間続いた。これらの火災時の風下のモニタリング結果から、一般公衆への浮遊の放射性物質によるリスクはなかったことが示されている。これらの火災以降、1976年までに以下の対応策が導入された。

1. トレンチ全体に火災が広がることを防ぐため、約45mごとに防火帯または防火壁を設置
2. トレンチ内での乾燥した紙類の量を減らすため、紙の廃棄物に対して、紙のバッグに代わり、ポリエチレンのバッグを使用
3. 消防署へ即座に連絡が可能なように、モニタリングのため、赤外線火災検知システムを設置

これらは、トレンチ処分に起因したトラブルとされており、同処分場では、これらも一因となり、トレンチからポルトでの処分方式へと変更が行われた。

## 1. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

### 4. その他の管理処分に関する調査研究

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

#### (1) 大型/角型廃棄体の固形化パラメータに関する研究（フェーズⅡ）

原子力発電所の廃止措置に伴って発生する L2 対象の解体廃棄物のうち大型/角型容器へ収納予定の廃棄物から、材質・形状・発生量を踏まえて設定された代表廃棄物について、改良モルタルを用いた実規模モルタル充填性試験を行い、充填性、空隙量等を評価し、大型/角型容器に適用可能な固形化パラメータを評価・決定した。

#### (2) LLW埋設後管理標準の改定に関する調査

浅地中ピット処分と浅地中トレンチ処分について、廃棄物埋設地における埋設後管理を規定する標準改定案を作成し、標準委員会の承認を得た。中深度処分（L1）については、埋設後管理標準改定の予備検討を行った。

#### (3) 中深度処分（L1）を含むLLW埋設処分に係る安全評価手法標準の改定に関する調査

浅地中ピット処分と浅地中トレンチ処分に係る安全評価手法標準の改定案を作成し、標準委員会の承認を得た。中深度処分（L1）については、安全評価手法標準改定の予備検討を行った。

#### (4) 地下空洞型処分施設の実施工に必要な技術情報の整備

手引き書の作成に向けて、本年度は、底部低透水層を対象に、実施工上の要点及び背景情報等の整理を実施した。

(This page(p8) is intentionally kept blank.)

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

### 1. 処分システム工学確証技術開発

#### 1-1 事業の全体概要

我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って放射性廃棄物が既に発生しており、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（ガラス固化体）については、地層処分に向けた取組が行われており、処分技術の信頼性向上に関する基盤技術の開発が、最終処分のサイト選定プロセスを考慮して段階的に実施されている。

これまでに、ガラス固化体のオーバーパックへの封入・検査技術、緩衝材の施工技術及びモニタリング技術等の要素技術について、必要となる基盤技術が整備されてきた<sup>1)</sup>。今後、さらなる処分技術の信頼性向上のためには、実際の深部地下環境などを活用した試験を実施して、工学的な要素技術の信頼性を高める必要がある。

さらに、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえ、自然災害である巨大地震や巨大津波等に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の整備も喫緊の課題となっている。

本事業では、上記の状況を踏まえ、平成 25 年度から 5 年程度の期間で処分場の操業期間中における人工バリアの製作・施工技術及びモニタリング技術等の工学技術を、地下研究施設を活用して確証していくとともに、自然災害に対する処分場操業期間中の安全対策の整備を行う<sup>2)</sup>。

本事業は以下の 5 つの研究開発項目で構成されている。

- 1) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック
- 2) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材
- 3) 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築
- 4) モニタリング関連技術の整備
- 5) 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発

#### (1) 人工バリアに関するこれまでの研究開発成果

原環センターでは平成 24 年度までに、オーバーパックと緩衝材の製作・施工およびモニタリング機器に関する要素技術の開発を実施してきた<sup>1)</sup>。オーバーパックについては、溶接や非破壊検査技術の適用性についての検討を行い、溶接金属の組成によっては溶接部で選択的な腐食が生じること、溶接部にはボイドなどの溶接欠陥が生じる可能性があることを確認した。緩衝材については、施工方法や施工品質についての検討を行い、施工時の地下水の量によっては、緩衝材の流出が生じる可能性があることを確認した。モニタリングについては、無線伝送技術の開発などを実施してきた。

#### (2) 人工バリアの健全性を判断するための指標

オーバーパックや緩衝材の健全性は、指標に基づいて判断される。人工バリアの設計から処分場閉鎖までの概略図を図-1 に示す。人工バリアの品質／健全性が確保されていることを判断

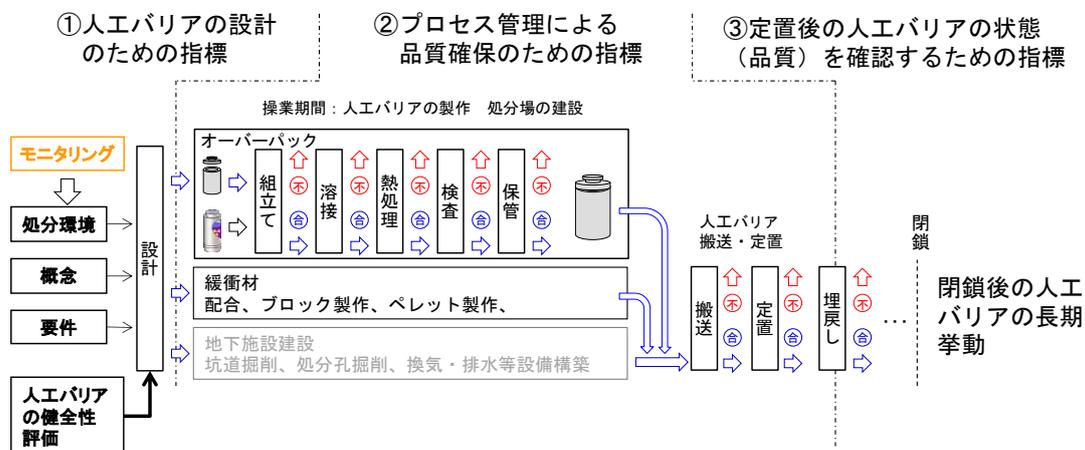


図-1 人工バリアが健全であることを判断するために必要な指標

するためには、以下の3つの指標を設定する必要がある。

- ①人工バリアの設計のための指標
- ②プロセス管理による品質確保のための指標
- ③定置後の人工バリアの状態（品質）を確認するための指標

①は、オーバーパックと緩衝材の設計のための指標であり、定置後の材料劣化を考慮して設定される。②は、仕様通りに人工バリアが製作されて、定置されたことを判断するための指標である。③は、定置後の人工バリアが設計条件の範囲内にあることを確認するための指標である。

(3) 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発

平成24年度に、自然災害を起因とするリスク事象として7つの技術開発課題を抽出した。平成25年度からは、それらの課題の中で優先度が高いと判断した①施設計画技術、②人工バリアの限界性能等について、主に火災事象に対する安全確

保対策を提示した。平成27年度は、これまでの研究開発成果の取りまとめを実施し、平成28年度は学会等で研究開発成果の普及を行った。

(4) 5カ年の研究開発目標

平成27年度に更新した処分システム工学確証技術開発の5カ年の開発目標を表-1に示す。平成24年度までの研究開発成果を踏まえて、i)～iii)では、人工バリアが健全であることを判断するための指標の提示、iv)では、人工バリアの性能確認のための全体枠組みの具体化についての検討を実施している。

- 1) 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 高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素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
- 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28年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発報告書、2017

表-1 各開発項目の年度ごとの実施内容及び目標（平成27年度更新）

	H25	H26	H27	H28	H29
i)人工バリア品質／健全性評価手法の構築 オーバーパック	・判断指標の抽出 ・健全性評価モデル案の作成 ・研究開発計画策定	・判断指標に影響する劣化事象の抽出 ・地下施設での腐食試験開始	・破壊評価に基づく限界欠陥寸法の提示 ・材料因子と腐食現象の関係	・10年間の溶接部の浸漬試験結果の提示 ・強度評価に基づく溶接部厚さの提示	・閉じ込め機能を担保する設計、製作、検査方法の提示 ・指標、許容範囲の提示
ii)人工バリア品質／健全性評価手法の構築 緩衝材	・緩衝材の品質評価項目の抽出 ・研究開発計画策定	・エロージョンによる性能劣化事象（流入量、液種）の定量化	・ウォーターマネジメント（人工注水、グラウト等）の実施方法・課題の提案	・緩衝材の設計・施工仕様策定に資する指標範囲の提示	
iii)人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築			・研究開発計画策定 ・遠心模型試験による加速試験データの取得 ・要素試験による解析パラメータの取得	・遠心模型試験と数値解析結果の比較による、データの検証および長期挙動評価手法としての課題の提示	・長期挙動評価の方法論、および検証データの提示
iv)モニタリング関連技術の整備	・性能確認モニタリングの課題抽出 ・研究開発計画策定	・操業安全等に関するモニタリングの課題抽出	・地下調査施設による地中無線モニタリング技術の確証	・性能確認モニタリング結果反映方法提案	・実現可能な技術選択肢による人工バリア等のモニタリング計画の例示
v)自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発	・検討手法等の適用性の確認 ・研究開発計画策定	・火災事象に対する人工バリアの健全性の把握	・火災事象に対する施設計画時の制約事項等の提案 ・成果の取りまとめ	・成果普及	

## II. 放射性廃棄物の地層処分にに関する調査研究

### 1-2 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック

#### ◇事業の概要

本事業では、高レベル放射性廃棄物の処分容器（以下、オーバーパック）の健全性評価手法を構築し、オーバーパックが健全であることを判断するための指標を提示することを目的として、オーバーパックの腐食及び強度に関する調査研究を実施している。

腐食については、地下研究施設などを活用した試験を実施して炭素鋼溶接部の腐食に関する試験データを取得している。また、溶接部における局所的な腐食の発生を防止するために、溶接部の残留応力を圧縮に改善するための熱処理条件を解析により取得した。

強度については、溶接欠陥を起点とした破損を防止するために、超音波探傷法により溶接欠陥寸法の定量化及び照射による炭素鋼の脆化量を推定するための検討を実施した。そして、オーバーパックに想定される全ての破損モードの発生を防止するために有限要素解析で破壊評価を実施した。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

#### ◇平成 28 年度の成果

平成 28 年度の成果の概要は以下のとおりである<sup>1)</sup>。

##### (1) オーバーパックの健全性評価手法の構築

構造物の健全性評価では、対象構造物の破損形態（どの部位がどのように破損するか）を想定し、それぞれの破損形態に対して考えらえる破損モード（例えば、腐食による局所的な貫通、延性破壊、脆性破壊など）を抽出して、想定される全ての破損モードに対して、要求される期間中に破損が生じないと判断された場合に対象構造物の健全性が確認されたことになる。

オーバーパックに想定される破損形態は、①欠陥を起点としない破損、②未溶接部を起点とした破損、③溶接欠陥を起点とした破損の3つが想定される。上記の3つの破損形態に対して、操業期間中及び埋設後の破損モードは、それぞれ①塑性

崩壊、延性破壊、腐食割れ、②弾塑性破壊、③脆性破壊が想定される。一般的な機器設計では、疲労も破損モードとして考慮されるが、板厚 190mm のオーバーパックに生じる繰り返しの応力変動は十分に小さい<sup>2)</sup>ため、疲労による破損は考慮する必要はない。

##### (2) オーバーパック溶接部の腐食試験

炭素鋼溶接部の腐食挙動を把握するために、平成 26 年度から国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、JAEA）との共同研究として、幌延深地層研究センター（以下、幌延 URL）の地下 350m 調査坑道でオーバーパック溶接部腐食試験を実施している。

オーバーパック溶接部腐食試験の試験装置の概要を図-1 に示す。長手方向に TIG 溶接部を設けた炭素鋼製の模擬オーバーパック試験体の内部にヒータを設置し、試験体表面温度を 80℃ に設定して継続的に腐食速度を測定している。3 電極式腐食センサーによる腐食速度の測定値と試験開始からの時間の関係を図-2 に示す。試験開始から 300 日程度までは、最大 100 μm/年の腐食速度が測定されたが、試験開始後 300 日以降は 10 μm/年以下の腐食速度になっており、実験室で実施している腐食試験と同程度の腐食速度になった。本試験装置は、平成 29 年度に解体し、試験体表面の分析を実施する計画となっている。

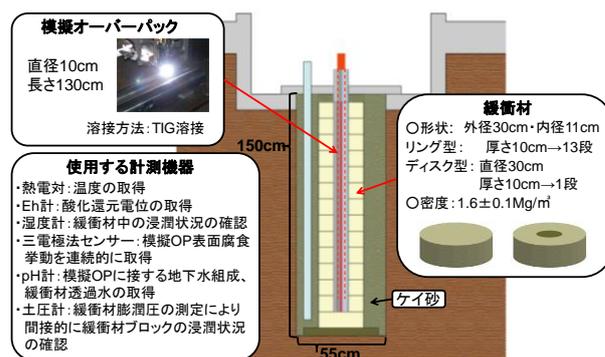


図-1 オーバーパック溶接部腐食試験の概要（幌延 URL）

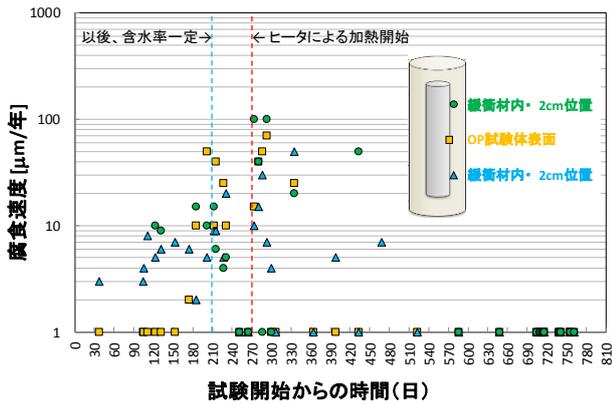


図-2 模擬オーバーパック表面温度と腐食速度の測定結果（幌延 URL における工学規模試験）

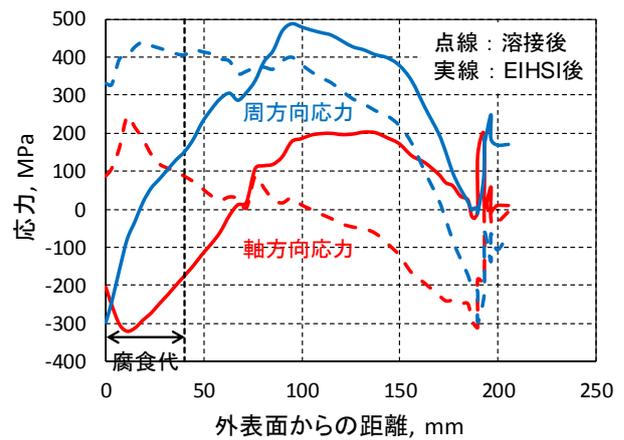


図-4 溶接部の残留応力分布の解析結果（平蓋形状）

実験室規模の腐食試験は、主に JAEA との共同研究として実施している。平成 28 年度は、低酸素雰囲気下での炭素鋼溶接部試験片の 5 年および 10 年間の浸漬試験結果の分析を行った。低酸素雰囲気下における平均腐食速度と浸漬期間の関係を図-3 に示す。試験開始 1 年程度までの腐食速度は比較的速いが、時間の経過とともに腐食速度は低下していることがわかる。浸漬期間 10 年の腐食速度は、オーバーパックの腐食代の設定根拠である  $10 \mu\text{m}/\text{y}$  を十分に下回っており、低酸素雰囲気下では、溶接部が炭素鋼オーバーパックの不均一な腐食の要因とならないことを確認した。

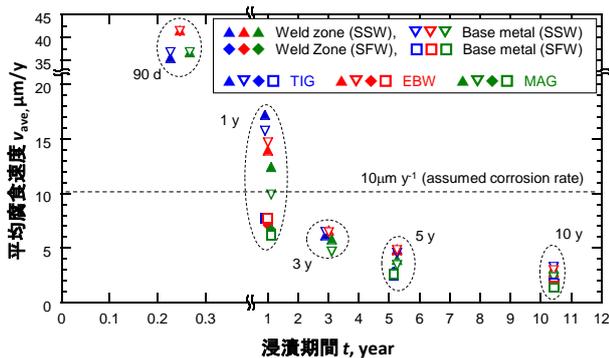


図-3 低酸素雰囲気における平均腐食速度

### (3) 溶接部の残留応力低減解析

溶接部に生じる可能性のある引張の残留応力は、局部的な腐食の発生の駆動力となる。平成 27 年度に有限要素解析で求めた平蓋形状の溶接残留応力分布に対して、腐食代に相当する板厚 40 mm を圧縮応力に改善することを目的として、外面誘導加熱応力改善法 (EIHSI) による残留応力の改善効果を確認した。溶接直後及び EIHSI 後の残留応力分布の計算結果を図-4 に示す。EIHSI 後の軸方向応力及び周方向応力は、表面からそれぞれ 50 mm 及び 20 mm 程度まで圧縮側に改善することができた。周方向応力については、溶接直後の引張残留応力が軸方向応力に比べて大きいため、表面から 40 mm 程度まで圧縮側に改善することが難しかったと考えられる。有限要素解析により実施した溶接部の破壊評価の結果から、必ずしも全層溶接の必要のないことが明らかになったため、部分溶接にすることで溶接直後の引張残留応力を小さくして、EIHSI により腐食代の引張残留応力を圧縮側に改善できる可能性がある。

### (4) 超音波探傷による溶接欠陥寸法の定量化

フェーズドアレイ法 (PhA 法) 全波形収録開口合成法 (FMC-TFM) を用いて溶接欠陥寸法の測定精度や近接した 2 つの欠陥の識別性能を把握するために超音波シミュレーションおよび探傷試験を実施した。

溶接部における欠陥の深さにより寸法や位置の測定精度が変化するため、欠陥深さを表面から約 30mm、50mm として、放電加工 (EDM) によりスリットを付与した溶接試験体を

## II. 放射性廃棄物の地層処分にに関する調査研究

作製した。溶接試験体の断面図を図-5 に示す。EDM スリットの寸法は、深さ 2mm または 5mm、長さ 10mm、間隔 0.3mm の矩形として開先底部に付与した。超音波探傷試験の実施後に試験体の断面を研削して EDM スリットの寸法測定を行った。

フェーズドアレイ法および FMC-TFM 法により欠陥を画像化した結果を図-6 に示す。図中の色は、青色から赤色になるにつれて EDM スリットからの反射波が強くなることを表している。フェーズドアレイ法と FMC-TFM 法の画像化結果を比較すると、フェーズドアレイ法に比べて FMC-TFM 法の方がそれぞれの EDM スリットを区別して検出できていることがわかる。ただし、浅い部分にある EDM スリットの一部は FMC-TFM 法では明確に検出することができなかった。これは、マトリックスアレイプローブを使用したことにより、画像の 1 画素当たりの情報量が低下したことが原因の一つであると考えられるため、今後は、使用するプローブや信号処理方法について最適化する必要がある。

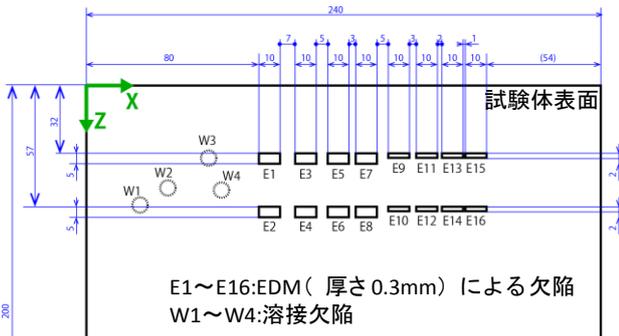
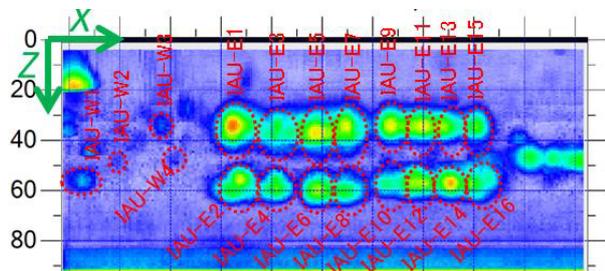
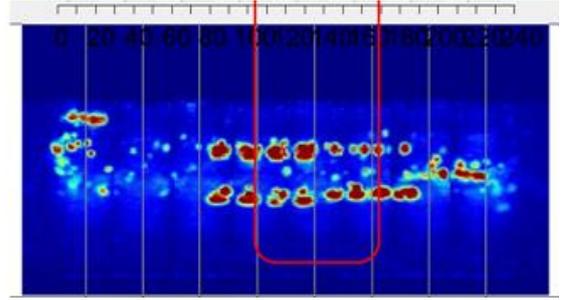


図-5 溶接試験体中の EDM スリット位置



(a) フェーズドアレイ法



(b) FMC-TFM 法

図-6 EDM スリットの画像化結果

### (5) 破壊靱性値の予測に関する検討

オーバーパックの照射条件で破壊靱性値の低下量を予測する手法は存在しないため、破壊靱性値の低下量は、放射線の照射による 1,000 年後の損傷量と硬さの増加量の関係と硬さの増加量と破壊靱性値の低下量の関係から推定する。そのため、照射試験片の分析と解析により損傷量を予測した。

炭素鋼の脆化因子に対する材料組成および照射速度の影響を調べるために、Fe イオンと電子線を試験片に照射し、照射試験片を作製した。試験片は Cu 濃度 0.5wt% の炭素鋼、FeCu 合金、FeMnSiCu 合金を用いた。照射温度は 90℃、照射速度は Fe イオン照射で  $1 \times 10^{-4}$  dpa/s、電子線照射で  $1 \times 10^{-8}$  dpa/s とした。照射量は 0.1 dpa と 1 dpa の 2 条件とした。

照射試験片に対して超微小硬さ試験および 3 次元アトムプローブ分析を行った。硬さの増加量と溶質クラスタの体積率  $V_f^{1/2}$  の関係を図-7 に示す。溶質クラスタの  $V_f^{1/2}$  の増加に対しては、全ての材料で硬さの増加量が大きくなる傾向が認められ、溶質クラスタの形成は硬化に寄与することが確認された。

超微小硬さと破壊靱性値の関係を図-8 に示す。図中の赤線は、最小二乗法により求めた線形近似線である。硬さの増加にともない破壊靱性値の減少が認められた。

照射による炭素鋼の損傷量を予測することを目的として、転位ループおよび銅原子クラスタの平均直径と密度の時間変化を算出した。平均クラスタ直径およびクラスタ密度と損傷量の関係を図-9 に示す。時間の経過とともに平均クラスタ直径は大きくなり、転位ループに比べ銅-空孔集合体の直径が大きくなった。また、時間の経過に

ともないクラスタ数密度は増加した。

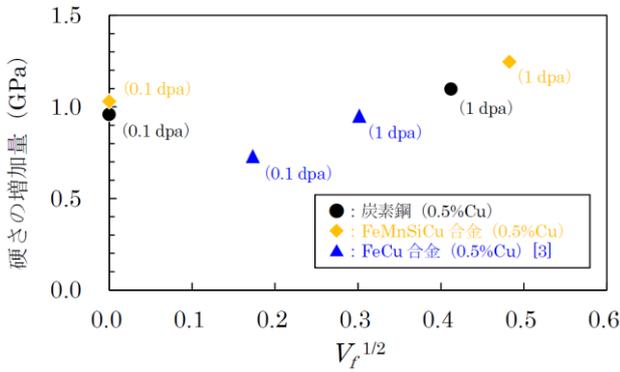


図-7 硬さの増加量と溶質クラスタの  $V_f^{1/2}$  の関係

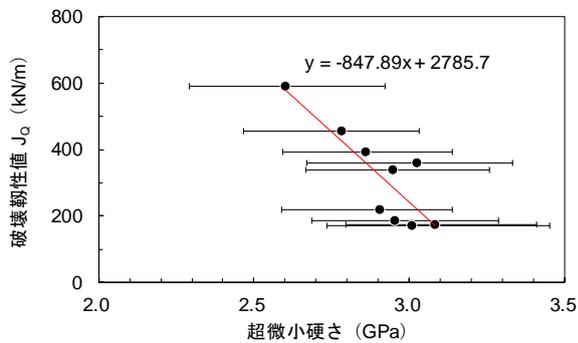


図-8 超微小硬さと破壊靱性値の関係

荷重とした。板厚が 80 mm 以上の場合は、降伏強度によらず参照点は、胴部長手中央部であった。一方、板厚が 70 mm 以下の場合は参照点は、上蓋中心となった。

板厚が小さくなるとともに崩壊発生時の外圧が減少していることがわかる。また、崩壊発生時の外圧は降伏強度にも依存した。降伏強度が  $\sigma_y = 200$  MPa、板厚 50 mm の場合の崩壊発生時の外圧は 39.4 MPa であり、埋設後のオーバーパックに作用する外圧が 10.7 MPa (図中に赤線で表示) とすると、約 3.6 倍程度の裕度があることがわかった。

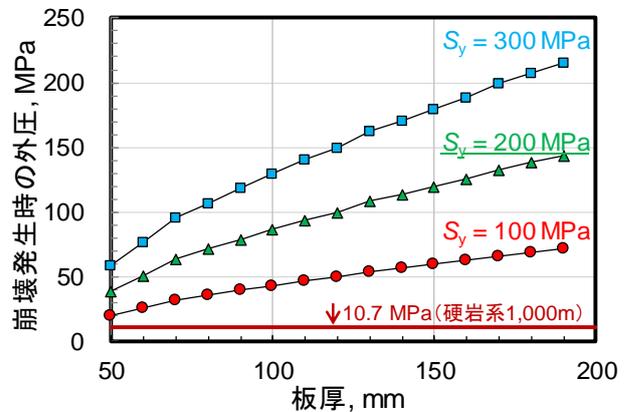
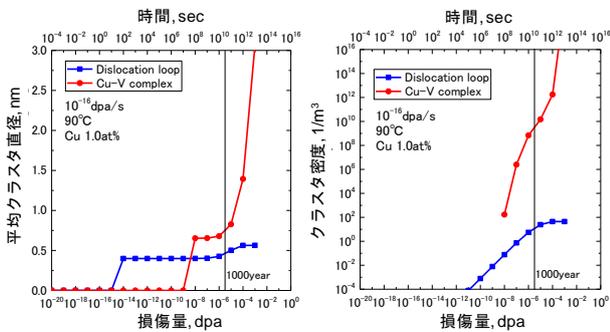


図-10 崩壊発生時の外圧と板厚の関係



(a) 平均直径と照射量依存性 (b) 数密度と照射量依存性  
図-9 欠陥集合体形成に対する照射量依存性

(6) オーバーパックの破壊評価

オーバーパックに想定される破損を防止することを目的として、有限要素解析による破壊評価を実施した。計算結果の一例として、崩壊発生時の外圧と板厚の関係を図-10 に示す。崩壊荷重の算出には、2 倍勾配法<sup>4)</sup>を適用した。2 倍勾配法では荷重と変位の関係を用いるため、荷重には外圧を用い、変位には蓋及び胴体の中央部の変位を用いて崩壊荷重を算出し、小さい方の外圧を崩壊

- 1) 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 28 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発報告書 (第 1 分冊) -人工バリア品質/健全性評価手法の構築-オーバーパック、2017
- 2) 山本陽一、鈴木覚、佐藤伸、伊藤浩二、地震動が地層処分システムの人工作業に及ぼす影響検討、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)、Vol.71、No.4、pp. I\_963-I\_973、2015
- 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 20 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書 (第 2 分冊) -人工バリア品質評価技術の開発 (1/2)、2009
- 4) 日本機械学会、発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2012年版) <第I編 軽水炉規格>、JSME S NC1-2012、2012

## II. 放射性廃棄物の地層処分に關する調査研究

### 1-3 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－ 緩衝材

#### ◇事業の概要

本事業は、再冠水後のベントナイト系緩衝材の健全性が維持されていることを評価する手法の構築、及び品質を確保するための施工技術の検討を目的とし、再冠水過程におけるベントナイトの挙動について、試験と数値解析を行っている。試験は、再冠水時の緩衝材の浸潤、膨潤、化学変質による影響、流出挙動を対象とし、さらに緩衝材の健全性を維持するための工学的対策の効果も対象として行っている。解析的な検討は、再冠水後の緩衝材の状態を評価するための解析と、施工方法による影響、工学的な対策の効果の評価のための解析に取り組んでいる。

試験は、再冠水過程に起こる事象に着目し、長期試験（5～7年間）を含め、平成21年度から継続して実施している<sup>1)</sup>。また、平成26年度からは、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター（以下、幌延URL）の地下施設での緩衝材流出試験を実施している。これらの試験結果は緩衝材の製作・施工技術についての実現性を示す一方、解析的評価のためのモデル構築のために使われる。解析は、施工方法による影響と工学的対策による効果を検討する水理解析、再冠水後の緩衝材の状態を予測する力学解析を行っている。

平成28年度は、緩衝材の密度の均質化、浸潤速度、膨潤挙動、化学変質に関する長期試験のデータを取得するとともに、長期試験の一部を終了し、試験後の緩衝材を解体して密度分布の測定やベントナイトの変質に関する分析を行った。また、緩衝材流出挙動に関する試験を実験室及び幌延URLで実施し、現象の把握と流出防止の対策を検討した。解析的な評価としては、緩衝材流出の原因となる湧水の評価のために、水理解析によって掘削の影響及び工学的な対策の効果について検討した。また、力学解析によって再冠水時の浸潤速度と密度の均質化を対象に再現解析を行い、再冠水挙動後の状態予測のための手法について検討した。さらに、これまでの研究成果及び既往の知見により、緩衝材施工方法に関するデータを整理し、施工方法に關しての新たな提言と課題の抽出を行うため

の検討に着手した。

本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである<sup>2)</sup>。

#### ◇平成 28 年度の成果

##### (1)再冠水期間の緩衝材に関する検討の方針

本事業は、平成 20 年度に計画策定された。再冠水期間に緩衝材の機能に影響を及ぼす現象のうち、本事業での研究対象を以下の 5 つとした。

- ・膨潤
- ・化学変質
- ・地下水浸潤（流入量、液種）
- ・間隙空気の移行
- ・緩衝材の流出

緩衝材の再冠水挙動に係わる試験は、平成 21 年度から行っている。また、実環境での緩衝材流出挙動、対策の効果把握するために、平成 26 年度から幌延 URL において原位置試験を開始した。さらに、再冠水期間の力学挙動に関する試験の結果をモデル化し、解析評価手法に反映し、数値解析によって再冠水後の緩衝材の状態示すことを目標としている。図-1 に示すように、「室内試験」、「地下での試験」、「解析手法による検討」3つの方法によって、現象理解をもとに、状態を予測し、緩衝材機能が低下することに対する対策を検討し、さらにその有効性を確認するという一連の課題に取り組むことを方針とした。

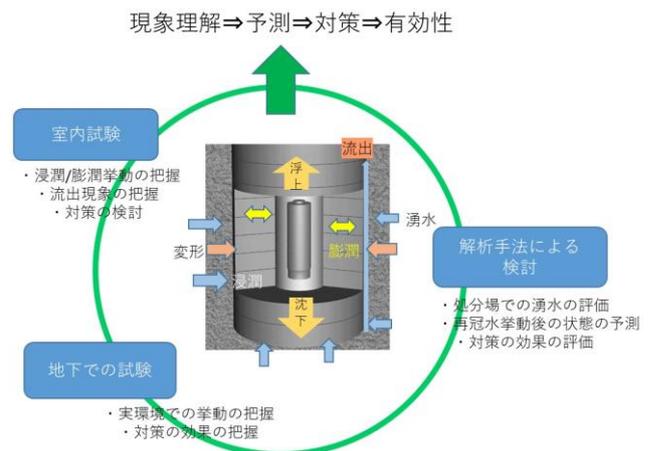


図-1 検討の方針

##### (2)室内試験

室内試験は、再冠水時の緩衝材に係わる事象を対象として、スケール効果を検討するために小型

試験から実規模までのスケールアップした試験を行うこと、および加速せずに実時間での挙動を見ることを方針として行っている。平成 28 年度に行った試験の一覧表を表-1 に示す。表には、各項目の目的と実施状況を示した。地下水浸潤に係わる試験 (I)、及び緩衝材の化学変質 (II) は複数年度にわたる試験を継続的に実施しているが、力学的に平衡に達したと判断できる試験について終了し、解体を実施している。

行われている試験のうち、今年度は、主に流出試験について報告する。

1) 天然バリアの透水性と緩衝材流出の関係取得試験 (III-②)

緩衝材流出に対する処分孔壁面 (界面) の透水性の影響を検討するため、透水性の異なる材料をセルの壁面として流出試験を行った。図-2 に示すような構造のセルを用い、セルの側面に多孔質材料を用いた。供試体は圧縮成形して作成した円柱状のブロックであり、通水液は蒸留水である。

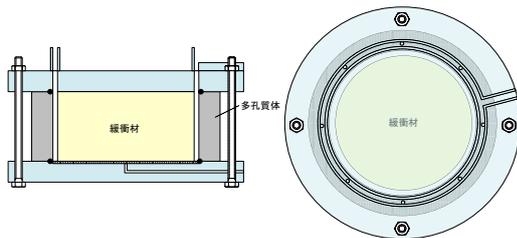


図-2 多孔質材料を用いた緩衝材流出試験セルの概略

セルの側面の透水係数は、処分場を設置するのに適していると考えられる範囲である  $10^{-8}$  m/s と  $10^{-10}$  m/s の 2 ケースとした<sup>3)</sup>。試験の結果を図-3 に示す。2つのケースの試験により得られた総流量と緩衝材流出量の関係は、流速毎に概ね一致しており、セルの透水性が総流量と流出量の関係に及ぼす影響は小さかった。急勾配になっている箇所は、ブロックの周辺の隙間が膨潤してシールされるまでの間に、ブロック表面の低密度領域が洗掘されたために一時的に緩衝材の流出量が増えたためと考えられる。その後は、アクリルセルを用いて取得した結果と概ね同等の勾配となっており、この時点でアクリルセルで観測されたように水みちができた可能性がある。以上の結果から、処分場が設置される程度の透水性を有する岩盤であれば、緩衝材の流出現象が発生する可能性があるとして予測できる。

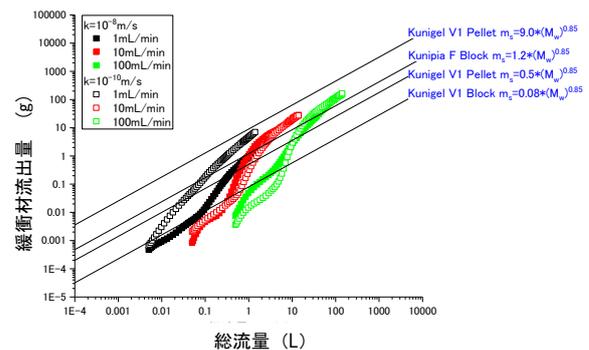


図-3 総流量と流出量の関係に透水性が及ぼす影響

表-1 試験項目と目的

試験項目	目的	実施状況
<b>I. 地下水浸潤</b>		
I-① 密度、応力履歴が異なる供試体を用いた密度均質化試験	初期密度分布の影響	継続・解体
I-② スラリーの圧密試験	膨潤挙動の力学的解釈	継続
I-③ 不飽和浸潤速度取得試験 一密度一定条件一	浸潤速度の測定	継続→加圧
I-④ 不飽和浸潤速度取得試験 一膨潤変形条件一	体積拘束しない場合の膨潤による変位とその速度の測定	継続
I-⑤ 浸潤による間隙空気の移行調査	間隙に閉じ込められた空気の圧力上昇を計測し、破過の可能性を検討	終了/解体
I-⑥ 土槽試験による二次元膨潤挙動の評価	施工に起因する膨潤挙動、密度均質化の検討	終了/解体
<b>II. 緩衝材の化学変質</b>		
II-① Ca型化する時期が膨潤挙動に及ぼす影響	Ca型化の起こる時期、及び順序の及ぼす影響	継続
<b>III. 緩衝材流出</b>		
III-① 水みちの断面積と乾燥密度の関係取得試験	水みちの断面積と流速・乾燥密度の関係取得	新規
III-② 天然バリアの透水性と緩衝材流出の関係取得試験	界面の透水性と流出挙動の関連	新規
III-③ 工学規模緩衝材流出試験	工学的対策の確認 ・ベレット充填	終了/解体
III-④ 高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験	高水圧下での緩衝材流出現象の定量評価	新規
III-⑤ II-② 緩衝材の破過圧と膨潤圧の関係の取得	・膨潤圧と破過圧の関係の取得 ・Ca型、Fe型などの変質の影響	新規

## II. 放射性廃棄物の地層処分にに関する調査研究

### 2) 工学規模緩衝材流出試験 (III-③)

内径 560 mm、高さ 600 mm のセルを使用した試験 (工学規模流出試験と呼ぶ) により、緩衝材流出に対する工学的対策として隙間にペレットを充填する方法の有効性について検討を行った。

膨潤後の平均乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$  程度となるように作成したブロックとアクリルセルの間の幅 30 mm の隙間をペレットで充填した。充填には、最大粒径 20 mm 程度のもものと 1~3 mm 程度の小粒径のものを使用した。ペレット部の乾燥密度は  $1.47\text{Mg/m}^3$  である。通水液は蒸留水である。

図-4 に試験開始前と試験開始後 6 日後の外観を示す。6 日後にはペレット表面は全体的に湿潤し、水みちがはっきりと見える。この後、180 日間通水が続いたが、上面の濡れの程度も水みちの形状もほとんど変化がなかった。

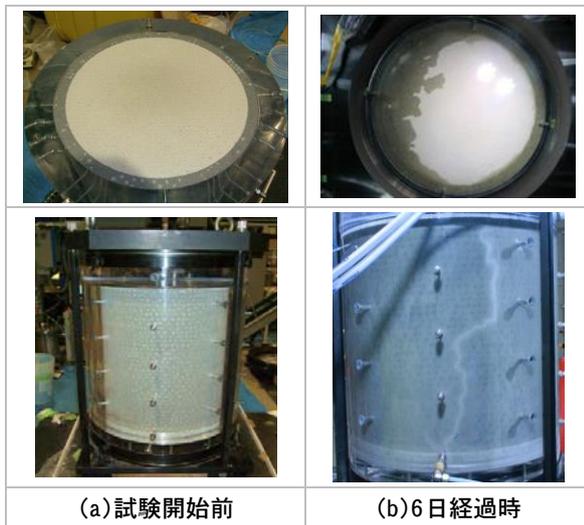


図-4 工学規模の緩衝材流出試験 (ペレット充填試験)

図-5 に緩衝材流出量と給水量の関係を示す。図には比較のために、他のケースも併せて示している。ペレットのケースは、対策なしのケース比べ、同じ給水量に対して流出量が多いが、これはペレットが充填されていることにより、隙間の容積が小さくなったために、緩衝材が切削されやすくなり、流出量が増えたためと考えられる。

さらに、ペレットのケースは、他のケースに比べて流出量と給水量の関係の勾配が緩いことが分かる。このことは、緩衝材の流出に対する長期的な抑制対策としてペレット充填が効果的であることを意味し、さらにペレットが周囲にあることによって、先にペレット部分が切削されるため、

緩衝材のブロック (本体) が保護されるという利点もあり、工学的対策として有効だと言える。

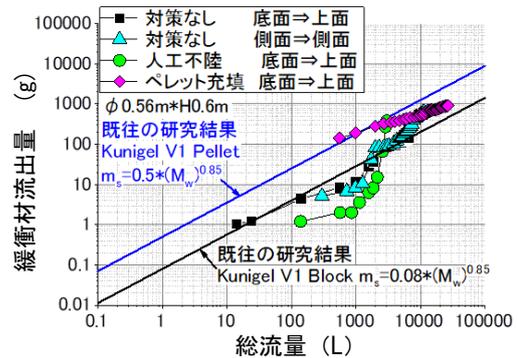


図-5 緩衝材流出量と給水量の関係

### (3) 地下研究施設における緩衝材流出試験

本研究は実際の処分孔での緩衝材流出現象の把握のために実施している。平成 28 年度は、長期試験 (約 5 か月)、及び体積拘束条件での短期試験 (約 1 か月) を行った。図-6 に試験設備の概要を示す。

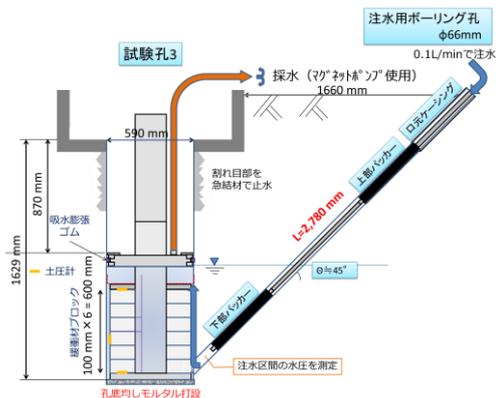


図-6 試験設備の概要

全てのケースで  $0.1\text{L/min}$  の流速で、緩衝材下部に向けて斜めに設置したボーリング孔から注水して試験を行った。緩衝材ブロックの乾燥密度は  $1.9\text{Mg/m}^3$  (周囲 2 cm の隙間閉塞後に  $1.6\text{Mg/m}^3$ ) とし、緩衝材の 8 分割の扇型のブロックを使用し、厚さ 10 cm のものを 6 段積み上げて試験孔に定置した。この大きさは実規模の 1/8 の大きさにあたり、前項で示した工学規模の室内試験とほぼ同じ直径である。

図-7 に体積拘束せずに長期に行った試験の水圧の変化を示す。ごく初期に水圧が上昇しているが、40 kPa に上がったところで、水圧は下降し、その後ほぼ一定の水圧を保っていた。水圧の下降

は、水みちの発生による破過を意味すると考えられる。色水の注水によって、水みちを確認することができた（図-8）。

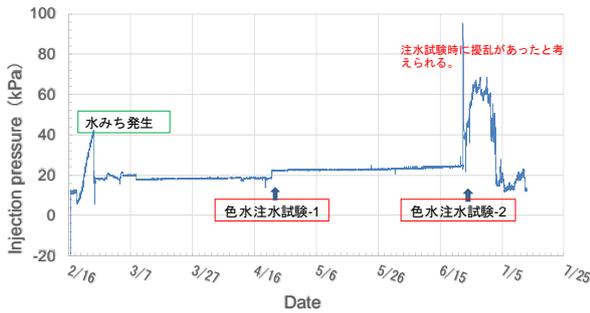


図-7 長期試験の水圧の変化



図-8 色水注水試験（7/20）

図-9 に、上部に蓋を設置して体積を拘束した条件での短期試験の土圧と水圧の変化を示した。水圧（紫のライン）は試験開始から徐々に上昇し、50~60kPa で一定になった。側部の土圧は初期から上昇し、0.8MPa で一旦一定になった。色水を注水しても緩衝材の上部の蓋に設置された排水口には色水は排水されず、体積拘束した試験では水みちは発生しなかったことが示唆された。水圧が一定になっている状態においては、注水した水は岩盤に流入していたことが予想される。このことは、緩衝材の体積を拘束した場合には、緩衝材のもつ止水性能が発揮され、岩盤の透水性、

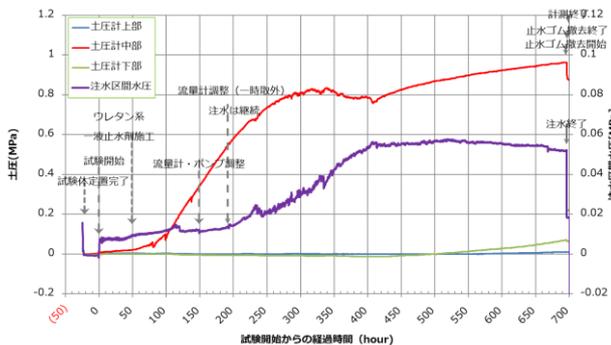


図-9 体積拘束下での試験の土圧と水圧の変化

亀裂の場所によっては緩衝材が切削されずに岩盤側に湧水が流出する可能性があることを意味する。今後、岩盤の透水性との関連を調査する予定である。

(4) 解析的な評価

緩衝材流出は湧水によって起こる現象であるため、湧水量を評価し、湧水抑制することは流出を防ぐことにつながる。本年度は、水理解析により、坑道掘削の進展に伴う湧水量変化の評価を行った。処分場のパネルを模擬するため、「割れ目ネットワークモデル」を使い、複数坑道を設定したモデルを構築した（図-10）。このモデルにより、周辺の処分坑道が処分孔の湧水量に与える影響、グラウト施工手順が処分孔の湧水量に与える影響等についての検討を行った。さらに、グラウトのモデル化手法に関する検討を行った。

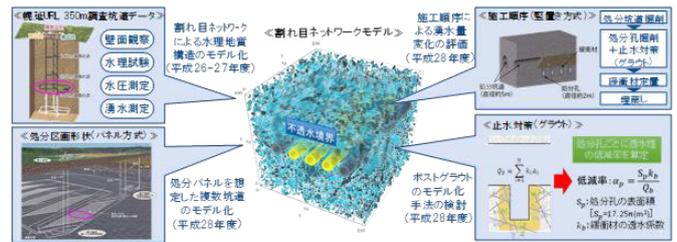


図-10 割れ目ネットワークモデルを用いた検討概要

この結果、隣接する処分坑道および処分孔の掘削に伴い掘削部周辺の水頭が低下し、湧水量が低下することを示すことができた。また、グラウトによる止水対策のモデル化方法の検討と、止水対策前後をシミュレートした浸透流解析を行い、湧水量分布の評価を行った。グラウトすることによる周囲の処分孔及び処分坑道への湧水の周り込み現象を評価した結果、全体としては、止水対策による湧水量の低減効果が示された。

- 1) 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 高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発報告書 平成 19 年度～平成 24 年度の取りまとめ報告書、2013
- 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 27 年度 地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学確認技術開発 報告書（第 2 分冊）人工バリア品質/健全性評価手法の構築—緩衝材、2016
- 3) 原子力発電環境整備機構、技術年報 2012 年度、NUMO-TR-13-01、2013 など

## II. 放射性廃棄物の地層処分にに関する調査研究

### 1-4 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築

#### ◇事業の概要

本事業では、処分システムを構成する人工バリアと周辺岩盤の長期挙動（熱-水-力学（THM）連成現象）の評価手法の構築を目的として、人工バリアの定置後から再冠水過程における環境条件を考慮した数値解析、相似則の適用によって時間加速実験が可能な遠心模型試験を通じ、解析手法の妥当性及び検証のための実験データの取得方法について検討している。

