

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FUNDING AND RESEARCH CENTER TOPICS

2025.7.NO.154

目次

センターの活動状況	①
サイト選定における公衆参加 ～ドイツ～	③
地層処分施設の設計・操業技術に関する最適化の考え方	⑤

センターの活動状況

運営状況

第45回理事会の開催

2025年6月5日（木）に対面及びWeb会議システムの併用により開催した第45回理事会において、以下の議案を付議し、それぞれ原案のとおり承認可決されました。

1. 2024年度事業報告の承認について
2. 2024年度決算の承認について
3. 第33回評議員会（定時）の招集について

第33回評議員会（定時）の開催

2025年6月27日（金）に対面及びWeb会議システムの併用により開催した第33回評議員会（定時）において、以下の議題を審議又は報告し、議案については原案のとおり承認可決され、報告については了承されました。

1. 議事録署名人の選任について
2. 2024年度事業報告について（報告）
3. 2024年度決算について（報告）
4. 評議員の選任について
5. 監事の選任について
6. 理事の選任について

今回の評議員及び理事の選任により、次の方が交代されました。

(敬称略)

区 分	退 任 者	新 任 者	新任者所属・役職
評議員	新井 史朗	増井 秀企	一般社団法人日本原子力産業協会 理事長
評議員	近藤 駿介	山口 彰	原子力発電環境整備機構 理事長
理事（非常勤）	佐々木敏春	安藤 康志	電気事業連合会 副会長

第 46 回理事会（決議の省略）

第 33 回評議員会（定時）において任期満了に伴う理事全員の選任が行われたため、同評議員会において選任された理事及び監事に対し、武谷典昭理事を理事長に、淵上善弘理事を専務理事に、西川進也理事を常務理事にそれぞれ選定することについて提案を行い、提案どおり可決する旨の理事会の決議があったものとみなされました（2025 年 6 月 27 日付）。

成果等普及活動の実施状況

2025 年度 第 1 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から処分の全体像を把握する第一歩として、安全評価の基礎知識を身につけたい技術者・研究者を対象とした、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」を以下のとおり開催しました。講義後の総合討論では、講義への質疑応答を通じて、理解を深めていただきました。

開催日時：2025 年 5 月 30 日（金）9：30～17：30

開催会場：京都大学 東京オフィス 大会議室 A,B

講 師：公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問 朽山 修 氏

プログラム：

講義 1：原子力・放射線の利用とそれに伴うリスク

講義 2：放射線の健康影響と放射線防護

講義 3：放射性廃棄物処分の基本戦略

総合討論



サイト選定における公衆参加 ～ドイツ～

情報調査室
徳島 秀幸

今から約 20 年前にドイツを初めて訪問した。その際、低中レベル放射性廃棄物（ドイツでは非発熱性放射性廃棄物とも呼ぶ）処分場のコンラッド処分場を見学した。当時、コンラッド処分場は、許可発給に関して地元が起こした訴訟が係争中であったため、必要な維持管理以外の作業はすべてストップしていた。また、高レベル放射性廃棄物（ドイツでは発熱性放射性廃棄物とも呼ぶ）に関しては、ゴアレーベンを処分場候補地として決めていたが、政権交代の影響があり、安全技術上の疑問点などが解明されるまで調査が凍結された状態であった。これらの事例からわかるように、放射性廃棄物処分事業の円滑な推進のためには、地元や政党などを含めた社会としてのコンセンサスを得ることが不可欠であることを示している。

ドイツの高レベル放射性廃棄物処分事業に関しては、結局、社会的なコンセンサスが得られていないことを理由として、ゴアレーベンでの処分計画をいったん白紙に戻し、2017 年から新たなサイト選定を開始している。このサイト選定では、我が国の自治体の自発的な参加に基づく方式ではなく、3段階のサイト選定プロセスにより地質学的観点などから適性の高い場所を絞り込み、地元へ申入れを行う方式である。我が国の場合もドイツの場合にもサイト選定の初期の段階から公衆を関与させ、地元や社会全体のコンセンサスを得ることが共通の課題であると言える。

本稿では、まず、ドイツにおいて現在行われているサイト選定手続きの概要を紹介したうえで、サイト選定手続における公衆参加の枠組みなどについて紹介する¹⁾。

ドイツにおけるサイト選定

ドイツで現在行われているサイト選定は、2013 年に制定（2017 年に改正）された、いわゆるサイト選定法²⁾に基づくものである。このサイト選定法では、ドイツ全土からスタートし、以下の 3 段階で最も適性のあるサイトを絞り込んでいく手続きが規定されている。

第 1 段階（不適切な地域の除外）

- 既存の地質データを基にドイツ全土を対象に適性評価を行い、不適切な地域を除外
- 予備的安全評価等を行い、地上からの探査地域を選定

第 2 段階（地下からの探査サイトの選定）

- 地上から探査を実施
- 探査結果をもとに、地下探査を行うサイトを選定

第 3 段階（地下探査を経て最終選定）

- 地下での探査結果をもとに処分場サイトを提案
- 連邦議会で法律を制定し、サイト選定を確定

このサイト選定で特徴的なことは、各段階の最終決定に際しては法律を制定すること、規制機関が公衆参加を推進すること、また、サイト選定の初期の段階から 3 階層での公衆参加手続きを行っていくことである。では、次にこの公衆参加手続きについてみていくことにする。なお、現在は第 1 段階が行われているところである。

