

# RWMC

原環センター  
2015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余裕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。

原子力エネルギーの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、2015年度(平成27年度)に実施した調査研究等の内容をご紹介するとともに、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.	諸外国における廃棄体の安全機能等に関する調査.....	3
3.	その他の管理処分に関する調査研究.....	5
II.	放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究.....	7
1.	処分システム工学確証技術開発.....	7
1-1	事業の全体概要 .....	7
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.....	9
1-3	人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材.....	13
1-4	人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築.....	17
1-5	モニタリング関連技術の整備.....	21
1-6	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.....	25
2.	可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発.....	29
2-1	事業の全体概要 .....	29
2-2	可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理.....	30
2-3	地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発－実証試験.....	34
2-4	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...	41
3.	沿岸部処分システム高度化開発.....	45
4.	T R U廃棄物処理・処分技術高度化開発.....	49
4-1	事業の全体概要 .....	49
4-2	ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上.....	51
4-3	炭素 14 長期放出挙動評価.....	55
4-4	ナチュラルアナログ調査.....	59
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.....	65
4-6	ガス移行連成挙動評価手法の開発.....	71
5.	堅置き定置方式に対応した搬送・定置設備の概念検討.....	75
6.	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 .....	77
7.	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.....	78
8.	その他の地層処分に関する調査研究.....	80
III.	放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	81
1.	放射性廃棄物海外総合情報調査.....	81
2.	放射性廃棄物重要基礎技術研究調査.....	83
3.	安全規制及び安全基準に係る内外の動向調査.....	86
4.	福島第一原子力発電所廃棄物の処分方策検討に資する海外関連技術 事例調査業務 .....	88
5.	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...	90

6 . その他の放射性廃棄物全般に共通する調査研究等.....	91
IV. 國際交流 .....	93
V. 資料 .....	95
1 . 講演会・セミナー等 .....	95
2 . 論文投稿、学会発表等 .....	96
3 . 刊行物 .....	102
4 . ホームページへの海外最新情報の掲載.....	103
5 . 委員会一覧 .....	108

## I. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

### I. 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

我が国においては、これまでの原子力発電の利用に伴って既に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。発電所廃棄物や TRU 廃棄物（地層処分相当の廃棄物を除く）等の低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分は、地下 50m 以深の大断面の地下空洞型処分施設における処分を概念とした検討が行われてきている。

平成 19 年度から平成 24 年度までの「地下空洞型処分施設性能確認試験」及び平成 25 年度、平成 26 年度の「地下空洞型処分施設閉鎖技術試験」において、大断面の地下空洞を活用し、より現実に即した条件下で、処分施設を模擬した実規模施設の設計・建設を行い、人工バリア等の主要な構造部の施工技術と初期性能を確認し、実用に供することができる施工技術を整備してきた<sup>1), 2)</sup>。一方、余裕深度処分では処分施設閉鎖後に数百年間の管理が必須になる見込みであるため、閉鎖技術に加え閉鎖後の長期的な管理の考え方やそのためのモニタリング技術も必要である。

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施設等も活用し、余裕深度処分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する。以下に初年度の成果を記す。

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 27 年度の成果

###### (1) 全体計画の策定

研究開発の初年度として、国内外の処分施設の機能確認や人工バリア長期性能に関する既往文献等の調査を踏まえ、具体的な処分施設を模擬した実規模施設（試験施設）の活用も念頭に、人工バリアの各部材（セメント系材料、低透水層及び埋戻し材等）の機能や周辺岩盤の状態変

化を長期に亘って確認するための技術開発課題を検討し、5 年間の全体計画（図-1）を策定した。

項目	H27	H28	H29	H30	H31
1. 国内外の既往研究成果等調査					
2. 人工バリアの長期性能調査					
3. 具体的な機能確認試験計画の策定	概念 ▼	既設実用模擬施設用いに準用する実験計画 ▼詳細 試験計画策定			
4. 機能確認の実現性確認		詳細計画・設備設計に資する解析 分析・ラボ試験等の検討 実験計画・製作		試験 設備設計・製作	
5. 施設の実用模擬施設における地震時挙動評価及びコンクリートピット等のひび割れ観察					
6. 情報収集及び委員会の設置・運営	▼委員会設置				

5年間の成果目標  
人工バリア等の機能確認方法の策定

図-1 全体計画

###### 1) 国内外の既往研究成果等調査

国内外の既往文献等を基に、処分施設の機能確認の目的や検討事例を調査した。また、調査結果を踏まえ、余裕深度処分における機能確認の在り方として、長期的な安全性が最新知見に照らして担保されていることの確認を目的とし、具体的な機能確認が安全評価の更新に資するものであること、また、その実施にあたっては実処分施設のバリア機能を低下させないこととした。

また、あわせて、機能確認試験の前提条件として、対象範囲を人工バリアとその評価の境界条件としての周辺岩盤とし、対象期間を操業期間中（埋設及び保全段階）とした。なお、建設前段階から開始されるモニタリングや操業段階の作業安全・放射線安全のためのモニタリングは検討対象外とした。

###### 2) 人工バリアの長期性能調査

余裕深度処分の安全評価等に関する学会などの既往文献や国内外の既往研究成果等をもとに、人工バリア等の安全機能に関する重要パラメータやパラメータへの影響因子について検討・整理した。また、これらパラメータについて、機能確認期間中の値の変化の可能性や計測可能性を検討し、機能確認の対象とする計測項目の候補を選定した。

###### (2) 具体的な機能確認試験計画の策定

上記で策定した全体計画に基づき、想定され

るモニタリング対象施設（実処分施設、地下模擬処分施設、地上施設、近傍ボーリング孔などの採水施設、地表/空中からの物理探査）の特徴を整理するとともに、現実的に実施可能なモニタリング施設として地下模擬施設、地上施設、近傍ボーリング孔などの採水施設を選定（図-2）した。

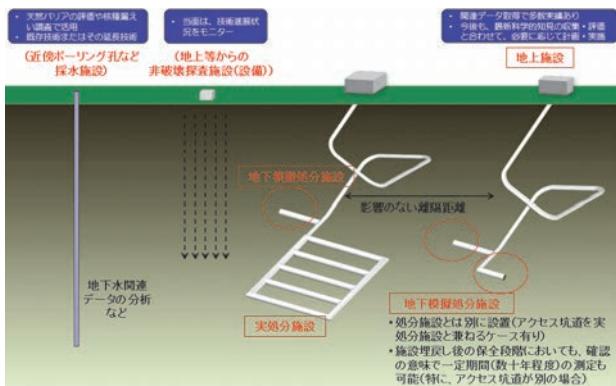


図-2 モニタリング施設のイメージ

また、選定したモニタリング対象施設ごとに、センサーまたはサンプリングによる機能確認を実施する場合の技術開発課題を整理した。

これらを踏まえ、機能確認試験の詳細計画や機能確認試験設備の設計に資するための、人工バリア等の安全機能の変遷に関する予察的な解析やラボ試験について検討した。また、あわせて、機能確認試験について、既存の実規模施設および新規施設を活用した試験設備概念を検討した。

### (3)既設の実規模施設における地震時挙動評価およびコンクリートピット等のひび割れ観察

#### 1)施設挙動の計測

施設・岩盤挙動については、坑内環境の気温及び湿度、上部埋戻し材の沈下量、底部低透水層の土圧及び沈下量、セメント系材料のひずみ、周辺岩盤の変位及び間隙水圧に係る計測を実施した。その結果、上部埋戻し材の沈下量は、平成27年5月時点で収束傾向が見られ（沈下量約5.4mm）、季節の温度変化による影響も約0.12mm/°Cであった。

また、底部低透水層に作用する土圧は、同層の極限支持力（1.85N/mm<sup>2</sup>）に比べ極僅か

（0.164N/mm<sup>2</sup>）であり、季節の温度変化の沈下量への影響も最大0.05mm程度であった。なお、

セメント系材料のひずみは、季節の温度変化に対応した変化しか認められず、周辺岩盤の変位は計器の測定精度（±0.50mm）と同等の最大0.16mm程度であり、間隙水圧の変動も防水シート背面の裏面排水工の機能により年間を通して僅かであった。

#### 2)地震波観測

地震動の観測については、今年度、計7回観測し、このうち、平成28年1月14日に観測した地震動は、平成25年以来観測した26回の地震の中で最も加速度が大きく、実規模施設から比較的離れた底盤上に設置した地震計の最大加速度は18.2gal（x方向）であった。

また、地震応答解析については、既往の観測データの中から、平成25年度及び平成26年度の既解析で使用した地震動（卓越振動数はそれぞれ4.1Hz及び3.5Hz）と異なる地震動（卓越振動数10.6Hz及び0.9Hz）を選定し、解析結果の比較を実施した。その結果、地盤の固有振動数（15Hz以上）帯の波を比較的多く含む、地震動（卓越振動数10.6Hz）が実規模施設の変形量に与える影響が相対的に大きくなることを確認した。

#### 3)ひび割れ観測

コンクリートピット等のひび割れ観察については、上部低透水層の上面、上部コンクリートピットの上面、左側側部低透水層表面及び底部低透水層内のひび割れ状況を調査した。その結果、平成26年度の調査時からのひび割れ幅の増大、進展、新たなひび割れの発生は確認されなかつた。

なお、対象部位の挙動計測でも、季節の温度変化に対応した応力変化は認められるものの、ひび割れが発生、進展するような不連続な応力挙動は認められず、調査結果と整合する結果が得られた。

- 1) 秋山吉弘、寺田賢二、山田淳夫、地下空洞型処分施設施工技術の確証試験の概要、原環センター技術報告書 RWMC-TRJ-15001、2016
- 2) 秋山吉弘、田中俊彦、「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－」、日本原子力学会誌 Vol. 58, No. 7, p40-44、2016

## I. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

### 2. 諸外国における廃棄体の安全機能等に関する調査

#### ◇事業の概要

本調査では、諸外国における廃炉等で発生した比較的放射能濃度の高い放射性廃棄物の廃棄体の安全機能等について整理することを目的として、表-1に示す国・放射性廃棄物処分場を対象に、以下の調査を実施した。

- ・ 各処分場等で処分される放射性廃棄物の調査
- ・ 各処分場等で製作される廃棄体の仕様の調査
- ・ 廃棄体の安全機能と仕様の関係の調査
- ・ 我が国の余裕深度処分の廃棄体の技術基準整備における技術的重要事項のとりまとめ

表-1 調査対象国及び調査処分場等

調査対象国	処分場等
米国	テキサス処分場
	廃棄物隔離パイロットプラント(WIPP)
英国	低レベル放射性廃棄物処分場(ドリッギング村近郊)
フランス	オーブ処分場
	ラ・マンシュ処分場
	長寿命低レベル放射性廃棄物の処分の検討状況
フィンランド	オルキルオト処分場
ドイツ	コンラッド処分場
韓国	月城処分場
スウェーデン	長寿命中低レベル放射性廃棄物の処分の検討状況

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27年度の成果

##### (1) 各処分場等で処分される放射性廃棄物の調査

各処分場等において埋設される、あるいは埋設予定の放射性廃棄物に関して、以下の項目について調査した。

- ・ 放射性廃棄物の種類（発生場所、発生源、機器名称）
- ・ インベントリ

表-2に(1)で整理した調査例を示す。

表-2 韓国、月城処分場への処分が予定されている放射性廃棄物の分類と発生源

容器	廃棄物の分類または名稱	廃棄物の内容または名稱	発生源	
			発生場所	発生源
200L	セメント固化	廃樹脂	原子力発電所	運転廃棄物
200L	乾燥	廃樹脂	原子力発電所	運転廃棄物
200L	重水炉ポリマー固化	廃樹脂	原子力発電所	運転廃棄物
200L	セメント固化	濃縮廃液	原子力発電所	運転廃棄物
200L	濃縮廃液固化	濃縮廃液	原子力発電所	運転廃棄物
200L	コンクリートライニング	廃フィルタ	原子力発電所	運転廃棄物
200L	重水炉コンクリートライニング	廃フィルタ	原子力発電所	運転廃棄物
200L	一般	雑固体	原子力発電所	運転廃棄物
200L	遮へい	雑固体	原子力発電所	運転廃棄物
320L	セメント固化	廃樹脂	原子力発電所	運転廃棄物
320L	乾燥	廃樹脂	原子力発電所	運転廃棄物
320L	セメント固化	濃縮廃液	原子力発電所	運転廃棄物
320L	濃縮廃液固化	濃縮廃液	原子力発電所	運転廃棄物
320L	コンクリートライニング	廃フィルタ	原子力発電所	運転廃棄物
320L	一般	雑固体	原子力発電所	運転廃棄物
320L	遮へい	雑固体	原子力発電所	運転廃棄物
320L	超高圧圧縮	雑固体	原子力発電所	運転廃棄物
高性能容器(HIC) ボリューム	乾燥	廃フィルタ	原子力発電所	運転廃棄物
古里内筒形コンクリート 古里4 Packコンクリート	セメント固化	廃フィルタ	原子力発電所	運転廃棄物
蔚珍C1型コンクリート 蔚珍C1型コンクリート	セメント固化	濃縮廃液	原子力発電所	運転廃棄物
蔚珍C4型コンクリート 蔚珍C2型コンクリート	セメント固化	廃フィルタ	原子力発電所	運転廃棄物
蔚珍C2型コンクリート 蔚珍C4型コンクリート	セメント固化	濃縮廃液	原子力発電所	運転廃棄物
蔚珍C2型コンクリート 蔚珍C4型コンクリート	セメント固化	廃フィルタ	研究炉(KAERI)	運転廃棄物
200L	廃フィルタ	廃樹脂	研究炉(KAERI)	運転廃棄物
200L	廃樹脂	廃樹脂	研究炉(KAERI)	運転廃棄物
200L	雑固体	雑固体	研究炉(KAERI)	運転廃棄物
200L	廃フィルタ	廃フィルタ	研究施設	研究施設
200L	廃樹脂	廃樹脂	研究施設	研究施設
200L	RI	RI	医療施設	医療施設
200L	RI	RI	研究施設	研究施設
200L	韓電原子力燃料	韓電原子力燃料	韓電原子力燃料	韓電原子力燃料

##### (2) 各処分場等で製作される廃棄体の仕様の調査

(1)で調査した放射性廃棄物について、製作される廃棄体の仕様を調査した。廃棄体は、各処分場等で設けられている受入基準を満たすよう製作されているため、(2)では、各処分場等における放射性廃棄物の受入基準を調査した上で、廃棄体の仕様の調査を行った。



図-1 ドイツ、コンラッド処分場で使用される角型容器

## (3) 廃棄体の安全機能と仕様の関係の調査

各処分場等に関する安全評価書の入手、または各処分場等の操業者等に対する聞き取り調査を行い、処分場の操業時及び長期の安全性において求められている安全機能と(2)で調査した廃棄体仕様との関係を調査した。廃棄体仕様と安全機能において、その関係性が見当たらない場合には、その旨を明確化し、廃棄体仕様が何に基づいて決定されているのか、その決定事項とともに検討経緯や考え方等について調査した。

表-3に(3)で整理した調査例を示す。

表-3 テキサス処分場の廃棄体仕様と仕様を設定する観点の概念的な整理

仕様の設定の観点 廃棄体の仕様	輸送	操業	長期の安全性
液体廃棄物の固定化			○
遊離液体	○	○	
爆発性	○	○	
有毒性	○		○
自然発火性	○	○	
気圧	○	○	
放射能量	○	○	○
キレート剤			○
表面汚染		○	
廃棄物パッケージ内の空隙			○

## (4) 我が国の余裕深度処分における廃棄体の技術基準整備の技術的重要事項のとりまとめ

(1)～(3)において調査した各国の情報を踏まえ、我が国の余裕深度処分における廃棄体の技術基準整備の技術的重要事項についてまとめた。

技術的重要事項の取りまとめに当たっては、各の処分概念や処分対象廃棄物の違いを考慮した上で、各処分場等における廃棄体仕様及び要件、廃棄体内における空隙の取扱いなどに注目し、我が国の余裕深度処分における廃棄体の技術基準整備において的重要事項をまとめた。

また、表-4に本調査における調査結果の一覧表の抜粋を示した。

表-4 調査結果一覧表（抜粋）

処分場	発生源	名称	インベントリ	廃棄体仕様	廃棄体仕様の概要
テキサス処分場	運転廃棄物 (原子力発電所、非発電) 解体廃棄物 (原子力発電所、非発電) 【ほぼすべての廃棄物をコンクリートキャニスタモジュール(CCM)に収納するため】	液体過式ラジ、圧縮廃棄物、 脱脂樹脂、床ドレン・ルクタスラップ、 燃料ボルト除去フルタスラップ、 ラップ、非圧縮廃棄物、非燃料炉内構造物、プロセスフルタ、炉 水淨化系樹脂、炉水脱塩樹脂、 二次系樹脂、水份吸收物、生物 廃棄物、高放射能廃棄物、低放 射能廃棄物、非圧縮廃棄物、密 封罐、解体廃棄物	許可廃棄物量: 9,000,000t <sup>3</sup> を超えない 放射能量: 3,890,000Ciを超えない	最大放射能濃度: Table 1-30, Table 2-30参照 液体廃棄物の固定化 遊離液体 爆発性 有毒性 自然発火性 気圧 放射能量 キレート剤 表面汚染 廃棄物パッケージ内の空隙	原子力規制委員会(NRC)、テキサス州による設定値。 長期の安全性 輸送、操業の安全性 輸送、操業の安全性 輸送、長期の安全性 輸送、操業の安全性 輸送、操業の安全性 輸送、操業の安全性 長期の安全性 操業の安全性 長期の安全性
LLRW	運転廃棄物 (原子力発電所、非発電) 解体廃棄物 (原子力発電所、非発電) 【LLRWでは運転廃棄物及び解体廃棄物の両方を処分】	プラスチック、紙、布、衣類、木材 及び金属、瓦礫、土壤及び様々な金属機器など	部分場の総放射能量が以下を超えないものとする。 $\alpha$ 線放射能: 40GBq/t $\beta$ 線/ $\gamma$ 線放射能: 12GBq/t	反応堆廃 爆発性物質 液体 可溶性の固体 強酸化剤 腐食性物質 高分子容器及びエアロゾル 有毒物質 化學強化剤またはキレート剤 イオン交換物質 生物由来、感染性及び病原性物質 廃棄物の劣化、空隙及び沈下特性 危険廃棄物 核分裂性放射性核種 放射線 汚染 承認済み分容器 その他の容器 容器への収納作業 重量超過容器	グラウト充填による金属性との反応により水素が発生する可能性がある。また、水素が発生することで廃棄体内に空隙を増加させる可能性がある。(操業安全要件) 操作安全と廃棄体の密封性的の保護(操業安全要件) 廃棄体の空隙を最小限にする。また、火災の可能性を低減するために、引火点の制限を設定している。(操業安全要件) 放射性核種または非放射線学的汚染物質の放出を最小限にする(操業安全要件) 廃棄体の荷物を防止(操業安全要件) 放射性核種の放出の回避(操業安全上の要求) 操業安全と廃棄体の密封性的の保護(操業安全要件) 操業安全(操業安全要件) 強化剤は、低温度で合つても放射性核種または非放射線学的汚染物質の移動性を高める可能性がある。(操業安全要件) 廃棄体の荷物による放射性物質の放出を最小限にする(操業安全上の要求) 廃棄体の空隙を低減する目的で制限(操業安全上の要求) 廃棄体の空隙を低減する目的で制限(操業安全上の要求) 操業安全(操業安全上の要求) 臨界の発生を防止(輸送要件) 輸送規則への適合と操業安全(輸送要件と操業安全上の要求) 輸送規則への適合と操業安全(輸送要件と操業安全上の要求) 輸送規則への適合と操業安全(輸送要件) 輸送規則への適合(輸送上の要求) 廃棄体の空隙を低減する目的で制限(輸送上の要求) 輸送規則への適合と操業安全(輸送要件と操業安全上の要求)

## I. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

### 3. 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について、種類、サイズ及び収納条件を整理し、モルタルの充填性に影響を与えると考えられる特性を持つ廃棄物を抽出した。

#### (2) L L W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段階管理による安全確保の方策、覆土の施工方法、保安のために講すべき措置及び記録などを規定した標準改定案を作成し、標準委員会へ本報告した。

#### (3) L 2／L 3 安全評価手法標準の整備（改定又は追補版策定）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、安全評価の考え方、安全評価における考慮事項、処分システムの状態設定、被ばく経路及び各シナリオの安全評価方法などを規定した標準改定案を作成し、標準委員会へ中間報告した。

#### (4) 余裕深度処分の安全評価手法の標準の改定に関する調査

低レベル放射性廃棄物埋設処分に係る安全評価手法標準について、新規制基準への適合化に関する調査検討を行い、新規制基準に対応し、かつ余裕深度処分施設の安全で合理的な施設設計、安全評価などを実行する上で有効に活用できる学会標準の整備のための調査を進めた。

#### (5) 廃止措置における国内外の技術、制度面の相違等に係る調査

諸外国における運転中及び廃止措置に伴う放射性廃棄物の処理処分方法について、最新の技術知見を整理した。また、諸外国の廃止措置引当金制度等の最新情報を収集して我が国の制度との違いを整理するとともに、経済協力開発機構／原

子力機関（OECD/NEA）の国際廃止措置費用構成（ISDC）に示された費用項目に対する充足度を整理した。

(This page(p6) 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。

- 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
- ii) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材
- iii) 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築
- iv) モニタリング関連技術の整備
- 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

#### (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／健全性が維持されていることを判断

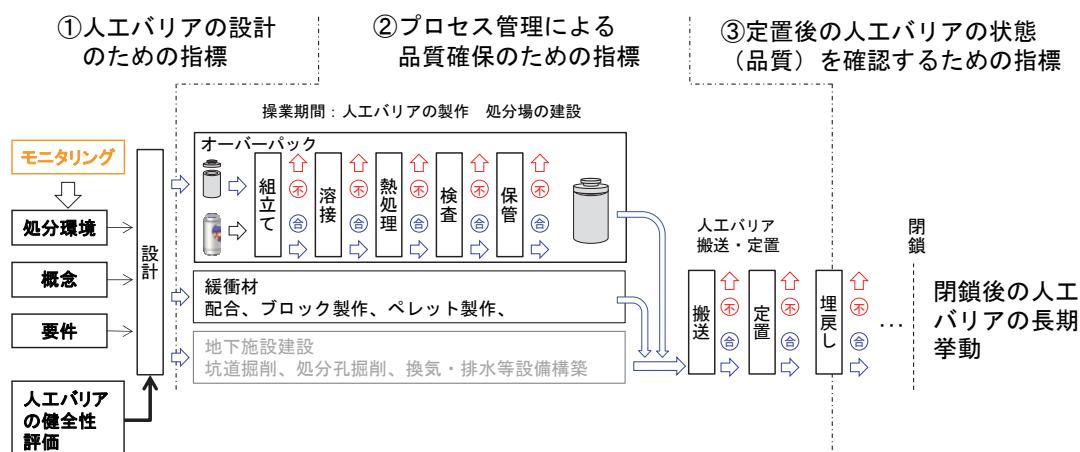


図-1 人工バリアが健全であることを判断するために必要な指標

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、定置後の処分環境が、人工バリアの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、それらの課題の内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、操業期間中の安全対策に関するこれまでの研究開発成果の取りまとめを実施した。

### (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、v)では、操業期間中の安全確保対策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 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、2015

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	・長期挙動評価の方針論、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

平成 24 年度までの遠隔操作技術高度化開発<sup>1)</sup>では、オーバーパックの溶接方法として、TIG 溶接、MAG 溶接、電子ビーム溶接の適用性を示し、超音波探傷法により 2~3mm 以上の溶接欠陥が 100% 検出できることを示した。また、人工バリア品質評価技術の開発<sup>1)</sup>では、溶接部を対象とした腐食試験を実施し、腐食試験データを取得した。平成 25 年度からは、これまでの研究開発成果を踏まえて、オーバーパックの健全性評価手法の構築に向けた検討を実施している。

一般的な構造物は、供用後の検査や補修により、その健全性を確保している。しかし、処分孔に定置した後のオーバーパックに対して検査や補修を行いうことは想定されていない。そのため、定置前の段階で、要求される期間の健全性が維持されることを示す必要がある。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）を抽出する。想定される全ての破損形態に対して、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ることになる。オーバーパックの場合、腐食形態が全面腐食で進み、要求される閉じ込め期間中に外圧などの負荷により破損が生じないと判断された場合に健全性が確認されたことになる。

本事業では、地下深部を想定した環境下におけるオーバーパック溶接部の腐食試験を実施するとともに、外圧などの負荷に対して、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。

#### ◇平成 27 年度の成果

平成 27 年度の成果の概要は以下のとおりである<sup>2)</sup>。

##### (1) オーバーパックの健全性評価手法の構築

オーバーパックには、「発熱が著しい期間の地

下水接触の防止」の安全機能が設定されている<sup>3)</sup>。つまり、オーバーパックの健全な状態とは、ガラス固化体の発熱が著しい期間、ガラス固化体と地下水の接触を防止している状態と定義することができる。

オーバーパックの健全性を確保するためには破損形態と破損モードを適切に想定することが重要となる。オーバーパックの破損形態は、①腐食による貫通、②材料中の欠陥を起点としない破損、③材料中の欠陥を起点とした破損の 3 つが想定される。3 つの破損形態に対して、破損モードはそれぞれ①局部腐食、②塑性崩壊、③塑性崩壊、弾塑性破壊、脆性破壊が想定される<sup>2)</sup>。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、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>4)</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、以下の 3 つの異なる大きさの試験体を用いた腐食試験の計画を平成 25 年度に策定した。1) 模擬オーバーパック溶接試験体を用いた腐食試験（工学規模試験）、2) 数十 cm 程度の試験体を用いた腐食試験（小規模要素試験）、3) 数 cm 程度の試験片を用いた腐食試験（実験室規模試験）。

工学規模試験は、地下施設と地上施設で実施している。地下施設の試験は、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 調査坑道で実施している。オーバーパック溶接部腐食試験の概要を図-1 に示す。長手方向に TIG 溶接部を設けた模擬オーバーパック試験体の周囲に緩衝材を設置して、幌延

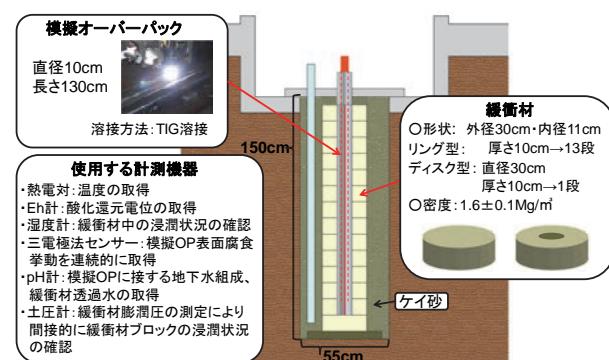


図-1 オーバーパック溶接部腐食試験の概要（幌延 URL）

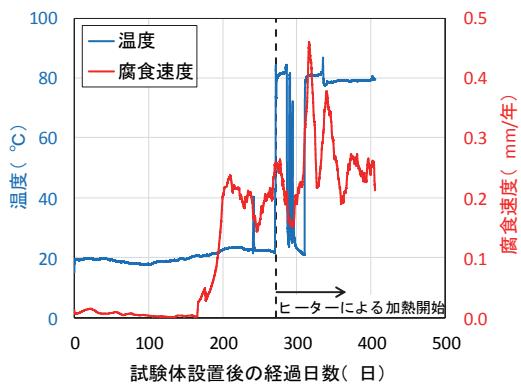


図-2 模擬オーバーパック表面温度と腐食速度の測定結果（幌延 URL における工学規模試験）

URL の地下水環境下で腐食試験を実施している。平成 27 年度は、ガラス固化体の発熱の影響を考慮して、試験体内部にヒーターを設置した。試験体表面温度の時間変化を図-2 に示す。ヒーターの出力を調整し、試験体表面温度を 80°C に設定して、腐食速度の継続的な測定を実施している。図には、電気化学ノイズ法 (ENA 法) で測定している腐食速度の時間変化も併せて示した。現状では、腐食速度を換算する係数として、試験環境とは異なる溶液系のものを用いているため、腐食速度が数百  $\mu\text{m}/\text{y}$  なっているが、試験体取出し後(平成 29 年度を予定) の分析結果により換算係数を補正する。一方、幌延 URL と同様の試験装置を地上施設に構築して腐食試験データを取得している。

小規模要素試験では、腐食挙動の経時変化を確認する試験と不均質な環境条件での試験を実施している。これらの試験を継続して実施し、工学規模試験の試験期間中の腐食挙動の評価に資するデータを継続的に取得する。また、原位置で腐食速度などの計測が可能な腐食計測技術として、腐食レジストリー法、直流電位差法、インピーダンス (EIS) 法について、地層処分事業への適用性の調査を実施している。

実験室規模試験は、主に JAEA との共同研究として実施している。平成 27 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 年間の浸漬試験の維持管理を実施した。試験片の分析は、平成 28 年度に実施する。また、オーバーパックの代替材料としてチタンの浸漬試験を平成 20 年度から実施している<sup>5)</sup>。チタンの浸漬試験はガラスアンプル法で実施しており、6 年間の

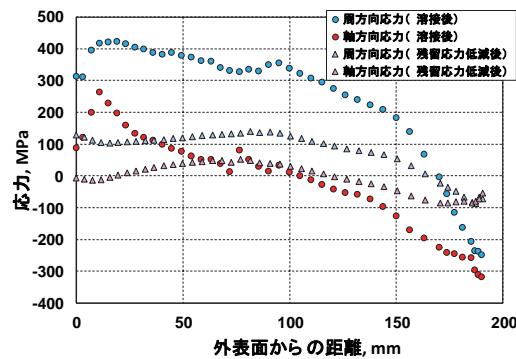


図-3 溶接部の残留応力分布の解析結果

浸漬試験片の分析を行った。Ti および Ti+0.15Pb の母材と溶接部の腐食速度は、6 年間経過時点で全ての試験片について  $10^{-2} \mu\text{m}/\text{y}$  を下回った。母材に比べてチタンの溶接部の腐食速度は遅くなるという結果が得られた。

### (3) 溶接部の限界き裂寸法に関する検討

溶接部には、ボイドなどの欠陥が発生する可能性がある。欠陥が十分に小さい場合には、欠陥を起点とした破損は生じないが、比較的大きな欠陥が発生した場合には、欠陥を起点とした破損が生じる可能性がある。そのため、想定される環境条件下で溶接部が破損しない限界の欠陥寸法を有限要素解析により求めた。

平成 27 年度は、平蓋形状のオーバーパックを対象とした。溶接条件は、TIG 溶接による 190 mm の全層溶接とした。溶接時に発生する残留応力は、溶接欠陥を起点とした破損の駆動力となる。そのため、最初に溶接部の残留応力分布および溶接後熱処理 (PWHT) による残留応力の低減効果を解析で確認した。溶接条件を模擬した非定常熱伝導解析を実施し、その結果を用いて、弾塑性解析により溶接残留応力分布を計算した。加熱箇所、昇温速度、保持時間をパラメータとして、PWHT 後の残留応力分布を計算した。残留応力の計算結果を図-3 に示す。溶接直後の引張残留応力は、軸方向に比べて周方向で大きく、最大で 420 MPa 程度になった。PWHT 後の軸方向および周方向応力は、それぞれ最大で約 50 MPa、140 MPa 程度に低減される結果となった。

溶接部の破損に寄与しない欠陥寸法を把握するため、溶接欠陥を応力状態の最も厳しくなるき裂とみなして、き裂先端の応力拡大係数を求めた。解析では、ガラス固化体から放出される放射

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

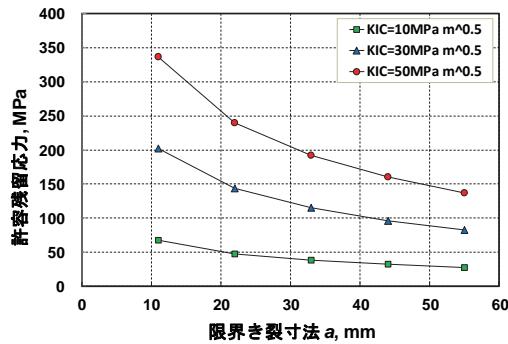


図-4 溶接部の許容残留応力と限界き裂寸法の関係  
(板厚 : 110mm)

線による脆化の影響を考慮して、脆性破壊を仮定した。

溶接欠陥の形状は、半円の開口き裂としてモデル化し、板厚およびき裂寸法をパラメータとした。オーバーパックに作用する外圧（「第2次取りまとめ」における硬岩系1,000mの外圧値10.7MPa）と溶接残留応力とした。解析の結果から、耐圧厚さに相当する板厚110mmにおける許容引張残留応力と限界き裂寸法の関係を図-4に整理した。この図から、破壊靭性値と残留応力が与えられた場合、非破壊検査で検出する必要があるき裂寸法を推定することができる。ただし、限界き裂寸法は破損する最小のき裂寸法であり、非破壊検査による寸法測定誤差などを考慮して適切な裕度を設定し、許容できる欠陥寸法を決定する必要がある。

### (4)超音波探傷による欠陥寸法定量化

平成26年度までは、主にフェーズドアレイ法（以下、PhA法とする）による溶接欠陥寸法および位置の定量化方法について検討を行ってきた。平成27年度は、探傷試験のデータ処理方法に全波形収録開口合成法（以下、FMC-TFM法とする）を適用して、溶接欠陥寸法の測定精度について検討を行った。FMC-TFM法のデータ処理方法の概念図を図-5に示す。従来のPhA法では、個々の振動子から送信される超音波のタイミングを制御し、合成された超音波ビームの反射波から欠陥寸法などの情報を取得する。FMC-TFM法では、1つの振動子から送信され、欠陥などからの反射波を全ての振動子で受信することを振動子を切り替えて繰り返し、開口合成信号処理を実施する。欠陥等の反射源を種々の方向から見た反射像を得るために、欠陥寸法や位置の測定精度

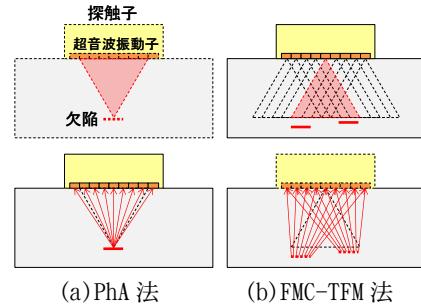


図-5 PhA法とFMC-TFM法におけるデータ処理方法

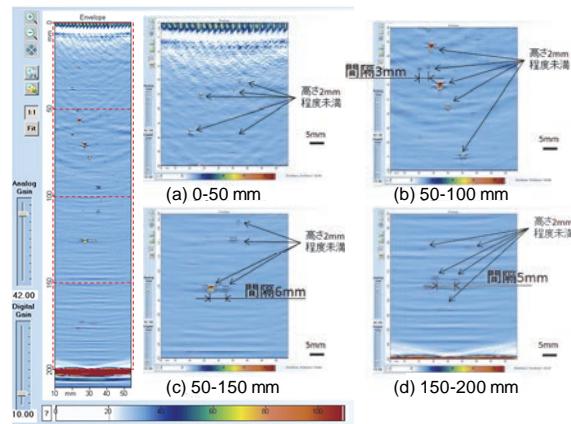


図-6 FMC-TFM法における欠陥寸法および位置の測定結果

を向上させることができる。

FMC-TFM法による欠陥寸法の測定精度を確認するために、溶接試験体を用いて超音波探傷試験を実施した。使用した探触子の周波数は3MHzと5MHzであり、開口寸法は64mmとした。探傷試験の結果の一例を図-6に示す。図には、板厚全体の測定結果と(a)-(d)に深さ50mmの範囲毎に拡大表示した測定結果を示した。溶接部には、深さ20mmから170mmの範囲に2mm程度の大きさの欠陥が複数検出された。同程度の深さ位置で近接した欠陥指示の間隔は3mmから5mm程度であるため、3mm～5mm程度以上の間隔であれば、近接した欠陥を分離して測定できると考えられる。以上の結果から、データ処理方法にFMC-TFM法を適用することにより、溶接深さ10mm～190mmに対して、溶接欠陥寸法および位置の測定精度および近接欠陥の分解能の向上の可能性を確認した。今後は、溶接試験体の断面を削り、欠陥寸法の実測値とFMC-TFM法による測定結果を比較し、実際の欠陥に対する測定精度を確認することが必要である。

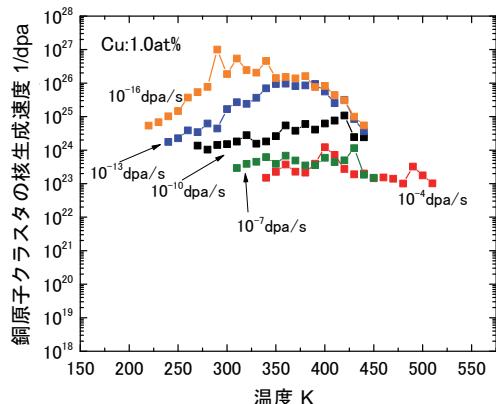


図-7 銅原子クラスタ核生成速度の照射条件依存性

## (5) 破壊靭性値の予測に関する検討

平成 27 年度は、照射による損傷量を予測するために、モンテカルロ法を用いた銅原子クラスタの核生成プロセスのシミュレーションモデルを構築した。照射により、材料中には空孔や格子間原子などの非平衡欠陥が発生する。構築したモデルでは、1 つの銅原子に着目して、銅原子クラスタに対する銅原子、空孔、格子間原子の流入と流出を考慮することで、銅原子クラスタの核生成を詳細に調べることができる。銅原子クラスタと温度の計算結果を図-7 に示す。照射速度が低い条件では、銅原子クラスタが多く形成され、脆化が進むという傾向をシミュレーションにより再現することができた。今後は、銅原子クラスタだけでなく転位ループも併せて、それらの核生成と成長を考慮し、照射によるナノスケールの構造の変化を計算するためのモデルを構築する。

また、炭素鋼の脆化因子に対する材料組成、照射温度、照射速度および溶接の影響を調べるために、Fe イオンを試験片に照射し、照射試験片を作製した。試験片は炭素鋼 (SM400B) および Fe-Cu 合金を用いた。照射温度は 90°C と 290°C とし、照射速度は  $1 \times 10^{-4}$  dpa/s とした。照射量は 0.1 dpa と 1 dpa の 2 条件とした。

最初に、照射試験片に対して超微小硬さ試験を行い、照射損傷による硬化量を測定した。硬さの測定結果を図-8 に示す。炭素鋼については、290°C よりも 90°C 照射の方が硬化量は大きくなる傾向が見られた。次に、3 次元アトムプローブ (3DAP) と透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いてナノスケールの組織の分析を行った。3DAP による 3 次元の原子分布の測定結果の一例を図-9 に示す。炭素鋼の 290°C、1dpa の照射条件では、Mn、Si、P が

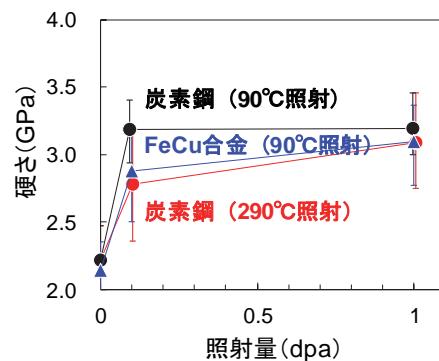
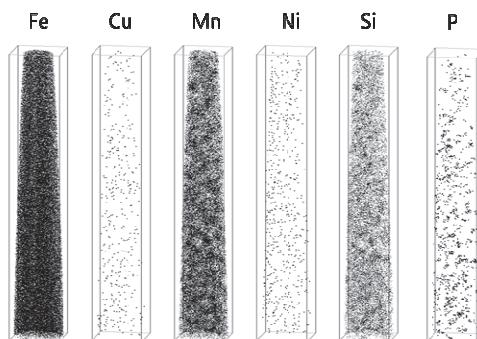


図-8 イオン照射に伴う硬さの変化

図-9 炭素鋼試料の原子分布の測定結果の一例  
(1dpa、290°C) (測定範囲 : 200 × 35 × 35 nm)

集積したクラスタの形成が観察された。また、TEM 観察の結果から、転位ループの形成も確認された。以上の結果から、炭素鋼の脆化因子として、溶質クラスタと転位ループの形成が確認された。照射損傷による硬化量（脆化量）の増加をミクロ組織の変化で説明するためには、さらに詳細な分析を継続して行う必要がある。

- 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 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－オーパーパック、2016
- 3) 原子力発電環境整備機構、処分場の安全機能と技術要件、NUMO-TR-10-11、2011
- 4) 山本陽一、鈴木覚、安保英範、藤原啓司：地震動による人工バリアへの影響、原子力バックエンド研究、Vol. 21、No. 2、pp. 101-104、2014
- 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 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

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

### 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、ベントナイト系緩衝材の品質を確保した施工技術、再冠水後の緩衝材の健全性が維持されていることを評価する手法を構築することを目的に、再冠水過程におけるベントナイトの挙動について、試験をもとに検討を行っている。試験の対象は、緩衝材の浸潤、膨潤、流出挙動であり、これまでに、試験は小型規模のものから、長尺セルによる一次元試験（長さ1m）、土槽試験（二次元、70cm×20cm）、工学規模試験（56cm $\phi$ ×60cm）、実スケール試験とスケールアップしながら、長期試験（5～6年）を含め、平成21年度から継続して研究開発を実施している<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・施工技術について小規模試験から実規模試験に至る各種の試験を通じて実現性を示す一方、評価のための解析手法に資すること、また、緩衝材の流出などに対する工学的対策を提示することを目的としている。

平成27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継続して取得するとともに、緩衝材流出挙動を評価し、対策を講じるために、緩衝材を予め膨潤させる施工方法や解析による湧水対策の評価について検討するとともに、緩衝材機能を保持するための周辺部材の在り方についての調査を行った。

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27年度の成果

##### (1) 緩衝材の施工品質のうち再冠水挙動に影響を及ぼす項目

本事業は、平成20年度に計画策定された。その際に、文献調査などによって緩衝材の施工品質のうち再冠水挙動に影響を及ぼす項目（影響因子）、及び影響因子によって影響を受ける再冠水時の現象を抽出した。影響因子としては、

- ・隙間の有無、位置

- ・密度分布の程度、方向
- ・初期透水性（施工直後の間隙分布）

を考え、これらの影響因子によって影響を受ける再冠水時に緩衝材に発生する現象としては、

- ・膨潤
- ・化学変質
- ・力学性能変化
- ・地下水浸潤（流入量、液種）
- ・ガス移行
- ・熱影響

を抽出した。さらにこの後、平成21年度には、海外事例の調査などにより、

- ・緩衝材の流出

が、検討すべき現象として加えられた。

以上の抽出された現象を考慮し、平成21年度から、試験を行っている。表-1に平成27年度に行なった試験の項目と分類を示す。

表-1 試験項目と分類

試験対象	小規模試験	土槽試験	工学規模	地下環境	分類
施工品質（密度分布）の均質化	●	—	—	—	密度均質化
Ca型化の影響	●	—	—	—	—
施工品質（密度分布）が再冠水に及ぼす影響	—	●	—	—	—
不飽和浸潤速度	● <sup>(2)</sup>	—	—	—	浸潤状況把握
再冠水時の緩衝材流出	● <sup>(4)</sup>	—	●	● <sup>(4)</sup>	—
再冠水時の間隙空気の影響	● <sup>(3)</sup>	—	—	—	複合問題
緩衝材の施工技術による影響度の低減検討	—	—	●	—	—

