RUMC

原環センター 2017年度 技術年報



公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

ごあいさつ

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

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

原子力利用や放射性廃棄物の最終処分に関する様々な議論が行われていますが、当センターは、 原子力技術分野に関わる一員としての立場を認識し、社会から求められる調査研究やそれら成果 の普及に積極的に取り組んでいます。この技術年報は、2017 年度(平成 29 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。本技術年報を通じて、当センターの活動をご理解 いただければ幸いです。

> 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター 理事長 高 橋 彰

Ι.	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
	 その他の管理処分に関する調査研究 	7
\mathbb{I} .	放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究	9
	1. 処分システム工学確証技術開発	9
	1-1 事業の全体概要	9
	1-2 人工バリア品質/健全性評価手法の構築-オーバーパック	11
	1-3 人工バリア品質/健全性評価手法の構築-緩衝材	15
	1-4 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築	21
	1-5 モニタリング関連技術の整備	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 地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発-実証試験	30
	2-3 可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理	36
	2-4 回収可能性の維持についての検討	40
	3. 沿岸部処分システム高度化開発	44
	4. TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発	50
	4-1 事業の全体概要	50
	4-2 ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上	53
	4-3 炭素 14 長期放出挙動評価	57
	4-4 ナチュラルアナログ調査	61
	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	67
	4-6 ガス移行連成挙動評価手法の開発	73
	5. 直接処分における廃棄体の固有性確認技術の適用性検討	81
	6. 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	83
	7. ジルカロイハルの HIP 処理によるヨウ素固定化方法の検討	84
	 その他の地層処分に関する調査研究 	85
Ⅲ.	放射性廃棄物全般に共通する調査研究等	87
	1. 放射性廃棄物海外総合情報調查	87
	2. 放射性廃棄物重要基礎技術研究調查	89
	 3. 安全規制及び安全基準に係る内外の動向調査 	93
	4.諸外国における廃棄体等の放射能濃度評価に関する調査	95
	5.諸外国における放射性廃棄物埋設施設の性能確認に関する調査	97
	6. その他の放射性廃棄物全般に共通する調査研究等	99
IV.	国際交流	101
ν.	資料	103
	1. 講演会、セミナー、研究発表会	103
	2. 論文、学会発表等	104

目 次

3.	刊行物	113
4.	ホームページへの海外最新情報の掲載	114
5.	委員会一覧	119

1. 地下空洞型処分施設機能確認試験

◇事業の概要

原子力発電所等の運転及び解体に伴って発生 する低レベル放射性廃棄物中には、埋設時点の放 射能濃度がコンクリートピット処分対象廃棄物 に比べ2オーダー程度高い廃棄物が存在する¹⁰。

このため、これら廃棄物については、廃棄物と 公衆の離隔距離を確保し、かつ、長期にわたり放 射性物質の移行抑制を図るための処分方法とし て地下 70m 以深の地下空洞内に圧縮ベントナイト 等の人工バリアを備えた処分施設(以下、「地下 空洞型処分施設」という。)を設置し、そこに埋 設する方法が検討されてきている。

また、これら廃棄物については、その潜在的な 影響が長期にわたり残存する可能性があるため、 廃棄物の埋設が完了し、地表に繋がる坑道を埋戻 した後においても、処分施設の長期的な安定性の 見通しを確認するため、規制が終了するまでの期 間(300~400 年程度)、モニタリング等の能動的 管理を実施することが求められている²⁰。

これらを背景とし、本事業は、平成27年度から5年間程度の期間で、平成26年度までに構築した実規模施設も活用し、地下空洞型処分施設の 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わたる機能確認方法の確立 を目的とした検討を実施するものである。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の 委託事業「平成 29 年度低レベル放射性廃棄物の 処分に関する技術開発事業(地下空洞型処分施設 機能確認試験)」により実施したものである。

◇平成 29 年度の成果 ³⁾

(1)確認対象項目(モニタリング項目)の検討 規制基準の動向²⁾を考慮した上で、地下空洞型 処分施設に要求される基本安全機能を整理した。 また、それらを細分化し、同施設を構成する各 部位に要求される技術要件と要求される段階、 さらには技術要件を満たすための部材仕様や管 理項目の関係を明確化した。その上で、モニタ リングの対象期間である、建設段階、廃棄物の 埋設段階、閉鎖措置段階、保全段階に着目し、 同施設に発生し得る事象を各部位の仕様・管理 項目と関連付け、確認対象項目(モニタリング 項目)の候補を抽出した。

(2)施設挙動の定量化解析

モニタリング計画を具体化しようとした場合、 施設挙動の経時変化を定量的に予測することが 求められる。そこで、熱・水・力学に着目する とともに化学に着目し、施設挙動の把握を目的 とした予察解析を実施した。

1)熱・水・力学に着目した施設挙動

排水管閉鎖後の再冠水プロセスにおける施設 内温度変化の把握を目的に解析を実施した。

解析モデルは、処分施設を中心に十分離れた 範囲の岩盤までを横断面方向に 2 次元 FEM にモ デル化した(図-1参照)。地下水については、処 分施設底盤で GL-100m相当の静水圧が作用する よう設定するとともに、紙面左から右向きに動 水勾配 0.07 を与えた。解析用パラメータは、そ れぞれのバリア材に応じた試験結果及び文献値 に基づき設定した。廃棄体からの発熱は、初期 発熱量を 10W/m³とし、その後は Co-60 の減衰曲 線に従い減少するものとしてモデル化した。解 析ステップを図-2 に示す。解析には、熱-水連成 解析コード TOUGH2⁴を用いた。



図-1 熱・水・力学解析の解析モデル

放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究



解析結果として、水飽和率と温度の経時変化 を図-3 に、代表的なステップにおける水飽和率 と温度の分布図を図-4 に示す。廃棄体中心部で 最高温度が約 80℃に達すること、水飽和率は時 間経過とともに有意に変化する挙動が確認され た。



図-3 水飽和率と温度の経時変化



図-4 水飽和率と温度の分布図

2) 化学に着目した施設挙動

近傍ボーリング孔を用いた地下水組成モニタ リングにおいて着目すべき分析項目を抽出する ことを目的として解析を実施した。

解析モデルは、処分施設を中心に十分離れた 範囲の岩盤までを横断面方向に 2 次元 FEM にモ デル化した(図-5 参照)。解析用パラメータは、 それぞれのバリア材に応じた試験結果及び文献 値に基づき設定した。地下水組成は、降水系地 下水としての代表的な値を設定し、地下水流動 条件は前述 1)と同一とした。また、環境温度は 15℃で一定とした。解析には、物質移行解析プ ログラム LIFE D.N.A.⁵⁰を用いた。



図-5 化学解析の解析モデル

解析結果の一例として、周辺岩盤における Na イオン濃度分布、Ca イオン濃度分布、pH 分布の 経時変化を図-6~図-8 に示す。また、処分空洞 から下流側の近傍(2m)、5m、10m、20m の位置に おける Ca イオン濃度と pH の経時変化を図-9、 図-10 にそれぞれ示す。

|. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

Na イオンは周辺岩盤の下流側で濃度の上昇が 起こるが、イオンとしての移動が速く量も少な いことから濃度上昇は 3mmol/1 程度である。一 方、Ca イオンでは 10mmol/1 以上に濃度が上昇す る領域が存在し、地下水組成モニタリングの際 には場所により有意な差として現れる可能性が ある。また、pH は短期的には徐々に上昇し、位 置による違いが比較的大きいものの、長期的に は下流側 20m の範囲では周辺岩盤の pH は 12 程 度に収束する結果となった。



図-6 Na イオン濃度分布の経時変化



図-7 Ca イオン濃度分布の経時変化



図-8 pH分布の経時変化



図-10 pHの経時変化

期間(年)

(3)既存計測技術を利用したモニタリング計画の 具体化

これまでの検討から、合理的な確認対象項目 として次のものが抽出されている。

- ・処分施設の変形
- ・低拡散層のひび割れ
- ・処分空洞の裏面排水分析
- ・近傍ボーリング孔による地下水分析

これらの各確認対象項目について、望ましいと 考えられる計測方法、計測期間、計測範囲、計測 頻度、計測結果の利用方法について検討した。 ー例として、計測期間及び計測範囲の例を図 -11 に、処分施設の変形を対象にした場合の変位 計測方法のイメージを図-12 にそれぞれ示す。



図-11 変位計測の計測期間及び計測範囲の例



図-12 3D レーザースキャナーによる変位計測イメージ

(4) 光ファイバセンサー技術の適用性検討

前述(1)及び(3)の検討を通じて、廃棄物の埋 設段階までの期間は既存計測技術を利用するこ とでモニタリングの実現性の見通しが得られた が、一方で、閉鎖措置段階以降のモニタリング 手段としては、現実的には周辺地下水の水質分 析など極めて限定されることが明らかとなった (表-1参照)。これは、既存のセンサー類の適用 を考えた場合、耐久性やバッテリー容量に関す る課題があること、接続ケーブルの配線処理が 非常に困難なことに起因する。

これらの諸課題を解決できる可能性のある技 術として光ファイバセンサーを候補として、モ ニタリングへの適用性について検討を行うこと にした。

想定する 計測技術	段階	確認対象項目の候補
実処分施設	閉鎖措置 段階前	処分施設の変形計測(処分空洞 の内空変位、底部低透水層の上 載荷重による沈下)
で適用可能		セメント糸材料のひひ割れ観測 事面排水の水質分析
な既存計測 技術		周辺地下水の水質分析(近傍ボ ーリング孔)
	閉鎖措置 段階以降	周辺地下水の水質分析(近傍ボ ーリング孔)
	閉鎖措置	低透水層の膨潤圧
米ファイバ	段階前	セメント系材料のひび割れ観測
ルノノイン		低透水層の膨潤圧
技術	閉鎖措置 段階以降	セメント系材料のひび割れ観測
1211		地下水浸潤状況(地下水浸潤に
		伴う温度変化)

表-1 抽出されたモニタリング項目の候補

1) 光ファイバセンサーの耐久性評価

塩分・高 pH・放射線の各環境下においてそれぞ れ劣化促進試験を行い、光ファイバセンサーの機 械的、光学的特性の変化を把握することとした。

評価試験に供する光ファイバセンサーは、与え る劣化因子(塩水・高 pH・放射線)に対して試験 結果に差が生じると予想される光ファイバセン サーを市販品のなかから選択した(表-2、図-13 参照)。それぞれ一次被覆のみが施された外径250 ミクロンの光ファイバセンサーである。

劣化促進パラメータを表-3に示す。

表-2 光ファイバセンサーのサンプル

No.	タイプ	メーカ	型番
1	汎用	Corning	SMF-28 Ultra Bare Fiber
2	耐水	OFS	F78814
3	耐放射線	フジクラ	SMF-RRSMFB



劣化	少化理培	劣化水準		
因子	为儿垛党	1	2	3
塩分	高濃度(海水の2倍) 塩水に浸漬(60℃)	10 日*	50 日	(100 日)
高 pH	高アルカリ溶液 (pH13)に浸漬 (60°C)	(1日)	10 日*	_
放射線	200Gy/h を照射	5h*	100h	_

表-3 劣化促進パラメータ

(*は前年度実施済み、カッコ内は今後実施予定)

塩水浸漬のサンプル(汎用タイプ、耐水タイ プ)を対象に、機械的特性を評価するために実 施した動的疲労試験 6)の結果を、図-14、図-15 にそれぞれ示す。耐水タイプでは、破断応力は 初期値との差異は小さく、明らかな劣化は認め られない。耐水タイプは、高 印浸漬に対しても 破断応力並びに動的疲労係数に大きな変化がな いことが分かった。



汎用タイプと耐放射線タイプを対象に実施し た放射線照射試験結果として、累積放射線量と 散乱損失の関係を図-16 に示す。光ファイバセン サーのコアにフッ素がドープされた対放射線タ イプでは、著しく耐放射線性が高められている ことが確認された。



2) 光ファイバセンサーによるひずみ、温度の計測 光ファイバセンサーを用いた計測システム (光ファイバセンサー、光スイッチ、光計測器 (Neubrex 社製 NBX-7020)、データ処理装置より 構成)を構築し、それを用いて、実規模施設等 においてひずみ(ひび割れ)及び温度の連続計 測に着手した。

計測対象部位と測定項目を表-4 に、計測シス テムの構成を図-17 にそれぞれ示す。

部位	測定項目	割当チャンネル
側部低拡散層	ひずみ	1, 2
上部低拡散層	ひずみ	3、4
手前コンクリートピット	ひずみ	5,6
アクセス坑道沿い	温度	7、8

表-4 光ファイバセンサーによる計測部位と測定項目



図-17 計測システムの構成

ひずみ分布計測においては、二次被覆と光ファ イバが一体化した一芯のセンサーケーブル(図 -18; OFS 社製 C80920、1.8×3.5mm)を、温度分布 計測においては、二次被覆と光ファイバが縁切り された構造の四芯のセンサーケーブル(図-19; OFS 社製 CX80766、外径 8.5mm)を用いる。



図-18 ひずみセンサーケーブル断面図



図-19 温度センサーケーブル断面図

ひずみ計測用光ファイバセンサーは、側部低拡 散層、上部低拡散層、手前コンクリートピットの それぞれ表面に、エポキシ接着剤(スリーエム製 DP-420)を用いて直線部を全線固定した。一例と して、手前コンクリートピット表面のセンサーの 配置を図-20に示す。なお、図内に併記するチャ ンネル(Ch.)番号は、光スイッチへの接続チャ ンネルである(表-4参照)。



図-20 ひずみ計測用光ファイバセンサーの配置 (手前コンクリートピット表面)

温度計測用光ケーブルは、坑道に沿って吊り治 具を用いて敷設した。

また、光ファイバセンサーによる温度分布計測 を定量的に評価するために、参照用データ取得用 の温度計(T&D 製 TR71wf)を計7箇所に設置した (坑口、坑口から 200m 地点、同 400m、同 600m、 同 800m、同1,000m、実規模施設位置)。温度計の 測温部は、温度計測用光ケーブルに固定した。

温度計測用光ケーブルと温度計の配置を図-21 に示す。



図-21 温度計測用光ケーブルと温度計の配置

次年度には、実規模施設に人為的にひび割れを 導入し、それを光ファイバセンサーにより計測す る試験を計画している。ひずみ及び温度の連続計 測は次年度も継続し、計測データの評価を行うと ともに、光ファイバセンサー技術のこの分野への 適用性について検討を進める予定である。

- 1) 電気事業連合会、原子力発電所等の廃止措置及び運転 に伴い発生する 放射性廃棄物の処分について、平成 27年2月12日 (平成28年8月23日一部改訂)
- 2)原子力規制庁、炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え 方について(改定案)、廃炉等に伴う放射性廃棄物の規 制に関する検討チーム第27回会合、参考資料27-2-2、 平成29年11月2日
- 3) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 29 年度 低レベル放射性廃棄物の処分に関する技 術開発事業 地下空洞型処分施設機能確認試験報告書、 2018
- 4) http://esdl.lbl.gov/research/projects/tough/
- 5) 横関ほか、水和反応と温度依存性を考慮したセメント 系材料のイオン拡散係数予測モデル、土木学会論文集、 No. 725/V-58、pp. 131-142、2003
- 6) JIS C 6821、光ファイバ機械特性試験方法

|. 放射性廃棄物の管理処分に関する調査研究

2. 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)L1 埋設後管理標準の改定に関する調査

中深度処分対象廃棄物の埋設地及び埋設施設 に係る埋設後管理標準に関して、L1 新規制基準 を考慮し、より安全性と合理性の高い学会標準の 改定に資することを目的として、調査、検討、学 会審議支援などを行った。

(2)浅地中ピット処分対象廃棄体(ドラム缶)の製 作及び検査方法の整備に関する調査

浅地中ピット処分対象廃棄体(ドラム缶形態) 製作方法及び検査方法に関する標準の制定の準 備を図るため、同廃棄体の製作検査標準の本体及 び附属書の検討、平成30年度に開催を計画する 日本原子力学会LLW廃棄体等製作・管理分科会へ 向けた対応支援を行った。

(3) 中深度処分の安全評価手法標準の改定に関する調査

中深度処分の安全評価手法標準に関して、L1 新規制基準を考慮し、より安全性と合理性の高い 学会標準の改定に資することを目的として、調査、 検討、学会審議支援などを行った。

(4)地下空洞型処分施設の実施工に必要な技術情報の整備

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

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

11. 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、緩衝材の施工技術ならびにモ ニタリング技術等の要素技術について、必要とな る基盤技術の整備が進められてきた¹¹。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。

上記の状況を踏まえ、本事業では平成25年度か ら5年間で、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に関する整備を実 施した。平成29年度は、平成25年度からの5年 間に及ぶ全体成果の取りまとめを行った²⁰。得ら れた成果の概要を以下に示す。

(1)人工バリア品質/健全性評価手法の構築

ーオーバーパック

平成25年度から29年度の5年間では、健全な オーバーパックを設計・製作するための方法論を 構築することを目的として、オーバーパックに想 定される全ての破損モードを抽出した上で、溶接 部を対象とした腐食試験および破損の発生を防 止するための破損評価を実施した。

腐食については、炭素鋼の溶接部を含む低酸素 雰囲気における浸漬期間 10 年間までの腐食速度 に関するデータを取得した。地下研究施設におけ るオーバーパック溶接部腐食試験では、試験開始 から 350 日程度経過すると模擬オーバーパック 表面近傍が低酸素状態になり、腐食速度が数µm/ 年程度になったと考えられ、第2次取りまとめで 仮定された水の還元による腐食速度 10µm/年を 上回ることはなかった。また、腐食割れの発生を 防止するために、外面誘導加熱応力改善法による 熱処理条件を有限要素解析により求め、腐食代に 相当する外表面から 40 mm の範囲を全て圧縮に改 善できる見通しを得ることができた。

破損評価については、溶接欠陥を起点とした破 損を防止するために、超音波探傷法による溶接欠 陥寸法の定量化方法を提示した。また、ガラス固 化体からの放射線の照射による炭素鋼の脆化量 を推定するための検討を実施し、1,000年間の破 壊靭性値の低下量は無視できるほど小さいこと を示した。さらに、有限要素法による破損解析を 実施し、オーバーパックに想定される全ての破損 モードの発生を防止するための崩壊荷重と板厚 の関係や溶接部の許容残留応力と限界き裂寸法 の関係などを示した。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の 委託事業「平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等 の地層処分に関する技術開発事業(処分システム 工学確証技術開発)」により実施したものである。

(2)人工バリア品質/健全性評価手法の構築

-緩衝材

平成25年度から29年度の5年間では、緩衝材 の健全性を評価することを目的として、再冠水過 程を対象とした室内要素試験や地下環境での試 験により試験データを取得するとともに、再冠水 後の緩衝材の状態を予測するための数値解析手 法の開発に向けた取組を進めた。

室内試験では、緩衝材の再冠水過程に発生する 浸潤、膨潤、変質、流出のそれぞれの現象に対し て、試験溶液などを変化させて試験データを取得 した。また、平成26年度からは、地下環境での 緩衝材流出現象の把握のために、地下研究施設の 試験坑道における緩衝材流出試験を実施した。緩 衝材の流出を抑制する対策として、緩衝材と岩盤 の隙間にペレットを充填するなど、流出に対して 隙間の処理方法が重要であることがわかった。解 析的評価手法の検討では、緩衝材の施工方法の違 いによる影響と緩衝材流出抑制のための工学的 対策の効果について、割れ目ネットワークモデル を用いた水理解析により検討を行い、再冠水後の 緩衝材の状態を予測するための力学解析を実施 した。

(3)人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の 構築

平成27年度から平成29年度の3年間では、人 エバリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築 を目的として、ニアフィールド領域を対象とした 遠心模型試験及びTHM連成解析を実施した。遠心 模型試験の利点としては、①実物と相似な位置に おいて等価な自重応力状態を再現できること、② 圧密やダルシー則を満たすような透水現象など の時間を加速して再現できる(実時間換算すると 時間短縮の効果)ことの2つが挙げられる。

ニアフィールド領域は、オーバーパック、緩衝 材、下部埋戻し材、上部埋戻し材、岩盤(処分孔 および処分坑道) など複数の要素で構成されてい るため、遠心模型試験では、単純な模型から段階 的に構成要素を増やした 3 ケースの遠心模型を 作製して 100 年相当の時間経過に対応する試験 データを取得した。これと並行して、要素試験に より THM 連成解析に用いる材料の物性値などの 入力パラメータを取得し、遠心模型試験の再現解 析を実施した。遠心模型試験の結果から、処分孔 底部に水位が到達すると、先行する下部の緩衝材 が膨潤することでオーバーパックの浮上が開始 し、その後、上部の埋戻し材に水位が到達するこ とで、浮上したオーバーパックが沈下する傾向が 見られた。同試験条件を再現した THM 連成解析で も、オーバーパックの鉛直方向変位の時間変化に 同様の傾向が見られた。また、処分坑道までを模 擬した遠心模型試験の膨出センサーの測定結果 と試験後の CT 画像から、緩衝材が上部埋戻し材 の領域に膨出したことが確認された。そのため、 上部埋戻し材の剛性などによっては、上部埋戻し 材の領域に緩衝材が膨出することにより緩衝材 の乾燥密度が低下する可能性があることがわか った。

(4) モニタリング関連技術の整備

平成25年度から29年度の5年間では、処分シ ステムの状態把握等に資するモニタリング関連 技術の整備を実施するとともに、地層処分におけ る人工バリア等の品質保証や性能確認に係る取 組の具体化に向けた国際的な検討動向の調査を 行った。加えて、施設閉鎖後の制度的管理の一環 である記録保存に関する国際的な検討動向につ いての調査を行った。

国際的には、品質保証やモニタリング等を包含 した「性能確認プログラム」の具体化が、処分場 の最終閉鎖判断に資する情報を提供することを 目的として検討されている。そのため、わが国に 適用可能な性能確認プログラムの構築に向けて、 スウェーデン、フィンランドならびに米国におけ る事例や国際共同研究等における検討内容の調 査を行い、基盤情報として整理した。

モニタリング関連技術の整備については、無線 伝送及び無線給電技術の開発を実施した。無線伝 送技術では、長期運用性の向上やシステムの冗長 性の確保に向けて、過年度までに製作・開発した 地中無線関連装置(送信器、受信器ならびに中継 装置)を組み合わせた無線伝送システムに関する 地上での動作確認試験を実施した。無線給電技術 では、再冠水後の塩水を含む伝送媒体を介した環 境や処分孔内への設置などの多様性を考慮した 室内要素試験を実施し、無線給電技術の実用化の 見通しに係る知見を取りまとめた。

記録保存については、諸外国の記録保存に関す る最新の考え方や方策について、OECD/NEA-RWMC (経済協力開発機構原子力機関-放射性廃棄物管 理委員会)による Records, Knowledge and Memory (RK&M) イニシアチブの取組を中心として整理し た。

個別の実施内容及び取りまとめの詳細については、以下(Ⅱ-1-2からⅡ-1-5)の各項に記載する。

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 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関 する技術開発事業 処分システム工学確証技術開発 平 成 25 年度~平成 29 年度の取りまとめ報告書、2018

1-2 人工バリア品質/健全性評価手法の構築-オーバーパック

◇事業の概要

本事業では、期待される期間における要求性能 を満たす健全なオーバーパックを設計・製作する ための方法論を構築することを目的として、オー バーパックに想定される全ての破損モードを抽出 した上で、溶接部を対象とした腐食試験及び破損 の発生を防止するための破損評価を実施した¹⁾。

腐食については、地下研究施設などを活用した 試験を実施して炭素鋼溶接部の腐食試験データを 取得するとともに、腐食割れの発生を防止するた めの溶接後の熱処理条件を解析により求めた。

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

◇平成 25 年度~29 年度の取りまとめ ¹⁾

(1)オーバーパックの破損モードの抽出

構造物の健全性評価では、使用環境で想定され る全ての破損モード(延性破壊、脆性破壊などの 壊れ方)に対して、使用中に破損が生じないと判 断された場合にその健全性が確認されたことに なる。一般的な構造物とは異なり、オーバーパッ クには埋設後の検査や補修を行うことが想定さ れていないため、埋設前の段階でその健全性を確 認しておく必要がある。

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

(2)オーバーパック溶接部の腐食評価

オーバーパックの腐食代の設定では、炭素鋼の 全面腐食が前提とされており、酸化性雰囲気の腐 食量と低酸素雰囲気における腐食速度により板 厚の設定が行われている。しかし、平成 24 年度 までに実施した腐食試験の結果から、溶接条件に よっては母材に比べて溶接部で局部的な腐食が 発生する可能性があることが確認されている²⁰。

本事業では、炭素鋼の腐食速度に対する信頼性 を向上させるために、長期間の浸漬試験と地下環 境での腐食試験により、腐食速度の取得及び腐食 形態の把握などを行った。また、溶接部の引張残 留応力は、環境条件によっては応力腐食割れや水 素脆化割れを発生させる駆動力となるため、溶接 後の熱処理に関する検討を行った。

1)低酸素雰囲気における腐食試験

材料組成や組織が異なる溶接部の腐食速度を 調べるために、3 種類の方法(TIG、MAG、EBW) で作製した溶接試験体及び母材から作製した腐 食試験片を用いて低酸素雰囲気下における浸漬 試験を実施した。浸漬期間10年までの平均腐食 速度の経時変化を図-1に示す。母材と溶接部の 腐食速度の差は、浸漬期間3年以降では小さくな った。また、浸漬期間0長期化にともない腐食速 度は低下し、浸漬期間10年の平均腐食速度は、 母材及び溶接方法に因らず4µm/y以下となった。 浸漬期間3年以降の平均腐食速度は、第2次取り まとめで腐食代の設定に用いられた低酸素雰囲 気における腐食速度10µm/yを下回る結果とな った。

2)オーバーパック溶接部腐食試験

地下環境での炭素鋼溶接部の腐食挙動を把握 するために、実寸大に近いスケールの溶接試験体 を用いた腐食試験を行った。試験は、国立研究開 発法人日本原子力研究開発機構(以下、原子力機 構)との共同研究として、幌延深地層研究センタ ーの地下 350m 調査坑道で実施した。





図-2 オーバーパック溶接部腐食試験の概要



図-3 模擬オーバーパック表面の腐食速度の測定結果

試験装置の概要を図-2に示す。長手方向に TIG 溶接部を設けた炭素鋼製の模擬オーバーパック 試験体の内部にヒータを設置し、試験体表面温度 を80℃に設定した。3 電極式腐食センサーによる 腐食速度の測定値の時間変化を図-3 に示す。緩 衝材中(図中 Ch2、Ch3)と模擬オーバーパック 表面に設置したセンサー(図中Ch1)の出力から、 それぞれ試験開始後100日及び170日程度で腐食 速度が計測され始めた。試験開始後200日程度経 過して緩衝材中の含水率がほぼ一定になると、酸 素が緩衝材中を拡散で移動することになり、模擬 オーバーパック表面への酸素供給が制限される ために腐食速度が低下したと考えられる。また、 試験開始から 260 日程度経過後に模擬オーバーパ ック中のヒータで加熱を開始したところ、温度上 昇にともない腐食速度は増加したが、その後は模 擬オーバーパック表面近傍が低酸素状態になり、 腐食速度は数µm/年程度になったと考えられる。

3)溶接部の残留応力低減解析

腐食代に相当する板厚40mmの範囲を圧縮応力 に改善することを目的として、外面誘導加熱応力 改善法(EIHSI)による熱処理条件を有限要素解



析により求めた。溶接直後及び EIHSI 後の残留応 カ分布を図-4 に示す。図では、縦軸の正方向が引 張応力を表している。図には、溶接後熱処理 (PWHT) の結果も併せて示した。溶接深さ 190 mm の場合、 設定した熱処理条件では、オーバーパック外表面 から 40 mm の範囲の周方向応力を全て圧縮に改善 することはできなかった。一方で、溶接深さ 90 mm の場合、溶接部深部の引張応力が大きくなる傾向 は見られたが、外表面から 40 mm の範囲を全て圧 縮に改善できる熱処理条件が得られた。

(3)オーバーパックの構造評価

オーバーパックに想定される破損形態は、①欠 陥を起点としない破損、②未溶接部を起点とした 破損、③溶接欠陥を起点とした破損の3つに限定 される。このうち、①と②の破損形態については、 外圧に対して適切な板厚及び溶接深さを設定す ることで防止することができる。③の破損形態に ついては、設計(適切な溶接深さの設定)と溶接 部の非破壊検査で防止することができる。

本事業では、190 mm の板厚に対して超音波探 傷法により溶接欠陥寸法を定量化する方法及び ガラス固化体から放出される放射線による照射 損傷による炭素鋼の破壊靭性値の低下量を予測 するための手法の検討を行った。

1) 超音波探傷による溶接欠陥寸法の定量化

溶接欠陥寸法を定量化するために、溶接試験体 に対してフェーズドアレイ法(PhA法)による超 音波探傷を実施した。欠陥指示高さと断面マクロ 調査による欠陥高さの実測値の関係を図-5 に白 抜きで示す。図には、平成24年度までに取得し たPhA法による測定結果も併せて示した³³。欠陥 高さの実測値に対してPhA法による測定値には ばらつきがあるが、実測値とPhA法による測定値 の差(測定誤差)については、欠陥高さに対する 依存性は見られなかった。

欠陥の上下端のエコーの差から欠陥高さを求 める場合、考慮すべき誤差要因は、①上下端の測 定に同時に現れる誤差(キャリブレーション誤差 等)、②上下端の測定で独立に現れる誤差(欠陥 の性状に起因する誤差や読み取り誤差等)に分類 される。高さ測定では上下端の差をとるため、① の誤差は相殺されて②の誤差が残る。そのため、 読み取り誤差等により生じる「標準偏差」から誤 差を求めることが妥当と考えられる。

溶接欠陥の深さ測定の標準偏差は、1.8 mmで あったため、高さ測定の標準偏差は2.5 mmとな る。さらに、信頼区間90%の場合には標準偏差の 約1.65倍であることから、4.1 mmとなる。した がって、発生が予測される誤差の90%までを考慮 して測定値を評価する場合、高さ測定値に対して PhA 法では4.1 mmを加算することで欠陥寸法を 定量化することが考えられる。PhA 法の測定値に 4.1 mmを加算した結果を図-5 に塗りつぶしのプ ロットで示した。これにより、測定した50 個の 溶接欠陥の中で47 個の欠陥の寸法を安全側に定 量化することができた。この定量化方法により、 欠陥寸法を過大評価することになるが、溶接部に 対して2 方向から超音波探傷を実施するなどに より、更に測定誤差を低減できると考えられる。

2)破壊靭性値の低下量の予測

ガラス固化体から放出される放射線による炭 素鋼の破壊靭性値の低下量を以下の方法で推定 した。①照射試験片の損傷量と硬さの増加量の関 係を用いて、硬さの増加量と破壊靭性値の低下量 の関係を求める。②照射試験片を模擬した冷間加



工材を用いて、硬さの増加量と破壊靭性値の低下 量の関係を求める。③解析で1,000年後の照射損 傷量を推定し、①と②の関係を用いて1,000年後 の炭素鋼の破壊靭性値の低下量を推定する。

照射試験では、試験片に Fe イオンと電子線を 照射した。試験片は Cu 濃度 0.5wt%の炭素鋼、FeCu 合金、FeMnSiCu 合金を用いた。照射温度は 90°C、 照射速度は Fe イオン照射と電子線照射でそれぞ れ 1×10^{-4} 、 1×10^{-8} dpa/s とした。また、累積の 照射量は 0.01、0.1、1 dpa の 3 条件とした。

照射試験片に対して TEM 観察及び 3 次元アトム プローブ分析を実施した結果、炭素鋼の脆化因子 として転位ループと溶質クラスタの形成が確認 された。2 つの脆化因子が存在する場合、硬化に 対する寄与は、せん断強度の増加量としてオロワ ンモデルで表すことができる。オロワンモデルを 用いて求めたせん断強度の増加量 $\Delta \tau$ と超微小硬 さの増加量 ΔH の関係を図-6 に示す。 $\Delta \tau \geq \Delta H$ の 関係から、最小二乗法により図中に記載した回帰 直線を求めた。次に、炭素鋼 SM400B の板材に対 して照射による損傷を模擬した冷間圧延加工(圧 延率:5%~20%)を施し、破壊靭性試験と硬さ測 定を実施した。試験結果から、最小二乗法により 破壊靭性値の低下量 ΔK と超微小硬さの関係とし て ΔK =321.88× ΔH が得られた。

オーバーパックの照射条件(損傷速度は過去の 計算結果から 10⁻¹⁶ dpa/s、照射温度は 90°C と仮 定)における照射損傷量を反応速度論により算出 した。その結果から、オロワンモデルを用いてせ ん断強度の低下量と照射損傷量の関係を求めた (図-7)。時間の増加とともに降伏応力(せん断 強度に相当)は増加するが、保守的に評価しても 降伏応力の増分はオーバーパック処分後 1,000 年の時点で 48 kPa 程度となった。



図-6 超微小硬さの増加量とせん断強度の増加量の関係



図-7 炭素鋼の照射量と降伏応力の増加量の関係

照射試験の結果から得られたせん断強度の増加量と硬さの増加量の関係を用いると、1,000年後の超微小硬さの増加量は 4.51×10^{-4} GPa となった。さらに、硬さと破壊靭性値の関係から、1,000年後の破壊靭性値の低下量は 1.45×10^{-1} MPa \sqrt{m} となった。炭素鋼 SM400Bの冷間圧延加工なしの破壊靭性値は 368 MPa \sqrt{m} であったため、1,000年間の破壊靭性値の低下量は無視できるほど小さいことがわかった。

3)オーバーパックの破壊評価

想定される全ての破損モードを対象として、有 限要素解析による破損評価を実施した。計算結果 の一例として、埋設後における崩壊発生時の外圧 と板厚の関係及び溶接部の許容残留応力と限界 き裂寸法の関係を図-8と図-9に示す。

崩壊発生時の外圧は、降伏強度 Sy の弾完全塑 性体を仮定して、2 倍勾配法⁴⁾を用いて算出した。 解析結果から、降伏強度によらず参照点は、板厚 100 mm 以上では胴部長手方向中央部、板厚 90 mm 以下では上蓋中心となった。埋設後のオーバーパ ックに作用する外圧が 10.7 MPa (硬岩系岩盤の 深度 1,000 m の想定外圧)とすると、Sy = 100 MPa



の担合でた 41 9mm い上の板頂なこげ破招け仕!

の場合でも 41.8mm 以上の板厚ならば破損は生じ ないことがわかった。

溶接欠陥を起点とした破損解析では、脆性破壊 を仮定して、溶接欠陥寸法をパラメータとして破 壊の駆動力である応力拡大係数を求め、溶接残留 応力と限界き裂寸法の関係を求めた。解析結果か ら、例えば、炭素鋼の破壊靭性値が 200MPam^{0.5}以 上ならば、55mmの溶接欠陥が存在しても 500MPa の引張残留応力が許容できることになる。ただし、 欠陥寸法または許容される溶接残留応力の大き さには適切な安全係数を考慮する必要がある。

- 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関 する技術開発事業処分システム工学確証技術開発平 成25年度~平成29年度の取りまとめ報告書、2018
- 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
- 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
- 日本機械学会、発電用原子力設備規格 設計・建設規 格(2012年版)<第1編 軽水炉規格>、JSME S NC1-2012、 2012

1-3 人工バリア品質/健全性評価手法の構築-緩衝材

◇事業の概要

本事業は、再冠水後のベントナイト系緩衝材の 健全性を評価することを目的とし、再冠水過程に おけるベントナイトの挙動について室内での要素 試験や地下の実環境での試験を行い、さらに試験 結果や地下環境のデータを参照した数値解析を行 い、再冠水後の緩衝材の状態を示す評価手法の開 発を行っている。

室内試験は、再冠水過程に起こる事象に着目し、 浸潤、膨潤、緩衝材の変質、再冠水過程に起こる 流出を対象に、長期試験(5~8年間)を含め、平 成21年度から継続して実施している¹⁾。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が再冠水する過程 の現象理解と、数十年から数百年かかることが想 定される再冠水後の状態を解析的に評価するため のモデル構築のために使われる。解析的評価手法 の検討は、施工方法の違いによる影響と緩衝材流 出抑制のための工学的対策による効果の検討を水 理解析により行い、再冠水後の緩衝材の状態の予 測を力学解析により行っている。

平成29年度は、5か年計画の最終年度にあたるた め、室内試験では、緩衝材の密度の均質化、浸潤 速度、膨潤挙動、緩衝材の変質に関して長期に取 得してきた試験データについて、現状での到達点 と課題についてまとめた。また、室内試験の結果 を検証データとして、浸潤挙動および緩衝材膨潤 挙動を評価する解析手法について検討した。さら に、緩衝材流出挙動に関する試験を幌延URLで実施 し、地下環境と流出現象の把握のための測定およ び観察を行った。加えて、緩衝材流出の原因とな る湧水環境を水理解析によって評価し、処分場の 施工の工程に応じた処分場の坑道の掘削の進行状 態による影響等について検討した。これらの研究 成果を基に、緩衝材施工方法に関しての提案と課 題の抽出を行い、現状での緩衝材の知見をまとめ ている。

◇平成 25 年度~29 年度の取りまとめ ²⁰

(1) 再冠水期間の緩衝材に関する検討

本事業では、再冠水に至る期間に緩衝材の機能 に影響を及ぼす可能性のある現象のうち、図-1 に示す5つを研究対象としている。



図-1 本業務で対象とした再冠水期間の緩衝材に起こる 現象

これらの現象に対して、室内試験、地下の実環 境での試験、ならびに解析手法による検討の3つ の方法によって取り組み、現象理解を深めるとと もに、再冠水後の状態の予測手法の高度化や緩衝 材の機能低下に対する対策の具体化を行う。

平成29年度までの5か年で、地下水浸潤と密 度均一化の長期試験で得られた検証データを基 に、力学解析手法について検討し、挙動を再現し 得ることを示した。検証データは1次元をモデル 化したものや、小型試験で取得したものであるた め、今後実規模での解析的評価に向けた検討が必 要である。化学変質に関しては、Ca 型化の進行 に伴う力学挙動の変化を測定し、Ca 型化と飽和 の発生する順番で膨潤圧が異なる可能性がある ことを示した。緩衝材流出に関する現象把握と工 学的な対策については、室内試験と地下での原位 置試験により、流出の発生条件を確認し、ペレッ トによる隙間充填や、予め膨潤させる等による流 出抑制の効果の有無を検討した。地下環境では、 測定項目、現象の観察方法が限られるため、工学 的な対策の効果や緩衝材機能の健全性を確認す るためには、今後も室内試験による確認を行いな がら進める必要がある。また、これまで得られた 成果をもとにした緩衝材の設計に関する知見を 整理し、設計方法について示した。これら結果の うち、浸潤挙動、緩衝材流出、施工方法について の検討結果について以下に述べる。

(2)緩衝材への地下水浸潤挙動

1)一次元浸潤速度取得試験(密度一定条件)

緩衝材の膨潤挙動や力学性能変化は、緩衝材に 地下水が浸潤することによって起こるため、地下 水の浸潤挙動を把握することは、緩衝材が飽和し 定常に至るまでの評価のために重要である。本研 究では、緩衝材が飽和に至った時の状態を予測す るために必要な解析手法の構築のためのモデル 試験とするため、一次元が成り立つと考えられる 簡単な境界条件における浸潤フロントの移動速 度を取得した。

図-2 に浸潤フロントの計測結果から得られた 飽和度の進展状況とその近似式、および飽和度の 遷移領域を示す。飽和度が初期値から 1%増加し た地点から飽和度が95%を超える地点を飽和度の 遷移領域として示している。図に示すように、飽 和度の遷移領域は NaCl の方が短く、蒸留水の方 が長いことが分かる。このため、給水した際に、 NaCl の方が、高飽和度領域が供試体下部にある 厚さで存在することになる。蒸留水を給水した場 合には、供給水が供試体上部に吸い上げられるた めに遷移領域が長くなり、高飽和度領域の厚さは 小さくなると考えられる。これらの結果により、 浸潤速度は地下水の液性によって大きく影響を 受けることは明らかであり、再冠水過程における 飽和度の分布も異なることにより、密度分布や膨 潤圧の発現にも差が生じると考えられる。 浸潤過 程による緩衝材の特性の発現プロセスを考慮し た評価には、速度と共に、液性による影響も重要 である。



図-2 飽和度の進展と遷移領域

2) 一次元を模擬した供試体の膨潤変形試験

処分孔に緩衝材をブロックで定置するために は隙間が必要であるため、再冠水時にはその隙間 を埋める緩衝材の自己シール特性に伴う膨潤変 形が想定される。膨潤変形に伴って緩衝材の浸潤 領域の乾燥密度は低下し、また、後述するような 緩衝材の流出現象は緩衝材の周辺には隙間が存 在する場合には、その隙間を緩衝材がシール(膨 潤)する過程で流出現象が発生し、シールが十分 に進まないために流出が継続すると考えられる。 このため、膨潤変形条件下での浸潤速度および膨 潤の挙動把握は重要である。

図-3 に試験装置の概念図を示す。供試体は、 先ず、仮締固めモールドで層厚5.5mm 程度に締固 め、出来上がったブロックの辺を油性マジックで 縁取り、試験用のアクリルセルに挿入して本締固 めを行った。本締固めは仕上がり層厚5mmとなる ように行い、これを繰り返して高さ30mmの供試 体を作製した。その後、比抵抗計測用の電極を設 置して供試体上部を蒸留水で満たし、自由吸水で きる条件とした。試験中の膨潤量は、比抵抗値の 変化と油性マジックの縁取り箇所の目視で計測 した。



