

平成30年度
高レベル放射性廃棄物等の
地層処分に関する技術開発事業

可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発

報告書（第1分冊）

事業の概要・要旨

平成31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

本報告書は、経済産業省からの委託研究として、公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した、平成30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・技術高度化開発の開発成果を取りまとめたものです。

報告書の構成

平成30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・技術高度化開発の報告書は、以下の分冊により構成されている。

当該報告書	分冊名	報告書の標題
	第1分冊	可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発の事業概要・要旨
	第2分冊	地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発
	第3分冊	回収可能性の維持についての検討

目 次

第 1 章	はじめに	1-1
1.1	事業概要	1-1
1.1.1	事業の目的	1-1
1.1.2	平成 30 年度の実施内容	1-2
1.1.3	報告書の構成	1-4
第 2 章	地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発	2-1
2.1	実証試験の概要	2-1
2.1.1	処分坑道横置き・PEM の方式の実証試験	2-1
2.2	搬送定置・回収技術の実証的整備（第 2 分冊：第 3 章）	2-2
2.2.1	実施概要	2-2
2.2.2	搬送定置・回収技術の開発計画	2-2
2.2.3	定置・回収装置の整備	2-3
2.2.4	地上模擬坑道での要素試験	2-4
2.2.5	地上模擬坑道での実機試験	2-6
2.3	隙間充填技術の実証的整備（第 2 分冊：第 4 章）	2-8
2.3.1	実施概要	2-8
2.3.2	地下環境での模擬 PEM-坑道間の下部狭隘部 隙間充填技術の実証的整備	2-9
2.3.3	地下環境での模擬 PEM-坑道間の上部開放部 隙間充填技術の実証的整備	2-19
2.3.4	成果のまとめ	2-28
2.4	隙間充填材除去技術の実証的整備（第 2 分冊：第 5 章）	2-29
2.4.1	実施概要	2-29
2.4.2	除去対象とする隙間充填材	2-29
2.4.3	充填材除去の目的と概念的手順	2-30
2.4.4	機械的除去技術（オーガ方式）の整備	2-31
2.4.5	流体的除去技術（ウォータージェット方式）の整備	2-33
2.4.6	成果のまとめ	2-1
2.5	地層処分実規模試験施設の運営（第 2 分冊：第 6 章）	2-2
2.5.1	実施概要	2-2
2.5.2	施設の公開	2-2
2.5.3	緩衝材可視化試験	2-2
2.5.4	来館者との対話記録の分析	2-3
第 3 章	回収可能性の維持についての検討	3-5
3.1	はじめに	3-5
3.1.1	背景及び目的	3-5
3.1.2	回収可能性の維持についての今後の検討のベース	3-6
3.1.3	過年度及び本年度の検討概要	3-8

3.2	安全性への影響の定量的な評価技術の整備に向けた既存技術の整理と課題抽出	3-10
3.3	回収可能性維持期間の影響に関する定量的評価	3-15
3.3.1	検討方針と検討項目の概要	3-15
3.3.2	技術検討項目に対する影響評価方法の整理	3-17
3.3.3	回収可能性維持期間の影響評価方法の検討	3-26
3.4	回収容易性に関する検討	3-50
3.4.1	検討方針と検討項目の概要	3-50
3.4.2	回収の容易性を高めることの方の考え方の整理	3-52
3.4.3	既存処分概念等の整理	3-56
3.4.4	回収の容易性を高めた工夫のポイントの抽出	3-58
3.4.5	処分坑道の状態設定に関する検討	3-61
3.4.6	回収容易性に関する今後の検討	3-66

目 次

図 1.1.2-1	可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 5ヵ年計画	1-2
図 2.1.1-1	処分坑道横置き・PEM方式の定置/回収作業における位置付け	2-1
図 2.2.2-1	搬送定置・回収技術の開発計画模式図	2-2
図 2.2.3-1	定置・回収装置の完成イメージ図	2-3
図 2.2.4-1	地上模擬坑道 平面図	2-4
図 2.2.4-2	要素試験装置(写真)	2-4
図 2.2.5-1	定置・回収装置(写真)	2-6
図 2.3.2-1	充填・実証の対象とする坑道断面と充填方式	2-9
図 2.3.2-2	下部狭隘部の隙間充填装置配置イメージ(試験坑道2)	2-10
図 2.3.2-3	下部狭隘部の充填材 製造工程	2-10
図 2.3.2-4	粒度分布の管理(平成29年度)	2-11
図 2.3.2-5	粒度分布の管理(平成30年度)	2-11
図 2.3.2-6	充填容積	2-12
図 2.3.2-7	移送性能確認試験結果(平成30年度)	2-13
図 2.3.2-8	スクリュウ回転速度と移送性能の関係(平成30年度)	2-13
図 2.3.2-9	平成29年度に設定した施工プロセス管理	2-15
図 2.3.2-10	試験実施手順(充填施工)	2-16
図 2.3.2-11	実証試験における実充填容積	2-17
図 2.3.3-1	上部開放部の形状(幌延 URL 深度350m 坑道 試験坑道2)	2-19
図 2.3.3-2	下部狭隘部と上部開放部の境界に設置した鉄板	2-20
図 2.3.3-3	幌延 URL 試験坑道2 上部開放部の充填範囲図	2-20
図 2.3.3-4	上部開放部 実証試験フロー	2-21
図 2.3.3-5	伸縮アーム式吹付け機械による吹付け状況	2-22
図 2.3.3-6	乾燥密度の各計測結果と施工日の関係	2-25
図 2.3.3-7	隙間充填材の製造毎(フレコン毎)の含水比結果	2-25
図 2.3.3-8	吹付け前後(製造後、施工後)の含水比結果	2-26
図 2.3.3-9	吹付け前後(製造後、施工後)のベントナイト混合率結果	2-26
図 2.3.3-10	全体の吹付け施工サイクルタイム	2-27
図 2.4.2-1	隙間充填の前後 写真	2-30
図 2.4.2-2	実証試験における各々の除去技術の対象領域 断面図	2-30
図 2.4.3-1	隙間充填材の除去手順	2-31
図 2.4.4-1	製作したオーガアタッチメント	2-31
図 2.4.4-2	機械的除去装置 全景	2-32
図 2.4.4-3	地上試験結果(一部)	2-32
図 2.4.5-1	流体的除去装置 ノズルの動き 説明図	2-33
図 2.4.5-2	流体的除去装置(ウォータージェット方式)	2-33

☒ 2.4.5-3	各ノズルの特徴等 一覧	2-34
☒ 2.4.5-4	試験ケース 3-2 除去手順毎の状況	2-35
☒ 2.5.1-1	地層処分実規模試験施設	2-2
☒ 2.5.3-1	緩衝材ブロックの一体化挙動の可視化試験の様子	2-2
☒ 2.5.4-1	来館者との対話記録の分析例（質問の属性の経時変化）	2-3
☒ 3.3.2-1	ニアフィールドにおいて起こりうる現象のイメージ	3-19
☒ 3.3.2-2	ファーフィールドにおいて起こりうる現象のイメージ	3-19
☒ 3.3.2-3	技術検討項目の評価対象とする現象と影響を与えている現象の関連性(再利用時の健全性以外)	3-21
☒ 3.3.2-4	「再利用時の健全性」の評価対象とする現象と影響を与えている現象の関連性	3-22
☒ 3.3.2-5	「開放坑道の健全性（空間安定性）」に関する評価手法のフロー	3-24
☒ 3.3.3-1	処分坑道掘削時の湧水量の経時変化（case1a,case1a-9）	3-28
☒ 3.3.3-2	感度解析に用いた不飽和特性曲線の比較	3-30
☒ 3.3.3-3	飽和・不飽和解析手法と二相流解析手法の再冠水解析の水圧分布（2年後）	3-32
☒ 3.3.3-4	降雨涵養量の違いによる地下水位低下の経時変化	3-33
☒ 3.3.3-5	「切り出しモデル」解析結果の坑道湧水量の経時変化	3-34
☒ 3.3.3-6	流跡線による地下水流動の可視化の例	3-35
☒ 3.3.3-7	地下水流動フロントの経時変化に関する可視化の例（3D表示）	3-35
☒ 3.3.3-8	ファーフィールドモデルの概念図	3-38
☒ 3.3.3-9	岩盤中の黄鉄鉱と方解石の体積割合、地下水のpHとEh並びにCa ²⁺ 及びHCO ₃ ⁻ の分布（透水係数：高透水，高Cl ⁻ 濃度地下水）	3-39
☒ 3.3.3-10	坑道掘削時点からの吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水pHの変化(高Cl ⁻ 濃度地下水，速度論係数：標準)	3-41
☒ 3.3.3-11	坑道掘削時点からの吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水pHの変化(低Cl ⁻ 濃度地下水，速度論係数：標準)	3-42
☒ 3.3.3-12	再冠水時の岩盤地下水のpHとEhならびにCa ²⁺ 及びHCO ₃ ⁻ の分布（透水係数：3×10 ⁻⁸ m/s，高Cl ⁻ 濃度地下水）	3-43
☒ 3.3.3-13	吹付けコンクリートのヤング率の経時変化	3-44
☒ 3.3.3-14	鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率（高Cl ⁻ 濃度地下水，速度論係数：標準，透水係数：3×10 ⁻⁹ ）	3-47
☒ 3.3.3-15	高Cl ⁻ ケースのヤング率と力学的影響評価に用いたヤング率の比較	3-48
☒ 3.4.1-1	回収の容易性に係る検討の流れ	3-52
☒ 3.4.2-1	設計仕様設定までの流れ（[21]に一部加筆）	3-55
☒ 3.4.4-1	工夫のポイントのイメージ例：大口径作業坑道から小口径坑道への定置	3-59
☒ 3.4.5-1	処分坑道の状態設定のイメージ（横置き PEM方式の場合）	3-61
☒ 3.4.5-2	状態設定：PEM定置後処分坑道を埋め戻し状態とした場合の作業展開	3-62

- 図 3.4.5-3 状態設定 : PEM 定置後処分坑道を開放状態とした場合の作業展開3-62
- 図 3.4.5-4 状態設定 : PEM 定置後地下施設全体を水没状態とした場合の作業展開...3-63

表 目 次

表 2.2.4-1	要素試験装置の仕様	2-4
表 2.2.5-1	定置・回収装置の仕様	2-6
表 2.3.2-1	各製造工程における充填材の品質確認結果	2-11
表 2.3.2-2	移送性能確認試験結果（平成 30 年度）	2-12
表 2.3.2-3	移送性能確認試験結果のとりまとめ（平成 30 年度）	2-13
表 2.3.2-4	移送性能確認試験結果（平成 29 年度）	2-14
表 2.3.2-5	地上予備試験のうち試験ケース 4-2（平成 29 年度）の試験条件	2-14
表 2.3.2-6	地下充填実証試験の試験条件	2-15
表 2.3.2-7	実証試験実施手順	2-15
表 2.3.2-8	下部狭隘部への実充填質量	2-17
表 2.3.2-9	下部狭隘部充填密度（乾燥密度は含水比 6.5%として算出）	2-17
表 2.3.3-1	上部開放部の充填材料および目標の乾燥密度	2-19
表 2.3.3-2	吹付けパラメータと設定値[4]	2-22
表 2.3.3-3	管理項目 一覧	2-23
表 2.3.3-4	乾燥密度結果 一覧	2-24
表 2.3.3-5	吹付け施工サイクルタイム（全体・1m ³ 当たり）	2-27
表 2.3.3-6	吹付け施工の作業効率	2-27
表 2.4.2-1	上部開放部、下部狭隘部の隙間充填材の仕様および目標の乾燥密度	2-29
表 2.4.2-2	下部狭隘部の隙間充填 実証試験 結果 ¹	2-29
表 2.4.2-3	上部開放部の隙間充填 実証試験 結果 ²	2-29
表 2.4.5-1	試験ケース 3-2 除去手順	2-34
表 2.4.5-2	決定した流体的除去手順の設定	2-36
表 3.1.2-1	R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目[4]	3-7
表 3.1.2-2	定量化の時期と反映先	3-8
表 3.2-1	各技術検討項目に対する既存技術の整理と課題抽出の概要一覧表	3-12
表 3.2-2	各技術検討項目に対する既存技術の整理と課題抽出の概要一覧表	3-12
表 3.2-3	各技術検討項目に対する既存技術の整理と課題抽出の概要一覧表	3-14
表 3.3.2-1	各影響評価項目で考慮する現象とそれらに影響を与えている現象	3-23
表 3.3.3-1	吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化（高 Cl ⁻ 濃度地下水，速度論係数：標準，透水係数：3×10 ⁻⁹ ）	3-46
表 3.3.3-2	各鉱物の吹付けコンクリート単位体積当たりのモル数と 1 モル当たりのカルシウム数	3-46
表 3.4.1-1	回収の容易性を設計に考慮する際の多様な方法の例[4]	3-50
表 3.4.2-1	アクセス性向上の要素における考慮事項の例	3-53
表 3.4.2-2	ハンドリング性向上の要素における考慮事項の例	3-54
表 3.4.3-1	国内外の処分概念における回収の容易性向上の視点からのポイント	3-58

表 3.4.4-1	回収の容易性向上の視点からの工夫のポイント例.....	3-60
表 3.4.5-1	処分坑道の状態設定の違いによる各作業の負荷及び安全性への影響	3-64

第1章 はじめに

1.1 事業概要

平成30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

1.1.1 事業の目的

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の地層処分に係る研究開発については、国、研究開発機関等が、それぞれの役割分担を踏まえつつ、密接な連携の下で、基盤研究開発を着実に進めていくことが重要である。

平成26年4月のエネルギー基本計画においては、高レベル放射性廃棄物の問題の解決に向けた取組の抜本強化として、「地層処分を前提に取組を進めつつ、可逆性・回収可能性を担保し、今後、より良い処分方法が実用化された場合に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにする。」「処分場を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、処分場閉鎖までの間の高レベル放射性廃棄物の管理の在り方を具体化する。」との方針が示された。また、平成26年5月の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WGにおいても、「最終処分に向けた取組を進める上では、数世代にも及ぶ長期的な事業であることから、可逆性・回収可能性を担保し、将来世代も含めて最終処分に関する意思決定も見直せる仕組みとすることが不可欠」と示されている。諸外国においては、我が国に先行して可逆性・回収可能性を担保したプロセスへの見直しが検討・導入されつつあり、我が国においても最終処分における可逆性・回収可能性の意義や具体的な確保のあり方、必要な技術に関する検討が必要である。さらに、平成27年5月の改定された特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針では、「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」とされている。

回収技術については、これまでに資源エネルギー庁での基盤研究開発（具体的には平成19年から24年まで実施した地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発）及び、平成25年から26年まで実施した地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発））において、操業技術として必要となる遠隔搬送・定置に関する技術調査ならびに要素試験や地上での適用試験などを通して、多様な地質環境条件や処分概念への対応を念頭に置いた基盤技術として整備を進めてきた。また、操業技術を構成する要素技術の一つとして、回収技術の中核技術である緩衝材除去技術について、塩水を利用しての遠隔による機械除去の実証を、地上施設において実施することにより適用性の検討を実施してきた。

これまでに取り組んできた回収技術の高度化という観点では、今後、地上とは異なる地下環境での搬送定置・回収技術に関する原位置試験を通じた操業時の工学技術の整備・実証が必要である。これらを背景として、本事業では、回収可能性を維持することに伴う影響等の検討を進める

とともに、搬送定置や緩衝材除去等に係る技術等の地下環境での適用性確認などの実証的な取組を進め、国民の地層処分技術に関する信頼感の醸成や事業の柔軟な推進に資することを目的とする。

1.1.2 平成30年度の実施内容

本事業は平成27年度から5年程度の期間で進められている。5か年の計画を図1.1.2-1に示す。

5か年計画のうちの4年目にあたる平成30年度は、人工バリア材料の搬送定置・回収技術の高度化開発を目的とした「(1)地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発」、回収可能性の維持期間の影響評価と影響低減の方策等の検討を目的とした「(2)回収可能性の維持についての検討」の2つの項目について、検討や研究開発を実施する。併せて、地層処分実規模試験施設の運用等を行う。

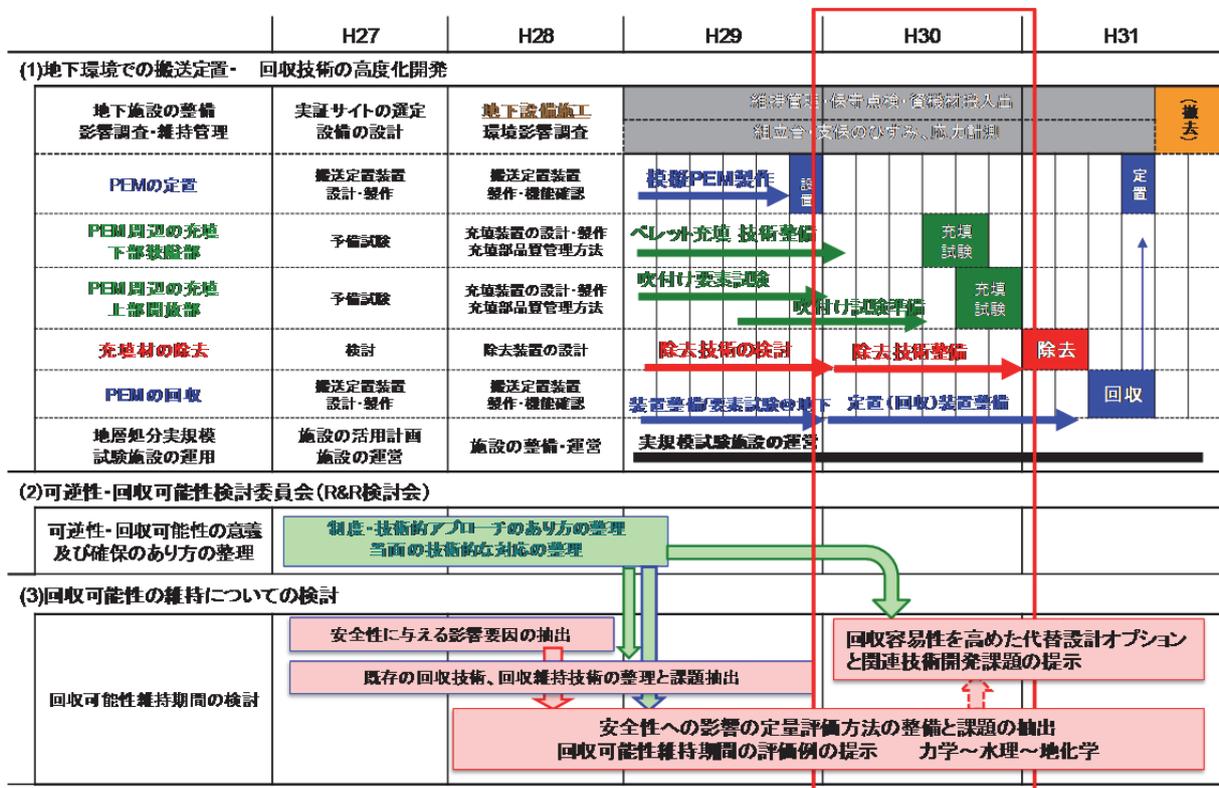


図 1.1.2-1 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 5か年計画

本年度は以下の項目を実施する。

(1) 地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発

搬送定置技術、PEM-坑道間の隙間充填技術、充填材の除去技術、PEMの回収技術等の実証試験の対象となる要素技術について、地下環境での技術実証に向けて、平成29年度に引き続き装置の設計・製作、地上での確認試験等を実施する。

1) 実証試験サイトの整備

幌延深地層研究センター（以下、「幌延 URL」という。）の地下 350m 調査坑道に位置する試験坑道 2 に整備した地下実証試験サイト、及び平成 29 年度に整備した地上実証試験サイトについて、実証試験に必要な設備等の整備及び維持管理を実施する。

2) 地下環境での搬送定置・回収技術の実証的整備

地下環境での実証試験を行うための設備や装置の整備を継続して実施する。

PEM の回収作業に適用する搬送定置技術については、装置の整備を継続実施するとともに、地上に構築したコンクリート模擬坑道面（地上実証試験サイト）において充填材除去後を想定した環境下でのエアベアリングの走行試験を実施し、地下での実証試験計画に反映する。

PEM-坑道間の隙間充填技術については、平成 29 年度までに整備した吹付け方式（上部開放部）とペレット充填方式（下部狭隘部）を用い、幌延 URL の試験坑道 2 において PEM と坑道間への隙間充填材の施工試験を実施する。

隙間充填材の除去技術については、機械的除去方式と流体を用いたウォータージェット方式による充填材の切削、及び排出等の試験を継続実施し、幌延 URL で除去する充填部の形状を考慮した実証試験装置の設計・製作を行う。

3) 地層処分実規模試験施設の運用

平成 20 年から 25 年まで資源エネルギー庁原子力発電施設広聴・広報等事業（地層処分実規模設備整備事業）整備した地層処分実規模試験施設を運用する。運用にあたっては、試験等の一般公開による国民への理解促進活動も念頭に置くこととする。

(2) 回収可能性の維持についての検討

これまでに、回収維持による影響の定量的評価技術の一つとして坑道の安定性等に着目した定量的な評価方法の検討を行った。この検討をさらに進めるとともに、平成 29 年度には「可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理」（以下、「R&R 検討会」という。）でまとめられた技術検討項目を踏まえて、技術検討項目の意味と、その指標、現状技術、課題について整理する。また、技術検討項目で示されている「回収の容易性」について、取り組み、回収を容易とするためのオプションを含めた検討を行う。さらに、安全性への影響について、定量的な評価方法を検討し、一連の方法と結果を例示する。

1) 回収可能性維持期間の検討

回収可能性の維持期間を決定するために必要となる R&R 検討会で示された「安全性への影響」と「回収の容易性」に関する技術検討項目について、具体的な検討を行う。「安全性への影響」については、技術検討項目として示された 11 項目について、評価のための指標、現状技術、課題等を整理する。その上で、本検討で取り組んでいる定量的評価技術の位置づけを明確にする。また、「回収の容易性」に関しての検討についても本年度から取り組みを開始し、回収容易性を考慮した代替技術オプションを提示することを念頭に、国内外の調査に基づき、回収を容易にするため

の工夫のポイントを抽出し、具体案を示す。

2) 回収可能性維持期間の影響に関する定量的評価

平成29年度までの坑道の安定性に着目した検討に加え、水理学的な評価手法についての検討を進め、力学的影響評価、並びに化学的影響評価に相互に影響する回収維持期間中の水理学的な影響の評価方法を示す。また、化学的影響に関する定量的な評価方法についても、水理学的な評価との関連性を考慮して、評価方法を検討し、関連する技術検討項目についての解析的な評価方法を例示する。

1.1.3 報告書の構成

本事業の実施内容は 1.1.2 で示したように、「(1) 地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発」「(2) 回収可能性の維持についての検討」である。報告書は本冊である『(第1分冊)事業の概要・要旨』にて、事業の概要、本年度の実施内容および成果の概要を示した。各実施内容の成果の詳細については、『(第2分冊)地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発』『(第3分冊)回収可能性の維持についての検討』に示した。