表に示した試験のうち、以下に不飽和浸潤速度の測定、再冠水時の間隙空気の影響、再冠水時の緩衝材流出の主な結果を示す。

##### (2) 不飽和浸潤速度の測定

本試験は、平成21年度より継続して実施しており、再冠水時に緩衝材に水が浸潤する場合の不飽和領域と飽和領域の境界（浸潤フロント）の移動速度を測定し、得られたモデル式を解析に反映することにより、再冠水の進行過程を推定することを目的としている。

試験は、直径50mm、高さ1000mmのセルを用い（図-1）、ベントナイトはクニゲルV1にケイ砂を30wt%混合したものを1.6Mg/m<sup>3</sup>の密度になるように充填した。蒸留水と海水相当のイオン強度の0.5M NaCl水溶液を通水した時の緩衝材中の比抵抗値を計測し、緩衝材中の飽和度の進行を測定している。

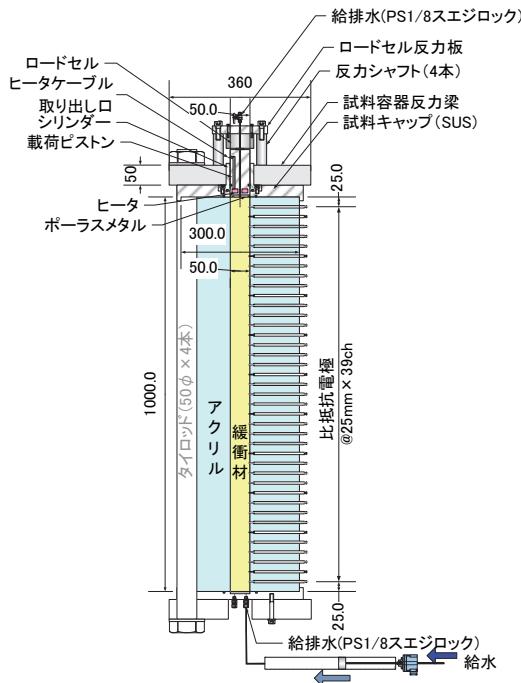


図-1 長尺ベントナイト供試体を用いた一次元浸潤速度取得試験

予備試験により、比抵抗値とベントナイトの飽和度の関係をあらかじめ取得し、比抵抗値から飽和度を算定した。図-2に飽和度が初期値から1%増加した時点で浸潤フロントが到達したと見なした場合の浸潤フロントの進展状況を示す。比抵抗計測のための電極が50mm間隔で設置されているため、浸潤フロントの進展状況も階段状になっている。

蒸留水のケースの場合、浸潤フロントの位置  $d(\text{mm})$  は、給水時間  $t(\text{day})$  の指数関数として  $d = 60t^{0.35}$  で近似できる。この関係式に基づいて浸潤フロントが供試体上部まで到達する時間を算出すると、約8.5年となる。この結果は、毛細管現象による水の拡散速度の理論式である Washburn 式(図-2の破線)、よりも緩慢であった。これは、ベントナイトの主要粘土成分であるモンモリロナイトの特性、飽和度が1%増加した時点を浸潤フロントと定義したことなどが原因と考えられる。NaCl 水溶液の場合、Washburn 式と整合する結果であるが、浸潤フロントの進展状況は蒸留水の場合よりも遅かった。NaCl 水溶液の場合には液中のイオン濃度が高いことにより、モンモリロナイトが凝集するために毛細管現象に寄与する微小な空隙が減少することが考えられる。

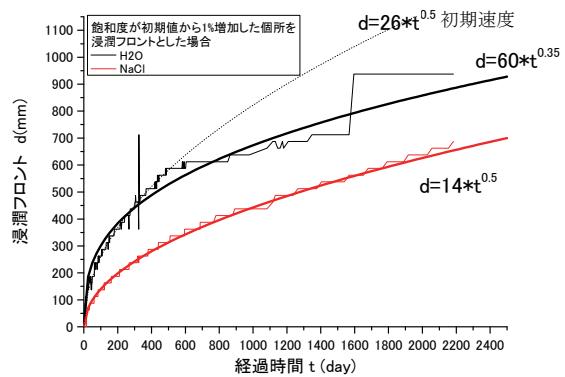


図-2 浸潤フロント(初期飽和度からの増分が1%で定義)の進展状況

### (3)再冠水時の間隙空気の影響

前項で緩衝材の一次元浸潤速度試験を測定した装置(図-3)を用いて、トラップされた空気が地下水の浸潤挙動に及ぼす影響を計測する試験を行った。ベントナイトも同じものを同一密度で充填した。一次元浸潤速度試験では、地下水浸潤に伴う間隙空気圧の増加が地下水浸潤速度に影響を及ぼさないように供試体上端を大気圧解放条件としていた。しかしながら、実際の処分場での地下水の浸潤状況を想定すると、浸潤に伴って間隙空気が緩衝材内部にトラップされ、緩衝材の均一な飽和を阻害する可能性が考えられる。そこで、本試験では、間隙空気が緩衝材内部にトラップされた場合を想定して上下から給水し、セル中央で間隙空気圧変動を制御・計測した。

試験の初期は流量制御で蒸留水を給水したが、比抵抗分布から膨潤領域が確認された時点で圧力制御に切り替えた。初期の給水圧を10kPaとして段階的に給水圧を増加させ、550日目に876kPaまで増加させた。圧力は大気圧の変動の影響を受けないようにするために、絶対圧計により計測した。この絶対圧計は、真空状態をゼロとしているため、876kPaは通常のゲージ圧計の1MPaに相当する。

図-4に間隙空気圧と給水速度の経時変化を示す。水圧を876kPaまで増加させた後は、間隙空気圧が増加に転じ、約2年間で3kPa程度、一定勾配で増加した。給水速度は漸減しているが、間隙空気圧が漸減している期間に比べて、その値は安定している。このことから、供試体への物質移動の収支が、給水と間隙水への間隙空気の溶存のみで決まり、不規則な間隙空気の移動な

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

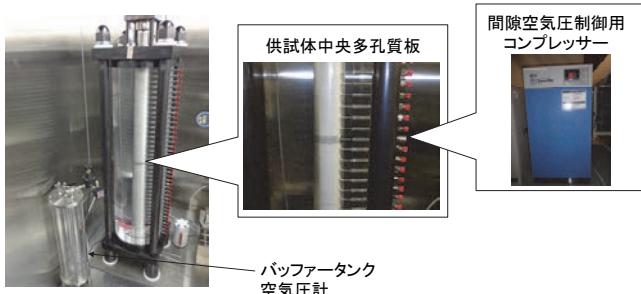


図-3 浸潤による間隙空気の移行試験セル

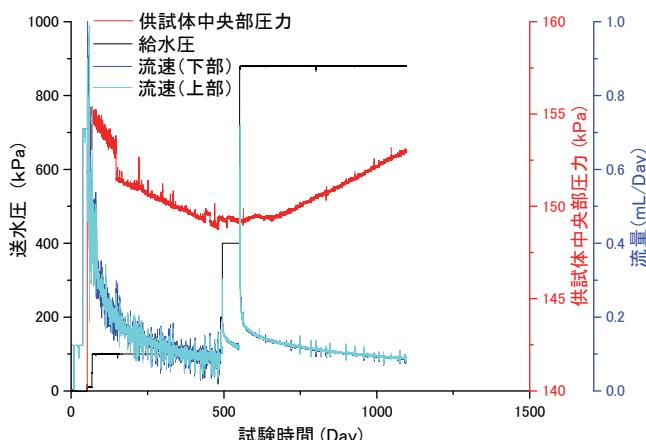


図-4 間隙空気圧と給水速度の経時変化

どが生じていないものと考えられる。

以上の結果からは、間隙にトラップされた空気が地下水に溶け込む速度が浸潤速度に対し、ある程度の速度をもっており、緩衝材に浸潤するのと並行して間隙空気が溶解するため、間隙空気圧の上昇が抑制されたと考えられる。そのため、間隙空気の圧力上昇により緩衝材が破過する懸念は比較的小さいと考えられる。ただし、実際の処分孔では、廃棄体からの熱により浸潤した地下水の温度が上昇すれば、地下水への気体の溶解度は小さくなるため、再度、間隙空気として析出し、圧力が上昇する可能性があることに注意が必要である。

### (4) 再冠水時における緩衝材の流出

再冠水時の地下水の湧出による緩衝材の流出は、緩衝材の密度低下に繋がり人工バリアの性能を低下させる。そのため、緩衝材の安全機能を確保するためには、流出による性能低下の程度を把握する必要がある。本試験では再冠水過程における地下環境の緩衝材の流出への影響を把握するための試験を行い、さらに流出に対する工学的対

策について検討するための試験を実施している。

#### ① 小型セルによる緩衝材流出試験

平成 26 年度までに、緩衝材流出現象が地下水の組成や流速の影響を受けること確認するために、ベントナイト供試体（クニゲル V1）にイオン強度 0.5 の NaCl、および CaCl<sub>2</sub> 水溶液を通水する試験を実施した。その結果、イオン強度、およびベントナイトの Ca 型化により、緩衝材流出挙動に影響が見られた。通水液の組成により、ベントナイトが凝集し、膨潤性が低下することなどが影響したと考えられ、流出速度の増加、途中からの流出の低下、などがあった。

平成 27 年度は、次項に述べる幌延地下坑道での緩衝材流出試験との比較、および評価のための基礎データとするために、模擬幌延地下水による試験を行った。

図-5 に水みちの形成状況を示す。通水初期段階で供試体の大間隙を連ねた水みちが、供試体とセルとの界面に複数形成され、そのうちの 1 本の水みち形成に収斂し、次第に成長した。通水開始から 12 時間で大きな水みちが形成され、その後も太さや位置は変化しなかった。

模擬幌延地下水のイオン強度は 0.18 程度であるため、イオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液や CaCl<sub>2</sub> 水溶液のように、流出物質が凝集により塊状であったり、沈殿物が水みち内で上下動するような現象は見られなかった。

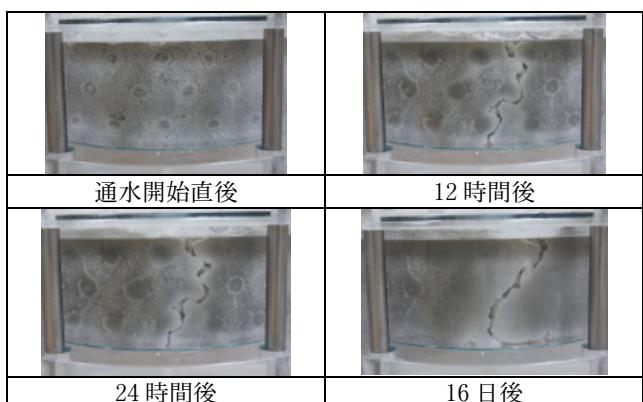


図-5 水みちの形成状況（通水液：模擬幌延地下水）

図-6 に、総流量とベントナイトの流出質量の関係を示す。図には、これまでに実施した試験結果から得られた近似線も併せて示している。図から、総流量とベントナイト流出質量の関係の勾配は、模擬幌延地下水を用いても蒸留水を用

いたケースと同等であることが分かる。このことから、本試験の条件においては、緩衝材流出に対して模擬幌延地下水程度のイオン強度であれば、その影響は小さいと言える。

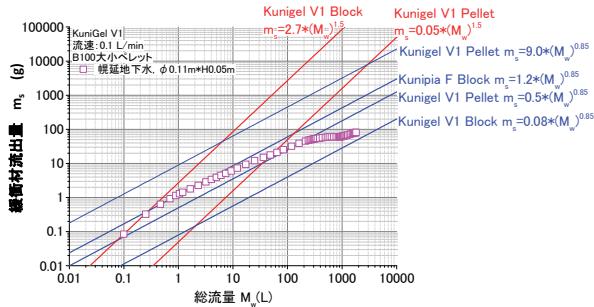


図-6 総流量と緩ベントナイト流出質量の関係  
(通水液：模擬幌延地下水)

## ②地下研究施設における緩衝材流出試験

平成 26 年度より、幌延深地層研究センターの地下 350m 坑道で緩衝材流出試験を開始した。試験のために、平成 26 年度に直径 56cm の試験孔を掘削し、当初深さは 80cm であったが、平成 27 年度に 170cm まで掘り下げた。また、試験孔からの自然湧水の他に人工的に注水できるように、試験孔の底部に向かって、斜めに注水ボーリング孔を設置した。図-8 に試験設備の概要を示す。

試験は、注水量を短期に変化させた試験と一定量の注水を長期で行う試験の 2 回行った。ここでは、注水量を変化させた試験の結果を示す。

短期注水試験は、乾燥密度  $1.6 \text{ Mg/m}^3$  の緩衝材の 8 分割ブロックを使用し、厚さ 10cm のものを 6 段積み上げて試験孔に定置した。注水試験の前に、斜め注水ボーリング孔のパッカーを収縮した約  $2 \text{ L/min}$  が流れ続ける状態では水みちが生じること、パッカーを拡張することによって湧水量が約  $0.4 \text{ L/min}$  に低減すると、水みちが閉塞傾向となることが確認された。その後の定流量注水試験では水の流れる流路が狭いときに、抵抗を受けて水圧が上昇すること、流路が拡張する際に注水側の水圧が低下することなどが確認された。

図-9 には、水みちを着色した水を流して確認した時の状況を示す。試験孔と緩衝材の界面に水みちができ、注水ボーリング孔から注入した色水が水みちを通って、流出していく様子が観察できた。この時、室内試験と同様の測定方法で緩衝材流出量を計測した。水みちが太くなつて水圧が下

降した直後等は流出量が一時的に多くなったが、それ以外では、緩衝材上部に滞留している地下水に希釈されることや、ベントナイトが沈殿してしまうことなどの理由で、定量的な評価はできなかった。

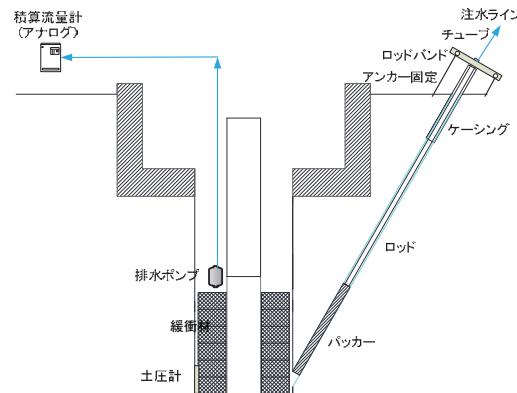


図-8 試験設備の概要

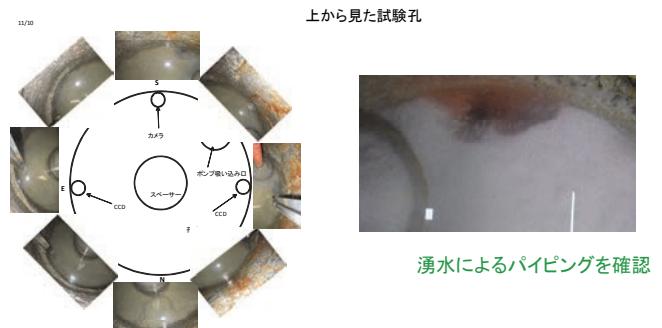


図-9 水みちの確認

今回の試験では、水圧変化、湧水量（排水量）は測ることができたが、緩衝材流出量、土圧（緩衝材膨潤圧）は測れておらず、また緩衝材上部を水みち観察のために拘束していない状態であった。今後、緩衝材上部に蓋を設置するなどして、より定量的な試験を行う。

- 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証技術開発 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

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

### 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

人工バリアなどの長期挙動を検討する場合、数値解析を用いる一方、オーバーパックの腐食速度や緩衝材の膨潤圧、浸潤速度などについては室内試験等による検討が進められている。これらの結果は数値解析の妥当性、信頼性を高め、長期挙動を評価する上で重要な役割を果たしている。

本事業では、人工バリア及び周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築に資するため、以下の項目について、評価・挙動把握を実施する。

- ・人工バリア及び周辺岩盤の挙動評価
- ・数値解析による長期挙動の把握
- ・数値解析結果（長期挙動）を検証するための試験データの取得

平成 27 年度は、本事業の初年度となるため、研究開発計画を策定した（表-1）。策定した計画を基に、以下の内容を実施した。

#### (1) 遠心模型試験

- (2) 数値解析（感度解析）
- (3) 要素試験（パラメータ取得）

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 27 年度の成果

#### (1) 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が良く、実物に近い力学的・水理的挙動を再現することができるといったメリットがある<sup>③</sup>。例えば、ダルシー則に従う浸潤挙動では、 $1/n$  に縮尺した小型模型に  $nG$  の遠心加速度を与えることで、距離が  $1/n$ 、浸潤の速度（水頭差）が  $n$  倍になるため、浸潤時間を  $1/n^2$  に短縮することが可能となる。そのため、遠心模型試験により、数百年規模の人工バリア及び周辺岩盤の浸潤挙動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となる。

今年度は人工バリア及び周辺岩盤の基礎的なデ

ータ取得を目的に、図-1 に示す簡易なモデルによる試験を実施し、約 40 日間の連続運転を行うことで、100 年程度の人工バリア及び周辺岩盤の挙動データを取得した。

表-1 本事業の研究開発計画

	H27	H28	H29
調査研究全体	・全体計画立案	・計画の更新	・次フェーズへの課題整理
数値解析	・感度解析（パラメータスタディ）	・H27 年度遠心模型試験の解析	・H28 年度遠心模型試験の解析 ・取りまとめ
要素試験	・解析に必要なパラメータ取得	・解析に必要なパラメータ取得	・解析に必要なパラメータ取得 ・取りまとめ
遠心模型試験	・遠心模型試験の実施	・遠心模型試験の実施	・遠心模型試験の実施 ・取りまとめ

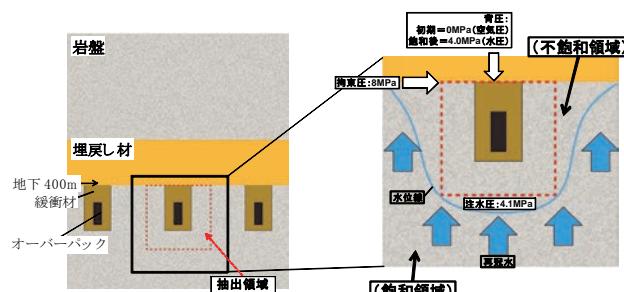


図-1 遠心模型試験のモデル領域

#### 1) 遠心模型

図-1 の破線内を模擬し、オーバーパック 1 体、処分孔 1 孔（処分坑道を含まない）の廃棄体周辺を抽出した 1/30 模型を作製した。遠心模型試験で使用する模型部材、寸法及び仕様を表-2 に示す。緩衝材及びオーバーパックは、HLW 第 2 次取りまとめを基に寸法、重量を設定した。オーバーパックには、ガラス固化体の発熱を模擬するためにヒータを内蔵し、縮尺を考慮してオーバーパックとガラス固化体を合わせた重量を設定した。

#### 2) 試験容器

遠心模型は、実際の地下の地圧、水圧相当の応力を負荷するため、図-2 に示す試験容器に封入した。試験容器は、ジュラルミン製で、周圧は水圧、軸圧はピストン構造によって負荷させる三軸タイプ、最大 10MPa の等方圧を負荷できる容器とした。

#### 3) 試験条件

遠心加速度 30G、8MPa の等方圧（深度 400m 相当）の拘束条件とした。オーバーパックの温度は、HLW 第 2 次取りまとめの処分孔堅置き方式・隙間

モデルの CASE.A (表-3) の経時変化を参考して設定した。試験容器と岩盤の境界温度は、平均的な地温勾配 ( $2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ )<sup>4)</sup> から  $33^{\circ}\text{C}$ 一定に設定した。間隙水圧の条件は、岩盤の密度を  $2.0\text{Mg/m}^3$ 、水の密度を  $1.0\text{Mg/m}^3$ とした場合の所定の深度における被り圧に対応するように、模型上端面を  $4.0\text{MPa}$  とした。試験では、オーバーパックの変位量およびオーバーパックにかかる土圧、緩衝材の土圧、緩衝材及び岩盤のひずみ、温度を計測するために、図-3 に示すように計測機器を取り付けた。

表-2 模型部材、寸法及び仕様

模型部材	模型寸法	仕様
緩衝材	直径 $\varnothing 74\text{mm}$ 高さ $137.7\text{mm}$	乾燥密度 $1.6\text{Mg/m}^3$ ペントナイト：ケイ砂 = 70wt% : 30wt% ※ペントナイトはクニゲルV1 ケイ砂は3号と5号の等量混合
オーバーパック	直径 $\varnothing 27.3\text{mm}$ 高さ $57.67\text{mm}$	密度 $6.35\text{Mg/m}^3$ ステンレス製鋼材 小型カートリッジヒーター × 2 個 土圧計 × 3 個
周辺岩盤	直径 $\varnothing 180\text{mm}$ 高さ $180\text{mm}$	三浦層群初声層の凝灰岩（初声凝灰岩） $q_u=16.8\text{MPa}$ (要素試験結果より)

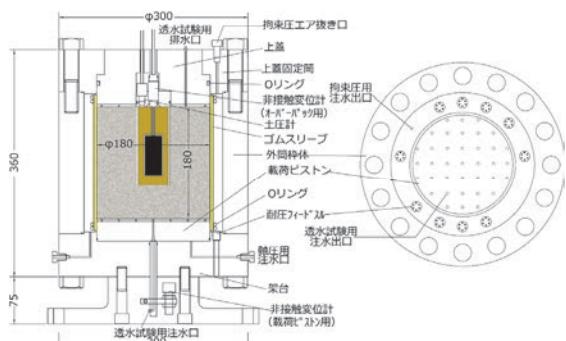


図-2 試験容器の概略図

表-3 処分孔縦置き方式・隙間モデル<sup>1)</sup>

ケース	隙間の位置		
	ガラス固化体- オーバーパック間	オーバーパック- 緩衝材間	緩衝材-岩盤間
CASE.A	空気	空気	空気
CASE.B	空気	粉末ペントナイト	粉末ペントナイト
CASE.C	空気	水	水

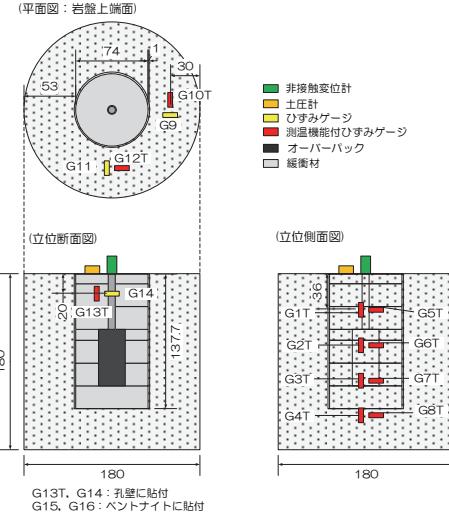


図-3 計測機器のレイアウト

## 4) 試験結果

試験によって得られた結果を以下に示す。

- オーバーパックは注水開始後急激に浮上した。これは、注水口が容器下にあるため、緩衝材下部から膨潤したためだと考えらえる。その後、緩衝材上部の膨潤によって沈下し、収束した。（図-4）
- 岩盤側面は、試験開始直後に間隙水の浸潤により引張ひずみが生じた。その後、岩盤と緩衝材の飽和による剛性低下の影響で圧縮方向に推移した。
- 試験後、緩衝材をサンプリングした結果、含水比は下方から上方に向かって低下し、乾燥密度は下方から上方に向かって増加する傾向を示した。

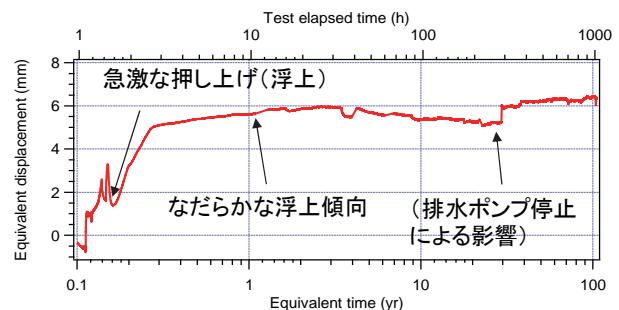


図-4 オーバーパックの変位

## (2) 数値解析（感度解析）

数値解析により長期挙動を評価する場合、解析パラメータを設定する必要がある。今年度は、人

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

工バリア及び周辺岩盤を解析する場合に、どの解析パラメータが重要となるのかを把握するために、熱-水-力学 (T-H-M) 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を実施した。感度解析に使用した解析コードは、(一財) 電力中央研究所で開発された T-H-M 連成解析コードである「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>5)</sup>」を使用した。

### 1) 解析モデル

感度解析では、既往研究との比較ができるように、LOSTUF で実績のある解析モデル形状、境界条件を採用した。図-5 に解析モデルの寸法と境界条件を示す。これは廃棄体周辺のみを抽出した軸対称モデル<sup>6)</sup>である。解析モデルでは埋戻し材と緩衝材および初期隙間を区別し、直径と高さが 5.4m の範囲をモデル化した。力学拘束は対称軸とモデル上面をローラー支持とし、上面と底面および側面境界の温度は、35°C (地表面温度 25°C、深度 500m、温度勾配 2°C/100m) で一定とした。水理境界としてモデルの下半分に相当する外側境界面を圧力 3MPa で一定とし、上面は間隙水が自由に抜ける浸出面境界に設定した。ガラス固化体の発熱温度は 95°C で一定とした。なお、人工バリア定置前の岩盤の初期応力として、外側に拘束圧 6MPa を設定した。

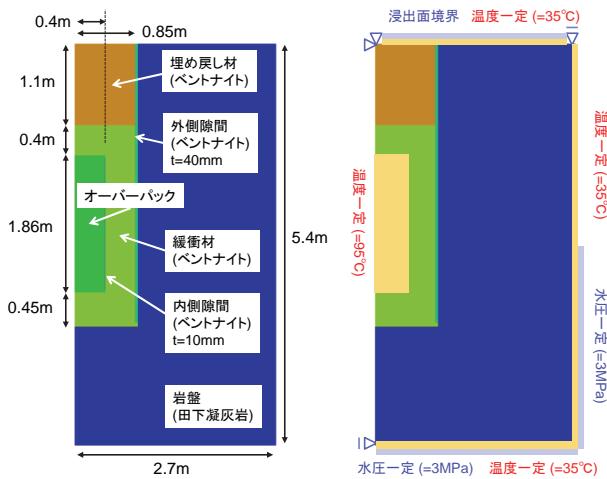


図-5 解析モデルの諸元と境界条件

### 2) 感度解析ケース

感度解析ケースを表-4 に示す。緩衝材は隙間がなく均質で飽和した状態を基本ケースとした。

また、ガラス固化体の発熱の影響を確認するため、熱を考慮しないケース HM-0～HM-6 を設定した。なお、解析に必要な各パラメータは HLW 第 2 次取りまとめを基本とした。THM-0～3 と HM-0～3 はそれぞれ加熱の有無以外に条件に相違がなく、加熱の影響を比較することができる。この他、処分孔と緩衝材の隙間を考慮したケースを設定し、境界の拘束圧を変えることでその影響を確認した。

表-4 解析ケースと内容

ケース	内容
THM-0 (基本ケース)	加熱あり、隙間なし・ペントナイト均一
THM-1	ペントナイトの固有透過度 1/2
THM-2	岩盤の固有透過度 1/10
THM-3	水分特性曲線 JNC2000 <sup>1)</sup>
THM-4	ペントナイトの固有透過度を 2 倍とする
THM-5	岩盤の固有透過度を 10 倍とする
THM-6	膨潤の進行に関するパラメータを 1.0～3.0
THM-7	簡易な膨潤モデルの採用
THM-8	ペントナイトのポアソン比を飽和時のものとする
THM-9	ペントナイトのヤング率を乾燥時のものとする
THM-10	岩盤のクリープを考慮
HM-0 (基本ケース)	加熱なし、隙間なし・ペントナイト均一
HM-1	ペントナイトの固有透過度 1/2
HM-2	岩盤の固有透過度 1/10
HM-3	水分特性曲線 JNC2000 <sup>1)</sup>
HM-4	ペントナイトの吸水挙動を水分拡散とする
HM-5	処分孔の隙間を考慮、拘束圧 6 MPa、水圧 3 MPa
HM-6	処分孔の隙間を考慮、拘束圧 10 MPa、水圧 5 MPa

### 3) 解析結果

各解析ケースから得られた結果を以下に示す。

- ・緩衝材の飽和時期は、ガラス固化体の熱を考慮した場合、一様に早くなることを確認した。これは、緩衝材内の間隙水の粘性が低下することによる影響と考えられる。
- ・緩衝材の剛性が膨潤挙動に与える影響は大きく、浸潤過程で変化する緩衝材の剛性を考慮する必要がある。
- ・緩衝材の膨潤は、周辺岩盤の変形に大きな影響を与えるため、解析において膨潤挙動を考慮することは重要である。
- ・処分孔およびオーバーパックと緩衝材間に隙間をモデル化することで、浸潤過程における緩衝材の密度分布を考慮することが可能である。
- ・材料パラメータのうち人工バリア及び周辺岩盤の最も影響を与えるパラメータは、剛性和ポアソン比であった。

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

### (3)要素試験

本事業では、遠心模型試験に使用した周辺岩盤模型及び人工バリア（緩衝材）の要素特性を取得した。表-5 に各要素特性を取得するために実施した室内試験の一覧表を示す。

表-5 要素試験の一覧表

特性値	試験工種	要素試験方法・規格・基準	対象材料
物理特性	土粒子の密度試験	土粒子の密度試験方法 JIS A1202:2009	ペントナイト 緩衝材 周辺岩盤
	含水比試験	土の含水比試験方法 JIS A1203:2009	ペントナイト
		岩石の含水比試験方法 JGS 2134-2009	周辺岩盤
粒度試験	土の粒度試験方法 JIS A1204:2009	周辺岩盤	
		土の液性限界・塑性限界試験 JIS A1205:2009	ペントナイト
メチレンブルー吸着試験	メチレンブルー吸着量の測定方法 JBAS-107-91	ペントナイト	
	透心沈殿法(Schofield 法)	---	ペントナイト
湿潤密度試験	土の湿潤密度試験方法 JIS A 1225:2009	緩衝材（乾燥密度） 1.6Mg/m <sup>3</sup>	
		緩衝材（乾燥密度） 1.7Mg/m <sup>3</sup>	
		緩衝材（乾燥密度） 1.5Mg/m <sup>3</sup>	
		岩石の密度試験方法 JGS 2132-2009	周辺岩盤
超音波伝播速度測定	パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法 JGS2110-2009	周辺岩盤	
膨潤特性	膨潤圧測定	岩石の吸水膨脹試験方法 JGS-2121-2009	緩衝材
熱特性	熱伝導率測定	ASTM D5334-14	緩衝材 周辺岩盤
保水特性	保水特性試験	サイクロメーター法 JGS 0151-2009	緩衝材 周辺岩盤(排水過程) 周辺岩盤(吸水過程)
透水特性	変水位透水試験	変水位透水試験 JIS A1218:2009 を参考	緩衝材
		三輪透水試験 JIS A1218:2009 を参考	周辺岩盤
圧密特性	圧密試験	土の段階載荷による圧密試験方法 JIS A1217:2009 を参考	周辺岩盤
力学特性	一軸圧縮試験	土の一軸圧縮試験方法 JIS A1216:2009	緩衝材
		岩石の一軸圧縮試験方法 JGS 2521-2009	周辺岩盤
	一軸引張試験	岩石の一軸引張り試験方法 JGS 2552-2015	周辺岩盤
	三輪 CU 試験	土の圧密非排水(CU)三輪圧縮試験方法 JGS 0522-2009 を参考	緩衝材
	三輪 CD 試験	岩石の CD 三輪圧縮試験 JGS 2534-2009	周辺岩盤

室内試験によって得られた結果を以下に示す。

- ・物理特性：緩衝材については、既往研究成果と同等の結果であることを確認した。
- ・緩衝材の膨潤特性：遠心模型試験で得られた緩衝材の土圧（膨潤圧）とほぼ同等であった。
- ・熱特性：緩衝材は供試体作製時の乾燥密度に係わらず、飽和度の上昇とともに増加する傾向を確認した。
- ・力学特性：緩衝材の一軸圧縮強さ及び変形係数は同じ乾燥密度条件においても、供試体作製時の初期含水比が高いほど低下する傾向を確認した。

- 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
- 3) Taylor, R. N.: Geotechnical Centrifuge Technology, London, Blackie Academic & Professional, 1995.
- 4) 田中明子、山野誠、矢野雄策、筮田政克、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
- 5) 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
- 6) 緒方信英、小崎明郎、植田浩義、朝野英一、高尾肇“高レベル放射性廃棄物処分の事業化技術—その4 人工バリアの設計と製作—”，原子力バックエンド研究、Vol.5、No.2、pp. 103-121、1999

## 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するモニタリングに関する研究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調査を実施している。モニタリングについては、サイト調査段階から閉鎖後段階までを見据えた各段階を対象に、その意義や目的について整理<sup>①)</sup>した上で、適用可能性のある測定方法や技術を調査し、地層処分モニタリング技術メニュー\*（以下、技術メニュー）として整備している。一方、記録保存については、地層処分における記録の長期保存に係る要件、課題ならびに方策等の整理<sup>②)</sup>や最新動向の調査を実施している。

平成 27 年度は、平成 25 年度に立案した 5 年間の研究計画の 3 年目として、モニタリングの枠組みと技術的側面に関する検討と記録保存に関する調査を実施した<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。

\*地層処分モニタリング技術メニュー：地層処分の各事業段階に適用可能性のある測定方法や技術をデータベース化したものであり、階層化したメニュー構成によって、例えばモニタリング計画の立案に際して、実施目的、時期、場所等に応じて、何をどのように測定することにより、どのような情報が入手可能かを示す技術選択肢を提供する。

### ◇平成 27 年度の成果

#### (1) 調査研究の着目点

モニタリングに係る調査研究は、資源エネルギー庁調査等委託事業として平成 12 年度に着手している。以降、わが国におけるモニタリング方策や計画等の策定に資する情報や基盤技術等の整備に向けて、モニタリングの位置付けや目的等に係る検討とともに、技術の適用性に関する体系的な情報整備を進めてきた。併せて、記録保存についても、本事業の調査研究の対象として、国際的な議論などの最新動向の調査を実

施している。

このような調査研究の取組は、委託事業の節目とも整合させつつ段階的に進めており、第 1 フェーズ（平成 12 年度～平成 18 年度）及び第 2 フェーズ（平成 19 年度～平成 24 年度）の調査研究を経て、それらの地層処分事業における位置付けに関する国内外の検討動向等の整理を行い、モニタリングについては次の 4 つの反映先の観点からその意義や目的等を整理した。

- 1) ベースライン構築（サイト調査と関連）
- 2) 環境データベース構築（サイト調査と関連）
- 3) 規制等遵守（放射線学的、非放射線学的、防護措置の遵守）
- 4) 性能確認（安全評価結果に影響を及ぼす FEPs (Features, Events and Processes) に関連するパラメータの確認）

また、技術的側面に関する検討（技術開発）では、技術メニューの整備を進めるとともに、モニタリングに関連する要素技術のうち、共通的かつ中核技術であるデータ伝送技術に着目し、特にケーブルを用いないことから処分場の安全機能への擾乱の抑制が期待できる無線通信技術について、要素試験から地下環境での実証試験へと段階的に取り組んできた。

平成 25 年度からの 5 カ年計画では、上記のこれまでの調査研究成果を踏まえ、主に技術的観点から以下の取組を進めている<sup>③)</sup>。

- 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）取組となる上記の「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。併せて、技術メニューの整備・拡充を進める。
- 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、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。

これらの取組のうち、状態確認技術の検討（上記②）に係る取組を中心に、平成 27 年度の成果を以下に整理する。

## (2) 無線通信技術（無線によるデータ伝送技術）

無線通信技術については、上述した第 2 フェーズまでの開発経緯の中で、日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センターの協力を得て、送信機（地下）から受信機（地上）までの無線通信に係る地下施設での実証試験を行い、その技術的な成立性を確認している（図-1）。

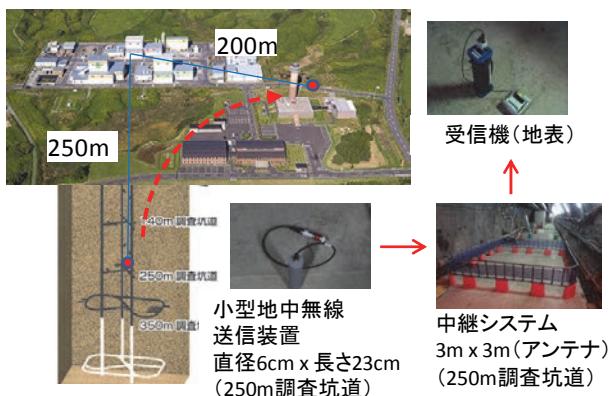


図-1 幌延 URL における地中無線中継試験イメージ図  
(地表への中継)

一方、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ためには、内部電源による運用上の制約への対処といった課題が残されている。現時点では地中無線や中継装置等の運用には内部電源が不可欠であるが、電源消費と通信距離（出力に依存）には相反する関係があり、電源消費の抑制に向けた対策の 1 つとして、中継装置を多段配置して装置単体での通信距離を短くすることなどが望まれる。また、中継装置の多段化（多重化）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（図-2）。

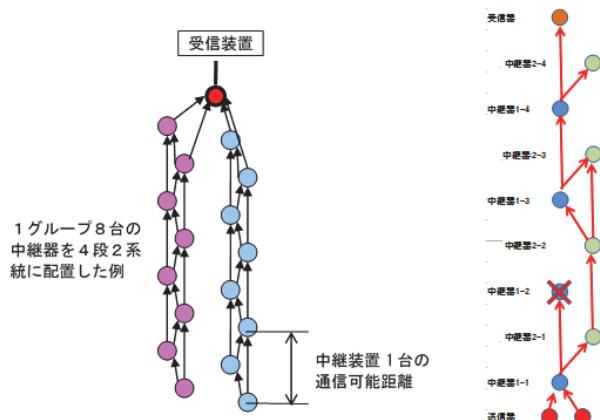


図-2 地中無線装置による多段、多系統でのデータ中継のイメージ（右図は中継器故障時の迂回イメージ）

### ① 多段多系統化に係る検討

上記の課題認識を踏まえ、本年度は前年度に続き中継の多段多系統化に係る検討を進め、多段多系統化による通信経路の冗長性に関する評価（システム全体の信頼性に関する理論値を評価することで検証）と最適化（適切な中継段数及び系統列数）に関する検討を行い、更に中継装置を構成する回路の製作及びプログラムの開発を行った。プログラム開発については、省電力動作シーケンス、時計同期プログラムならびに無線ネットワークを構成するマルチホップシーケンス等を組み込んだうえで、省電力化に向けた回路及び基板の製作と動作確認を実施した（図-3）。省電力化により、中継装置制御回路の待機中消費電流が従来の 123mA から 4.0mA になるなどの効果を確認した。



図-3 中継の多段化に関する機能確認試験の様子（屋外での通信試験）

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

### ②地下調査施設における地中無線通信試験

上記の要素技術の開発に加え、日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センター及び瑞浪超深地層研究所において、これまでに開発した小型地中無線送信装置を平成 26 年度に設置し、地下施設での実運用に向けた実証的な取組を進めている。

幌延深地層研究センターでは、人工バリア性能確認試験の実施に際して、緩衝材及び坑道埋め戻し材中に小型地中無線送信装置を設置し（図-4）、土圧や間隙水圧のモニタリングを開始している（図-5）。緩衝材ブロック及び埋戻し材ブロック内に設置した各小型送信器から受信した無線伝送データの分析により、所定の頻度（2 回/日）による計測や定時におけるデータ送受信を確認し、これらが正常に動作していることを確認している。



図-4 人工バリア性能確認試験における模擬処分孔中の緩衝材ブロックへの小型地中無線送信装置の設置状況（左下：土圧計、左上及び右上：間隙水圧計）

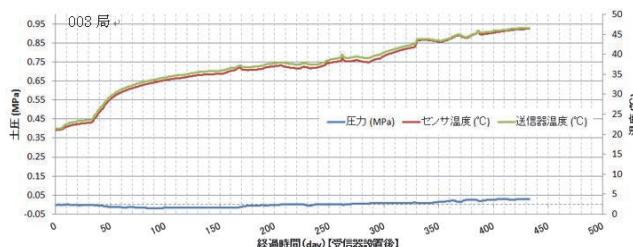


図-5 無線送信された緩衝材の全圧及び温度データ（圧力については計測期間中での大きな変化は確認出来なかったが、温度については中心部の模擬オーバーパックの加熱に伴う温度上昇を捉えている）

瑞浪超深地層研究所では、地下 500m の研究アクセス北坑道で実施される再冠水試験において、地中無線を利用してモニタリングを実施するため（水圧センサ 2 台での計測）、平成 26 年度に坑内に装置を設置し（図-6）、計測を開始している。その後、送受信の動作を含め、システムとして機能していることを確認している。

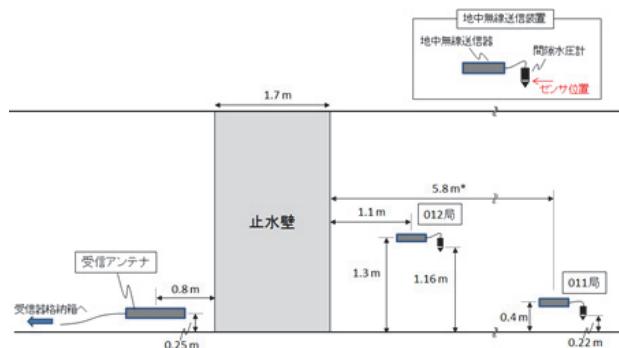


図-6 再冠水試験における地中無線送受信装置の設置場所等に関する模式図（縦断図）

### (3)電力供給技術（非接触による電力供給に関する検討）

既に述べた開発経緯の中で、特に中核的な要素技術として開発を進めてきた無線通信技術の適用性等の向上とともに、その長期的な運用における内部電源の制約への対処の重要性が認識されてきた。これを踏まえ、平成 25 年度からの 5 カ年計画では非接触による電力供給に関する検討を進めている。平成 25 年度の調査及び検討を経て、非接触による電力供給方法として電磁波による無線給電技術（磁界共振結合）を有力な候補の 1 つとして選定し、平成 26 年度より、同技術の地層処分施設への適用性に関する検討を進めてきた。平成 26 年度の検討では、緩衝材中に設置した地中無線モニタリング装置への電力供給を想定し、磁界共振結合による電力供給方式について（図-7）、送受信コイルの設計・製作及び試行による伝送効率や最適な周波数の確認などを通じて、電力供給が基本的に可能であることを確認した。