サイト選定における公衆参加

前述のように、ドイツのサイト選定では、適性の高い場所を絞り込んでいくこととしており、サイト選定プロセスにおいては、選定された地域が含まれる自治体に拒否権はないとされている。このため、現在行われているドイツのサイト選定手続きでは、サイト選定の初期の段階から地元だけでなく、社会的なコンセンサスを形成したうえで処分場サイトを決定するための公衆参加の枠組みを設けている。

サイト選定法では、連邦レベル、地域をつなぐ地域横断レベル、地域レベルの 3 つの階層それぞれで公衆参加の枠組み・委員会を設置し、情報提供等公衆参加を進めていくことが規定されている（写真 1）（次ページ）。以下にそれぞれの構成、役割等を示す。

連邦レベル：「社会諮問委員会³⁾」

役割：サイト選定の全プロセスを中立的な立場で監視し、関係者間の調整を行う。

構成：18 名（12 名は連邦議会・参議院選出、6 名は市民から選出）。市民枠には若者世代の代表も含まれる。

特徴：政府から独立し、選定過程の透明性向上と信頼性確保を目的とする。

地域横断レベル：「サイト区域専門会議」

「地域代表者専門会議」

役割：候補地域の自治体・住民・専門家が集まり、

合意形成を図る。

特徴：自治体や社会組織の代表が参加し、透明性の高い議論を展開。

地域レベル：「地域会議」

役割：処分場候補サイトの地元住民が意思決定に関与し、サイト選定に関する議論を行う。

構成：代表者グループ（自治体や社会組織の代表）
総会（有権者全員が参加可能）
公衆（一般市民も含む）



写真1 公衆への情報提供の様子

公衆参加と社会的受容性の向上

社会的なコンセンサスが得られなかったことから再度サイト選定を行うことになったため、現在行われているサイト選定では、公衆参加手続きが強化されている。公衆参加の徹底は、処分場選定の社会的受容性を高める上で非常に重要な要素である。ドイツの事例から、参考となるポイントとしては以下が挙げられる。

<透明性の確保>

- ・選定プロセスを公開し、国民が理解しやすい情報提供を実施。
- ・説明会やワークショップの定期開催により、住民の不安を軽減。

<地域住民との対話強化>

- ・地元密着の地域会議の設置を通じて、住民が意見を出せる環境を整備。
- ・住民の意見を考慮し、納得感を持てる選定プロセスを構築。

<段階的な合意形成>

- ・初期の段階から住民を巻き込み、反対意見も吸い上げながら選定を実施。
- ・地域と国全体のバランスを考慮した意思決定手法を採用。

終わりに

昨年 2024 年 12 月に約 20 年ぶりにコンラッド処分場を訪問した。コンラッド処分場は、訴訟が終了し許可が有効となった 2007 年以降、処分場へ改造するための工事が行われており、訪問時点でも改造工事が

が続けられていた。実際に坑道は大幅に拡張され、放射性廃棄物の定置坑道も概ね完成していた。その他、地上でも新たな施設が作られており、コントロールルームも刷新され、近代的な設備が導入されていた。しかし、コンラッド処分場の操業開始は、今から 5 年程度先の 2030 年代初めが見込まれている。これは 1982 年に最初に許可申請が出されてから、50 年近く要したことを意味している。

一方、高レベル放射性廃棄物処分に関しては、当初、2031 年にサイトを決定することを目標としていたが、このスケジュールは大幅に遅れ、今から数十年後となる可能性がある。このように、放射性廃棄物処分事業は、非常に時間がかかるものであり、円滑にすすめるためには、初期の段階からの地元住民や国民の理解を得ていくことが重要である。公衆参加は、サイト選定の社会的受容性を向上させる鍵となるものであり、ドイツのように、科学的適性の評価と公衆参加を組み合わせた枠組みを導入することは、サイト選定を効果的に進めることに貢献できる可能性がある。

本稿で紹介したドイツの公衆参加の枠組みのうち、連邦レベルの社会諮問委員会には、これまでにない試みも導入されている。独立した立場から実施主体や規制機関、市民の仲介役として働くことや、長期にわたる処分事業を意識した若年層の委員を含めることなどが例として挙げられる。

現時点では、実際に調査が行われる地域が絞り込まれておらず、今後より狭い範囲の候補地域が明らかになるにつれ地元の反対は増えてくる可能性がある。地元には、より密着した地域会議等が設定され、地元との対話が行われていくことになるが、本稿で紹介した各レベルでの公衆参加手続きの有効性の有無は興味深く、我が国にとっても参考となる事例と考えられる。

ドイツやその他諸外国の地層処分の状況について知りたい方は、原環センターウェブサイトの「海外情報ニュースフラッシュ (<https://www2.rwmc.or.jp/nf/>)」や「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について (<https://www2.rwmc.or.jp/>)」をご覧ください。

（本稿の内容は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業である「放射性廃棄物海外総合情報調査」の成果に基づいています。）

<参考文献>

- 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 2025 年版、資源エネルギー庁
- 2) 高レベル放射性廃棄物の最終処分場のサイト選定に関する法律（サイト選定法）
- 3) 社会諮問委員会ホームページ、https://www.nationales-begleitgremium.de/EN/Home/home_node.html

地層処分施設の設計・操業技術に関する最適化の考え方

処分工学技術プロジェクトチーム
川久保 政洋、小林 正人、阿部 孝行

1. はじめに

近年、国際機関や主要国において、高レベル放射性廃棄物の地層処分における処分概念や設計の“最適化”に関する具体的な考え方が示されつつある。最適化は放射線防護や経済性に加え、操業技術に関する実証性、遠隔操作性、品質保証、規制適合性、メンテナンス性など多様な要素を含むが、汎用的な方法論としては未だ確立されていない。わが国においても、サイト選定の進展に応じて、国際的な動向を踏まえた上で、段階的に設計を進めるための最適化の具体的な方法論の構築が求められている¹⁾。本研究では、地層処分における処分場設計及び操業技術の最適化のための評価項目や指標を工学的観点から整理し、最適化の方法論の整備に向けた検討を行った。