第2章 地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発

2.1 実証試験の概要

本事業で実証の対象とする回収技術は最終処分施設の閉鎖までの操業期間中の廃棄物搬出の可能性（回収可能性）を確保するための工学技術である。これらに必要となる個別の要素技術についてはで述べたように、処分システム工学要素技術高度化開発、および地層処分回収技術高度化開発にて、遠隔搬送・定置技術、回収技術に関する技術調査や要素試験、地上での適用試験などを通して、基盤技術としての整備を進めてきた。このような技術的な取組を経て、本事業ではこれまで開発してきた搬送定置や緩衝材除去技術を活用して、地下での適用性の確認及び地下環境における高レベル放射性廃棄物の搬送定置・回収技術の実証的な整備を行う。加えて、このような取組を通じて、国民の地層処分技術に関する安心感の醸成及び可逆性・回収可能性に関する最終処分政策に寄与するとともに、将来世代に対して高レベル放射性廃棄物の処分方法の選択肢について柔軟性を持たせることを目的とする。

2.1.1 処分坑道横置き・PEM方式の実証試験

処分坑道横置き定置方式については、ブロック方式の緩衝材の定置技術からオーバーパックの回収に関連する緩衝材の除去技術まで、実規模スケールでの技術の実証試験が地上で実施されている。一方、処分坑道横置き・PEM方式については、定置装置についてはエアベアリング方式の要素試験が実施され、隙間充填については小型の模擬土槽を用いたペレット充填時の充填率・密度計測にとどまっている。本事業では処分坑道横置き・PEM方式について、PEMの搬送・定置技術、PEM坑道間の隙間充填技術、隙間充填材の除去技術、PEMの回収技術について、実規模スケールでの地下環境で実証を実施する。

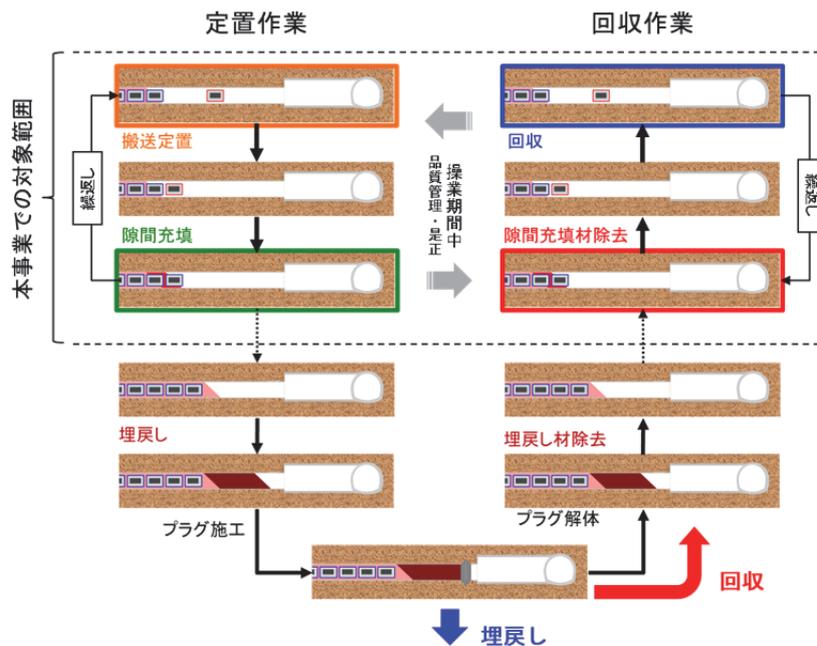


図 2.1.1-1 処分坑道横置き・PEM方式の定置／回収作業における位置付け

2.2 搬送定置・回収技術の実証的整備（第2分冊：第3章）

2.2.1 実施概要

搬送定置・回収技術については、幌延 URL 試験坑道 2 において、処分坑道横置き PEM 方式の地下実証試験を平成 31 年度に実施することを目的とし、エアベアリング技術を用いた定置・回収装置の整備を継続して実施する。また、平成 29 年度に製作した要素試験装置及び整備した定置・回収装置を用いて、幌延 URL 試験坑道 2 と同等の形状で地上に構築した地上模擬坑道の走行面で PEM の定置・回収試験を実施し、エアベアリングの走行特性を取得する。地上模擬坑道における試験により、打設コンクリート面及び充填材除去後の走行面での PEM の搬送性に関する知見を得て、幌延 URL での地下実証試験の計画に反映する。

2.2.2 搬送定置・回収技術の開発計画

処分坑道横置き PEM 方式の搬送定置・回収技術として、設計オプションの自由度を向上させるよう、小断面処分坑道において大重量搬送の可能なエアベアリング技術を選定した。

エアベアリング方式の搬送定置・回収技術の開発計画の模式図を図 2.2.2-1 に示す。本計画を踏まえ、本年度は、打設コンクリート面及び充填材除去後の走行面での PEM の搬送を確認するため、以下を実施した。

- ・ 定置・回収装置の整備
- ・ 地上模擬坑道での要素試験
- ・ 地上模擬坑道での実機試験

なお、定置・回収装置の整備には期間を要することから、要素試験は要素試験 1 と要素試験 2 に分割し、要素試験 1 は定置・回収装置の整備前に、要素試験 2 は別途実施する充填材除去試験後に実施する計画とした。また、実機試験は要素試験 2 の後に実施する計画とした。

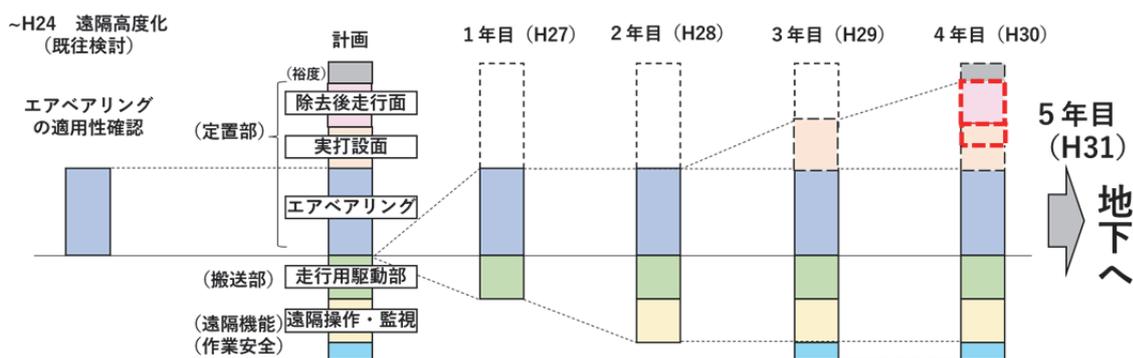


図 2.2.2-1 搬送定置・回収技術の開発計画模式図

2.2.3 定置・回収装置の整備

地下実証試験に使用する定置・回収装置（完成イメージ図を図 2.2.3-1 に示す。）について、装置構成を以下に示す。

- ・定置部は、エアベアリングを 10 個（片側 5 個ずつ）配置し、PEM を載せる台座をガイドとして利用するガイドローラを設置する（ 1 ）とともに、エアベアリングにエアを供給していない時に装置の荷重を受ける走行ローラを設置した。
- ・搬送部は、エアコンプレッサ、制御盤及び電動機を搭載し、電動機と接続している車輪により定置部と搬送部の装置全体を前後進させる構造とした。また、搭載機器への電源供給は幌延 URL 既設の電源設備から中継ボックスを介して供給するものとし、可搬式の電源ケーブルを随走させるものとした。
- ・装置の操作は、遠隔操作できるように、装置には検出器類及びカメラを設置し、ソフト面では運転モードやインタロック等を設定できるようにした。操作用の制御信号は、操作卓から中継ボックスを介して制御盤まで有線で送受信するものとし、可搬式の信号ケーブルを電源ケーブルと同経路で随走させるものとした。
- ・地下実証試験中の作業安全を確保するため、パトライト、ブザー、メロディホンを設置した。

1：処分坑道横置き PEM 方式では、隙間充填材の充填性を考慮して、PEM を台座に定置する設計となっており、定置・回収装置は、この台座を装置走行上のガイドとして利用する方式を採用した。

本年度は、平成 29 年度に実施した幌延 URL 試験坑道 2 での要素試験の結果を反映し、エアベアリングへの供給空気増加対応等を実施した。

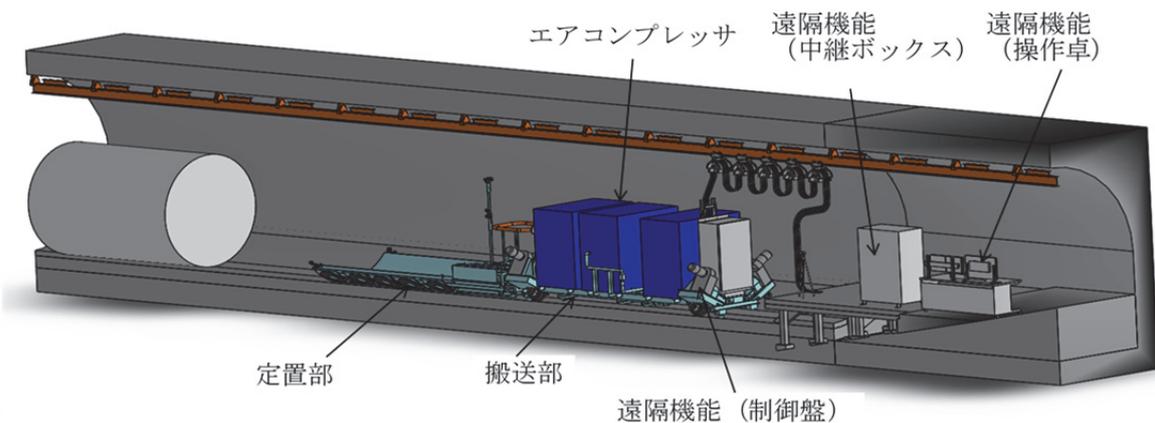


図 2.2.3-1 定置・回収装置の完成イメージ図

2.2.4 地上模擬坑道での要素試験

地上模擬坑道(図 2.2.4-1 に平面図を示す。)で要素試験装置(仕様を表 2.2.4-1 に、図 2.2.4-2 に外観写真を示す。)を使用して要素試験を実施した。各試験の目的及び得られた知見は以下のとおり。

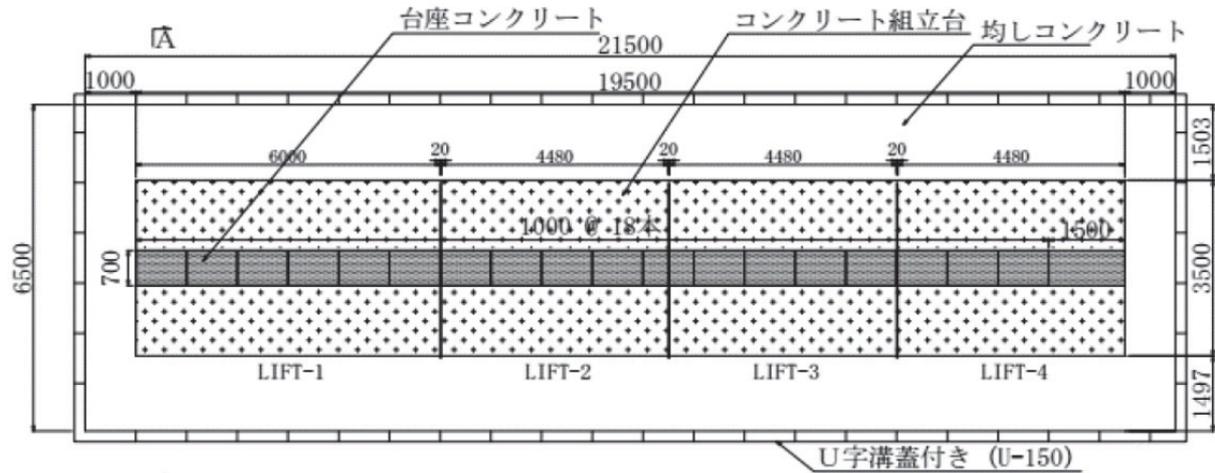


図 2.2.4-1 地上模擬坑道 平面図

表 2.2.4-1 要素試験装置の仕様

基本仕様	最大積載荷重	14.125 ton
	機器重量	約 830 kg
	機器寸法	(L)2200 mm × (W)1830 mm
荷重支持	エアベアリング	AeroGo 社 K21NHD 特殊品 curved type (径: 533mm 揚程: 31mm 定格圧力: 0.41MPa) 走行方向に対して左右 2 枚ずつ (合計 4 枚) 使用
走行	方式	ウィンチによる牽引
	速度	(標準) 5 m/min、ウィンチ制御盤で変速可
運転	方式	手動運転
	監視	直接目視 (試験員) による監視

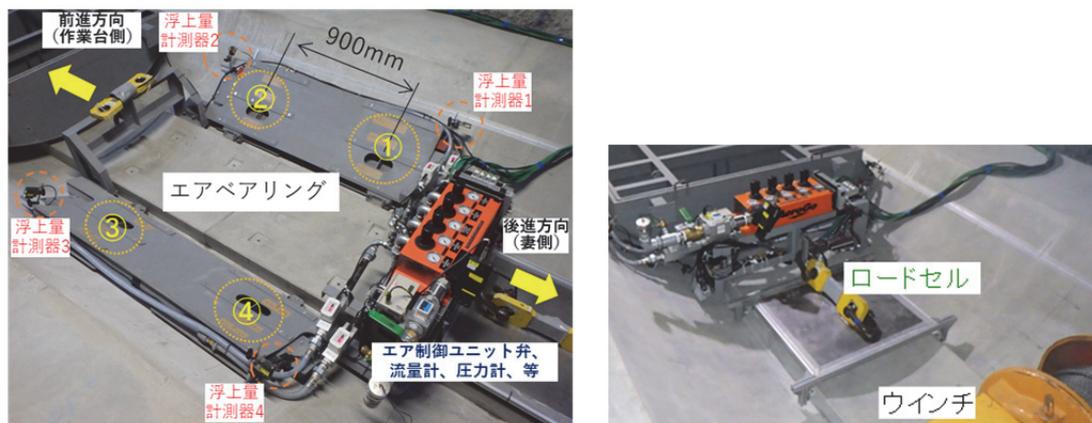


図 2.2.4-2 要素試験装置 (写真)

(1) 試験目的

1) 要素試験 1

- ・平成 29 年度に実施した幌延 URL 試験坑道 2 での試験データと、地上模擬坑道での試験データを比較することで、幌延 URL 試験坑道 2 と地上模擬坑道との走行特性を比較する。
- ・充填材除去後の走行面を想定し、要素試験装置を走行させることで、PEM 搬送に関する課題を抽出する。

2) 要素試験 2

- ・充填材除去後の走行面を模擬し、要素試験装置を走行させることで、PEM 搬送に関する課題の解決方法に対する妥当性を確認する。

(2) 試験で得られた知見

1) 要素試験 1

供給空気流量について、基本的には一定値を示していたが、重量 14.125t を積載した試験の多くで、特定のエアベアリングの供給空気流量が変動していた。本変動中は当該のエアベアリングからエア漏れが発生していたと推定できる。

供給空気圧力及び浮上量について、上記の供給空気流量の変動中も含めて、ほぼ設定した通りの値であった。このことから、上記の供給空気流量の変動は、走行に対して大きな影響を与えていなかったと推定できる。

牽引力について、幌延 URL での要素試験で得られた動摩擦係数(約 0.018)[4]と同程度であり、幌延 URL 試験坑道 2 と同様の走行特性が得られたと考えられる。また、走行面の差異については、モルタル面とコンクリート面との比較では走行面の状態(乾燥、散水、残留物)によって牽引力の高低は異なっていたが、上敷き材(特にトタン板)を敷いた場合には牽引力は低くなる傾向となった。走行方向については、LIFT-2 側へ進む時(行き)の方が LIFT-4 側に進む時(戻り)よりも牽引力が高くなる傾向であったが、装置の走行特性は走行方向によらないはずであるため、本傾向は別の要因(例えば 0.1°(0.2%)勾配があると往復 0.2°(0.4%)分の差が生じ摩擦係数としては 0.004 の差となる)によるものと考えられる。

以上により、装置の走行特性として、走行面の状態により牽引力の高低はあるものの、走行面に残留物が有ることに対しては特に走行上の問題は無いと判断できる。ただし、走行面の目地部で牽引力の増加が発生し、いくつかエアベアリングが損傷したことから、目地部を補修し段差及び割れ等がない状態とする必要があることが判明した。

2) 要素試験 2

供給空気流量、供給空気圧力及び浮上量について、ほぼ設定した通りの値で大きな変動は確認されなかった。このことから、選定したエアベアリングの状態は良く、走行時にエア漏れも無くエアベアリングへの供給空気は安定していたと考えられる。

目地部については、モルタルで段差を解消することで走行可能となったことから対策の妥当性を確認した。ただし、複数回走行を実施した後にモルタルの剥がれ及び通過時の牽引力増加が発

生じたことから、目地部への追加の補修方法を検討することとした。

また、装置計器類の設置位置について、残留物が排土板により台座脇で塊状になって押し退けられることから、台座脇付近には計器類を設置しないことが適当と考える。

2.2.5 地上模擬坑道での実機試験

地上模擬坑道で定置・回収装置（仕様を表 2.2.5-1 に、図 2.2.5-1 に外観写真を示す。）を使用して実機試験を実施した。各試験の目的及び得られた知見は以下のとおり。

表 2.2.5-1 定置・回収装置の仕様

基本仕様	取扱荷重 (PEM 重量)	36.5 ton
	取扱寸法 (PEM 寸法)	2316mm × (L)3343mm
	機器重量	約 6100 kg (搬送部 : 5200kg 定置部 : 900kg)
	機器寸法	(L)9500 mm × (W)2065 mm × (H)2495 mm
荷重支持	エアベアリング	AeroGo 社 K21NHD 特殊品 curved type (径 : 533mm 揚程 : 31mm 定格圧力 : 0.41MPa) 走行方向に対して左右 5 枚ずつ (合計 10 枚) 使用
搬送	方式	電動機 (1.5kW × 4 台) 接続された車輪による走行
	速度	(高速) 5 m/min (低速) 1 m/min
運転	方式	遠隔自動運転 / 遠隔手動運転 / 保守モード運転
	監視	画像の目視 (試験員) 及び各種計測値による監視



図 2.2.5-1 定置・回収装置 (写真)

(1) 試験目的

実機試験は、打設コンクリート面及び充填材除去後の走行面での PEM の搬送性を確認することを目的とした。

(2) 試験で得られた知見

定置・回収装置について、エアベアリングの定格圧力 (0.41 [MPa]) 範囲内で走行できたことから、PEM (36.5t) に対して十分な耐荷重があることを確認できた。また、コンプレッサの流量不足に対して、項目 2.3.3 に記載したエアベアリングへの供給空気増加対応の妥当性を確認できた。また、LIFT 間目地部のような段差や割れに対して、モルタル補修による段差解消と補修部の補強の妥当性を確認できた。

押引力について、w以下の傾向を確認した。

- ・モルタル面よりもコンクリート面の方が押引力は高い傾向であった。
- ・上敷き材面での押引力は低い傾向であった。
- ・回収時 (LIFT-1 側から LIFT-4 側への搬送時) よりも定置時 (LIFT-4 側から LIFT-1 側への搬送時) の方が高い傾向であった。(要素試験 1 で得た走行方向に対する傾向と同様であり、装置の走行特性とは別の要因と考えられる。)

幌延 URL での要素試験で得られた動摩擦係数 (約 0.018) [4] に対して、今回の地上模擬坑道での動摩擦係数 (回収時コンクリート面 : 0.021) は同等であったことから、2つの坑道での走行特性は同等と考えられ、幌延 URL で PEM を搬送できると判断できる。

また、前方 PEM 接近試験により、前方 PEM と約 10mm 程度の距離まで接近させることが可能であることが分かった。ただし、PEM の浮上・着床で数 mm ずれることから、PEM 同士を接触させた状態で PEM を浮上させようとする、接触面から反力を受けて PEM を浮上できなくなる可能性が示された。よって、PEM 同士を接触させて定置させると PEM を回収できなくなることが考えられる。ただし、幌延 URL での地下実証試験で試験対象となる PEM (模擬 PEM) は前方 PEM (疑似 PEM) と 10mm 程度の距離を置いて設置されていることから、幌延 URL での地下実証試験については、PEM の回収は可能であると判断できる。

なお、PEM 搬送時にコンクリート台座ブロック境界が破損した。本破損は、定置・回収装置のガイドローラがブロック境界の隙間に差し掛かった際の荷重 (押引力) によるものと推定でき、これに対する改善方法として、台座 (走行ガイド) の耐久性を向上させる等の対応が考えられる。

ただし、現状でも実機試験回数程度の PEM 搬送は可能であることから、本事業では特に改善を要しないと判断した。

以上の要素試験と実機試験の結果により、幌延 URL 試験坑道 2 の走行面においても、段差や割れに対してモルタル補修等の適切な対応を取ることで、整備した定置・回収装置が PEM を搬送 (定置及び回収) 可能であると判断した。

2.3 隙間充填技術の実証的整備（第2分冊：第4章）

2.3.1 実施概要

処分坑道横置き・PEM方式では、定置作業を行う装置の可動領域が必要となるため、定置されたPEMと坑道間に空間（以下、隙間という。）が生じる。この隙間の残存はPEM内部の緩衝材の膨出による密度低下、坑道長手方向の有意な水みち形成、坑道安定性の低下等、地層処分の操業や長期の安全性への影響が懸念されるため、適切な材料を充填することが検討されている[1]。回収の観点から隙間充填材をみると、回収設備の可動空間を満たしPEMを拘束するものである。

隙間に充填される材料については、充填部の規模や要件を満足するための充填材の機能や施工する空間等の観点から粘土系材料とし、施工方法としてペレット充填方式[1]や吹付け方式[2]等が検討されている。本事業で隙間充填材を施工する空間の形状は、第2章に示したように上部に開放部、下部に狭隘部を有している。平成28年度までは、上部・下部共にペレット方式による隙間充填材の施工検討を進めたが[3]、事業者のニーズ[2]、充填材除去試験の観点から、上部開放部の施工方法は吹付け方式に変更した。ペレット充填方式による下部狭隘部の充填材は、ベントナイト100%、乾燥密度1.37Mg/m³[1]、吹付け技術による上部開放部の充填材はベントナイト：ケイ砂 = 50：50、乾燥密度1.6Mg/m³[2]を施工試験の目標値とした。

地層処分事業の操業における品質管理の方法として、遠隔操作性や施工部の品質を損なわない非破壊での検査方法が求められ、各工程の検査の合格を積み重ねることで、最終的な品質を確保するプロセス管理が主となると考えられる。このためには、検査の時期、場所、頻度、合格とする値やその範囲、それらを設定する際の根拠が必要になる。隙間充填材の品質についても充填部からのコア採取等ではなく、充填材の施工プロセスで管理することを念頭置いた。平成29年度には、要素試験や地上試験を行い、上述の施工プロセス管理のための手順・試験条件・機械や装置の設定値などを把握した。一方で、本事業のような実証試験の段階では、施工試験時にコア採取のような破壊を伴う分析・評価も可能であることから、プロセス管理による品質確保の妥当性の検証も含めて、検討を進めてきた。

本事業のスコープであるPEMの回収技術では、隙間充填材の除去技術が中核となる。第5章に詳細を記す隙間充填材の除去技術の実証的整備においては、除去対象とする隙間充填材の性状が試験条件として重要となる。本章では、隙間充填材の施工技術について述べる。