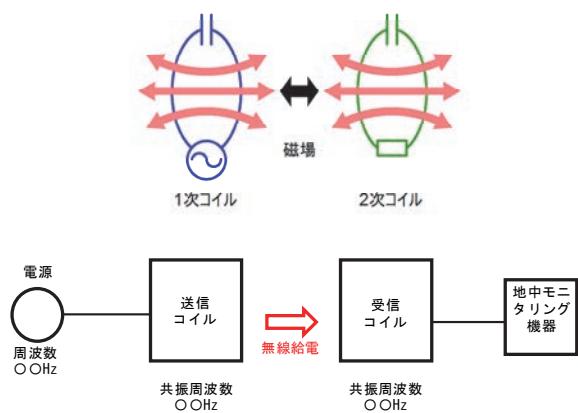


図-7 磁界共振結合による電力供給方式のイメージ

本年度は、前年度の試行結果を踏まえ、更なる適用性の確認として、プラグを跨いだ使用環境を想定するとともに（図-8）、無線給電システムにおけるコイル径とコイル間距離に関するスケール則等の検討を行った。

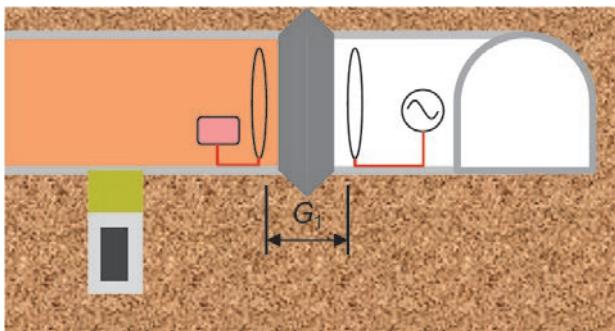


図-8 磁界共振結合によるプラグを跨いだ電力供給のイメージ

これらの検討から、プラグを跨いだ使用環境への適用性を確認するとともに、実際に製作したコイルを用いた要素試験による評価パラメータの取得及び給電効率の実験的評価手法の検討を通して、給電効率の理論値に関する計算手法の信頼性を向上させた。また、スケール則の検討結果として、送受電コイルが同一径かつ同軸上で正対している場合における給電効率について、コイル間距離とコイル直径の比率で規格化して整理した結果、コイルの大きさが異なりコイルパラメータが異なる場合やコイルの種類（例えば円形コイルとソレノイドコイルなど）が異なる場合でも、ほぼ同じ線上に乗る傾向を得た（図-9）。これにより、比率を揃えた小規模

のコイルによる給電試験によって、実規模スケールのコイルの給電効率を評価出来る見通しを得た。

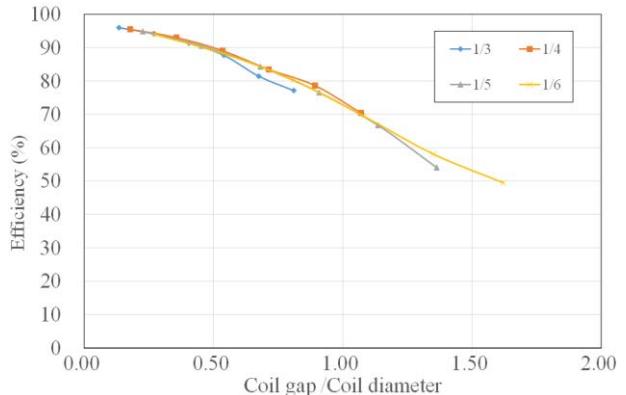


図-9 スケール則に関する検討結果の例（コイル間距離/コイル直径と伝送効率の関係）

- 1) 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、地層処分にかかるモニタリングの研究－位置付け及び技術的可能性－、RWMC-TRJ- 04003、2004
- 2) 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、地層処分にかかる記録保存の研究－位置付け・方策・技術的可能性－、RWMC-TRJ 08001、2009
- 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 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－、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 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

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

### 1-6 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

#### ◇事業の概要

本事業は、地層処分システムに関わる巨大地震、津波等の対策技術を開発し、大規模な自然災害に対する処分システムの安全性確保に資することを目的とする。平成 24 年度においては、巨大地震・津波に代表される大規模な自然災害を原因とするリスク事象及びその影響を想定し、リスク低減に向けた 7 つの技術開発課題を抽出した<sup>1)</sup>。抽出した技術開発課題から優先度が高いと考えた

「施設計画技術」、「人工バリアの限界性能等の調査・試験」に対して工学的視点で検討を行い、対策技術に関わる技術調査や適用性確認試験等を平成 25 年度～平成 29 年度に実施するものである。

平成 25 年度、平成 26 年度における「施設計画技術」の検討では、災害による火災に着目し、簡易モデルによる火災解析、避難シミュレーションを実施し、評価手法の適用性を検討した。「人工バリアの限界性能等の調査・試験」では、地上施設及び地下施設で火災が発生した場合の人工バリアへの影響（温度、塑性ひずみなど）について解析を行った。解析において必要となる高温時の緩衝材の熱特性データ等について実験により取得した。一方、津波に伴う海水によるキャニスター（ステンレス）の腐食については、既存文献の調査を実施し<sup>2)</sup>、海水に浸漬した場合の応力腐食割れ（SCC）の可能性について検討した。

平成 27 年度は、過年度までの成果を踏まえ、安全対策に資するとりまとめを行うために自然災害に対する安全対策（技術要件）の調査・検討、火災事象に対する安全確保対策の検討及び自然災害等における人工バリアへの影響評価に関する調査・検討を実施した<sup>3)</sup>。なお、解析における坑道の寸法については、2010 レポート<sup>4)</sup>に基づき設定した。

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 27 年度の成果

##### (1) 自然災害に対する安全対策（技術要件）の調査・検討

##### 1) 操業安全確保の考え方

地層処分施設の操業期間中の安全確保の検討に際し、既存の類似する施設の保安に係る法令に基づいて検討した。法令については、鉱山保安法、労働安全衛生法、道路法、原子力に係る原子炉等規制法、管理規則などを対象とした。

地層処分施設のうち地下施設においては、大深度地下構造物という点で最も類似性が高いと考えられる鉱山に係る法令とそれに基づく安全対策を基本に据え、これに道路法や原子力関連の法令に基づく規制事項や要求事項を反映させることとした。

##### 2) 放射性物質取扱い施設の安全確保の考え方

技術要件の整理を受け、第二種廃棄物埋設施設や地層処分施設と同様にガラス固化体を扱う施設である貯蔵施設の関係法令とともに最新の情報として福島第一原子力発電所の事故以降に施行された再処理施設、第二種廃棄物埋設施設の新規制基準における放射線安全に関する考え方について整理した。

##### 3) 多重（深層）防護の考え方

IAEA の多重防護の考え方は、表-1 に示すように安全に関連するすべての活動に独立した多層の措置が準備されていることを確保することであり、万一故障や失敗が生じても、それは適切な措置により検知されて修正されるか是正されるというものである。

表-1 IAEA の防護レベルにおける目的、手段<sup>5)</sup>

防護レベル	目的	目的達成に不可欠な手段
レベル 1	異常運転や故障の防止	保守的設計及び建設・運転における高い品質
レベル 2	異常運転の制御及び故障の検知	制御、制限及び防護系、並びにサーベランス特性
レベル 3	設計基準内への事故の制御	工学的安全施設及び事故時対応
レベル 4	事故の進展防止及びシビアアクシデントの影響緩和を含む過酷なプラント状態の制御	保管的手段及び格納容器の防護を含めたアクシデントマネジメント
レベル 5	放射性物質の大規模な放出による放射線影響の緩和	サイト外の緊急時対応

表-1 に示した IAEA の多重防護の考え方に基づいて、地層処分施設における火災に対する安全対策について放射線安全、一般労働安全の観点から防護レベル、目的、手段と対策事例について検討を行った。地層処分施設における多重

防護の考え方に基づいた放射線安全に対する防護レベル、目的、手段の考え方(案)を表-2 に示す。

表-2 多重防護に基づく放射線安全の考え方(案)

防護レベル	目的(状態)	目的達成に不可欠な手段	対策例(火災)
レベル1	異常事象を発生させない(通常操業)	脅威を想定し、発生を未然に防止する仕組み	作業前点検教育・訓練多量化
レベル2	異常事象の検知および拡大防止(異常発生)	異常の検知、機能維持の防護策	通報設備消火設備風門
レベル3	放射能を漏らさない(異常拡大)	容器内の閉じ込め	換気制御防火扉
レベル4	放射能を施設外へ出さない(事故の防止)	施設内の閉じ込め	除去フィルタ隔離壁避難経路
レベル5	放射線影響の緩和(坑外漏えい)	サイト外の緊急時対応	周辺住民の避難

## (2)火災事象に対する安全確保対策の検討

表-2 の多重防護の考え方を踏まえ、火災時の熱や煙の拡散を防ぎ、作業員への安全を確保する対策(風門)について、3次元流体解析(VENTMINE)を実施し、効果を検討した。また、自然災害によって換気設備が停止した場合の通気の確保策の1つとして、自然通気の可能な条件について解析を行った。

### 1)安全対策(風門)の検討

鉱山では、通気をコントロールするために設けられた仕切り(風門)が火災の影響を低減する対策になっている例がある。そこで、風速の有無、風門の設置によって火災の拡散にどのような影響を与えるのかについて解析した。

#### ①解析条件と解析ケース

図-2 に示すように延長 1,000m の坑道中央部において火災が発生した場合に、熱やガスの拡散状況について解析した。解析ケースは、換気設備の

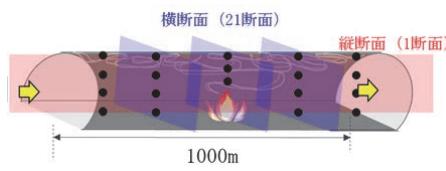


図-2 解析モデル

表-3 解析ケース

	換気設備	安全対策	考え方
ケース 1	正常運転	無	坑内が通常の通気状態である場合を想定し、労働安全衛生規則で定められる最小値 0.3m/s を想定
ケース 2	停止	無	坑内が停電により無風状態となった場合を想定ただし、風速ゼロでは解析ができないため、0.01m/s に設定
ケース 3	正常運転	有	風門の安全対策を実施した効果を確認するため、ケース 2 と同じ風速を想定

稼働の有無、安全対策の有無を組み合わせた 3 ケースとした(表-3)。

安全対策として、火災発生地点の前後 30m に坑道上部の半分の断面を閉じる風門を設置し(図-3)、その影響による熱やガスの拡散状況について火災発生から 50 秒後、150 秒後、250 秒後、380 秒後、450 秒後、530 秒後、660 秒後の解析結果を比較・検討した。

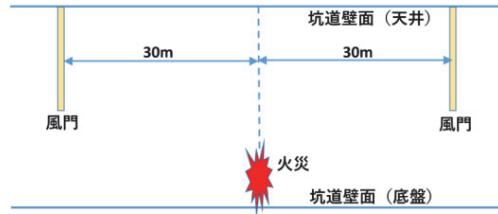


図-3 安全対策(風門)の設定イメージ

#### ②解析結果

火災発生から 660 秒後の解析結果を 1 例として図-4 に示す。ケース 1(風速 0.3m/s)とケース 2(換気設備停止時)を比較すると、風上側は風速の影響に関係なく一酸化炭素が拡散し、風下側は風によって坑道の端(500m 先)まで達している。

ケース 3 では、風門によって風上側への拡散が抑えられる結果を示しており、風上側にいる作業員の避難を支援する有効な対策であることを確認した。風下側は、風上側に流れにくいため、坑道の上部・下部に關係なくケース 1 より坑道全体に拡散する。

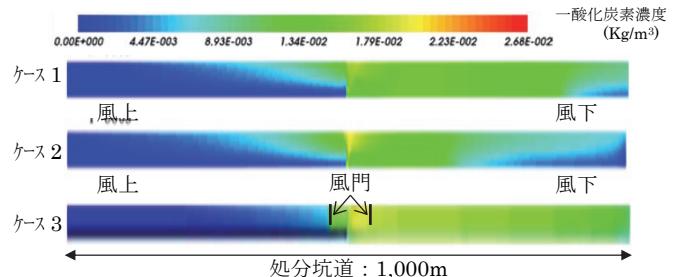


図-4 処分坑道における火災解析(660秒後)

### 2)自然通気の条件検討

坑道における通気には、図-5 に示すように自然通気と機械換気があり、機械換気は停電時には換気設備が停止し、地下坑道内へ空気が供給できなくなる。一方、自然通気は、坑口の高さ、坑道深さ、坑道内温度の差による空気の密度差により空気の流れが生じるため、安全対策の 1 つとして自然通気の可能性について検討した。

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

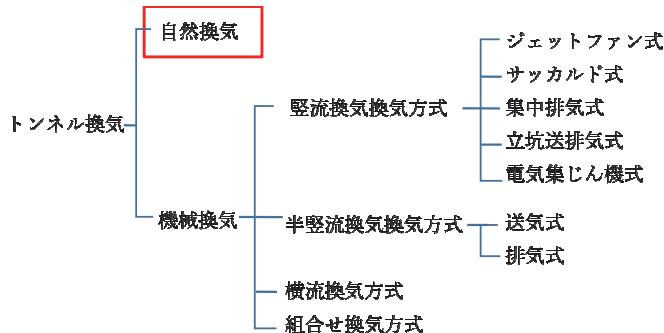


図-5 坑道における換気方式の種類<sup>6)</sup>

### ① 解析条件と解析ケース

自然通気の発生する坑道条件を確認するため、図-6に示す立坑と横坑のみで構成される地下施設を模擬した簡易モデルで解析を行った。

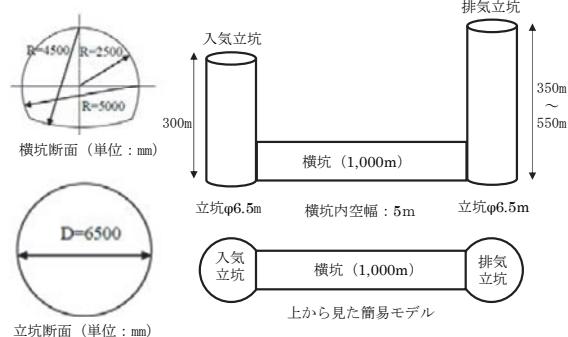


図-6 解析モデルの形状定義

簡易モデルで解析を実施するにあたっては、自然通気が発生する空気の密度差に着目し、坑道条件として⑦2つの立坑坑口の高低差（圧力差）、①地上との温度差（深度等）による3ケースの解析を行った（図-7）。

- ⑦ 坑口高低差のみ（高低差50m、深さ300m）  
立坑に高低差をつける
- ①-1 横坑を深く（高低差50m、深さ500m）  
横坑を⑦より200m深く設定
- ①-2 立坑底部の温度差  
⑦の排気坑の底部を+6°C（30°C）に設定

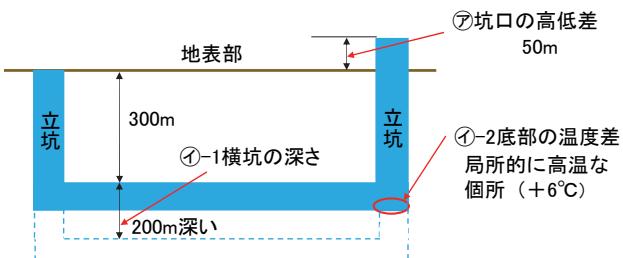


図-7 自然通気に関する検討ケース概要

### ② 解析結果

圧力差、温度差により生じる自然通気（風速）の解析結果を表-4に示す。

各ケースでは、労働安全衛生規則の風速（0.3m/s）を超える結果となった。また、横坑を深くしたり、地温が高い箇所に排気立坑設置することにより風速を上げる効果があることを確認した。今回の解析結果より、立坑坑口に高低差を設けること等により自然通気が確保できることを確認した。一方、自然通気は、流体の密度差によって生じるものであり、夏場の地表面の温度が高い場合には、密度差が小さくなることから自然通気による風量も小さくなる。

表-4 各ケースの解析結果

ケース	⑦	①-1	①-2
排気立坑(中間点) の風速	1.67m/s	2.94m/s	2.11m/s

### (3) 自然災害等における人工バリアへの影響評価に関する調査・検討

#### 1) 火災解析において重要な項目の検討

過年度の成果から、ガラス固化体をオーバーパックに封入する前に火災の影響を受けたケースが、最もガラス固化体の温度上昇が大きいことを確認している。そこで、火災に対してガラス固化体への熱影響やキャニスターへの応力影響を与える項目について検討した。

#### ① 燃焼解析において重要な項目の検討

火災による温度の上昇は、温度差のある物体間で熱が移動することを計算することにより把握できる。熱の伝わり方は、伝導・対流・ふく射（放射）の3つに分けられる。そこで、伝導・対流・ふく射によるガラス固化体への入熱量に対して火炎との位置関係や風速がどのように影響を及ぼしているか解析を行った（図-8）。

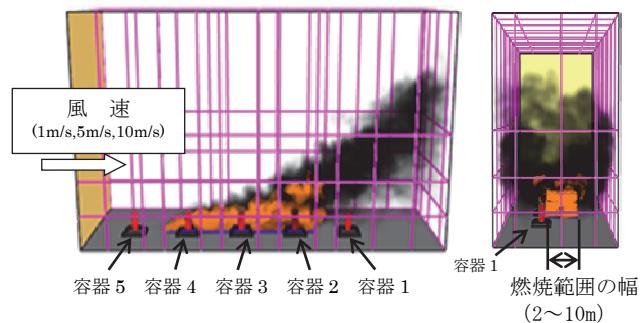


図-8 風速10m/s、燃焼範囲の幅4mにおける火災

地上施設内の中央部にディーゼル燃料の溜まり場を設定し、その横にガラス固化体あるいはオーバーパックを想定した 5 個の容器を並べ、位置関係による入熱量の違いを比較した。換気による風は、左から右方向へ流れる設定とし、風速と燃料の溜まり場の幅の値を解析パラメータとすることによって、各容器に対する入熱量にどのような差異が生じるのか確認した。

## ②応力解析における重要項目の検討

応力解析は、燃焼解析で得られた入熱分布をオーバーパックおよびキャニスタの表面に設定して解析を行った。

キャニスタ内には、ガラス固化体の他に空気やガラス固化体に含まれる放射性核種の  $\alpha$  崩壊によって発生する He ガスが内包されている。火災が発生すると内部のガス（気体）は膨張し、キャニスタ内の圧力が上昇する。したがって、火災によってキャニスタに生じる応力として、He ガスを含めた内部のガスの圧力がキャニスタへ影響を与える重要項目とすべきか解析して検討することとした（図-9）。

図-9 キャニスタと気体内包部

## 2) 解析による結果

### ①燃焼解析結果

風速 10m/s の場合は、容器 3 の入熱量より下流側に設置した容器 2 の入熱量の方が高い。燃焼範囲の幅の影響は、図-10 に示したように、燃焼の幅を 6m に広げるまでは入熱量が上昇する傾向がみられるが、6m を超えると入熱量は下がる結果となった。火炎の勢いが強く、熱量が天井へ上昇したためと考えられる。

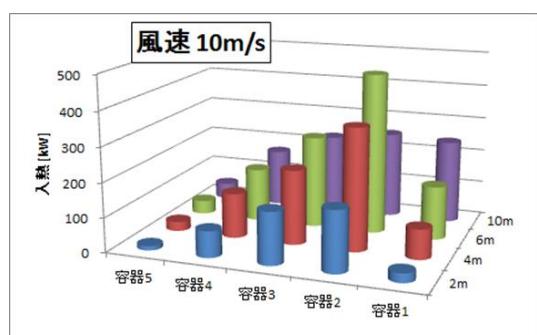


図-10 風速、燃焼量と入熱量の関係

### ②応力解析結果

図-11 に示すように内圧を考慮・考慮せずにによる塑性ひずみは、いずれも 8.6% 程度と差が無かったことから、ガスの熱膨張（内圧）によるキャニスタへの影響は小さく、応力解析の重要な項目として抽出する必要はないと考える。また、ガラス固化体とキャニスタをモデル化するにあたっては、キャニスタとガラス固化体を一体としてモデル構築した場合、個々の独立したモデルと比較すると塑性ひずみ（応力）が高くなる傾向があるため、一体化したモデルで解析を行う場合はこの点に留意する必要がある。

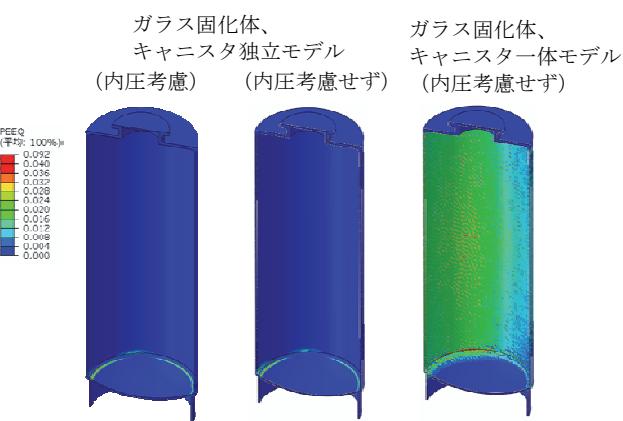


図-11 火災発生から 130 分後の応力解析結果の比較

- 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、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 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 処分システム工学確証技術開発（第 4 分冊）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、2014
- 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 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（第 4 分冊）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、2016
- 4) 原子力発電環境整備機構 (NUMO)、地層処分事業の安全確保（2010 年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－、2011
- 5) IAEA INGAS-10, Defence in Depth in Nuclear Safety, Vienna, 1996
- 6) 建設業労働災害防止協会、新版ずい道等建設工事における換気技術指針『換気技術の設計及び粉じん等の測定』、2012

## 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ついては、最終処分法が定める3段階の調査ステップの最初の段階である文献調査の実施に至っていない状況や東北地方太平洋沖地震以降の地層処分事業を取り巻く社会環境の変化も見られる状況を踏まえ、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）において最終処分政策の再構築に向けた審議が行われた。同ワーキンググループの議論を踏まえ、平成26年4月に策定（閣議決定）されたエネルギー基本計画では、高レベル放射性廃棄物の問題の解決に向けた取組の抜本強化として以下の方針が示された。

- 地層処分を前提に取組を進めつつ、可逆性・回収可能性を担保し、今後より良い処分方法が実用化された場合に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにする。
- 処分場を開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、処分場閉鎖までの間の高レベル放射性廃棄物の管理の在り方を具体化する。

これらの検討や方針を踏まえ、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には、可逆性・回収可能性に関連する取組の方針も示されている（次節2-2に詳述）。

諸外国では、わが国に先行して可逆性や回収可能性を担保したプロセスの検討、或いは導入がされつつある。わが国においても、最終処分事業における可逆性・回収可能性の意義や確保のあり方等について整理するとともに、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>、人工バリア材料や処分場の操業や回収に関する技術や装置など、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可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理
- 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
- ③地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発－回収可能性の検討

上記のそれぞれについて、次節以降に平成27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 可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理

### ◇事業の概要

わが国における高レベル放射性廃棄物の地層処分については、平成12年に特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（以下、「最終処分法」）が制定され、それまでの研究開発の段階から事業実施の段階へと移行している。同法に基づき処分事業の実施主体として設立された原子力発電環境整備機構（NUMO）は、最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公募を平成14年に開始してサイト選定活動に着手したものの、最終処分法が定める3段階の調査ステップの最初の段階である文献調査の実施に至っていない。そのような中、平成23年3月に発生した東北地方太平洋沖地震の結果として、地層処分の技術的信頼性に対する国民の不安や懸念が高まるなど、地層処分事業を取り巻く社会環境の変化も見られる。

このような状況を踏まえ、国の審議会（総合資源エネルギー調査会の下に設置された放射性廃棄物ワーキンググループ、以下「廃棄物WG」）において最終処分政策の再構築に向けた審議が行われた。廃棄物WGの中間とりまとめ（平成26年5月）では、“可逆性・回収可能性が適切に担保されるのであれば、現世代として地層処分に向けた取組を進めることは、最も適切な対処方策”、

“数世代にも及ぶ長期的な事業であることから、可逆性・回収可能性を担保し、将来世代も含めて最終処分に関する意思決定を見直せる仕組みとすることが不可欠”との見解が示された。こうした議論も踏まえて、平成27年5月に閣議決定（改定）された特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（以下、「最終処分基本方針」）では、“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”が示された。

以上の背景を踏まえ、本事業では可逆性・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行った。

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27年度の成果<sup>1)</sup>

前述のように、わが国での地層処分事業の段階的な進め方において、安全性の確保を前提とした処分施設の閉鎖段階までの回収可能性の維持及び政策や事業に関する可逆性の担保が位置付けられたところであるが、わが国におけ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検討が必要と考えられる事項（論点）について整理しておくことは重要である。

そのため本事業では、技術及び社会科学の双方に配慮した有識者で構成する「可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会」（以下、「検討会」）を設置し、これらの事項の整理に向けた検討を進めた。検討では、諸外国における関連動向などを参考にしつつ、将来の代替処分オプション等の選択可能性の評価、政策や事業の安定性、研究開発の着実な実施、安全性の確保など、多面的な観点から議論を行い、最終処分政策の推進に資することを目的としている。

以下に平成27年度の成果を、1)検討会における議論の前提と視点、2)議論の進め方、3)平成27年度の議論の進展、の順に整理する。

#### (1) 検討会における議論の前提と視点

最終処分基本方針の改定に至る廃棄物WGでの議論は、可逆性・回収可能性に関する国際的な共通理解として得られた定義を参照しつつ進められてきた（表-1）。本検討会でも同様に、可逆性・回収可能性の定義について、経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）が示したものを持襲した。

表-1 可逆性および回収可能性の定義<sup>2)</sup>

<b>可逆性 (Reversibility)</b> : 原則として、処分システムを実現していく間に行われる決定を元に戻す、或いは検討し直す能力を意味する。後戻り (Reversal) とは、決定を覆し、以前の状態に戻す行為である。
<b>回収可能性 (Retrievability)</b> : 原則として、処分場に定位された廃棄物或いは廃棄物パッケージ全体を取り出す能力を意味する。回収 (Retrieval) とは、廃棄物を取り出す行為である。回収可能性があるということは、回収が必要となった場合に回収ができるようにするための対策を講じることを意味している。

本検討会における議論では、廃棄物WGの議論やそれを踏まえた最終処分基本方針の規定事

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

項を前提として検討を進めた。具体的には、表-2に示す議論の視点や範囲を共有したうえで、諸外国の取組を含む国際的な議論やわが国の制度や取組に留意しつつ議論を進めた。

表-2 議論の視点と範囲

○本検討会が対象とする『施設閉鎖までの可逆性・回収可能性の維持』は、最終処分法の枠内での取組として、将来世代にわたる段階的な社会的合意形成に係る活動を担保するものであり、可逆性と回収可能性は連動して考えるべきとする廃棄物WGの議論を念頭に置き、可逆性を制度論、回収可能性を制度論から導かれる技術的要求等、といった視点で議論を展開する。その際、以下に留意する。 <ul style="list-style-type: none"><li>・可逆性については、最終処分基本方針によって明文化されたものの、将来、実際に可逆性が実行される際、付随する制度的課題が想定される場合には、今後の検討すべき事項の抽出に向けて議論を進める。</li><li>・回収可能性については、今後整備される安全規制制度の検討に委ねるべき事項があり得ること、特に技術的観点から要求或いは配慮すべき事項等において安全規制制度の要求と共通する部分があり得ることに留意する。</li></ul>
○本検討会では、考慮すべき回収可能性の維持期間について、以下を基本として議論を進める。 <ul style="list-style-type: none"><li>・回収可能性に関する本検討会での定義（表-1）を踏まえ、維持期間の起点を操業開始時点（廃棄体の定位以後）とする。</li><li>・維持期間の終点は、最終処分基本方針やNUNOの安全確保構想での考え方<sup>③</sup>を踏まえ、施設閉鎖（閉鎖措置計画の認可）までとする。</li><li>・回収可能性の維持期間には、最終処分基本方針の規定を踏まえ、施設を閉鎖せずに一定期間回収可能性を維持する可能性を考慮する。</li></ul>

### (2) 議論の進め方

検討会での議論に先立ち、可逆性・回収可能性に関するわが国これまでの議論及び制度を整理・共有するとともに、海外において先行的に行われた検討や取組の動向等を概観し、そこで論点や課題とされた事項等を包括的に整理したうえで、議論を順次進めることとした。具体的には、検討会での確認を経て、表-3に示す13の検討項目を本検討会で議論の対象とすべきものとして抽出した。

表-3 議論の対象とした13の検討項目

○考慮すべき動機
○考慮すべき動機の事業段階に応じた変化
○可逆性・回収可能性の実行に係る判断基準・判断指標
○回収の技術的な実現性
○回収の容易性

- 回収後の廃棄体管理
- 処分場設計への技術的要要求
- 回収可能性に係る戦略・計画の策定
- 研究開発・実証
- 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
- モニタリング等の役割
- 費用
- 意思決定のホールドポイントに係る留意事項

### (3) 平成27年度の議論の進展

平成27年度に4回の検討会を開催した。第1回目では、本検討会における検討の前提や範囲等を確認し、主に海外におけるこれまでの先行的な議論や取組の動向等を概観したうえで、上記の検討項目の抽出を行った。第2回目以降、抽出した検討項目毎に、更なる関連情報等の把握を行いつつ議論を展開した。第4回までに、抽出した13の検討項目のうち、6つの検討項目について議論を進めた。

6つの検討項目に関する議論の内容を、3つの観点から以下に整理する。これらの整理は、次年度に予定する本検討会としての取りまとめを行う前の中間段階のものである。

#### ① 可逆性・回収可能性を必要とする動機

検討項目の1つである「考慮すべき動機」の議論では、関連する他の2つの検討項目（考慮すべき動機の事業段階に応じた変化、可逆性・回収可能性の実行に係る判断基準・判断指標）を統合的に議論した。議論においては、参考情報として、可逆性・回収可能性に関する諸外国の制度整備状況（表-4）や、諸外国の制度や検討過程で示された可逆性・回収可能性を必要とする動機（表-5）について把握・共有した。

このような諸外国の動向も参考としつつ、検討会での議論は、可逆性・回収可能性を必要とする動機を整理し、それらの動機への対応の観点から地層処分事業に関連する各種制度との関係性について整理することを目的とした。のような整理によって、本検討会が対象とする最終処分法の枠内での可逆性・回収可能性で考慮すべき動機の特定、更にその実行に至るシナリオや判断基準のあり方などをより具体的にイメージすることができ、それらは今後の具体的な運用等を考えるうえでの有益な情報として活用できると考えた。

上記の目的に沿った平成27年度の検討によつて、動機や制度との関係性に関する議論が深められた一方で、次のような意見も示されたことから、これらに留意して、今後も引き続き更なる情報整理や議論を進めることとした。

- ・動機の分類や整理における視点設定の工夫や、それらの動機が制度との関係でどのように整理できるかについて更なる検討が必要。
- ・事業の進展に伴う各段階をイメージして、動機を持つ主体やその変化等について考えることも有益。

表-4 可逆性・回収可能性に関する諸外国の制度整備状況  
(地域の意向を尊重する制度を含む)

○事業規制制度（事業推進に係る制度）
<ul style="list-style-type: none"> <li>・フランスが可逆性、スイス及び米国が回収可能性の維持を明示的に要求。</li> <li>・フィンランド、カナダが、事業推進の面から制度として回収可能性の維持を位置付け。</li> <li>・既にサイトを特定して建設許可申請段階にあるスウェーデンやフィンランドでは、回収可能性等の位置付けに変化が見られる。</li> </ul>
○安全規制制度（回収可能性の維持を明示的に要求しているもの）
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ドイツ、スイス、米国が回収可能性の維持を明示的に要求（以前は、フィンランドも安全規則で要求）。</li> </ul>
○安全規制制度（回収可能性等のための措置が安全性に影響を及ぼしてはならないことを明示的に要求しているもの）
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ドイツ、スイス、米国以外の全ての主要国において明示的に要求。</li> </ul>
○地域の意向を尊重する制度については、上記の可逆性・回収可能性に係る制度とは別の制度として位置付けられている（スウェーデン、フィンランド、英国など）。

表-5 諸外国の制度や検討過程で示された可逆性・回収可能性を必要とする動機の中間整理結果

○段階的意思決定プロセスの担保・プロセスに対する信頼醸成
○地層処分概念への支持獲得のための期間確保
○科学・技術の進歩や新たな望ましい管理方策の開発、社会的進展
○将来世代による選択の権利の維持
○新たな資源価値等としての再利用
○安全性に係る課題／想定外の状況への対応
○不安
○閉鎖前に処分場の性能を確認または実証したいという要望
○実施主体によるBATの導入（回収可能性のみ）

②実現性の提示に向けた技術的アプローチの方

向性

検討項目「回収の技術的な実現性」の議論で

は、関連性が高いことが想定された他の検討項目「回収の容易性」を併せて議論した。地層処分では閉鎖後の遠い将来においてもなお廃棄体の回収は可能であるという国際的な共通理解があることを念頭に、検討会における議論は、社会に技術的な実現性を示すうえでの“技術的アプローチの方向性（戦略）”<sup>(※)</sup>を主要な視点の1つとして議論を展開した。

※ここでの技術的アプローチとは、次のようなことを意味する。

「回収可能性は、全体設計と開発プロセスのごく一部でしかないという点も認識しておく必要がある。処分場開発を進める中で、回収可能性に関する戦略的な意思決定を行う必要がある。つまり、処分場の設計は変更せずに回収方法の開発に重点をおくのか、あるいは回収を容易にするために設計変更に重点を置くのかという点である。」<sup>2)</sup>

議論に先立ち、諸外国の取組の動向を把握するとともに、国際的に共有されている2つの主要な戦略<sup>2)</sup>にスイスの個別戦略を加えた3つの戦略の存在を確認した。

**戦略1：受動的安全に向けた処分場の設計は変更せずに「回収方法の開発」に重点を置く（図-1）**

**戦略2：回収を容易にするために「設計変更／設計への考慮」（処分概念や設計への反映）に重点を置く（図-2）**

**スイスの個別戦略：**定置した廃棄体の状態を知りたいという本質的な要求に対して、パイロット施設を設けてモニタリングを行う概念を処分場設計に組み入れることで対応

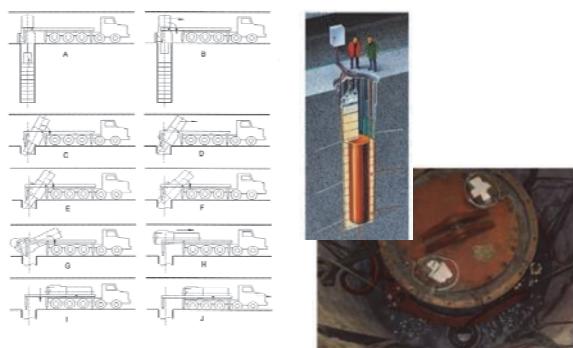


図-1 戦略1（回収方法の開発に重点）の例（フィンランドやスウェーデンが本戦略に対応した取組を実施）

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

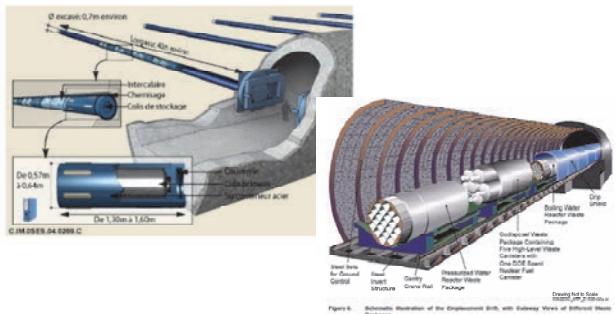


図-2 戰略 2（処分概念や設計への反映に重点）の例（フランスや米国が本戦略に対応した取組を実施）

これらの国際的に共有されている主要な戦略や諸外国の取組の動向、更にわが国の段階的な事業の進め方（処分概念等の開発の進め方）を踏まえ、検討会では次のような共通理解を得た。

- ・戦略 2 の技術的アプローチでは、処分場設計の具体化が必要であり、そのためには候補サイト或いは候補母岩が特定され、地質環境特性等が精緻に把握される必要がある。
- ・一方で、わが国の進め方は、サイトの地質条件に応じて必要な人工バリアを設計することとしており<sup>4), 5)</sup>、NUNO の安全確保構想で示される段階的な進め方を踏まえれば<sup>2)</sup>、特定の候補サイトへの適用を念頭においていた処分概念の具体化は概要調査を終える段階以降となる。

このような理解から、わが国における技術的アプローチの方向性に関する当面の戦略について、次のような示唆を得た。

- ・地質環境特性（候補サイト）が具体化されない段階では、戦略 1 が主体となる。
- ・戦略 2（回収の容易性を処分概念や設計へ反映することに重点）については、事業進展に伴う候補サイトの特定や調査の進展に伴う地質環境特性の具体化に応じた、受動的に安全な地層処分システムの概念や施設設計の具体化検討の中で、例えば地域との関係等への配慮など、社会のニーズにも留意しつつ、戦略 2 の採用の可否やその程度を検討することが可能となる。

但し、国際的に共有されている 2 つの戦略は、大まかな方向性を概念的に示しているに過ぎず、例えば、戦略 1 であっても、より回収作業が容易となるような地下構造物の材料選択の工夫や操

業手順等の工夫など、より戦略 2 の概念に近いアプローチも想定し得る。その意味で、2 つの戦略は、決定的に異なるもの、或いはある段階で切り替わるというものではなく、両者の中間的なアプローチや他の異なるアプローチなど、多様なものを想定し得ることが検討会で確認された。

### ③回収後の廃棄体管理

検討項目「回収後の廃棄体管理」の議論では、回収後の廃棄体の保管について、現存する関連施設で既に安全な管理技術が存在することなどから、技術的に大きな問題はないのではないかといった共通理解が得られた。更に、次のような事項を念頭に置けば、予め回収後の廃棄体管理に係る精緻な計画等を要求することは必ずしも正当化されないのではないかとの示唆を得た。

- ・ここで議論の対象とした可逆性・回収可能性の目的を踏まえれば、回収時にはその後の別の管理ルートが特定されていることが想定される。
- ・諸外国の検討実例から、回収が必要となつた時に、その時点における状況等に応じて最適化された回収計画の中で回収後の廃棄体管理も検討されることが窺える。

平成 27 年度の 6 つの検討項目に関する議論に続き、次年度は残された検討項目に関する議論を順次進める予定である。また、平成 27 年度の議論で得られた共通理解や示唆についても、今後の関連検討項目の議論や最終取りまとめにおいて再度確認するとともに、更なる必要な議論を行う予定である。

- 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 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：可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書 第 1 編、2016
- 2) OECD/NEA, Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel Final Report of the NEA R&R Project (2007–2011), 2011
- 3) 原子力発電環境整備機構、地層処分事業の安全確保（2010 年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－、NUMO-TR-11-01、2011
- 4) 原子力委員会（放射性廃棄物対策専門部会）、放射性廃棄物対策専門部会中間報告書“放射性廃棄物処理処分方策について”、1984
- 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

## 2-3 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。技術的な取組については、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。このような背景を受け、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に対して、地下での適用性確認、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通じて、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我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する。

平成27年度は以下の内容を実施した。

- (1) 実証試験計画の立案
- (2) 個別試験計画の具体化
- (3) 地層処分実規模試験施設の活用

### ◇平成27年度の成果<sup>1)</sup>

#### (1) 実証試験計画の立案

##### 1) 工学技術の整備状況

我が国で検討されている処分孔堅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の整備の状況を、操業の一連の流れとして図-1に示す。

「処分孔堅置き定置方式」については、地層処分実規模整備事業にて実規模、実物の緩衝材ブロックの定置設備が整備され、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>にて緩衝材除去システムを整備し、地上において実規模スケールでの実証的検討が行われており、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<sup>\*</sup>方式)」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36.5tである。処分システム工学要素技術開発<sup>4)</sup>にてPEMの製作、狭隘部でも搬送・定置が可能なエアペアリング技術について実規模スケールでの要素試験、PEM-坑道間の隙間充填技術としてペレット方式の検討が行われている。隙間充填材の除去やPEM回収と

図-1 実規模スケールでの工学技術の整備状況

処分概念	搬送・定置技術		廃棄体回収技術	
	搬送定置	隙間充填	除去	回収
処分孔 堅置き 定置方式 (ブロック)	 緩衝材定置設備	 隙間 OP - 緩衝材 緩衝材 - 岩盤	 緩衝材除去システム	 廃棄体の引上げ
処分坑道 横置き 定置方式 (PEM)	 エアペアリング	 要素試験 ペレット充填 PEM - 坑道間 隙間充填装置	 PEM - 坑道間 隙間充填材除去装置	 定置の逆動線

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

といった要となる技術については未実施であり、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。

これら 2 つの定置方式に対し、操業技術の実現性を提示するため、処分孔堅置き定置方式に比べて未整備の技術が多い処分坑道横置き定置方式を実証試験の対象とした。

### 2) 処分坑道横置き定置方式 (PEM 方式)

図-2 に示したエアベアリング方式の場合、処分坑道の内径は定置作業性の確保のため 15cm 程度の隙間が必要である。人工バリアの長期安全性の観点から、この PEM - 坑道間を適切な隙間充填材で満たすことが必要である。この隙間充填材の要件として、坑道長手方向透水係数の確保と鋼殻内の緩衝材の膨出抑制が挙げられる。既往の検討では隙間充填材に緩衝材相当の有効粘土密度 ( $1.37 \text{ Mg/m}^3$ ) を求めており、15cm 程度の狭隘な隙間に對してペレット方式の適用性が示されている。PEM 方式では、PEM の搬送・定置 (①)、PEM - 坑道間の隙間充填 (②) の繰り返しが、一般的な工程となる。

図-2 に PEM の回収作業の概略工程を示す。処分坑道端部のプラグや坑道埋め戻し材など PEM から距離がある部材の撤去は既存の解体技術や坑道掘削技術が適用出来ると考えられるため本事業では検討対象から除外した。同図に示すように PEM を破損しない技術で隙間充填材を除去 (③)、解放された PEM を搬送・定置装置を用いて処分坑道から回収 (④) の繰り返しが一般的な工程となる。定置作業中の坑道からの回収、PEM の位置調整等の施工品質管理といった操業期間中の作業についても基本的には③と④の技術で

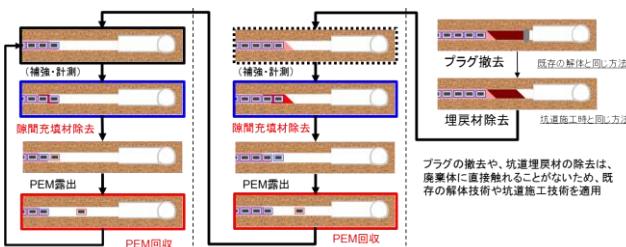


図-2 PEM の回収作業の概略工程

対応可能であり、回収の動機に因らない PEM の回収作業の中核技術である。

以上より、本事業では以下の 4 つの技術を実証試験の対象に設定した。

- ① PEM の搬送・定置技術 (エアベアリング)
- ② PEM - 坑道間の隙間充填技術 (狭隘部対象)
- ③ PEM - 坑道間の隙間充填材除去技術
- ④ PEM の回収技術 (搬送・定置技術の逆動線)