2. 最適化の方法論とその活用先

原環センターでは、2020年度の自主調査研究「地層処分施設の設計・操業技術の最適化手法に関する研究」の一環として、民間企業有志及び関係機関の協力を得て「設計・操業技術の最適化手法に関する研究会」（以下「最適化研究会」という。）を設置し、我が国に適用可能な最適化の方法論の提示に向けて以下のステップで検討を進めた²⁾。

- 1) 諸外国の先行検討事例等の調査
- 2) 最適化の考え方に関する検討・整理
- 3) 最適化の試行による評価項目の素案の設定

ステップ1)では、国際機関や海外の実施主体の最適化に関する検討状況を調査し、以降のステップで参考になる情報を整理した。ステップ2)では、諸外国の検討動向を踏まえ、わが国に適用可能な最適化の考え方について検討し、多様な観点から構成される最適化の評価項目及び評価指標の素案を整理した。ステップ3)では、複数の代替設計オプション案を対象として、最適化の評価項目の適用性を確認するとともに、必要に応じて評価項目の見直しを行った。

2.1 最適化の考え方と評価項目の整理

(1) 諸外国の検討事例を踏まえた最適化の考え方

国際機関（ICRP、IAEA、OECD/NEA）及び主要国（フィンランド、スウェーデン、米国、フランス、

スイス、カナダ）の公開文献から、国際的な最適化の動向を分析し、わが国への適用を目指した最適化の考え方を整理した。最適化に関する主な考え方を以下に示す。

- 最適化の主要な観点は放射線防護である。
- 最適化は、複数の設計オプション、或いは、複数の建設・操業技術オプションからの選択における比較評価である。
- 最適化のための評価項目として「処分場の設計」だけではなく「技術的实现性」に関連する項目も挙げられている。
- 評価項目のうち、定量的な評価によって裏付けることが可能なものもあるが、本質的には定性的な評価である。
- 最適化では、評価項目を体系的に扱い、評価項目間の相対的な重要度が考慮される。
- 各段階における利用可能な最善技術（BAT）を適用することで最適化を支援できる。

諸外国では、技術的实现性に関する項目も最適化の評価項目の一つとして検討されており、設計された処分場が技術的に構築可能か否かという観点は極めて重要である。操業技術の特性や制約に応じて設計を更新する必要があることを考慮すると、柔軟な対応力を確保するためにも、早期の段階から操業技術オプションに関する最適化の検討を進めることが、研究開発計画の立案にとっても有益である。

以上を踏まえて、わが国では最適化の対象を以下の二つに区分して、最適化を考えることが効果的であると考えられる。

- ①設計
- ②操業技術（設計された処分場を構築するための建設、製造・施工技術）

とくに、操業技術について、地下構成要素（オーバーバック、緩衝材、埋戻し材、プラグ、坑道、支保工等）ごとに細分化して最適化を適用することにより、それぞれの技術の特性に応じた適切な評価項目の設定が可能となる。さらに、処分場の領域に対して、どのようなスケールで設計や操業技術の最適化を行う

べきかについても検討しておく必要がある。ひとつの処分場に単一の設計・操業技術を適用する必要性は必ずしもなく、処分場の領域内で地下環境の特性が異なる場合には、パネル単位や処分坑道単位で異なる設計や操業技術を適用することにより、システム全体としての最適化が実現される可能性がある。

(2) 設計の最適化に関する評価項目の素案の設定

諸外国の検討動向等から抽出した最適化の評価項目を参考にして、最適化研究会で考案した複数の代替設計オプションに対して比較評価を行うことにより、処分場設計の最適化の評価項目（素案）を設定した。比較評価の基となるリファレンス設計には、「処分孔竖置き方式・パネル型」を設定した。代替設計オプション案及び比較評価の結果については、参考文献²⁾を参照されたい。

上記の比較評価の結果、以下の13項目を設計の最適化の評価項目として設定した。

- ①詳細設計への具体化の見通し／設計構築の実現性
- ②設計のロバスト性・柔軟性
- ③建設・操業性
- ④品質保証・品質管理のし易さ
- ⑤閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ
- ⑥閉鎖後長期の性能評価の確からしさ
- ⑦閉鎖前の安全性（放射線防護）
- ⑧閉鎖後長期の安全性（放射線防護）
- ⑨一般労働安全
- ⑩環境保全
- ⑪回収可能性
- ⑫費用・経済性
- ⑬その他（社会的受容性、制度的要件適合性等）

2.2 地層処分における最適化の活用先

最適化というツールの活用方法としては、以下の2つが考えられる。

- 1) 処分場設計における柔軟性の確保と段階的な詳細化及び研究開発課題の明確化
- 2) 安全規制への対応

包括的技術報告書では、段階的な調査と地質環境情報に基づき処分場の設計を最適化する方針が示されている³⁾。設計と操業技術の両面から多様なオプションを準備し、早い段階で最適化を実施することで、技術開発の課題抽出と研究開発計画の具体化を図ることができる。

