

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FUNDING AND RESEARCH CENTER TOPICS

2024.1.NO.148

目次

年頭のご挨拶	①
センターの活動状況	②
地層処分事業における回収可能性が維持された状態とは？ ～技術的アプローチによる維持期間の定義方法について～	④

年頭のご挨拶

新春のお慶び申し上げます。皆様におかれましては、穏やかな新年をお迎えのこととお喜び申し上げます。

昨年は記録的な猛暑が続き、一年があっという間に過ぎました。この一年を通じて世界の平均気温は上昇し、地球温暖化対策が喫緊の課題であることを痛感いたしました。同時にカーボンニュートラルへの取り組みが進められ、小型モジュール炉を含む新規原子炉の計画や、先進的原子炉実証プログラムによって、世界的に原子力への関心が高まっています。

我が国でも、原子力発電所の新たな再稼働や日本原燃株式会社の六ヶ所再処理工場の竣工を目指した計画が進行中です。また、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関しては、北海道の神恵内村及び寿都町での文献調査が進捗しており、今後の報告書が注目されています。

こうした状況の中で、弊センターの調査研究部門は、放射性廃棄物の処分の着実な実施に向けて、地層処分に関する社会全般からの要請に応え、調査研究にあたっては関係機関と連携し、より実践的な貢献を行いたいと考えています。また、研究の成果や国内外の情報については積極的な発信・提供を行うとともに、人材育成への取り組みを進めるため、講演会・セミナー開催等を行います。皆様の期待に応えるべく、事業を進めてまいります。

高レベル放射性廃棄物等最終処分の資金管理業務においては、今後の地層処分の動向や原子力発電所再稼働の動向により、資金の変動が予想される一方、今後想定される金融環境の変化に対して的確な対応を行うように努め、確実な資金管理を実施します。

様々な変化が予想される中で、引き続き真摯に事業を進めたいと存じますので、ご指導とご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター
理事長 武谷 典昭

センターの活動状況

成果等普及活動の実施状況

2023年度 第3回原環センター講演会の開催

2023年度第3回原環センター講演会を対面及びオンラインで開催し、71名（対面14名、オンライン57名）の方に参加いただきました。

2001年に刊行された『TRU 廃棄物処分概念検討書』における処分施設の性能評価において、再処理施設のオフガスシステムのヨウ素129を捕集するために設置した、多孔質アルミナに硝酸銀を添着したフィルター材からの廃棄物（廃銀吸着材）から放出されるヨウ素129が、最も影響の大きい核種であることが示されました。本講演では、ヨウ素129を対象とした代替固化技術の開発のこれまでの経緯や、求められる性能などについて、2022年度まで開発してきたアルミナをマトリクスとしたHIP（熱間等方圧プレス）固化技術を中心に、その性能の評価までを紹介しました。

開催日時：2023年10月27日（金）14：00～16：00

対面会場：原環センター 第1、2会議室

演 題：TRU 廃棄物の地層処分におけるヨウ素129対策

講演者：地層処分バリアシステム研究開発部 大和田 仁



2023年度 第3回原環センターセミナーの開催

放射性廃棄物処分の安全評価の基礎的知識の上に、最新の実践的な安全評価の体系を講義と演習で理解することを目標として、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」を以下のとおり開催しました。GoldSim Playerを使用した解析演習を、講師の指導の下に行い、安全評価の基礎の理解を深めていただきました。

開催日時：2023年11月21日（火）9：30～17：30

開催会場：京都アカデミアフォーラム in 丸の内

講師：東海大学 工学部 応用化学科

教授 若杉 圭一郎 氏

プログラム：

講義1 安全評価の概要と評価事例

講義2 核種移行解析で考慮するプロセスと基本式

講義3 総合安全評価による処分システム性能の理解



2023 年度 原環センター研究発表会の開催

2023 年度原環センター研究発表会を対面及びオンラインで開催し、各界から 194 名（対面 47 名、オンライン 147 名）の方に参加いただきました。武谷理事長の開催挨拶に引き続き、当センターからの研究発表と経済産業省 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部 放射廃棄物対策課長 下堀友数氏による特別講演「最終処分の現状と今後の取組について」を行いました。