本事業では地下環境での搬送定置・回収技術の実証的な試験の実施を実施項目としている。国内に存在する鉱山跡地、地下空洞 (トンネル)、地下調査施設を比較し、地下実証試験サイトとして利用可能な施設について、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。）を選定した。幌延 URL では地下 350m の調査坑道にて、人工バリアや地質環境に関する様々な研究が行われ、また地層処分実規模試験施設が同一敷地内に整備運営されており、地層処分に関連する他の研究開発との連携という観点でも優れている。地下実証試験サイトとして幌延 URL 地下 350m に位置する試験坑道 2 を設定した。図-3 に幌延試験坑道 2 の位置および現状を示す。

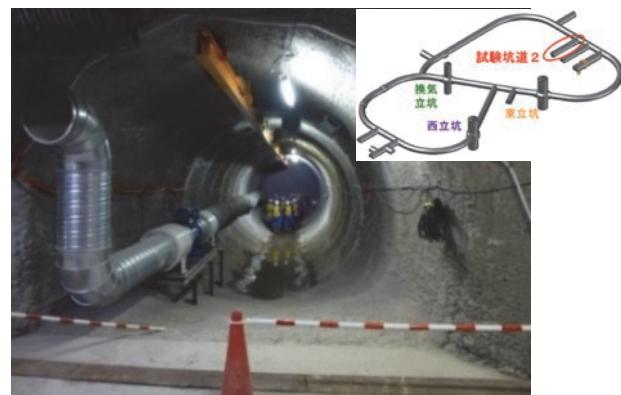


図-3 幌延 URL 試験坑道 2

### 3) 処分孔堅置き定置方式

処分孔堅置き定置方式については、既に緩衝材定置設備が整備されている地層処分実規模試験施設を地上試験サイトとして活用し、課題について検討する。

表-1 全体スケジュール

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・定置装置 (回収装置)	■	■		
	隙間充填装置	■	■		
	充填材除去装置		■	■	
地下での実証試験				■	■
実規模試験施設の活用	■	■	■	■	■

#### 4) 5カ年の実証試験計画

平成27年度から平成31年度までの5カ年で実施するため、全体スケジュールを作成した(表-1)。

#### (2) 個別試験計画の具体化

全体計画に基づき、地下環境にて処分坑道横置き定置方式(PEM方式)の実証試験の実施に必要となる個別試験計画を具体化し、一部については、設計・製作、予備試験に着手した。

- ・地下実証試験サイトの整備
- ・PEMの搬送・定置装置(エアベアリング)
- ・PEM-坑道間の隙間充填装置(狭隘部対象)
- ・PEM-坑道間の隙間充填材除去装置
- ・PEMの回収装置(搬送・定置装置の逆動線)

#### 1) 地下実証試験サイトの整備

地下実証試験サイトとして選定した幌延URL地下350m試験坑道2は内径4m、奥行き25mの円形坑道である。エアベアリングによるPEMの搬送定置における最小坑道径は、PEMの外径に搬送定置、隙間充填作業に必要となる15cmの隙間を加えた内径2.6mである。実証試験に必要な内径2.6mの試験孔を試験坑道2に構築する方法について検討した。幌延URLにて掘削に利用可能な資機材等の制約条件や支保工解析結果を踏まえると、施工可能な試験孔は試験坑道2の内径に近い4m程度となった。エアベアリングによる搬送・定置技術の実証試験では、エアベアリングの走行面の平滑度、段差が重要な試験環境条件となる。本事業では新規試験孔の掘削はせず試験坑道2を活用し、走行面として必要な内径2.6mの坑道下部の部分(組立台)を図-4のように施工する計画とした。PEMや試験設備の重量により、試験

坑道2に与える影響を3次元解析で評価し、組立台を適切に施工すれば既設坑道に影響を与えないことを確認した。今後、鉄筋の配置やコンクリートの等の施工計画を具体化する。

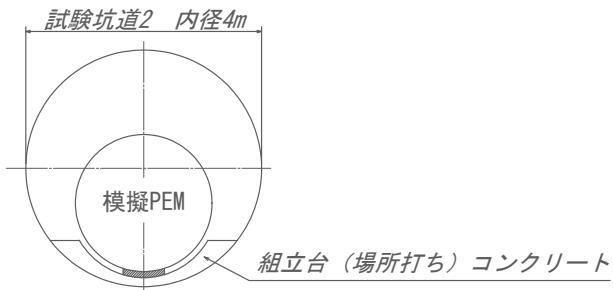


図-4 試験坑道2内配置計画(組立台)

#### 2) 搬送・定置装置の整備

PEMの搬送・定置を行うエアベアリングについては、処分システム高度化開発にて要素技術レベルでの試験が実施された。本事業では、実際の地下環境での実証試験に適用するため、これまでの成果を踏まえ、以下の項目に着目して装置の設計および製作を実施する。

- ・不整地走行性(現場打設コンクリート面)
- ・遠隔操作性(重量物搬送時の安全確保)
- ・遠隔監視機能(センサ、カメラなど)

エアベアリングによる搬送・定置装置の全体構成を図-5に示す。エアベアリングを具備する定置装置に、エア源のコンプレッサを搭載し走行モータを有する搬送装置を連結し、PEMを把持した定置装置(エアベアリング)を押し引きする構成とした。また、搬送・定置装置は、地下実証試験場所である試験坑道2までの搬入路の最少断面(W1.8m x H2.0m)以下に分割可能で、2tホイス

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

トで組立可能な構造とし、地下での実証試験に配慮した設計とした。

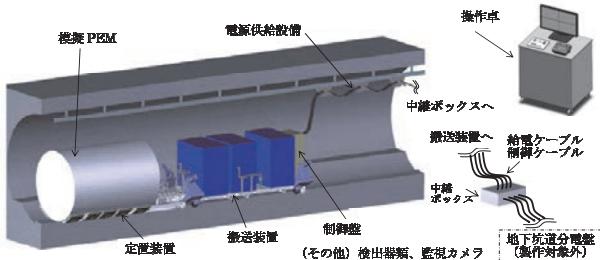


図-5 搬送・定置装置 3D 鳥瞰図 (PEM 把持時)

平成 27 年度は仕様を具体化し、全体の基本設計を実施するとともに、定置装置、搬送装置については詳細設計と製作を実施した。図-6 に製作した定置装置と搬送装置を示す。



図-6 製作した定置装置 (左) と搬送装置 (右)  
(左: 黒い円盤状のものがエアペアリング)  
(右: 装置上にエアコンプレッサ 3 台を搭載)

製作した搬送・定置装置の動作確認試験を実施した。装置が適切に動作することを確認することが目的のため、走行面は鋼製とし、操縦は有線リモコンを用いた。図-7 に動作確認の様子を示す。また平成 28 年度以降の試験や地下での実証試験に向けた反映事項の抽出するため、コンプレッサ流量、牽引力、モータ電流等の装置の作動状況を確認するためのデータを取得した。また浮上量や、PEM 把持状態で設定速度 (5m/min)において搬送可能であること、±2mm の精度で定位可能などを確認した。また段差については、約 1mm の段差を通過できることを確認した。

今後、遠隔操作のための操作卓、遠隔監視のためのセンサ・カメラ類の整備を進め、コンクリート面での走行性など、地下での実証試験に先立ち必要なデータを取得するための地上試験を継続して実施する計画である。

さらに本事業での PEM の回収作業は、搬送・定置装置を用いて、定置動作の逆運動線で実施することを予定している。これまで清浄な走行面のみでの動作確認であったが、隙間充填材除去後の走

行面での動作確認も回収作業ためには必須である。



図-7 搬送・定置装置 動作確認の様子

後述する隙間充填材除去装置の性能および除去完了後の状態で連携して開発を進めていく。

### 3) 隙間充填・除去装置の整備

図-2 に示すように、処分坑道横置き方式 (PEM 方式) の回収は、隙間充填材の除去と PEM 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。前述したとおり既往の検討では隙間充填材に緩衝材相当の粘土密度 (1.37Mg/m<sup>3</sup>) を求めており、15cm 程度の狭隘な隙間に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ュー方式による緩衝材の施工試験がある<sup>5)</sup> (図-8)。これらは本事業にも応用可能な成果を得ているため、隙間充填材の施工方法としてスクリュー方式によるペレット充填を採用した。

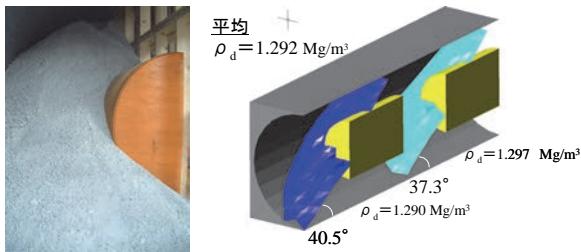


図-8 ペレットによる緩衝材施工試験の実績 5)

PEM-坑道間の隙間充填に使用するペレットとして、これまでに大小球ペレットによる要素試験を実施した（図-1 参照）。今回の実証試験では充填する空間が大きいため効率の良いペレットの製造も重要な要素となる。このためペレットの製造技術と隙間への充填技術を合わせて目標の粘土密度の達成を図る計画とした。

充填技術の検討では、地下環境での実証試験サイトの坑道断面、および坑道内での PEM の位置は図-4 のようになるため、PEM-坑道間の隙間としては下部の狭隘部（組立台-PEM 間）とそれ以外の広い部分（PEM-試験坑道 2 壁面）が存在する。狭隘部の充填は技術的な難易度が高いため、この部分の充填技術の検討から着手した。

狭隘部へ上部からペレットを充填した場合の結果を図-9 に示す。ペレットは安息角を成すため、ペレット法面と PEM 鋼殻が接した部分より奥には重力落下による充填は困難なことを確認した。この結果をもとに適切な充填装置の配置を検討する。充填装置は期待する密度（充填率）を達成出来るように製造されたペレットを充填部へ移送する装置であるから、移送前後でペレットの

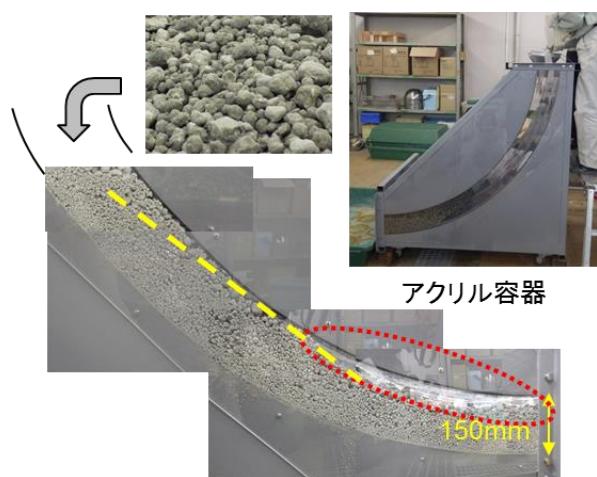


図-9 狹隘部へのペレット充填状況

性状が変化しないことが重要である。狭隘部への適用可能な外径 101.6mm のスクリューコンベアを試作し、ペレットの移送前後で粒度分布が変化しないことを確認した（図-10）。

本年度取得した予備試験の結果を踏まえ、ペレット形状や表面粘性の改善、適切なスクリューコンベア吐出位置等を設計に反映させ、図-11 のような充填装置を製作する。また隙間充填材の密度など施工品質の管理に資するデータの取得も進め、地下での実証試験項目に反映させる。

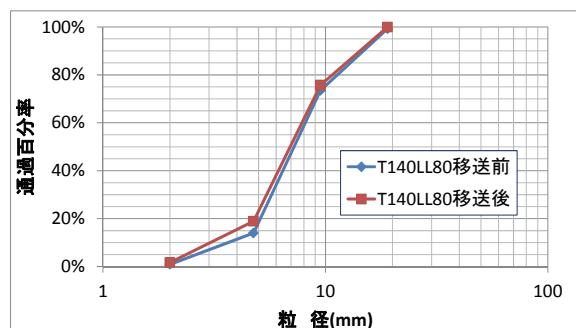


図-10 移送によるペレット粒径への影響

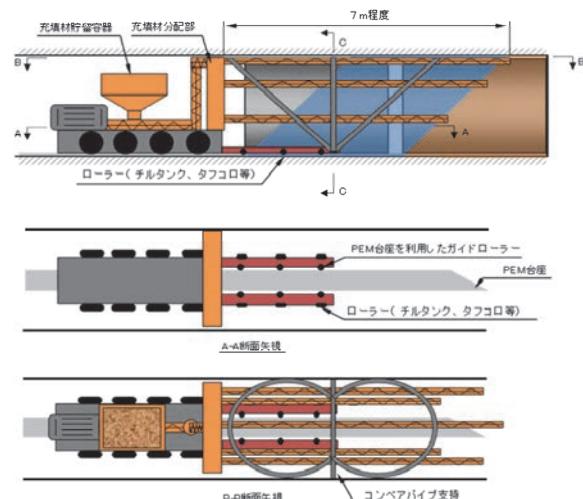


図-11 隙間充填装置の基本設計概念図

PEM の回収のための隙間充填材の除去方法として、既往の研究成果から、流体を用いた塩水スラリー方式、ウォータージェット方式、機械的に除去するドリル方式、アイスblast方式等を抽出した。先行して実施している隙間充填材の性状、今後設定する充填作業後の除去作業時の状態などを踏まえて技術を選定し、隙間充填材除去装置の設計・製作を進める計画である。

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

### (3) 地層処分実規模試験施設の活用

地層処分実規模試験施設は平成22年度4月から26年度まで資源エネルギー庁の広報事業の一つとして整備されてきた。本年度より本施設を地層処分の操業技術である搬送定置・回収技術の実証試験を実施する地上実証サイトとしての整備を実施した。また、施設内での緩衝材定置試験、展示物の説明などの一般公開による国民への理解促進活動を引き続き実施した。平成27度に実施した主な項目を以下に示す。

- ・実証試験に向けた施設整備の検討
- ・緩衝材定置試験装置の改良
- ・緩衝材除去システムの整備（移設含む）
- ・理解促進活動

#### 1) 実証試験に向けた施設整備の検討

本検討では、実規模試験施設の活用に関して、図-12に示すとおり既往の検討で整備した搬送定置・回収技術の知見を活用した実証試験の年度別計画を策定した。本年度は、実規模試験施設での実証試験の検討及び実証試験に必要な施設内整備に関わる検討及び整備を実施した。

項目	H27	H28	H29	H30	H31
実証試験計画の検討					
緩衝材定置 試験装置	装置改良				
	実証試験				
緩衝材除去 システム	施設内整備				
	緩衝材除去シ ステムの移設				
	実証試験				
理解促進活動					

図-12 実規模試験施設の活用と年度別計画

#### 2) 緩衝材定置装置の改良

実規模試験施設内の緩衝材定置試験装置に必要な監視項目、監視方法を整理し、監視機能の改良を実施した。緩衝材定置試験装置を用いた定置工程における監視は、以下の3つの機能が必要となる。

- ・緩衝材搬送機構の一部
- ・緩衝材旋回機構
- ・緩衝材定置機構

上記の機構を対象にした4台の監視カメラを定置試験装置に設置し、実規模試験施設の2階か

らの遠隔操作が可能となるよう制御システムの改良を行った（図-13）。

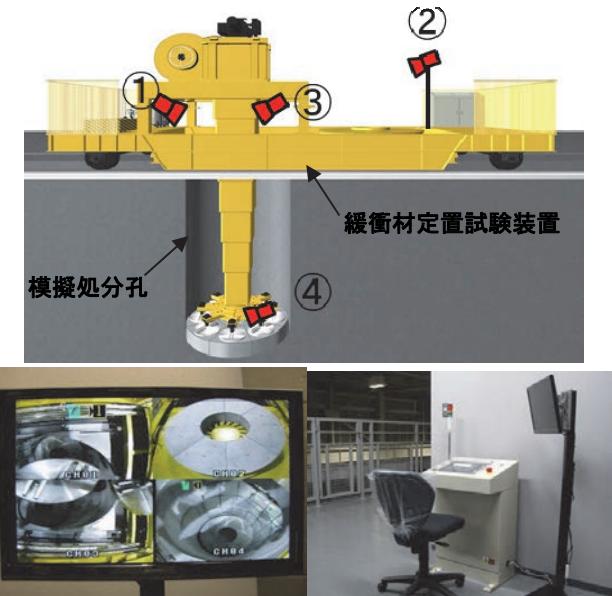


図-13 監視カメラ位置、モニター画面と操作卓

#### 3) 緩衝材除去システムの整備

実規模試験施設には処分孔堅置き定置方式の緩衝材ブロックの定置試験を実施するための模擬処分孔がある。本施設にて堅置き方式の緩衝材除去試験を実施するためには、模擬処分孔の改良と付帯設備の整備、地層処分回収技術高度化開発で製作した緩衝材除去システム（噴射・吸引設備、塩水リユース設備、遠隔操作設備）を施設内へ移設する必要がある。

緩衝材除去システムの各設備について、実規模試験施設の床荷重、模擬処分孔の位置等を考慮し、すべての設備が設計床荷重以下であるように配置を検討した。各設備の配置を図-14に示す。

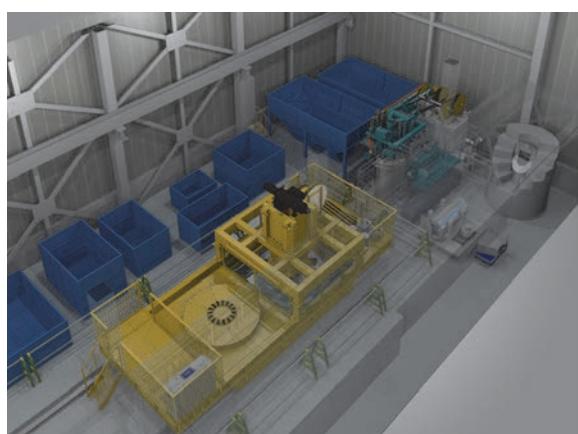


図-14 緩衝材除去システムの配置例

現状の模擬処分孔は、視認性を高めるため半円状の構造となっている。緩衝材除去試験を行う場合は、塩水が漏えいしないように筒状の構造にするなどの補強及び改良が必要となるため、図-15に示すように、①視認性を優先し模擬処分孔の前面（観察者側）をアクリル構造とする、②模擬処分孔での作業性を確保するため側部を鋼製部材による開口構造（開口部はアクリル）とする、③視認性を考慮しないで側部を鋼製部材による筒状構造とする等の改良案を検討した。

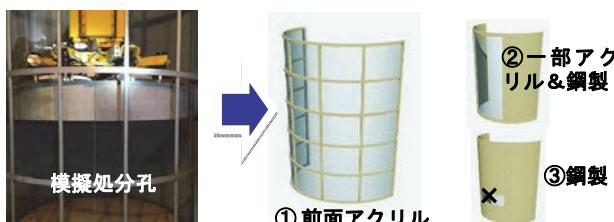


図-15 実規模試験施設の模擬処分坑道

また実規模試験施設で緩衝材除去システムを使用する場合、現状の受電設備の増強等、他のユーティリティの整備の必要性などを整理した。

図-14に示した施設内の配置案に基づき、平成27年度は緩衝材除去システムのうち、噴射・吸引設備及び遠隔操作設備の移設を実施した（図-16）。施設の見学者への安全に配慮し、立ち入り禁止措置を講ずるとともに設備の周りに紹介用のLEDパネルや動画再生モニター等を展示了。

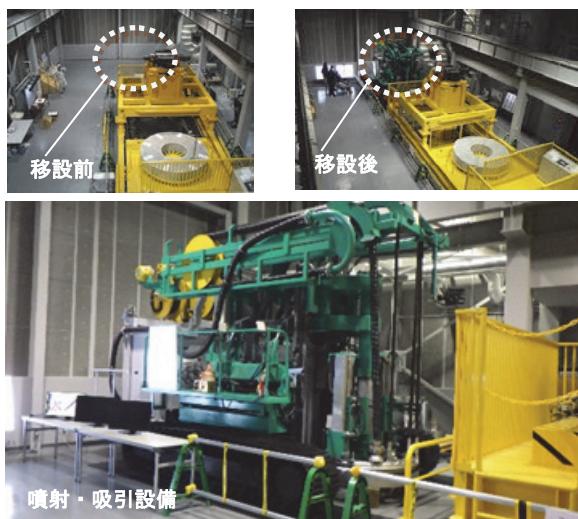


図-16 実規模試験施設の整備前後の様子、および移設した噴射・吸引設備

#### 4) 理解促進活動

平成26年度まで地層処分実規模試験施設で実施した施設の維持管理、および理解促進活動を継続して実施した。平成27年度の来館者数は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38,127名となった。また「おもしろ科学館 2015 in ほろのべ」の開催日（9/5(土), 6(日)）に緩衝材定置試験を一般に公開し、2日間で670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27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、2016.
- 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) 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関する調査研究

### 2-4 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

#### ◇事業の概要

高レベル放射性廃棄物処分における廃棄体の回収可能性に関して、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関する基本方針」<sup>1)</sup>（以下、「基本方針」）において、国及び関係研究機関は、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求められている。また、最終処分に関する国民との相互理解を深め、最終処分事業を円滑に推進するための社会的側面に関する調査研究も進めていくことが重要であることが記されている。

原環センターではこの「基本方針」に先立ち、平成25年度、26年度に回収可能性維持期間の検討を実施した<sup>2)</sup>。この調査では、回収可能性を維持できる期間について定量的な評価を試みた。これを踏まえ、平成27年度から始まった本検討は、処分施設の安全性に影響を及ぼす要因について人工バリアの性能維持が可能な期間の観点から分析し、影響要因について網羅的に整理することを目的として開始した。さらに、整理した結果に基づき、処分場の長期的な安全性を損なうことなく坑道を維持できる期間を設定するための具体的な方策とリスク、回収後の対応等の要素をまとめ、回収可能性の維持に係わる技術要素マップを作成した<sup>3)</sup>。

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27年度の成果

##### (1) 評価に対する基本的な考え方

###### 1) 回収可能性と長期的な安全性への影響

廃棄物処分場の建設・操業により、人工バリアとその周辺の岩盤および坑道は、熱的(T)、水理的(H)、力学的(M)、化学的(C)な特性が変化するとともに、特性の変化は相互に影響を及ぼし合う。このため、回収可能性の維持および人工バリアの長期性能を維持するには、人工バリアおよびそれらを取り巻く岩盤・坑道環境の状態を維持

する必要がある。これらの状態維持のためには、処分場の操業安全性や長期的な安全性を損なう要因となる各因子の把握・評価や、その結果に基づいた工学的対策の検討が必要となる。

###### 2) 閉鎖時期の違いによる人工バリアの性能維持

人工バリアの状態変化は処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持する場合の方がすぐに埋め戻す場合よりも大きくなると考えられる。従って、処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持し、かつ安全評価で求められるバリアの要求性能を満足するためには、回収可能性維持期間に生じる状態変化に対応するための対策が必要となる。

閉鎖時期の違いと人工バリアの状態変遷の概念を図-1に示す。施工時には核種移行評価の起点で求められる要求性能を満たす状態(A<sub>0</sub>)を1000年後に人工バリアが維持するために、回収可能性を考慮しない場合にも要求性能より高い状態になるよう施工する(A)。回収可能性維持期間を考慮することにより、維持期間中の性能低下を見込むことが必要となり、さらに初期性能を上げて施工する必要があることが予測される(C)。ここで、工学的な対策を別途施すことを前提とすることにより、初期性能はCまで上げずにBの状態にすることが可能になることもあると考えられる。この初期のバリアの状態は維持期間を考慮して設定することが必要である。

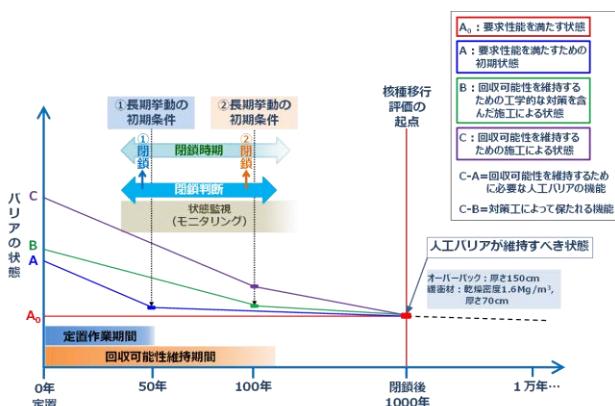


図-1 閉鎖時期の違いと工学的対策によるバリアの状態変遷の考え方

以上、2つの基本的な考え方を基に、本検討では第2次レポート<sup>4)</sup>およびNUMOで示されている処分場の設定を基本として、網羅性を持った検討を行い、回収可能性を維持することによる影響および維持のための方策を示すことにした。

## (2) 検討方法

平成 27 年度は、回収可能性維持の影響を分析し、必要技術を抽出した「技術要素マップ」を作成することと検討の 5 か年の計画を策定することを目的とした。検討の手順を図-2 に示す。今年度は、豊富な実績による処分場を検討の対象とした。

初めに基本ケースを設定し、基本ケースを始点として検討のケースを展開した。基本ケースは処分場の概念として既存の知見が多く、標準的と言えるものとし、検討すべき要素をできるだけ多く含んでいる状態を選択した。

次に、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影響を及ぼす要因と要素を抽出した。本業務において実施する作業内容は、評価や整理の際の基軸を明確にした検討

(例えば、時間・場所・場合 (TPO) や温度・水理・力学・化学 (以下、THMC) を基軸とした検討)を行った。また、分析と整理による要素の妥当性の検討には、既往の検討で実績のある手法(例えば、Features, Events and Processes (以下、FEP) や Process · Influence · Diagram (以下、PID) 作成)を用いた。

これらの検討をもとに、技術要素マップの構造を具体化し、設定したケース毎、対象範囲毎に技術要素マップを作成した。

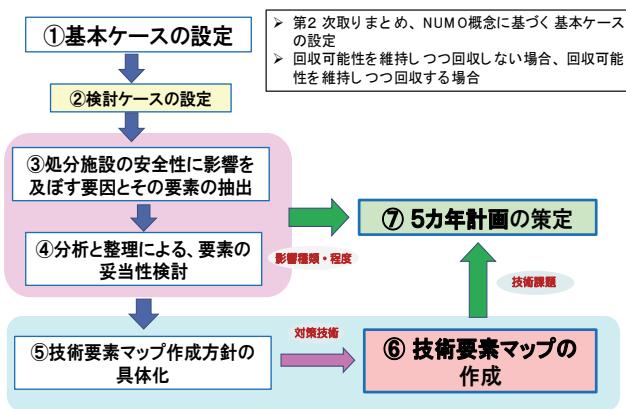


図-2 検討手順

## (3) 基本ケース

基本ケースの条件、状態を以下に、概念図を図-3 に示す。

- ① 処分岩種：軟岩系岩盤（新第三紀堆積岩）
- ② 処分深度：500m
- ③ 処分場レイアウト：平面パネル配置

④ パネル数：6 面

⑤ アクセス：斜坑と立坑

⑥ 坑道：支保工、覆工および背面排水システム

⑦ 建設・操業（定置・埋戻し）期間：約 60 年

⑧ 廃棄体数：4 万本（5 体/日で定置）

⑨ 人工バリア定置方式：ブロック豊富な配置

⑩ 回収までの処分場状態：アクセス坑道、主要坑道、連絡坑道は開放され、処分坑道の埋戻しは完了していると設定 (NUMO 概念と同一とした。)

⑪ 回収可能性維持期間：安全性が合理的に実現できる範囲として処分場閉鎖までの期間とする。処分場建設、操業、回収作業に要する期間として、維持する期間は約 100 年と設定

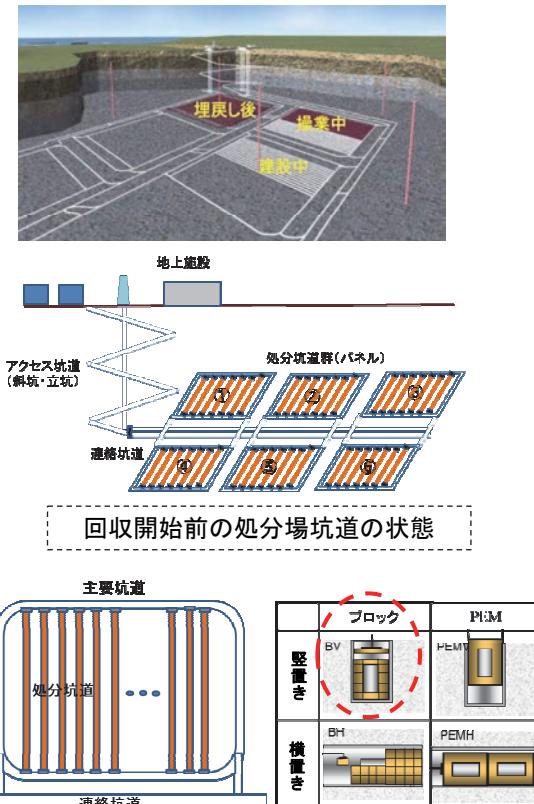


図-3 基本ケースの概念

なお、この基本ケースには、回収可能性を維持した後に回収しないで閉鎖する場合と回収可能性を維持した後、回収する場合の 2 つの場合が含まれる。

## (4) 検討ケース

状態オプションと回収シナリオを設定し、検討ケースは 7 ケースとした。表-1 に各ケースを示す。表中のケース III が前項で述べた基本ケースで

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

ある。

表中の左の列に示した状態のオプションは、以下の4つである。

- ①処分孔に廃棄体を定置し、緩衝材はない状態。
- ②処分孔に廃棄体と緩衝材を定置した状態。
- ③処分坑道も埋め戻した状態。(基本ケース)
- ④パネルの主要坑道まで埋め戻した状態。

表の上段の行に示す回収シナリオは回収可能性維持期間を4期間、設定した。

- ①回収可能性維持期間30年(廃棄体定置終了前に回収する。)
- ②回収可能性維持期間100年(定置終了後すぐに回収が決定され、回収工事が終了するまでの期間。基本ケース)
- ③回収可能性維持期間200年(定置終了後100年維持する。)
- ④回収可能性維持期間300年(定置終了後200年維持する。)

表-1 検討ケース

	回収シナリオ① (廃棄体定置開始後10年)	回収シナリオ② (廃棄体定置開始50年)	回収シナリオ③ (廃棄体定置開始後150年)	回収シナリオ④ (廃棄体定置開始後250年)
回収可能性維持期間30年	回収可能性維持期間100年	回収可能性維持期間200年	回収可能性維持期間300年	
オプション①	ケースI			
オプション②	ケースII			
オプション③	ケースV オプション③	ケースIII 基本ケース	ケースVI オプション③	ケースVII オプション③
オプション④	ケースIV			

なお、回収しないで閉鎖する場合においても、回収可能性を維持する対策を考える上では回収にかかる工期を含んだものとしなければならないため、検討の対象となる期間は同じとなる。

### (5)影響の抽出と分析

本業務での回収可能性の維持の影響に関する抽出、分析は、THMCを基軸として各ケースで状態変遷表としてまとめ、さらに既往の検討手法として実績のあるFEPやPIDを作成することによって行った。一連の作業により、回収可能性維持による影響を把握し、その結果を基に必要となる技術を抽出した。検討の例として、図-4にPIDを示す。ここで示したのは、基本ケース・処分場スケールにおける回収しない場合の影響の伝搬図

である。黄色で塗ったイベントは、影響がトリガーとなるものであり、図中の左から右へと影響は伝播する。そのため、右に行くほど時間が経過することになる。このようなPIDは、ケース、特性、スケール、回収の有無に分けて作成し、THMCへの影響を示した。

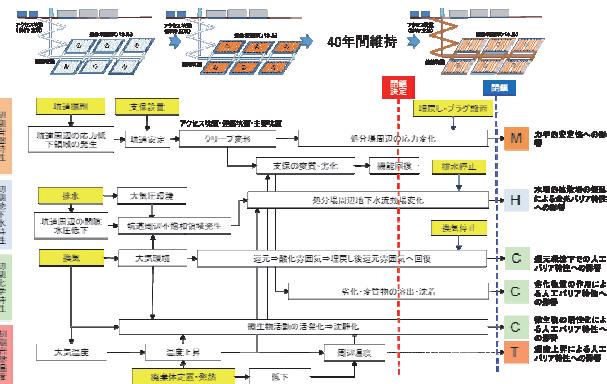


図-4 基本ケース：処分場スケールにおける回収しない場合のPID

これらの検討から導かれる影響を閉鎖前と閉鎖後に分け、想定される影響の範囲や程度について定性的に整理した。得られた傾向を図-5に示す。

回収しない場合、閉鎖前の影響（作業リスク、環境影響および事業コスト）は、開放している範囲が大きくなるに従い増大していく。回収する場合には、閉鎖前の影響は開放範囲が小さい場合ほどその影響は大きくなる。閉鎖後の影響は、回収しない場合の各スケール（処分場スケール、パネルスケール、処分孔スケール）とも維持形態の開放範囲が大きくなるほど程度が大きくなっている。一方、回収する場合は、再掘削が多いほど影響があると考えられ、開放範囲が小さくなるほど、再掘削による影響が大きくなると予測できる。

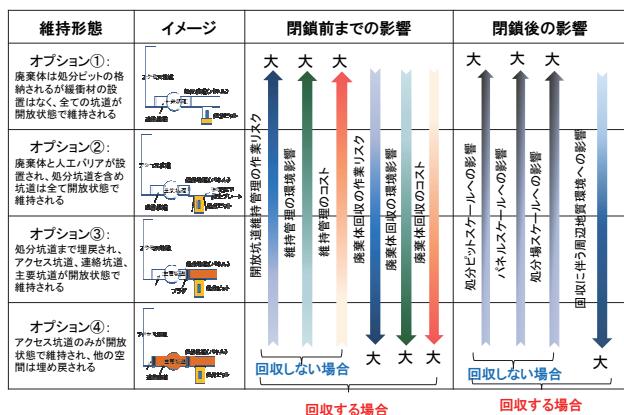


図-5 処分場の状態オプションの違いによる影響の程度の比較

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

### (6)技術要素マップ作成

影響評価、対応策の検討成果に基づき、必要技術を抽出し、それらの区分を整理することにより技術要素マップの枠組みを構築した。図-6にそのテンプレートを示す。

- 技術要素は以下に示す6つに分類した。
- 坑道維持更新技術
  - 回収技術
  - 閉鎖後長期安全性への影響評価技術
  - 閉鎖後長期安全性への影響低減技術
  - 事業中安全性への影響評価技術
  - 事業中安全性への影響低減技術

これらの技術を各スケールの構成要素毎に整理した。また、構成要素の回収可能性維持の影響による変化を技術の必要性の根拠として示した。

技術要素マップに示した各技術は、相互関連等も考慮して、さらに技術群として整理し、その課題の抽出も行った。

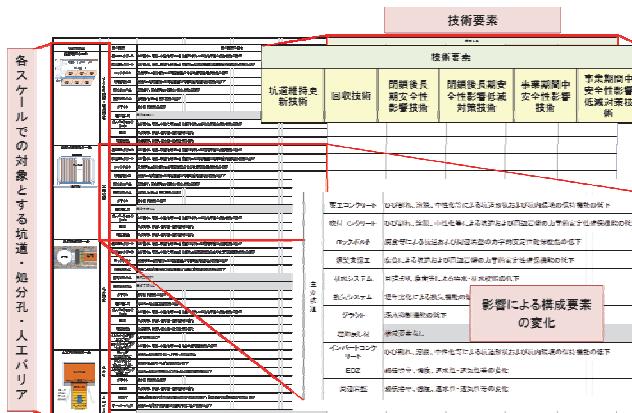


図-6 技術要素マップのテンプレート

作成した技術要素マップについて、回収可能性維持状態および回収可能性維持期間に着目した比較を行った。その傾向を図-7に示す。

回収可能性維持状態の違いに着目すると、埋め戻しが進んでいない状態では、維持更新に係る技術要素は多くなり、回収に係る技術要素は少なくなる傾向となる。一方、回収可能性維持期間による技術要素の違いは認められなかった。これは、回収可能性維持期間が変化した場合には必要となる技術を適用する頻度は増大するが、技術自体は変わらないためと考えられる。ただし、国内のトンネルにおける供用実績は100年程度であり、200~300年という期間での維持管理の経験は無いことに留意する必要がある。



図-7 技術要素マップの状態オプションおよび回収シナリオの変化に関する整理

### (7)5か年の検討計画

技術要素マップおよび技術課題を整理して、5カ年計画に集約した。図-8に計画の概要を示す。平成28年度は異なる定置方式である横置き・PEM方式を対象として同様の検討を行い、比較を行い、また、回収可能性維持の影響および対策工の効果についての定量的評価を順次実施する必要がある。



図-8 5か年の検討計画

- 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) 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次取りまとめ一分冊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、国が科学的有望地を提示することが示され、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、科学的有望地の具体的要件・基準についての検討が進められている。平成 27 年 12 月に取りまとめられた中間整理では、「適性の低い地域」を除いた上で、廃棄物の輸送時の安全性の観点から、沿岸部が「より適性の高い地域」として整理されるとともに、沿岸部における特性と留意事項が示され、今後の調査研究の取組についても、具体的な検討の場で議論すべきとの指摘がなされた<sup>①)</sup>。地層処分技術については、個別の要素技術開発やそれらの体系的な取りまとめが着実に積み重ねられてきた一方で、沿岸部へのそれらの適用については、調査技術の特殊性や塩水に対応した技術開発及びそれらの体系化が十分とは言い難い。また、処分場建設・操業に対する沿岸環境影響の理解に乏しいこと、更には、安全評価の信頼性向上の観点から、塩水と淡水が混在する環境が天然・人工バリア性能に及ぼす影響を考慮する必要があることなどの沿岸部固有の課題がある。

以上を踏まえ、沿岸部の特性に関連する課題の解決に向けた取組を着実に進める必要があることから、沿岸部に関連する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や新規の課題を抽出し、今後達成すべき目標の設定とともに沿岸部に関する今後の研究開発計画を立案する。加えて、それに基づき、地層処分技術の信頼性及び安全性の更なる向上を目的に、沿岸部を対象とした技術開発とその体系化を行う。

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、原子力環境整備促進・資金管理センター、ならびに電力中央研究所の 4 機関が共同で、沿岸部における次の 3 つの分野に関する技術の高度化開発として実施したものである。

- 1) 地質環境の調査技術の高度化開発
- 2) 工学技術の高度化開発
- 3) 安全評価技術の高度化開発

#### ◇平成 27 年度の成果<sup>②)</sup>

当センターは、上記の 3 つの技術分野のうち、沿岸部における工学技術の高度化開発に、日本原子力研究開発機構と分担して取り組んだ。概要調査段階以降で必須となる工学技術に関する高度化開発では、沿岸部における処分システムの構築を念頭に、既存の知見やデータ等を踏まえて、ニアフィールドを構成する人工バリア（ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材）及び坑道等を含むニアフィールド構成材料（支保、隙間充填材、埋め戻し材、プラグ、グラウト等）について、沿岸部特有の地質環境条件を考慮した長期的な挙動の評価とともに、ニアフィールド領域での処分システムの成立性と品質確保に関するエンジニアリングを意識した手法の開発が必要となる。

このような課題認識のもと、平成 27 年度の事業では、①沿岸部における地層処分のための工学技術の検討及び関連情報の整理を行い“課題抽出の視点”を整理しつつ、次の 3 つの観点、

- ②人工バリア材料等を対象とする劣化や変質に関する現象の把握
- ③グラウト設計及び影響評価技術の開発
- ④ニアフィールド領域での処分システム構成材料の成立性と品質確保の方法の提示

について、沿岸部の特性等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や新規の課題を抽出し、今後達成すべき目標の設定とともに沿岸部に関する今後の研究開発計画を立案した。上記の①～④に係る本年度の調査や検討等の成果のうち、当センターが実施した①、②、ならびに④について、以下に整理する。

##### (1) 沿岸部における地層処分のための工学技術の検討及び関連情報の整理

沿岸部における地層処分に際して留意すべき課題の検討に資する調査として、沿岸部に特有となる“課題抽出の視点”を整理した。具体的には、沿岸部での地層処分場の立地を進めている海外事例を対象として、わが国の概要調査段階以降に必須となる技術等に関して先行的に行われた検討、特に技術的観点からの検討や対策等に着目して調査した。海外事例として、沿岸部での地層処分場の立地計画が具体化しているスウェーデン

及びフィンランドを調査の対象とした(図-1)。スウェーデンでは、実施主体であるSKB社が2011年3月に処分場の立地・建設の許可を申請し、現在、安全審査が進められている。フィンランドでは、実施主体であるPosiva社が2012年12月に処分場の建設許可を申請し、2015年11月に政府が建設許可を発給している。

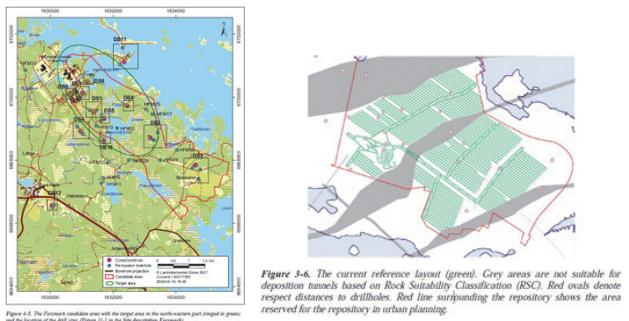


図-1 スウェーデン(左)及びフィンランド(右)で計画されている処分場レイアウト<sup>3), 4)</sup>

両国における沿岸部に特有な工学技術の課題の認識と、それへの対応について、特にサイト選定プロセスの初期段階において取りまとめられた技術資料等に着目しつつ、わが国の概要調査に相当する段階における検討経緯を中心に調査を行い、次のように整理した。

○人工バリア等のニアフィールド構成要素に期待する安全機能に及ぼす影響の観点から、特に塩分を含む地下水(以下、「塩水系地下水」または「海水系地下水」という。)の化学条件(組成条件等)が重要であり、以下に留意が必要である。

- ・塩水系地下水環境では、ベントナイトで構成される緩衝材のみならず、処分坑道埋め戻し材等への影響にも留意が必要である。仕様設定の柔軟性(密度を上げられる可能性)の点で、混合土としての調整幅に制約のある埋め戻し材への影響に留意が必要である。

- ・ベントナイトの変質(ゲル化した粘土の浸食)に影響するものとして、含まれる他の鉱物(二価の陽イオンなど)にも留意が必要である。
- ・セメント系材料について、ベントナイト系緩衝材へのアルカリ影響に対する塩水系地下水の関与のみならず、セメント系材料への直接的な劣化影響にも留意が必要である。
- ・上記の個々の構成要素への影響のみならず、そ

れらの相互作用や相互プロセスについて、THMC(温度、水理、応力、化学)の観点からシステム全体として捉える必要がある。

○処分場深度の地下水塩分濃度の長期的な変遷挙動把握の観点から、以下に留意した地下の水理場の把握と将来の変遷挙動の見積りが重要である。

- ・水理場の長期変遷挙動のみならず、建設・操業期間の地下坑道の開放に伴う、地下深部の高塩分濃度水や周囲の塩分濃度の高い滞留水等の引き込みの可能性にも留意が必要である。
- ・上記の把握には、水理モデル(流動解析モデル)の開発において、地域スケールから、処分場スケール、処分孔スケール(ニアフィールド領域)へと解像度を上げる必要がある。

○上記のような、塩水系地下水による構成要素への影響低減策の1つとして、グラウトが挙げられている。

- ・効果的なグラウト法により、地下の処分空間の有効活用が期待できる(小規模な透水性領域や亀裂を受け入れられる)。
- ・上記スケール(ニアフィールド)での流動場の解析では、このようなグラウトの効果も加味されることが望ましい。