このような検討を平成27年度から3ヵ年計画のもとで実施しており、平成27年度は、使用する材料の特性値を取得する要素試験、THM連成現象の材料パラメータや境界条件に対する感度解析、廃棄体周辺を模擬した模型（処分孔1孔）による遠心模型試験を実施した。得られた感度解析の結果から、緩衝材の剛性やポアソン比が長期挙動評価に重要なパラメータであること、水理特性や伝熱特性が岩盤等の変形に与える影響が小さいことなどを確認した。また、遠心模型試験により緩衝材の膨潤に伴いオーバーパックに変位が生じること、試験終了後の緩衝材の密度及び含水比が模型の上下で異なることなどを確認した。

平成28年度は、引き続き数値解析及び遠心模型試験を行った。数値解析は感度解析及び要素試験の結果に基づき、平成27年度に実施した遠心模型試験の結果に対する再現解析を実施し、解析の妥当性及び重要なパラメータの検討を行った。遠心模型試験では、埋め戻し材を処分孔上部に設置することによる緩衝材の変形に着目し、相似則に基づいて定置後の約100年間に相当する人工バリア及び周辺岩盤の力学的挙動に関するデータを取得した。なお、本事業ではHLW第2次取りまとめ<sup>1)</sup>に示された「処分坑道堅置き定置方式」を対象とした。

本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである<sup>2)</sup>。

#### ◇平成28年度の成果

##### (1) 数値解析（遠心模型試験の再現解析）

平成27年度に実施した遠心模型試験の再現解

析を行い、ニアフィールドにおけるTHM連成現象のモデル化方法の妥当性及び長期挙動評価において重要となるパラメータの確認を行った。解析コードはTHM連成解析コード「放射性廃棄物地層処分における地下空洞長期安定性解析プログラム（LOSTUF）<sup>3)</sup>」を使用した。

##### 1) 解析モデルの諸元・境界条件

再現解析の対象とした平成27年度実施の遠心模型試験は、1/30スケールの模型を用いて、以下の条件で実施した。

- ・試験期間：40日間
- ・遠心力場：30G
- ・その他：模型底面から注水、模擬オーバーパック内に熱源（ヒーター）を設置

本試験による約40日間に渡る経時変化は、実寸換算で約100年間の現象に相当する<sup>4)</sup>。再現解析のために作成した軸対称モデルのFEMメッシュ図を図-1に示す。解析では遠心模型試験における相似則の成立を確認するため、実物寸法の解析ケースも実施した。図-1には供試体の実物寸法とその1/30の模型寸法の両方を示した。なお、模型では計測器のケーブルなどを通すために、模擬オーバーパックから細い心棒部分を設けている（図の左端の中立軸付近）。

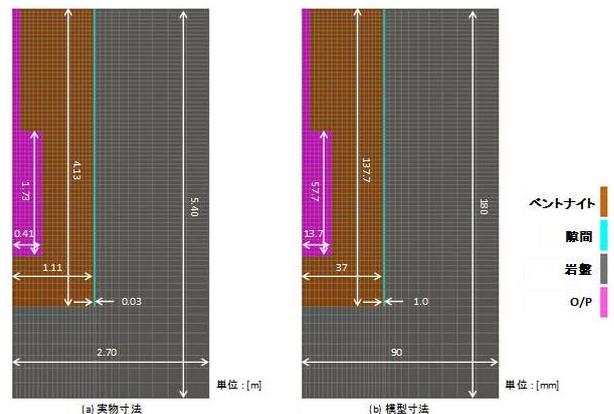


図-1 解析モデルのFEMメッシュ図  
(2388要素・2498節点)

図-2に解析モデルと境界条件を示す。解析では、埋め戻し材と緩衝材を区別せず、岩盤と緩衝材の間にある施工時の初期隙間は区別し、直径と高さが5.4mの範囲をモデル化した。なお、人工バリアの定置前の岩盤外側に8MPaの拘束圧を考慮し、これに相当する初期応力を設定した。また、

水理境界としてモデルの底面に位置する境界面を圧力 4.1MPa で一定とし、上面は間隙水圧が 4.0MPa を超えた段階で間隙水が自由に抜ける浸出面境界に設定した。

温度境界条件については、上面と底面及び側面境界の温度を 33℃で一定とした。オーバーパックの発熱は、心棒を除いたオーバーパック本体の部分に、模型試験結果より直接温度履歴を設定した。本解析モデルでは、緩衝材の表面全体を覆うように THM 連成ジョイント要素を配置しており、膨潤による変形がオーバーパックや岩盤など周囲の剛性によって拘束されないようにモデル化を行った。

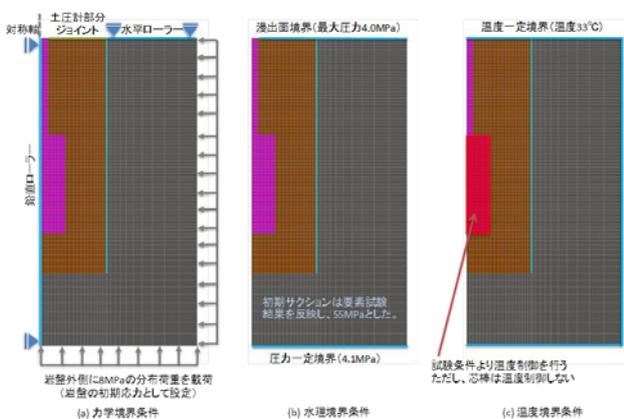


図-2 解析モデルの諸元と境界条件

2) 解析ケース

解析ケースとして、上述した条件を設定した基本ケース (Case 1) に加え、遠心力模型試験結果との比較のために条件を変えた 24 ケースを設定した。また、遠心模型試験における相似則が解析で成立することを確認するため、基本ケースと同じ条件でモデル寸法を実規模相当の 30 倍に設定した Case 0 をこれらとは別に設定した。設定する検討ケースは、物性値のばらつきなどを考慮することを基本としたが、緩衝材や乾燥した岩盤の剛性などについては解析における物性値以外に関する検討ケースも加えた。具体的に剛性などの飽和度依存性を考慮した際に弾性ひずみを再配分するなど、解析におけるモデル化方法自体も検討項目に加えている。

3) 要素試験

数値解析に用いる人工バリアと周辺岩盤 (遠心模型試験に用いた岩盤供試体) の要素特性 (入力

パラメータ) のデータを取得するため、要素試験を実施した。要素試験では、データのばらつきを統計処理できるデータ数を確保することとし、緩衝材、埋め戻し材及び岩盤について、物理特性 (固相の密度、湿潤密度等)、膨潤特性、熱特性、保水特性、圧密特性と力学特性 (一軸圧縮強さ測定、せん断強度測定等) を、日本工業規格及び地盤工学会基準・規格等に基づき取得した。

4) 解析結果

①遠心模型試験の相似則の確認

模型寸法の基本ケース (Case 1) と同条件の実寸法ケース (Case 0) の解析結果の比較から、解析結果に優位な差は見られず、想定されている模型試験の相似則を満たすことを確認した。

②透水性の評価が与える影響

岩盤及び隙間の透水性を検討したケースと遠心模型試験により得られたオーバーパックの鉛直変位履歴を図-3 に示す。図-3 では、基本ケース (Case 1)、岩盤の固有透過度を平均値の  $\pm 1\sigma$  に設定した Case 2 及び Case 3、岩盤と緩衝材の隙間の透水性を基本ケースの 1000 倍とした Case 4 と遠心模型試験により得られた結果について比較している。オーバーパックの変位に関して、Case 1~Case 3 の間には大きな変化はないが、隙間を水みちとして考慮した Case 4 では、側方から緩衝材が一様に膨潤することでオーバーパックの鉛直方向の最大変位が小さくなっている。また、解析結果と比べて遠心模型試験によるオーバーパックの鉛直変位は約 6mm 程度と小さい。これは、緩衝材の上部と下部が殆ど時間差を生じることなく膨潤しているためと考えられる。緩衝材と岩盤間にある隙間は、浸潤過程で水みちになると考えられ、今後の解析ではこの隙間を考慮した緩衝材の浸潤過程を考慮することが重要である。

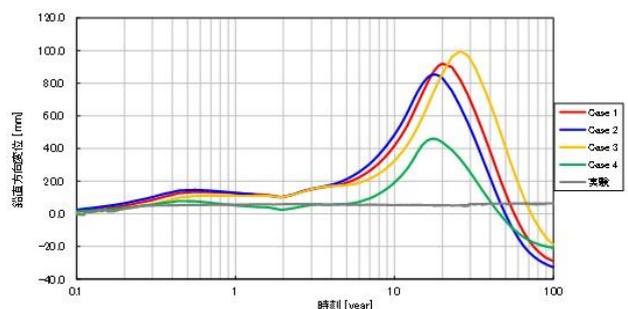


図-3 オーバーパック鉛直変位の履歴

## II. 放射性廃棄物の地層処分にに関する調査研究

### ③緩衝材物性の飽和度依存性を考慮した場合のオーバーパックの変位

緩衝材の剛性に対する飽和度依存性を考慮した Case13 と遠心模型試験により得られたオーバーパックの鉛直変位を図-4 に示す。解析と遠心模型試験のオーバーパックの鉛直変位は数値的に異なるものの、下部緩衝材の膨潤に伴う上昇、ヒーターの加熱停止による熱応力の消失による降下、オーバーパック付近の緩衝材の膨潤による上昇等の傾向が解析で再現されている(図の青枠の箇所)。

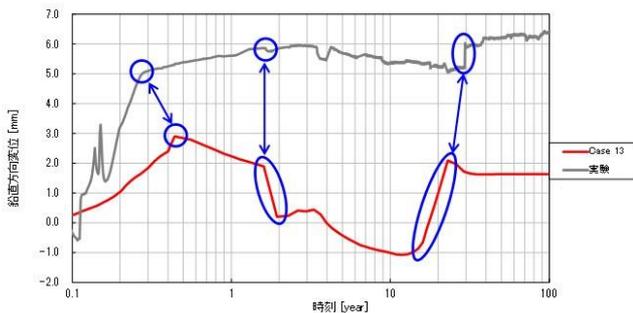


図-4 代表的なケースのオーバーパック鉛直変位の履歴

### (2) 遠心模型試験

遠心力場の相似則を利用した遠心模型試験は、実物と縮尺模型の応力の対応に優れ、実物に近い力学的・水理的挙動を再現することができ<sup>5)</sup>、数百年規模の人工バリアと周辺岩盤の浸潤及び力学的挙動を数か月間の試験で再現することが可能である。

本年度の遠心模型試験は、次年度の再現解析の対象とするデータの取得及び異なる模型条件(抽出領域)における現象の把握を目的とした。

#### 1) 遠心模型の概要

平成 27 年度に作製した模型の上部に埋め戻し材を設置した(図-5)。これにより、埋め戻し材の存在によって生じる緩衝材の変形特性(膨出)がオーバーパックの変位に与える影響や、その時の緩衝材と埋め戻し材の土圧の状況、緩衝材の膨出状態の定性的な把握を試みた。

図-5 に示すように、作製した遠心模型は、オーバーパック 1 体、処分孔 1 孔、緩衝材、埋め戻し材及び周辺岩盤から構成される処分孔サイズの 1/30 の縮尺模型である。遠心模型で使用する模型部材、寸法及び仕様は、HLW 第 2 次取りまとめの処分孔縦置き方式<sup>1)</sup>を基に設定した。また、

オーバーパックの変位量や緩衝材、埋め戻し材の膨潤変形挙動等を測定するための各種センサーを模型に設置した。

#### 2) 境界条件

試験条件は、遠心加速度 30G 場において、岩盤の径方向の有効応力が 4.0MPa (深度 400m の水頭相当)、埋め戻し材の有効応力が 0.1MPa となるように拘束圧条件を決定し、埋め戻し材の周囲には径方向の応力が作用しないように金属のリングを設置した。岩盤外側の境界温度は、実験室の常温(25℃)を地上の平均気温と仮定し、平均的な地温勾配(2℃/100m)<sup>6)</sup>から 33℃一定に設定した。

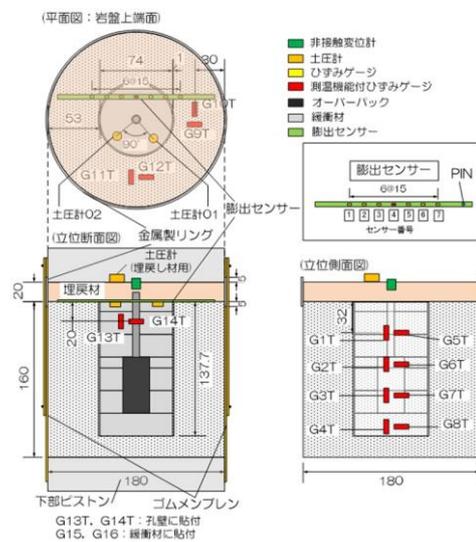


図-5 遠心模型のレイアウト図

### 3) 試験結果

#### ①緩衝材の土圧

緩衝材中に埋め込まれた土圧計、軸圧及び模型上面の排水圧の経時変化を図-6 に示す。

試験開始後、0.4 年相当経過時までは、下方の緩衝材の膨潤による土圧の増加がみられた。その後、模型上面の排水圧が増加すると緩衝材全体の膨潤が始まり、土圧の増加量が大きくなった。20 年相当経過時あたりから土圧が収束しはじめていることから、模型内の緩衝材が飽和したと考えられる。また、緩衝材に設置した土圧計は 90° になるように 2 個設置されており、模型上面の排水圧が上昇しはじめる頃から土圧の増加傾向に差が出た。このことから、緩衝材の膨潤に偏りがあることがわかる。

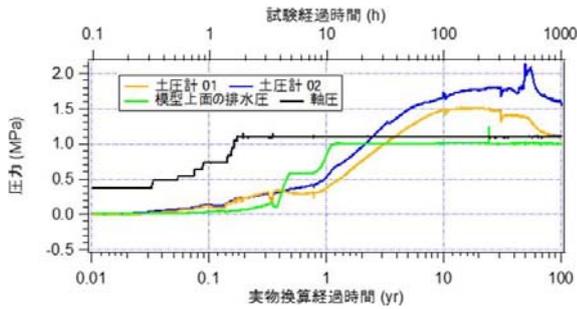


図-6 緩衝材に埋め込まれた土圧計で計測された圧力と軸圧、排水圧の経時変化

②オーバーパックの変位量

オーバーパックの鉛直変位経時変化を図-7 に示す。変位量のプラスは浮上、マイナスは沈下を表している。オーバーパックは約 0.23 年相当経過時まで浮上し、それ以降は値が漸減しており、沈下する傾向を示した。これは、上部緩衝材に間隙水が浸潤することで膨潤し、オーバーパックを押し戻したことや、緩衝材の膨出が原因と考えられる。

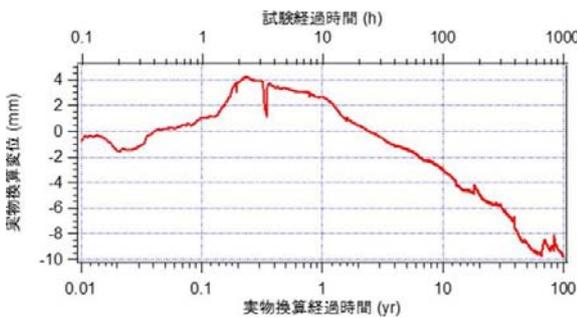


図-7 オーバーパックの鉛直変位の経時変化

③膨出センサー

本年度の遠心模型試験は、岩盤及び緩衝材の上に埋め戻し材が存在するため、緩衝材の膨出現象が発生すると考えられ、その膨出の状況を把握するために薄さ 0.3mm のリン青銅板を用いた膨出センサーを岩盤上面に設置した。(膨出センサーの選定では、幌延 URL における人工バリア性能確認試験で使用されている緩衝材膨出センサー<sup>7)</sup>を参考とした。)

膨出センサーに貼付したひずみゲージから計測されたひずみの経時変化を図-8 に示す。膨出センサーにはひずみゲージが 1~7 まで設置されているが、3, 4, 5, 7 は値が安定しなかったため、データから除外した。また、計測値について事前のセンサー動作確認と比較した結果、リン青銅板

と岩盤、緩衝材、埋め戻し材との間に生じる摩擦による引張りひずみが生じた可能性が高く、その影響と思われる増減値を計測値より除き点線で示した。実線の部分のみを見ると岩盤上にある bs\_01 は時間の経過とともに値が大きくなった。一方、緩衝材の上に位置し、かつ対称な位置にある bs\_02 と bs\_06 は値の変化が小さく計測値もほぼ同等となっている。このことから、膨出センサーを設置した位置での緩衝材の膨出は比較的一様に発生していると考えられる。

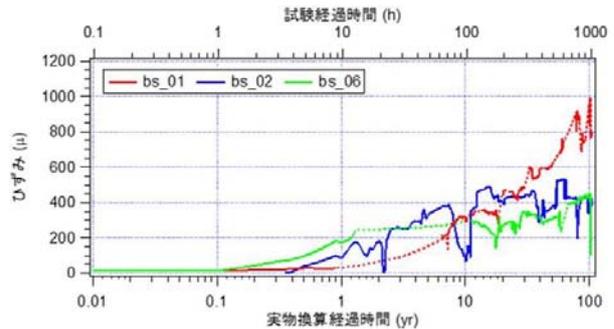


図-8 時間毎のひずみ分布状況

- 1) 核燃料サイクル機構、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次とりまとめ 一分冊 2 地層処分の工学技術、JNC TN1440 99-024、1999
- 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 28 年度 地層処分技術調査等事業処分システム工学確証技術開発 報告書 (第3分冊) 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築、2017
- 3) 澤田昌孝、岡田哲実、長谷川琢磨、高レベル放射性廃棄物処分地下施設の長期挙動予測評価プログラムの開発—緩衝材膨潤評価式の数値モデル化と熱・水・応力連成解析スキームの構築—、電力中央研究所 研究報告、N05028、2006
- 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 27 年度 地層処分技術調査等事業処分システム工学確証技術開発 報告書 (第3分冊) 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築、2016
- 5) Taylor, R. N.: Geotechnical Centrifuge Technology, London, Blackie Academic & Professional, 1995.
- 6) 田中明子、山野誠、矢野雄策、笹田政克、日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース、数値地質図 DGM P-5、産業技術総合研究所地質調査総合センター、2004
- 7) 中山雅、大野宏和、中山真理子、小林正人、幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験; 計測データ集(平成 27 年度), JAEA-Data/Code, 2016- 5, 2016

## II. 放射性廃棄物の地層処分にに関する調査研究

### 1-5 モニタリング関連技術の整備

#### ◇事業の概要

本事業では、高レベル放射性廃棄物の地層処分事業を対象に処分システムの状態把握等に関わるモニタリング関連技術の整備と施設閉鎖後の制度的管理の一環である記録保存に関する国際的な検討動向の調査を実施している。具体的には、平成 25 年度からの 5 カ年計画で、以下の観点から調査研究を進めている。

- ①長期健全性の確認等に関する検討：地層処分事業に特徴的な（特有の）取組となる、構築する処分場の「性能確認」について、モニタリングを含めた取組の全体枠組みの具体化に向けた検討を進める。
- ②状態確認技術の検討：モニタリングに関連する要素技術の開発として、無線通信技術の信頼性や実用性（適用性や冗長性）の向上に取り組むとともに、無線通信技術に関連する電源供給技術や他の状態確認に係る技術の調査や検討を進める。
- ③記録保存に関する調査：地層処分事業における記録保存について、国や関連機関による取組計画等の策定の際に活用可能な基盤情報等の整備に向けて、特に最新の国際的な検討動向等の調査を行い、その目的や具体的方策ならびに技術的可能性等に関する検討動向等の整理・分析を進める。

以下に、平成 28 年度取組の内容と成果<sup>1)</sup>について整理する。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

#### ◇平成 28 年度の成果

##### (1) 長期健全性の確認等に関する検討

モニタリングを含めた地層処分システムの「性能確認」について、国際共同研究（Modern2020 プロジェクト）に参画して、各国のモニタリングの考え方や最新の国際的な検討動向を把握するとともに、国際機関（IAEA：国際原子力機関、OECD/NEA：経済協力開発機構原子力機関）が発行する関連資料の調査を行った。例えば、IAEA が発行する特定安全要件<sup>2)</sup>や特定安全指針<sup>3)</sup>では、性能確認プログラムまたはその

一部であるモニタリングを実施することを要求している。また、地層処分事業が先行する諸外国では、規制要件との関係で国によって性能確認プログラムの中でのモニタリングの位置付けが異なっているが、性能確認プログラムあるいは品質管理/品質保証プログラム等により、構築される処分場の閉鎖後長期の性能を保証（確認）しようとする考え方がある。国際共同研究である MoDeRn プロジェクト<sup>4)</sup>は 2009 年 5 月～2013 年 10 月に実施され、各国共通の性能確認に関するモニタリングのフレームワークの構築に向けた検討やケーススタディ等が実施されている。また、同プロジェクトの後継として着手された Modern2020<sup>5)</sup>プロジェクトでは、モニタリングが閉鎖後長期の安全性の確認に資することを認識した上で、モニタリングのあり方の検討とともに、スウェーデン、フィンランド、フランス等で具体化されつつある処分場操業時の性能確認に資するモニタリング計画等をケーススタディの対象として検討を進め、モニタリングできるプロセスではなく、性能確認をするうえでモニタリングが必要となるプロセスの抽出から全体プログラムを構築するという考え方が示されている。このような国際的な検討動向から窺える性能確認プログラムの要点は以下のとおりである。

- 処分場の構成要素（人工バリア及び他の地下構成要素）の安全機能、性能や品質に影響する事象を確認の対象とする
- 処分概念や確認すべき事象の特性により、人工バリア等の製造時の品質管理、建設・操業時の品質管理、室内試験や現地試験、モニタリングという異なった手法を組み合わせることで目的を達成する

上記のような国際的な動向をふまえ、わが国における性能確認プログラムを検討するにあたっては、わが国で検討されている処分概念と類似した処分概念を有するスウェーデンにおける「品質管理/品質保証プログラム」やフィンランドにおける「性能確認プログラム」の体系や構造等について、さらに調査を進めることが有益と考える。

(2) 状態確認技術の検討

平成 28 年度は昨年度に引き続き、無線通信技術の信頼性や実用性（適用性や冗長性）の向上、電源供給技術の適用性について検討した。

①無線通信技術の開発

無線通信技術については、これまでの取組において、深度 250m の地下から地上までの無線通信の実証試験など、その技術的な成立性を確認している。平成 25 年度より開始した本事業では、地層処分施設に対するモニタリングの適用性や冗長性を向上させるうえでの残された課題への対応を進めている。このような課題の 1 つとして、内部電源による運用上の制約があり、その対策として中継装置の開発を進めている。中継装置を設置することにより、装置単体での通信距離を短くして電源消費を抑制することが可能となる。また、中継装置の複数設置（多段化）により、複数のプラグを跨いだ無線通信や、一部の中継装置の故障時における伝送経路の確保など、無線通信システムとしての適用性や冗長性の向上が期待できる。

平成 28 年度は、昨年度に製作した基盤と回路<sup>6)</sup>をベースに図-1 に示す設計フローに沿って、アンテナ・電源を設計・製作し、それらを内包可能な筐体を製作して装置全体を組み立てた。

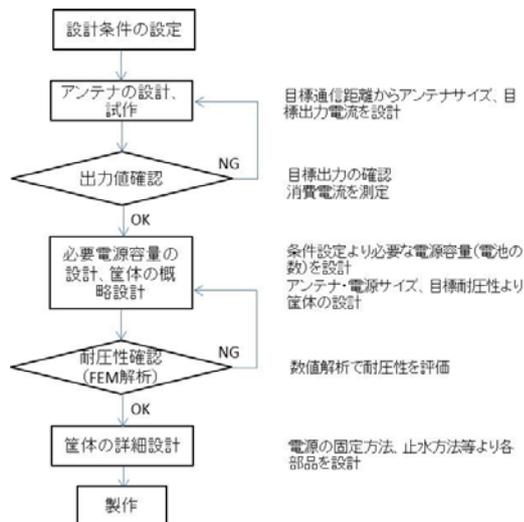


図-1 中継装置の設計フロー

中継装置は、センサ 10 台分に相当するデータ量を 100m 先に 1 回/週の頻度で 10 年間継続して送信可能であることを設計要件として、内蔵電池が搭載可能なように設計した。筐体の材質は、

小型送信器と同じ硬質塩化ビニル樹脂（PVC）とし、深度 500m の静水圧（5MPa 程度）に耐えられる厚さ 35mm とした。筐体に載荷圧力 5MPa を均等に作用させた解析によって得られた 0.5mm の最大変位量が、内部の部品に影響を与えないことを確認している。また、製作した中継装置の通信特性を確認するため、地上において、アンテナ、電源、基板を筐体に収納して動作確認試験を実施し、本装置の目標性能である通信距離 100m までの受信強度があることを確認した。

さらに、システムの冗長性の確保を目的として、故障時における中継ルートの変更を可能とするためのデータ分岐の機能に関する試験を実施した。試験は、3 台の中継装置を用いて、図-2 に示すシステム構成のもとで、以下の手順で実施した。

- 手順 1. 小型送信器 1, 2→中継装置 1→中継装置 2→受信器
- 手順 2. 中継装置 2 の故障  
受信機から手動で中継装置 3 へ発信の指令を通信
- 手順 3. 小型送信器 1, 2→中継装置 1→中継装置 3→受信器

中継装置 2 から中継装置 3 に経路が切り替わっても、小型送信器からのデータが受信器まで通信できたため、中継器の故障等における無線通信技術の冗長性が確保できることを確認した。

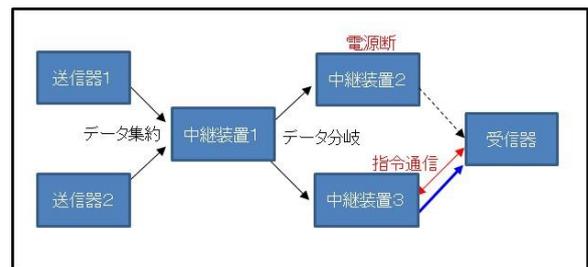


図-2 故障時のルート変更

②無線給電技術の開発

地中無線装置を用いた長期モニタリングに必要な電力供給技術については、非接触による電力供給方法として磁界共振結合方式を有力な技術として選定し、無線給電技術の理論的境界の取得、試験による給電効率の評価手法の検討を実施してきた。

平成 28 年度は、昨年度に取得した給電効率の理論的境界<sup>6)</sup>の検証を目的として、小規模コイル

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

を用いて 10W 程度の無線給電を行う試験を実施し、理論値と実測値の給電効率の間に有意な差がないことを確認した。

また、無線給電技術を地層処分へ適用する場合、施工時のコイルのずれ、プラグを介した給電の必要性ならびに複数のコイルへの給電時における給電効率への影響などが想定されるため、これらについて試験や調査を実施した。なお、平成 27 年度において、コイル間距離／コイル直径を同一に保つことにより小規模サイズの試験で実規模サイズの給電効率を見通せることを確認しており、試験条件を簡便化するため小規模コイルを用いた試験で評価を実施した。

無線給電の給電効率については、施工時のずれ等により送受電コイルに変位や偏角が生じ、効率が低下する可能性がある。そこで、送電コイルと受電コイルの間に、変位や偏角がある場合を想定したケーススタディを行い、給電効率への影響を評価した（図-3）。その結果、コイル間距離がコイル直径と同じ場合、コイル直径の 50% の変位で 5% 程度の給電効率の低下、50° の偏角が生じた場合でも 2% 程度の給電効率の低下であった。これより、変位および偏角の給電効率への影響は小さく、送受電コイル施工時には、変位、偏角に対して高い精度は必要でないことを確認した（図-4）。

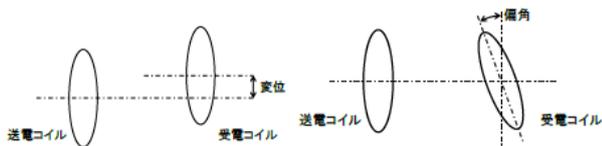


図-3 変位や偏角のイメージ図

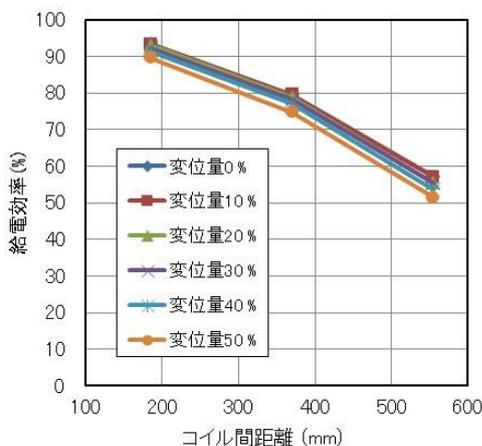


図-4 変位と給電効率の関係

プラグを介した無線給電への影響について、鉄筋およびコンクリートがそれぞれ給電効率に与える影響を評価した。鉄筋を模擬した金網を介した給電試験（図-5）では、給電効率が約 66% 低下する結果となった。この効率低下は、共振周波数や負荷抵抗を調整することにより約 34% の低下まで改善ができる。一方、コンクリートを介した影響は 3% 程度の給電効率の低下であり、鉄筋と比較して影響が小さいことがわかった。これより、プラグを介した無線給電を行う場合、コンクリートよりも鉄筋に対する影響軽減策の検討がより重要になると考えられる。

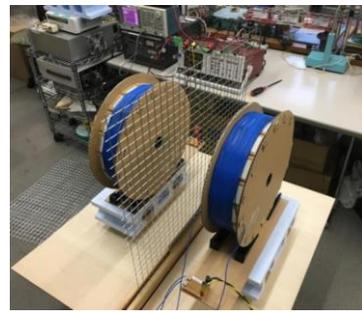


図-5 金網を介した給電効率の影響評価

### ③地下研究施設での実証試験

上記の技術開発に加え、平成 26 年度から日本原子力研究開発機構との共同研究により幌延深地層研究センターおよび瑞浪超深地層研究所の試験坑道において地中無線通信技術の適用性に関する実証試験を実施している。幌延深地層研究センターの地下研究施設では、平成 26 年度から、地中無線通信装置 7 台を緩衝材ブロックと埋め戻し材ブロックにそれぞれ設置している。平成 29 年 2 月末時点までの約 27 ヶ月の間、全てのセンサからのデータが所定の頻度で継続的に伝送されていることを確認し、これらが正常に動作していることを確認している。次年度も引き続き計測を実施し、地下環境下での無線通信システムの動作状況についてとりまとめる予定である。

### (3) 記録保存に関する調査

本調査の目的は、高レベル放射性廃棄物の地層処分における記録保存について、その目的、具体的方策及び技術的可能性を検討し、今後わが国で記録保存に係る計画等を具体化する際に、

それを支援する技術情報等を整備することである。本調査では、OECD/NEA の放射性廃棄物管理委員会（RWMC）が主導している記録保存に関するプロジェクト（RK&M（Records, Knowledge and Memory：記録、知識、記憶）イニシアチブ）に関して、検討動向の調査を平成 24 年度から平成 26 年度にかけて実施<sup>7) 8) 9)</sup>するとともに、平成 27 年度からは同イニシアチブに参画し、情報を収集している。

①記録等の保存手法の分類

RK&M イニシアチブでは、記録・知識・記憶の保存に関する各種の手法の分類について検討が進められている。

②文化遺産/マーカー

文化遺産としての意味合いを含むマーカーは、地上建造物の痕跡、地上に設置されたマーカー、地下に設置されたマーカー、モニュメントに区分されている。

ここでは、地上に設置されたマーカー、地下に設置されたマーカー、モニュメントについてそれぞれの役割や配置、これらにどのような情報を記すべきかについて、検討が進められている。

③鍵となる情報ファイル/基本的情報セット

一般の公衆を対象として約 50 ページの分量で地層処分場の位置や廃棄物のインベントリ、セーフティケース等の主要な情報を伝える「鍵となる情報ファイル（KIF: Key Information File）」及び技術者等を対象として処分場の歴史、建設、特性等に関する根拠を提示し、安全性を立証するとともに、さらなる検証を可能とする「基本的情報セット（SER: Set of Essential Records）」について、それぞれのファイルにどのような情報を記載すべきかが議論されている。

RK&M イニシアチブでは、以上の様な検討を進め、今後、全体の成果を取りまとめた最終報告書（テーマ別の個別報告書を含む）を整備する予定である（現時点で表-1 の構成が想定されている）。

今後、RK&M イニシアチブでは、上記のような検討結果に加えて、記録保存に関わる各種手法の位置付けや相互の手法の関係性に関する考察結果等についても取りまとめられる予定である。次年

度も、本イニシアチブに参画し、わが国の地層処分事業における記録保存の取組の具体化に資する情報の収集を実施する。

表-1 フェーズ 2 最終報告書構成案

章	内容
第 1 章	イントロダクション
第 2 章	目的と範囲
第 3 章	RK&M イニシアチブにおける取り組み
第 4 章	記録保存に関する各種手法の相互関係
第 5 章	記録保存に関する各種手法
付録	記録保存手法の相互関係表、用語集、法令集

- 1) 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 28 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書（第 4 分冊）－モニタリング関連技術の整備－、2017
- 2) International Atomic Energy Agency: Safety Standards Series, Specific Safety Requirements, No. SSR-5, "Disposal of Radioactive Waste", (2012)
- 3) International Atomic Energy Agency: Safety Standards Series, Specific Safety Guide, No. SSG-31, "Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities", (2014)
- 4) MoDeRn Project HP:<http://www.modern-fp7.eu/>
- 5) Modern2020 Project : HP:  
<http://www.modern2020modern2020.eu/>
- 6) 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 27 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書（第 4 分冊）－モニタリング関連技術の整備－、2016
- 7) 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 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 3 分冊）－モニタリング技術の開発－、2013
- 8) 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 25 年度 地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 3 分冊）－モニタリング関連技術の整備－、2014
- 9) 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 26 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書（第 3 分冊）－モニタリング関連技術の整備－、2015

## II. 放射性廃棄物の地層処分にに関する調査研究

### 2. 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発

#### 2-1 事業の全体概要

わが国の地層処分事業における可逆性・回収可能性は、国の審議会（総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会放射性廃棄物ワーキンググループ）における議論を経て、平成27年5月に改定された特定放射性廃棄物の最終処分にに関する基本方針において次のように定められている。

○今後の技術やその他の変化の可能性に柔軟かつ適切に対応する観点から、基本的に最終処分にに関する政策や最終処分事業の可逆性を担保することとし、今後より良い処分方法が実用化された場合等に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにする。このため、機構（原子力発電環境整備機構）は、特定放射性廃棄物が最終処分施設に搬入された後においても、安全な管理が合理的に継続される範囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性（回収可能性）を確保するものとする。（「第4 特定放射性廃棄物の最終処分の実施に関する事項」からの抜粋）

○最終処分施設を閉鎖せずに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、最終処分施設の閉鎖までの間の特定放射性廃棄物の管理の在り方を具体化する。（「第5 特定放射性廃棄物の最終処分に係る技術の開発に関する事項」からの抜粋）

このような状況を踏まえ、可逆性・回収可能性に関する今後の具体的な運用や研究開発の推進に向けて、更なる議論や検討が必要となる事項（可逆性・回収可能性の意義や確保のあり方等）の整理を行うとともに、回収技術の信頼性の向上や回収可能性の維持に係る技術的な検討を進めておく必要がある。

回収可能性に関連する技術的な取組については、資源エネルギー庁の基盤研究開発として、これまでに次のような調査等事業が進められてきた。

○地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発）（平成19～24年度）<sup>1)</sup>

○地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）（平成23～26年度）<sup>2)</sup>

これらの事業では、操業における中核技術として、遠隔搬送・定置に関する技術調査や要素試験、更には地上での適用試験などを通して、基盤技術としての整備を進めてきた。回収技術については、その中核技術と位置付けられる緩衝材除去技術について、地上での塩水を利用した緩衝材除去試験を実施し、その適用性に関する検討を進めてきた。

また、資源エネルギー庁の原子力発電施設広聴・広報等事業では（平成20～26年度地層処分実規模設備整備事業）<sup>3)</sup>、人工バリア材料や緩衝材の定置に装置等の公開を通して、工学技術の実現性の理解等に資する実規模施設の整備・運用を行ってきた。

このような取組の経緯を踏まえ、これまでに開発してきた回収技術の高度化という観点から、今後、地上とは異なる地下環境での搬送定置や回収技術に関する原位置試験を通じた操業時の工学技術の整備・実証が必要となる。

以上のような背景のもと、平成27年度からの5年程度の計画で着手した本事業では、国民の地層処分技術に関する安心感の醸成や可逆性・回収可能性に関する最終処分政策への反映に資するとともに、将来世代に対し高レベル放射性廃棄物の処分方法の選択肢について柔軟性を持たせること及びわが国における可逆性・回収可能性の概念や技術の整備を目的として、次の取組を進めている。

①地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発－実証試験

②地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発－回収可能性の検討（可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理を含む）

上記のそれぞれについて、次節以降に平成28年度の実施内容や成果を整理する。

- 1) 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19～24年度地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発）報告書、2013
- 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23～26年度地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連 地層処分回収技術高度化開発）報告書、2015
- 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20～26年度原子力発電施設広聴・広報等事業（地層処分実規模設備整備事業）報告書、2015

2-2 地下環境での搬送定置・回収技術の高度化  
開発－実証試験

◇事業の概要

本事業で実証の対象とする回収技術は最終処分施設の閉鎖までの操業期間中の廃棄物搬出の可能性（回収可能性）を確保するための工学技術である。これらに必要となる個別の要素技術については、前項 2-1 で述べたように、処分システム工学要素技術高度化開発、および地層処分回収技術高度化開発にて、遠隔搬送・定置技術、回収技術に関する技術調査や要素試験、地上での適用試験などを通して、基盤技術としての整備を進めてきた。このような技術的な取組を経て、本事業ではこれまで開発してきた搬送定置や緩衝材除去技術を活用して、地下での適用性の確認及び地下環境における高レベル放射性廃棄物の搬送定置・回収技術の実証的な整備を行う。加えて、このような取組を通じて、国民の地層処分技術に関する安心感の醸成及び可逆性・回収可能性に関する最終処分政策に寄与するとともに、将来世代に対して高レベル放射性廃棄物の処分方法の選択肢について柔軟性を持たせることを目的とする。

平成 28 年度は以下の内容を実施した。

- (1) 地下実証試験サイトの整備
- (2) 搬送定置・回収技術の実証的整備
- (3) 隙間充填技術の整備
- (4) 隙間充填材除去技術の整備
- (5) 地層処分実規模試験施設の活用

◇平成 28 年度の成果<sup>1)</sup>

○実証試験計画の見直し

わが国で検討されている処分孔縦置き定置方式と処分坑道横置き定置方式に対して、これまでに基盤研究で実施された遠隔搬送・定置技術や回収に係る工学技術が整備されてきた。

「処分孔縦置き定置方式」については、地層処分実規模整備事業において実規模、実物の緩衝材ブロックの定置設備を整備し、真空把持装置の適用性やブロックの定置精度等の知見を得た<sup>2)</sup>。また地層処分回収技術高度化開発<sup>3)</sup>において緩衝材除去システムを整備し、地上での実規模スケールでの実証的検討を行い、塩水を利用した緩衝材の

除去に要する時間や塩水リユース設備の効率など実証的な知見を得た。

「処分坑道横置き定置方式 (PEM) (Prefabricated Engineered barrier system Module)」については、地上施設で鋼殻に包まれた人工バリアを鋼殻容器ごと地下に搬送して、掘削した処分坑道に定置する処分方法である。PEM は直径約 2.3m、長さ約 3.3m の円筒型で、重量が約 36.5ton である。処分システム工学要素技術開発<sup>4)</sup>において、PEM の製作、狭隘部での搬送・定置が可能なエアベアリング技術について実規模スケールでの要素試験、ペレット方式による PEM-坑道間の隙間充填技術の検討が行われている。

一方、隙間充填材の除去や PEM の回収など、回収工程の要となる技術については未整備であることから、粘土系材料である隙間充填材を除去した後に想定される環境での走行試験や、回収作業を行うための前工程である隙間充填材の除去技術への要求項目の抽出等、工程の繋がりに留意した課題の設定、対策の検討、実証試験が必要である。

本事業において平成 27 年度に策定した回収の実証試験計画では、処分坑道横置き定置方式 (PEM) について、地下で実証を行う。その際、上述した未整備の技術について、適宜、装置開発や特性に係る要素試験を積み重ねつつ取り組む計画である。

なお、地下環境での実証試験に向けた全体工程については、予定される 5 年間のなかで確実に実施するため、図-1 に示すように各試験項目の実施順を見直し、平成 30 年度に試験坑道内への PEM の設置と隙間充填の実施、平成 31 年度に充填材の除去と PEM の回収試験を行った後に、PEM の搬送・定置試験を実施する計画とした。

以後、見直した後の計画に従って実施した平成 28 年度の成果について整理する。

項目	H27	H28	H29	H30	H31
実証試験計画の検討	■				
装置・設備整備	地下実証試験設備	■	■	■	■
	搬送・定置技術 (回収技術)	■	■	■	■
	隙間充填技術		■	■	■
	充填材除去技術		■	■	■
地下での実証試験				■	■
実規模試験施設の活用	■	■	■	■	■

図-1 実証試験の全体工程

(1) 地下実証試験サイトの整備

地下環境での回収技術の実証試験のフィール

## II. 放射性廃棄物の地層処分にに関する調査研究

ドとして、平成 27 年度に、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター（以下、幌延 URL という。）の地下 350m に位置する試験坑道 2 を地下実証試験サイトに選定した。

平成 28 年度は回収試験を実施するための整備計画を具体化し、試験坑道 2 の整備を行った。回収試験のための設備は、図-2 に示すように組立台、台座、作業台で構成されている。

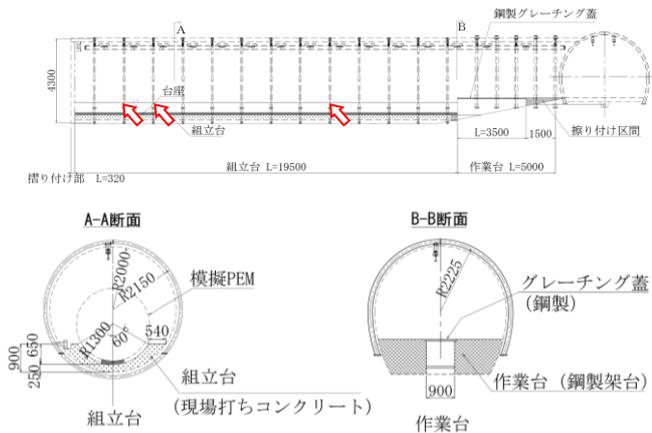


図-2 試験坑道 2 の設備の配置図

①組立台：定置・回収装置の走行面で、円形トンネルの下側を模擬した。断面形状と寸法は直径φ2600mm の円形のうち中心角 120° の円弧（下に凸）で、トンネル軸方向への延長は 19.5m である。組立台は鉄筋コンクリート構造で、浮型枠を用いて現場打設した。

②台座：PEM を定置する台で、形状は組立台の曲面に適合した円弧長 700mm、厚さ 110mm の瓦状である。プレキャスト鉄筋コンクリート製で、打設した組立台の上に並べた後、アンカーボルトで固定した。

③作業台：坑口側に設けた実証試験で使用する装置の制御盤等の設置や準備作業等の場であり、各パーツは（例えば、手すりなど）、取り外しが可能な鋼製構造物である。

PEM や試験設備等の重量物および試験動作が、試験坑道 2 の支保工や周辺環境に与える影響を確認するため、図-2 の矢印で示す位置に、組立台の内部にはコンクリート応力計と温度計を、試験坑道 2 の鋼製支保工には支保工応力計をそれぞれ設置した（図-3）。今年度から、図-4 に示す



図-3 計測機器の設置状況  
（例：コンクリート応力計の設置）

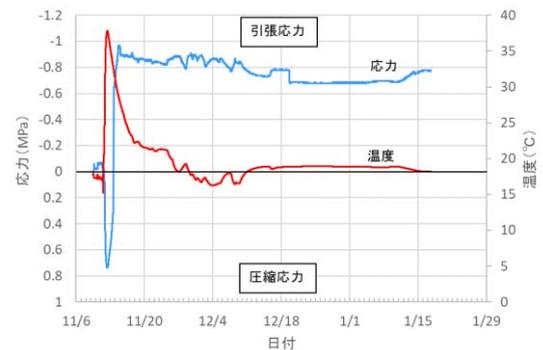


図-4 例：コンクリート応力、温度の経時変化

ようにコンクリート打設時からのコンクリート応力と温度の経時変化、および鋼製支保工の応力の経時変化の計測を開始した。次年度以降、継続的にデータを取得する予定である。

図-5 に各設備構築後の試験坑道 2 の状況を示す。



図-5 整備後の試験坑道 2 の様子

(2) 搬送定置・回収技術の実証的整備

平成 27 年度は、PEM の定置・回収を行う定置装置について、装置全体の基本設計を実施した。また、定置部・搬送部を詳細設計、製作し、同製作品の手動動作確認に必要な仮設操作パネルを設置した。定置装置主要部の製作については、平成 28 年度までに予定された装置開発を完了させると共に、平成 31 年度に実施予定の地下実証試験に向けた試験データの取得や整備を進めるため、以下を実施した。

- ①電気、計装制御部の詳細設計、製作
- ②地上性能確認試験
- ③模擬 PEM の基本設計

図-6 に定置装置の整備状況を示す。

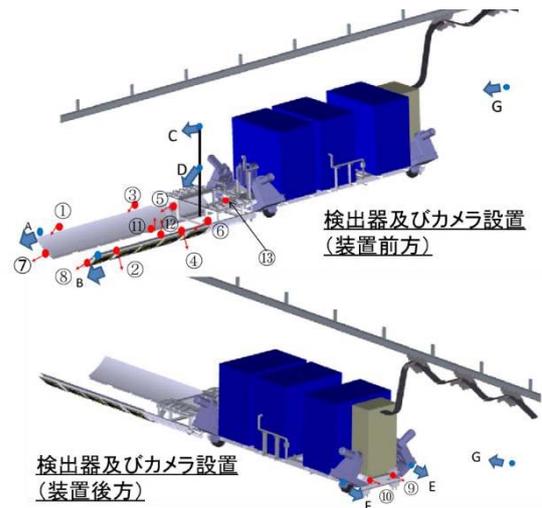


図-6 定置装置の整備状況

①電気、計装制御部の詳細設計、製作

定置装置の遠隔操作に必要な電気、計装制御部について、ハード関連装置として、ケーブル、制御盤、監視カメラ、検出器（センサ）ならびに操作卓の詳細設計を行い、製作した。定置装置の走行状態や装置位置、PEM の把持、定置部上昇量（浮上量）等、地下実証試験において定置・回収動作に必要な検出・監視機能を検討し、各監視カメラと検出器の性能仕様、数量、配置を決定したうえで詳細設計と製作を実施した。図-7 に定置装置の監視カメラ、検出器の配置を示す。