開催日時：2023 年 12 月 8 日（金）13：30～16：30

開催形式：対面及びオンライン方式

開催場所：星陵会館ホール（星陵会館）

プログラム：

開会挨拶 理事長 武谷 典昭

研究発表 TRU 廃棄物の廃棄体パッケージの開発～製作性と閉じ込め性の課題への挑戦～
地層処分バリアシステム研究開発部 藤井 直樹、丸山 紀之

特別講演 最終処分の現状と今後の取組について
経済産業省 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部
放射性廃棄物対策課長 下堀 友数 氏



研究発表での質疑応答



武谷理事長の開会挨拶



研究発表（藤井）



研究発表（丸山）



下堀氏の特別講演

地層処分事業における回収可能性が維持された状態とは？ ～技術的アプローチによる維持期間の定義方法について～

地層処分工学技術研究開発部
小林 正人

1. はじめに

地層処分事業における“回収 (retrieval)”とは、廃棄物を取り出す行為、“回収可能性 (retrievability) がある”とは、処分場に定置された廃棄物あるいは廃棄物パッケージを回収できるようにするための対策を講じることと定義されている¹⁾。回収を選択する動機としては、安全上の不具合是正、代替管理方策への移行など、様々なケースが考えられる。本報告では、特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針 (以下「基本方針」という) に示された回収可能性に対し、回収可能性が維持された状態を定義する方法の考え方、及びその状態を提示するための技術開発の状況について紹介する。

2. 地層処分事業における回収可能性の導入

2.1 回収時の地下施設の状態と回収の容易性

処分場の閉鎖後長期の安全性は、深地層への廃棄物の定置による隔離と閉じ込めによる受動的安全性によって確保される。この安全性は、定置後の坑道埋戻し、換気や排水などの停止により、本来の地下深部の環境に回復していくことで向上する。一方、回収の容易性は、坑道の埋戻し範囲が拡大し、廃棄体へアクセスするための作業量が増加することにより低下する。このように、閉鎖後長期の安全性と回収の容易性は一種のトレードオフの関係にある。

このような処分事業の進捗に伴う「処分場の安全性の向上」と「回収の容易性の低下」の関係について、図-1 に示す R-scale が OECD/NEA により提案されている¹⁾。R-scale によれば閉鎖後の遠い将来であっても、コストをかければ回収作業は可能とされている。

NUMO 包括的技術報告書 (以下「NUMO-SC」という)²⁾ では、回収可能性を維持するための状態として、処分坑道を埋め戻し、端部に力学プラグを設置した状態 (以下「状態 B」という) が、回収の容易性、処分場の閉鎖後長期の安全性の観点で、適用性が総合的に高いと評価している。

2.2 本稿で対象とする回収の前提について

2015 年 5 月に改定された基本方針では、「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。」ことが明文化された。

基本方針で要求される可逆性・回収可能性について、その要点を以下のように解釈、整理した。

- 実施中の地層処分事業から、将来世代が選択した廃棄体の代替管理方策に移行するために回収する (最終処分政策の変更)。故に、回収対象は回収の実行を選択した時点で定置済みの全ての廃棄体である。全量定置後に回収する場合、最大で 4 万本以上の数量となる。
- 最終処分政策の変更のために行う回収であり、実施中の地層処分事業において操業安全、閉鎖後長期の安全性に問題は生じていない。故に、オーバーパックの閉じ込め機能は確保されており、回収時の汚染の影響は検討から除外できる。
- 回収可能性の維持期間中に考慮すべきシナリオとして、維持期間中に最終閉鎖の判断後に処分施設を閉鎖 (シナリオ①)、維持期間中に回収実行の判断を行い全量回収 (シナリオ②) の 2 つが考えられる。