図-3 一次元膨潤変形試験セルと供試体上面の状況

図-4 に層毎の厚さの変化を示した。試験直後 は、水と接している最上部の層が著しく膨潤した。 時間が経過するに従って、膨潤する層数が増加し、 上部の層から下部の層になる程、膨潤変形量は小 さかった。また、膨潤量がある程度大きくなった 層は、膨潤が止まることが分かった。

膨潤領域が飽和していると仮定して膨潤距離 を飽和フロントとして考えると、膨潤距離の進展 は、密度一定条件の飽和フロントの進展に類似し ていた。ただし、その速度は密度一定条件よりも 速く、給水時間の平方根で近似すると、*d* = 8√*t* と なった。このことから、密度一定条件の飽和フロ ントの概ね倍の速度で浸潤するといえる。但し、 浸潤した箇所は膨潤することとなるが、膨潤領域

では、供試体表面で密度が低下しているため、密 度一定条件の飽和フロントとは単純に比較でき ない。さらに、20日目以降の浸潤距離は概ね一 定であり、膨潤厚さのみが増加していた。20日 目以降に浸潤した水は膨潤変形に消費され、供試 体内部にはほとんど水が供給されていないと考 えられる。これらの結果から、隙間がある場合に は、内部に向かっての浸潤が進まず、表面での膨 潤が進むため緩衝材の表面の密度が低下すると 考えられる。密度低下は自己シール性の低下を意 味するため、緩衝材の流出が促される結果となる。 そのため、隙間が埋められる過程での緩衝材表面 の自己シール性が発揮されるまでのプロセスの 評価が必要となり、この試験を検証データとした 評価手法の検討により、緩衝材の流出量及び抑制 方法の根拠が得られると考えられる。



(3)緩衝材の流出に関する検討

1)地下研究施設における緩衝材流出試験
 ①平成 29 度の地下研究施設における試験

本研究は地下環境での緩衝材流出現象の把握 を目的とし、幌延 URL の地下 350m の試験坑道に 竪置き模擬緩衝材を設置し、緩衝材流出試験を実 施した。平成 29 年度は、緩衝材を体積拘束(蓋 の設置)した条件で、緩衝材(試験体)を膨潤さ せる一定の期間(約2ヶ月)を取り、その膨潤圧 がほぼ一定になったのを確認した後に、注水試験 を実施した。図-5 に試験設備の概要を示す。ま た、膨潤圧測定開始から注水試験終了までの測定 データを図-6 に示す。膨潤期間には、緩衝材ブ ロックと試験孔壁との間に設置した側部土圧計 (鉛直設置)による計測値は、上部、中部、下部 の順に膨潤圧が発現し、約2ヶ月(1456 時間) でほぼ横ばい(上部、中部では約 1.1MPa、下部 は約 1.4MPa)となっていた。緩衝材上部に滞留 する地下水のベントナイト量の測定値(ベントナ イト濃度・図-6)は、定置後初期を除いて、継続 した濃度の上昇は無いことから、膨潤期間には、 緩衝材の浸食・流出は無かったと考えられる。



図-5 試験設備の概要



図-6 膨潤圧測定開始~注水試験終了まで測定結果 (圧力(水圧)とベントナイト濃度を併記)

上記の膨潤期間の後、注水試験を実施した。注 水の結果、注水圧力 20^{-35kPa} と比較的小さい圧 力で圧力低下(H28 年度試験では 60kPa で圧力低 下)が起こり、注水孔付近から試験体上部へ連通 する経路(緩衝材と孔壁の界面、岩盤中の割れ目 など)を通じて、緩衝材の一部が流出する現象が 発生したと考えられた。試験体の回収後の緩衝材 の表面の状況からも、緩衝材の一部が流出した可 能性が示唆される水みちの形跡が見られた。膨潤 期間を取ることにより、土圧計では高い圧力が計 測されたものの、今回の膨潤方法では期待された 流出抑制のための十分な止水性は得られなかっ たと考えられる。

②地下研究施設における5か年の試験結果

平成25年度から行った地下研究施設での試験のうち、注水することによって試験を行った27年度から29年度に幌延URLデータ実施した主要な試験ケースを表-1に示す。

CA SE	製作時 緩衝材 乾燥密度 (Mg/m ³)	注水条件 (L/min)	処分孔 (緩衝材) 上部条件	試驗概要
1	1, 6	$\begin{array}{c} 0 & 05 \rightarrow 0 & 1 \\ -0 & 2 \rightarrow 0 & 3 \\ -0 & 4 \rightarrow 0 & 5 \\ -0 & 65 \rightarrow \\ 0 & 8 \end{array}$	上部開放	注水条件をパラメ ータとした流出現 象の確認
2	1-9 ^{mi}	0. t	上都開放	廃墾体定置後《上 部坑道の埋め戻し なし》を想定した 流出現象の確認
3	1,9%	0.1	上部拘束 ; 上蓋あり り	廃棄体定置後、上 部坑道の埋め戻し を想定した流出現 象の確認
4	1.9***	0. T	上部拘束 : 上蓋あ り	工学的対策とし て、ペントナイト ペレットによる感 間充填した場合の 流出抑制効果の確 認
5 #2	1, 9 ^{iei}	0. 1	上部拘束 : 上蓋あ り	工学的対策とし て、緩衝材外周と 孔壁間の瞬間につ いて、緩衝材を事 前に応覚させた場 合の流出抑動効果 の確認

表-1 地下研究施設における主な試験ケース

※1:隙間部を含めた飽和膨潤後の乾燥密度1.6Mg/m³
 ※2:平成29年度の地下研究施設における緩衝材流出試験

上記、試験ケースの結果概要を以下に示す。 CASE1:処分孔上部を開放状態において、注水 流量が少ない(0.3L/min以下)条件では、緩衝 材の流出は生じるが、水みちが閉塞傾向となるこ とが確認された。一方、0.4L/min以上では水み ちの拡張が示唆される結果を得た。

CASE2: 処分孔上部を開放状態とし、注水流量 0.1L/minの条件において、約5ヵ月間の試験を行った。通水を継続することにより、水みちが生じると共に経路や数が変化することが確認された。

CASE3:処分孔上部に上蓋を設置することにより、緩衝材上部への膨潤変形が抑制された状態で、 注水流量 0.1L/min の条件による試験を行った。 この試験では、緩衝材外周と試験孔壁の隙間部へ の膨潤が進んだと考えられ、孔壁と緩衝材の間に 上部まで通じる水みちは確認されず、緩衝材の流 出抑制効果が見られた。また、緩衝材の流出経路 として周辺岩盤の可能性が示唆された。

CASE4:緩衝材流出抑制のための工学的対策として、孔壁の隙間にベントナイトペレットを充填

した。ペレットの吸水・膨潤が早いため、緩衝材 本体の吸水・膨潤が妨げられ、緩衝材表面の密度 が低下する領域が減り、流出抑制効果があること を示唆する結果を得た。

CASE5:平成29年度として記述。

③地下研究施設における試験のまとめ

これまでの地下研究施設における緩衝材流出 試験(原位置試験)で得られた試験では、以下の ようなことが明らかとなった。

- ・亀裂のような集中湧水箇所がある場合には、
 緩衝材に水みちができることによる流出が生じた。これにより、原位置の岩盤と緩衝材の界面でも室内試験で見られたような緩衝材の流出が起こることが明らかとなった。
- ・緩衝材の膨潤による止水性が高まった場合には、注水した水の流出経路は周辺岩盤(EDZ)である可能性が示唆された。周辺岩盤の透水性、水圧と緩衝材の止水性の関係により、流出挙動は変化するため、処分孔周辺の環境と流出挙動の関係を把握する必要がある。
- 流出対策として、緩衝材周囲の隙間をペレット充填した場合、緩衝材の密度低下を抑制できる可能性があることがわかった。一方、予め膨潤させた場合には、隙間の緩衝材密度が低くなったことにより、緩衝材流出が低圧でも起こったことが示唆され、隙間の処理方法により緩衝材の外周部分の乾燥密度が影響を受けるため、流出抑制には重要であり、工学的対策として隙間の処理方法が重要であることがわかった。

2)解析的な評価

緩衝材流出現象は処分孔湧水に起因する現象 であり、その湧水量を適切に評価し、抑制するこ とが必要である。そこで本研究は地下水流動解析 により、処分坑道及び処分孔の湧水量に着目した 評価を行っている。使用する解析モデルは幌延 URL の 350m 坑道の地下環境を再現した割れ目ネ ットワークモデルにより構築した(図-7)。

平成 29 年度は、「周辺坑道の埋戻しが処分孔の 湧水量に与える影響の評価」及び「定置後の処分 孔周辺の地下水流動の評価」について検討した。 前者は、具体的に考え得る施工順序として、緩衝 材の定置を先行して実施した場合(施工順序 A) と、定置後すぐに処分坑道を埋戻した場合(施工

放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

順序 B)を想定し、それを模擬した地下水流動解 析を行った。その結果、施工順序 A は処分孔の湧 水量は大きく変わらないが、施工順序 B は処分孔 の湧水量が増加した。このことから、パネル内の 周辺坑道の埋戻しは、緩衝材定置が全て完了し た後に行う方が処分孔の湧水量は少なくなると いう傾向が得られた。後者は、処分孔に緩衝材が 定置された後の状態について詳細にモデル化し (EDZ を含む)、地下水流動解析を行った。その 結果、処分孔周りの EDZ の有無によって緩衝材通 過流量は大きく変化するという傾向が得られた。





3)室内試験による緩衝材流出挙動の把握 ①高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験

これまでの検討で緩衝材への浸潤速度(量)と 湧水量の大小関係が緩衝材の流出の有無に対し て重要であることがわかった。一方で、実際の処 分場での湧水は、再冠水期間には、地下の深度が 深くなることにより水圧が高まるが、周辺の岩盤 の透水性が低いため低流量となる状態があるこ とが想定される。このような環境では、水圧が一 定であるために、緩衝材のシール性等により透水 性が変化し、流量が変化するため、定圧条件での 緩衝材流出現象の把握のための試験を行った。試 験は、図-8 に示すような二重セルを用い、圧力 を一定にした通水試験を実施した。

この試験では、通水圧は、再冠水期間に水位が 回復し、周辺岩盤の水圧が高まることを想定し、 概ね1.25Mpaに保って行われた。総通水量はほぼ 一定割合で増加しているものの、その勾配は時間 とともに減少傾向を示した。セル内へ供給される 水量は、試験開始当初は 90mL/min であったが、 時間とともに減少し、50mL/min 程度で収束して いる。このことは、実際の処分場においても緩衝 材の膨潤により、湧水量が抑制される可能性があ



図-8 二重セルを用いた高水圧・低流量環境下での緩衝材 流出試験イメージと写真

ることを意味している。

図-9 には、総通水量と緩衝材流出量の関係を 示す。工学規模の装置(560mm \$\phi \times 600mm) での試 験結果も合わせて示す。本試験では、通水量が時 間経過に伴って減少してため、総通水量と緩衝材 流出量の関係の勾配は緩くなっている。ただし、 ペレットを充填した工学規模流出試験の結果と 概ね同じ傾向でデータが推移した。このことから、 通水量が低下したとしても緩衝材表面の水みち の断面積が同等であるため、水みちを流れる液相 中のモンモリロナイト濃度は一定であり、その結 果として総通水量と流出量の関係は変化しない ものと考えられる。



図-9 高水圧低流量下における総通水量と流出量の関係

②亀裂を有する模擬岩盤の流出試験

孔壁近傍の亀裂(EDZ等)からの流出挙動を把 握する目的で、亀裂を有する岩盤での処分孔を模 擬した(1mmの隙間)流出試験を行った。図-10 に試験時の様子を示す。結果として、通水が継続 することにより、1mmの隙間からもこれまでの試 験と同様の流出現象が確認された。また、通水液 として用いた液種(イオン交換水、NaC1水溶液) の影響が大きく、NaC1水溶液を用いた場合の総 通水量と緩衝材流出量の関係は他のケースと比 べて低いことが確認された。一定流量での通水試 験であるため、地下環境で水位が回復することに より湧水量が減少する、あるいは周囲の水圧が上 昇し、水の流れが変化することを模擬したもので はないことに注意が必要であるが、処分孔周辺に 亀裂がある場合には短期間ではこのような流出 もあると考えられる。



(a) イオン交換水 (b) NaCI 水溶液 図-10 模擬亀裂内のエロージョン状況観察結果

③室内試験のまとめ

これまでの5か年において、緩衝材の流出に係 る要素に着目した試験を実施してきたが、今年度 は、一定圧力での湧水環境、亀裂(EDZ)の影響 等、実処分場環境を想定し、影響要素に着目した 室内試験を行い、流出現象への影響を確認した。 1)で示した地下研究施設における緩衝材流出試 験も併せて、より実処分場環境下に近い条件下で の流出試験を行い、対策を示すことが必要である。

(4)緩衝材の設計に関する検討

本検討では緩衝材の設計要件の関連性を整理 し、緩衝材の設計要件の関連性や従属関係等を整 理した。設計要件の関連性の整理より、実質的な 設計要件の絞り込みが可能と考えられる。すなわ ち、コロイドろ過性、自己修復性、微生物影響の 防止は、満足すべき基準値の関係からは実質的な 要件にならず、緩衝材の仕様は低透水性、自己シ ール性、応力緩衝性、製作施工性で決まると考え られる。

これらの各要件それぞれに関しての検討をふ まえた緩衝材の設計フローを図-12に示す。フロ ー図に示される設計要件と裕度に対応した緩衝 材の仕様範囲の設定例を図-13に示す。

本検討では緩衝材の設計施工に関わる現状の 知見を整理し、設計方法に関する提案を行った。 ただし、緩衝材の設計においては施工誤差等も考 慮する必要があり、考慮すべき湧水についてはサ イト条件や施工手順、工学的対策とも関連するた め、今後も総合的な観点からの検討が必要である。



(PEM・撒出し締固め式の例)

- 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 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関 する技術開発事業 処分システム工学確証技術開発 平 成 25 年度~平成 29 年度の取りまとめ報告書、2018
- 3) 原子力発電環境整備機構、技術年報 2012 年度、 NUMO-TR-13-01、2013 など
- 4) 公益財団原子力環境整備促進・資金管理センター、平成28年度地層処分技術調査等事業処分システム工学確証技術開発報告書(第2分冊),2017

1-4 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法 の構築

◇事業の概要

本事業では、再冠水後の人工バリアの状態を把 握するための解析的手法の信頼性向上に向けて、 解析手法の妥当性を確認するためのツールとして 利用可能な遠心模型試験(加速試験)技術の高度 化に取り組んでいる。具体的には、平成27年度か らの3年間計画で、ニアフィールド領域(人工バ リアと周辺岩盤)における熱-水-力学(THM)連成 挙動を対象とした遠心模型試験を行い、試験結果 と試験条件を再現した解析モデルの結果を比較す ることにより、THM 連成解析で考慮すべき重要な パラメータの抽出、及び人工バリアと周辺岩盤の 長期挙動の予測手法(案)を構築した。

ニアフィールド領域は、オーバーパック、緩衝 材、下部埋戻し材、上部埋戻し材、岩盤(処分孔 及び処分坑道) など複数の要素で構成されている。 遠心模型試験では、単純なものから段階的に構成 要素を増やした3 ケースの遠心模型を作製して 100 年相当の時間経過に対応する試験データを取 得した。これと並行して、THM 連成解析による再 現解析では、材料の物性値などの入力パラメータ を取得するための要素試験を行い、THM 連成解析 結果におよぼす材料物性や境界条件などの影響を 把握するために、ガラス固化体の発熱や緩衝材と 岩盤の間の隙間の有無などの境界条件、材料物性 などをパラメータとする感度解析を実施した。そ の後、感度解析の結果を踏まえて、遠心模型試験 の条件を再現した解析を行い、連成解析で留意す べき点についてまとめるとともに、遠心模型試験 結果の妥当性について検討した。

遠心模型試験及び THM 連成解析により得られた 結果より、米国機械学会(ASME)の「検証と妥当 性確認(V&V)」の考え方を参考にして、人工バリ アと周辺岩盤の長期挙動予測手法の案を構築した。

◇平成 27 年度~29 年度の取りまとめ ¹⁾

(1) 遠心模型試験

遠心模型試験は、縮尺 1/n の小型模型を遠心力 載荷装置に設置し、nGの遠心加速度を作用させ ることにより加速試験を行う「物理模型実験」の 手法の一つである。遠心模型試験の利点は、①実物と相似な位置において等価な自重応力状態を 再現できること、②圧密やダルシー則を満たす透 水現象などの時間を加速して再現できることで ある。

1)試験条件及び境界条件

本研究で用いた遠心模型は、HLW 竪置き方式の 廃棄体周辺領域とした。

平成 27 年度から平成 29 年度までに実施した 3 ケースの試験条件を表-1 に示す。平成 27 年度は 岩盤供試体に模擬処分孔を掘削した 1/30 模型を 使用した。模型上面に地圧相当の全応力を負荷し て 30G 場での試験を実施した。平成 28 年度は平 成 27 年度の模型の上部に厚さ 20 mm (実物換算 で 0.6 m)の埋戻し材を設置し、埋戻し材に生じ る自重応力を軸応力として負荷した 30G 場での 試験を実施した。平成 29 年度は 1/50 模型の上部 に厚さ 100 mm (実物換算で 5 m)の埋戻し材を設 置することで処分坑道を模擬し、模型の高さ方向 の変位を固定した 50 G 場での試験を実施した。 各試験ケースを通して、模型の処分孔上端面に 作用する飽和後の有効応力は 4.0 MPa とした。

	単位	H27	H28	H29
遠心加速度	G	30	30	50
模型縮尺	-	1/30	1/30	1/50
処分坑道	-	無し	0.6 m 分模擬不足分 は軸圧で補完	有り(5 m)
周圧	MPa	8.0	5.0	5.0
軸圧	MPa	8	1.1	模型高さを一定にす る制御
下端圧(注水 圧)	MPa	4.1	1.05	1.07
上端圧 (背圧)	MPa	4.0	1.0	0.92
飽和後有効応力 (処分孔上端 面)	MPa	4.0	4.0	4.0
オーバーパック 温度	-	HLW 第2次取りまと を参照して設定し、制	めの処分孔竪置き方式・ 御を実施。(詳細は年度	隙間モデルの CASE.A 報告書参照)
概略図	-			

表-1 遠心模型試験の試験条件

2) 遠心模型試験結果

①緩衝材の膨潤に伴う応力

緩衝材の全応力(設置された土圧計の位置にお ける間隙水圧を深度400m相当の静水圧と仮定し、 それを差し引いた値)の測定結果を図-1に示す。 図中の矢印は、水位が処分孔上端部まで到達し た時間を表している。H27 と H28 の矢印は、H29 の水位センサーの測定結果から浸潤速度を求め て推定した水位の到達時間を表している。緩衝 材の初期の全応力及び全応力が発生する時間は 各ケースで異なるものの、全応力の最大値は0.5 MPa~0.6 MPa とほぼ同等となった。H28 と H29 の ケースでは、緩衝材の全応力の最大値計測後に 値の低下が見られた。これは上部埋戻し材の有 無と埋戻し材の厚さの違いに起因すると考えら れる。

②オーバーパックの鉛直変位

オーバーパックの鉛直変位の経時変化を図-2 に示す。各ケースともに処分孔底部に水が到達 し、下方の緩衝材が膨潤を開始するとオーバー パックは上方に移動した。移動量が最大値を計 測した後、H27のケースは収束傾向にあり、H28 とH29のケースは沈下する傾向を示した。H28と H29のケースの沈下量の違いは、試験後の目視や 後述する CT 画像から、H29 では下部埋戻し材の ベントナイトが上部埋戻し材の領域に膨出した 可能性があるため下部埋戻し材の密度が低下し、 沈下量が H28 に比べて小さくなったと考えられ る。

③緩衝材の密度分布

図-3 に各年度における試験後の緩衝材の乾燥 密度の深度分布を示す。H27のケースは下部に比 べると上部の密度が大きくなった。一方、H28と H29のケースでは相対的に上部と下部の密度が小 さく、中央部の密度が大きい凸型の分布になった。 H27のケースは処分孔上面に上蓋が設置されてい るため、下部埋戻し材の上方からは水が浸潤し難 い模型形状であった。このため、緩衝材の膨潤 が下方から順に発生したと考えられる。一方、 H28 と H29 のケースでは透水しやすい上部埋戻し 材が設置されているため、緩衝材の下方の膨潤が 始まった後、上部埋戻し材を通して下部埋戻し 材に間隙水が浸潤した可能性があり、緩衝材中 部より先に下部埋戻し材が膨潤したと考えられ る。これにより、緩衝材の中部が上下より圧縮 され密度が高くなったと推察される。また、H29 のケースの密度が H28 のケースより小さい理由 としては、後述する CT 画像の撮影結果から下部 埋戻し材が上部埋戻し材の領域に膨出した可能 性が考えられる。











④遠心模型試験の CT 画像

平成29年度の試験前後の遠心模型のX線CT画 像を図-4 に示す。画像の濃淡は、物質の密度の 大きさに対応している。CT 撮影は、模型を圧力 容器から開封(除荷)して行った。構成要素の境 界(岩盤と上部埋戻し材の間、岩盤と緩衝材の間、 緩衝材とオーバーパックの間)に生じた隙間は、 試験装置の圧力容器の開封時に生じたと考えら れる。試験前に撮影したCT画像では、緩衝材と 岩盤の境界面などに隙間が見られたが(図-4左)、 試験後のCT画像では緩衝材や埋戻し材の膨潤に より隙間が閉塞した(図-4右)。



図-4 遠心模型の CT 画像(H29 年度)



図-5 処分孔周辺を拡大した試験後の CT 画像(H29 年度)

図-5 に上部埋戻し材と処分孔上端の境界付近 の CT 画像(濃淡強調)を示す。図-5 おける(a) ~(e)は、図中央の模型縦断面画像の左に示した 矢印の位置における横断面である。(a)は上部埋 戻し材部分、(b)~(d)は上部埋戻し材と下部埋め 戻し材の境界部分、(e)は下部埋め戻し材部分で ある。画像(a)では上部埋戻し材部分であること から、全体がほぼ同色(薄灰色)である。また、 (e)では岩盤、下部埋戻し材、オーバーパック (ケーブル取り出しの芯棒)が明確に区別できて いる。一方で、(b)~(d)の上部埋戻し材と下部 岩盤上端部の境界付近の CT 画像では、上部埋戻 し材とは明らかに異なる白色の領域が処分孔と その周辺に見られた。これは、図-3 で示した H29のケースの試験後における緩衝材と下部埋戻 し材の乾燥密度が低下したことを考慮すると、 上部埋戻し材中に膨出した下部埋戻し材と考え られる。

(2) THM 連成解析における解析モデルの検討

遠心模型試験の再現解析を行い、ニアフィール ド領域に対する THM 連成解析のモデル化方法に ついて検討を行った。解析コードは THM 連成解析 コード「放射性廃棄物地層処分における地下空洞 長期安定性解析プログラム(LOSTUF)³⁾」を使用 した。

1) 遠心模型試験の再現解析(H27のケースの再現)

平成 27 年度に実施した遠心模型試験における オーバーパックの鉛直方向の変位と再現解析の 結果を図-6 に示す。



図-6 オーバーパックの鉛直方向変位の比較(H27)

図内の基本ケースの解析では、材料試験で取得 した物性値等の平均値を用い、緩衝材の剛性は飽 和時のもの、緩衝材と岩盤やオーバーパック間の 摩擦係数は0.3とした。遠心模型試験におけるオ ーバーパックの鉛直方向の変位が最大6mm程度 であったのに対して、再現解析の基本ケースでは、 換算時間で約 20 年後にオーバーパックが 90 mm 程度上昇する解析結果を示した。一方、緩衝材と 岩盤の隙間を考慮したケース(隙間の透水係数を 1,000 倍に設定) では、オーバーパックの変位の 最大値は50mm程度であった。さらに、緩衝材の 剛性に対する飽和度依存性を考慮したケースで は、オーバーパックの変位は最大3 mm 程度にな り、遠心模型試験の傾向(図内の黒線)に近い結 果が得られた。複数の要素で構成されるニアフィ ールド領域を対象とした連成解析では、構成要素 間の境界条件や物性値等を現実的に設定するこ とにより、遠心模型試験の結果に近い解析結果が 得られることがわかった。

2)遠心模型試験の再現解析(H29のケースの再現) 平成 29年度の遠心模型試験と再現解析におけ るオーバーパックの鉛直変位と緩衝材の全応力 の時間変化を図-7 に示す。試験と解析ともに、 初期段階では、オーバーパックは上向きに移動し、 換算時間で7年程度経過後に下向きに移動した。



図-7 オーバーパックの変位と緩衝材の全応力(H29)

緩衝材と埋戻し材の飽和度分布の解析結果(図 -8)を見ると、オーバーパック下部の岩盤から水 が浸潤し、時間の経過にともないオーバーパック 上部の緩衝材と埋戻し材の領域の飽和度が大き くなっていることがわかる。緩衝材と坑道の間の 下部埋戻し材は、緩衝材と同じ材料定数を設定し ており、緩衝材はオーバーパックの下部に比べて 上部に多くあるため、オーバーパックの上向きよ りも下向きの変位量が大きくなったと考えられ る。緩衝材に作用する全応力については、初期の 膨潤による応力が生じた後、1年相当経過後に膨 潤による応力変化が大きくなり、20 年相当経過 した時点で応力値は最大になった。オーバーパッ クの変位及び緩衝材の全応力の計算結果は、遠心 模型試験の結果に比べて絶対値は一致していな いが、時間変化の傾向としては概ね一致する結果 が得られた。

(3)人工バリアと周辺岩盤の長期挙動予測手法(案)の構築

遠心模型試験を対象とした再現解析の結果か ら得られた課題及び ASME V&V-10⁴を参考にして 構築した人工バリアと周辺岩盤の長期挙動予測 手法(案)を図-9 に示す。上記の長期挙動予測







図-9 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動予測手法(案)

手法(案)では、ASMEのV&V-10と同様に、まず は実処分環境で想定される事象を概念モデル(相 関式など)で表現して計算コードに組み込み、計 算結果と厳密解(誤差なく求められた解)等を比 較することで計算コードの検証を行う。次に、厳 密解等が得られないことが想定される THM 連成 現象に対しては、連成現象の解析結果は試験結果 との比較によって、その妥当性を確認することに なる。但し、地層処分のような長期間を対象とし た試験は現実的には難しいため、時間短縮が可能 な遠心模型試験が有効になると考えられる。

- 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関 する技術開発事業処分システム工学確証技術開発平 成25年度~平成29年度の取りまとめ報告書、2018
- 2)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一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
- 3)澤田昌孝、岡田哲実、長谷川琢磨、高レベル放射性廃 棄物処分地下施設の長期挙動予測評価プログラムの開 発-緩衝材膨潤評価式の数値モデル化と熱・水・応力 連成解析スキームの構築-、電力中央研究所研究報告、 N05028、2006
- American Society of Mechanical Engineers, Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME V&V 10-2006, (2006)

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 を対象に、品質保証や性能確認に係る取組の具体 化に向けた国際的な検討動向を把握するととも に、処分システムの状態把握等に資するモニタリ ング関連技術の整備を行った。更に、施設閉鎖後 の制度的管理の一環である記録保存に関する国 際的な検討動向を把握した。平成29年度は以下 の観点から調査研究を進め、平成25年度からの5 ヵ年事業としての成果の取りまとめを行った。

1)品質保証/性能確認プログラムの構築に向け た国際的な検討動向

国際的には、最終閉鎖判断に資する情報を提 供することを目的として、品質保証やモニタリ ング等を包含した「性能確認プログラム」の具 体化が検討されている。わが国に適用可能なプ ログラムの構築に向けて、諸外国の先行事例や 国際共同研究等における検討内容の調査を行い、 基盤情報として整理した。

2) モニタリング関連技術の開発

・無線伝送技術の開発

長期運用性の向上やシステムの冗長性の確保 に向けて、過年度までに製作・開発した地中無 線の送信器、受信器ならびに中継装置を組み合 わせた無線伝送システムに関する地上での動作 確認試験を実施した。

・電磁波による無線給電技術の開発

再冠水後の塩水を含む伝送媒体を介した環境 や処分孔内への設置などの多様性を考慮した室 内要素試験を実施し、無線給電技術の実用化の 見通しに係る知見を取りまとめた。

3)記録保存に関する国際的な検討動向

制度的管理に係る取組として、最新の国際的 な検討動向を整理した。

◇平成 25 年度~29 年度の取りまとめ ¹⁾

- (1)品質保証/性能確認プログラムの構築に向け た国際的な検討動向
- 諸外国の品質保証/性能確認プログラムの具体的事例の調査

スウェーデン、フィンランド及び米国の 3 か 国における品質保証/性能確認プログラムに関 連する規制要求について調査を行った(表-1)。 スウェーデン²⁰、フィンランド³⁰とわが国では、 廃棄体が使用済燃料とガラス固化体という違い はあるものの、地質環境が本来有する天然バリ アと人工バリアを組み合わせた多重バリアシス テムに基づいた地層処分概念で、立地・建設の 許可申請を行っている。一方、米国⁴⁰の Yucca Mountain での地層処分概念は、わが国の概念と は異なるが、規制機関である原子力規制委員会 (NCR)により、「性能確認プログラム」の実施 を明確に規制要件としている。

項目		スウェーデン	フィンランド	米国
規制	品質 保証	要求している (SSMFS 2008:21)	要求している (YVL D.5)	要求している (10 CFR Part 63) 検査やモニタリングも品質保証 の一環
 一要求	性能 確認	要求していない (SSMFS 2008:21) 解析によりモニタリング等の措 置による安全性への影響がない ことを示した上での実施を言及	要求している (YVL D.5)	要求している (10 CFR Part 63) モニタリング内容(確認事項/ 期間/方法等)を詳細に規定
	品質 保証	≻材料調達、製造、設置 の各段階で検査を実施 し、施工後初期状態を 満たすための設計前提 条件を満たしているこ とを確認	≻同左	材料購入や製造に関 する検査等の内容の みならず、 <u>性能確認</u> プログラムの適切な <u>履行</u> も含まれる。
事業者の取組	性能 確認	人工バリア(キャニスタ、銀街村、埋め戻し村)の性能は、地下研究施設での試験等の確認したが、 気施設での試験等の確認では実施するが、実辺分場でのすこなり、ないないない、 グは、安全機能を損なう為、実施せず >処分坑道や処分孔の岩 盤特性モニタリングは 実施	 > 初期段階からのバリア 変遷のモニタリングを 実施 > モニタリング対象とす るパラメータを抽出し、 それらの変遷をモニタ リングで確認 > ただし、実処分場での モニタリング実施については検討中 	バリア構成要素が当 初の設計通りとを原を しているようとを原を含 む性生能確認 り確認 ただし、 <u>甘は確なあるこでア クセル分概素</u> で たいし、 <u>甘は確なあるこ</u> とからえここ とからえここ とから次の 病気。

表-1 各国の品質保証/性能確認プログラムの考え方

スウェーデンやフィンランドでは、米国のように「品質保証ブログラム」や「性能確認ブログラム」等の名称はなく、相 成要素の関連も明確にされているわけではないため、明確にされている米国の例を参考に便宜上の名称を記載した。

②品質保証/性能確認プログラムの構築に資す る知見の体系化

調査結果を踏まえ、各国の品質保証/性能確 認プログラムに関する内容を比較可能な形式で 整理するともに、各国間の相違点や共通点につ いて分析した。一例として、各国の人工バリア に係わる品質保証/性能確認プログラムに対す る事業者の取組み内容を表-1に示す。 ③国際共同研究における検討動向^{50,60}

国際共同研究 Modern2020 プロジェクトは、各 国の法規制要件や処分概念の特徴等を考慮に入 れた上で、性能確認に資するモニタリング・プ ログラムを作成する手法の構築を目的としてい る。平成28年度までに、各国に共通するモニタ リングパラメータのスクリーニング方法が提示 されており、平成29年度には、スウェーデンの SKB 社が実施した自国の処分概念へのスクリー ニング方法の適用事例がケーススタディとして 報告されている。

(2) モニタリング関連技術の開発

無線伝送技術の開発

地中無線によるデータ通信において送信器・ 受信器間の通信距離を向上させる方法の1つと して、中継装置を用いる方法について平成26年 度から検討を行い、平成28年度までに中継装置 による多段多系統化の検討を行った。平成29年 度ⁿは地中無線の送信器、受信器ならびに中継装 置を組み合わせた無線伝送システムの6か月間 の動作確認試験を実施し、1時間間隔でのデータ 通信(合計4,353回)を連続して行った。これ は計測システムの設計条件である1週間間隔の 通信を10年間継続した場合の通信回数520回の 8倍である。また、動作確認試験中には中継装置 の故障を模擬して通信経路の変更を5回行うと ともに、中継装置の通信距離についても調べた。

中継装置の通信距離試験状況を図-1 に示す。 試験中の計測システムは正常に動作し、通信経路の変更後も正常にデータ通信ができたことから、計測システムは頑健性と中継装置の故障に対する冗長性を有することを確認した。また、 中継装置の大気中での通信距離は、測定環境の ノイズレベルが 1 mVrms 程度の場合であれば 100m 程度の通信が可能であることを確認した。



図-1 中継装置の通信距離試験状況

一方、平成26年度から国立研究開発法人日本 原子力研究開発機構(以下、原子力機構)の幌 延URL と瑞浪URL の地下坑道において、原子力 機構が実施する原位置試験に合わせた送信器– 受信器による地中無線伝送試験を継続実施した。 なお、瑞浪 URL では原子力機構の冠水試験を終 えたため、計測を終了した。

これらの試験結果から、無線伝送技術につい ては地下環境で適用できる見通しが得られたた め、今後は品質保証/性能確認プログラムの枠 組みの中での運用を想定した高度化開発を実施 していく必要がある。

②無線給電システム設計手法の検討

無線給電方法には電界共振結合方式と磁界共 振結合方式があり、平成26年度の予備検討経て、 磁界共振結合方式を本事業での検討対象として 選定した。磁界共振結合方式による無線給電の 概念を図-2 に示す。1 次コイル(送電コイル) への通電で発生した磁場により、2次コイル(受 電コイル)に電流が生じることで給電すること ができる。無線給電による給電効率は、1次コイ ル-2 次コイル間の離間距離や伝送媒体(介在 物)の影響を受けることが分かっており、地下 の処分環境を考慮して、これまでに離間距離や プラグの材料であるベントナイト、コンクリー トや鉄筋を対象とした室内要素実験で給電効率 の評価を行った。平成29年度⁷⁾は給電効率に及 ぼす地下水の影響を把握するために、純水、水 道水、人工海水を伝送媒体として給電効率を評 価した。



図-2 磁界共振結合方式のイメージ

地下水を介した無線給電の実験状況を図-3 に 示す。実験では、水道水ならびに濃度を変えた 人工海水を用いた。図-4 に人工海水濃度と給電 効率の関係を示す。試験の結果、水道水と純水 を伝送媒体とした場合は空気中と同程度の給電 効率であったが、人工海水を伝送媒体とした場 合、人工海水の濃度が高いほど給電効率は低下 した。給電効率の変化はコイル近傍に存在する 海水の影響であることが明らかであるが、その 詳細については今後更なる調査が必要である。

また、処分孔における無線給電技術の適用を 想定して、伝送効率の向上を目的とした中継方 式と、複数の受電コイルに対する無線給電を目 的としたインナー方式の給電方式による室内要 素実験を行った。中継方式とインナー方式の処 分孔への適用概念を図-5及び図-6に示す。

中継方式による実験は図-7 のように、同じ大 きさの送信コイルと受電コイルを設置し、その 間を電気的には独立した状態で配置した(どこ にも繋がっていない)。実験結果を図-8 に示す。 中継コイルを利用することにより、給電効率を 向上させることができる可能性に加え、中継コ イルの位置による特性(送受電コイル間の中間 点に設置する時が最も給電効率が良い)などを 確認した。



図-3 地下水を介した無線給電の実験状況



図-4 人工海水濃度と給電効率の関係



図-5 中継方式の処分孔への適用イメージ⁵⁰



図-6 インナー方式の処分孔への適用イメージ⁵⁰



図-7 中継方式における給電実験状況



図-8 中継方式の給電効率の理論値と実験値 (送電距離 740mm)

また、インナー方式による実験では、図-9のように、送電コイルに対して小さめの受電コイル2個を配置して給電効率の測定を行った。その結果、受電コイルを増やすと給電効率が上昇すること、一方の送受電コイル間距離が短いと、もう一方の送受電コイル間距離が長くても高い給電効率を得られることなどが確認された。

これらのことから、処分孔における利用を想 定した場合の無線給電によるセンサー等への電 力供給の可能性の見通しを得た。今後は室内試 験だけでなく、原位置試験などでの将来の実用 化に向けた課題の抽出が必要と考えられる。



図-9 インナー方式の給電実験状況

(3)記録保存に関する国際的な検討動向

地層処分事業においては、候補地の調査段階 から事業期間中の広範囲な情報が記録され、そ の情報量は膨大なものとなることが予測される。 記録された情報は、最終処分法や炉規法等に基 づいて保存されるが、保存すべき記録の詳細は 規定されていないため、記録の具体的な内容や 構造、保存方法を予め検討し、記録の保存と伝 達を確実なものとする必要がある。

このような課題認識のもと、本検討では、諸 外国の記録保存に関する最新の考え方や方策に ついて、OECD/NEA-RWMC(経済協力開発機構原子 力機関-放射性廃棄物管理委員会)による Records, Knowledge and Memory (RK&M) イニシ アチブの取組を中心として整理した。

RK&M イニシアチブは 2018 年4月に活動を終了 したが、地層処分に関する記録を公文書保管所 における文書保存、マーカー、タイムカプセル 等の異なる方法を組み合わせる記録の多重化、 記録を4階層に区分し、上位の階層の記録ほど、 重要な情報を簡潔にまとめる記録の多層化、上 位の階層の記録文書やマーカー等を多言語にて 記載する記録の多言語化等の方策を示している。

- 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関 する技術開発事業処分システム工学確証技術開発平 成25年度~平成29年度の取りまとめ報告書、2018
- 2) たとえば Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, SKB, TR-11-01, 2011
- 3) たとえば Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Synhesis 2012, POSIVA 2012-12, Posiva, 2012
- 4) たとえば Repository Performance Confirmation, SAND2011-6277, SNL, 2011
- 5) Modern2020 Project : HP: http://www.modern2020.eu/
- 6) Wireless Data Transmission Demonstrator: from the HADES to the surface. MoDeRn Project Deliverable D-3.4.2, 2013
- 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28年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工 学確証技術開発 報告書(第4分冊) –モニタリング関 連技術の整備-、2017

2. 可逆性・回収可能性調査・技術高度化 開発

2-1 事業の全体概要

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

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

このような状況を踏まえ、可逆性・回収可能性 に関する今後の具体的な運用や研究開発の推進に 向けて、更なる議論や検討が必要となる事項(可 逆性・回収可能性の意義や確保のあり方等)の整 理を行うとともに、回収技術の信頼性の向上や回 収可能性の維持に係る技術的な検討を進めていく 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)¹⁰
- ○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)²⁾

これらの事業では、操業段階における中核技術

である遠隔搬送・定置に関する要素技術開発や地 上での適用試験などを通して基盤技術としての整 備を進めるとともに、一連の回収作業において重 要な役割を担う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)³³、人工バリア材料や緩衝材の定置装置等の公 開を通して、操業に係る工学技術の理解等に資す 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 発してきた技術の高度化の観点から、実際の地下 環境での原位置試験等を通じて、操業技術として の更なる信頼性を向上させていく必要がある。

以上のような背景のもと、平成27年度からの5 年間の計画で着手した本事業では、地層処分技術 や可逆性・回収可能性に関する施策に対する国民 の信頼感の醸成に資することを目的として、可逆 性・回収可能性の概念や技術の高度化に向けた次 の取組を進めている。

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

上記のそれぞれについて、次節以降に平成 29 年 度の実施内容や成果を整理する。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の 委託事業「平成29年度高レベル放射性廃棄物等の 地層処分に関する技術開発事業(可逆性・回収可 能性調査・技術高度化開発)」により実施したもの である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
- 4)公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関す る技術開発事業(可逆性・回収可能性調査・技術高度 化開発)報告書(第1分冊)、2018

2-2 地下環境での搬送定置・回収技術の高度化 開発-実証試験

◇事業の概要

本事業では、処分施設の最終閉鎖までの操業 期間中の廃棄物搬出の可能性(回収可能性)を 確保するための回収技術について、実際の地下 環境での技術実証に取り組んでいる。一連の回 収技術に必要となる個別の要素技術については、 前項 2-1 で述べたように、処分システム工学要 素技術高度化開発、および地層処分回収技術高 度化開発において、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。このような段階的な取組を経て、 本事業ではこれまで開発してきた搬送定置や緩 衝材除去技術を活用して、地下での適用性の確 認及び地下環境における高レベル放射性廃棄物 の搬送定置・回収技術の実証的な整備を行う。