## (2) 人工バリア材料等を対象とする劣化や変質に関する現象の把握

標記に関する調査や検討に先立ち、これまでの研究開発等の成果を踏まえ、対象となる構成要素(材料)及び考慮すべき挙動(及びその影響因子)を表-1のように整理した。

表-1 対象材料とその挙動に影響を及ぼす因子

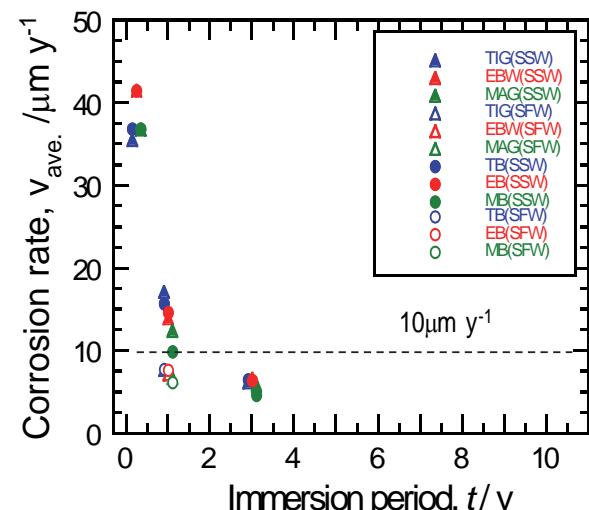
材料	考慮すべき挙動
オーバーパック	○不働態化、○酸素による腐食進展、○水の還元による腐食進展、○応力腐食割れ、○水素脆化
緩衝材	○基本特性に対する化学的影響、○侵入・浸食、○残留密度差、○膨潤圧、○浸潤速度、○流出、○緩衝材定置方法による膨潤性能への影響
その他 のニア フィー ルド構 成材料	○劣化・変質
	○相互影響
	○隙間充填材
	○支保
	○プラグ
	○グラウト

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

上表の整理に基づき、当センターでは、オーバーパック、緩衝材、ならびにセメント系材料（その他のニアフィールド構成材料）について、沿岸部に特有となる環境における劣化や変質に関する既存の知見等の調査を行い、課題と対策案の整理を行った。また、この整理結果を踏まえて、試験時間や試験スケール等を考慮して、必要なデータ等を取得するための全体試験計画を立案した。立案に当たっては、閉鎖後の長期挙動評価への反映と、設計・施工等のエンジニアリングへの反映といった2つの観点に着目した。

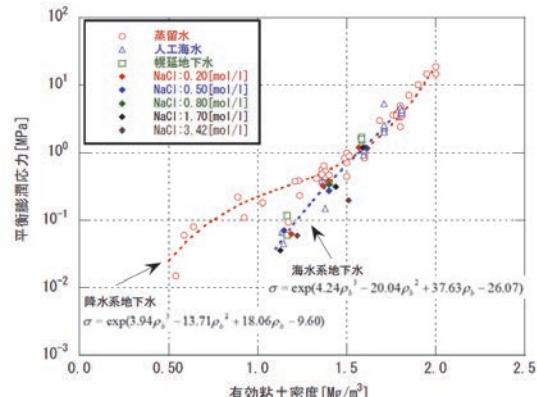
これらの調査や情報の整理を通して、沿岸部で想定される海水系地下水との相互作用による機械的特性及び化学的特性の変化に関する知見をまとめるとともに、更なる高度化に向けた個別の課題の抽出と今後の取組に係る計画を具体化した。

既存の知見等に関する調査から、オーバーパック、緩衝材、セメント系材料の各要素に関して、海水成分の影響や海水系地下水の影響を受ける環境での挙動を把握する目的で、主に人工海水を用いた種々の試験がこれまでに実施されており、データや知見が得られていることを把握した（それらの一部を図-2～図-4に抜粋して示す）。



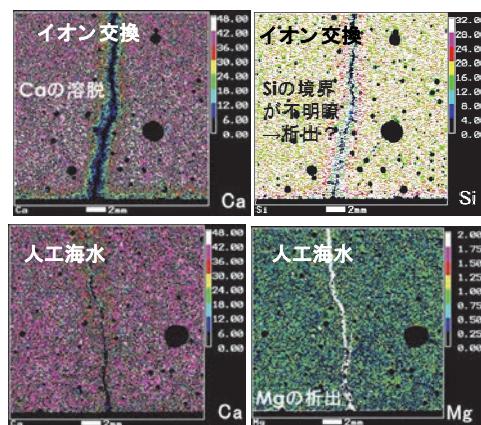
海水環境下におけるオーバーパック溶接部の腐食速度について、低酸素濃度下（還元環境下）において、炭酸塩濃度、塩化物イオン濃度、pHによる平均腐食速度への影響は小さいこと、また、圧縮ペントナイト中でも人工海水、人工淡水で腐食進展に大きな違いは認められないことが確認されている。

図-2 得られた知見の例(抜粋)：オーバーパック<sup>5)</sup>



海水系地下水を用いた試験により、ペントナイトの有効粘土密度と膨潤応力関係等が把握されている。

図-3 得られた知見の例（抜粋）：緩衝材<sup>6)</sup>



人工海水を用いた通水後の亀裂の観察結果（充填及び溶脱の状態）から、セメント系材料に生じた亀裂は地下水との反応によって閉塞傾向となる見通しが得られている。

図-4 得られた知見の例（抜粋）：セメント系材料<sup>7)</sup>

一方、これらの知見やデータ等は、処分サイトが特定されない段階のジェネリックな検討である。そのため、例えばセメント系材料については、沿岸部での現実的な環境を想定したものではなく、海水成分の影響を概括的に把握することを目的としたものなど、得られた試験データ等の多くは人工海水や海水濃度での模擬地下水を用いた検討によって得られたものが中心となっている。このような状況を踏まえ、今後の課題を以下とした。

- ・わが国の沿岸部をより具体的に想定した地下水組成及びイオン強度での各要素の挙動把握と長期評価のためのデータ蓄積（例えばオーバーパックであれば、腐食挙動評価に必要な緩衝材間隙水の組成、pH、Eh 等の異なる条件に関するデータの蓄積）。
- ・海水系地下水の影響を受ける環境であっても、

上記のような異なる条件に応じた影響の評価に基づく工学的な対策を講じることで、その影響を抑制または回避できることを示すためのデータの蓄積と長期挙動の確認。

### (3)ニアフィールド領域での処分システム構成材料の成立性と品質確保の方法の提示

既に述べた北欧の先行的な取組やこれまでの研究開発成果など、既存の知見等の調査を踏まえ、まずは人工バリアシステム（EBS）の成立性とその品質確保の考え方を整理した。その上で、課題の抽出と今後の研究開発計画の立案に向けた視点の整理を行った。

これまでに得られた知見から、EBS の成立性とその品質確保は、処分場における湧水条件と密接に関わることが把握されつつある。また、これらの知見に基づけば、EBS の成立性とその品質確保は、それが定置、設置される処分場のある領域における湧水条件及びそれに対応する湧水対策についての考慮が求められる。処分場における湧水が岩盤中の地下水に起因することから、EBS の成立性等を検討するうえで考慮すべき対象の範囲として、EBS を取り囲む周辺岩盤を含むニアフィールド領域を考慮する必要がある。EBS の成立性の観点からは、特に、操業段階及び閉鎖後長期の双方の安全性が確保される見通しを示す必要があり、これらを検討するうえで、廃棄体を内包し、その外側では岩盤と接することになる“緩衝材”が当初の要求機能を満たすことが、双方の安全性を確保するうえで必須になるとえた。

このような課題認識のもと、特に塩水系地下水の湧水による緩衝材の流出防止に着目しつつ、地下水流动解析から得られる湧水条件から、各種材料の特性や仕様等を評価する解析的手法の調査を行い、今後の対応技術の整備に向けた課題の整理を行った。北欧の先行的な研究では（例：図-5）、特定の地下環境と処分概念を前提として、湧水環境下に置かれた緩衝材の流出挙動の把握に基づくシステムの成立性に係る知見等が整理されている。わが国でも、幅広い地質環境条件を念頭に置きつつ、緩衝材の流出挙動の調査が進められている<sup>9)</sup>。

処分システムの成立性等を示して行くうえでの今後の取組では、緩衝材の挙動（特に再冠水時）を湧水環境と結び付け、閉鎖後長期の安全性の前提となる所定の初期性能を、閉鎖前の操業段階で

如何に構築するかという点に焦点を当て、検討領域を個別要素単体ではなくニアフィールド領域全体として、湧水対策や効果を考慮することが必要となる。その際、次のような視点が重要となる。

- ・解析的アプローチに基づく検討対象領域での水理特性（湧水条件）の評価、把握
- ・処分システム構成材料の個々の変遷挙動等の把握に基づく、材料選定、仕様、組み合わせ、配置といった基本条件の検討

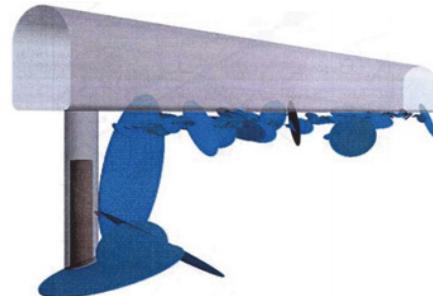


Figure 7-4. A flowpath from the deposition hole into the excavation damaged zone (Poteri & Laitinen 1999).

図-5 ニアフィールド領域の水理モデリングの例<sup>8)</sup>

- 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、平成27年12月
- 2) 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
- 3) SKB, Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, Volume I, SKB TR-11-01, 2011
- 4) Posiva, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Synthesis 2012, POSIVA2012-12, 2012
- 5) Kobayashi.M, Yokoyama.Y, Takahashi.R, Asano.H, Taniguchi.N and Naito.M, “long term integrity of overpack closure weld for HLW geological disposal Part 2 corrosion properties under anaerobic conditions”, Corrosion Engineering, Science and Technology, Vol. 46, No. 2, pp. 212–216, 2011
- 6) 菊池広人、棚井憲治、幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験、JNC TN8430 2004-005、2005。
- 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18年度地層処分技術調査等事業 TRU廃棄物関連処分技術調査－人工バリア長期性能確証試験、2007
- 8) Posiva, Safety assessment of spent fuel disposal in Hastholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara TILA-99, POSIVA 99-07, 1999
- 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2分冊）－人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材、2015

## 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>。

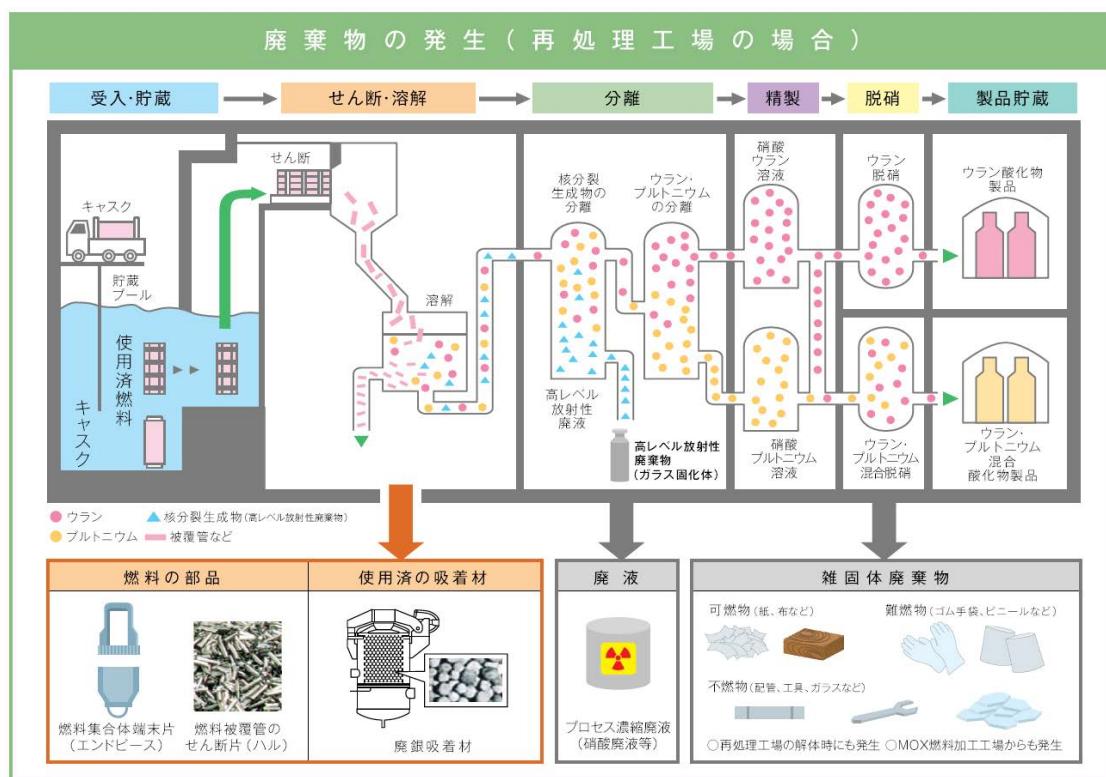
グループ 1 廃銀吸着剤：燃料溶解工程等のオフガス系で、主にヨウ素 129 を捕集したフィルター

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

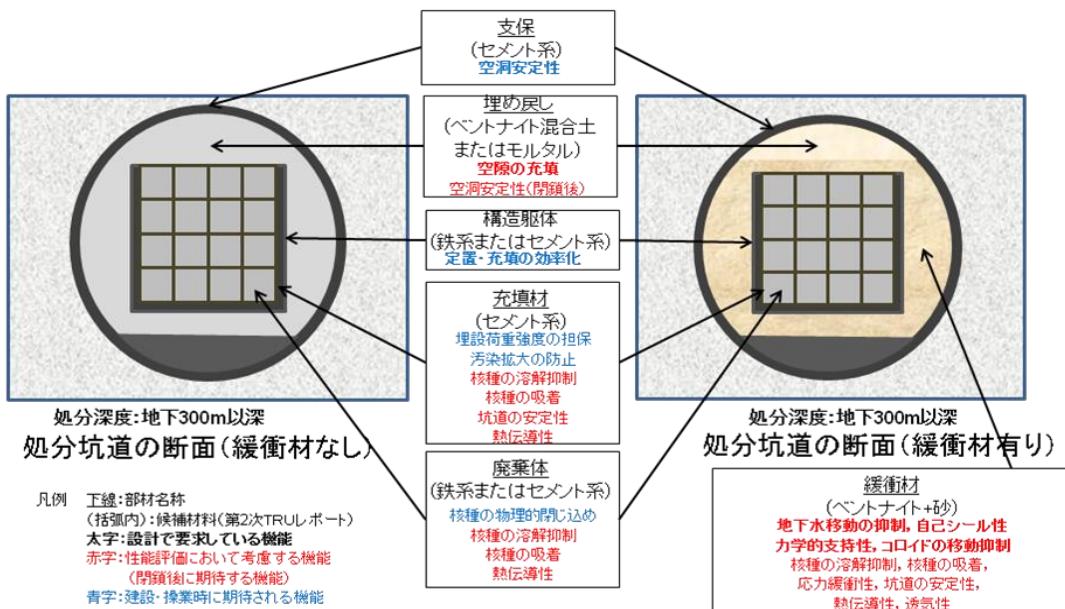
グループ 4 その他の廃棄物

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ー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>

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、ペ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ペ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、その安全度を示すことが必要である。加えて、ペ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、各バリア材料の吸着性の変化

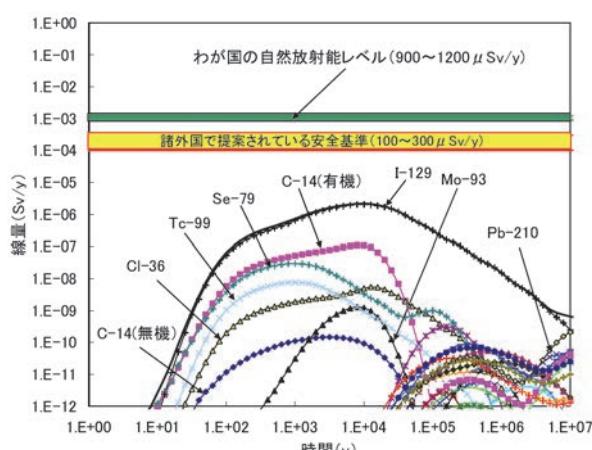
など上述の材料間の相互作用によって生じる性能の変化について、ナチュラルアナログ等も活用して、予測する必要がある。

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吸着性が極めて低く、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出来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。

- 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)
- 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ー、2005

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

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

### 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 衍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>N<sub>0</sub><sub>3</sub> の N<sub>0</sub><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溶融固化する技術

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 力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 力年で必要な 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 27 年度の成果

##### （1）アルミナ固化技術

アルミナ固化体の内部構造を評価するため、収束イオンビームにより固化体の断面を切り出しながら SEM 写真を撮影し、3 次元画像に合成した。

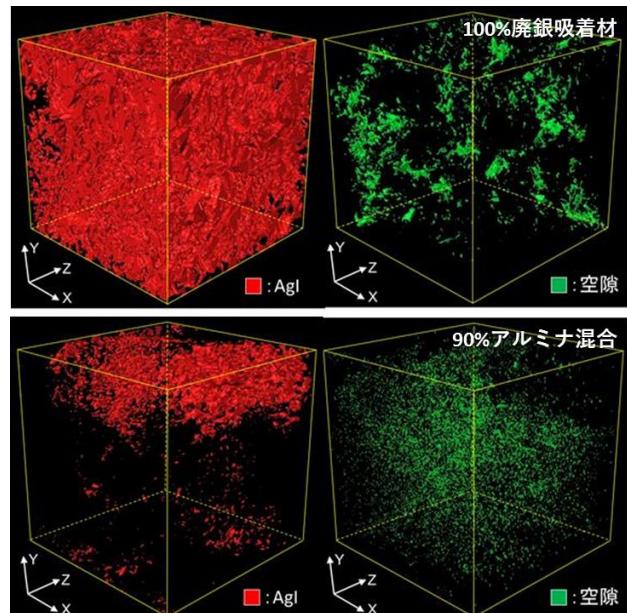


図-1 3D-SEM によるアルミナ固化体の AgI および空隙の分布状態

今回は廃銀吸着材のみで作製したアルミナ固化体と、廃銀吸着材に試薬アルミナを 90% 添加

して HIP 固化させた 90% アルミナ混合固化体を対象に、1 辺の長さが  $25\mu\text{m}$  となる立方体領域を測定した。AgI と空隙を可視化したものを図-1 に示す。90% アルミナ混合固化体は AgI が減り、空隙も微細に分散していた。

これを 1 辺  $0.5\mu\text{m}$  の立方体を 1 単位として分割した。この一単位のうち、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 となつて溶け出すため空隙の一部と考え、空隙と AgI を合わせて疑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。手前の面にある疑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。廃銀吸着材のみで作製した固化体では黄色で示す貫通経路があるが、90% アルミナ混合固化体では貫通する経路が存在せず、ヨウ素の放出が抑制されたと考えられた。

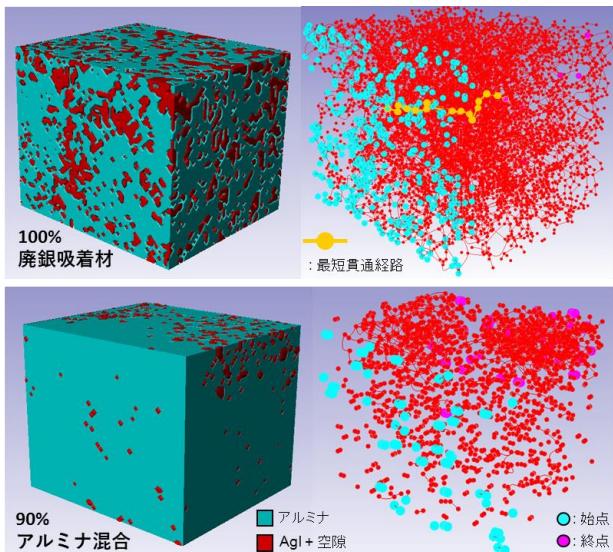


図-2 疑似空隙の貫通状態

廃銀吸着材のみで作製したアルミナ固化体と、90%, 99% アルミナ混合固化体で浸漬試験を行った。図-3 よりアルミの浸出量はどれもほぼ直線的に増加（溶解速度一定）するが、アルミナ混合固化体は廃銀吸着材のみの固化体よりも大幅に低くなった。このことより、固化体の母相である Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の溶解速度は結晶粒及び結晶粒界の状態により大きく変化すると考えられた。

また、ヨウ素（図-4）では 90% アルミナ混合固化体が 99% よりも大きな値を示しているが、

試験初期（～1 日）の浸出量が極端に高いためで、固化体初期表面に平均組成以上の AgI が存在していたとみられる。

ヨウ素の溶解速度は試験初期を除き時間によらずほぼ一定（溶解量は時間に対して直線的に増加）であるのに対して、アルミナ混合固化体では溶解速度は時間とともに低下したことから、溶解機構が異なることが推測された。

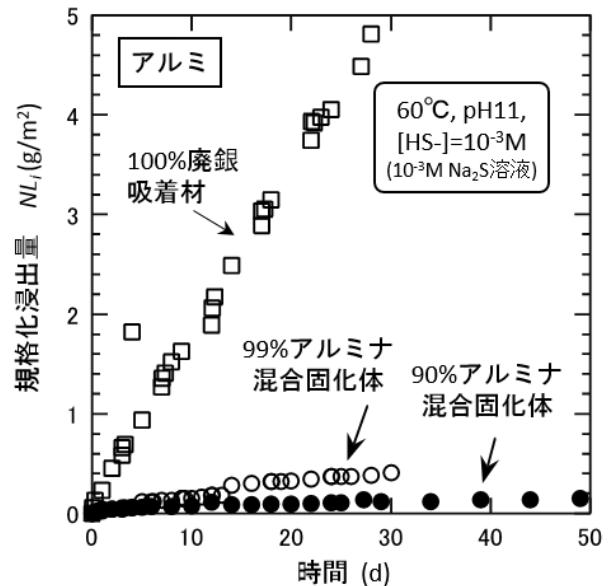


図-3 アルミの規格化浸出量

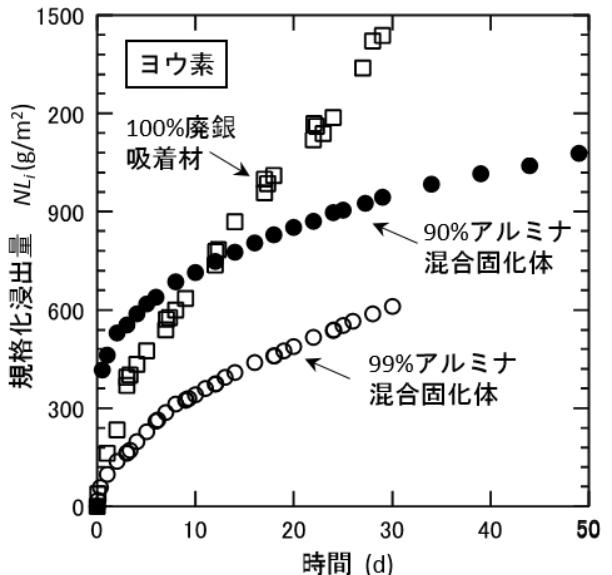


図-4 ヨウ素の規格化浸出量

## (2) BPI ガラス固化技術

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

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

する理解が不可欠である。

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 27 年度は Bi-O 原子間ポテンシャルについて取り組み、 $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$  結晶を対象として選択し、密度汎関数法 (DFT) 計算を行って、変形にともなうエネルギー変化を評価した。 $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$  結晶の変形に伴うエネルギー変化を図-5 に示す。DFT 計算に基づく全エネルギー曲線（黒点）は Bi-O の伸縮に対応する変形にともない、下に凸の曲線となる。このエネルギー曲線が再現可能となる原子間ポテンシャルにおけるパラメータの最適値を得た。得られた原子間ポテンシャルを使用することにより、 $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$  結晶の構造再現が可能となった。

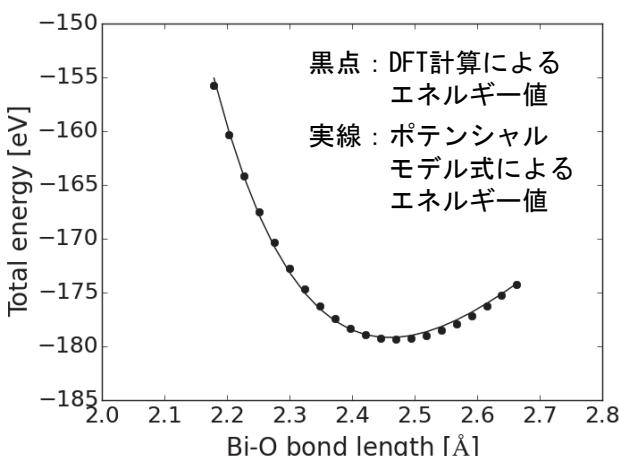


図-5  $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$  結晶の変形に伴うエネルギー変化の再現

BPI ガラス固化体からのヨウ素浸出形態の解明のため、多様な地下水組成の影響について検討した。BPI ガラス固化体が地層処分環境下に置かれた状態で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。その結果、ペントナイト平衡水の場合にはハイドロセルサイトが形成され、降水系地下水と海水系地下水の場合にはパイロモルファイトが生成する結果

(図-6) が得られた。

また、これまでの検討から変質層の主要成分は、Pb の炭酸水酸化物であるハイドロセルサイトであったため、浸漬試験において炭酸塩の影響確認を実施した。その結果、ヨウ素とホウ素は調和溶解し、炭酸イオン濃度が上昇するにつれて、ホウ素とヨウ素の規格化浸出量が上昇することが確認された（図-7）。

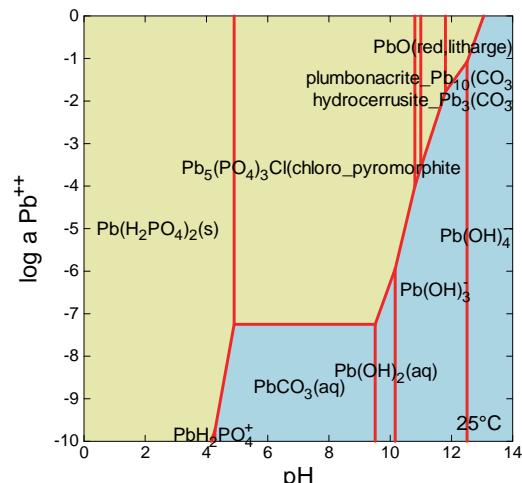


図-6 降水系高 pH 型地下水の溶解度計算結果

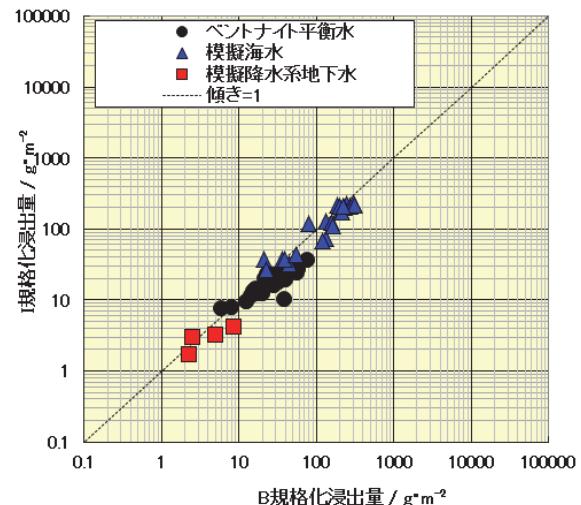


図-7 ホウ素とヨウ素の規格化浸出量

### (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、これまでの検討を踏まえた鉱物モデルを用いてきた。そこで、平成 27 年度は、この鉱物モデルを従来のレファレンスである OPC 固化体の計算にも適用し、同じ条件でセメント固化体とヨウ素の放出を比較した。ここで、phreeqc を用いて瞬時平衡計算を行い、液

固比を変化させるバッチ計算をした。

熱力学データベースは、JNC-TDB. TRU<sup>6)</sup>を基本とし、A. Atkinson<sup>7)</sup>によるC-S-Hゲルの熱力学データを用いた。また、OPC固化体の初期鉱物組成には、セメント固化体と同量のヨウ素を、エトリンガイト、モノサルフェートやハイドロガーネット中に含有させている。液相組成は純水（イオン交換水）とSRHP（海水系高pH型地下水）とし、これまでの方法<sup>8)</sup>に従ってバッチ計算を繰り返した。純水の計算では液固比1mL/gごとに新しい液で瞬時平衡計算し、SRHPの計算では液固比を段階的に高めて、その都度、瞬時平衡計算を行った。

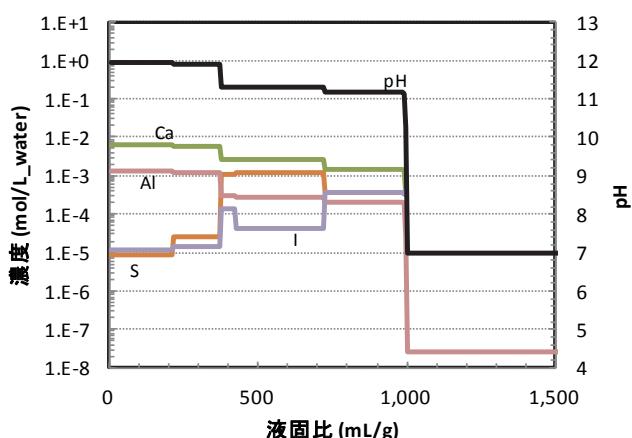


図-8 液固比変化による液相変遷結果例（ケース①）

セメント固化体をイオン交換水で液交換計算を行った場合の液相変遷の計算結果例（ケース①）を図-8に示す。ヨウ素含有固相は液固比およそ1000で消失していた。

#### (4) 技術選定の検討・準備

技術選定のための考え方や必要な評価項目などを整理して必要なR&Dを整理するため、処分事業者および再処理事業者に対して各技術の現状を説明し、課題や事業者のニーズを抽出した。

アルミナ固化体およびBPIガラス固化体は、現状の技術課題のコンセンサスを得て、基盤的な技術開発の継続により課題を解決出来ると考えられた。また、現状想定される地質環境や処分施設の人工バリア等の構造物による影響に関しては、各代替技術の適用性について判断する指標を抽出し、現状の影響度や評価について整理して、今後の検討課題とした。

- 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・処分技術処理・処分技術開発 報告書（第1分冊）－ヨウ素固定化処理技術開発－、2013

### 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°C～80°C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った。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°C 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でき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認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（ホット試験および長期腐食試験）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 27 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 27 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、環境およ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°C～80°C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、模擬地下水条件ではアルカリ条件よりも腐食速度が大きくなり、模擬地下水に含まれる Ca、Cl といった元素の影響についても検討が必要と考えられた。

一方、平成 26 年度<sup>5)</sup>には 30～80°C 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。しかし電子線回折像の明瞭な分離が難しく、結晶構造の確認を得られていなかった。

そこで、平成 27 年度、NaOH (pH12.5) に 2 年間・80°C で浸漬させたジルカロイ-4 試料を、球面収差補正 TEM (Cs-TEM) を用い、解像度を高めて観察（図-1）した。そのときの電子線回折像と良く適する結晶構造の計算結果を図-2 に示す。酸化膜の金属界面近傍は正方晶、表層側は単斜晶が存在していた。これは高温水中で形成する酸化膜の結晶構造と同じ構成であり、低温での腐食挙

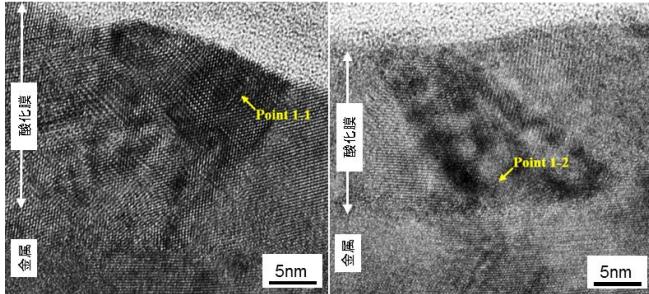


図-1 ジルカロイ-4 酸化膜のCs-TEM観察  
(NaOH、pH12.5、80°C×2年)

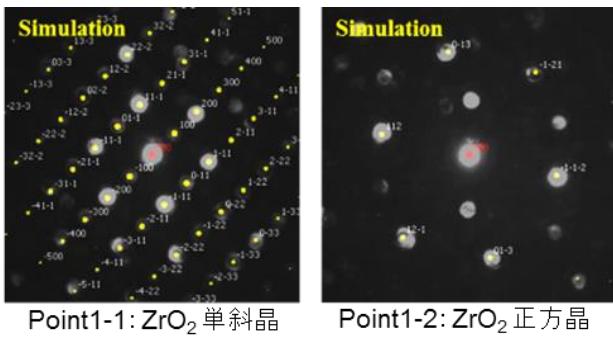


図-2 ジルカロイ-4 酸化膜の電子線回折像

動が高温のものと同等である可能性を示していた。

また、高温と低温腐食の間である 180~270°C で、被覆管のジルカロイ-4 について、オートクレーブを用いた腐食試験を行い、酸化膜を形成させた。これを佐賀県立九州シンクロトロン光研究センターの放射光（ビームライン 15）を利用して高強度 X 線回折を測定し、酸化膜の結晶構造を同定した。酸化膜を形成する温度に、結晶構造が影響を受けるのかどうか、酸化膜の厚さを約 100nm に合わせて腐食温度（180°C~270°C）の影響を評価した。

図-3 に測定結果の例を示し、ジルカロイ-4 酸化膜中の正方晶と単斜晶の比を図-3 から半定量して求めたものを図-4 に示す。腐食温度が高くなるにつれて、正方晶の占める割合は小さくなつた。ジルカロイ酸化膜の結晶構造の変化は、必ずしも酸化膜厚さだけでなく、酸化膜を形成したときの温度に影響を受ける可能性が示唆された。

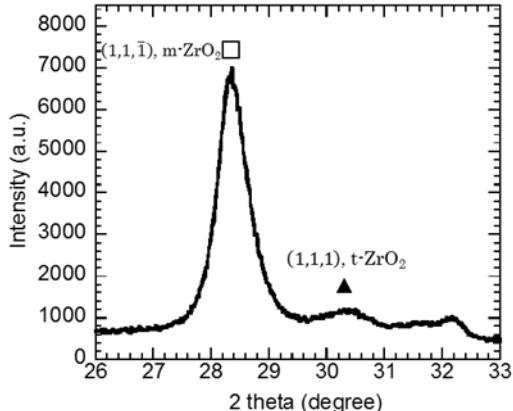


図-3 ジルカロイ-4 酸化膜のXRD測定結果 99.34 nm  
(270°C)

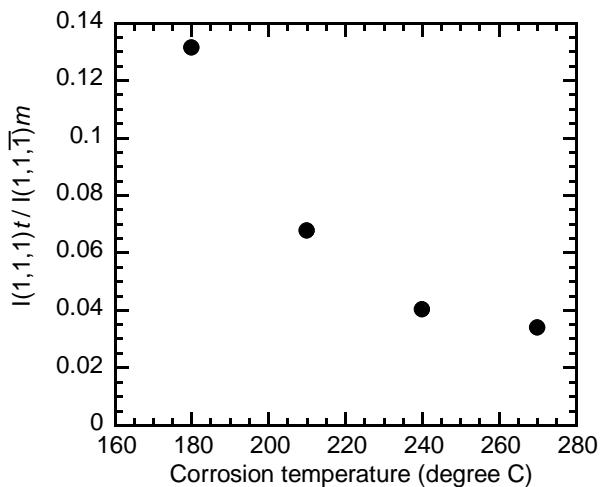


図-4 腐食温度に対するジルカロイ-4 酸化膜中の正方晶と単斜晶の比

次に、照射影響が腐食に与える程度を調査するため、照射済み被覆管の浸漬試験を継続して実施している。平成 27 年度は浸漬開始から 7.5 年経過したサンプルについて、ガンマ核種や金属組成成分の浸出データを取得した。図-5 に外面酸化膜が付いた照射済みの被覆管の浸漬試験結果

(Sb-125 の浸出割合) を示す。Sb-125 は被覆管の添加元素である Sn の放射化で主に生成する核種である。また、浸漬液の液性 (pH12.5, NaOH) では、陰イオン形態で存在すると考えられ、カルボン酸形態の C-14 に浸出挙動に近い可能性がある。Sb-125 は、照射終了時点では被覆管金属マトリクス中にほぼ均一に存在していると考えられるが、被覆管酸化膜中の存在状態は明確ではない。7.5 年までのデータでは放出割合はほとんど変化していないかった。浸漬初期には酸化膜から Sb-125 が放出されるが、その後の酸化膜からの

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

放出および金属腐食に伴う放出は浸漬初期の放出量に比べて非常に小さいためと考えられる。

今後も、データを蓄積するとともに、浸出挙動の解明や腐食挙動との関連について検討を進めていく。

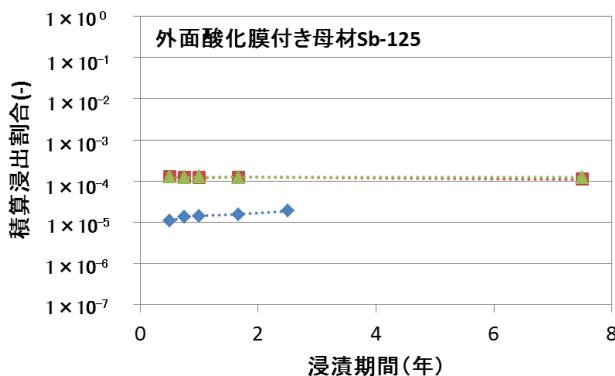


図-5 Sb-125 の浸出割合  
(照射済み被覆管外面酸化膜付き母材試料)

### (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り、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を示し続けている（図-6）。8 年経過時点では  $30^{\circ}\text{C}$ 、pH12.5 での条件でおおよそ  $1\text{mm}/\text{年}$  となった（図-7）。また、NaOH および純水において 2 年浸漬試験をしたサンプルの一部の分析では、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。今後、皮膜が経時的に成長していくか評価を継続していく。

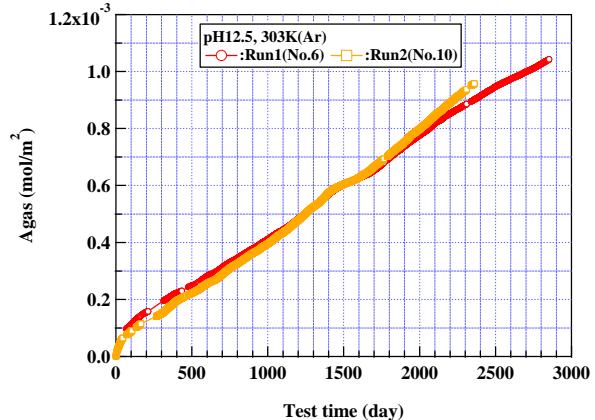


図-6 SUS304の累積放出水素ガス量 ( $30^{\circ}\text{C}$ , pH12.5)

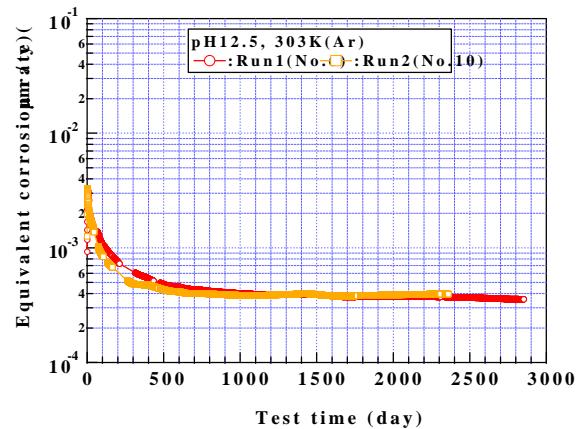


図-7 SUS304の腐食速度 ( $30^{\circ}\text{C}$ , pH12.5)

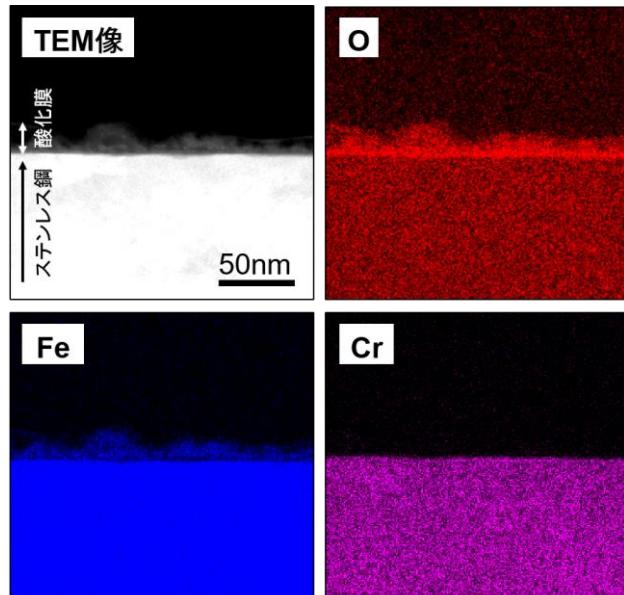


図-8 SUS304浸漬試験 ( $80^{\circ}\text{C}$ , 純水, 2年) 後における酸化膜のCs-TEM観察およびEDXマッピング分析結果

#### (4)炭素化学形態の調査

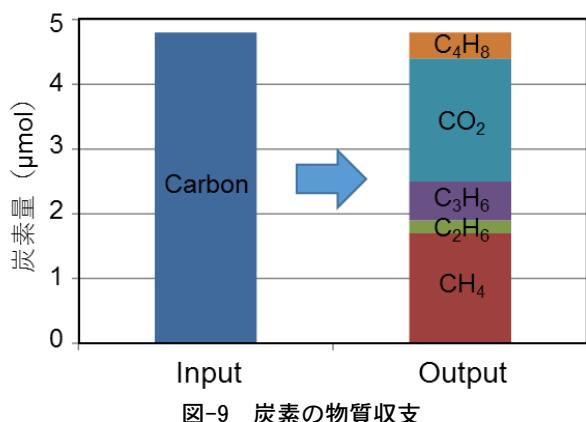
ジルカロイ等の金属の腐食にともなって放出される炭素の化学形態を評価するため、試験方法を検討し、その試験における試験溶液と発生ガスのサンプリング方法の検討を行った。まずは、簡単のため安定炭素（C-12）を用いて検討した。

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し、系外からの混入を抑制できた。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。しかし、試料調製時の大気の混入や炭素量の物質収支が合わないといった課題が残った。

これらを踏まえ、大気混入の原因を調査したところ、グローブボックス内に試料を搬入する際に随伴して大気が混入することが分かった。

また、物質収支については、溶け残った残渣重量と炭素濃度を分析して、炭素の溶解量を評価する必要があると判明した。そこで、回収した残渣を燃焼赤外法で分析し、残留した炭素量を求め、仕込んだ材料に含有する炭素量から残留した炭素量を差し引いたところ、図-9 のように溶液中に放出された炭素量を精度よく把握できた。