地下環境での搬送定置・回収技術の実証的整備の全体工程では、次年度、幌延URLにおいて充填材の除去およびPEMの搬送定置・回収技術の実証試験を実施する計画である。これらの実証試験に先立ち、今年度は、幌延URL試験坑道2において隙間充填技術の実証試験を実施した。

2.3.2 地下環境での模擬 PEM-坑道間の下部狭隘部 隙間充填技術の実証的整備

(1) 幌延 URL における下部狭隘部を対象とした隙間充填技術の実証試験

下部狭隘部の形状は、直径 2.6m の円形坑道底部に高さ 11cm のコンクリート製の台座が設置され、その上に直径約 2.3m の PEM を定置した際に生じる十数 cm の隙間である（図 2.3.2-1）。

この狭隘な部分に適用する充填材は、低透水性の確保および緩衝材の鋼殻外への膨出抑制の観点から、候補材料として緩衝材相当の有効粘土密度を有する粘土系材料、狭隘な場所へ適用可能な充填技術としてペレット方式が有効と評価された。

本事業では充填部の体積より必要な充填材が多くなることから、ペレットには密度を高めた解砕材を粒度調整したものを採用し、充填方法と合わせて目的の密度の達成を図った。

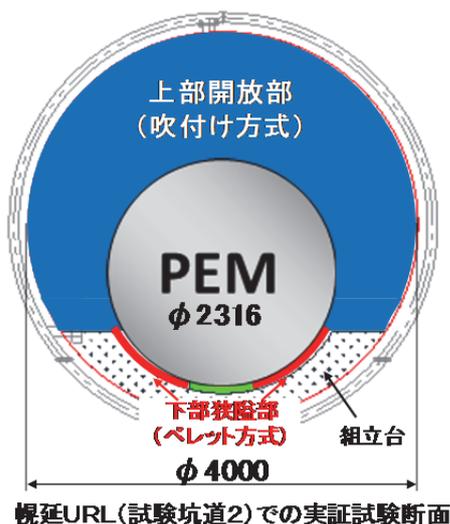
ペレット充填方式での品質管理では、未充填部が生じない充填方法、充填部の体積に対する充填質量から求められる全体の密度（かさ密度）と、密度のバラつき（密度分布）が重要である。

平成 29 年度までの検討では、狭隘部の充填品質を施工プロセスの管理によって確保するための、施工に関する管理項目と管理手法の設定に資する検証データを地上での段階的な実証試験により取得してきた（平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発報告書参照）。

今年度は、これまでの地上試験等にて設定した充填品質を確保しうる施工プロセスを再現することで、充填品質を確保（再現）できることを実証するため、幌延 URL 深度 350m 試験坑道 2 において原位置実証試験を実施した。

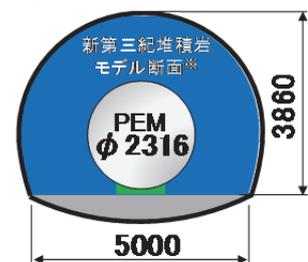
図 2.3.2-2 に下部狭隘部の隙間充填実証試験時の充填装置配置イメージを示す。

■ 坑道断面



■ 上部開放部(吹付け方式)

NUMOセーフティケースの一例
に対する充填技術の実証



■ 下部狭隘部(ペレット方式)

PEMを搬送・定置しうる最小断面
に対する充填技術の実証



※出典: NUMOセーフティケースに関する外部専門家ワークショップ、(3)処分場の設計と工学技術、2016.9.23

図 2.3.2-1 充填・実証の対象とする坑道断面と充填方式

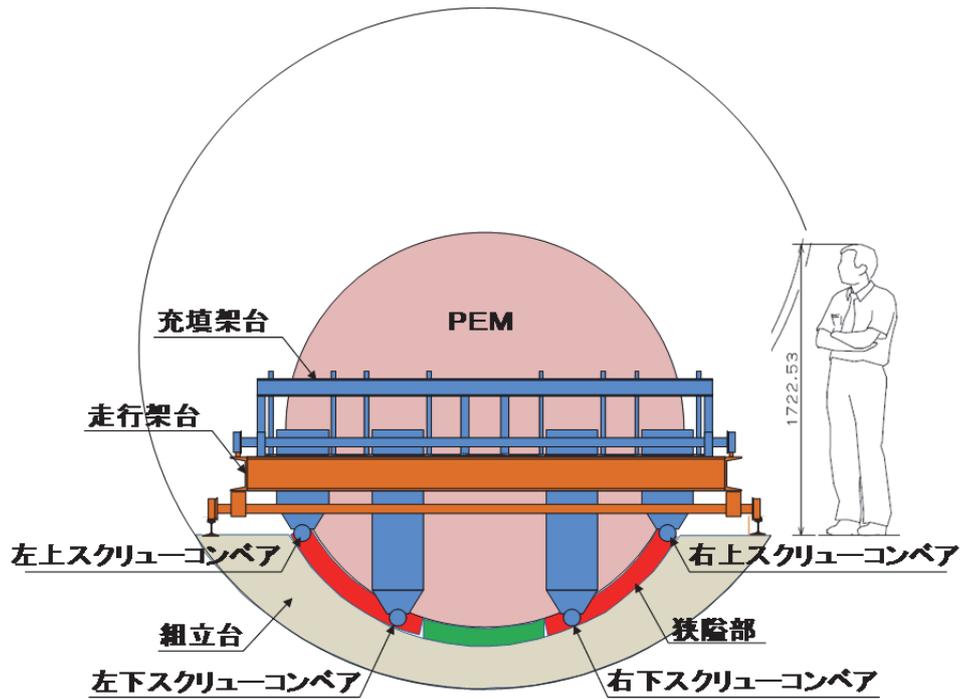


図 2.3.2-2 下部狭隘部の隙間充填装置配置イメージ (試験坑道 2)

(2) 下部狭隘部を対象とした隙間充填技術実証試験の実施概要

1) 充填材料の製造

下部狭隘部の充填材の製造は、平成 29 年度に設定した粒子密度や粒度分布をもとに品質管理を実施した。充填材の製造工程を図 2.3.2-3 に示す。

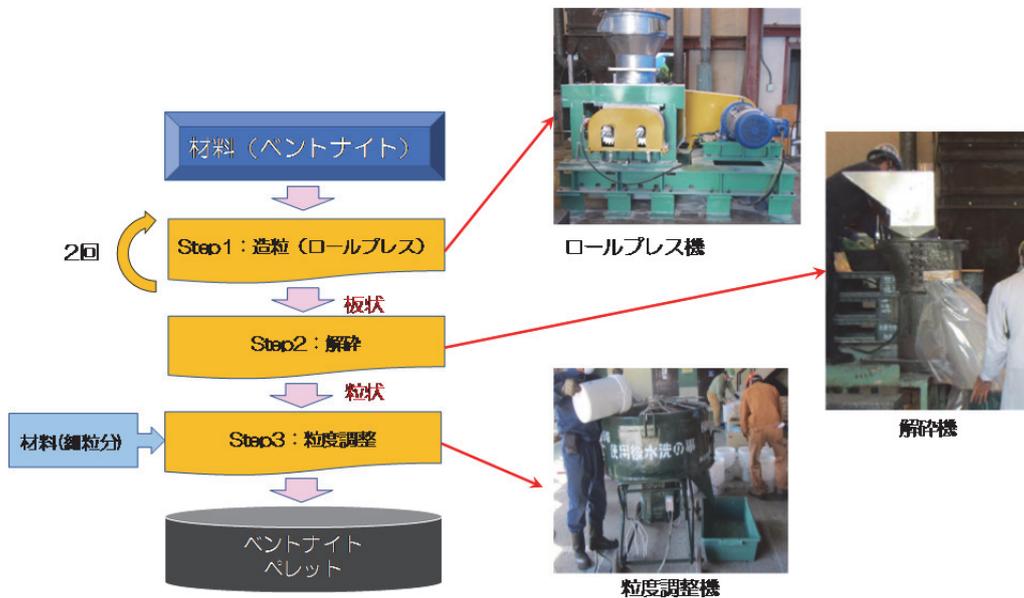


図 2.3.2-3 下部狭隘部の充填材 製造工程

各製造工程における今年度と平成 29 年度の充填材品質の確認結果を表 2.3.2-1 に示す。

また図 2.3.2-4 および図 2.3.2-5 に平成 29 年度と今年度の充填材の粒度分布を示す。今年度も、

所定のフラー曲線の範囲の粒度分布となるよう粒度調整を行うことで、平成 29 年度と同等程度の密度となっていることを確認し、今年度の実証試験用の充填材として用いることとした。

表 2.3.2-1 各製造工程における充填材の品質確認結果

製造工程	試験項目	平成 30 年度	平成 29 年度
1.ロールプレス後	含水比 (%)	7.3	8.5
	乾燥密度 (Mg/m ³)	2.00	1.98
2.解砕後	含水比 (%)	6.4	-
3.粒度調整後	含水比 (%)	6.5	8.8
	最小密度 (Mg/m ³)	1.05	1.12
	最大密度 (Mg/m ³)	1.47	1.46

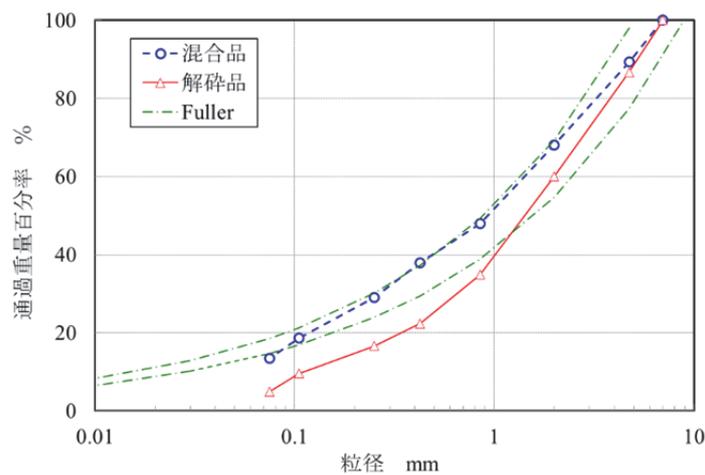


図 2.3.2-4 粒度分布の管理 (平成 29 年度)

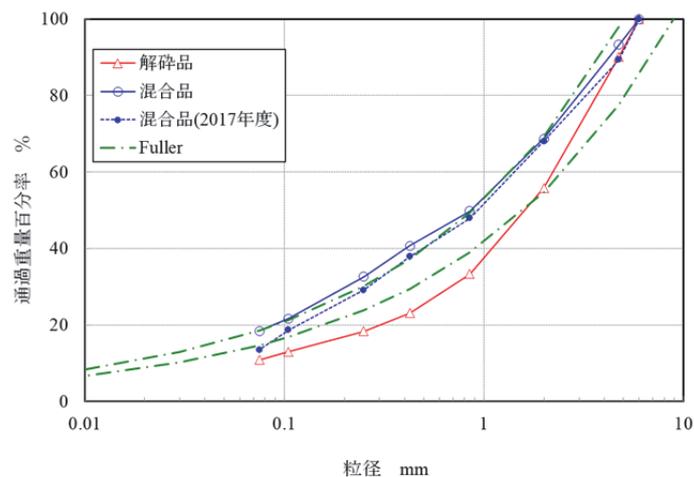


図 2.3.2-5 粒度分布の管理 (平成 30 年度)

2) 充填技術実証試験

充填技術実証試験は、『充填容積の確認』、『移送性能確認試験』、『施工プロセスと条件設定』、『充填技術実証試験』、『充填品質確認』、『光ファイバー計測による充填密度分布の推定』の順に実施した。

『充填容積の確認』では、充填延長（PEM 長 3.343m）を 6 等分してそれぞれの区間ごとに容積を算出した（図 2.3.2-6 参照）。

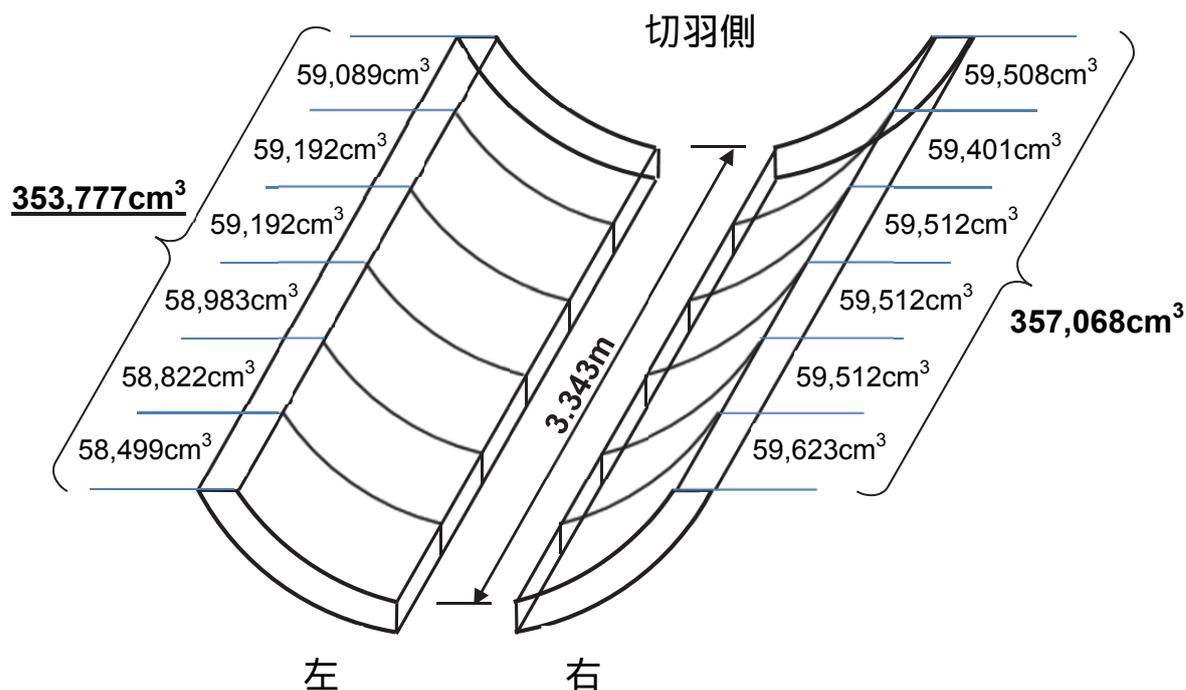


図 2.3.2-6 充填容積

『移送性能確認試験』では、平成 29 年度の地上実証試験にて、充填に用いる 4 本のスクリーコンベアの移送性能が概ね均一であることが確認されていることから、4 本のスクリーコンベアを代表して 1 本のスクリーコンベアにより実施した(表 2.3.2-2、図 2.3.2-7 および図 2.3.2-8 参照)。試験の結果、平成 29 年度とほぼ同等の移送性能であることを確認した。(表 2.3.2-3 および表 2.3.2-4 参照)。

表 2.3.2-2 移送性能確認試験結果（平成 30 年度）

														(kg/m in)	
移送時間	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	平均
右上 34rpm	0	1.057	6.551	12.041	12.076	12.115	12.059	12.044	12.207	12.104	12.159	12.167	11.906	11.985	12.08 (3-13m in)
右上 17rpm	0	0.244	5.845	6.022	6.165	6.124	6.127	6.067	6.175	6.154	6.218	6.074	6.150	6.188	6.13 (3-13m in)

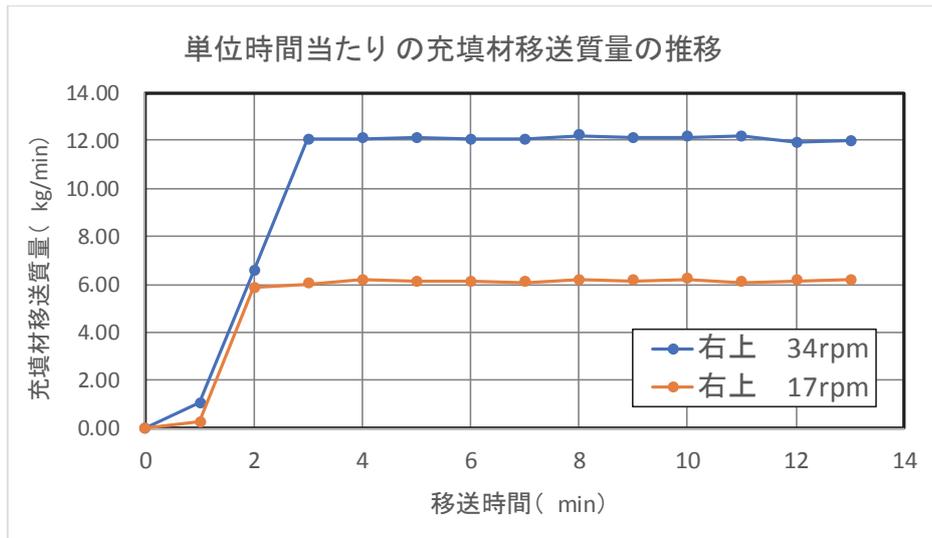


図 2.3.2-7 移送性能確認試験結果 (平成 30 年度)

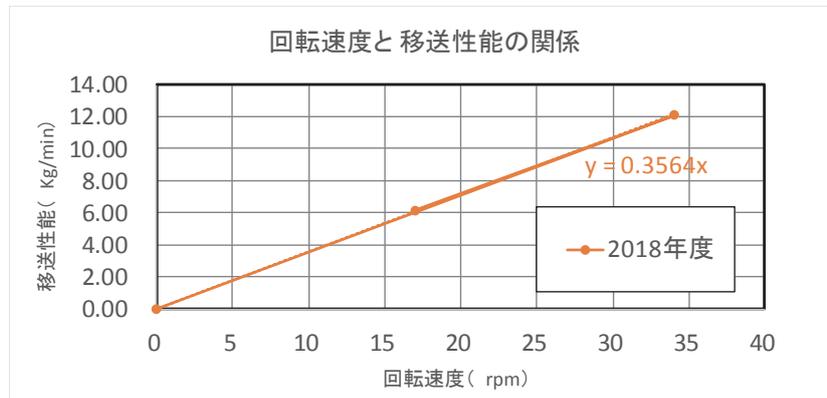


図 2.3.2-8 スクリュー回転速度と移送性能の関係 (平成 30 年度)

表 2.3.2-3 移送性能確認試験結果のとりまとめ (平成 30 年度)

試験ケース	平均	最大値	最小値	設定した スクリュー移送性能
1-1 右上 (34rpm)	12.08	12.21	11.91	17rpm: 6.06kg/min 34rpm: 12.12kg/min
1-2 右上 (17rpm)	6.13	6.22	6.02	

表 2.3.2-4 移送性能確認試験結果（平成 29 年度）

試験ケース	平均	最大値	最小値	左の結果から設定した スクリー移送性能
1-1 右上 (34rpm)	12.65	12.76	12.50	17rpm: 6.25kg/min 34rpm: 12.50kg/min
1-2 右上 (17rpm)	6.28	6.38	6.20	
1-3 左上 (34rpm)	12.63	12.76	12.48	

『施工プロセスと条件の設定』については、平成 29 年度に実施した地上予備試験の結果から、概ね最適とされた試験ケース 4-2 (表 2.3.2-5 および図 2.3.2-9 参照) で得た試験条件を基本とし、移送性能試験で得た結果を考慮して設定した (表 2.3.2-6 参照)。

表 2.3.2-5 地上予備試験のうち試験ケース 4-2 (平成 29 年度) の試験条件

試験ケース	左右	狭隘部 断面積 (m ²)	充填材含水比 8.8%の場合 の単位長あた りの所要充填 質量 (kg/m)	スクリー回転速度 および 比率設定 (kg/min)			初期充填					移動充填		後充填	
							充填時間 設定 (sec)		初期充填 設定充填質量 (kg/20cm)		移動充填 設定充填質量 (kg/m)		移動速度 設定 (mm/min)	充填 時間 (sec)	設計 充填質量 (kg)
							上段	下段	合計	上段	下段	設計に対する 割合率			
4-2 T-1	左	0.1061	158.1	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	15%	177.3	12%	95.3	30	8.5
	右	0.1051	156.7	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	16%	177.3	13%			
4-2 T-2	左	0.1061	158.1	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	15%	177.3	12%	95.3	44	12.4
	右	0.1051	156.7	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	16%	177.3	13%			
4-2 T-3	左	0.1061	158.1	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	15%	177.3	12%	95.3	27	7.6
	右	0.1051	156.7	7.81	9.11	16.92	148	113	36.4	16%	177.3	13%			

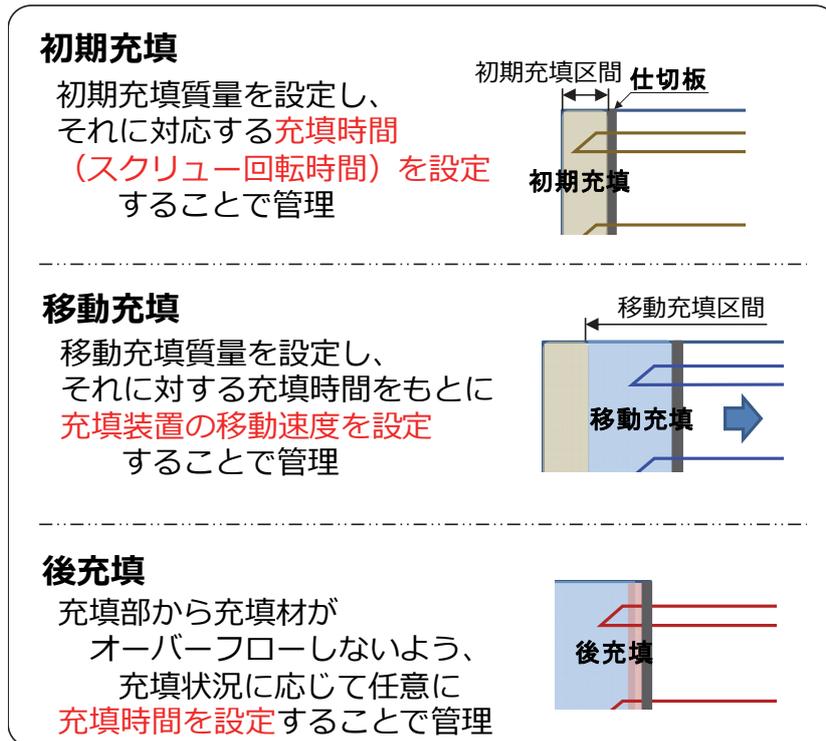


図 2.3.2-9 平成 29 年度に設定した施工プロセス管理

表 2.3.2-6 地下充填実証試験の試験条件

試験ケース	左右	狭隙部 断面積 (m ²)	充填材含水比 6.5%の場合 の単位長あたりの 所要充填 質量 (kg/m)	スクリー回転速度 および 比率設定 (kg/min)			初期充填				移動充填		後充填		
				上段	下段	合計	充填時間 設定(sec)		初期充填 設定充填質量 (kg/22cm)		移動充填 設定充填質量 (kg/m)	移動速度 設定 (mm/min)	充填 時間 (sec)	設計 充填質量 (kg)	
							上段	下段	設計に対する 割増率	設計に対する 割増率					
地下充填 実証	左	0.1058	154.4	7.57	8.84	16.41	164	125	39.2	15.5%	173.7	12.5%	94.5	44.0	12.03
	右	0.1068	155.8	7.65	8.92	16.57	164	125	39.6	15.5%	175.3			44.0	12.15