このような取組を通じて、地層処分技術や可 逆性・回収可能性に関する施策に対する国民の 信頼感の醸成に資することを目的としている。

本事業は平成27年度からの5ヵ年計画で取り 組んでおり、平成29年度は主に以下を実施した。

(1) 搬送定置・回収技術の実証的整備

(2)隙間充填技術の整備

(3)隙間充填材除去技術の整備

(4) 地層処分実規模試験施設の活用

◇平成 29 年度の成果 ¹⁾

本事業の技術実証で前提とする定置概念・定 置方式は、「処分坑道横置き PEM 方式 (Prefabricated Engineered barrier system Module)」(※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 発において、PEM の製作、狭隘な処分坑道での 搬送・定置が可能なエアベアリング技術につい て実規模スケールでの要素試験、ペレット方式 による PEM-坑道間の隙間充填技術の検討が行わ れている²⁰。これらに加えて、本事業では、隙 間充填材の除去や PEM の回収など、回収作業の 要となる工程を対象として、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 搬送定置装置の走行試験や、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、一連の回収工程における個々 の作業の繋がりに留意し、課題の設定・検討、 実証試験に使用する装置の整備を進めている。

地下環境での実証試験に向けた全体工程を図 -1 に示す。平成 31 年度に充填材の除去と PEM の回収試験に向け、(1)搬送・定置技術(逆動線 で回収にも適用)、(2)隙間充填技術、(3)隙間充 填材除去技術それぞれに対し、検討・整備を進 めた。



図-1 実証試験の全体工程

本事業の地下実証試験実施場所として、平成 27年度に国立研究開発法人日本原子力研究開発 機構幌延深地層研究センター(以下「幌延 URL」 という。)深度 350m の試験坑道 2 を選定した。 図-2 に平成 29 年度末の試験坑道 2 の整備状況 を示す。PEM-坑道間の隙間の形状は、上部開放 部(0.7~1.3m 程度)、下部狭隘部(十数 cm 程度) である。平成 28 年度までの当初の検討では、上 部・下部共にペレット方式による隙間充填材の 施工検討を進めたが³³、事業者のニーズ⁴⁰や隙間 充填材の除去試験の重要性に留意して、上部開 放部の施工方法は吹付け方式としている。



図-2 幌延 URL 試験坑道 2(平成 29 年度末)

(1) 搬送定置・回収技術の実証的整備

エアベアリングによる PEM の回収時の動作の 概要を図-3 示す。本機構の特徴として、十数 cm の隙間があれば挿入可能で、エアベアリングと走 行面との間に形成される空気膜による摩擦の低 減効果により、重量物を小さな力で搬送すること ができる。平成 28 年度までに地上施設に設けた 鋼製模擬坑道面(凹凸、気泡等が無い理想的な面) にて、エアベアリングを 10 枚備えた実機で搬送 時の空気量や牽引力等の運転パラメーターを取 得し、36.5t の PEM が搬送可能であることを確認 した(このパラメーターを評価の基準とした)。

一方、空気膜の形成に対しては走行面の性状が 大きく影響する。平成 29 年度は幌延 URL での回 収実証試験に向け、試験坑道 2 に現場打設したコ ンクリート面に対し、エアベアリングの適用性を 確認する要素試験を実施した。



図-3 エアベアリング技術の概要

要素試験は、平成28年度に試験坑道2に現場 打設で整備したコンクリート面における気泡痕、 凹凸や表面粗さ等、鋼製模擬坑道と異なる条件で のエアベアリングの適用性、重量物搬送時の運転 パラメーターを取得し、実機を用いた試験に反映 することが主目的である。エアベアリングの枚数 を実機の10枚から4枚に変更した実機の簡易版 である要素試験装置を新たに製作して試験に供 した。実機と同様にエアベアリングの特性を把握 するためにエアベアリング毎に流量計と圧力計 を、装置の姿勢や浮上高さを確認するために四隅 に距離計を設けた。圧縮空気は坑道内に既設の圧 空管から供給し、坑道に固定したウインチで装置 を牽引した。試験時にはエアベアリング一枚当た りが支える重量が36.5tのPEMを搭載した実機と 同様になるように、ウエイトを載せた。

図-4に試験坑道2での要素試験の様子を示す。 試験の結果、予め地上で実施した鋼製模擬坑道面 における要素試験装置による走行試験で取得し た運転パラメーターを再現した走行試験では、姿 勢や浮上高さが安定しないことが分かった。原因 として、走行面の気泡痕等からの空気の漏れによ り、空気膜が維持できないことが示唆された。そ こで坑道面での漏れを補うように空気流量を増 加させたところ、試験坑道2で PEM 相当の荷重条 件で走行できることを確認した。



図-4 試験坑道2での要素試験の様子

要素試験では、実打設面でのエアベアリング適 用性の評価に資する特性データとして、負荷荷重 を変化させた場合の走行可能時の空気供給量と 牽引力も併せて取得した。一例として、装置総重 量と供給空気量の関係を図-5に示す。



図-5 装置総重量と供給空気量の関係(地下要素試験)

今回の要素試験により、幌延 URL 試験坑道2実 打設面(乾燥コンクリート面)で PEM 相当の重量 物をエアベアリングで搬送するための供給空気 量及び牽引力は共に増加するものの、実際の坑道 面にてエアベアリングによる PEM の搬送・定置が 可能である見通しを得た。本要素試験の結果を受 けて、実機を改良するとともに、要素試験装置及 び実機による充填材除去後の走行面での走行確 認試験を実施し、エアベアリングの走行特性評価 及び実機の運転パラメーターの反映を進めてい く。

(2)隙間充填技術の整備

処分坑道横置き PEM 方式の PEM-坑道間への充 填材の施工技術を整備した。充填部の形状は図-2 に示すように、下部は幅十数 cm の狭隘な隙間、 上部は幅百数十 cm であり、施工方法として、前 者にペレット方式、後者に吹付け方式を採用した。 実際の地下での施工に先立ち本年度は地上で予 備的な充填試験を実施し、充填部の密度や配合比 等の性状を、コア採取による分析・評価で取得し た。実際の地下での施工時には、施工プロセス管 理による品質管理手法の妥当性を検証すること も計画している。

①下部狭隘部の充填技術(ペレット充填方式)

既往の検討より、純ベントナイト製のペレット を用いた充填方法を採用し³⁾、ペレットを移送す る技術としてスクリューコンベアを選定した。こ れらの充填技術に対して、使用ペレットの性状と 充填方法の最適化を行い、未充填部の発生を防ぎ、 所定のかさ密度(緩衝材相当のpa=1.37Mg/m³)を 達成する充填技術を整備した。図-6に下部狭隘部 の充填試験(ペレット充填方式)のフローを示す。



図-6のステップ1から3までの検討により、 ペレット自体の密度や粒度分布、狭隘部に未充填 部を生じさせないスクリューコンベアの配置や 動作条件等に係る知見を取得した。

これらを基に、幌延 URL での充填試験に適用す る充填装置を製作した。装置には回転数(=移送 量)の調整が可能な4本のスクリューコンベアが 前後進する走行架台に取り付けられており、レー ル上を走行する(図-7)。

この充填装置を使用し、幌延 URL の狭隘部を模 擬した鋼製の模擬土槽に対する予備試験を実施 した(ステップ4)。ペレットの充填後、PEM に相 当する土槽内側壁に設けたサンプリング窓から シンウォールを打ち込み、かさ密度を測定した結 果、概ね目標とした乾燥密度である 1.37Mg/m³付 近の密度となることを確認した。また。土槽内側 壁を取り外し未充填部の有無を目視で確認した ところ、未充填部は確認出来ず、適切に充填出来 ることを確認した(図-8)。



図-7 狭隘部充填装置外観



図-8 充填試験後の狭隘部内部の様子(サンプリング後)

以上のように、充填材料であるペレットの性状 (密度、粒度分布)、充填装置の製作ならびに所 定の密度を得るための装置の運転条件の整備を 行い、平成30年度に計画する幌延URLでの下部 狭隘部の充填試験の準備が完了した。

②上部開放部の充填技術(吹付方式)

上部開放部の隙間に対する隙間充填は、ベント ナイトにケイ砂を50%配合した混合土を乾燥密度 1.6Mg/m³となるように、吹付け方式による施工と した⁴⁾。吹付けにおける品質管理では、吹付け用 充填材の性状、目標密度を得る吹付け条件、未充 填部が生じない吹付け施工手順、充填部の体積に
対する充填質量から求められる全体の密度(かさ 密度)と、密度のバラつき(密度分布)が重要で ある。

吹付け用充填材料は、JIS A1210『突固めによる土の締固め試験法』に基づき予備試験を実施し、 締固め曲線を取得した。これより、ケイ砂粒度を 3号+5号、最適含水比付近に水分量を調整した ものを吹付け用充填材料とした(図-9)。



図-9 突き固め試験の結果の一例(ケイ砂:3号+5号)

本事業における吹付け試験は汎用機を組合わ せて実施する。予備試験によって設定した性状の 吹付け用充填材料を製造する仮設製造プラント の運転、製造した材料の保管、吹付け機への投入、 吹付けノズルの動作等、充填部の品質に係る管理 項目に対し、管理値を設定するための要素試験を 実施した。図-10に試験で使用した設備等を示す。



図-10 吹付け用充填材材料の製造プラント 左:混練、含水比調整状況、中央:製造プラント外観、 右:吹付け機

幌延 URL の試験坑道 2 における上部開放部は、 PEM 側部の幅がおよそ 70cm であることから、要 素試験では、幅 70cm、奥行き 1m の試験土槽を使 用し、水平吹きの場合は箱型、斜め吹きの場合は 一面を欠いた箱への吹付けを施工した。試験では、 吹付け機の回転数(材料供給速度に相当)と吐出 空気量をパラメーターとし、吹付け部の密度、な らびにこれらが吹付け部の密度やリバウンド率 に与える影響を調査した(図-11)。試験の結果、 吐出空気量が少ない場合は付着力が弱く辛うじ て目標の 1.6Mg/m³を達成する一方で、吐出空気量 が多くなると吹付けた材料が吹き飛ばされ、結果 としてリバウンド率が増加した。要素試験の結果 より吹付け時の管理値として、吐出空気量 10~ 12m³/min、吹付機の回転数 5rpm、吹付けノズルと 対象との離隔を 1m に設定した(表-1)。



図-11 吹付け要素試験状況 左:機械吹付け状況、中央:吹付け後の試験土槽 (斜め吹付け)、右:リバウンド率の測定(質量測定)

ゆけいままき除っかり

☆ ○ 吹竹り安系試験の結果									
吹付け	吐出空気量	回転数	吹付け量	リバウンド率	乾燥密度				
方向	(m ³ /min)	(rpm)	(kg)	(%)	(Mg/m^3)				
垂直	10	5	541.6	26.4	1.610				
	12	5	466.8	38.8	1.757				
水平	10	5	519.6	24.4	1.655				
	12	5	475.2	35.8	1.758				

幌延 URL の実際の坑道空間を想定した吹付け 機械の動きの制約、ノズルの挿入方向や角度等を 確認することを含めて吹付け施工確認試験を実 施した。施工確認試験は、伸縮アームを有する自 走式の吹付け装置を使用して実施した(図-12)。

吹付け施工確認試験の結果の一例を図-13に示 す。試験の結果、PEM 側部や坑道際部などのノズ ルが届きにくい箇所に対しては若干密度が低く なる傾向が見られた。これらの改善に向けて、吹 付け装置のアームやノズル稼働域の調整などに より吹付け面に対して垂直に吹付けが行えるよ う施工手順等の工夫を今後実施していく。



図-12 伸縮アームを有する吹付け装置を使用した 吹付け施工確認試験の状況



図-13 吹付け施工確認試験結果(コアサンプリング)

(3)隙間充填材除去技術の実証的整備

(2)に示した隙間充填技術によって施工された 充填材を除去し、(1)で整備したエアベアリング 装置にて PEM を回収できる状態にするための、隙 間充填材の除去技術を整備した。

充填材の除去技術の選定に際しては PEM 鋼殻 に与える影響を避ける点に留意した。上部開放部 のうち坑道近傍部は PEM から離れているため、除 去効率を重視した機械的除去方式を、PEM 近傍及 び下部狭隘部は PEM 鋼殻へ与える影響が小さい 流体除去方式のうち、切削水の運動エネルギーで 対象を粉砕するウォータージェット方式を選定 した。図-14 に各方式の対象部位を示す。



図-15 に除去の作業工程を模式的に示す。隙間 充填材の除去は PEM-坑道間の充填材を搬出可能 な状態として、PEM の回収作業が出来る状態とな るまで坑道外への搬出作業を続けることとなる。 このような機械的/流体方式によって、副産物化 (①)する。本事業では、その後の②と③の工程 について、狭い空間に対して連続的に実施出来る バキューム方式を採用する。



機械的方式、流体方式それぞれについて、適用 する技術を具体化した。PEM から離れた部分を対 象とする機械的方式についは、大量の充填材を効率的に除去する必要があるため、一般的な土木に 適用される掘削技術を比較検討し、オーガ(アー スオーガ)による機械的な方式による除去(機械 式除去)を選定した。本事業では図-16に示す機 械的除去装置の概念のうち、コア技術であるオー ガー掘削+吸引部について検討・製作を実施し、 地下の除去試験に供することとした。



図-16 機械的除去方法による設備の概念例

流体方式であるウォータージェットについて は、平成28年度に実施したベントナイト系土質 材料圧縮成型体の切削試験の結果を踏まえた除 去の要素試験を計測的に実施した。本年度は奥行 き方向の切削能力を確認するため、直径15cm、 長さ方向1mのセル内に作製した充填材に対して 切削試験を実施し、奥行方向の切削性についての データを取得した(図-17)。今後、ノズルを円筒 形状である PEM に沿わせて動かす装置の製作を 進める。



図-17 奥行方向の切削試験状況

①吸引による充填材の撤去

流体除去技術で切削した充填材について、吸引 方式による連続的な撤去の可能性に関する予備 的な検討を実施した。吸引車を使用した予備試験 の結果、吸引ホースの径である3インチよりも小 さく切削ができれば、連続的に吸引除去が可能で あることを確認した。

(4) 地層処分実規模試験施設の活用

幌延 URL 内において、高レベル放射性廃棄物地 層処分に関して、実規模・実物を基本として(実 際の放射性廃棄物は使用しない)、緩衝材定置技 術など操業に係る工学技術の実現性の検証、地層 処分の安全確保の考え方、地層処分に使用される 材料の性質を実感・体感し、理解を促進する「地 層処分実規模試験施設(以下「実規模施設」とい う。)」を整備してきた[®]。

平成29度に実施した主な項目を以下に示す。

①施設の公開

②理解促進活動

- 緩衝材可視化試験
- ・試験の公開

③対話記録の分析

1施設の公開

平成 29 年度は、前年度に引き続き実規模施設 の公開、来館者への設備の説明等を実施した。平 成 29 年度は延べ 5,545 人の方が施設を訪れ、平 成 22 年 4 月の施設開館からの累計は 49,235 人と なった(平成 30 年 3 月 31 日までの集計)。

②理解促進活動

実規模施設を常時一般に公開し、常駐する試験 員による案内、説明を行った。

·緩衝材可視化試験

実規模施設では処分孔竪置き定置方式ブロッ ク方式の実物のカットモデルを公開している。隣 接するブロックが浸潤・膨潤プロセスを経て一体 化していく過程を来館者に体感してもらうため、 過年度から実施中の可視化試験の供試体ブロッ クを改良した試験を公開した。図-18 に小型緩衝 材ブロックを用いた可視化試験の様子を示す。



図-18 緩衝材可視化試験(ブロック定置方式の模擬)

・試験の公開

「おもしろ科学館 2017 in ほろのべ」の開催 日(7/22(土)、23(日)に合わせ、緩衝材定置試験 を一般に公開した。2日間で 572 名(前年度 670 名)が来館し、定置装置の運転や緩衝材の止水試 験等を体感して頂いた。

③対話記録の分析

施設の公開や理解促進活動時に、施設に常駐す る試験員が、来館者からのコメントや質問を来館 者記録として来館者の属性と共に記録している。 平成22年度の地層処分実規模試験施設の開館時 から実施している来館者との双方向対話記録の 分析を実施し、本施設を訪れる来館者の属性や、 興味・関心事項の傾向を把握した。今後、本施設 の在り方だけでなく、高レベル放射性廃棄物の地 層処分事業の理解促進に資するため、研究・技術 開発側からの情報発信等、成果の見せ方について も検討を進めていく。

- 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関す る技術開発事業(可逆性・回収可能性調査・技術高度 化開発) 報告書(第2分冊)、2018
- 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 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
- 3)公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成28年度地層処分技術調査等事業(可逆性・回収可 能性調査・技術高度化開発)報告書(第1分冊)、2017
- 4) NUMO、NUMO セーフティケースに関する外部専門家ワー クショップ、配布資料:(3)処分場の設計と工学技術、 2016.9.23
- 5) SKB, TR-00-15, Techniques for freeing deposited canisters, 2000.1
- 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

2-3 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

2-1 節で述べたように、放射性廃棄物ワーキン ググループ(以下、「廃棄物WG」)による議論を経 て¹⁾、現世代として地層処分に向けた取組を進め ることが再確認されるとともに、平成27年5月に 改定された基本方針では、今後より良い処分方法 が実用化された場合等に将来世代が最良の処分方 法を選択できるようにするため、基本的に最終処 分に関する政策や最終処分事業の可逆性を担保す ること、及び原子力発電環境整備機構(NUMO)は 特定放射性廃棄物が最終処分施設に搬入された後 においても、安全な管理が合理的に継続される範 囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の 搬出の可能性(回収可能性)を確保することが定 められた²⁰。

こうした背景を踏まえ、本事業では、可逆性及 び回収可能性(以下、「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制度の運用 や研究開発の推進に向けて更なる検討が必要と考 えられる事項の整理を目的として、平成27~28年 度に「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」)を設置して議 論を進め、平成29年度に議論を通して得られた成 果の取りまとめを行った。それらは、制度面及び 技術面の2つの観点から次のように要約できる。

 つわが国では、基本方針で可逆性・回収可能性の 維持を規定して将来世代の柔軟性を確保してお り、諸外国と同様の制度整備状況にあるといえ る。但し、将来の可逆性・回収可能性の実行に 係る費用負担など、今後の事業進展の状況によ って課題となる可能性のある事項が認識された。
 し技術面では、基本方針で示されている回収可能 性を維持した場合の影響等に関する調査研究や 回収技術の開発が進められている。但し、安全 性、回収の容易性、維持期間ならびに費用など が、回収可能性を維持することに関してトレー ドオフの関係にあり、これらの関係が回収可能 性の維持に関する技術的アプローチ(回収の容 易性をどの程度設計に反映するか等)によって 異なることが認識された。 上記のような成果とともに認識された課題を踏 まえ、検討会では回収可能性の維持に関する技術 的アプローチの具体化に係る今後の技術検討の枠 組みに関する検討も行った。

本稿では、平成 29 年度に実施した検討会の取り まとめに沿って、得られた成果を整理する。

◇平成 29 年度の成果 ³⁾

(1)検討会における議論の進め方

上述した目的の議論を進めるため、外部有識者 の協力のもとで検討会を設置し、技術及び社会科 学の双方に配慮しつつ議論を展開した。具体的に は、最初に可逆性・回収可能性の導入に至るわが 国の議論や制度を共有したうえで、国際機関を含 む諸外国における先行的な検討や取組の動向等 を参照し、そこで論点や課題とされた事項等を本 検討会における検討項目として抽出した(表-1)。 検討会では、表-1 に示す個々の検討項目に対し て、以下に留意しつつ議論を進めた。

- ○基本方針の規定内容を出発点として、これまでの廃棄物 ₩G や安全規制制度に係る議論を含めたわが国におけるこれまでの検討経緯などに留意しつつ議論を展開する。
- ○安全性の観点で、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 回収可能性に係る技術的観点では共通する部 分があり得ることに留意する。

表-1 本検討会で議論の対象として抽出した 13の検討項目

•	可逆性・回収可能性を必要とする動機
•	可逆性・回収可能性を必要とする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
•	回収後の廃棄体の管理
•	処分場設計への技術的要求
•	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
•	音思決定のホールドポイントに係る留音事項

なお、可逆性・回収可能性の用語の定義につい

ては、廃棄物 WG では国際的な共通理解として得られた定義を参照しつつ議論が進められてきた経緯を踏まえ、本検討会でも国際機関が主導したプロジェクト³⁰で示された定義を踏襲した(表-2)。

表-2 可逆性・回収可能性の定義

- 可逆性(Reversibility):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。
- 回収可能性(Retrievability):原則として、処分場に定 置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。
- (2)検討会における議論を通して得られた成果

表-1 に示す13の検討項目に関する議論を経て、 成果の取りまとめでは、個々の検討項目の関連性 や類似性を踏まえて、幾つかの観点から取りまと めて整理している。本稿では、これらの成果を次 の3つの観点から整理する。

- ・可逆性・回収可能性の制度としてのあり方
- ・回収可能性に関する技術的アプローチのあり方
- ・当面の技術的な対応

1)可逆性・回収可能性の制度としてのあり方

改定された基本方針によって可逆性・回収可能 性が導入されたところであるが、その将来の実行 にあたっては、関連するどの制度のもとで検討や 判断が行われるべきかといったことなど、他の制 度との関係を整理しておく必要がある。

このような観点から、諸外国の可逆性・回収可 能性に係る制度整備状況(表-3)などを参照しつ つ、基本方針によって導入された可逆性・回収可 能性の概念とそれを必要とする動機や関連する 他の制度との関係を図-1のように整理した。同 整理を通して、将来の可逆性・回収可能性の実行 の際には以下に留意が必要であることを認識し た。

○現世代の責任として可逆性・回収可能性を担保 する形で安全な地層処分を着実に進める結果 として、事業の進展とともに将来の柔軟性は制 約される(事業進展とともに、回収の容易性は 低減し、回収費用は増加する)。

○将来の可逆性・回収可能性の実施(政策転換) に伴う相応の負担も想定される(政策転換に係 る費用や廃棄物の回収・移動に係る費用や作業 リスクなど)。

	可逆性・回収可能性の維持等 を要求する規定の有無			地域の意 向を尊重	41 应款准备力 - 第十7 按索		
	事実規制 制度	安全規 維持	約制度 影響	する制度 の有無			
スウェーデ ン	×	×	0	0	●実施主体(SKB社)が1992年の研究開発計画より、本格提集の前に5年間の初期提集期間(実証定 置処分:全体の5~10%定定置)の導入に関する調査研究を提案(併せて、実証定置処分の期間よ 回数が必要であることを提示)。		
					 ●ナイルを決定して立地:建設許可申請段階にある現在では、実証定置処分の概念はなくなっている。 ●ナイル還定段階(立地・建設許可申請段階まで)における地域の意向の反映を環境法典によって制度化。 		
フィンランド	▲ (回収可能	×	×	0	●サイトの決定に関する原則決定に際して、環境影響評価(EA)における議論も考慮して、回収可能性の維持を規定(政府が策定した1999年の一般安全規則、及び2000年の政府の原則決定文書)。		
	性)	(右横	(参照)		 ●但し、2008年の安全規則改定に伴い、安全規制制度上の同規定は廃止(原則決定は現在も存続)。 		
			,	ļ	●サイト選定段階(原則決定段階まで)における地域の意向の反映を原子力法によって制度化。		
フランス	〇 (可逆性)	×	0	×	●サイ・選定プロセスを再考した1991年法で可逆性を示唆。現在の唯一の候補サイトへと繋がるビュールへの地下研設置を決めた1998年の省庁間委員会決定において可逆性のある地層処分を支持。		
					●2006年および2016年の法で可逆性の維持を規定(少なくとも100年間)。可逆性の条件は、設置 許可申請後に新法で規定する予定。		
					●現在の安全指針は、可逆性のある地層処分を前提としている。但し、現時点では具体的な要求・要件に係る規程はない(可逆性の条件を定める新法制定を経て、安全指針への反映等が想定される)。		
ドイツ	×	0	0	×	●事業規制(事業推進)の観点から、現在検討中(2013年のサイト選定法に基づき委員会で検討中)。		
		(国収可 胞性		(サイト選定 手続きを検 討中)	●安全規制制度(2010年の安全要件)では、操業期間中における回収可能性の維持を要求。併せて、 閉鎖後の回収の可能性に備えて、廃業体パッケージが500年間健全であることを要求。		
スイス	〇 (回収可能 性)	0 (国収可 無件)	0	×	●2004年に改正した原子力法/原子力令、および安全規制制度(2009年の安全要件)の双方で、処分場の閉鎖まで回収可能性を要求(多額の費用を要せず回収が可能な方法で廃棄物の定置を要求)。		
	_				●地域の意向の反映などはないが、サイト決定後に(地下特性調査施設の建設前)、憲法規定に基づき、条件を満たせば国民投票を行うことができる。		
英国	×	×	0	0	●法規制制度(サイト選定に係る2014年の政府白書や安全規制に係る2009年のガイダンス)では、操業段階において回収を行うことができるとしているが、回収可能性の維持は要求していない。		
					●サイト還定段階(詳細は、現在検討中)における地域の意向の反映を、サイト還定手続きを規定する 政府白書(2014年)において規定。		
カナダ	A	×	0	٨	●法規制文書としては、可逆性・回収可能性に関する規定はない。		
	(回収可能 性)		Ū		●但し、2005年に実施主体(NWMO)が取用に提案した。回収可能性を維持した「適応性のある段階 的管理」※は、2007年の総督決定により、カナダの長期管理アプローチとなっている。その後の2010 年よりサイト環また開始。		
					●NWMOが2010年に策定したサイト還定計画(9段階からなるプロセス)において、地下実証施設の連 設・提業に係る許認可プロセスの前迄(第6段階応)、地域の實向が反映できることを示している。		
					※適応性のある段階的管理:サイト貯蔵や集中貯蔵等を組合せて最大240年の間、回収のためのアク セスを維持する概念が可能性のある概念として示されている。		
米国		0 (807)	×	Δ	●ユッカマウンテンの選定に至るサイト選定への着手段階より、事業規制(事業推進)(1982年NWPA) および安全規制制度(1981年NRC規則)の双方で、提業期間中における回収可能性の維持を要求。		
	性)	前性)			●安全規則が要求する回収可能性の維持については、その目的と期間が特定されている(安全性の観点から、NRC審査期間中における是正措置等の可能性を意図)。		
					サイト選定段階(大統領が処分場のためのサイトの推薦書を連邦議会に提出する際)に、サイト立地 州の知事等が不承認通知を連邦議会に提出できる。ただし、連邦議会上下院の決議による立地承 認治職に以下承認を考慮さたが可能。		
	1	1		L	; 彭次調により小学部を復りことが判断。		

表-3 可逆性・回収可能性に関する諸外国の制度整備状況

維持:可逆性・回収可能性の維持の要求の有無 影響: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旨の要求の有無

(注)下表における安全規制制度の欄



注)動機:ここでは、可逆性・回収可能性を必要とする理由、或いは実施を判断しな ければならない場面に至る原因やその時の状況などを総称するものとして"動 機"と表現している。

図-1 基本方針に基づく可逆性・回収可能性の概念とそれ を必要とする動機との関係

わが国では、最終処分法に基づく処分地選定プロセスや原子炉等規制法に基づく定期安全レビューなど、事業の段階的な進め方が制度化されている。更に、改定された基本方針によって、可逆性・回収可能性の維持を規定して将来世代の柔軟

性を確保するとともに、可逆性・回収可能性を維 持すべき期間(最終処分施設の閉鎖までの間)、 必要となる調査研究の実施(閉鎖せずに回収可能 性を維持した場合の影響等に関する調査研究)、 ならびに地層処分事業に係る施策に関する定期 的な評価の枠組みについて明らかにされている。 また、主要国の多くで可逆性・回収可能性が制度 的に位置付けられているものの、将来の実行に不 確実性のある可逆性・回収可能性に対する規定は、 "可逆性・回収可能性を確保する"、或いは"可 逆性・回収可能性の確保に係る措置が安全性に影 響を与えないようにする"といった定性的な内容 であり、一部の国における可逆性・回収可能性の 維持期間に関する規定を除き、詳細な要求は示さ れていない。

このような状況から、改定された基本方針の規 定を含めた可逆性・回収可能性に係る現時点にお けるわが国の制度は、諸外国と同様の整備状況に あるといえる。一方、将来の可逆性・回収可能性 の実行に係る費用負担のあり方や最終処分施設 の閉鎖までの間の特定放射性廃棄物の管理のあ り方、更に、今後検討が進められる安全規制制度 との関係において必要となる制度間での調整な ど、今後の事業進展の状況によって課題となる可 能性のある事項が存在し得ることを認識した。例 えば、費用負担のあり方に関して議論の余地が残 されていることが国際的に認識されているとこ ろであるが³³、これらに関する更なる議論を深め るためには、可逆性・回収可能性の維持や回収作 業に要する費用などの定量的な情報が、議論の前 提或いは議論に資する技術情報として必要とな る。

2)回収可能性に関する技術的アプローチのあり方 地層処分が有する特徴や概念に対して、"閉鎖 後の一定期間までは回収が技術的に可能である" との国際的な共通認識がある。そのような認識の もと、回収の実現性に関する議論が回収の容易性 に関する議論へと帰結する可能性が示唆される とともに、回収可能性の実現性を示していくうえ での2つの技術的な取組の方向性(戦略)が示さ れている³⁾。このような国際的な考え方を踏まえ、 今後、わが国でも採用し得るものとして、次の2 つの共存可能な技術的アプローチが存在し得る。

- **技術的アプローチ1**:回収方法(技術・装置)の 開発に重点をおくアプローチ
- **技術的アプローチ2**:回収をより容易にするための方法を設計に考慮するアプローチ

技術的アプローチ1は、処分場の設計の種類や 内容を問わず、図-2に示すような回収実施の際に 必要となる回収方法(技術・装置)を開発してお くアプローチである(スウェーデンやフィンラン ドがこれに相当する取組を進めてきた)。技術的ア プローチ2は、回収をより容易にするための方法 や程度との関係で、表-4に示すような多様な考え 方や方法が想定される(本アプローチを具体化し たものとして、廃棄体を完全に埋め戻さないフラ ンスの処分場の設計例がある)。



図-2 回収方法の開発例 4)

表-4 可逆性・回収可能性の定義

設計への考慮の考え	設計への考慮の方法の例
方	(操業手順の設定等を含む)
 回収可能性の維持 	○回収の容易性を坑道の埋め戻し状態
期間内において、廃	を工夫することで考慮する(廃棄体
棄体へのアクセス	を完全に埋め戻さない設計など)
を容易にしておく	○操業手順を工夫する
②回収可能性の維持	○回収時に解体・破壊しやすい地下構
期間内において、可	造物を導入する(材料選定の工夫な
能性のある将来の	ど)
回収作業が容易と	○回収の容易性を念頭に置いたレイア
なるようにしてお	ウトや坑道寸法設計、定置方法を工
<	夫する、など

わが国においても、今後、候補サイトの地質環 境の具体化に併せて、処分場の設計とともに回収 可能性に関する技術的アプローチを具体化して いく必要がある。その際、以下に留意が必要であ る。

- ○共存が可能な2つの技術的アプローチを効果的 に組合せて進めていける。
- ○採用し得る技術的アプローチの種類や内容に応じて、技術的に留意すべき事項が異なる。
- ○回収可能性を維持することに関して、安全性、 回収の容易性、回収の実施時期(回収可能性の

維持期間)や費用などの間で、トレードオフの 関係が存在し得る。これらの関係は、採用する 技術的アプローチの種類や内容によって異なる。

3) 当面の技術的な対応

上述したように、当面の課題として、わが国に おける回収可能性に関する技術的アプローチの具 体化を行う必要がある。また、1)で述べたように、 将来的には、基本方針で示された課題である施設 閉鎖までの管理のあり方の具体化が必要であり、 更に、可逆性・回収可能性の実施の可否を判断し なければならない場面も想定される。このような 具体化や判断の場面では、最終判断や決定に至る 検討や評価に資する定量的な技術情報が必要とな る。特に、当面の課題である技術的アプローチの 具体化においては、採用するアプローチの種類や 内容によってトレードオフの関係が異なることか ら、適切なアプローチを選択するには、これらの 関係をより定量的に示していく必要がある。

このような課題認識のもと、今後の技術的な検 討を進めるうえでの出発点として、技術的アプロ ーチの具体化に必要となる定量的な情報を想定 し、それらの定量化に必要となる技術検討項目を 以下に留意して取りまとめた(表-5)。

- ○今後採用し得る技術的アプローチの種類や内容 によって異なる個々のトレードオフの関係を具 体化でき、かつ、それらの総合的な比較評価を 可能とする枠組みとして整理する(定量化すべ き情報と今後採用し得る技術的アプローチを組 み合わせたマトリックス形式で整理する)。
- ○検討の出発点として、定量化すべき情報について、トレードオフの関係が想定される"安全性"、
 "回収の容易性"、"回収の実施時期(回収可能性の維持期間)"ならびに"費用"の4つの項目を設定する。また、今後採用し得る技術的アプローチには、現時点で想定し得る2つの処分概念オプションと坑道の埋め戻し状態オプションに関する6つの組合せを設定する。
- ○上記のマトリックスに"定量化に必要となる技 術検討項目"を加えて、定量化に向けて必要と なる技術検討項目を具体化する。

今後、表-5 内に"白抜き"で示したマトリッ クス内に定量的な情報を埋めていくことによっ て、個々のトレードオフの関係を具体化でき、今 後採用し得る技術的アプローチに関する総合的 な比較評価が可能となる。同表では更に、定量化 すべき情報の個々に対応する形で、定量化に必要 となる技術検討項目を例示している。これらの項 目は、今後の検討や調査研究の進捗に応じて、更 なる議論や必要な見直しが行われることを期待 している。

定盤化すべき情報		回収可能性の維持に関する技術的デ プローチ						Terror and an all the set of the		
		緊張き方式 情景き方式[Pit				き方式	PEM]	一生にの定量にに必要と多ら技術研究目標目(例)		
1.49.0.41.0	11115 W 10780 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	OFL	.092	OP3	OP1	092	OF3			
0.828	①回収可能性維持期間中の関 放抗道の安全性への影響							 関数抗運内の作業空間の安全性 関数抗道の確全性(空間安定性) 制数抗道の確全性(空間安定性) 		
	②回販作業時の安全性への影響 (回収を実施する場合)							1)回回時に再到用する抗運内の作業支援の安全性 ※面の作業時に一度運動販売に用きる間に支援した増加 の運動反した抗運の再を開始の健全性 1)回応時の環境体管器の健全性 2)回応時の環境体管器の増生性		
	(2)閉鎖後長期の安全信への影響 :回政可能性情報報告後に同 取过可能性情報報知道で書きの、 入工パワや天然パリア(月岩) に取付す可能換長期の安全機 能への影響							1回記の場合を目前感染やの認知な調査の存在に伴うスプログラに開きる 全な構築の入意。 高級ない調査がした状態、(加減)の特別ムクによる人工/07月の必要す の構成な利用のから、(加減)の特別ムクによる人工/07月の必要す の構成な利用のから、(加減)の特別ムクによる人工/07月のからす の構成な利用のから、(加減)の特別人のためます その力学用のから用い、 の構成したまた、「の力学」の分子した。(日本)の発見した の品類が可認されたたます。(日本)の分子した。(日本)の発見した の品類が可認されたたます。(日本)の分子した。(日本)の分子した。(日本)の分子 の品類が可認されたたます。(日本)の分子した。(日本)の分子した。(日本)の分子 の品類が可認されたたます。(日本)の分子した。(日本)の分子した。(日本)の分子 の品類が同志でのたます。(日本)の分子した。(日本)の分子した。(日本)の分子 の品類が同志でのため、(日本)の分子した。(日本)の分子した。(日本)の分子 の品類が同志でのため、(日本)の分子した。(日本)の分子した。(日本)の分子 の品類が同志でのため、(日本)の分子した。(日本)の分子した。(日本)の分子 の品類が同志でのため、(日本)の分子した。(日本)の分子した。(日本)の分子 の品類が同志でのため、(日本)の分子した。(日本)の分子した。(日本)の分子した。(日本)の分子した。(日本)の分子 の品類が同志でのため、(日本)の分子した。(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子した。(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の分子(日本)の(日本)の(日本)の(日本)の(日本)の(日本)の(日本)の(日本)(日本)(日本)(日本)(日本)(日本)(日本)(日本)(日本)(日本)		
2.回収の唇	(1)単位ユニットあたりの回収時間							1)より合理的な回収作業の実現に向けた技術検討/研究開発		
制任(回) (反作業)注 間)	(機関体1体又は処分死還1本) (2)全ての開墾体団収に低る全体作 服務期							a.回取時間の短端に同じて回取方法(弦相・装置)の展示化 b.回取作業手順の異体化 2)より回収の客層性を高めた処分場の設計開発		
3.最終開發	まずに回収可能性を維持できる期間							(国有の技術検討項目は想定されない。上記1.の安全性への影響に関する 技術検討結果等に基づき定量化する。)		
4.回视可能(生に係る費用						-1	(国务の技術検討項目は想定されない。上記1、~3、の技術検討技業等に) づき定量化する。)		
可能性の緒 古方式 17ション1(0) ・総参れた設備 ・他のれ道は開設	持に関する技術的アプローチとし P1) オプション 2 (OP2) ・ そうけい道を開催してラジ な設置 ・ アウェンパローの話めれ道 ・ 明約	,τâ	頭に オプシ: •79t	置いた ヨン3(ス代達の2	「処分 OP3) ^{州政}	→概念	13U	た道の埋め戻し状態」の組合せの例 構造されて、[PEM] オプション2(0P2) オプション: オプション1(0P1) オプション2(0P2) オプション: ・ をがれるの意味.14kg ・ を行ったがあー。後のの ・ のためいの意味.14kg ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・		
and the second s	AT BIORISTAN						79	セン状態 アクセン状態 アクセン状態		

表-5 回収可能性の維持に関する技術的アプローチの具 体化に係る技術検討の枠組み

(3)おわりに

以上のように、検討会では、わが国の可逆性・ 回収可能性について制度面及び技術面から整理 を行うとともに、示唆された課題への対処に向け て、回収可能性の維持に関する技術的アプローチ の具体化に係る技術検討の枠組みを示す"技術検 討のフレームワーク"として整理した。同整理が、 今後の更なる議論や技術検討を進めるうえでの 検討のベースとして活用されることを期待して いる(同フレームワークは、事業推進や安全規制 を問わず、可逆性・回収可能性を導入した地層処 分事業を今後進めていくうえでの共通的な基盤 と考える)。

- 1)総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子 カ小委員会放射性廃棄物ワーキンググループ、"放射性 廃棄物WG中間とりまとめ"、2014
- 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)"、2015
- 3) 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
- 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

2-4 回収可能性の維持についての検討

◇事業の概要

「2-1 事業の全体概要」で述べたように、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」¹⁾(以下、「基本方針」)で は、最終処分事業における可逆性・回収可能性の 確保のために、"最終処分施設を閉鎖せずに回収可 能性を維持した場合の影響等に関する調査研究を 推進する"ことが示されている。

回収可能性を維持できる期間については、上記 の基本方針の改定に先立つ平成25年度より検討 に着手しており²⁰、平成27年度からの5ヵ年とし て、処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持した場 合の影響等に関する評価技術の整備や対策技術の 具体化に向けた検討を進めている^{3),4),5)}。

平成 27 年度~平成 28 年度には、"処分孔竪置き ブロック方式"、及び"処分坑道横置き PEM 方式" を対象として、以下に係る定性的な検討を行った ^{3),4)}。

・回収可能性を維持した場合の影響の抽出・分析
 ・回収可能性の維持に必要となる技術の抽出

また、平成28年度からは、回収可能性を維持する ことによる処分場への影響の定量的な評価技術の 整備に向けて、坑道の安定性に関する力学的な影 響評価の適用可能な解析手法や条件の検討に着手 している⁴⁾。

このような経緯の中で、「2-3 可逆性・回収可能 性の意義及び確保の在り方の整理」に整理したよ うに、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」)を通して、回 収可能性を維持した場合の安全性への影響など、 今後定量的に検討していくべき具体的な技術検討 項目(以下、「定量化に必要な技術検討項目」)が 整理された。これを踏まえ、平成29年度からは、 定量化に必要な技術検討項目の個々について、定 性的、或いは定量的な検討を進めていくこととし ている。これらの定量的評価技術は、将来に行わ れる回収可能性の維持期間の決定を支援する技術 情報を提供するための技術となる。

平成 29 年度は、上記の定量化に必要な技術検討 項目に留意して、以下の取組を進めた⁵⁰。

○定量化に必要な技術検討項目の具体化

○回収可能性の維持に伴う影響に関する定量的

評価方法の調査・検討

◇平成 29 年度の成果

(1) 定量化に必要な技術検討項目の具体化

1) 定量化に必要となる技術の現状整理

検討会で整理された定量化に必要な技術検討 項目の個々について、調査段階における回収維持 期間の決定を支援する技術情報となる操業期間 中の安全性への影響及び閉鎖後長期の安全性へ の影響を定量化するための技術を整理した。その 結果、今後、定量的な評価のために解析技術等の 整備が必要な優先度の高い課題として、以下の6 項目を抽出した。

- 開放坑道の健全性(空間安定性)
- 埋戻した坑道の再利用時の健全性
- 坑道開放期間中の継続する坑内湧水の影響
- ●地下水の引き込みによる擾乱影響の程度と範囲
- 開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度
- ●ベースライン(建設前の元の地下環境の状態)
 への回復過程と回復の程度
- 2)回収維持技術、回収技術の整理と研究課題の抽 出

回収可能性の維持の検討では、上記の影響の定 量化に必要な技術に加え、回収維持期間中の地下 施設の維持技術(以下、「回収維持技術」)及び回 収技術の実現性にも留意が必要であるため、現時 点で適用可能な回収維持技術や回収技術を整理 した。本稿では、回収維持技術に関する技術動向 を整理する。