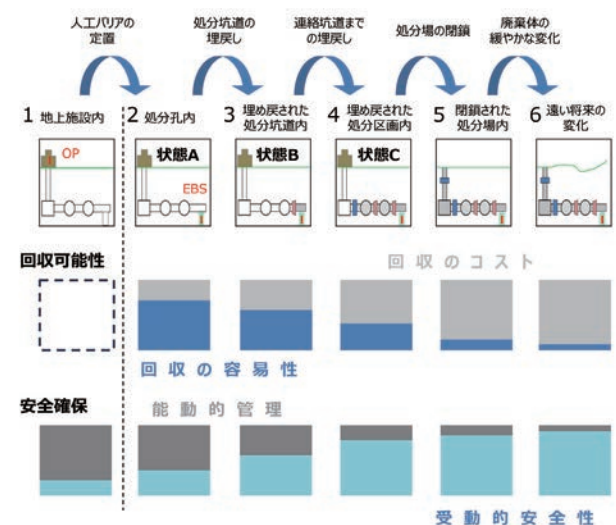


図-1 処分孔縦置き方式のR-scale の例
(※OECD/NEA の報告書¹⁾の図を基に作成)

3. 技術的検討の方針

3.1 R&R 検討会で整理された技術的検討の枠組み

冒頭に示した回収可能性に対する技術的対応方針として、ある処分場設計に対して回収技術を整備する、あるいは回収の容易性を設計で考慮する、これら2つの技術的アプローチが適用し得ることが国際的に共有されている¹⁾。基本方針に導入された回収可能性に関して、A) 回収の技術的対応の考え方や方針の具体化、B) 回収可能性を維持した場合の影響等に関する調査研究、さらには、C) 回収の技術的実現性の提示などが、わが国における当面の技術課題と考えられる。

このような課題に対して、外部有識者で構成する「可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会」（以下「R&R 検討会」という）を設置し、可逆性・回収可能性に関する多面的な検討を実施した³⁾。当面の技術検討の枠組みとして、特に上記A)とB)の課題に対応した定量化すべき技術情報として、表-1に示す4項目を挙げた³⁾。

3.2 回収可能性が維持された状態の技術的な定義

回収可能性の維持期間を長くする（将来の世代に意思決定の柔軟性を確保する）というメリットに対して、回収の安全性、回収の容易性、費用というトレードオフの関係にある。表-1に示した「1. 安全性への影響」と「2. 回収の容易性」の2項目、及び回

収可能性において考慮すべき最終閉鎖と回収の実行の2つのシナリオの関係から、基本方針が要求する安全な管理が合理的に継続される範囲内、すなわち回収可能性の維持期間の定義方法について検討した。

• 新たに追加される可能性のある維持期間

特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画で要求される最終処分施設の規模及び能力である、年間約1千本のペースで第一種特定放射性廃棄物を定置し、総量約4万本を定置完了後に速やかに施設の最終閉鎖に至る工程を本報告では標準工程と呼ぶことにする。建設・操業期間中に、閉鎖後長期の安全性への影響が懸念される事象が発生した場合などには、是正措置のための回収を行う必要があることから、基本方針の要求に因らず標準工程の間は回収可能性が維持されていることになる。これに対し、基本方針が要求する維持期間は、廃棄体の全量定置完了後から処分場の最終閉鎖までの期間を含むことになり、この期間を新たに追加される可能性がある維持期間と呼ぶことにする。

• シナリオ1：処分施設を最終閉鎖する場合

回収可能性の維持期間を経て施設を最終閉鎖することを選択した場合は、施設閉鎖後は受動的に安全な状態に移行する。図-2に示すように、最終閉鎖の判断は、処分システムの閉鎖後長期の安全性への影響が許容できる期間内で可能であり、この期間を超えると閉鎖後長期の安全性に対して不確実性が高まる。

