

令和4年度

高レベル放射性廃棄物等の
地層処分にに関する技術開発事業

回収可能性技術高度化開発

3カ年年取りまとめ報告書

令和5年3月

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

本報告書は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業として、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターと、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が実施した、令和2年度～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」の事業取りまとめ報告書である。

目次

1	はじめに	1-1
1.1	事業目的	1-1
1.2	高レベル放射性廃棄物の地層処分事業における回収可能性	1-1
1.2.1	基本方針の要求	1-1
1.2.2	R&R 検討会で整理された技術検討の枠組み	1-2
1.3	本事業における設定課題	1-4
2	開発方針	2-1
2.1	閉鎖前に考慮する回収のシナリオの整理	2-1
2.1.1	本事業における回収可能性の維持期間の定義	2-1
2.1.2	閉鎖までの回収に係るシナリオ	2-1
2.1.3	本事業で対象とするシナリオ	2-2
2.2	本事業で基本条件とする回収時の地下施設の状態	2-2
2.2.1	回収時の地下施設の状態の設定	2-3
2.2.2	地下施設の状態と維持に伴う留意事項	2-4
2.2.3	基本条件とした回収時の地下施設の状態（状態 B）	2-5
2.3	地下施設からの廃棄体の回収に必要な手順の具体化	2-6
2.3.1	回収作業の範囲の設定	2-6
2.3.2	“回収作業システム“としての手順の整理	2-6
2.3.3	状態 B の地下施設に対する回収作業システム	2-6
2.3.4	回収手順と必要な技術の抽出	2-8
2.4	回収可能性が維持されている状態の定義	2-9
2.4.1	標準工程における回収可能性が維持されている状態	2-9
2.4.2	基本方針で要求される回収可能性が維持された状態	2-11
2.4.3	回収可能性に対する技術的な裏付け	2-13
2.5	開発方針のまとめ	2-15
3	回収可能性の技術的実現性	3-1
3.1	回収可能性の技術的対応戦略	3-1
3.2	回収手順、作業、技術の具体化	3-2
3.2.1	回収作業を構成する技術の一覧	3-2
3.2.2	回収作業に必要な技術の抽出	3-3
3.3	廃棄体へのアクセスに係る技術	3-6
3.3.1	力学プラグの撤去	3-6
3.3.2	埋め戻された処分坑道の再開放	3-8
3.4	処分孔縦置き方式の廃棄体の回収に係る技術（坑底施設までの搬出）	3-12
3.4.1	上部埋戻し材の除去	3-12
3.4.2	緩衝材の除去	3-14
3.4.3	処分孔からのオーバーパックの搬出	3-19
3.5	処分坑道横置き・PEM 方式の廃棄体の回収に係る技術（坑底施設までの搬出）	3-22
3.5.1	隙間充填材の除去技術	3-23
3.5.2	処分坑道からの PEM の搬出	3-28

3.6 地上への搬出、保管に係る技術	3-31
3.6.1 坑底施設での積替え	3-31
3.6.2 アクセス斜坑を介した地上への搬出	3-32
3.6.3 地上での受入・処置・保管	3-33
3.7 回収作業時間の試算方法と作業の迅速化	3-37
3.7.1 回収作業時間の試算方法と課題	3-37
3.7.2 既存の処分概念に対する理論上の最短の回収時間の推定	3-42
3.7.3 処分概念への回収容易性の導入	3-43
3.7.4 定置概念としての成立性の向上	3-47
3.8 回収可能性の技術的実現性のまとめ	3-48
4 回収可能性の維持に伴う安全性への影響	4-1
4.1 回収可能性の維持に伴う影響を定量化する目的	4-1
4.1.1 定量化手法の整備の方針	4-1
4.2 定量化すべきプロセスの具体化に向けた取り組み	4-2
4.2.1 定量化に向けた検討フロー	4-2
4.2.2 操業期間中のタイムラインの具体化	4-4
4.2.3 処分場構成要素の機能の整理	4-5
4.2.4 ストーリーボードを用いた定量化すべきプロセスの抽出	4-6
4.3 地下研究施設を活用した取り組み	4-7
4.3.1 実際の地下環境における支保部材の状態把握	4-7
4.3.2 実際の地下深部の坑道で生じる事象の整理	4-15
5 総括	5-1

目次

図 1.2-1	安全な管理が合理的に継続できる範囲で回収可能性が維持されている状態	1-4
図 2.2-1	処分孔縦置き方式における回収時の地下施設の状態	2-4
図 2.2-2	処分坑道横置き・PEM方式における回収時の地下施設の状態	2-4
図 2.2-3	回収可能性を維持した場合の影響の相対比較（処分孔縦置き方式の場合）	2-5
図 2.2-4	本事業の対象とする回収時の地下施設の状態 B	2-5
図 2.3-1	状態 B の地下施設からの回収作業のシステム構成	2-7
図 2.3-2	サブシステムの例（「廃棄体へのアクセス確保」の構成）	2-7
図 2.3-3	状態 A の地下施設からの回収作業のシステム構成	2-8
図 2.3-4	状態 C の地下施設からの回収作業のシステム構成	2-8
図 2.4-1	最終閉鎖を選択した場合のタイムラインと安全性の関係	2-9
図 2.4-2	標準工程において回収可能性がされている状態の安全性との関係	2-10
図 2.4-3	安全な管理が合理的に継続できる範囲で回収可能性が維持されている状態	2-12
図 3.2-1	回収作業システムの構成（処分孔縦置き方式：状態 B）	3-2
図 3.2-2	廃棄体へのアクセスを確保する作業手順	3-2
図 3.2-3	処分坑道から坑底施設まで廃棄体を搬出する作業手順	3-3
図 3.2-4	地上への廃棄体搬出、及び地上での保管の作業手順	3-3
図 3.3-1	廃棄体へのアクセスを確保する作業手順（図 3.2-2 再掲）	3-6
図 3.3-2	力学プラグの構造仕様、構造図の例	3-6
図 3.3-3	バックホウと解体用アタッチメントによる力学プラグの撤去のイメージ	3-7
図 3.3-4	バックホウによる埋戻し材の掘削の様子	3-9
図 3.3-5	ずり積み機によるダンプトラックへの積込みイメージ	3-10
図 3.3-6	切羽における掘削装置と積込み装置	3-10
図 3.4-1	処分孔からオーバーパックを回収する作業手順（図 3.2-3 を改良）	3-12
図 3.4-2	ドリリングバケットによる上部埋戻し材の除去のイメージ	3-13
図 3.4-3	緩衝材除去システムを構成する設備	3-15
図 3.4-4	噴射吸引設備による緩衝材の除去	3-15
図 3.4-5	ウォータージェットによる緩衝材の除去	3-16
図 3.4-6	オーバーパック定置装置（軌道式）	3-20
図 3.4-7	転倒防止のオーバーパック把持機構と路盤上への引き上げ	3-20
図 3.4-8	オーバーパックの回収専用装置	3-21
図 3.5-1	処分孔から PEM を回収する作業手順（図 3.2-3 を改良）	3-22
図 3.5-2	PEM 周囲の隙間充填材の除去方法の概念イメージ	3-24
図 3.5-3	PEM 周囲の隙間充填材の除去範囲と目的	3-24
図 3.5-4	オーガー方式の隙間充填材の除去試験の状況	3-25
図 3.5-5	機械的な方式による隙間充填材の除去技術	3-26
図 3.5-6	ウォータージェットによる PEM 周囲の隙間充填材の除去	3-26
図 3.5-7	処分坑道からの PEM 回収技術のイメージ図	3-29
図 3.5-8	PEM からオーバーパックを回収する作業手順	3-30
図 3.5-9	PEM 内部の緩衝材の除去作業のイメージ	3-30
図 3.6-1	地上への廃棄体搬出、及び地上での管理の作業手順（図 3.2-4 再掲）	3-31

図 3.6-2	坑底施設の構造	3-32
図 3.6-3	作業時のアクセス斜坑輸送車両	3-33
図 3.6-4	地上施設での PEM からのオーバーパットの取り出し	3-34
図 3.6-5	ガラス固化体の受入・検査・封入施設からアクセス坑道への接続部の鳥瞰図	3-36
図 3.7-1	処分坑道内の複数の廃棄体回収への展開	3-38
図 3.7-2	複数本の処分坑道に対する同時且つ独立作業の例	3-38
図 3.7-3	複数本の処分坑道に対する作業の合理化（坑道本数=6 の場合）	3-39
図 3.7-4	処分区画に対する回収手順の合理化	3-40
図 3.7-5	全体回収時間の短縮に対する、作業の合理化・最適化、技術高度化の効果	3-40
図 3.7-6	複数の処分坑道における再開放作業と発生土の搬出作業	3-41
図 3.7-7	処分坑道から地上までの発生土の流れ	3-42
図 3.7-8	処分孔の近接による処分坑道の短尺化	3-45
図 3.7-9	隙間充填材の体積を減らす定置方法の例	3-46
図 3.7-10	隙間充填材を省略した PEM の定置方式	3-46
図 3.7-11	閉鎖後長期の安全性の観点から見た隙間幅の許容値	3-46
図 3.7-12	狭隘空間での PEM の定置・回収作業に適用する装置の概念図	3-47
図 4.2-1	回収可能性の維持に伴う影響事象の定量化手法の構築に係る検討フロー	4-3
図 4.2-2	処分場全体と処分坑道単体のタイムラインの関係	4-4
図 4.2-3	処分場構成要素の細分化、階層整理（アクセス立坑の例）	4-5
図 4.2-4	ストーリーボードの例（ニアフィールドスケール、詳細スケール、状態 B）	4-6
図 4.3-1	吹付けコンクリート供試体の作成及び幌延地下施設内の定置場所	4-7
図 4.3-2	定置装置および養生状況	4-7
図 4.3-3	室内物性試験の例	4-8
図 4.3-4	中性化深さ試験の例	4-9
図 4.3-5	養生期間毎の物理・力学物性試験結果	4-9
図 4.3-6	養生期間毎の空隙率分布	4-10
図 4.3-7	アウトプット法およびインプット法による透水試験結果	4-11
図 4.3-8	地盤工学会基準（JGS 0312-2018）に基づく透水試験結果（2022 年度）	4-11
図 4.3-9	2022 年度に実施した元素マッピングの結果の一例	4-12
図 4.3-10	2022 年度に実施した SEM/EDS 分析結果の一例	4-13
図 4.3-11	今回の解析で事例とした幌延深地層研究センター深度 350 m 坑道（試験坑道 3） ..4-16	
図 4.3-12	本解析のために構築した坑道周辺地質環境概念モデル（2020 年度）	4-16
図 4.3-13	力学的長期変化解析の概要	4-17
図 4.3-14	力学的長期変化解析の解析モデルとメッシュ	4-18
図 4.3-15	坑道周辺のコンプライアンスの経時変化（初期値からの変化率）	4-19
図 4.3-16	坑道周辺の透水係数の経時変化（初期値からの変化率）	4-19
図 4.3-17	支保工応力の経時変化	4-20
図 4.3-18	坑道維持期間および埋め戻し後の回復状況に関する解析の考え方	4-20
図 4.3-19	解析に用いたモデル、初期条件、境界条件およびパラメータ	4-21
図 4.3-20	解析に用いた EDZ、母岩および埋め戻し材の物質移動特性	4-22
図 4.3-21	坑道維持を継続した場合の坑道周辺地質環境の変化	4-23
図 4.3-22	坑道維持～埋め戻し後の坑道周辺地質環境の回復状況に関する解析結果の例	4-25

図 4.3-23	地質環境の安全機能「放射性物質の分散」に関する要因分析図	4-27
図 4.3-24	力学的長期変化解析から得られた坑道周辺の体積ひずみの経時変化	4-27
図 4.3-25	幌延深地層研究計画第 1 段階で得られた空隙率と透水係数との関係	4-28

表目次

表 1.2-1	回収可能性の維持に関する技術検討の枠組み	1-2
表 2.1-1	閉鎖までの回収に係るシナリオ	2-1
表 2.4-1	標準工程の建設・操業期間中に考慮するシナリオ	2-9
表 2.4-2	標準工程に回収可能性の維持期間を追加した場合のシナリオ	2-11
表 3.2-1	現行の定置概念に対する回収技術の整備状況	3-5
表 3.4-1	緩衝材の流体的除去の技術的選択肢	3-18
表 4.3-1	物理・力学・水理物性に関する気中養生試験体と水中養生試験体の相違点	4-14
表 4.3-2	炭酸化（中性化）および化学変化に関する気中養生試験体と水中養生試験体の相違点	4-14
表 4.3-3	設定した解析スケールの例	4-19
表 4.3-4	高レベル放射性廃棄物処分場の安全機能と構成要素の関係	4-26
表 4.3-5	抽出された FEP と状態変数との関連性	4-28
表 4.3-6	水理解析で得られる情報と重要度が高いと考えられる FEP との対応	4-29
表 4.3-7	影響度評価の観点から重要と考えられる解析用パラメータ	4-29

1 はじめに

1.1 事業目的

我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って既に放射性廃棄物が発生しており、その処理処分対策を着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物等の地層処分については、2000年に制定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（以下「最終処分法」という。）のもと、実施主体である原子力発電環境整備機構の設立を経て、最終処分法が定める三段階の調査ステップの最初の段階である文献調査に係る公募が開始された。

一方で、制度創設から10年以上を経た段階においても文献調査の実施に至っていない状況を踏まえ、原点に立ち返って何が根本的な課題であるかを追求することが必要であるとの認識のもと、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（以下「廃棄物WG」という。））において、我が国の最終処分政策の再構築に向けた議論が行われた。このような議論を経て、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、2015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」（以下「基本方針」という）では、今後より良い処分方法が実用化された場合などに将来世代が最良の処分方法を選択できるようにするため、基本的に最終処分に関する政策や最終処分事業の可逆性を担保すること、及び機構（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）を確保することが定められた。

地層処分事業への可逆性の導入という新たな施策に対する社会の信頼感を更に高めていくためには、それを裏付ける回収可能性という技術的能力に対する信頼性を高めていく必要がある、更に、基本方針が要求している回収可能性に係る調査研究課題（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などに関する調査研究）を着実に進めて行く必要がある。

本事業では、上述した回収可能性に係る技術的課題に取り組み、施策に対する社会の信頼感の更なる醸成に資することを目的とする。

1.2 高レベル放射性廃棄物の地層処分事業における回収可能性

NUMOは、「包括的技術報告書」（NUMO, 2021）（以下「NUMO-SC」という）において、地層処分事業における“回収”を「処分場に定置された廃棄物あるいは廃棄物パッケージ全体を取り出す行為」であることを示している。

1.2.1 基本方針の要求

2015年5月に改定された基本方針の第4（特定放射性廃棄物の最終処分の実施に関する事項）において、「今後より良い処分方法が実用化された場合などに将来世代が最良の処分方法を選択できるようにするため、基本的に最終処分に関する政策や最終処分事業の可逆性を担保すること、及び機構（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」が加えられ、回収可能性の確保が明文化された。さらに、第5（放射性廃棄物の最終処分に係る技術の開発に関する事項）において、「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など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。当該技術開発などの成果については、最終処分事業や国の安全規制において有効に活用されることが重要である」として、回収可能性に係る調査研究の実施を要求している。

1.2.2 R&R 検討会で整理された技術検討の枠組み

本事業の前身事業において、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関わる検討会」（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（原環センター，2017）。本検討会では、今後の具体的な制度の運用、研究開発の推進に向けて更なる検討が必要と考えられる事項（論点）について整理し、我が国における今後の運用や技術的な対応課題を取りまとめた。表 1.2-1 に R&R 検討会で整理された今後の技術的な対応課題（今後定量化が必要となる情報）を示す。これらは、今後の更なる議論や技術検討を進める上での“技術検討の枠組み”として整理されている。

同表に示された四つの課題について、本事業における課題の捉え方、並びに技術開発や検討の考え方・進め方について以下に整理する。

表 1.2-1 回収可能性の維持に関する技術検討の枠組み

定量化すべき情報	内 容
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
	②回収作業時の安全性への影響（回収を実施する場合）
	(2) 閉鎖後長期の安全性への影響
	①人工バリアに期待する閉鎖後長期の安全機能への影響 ②天然バリア（母岩）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響
2. 回収の容易性 （回収作業時間）	(1) 単位領域当たりの回収時間（例： 廃棄体 1 体、処分坑道 1 本、など）
	(2) 全ての廃棄体回収にかかる全体作業時間
3. 維持期間	最終閉鎖せずに回収可能性を維持できる期間
4. 費用	回収可能性に係わる費用

(1) 安全性への影響

安全性への影響とは、一定の確保すべき安全性のレベルに対してどのような影響があるかということを示す。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からの要求が、その指標の一つになると考えられる。安全性への影響については、操業期間中の安全性と、閉鎖後長期の安全性の二つに分けて検討を進めることができる。更に、前者は回収可能性維持期間中の安全性と回収作業時の安全性に、後者は地層処分の安全性を支える人工バリアと天然バリアに分けることができる。このように区分することで、安全性を論じる際の対象、安全性に影響を与える事象、安全性を定量的に扱う手法や工学的対策の検討など、課題の位置付けを明確にしつつ取り組むことが可能となる。

(2) 回収の容易性（回収作業時間）

回収の容易性を示すものとして、廃棄体へのアクセス性、回収作業の技術的な複雑さ、それに要する時間や費用など、幾つかの次元の異なる指標が想定される。R&R 検討会では、回収の容易性を示す指標の一つとして、定量化が可能である“回収作業時間”を設定した。回収作業時間は廃棄体一体あたり、処分坑道一本あたりのような単位領域あたりの回収時間と、回収の対象となった廃棄体の回収に係る全体作業時間の二つに細分できる。単位領域あたりの回収時間は、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、単位領域あ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など）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。地下施設の設計が具体化できない現在の事業段階を踏まえ、当面は単位領域あたりの回収時間に焦点を当てて検討を進める。今後、全体作業時間を見積る上でも、当面は単位領域あたりの回収時間は必須の情報となる。

(3) 回収可能性の維持期間

既に定置された廃棄体を回収（取り出す）する動機としては、

- ・ 処分事業の政策変更への対応
- ・ 処分事業の安全性に疑義が生じた場合の是正処置などの安全規制への対応
- ・ 自然災害や事故事象に対する復旧作業の一部

といったことが挙げられる。

基本方針に示された「将来世代が最良の処分方法を選択できるようにする」については政策変更への対応と解釈することができ、そのような政策変更が可能な期間と条件について、「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」と基本方針に示されている。以上のような基本方針の要求を踏まえれば、回収可能性の維持期間の終期はその意思決定の分岐判断（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）の時点と考えることができる。

これを踏まえ、本事業では、回収可能性の維持期間を“回収／閉鎖措置の判断が可能な期間”と定義する。本定義を踏まえ、基本方針に示される「安全な管理が合理的に継続される範囲内」について、以下のように整理する。

(a) 操業期間中（回収作業を含む）の安全性の観点

回収実行の判断の後に実施される回収作業の安全性が確保できる必要があることから、回収可能性の維持期間の終期は、その後に実施される可能性のある回収作業期間を考慮する必要がある（回収作業中の安全性の確保が困難になるよりも前に閉鎖、もしくは回収の判断を行う必要がある）。

(b) 閉鎖後長期の安全性の観点

処分施設を最終閉鎖せずに回収可能性を維持することに伴う影響が地層処分場の長期安全性に有意な影響を及ぼすよりも前に閉鎖もしくは回収の判断を行う必要がある。

以上より、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”を満たす回収可能性の維持期間を、処分場への廃棄体の定置開始から、操業期間中の安全性（回収作業期間中の安全性を含む）および閉鎖後長期の安全性に有意な影響を及ぼすよりも前と定義する。これらの期間を模式的に示すと図 1.2-1 のようになる（この関係については、2.4 に詳述する）。

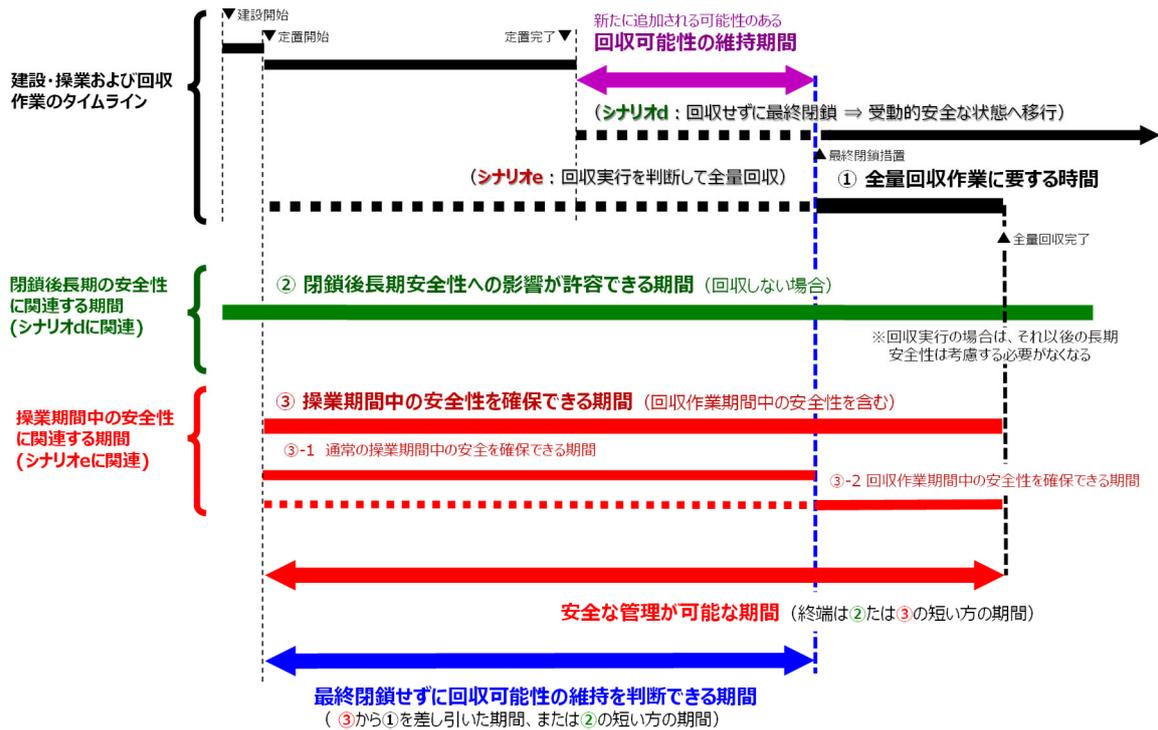


図 1.2-1 安全な管理が合理的に継続できる範囲で回収可能性が維持されている状態
(全量定置後の全量回収)

以上のような関係のなかで成立する回収可能性の維持期間は、前述した「(1)安全性への影響」と「(2)回収の容易性 (回収作業時間)」の 2 つの項目を定量化することで導出できる。したがって、回収可能性の維持期間は、(1)と(2)の検討を踏まえて総合的に判断される。しかしながら、実施主体などが予め回収可能性の維持期間を設定して(1)と(2)を設計・開発していく場合があることにも留意が必要である。

(4) 回収可能性の導入に伴う費用

回収可能性の導入に伴う費用は、操業期間中の回収可能性の維持に要する費用と、回収実施が決定された場合の回収作業に要する費用で構成される。前述(1)~(3)の技術検討を含め、今後の事業進展に応じて処分場の設計が具体化されることにより、このような費用を定量化する（見積もる）ことが可能となる。

表 1.2-1 に示す費用を含めた四つの項目は互いにトレードオフの関係にあり、今後の処分場設計の具体化では、全ての項目を定量的に評価して最適化していく必要がある。

1.3 本事業における設定課題

本事業における設定課題を、図 1.2-1 及び表 1.2-1 に示した四つの項目（操業期間中の安全性への影響、閉鎖後長期の安全性への影響、回収の容易性 (回収作業時間)、維持期間)の定量化に必要な技術情報の提示に向けた技術的論拠の整備と位置付けた。具体的には、これらの課題を包含した回収技術の高度化、回収可能性の維持に伴う安全性への影響の定量化手法の開発の二つの実施項目に落とし込み、効果的な開発計画を策定したうえで実施することとした。

2 開発方針

回収可能性に関する技術的な論拠の提示に向けた取組では、関係者間で課題認識を共有した上で取り組む必要がある。事業の進捗段階に留意して、検討や技術開発の実施において必要となる仮定や前提条件を適切に設定し、今後具体化される処分場の設計や人工バリアの定置概念、建設・操業計画に対して柔軟性を確保しつつ、着実な技術開発に取り組む必要がある

本章では、回収可能性に係る技術開発方針について以下の観点から整理した。

- ・閉鎖前に考慮する回収のシナリオの整理
- ・本事業で基本条件とする回収時の地下施設の状態
- ・地下移設からの廃棄体の回収に必要な手順の具体化
- ・回収可能性が維持されている状態の定義

2.1 閉鎖前に考慮する回収のシナリオの整理

2.1.1 本事業における回収可能性の維持期間の定義

地層処分事業における“回収”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全体を取り出す行為」である（NUMO, 2021）。回収可能性の維持期間の起点は、操業段階（操業と並行して別の場所で建設作業が行われる場合がある）において廃棄体を定置した時点となる。

基本方針には“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”と記述されている。一方、回収可能性の維持期間の終期は“閉鎖まで”であるが、本事業では回収技術を具体的に検討するため、回収可能性の維持期間の終期はその意思決定の分岐判断（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）の時点と定義した。原子炉等規制法に基づく廃棄物埋設に関する規制において規定されるマイルストーンとの関係では、この終期は施設の閉鎖措置の認可を得るタイミングとなる。回収せずに施設を最終閉鎖することが選択されれば、その後に閉鎖措置作業が行われる。また、回収が選択されれば、その後に回収作業が行われる。操業期間中の安全性を考える際には、これらの作業期間中の安全性を考慮する必要がある。

2.1.2 閉鎖までの回収に係るシナリオ

処分場の閉鎖を判断するまでの維持期間中における回収に係るシナリオを表 2.1-1 に示す。ここで、地層処分の事業開始時の計画に基づいて処分区画の建設・廃棄体の定置を行う工程を「標準工程」と称する。

表 2.1-1 閉鎖までの回収に係るシナリオ

(1) 標準工程の建設・操業期間中に考慮	
a. 最終閉鎖	定置完了後、処分施設を最終閉鎖する
b. 部分回収	特定の廃棄体、または特定の領域に定置された廃棄体を回収する
c. 全量回収	操業段階の途中にある状態から、定置済みの廃棄体を全て回収する
(2) 定置完了後に新たに追加される可能性のある維持期間を考慮	
d. 最終閉鎖	定置完了後、維持期間の延長を経て、処分施設を最終閉鎖する
e. 全量回収	定置完了後、維持期間の延長を経て、全ての廃棄体を回収する
(3) 廃棄体の破損による汚染を考慮	
f. 事象	※本事業における回収の定義外（影響拡大の抑制）

(1) 標準工程の建設・操業期間中に考慮するシナリオ

「a. 最終閉鎖」は、廃棄体を全量定置後、閉鎖作業に移行する、基本となる標準工程のシナリオである。このシナリオでは回収作業は行われない。

「b. 部分回収」は、定置済みの廃棄体の一部を回収するシナリオである。建設・操業の手順に不具合などがあつた特定の廃棄体、または定置後に明らかになった地質環境の影響を受ける領域に定置されている廃棄体を是正する場合などが該当する。対象となる廃棄体の位置や事業の進捗状況によって、作業規模が異なる。なお、回収対象外の廃棄体、領域は標準の建設・操業が継続されるものとした。

「c. 全量回収」は、定置済みの廃棄体を全て回収するシナリオである。定置済みの廃棄体全てが安全規制の観点からは是正対象となった場合や、将来世代が操業期間中に別の管理方策を選択した場合などが該当する。回収の判断をした時点で定置済みの全ての廃棄体が回収の対象であり、最大で4万體以上となる。

(2) 定置完了後に新たに追加される可能性のある維持期間を考慮するシナリオ

基本方針に示された将来世代の技術選択の余地を残すため、標準工程によって廃棄体全量定置が完了した後、最終閉鎖せずに回収可能性の維持期間を延長した場合である。この全量定置後の延長期間を“新たに追加される可能性のある維持期間”と定義する。この期間の後に閉鎖の判断をした場合は「d. 最終閉鎖」、回収の判断をした場合は「e. 全量回収」となる。

(3) 廃棄体の破損による汚染を考慮するシナリオ

所定の期間(1,000年)におけるオーバーパックの閉じ込め機能が保証されることを前提とすれば、操業期間中における廃棄体の破損による汚染への対応は、地層処分の事業者のリスクマネジメントの範疇であるため、本事業の検討対象から除外した。

2.1.3 本事業で対象とするシナリオ

上述のうち、(2)は、(1)に対して新たに維持期間が追加され、回収に至るまでの時間が増えたものである。また、(1)標準工程の「b. 全量回収」の対象となる廃棄体の本数及び作業領域は、「c. 部分回収」のものより増えたものである。したがって、全ての回収作業は「e. 全量回収」で実施するものに包含されることから、表 2.1-1 の太枠で囲んだ「d. 最終閉鎖」及び「e. 全量回収」のシナリオを本事業における検討、技術開発の対象とした。

2.2 本事業で基本条件とする回収時の地下施設の状態

経済協力開発機構/原子力機関(OECD/NEA)が主導したRRプロジェクトの報告書では、処分事業の進捗に伴う「処分場の受動的安全性の向上」と「回収作業のし易さの低下(コストの上昇)」の関係を示す“R-scale”が提案されている(OECD/NEA, 2011)。処分場の受動的安全性は、坑道が埋め戻されることによる換気や排水などの擾乱の停止により、本来の地下深部の環境に回復していくことにより向上する。一方、廃棄体の定置後の坑道の埋戻し範囲の拡大は、回収時に廃棄体へアクセスするための作業量が増加し、回収の容易性が低下する。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。

実際の処分事業において、回収可能性を維持する状態(回収時の地下施設の状態)は、処分場の設計、閉鎖後長期の安全性への影響、回収作業時の安全性への影響や確保のあり方(維持管理・

補修、など)、回収作業の容易性、そのコストなどを踏まえ、合理的に判断されることになる。

本節では、本事業における検討の基本条件とする回収時の地下施設の状態設定の考え方を述べる。

2.2.1 回収時の地下施設の状態の設定

(1) 回収時の地下施設の状態

処分坑道から坑底施設までの埋戻しの状態に着目し、操業の進捗段階に応じた回収時の地下施設の状態として、三つの地下施設の状態が提示されている (NUMO, 2021)。

(a) 状態 A : 処分坑道が埋め戻されておらず、解放された状態

廃棄体までのアクセス性の観点では、回収時に坑道の再掘削が不要となるため、回収がより容易となる。一方で、解放坑道での人工バリアの品質維持のための継続的な処置、開放坑道から空気の供給や排水の継続に伴う周辺環境への影響、それらに対する維持管理費用への影響などが懸念される。

(b) 状態 B : 処分坑道が埋め戻され、処分坑道の端部に力学プラグが設置された状態

状態 A と比較して、力学プラグの撤去、処分坑道の再解放が回収作業に追加される。一方、人工バリア周囲のニアフィールドスケールの領域は閉鎖時と同様の状態であり、閉鎖後長期の安全性への影響は状態 A よりは軽微と考えられる。

(c) 状態 C : アクセス坑道を除いた坑道が埋め戻されている状態

回収作業時の坑道の再解放時の物量が最も多くなる。地層処分の本質である安定した地下深部への廃棄体の定置の観点では、状態 B よりもさらに受動的安全性が確保されていると考えられる。

上記の共通的な考えに基づき、現行の定置概念である処分孔縦置き方式 (パネル型)、処分坑道横置き・PEM 方式 (デッドエンド型) の状態 A~C は、以下のように模式的に示されている。

(2) 処分孔縦置き方式 (パネル型) の回収時の地下施設の状態

図 2.2-1 は処分孔縦置き方式 (パネル型) の回収時の地下施設の状態のバリエーションである。

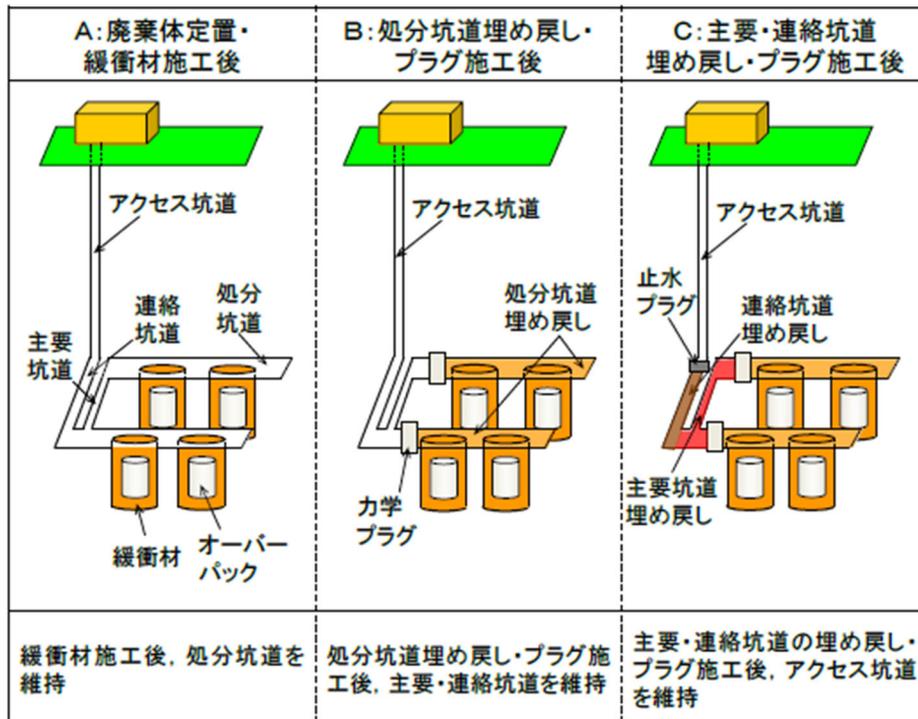


図 2.2-1 処分孔縦置き方式における回収時の地下施設の状態 (NUMO, 202.)

(3) 処分坑道横置き・PEM方式（デッドエンド型）の地下施設の状態

図 2.2-2 は処分坑道横置き・PEM方式（デッドエンド型）の回収時の地下施設の状態のバリエーションである。

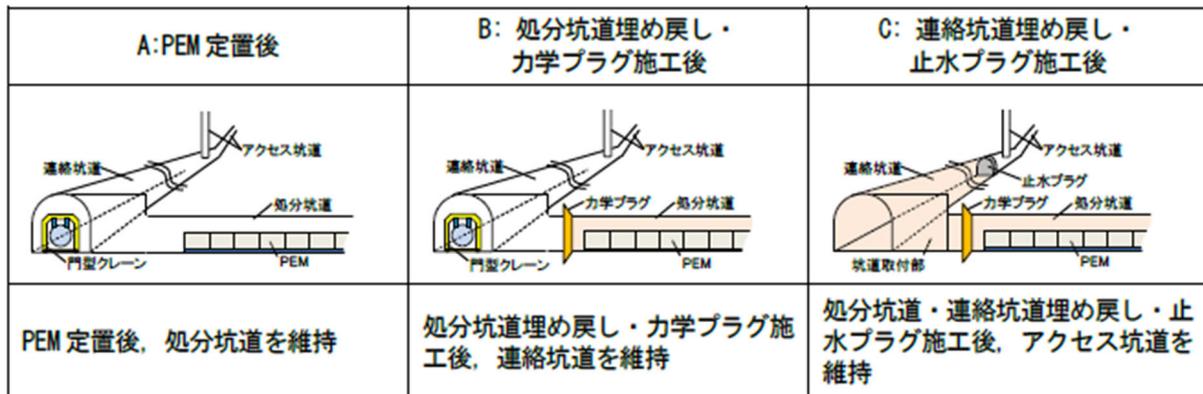


図 2.2-2 処分坑道横置き・PEM方式における回収時の地下施設の状態 (NUMO, 2021)

2.2.2 地下施設の状態と維持に伴う留意事項

回収可能性を維持した場合における母岩や人工バリアならびに坑道の維持管理に対する影響について、処分孔縦置き方式を例として、図 2.2-3 のように状態 A~C 間で定性的に相対比較されている (NUMO, 2021)。回収可能性を維持する地下施設の状態を設定するためには、この図に示される影響を定量的な情報のもとで比較評価を行い判断する必要がある。

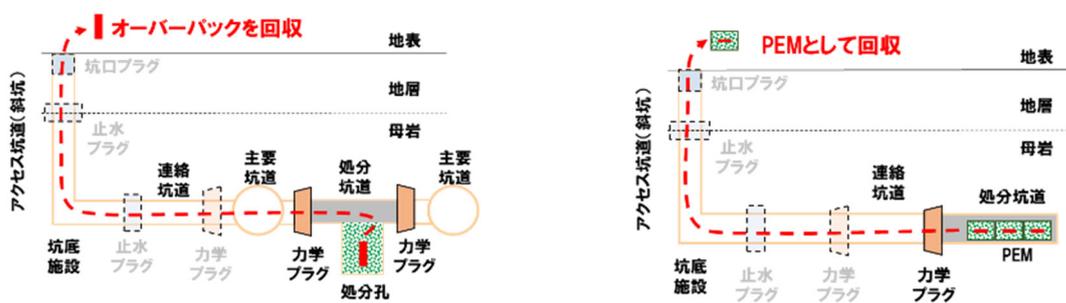
回収可能性の維持に伴う留意事項		状態A	状態B	状態C
回収の容易性	回収手順	①緩衝材の除去 ②オーバーバックの回収	①力学プラグの除去 ②処分坑道の埋め戻し材除去 ③緩衝材の除去 ④オーバーバックの回収	①止水プラグの除去 ②連絡坑道・主要坑道の埋め戻し材除去 ③力学プラグの除去 ④処分坑道の埋め戻し材除去 ⑤緩衝材の除去 ⑥オーバーバックの回収
	回収費用	低		高
受動的安全性への影響	周辺の地質環境に対する影響	処分場周辺の地下水位	低下範囲が大きい	低下範囲が小さい
		処分場周辺の地下水の流速	速い(動水勾配が大きい)	遅い(動水勾配が小さい)
		処分場周辺の地下水の酸化還元電位	高い	低い
	人工バリアに対する影響	緩衝材の流出の可能性	大	小
		オーバーバックの腐食の程度	大	小
能動的管理(坑道の維持管理)	維持管理の範囲	処分坑道、主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道	主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道	アクセス坑道
	排水量	多い		少ない
	維持管理費用	高		低

図 2.2-3 回収可能性を維持した場合の影響の相対比較（処分孔竖置き方式の場合）
(NUMO, 2021)

なお、図 2.2-3 に整理されている留意事項は、R&R 検討会で整理した安全性への影響(表 1.2-1) と整合的である。本書の 4 章に後述する“回収可能性の維持に伴う影響の定量化手法の整備”の取組は、回収可能性の維持状態の設定にも貢献することが期待される。

2.2.3 基本条件とした回収時の地下施設の状態（状態 B）

NUMO-SC では、得失が相反する回収の容易性、閉鎖後長期の安全性への影響、どちらの観点に対しても適用性が総合的に高いと見込まれる状態 B を、検討の対象とする回収時の地下施設の状態に設定している (NUMO, 2021)。これを踏襲し、本事業における技術開発や検討の対象として、図 2.2-4 に模式的に示す状態 B を設定した。



処分孔竖置き方式（パネル型）

処分坑道横置き・PEM方式（デッドエンド型）

図 2.2-4 本事業の対象とする回収時の地下施設の状態 B

2.3 地下施設からの廃棄体の回収に必要な手順の具体化

2.3.1 回収作業の範囲の設定

図 2.2-3 には、処分孔竖置き方式に対する各維持状態における地下施設からオーバーパックを回収する際の回収手順が例示されている。“状態 B”における回収手順は、①力学プラグの除去、②処分坑道の埋戻し材の除去、③緩衝材の除去、④オーバーパックの回収となっている。回収作業の技術的実現性を提示するためには、回収時の地下施設の状態を起点として、回収した廃棄体の地上での管理に至るまでの一連の手順を分析し、作業に適用可能な既存技術の有無を把握するとともに、実際の回収作業への適用性を向上させるための技術整備を効果的に実施する必要がある。例えば、前述の手順のうち「④オーバーパックの回収」と要約されている作業については、緩衝材除去後の処分孔からのオーバーパックの搬出作業及びその後の地上施設への搬送、地上での検査や保管など、一連の回収作業を具体的に考慮して課題の有無を確認しておくことが、技術的実現性を提示する上で重要である。

そこで、本事業で扱う回収作業の範囲を図 2.2-4 に示すように、廃棄体を地下処分坑道から地上施設まで運び出して保管するまでと設定し、処分坑道が埋め戻された“状態 B”の地下施設を対象に、回収手順を具体化した。

2.3.2 “回収作業システム”としての手順の整理

状態 B の地下施設に定置された廃棄体を地上で保管するまでの手順は、複数の個別作業が時間的・空間的に繋がっている。さらに、それら一連の行為が整合を持ち、且つ一体となって“廃棄体の回収”という機能を発現させることが、回収の容易性（回収作業時間）を考慮するうえでも必要となる。以上のような一連の回収手順を“回収作業システム”として整理した。システムという言葉の定義は、“複数の要素が有機的に関係しあい、全体としてまとまった機能を発揮している要素の集合体”とされている（広辞苑, 1995）。したがって、システムとは、境界、要素、要素間の相互影響の 3 因子から構成され、要素がさらにシステムとなる場合は、その要素は上位システムのサブシステムと捉えることとなる。

ここでは、システムの定義に基づき、回収作業システムの、境界、要素、要素間の関係性を設定する。回収システムの要素には回収に係る個別作業を割り当てるが、個別作業は任意に細分化できるため、個別作業として具体的かつ合理的に検討を進められるように適切に設定することが重要である。また、要素自体がさらに複数の要素から構成されるシステムである可能性に留意して、作業の目的や作業の実施場所などを考慮して設定する。ここでの三因子の定義方法は、本事業における技術開発の目的や検討の範囲、それらの位置付けなどを整理するために設定したものであり、システムの要素は必要に応じて細分化することや、追加・削除することができる。これにより、技術開発や検討の成果の拡張性を確保することが可能となる。