回収維持期間中における回収維持技術とし て、支保工や換気設備、排水設備等の維持管 理・更新技術(異常発生監視・点検技術、劣化 診断技術、補強・修復技術)が想定される。こ れらの技術は一般的なトンネルに適用されて おり、詳細な内容や手順がまとめられている ^{8),9)}。また、CIM (Construction Information Modeling / Management)導入による生産性向上、 インフラ用ロボットによる点検作業と施工の省 力化、AI (Artificial Intelligence:人工知能)

を活用した構造物の調査・維持管理、AR

(Augmented Reality:拡張現実)・VR (Virtual Reality:仮想現実)による品質向上、といった 技術開発も進められている。ただし、処分坑道横 置き PEM 方式の場合のような坑道内の狭隘空間 の存在、埋め戻した処分坑道の再掘削/再利用の 可能性といった地層処分に固有の特徴や要件に 留意が必要である。また、維持管理技術として利 用される異常発生監視等の計測器の一般的な寿 命は 10 年程度と想定されることから、長期的な 運用が可能な計測器及び計測システムの開発等 が研究課題として挙げられる。さらに、作業領域 が放射線管理区域に指定される場合には、作業員 被ばくの観点から、遠隔操作が可能な装置やロボ ット等による維持管理・更新技術の導入にも留意 が必要となる。

(2)回収可能性の維持に伴う影響に関する定量的 評価方法の調査・検討

1) 力学的影響評価方法の検討

平成 28 年度には、坑道安定性に関する解析的 評価として、岩盤や支保工を構成要素として設定 し、岩盤のクリープ変形(コンプライアンス可変 型モデル(大久保モデル))を用いた試行的な解 析を行い、岩盤の最大せん断ひずみや吹付けコン クリートの応力によって坑道安定性の評価を試 みた。平成 29 年度は同様な評価手法を用いて、 埋戻し材の膨潤圧の支持効果や吹付けコンクリ ートの溶脱速度の影響に対する解析を行った。実 施内容及び解析結果の概要を表-1 に示す。解析 の結果、埋戻し材の膨潤圧や初期剛性よりも吹付 けコンクリートの物性が坑道安定性に大きく影 響することが分かった。

表-1 坑道安定性に関する実施内容・解析結果の概要

実施内容	比較対象の 解析ケース	解析条件等	解析結果概要
埋戻し材の膨潤 圧の支持効果の 把握	新第三紀堆 積岩/横置 き方式/処 分坑道まで 埋め戻し	 ✓ 膨潤圧=0.38MPa ✓ 膨潤圧の経時変化は考慮しない 	埋戻し材の膨潤圧に 支持効果あり
埋戻し材の坑道 変形抑制の効果 の把握		 ✓ 埋戻し材の初期剛性を昨年 度の10倍(390MPa) ✓ 支保工・インバートがない と仮定(埋戻し材のみ) 	支保工があれば、埋 戻し材の剛性の違い が坑道変形抑制には 効かない
吹付けコンク リートの溶脱速 度の条件を変え た結果の把握	(昨年度の ケース8)	 ✓ コンクリートの初期弾性係 数に対して1/10になる期 間を400年後 ⇒200年後、800年後 	吹付けコンクリート の物性変化は坑道安 定性に大きく影響

さらに、本検討で用いている解析モデルの妥当 性の確認に向けて、解析と実環境での計測値を比 較して妥当性の確認を行った研究例等の調査を 行った。その結果、幾つかの比較検討事例がある ものの、計測期間が1年程度であるなど、本検討 の目的に即した研究例や実環境での計測例は見 つけられなかった。今後、長期間にわたる計測を 含めた現地計測との比較事例を積み上げる必要 がある。

また、本検討の坑道安定性の評価にはトンネル 設計のために使われている掘削時の指標を採用 しているが、回収可能性の維持を検討する上では、 従来の土木構造物の設計が想定していた期間よ りも長いことから、より長期間の坑道安定性評価 に対応した指標を用いる必要がある。また、時間 と共に岩盤の強度が低下していると解釈してい る事例¹⁰や軟弱な地山の強度の増加が見られる 事例¹⁰の存在にも留意して、回収可能性維持の影 響の検討に適用するために、長期間の岩盤の変化 の理解や長期変化後の岩盤の評価のための研究 も必要となる。

2)水理学的影響評価方法の検討

水理学的影響の評価は、以下の検討に資するこ とを目的としている。

- ・支保工などのセメント系部材の劣化等に影響
 を及ぼす可能性のある坑道の湧水量の時間変化
- ・回収維持期間中の坑道の開放に伴う酸化環境の広がり(空気の岩盤中への侵入による不飽和 領域の発生の可能性)
- ・閉鎖後の再冠水に至る期間及びその間の水理 場の変遷

廃棄体の定置方式・埋戻し状態・坑道開放期間 の違いによる影響を明確にするために、検討条件 を以下のように設定した。

- ・対象岩盤は新第三紀堆積岩で均質とする。
- ・NUMO が概念検討をしている処分孔竪置きブロ ック方式の処分概念を対象としたパネルの形 態である Through-type (連絡坑道間を処分抗 道が貫通する形)と処分坑道横置き PEM 方式の 概念への適応を検討している Dead-end-type (坑道の一方が行き止まりになっている形)の 2 種類の処分パネル¹²⁾を対象とする。
- ・解析モデルは、1パネルの1/4を切り出したパ

ネルスケールモデル(同数の廃棄体定置を想定 したモデル)と処分坑道周辺を細かくモデル化 した処分坑道詳細モデルを使用する。

- ・処分坑道を開放した状態と処分坑道を埋戻した 状態(連絡坑道のみ開放)を想定し、回収可能 性の維持期間は100~300年とする。
- ・解析ツールとして Dtransu3D・EL (FEM・飽和・ 不飽和、非定常地下水流動解析)を用いるが、 不飽和領域の発生、再冠水時間に関しては、液 相・気相の両方を考慮できる解析手法である TOUGH2 (FDM・二相流解析)も用いて、解析手 法の比較検討を行う。
- ・各材料の物性や不飽和特性は、既存文献等を踏 まえて設定する。

3D パネルスケールモデルによる解析結果例として、Through-type と Dead-end-type の処分坑 道掘削時の全水頭分布の経時変化を図-1 及び図 -2 に示す。本検討で設定した解析条件では、両 パネル形態ともに、処分坑道掘削時は1年程度、 処分坑道の埋戻し時は数年から10年程度で定常 状態となった。



処分パネルの形状の違いに着目すると、単位廃 棄物あたりの坑道長(連絡坑道+処分坑道)が長 い Through-type の方が、坑道開放による周辺地 下水への影響範囲が広くなり、また図-3 に示す ように坑内湧水量も多くなる。従って、周辺地下 水の引き込みに伴う影響が大きくなるため、不確 実性の低減の観点からは Dead-end-type の方が 有利となる。また、湧水処理の観点からは、処分 坑道を埋戻した状態の方が、坑内湧水量が低減さ れるために有利と言える(図-3)。

パネルスケールモデルによる解析においては、 地形、水理地質構造や掘削工程等を考慮した、よ り現実的な条件での検討が今後の課題と考えら れるが、これらを考慮すると解析モデル規模や解 析負荷が増大することから、評価目的に応じた評 価方法による検討が必要になる。



また、処分坑道付近をモデル化した詳細モデル による解析結果例として、EDZ を考慮したケース の不飽和領域の経時変化図を図-4 に示す。本検 討における解析条件に対する飽和・不飽和解析で は、坑道上部に不飽和領域が発生し、その影響が 坑道上方へ大きく拡がり、3ヶ月程度で進展が遅 くなる結果が得られた。一方、二相流モデルで解 析した場合は、上方へ大きく拡がりは抑制される ものの、坑道下部の EDZ 領域に不飽和領域が発生 する結果となり、約2年後に定常状態となった。



飽和・不飽和解析は、不飽和領域の透水性を飽 和領域よりも小さい値で評価することにより、不 飽和領域内の流体の流れを抑制する方法であり、 この透水係数と飽和度の関係を示す不飽和特性 曲線の設定が不飽和領域の拡がりに大きく影響 した可能性がある。図-4の結果から、液相だけ ではなく液相と気相の両相を扱うことができる 二相流解析手法の方が、坑道周辺の不飽和領域評 価手法として、より現実的と考えられるが、二相 流解析においても、飽和・不飽和解析と同じ不飽 和特性を用いており、解析に用いた物性の影響が 大きいこと考えられる。従って、今後は不飽和領 域に関する既往の実測・実験データ等の調査と不 飽和領域の発生に影響する要因についての感度 解析を実施し、より適切な解析条件の設定につい て検討した上で、得られたデータを次の化学的影 響評価の条件等へと引き渡す必要がある。

3) 化学的影響評価方法の検討

化学的影響をモデルにより評価する場合、評価 の中核となる解析手法は地球化学的反応解析で ある。解析技術の整備に先立ち、化学的影響の評 価において重要となるパラメータの検討に加え て、平成28年度までに作成されたプロセス・イ ンフルエンス・ダイヤグラム(PID)³⁾⁴⁾において 化学的影響として分類されている項目を抽出し、 影響の大きさの程度、及び評価方法の現状を把握 するための文献調査を行った。これらの取組を経 て、化学的影響評価に関して今後取り組むべき課 題を表-2のように整理した。

表-2 検討対象となる項目のまとめと今後の取り組み

項目	回収可能性 安全性/	維持による への影響	評価技術 (主に水理	本検討での 取り組み	
	閉鎖前	閉鎖後	—化学)		
支保の変質・劣化	小 (補修としては大)	中~大	セメント : 有 鋼材 : ある程度有	© (溶脱を中心に)	
天然バリアの変質	小	小	有 (透水、力学:途上)	Δ	
鋼材、PEM容器の 腐食	中 (回収する場合)	小	不足あり	○ (回収の観点から)	
岩盤の乾燥風化	小~中	小~中	ある程度有	水理評価次第	
操業段階における 化学的環境の変化	小~中	中	有	◎ (背景として必須)	
微生物活動の変化	小~大	中~大	不足	○ (例示)	

◎ 重点的, ○ 補足的, △予定なし

- 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
- 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成28年度地層処分技術調査等事業(地層処分回収技 術高度化開発)報告書、2017
- 5) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関す る技術開発事業(可逆性・回収可能性調査・技術高度 化開発)報告書、2018
- 6)核燃料サイクル開発機構、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処理処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊2 地層処分の工学技術、JNC TN1400 99-022、1999
- 7)原子力発電環境整備機構:処分場の安全機能と技術要件(2010年度版)、NUMO-TR-10-11、2011
- 8) 公益財団法人土木学会:トンネルの維持管理、2005
- 9) 公益財団法人鉄道総合技術研究所:トンネル補修・補 強マニュアル、2007
- 10) 里優,竹田直樹,亀村勝美:強度の時間依存性に着目 した岩盤の解析,第 18 回土質工学研究発表会講演集, 郡山,817-820,1983
- 11)北田正彦,櫻井春輔,芥川真一,岡部幸彦,進士正人: 在来工法で建設されたトンネルの拡幅時変形挙動とグ ランドリングに関する考察,土木学会論文集F Vol.65, No.2, 119-127, 2009
- 12) Yamamoto, Y et al.: Repository Design in Safety Case Development. Proceedings of the 16th International High-Level Radioactive Waste Management Conference, IHLRWM2017, Charlotte, NC, USA, April 9-13, 2017

3. 沿岸部処分システム高度化開発

◇事業の概要

高レベル放射性廃棄物等の地層処分については、 平成27年5月に閣議決定された「特定放射性廃棄 物の最終処分に関する基本方針」において、国は 科学的に適性が高いと考えられる地域を提示する ことなどが示された。これを受けて実施された総 合資源エネルギー調査会地層処分技術ワーキング グループにおいての議論が、平成29年4月にとり まとめられ、好ましい特性が確認できる可能性が 相対的に高い地域に関する考え方を示すとともに、 沿岸部を"輸送面でも好ましい地域"として整理 している^{1),2)}。このような整理に至る沿岸部の特性 や技術的対応の可能性については、別途設置され た沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に 関する研究会(以下、「研究会」)において議論が 進められ、平成28年8月のとりまとめでは、"今 後、技術の高度化に引き続き取り組むことで、さ らに信頼性を高めることが重要である"と結論付 け、併せて技術の高度化に向けて取り組むべき課 題とその方向性を示している³⁾。

平成 27 年度より開始した本事業では、上記の背 景を踏まえ、沿岸部における処分システムの構築 を念頭に、初年度に沿岸部の特性などに関連した これまでの地層処分研究開発成果の再整理を行い、 再検討が必要な課題などを抽出・整理するととも に⁴⁰、並行して進められた研究会にこれらの成果 を提供して議論を支援した。本事業で当センター が担当する工学技術の高度化に向けた取組につい ては、研究会で示された技術の高度化に向けて取 り組むべき課題とその方向性を踏まえ(研究会で 示された課題を表-1に示す)、平成 28 年度以降の 実施項目(大項目)として次の二つを設定し、含 まれる個々の課題に関する調査研究計画を具体化 したうえで着手している。

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

以下に、当センターが担当する工学技術の高度 化に向けた平成29年度の実施内容を整理する。な お、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託 事業「平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層 処分に関する技術開発事業(沿岸部処分システム 高度化開発)」により、国立研究開発法人産業技術 総合研究所、国立研究開発法人日本原子力研究開 発機構、一般財団法人電力中央研究所及び公益財 団法人原子力環境整備促進・資金管理センターの 4 機関が共同で、沿岸部における地層処分技術に 関する3つの技術分野の高度化開発(地質環境の 調査技術、工学技術、安全評価技術)として実施 したものである。

表-1 沿岸部研究会で示された課題(工学技術分野)

・オーバーパックの腐食速度に係るデータの拡充
・緩衝材の各種特性に係るデータの拡充
・セメント系材料の各種特性に係るデータの拡充
・グラウト材の各種特性に係るデータの拡充
・グラウト注入施工方法及びその長期的耐久性の検討
・ニアフィールド領域構成材料に係る各種データの拡充
に伴う現象モデルの高度化
・処分概念及びそれに必要な総合的評価手法の構築
・地上・地下施設の総合的な設計の検討

◇平成 29 年度の成果⁵⁾

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

本事業では、沿岸部で想定される地下水の組成 のうち、塩化物イオン(Cl⁻)と重炭酸イオン (HCO₃⁻)の濃度比に着目し、溶液組成が炭素鋼溶接 部の腐食の均一性に与える影響を調査している。 平成29年度は、市販の溶接材料を用いて作製し た腐食試験片(以下、「従来材」)に対する定電位 分極試験を実施するとともに、溶接部の選択的な 腐食を抑制する対策としてNiを添加した改良溶 接材料[®]を用いた腐食試験片(以下、「改良材」) の製作を実施した。

腐食試験は、80℃の恒温槽中で試験溶液に空気 を吹き込んで実施した。試験溶液の組成を表-2 に示す。試験溶液は、蒸留水に NaCl と NaHCO3 を 添加して調整した。試験片を浸漬して、80分後 の電位を浸漬前の電位として記録し、その後、設 定電位-630 mVSCE に設定して 100 時間の定電位 分極を行なった。参照電極は SSE (Saturated Silver - silver chloride Electorode)を用いた。 100 時間経過後に分極を停止し、10分後及び 30 分後に計測した電位の平均値を試験後の浸漬電位 とした。また、試験後に脱スケール処理を実施し、 三次元形状測定器で試験片の減肉形状を計測した。

Run	Cl-	HCO₃⁻ (NaHCO₃)	[Cl-]/[HCO ₃ -]
No.	(mol/L)	(mol/L)	(-)
1		2×10^{-4}	3
2	6×10^{-4}	2.5×10^{-3}	2×10^{-1}
3		2.5×10^{-2}	2×10^{-2}
4		2×10^{-4}	2×10^{2}
5	2.8×10^{-2}	2.5×10^{-3}	1.1×10^{1}
6		$2.5 imes 10^{-2}$	1.1
7		2×10^{-4}	3×10^{3}
8	5.4×10^{-1}	2.5×10^{-3}	2.2×10^{2}
9		2.5×10^{-2}	2.2×10^{1}

表-2 腐食試験の溶液組成

試験後の母材部分の外観観察の結果から、Run4、

5、7、8 では全面腐食、Run1、2、6、9 では孔食、 Run3 では顕著な腐食減肉なしという傾向が見ら れた。試験後の試験片全体の平均腐食深さに対す る溶接部の最大深さの比を Grooving Factor α として、全面腐食が見られた Run4、5、7、8 にお けるαを図-1 に示す。母材が全面腐食とみなせ る条件では溶接金属に選択腐食が確認でき、αは 1.2~2.1 程度であった。試験溶液中には、腐食 に対して攻撃的な塩化物イオンと、保護的な重炭 酸イオンが含まれている。Run4~6、Run7~9 は $[C1^-]$ がそれぞれ 2.8x10⁻² mol/L、5.4x10⁻¹ mol/L であり、 $[HCO_3^-]$ は $2x10^{-4}$ mol/Lから $2.5x10^{-3}$ mol/L と高くなっている。同一の[C1]濃度では、[HC03] の濃度が高くなるほどαが1に近づいた。一方で、 [HCO₃⁻]が2.5x10⁻³ mol/L より高くなると不働態化 が起こりやすくなり、孔食などの局部腐食を呈す る傾向がみられた。このように、沿岸部の地下水 の組成や特定の化学種の存在比の違いによって、 溶接部の腐食形態が変化することを確認した。



図-1 平均腐食深さに対する溶接部の最大深さの比

(2)人工バリア材料などに関する劣化や変質に関 する現象の把握-緩衝材-

本事業における緩衝材の劣化や変質に係る検 討では、海水のように複数のイオンを含む溶液に 対する再冠水時の挙動に係る知見を得ることを 目的として、これまでの試験で得られている知見 やデータを踏まえ(NaCl、CaCl²水溶液を用いた 試験例)、人工海水、各種溶存イオンならびにイ オン強度など、沿岸部の地下で想定される地下水 の化学成分に着目した試験を行い、知見やデータ の拡充を行うとともに、緩衝材の機能変化に対す るこれらの影響を確認することとしている。

平成 29 年度は、塩水系地下水の影響を把握するために、人工海水等を用いた次の試験を行った。

- ・地下水浸潤速度及び透水係数の取得試験
- ・人工海水等を用いたスラリー圧密試験
- ・二次元土槽試験による浸潤・膨潤挙動に関 する試験
- 密度分布が膨潤量に及ぼす影響に関する試験
- ・実験室規模の緩衝材流出に関する試験

このうち、本稿では、平成28年度から長期試 験を行っている地下水浸潤速度の取得試験の途 中経過と平成29年度に行った緩衝材流出に関す る試験結果について整理する。スラリー圧密試験、 密度分布の影響に関する試験については、次年度 まで継続してデータを取得する。

1)地下水浸潤速度及び透水係数の取得試験

浸潤の進展は、ベントナイト中の比抵抗値の測 定から得られる飽和度によって把握する。比抵抗 値は、液性の影響を受けるため、浸潤させる液相 の組成ごとに比抵抗値と飽和度の関係を予め測 定して把握しておく必要がある。図-2 に人工海 水を用いた場合の飽和度(Sr)と比抵抗値(R) の関係を示す。比抵抗値はベントナイト密度にも 依存するため、密度と飽和度を変えた試料を準備 し、比抵抗値を測定した。図中に飽和度と比抵抗 の試験結果を Archie 式の関数形を踏まえた式 1 にフィッティングさせて求めた近似式を示す。

$$R = a \left(\frac{\rho_d / \rho_w}{S_r}\right)^b = a \left(\frac{G_s}{S_r (1+e)}\right)^b \qquad (\not \exists 1)$$

ただし、 $\rho_{\mathfrak{q}}$ は乾燥密度、 $\rho_{\mathfrak{s}}$ は間隙液の単位体 積質量、eは間隙比、 $G_{\mathfrak{s}}$ は土粒子比重、 $a(\Omega m)$ 、b は液種の違いによる補正係数である。

||. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究



図-2 飽和度と比抵抗の関係 (ケイ砂30wt%含有のNa型ベントナイト,人工海水)

浸潤速度と透水係数を測定するための実験装置を図-3に示す。平成29年度中には浸潤が上部に達していないが(透水係数は未だ得られていない)、試験装置に螺旋状(2周半)に配置した比抵抗電極(外観写真の赤いキャップの部分)による測定値から、人工海水を浸潤させた場合の飽和フロントの経時変化が得られている(図-4)。飽和フロントは飽和度が95%に到達した場所と定義している。フロントの位置(供試体底面からの距離)をd(mm)、給水時間をT(Day)とすると、飽和フロントの移動のフィッティング結果は、

 $d = 20(T - 88)^{0.5}$ (圧力制御開始時点を起点)

となり、既往の研究で得られている蒸留水の場合 の式 ($d=4.5 t^{0.5}$)や NaCl 0.5M 水溶液の場合の 式 ($d=10.5 t^{0.5}$)と較べて早くなっている。現 状ではまだ計測時間が短いために、暫定値ではあ るが、浸潤速度に液性の影響があるといえる。





図-3 一次元浸潤速度試験装置概略図と外観



図-4 給水量と通水圧、飽和フロントの経時変化 (人工海水、圧力制御時の低圧ケース:7kPa)

海水中に主要成分として含まれる K と Mg の影響 について、イオン強度を 0.5M に統一して小型セ ルによる流出試験を行った。平成 29 年度は、人 工海水を通水液として流出試験を行った⁷⁰。図-5 に既往の結果を含め、これまで液種を変えて 0.1L/min で通水して試験を行ったケースの緩衝 材の流出量と通水量の関係を示す。図中には、参 考として蒸留水の場合のペレットを使ったケー ス等の既往試験結果も近似線で示した。同図から、 人工海水のケースでの流出量と通水量の関係は 蒸留水及び NaC1 水溶液の関係と概ね同等である ことがわかった。KC1 水溶液、MgCl2水溶液のケー スでは通水量に対しての流出量は少ない結果で あった。

図-6 に人工海水及び MgCl2 水溶液を 0.1L/min の流量で通水したケースの水みち形成状況を示 す。人工海水のケースでは、一本に収束した水み ちが発生しており、このような現象は蒸留水と NaCl 水溶液のケースでも同様であった。一方 MgCl₂水溶液のケースでは膨潤が進まず界面が鱗 片状になり、隙間が残っていた。これは、緩衝材 表面で陽イオン交換が起こったことにより膨潤 性能が低下し、さらにモンモリロナイトの凝集に より表面が鱗片状になったと考えられる。このた め、人工海水のケースと比較すると MgCl2水溶液 のケースはセル内の通水液が通過する断面積が 大きくなり、その結果として流出に影響する流速 及び水圧が低下し、緩衝材の流出量が少なくなっ たと考えられる。また、人工海水の通水のケース が蒸留水や NaCl 水溶液のケースと同等であった のは、人工海水中の Na イオンの量比が高いため、 人工海水中に K イオンや Mg イオンが含まれてい ても、本来の Na 型ベントナイトの性質が維持さ れ、膨潤性能の低下が小さかったためであると考 えられる。



図-5 緩衝材流出量と通水量の関係



(a)人工海水通水時
 (b)MgCl₂溶液通水時
 図-6 水みちの形成状況(通水開始後 60 分)

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

セメント系材料は、地下施設の構成要素として、 坑道の支保工及びインバート、更に TRU 廃棄物処 分では構造駆体ならびに充填材としての使用が 考えられている。沿岸部で想定される地下環境で は、塩分を含む地下水によるセメント系材料の化 学変質、及び、塩化物イオン浸透による鉄筋腐食 に伴うひび割れにより機械的特性が変化する可 能性がある。そのため、本事業では、処分場操業 期間中の空洞安定性の観点から、セメント系材料 の化学変質に伴う強度変化を把握することを目 的とした試験を実施して知見やデータを拡充す る。平成 29 年度は、以下の取組を進めた。

- 1)バルク試験体(各種セメントペースト)を浸 漬し、化学変質への海水成分濃度の影響、及 び、化学変質と機械的特性の関係のデータを 取得する試験
- 2)海水成分濃度の異なる地下水環境を想定し たセメント系材料への塩化物イオン浸透解 析の検討

上記1)の試験について、浸漬液の海水成分濃 度とセメント系材料の溶解及び海水成分浸透の 関係は、図-7及び図-8に示す様に、普通ポルト ランドセメント(OPC)では人工海水濃度が高い ほど溶解や海水成分浸透の領域の程度が大きい 傾向にあった。一方、混合セメント(FAC、BFSC) では OPC より溶解領域が小さく、塩化物イオン浸 透も OPC と異なり 1/10 人工海水に浸漬した試料 が最も顕著であった。



ろの数字は混和材の混合率(%))

ビッカース硬度(以下、「硬度」)は、図-8 に示す様に、カルシウム溶解が進行している部位 (溶脱部)で低下傾向が認められた。一方、溶脱 部以外の硬度は浸漬試験の開始前と同等であり、 塩化物イオン浸透の有無、塩素含有量の多少、及 び、浸漬後のアルミネート鉱物相(モノサルフェ ート、フリーデル氏塩等)の変化との間に関連は 認められなかった。

以上の結果から、塩分を含む地下水により化学 変質を受けたセメント系材料は、強度が低下する 可能性がある。平成29年度は浸漬期間が4ヶ月 での分析であったために化学変質が限定的であ った可能性があり、引き続き地下水の海水成分濃 度、セメント系材料の化学変質の程度及び強度と の関係を継続して検討する必要がある。

上記 2)のセメント系材料への塩化物イオン浸 透解析の検討では、平成 28 年度の調査から物質 移行と化学反応を連成させた相平衡物質移行解 析コード^{8),9)}の適用によって図-9に示す現象が考 慮可能なことを確認している。これを踏まえて平 成 29 年度は、海水成分濃度の異なる地下水環境 を想定したセメント系材料への塩化物イオンの 浸透解析を実施して上記 1)の試験結果と比較し、 析出物による閉塞の影響など、今後の検討で留意 すべき点を確認した。引き続き、塩分を含む地下 水環境を想定したケーススタディなど、塩化物イ オン浸透による鉄筋腐食に伴う種々のセメント 系材料の強度低下に関して検討を進める。



図-8 バルク試験体の接液面からの距離と Ca、CI 濃度 及びビッカース硬度の関係(浸漬期間4ヶ月)



図-9 セメント硬化体中での物質移動と相平衡の概念図

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

ニアフィールド領域における地層処分システムの成立性を考える際には、次の二つの観点からその見通しを示す必要がある(図-10)。

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

本事業では、研究会による課題整理(表-1)を 踏まえ、上記②(図-10の緑色の部分)を工学技 術の高度化開発において取り組むべき課題とし ている。

本課題については、平成27年度に実施した沿 岸部で立地を進めている北欧の先行事例に関す る調査結果から、閉鎖段階までにおける廃棄体定 置後の人工バリアの機能発揮に影響する要因(特 に、湧水による緩衝材流出挙動)に留意する必要 性が示されている⁴⁰。これを踏まえ、わが国の沿 岸部で特徴的な地下の湧水環境や地下の構成材 料に対する地下水の化学的影響などに関する重 要な要素や影響因子を特定し、成立性に係わる手 法の提示に向けた検討を進めている。成立性を示 すための手法を検討する上では、候補サイトが特 定される前のジェネリックな段階に留意して、地 質環境モデルや適用する処分システムの構成(図 -11)などを仮設定(地質環境:新第三紀堆積岩、 処分概念:竪置き定置方式)し、必要となる知見 やデータなどの体系を整備する。

上記の検討方針を踏まえ、本課題に関する全体 計画として、次の二つの実施項目を設定して取組 みを進めている。

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



図-10 エンジニアリングの枠内で扱われる処分 システムの成立性



図-11 想定されるニアフィールド領域の構成要素

上記 1) に関して、平成 28 年度までに実施した 海外事例調査(処分概念が類似するフィンランド



図-1 X線 CT 測定から得られたアルミナ固化 体の 3D イメージによる空隙分布

アルミナ結晶粒界による溶液の浸入とヨウ素 の放出について、粒界腐食モデルに基づいた溶 液浸入シミュレーションを行い、固化体浸漬条 件の各種パラメータの影響について説明性の検 討を行った。このシミュレーションでは、固化 体をマトリクス結晶粒子、結晶粒子の粒界、AgI および空隙からなるとし、それらの2次元構造 を SEM 画像から作成した。結晶粒界にマトリク ス結晶粒子より速い溶解速度を与え、粒界が溶 けるか AgI が溶けることによって新たな物質移 動経路が出現するという現象のモデル化を行っ た。図-2に溶液浸入シミュレーションの結果を 示す。図の赤い部分が溶液の浸入した領域を示 しているが、ステップ数の増加とともに、アル ミナ粒界を通して溶液の固化体内部への浸入が 認められる。さらに詳細な検討から、HS-濃度、 pH、空隙率の影響等については単純な反応・拡 散に基づく理論式で説明することができた。

地層処分の各種環境におけるアルミナ固化体 の性能を評価するため、想定される地下水環境 を模擬して浸漬試験を行った。アルミナ固化体 の構成するアルミナとAgIはpHとHS-濃度に影 響されるため、両因子を組み合わせた浸漬試験 を行った。また、地下環境に想定される地下水 組成として、中性近傍の純水、模擬降水系地下 水、ベントナイト平衡水においても評価した。



図-2 セルオートマトン法によるアルミナ固化 体内の溶液浸入シミュレーション

これらの試験結果を踏まえて、実廃棄体として 260 mm×260 mm L の円筒型固化体を想定し、固化 体寿命を計算評価した結果を pH-[HS]マップ上に 整理した(図-3)。アルミナ固化体中に保持された ヨウ素は AgI の化学形で存在しているため、溶液中 の-2 価の硫黄(HS-)が存在しないか、低濃度の一 般的な地下水であれば、AgIの溶解度が非常に低い ためヨウ素の保持性能が高い。一方、溶液中 HS-の 影響については、pH を 8~12.5 の範囲で調査し、 地下環境で想定される硫黄濃度の範囲では十分な 寿命を持つ固化体であると考えられる。



(2) BPI ガラス固化技術

均質なガラスマトリクスは、核種浸出の抑制や その長期的な挙動評価に有効であり、HLW ガラス と同様に放射性廃棄物の固化方法として期待さ

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

本事業は、再処理工場及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 を目的とした。

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(高レベル放射性 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¹⁰、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²⁰。

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

- グループ2 ハル・エンドピース:使用済燃料 をせん断、溶解した後に残る金属部材を圧縮 成形したもの
- グループ3 濃縮廃液:使用済燃料の溶解液か ら、ウラン、プルトニウムを抽出する際に発 生する低レベル濃縮廃液を固化したもの グループ4 その他の廃棄物

TRU 廃棄物の地層処分では、処分を効率的に行う観点から、地質環境に応じて掘削可能な範囲で 大口径の処分坑道に、ドラム缶やキャニスタ等を 数体まとめて収納した容器を集積配置する処分 方法が考えられている²⁰。そのため、処分坑道の 空洞安定性を維持するための支保工や、容器内及 び容器間の充填材等に、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、核種の移行抑制を期待し て、ベントナイト系材料を緩衝材として使用する ことも考えられている²⁰。処分坑道内に設置され た各人工バリアのうち、充填材等に用いられるセ メント系材料と、緩衝材及び埋め戻し材に用いら れるベントナイト系材料には、閉鎖後の長期にわ たる核種の移行抑制に関わる機能が期待されて



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¹⁾

いる 2)。

これら人工バリア材料の性能は、地下水や廃棄 体成分等との反応による化学的な変質によって変 化するため、長期にわたる人工バリア材料の化学 的変質について信頼性高く予測し、その安全尤度 を示すことが必要である。加えて、ベントナイト 系材料の物理特性の変化に伴う水理特性及びガス 移行特性の変化や、各バリア材料の収着性の変化 など上述の材料間の相互作用によって生じる性能 の変化について、ナチュラルアナログ等も活用し て、予測する必要がある。

また、図-2 に示すように、TRU 廃棄物の地層処 分において、影響線量を支配する核種はヨウ素 129 及び有機形態の炭素 14 である。これらは地質媒体 や人工バリア材への収着性が極めて低く、人工バ リア及び天然バリアに於ける移行遅延効果を見込 めないため、十分な減衰効果を得ることが難しい。 そのため、その影響低減には、固化体の性能や廃 棄物からの放出過程の現実的な評価等、廃棄体か らの放出を低くする技術や、信頼性の高い放出デ ータの蓄積と放出モデルの構築が必要となる。

当センターは、TRU 廃棄物の安全評価の信頼性 を高めることを目的として、前述のような人工バ リア材料の長期的な変遷とその影響に関する評価 技術の構築・改良(ナチュラルアナログ調査、ガ



ス移行連成挙動評価手法の開発、及び、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)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(ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上)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 (炭素 14 長期放出挙動評価)を、それぞれ実施し てきた。

平成 29 年度は、平成 25 年度からの 5 年間の本 事業での成果をとりまとめるとともに、今後に残 された課題について整理した。以下に、得られた 成果の概略を記す。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の 委託事業「平成29年度高レベル放射性廃棄物等の 地層処分に関する技術開発事業(TRU廃棄物処理・ 処分技術高度化開発)」により実施したものである。

(1) ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上

特徴の異なる3種類の代替固化体(アルミナ固 化体、BPI ガラス固化体、及びセメント固化体) について、開発を実施した。

セメント固化体に関しては、固化体に含まれる 鉱物相の溶解平衡計算によってヨウ素の放出を 評価可能であるが、固化体作製時の発熱の影響が 大きく、初期の鉱物相が想定した組成と異なるこ とが明らかになったため、冷却システムの導入や 固化体サイズといった処理プロセスを再度検討 する必要性が示された。

アルミナ固化体及び BPI 固化体に関しては、地 下水の溶存成分の影響を確認することにより、代 表的な地質環境条件に対する適正を明らかにす るとともに、ヨウ素 129 の長期放出挙動の評価の ためのモデル化を進めた。

(2)炭素 14 長期放出挙動評価

燃料被覆管に用いられるジルカロイ及びエン ドピースに用いられるステンレス鋼に含まれる 炭素 14 を対象に、その長期的な放出挙動、及び 化学形態についての調査を実施した。

炭素 14 の放射化金属からの長期的な放出に関 しては、ステンレス鋼及びジルカロイの腐食に伴 う放出と、ジルカロイの表面に生成した酸化膜か らの放出が考えられている。そのため、10 年間 の長期試験計画に基づいて、長期の腐食試験を実 施し、ジルカロイの表面の酸化膜の成長に伴って その腐食速度が遅くなることを明らかにすると ともに、現実的な腐食速度を提示した。また、ス テンレス鋼についても従来よりも遅い腐食速度 を設定できることを確認した。

また、易溶性核種として取り扱われている炭素

14 の影響の現実的な評価に必要な、化学形態の 設定に関しての情報を、国際共同研究(CAST プ ロジェクト)を通じて得ることができた。

(3)ナチュラルアナログ調査

平成25年度から平成29年度までの5年間では、 現在もアルカリ地下水がベントナイトまたはス メクタイト質粘土層に浸出している Active Type のナチュラルアナログである可能性がある候補 地において地質調査、試錐調査等を実施して、ナ チュラルアナログの露頭を特定するとともに、そ のサイトのアルカリ泉やトレンチ等の地下水調 査(現地計測及び水試料分析)、現地での地質調 査や試錐孔やトレンチで採取した岩石(粘土)試 料の鉱物・化学分析からスメクタイト質粘土層の 分布と地質環境の変遷、高アルカリ地下水の影響 範囲を評価した。また、人工バリアの長期評価モ デルの信頼性向上を図るため、調査によって得ら れたナチュラルアナログ試料の鉱物分析等によ り、過渡的な状態変遷を含むアルカリ環境下での ベントナイトの長期変質プロセスを推定した。

これらにより、以下のことを明らかにした。

- ●高アルカリ溶液はスメクタイトを生成させる 環境になりうる。
- Fe, Mg に富む高アルカリ環境での二次鉱物は ゼオライトではなくスメクタイトである。
- ●高アルカリ環境でのスメクタイト質の M-S-H の生成は速やかに生じるが、スメクタイトの結 晶化は 2,400~4,500 年程度の長期にわたる反 応である。
- ベントナイトは高アルカリ溶液で一部変質するかもしれないが、概ね、長期間健全である。
- (4)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

平成 25 年度から 29 年度の 5 年間では、「人工 バリア材料長期挙動評価」として、人工バリア閉 鎖後長期の挙動評価の手法について検討し、化学 変質現象モデル、力学構成モデル、透水係数モデ ルを反映した化学-力学弱連成解析を 2 次元断面 で実施可能にした。

「人工バリア評価の初期条件の設定」では、人 エバリアの施工から処分場の閉鎖・地下水による 飽和に至るまでの変化のうち、特にセメント系材 料の変化に着目し、50℃以上の環境条件で主な水 和鉱物である C-S-H が結晶化する可能性がある事、 結晶化は環境温度(高温ほど促進)とセメント系 材料を構成する材料特性(混和材、骨材等)に影 響される事を確認した。

(5) ガス移行連成挙動評価手法の開発

平成25年度から29年度の5年間では、緩衝材 中で生じる得る破過現象等の、特に影響が大きな ガス影響事象に着目して、「どの時期に」・「影響 の大きな現象が生じて」・「人工バリアシステム全 体の挙動にどのような影響をもたらすか」を網羅 的に把握する観点から、その根拠を拡充しながら シナリオを再構築した。

また、飽和した圧縮ベントナイトが破過に至る までの過渡期(気液二相流過程)のガス移行メカ ニズム(ガス浸入圧及び水相有効浸透率の経時変 化等)、並びに人工バリア材料界面(ベントナイ ト系及びセメント系材料)のガス破過メカニズム (破過圧、ガス相有効浸透率の経時変化等)の詳 細を明らかにし、その一部をガス移行挙動のモデ ル化に反映させた。

個別の実施内容及びとりまとめの詳細につい ては、以下(Ⅱ-4-2 からⅡ-4-5)の各項で述べ 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
- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物 処分技術検討書-第2次TRU 廃棄物処分研究開発取り まとめ-、2005

4-2 ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上

◇事業の概要

再処理施設の操業にともない、廃銀吸着材によって回収されるヨウ素129(以下、I-129)は、半減期が1570万年と長く、また、人工バリアや岩盤等への収着性が低いことから、地表まで移行する時間は地下水流速等の水理環境条件の影響を受け易い。このため、TRU廃棄物の地層処分の安全評価において、I-129は被ばく線量に大きな影響を及ぼす重要な核種である。

本事業は、地層処分において I-129 による被ば く線量の低減が可能であり、さらに長期性能評価 において不確実性が小さく、経済性の観点からも 有効なヨウ素固定化技術を開発し、我が国の幅広 い地質環境条件に柔軟に対応することのできる処 分技術を提言することを目標としている。

このように地質媒体及び人工バリアによる移行 遅延効果が十分期待できない I-129 の影響を低減 するため、本事業では固化体によってヨウ素を固 定化する技術を開発することとし、固定化処理技 術の開発目標値を①固化体からのヨウ素放出期間 10万年以上(特に地質条件が悪い場合でも I-129 からの最大被ばく線量を現行よりも約1桁低減可 能なヨウ素放出期間に相当)、②ヨウ素固定化処 理プロセスにおけるヨウ素回収率 95%以上(未回 収のヨウ素からの最大被ばく線量を小さくするよ うに設定)、として開発を進めている。

平成12年度¹⁾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²⁾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³⁾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⁴⁾ 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。

 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
 BPI ガラス固化技術:無機イオン交換体 BiPb02N03のN03をヨウ素で置換してBiPb02I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 カ年にわたる本事業の取りまとめ の結果⁵⁰を反映させ、今後5 カ年で必要な R&D 計 画を策定した後に実施した。

◇平成 29 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について詳細に検 討するため、3D-SEM の画像による空隙や空隙の 連結性について検討を行った。また、X 線 CT 測 定による 3D イメージの再構築には Volume Graphics 社の VGSTUDIO を用いた。今回は廃銀吸 着材に試薬アルミナを9割添加してHIP 固化させ たアルミナ固化体を対象に、浸漬試験後の内部構 造の変化に着目して分析を行った。3D イメージ による内部空隙の様子を図-1 に示す。空隙は1 ~10µm の大きさで分散しているが、これらの連 続性を確認することはできなかった。この結果は、 黒変領域の断面 SEM 観察からも溶液の浸入経路 となるような数十 μm 以上の連続的な空隙のつな がりが観察できなかった結果と整合的である。す なわち、浸漬試験において溶液は大きな空隙の部 分(元から存在した空隙や AgIの溶解によって生 じた空隙)のみを伝わって内部に浸入するのでは なく、アルミナ結晶粒界のような微細な領域をも 利用して浸入していくものと考えられる。



図-1 X線 CT 測定から得られたアルミナ固化 体の 3D イメージによる空隙分布

アルミナ結晶粒界による溶液の浸入とヨウ素 の放出について、粒界腐食モデルに基づいた溶 液浸入シミュレーションを行い、固化体浸漬条 件の各種パラメータの影響について説明性の検 討を行った。このシミュレーションでは、固化 体をマトリクス結晶粒子、結晶粒子の粒界、AgI および空隙からなるとし、それらの2次元構造 を SEM 画像から作成した。結晶粒界にマトリク ス結晶粒子より速い溶解速度を与え、粒界が溶 けるか AgI が溶けることによって新たな物質移 動経路が出現するという現象のモデル化を行っ た。図-2に溶液浸入シミュレーションの結果を 示す。図の赤い部分が溶液の浸入した領域を示 しているが、ステップ数の増加とともに、アル ミナ粒界を通して溶液の固化体内部への浸入が 認められる。さらに詳細な検討から、HS-濃度、 pH、空隙率の影響等については単純な反応・拡 散に基づく理論式で説明することができた。