『充填技術実証試験』は、上記で設定した施工プロセスと条件により、表 2.3.2-7 および図 2.3.2-10 に示す手順にて実施した。

表 2.3.2-7 実証試験実施手順

順序	実施項目	実施内容
1	試験条件の確認・設定	スクリー回転速度、充填時間、充填装置移動速度の設定
2	充填装置の配置	PEM の奥妻側の充填開始位置に配置
3	初期充填	充填装置停止状態で所定の時間充填を実施
4	移動充填	所定の速度で充填装置を移動させながら充填を実施
5	後充填	充填終了位置手前にて充填装置停止状態で充填を実施
6	バルク充填密度確認	充填装置への充填材投入量と充填装置内残量より算出
7	充填密度分布確認	光ファイバーによる相対的かつ定性的な密度分布確認

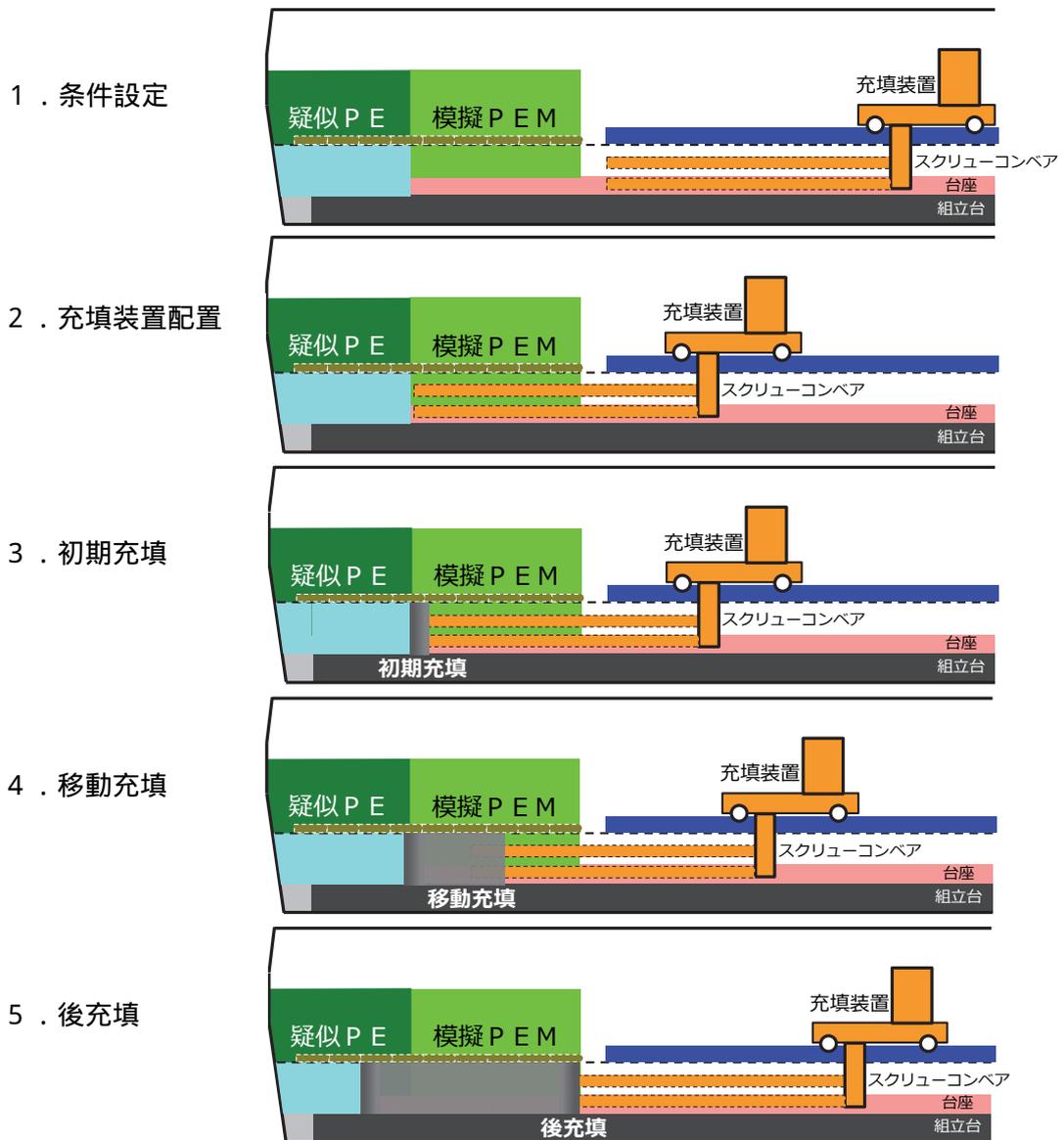


図 2.3.2-10 試験実施手順（充填施工）

『充填品質確認』は、左右の下部狭隘部充填容積に対して充填した充填材質量から、左右の下部狭隘部全体での充填密度を算出し、所定の充填密度を確保できていることを確認した（図 2.3.2-11、表 2.3.2-8 および表 2.3.2-9 参照）。

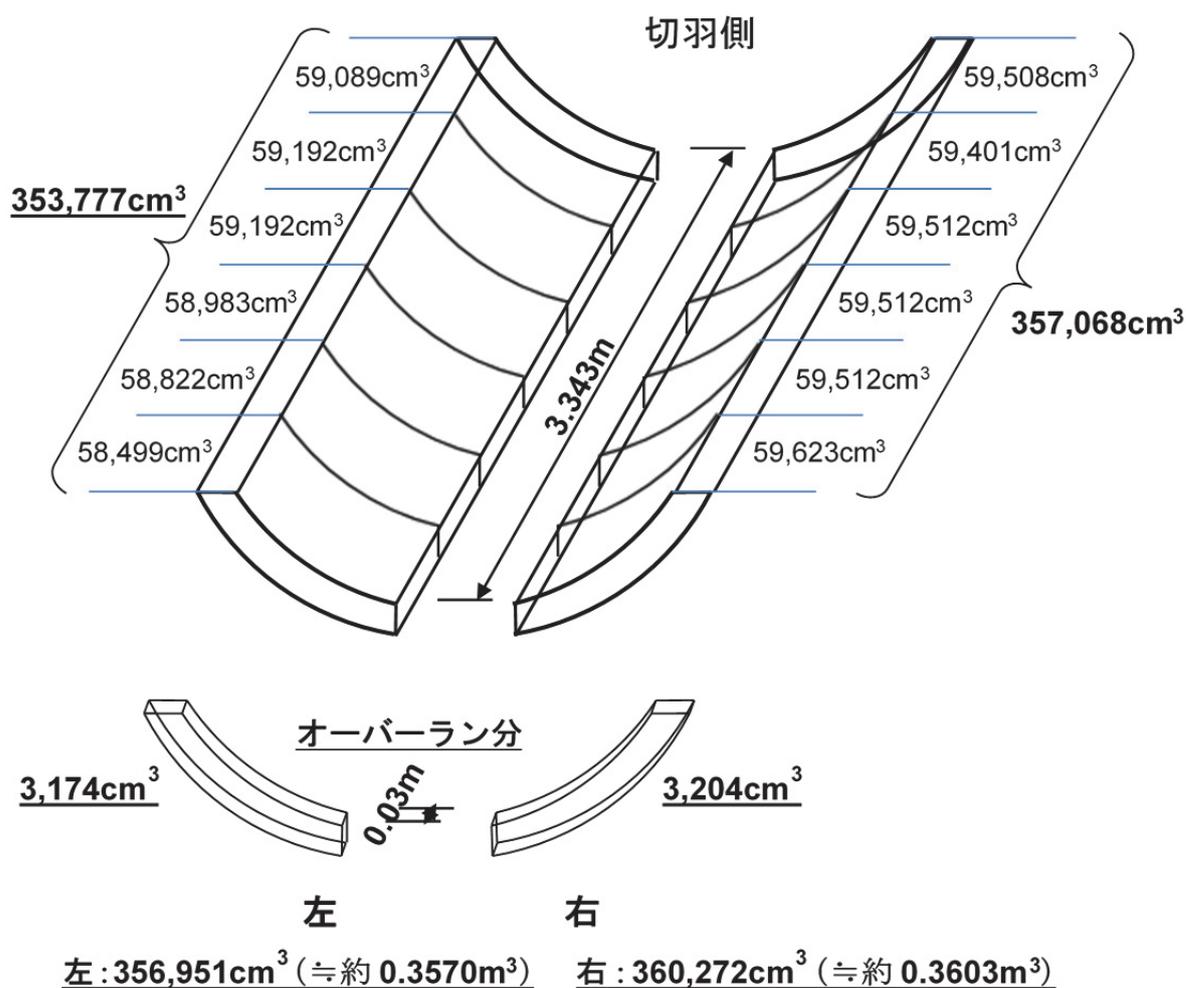


図 2.3.2-11 実証試験における実充填容積

表 2.3.2-8 下部狭隘部への実充填質量

管理項目	左スクリュー	右スクリュー
全投入質量(Mg)	0.7925	0.8412
残存質量(Mg)	0.2687	0.3036
実充填質量(Mg)	0.5238	0.5376

表 2.3.2-9 下部狭隘部充填密度 (乾燥密度は含水比 6.5%として算出)

		左狭隘部	右狭隘部
狭隘部充填密度 (Mg/m ³)	湿潤	1.467	1.492
	乾燥	1.378	1.401

『光ファイバー計測による充填密度分布の推定』では、含水比が一定の物質が有する熱伝導率の密度依存性を利用し、充填材の加熱、冷却過程を光ファイバーにて計測することで、坑道延長方向と PEM 半径方向の充填密度分布を推定した。

結果、坑道延長方向および PEM 半径方向ともに、平成 29 年度に実施した地上予備試験時の密度分布の傾向と概ね一致することから、施工プロセス管理による充填品質の再現性が確認された（詳細は第 2 分冊 4 章を参照）。

2.3.3 地下環境での模擬 PEM-坑道間の上部開放部 隙間充填技術の実証的整備

本事業で対象とした上部開放部の空間形状は、模擬 PEM 上部の最大幅 約 1300mm、模擬 PEM 側部の最大幅 約 700mm、奥行 4m 程度（図 2.3.3-1）である。

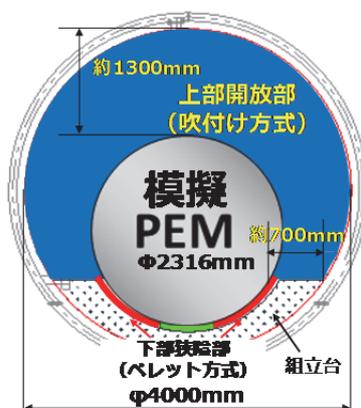


図 2.3.3-1 上部開放部の形状（幌延 URL 深度 350m 坑道 試験坑道 2）

平成 29 年度までの検討では、地上での段階的な予備試験、要素試験、模擬土槽試験を実施することで、上部開放部の充填品質（表 2.3.3-1 ベントナイト：ケイ砂=50：50 としたベントナイト混合土に対し、乾燥密度 1.6Mg/m³ 以上）を確保するための、材料、施工方法および、施工に関する管理項目の設定に資する検証データを取得してきた。詳細については、「平成 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 報告書（第 2 分冊）地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発」[4]を参照されたい。

表 2.3.3-1 上部開放部の充填材料および目標の乾燥密度

対象部位	充填材料	目標の乾燥密度
上部開放部	ベントナイト：珪砂 = 50：50	乾燥密度 1.60Mg/m ³ 以上 (有効粘土密度 1.15Mg/m ³)

これまでに地上試験等にて確認・把握してきた、所定の品質を確保する施工プロセスを、地下の原位置で再現することで、地下の原位置においても地上と同様に所定の品質を確保できることを確認するための実証試験を実施した。

(1) 幌延 URL における上部開放部を対象とした隙間充填技術の実証試験

1) 実証試験概要

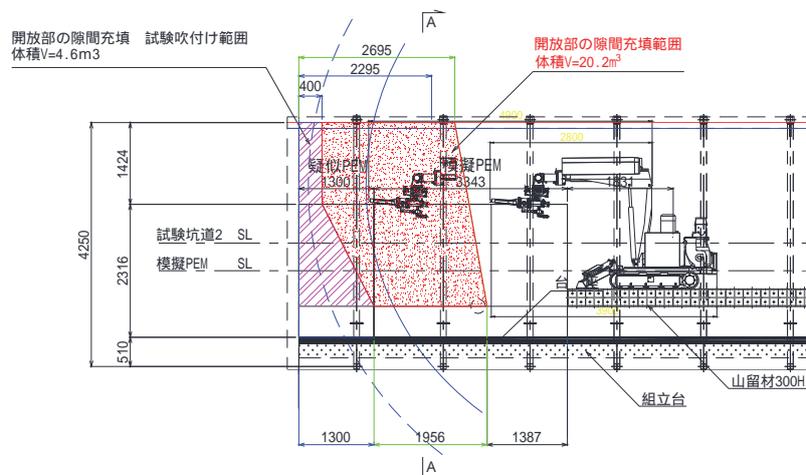
幌延 URL における上部開放部の隙間充填技術実証試験では、伸縮アーム式の吹付け機械による吹付けにより隙間を充填した。上部開放部の隙間充填材は吹付け用ベントナイト混合土とし、製造プラントを仮設して、二軸強制ミキサーにより材料を製造（混合）した。なお、ベントナイト混合土の配合は、ベントナイト：ケイ砂（3号 + 5号）= 50%：50%とし、最適含水比（約 16%）

である。また、上部開放部の隙間充填材の製造後、充填試験を開始するまでの期間、隙間充填材をフレキシブルコンテナパック（以下「フレコン」という）に収納し保管した。上部開放部の吹付け充填に係るデータとして、3D スキャナを用いて計測した充填体積と充填材重量から求めた乾燥密度や、誘電率計測法およびコアサンプリングから乾燥密度を取得し、目標の乾燥密度 1.60Mg/m^3 に対するバラつき等を示した。また、回収したリバウンド材の重量計測から、吹付け量に対するリバウンド率を算出した。また、回収したリバウンド材の重量計測から、吹付け量に対するリバウンド率を算出した。図 2.3.3-3 に幌延 URL 試験坑道 2 上部開放部の充填範囲図を示す。なお、下部狭隘部と上部開放部の境界には、鉄板を設置し（図 2.3.3-2）各々の充填技術の実証試験に対して区分を分けている。



図 2.3.3-2 下部狭隘部と上部開放部の境界に設置した鉄板

縦断図



横断図

A-A断面

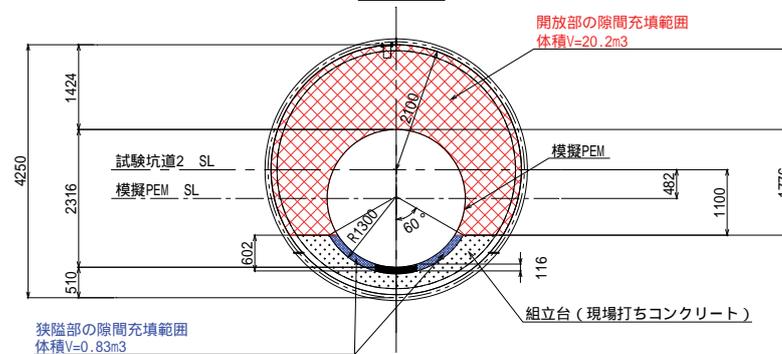


図 2.3.3-3 幌延 URL 試験坑道 2 上部開放部の充填範囲図

図 2.3.3-4 に上部開放部の実証試験フローを示す。地上で製造した隙間充填材を地下の試験坑道 2 に搬入・運搬し、その隙間充填材を吹付け装置に供給、伸縮アーム式の吹付け機械を用いて、吹付けを実施した。ノズルワークや機械配置等を確認する「試験吹付け」を試験坑道の奥部（図 2.3.3-3 の縦断図のうち、紫ハッチ部）にて行い、その後「本吹付け」により開放部の充填を実施した。なお、吹付け数量は、試験吹付けで約 5m³、本吹付けで約 20m³ である。試験吹付け終了後、3D スキャナによる充填体積の計測を行い、本吹付けを開始した。本吹付けでは、午前の終了後にコアサンプリング・誘電率計測、1 日の作業終了時にコアサンプリング・誘電率計測、3D スキャナによる体積計測を行った。サンプリング試料は後日、室内試験により乾燥密度等のデータを取得した。

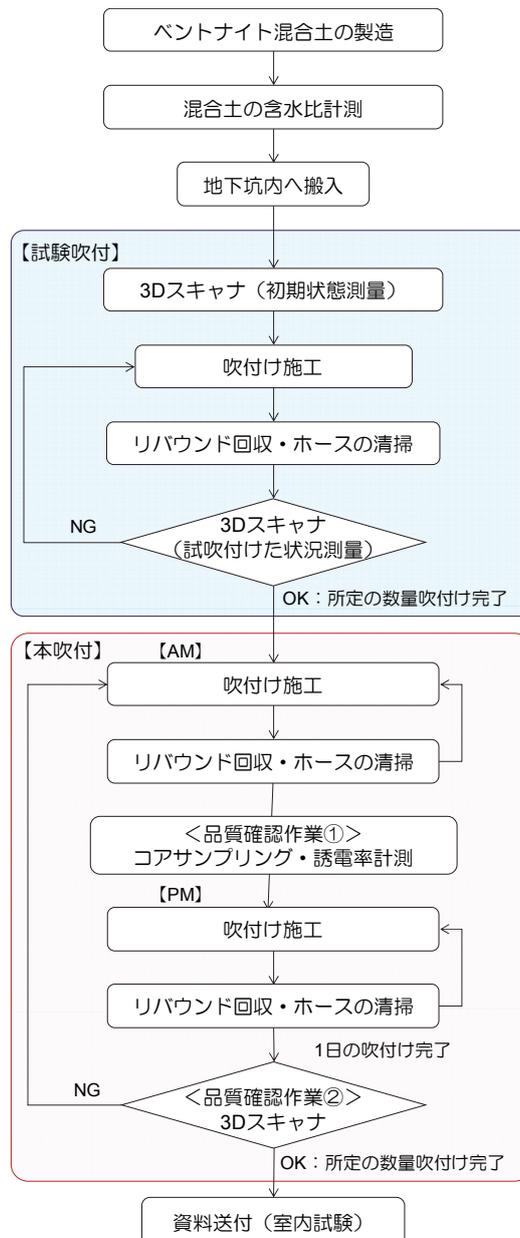


図 2.3.3-4 上部開放部 実証試験フロー

2) 上部開放部の隙間充填（吹付け）

上部開放部の吹付けによる隙間充填は、平成 29 年度までに実施した予備試験等から把握した目標乾燥密度を達成するための吹付けパラメータの基本設定値（表 2.3.3-2）[4]を基に、吹付け機械（ニードガン）伸縮アーム式の吹付け機械等を用いて実施した。

表 2.3.3-2 吹付けパラメータと設定値[4]

吹付パラメータ	設定値	備考
吹付機械の回転数	5rpm	機械側で設定
空気圧縮機のエア量	10～12m ³ /min	デジタルフロースイッチで計測
吹付けノズルから吹付け面までの距離	1.2m 以内	距離計（パトランプ）による確認 オペレータの操作技量を含む
吹付けノズルから吹付け面までの角度	法面に対し直角	オペレータの操作技量を含む

吹付けの手順を以下に示す。まず、隙間充填材を材料ホッパー内に供給し、ベルトコンベアを介して吹付機械（ニードガン）に隙間充填材を送る。次に、圧縮空気を原動力として、吹付け機械（ニードガン）から隙間充填材をホース（3 インチ）内に圧送し、伸縮アーム式吹付け機械のノズル先端より噴射、対象箇所への吹付けを行う。

なお、地上での隙間充填材の製造状況に応じて、フレコン 3 袋（約 900kg）～5 袋（約 1500kg）毎に吹付けを行い、リバウンドの回収を行った。リバウンドの回収には主に長距離空気搬送機（ジェクター）を用いて行い、必要に応じて人力によるリバウンド材の回収を行った。吹付け作業状況を図 2.3.3-5 に示す。

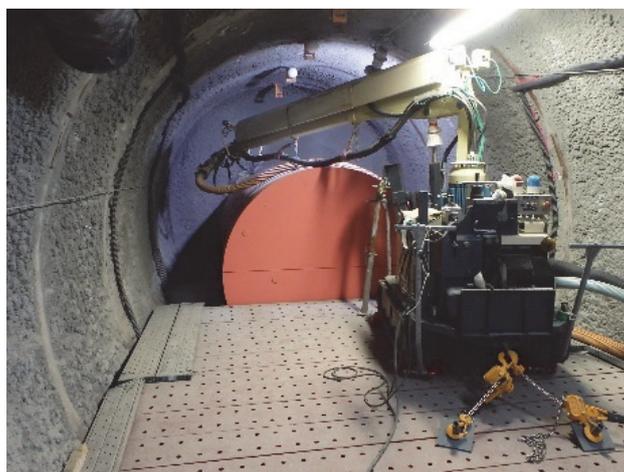


図 2.3.3-5 伸縮アーム式吹付け機械による吹付け状況

(2) 充填品質確認

1) 管理項目

上部開放部の隙間充填に係る実証試験における管理項目を表 2.3.3-3 に示す。

表 2.3.3-3 管理項目 一覧

分類	項目	基準・標準類 (確認方法)	管理基準値	管理 or 確認	実施時期	数量
品質管理 (材料)	締固め特性	JIS A 1210		確認	前年度に 取得済	
	含水比 (ベントナイト)	赤外線水分計		確認	混合前	1点/フレコン
	含水比 (ケイ砂)	赤外線水分計		確認	混合前	3点/全体
	含水比 (ベントナイト 混合土)	赤外線水分計	$W_{opt}15.8 \pm 2\%$ 以内	管理	混合後	1点/フレコン
	ベントナイト 混合率	JBAS 107-91	50%	確認	混合後	1点/フレコン
施工管理	重量	(クレーンスケール)		確認	吹付け前	1点/フレコン
	吹付け距離	(レーザー距離計)	1.2m 以内	確認	吹付け時	
	吹付け角度	(目視)	吹付け面に対し 90度	確認	吹付け時	
	吹付け機械 回転数	(目視)	5rpm	確認	吹付け時	
	吹付け機械への エア量	(デジタルフロースイ ッチ計測値の目視)	10~12m ³ /min	確認	吹付け時	
	リバウンド量・率	(クレーンスケール)		確認	リバウンド回収後	1施工単位ごと
品質管理 (施工後)	乾燥密度	(3D スキャナ計測)	(目標値) 1.6Mg/m ³	確認	午後の 吹付け作業後	
		(コアサンプリング、 試料による試験)			午前/午後の 吹付け作業後	20個程度/日
		(誘電率計測)			午前/午後の 吹付け作業後	コアサンプリング箇 所×4点
	含水比	JIS A 1203 (コアサンプリング 試料による試験)		確認	午前/午後の 吹付け作業後	20個程度/日
	ベントナイト 混合率	JBAS 107-91 (コアサンプリング 試料による試験)	50%	確認	午前/午後の 吹付け作業後	20個程度/日
その他	サイクルタイム	(ストップウォッチ)	主要工程の 所要時間記録		施工時	日常記録
	地上建屋・坑内 環境データ	(温湿度計)			常時	日常記録