また、中深度処分に関する規制基準において、複数の設計案を比較評価し、放射性物質の移動抑制性能に優れた設計を選定することが求められている⁴⁾。

地層処分に対してもこのような規制基準が整備される場合には、設計の最適化による評価結果は、規制当局に対する設計の妥当性の説明根拠としても活用することができる。

以降では、上記1)の観点から実施している処分場設計の最適化の検討例として、回収可能性に着目した処分場の設計オプションの検討、操業技術の最適化に向けた取組みの例として、現行の処分場設計に対する坑道埋戻し技術オプションの整備の実施内容を紹介する。

3. 回収可能性に着目した設計オプションの検討

処分場に定置された廃棄体の全量回収に要する期間（時間）は、回収時の作業安全性が確保できる期間であるとともに、回収作業の観点から回収可能性の維持期間を設定するための定量化項目の一つとされている⁵⁾。回収可能性の維持に伴う安全性への影響が許容できる前提の下では、全量回収に要する期間が短い（回収の容易性が高い）方が、維持期間をより長く設定することができる⁶⁾。

回収の容易性向上における処分場設計の最適化は、作業時間をより短縮するため、放射性廃棄物の地層処分の安全が確保される範囲内で、オプションを適切に選択する行為と定義することができる。本章では、処分場の設計及び作業に適用する技術の2つの観点から、回収容易性の向上（作業時間の短縮）に向けたオプションの選択について述べる。なお、本章で扱う回収は、処分場の安全性に疑義が生じた場合の是正措置ではなく、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。）に示された政策変更（将来世代の技術的選択肢の確保）を対象としている。

3.1 適用する技術の高度化による容易性向上

包括的技術報告書³⁾には、「処分場の設計フロー」に従って、わが国で想定される複数の地質環境モデルに対して、処分場への要求事項を満たすように検討された処分場の仕様が複数例示されている。そのため、これらの処分場の仕様例に対して、技術オプション（工法、装置、計画）によって回収の容易性を向上させるアプローチならば、処分場の安全機能への影響は無いと考えられる。以下では、新第三紀堆積岩類を母岩とし、深度500mに設置される処分孔竖置き方式を例に、技術による回収容易性の向上の考え方について述べる。

(1) 回収作業手順と必要な技術

回収時の地下施設の状態として、処分坑道が埋め戻され、力学プラグが設置された状態（状態B）が設定されている³⁾。この状態からオーバーバック1

体を回収して地上施設で保管するまでの一連の作業手順を具体化したものを図1に示す⁶⁾。

図中に破線枠で示した個別作業に対し、処分場の建設・操業や一般土木で用いられる技術の適用性を評価した上で転用するとともに、回収に特有の技術を整備することになる。これにより、回収作業の技術的実現性が確保される。

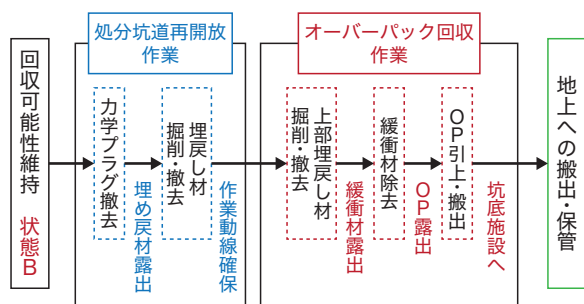


図1 回収作業の具体的な手順

(2) オーバーバック1体の回収容易性の向上

オーバーバック1体の回収に要する時間は、図2に示すように、各作業に要する時間と、装置の入替時間の和になる。回収の容易性は、作業自体を迅速化する技術の適切な選択、或いは開発によって向上する。具体的な例として、オーバーバック周囲の緩衝材除去への塩水ウォータージェット方式の採用が挙げられる⁶⁾。

場所	作業内容	プラグ	オーバーバック1体目
地下坑道	再開放	撤去	(入替)
	除去・搬出		(入替)
	(坑底施設)		積替え
斜坑・地上	搬出・保管		

図2 オーバーバック1体の回収に要する時間

(3) 作業の合理化による回収容易性の向上

図2に示したオーバーバック1体の回収手順の繰返しにより、処分坑道内に定置された複数体のオーバーバックを回収することも可能である。一方、図3のように同一作業を集約すれば、作業ごとに異なる装置の段取り替えを省略でき、より迅速に回収作業を実施することができる。

さらに回収作業時間を短縮する方策として、複数の領域での同時且つ独立作業が考えられる。図4は複数本の処分坑道における作業手順の例であるが、処分坑道1本ずつ順に実施する場合と比較して、約半分の時間で回収が可能となる。