表-1 定量化すべき情報と定量化に必要な技術検討項目（例）及び技術検討の視点³⁾

1. 安全性への影響		
(1) 操業期間中の安全性への影響	① 回収可能性維持期間中の開放坑道の安全性への影響	1) 開放坑道内の作業空間の安全性 a. 開放坑道の健全性（空間安定性） b. 開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響
	② 回収作業時の安全性への影響（回収を実施する場合）	1) 回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性 a. 埋め戻した坑道の再利用時の健全性 b. 再利用する坑道内の安全な作業環境確保策の実施可否 2) 回収時の廃棄体容器の健全性
(2) 閉鎖後長期の安全性への影響	1) 回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う人工バリア等に期待する安全機能への影響 a. 開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響 b. 廃棄体からの熱による影響 c. 坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響	
	2) 回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う天然バリア（母岩）に期待する安全機能への影響 a. 化学組成の異なる地下水の引き込み b. 開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる母岩側への影響、など	
2. 回収の容易性（回収作業時間）		
(1) 単位ユニット当たりの回収作業時間（廃棄体1体、処分坑道1本、処分区画）		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 a. 回収作業時間の短縮に向けた回収方法（技術・装置）の高度化 b. 回収作業手順の具体化
(2) 全ての廃棄体回収に係る全体作業時間		2) より回収の容易性を高めた処分場の設計開発
3. 最終閉鎖せずに回収可能性を維持できる期間 （※固有の技術検討項目は想定されない。上記1.～2.の技術検討結果等に基づき定量化される）		
4. 回収可能性に係る費用（※固有の技術検討項目は想定されない。上記1.～3.の技術検討結果等に基づき定量化される）		

● シナリオ 2：全量回収を選択した場合

4万本以上の廃棄体の回収作業にはある程度の時間を要する。安全な回収作業を行うためには、回収作業が完了するまでの期間中の作業安全性が確保されている必要がある。図-3に示すように、回収実行の判断を、回収時の作業安全性が確保できる期間の終期から全量回収作業に要する期間を差し引いた時点までの期間内で行えば、作業安全性が確保された期間内で回収作業を終えることができる。

● 回収可能性の維持期間の終期

安全な管理が可能な期間とは、回収を含む操業期間中と閉鎖後長期の双方の安全性を満足できる期間と考えることができる。この期間について、図-2及び図-3にそれぞれ示した2つのシナリオと安全性の関係をまとめ、図-4のように表現した。

図-4は、シナリオ2に関連する操業期間中の安全性が確保できる期間が、判断の期限を決定している場合の模式図である。この期限を過ぎた場合は、回収時の作業安全性に対する不確実性が高まることを意味している。この期限を超えて更なる維持期間の延長を選択する場合には、作業安全性の確保のための追加の対応が必要になり、回収コストの増加に繋がる。この選択の合理性については、将来世代の判断に委ねられることになる。

このような関係性より、全量定置後に新たに追加される可能性のある回収可能性の維持期間の終期、すなわち回収して別の管理方策に移行する／回収せずに地層処分施設を最終閉鎖する判断が可能な期限は、「閉鎖後長期の安全性への影響が許容できる期間の終期」と③から①を差し引いた「作業安全性の観点から回収実行を選択する期限」の早い方となる。つまり、基本方針が要求する回収可能性の維持期間は、処分施設に廃棄体を1体定置した時点を始めとし、上記の判断の期限を終期とする期間と定義することができる。なお、確保すべき安全性のレベルについては、今後整備される安全規制制度などからの要求が、その指標の一つになると考えられる。