2) 品質管理（施工後）結果

表 2.3.3-3 に示した管理項目のうち、本項では、品質管理（施工後）の結果を示す。その他の結果については、第 2 分冊第 4 章を参考されたい。

a 乾燥密度

乾燥密度の結果を表 2.3.3-4 に示す。コアサンプリングによる乾燥密度の平均は 1.66Mg/m³ となり、目標乾燥密度 1.6Mg/m³ を達成する結果を得た。この結果は、平成 29 年度の地上試験における平均値 1.61 Mg/m³ と同程度の結果である。この結果より、所定の条件の下で施工プロセス管理を行うことで品質の確保と再現が可能であり、一般的な管理手法となりうる可能性を有することが示唆された。一方、誘電率計測による乾燥密度の平均は 1.56Mg/m³、3D スキャナ計測による乾燥密度の平均は 1.48Mg/m³ となり、目標乾燥密度 1.6Mg/m³ に比べ、0.1Mg/m³ 程度の差異を有する結果となった。図 2.3.3-6 に乾燥密度の各計測結果と施工日の関係を示す。コアサンプリングと誘電率計測の結果については、施工日ごとの傾向が近い結果となった。一方、3D スキャナを用いた乾燥密度の値は、誘電率計測、コアサンプリングによる試験結果に比べ、全体的に低い値となった。乾燥密度の算出手法による結果の異なりやバラツキの原因の特定は今後の課題となった。

表 2.3.3-4 乾燥密度結果 一覧

計測日	乾燥密度(Mg/m ³)		
	3D スキャナ	誘電率	コアサンプリング
1/11PM	1.51	1.60	1.71
1/15AM	-	1.63	1.72
1/15PM	1.55	1.58	1.64
1/16AM	-	1.60	1.68
1/16PM	1.46	1.52	1.64
1/17AM	-	1.53	1.59
1/17PM	1.54	1.56	1.65
1/18PM	1.57	1.52	1.68
1/21PM	1.33	1.56	1.64
1/22PM	1.40	1.53	1.68
平均	1.48	1.56	1.66

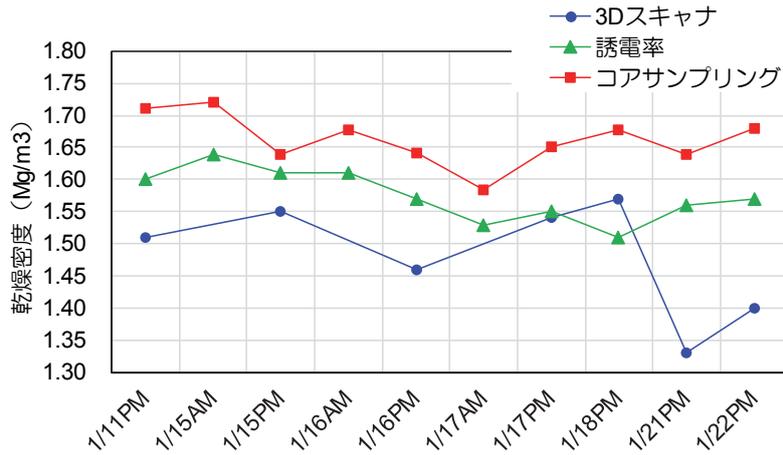


図 2.3.3-6 乾燥密度の各計測結果と施工日の関係

a 含水比

隙間充填材は、製造の後、当日中に吹付け材料として使用した。二軸強制ミキサーにより混合・製造した隙間充填材の含水比の平均は 15.62%となり、当初設定した含水比 15.8%とほぼ同等の結果となった。混合後に計測した隙間充填材の含水比について、収納したフレコン毎に整理した結果を図 2.3.3-7 に示す。なお、図 2.3.3-7 には、本吹付けに使用した No.39~223 までの 185 袋の含水比計測結果について示した。試験期間中（8 日間）において、全ての製造日で、管理値である 15.8% ± 2%以内に収まっていることから、一定の品質を確保した隙間充填材の製造がなされたと考えられる。

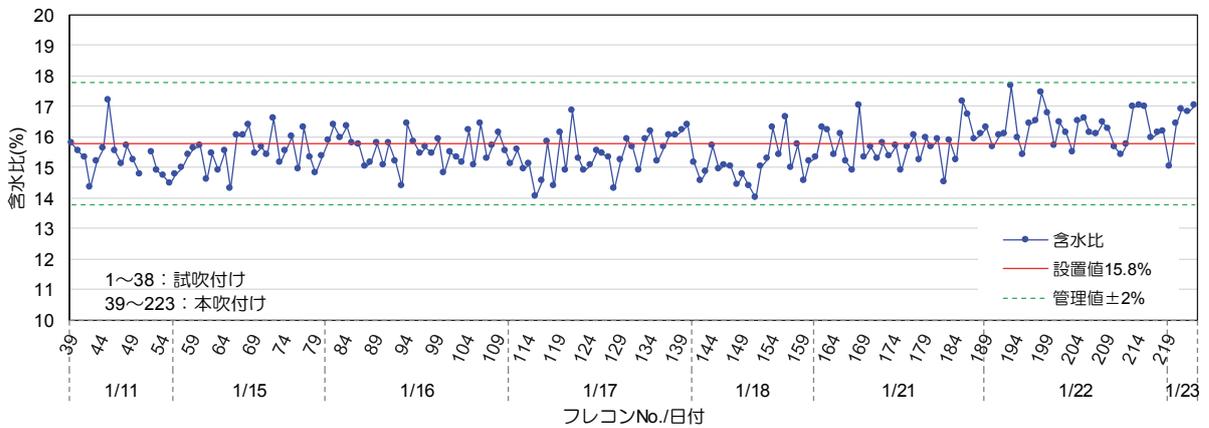
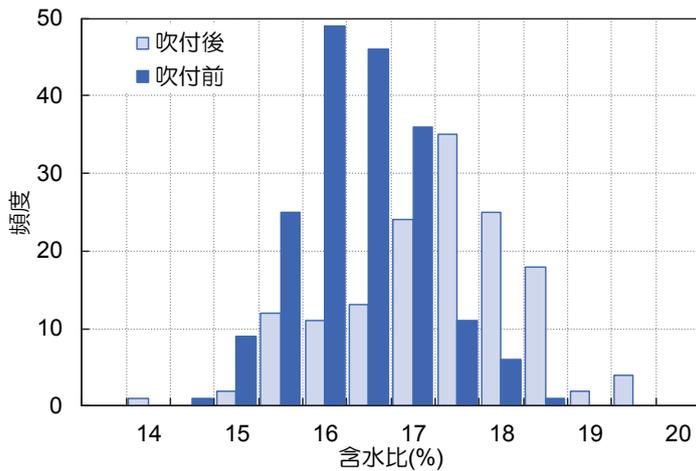


図 2.3.3-7 隙間充填材の製造毎（フレコン毎）の含水比結果

図 2.3.3-8 に吹付け前後の含水比の比較を示す。ここで吹付け前とは隙間充填材の製造直後を示し、吹付け後とはコアサンプリングした試料から求めた含水比を示す。吹付け後の平均含水比は約 17%となり、製造後の含水比の平均値 15.62%に比べて約 1.5%程度、含水比が上昇する結果となった。今回の実証試験では、製造（混合）した隙間充填材を当日中に吹付け材料として使用していることから、若干の水分のなじみの影響、または測定誤差の範囲内の差異とも考えられる。



	吹付け後	吹付け前	差分
平均	17.03	15.62	1.42
標準偏差	1.00	0.70	0.30
中央値	17.17	15.61	1.56
範囲	5.74	3.66	2.08
最大値	19.33	17.64	1.69
最小値	13.59	13.98	-0.40
標本数	147	184	

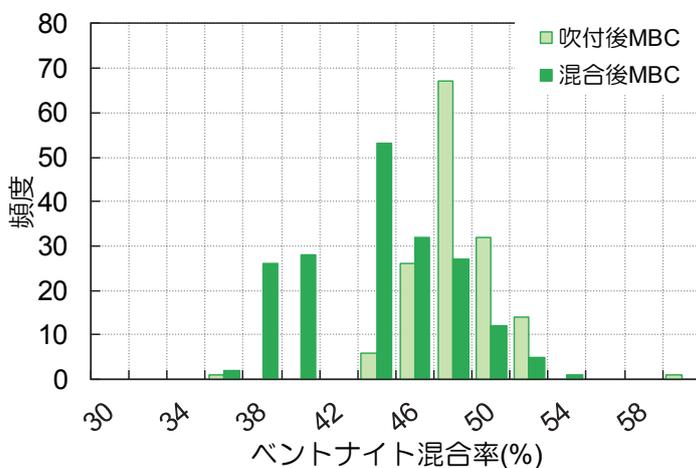
図 2.3.3-8 吹付け前後（製造後、施工後）の含水比結果

a ベントナイト混合率

二軸強制ミキサーにより混合・製造した隙間充填材のベントナイト混合率の平均は 43.0%、バラつきの範囲は 35.3~53.8%となり、設定値 50%に比べて若干低い値となった。

ベントナイト混合率のバラつきについて、製造時の加水方法による影響が考えられる。昨年度は、人力のジョウロにて目視確認しつつ加水・混合を実施したが、今年度は数量が多いことから、位置を固定したシャワーホースによる自動計量による加水を行った。今年度の位置を固定したシャワーホースによる加水方法は、多量の材料を混合する際に効率的ではあるが、一方、局所的に加水される場合があり、その結果、ベントナイトのダマが生じることがある。これらの影響により、製造後のベントナイト混合率がやや設定値よりも低い値となったと考えられる。

図 2.3.3-9 に吹付け前後のベントナイト混合率を示す。ここで吹付け前とは隙間充填材の製造直後を示し、吹付け後とはコアサンプリングした試料から求めた混合率を示す。吹付け後のベントナイト混合率は、平均では約 47.2%となり、製造後の混合率の平均値 43.0%に比べて平均で約 4.2%上昇した。この結果は、リバウンド材に砂分が多く含まれたことが要因の一つとして考えられる。



	吹付け後	吹付け前	差分
平均	47.17	42.95	4.21
標準偏差	2.60	3.74	-1.14
中央値	46.82	42.20	4.62
範囲	23.12	18.50	4.62
最大値	58.38	53.76	4.62
最小値	35.26	35.26	0.00
標本数	147	186	

図 2.3.3-9 吹付け前後（製造後、施工後）のベントナイト混合率結果

(3) サイクルタイム

吹付け・リバウンド材の回収・ホース閉塞などに要した時間について計測を行い、サイクルタイムを算出した。全体の吹付け施工サイクルタイムを図 2.3.3-10 に、全体および 1m³あたりのサイクルタイムを表 2.3.3-5 に示す。また、サイクルタイムを基に算出した作業効率を表 2.3.3-6 に示す。

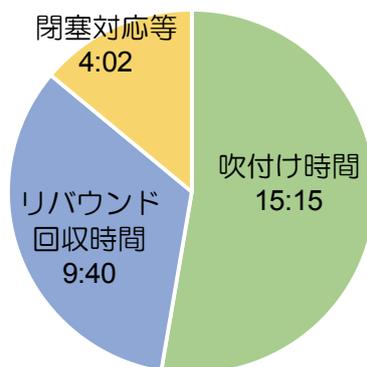


図 2.3.3-10 全体の吹付け施工サイクルタイム

表 2.3.3-5 吹付け施工サイクルタイム (全体・1m³当たり)

(hr:min)	吹付け時間	回収時間	閉塞対応など
全体	15:15	9:40	4:02
1m ³ 当たり	0:41	0:26	0:10

表 2.3.3-6 吹付け施工の作業効率

	吹付け時間	吹付け重量(Mg) 吹付け体積(m ³)	吹付け作業効率	備考
時間あたり吹付け重量	15:15	37.877 Mg	2.48 Mg / h	
時間当たり吹付け体積		20.47 m ³	1.34 m ³ / h	湿潤密度=1.85Mg/m ³ ,乾燥密度=1.6Mg/m ³ ,含水比 15.8%を基に上記の重量から体積を算出

2.3.4 成果のまとめ

(1) 下部狭隘部の隙間充填技術

平成 29 年度の予備試験結果をもとに設定した試験条件による施工プロセスの管理を行うことで、充填品質の確保と再現が可能であることを実証した。また、充填密度の相対的な分布やバラつきについても、同様に施工プロセスの管理を行うことで、それらの傾向に再現性が確認された。

以上より、横置き PEM 方式の狭隘部隙間充填技術としてペレット方式を採用する場合、所定の充填条件の下で施工プロセス管理を行うことで品質の確保と再現が可能であり、一般的な管理手法となりうる可能性を有することを確認した。

(2) 上部開放部の隙間充填技術

地下実証試験の前に実施した地上試験等で確認・設定した試験条件・施工プロセスに基づき、上部開放部を対象とした隙間充填技術に係る地下実証試験を実施した。その結果、コアサンプリングによる乾燥密度の平均値は 1.66 Mg/m^3 、バラつき $1.39 \sim 1.83 \text{ Mg/m}^3$ と目標乾燥密度 1.6 Mg/m^3 に対し $\pm 0.2 \text{ Mg/m}^3$ 程度のバラつきとなる結果を得た。この結果は、平成 29 年度の地上試験[4]における乾燥密度の平均値 1.61 Mg/m^3 (バラつき $1.4 \sim 1.7 \text{ Mg/m}^3$) と同程度の結果である。この結果から、所定の条件の下で施工プロセス管理を行うことで、一定の品質の確保と再現が可能であり、一般的な管理手法となりうる可能性を有することが示唆された。

2.4 隙間充填材除去技術の実証的整備（第2分冊：第5章）

2.4.1 実施概要

平成29年度までに、PEM - 坑道間の隙間充填材の施工技術や充填材の除去技術の検討、実証試験に向けた要素試験等を含め、除去の対象とする隙間充填部の施工技術や性状、流体的 / 機械的な除去方法の整備を進めてきた[3] [4] [5]。

今年度は、平成29年度までの成果を踏まえ、地下環境での回収実証試験に向けた隙間充填材の除去技術として、流体的除去技術（ウォータージェット方式）および機械的除去技術（オーガ方式）に係る地上試験を行い、各々の技術の実証的整備を進めるとともに、平成31年度の地下施設における実証試験に向けた除去試験の計画策定を実施した。

2.4.2 除去対象とする隙間充填材

除去対象とする隙間充填材は、下部狭隘部に充填されたベントナイトペレットと上部開放部に充填されたベントナイト混合土の2種類である。下部狭隘部の形状は、直径2.6mの円形坑道底部に高さ11cmのコンクリート製の台座が設置され、その上に直径約2.3mのPEMを定置した際に生じる十数cmの隙間である。一方、上部開放部の空間形状は、模擬PEM上部の最大幅約1300mm、模擬PEM側部の最大幅約700mm、奥行4m程度である（図2.3.3-1）。なお、下部狭隘部と上部開放部の境界には、各々の領域を区分するための鉄板を存置している。

下部狭隘部と上部開放部の各々について、隙間充填材の仕様および目標の乾燥密度、実証試験の充填結果を表2.4.2-1～表2.4.2-3に示す。また、隙間充填前後の写真を図2.4.2-1に示す。

表 2.4.2-1 上部開放部、下部狭隘部の隙間充填材の仕様および目標の乾燥密度

対象部位	充填材料	目標の乾燥密度
下部狭隘部	ベントナイト 100% ペレット	乾燥密度 1.37 Mg/m ³ 以上 (有効粘土密度 1.37Mg/m ³)
上部開放部	ベントナイト：ケイ砂 = 50：50	乾燥密度 1.60 Mg/m ³ 以上 (有効粘土密度 1.15Mg/m ³)

表 2.4.2-2 下部狭隘部の隙間充填 実証試験 結果¹

左側 下部狭隘部 乾燥密度	右側 下部狭隘部 乾燥密度
1.38 Mg/m ³	1.40 Mg/m ³

1：製造時の含水比 6.5%

表 2.4.2-3 上部開放部の隙間充填 実証試験 結果²

コアサンプリングによる 乾燥密度（平均）	誘電率計測による 乾燥密度（平均）	3D スキャナ計測による 乾燥密度（平均）
1.66 Mg/m ³	1.56 Mg/m ³	1.48 Mg/m ³

2：製造時の含水比 15.6%、吹付け後のコアサンプル含水比 17.0%

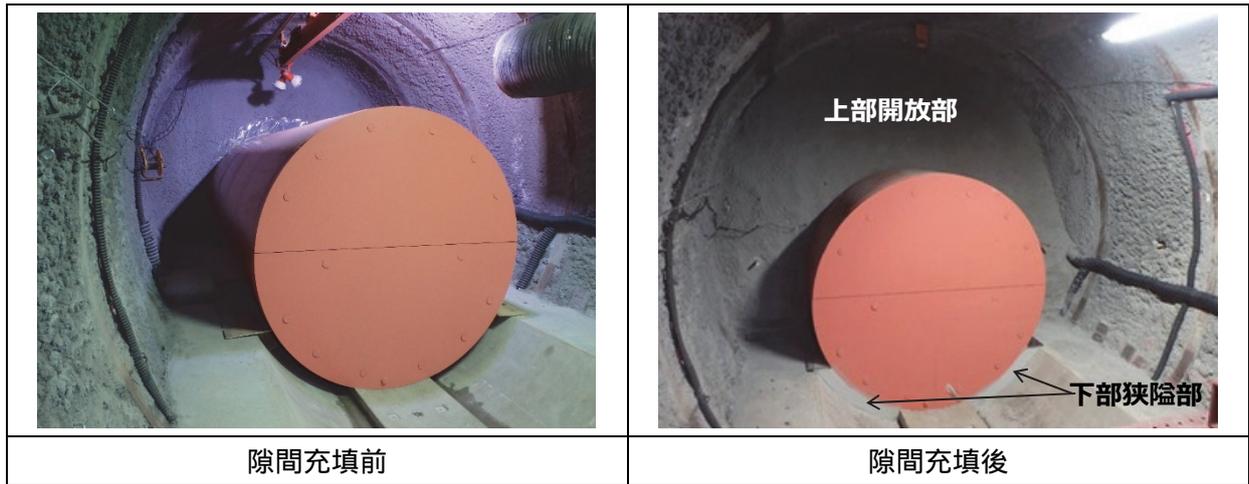


図 2.4.2-1 隙間充填の前後 写真

上述の通り、幌延 URL 試験坑道 2 において実施した隙間充填（上部開放部と下部狭隘部）の領域は、空間的な条件が大きく異なるため、除去技術はそれぞれの充填領域を対象に各々の除去技術を検討してきた。平成 29 年度までの検討により、PEM 近傍 300mm を除く上部開放部（図 2.4.2-2 の青色部）については、機械的除去技術（オーガ方式）を、上部開放部のうち PEM 近傍 300mm 以内および下部狭隘部（図 2.4.2-2 の緑色部および赤色部）については、流体的除去技術（ウォータージェット方式）を選定した。

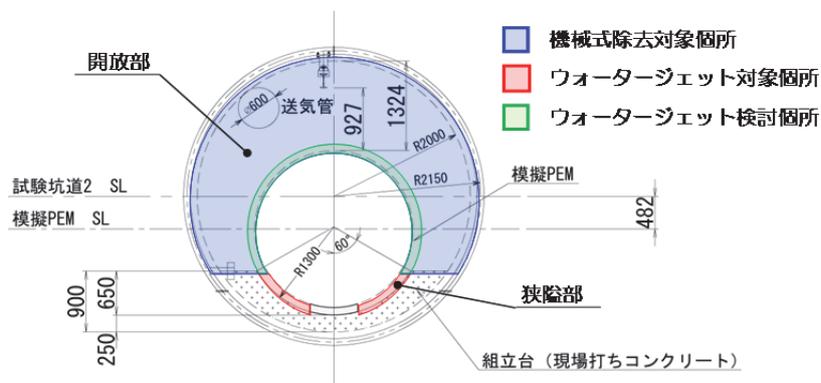


図 2.4.2-2 実証試験における各々の除去技術の対象領域 断面図

2.4.3 充填材除去の目的と概念的手順

PEM 周辺の充填材除去の目的は、1) 回収の対象物と周辺の縁切り（PEM-坑道間に施工された充填材を除去し、坑道内で PEM を搬送可能な状態とする）、2) 回収装置が要求する動作環境の実現（PEM を坑道外へ搬出するための回収装置の作業空間・走行路面などの環境を整える）となる。これら 2 つの目的を鑑みた除去技術の適用手順（図 2.4.3-1）に対し、本事業では「ほぐし」～「積み込み」までの連続的な作業を想定した除去技術の選定を行い、技術の整備・実証試験を実施している。

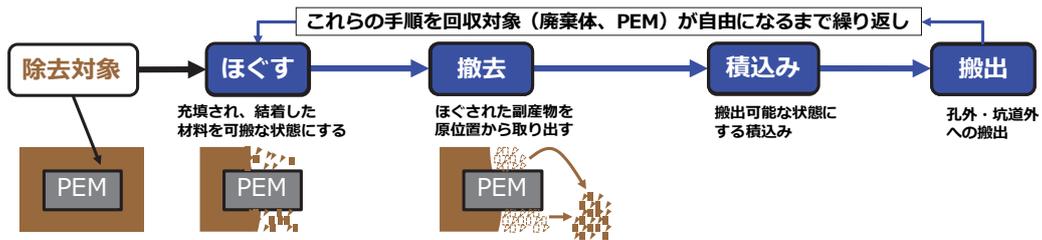


図 2.4.3-1 隙間充填材の除去手順

2.4.4 機械的除去技術（オーガ方式）の整備

来年度の地下実証試験を見据え、今年度は機械的除去技術として、充填材を切削するオーガ方式によるアタッチメントと切削した充填材のバキュームによる吸引捕集機構とを装備した機械的除去装置を製作した。また、製作した除去装置を用いた地上での除去試験を行い、本技術の整備に係るデータを取得した。

上部開放部の隙間充填材と同仕様の供試体（乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ ，含水比 16%）を鋼製枠内に準備し、地上試験を実施した、供試体の寸法は $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.7\text{m}$ である。

製作したオーガ方式によるアタッチメントを図 2.4.4-1 に、アタッチメントをバックホウに装着した機械的除去装置の全景を図 2.4.4-2 に示す。地上試験では、製作した装置による切削・吸引捕集の可否、1 孔あたりの切削量・時間、連続的な切削の状態等を確認した。図 2.4.4-3 に地上試験の結果を抜粋して示す。供試体の中央部の切削・捕集（直径 200mm・深さ 300mm、切削量 0.006m^3 ）に対し、50 秒での切削・捕集が可能であった。また、連続的な除去においても、オーガ内・吸引ホース内の閉塞は発生せず、良好な除去が可能であった。一方で、所定の切削位置にオーガアタッチメントを合わせるバックホウの操作等に時間を要した点については、地下実証試験における課題の一つと考えられた。