また、遠隔操作に必要な電気、計装制御部のソフト開発として、各検出器の信号に対応した動作に係るインターロックや自動/手動の運転モ



●カメラ(ライト付)

No.	名称	個数	機能
A	前方確認カメラ1	1	走行面、台座上の確認
B	前方確認カメラ2	1	
C	中腹カメラ(上)	1	PEMと坑道の接触確認
D	中腹カメラ(下)	1	エアベアリング部のPEM接地面の確認
E	後方確認カメラ1	1	走行面、台座上の確認
F	後方確認カメラ2	1	
G	全体監視カメラ	1	定置装置を後方から俯瞰的に確認(試験用)

●検出器

No.	名称	個数	機能
①	浮上量検出器1	1	坑道面からの浮上量を検出
②	浮上量検出器2	1	
③	浮上量検出器3	1	
④	浮上量検出器4	1	
⑤	PEM検出器1	1	PEMの把持位置を検出
⑥	PEM検出器2	1	
⑦	前方検出器1	1	前方(壁面、PEM)との距離を検出
⑧	前方検出器2	1	
⑨	後方検出器1	1	後方停止位置を検出
⑩	後方検出器2	1	
⑪	在荷検出器1	1	PEM把持状態を検出
⑫	在荷検出器2	1	
⑬	牽引力検出器	1	牽引力確認用の検出器

図-7 定置装置 監視カメラ、検出器の配置

ード（手動は主にメンテナンス用）を設定した。

これらの開発をとおして、定置装置の遠隔操作に必要な電気・計装制御部のハード及びソフトを整備し、予定した定置装置主要部の製作を完了した。

②地上性能確認試験

①で製作した装置について、理想的な平滑走行面の条件である鋼製の模擬坑道面を用いて性能確認試験を実施し、エアベアリングの要素試験の結果<sup>5)</sup>を基に評価した。

エアベアリングにより重量 36.5ton の模擬 PEM を把持（浮上）する場合、安全に搬送するために必要な上昇量である 40mm を確保するためのコンプレッサーの吐出量を測定し、計画通りに PEM を浮上出来ることを確認した（図-8）。

## II. 放射性廃棄物の地層処分に關する調査研究

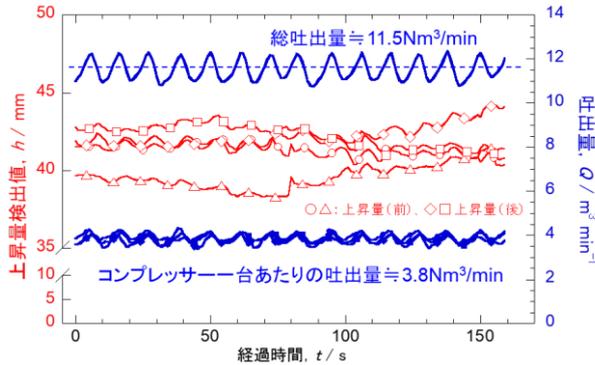


図-8 エアベアリング上昇量とコンプレッサー流量

エアベアリングの潤滑効果を確認するため、浮上させた状態で前後進時の力を計測した。静止状態からなので3kN程度の力が必要であるが、走行中に必要な力はエアベアリングの要素試験時と同程度の1~2kNであった。

確認項目：搬送部を用いた前進／後進時の必要な力  
結果：静止から始動まで 最大3kN(≒300kgf)  
移動時は前進1.5kN、後進1.2kN程度

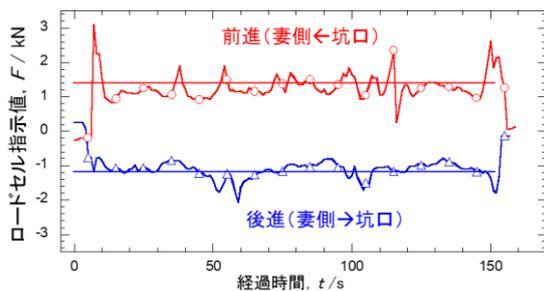


図-9 エアベアリング前後進に移動に必要な力

地下での PEM の回収試験では、センサやカメラで走行面や装置自体の状態を監視しながら遠隔で操作する計画である。本年度までに整備した状態監視機能について、自動運転モード（起動から停止までの一連の動作をセンサ等で判断して実行するもの）により装置を動作させ、PEM の回収動作時の各々のセンサの検出値を操作卓上のステータスモニターで確認した。図-10 にモニターでの状態監視の様子、および各センサの検出値のログデータを示す。さらに、設置した前方、後方確認カメラにより模擬坑道上の障害物を視認できることを確認した。

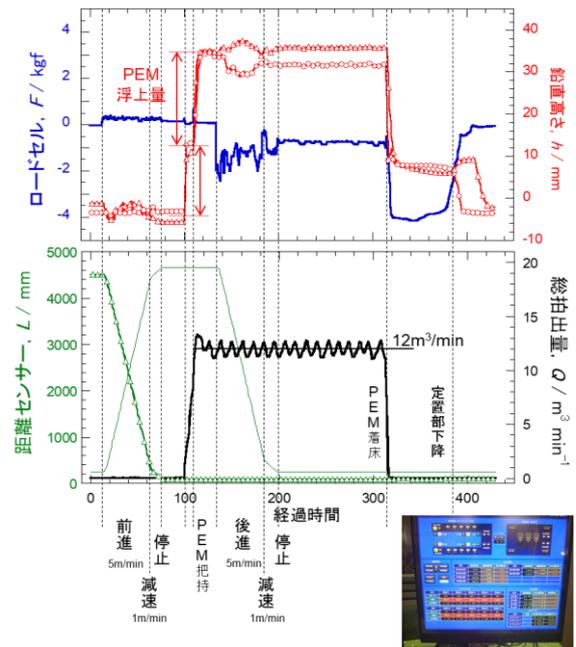


図-10 各検出器データによる装置の状態把握  
(例： PEM の回収動作試験時の様子)

次年度以降は、定置装置の現場打設コンクリート上（(1)で整備）での適用性に係わるデータを取得するとともに必要となる装置の改良等を実施し、坑道の施工技術とエアベアリングによる狭隘空間での PEM の定置／回収技術の成立性を、実証試験を通じて提示していく。

### ③ 模擬 PEM の基本設計

地下実証試験で使用する模擬 PEM について、寸法、重量、重心位置だけではなく、地下への搬入、試験坑道 2 内での組立を念頭においた構造を検討した。図-11 に基本設計した模擬 PEM 主要寸法図を示す。

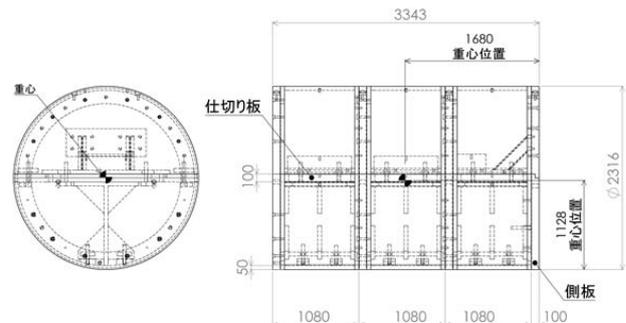


図-11 模擬 PEM 主要寸法図

(3) 隙間充填・除去装置の整備

処分坑道横置き方式 (PEM) の回収は、隙間充填材の除去と PEM の坑道外への搬出が主たる工程となるため、回収の実証試験の対象として、定置された PEM および PEM-坑道間に隙間充填材が適切に施工された状態を構築する必要がある。既往の検討では、隙間充填材に緩衝材相当の粘土密度 ( $1.37\text{Mg}/\text{m}^3$ ) が求められており、15cm 程度の狭隘な隙間に対してペレット方式の適用性が示されている。また類似するペレットの移送技術として、遠隔操作技術高度化調査で実施したスクリー方式による緩衝材の施工試験がある<sup>6)</sup>。これらの成果の本事業への応用可能性を検討したうえで、隙間充填材の施工方法としてスクリー方式によるペレット充填を採用した。

平成 28 年度は PEM-坑道間の隙間充填技術については、充填材となるペレットの製造試験、充填材の配合、充填部へのペレットの移送試験、および充填部の品質管理方法の検討を実施した。実証試験サイトである試験坑道 2 内に定置した PEM の周囲の充填体積は大きく、大量のペレットが必要となることから、ブリケッティング法による高圧縮ペレットの製造試験を実施した。その結果、大きさ  $20\text{mm}\times 30\text{mm}$ 、乾燥密度  $2.0\text{Mg}/\text{m}^3$  のペレットを効率よく製造出来ることを確認した。充填材の配合については確実に充填部の密度を達成するため、ブリケッティング法により造粒したペレットに 2mm 以下のクニゲル GX を重量比で 30% 混合させた材料配合案を得た (図-12)。



図-12 ブリケッティングによるペレット製造試験

このペレットを用いて、スクリーフィーダによる模擬土槽への移送試験を実施し、移送中の粒径や配合比等の充填材性状の変化、投入姿勢による材料の分離に係るデータを取得した (図-13)。

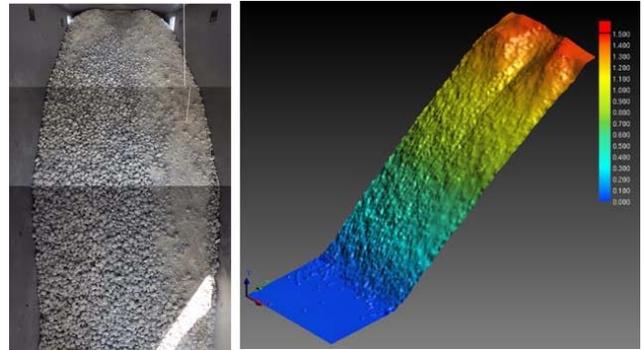


図-13 上部開放部を対象としたペレット充填状況

充填部が目標の密度を達成していることを非破壊で確認するため、誘電率計を用いて水分量から密度を計測する技術の検討を行い、適用の見通しを得た。これらの知見より、スクリーフィーダの配置等の装置の計画を進めていく。

隙間充填材の除去技術については、先ず除去作業の各工程で重要となる技術を抽出し、計画を具体化した。坑道において隙間充填材で覆われた状態の PEM を回収するために、充填材の除去技術に求められる要件は、充填材による PEM 拘束力の解放、回収装置が動作する環境の実現である。そのための充填材の除去工程は、①PEM-坑道間に密実に施工された充填材を掻き出すことが出来る状態とする“ほぐす”工程 (副産物化)、②ほぐした充填材 (副産物) を PEM-坑道間の隙間から掻き出す工程、③副産物を搬出装置に積込む工程、④坑道外への搬出の 4 つの主要な工程から構成され、①～④を PEM が搬出可能な状態になるまで行う。このうち除去作業の要となる①について、除去対象部分の形状、地下で確保可能な作業空間、PEM への影響等に留意し、機械的除去と水理的除去の組合せによる除去作業を計画した。

## II. 放射性廃棄物の地層処分にに関する調査研究

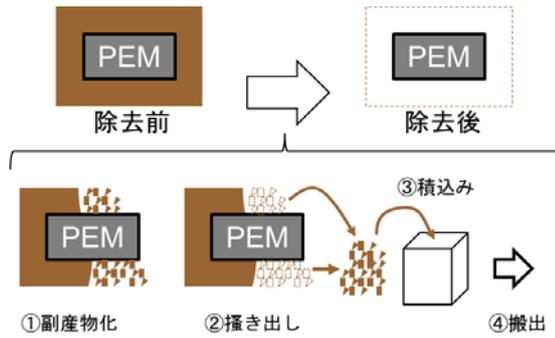


図-14 充填材の除去工程の概要

水理的除去については、回収技術高度化開発において、処分坑道縦置き定置方式に対して塩水を用いた緩衝材のスラリー化、吸引による除去、固液分離による塩水の再利用技術等の検討・実証試験を行った。本事業で対象とした処分坑道横置き定置方式 PEM では、塩水を溜めて充填材を浸漬することが出来ない、除去対象の物量が多いといった点が処分坑道縦置き定置方式とは異なるため、除去に利用する流体の圧力を高めたウォータージェットによる充填材の切削要素試験を選定した。

ウォータージェットによる充填材の切削性、充填材の飽和度や施工方法の影響、切削水（淡水／塩水）の影響等を調査するための予備試験を実施した。その結果、飽和度の高い充填材の除去が可能であり、同一飽和度であれば切削供試体の製作法（締固め／ペレット充填（図-15 参照））に因らず、切削効率は変わらないことを確認した。ウォータージェットは流体の運動エネルギーで対象物を切削するため、切削水の性状は効率に影響しないが、切削水に塩水を用いた場合は副産物がスラリー化し易く、除去工程のうち②～④が煩雑になることが懸念された。

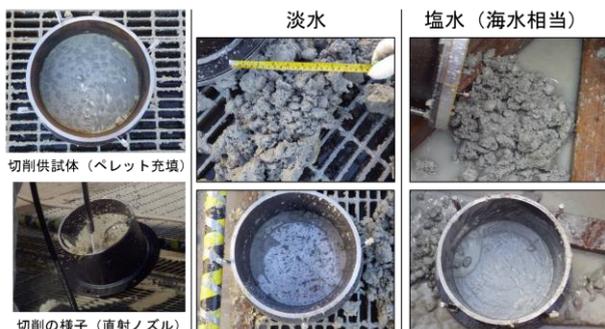


図-15 ウォータージェットによる充填材の切削試験（ペレット充填試験体、飽和度≒74%）

以上の結果より、水理的除去では除去後の工程や地下環境への影響が小さいことを加味し、切削水に淡水を用いることとした。

予備試験で用いた 20MPa の水圧では、PEM の鋼殻と同様の素材である鋼製容器への影響は確認されないが、使用するノズルや噴射条件によってはコンクリートの表面性状が低下する恐れが示唆された。これは回収作業を行うエアベアリング方式の定置・回収装置の走行面に影響するため、ウォータージェットの噴射方向等を今後検討する予定である。

機械的除去については、一般的なトンネルや土木工事で使用される掘削技術の整理を行った。

今回の試験や整理結果を踏まえ、水理的方法と機械的方法を組み合わせ、(1)で整備した断面形状の試験坑道における充填材の除去技術について、①～④の一連の除去工程で必要となる技術の整備を進めていく。

PEM-坑道間の隙間充填材について、これまでの基盤研究では、充填材に緩衝材相当の膨潤圧を持たせ、鋼殻内の緩衝材の膨出を抑制する方式について、ペレット方式の検討が進められてきた。一方、十分に飽和していないペレットでは、除去工程で重要となる①の工程が実証試験上不要となる。回収の実証試験の意義の観点からも、充填材の施工技術の見直しを含めた検討、技術の整備を進める。

### (4)地層処分実規模試験施設の活用

原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター内において、高レベル放射性廃棄物地層処分に關して、実規模・実物を基本として（実際の放射性廃棄物は使用しない）、緩衝材定置技術など操業に係る工学技術の実現性の検証、地層処分の安全確保の考え方、地層処分に使用される材料の性質を実感・体感し、理解を促進する「地層処分実規模試験施設」を整備してきた。

本年度は、実規模試験施設での H27 年度に検討した実証試験計画に基づき、計画の見直し、検討及び検討結果に基づく整備を実施した。平成 28 年度に実施した主な項目を以下に示す。

- ・緩衝材除去システムの整備
- ・理解促進活動

1) 緩衝材除去システムの整備

緩衝材除去システムは、図-16 に示すよう塩水リユース設備、遠隔操作設備、噴射・吸引設備から構成され、平成 27 年度に主要設備のうち、遠隔操作設備と噴射・吸引設備を実規模試験施設に移設している。

本年度は、理解促進活動に向けた整備のため、緩衝材除去システムを構成する主要設備である、塩水リユース設備のうち固液分離水槽の移設を行った。移設前後の実規模試験施設設備建屋内を図-17 に示す。

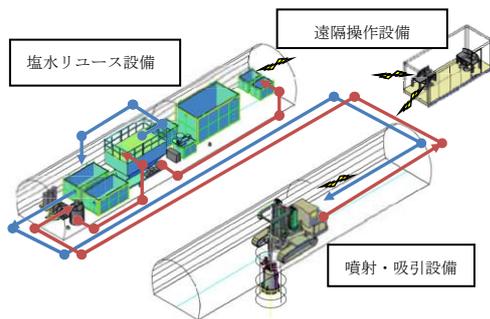


図-16 緩衝材除去システム概要図

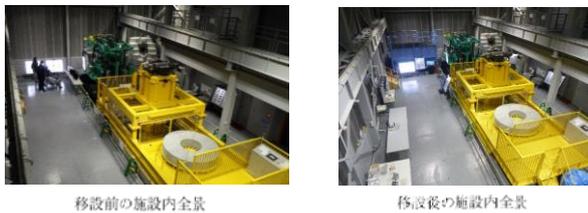


図-17 移設前後の施設内全景

2) 理解促進活動

地層処分実規模試験施設で実施した施設の一般公開、緩衝材定置試験の公開（「おもしろ科学館 2016 in ほろのべ」）を継続して実施した。平成 28 年度の来館者数は 5,563 人（前年度 5,472 人）であり、平成 22 年 4 月 28 日の開館以来の延べ来館者数 43,690 名となった。また「おもしろ科学館 2016 in ほろのべ」の開催日（7/30(土)、31(日))に緩衝材定置試験を一般に公開し、2 日間で 670 名（前年度 562 名）が来館した。

- 1) 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 28 年度地層処分調査等事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 報告書、2017.
- 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 26 年度地層処分原子力発電施設広聴・広報等事業 地層処分実規模設備運営等事業 報告書、2015.
- 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 26 年度地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）報告書、2015.
- 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 24 年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 1 分冊）遠隔操作技術高度化開発、2013.
- 5) 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 22 年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 1 分冊）遠隔操作技術高度化開発、2011.
- 6) 財団法人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 遠隔操作技術高度化調査 報告書(2/2)、2005.

## II. 放射性廃棄物の地層処分にに関する調査研究

### 2-3 地下環境での搬送定置・回収技術の高度化 開発－回収可能性の維持についての検討

#### ◇事業の概要

平成 27 年 5 月 22 日に閣議決定された「特定放射性廃棄物の最終処分にに関する基本方針」<sup>1)</sup>(以下、「基本方針」)では、地層処分事業の可逆性・回収可能性に関する規定とともに、“最終処分施設を閉鎖せずに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、最終処分施設の閉鎖までの間の特定放射性廃棄物の管理の在り方を具体化する”ことが示されている。

原環センターでは上記の基本方針の改定に先立つ平成 25 年度より、回収可能性を維持できる期間に関する検討に着手した<sup>2)</sup>。平成 27 年度からの 5 ヵ年計画で開始した本事業における“回収可能性の維持についての検討”では、平成 25～26 年度の検討成果を踏まえ、処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の長期的な安全性に与える影響等について検討を進めている。

平成 27 年度に策定した本事業の 5 ヵ年計画では、当初の 2 ヵ年において、回収可能性を維持した場合の影響の抽出・分析、及び回収可能性の維持に必要な技術の抽出・整理を幅広く行うことを目的とした定性的な検討を進める計画であり、平成 27 年度は“縦置きブロック設置方式”を対象としてこれらの検討を行った<sup>3)</sup>。

平成 28 年度は、平成 27 年度と同様な定性的な検討を“横置き PEM 設置方式”に対して行うとともに、回収可能性を維持することによる処分場への影響の定量的な評価技術の整備に向けて、坑道の安定性に関する定量的評価の条件や適用可能な解析手法の検討に着手した<sup>4)</sup>。さらに、可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理に向けた多面的な検討を進めた。

本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

#### ◇平成 28 年度の成果

(1) 回収可能性を維持に伴う影響の分析と技術要素マップの作成

##### 1) 検討方針

平成 27 年度と同様に、以下に示す検討方針の

もとで検討を実施した。

- ・ 処分場の成立性（バリア性能）への影響、回収の容易性への影響、回収作業による人工バリアと坑道環境への影響、について検討する。
- ・ 処分場の閉鎖をしない時間の影響、回収可能性の維持による物理的な影響、回収しない・回収した場合の影響、といった TPO（時間・場所・場合）を明確にした包括的な検討を行う。
- ・ 以上の検討をとおして具体化される回収可能性の維持に関連して必要となるハード技術やソフト技術を、関連する技術とその要素（特徴、適用方法、用いられる理論等）で構成する“技術要素マップ”として体系的に整理する。

#### 2) 検討方法

横置き PEM 設置方式を対象に、回収可能性の維持に伴う影響に関する抽出・分析を、TPO や温度・水理・力学・化学（以下、THMC）を基軸として、既往の検討で実績のある手法（Features, Events and Processes (FEP) や Process・Influence・Diagram (PID)）を用いて行った。処分概念、回収可能性の維持期間、回収シナリオ（廃棄体定置後から回収が決定されるまでのシナリオ）、回収工程等、関連する前提条件を設定し、回収可能性の維持に伴う影響を評価する基本ケースと検討ケースを、回収シナリオと処分場状態オプションを組合せて、図-1 のように設定した。

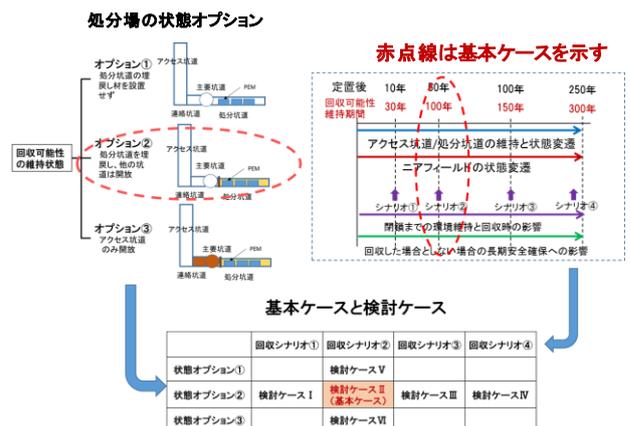


図-1 基本ケースと検討ケースの設定

回収可能性を維持する処分場の状態オプションは以下の3つである。

- ① 全ての坑道を開放した状態。
- ② 処分坑道を埋戻した後、端部にプラグを設置し、処分坑道以外の坑道は開放した状態。

③処分坑道、主要坑道、連絡坑道を埋戻し、アクセス坑道のみを開放した状態。

3) 影響の抽出と分析

上記の検討方法から導かれた結果の1つとして、状態オプションの違いによる回収可能性を維持することによる処分場の閉鎖前と閉鎖後の影響の増減などの傾向を定性的に把握した(図-2)。閉鎖前の影響は、坑道を開放する期間が長くなることで、坑道安定性が損なわれる可能性が増し、維持・補修作業が増加し、関連する作業、環境負荷、コストが増大する。一方で、維持補修が行われることによって安定性が確保されていると、PEM回収時の作業、環境負荷、コストは低下する。閉鎖後の安全機能に与える影響は、全ての指標について坑道の開放期間に比例して増加する傾向となる。

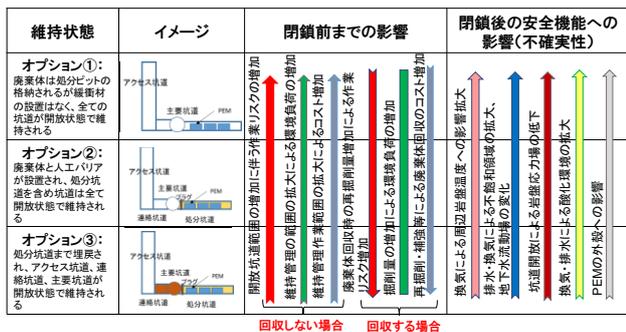


図-2 状態オプションの違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響の変化

4) 技術要素マップの作成と技術課題の整理

全ての検討ケースを対象にして、必要技術を抽出した技術要素マップを作成し、その上で整理し

た技術的課題について重要度(本事業において取り扱うのに相応しい内容かどうか)、緊急度(検討を実施していくプロセスにおける順番)等の指標を用いた分析を行った。分析結果を表-1に示す。表中の薄い色はハード技術、濃い色はソフト技術であり、I~IIIを記した欄は、IIIが最も重要度や緊急度が高いことを表している。

(2) 定置方式の違いによる影響の比較

平成27、28年度の2年間の検討をもとに、縦置きブロック定置方式と横置きPEM定置方式について、回収可能性の維持に伴う影響の定性的な比較検討結果をまとめた。定置方式の違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響に関する定性的な比較結果を図-3に示す。横置きPEM定置方式では特定の廃棄体を回収するために、同一坑道内の関係のないPEMも回収する必要性が発生する場合は、回収作業の量が増える。閉鎖後の長期安全性への影響の観点では、PEMは鋼製の外殻が健全である限り外部の影響を受けることがないため、人工バリア性能への影響は、横置きPEM方式の方が小さくなる。

定置方式	閉鎖前への影響		閉鎖後への影響	
	共通	異なる影響	共通	異なる影響
縦置きブロック定置方式	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑道開放区間長が最大となる状態で、支保工等の維持管理・更新に係る作業リスク、環境負荷、コストは最大となり、維持期間に伴い増加する。一方で、廃棄体回収時には最も容易となりリスク、環境影響、コストとも最小となる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>オーバーバック回収・搬出時の放射線対策が必要となる。</li> <li>オーバーバック周辺の掘削材除去に係るコストがかかる。(構成部品の個々の除去を要する)</li> <li>坑道埋戻し材の撤去量が多くなる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑道開放区間長が最大となった状態で、掘削材除去への影響が顕著となる。特に水理と地化学特性は、維持期間の増加とともに変化が増大する。</li> <li>坑道の埋戻し区間が増えると同程度掘削への影響は最大スケールとも減少していく。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>状態オプション①では、オーバーバックが長期にわたり酸素と水濡の影響を受け腐食が促進される。</li> <li>状態オプション②での掘削材の搬出の可能性がある。</li> </ul>
横置きPEM定置方式	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑道が埋め戻された状態では、閉鎖前の影響に際するこの傾向が逆転する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>PEM定置後の空間が狭小となるため坑道の維持管理が複雑となる。</li> <li>一部のPEMを回収する場合の対象外のPEMも撤去する必要がある。</li> <li>PEMではベントナイトも一緒に回収することになり、回収・搬出、搬出後の対応が多くなる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑道の埋戻し区間が増えると同程度掘削への影響は最大スケールとも減少していく。</li> <li>廃棄体回収時は、処分坑道ごとに実施されるため影響は局所的で維持管理時の影響に支配される。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>PEMの鋼製外殻のために坑道の状態による性能への影響は小さい。</li> </ul>

図-3 定置方式の違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響比較結果のまとめ

表-1 技術課題に対する重要度および緊急度の分析

技術の分類	技術内容	課題	重要度	緊急度
閉鎖後長期の安全性	坑道開放と回収が長期安全性に与える影響を評価するための技術・坑道等開放による影響(程度、範囲)予測	①評価のためのデータ整備状況調査、データ整備	II 他の研究機関、技術開発等で既に研究が進められている。	課題①: II 他の機関等での研究実施状況の調査・整理が必要。未実施なら整備。
	坑道開放と回収による長期安全性への影響を緩和・削減するための技術 ・周辺坑道の水理学的影響緩和・削減 ・地化学的影響緩和・削減 ・人工バリア初期性能への影響緩和・削減	①維持状態・期間を想定した処分場への水理学的・地化学的影響と対策工効果の定量的評価 ②維持状態・期間を考慮した維持管理技術の高度化 ③回収技術のさらなる高度化、合理化技術の検討 ④維持状態・期間を想定した計測・測定技術(モニタリング技術)整備	III 回収可能性維持期間を対象とした高度化、合理性向上の検討は他研究において未実施。	課題①: III 課題②: III 課題③: III 課題④: II 影響と対策工効果を定量的に把握した後、具体的方策を示す。
事業期間中の安全性	坑道開放および回収作業時の作業、周辺環境影響、コスト評価のための技術 ・放射線安全、一般労働安全性の評価 ・環境影響の評価 ・コストの評価	①コスト評価のための根拠データ整備	II 他の研究機関、技術開発等で既に研究が進められている。	課題①: II 他の機関等での研究実施状況の調査・整理が必要。未実施なら整備。
	坑道開放および回収に伴う影響を緩和・削減するための対応技術	①維持状態・期間を想定した処分場への水理学的・地化学的影響と対策工効果の定量的評価 ②維持状態・期間を考慮した維持管理技術の高度化 ③回収技術のさらなる高度化、合理化技術の検討 ④維持状態・期間を想定した計測・測定技術(モニタリング技術)整備	III 回収可能性維持期間を対象とした高度化、合理性向上の検討は他研究において未実施。	課題①: III 課題②: III 課題③: III 課題④: II 影響と対策工効果を定量的に把握した後、具体的方策を示す。

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

### (3) 回収可能性の維持に伴う影響に関する定量的評価方法の調査・検討

#### 1) 検討方針

回収可能性を維持することによる影響を定量的に評価するためには、回収可能性を維持する間の坑道の状態や維持期間の違いを踏まえた上で、閉鎖後の長期安全性および閉鎖前の作業環境の安全性に与える影響を THMC の観点から定量的に評価する必要がある。THMC それぞれの影響は、相互に影響し合っており、連成解析による評価が求められるが、本事業では各影響を把握するために、個々の解析を実施することとした。回収可能性を維持する間の状態や期間を考慮して定量的に評価を行うべき検討項目を図-4 に示す。

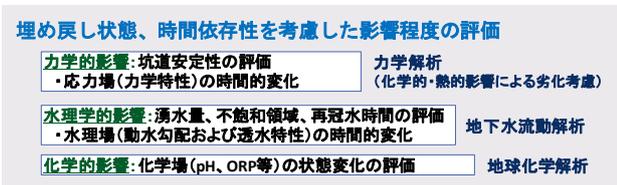


図-4 回収可能性維持状態・期間を考慮した定量的評価検討項目

これらの定量的な評価手法は、影響の定量的な評価だけでなく、影響の低減技術の効果の評価にも活用が可能となる。ここでは、地下の構造物の初期性能や品質を向上させるための技術、及び維持管理・補修技術の2つを影響低減技術について検討した。本年度は、力学的影響の評価方法の検討として、坑道安定性に関する解析手法の検討に着手し、定量的に評価するための条件を検討し、既存の解析手法を用いた試算による適用性の確認を行った。

#### 2) 坑道安定性の解析的評価 (試行結果)

坑道安定性に関する解析的評価では、第2次取りまとめ<sup>5)</sup>や NUMO の技術資料に示されている既往検討の処分場の設計を基に、岩盤や支保工など各材料を構成モデルとして設定し、時間依存性を考慮できる解析手法を用いた試行的な解析を行い、検討を行った。解析には有限差分法による解析コードである FLAC3D (Itasca 社) を用いた。解析条件等は以下の通りである。

- ・岩盤のクリープ変形 (コンプライアンス可変型モデル (大久保モデル))、透水性変化 (ひずみ-透水係数関係式でモデル化) を考慮
- ・支保工 (吹付けコンクリート、鋼製支保工) の

材料劣化、緩衝材・埋戻し材の飽和進行に伴う物性変化を考慮

- ・長期力学解析における初期応力状態は、坑道・処分孔の掘削解析結果を使用

検討ケースは、岩種、定置方式、埋め戻しの状態オプションを組み合わせる 8 ケースを設定して長期力学解析を実施した。長期力学解析の一例として、新第三紀堆積岩・横置き方式・処分坑道までを埋め戻した場合 (ケース 8) における解析結果を図-5 に示す。

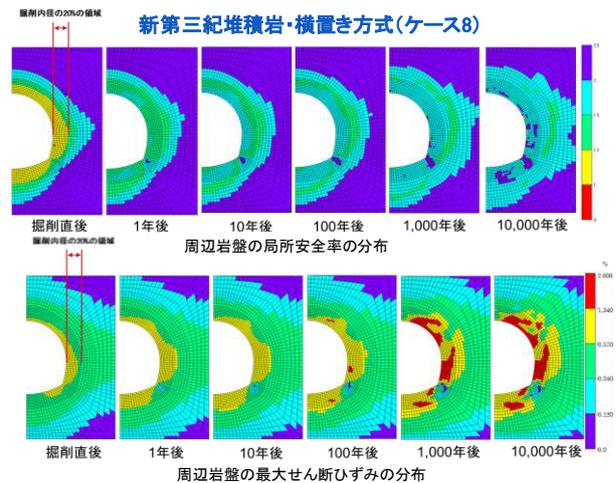


図-5 周辺岩盤の局所安全率と最大せん断ひずみの分布の変化 (ケース 8)

以上の解析結果を基に、坑道の力学的安定性への影響評価をするにあたり、評価指標として、第2次取りまとめ<sup>5)</sup>と同様に設計時の局所安全率、せん断ひずみ、支保工の応力度の基準を用いた。

図-5 より、新第三紀堆積岩では、坑道安定性の評価の目安となる局所安全率  $F_s=1.2$  の領域が掘削直後に坑道掘削径の20%以下になることを満足し、時間とともに安定する。また、限界せん断ひずみ  $\gamma_{max}=0.570\%$  (平均値) 超過領域は、時間とともに岩盤の外側に広がり、1万年後には坑道掘削径の30%の領域まで拡大した。ただし、ここで用いた評価基準は安全裕度を見込んだ掘削時の基準であり、掘削後、長期における坑道の力学的安定性の評価基準としては適切ではないと考えられる。そこで、坑道安定性の評価基準を限界せん断ひずみの上限値 (1.340%) とし、坑道周辺の肩部 (最初に不安定化が進行する箇所) に着目して坑道安定期間を評価した。また、吹付けコンクリートの降伏強度を評価基準とした検討も

った。その結果、評価基準によって坑道安定期間に差（数十日～数百年）が生じ、評価基準の考え方が重要であることが分かった。

3) 坑道安定性の影響低減技術の効果の検討

坑道安定性の影響低減技術として、支保工の剛性の裕度確保（鋼製支保工の建込間隔を 1m から 0.5m に変更：ケース 9）、吹付けコンクリートの溶脱の抑制（溶脱完了時期を 400 年から 1 万年に延長：ケース 10）の 2 ケースを対策工として効果を検討した。その結果を図-6 に示す。ケース 9 は、最大せん断ひずみ、支保工応力度のいずれで評価した場合においても、基本設定より坑道安定期間は長くなった。一方、ケース 10 では、最大せん断ひずみで評価した場合は、坑道安定期間は基本設定より長くなったが、支保工応力度で評価した場合は、短くなる結果となった。こうした影響低減技術の効果の検討には、さらに構成材料の劣化速度等を考慮することが必要である。

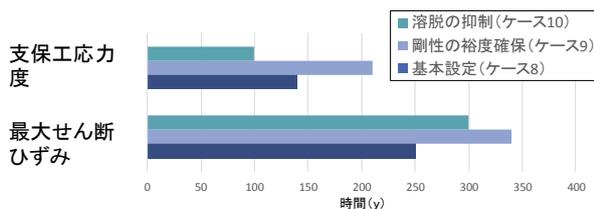


図-6 影響低減対策例における坑道安定期間の評価結果

(4) 可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理

既に述べたように、平成 27 年 5 月に改定された基本方針では、今後より良い処分方法が実用化された場合等に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにするため、「基本的に最終処分に関する政策や最終処分事業の可逆性を担保すること、及び「機構は、特定放射性廃棄物が最終処分施設に搬入された後においても、安全な管理が合理的に継続される範囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性（回収可能性）を確保する」ことが定められた。

こうした状況を踏まえ、平成 27 年度より「可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会」（以下、「検討会」という。）を設置して、可逆性・回収可能性に関するわが国における今後の具体的な運用や技術開発に資する多面的な検討を進めている。

平成 27 年度から着手した検討では、議論に先立ち、最初に以下について確認・共有した。

- ①本検討会における議論の前提と視点の確認
- ②可逆性・回収可能性に関するわが国のこれまでの議論及び制度の把握
- ③海外において先行的に行われた検討や取組の動向等の把握

特に、上記②③の情報の把握・共有を通して、表-2 に示す 13 の検討項目を本検討会で議論の対象として抽出し、これらについての議論を順次進めることとした<sup>3)</sup>。

表-2 議論の対象とした 13 の検討項目と進捗

平成 27 年度に検討を進めた項目
<input type="checkbox"/> 考慮すべき動機
<input type="checkbox"/> 考慮すべき動機の事業段階に応じた変化
<input type="checkbox"/> 可逆性・回収可能性の実行に係る判断基準・判断指標
<input type="checkbox"/> 回収の技術的な実現性
<input type="checkbox"/> 回収の容易性
<input type="checkbox"/> 回収後の廃棄体管理
平成 28 年度に検討を進めた項目
<input type="checkbox"/> 処分場設計への技術的要求
<input type="checkbox"/> 回収可能性に係る戦略・計画の策定
<input type="checkbox"/> 研究開発・実証
<input type="checkbox"/> 閉鎖せずに回収可能性を維持する場合の施設設計や安全性への影響
<input type="checkbox"/> モニタリング等の役割
<input type="checkbox"/> 費用
<input type="checkbox"/> 意思決定のホールドポイントに係る留意事項

平成 28 年度までの検討会活動により、上表の全ての項目の検討を終えている。平成 29 年度には、それらの検討結果の取りまとめを行う予定である。

- 1) 経済産業省、「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）」、<http://www.meti.go.jp/press/2015/05/20150522003/20150522003-1.pdf>
- 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 26 年度 地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）平成 23 年度～平成 26 年度 総括報告書、2015
- 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 27 年度地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）報告書、2016
- 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 28 年度地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）報告書、2017
- 5) 核燃料サイクル開発機構、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処理処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—分冊 2 地層処分の工学技術、JNC TN1400 99-022、1999

### 3. 沿岸部処分システム高度化開発

#### ◇事業の概要

平成 27 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」では、国が「前面に立って取り組む」こと等が示され、総合資源エネルギー調査会地層処分技術ワーキンググループにおいて、地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準についての検討が進められた。同ワーキンググループにおける検討結果は、平成 27 年 12 月の中間整理<sup>1)</sup>を経て、平成 29 年 4 月にとりまとめられ、好ましい特性が確認できる可能性が相対的に高い地域に関する考え方を示すとともに、沿岸部を“輸送面でも好ましい地域”として整理している<sup>2)</sup>。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、別途設置された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、平成 28 年 8 月のとりまとめでは、“海域を含めた沿岸部において地層処分を実現するために必要な基本的な技術はおおむね整備されている”、“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、併せて技術の高度化に向けて取り組むべき課題とその方向性を示している<sup>3)</sup>。

平成 27 年度より開始した本事業では、上記の背景を踏まえ、沿岸部における処分システムの構築を念頭に、初年度に沿岸部の特性などに関連したこれまでの地層処分研究開発成果の再整理を行い、再検討が必要な課題などを抽出・整理するとともに<sup>4)</sup>、並行して進められた研究会にこれらの成果を提供して議論を支援した。本事業で当センターが担当する工学技術の高度化に向けた取組については、研究会で示された技術の高度化に向けて取り組むべき課題とその方向性を踏まえ（沿岸部研究会で示された課題を表-1 に示す）、平成 28 年度以降の実施項目（大項目）として次の二つを設定し、含まれる個々の課題に関する調査研究計画を具体化したうえで着手している。

- ①人工バリア材料などに関する劣化や変質に関する現象の把握（各種特性などのデータ拡充）
- ②塩水環境下ニアフィールド領域での処分システムの成立性に係わる手法の提示

以下に、当センターが担当する工学技術の高度化に向けた平成 28 年度の実施内容を整理する。なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により、産業技術総合研究所、日本原子力研究開発機構、電力中央研究所及び原子力環境整備促進・資金管理センターの 4 機関が共同で、沿岸部における地層処分技術に関する 3 つの技術分野の高度化開発（地質環境の調査技術、工学技術、安全評価技術）として実施したものである。

表-1 沿岸部研究会で示された課題（工学技術分野）

<ul style="list-style-type: none"> <li>・オーバーパックの腐食速度に係るデータの拡充</li> <li>・緩衝材の各種特性に係るデータの拡充</li> <li>・セメント系材料の各種特性に係るデータの拡充</li> <li>・グラウト材の各種特性に係るデータの拡充</li> <li>・グラウト注入施工方法およびその長期的耐久性の検討</li> <li>・ニアフィールド領域構成材料に係る各種データの拡充に伴う現象モデルの高度化</li> <li>・処分概念およびそれに必要な総合的評価手法の構築</li> <li>・地上・地下施設の総合的な設計の検討</li> </ul>
--

#### ◇平成 28 年度の成果<sup>5)</sup>

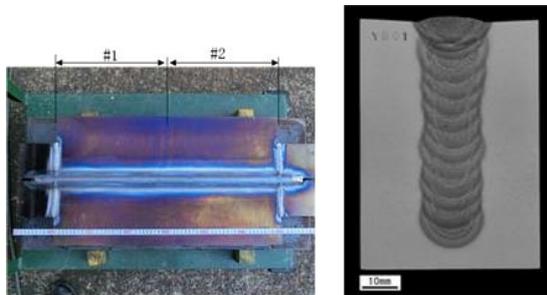
- (1)人工バリア材料などに関する劣化や変質に関する現象の把握－オーバーパッカー

沿岸部における炭素鋼オーバーパックの適用性・成立性及び長期的な信頼性向上を目的として、当センターでは炭素鋼の溶接部の腐食挙動に着目し、電気化学試験により腐食挙動に関するデータの取得に着手した。

平成 28 年度は、市販の溶接材料を用いた溶接試験体（以下、「従来材」）を製作して、腐食試験の条件設定のための予備試験を実施するとともに、Ni を添加した改良溶接材料の製作を実施した。溶接材に Ni を添加することにより、市販の溶接材料に比べて溶接部の選択的な腐食が改善されることが報告されている<sup>6)</sup>。

炭素鋼の母材は既往研究との整合性を考慮して SF340A とした。従来材の作製では、溶接方法は TIG 溶接とし、市販の溶接材料 (YGW17) を用いた。溶接試験体の外観及び断面のマクロ写真を図-1 に示す。断面マクロ観察の結果、一層当たりの溶着量が十分であり、溶接部の選択的な腐食が生じる要因となる原質部と再熱部が適切に形成されていることを確認した。腐食試験片は、浸透探傷検査及び放射線検査の結果に基づき、溶接欠陥が存在しない部分から採取した。腐食試験片

の表面に欠陥がないことを目視確認した後、シリコン樹脂で試験面以外をマスキングした。



(a) 試験体外観 (b) 断面マクロ写真

図-1 溶接試験体の外観及び断面マクロ写真

定電位分極試験により溶接部における選択的な腐食の発生を短時間で再現するための予備試験を実施した。試験溶液の濃度は $[Cl^-]=19,000$  ppm、 $[HCO_3^-]=150$  ppm、試験温度は $80^\circ C$ 、試験電位は $E=-650$  mV<sub>SCE</sub>として100時間の定電位分極試験を実施した。予備試験の結果からは、溶接部の選択的な腐食が明確に観察できなかったため、試験電位を見直したうえで平成29年度の本試験を実施する。

Niを添加した改良溶接材は、既往の報告<sup>6)</sup>に基づき、母材の希釈効果を考慮して溶接材料のNi濃度の目標値を0.30wt%として製作した。

(2) 人工バリア材料などに関する劣化や変質に関する現象の把握－緩衝材－

緩衝材に割り当てられた閉鎖後長期の安全機能が発揮されることを示すためには、施工時の品質に対するその後の変遷挙動を把握しておく必要がある。特に、工学的な観点では、緩衝材の施工品質や施工後の再冠水に至る迄の変遷挙動(場の擾乱による時間変化等の影響を考慮した緩衝材の再冠水挙動)を定量的に評価し、安全評価が期待する初期性能を達成することを示す必要がある。そのため、当センターでは、工学的な観点から緩衝材の再冠水挙動に影響を及ぼす因子として、①膨潤挙動、②化学変質(イオン交換)、③力学性能変化、④地下水浸潤(流入量、液種)、⑤ガス移行(間隙空気移行)に関する知見等の拡充に取り組みを進めてきた<sup>7)</sup>。

本事業では、これらの関連する調査研究の成果及びわが国の沿岸部の特性を踏まえ、必要となる知見やデータを拡充することとしている。具体的

には、沿岸部の特性、特に地下水組成(塩水系地下水)の影響を受ける事象として、緩衝材の密度均質化、浸潤速度、緩衝材流出を本事業における検討対象として抽出し、これらについて、既存の淡水条件等での研究と比較検討するための知見やデータを拡充することを目的として、塩水系地下水の条件で以下の試験を行った。

- ・地下水浸潤速度及び透水係数の取得に関する試験
- ・緩衝材流出に関する実験室規模の試験
- ・設置方式による膨潤性能への影響に関する試験
- ・密度分布が膨潤量に及ぼす影響に関する試験

このうち、平成28年度は、地下水浸潤速度の測定と緩衝材流出時の境界条件の取得に着手した。

地下水浸潤速度の測定には、長さ30cmの円柱状のセルを用い、試験溶液は人工海水とCaCl<sub>2</sub>のイオン濃度が海水相当となる溶液とした。これまでに実施した関連試験実績<sup>7)</sup>から、試験開始後約2年間(平成30年度まで)でセル内の緩衝材が飽和すると想定され、飽和後に排水量を測定することにより、透水係数も取得することができる。

緩衝材流出試験は、これまでの関連する取組において、緩衝材の流出が発生する条件や流出挙動の定量的な評価に向けた種々の条件での試験が行われている<sup>7)</sup>。沿岸部の海水系の地下水を念頭に置いた場合、イオン種、イオン濃度の影響を考慮する必要がある。そのため、平成28年度は海水中の主要成分であるMgとKの影響について検討した。NaCl溶液を用いた既存の試験結果との比較のために、イオン強度は0.5に統一し、MgCl<sub>2</sub>溶液及びKCl溶液を通水液として流出試験を行った。通水量と緩衝材の流出量との関係を図-2に示す。得られた近似線の勾配は、蒸留水、CaCl<sub>2</sub>水溶液、KCl水溶液の場合、NaCl水溶液とMgCl<sub>2</sub>水溶液の場合でそれぞれ同様の傾向を示した。緩衝材流出試験後の緩衝材とセルの界面の状態