2.3.3 状態 B の地下施設に対する回収作業システム

状態 B の地下施設に対する回収作業システムについて、システムを構成する境界、要素、要素間の関連性を以下のように設定した。

(1) システムの境界

起点側の境界を「回収可能性が維持された地下施設」、終点側の境界を「地上施設での廃棄体の保管」とする。この境界によって回収作業は“回収可能性の維持”、“代替管理方策への移行”の間を担う“回収作業システム”として区分される。

(2) システムの要素

図 2.2-3 に示された回収手順は処分孔縦置き方式に対するものである。この手順を参考に現行の二つの定置概念に対する廃棄体の回収作業として一般化し、要素を設定した。

一つ目の要素を同図に示される①力学プラグの除去と②処分坑道の埋戻し材除去を合わせた「廃棄体へのアクセス確保」とした。回収時の搬出対象が縦置き方式ではオーバーパック、横置き方式では PEM であるため、回収作業における放射線防護の方策も変わる。

③緩衝材の除去と④オーバーパックの回収は廃棄体の回収に係るものであるが、④は処分坑道内における作業から、地上までの搬出、地上施設での保管まで作業範囲が広い。そこで、作業時の搬送・定置方法を参考に坑底施設を境に輸送作業を分割して、二つ目の要素を③と④（坑底施設までの輸送）を合わせた「廃棄体回収（地下）」とした。

三つ目の要素は「地上への搬出・地上での保管」とした。

(3) 要素間の関係性

一連の回収作業（回収作業システム）を構成する、「廃棄体へのアクセス確保」、「廃棄体回収（地下）」、「地上への搬出・地上での保管」の三つの要素は、この順番で進行する。

(4) 状態 B からの回収作業のシステム構成

以上の設定より、状態 B に対する回収作業システムは図 2.3-1 の構成となる。この構成において、要素間の境界を定義すると要素はサブシステムとなる。例えば「廃棄体へのアクセス確保」は、図 2.3-2 に示すサブシステムで構成される。

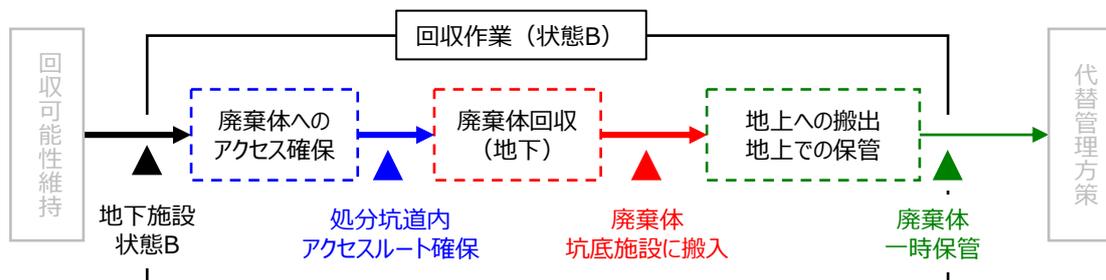


図 2.3-1 状態 B の地下施設からの回収作業のシステム構成
（実線：システムの境界、破線：要素の境界、▲：境界、矢印：要素間の繋がり）

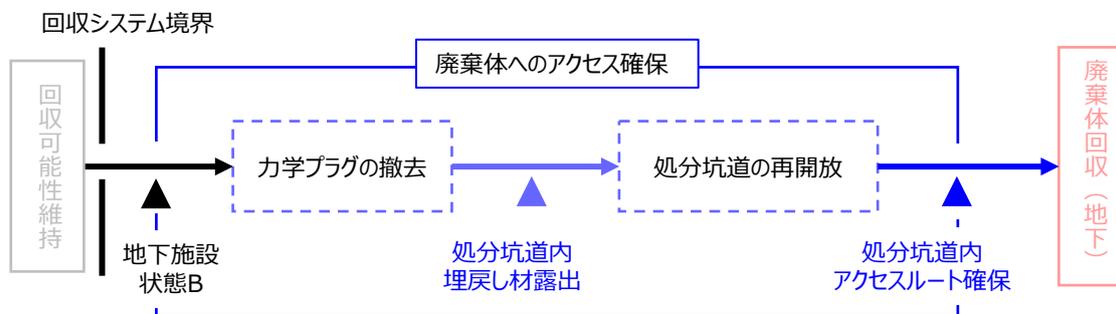


図 2.3-2 サブシステムの例（「廃棄体へのアクセス確保」の構成）

(5) 他の地下施設の状態への拡張

状態 A からの回収作業システムは、状態 B のシステム構成から要素“廃棄体へのアクセス確保”を除いたものになる（図 2.3-3）。また、状態 C の場合は状態 B の構成に、要素“処分坑道へのアクセス確保（連絡坑道や主要坑道の再開放作業）”が追加されるが、この要素自体は“廃棄体へのアクセス確保”と同様の構成である（図 2.3-4）。このうち、“処分坑道へのアクセス確保”は、“廃棄体へのアクセス確保”と同様の作業となることから、状態 B の回収作業が全ての必要な要素を網羅していることになる。つまり、状態 B における回収作業に必要な技術を整備することで、様々な状態の地下施設からの回収に必要な技術をカバーすることができる。

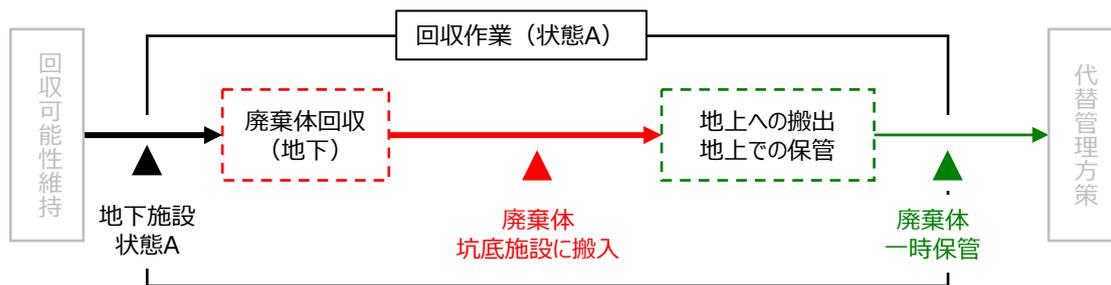


図 2.3-3 状態 A の地下施設からの回収作業のシステム構成

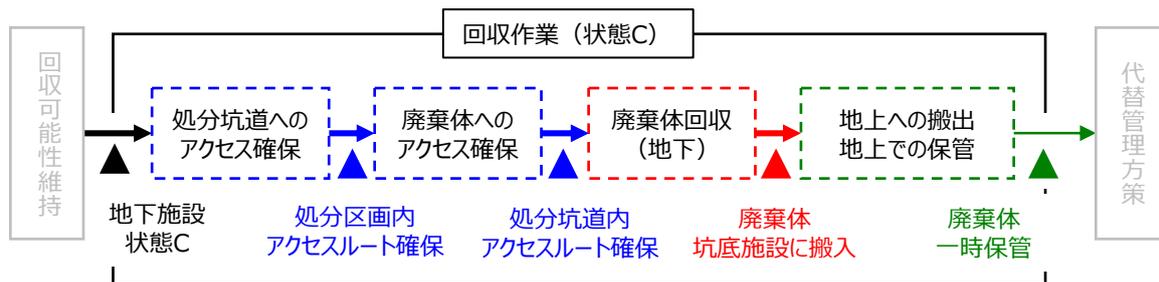


図 2.3-4 状態 C の地下施設からの回収作業のシステム構成

2.3.4 回収手順と必要な技術の抽出

図 2.3-2 に示すように、システムの要素をサブシステムとして細分化する手順を反復し、階層構造の形で整理することで、各作業を構成する具体的な作業内容や作業に必要な技術、その技術で実現する状態などが具体化される。これにより一連の作業手順が技術を含めて体系的に可視化できる。

回収作業の技術的実現性は、このシステムが滞りなく機能することで示すことができる。また、技術的実現性における課題はシステムの動作上のボトルネックとして顕在化するため、技術開発の対象や目的を合理的に設定することができる。

このような方針に基づく回収作業の技術的実現性の提示については、本書の第 3 章に詳述する。

2.4 回収可能性が維持されている状態の定義

R&R 検討会で整理された、安全性への影響、回収作業期間、回収可能性の維持期間の関係から、基本方針に示される“安全な管理が合理的に継続される範囲”を満たす、回収可能性が維持されている状態を検討した。

2.4.1 標準工程における回収可能性が維持されている状態

地層処分の事業開始時の計画に基づいて処分区画の建設・廃棄体の定置を行う「標準工程」における回収可能性の成立性を、事業のタイムラインと安全性の関係から以下のように定義した。

(1) 標準工程の建設・操業期間中に考慮する回収に係るシナリオ

既出の表 2.1-1 より、対象となるシナリオを表 2.4-1 に抜粋（再掲）する。

表 2.4-1 標準工程の建設・操業期間中に考慮するシナリオ

(1) 標準工程の建設・操業期間中に考慮する回収に係るシナリオ	
a. 最終閉鎖	定置完了後、処分施設を最終閉鎖する
b. 部分回収	特定の廃棄体、または特定の領域に定置された廃棄体を回収する
c. 全量回収	建設・操業の途中にある状態から、定置済みの廃棄体を全て回収する

各シナリオが成立する条件を以下に詳述する。

(2) 標準工程における処分場の最終閉鎖シナリオと安全性の関係

「a. 最終閉鎖」は、廃棄体の全量定置後に閉鎖作業に移行する、基本となる標準工程のシナリオである。このシナリオでは回収作業は行われぬ。

図 2.4-1 は、現時点のセーフティケース開発の中で考慮されている安全性への影響を、標準工程のタイムライン上に模式的に示したものである。この関係は、現行の処分概念に対して、回収に係る種々の安全性の検討をする上での前提となる。

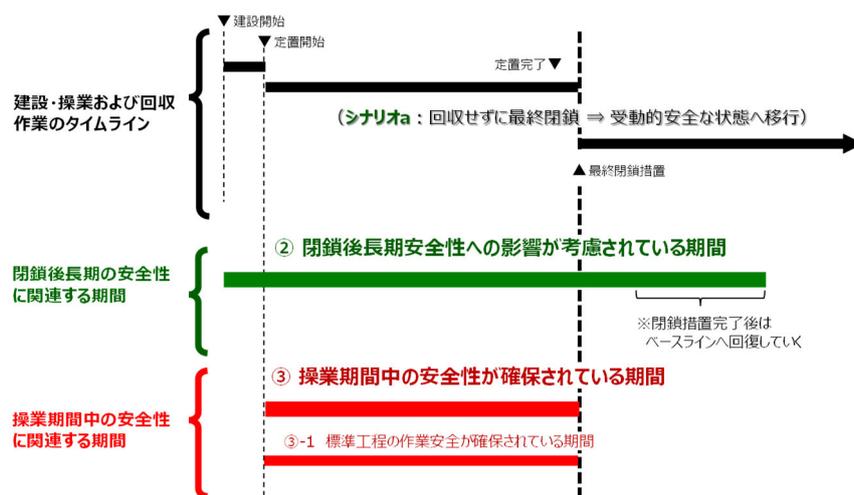


図 2.4-1 最終閉鎖を選択した場合のタイムラインと安全性の関係

図中②の線は、閉鎖後長期の安全性への影響が考慮されている期間（施設の最終閉鎖がされない状態を継続しても閉鎖後長期の安全性への影響が許容される期間）を示している。坑道などの地下施設の建設に伴う周辺岩盤への影響、セメントや鋼材などの材料の持ち込み、換気による空

気の供給、坑道への湧水・排水による水理場の変化など、建設・操業期間中に地下深部本来の環境への擾乱が生じる。通常の操業における閉鎖までに生じる事象や閉鎖後長期の安全性へ与える影響は、既に現時点のセーフティケース開発の中で考慮されているものとした。

図中③の線は、操業期間中の安全性が確保されている期間を示している。処分坑道の建設、坑道への廃棄体の定置、坑道の埋戻しといった、建設・操業工程の作業を安全に遂行できるよう、操業計画・施設設計に考慮されている。なお、既出の2.1.1項で述べたように、図2.4-1に“▲最終閉鎖措置”と記載したタイミングには、回収可能性の維持期間の終期となる閉鎖措置の認可を得るタイミング及びその後の二種の作業期間が包含されていることに留意されたい（回収せずに施設を最終閉鎖する場合の閉鎖措置作業及び回収する場合の回収作業であり、いずれも操業期間中の安全性として考慮が必要な期間である）。

(3) 標準工程における部分回収または全量回収シナリオと安全性の関係

図2.4-2は、標準工程において全量定置後に全量回収を実行するシナリオ「c. 全量回収」に係る安全性をタイムライン上に模式的に示したものである。このシナリオが、操業開始からの期間が最も長く、且つ回収対象の廃棄体数が最も多く、「b. 部分回収」のシナリオを包含している。

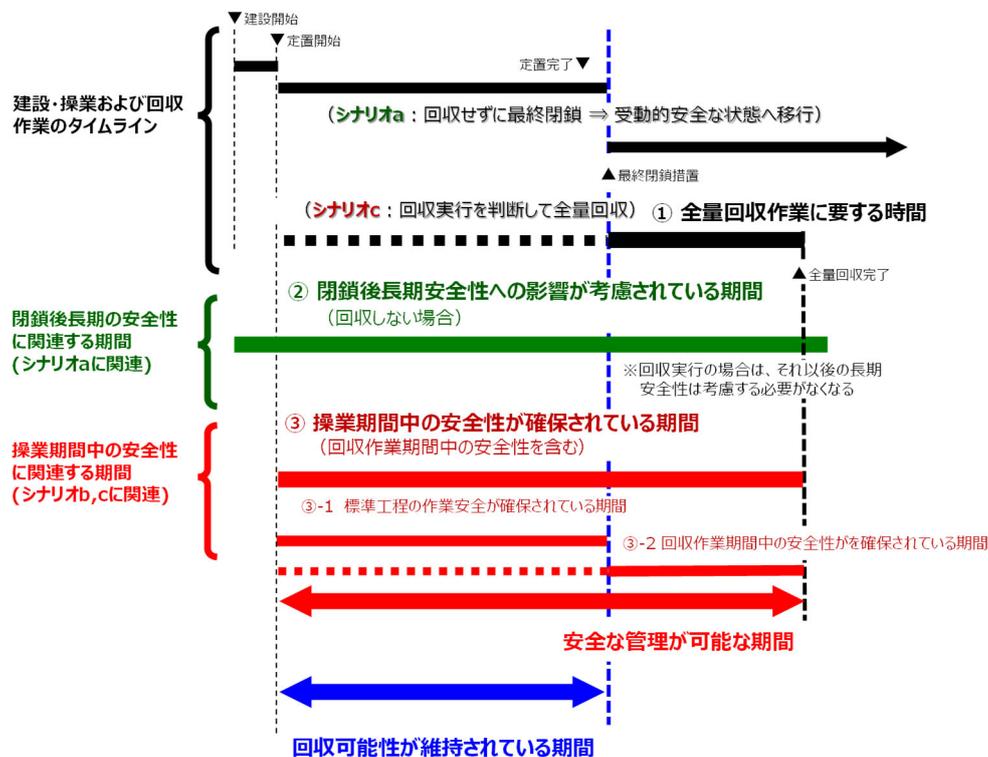


図 2.4-2 標準工程において回収可能性がされている状態の安全性との関係

図中②の線は、図2.4-1と同様に閉鎖後長期の安全性への影響が考慮されている期間を示している。部分回収を実施する際には、回収対象ではない領域へ有意な影響が生じないようにする必要がある。全量回収を実施する場合は、定置済みの廃棄体の全てが安全規制の観点からは正対象となる場合や、将来世代が操業期間中に別の管理方策を選択した場合などであることから、回収判断後の閉鎖後長期の安全性への影響は、全量回収シナリオでは考慮しないものとした。

回収作業を実行する場合、回収の規模や地下施設の状態に応じ、図中①の線で示す回収作業時間（期間）が必要であり、この期間の作業安全性が確保される必要がある。よって、最終閉鎖を

選択したシナリオにおける“③-1 標準工程の作業安全が確保されている期間”に“③-2 回収作業期間中の安全性が確保されている期間”が追加された③の線が、操業期間中の安全性が確保されている期間となる。

(4) 地層処分システムにおける回収可能性の維持

地層処分事業における安全規制対応としての回収可能性は、「b. 部分回収」や「c. 全量回収」などの規模によらず、事業の安全性確保という観点では必要な措置である。つまり、標準工程における施設閉鎖までの回収可能性は地層処分システムが備えているべきものであり、図 2.4-2 に示す建設・操業・回収のタイムラインと安全性への影響の関係が成立していることが、安全な処分場操業の前提条件になると考えられる。

2.4.2 基本方針で要求される回収可能性が維持された状態

標準工程で廃棄体全量定置が完了した後、閉鎖後長期の安全性が確保されると判断され、閉鎖措置の認可が得られれば最終閉鎖に移行するため、安全規制の観点で回収可能性の維持期間を延長する動機は無いと考えられる。一方、基本方針に示された「将来世代が最良の処分方法を選択できるようにする」という観点は、その時点で進行中の処分事業の長期安全性が確保される見込みであっても、別の代替管理方策の選択の余地を残すと解釈できるが、この選択自体には期限が無い。これに対し、基本方針では「安全な管理が合理的に継続される範囲内」かつ「最終処分施設の閉鎖までの間」という制限を設けている。

標準工程の“回収可能性が維持されている期間”を示した図 2.4-2 の関係性を基に、基本方針に示された「安全な管理が合理的に継続される範囲内で回収可能性を確保する」へと拡張した場合について検討した。

(1) 全量定置完了後の回収可能性の維持期間

標準工程の全量定置完了後も延長される可能性のある回収可能性の維持期間について、本事業では“新たに追加される可能性のある回収可能性の維持期間”と定義する。この期間はシナリオ「a.最終閉鎖」でも発生し得る全量定置完了から閉鎖措置開始までの期間（閉鎖措置計画の認可が得られるまでの期間）であり、意思決定（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）が可能な期間である。また、この期間は、意図的に設ける場合（設計に考慮）と結果的に確保される場合（評価の結果）の二通りの意味を持つが、事業許可申請において、この期間が定義されていなければ、その期間の操業安全を評価することができないことから、現実的には事業許可申請段階までには回収可能性の維持期間が設定されることが想定される。

(2) 維持期間の延長を経て、全ての廃棄体を回収するシナリオと安全性の関係

既出の表 2.1-1 より、対象となるシナリオを表 2.4-2 に抜粋（再掲）する。

表 2.4-2 標準工程に回収可能性の維持期間を追加した場合のシナリオ

(2) 定置完了後に新たに追加される可能性のある維持期間を考慮	
d. 最終閉鎖	定置完了後、維持期間の延長を経て、処分施設を最終閉鎖する
e. 全量回収	定置完了後、維持期間の延長を経て、全ての廃棄体を回収する

標準工程において回収可能性が維持されている状態の安全性との関係を示す図 2.4-2 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を考慮したタイムライン上に拡張したものを図

2.4-3 に示す。

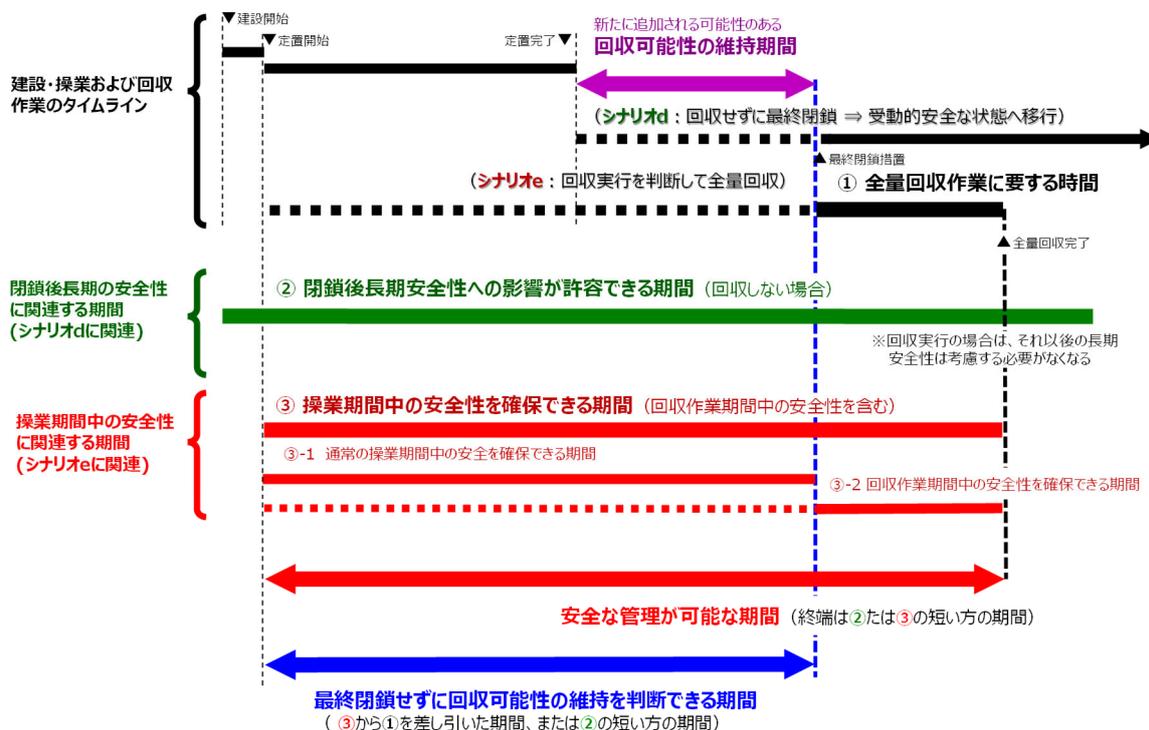


図 2.4-3 安全な管理が合理的に継続できる範囲で回収可能性が維持されている状態
(※③操業期間中の安全性を確保できる期間が維持期間の終期を決定する場合の関係)

「d. 最終閉鎖」は、廃棄体を全量定置後、新たに追加される可能性のある回収可能性の維持期間を経て、最終閉鎖に至るシナリオであり、回収作業は行われず。最終閉鎖までの期間の地下施設は状態 B で維持されるため、換気による空気の供給、坑道への湧水・排水による水理場の変化など、地下深部本来の環境への擾乱が、標準工程の操業期間から継続する。最終閉鎖が選択可能な期間は、図中②の線で示す影響が閉鎖後長期の安全性に対して許容できる期間内である。

「e. 全量回収」は、廃棄体を全量定置後、新たに追加される可能性のある回収可能性の維持期間を経て、代替管理方策を選択した場合に廃棄体を全て回収するシナリオである。これは、政策変更によるものであるため部分回収は想定しない。回収作業期間中の安全性が確保されている状態は、図中①の線で示した全量回収に要する期間が、図中③の線で示す作業安全が確保できる期間内（坑道の空間安定性）に収まることである。言い換えれば、③の作業安全が確保できる期間の終期から、①の全量回収作業に要する期間だけ遡った時点よりも前に回収の実行を判断する必要がある。

以上を整理すると、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」の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「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。

①の全量回収作業時間は、回収手順や装置の能力などを基に定量化することができる。そのため、回収作業が計画通りに進む場合の時間は、回収の規模に応じて“○時間”や“○日”といったオーダーの精度で技術的な論拠に基づいて提示することができると考えられる。一方、②や③の安全性に係る期間の定量化は評価を伴うものであり、①と同じオーダーで定量化（数値化）でき

るとは限らない。これらの定量化が必要となる項目のオーダーの違いにも留意した上で、回収可能性の維持に対する安全性の確保のあり方を検討していく必要がある。

2.4.3 回収可能性に対する技術的な裏付け

R&R 検討会で整理された定量化項目（表 1.2-1 参照）を基に、安全な管理が合理的に継続できる範囲で回収可能性が維持されている状態を、

- ①全量回収作業に要する期間
- ②閉鎖後長期の安全性への影響が許容できる期間
- ③操業期間中の安全性を確保できる期間

※及び、上記から導出される回収可能性の維持期間（維持閉鎖せずに回収可能性の維持を判断できる期間）

の四項目の関係を図 2.4-3 に示した。この関係から、地層処分事業に対する回収可能性の維持期間に関する技術的な対応を以下のように捉える。

(1) 地層処分の標準工程における回収可能性

既定の定置概念に対して、標準工程における施設閉鎖までの回収可能性は、安全規制上の要求として地層処分システムが備えているべきものである。安全な処分場操業の前提条件となる、安全規制への対応の観点での回収可能性は、既出の図 2.4-2 の関係を示すことで確保される。このような関係性が成立するように、回収技術の整備ならびに回収作業を含めた操業期間中の安全性と閉鎖後長期の安全性の双方を確保する方策を処分場の設計に盛り込むことが必要である。

(2) 閉鎖せずに回収可能性を維持できる期間の評価

図 2.4-2 の関係を有する既定の定置概念に対して、全量定置後に延長（追加）される可能性のある回収可能性の維持期間は、維持期間終期となる全量回収か最終閉鎖の判断の時期が、「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「作業安全の観点から回収実行を選択できる期限」の早い方の期限内にあることを評価することで示すことができる。延長が可能な期間は、処分サイトの地質環境条件や定置概念によっては延長ができない可能性があることに留意が必要である。

(3) 回収可能性の維持期間を予め設定した処分場設計

現時点では、新たに追加される可能性のある回収可能性の維持期間に対する具体的な要求はない。回収可能性の維持期間を予め設定する場合には、以下のような対応が考えられる。

まず、閉鎖後長期の安全性への影響を許容する必要がある期間を設定する（図 2.4-3 の②）。この期間の終期が、標準工程の建設・操業期間と新たに追加する回収可能性の維持期間を足した期間より後になる必要がある。この関係が成立するような影響低減の方策を、処分場設計や維持期間中の地下施設の状態設定などに反映する必要がある。

続いて、既定の概念に対して作業安全性を確保する必要がある期間を設定する（図 2.4-3 の③）。この期間は、標準工程の建設・操業期間及び新たに追加する可能性のある回収可能性の維持期間、ならびに全量回収作業に要する期間（図 2.4-3 の図中①）の和となる。この期間が成立するように作業安全性（操業期間中の安全性）を確保するための坑道設計への反映、維持管理計画の策定、これらの期間の短縮に繋がる回収作業の迅速化（回収の容易性）などの技術的対策を処分場設計に反映する必要がある。

回収可能性の観点からの処分場の成立性は、この二つの手順の反復により図 2.4-3 の関係が成

立するように処分場設計を最適化していくことで提示できると考えられる。

R&R 検討会で整理された定量化項目のうち、回収可能性の導入に伴う費用は、操業期間中の回収可能性の維持に要する費用、回収実施が決定された場合の回収作業に要する費用に加え、(3)に挙げるような工学的な対応を処分場設計に含める費用などから構成される。図 2.4-3 に示される①～③の技術検討を含め、今後の事業進展に応じて処分場の設計が具体化されることにより、このような費用を定量化する（見積もる）ことが可能となる。

2.5 開発方針のまとめ

現行の定置概念が処分事業の安全な遂行のために備えておくべき回収能力を出発点として、基本方針が要求する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の回収可能性へと拡張して、地層処分事業の最終閉鎖までの期間に想定される回収可能性に係る種々のシナリオを整理した。これらのシナリオの整理と分析をとおして、基本方針で要求される回収可能性のシナリオが、回収可能性に関する全てのシナリオを包含していることを確認した。

現行の二つの定置概念に対する回収時の地下施設の状態を、処分坑道が埋め戻され力学プラグが施工された状態と設定した（状態 B）。このような状態の地下施設に対する一連の回収作業の境界を「回収可能性が維持された地下施設」から「地上施設での廃棄体の保管」までと設定し、その間の回収手順を“回収作業システム”及び“サブシステム”として階層的な構造として整理した。回収作業の技術的実現性は、回収作業システムを構成する個別作業を構成するサブシステムに対する技術の有無や、一連の作業の流れとしての整合性を提示していくことで向上させることができる。

R&R 検討会で整理された定量化すべき項目（四つの項目）を踏まえ、回収可能性の維持期間中の作業安全性（操業期間中の安全性）、維持に伴う閉鎖後長期の安全性への影響、回収作業時間（回収の容易性）の三項目の関係性から、安全な管理が合理的に継続できる状態を示した（図 2.4-3）。回収可能性の導入に伴う費用は、今後の事業進展に応じた処分場設計の具体化に伴い定量化される。

以上を踏まえ、技術開発の目的を、定量的技術情報の提示に向けた技術的論拠の整備と位置付け、回収可能性の技術的実現性及び回収可能性の維持に伴う安全性への影響の定量化手法の開発の二つの実施内容に落とし込み、効果的な開発計画を策定して検討や開発を進めた。

第 3 章に「①全量回収作業に要する時間」の定量化に向けた回収可能性の技術的実現性を、第 4 章に「②閉鎖後長期の安全性への影響が許容できる期間」及び「③操業期間中の安全性を確保できる期間」の定量化に向けた回収可能性の維持に伴う安全性への影響の定量化手法を、それぞれの技術開発の達成状況を含めて詳述する。

3 回収可能性の技術的実現性

本章では、これまでに取り組んできた回収技術に対する種々の検討や技術開発ならびに実証試験の成果などを踏まえ、現時点における、わが国の高レベル放射性廃棄物の地層処分事業の回収可能性の技術的実現性について整理する。

3.1 回収可能性の技術的対応戦略

回収可能性の技術的実現性は、処分施設に定置された廃棄体を安全に回収するための技術が整備されていることをその根拠とともに示されるべきものであり、併せて、安全な管理が合理的に継続できる範囲で回収可能性が維持されている状態を示すための項目（根拠）の一つとなる「①全量回収作業に要する時間」の定量化にも資する。

この課題に対して、以下の手順を設定した上で、技術の整備を進めた。

- 現行の定置概念に対する回収に必要な技術の抽出

現行の定置概念に対する回収に必要な技術の抽出のために、一連の回収作業をシステムとして定義して、処分坑道に定置された廃棄体を地上施設まで搬送し保管するまでの回収手順、手順を構成する個別作業、作業に必要な技術を具体化する。

- 適用可能な技術の有無の評価

第一段階として、廃棄体一体を確実に回収するために必要な技術（装置、設備、工法など）、または適用性が見込まれる類似の技術の有無について評価する。併せて、回収作業時間の算定根拠となる情報の整理を進めるとともに、既存技術の適用が困難な作業に対してその実施に必要な技術の整備を進める。

- 全体作業時間の試算

現行の定置概念を対象に、廃棄体一体の回収手順を基に回収の規模に応じた回収手順や作業の合理化を検討し、「①全量回収作業に要する時間」を試算する。なお、検討に必要な処分施設の詳細な情報は現時点では未定の部分があるため、NUMO-SCの情報に基づく仮定を置く。

- 回収時間の短縮を実現する技術的方策の検討

「①全量回収作業に要する時間」は、安全な管理が合理的に継続できる範囲で回収可能性が維持されている状態を示すための項目の一つとなるが、他の定量化項目や回収可能性の維持期間などとの関係から、短縮を求められることも想定される。そのため、現行の定置概念に対する回収作業時間の短縮を実現する技術的方策を検討するとともに、回収の容易性を高めた詳細設計オプションを例示する。

- 回収作業時間の短縮（容易性向上）に向けた課題の整理

回収作業の高度化、回収手順の合理化・最適化ならびに詳細設計オプションの具体化など、技術的方策ごとの実現性の向上に向けた課題を整理するとともに、回収可能性以外の処分場の設計因子に対する成立性の検討・評価を行う。

これにより、回収技術の有無だけではなく、現在の候補概念や設計ならびに標準工程である通常の建設・操業技術としての実現性にも留意した回収可能性の技術的実現性の向上を図る。

以上のような回収可能性に係る技術的対応方針に沿って、回収可能性に対する現時点の技術の整備状況について、以降に詳述する。

3.2 回収手順、作業、技術の具体化

2.3 節に示した回収作業手順に基づき、更なる回収手順や作業内容の具体化を行い個別作業の目的を示す境界を設定した。

3.2.1 回収作業を構成する技術の一覧

(1) 状態 B からの回収作業手順の具体化（第一階層のシステムの例）

状態 B の地下施設に定置された廃棄物を、地上施設内で安全に保管するまでを回収作業の範囲とする。作業内容や実施場所を境界として、廃棄物へのアクセス確保、廃棄物の回収（地下）、地上への搬出・地上での保管といった個別の要素から構成されるシステムとなる（図 3.2-1）。

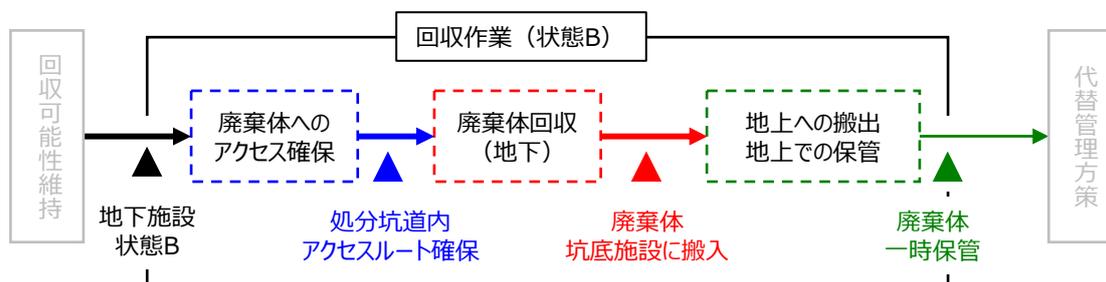


図 3.2-1 回収作業システムの構成（処分孔縦置き方式：状態 B）

（実線：システムの境界、破線：要素の境界、▲：境界、矢印：要素間の繋がり）

(2) 作業手順の具体化（地下）（第二階層のシステム）

図 3.2-1 の回収作業システムを構成する三つの要素それぞれの作業内容を具体化した。

(a) 廃棄物へのアクセス確保

廃棄物へのアクセス確保では、処分坑道が埋め戻され力学プラグが施工された“状態 B”から、回収対象の廃棄物までの経路を確保するまでを作業範囲として、鉄筋コンクリート製の力学プラグの撤去、処分坑道の埋戻し材の掘削の二つの作業を設定した（図 3.2-2）。

処分坑道定置方式では、処分坑道内の埋戻し材の掘削範囲によっては、回収対象の廃棄物（例えば横置き・PEM 方式）が坑道内に露出することも想定される。このような場合には、搬出時の作業安全性の確保を考慮したうえで廃棄物の損傷を防止する施工技術を選択する必要がある。この適用技術や装置に対する留意事項は、後続の作業(b)にも含めることとした。

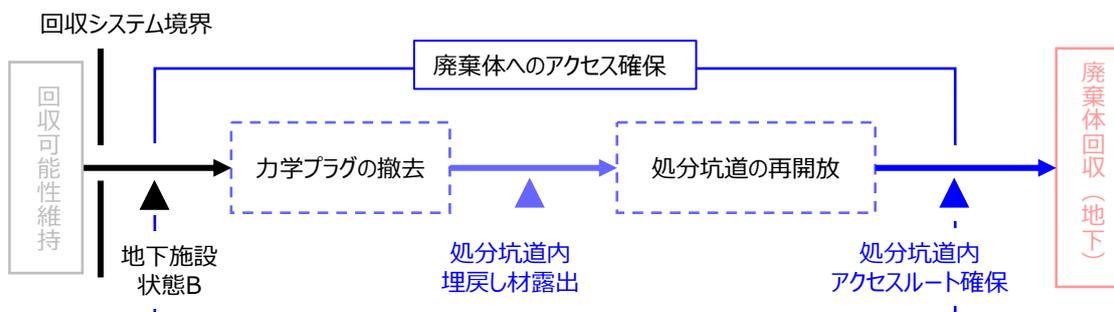


図 3.2-2 廃棄物へのアクセスを確保する作業手順

（実線：システムの境界、破線：要素の境界、▲：境界、矢印：要素間の繋がり）

(b) 廃棄体回収（地下）

埋戻し材を撤去した処分坑道内から廃棄体を搬出して坑底施設に搬入するまでを作業範囲として、回収対象を拘束する土質材料の除去、処分坑道からの搬出を要素として抽出した（図 3.2-3）。

この範囲の作業内容は、処分区画の形状（パネル型／デッドエンド型）、廃棄体の定置場所（処分孔／処分坑道）、搬出される廃棄体の形態（オーバーパック／PEM）によって異なる。現行の二つの定置概念である処分孔縦置き方式（パネル型）、処分坑道横置き・PEM方式（デッドエンド型）のそれぞれに対して内容を具体化した。

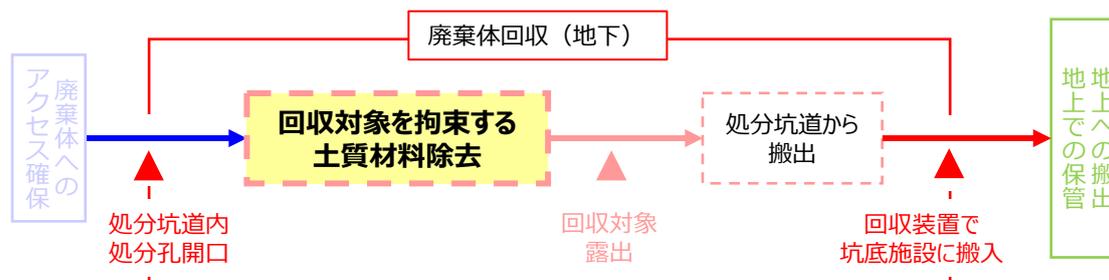


図 3.2-3 処分坑道から坑底施設まで廃棄体を搬出する作業手順

（実線：システムの境界、破線：要素の境界、▲：境界、矢印：要素間の繋がり）

(c) 地上への搬出、地上での保管

坑底施設に搬入された廃棄体を地上施設で一時保管の状態にするまでを作業範囲として、坑底施設での輸送車両への積替え、アクセス坑道（斜坑）を介した地上施設への輸送を抽出した（図 3.2-4）。

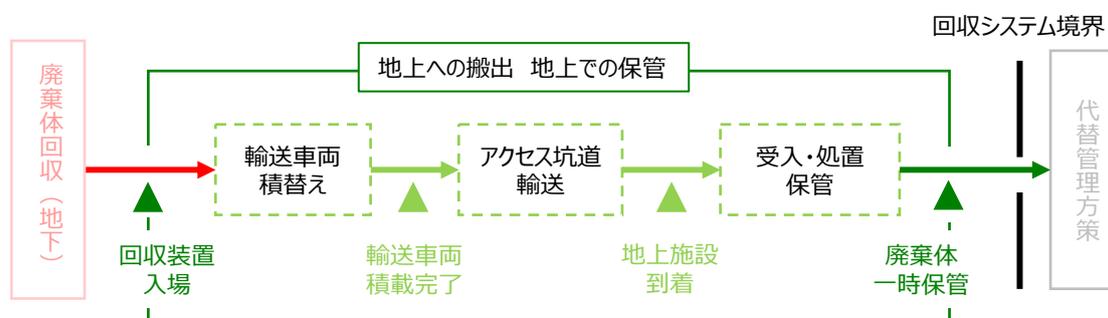


図 3.2-4 地上への廃棄体搬出、及び地上での保管の作業手順

（実線：システムの境界、破線：要素の境界、▲：境界、矢印：要素間の繋がり）

このように、システムの要素をサブシステムとして細分化する手順を反復し、階層構造の形で整理することで、各作業を構成する具体的な作業内容や作業に必要な技術、その技術で実現できる状態（次の境界となるサブシステムに受け渡す時の状態）などが明確になる。

3.2.2 回収作業に必要な技術の抽出

現行の2つの定置概念における、状態 B からの回収作業に必要な技術を抽出し、技術の有無や開発段階を表 3.2-1 整理した。

処分孔縦置き方式の緩衝材除去技術、処分坑道横置き・PEM方式の隙間充填材除去技術は、作業の実施によっては回収対象の廃棄体が露出するが、この作業に適用可能な既存の装置や設備が存在しないため、基盤研究における優先的な技術開発の対象としている（表 3.2-1 内太枠）。その

他の作業については、トンネル施工技術など既存の土木技術や、地層処分事業の建設・操業段階に適用される技術の応用・転用が見込まれる。

このように回収作業システムを構成する一連の技術は、開発レベルに差はあるものの、その適用の見通しが得られており、廃棄体の回収作業の技術的実現性はあると言える。今後、各技術について、回収作業を想定した具体化や実証試験などを行い、適用性を確認していくことで、回収に対する技術的実現性を向上させていく必要がある。

なお、表 3.2-1 の階層構造や各要素の境界は、本事業の過年度の検討に基づき設定したものである。今後の検討や技術開発の進捗に合わせて知見の拡充や細分化・統合を重ねるなど、適宜、見直していく必要がある。