このように、個別技術の高度化と作業合理化の2つの観点から回収作業計画を具体化することで、各作業に適用する技術オプションの選定や開発課題が明確になると考えられる。

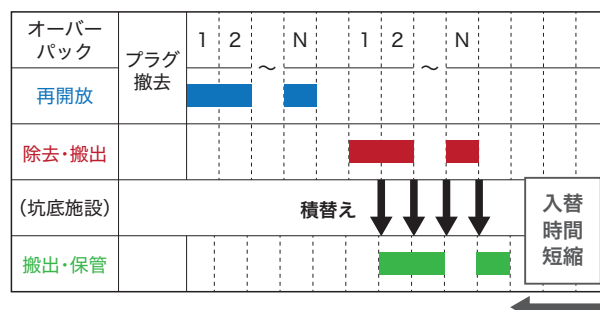


図3 処分坑道内での同一作業の集約

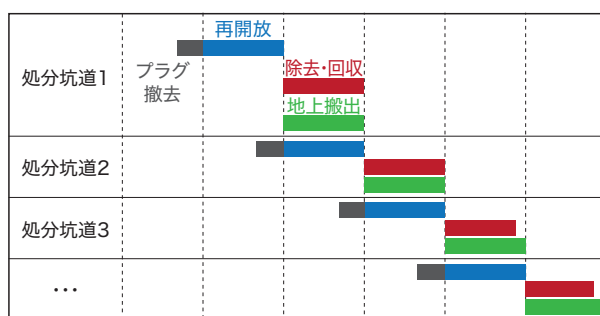


図4 複数の処分坑道での同時且つ独立作業

(4) 技術的アプローチによる容易性向上の限界

前述した“同時且つ独立作業”を処分場全体の規模で考えた場合、区画単位での作業の集約に帰結する。これは建設・操業時の区画分割と共通である。再開放が完了した処分区画から回収に移行するため、作業時間が「再開放≧回収」となるように回収技術を整備、或いは複数坑道で同時稼働とした場合に、回収作業時間は最も短くなる。図5に示すように、全量回収に要する時間は、区画内の処分坑道の再開放に要する時間×(区画数+1)となる。

処分坑道の再開放に要する時間は、埋戻し材を掘

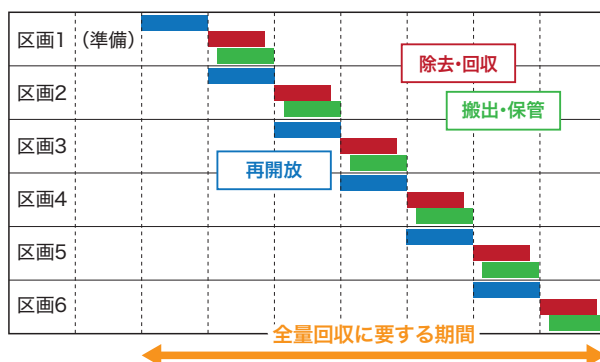


図5 複数の処分区画で同時且つ独立作業

削する技術（装置の能力や台数など）で短縮が可能であるが、地下の空間的な制約条件の下では限界がある。さらに、発生する掘削土の地上への搬出能力の影響を受ける。具体的には、地上への資機材の搬入出経路に設定されているアクセス立坑の能力である。これは、既存の処分場の仕様例に対して、技術的アプローチによる回収容易性の向上に上限があることを示唆している。

3.2 設計オプションによる容易性向上

より長期の回収可能性の維持期間の要求に対して、更なる回収の容易性向上が必要となることも想定される。これに対して、技術的アプローチに加え、処分場設計に回収の容易性を予め考慮しておくことも考えられる。

(1) 技術的アプローチの補完

既存の処分場設計に対する設計オプションの変更、及び新たな設計オプションの追加は、処分場の閉鎖後長期の安全性に影響を与えない範囲とする必要がある。回収容易性の向上に対する技術的アプローチにおいて制約となり得る掘削土の地上への搬出能力について、この範囲で適用可能なオプションを具体化した。以下に設計オプションの例を挙げる。

- ・アクセス斜坑の活用：廃棄体の搬入出経路である斜坑を掘削土の搬出経路としても利用する。既存の処分場設計に変更は無いが、管理／非管理区域間の換気や動線の検討が必要である。
- ・アクセス立坑の増設：回収の判断後に立坑を新たに増設する。処分場設計に対し、予め効果的な増設位置を設定する、地下坑道に接続場所を設けるなど、事前の検討、準備が必要である。

(2) 処分場設計の変更

状態 B の処分坑道を再開放した際の発生土の総量は、処分坑道の断面形状と総延長に依存する。この総量そのものを削減することで、全量回収に要する時間を短縮することができる。坑道断面の縮小は坑道内で使用する装置の制約となるため、ここでは、処分坑道の短尺化について述べる。

新第三紀堆積岩類を例にすると、処分坑道長は処分孔間隔（6.66m）と定置本数（131 体）、取付部の長さ（30m × 2）より、約 930m となる³⁾。この処分孔間隔 6.66m は、裸孔での力学的安定性評価に基づき 3d（d: 処分孔径）で設定された値である。一方、処分孔同士が接触する条件 d において廃棄体からの熱影響を評価した結果、オーバーパック表面の最高温度が 100℃ 未満となった⁶⁾。これは、図6 のように人工バリア同士が接触し、坑道総延長を約 1/3 程度

に短尺化する余地があることを示唆している。この処分孔の力学的安定性は、母岩の亀裂を考慮した上で、孔壁の補強や孔を連結させ補強したトレンチ型など、処分坑道の設計オプション、技術オプションで確保する必要がある。

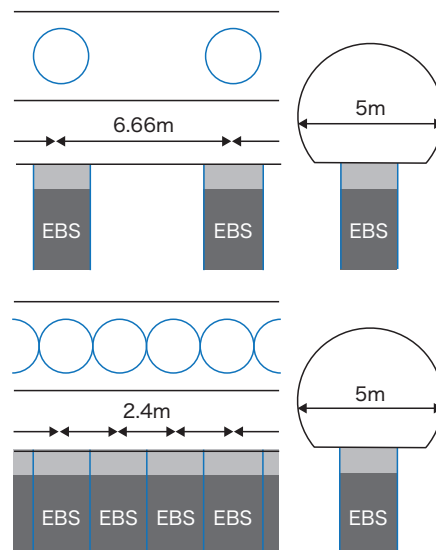


図6 回収容易性を向上させた設計オプションの例
（上：現行の処分坑道、下：処分孔近接）

(3) 処分場設計の最適化におけるオプション

2. で述べたように、最適化はその対象を「処分場設計」と「操業技術」に区分して実施することが効果的である。その本質は技術と設計間でフィードバックし合うことで、処分場設計の段階的な詳細化、技術開発課題の明確化にあると考えられる。包括的技術報告書に例示された処分場設計に対する回収技術の整備及び作業の合理化による容易性の向上の観点から、技術による作業時間の短縮効果とその試算方法の考え方を示した。これにより、技術による時間短縮の限度を把握するとともに、処分坑道レイアウトに係るオプションの更新として処分場設計にフィードバックした。