(図-3)は、通水液の種類による特徴が見られ、これまでの淡水あるいはNaCl溶液での試験で見られた水みちの形状とは大きく異なっていた。緩衝材の膨潤は溶存イオン種やイオン強度によって影響され、膨潤のしかたが異なるため、流出の挙動も違うと考えられる。今回の試験では、流出量に対しては大きな影響はなかったが、イオン種により、膨潤速度、浸透等も異なるため、長期的

## II. 放射性廃棄物の地層処分に關する調査研究

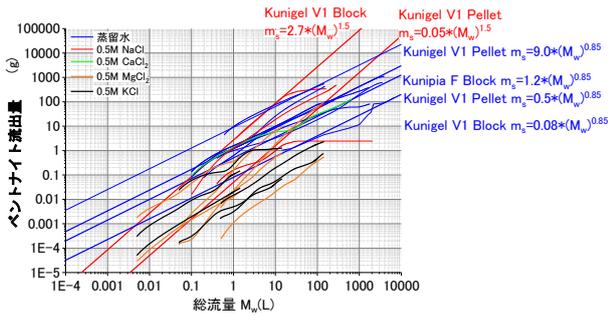


図-2 緩衝材流出量と通水量の關係

な流出挙動への影響の可能性を考えて、今後分析を行う予定である。また、本年度の試験は単一成分の水溶液（海水のイオン強度と同等濃度）を用いたが、実際の海水系地下水は、Na イオン濃度の高い溶液中に Mg イオンや K イオンが共存している。その際には、最も濃度の高い Na イオンによる特性が強く発現し、他のイオン影響は緩和されると予測されるが、今後、人工海水などでの試験により、複数イオンによる影響に関するデータを取得し、影響の大きさを確認する必要がある。



(a)NaCl 溶液通水時 (b)MgCl<sub>2</sub>溶液通水時

図-3 緩衝材流出試験時の緩衝材の表面観察

### (3) 人工バリア材料などに関する劣化や変質に関する現象の把握—セメント系材料—

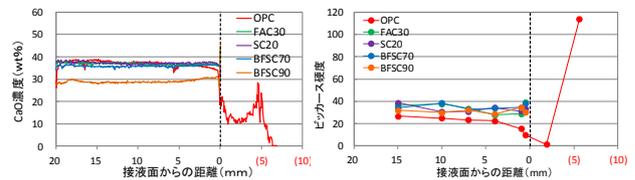
セメント系材料は、地下施設の構成要素として、坑道の支保工及びインバート、更に TRU 廃棄物処分では構造躯体ならびに充填材としての使用が考えられている。沿岸海底下では、塩分を含む地下水によるセメント変質及び鉄筋腐食によるひび割れの 2 つの要因により機械的特性が変化することがある。そのため、本事業では、処分場操業期間中の空洞安定性の確保の観点から、セメント系材料の変質に伴う強度変化を把握することを目的とした試験を実施し、知見やデータを拡充する。平成 28 年度は、以下の取組を進めた。

1) 10 年程度の期間人工海水に浸漬したバルク試験体（セメントペースト）の変質と機械的

特性の關係を取得するための試験

### 2) 産業界で検討されている鉄筋腐食に関する塩化物イオン浸透モデルの調査

上記 1) の試験結果から、普通ポルトランドセメントの Ca 溶出が生じた領域において硬度が低下することを確認した。一方、混合セメントについては Ca 溶出及び硬度低下が認められなかった（図-4、図-5）。このことから、海水系地下水によるセメント変質により、操業期間中にセメント系材料の強度が低下する可能性を把握した。今後、セメント系材料の変質と強度の關係を定量化するために、様々な塩水環境におけるバルク状のセメント系材料からの成分溶出量と強度の低下量の關係を把握するための試験を実施する予定である。



(横軸の 0 より右側はバルク試験体外側に生成した二次鉱物)

(a)接液面からの距離と Ca 濃度の關係

(b)接液面からの距離とピッカース硬度の關係

図-4 バルク試験体の浸漬試験結果（浸漬期間 10 年程度）  
 (OPC: 普通ポルトランドセメント、FAC: フライアッシュセメント、SC: シリカセメント、BFSC: 高炉セメント、数字は混合材の混合率 (%))

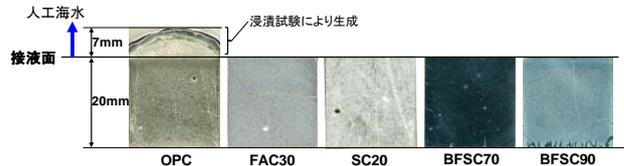


図-5 バルク試験体の断面写真

上記 2) では、最初に海洋土木構造物等を対象として産業界で検討されている塩化物イオン浸透モデルについて、文献を調査した。次に、沿岸海底下における処分場の支保工等の鉄筋コンクリート構造物への塩化物イオンの浸透挙動及び鉄筋腐食の評価の際の観点を以下の様に設定し、文献の調査から得られたモデルの適用性を検討した。

・塩化物イオンの浸透では、塩化物イオンの岩盤側からの浸透、セメント水和物への固定等に加え、坑道側が建設、操業中に空気と接しているため、空隙が不飽和な状態での塩化物イオンの移動やセメント水和物に

固定された塩化物イオンの炭酸化による分解を考慮する

- ・鉄筋腐食判定ではCl<sup>-</sup>濃度に加え、[Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>]を用いることも考慮する

TRU 廃棄物の人工バリアの長期挙動評価で用いる化学解析手法<sup>8),9)</sup>を参考にしつつ検討した結果、上記の点を考慮できる可能性のある塩化物イオン浸透モデルを見出すことができた<sup>10),11)</sup>。いずれのモデルも、地上構造物を対象としているため、今後、地下環境での塩化物イオンの浸透挙動への適用性のケーススタディ等による検討を実施する予定である。

(4) 塩水環境下ニアフィールド領域での処分システムの成立性に係わる手法の提示

ニアフィールド領域における地層処分システムの成立性を考える際には、次の二つの観点からその見通しを示す必要がある(図-6)。

- ①閉鎖後長期の安全性を満たす(閉鎖後長期の安全評価の枠内で扱われる取組)
- ②設計・構築する処分場が閉鎖後長期の安全評価の前提となる初期性能を達成する(設計・建設～閉鎖段階におけるエンジニアリングの枠内で扱われる取組)

本事業では、研究会による課題整理(表-1)を踏まえ、上記②(図-6の緑色の部分)を工学技術の高度化開発において取り組むべき課題とする。

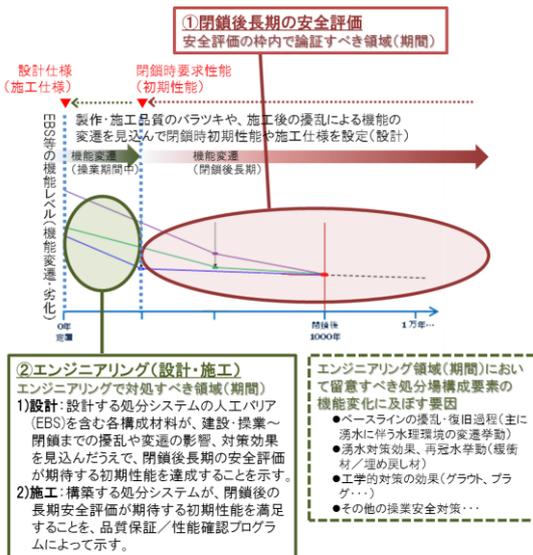


図-6 エンジニアリングの枠内で扱われる処分システムの成立性

本課題については、平成27年度に実施した北欧(沿岸部での立地を進めているスウェーデン及びフィンランド)の先行的な取組事例に關する調査結果から、閉鎖段階までにおける廃棄体定置後の人工バリアの機能発揮に影響する要因(特に、湧水による緩衝材流出挙動)に留意する必要性が示されている<sup>4)</sup>。これを踏まえ、わが国の沿岸部で特徴的な地下の湧水環境や地下の構成材料に対する化学的影響などに関する重要な要素や影響因子を特定し、成立性に係わる手法の提示に向けた検討を進める。成立性を示すための手法を検討する上では、候補サイトが特定される前のジェネリックな段階に留意して、地質環境モデルや適用する処分システムの構成(図-7)などを仮設定(地質環境:新第三紀堆積岩、処分概念:豎置き定置方式)し、必要となる知見やデータなどの体系を整備する。

上記の検討方針を踏まえ、本課題に關する全体計画として、次の二つの実施項目を設定して取組を進める。

- 1) 処分システム成立性の提示に係わる手法及び体系の整備
- 2) 水理解析体系の整備

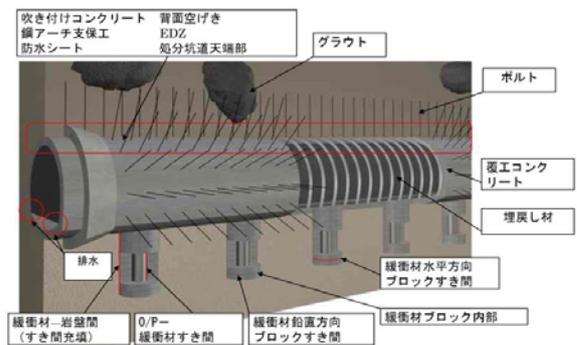


図-7 想定されるニアフィールド領域の構成要素

上記1)に關して、平成28年度は、海外事例(主にフィンランドやスウェーデン)に關する調査を実施し<sup>12),13)</sup>、わが国の処分システムの成立性の提示に必要な手法や知見などの体系化の基礎となる素案を整備した(図-8)。また、国内文献の調査も併せて実施し、上記の体系の素案との対応関係を整理した。

## II. 放射性廃棄物の地層処分に關する調査研究

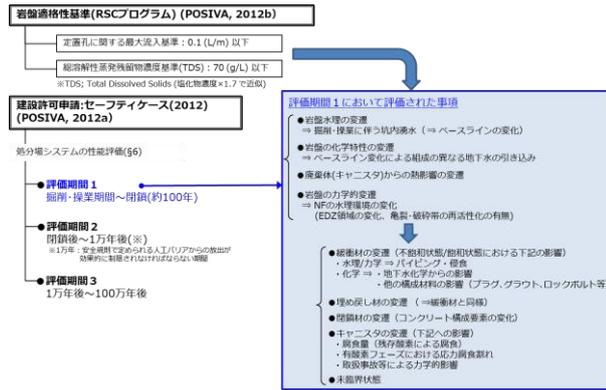


図-8 フィンランドの性能評価書における建設・操業～閉鎖段階までの評価や知見等の体系

今後は、北欧の評価体系を基本として、北欧の検討事項に含まれない項目について(わが国の処分概念に固有の構成要素)、一般的な土工学分野における適用事例などから補完しつつ、わが国に適用可能な手法や体系の整備を進める。

2)については、処分システムの成立性を提示するうえで必要となる水理環境の把握のために、水理解析体系の整備を実施した。最初に、沿岸部に特有となる因子を整理し、沿岸部で想定される小さな動水勾配、塩淡境界ならびに沿岸海底下における海水の静水圧を考慮すべき因子として挙げ、地下水流動解析によりその影響を評価した。次に、操業手順が処分坑道の湧水状況に与える影響を把握することを目的として、ネスティング手法(入れ子構造の解析モデルを用いた手法)を用いて空間スケールの異なる三次元水理地質構造モデルを構築し、水理解析体系を整備した。本モデルを用いて建設・操業過程を考慮した非定常の地下水流動解析を行った。その結果より、掘削過程の違いによる処分坑道の湧水量について比較・評価を行い、その傾向を把握した。平成29年度は、ニアフィールドスケールモデルの作成を含む水理解析体系の更なる整備を進めるとともに、エンジニアリング的な手法(止水対策など)の効果に関する検討を進める。

3) 年計画の最終年度には、本事業で整備する手法や体系に、沿岸部で想定される条件や特定の処分概念を例題として適用する予定である。このような取組を経て、わが国の沿岸部における処分システムの成立性を例示的に示す(要素組み合わせ、配置、坑道開放状態などの柔軟性)とともに、個別材料に関する基本情報・要求性能、操業手順

の柔軟性を示すことが可能と考える。

- 1) 総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会 原子力小委員会地層処分技術ワーキンググループ、科学的有望地の要件・基準に関する地層処分技術WGにおける中間整理、2015
- 2) 総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会 原子力小委員会地層処分技術ワーキンググループ、地層処分に關する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果(地層処分技術WGとりまとめ)、2017
- 3) 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
- 4) 産業技術総合研究所、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、電力中央研究所: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、日本原子力研究開発機構、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28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、2017
- 6) 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22年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物関連処分システム紅玉要素技術高度化開発報告書(第2分冊) -人工バリア品質評価技術の開発-(1/2)、2011
- 7) 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27年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学確証技術開発 人工バリア品質/健全性評価手法の構築-緩衝材、2015
- 8) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物処分技術検討書-第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-、2005
- 9) 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(第4分冊) -人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア初期条件の設定-、2017
- 10) 例えば、細川佳史、山田一夫、Bjorn JOHANNESSON、Lars-Olof NILSSON、熱力学的相平衡を考慮した Multi-species 物質移動モデルの構築、コンクリート工学年次論文集、Vol. 29、No. 1pp. 957-962、2007
- 11) 例えば、細川佳史、小川彰一、山田一夫、水分・CO2 ガス及び液相化学種の移動と熱力学的相平衡との連成システムによる複合劣化の再現、第65回セメント技術大会講演要旨、pp. 308-309、2011
- 12) Posiva (2012a): "Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Synthesis 2012", POSIVA 2012-12, 2012
- 13) Posiva (2012b): "Rock Suitability Classification, RSC 2012", POSIVA 2012-24, 2012

## 4. TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発

### 4-1 事業の全体概要

本開発は、再処理工場および混合酸化物燃料の加工施設から発生する放射性廃棄物（TRU 廃棄物）の地層処分における人工バリア材の特性（ベントナイト系緩衝材・セメント系材料における長期にわたる複合的事象の評価）ならびに重要核種の影響（ヨウ素 129 及び炭素 14 による被ばく線量の低減対策）について、特に長期評価の信頼性確保の観点から、これまでに明らかになった課題を解決し、安全評価の信頼性を向上させることを目的としている。

TRU 廃棄物は、図-1 に示すように、使用済燃料の再処理によってガラス固化体（高レベル廃棄物、以下 HLW という）を製造する際に発生する種々の廃棄物であり<sup>1)</sup>、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>2)</sup>。

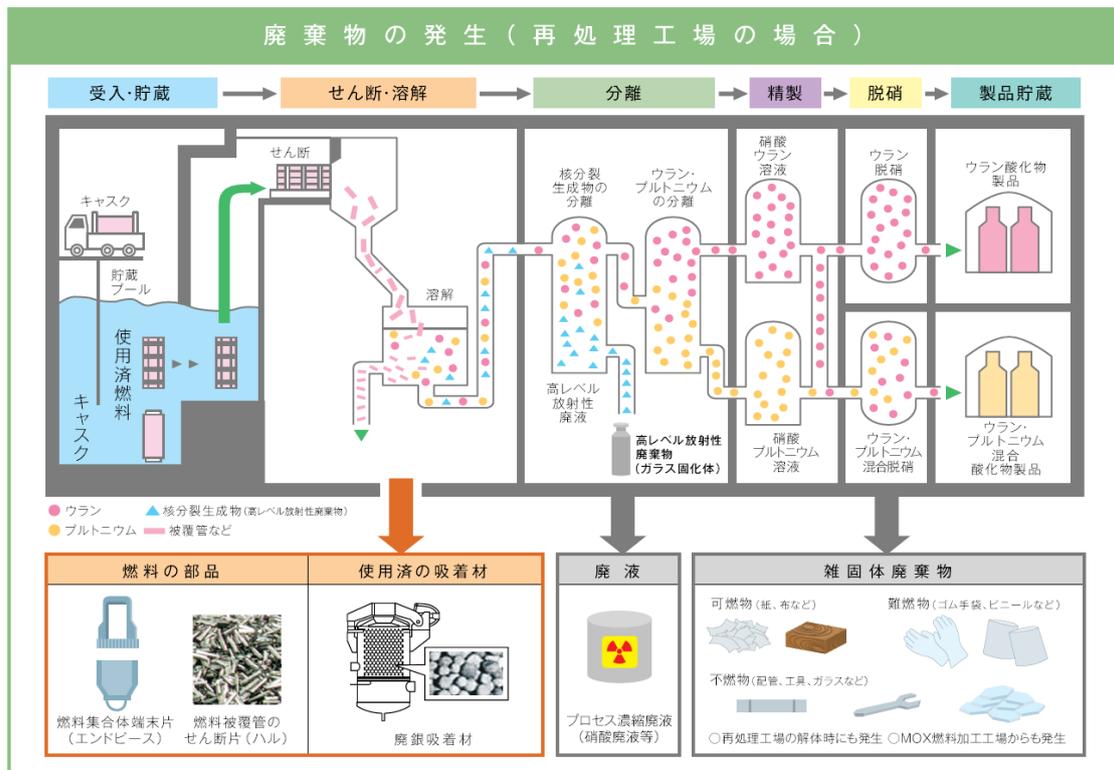
グループ 1 廃銀吸着剤：燃料溶解工程等のオフガス系で、主にヨウ素 129 を捕集したフィルター

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

TRU 廃棄物の地層処分では、処分を効率的に行う観点から、地質環境に応じて掘削可能な範囲で大口径の処分坑道に、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>2)</sup>（図-2）。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、容器内および容器間の充填材等に、大量のセメント系材料の使用が考えられている。また、処分場の地質環境や廃棄体特性に応じて、核種の移行抑制



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>1)</sup>

II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

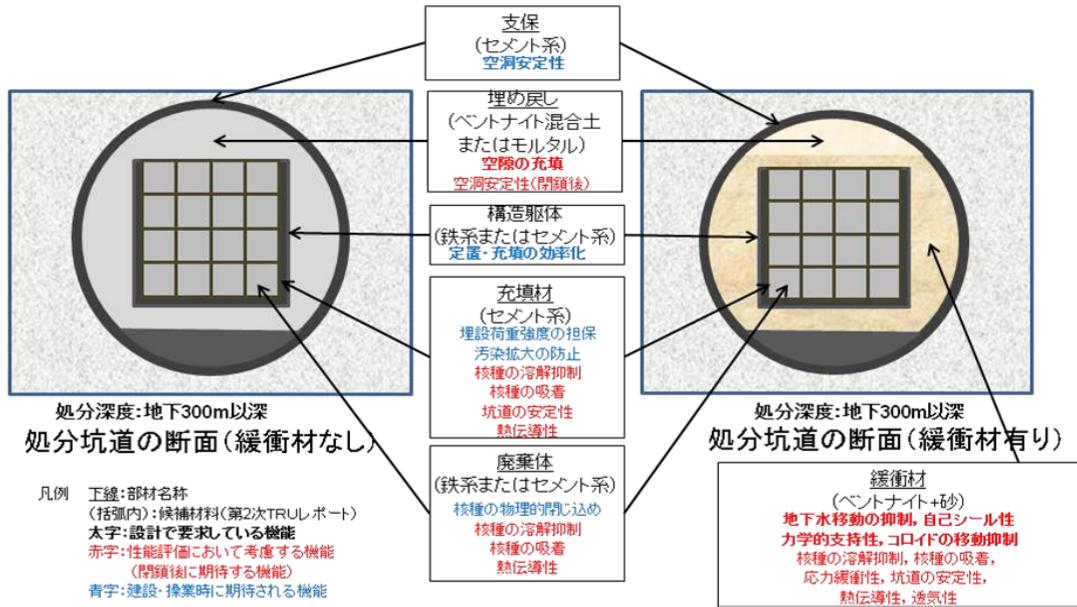


図-2 第2次 TRU レポート<sup>2)</sup>で示された処分坑道の断面と各部材に期待する機能の例

を期待して、ベントナイト系材料を緩衝材として使用することも考えられている<sup>2)</sup>。図-2に示すように、処分坑道内に設置された各人工バリアのうち、充填材等に用いられるセメント系材料と、緩衝材及び埋め戻し材に用いられるベントナイト系材料には、閉鎖後の長期にわたる核種の移行抑制に関わる機能が期待されている<sup>2)</sup>。

これら人工バリア材料の性能は、地下水や廃棄体成分等との反応による化学的な変質によって変化するため、長期にわたる人工バリア材料の化学的変質について信頼性高く予測し、その安全尤度を示すことが必要である。加えて、ベントナイト系材料の物理特性の変化に伴う水理特性及びガス移行特性の変化や、各バリア材料の収着性の変化

など上述の材料間の相互作用によって生じる性能の変化について、ナチュラルアナログ等も活用して、予測する必要がある。

また、図-3に示すように、TRU 廃棄物の地層処分において、影響線量を支配する核種はヨウ素 129 及び有機形態の炭素 14 である。これらは地質媒体や人工バリア材への収着性が極めて低く、人工バリアおよび天然バリアに於ける移行遅延効果を見込めないため、十分な減衰効果を得ることが難しい。そのため、その影響低減には、固化体の性能や廃棄物からの放出過程の現実的な評価等、廃棄体からの放出を低くする技術や、信頼性の高い放出データの蓄積と放出モデルの構築が必要となる。

当センターは、TRU 廃棄物の安全評価の信頼性を高めることを目的として、前述のような人工バリア材料の長期的な変遷とその影響に関する評価技術の構築・改良を進めるとともに、ヨウ素 129 の影響低減対策としてヨウ素を長期間保持する固化体の開発を、炭素 14 の影響低減対策として、グループ 2 の放射化金属に含まれる炭素 14 の放出過程の現実的な評価を、それぞれ実施している。

以下に個別の実施内容について述べる。

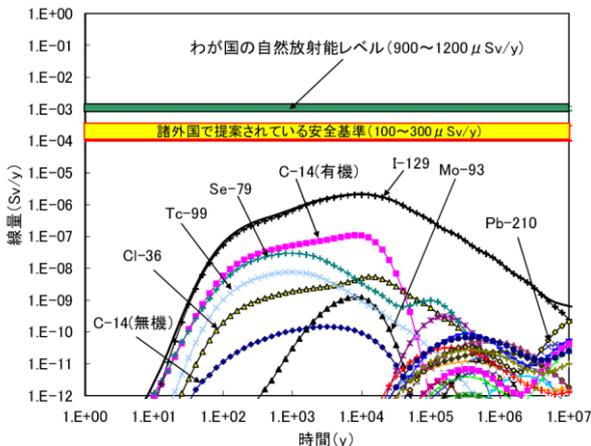


図-3 第2次 TRU レポート<sup>2)</sup>のレファレンスケースに於ける線量評価結果<sup>2)</sup>

- 1) 資源エネルギー庁 Web Site 「放射性廃棄物のホームページ」, [http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/nuclear/rw/tru/tru01.html](http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/tru/tru01.html)
- 2) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物処分技術検討書-第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-、2005

## 4-2 ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上

### ◇事業の概要

再処理施設の操業にともない、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、また、人工バリアや岩盤等への収着性が低いことから、地表まで移行する時間は地下水流速等の水理環境条件の影響を受け易い。このため、TRU 廃棄物の地層処分の安全評価において、I-129 は被ばく線量に大きな影響を及ぼす重要な核種である。

本事業は、地層処分において I-129 による被ばく線量の低減が可能であり、さらに長期性能評価において不確実性が小さく、経済性の観点から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処分技術を提言することを目標としている。

このように地質媒体及び人工バリアによる移行遅延効果が十分期待できない I-129 の影響を低減するため、本事業では固化体によってヨウ素を固定化する技術を開発することとし、固定化処理技術の開発目標値を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）、として開発を進めている。

平成 12 年度<sup>1)</sup>に実施した国内のヨウ素固定化処理技術の調査結果に基づき 7 技術について開発計画を策定し、開発を進めた。平成 16 年度<sup>2)</sup>にはヨウ素放出抑制能力と処理プロセスの成立性を中心に評価を行い、5 技術に絞り込んだ。平成 18 年度<sup>3)</sup>は各固化体のヨウ素放出期間及び固定化処理プロセスの成立性について整理し、平成 19 年度<sup>4)</sup>に目標とした 10 万年のヨウ素放出を見込める環境条件を提示した。以下に示す 3 つの固化技術に絞り込み、ヨウ素回収率を 95%以上とする目処が得られた。

- ①アルミナ固化技術：使用済みのヨウ素吸着材（以下、廃銀吸着材）を熱間等方圧加圧（HIP）処理し、焼結体とする技術
- ②BPI ガラス固化技術：無機イオン交換体

BiPbO<sub>2</sub>NO<sub>3</sub>の NO<sub>3</sub>をヨウ素で置換して BiPbO<sub>2</sub>I とし、ガラスフリットと混ぜて低温で熔融固化する技術

- ③セメント固化技術：廃銀吸着材から脱離させたヨウ素をヨウ素酸溶液とし、アルミナセメントにヨウ素の収着性の高いセメント水和鉱物であるエトリンガイト（Aft）やモノサルフェート（AFm）を生成させる目的で二水石膏を加えたセメントとともに混練し固化体を作製する技術

これら 3 技術に対し、固化体の長期評価モデルの確立や信頼性確保のための検討を実施した。

また、上記技術開発は、平成 19 年度より平成 24 年度までの 6 カ年にわたる本事業の取りまとめの結果<sup>5)</sup>を反映させ、今後 5 カ年で必要な R&D 計画を策定した後に実施した。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

### ◇平成 28 年度の成果

#### (1)アルミナ固化技術

ヨウ素閉じ込め性の高いアルミナ固化体の製造条件の検討を行った。純アルミナと廃銀吸着材を混合した固化体は、廃銀吸着材の粉碎粒径によって、マクロスケールレベルでは、いずれも均一性が高いが、アルミナ以外の成分が混合されたアルミナを混合した固化体は、均一性が若干劣ることがわかった。

また、固化体の内部構造について詳細に検討するため、3D-SEM の画像による空隙や空隙の連結性について検討を行った。今回は廃銀吸着材に試薬アルミナを添加して HIP 固化させたアルミナ固化体を対象に、1 辺の長さが 25 μm となる立方体領域を測定した。AgI と空隙が大半を占めるものを擬似空隙とみなし、立方体のつながりを検討した。高 HS<sup>-</sup>環境下で AgI は Ag<sub>2</sub>S となって溶け出すため空隙の一部と考え、空隙と AgI を合わせて擬似空隙とみなして考えた。このようにして、溶液の通り道が表面から裏面に貫通するかどうかを評価した。手前の面にある擬似空隙を始点として、奥の面に向かって貫通しているか調べたものを図-2 に示す。空隙と AgI を合わせて拡張した擬似空隙について、相対する表面間を貫通する経路の探索をしたが、いずれの固化体についても貫

## II. 放射性廃棄物の地層処分に關する調査研究

通経路は存在しなかった。これらの結果より、アルミナ固化体は空隙や AgI が互いに分離されたマイクロ構造であることを示していた。

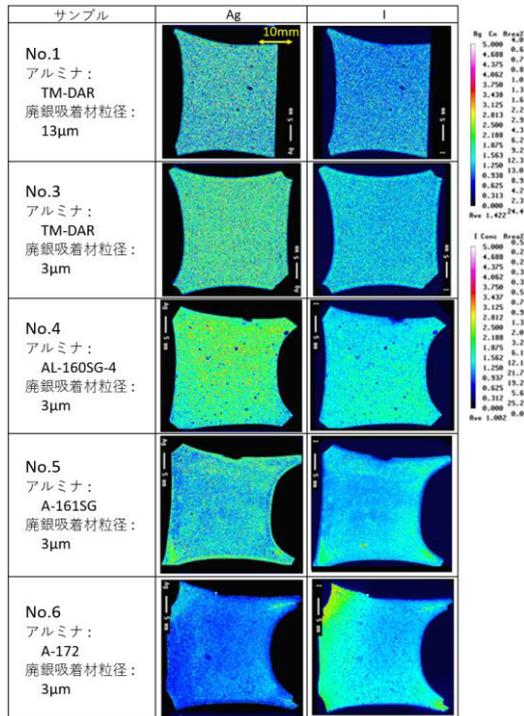


図-1 アルミナ固化体の固化体断面の EPMA マッピング分析結果 AgI および空隙の分布状態

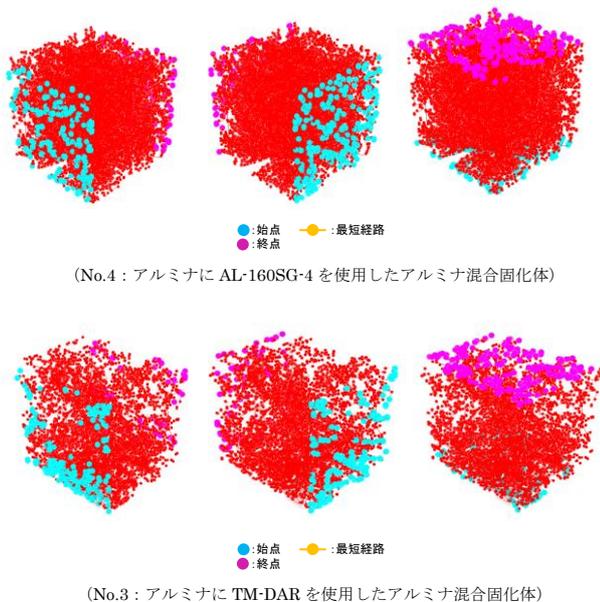


図-2 3D-SEM 画像をもとにした空隙+AgI の連続性解析結果

アルミナ固化体からのヨウ素浸出の機構を検討するため、浸漬試験を異なる温度で実施した。図-3 よりヨウ素の規格化浸出量は温度依存性が確認された。また、規格化浸出量から放物線則に基づいた速度定数を、各温度にて算出することができ、アレニウスの関係式からその活性化エネルギーを決定した。今後は、得られた活性化エネルギーから詳細な浸出機構を論ずる必要がある。

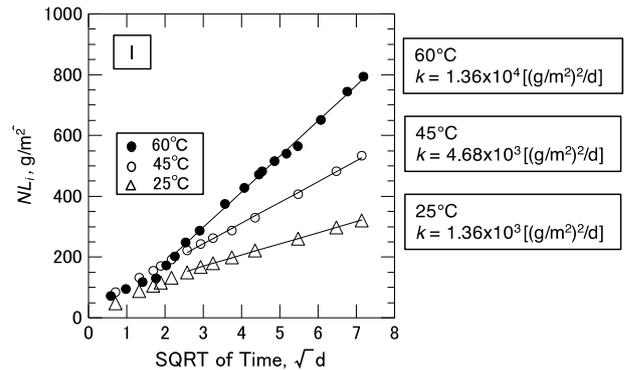


図-3 ヨウ素の規格化浸出量

### (2)BPI ガラス固化技術

均質なガラスマトリクスは、核種浸出の抑制やその長期的な挙動評価に有効であり、HLW ガラスと同様に放射性廃棄物の固化方法として期待されている。BPI ガラスの性能を評価するためには、固化体からのヨウ素放出挙動の解明が必要であり、それには BPI ガラスの構造や物理・化学的な特性に関する理解が不可欠である。

BPI ガラス固化体からのヨウ素浸出の解明のため、多様な地下水組成の影響について検討した。想定される地下水性状（降水系地下水、海水系地下水）および人工バリア構成等を考慮して、地球化学計算コードを使用したシミュレーションにより、水溶液条件下の Pb の化学種および鉱物の析出可能性について解析評価した。これまでの検討から変質層の主要成分は、Pb の炭酸水酸化物（ヒドロセルサイト）であることが示されている。一方、特定の環境条件においてはリン酸塩鉱物の生成の可能性があり、ガラス溶解が促進される懸念が示された。そのため、ベントナイト平衡水のリン酸濃度を  $3 \times 10^{-6}$  mol/L に調製し、浸漬試験を実施した。浸漬後の表面観察の結果（図-4）、さらに XRD の結果からもリン酸塩鉱物の存在は確認されず、これまで同様にヒドロセルサイトが主成分であった。また、ヨウ素の浸出も、リン

酸の存在による増加は認められなかったことから、リン酸によるガラス溶解の促進の可能性は小さいと考えられる。

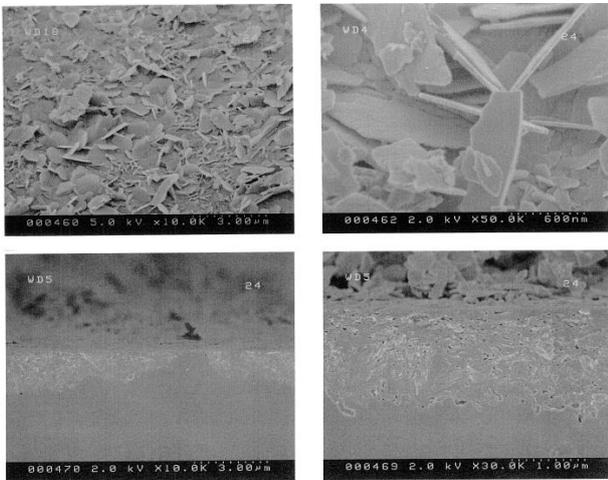


図-4 リン酸を含むベントナイト平衡水に 120 日間浸漬させた後の BPI ガラス表面の SEM 観察

BPI ガラス固化体の溶出挙動に関するモンテカルロ法を用いたシミュレーションモデルにおいては、構成元素の結合エネルギーを表すパラメータを使用している。そのため、これまで微視的構造の再現に必要な、それぞれの原子間ポテンシャルを構築してきた。平成 28 年度に行ったガラス溶解シミュレーションの結果を図-5 に示す。溶液の侵入や表面変質層の分析結果をおおむね再現できるような解析結果が得られている。ガラスの溶解モデルに関して、海外における溶出モデルに関する調査も行った。諸外国では、高レベル放射性廃液のホウケイ酸ガラス固化体を対象として、溶出モデルの検討が進められており、フランスでは、保護反応相と呼ばれる相を含めて、溶解挙動を詳細化したモデルを開発していた。これをレビューした英国は上記 GRAAL モデルが有効であると結論付け、英国のガラス固化体への適用を検討していることがわかった。

### (3)セメント固化技術

アルミナセメントを用いることを特徴とするセメント固化体の評価には、これまでエトリンガイトにヨウ素（ヨウ素酸イオン）を固定化させるというコンセプトのもと、セメント固化体の開発を行ってきた。実用化を見据えたスケールアップによって、発熱影響が顕著となり、冷却システムの導入や固化体サイズといった処理プロ

セスの検討などの必要性・課題が整理された。

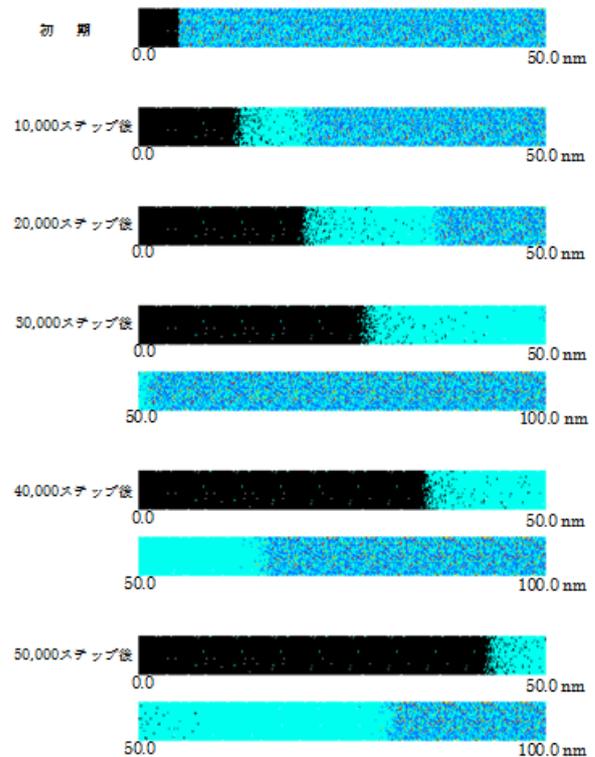


図-5 モンテカルロシミュレーションによるガラス成分分布（青色：B，水色：Pb，緑色：Bi，橙色：Zn，赤色：I，黒色：液相）

- 1) 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 12 年度地層処分経済性向上調査 地層処分システム開発調査報告書、2001
- 2) 財団法人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) 財団法人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) 財団法人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 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 1 分冊）－ヨウ素固定化処理技術開発－、2008
- 5) 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 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
- 6) Randolph C. Arthur et al., “Development of Thermodynamic Databases for Hyperalkaline, Argillaceous Systems”, JNC, TN8400 2005-010, 2005
- 7) A. Atkinson et al., “Aqueous chemistry and thermodynamic modelling of CaO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O gels at 80°C”, DoE, DoE-HMIP-RR-91-045, 1991
- 8) 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 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 1 分冊）－ヨウ素固定化処理技術開発－、2013

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

### 4-3 炭素 14 長期放出挙動評価

#### ◇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（ジルカロイ被覆管）・エンドピース（ステンレス鋼）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、平成 16 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（平成 16 年度～平成 18 年度）では、ジルカロイ被覆管・ステンレス鋼の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（平成 19 年度～平成 24 年度）には、それまで PWR を代表として評価されていた C-14 のインベントリについて、炉型（PWR、BWR）や燃料型式、さらに材料ごとの詳細なインベントリを初めて評価した。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 年間の浸出試験を実施している<sup>2)</sup>。

また、長期にわたる C-14 の放出挙動を評価するため、ジルカロイ被覆管の短期的な腐食挙動に加え、長期の腐食挙動を把握する必要がある。このため、想定される処分環境での腐食試験を実施し、その試験により得られた腐食速度や酸化膜の性状等をもとに、処分環境での腐食挙動と加速的な条件と考えられる高温（300℃前後、炉外）条件での腐食挙動とを比較した。蓄積された高温条件での知見により、得られた経験的な腐食挙動や腐食式の処分環境への適用が可能となり、長期的な腐食挙動予測の信頼性を高めることが期待できる。

ジルカロイについて本事業では、高温での試験等の結果を基に構築された腐食モデルの地層処分への適用性について今後も検討を進め、提案した長期予測の腐食式に基づく腐食モデルの構築に取り組むこととした。また、ステンレス鋼や瞬時放出とされている酸化膜からの C-14 の放出につい

ても、ジルカロイの腐食による C-14 の放出に次いで優先度は高く、核種浸出の長期予測モデルの構築と、照射済み金属を対象とした試験を含めたデータ取得による確証を実施することとした<sup>2)</sup>。

これらフェーズ 2 の成果を踏まえ、平成 25 年度からフェーズ 3 として、長期的な C-14 の放出挙動の調査（ホット試験及び長期腐食試験）に加え、下記に示す項目についても調査を実施している<sup>3)</sup>。

- ・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
- ・国際的な情報共有・調査

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。平成 28 年度に実施した項目についてその成果を以下に示す<sup>4)</sup>。

#### ◇平成 28 年度の成果

##### (1) ジルカロイの長期腐食モデルの検討

これまで、高温条件で得られているジルカロイの腐食式を、処分環境における長期の腐食挙動にも適用し得るか検討を進めてきた。

低温における腐食試験として、高温炉外試験と同じ純水条件での浸漬試験を継続している。また、腐食速度に対する加速因子として、環境及び材料の影響についても検討を行っている。純水条件に対してアルカリ（NaOH）条件では、30℃～80℃において腐食速度が数倍程度大きくなる傾向にあった。また、平成 26 年度<sup>5)</sup>には 30～80℃の純水で 12 ヶ月浸漬させたジルカロイ-4 が形成した酸化膜の TEM 観察を行い、酸化膜が結晶化していることを示した。これは高温水中で形成する酸化膜の結晶構造と類似している可能性を示すものであり、低温での腐食挙動が高温のものと同様である可能性を示していた。

一方、ジルカロイは炉内で水素を吸収し、水素化物を含んでいる。また、処分環境でも腐食が進むと、水素を吸収し、水素化物が増加する可能性がある。そのため、水素化物による腐食速度の影響や、水素化物自身による腐食によって水素ガスの発生などが懸念されることから、基礎的な検討として水素化物の処分環境での安定性という観点から、水素化物の酸化の可能性について検討した。水素化物を 160℃の水溶液中で腐食させた結果を図-1 に示す。不均一ではあるが、試料表面

に 50~200nm 程度の酸化物の被膜が形成されていることが確認できた。これは、ジルコニウムを同様の条件で腐食させた際の酸化膜（厚さ）と類似しており、水素化物も金属ジルコニウムと同様に処分環境で腐食し、水素ガスを発生させる可能性を示唆している。今後は、酸化反応の速度的な解釈や、水素発生量、さらにはジルカロイの腐食速度への影響などについて定量的な検討が必要である。

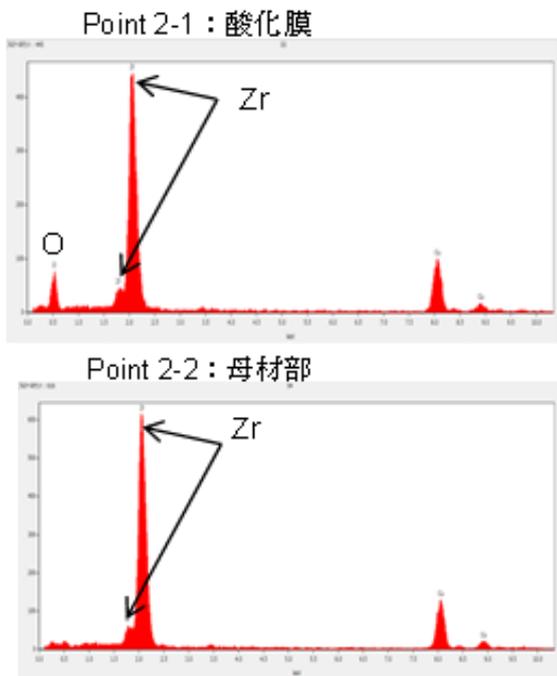
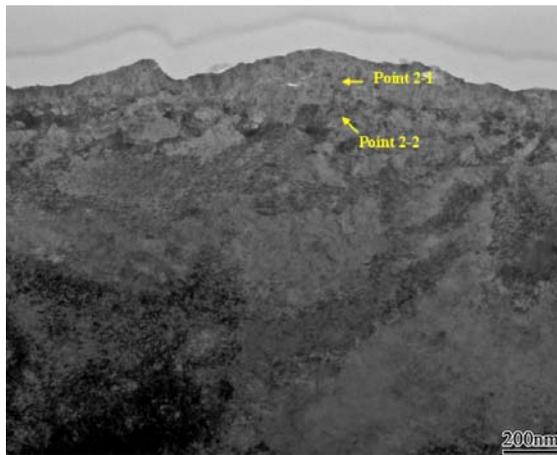


図-1 ジルコニウム水素化物の表面観察結果  
(純水, 160°C×6ヶ月)

(3) ステンレス鋼の腐食データの取得

TRU 廃棄物の安全評価の信頼性向上として、燃焼集合体の上下ノズルであるエンドピース中の C-14 の放出挙動を検討するため、想定される処分環境下でのステンレス鋼の長期的な評価モデルを構築する必要がある、腐食挙動を評価している。

埋設初期はステンレス鋼中のイオンが不働態皮膜を超えて移動して成長（拡散のため 1/2 乗則に従う）し、それ以降は溶解度平衡となって直線則に従う腐食挙動が示唆されている<sup>5)</sup>。平成 28 年度は純水中でのステンレス鋼の腐食速度についてデータをまとめ、特に、バッチ式のアンプル試験によって異なる温度の腐食速度を取得し、継続的な腐食速度はガスフロー法によってモニタリングした（図-2）。これまで取得したアルカリ水溶液中での腐食速度<sup>5)</sup>と同様に、初期には腐食速度は経時的に低下するが、1 年程度を超えたあたりから腐食速度は一定となる傾向を示した。今後は、腐食機構の検討のために、長期データの蓄積（特に、323 K や 353 K）や、不働態皮膜の分析等が必要である。特に皮膜分析については、一部のサンプル分析では、酸化膜に結晶性が局所的に見られる部分があることや、EDX マッピングや XPS のデプスプロファイルに Cr の濃縮が認められないなど、一般に言われるステンレスの特徴とは、一部異なる様相を呈している点について留意しながら、経時的な成長の観点も含めて評価が必要である。

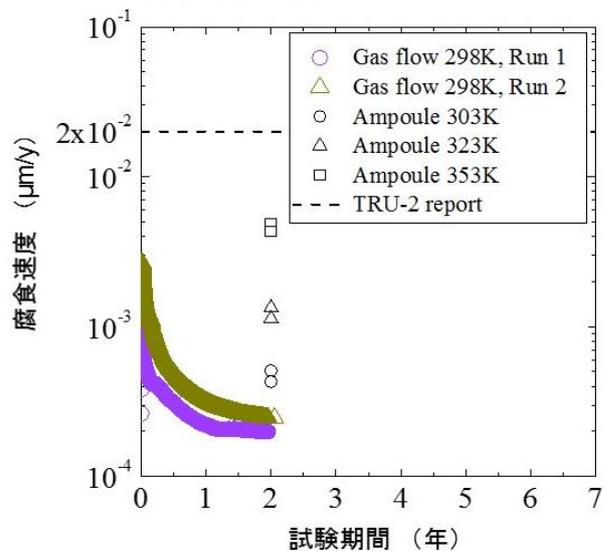


図-2 SUS304 の純水中での腐食速度の経時変化と温度依存性

## II. 放射性廃棄物の地層処分にに関する調査研究

### (4) 炭素化学形態の調査

ジルカロイ等の金属の腐食にともなって放出される炭素の化学形態を評価するため、試験方法を検討し、その試験における試験溶液と発生ガスのサンプリング方法の検討を行った。まずは、簡単のため安定炭素 (C-12) を用いて検討した。

これまで、四重極質量分析計 (Q-MS) を直結する分析システムを構築することで、系外からの混入の抑制を可能にした。その結果、炭素化合物としてメタン、エタン等の有機ガス成分の微量分析が可能となった。また、試料調製時の大気への混入や炭素量の物質収支が合わないといった課題もあったが、大気混入の原因を調査し、グローブボックス内に試料を搬入する際に随伴した大気への混入を抑えることができた。また、物質収支については、鉄粉を酸性条件で溶解させた際に溶け残りが多く、精度よいデータが得られなかった。