3.3～3.6 節に、表 3.2-1 の第二階層のシステムの内容を詳述する。各節の冒頭部分に、システム構成を載せるとともに、各作業の内容を具体的に記す。

表 3.2-1 現行の定置概念に対する回収技術の整備状況

システム			具体的な内容	適用可能な技術の有無 技術開発の現状	技術開発レベル	詳細	
第一階層	第二階層	第三階層					
回収可能性の維持							
境界：処分坑道が埋め戻され、端部に力学プラグが設置された状態で、回収可能性が維持されている。							
回収作業	アクセス	力学プラグ撤去	解体	既存の鉄筋コンクリート構造物の解体技術は、プラグ本体の解体への適用の見込みがある。 (解体用アタッチメントの使用、ワイヤーソーイング、コアドリルによるラインカット、など) 解体対象の規模に対する、各種工法の積算方法があるため、作業時間の試算が可能である。	机上検討	3.3.1	
			積込				
			搬出				
	作業の境界：力学プラグが撤去され、処分坑道断面に埋戻し材が露出している。						
		処分坑道再掘削		掘削	既存のトンネルの掘削技術は、既設坑道からの埋戻し材の再掘削への適用の見込みがある。 (バックホウ、ずり積み機、自由断面掘削機、ダンプトラック、ベルトコンベア、など) 掘削対象の規模に対する、工事積算基準が整備されており、作業時間の試算が可能である。	机上検討	3.3.2
				積込			
搬出							
境界： 開放された処分坑道路盤処分孔が開口／隙間充填材に覆われた PEM が露出							
廃棄体回収 (地下)	処分孔縦置き方式	上部埋戻し材除去	掘削	オーバーパックまでの離隔を確保することで、既存の掘削技術の適用の見込みがある。 機械的除去技術の要素試験の結果、工事積算基準などから、作業時間の試算が可能である。	机上検討	3.4.1	
			搬出				
			作業の境界： 処分孔内で緩衝材が露出 オーバーパックは数十 cm の厚さの緩衝材に覆われている。				
		緩衝材除去		緩衝材除去	回収作業に特有の技術であり、流体を用いた緩衝材除去システムが整備されている。 除去効率に係る要素試験、フルスケールの緩衝材除去試験より、作業時間が得られている。	要素試験 フルスケール実証	3.4.2
				除去生成物の処理			
				作業の境界： 処分孔内でオーバーパックが自立している			
	処分坑道から搬出		処分孔から引上げ	回収専用装置の開発のほか、作業時の定置装置の逆動線による回収の実現可能性の見込みがある。 操業計画におけるオーバーパック定置速度を具体化することで、作業時間を推定できる見込みがある。	机上検討	3.4.3	
			坑底施設まで輸送				
処分坑道横置き・ PEM 方式	隙間充填材除去		掘削	回収作業に特有の技術であり、実寸大の隙間充填材の切削要素試験、装置の概念設計により、技術的実現性が示されている。また、試験結果を基にした作業時間の推定方法も検討されている。	要素試験 装置概念設計	3.5.1	
			搬出				
			作業の境界： 処分坑道の台座上に PEM が載っている				
	処分坑道から搬出		輸送	PEM 回収専用機の装置概念が示されている。 操業計画における PEM 定置速度から、作業時間の推定できる。	机上検討	3.5.2	
			境界： 回収装置でオーバーパック／PEM が坑底施設に運びこまれている				
地上まで搬出 地上での保管	坑底施設積替え		積替え	建設・作業時の坑底施設の転用、操業計画から推定した設備能力から、作業時間が試算できる。 作業の境界： オーバーパック／PEM が、アクセス坑道輸送車両に積載されている。	机上検討	3.6.1	
			アクセス坑道搬送				搬送
	作業の境界： オーバーパック／PEM を積載したアクセス坑道輸送車両が、地上施設に入場する。						
		地上施設での保管		受入	製造時の払出し作業の逆動線で実施 PEM の組立作業の逆動線、緩衝材除去システムを使用して鋼殻内の緩衝材を除去 ターニング加工により 190 mm 厚の炭素鋼を切断 代替管理方策に応じて、PEM、オーバーパック、キャニスタの形態で保管	机上検討	3.6.3
PEM 解体							
OP 開封							
保管							
境界： 代替管理方策に対応した状態で、廃棄体が適切に保管されている。							
代替管理 方策							

3.3 廃棄体へのアクセスに係る技術

本節では、処分坑道が埋め戻され力学プラグが施工された状態 B から、回収対象の廃棄体までのアクセス（経路）を確保するための作業に関連する技術について示す。

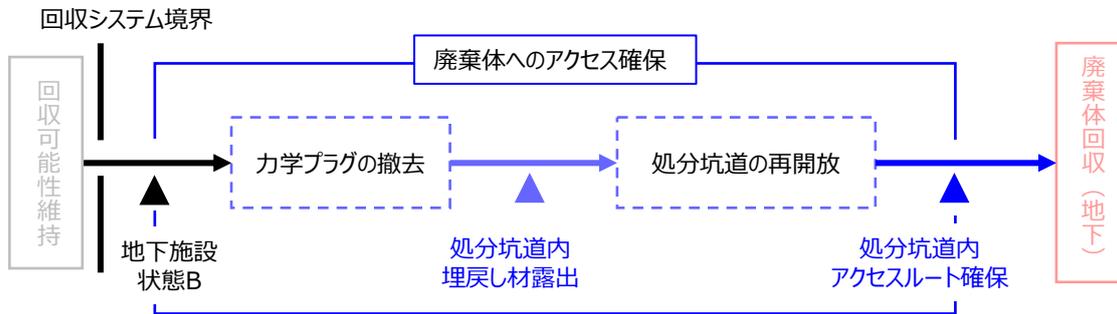


図 3.3-1 廃棄体へのアクセスを確保する作業手順（図 3.2-2 再掲）

（実線：システムの境界、破線：要素の境界、▲：境界、矢印：要素間の繋がり）

3.3.1 力学プラグの撤去

ここでは、回収時の地下施設の状態 B に対して、処分坑道に入坑するため、端部に施工されている力学プラグを撤去する作業の技術的実現性と課題について述べる。

(1) 本作業の範囲

鉄筋コンクリート製の力学プラグの撤去作業の範囲は以下の通り。

- ・作業前： 坑道入口に鉄筋コンクリート製の壁がある。
- ・作業後： 力学プラグが撤去され、坑道埋戻し材が露出している（処分孔定置の場合）。
後続の作業に支障となるような坑道壁面や路盤上の突起物がない。

(2) 撤去対象の力学プラグの仕様

廃棄体定置後の処分坑道端部には、地下水の浸潤による埋戻し材の膨出を防止するため、鉄筋コンクリート製の力学プラグが設置されている。力学プラグは、設置する処分坑道の寸法や周辺岩盤への反力確保の方法などを考慮して設計される。図 3.3-2 に、深成岩類深度 1,000 m の坑道への設置を想定した場合の仕様例を示す（NUMO, 2021.）。

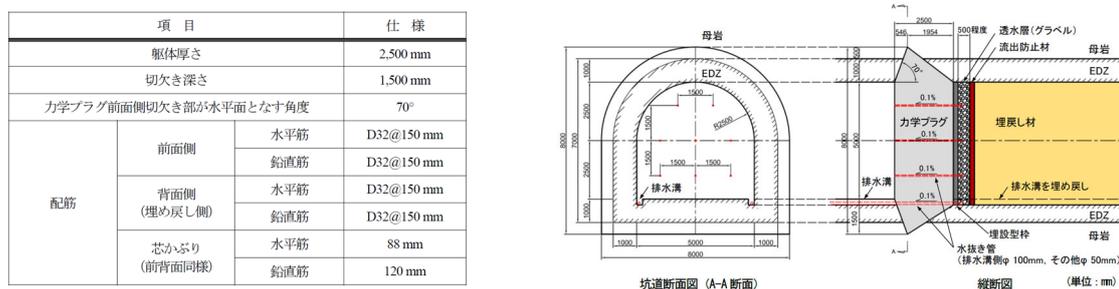


図 3.3-2 力学プラグの構造仕様、構造図の例
(NUMO, 2021.)

(3) 力学プラグの撤去に必要な技術

力学プラグ本体を厚さ 2.5 m の鉄筋コンクリート壁とみなせば、コンクリート構造物の撤去・解体に使用する既存の技術や工法の適用が考えられる。横向きの鉄筋コンクリート壁の撤去に係

る類似の事例としては、立坑からのシールド発進口の構築などがある。力学プラグの解体への適用が見込まれる技術を以下に整理する。

(a) バックホウと解体用アタッチメント

バックホウなどのベースマシンに、コンクリート構造物の解体に使用するアタッチメント（ブレーカー、圧碎機、小割圧碎機、ガラバケットなど）を装着して、対象物を解体する（図 3.3-3）。



図 3.3-3 バックホウと解体用アタッチメントによる力学プラグの撤去のイメージ (NUMO, 2021)

(b) ワイヤソーイング

切削用のビーズが付いたワイヤーで対象物をブロック状に切り分ける。パイロット孔（貫通孔）を設けて対象物にワイヤーを巻き付けて切断する方式、チェーンソーのように直接切断用のワイヤーを押し付けて切断する方式がある。

(c) コアドリルによるラインカット

コアドリリングによる小口径の穴を連結させて、対象物を切断する方式である。坑道断面の力学プラグを撤去するためには、多数のコアを抜く必要があるが、他の方式と比較して、コア抜き装置自体は比較的簡便である。

(d) その他の方式

上記の他に、大型の回転鋸刃で切断するフラットソーイング、火薬による制御発破、静的破碎剤、鉄筋への通電加熱による破碎などがある。以上のように、鉄筋コンクリート構造物の解体作業で用いられる既存の技術や工法が力学プラグ撤去の候補として挙げられる。

(4) 作業時間の推定

鉄筋コンクリート構造物の解体作業は一般的に行われており、各技術・工法に対して、積算例が示されている。「(a)破碎用アタッチメント」の場合、土木工事積算基準（NEXCO, 2021）に記載のある“コンクリート構造物取壊し”の鉄筋構造物の機械施工に基づけば、撤去する部分の力学プラグの体積から、約 30 時間と算出される（原環センター・原子力機構, 2021）。

(5) 技術的実現性向上に向けた課題

力学プラグの撤去作業上の課題として、以下の項目を挙げた。

(a) 力学プラグ撤去の可否判断

鉄筋コンクリート構造の力学プラグが大深度の岩盤から受ける地圧の影響、施工後の時間経過に伴う性状の変化など、撤去前の力学プラグの状態の確認は、安全な作業の一助となると考えられる。

例示した各技術や工法は広く使われているが、それぞれの利点や適用限界などを踏まえて選択

する必要がある。特に、地下の坑道内での撤去作業では、力学プラグの片側面からしかアプローチできず、装置の大きさや作業姿勢、動力源、解体により発生した破砕物の搬出など、作業上の制約条件にも留意が必要である。実際の地下で力学プラグの撤去作業を実施した SKB のレポートによれば、油圧ブレーカーの能力不足、粉塵の発生、円滑な破砕物の搬出などが課題として挙げられている (SKB, 2019)。

(b) 力学プラグの構成材料への適用性

図 3.3-2 に示すように、力学プラグ本体は鉄筋コンクリート部の背面に埋設型枠、透水層 (砂利)、流出防止材がある。これらの撤去についても材料に合わせた撤去方法を考える必要がある。また、埋設型枠が鋼製である場合、鉄筋コンクリート用の切削ツールでは対応できないばかりか、刃の破損などが生じる可能性も懸念される。力学プラグを複合材料の構造物とみなして、合理的な解体方法を検討することが重要である。

(c) 処分坑道内の廃棄体定置場所による留意点

処分坑道横置き・PEM 方式において、力学プラグの背面から隙間を開けずに PEM が定置されるレイアウトの場合、力学プラグの撤去作業で PEM に物理的な損傷を与えないような対策が必要である。

(d) 技術実証による実現性の提示

以上のように、力学プラグを鉄筋コンクリート構造物と捉えた場合の撤去作業に適用する技術は既に存在する。実際の制約条件下での技術の適用性の確認、課題の抽出と技術的対策の拡充に向けて、実規模での実証試験などをおして実現性を示していく必要がある。

3.3.2 埋め戻された処分坑道の再開放

ここでは、力学プラグを撤去した後の処分坑道に施工された埋戻し材を撤去し、回収対象の廃棄体までのアクセスルートを確認する作業の技術的実現性と課題について述べる。なお、この作業では回収対象の廃棄体は露出しないものとする。

(1) 本作業の範囲

埋め戻された処分坑道の再開放作業の範囲は以下の通り。

- ・作業前： ベントナイト混合土で、処分坑道全断面が埋め戻されている。
- ・作業後： 埋戻し材が撤去され、廃棄体近傍 (処分孔上、最前方の PEM 前方) に到達できる。後続の作業に支障となるような、坑道壁面、路盤上の残存がない。

(2) 撤去対象の埋戻し材の仕様

処分坑道内の低透水性の確保及び緩衝材の膨出を抑制するため、ベントナイトに建設時の発生土を配合した埋戻し材が施工されている。埋戻し材の機能は“処分坑道内の低透水性の確保”と処分孔や PEM 内の緩衝材の密度低下の要因となり得る“緩衝材の膨出抑制”である。処分坑道の埋戻し材の配合はベントナイト 15%、発生土 85%であり、乾燥密度は 1.80 Mg/m^3 と設定されている (NUMO, 2021)。なお、坑道の埋戻し技術については、地層処分施設閉鎖技術確証試験において検討が進められている (原子力機構・原環センター, 2023)。

(3) 処分坑道の再開放到に必要な技術

処分坑道の再開放は、既設の処分坑道内で既知の土質材料である埋戻し材を掘削し、発生土を処分坑道外へ搬出する作業である。ここでは、処分坑道の空間安定性は確保されており、再開放作業による緩みや支保部材の崩落、路盤のガタツキなどはないという仮定の下で技術を整理した。

(a) 埋戻し材の掘削技術

埋戻し材の掘削は既設の坑道内のベントナイト混合土を除去する作業であるため、坑道の新設と比較して、岩盤の破碎や支保の施工などが不要である。また、掘削対象の埋戻し材の仕様は既知であり、掘削時の埋戻し材の特性は、湧水による含水比の変化を含めて予見可能である。

処分坑道での埋戻し材の掘削作業には、通常のトンネル掘削で使用されるバックホウや自由断面掘削機といった施工機械の適用が考えられる。

図 3.3-4 に処分坑道の再開放の類似の事例として、埋戻し試験後の解体時の様子を示す（原子力機構・原環センター, 2023.）。含水比が 9%程度の場合は、ブレーカーによる斫も効果的で、バケットへの付着も僅かであったことから、通常の掘削技術の適用性は高いと考えられる。

(b) 発生土の積み込み技術

発生土（掘削した埋戻し材）を搬出装置・設備に積み込む方法として、掘削機械のアタッチメントをバケットに換えて積み込む方法や、ずり積み機など発生土の積み込みに特化した装置の使用などが考えられる（図 3.3-5）。また、掘削と積み込みを同時に行う装置もある。図 3.3-6 に示すように限られた空間での作業性、切羽での装置の入換えの手間と専用機の導入による作業効率の改善などを考慮して技術を選択する必要がある。



ブレーカーでの斫作業（含水比約 9%）



バケットによる掻き出し作業

図 3.3-4 バックホウによる埋戻し材の掘削の様子
(原子力機構・原環センター, 2023.)

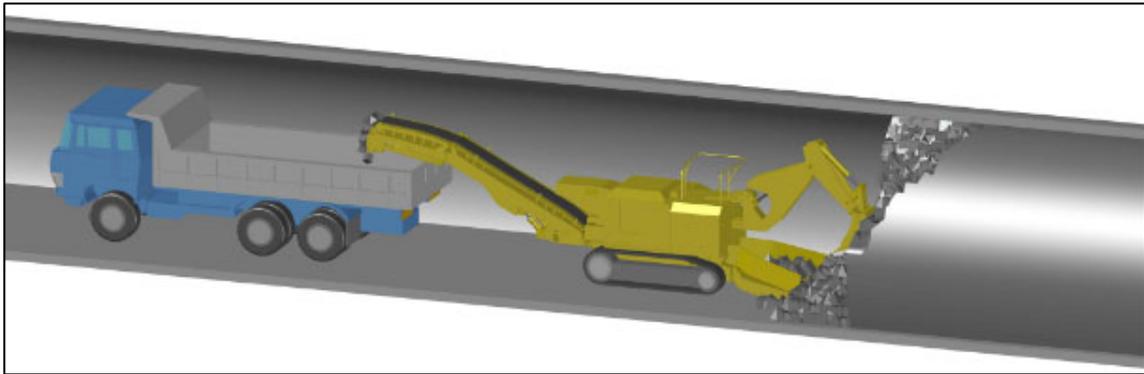


図 3.3-5 ずり積み機によるダンプトラックへの積込みイメージ



図 3.3-6 切羽における掘削装置と積込み装置

(c) 発生土の搬出技術

処分坑道の切羽から坑口まで発生土を乾式で搬出する方法として、発生土を積み込んだ容器を運ぶ方式とコンベアーを使用する方式がある（土木学会, 2016）。前者はダンプトラックやずり鋼車が該当し、走行方式には自走式（ホイールやクローラー）と軌道式（レール敷設）、運び方によってダンプトラック式、コンテナ式、シャトルカー式などのバリエーションがある。

連続コンベアー方式は、ずりを切羽から坑口まで直接、且つ、連続的に搬出するものであるが、再開放作業の進捗に伴うベルトの延長作業、再解放後の設備の撤収作業などが別途必要になる。

処分坑道から運び出された発生土は、処分場の建設・作業時の掘削ブリの搬出方法や装置を再利用し、既設のアクセス立坑で地上へ搬出されるものとした。

(4) 作業時間の推定

処分坑道 1 本の埋戻し材の掘削に要する時間の算出には、処分坑道の全長、適用する工法、処分坑道からの発生土の搬出経路などの情報が必要である。

本事業では、新第三堆積岩類深度 500 m に位置する処分孔縦置き方式を例に、土木工事積算基準（NEXCO, 2021）に記載のある“機械方式（ベンチカット工法）”を参考に、掘削時間を試算した。掘削装置と積込み装置の入替、一掘進長 1 m の片押し掘進で行った場合、作業重心におけ

る一掘進長あたりのサイクルタイムから、処分坑道1本あたりの再掘削に要する時間は約 3,600 時間と見積もられる（原環センター・原子力機構, 2021）。

(5) 技術的実現性の向上に向けた課題

処分坑道内の埋戻し材の掘削作業上の課題として、以下の項目を挙げた。

(a) 施設設計に合わせた技術の選択

埋戻し材の撤去作業は、一般のトンネル工事で使用される工法で実施が可能と考えられる。一方、一般のトンネル建設においても掘削ズリの搬出（ずり処理）は掘進速度を支配する大きな要素である。坑道内の空間的な制約、発生土の搬出に係る施設レイアウトなどを踏まえ、掘削と搬出のバランスを考慮して技術を選択する必要がある。

(b) 回収時の作業性の予測

再開放時の埋戻し材は、湧水による含水比の変化、施工後の化学的な変化などにより、掘削に影響を及ぼす土質材料の性状が施工時と異なることが考えられる、一方で、ベントナイトに混合する母岩の掘削ズリの特性や、施工方法による埋戻し領域の初期状態は既知であることから、施工後の経時変化に伴う物性変化の知見を予め拡充しておくことで、技術の選択を含めた回収計画の策定の一助になると考えられる。

(c) 発生土の搬出先の選択肢と必要な技術

試算の対象とした処分坑道の断面積は約 16.5 m²であるため、礫混ざり粘性土の土量変化率 1.4 より、1m の再掘削で 23.1 m³、処分坑道 1 本あたり 2 万 m³以上の発生土が生じる。搬出した発生土への対応が回収作業の制約とならないように、地上に搬出されたベントナイト混合土である発生土を適切に保管、処理する設備を用意しておく必要がある。

発生土を廃棄体の回収が完了した別の処分坑道の埋戻し材として再利用することも考えられる。ただし、発生土は従来の埋戻し用の混合土のように性状が管理されたものではなく、体積が増加したものを別の坑道内に改めて元の体積になるように高密度に施工する技術が必要である。さらに、埋戻しの目的によって技術的な課題が異なる。回収後の代替管理方策が既設の処分坑道の再利用を前提としない場合は、放棄する坑道の埋戻し作業となることから、出来るだけ高密度に速やかに施工することに焦点が置かれると考えられる。一方、処分場として処分坑道を再利用する場合は、建設・操業段階における埋戻し材に関する品質保証体系と整合していることが求められる（原子力機構・原環センター, 2023）。

(d) 技術実証による実現性の提示

以上のように、処分坑道の再開放を既設の坑道からの土質材料の撤去と捉えた場合、一般土木技術が適用できると考えられる。実際の制約条件下での技術の適用性の確認、課題の抽出と技術的対策の拡充に向けて、実規模での実証試験などをおして実現性を示していく必要がある。

また、性状が管理されていない発生土が埋戻しの施工効率に与える影響を確認しておくことは、発生土の処理方法の柔軟性の確保の観点から効果的である。

3.4 処分孔縦置き方式の廃棄体の回収に係る技術（坑底施設までの搬出）

処分孔縦置き方式において、埋戻し材を撤去した処分坑道内では、土質材料で埋め戻された処分孔が路盤上に開口している。本節では、オーバーパックの閉じ込め機能が確保されており放射性物質の漏えいは生じていない前提の下で、処分坑道からオーバーパックを搬出する作業について示す。

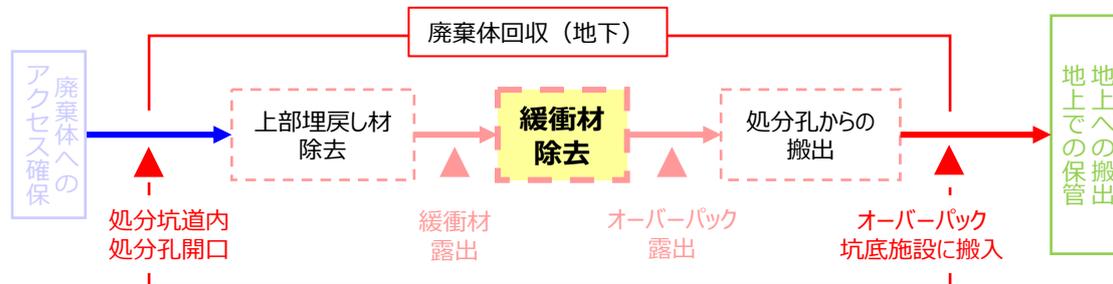


図 3.4-1 処分孔からオーバーパックを回収する作業手順（図 3.2-3 を改良）
（実線：システムの境界、破線：要素の境界、▲：境界、矢印：要素間の繋がり）

3.4.1 上部埋戻し材の除去

ここでは、人工バリアの上に遮蔽の目的で施工されている上部埋戻し材を除去する作業の技術的実現性と課題について述べる。

(1) 本作業の範囲

上部埋戻し材を除去する作業の範囲は以下の通り。

- ・作業前： 処分孔内上端まで、ベントナイト混合土で埋め戻されている。
- ・作業後： オーバーパックの上部の数十 cm まで、処分孔内の埋戻し材が除去されている。

(2) 除去対象の上部埋戻し材の仕様

上部埋戻し材は処分坑道の線量を低下させる遮蔽の役割があり厚さは 1 m とされている。この埋戻し材の配合はベントナイト 30%、ケイ砂 70%、乾燥密度 1.60 Mg/m³の緩衝材と同じ仕様とされている（NUMO, 2021）。上部埋戻し材の施工技術は未定であるが、技術検討では処分孔内に隙間なく埋戻し材が施工されているものとした。

(3) 上部埋戻し材の除去に必要な技術

掘削によって遮蔽厚さが減少するため作業は遠隔操作を前提とする。処分孔内の掘削作業となるため、閉じ込め容器であるオーバーパックへの機械的な損傷の回避を最優先に、除去効率性の確保から掘削深さを管理した機械的な方法を選択した。

掘削用の機材がオーバーパックと接触しないために確保する距離を 50 cm と設定し、厚さ 1 m の上部埋戻し材と厚さ 20cm の緩衝材の一部を合わせて、1.2 m の範囲を機械的な方法で除去する場合の候補技術を以下に挙げた。

(a) バックホウによる掘削

3.3.2 で述べた処分坑道の再開放と同様に、バケットを取り付けたバックホウで処分孔を 1.2 m の深さまで掘削し、発生土を積込み・搬出する。円形の処分孔内を既定の深さで効率的に掘削するため、マシンガイダンスの導入が効果的と考えられる。

(b) ドリリングバケットによる掘削

アースドリル工法で使用されるようなドリリングバケットで、処分孔内をくり抜くように掘削する。掘削径は使用するバケット径、掘削深さはバケットを下降させる距離で管理されるため、動作が単純で遠隔操作に適していると考えられる。発生土はドリリングバケット内に収納され、掘削装置とともに坑道外に搬出される。バケットを交換型として、発生土を搬出するコンテナの役割を付与すれば、地下での発生土の積込み作業が省略できると考えられる。

図 3.4-2 にドリリングバケット方式の除去装置のイメージならびに類似する施工機械を示す。この装置は、幌延深地層研究センター試験坑道 4 において、実規模の試験孔の掘削作業に適用された超低頭型の掘削装置である（原子力機構, 2019）。



図 3.4-2 ドリリングバケットによる上部埋戻し材の除去のイメージ
(左：装置概念、右：類似する掘削装置（原子力機構, 2019）)

(4) 作業時間の推定

前記(3)の必要な技術として例示した方式による切削時間の情報が公開資料で見つけられないため、ここでは 2018 年度に実施した隙間充填材の機械的除去技術の要素試験におけるオーガー方式（図 3.5-4 参照）の除去能力を基に、処分孔の直径 2.22 m と掘り下げ深さ 1.2 m の除去体積から (4.645 m³)、作業時間を 6 時間と見積もった（原環センター・原子力機構, 2021）。

(5) 技術的実現性の向上に向けた課題

上部埋戻し材の掘削作業上の課題として、以下の項目を挙げた。

(a) 回収時の作業性の予測

掘削に影響を及ぼす土質材料の性状は、湧水や施工後の経過期間による含水比で変化する。含水比と掘削性との関係の知見を予め拡充しておくことで、技術の選択を含めた回収計画の策定の一助になると考えられる。

(b) 除去範囲（深さ）の設定と作業精度

オーバーパックへの機械的な損傷を避けるために残した厚さ 50 cm の緩衝材は、次項 3.4.2 に示す流体的除去技術による除去作業の対象となる。作業時の位置制御の精度が高いほど、オーバーパック上に残される緩衝材の厚さを減らすことができ、緩衝材除去に要する全体作業時間の短縮やスラリー状の除去生成物の処理作業の合理化に繋がると考えられる。

また、1.2 m の除去範囲（深さ）は、処分坑道路盤と処分孔上端が同レベルという前提の下、上述した作業精度を考慮して設定したものである。実際の施設設計における処分坑道路盤からの処

分孔の深さに応じて適切に設定する必要がある。

(c) 発生土の処理

上部埋戻し材は緩衝材相当の仕様であるため、処分坑道の埋戻し材よりもベントナイトの比率が高い。3.3.2(5)(c)に示した処分坑道の再開放時の課題と同じく、適切な発生土の処理方法は円滑な回収作業の実施のためには重要である。

(d) 技術実証による実現性の提示

既出の「(4)作業時間」の試算で用いたオーガー方式の除去技術による作業速度は、PEM方式の回収作業のボトルネックになることが示唆されており、迅速化が必要な技術開発課題として抽出されている。(3)で挙げたように、適用が見込まれる類似技術について、一連の回収作業に対する適用性を実証試験などで確認して技術的実現性を提示するとともに、回収作業計画の策定・具体化に必要な作業時間などの情報を拡充することが必要である。

3.4.2 緩衝材の除去

上部埋戻し材を除去後の処分孔内のオーバーパックは、上部に50 cm厚さの緩衝材、側部に厚さ70 cmの緩衝材に囲われた状態になっている。ここでは、この緩衝材を除去し、処分孔内から引上げることができる状態にする作業について、オーバーパック周囲の緩衝材除去作業の技術的実現性と課題を、以下に述べる。

(1) 本作業の範囲

オーバーパック周囲の緩衝材除去作業の範囲は以下の通り。

作業前： 処分孔内のオーバーパックが緩衝材で拘束されている。

作業後： 処分孔内でオーバーパックがフリーな状態になっている。

(2) 除去対象の緩衝材の仕様

人工バリアの構成要素である緩衝材の配合はベントナイト 30%、ケイ砂 70%、乾燥密度 1.60 Mg/m³である (NUMO, 2021.)。緩衝材の製作・施工方法には複数のオプションがあるが、回収時の除去作業の技術検討では処分孔内に隙間なく施工されているものとした。

(3) 緩衝材の除去に必要な技術

ベントナイト混合土である緩衝材の除去技術には、閉じ込め機能を有するオーバーパックへの機械的な損傷を避けることが求められる。よって、既存の掘削技術をそのまま適用することはできず、緩衝材の除去に特化した技術が必要である。

オーバーパックのように、閉じ込め機能を有する容器周囲の土質材料の除去技術について様々な方法が検討されている (SKB, 2000.)。このような検討を踏まえ、機械的な損傷を避けることを第一として流体的除去技術を選定した。

流体的な除去は、水の作用によって土質材料を流動性のある除去生成物に変え、それを吸引などの方法で取り除くものである。噴射水の種類、噴射圧力、使用するノズルの種類など、噴射条件には多数の組合せがあり得る。これまでに実施した要素試験、フルスケールの実証試験の成果に基づき、流体的除去技術による緩衝材除去の技術的実現性を以下に示す。

(a) 塩水の低圧噴射による緩衝材の除去

体積拘束が無い条件下で緩衝材を水と接触させると膨潤するが、電解質溶液の場合はスラリー化が促進される。この効果を利用して緩衝材を流動性のある除去生成物に変える方式である。要素試験などを経て、実規模の緩衝材除去システムとして整備されている。図 3.4-3 に緩衝材除去システムを構成する三つの設備を示す。

この設備を用いたフルスケールの緩衝材除去試験を地上にて実施した（原環センター，2015）。低圧噴射のため塩水やスラリーの飛散は抑えられており、除去作業時の周辺環境は良好である。一方で、電解質溶液による緩衝材のスラリー化の原理は陽イオンの作用によるものであるため、一つの処分孔に対する除去作業に 78 時間程度を要することが課題として挙げられる。



図 3.4-3 緩衝材除去システムを構成する設備
(原環センター, 2015)

(i) 噴射吸引設備

処分坑道内の走行機能、処分孔上での位置の微調整機能、塩水噴射ノズル・スラリー吸引口を備える噴射リング、オーバーパックの転倒防止の把持機構、噴射リングの上昇／下降機能を有する。噴射ノズルから 0.6MPa の低圧で塩水を噴射しながらリング自体を揺動運動させ、オーバーパック周囲の緩衝材をスラリー化させる。スラリー化とスラリー吸引を繰り返すことで、オーバーパック上部と側部の緩衝材を除去し、緩衝材から縁切りをするものである。



図 3.4-4 噴射吸引設備による緩衝材の除去
(原環センター, 2015)

(ii) 塩水リユース設備

噴射吸引設備の塩水の消費量は平均で約 15 m³/h であり、オーバーパック 1 体の回収のためにおよそ 1,170 m³ 程度の塩水を消費する。これは標準的な 25 m プール (L25 m, W12.5 m, D1.35m) の容量約 442 m³ の 2.8 杯分に相当する。処分孔ごとに必要な塩水を貯留する水槽や、吸引したスラリーを溜めておく水槽を確保することは、空間的な制約のある地下坑道内では困難である。

そこで、吸引したスラリーから固形物を取り除き、濁度や濃度を調整した塩水を再利用するた

めの塩水リユース設備を設けた。除去に使用する塩水にはスラリーの固液分離効果もあり、固形物の沈降速度と噴射水量のバランスから設備容量を適切に設計することで、地下での除去作業の技術的実現性が向上している。

(iii) 遠隔操作設備

作業安全上の遮蔽層としての緩衝材が無くなるため、全ての作業を遠隔操作で実施する必要がある。装置の姿勢や位置などの状態把握や処分孔内での除去深度など、計画通りに作業が進むことを確認するための管理項目を設定し、各種センサーや監視用カメラを搭載し、技術的実現性を検証した。また、坑道内でのケーブル類の取り回しへの対応として、データのやり取りに無線伝送技術を適用している。

(b) 塩水ウォータージェットによる緩衝材の除去

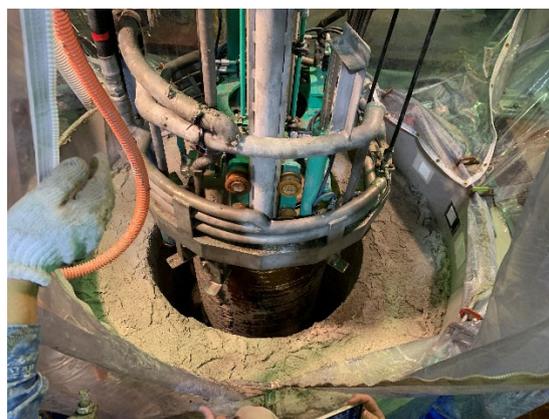
(a)で整備した緩衝材除去システムの基本構成を踏襲し、噴射圧を 0.6MPa から 20MPa に引上げ、除去の原理を流体の運動エネルギーによる物理的な作用（切削）に変更することで、作業時間の大幅な短縮を図った（原環センター・原子力機構, 2023.）。

上記の高度化では、ウォータージェットの切削性能と面的な除去が両立するトルネードノズルを採用した。このノズルから噴射された水流は図 3.4-5 左のように緩衝材を数 cm 程度の幅と深さをもつ溝状に切削する。このノズルを複数備えた噴射リングを揺動・下降させることで、緩衝材を除去する。

飽和度 80%の緩衝材に対する塩水ウォータージェットによる実規模の除去試験の結果、一つの処分孔に対する除去作業の所要時間は 4~5 時間となり、(a)方式の所要時間である 78 時間を大幅に短縮できる見通しを得た。また、時間の短縮に伴い使用水量も 75 m³ 程度に削減できた。一方、噴射中は塩水が霧状に舞い上がるため、噴射吸引設備だけではなく、処分坑道の構成要素、換気設備などへの飛来塩による腐食影響が懸念される。処分孔からの飛散を低減するための防霧カバーなど対策が必要である。



トルネードノズルによる溝状の切削痕の例
(一次元の噴射要素試験)



フルスケールでの除去試験

図 3.4-5 ウォータージェットによる緩衝材の除去
(原環センター, 2023)

(c) 真水ウォータージェットによる緩衝材の除去

物理的な切削作用を主とするウォータージェットでは、噴射水として真水の使用も可能と考えられる。真水を使用したフルスケールの緩衝材除去試験は未実施であるが、図 3.4-5 (左図) に例示したトルネードノズルによる噴射要素試験の結果から、真水を使用した場合の作業性の推定を

試みた。

噴射要素試験では、同一噴射条件の塩水の結果と比較して除去速度の目安となる一次元の切削痕の深さが76%に低下した。この結果から、処分孔一つあたりの除去作業は5.3~6.5時間と推定される。これは(a)方式の場合の1/12程度であり、現実的な作業時間まで短縮されている。塩水と真水によって違いが生じる要因については更なる検討が必要ではあるものの、真水ウォータージェットは技術的選択肢になり得る。

真水を使用した場合は、塩水で懸念される周辺環境への影響は低減されるが、塩水のようなスラリーの固液分離機能は期待できないため、吸引したスラリーの減容化が課題である。

なお、真水の低圧噴射による緩衝材の除去は、陽イオンによるスラリー化促進作用、高圧噴射による物理的な切削作用といった、処分孔内の緩衝材を除去生成物に変える原理が無い。よって、緩衝材除去の方式としては適用性が低いと考えられる。

(4) 作業時間と除去効率に対する緩衝材の飽和度の影響

(a) 処分孔一つあたりの作業時間

前述のとおり、実規模の緩衝材除去試験によって、塩水低圧噴射では約78時間、塩水ウォータージェットで4~5時間の実績を得ている。また、真水ウォータージェットの場合は噴射要素試験の結果から5.2~6.5時間と推定される。高圧噴射を選択することで、現実的な時間内での回収作業の見通しが得られている。

(b) 除去効率に対する緩衝材の飽和度の影響

除去対象の緩衝材は、定置からの経過時間、処分孔内の湧水量によって、回収時の飽和度が変化する。(3)(a)方式の場合、緩衝材の飽和度が低いと塩水が内部に浸潤しやすいが、飽和度が高くなると除去効率が低下する(原環センター, 2011)。

一方、高圧噴射の要素試験において、飽和度60%の供試体の切削深さは、同一条件の飽和度80%と比較して89%に低下した。つまり、高圧噴射方式では、飽和度が高い方が高い除去効率となる。ただし、緩衝材の飽和度が60%であったとしても処分孔1つあたりの除去作業時間は10時間未満となるため、高圧噴射による緩衝材除去は回収時の緩衝材の状態にさほど影響を受けず、現実的な時間内での回収作業の実現が可能な技術であると言える。

(5) 技術的実現性向上に向けた課題

緩衝材除去技術については、種々の要素試験や実規模の緩衝材除去試験によって、技術的実現性が示されている。除去生成物の処理、回収の場面に応じた方式の選択など、本技術の適用性を向上させるための課題を以下に整理した。

(a) 除去生成物の処理方法

ウォータージェットによる除去作業時間の短縮は、同時に使用する塩水量、すなわちスラリー状の除去生成物の発生量の削減にも繋がる。図3.4-5(右図)の噴射リングの消費水量は約15 m³/h、処分孔一つあたりの消費量は約75 m³、発生するスラリーも同程度の量となり、噴射する塩水と吸引したスラリーを逐次搬入出する作業の実現の見通しがある。これは、除去生成物の処理方法に、塩水リユース設備による原位置処理、地上または地下に設置した処理プラントでの処理など、技術的選択肢が増えることを意味しており、流体的除去技術の適用性の向上に繋がる。

除去生成物の処理技術を具体化するため、塩水/真水それぞれのベントナイトスラリーの特性の把握、凝集剤の添加による固液分離特性の基礎データの取得などを進め、地下の空間的制約下

における設備規模に応じた処理設備の具体化を進める必要がある。

(b) 除去方式の選択肢

これまでの技術開発をとおして、オーバーパック周囲の緩衝材の除去作業への適用が見込まれる流体的除去技術として、(3)に示す三つの方式が技術的選択肢として実証されている。それぞれの技術の特徴を表 3.4-1 に整理した。本事業の技術開発の主目的である回収作業の迅速化の観点では、塩水ウォータージェットが最も作業時間が短く適用性が高い技術となる。一方、回収後の処分孔を再利用する場合など、使用した塩水の影響が懸念される際は、作業時間と周辺環境への影響の観点から真水ウォータージェットの適用性が高くなる。

回収作業の迅速化以外の技術選択における評価項目を整備することで、最適な方式を選択するための評価が可能となる。これらに加えて、原位置の湧水を使用したウォータージェット方式も選択肢となり得る。

表 3.4-1 緩衝材の流体的除去の技術的選択肢

噴射方式	(a) 塩水 低圧噴射	(b) 塩水 ウォータージェット	(c) 真水ウォータージェット
噴射水性状	4%並塩溶液	4%並塩溶液	真水
噴射圧	0.6 MPa	20 MPa	20 MPa
使用ノズル (下方※1)	直射	トルネード	トルネード
試験実施規模	フルスケール	フルスケール	一次元要素試験
処分孔1つあたりの 作業時間※2 (飽和度)	78 時間 (60%)	4~5 時間 (80%)	5.2~6.5 時間 (80%)
坑道内環境	良好	塩水・スラリーが 霧状に飛散	真水・スラリーが 霧状に飛散
消費水量※3	1,170 m ³	75 m ³	97.5 m ³
塩水リユース設備	必須	選択可	適用不能※4
適用例	地下水組成が海水の 場合の部分回収	処分孔の再利用を前 提としない全量回収	処分孔の再利用を想 定する全量回収

※1：オーバーパック側部の緩衝材除去用 把持部露出用の直射ノズルが別途設けられている
 ※2：上部緩衝材 50 cm、側部緩衝材 175 cm を連続除去した場合の正味の作業時間
 ※3：単位時間あたりの消費水量を 15 m³/h とした場合の概算値
 ※4：真水には固液分離促進効果が期待できないため

(c) 処分孔からの引上げ・搬出作業との境界

噴射吸引設備は、緩衝材除去時の処分孔内でのオーバーパック転倒を防止する機能を備えている。3.4.3 項で詳述するオーバーパックの引き上げ作業時の転倒防止策であるオーバーパック底部の緩衝材存置など、作業間の繋がりに留意して除去範囲を設定することで、安全な回収作業を実現することが可能となる。

(d) 除去方式の違いによる作業計画への影響

塩水低圧噴射による緩衝材除去幅は数十 cm 程度であり、図 3.4-4 (右図) のように除去後の緩衝材側面に凹凸が生じる。これは、孔内に停留する塩水とある程度の時間接触した部分がスラリー化するためと考えられる。一方、塩水低圧噴射に比べ短時間で除去が完了する塩水ウォーター

ジェットでは、塩水との接触時間も短く、水流による切削幅が 20 cm 程度とほぼ一定になるため、図 3.4-5 (右図) のように円筒状となる。除去後の仕上がりの違いから、噴射方式の違いによる回収作業計画の策定への留意点として考えられる項目を以下に挙げた。

- ・ ウォータージェットの場合は噴射条件の設定で除去幅を管理でき、オーバーパックの引き抜きに必要な緩衝材の除去量を最小限することができる。これは、塩水リユースシステムのような除去生成物の処理系統の能力設定や除去作業時の運転管理の容易性に寄与する。
- ・ 除去後の処分孔内には厚さ 50 cm 程度の緩衝材が残存した状態となる。この緩衝材に処分孔の支保のような機能が期待できれば、回収時の処分孔の健全性喪失による孔壁の崩落といった作業上の不確実性を低減できる可能性がある。

3.4.3 処分孔からのオーバーパックの搬出

周囲の緩衝材が除去されたオーバーパックは、処分孔から引上げが可能な状態になっている。ここでは、オーバーパックを処分孔から引上げ、坑底施設に搬入する作業の技術的実現性と課題について述べる。

(1) 本作業の範囲

処分孔からオーバーパックを搬出する作業の範囲は以下の通り。

- ・ 作業前： 処分孔内のオーバーパックが可搬な状態にある。
- ・ 作業後： 回収装置で坑底施設に搬入されている。

(2) 回収対象となるオーバーパックの設定

技術的実現性の検討に際して、搬出対象のオーバーパックの性状を以下のように設定した。

(a) オーバーパック把持部の位置

緩衝材除去後のオーバーパックは、除去せずに残されている下部の緩衝材に載った状態である。フランジ形状の把持部（オーバーパック上面）は、処分孔底面から下部緩衝材厚さ 70 cm にオーバーパック胴部の長を 175 cm を足した 245 cm に位置している。