今後、信頼性の向上を高めつつ、炭素化合物の発生機構の考察に資するデータを取得していく。



#### (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 のソーススタークに注力するため、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）を提示し、各機関の腐食データの基準として評価された。試験条件の共通化について検討中であり、pH12.0～12.5 の NaOH または Ca(OH)<sub>2</sub> 水溶液などが検討されている。また、加速器質量分析（AMS）の詳細についても議論され、試薬等からのコンタミや分析濃度レベルを事前に把握することが重要であるとの認識を共有した。

今後の計画への反映および成果の利用として、前処理法などは、今後予定している化学形態分析の計画に反映できると想定している。また、C-14 インベントリデータなどは本事業で得られたデータとの比較が可能とみられた。

- 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、アルカリーベントナイト反応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>に対して、平成25年度から5カ年の計画で、アルカリ地下水の地球化学特性とその反応や時間スケールがより明確になり、また室内実験との対比も可能なアルカリ変質現象の観察が可能な場として、現在もアルカリ地下水がベントナイト層に浸出しているフィリピンの（“Active Type”の）NAサイトにおける調査を実施する。

平成27年度は、平成26年度までの調査結果<sup>3)</sup>を踏まえ、pH11を超えるアルカリ湧水を複数地点で確認したパラワン島中部Narrra地区（図-1参照）を対象とした、(1) NAサイトの探査、(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、(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27年度の成果

###### (1) NAサイトの探査

###### 1) Active TypeのNAの特定

pH11程度の高アルカリ地下水がスメクタイトを含有する粘土質堆積物中に直接浸水しているActive TypeのNAを探査・選定することを目的として、平成26年度までの調査でpH11を超えるアルカリ湧水を複数地点で確認したパラワン島中央部の東部沿岸域に位置するNarrra地区を中心に、地質概査、高アルカリ地下水の水理地

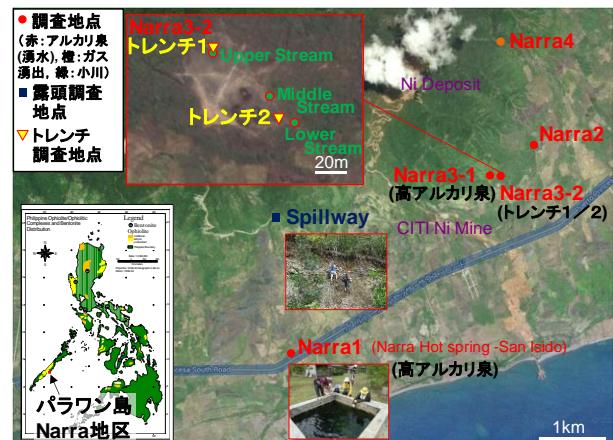


図-1 NA調査サイト（Narrra地区）の位置図

質学的調査や地球化学的調査およびトレーンチ調査などを実施した。

石灰華（Travertine）の平坦地となっているNarrra3-2周辺を対象として露頭調査を行い、2カ所のトレーンチ（トレーンチ1：Narrra3-2の平坦地に注ぐ河川の比較的上流域周辺、トレーンチ2：トレーンチ1の下流の地形が落ち込んだ先の石灰華の堆積する場所）掘削地点を選定し、トレーンチ調査を実施した。

トレーンチ2（図-2及び3参照）において、粘土質の碎屑性堆積物を確認した。2ヶ所のトレーンチ壁面の浸出水は、pH11を超える高アルカリ地下水で流量が多い。また、トレーンチ2の碎屑性堆積物ではXRDによる鉱物分析からスメクタイトが同定されることから、アルカリ地下水が現在もスメクタイトを含む粘土質堆積物に浸出しているActive TypeのNAといえる露頭が本事業で初めて確認された。

###### 2) 高アルカリ地下水の地球科学特性

地下水の地球化学特性と流動特性の観点から、Narrra地区の高アルカリ地下水は、pHと温度が高く、還元性である。またNarrra3-1～3-2地区だけでなくPalawanのアルカリ地下水は総じてMg濃度が低く、Ca濃度が高い蛇紋岩化作用に伴うアルカリ地下水の典型的な特徴を示す。図-2に示すようにNarrra3-2のトレーンチの浸透水はNarrra3-1の源泉とほぼ水質が同じであり、一方、表層水と混合しているとみられるアルカリ河川水とは水質が異なる。このことから、Narrra3-2トレーンチの浸透水はNarrra3-1源泉の地下水がトラバーチンの上部から下部へ浸透したのではな

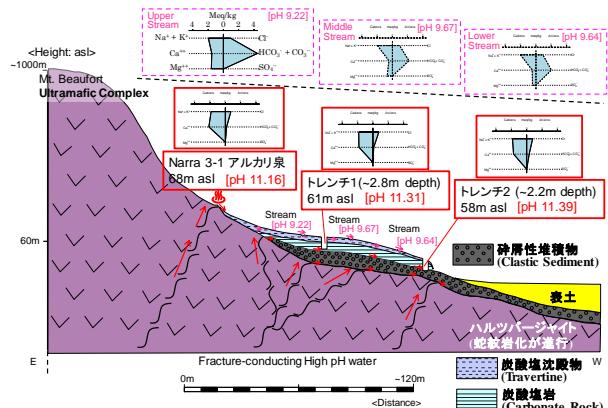


図-2 NA サイト (Narrra 地区) の模式層序学的断面図と地下水水質

く、高アルカリ地下水が湧出するオフィオライトの亀裂のチャンネルいくつか存在し、そこからの高アルカリ地下水がトラバーチン下の粘土質の碎屑性堆積物に浸透しているものと考えられる。上面からの雨水等の浸透を抑制しているのは、炭酸塩鉱物の縞状構造の形成（透水性が高い層と低い層の成層構造）に伴う固化プロセスにおける続成作用により、炭酸塩岩が深くなるほど熟成され、緻密で割れ目が少なく組織的に安定していくため、炭酸塩質堆積物が不透水層となっているためだと考えられる。

### 3) 地質環境

トレーニングチャネル2の基盤岩直上の碎屑性堆積物は、パラワンオフィオライト（ハルツバージャイト）起源の岩片（亜角礫：長径2cm以下）の礫と少量の石英安山岩起源の斜長石と石英の斑晶から構成されている。基質は、一部砂質なものもあるが、大部分がシルト質から粘土質を示す。特に、上位層の堆積物（約20cmの層厚）は細かい層理面が発達する黒色粘土質である。トレーニングチャネルの西壁の露頭観察や、礫種や粒度・構成鉱物・運搬・堆積過程などを考慮すると現地性の地滑り堆積物と想定される。

### 4) 岩石鉱物学的特性

この碎屑性堆積物に含まれるスメクタイトは、定方位 XRD のエチレンギリコール処理によるピークのシフトや 006 面の観察から 3 八面体型スメクタイトであるサポナイトが主であることが同定された。

一方、基盤岩であるパラワンオフィオライトは、単斜輝石を微量含むハルツバージャイト質超塩基性火成岩（斜方輝石かんらん岩）である。他の碎屑性堆積物 (Clastic Sediments) を構成する岩片・鉱物片の原岩は、自形の Cr-スピネルを含有するダナイト質超塩基性火成岩起源（ダンかんらん岩）、透角閃石で特徴づけられるトレモラ角閃岩起源、かんらん石ウェブステライト起源と斑レイ岩起源であると考えられる。これらの原岩は、苦鉄質鉱物の組成とモードによる程度の差はあるが、蛇紋岩化作用が顕著である。

碎屑性堆積物を構成する種々の岩片の基質には、少量の炭酸塩鉱物と C-S-H（主にトバモライトなど）が観察される。また、植物遺体（木根）を水滑石や C-S-H が置換していることから、高アルカリで、高 Mg/Si 比の地球化学的場と地下水がかなりの時間浸透するような水理場が存在したものと示唆される。

### (2) 年代測定による反応時間の評価

Narra 地区のトレーニングチャネルでは、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る埋没木根や貝（化石）が見つかったことから、炭酸塩の TL (Thermoluminescence : 熱ルミネッセンス) 年代測定に加え、新たに埋没木根の放射性炭素 (<sup>14</sup>C) による絶対年代測定を実施した。

トレーニングチャネル1の最下部（深度約2.8m）を構成する堆積性炭酸塩岩層中の埋没木根（図-3 参照）の <sup>14</sup>C 年代は約4,500年であった。この年代値は、埋没木根の母岩がパラワンオフィオライト起源の高アルカリ湧水からの化学的沈殿により形成された堆積性炭酸塩岩であり、その時棲息していたあるいは遺体としての植物木根が沈殿・堆積・固結プロセス中に取り込まれたものと考えられることから、高アルカリ地下水湧水の時間スケールと見なすことが出来る。しかし、この埋没木根を含有している堆積性炭酸塩岩はパラワンオフィオライト基盤岩の直上に累重しているものでないことから、高アルカリ湧水の時間スケール（始動開始時期）はより古くなることが見込まれる。

炭酸塩の TL 年代測定では、合成鉱物を使った基礎実験における炭酸塩の Mn 濃度と TL 特性の関連性を踏まえ、対象試料の Mn 濃度から算出した TL 年代の補正係数を用いて、パラワン島 Narra

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

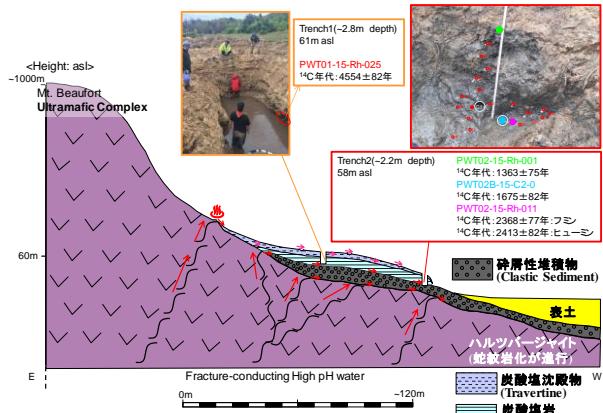


図-3 Narra 地区トレントの<sup>14</sup>C 年代測定結果

地区的トレントサイトの炭酸塩試料のTL年代を評価した。その結果、表層部の炭酸塩の年代は988ka、最深部の炭酸塩では173kaとなった。上記の<sup>14</sup>C年代を求めた木根が炭酸塩の形成とともに埋没したと考えると、両者の隔たりは大きい。含水率が高く分析試料としての状態の悪さ、最初の加熱(Natural測定)の際の感度変化の影響、蓄積線量測定時のルミネッセンス強度の高いピークの影響、生物起源のアラゴナイトの影響等が年代を過大評価した理由と考えられ、さらに検討が必要である。ただし、今回のトレント試料でも年代測定に必要なTL発光量を示していることは確認できたため、上記の課題をクリアすることでより正確な年代を測定できると考えられる。

### (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

Palawan島Narra地区のアルカリ地下水が浸出しているトレント2の壁面から採取した碎屑性堆積物及びコアドリルで採取した基盤岩に近い礫を含む碎屑性堆積物について、EPMAによる元素マッピング観察・鉱物のスポット定量分析、鉱物のマイクロX線回折分析を実施し、アルカリ変質プロセスに関わる鉱物組成や化学組成の変遷過程について調べた。

Narra地区のトレントで確認されたpH11.3のアルカリ環境下にある碎屑性堆積物のスメクタイト(鉄サポナイト)はC-S-Hと共生する産状が多くみられる(図-4参照)。このことから、現在も見られる低温蛇紋岩化作用による高アルカリ地下水によって鉄サポナイト形成されたと考えられる。

えられる。その生成過程では、表-1に示すように、碎屑性堆積物の超塩基性岩起源のかんらん石、斜方輝石、少量の単斜輝石、角閃石と蛇紋石及び少量の石英、斜長石と高アルカリ地下水との反応であり、かんらん石、輝石に加えCrスピネル、磁鉄鉱等のマフィック鉱物から供給されるFeによって鉄サポナイトが生成したものと示唆される。

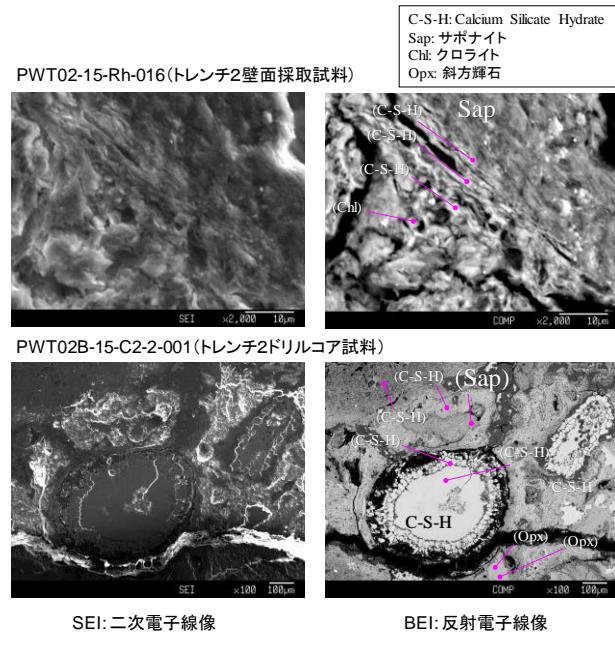


図-4 C-S-H と共生する鉄サポナイトの産状  
SEI: 二次電子線像  
BEI: 反射電子線像

スメクタイトが高アルカリ地下水によって生成するこのサイトの地質構造学的発展は図-5に示すように、①パラワンオフィオライト(ハルツバージャイト質超塩基性岩体)の定置・隆起、②低温型蛇紋岩化作用に伴う蛇紋石、滑石、水滑石、磁鉄鉱等の沈殿と高アルカリ性( $\text{pH} > 11$ )地下水の形成、③パラワンオフィオライトの風化→浸食→移動→(運搬)→堆積サイクルによる碎屑性堆積物の累積と炭酸塩沈殿物(トラバーチン)の堆積、④碎屑性堆積物に含有する斜方輝石、少量の単斜輝石、極少量のかんらん石・角閃石・蛇紋石のアルカリ変質によるサポナイトの生成と炭酸塩沈殿物の圧密作用による岩石(炭酸塩岩)化、⑤現在の環境(蛇紋岩化作用による高アルカリ地下水の生成と碎屑性堆積物への浸出が継続)と解釈することができる。

これらのことから、Narra地区のNAはFossil TypeのNAのように火山性碎屑物を起源とし続成作用でできたベントナイトに高アルカリ地下水

表-1 アルカリ環境下でのスメクタイトの生成に関する鉱物変遷過程

Lithology	Primary Mineral [初期構成鉱物]	Water - Rock Interaction		Reaction with Hyperalkaline Groundwater
		Serpentinization	Low-Temperature Type Alteration	
Travertine [石灰華：化学沈殿物] Carbonate [炭酸塩岩]	凡例 Qz: 石英<Quartz> Plagioclase: 斜長石 Ol: かんらん石<Olivine> Opx: 単斜輝石<Orthopyroxenes> Cpx: 単斜輝石<Clinopyroxenes> Amph: 角閃石<Amphibole> Cr-Spinel: クロムスピネル	Saponite: サポナイト Magnetite: 磁鐵鉱 Serpentine: 蛇紋石 Brucite: ブルーサイト、水滑石 Talc: タルク、滑石 Cholomite: 緑泥石 Calcite: 方解石 Aragonite: アラゴナイト、霰石	Nontronite: ノントロナイト	Calcite
Clastic Sediment [碎屑性堆積物] Ophiolite Derivatives [オフィオリットから派生した堆積物]	(Qz) (Plagioclase)*			Calcite (Aragonite) 溶存イオン種 Smectite (Saponite)の形成
Pyroclastics [火山碎屑物]	Ol* Opx** (Cpx)* (Amph)* [Cr-Spinel] (Magnetite)	Serpentine* Brucite Talc Magnetite	Chlorite	(Si <sup>4+</sup> ) (Ca <sup>2+</sup> ) (Al <sup>3+</sup> ) Mg <sup>2+</sup> Ca <sup>2+</sup> Si <sup>4+</sup> (Al <sup>3+</sup> ) Fe <sup>2+</sup> Saponite (tri-octahedral smectite) [3・八面体型スメクタイト] [X <sub>0.33</sub> (Mg <sub>3</sub> )(Al <sub>0.33</sub> Si <sub>3.67</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ] C-S-H
Palawan Ophiolite (Harzbergite) [ハルツバージェイ: 斜方輝石かんらん岩]	Ol Opx (Cpx) (Amph) [Cr-Spinel] (Magnetite)	Serpentine Brucite Talc Magnetite	Chlorite	(Nontronite) (Saponite) (C-S-H)

\*: Saponiteの前駆鉱物(Precursors)

が過去に浸出したのではないため（高アルカリ地下水と反応したのはベントナイトでなくオフィオリイト起源の苦鉄質を主成分とする碎屑性堆積物）、この NA 事例のみでベントナイトのアルカリ変質プロセス（特にモンモリロナイトの溶解・変質）を説明することは困難である。しかしながら、この Narra 地区のサイトでみられるスメクタイトが生成する環境は、高アルカリ溶液がモンモリロナイトを溶解させ非膨潤性の鉱物である沸石等に変質させるだけでなく、モンモリロナイトと同じ膨潤性等の特性を有する別のタイプのスメクタイト（鉄サポナイト）が形成されることを意味し、当然そのような環境ではこの鉄サポナイトは長期間安定に存在する。したがって、Narra 地区の天然現象は、TRU の地層処分場の充填材等のセメント系材料の高アルカリ浸出水に廃棄体容器等から鉄成分が付加されることが想定される人工バリアシステムで、どのような条件でサポナイトが生成し、スメクタイトが安定に存在することになるのかの手がかりとなり得る、絶好のナチュラルアナログであると位置付けができる。

さらに、このナチュラルアナログは Active

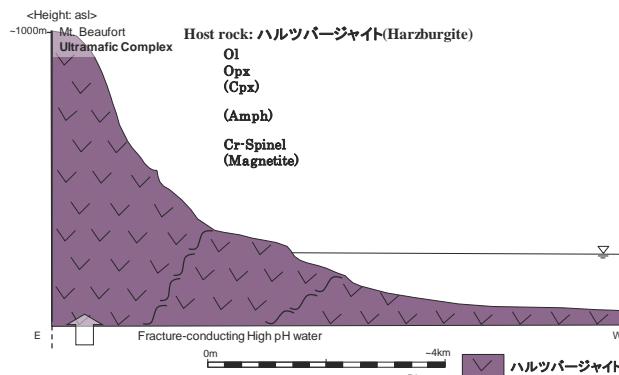
Type であることから、①アルカリ変質反応に寄与する高アルカリ地下水は、低温蛇紋岩化作用により現在も湧出しているため、その地球化学特性を現地調査により直接把握できる、②炭酸塩や堆積物の年代測定が可能であり、アルカリ地下水との反応時間が推測できる、という利点もあげられる。

また、このサイトでみられるアルカリによるサポナイトの生成が人工バリアシステムのナチュラルアナログというためには、苦鉄質(Mafic)の構成鉱物とアルカリとの反応によってだけでなく、珪長質(Felsic)の鉱物が多く含まれる人工バリアのベントナイト緩衝材のアルカリ変質でも生成するかが重要なポイントであるが、少なくともモンモリロナイトが主要鉱物であるベントナイトとアルカリ地下水との反応により、直下の玄武岩ガラスからアルカリで溶脱した鉄成分も加わり、二次鉱物として鉄サポナイトが生成したことを Fossil Type であるルソン島の Saile 鉱山のナチュラルアナログで確認している（この数 mm の変質ベントナイトでしか鉄サポナイトはみられない）。このことから、アルカリ環境下での鉄サポナイトの生成は人工バリアシ

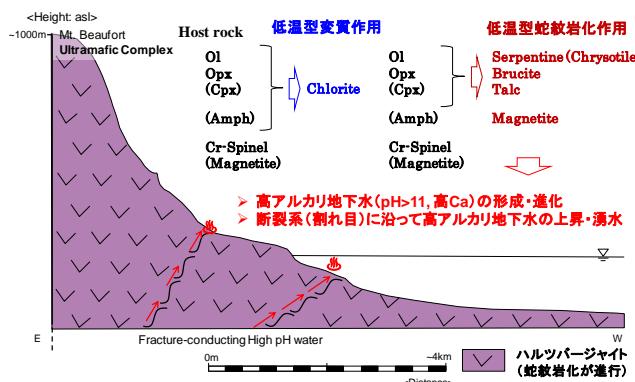
## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

ステムにおいても生じることが十分予測され、このナチュラルアナロジーでは、鉄-アルカリペントナイト相互作用について長期の変質プロ

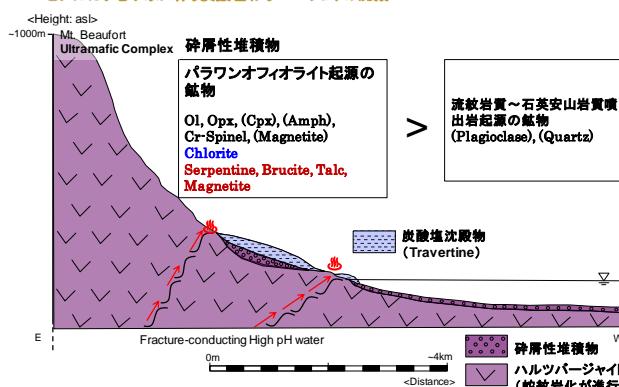
### I. パラワンオフィオライトの定置(33~23Ma)



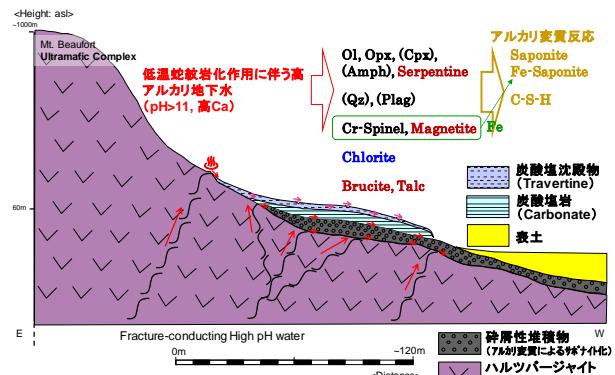
### II. パラワンオフィオライトでの蛇紋岩化作用



### III. パラワンオフィオライトの隆起-浸食-移動-堆積(碎屑性堆積物)とアルカリ地下水に伴う炭酸塩(トラバーチン)の沈殿



IV. 碎屑性堆積物のアルカリ変質によるスメクタイト生成  
炭酸塩沈積物の圧密作用による岩石(炭酸塩岩)化



### V. 現在も蛇紋岩作用による高アルカリ地下水が生成し、碎屑性堆積物に浸出 (Active Typeのナチュラルアナロジー)

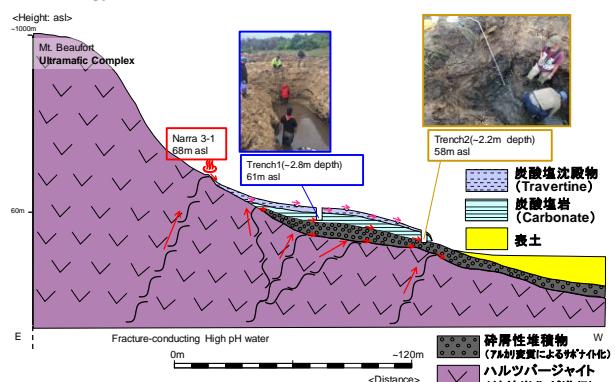


図-5 パラワンオフィオライトの地質構造学的発展と碎屑性堆積物のスメクタイト形成モデル

### (4) 地球化学シミュレーションモデルによる変質解析

ルソン島の Saile 鉱山の NA ではアルカリ変質鉱物として、鉄モンモリロナイト、鉄サポナイト、ノントロナイトが同定されている一方、パラワン島 Narra 地区の NA ではアルカリ環境下で鉄サポナイトが生成するサイトが確認され、フ

ィリピンの NA が TRU 廃棄物の人工バリアシステムにおいてアルカリと鉄が供給される環境でのスメクタイトが安定性を示す可能性が高いことが示された。しかしながら、その地球化学計算による評価に必要な鉄含有粘土鉱物の熱力学データは十分ではなく、そのデータ整備と検証も重要な課題である。

現状のデータベースでこれらが十分整備されているものは少なく、このNAや人工バリアシステムの評価に必要な鉄粘土鉱物の安定相図はデータベースによって大きく異なる。ただし、鉄スメクタイトのデータセットが整備されているWilson et al. (2006a)<sup>4)</sup>の熱力学データセットでは、パラワン島 Narra 地区の高アルカリ地下水条件では安定相として鉄サポナイトが生成することが示され、このことはフィールドの観察事実と一致した。また、室内実験で得られたデータでも鉄サポナイトの安定相を確認しており、現状では Wilson et al. (2006a)<sup>4)</sup>の鉄含有粘土鉱物の熱力学的データセットを使用して、一次元輸送反応モデリングを実施することが好ましいと考えられる。

二次鉱物（カリ長石、鉄サポナイト、沸石）の鉱物組み合わせを再現するために、それらの二次鉱物の生成・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は、本質的にはベントナイトのアルカリ変質反応において、反応に寄与するアルカリ溶液の拡散速度と鉱物の溶解・生成（沈殿）の反応速度の大きさによってその取り扱いが決まるものと考えられることから、ナチュラルアナログ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を明らかにする必要がある。

ルソン島の Saile 鉱山の NA の変質解析の検討から、pH が高いアルカリ溶液との反応では、二次鉱物の溶解に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た（図-6 参照）。この二次鉱物の溶解については、拡散速度より反応速度が十分遅いとみられることから、速度論の適用が妥当かもしれない。ただし、今回のケースではカリ長石と鉄サポナイトの沈殿（生成）・溶解挙動を見るため、二次鉱物として生じると考えられる沸石類は設定していないため、鉄・アルカリ環境下での変質を考える場合には、ベントナイトの構成鉱物が溶解してサポナイトが形成するのか、あるいは沸石が生成するのか、条件によってどちらが支配的になるか見極めることが重要であり、まずは Wilson et al. (2006a)<sup>4)</sup>の鉄スメクタイトの熱力学データの適用性を確認する必要がある。その上で、アルカリ変質の地球化学計算における二次鉱物の設定について見直しが必要なのかを、ナチュラルアナログ再現解析から検討することが、当面の最も重要な課題である。

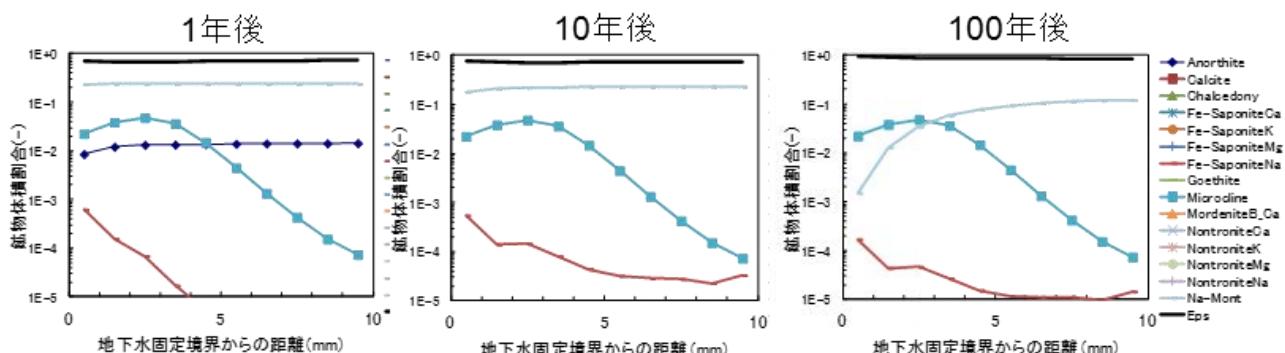


図-6 Saile 鉱山の NA の変質解析結果(二次鉱物の溶解速度を考慮したケース)

- 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 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）－ナチュラルアナログ調査－、2016
- 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 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 3 分冊）－ナチュラルアナログ調査－、2015

- 4) Wilson, J., Savage, D., Cuadros, J., Shibata, M. and Ragnarsdottir, K. V., “The effect of iron on montmorillonite stability. (I) Background and thermodynamic considerations”, Geochimica et Cosmochimica Acta, 70(2), 306-322, 2006

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

### 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、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の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 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、確証試験と数値解析への適応を検討する。一方、「人工バリア初期条件の設定」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、操業中の熱の影響、施工による初期設定への影響等を検討する。

このうち、平成 27 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 解析の手法の検討、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 27 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、セメント成分が溶解することにより高 pH になった地下水との接触により化学的に変質する。化学的な変質は力学的な人工バリアの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) 緩衝材(ベントナイト)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 連成解析手法の検討を実施している<sup>2)</sup>。以下にその結果を記す。

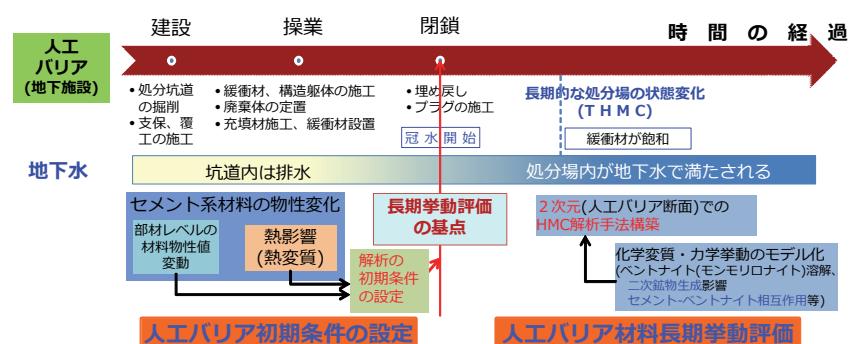


図-1 人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア初期条件の設定の実施概要

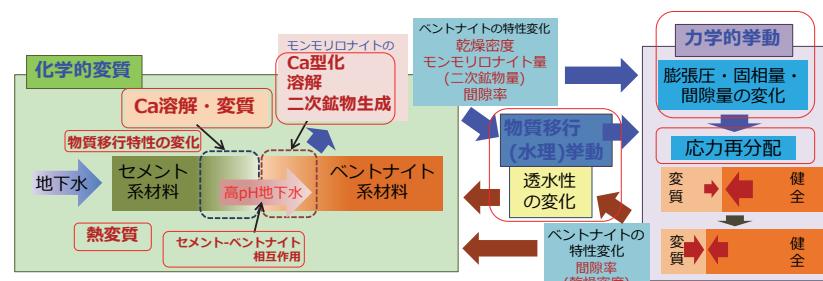


図-2 人工バリア材料の相互影響と性能との関係

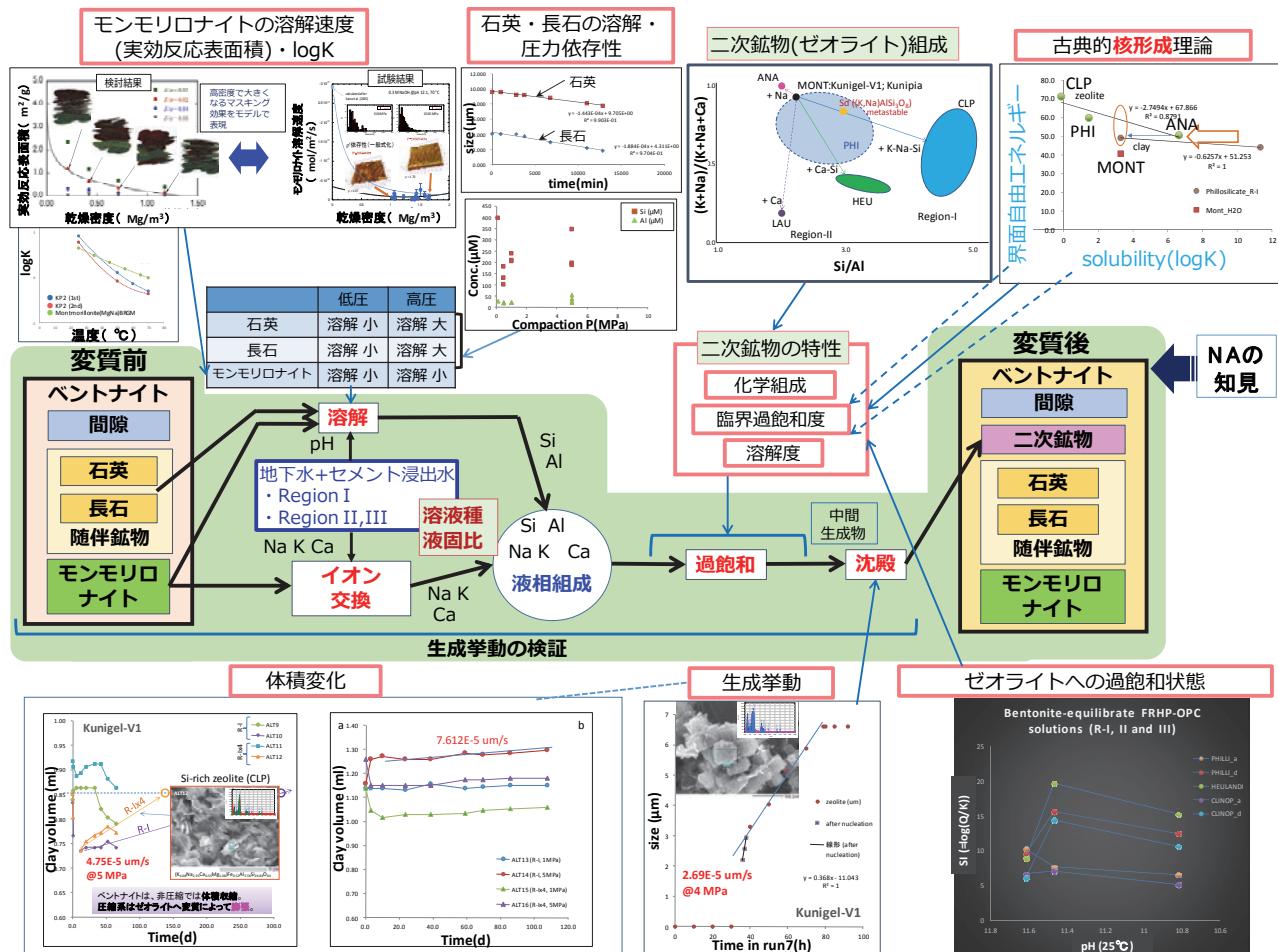


図-3 ベントナイトの変質に伴う二次鉱物の生成挙動に関する試験結果とモデル化案の概要

## 1) 緩衝材の化学変質に関する試験とモデル化

セメント浸出水のアルカリによるモンモリロナイトの溶解に伴い二次鉱物として生成するゼオライトの生成の条件や挙動を試験により把握し、モデル化案を策定、また、力学挙動に影響する二次鉱物生成による体積変化挙動を把握するために試験を行った。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ロチロライトの生成挙動に加え、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 ( $\text{SiO}_2$ ) 及び長石の溶解がゼオライトの生成条件に関連することなどがわかった。これらの知見を元に二次鉱物のモデル化案を策定し(図-3)、長期挙動評価へ反映するための検証等を進めていく予定である。

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

価にその現象を反映するため室内試験で確認してきた<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(Grimse Test Site: グリムゼル試験場) の構造物から採取した建設後 12 年間を経過した試料<sup>3)</sup>(図-4)を平成 26 年度から分析している。



図-4 セメント-ベントナイト接触試料の Nagra GTS での採取状況

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

試料を3mm間隔に粉末化して確認した結果、セメントと接触したペントナイト部分は変質が進んでおらず、X線吸収微構造(XAFS)分析による定量ではC-S-Hの量は少なかった(図-5)。C-S-Hは、接触部のごく近傍で生成している可能性があるため、より高分解能なXAFS分析等による確認が必要である。

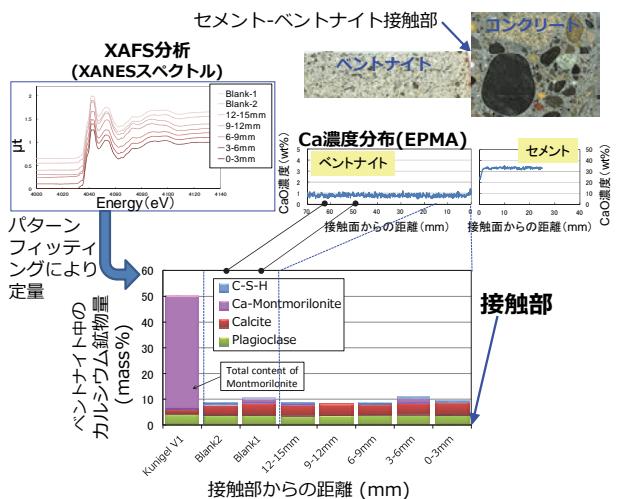


図-5 セメント-ペントナイト接触部分の変質状態に関するXAFS分析結果

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関する検討で、平成24年度までにペントナイトの乾燥密度の増加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る。この点を説明するために、数学的な手法でのモデル化を検討した。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、実効反応表面積の定式化をして、従来の実効反応表面積(7m<sup>2</sup>/g)のケースと比較し、長期評価の不確実性を低減した(図-6)。

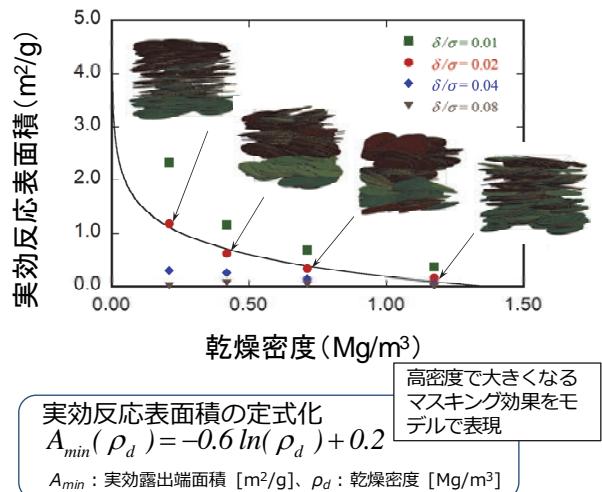


図-6 圧密下のモンモリロナイト実効反応表面積の定式化

平成27年度は、実効反応表面積の定式化の信頼性を高めるために、モンテカルロシミュレーションにより平衡の積層状態を計算する際の初期状態の影響や円盤状粒子の粒子径の影響について検討した。その結果、初期の円盤状粒子の積層状態によって平衡状態までは至らない準安定状態があることがわかった。また、粒子径の影響は少ないことを確認した。加えて、積層構造中の間隙の状態についても把握することができる様になり、緩衝材の長期変遷の評価に有益な技術が得られた(図-7)。

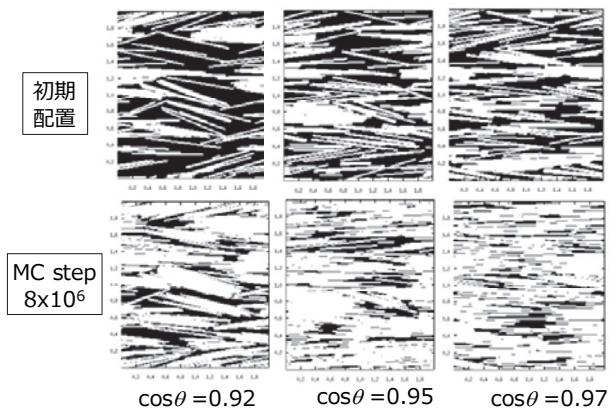


図-7 円盤状粒子の平衡構造計算結果の断面図  
(初期配向角度( $\cos \theta = 0.92-0.97$ )、白：円盤状粒子、黒：間隙)

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初期物性値から得ることを目的に、物質移行特性(拡散係数)のモデルを検討した(図-8)。

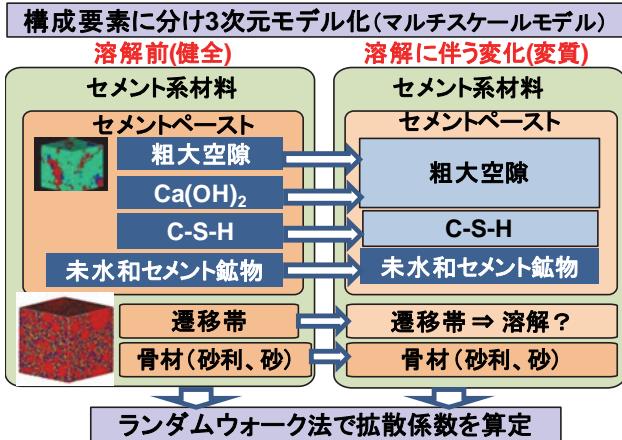


図-8 セメント系材料の拡散係数モデルの概要

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。各構成要素の変質挙動を考慮した3次元モデルにマルチスケールモデル<sup>5)</sup>とランダムウォーク法を適用し、平成27年度までに混合セメントを使用したモルタル材料について変質状態に応じた拡散係数を算定することが可能となった(図-9)。骨材の界面の遷移帯の取扱いは不明な点がある等、残された課題を今後検討し、モデルの信頼性を向上させる必要がある。

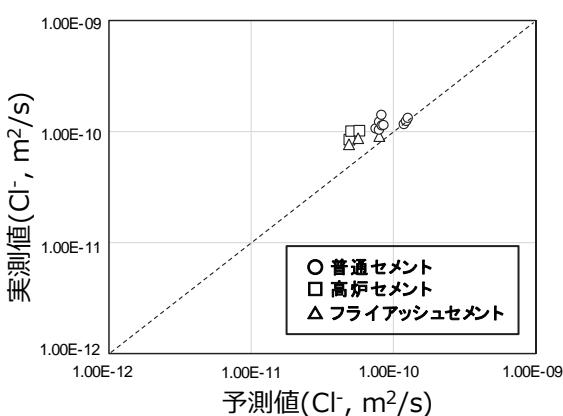


図-9 セメント系材料の拡散係数モデルの予測値の実測値との比較

## 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変質を受けた場合の力学挙動についてモデル化を行っている。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の圧密変形(完全飽和線)に関して、モデル化することが出来ている。平成27年度は、これまで試験が難しかった完全飽和線の低応力部分のデータを取得して高度化した(図-10)。加えて膨張挙動に関しては、変質が進行すると完全飽和線まで膨張しない点について、非可逆性により整理することによりモデル化を行った(図-11)。今後データを拡充して、変質の進行に伴う非可逆性の変化をモデル化する必要がある。せん断挙動について、等体積一面せん断試験を行い、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の拡充を進めている。

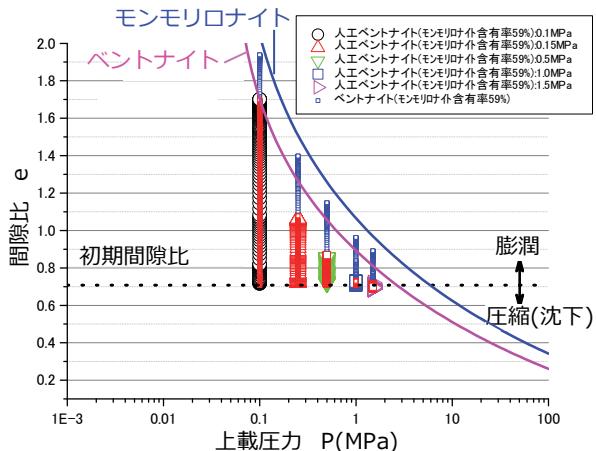


図-10 ベントナイトの完全飽和線(低応力部の挙動を考慮)