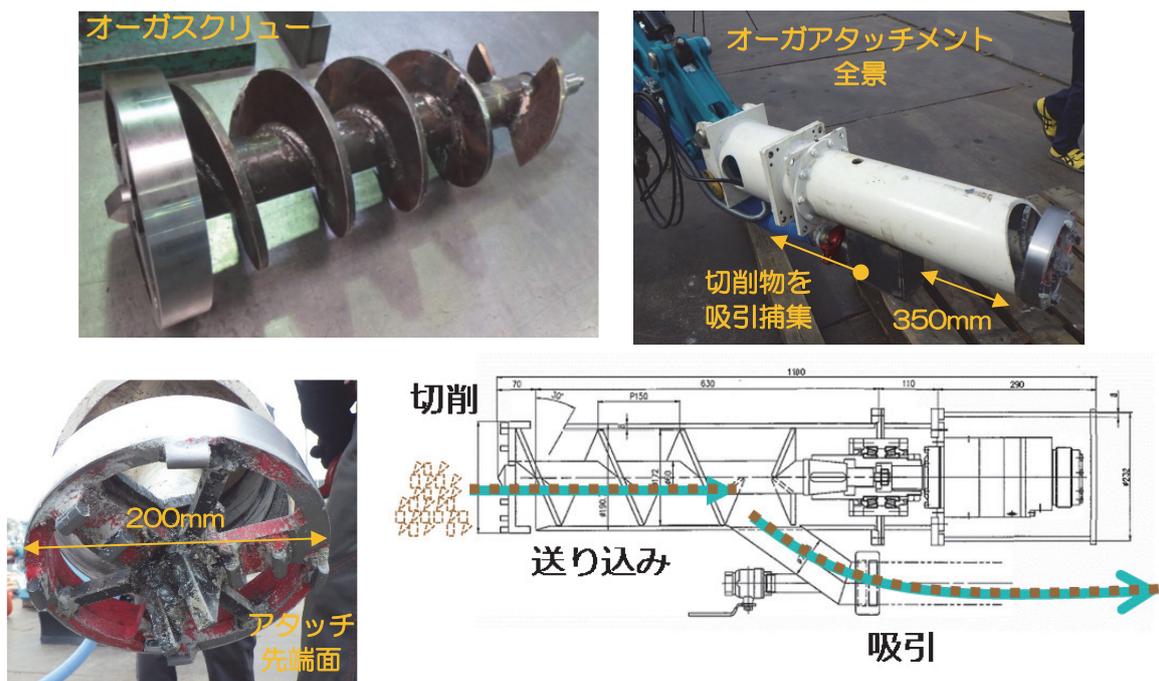


図 2.4.4-1 製作したオーガアタッチメント



図 2.4.4-2 機械的除去装置 全景



切削・吸引時間は 50 秒 / 孔
 直径：200mm、深さ約 300mm
 切削位置の調整時間除く



大割りされた切削物の
 解砕・吸引

図 2.4.4-3 地上試験結果 (一部)

2.4.5 流体的除去技術（ウォータージェット方式）の整備

今年度は、流体的除去装置（ウォータージェット方式）の製作および除去装置を用いた充填材の除去に係る地上試験を行い技術の整備に資するデータを取得した。

製作した流体的除去装置（ウォータージェット方式）は、PEM 近傍の充填材の除去を行うため、円筒形状の PEM に沿って、圧力水を噴射するノズルが円弧状および前後に運動する仕組みとした（図 2.4.5-1，図 2.4.5-2）。なお、噴射後に流動化した充填材を連続的に捕集するため、吸引による捕集方式を採用した。

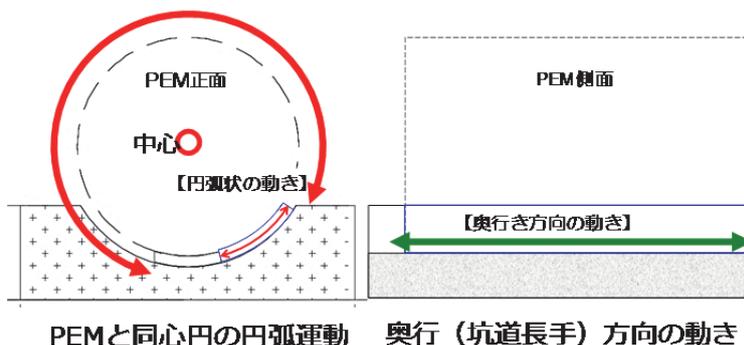


図 2.4.5-1 流体的除去装置 ノズルの動き 説明図

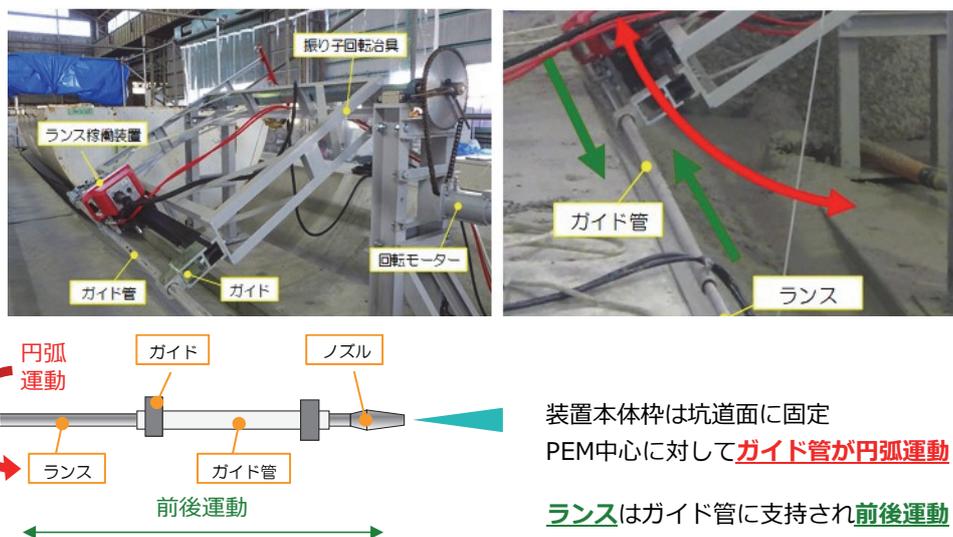


図 2.4.5-2 流体的除去装置（ウォータージェット方式）

下部狭隘部のスケールを模擬した地上試験ヤードにおいて、製作した流体的除去装置による充填材の除去試験を実施した。除去装置に取付けて使用する噴射ノズルを数種類準備し、切削性・切削範囲等を確認した（図 2.4.5-3）。試験は、噴射ノズルの選定，ノズルの動きと（円弧運動，前後運動の組合せ）による充填材の切削状況の確認、地上施設における実寸大の下部狭隘部を対象とした除去手順の確認の順番で進めた。

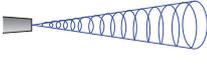
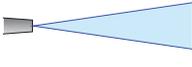
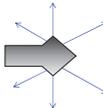
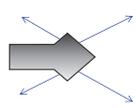
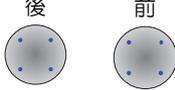
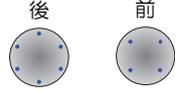
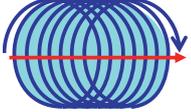
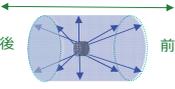
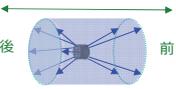
ノズル種類	直射	トルネード	扇射	配管清掃用 前後横3方向	配管清掃用 前後2方向
写真					
切削形状					
切削断面				後 前 	後 前 
切削軌跡				後 前 	後 前 
(20MPa 時) 使用水量	54L/min	30L/min	20L/min	74L/min	74L/min
坑道面への影響	長手方向へのウォータージェット噴射の場合 噴射圧 20MPa まで坑道面を傷つけない			坑道面に垂直入射しない場合、噴射 圧 20MPa まで坑道面を傷つけない	

図 2.4.5-3 各ノズルの特徴等 一覧

噴射ノズルの選定の結果、PEM と周辺の縁切りのための「切削」にはトルネードノズルが適しており、噴射圧 20MPa までは、坑道面（コンクリート面）を傷めないことを確認した。PEM の回収装置が要求する動作環境の実現のための「仕上げ洗浄」には、配管洗浄用ノズルが適するとこの結果を得た。ウォータージェットで切削した充填材は、スラリー化したものを吸引により連続的に捕集する方式を採用した。

地上試験結果の一例として、試験ケース 3-2 の結果を抜粋して以下に示す。試験ケース 3-2 は、トルネードノズルおよび配管洗浄ノズルにより流体的除去手順の確認を行った。試験ケース 3-2 の除去手順と状況を表 2.4.5-1 に示し、除去手順毎の状況写真を図 2.4.5-4 に示す。

表 2.4.5-1 試験ケース 3-2 除去手順

試験ケース	使用ノズル	奥行き移動	円弧状移動範囲	状況
3-2	トルネード	移動なし	円弧	5min 噴射のみ行き、水量を与える
	トルネード (前進)	約 5cm/min	円弧	解砕および大まかな除去が可能
	配管清掃用 (前進)	約 20cm/min	円弧	狭隘部上部の除去はできているが、台座側部の残存が確認
	配管清掃用 (後退)	約 10cm/min	円弧 1/2	狭隘部下部(台座付近)の除去を重点的に実施
	～ を 2 回繰り返す			配管清掃用で 2 往復し、完全に除去完了

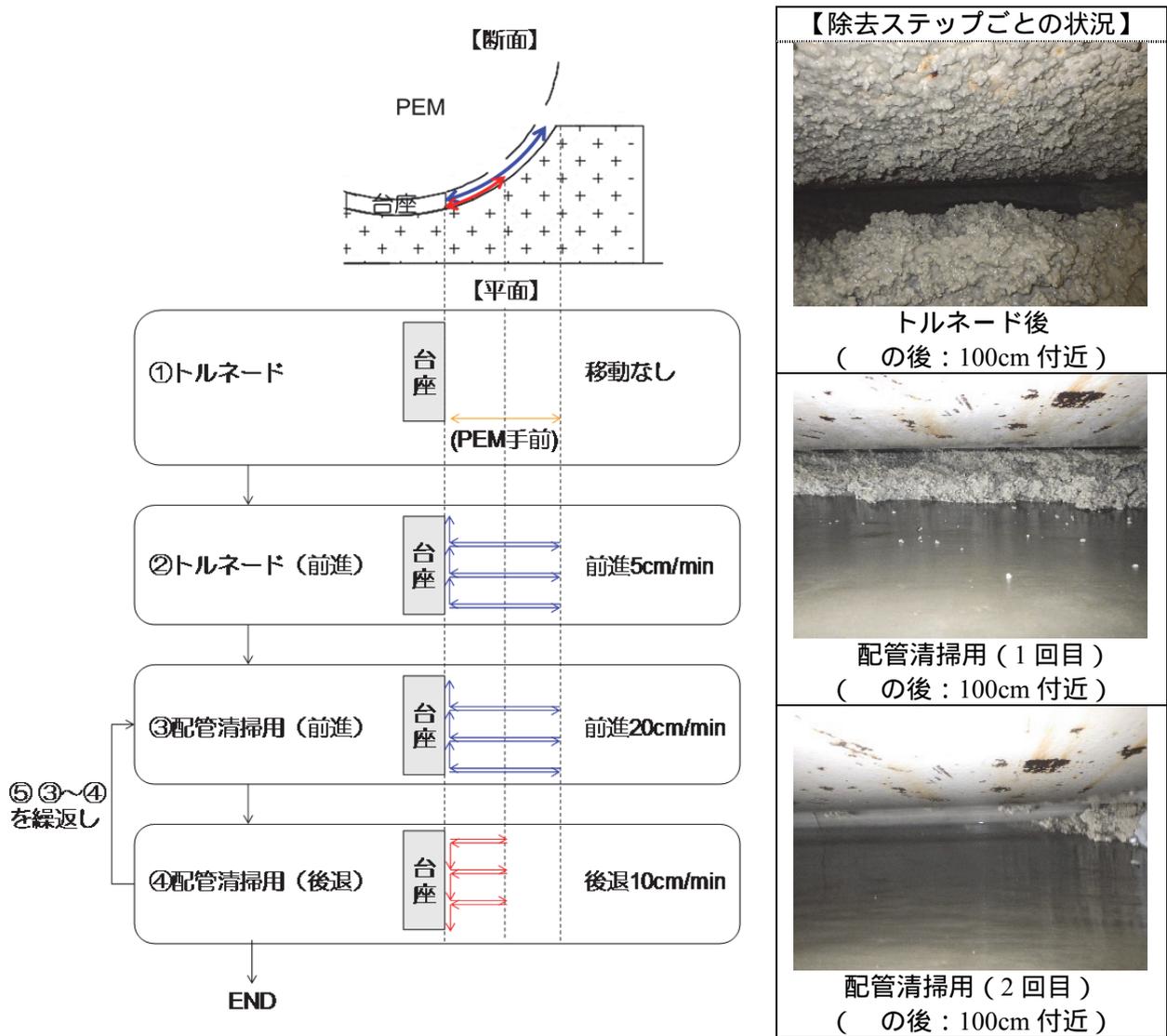


図 2.4.5-4 試験ケース 3-2 除去手順毎の状況

試験ケース 3-2 の結果から、PEM 坑道間の縁切りとして、トルネードノズルによる切削は有効であると判断できた。トルネードノズルの前進速度とバキューム吸引に関して着目すると、2 種類の前進速度 (10cm/min、5cm/min) のうち、10cm/min では除去対象物の流動化に対してノズルの前進速度が速くなりノズルが充填材に突き刺さる事象や、充填材の流動化が不十分でバキュームで吸えない等が発生した。一方 5cm/min では、ノズルが除去対象物に接触することもなく、バキュームによる吸引捕集も順調に実施できた。これはベントナイト(クニゲル V1)の液性限界 416%[6]に対し、前進速度 5cm/min の場合では除去対象物の含水比は 484%となり、ベントナイト(クニゲル V1)の液性限界以上となるが、前進速度 10cm/min の場合では、ベントナイト(クニゲル V1)の液性限界以下となることで説明できる。

地上試験の結果を基に決定した除去手順の設定を表 2.4.5-2 に示す

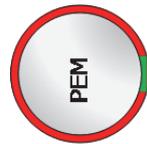
表 2.4.5-2 決定した流体的除去手順の設定

PEM1 体分の下部狭隙部（片側）の除去試験を実施

使用ノズル	ノズルワーク	目的	断面図	平面図	除去後の状態 (半PEM接目)	所要時間	使用水量
1. トルネード	円弧移動のみ	流動化				5分	150L
2. トルネード	円弧移動 前進 約5cm/分	PEM-坑道間の充填材のたまかな切削・吸引捕集				約70分	2,100L
3. 配管清掃用	円弧移動 前進 約20cm/分	PEM外面、坑道面の洗浄、切削物の吸引捕集			—	約115分	1,100L
4. 配管清掃用	1/2円弧移動 後退 約10cm/分	台座近傍（エアベアリングの走行部）の洗浄、切削物の吸引捕集				約30分	2,220L
5. 3~4を もう1回	円弧移動 前進 約20cm/分 + 1/2円弧移動 後退 約10cm/分					約45分	3,330L

PEM-坑道間の縁切り

回収装置動作環境の実現



円形断面坑道に設置された場合、充填材の除去に要する時間は今回の結果から単純に換算すると、20.6h (7.6倍)
回収装置の走行のための洗浄で多くの時間と水を使用



回収装置からの要求により簡略、省略可能と考えられる時間



減容化処理（固液分離）
切削水リユースなどにより
減量可能な数量

2.4.6 成果のまとめ

(1) 機械的除去技術（オーガ方式）

上部開放部の隙間充填材（ベントナイト混合土）を対象とした機械的除去技術（オーガ方式）について、地上での要素試験を実施し、技術の適用の見通しを得た。

上部開放部の隙間充填材と同仕様の供試体(乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$,含水比 16%、 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.7\text{m}$)を鋼製枠内に準備し要素試験を実施した。製作したオーガ方式による機械的除去装置を用いて、1) 除去装置による切削・吸引捕集の可否、2) 1 孔あたりの切削量・時間、3) 連続的な切削の状態等に関する知見を得た。具体的には、供試体の中央部の切削・捕集(直径 200mm・深さ 300mm ,切削量 0.006m^3)に対し、50 秒での切削・捕集が可能であった。また、連続的な除去においても、装置の一部の改良の結果、オーガ内・吸引ホース内の閉塞は発生せず、良好な除去が可能となった。一方で、地下での実証試験に向けて、狭隘な空間における操作性の向上や、除去対象の充填材を高含水比とした場合の本技術の適用性等に関するデータの取得や装置の改良が今後の課題となった。今後、これらの地上試験の結果より得た知見を基に、地下での充填材除去試験の計画を具体化していく。

(2) 流体的除去技術（ウォータージェット方式）

下部狭隘部の隙間充填材（ベントナイトペレット）を対象とした流体的除去技術（ウォータージェット方式）について地上試験を実施し、その技術の適用の見込みを得た。

幌延 URL の下部狭隘部スケールを模擬した地上試験ヤードにおいて、ウォータージェット方式による流体的除去装置を用いた試験を行い、1) 噴射ノズルの選定、2) ノズルの動きと（円弧運動、前後運動の組合せ）による充填材の切削状況の確認、3) 地上施設における実寸大の下部狭隘部を対象とした除去手順の確認・設定に関する知見を得た。具体的には、噴射ノズルの選定の結果、PEM と周辺の縁切りのための「切削」にはトルネードノズルが適しており、噴射圧 20MPa までは、坑道面（コンクリート面）を傷めないことを確認した。PEM の回収装置が要求する動作環境の実現のための「仕上げ洗浄」には、配管洗浄用ノズルが適するとの結果を得た。また、地上試験を通じ、流体的除去技術に係る吸引捕集の観点からは、充填材の液性限界に対応する量の切削水を使用して充填材を十分に流動化させることで効率的な吸引捕集が可能となるとの見通しを得た。今後、これらの地上試験の結果より得た知見を基に、地下での充填材除去試験の計画を具体化していく。

2.5 地層処分実規模試験施設の運営（第2分冊：第6章）

2.5.1 実施概要

日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センターゆめ地創館に隣接する地層処分実規模試験施設の維持管理、運営を実施した。施設を常時一般に公開し、常駐する試験員による施設の案内、説明を行い、来館者とのやり取りを対話記録として収集し、内容の分析を行った。



図 2.5.1-1 地層処分実規模試験施設

2.5.2 施設の公開

平成30年度も前年度に引き続き、地層処分実規模試験施設の公開、来館者への設備の説明等を実施した。平成30年度は延べ5,200の方が施設を訪れ、平成22年4月の施設開館からの累計は54,435人となった（平成31年2月28日までの集計）。

また、幌延町で7月21日、22日開催された「おもしろ科学館2018 in ほろのべ」に合わせ、緩衝材定置試験装置を使用した定置試験の公開、ベントナイト体感試験を実施した。なお、この2日間の来館者は、地層処分実規模試験施設のみで792人であった。

2.5.3 緩衝材可視化試験

処分孔縦置きブロック方式における緩衝材ブロック間の隙間について、地下水による膨潤で隙間が塞がりブロック同士が一体化していく過程を、来館者に分かり易く示すため、小型緩衝材ブロックを用いた可視化試験を継続して公開した。図2.5.3-1に可視化試験の様子を示す。



図 2.5.3-1 緩衝材ブロックの一体化挙動の可視化試験の様子

2.5.4 来館者との対話記録の分析

実規模試験施設では説明時に常駐する試験員が、来館者からのコメントや質問を来館者記録として来館者の属性と共に記録している。来館者の年齢や性別等の属性、グループ構成等でのどのような事項に関心があるのか傾向を把握することで、より効果的な説明や展示パネル等の更新に反映出来ると考える。図 2.5.4-1 に対話記録の分析のうち、来館者との対話のトピックの割合の変化を例として示す。

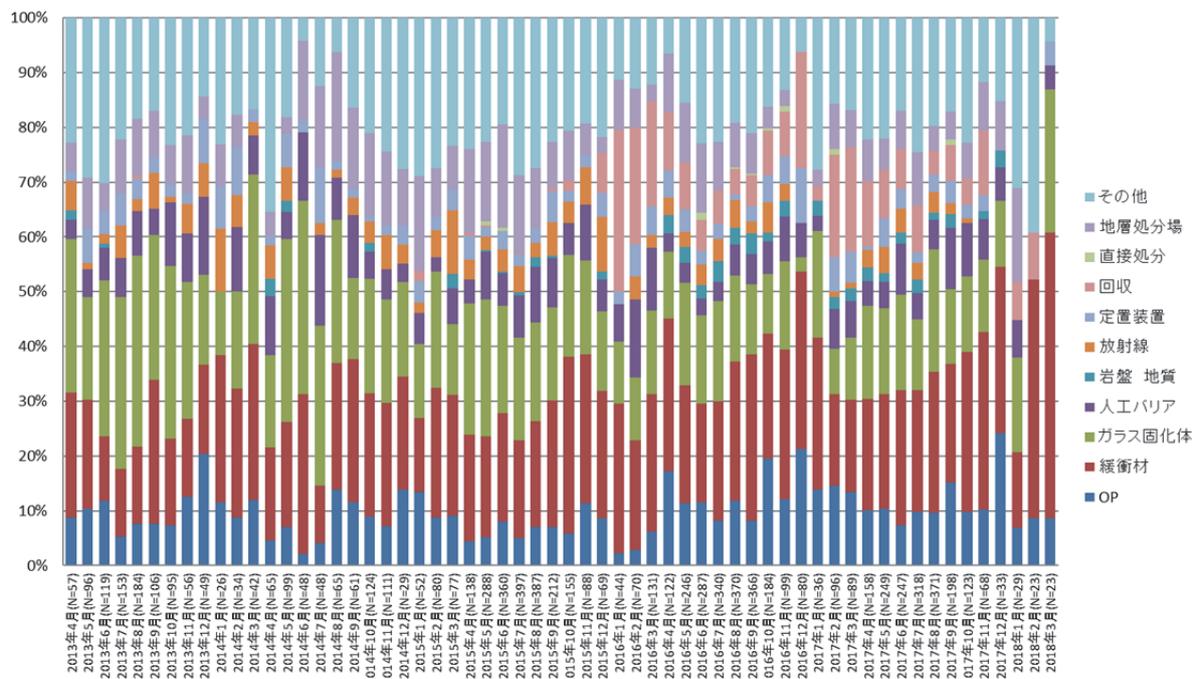


図 2.5.4-1 来館者との対話記録の分析例（質問の属性の経時変化）

平成 22 年度の地層処分実規模試験施設の開館時から実施している来館者との双方向対話の記録を分析し、本施設を訪れる来館者の属性や、興味・関心事項の傾向を捉えることができた。今後、さらに分析を進め、本施設の在り方だけでなく、高レベル放射性廃棄物の地層処分事業の理解促進に資するため、研究・技術開発側からどのような情報が発信されるべきか、そのような成果の見せ方についても検討を進めていく。

第2章 参考文献

- [1] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 24 年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 1 分冊）遠隔操作技術高度化、2013 年 3 月
- [2] NUMO、NUMO セーフティケースに関する外部専門家ワークショップ、配布資料:(3) 処分場の設計と工学技術、2016.9.23。
- [3] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 28 年度地層処分技術調査等 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 報告書（第 1 分冊） 2017 年 3 月
- [4] 原子力環境整備促進・資金管理センター；平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発報告書（第 2 分冊）地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発（2018）
- [5] 原子力環境整備促進・資金管理センター 平成 27 年度地層処分調査等事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 報告書（第 2 編） 2016.3
- [6] 核燃料サイクル開発機構 わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 地層処分研究開発第 2 次取りまとめ 分冊 2 地層処分の工学技術

第3章 回収可能性の維持についての検討

3.1 はじめに

3.1.1 背景及び目的

放射性廃棄物の地層処分事業における可逆性・回収可能性については、我が国で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。）が制定される以前から、一部の国や国際機関などで先行的な議論が進められてきた。