(b) オーバーパック本体の状態

3.4.2 で述べた緩衝材除去のウォータージェット噴射条件は並塩 4%、噴射圧 20 MPa であり、金属製のオーバーパックを損傷させる能力は無い。

塩水ウォータージェットによる除去では塩水を使用するが、緩衝材の除去作業でも示したように塩水との接触時間が短いことから作業による腐食は僅かである。よって、腐食減量や腐食生成物による重量変化は無視し、オーバーパックの重量は製造時と同重量とした。

(3) オーバーパックを処分孔から搬出するために必要な技術

回収時に必要な動作は、処分孔から引上げる縦方向の動き、定置場所から坑底施設まで輸送する横方向の動き、オーバーパックの遮蔽の三つに分解できる。オーバーパックの表面線量は定置から回収までの経過時間に依存するが、放射線に対する作業安全の観点から遠隔操作を前提とした。

(a) オーバーパック定置装置の転用

操業における定置装置の動きは、坑底施設－処分孔間の搬送、処分孔内へのオーバーパックの定置であり、地下坑道内の走行機能、処分孔直上での把持機構の上下機能、遮蔽機能を備えてい

る。定置装置を回収作業に転用し、逆動線の動きで処分孔内のオーバーパックを坑底施設まで運ぶ作業で回収を行う。

定置装置が坑道内に敷設された軌道上を走行する方式の場合、そのまま転用するためには、再解放後の坑道への軌道の再敷設が必要になる。

(b) 回収作業用の装置

3.4.2 に示した噴射吸引設備には、側部の緩衝材を除去した際の転倒防止のため、噴射リング回転軸部に把持部のチャック機構を備えている。オーバーパックを把持した状態で、噴射リングの昇降機能を使用すれば、図 3.4-7 (右図) のようにオーバーパックを路盤上まで引き上げることができる。

噴射吸引設備は、遠隔操作設備や塩水リユース設備と塩水供給配管、除去生成物吸引配管、動力線で接続されており、坑底施設までの自走には課題があるため、別途搬出する装置が必要である。図 3.4-8 (左図) は、コンテナ型の遮蔽容器をフォークリフト型の装置で搬送する回収装置の概念図である。搬出装置は、処分孔から引き上げたオーバーパックを処分坑道内で受け取り、坑底施設まで搬出する（※図中の車両は乗車型だが、遠隔操作により無人で搬出を行う）。

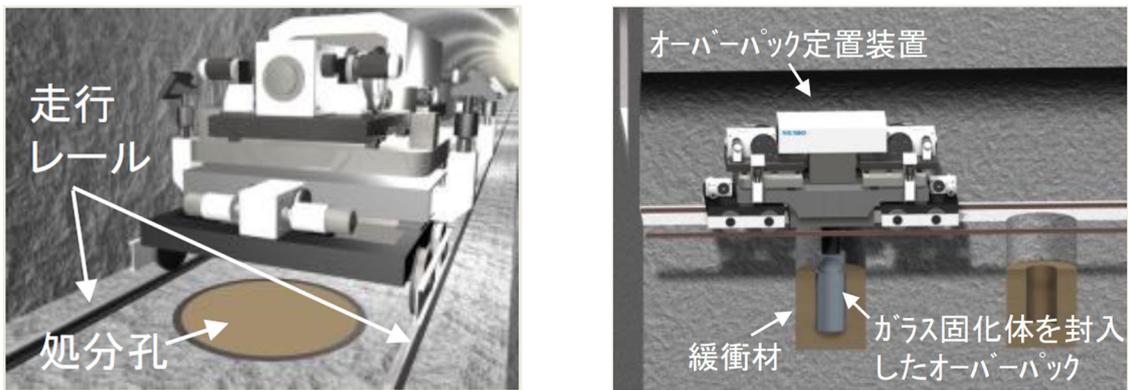


図 3.4-6 オーバーパック定置装置（軌道式）

(NUMO, 2021)

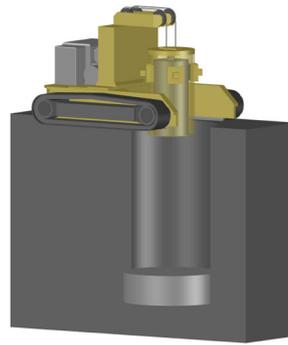


図 3.4-7 転倒防止のオーバーパック把持機構と路盤上への引き上げ

(原環センター, 2015)



遮蔽コンテナ+搬出装置（遠隔操作）



回収専用装置

図 3.4-8 オーバーパックの回収専用装置

以上は、引上げと搬出を別の装置に分けた場合に必要な技術（装置）であるが、オーバーパックの回収装置に必要な三つの機能（引上げ、輸送、遮蔽）を有する回収専用装置も考えられる。図 3.4-8（右図）に示した装置概念は、定置装置の転用上の課題である軌道の再敷設を解消するため、自走機能（クローラー）を付けたものである。

(4) 作業時間の推定

現在の操業計画において、オーバーパックの定置数量は一日平均 5 体とされている。よって、地下施設にはこの規模に合わせた定置装置が配備されていると仮定すれば、一日 5 体までの搬出作業は、既存の装置を用いた定置作業の逆動線で実現可能と考えられる。さらに、一日 5 体の作業容量と実際に投入される定置装置の台数から一台あたりの能力を算出すれば、既設の定置装置の転用による回収作業時間が推定できる。

図 3.4-8（右図）に示すような専用機を使用した場合の作業時間を、以下の仮定で試算した。処分孔からのオーバーパックの引き上げに要する時間は、既存の噴射吸引設備の昇降機能（3.6 m/min）を使用した場合約 1 分である。その後遮蔽容器への積込みも数分程度とする。搬出装置の走行速度を 1 km/h とした場合、約 900 m の処分坑道からのオーバーパックの搬出に要する平均時間はおよそ 1 時間となる（原環センター、2021）。

(5) 技術的実現性向上に向けた課題

(a) オーバーパック把持部の健全性

上述した作業は、操業時と同じ方法でオーバーパック上部にあるフランジ形状の把持部を掴んで取り扱えることが前提である。オーバーパック上部の把持部を使用して処分孔から引き上げられない場合は、側部を把持する、或いは磁力で吸着させるなどの別のハンドリング方法を用意しておくことで、回収作業の実現性を更に確実なものにできる。

なお、回収時の把持部の健全性については第 4 章で詳述するが、回収可能性の維持に伴う安全性への影響の中で、作業安全に係る課題として扱うことになる。今後具体化されるオーバーパック把持部の形状（フランジ部の厚さや幅、首部の太さなど）、製作方法（無垢材からの削り出し、隅肉溶接による接合、など）を踏まえて、回収作業時の力学的な耐力を定量的に評価する必要がある。

(b) 処分孔内でのオーバーパックの転倒防止

3.4.2 項で述べたように、緩衝材除去では把持部を掴みながら側部緩衝材を除去することで、処分孔内でのオーバーパックの転倒を防いでいる。図 3.4-6 や図 3.4-8 のように別の装置で引き上げる場合、装置の入替作業中に処分孔内でオーバーパックが一時的にフリーになるため、転倒防止を考慮する必要がある。オーバーパック側部緩衝材を数 cm 程度残すことなどが対策として考えられる。

(c) 引上げ時に必要な力と反動対策

オーバーパックの引上げに必要な力は、①オーバーパック自体の重量、②下部緩衝材を引き剥がす力、③転倒防止のために側部緩衝材の一部を残した場合は側部摩擦と底面部負圧に起因する力、これら 3 つの力の和となる。また、②や③に起因する力が何らかの理由で急に無くなった場合、装置が反動により暴れる可能性もある。引上げ作業時の安全性確保のため、引上げ装置には十分な引上げ能力に加え、反動への対応も考慮する必要がある。

(d) 坑底施設の設定への対応

搬出先の坑底施設ではアクセス坑道(斜坑)輸送車両へのオーバーパックの積替え作業を行う。既存設備の活用を前提とする場合は、オーバーパック搬出技術との整合に留意が必要である。

(e) 技術実証による実現性の提示

以上のように、オーバーパックの引上げ作業及び坑底施設への搬入作業に係る概念を提示することができていることから、処分坑道からのオーバーパックの搬出作業の技術的実現性についての見通しはあると言える。実際の制約条件下での技術の適用性の確認、安全に確実に実施するための課題の抽出と技術的対策の拡充に向けて、実規模での実証試験などで実現性を示しておく必要がある。

3.5 処分坑道横置き・PEM 方式の廃棄体の回収に係る技術（坑底施設までの搬出）

3.3 節で述べたように、力学プラグ及び埋戻し材を撤去した処分坑道内には、土質材料で埋め戻された PEM が定置されている。PEM 方式の場合は、廃棄体を PEM として搬出する方法と、PEM 内のオーバーパックを搬出する方法の二通りが技術的選択しとして考えられる。

本節では、処分坑道から PEM として回収する場合を基本として、その作業手順及び PEM 内のオーバーパックを回収する場合の代替手順としての課題について示す。

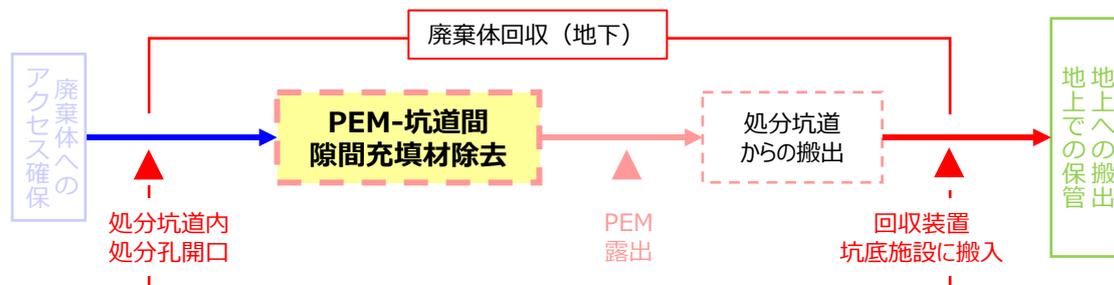


図 3.5-1 処分坑道から PEM を回収する作業手順（図 3.2-3 を改良）

（実線：システムの境界、破線：要素の境界、▲：境界、矢印：要素間の繋がり）

3.5.1 隙間充填材の除去技術

ここでは、状態 B の処分坑道からの PEM の搬出に必要となる、PEM と坑道間に施工された隙間充填材の除去作業及び PEM を回収装置で処分坑道から搬出できる状態にする作業の技術的実現性と課題について述べる。

(1) 本作業の範囲

PEM 周囲の隙間充填材の除去作業の範囲は以下の通り。

- ・作業前： ベントナイト混合土で、処分坑道全断面が埋め戻されている。
- ・作業後： 隙間充填材が除去、PEM が搬出可能な状態となっている。
後続の作業に支障となるような、坑道壁面、路盤上の残存がない。

(2) 除去対象の隙間充填材と PEM の設定

(a) 隙間充填材

現行の処分坑道横置き・PEM 方式では図 3.5-7 (左図) に示すような門型方式の定置装置が検討されており、定置作業では PEM の周囲に空間を必要とする。処分坑道の低透水性の確保、PEM 内の緩衝材が周囲に膨出して密度が低下しないよう、この空間には坑道の掘削ズリにベントナイトを混合した隙間充填材が施工されることになっている。この隙間充填材は、PEM が定置されている坑道内における施工性を考慮して、他の地下坑道よりもベントナイトの比率を高めた隙間充填材を乾燥密度 1.6Mg/m^3 で施工することが検討されている (NUMO, 2021)。

掘削ズリの性状は母岩に依存するため、除去対象となる隙間充填材の配合はベントナイト 50%、ケイ砂 50%、乾燥密度 1.60 Mg/m^3 とした。隙間充填材の施工方法には複数のオプションがあるが、回収時の除去作業の技術検討では処分坑道に隙間なく施工されているものとした。

(b) PEM

回収対象の PEM は鋼殻リング方式で製作され、形状は直径 2,316mm、全長 3,356mm の円柱型である (NUMO, 2021)。回収時の PEM の重量は内部の緩衝材が飽和した最も重い約 40t と仮定した。PEM の鋼殻にはオーバーパックのような閉じ込め機能は求められていない。

技術開発の第一段階として、最も単純な定置状態を仮定した。PEM には門型クレーン方式の定置装置と結合するための固定金物 (突起物) があるが、本事業での検討では無いものとした。また PEM は処分坑道路盤上のコンクリート台座上に隙間を開けずに横向きで定置されているものとした。つまり、処分坑道、PEM と隙間充填材の幾何学的な位置関係は、坑口から妻側まで同一となる。これら固定金物、PEM の定置間隔については、(5)に技術的実現性の向上に向けた課題として整理した。

(3) 隙間充填材の除去に必要な技術

(a) 隙間充填材の除去範囲の具体化

PEM 周囲の隙間充填材は PEM 一体あたり約 42 m^3 であり、除去作業には効率性が要求される。PEM 鋼殻は搬出時の人工バリア輸送容器となるため、搬出作業に耐え得る構造健全性を損なうような損傷は避ける必要がある。さらに、後続作業となる「処分坑道からの PEM の搬出」が要求する作業環境を整えることも必要であるが、PEM 回収装置が要求する環境条件は現時点では具体化されていない。ただし、隙間充填材が残存していない方が、後続の作業上有利である。

隙間充填材の除去は、3.3.2 項に示した埋戻し材の掘削技術と基本的な部分は共通であるが、PEM の周囲という特殊な部位を対象としているため、隙間充填材の除去に特化した技術 (装置)

が必要である。

隙間充填材の除去方法の概念として、図 3.5-2 のような方式が検討されている (NUMO, 2021)。除去作業の目的を PEM 周りの土質材料から受ける拘束力の解除、PEM 回収装置が必要とする動作環境の構築の二つとし、図 3.5-3 に示す【除去-1】【除去-2】に対する技術開発状況を整理する。



図 3.5-2 PEM 周囲の隙間充填材の除去方法の概念イメージ (NUMO, 2021)

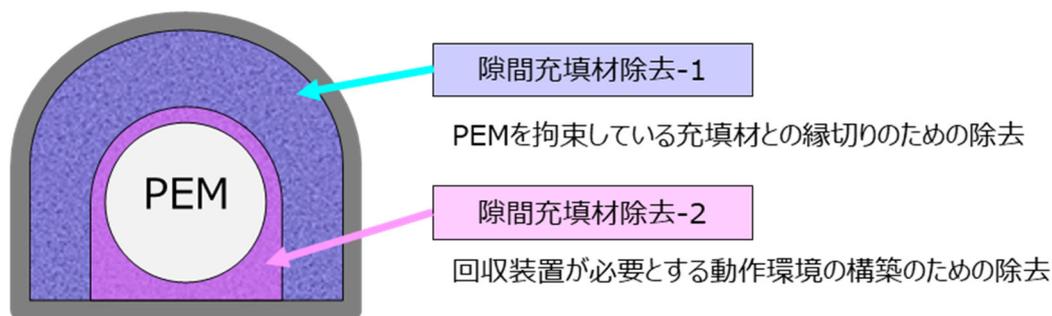


図 3.5-3 PEM 周囲の隙間充填材の除去範囲と目的

(b) オーガー方式による機械的除去 (隙間充填材除去-1)

土質材料から受ける拘束力の解除を目的とした機械的除去技術として、バックホウに取り付けるオーガー方式のアタッチメントを試作した (原環センター, 2020)。この方式では、掘削時動作が坑道長手方向となるため、アタッチメントが PEM に接触するリスクが低くなる。また、切削による除去生成物は、切削箇所から後方に設置した分離タンクに吸引捕集される。このアタッチメントによる掘削では、約 0.01 m^3 の隙間充填材が円柱状にくり抜かれる。この一動作の所要時間は約 1 分、PEM 一体あたりに換算すると除去時間は約 70 時間と見積もられる。

この方式によって、PEM 周囲の隙間充填材を機械的に除去する技術があることが示された。一方、一孔ごとの間欠的な掘削作業による 68 時間の作業時間、オーガー鞘管内部での除去生成物による閉塞が技術開発課題として抽出されている。



小型バックホウによる切削状況



オーガーアタッチメント (φ20cm)

図 3.5-4 オーガー方式の隙間充填材の除去試験の状況
(原環センター, 2020)

(c) 自由断面掘削用の切削ツールを使用した機械的除去 (隙間充填材除去-1)

オーガー方式の課題に対して、自由断面掘削方式による除去作業の迅速化に向けた技術開発が進められている。この方式では、回転ドラムに切削ピックが配列されたツインヘッダーを隙間充填材の施工範囲に合わせて動かして充填部を解砕し、除去生成物を吸引排土するものである。坑道断面全体を連続的に除去することで、除去作業の迅速化を図るものである。

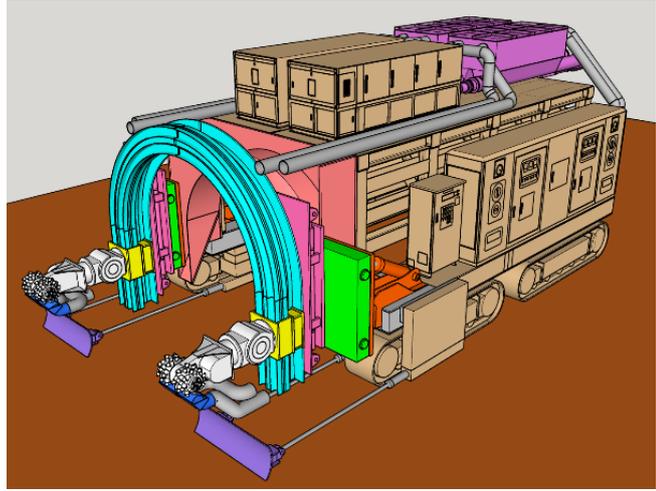
軟岩用のピック配列のツインヘッダーと吸引アタッチメントから構成される切削ユニットを使用した実寸大の機能確認試験が行われている (原環センター・原子力機構, 2023.)。切込み量や送り量などの条件が切削効率に与える影響、吸引方式による除去生成物の捕集効率、塑性状の土質材料の切削に適したピック配列の検討に資する基礎的な情報など、装置や除去作業の具体化に資する知見が取得されている (図 3.5-5 (左図))。

さらに、複数の PEM に対する回収作業手順の具体化 (3.7.1 項に詳述)、坑道内での装置の動作分析による要件定義、前述した除去ユニットの機能確認試験の知見を合わせ、現行の処分坑道横置き・PEM 方式の処分坑道での除去作業に適用する装置の概念設計が進められている (図 3.5-5 (右図))。この装置は PEM を跨ぐ逆 U 字型の構造で、複数の PEM 周りの除去作業を、連続的に実施することを想定している。

このような取り組みにより、隙間充填材を効率的に除去できる【除去-1】の作業内容や装置が具体化され、技術的実現性が示されつつある。



切削ユニット機能確認試験



装置の概念設計

図 3.5-5 機械的な方式による隙間充填材の除去技術
(原環センター・原子力機構, 2023)

(d) 横向きウォータージェット方式による流体的除去（隙間充填材除去-2）

機械的除去装置の精密な動作や、スクレーパーなどの器具による PEM 周囲の隙間充填材の除去よりも、PEM 鋼殻への影響を抑制できる方法として 3.4.2 項に示したウォータージェット方式の適用が考えられる。

図 3.5-6 は機械的除去技術により坑道側を除去した状態を模擬した PEM 周囲の隙間充填材を真水ウォータージェットで除去した試験時の状況である。この除去装置は PEM の外周に沿ってトルネードノズルが移動できるようにしたものであるが、ノズルが移動する円周の位置や、ノズルと対象の離隔を適切に管理することで、ウォータージェットが隙間充填材の除去にも適用できる見通しを得た。一方で、ノズルから噴射され水や切削された対象物が周囲に飛散し坑道内は霧状になる。さらに、除去生成物であるスラリーが盤路盤上に広がるため、それらの捕集作業や坑道内の作業環境の復旧作業が必要となった。

処分坑道でのウォータージェット方式による除去には、周辺への飛散や除去技術の捕集に課題が残されているが、PEM への機械的な影響を考慮した流体的除去の技術的実現性が見通しが得られている。



図 3.5-6 ウォータージェットによる PEM 周囲の隙間充填材の除去
(原環センター, 2020)

(e) 隙間充填材の性状に対する除去技術の適用性

ベントナイト混合土は、配合比、乾燥密度、飽和度の違いによって、切削に影響する特性が変化する。隙間充填材の仕様は施工技術と充填部の品質保証の観点から、今後具体化されていくと考えられる。回収時の飽和度は、定置後の時間経過や処分坑道内の湧水環境によって場所によるバラツキを想定される。これらの因子が機械的除去の効率に与える影響について、室内試験によるデータ取得が進められている（原環センター・原子力機構, 2023.）。これらの取得データは、隙間充填材の除去に適した回転カッターのピック配列の具体化ならびに整備した装置の適用性や作業効率の事前の予測などに寄与する。

(4) 隙間充填材の除去に要する時間

(a) オーガー方式

オーガー方式による隙間充填材の除去に要する時間は、切削要素試験をとおして得た除去時間から（オーガー切削 1 回あたりに約 1 分）、PEM 一体あたり約 70 時間と見積もられている。ただし、この時間は切削時間のみであり、位置合わせなど実際の作業時の動作を考慮するとさらに長時間になる。

(b) 自由断面方式

自由断面方式による隙間充填材の除去については、3.5.2(4)に詳述する PEM 回収装置の作業速度との時間バランスから、PEM 一体あたりの除去作業の目標を 5 時間未満と設定し、装置化に向けた技術開発が実施されている。除去ユニット機能確認試験で得られた除去効率より、図 3.5-5（右図）の概念設計図の装置は、移動や段取りなどの時間を考慮しても、目標時間を達成できる見通しが得られている。

(c) 流体式除去

3.4.2 項に示した緩衝材除去技術の整備のプロセスを踏襲することで、流体方式による隙間充填材の除去作業時間の試算が可能と考える。隙間充填材を対象とした図 3.4-5（左図）に示す噴射要素試験から得られた噴射条件と除去効率の関係に基づいて、噴射ノズルの数や配置、揺動速度を設定し、揺動一往復あたりの奥行方向の除去幅及び除去速度を見積もることが可能である。

下向き処分孔と異なり、横向きウォータージェットでは滞留する水の層によるジェットの減衰が無いため除去効率は高いと想定される。一方で、周辺に飛散した除去生成物や水の捕集及び清掃に要する時間を考慮する必要がある。

(5) 技術的実現性の向上に向けた課題

隙間充填材の除去の技術的実現性は、除去作業を行う装置の成立性だけではなく、処分場の施設設計（坑道断面形状、PEM 同士の定置間隔など）、操業技術（定置方法、隙間充填方法など）といった一連の建設・操業に係わる設計や適用技術と整合を図る必要がある。

(a) 台座上の PEM の転倒防止と除去範囲

PEM は処分坑道の路盤上に設置されたコンクリート製の台座上に定置されている。台座の幅にもよるが、周囲の隙間充填材を除去した PEM は一時的に不安定な状態になる。台座からの PEM の転落を防止する観点では、台座周辺の隙間充填材は存置した方が作業安全上は有利と考えられる。一方、台座を装置の走行時のガイドとして利用する場合や回収時に PEM を下側から持ち上

げる場合には、台座周辺の間隙充填材の除去が必要となる。

間隙充填材の除去範囲は上記のような後続作業も踏まえた上で設定し、除去装置の機能に反映する必要がある。

(b) PEM 把持部周囲の除去

定置作業時の PEM の把持方法として、エアベアリング方式のように下から持ち上げるもの（原環センター，2020.）や、門型クレーン方式のように吊上げるものが想定されている。門型クレーン方式は、PEM を跨ぐ構造体上部に吊上げ装置があり、緊縮装置（ツイストロック）で PEM をハンドリングする（図 3.5-7（左図））。この方式で定置される PEM 上部には固定金物を取り付けられており、単純な円柱形状ではない。機械的な除去の回転カッターが PEM 鋼殻や突起物と接触しないようにする必要がある。

また、PEM の搬出を定置装置で行う場合、固定金物周囲、及び金物内部に入り込んだ充填材を除去するため流体的除去技術の適用が考えられるが、作業環境の保全の観点から噴射水やスラリー状の除去生成物が路盤上に散乱しないような対策が必要である。

(c) 隣接する PEM 間の間隙充填材の除去

処分坑道横置き・PEM の概念では、隣接する PEM 同士は接触して定置されている（NUMO，2021）。定置作業時の PEM 同士の衝突防止や、廃棄体からの熱影響の考慮による定置密度の低減などの理由から、隣接する PEM 間に空間を設けることも想定される。この空間にも間隙充填材が施工されるため、回収作業時は、坑道奥行方向だけではなく、隣接する PEM 間に存在する間隙充填材を除去する必要があるため、定置状態に合わせた除去装置の工夫が必要である。

(d) 隣接する PEM 間の間隙充填材の残存の許容

PEM 周囲の間隙充填材を完全に除去するためにはウォータージェット方式が有効であるが、処分坑道内での水や除去生成物の扱いに課題が残る。PEM の回収装置が間隙充填材の残存を許容するのであれば、その程度によっては、乾式である機械的除去技術のみで、回収時の作業環境を実現できる可能性がある。

3.5.2 処分坑道からの PEM の搬出

ここでは、間隙充填材の除去後に処分坑道から PEM を坑底施設まで搬出する作業の技術的実現性と課題について述べる。

(1) 本作業の範囲

処分坑道からの PEM の搬出作業の範囲は以下の通り。

- ・作業前： 処分坑道内で搬出可能な状態になっている。
- ・作業後： 坑底施設に運び込まれている。

(2) 搬出対象の状態

図 3.5-3 に示す搬出対象物である間隙充填材は、複数の工程を経て完全に除去されており、PEM や坑道壁面、路盤上に残存が無い理想的な状態とする。回収対象の PEM の状態は 3.5.1(2)(b) に整理した状態で、後述する回収装置のハンドリングに耐える構造健全性を保持しているものとした。

(3) PEM を処分坑道から搬出するために必要な技術

PEM の回収時に必要な動作は、PEM を処分坑道内の定置位置（例えばコンクリート製台座）で持ち上げる縦方向の動き、定置場所から坑底施設まで輸送する横方向の動きに分解できる。重量約 40 t の横向き円柱形状の PEM を処分坑道から搬出する技術の概念を図 3.5-7 に示す。

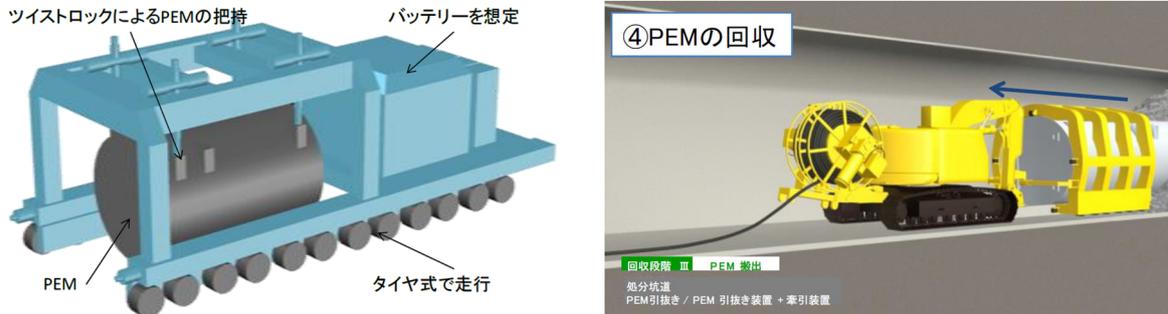


図 3.5-7 処分坑道からの PEM 回収技術のイメージ図
左：定置装置の転用、右：回収専用装置（NUMO,2021）

(a) PEM 定置装置の転用

操業時における PEM の搬送・定置装置として、図 3.5-7 左に示す門型クレーン方式が検討されている。この装置には、坑底施設における輸送車両からの吊上げによる PEM の受け取り（縦方向の動作）、定置場所までの搬送（横方向の動作）、処分坑道内の定置位置での PEM の着床（縦方向の動作）の機能がある。この装置を定置作業の逆動線で使用し、PEM を坑底施設まで搬出する方法である。

(b) PEM 回収装置

PEM の回収装置として、図 3.5-7 (右図) の概念が示されている (NUMO, 2021)。PEM を抱え込む枠を挿入し、油圧で台座から地切りした後に処分坑道から搬出する。この抱え込み部は、PEM を下側から支える方式である。

(4) 作業時間の推定

現在の操業計画において、PEM の定置数量は一日平均 5 体とされている。よって、地下施設にはこの規模に合わせた定置装置が配備されていると仮定すれば、一日 5 体までの搬出作業は、既存の装置を用いた定置作業の逆動線で実現可能と考えられる。さらに、一日 5 体の作業容量と実際に投入される定置装置の台数から一台あたりの能力を算出すれば、既設の定置装置の転用による回収作業時間が推定できる。図 3.5-7 (右図) に示すような専用機を使用した場合の作業時間は、装置の走行速度、油圧ジャッキによる抱え込み部の昇降速度に依存する。

処分坑道からの PEM の搬出作業の所要時間の大部分は、坑底施設と定置場所の間を装置が往復する時間と考えられる。この距離はデッドエンド型の処分区画の配置概念図より片道平均約 2.5 km、搬出装置の走行速度が 1 km/h のとすれば、坑底施設を出発した回収装置が処分坑道で PEM を積載後、再び戻ってくるまでの時間は約 5 時間と見積もられる (原環センター, 2021)。

(5) 技術的実現性向上に向けた課題

(a) PEM の把持方法と鋼殻の健全性

廃棄体を PEM の形態で回収する場合は、持ち上げや搬出時の把持で崩壊しない構造健全性が求められる。一方、回収装置に PEM のどの部分で自重を支えるかによって、PEM に作用する外

力が変わるため、加わる力を考慮した健全性の評価が必要となる。

(b) PEM の健全性に依存しない回収方法

PEM 方式の特徴は、地上で人工バリアを PEM 容器内に組み立てるため品質管理が容易であること、鋼殻があることにより処分坑道内で滴水や高湿度による緩衝材の膨潤といった埋戻し前の品質低下が生じにくいことが挙げられる。PEM 鋼殻にはこれらの、人工バリア組立時の緩衝材の型枠、搬送時の外殻、隙間充填材には、施工までの期間における品質の確保や維持といった役割が期待されているが、回収時の健全性までは期待されていない。

回収維持期間中の腐食による PEM 鋼殻の破損など、搬出作業に耐え得る強度が確保されていない場合は、図 3.5-8 のような作業手順が想定される。PEM 内部の緩衝材除去は、ウォータージェットを活用した図 3.5-9 のような手順が考えられる。一方、PEM 開封技術は未整備である。

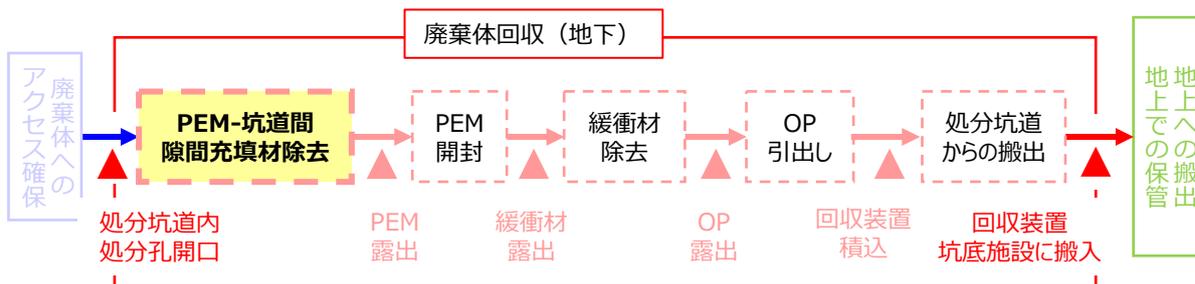


図 3.5-8 PEM からオーバーパックを回収する作業手順

(実線：システムの境界、破線：要素の境界、▲：境界、矢印：要素間の繋がり)

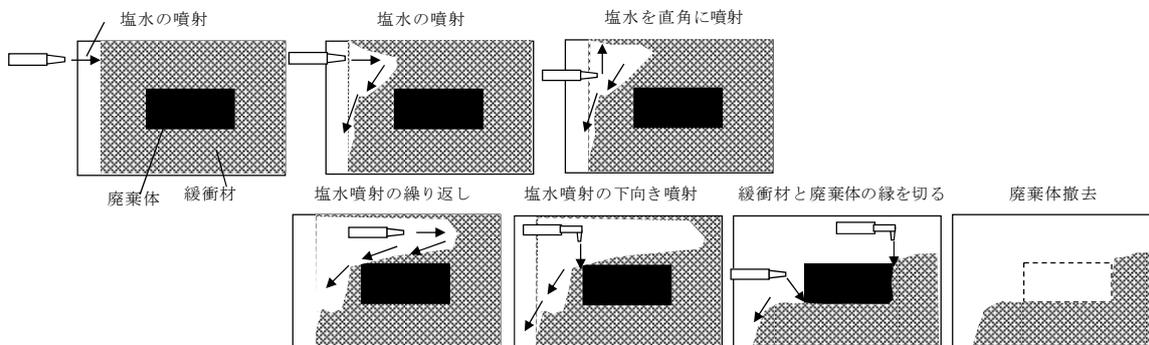


図 3.5-9 PEM 内部の緩衝材の除去作業のイメージ

(原環センター, 2012)

3.6 地上への搬出、保管に係る技術

本節では、地下施設から地上施設まで廃棄体を搬出して安全に保管するまでの作業工程と必要となる技術について述べる。ここでは、作業時の廃棄体の搬入と同様に、アクセス坑道（斜坑）を搬出経路とした。

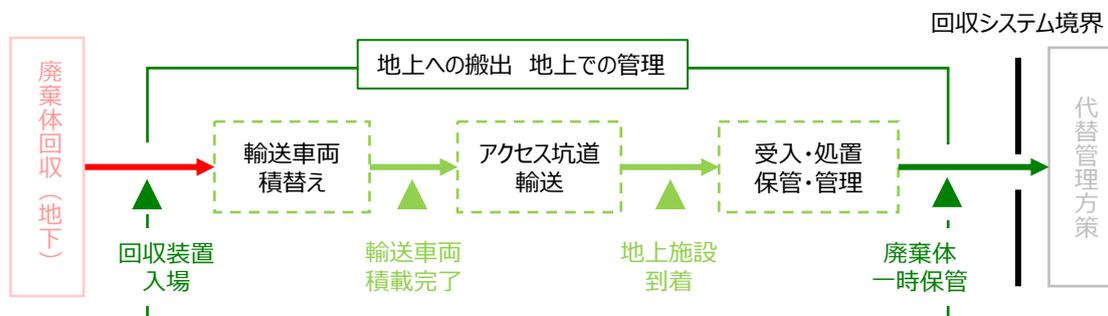


図 3.6-1 地上への廃棄体搬出、及び地上での管理の作業手順（図 3.2-4 再掲）
（実線：システムの境界、破線：要素の境界、▲：境界、矢印：要素間の繋がり）

3.6.1 坑底施設での積替え

ここでは、処分坑道から回収装置で搬出されたオーバーパックや PEM を、坑底施設でアクセス斜坑の搬送装置に積み替える作業の技術的実現性と課題について述べる。本作業により、地下での作業（処分坑道からの搬出）と地上に至る作業（アクセス斜坑からの搬出）が分離される。

(1) 本作業の範囲

坑底施設での積替え作業の範囲は以下の通り。

- ・作業前： 処分坑道から回収装置で坑底施設に搬入されている。
- ・作業後： アクセス斜坑搬送車両に積み込まれている。

(2) 積替えの対象

坑底施設に搬入されるオーバーパック（3.4.3 項）及び PEM（3.5.2 項）が積替えの対象である。それぞれの廃棄体の積換の方法は定置場所からの回収方法に依存し、処分孔定置のオーバーパックは縦向き、処分坑道から回収装置で運びこまれる PEM は横向きとした。回収時のオーバーパックや PEM の作業安全に対する影響は、第 4 章で扱う課題としており、ここでは作業時と同じ方法でハンドリングが可能な健全性が確保されていることを前提とした。

(3) 必要な技術

アクセス斜坑と連絡坑道の接続部には、図 3.6-2 に示すような坑底施設がある。この施設には、作業時にアクセス斜坑搬送装置から定置装置に廃棄体を積み替える設備がある。廃棄体は、作業時と同様の形態・姿勢で坑底施設に搬入されるため、定置時の積替え作業の逆動線でアクセス斜坑搬送車両に積替えができると考えられる。

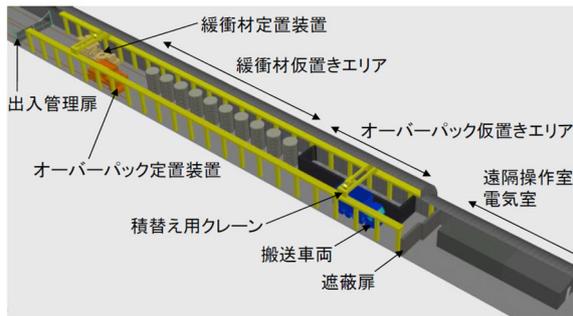


図 4.5-25 坑底施設の構造（縦置き・ブロック方式）

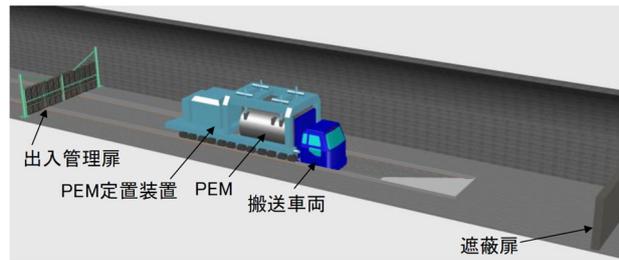


図 4.5-26 坑底施設の構造（横置き・PEM方式）

図 3.6-2 坑底施設の構造

左：オーバーバック、右：PEM（NUMO,2021）

(4) 既存の坑底設備の容量、作業時間の推定

既設の坑底施設は、操業計画に基づき一日 5 体のオーバーバックまたは PEM を積み替える能力がある。少なくとも、一日あたりの廃棄体の回収数量が 5 体以内までは、既存の坑底施設で円滑な積替えができると考えられる。また、操業計画における一日の稼働時間より、5 体の作業容量と実際に投入される定置装置の台数から一台あたりの能力を算出すれば、既設の定置装置の転用による回収作業時間が推定できる。

(5) 技術的実現性向上に向けた課題

既設の坑底施設は、定置装置の動きや構造に合わせたものになっているので、定置装置を使用した逆動線での回収作業では、装置と設備の整合は確保されていると考えられる。一方、回収専用機を使用する場合は、前述の廃棄体の姿勢の他に、装置と設備の空間的な干渉などが生じないように装置を設計する必要がある。

3.6.2 アクセス斜坑を介した地上への搬出

ここでは、坑底施設でアクセス斜坑輸送設備に積み込まれた廃棄体を、アクセス坑道（斜坑）を介して地上へ搬出する作業の技術的実現性と課題について述べる。

(1) 本作業の範囲

アクセス斜坑を介した廃棄体の地上への搬出作業の範囲は以下の通り。

- ・作業前： 坑底施設にて、搬送車両にオーバーバック／PEM が積み込まれている。
- ・作業後： 地上の保管・管理施設に運びこまれる。

(2) 廃棄体の搬出経路

処分坑道から回収された廃棄体の搬出経路は、操業時の廃棄体の搬入経路であるアクセス坑道（斜坑）とした。アクセス斜坑は幅 9m の坑道で、斜度 10% である。アクセス斜坑は閉鎖作業で埋め戻されるまで常に開放状態であるため、維持管理が成されているものとした（支保工やインバートなどは健全である）。

(3) 搬出に必要な技術

坑底施設から地上施設までの搬出は、図 3.6-3 に示す操業時のアクセス斜坑搬送車両の転用が

可能と考えられる。この輸送車両は、坑底施設での積替え及びアクセス斜坑の走行に際して建築限界上の問題はない。



図 3.6-3 作業時のアクセス斜坑輸送車両
左：オーバーパック、右：PEM (NUMO,2021)

(4) 作業時間の推定

アクセス斜坑は、操業計画に基づき一日 5 体のオーバーパックまたは PEM を搬入する能力がある。少なくとも、一日あたりの廃棄体の回収数量が 5 体以内までは、既存のアクセス斜坑、及びアクセス斜坑輸送車両を使用した円滑な搬出が可能と考えられる。

また、操業計画における一日の稼働時間、及びアクセス斜坑の物流容量と実際に投入されるアクセス斜坑輸送車両の台数から一台あたりの能力を算出することで、既存施設を回収作業に転用した場合の上限が推定できる。

(5) 技術的実現性の向上に向けた課題

操業時には、アクセス斜坑輸送車両は重量物であるオーバーパックや PEM を地上から地下へ搬入する。斜坑を下る際は、速度が超過しないような制動能力が必要である。一方、回収時は重量物を積載した状態での登坂能力が必要となる。操業時と回収時で輸送車両に求められる能力が異なるため、転用するには留意が必要である。

3.6.3 地上での受入・処置・保管

ここでは、地上に搬出されたオーバーパックや PEM の地上施設での受け入れ検査、保管の形態に合わせた適切な処置及び保管の技術的実現性と課題について述べる。

(1) 本作業の範囲

地上に搬出されたオーバーパックや PEM の受入・処置・保管の作業範囲は以下の通り。

- ・作業前： 廃棄体がアクセス斜坑輸送車両にて、地上施設に搬入される。
- ・作業後： 適切な状態で管理・保管される。

(2) 保管の対象

保管の対象は、地上施設に搬出されたオーバーパックまたは PEM である。地上施設への搬入時の積み方は、3.6.2 項と同じく、オーバーパックは縦向き、PEM は横向きとした。

(3) 安全な管理・保管に係る技術

回収作業に係る地上施設に整備される設備や施設内レイアウト、規模などは回収計画に基づいて具体化されると考えられる。ここでは、運び込まれた廃棄体を、安全に管理・保管するまでの主要作業を仮定して、既存の技術の適用性を述べる。