平成 28 年度は液固比や酸濃度を調整することで鉄粉を全量溶解させることに成功した。それにより、生成炭素と分析データ間の収支に確認が可能となった。図-3 に、酸性条件における生成炭素量 (in) と分析炭素量 (out) の結果を示す。分析炭素量は、気相分析及び液相分析の和として示す。炭素収支はかなり良い一致を示しており、また、液相成分より気相成分の生成が多いという傾向が確認できた。

以上のように、開発した分析システムの信頼性が確保できたことから、今後、種々の条件下、特にアルカリ条件での腐食試験を行い、溶液条件と生成物の関係をもとに反応機構を検討するためのデータをそろえていく予定である。

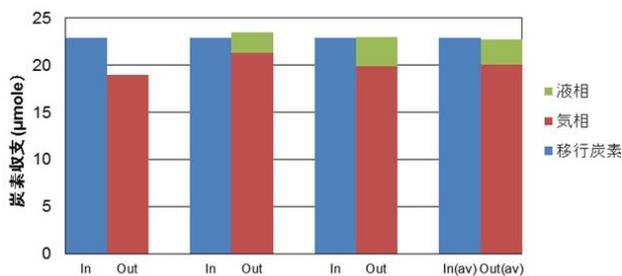


図-9 酸性条件の試験における炭素バランス算出結果

### (5) 国際的な情報共有・調査

放射性廃棄物に含まれる C-14 に関する問題は、近年、欧州を中心に諸外国でも関心が高まっている。欧州では 2025 年の処分開始に向けた取り組みとして、具体的な研究開発を支援する計画 (IGD-TP) が進められており、C-14 の課題に対して CAST (Carbon 14 Source Term) プロジェクトと呼ばれる共同研究が 2013 年から 2017 年まで計画されている。このプロジェクトでは特に C-14 のソースタームに注力するため、本事業と関連することからこのプロジェクトへ参画している。

RWMC からはステンレス腐食の長期データ (ガスフロー試験)、ジルカロイ腐食の長期データ、照射済み被覆管からの C-14 浸出率や C-14 化学形態に関する情報を提供し、各機関の腐食データ等の比較検討を行っている。特に化学形態に関しては各機関からの関心も高く、また、各機関もそれぞれデータの取得・提示が進んでいる。5 カ年のプロジェクトも残り 1 年となり、取りまとめに向けたスケジュール等、全体の成果の見通しや方向性が確認されている。

- 1) 財団法人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) 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 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) 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 25 年度 地層処分技術調査等-放射化金属廃棄物中の C-14 の放出挙動評価-報告書 (第 3 分冊)、2014
- 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 27 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 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-、2016
- 5) 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 26 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 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-、2015

#### 4-4 ナチュラルアナログ調査

##### ◇事業の概要

本事業は、ナチュラルアナログ（以下、NA）調査を実施することで、高アルカリ流体とスメクタイト及び随伴鉱物との相互作用によるベントナイト緩衝材の長期変遷に関する直接的な根拠となるデータを取得し、フィールドデータと解析モデルを活用したアルカリ変質現象の解釈に基づき、TRU 廃棄物処分でのセメント系材料の影響による人工バリア（ベントナイト）の長期健全性評価の信頼性向上を図ることを目的としている<sup>1)</sup>。

平成 24 年度まで調査を実施したアルカリ性地下水との過去の反応が確認できたフィリピンの Saile 鉱山の NA（“Fossil Type” の NA）<sup>2)</sup>では、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が明確でないため、それらをより明確に理解できる場として、平成 27 年度<sup>3)</sup>に現在もなおアルカリ性地下水が浸出している Active Type の NA を確認したパラワン島 Narra 地区において調査を実施した。

平成 28 年度は、平成 27 年度までの調査結果<sup>3)</sup>を踏まえ、(1) NA サイトの地質環境調査、(2) 年代測定による反応時間の評価、(3) アルカリ環境下でのベントナイトの長期変質プロセスと NA、(4) 地球化学シミュレーションモデルによる変質解析について検討した。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

##### ◇平成 28 年度の成果

###### (1) NA サイトの地質環境調査

パラワン島 Narra 地区（図-1 参照）において、スメクタイトを含有する碎屑性堆積物の分布とその地質構造や高アルカリ地下水流動等を把握することを目的とした試錐調査、アルカリ環境下でのスメクタイトの生成や安定性に関わる現象を直接観察・分析するための試料採取を目的としたトレンチ調査を実施した。

試錐調査から、パラワンオフィオライトの基盤深度は現地形、特に、古河川系に規制された地形面起伏の谷様窪み（凹部）に支配されており、基盤深度の大きなところでは碎屑性堆積物

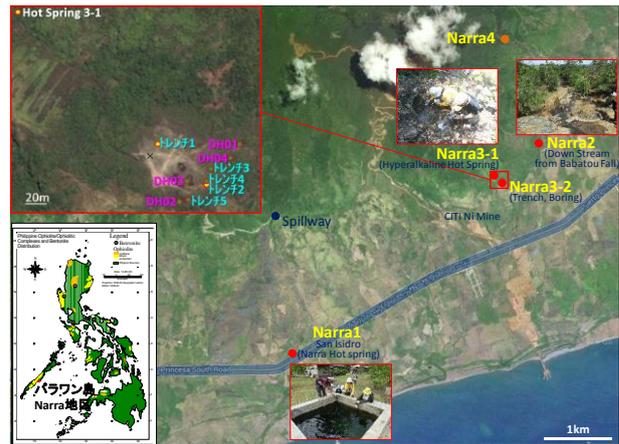


図-1 NA 調査サイト（Narra 地区）の位置図

が厚く堆積し、下部層の層厚が厚く、局所的ではあるが黒色の粘土化が顕著である。これは堆積環境での間隙水との変質反応などによる粘土化のためだと考えられる（図-2 地質断面図参照）。

地下水環境については、高アルカリ源泉（Narra3-1）の南東約 100m 下流側に分布する石灰華（Travertine）の平坦地となっている Narra3-2 地点で調査したすべての試錐孔及びトレンチにおいて、pH11 を超える高アルカリ地下水が浸出している碎屑性堆積物を確認したことから、炭酸塩沈殿物の見られる Narra3-2 調査サイト全域に高アルカリ地下水が流動していることが考えられる（図-2 地下水特性参照）。

トレンチ調査から、いずれのトレンチでも碎屑性堆積物の上部層は石灰華起源の炭酸塩沈殿物、下部層は、黒色（還元環境を示す）の碎屑性堆積物で構成され、全体的には碎屑性堆積物の上位は砂質で、下位は泥質である。また、トレンチ 4 及び 5 では、平原に形成された河川系の谷を埋めた沿岸域の層内礫層とみられる礫岩層が局所的にみられた。

XRD による鉱物分析では、粘土化しているトレンチ及び試錐孔のほぼすべての試料において、スメクタイトの明瞭なピーク（定方位 XRD パターンの EG 処理後のピークシフト）を示した。偏光顕微鏡観察でもすべてのトレンチの碎屑性堆積物で（泥質部砂質部とも）スメクタイトが同定された。不定方位 XRD の 060 面のピーク形状から、Narra3-2 地点で採取した試料中に含まれるスメクタイトは、概ね 3 八面体型であるサポナイトが主であると考えられるが、トレンチ 5

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

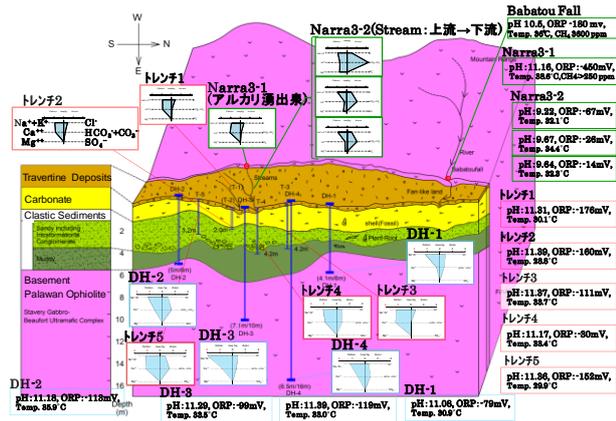


図-2 Narra 地区の地質断面概念図と地下水特性

(及び DH02 孔) 付近においては、2 八面体型であるノントロナイトが含まれる傾向にあった。

XRF 分析に基づく粘土鉱物生成環境に係る岩石化学的特性から、大部分の試料は、パラワンオフィオライト超苦鉄質複合岩体を構成するハルツバージャイト起源の碎屑性堆積物のため、原岩のバルク組成を反映して、MgO に富み、CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に著しく乏しく、Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O にも乏しい。さらに、シリカ成分(SiO<sub>2</sub>)に乏しい不飽和な超塩基性岩としての特性がある。これらのことを総合すると、碎屑性堆積物はパラワンオフィオライト超苦鉄質複合岩体が定置後、比較的表層部が風化・浸食・運搬され沈積した現地性の碎屑物であることが推察される。ただし、トレンチ 5 及び試錐孔 (DH02) の試料は、他のトレンチ、試錐孔とは傾向が異なり、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> 成分に富んでいる。このような差が生じた原因として、碎屑性堆積物中にみられる礫岩の化学組成の違いにより、碎屑性堆積物のバルク化学組成の違いに影響を与えたことが考えられる。トレンチ 5 の礫岩はその鉱物組成から斑れい岩由来であると見られ、そこに多く存在する斜長石から Al が供給されたとみられる。

### (2) 年代測定による反応時間の評価

パラワン島 Narra 地区の NA サイトにおいて、高アルカリ地下水が湧出した初期の年代がわかれば、反応時間の最小値として時間スケールを評価することが可能である。ナチュラルアナログサイトである Narra3-2 地点のトレンチでは、アルカリ地下水によって生成・堆積した炭酸塩の年代にかかわる木片や貝殻見られ、放射性炭

素年代法の適用が可能である。炭酸塩は放射性炭素年代法だけでなく熱ルミネッセンス (以下、TL) 年代測定法の適用可能性がある。また、碎屑性堆積物の堆積年代についても、堆積層中の木片、貝殻、土壌の放射性炭素年代測定から推測することが可能である。このような観点から、木片、貝殻、腐葉土、炭酸塩の放射性炭素 (以下、C-14) 年代測定を実施した。

各種試料の C-14 年代測定結果から、トレンチの底部付近で採取した腐葉土 (フミン酸・ヒューミン) が最も古い年代を示していることから、碎屑性堆積物に取り込まれた木片が、長い時間での十分な腐植作用のもと熟成し、土壌化した過程を示すものと考えられる。したがって、これらの放射性炭素年代値から、各トレンチにおいて木片の堆積層準 (埋没深度) と時間との対応が整合的である。各トレンチの木片の C-14 年代を比較すると、トレンチ 3 (4669±48 年)、トレンチ 4 (3681±48 年)、トレンチ 5 (2443±46 年: 図-3 参照) の順で古いということが言え、オフィオライトの浸食・運搬・堆積過程が、これらの期間にわたり、断続的に生じていたと考えられる。貝殻については、亜熱帯～熱帯の淡水～汽水産に広く分布するカワナナの貝殻であり、碎屑性堆積物から採取したトレンチ 3 の貝殻は 5203±62 年、であった。基盤岩との境界付近の炭酸塩中から採取したトレンチ 4 の貝殻は 3725±48 年、トレンチ 5 の貝殻は 2401±46 年 (図-3 参照) であった。ただし、トレンチ 4 及び 5 の炭酸塩中の貝殻の年代は碎屑性堆積物中のそれぞれの木片の年代と大差は見られなかった。また、腐葉土については、トレンチ 3 (9939±58 年: フミン酸)、トレンチ 5 (9587±56 年: フミン酸 (図-3 参照)) であり、超塩基性岩を起源とする碎屑物が堆積してから約 1 万年程度は経過しているものと推測される。

炭酸塩については、アルカリ地下水から方解石が形成されたものが主と考えられるため、アルカリ地下水との接触期間と最も直結する年代と考えられる。炭酸塩鉱物の C-14 年代は 1965±46 年であった (図-3 参照)。このことから、高アルカリ地下水が少なくとも 2000 年程度は碎屑性堆積物に浸出し、その期間アルカリとの相互作用が続いていると考えられる。

一方、Narra のトレンチの炭酸塩試料について、



図-3 Narra 地区トレンチ 5 の <sup>14</sup>C 年代測定結果

合成方解石による TL 特性に係る試験から年代評価に係る年間線量計算の関係式の改良を加えて、SARA 法による TL 年代評価を適用した結果、炭酸塩試料は主として方解石であるが、微量の貝化石の混入しているため、その発光曲線はアラゴナイト（サンゴ）の標準試料と類似していることが明らかになった。アラゴナイトは一度熱ルミネッセンス測定を経ると方解石へ変化しそのために人工放射線をあてて測定すると発光曲線は方解石と同様の発光曲線を示すようになる。この鉱物種の変化のため、適切な蓄積線量の決定ができなかった。

パラワンの NA では、アルカリ地下水との反応時間の観点から、炭酸塩の生成年代である炭酸塩鉱物の C-14 年代として 1965±46 年、というのが直接評価された最も重要な年代データである。ただし、蛇紋岩化作用による高アルカリ地下水の生成環境を考えると、さらに古い時代からアルカリ地下水が浸出していたと考えることもでき、さらに炭酸塩試料を中心に幅広く年代測定を実施して、反応した時間スケールを評価することが残された課題である。

### (3) アルカリ環境下でのベントナイトの長期変質プロセスと NA

Narra 地区のアルカリ環境下の 3 か所のトレンチの粘土化した碎屑性堆積物から採取した試料の EPMA 分析の結果、スメクタイトの産状としては、斜方輝石・かんらん石の蛇紋石化作用により形成された蛇紋石や、それを部分的（蛇紋石縁・微小な割れ目・へき開など）に交代して生成した緑泥石の反応縁を交代・置換したもの

と、苦鉄質鉱物の粒間やマトリックスを充填して存在するものがある。ここでのスメクタイトは、3 八面体型サポナイト（Fe-サポナイトも含む）とスチープンサイトおよび 2 八面体型ノントロナイトである。総合的にスメクタイトの形成・進展を考察すると、マスバランス的には、風化段階では苦鉄質鉱物（斜方輝石・かんらん石・単斜輝石・角閃石など）と少量な斜長石および、変質鉱物（蛇紋石・緑泥石）からの Mg-Si-(Fe)-(Ca)-(Al) の供給により 3 八面体型 Mg-(Fe)サポナイトと 2 八面体型スメクタイトが形成され、その後、アルカリ地下水環境下での反応で、Fe-サポナイトとノントロナイトおよび、スチープンサイトが形成されたものと推定される。また、鉱物組成的には、アルミナ成分の少ない碎屑性堆積物では Al 成分に乏しいスチープンサイトと、Mg 成分に富み、Al 成分に乏しいサポナイトが形成され、比較的アルミナ成分に富む、例えば、トレンチ 5 の場合は、Fe-サポナイトとノントロナイトが観察・同定されており、これらの傾向は XRD 分析の結果と整合している。

(1)でのバルク分析を含むこれまでの分析・観察結果から、Narra 地区のスメクタイトの形成・進展プロセスに係る鉱物変遷プロセスを図-4 にまとめる。スメクタイト生成については、風化プロセスにおける、苦鉄質鉱物の交代・置換による、①3 八面体型 Mg-(Fe)サポナイト（Mg 成分に富み Al 成分に乏しいサポナイト）、②2 八面体型スメクタイトの生成と、アルカリ地下水環境下プロセスにおける、出発物質（前駆鉱物と変質鉱物〈蛇紋石、緑泥石〉）の変質反応による③3 八面体型 Fe サポナイトの生成、溶液系の飽和状態のもと沈殿・結晶化した C-S-H または方解石と共生する溶液系での新たな溶解・沈殿反応により形成された④スメクタイト（ゲル状: Ca-Si-Al に富むサポナイト及びノントロナイト）、溶液系（M-S-H）から沈殿・結晶化した⑤スチープンサイト（Mg 成分に富み Al 成分に乏しいスチープンサイト）か、前駆鉱物（蛇紋石）からの変換によるスチープンサイトの形成があったとみられる。これらのスメクタイトの主要な変質反応プロセスは、前駆鉱物（主に苦鉄質鉱物）の構造を保存して、(i)層間陽イオン交換と層間物質の吸着・固定による交代・置換反応と、(ii)既存鉱物（スメクタイト・変質鉱物も

II. 放射性廃棄物の地層処分に關する調査研究

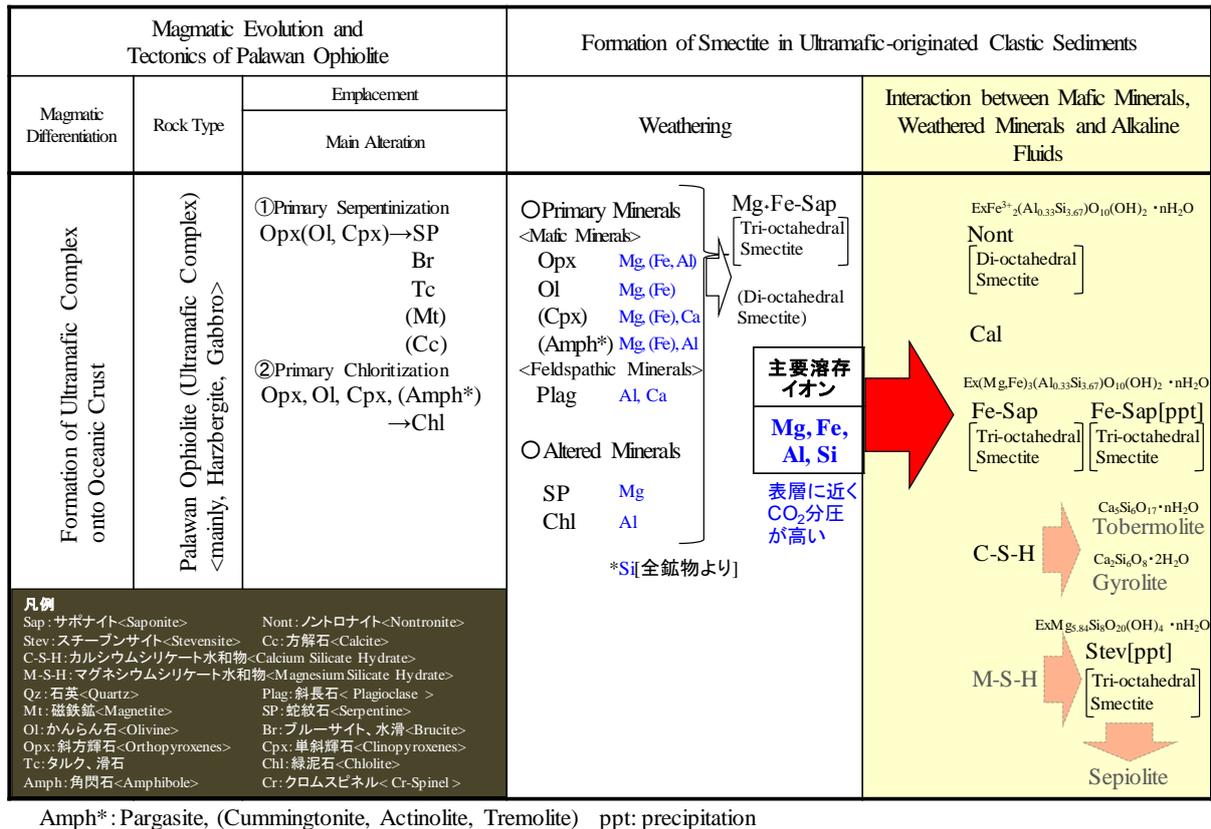


図-4 Narra 地区のス멕タイトの形成・進展に係る変質プロセス

含む)の溶解・沈殿(結晶化)反応があり、アルカリ環境下での③、④と⑤のス멕タイト生成は、(ii)の反応による変質反応プロセスに支配されて、形成・進展したものと考えられる。

TRU 廃棄物の地層処分場でのベントナイト-セメント相互作用による変質過程でもっと重要な反応は、ス멕タイト(2八面体型のモンモリロナイト)と高アルカリ溶液との相互作用、特に、高アルカリによるス멕タイトの溶解である。一方で、アルカリ環境は天然ではス멕タイトを生成する環境でもあり、Narra 地区の調査サイトにおいても、まさにアルカリ溶液から沈殿・成長したス멕タイトが観察されている。したがって、Narra 地区の変質プロセスにおいて NA となる現象は、以下の2つである。

- I. 風化作用等により形成した3八面体型ス멕タイトのアルカリ環境下での変質反応と安定性
- II. アルカリ溶液から、C-S-H沈殿相(あるいは炭酸塩)と共存するス멕タイトの形成とその地球化学的環境条件

ルソン島の Saile 鉱山でのアルカリ変質プロセス<sup>2)</sup>と現状までの知見で得られたパラワン島 Narra 地区の NA との比較で考察すると(図-5参照)、Saile 鉱山でまず目されるのは、モンモリロナイトを含むス멕タイトのアルカリ変質反応において、Feイオンの影響を強く受け、Feを含むス멕タイト等の鉄粘土鉱物が二次鉱物として生成されることである。特に、Fe-サポナイト等の鉄を含む3八面体型ス멕タイトについては、Saile 鉱山では、Ca型モンモリロナイトのアルカリ溶液への溶解・沈殿反応により、玄武岩ガラス等から供給される Fe<sup>2+</sup>を使って鉄サポナイトが生成している。一方、Narra 地区では、アルカリ溶液に超塩基性岩起源の碎屑物中の前駆鉱物(初生苦鉄質鉱物と蛇紋石・緑泥石の変質鉱物)に溶解によって供給される Mg, Fe, Al, Si が過飽和になり、C-S-Hを伴って鉄サポナイトあるいはスチーブンサイトが生成している。すなわち、Narra 地区でのアルカリ溶液から鉄を含む3八面体型ス멕タイトが生成するプロセスは、Saile 鉱山のプロセスと共通している

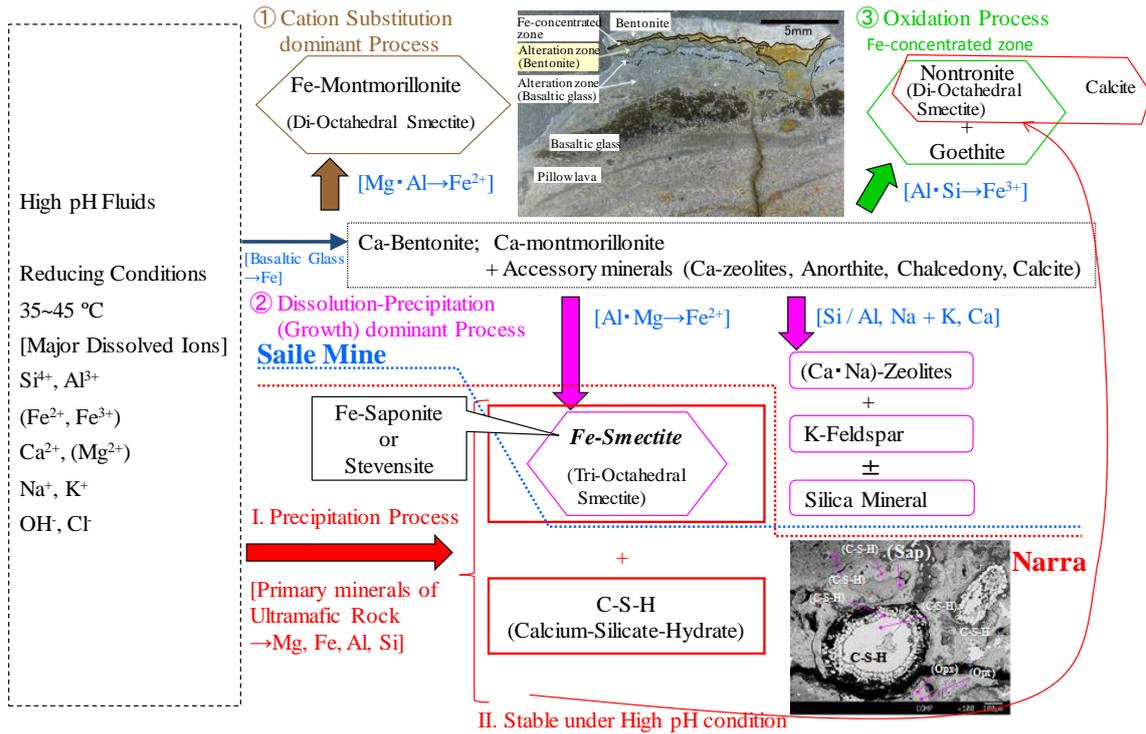


図-5 フィリピン NA のアルカリ変質プロセス (ルソン島 Saile 鉱山の NA とパラワン島 Narra 地区の NA の比較)

ことから、アルカリによってサポナイトのような 3 八面体型スメクタイトが生成するプロセスはベントナイト-アルカリ相互作用でも生じる可能性が高いと考えられる。

TRU 廃棄物の処分環境を考えた場合、高 pH での鉄の溶解度は低く、鉄筋コンクリートや鉄製容器のようなベントナイトと直接接していない部材からの鉄の供給によるアルカリ変質は、それほど顕著に起きないと想定できる。しかしながら、施工時には様々な鉄部材が処分場に持ち込まれ、施工時の酸化環境での鉄部材の影響が緩衝材に残ったり、あるいは海水環境における Fe, Mg の流入、コロイドによる流入等が生じたりすることが想定され、Narra 地区や Saile 鉱山でみられる Mg, Fe, Al, Si に過飽和なアルカリ溶液による変質反応が、TRU 廃棄物の地層処分場のベントナイト緩衝材においても生じる可能性は十分ある。

Narra 地区でみられる天然現象は、初生物質がベントナイトではないため、TRU 廃棄物処分場の人工バリアシステムのアナログとは言えないが、処分環境と類似する環境でのベントナイトのアルカリ変質における主要な反応プロセスの NA と位置付けることができる。また、Saile 鉱山と合

わせてフィリピンの NA とみれば、システムの NA として提示することも可能である。

TRU 廃棄物の地層処分場における大量のセメント材によって形成される高アルカリ環境は、スメクタイト (モンモリロナイト) の溶解に伴うベントナイト緩衝材の機能低下・喪失を引き起こすマイナス要因である一方で、スメクタイトの生成・安定性をもたらすプラスの要因であることがこの Narra 地区のアナログは示している。傍証という程度の NA としてはこれでも十分かもしれないが、長期挙動の評価に NA を反映させるという意味においてのセーフティケースとして活用することを目指すためには、どのような環境条件でスメクタイトが生成し、安定に存在するのかを示せるようなデータを取得することが今後の課題である。

#### (4) 地球化学シミュレーションモデルによる変質解析

アルカリ変質鉱物である Fe 型モンモリロナイト、Fe-サポナイト、ノントロナイトと変質鉱物による空隙の閉塞がみられた Saile 鉱山の NA を再現することを目的として、地球化学反応と物質輸送現象を連成させた PHREEQC- TRANS による

## II. 放射性廃棄物の地層処分にに関する調査研究

変質解析で、二次鉱物（カリ長石、Fe-サポナイト、沸石）の生成・溶解における平衡論的または速度論的な取り扱いについて、NA における拡散速度を評価し、これと生成する鉱物の反応速度との関係について検討した結果、二次鉱物の溶解は、拡散速度より反応速度が十分遅いとみられ、反応速度を設定することで、実現象の固相組成・固相分布を再現できる可能性が示唆されている。これらの検討結果を踏まえ、今年度は、二次鉱物として生成すると考えられる鉄粘土鉱物の最新の熱力学データ（フランスの地質調査所(BRGM)の thermodem v1.10\_11dec2014<sup>4)</sup> 及び日本原子力研究開発機構の JAEA\_TDB\_GWB14\_BETA0104<sup>5)</sup>）を反映し、物質移行と一部反応速度も考慮した変質解析を実施した。

その結果、二次鉱物やその生成の様子に熱力学データの違いによる大きな差は見られず、いずれの変質解析のケースも、変質に伴って二次鉱物は生成するが、初期鉱物の溶解に伴う密度の低下が見られた。これは実際 Saile 鉱山の NA

とも一部整合するが、一方で二次鉱物による閉塞は現状の解析条件では生じないと考えられる。そこで、下流側の鉄（マグネタイト）から Fe がすぐに供給される条件の変質解析も実施した結果（図-6 参照）、これまでのケースに比べ Fe-サポナイトの生成がより生じることを確認できた。Saile 鉱山の NA では、鉄濃集帯でみられたノントロナイトや針鉄鋼は  $Fe^{3+}$  をもつ鉄鉱物であり、表層からの酸化水や微生物の影響で酸化還元電位が酸化側に変化しているためにこれらの鉱物が生成したと考えられる。酸化還元電位の局所的な変化を現状の地球化学モデルに反映させることが難しいために、今回の計算ではそのような酸化還元電位が変化する条件は入れておらず、そのために、沈殿が見られたのは鉄サポナイトである。アルカリ条件で鉄の溶解度が低いことを考慮すると、鉄を含む鉱物が沈殿し空隙閉塞が起こるために、このモデルのように近傍に鉄を供給する鉱物が存在することがその一因である可能性が、今回の計算結果から示唆された。

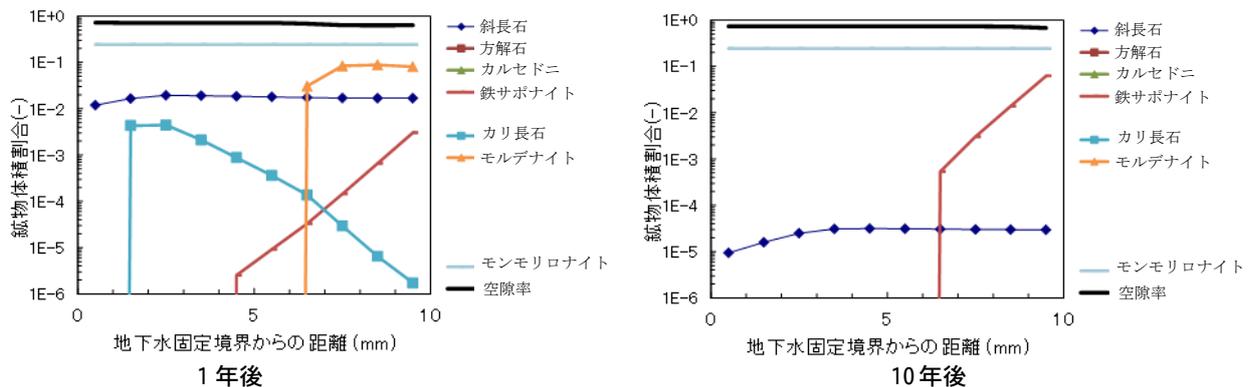


図-6 Saile 鉱山の NA の変質解析結果(鉄の供給を考慮したケース)

- 1) 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 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 3 分冊）ーナチュラルアナログ調査ー、2017
- 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 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
- 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 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 3 分冊）ーナチュラルアナログ調査ー、2016
- 4) Blanc, P. and Galihnou, H., Thermochimie: Estimation des entropies, capacités calorifiques et volumes molaires des phyllosilicates deshydrates et hydrates, Rapport final. Rapport BRGM/RP-55966-FR, 2007
- 5) 日本原子力研究開発機構、平成 25 年度地層処分技術調査等事業セメント材料影響評価技術高度化開発報告書、2014

### 4-5 人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア評価の初期条件の設定

#### ◇事業の概要

再処理工場及び MOX 燃料加工工場等から発生する TRU 廃棄物の地層処分における人工バリアシステムでは、セメント系材料とベントナイト系材料の併用が検討されている<sup>1)</sup>。これらの材料は、地下水や各バリア材料からの浸出成分との作用により長期的には変質し、人工バリアの地下水侵入抑制、放射性核種の収着や閉じ込め等の特性に変化をもたらす可能性がある。そのため、これらの材料の地下環境での長期的変化による人工バリアの性能への影響を評価し、人工バリアの成立性の説明や設計、施工への反映をすることが必要である。

本事業では、平成 19 年度より平成 24 年度までに実施した事業の成果及び抽出された課題<sup>2)</sup>に基づき、TRU 廃棄物の地層処分における人工バリアの閉鎖後長期の挙動評価を目的として、平成 25 年度より 5 力年の計画で「人工バリア材料長期挙動評価」及び「人工バリア評価の初期条件の設定」に関する調査研究を実施している<sup>3)</sup>。本事業の実施概要を図-1 に示す。「人工バリア材料長期挙動評価」では、緩衝材(ベントナイト)を対象に、水理-力学-化学(HMC)連成挙動及び数値解析による長期挙動評価の信頼性を高めることを目的に、検証試験と数値解析の高度化を検討する。閉鎖直後の処分場は地下水による飽和に至る過程にあり、徐々に進行する化学変質を力学、水理挙動と連成する必要がある。そのため、HMC 連成解析は処分場の閉鎖時を基点とした。「人工バリア評価の初期条件の設定」では、セメント系材料の長期挙動評価への初期条件の設定及びその影響に着目し、解析精度の向上を目的に、作業中の熱の影響、施工の初期設定への影響等を検討する。

このうち、平成 28 年度は、平成 25 年度に策定した実施計画及びこれまでの成果をもとに、現象把握とモデル化、HMC 解析手法の検討、加えて初期条件への反映事項について検討を行った<sup>4)</sup>。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

#### ◇平成 28 年度の成果

##### (1)人工バリア材料長期挙動評価

人工バリアに使用されるベントナイトは、セメント成分の溶解によって高 pH になった地下水との接触により化学的に変質する。化学的な変質は人工バリアの力学的な状態に影響を及ぼし、これらは相互に影響を及ぼし合う<sup>1)</sup>(図-2 参照)。平成 24 年度までに、これらの現象を人工バリアの長期挙動評価へ考慮するために、化学解析、力学解析及び 1 次元での化学力学弱連成解析手法を構築した<sup>2)</sup>。

これらの現象をより忠実に人工バリアの長期挙動評価に反映するには、ベントナイトの主要成分であるモンモリロナイトの溶解に加え、それに伴う二次鉱物の生成及び体積変化などの現象、これらが水理力学挙動に及ぼす影響の把握と評価解析への反映、並びに解析手法の 2 次元化などが必要である。平成 25 年度から、これらの点に関して、1) 人工バリア構成材料の化学変質に関する試験とモデル化、2) 緩衝材の力学特性に関する試験とモデル化、及び、3) HMC 連成解析手法

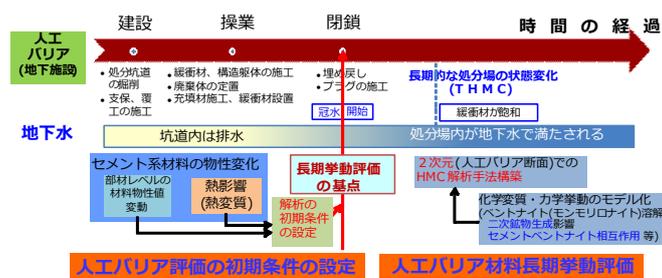


図-1 人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア初期条件の設定の実施概要

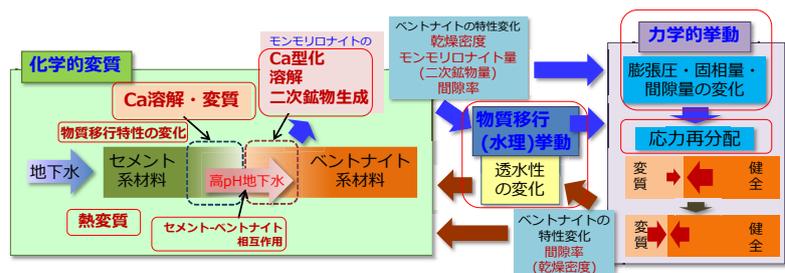


図-2 人工バリア材料の相互影響と性能との関係

## II. 放射性廃棄物の地層処分に關する調査研究

の検討を実施している<sup>3)</sup>。以下にその成果を記す。

- 1) 人工バリア構成材料の化学変質に關する試験とモデル化
  - a) ベントナイト緩衝材の化学変質に關する試験とモデル化

セメント浸出水中のアルカリによるベントナイトの化学変質について、図-3 に示す様に現象のモデル化を検討した。

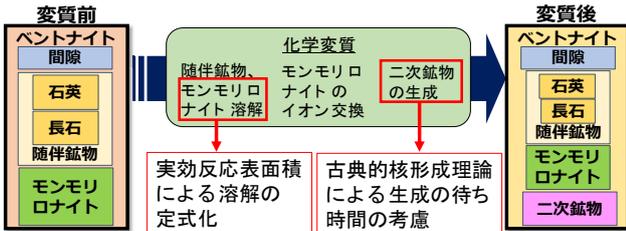


図-3 ベントナイト変質に伴う化学変質挙動のモデル化案

モンモリロナイトの溶解について、実効反応表面積による定式化を検討した。化学解析で使用するモンモリロナイトの溶解速度式の高度化に關連した平成 24 年度までの検討にて、ベントナイトの圧密に伴い溶解速度が低下することを試験により確認している<sup>2)</sup>。これはモンモリロナイト粒子同士のマスキングによる実効反応表面積の減少と考えられ、モンテカルロシミュレーションで円盤状粒子の積層の平衡状態を計算し、その状態の実効反応表面積を算出した。平成 26 年度までの検討により、1.2Mg/m<sup>3</sup>程度までの現実的な乾燥密度での再現ができ、実効反応表面積を定式化する事により、従来の実効反応表面積(7m<sup>2</sup>/g 一定)のケース<sup>1)</sup>と比較して、長期評価の不確実性を低減した(図-4)<sup>5)</sup>。

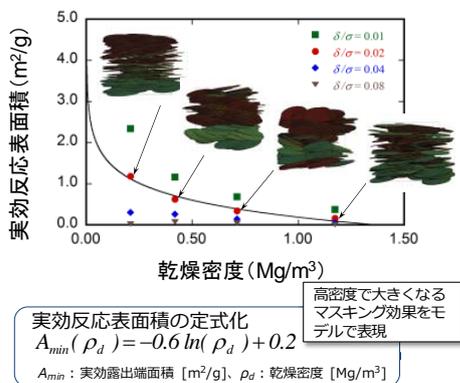


図-4 圧密下のモンモリロナイト実効反応表面積の定式化

しかしながら、低密度条件(～0.05Mg/m<sup>3</sup>)では四重極ポテンシャルを用いた解析、高密度条件では剛体ポテンシャルを用いた解析となっており、実効反応表面積の変化が最も大きいと予想される中密度条件(0.1～0.5Mg/m<sup>3</sup>)において両者が整合的であるかの検討が課題として残っていた。そこで、平成 28 年度は、中密度領域において、前記二つのポテンシャルを用いた解析を実施した。その結果、二つのポテンシャルから求めた実効反応表面積は完全には一致しないものの整合的である事、及び、溶解速度実験から求めた実効反応表面積と良く一致する事が確認された(図-5)。今後、これらの結果を化学解析に資するための定式化の検討が必要である。

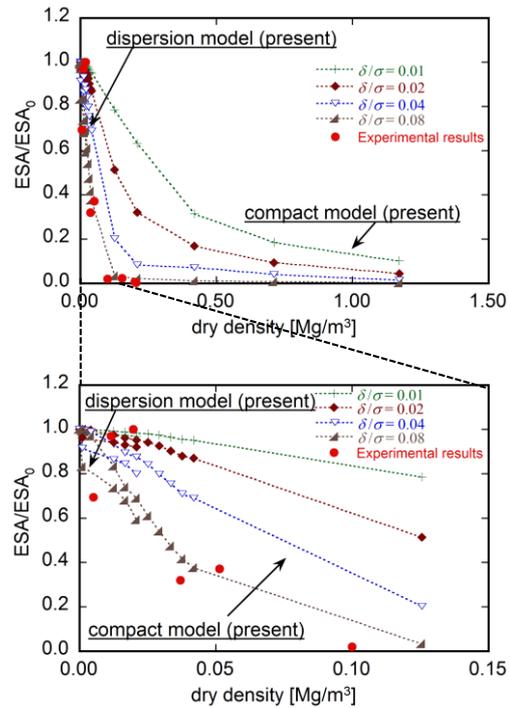


図-5 モデルによる解析及び溶解速度実験から得られた反応表面積比の比較

また、モンモリロナイトの溶解に伴う二次鉱物(ゼオライト)の生成について、生成条件や力学挙動に影響する体積変化を試験により把握し、モデル化案を策定した。平成 26 年度までに試験で確認したアナルサイム及びクリノプチロライトの生成挙動<sup>5)</sup>に加え、平成 27 年度はフィリップサイトの生成挙動を確認し、これらの比較によりベントナイトに含まれるカルセドニ(SiO<sub>2</sub>)及び長石の溶解がゼオライトの生成条件に關連する

ことなどがわかった<sup>6)</sup>。

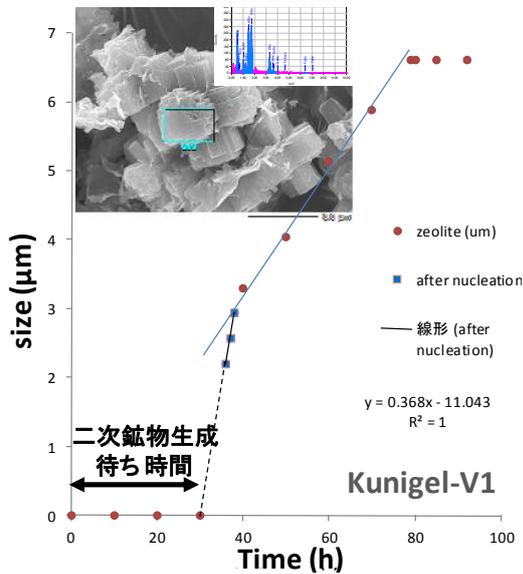


図-6 二次鉱物の生成挙動の確認試験の結果の一例

平成 28 年度は、図-6 に示した二次鉱物の生成待ち時間を考慮すべく、古典的核形成理論の不均質核形成の考え方(系内にある粒子表面での核形成を想定)に基づき、過飽和度の逆数の対数と二次鉱物の生成待ち時間の対数が直線関係となるモデル式案を検討した。試験にて得られた二次鉱物の生成待ち時間と過飽和度は概ね直性関係を示し(図-7)、本モデル式で現象を整理できるものと考えられる。長期挙動評価へ反映するため、モデルの高度化の検証等を進めていく予定である。

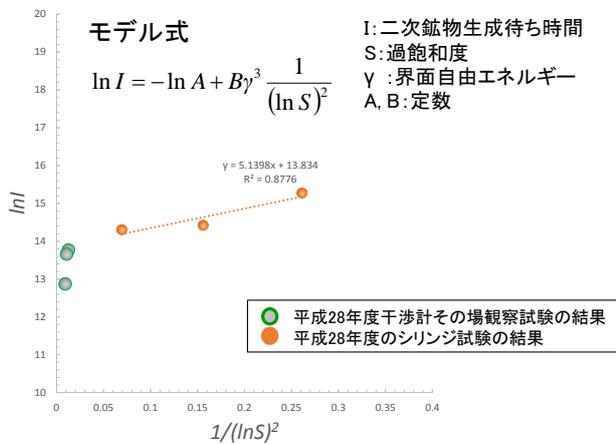


図-7 過飽和度と二次鉱物の生成待ち時間の関係

b)セメントとの接触部分におけるベントナイトの化学変質挙動の調査

セメントとベントナイトの接触部分で生成する珪酸カルシウム水和物(C-S-H)は、ベントナイトの変質を抑制する可能性があり、長期挙動の評価に反映するため室内試験でその挙動を確認してきた<sup>2)</sup>。これに関して現実的な条件での挙動の把握のため、Nagra(放射性廃棄物管理協同組合、スイス)の GTS(Grimsel Test Site:グリムゼル試験場)の建設後 12 年間を経過した構造物から採取した試料<sup>3)</sup>を平成 26 年度から分析している。

平成 28 年度はマイクロビームを用いた X 線吸収微細構造分析(XAFS)にて室内試験試料の薄片を 100 μm 間隔で分析した結果、これまでに適用したことがあるフォトダイオード検出器を用いた多測定の同時分析<sup>2)</sup>と同様に、線分析データを得る事が出来た(図-8(a))。一方、Nagra の試料については、ベントナイト系材料中に砂が混合されているため測定用薄片を薄くできず、定量精度が低かった(図-8(b))。今後、分析手法を検討して定量精度を向上させ、測定データを拡充するとともに知見をとりまとめる予定である。

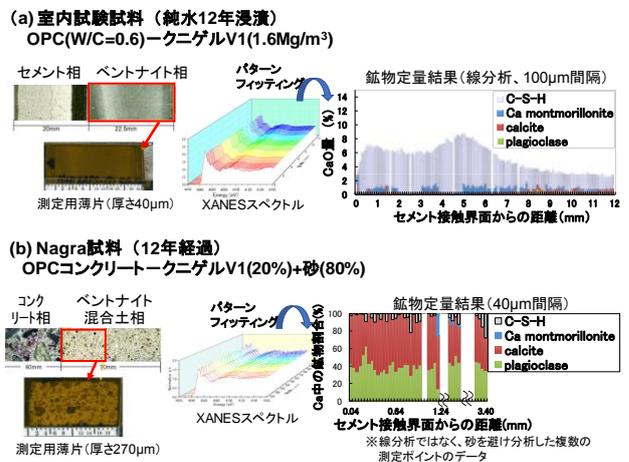


図-8 セメント-ベントナイト接触部分の変質状態に関する XAFS 分析結果 (KEK 放射光施設 BL-15A1 を使用、ビーム径 20 μm)

c)セメント系材料の化学変質に伴う物質移行特性変化のモデル化

セメント系材料の長期変遷をより現実的に解析により評価するために、Ca の溶解に伴い変化するセメント系材料の拡散係数を溶解前の初期物性値を元に得ることを目的に、物質移行特性(拡散係

II. 放射性廃棄物の地層処分にに関する調査研究

数)の予測モデルを検討した(図-9)。

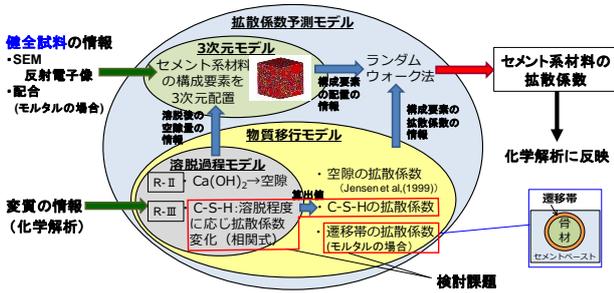


図-9 セメント系材料の拡散係数予測モデルの概要

現実的な材料にモデルを適応させるため、骨材を含むモルタル材料や混合セメントでの検討を実施した。平成 28 年度は、様々なセメントを用いた場合の、様々な変質段階に応じた C-S-H の拡散係数を算出するための関係式を導出した。この結果も踏まえた変質後の各構成要素の拡散係数算出値を用い、3次元モデルにマルチスケールモデル<sup>7)</sup>とランダムウォーク法を適用する事で、混合セメントを使用したモルタル材料について変質後の拡散係数を算定した(図-10)。骨材の界面の遷移帯の取扱いに不明な点がある等、残された課題を今後検討し、信頼性を向上させる必要がある。