我が国では、最終処分法の制定から10年以上を経た現段階においても事業に進展が見られない状況に加え、平成23年3月に発生した東北地方太平洋沖地震や東京電力福島第一原子力発電所事故の結果として、原子力発電や科学技術に対する国民の不安や懸念が高まるなど、地層処分事業を取り巻く社会環境に変化も見られた。このような中、平成25年より、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[1]（以下、「廃棄物WG」という。）において、これまでの取組を繰り返すのではなく、最終処分政策の枠組みを見直し、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、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。同WGでは、将来世代の選択の柔軟性の確保という観点から地層処分事業における可逆性・回収可能性のあり方等に関する議論が進められ、同WGの中間とりまとめ（平成26年5月）を経て、平成27年5月に改定された特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針[2]（以下、「基本方針」という。）によって、最終処分事業の可逆性の担保、及び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。

このような背景を踏まえ、基本方針によって定められた最終処分事業における可逆性・回収可能性について、必要となる技術的な取組を着実に前進させ、施策への信頼性さらに地層処分事業に対する社会の信頼性の維持に貢献して行くことが必要である。特に、技術的な観点からは、可逆性・回収可能性に関する次のような課題について、更なる検討や調査研究を進めていくことが必要である。

1) 我が国における今後の具体的な制度の運用や研究開発の推進に向けて更なる検討が必要と考えられる事項についての整理と技術的な対応

2) 最終処分施設を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等に関する調査研究の推進

廃棄物WG議論における国際的な検討動向を踏まえた可逆性・回収可能性に関する当初の議論では、閉鎖までの間回収可能性が確保されていても閉鎖の時期に係る考え方が検討されていないことが、課題の一つとして挙げられた（第4回廃棄物WG資料1、平成25年10月）。このような課題認識を踏まえ、基本方針では本調査研究を進めるべきことが定められている。

資源エネルギー庁では、上記のような廃棄物WGにおける議論の進展に応じて、示された課題に適時に対応すべく、平成25～26年度に回収可能性を維持できる期間に関する検討に取り組んできた[3]。本事業は、そこでの検討を引き継ぐ形で平成27年度より着手しているものであり、上記の背景を踏まえ、次の2つの課題を設定して取り組むこととしている。

- ・可逆性・回収可能性に関する我が国における今後の具体的な制度の運用や研究開発の推進に向けて更なる検討が必要と考えられる事項を整理すること。
- ・地下環境における高レベル放射性廃棄物の回収可能性の維持に関して、処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等に対する評価技術や対策技術を整備すること。

3.1.2 回収可能性の維持についての今後の検討のベース

上述した1つ目の課題については、大学等に所属する外部有識者の協力のもとで「可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会」(以下、「R&R 検討会」という。)を平成27年度に設置し、平成27～28年度の2カ年にわたって、可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理に向けた多面的な検討を進め、平成29年度に報告書として成果を取りまとめた[4]。本成果より、回収可能性に関して今後必要となる技術的な対応として、以下の～の項目が抽出された。

我が国における回収可能性に関する技術的アプローチの具体化

基本方針で示された課題である施設閉鎖までの管理のあり方の具体化

(閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響の定量化)

将来の可逆性・回収可能性の実施の可否を判断しなければならない場面での対応

廃棄物WGで示されたように、処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持する期間は、地元の意向等を踏まえた上で決定・見直しすることから、上記の～の技術対応のうち、直近の対応が必要となる可能性のあるものは及びの課題と考えられた。さらに、を具体化するにはを具体化する必要があり、またで適切なアプローチを選択するにはの影響を定量化することから、及びの課題は並行して取り組む必要がある。

一方で、回収可能性を維持することに関して、

1. 安全性への影響
2. 回収の容易性(回収作業時間)
3. 最終閉鎖せずに回収可能性を維持できる期間
4. 回収可能性に係る費用

といった事項の間でトレードオフの関係が存在する。採用する技術的アプローチの種類や内容によってこれらのトレードオフの関係が異なることから、適切な技術的アプローチを選択するためには、これらトレードオフの関係をより定量的に示していく必要がある。R&R 検討会では、これらのトレードオフの関係の定量化に向けた技術的な検討を進める際の出発点として、今後の技術的アプローチの具体化に必要な定量的な情報を想定し、それらの定量化に必要な技術検討項目を具体化し、回収可能性の維持に関する技術的アプローチの具体化に係る技術検討の枠組み(技術検討のフレームワーク)として提示している。技術検討のフレームワークでは、トレードオフの関係にある上記1～4の4つの定量化すべき情報のうち、「安全性への影響」及び「回収の容易性(回収作業時間)」に着目して、定量化に必要な技術検討項目と技術検討の視点を表3.1.2-1のように整理している。

本事業における回収可能性の維持についての検討では、表3.1.2-1に示すR&R 検討会で示された技術検討項目を“検討のベース”と位置付けて、更なる議論や技術検討を進めることとしてい

る。

表 3.1.2-1 R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目[4]

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目」		
定量化すべき情報	定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点	検討対象(イメージ)
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)	1)開放坑道内の作業空間の安全性 保守管理のために開放坑道内に人が出入りするため、開放坑道内の作業空間の安全性確保の観点から、以下の評価・検討や技術の具体化を行う。 a.開放坑道の健全性(空間安定性) b.開放坑道内(作業空間)への廃棄体からの熱影響	
	1)回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性 一度埋め戻した坑道の再掘削/再利用を前提とする場合に、 回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性確保の観点から、以下の評価・検討や技術の具体化を行う。 a.埋め戻した坑道の再利用時の健全性 b.再利用する坑道内(作業空間)への廃棄体からの熱影響 2)回収時の廃棄体容器の健全性 回収装置による把持・取り出しの際には、廃棄体容器に一定の機械強度が要求されることから、廃棄体容器の健全性に関する評価や検討を行う。	
	1)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う人工バリア等に期待する安全機能への影響 維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ、人工バリア(及び他の地下構造物)に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響を下記観点から評価する。 a.開放坑道を介した空気(酸素)の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響 b.廃棄体からの熱による影響 c.坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響	
	2)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う天然バリア(母岩)に期待する安全機能への影響 維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ、天然バリア(母岩)に期待される閉鎖後長期の安全機能に係る次のような影響を評価する。 a.地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度(化学組成の異なる地下水の引き込みの影響) b.開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度 c.ベースライン(建設前の元の地下環境の状態)への回復過程と回復の程度	
2. 回収の容易性(回収作業時間) (1)単位ユニットあたりの回収時間(廃棄体1体又は処分坑道1本) (2)全ての廃棄体回収に係る全体作業時間	1)より合理的な回収作業の実現に向けた技術検討/技術開発 a.回収時間の短縮に向けた回収方法(技術・装置)の高度化 b.回収作業手順の具体化 2)より回収の容易性を高めた処分場の設計開発: 回収の容易性を設計に考慮する際の多様な方法の導入や組合せに関する検討を進め、前提とした2つの処分概念オプション以外の新たなものを含めて、より回収の容易性を高めた処分場の設計開発に係る検討を進める。	

※定量化すべき情報のうち、技術検討の直接的な対象ではない「3.最終閉鎖せずに回収可能性を維持できる期間」と「4.費用」は整理の対象外。

なお、意思決定を支援するために定量的な情報を提示しなければならない時期として、表 3.1.2-2 に示すような幾つかの場面が想定される(これ以外に操業段階以降に何らかの理由で回収実施の意思決定が必要な場面も想定される)。廃棄物 WG で示されているように、回収可能性の維持期間は地元の意向も踏まえて決定されることから、処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等に対する評価方法は、サイト選定の段階から準備される必要がある。本事業における処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等に対する評価技術の整備は、まずは

サイト選定段階で利用されることを念頭に置くが、表 3.1.2-2 に示すように、これらの技術は後の段階における設計照査や安全規制対応技術へと利用されていくこととなる。なお、特に、サイト選定の初期段階では、サイトの地質環境や処分概念等の入力情報に不確かさや十分性への制約がある。ここでの定量化技術の整備においては、入力情報に関する制約にも留意して、利用されるそれぞれの段階における利用目的や必要な情報レベルとともに、提示可能な情報項目やアウトプットの精度（入力の制約）を整理して行くことが必要となる。

表 3.1.2-2 定量化の時期と反映先

アクション	反映先
サイト選定段階における地元や関係者との協議	施設最終閉鎖までの管理のあり方（回収維持期間）の決定
サイト選定段階における設計照査	安全規制プロセスにおける設置許可申請
操業段階における地下の状態把握 ・製造・施工プロセス管理 ・原位置モニタリング	安全規制プロセスにおける定期安全レビュー 安全規制プロセスにおける閉鎖認可申請

本章では、上述した目的及び検討のベースに対応した調査研究に係る取組に関して、本年度の検討成果を取りまとめている。以下に、本事業における検討概要を整理したうえで、次節以降に本年度の検討結果等を要約整理する。

3.1.3 過年度及び本年度の検討概要

3.1.1 項に示した目的のうち、2 つ目に対応する項目については、処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等に関する検討（以下、「回収可能性の維持についての検討」という）として、平成 27 年度より開始した。平成 27～28 年度には、回収可能性を維持したことによる影響を受ける因子の抽出と影響範囲等の分析、及び一定の期間回収可能性を維持するために必要となる技術の現状調査と課題を含めた整理を進めた。これらの当初の 2 ヶ年の取組では、“ 竖置きブロック定置方式 ” 及び“ 横置き PEM (Prefabricated Engineered Barrier System Module) 定置方式 ” を対象として定性的な分析に基づき検討や整理を行うとともに、平成 28 年度からは回収可能性を維持することによる影響の定量的な評価を行うための技術の整備に向けて、坑道の安定性に関する定量的評価の条件や適用可能な解析手法の検討に着手した[5], [6]。一方、3.1.2 項に示した回収可能性の維持についての今後の検討のベースを踏まえ、平成 29 年度からは、本事業における回収可能性の維持についての検討の成果目標は以下のように設定して、検討及び調査研究を進めることとした。

- 回収可能性を維持した場合の「安全性への影響」に係る評価技術について、既存の解析的評価技術を整理し、安全性への影響の定量的評価方法を整備する。また、それに伴って必要となる評価指標やパラメータ等を具体化する。
- 回収可能性を維持した場合の既存の回収技術、回収維持技術を整理し、取り組むべき課題

を抽出する。

- 「回収の容易性」を考慮した場合の代替設計オプションを具体化し、関連する技術開発課題を抽出する。

平成 29 年度は、表 3.1.2-1 に示す安全性への影響の定量化に必要な技術検討項目に留意して、坑道安定性に着目した力学的な影響評価方法の整備に向けた検討に加え、坑道湧水量の時間変化や空気の岩盤中への侵入による不飽和領域の発生の可能性といった水理学的な影響評価方法の調査・検討を行った[4]。また影響の定量化に必要な技術に加え、回収維持期間中の地下施設の維持技術及び回収技術の実現性にも留意が必要であるため、現時点で適用可能な回収維持技術¹や回収技術²の整理を行った[4]。

- 1 回収維持状態を維持するのに必要な技術で、維持管理技術や構造物の補修技術等
- 2 回収作業に必要な技術で、埋め戻し材の除去技術、廃棄体の再把握、搬送技術等

本年度は、引き続き上記の成果目標を達成するために以下の検討を行う。

(1) 回収可能性維持期間の検討

R&R 検討会で示されたで定量化に必要な技術検討項目に関して、安全性への影響の定量的な評価技術の整備に向けての既存技術の整理と課題抽出を行う(3.2 節)。

また、回収の容易性を高めた設計オプションの具体化について、検討の視点を整理したうえで、回収容易性の視点及び既存処分概念等の整理や容易性を高めた設計オプションの検討を行う(3.4 節)。

(2) 回収可能性維持期間の影響に関する定量的評価

R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目に関して、昨年の検討結果も踏まえた上で、力学的・水理学的・化学的な各影響の試解析を通して、回収可能性を維持した場合の安全性への影響の定量的評価方法を示し、定量的評価を行ううえでの課題を抽出する(3.3 節)。

3.2 安全性への影響の定量的な評価技術の整備に向けた既存技術の整理と課題抽出

R&R 検討会で示された定量化に必要な各技術検討項目に対して、安全性への影響の定量的な評価技術の整備に向けての既存技術の整理と課題抽出を行った。まず、原子力発電環境整備機構（以下、「NUMO」という）の「処分場の安全機能と技術要件（NUMO-TR-10-11）」[7]等を参照して、安全性への影響の意味や指標の整理を行った。その上で、学会等により整理された文献、地層処分に関する研究等を行っている各機関（NUMO、日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という）、原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、「RWMC」という））等のレポートに基づいて指標を時間依存で評価できる既存の解析技術、及び既存の解析技術を用いて評価を行う解析的評価技術について現状レベルの整理を行い、技術検討項目の定量的評価実施に向けた課題を抽出した。なお、R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目で想定される現象は、物理現象の相互作用により生じることが考えられる。従って、熱 - 水理（浸透） - 力学 - 化学の相互作用を連成させた解析的評価技術により評価することが理想であるが、これは研究段階にあることから、ここでは安全性への影響を示す指標を直接評価する解析的評価技術について整理した。また、課題に対する本事業での取り組み状況の有無を整理し、本事業で取り組んでいる技術検討項目については取り組み状況も整理した。表 3.2-1～表 3.2-3 に、各技術検討項目に対する既存技術の整理と課題抽出について一覧表としてまとめたものを示す。

また、複数の技術検討項目に関係する課題や解析技術を用いて定量的な評価を行う際の共通した課題について以下にまとめた。

課題 1．解析に用いる物性値とその変化（劣化など）に関する不確実性の取り扱い

回収可能性を維持したときの地質環境や人工バリアの安全性への影響について、時間依存を考慮した解析技術により定量的な検討を行う際に課題となるのが、解析に用いる物性値とその変化（劣化など）に関する不確実性の取り扱いである。地質環境や坑道に用いられる材料の物性値とその時間変化を予測して、計画、調査段階の解析で適切に設定することは非常に難しい。坑道の支保部材や覆工は施工条件や地質環境の影響を大きく受け、我が国の地質環境はサイトに依存し、各種特性は非線形性を示し、不均質性を有する。より信頼性の高い解析的評価を行うためには、このような不確実性を考慮したモデルの構築方法について、今後もさらに検討する必要がある。

課題 2．回収可能性の維持期間を考慮した際に適用する坑道安定性に関する限界値の検討

回収可能性維持を考慮したときに適用する、坑道安定性の評価のため岩盤の応力及びひずみの限界値には定まったものがないため、今後検討が必要な課題と考えられる。本事業では、適用する限界値について、従来から用いられてきた限界値の他に、一般の土木構造物で考えられているよりも長い期間への対応が見込まれる限界値の文献調査を行い、検討を進めている。また、時間とともに岩盤（地山）の強度が変化していくと解釈された既往の研究事例についても調査を行っている。これらを踏まえると、今後、載荷時間を変えた各種力学試験データの拡充を図ったうえで、時間依存性を考慮した岩盤の応力及びひずみの限界値を検討していくことが必要である。

課題 3 . 安全性への影響低減のための対策とその効果の定量的評価技術の検討

回収可能性を維持することによる安全性への影響を低減する対策の検討、及び、対策の効果の目安を解析的評価により定量的に示す方法の検討をさらに充実させることが重要である。

課題 4 . 予測解析の信頼性確保への取り組み

解析的評価技術全般に係る課題として、予測解析の信頼性確保への取り組みが必要なことが挙げられる。回収可能性を維持したことにより生じる現象及びその影響については、評価期間が長く、原位置の再現が難しい等の理由から、実験や実現象との比較による妥当性確認が困難である。そのため、予測解析の信頼性如何に確保するかが重要となる。V&V (Verification and Validation, 検証と妥当性確認) の観点を踏まえ、課題 1 ともあわせて解析的評価技術の整備を行っていくことが望まれる。

表 3.2-1 各技術検討項目に対する既存技術の整理と課題抽出の概要一覧表

定量化すべき情報	技術検討項目	安全性への影響の整理 (定量評価対象の解釈)	安全性への影響を示す指標	既存の解析技術 (指標を時間依存で解析できる技術)	既存解析的評価技術の現状レベル()と課題()	本事業での取り組み	
(1) 採掘期間中の安全性への影響	1) 開放坑道内の作業空間の安全性	回収可能性の維持期間が長くなるほど、開放坑道の周辺岩盤の変形(坑道構築時の応力再配分、クレーン変形、化学的・熱的影響による変形・強度特性の変化、支保工の変形)や支保工の劣化・変形(鋼材の腐食、コンクリートのセメント溶脱・ひび割れ・中性化)が進行する。そのため、事業期間(維持期間)中の安全対策の一つである「空洞の力学的安定性の確保」への影響が大きくなることから、数百年に及ぶ力学的安定性の変化を定量的に評価する必要がある。	○岩盤のひずみ、応力(坑道設計時に用いる指標) ○支保部材の応力(坑道設計時に用いる指標) ○内空変位速度(坑道維持管理に用いる指標) ○コンクリートのひび割れ幅や長さ(坑道維持管理に用いる指標)	○粘弾性解析、粘弾塑性解析構成モデル(力学モデル)として大久保モデルや地山劣化モデルを導入 亀裂進展問題に対する数値解析手法やコンクリートのひび割れの発生・進展の予測解析手法の研究例はあるが、研究段階で、解析的予測は困難	○数百年に及ぶ開放期間を想定した解析的評価例はない 埋め戻された坑道に対してクレーンを考慮した大久保モデルを導入した解析例はあり ○計測された内空変位速度から地山の劣化の進行を仮定する地山劣化モデルを導入した解析例はあり 支保工の劣化による剛性低下等、物性値の時間変化の設定 一般的土木構造物よりも、より長期間に対応した坑道の力学的安定性評価基準の設定 内空変位速度の坑道の力学的安定性評価指標への適用性検討(サイト選定段階での適用は入力値の設定方法が困難)	○周辺岩盤や支保工を連続体として、クレーンを考慮した大久保モデルを導入し、吹付けコンクリートの溶脱による支保工の剛性の低下を想定した開放坑道の解析的評価方法を検討 ○支保工の劣化現象に関する地球化学解析からの情報の反映方法を検討 ○坑道の力学的安定性評価基準の研究事例調査と検討 ○解析結果を用いた、内空変位速度の坑道の力学的安定性評価指標への適用性検討	
	2) 回収時の廃棄体容器の健全性	a. 埋め戻した坑道の再利用時の健全性 b. 再利用する坑道内の作業空間への廃棄体からの熱的影響	回収可能性の維持期間中に、開放坑道内の温度、特に廃棄体が定置された処分坑道の坑内温度が、廃棄体の発熱量の経時変化と空気の対流によって変化することが考えられる。そのため、事業期間(維持期間)中の安全対策の一つである「作業環境の維持」のための「換気経路の確保」が必須となることから、維持期間中の開放坑道に対して、廃棄体からの熱影響を定量的に評価した上で、「換気経路の確保」を検討する必要がある。なお、廃棄体の発熱は、周辺岩盤や支保工の変形・強度特性変化にも影響する可能性あり。	○坑内温度 (労働安全衛生規則の第六百一十一条に定められた気温三十七度以下)	○伝導熱(熱伝導)解析 ○対流熱伝達(熱流体)解析 ○ぶく射伝熱解析 換気は建設段階においても必須であり、一般のトンネルの建設計画時に用いられている換気設計技術指標がある	○埋め戻した坑道の再利用を想定した解析的評価例はない 埋め戻し材及び支保工を考慮していないが、埋め戻された坑道に対してクレーンを考慮した大久保モデルを導入した解析例はあり ○計測された内空変位速度から地山の劣化の進行を仮定する地山劣化モデルを導入した解析例はあり 支保工の劣化による剛性低下等、物性値の時間変化の設定 一般土木構造物よりも、より長期間に対応した坑道の力学的安定性評価基準の設定 再利用時における内空変位速度の坑道の力学的安定性評価指標への適用性検討(サイト選定段階での適用は入力値の設定方法が困難)	○周辺岩盤や支保工を連続体として、クレーンを考慮した大久保モデルを導入し、吹付けコンクリートの溶脱による支保工の剛性の低下を想定した埋め戻した坑道の解析的評価方法を検討 ○埋め戻し材の膨潤圧及び剛性低下を考慮した解析的評価方法を検討 ○支保工の劣化現象に関する地球化学解析からの情報の反映方法を検討 ○坑道の力学的安定性評価基準の研究事例調査と検討
(1) 採掘期間中の安全性への影響	1) 回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性	回収可能性の維持期間中に、埋め戻した坑道の坑内温度が廃棄体の発熱量の経時変化し、再掘削時の時期等に応じて坑内温度が変化することが考えられる。そのため、事業期間(維持期間)中の安全対策の一つである「作業環境の維持」のための「換気経路の確保」が必須となることから、再利用する坑道に対して、廃棄体からの熱影響を定量的に評価した上で、「換気経路の確保」を検討する必要がある。なお、廃棄体の発熱は、周辺岩盤や支保工の変形・強度特性変化にも影響する可能性あり。	(1) 1)a. 開放坑道内の廃棄体からの熱影響に同じ 1)b. 開放坑道内への廃棄体からの熱影響に同じ	(1) 1)a. 開放坑道内の健全性に同じ 1)b. 開放坑道内への廃棄体からの熱影響に同じ	○埋め戻した坑道の再利用を想定した解析的評価例はない 埋め戻し材及び支保工を考慮していないが、埋め戻された坑道に対してクレーンを考慮した大久保モデルを導入した解析例はあり ○計測された内空変位速度から地山の劣化の進行を仮定する地山劣化モデルを導入した解析例はあり 支保工の劣化による剛性低下等、物性値の時間変化の設定 一般土木構造物よりも、より長期間に対応した坑道の力学的安定性評価基準の設定 再利用時における内空変位速度の坑道の力学的安定性評価指標への適用性検討(サイト選定段階での適用は入力値の設定方法が困難)	○埋め戻した坑道の再利用を想定した解析的評価例はない 埋め戻し材及び支保工を考慮していないが、埋め戻された坑道に対してクレーンを考慮した大久保モデルを導入した解析例はあり ○計測された内空変位速度から地山の劣化の進行を仮定する地山劣化モデルを導入した解析例はあり 支保工の劣化による剛性低下等、物性値の時間変化の設定 一般土木構造物よりも、より長期間に対応した坑道の力学的安定性評価基準の設定 再利用時における内空変位速度の坑道の力学的安定性評価指標への適用性検討(サイト選定段階での適用は入力値の設定方法が困難)	○埋め戻した坑道の再利用を想定した解析的評価例はない 埋め戻し材及び支保工を考慮していないが、埋め戻された坑道に対してクレーンを考慮した大久保モデルを導入した解析例はあり ○計測された内空変位速度から地山の劣化の進行を仮定する地山劣化モデルを導入した解析例はあり 支保工の劣化による剛性低下等、物性値の時間変化の設定 一般土木構造物よりも、より長期間に対応した坑道の力学的安定性評価基準の設定 再利用時における内空変位速度の坑道の力学的安定性評価指標への適用性検討(サイト選定段階での適用は入力値の設定方法が困難)
	2) 回収時の廃棄体容器の健全性	回収可能性の維持期間が長くなるほど、処分坑道内の空気(酸素)、地下水、熱の影響による廃棄体容器の腐食が進行する。そのため、オーバーバックの設計要件である「耐食性」や「耐圧性」等への影響が大きくなることから考えられ、回収段階においても「構造健全性を維持し、閉じ込め性を損なわないこと」が求められることから、坑道の埋め戻し状態や人工バリアの環境条件を考慮した廃棄体容器の健全性の変化を定量的に評価する必要がある。	○廃棄体容器(オーバーバック)の腐食深さ	○腐食解析	○換気設計指標に基づき、処分場レイアウトを考慮した換気(冷房)設備の検討例あり 対流熱伝達(熱流体)解析、及びぶく射伝熱解析は、非線形性が強い解析を非定常で実施する必要があり、収束性や計算規模の面から実施は容易ではなく、必要な定数を実験等により求める必要がある 廃棄体定置後一定期間埋め戻された坑道を再利用するときの換気検討	○埋め戻した坑道の再利用を想定した解析的評価例はない 埋め戻し材及び支保工を考慮していないが、埋め戻された坑道に対してクレーンを考慮した大久保モデルを導入した解析例はあり ○換気設計指標に基づき、処分場レイアウトを考慮した換気(冷房)設備の検討例あり 対流熱伝達(熱流体)解析、及びぶく射伝熱解析は、非線形性が強い解析を非定常で実施する必要があり、収束性や計算規模の面から実施は容易ではなく、必要な定数を実験等により求める必要がある 廃棄体定置後一定期間埋め戻された坑道を再利用するときの換気検討	○埋め戻した坑道の再利用を想定した解析的評価例はない 埋め戻し材及び支保工を考慮していないが、埋め戻された坑道に対してクレーンを考慮した大久保モデルを導入した解析例はあり ○換気設計指標に基づき、処分場レイアウトを考慮した換気(冷房)設備の検討例あり 対流熱伝達(熱流体)解析、及びぶく射伝熱解析は、非線形性が強い解析を非定常で実施する必要があり、収束性や計算規模の面から実施は容易ではなく、必要な定数を実験等により求める必要がある 廃棄体定置後一定期間埋め戻された坑道を再利用するときの換気検討