(a) アクセス斜坑輸送車両からの積み下ろし

アクセス斜坑輸送車両からオーバーパックまたは PEM を降ろし、地上施設内での運搬台車またはトラバースーに積み替える。図 3.6-3 のように、輸送車両及び積み方は操業時と共通であるため、積み下ろしはオーバーパックや PEM の製作施設の払出室と同様の設備での実施が可能と考えられる。

(b) 受け入れ検査

受け入れ検査では、次の工程である“保管形態に応じた処置”の作業エリアへ移送する前に、運搬台車上に載せたオーバーパックや PEM の状態を確認し、作業の支障となる問題が無いことを確認する。検査項目は今後具体化されるものとした。

(c) 保管形態に応じた処置

地上施設での保管時の廃棄体の形態は、ステンレス製キャニスタ、オーバーパック、PEM の三種類が考えられる。受け入れ時の形態から、保管の形態へ移行するための、PEM からのオーバーパックの取出し作業、オーバーパックからのガラス固化体の取出し作業を具体化し、適用性が見込まれる既存技術を以下に挙げる。

(i) PEM からのオーバーパックの取り出し

PEM からオーバーパックを取り出す作業について、操業時の PEM の製作作業の逆動線での実施を想定した。鋼殻リング方式の PEM は縦向きで組み立てた後、輸送のため転胴装置で横向きにする。この転胴設備を利用して、横向きで搬入された PEM を天地に留意して立て起こす。この状態の PEM 鋼殻を処分孔と見なせば、既出の緩衝材除去技術（3.4.2 項）や引上げ技術（3.4.3 項）を適用することで、オーバーパックを取り出すことが可能と考えられる。

PEM から取り出したオーバーパックは、表面に付着したベントナイトを洗浄後、保管エリア、または後続の開封作業エリアへ輸送される。

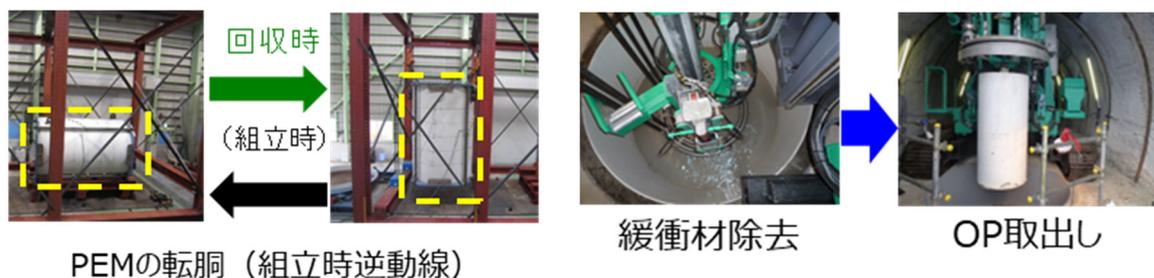


図 3.6-4 地上施設での PEM からのオーバーパックの取り出し
(左図：原環センター，2012 右図：原環センター，2015)

(ii) オーバーパックからのキャニスタの取り出し

ガラス固化体の形態で保管する場合、オーバーパックの開封、オーバーパックからのステンレスキャニスタの取り出し作業が必要である。

オーバーパックは厚さ 190 mm の炭素鋼製の円筒容器であり、蓋と胴部が溶接により接合されている。ガラス固化体への影響を考慮すると溶断はリスクが高い。またオーバーパックを横向きにして開封する場合には転胴作業が必要であり、且つ内部でキャニスタが転がる可能性がある。

以上のことから、オーバーパックを立てた状態で切断する方法が有力と考えられる。この開封作業を行う装置として、主轴が上向きのターニング加工機がある。これは、面盤にオーバーパッ

クを固定して回転させながら刃物を当てることで（皮むきの要領で）切断するものである。

開封によって、キャニスタが剥き出しになることから、適切な方法でオーバーパックからキャニスタを引上げ、保管エリアに搬出する必要がある。

(d) 代替管理方策への移行までの仮保管

代替管理方策に移行するまでの期間、回収後の廃棄体を一時的に仮保管する必要がある。仮保管施設の規模は、代替管理方策への移行計画、回収作業速度を踏まえて、オーバーフローしないように設定する必要がある。また、廃棄体からの発熱に対する適切な冷却機能が必要である。

地上施設での保管時は PEM、オーバーパック、キャニスタの3つの形態が選択肢として挙げられるが、地下での回収作業の方法、地上での保管施設の制約、代替管理方策への準備などを踏まえて選択することになる。それぞれの形態の特徴を以下に挙げる。

(i) PEM での一時保管

処分坑道横置き・PEM方式の回収作業において、PEMとして回収した場合、3つの形態の中で最も大型であることから、広い保管エリアが必要になる。また、オーバーパック、緩衝材、PEM鋼殻が遮蔽層として機能するため、保管施設内の空間線量は低いが、閉じ込め機能を有するオーバーパックの健全性を直接確認することができない。

(ii) オーバーパックでの一時保管

地下施設からオーバーパックの形態で回収した場合、または地上施設で PEM から取り出した場合、PEMと比較して保管エリアは物理的に小さくできるが、施設内の空間線量や温度が高くなる可能性がある。

閉じ込め機能を有するオーバーパックを直接検査することが出来るため、閉じ込め機能の喪失の有無を直接確認することができる。

(iii) キャニスタでの一時保管

キャニスタは、高さ約 1,340 mm、直径約 430 mm、内部の固化ガラスを含めた重量は約 490 kg であり、保管時の形態では最も小型軽量である。遮蔽層が厚さ 5 mm のステンレス鋼のみのため、最も線量が高い。また、回収後のキャニスタの破損の有無にも留意が必要である。

この形態による保管方法を採用している関連施設として、日本原燃株式会社が運用している高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センターがある。

(4) 施設の規模

全量回収に要する作業時間が短い方が、坑道の空間安定性などの作業上の不確実性を低減することができる。一方、地上施設での保管は、回収した廃棄体を次の代替管理方策に移行させるまでの一時的なものとするれば、地下からの搬出（保管施設への搬入）、保管施設からの払出しのバランスに基づいて設定することになる。回収作業の支障とならないような規模を確保する必要があるが、具体的な規模は将来世代が選択する代替管理方策に依存する。

(5) 技術的実現性の向上に向けた課題

(a) 地上での保管・管理施設の設備

(3)には、現行の2つの定置概念に対する回収作業を対象に、地下からの搬出時の形態（オーバーパック、PEM）を地上での保管時の形態（PEM、オーバーパック、キャニスタ）にするための

技術を挙げた。地上施設内での作業の詳細化を進め、必要なラインの数、施設に備える他の機能などを具体化していくことで、安全な保管・管理の技術的実現性の向上を図る必要がある。

(b) アクセス斜坑と地上施設の接続

図 3.6-5 に、ガラス固化体の受入・検査・封入施設とアクセス坑道（斜坑）との接続部の設計例を示す。操業時は施設とアクセス坑道を直結し、製作・検査後の廃棄体を地下に直接払出す構造が検討されており、地上を迂回する場合と比較して作業動線を単純化している。

回収時の物流は操業時の逆で、アクセス坑道から地上施設への輸送車両の動きになる。回収したオーバーパックや PEM の受入・処置・保管施設についてもアクセス坑道と直結する構造とする場合、処分場の建設の段階で回収用の施設への分岐を設けておくことで、必要な施設の整備が円滑に進むと考えられる。

(c) 受入・処置・保管施設を用意する時期

全量回収の規模に応じた設備規模を予め全て用意する必要があるかについては、代替管理方策への移行計画に依存する。

回収可能性の維持期間の起点は地下の処分坑道に廃棄体の定置を始めた時である。すなわち、標準工程の建設・操業期間中においても、安全規制対応の是正措置などにより回収を行う可能性がある。代替管理方策への移行を目的とした回収とは規模や内容が異なると考えられるが、PEM やオーバーパックの再製作に向けた前段階の処置は、(3)(c)に示した方法と共通する部分がある。オーバーパックや PEM の解体施設を現行の処分概念の施設に併設しておくことは、標準工程における回収への対応だけではなく、製作する人工バリアの品質確保の観点でも有効であると考えられる。さらに、施設が操業期間中に稼働していれば、代替管理方策への移行時には作業に対するノウハウが蓄積され、既存の施設を必要な規模に増強することができるものと考えられる。

以上は、地層処分事業者のリスクマネジメントの範疇ではあるが、このような対応は地層処分事業における標準工程に対する安全性、それを裏付ける回収可能性という技術的能力に対する信頼性を高め、社会の信頼感の更なる醸成に繋がるものと考えられる。

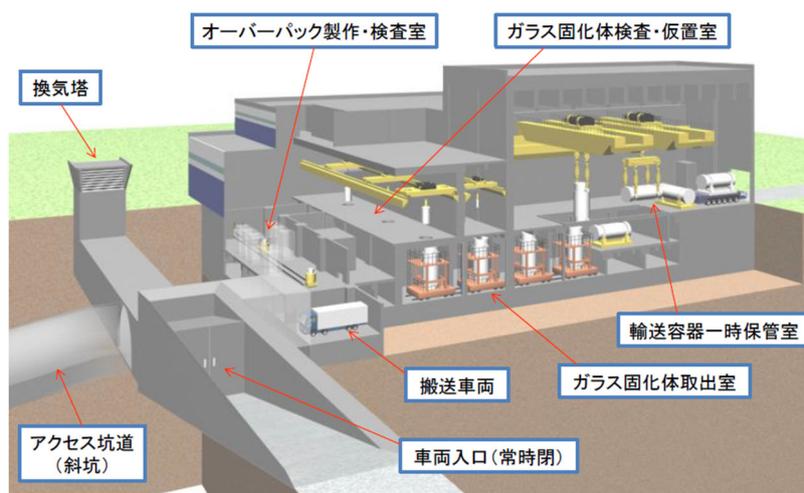


図 3.6-5 ガラス固化体の受入・検査・封入施設からアクセス坑道への接続部の鳥瞰図 (NUMO, 2021)

3.7 回収作業時間の試算方法と作業の迅速化

現行の定置概念における回収作業の範囲（境界）を、定置された廃棄体を地上施設で管理下に置くまでと設定し、状態 B の地下施設を対象に回収手順を具体化し、表 3.2-1 に整理した。また個別作業の具体的な内容、適用が見込まれる技術の有無や現状の整備状況などを 3.3～3.6 節に詳述した。以上より、状態 B の地下施設を対象とした回収作業について、技術の有無の観点から技術的実現性を示した。

このような整理を踏まえ、安全な管理が合理的に継続できる範囲で回収可能性が維持されている状態を表す図 2.4-3 内の「①全量回収作業に要する時間」の定量化に向けた検討を進めた。

3.7.1 回収作業時間の試算方法と課題

表 1.2-1 に示す R&R 検討会で整理された今後の技術的な対応課題（今後定量化が必要となる情報）のうち、回収の容易性（回収作業時間）として「単位領域あたりの回収作業時間」、「すべての廃棄体回収にかかる全体作業時間」を具体的な項目として挙げている。

表 3.2-1 の整理は廃棄体一体を回収する場合の作業内容と手順であり、これを基本作業と定義する。基本作業の作業時間は、3.3～3.6 節に示した個別作業に要する時間から定量的に見積もることが可能である。一方で複数の廃棄体を対象とする場合には、廃棄体一体に対する基本作業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など）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。

ここでは基本作業での回収作業時間を基に、回収の規模に応じた「単位領域あたりの回収作業時間」から全体作業時間を推定する方法について述べる。

(1) 基本作業の反復

基本作業を回収する廃棄体の本数分だけ繰り返せば、回収の対象の廃棄体を全量回収することが技術的には可能である。この方式による全体回収作業に要する時間は、単純に基本作業に要する時間×回収する廃棄体数になる。ただし、作業の進展によって、処分区画内の位置が変わるため、装置の移動に要する時間は都度変化することに留意が必要である。また、作業の迅速化に向けて複数の回収装置を同時並行作業として実施することも想定されるが、動線の干渉や搬出能力などとの整合性などにも留意が必要となる。

(2) 処分坑道の複数の廃棄体回収への展開

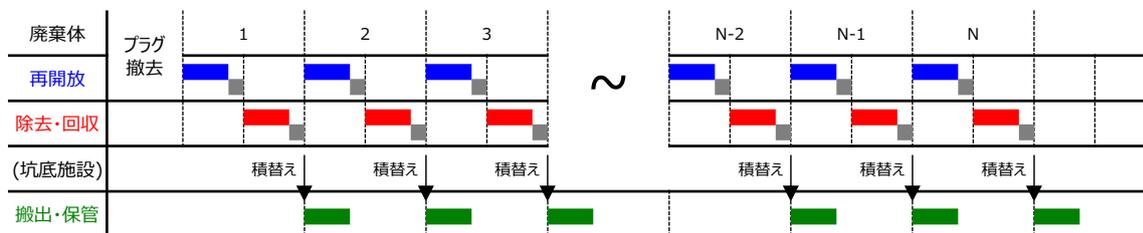
処分坑道内の廃棄体を複数本から全量回収する場合の作業を考える。現行の処分孔縦置き方式では 169 体／処分坑道、処分坑道横置き・PEM 方式では 209 体／処分坑道の廃棄体が定置される。基本作業の反復では、回収する廃棄体の数量だけ、個別作業に係る装置の入替えや段取り替えが発生する。作業内容の一部を集約するなど、作業手順の合理化により、これらに要する時間を削減できると考えられる。

まず、状態 B に対する基本作業の最初の作業である力学プラグの撤去は、処分坑道一本に対して片側からの再開放の場合は一度である。

処分孔縦置き方式の場合は、続く処分坑道の再開放を、回収対象のオーバーパックが定置された処分孔が含まれる範囲を一括で行う。この後、3.4 節で述べた緩衝材の除去とオーバーパックの搬出を行うことで、坑道の掘削作業の装置とオーバーパック回収作業の装置の入替作業を省略することができる。処分坑道横置き・PEM 方式の場合は、回収対象の PEM が含まれる範囲の隙間充填材を一括で除去し、その後坑口側から PEM を一体ずつ搬出する作業とすることで、隙間充填材の除去装置と PEM 回収装置の入替作業を省略することができる。

このような、個別作業の集約は、それぞれの作業を担当する装置や設備の段取り替えや入替作業の省略による作業時間の短縮の他に、坑道内での作業の単純化による、作業自体の管理の容易性も高まるものと考えられる。

・ 処分坑道に対する基本作業の反復（■は装置の入替え時間を示す）



・ 処分坑道内での作業の集約による合理化

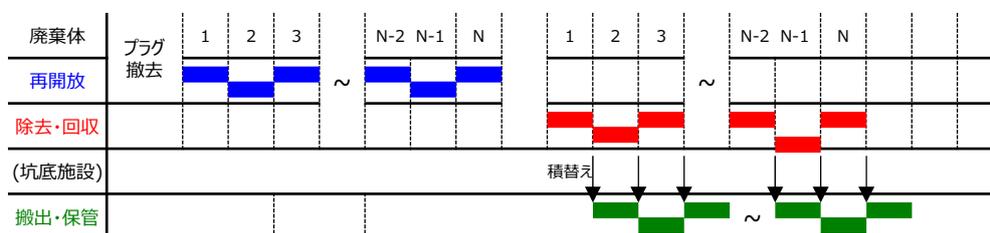


図 3.7-1 処分坑道内の複数の廃棄体回収への展開
(廃棄体数=N の場合)

(3) 複数本の処分坑道からの廃棄体回収への展開

状態 B の処分坑道からの回収では、処分坑道の再開放から廃棄体の回収という手順になる。一方、複数本の処分坑道に作業範囲を拡張することで、再開放と廃棄体の回収の二つの作業をそれぞれ別の処分坑道での同時且つ独立に実施することが可能になる。最も単純な 2 本の処分坑道に対する作業の時間バランスは、坑道一本あたりの再開放時間が坑道一本あたりの廃棄体回収時間に等しくなる。再開放から回収を複数の坑道に対して同時且つ独立で実施するように作業を合理化すると、図 3.7-2 のような全体回収作業の時間短縮が可能となる。

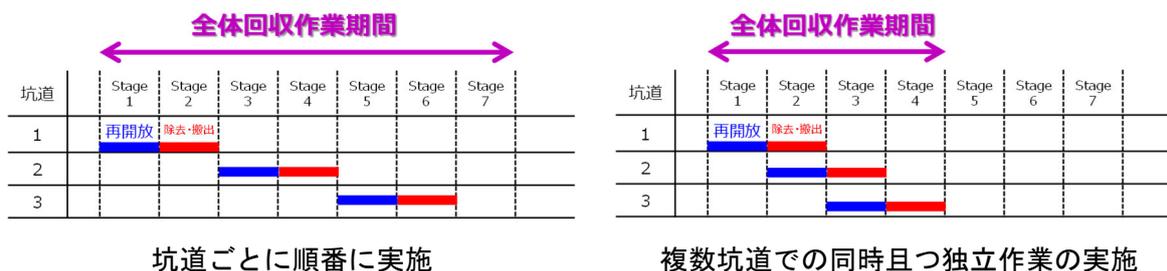


図 3.7-2 複数本の処分坑道に対する同時且つ独立作業の例
(坑道本数=3 の場合)

図 3.7-2 (右図) の作業の合理化をさらに発展させ、同時作業を行う処分坑道の本数を増やすと、図 3.7-3 のように更なる作業時間の短縮が可能となる。

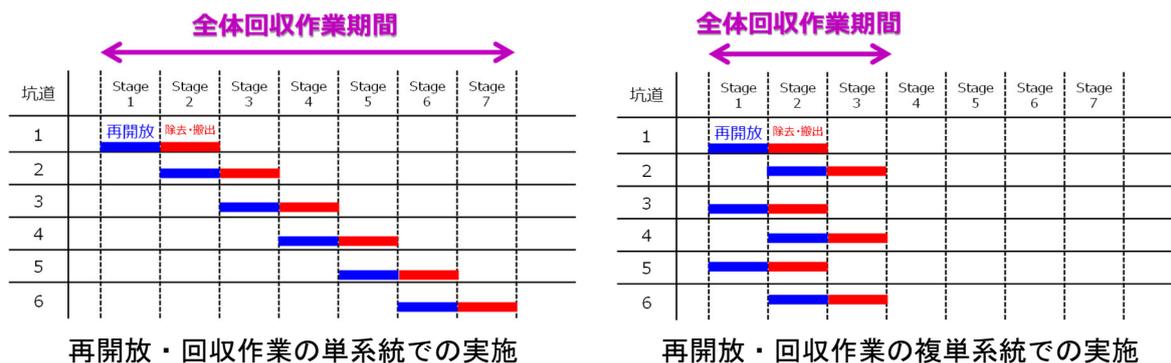


図 3.7-3 複数本の処分坑道に対する作業の合理化（坑道本数=6 の場合）

現行の処分概念では地下の定置領域が6区画に分割されており、処分孔縦置き方式（パネル型）では51処分坑道／区画、処分坑道横置き・PEM方式（デッドエンド型）では32処分坑道／区画の処分坑道本数となっている。再開放作業と回収作業のそれぞれについて、地下施設の制約内で作業ライン数を増やすことで、複数本の処分坑道からの回収作業時間の短縮が見込まれる。

(4) 全量回収作業に要する時間

全ての処分坑道に廃棄体が定置され、状態Bで回収可能性が維持されている処分場から、4万トン以上の廃棄体を全量回収する作業に要する時間の試算について、処分区画ごとの作業区分に着目して検討した。

NUMO-SCにおける「建設・操業時の作業動線と換気経路の検討」では、処分坑道を掘削する建設区画と、廃棄体の定置を行う操業区画を分け、建設と操業を別区画での同時且つ独立作業とする計画が検討されている。これは、放射性廃棄物を扱う作業とその他の作業の動線や換気経路が交差しないようにするためとされている。（NUMO, 2021）

回収手順を、処分坑道の再開放（処分坑道内での回収装置の動作環境の構築）と、廃棄体の回収（廃棄体の処分坑道外への搬出）の二つに分け、建設・操業時の考え方を踏襲すると、回収工程で考慮する条件は以下ようになる。

- ・ 再開放及び回収の別区画での同時且つ独立作業の実施
- ・ 再開放及び回収時の動線の分離（廃棄体の有無による分離）
- ・ 廃棄体はアクセス坑道（斜坑）より搬出、その他はアクセス立坑を利用
- ・ 発生土の搬出作業は、建設時の掘削ブリの搬出に使用したアクセス立坑を利用

この条件に基づき、現行の定置概念に対する全量回収手順を、処分区画単位で合理化したものを図3.7-4に示す。廃棄体回収は再開放後の区画で実施するため、この図のような回収手順が成立する条件は“処分区画あたりの再開放時間 \geq 処分区画あたりの廃棄体回収時間”である。また、図中に示すように、6つの処分区画の場合の全量回収時間（期間）は、処分区画あたりの再開放時間を7倍することで見積もることができる。

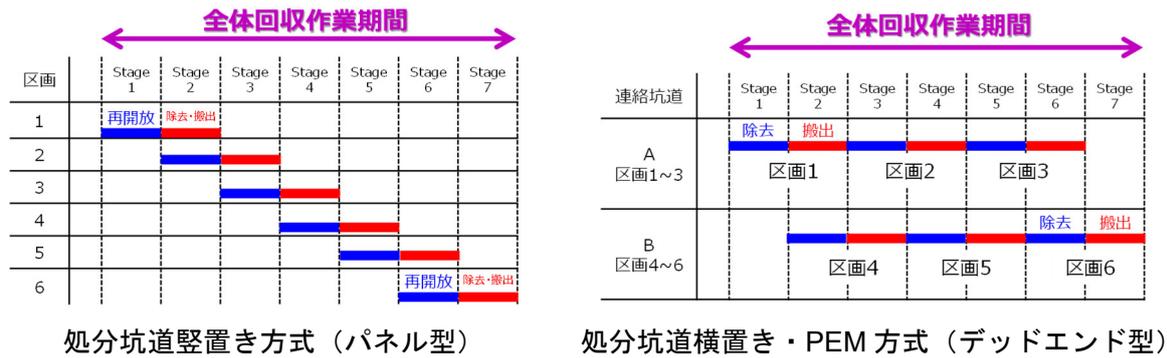


図 3.7-4 処分区画に対する回収手順の合理化

(区画数=6)

(5) 処分施設の設計と回収手順の合理化・最適化と作業時間の関係

基本となる「廃棄体一体の回収作業時間」、複数の廃棄体へ拡張した「単位領域あたりの回収作業時間」、4万體以上の「すべての廃棄体回収にかかる全体作業時間」は、回収対象の廃棄体数と単純な比例関係にならない。これは、処分場の地下施設の設計（地下施設の展開や坑道設計など）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ためである。

図 3.7-5 は全体作業時間に対する、技術の高度化、作業の合理化・最適化の効果を模式的に示したものである。縦軸は作業の合理化・最適化の程度、横軸はある定置概念・維持の状態からの回収作業時間を表している。基本作業を4万回以上反復して全量回収を実施した場合が最も全体作業時間が長期間になるため、この T_{MAX} を起点とする。作業時間を短縮する最も単純な方法は、3.3~3.6 節に詳述した個別作業の効率を上げる技術の高度化である。本事業で実施したウォータージェット方式の緩衝材除去技術、機械的除去技術の整備（高度化）がこれに該当する。同一作業の集約 ((2)参照)、複数の坑道での同時作業 ((3)参照)、別区画での同時且つ独立作業 ((4)参照) は、いずれも作業量の合理化、作業手順の最適化に相当する。

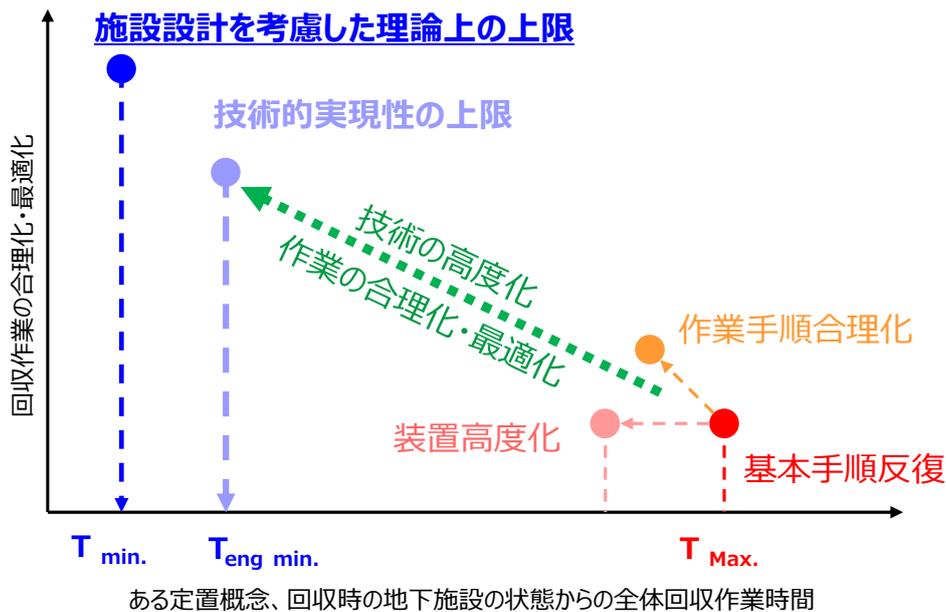
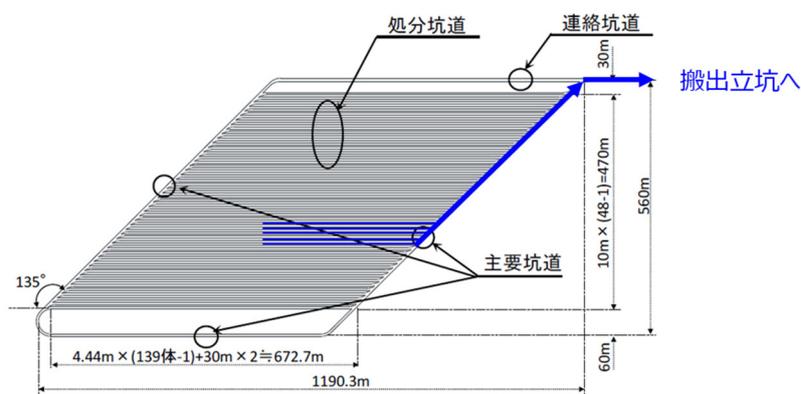


図 3.7-5 全体回収時間の短縮に対する、作業の合理化・最適化、技術高度化の効果

(6) 作業の合理化・最適化における技術的な課題

このように、適用する技術の高度化、作業の合理化・最適化によって、全体作業時間は短縮されていく。複数の坑道での同時作業は、図 3.7-3 のように同時に作業する処分坑道を増やすほど、回収作業時間の短縮に繋がるが上限がある。処分坑道の再開放作業を例に、地下特有の空間や設備規模による制約に留意しつつ、作業時間短縮の上限について以下に整理する。

図 3.7-6 は現行の処分坑道設置方式（パネル型）の処分区画に、処分坑道の再開放作業と発生土の搬出作業の動線を重ねたものである。処分坑道の再開放時の掘進速度は切羽での掘削能力と発生土の搬出能力のバランスで決まり、発生土の搬出能力が十分に確保された状態が、最も再開放時間が短くなる。一方、複数の処分坑道の再開放作業を同時並行実施する場合、切羽での掘削は坑道ごとに独立作業であるが発生土の搬出経路は主要坑道で合流する。そのため、処分坑道の再開放は発生土の発生源である処分坑道から主要坑道を経由したアクセス立坑までの経路や物流容量が制約となる。



(a) パネル型（深成岩類の竖置き・ブロック方式の例）

図 3.7-6 複数の処分坑道における再開放作業と発生土の搬出作業
(青線は再開放作業と発生土の搬出の動線を示す。)(NUMO, 2021 に加筆)

処分坑道からダンプトラックなどで発生土を搬出する場合、掘削に伴って切羽位置が移動するため、坑道からの発生土の搬出速度（ダンプトラックの入場・出場間隔）が変化する。地下施設の物流容量を最大限に活用するためには、入退場する複数の車両の運行の最適化の必要性など、運用上の課題がある。

(7) 回収技術の整備による回収作業時間の迅速化の上限（技術的アプローチ1）

図 2.4-3 内の①全量回収作業に要する時間は、地下施設のレイアウトが具体化された後、回収作業時の物流シミュレーションなどによって作業手順を最適化することで、定量化されていく。以上のように、既存の定置概念における回収時の地下施設の状態に対して、回収技術の高度化、作業の合理化・最適化によって短縮された回収作業時間を $T_{\text{eng_min}}$ と表す（図 3.7-5）。このような、技術の高度化、作業の合理化・最適化によって、回収作業時間の短縮を図る方法を、本事業では**技術的アプローチ1**と定義する。技術的アプローチ1により実現できる回収作業時間 $T_{\text{eng_min}}$ は、処分場のレイアウトや設備規模に依存する搬出能力をフル活用して回収作業を実行した場合の理論上の最短の作業時間 T_{min} に漸近する。

3.7.2 既存の処分概念に対する理論上の最短の回収時間の推定

技術的アプローチ1により短縮される回収作業時間を算出するためには、処分場の設計情報（坑道レイアウトや各種設備の能力、など）、回収時の地下施設の物流動線（埋戻し状態と利用可能な経路、など）、個別作業に適用する技術の能力、それらを統合して合理化・最低化を行うシミュレーション技術など、多くの詳細な技術情報が必要である。しかしながら、地下の処分場レイアウトは定置に適した母岩の分布や地下水流動場に依存するため、操業開始前や建設・操業期間中に最終的な地下施設のレイアウトを得ることは難しい。したがって、回収作業時間の算出に不確実性があることに留意しなければならない。

本項では、現行の定置概念のセーフティケースである NUMO-SC から得られる情報から、 T_{min} を試算する方法について述べる。

(1) 処分坑道の再開放到に着目した試算方法

処分坑道が埋め戻された状態 B の地下施設の回収作業の合理化・最適化による全量回収時間（期間）は、前項 3.6.1 に示すように、六つの処分区画の場合、処分区画あたりの再開放到時間を 7 倍することで見積もることができるが、現状、処分区画あたりの再開放到時間の算出に必要な種々の情報が不足していることに留意しなければならない。

複数の坑道で同時に再開放到作業を行った場合の、発生土の流れを図 3.7-7 に模式的に示す。建設・操業時の物流経路の考え方を踏襲すると、各坑道から搬出される発生土は、主要坑道、連絡坑道で合流し、最終的にはアクセス立坑から地上に搬出される。技術の高度化や作業の合理化・最適化はこの経路の稼働率の向上に寄与する。しかしながら、最終的な地上への搬出経路であるアクセス立坑の容量を超えることはできない。つまり、アクセス立坑の搬出能力が、処分孔縦置き方式の再開放到作業や処分坑道横置き・PEM 方式の隙間充填材の除去作業に要する時間、ひいては全体回収時間を決定する因子となる。

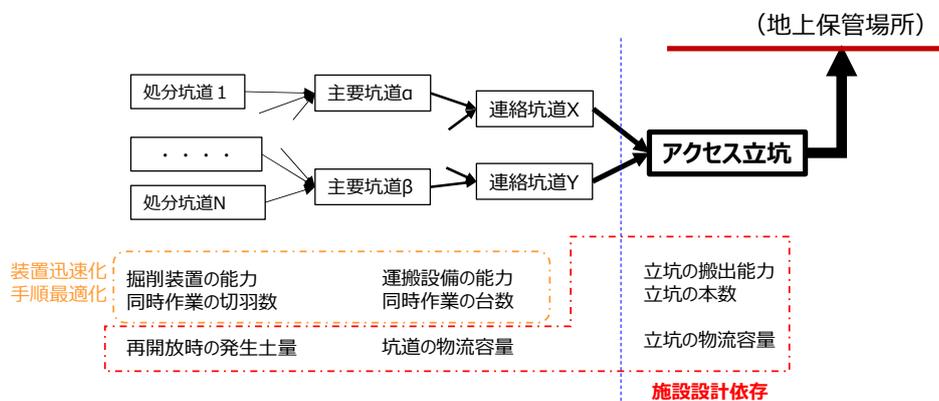


図 3.7-7 処分坑道から地上までの発生土の流れ

(2) 発生土の搬出経路であるアクセス立坑の搬出能力の設定方法

アクセス立坑は、処分場の建設・操業時に廃棄体を除く物資の搬入出作業を担うことから、処分場の建設時の掘削ブリの搬出に着目して、アクセス立坑の搬出能力を見積もる方法を検討した。

新第三紀堆積岩類の処分坑道は内空幅 5 m の三芯円である。この坑道 1 m あたりの掘削ブリの体積は、支保の厚みを考慮して実際に掘削される断面積に土量変化率（ほぐし率）を掛けたものになる。NUMO-SC 上の計画では、処分坑道の建設は月進 500 m とされており（NUMO, 2021）、これらから、一ヶ月あたりに地下で発生する掘削ブリの総量を見積もることができる。これを建設時のブリ搬送の効率、その他の資機材の搬入出時間、一ヶ月あたりの建設作業時間、点検によ

る休止などを考慮したアクセス立坑の使用可能時間で割ることで、時間あたりのアクセス立坑の搬出能力が推定できる。

(3) 回収時の再開放時間の推定

処分孔縦置き方式の場合は坑道内空の断面積に土量変化率を掛けた発生土、処分坑道横置き・PEM方式の場合はPEM-坑道間の隙間の面積に土量変化率を掛けた除去生成物が、回収作業時に処分坑道から搬出される土量になる。一日あたり回収作業時間を設定すれば、処分坑道一本から発生する土量を地上に搬出するために必要な時間、すなわち処分坑道一本の再開放時間の理論上の最短時間が算出される。

(4) 理論上最短となる全体回収時間

処分坑道一本の理論上の最短時間に処分区画あたりの処分坑道本数を掛けることで、区画あたりの理論上の最短の再開放時間が導出される。この値を7倍することで、 T_{min} を見積もることができる。

(5) 処分概念としての回収可能性の担保の判断

以上のような手順で導出した T_{min} を、図2.4-2に示す“標準工程において回収可能性が維持されている状態の安全性との関係”における【①全量回収作業に要する時間】に当てはめると、標準工程が成立するために必要な【③操業期間中の安全性が確保されている期間】を見積もることができる。この図中で【①】と【③】の成立性を確認することで、構築した地層処分概念に回収可能性が担保されているかが判断できる。 T_{min} はあくまでも理論上の最短期間であり実際にはこれ以上の期間を要する。処分場の地質環境条件、処分概念、適用する技術など、具体化されていく情報を反映していくことで、地層処分事業に対する回収可能性の技術的実現性が向上していくものとする。

3.7.3 処分概念への回収容易性の導入

3.7.1(7)で定義した技術的アプローチ1による全体回収時間 T_{eng_min} は、地層処分施設の設備能力から試算される T_{min} を下回ることができない。図2.4-2に示す標準工程における回収可能性の成立性、図2.4-3に示す全量定置後に新たに追加される可能性のある維持期間を確保するという要求への技術的実現性の提示においては、 T_{min} の更なる短縮が要請されることも考えられる。

このような要請に対して、技術的な対応策を予め検討しておくことは、地層処分事業に対する回収可能性の導入という施策に対する信頼性向上に貢献すると考えられる。本項では処分概念に対する回収の容易性の導入について述べる。

(1) 処分概念と回収容易性（技術的アプローチ2）

ここで検討する回収の容易性は、R&R検討会で整理された技術的枠組み（表1.2-1参照）を踏まえ、作業時間の短縮に資するものである。既存の処分概念に対する技術的アプローチ1に対して、回収をより容易にするための方法を設計に考慮する方法を“技術的アプローチ2”と定義する。技術的アプローチ1による回収の容易性に対する最も大きな制約は、前項3.7.2に示したように“再開放時の発生土の搬出”となる。この制約を解消するための技術的な方策について、現行の概念（設計）を出発点として検討した。なお、ここで検討する方策は建設・操業時の安全性確保のあり方も考慮した施設設計の変更も含むものである。

以下に、技術的アプローチ2の例を示す。

(a) 地上への搬出経路の見直し

3.7.1(4)に示したように、建設・作業時の換気・作業動線の考え方を踏襲し、再開放時の発生土の地上への搬出経路をアクセス立坑に限定したことで、アクセス立坑の搬出能力が全体作業時間の制約となっている。この制約を解除し、現行の概念で廃棄体の搬入出経路としているアクセス坑道（斜坑）を、物流容量の範囲内で発生土の搬出経路として使用すれば、再開放作業時間が短縮される。

課題として、アクセス斜坑自体の物流容量の設定、アクセス斜坑地上出口部分の扱い（地上施設との接続部、図 3.6-5 参照）、建設・作業時の作業動線と換気経路の設定及びそれに合わせた設備との整合などが挙げられる。この技術的アプローチでは、閉鎖後長期の安全性に対する影響はない。また作業時間の短縮効果は、使用可能なアクセス斜坑の物流容量に依存する。

(b) 地上への搬出経路の増設

現行の定置概念に対して、発生土の地上への搬出経路であるアクセス立坑を増設し、地上への物流容量を増やすことで再開放時間の短縮を図るものである。アクセス立坑を増設する時期によって、この技術的アプローチを適用する際の課題が変わる。

建設・作業時からアクセス立坑を増設しておく場合、回収作業の初めから複数本のアクセス立坑からの搬出が可能になるが、標準工程のコスト増に繋がる。また、建設・作業時の換気（風向・風量）などの換気設備の見直しが必要になる。処分施設の最終閉鎖を選択した場合は、地上への優位な移行経路とならないよう、適切な埋戻し作業を行う必要がある

全量回収を選択した後に増設する場合、実際に建設された地下施設の広がりや地上での坑口の位置関係、搬出効率が最大になる位置、回収作業時の換気経路などを踏まえて、立坑の増設場所が選定される。また、最終閉鎖を選択した場合はアクセス立坑の増設はされないため、閉鎖後長期の安全性に与える追加の影響はない。

(c) 回収可能性の維持状態の変更

処分坑道の再開放、隙間充填材の除去は、処分坑道が埋め戻された状態 B の地下施設に対する回収手順上の作業である。この作業を省くためには、処分坑道が解放された状態 A で回収可能性を維持する必要がある。

図 2.2-3 に例示するように、状態 A は受動的安全性への影響が状態 B や C と較べて相対的に大きいと考えられている。第 4 章に詳述する、回収可能性の維持に伴う安全性への影響を踏まえ、処分概念としての成立性、影響を低減するための対策の導入などを検討する必要がある。

(2) 再開放時の発生土の削減

処分坑道の再開放に要する作業時間を短縮する方策として、発生土量そのものを削減する方策について、現行の二つの定置概念に対して検討した。

再開放時の発生土量は、処分坑道断面積、坑道全長、発生土の土量変化率によって求めることができる。坑道断面積は定置装置の作業性、土量変化率は土質に依存するため、ここでは定数として扱う。坑道全長は定置間隔と坑道あたりの定置数量によって設定されるが、最終的に定置される廃棄体数は 4 万體以上の定数として扱うことを踏まえると、再開放時の発生土量を削減するための変数は定置間隔となる。

(a) 処分孔豎置き方式

処分孔豎置き方式の定置間隔は、隣り合う処分孔同士の力学的安定性と廃棄体からの熱影響を考慮して設定されるが、現行の新第三紀堆積岩類における定置概念の場合には、力学的安定性が定置間隔の決定因子となっており、処分孔直径を d として $3d$ と設定されている。

これに対して、処分孔壁の安定性を鋼製ライナーなどで確保することで、廃棄体の熱影響が決定因子となる場合の定置間隔を、現行の定置間隔の熱的評価に適用した物性値や手法を踏襲して再現性を確認した数値解析ツールを用いて評価したところ、処分孔同士が接触する間隔 d でも成立することを確認した（原環センター・原子力機構, 2021）。

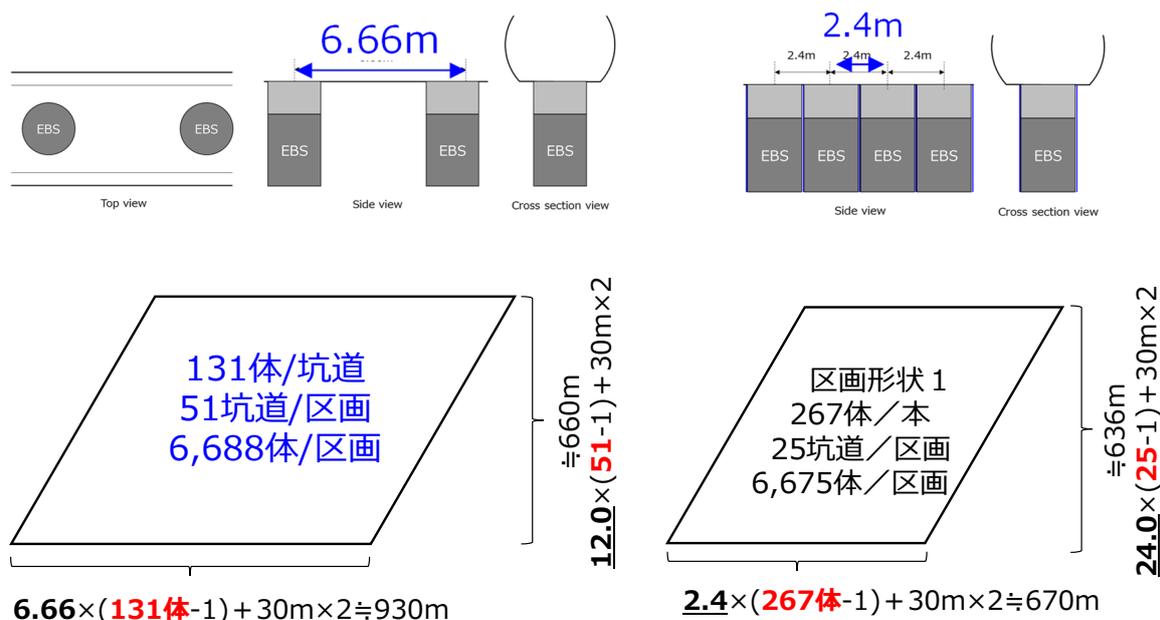


図 3.7-8 処分孔の近接による処分坑道の短尺化

(新第三紀堆積岩類 深度 500 m 処分孔豎置き方式 (パネル型))