4. 回収可能性に係る検討、技術開発の取組み

4.1 維持期間の設定方法を整備するタイミング

基本方針が要求する回収可能性の維持期間については、放射性廃棄物WG中間取りまとめにおいて、

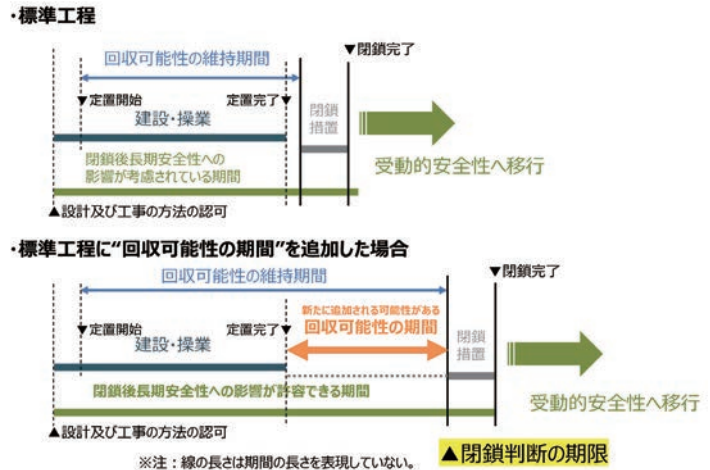


図-2 最終閉鎖の判断期限の模式図

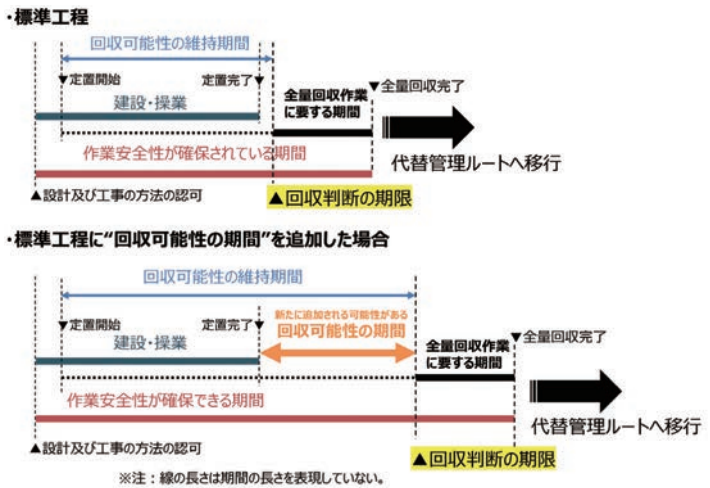


図-3 全量回収の判断期限の模式図

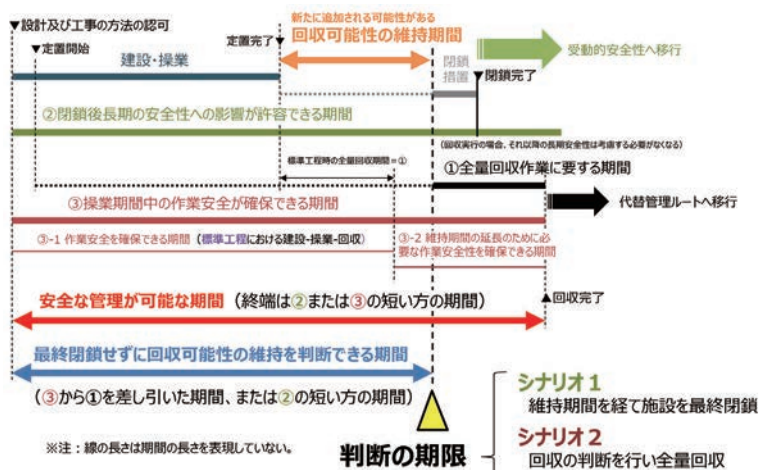


図-4 最終閉鎖／全量回収の判断の期限の模式図
(※作業安全性が維持期間の終期となる場合)

その影響を調査研究した上で地元の意向等も踏まえて決定・見直しを図るものとされている。また、計画される維持期間中の施設の状態や維持・管理方策を踏まえて、その間の安全性や閉鎖後の安全性への

影響が安全規制制度のもとで審査されることも想定されることから、事業許可申請段階までに結論が必要と考えられる。さらに、事業開始後に当初計画よりも維持期間を長くすることは、図-4 に示すような安全性を担保できない可能性も懸念される。

以上より、回収可能性の維持期間を設定する手法が求められるタイミングは、地元（議論する相手）が具体化され、議論が始まる段階と想定される。よって、定置概念や処分場設計を各調査段階で得られる情報に基づいて具体化していく過程で、回収可能性がどのように担保されているのかを示すため、技術的な論拠に基づく手法を予め用意しておくことが肝要である。

このような課題認識の下、NUMO-SC に例示された2概念を対象として、図-4 の①～③それぞれを定量的に示すための手法の検討、及び技術開発を進めている。以下に、その概要を示す。なお、具体的な実施内容や成果などは事業報告書⁴⁾を参照されたい。

4.2 回収技術の高度化開発

回収作業の技術的実現性、全体回収作業に要する期間（図-4 の①）の定量化、作業時間の短縮（容易性の向上）に資する技術情報の提示に向けて、廃棄体の回収作業の具体化、及び適用可能な回収技術の整備を進めている。