本章では最適化の評価項目のうち「⑪回収可能性」に係る回収の容易性向上の観点での検討例を示したが、他の評価項目についても、同様に検討することで、処分場概念レベルの設計オプションの技術的実現性、延いては地層処分事業の信頼性向上に寄与するものと考えられる。

4. 埋戻し施工技術オプションの整備

4.1 埋戻し材の設計・施工技術の開発

埋戻し材には、再冠水後の地下水の侵入に伴う膨潤により周辺岩盤と同等の水理学的特性を発揮し、坑道内が卓越した地下水の流動経路となることを抑制する機能が求められる。設計要件には低透水性と

製作施工性が設定されており、使用材料には低透水性を確保するためのベントナイトと材料調達、経済性の観点より建設時に発生する掘削土の利用が想定されている³⁾。また、対象となる坑道は処分坑道、主要坑道、連絡坑道などであり、様々な坑道への適用性を検討する必要がある（表1）。

原環センターでは、候補サイトの地質環境や施工環境に応じて柔軟に埋戻し材の設計仕様及び施工技術を選択できるように、埋戻し材の材料特性や埋戻し施工技術オプションなどに関する基盤情報の整備を進めている。埋戻し施工技術オプションの整備では、複数の施工技術について要素試験や工学規模での施工試験を実施し、技術の実証や材料・施工仕様の設定手法の具体化を進めるとともに、施工性や施工品質に関わる施工情報を取得している。

表1 埋戻し材の設計要件及び対象坑道

設計要件	低透水性	母岩の平均的な透水係数の10倍を上限值に設定。岩盤の透水性が異なる場合には異なる埋戻し材の仕様を設定する。
	製作施工性	既存技術、実現性の見通しのある技術により坑道内での製作施工が可能であること。
使用材料	ベントナイト	低透水性の確保のため。
	掘削土	元の岩盤、材料調達、経済性の観点より有効利用が合理的。
対象坑道		処分坑道、主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道。

4.2 埋戻し材の施工技術オプションの整備

原環センターでは、施工技術オプションの整備を目的として、2018年度から2022年度には転圧工法及び吹付け工法⁷⁾、2023年度以降はスクリー工法、ブロック工法、斜め転圧工法⁸⁾を対象に、合計5工法の検討を実施している。施工技術オプションに関する研究開発では、文献の調査等を通じて既往の知見を体系的に整理したうえで、室内試験、要素試験及び小規模施工試験を段階的に実施し、材料・施工仕様の設定手法の具体化を図る。次に、これらの成果を踏まえて施工試験用の材料・施工仕様を設定し、実規模の施工試験を実施することにより、施工性の確認を行うとともに、設計・施工技術の選定に資する施工情報を取得している。

写真1に、模擬坑道（幅5m×高さ5m）における転圧工法と吹付け工法の実規模施工試験の実施状況を示す。本試験では、模擬坑道の下半部を転圧工法により、上半部及び妻・側壁近傍部を吹付け工法により施工し、施工品質や施工速度等の施工情報を取得するとともに、品質管理方法の有効性を確認した。

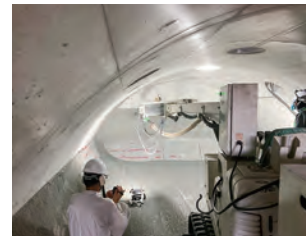


写真1 模擬坑道と実規模施工試験の状況

4.3 埋戻し施工技術オプションの評価項目（案）

施工技術オプションの整備では、埋戻し施工技術の選定に資する評価項目案を設定し、各施工技術に関する施工情報の整理を進めている。埋戻し施工技術オプションの評価項目案を表2に示す。評価項目には、坑道内における施工可能範囲、達成可能な施工品質、施工速度、原位置における施工管理の容易性、掘削土の適用範囲などが含まれており、これらは必要に応じて随時更新することになる。

表2 埋戻し施工技術オプションの評価項目（案）

	評価項目
1	対象坑道及び坑道における施工可能範囲
2	達成可能な施工品質（透水係数、乾燥密度など）
3	施工速度、施工量（m ³ /h）
4	原位置施工管理の容易性（品質保証の容易性）
5	掘削土の適用範囲（岩種、最大粒径など）
6	使用材料の柔軟性（製造、含水比の幅など）
7	施工環境に対する適応性（滴水、湧水、湿度など）
8	施工による環境影響（騒音、粉塵など）
9	その他（遠隔化・自動化、費用・経済性など）

これまでに実施した転圧工法及び吹付け工法による施工試験の結果を踏まえて、評価項目（案）の1～5の項目に対して定性的に評価した結果を表3に示す。評価の結果、両工法においては、施工速度及び原位置での施工管理の容易性に課題が認められた。これらの課題に対応するために、2023年度よりスクリー工法、ブロック工法、斜め転圧工法に関する研究開発を開始した。評価項目に基づく定性的な評価は、候補サイトの地質環境や施工条件に応じた柔軟な施工技術の選定に活用できるだけでなく、今後、整備すべき基盤情報や研究開発課題の明確化にも有効である。