地層処分の各種環境におけるアルミナ固化体 の性能を評価するため、想定される地下水環境 を模擬して浸漬試験を行った。アルミナ固化体 の構成するアルミナとAgIはpHとHS-濃度に影 響されるため、両因子を組み合わせた浸漬試験 を行った。また、地下環境に想定される地下水 組成として、中性近傍の純水、模擬降水系地下 水、ベントナイト平衡水においても評価した。



図-2 セルオートマトン法によるアルミナ固化 体内の溶液浸入シミュレーション

これらの試験結果を踏まえて、実廃棄体として 260 mm×260 mm L の円筒型固化体を想定し、固化 体寿命を計算評価した結果を pH-[HS]マップ上に 整理した(図-3)。アルミナ固化体中に保持された ヨウ素は AgI の化学形で存在しているため、溶液中 の-2 価の硫黄(HS-)が存在しないか、低濃度の一 般的な地下水であれば、AgIの溶解度が非常に低い ためヨウ素の保持性能が高い。一方、溶液中 HS-の 影響については、pH を 8~12.5 の範囲で調査し、 地下環境で想定される硫黄濃度の範囲では十分な 寿命を持つ固化体であると考えられる。



(2) BPI ガラス固化技術

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

BPI ガラス固化体からのヨウ素浸出の解明のた め、多様な地下水組成の影響について引き続き検 討した。これまでの検討から変質層の主要成分は、 Pb の炭酸水酸化物(ハイドロセルサイト)であ ることが示されている。一方、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 いて解析評価すると、特定の環境条件においては 硫黄系鉱物の生成の可能性がある。そのため、純 水に硫化ナトリウムを加えた溶液中での浸漬試 験を行った。浸漬後の表面観察の結果を図-4 に 示す。白色を呈する層がガラス上に形成され、そ の上に茶色を呈する層が形成されていることが 分かる。SEM-EDX 観察から白色層は葉片状の微結 晶でできており、そこからは Pb と0しか検出さ れないため、この微結晶はハイドロセルサイトと 考えられる。茶色の層は、球状に凝集した物質が 中心で、Pb. 0 とともに I (ヨウ素) が検出され た。さらに電子回折の結果から、鉛の炭酸塩では あるが、これまでに観察されてきたハイドロセル サイトとは異なる新しい物質であることがわか った。これらの結果から、BPI ガラスの溶解やヨ ウ素放出は浸漬環境に大きく影響受けることが 改めて明らかとなった。



図-4 純水+Na₂S に浸漬した BPI ガラス固化体の外観

BPI ガラスの各種浸漬試験の結果から、ヨウ素の規格化浸出量の経時変化に拡散則を適用し、固

化体寿命を計算評価した結果を pH-[IC (炭酸イ オン濃度)]マップ上に整理した(図-5)。pH11 以下では、炭酸イオン濃度が 0.05M より高くなる と 10 万年以下の寿命となる傾向が認められるが、 同じ炭酸イオン濃度でもリン酸イオンや HS-共存 下では寿命が長くなる。また、非常に低濃度のリ ン酸イオンの共存により、固化体の寿命は 1 桁か ら 2 桁向上する。同様に HS⁻も共存量が高いほど 固化体の寿命が長くなる傾向が認められ、幅広い 環境で固化体の適性が示された。



図-5 BPI ガラス固化体の寿命評価の環境対応マップ

(3) セメント固化技術

アルミナセメントを用いることを特徴とする セメント固化体の評価には、これまでエトリンガ イトにヨウ素(ヨウ素酸イオン)を固定化させる というコンセプトのもと、セメント固化体の開 発を行ってきた。実用化を見据えたスケールア ップによって、発熱影響が顕著となり、冷却シ ステムの導入や固化体サイズといった処理プロ セスの検討などの必要性・課題が整理されてき た。その一方で、I-129対策としては固化体によ るソースターム評価だけではなく、ニアフィール ドを含めたトータルシステムの評価が重要であ り、セメントとヨウ素の関係は引き続き重要な課 題である。特に、熱影響を受けたセメント水和物 とヨウ素との相互作用は重要な知見であること から、今後はこれまで得られた知見を活用し、特 にヨウ素の移行特性(分配係数など)の評価とし て、成果を発展させて行く必要がある。

◇平成 25 年度~29 年度の取りまとめ

本事業は、TRU 廃棄物の地層処分において最も 高い被ばく影響を与える I-129 を長期にわたり閉 じこめる代替固化体(アルミナ固化体、BPI ガラ ス固化体、セメント固化体)を開発し、その影響 を低減することを目的として実施した。これまで の試験や解析等において、ヨウ素固化体の溶出試 験や固化方法の改良等を行い、アルミナ固化体の 空隙率の低減、BPI ガラス固化体のヨウ素浸出へ の地下水中の溶存イオン種の影響、セメント固化 体中のヨウ素固定鉱物相を確認するなどの成果を 得ることで、I-129 の放出を抑制できることを確 認した。以上のように、各代替技術の特性に応じ た評価技術や環境適応性について進展が得られ、 今後は再処理事業や処分立地選定など事業の進展 に応じて、スケールアップやサイトスペシフィッ クな環境適性など、実用化へ向けた継続的な技術 開発が期待される。一方で、セメント固化技術で も記載したように、固化体開発によるソースター ム低減という単一のバリア機能に依存するには限 界がある。安全確保の多重性の観点から、移行挙 動や生活圏まで含めた総合的な I-129 対策技術へ の取組が継続的に進められ、TRU 廃棄物処分に対 する信頼感の向上に資することが望まれる。

- 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
- 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
- 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
- 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)公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関 する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開 発 報告書(第1分冊)-ヨウ素 129 対策技術の信頼性 向上-、2018

4-3 炭素 14 長期放出挙動評価

◇事業の概要

本事業は、使用済燃料の再処理過程で発生する ハル(ジルカロイ被覆管)・エンドピース(ステン レス鋼)に含まれる炭素14(以下、C-14)の長期的 放出挙動の評価に関する信頼性向上を目的として、 平成16年度に開始した。研究は大きく3つの項目 に分類される。第一にC-14インベントリの合理 的設定方法の検討、第二に放射化金属からのC-14 放出挙動評価、第三に放出挙動評価の補完試験と しての金属の腐食速度評価などのコールド試験 (想定される処分環境温度30℃~80℃での腐食試 験)である。

事業を効率よく確実に進めるため、研究フェー ズを区切って実施してきた。フェーズ1(平成16 年度~平成18年度)では、ジルカロイ被覆管・ス テンレス鋼の特性に関わる情報収集等を行い、試 験計画の立案を行うとともに、基礎試験を実施し、 一部のデータを取得した¹⁰。

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²⁰。

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℃前後、炉外)条件 での腐食挙動とを比較した。蓄積された高温条件 での知見により、得られた経験的な腐食挙動や腐 食式の処分環境への適用が可能となり、長期的な 腐食挙動予測の信頼性を高めることが期待できる。

ジルカロイについて本事業では、高温での試験 等の結果を基に構築された腐食モデルの地層処分 への適用性について今後も検討を進め、提案した 長期予測の腐食式に基づく腐食モデルの構築に取 り組むこととした。また、ステンレス鋼や瞬時放 出とされている酸化膜からの C-14 の放出につい ても、ジルカロイの腐食による C-14 の放出に次 いで優先度は高く、核種浸出の長期予測モデルの 構築と、照射済み金属を対象とした試験を含めた データ取得による確証を実施することとした²⁰。

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

・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

◇平成 29 年度の成果 4)

(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、腐食速度に対する加速因子 として、環境及び材料の影響についても検討を行 った。また、照射影響の観点から、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29 年度は浸漬開始から9.5 年経過したサンプルに ついて、C-14 等の核種や金属組成成分の浸出デ ータを取得した。

図-1 にこれまでの結果も含め、核種や金属成 分の浸出割合を、腐食と核種浸出が調和的である と仮定し、腐食速度に換算した結果を示す。なお、 腐食速度の参考値として、第2次 TRU レポートで 評価されている値、および、原子炉の運転時の温 度範囲において取得された腐食速度を 20℃に外 挿した値も合わせて示す。いずれの元素・核種も 経時的な腐食速度(すなわち浸出率)の変動は明 確でない。また、第2次TRU レポートで仮定され ているような腐食と調和的な浸出であれば、すべ ての元素・核種は同じ腐食速度となるはずである が、本試験の結果から元素・核種ごとの放出には 大きな差異があり、調和浸出とはならない結果が 示された。ここで、Sb-125 は添加元素の Sn、Co-60 は不純物 Co がそれぞれ主な由来元素である。ま た、ジルカロイ中において、Zr や Sn は固溶し、 Fe, Cr, Ni は粒界析出元素である。これら元素・ 核種の溶出はおおきく2つのグループ(固溶グル

ープおよび非固溶グループ) に分けることができ ることから、合金中の存在状態によって浸出挙動 が影響を受ける可能性が示唆される。C-14 は、 合金中の窒素不純物が生成起源であるが、浸出挙 動の結果から非固溶グループに近い挙動である ことから、炭化物(ZrC)として存在する可能性 が示唆される。以上により、腐食との核種浸出の 関係については、単純な調和浸出で説明するのは 難しく、ジルカロイ合金中での存在状態や合金成 分の酸化プロセスなどの特性に応じて、それらの 放出特性(調和性)が影響されると考えられるた め、今後より詳細な検討が必要である。



(2)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腐食挙動を評価す る必要があり、長期的な腐食試験を継続している。

図-2 に腐食に伴って生成する水素量から評価 した腐食速度の経時変化を示す。腐食の初期段階 ではステンレス鋼中のイオンが不働態皮膜を超 えて移動して成長(拡散のため1/2乗則に従う) し、それ以降は溶解度平衡となって直線則に従う) 腐食挙動が示唆される。1年程度を超えたあたり から腐食速度は 30℃において 0.4nm/y 程度の一 定値である。一方で、ステンレス鋼の腐食は局部 腐食の問題が残されており、また、ジルカロイ やニッケル合金との異種金属接触腐食の評価も 必要である。あわせて、腐食速度に根拠を与え るため、TEM等を用いて腐食により形成する酸化 膜の経時的な観察や分析、さらに、海水や炭酸イ オンなどの環境因子が腐食速度に与える影響評価などが今後の課題として挙げられる。



図-2 SUS304 の NaOH 水溶液中での腐食速度の 経時変化と温度依存性

(3)炭素化学形態の調査

放出される C-14 の化学形態とその安定性は移 行挙動の評価においてきわめて重要なファクタ ーである。9.5 年間の照射済み被覆管の浸漬試験 の結果から、放出された C-14 の化学種グループ を分画した結果を図-3 に示す。浸漬初期は、ガ ス成分の C-14 の割合が多いが、1 年後からその 割合は小さくなり、全期間を通じて数%程度であ った。一方、溶存形態としては有機成分が優勢で あり、全体としては概ね6割程度であった。これ までの安全評価ではすべて溶存有機として評価 されているが、一定割合のガス成分や溶存無機成 分も存在することが確認できた。そのため、安全 評価において、核種移行シナリオや、移行パラメ ータの再検討が必要となる可能性がある。特に、 金属の腐食等にともなって発生する水素ガスを キャリアとしたガス移行シナリオが、今後、重要 となる可能性がある。なお、本検討の範囲では、 各成分ともに詳細な化合物の特定までには至ら なかった。浸出する C-14 量が極めて少ないこと、 目的の化合物に分画するために高度な技術が必 要であることなどがその理由である。将来は、加 速器質量分析などの高感度な手法を取り入れて、 具体的な化合物の特定・定量の実施とともに、炭 素化合物の生成機構が明らかになることが期待 される。

||. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究



C-14の化学種割合の経時変化

(4)国際的な情報共有・調査

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

本年度で CAST プロジェクトは終了し、プロジ ェクトの成果等が取りまとめられた。このプロジ ェクトではソースタームのなかでも特に C-14 の 化学形態の評価への関心が高く、分析手法の開発 から照射済みの各種材料を用いた腐食試験等が 行われた。試験期間は短期であるが、特に、照射 済みの鋼材(ステンレス鋼等)を用いた C-14 浸 出データは貴重な知見であり、ジルカロイやステ ンレス鋼に関して以下のような国際的な最新の 知見・情報が得られた。

- ・極低濃度の C-14 浸出量の分析はチャレンジ ングであり、再現性など試験結果が整合しな いケースがある
- ・C-14 インベントリは放射化計算で解析評価 が可能である
- ・C-14 浸出率は経時的に低下する
- ・C-14 の浸出形態は溶存種(カルボン酸)が 多く、ガス成分(メタン)も一定量含まれる
- ・照射材と未照射材では腐食速度に違いがある
 ・腐食と核種浸出の調和性は確認できなかった
 プロジェクト全体の課題としては、特に炭素の
 化学形態の課題を中心に、ガス移行シナリオなど

安全評価への反映の観点でまとめられた。また、 外部評価委員からは、これまで例がなかったプロ ジェクトであり、非常に難しい課題である C-14 の問題に取り組んだ姿勢や新しい知見が多く得 られた点が高く評価された。さらに、成果の普及 の観点、人材育成の面でも高く評価されている。 一方で、今後も最新の C-14 分析技術などを活用 し、継続的に C-14 問題に取り組んで欲しいとの 期待も示された。

なお、CAST プロジェクトでまとめられた課題 の多くは、本調査研究の課題とほぼ一致すること から、国際的に課題を共有できたことも重要な成 果である。特に、安全評価の観点から、C-14 の 化学形態の詳細やその安定性・移行挙動が極めて 重要である。以上、放射化金属廃棄物に対する課 題には国際的な協力関係も活用し、処分の実施に 向けて着実に技術開発を継続・進展させていくこ とが必要である。

◇平成 25 年度~29 年度の取りまとめ

本技術開発では、燃料被覆管の材料であるジル カロイを中心に腐食挙動等の評価を行い、これま での安全評価パラメータと比較し、影響度合いを 確認することを目的として実施した。特に、10年 間の長期試験計画に基づいたデータ取得・評価を 行った。ジルカロイの長期腐食試験では長期の腐 食データを取得し、酸化膜の成長により腐食速度 が次第に遅くなることを明らかにし、長期安全評 価のための現実的な腐食速度を提示することがで きた。一方、被覆管から放出した C-14 は腐食速度 から推定される C-14 量より少なく、これまで仮定 されてきた腐食との調和放出モデルとは必ずしも 一致しない可能性が示唆された。エンドピースの 材料である未照射のステンレス鋼についても、ジ ルカロイと同様の腐食試験を行い、これまでの仮 定された腐食速度の保守性を確認することができ た。また、C-14は易動性核種として扱われており、 化学形態によっては評価シナリオや移行特性が大 きく影響される。そのため、有機炭素化合物の安 定性を含め、C-14の化学形態の情報が不可欠であ ることから、本技術開発では、燃料被覆管から放 出された C-14 の形態(ガス、溶存有機・無機)を 長期的に確認するとともに、国際プロジェクト (CAST プロジェクト)に参画することで、国際的 にも最新の知見・情報を入手するとともに、ガス 移行シナリオの影響等を含め、C-14に関する課題 を共有することができた。

以上のように、安全評価に必要な評価技術が進展し、影響低減に見通しが得られつつあることから、今後も継続的な技術開発や課題の解決によって、処分事業への国民の信頼感の向上に資する必要がある。そのためには、廃棄体の特性評価などのソースタームだけではなく、浸出後の移行特性や生活圏まで含めた総合的な C-14 対策の必要性が国際的にも認識されており、特に、C-14 の放出時の化学形態やその後の安定性の評価が重要となる。一方で、放射化金属廃棄物は廃棄体化のための最適な処理プロセスを行わないため、実廃棄物

(使用済燃料)そのものの特性を保持しており、 不均質で複雑な組成・特性を有している。例えば、 ハルにおける瞬時放出割合やジルカロイ腐食にお ける水素吸収の影響などが国際的にも課題として 指摘されている。放射化金属廃棄物には解決すべ き課題が多いのが現状であり、国際的な協力関係 も活用し、処分の実施に向けて着実に技術開発を 継続・進展させていくことが望まれる。

- 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 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関 する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開 発 報告書(第2分冊)-炭素14長期放出挙動評価-、 2018

4-4 ナチュラルアナログ調査

◇事業の概要

本事業は、ナチュラルアナログ(以下、NA)調 査を実施することで、高アルカリ流体とスメクタ イト及び随伴鉱物との相互作用によるベントナ イト緩衝材の長期変遷に関する直接的な根拠と なるデータを取得し、フィールドデータと解析モ デルを活用したアルカリ変質現象の解釈に基づ き、TRU 廃棄物処分でのセメント系材料の影響に よる人工バリア(ベントナイト)の長期健全性評 価の信頼性向上を図ることを目的としている¹⁰。

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)²⁾では、 過去に浸出していたアルカリ地下水の地球化学 特性やその反応時間が明確でないため、それらを より明確に理解できる場として、現在もなおアル カリ性地下水が流出している候補サイトを探査 し、スメクタイト質の堆積物にアルカリ地下水が 浸出している Active TypeのNAを探査し確認し たパラワン島 Narra地区におい平成27年度³⁾から 詳細な調査を開始した。

平成 29 年度は、平成 28 年度までの調査結果⁴⁾ を踏まえ、(1) NA サイトの地質環境調査、(2) 年 代測定による反応時間の評価、(3) アルカリ環境 下でのベントナイトの長期変質プロセスと NA、 (4) 地球化学シミュレーションモデルによる変 質解析について検討した。また、平成 25 年度~29 年度の 5 か年の NA 調査で得られた成果について、 TRU 廃棄物の人工バリアシステムのどの現象の NA として使えるか、という観点でとりまとめた。

◇平成 29 年度の成果 ¹⁾

(1)NA サイトの地質環境調査

パラワン島 Narra 地区 (図-1 参照) において、 スメクタイトの地球化学的環境の状態変化に伴う鉱物学的変遷とその安定性の評価を目的とし たフィールド調査として地質環境調査を実施し た。特に、スメクタイトの生成についてアルカ リ地下水との相互作用かアルカリ地下水を介し ない風化によるものとの差を明らかにするため に、アルカリ影響を受けていない露頭及びアル カリ環境下にある平原(Narra3-2 サイト)にお けるトレンチ調査及びストリッピング調査を実 施した。さらに、これらのフィールド調査によ りトレンチ及びストリッピングから採取した試 料については、岩石鉱物学的調査として、XRDに よる鉱物分析、XRFによる全岩化学分析、薄片の 光学顕微鏡観察、スメクタイトの定量分析を実 施した。



図-1 NA調査サイト(Narra地区)の位置図

地質環境調査では、ルートマッピングに基づ き、アルカリ影響を受けていない蛇紋岩化作用 を受けたハルツバージャイトが露出しているス トリッピング掘削地点 (ストリッピング 1~3) を選定した。また、下部層を構成する粘土質の 砕屑性堆積物の分布状況とその走行・傾斜方向 および、基盤深度から、平成28年度に実施した トレンチ3~5に対して、より東傾斜で、走行に 平行な2サイトをトレンチ掘削地点(トレンチ6 ~7)として選定した。また、アルカリとの相互 作用がない物理的風化環境下にある砕屑性堆積 物の採取のためのトレンチとして、Narra3-2 サ イトの南西部の小高い丘を形成している地点 (トレンチ 8) を選定した。トレンチ 5~7 (ト レンチ5は昨年度掘削)では、pH11程度の高ア ルカリ地下水が浸出している砕屑性堆積物を確 認した。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も つこれらの高アルカリ地下水は、炭酸塩沈殿物 が見られる河川系扇状地的な地形的特徴をもつ Narra3-2 調査サイト全域の地下に流動している と考えられる。

トレンチ調査から、トレンチ6及びトレンチ7

||. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

の岩質は、既存のトレンチ(トレンチ 2~5)と 同様で、最上位から、(i)未固結なトラバーチ ン起源の炭酸塩沈殿物、(ii)比較的固結した炭 酸塩堆積物、(iii)黒色で粗粒砂質な砕屑性堆積 物で、パッチ状に粘土質マトリックスが偏在的 に挟在、(iv)(iii)の下位にルーズで不規則に配 列したパラワンオフィオライト起源(一部班れ い岩を含有)の扁平な巨礫や亜円礫が層間内礫 層として挟在、(v)トレンチ底部の黒色の泥質 (一部粘土化) な砕屑性堆積物であった。ただ し、トレンチ7では、床面近傍に、図-2のよう な特異的な淡灰色からクリーム色の層厚約 20cm で、ほぼ水平に連続性のある細粒砂質堆積物(偏 光顕微鏡観察から降下火山灰堆積物)が観察さ れた。一方、トレンチ8では、高アルカリ地下 水の浸出が見られず、その岩質は、未固結で、 淡褐色のルーズな砂質の風化堆積物であった。

ストリッピング調査では、各ストリッピング での細屑化に差がみられるが、大きな違いはな く、基盤岩の表層部は、塊状で、節理周辺での 角礫化と割れ目系優勢部での細礫化に伴う岩屑 が顕著な物理的風化堆積物で構成されている。

岩石鉱物学的調査として実施した XRD による 鉱物分析から(図-3参照)、トレンチ及びストリ ッピングで採取したすべての試料でスメクタイ トを同定した。トレンチ6、7の①アルカリとの 相互作用のある超塩基性岩起源の砕屑性堆積物 はスメクタイト化が顕著であるが、トレンチ7 の②降下火山灰堆積物及びトレンチ8の③アル カリとの相互作用のない風化堆積物はスメクタ イト含有量が少ない。そのトレンチ8の風化堆 積物には斜長石、普通輝石、角閃石、蛇紋石が 同定され、班れい岩由来の堆積物であると考え られる。ストリッピングの④アルカリとの相互 作用のない風化堆積物は、蛇紋石が主要な鉱物 であり、トレンチの超塩基性岩起源の砕屑性堆 積物に比べるとスメクタイトの相対強度は低く、 また鉱物のバリエーションが圧倒的に少ない。

XRFによる全岩化学分析では、蛇紋岩化が進ん だハルツバージャイト起源であるトレンチの① 砕屑性堆積物とストリッピングの④蛇紋岩質風 化堆積物は原岩のバルク組成を反映し、MgO, Fe203に富み、CaO, Al203に著しく乏しく、Na20, K20 にも乏しい。トレンチ・ストリッピング両者の 比較では、ストリッピングの④蛇紋岩質風化



図-2 トレンチ7の東壁面(①砕屑性堆積物に挟まれた② 降下火山灰堆積物(赤矢印の白色層))



図-3 XRD チャート(左上:①砕屑性堆積物(アルカリ環 境)、右上:②降下火山灰堆積物(アルカリ環境)、 左下:③班れい岩質砕屑性堆積物(風化環境)、右 下:④蛇紋岩砕屑性堆積物(風化環境))

堆積物は、スメクタイト化がより進んでいるト レンチの①砕屑性堆積物に比べて SiO² が少なく、 CaO はほとんどない。これは、アルカリ環境下で CaO が供給されるトレンチ試料と違い、風化過程 で Ca 成分が溶脱しているためだと考えられる。 一方、トレンチ 8 の③班れい岩起源の風化堆積 物とトレンチ 7 の②降下火山灰堆積物について は、これらの堆積物に斜長石が多く含まれてい るために、他の試料よりも Al₂O₃が多く、MgO と Fe₂O₃ が少ない傾向が明確にみられた。

光学顕微鏡による観察及びモード分析等によるスメクタイトの定量分析から、①アルカリ環境下のハルツバージャイト起源の砕屑性堆積物については、基質はスメクタイトが多く、スメクタイト化は 39.3~44.1%、②アルカリ環境下の降下火山灰堆積物については、基質はスメクタイトが少なく、火山灰や火山ガラス(新鮮なものが多い)、普通角閃石、斜長石などが散在し、スメクタイト化は 16.4%、③物理的風化環境下の蛇紋岩砕屑性堆積物については、基質はスメク

タイトが優勢であるがその量比は①よりも少な く、スメクタイト化は 33.0%、④物理的風化環 境下の班れい岩質砕屑性堆積物については、基 質はスメクタイトが少なく、スメクタイト化は ③物理的風化環境下の蛇紋岩砕屑性堆積物と同 等であった。これらの結果から、アルカリ環境 下の砕屑性堆積物は総じて風化環境下の砕屑性 堆積物よりもスメクタイト化が顕著であるが、 火山ガラスはアルカリ環境下でもそれほど変質 しないということがいえる。

(2)年代測定による反応時間の評価

パラワン島の Narra3-2 サイトでは、高アルカ リ地下水が湧出した年代から、反応時間を推定 することが可能である。今年度は、Narra3-2 サ イトのトレンチ 6 及びトレンチ 7 (図-4 参照) から採取した炭酸塩、木片、砕屑性堆積物(土 壌)試料の放射性炭素年代測定を実施した。

各種試料の年代測定結果から、トレンチの底 部付近で採取した土壌試料(ヒューミン)が、 最も古い年代を示しており、トレンチ3~5と同 様の傾向を示した。土壌中のヒューミンは土壌 腐食物質のうちアルカリ、酸ともに不溶性の有 機物であり、その放射性炭素年代が堆積年代を 示すと考えられる。トレンチ6(4,008±73年)、 トレンチ7(4,516±74年)という結果から、今 年度掘削したトレンチの砕屑性堆積物の堆積年 代が 4000~4500 年程度と推察される。昨年度の トレンチ3 (9,721±57年)、トレンチ5 (9,647 ±56 年)の結果を踏まえると、扇状地様である Narra3-1の源泉からNarra3-2のトレンチ掘削地 点にわたる調査サイトにおいて走行方向での砕 屑性堆積物の堆積年代はほとんどない。一方で 傾斜方向では下部層(東南)方向の堆積年代の 方が 5000 年程度若いことがわかる。

木片の¹⁴C 年代については、炭酸塩中の木片が 砕屑性堆積物中の木片よりも年代が若いのは、 調査サイトの堆積過程から整合的であるが、断 続的に生じていたと考えられるオフィオライト の浸食・運搬・埋没過程において、埋没した木 片が移動していた可能性があり、必ずしも木片 の年代はそれが埋没していた堆積物の堆積年代 と一致するとは限らないことを示している。

炭酸塩の¹⁴C 年代については、トレンチ7の炭酸塩(2,771±73年)はこれまでに測定した炭酸

塩で最も古い年代を示す炭酸塩である。炭酸塩 については、アルカリ地下水と大気中の炭酸ガ スとの相互作用により方解石の沈殿によって形 成したものが主であり、アルカリ地下水が連続 して流出している間にさらに古い時代に生成し た炭酸塩や不純物を固結しながら堆積したと考 えられるため、アルカリ地下水との接触期間と いう意味では、その生成年代がもっとも接触時 間と直結する年代と考えられる。したがって、 トレンチ7の炭酸塩の(2,771±73年という)¹⁴C 年代から、アルカリ地下水が少なくとも 2,800 年程度前からこのサイトに流出し、砕屑性堆積 物にも浸出していたと考えられる。



図-4 Narra 地区トレンチ7の¹⁴C年代測定結果

(3) アルカリ環境下でのベントナイトの長期変質 Narra 地区のトレンチ及びストリッピングか ら採取したスメクタイトがみられる砕屑性堆積 物について、EPMA による観察・分析を実施した。

スメクタイトの Al 組成については、バイデラ イトが主である班れい岩起源の風化された堆積 物は明らかにその含有量が多い。一方で、トレ ンチ 5 の超苦鉄質岩起源の砕屑性堆積物でも班 れい岩起源の層内礫層の影響で比較的 Al 成分が 多く、アルカリ相互作用により生成したサポナ イトにも Al が取り込まれている。降下火山灰堆 積物では Al 含有量の差が大きく、源岩の組成を 反映した Al を含むバイデライトと Al の少ない サポナイトが共存していると考えられる。また、 Narra の堆積物中のスメクタイトについては、Al と Cr, Fe, Si には負の相関がある。

Narra の高アルカリ環境では、サポナイトある いは鉄サポナイトが主として生成し、一部ノン トロナイトやスチーブンサイトが生成している と考えられる。ただし、Al に富む班れい岩質堆 積物と降下火山灰堆積物では、Fe, Mg に富むサ ポナイトに分類されるスメクタイトがある一方 で、モンモリロナイトやバイデライトに分類さ れる Al に富むスメクタイトも多くみられる。

パラワン島 Narra 地区のスメクタイトの形成 環境と変質反応プロセスは、物理的風化環境と、 アルカリ地下水環境に区別される。

物理的風化環境下での苦鉄質鉱物を主成分と する砕屑性堆積物でのスメクタイトの形成に係 る反応プロセスについては、前駆鉱物とこのよ うな溶液との相互作用により、2八面体型のノン トロナイトと3八面体型でA1に乏しい Mg-Fe サ ポナイトが初生鉱物である。その後、Fe に富む サポナイトへ鉱物学的な組成変化をする。

アルカリ地下水環境下でのスメクタイトの形 成に係る反応プロセスについては、Mg, Fe に富 む超苦鉄質岩起源の砕屑性堆積物では、図-5 に 示すように、高アルカリ地下水との相互作用に より、苦鉄質鉱物や蛇紋石、緑泥石が溶解して、 Mg, Fe, Si が溶解し、高アルカリ地下水中のCa、 少量の斜長石から溶出する Al によって、スメク タイトの前駆体となる M-S-H と C-S-H が沈殿す る。Fe や Al も容易に取り込み、M-F-A-S-Hのよ うなやや複雑な組成にもなりうる M-S-Hからは、 (Mg) サポナイト、鉄サポナイト、スチーブン サイト等の3八面体型のスメクタイトが生成し、 さらに、Fe-richの3八面体型スメクタイトの周 囲では、より安定なノントロナイトが生成する。 一方、C-S-H は数千年の時間スケールでジャイロ ライト等に一部結晶化したり、カルサイトに変 化したりする。Al に富む降下火山灰堆積物では、 図-6 に示すように、高アルカリ地下水との相互 作用により、降下火山灰堆積物中の斜長石や火 山ガラス、火山軽石 (パミス) が一部溶解して、 Al, Si が溶解し、高アルカリ地下水中の Ca、周 囲の苦鉄質鉱物等から溶出する Mg, Fe によって、 Al-richなところでは2八面体型のバイデライト、 Fe-rich なところでは超苦鉄質岩起源の砕屑性 堆積物と同様にサポナイト等の3八面体型のス メクタイトが生成し、一部その反応縁にノント ロナイトが生成する。







図-6 パラワン島 Narra 地区の AI に富む降下火山灰堆積 物中のスメクタイト生成に係る鉱物変遷プロセス

(4)地球化学シミュレーションモデルによる変質 解析

オフィオライトの蛇紋岩化作用過程で生成し た高アルカリ地下水とベントナイトとの相互作 用において、アルカリ環境下のスメクタイトの 安定性やアルカリ溶液からの二次鉱物生成挙動 のベントナイトのアルカリ変質に伴う状態変遷 評価について、パラワン島及びルソン島の NA を 対象として以下の地球化学計算を実施した。

パラワン島 Narra 地区の NA 環境での安定相の 解析から、Narra 地区で採取された地下水は、図 -6 に示すように、概ねサポナイトの安定領域に プロットされており、特に、サポナイトや鉄サ ポナイト等の 3 八面体型スメクタイトの前駆体 の主要成分である、Mg, Fe, Si 濃度が高い領域 において、サポナイトが安定相であることが確 認できた。これらは Narra 地区の NA サイトの砕 屑性堆積物中での観察結果と整合し、高アルカ リ地下水によるスメクタイト化が地球化学計算 の観点からもいえる。

Ca については、図-7 右図に示すように、 C-A-S-Hとサポナイトの境界付近にNarra地区の 地下水はプロットされている。これは、C-S-Hと サポナイトの共生が多く確認された、Ca 濃度が 高いトレンチ 2 の砕屑性堆積物中の鉱物の産状 と整合する。Al については、Al-rich のスメク タイトであるバイデライトと Fe, Mg-rich のス メクタイトであるサポナイトの境界付近にプロ ットされている。これは、降下火山灰堆積物中 のスメクタイトで類似した産状がみられ、アル カリ変質によって、Al 成分の多いところはバイ デライト、Fe, Mg 成分の多いところはサポナイ トが生成することを示している。

一方、セメント平衡水またはセメント-ベン トナイト平衡水の化学組成でも、Narra 地区の NA サイトと同様に、図-8 に示すように、サポナ イトの安定領域内に存在していることを確認し た。間隙水が pH12.5 付近の場合、Mg²⁺の活量が 10⁻⁷ mol/L 程度(log([Mg²⁺]/[H⁺]²)=16.8)であれ ば、サポナイトの安定領域である。現状のセメ ント平衡水のデータでは、Fe, Mg の影響は評価 されていないが、処分場においては海水や鉄部 材からの Fe, Mg の影響で、ゼオライトが安定相 とはならないケースも十分考えられる。

ルソン島 Saile 鉱山の NA の高アルカリ地下水 との相互作用があったベントナイトと枕状溶岩 の接触部の変質解析から、これまでの条件に M-S-HおよびF-S-Hを二次鉱物の設定に追加した ことにより、M-S-Hまたは F-S-Hと鉄サポナイト がアルカリ変質鉱物として生成していることが 確認された。パラワン島 Narra 地区の NA の観察 結果や安定相の解析結果から、アルカリ溶液か ら沈殿形成して生成していたスメクタイトにつ いては、M-S-Hがその前駆体である可能性が示唆 されたが、ルソン島の Saile 鉱山の NA の変質解 析においては M-S-H と鉄サポナイトの生成が確 認され、サポナイトの生成に M-S-H が影響を与 える可能性があることを解析でも確認できた。



図-7 Al203-FeO-MgO-CaO-SiO2-H2O系 (Narra 地区の地下水)の安定相図

◇平成 25 年度~29 年度の取りまとめ

ルソン島北西部及びパラワン島中南部で実施 した過去5か年の NA 調査から、以下の知見が得 られた。

 ●高アルカリ溶液はスメクタイトを生成させる 環境になりうる。

TRU 廃棄物の地層処分場でのベントナイトーセ メント相互作用での最も重要な反応は、ベントナ イトの主要粘土鉱物であるスメクタイト(2八面 体型のモンモリロナイト)の高アルカリ溶液によ る溶解・変質である。しかしながら、パラワン島 Narra 地区のサイトでは、高アルカリ環境(pH > 11)がスメクタイト(Mg, Fe に富むスメクタイト

図-8 Al203-Mg0-Ca0-Si02-H20系 (セメント平衡水)の安定相図

(3 八面体型のサポナイト、2 八面体型のノント ロナイト等))を生成する環境でもあることを示 している。もちろん、このようなスメクタイトが 生成する高アルカリ環境では、スメクタイトが長 期にわたり安定に存在する。

 ● Fe, Mg に富む高アルカリ環境での二次鉱物はゼ オライトではなくスメクタイトである。

Narra 地区の Mg, Fe に富む地下水環境では、地 球化学計算からサポナイトが安定相であると評 価され、実際に Narra 地区のアルカリ環境下の堆 積物中にはゼオライトはほとんど存在せず、アル カリ変質によって生成したスメクタイトは主に 3 八面体型のサポナイトである。アルカリ変質反応 でキーとなるのは Si の挙動であり、Fe, Mg に富 む高アルカリ環境では、Siは、アルカリに取り込まれてゼオライトが生成するのではなく、Fe, Mgと結びついて前駆体となる M-S-HやF-S-H等で沈殿し、それらが(鉄)サポナイト、スチーブンサイト等の3八面体型のスメクタイトに成長する。降下火山灰堆積物のAl-richな環境でも、2八面体型のバイデライトが生成するが、サポナイトの生成のほうが多い。

 ●高アルカリ環境でのスメクタイト質のM-S-Hの 生成は速やかに生じるが、スメクタイトの結晶 化は 2400~4500 年程度の長期にわたる反応で ある。

Narra 地区の苦鉄質の堆積物中で生成するスメ クタイトは C-S-H と共生している産状が多くみら れる。アルカリ溶液からの Ca と Si との結合によ る C-S-H の形成は、高アルカリ地下水が浸出して それほど時間を経ずに生じたと考えられる。スメ クタイトの変質プロセスでは、M-S-H の生成(沈 殿)速度ではなく、高アルカリ溶液と反応する出 発物質の溶解速度に律速すると考えられるが、ア ルカリとの相互作用により速やかに生成したス メクタイト質(組成)のM-S-H や F-S-H は、堆積 年代の異なるトレンチの砕屑性堆積物のスメク タイトのピーク強度の差から、アルカリとの相互 作用が始まって 2400 年~4500 年程度の時間スケ ールで、より Si-rich な結晶質のスメクタイトに 成長・進展する。

 ベントナイトは高アルカリ溶液で一部変質す るかもしれないが、概ね、長期間健全である。 Narra 地区のサイトではスメクタイトのアルカ リ変質プロセスを直接観察できる NA サイトであ るが、ここで主にみられるスメクタイトは、サポ ナイト、ノントロナイト、スチーブンサイトとい った Fe と Mg 成分に富むスメクタイトであること である。処分場の変質プロセスを考えた場合、珪 長質成分に富むモンモリロナイトや随伴鉱物で 構成されるベントナイトのアルカリ変質で、当 NA サイトで観察される Fe, Mg 成分に富むスメクタ イト現実的に生成するのかという点を考慮しな ければならない。

ここで、ルソン島 Saile 鉱山の NA におけるア ルカリ変質プロセスでは²⁰、Ca 型ベントナイトに 玄武岩質枕状溶岩の亀裂を流路とする pH11 程度 の高アルカリ地下水が接触し、枕状溶岩-ベント ナイト界面で 5mm 程度のベントナイトのアルカリ 変質が確認された。この微小の変質領域でのアル カリ変質による二次鉱物については、界面付近の 玄武岩ガラスの溶解に伴い溶出した 2 価の Fe イ オンの一部が、2 八面体型モンモリロナイトの層 間陽イオンである Ca との陽イオン交換反応によ り Fe 型化(Fe 型モンモリロナイト)して、一部 は溶解反応を伴い鉄サポナイトとして沈殿し、そ の後、酸化環境下で余剰の 3 価の Fe が、ノント ロナイトと針鉄鉱を晶出(沈殿)させ、緻密な鉄 濃集帯を形成し、それによるクロッギング(空隙 閉塞)により変質領域も限定されたとみられる。

Narra 地区でのアルカリ溶液から鉄を含むスメ クタイトが生成するプロセスは、Saile 鉱山のア ルカリ変質プロセスと共通しており、アルカリに よって Fe を含むスメクタイトが生成するプロセ スは、苦鉄質の環境だけでなく、ベントナイト-アルカリ相互作用でも生じる可能性が高いと考 えられる。その場合は、Saile 鉱山の NA が示すよ うに、アルカリ変質反応に伴い生成した鉄を含む スメクタイトのクロッギングが物質移行を抑制 し、それによって変質反応が抑制されることが期 待できる。

- 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関 する技術開発事業TRU廃棄物処理・処分技術高度化開 発報告書(第3分冊)-ナチュラルアナログ調査-、 2018
- 2) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 24 年度 放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射 性廃棄物重要基礎技術研究調査 多重バリアの長期安 定性に関する基礎情報の収集及び整備 平成 19 年度~ 24 年度の取りまとめ報告書、2013
- 3) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処 理・処分技術高度化開発報告書(第3分冊)ーナチュ ラルアナログ調査-、2016
- 4) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処 理・処分技術高度化開発報告書(第3分冊)ーナチュ ラルアナログ調査-、2017

4-5 人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア 評価の初期条件の設定

◇事業の概要

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

本事業では、平成19年度より平成24年度まで の事業の成果及び抽出された課題²⁰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カ 年の計画で「人工バリア材料長期挙動評価」及び 「人工バリア評価の初期条件の設定」に関する調 査研究を実施した³⁾。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、主 に緩衝材(ベントナイト)を対象に、水理-力学 化学(HMC) 連成挙動の長期評価の信頼性向上を 目的に、確証試験を実施し数値解析の高度化を検 討した。閉鎖直後の処分場は地下水による飽和に 至る過程にあり、徐々に進行する化学変質を力学、 水理挙動と連成する必要がある事を勘案し、本事 業では、HMC 連成解析の基点を処分場の閉鎖時と した。「人工バリア評価の初期条件の設定」では、 セメント系材料の長期挙動評価の初期条件の設定 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、施工の初期設定への影響等を 検討した。

◇平成 29 年度の成果 4)

(1)人工バリア材料長期挙動評価

人工バリアに使用されるベントナイトは、セメ ント成分の溶解によって高 pH になった地下水と の接触により化学的に変質する。化学的な変質は 人工バリアの力学的な状態に影響を及ぼし、これ らは相互に影響を及ぼし合う¹⁾(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²⁰。



図-1 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

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。これらの点に関して、1)人工バリ ア構成材料の化学変質に関する試験とモデル化、 2)緩衝材の力学特性に関する試験とモデル化、 及び、3) HMC 連成解析手法の検討、加えて解析 結果に基づく人工バリア成立性の考察を実施し た。以下にその成果を記す。