● 回収作業の技術的実現性

回収手順と技術（手法、装置、設備、など）の整備状況を整理し、回収作業の技術的実現性をシステムとして提示することを目的とし、状態Bの処分場から廃棄体1体を回収して地上で保管するまでの一連の作業手順や個別作業の内容を具体化した。処分坑道の再開放（力学プラグの撤去と埋戻し材の再掘削）、廃棄体の回収（土質材料の除去、処分坑道から坑底施設までの搬出）、地上での保管（坑底施設から地上までの搬出、代替管理方策への移行までの保管・管理）の3つの大工程に整理した。また、回収作業時の特有の作業として、処分坑道からの搬出（回収）前の廃棄体を拘束する土質材料の除去が抽出された。

● 回収作業に要する時間の定量化

表-1 に示すように、回収作業時間は廃棄体1体当たり、あるいは処分坑道1本当たりのような単位領域当たりの回収時間と、回収の対象となる廃棄体の全量回収に係る全体作業時間を定量化項目として挙げている。単位領域当たりの回収時間は、回収工程の分析と各作業に要する時間からある程度定量的に見積もることが可能である。一方で全体作業時間は、単位領域当たりの回収時間と数量との単純な比例関係にはなく、処分場の地下施設の設計（地下施設の展開や坑道設計等）に対応した作業動線や物流容量、各作業の組合せの最適化・合理化を経て算出される。

図-5 は、処分坑道の再開放期間が回収作業に伴う発生土の搬出経路である立坑の能力によって決まると仮定した場合の、作業手順の組立ての例である。この場合、全体回収作業に要する期間（図-4 の①）は、図-5 に示すように、区画の再開放時間×（区画数+1）で見積もることができる。

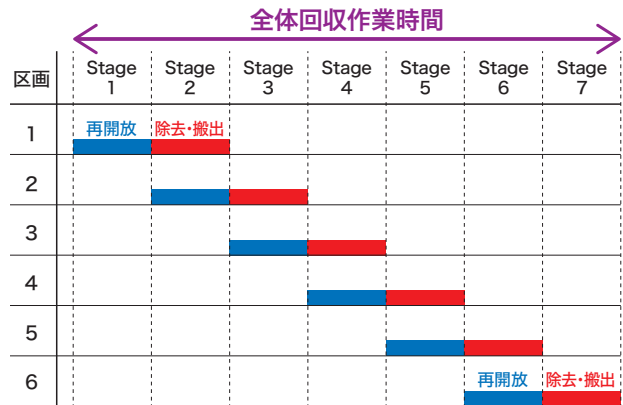


図-5 処分場全体の回収作業期間区画数6の例

● 廃棄体周囲の土質材料を除去する技術の整備

地下施設の施設設計が具体化できない現在の事業段階を踏まえ、当面は単位領域当たりの回収時間に焦点を当てて検討を進めることになるが、今後、全体作業時間を見積る上でも、最小単位である廃棄体1体当たりの回収時間は必須の情報である。回収の個別作業に対して、一般土木や産業に適用されている既存技術が適用できる場合は、実機の仕様（カタログ値など）や工事積算基準などから作業時間を見積もることができる。一方で、地層処分事業の回収に特有の作業である廃棄体周囲の土質材料の除去技術については、技術的実現性の確認及び作業時間の見積りに必要な技術情報の整備が必要である。

NUMO-SC に例示された2概念のうち、処分孔竖置き方式では、閉じ込め機能を有するオーバーパックに機械的な損傷を与えずに周囲の緩衝材を安全に除去するため、流体を用いた除去技術の整備を進めている。これまでに塩水による緩衝材のスラリー化促進作用を利用した緩衝材除去システムを整備しフルスケールでの技術的実現性を提示するとともに⁵⁾、ウォータージェット化により除去作業時間を処分孔1つ当たり5時間程度に短縮できる見通しを得ている⁴⁾。処分坑道横置き・PEM方式では、PEMと処分坑道間に施工された隙間充填材を、外周部とPEM周辺の2段階に分けて除去することが考えられている²⁾。このうち外周部の比較的広い範囲を機械的に除去する技術の整備に着手している。これまでに、処分坑道内に定置されている複数のPEMに対して連続して除去作業が実施可能なPEMを跨ぐ構造の