図 3.7-8 に現行のパネル形状と処分孔を近接させた場合のパネル形状を合わせて示す。定置間隔を縮小すると坑道一本あたりの定置密度が高くなるため、熱的な成立性から処分坑道中心間距離は広くなるが、現行と同じ 6 パネルとして、現行の定置区画と同程度の形状・規模になるようにすると上図 (右図) のようになる。

この処分区画は、定置間隔が縮小した他は現行の豎置き方式と同様であるため、3.3 及び 3.4 節に示した技術の適用が可能である。アクセス立坑の搬出能力から推定される T_{\min} は、処分坑道が短縮された分だけ小さくなる。図 3.7-8 (右図) のレイアウトの T_{\min} は、同図 (左図) の現行の定置概念に対して約 36% に短縮される。ただし、処分坑道の短縮に合わせて建設・操業段階のアクセス立坑の能力も合理化された場合は、この限りではない。

(b) 処分坑道横置き・PEM 方式の詳細設計オプションの例

処分坑道横置き・PEM 方式の場合、図 3.7-9 のように坑道断面の縮小、または PEM の向きを現行の直列から並列に変更することで、PEM-坑道間の空間の隙間充填材の体積が削減できる。しかしながら、PEM 周囲の隙間形状が複雑且つ狭く、作業効率の低下により時間短縮効果は限定的と考えられる。そこで、図 3.5-1 の回収手順から隙間充填材の除去作業を省略する定置方式について、定置概念としての成立性、及び技術的実現性の提示に向けた検討を実施した。

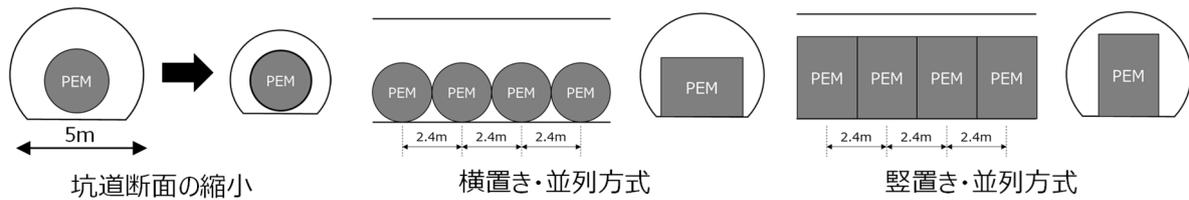
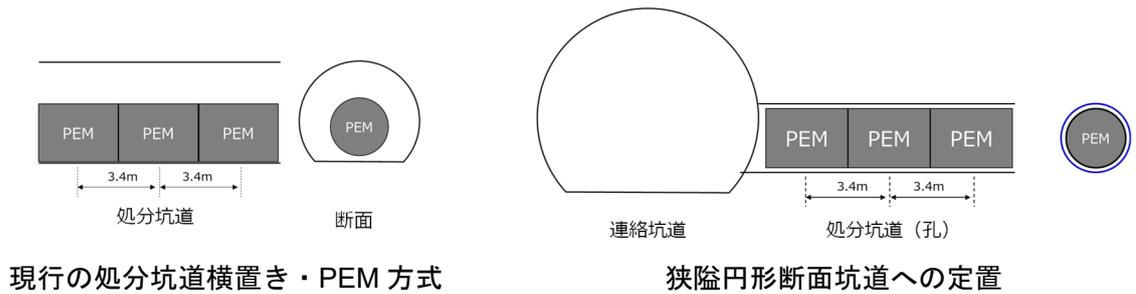


図 3.7-9 隙間充填材の体積を減らす定置方法の例



現行の処分坑道横置き・PEM方式

狭隘円形断面坑道への定置

図 3.7-10 隙間充填材を省略した PEM の定置方式

(新第三紀堆積岩類 深度 500 m 処分坑道横置き・PEM方式 (デッドエンド型))

PEM 周囲の許容できる隙間の幅について、PEM 内部の緩衝材が長期的に隙間を埋めることを想定し、基本的な設計要件に対する緩衝材の仕様範囲を満たすことができるかを検証した (原環センター, 2021.)。基準値は、最も高い有効粘土密度を要求する「Ca 型化した緩衝材が塩水環境中で自己修復性を発現する下限値」とした。図 3.7-11 に、隙間幅と有効粘土密度の関係を示す。PEM 内部からの緩衝材の膨出による隙間の閉塞挙動、巨視的な密度分布、安全評価上の坑道長手方向の透水性など、確認すべき項目や課題は存在するが、定置後の PEM 周囲の隙間を存置する定置方式が成立する見通しを得た。

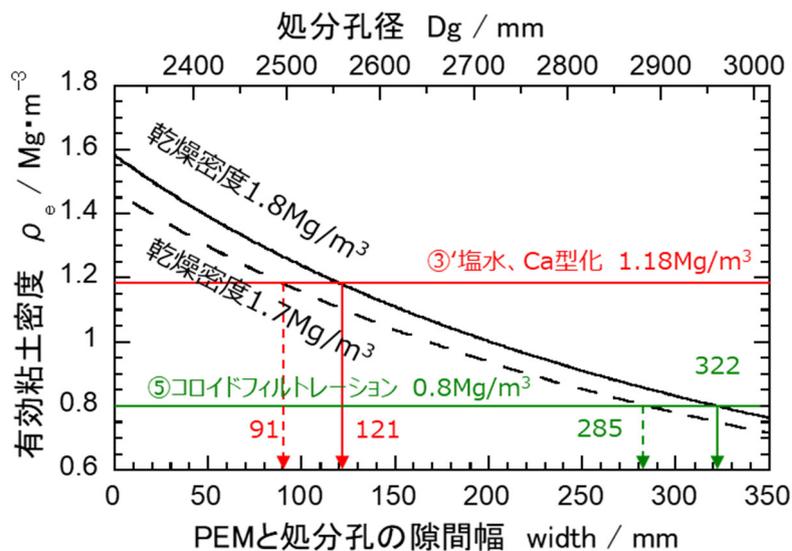
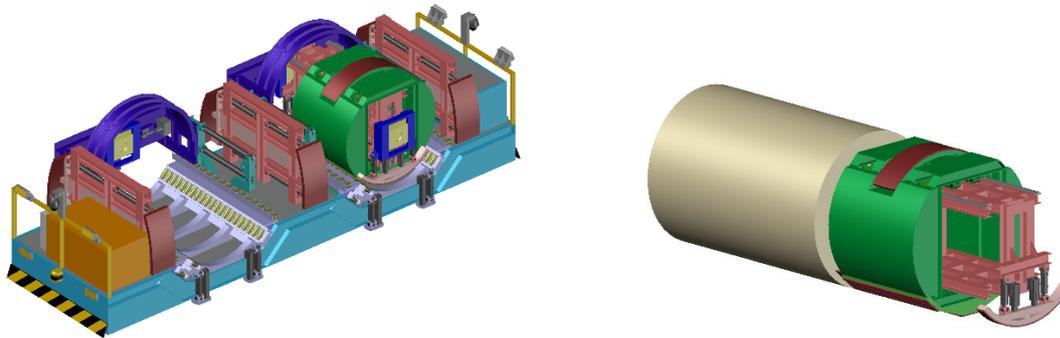


図 3.7-11 閉鎖後長期の安全性の観点から見た隙間幅の許容値 (原環センター・原子力機構, 2021)

今後、このような狭隘な円形断面の処分坑道への PEM 方式の適用に係る技術的実現性の提示に向けた技術開発を実施していく必要がある。この定置概念に対して“建設作業システム”、“定置作業システム”、“回収作業システム”など、各作業手順を具体化しつつ、効果的な技術開発を進める必要がある。図 3.7-12 に定置・回収作業を想定した、狭隘空間での重量物である PEM の推進／牽引装置の概念図を例示した。



坑道内定置・回収装置

連絡坑道内、搬送車両

図 3.7-12 狭隘空間での PEM の定置・回収作業に適用する装置の概念図

(原環センター・原子力機構, 2023)

3.7.4 定置概念としての成立性の向上

前項では【③全体回収作業に要する時間】の短縮を目的として、現行の処分場設計に大きな変更は加えずに工夫が可能な技術的方策や、現行の定置概念を起点とした回収の容易性を高めた詳細設計オプションの例を示した。これらの方策や詳細設計オプションは様々な評価項目や設計因子に基づいてその妥当性が評価される。そのような評価項目の例として、以下の項目が今後の処分場設計の最適化に係る検討の“たたき台”として提案されている（原環センター，2021）。

- ① 詳細設計への具体化の見通し／設計構築の実現性（建設・施工技術の適用性の見通し）
- ② 設計のロバスト性・柔軟性
- ③ 建設・操業性（建設・操業の作業性）
- 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

回収の容易性の向上（作業時間の短縮）の観点から検討を進めた詳細設計オプションは、これらの評価項目で妥当性が評価され、結果に応じて技術開発に取り組むことで、定置概念としての最適化が図られると考えられる。なお、今後の検討過程において、これらの評価項目も適時に更

新されていく。

3.8 回収可能性の技術的実現性のまとめ

現行の二つの定置概念に対して、回収作業の技術的実現性の提示及び回収可能性が維持されている状態を示すことに資する「①全量回収作業に要する時間」の定量化に向けた、技術検討や整備が進められている。現段階における技術の整備状況と課題は以下のとおり。

- 回収作業に適用可能な技術の有無と技術的実現性の提示

状態 B の地下施設に定置してある廃棄体を地上施設で保管するまでを回収作業(境界)として、回収手順、手順を構成する個別作業、作業に必要な技術を“回収作業システム”として、サブシステムを含めた階層構造で整理した。トンネル施工などの一般土木技術、処分場の建設・操業時に想定される装置や設備、これまでの基盤研究における技術開発成果を概観・整理した結果、開発レベルに差はあるものの、回収作業システムを構成する一連の技術が揃っており（或いは整備の見通しがある）、廃棄体の回収作業の技術的実現性が見通しがあると言える。

- 除去技術の優先的な整備による技術的実現性の向上

オーバーパック回収時の緩衝材除去及び PEM 回収時の隙間充填材の除去に係る技術は、回収作業特有のものであり、且つ回収作業のボトルネックになる作業として抽出された。これに対して、現行の二つの定置概念を対象に、流体式除去技術及び機械的除去技術の整備が優先的に進められており、要素試験や実規模の実証試験によって、現実的な時間内での除去作業が実施できる見通しが得られている。

- 全体回収作業時間の試算方法（定量化方法）の提示

【①全量回収作業に要する時間】について、廃棄体一体の回収手順を基に回収の規模に応じた定量化方法を提示した。試算に必要な処分施設の詳細な情報は現時点では未定の部分があるため、NUMO-SC の情報に基づく仮定を置くとともに、技術や手順の合理化・最適化で達成可能な理論的な最短の作業時間を、処分施設の設備能力から試算する方法を整備した。

- 回収時間の短縮に資する技術的な対応策

回収可能性が維持されている状態を示す他の項目との関係から、「①全量回収作業に要する時間」に対して、短縮を求められることも想定される。そのため、現行の定置概念に対する回収作業時間の短縮を実現する技術的方策を提示するとともに、回収の容易性を高めた詳細設計オプションを例示した。この試みは、安全な管理が合理的に継続している状態を技術的に担保することに寄与する。

- 回収作業時間の短縮（容易性向上）に向けた課題

回収手順の個別作業に必要な技術、定量化項目である全体回収作業に要する時間の積算、回収作業時間を短縮に資する技術的な対応策など、これらの技術の実現性の提示及び向上に向けた課題をそれぞれの項目ごとに整理した。

4 回収可能性の維持に伴う安全性への影響

本章では、回収可能性の維持に伴う閉鎖後長期の安全性／操業期間中の安全性の定量化に向けた検討について詳述する。

4.1 回収可能性の維持に伴う影響を定量化する目的

基本方針の第5（放射性廃棄物の最終処分に係る技術の開発に関する事項）において、“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。当該技術開発等の成果については、最終処分事業や国の安全規制において有効に活用されることが重要である”として、回収可能性に係る調査研究の実施を要求している。

地下施設の建設に伴う周辺岩盤への力学的な影響、セメントや鋼材など本来の地下環境には存在しない材料の持ち込み、換気による空気の供給、坑道への湧水・排水による水理場の変化など、建設・操業期間、回収可能性の維持期間中は地下深部本来の環境への擾乱が生じる。標準工程から、全量定置後に新たに追加される可能性がある回収可能性の維持期間まで考慮した、安全な管理が合理的に継続できる状態を模式的に示した図 2.4-3 の関係を示すためには、同図に示した「②閉鎖後長期の安全性への影響が許容できる期間」や「③操業期間中の安全性を確保できる期間」の定量化が必要である。定量化技術としての信頼性や説明性の確保、更に将来の安全規制対応なども考慮すれば、建設から操業、(回収可能性の維持)、閉鎖、閉鎖後長期という一連の期間に生じる事象の時間変遷をより丁寧に考慮して、実現象としての影響の程度に応じた優先課題の評価、ならびに定量化手法の整備における現象論的知見や経験則の活用可能性など、より丁寧かつ包括的な視点で取り組む必要がある。

4.1.1 定量化手法の整備の方針

定量化手法の整備では、現行の二つの定置概念、回収可能性の維持期間中における三種類の地下施設の状態設定オプションだけではなく、処分場が建設される地質環境条件、第三章で例示した詳細設計オプションを含めて今後具体化される様々な処分場設計への適用を見据えて、以下の点に留意して検討を進めた。

- 起点とする定置概念の設定

NUMO-SC を参考に、新第三紀堆積岩類深度 500 m に建設される、処分孔縦置き方式（パネル型）、回収維持期間中の地下施設は状態 B を検討の基本とした。

- 操業期間中のタイムラインの具体化

処分場の建設、操業、回収可能性の維持、回収作業又は施設の最終閉鎖といった、一連の期間を細分化した。

- 処分場構成要素の分解

処分場の状態変遷を評価する上で、影響を受ける部分や影響を与える要因の抽出及びその評価をしやすくし、実際の処分場の仕様、異なる定置概念や維持の状態設定オプションへの拡張を可能とするために、処分場構成要素の抽出・細分化を実施した

- ストーリーボードの採用

定量化すべきプロセスの抽出のため、地層処分システム全体のふるまいを俯瞰でき、時間・空間スケールに関する整合性を確認できる表現方法であるストーリーボードを採用した。

- 地下研究施設との連携

実際の地下環境で生じる事象を取り入れることで、定量化手法や評価結果の信頼性向上を図る。

4.2 定量化すべきプロセスの具体化に向けた取り組み

4.2.1 定量化に向けた検討フロー

閉鎖後長期の安全評価の基本手順では、地層処分システム全体のふるまいを俯瞰でき、時間・空間スケールに関する整合性を確認できる表現方法として、ストーリーボードが導入されている (NUMO, 2021)。ここでは、操業期間中及び閉鎖後長期の安全性が確保される期間において安全性に影響を及ぼす要因やシナリオの整理を行うため、「地下構造物の安定性及び供用性」を対象として、ストーリーボードによる整理を実施することとした。検討フローを図 4.2-1 に示す。

ストーリーボードは、段階的に作成され (NUMO, 2011)、第 1 段階のストーリーボードとして、さまざまな分野の専門家との議論の前に、安全評価の専門家を中心となり、安全機能に着目した処分システムの状態変遷に関わる知見を集約する。次に、さまざまな分野の専門家との議論に基づき、第 1 段階のストーリーボードを改善する。

このようにして改善したストーリーボードに基づいて、処分場構成要素ごとに機能が喪失するプロセスとその原因を抽出し、具体的に定量化すべきプロセスを地下構造物の安定性及び供用性に係るシナリオとして整理するとともに、実現象としての影響の程度に応じて定量化手法を整理し、現状技術を踏まえた技術課題としてまとめる。

まとめられた技術課題に対して、モデル開発、既存坑道や原位置試験場における観測データ取得、新たな原位置／室内試験によるデータ取得、予測解析結果の整理など、包括的な視点で定量化手法の整備を実施する。

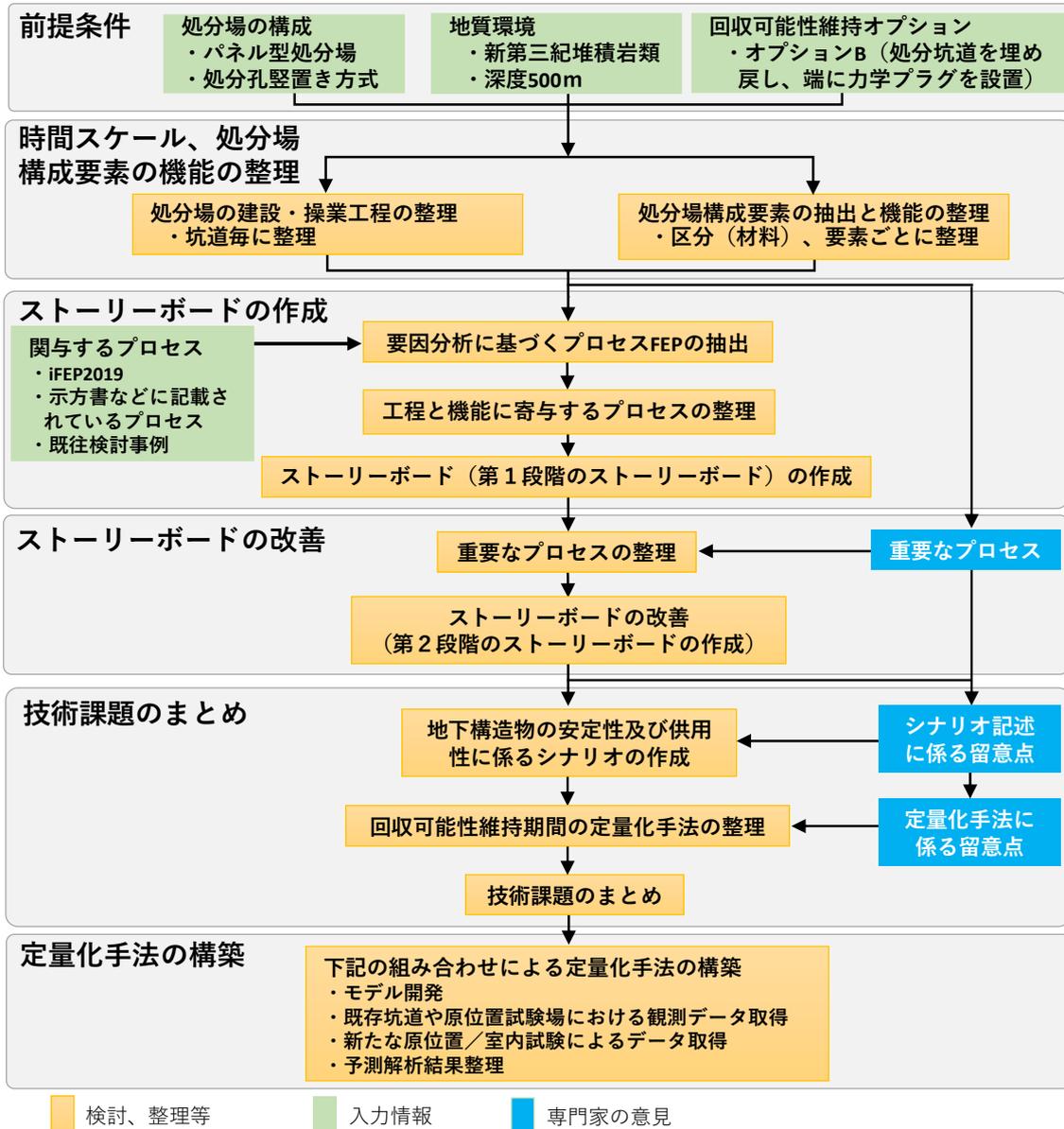


図 4.2-1 回収可能性の維持に伴う影響事象の定量化手法の構築に係る検討フロー

図 4.2-1 に示す検討フローにおける、時間スケール、処分場構成要素の機能の整理について以下に述べる。

4.2.2 操業期間中のタイムラインの具体化

建設・操業は、地上から地下までのアクセスルート of 建設、処分区画ごとの建設・操業へと展開するため、処分区画単位、さらには同一処分区画内の処分坑道単位や処分孔単位で建設と人工バリアの定置・部分埋戻しといった作業が繰り返される。個々の人工バリアや地下構成要素に着目すると、これらは、設置場所や施工後の全量定置完了までの経過時間が異なり、それに応じて環境条件やその変遷状況も異なる。

このような時間的な分布の存在を、構成要素ごとに扱うことは非常に煩雑になり、必ずしも効果的ではない。そこで、建設・操業工程の分析を行い、建設・操業期間中に地下処分施設が迎える状態変遷の一般化を試みた。この分析では、建設・操業に要する具体的な時間経過を定量的に把握するとともに、回収可能性の維持に伴う影響を考慮すべき対象（地下構成要素や使用材料）の抽出も併せて実施した。

図 4.2-2 の上段は、建設・操業期間のタイムラインのうち 6 区画全体を示したものである。処分坑道内の換気や排水の継続・停止は、処分坑道自体だけではなく、人工バリアや周辺岩盤の状態変遷に影響を及ぼすため、開放状態／埋戻し状態の違いは、影響の検討では重要となる。そこで、地層処分施設内に存在する坑道の 1 本に注目し、処分場の建設開始から定置完了を経て、回収に至る一連のタイムラインを抽出した。図 4.2-2 の下段に、特定の 1 本の処分坑道に対するタイムラインを示す。実線は処分坑道内に空間が無い状態（掘削前または埋戻し後の状態）を示し、点線は開放されている状態を示した。

NUMO-SC における地層処分の安全評価における時間スケールは、処分場閉鎖から再冠水完了までの期間： T_1 からとなっている。図 4.2-2 に整理した閉鎖前の期間を T_0 として、処分施設の建設開始から廃棄体の定置完了を経て、廃棄体の回収完了までの期間を扱うタイムスケールとして定義した。なお、影響の検討においては、細分化したイベントを適切に集約して合理的に進めることが重要である。

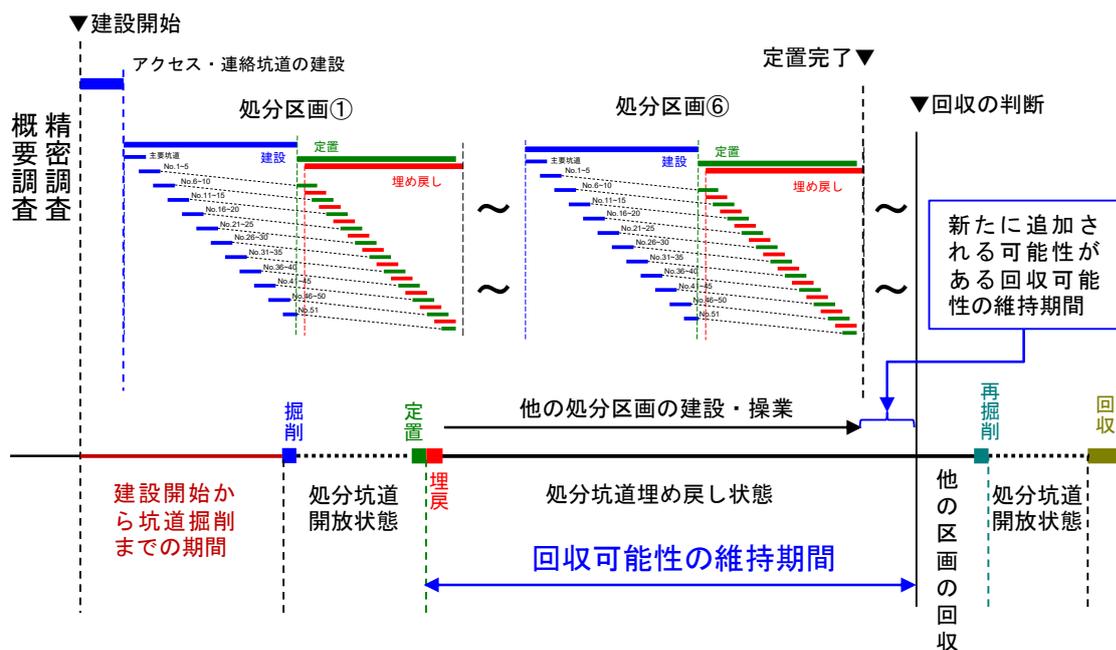


図 4.2-2 処分場全体と処分坑道単体のタイムラインの関係

4.2.4 ストーリーボードを用いた定量化すべきプロセスの抽出

前項に示した建設・操業期間のタイムラインの分析結果及び処分場構成要素の抽出結果などにに基づき、処分場構成要素に要求される機能に影響を与えるプロセスを抽出し、段階的にさまざまな分野の専門家との議論を経た上で、「地下構造物の安定性及び供用性」に着目した処分システムの状態変遷に関わる知見を集約したストーリーボードを作成した。(図 4.2-4)

地下構造物は多くの要素が統合されたものであり、要素ごとの THMC が相互に影響すること、要素ごと THMC ごとにスケールが異なることから、一つのシナリオとして表現するためには、複数のプロセスの変遷を統合する必要があるため、特定の要素のプロセスの変遷をサブシナリオと定義し、ストーリーボード及び専門家の意見を参考に区分別、時間別に 74 のサブシナリオを抽出した。これらのサブシナリオの定量化においては、類似条件での経験・知見の活用や解析的手法の適用が必要となる。

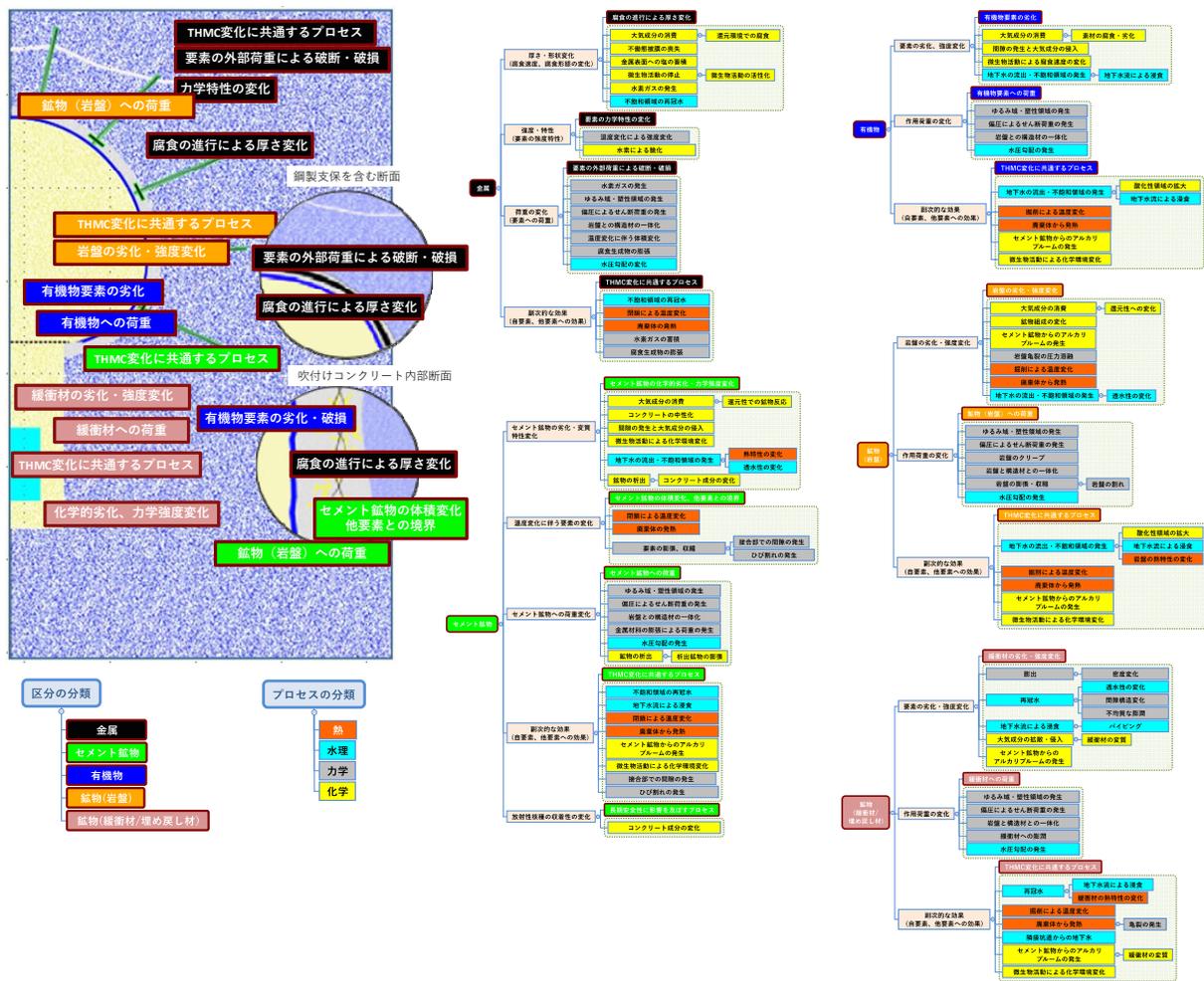


図 4.2-4 ストーリーボードの例（ニアフィールドスケール、詳細スケール、状態 B）

4.3 地下研究施設を活用した取り組み

実際の地下環境での事象を取り込むことで、評価手法（解析）の信頼性向上を図るため、幌延深地層研究センターを活用した物性値の取得、坑道周辺環境の予察的解析を実施した。

以下に、本事業3カ年の成果の概要を示す。

4.3.1 実際の地下環境における支保部材の状態把握

回収可能性維持期間中の開放坑道の安全性への影響に支配的な影響を及ぼす可能性があるのは、力学的安定性を確保し坑道の空間を必要な期間維持するための支保工の健全性である。このため、実際の地質環境を対象とした技術開発として、幌延深地層研究センター地下施設内の坑道で実際に施工されている低アルカリ性コンクリート(HFSC)の吹付けコンクリート支保工を再現した供試体を作成し、実際の坑道内で支保工がさらされる環境（坑道内の通気環境、支保工背面の岩盤筐体部の飽和状態に近い環境）において定置養生し、コンクリート供試体の物性試験や化学組成等の分析を実施した。図 4.3-1 にコンクリート供試体の製作及びその養生方法を示す。

作成した供試体は、坑内通気中（気中養生）、幌延深地層研究センター深度 350 m 坑道周辺の原位置地下水中（水中養生）で定置養生を開始した（図 4.3-2）。定置養生前と、定置養生開始後約 1 年、2 年経過した供試体の一部を用い、図 4.3-3 に示す各種の物性試験や分析を実施しその物性の変化やそのメカニズムをするとともに、水理物性（透水性）の経年変化に関する検討も併せて実施した。以降に得られた成果の概要を紹介する。

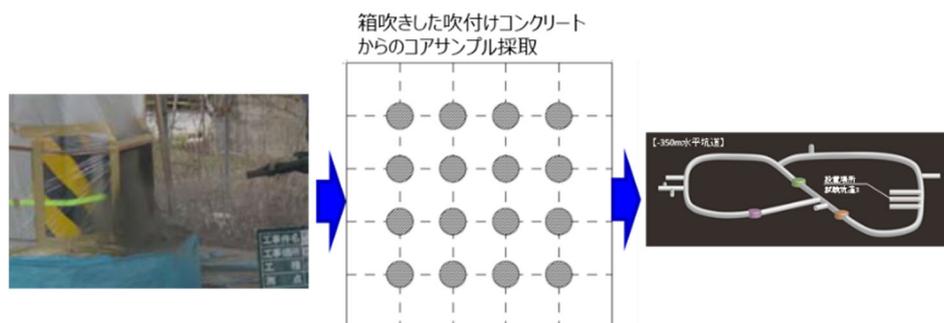
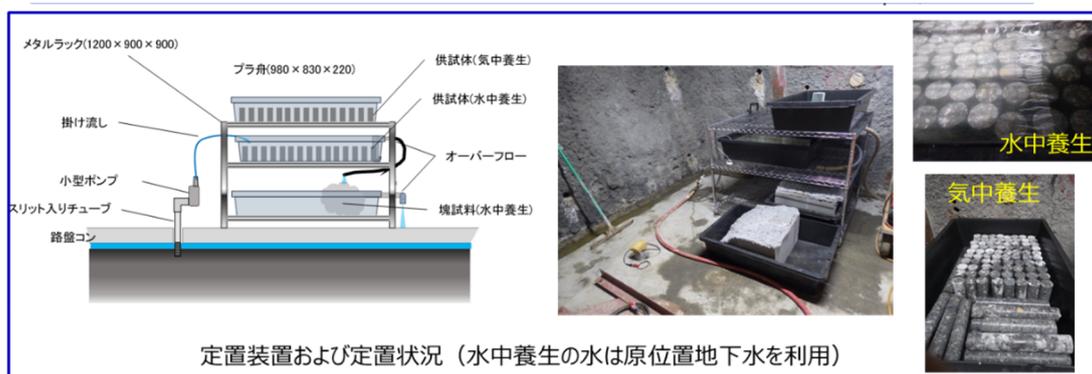


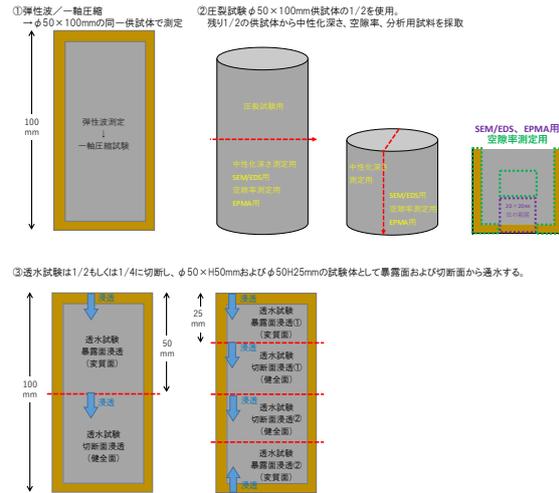
図 4.3-1 吹付けコンクリート供試体の作成及び幌延地下施設内の定置場所



定置装置および定置状況（水中養生の水は原位置地下水を利用）

図 4.3-2 定置装置及び養生状況

	試験項目	寸法	合計試料数
物性試験	一軸圧縮試験	φ50mm×H100mm	18
	弾性波測定 (P、S波)	φ50mm×H100mm	18
	透水試験	アウトプット法 φ50mm×H50mmおよび φ50mm×H25mm	20
		・JGS 0312-2018「低透水性材料の透水試験方法」に準拠 φ50mm×H25mm	8
	圧裂試験	φ50mm×H50mm	18
空疎率測定	2.5~5mm角のモルタル部	20	
分析	炭酸化 (中性化) 深さ	φ50mm×H50mm	10
	面分析測定試料用供試体作製	20×20×10mm	18
	EPMAによる面分析	上記試料による分析	10
	SEM/EDSによる分析	上記試料及び破断面による分析	20
	地下水分析	項目 pH, Na, K, Ca, Mg, Cl, HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Si, Al	6



(a) 分析項目 (b) 試験に供する供試体の作成状況

図 4.3-3 室内物性試験の例

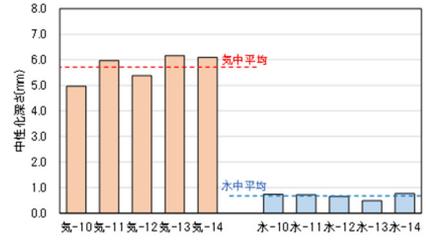
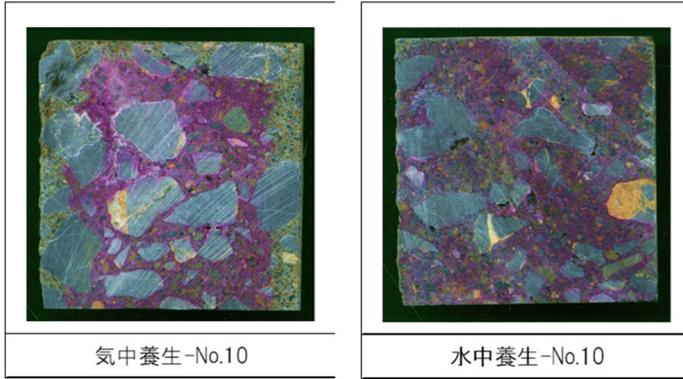
(1) 供試体の状態変化 (炭酸化 (中性化)) と物理・力学物性の変化について

図 4.3-4 は、気中養生及び水中養生における供試体境界部付近の炭酸化 (中性化) の状況を示したものである。2 か年の定置養生により、水中養生供試体については、炭酸化 (中性化) は供試体表面 1 mm 以下のわずかな範囲にとどまっていたが、気中養生供試体は 2022 年度の時点で 6 mm 前後まで経時的に進行していることがわかった。一方で、この炭酸化 (中性化) 深さについては、OPC に関する土木学会予測式での中性化速度係数 (4.31 mm) と、実測から求めたそれ (4.04 mm) はほぼ等しく、現状では HFSC (低アルカリ性コンクリート) であることや吹付けコンクリートであることによる影響は見られていない。

各種の力学物性試験結果を養生期間ごとに図 4.3-5 にまとめて示すが、初期値 (材令 28 日) と比較すると、気中養生・水中養生供試体とも一軸圧縮強度、静弾性係数、圧裂強度は養生期間 1 年後に増加したが、1 年後 (2021 年度) と 2 年後 (2022 年度) についてはほぼ変化がない。見掛け密度や弾性波速度は、養生期間によらずほぼ変化がなく、養生条件の違いが力学物性・物理物性の変化に与える影響も現状では大きくないものと考えられる。

一方、供試体内部の構造変化を見るために実施した空疎率測定結果を図 4.3-6 に示す。気中養生、水中養生いずれの供試体についても、トータルの空疎率には初期値からの大きな変化は認められず、炭酸化 (中性化) が生じていない健全部の空疎径分布も相対的に大きな違いはない。一方、炭酸化 (中性化) 領域と健全部で比較すると、水中養生試料ではその差はわずかであるのに対し、気中養生試料は径 0.01~0.1 μm の空隙が顕著に増加していることがわかる。また、初期値と比較すると、気中養生試料より水中養生試料の方がより小さな空隙の増加が見られ、セメントの水和反応が進み、より緻密な構造となっているものと推定される。

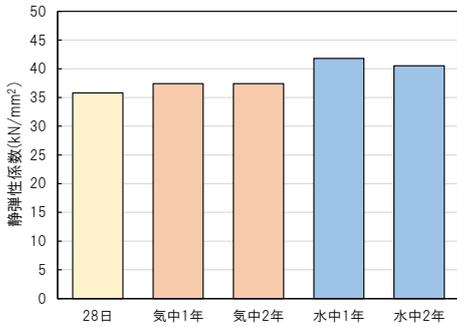
緑：炭酸化（中性化）が生じている場所
紫：健全部



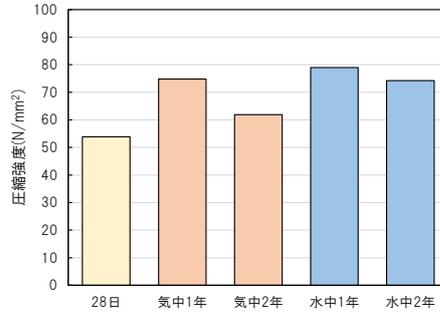
(a) フェノールフタレイン塗布後の炭酸化（中性化）領域の状況

(b) 中性化深さ

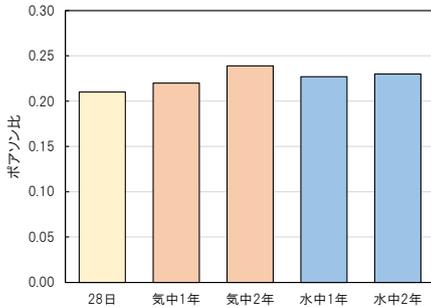
図 4.3-4 中性化深さ試験の例



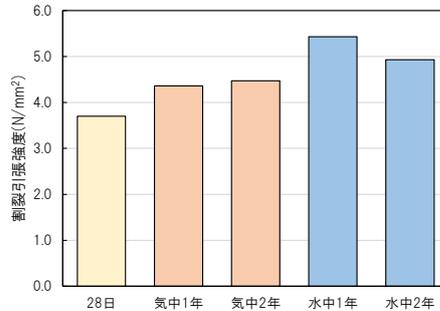
(a) 静弾性係数



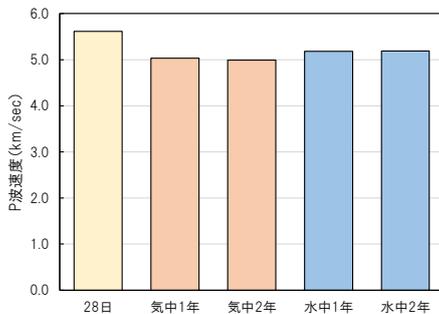
(b) 圧縮強度



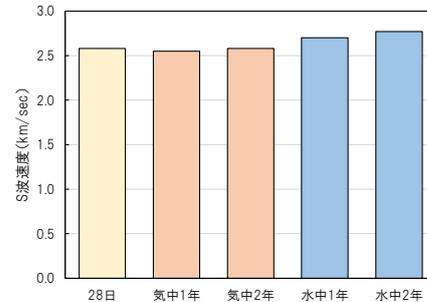
(c) ポアソン比



(d) 割裂引張強度

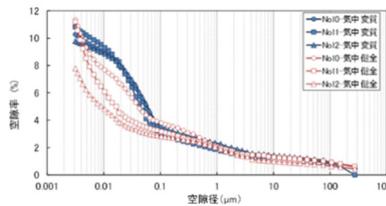
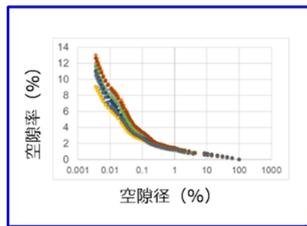