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

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



図-3 ベントナイト変質に伴う化学変質挙動のモデル化案

モンモリロナイトの溶解について、実効反応表 面積の定式化を検討した。化学解析で使用するモ ンモリロナイトの溶解速度式の高度化に関連し た平成24年度までの検討にて、ベントナイトの 圧密に伴い溶解速度が低下することを試験によ り確認している²⁰。これはモンモリロナイト粒子 同士のマスキングによる実効反応表面積の減少 と考えられ、モンテカルロシミュレーションで円 盤状粒子の積層の平衡状態を計算し、その状態の 実効反応表面積を算出した。これまでの検討によ り、1.2Mg/m³程度までの現実的な乾燥密度での再 現ができ、実効反応表面積を近似曲線により定式 化する事により、従来の実効反応表面積(7m²/g 一定)のケース¹⁰と比較して、長期評価の不確実 性を低減した⁵⁰。





平成 29 年度は、粒子間距離と乾燥密度の関係 の理論式⁶⁾を参考に、モンテカルロシミュレーシ ョンで算出した実効反応表面積を乾燥密度との 関係で検証しつつ定式化した(図-4)⁴⁾。

また、モンモリロナイトの溶解に伴う二次鉱物 (ゼオライト)の生成について、生成条件や力学 挙動に影響する体積変化を試験により把握し、モ デル化を検討した。これまでに二次鉱物の生成挙 動を確認し、ベントナイトに含まれるカルセドニ (SiO₂)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、生成するゼオライトの種類は、 溶液組成と界面自由エネルギーにより決まる事 などがわかった^{4),5),7),8)}。



図-5 二次鉱物の生成挙動の確認試験の結果の一例

平成28年度及び29年度は、図-5に示した二 次鉱物の生成待ち時間を考慮すべく、古典的核形 成理論の不均質核形成の考え方(系内にある粒子 表面での核形成を想定)に基づき、過飽和度の逆 数の対数と二次鉱物の生成待ち時間の対数が直 線関係となるモデル式を検討した。試験にて得ら れた二次鉱物の生成待ち時間と過飽和度は概ね 直性関係を示し(図-6)、本モデル式で現象を整理 できるものと考えられる⁴。

以上の検討成果は、暫定的な形ではあるものの、 3)の HMC 連成解析へ反映した⁴⁾。

b)セメントとの接触部分におけるベントナイト の化学変質挙動の調査

セメントとベントナイトの接触部分で生成す る珪酸カルシウム水和物(C-S-H)は、ベントナ イトの変質を抑制する可能性があり、長期挙動の 評価に反映するため室内試験でその挙動を確認 して、まとめた^{2),4)}。一方で、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


図-6 過飽和度と二次鉱物の生成待ち時間の関係

同組合、スイス)の GTS (Grimsel Test Site: グリムゼル試験場)の建設後 12 年間を経過した 構造物から採取した試料³⁾を分析した。平成 29 年度には、マイクロビームを用いた X 線吸収微細 構造分析 (XAFS、KEK の BL-15A1 を使用)にて 100 μ m 間隔で原位置分析を実施し、その結果を試料 の存在した環境ごとの化学変質のケースとして 整理した⁴⁾ (図-7)。いずれもベントナイトの変質 (C-S-H の生成)は、飽和度やセメント種等に因 って限定的であった。



図-7 Nagra GTS で採取した試料の測定結果

c) セメント系材料の化学変質に伴う物質移行特性 変化のモデル化

セメント系材料の長期変遷をより現実的な解析 により評価するために、Caの溶解に伴い変化する セメント系材料の拡散係数を溶解前の初期物性値 を元に得ることを目的に、物質移行特性(拡散係 数)の予測モデルを検討した。 平成 28 年度までにセメント種毎に様々な変質 段階に応じた C-S-H の拡散係数を算出するため の関係式を導出し、各種セメントペーストの拡散 係数予測モデルを構築した(図-8、青点線枠内) ⁸⁾。平成 29 年度は、骨材を含むモルタル材料へ適 応させるため、遷移帯の拡散係数の設定方法を検 討した。試験結果から、既往の検討⁹⁾に基づき、 Ca 溶解前後で遷移帯の拡散係数がセメントペー スト部分と一定比率を保つとした⁴⁾。

以上の成果を盛り込んだ 3 次元のマルチスケ ールモデル¹⁰とランダムウォーク法を適用する 事で、各種セメントを使用したモルタル材料につ いて変質後の拡散係数を予測する事が可能とな った(図-8、赤点線枠内)。なお、本手法を適用 して算出したセメント系材料の拡散係数を、3) の HMC 連成解析に反映した。



図-8 溶脱したモルタルの拡散係数の予測フロー

2)緩衝材の力学特性に関する試験とモデル化

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

圧密挙動(完全飽和線)に関しては、モンモリ ロナイトが溶解した場合に加え、二次鉱物が生成 した場合をモデル化することが出来た。また、こ れまでに、模擬 Region I 浸出液等のアルカリ溶 液の影響を検討し、イオン強度及び完全飽和線の 移動で整理できることを示した⁸⁰。

膨潤挙動に関しては、これまでに引き続き平成

29 年度には、ベントナイトの Ca 型化の影響についても試験データを基に非可逆比により整理し、 モデルを拡充した(図-9)。



せん断挙動については、これまでに等体積一面 せん断試験を実施し、知見が少なかったベントナ イトの限界状態線に関する知見を拡充した。その 結果、限界状態線は乾燥密度と拘束圧の関係にお いて完全飽和線と平行な関係にある事、限界状態 線に至る過程は溶液の種類によって大きな差が ない事を確認した[®]。平成 29 年度は、簡便さで は一面せん断試験に劣るものの、より有効なデー 夕が取得可能な三軸 CU 試験にて従来のφ5cm× 10cm より小さいφ2cm×4cm の試験体で試験を実 施する手法について、寸法効果の影響、混合する 珪砂の粒子の影響、三軸試験での拘束圧の設定に ついて検討して整理を行った。今後、試験データ を拡充しモデルの信頼性を高め、力学挙動解析へ 反映する必要がある。

3)HMC 連成解析手法の検討、解析結果に基づく人工バリア成立性の考察

ここでは、力学解析と化学解析の2次元での弱 連成手法について検討を進めた。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³を2次元FEM化した土/水連成有限要素プログ ラムDACSAR-BA¹¹⁾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-TRANS¹²⁰ 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29年度は、これまで検討成果(圧 密系でのモンモリロナイトの溶解挙動、二次鉱物 の生成タイミングの遅れ、化学変質に伴うセメン ト系材料の拡散係数変化、力学解析の構成モデル の弾塑性化、ベントナイトの Ca 型化を考慮可能 な透水係数モデル)を反映すると共に再冠水過程 における緩衝材の密度分布を考慮した HMC 連成解 析を実施し、人工バリアの成立性を考察した⁴。

化学解析の結果を図-10、化学解析結果を反映し た力学解析結果を図-11 にそれぞれ示す。本解析 では、変質が少なく、再冠水による緩衝材の密 度分布が生じたとしても応力の再分配により密 度分布が均整化されると共に、人工バリアの2次 元の断面の多くに健全部が維持される傾向にあ った。



(d) 本フェーズの成果反映(初期条件に再冠水考量)

図-10 本フェーズの成果を反映した化学解析結果 再冠水過程については、地下 300m の処分坑道に 対して地表面まで水頭を上昇させた時の乾燥密 度分布として反映



図-11 化学解析結果(本フェーズの成果反映)を 考慮した力学解析結果(乾燥密度分布)

核種移行の観点からも、変質等の長期変遷を 経ても、人工バリアからの核種の移行量が既往の 検討と比較して増加する事はないと考察された⁴。 従って、現状の人工バリアの概念であれば、基本 シナリオにおいて種々の変質を考慮した場合に も、拡散場が担保され性能を保つと考えられる。 ただし、化学解析でのベントナイト中の石英の 溶解が顕著なケース等、現実と乖離している部分 が残っている点は今後の課題である。

(2)人工バリア評価の初期条件の設定

人工バリアの長期挙動評価の解析の基点は、 前述の様に処分場が建設、操業を経て閉鎖された 時点としている。解析の基点における材料特性値 等の初期条件は、長期の解析結果に影響を及ぼす ため、より正確な設定が必要である。そのため、 従来用いられてきた材料自体の特性に関する情 報に加え、建設や閉鎖までの影響を考慮する必要 がある。本検討では、セメント系材料の材料特性 値(拡散係数、力学特性等の物性値)において予想 される放射性廃棄物の熱による変質の影響を中 心に、長期解析の初期条件の設定に考慮すべき事 項を提示する事を目的とした。

平成 29 年度は、平成 28 年度までに続きセメン ト系材料の熱履歴による C-S-H のトバモライト化 (結晶化)を検討した。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。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) 試料により結晶化を確認している²⁰。また、平成 28 年度には、処分場の制限温度である 80 \mathbb{C}^{10} を下 回る 50 \mathbb{C} 程度の熱に 30 年程度の間暴露されたと 推定される試料にて、C-S-H の Ca/Si モル比の低 下及び XRD において結晶化の兆候が認められた⁸⁰。

結晶化条件を明らかにするため、合成 C-S-H 及 び合成 C-A-S-H の粉末を一定温度に保管する試験 (定温度試験)を実施した。その結果、50℃以上 の条件において Ca/(Si+AI)モル比がトバモライ トの組成の 0.83 程度の条件で、高温ほど結晶化し やすい傾向が認められた(図-12)。また、石英粉 を添加した各種セメント水和物粉体及び各種セメ ント硬化体の定温度試験では、セメント種毎に結 晶化の兆候の有無に差異が生じており、結晶化が 混和材や骨材の影響を受ける事が示唆された⁴。



図-12 熱影響による C-S-H の結晶化条件の整理

これまでに得られた知見に基づき、C-S-H の結 晶化のメカニズムを推定した(図-13)。Ca/Si モ ル比または Ca/(Si+A1)モル比の 0.83 程度への低 下は、地層処分場においても起こり得ると考えら れる。したがって、これまでの試験結果は、地層 処分場においてセメント系材料が結晶化する可能 性がある事を示唆していると考えられる。一方で、 セメント硬化体の定温度試験からは、結晶化には 長時間を要するものと考えられる。



図-13 C-S-Hの結晶化のメカニズム(推定)

セメント系材料の物性値への熱の影響について は、硬化体を結晶化させて物性値変化を確認する 予定であるが、未だ結晶化過程にあるため、引き 続き試料の評価を進める必要がある。

◇平成 25 年度~29 年度の取りまとめ

平成25年度から平成29年度では、TRU 廃棄物の 地層処分の人工バリア閉鎖後長期の挙動評価を目 的に、評価手法及び閉鎖後長期にわたる成立性を検 討した。

「人工バリア材料長期挙動評価」では、本フェーズの成果である化学変質現象モデル、力学構成モデル、透水係数モデルを反映した化学-力学弱連成解析を2次元断面で実施可能となった。解析結果は緩衝材の変質が抑制される傾向にあり、現状の人工バリアの概念であれば基本シナリオにおいて種々の変質を考慮した場合にも、拡散場が担保され性能を保つと考えられた。今後、現実的な挙動とは異なる解析結果を示す点及び連成頻度の向上等の課題の検討により、人工バリア閉鎖後長期の挙動のより信頼性の高い評価が可能となると考えられる。

「人工バリア評価の初期条件の設定」では、50℃ 以上の環境条件で C-S-H が結晶化する可能性があ る事、結晶化は環境温度(高温ほど促進)とセメン ト系材料を構成する材料特性(混和材、骨材等)に 影響される事が確認された。一方、結晶化が物性値 に及ぼす影響に関する試験は、未だ結晶化過程にあ るため、試験を継続し、長期解析の初期条件への反 映の要否を検討していく必要がある。

- 1) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物 処分技術検討書-第2次TRU 廃棄物処分研究開発取り まとめ-、2005
- 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29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関す る技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 (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-、2018
- 5) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処 理・処分技術高度化開発(第4分冊)-人工バリア材 料長期挙動評価・人工バリア初期条件の設定-、2015
- 6) E. Paineau, I. Bihannic, C. Baravian, A. M. Philippe, P. Davidson, P. Levitz, S. S. Funari, C. Rochas and L.J. Michot, Aqueous suspensions of natural swelling clay minerals. 1. Structure and electrostatic, Langmuir, 27, 5562, 2011
- 7) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 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
- 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処 理・処分技術高度化開発(第4分冊)-人工バリア材 料長期挙動評価・人工バリア初期条件の設定-、2017
- 9) C.C Yang, J K Su, Approximate migration coefficient of interfacial transition zone and the effect of aggregate content on the migration coefficient of mortar, Cement and Concrete Research, Volume 32, Issue 10, P1559-1565, 2002
- 10) 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
- 11)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
- 12) 電気事業連合、核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物 処分技術検討書 -第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取 りまとめ-、JNC TY1400 2005-013、FEPC TRU-TR2-2005-02、根拠資料集 4-2、2005

4-6 ガス移行連成挙動評価手法の開発

◇事業の概要

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

上記の影響評価に係る課題は「第2次TRUレポ ート」¹⁰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」²⁰にて提示されており、 特にベントナイト系緩衝材中の力学連成を伴うガ ス移行を考慮した評価モデルの開発、掘削影響領 域を含むニアフィールド全体におけるガス移行評 価モデルの開発等の必要性が提言されている。

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

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

このうち、フェーズ2(平成19~24年度)に対応した検討⁴⁾では、人工バリアのうちベントナイト緩衝材中のガスの移行挙動解明に向け、水とガスの透過性及び力学特性データの取得やガス移行解析モデルの構築/高度化を推進した他、人工バリアの周辺岩盤を含むガス移行挙動を評価するためのシナリオ構築、及びシナリオ評価手法を整備した。しかし、その一方で、現実的なガス移行挙動を評価するには、不確実性を有する多くの課題

(多様な人工バリア材料に対するガス移行挙動の 解明やモデル化が必要であること、また、多様な 廃棄物処分概念を考慮した評価シナリオの構築と 根拠の拡充が必要であること等)が残された。

これを踏まえ、フェーズ3(平成25~29年度)

に対応した検討^{5)~9)}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。

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



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

◇平成 29 年度の成果⁹⁾

- (1)ガス移行解析ツールを用いた人工バリアシス テムの成立性の評価
- a. 安全評価上の重要事象が考慮された解析的評価のための評価シナリオの設定

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

平成 27 年度は、平成 26 年度までの成果をベ ースとして、シナリオ構築・評価の流れ(実施 手順)の再整理(評価の体系化)を図ることを 目的に、図-2 に示すような各々の作業(評価要 素①~④)の流れと相関性を明確化した評価体 系を整備し⁷⁷、平成28年度には、平成27年度ま でに整備した評価体系(図-2)における評価要 素のうち、主に「②シナリオ設定」に係る FEP の不確実性(信頼性の程度)に着目した検討 (課題の抽出)を図-3に示すフローで実施する とともに、その低減方策(課題解決方策)を策 定した。⁸⁰



図-2 体系化したガス移行評価の流れ(実施手順) と評価要素(①~④)

(1) シナリオ成立上の重要FEPの絞り込み
 (2) 重要FEPIに関連した最新知見 (国内外)の十分性や信頼性 等の分析
 (3)分析結果に基づく課題 の抽出と解決方策の 検討

図-3 シナリオ設定の不確実性低減に向けた検討フロー

平成 29 年度は、平成 28 年度に検討した、核 種移行への影響を考慮したガス移行評価シナリ オの分類から安全評価上で重要な事象を抽出・ 把握したうえで、それらの重要事象が考慮され た解析的評価を実施する際に評価ケースの検討 に用いる評価シナリオを設定した(図-4)。



図-4 解析的評価のために設定した評価シナリオ

- b. 不確実性を考慮したガス移行挙動の解析的評価
- 本項目では、『ガス移行連成挙動解析ツールの高度化』として、ガス移行評価シナリオの根
- i『ガス圧上昇中にガスの排出量が急激に増大する現象』と定義¹⁰

拠の拡充や評価手法の整備に資する、既存のガ ス移行連成挙動解析ツール(計算を実行する 「解析コード」、及び解析に必要なパラメータ 群のデータベース化/解析コードによる計算と 連動可能なプログラムである「データライブラ リ」の総称)⁴⁾を更に高度化することを目的とし て、平成25年度に策定した実施計画⁵⁾に基づき、 平成28年度までにガス移行モデル(解析ツール に組込まれた数理モデル)の検証及び解析手法 (解析ツールを用いたモデリング手法)の信頼 性向上に向けた検討を進めてきた。

平成29年度は、既存のガス移行評価シナリオ のうち TRU 廃棄物グループ 2 の処分概念で想定 する事象(ガス移行に伴う汚染水が押出される 等)⁴⁾の定量評価に資するべく、既往検討にて検 証したガス移行モデルと解析ツール^{4)~7)}を用い、 解析的な検討を行った。具体的には、図-5のよ うに人工バリア断面を 2 次元の格子でモデル化 したうえで、前述の「a. 安全評価上の重要事象 が考慮された解析的評価のための評価シナリオ の設定」において設定した評価シナリオ(図-4) をもとに核種移行への影響が大きいと思われる 不確実性(ガス発生速度[G]、廃棄体間隙率[W]、 緩衝材の水理物性[B]、流路拡幅現象[P])を考 慮した評価ケース、解析ケースを設定し、様々 な条件下でのガス移行試験(飽和した緩衝材中 へのガス浸入~大破過ⁱに至るまでの排水挙動を 評価した試験等)により取得したデータを再現 可能なガス移行モデル(数理モデル)やパラメ ータ(表-1)、並びに解析ツール(二相流解析 コード:GETFLOWS 等)を用いたガス移行解析を 行い、ガス移行に伴う廃棄体外側境界部および 緩衝材外側境界部への汚染水の排水量、累積排 水量の定量評価を行った。

解析の結果、G1 ケースにおいて「G1W1B1P0」 が緩衝材外側への排水量最小、「G1W2B2P1」が 緩衝材外側への排水量最大となった。また、G3 ケースにおいて「G3W1B2P1」「G3W1B2P2」が緩 衝材外側への排水量最大となった。これに 「G1W2B2P1」の自己修復を考慮したケースであ る「G1W2B2P2」を加えた5 ケースを、核種移行 率の幅を考慮する上で安全評価上重要な解析ケ ースに位置付けることとした(表-2)。



図-5 解析モデルと境界条件

表-1 既往検討にて検証した数理モデルとパラメータ4)~7)



表-2 解析ケースの設定係	解析ケースの)設定例
---------------	--------	------

ケース名 ※1	G:ガス発生速度 〈mol/m/y〉量	W:廃棄体 間隙率	B:緩衝材 水理物性	P:流路拡幅現象
Case ⁻ G1W1B1P0	1倍 (全評価期間中)	0.19	TRU2	考慮しない
Case ⁻ G1W2B2P1	Ť	0.5	FY2012_SG@	考慮 (自己修復性無し)
Case ⁻ G1W2B2P2	Ť	Ť	Î	考慮 (自己修復性有り)
Case ⁻ G3W1B2P1	10倍 (全評価期間中)	0.19	Î	考慮 (自己修復性無し)
Case ⁻ G3W1B2P2	↑	Ŷ	↑	考慮 (自己修復性有り)

ケース名※1 について

G1: 第2次 TRU レポートの「ガス影響ケース」での提示値 (廃棄物 Gr.2-C) 相当 G3: G1の10倍

W1: 第 2 次 TRU レボートの「ガス影響ケース」での提示値 (0.19) W2: 第 2 次 TRU レボートの「人工パリア変質影響ケース」での提示値 (0.5)

平成 28 年度報告書[2]で坑道からの累積押し出し水量が最少となった第 2 次 B1: TRU レポートの水理物性

B2: 平成 28 年度報告書[2]で坑道からの累積押し出し水量が最多となった FY2012_SG②の水理物性

P0: 緩衝材の流路拡幅を考慮しないケース

10 被回行2000日は4回とうねじんが、「ころ後復性は考慮しないケース
 P1: 緩衝材の流路拡幅は考慮するが、自己修復性は考慮しないケース
 P2: 緩衝材の流路拡幅を考慮し、自己修復性も考慮するケース



図-6 排水量ピーク値

また、上記5ケースにおいてさらに詳細評価解 析を実施し、G3 ケースでは G1 ケースに比べて排 水量の最大ピーク値が大きく、また最大ピーク時 間が早くなることを確認した(図-6、図-8)。ま た、自己修復性無し(P1)ケースでは排水量のピ ークは 1~2 度で、明瞭な選択的移行経路を生じ るのに対し、自己修復性有り(P2)ケースでは排 水量のピークは複数生じ、明瞭な選択的移行経路 を生じないことを確認した(図-8)。

c. 核種移行評価にかかる検討

本項目では、人工バリアから天然バリアまで の核種移行経路を、第2次 TRU レポートに準拠 した 1 次元でモデル化し(図-7)、前述の「b. ガス移行解析における不確実性を考慮したガス 移行挙動の解析的評価」にて実施したガス移行 解析結果に準拠した核種移行解析ケース(安全 評価上で重要な 5 ケース)を設定し、核種移行 解析を実施した。なお、核種移行解析において は、その結果に大きな影響を与える汚染水の排 出挙動(排水流量の変化パターン)について、 ガス移行解析の各ケースから保守的に評価した 汚染水排出量(排水流量)の、各ケースにおけ る流路拡幅現象のモードを考慮した近似結果 (図-8)を基に条件設定した。

解析コードは米国 Yucca Mountain プロジェク トの総合安全評価において使用実績があり、そ の後、我が国における地層処分の安全評価にお ける de facto standard ともなっている汎用的 シミュレーションソフトウェア GoldSim (Golder Associates, 2001[15])を用いた。



図-7 TRU-2 に準拠した核種移行解析モデル



図-9 に各解析ケースにおけるガス移行解析結 果を近似した排水速度と、リファレンス(ガス 影響を考慮しない)ケースの場合の人工バリア 出口における核種フラックス(EDZフラックス) とを、時間軸を同期させた図として示す。また、

リファレンスケースにおいて EDZ フラックスの ピークを与える Sr-90 に着目して、各解析ケー スにおける EDZ フラックスの経時変化を比較し たものを図-10に、リファレンスケースにおいて 生物圏での線量率への寄与が最も大きい C-14 に 着目して、各解析ケースにおける C-14 の線量率 の経時変化を比較したものを図-11 に示す。



図-9 各解析ケースにおけるガス移行解析結果 (排水量ピーク)の近似とEDZ フラックス



図-10 EDZ フラックスの各解析ケースの比較 (Sr-90)



図-11 生物圏での線量率の各解析ケースの比較(C-14)

図-10 に示されるとおり EDZ フラックスを視座 とした場合には各解析ケースにおける相違が認 められたものの、図-11に示されるとおり生物圏 における線量率を視座とした場合には、総じて、 各解析ケースにおける相違は小さくなっている。 これは母岩における核種移行遅延効果によるも のである。しかしながら、緩衝材の自己修復性 を考慮せず、透気経路が閉塞せずに残存すると 仮定した G1W2B2P1 および G3W1B2P1 の2ケースで は、リファレンスケースケースと比較した場合、 線量率の上昇が認められた。リファレンスケー スでは最大線量率 0.058 μ Sv/y だったのに対し、 G1W2B2P1 ケースでは最大線量率 0.066 μ Sv/y、 G3W1B2P1 ケースでは最大線量率 0.10 μ Sv/y とな った。

以上の核種移行解析結果より、人工バリアか らの核種移行率等を評価することで、人工バリ アの成立性(核種の閉じ込め性能)が担保され る条件(ガス発生量の許容幅等)を以下のよう に見出した。

- ①人工バリア内におけるガス発生速度(mol/y・ 処分坑道奥行き 1m 当たり)は、第2次TRUレ ポートでの評価結果(図-12参照)程度までは 許容できる。
- ②上記「①」のガス発生速度において、人工バリア内で気相が形成された結果として、人工バリア内部でガスが移行することで緩衝材に 到達してガス破過が生じても、緩衝材の自己 修復性が期待通りに発揮されれば、繰り返される汚染水の押出し挙動において、その排水 流量(Nm³/y、処分坑道奥行き1m当たり)のピーク値出現時刻が後ろ倒しになることに伴い、 人工バリアの核種移行率(Bq/y)のピーク値

(移行率の支配核種である Sr-90 の移行挙動 に由来)が低減さることにより、その結果と して核種移行率のピーク値が第 2 次 TRU レポ ートでの評価結果(安全性が確認されたリフ ァレンスケースでの評価結果)と同等かそれ 以下になることから、核種の閉じ込め性能が 担保される。



図-12 ガス発生量の評価結果(堆積岩系岩盤、廃棄 体グループ2/キャニスタ)

(2)人工バリアシステムのガス移行連成挙動の評 価に係る知見の拡充

本項目では、既往のガス移行評価シナリオ⁴で 想定する現象の理解や不確実性の低減等に資す るデータの取得を目的として、平成25年度に策 定した実施計画⁵に基づき、前フェーズ(平成19 ~24年度)で取得されたデータ(特に緩衝材中 の大破過が生じる際の挙動に着目したもの)をさ らに拡充/充実させていく(前フェーズで取得し た以外のデータの取得)こととした。

平成 26 年度は、緩衝材(ベントナイト)やセ メント系材料(モルタル)中のガス移行形態に 関して、これまで知見の少なかった気液二相流 形態が主体となる(特に緩衝材中で大破過等が 生じない)ことを想定した条件でのガス移行試 験を実施し、その挙動を評価した⁶⁰。

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

その一例として、平成28年度に実施したベン トナイト界面に関する試験では、図-13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-13 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-14 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。界面幅は供試体直径(60mm)に対して 1~3mm 幅としたが、これは実際 の定置時における緩衝材ブロック(約1,000mm 四 方)間隔の水平幅(界面幅)を大きく見積もり、 最大約 18mm~54mm 程度になることを仮定した場 合の「想定値」から換算・設定したものである。



図-14 ガス移行挙動評価試験の概念

試験の結果、界面幅を 1mm とした供試体(図-15)では、既往のガス移行試験結果⁴⁰(界面の無い同一寸法のベントナイト供試体による)とほぼ 同様に、間隙へのガス浸入(間隙圧の上昇)によ る有効応力の低下を伴いながら、供試体側方から の排水挙動(ガス移行に伴う間隙水の押出し)や ガスの破過圧が観測されたことから、当該界面は 飽和過程で自己閉塞(十分に一体化)しており、 ガス移行挙動や破過圧に対して与える影響は小さ い可能性が示唆された。一方で、界面幅を 3mm と した供試体(図-16)でのガスの破過圧は 1.1MPa であり、界面幅 1mm の供試体と比較して約0.2MPa 低い値を得た。この要因解明のため、ガス破過に 至るまでの排水挙動に着目して両者を比較したと ころ、排水が卓越しているのは界面幅 1mm の供試 体では側方(界面以外)なのに対し、界面幅 3mm の供試体は中央部(界面付近)であることから、 後者は前者と比較して界面の自己閉塞が緩慢な状 態であり、卓越した水・ガス移行経路となったこ とに依る可能性が示唆された。

以上により、界面幅が 3mm (図-15 での寸法) を超えると自己閉塞性に影響が及ぶ可能性がある ことから、実際の緩衝材ブロック定置時の間隔は 約 50mm 以下に抑えるのが望ましいと思われる。



図-15 ガス注入(排水)過程における供試体(界面幅: 1mm)からの排水挙動と有効応力の経時変化



図-16 ガス注入(排水)過程における供試体(界面幅: 3mm)からの排水挙動と有効応力の経時変化

平成 29 年度は、平成 25 年度に策定した実施 計画[®]に基づき、複合システムとしての TRU 廃棄 物処分施設の人工バリアシステム中のガス移行 特性把握を目的として、廃棄体容器/各容器間 の区画充填材の界面を模擬した、炭素鋼/モル タル界面供試体(図-17 および図-18)によるガ ス移行試験を実施し、当該海面におけるガス移 行挙動を評価した。

なお、廃棄体パッケージは、廃棄体が熱を持 つことから、50℃から 90℃の温度条件が与えら れている。よって今回用いる供試体(φ50 mm、 厚さ 50 mm)についても常温打設後に常温養生し たものに加え、80℃の熱水中で所定の期間養生 (28日および91日)を行ったものを、常温下で の透水・透気試験に供することとした。また、 炭素鋼/モルタル界面供試体界面の有無による ガス移行特性の違いを比較するため、当該界面 (炭素鋼板)のない供試体でも同様の試験を行 った。



図-17 界面模擬供試体のイメージ



図-18 ガス移行試験装置の概念図

透水・透気試験による、各供試体のガス移行特 性評価結果を図-19 および図-20 に示す。

図-19 は、充填材中の界面の有無に着目し、そ の透過係数(ここでは透水特性)への影響を評価 するために整理したものであり、養生期間 28 日 を 三角印で、養生期間 91 日を四角印で示し、そ れぞれ塗りつぶしてあるものが 80℃養生、中抜き のものが 20℃養生を示している。この結果から透 水特性に関して以下の点が指摘された。

・養生期間が短い28日のものは、界面の影響が 明確に現れ、界面有のものが1桁大きな透過 係数となる。

- ・ 91 日養生となると 80℃養生でも 20℃養生でも 界面の有無の影響が見られなくなる。
- ・長期でのガス移行特性を考える場合には、実際の打設時には80℃養生となるため、常温(20℃養生)での透過係数に対して、1~2桁透過係数を高く見積もっておく必要がある。

一方で、図-20は、同じく充填材中の界面の有 無が、その透過係数(ここでは透気特性)への 影響を評価するために整理したものである。整 理結果から透気特性に関して以下の点が指摘さ れた。

 ・透気試験から得られる透過係数では、80℃養 生において、界面の影響が現れ、界面有の場 合の方が界面無と比較して大きくなる傾向が ある。



図-19 界面の有無と透水試験から求めた透過係数の関係



図-20 界面の有無と透気試験から求めた透過係数の関係

◇平成 25 年度~29 年度の取りまとめ

平成 25 年度から平成 29 年度までの調査研究成 果を以下にまとめる。¹¹⁾

ガス移行解析ツールを用いた人工バリアシステ ムの成立性の評価のうち、安全評価上の重要事象 が考慮された解析的評価のための評価シナリオの 設定においては、既存のガス移行シナリオの拡張 や根拠拡充を図った。具体的には、既存のシナリ オをベースに、人工バリアシステムで想定される ガス影響事象のうち、特に影響の大きな事象(緩 衝材中で生じる得る破過現象等)に着目して、

「どの時期に」・「影響の大きな現象が生じて」・ 「EBS 全体の挙動にどのような影響をもたらすか」 を網羅的に把握する観点から、その根拠を拡充し ながらシナリオを再構築した。

また、不確実性を考慮したガス移行挙動の解析 的評価および核種移行評価にかかる検討において は、これまでに確認できている連成現象メカニズ ムのモデル化と高度化を達成した。具体的には、 高度化したモデルを用い、再構築したシナリオに 基づくガス移行解析と連成挙動評価、並びにガス 移行連成挙動を考慮した核種移行解析によって人 エバリアから押し出される汚染水の排水量と核種 移行率等を評価することで、人工バリアの成立性 (核種の閉じ込め性能)が担保される条件(ガス

発生量の許容幅等)を見出した。

人工バリアシステムのガス移行連成挙動の評価 に係る知見の拡充においては、前フェーズで解明 できなかったガス移行連成現象メカニズム(素過 程)のうち、その一部解明を達成した。具体的に は、飽和した圧縮ベントナイトが破過に至るまで の過渡期(気液二相流過程)のガス移行メカニズ ム(ガス浸入圧および水相有効浸透率の経時変化 等)、並びに人工バリア材料界面(ベントナイト 系およびセメント系材料)のガス破過メカニズム (破過圧、ガス相有効浸透率の経時変化等)の詳 細を明らかにし、その一部をモデル化に反映する ことができた。

今後、セーフティケースの構築に必要な「閉鎖 後長期の安定性の評価」のうち、シナリオ構築 (地層処分システムの状態設定のための現象モデ ルの高度化)に資する「放射性廃棄物由来の発生 ガスに関する現象モデルの妥当性検討」に対して 本技術開発の成果(ガス移行連成挙動の現象モデ ル)を更に高度化・検証しながら反映していくこ とが課題となる。検証した現象モデルによるガス 影響に係る施設(人工バリア)の成立性評価結果 (提示された施設成立条件)は、ガス対策を考慮 した処分施設設計等への反映・貢献が期待できる。

- 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) 地層処分基盤研究開発調整会議、地層処分基盤研究に 関する全体計画【研究開発マップ】(平成25年度~平 成29年度)、2014
- 3) 原子力発電環境整備機構、地層処分を行う低レベル放 射性廃棄物(TRU 廃棄物)について、2008
- 4)公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成24年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分 技術 人工バリア長期性能評価技術開発 平成19年度~ 24年度取りまとめ報告書、2013
- 5) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 25 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処 理・処分技術高度化開発 報告書(第5分冊)-ガス移行 連成挙動評価手法の開発-、2014
- 6) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処 理・処分技術高度化開発 報告書(第5分冊)-ガス移行 連成挙動評価手法の開発-、2015
- 7) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処 理・処分技術高度化開発 報告書(第5分冊)-ガス移行 連成挙動評価手法の開発-、2016
- 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処 理・処分技術高度化開発 報告書(第5分冊)-ガス移行 連成挙動評価手法の開発-、2017
- 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 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関 する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開 発 報告書(第5分冊)-ガス移行連成挙動評価手法の開 発-、2018
- 10)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
- 11) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関 する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開 発 平成 25 年度~29 年度取りまとめ報告書、2018

5. 直接処分における廃棄体の固有性確認 技術の適用性検討

◇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29年度高レベル放射性廃棄物 等の地層処分に関する技術開発事業(直接処分等 代替処分技術開発)」では、代替処分技術のうち 使用済燃料の直接処分技術について、諸外国の事 例調査を通じて最新の技術開発動向や技術的課題 等を把握したうえで、我が国の諸条件を考慮した 場合の処分施設の設計・性能評価技術の調査や技 術開発を実施することとしている。

その一環として原子力機構より「直接処分にお ける廃棄体の固有性確認技術の適用性検討」を受 託し、直接処分における保障措置技術としての超 音波探傷法の適用性に関する検討を実施した。本 報告はその成果である。

◇平成 29 年度の成果

溶接試験体内部に人工的に設けた特徴(スリット)に対し、フェーズドアレイ法による超音波探 傷試験の測定および超音波シミュレーション解析 (3 次元 FEM コード、ConWAVE8)を行い、特徴の 位置や大きさを両者で比較することにより、解析 結果の妥当性を確認した。また、炭素鋼と銅の複 合処分容器の固有性確認手法としての超音波探傷 技術の適用性について超音波シミュレーション解 析を用いて評価した。

(1)溶接試験体を用いた超音波探傷試験
 平成27年度、平成28年度には超音波シミュレ



図-1 フェーズドアレイ法による溶接試験体の測定概要

ーション解析を利用して、炭素鋼処分容器の固有 性確認手法としての超音波探傷技術の適用性を 検討した^{1).2)}。平成29年度は、超音波シミュレー ション解析の妥当性を確認することを目的に、溶 接試験体を用いたフェーズドアレイ法の超音波 探傷試験と溶接試験体の切断により特徴の位置 及び形状を把握した上で解析モデルを作成した 超音波シミュレーション解析を行い、両者の結果 を比較した。

溶接試験体は長さ 420mm、幅 240mm、厚さ 200mm の炭素鋼製であり、長手方向の中央部に TIG 溶接を実施しし、溶接の途中で試験体表面か ら深さ 70mm の位置に放電加工により約 2、5、 8mm の特徴を設けた。超音波探傷試験による測定 概要を図-1 に示す。超音波探傷試験の終了後に は、試験体を切断して特徴の正確な位置や大きさ を実測し、解析モデルへ反映して超音波シミュレ ーション解析を行った。大きさ 8mm の特徴に対す るフェーズドアレイ法による測定結果を図-2に、 切断面を図-3 に、解析結果を図-4 に示す。





図-4 超音波シミュレーションによる解析結果

解析結果から得られた特徴の位置及び寸法は 測定結果の誤差範囲内に含まれていることから、 超音波シミュレーション解析は、フェーズドア レイ法による超音波探傷測定の結果を再現でき ており、解析結果が妥当であることを確認した。

(2) 複合処分容器の検認技術への超音波探傷技術の適用性検討

炭素鋼と銅の複合処分容器の固有性確認技術 として、超音波探傷技術の適用性を確認すること を目的に、複合処分容器の接合部を模擬した超音 波シミュレーション解析を実施した。

解析では、SKB (スウェーデン)で検討されて いる複合処分容器の形状³⁰を参考にして解析モデ ルを作成した。蓋部付近と溶接部近傍の構造を図 -5 に、フェーズドアレイ法の探触子を複合処分 容器の胴部に設置した接合部のモデルを図-6 に 示す。なお、解析では銅容器の蓋部と胴部の隙間 による回折波の影響を確認するため、幅 0.6mm の 空隙を設けた。純銅の縦波速度は 4,700m/s、横 波速度は 2,270m/s とし、弾性波の振幅の減衰は 小さいため解析では考慮しなかった。

接合部に大きさ 2mm と 5mm の特徴を設けた場合 の解析モデルと解析結果を図-7、図-8 に示す。 解析結果から、超音波探傷の適用性を探傷性(小 さな特徴の検出性、測定精度、再現性)および識 別性(得られる特徴の位置、大きさなどの情報) ¹⁾に着目して評価した。

また、隙間の先端部で発生する回折波の影響は 半径 5mm 程度で収まるため、隙間から 5mm 以上の 間隔をあけて特徴を配置すれば良いことも確認 した。



図-5 複合処分容器の蓋部付近の構造³⁾



図-6 複合処分容器の溶接部のモデル化



図-7 超音波シミュレーション解析の解析モデル



図-8 超音波シミュレーション解析結果(集束距離 70mm)

- 日本原子力研究開発機構、平成27年度地層処分技術調 査等事業直接処分等代替処分技術開発報告書、2016年
- 2)日本原子力研究開発機構、平成28年度地層処分技術調 查等事業直接処分等代替処分技術開発報告書、2017年
- 3) SKB (2006) : Reliability of nondestructive testing(NDT) of the copper canister seal weld, SKB Rapport R-06-08, 2006. 4
- 日本原子力研究開発機構、平成29年度高レベル放射性 廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業直接処分等 代替処分技術開発報告書、2018年

6. 先進的核燃料サイクル技術の地層処分 概念への影響検討

◇事業の概要

本事業では、放射性廃棄物の処分の観点から、 今後の原子力利用の様々な形態について調査を 実施している。平成28年度は、核燃料サイクル -地層処分関連図を更新するとともに、地層処分 の工学的成立性の点からは処分場の温度が重要 となることから、廃棄物とその前提条件の多様化 を念頭に、ガラス固化体と使用済燃料を対象とし て処分場の熱計算手法について検討した。

平成 29 年度は、継続的な原子力利用を前提と した燃料サイクル形態と廃棄物量を評価した CEA/フランスの 2012 年報告書に着目してその内 容を調査、分析すると共に、平成 26 年度からの 本事業の成果を日本原子力学会 2018 春の年会に て報告した。

◇平成 29 年度の成果

(1)技術報告書(CEA/フランス)に関する事例調査 放射性廃棄物等管理計画法(2006年)に基づき、 原子力・代替エネルギー庁(CEA)より公表された 全5巻の報告書の第2巻「長寿命放射性核種の 分離・変換」¹⁾を調査した。本書では、粘土層を 利用するフランスの地層処分の科学的、技術的 実現可能性に言及した上で、現在使われている 軽水炉を第3世代軽水炉でリプレース(2020年 ~)し、移行期を経て最終的には第4世代ナトリ ウム冷却型高速炉(2040 年~)に全て置き換える (2100 年~)シナリオの下で、プルトニウム(Pu) のリサイクルとマイナーアクチノイド(MA)の分 離・変換を進めた場合の放射性廃棄物の量と有 害度の低減が検討されている。そして、回収率 99.9%で MA を分離して Pu と共に高速炉サイクル 内に収納して燃焼することにより、ガス固化体 を対象とした 2150 年時点の地層処分場の面積は、 通常の処理・処分と比較して、同固化体埋設領 域で 1/10、処分場全体では 1/3 に削減可能であ るとしている。

本調査より、廃棄物管理の視点から関連する プロセスの条件を分野横断的に設定、評価、検 討することが重要であり、それには環境負荷低 減の効果を定量的に表示する指標、及び原子力 利用に関する時間軸を意識したシナリオを持つ ことが必要であると考えた。

(2)日本原子力学会2018春の年会での研究発表 平成26年度に開始した本事業の成果を一般セ ッション/核燃料と材料/放射性廃棄物処理のセ

ッションにおいて発表した。

「21世紀後半に向けた廃棄物管理の選択肢:Pu 利用推進と環境負荷低減型地層処分に関する研 究」

- (1)経緯、視点、研究展開
- (2)技術報告書(CEA/フランス)に関する事例調査
- (3)核燃料サイクル諸条件が使用済燃料とガラス 固化体に及ぼす影響
- (4)Cs/Sr 分離による高含有ガラス固化体処分の 廃棄体専有面積評価
- (5)U02 使用済燃料冷却期間長期化におけるMA 分離の効果
- (6)処分場負荷低減を目指したバックエンドシス テム研究開発への提言
- 1) Séparation-transmutation des éléments radioactifs á vie longue, CEA, Décembre 2012.