装置概念を提示した。また、装置前方で連続的に切削・排土を行う除去ユニットの実現に向け、既存の軟岩用のドラムカッターによる隙間充填材を模擬した供試体の切削要素試験を実施し、PEM1 体当たり 5 時間で除去できる見通しを得るとともに、ベントナイト混合土である隙間充填材を連続的に除去するカッター形状の具体化に資する知見を取得した⁴⁾。

4.3 回収の容易性を高めた設計オプションの開発

回収手順の合理化や、個別作業を迅速化しても、回収作業には一定の時間を要する。更なる迅速化が望まれるような状況を想定して、回収の容易性を設計に考慮する技術的アプローチについても検討を進めている。図-5 のような回収作業時間となる場合は、状態 B の処分坑道の再開放時間を短縮することが効果的である。処分孔縦置き方式では処分孔を近接させることによる処分坑道長さの短尺化、処分坑道横置き・PEM 方式では隙間充填材の除去作業を省略する処分坑道の狭隘断面化といった詳細設計オプションを考案するとともに、地層処分事業としての成立性、及び建設・操業の技術的実現性の提示に向けた課題の整理、具体的な検討に着手している。

4.4 維持に伴う影響の定量化手法の整備

基本方針においても、最終処分施設を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等について調査研究を進め、最終処分施設の閉鎖までの間の特定放射性廃棄物の管理の在り方を具体化することが求められている。閉鎖後長期の安全性への影響が許容できる期間（図-4 の②）、操業期間中の安全性が確保できる期間（図-4 の③）について、表-1 の安全性への影響の項目に示したの具体的な視点を踏まえ、安全性を定量化する手法の整備を進めている。

回収作業を含む操業期間中の安全性への影響の定量化では、建設・操業期間中からの地下構成要素の状態や機能の変遷を扱う必要がある。そこで、処分孔縦置き方式の状態 B に至る建設・操業工程を分析し、時間・空間スケールの把握、時間経過とともに状態が変遷していく処分施設の構成要素の整理を行った。また、回収可能性の維持に伴い影響を受ける対象ごとに、時間・空間スケールに関する整合性を確認できるように表現するため、閉鎖後長期の安全評価でも採用しているストーリーボードを導入した。

整備を進めている回収技術（4.2 参照）では、埋め

戻した坑道を再利用して廃棄体を回収することを前提としている。図-3 に示した回収実行の判断期限の設定において、操業期間中の安全性が確保できる期間は重要な定量化項目である。ストーリーボードの改善、定量化すべきプロセスのサブシナリオの形式での整理、定量化に当たっての課題の抽出と、地下構造物の安定性及び供用性の定量化手法の整備に向け、着実に検討を進めている。

5. おわりに

地層処分事業への可逆性の導入に対する社会の信頼感を高めるため、回収手順や技術の更なる具体化、試験による技術的根拠に基づく実現性の提示、並びに基本方針に示された回収可能性を維持した場合の影響等についての課題に対し、今後も着実に取り組んでいく。

参考文献

- 1) 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)
- 2) 原子力発電環境整備機構, 包括的技術報告: 我が国における安全な地層処分の実現 - 適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築 -, NUMO-TR-20-03, 2021.
- 3) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する研究開発事業（可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書（第 3 分冊）、2018.
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター、日本原子力研究開発機構、令和 4 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（回収可能性技術高度化開発）3 ヶ年の取りまとめ報告書、2023.
- 5) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 26 年度地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）報告書、2015.

（本稿は、2023 年 9 月 29 日に開催した「2023 年度第 2 回原環センター講演会の講演「地層処分事業における回収可能性が維持された状態とは？～技術的アプローチによる維持期間の定義方法について～」に基づき作成しました。）

編集発行

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
ホームページ <https://www.rwmc.or.jp/>