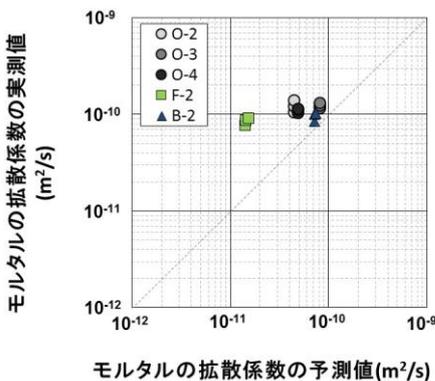


図-10 変質後のセメント系材料(モルタル)の拡散係数のモデルの予測値の実測値との比較 (O:普通セメント、F:フライアッシュセメント、B:高炉セメントを使用)

2) 緩衝材の力学特性に関する試験とモデル化

ここでは、ベントナイトが化学的な変質を受けた場合の力学挙動(圧密、膨潤、せん断)についてモデル化を行っている。

圧密挙動(完全飽和線)に関しては、モンモリロ

ナイトが溶解した場合に加え、二次鉱物が生成した場合をモデル化することが出来ている。平成 28 年度は、模擬 Region I 浸出液等のアルカリ溶液の影響を検討し、イオン強度及び完全飽和線の移動で整理できることを示した。

膨潤挙動に関しては、平成 27 年度に引き続き、平成 28 年度に非可逆比により整理したモデルのデータを拡充して検証した(図-11)。今後、ベントナイトの Ca 型化等の変質の影響を検討する必要がある。

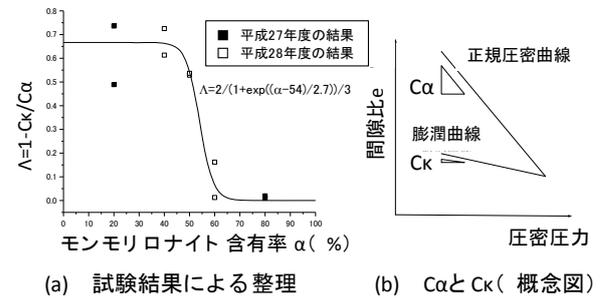


図-11 ベントナイトの膨潤挙動の非可逆比によるモデル化

せん断挙動については、平成 28 年度は、等体積一面せん断試験からこれまで知見が少なかったベントナイトの限界状態線に関する知見を拡充した。その結果、限界状態線は乾燥密度と拘束圧の関係において完全飽和線と平行な関係にある事、限界状態線に至る過程は溶液の種類によって大きな差がない事を確認した(図-12)。また、簡便さでは一面せん断試験に劣るものの、より有効なデータが取得可能な三軸  $\bar{c}_u$  試験について、従来の  $\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$  より小さい  $\phi 2\text{cm} \times 4\text{cm}$  の試験体で試験可能であることを確認した。今後、試験データを拡充しモデルの信頼性を高め、力学挙動解析へ反映する必要がある。

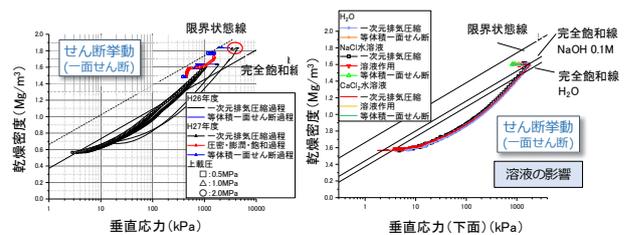


図-12 せん断挙動に関する試験結果

3) HMC 連成解析手法の検討

ここでは、力学解析と化学解析の2次元での弱連成手法について検討を進めている。力学解析には、平成25年度に構築したベントナイトの化学変質やそれに伴う固相量の変化に対応可能な構成モデル<sup>3)</sup>を2次元FEM化した土/水連成有限要素プログラム DACSAR-BA<sup>8)</sup>を使用した。化学解析には、地球化学・物質移動連成解析コード PHREEQC-TRANS<sup>9)</sup>を使用した。これまでに、弱連成による長期での2次元 HMC 連成解析が可能となり、緩衝材の長期力学挙動の評価への化学変質の影響の考慮が可能になった。化学解析において、平成28年度は二次鉱物の生成待ち時間等の影響の検討を実施した。化学解析において二次鉱物の生成待ち時間を考慮した結果、従来過大に見積もっていたモンモリロナイトの溶解が緩和される傾向が認められた。平成28年度は影響の有無を確認するための便宜的なモデルであったため、引き続きモデルの高度化を検討する必要がある。化学変質を考慮した力学挙動において、平成28年度は構成モデルの弾塑性化を検討した。弾塑性モデルによる解析では、弾性モデルと比較して、過圧密の挙動により各層の密度差が長期経過後も残存した上に、初期乾燥密

度が低い層において間隙比が部分的に高くなる局所領域の形成が予測された(図-13)。

今後、検討を進めている各種現象モデルの反映、施工条件や冠水挙動の考慮及び連成の手法の検討を行い、信頼性の高い長期挙動解析手法を構築するとともに、これを用いた長期評価により人工バリアの成立性に関して検討していく予定である。

(2) 人工バリア評価の初期条件の設定

人工バリアの長期挙動評価の解析の基点は、前述の様に処分場が建設、操業を経て閉鎖された時点とする。解析の基点における材料特性値等の初期条件は、長期の解析結果に影響を及ぼすため、より正確な設定が必要である。そのため、従来用いられてきた材料自体の特性に関する情報に加え、建設や閉鎖までの影響を考慮する必要がある。本検討では、セメント系材料の材料特性値(拡散係数、力学特性等の物性値)において予想される放射性廃棄物の熱による変質の影響、及び、セメント系材料部材の部位の違いによる特性値の変動について検討し、長期の解析の初期条件の設定に考慮すべき事項を提示する。加えて、人工バリアの長期性能、初期条件等への影響が考えられるセメント系材料のひび割れに関する非破壊検査手法について検討した。

平成28年度は、平成27年度までに続きセメント系材料の熱変質について検討を行った。これは熱履歴によるC-S-Hの結晶化(トバモライト化)によるもので、これまでに建設後80年程度の熱履歴を受けたコンクリート(経年コンクリート)試料により確認している<sup>2)</sup>。この結晶化により、セメント浸出水のpHの低下が期待される一方、材料特性値の変化が懸念される。そのため、処分場の制限温度である80℃<sup>1)</sup>以下で結晶化が起こるのかについて、また、その場合の結晶化条件について明らかにするため、合成C-S-H及び合成C-A-S-Hの粉末を一定温度に保管する試験(定温度試験)を実施した。その結果、50℃以上の条件においてCa/(Si+Al)モル比がトバモライトの組成の0.83程度の条件で結晶化しやすい傾向が認められた(図-14)。

また平成28年度までに、石英粉を添加した普通セメント水和物粉体の定温度試験にて結晶化が認められている<sup>6)</sup>。この試料の浸漬液の分析からはCa及びSiの溶解が確認されており、それにより

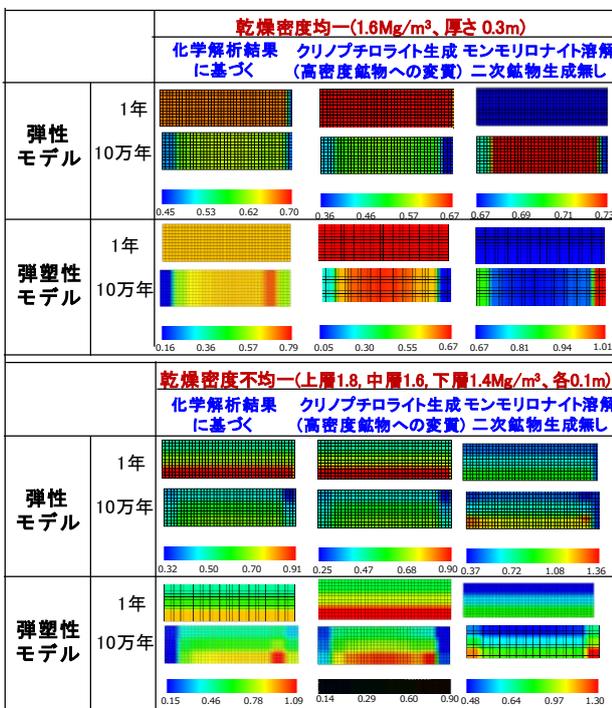


図-13 力学解析結果の一例  
(緩衝材部分の間隙比eの分布)

## II. 放射性廃棄物の地層処分に關する調査研究

C-S-H の Ca/Si モル比が低下し結晶化しやすい 0.83 程度になったと推定される。更に、平成 28 年度に実施した経年コンクリート（普通セメントコンクリート）の分析においても、50°C 程度の熱に 30 年程度の間暴露されたと推定される試料にて、C-S-H の Ca/Si モル比が一般的なセメント水和物よりも低くなっていた（1.04、EDS による 20 点の測定値の平均）のに加え、結晶化の兆候が認められた（図-15）。

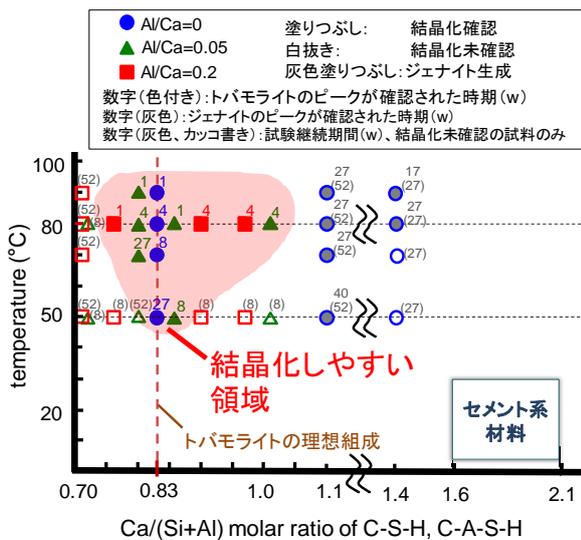


図-14 熱影響による C-S-H の結晶化条件の整理

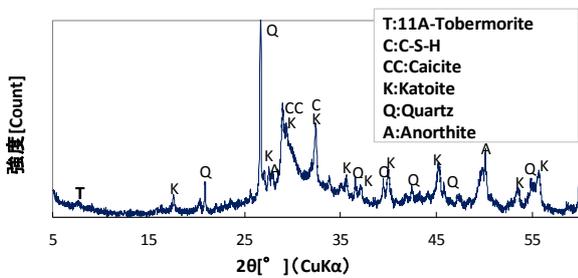


図-15 経年コンクリートの鉱物相  
(50°C 程度で 40 年程度暴露されたと推定される試料)

セメント系材料中の骨材（石英）溶解による C-S-H への Si 供給に伴う Ca/Si モル比または Ca/(Si+Al) モル比の 0.83 程度への低下は、地層処分場においても起こり得ると考えられる。したがって、これまでの試験結果は、地層処分場においてセメント系材料が結晶化する可能性がある事を示唆していると考えられる。今後、定温度試験を継続し、現在までに結晶化が認められていない試料でも結晶化するかを確認した上で、結晶化条件

を整理する必要がある。

セメント系材料の物性値への影響については、硬化体を結晶化させ物性値変化を確認する試験を実施している。引き続き、試料の評価を進め、初期条件の設定に関して取りまとめる予定である。今後、セメント系材料の結晶化による人工バリア性能への影響、さらに必要に応じ結晶化への対策、及び、初期条件の設定方法の提示等を検討する必要がある。

- 1) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－、2005
- 2) 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 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) 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 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（第 4 分冊）－人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア初期条件の設定－、2014
- 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 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（第 4 分冊）－人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア初期条件の設定－、2017
- 5) 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 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（第 4 分冊）－人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア初期条件の設定－、2015
- 6) 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 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（第 4 分冊）－人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア初期条件の設定－、2016
- 7) Dale P. Bentz, Edward J. Garboczi, and Kenneth A. Snyder, “A hard core/soft shell microstructural model for studying percolation and transport in three-dimensional composite media”, NIST Internal Report 6265, 1999
- 8) 高山裕介、ベントナイトの力学モデルと放射性廃棄物地層処分における緩衝材としての品質評価、神戸大学博士論文、2014
- 9) 電気事業連合、核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－、JNC TY1400 2005-013、FEPC TRU-TR2-2005-02、根拠資料集 4-2、2005

#### 4-6 ガス移行連成挙動評価手法の開発

##### ◇事業の概要

TRU 廃棄物処分においては、処分施設内の構造材や廃棄体に含まれる金属の腐食等に起因したガスの発生が懸念されるが、ガスの施設外へ向けての移行や蓄圧等の現象が生じた場合、人工バリアの長期健全性に影響を及ぼす可能性がある。

上記の影響評価に係る課題は「第2次 TRU レポート」<sup>1)</sup>及び「TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画」<sup>2)</sup>にて提示されており、特にベントナイト系緩衝材中の力学連成を伴うガス移行を考慮した評価モデルの開発、掘削影響領域を含むニアフィールド全体におけるガス移行評価モデルの開発等の必要性が提言されている。

本事業では、図-1 に示す TRU 廃棄物処分施設の人工バリア概念 (TRU 廃棄物グループ 2 の例)<sup>1),3)</sup>と人工バリア材料を対象として、主に赤字で示すベントナイト系/セメント系材料の課題解決に係る「ガス移行連成挙動の評価手法」を開発・整備して人工バリア性能への影響評価を行い、その上で人工バリアの健全性を示すことを目標としている。

なお、「TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画」<sup>2)</sup>では、地層処分の事業化フェーズである国の基盤研究開発を、サイト選定プロセスを考慮し段階的に成果を反映させることを念頭に置き、フェーズ 1～3 として定義しているが、本事業においても当該計画に沿う形で検討を進めた。

このうち、フェーズ 2 (平成 19～24 年度) に対応した検討<sup>4)</sup>では、人工バリアのうちベントナイト緩衝材中のガスの移行挙動解明に向け、水とガスの透過性及び力学特性データの取得やガス移行解析モデルの構築/高度化を推進した他、人工バリアの周辺岩盤を含むガス移行挙動を評価するためのシナリオ構築、及びシナリオ評価手法を整備した。しかし、その一方で、現実的なガス移行挙動を評価するには、不確実性を有する多くの課題 (多様な人工バリア材料に対するガス移行挙動の解明やモデル化が必要であること、また、多様な廃棄物処分概念を考慮した評価シナリオの構築と根拠の拡充が必要であること等) が残された。

これを踏まえ、フェーズ 3 (平成 25～29 年度)

に対応した検討<sup>5)~7)</sup>では、ベントナイト系緩衝材のみならず、セメント系材料中におけるガス移行挙動の不確実性の把握・理解に係る知見 (室内試験によるデータ取得) を拡充していく他、把握されたガス移行挙動の素過程 (現象) の理解とモデル化を進めつつ、試験結果を再現できる解析・評価手法の信頼性向上を図っていくこととした<sup>4)~7)</sup>。

また、材料単体のみならず、人工バリア内のガス移行経路になることが懸念される材料界面 (異種材料間/同種材料間) を考慮した複合システムとしてのガス移行連成挙動の評価手法の高度化、及び多様な処分概念への対応に向けた評価シナリオとシナリオ構築に係る FEP (Features, Events and Processes) を拡張することにより、人工バリア性能に対する現実的な影響評価に向けた検討を推進していくこととした<sup>5)~7)</sup>。

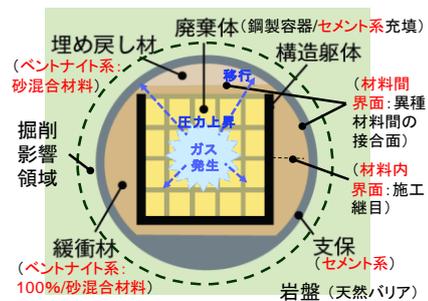


図-1 本事業において対象とする TRU 廃棄物処分施設の人工バリア概念図 (廃棄物グループ 2 の例) と人工バリア材料 (赤字で追記)<sup>1),3)</sup>

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

##### ◇平成 28 年度の成果

平成 28 年度の成果の概要は以下のとおりである。<sup>8)</sup>

###### (1) ガス移行評価シナリオの拡張

本項目では、ガス移行評価シナリオと FEP 拡張に係る検討として、前フェーズ (平成 19～24 年度) の成果 (TRU 廃棄物グループ 2 の処分概念を対象としたシナリオ及びシナリオ構築・評価手法) を用いることで、平成 25～26 年度にわたって TRU 廃棄物グループ 1 と 3、及び 4 を対象とした新たなシナリオを構築し、既存のシナリオとの統合・整理を図ってきた。<sup>5),6)</sup>

平成 27 年度以降は、平成 26 年度までの成果

## II. 放射性廃棄物の地層処分にに関する調査研究

をベースとして、シナリオ構築・評価の流れ（実施手順）の再整理（評価の体系化）を図ることを目的に、図-2 に示すような各々の作業（評価要素①～④）の流れと相関性を明確化した評価体系を整備し、既存のシナリオ構築・評価手法の信頼性向上や不確実性の低減を図る検討を進めることとした。

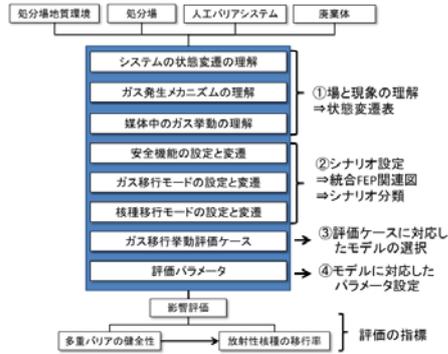


図-2 体系化したガス移行評価の流れ（実施手順）と評価要素（①～④）

平成 28 年度は、平成 27 年度に整備した評価体系（図-2）における評価要素のうち、主に「②シナリオ設定」に係る FEP の不確実性（信頼性の程度）に着目した検討（課題の抽出）を図-3 に示すフローで実施するとともに、その低減方策（課題解決方策）を策定した。

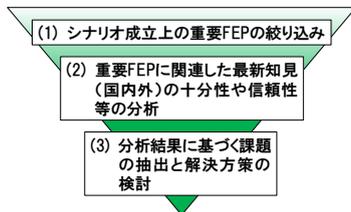


図-3 シナリオ設定の不確実性低減に向けた検討フロー

### (2) ガス移行連成挙動解析ツールの高度化

本項目では、ガス移行評価シナリオの根拠の拡充や評価手法の整備に資する、既存のガス移行連成挙動解析ツール（計算を実行する「解析コード」、及び解析に必要なパラメータ群のデータベース化／解析コードによる計算と連動可能なプログラムである「データライブラリ」の総称）<sup>4)</sup>を更に高度化することを目的として、平成 25 年度に策定した実施計画<sup>5)</sup>に基づき、平成 27 年度までにガス移行モデル（解析ツールに組み込まれた数理モデル）の検証及び解析手法（解析ツールを用いたモデリング手法）の信頼性向上に向けた検討を進めてきた。

平成 28 年度は、既存のガス移行評価シナリオのうち TRU 廃棄物グループ 2 の処分概念で想定する事象（ガス移行に伴う汚染水が押出される等）<sup>4)</sup>の定量評価に資するべく、平成 27 年度までに検証したガス移行モデルと解析ツール<sup>4)~7)</sup>を用い、解析的な検討を行った。具体的には、図-4 のように人工バリア断面を 2 次元の格子でモデル化したうえで、様々な条件下でのガス移行試験（飽和した緩衝材中へのガス浸入～大破過\*に至るまでの排水挙動を評価した試験等）により取得したデータを再現可能なガス移行モデル（数理モデル）やパラメータ（表-1）、並びに解析ツール（二相流解析コード：GETFLOWS 等）を用いたガス移行解析を行った。

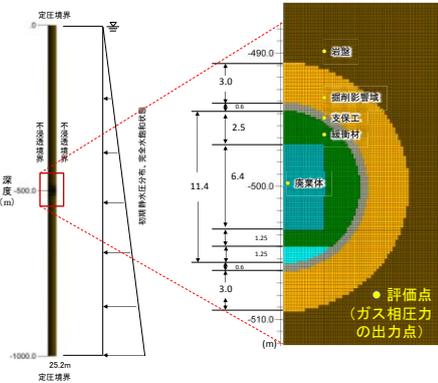


図-4 解析モデルと境界条件

表-1 平成 27 年度までに検証した数理モデルとパラメータ<sup>4)~7)</sup>

毛細管圧力曲線 (van Genuchten モデル)	相対浸透率曲線 (van Genuchten モデル)																																										
$P_c = P_0(S_{we}^{-1/m_c} - 1)^{1/n_c}$ $S_{we} = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr} - S_{gr}}$ $m_c = 1 - 1/n_c$	$k_{rp} = \sqrt{S_{pe}}(1 - (1 - S_{pe}^{1/m_p})^{m_p})^2$ $S_{pe} = \frac{S_p - S_{pr}}{1 - S_{wr} - S_{gr}}$ $m_p = 1 - 1/n_p$ $p = w, g \text{ (water, gas phase)}$																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>ケース</th> <th><math>S_{wr}(-)</math></th> <th><math>S_{gr}(-)</math></th> <th><math>n_c(-)</math></th> <th><math>n_p(-)</math></th> <th><math>P_0(MPa)</math></th> <th><math>m_c(-)</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ケース 1 (排水量=最大)</td> <td>0.3867</td> <td>0.0</td> <td>1.449</td> <td>13.70</td> <td>0.661</td> <td>1.821</td> </tr> <tr> <td>ケース 2</td> <td>0.2000</td> <td>0.0</td> <td>2.884</td> <td>2.451</td> <td>0.336</td> <td>3.709</td> </tr> <tr> <td>ケース 3</td> <td>0.2000</td> <td>0.0</td> <td>2.884</td> <td>2.451</td> <td>0.333</td> <td>3.709</td> </tr> <tr> <td>ケース 4</td> <td>0.2280</td> <td>0.0</td> <td>2.455</td> <td>2.474</td> <td>0.324</td> <td>3.297</td> </tr> <tr> <td>ケース 5 (排水量=最小)</td> <td>0.3639</td> <td>0.0</td> <td>2.011</td> <td>2.953</td> <td>0.291</td> <td>2.290</td> </tr> </tbody> </table>	ケース	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_c(-)$	$n_p(-)$	$P_0(MPa)$	$m_c(-)$	ケース 1 (排水量=最大)	0.3867	0.0	1.449	13.70	0.661	1.821	ケース 2	0.2000	0.0	2.884	2.451	0.336	3.709	ケース 3	0.2000	0.0	2.884	2.451	0.333	3.709	ケース 4	0.2280	0.0	2.455	2.474	0.324	3.297	ケース 5 (排水量=最小)	0.3639	0.0	2.011	2.953	0.291	2.290	
ケース	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_c(-)$	$n_p(-)$	$P_0(MPa)$	$m_c(-)$																																					
ケース 1 (排水量=最大)	0.3867	0.0	1.449	13.70	0.661	1.821																																					
ケース 2	0.2000	0.0	2.884	2.451	0.336	3.709																																					
ケース 3	0.2000	0.0	2.884	2.451	0.333	3.709																																					
ケース 4	0.2280	0.0	2.455	2.474	0.324	3.297																																					
ケース 5 (排水量=最小)	0.3639	0.0	2.011	2.953	0.291	2.290																																					

\* 『ガス圧上昇中にガスの排出量が急激に増大する現象』と定義<sup>9)</sup>

解析の結果、図-5 に示すようにリファレンスのために実施した基本ケース（第2次 TRU レポートで提示されたモデル・パラメータ<sup>1)</sup>を用いたケース）と比較して、ケース1及び5（表-1に示す5つのパラメータのうち、緩衝材からの累積押し出し水量が各々最大・最小となった試験データから同定したものをを用いたケース）では、人工バリア（奥行き1m当たり）からの累積押し出し水量（ $m^3/y/m$ ）は増加するが、内部の最大ガス圧は減少することが分かった。このことから、第2次 TRU レポートの知見<sup>1)</sup>を用いた評価では、ガス圧については保守的評価となるが、累積押し出し排水量については少なく見積もる（安全裕度が小さい）可能性が示唆された。一方で、ガス圧については基本ケース（最大値）とケース5（最小値）の範囲に収まるとともに、累積押し出し水量もケース5（最多値）と基本ケース（最少値）の範囲に収まることが分かった。

以上により、シナリオで想定する事象（ガスの蓄圧や汚染水の押し出し）の規模は、信頼性の高いモデル・パラメータを複数用いたガス移行解析からガス圧や累積押し出し排水量の最大・最小値等を見積もることによって得られる「定量的な幅」の範囲で評価できる可能性が示唆された。

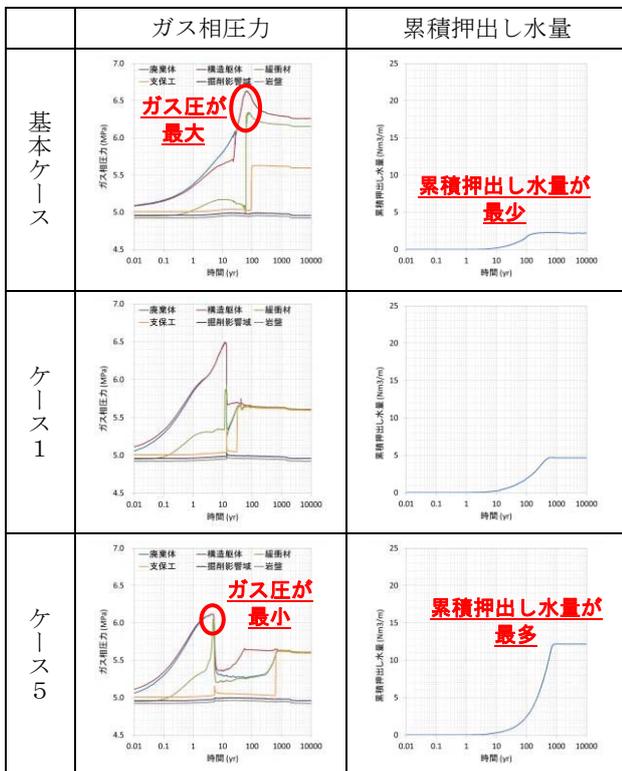


図-5 ガス移行解析結果

(3) ベントナイト系材料及びセメント系材料のガス移行に係るデータの拡充

本項目では、既往のガス移行評価シナリオ<sup>4)</sup>で想定する現象の理解や不確実性の低減等に資するデータの取得を目的として、平成25年度に策定した実施計画<sup>5)</sup>に基づき、前フェーズ（平成19～24年度）で取得されたデータ（特に緩衝材中の大破過が生じる際の挙動に着目したものをさらに拡充/充実させていく（前フェーズで取得した以外のデータの取得）こととした。平成26年度は、緩衝材（ベントナイト）やセメント系材料（モルタル）中のガス移行形態に関して、これまで知見の少なかった気液二相流形態が主体となる（特に緩衝材中で大破過等が生じない）ことを想定した条件でのガス移行試験を実施し、その挙動を評価した<sup>6)</sup>。

平成27年度以降は、既存のガス移行評価シナリオ<sup>4)~7)</sup>で想定するような人工バリア材料間界面（特にベントナイト及びモルタル材料間界面）におけるガスの移行挙動を評価することを目的に、当該界面を模擬した供試体を用いてのガス移行挙動評価試験を実施することとした。

その一例として、平成28年度に実施したベントナイト界面に関する試験では、図-7に示すような上部緩衝材ブロックの定置時に生じ得る隙間（同一材料間界面）の模擬供試体を作製したうえで、当該界面におけるガス移行挙動を評価した。

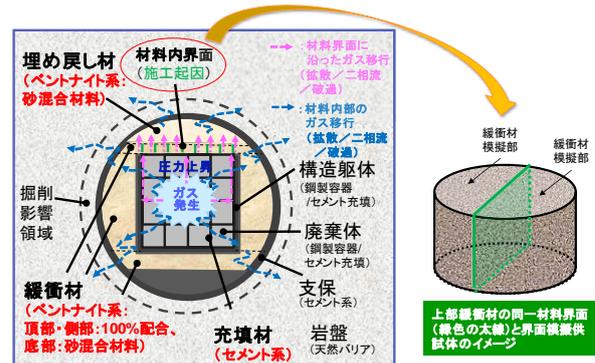


図-7 人工バリア内で想定されるガス移行挙動の概念と模擬供試体のイメージ

図-8に模擬供試体を用いたガス移行挙動評価試験の概念図を示す。当該試験では、既往のガス移行評価シナリオ<sup>4)</sup>において想定するような、人工バリア内でのガス発生が律速段階かつ安全評価上で保守的な条件となる飽和後の緩衝材（ガスが透過しづらい状態）のガス移行挙動を評価するた

## II. 放射性廃棄物の地層処分にに関する調査研究

め、まず初期飽和度 90%となるよう締め固めた模擬供試体（クニゲル V1：100%、乾燥密度： $1.36\text{Mg}/\text{m}^3$ ）の下面より注水することで飽和状態を構築した後、背圧载荷とともにガスを注入する手順とした。なお、模擬する界面幅は供試体直径（ $\phi 60\text{mm}$ ）に対して 1~3mm 幅としたが、これは実際の定置時における緩衝材ブロック（約 1,000mm 四方）間隔の水平幅（界面幅）を大きく見積もり、最大約 18mm~54mm 程度になることを仮定した場合の「想定値」から換算・設定したものである。

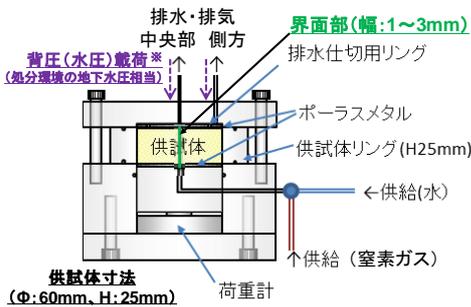


図-8 ガス移行挙動評価試験の概念

当該試験の結果、界面幅を 1mm とした供試体（図-9）では、既往のガス移行試験結果<sup>4)</sup>（界面の無い同一寸法のベントナイト供試体による）とほぼ同様に、間隙へのガス浸入（間隙圧の上昇）による有効応力の低下を伴いながら、供試体側方からの排水挙動（ガス移行に伴う間隙水の押出し）やガスの破過圧が観測されたことから、当該界面は飽和過程で自己閉塞（十分に一体化）しており、ガス移行挙動や破過圧に対して与える影響は小さい可能性が示唆された。一方で、界面幅を 3mm とした供試体（図-10）でのガスの破過圧は 1.1MPa であり、界面幅 1mm の供試体と比較して約 0.2MPa 低い値を得た。この要因解明のため、ガス破過に至るまでの排水挙動に着目して両者を比較したところ、排水が卓越しているのは界面幅 1mm の供試体では側方（界面以外）なのに対し、界面幅 3mm の供試体は中央部（界面付近）であることから、後者は前者と比較して界面の自己閉塞が緩慢な状態であり、卓越した水・ガス移行経路となったことに依る可能性が示唆された。

以上により、界面幅が 3mm（図-8 での寸法）を超えると自己閉塞性に影響が及ぶ可能性があることから、実際の緩衝材ブロック定置時の間隔は約 50mm 以下に抑えるのが望ましいと思われる。

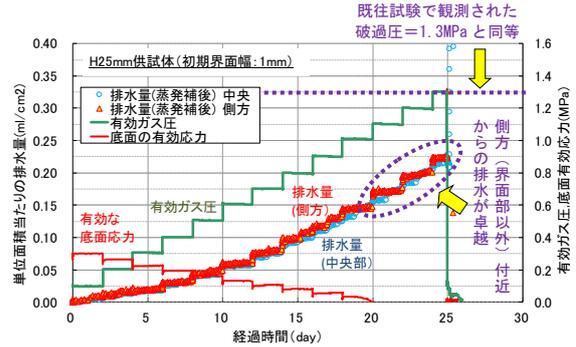


図-9 ガス注入（排水）過程における供試体（界面幅：1mm）からの排水挙動と有効応力の経時変化

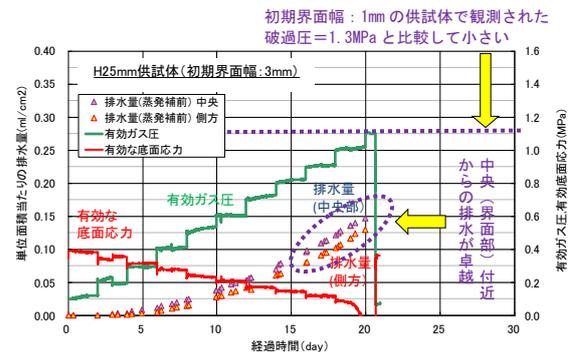


図-10 ガス注入（排水）過程における供試体（界面幅：3mm）からの排水挙動と有効応力の経時変化

- 1) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物処分技術検討書 - 第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ、2005
- 2) 地層処分基盤研究開発調整会議、地層処分基盤研究に関する全体計画【研究開発マップ】（平成 25 年度～平成 29 年度）、2014
- 3) 原子力発電環境整備機構、地層処分を行う低レベル放射性廃棄物（TRU 廃棄物）について、2008
- 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 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
- 5) 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 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) - ガス移行連成挙動評価手法の開発一、2014
- 6) 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 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) - ガス移行連成挙動評価手法の開発一、2015
- 7) 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 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) - ガス移行連成挙動評価手法の開発一、2016
- 8) 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 28 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書(第 5 分冊) - ガス移行連成挙動評価手法の開発一、2017
- 9) 一般財団法人電力中央研究所、処分施設条件を考慮した締め固めたベントナイトのガス移行特性評価 電力中央研究所報告、2012

## 5. 搬送・定置設備の設計フローの構築及び概念設計

### ◇事業の概要

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）が、経済産業省資源エネルギー庁から受託した「平成 28 年度地層処分技術調査等事業（直接処分等代替処分技術開発）」<sup>1)</sup>において、直接処分技術については、わが国において使用済燃料の直接処分が技術的な信頼性をもって実現できることを例示するために、考えられる処分場施設の設計・性能評価技術の開発を実施するとしている。

原環センターは原子力機構より「搬送・定置設備の設計フローの構築及び概念設計」を受託し、処分場施設の設計技術開発の一環として搬送・定置設備の設計フローの構築及び概念設計並びに使用済燃料の処分施設の設計段階において考慮しておくことが必要になると考えられる保障措置技術の適用性検討を実施した。ここでは搬送・定置設備に関する検討成果について報告する。

### ◇平成 28 年度の成果

平成 27 年度までに、縦置き及び横置きブロック方式や PEM 方式などの人工バリアの定置方式を含む様々な処分場概念や人工バリア仕様への適用が期待できる搬送・定置に関わる候補技術を体系的に取りまとめた。また、地上施設についても封入設備に適用可能な技術オプションを体系的に取りまとめた<sup>1)~3)</sup>。

これらの成果を踏まえ、平成 28 年度は、搬送・

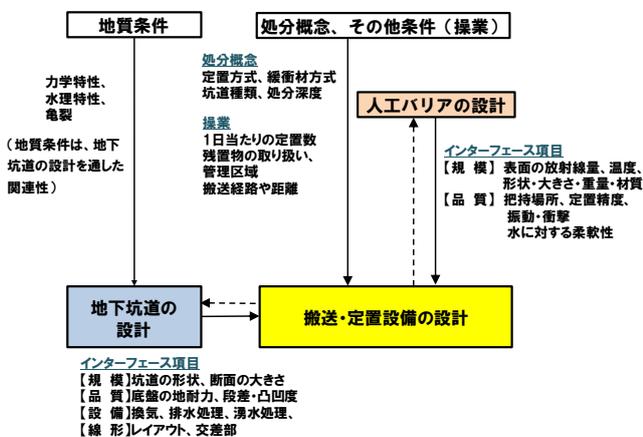


図-1 搬送・定置設備の設計と地下坑道、人工バリア、処分方式等との設計項目の関連性

定置設備の設計フローの具体化の観点から、人工バリアや地下坑道などの他の処分施設の設計との連携に加え、使用済燃料の直接処分での留意が必要となる保障措置や核セキュリティを考慮した技術やシステムと連携する項目を明確にした上で設計フローを整備した。さらに人工バリアや地下坑道などの他の処分施設の設計と整合する仕様の搬送・定置設備の概念を例示した。

### (1)搬送・定置設備の設計と人工バリアや地下坑道等の設計との関連性

平成 26 年度に実施した搬送・定置設備の技術オプションに関する体系的な整理結果<sup>2)</sup>に基づき、搬送・定置設備の設計と人工バリアの設計、処分坑道の設計、処分方式/地質条件や操業等との関連性を整理した。整理結果を図-1 に示す。

人工バリアの設計との関連では、処分容器表面の放射線量や温度、処分容器や緩衝材の形状、大きさ、重量や材質などの諸元、搬送・定置作業時の把持位置、定置精度、振動・衝撃などが搬送・定置設備の設計に関連する項目として挙げられた。また、地下坑道（処分坑道）の設計との関連において、坑道の形状や断面の大きさ、底盤の地

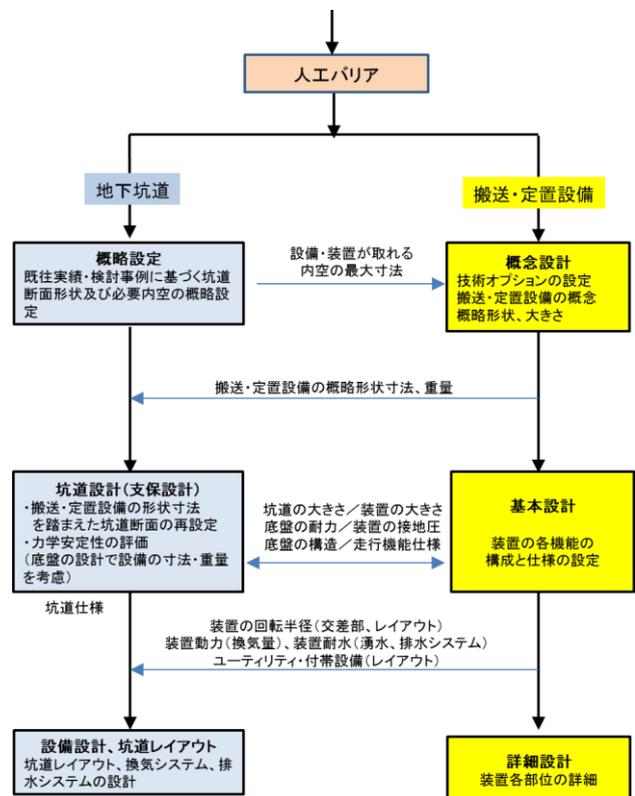


図-2 設計フローにおける搬送・定置設備と地下坑道の関係

## II. 放射性廃棄物の地層処分に關する調査研究

耐力、段差や凸凹、換気・排水・湧水処理などの設備、坑道のレイアウトや交差部の形状などが挙げられる。一方、母岩の力学特性、水理特性ならびに岩盤のき裂状況などは地下坑道の設計に影響を与えるが、搬送・定置設備の設計には直接的に影響することはないと考えられる。

搬送・定置設備の設計と地下坑道の設計との関連部分に着目した設計フローを図-2に示す。同フローでは搬送・定置設備の概念設計、基本設計、詳細設計に至る手順とともに、地下坑道の概略設定、坑道設計（支保設計）、設備設計・坑道レイアウトの設計手順との関連性についても整理した。

### (2) 搬送・定置設備の設計と保障措置・核セキュリティとの関連性

保障措置システム及び核セキュリティシステムからの要求事項<sup>2),3)</sup>に対して、搬送・定置設備を含む地下施設での対応を検討した。2つのシステムからの地下施設への要求事項に対する対応を表-1に示す。これらの整理に基づき、搬送・定置設備での具体的な対応例を以下のように設定した。

- ・搬送・定置装置に搭載したカメラや放射線モニタにより、搬送・定置作業中の処分容器を確認する
- ・地下坑道の出入り口などの要所における監視カメラや放射線モニタにより、処分容器を搭載した搬送・定置設備の位置を監視、管理する。

表-1 保障措置システム及び核セキュリティシステムからの要求事項に対する地下施設での対応

保障措置システムからの要求事項に対する対応	監視カメラ、放射線モニタなどの、異なる2種類の方法により処分容器の所在を、監視・記録する
	上記の監視・記録に用いる技術と設備・施設が互いに干渉しない
	廃棄体封入後の処分容器では、処分容器検認のための超音波測定による溶接ビード等の測定を実施し、記録と比較して再検認を行う
核セキュリティシステムからの要求事項に対する対応	査察活動（設計情報検認および補完アクセス等を含む）を受ける
	地下施設の出入り口でカメラ等による侵入を検知
	地震波測定や電磁波レーダ等のモニタリングにより侵入活動の検知
	カメラ等による核物質の監視

### (3) 概念設計の例示

人工バリアや地下施設の設計および保障措置システム及び核セキュリティシステムからの要求事項と整合する、地上施設及び搬送・定置設備のハンドリングフローの例を図-3に示す。

同図では、使用済燃料詰替施設と処分場が同一敷地内に配置された場合の、縦置きブロック定置方式を例にしたものである。搬送・定置設備は廃棄体の搬送・定置装置を対象とし、坑道は、地上施設と直結するアクセス坑道（斜坑を想定）とアクセス坑道から先の連絡・主要坑道や処分坑道で構成されるものとした。

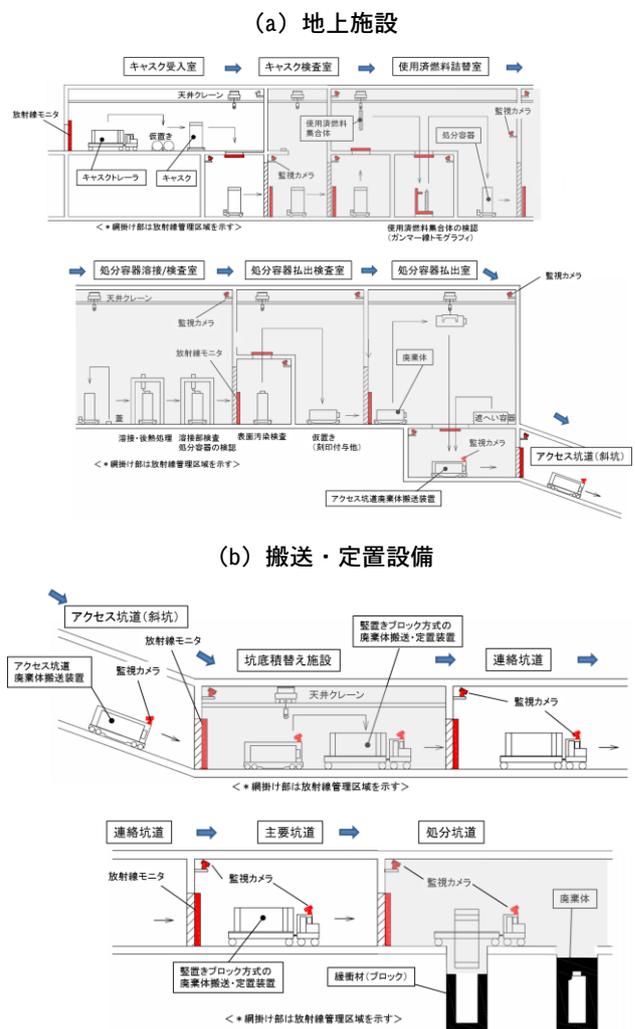


図-3 地上施設及び搬送・定置設備のハンドリングフローの例

- 1) 日本原子力研究開発機構、平成28年度地層処分技術調査等事業直接処分等代替処分技術開発報告書、2017年
- 2) 日本原子力研究開発機構、平成26年度地層処分技術調査等事業使用済燃料直接処分技術開発報告書、2015年
- 3) 日本原子力研究開発機構、平成27年度地層処分技術調査等事業直接処分等代替処分技術開発報告書、2016年

## 6. 諸外国等における地層処分事業に係る 社会科学的研究に関する調査

### ◇事業の概要

原子力発電環境整備機構（NUMO）が、地層処分事業に係る対話活動の進め方及び対話活動に用いる関係資料や説明内容等へ反映し充実を図るとともに、今後 NUMO が実施する社会的側面に関する調査研究支援の実施に活用するため、諸外国等による社会科学的研究の実施内容を調査し、体系的に取りまとめた。また、類似の取組みを我が国で実施する場合を前提に、我が国の社会的諸制度・法規制等との比較など留意すべき事項等を追加調査・整理した。さらに、それらの成果を踏まえた報告会を実施した。

なお、本事業は、原子力発電環境整備機構（NUMO）の委託により実施したものである。

### ◇平成 28 年度の成果

#### (1) 諸外国等による社会科学的研究の実施内容に関する調査及び体系的取りまとめ

諸外国等が過去に実施してきた社会科学的研究に関し、我が国の地層処分事業の推進に資する有用な情報について既存の関連文献等に基づき、諸外国等の調査をし、これらを体系的に取りまとめた。

具体的には、放射性廃棄物の管理に関して、経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA）の「ステークホルダーの信頼に関するフォーラム」（FSC）において実施されてきた社会科学に関する取組みを調査した。また、地層処分事業に係る社会的側面に関して実施主体が先駆的に取り組んできた海外事例として、スウェーデンのスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB 社）及びカナダのカナダ核燃料廃棄物管理機関（NWMO）に注目し、これらの実施主体における社会科学的研究の内容を体系的に取りまとめた。以下に OECD/NEA、SKB 社及び NWMO の取組みに関する調査結果の概要を示す。

#### 1) 「ステークホルダーの信頼に関するフォーラ

#### ム」（FSC）の取組み

FSC は 2000 年の設立以降、様々なステークホルダー間の対話や、信頼の共有、廃棄物管理方法に関する合意と承認を進展させるための方法を学習し、育むことを目的として活動しており、その活動には年次会合、国別ワークショップなどがある。国別ワークショップは、これまでに 11 回開催されており、2016 年にはスイスにおいて「放射性廃棄物管理における持続可能な世代間意思決定」をテーマとして開催された。