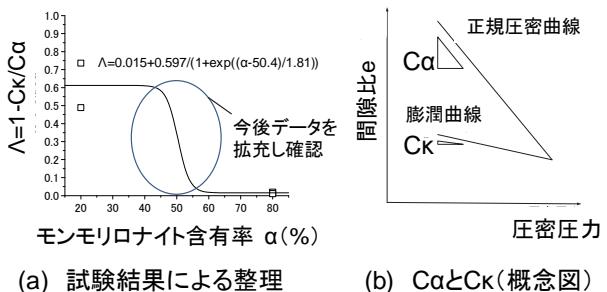


図-11 ベントナイトの膨潤挙動の非可逆化による整理

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

### 3) HMC 連成解析手法の検討

ここでは、2次元での力学解析と化学解析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>6)</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>7)</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。平成27年度は、化学解析の解析条件の検討、ベントナイトの密度分布に施工の条件を考慮する手法の検討、化学変質を考慮した際の長期の力学挙動の解析による評価など、連成解析に関する検討を実施した。化学変質を考慮した力学挙動は、モンモリロナイトの溶解に加え二次鉱物の生成を考慮して長期の解析をすると二次鉱物の生成を考慮しない場合に比べて変形が少ないことや生成する二次鉱物の種類によって力学挙動が異なること等、より現実的な長期解析が可能となった(図-12)。

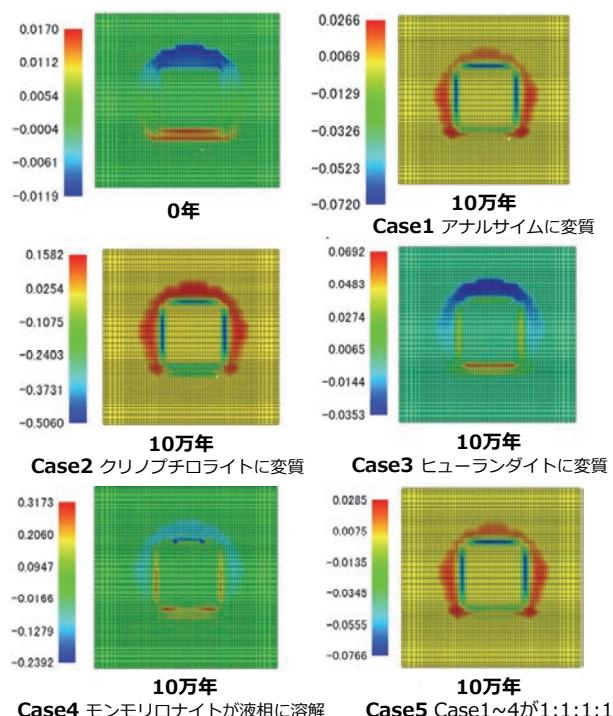


図-12 人工バリアの化学変質を反映した長期力学挙動解析の結果（体積ひずみ(10万年後)）

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起点は、図-1に示す様に処分場が建設、操業を経て閉鎖された時点である。解析の起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、解析の初期条件は、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、力学特性等の物理値)において予想される処分場の閉鎖までの放射性廃棄物の熱による変質の影響、及び、人工バリアのセメント系材料の部材の大きさで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27年度は、熱変質について検討を行った。セメント系材料の熱変質は熱履歴による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。結晶化条件を明らかにするために、合成C-S-HもしくはOPC(普通ポルトランドセメント)硬化体の粉末を一定温度に保管する定温度試験を実施した。50°C以上の条件において、骨材(石英)の溶解によりC-S-HにSiが供給されることでCa/Siモル比(C/S)がトバモライトの組成の0.83程度に低下し、トバモライトが生成することがわかっている(図-13、図-14)。加えて、合成C-A-S-Hによる定温度試験により、C-A-S-Hもトバモライト化が起こる可能性のあることがわかった(図-13)。

C-S-Hの結晶化により、セメント系材料の物理値が変化することが懸念される。物理値への結晶化の影響を調査すると共に、OPC硬化体を結晶化させて物理値の変化を確認する試験を開始した。

今後試験による評価を進め、初期条件の設定に関して取りまとめる予定である。なお、80°C以下では結晶化が起こらないとして人工バリアの制限温度が設定されている<sup>1)</sup>。結晶化の材料特性値への影響は少ないとされるが、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。

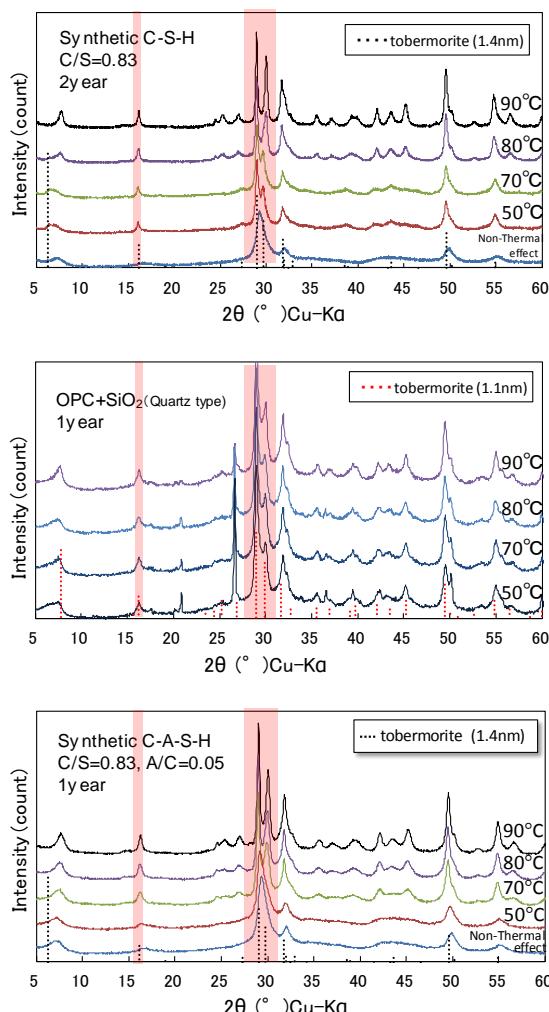


図-13 定温度試験による C-S-H の結晶化条件の確認結果 (XRD)

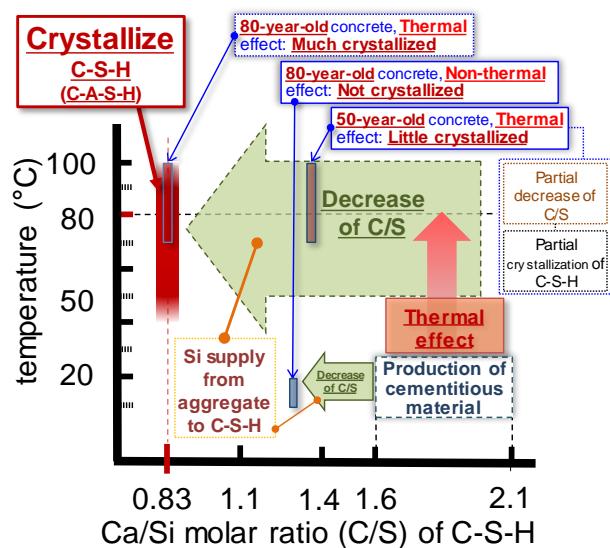


図-14 熱影響による C-S-H の結晶化条件の整理

- 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 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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

本事業では、「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>で提示されたガス移行挙動評価に関する課題の解決を目指す。

具体的には、処分施設内で構造材や廃棄体に含まれる金属の腐食等によって発生するガスが内部で蓄圧されること等により、人工バリアの長期安全性に影響を及ぼす可能性がある。その影響の程度を評価するために、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が必要である。

図-1 に、本事業において検討対象とする TRU 廃棄物処分施設の人工バリア概念（廃棄物グループ 2 の例）<sup>1) 3)</sup>と人工バリア材料（赤字で表記）を示す。

本事業では、上記のうち人工バリア（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て、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>4) 5) 6)</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) 5) 6)</sup>。

また、材料単体のみならず、人工バリア内で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>4) 5) 6)</sup>。

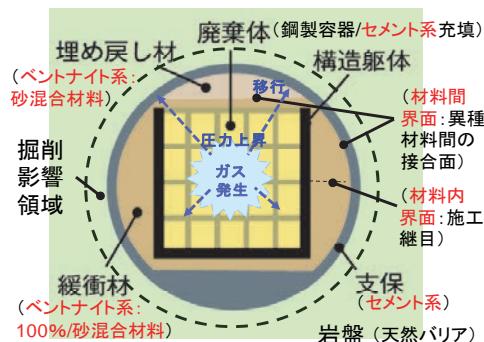


図-1 本事業において対象とする TRU 廃棄物処分施設の人工バリア概念図（廃棄物グループ 2 の例）<sup>1) 3)</sup>と人工バリア材料（赤字で表記）

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 27 年度の成果

平成 27 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（処分施設内から比較的多くのガス発生が懸念される廃棄物グループ 2 の処分概念を対象に構築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年度にわたって廃棄物グループ1と3、および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年度は、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べく、平成26年度までの成果をベースとして、シナリオ構築・評価における流れ(実施手順)の体系化を図った。具体的には、実施手順を主に4つの評価要素(「①(処分施設で想定される)場と現象の理解」・「②シナリオ設定」・「③評価ケース/モデル設定」・「④パラメータ設定」)に分類したうえで(図-2)、各々の作業(評価)の流れと相関性を明確化した評価体系を整備した。また、各々の評価要素毎における不確実性についても分析し、その低減方策を策定した。

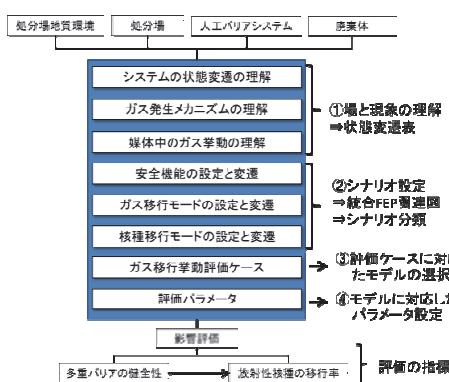


図-2 体系統化したガス移行評価の流れ(実施手順)と評価要素(①~④)

## (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」、およ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年度に策定した具体的な実施計画<sup>5)</sup>に基づき、平成26年度までにガス移行モデル(解析コードに組込まれた数値モデル)の検証および解析手法(解析コード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27年度は、ガス移行モデルの更なる信頼性向上を図るべく、既存のガス移行評価シナリ

オ<sup>4)</sup>で想定するようなベントナイト緩衝材中で気液二相流が主体となる(特に緩衝材中で大破過<sup>\*</sup>等が生じない)条件下でのガス移行試験(平成26年度に実施)により取得したデータを対象とし、当該試験系を図-3のようにモデル化したうえで、これまでに整備した解析ツールと既往のガス移行モデル(数理モデル)・パラメータ(表-1)を用いた再現解析を実施した。

その結果、試験データのフィッティング解析(逆解析手法を用いた既往パラメータの幅の範囲内での微調整と同定)により、図-4に示すように複数個の試験データを良好に再現可能となったこと、並びに、これまで不明確であったパラメータの適用幅が既往パラメータの範囲内であることが確認できたことで(表-2および図-5)、数理モデル・パラメータの信頼性を向上させた。

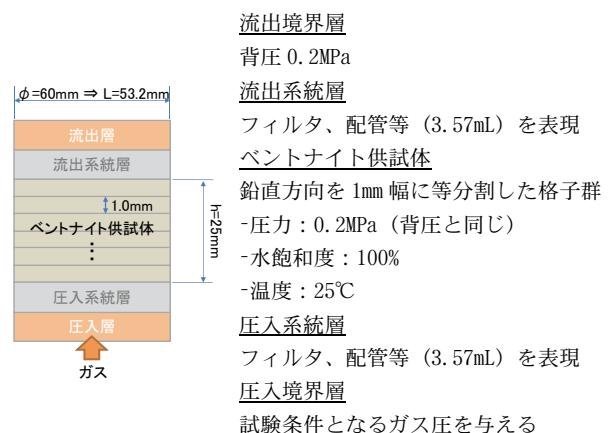


図-3 解析モデルと境界条件

表-1 既往の数理モデルとパラメーター観<sup>6)</sup>

$S_{\text{wp}}(-)$	$S_{\text{er}}(-)$	$n_p(-)$	$n_e(-)$	$P_0(\text{MPa})$	$n_c(-)$	相対浸透率	毛細管圧力
1 0.3867	0.0	1.449	13.70	0.661	1.821	$k_{\text{rp}} = \sqrt{S_{\text{wp}}} (1 - (1 - S_{\text{wp}})^{1/m_p})^{n_p}$	$P_c = P_0 (S_{\text{wp}}^{-1/m_p} - 1)^{1/n_c}$
2 0.2000	0.0	2.884	2.451	0.33	3.709	$S_{\text{pe}} = \frac{S_{\text{wp}} - S_{\text{er}}}{S_{\text{er}}}$	$S_{\text{we}} = \frac{S_{\text{er}} - S_{\text{er}}}{1 - S_{\text{er}} - S_{\text{er}}}$
3 0.2000	0.0	2.884	2.451	0.333	3.709	$m_p = 1 - 1/n_p$	$p = w, g$ (water, gas phase)
4 0.2280	0.0	2.455	2.474	0.324	3.297		$m_c = 1 - 1/n_c$
5 0.3639	0.0	2.011	2.953	0.291	2.290		

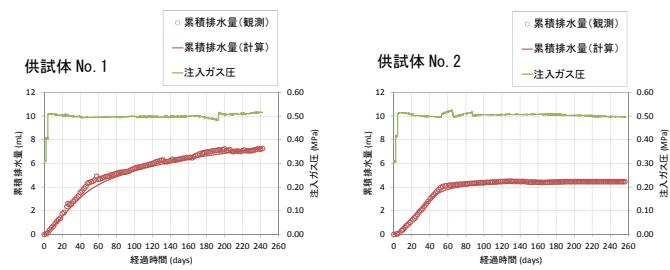


図-4 再現解析結果

\*『ガス圧上昇中にガスの排出量が急激に増大する現象』<sup>7)</sup>と定義

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

表-2 同定された二相流パラメーター観

供試体	$S_{nr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_w(-)$	$n_g(-)$	$P_0(MPa)$	$n_c(-)$
No.1	0.360	0.0	2.01	2.95	0.20	2.29
No.2	0.387	0.0	1.45	13.7	0.56	1.82

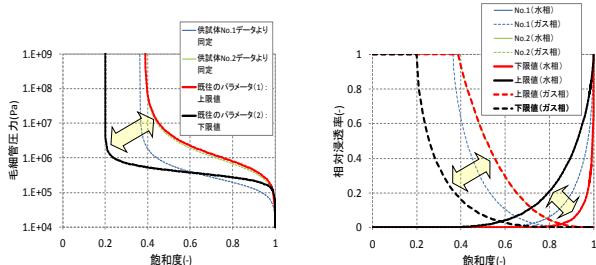


図-5 既往のモデルパラメータと本項目で同定されたパラメータの比較（同定されたパラメータは、それぞれ既往のパラメータ幅の中（黄色の「印」の範囲内）に収まっている）

### (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、ガス移行モデルの検証に必要なデータ取得を目的として、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）で取得されたガス移行挙動評価に係わる材料特性データ（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、その挙動を評価してきた<sup>6)</sup>。

平成27年度は、人工バリア内でのガス移行挙動評価として、既存のガス移行評価シナリオ<sup>4)</sup>で想定するようなバリア材料間における材料界面（ベントナイト／セメント）におけるガス移行挙動を評価することを目的に、当該界面の模擬供試体を用いたガス移行挙動評価試験を実施した。

その一例として、ベントナイトについては、図-6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。

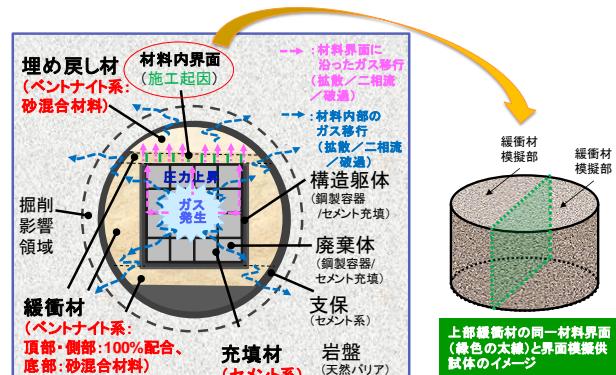


図-6 人工バリア内で想定されるガス移行挙動の概念と模擬供試体のイメージ

図-7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（流体に対する低透過性が発現し、ガスが透過しづらい状態）のガス移行挙動を評価するため、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配合率：100%、乾燥密度：1.36Mg/m<sup>3</sup>）の下面より注水することで飽和状態を構築し、その後ガスを注入する手順とした。

なお、模擬した界面幅は供試体半径（30mm）に対して1mm幅としたが、これは実際の緩衝材ブロック（約1.0m四方）間における隙間の水平幅が約18mm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。

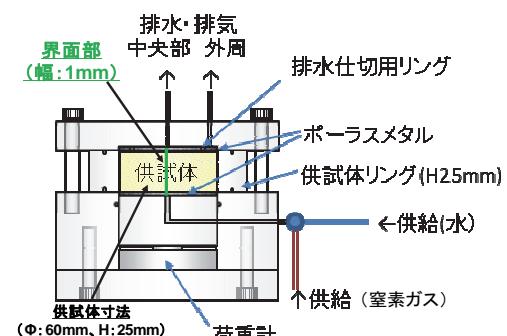


図-7 ガス移行挙動評価試験の概念

当該試験の結果、図-8に示すように、注水飽和後の供試体内部状態に関しては（1層/cm毎の水平方向カットによる解体調査を実施）、界面部の乾燥密度はその他部位より相対的に低く（間隙率が高く）、含水比分布は高くなる傾向（間隙率が高いところに水が浸透）が確認できたが、図-9

に示すように、その後のガス移行過程においては既往のガス移行試験結果（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（ガス移行に伴う間隙水の押し出し）挙動や破過圧が観測されたことから、材料界面の影響はガス移行挙動やガス破過圧に対して小さい可能性が示唆された。

今後の課題としては、今回想定した以外の界面幅（ $\phi 60\text{mm}$  の供試体で 2~5mm 程度、1m 四方の緩衝材ブロック寸法換算では 36~90mm 程度に相当）の変動影響（緩衝材ブロック定置施工時のバラつきを考慮）を評価する必要があると考える。

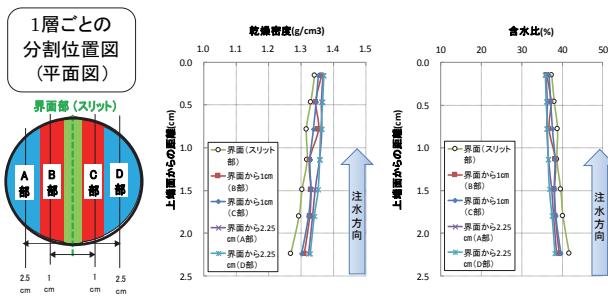


図-8 注水飽和過程における供試体内的水分・密度分布

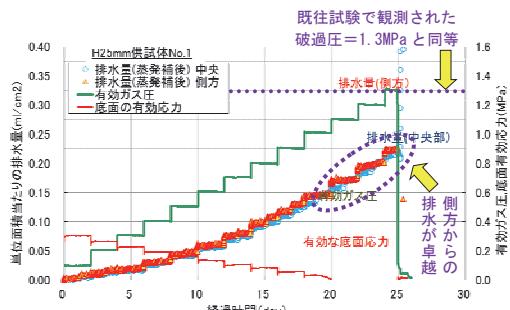


図-9 ガス注入(排水)過程における供試体からの排水挙動と有効応力の経時変化

一方で、上記のような緩衝材中のガス移行挙動の把握・理解に資する、力学連成二相流解析における高精度の解を得るために、ベントナイト系材料の特性（力学特性パラメータ）を適切に取得・同定する必要がある。

このため、前フェーズで取得対象としたベントナイト 100% 材料の特性データ<sup>6)</sup>の他、処分材料の多様性に対応するべく、平成 25 年度以降は底部緩衝材に想定されているベントナイト・砂混合材料（砂配合率 30%）データを拡充していくこととした<sup>5) 6)</sup>。平成 26 年度までに、

飽和度とサクションの相関性を把握するとともに、一定応力下のサクション（飽和度）制御試験により、膨潤（吸水飽和）・収縮（ガス移行による押し出し脱水）過程における詳細な材料挙動を把握したとともに、材料特性に係わるデータを取得・同定した。

平成 27 年度は、サクション制御式の圧密試験装置を用い、異なる数水準のサクションを載荷した複数個の供試体を準備したうえで、各サクション毎に圧密載荷・除荷試験を行い、詳細な材料挙動を把握・評価（載荷時：圧縮指数、除荷時：膨潤指数）するとともに、これらのサクション依存性に係るデータを取得・同定した（図-10）。

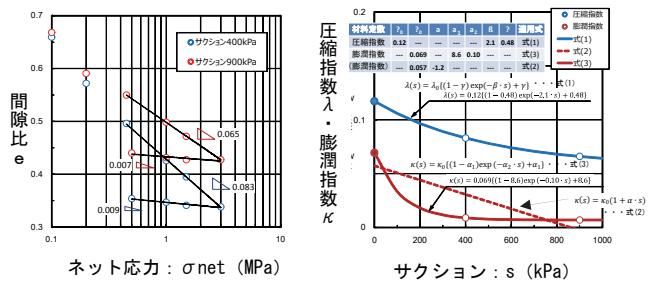


図-10 各サクション毎におけるベントナイト・砂混合材料の圧縮挙動と膨潤挙動(左図)、および圧縮指数λ・膨潤指数κのサクション依存性(右図)

- 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
- 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
- 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
- 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
- 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－、2014
- 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－、2015
- 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
- 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－、2016

## 5. 壊置き定置方式に対応した搬送・定置設備の概念検討

### ◇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 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）<sup>1)</sup>」は、使用済燃料の直接処分についての技術的課題等の把握およびそれを実現するために必要な技術開発、ならびにその他の代替処分オプションについての調査と有効性の検討をわが国の諸条件を踏まえて行うことを目的としている。そのうち原環センターが原子力機構から受託した「壊置き定置方式に対応した搬送・定置設備の概念検討」では上記を踏まえ、搬送・定置設備の技術オプションの体系的整理<sup>2)</sup>を用いて、壊置き定置方式の搬送・定置設備について概念設計を実施した。

### ◇平成 27 年度の成果

本年度は、壊置き定置における搬送・定置設備の概念設計を行うものとし、平成 26 年度に取りまとめた搬送・定置設備の技術オプションの体系的整理<sup>2)</sup>を利用して搬送・定置設備を構成する要素技術を絞込み、地層処分分野での先行事例<sup>5)6)7)</sup>や一般産業での事例を参考に設備の構成、概形や寸法を検討した。そして、設備の実現可能性について、技術オプションの利害得失における特徴整理の視点<sup>2)</sup>の項目別に課題と課題解決策の提示を行った。

さらに、横置き定置方式や CARE (CAverne Retrievable) 概念<sup>3)</sup>も含めて定置方式の違いによる搬送・定置設備の総合評価を実施した。

#### (1) 壊置き搬送・定置設備の概念設計

##### 1) 検討ケース

壊置き定置としてブロック方式（使用済燃料の廃棄体と緩衝材ブロックに分けた定置方式）と、廃棄体と緩衝材をあらかじめ一つのパッケージに組み込んだ PEM (Prefabricated EBS (Engineered Barrier System) Module) 方式の 2 つ定置方式を検討対象とした。PEM 方式においては 1 つの処分孔への定置数を単数の場合と複数

の場合について検討した。

定置対象は使用済燃料 PWR 燃料集合体 2 体収容の人工バリア(廃棄体と緩衝材ブロック)<sup>4)</sup>と PEM<sup>2)</sup>である。表-1 に壊置き定置方式での検討ケースと定置対象物の寸法等を示す。

表-1 壊置き定置の検討ケースと定置対象

定置方式	壊置き定置			
	ブロック方式		PEM方式	
	廃棄体	緩衝材	単数	複数
対象物の寸法 重さ	炭素鋼 処分容器 ・外径 0.839m ・長さ 4.780m ・重さ 約18 t	ペントナイト ブロック ・外径 2.239m ・長さ 6.180m ・重さ 約35 t	炭素鋼PEM容器 ・外径 2.295m ・長さ 6.466m ・重さ 約64.6 t	
定置イメージ				

#### 2) 概念設計

ここでは PEM 方式（単数）を例として紹介する。まず、装置を特徴づける把持機能と昇降・定置機能についての技術オプションの体系的整理を用いて候補技術を抽出し、先行事例等を参考に装置の構成、概形や寸法等を検討した。

把持機能には把持部吊り下し技術を、昇降・定置機能にはワイヤ+ワインチ技術を採用した。装置は一般産業で用いられているガントリクレーンのように、櫓の上部に昇降機構を設置した構造とした。図-1 に装置概念を示す。

なお、PEM 方式（複数）の場合、定置する PEM の寸法や重さは PEM 方式（単数）と同じであるため、装置に必要な能力もほぼ同様である。しかし、複数定置では処分孔内の吊下げ距離が大きいためワイヤが長くなり、収納するためのワイヤドラムを櫓外に配置した装置概念となる。

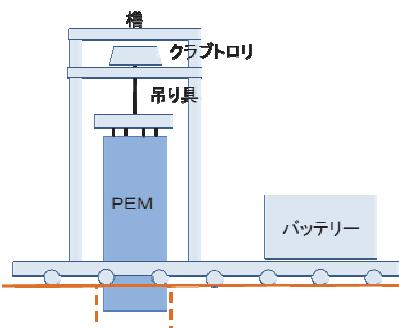


図-1 壊置き PEM 方式（単数）の装置概念

## (2)他の定置オプションの概念設計

横置き定置方式の代表的な定置条件における搬送・定置設備について、設備の実現可能性、課題点等について検討した。なお、横置き定置のブロック方式については平成25年度<sup>4)</sup>に、PEM方式の複数定置については平成26年度<sup>2)</sup>に概念設計を行っており、本業務では過年度の成果を基に実現可能性について整理した。また、CARE概念については、定置装置に関する実現可能性と課題を整理した。

## (3)総合評価

搬送・定置装置の概要と課題、実現可能性への課題点の総合評価を表-2に示す。

把持機能として把持部吊り下し技術を選定した装置では、遠隔操作が可能な把持の着脱方法や吊具、また、回収可能性においては定置されている廃棄体やPEMを再把持する吊具構造など、吊具に関する課題がある。

一方、昇降・定置機能にワイヤ+ワインチを選定した装置では、重量物の落下に対する安全対策が課題である。安全対策には吊りワイヤの二重化が挙げられるが、安全性をより確実にするためには安全対策の多重化が必要である。特に、堅置きPEM方式（複数）では吊りワイヤの二重化以外の多様な安全対策を講じることは難しいと考えられる。

表-2 処分坑道搬送・定置装置の実現可能性の総合評価

搬送・定置設備の概要	定置方式	堅置き定置			横置き定置			CARE概念	
		PEM方式		PEM方式	PEM方式				
		廃棄体	単数	複数	廃棄体	単数	複数		
把持、昇降・定置機能の技術	把持： 把持部吊り下し 昇降・定置： ワイヤ+ワインチ	把持： 片持ち吊り下し 昇降・定置： ワイヤ+ワインチ	把持： 押し込み 昇降・定置： エアペアリング	把持： 把持部吊り下し 昇降・定置： ワイヤ+ワインチ	天井クレーン エア台車				
装置の概略規模	高さ5.2m×幅3.0m 長さ14m 重量75t	高さ8.5m×幅3.5m 長さ12m 重量100t～150t	高さ8.5m×幅3.5m 長さ16m 重量110t～160t	ø2.34m円形 長さ13.5m 重量36t	ø2.5m円形 長さ8.5m 重量5～10t	高さ3.5m×幅3.5m 長さ14.5m 重量100t～150t	—		
参考とした先行事例	SKB MAGNE実証試験装置 <sup>5)</sup> NUMOのVS-G型 <sup>6)</sup> (ガラス固化体)	BSK3キニスタの定置試験装置 <sup>7)</sup>	DBEの平成25年度成果 <sup>3)</sup>	エアペアリングの実証試験装置 <sup>8)</sup> (ガラス固化体)	平成26年度成果 <sup>2)</sup>	平成25年度成果 <sup>4)</sup>			
実現可能性への回収可能性	○	—	—	△	—	—	—	—	
課題解決の難易度	先行事例が利用でき、課題解決の困難な項目はない	処分坑道近傍での定置になるため、課題解決の困難な項目はない	定置作業中の落下に対する安全性の確保や回収方法が解決の困難な項目である	個々の技術は既存技術の延長線上にあり、課題解決が困難な項目はない	先行事例が利用でき、課題解決の困難な項目はないが、定置作業の効率は低い	個々の技術には実績も多く、課題解決の困難な項目はない	地上施設での技術を転用し、解決の困難な課題はないが、超長期に渡る維持が必要		
実現可能性の総合評価	実現可能性は高い	実現可能性は高い	解決の困難な課題があり、実現可能性は低い	課題点はあるが、実現可能性はある	課題点はあるが、実現可能性はある	実現可能性は高い	課題点はあるが、実現可能性はある		
課題の難易度	○：既存技術を利用して解決できる ×：現状では有効な解決策がない	△：既存技術が利用できるが、新たな構造やシステムの検討が必要 —：困難な課題なし							

## 6. 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及びインコネル製の支持バネ等と、燃料棒の上下に接合されていた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>。

ハル・エンドピースに含まれる放射性核種のうち、特に処分後の影響が大きい核種は、ジルカロイ及び炭素鋼に含まれる非放射性の窒素及び炭素の放射化によって生成した炭素 14 である<sup>2)</sup>。

当センターでは、経済産業省からの受託事業において、TRU 廃棄物の地層処分の安全評価の信頼性向上を目的として、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、廃棄物の処分に向けては、廃棄物に含まれる放射性核種の総量（インベントリ）の推定や、廃棄物の受け入れ等に必要な廃棄体確認等が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、これまでに実施した炭素 14 のインベントリ設定方法を参考しつつ、他の核種のインベントリに関するデータ取得の手法及び計画について検討することとした。

このような検討には、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、放射化計算を実施するための運転履歴に対するデータなど、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。そのため、本検討においてはそのような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。

### ◇平成 27 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ハル・エンドピースのインベントリの設定に必要な情報を提供してきた。平成 27 年度については、作業会が開催されなかったため、具体的な情報提供等の作業は発生しなかった。なお、昨年度までに実施してきた、電力共通研究の事前検討の内容も、上記ロードマップの一部を形成することから、その活動をインベントリ作業会での活動として実施する予定であったが、次年度以降に見送られたが、当センターとしても、R&D 計画の策定および必要な技術開発への寄与の観点から、引き続き作業会へ参画することが重要である。

#### (2) 今後の進め方の検討

電力事業者と今後の対応について協議した。今後の見込みとして、電力事業者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であることから、それらを反映したインベントリ評価が実施できる可能性がある。また、国内および海外でのインベントリや重要核種の決定方法についての情報について検討した。一方、原環センターで実施しているエネ庁の委託事業のなかから、インベントリ設定に反映できるような項目について今後検討し、具体化していくこととした。

#### (3) 次年度以降の計画

平成 28 年度以降、TRU 電共研が再会される見通しが得られるまで検討を継続する。「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。

- 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

## 7. 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

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（以下、第2次取りまとめ）では、燃焼度45 GWd/THM、冷却期間4年のUO<sub>2</sub>使用済燃料の再処理にともない発生するガラス固化体をリファレンスケースとして、その発熱量に基づく処分場の熱解析により、地層処分場の概念設計が実施された。そして、人工バリア及び天然バリア中の核種移行解析などにより、地層処分の成立性が示された<sup>1)</sup>。

我が国の原子力政策の基本方針としては、高レベル放射性廃棄物の最終処分に向けた取組の抜本強化、使用済燃料の貯蔵能力の拡大、放射性廃棄物の減容化・有害度低減のための技術開発、再処理やプルサーマル等の推進などがエネルギー基本計画で示されている<sup>2)</sup>。

本事業では、今後の原子力エネルギーの利用状況の変化の可能性（燃焼度の変化やMOX燃料の利用など）を考慮して、放射性廃棄物の処分の観点から、核燃料サイクル全体として解決策を提示することを目的とする。

平成26年度は、今後の原子力利用のシナリオについて検討し、核燃料サイクルと処分の関連を図に整理した上で、研究開発課題を抽出した。

本年度は、今後の軽水炉の利用状況と再処理量を仮定して、使用済燃料の累積量及びPu分離量からPu消費量を差し引いたPu保管量を算出するとともに、放射性廃棄物の処分の観点から再処理やガラス固化で有効と考えられる技術を考慮して、核燃料サイクルと地層処分の関連図を更新した（図-1）。

1) 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

2) 経済産業省、エネルギー基本計画、2014

## II. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

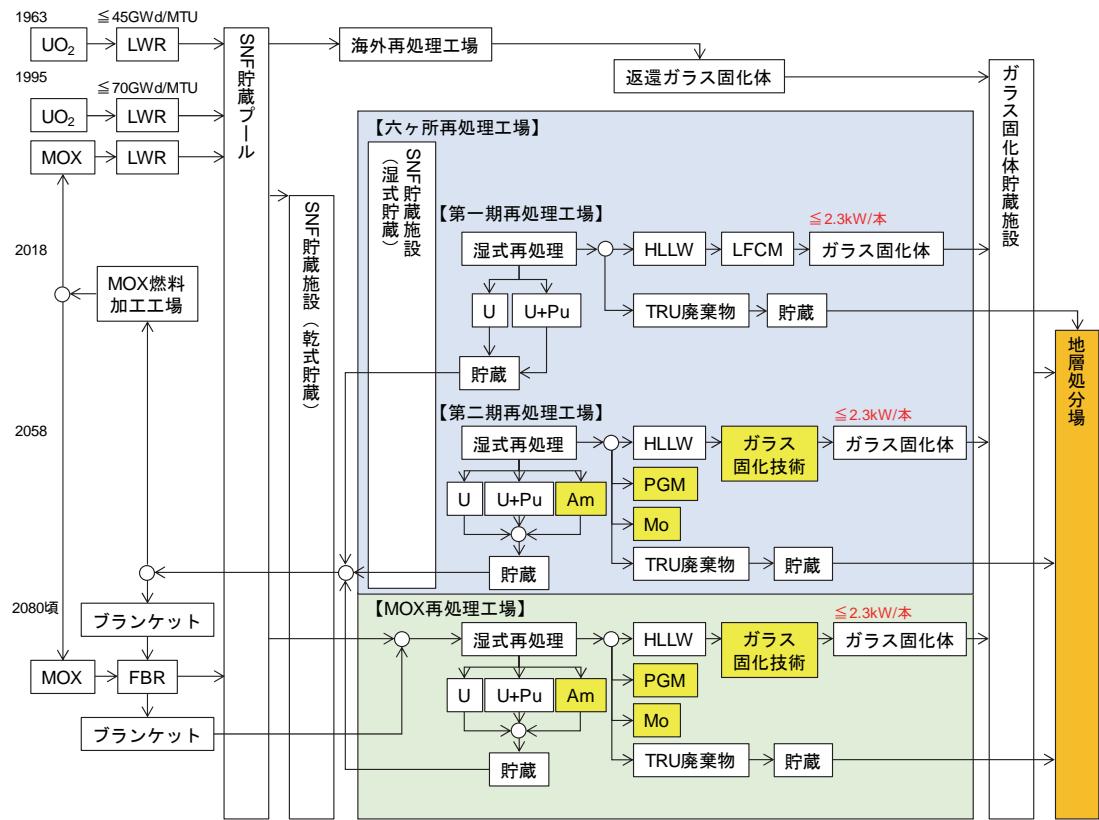


図-1 核燃料サイクルと地層処分の関連図

## 8. その他の地層処分に関する調査研究

その他地層処分に関する以下の調査研究を行った。

### (1)超音波探傷技術の処分容器同定・識別及び未開封確認への適応性検討作業

使用済燃料直接処分における保障措置関連技術の一つとして、処分容器の同定・識別、及び未開封確認を念頭に、処分容器の溶接部を対象とした超音波探傷技術について、既往試験データの解析、超音波シミュレーションを用いた解析、及び画像処理技術の調査等を行い、その適用性を検討、評価した。

### III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

## 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 26 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、社会的意見決定方策、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.rwmic.or.jp>)では、諸外国での進捗状況の理解を深めることを目的として、原子力発電の動向や使用済燃料／高レベル放射性廃棄物の発生や貯蔵など、処分前管理に関する情報を充実させた（図-2）。

上記のウェブサイトにおいては、諸外国における地層処分計画と技術開発、処分事業に関わる制度・実施体制、処分地選定の進め方と地域振興、処分事業の資金確保、安全確保の取り組み・コミュ

ニケーションの観点から最新情報と解説を掲載した。また、『海外情報ニュースフラッシュ』として、諸外国の高レベル放射性廃棄物処分を中心としたニュース記事を92件掲載した(記事タイトルの一覧は、資料VI-5を参照)。



図-2 ウェブサイト「諸外国での高レベル放射性廃棄物処分」の閲覧イメージ  
<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(2016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(2016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28年2月発行)は、諸外国における高レベル放射性廃棄物の地層処分の進捗状況に関する情報を体系的に整理・解説することにより、地層処分の理解促進に資することを目的とした資料である。誰でも利用できるように難しい表現をできるだけ避け、諸外国の状況や多様な取り組みがわかるように配慮している。具

体的には、地層処分概念や施設設計、処分事業の計画や進捗のみならず、法制度、資金確保、サイト選定の進捗や地域振興などの幅広い観点から、当該国での地層処分事業の特徴について解説している。2016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27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28年3月発行)は、欧米主要国の地下研究所、処分場候補サイトなどを訪問、視察を企画・検討する際の補助的な資料と活用してもらうことを意図したものである。訪問先として注目される地下研究所、高レベル放射性廃棄物処分場の候補サイト、中間貯蔵施設、放射性廃棄物処分場などの所在地、施設概要のほか、見学方法、問い合わせ先などの情報を最新化してまとめた。

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

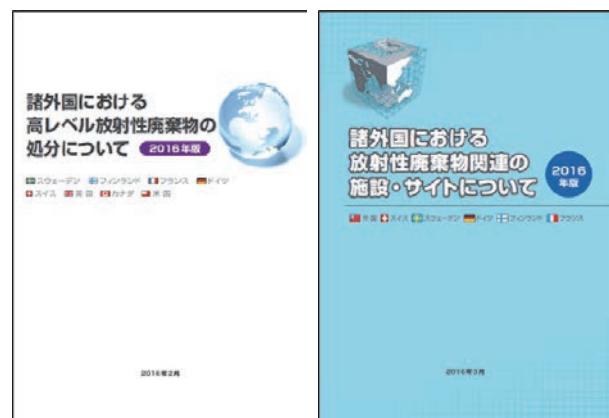


図-3 平成27年度に整備した技術情報冊子

- 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、2016

## 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、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。

調査においては、処分技術に関連する先進的な研究開発を実施するとともに、研究の実施に係る進捗管理や成果のとりまとめを行った<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 27 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〔親委員会及び分野別委員会（地質環境、工学技術、性能評価、直接処分の 4 分野）〕を設置し、平成 27 年度の研究開発内容・進捗状況に関する研究実施者による中間及び最終報告に基づいて、チェックアンドレビューを行った。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动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动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 27 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、研究坑道の孔壁に露出する岩盤を対象に原位置での浸透率測定を行った。その結果、断層面からの距離が大きくなるにつれて徐々に浸透率が低くなった（図-1）。

また、断層周辺の浸透率を踏まえて局所的な水理地質モデルを構築し、予察的な地下水流动シミュレーションを実施した。さらに、水-岩石反応を考慮した物質移行解析を行う上で必要な、岩石の鉱物組成や化学組成の把握のために、岩石試料の採取位置座標と化学組成・鉱物組成に逆距離加重法を適用して、主立坑断層周辺の主要化学組成と鉱物組成の空間分布を推定した。

また、断層周辺に分布する地下水中の環境トレーサーである六フッ化硫黄（SF<sub>6</sub>）の分析システムの検証と改良を行った。

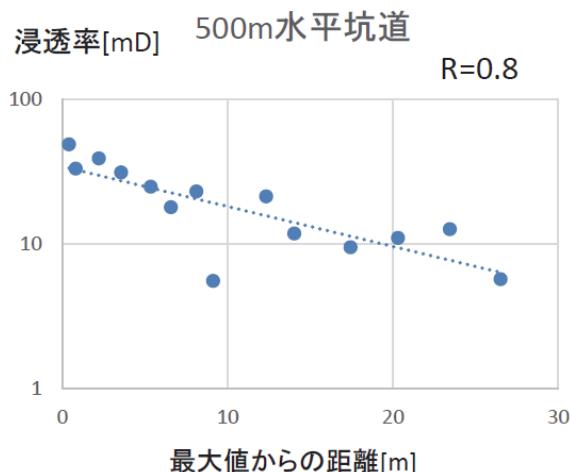


図-1 瑞浪超深地層研究所の深度 500m の水平坑道における、浸透率最大値を示す地点からの距書と浸透率の相関関係

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：鳥取大学 奈良禎太）

岩盤内ではき裂や空隙のネットワークが流体の流路となるが、き裂や空隙を閉塞させるプロセスがあれば、遮蔽性が大きくなる。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遮蔽性（バリア性能）の特性を調査する。

平成 27 年度は、巨視き裂を含む岩石、及び粘土層でき裂が充填された岩石を用いて透水試験

を行った。巨視き裂を含む岩石の透水係数は割れ目を有しない（インタクトな）供試体の透水係数と比べて極めて高い結果となった。粘土（イライト）で充填された層を含む供試体の透水係数は、巨視き裂を含む岩石の場合より3桁低く、インタクトな供試体よりは1桁高い結果となった。

破壊力学試験では、大島花崗岩を用いて、カルシウムイオン濃度が高い条件にてダブルトーション法によるき裂進展測定を行った。カルシウムイオン濃度が高い環境下では、き裂進展速度がより低くなり、サブクリティカルき裂進展<sup>1</sup>が抑制されることが示された。

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流れを整備し、処分施設の長期的力学挙動の予測システムの開発を目標とする。

平成27年度は、ベントナイトの各要素試験（ベントナイトの密度を変化させた一軸圧縮試験、温度を変化させた一軸圧縮試験、吸水過程でのベントナイト膨潤試験）を実施した。

密度を変化させた一軸圧縮試験では、緩衝材の乾燥密度が高いほどベントナイトの圧縮応力と弾性係数が上昇する傾向が示された。温度を変化させた一軸圧縮試験では、温度が上昇すると徐々にベントナイトの最大圧縮応力が低下し、弾性係数も低下する傾向となった。吸水過程での膨潤試験では、温度が高くなるとベントナイトが膨潤しやすくなる傾向が示された。

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27年度は、4価アクチノイドのアナログ元素である4価ジルコニウムを用いて、高イオン強度（高濃度NaNO<sub>3</sub>溶液）条件下での炭酸イオンとの錯生成反応及び水酸化物コロイドの挙動を検討した。