表3 転圧工法と吹付け工法の定性的評価結果

	転圧工法		吹付け工法	
施工可能範囲	△	坑道上半部は別工法との組合せが必要	○	全断面、狭陰部の施工が可能
達成可能な施工品質	○	高い施工品質が可能	○	高い施工品質が可能
施工速度	△	別工法との組合せを考慮する必要あり	△	リバウンド及びその処理方法が課題
原位置施工管理の容易性	△	撤出し厚さ、転圧回数等の施工管理が必要	△	材料供給量、吹付け圧力等の施工管理が必要
掘削土の適用範囲	○	最大粒径 20mm まで利用可能	△	最大粒径 5mm 以下に限定

4.4 埋戻し施工技術オプションの最適化の例

埋戻し施工技術の選定にあたっては、地層ごとに設定される低透水性及び各坑道における施工性を満足する技術について、施工品質、施工速度、施工管理の容易性、掘削土の利用可能性等の観点から評価を行い、これらの結果を総合的に判断した上で、適切な施工技術を選定することが求められる。処分坑道（堅置き・ブロック方式）、主要坑道、連絡坑道と処分坑道（横置き・PEM方式）に対する各施工技術の相対比較に基づく定性的評価の一例を表4に示す。例えば、処分坑道（堅置き・ブロック方式）等においては、埋戻し材の低透水性及び製作施工性を満足したうえで、さらなる高密度化や均質化といった高い施工品質や施工管理の容易性が求められる場合にはブロック工法が有力な選択肢となる。また、施工速度及び施工管理の容易性を重視する場合にはスクリー工法が、掘削土の再利用を重視する場合には転圧工法や斜め転圧工法が有効である。同様に、処分坑道（横置き・PEM方式）において施工品質を重視する場合には吹付け工法、施工速度や施工管理を重視する場合にはスクリー工法が有効

表4 各施工技術の相対比較に基づく定性的評価例
(処分坑道（堅置き・ブロック方式）、主要坑道など）

施工技術	施工品質	施工速度	施工管理	掘削土利用
吹付け工法	○	△	△	△
転圧工法	○	△	△	◎
斜め転圧工法	○	△	△	◎
スクリー工法	△	◎	○	△
ブロック工法	◎	○	○	○

(処分坑道（横置き・PEM方式）)

施工技術	施工品質	施工速度	施工管理	掘削土利用
吹付け工法	○	△	△	△
スクリー工法	△	◎	○	△

である。現時点では、全ての坑道及び評価項目に対して最適と考えられる単一の施工技術は存在しない。このため、各技術の利点と課題を踏まえ、施工技術として求められる条件に応じて最適な施工技術を選定することが合理的である。

これらの施工技術の特徴を踏まえ、横置き・PEM方式の処分概念において、掘削土利用に着目した坑道全体の最適化の検討例を表5に示す。

処分坑道の埋戻し施工において、掘削土の適用範囲には一定の制約がある。具体的には、掘削土の混合率は50%程度に抑えられており、施工速度を重視してスクリー工法を選定する場合、使用可能な掘削土の最大粒径が現状では5mm以下に限定される。

掘削土の使用にあたっては、施工性及び施工品質を確保するために破碎・粒度調整を行った材料を用いることが想定されている。既存の碎石・砕砂の製造工場における製造コストや産業廃棄物発生量等の実態を踏まえると、製造量全体に対して、一般的に碎石が全体の40～60%、砕砂が20～40%、微粉が5～10%の割合で生産されている。

このため、スクリー工法による処分坑道の埋戻し施工では、掘削土の利用率は低くなり、使用材料は砕砂の利用に限定される。坑道全体における掘削土の有効利用を図るためには、処分坑道以外の坑道には碎石を活用しつつ、掘削土の混合率が高い埋戻し材の施工が可能な転圧工法や斜め転圧工法を選定することが有効な手段となり得る。これにより、坑道全体として掘削土の利用効率を高める最適化が可能となる。

埋戻し施工技術の最適化にあたっては、地上施設における材料の製造方法や坑道への搬入方法についても考慮する必要がある。また、これらの最適化によって得られた知見は、地上施設や坑道の設計に対するフィードバックとして活用することができ、設計全体の最適化に資するものと考えられる。

表5 掘削土利用に着目した坑道全体の最適化検討例
(横置き・PEM方式、新第三紀堆積岩類)

坑道	掘削量(万m³)	施工技術	掘削土の適用条件	
処分坑道	311	スクリー工法	△	砕砂のみ混合率 50%
連絡坑道	43	斜め・水平転圧工法	◎	碎石・砕砂混合率 85%
アクセス坑道(斜坑)	40	斜め・水平転圧工法	◎	碎石・砕砂混合率 85%
アクセス坑道(立坑)	10	斜め・水平転圧工法	◎	碎石・砕砂混合率 85%
掘削土発生量	404	→	掘削土利用量を最適化	碎石○万m³ 砕砂△万m³

5. まとめ

最適化研究会における検討を通して、わが国で設計及び操業技術を選択するための最適化の考え方と評価項目の素案を整理した。最適化の対象を「設計」と「操業技術」に区分することで、個々の操業技術の特性に応じた詳細かつ適切な評価項目の設定が可能である。

本報告では、処分場設計の最適化の検討事例として、回収の容易性向上の観点から回収時の作業時間の短縮の考え方を整理し、処分坑道レイアウトの設計に反映する方法を示した。また、操業技術の最適化の検討事例として、埋戻し施工技術の選定に資する評価項目の素案を整理し、これまでに実施した施工試験の結果を踏まえて定性的な評価により最適化の例を示した。