FSC は、国別ワークショップ、年次会合などの活動を通じて得られた成果を報告書として公表している。放射性廃棄物管理を実現する社会的意思決定に係る重要な概念を紹介する文書『放射性廃棄物管理におけるステークホルダーの信頼：主要用語の注釈つき解説』が 2013 年に発行されている。

#### 2) カナダ NWMO の取組みに関する調査

カナダ核燃料廃棄物管理機関（NWMO）は、2002～2005 年にわたり核燃料廃棄物の長期管理政策の確立に向けて、多くの国民が関与する政策対話を実施した。この結果として NWMO は「適応性のある段階的管理」（APM）を開発し、この APM がカナダの使用済燃料の処分方針として採用された。

本調査では、対話活動に向けて NWMO が社会科学の側面の情報提供をどのように進めたかなどを整理した。

NWMO は、意図的に多様な意見を取り込むように、社会科学的研究の取組みとみなしうる以下の二つの取組み方策を実施していた。

- ①背景資料の整備
- ②様々な対話イニシアチブの実施

#### ①背景資料の整備

NWMO は、カナダの核燃料廃棄物の長期管理アプローチの研究を行うにあたり、社会的受容性の前提条件に関係する背景資料を数多くの執筆者に依頼し、作成している。表-2 に示すように、NWMO が管理アプローチの提案報告書を最終的に取りまとめた 2005 年 11 月時点までに、背景資料の構成は以下の 9 テーマ、全体で 70 件を越える論文・資料が公表されていた。

背景資料には技術的内容のものも含まれているが、大部分は社会科学に関連するものである

## II. 放射性廃棄物の地層処分にに関する調査研究

(件数ベースでは約 74%)。

表-2 NWMO の背景資料のテーマと件数

テーマ	件数
主導理念	10
社会と倫理の次元	9
健康と安全	5
科学と環境	6
経済的要因	4
技術方法	18
制度とガバナンス	13
ワークショップ・レポート	5
評価関連	3

### ②様々な対話イニシアチブの実施

NWMO は、対話イニシアチブの活動成果を「対話報告書」として公表している。対話報告書は、対話の形態・形式によって以下の 6 つに分類されており、対話活動詳細を記載した上で、専門家、先住民組織、公衆、若者、地域住民など意見の聞き取り結果を取りまとめた議事録が示されている。

- 専門家ワークショップ・円卓会合
- 先住民との対話
- 公衆の態度に関する調査
- 価値観に関する全国対話
- 電子対話
- 公衆説明会と討論セッション

### 3)スウェーデン SKB 社の取組みに関する調査

スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社(SKB 社)は、1990 年代に総合立地調査と呼ばれる立地方法研究の枠内で「社会調査」を実施していた。その後、2001～2002 年にかけて、エストハンマルとオスカーシャムの 2 自治体がサイト調査(我が国の概要調査に相当)の受け入れを議決したことを受け、SKB 社が各自治体において、ボーリング調査や環境影響評価が実施された。SKB 社は、2004 年の研究開発実証プログラムにおいて、技術開発・安全評価研究に加え、社会科学的研究を行う計画を表明した。SKB 社が社会科学的研究を公募し、応募者に資金提供する形態で実施された社会科学的研究プログラムであり、2004 年から 2010 年に実施された。

SKB 社は、原子力廃棄物及びサイト調査自治体に関連するものとして自社が資金提供を行う以下の 4 つの一般的な研究領域に限定している。

- ①社会経済的な影響
- ②意思決定プロセス
- ③世論および公衆の態度－心理社会的な効果
- ④周辺社会の変化

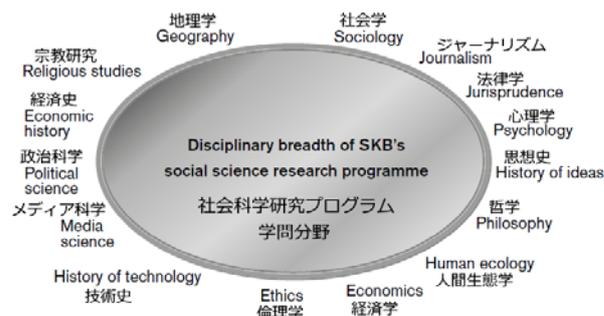


図-2 社会科学的研究プログラムの学問分野

SKB 社から資金提供を受けた計 18 件の研究プロジェクトは、図-2 に示す 15 の異なる学問分野をカバーしており、23 名の研究者が参加した。これらの社会科学的研究の成果は、環境影響評価の協議に参加する国の機関、自治体、環境団体、地元住民に広く提供されたほか、成果の一部については、SKB 社が 2011 年に取りまとめた環境影響評価報告書において言及されている。

### (2)我が国の社会的諸制度・法制度等との比較の観点からの追加調査・整理

調査を実施したカナダ及びスウェーデンの事例を比較することで、我が国において類似の取組みを行うことを想定した場合の示唆をまとめた。以下にその一部を示す。

- ・社会科学的研究の「目標」の設定と表現は、法制度・事業背景を色濃く反映するため、外国の例をそのまま取り入れることは難しい
- ・2 カ国の研究領域には共通性を読み取れ、我が国の取組みにも適用できる見通しがある
- ・社会科学的研究の知見・成果を一般の人々との対話ツールとして活用することが可能

### (3)報告会の実施

前述の (1)、(2) の調査結果等を取りまとめ、プレゼンテーション資料を作成し、報告会を実施した。

## 7. ハル・エンドピースの地層処分に向けた廃棄物データの整備に関する研究計画の検討

### ◇事業の概要

ハル・エンドピースは使用済燃料の再処理工程で、燃料棒の裁断及び核燃料の溶解工程から排出されるジルカロイ製の被覆管やステンレス鋼製のエンドピースからなる廃棄物であり、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、ハル・エンドピースに含まれる炭素 14 のインベントリ評価、ならびに放出挙動のモデル化及び評価を実施してきた<sup>2),3)</sup>。一方で、廃棄物の受け入れ等に必要となる廃棄物確認等で必要となる核種濃度の推定・設定等のために、今後、炭素 14 以外の放射性核種に対するデータ取得が必要となるものと考えられる。

そこで、本検討では、インベントリに関するデータ取得の手法や計画について検討する。それには対象とする被覆管及びステンレス鋼等に含まれる添加元素や不純物等に関するデータや、放射化履歴など、材料メーカーや電力会社等が所有するデータを用いる必要があるため、データを収集するための体制及び収集方法について検討を開始した。また、TRU 廃棄物グループ 2 のジルカロイハルの処理方法を検討することで、グループ 1 廃棄物を含めた合理的な TRU 廃棄物の処理方法について検討した。

### ◇平成 28 年度の成果

#### (1) 地層処分対象廃棄物のインベントリに関する作業会

NUMO と JNFL が中心となり、JAEA、電力、基盤研究実施機関（当センター）が参加して実施される「地層処分対象廃棄物のインベントリに関する作業会」へ参画し、特に、エネ庁委託事業の成果をもとにインベントリ設定に必要な情報を提供してきた。平成 28 年度は、合計 6 回の作業会が開催された。核種インベントリに関わるロードマップの見直しを含め、R&D 計画や実施機関について議論を行い、次年度以降の研究計画について具体化した。

#### (2) 電力共通委託計画の策定

「地層処分対象廃棄物のインベントリに関する作業会」における議論や計画を通して、電力事業者と今後の対応について協議した。電力事業者等からウランペレットや炉内構造材の化学組成に関する情報が得られる見込みが得られた。それらを反映したインベントリ評価について、平成 29 年度に電力共通委託として実施できる見込みを得たことから、そのための調査計画を策定した。

#### (3) ジルカロイハルの HIP 処理条件の調査

ジルカロイハルをマトリクス母材とし、廃銀吸着材を熱間等方圧加圧法（HIP）により物理的に閉じ込める固化技術について、HIP 処理の基礎的な処理条件を見出すことに成功した。今後は、ジルカロイハルの形状等の前処理手法などに着目し、合理的に HIP 処理できる条件を整備する。また、作製した固化体の均質性や空隙構造など、基礎的な物性の取得等を含め、ジルカロイハルによる固化技術の成立性を見通しを得る予定である。

#### (4) 次年度以降の計画

平成 29 年度以降、TRU 電共研が電力共通委託として再会される見通しが得られたことから、今後の「地層処分対象廃棄物のインベントリに関する作業会」および「電共研（ハル・エンドピースのインベントリ）の事前検討」等については電力委託研究として継続させるが、今後の議論や進捗を踏まえ、検討内容については柔軟に対応する必要がある。ジルカロイハルの HIP 処理による処理・処分の合理化については、次年度以降も資源エネルギー庁への提案・受託まで技術開発を継続し実用化を目指す。

- 1) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－、2005
- 2) 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 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（第 2 分冊）－炭素 14 長期放出挙動評価－、2014

## 8. 先進的核燃料サイクル技術の地層処分概念への影響検討

### ◇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。平成27年度には、核燃料サイクル-地層処分関連図について、高速炉への移行期を見据えて、発電、再処理、処分の関係を時系列で整理した。また、ガラス固化体の成立性の観点から、 $UO_2$ 及びMOX燃料の燃焼度と使用済燃料の冷却期間をパラメータとして、使用済燃料中の核種の放射能（マイナーアクチニド、白金族元素、Moなど）及び発熱量と時間の関係を計算した。

平成28年度は、核燃料サイクル-地層処分関連図を更新するとともに、地層処分の工学的成立性の点からは処分場の温度が重要となることから、廃棄物とその前提条件の多様化を念頭に、ガラス固化体と使用済燃料を対象として処分場の熱計算手法について検討した。

### ◇平成28年度の成果

#### (1)核燃料サイクル-地層処分関連図の更新

平成27年度に更新した核燃料サイクル-地層処分関連図を以下の点から再度見直しを行った。

○関連図中のプロセスに関して、廃棄物発生条件となるもの、廃棄物の受け入れに関して

制限となるもの、及び廃棄物の物流上のバッファとして働くものを明示。

○再処理後の核種分離プロセスとその後のガラス固化等廃棄物処理プロセスの記述の詳細化。

更新した関連図を図-1に示す。

#### (2)処分場の熱計算手法の検討

有限要素法では、適切なメッシュサイズやタイムステップを設定しなければ、妥当な計算結果を得ることができない。適切な計算条件を調べるために、使用済燃料及びガラス固化体を対象として、硬岩系岩盤の深度1,000mにおける地層処分場の熱計算を実施した。処分場の熱計算には、3次元熱伝導解析ソフトC4Hを使用した<sup>1)</sup>。計算モデル、処分場構成材料の物性値、坑道離間距離、廃棄体ピッチは、直接処分第1次取りまとめ報告書<sup>2)</sup>及び地層処分第2次取りまとめ報告書<sup>3)</sup>を参照して設定した。使用済燃料及びガラス固化体の発熱量と時間の関係は、上記の文献中のグラフから読み取った。

使用済燃料とガラス固化体の計算に用いた要素数と接点数を表-1に示す。2種類のメッシュサイズを用いて処分場の熱計算を実施した。廃棄体周辺のメッシュは細かく設定し、廃棄体から離れた岩盤部分のメッシュは相対的に大きく設定した。それぞれのメッシュを用いて求めた処分容器（ガラス固化体の場合はオーバーパック）と緩衝

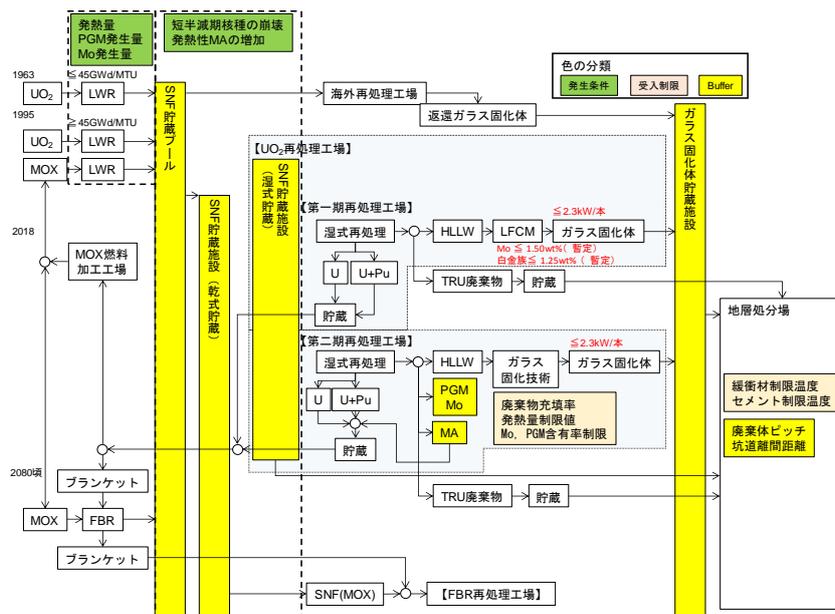
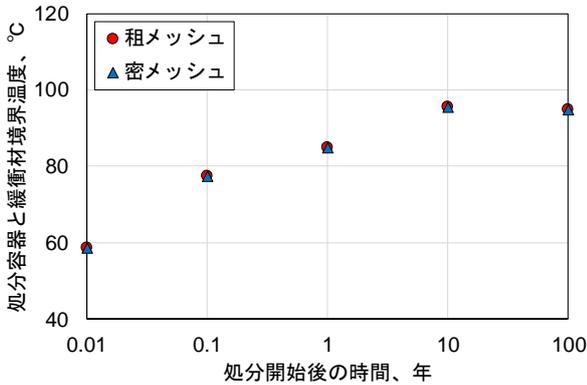


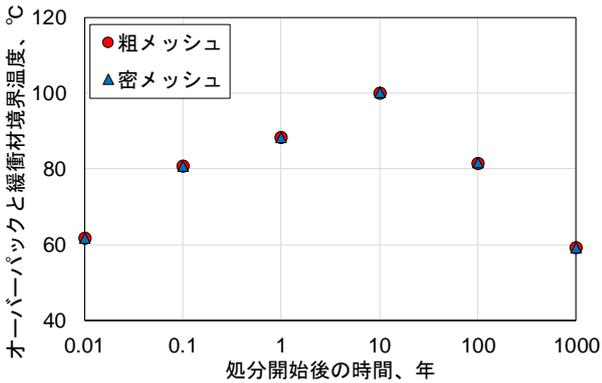
図-1 核燃料サイクル-地層処分関連図

表-1 処分場計算のメッシュ数と要素数

	メッシュ	要素数	接点数
使用済燃料	粗	5,621	26,385
	密	13,524	61,027
ガラス固化体	粗	1,810	9,357
	密	3,546	17,241



(a) 使用済燃料



(b) ガラス固化体

図-2 処分場温度に対する計算メッシュ依存性

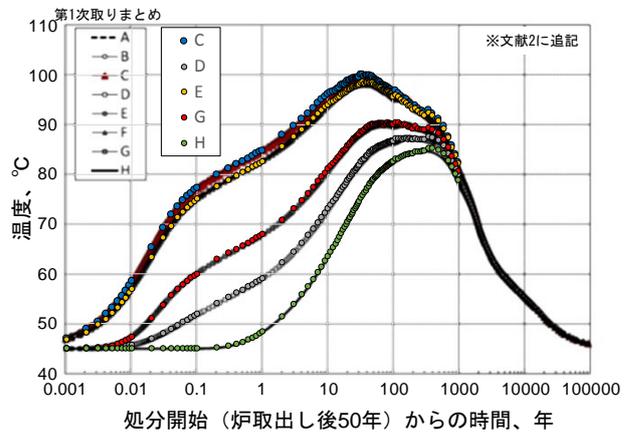
材の境界温度を図-2 に示す。使用済燃料及びガラス固化体の計算モデルでメッシュサイズの違いによる最大の温度差は、それぞれ 0.02℃、0.07℃であり、粗メッシュでも計算結果が十分に収束していることを確認した。

使用済燃料及びガラス固化体を対象として、粗メッシュを用いて計算した処分場温度を図-3 に示す。今回は、処分後 1,000 年までの計算を実施した。図中の実線や点線などは温度の出力点を表しており、例えば C 点は処分容器と緩衝材の境界温度を表している。計算により得られた各位置における温度の時間変化は、直接処分第 1 次取りまとめ及び地層処分第 2 次取りまとめ報告書の計算結果とよく一致した。また、ガ

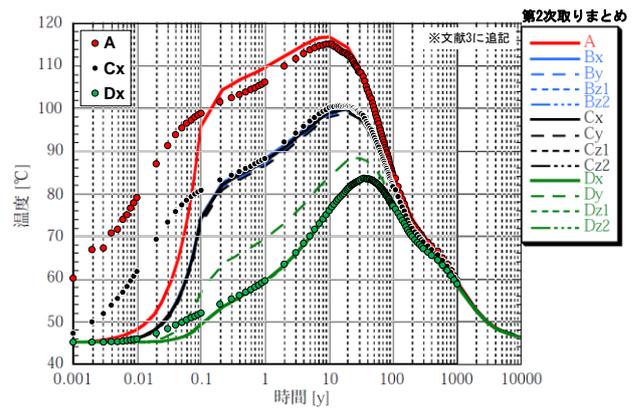
ラス固化体の発熱量のタイムステップを細かく設定したことにより、処分開始から 0.1 年までの温度上昇を適切に表現できることを確認した。

深さ 1,200m の計算領域を対象として、廃棄体周辺から地表までの領域のメッシュを適切に分割することにより、妥当な処分場温度を計算する手法を整備した。これにより、多様な廃棄物の条件に対して、処分場の工学的成立性について検討することが可能になった。

- 1) 算生会 HP、<http://sanseikai.la.cocan.jp/Pub/>
- 2) 日本原子力研究開発機構、わが国における使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価—直接処分第 1 次取りまとめ—、2015
- 3) 核燃料サイクル開発機構、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—、1999



(a) 使用済燃料



(b) ガラス固化体

図-3 粗メッシュを用いた処分場温度の計算結果

## 9. 理解促進活動の視点等を組み込んだ研究開発方法論の検討

### ◇事業の概要

地層処分手業を推進するためには、地層処分に係る技術の信頼性を向上させるための研究開発を進めるだけでなく、そのような取組が着実に進んでいることをステークホルダーと共有することが重要である。例えば近年の国際共同研究の1つとして（InSOTEC プロジェクト）、社会的課題と技術的課題の関係、技術をどのように社会の要請へ適用させるか等が議論されている<sup>1)</sup>。これまでに、技術や研究開発等に係る社会への情報提供が進められてきているものの、更に効果的なものとするためには、双方向コミュニケーションの拡充等によって、発信された情報の社会のニーズへの適合性や相互理解の充分性などを検証していく必要がある。

このような背景を受け、地層処分実規模試験施設における、試験員と来館者との双方向対話記録を標本として、情報を受け取る一般の方々が地層処分に抱いている興味や関心ならびに不安を感じている事項等を整理した。

### ◇平成 28 年度の成果

本事業における検討では、地層処分実規模試験施設における来館者記録を活用している。本施設の整備は、平成 20 年度の経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層処分実規模設備整備事業」において着手された<sup>2)</sup>。本事業を受託した原環センターは、本施設の設計、建設及び施設の維持管理・運営を実施している。本施設の所在地は北海道天塩郡幌延町にある国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構という）幌延深地層研究センターの敷地内である。原子力機構の「ゆめ地創館」との一体的な運営を行い、来館者に対しては共同でアンケートを実施している。このような形式化されたアンケートとは別に、本施設では来館者への説明を担当する試験員が来館者とのやり取りを対話記録として整理している。この記録には、本施設内で説明する地層処分関連技術に係る内容の他に、原子力に対する疑問や意見など、本施設以外にも来館者が日頃から抱いてい

る興味・関心事項も多数見受けられる。来館者記録には、年月日（曜日）、天候、入退室時間（滞在時間）、年代・性別等の属性の他に、来館者と試験員の対話の情報が含まれている。この来館者記録を様々な観点から分析することで、来館者の属性、属性ごとの興味・関心事項を抽出することができる。以下に、分析結果の一例を示す。

#### (1) 来館者数の推移、属性

平成 22 年度の施設公開開始から平成 28 年 3 月末までに延べ 43,690 人が本施設を訪れている。対話情報の記録から得られる来館者の居住地を月別に表したものが図-1 である。施設所在地の地理的・気候的な特性もあり、夏季に来館者が多く、冬季は少なめとなっている。

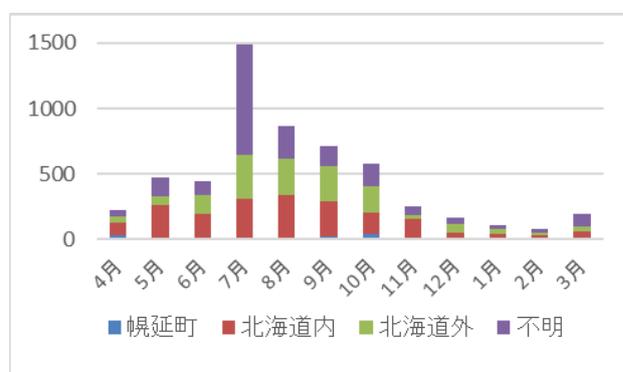


図-1 来館者数の年間推移（平成 27 年度）

#### (2) 来館者の属性と、施設での滞在時間

滞在時間は来館者の本施設への関心や満足度の程度を知る一つの指標になると考えられる。滞在時間を居住地別に整理すると、道外に来館者の滞在時間が長い傾向となった（図-2）。この理由として、観光の合間の立ち寄り時間に余裕がある、施設見学会への申込者であり、当初から地層処分に一定の関心がある、などが考えられる。

#### (3) 標本としての適切性

来館者の年齢、性別、居住地等の属性分析より、本施設への来館者は施設見学会への参加者の他に、近隣にある観光施設（トナカイ観光牧場）の帰り道や、幌延深地層研究センター前を偶然通行した観光客が立ち寄った事例が多く含まれていることが分かった。分析対象である来館者記録は、無作為に抽出された一般の方々の興味、関心、疑問と捉えることができると考えられる。

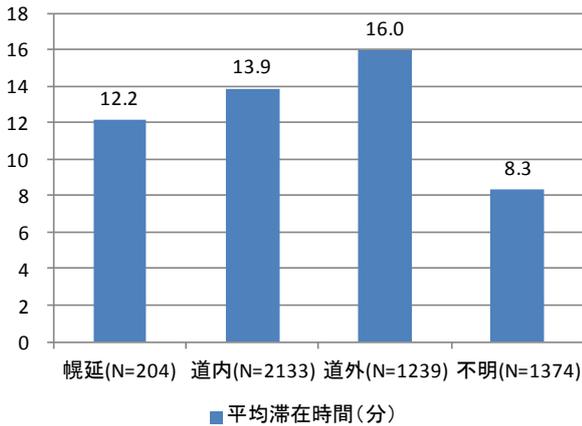


図-2 居住地別における滞在時間

(4) 来館者の興味・関心事項

来館者記録から得られる質問対応の内容から、来館者が疑問、興味、関心を持つ事項を分類・整理し、分類項目別の割合として示したものが図-3である。本施設で説明している地層処分関連技術に関連する項目が半数以上を占めることから、実際の関連装置等を目の前にした説明は来館者の興味・関心を引き出すことに有効であると言える。

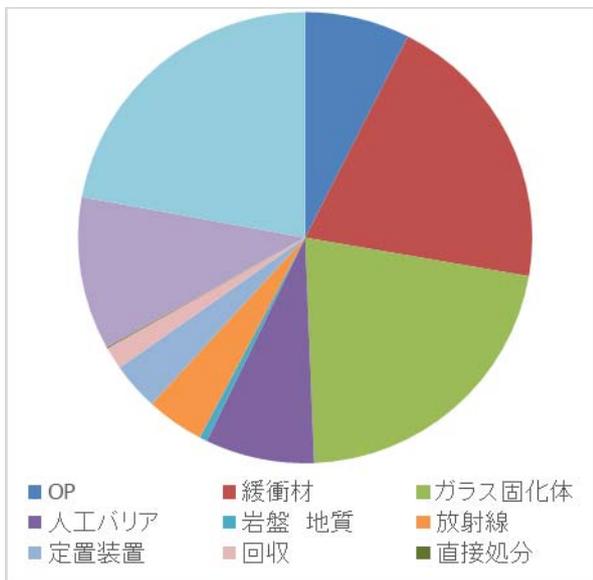


図-3 来館者からの質問内容の割合

来館者記録上の質問と回答の対話文章から主要なキーワードを抽出し、「容器」「緩衝材」などの“事物”と、「作る」「隙間」「決める」などの“行為”や“状態”を表すものに区分けし、それぞれの出現率を評価することで関心事項の内容を分析した。例えば、「緩衝材」に分類される質

問では「隙間・ヒビ・割れ」といったキーワードの出現率が高い傾向がある。これは実物の緩衝材ブロックの前での説明により、一定の理解が深められた結果として、関連する更に深い情報を欲する傾向が窺えることから、本施設における説明が、来館者の地層処分の技術や人工バリアへの興味・関心の誘発、ならびに理解に効果があることを示唆している。

また、来館者記録から抽出したキーワードを変数として、変数クラスター分析、共起ネットワーク分析といった手法を用いることで、そのグループが持つ興味・関心の傾向を探ることができる。このような分析手法により、ある質問をしたグループが他にどのような質問をするのかの傾向を把握することができる。今後、これらの手法による関心事項の分析を進めることで、来館者の興味・関心事項に即した効果的な説明方法や、今後来館者から示される可能性がある質問への適切な対応の準備に繋げることが期待できる。

(5) まとめ

平成 22 年度の地層処分実規模試験施設の開館時から実施している来館者との双方向対話の記録を分析し、本施設を訪れる来館者の属性や、興味・関心事項の傾向を捉えることができた。さらに分析を進め、本施設の在り方だけでなく、高レベル放射性廃棄物の地層処分事業の理解促進に資するため、研究・技術開発側からどのような情報が発信されるべきか、そのような成果の見せ方についても検討を深めていきたい。

- 1) International Socio-Technical Challenges for implementing geological disposal (InSOTEC), PROJECT FINAL REPORT, 2014.
- 2) 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 20 年度核燃料サイクル関係推進調査等委託費（地層処分実規模施設整備事業）報告書、2009.

### 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<sup>1)</sup>。

なお、本事業は、経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである。

##### ◇平成 28 年度の成果

(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、スペイン等を中心に、各国の処分実施主体等からの直接的な情報収集も活用しつつ、法制度の整備状況、サイト選定のプロセス、選定基準、許認可申請・発給の状況、処分技術情報、情報提供・広報、社会的意思決定方策、地域振興方策、資金確保関係、関係する訴訟等の情報を収集した。また、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。

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」(http://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

二ヶ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100件掲載した（記事タイトルの一覧は、資料VI-5を参照）。

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。2017年版では、主要8カ国（スウェーデン、フィンランド、フランス、ドイツ、スイス、英国、米国、カナダ）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、平成28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（平成29年3月発行）の改訂では、これまでの欧米6カ国（スウェーデン、フィンランド、フランス、ドイツ、スイス、米国）に英国とカナダを追加し、計8カ国における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-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  
<http://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（2017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（2017年版）』（図-3：右）の2種類の資料を作成した。

技術情報冊子①（平成29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



図-3 平成28年度に整備した技術情報冊子

- 1) 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27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（平成28年度分）、2017

## 2. 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査

### ◇事業の概要

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長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU廃棄物）を初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。

これらの背景を踏まえて、本調査では、平成 26 年度より 4 ヶ年で高レベル放射性廃棄物の地層処分を中心とした先進的な研究開発を大学等への委託により実施するとともに、今後の我が国の基盤研究開発の課題を検討することで、処分実施主体が将来処分事業を進めるにあたって必要となる技術基盤の整備を図ることを目的としている。

なお、本事業は、経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施したものである<sup>1)</sup>。

### ◇平成 28 年度の成果

#### (1) 研究開発に関する進捗管理・取りまとめ

平成 26 年度に公募により選定した 6 件の研究テーマの進捗管理等のための検討委員会を設置し、平成 28 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行った。検討委員会によるチェックアンドレビューは、年度内に中間（9 月）及び最終（3 月）の 2 回実施した。また、研究実施者との間で電子メールや面談による意見交換等を行うことにより、進捗管理を行った。

研究テーマの概要と本年度の成果概要を以下に示す。

#### ① 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：京都大学 柏谷公希）

本研究は、断層周辺の地下水流動及び物質移行における断層のパスあるいはバリアとしての機能を明らかにすること、さらに、パス、バリアとしての機能を評価するための手法を構築することを目的としている。

平成 28 年度は、国立研究開発法人日本原子力

研究開発機構（JAEA）の瑞浪超深地層研究所において、地下水を採取し、溶存成分や同位体組成を分析した。採取試料の分析結果と、これまで JAEA により蓄積された地下水の地球化学特性のモニタリングデータをあわせ、主立坑断層周辺に分布する地下水の物理化学パラメータや地球化学特性の空間分布及び時間変化について検討した。その結果、断層の北東側と南西側で水質や同位体組成の違いが認められ、これら地球化学的特性の違いから、主立坑断層に遮水性の水理構造が存在する可能性が示唆された。

また、断層の水理特性を踏まえて広域の水理地質モデルを作成し、地下水流動解析を行った。その結果、断層の南西側に比べて北東側で水頭が高くなり、実測された水頭の分布を定量的に再現できた。また、塩化物イオンとトリチウムを対象に実施した物質移行解析では、断層の北東側では立坑掘削の影響領域が限定されるのに対し、南西側では塩化物イオンの浸透が、また、トリチウムも深部まで濃度の高い領域が分布することが示され、これらも地下水試料の分析結果と整合する結果となった。しかしながら、水頭、塩化物イオン濃度、トリチウム濃度の解析結果は定量的には実測値と一致しないことから、水理地質モデルの改良が必要と考えられる。

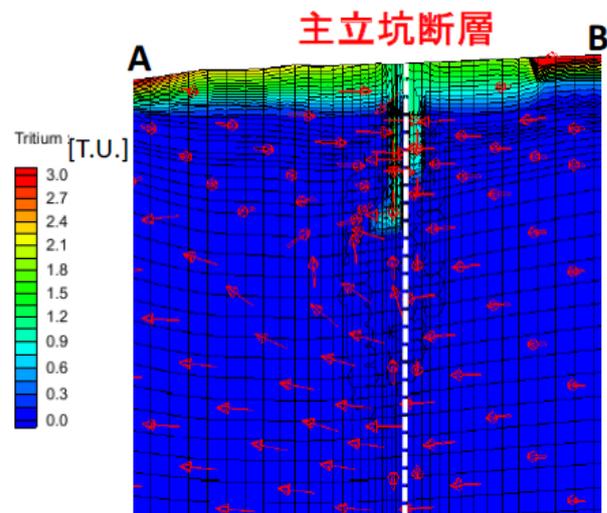


図-1 物質移行解析で得られたトリチウム濃度の空間分布

#### ② 岩石き裂の治癒作用を利用した不連続面のバリア性能向上に関する研究（研究者：京都大学 奈良禎太）

岩盤内では亀裂や空隙のネットワークが流体の流路となるが、それらを閉塞させるプロセスがあれば、遮水性が高くなる。本研究では破壊力学試験と透水試験により、岩石内の節理や断層のバリア性能の特性を調査する。

平成 28 年度は、JAEA 瑞浪超深地層研究所から採取したインタクトな土岐花崗岩と坑道壁面から採取した粘土を供試体として室内透水試験を行った。その結果、粘土の透水係数はインタクトな花崗岩より 1 オーダー高く、巨視亀裂を含む花崗岩よりは 3~4 オーダー低くなった。次に、フローポンプ法を用いて、巨視亀裂を含む花崗岩に粘土懸濁液を流し続けながら透水試験を行った。その結果、時間の経過とともに透水係数が低下した。これらの結果から、亀裂内部に粘土が沈殿することにより亀裂が閉塞し、透水係数の低下につながったものと考えられる。今後は亀裂に供給される粘土の量について検討することが課題となる。

③天然バリアと人工バリアの力学特性を考慮した放射性廃棄物処分施設の長期的な力学挙動予測システムの開発（研究者：福島高専 金澤伸一）

本研究は、処分施設の建設から閉鎖までの期間に着目し、岩盤とベントナイト緩衝材の力学特性を考慮できるモデルを組み込んだ、熱/土/水/空気連成有限要素解析を実施し、建設から供用までの熱や再冠水等の影響を考慮した力学挙動を連続して解くことで、その後の岩盤とベントナイト緩衝材の長期的（数十万年オーダー）な力学的相互作用を把握することを目的とする。さらに、解析条件の選定や解析結果の評価方法までの一連の作業手順を整備し、処分施設の長期的な力学挙動の予測システムの開発を目標とする。

平成 28 年度は、さまざまな温度、飽和度におけるベントナイトの一軸強度を計測した。30℃~80℃の温度、30~70%の飽和度の範囲でベントナイトの一軸強度を計測したところ、温度が上昇するにつれて最大圧縮強度が減少した。また、飽和度が上昇するにつれ、強度分布が 40%~50%で最大となる傾向となった。これらの結果は、ベントナイトは一般的な土の締固め曲線のような力学挙動をとることを示している。また、実際の処分施設において、高温にさらされるベントナイト

の強度は低下する可能性が示唆された。

また、土-水-空気連成有限解析コードに空気溶存を考慮できるようにした解析プログラムを用いて、埋め戻された処分坑道の地下水の再冠水過程に伴って、その内部領域である緩衝材の不飽和~飽和の状態変化及び膨潤挙動の解析を行った。処分坑道天井部分まで再冠水するまでの期間を再冠水完了期間とし、この期間を 100 年と 10 年に変えたシミュレーションを行って、内部の緩衝材領域の飽和度を解析した。解析の結果、再冠水完了期間を 100 年とした場合は、約 60 年で廃棄体周囲の緩衝材が飽和したが、再冠水完了期間を 10 年に設定した場合は、廃棄体上部の緩衝材に不飽和部分が残る完全飽和しない結果となった。これらの結果から、処分坑道の再冠水が緩やかに進行する場合には、内部の緩衝材領域はその外部の処分坑道が飽和するより早く飽和に至るが、処分坑道の再冠水が速やかに進行する場合には、緩衝材が飽和するまでに長い時間が必要となることが考えられる。

今後は、解析モデルへの熱力学の組み込み、及び温度を考慮した緩衝材の力学挙動試験の結果と解析結果の整合性を検討することが課題となる。

④硝酸塩影響評価のための高イオン強度下におけるアクチノイドの溶液化学的研究（研究者：京都大学 小林大志）

本研究では、TRU 廃棄物に含まれる硝酸塩が処分施設内や近傍においてアクチノイドの移行挙動に与える影響を定量的に評価するため、高濃度硝酸ナトリウム溶液中でのアクチノイドの錯生成、酸化還元、コロイド挙動について検討するとともに、反応に関わる熱力学データを取得する。また、高イオン強度下でのアクチノイドの熱力学モデルを提案し、硝酸塩影響下でのアクチノイドの化学的挙動の理解及びその定量的評価につなげることを目的とする。

平成 28 年度は、錯生成については、硝酸イオンと炭酸イオン共存下で 4 価プルトニウム (Pu(IV)) の溶解度を測定した。また、得られた溶解度データから、炭酸イオン共存下における Pu(IV) 溶解度の熱力学データ解析を行った。解析の結果、特異イオン相互作用 (SIT) モデルによる Pu(IV) 炭酸錯体のイオン相互作用係数は正の値となり、ウランやネプツニウム炭酸錯体といっ

### III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

た既存研究で報告されている負の値と異なる傾向を示した。

高イオン強度溶液下でのコロイド挙動に関しては、イオン強度による傾向をより詳細に調べるために、平成 27 年度に検討したジルコニウム (Zr) 水酸化物のゼータ電位を、より低イオン強度条件において測定した。測定の結果、酸性領域とアルカリ性領域において、イオン強度が低くなるにつれて Zr 水酸化物のゼータ電位絶対値が大きくなる傾向を示した。次に、電気二重層を仮定し、コロイド種を構成する加水分解種の形式電荷からゼータ電位の値の再現を試みた。その結果、すべり面までの距離 ( $x_c$ ) は、イオン強度が高くなるほど小さくなり、高イオン強度ほど電解質によってすべり面が圧縮される効果が表れていると考えられる。一方で、高イオン強度においてコロイド表面からすべり面までの距離 ( $x_c$ ) がコロイドの電気二重層の厚さより厚くなったため、計算された  $x_c$  の値が過大評価の傾向となった。また、コロイド内部に取り込まれる溶液中のイオンの効果 ( $\Delta z$ ) はイオン強度が高くなるほど小さくなる傾向を示した。今後はこれらパラメータ値の解釈が課題である。

⑤地層処分の性能評価の精緻化を目指した薄片状雲母を用いた核種の収着メカニズムに関する基礎的研究 (研究者：東北大学 千田太詩) 本研究は、雲母が有する異方性が核種収着挙動に与える影響について基礎的知見を取得し、取得データをもとにした拡散・収着を考慮した二次元数値解析を実施するとともに、雲母薄片への核種収着に重要となる因子を整理し、天然バリア中の核種移行評価 (地層処分システムの性能評価) への反映手法を提示する。

平成 28 年度は、黒雲母への収着挙動に関して、トレーサーの価数の違いの影響を調べるために、これまで実施してきた三価ユウロピウム (Eu) に加えて、黒雲母への一価のセシウム (Cs) と二価のストロンチウム (Sr) の収着試験を行った。黒雲母薄片に対する Cs の収着は Eu よりも大きく、薄片内部にも相当量の浸入が確認された。一方で、Cs の場合は試験開始直後に収着がほぼ終了するのに対し、Eu は緩やかに薄片への収着及び拡散浸入が続くことが確認された。収着挙動の相違の原因として、水和イオン半径が小さく黒雲母層間負

電荷との相互作用が大きい Cs の場合は、層間が狭まることにより内部への拡散が阻害されることが考えられる。一方で、水和イオン半径が大きく黒雲母層間負電荷との相互作用が小さい Eu の場合は、黒雲母の層間が広いままであるため、層間内部への Eu 拡散が緩やかに継続するメカニズムが考えられる。なお、Sr の黒雲母への収着は僅かであった。

また、収着実験結果に基づき、二次元拡散モデルに基づいた黒雲母薄片内部へのトレーサーの拡散係数評価を行った。その結果、得られた Eu の拡散係数は、第 2 次とりまとめのレファレンスケースとして設定されている母岩中の実効拡散係数と同程度となったが、Cs は一桁大きく、Sr については一桁小さいオーダーであった。今後、モデルのパラメータ設定や、収着実験の試験条件の見直しが課題と考えられる。

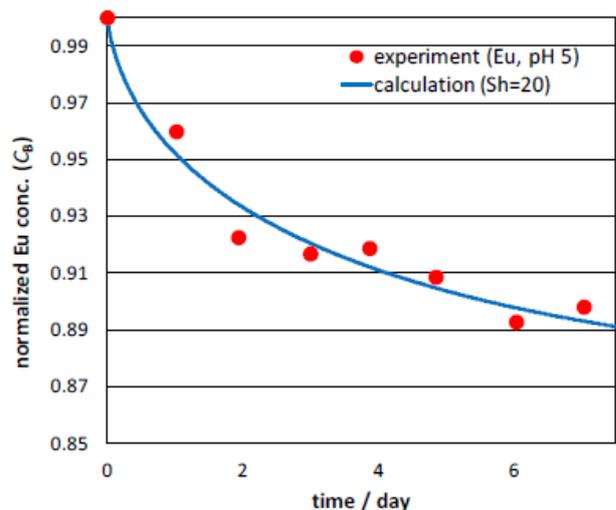


図-2 収着実験結果 (Eu, pH5) の数学モデル解析

⑥高レベル放射性廃棄物処分に関わるアジェンダ・セッティング (政策課題設定) の基礎的研究 (研究者：東京大学 小松崎俊作)

本研究は、処分事業に対する国民・社会の理解促進と信頼性向上をはかる上での前提条件となるアジェンダ・セッティング (政策課題設定) の研究を通じて、処分事業の社会的側面の理解を深めることを最終目標とする。そのために、

- (i) 高レベル放射性廃棄物 (HLW) 処分のためのアジェンダが設定されるための要因を抽出し、
- (ii) 我が国における高レベル放射性廃棄物処分のために有効なアジェンダ・セッティングのあり方を提示することを目的とする。

平成 28 年度は、これまで行ってきた社会調査データを活用し、定量データの分析を通じた、具体的施策ないしその影響プロセスについて検討する。また、「科学的有望地」〔注：現在は「科学的特性マップ」に名称が変更されている〕の公表を見据えて、公表の前後での態度変容を観察・分析するための社会調査と、パネルデータを用いた中長期的な態度の変遷を分析するための社会調査を実施した。

「周囲の意見」が HLW 処分に関わる態度形成に与える影響について、2016 年にオンラインのアンケート調査で実施した結果を分析した。調査では、2015 年の調査にも参加した回答者を、2015 年の質問「高レベル放射性廃棄物」に関する知識の違いで「高知識群」「低知識群」に分類した。さらに処分地選定の文献調査に対する態度を支持派・反対派に分類したうえで、それぞれのグループに自身が多数派・少数派であることをランダムに示し、その操作後に、高レベル放射性廃棄物の地層処分に対するネガティブな意見及びポジティブな意見の合計 18 の意見に対する、同意の程度を測定した。その結果、「周囲の意見」が精緻化見込みモデル<sup>1)</sup>における周辺的情報として機能していること、また、特に文献調査支持派のうち、中心ルートを用いると考えられる高い知識を持つ集団では、支持派が多数と想定される環境において、むしろ手続き等に対する不満が浮上しやすい傾向があることが明らかとなった。

また、「科学的有望地」の公表が人々のどのような認知につながるのか、結果としてアジェンダ・セッティングにつながるか、HLW 処分事業の進展にポジティブな影響を及ぼしうるかといった点を検討すべく、社会調査に基づく社会心理学的分析を行った。具体的には、インターネットを用いたアンケート調査を、2017 年 1 月上～中旬に全国の 1700 人を対象として実施した。科学的有望地において「より適性の高い地域」に分類された地域から居住地までの距離に基づいてシナリオを設定し、各シナリオにおいて文献調査への応募と処分施設受け入れに関する態度を調査し

た結果、距離が最も近いシナリオ、すなわち「自宅が『より適性の高い地域』に入った」シナリオ（シナリオ 1-1）で、文献調査への応募に関して支持しない割合が最も高くなり、距離が離れるほど、「どちらでもない」の回答が増加した。一方で、シナリオ 1-1 では、応募への支持の割合も最も高くなる二極化傾向となった。また、処分施設受け入れに関しても、シナリオ 1-1 で、支持しない割合が最も高くなり、距離が離れるほど「どちらでもない」の回答が増加した。文献調査への応募とは異なり、処分施設受け入れに関しては、支持する割合も距離が近くなるにつれて微減した。また、科学的有望地の範囲の認知に係る回答から、国民の多くが自身の居住地が適性のある地域に入るとは考えていないことが推定された。今後、「科学的有望地」公表後の調査を実施し、公表前後の比較を行うことが課題である。

上記の研究の実施に加えて、本事業では、研究管理の進捗・取りまとめに関連して、地層処分基盤研究開発調整会議が策定した「地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 25 年度～平成 29 年度）」（以下、全体計画という）に関して、全体計画に示されている研究開発状況の中間評価を行うこととなっていた。しかし、平成 28 年度に行われた原子力委員会放射性廃棄物専門部会による、最終処分関係行政機関等の活動状況に関する評価により、今後は地層処分基盤研究開発調整会議を拡充し、実施主体・基盤研究機関一体で「真の全体計画」を策定・実施していくこととなった。そのため、今後編成される調整会議の議論への反映のため、我が国の研究開発機関が海外の地下研究所等に参加するにあたり参考となる、諸外国において実施中の地下研究所を活用した、以下の国際共同研究について調査し取りまとめを実施した。

- ・ ユーラトムプロジェクト
- ・ DECOVALEX プロジェクト
- ・ モン・テリプロジェクト
- ・ グリムゼル試験サイト
- ・ SKB タスクフォース

<sup>1)</sup>精緻化見込みモデル：人間の態度形成に、対象となるイシューの内容を詳細に検討して態度を形成する中心ルートと、詳細に立ち入らず周辺的情報によって判断するルート（周辺ルート）があると考えるモデル

1) 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 26 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（国庫債務負担行為に係るもの）報告書（平成 28 年度分）、2017

III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

3. 安全規制及び安全基準に係る内外の動向調査

◇事業の概要

本調査では、我が国の放射性廃棄物処分に係る安全規制体系の整備に資するため、放射性廃棄物処分に係る安全規制の枠組み及び安全評価手法、廃棄物の管理と処分のあり方等について、諸外国における動向の調査を行った。本調査報告書では、最初に調査対象国における放射性廃棄物処分に関連した、処分の実施体制、安全規制制度の概要、放射性廃棄物処分の最新動向などの基本情報をとりまとめた。本調査においては、以下の国及び国際機関等を調査対象とした。

表-1 調査対象国及び調査国際機関等

調査対象国 (12 国)	調査国際機関等 (4 機関)
スウェーデン、フィンランド、米国、フランス、スイス、カナダ、英国、ドイツ、スペイン、ベルギー、中国、韓国	国際原子力機関 (IAEA)、経済協力開発機構 / 原子力機関 (OECD/NEA)、国際放射線防護委員会 (ICRP)、欧州連合 (EU)

なお、本事業は、原子力規制委員会原子力規制庁の委託により実施したものである。

◇平成 28 年度の成果

(1) 諸外国における安全規制等に関わる最新情報の調査・整理

調査対象国、及び調査対象国際機関等に関する放射性廃棄物の処分等についての最新知見等を調査し整理した。

具体的には、平成 27 年度及び平成 28 年度に公表された規制関連情報、対象国の実施主体等の取りまとめた報告書、許認可申請書などを中心に調査し、以下に示す事項について、規制での取扱いの状況、事業者の取組状況、状況に至る背景及び過程に関して進捗が見られるものについて整理を行った。

- ①立地選定段階における規制側の関与 (法的根拠の有無及び内容、法的根拠が無い場合の関与のよりどころ等)
- ②評価期間の考え方 (安全機能、各バリア要素との関係も含む)