(e) P波速度

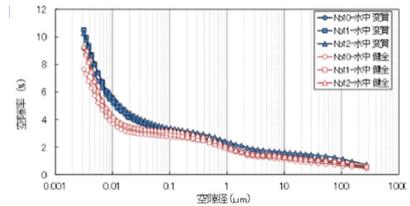


(f) S波速度

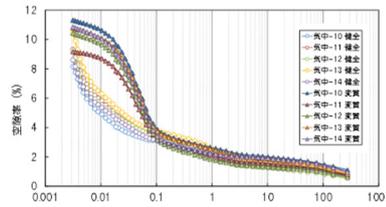
図 4.3-5 養生期間ごとの物理・力学物性試験結果



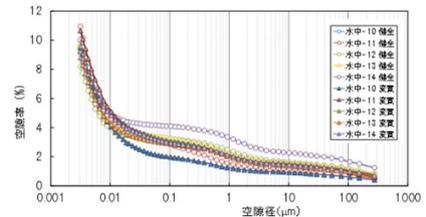
(b) 2021 年度気中養生



(c) 2021.年度水中養生



(d) 2022 年度気中養生



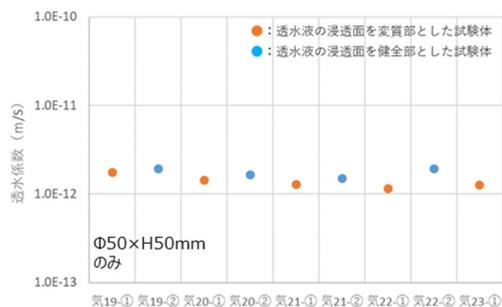
(e) 2022 年度水中養生

(a) 2020 年度 (初期値)

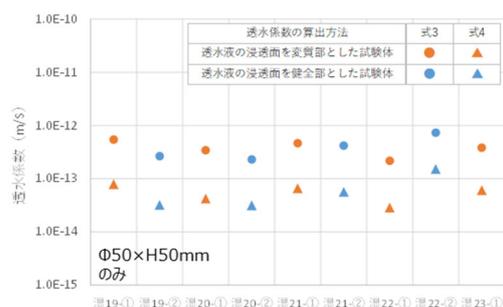
図 4.3-6 養生期間ごとの空隙率分布

図 4.3-7 及び図 4.3-8 に透水試験の結果を示す。透水試験については、既往の研究から、HFSC が低透水性材料であることがわかっていたため、ここではコンクリート工学一般的に適用されるアウトプット法、インプット法その他、特に低透水性の地盤材料を対象に基準化された試験法 (JGS 0312-2018) の 3 種類を適用した。

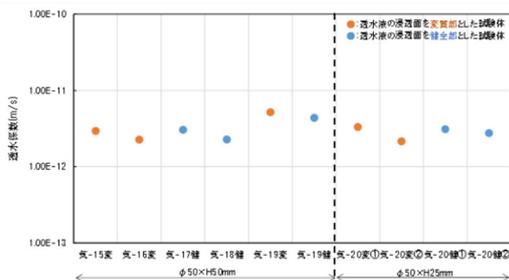
今後の透水試験を継続的に実施する観点から供試体高さを変えた試験 (5 cm 及び 2.5 cm) も実施したが、それは結果にほとんど影響しない。得られた透水係数は、気中養生供試体が 10^{-12} m/s オーダー、水中養生供試体が $10^{-13} \sim 10^{-14}$ m/s オーダーで、2021 年度と 2022 年度の結果にオーダーが変わるような差はなく養生期間の影響は物理・力学物性と同様現時点では大きなものではないと考えられる。ただし、気中養生と水中養生では、透水係数の 1~2 オーダー程度の差があり、これは前述の空隙構造の変化と関連する可能性が高いと考えられる。



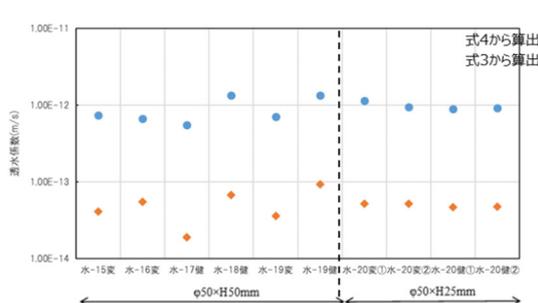
(a) 2021 年度気中養生



(b) 2021 年度水中養生



(c) 2022 年度気中養生



(d) 2022 年度水中養生

図 4.3-7 アウトプット法及びインプット法による透水試験結果

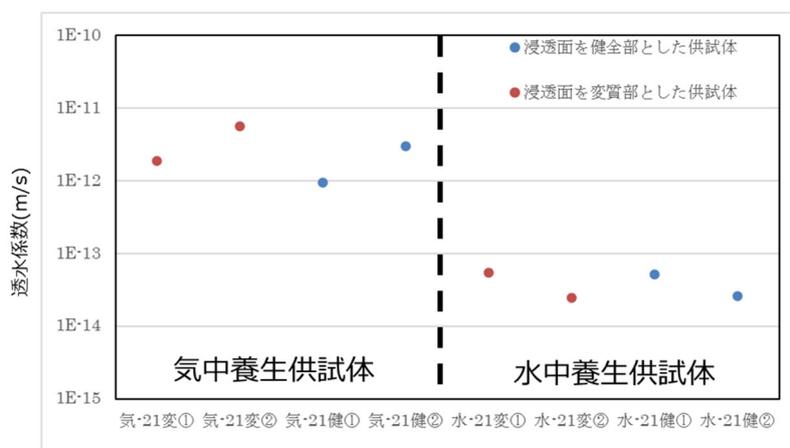


図 4.3-8 地盤工学会基準 (JGS 0312-2018) に基づく透水試験結果 (2022 年度)

(2) 化学組成などの変化について

図 4.3-9 に元素マッピングの結果の例を示す。気中養生試料において、炭酸化（中性化）領域に相当する範囲では、CaO 濃度が試料内部より明らかに低下しているが、これは大気中の二酸化炭素との反応により、Ca 成分を含有する水和物が炭酸化し炭酸カルシウムに変化するとともに、組織が粗な状態となり空隙が増加したため CaO 濃度が低下して見えているものと推定している。ただし、生成した炭酸カルシウムが濃集するような状況は現状確認できていない。SO₃ 濃度は、炭酸化領域で濃度が低下していることがわかり、これは SO₃ を含む水和物の分解が生じているものと解釈している。

水中養生試料については、供試体境界外部に薄い沈殿層が見られ、これは炭酸カルシウムの層と考えられる。また、気中供試体に比べ極薄いものの、炭酸化領域において、CaO 濃度の低下が

見られた。このため、この範囲では Ca が養生水へ浸出し供試体境界外部に沈積しているものと考えられる。また、MgO、Na₂O 及び K₂O は、表層から 0.5 mm 程度で濃度が高い範囲が見られること、気中養生試料では、0.2%以下であった Cl 濃度が、水中養生試料では、0.2~0.4%程度の濃度となっており気中養生試料よりも高くなっていることから、これらは養生水である地下水がコンクリート供試体内部へ浸透したものと考えられる。

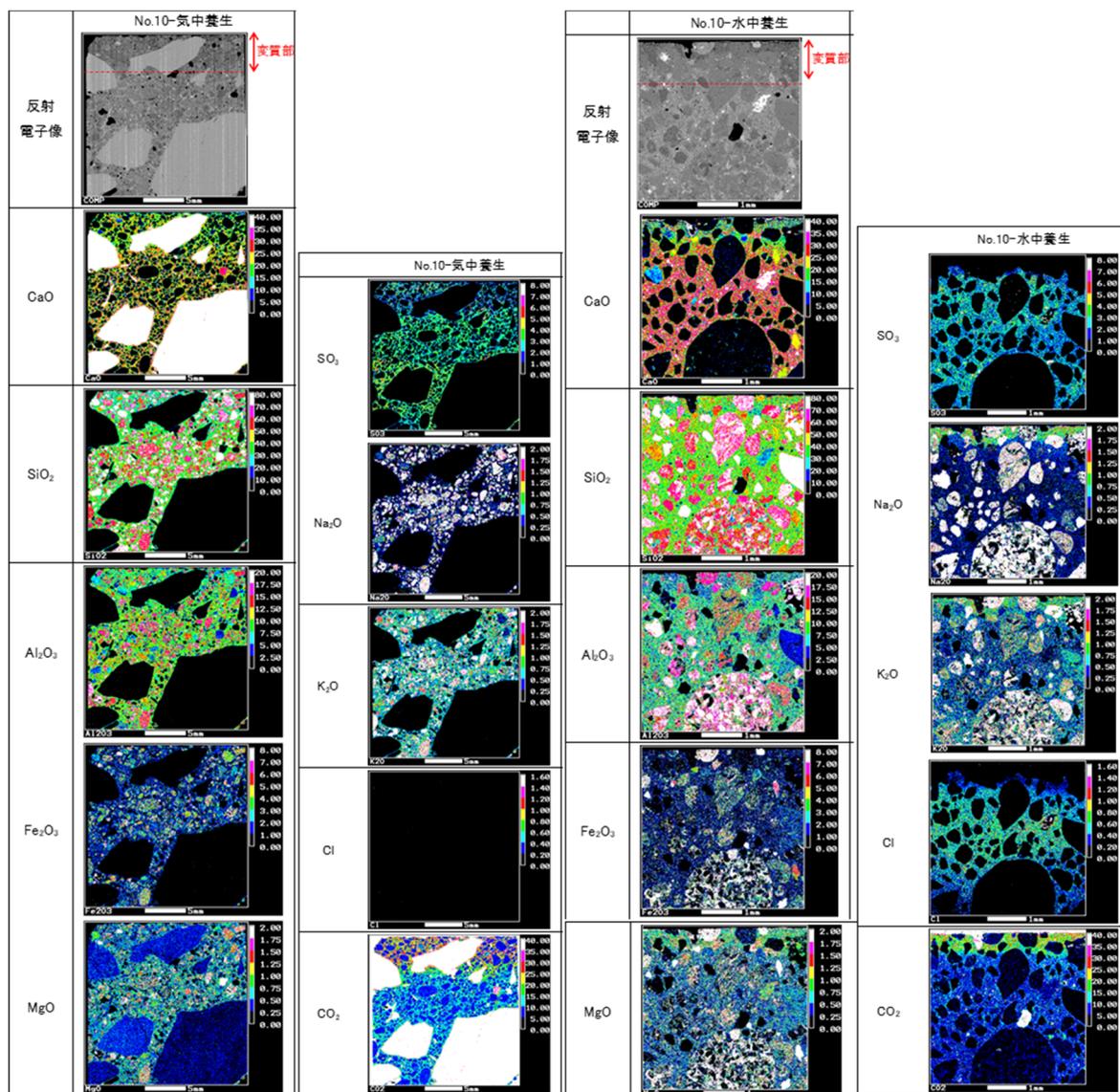
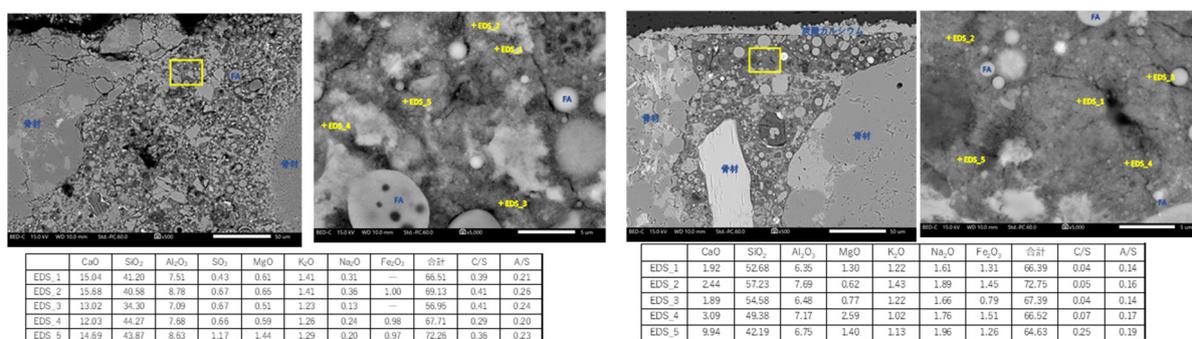


図 4.3-9 2022 年度に実施した元素マッピングの結果の一例

図 4.3-10 に SEM/EDS 分析結果の例を示す。炭酸化（中性化）領域は、健全部に比べ間隙（暗い部分）が多くなっており、先の元素マッピング同様微細組織が粗な状態であることがわかる。この領域の C-S-H の Ca/Si モル比は、0.3 程度とかなり小さい。HFSC コンクリート中の C-S-H の C/S は、健全部においても C/S=1.0~1.2 程度であり、OPC セメントコンクリート (C/S=2.0) よりも C/S の低い C-S-H が生成していること、炭酸化により体積が増加する水酸化カルシウムも存在しないことから、C-S-H の炭酸化で組織が粗となったものと考えられる。健全部は、いずれの試料も緻密な試料であり、また、残存する未水和セメントの割合も多くないことから水和も進

んだ状態であった。一方、観察されたフライアッシュ粒子は、表面に水和層が見えるものの、未水和のフライアッシュ粒子も多く、反応率としてはそれほど高くないと推測される。HFSC の場合、初期段階でシリカフェームが反応し、水酸化カルシウムの消費と間隙水の pH の低下が生じるため、フライアッシュの反応自体は停滞することが考えられるが、今回の結果はこのことを裏付けるものである。

水中養生試料については、炭酸化（中性化）領域では、供試体表層に炭酸カルシウム層が確認された一方、内部では炭酸カルシウムの生成は少なかった。試料表面に溶出した Ca が養生水中の炭酸イオンと反応・沈殿し、炭酸カルシウム層を形成したと考えられる。また、気中養生供試体の炭酸化領域同様、C-S-H の C/S が低く、Ca が極端に少なくなっており、水中養生の表層においては、C-S-H が溶解し、Ca が外部へ移動したことにより、組織が粗な状態になっているものと考えられる。また、Na、K の濃度分布において、濃度の高い範囲が確認され、地下水からの成分移動であることが推察される。健全部については、気中養生の健全部の状態との違いはなく、緻密な組織となっていた。また、C-S-H の C/S も気中養生の健全部と同程度の値であった。



(a) 気中養生試料 No.10

(b) 水中養生試料 No.10

図 4.3-10 2022 年度に実施した SEM/EDS 分析結果の一例

(3) まとめ

気中養生試験体と水中養生試験体の相違点をまとめて表 4.3-1 及び表 4.3-2 に示すが、3 ヶ年の本調査研究により、コンクリート支保工がさらされる環境条件の違い（坑道内通気中か地下水中か）による炭酸化（中性化）の発生メカニズムやその化学的特性に関する知見が得られるとともに、通気にさらされている場合、炭酸化（中性化）がコンクリート供試体の空隙構造に大きな変化を及ぼすこと、それが物理・力学・水理物性に影響を与えることが示され、HFSC コンクリート支保工の長期的な物性変化モデル構築のための基礎的な知見が整備できた。

また、調査方法として、炭酸化領域の範囲を把握する上では、フェノールフタレインを塗布するという簡便かつ人為差がない方法で十分であること、HFSC のような緻密なコンクリートを対象とした場合の透水試験法についての適用性なども把握できつつあり、HFC の長期的な物性変化モデル構築に必要な調査技術の整備が進んだ。

一般的には、コンクリート支保工に求められている性能が短期強度であり、かつ HFSC のような地層処分のために開発したコンクリート材料では長期的な変化に関する既往の研究事例も少ないことから、今後も、地層処分想定される環境下において、長期材齢における吹付けコンクリートの特性や変質に関するデータの蓄積を今後も進めることが、回収可能性維持期間の検討結果の信頼性向上の観点から重要と考える

表 4.3-1 物理・力学・水理物性に関する気中養生試験体と水中養生試験体の相違点

項目		気中養生試験体と水中養生試験体の相違点
一軸圧縮強度		圧縮強度および静弾性係数：気中<水中 ⇒セメントの水和反応による緻密化、中性化の影響（気中>水中）
弾性波測定	速度	P波速度およびS波速度：気中<水中 ⇒セメントの水和反応による緻密化、試験体の含水状態による伝播速度の差（気体中の透過速度<液体中の透過速度）
	弾性係数	動せん断弾性係数および動弾性係数：気中<水中 ⇒P波速度およびS波速度から算出するため、速度に依存
圧裂試験		割裂引張強度：気中<水中 ⇒セメントの水和反応による緻密化
透水試験（試験継続中）		透水係数：気中>水中 ※予備検討の結果から推察 ⇒セメントの水和反応による緻密化
空隙率測定		健全部の空隙率：気中=水中 0.01~0.1μmの空隙：気中では空隙が存在、水中ではほとんどない 0.01μm以下の空隙：気中<水中 ⇒セメントの水和反応による緻密化

表 4.3-2 炭酸化（中性化）及び化学変化に関する気中養生試験体と水中養生試験体の相違点

項目	気中養生試験体	水中養生試験体
中性化深さ	平均値：5.72mm ⇒炭酸化による変質	平均値：0.6mm ⇒溶脱による変質
EPMAによる元素濃度分布	CaO：濃度低下(健全部>変質部) SiO ₂ ：濃度低下(健全部>変質部) ⇒組織が粗な状態となったため SO ₃ ：濃度低下 ⇒炭酸化によるSO ₃ 水和物の分解 CO ₂ ：濃度上昇(健全部<変質部) ⇒水和物の炭酸化	CaO：濃度低下(健全部>変質部) ⇒養生水へ浸出 濃度上昇(健全部<変質部)： MgO,Na ₂ O,K ₂ O,Cl：濃度上層 (表層のみ) ⇒地下水成分の浸透
SEM/EDS分析	変質部は健全部より粗な状態 C-S-Hの炭酸化が生じている ⇒変質部のC/Sの低下 試料内部にCaCO ₃ が生成	変質部は健全部より粗な状態 Caの溶脱が生じている ⇒変質部のC/Sの低下 試料外部にCaCO ₃ 層が生成

4.3.2 実際の地下深部の坑道で生じる事象の整理

回収可能性維持期間が天然バリアに期待する安全性への影響を検討するためには、坑道周辺地質環境に関する長期的な影響を把握する必要があるため、3 ヶ年のという期間内では原位置試験などで有意な結果を得ることも困難であることから、今フェーズでは解析的にそれを検討することとした。また、4.3.1 同様、実際の地質環境を対象とすることを前提としことから、多岐にわたる既往の調査研究成果が存在する幌延深地層研究センター地下施設内の深度 350 m 坑道周辺地質環境を事例とすることとした。なお、対象となる地質環境は、新第三紀の堆積軟岩で構成されており地下水中に多量の溶存ガス（主にメタン）が賦存する特徴を有していることから、後述するようにこれらの特徴を最大限考慮したモデル化・解析を指向した。一方で、特に多量の溶存ガスの影響を考慮するための多成分二相流解析を実施するため、それらを勘案し以下のようにステップバイステップでの技術開発を進め、最終的には開放期間～坑道埋戻し後の回復までの解析結果に基づき安全評価への影響に関する概念的な検討を実施した。

2020 年度：幌延を事例とした坑道周辺地質環境概念モデルの構築及びそれを踏まえた予察的解析（2 次元での多成分 2 相流解析の実施可能性の確認）

2021 年度：2020 年度構築した解析モデルを用い、EDZ についてより現実に近い条件設定を設定した上で、坑道維持状態の期間を最大 1,000 年とした解析を実施

2022 年度：2021 年度の坑道維持状態の解析結果を用い、ある時間に埋め戻されたのちの坑道周辺環境回復状況に関する解析を実施するとともに、その結果に基づき地層処分システムへの影響に関する概念的な検討を実施する

以降に得られた成果について概説する

(1) 坑道周辺地質環境の長期変化解析について

前述のように事例とした幌延深地層研究センター地下施設では、多種多様な調査研究が行われており、坑道周辺部の地質環境に関する様々な知見が得られている。本解析評価では、幌延深地層研究センター深度 350 m 坑道周辺（図 4.3-11）を事例として取り上げるとともに、坑道周辺部に発生する初期の地質環境と異なる特性を有する EDZ（掘削損傷領域）に特に着目するとともに、これまでほとんど行われていなかった 2 次元での多成分 2 相流解析を実施するための既往の研究成果の調査を行い、その結果に基づく坑道周辺地質環境の概念モデルを構築した（図 4.3-12）。概念モデル構築のポイントは以下のとおりである。

- ・ 坑道壁面から 0.8 m（吹付けコンクリートの厚さ 0.16 m も含む）以内に掘削時の応力再配分によって、割れ目が発生した。坑道壁面から 0.25 m 以内の割れ目は相互に連結していて、大きな開口量を持つ割れ目も観察された。
- ・ 坑道掘削に伴って壁面近傍には、せん断が成因で無い割れ目が多数発生していた。
- ・ 弾性波速度の分布に基づいて評価した場合、掘削損傷領域の幅は、岩盤面から最大 1m 程度となっていた。
- ・ 壁面から 0.4 m の範囲（吹付けコンクリートの厚さは含まれていない）では、引張割れ目が発達していて、健岩部と比較して透水係数は 4～5 桁増加した。また、引張割れ目が発達した領域よりも深い箇所でも、透水係数は 1～2 桁増加した。
- ・ 坑道掘削後約 2 年間、坑道周辺岩盤の透水係数に経時変化は見られない（モンテリー岩盤研究所の結果とは異なった結果）。
- ・ 岩盤の構成は、坑道壁面から深度約 1 m の範囲の EDZ と、それ以深の母岩に大別できる。
- ・ 母岩は浸透率が 10–18 m² 程度と小さく、地下水にはメタン（CH₄）、二酸化炭素（CO₂）が溶存している。これらが脱ガスすることにより、母岩内に不飽和領域が形成されていると考

えられる。

- EDZ は損傷亀裂を有しており、浸透率は母岩の 105 倍にも達する。損傷亀裂の影響により、負圧に対する保水性は母岩よりも小さくなると考えられる。
- なお、地下水や溶存ガスは、圧力勾配により坑道に向かって流れると考えられる。

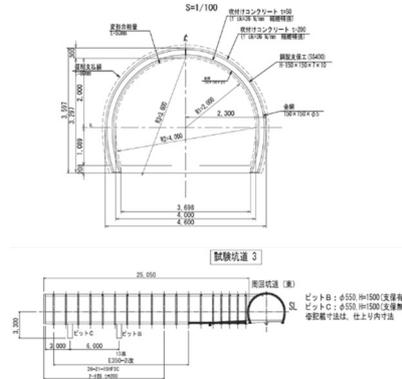


図 4.3-11 今回の解析で事例とした幌延深地層研究センター深度 350 m 坑道（試験坑道 3）

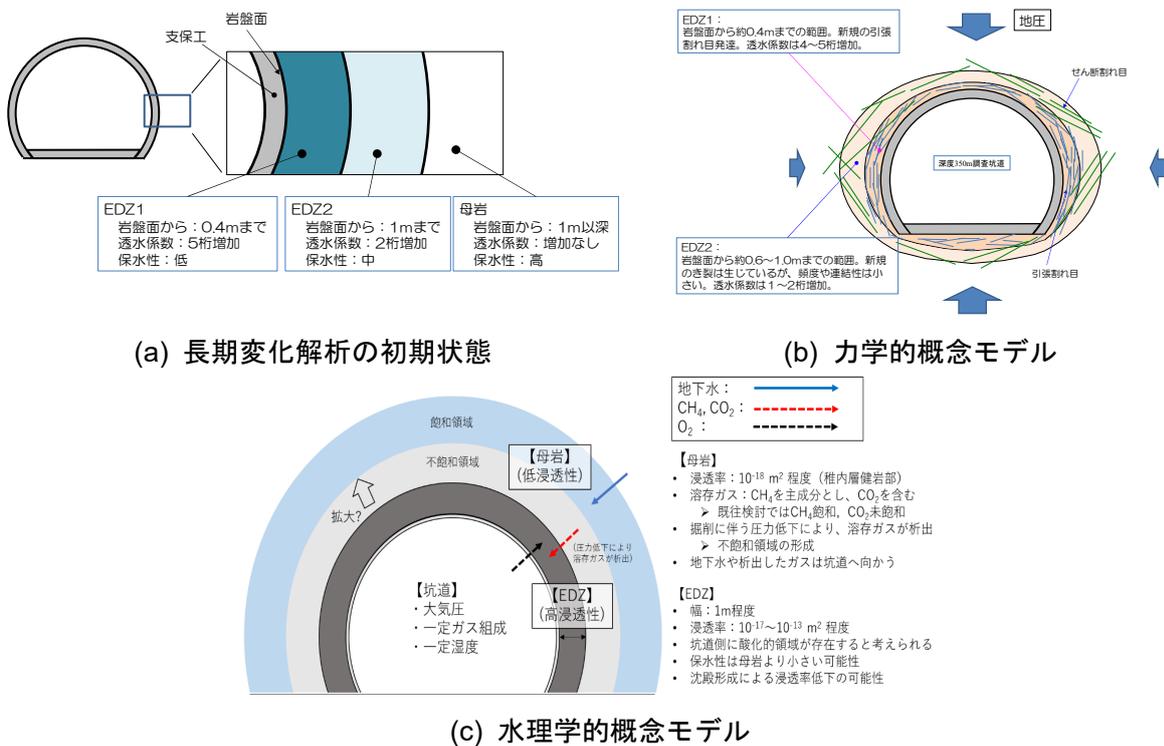


図 4.3-12 本解析のために構築した坑道周辺地質環境概念モデル（2020 年度）

その上で、EDZ を考慮し多量の溶存ガスが賦存する地質環境を対象とした長期的な解析評価を行うため、ここでは以下の方法を採用した。

- 力学的長期変化解析により周辺岩盤の透水係数や弾性係数や透水係数などの経時変化を算定 (①)
 - ①の解析結果を、水理学的長期変化解析（気液二相流を考慮した長期変化解析）の解析条件として引き渡す方法で坑道周辺地質環境の長期変化を考慮した解析を実施 (②)
- 具体的には、後述するように力学的長期変形解析で得られた透水係数変化の分布域を陽にモデ

ル上に考慮するとともに、その変化の程度に対応する絶対浸透率、比貯留率を設定し、気液 2 相流解析により坑道周辺岩盤中の長期的な水理場やガスの分布状況を解析評価した。

(a) 力学的長期変化解析

力学的長期変化解析は、前述の通り EDZ における物性の変化やその範囲の拡大の有無を評価することを主目的として実施した。なお、解析は受注者開発の解析コードを使用している。

図 4.3-13 に解析の概要を示す。堆積軟岩で岩石自体の有効空隙率も 30%程度あるため EDZ の物性変化や拡大を引き起こす坑道周辺部の力学的長期変形(クリープ)を考慮するとともに、EDZ や母岩中の亀裂(引張亀裂、せん断亀裂)に作用する応力変化と透水係数変化の関係は室内試験を用いて設定した。なお、水理学的長期変化解析では、絶対浸透率は母岩のそれに力学解析で得られた透水係数の変化割合を乗じる形で表現し、比貯留率はパラメータ設定の式に含まれる剛性率の値を力学的長期解析で得られた各要素のコンプライアンスを用いて算定した。

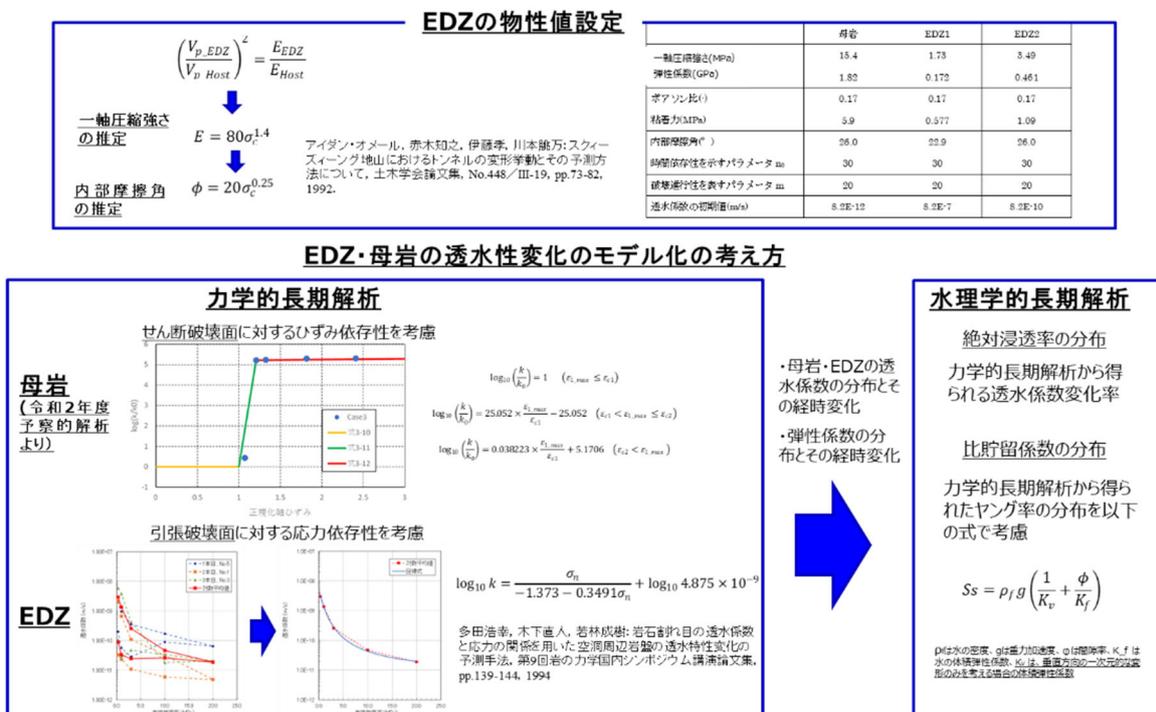


図 4.3-13 力学的長期変化解析の概要

解析モデル・メッシュと設定した解析ケースの例を図 4.3-14 及び表 4.3-3 に示す。Case4、Case5 の長期クリープ解析に必要なパラメータは、幌延の堆積岩の室内試験結果から設定しているが、Case5 は長期変形による影響が最も大きくなる解析ケースとなる。以下に本解析で得られた主な知見を示す。

- 弾性係数(図 4.3-15)については、Case4 では、掘削後 1 年までの間に EDZ1 全体で低下が生じ、特に底盤部の EDZ1 が顕著である。その後、底盤部の EDZ1 において弾性係数が低下する領域が徐々に拡大したが、天端部や側壁部の EDZ1 ではあまり変化は起きていない。Case5 では、掘削後 1 年までの間に底盤部の EDZ1 と EDZ2 の弾性係数の低下が顕著に生じ、また側壁部や天端部の EDZ1 でも弾性係数の低下が見られた。その後も、底盤部では EDZ1 と EDZ2 共に低下域が拡大し続けるとともに、さらに、側壁部の EDZ1 と EDZ2 の境

- 界付近でも弾性係数低下領域が広がっている。
- 透水性係数(図 4.3-16)については、Case 4 では、掘削後 1 年間で、EDZ1 全体と隅角部の EDZ2 において透水性係数の増加が見られ、掘削後 50 年間までに底盤部や側壁部の EDZ2 でも透水性係数の増加が見られたが、その後の経時変化は小さくかつ母岩部では変化がなかった。一方、Case5 では、Case4 と同様掘削後 1 年間で EDZ1 全体、隅角部と底盤部の EDZ2 において透水性係数の増加が見られ、クリープ変形が早いため Case4 と比較すると透水性係数の増加のタイミングも速い。そして、50 年まで底盤部や側壁部の EDZ2 の透水性係数が増加した領域が拡大したが、Case4 同様その後の経時変化はあまり見られず、母岩部での透水性係数の増加はない。なお、幌延の地下施設では、坑道周辺岩盤の透水性係数の経時変化を調べる調査が行われたが経時変化は認められておらず、その計測点と整合する側壁部の EDZ1 の要素を取り出し透水性係数の経時変化を確認した。その結果、両ケースとも壁面近傍の EDZ1 内の要素の透水性係数は掘削後 1 年経過時に母岩の透水性係数の 1×10^5 倍から 1.4×10^5 倍程度まで増加するが、その後経時変化はほとんどなく、定性的には本解析の経時変化と整合している。
 - 天端部と側壁部の支保工の着目要素における最大主応力の経時変化(図 4.3-17)では、Case4 では、1,000 年経過時に天端部の支保工の最大主応力は 18 MPa、側壁部は 11 MPa、Case5 では、天端部の最大主応力は 20 MPa、側壁部では初期段階で 11 MPa 程度となった。幌延の地下施設の吹付けコンクリートは設計基準強度が 36 MPa であり、支保工が健全であれば破壊にクリープ変形が生じたとしても破壊に至る可能性が小さいと考えられる。

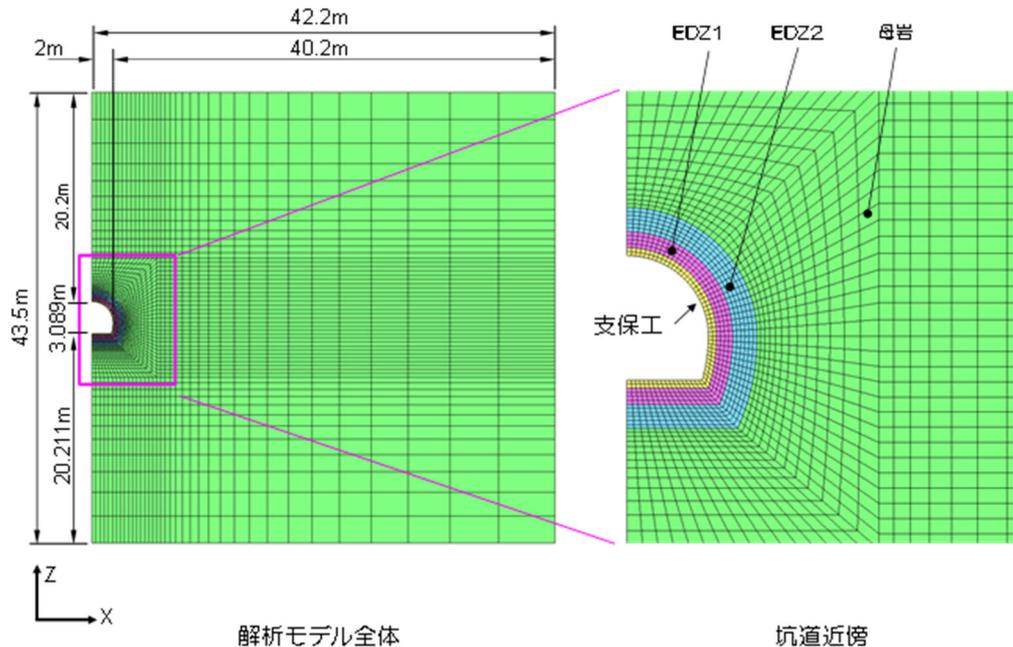


図 4.3-14 力学的長期変化解析の解析モデルとメッシュ

表 4.3-3 設定した解析スケールの例

	力学的長期変化解析*	水理学的長期変化解析		備考
	力学的因子：クリープ変形	水理学的因子： 支保工の有無・EDZの考慮		
Case4	標準的な場合 ($n_0=30, m=20$)	支保工 なし	EDZ1 省略、 EDZ 2 考慮	クリープ変形が標準的なケース
Case5	クリープ変形が速い場合 ($n_0=18, m=18$)	支保工 なし	EDZ1 省略、 EDZ 2 考慮	クリープ変形が速いケース

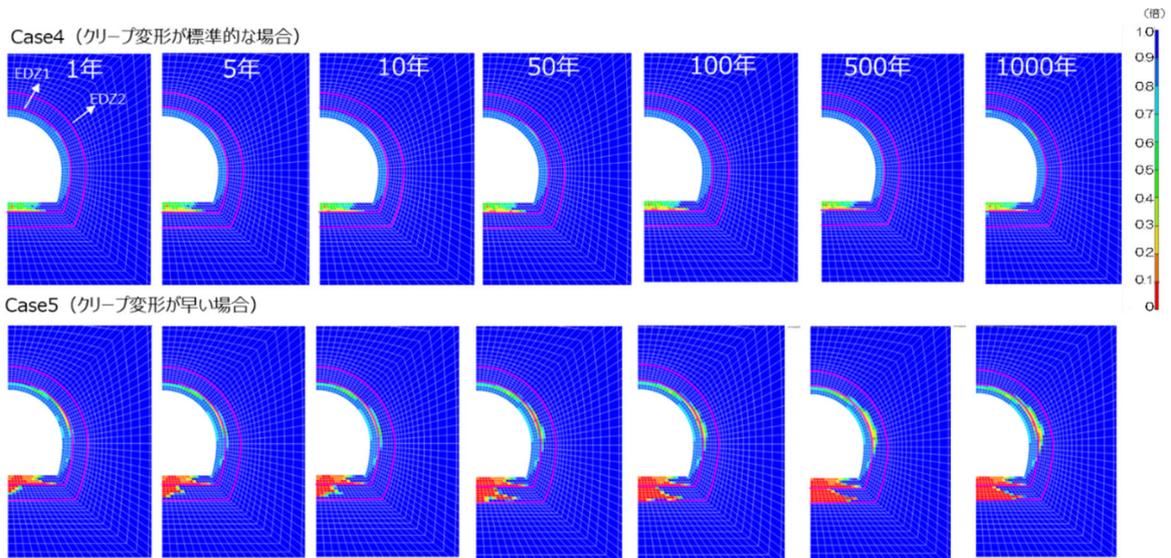


図 4.3-15 坑道周辺のコンプライアンスの経時変化（初期値からの変化率）

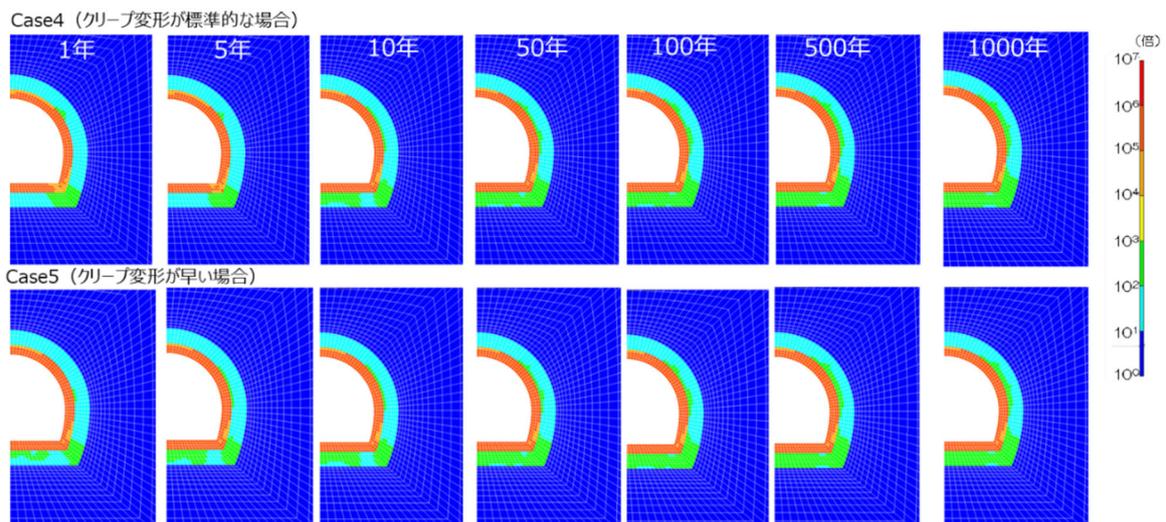
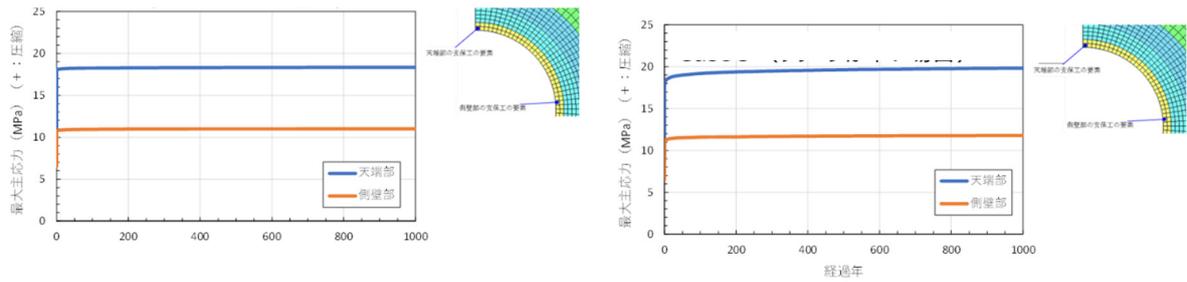


図 4.3-16 坑道周辺の透水係数の経時変化（初期値からの変化率）



(a) Case 4 (クリープが遅い場合)

(b) Case 5 (クリープが早い場合)

図 4.3-17 支保工応力の経時変化

(b) 水理学的長期変化解析

本解析は、(a) の力学的長期変化解析で得られた弾性係数、透水係数の変化などを受けた形でパラメータを設定した上で、図 4.3-18 のような時系列で坑道開放期間がその後の地質環境回復に及ぼす影響を定量的に把握するために実施した。