熱力学モデルにより、硝酸ナトリウム水溶液中のジルコニウム炭酸錯体の錯生成反応を概ね再現できたが、活量補正パラメータについては、文献データと比較した結果、改良する必要性が認められた。

硝酸塩影響下でのジルコニウム水酸化物コロイドのゼータ電位を測定し、また、加水分解反応に基づき水酸化物コロイドの平均電荷を計算することで、ゼータ電位の実験値の再現を試みたところ、硝酸塩濃度0.5Mでは実験値の再現が比較的良好であったが、2.0M条件においては、モデル改良の必要性が認められた。

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：東北大學 千田太詩）

本研究は、雲母の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、核種移行評価への反映方法を併せて提示することにより、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）に資することを目的とする。具体的には、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する。さらに、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な因子を整理し、核種移行評価への反映手法を提示する。

平成27年度は、黒雲母薄片及び変質鉱物に対するユウロピウム(Eu)の収着実験を行った。pH3

<sup>1</sup> 応力拡大係数が破壊じん性に達していない状態においてき裂が緩やかに進展する現象

### III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

の条件では、黒雲母薄片内への Eu の拡散浸入は、浸漬後 30 日経過しても継続していることを確認した。また、pH3 と pH5 の条件と比較して、pH8 の条件では、水溶液中の Eu 濃度が著しく低くなつた。飛行時間型二次イオン質量分析(ToF-SIMS)により、吸着試験後の黒雲母を分析したところ、Eu が加水分解する pH 8 の条件においても、薄片内に Eu が拡散浸入することを確認した。さらに Eu は変質鉱物の緑泥石及び絢雲母にも顕著に吸着することを確認した。(図-2)

また、黒雲母薄片の層間内部への Eu 収着移行挙動について二次元拡散方程式によるモデル解析の整備を行い、収着試験データを適用した拡散係数評価の実現可能性について目処が得られた。

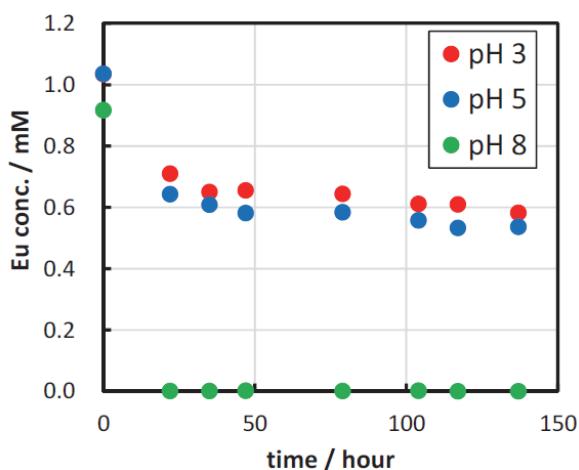


図-2 緑泥石粉末への Eu(III)収着の pH 依存性

⑥高レベル放射性廃棄物処分に関するアジェンダ・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 27 年度は、4 つのアジェンダ・セッティング類型の一つである「フレーミング」<sup>2</sup>の事例

として郵政民営化を取り上げ、問題のすり替えによる「アリーナの拡大」<sup>3</sup>というメカニズムを得た。

また、原子力分野におけるアジェンダ・セッティングの事例として、英国における放射性廃棄物処分事業の政治分析を行つた。公衆討議政策のアジェンダ・セッティングが行われた過程を分析し、公衆討議政策が（現時点では）失敗に終わった過程と原因を明らかにした。

さらに、政策に関するアジェンダ・セッティングをどのように行う必要があるかを特定するため、人々の態度形成に影響を与える要因の発見・特定を目的として、ウェブアンケートによる社会心理学的調査を行つた。その結果、政府に対する信頼と原子力発電の経済的メリット認識が態度形成要因ではなくなつたことを明らかにした。また、態度形成に影響を及ぼす可能性のある要因として、「否定的感情」、「同調圧力」を検討するための試行的なアンケート調査を実施した。

さらに、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（以下、調整会議という）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平成 26 年度までの研究開発状況の中間評価を、前述の検討委員会にて行った。具体的には、「全体計画」に示されている研究開発テーマの、平成 26 年度までの研究開発状況の中間評価・チェックアンドレビューについて、事務局として、以下のような委員会の運営に係る作業を実施した。

- ・ 中間評価の概要、位置付け、その後の計画等を検討委員会で説明する資料等の作成
- ・ 委員会の日程調整や会場の手配、委員会の進行スケジュールの作成、及び委員会開催後の議事録の取りまとめ等

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 27 年度分）、2016

<sup>2</sup> 問題を特定の見方（フレーム）に沿って提示すること

<sup>3</sup> 議論の場に参加しうるアクターの範囲が拡大すること

### 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関す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か国）	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27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26年度及び平成27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、法的根拠が無い場合の関与のよどみ等）
- 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処分場の最適化とBAT（利用可能な最善の技術）
- 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性能評価・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）の取扱い、結果の反映方針
  - 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（スウェーデンにおけるSFR処分場の拡張申請に対する審査状況等）

##### （2）放射性廃棄物の処分における規制研究並びに規制研究支援機関及び中立的研究機関の取扱いに関する考え方の整理

諸外国における放射性廃棄物の処分における規制研究並びに規制研究支援機関及び中立的研究機関の取扱いに関する考え方の整理を目的として、表-1に示した対象国等について、規制研究に関する考え方（規制研究の定義、規制として実施すべき研究項目とその理由等）について調査した。

また、規制研究支援機関の活用状況、活用している規制研究支援機関の性格・位置付け等を考慮し、規制研究支援機関を利用しているフランス、米国、スウェーデン、スイスの国・規制研究支援機関を抽出し、これらの機関の設置経緯、研究開発の実施範囲、独立性を維持するための措置等について調査した。

- ・原子力分野の規制研究支援機関を活用している例：【フランス】放射線防護・原子力安全研究所（IRSN）
- ・放射性廃棄物分野の規制研究支援機関を活用している例：【米国】放射性廃棄物規制解

### III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

#### 析センター (CNWRA)

- 専属の規制研究支援機関を持たず、特定の目的のために外部人材を活用している例：【スウェーデン】INSITE（サイト調査活動を追跡・評価する独立グループ）
- 中立的な研究機関を活用している例：【スイス】パウル・シェラー研究所 (PSI)

さらに、規制機関や規制研究支援機関が参加している、以下の国際プロジェクトの目的、実施概要、参加機関等について調査を行った。

- SITEX (Sustainable network of Independent Technical EXPertise for radioactive waste Disposal)
- DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALIDation against EXperiments)

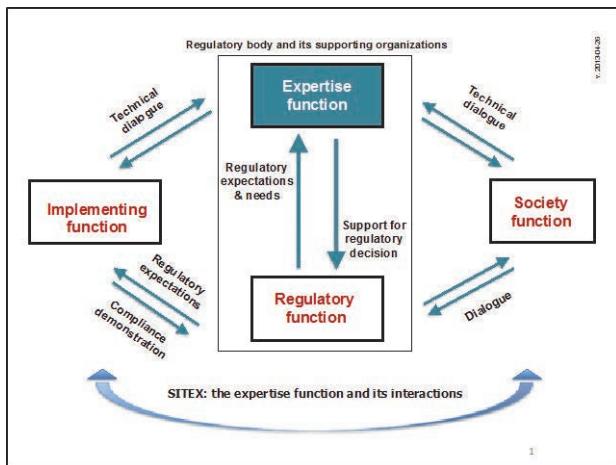


図-2 SITEX で示された専門家機能と規制機関、その他のステークホルダとの相互関係の概念

#### (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、規制研究支援機関の活用、研究実施内容等について、規制機関及び規制研究支援機関の双方から聞き取り調査を行った。

##### ①スイス

- パウル・シェラー研究所 (PSI)
- 連邦原子力安全検査局 (ENSI)
- 放射性廃棄物管理共同組合 (NAGRA)

##### ②フィンランド

- フィンランド技術研究センター (VTT)
- 放射線・原子力安全センター (STUK)

また、海外訪問調査等の機会を活用し、(1)及び(2)の調査結果について、面談による確認も行った。

#### The "Play Areas" in the Finnish NW Research

KYT2018 (MEE) Licence holders/applicants:  
Posiva, NPP companies



図-3 フィンランドにおける原子力廃棄物管理研究の役割分担

## 4. 福島第一原子力発電所廃棄物の処分方策検討に資する海外関連技術事例調査業務

### ◇事業の概要

本事業は、福島第一原子力発電所の事故及びその廃炉作業によりサイト内で発生する固体廃棄物の処理処分の基本的考え方の取りまとめを行うにあたり、関連する海外の事例を調査し、処分方策の具体的な検討に資することを目的としている。

本事業では、スウェーデン、フィンランド、フランス、米国の4カ国を調査対象とし、主に余裕深度処分に相当する処分方式及び処分概念、処分の安全評価における人間侵入シナリオの考え方、制度的管理のあり方について、その基となる考え方・背景等を含めた調査を行った。これらの各項目に対する、調査対象国毎の調査事項について、表-1に示す。

なお、本事業は、原子力損害賠償・廃炉等支援機構の委託により実施したものである。

### ◇平成27年度の成果

#### (1) 低中レベル放射性廃棄物の処分方式・概念に関する調査

調査対象国において、低中レベル放射性廃棄物の坑道及びサイロによる処分方式、及び廃炉に伴う廃棄物に関する処分概念について調査した。

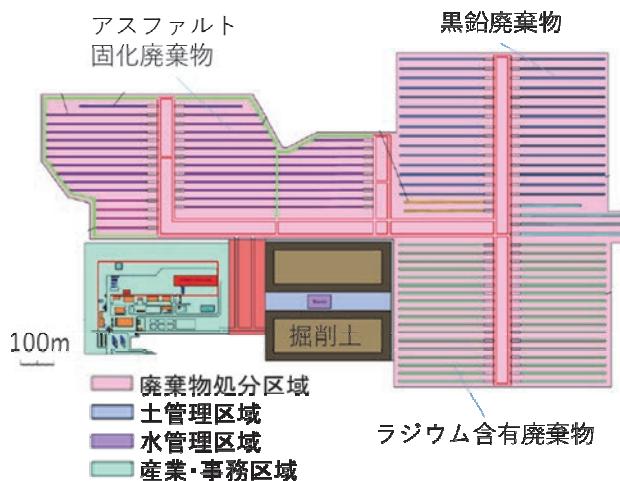


図-1 フランスの長寿命低レベル放射性廃棄物の地下坑道での処分概念（平面図）<sup>1)</sup>

調査事例としては、フィンランドのオルキルオト発電所サイトにて操業中のサイロ方式による低中レベル放射性廃棄物処分場や、フランスにおいて現在検討中の長寿命低レベル放射性廃棄物の深度20~30mでの坑道処分の概念（図-1）等が挙げられる。これらの事例について、処分方式、処分概念、処分施設の特徴、処分費用等に関する情報を収集し、整理した（表-1）。

#### (2) 処分の安全評価における人間侵入シナリオの評価に関する調査

調査対象国における、放射性廃棄物処分の安全評価における人間侵入シナリオの評価について、調査を行った。調査事例としては、スウェーデンの短寿命低中レベル放射性廃棄物処分場（SFR）の拡張申請における安全評価書での人間侵入シナリオ、米国の低レベル放射性廃棄物処分の安全評価における人間侵入シナリオ（図-2）等が挙げられる。

これらの事例における基準線量、評価方法及びその基となる背景・考え方等について、情報を収集し整理した（表-1）。

#### (3) 制度的管理のあり方に関する調査

調査対象国における処分場の事業廃止後の制度的管理のあり方に関し、規定及びその基となる背景・考え方等について、情報を収集し整理した。

調査にあたっては、制度的管理を能動的な制度的管理と受動的な制度的管理に区分し、能動的な

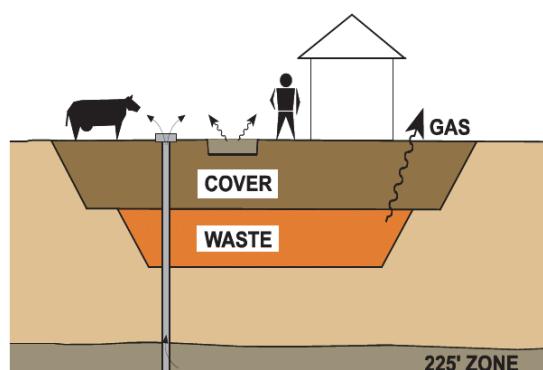


Figure 8.0-6.13-2. Inadvertent Intruder Resident

図-2 米国のWCSテキサス低レベル放射性廃棄物処分場の人間侵入シナリオの概念図（意図的でない掘削者・居住者）<sup>2)</sup>

### III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

制度的管理に関しては、監視項目（モニタリング・サーベイランスの項目）、監視期間、監視地点等について、受動的な制度的管理に関しては、文書・マーカ等による記録保存の考え方、その考え方に基づいた制度、管理期間等について情報を収集、整理した。

具体的には、各国の関連法令のほか、フランスのラ・マンシュ短寿命低中レベル処分場における記録保存に関する取り組み（図-3）や、米国の廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）でのマーカに関する検討等の事例を調査した（表-1）。



図-3 フランスのラ・マンシュ短寿命低中レベル処分場における恒久紙への記録保存作業<sup>3)</sup>

- 1) ANDRA, PNGMDR 2013–2015 PROJET DE STOCKAGE DE DÉCHETS RADIOACTIFS DE FAIBLE ACTIVITÉ MASSIQUE À VIE LONGUE (FA-VL) RAPPORT D' ÉTAPE 2015, 2015
- 2) Waste Control Specialists LLC, "Application for License to Authorize Near-Surface Land Disposal of Low-Level Radioactive Waste", The Revision 12c, May 1, 2007
- 3) ANDRA, Disposal facilities: preserving a collective memory for future generations, Essential Series, 2006

表-1 本業務における調査対象国と調査事項

調査対象国	低中レベル放射性廃棄物の処分方式・概念に関する調査事項	人間侵入シナリオの評価に関する調査事項	制度的管理のあり方に関する調査事項
スウェーデン	・炉内構造物等の廃炉に伴う長寿命低中レベル放射性廃棄物の処分場（SFL）に関する検討状況、坑道方式とサイロ方式の費用、建設、操業面の比較検討結果等	・短寿命低中レベル放射性廃棄物処分場（SFR）の拡張申請における安全評価書（SR-PSU）での人間侵入シナリオ ・同評価書においてリスク基準の適用を受ける「井戸侵入シナリオ」、並びに、線量基準がなく例証のみが求められる「将来の人間活動シナリオ」の設定、評価結果等	・能動的な制度的管理について、監視項目（モニタリング・サーベイランスの項目）、監視期間、監視地点等 ・受動的な制度的管理について、文書・マーカ等による記録保存の考え方、その考え方に基づいた制度、管理期間等 ・制度的管理に関する規定の策定経緯等
フィンランド	・ロヴィーサ発電所サイトでの坑道方式による低中レベル放射性廃棄物処分に関する処分概念等 ・オルキルオト発電所サイトでのサイロ方式による低中レベル放射性廃棄物処分及び廃炉廃棄物処分に関する処分概念等	・放射線・原子力安全センター（STUK）による「YVL D.5:原子力廃棄物の処分」における、人間侵入シナリオ ・同規則における線量の期待値での比較の容認、ボーリング及び井戸掘削シナリオの評価の要求に関する背景等	
フランス	・天然ウラン黒鉛ガス型原子炉の解体によって生じる黒鉛廃棄物等の長寿命低レベル放射性廃棄物の処分方式・概念等 ・長寿命中レベル放射性廃棄物の地層処分に関する処分概念等 ・廃炉に伴う廃棄物の浅地中処分に関する処分概念等	・ラ・マンシュ低中レベル放射性廃棄物処分場に関する安全評価における人間侵入確率設定の根拠、具体的な評価方法等 ・高レベル及び低中レベル放射性廃棄物に関する基準線量とその評価条件、人間侵入シナリオにおける評価方法	
米国	・低レベル放射性廃棄物の浅地中処分に関する連邦規則 10 CFR Part 61 での $\alpha$ 核種の埋設濃度上限設定の根拠及び考え方等 ・同規則での固体廃棄物に含まれる液体体積制限の設定根拠 ・GTCC 廃棄物に関する、2011 年のドラフト環境影響評価書（DEIS）での処分概念	・高レベル放射性廃棄物、TRU 廃棄物の処分の安全評価に関する規則における評価方法及び様式化したシナリオ設定の考え方等 ・低レベル放射性廃棄物処分の安全評価における人間侵入シナリオ	

## 5. 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、その適用可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。

次に、本年度は、放射性廃棄物の処理・処分に関する調査・研究として以下の2件をとりまとめた。

- ①セメント系材料の海水影響に関する調査
  - ・セメント系材料の海水環境の化学的変質、力学的挙動、物質移行等の処理処分に係わる国内外の文献調査からの今後の検討課題を整理(図-1)。
- ②福島第一事故廃棄物廃棄物の処理処分技術の調査

「セメント+コンクリート+塩化物+劣化」検索結果

No.	タイトル / 著者 / 指載誌 / キーワード	内容										
		力学特性	物質移行	ひび割れ	MSH	結晶変質	溶剤	実構造物 露頭試験	塩害耐 性	塩濃度	海水系 地下水	
1	塩化物系の凍結防止剤によるコンクリートの化学的劣化に関する研究 森 真亮(文部科学省委員会) コンクリート工学=Concrete journal 49(8), 43-49, 2011-08-01	○				○						
2	2105.秋不知海岸に見露した含氯コンクリートの腐食抑制効果(補修・補強)(材料) 橋田 直倫、久保 勝司、村下 刚(他)、凌江 二夫(他) コンクリート工学年次論文集 30(2), 625-630, 2008-07-30	自然電位・ 分極抵抗 質量変化 腐食速度 塩化物浸透					○	海水(飛来 塩分)				
3	セメント硬化体の化学的侵食過程におけるイオンの拡散性状と水和物量の変化 久田 真、伊藤 慎也、酒井 宗義 土木学会論文集(T53), 39-50, 2004	イオン拡散 性状 イオン透過 性状 水和物量変化			○	○		CaCl <sub>2</sub> ClO <sub>4</sub> NaOHNaNO <sub>3</sub> NaCl SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	それぞれ 1/2M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> のみ 1/10濃度			
4	海洋環境に位置するPC橋の劣化 阿波根 康夫、神谷 正哲、大城 芳樹(他)、仲村 佳輝 コンクリート工学=Concrete journal 40(3), 36-42, 2002-03-01	圧縮強度 静弾性 中性化 自然酸素 分極抵抗 ASR	塩化物浸透			○		○(22年経 過した沖縄 の海洋環境 下PC橋)	海水(飛来 飛沫塩分 等)			
5	塩害環境下のコンクリート橋に適用した塩害対策の追跡調査 橋山 和昭、大橋 昂、松田 哲夫、青山 誠伸 コンクリート工学Vol. 42 (2004) No. 3, pp.30-37	鉄筋の腐 食・進塩性 能	塩化物浸透 拡散係数	○				○(海堤、 道路用試験 体)	海水		OPC HPC	

図-1 セメント系材料の文献調査結果(抜粋)

### III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

#### 6. 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 27 年度版）」を作成した。

##### (2) 下水汚泥焼却灰の放射性物質対策に関する調査検討業務委託

自治体で発生するセシウムを含む焼却灰の処分開始に向け、処分方法を具体化し、処分開始の見通しを得た。

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

## IV. 國際交流

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・研究協力を実施している海外機関

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、平成 27 年度には、ANDRA、NAGRA、SKB/SKBI、DBE 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	ポシヴィア社 (Posiva Oy)
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・運転会社 /DBE テクノロジー社 (DBE/DBE Technology)
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	中国核工業集団公司地質・鉱山局 (CNNC/DGM)
台湾	(財) 核能科技協進会 (NuSTA)



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）および炭素 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、欧州での研究状況の情報収集等を行った。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

平成 25 年度まで参画した、EURATOM の「モニタリングに関する国際共同研究 MoDeRn (Monitoring Developments for Safe Repository Operation and Staged Closure)」プロジェクトの後継として、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

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た。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ている。

本年度、当センターでは、処分実施主体によるモニタリング計画を調査するとともに、当センターの地中無線モニタリング技術に関する情報提供、欧州でのモニタリングに関する検討状況の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。

2015 年 6 月に European Commission との契約が成立し、正式にスタートした。初年度は、参加する各機関の計画をもとに、Cebama プロジェクトとしての実施計画をとりまとめるとともに、各機関の成果を相互に比較可能とするためのベンチマークテスト等の計画の策定を実施した。

各機関の 2015 年度の成果は、2016 年 5 月に開催される Cebama, 1st Annual Workshop (<http://www.cebama.eu/Register/FirstWorkshop>) で公開される。

#### (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 (The 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) での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方から、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、当センターは本年度より参加している。また、日本からは当センターのほかに国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 (以下、JAEA) が研究施設等廃棄物の処分実施主体として参加している。

本年度、当センターでは、JAEA と共に、RK&M イニシアチブが地層処分の記録保存技術として検討しているタイムカプセルについて、1970 の大阪万博開催時に、大阪城公園に設置されたタイムカプセルに関する事例調査を行うとともに、将来の世代が地層処分場に関する膨大な記録を調査する際に鍵となるファイルに関する検討状況等について情報収集を行った。

## 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「研究施設等廃棄物の処分の概要について」 坂本 義昭 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 廃棄物対策・埋設事業統括部 技術主席）	平成27年6月19日	原環センター
	第2回講演会「地下空洞型処分施設の施工技術の確証試験」 秋山 吉弘（基準規格・L1 プロジェクト）	平成27年9月11日	原環センター
	第3回講演会「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」 宮本 泰明 氏（国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 廃炉国際共同研究センター 研究推進室 室長代理、技術研究組合国際廃炉研究開発機構 開 発計画部 副部長）	平成28年2月26日	原環センター
	第4回講演会「地層処分の記録と記憶」 江藤 次郎（技術情報調査プロジェクト）	平成28年3月30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27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27年10月29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27年11月12日	東海大学高輪 キャンパス
研究発表会	平成27年度原環センター研究発表会 1.研究発表 「原環センターにおける調査研究の概要」 田中 俊彦（常務理事） 「オーバーパックの品質／健全性－評価・製作・初期条件から なるシステムの構築－」 小林 正人（処分工学調査研究プロジェクト） 「余裕深度処分施設の施工技術の確証－地下環境下・実規模大 の地下空洞型処分施設の構築を例に－」 秋山 吉弘（基準規格・L1 プロジェクト） 2.特別講演 「核燃料サイクル分野の横断的研究から見えてきたこと」 佐藤 正知 氏（独立行政法人国立高等専門学校機構 福島工業高等専門学校 特命教授、北海道大学名誉教授）	平成27年12月3日	星陵会館 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底部低透水層の転圧工法による施工品質の評価	山田淳夫、秋山吉弘	土木学会 土木学会論文集 C (地盤工学) Vol.71 No.3, 2015
2	Effects of hydrosulfide and pH on iodine release from an alumina matrix solid confining silver iodide	桜木智史	Material Research Society Symposium Proceedings vol.1744, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXVIII, 2015
3	Current Status of Immobilization Techniques for Geological Disposal of Radioactive Iodine in Japan	桜木智史	Material Research Society Symposium Proceedings vol.1744, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXVIII, 2015
4	Study of stainless steel corrosion by hydrogen measurement under deoxygenated, low-temperature and basic repository conditions	桜木智史、吉田誠司	Progress in Nuclear Energy, Vol.87, pp26-31, 2016

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	オーバーパックの健全性評価に関する研究 －溶接部を対象とした腐食評価と構造評価－	川久保政洋、小林正人、朝野英一	日本原子力学会バックエンド部会 第31回バックエンド夏期セミナー 2015/8/5～6
2	オーバーパックの健全性評価に関する研究 －再冠水時における緩衝材の流出挙動に対する地下水成分の影響－	横山聰、石井智子、朝野英一	日本原子力学会バックエンド部会 第31回バックエンド夏期セミナー 2015/8/5～6
3	低レベル放射性廃棄物処分における埋戻し材に関する材料特性評価試験について（その3）	山田淳夫、秋山吉弘	地盤工学会 第50回地盤工学研究発表会 2015/9/1～4
4	実施規模で施工した緩衝材（ペントナイト）の透水係数の評価	山田淳夫、秋山吉弘	地盤工学会 第50回地盤工学研究発表会 2015/9/1～4
5	Fundamental experiment on swelling characteristics of bentonite mixture soil(10～20% of bentonite mixing ratio)	山田淳夫、秋山吉弘	地盤工学会 第50回地盤工学研究発表会 2015/9/1～4
6	ヨウ素固定化セメントの発熱特性およびスケールアップ －（1）発熱影響による水和鉱物組成およびヨウ素固定相の評価－	桜木智史	日本原子力学会 2015年秋の大会 2015/9/9～11
7	地中無線モニタリング装置への磁界共鳴式電力伝送の適用試験	江藤次郎	日本原子力学会 2015年秋の大会 2015/9/9～11
8	廃棄体回収のための緩衝材除去装置の開発（1）全体概要	朝野英一、塚原茂樹、岩谷隆文	日本原子力学会 2015年秋の大会 2015/9/9～11
9	廃棄体回収のための緩衝材除去装置の開発（2）装置開発	塚原成樹、朝野英一、岩谷隆文	日本原子力学会 2015年秋の大会 2015/9/9～11
10	廃棄体回収のための緩衝材除去装置の開発（3）緩衝材除去装置による実規模試験	岩谷隆文、塚原成樹、朝野英一	日本原子力学会 2015年秋の大会 2015/9/9～11
11	廃棄体回収のための緩衝材除去装置の開発（4） 3D計測技術の開発	朝野英一、塚原成樹、岩谷隆文	日本原子力学会 2015年秋の大会 2015/9/9～11
12	理解促進活動における地層処分実規模試験施設の効果	中山真理子、岩谷隆文、小林正人、朝野英一	日本原子力学会 2015年秋の大会 2015/9/9～11
13	フィリピン国・ザンバレスオフィオライトのアルカリ地下水との相互作用によるペントナイトの地球化学的・鉱物学的変遷プロセス	山川稔、藤井直樹	日本原子力学会 2015年秋の大会 2015/9/9～11

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
14	地下空洞型処分施設における上部埋戻し材の施工時の品質管理に関する検討	山田淳夫、秋山吉弘	土木学会主催 平成 27 年度全国大会 第 70 回年次学術講演会 2015/9/16~18
15	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） －TRU 廃棄物処分におけるガス影響シナリオに係る不確実性の検討－	古賀和正、大和田仁	土木学会主催 平成 27 年度全国大会 第 70 回年次学術講演会 2015/9/16~18
16	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） －圧縮飽和ベントナイトの低圧注入条件によるガス移行試験と特性評価－	古賀和正、大和田仁	土木学会主催 平成 27 年度全国大会 第 70 回年次学術講演会 2015/9/16~18
17	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） －力学連成二相流解析によるガス移行試験の予察的検討－	古賀和正、大和田仁	土木学会主催 平成 27 年度全国大会 第 70 回年次学術講演会 2015/9/16~18
18	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） －ベントナイト・砂混合材料のヒステリシス水分特性とサクション変化に伴う膨潤・収縮変形特性－	古賀和正、大和田仁	土木学会主催 平成 27 年度全国大会 第 70 回年次学術講演会 2015/9/16~18
19	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 5） －処分システムにおけるガス移行挙動解析手法の高度化－	古賀和正、大和田仁	土木学会主催 平成 27 年度全国大会 第 70 回年次学術講演会 2015/9/16~18
20	溶脱に伴う硬化セメントペーストの拡散係数変化に関する検討（その 1） －セメント硬化体の溶脱試験手法の検討－	林大介	土木学会主催 平成 27 年度全国大会 第 70 回年次学術講演会 2015/9/16~18
21	溶脱に伴う硬化セメントペーストの拡散係数変化に関する検討（その 2） －混合セメント硬化体の溶脱試験手法の検討－	林大介	土木学会主催 平成 27 年度全国大会 第 70 回年次学術講演会 2015/9/16~18
22	溶脱に伴う硬化セメントペーストの拡散係数変化に関する検討（その 3） －予測モデルに関する検討－	林大介	土木学会主催 平成 27 年度全国大会 第 70 回年次学術講演会 2015/9/16~18
23	Kozeny-Carman 則を用いたベントナイト系人工バリアの止水性能評価	大和田仁、林大介	土木学会主催 平成 27 年度全国大会 第 70 回年次学術講演会 2015/9/16~18

V. 資料

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
24	Effect of hydration heat on iodine distribution in gypsum additive calcium aluminate cement	桜木智史	Materials Science &Technology(MS&T15) "Materials Issues in Nuclear Waste Management in the 21 <sup>st</sup> Century" 2015/10/4~8
	Immobilization Techniques for Geological Disposal of Radioactive Iodine in Japan	桜木智史	Materials Science &Technology(MS&T15) "Materials Issues in Nuclear Waste Management in the 21 <sup>st</sup> Century" 2015/10/4~8
25	A study on thermal alteration of cementitious material in TRU radioactive waste disposal	林大介、大和田仁、藤井直樹	第5回東アジア放射性廃棄物管理フォーラム (EAFORM2015) 2015/10/25~28
26	Study on experimental method for understanding and evaluation of corrosion phenomena of waste disposal package	小林正人、中山真理子、川久保政洋、朝野英一	第5回東アジア放射性廃棄物管理フォーラム (EAFORM2015) 2015/10/25~28
27	原子力環境整備促進・資金管理センターと日本原子力研究開発機構との共同研究－無線計測技術の適用性に関する研究－	川久保政洋、小林正人	平成27年度東濃地科学センター地層科学研究 情報・意見交換会 2015/10/29
28	放射性廃棄物処分容器の構造健全性に関する研究 －限界き裂寸法と残留応力の関係－	川久保政洋、小林正人、朝野英一	日本機械学会主催 M&M2015 材料力学カンファレンス 2015/11/21~23
29	地層処分施設における遠隔回収技術の開発	朝野英一、塚原成樹	精密工学会 大規模環境の3次元計測と認識・モデル化技術専門委員会 第20回定例研究会 2015/12/6
30	Corrosion Kinetics of stainless steel under deep geological repository condition	桜木智史、吉田誠司	Waste Management Symposia 2016 2016/3/6~10
31	A New Manufacturing Method of Bentonite Pellets as a Gap Filling Material for HLW Repository	朝野英一	Waste Management Symposia 2016 2016/3/6~10
32	Applicability of Wireless Power Transfer for Monitoring Technology of Radioactive Waste Geological Disposal	小林正人、江藤次郎	Waste Management Symposia 2016 2016/3/6~10

No.	題 目	原環センター発表者	発表先
33	室温近傍の水腐食によって生成したジルコニウム酸化物の結晶構造	吉田誠司、桜木智史	日本原子力学会 2016年春の大会 2016/3/26~28

V. 資料

(3)解説等

No.	題 目	著 者	発 表 先
1	地層処分のサイト選定の取組状況 (その1) 地質学的基準によるサイト選定－ドイツ、スイス－	徳島秀幸、山本啓太	日本原子力学会誌アトモス 2015年8月号
2	地層処分のサイト選定の取組状況 (その2) 地質学的基準によるサイト選定－英国、カナダ－	佐原聰、稻垣裕亮	日本原子力学会誌アトモス 2015年9月号
3	スウェーデン、直接処分を採用	稻垣裕亮	月刊エネルギーレビュー 2015年7月号
4	フィンランド－世界初の高レベル放射性廃棄物の地層処分場の操業開始が近づく－	田辺博三	月刊エネルギーレビュー 2015年7月号
5	地層処分事業等の国際的な動向	稻垣裕亮	日本原子力産業協会、原子力年鑑 2016 2016年10月
6	わが国の放射性廃棄物対策の状況	田辺博三	日本原子力産業協会、原子力年鑑 2016 2016年10月
7	地層処分施設における遠隔回収技術の開発	朝野英一、塚原成樹	日本ロボット工業会 機関誌「ロボット」228号
8	放射性物質による事故由来汚染物の対策技術の現状 (6)福島第一原子力発電所事故由來の放射性廃棄物の処理・処分に向けての技術課題と解決方策	大和田仁	地盤工学会誌 Vol.64 No.2, Ser.No.697
9	高レベル放射性廃棄物の地層処分－人工バリアシステム構築のための機械技術－	朝野英一	講演：廃止措置研究・人材育成等強化プログラム 神戸人材育成セミナー

## 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№114	TRU 廃棄物地層処分における固化体の機能—ヨウ素 129・炭素 14 の放出挙動を例に—	2015 年 6 月
2	原環センタートピックス№115	研究施設等廃棄物の処分の概要について	2015 年 9 月
3	原環センタートピックス№116	核燃料サイクル分野の横断的研究から見えてきたこと	2015 年 12 月
4	原環センタートピックス№117	余裕深度処分施設の施工技術の確証—地下環境下、実規模大の地下空洞型処分施設の構築を例に—	2016 年 3 月
5	原環センター2014 年度 技術年報		2015 年 11 月
6	原環センター技術報告書	地下空洞型処分施設施工技術の確証試験の概要	2016 年 3 月

上記の刊行物は、原環センターホームページのライブラリー <http://www.rwmc.or.jp/library/> からご覧いただけます。

## 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	2015/4/3	追記) 米国で 2016 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 836 万ドルを要求 [2015 年 2 月 3 日既報]
2	2015/4/6	追記) 英国政府が地層処分施設の新たなサイト選定プロセス等を示した白書を公表 [2014 年 8 月 1 日既報]
3	2015/4/8	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]
4	2015/4/9	英国で地質学的スクリーニングに関して評価を行う独立評価パネル (IRP) を地質学会が設置
5	2015/4/15	ドイツで「高レベル放射性廃棄物処分委員会」が新たな処分実施主体の設置を提案
6	2015/4/17	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
7	2015/4/20	スウェーデン SKB 社が使用済燃料のキャニスター封入施設の建設許可申請の補足書を提出 [2015 年 2 月 3 日既報]
8	2015/4/20	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	2015/5/7	追記) 米国で 2016 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 836 万ドルを要求 [2015 年 2 月 3 日既報]
10	2015/5/7	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]
11	2015/5/8	追記) 米国における民間での使用済燃料の中間貯蔵施設の計画を巡る動き [2012 年 10 月 12 日既報]
12	2015/5/18	フランス原子力安全機関 (ASN) が、放射性廃棄物管理機関 (ANDRA) に対し、地層処分場の操業時リスク管理に関するレビュー結果を提示
13	2015/5/21	英国ドーンレイで新たな低レベル放射性廃棄物処分施設が廃棄物の受け入れを開始
14	2015/5/25	ドイツ「高レベル放射性廃棄物処分委員会」における検討状況
15	2015/5/25	追記) 米国で 2016 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 836 万ドルを要求 [2015 年 2 月 3 日既報]
16	2015/5/26	フィンランドで原子力法及び放射線法が改正
17	2015/5/26	英国政府が「自治体の意思表示のための作業グループ」(CRWG) の活動状況を公表
18	2015/6/2	英国のウェールズ政府が地層処分を高レベル放射性廃棄物等の管理方針として決定－処分の実施プロセス等に関する公開協議を開始－
19	2015/6/3	追記) 米国の廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) で放射線事象に対応した一部施設の早期封鎖計画等を検討 [2014 年 6 月 4 日既報]

	掲載日	タイトル
20	2015/6/4	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]
21	2015/6/18	韓国で使用済燃料公論化委員会が「使用済燃料管理勧告 (案)」を公表
22	2015/6/18	英国ドリッギン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
23	2015/6/19	米国で放射性廃棄物技術審査委員会 (NWTRB) が DOE による独立した処分計画に対する評価報告書を公表
24	2015/6/22	フランスで国家評価委員会 (CNE) が第 9 回評価報告書を公表
25	2015/6/26	スウェーデンで SSM が使用済燃料最終処分場の立地・建設許可申請に対する安全審査の中間結果 (第一回) を公表
26	2015/6/26	ドイツで BMUB がゴアレーベン中間貯蔵施設に代わる返還ガラス固化体の貯蔵先を提案
27	2015/7/2	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]
28	2015/7/3	追記) 英国政府が「自治体の意思表示のための作業グループ」(CRWG) の活動状況を公表 [2015 年 5 月 26 日既報]
29	2015/7/3	フランスの放射性廃棄物管理機関 (ANDRA) が国家放射性廃棄物インベントリレポートの 2015 年版を公表
30	2015/7/3	追記) 韓国で使用済燃料公論化委員会が「使用済燃料管理勧告 (案)」を公表 [2015 年 6 月 18 日既報]
31	2015/7/7	追記) ドイツ「高レベル放射性廃棄物処分委員会」における検討状況 [2015 年 5 月 25 日既報]
32	2015/7/13	フランスで地層処分場の設置許可申請スケジュールの変更等に関する法律が成立
33	2015/7/16	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]
34	2015/7/16	追記) 韓国で中・低レベル放射性廃棄物処分場の竣工予定を 2014 年 6 月に再変更 [2012 年 1 月 24 日既報]
35	2015/7/24	米国で NRC がクラス C を超える低レベル放射性廃棄物処分の許認可権限をテキサス州に与えることを検討
36	2015/7/30	英国の放射性廃棄物管理会社 (RWM) が地層処分対象の放射性廃棄物インベントリ報告書を公表
37	2015/7/31	追記) スペインで放射性廃棄物管理公社 (ENRESA) が集中中間貯蔵施設 (ATC) の立地・建設許認可を申請 [2014 年 2 月 4 日既報]
38	2015/8/3	追記) 英国で地質学的スクリーニングに関して評価を行う独立評価パネル (IRP) を地質学会が設置
39	2015/8/4	追加) 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]
40	2015/8/6	追加) フィンランドで新規原子炉建設と最終処分場の拡大に関する原則決定について経済大臣が提案 [2010 年 4 月 27 日既報]

V. 資料

	掲載日	タイトル
41	2015/8/10	英国政府が地層処分事業に関する持続可能性評価と生息環境規制評価の実施内容案を公表
42	2015/8/10	フランスで地層処分場の設置許可申請スケジュールの変更等に関する法律に憲法院が違憲の判断
43	2015/8/17	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]
44	2015/8/20	追記) 米国で NRC がクラス C を超える低レベル放射性廃棄物処分の許認可権限をテキサス州に与えることを検討 [2015 年 7 月 24 日既報]
45	2015/8/21	ドイツで連邦政府が国家放射性廃棄物管理計画を承認
46	2015/8/24	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]
47	2015/9/8	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
48	2015/9/8	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
49	2015/9/10	英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案の公開協議を開始
50	2015/9/11	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]
51	2015/9/24	英国で原子力安全規制機関が地層処分の実施主体に対するレビュー報告書を公表
52	2015/10/2	追記) 米国で 2016 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 836 万ドルを要求 [2015 年 2 月 3 日既報]
53	2015/10/5	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]
54	2015/10/16	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
55	2015/10/19	スイスで連邦評議会が地層処分場の設置に係る立地地域への交付金及び補償金に関する報告書を公表
56	2015/10/20	英国の放射性廃棄物移転契約 (WTC) における契約価格の設定方法を欧州委員会が承認—EU の国家補助禁止規則には抵触しないとの結論を公表
57	2015/10/20	ドイツで連邦政府がバックエンド資金確保のあり方を検討する委員会の設置を決定
58	2015/10/22	追記) スイス連邦評議会が廃止措置・廃棄物管理基金令改正案を閣議決定 [2014 年 7 月 4 日既報]
59	2015/10/30	カナダの使用済燃料処分場のサイト選定の状況—オンタリオ州セントラルヒューロン自治体が第 3 段階第 2
60	2015/11/5	追記) 英国ドリッギン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]
61	2015/11/12	ベルギー放射性廃棄物・濃縮核分裂性物質管理機関 (ONDRAF/NIRAS) と連邦原子力管理庁 (FANC) が浅地中処分場の建設許可に係る新たなスケジュールを公表

	掲載日	タイトル
62	2015/11/12	フィンランド政府が使用済燃料処分場の建設許可を発給
63	2015/11/18	追記) スウェーデンで SSM が使用済燃料最終処分場の立地・建設許可申請に対する安全審査の中間結果（第一回）を公表 [2015年6月26日既報]
64	2015/11/19	米国で原子力規制委員会（NRC）が使用済燃料管理部門の規制会議を開催
65	2015/11/20	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]
66	2015/11/24	米国で放射性廃棄物技術審査委員会（NWTRB）が地層処分場のサイト選定プロセスに係る報告書を公表
67	2015/12/17	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]
68	2015/12/18	追記) 英国のウェールズ政府が地層処分を高レベル放射性廃棄物等の管理方針として決定－処分の実施プロセス等に関する公開協議を開始－ [2015年6月2日既報]
69	2015/12/24	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の構築に向けた取組を開始
70	2015/12/24	追記) 米国で2016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1億836万ドルを要求 [2015年2月3日既報]
71	2015/12/25	追記) 米国で NRC がクラス C を超える低レベル放射性廃棄物処分の許認可権限をテキサス州に与えることを検討 [2015年7月24日既報]
72	2016/1/7	米国で超深孔処分のフィールド試験を実施へ
73	2016/1/13	フランスで地層処分プロジェクトのコスト評価に関する進捗状況を公表
74	2016/1/14	フィンランドで放射線・原子力安全センター（STUK）が安全規則を策定
75	2016/2/1	スウェーデンで使用済燃料最終処分場の立地・建設許可申請書及びキャニスター封入施設の建設許可申請書に対する意見募集を開始
76	2016/2/3	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]
77	2016/2/5	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]
78	2016/2/10	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]
79	2016/2/12	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
80	2016/2/19	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
81	2016/2/18	英国政府が低レベル放射性廃棄物の管理戦略の最新版を公表
82	2016/2/19	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 [2014年11月25日既報]
83	2016/2/26	米国で DOE がクラス C を超える低レベル放射性廃棄物処分の最終環境影響評価書（FEIS）を公表

V. 資料

	掲載日	タイトル
84	2016/3/7	追記) 英国政府が「自治体の意思表示のための作業グループ」(CRWG) の活動状況を公表 [2015年5月26日既報]
85	2016/3/22	米国で連邦議会下院がエネルギー省(DOE)にユッカマウンテン再開計画について質す書簡を送付
86	2016/3/23	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]
87	2016/3/25	追記) スウェーデンSKB社が使用済燃料のキャニスタ封入施設の建設許可申請の補足書を提出 [2015年2月3日既報]
88	2016/3/29	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

## 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、モニタリング関連技術、自然災害に対する操業期間中の安全対策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	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の推進に向けて更なる検討が必要と考えられる事項（論点）の整理
	沿岸部処分システム高度化開発	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	関連研究成果等を踏まえた沿岸部の特性や留意事項に関する整理、及び技術的信頼性の更なる向上に向けた課題の抽出等に向けた審議
	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
	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	先進的核燃料サイクル技術の地層処分概念への影響等の審議
III. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等	放射性廃棄物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 2015年度 技術年報**

---

2016年11月発行

2017年5月改訂

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター  
〒104-0052 東京都中央区月島一丁目15番7号  
パシフィックマークス月島8階

TEL 03-3534-4511（代表）

FAX 03-3534-4567

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、  
企画部にお問い合わせください。