ジルカロイハルの HIP 処理によるヨウ 素固定化方法の検討

◇事業の概要

再処理施設の操業にともない発生する廃銀吸着 材は TRU 廃棄物の地層処分ではグループ1に分類 されている¹⁾。廃銀吸着材によって回収されるヨ ウ素 129(以下、I-129)は、半減期が 1570 万年 と長く、また、人工バリアや岩盤等への収着性が 低いことから、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。当センターでは、経済産 業省からの受託事業において、I-129 による被ば く線量の低減の観点からヨウ素固定化技術を開発 し、我が国の幅広い地質環境条件に柔軟に対応す ることのできる処分技術を提言することを目標と した研究開発を行っている^{2),3)}。しかし、現在のと ころ実用化が期待できる固化技術のマトリクスと しては、セラミックおよびガラスの2つに限られ ている。また、それぞれの固化体は処分環境に対 する適性も一定の範囲があることから、技術オプ ションの確保、さらには幅広い環境に適用できる 固化技術の開発が期待される。

一方、ハル・エンドピースは使用済燃料の再処 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(ハル)やス テンレス鋼製のエンドピースからなる廃棄物であ り、一軸圧縮処理することでコンパクト化し、ス テンレス製のキャニスタに封入されて処分される 予定である。TRU 廃棄物の地層処分ではグループ 2に分類されている¹⁰。当センターでは、経済産業 省からの受託事業において、ハル・エンドピース に含まれる炭素 14 のインベントリ評価、ならびに 放出挙動のモデル化及び評価を実施しているが、 とくに、腐食特性については、処分後の放射性核 種の放出源と考えられることから、処分環境にお けるジルカロイの腐食挙動の評価に関する研究開 発を実施している^{20.4}。

本研究では、グループ1の廃銀吸着材を安全に 処分するための代替技術の開発とともに、グルー プ2(ハル・エンドピース)と材料特性を共有化 することで、グループ間の処理方法および安全評 価技術開発の合理化も期待できることから、ジル カロイハルの HIP 処理によるヨウ素固定化方法の 開発を目的として実施する。そのため、ジルカロ イハルをマトリクスとする固化体の開発を行い、 実用化への見込みを得ることで、将来の研究開発 継続に反映させる予定である。なお、使用済みの 燃料被覆管については、資源の有効利用の観点か ら、従来より再利用することが検討されているこ とから、金属マトリクスとしてハル(ジルカロイ) を活用することで、資源・廃棄物有効活用も図れ る効果も期待できる。

◇平成 29 年度の成果

ジルカロイとヨウ素を吸着したフィルタ(廃銀 吸着材)とを熱間等方圧加熱処理(HIP)すること によって、ヨウ素の放出を抑制する固化体を製造 することを目的に、ジルカロイの HIP 処理条件に ついて検討した。それにより、ジルカロイハルを マトリクス母材とし、廃銀吸着材を熱間等方圧加 圧法(HIP)により閉じ込める固化技術について、 HIP 処理の基礎的な処理条件を見出すことができ た。今後は、ジルカロイと廃銀吸着材の基材であ るアルミナや HIP のカプセル材料との相互作用な どに着目し、合理的に HIP 処理できる条件を整備 する。また、作製した固化体の均質性や空隙構造 など、基礎的な物性を把握する必要がある。

- 1) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物 処分技術検討書-第2次TRU 廃棄物処分研究開発取り まとめ-、2005
- 2) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 24 年度 地層処分技術調査等事業ヨウ素・炭素処 理・処分技術高度化開発 平成 19 年度~24 年度取りま とめ報告書、2013
- 3) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関 する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開 発 報告書(第1分冊)-ヨウ素 129 対策技術の信頼性 向上-、2018
- 4) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関 する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開 発 報告書(第2分冊)-炭素14長期放出挙動評価-、 2018

||. 放射性廃棄物の地層処分に関する調査研究

8. その他の地層処分に関する調査研究

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

(1)地層処分対象廃棄物の核種インベントリに関 する検討

地層処分対象廃棄物の処分場への受け入れ等 のためには、核種インベントリとして放射性核種 の組成やそれらの放射能濃度に関するデータが 求められるものと考えられ、今後、関連するデー タの整備を進めていく必要がある。

本検討においては、燃料の構成材料等について 核種インベントリに関連した調査を実施すると ともに、調査結果を反映しながら、今後のデータ 取得計画を検討した。

(This page(p86) is intentionally kept blank.)

Ⅲ. 放射性廃棄物全般に共通する調査研究等

1. 放射性廃棄物海外総合情報調查

◇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 報等に基づいてウェブサイト、技術情報冊子等を 通じて外部に向けて発信し、関係者間での情報共 有と知識普及、幅広い国民各層への理解促進を図 った。

なお、本事業は、経済産業省資源エネルギー庁 の委託事業「平成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)(国庫 債務負担行為に係るもの)」により実施したもので ある。

◇平成 29 年度の成果 ¹⁾

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

欧米諸国の高レベル放射性廃棄物等の情報に ついては、フィンランド、スウェーデン、フラン ス、スイス、英国、米国、カナダ、ドイツ、ベル ギー、スペイン等を中心に、各国の処分実施主体 等からの直接的な情報収集も活用しつつ、法制度 の整備状況、サイト選定のプロセス、選定基準、 許認可申請・発給の状況、処分技術情報、情報提 供・広報、社会的意思決定方策、地域振興方策、 資金確保関係、関係する訴訟等の情報を収集した。 また、アジア諸国に関しては、韓国、中国、台湾 における放射性廃棄物処分の関連情報として、法 制度の整備状況とともに、処分概念、サイト選定 等の技術情報、資金確保関連、地域振興方策等の 情報を収集した。 以上の調査に加えて、その他の個別情報の調査 として、海外主要国における放射性廃棄物処分の 関連法規制の詳細や、各国関係機関が発行する主 要報告書等の調査を行った。

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

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

	BWMG 技術的	छन्छरुन्द्र ए।	トピックを通んでくださ	As.	• 10 • ×-944
	相同意 登高州田同志 祝聞 王珍清晰	計算情報調整 私分銀橋と 地域 研究開発 主要文書 周辺	组分 印刷·风利用: 技術 和主要的	(社会的意思) 法如4000 期外法制度	漏外の 性電評価 状況・睡時 評価情報
10	データベースは、高		an and a start		
R,	その他の高レベルを	RWMC 技術情報データベース			
		ログイン開報:	sahara@rwmc.or	jp (rwmc)	
179 8.	補助における使計り 主要文献の翻訳等力	登録文書情報表示画面			
	Ar-2018Elt	東る 文書傳報を修正する	分博先を終正する 非公	間にする 作業フォルジを変更する	FileTa
	SUL-YOMENCIA		2000	日は日間されています。	
1-	各国情報調查-国際	作業フォルダバス名:	ftp://ftp2.rwmc.or.jp/	co00/Reports/se-SKB/EIA2011	
	(NAS) (28173-	作業フォルダ識別名:	Reports.se-SKB.EIA	2011	
5.	各国情報調查一進計	データ 名:	MKB201103		
	制、黄笠管埕、壤		(日本語)	環境影響報告書:使用清燃料の中間機	1篇、别入及び最終机分
3.	各国情報調查一研究 安全評価、回収可能	文書タイトル:	(英語褒典)	Environmental Impact Stateme and final	nt. Interim storage, encapsulation
4.	処分段階と主要文部 (情報))	1	(スウェーデン語原件)	Miljökonsekvensbeskrivning. M slutförvaring	ellanlagring, inkapsling och
2	NOTIFIC TO A DESCRIPTION OF THE OWNER	会行年月日:	20110300/		
2.	和空間交生分別以上主文例	發行機關·国:	(補監等) SKB / (图)	スウェーデン	
6. 7.	評価,規制機関報告 社会的意思決定事(95	2-各国信報調査-進歩幅 4-処分務階と主要文書-	研4-08.スウェーデン-5.単純評価 07.スウェーデン-主要報告書	
	7月社会的意思決定(77-1128:	MKB201103.ja.doc.	
8.	南外法制度(海外)	THE CONTRACT (DIVIS)	サイズ:	39,983,610 bytes	
	等))	Statement (market)	ファイル目時:	2012/04/05 15:53:18	
9,	海外の状況・短緯		dott如日时:	2012-04-06 15:54:41.0	
	独自に取りまとめた		ファイル名:	MKB201103.en.pdf	
10.	性能評価詳細情報	The And Page (Manimum)	サイズ:	38,160,753 bytes	
	文・文献)	27747010W (908/24) :	ファイル目標:	2011/12/02 21:27:20	
1-12	っています.		db全錄日時:	2012-03-27 17:18:58.0	
C.G.S. C. G. 3 1			ファイル名:	MKB201103.sv.odf	
_			サイズ:	30,719,259 bytes	
		ファイル(用靴(スワエーデン語原則)	77404801:	2011/03/17 0:34:42	
			d59932000 :	2012-03-27 17:18:58.0	
		保護企業	rwmc		

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

報を充実させた(図-2)。

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

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

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102件掲載した(記事タイトルの 一覧は、資料 V-4 を参照)。



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

技術情報冊子の整備として、①『諸外国におけ る高レベル放射性廃棄物の処分について(2018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(2018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 30 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。2018 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 29 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 30 年 3 月発行)の改訂 では、欧米 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、カナダ、米国) における低中レベル放射性廃棄物を中心とした 放射性廃棄物の管理概要や処分関連施設・サイト の概要に関する情報を最新化した。また、各国に おける放射性廃棄物の区分、放射性廃棄物処分の 方針、処分の実施体制の項目を新たに設けて解説 を加え、記載内容を充実させた。

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



図-3 平成 29 年度に整備した技術情報冊子

 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、 平成27年度 放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性 廃棄物海外総合情報調査報告書(平成29年度分)、2018

2. 放射性廃棄物重要基礎技術研究調查

◇事業の概要

我が国では、原子力発電の利用に伴って既に放 射性廃棄物が発生しており、その処理処分対策を 着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物 の地層処分や長半減期低発熱放射性廃棄物(TRU 廃棄物)を初めとする低レベル放射性廃棄物の処 理処分等に係る政策立案や研究開発において、国 や関係機関、処分実施主体等の役割分担のもとで 進めていくことが重要である。

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

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の 委託事業「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)」により実施したもの である。

◇平成 29 年度の成果 ¹⁾

(1)研究開発に関する進捗管理・取りまとめ

平成26年度に公募により選定した6件の研究 テーマの進捗管理等のための検討委員会を設置 し、平成29年度の研究開発内容・進捗状況に関 するチェックアンドレビューを行った。検討委員 会によるチェックアンドレビューは、年度内に中 間(9月)及び最終(2月)の2回実施した。ま た、研究実施者との間で電子メールや面談による 意見交換等を行うことによる進捗管理も実施し た。さらに、平成29年度は本事業の最終年度に あたることから、各研究テーマについて4年間の 研究成果の概要を総括資料として取りまとめた。

各研究テーマの概要と平成 29 年度の成果概要 を以下に示す。

1)断層周辺の地下水流動特性および物質移行特 性に関する包括的研究(研究者:京都大学 柏 谷公希)

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

平成 29 年度は、前年度に引き続き、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採取した地下水の溶存 成分や同位体組成を分析した。また、主立坑断層 周辺の地下水流動及び物質移行状態を推定する ため、これまでに得られているデータを用いて断 層周辺の水理、地化学モデルを構築し、地下水流 動解析・物質移行解析、及びスメクタイトによる イオン交換反応を考慮した反応輸送解析を実施 した。

地下水採取試料の分析結果、断層の北側と南側 で水質や同位体組成の違いが認められ、これら地 球化学的特性の違いから、断層が地下水流動や物 質移行の境界として機能していることが確認さ れた。

断層周辺モデルを用いて地下水流動解析を実施した結果、立坑坑道内の地下水湧出点に向かっ ている地下水流動が認められた。また、断層から の距離に応じた Double porosity モデルを用いて 塩化物イオンの物質移行解析を行った結果、断層 の北側と南側で濃度の空間分布が大きく異なっ ていること、地下水の流動と深部地下水の上昇が 認められ、既存研究との整合性があった。イオン 交換を考慮したモデルでの反応輸送解析では、イ オン交換を考慮しないモデルと比較して、断層周 辺でナトリウム、カルシウムイオンの大きな濃度 変化が認められた(図-1)。これらの結果から、 地下水流動に伴う水一岩石反応を考慮した移行 解析が可能であることを確認できた。



図-1 断層周辺モデルを用いた物質移行解析による 塩化物イオン濃度の時空間変化推定

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

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

平成 29 年度は、粘土がき裂を充填する過程で の岩石の透水係数測定を室内試験、及び JAEA 瑞 浪超深地層研究所の深度 300mの坑道での原位置 試験を行った。

室内試験では、瑞浪超深地層研究所から得られ た巨視き裂を含む黒雲母花崗岩、及び同研究所か ら採取した粘土を用いて、粘土懸濁液を岩石供試 体に流しながら透水試験を行った結果、差圧が時 間の経過とともに上昇した。試験終了後に供試体 をデジタルマイクロスコープにて観察したとこ ろ、き裂内部に粘土が充填していることが確認で きた。このことから、時間の経過とともに、き裂 開口幅が低下し、岩石の透水性低下につながった ことが示唆された。

原位置試験では、坑道側壁に掘削した、き裂が 認められるボーリング孔を試験孔として用い、定 流量ポンプで粘土懸濁液を注入し、その際の注入 圧力の経時変化を測定した。得られた注入圧デー タを用いて透水係数を評価した結果、試験回数が 増加するにつれ透水係数が低下した。試験孔をデ ジタルマイクロスコープにて観察したところ、巨 視き裂に粘土が充填していることが確認された ため、粘土がき裂を充填することにより岩盤の透 水係数が低下したことが示唆された。

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 連の作業手順を整備し、処分施設の長期的な力学 挙動の予測システムの開発を目標とする。

平成 29 年度は、廃棄体から発せられる温度の 影響や再冠水に伴う飽和度変化を考慮した一軸 圧縮試験、及び温度変化を考慮した膨潤量試験を 行った。また、熱の影響を評価可能となるような 連成解析コードにより膨潤量試験の再現解析、及 び処分施設を対象とした再冠水解析を行った。

様々な温度・飽和度条件にてベントナイト円柱 供試体の一軸圧縮試験を行った結果、温度変化に ついては、温度が上昇するにつれて圧縮強度が一 様に減少した。一方で、飽和度変化については、 30~90%の間で変化させたところ飽和度 40~ 50%にて圧縮強度がピークとなった。温度上昇に よる圧縮強度の低下は、間隙中の水・空気膨張に よるマイクロクラックの発生や、乾燥収縮による クラックの発生のためと考えられた。飽和度に関 して 40~50%の飽和度において強度が最大とな った結果は、この条件でサクション応力が最大と なることによるものと考えられた。

膨潤量試験に対する再現解析については、熱を 考慮したコードにて解析をした結果、温度上昇に 伴い膨潤量が大きくなるという実験結果を再現 できた。また、処分施設を対象とし、坑道周囲全 面から地下水を浸入させて再冠水解析を行った 結果、再冠水期間を100年とした場合は、再冠水 が完了する前に約60年で廃棄体周囲の緩衝材が 全飽和した。この結果から、冠水が緩やかに進行 した場合は、緩衝材の飽和が急激に進まず、内部 への湿潤が進むことによって冠水完了前に緩衝 材が飽和する可能性があると考えられる。また、 廃棄体周辺の緩衝材は熱の影響により飽和の進 行が遅くなるという結果が示された。

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、処分施設内や近傍において、TRU 廃棄物に含まれる硝酸塩がアクチノイドの移行 挙動に与える影響を定量的に評価するため、高 濃度硝酸ナトリウム溶液中でのアクチノイドの 錯生成、酸化還元、コロイド挙動について検討 するとともに、反応に関わる熱力学データを取 得することを目的とする。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 29 年度は、錯生成については、高濃度硝酸イオン環境での炭酸イオン共存下で4価プルトニウム(Pu(IV))の溶解度を測定した。また、これまでに得られた溶解度データを用いて、炭酸イオン共存下における Pu(IV)溶解度の熱力学データ解析を行った。昨年度のモデルからの改良として、二元錯体 Pu(OH)2(CO3)3⁴の化学種を仮定し、高イオン強度特異イオン相互作用(SIT)モデルを用いて解析した結果、溶解度試験の結果を概ね再現できた(図-2)。



図-2 炭酸イオン (0.16M) 共存下における Pu 溶解度 (イオン強度 0.5M、2.0M)

高イオン強度溶液下でのコロイド挙動に関し ては、硝酸ナトリウム水溶液においてジルコニウ ム(Zr)酸化物のゼータ電位で測定し、解析により 酸化物表面のプロトン解離反応定数を得た。得ら れた酸化物表面の酸解離反応定数と加水分解種 の平均電荷を用いることにより Zr 水酸化物コロ イドのゼータ電位の解析を行った結果、計算値の ゼータ電位は実験値を概ね再現できた。

硝酸イオンによる 4 価ウラン酸化反応につい ては、硝酸イオンまたは亜硝酸イオンとウラン水 酸化物懸濁液を接触させて、反応後の亜硝酸イオ ンとウラン濃度を定量した。実験の結果、硝酸イ オンの系と比較して亜硝酸イオンを添加した系 ではウランが酸化して溶解度が高くなったこと が示唆された。

上記結果に基づいてアクチノイド溶解度に対

する硝酸塩影響を評価した結果、硝酸イオン濃度 が高い初期では4価アクチノイドの溶解度が移 行挙動を支配し、水酸化物コロイドは生成したと しても凝集する可能性が高いこと、一方で、時間 の経過とともに硝酸塩濃度が低下するにつれて、 水酸化物コロイドが分散して移行挙動に影響が 表れることが示唆された。

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:東北大学 千田太詩) 本研究は、雲母が有する異方性が核種収着挙動 に与える影響について基礎的知見を取得し、取 得データをもとにした拡散・収着を考慮した二 次元数値解析を実施するとともに、雲母薄片へ の核種収着に重要となる因子を整理し,天然バ リア中の核種移行評価(地層処分システムの性能 評価)への反映手法を提示することを目的として いる。

平成 29 年度は、黒雲母への収着挙動に関して、 様々な塩化ナトリウム (NaCl) 濃度にて黒雲母薄 片へのセシウム (Cs)、ストロンチウム (Sr)、ユ ウロピウム (Eu) 収着試験を行った。Cs や Sr は NaCl 濃度が上昇するにつれて収着量が減少した 一方で、Eu は収着量が増加した。飛行時間型二 次イオン質量分析 (SIMS) にて収着試験後の黒雲 母薄片を分析したところ、Eu が加水分解する pH8 の条件においても Eu の薄片内部への浸入が顕著 であった。

また、収着実験の結果を基に、数学モデルによる Eu の黒雲母薄片内部への見かけの拡散係数を 解析したところ、見かけの拡散係数は 10⁻¹³~10⁻¹² m²/s と見積もられた。この値は母岩の実効拡散係 数と同程度であった。このことから、従来花崗岩 のマトリクスによる核種収着は局所平衡が仮定 されていたが、黒雲母薄片内への拡散過程を考慮 したモデルによっても、従来評価と同様の核種収 着が期待できることが示唆された。

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

本研究は、処分事業に対する国民・社会の理解 促進と信頼性向上をはかる上での前提条件とな るアジェンダ・セッティング(政策課題設定)の 研究を通じて、処分事業の社会的側面の理解を 深めることを最終目標とする。そのために、 (i)高レベル放射性廃棄物(HLW)処分のため のアジェンダが設定されるための要因を抽出し、

(ii)我が国における高レベル放射性廃棄物処分 のために有効なアジェンダ・セッティングのあ り方を提示することを目的とする。

平成29年度は、「科学的特性マップ」の公表が アジェンダ・セッティングならびに個人の態度形 成に及ぼす影響について社会調査を行った。また、 これまで実施してきた HLW 処分に対する人々の 態度に係る社会心理学的調査を継続して実施・分 析した。

「科学的特性マップ」公表後に日本全国を対象 としてオンラインによる質問調査を行った結果、 文献調査・処分施設立地の受容性が低下する結果 となった。また、受容性は「好ましい地域」と自 宅までの距離に関連するわけではなく、自宅が 「輸送面でも好ましい地域」に入っているか否か に大きく依存していることが示唆された。これら の結果から、マップの公表は、自宅が「輸送面で も好ましい地域」であるローカルなレベルでは、 精緻化見込みモデルⁱにおける「中心ルート」に よる態度形成を高めることに貢献する一方で、そ の他の多くは「周辺ルート」的情報処理にとどま ってしまう可能性が示唆された。

また、これまでと同様に社会心理学的なアンケ ート調査を実施し、文献調査を進める上での決定 方法選好についても追加調査を行った結果、住民 投票によって自治体が自主的に文献調査に応募 する方式、または市区村長の受入れのようなロー カルレベルでの意思決定が、総理大臣・経済産業 省・環境省・国民投票といった外部による意思決 定で決められるよりも支持されることが示唆さ れた。また、外部による意思決定においても、1 つの自治体を決め打ちするより 10 の候補自治体 を選ぶ方法が支持された。これらの結果から、ロ ーカルの民意をくみ取るプロセスや、事業に直接 関与しない国民に対する決定責任を軽減するよ うな配慮が重要であるとの示唆が得られた。

また、4年間で実施してきた研究成果をとりま とめて、アジェンダ・セッティングと個人の態度 形成との関係を包括的に整理し、政策提言につな げるための検討を行った。アジェンダ・セッティ ングと個人の態度形成との関係を包括的に整理 した結果、国家レベルのアジェンダ・セッティン グと個人の態度形成過程の関係を類型化するこ とができた。各類型に含まれる事例などを検討し て、(A)国民が受け入れを検討する自治体レベル に具体的な検討を安心して委ねられるアジェン ダ、(B)受け入れを検討する自治体レベルで、合 理的判断に基づく政治的意思決定が実現するよ うなアジェンダの両方につながるような、アジェ ンダ・セッティングを設計することの有用性が示 唆された。このようなアジェンダ・セッティング につながるフレーミングとして、「地方創生」が 考えられた。また、沈黙のらせん理論"に基づく 検討から、そもそも処分制度の公正性を高めるこ とが重要であることが示された。

上記の研究の実施に加えて、本事業では、研究 管理の進捗・取りまとめに関連して、地層処分基 盤研究開発調整会議が策定した「地層処分基盤研 究開発に関する全体計画(平成25年度~平成29 年度)」(以下、全体計画という) に関して、全体 計画に示されている研究開発状況の中間評価を 行うこととなっていた。しかし、平成28年度に 行われた原子力委員会放射性廃棄物専門部会に よる、最終処分関係行政機関等の活動状況に関す る評価結果に基づき、今後は地層処分基盤研究開 発調整会議を拡充し、実施主体・基盤研究機関一 体で「真の全体計画」を策定・実施していくこと となった。このため、平成29年5月に新たに地 層処分研究開発調整会議が設置され、平成 30 年 からの 5 ヵ年の地層処分研究開発に関して議論 が行われた。本事業ではその一環として会議の運 営にかかわる支援活動を実施した。また、上記の 議論に資する海外の研究開発に関する文献の翻 訳を行った

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29年度分)、2018

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

ii 自分の意見が少数派であることを認識することにより、
 意見が出しにくくなり、その循環過程によって公的な表明や沈黙が螺旋状に増大し世論の収斂が起こること

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埋設に係る 規制基準等の整備に資する諸外国の動向を把握す ることを目的とし、諸外国における規制基準等の 最新情報について調査・整理等を行った。

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 29 年度の成果

(1)諸外国における規制基準等に係る最新情報の 調査・整理

表-1 の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埋設等についての最新知 見等を調査し、整理した。

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)

具体的には、平成28年度及び平成29年度に公 表された、埋設事業の概要、規制に関する法体系 と規制制度、規制機関の概要、事業者から提出さ れた各申請に対する規制機関による審査につい て調査、整理した。また、各法令・基準等の法体 系における位置、規制機関による各種申請の審査 方法を定めた内規、審査官の権限及び規制支援機 関の関与についても調査、整理した。さらに、以 下に示す規制関連情報が反映された文書等とそ れらに対する事業者の取組状況について整理を 行った。

- ①立地選定段階における規制側の関与(法的根拠の有無及び内容、法的根拠が無い場合の関与のよりどころ等)
- ②評価期間の考え方(安全機能及び各バリア要 素との関係も含む)
- ③廃棄物埋設に係る放射線防護の最適化

(ALARA 及び BAT の考え方等)

- ④人間活動の影響(人間侵入及び人為事象シナ リオ)
- ⑤長期に係る線量基準とリスク基準の考え方 及び代替指標の有無とその解釈・信頼性・ 根拠
- ⑥安全評価における不確実性の取扱い
- ⑦セーフティケースの内容とそれに対する規 制側のレビュー
- ⑧社会・ステークホルダーとのコミュニケー ション
- ⑨定期的な安全レビュー(PSR)の結果の反映 方針
- ⑩可逆性と回収可能性
- ①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)
- ②埋設施設の性能確認(モニタリング・サーベ イランスの在り方等)
- ③受動的な制度的管理(文書・マーカ等の記録の管理等)

④その他、特記すべき動向



表-2 法体系の調査結果の整理例 (米国の高レベル放射性廃棄物処分に係る法体系)

(2) 埋設施設の性能確認に関する規制基準の調査

埋設施設の性能確認に関する規制制度が整備 されている、フィンランド、米国、フランス、英 国の4か国を調査対象国として選択し、以下①~ ③の調査を行った。

1規制関連文書の整理

我が国における埋設施設の性能確認及び放射 性物質の異常な漏えいの監視等に関する規制要 求を整理した上で、調査対象国における規制要求 を我が国と対比させて、整理を行った。具体的に は、調査対象国における埋設施設の性能確認及び 放射性物質の異常な漏えいの監視に際して、どの ような情報(埋設施設及び周辺の放射能濃度、人 エバリアの健全性、天然バリアの健全性、地下水 の流動状況等)の把握がどのような規制要件(確 認項目、確認地点の選定、監視の期間等)に基づ き、どの段階(事業許可申請、閉鎖措置申請、廃 止措置申請等)で要求されているかを整理した。 また、事業許可申請前におけるサイトの特性調査 の在り方が調査対象国において、どのように規定 されているかを調査し、埋設施設の性能確認との 関係性について整理した。整理した調査結果の例 を表-3に示す。

②対象国際機関の基準の整理

IAEA の特定安全要件 SSR-5「放射性廃棄物の処 分」、特定安全指針 SSG-23「放射性廃棄物処分の セーフティケースと安全評価」及び特定安全指針 SSG-31「放射性廃棄物処分施設のモニタリング及 びサーベイランス」における埋設施設の性能確認 及び放射性物質の異常な漏えいの監視等に関す る規定内容を整理し、これらの要件と調査対象国 の規制関連文書等における基準等との関係性に ついて整理した。

③各国の審査に関する調査

調査対象国において、埋設施設の性能確認及び 放射性物質の異常な漏えいの監視等に関する規 制要求への事業者の対応を、規制者がどのように 確認しようとしているか(判断指標、判断手法等) について調査した。また、事業が先行している国 に関しては、具体的な審査内容についても調査を 行った。

(3)海外現地調查

(1)及び(2)の調査に関連して、以下の国、機関 を訪問し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、埋設 施設の性能確認に関する情報について、聞き取り 調査を行った。

①フランス

- ・原子力安全機関 (ASN)
- ・放射線防護・原子力安全研究所 (IRSN)
- ・放射性廃棄物管理機関 (ANDRA)
- ②英国
 - ・環境規制機関 (EA)



表-3 埋設施設の性能確認に関する規制基準の調査結果の整理例

4.諸外国における廃棄体等の放射能濃度 評価に関する調査

◇事業の概要

本調査では、今後の低レベル放射性廃棄物埋設 センターでの埋設対象となる廃棄体及びコンクリ ート等廃棄物(以下、廃棄体等)の廃棄物確認の 手法の整備に資するため、諸外国の廃炉等で発生 した廃棄体等の放射能濃度評価方法について、放 射化と表面汚染の評価方法に着目して調査し、整 理した。本調査では、イギリス及びドイツの埋設 施設に埋設される廃棄体等を対象として調査を実 施した。

◇平成 29 年度の成果

(1)イギリス

イギリスでは、初期に導入されたすべてのマグ ノックス炉(いわゆるガス冷却炉(GCR))は閉鎖 され、ほとんどが長期安全貯蔵もしくはその準備 中の段階である。そのため、将来の廃炉に向けた 準備(廃止措置計画、評価及び技術の開発)とし て、マグノックス炉の解体により発生する放射性 廃棄物ⁱの放射線学的な特性評価が行われている。 本調査では、このマグノックス炉の解体から発生 する放射性廃棄物の放射線学的な特性評価事例 について、調査・整理を行った。

<調査事例①>

イギリスでは、世界最初の商業用原子力発電所 であるコールダーホール原子力発電所(マグノッ クス炉4基、1956年操業~2003年閉鎖)において、 16体の熱交換器(=蒸気発生器)の取り外しの準 備として、熱交換器周辺の2,500tの配管及び鉄製 の構造物を取り外す作業が行われた。この作業の 際に、セラフィールド社(現コールダーホール原 子力発電所を管理・運営している会社)は、廃止 措置と廃棄物ルートの最適化を図るために、放射 化及び表面汚染を分類して、放射能濃度評価を行 った。表面汚染については、原子炉冷却材である 二酸化炭素との接触の有無、放射化については原 子炉からの距離と中性子束の影響の可能性を考慮 し、汚染形態の分類が行われていた。また、これ らの汚染形態に応じて放射能濃度評価方法が選択 されていた。表-1 に本事例における汚染形態の分 類及び対応する放射能濃度評価方法を示す。

表-1 核種、汚染形態及び放射能濃度評価方法の分類の関係

汚染形態	対象廃棄物 (例)	核種	放射能濃度評価方法
放射化	圧力容器	Ni-63	放射化計算及び試料分析
	生体遮へい	Ca-41	放射化計算及び試料分析
	グラファイト (減速材)	C-14	放射化計算及び試料分析
表面汚染	蒸気系配管	H-3, C-14, Fe-55, Ni-63	SF法
放射化及び表面汚染	上部配管	Co ⁻⁶⁰ , Cs ⁻ 137, Mn ⁻⁵⁴ , H ⁻³ , C ⁻ 14, Fe ⁻⁵⁵ , Ni ⁻⁶³	SF 法

<調査事例②>

イギリスでは、1970年代当時にマグノックス炉 の所有者であった中央発電委員会(CEGB)が運転 終了後に発生する廃棄物の放射能インベントリを 推定するために、既存の文献値を用いた放射化計 算と実機から採取した試料から得た親核種濃度に 基づく放射化計算を実施することにより、放射化 計算に用いるデータの検証を行っている。この検 証作業では、圧力容器中のNi-63、生体遮へいコ ンクリート中のCa-41及びグラファイト(減速材) 中のC-14を各材質中の支配的な核種として取り 扱っている。(表-2参照)

表-2 主要核種の生成機構と親元素設定方法の分類

評価対象核種	核種の生成機構	親元素設定方法の分類
C-14	N-14(n,p)C-14 O-17(n,a)C-14	文献値(利用可能なデータ)+試料の分析
Ca-41	Ca-40(n,s)Ca-41	文献値(利用可能なデータ)+試料の分析
Ni-63	Ni-62(n, y)Ni-63	文献値(利用可能なデータ)+試料の分析

親核種濃度の設定に関して、文献値は、原子炉 材料の構造健全性の検証目的で取得された限られ た数のサンプルと冶金学の経験から得られた最良 の判断に基づくデータであった。しかしながら、 用いたサンプルは、複雑な幾何学形状を考慮する 必要がある放射化計算の目的には、必ずしも理想 的なものではなかったと評価している。

放射化計算の検証を目的として、実機から試料 を採取し、放射化学的分離によって親元素濃度の 分析を行った結果、先の放射化計算で用いた文献 値は不正確であり、その適用は適切ではないとい う結論を得ている。

解体及び処分の選択肢を検討する場合、それに 必要とされる詳細度で放射能インベントリを得る には、理論的な評価と実験的な評価を組み合わせ ることが唯一の手段となる。放射化計算には、「複 雑な形状の中性子束」や「特に微量元素の材料組 成」に伴う不確実性があるため、放射化計算を唯 一の方法として使用することはできない。同様に、 運転中の原子炉の場合、代表的な位置から取得で きるサンプル数が限られるため、実験的測定だけ でも十分ではないとしている。

(2)ドイツ

ドイツの原子力発電所の廃止措置では、即時解 体方式が採用されている。本調査では、廃止措置 中の原子力発電所を含む複数の原子力発電所を 所有している、プロイセン・エレクトラ(PEL) 社への訪問調査などにより放射能濃度評価方法 等に関する情報を入手し、情報の整理を行った。

PEL 社は 2005 年からシュターデ原子力発電所 (PWR、運転期間 1972~2003 年)の廃止措置を進 めている。廃止措置計画立案では、その当初から、 発生する放射性廃棄物の処分先を考慮しており、 クリアランスまたは非発熱性放射性廃棄物(低中 レベル放射性廃棄物に相当)に分類している。後 者はコンラッド処分場(地層処分場)で処分する 計画である。その受け入れ基準と発生者別の処分 容量の割り当ては定まっているが、操業開始は 2022 年の見込みであり、処分する廃棄体はサイ ト内の中間貯蔵施設で保管している。

廃止措置工程は大きく 4 フェーズに分けられ ており、第3フェーズで原子炉圧力容器 (RPV) と生体遮へいコンクリートの解体撤去が行われ た。コンラッド処分場で受け入れ可能な廃棄物容 器に収納し、重量や放射能濃度の基準を満足する 廃棄体を製作するには、大型廃棄物の放射能分布 を正確に把握し、切断方法を検討する必要がある。 シュターデ原子力発電所の解体から発生する放 射性廃棄物については、廃止措置計画の初期立案 段階で行う放射化計算のみでなく、第3フェーズ の詳細工程の立案段階において、実機からサンプ ルを採取・分析し、親元素濃度を得たうえで再度 放射化計算及びスケーリングファクタを用いた 難測定核種の濃度評価を行うことにより、原子炉 容器や生体遮へいコンクリートの切断部位や方 向を検討している。しかしながら、特に放射能レ ベルの高い部分や狭隘部から、統計手法を適用し うる十分な数のサンプルを採取するのは困難で

あるため、微量元素の含有量に対する放射化計算 の感度解析や、汚染/放射化部位の線量率測定に 基づく推定を組み合わせることにより、より信頼 性の高い放射能インベントリの評価に努めてい る。

廃止措置を進めていく過程で、当初は想定して いなかった汚染部位が発見されることもある。シ ュターデ発電所の場合、原子炉圧力容器の撤去後、 その下方のコンクリート構造物に軽微な汚染が あることが発見された。この部位は、当初の計画 では、原子炉建屋のクリアランス/解体後に非放 射性廃棄物として解体撤去する予定であったが、 建屋を維持したまま内部コンクリート構造物を 解体するように工程を組み替える必要性が生じ たため、工期に遅れが生じることになった。



図-1 シュターデ原子力発電所

i イギリスにおいて、廃炉により発生する放射性廃棄物 は、低レベル放射性廃棄物と中レベル放射性廃棄物に分 類される。瓦礫や土壌などを含む放射能レベルの低い低 レベル放射性廃棄物は浅地中処分、炉内構造物などを含 む比較的放射能レベルの高い中レベル放射性廃棄物に関 しては、地層処分する予定である。

諸外国における放射性廃棄物埋設施設の 性能確認に関する調査

◇事業の概要

本事業では、諸外国における埋設施設の性能等 の確認に関する規制要求に対する、事業者等の推 進側の対応状況を整理し、我が国における規制要 求に関する事項の検討に資することを目的として、 以下の項目を実施した。

・国際共同研究プロジェクトの調査

・埋設施設の性能確認に関する技術的知見の整理

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 29 年度の成果

(1)国際共同研究プロジェクトの調査

ユーラトム (欧州原子力共同体)の国際共同研 究プロジェクトである MoDeRn プロジェクトⁱ及 び、MoDeRn の後継である Modern2020 プロジェク ト (以下、MoDeRn 等) について、以下の事項を 調査した。

- ・参加国
- ·参加組織
- 各組織の属性(規制、規制支援機関、推進等)
- ・MoDeRn 等のプロジェクト全体の概要
- ・MoDeRn 等のプロジェクト全体の実施目標
- ・WP(ワークパッケージ)ごとの概要、目的
- ・WP 同士の相関関係
- ・WPごとの成果の概要

<MoDeRn プロジェクトの概要>

MoDeRn プロジェクトは、ユーラトム(欧州原 子力共同体)の第7次枠組み計画において2007 年から5か年計画で実施された共同研究プロジ ェクトの1つであり、EU各国、米国、日本、ス イスから処分実施主体や研究機関などが参加し、 会合や報告書作成、公開ワークショップなどの活 動を実施した。

MoDeRn プロジェクトでは、地層処分の操業段 階に実施される、放射性廃棄物埋設施設の性能確 認に資するモニタリングについて、放射性廃棄物 処分実施主体が、各国の安全規制や処分概念、技 術的実現性を踏まえ、計画を策定する際に参照で きるフレームワーク¹⁾を取りまとめた。この目的 を達成するため、MoDeRn プロジェクトでは、モ ニタリング戦略の検討や技術開発等の課題を、ワ ークパッケージ(WP)を組織して検討した。(図 -1参照)



図-1 MoDeRn プロジェクトの WP 間の関係図

<Modern2020 プロジェクトの概要>

Modern2020 プロジェクトは、欧州委員会(EC) の第8次枠組み計画(Horizon2020)の一環とし て実施されており、実施期間は2015年6月から 2019年5月までである。地層処分事業を先行す る国々で2020年代に開始される処分場操業段階 での埋設施設の性能確認に資するモニタリング 計画の策定を可能とするとともに、地層処分事業 が進んでいない国や、各国のステークホルダに対 し、各国固有の安全規制等の要求事項のモニタリ ング計画への反映方法の例示を目標としている。

Modern2020 プロジェクトには、実施主体や研 究機関に加え、規制支援研究機関(フランス、 IRSN)が参加しており、モニタリングの技術的実 現性やモニタリング・パラメータの選定等の検討 に関与している。また、Modern2020 プロジェク トでは、各 WP が社会的関心事項とステークスホ ルダの関与に関する WP を中心に、相互に関与し て研究を実施している。(図-2参照)

(2) 埋設施設の性能確認に関する技術的知見の整理

(1)の MoDeRn 等の国際共同研究プロジェクト の調査結果も踏まえ、諸外国における埋設施設の 技術的知見及び技術開発の現状を整理した。具体 的には調査対象国において、以下の調査を実施し た。

- ①埋設施設の規制要求に対して、埋設事業の推進側がどのような事項をどのような手段で 把握しようとしているのか。
- ②①で整理した測定手段を実施するにあたっ て、推進側が実施している技術開発の現状。



図-2 Modern2020 プロジェクトの WP 間の関係図

調査対象国については、原子力規制庁殿から提 供された各国の埋設施設の性能確認等に関する 規制要求の情報及び各国の埋設事業の進捗状況 等を考慮した上で、原子力規制庁と協議した結 果、フィンランド、フランス、米国、英国の4か 国とした。(2)の調査結果・整理の例を表-1に示 す。

表-1 調査結果例(岩盤力学に係るモニタリング項目の 手法、技術、測定場所、測定時期の概要)

プロ セス	対象/ 方法	場所	開始時期	概要	頻度
応力再分	伸縮計に よる測定	ONKALO	2011	 ボーリング孔の軸沿いの岩石の変位を 測定 最初の測定サイト:作業者用立坑の周 囲に、5件のマルチボイント伸縮計を 設置(180 m深度) ⇒4ほぼ失敗 第二の割定サイト(地下345 m深 度):2010年初めにONKALO斜坑か らPOSEニッチに向かって1台の「3ボ イント伸縮計」を設置 	継続的(自動11日に1回録)
HC.	収束測定	ONKALO	2008	・ 掘削場所の境界線に設置した複数のビ エの組み合わせの相対的な距離を測定 制定は一般に特殊なテーブを使って手 作業で実施 スポーリング実験(POSE)では、地下 345 mの深度の「調査ニッチ3」におい て収束測定を実施。ニッチ表面から1 m 木満の場所に6本の収束ビンを設置	年 1~ 2回

また、調査対象とした4か国の埋設施設の性能 確認に関する規制要求と、事業者を含む推進側が 行っている、規制要求に対応するための研究開発 の現状について、整理した結果例を表-2に示す。

1) MoDeRn (2013) Monitoring Reference Framework Report. MoDeRn Project Deliverable D-1.2.1

i MoDeRn は Monitoring Developments for safe Repository operation and staged closure (安全な処分 場操業及び段階的閉鎖のためのモニタリングの開発)の 略である。

	規制要求	規制要求に対する事業者の対応
フ	・ 処分施設の操業段階にわたりバリア機能を確保するための研究及び検査プ	・2012 年の建設許可申請時に、申
イ	ログラムを設定(STUK Y4 規則第 33 条)	請書を支援する文書の一つとし
ン	・ 処分施設の建設、操業及び解体に関する計画策定に当たり、中間貯蔵によ	て、操業期間前までのモニタリン
ラ	る原子力廃棄物の放射能の減衰、高度な技術と研究データの活用、さらに	グ計画を提出した。
ン	はバリアの性能及び長期安全性に関する理解を調査及びモニタリングを通	・YVL D.5 の 506 段で示されるモ
ド	じて取得する必要性を考慮(STUK Y4 規則第 8 条)	ニタリング内容の中で、人工バリ
	・ 処分施設の建設及び操業期間中に、掘削する場所及び岩盤が処分に適して	アシステム以外についてはモニ
	いることを確実にするため、並びに母岩の安全に関わる特性やバリアの性	タリング計画に沿ってモニタリ
	能に関する補足的情報を得るための調査、試験及びモニタリング・プログ	ング活動を実施した。(実際には
	ラムを実施すること、そのプログラムには少なくとも以下を含めることを	ONKALO 建設時より岩盤、水
	要求(YVL D.5 506)	理、地化学、外来物質、地表環境
	✓ 掘削が予定されている岩盤容積の特性評価	の分野のモニタリングは継続)
	✓ 定置室を取り囲む岩盤の岩盤応力、移動及び変形に関するモニタリング	・2012 年の計画では、操業期間中
	✓ 定置室を取り囲む岩盤に関する水理地質学的なモニタリング	の人工バリアシステムに係るモ
	✓ 処分地における地下水の化学的な性質に関するモニタリング	ニタリングについてはジェネリ
	✓ 人工バリアの挙動に関するモニタリング	ックな原則しか示されていない。
	 建設許可由請時に提出する予備的安全解析報告書(PSAR) 撮業許可由請時に	操業期間中に実施する内容につ
	提出する是約安全解析報告書 (FSAR) に	いて研究開発中。次回の操業許可
	「近日うる取代タエボリー取日日(1950)に、校福500(日及した明旦、武歌及 7 $($ モータリング・プログラムの内容を全める (VVLD5706)	申請時に更新されるモニタリン
	してニアリンク フロノフムの内谷を占める。(17日15.5700)	グ計画に含まれる予定している。

表-2	規制要求と規制要求に対す	る事業者の研究開発状況の整理例
24 4	加丽女尔兰的女子仨么了	

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查

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 29 年度版)」を作成した。

(2)福島第一原子力発電所で発生する廃棄物等の 処理処分に関する検討

福島第一原子力発電所の廃炉に向けた研究開 発動向に関して、関連する研究開発の成果につい て、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が 主催の「廃止措置及び廃棄物管理におけるセメン ト系複合材料に関する研究カンファレンス」 (RCWM2017)で紹介した。

(This page(p100) is intentionally kept blank.)