これらの検討事例のように、操業技術の最適化によって得られた結果を処分場の設計に反映し、操業技術と設計の間でフィードバックを繰り返すことが重要である。そのため、操業技術については、できるだけ早い段階から最適化の検討を進めることが効果的な研究開発計画の立案にとって有益である。また、最適化は、処分場設計の段階的な詳細化及び関連する研究開発課題の明確化に資するものであり、併せて設計選定プロセスを通じた安全規制への適切な対応にも寄与できると考えられる。

本報告では、主に工学的な観点から検討を進めたが、今後の最適化の実践に向けた更なる検討においては、地質分野や安全評価分野との連携、統合が必要である。

本報告には、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業【JPJ007597】（令和2年度～令和4年度回収可能性技術高度化開発）、（平成30年度～令和4年度地層処分施設閉鎖技術確証試験）、（令和5年度～令和6年度地層処分施設施工・操業技術確証試験）」の成果の一部を使用している。

（本稿は、2024年12月13日に開催した2024年度原環センター研究発表会の研究発表「地層処分施設の設計・操業技術に関する最適化の考え方」に基づいて作成したものである。）

参考文献

- 1) 地層処分研究開発調整会議、地層処分研究開発に関する全体計画（令和5年度～令和9年度）、2023.
- 2) 原子力環境整備促進・資金管理センター、地層処分施設の設計・操業技術の最適化手法に関する研究、RWMC-TRJ-20001、2021.
- 3) 原子力発電環境整備機構、包括的技術報告書：

わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築—、2021.

- 4) 青木他、中深度処分の規制基準の背景及び根拠、NRA 技術ノート、NTEN-2022-0001、2022.
- 5) 原子力環境整備促進・資金管理センター・日本原子力研究開発機構、平成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3分冊）、2018.
- 6) 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ヵ年の取りまとめ報告書、2023.
- 7) 日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、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地層処分施設閉鎖技術確証試験5ヵ年とりまとめ報告書、2023.
- 8) 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5年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地層処分施設施工・操業技術確証試験）報告書、2024.

質疑応答

質問1 「設計の最適化」という表現に違和感があります。設計とは、要求性能を満たす中で形状や寸法などを決めるものと理解しています。今回の設計オプションの比較では、要求性能をどのように定義し、その性能に対してどのような判断で比較をしているのかがよく分かりません。評価項目についても、客観的な判断基準が示されていないように見えます。設計の最適化とは、具体的にどのような判断で行っているのか教えてください。

回答1 設計の最適化では、放射線防護だけでなく、施工品質や性能確認のし易さなども含めて多面的に考慮する必要があると考えています。しかし、これらの評価項目の中では、定量的に評価することが難しいものもあり、現時点では定性的な評価が中心です。海外でも同様に、定性的な評価が主流になっているようですが、今後、段階的に考え方を更新していく必要があると考えています。

質問2 設計案A、B、Cに対して安全評価を実施して複数の設計案を示し、その中から線量が最も小さい設計が選ばれる流れになっています。

コストが安い設計や建設操作性が良い設計がオプションとして示されたとしても、安全評価をしてみたら、最も線量が低くなる高コストの設計案が選ばれることになるのではないかと考えてしまいました。設計案を考える段階で、例えば、フラックスや施設通過流量などの簡易的な指標で線量の大小の目安を付けて設計案を考えていくことになるかと思いましたが、その辺りはいかがでしょうか。

回答2 今回示した設計案 A、B、C については、人工バリアの仕様と寸法などが同一なので、フラックスも同様と考えていますが、将来的には、人工バリアの材料や厚さなどを変えるオプションも含めて評価されることになるかと考えています。最も線量が小さい設計案はコストが高くなる可能性もあるので、評価項目の1つとして経済性とのバランスを取って比較する必要があると考えています。

質問3 処分費用は将来的に見直されるべきであり、過去の設計費用を前提に設計や操業技術の最適化を考えるというのは現実的ではありません。

回答3 処分費用については、設計と操業技術の最適化も考慮して見直すことが必要だと考えています。

質問4 中深度処分に関する技術ノートの内容が誤解を生む可能性があります。「線量が最も小さい設計」といった表現ではなく、「性能が最も優れた設計」という評価の視点が重要です。今後、

技術ノートの改訂も必要かもしれません。

回答4 ご指摘ありがとうございます。まだ概念的な検討段階ですが、今後、原子力規制庁とも議論をさせていただきたいと考えています。

質問5 最適化のためには多面的な性能評価が必要になると思いますが、現状では必要な情報がすべて揃っているわけではありません。したがって、必要な技術開発を優先的に進めることが重要だと考えます。

回答5 おっしゃる通りです。情報不足の部分は今後の研究開発課題になると考えています。研究開発課題を明確化できることも最適化の検討を進めるメリットになると考えています。

質問6 埋戻し材に掘削土を再利用する際には、土壤汚染対策法上のヒ素や重金属が含まれていないか確認する必要があると思います。不法投棄と見なされるリスクもあるため、掘削土の成分などを調査することもオプションとして必要ではないかと思いました。

回答6 掘削土に含まれている成分は重要な確認項目であり、環境に悪影響を与えないよう、今後、適切な基準と運用方針を設けて対応していく必要があると考えています。

コメント

掘削土のふるい分けに関して、日本とアメリカでは5mm基準ですが、欧州では4mmが一般的です。今後のデータ整備には、欧州基準も考慮すべきではないでしょうか。