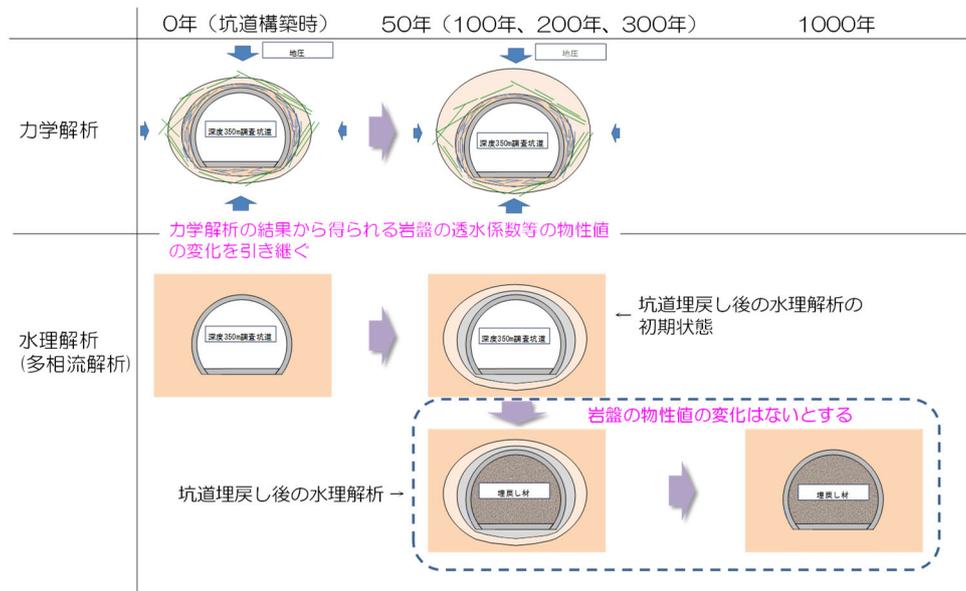


図 4.3-18 坑道維持期間及び埋戻し後の回復状況に関する解析の考え方

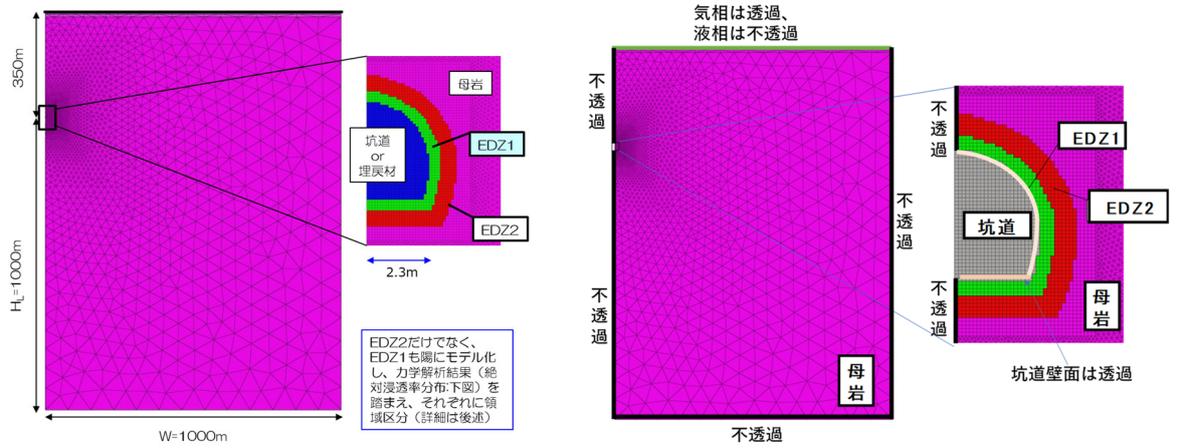
用いた解析コードは、国際的に広く利用されている TOUGH3 の TMVOC モジュール（多成分三相系の流体解析コード）を用いた。本解析コードは、以下の相及び成分について、多孔質媒体中の浸透流、水相への溶解及び水相からの気化並びに溶解物質の移流分散などの計算が可能である。

取り扱える相：水相、気相及び非水溶性液体（NAPL）

取り扱える成分：水、非凝縮性ガス（取り扱う圧力、温度の範囲内で、液化しないガス； Non-Condensable Gases； NCG）及び揮発性有機化合物(water-soluble Volatile Organic Chemicals； VOC)。水及び VOC については、蒸気（気体）も考慮可能

なお、本解析では、相として水及び NCG のみを考慮し、うち NCG の成分としては、 CH_4 、 CO_2 、 O_2 、 N_2 を考慮している。

図 4.3-19 は、最終年度である 2022 年度の解析モデルと初期条件、設定した境界条件及び力学的長期変化解析結果に基づき最終的に設定した EDZ の各物性である。図 4.3-20 には EDZ、母岩及び埋戻し材の水分特性曲線などを示す。



材料名	初期圧力 (Pa)	温度 (°C)	初期飽和度
母岩	地下水位 G.L. -10m 時の静水圧 $\rho g(350 - 10) - \rho g z + 101300$	25.5	1.0
EDZ1			
EDZ2	ここで、 ρ は水の密度 1.0 Mg/m ³ 、 g は重力加速度 9.81 m/s ² 、 z は鉛直方向の位置 (m) であり、地表面 $z=350$ m を基準とする。		

材料名	初期溶解量 CH ₄ (モル分率)	初期溶解量 CO ₂ (モル分率)	初期溶解量 O ₂ (モル分率)	初期溶解量 N ₂ (モル分率)
母岩	(初期圧力)/(ヘンリー定数) × 0.922	(初期圧力)/(ヘンリー定数) × 0.0177	0	0
EDZ1				
EDZ2				

区分名	圧力 (Pa)	飽和度	気相の CH ₄ (モル分率)	気相の CO ₂ (モル分率)	気相の O ₂ (モル分率)	気相の N ₂ (モル分率)
地表面	101300	0.0	0	0	0.21	0.79

区分名	圧力 (Pa)	飽和度	気相の CH ₄ (モル分率)	気相の CO ₂ (モル分率)	気相の O ₂ (モル分率)	気相の N ₂ (モル分率)
坑道	101300	0.0	0	0	0.21	0.79

(a) 解析モデル及び初期条件

(b) 境界条件

絶対浸透率[m ²]			
区分	抽出した要素	坑道掘削から 0-10年	坑道掘削から 10-300年
EDZ1①	要素68(①)	4.24E-13	4.41E-13
EDZ1②	要素57(②)	1.83E-13	1.81E-13
EDZ1③	要素22(③)	1.08E-13	1.15E-13
EDZ1④			
EDZ1⑤			
EDZ1⑥			

比貯留係数[1/m]			
区分	抽出した要素	坑道掘削から 0-10年	坑道掘削から 10-300年
EDZ1①	要素68(①)	1.05E-4	1.05E-4
EDZ1②	要素57(②)	9.65E-5	9.93E-5
EDZ1③	要素235(⑤)	8.94E-5	9.27E-5
EDZ1④			
EDZ1⑤			
EDZ1⑥			
EDZ1⑥	要素220(⑥)	5.83E-5	6.22E-5

(c) 絶対浸透率 (EDZ1)

(d) 比貯留係数 (EDZ1)

絶対浸透率[m ²]			
区分	抽出した要素	坑道掘削から 0-10年	坑道掘削から 10-1000年
EDZ2①	要素335(①)	1.65E-16	1.86E-16
EDZ2②			
EDZ2③	要素322(⑤)	1.11E-16	1.32E-16
EDZ2④			
EDZ2⑤			
EDZ2⑥			
EDZ2⑦	要素301(⑦)	9.69E-17	1.01E-16
EDZ2⑧			
EDZ2⑨			

比貯留係数[1/m]			
区分	抽出した要素	坑道掘削から 0-10年	坑道掘削から 10-1000年
EDZ2①	要素335(①)	4.12E-5	4.23E-5
EDZ2②			
EDZ2③	要素322(⑤)	2.17E-5	3.14E-5
EDZ2④			
EDZ2⑤			
EDZ2⑥			
EDZ2⑦	要素301(⑦)	2.15E-5	2.15E-5
EDZ2⑧			
EDZ2⑨			

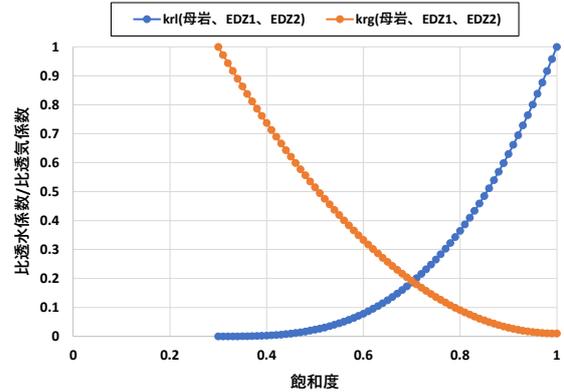
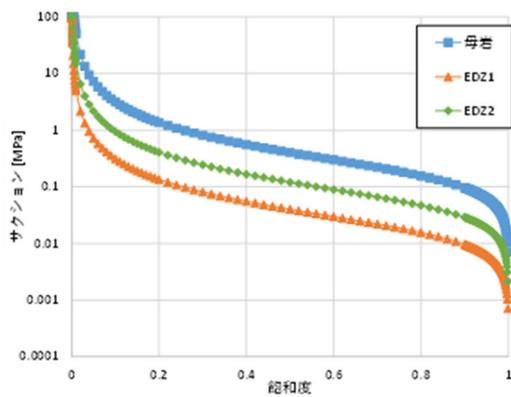
(e) 絶対浸透率 (EDZ2)

(f) 比貯留係数 (EDZ2)

図 4.3-19 解析に用いたモデル、初期条件、境界条件及びパラメータ

材料名	α [1/Pa]	λ
母岩	5.0×10^{-6}	0.455
EDZ2	1.667×10^{-5}	
EDZ1	5.0×10^{-5}	

(a) EDZ 及び母岩の水分特性曲線 (van Genuchten モデル) のパラメータ

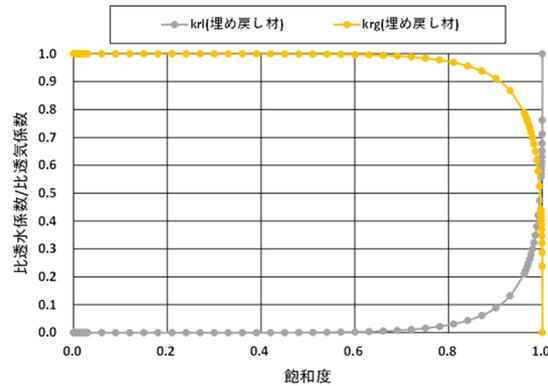
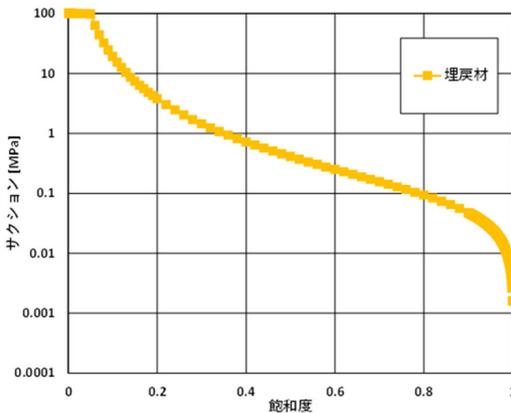


(b) EDZ 及び母岩の水分特性曲線 (van Genuchten モデル)

(c) EDZ 及び母岩の比透気係数 (Mualem-van Genuchten モデル)

材料名	α [1/Pa]	λ
埋戻し材	1.15×10^{-5}	0.299

(d) 埋戻し材の水分特性曲線 (van Genuchten モデル) のパラメータ



(e) 埋戻し材の水分特性曲線 (van Genuchten モデル)

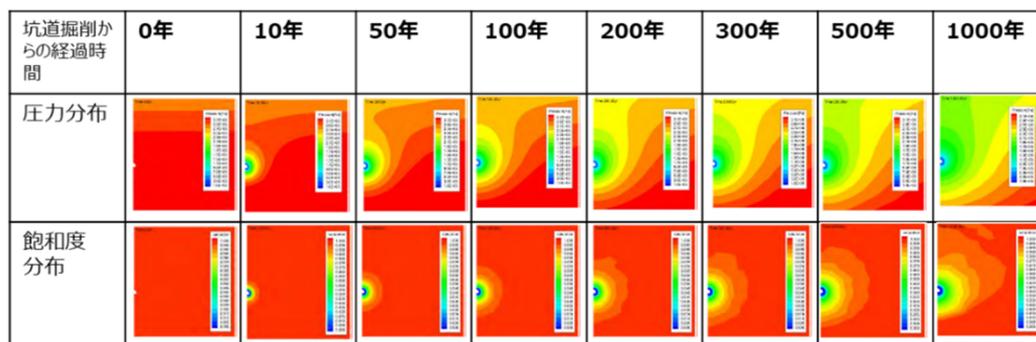
(f) 埋戻し材の比透気係数 (Mualem-van Genuchten モデル)

図 4.3-20 解析に用いた EDZ、母岩及び埋戻し材の物質移動特性

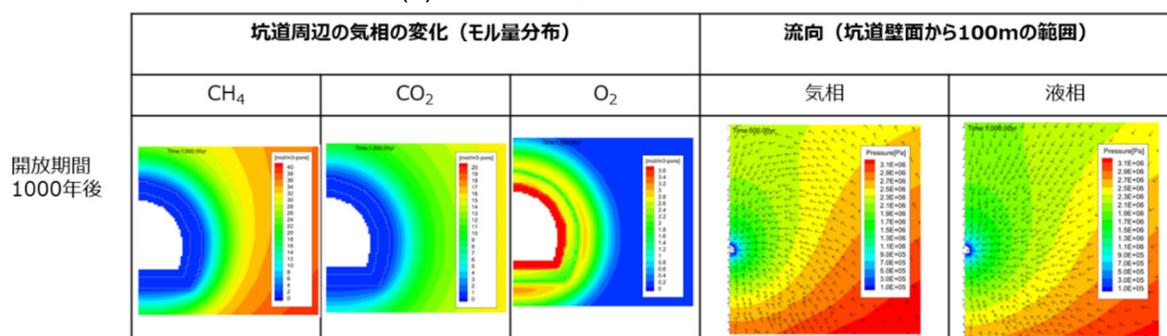
以下に解析で得られた主な知見を示す。

- 坑道維持状態の水理学的長期変化解析結果として、岩盤のクリープ変形が最も大きい場合の1,000年間の解析結果を図 4.3-21 に示すが、時間の経過とともに、坑道周辺の圧力低下領域が拡大し、坑道周辺の飽和度低下領域が坑道を中心とする同心円状に拡大した。また、時間

の経過とともに、坑道周辺の間隙に含まれる気相 CH_4 モル量、気相 CO_2 モル量が増加し、その領域が坑道外側の岩盤へと拡大した。これは、高压の地下水中に溶解していたガスが、坑道周辺の圧力低下領域の拡大によって低压になることにより気化する領域が増えたためと考えられる。加えて、坑道掘削後、坑道近傍の EDZ に気相の O_2 が坑道から侵入し、それが徐々に岩盤へと拡大していく。なお、EDZ は、 CH_4 と CO_2 が気相と液相ともにほぼ存在しないが、 O_2 は存在している。これは、気化した CH_4 及び CO_2 が絶対浸透率が低い岩盤から絶対浸透率が高い EDZ へ移動するよりも、坑道から絶対浸透率が高い EDZ に侵入しやすいことを示していると考えられる。



(a) 圧力及び飽和度の時間変化



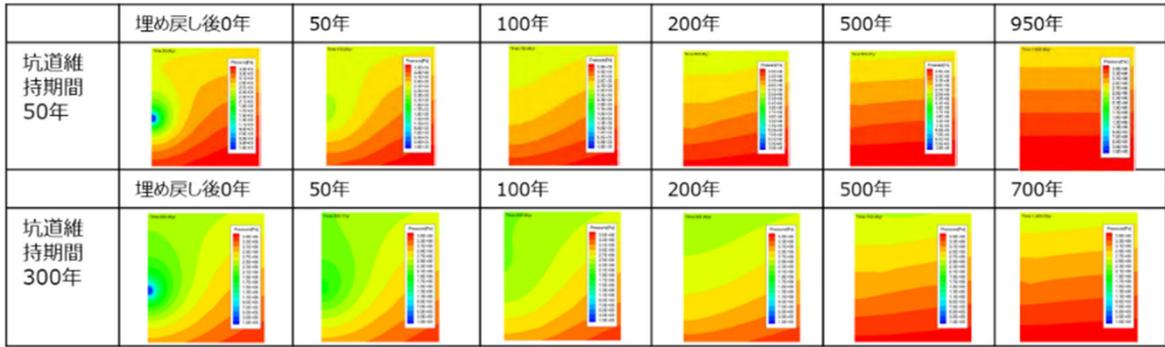
(b) 開放期間 1000 年後の気相と流向

図 4.3-21 坑道維持を継続した場合の坑道周辺地質環境の変化

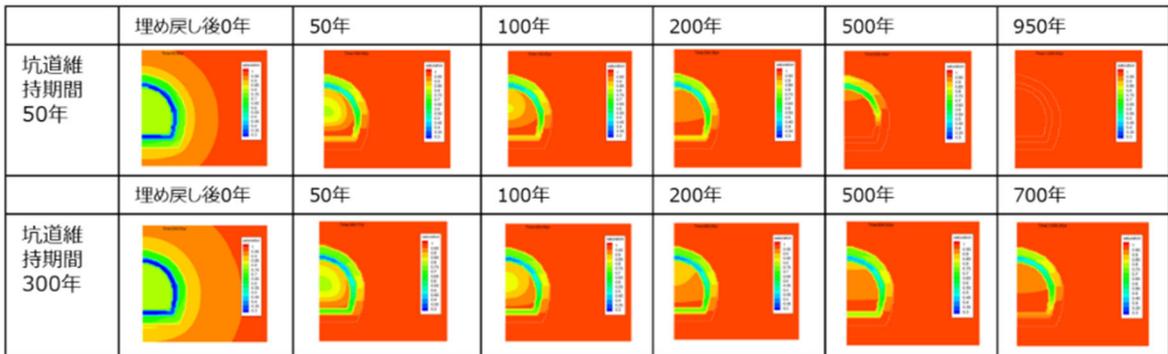
- 坑道開放から 50 年、100 年、200 年、300 年後のそれぞれの状態を初期条件とし、坑道埋戻し後の水理学的長期変化解析を実施した結果 (図 4.3-22) では、圧力については、時間の経過とともに坑道周辺の圧力が回復し、坑道開放期間が違っていても、同じ埋戻し状態の期間において、圧力は、オーダーが変わるほどの差は無いと考えられる。飽和度についても、不飽和領域は徐々に減少するが、EDZ の飽和度の上昇は、埋戻し材よりも遅れることが特徴であり、特に EDZ の上部は不飽和領域が遅くまで残りやすい。また、EDZ2 よりも EDZ1 の方が飽和度の上昇が遅い。飽和する順番が埋戻し材、EDZ2、EDZ1 の順番になる理由は、同じ飽和度では、サクション圧の絶対値が、埋戻し材 > EDZ2 > EDZ1 であり、この順番で水を吸いやすいためである。坑道開放期間が違っていても、同じ埋戻し状態の期間において、飽和度は、オーダーが変わるほどの差は無い。 CH_4 及び CO_2 については、埋戻しからある程度の期間、例えば、50 年であれば 200 年まで、300 年であれば 500 年までの間は、EDZ1 及び EDZ2 内の気相及び液相の合計 CH_4 モル量及び合計 CO_2 モル量が増加している。これは、母岩から浸潤してきた CH_4 を含む液相が圧力の低い坑道周辺に移動し、脱ガスした CH_4 が EDZ1 及び

EDZ 中に移動するためと考えられる。EDZ にて増加した気相及び液相の合計 CH_4 モル量及び合計 CO_2 モル量は、徐々に減少しており、気相の CH_4 及び CO_2 が液相に再溶解し拡散していると考えられる。 O_2 については、埋戻しから 20 年後にかけて、埋戻し材及び EDZ2 内の気相及び液相の合計 O_2 モル量が増加している。この増加は、EDZ1 や坑道下部の岩盤の O_2 が移動してきたことによるものと推察される。50 年以降は埋戻し材及び EDZ2 内にて気相及び液相の合計 O_2 モル量が減少しており、気相の O_2 が液相に再溶解し拡散していると考えられる。なお、液相に再溶解し状態 O_2 は坑道の上方に移動する。

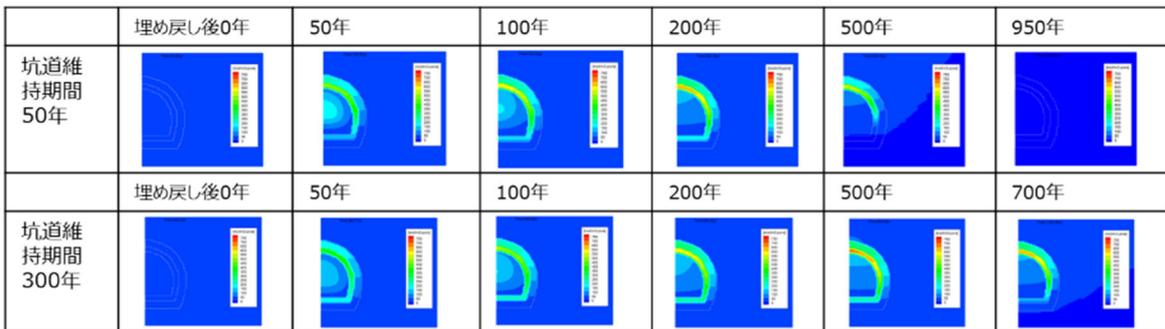
以上の結果をまとめると、坑道開放期間が長いほど、静水圧分布、飽和状態に戻るなどの坑道周辺の回復が遅くなる結果となった。これは、坑道開放期間が長いほど坑道周辺の岩盤の不飽和領域が大きく、飽和になるまでの時間がかかるためである。また、坑道開放期間が長いほど気相のガスが坑道周辺に残りやすく、 O_2 は特に液相に溶解したガスが残りやすい傾向がある。



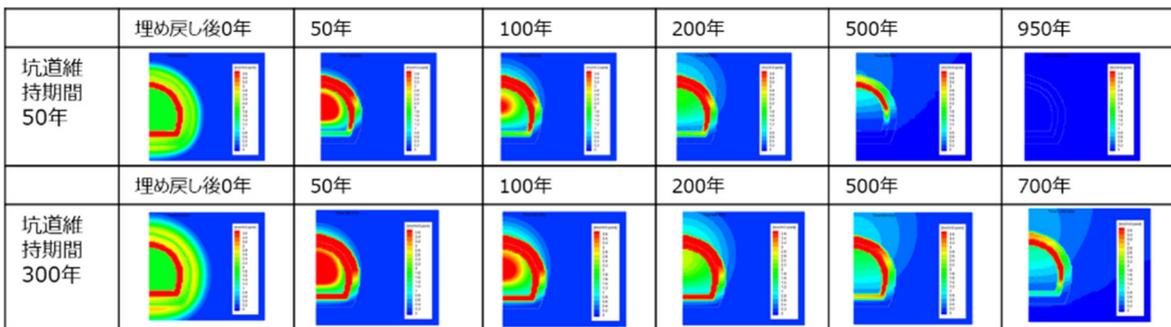
(a) 圧力分布の時間変化



(b) 飽和度の時間変化



(c) 気相の CH₄ モル量の時間変化



(d) 気相の O₂ モル量の時間変化

図 4.3-22 坑道維持～埋戻し後の坑道周辺地質環境の回復状況に関する解析結果の例

(2) 坑道周辺地質環境の長期変化に関する解析結果に基づく安全評価への影響に関する概念検討

今フェーズでは、(a),(b) の結果を分析し、安全評価上考慮する必要がある影響因子について、既存の FEP リストなどを参考としつつ抽出するとともに、その影響の大きさなどについての概念的な検討を行った。

具体的には、既存の FEP リストとして、原子力環境整備機構（以下、NUMO）が包括的技術報告書（原子力環境整備機構，2021）において整理された「NUMO FEP」及び、FEP と処分場の構成要素及び安全機能の関連性を整理した。NUMO の包括的技術報告書によると、高レベル放射性廃棄物処分場の安全機能と構成要素の関係は、表 4.3-4 のように整理されているが、今回の解析評価で対象としているのは、「地質環境」と「埋戻し材」の 2 つであること、また、基本概念の内、「隔離」とは、廃棄物と生活圏との物理的な距離を確保することであり、回収可能性維持の観点からは直接関連はないことから、ここでは「地質環境」に期待されている、「放射性物質の溶解の抑制」、「遅い地下水流速による放射性物質の移行の抑制」、「放射性物質の吸着」、「放射性物質の分散」について検討することとした。また、埋戻し材については、「坑道及びその周辺が卓越した放射性物質の移行経路となることの抑制」を取り上げることとした。

表 4.3-4 高レベル放射性廃棄物処分場の安全機能と構成要素の関係

基本概念	安全機能		構成要素
隔離	自然現象の著しい影響からの防護		地質環境
	人の接近の抑制		
閉じ込め	放射性物質の溶出の抑制	ガラスマトリクスによる溶出の抑制	ガラス固化体
		廃棄体と地下水の接触の防止	オーバーバック
	放射性物質の移行の抑制	放射性物質の溶解の抑制	地質環境
		遅い地下水流速による放射性物質の移行の抑制	地質環境
		放射性物質の移流による移行の抑制	緩衝材
		コロイド移行の抑制	緩衝材
		放射性物質の吸着	緩衝材 地質環境
		放射性物質の分散	地質環境
坑道およびその周辺が卓越した放射性物質の移行経路となることの抑制	止水プラグ、埋戻し材		

NUMO の包括的技術報告書では、これらの安全機能と状態変数の因果関係について整理が行われており、FEP の状態変数への影響の有無を検討して、各状態変数と FEP の関係を状態変数関連図に追記した図（要因分析図：例として図 4.3-23）を作成している。この情報と本解析で得られた結果と合わせて検討を進めた。

力学的長期変化解析では、母岩のひずみの経時変化が得られ、かつそれから求められる体積ひずみと母岩の間隙構造の変化には関連性があることから、母岩のクリープ変形の影響が保守的となる Case5 の結果からそれらを算出し影響を検討した。図 4.3-24 にその結果を示すが、例えば、坑道掘削前の稚内層の間隙率を 40% とすると、坑道掘削及び坑道の開放期間中の体積ひずみは 0.19～0.25% であったので、母岩の間隙率は 39.9～40.1% で変動することになる。一方、幌延の地上からの調査研究段階（第 1 段階）の結果では、稚内層の間隙率と透水係数の関係は図 4.3-25 で示されており、今回評価された変動幅では、母岩の透水係数はほとんど変化せず、従って母岩のクリープが安全評価に与える影響はほぼないと評価することができる。

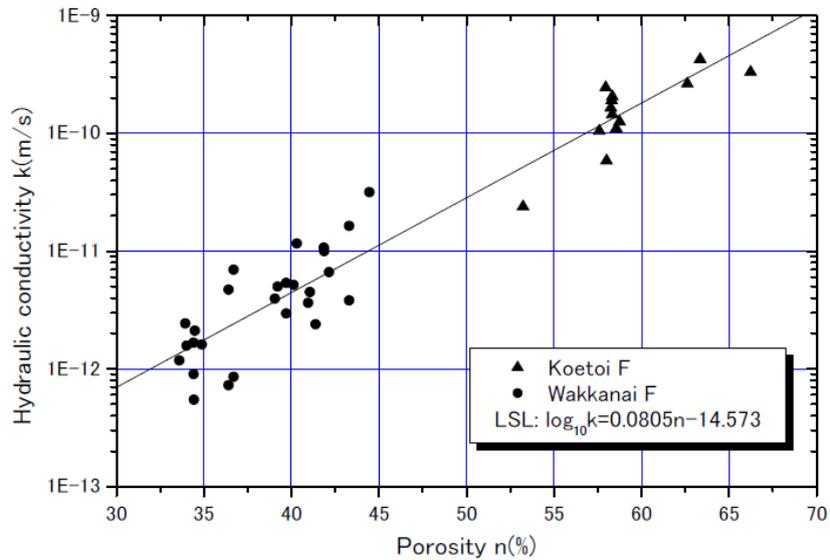


図 4.3-25 幌延深地層研究計画第 1 段階で得られた空隙率と透水係数との関係

水理学的長期変化解析については、関連事項が多いため、まず安全評価上の重要度の簡易的な指標として、「より多くの状態変数との関連性を有する FEP ほど重要度が高い」という考え方を採用することとした。前掲の要因分析図に基づいて、抽出された FEP と状態変数との関連性を整理すると、表 4.3-5～表 4.3-7 のようになり、より多くの状態変数と関連性を有する FEP としては、「水化学」「微生物／生物が媒介するプロセス」「パイピング／流出」及び「水の輸送」が挙げられた。

表 4.3-5 抽出された FEP と状態変数との関連性

FEP	状態変数										埋め戻し材					
	地質環境					埋め戻し材					埋め戻し材					
	溶液の濃度	溶液の空隙	間隙水水質	地下水水質	有機物濃度	コロイド濃度	鉱物組成	間隙構造	温度	動水勾配	厚さ	密度	間隙構造	間隙水水質	鉱物組成	温度
水の輸送	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-
パイピング／流出	○	○	○	○	○	○	-	○	-	-	○	○	○	-	-	-
再冠水／脱飽和	○	○	-	○	-	-	-	-	○	-	-	-	○	-	-	-
処分場の水理的影響	-	-	-	○	-	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-
ガス相の形成	-	-	-	○	-	○	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-
水化学	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	○	○	○	○	-
微生物／生物が媒介するプロセス	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	○	○	○	○	-

表 4.3-6 水理解析で得られる情報と重要度が高いと考えられる FEP との対応

水理解析で得られる情報		影響を受けうる FEP (重要度高)	影響度の評価		重要な解析用パラメータ
一次的	二次的		定性的	定量的	
圧力 (液相)飽和度	液相の流向・流速	水の輸送	○	○	(a)
		パイピング／流出	○	×	(a), (c)
ガス成分の分圧	ガス成分の物質質量	水化学	○	×	(a), (b)
圧力 (液相)飽和度	—	微生物／生物が媒介するプロセス	○	×	(a), (b)
ガス成分の分圧	ガス成分の物質質量				

表 4.3-7 影響度評価の観点から重要と考えられる解析用パラメータ

記号	重要と考えられる解析用パラメータ
(a)	気液二相浸透流パラメータ (絶対浸透率、水分特性曲線、比透水係数、比透気係数)
(b)	地下水中の溶存ガス種とその初期溶解量
(c)	埋め戻し材の密度、ベントナイト割合

上記を踏まえ、坑道掘削から埋戻しを経て 1,000 年後までの長期変化解析結果に基づき、安全評価への影響に関する概念的な検討を行った結果は以下の通りである。

・圧力

1,000 年後の坑道周辺の圧力分布は、坑道開放期間 (50 年～300 年) とそれに連動した埋戻し後の経過時間 (950 年～700 年) の違いにより異なり、坑道開放期間が短く、埋戻し後の経過時間が長いほど、静水圧分布に近い状態となっている。したがって、圧力分布の影響を受ける坑道周辺の「動水勾配」や「水の輸送」は、坑道開放期間が長いほど回復過程では岩盤中での値が大きくなると考えられるが、時間経過とともに最終的には定常となるため、その影響が長期間残留する可能性はほとんどない。

・(液相) 飽和度

1,000 年後の坑道近傍の飽和度分布は、坑道開放期間とそれに連動した埋戻し後の経過時間の違いにより、特に EDZ 内で大きく異なる。具体的には、坑道開放期間が長く、埋戻し後の経過時間が短いほど、坑道の頂部から側部にかけての EDZ の飽和度低下領域が広く、飽和度の値も小さくなっている。例えば、坑道維持期間が 50 年度と 300 年のケースで坑道の頂部付近の EDZ1 内の飽和度を比較すると最大 0.5 程度異なる。したがって、飽和度の影響を受けるとされる「水の移動」「温度」などの FEP は、坑道開放期間の長さの影響を受けて回復過程でも変化する可能性が考えられるが、圧力同様時間の経過とともに最終的には定常 (飽和状態) となるため、その影響が長期間残留する可能性はほとんどない。

・単位体積当たりのメタンの物質質量

1,000 年後の坑道近傍のメタンの物質質量は、坑道開放期間とそれに連動した埋戻し後の経過時間の違いにより、EDZ 及び埋戻し材内で大きく異なっている。具体的には、坑道開放期間が長く、埋戻し後の経過時間が短いほど、坑道の頂部から側部にかけての EDZ 及び埋戻し材内のメタンの物質質量が多くなり、このメタンの物質質量分布は、前述の飽和度分布と形状がほぼ一致する。このため、液相中の溶解ガス種の影響を受ける「液相の pH, Eh」「地下水水質」などの FEP は、坑道開放期間の長さの影響を受けて回復過程では変化する可能性が考えられる。しかし、メタン

物質と大きく関連している飽和度は、時間の経過とともに最終的には定常（飽和状態）となるため、その影響が坑道近傍で長期間残留することはないと予想される。また、坑道上方へ拡大したメタンの領域も、基本的には元々存在したメタンの物質と大きく異なるものではないので、その影響は小さいと考えられる。

・ 単位体積当たりの酸素の物質

1,000 年後の坑道近傍の酸素の物質は、前述のメタンの物質と同様に、坑道開放期間が長く、埋戻し後の経過時間が短いほど、坑道の頂部から側部及び底部にかけての EDZ、並びに埋戻し材内の量が多くなっている。したがって、CH₄ 同様に液相中の溶解ガス種の影響を受ける「液相の pH, Eh」「地下水水質」などの FEP は、坑道開放期間の長さの影響を受けて回復過程では変化する可能性が考えられる。ただし、酸素物質と大きく関連する飽和度は、時間の経過とともに最終的には定常（飽和状態）となるため、酸素は地下水に溶解していき、最終的には全体的に拡散して稀薄な濃度になっていくと予想されることと、実際の岩盤中には酸素と反応する鉱物や酸素を利用する微生物が存在するため、本解析のように酸素の消費を考慮しない場合よりも、物質ははるかに早く低減していくことが考えられる。但し、酸素は一般には地下深部の地質環境中にほとんど存在しないため、その残留による影響については、定量的な検討を行うことが肝要である。

(3) まとめ

幌延を事例とし、溶存ガスが多量に賦存するような実際の地質環境下での、坑道周辺地質環境の長期的な変化と埋戻し後の回復状況に関する解析的な知見及び、それらの結果から類推される地層処分システムの安全性への影響評価の考え方に関する予察的な知見を提示した。一方、これらは多種多用の研究開発成果が得られていた幌延の地質環境を事例として実施しているものであるため、実際の処分事業においてこのような評価が必要な場合は、特定されたサイトにおいて、その場の地質環境に関する様々な知見が十分収集されていることが前提となる。

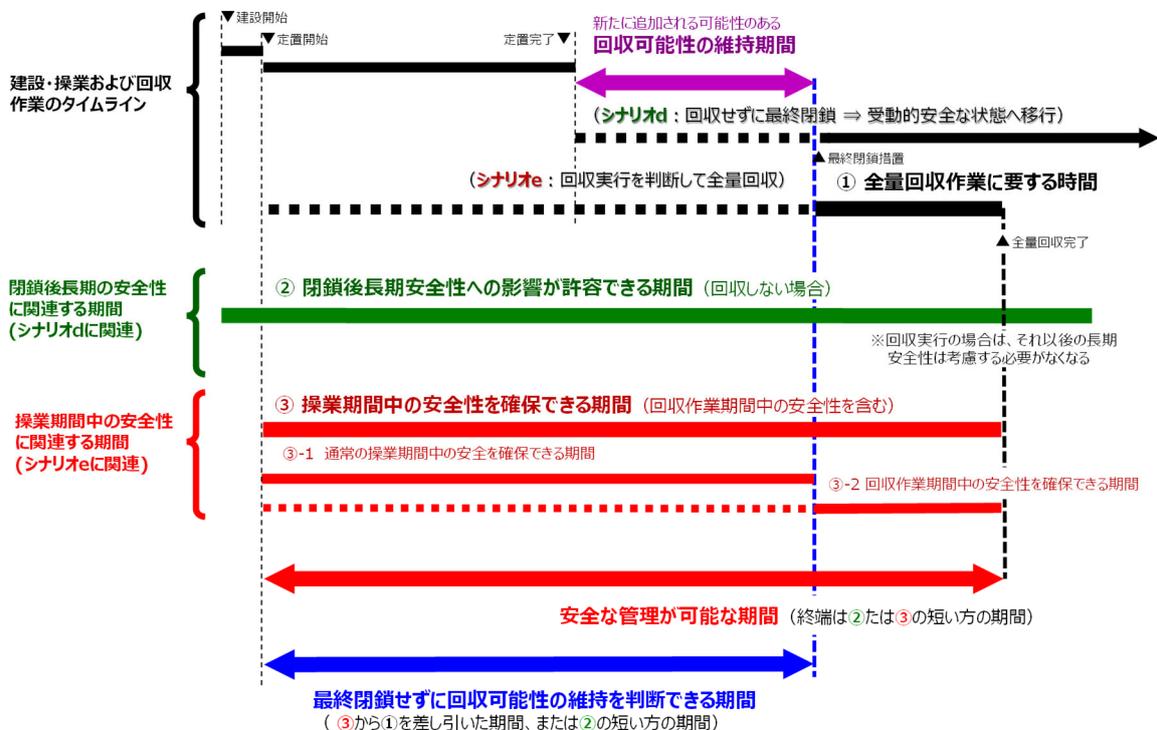
5 総括

地層処分事業への可逆性の導入という新たな施策に対する社会の信頼感を更に高めて行くために、それを裏付ける回収可能性という技術的能力の裏付け、施策に対する安全性に係る検討や技術開発に取り組んだ。今後のわが国における回収可能性に係る更なる検討や技術開発のたたき台となることも念頭に置き、開発方針・計画を設定して個別課題に取り組み、以下の成果を得た。

・回収可能性が維持されている状態の定義と開発方針の設定

基本方針において、回収可能性を維持する期間の終点は“最終処分施設の閉鎖までの間”と示されている。これを踏まえて、実際の地層処分事業における回収時の地下施設の状態や作業手順を具体的に検討するため、本事業では“最終閉鎖せずに回収可能性の維持を判断できる期間（回収可能性の維持期間）”と定義した。回収可能性の維持期間の起点は廃棄体の定置を開始した時点であり、この定義における終点、すなわち最終閉鎖／全量回収を判断する期限を決定するための技術情報を提供することが基本方針の意図する課題と捉えている。この課題への対応を、回収可能性に係る技術開発や検討の成果の反映先としている。

前身の事業で設置した R&R 検討会では、可逆性・回収可能性に対する多面的な検討を経て、回収に関する技術的な対応の評価や判断を支援する（必要となる）技術情報を複数の定量化すべき項目として整理している。これらの項目のうち、回収可能性の維持期間中の作業安全性（操業期間中の安全性への影響）、維持に伴う閉鎖後長期の安全性への影響、回収作業時間（回収の容易性）の三項目より、最終閉鎖／全量回収の判断期限の技術的な関係を下図のように整理した。



安全な管理が合理的に継続できる範囲で回収可能性が維持されている状態
(全量定置後の全量回収)

本事業の個別実施項目の目標を、この図の関係を定量的に示すための技術情報の提示に向けた技術的論拠の整備と位置付け、回収技術の高度化、回収可能性の維持に伴う安全性への影響の定量化手法の開発の二つの実施内容に落とし込み、検討や技術開発に取り組んだ。

・回収技術の高度化開発による回収作業の技術的実現性の提示

回収技術の高度化では、現行の二つの定置概念に対する回収技術の整備を進めるとともに、回収可能性が維持されている状態を示すために必要となる定量化項目「①全体回収作業に要する時間」を算出するための技術情報を整備した。

回収を実施するために必要な技術について、状態 B の地下施設に定置してある廃棄体を地上施設で保管するまでを回収作業とし、回収手順、手順を構成する個別作業、作業に必要な技術を、“回収作業システム”として整理した。トンネル施工などの一般土木技術、処分場の建設・操業時に想定される装置や設備、これまでの基盤研究における技術開発成果を概観・整理した結果、開発レベルに差はあるものの、回収作業システムを構成する一連の技術が揃っており（或いは整備の見通しがある）、廃棄体の回収作業の技術的実現性が見通しがあると言える。

廃棄体一体の回収手順を基に、回収の規模に応じた全体回収作業時間の定量化方法を提示した。一方、回収可能性が維持されている状態を示す他の項目との関係から、「①全量回収作業に要する時間」に対して、短縮を求められることも想定される。そのため、現行の定置概念に対する回収作業時間の短縮に資する技術的方策を提示するとともに、回収の容易性を高めた詳細設計オプションを例示した。この試みは、安全な管理が合理的に継続している状態を技術的に担保することに寄与する。

基本方針の意図を踏まえて今後も引き続き、回収手順の個別作業に必要な技術、定量化項目である全体回収作業に要する時間の積算、回収作業時間を短縮する回収容易性の向上など、回収可能性の技術的実現性の提示及び向上に向けた課題に取り組んでいく必要がある。

・回収可能性の維持に伴う安全性への影響の定量化手法の開発

回収可能性の維持に伴う影響について、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て、ストーリーボードを整備するとともに、それを用いて定量化すべきプロセスをサブシナリオの形式で整理して、定量化手法の整備における課題を抽出した。

今後、地下構造物の安定性及び供用性に向けた定量化手法の構築に向けて、サブシナリオごとに「類似条件での経験・知見の活用」や「解析的手法の適用」による定量化手法の具体化を行っていくとともに、専門家との議論で抽出された個別のプロセスに関する課題の解決を図っていく必要がある。特に操業期間中の安全性の観点では、実際の地下環境で発現する可能性のある事象を取り込み、また、評価手法（解析）の信頼性の向上を図るために、地下研究施設を活用した物性値の取得、坑道周辺環境の予察的解析を継続して実施していく必要がある。

参考文献

- 原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 22 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書，2011.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 23 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，2012.
- 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.
- 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（別冊）可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理について，2019.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 31 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 平成 27 年度～平成 31 年度 5 カ年とりまとめ報告書，2020.
- 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 2 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）報告書，2021.
- 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.
- 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 3 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）報告書，2022.
- 原子力発電環境整備機構，地層処分事業のための安全評価技術の開発(I)-シナリオ構築技術の高度化，NUMO-TR-10-09，2011.
- 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.
- 広辞苑第 6 版 岩波書店 1995
- 土木学会，2016 年制定トンネル標準示方書 [共通編]・同解説／[山岳後方編]・同解説 2016.
- 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日本原子力研究開発機構，幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験；350m 調査坑道における人工バリアの設置及び坑道の埋戻し，JAEA-Research-2019-007，2019.
- 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）報告書，2023.
- 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) December 2011.
- NEXCO, 土木工事積算基準 令和 3 年度版，2021.
- SKB, Full-scale test of the Dome Plug for KBS-3V deposition tunnels Project summary and evaluation of the final results, TR-18-02, 2019.
- SKB, Techniques for freeing deposited canisters, TR-00-15, 2000.