- ③廃棄物埋設に係る放射線防護の最適化 (ALARA、BAT の考え方等)
- ④人間活動の影響 (人間侵入、人為事象シナリオ)
- ⑤長期に係る線量・リスク基準・代替指標と解釈・信頼性・根拠
- ⑥安全評価における不確実性の取扱い
- ⑦セーフティケースの内容とそれに対する規制側のレビュー
- ⑧社会・ステークホルダーとのコミュニケーション
- ⑨定期的な安全レビュー (PSR) の結果への反映方針
- ⑩可逆性と回収可能性
- ⑪許認可終了後の制度的管理 (管理の方法、主体、管理終了の判断等)
- ⑫能動的な制度的管理 (モニタリング・サーベイランスのあり方等)
- ⑬受動的な制度的管理 (文書・マーカ等の記録の管理等)
- ⑭その他、特記すべき動向

表-2 (1) の調査結果の整理例

立地選定段階における規制側の関与 (法的根拠の有無及び内容等)

米国	許認可申請書を提出する前に、ユッカマウンテン・サイトでサイト特性調査計画を実施すること、サイト特性調査計画のレビュー手続きが規定されている。また、NRC や EPA による環境放射線防護基準や技術要件等の策定が規定されている。低レベル放射性廃棄物処分の法令では、許認可申請を前提として、申請者が行うプロセス、取得すべきデータが示されている他、サイト適性評価のための要件、サイト選定プロセスの具体的な実施方法などのサイト選定の方向性を示している。
フランス	ASN は Dossier2005 のレビューや、ANDRA によるサイトの提案内容に関して、意見書を政府に提出している。
スウェーデン	原子力活動法に基づき、SKB 社が 3 年ごとに提出する RD&D プログラムの審査や安全評価書の審査を実施しており、そのなかで、立地段階において調査対象とする場所の SKB 社の選定結果に対するレビューも組み込まれている。
フィンランド	TVO 社やボンヴァ社によるサイト選定の各段階での調査の取りまとめ報告書や安全評価報告書のレビュー、サイト選定の最終段階での原則決定申請書に対する予備的安全評価の実施を行っている。また、環境影響評価手続きの一環として、公衆等とのコミュニケーション活動を実施した。
スイス	原子力法では、立地選定段階において必要に応じて実施される地球科学的調査のために許可の取得が必要とされている。また、特別計画では、サイト選定の第 1 段階から第 3 段階の各段階で規制機関等が審査、評価、意見聴取等を行うことが定められている。
英国	2009 年 EA ガイダンスでは、サイト選定プロセスに対する規制は対象外としているが、事業者の初期活動を規制面から審査することを通じて、サイト選定プロセスを支援する意向を表明している。
カナダ	原子力安全管理法及び同法に基づく規則における許認可プロセスでは、処分場の建設許可 (第 2 段階) の前に、サイト準備許可と呼ばれる許可段階が設定されている。このサイト準備許可では、ある特定の場所に立地しようとするための準備を行うための許可申請である。このため、立地選定段階の末期においては、法律に基づく許認可プロセスとしての規制の関与が存在する。
ドイツ	発熱性放射性廃棄物処分に関して、サイト選定法では、規制機関である連邦放射性廃棄物処分安全庁が、計画推進者 (連邦放射性廃棄物管理機関 (BGE)) が提案した地表及び地下からの探査計画及び評価基準の確定、地上及び地下での探査サイトについてレビューを行い、連邦政府に対してサイトの提案を行うなどして関与する。また、サイト選定段階を通じての情報提供の役割も有している。

(2) 廃棄物処分の規制に係る放射線防護の最適化に関する考え方及び取組みの整理

諸外国における放射線防護の最適化及び取組みについて調査した。具体的には、(1)の「③廃棄物埋設に係る放射線防護の最適化」で調査した国から数カ国を抽出し、最適化の考え方が規制関連文書（法律、政令、指針等）に導入された経緯やそれまでの議論、及び事業者の取組みについて、最適化の対象、指標、手法、判断基準の適切な設定等が規則、申請及びその評価において、どのように扱われているかに着目しつつ、調査及び整理を行った。なお、調査対象国は原子力規制庁殿との協議して決定し、スウェーデン、フィンランド、米国、フランス、英国とした。

整理した調査結果の例を表-3 に示す。

(3) 海外現地調査

(1)及び(2)の調査について、次の国、機関を対象に海外現地調査を行った。現地調査では、安全規制に関する最新情報を入手したほか、防護の最適化について、規制機関及び処分実施主体の双方から聞き取り調査を行った。

①フィンランド

- 放射線・原子力安全センター (STUK)
- テオリスーデン・ヴォイマ社 (TVO 社)

②フランス

- 原子力安全機関 (ASN)
- 放射性廃棄物管理機関 (ANDRA)

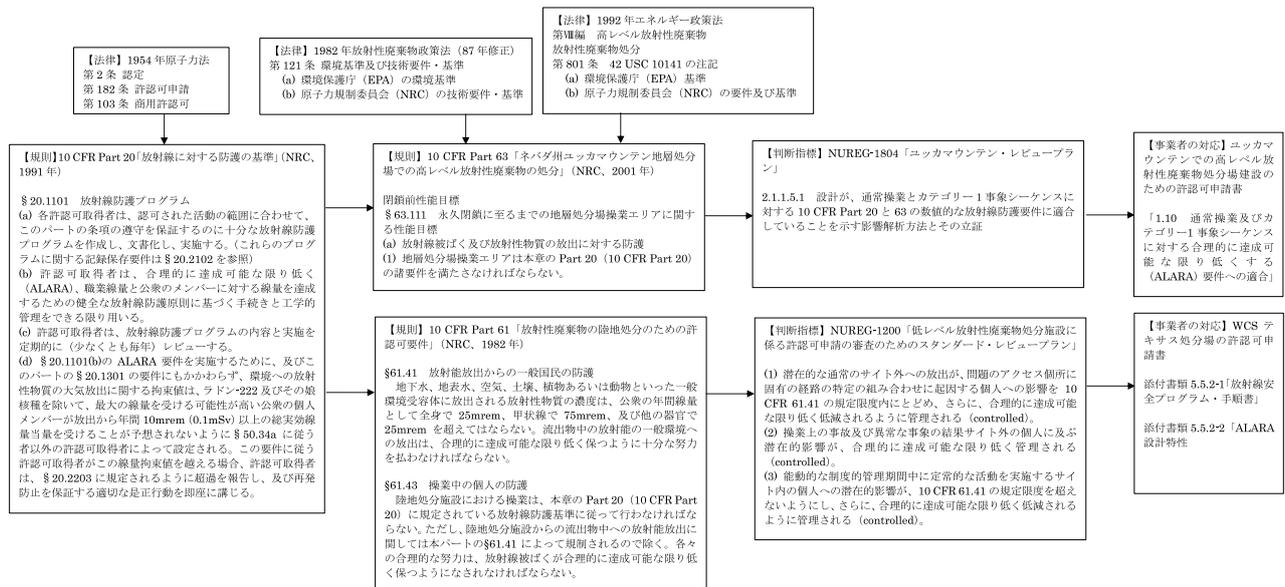
表-4 海外現地調査にて入手した資料例

**About the disposal facility design**

- Design of the disposal facility for the operational time
  - A classification into radiation protection areas and zones
  - Layout design and design of systems and components shall comply with the YVL C.1, Structural radiation safety
  - Radiation monitoring system
  - Limitation and monitoring of releases shall comply with the YVL C.3, Limitation and monitoring of radioactive releases from nuclear facility
- ALARA principle
- SSCs shall be safety classified according to safety relevance
  - Also classified based on their durability under environmental conditions
  - Both operational and post closure safety shall be considered
    - Transfers of waste packages, radiation measurements, fire protection
    - EBS components, host rock surrounding the disposal rooms
- SSC design
  - Safety classification, environmental conditions, foreseen service life

SÄTTELIVÄRMEKÄSKUS • STRÅLSÄKERHETSCENTRALEN  
RADIATION AND NUCLEAR SAFETY AUTHORITY

表-3 (2)の調査結果の整理例（米国における防護の最適化に関する法的規制要求とその対応状況）



#### 4. 福島第一原子力発電所事故で発生する廃棄物等の処理処分に関する検討

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災によって発生した津波によって、東京電力福島第一原子力発電所（以下福島第一発電所という）では、原子炉内の燃料の溶融、水素爆発に伴う損傷等、甚大な被害が発生した。その結果、初期に原子炉の冷却のため投入された海水等による多量の塩分を含む汚染水や、その汚染水を処理する目的で使用された吸着材等、多岐にわたる廃棄物が現在も発生し続けている。これら廃棄物は、事故によりコントロールできない状態で発生したものであり、破損した燃料を起源とした汚染物（放射化物、運転廃棄物由来等）で、放射性核種を含んでいることや、事故直後の炉心冷却に用いた海水の成分を含む可能性があること、汚染のレベルが多岐にわたりその物量も大きいこと等、従来の原子力発電所で発生する放射性廃棄物とは異なる特徴がある。

固体廃棄物の調査は、瓦礫・伐採木・汚染水処理二次廃棄物等の放射性核種の種類、量に関する分析結果等の解明、さらに、廃棄物の処理・処分の方策も処分概念の候補等検討が進んでいる。しかし、廃棄物の処理・処分の方策を特定の技術に基づいて検討することは困難であり、能性のある技術について幅広く調査し、その特徴、適用範囲などを基に、次第に明らかになる事故廃棄物の性状にあわせて順次絞り込みを実施し、最終的に実用化の可能性のある技術を選定することが有効と考えられた。この考え方にに基づき、当センターでは、平成 23 年度から国内外の処理技術について、以下の各観点から幅広く調査してきた。

- ①原子力発電所での廃棄物処理において実績のある技術およびそれらから派生した技術
- ②国内外の研究機関で、放射性廃棄物の処理・処分への適用が検討された実績のある技術
- ③塩分を含む廃棄物の固化について国内外で発表された技術

その結果は、「取りまとめ表」として、個々の廃棄物（ゼオライト、スラッジ、燃料デブリ等）ごとに、溶融固化、マトリックス固化、容器収納等の処理技術の特徴、及び個別の処理技術の詳細を「個別技術調査表」にまとめた。

これらの成果は、東京電力ならびに日本原子力研究開発機構等と情報共有され、処理技術のデータベース化にも利用されている。

平成 28 年度は、福島第一原子力発電所で発生する固体廃棄物に関する技術情報の収集等を中心に活動した。

##### (1)原子力規制委員会の検討会等の傍聴

特定原子力施設監視・評価検討会の第 45 回から第 51 回を傍聴し、建屋内の滞留水の処理等に向けた取り組み状況に関する情報を収集した。

また、第 5 回特定施設原子力施設放射性廃棄物規制検討会を傍聴し、水処理 2 次廃棄物に関する最新の情報を収集した。

##### (2)経済産業省 資源エネルギー庁の各検討会を通じた情報収集

廃炉・染水対策関係閣僚会議のもとに設置された、廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議（会議自体は非公開）では、開催ごとに最新の廃棄物量、分析結果等が示されており、会議後に Web Site にて公表される資料をもとに、福島第一原子力発電所構内の固体廃棄物に関する最新の情報を収集した。

また、多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会を傍聴し、処理水の取り扱いの動向に関する情報を入手した。

##### (3)文部科学省の英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の成果報告会での情報収集

廃炉加速化研究プログラム及び廃止措置研究・人材育成等強化プログラム H28 年度成果報告会に出席し、情報を収集した。このプログラムは、平成 27 年度に「東京電力株式会社福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン（平成 26 年 6 月文部科学省）」等を踏まえて設置されたものであり、福島第一原子力発電所の廃炉等を始めとした原子力分野の課題解決に貢献するため、国内外の英知を結集し、様々な分野の知見や経験を、従前の機関や分野の壁を越えて緊密に融合・連携させることにより、基礎的・基盤的研究や人材育成を推進するものとされている。

## 5．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)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（平成 28 年度版）」を作成した。

IV. 国際交流

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。

併せて、欧州原子力共同体（EURATOM）、欧州委員会（EC）、経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）等の国際機関の事業に積極的に協力している。

(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、或いは、覚書を締結している海外機関は次表のとおりである。

下表のうち、2016年度には、NAGRA、SKB、DBE、ANDRA との情報交換等を実施した。

表-1 当センターが協力協定（覚書）を締結している海外機関一覧

国	機関名
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)
フランス	放射性廃棄物管理機関 (ANDRA)
ドイツ	ドイツ廃棄物処分施設建設・運営会社 (DBE)/DBE Technology 社
スイス	放射性廃棄物管理共同組合 (NAGRA)
ベルギー	ベルギー原子力研究センター (SCK・CEN)
スペイン	放射性廃棄物管理公社 (ENRESA)
英国	原子力廃止措置機関 (NDA)
ロシア	ロシア科学アカデミー (RAS)
韓国	韓国原子力研究所 (KAERI)
	韓国水力原子力株式会社中央研究所 (KHNP CRI)
	韓国原子力環境公団 (KORAD)
中国	中国核工業集团公司地質・鉱山局 (CNNC DGM)
台湾	(財) 核能科技協進會 (NuSTA)



NAGRA との情報交換



ANDRA との情報交換

(2) 炭素 14 のソースタームに関する国際共同研究

EC の 2013 年までの研究開発の枠組みである FP7 のもと、欧州原子力共同体 (EURATOM) の IGD-TP (Implementing Geological Disposal Technology Platform) のプロジェクトとして実施されている「炭素 14 のソースタームに関する共同研究 CAST (Carbon-14 Source Term)」に参画した。

CAST プロジェクトは、炭素 14 のソースタームである、ジルカロイ、炭素鋼、黒鉛および使用済み樹脂の各廃棄物を対象として、それらの炭素 14 含有量 (インベントリ) 及び炭素 14 の放出挙動を明らかにすることを目的としたプロジェクトである。

当センターは、ハル・エンドピースに含まれる炭素 14 のインベントリ設定の考え方、ジルカロイ及びステンレス鋼の腐食試験および炭素 14 の浸出率に関するデータなど、これまでに実施した試験及び解析等の結果を提供するとともに

に、欧州での研究状況の情報収集等を行った。また、10月にオランダで開催された第1回ワークショップに参加し、我が国のC-14を含有する廃棄物の概要について報告した。CASTプロジェクトのこれまでの成果はCASTのWeb Site <http://www.projectcast.eu/>において各ワークパッケージ(WP)の年度報告書として公開されている。

### (3) モニタリングに関する国際共同研究

ECのHORIZON2020の枠組みにおいてEURATOMが実施するIGD-TPのプロジェクトであるModern2020(Development and Demonstration of monitoring strategies and technologies for geological disposal)プロジェクトに参画している。本プロジェクトでは、2020年代に処分場の建設・操業の開始が見込まれる欧州各国での、操業期間中の処分場でのモニタリング計画の検討に焦点が当てられ、2015年より検討を実施している。

2016年度には、当センターは、地中無線モニタリング技術に関する情報提供を行うとともに、欧州でのモニタリングに関する検討状況について情報収集等を行った。本共同研究の成果は、順次プロジェクトのウェブサイト(<http://www.modern2020.eu/>)にて公開される。

### (4) セメント系材料の長期性能評価に関する国際共同研究

ECのHORIZON2020の枠組みにおいてEURATOMが実施するIGD-TPのCebama(Cement-based materials, properties, evolution, barrier functions)プロジェクトに参画した。

Cebamaプロジェクトは、セメント系材料の変質及びセメント系材料から他の材料が受ける影響(WP1)、セメント系材料の核種移行抑制効果(WP2)、それらを受けた処分場の化学的変遷の解析(WP3)を対象として研究開発を行うとともに、得られた成果の普及やこの分野の人材を育成することを目的として、2015年6月にスタートしたプロジェクトである。

当センターは、セメント系材料と他の材料との界面での力学、物質移行挙動の変遷に関する試験(WP1)及びその解析(WP3)についての成果を提供するとともに、欧州での研究状況の情報収集等

を行っている。

2016年度は、5月にバルセロナで第1回の公開ワークショップをCebama, 1st Annual Workshop(<http://www.cebama.eu/Register/FirstWorkshop>)として開催した。当センターからはベントナイト系材料の変遷に伴う力学挙動解析の結果に及ぼす2次鉱物の種類の影響及びセメント系材料とベントナイトとの界面での変質層の拡がりに関するXAFS分析の結果について報告した。

### (5) 記録保存に関する国際共同研究

OECD/NEAの放射性廃棄物管理委員会(RWMC)では、地層処分に関する記録等の保存に関する取組として、2011年より、世代を超えた記録、知識及び記憶の保存(Preservation of Records, Knowledge & Memory (RK&M) across Generations)イニシアチブ(以下、RK&Mイニシアチブ)における検討を実施している。RK&Mイニシアチブでは、OECD/NEA参加国における地層処分に関する記録等の保存に関して、様々な時間軸に対応するために、複数のメカニズムや技術を統合し、相互に補完することが必要であるとの考えから、各国の地層処分実施機関、研究機関、公文書保存機関等が協力して課題に取り組んでおり、当センターは2015年より参加している。

2016年度には、当センターは、地層処分の記録保存について国際的な検討内容について情報収集を行うとともに、重要項目を抽出した記録セット(SER: Set of Essential Records)の項目等について他の参加機関と共に検討を行った。

本共同研究の成果は、順次ウェブサイト(<https://www.oecd-nea.org/rwm/rkm/>)にて公開される。

V. 資料

V. 資料

1. 講演会・セミナー等

	講演会等概要	開催日	会場
講演会	第1回講演会「幌延深地層研究のあゆみ」 講演1：「幌延深地層研究のあゆみ1」 棚井 憲治 氏（国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 幌延深地層研究センター 研究計画調整グループリーダー） 講演2：「幌延深地層研究のあゆみ2 –原環センターの取り 組み–」 小林 正人（処分工学調査研究プロジェクト）	平成28年7月20日	原環センター
	第2回講演会「最終処分関係行政機関等の活動状況に関する評 価報告書について」 川合 現 氏（内閣府原子力政策担当室 政策統括官（科学 技術・イノベーション担当）付参事官（原子力担当））	平成28年11月18日	原環センター
	第3回講演会「地層処分にに関する欧州共同研究の枠組み」 大和田 仁（処分材料調査研究プロジェクト）	平成29年1月20日	原環センター
	第4回講演会「スウェーデンとカナダにおける地層処分事業の 社会的側面の取り組み」 佐原 聡（技術情報調査プロジェクト）	平成29年3月28日	日本交通協会
セミナー	第1回原環センターセミナー 「放射性廃棄物最終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）	平成28年5月27日	京都大学 東京オフィス
	第2回原環センターセミナー 「放射性廃棄物最終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）	平成28年10月27日	京都大学 東京オフィス
	第3回原環センターセミナー 「放射性廃棄物最終処分の安全評価の基礎Ⅲ」 大江 俊昭 氏（東海大学工学部原子力工学科 教授）	平成28年11月10日	東海大学高輪 キャンパス
創立40周年記念講演会	原環センター創立40周年記念講演会 1.「原環センターの40年と展望」 田中 俊彦（常務理事） 2.記念特別講演Ⅰ 「地層処分の社会的実現－無知の無知に向き合う－」 朽山 修 氏（公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問） 3.記念特別講演Ⅱ 「グローバルな視点で考える日米エネルギー政策」 ケント・E・カルダー 氏（ジョンズ・ホプキンス大学高等 国際問題研究大学院ライシャワー東アジア研究センター所 長、同大学院教授）	平成28年12月9日	日本橋三井 ホール

## 2. 論文投稿、学会発表等

## (1)論文投稿

No.	題 目	原環センター著者	発 表 先
1	放射性廃棄物の地下空洞型処分施設に用いる上部充てん剤の施工品質の評価	秋山吉弘	土木学会 土木学芸論文集 E2 (材料・コンクリート構) Vol.72, No.3 pp.234-248,2016
2	Iodine Immobilization : Development of Solidification Process for Spent Silver-Sorbent using Hot Isostatic Press Technique	桜木智史、吉田誠司	Progress in Nuclear Energy, Vol.92, pp267-272, 2016
3	Microscopic Structural Analysis of Lead Borate-Based Glass	桜木智史	Progress in Nuclear Energy, Vol.91, pp339-344, 2016
4	Iodine Release Behavior from Iodine-Immobilized Cement Solid under Geological Disposal Conditions	桜木智史、大和田仁	Progress in Nuclear Energy, Vol.92, pp273-278, 2016
5	Corrosion Kinetics of stainless steel under alkaline repository condition	桜木智史、吉田誠司	Proceedings of the Waste Management 2016 Conference, March 6-10, 2016, Phoenix, Arizona, USA
6	A New Manufacturing Method of Bentonite Pellets as a Gap Filling Material for HLW Repository	朝野英一	Proceedings of the Waste Management 2016 Conference, March 6-10, 2016, Phoenix, Arizona, USA
7	Applicability of Wireless Power Transfer for Monitoring Technology of Radioactive Waste Geological Disposal	小林正人、江藤次郎	Proceedings of the Waste Management 2016 Conference, March 6-10, 2016, Phoenix, Arizona, USA
8	Effect of Hydration Heat on Iodine Distribution in Gypsum - Additive Calcium Aluminate Cement	桜木智史	Advances in Materials Science for Environmental and Energy Technologies V: Ceramic Transactions, Volume 260 (September 2016)
9	放射性廃棄物の地下空洞型処分施設に用いる側部低透水層の転圧工法による施工品質の評価	秋山吉弘	土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.72, No.2, 164-178, 2016
10	Carbon 14 Distribution in Irradiated BWR Fuel Cladding and Released Carbon 14 after Aqueous Immersion of 6.5 years	桜木智史	Procedia Chemistry 21(2016) 341-348

V. 資料

(2)学会発表等

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
1	SCC prevention by residual stress improvement for carbon steel overpack	川久保政洋、 小林正人、朝野英一	The 6th International Workshop on Long-Term Prediction of Corrosion Damage in Nuclear Waste Systems(LTC2016) 2016/5/9～12
2	Corrosion and hydrogen absorption behavior of titanium under anaerobic condition	小林正人、川久保政洋、 朝野英一	The 6th International Workshop on Long-Term Prediction of Corrosion Damage in Nuclear Waste Systems(LTC2016) 2016/5/9～12
3	OBSERVATION OF GROWTH OF THE ALTERED ZONE REGARDING CEMENT-BENTONITE INTERACTION BY USING CA-XAFS ANALYSIS	大和田仁、藤井直樹、 林大介	Cebama Project 1st Annual Workshop 2016/5/11～13
4	EFFECT OF SELECTION OF SECONDARY MINERALS ON H-M-C COUPLING CALCULATION	大和田仁、林大介	Cebama Project 1st Annual Workshop 2016/5/11～13
5	Overview of RWMC's R&D regarding cement leaching -As a source term of the long term alteration of EBS system-	大和田仁、藤井直樹、 林大介	4th International Workshop on Mechanisms and Modelling of Waste/Cement Interactions 2016/5/22～25
6	Thermal alteration of cementitious material in TRU radioactive waste disposal	林大介、大和田仁、 藤井直樹	4th International Workshop on Mechanisms and Modelling of Waste/Cement Interactions 2016/5/22～25
7	A study on the diffusion coefficient of the hardened cement leached by ammonium nitrate solution	大和田仁、林大介	4th International Workshop on Mechanisms and Modelling of Waste/Cement Interactions 2016/5/22～25
8	Diffusivity of altered hardened cement paste by 3D spatial image model	大和田仁、林大介	4th International Workshop on Mechanisms and Modelling of Waste/Cement Interactions 2016/5/22～25

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
9	Mineralogical changes by the interaction of bentonite and cement	大和田仁、藤井直樹、林大介	4th International Workshop on Mechanisms and Modelling of Waste/Cement Interactions 2016/5/22~25
10	人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築に向けて	小林正人	日本地球惑星科学連合 連合大会 2016 大会 2016/5/22~26
11	Carbon 14 distribution in irradiated BWR fuel cladding and released carbon 14 after 6.5 years aqueous immersion	桜木智史	ATALANTE 2016 2016/6/5~10
12	Monte Carlo 解析による積層モンモリロナイト粒子の空隙構造の定量化	林大介	平成 28 年度資源・素材学会 北海道支部春季講演会 2016/6/18
13	Hyperalkaline natural analogue potential at central Palawan in the Philippines	藤井直樹、山川稔	Goldschmidt 2016 2016/6/26~7/1
14	Smectite and CSH formation under hyperalkaline conditions at Narra in Palawan, Philippines	藤井直樹、山川稔	Goldschmidt 2016 2016/6/26~7/1
15	再冠水過程における地下環境を考慮した緩衝材流出試験－室内試験による検討－	石井智子、川久保政洋	日本原子力学会バックエンド部会主催 第 32 回バックエンド夏期セミナー 2016/8/3~5
16	処分孔竖置き方式における緩衝材流出に関する検討（その 1；研究計画）	岩谷隆文、城まゆみ、川久保政洋、石井智子、朝野英一	土木学会主催 平成 28 年度全国大会 第 71 回年次学術講演会 2016/9/7~9
17	処分孔竖置き方式における緩衝材流出に関する検討（その 2；室内試験での緩衝材流出試験）	横山聡、石井智子、朝野英一	土木学会主催 平成 28 年度全国大会 第 71 回年次学術講演会 2016/9/7~9
18	処分孔竖置き方式における緩衝材流出に関する検討（その 3；幌延 URL における原位置試験）	横山聡、城まゆみ、石井智子	土木学会主催 平成 28 年度全国大会 第 71 回年次学術講演会 2016/9/7~9
19	処分孔竖置き方式における緩衝材流出に関する検討（その 4；地下水流入に関する解析的検討）	石井智子、城まゆみ	土木学会主催 平成 28 年度全国大会 第 71 回年次学術講演会 2016/9/7~9
20	TRU 廃棄物処分におけるガス移行連成挙動評価手法の開発（その 1） －研究開発の全体概要－	古賀和正、大和田仁	土木学会主催 平成 28 年度全国大会 第 71 回年次学術講演会 2016/9/7~9

V. 資料

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
21	TRU 廃棄物処分におけるガス移行連成挙動評価手法の開発 (その 2) ーガス移行評価シナリオの構築と根拠の拡充ー	古賀和正、大和田仁	土木学会主催 平成 28 年度全国大会 第 71 回年次学術講演会 2016/9/7~9
22	TRU 廃棄物処分におけるガス移行連成挙動評価手法の開発 (その 3) ー界面を有する圧縮飽和ベントナイト供試体のガス移行試験ー	古賀和正、大和田仁	土木学会主催 平成 28 年度全国大会 第 71 回年次学術講演会 2016/9/7~9
23	TRU 廃棄物処分におけるガス移行連成挙動評価手法の開発 (その 4) ーベントナイト・砂混合材料の不飽和圧密特性とそのモデル化ー	古賀和正、大和田仁	土木学会主催 平成 28 年度全国大会 第 71 回年次学術講演会 2016/9/7~9
24	自然災害に対する操業期間中の地層処分施設の安全対策ー人工バリアに対する火災影響評価の検討ー	山川浩光、蓮井昭則、川久保政洋、朝野英一	日本原子力学会 2016 年秋の大会 2016/9/7~9
25	セメント系材料の熱による変質に関する検討	林大介、大和田仁	日本原子力学会 2016 年秋の大会 2016/9/7~9
26	モルタルの溶脱に伴う物性変化に関する評価	林大介、大和田仁	日本原子力学会 2016 年秋の大会 2016/9/7~9
27	TRU 廃棄物処分システムにおけるベントナイト系材料の 2 相流パラメータ同定と適用性検証	古賀和正、大和田仁	日本原子力学会 2016 年秋の大会 2016/9/7~9
28	処分環境下におけるジルカロイの腐食挙動 (1) 腐食速度	桜木智史、吉田誠司	日本原子力学会 2016 年秋の大会 2016/9/7~9
29	処分環境下におけるジルカロイの腐食挙動 (2) 酸化膜の性状評価	桜木智史、吉田誠司	日本原子力学会 2016 年秋の大会 2016/9/7~9
30	処分環境下におけるジルカロイの腐食挙動 (3) 諸要因の検討	桜木智史、吉田誠司	日本原子力学会 2016 年秋の大会 2016/9/7~9
31	放射性廃棄物地層処分におけるベントナイト緩衝材の変質評価	林大介	地盤工学会 第 51 回地盤工学研究発表会 2016/9/13~16
32	Future Utilization of Nuclear Energy and Radioactive Wastes Management	朝野英一、川久保政洋	INES-5 2016/10/31~11/2
33	Development of Remote HLW Emplacement System for Japanese Deep Geological Repository	小林正人、橋本和幸	日本原子力学会 関東・甲越支部「第 15 回若手研究者発表討論会」 2016/11/2

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
34	Crystal structures of oxide layers by water corrosion of pure zirconium, hydride zirconium and Zircaloy-4 under deep geological repository conditions for nuclear wastes	吉田誠司、桜木智史	NuMat2016 The Nuclear Materials Conference 2016/11/7～10
35	自然災害に対する操業期間中の地層処分施設の安全対策－火災時における安全対策の検討－	山川浩光、蓮井昭則、川久保政洋、朝野英一	日本原子力学会 2017年春の年会 2017/3/27～29
36	炭素鋼の低温照射下での脆化挙動	川久保政洋	日本原子力学会 2017年春の年会 2017/3/27～29

## V. 資料

### (3)解説等

No.	題 目	著 者	発 表 先
1	地下空洞型処分施設の建設技術の確証 —地下環境下、実規模大の模擬処分施設の構築を例に—	秋山吉弘、田中俊彦	日本原子力学会誌アトモス 2016年7月号
2	分離変換 (P&T)技術の意義と効果	田辺博三	日本原子力学会 分離変換技術総論 2016年9月

## 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№118	福島第一原子力発電所事故廃棄物の処理・処分技術開発の概要	2016年6月
2	原環センタートピックス№119	地層処分の記録と記憶	2016年9月
3	原環センタートピックス №120/121	地層処分の社会的実現－無知の無知に向き合う－	2017年2月
4	原環センター2015年度 技術年報		2016年11月
5	原環センター40年の歩み		2016年12月
6	放射性廃棄物処分の原則と基礎		2016年12月
7	高レベル放射性廃棄物を地下深く終（しま）う地層処分		2016年12月
8	オーラル・ヒストリー～地層処分研究開発を語る～		2016年12月

V. 資料

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」(<http://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。]

	掲載日	タイトル
1	2016/4/7	米国でエディ・リー・エナジー・アライアンス (ELEA) サイトにおける中間貯蔵施設建設の許認可申請予定をホルテック社が NRC に通知
2	2016/4/7	追記) 米国で超深孔処分のフィールド試験を実施へ [2016 年 1 月 7 日既報]
3	2016/4/18	中国で地下研究所のサイト評価のためのボーリング孔の掘削が開始
4	2016/4/18	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プロジェクトに関する意見収集が終了 [2014 年 11 月 25 日既報]
5	2016/4/18	追記) 米国で 2017 会計年度の予算要求－高レベル放射性廃棄物処分関連に対して 1 億 5,064 万ドルを要求 [2016 年 2 月 12 日既報]
6	2016/4/20	追記) 米国でウェースト・コントロール・スペシャリスト (WCS) 社が使用済燃料の中間貯蔵施設の許認可申請の意向通知を NRC に提出 [2015 年 2 月 10 日既報]
7	2016/4/20	追記) スイス連邦エネルギー庁が NAGRA の環境影響評価の予備調査報告書及び仕様書に対する連邦環境庁の見解を公表 [2016 年 3 月 29 日既報]
8	2016/4/20	追記) スイスで NAGRA が地層処分場のサイト選定プロセス第 2 段階での絞り込み結果を公表 [2015 年 2 月 10 日既報]
9	2016/4/20	追記) フランスで長寿命低レベル放射性廃棄物処分プロジェクトの進捗に関する報告書が公表 [2015 年 10 月 16 日既報]
10	2016/4/22	追記) 米国で 2017 会計年度の予算要求－高レベル放射性廃棄物処分関連に対して 1 億 5,064 万ドルを要求 [2016 年 2 月 12 日既報]
11	2016/4/27	米国で放射性廃棄物管理会社 (RWM) が地質学的スクリーニングのガイダンスを公表
12	2016/5/3	米国でウェースト・コントロール・スペシャリスト (WCS) 社が使用済燃料の中間貯蔵施設の許認可申請書を NRC に提出
13	2016/5/6	米国で NRC がユッカマウンテン処分場の建設認可に係る補足環境影響評価書 (SEIS) の最終版を公表
14	2016/5/10	ドイツでバックエンド資金確保のあり方を検討する委員会が放射性廃棄物管理に係る資金確保のための公的基金設置を勧告
15	2016/5/12	追記) 米国で超深孔処分のフィールド試験を実施へ [2016 年 1 月 7 日既報]
16	2016/5/16	追記) 米国で 2017 会計年度の予算要求－高レベル放射性廃棄物処分関連に対して 1 億 5,064 万ドルを要求 [2016 年 2 月 12 日既報]
17	2016/5/16	追記) 米国で NRC がユッカマウンテン処分場の建設許可に係る補足環境影響評価書 (SEIS) の最終版を公表 [2016 年 5 月 6 日既報]
18	2016/5/24	追記) 米国でウェースト・コントロール・スペシャリスト (WCS) 社が使用済燃料の中間貯蔵施設の許認可申請書を NRC に提出 [2016 年 5 月 3 日既報]

	掲載日	タイトル
19	2016/5/26	カナダでチョークリバー研究所における浅地中処分場プロジェクトの環境影響評価手続きのためのパブリックコメントの募集が開始
20	2016/5/31	韓国産業通商資源部が「高レベル放射性廃棄物管理基本計画（案）を公表
21	2016/6/1	フランスで国家評価委員会（CNE）が第10回評価報告書を公表
22	2016/6/2	英国での放射性廃棄物管理会社（RWN）が地層処分の研究開発プログラム等を公表
23	2016/6/3	追記）米国の廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）で操業の再開に向けた復旧計画を公表〔2014年10月2日既報〕
24	2016/6/6	追記）ドイツでバックエンド資金確保のあり方を検討する委員会が放射性廃棄物管理に係る資金確保のための公的基金設置を勧告〔2016年5月10日既報〕
25	2016/6/15	追記）米国で超深孔処分のフィールド試験を実施へ〔2016年1月7日既報〕
26	2016/6/21	フランスで原子力安全機関（ASN）が可逆性の技術的解釈に関する見解書を公表
27	2016/6/22	ドイツで「高レベル放射性廃棄物処分委員会」が処分場サイト選定における公衆参加手続き等を決定－最終報告書へ組み込み－
28	2016/6/24	フィンランドでフェノヴォイマ社が使用済燃料の処分に向けた環境影響評価（EIA）計画書を提出
29	2016/6/28	追記）米国で超深孔処分のフィールド試験を実施へ〔2016年1月7日既報〕
30	2016/6/29	ドイツで連邦議会が放射性廃棄物処分の実施体制を変更する法案を可決
31	2016/6/30	ドイツで「高レベル放射性廃棄物処分委員会」が最終報告書を採択
32	2016/6/30	スウェーデンでSSMが使用済燃料最終処分場の建設許可申請に関する土地・環境裁判所への意見書を提出
33	2016/7/4	追記）米国でDOEが廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）の放射線事象に関する2回目の事故調査報告書を公表〔2015年4月17日既報〕
34	2016/7/6	追記）スウェーデンSKB社が短寿命低中レベル放射性廃棄物処分場の拡張を申請〔2014年12月22日既報〕
35	2016/7/8	追記）米国でウェスト・コントロール・スペシャリスト（WCS）社が使用済燃料の中間貯蔵施設の許認可申請書をNRCに提出〔2016年5月3日既報〕
36	2016/7/11	ドイツで「高レベル放射性廃棄物処分委員会」が最終報告書を提出
37	2016/7/13	フランスで地層処分場の設置許可条件と可逆性に関する法律が成立
38	2016/7/13	追記）ドイツで連邦議会が放射性廃棄物処分の実施体制を変更する法案を可決〔2016年6月29日既報〕
39	2016/7/13	追記）フィンランドでフェノヴォイマ社が使用済燃料の処分に向けた環境影響評価（EIA）計画書を提出〔2016年6月24日既報〕
40	2016/7/19	追記）英国ドリッグ処分場内の新たな施設での処分計画に関する公開協議が開始〔2015年6月18日既報〕
41	2016/7/20	追記）ドイツで「高レベル放射性廃棄物処分委員会」が最終報告書を提出〔2016年7月11日既報〕
42	2016/7/27	追記）米国でエネルギー省（DOE）が同意に基づくサイト選定アプローチの構築に向けた取組を開始〔2015年12月24日既報〕

V. 資料

	掲載日	タイトル
43	2016/7/28	カナダの核燃料廃棄物管理機関（NWMO）が 2017-2021 年の実施計画案への意見募集を開始
44	2016/7/29	追記）韓国で中・低レベル放射性廃棄物処分場の第 1 段階施設が竣工〔2015 年 9 月 8 日既報〕
45	2016/8/1	英国で放射性廃棄物管理委員会（CoRWM）が 2015 年度の年次報告書を公表
46	2016/8/2	スイスで規制機関 ENSI がトンネル掘削現場でのオリンパス粘土層の調査を実施へ
47	2016/8/16	スイスで NAGRA が技術的実現可能性に関するサイトの評価基準についての補足文章を公表
48	2016/8/22	追記）米国で NRC によるユッカマウンテン処分場の安全性評価報告（SER）の全 5 分冊が完成〔2015 年 1 月 30 日既報〕
49	2016/8/24	追記）フィンランドでフェノヴォイマ社が使用済燃料の処分に向けた環境影響評価（EIA）計画書を提出〔2016 年 6 月 24 日既報〕
50	2016/8/25	追記）韓国産業通商資源部が「高レベル放射性廃棄物管理基本計画（案）」を公表〔2016 年 5 月 31 日既報〕
51	2016/9/15	米国でエネルギー省（DOE）が同意に基づくサイト選定プロセスに対する意見を集約
52	2016/9/16	追記）米国でエネルギー省（DOE）が同意に基づくサイト選定プロセスに対する意見を集約〔2016 年 9 月 15 日既報〕
53	2016/9/23	追記）米国でエディ・リー・エナジー・アライアンス（ELEA）サイトにおける中間貯蔵施設建設の許認可申請予定をホルテック社が NRC に通知〔2016 年 4 月 7 日既報〕
54	2016/9/23	追記）米国でウェースト・コントロール・スペシャリスト（WCS）社が使用済燃料の中間貯蔵施設の許認可申請書を NRC に提出〔2016 年 5 月 3 日既報〕
55	2016/9/30	追記）米国で 2017 会計年度の予算要求－高レベル放射性廃棄物処分関連に対して 1 億 5,064 万ドルを要求〔2016 年 2 月 12 日既報〕
56	2016/9/30	追記）ドイツで「高レベル放射性廃棄物処分委員会」が最終報告書を提出〔2016 年 7 月 11 日既報〕
57	2016/10/3	スイスで NAGRA がサイト選定第 3 段階におけるボーリング調査の実施に向けた許可申請書を提出
58	2016/10/4	追記）米国でエネルギー省（DOE）が同意に基づくサイト選定プロセスに対する意見を集約〔2016 年 9 月 15 日既報〕
59	2016/10/5	スウェーデン SKB 社が RD&D プログラム 2016 を公表：使用済燃料の処分開始を 2030 年に設定
60	2016/10/17	米国の廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）で処分エリアの一部を閉鎖へ
61	2016/10/25	ドイツで連邦政府が放射性廃棄物管理のための公的基金設置等を定める法案を閣議決定
62	2016/10/26	ドイツでサイト選定手続きにおける社会諮問委員会への市民代表委員選出のための市民フォーラムを開催

	掲載日	タイトル
63	2016/10/27	追記) スイスで NAGRA に対して地質学的候補エリアにおける三次元弾性波探査の実施を州が許可発給 [2015 年 9 月 8 日既報]
64	2016/10/28	米国で DOE が民間での中間貯蔵施設の開発について情報要求 (RFI) を告示
65	2016/11/10	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
66	2016/11/15	追記) 米国でウェースト・コントロール・スペシャリスト (WCS) 社が使用済燃料の中間貯蔵施設の許認可申請書を NRC に提出 [2016 年 5 月 3 日既報]
67	2016/11/30	フィンランドで使用済燃料処分場の建設を開始
68	2016/12/6	フランスで規制機関が ANDRA による地層処分場の「安全オプション意見請求書」に関する国際レビュー結果報告書を公表
69	2016/12/8	追記) フランスで規制機関が ANDRA による地層処分場の「安全オプション意見請求書」に関する国際レビュー結果報告書を公表 [2016 年 12 月 6 日既報]
70	2016/12/8	ドイツで社会諮問委員会の委員が決定
71	2016/12/14	追記) 米国で 2017 会計年度の予算要求 - 高レベル放射性廃棄物処分関連に対して 5,064 万ドルを要求 [2016 年 2 月 12 日既報]
72	2016/12/15	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プロジェクトに関する意見収集が終了 [2014 年 11 月 25 日既報]
73	2016/12/16	ロシアで初となる低中レベル放射性固体廃棄物の浅地中処分場の操業が開始
74	2016/12/19	追記) フィンランドでフェノヴォイマ社が使用済燃料の処分に向けた環境影響評価 (EIA) 計画書を提出 [2016 年 6 月 24 日既報]
75	2016/12/19	米国で DOE が米国起源の高レベル放射性廃棄物の処分場計画案を公表
76	2016/12/19	スイスで規制機関 ENSI が地質学的候補エリア「北部レゲトン」をサイト制定第 3 段階での検討対象とすべきとの見解を表明
77	2016/12/20	追記) ドイツで連邦政府が放射性廃棄物管理のための公的基金設置等を定める法案を閣議決定 [2016 年 10 月 25 日既報]
78	2016/12/22	追記) 米国で超深孔処分のフィールド試験を実施へ [2016 年 1 月 7 日既報]
79	2016/12/22	英国のスコットランド政府が放射能レベルの高い放射性廃棄物の長期管理方針の実施戦略を公表
80	2016/12/22	追記) フィンランドで使用済燃料処分場の建設を開始 [2016 年 11 月 30 日既報]
81	2016/12/26	ドイツで連邦政府が高レベル放射性廃棄物処分委員会の勧告を反映したサイト選定法の改正法案を閣議決定
82	2016/12/27	スイスで NAGRA が放射性廃棄物管理プログラム及び研究開発計画を提出
83	2016/12/27	米国で廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) の操業再開が決定
84	2017/1/5	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プロジェクトに関する意見収集が終了 [2014 年 11 月 25 日既報]
85	2017/1/5	追記) 米国でエネルギー省 (DOE) が同意に基づくサイト選定プロセスに対する意見を集約 [2016 年 9 月 15 日既報]

V. 資料

	掲載日	タイトル
86	2017/1/6	追記) 米国で廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) の操業再開が決定 [2016 年 12 月 27 日既報]
87	2017/1/13	米国で DOE が高レベル放射性廃棄物の処分施設等の同意に基づくサイト選定プロセス案を公表
88	2017/1/18	米国で廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) の操業が再開
89	2017/1/27	追記) 米国でウェースト・コントロール・スペシャリスト (WCS) 社が使用済燃料の中間貯蔵施設の許認可申請書を NRC に提出 [2016 年 5 月 3 日既報]
90	2017/2/8	追記) スイスで NAGRA に対して地質学的候補エリアにおける三次元弾性波探査の実施を州が許可発給 [2015 年 9 月 8 日既報]
91	2017/2/23	台湾で低レベル放射性廃棄物及び使用済燃料の集中中間貯蔵に向けた取組を推進へ
92	2017/2/28	追記) 米国で DOE が廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) に係る適合性再認定申請書を提出 [2014 年 3 月 27 日既報]
93	2017/3/6	フランスで 2016~2018 年を対象とした「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) 公表
94	2017/3/17	米国で 2018 会計年度の予算方針を公表—ユッカマウンテン計画の予算を要求
95	2017/3/17	追記) 米国でウェースト・コントロール・スペシャリスト (WCS) 社が使用済燃料の中間貯蔵施設の許認可申請書を NRC に提出 [2016 年 5 月 3 日既報]
96	2017/3/22	追記) 米国で 2018 会計年度の予算方針を公表—ユッカマウンテン計画の予算を要求 [2017 年 3 月 17 日既報]
97	2017/3/22	追記) カナダでチョークリバー研究所における浅地中処分場プロジェクトの環境影響評価手続きのためのパブリックコメントの募集が開始 [2016 年 5 月 26 日既報]
98	2017/3/29	追記) 米国で 2018 会計年度の予算方針を公表—ユッカマウンテン計画の予算を要求 [2017 年 3 月 17 日既報]
99	2017/3/31	追記) 米国で 2018 会計年度の予算方針を公表—ユッカマウンテン計画の予算を要求 [2017 年 3 月 17 日既報]
100	2017/3/31	追記) 米国でウェースト・コントロール・スペシャリスト (WCS) 社が使用済燃料の中間貯蔵施設の許認可申請書を NRC に提出 [2016 年 5 月 3 日既報]

## 5. 委員会一覧

分野区分	研究件名	委員会名称	審議事項
I. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究	地下空洞型処分施設機能確認試験	地下空洞型処分施設機能確認試験検討委員会	人工バリアや周辺岩盤の長期にわたる機能確認方法の審議
II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究	処分システム工学確証技術開発	処分システム工学確証技術検討委員会	人工バリア品質/健全性評価手法、人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築、モニタリング関連技術に関する調査結果等の審議
	可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発	地層処分回収技術高度化開発検討委員会	緩衝材除去技術開発の成果、回収維持期間、実証試験計画の調査結果等の審議
		可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会	わが国の地層処分手業において可逆性・回収可能性を確保していく上で、今後の具体的な運用等に向けて更なる検討が必要と考えられる事項等の整理に向けた審議
	沿岸部処分システム高度化開発	沿岸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・安全評価に関する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
	TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発	TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発検討委員会	TRU 廃棄物の地層処分における重要核種（ヨウ素 129 及び炭素 14）への対策技術、人工バリアの長期性能の変遷に係る試験・解析等に関する計画、成果等の審議
		TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発ワークショップ	TRU 廃棄物の地層処分における重要核種（ヨウ素 129 及び炭素 14）への対策技術、人工バリアの長期性能の変遷に係る試験・解析等を対象とした、他の研究機関の専門家を交えた議論、討議
		先進的核燃料サイクル技術の地層処分概念への影響検討	先進的核燃料サイクル技術の地層処分概念に関する検討委員会
III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等	放射性廃棄物重要基礎技術研究調査	検討委員会	採択した研究開発テーマに関する研究計画、研究成果等の審議

## 原環センター 2016年度 技術年報

---

2017年10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 <http://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、  
企画部までお問い合わせください。