Ⅳ. 国際交流

Ⅳ. 国際交流

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

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

(1)情報交換・研究協力を行っている海外機関 放射性廃棄物管理分野における相互協力に関 して、現在までに当センターとの間で協定あるい は覚書を締結している海外機関は下表のとおり である。

これらのうち、2017 年度には、ANDRA, NAGRA、 SKB 社、SCK-CEN との情報交換等を実施した。

表-1	当センターが協力協定/情報交換覚書を締結し
	ている海外機関一覧

王	機関名
フランス	放射性廃棄物管理機関(ANDRA)
スイス	放射性廃棄物管理共同組合(NAGRA)
フィンランド	ポシヴァ社 (Posiva Oy) /Posiva Solutions 社
スウェーデン	スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社 (SKB社)
ドイツ	ドイツ廃棄物処分施設建設・運転会社 (DBE)/DBE Technology 社
スペイン	放射性廃棄物管理公社 (ENRESA)
ベルギー	ベルギー原子力研究センター(SCK-CEN)
ロシア	ロシア科学アカデミー (RAS)
英国	原子力廃止措置機関 (NDA)
韓国	韓国水力原子力株式会社中央研究所 (KHNP CRI)
韓国	韓国原子力環境公団 (KORAD)
韓国	韓国原子力研究所 (KAERI)
台湾	(財)核能科技協進會(NuSTA)
中国	中国核工業集団公司地質・鉱山局 (CNNC DGM)



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 欧州原子力共同体(EURATOM)のIGD-TP (Implementing Geological Disposal Technology Platform)の枠組みにおいて実施されている 「炭素のソースタームに関する共同研究 CAST (Carbon-14 Source Term)」に参画し、炭素14 のインベントリ設定手法や浸漬試験等の成果を 提供するとともに、欧州での研究状況の情報収集 等を行った。また、2018年1月に開催されたFinal Work Shopにおいて、その成果を報告した。CAST プロジェクトのこれまでの成果は CAST のWeb Site http://www.projectcast.eu/において公開 されている。

(3) モニタリングに関する国際共同研究

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

2017 年度には、地中無線モニタリング技術に 関する情報提供を行うとともに、欧州でのモニタ リングに関する検討状況について情報収集等を 行った。本共同研究の成果は、順次プロジェクト のウェブサイト(http://www.modern2020.eu/) にて公開される。 (4)セメント系材料の長期性能評価に関する国際 共同研究

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

Cebama プロジェクトは、セメント系材料の変 質及びセメント系材料から他の材料が受ける影響(WP1)、セメント系材料の核種移行抑制効果

(WP2)、それらを受けた処分場の化学的変遷の解 析(WP3)を対象として研究開発を行うとともに、 得られた成果の普及やこの分野の人材を育成す ることを目的として、2015 年 6 月にスタートし たプロジェクトである。

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

2017 年度は、5 月にフィンランドのヘルシンキ で第 2 回の公開ワークショップを Cebama, 2nd Annual Workshop (https://www.cebama.eu/resister/ SecondWorkshop) として開催した。当センターから はベントナイト系材料の変質について溶解に伴 う二次鉱物生成挙動の試験結果、化学変質に伴う 力学挙動解析手法の検討成果及びセメント系材 料の熱変質挙動の試験件かについて報告した。

(5)世代を超えた記録、知識及び記憶の保存に関す る国際共同研究

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

2017 年度には、当センターは、地層処分の記

録保存について国際的な検討内容について情報 収集を行うとともに、記録保存に関する各国の法 令のデータベース整備のための情報提供を行っ た。

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

Ⅴ. 資料

1. 講演会、セミナー、研究発表会

講演会等概要		開催日	会場
講演会	第1回講演会「超深地層研究所計画における研究の歩み」 笹尾 英嗣 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 東濃地科学センター地層科学 研究部 結晶質岩地層環境研究グループグループリーダー)	平成29年5月19日	原環センター
	第2回講演会「科学的特性マップの提示と今後の取組につい て」 吉村 一元 氏(経済産業省資源エネルギー庁 電力・ガス 事業部 放射性廃棄物対策技術室長 兼 放射性廃棄物対策 広報室長)	平成29年9月27日	原環センター
	第3回講演会「DECOVALEX プロジェクトの歴史と現状」 杉田 裕 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 核燃料サイクル工学研究所 環境 技術開発センター 基盤技術研究開発部 ニアフィールド研 究グループ 研究副主幹) 高山 裕介 氏(同 研究員)	平成30年2月16日	原環センター
	第4回講演会「放射性廃棄物の処分と分離・変換」 田辺 博三 氏(内閣府 原子力政策担当室 政策企画調査官 日本原子力学会フェロー)	平成30年3月2日	原環センター
セミナー	第1回原環センターセミナー 「放射性廃棄物処分の安全評価の基礎I」 杤山 修 氏(公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問)	平成29年5月17日	京都大学 東京オフィス
	第2回原環センターセミナー 「放射性廃棄物処分の安全評価の基礎Ⅱ」 杤山 修 氏(公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問)	平成29年10月26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29年11月9日	東海大学高輪 キャンパス
研究発表会	平成 29 年度原環センター研究発表会 1.研究発表 (1) セメントとベントナイトの相互作用のナチュラルアナロ グ調査 藤井 直樹 (処分材料調査研究プロジェクト プロジェク ト・マネジャー) (2) ドイツにおける放射性廃棄物管理の現状 徳島 秀幸(技術情報調査プロジェクト プロジェクト・ マネジャー) 2.特別講演「放射性廃棄物処分における個人の態度形成と社会 的意思決定-社会的側面に関する研究課題-」 小松崎 俊作 氏(東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学 専攻 国際プロジェクト研究室 講師)	平成29年12月25日	星陵会館ホール

2. 論文、学会発表等

(1)論文

No.	題目	原環センター著者	発表先
1	Evaluation of specific surface area of bentonite-engineered barriers for Kozeny-Carman law	大和田仁、石井智子	Soils and Foundations,57 (2017)
2	磁界を用いたワイヤレス電力伝送にお ける結合係数とコイルサイズのスケー ル則	小林正人	電気学会論文誌 D(産業応用 部門誌) Vol. 137, No4, p326-333, 2017
3	Observation of growth of the altered zone regarding cement-bentonite interaction by using Ca-XAFS analysis	大和田仁、藤井直樹、 林大介	KIT SCIENTIFIC REPORTS 7734, Proceedings of the First Annual Workshop of the HORIZON 2020 CEBAMA Project, May 2016 Barcelona, (2017)
4	Effect of selection of secondary minerals on H-M-C coupling calculation	大和田仁、林大介	KIT SCIENTIFIC REPORTS 7734, Proceedings of the First Annual Workshop of the HORIZON 2020 CEBAMA Project, May 2016 Barcelona, (2017)
5	Effects of calcium leaching on diffusion properties of hardened and altered cement pastes	大和田仁、林大介	Physics and Chemistry of the Earth,Parts A/B/C Volume 99, June 2017, Page 175-183
6	地層処分におけるモニタリングのため の無線電力伝送の適用性に関する検討	小林正人、江藤次郎	日本原子力学会 バックエンド部会 部会誌 Vol.24 No.1,p45-52, 2017
(2)学会発表等

No.	題目	原環センター発表者	発表先
1	Effects of high burn-up operation and extended cooling period of spent fuel on vitrification and storage period	川久保政洋、朝野英一	2017 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants(ICAPP2017) 2017/4/24~23
2	RESEARCH ACTIVITIES AT RWMC ON THE BENTONITE RE-SATURATION PROCESS (1) Overview	石井智子、江守稔	BEACON 2017/6/19~20
3	RESEARCH ACTIVITIES AT RWMC ON THE BENTONITE RE-SATURATION PROCESS (2) LABORATORY AND NUMERICAL EVALUATION	石井智子、川久保政洋	BEACON 2017/6/19~20
4	RESEARCH ACTIVITIES AT RWMC ON THE BENTONITE RE-SATURATION PROCESS (3) A BOX-TYPE CELL EXPERIMENT TO EVALUATE BUFFER MATERIAL HOMOGENIZATION DURING THE PROCESS OF SATURATION	石井智子、朝野英一	BEACON 2017/6/19~20
5	 地層処分場の人工バリアと周辺岩盤の THM長期挙動評価手法の構築に向けて (その1) -全体概要と評価手法- 	小林正人	第52回 地盤工学研究発表会 2017/7/12~14
6	地層処分場の人工バリアと周辺岩盤の THM 長期挙動評価手法の構築に向けて (その2) –遠心力模型実験の数値解析 -	石井智子	第52回 地盤工学研究発表会 2017/7/12~14
7	 地層処分場の人工バリアと周辺岩盤の THM長期挙動評価手法の構築に向けて (その3) -数値解析に連動した要素試験(緩衝材) - 	石井智子	第52回 地盤工学研究発表会 2017/7/12~14
8	 地層処分場の人工バリアと周辺岩盤の THM長期挙動評価手法の構築に向けて (その4) -数値改正に連動した要素試験(周辺岩盤) - 	岩谷隆文	第52回 地盤工学研究発表会 2017/7/12~14
9	 地層処分場の人工バリアと周辺岩盤の THM 長期挙動評価手法の構築に向けて (その5) -遠心力模型実験- 	岩谷隆文	第52回 地盤工学研究発表会 2017/7/12~14
10	密度差のある二つの締固めベンドナイ ト供試体の直列膨潤圧試験シミュレー ション	石井智子	第52回 地盤工学研究発表会 2017/7/12~14

No.	題目	原環センター発表者	発表先	
11	化学物質によるベントナイト緩衝材の 超長期挙動に及ぼす初期密度分布の影 響	林大介	第 52 回 地盤工学研究発表会 2017/7/12~14	
12	Formation and stability of smectite under hyper-alkaline conditions at Narra in Palawan, Philippines	藤井直樹、山川稔	16th International Clay Conference (ICC 2017) 2017/7/17~21	
13	Numerical analysis of reactive surface area in compacted clay structure	林大介	16th International Clay Conference (ICC 2017) 2017/7/17~21	
14	人工バリアの長期挙動評価手法の検討	井田雅也、林大介、 大和田仁	第33回日本原子力学会バッ クエンド部会夏期セミナー 2017/8/25~26	
15	有限要素法によるオーバーパックの破 壊評価	川久保政洋、小林正人、 朝野英一	第 33回日本原子力学会バッ クエンド部会夏期セミナー 2017/8/25~26	
16	アルミナ固化体のヨウ素閉じこめ性能 に及ぼすアルミナ混合の影響評価	桜木智史	日本原子力学会 2017 年秋の大会 2017/9/6~8	
17	地層処分環境下における BPI ガラス固 化体の溶解挙動	桜木智史	日本原子力学会 2017 年秋の大会 2017/9/6~8	
18	処分環境下におけるジルカロイの腐食 の活性化エネルギー	桜木智史	日本原子力学会 2017 年秋の大会 2017/9/6~8	
19	誘電率計を用いたベントナイトペレッ ト充填密度計測試験	小林正人、橋本和幸、 城まゆみ	平成 29 年度全国大会 第 72 回年次学術講演会 2017/9/11~13	
20	高密度ベントナイトペレットの試験製 造	小林正人、橋本和幸、 岩谷隆文	平成 29 年度全国大会 第 72 回年次学術講演会 2017/9/11~13	
21	ウォータージェットを用いたベントナ イト充填除去技術の検討	小林正人、橋本和幸、 塚原成樹	平成 29 年度全国大会 第 72 回年次学術講演会 2017/9/11~13	
22	割れ目ネットワークモデルによる処分 パネルを考慮した湧水量の評価	石井智子、今井政孝、 城まゆみ、渥美博行	平成 29 年度全国大会 第 72 回年次学術講演会 2017/9/11~13	
23	TRU 廃棄物処分におけるガス移行連成 挙動評価手法の開発(その1) -緩衝材(ベントナイト・砂混合材料) の不飽和せん断強度特性-	古賀和正、大和田仁	平成 29 年度全国大会 第 72 回年次学術講演会 2017/9/11~13	
24	 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) -界面を有する緩衝材(圧縮ベントナイト)供試体のガス移行試験(その2) - 	古賀和正、大和田仁	平成 29 年度全国大会 第 72 回年次学術講演会 2017/9/11~13	

No.	題目	原環センター発表者	発表先
25	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) -界面を有する充填材(モルタル系材 料)供試体のガス移行試験-	古賀和正、大和田仁	平成 29 年度全国大会 第 72 回年次学術講演会 2017/9/11~13
26	 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) ガス移行評価シナリオの拡張に関す る検討(ガス影響に係るシナリオの整 理) - 	古賀和正、大和田仁	平成 29 年度全国大会 第 72 回年次学術講演会 2017/9/11~13
27	地下空洞型処分施設機能確認試験の概 要 -地下空洞型処分施設機能確認試験(そ の1)-	藤原啓司、渥美博行、 田中正人、寺田賢二	平成 29 年度全国大会 第 72 回年次学術講演会 2017/9/11~13
28	地下空洞型処分施設機能確認試験の概 要 -地下空洞型処分施設機能確認試験(そ の2)-	渥美博行、藤原啓司、 田中正人、寺田賢二	平成 29 年度全国大会 第 72 回年次学術講演会 2017/9/11~13
29	 人工バリアの安全機能に対する影響因子の抽出 地下空洞型処分施設機能確認試験(その3)- 	渥美博行、藤原啓司、 田中正人、寺田賢二	平成 29 年度全国大会 第 72 回年次学術講演会 2017/9/11~13
30	地下空洞型処分施設の再冠水過程にお いて人工バリアの機能に影響を及ぼす シナリオ検討 -地下空洞型処分施設機能確認試験(そ の4)-	渥美博行、藤原啓司、 田中正人、寺田賢二	平成 29 年度全国大会 第 72 回年次学術講演会 2017/9/11~13
31	地下空洞型処分施設の再冠水過程において人工バリアの機能に影響を及ぼす シナリオ検討 -地下空洞型処分施設機能確認試験(その5)-	渥美博行、藤原啓司、 田中正人、寺田賢二	平成 29 年度全国大会 第 72 回年次学術講演会 2017/9/11~13
32	低濃度硫酸塩が作用するセメント系材 料の科学的変質に関する解析的検討 -地下空洞型処分施設機能確認試験(そ の6)-	渥美博行、藤原啓司、 田中正人、寺田賢二	平成 29 年度全国大会 第 72 回年次学術講演会 2017/9/11~13
33	ベントナイト混合土の地下挙動に関す る検討	寺田賢二	平成 29 年度全国大会 第 72 回年次学術講演会 2017/9/11~13
34	不均質な地層処分環境下におけるオー バーパックの炭素鋼溶接部の腐食挙動	川久保政洋、小林正人	日本原子力学会 2017 年秋の大会 2017/9/13~15
35	モニタリング関連技術の開発(無線電力 伝送におけるコンクリートと鉄の影響)	小林正人、山川浩光、 蓮井昭則、坪能和宏	日本原子力学会 2017 年秋の大会 2017/9/13~15

No.	題目	原環センター発表者	発表先
36	Long-term stability of bentonite under hyperalkaline condition shown by natural analogue in the Philippines	藤井直樹、山川稔	7th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement 2017/9/24~27
37	Detailed laboratory gas injection test on bentonite buffer material (as the interface of bentonite blocks) for TRU disposal facility	古賀和正、大和田仁	7th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement 2017/9/24~27
38	New aspects of interaction between steel and compacted bentonite at an engineered barrier system :(1) influence on hydraulic property	石井智子、朝野英一	7th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement 2017/9/24~27
39	New aspects of interaction between steel and compacted bentonite at an engineered barrier system :(2) Mineralogy of Fe-alteration in the presence of freshwater and seawater	石井智子、小林正人、 朝野英一	7th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement 2017/9/24~27
40	Study on methods to prevent piping and erosion in buffer materials intended for a vertical disposal pit, at Horonobe URL	城まゆみ、中山真理子、 岩谷隆文、石井智子、 川久保政洋、朝野英一	7th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement 2017/9/24~27
41	Experimental evaluation to determine rates of groundwater seepage into buffer materials	石井智子、川久保政洋、 朝野英一	7th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement 2017/9/24~27
42	Elastoplastic prediction of clay-buffer homogenization due to swelling behavior	石井智子、川久保政洋	7th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement 2017/9/24~27
43	Monte Carlo 法を用い montmorillonite 粒子の低-高密度領域における積層構 造の解析	林大介	資源・素材&EARTH 2017 2017/9/26~29

No.	題目	原環センター発表者	発表先	
44	海外における高レベル放射性廃棄物処 分の進捗状況について	稲垣裕亮	「くらしと廃棄物」報告会 2017/9/30	
45	Dissolution Behavior of Lead Borate Glass at Simulated Geological Disposal Conditions	桜木智史	MRS2017 Scientific Basis for Nuclear Waste Management Symposium 2017 2017/10/29~11/3	
46	Activation energy for parabolic corrosion kinetics of Zircaloy-4 by consecutive hydrogen measurement at 30-80°C	桜木智史	MRS2017 Scientific Basis for Nuclear Waste Management Symposium 2017 2017/10/29~11/3	
47	地層処分環境における純 Zr および Zircaloy-4 の腐食挙動	桜木智史	第 64 回材料と環境討論会 2017/11/8~10	
48	地層処分環境におけるステンレス鋼の 腐食挙動	桜木智史	第 64 回材料と環境討論会 2017/11/8~10	
49	DEVELOPMENT OF WIRELESS MONITORING SYSTEMS FOR GEOLOGICAL DISPOSAL	坪能和宏、小林正人、 山川浩光、蓮井昭則	EAFORM2017 2017/11/27~29	
50	STRUCTURAL INTEGRITY ASSESSMENT OF DISPOSAL PACKAGE FOR RADIOACTIVE WASTE-FAILURE ASSESSMENTES FOR OVERPACK USING FINITE ELEMENT ANALYSIS	川久保政洋、小林正人、 朝野英一	EAFORM2017 2017/11/27~29	
51	STUDY ON PIPING AND EROSION OF BUFFER MATERIAL DURING THE RE-SATURATION PERIOD	阿部孝行、川久保政洋、 今井政孝、石井智子	EAFORM2017 2017/11/27~29	
52	MIGRATION EXPERIMENT OF VOID AIR IN BUFFER MATERIAL DURING SEEPAGE	高本尚彦、川久保政洋、 今井政孝、石井智子	EAFORM2017 2017/11/27~29	
53	NUMERICAL ANALYSIS OF INFLOW CONTROL FOR QUALITY MANAGEMENT OF BUFFER MATERIAL USING DISCRETE FRACTURE NETWORK MODLE	石井智子、城まゆみ、 今井政孝、渥美博行	EAFORM2017 2017/11/27~29	
54	GROUNDWATER FLOW ANALYSIS FOR EVALUATING FACTORS ON WATER INFLOW TO THE FACILLITY DURING THE OPERATION PERIOD	今井政孝、江守稔、 石井智子、川久保政洋、 坪能和宏	EAFORM2017 2017/11/27~29	
55	through bentonite buffer material	百賞和止、天和田仁	2017/11/27~29	

No.	題目	原環センター発表者	発表先
56	Evaluation of Carbon 14 Release from Irradiated Zircaloy Fuel Cladding Through a Long-term Static Leaching Test	植田浩義、桜木智史、 藤井直樹、大和田仁	EAFORM2017 2017/11/27~29
57	Synthesis and Microstructural characteristics of Iodine-bearing waste simulant formed by HIP sintering of the silver impregnated alumina sorbent	桜木智史、吉田誠司	12th International conference on Hot Isostatic Pressing (HIP17) 2017/12/5~8
58	Corrosion tests of non-irradiated stainless steel by hydrogen measurement system	桜木智史、植田浩義	CASR シンポジウム 2018/1/16~18
59	Corrosion behavior of irradiated and non-irradiated zirconium alloys: investigations on corrosion rate, released ¹⁴ C species and IRF	桜木智史、植田浩義	CASR シンポジウム 2018/1/16~18
60	高レベル放射性廃棄物地層処分におけ る放射性同位体の移行挙動と安全性の 評価	朝野英一	同位体科学会第16回同位体 科学研究会 2018/3/16
61	21世紀後半に向けた廃棄物管理の選択 肢:Pu利用推進と環境負荷低減型地層 処分に関する研究 (1)経緯、視点、研究展開	川久保政洋、坪能和宏、 朝野英一	日本原子力学会2018年春の 年会 2018/3/26~28
62	 21世紀後半に向けた廃棄物管理の選択肢: Pu利用推進と環境負荷低減型地層処分に関する研究 (2)技術報告書(CEA/フランス)に関する事例調査 	朝野英一、川久保政洋、 坪能和宏	日本原子力学会2018年春の 年会 2018/3/26~28
63	21世紀後半に向けた廃棄物管理の選択 肢:Pu利用推進と環境負荷低減型地層 処分に関する研究 (3)核燃料サイクル諸条件が使用済燃 料とガラス固化体に及ぼす影響	川久保政洋、朝野英一	日本原子力学会2018年春の 年会 2018/3/26~28
64	21世紀後半に向けた廃棄物管理の選択 肢:Pu利用推進と環境負荷低減型地層 処分に関する研究 (4)Cs/Sr分離による高含有ガラス固 化体処分の廃棄体専用面積評価	朝野英一	日本原子力学会2018年春の 年会 2018/3/26~28
65	21 世紀後半に向けた廃棄物管理の選択 肢:Pu利用推進と環境負荷低減型地層 処分に関する研究 (5)UO₂使用済燃料冷却期間長期化に おけるMA分離の効果	川久保政洋、朝野英一	日本原子力学会2018年春の 年会 2018/3/26~28

No.	題目	原環センター発表者	発表先
66	21世紀後半に向けた廃棄物管理の選択 肢:Pu利用推進と環境負荷低減型地層 処分に関する研究 (6)処分場負荷低減を目指したバック エンドシステム研究開発の提言	川久保政洋、坪能和宏、 朝野英一	日本原子力学会2018年春の 年会 2018/3/26~28

(3)解説等

No.	題目	著者	発表先
1	地層処分の記録の保存	江藤次郎	原子カシステム研究懇話会 第 266 回定例懇談会 2017 年 7 月
2	地層処分の記録の保存	江藤次郎	原子カシステム研究懇話会 原子カシステムニュース Vol.28.No.2.2017.9
3	ドイツにおける放射性廃棄物管理の責 任分担変更と基金の設置	徳島秀幸	日本原子力学会誌 ATOMO∑ Vol.59 2017 年 10 月号 P24-P28
4	地層処分事業等の国際的な動向	稲垣裕亮	原子力年鑑 2018 P156-162

Ⅴ. 資料

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№122	超深地層研究所計画における研究の歩み	2017年6月
2	原環センタートピックス№123	地層処分実規模試験施設での理解促進活 動-来館者記録の分析-	2017年9月
3	原環センタートピックス№124	放射性廃棄物処分における個人の態度形 成と社会的意思決定 -社会的側面に関する研究課題-	2017 年 12 月
4	原環センタートピックス№125	セメントとベントナイトの相互作用のナ チュラルアナログ調査	2018年3月
5	原環センター2016年度 技術年	報	2017年10月

4. ホームページへの海外最新情報の掲載

原環センターのウェブサイト「諸外国での高レベル放射性廃棄物処分」(<u>https://www2.rwmc.or.jp</u>) 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	2017/4/3	追記)カナダの核燃料廃棄物管理機関(NWMO)が2017-2021年の実施計画案への意 見募集を開始〔2016年7月28日既報〕
2	2017/4/4	追記)ドイツで連邦政府が高レベル放射性廃棄物処分委員会の勧告を反映したサイト選定法の改正法案を閣議決定〔2016 年 12 月 26 日既報〕
3	2017/4/6	英国政府と原子力廃止措置機関(NDA)が2016年版の放射性廃棄物インベントリ報告書を公表
4	2017/4/7	米国でエディ・リー・エナジー・アライアンス (ELEA) サイトにおける中間貯蔵施 設の建設に係る許認可申請書をホルテック社が提出
5	2017/4/12	追記)米国で廃棄物隔離パイロットプラント(WIPP)の操業が再開〔2017年1月18 日既報〕
6	2017/4/18	追記)米国で 2018 会計年度の予算方針を公表―ユッカマウンテン計画の予算を要求〔2017 年 3 月 17 日既報〕
7	2017/4/20	追記)スイスで規制機関 ENSI が地質学的候補エリア「北部レゲレン」をサイト選定 第3段階での検討対象とすべきとの見解を表明〔2016 年 12 月 19 日既報〕
8	2017/4/21	米国の連邦議会下院で 2017 年放射性廃棄物政策修正法案の検討を開始
9	2017/4/21	追記)米国でウェースト・コントロール・スペシャリスト(WCS)社が使用済燃料の 中間貯蔵施設の許認可申請書をNRCに提出〔2016年5月3日既報〕
10	2017/4/24	英国政府が「地層処分と地域との協働に関する公衆との対話」に係る報告書を公表
11	2017/4/25	追記)米国の連邦議会下院で放射性廃棄物政策修正法案の検討を開始〔2017 年 4 月 21 日既報〕
12	2017/4/27	ロシアで地下研究所建設の一般競争入札を公告
13	2017/4/27	ドイツで放射性廃棄物処分の新たな実施主体である連邦放射性廃棄物機関(BGE)が 活動を開始
14	2017/4/27	追記)米国の連邦議会下院で放射性廃棄物政策修正法案の検討を開始〔2017年4月 21日既報〕
15	2017/5/1	 追記)米国で2017会計年度の予算要求-高レベル放射性廃棄物処分関連に対して1 億5,064万ドルを要求〔2016年2月12日既報〕
16	2017/5/8	 追記)米国で2017会計年度の予算要求-高レベル放射性廃棄物処分関連に対して1 億5,064万ドルを要求〔2016年2月12日既報〕
17	2017/5/11	追記)ドイツで連邦政府が放射性廃棄物管理のための公的基金設置等を定める法案 を閣議決定〔2016 年 10 月 25 日既報〕
18	2017/5/19	追記)米国の連邦議会下院で放射性廃棄物政策修正法案の検討を開始〔2017年4月 21日既報〕
19	2017/5/24	米国で2018会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に係る予算 を要求
20	2017/5/25	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〕

	掲載日	タイトル
21	2017/5/25	追記)米国でエディ・リー・エナジー・アライアンス(ELEA)サイトにおける中間 貯蔵施設の建設に係る許認可申請書をホルテック社が提出〔2017年4月7日 既報〕
22	2017/5/29	米国で政府説明責任院(GAO)がユッカマウンテン処分場の許認可手続の再開に係る 報告書を公表
23	2017/5/30	追記)米国で政府説明責任院(GAO)がユッカマウンテン処分場の許認可手続の再開 に係る報告書を公表〔2017 年 5 月 29 日既報〕
24	2017/6/15	追記)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〔2015 年 11 月 12 日既報〕
25	2017/6/15	追記)米国で2018会計年度の予算方針を公表ーユッカマウンテン計画の予算を要求〔2017年3月17日既報〕
26	2017/6/19	スイスのモン・テリ岩盤研究所で坑道拡張工事が開始
27	2017/6/19	追記)米国の連邦議会下院で放射性廃棄物政策修正法案の検討を開始〔2017年4月 21日既報〕
28	2017/6/20	フィンランドで地層処分場の統合作動試験に向けたパイロットボーリングの掘削を 開始
29	2017/6/20	追記)ドイツで連邦政府が放射性廃棄物管理のための公的基金設置等を定める法案 を閣議決定〔2016 年 10 月 25 日既報〕
30	2017/6/22	追記)米国でウェースト・コントロール・スペシャリスト(WCS)社が使用済燃料の 中間貯蔵施設の許認可申請書をNRCに提出〔2016年5月3日既報〕
31	2017/6/23	追記)米国で2018会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に 係る予算を要求〔2017年5月24日既報〕
32	2017/6/27	追記)ドイツで連邦政府が放射性廃棄物管理のための公的基金設置等を定める法案 を閣議決定〔2016 年 10 月 25 日既報〕
33	2017/6/28	カナダの使用済燃料処分場のサイト選定の状況-2地域がサイト選定プロセスから 除外
34	2017/6/29	追記)米国の連邦議会下院で放射性廃棄物政策修正法案の検討を開始〔2017年4月 21日既報〕
35	2017/7/4	追記)ドイツで連邦政府が放射性廃棄物管理のための公的基金設置等を定める法案 を閣議決定〔2016 年 10 月 25 日既報〕
36	2017/7/4	追記)スイスで規制機関 ENSI が地質学的候補エリア「北部レゲレン」をサイト選定 第3段階での検討対象とすべきとの見解を表明〔2016 年 12 月 19 日既報〕
37	2017/7/5	スウェーデンの規制当局が原子力廃棄物基金への2018~2020年拠出金単価の試算値 を公表
38	2017/7/5	追記)フランスで規制機関が ANDRA による地層処分場の「安全オプション意見請求 書」に関する国際レビュー結果報告書を公表〔2016 年 12 月 6 日既報〕
39	2017/7/6	スウェーデンで使用済燃料最終処分場の建設許可申請に関する土地・環境裁判所の 口頭弁論が2017年9月に開催予定
40	2017/7/11	追記)米国でエディ・リー・エナジー・アライアンス(ELEA)サイトにおける中間 貯蔵施設の建設に係る許認可申請書をホルテック社が提出〔2017年4月7日 既報〕
41	2017/7/13	追記)米国で2018会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に係 る予算を要求〔2017年5月24日既報〕

	掲載日	タイトル
42	2017/7/18	米国で環境保護庁(EPA)が廃棄物隔離パイロットプラント(WIPP)の3度目の適合 性再認定の決定
43	2017/7/21	フランスで放射性廃棄物管理機関(ANDRA)が地層処分場の設置許可申請の1年先送 りを発表
44	2017/7/21	追記)米国でウェースト・コントロール・スペシャリスト(WCS)社が使用済燃料の 中間貯蔵施設の許認可申請書をNRCに提出〔2016年5月3日既報〕
45	2017/7/25	追記)米国の連邦議会下院で放射性廃棄物政策修正法案の検討を開始〔2017 年 4 月 21 日既報〕
46	2017/8/1	追記) ロシアで地下研究所建設の一般競争入札を公告〔2017 年 4 月 27 日既報〕
47	2017/8/2	追記)米国で2018会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に 係る予算を要求〔2017年5月24日既報〕
48	2017/8/2	追記)ドイツで連邦政府が放射性廃棄物管理のための公的基金設置等を定める法案 を閣議決定〔2016 年 10 月 25 日既報〕
49	2017/8/4	フランスで規制機関が ANDRA による地層処分場の「安全オプション意見請求書」に 関する見解案を公表
50	2017/8/7	スイスで規制機関ENSIが地層処分場に係る役割と姿勢についてのポジションペーパ ーを公表
51	2017/8/9	英国で放射性廃棄物管理会社 (RWM 社) が地層処分施設の一般的な条件でのセーフティケース(2016 年版)を公表
52	2017/8/10	追記)米国で NRC がユッカマウンテン処分場建設についての再開後の安全審査を終 了し、残予算の使途を決定〔2016 年 11 月 10 日既報〕
53	2017/8/14	追記)ドイツで放射性廃棄物処分の新たな実施主体である連邦放射性廃棄物機関 (BGE)が活動を開始〔2017年4月27日既報〕
54	2017/8/25	追記) スイスで NAGRA がサイト選定第3 段階におけるボーリング調査の実施に向け た許可申請書を提出〔2016 年 10 月3日既報〕
55	2017/9/5	追記)カナダでチョークリバー研究所における浅地中処分場プロジェクトの環境影響評価手続きのためのパブリックコメントの募集が開始〔2016 年 5 月 26 日既報〕
56	2017/9/7	ドイツで新たなサイト選定手続きが開始
57	2017/9/11	中国で原子力安全法が成立
58	2017/9/11	追記)米国で2018 会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に 係る予算を要求〔2017 年 5 月 24 日既報〕
59	2017/9/21	追記)スウェーデンで使用済燃料最終処分場の建設許可申請に関する土地・環境裁 判所の口頭弁論が2017年9月に開催予定〔2017年7月6日既報〕
60	2017/9/25	追記)米国で2018 会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に 係る予算を要求〔2017 年 5 月 24 日既報〕
61	2017/9/26	追記)米国でエディ・リー・エナジー・アライアンス(ELEA)サイトにおける中間 貯蔵施設の建設に係る許認可申請書をホルテック社が提出〔2017年4月7日 既報〕
62	2017/10/6	フィンランドの使用済燃料処分場の建設状況:キャニスタ封入施設建設のための岩 盤掘削作業が完了
63	2017/10/11	スイスで地層処分場立地地域への交付金及び補償金交渉プロセスの枠組みを示すガ イドラインが公表

	掲載日	タイトル
64	2017/10/20	追記)スウェーデンで使用済燃料最終処分場の建設許可申請に関する土地・環境裁 判所の口頭弁論が2017年9月に開催予定〔2017年7月6日既報〕
65	2017/10/25	追記)米国の連邦議会下院で2017年放射性廃棄物政策修正法案の検討を開始〔2017 年4月21日既報〕
66	2017/10/30	追記)スウェーデンで使用済燃料最終処分場の建設許可申請に関する土地・環境裁 判所の口頭弁論が2017年9月に開催予定〔2017年7月6日既報〕
67	2017/10/31	追記)ロシアで地下研究所建設の一般競争入札を公告〔2017 年 4 月 27 日既報〕
68	201711/7	追記) スイスで NAGRA がサイト選定第3 段階におけるボーリング調査の実施に向け た許可申請書を提出〔2016 年 10 月3日既報〕
69	2017/11/9	追記)カナダの使用済燃料処分場のサイト選定の状況-2地域がサイト選定プロセスから除外〔2017年6月28日既報〕
70	2017/11/16	フランスで国家討論委員会(CNDP)が地層処分場プロジェクトに関する情報提供・ 公衆参加を監督する保証人を任命
71	2017/11/22	追記)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〔2016 年 2 月 26 日既報〕
72	2017/11/28	スイスでサイト選定手続第2段階の成果報告書の草案が公表、意見聴取開始
73	2017/11/29	追記)カナダでチョークリバー研究所における浅地中処分場プロジェクトの環境影響評価手続きのためのパブリックコメントの募集が開始[2016 年 5 月 26 日既報]
74	2017/12/4	フランスで国家評価委員会 (CNE) が第11回評価報告書を公表
75	2017/12/8	カナダの使用済燃料処分場のサイト選定の状況-エリオットレイク/ブラインドリ バー地域がサイト選定プロセスから除外
76	2017/12/11	追記)米国で2018 会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に 係る予算を要求〔2017 年 5 月 24 日既報〕
77	2017/12/12	追記)スウェーデンで使用済燃料最終処分場の建設許可申請に関する土地・環境裁 判所の口頭弁論が2017年9月に開催予定〔2017年7月6日既報〕
78	2017/12/12	追記)スウェーデン SKB 社が短寿命低中レベル放射性廃棄物処分場の拡張を申請 〔2014 年 12 月 22 日既報〕
79	2017/12/13	英国で原子力廃止措置機関(NDA)が2018-2021年度ビジネスプランのドラフト版 に対する公衆協議を開始
80	2017/12/19	追記)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〔2015年11月12日既報〕
81	2017/12/22	追記)スウェーデンで SSM が使用済燃料最終処分場の建設許可申請に関する土地・ 環境裁判所への意見書を提出〔2016 年 6 月 30 日既報〕
82	2017/12/25	追記)スウェーデンの規制当局が原子力廃棄物基金への2018~2020年拠出金単価 の試算値を公表〔2017年7月5日既報〕
83	2017/12/25	追記)米国で2018 会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に 係る予算を要求〔2017 年 5 月 24 日既報〕
84	2017/12/28	スイスの原子力発電事業者による2016年処分費用見積りに対する費用計算の審査と 安全面の審査の結果が公表
85	2018/1/9	追記)ドイツで放射性廃棄物処分の新たな実施主体である連邦放射性廃棄物機関 (BGE)が活動を開始〔2017年4月27日既報〕

	掲載日 タイトル			
86	2018/1/17	フランスで規制機関が ANDRA による地層処分場の「安全オプション意見請求書」に 関する見解書を公表		
87	2018/1/19	米国の廃棄物隔離パイロットプラント(WIPP)で地下施設の掘削活動が再開		
88	2018/1/25	スウェーデンで放射線安全機関(SSM)と土地・環境裁判所が使用済燃料最終処分場 及びキャニスタ封入施設の建設許可申請に関する政府への意見書を提出		
89	2018/1/25	追記)米国で2018 会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に 係る予算を要求〔2017 年 5 月 24 日既報〕		
90	2018/2/2	追記)フィンランドでフェノヴォイマ社が使用済燃料の処分に向けた環境影響評価 (EIA)計画書を提出〔2016年6月24日既報〕		
91	2018/2/5	英国で地層処分施設(GDF)に関する国家政策声明書(NPS)案についての公衆協議が開始		
92	2018/2/5	英国で地層処分施設に関する地域との協働プロセス案の公衆協議が開始		
93	2018/2/7	台湾電力公司が行政院原子能委員会に使用済燃料の最終処分に関する技術フィージ ビリティ評価報告等を提出		
94	2018/2/9	追記)ドイツで社会諮問委員会の委員が決定〔2016年12月8日既報〕		
95	2018/2/13	追記)米国で 2018 会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に 係る予算を要求〔2017 年 5 月 24 日既報〕		
96	2018/2/16	米国で2019会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に係る予算 を要求		
97	2018/2/22	追記)スウェーデンで放射線安全機関(SSM)と土地・環境裁判所が使用済燃料最終 処分場及びキャニスタ封入施設の建設許可申請に関する政府への意見書を提 出〔2018年1月25日既報〕		
98	2018/3/1	追記)米国でエディ・リー・エナジー・アライアンス(ELEA)サイトにおける中間 貯蔵施設の建設に係る許認可申請書をホルテック社が提出〔2017年4月7日 既報〕		
99	2018/3/12	ドイツでコンラッド処分場の操業開始の遅延を公表 -2027 年前半の操業開始見込み		
100	2018/3/13	フランス政府が地層処分プロジェクトに関する透明性強化の方針を公表		
101	2018/3/16	追記)米国で 2019 会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に 係る予算を要求〔2018 年 2 月 16 日既報〕		
102	2018/3/27	追記)米国で2018 会計年度の予算要求-ユッカマウンテン許認可手続の再開等に 係る予算を要求〔2017 年 5 月 24 日既報〕		

5. 委員会一覧

分野区分	研究件名	委員会名称	審議事項
I.放射性廃棄物の 管理処分に関す る調査研究	地下空洞型処分施設機能 確認試験	地下空洞型処分施設機 能確認試験検討委員会	人工バリアや周辺岩盤の長期 にわたる機能確認方法の審議
Ⅱ.放射性廃棄物の 地層処分に関す る調査研究	処分システム工学確証技 術開発	処分システム工学確証 技術検討委員会	人工バリア品質/健全性評価手 法、人工バリアと周辺岩盤の 長期挙動評価手法の構築、モ ニタリング関連技術に関する 調査結果等の審議
	可逆性・回収可能性調査 ・技術高度化開発	地層処分回収技術高度 化開発検討委員会	緩衝材除去技術開発の成果、 回収維持期間、実証試験計画 の調査結果等の審議
		可逆性・回収可能性の確 保に向けた論点整理に 係る検討会	わが国の地層処分事業におい て可逆性・回収可能性を確保 していく上で、今後の具体的 な運用等に向けて更なる検討 が必要と考えられる事項等の 整理に向けた審議
	沿岸部処分システム高度 化開発	沿岸処分システム高度 化開発評価委員会	沿岸部固有の環境を踏まえた 概要調査段階で必要となる地 質環境の調査・工学・安全評 価に関する技術開発に関する 研究計画、実施方法、結果の 評価等に関する審議
	T R U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 術研究調查	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 2017年度 技術年報

2018年10月発行

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

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