表 3.2-2 各技術検討項目に対する既存技術の整理と課題抽出の概要一覧表

定量化すべき情報 (2) 閉鎖後長期の安全性への影響	技術検討項目	安全性への影響の意味の整理 (定量評価対象の解釈)	安全性への影響を示す指標	既存の解析技術 (指標を時間依存で解析できる技術)	既存解析的評価技術の現状レベル()と課題()	本事業での取り組み
	1)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う人工バリア等に期待する安全機能への影響	回収可能性の維持期間が長くなるほど、開放坑道を介した空気の酸素の持ち込みにより、人工バリアのうち廃棄体容器(オーバーバック)の腐食が進行し、安全機能である「放射性物質の浸出抑制」の技術要件、基本的なバリア性能の確保としての「耐食性」、「構造健全性」、「溶接部耐食性・構造健全性」に影響を及ぼすようになると考えられる。そのため、回収可能性の維持期間中の開放坑道を介した酸素の持ち込みにより、廃棄体容器の腐食量がどの程度変化するかを定量的に評価する必要がある。	○廃棄体容器(オーバーバック)の腐食深さ	○腐食解析	○回収可能性維持期間を対象として、坑道の埋め戻し状態の違いを考慮した評価期間100年の腐食解析例あり 温度、地下水、空気(酸素)などの人工バリアの環境条件をより現実的な設定とした解析 腐食の定量評価が困難な場合には腐食しないような対策を検討	既往の類似評価検討例があるため、本事業では本技術検討項目の取り組みは実施していない
	a.開放坑道を介した空気の酸素の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響	回収可能性の維持期間中の開放坑道の存在に伴い、廃棄体からの熱影響により緩衝材の材料が変質し、特に緩衝材の粘土成分のイライタ化は、安全機能の一つである「放射性物質の移行抑制」における緩衝材の技術要件(基本的なバリア性能の確保)でもある「低透水性」、「コロイドろ過能」、「吸着性」に影響すると考えられる。 一方で、緩衝材の熱による変質を回避する観点から廃棄体の埋設密度などの設定が行われることとなる。そのため、基本的には緩衝材の熱影響に対する定量評価は必要ないが、回収維持期間中の維持状態によっては、廃棄体からの熱による影響により、緩衝材がどの程度変化するかを定量的な評価が必要となる場合がある。 なお、オーバーバックの鋼製材料は、良好な耐熱性を有している。	○緩衝材の材料中の粘土成分(モンモリロナイト)の量	○速度論に基づくイライタ化率解析	○廃棄体定置後すぐに埋め戻され、ベントナイトが飽和した条件下での緩衝材温度の経時変化を考慮し、室内試験や天然のイライタ化事例の研究から導出された複数の速度反応式を用いた評価期間100万年のイライタ化率解析例など 開放坑道を想定した緩衝材温度の評価とそれに基づくイライタ化率の解析	既往の類似評価検討例があるため、本事業では本技術検討項目の取り組みは実施していない
	b.廃棄体からの熱による影響					
	c.坑道開放期間中に継続する坑内湧水による影響	回収可能性の維持期間中の開放坑道への湧水(+酸素・熱)が継続することにより、オーバーバックの腐食が進行し、技術要件(基本的なバリア性能の確保)としての「耐食性」、「構造健全性」、「溶接部耐食性・構造健全性」に影響を及ぼすようになると考えられる。また維持期間が長くなるほど、湧水による緩衝材、埋め戻し材、止水プラグのベントナイトの流出が進行し、安全機能である「放射性物質の移行抑制」に変化を及ぼすことが考えられる。 そのため、回収可能性の維持期間中の坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響により、廃棄体容器の腐食量がどの程度変化するかを定量的に評価する必要がある。また、緩衝材、埋め戻し材、止水プラグのベントナイト流出がどの程度変化するかを定量的に評価する必要がある。	○廃棄体容器(オーバーバック)とその溶接部の材料、形状・厚さ ○緩衝材、埋め戻し材及び止水プラグのベントナイト含有量、乾燥密度(密度)	○腐食解析 ベントナイト流出現象そのものの解析技術はあるが、研究段階で、解析的な予測は困難 実験結果を用いて、湧水量から緩衝材流出量を予測(別事業であるニアフィールドシステム評価確証技術開発にて検討が進められている) ○坑内湧水量を予測する地下水流動解析技術として以下がある ・飽和・不飽和浸透流解析 ・多相流解析	腐食解析 既往の類似評価検討例があるため、本事業では本技術検討項目の取り組みは実施していない 地下水流動解析 ○坑道安定性評価の解析結果に基づき、坑道周辺の水理特性の変化を考慮した解析的評価方法の検討 ○数百年に及び開放期間を想定した解析的評価	腐食解析 既往の類似評価検討例があるため、本事業では本技術検討項目の取り組みは実施していない 地下水流動解析 ○坑道安定性評価の解析結果に基づき、坑道周辺の水理特性の変化を考慮した解析的評価方法の検討 ○数百年に及び開放期間を想定した解析的評価

表 3.2-3 各技術検討項目に対する既存技術の整理と課題抽出の概要一覧表

定量化すべき情報	技術検討項目	安全性への影響の意味の整理 (定量評価対象の解釈)	安全性への影響を示す指標	既存の解析技術 (指標を時間依存で解析できる技術)	既存解析的評価技術の現状レベル()と課題()	本事業での取り組み
閉鎖後長期の安全性への影響	2) 回収可能性の維持期間中の開放坑道への影響 a. 地下水の引き込みによる攪乱影響の範囲と程度(化学組成の異なる地下水の引き込みの影響) b. 開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度	回収可能性の維持期間中に坑道が開放され、換気が実施・継続されることにより、壁面から支保工や岩盤へ酸素が供給され、坑道周辺における物理学的な不飽和領域の形成や化学的酸化領域の形成が進展し、「母岩の好ましい特性」に変化を及ぼすようになり、母岩の安定性の変化は、安全確保の基本概念となる。「閉鎖後閉じ込め」は、安全確保の基本概念となる。「放射線閉じ込め」の影響する。そのため、回収可能性の維持期間中の開放坑道により、母岩の化学環境がどの程度変化し、またその変化がどの範囲まで及ぶかを定量的に評価する必要がある。また、そのためには地下水流動の変遷も定量的に把握する必要がある。	○地下水のpH、酸化還元電位(岩盤中の地下水のpHや酸化還元電位の変化が、放射性物質の難溶性、吸着遅延性とバリア材料の安定性の変化を支配するため)	○地球化学解析 ○地下水流動の変遷を定量化するための地下水流動解析として以下がある ・飽和・不飽和浸透流解析 ・多相流解析	地球化学解析 ○高pH地下水による天然バリアの変質に関する解析例はあるが、化学組成の異なる地下水の引き込みを対象とした解析的評価例はない 反応速度を含む熱力学データの整備 鉱物や溶解モデルの設定(一般化した解析はできない) 地下水流動解析 ○海水準変動の低下に伴う淡水による地下水塩濃度変化の長期的変遷を考慮した解析例や大規模地下空洞の建設・操業に伴う地下水流動状況を再現した解析例があるが、地下水の引き込みによる攪乱影響の範囲と程度を対象とした解析的評価例はない 地下水の引き込みによる攪乱影響の範囲と程度を対象とした解析手法の具体化 地下水流動解析から地球化学解析への情報の引き渡しなど の手法の体系化及び具体化 飽和・不飽和浸透流解析と多相流解析それぞれの特性を踏まえた手法の選択とその体系化	地球化学解析 ○高Cl ⁻ 濃度の還元性地下水中に淡水の酸化性地下水を引き込む際の鉱物反応を考慮した解析的評価方法の検討 地下水流動解析 ○流跡線分布に基づく地下水の引き込み範囲と程度の解析的評価方法の検討 ○地下水流動解析から地球化学解析への情報の引き渡しなどの手法の体系化及び具体化
		回収可能性の維持期間中に坑道が開放され、換気が実施・継続されることにより、壁面から支保工や岩盤へ酸素が供給され、坑道周辺における物理学的な不飽和領域の形成や化学的酸化領域の形成が進展し、「母岩の好ましい特性」に変化を及ぼすようになり、母岩の安定性の変化は、安全確保の基本概念となる。「閉鎖後閉じ込め」は、安全確保の基本概念となる。「放射線閉じ込め」の影響する。そのため、回収可能性の維持期間中の開放坑道により、母岩の化学環境がどの程度変化し、またその変化がどの範囲まで及ぶかを定量的に評価する必要がある。また、そのためには坑道近傍の地下水流動の変化も定量的に把握する必要がある。	○地下水のpH、酸化還元電位(岩盤中の地下水のpHや酸化還元電位の変化が、放射性物質の難溶性、吸着遅延性とバリア材料の安定性の変化を支配するため)	○地球化学解析 ○不飽和領域を定量化するための地下水流動解析として以下がある ・飽和・不飽和浸透流解析 ・多相流解析	地球化学解析 ○高pH地下水による天然バリアの変質に関する解析例はあるが、酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度を対象とした解析的評価例はない 反応速度を含む熱力学データの整備 鉱物や溶解モデルの設定(一般化した解析はできない) 地下水流動解析 ○TRU廃棄物処分ガスの移行を考慮した間隙圧力等の経時変化の解析例はあるが、酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度を対象とした解析的評価例はない 解析に必要な不飽和特性の設定 飽和・不飽和浸透流解析と多相流解析それぞれの特性を踏まえた手法の選択とその体系化 地下水流動解析から地球化学解析への情報の引き渡しなど の手法の体系化及び具体化が必要である。	地球化学解析 ○開放坑道の壁面を介して酸素が供給された際の鉱物反応を考慮した二アフィールトへの影響に対する解析的評価方法の検討 地下水流動解析 ○酸化性雰囲気(不飽和領域)の発生状況の解析的評価と不飽和領域の設定方法の検討 ○飽和・不飽和浸透流解析と二相流解析の結果比較による手法の具体化 ○地下水流動解析から地球化学解析への情報の引き渡しなどの手法の体系化及び具体化
	c. ベースライン(建設前の元の地下環境の状態)への回復過程と回復の程度	回収可能性の維持期間中における湧水や酸素の供給等によって生じた化学環境及び水理場の変化の程度が、閉鎖後のベースラインへの回復過程と回復の程度に及ぼす影響が考えられる。これらの母岩の化学環境及び水理場の変化は、安全確保の基本概念となる。「閉鎖後閉じ込め」の安全機能の一つである「放射性物質の移行抑制」に影響する。そのため、回収可能性の維持期間中の開放坑道により変化した母岩の化学環境及び水理場が、ベースラインへと回復する際のどの範囲まで、どの程度回復するかを定量的に評価する必要がある。	○地下水のpH、酸化還元電位(岩盤中の地下水のpHや酸化還元電位の変化が、放射性物質の難溶性、吸着遅延性とバリア材料の安定性の変化を支配するため) ○地下水流速 (地下水流速が遅いことが、放射性物質の移行抑制に寄与するため) ○上記3つの指標が好ましい状態へ移行するまでの時間	○地球化学解析 ○地下水流動解析 ・飽和・不飽和浸透流解析 ・多相流解析	地球化学解析 ○回収可能性維持期間を経た後の再冠水時の鉱物反応を考慮した解析的評価方法の検討 地下水流動解析 ○処分場の1バネルを包含する解析モデルによる、降雨による涵養を考慮した飽和・不飽和浸透流解析による再冠水時の地下水流動の変遷を把握するための解析的評価方法の検討 ○飽和・不飽和浸透流解析と二相流解析の結果比較による手法の具体化 ○地下水流動解析から地球化学解析への情報の引き渡しなどの手法の体系化及び具体化	地球化学解析 ○回収可能性維持期間を経た後の再冠水時の鉱物反応を考慮した解析的評価方法の検討 地下水流動解析 ○処分場の1バネルを包含する解析モデルによる、降雨による涵養を考慮した飽和・不飽和浸透流解析による再冠水時の地下水流動の変遷を把握するための解析的評価方法の検討 ○飽和・不飽和浸透流解析と二相流解析の結果比較による手法の具体化 ○地下水流動解析から地球化学解析への情報の引き渡しなどの手法の体系化及び具体化

3.3 回収可能性維持期間の影響に関する定量的評価

処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持したことによる安全性への影響の定量的な評価方法を示すために、力学的・水理的・化学的な各影響の試解析を通して評価方法の具体化を行った。また、定量的評価を行ううえでの課題の抽出も行った。

3.3.1 検討方針と検討項目の概要

定量評価方法の具体化にあたっては、以下の方針に沿って検討を進めることとした。

➤ 方針 1：R&R 検討会で示された技術検討項目に沿った検討を行う

定量化に必要な技術検討項目については、R&R 検討会においてまとめられており、前節の表 3.2-1～表 3.2-3 に示したように、本事業では、現段階では既往の類似検討例がない、あるいは少なく、今後、定量的評価のための解析技術等の整備が必要となると考えられる以下の 6 項目に対して、優先して安全性への影響の評価方法の具体化を行うこととした。

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

なお、開放坑道の健全性（空間安定性）、坑道開放期間中の継続する坑内湧水の影響、ベースラインへの回復過程と回復の程度については、平成 28 年度より、具体的な力学的影響評価及び水理的影響評価の検討を行っている[4]、[6]。

➤ 方針 2：影響の定量的評価手法と安全性に対する影響を明確にした検討を行う

方針 1 で示した技術検討項目を定量的に評価する方法については、THMC（熱的（T）、水理的（H）、力学的（M）、化学的（C））の影響の観点からの取り組み方法がある。THMC を対象とする場合には、THMC の複数の影響評価を同時に考慮する連成解析を用いることも考えられるが、本検討においては、THMC の各影響について、時間依存性による物性や境界条件の変化の結果を引渡しながら複数の解析を段階的に実施する。これは、長期的な安全性に対する影響低減技術の効果も含めた検討をするために、THMC それぞれの影響についての解析を行い、影響要素を抽出するためである。

➤ 方針 3：時間変化を示すことのできる手法を用いる

解析的評価方法として、回収可能性維持の影響を明らかにするために、回収維持のために地下施設が開放されている期間による影響を定量化することが必要である。そのため、解析は非定常解析を行うことを主とし、経時変化を示すことができるものとする。経時変化を明確とするために、モデル、前提条件等はある程度、シンプルなものとし、モデルの複雑さによって、

現象の経時変化が明確にならないことを避けるものとする。また、多くの解析の前提条件、モデルはサイトの特性が反映されるべきものであるため、今後、サイトが具体的になった場合に、その情報を取り込んだ解析ができる手法を検討対象とする。

上記の検討方針、及び昨年度までに実施した検討結果を基に、本年度は以下を実施した。

(1) 技術検討項目に対する影響評価方法の整理

各技術検討項目において着目する現象や影響を与える現象を抽出・整理し、3.2節で示した各技術検討項目に対する影響評価方法の概要を示す。さらに、この技術検討項目に対する影響評価方法の整理から、回収可能性維持期間に対する各影響評価方法がどのように位置付けられているのかを示す。

(2) 回収可能性維持期間の影響評価方法の検討

本年度は、以下の1)～3)の解析的定量的評価等を実施することで、R&R検討会で示された定量化に必要な技術検討項目に対する、回収可能性を維持した場合の安全性への影響の定量的評価方法を示す。

1) 水理学的影響評価

昨年度の検討により課題となった水理解析手法の適切な解析条件の設定や解析結果の妥当性に係る課題についての検討を進めると共に、技術検討項目に関する定量評価方法を例示する。実施内容は、水理解析の課題の検討として、不飽和領域に関する既往の知見の整理、不飽和領域の形成や再冠水時間についての、設定パラメータの違いに関する感度解析、及び解析手法の違いによる影響の把握（飽和・不飽和浸透流解析、二相流解析等）を行い、解析手法の高度化のための検討も実施する。また、技術検討項目に関する定量評価方法の例示として、坑道開放状態の維持による地下水の引き込み影響の評価のために、流跡線解析（地下水流動の可視化）を実施する。また、これらの結果については、必要に応じて種々の水理学的データを抽出し、「2) 化学的影響評価」に引き渡す。

2) 化学的影響評価

本年度は、技術検討項目に対応する化学的影響評価方法について具体化する。まず、昨年度までの検討結果や「1)水理学的影響評価」の結果等を参考にして、化学的影響評価のための解析モデルや解析条件を設定する。そして、化学反応・物質移行連成解析により、回収可能性維持による地下水のpHの変化、酸化還元状態(Eh)の変化、ならびに、支保工などの地下構成要素（セメント系材料、鋼材）の劣化挙動を把握することにより、安全性への影響の評価方法の検討を行う。

3) 力学的影響評価

上記の「2)化学的影響評価」の結果を基に、力学解析で使用する支保工等のパラメータの導出を検討する。その結果と昨年度までの力学的解析の条件としていたパラメータとの比較により、その適用性について確認する。また、回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性に関連して、再掘削時の力学的影響評価方法についても検討する。

3.3.2 技術検討項目に対する影響評価方法の整理

(1) 検討対象とする現象のイメージ

技術検討項目として挙げられている内容に関わる現象や影響について、安全性への影響として検討の対象となる現象について具体化を行った。ここでの対象は、横置き PEM 方式とした。評価手法の検討の際は、適宜、豎置き定置方式についても対象としている。図 3.3.2-1 にニアフィールドにおけるおこりうる現象のイメージを示す。ニアフィールドでは、お互いが関連しつつ様々な現象が起こると想定されることから、力学的影響、水理学的影響、化学的影響に分けて図示した。また、ファーフィールドについて起こりうる現象のイメージを

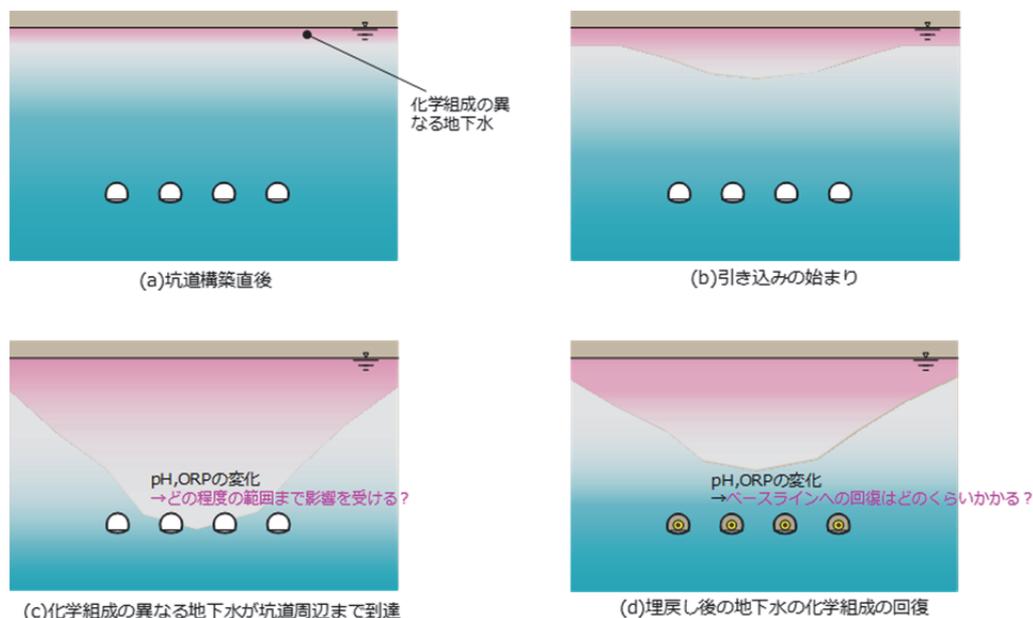


図 3.3.2-2 に示す。

力学的影響に関しては、坑道構築後から周辺岩盤や支保工の変形が進行すると、いずれ、空間が不安定化すると考えられる。また、坑道を掘削すれば周辺岩盤には透水性が増加する領域が発生し、さらに、周辺岩盤の変形が進行すれば、透水性が変化する領域は拡大していくものと想定される。埋め戻し後の坑道内部は埋め戻し材で支えられているので、不安定化に対する懸念は不要と考えられる。その後、廃棄体回収のために再掘削をした場合は、坑道構築後と同様に、再び周辺岩盤や支保工の変形の進行に伴い坑道が不安定化することが懸念される。

水理学的影響に関しては、坑道を構築すると周辺岩盤の水圧分布等の地下水流動場が変化して湧水が発生し、場合によっては坑道壁面から大気浸入することにより、不飽和領域が発生する可能性があると考えられる。また、湧水が発生すれば、周辺の化学組成の異なる地下水が引き込ま

れることも考えなければならない。さらに、横置き PEM 方式の場合は、埋め戻し後に岩盤と埋め戻し材の間に隙間が存在する場合には、湧水量が多い場合にはベントナイトが流出する可能性がある。流出によって、ベントナイトが損失すれば、埋め戻し材の低透水性が損なわれる可能性がある。坑道の埋め戻し後には、湧水が抑えられて周辺岩盤の地下水流動が変化し、処分場周辺からの地下水の引き込みが大きく減少すると考えられる。また、周辺の地下水流動場の回復にどの程度の時間がかかるのかも検討対象となる。さらに、再掘削が行われた場合は、坑道構築後と同様に、湧水が発生し、不飽和領域が発生する可能性、周辺の地下水の再引き込みも起こることも考えられる。

化学的影響に関しては、坑道を構築した時に、溶存ガスの脱ガスや大気浸入により、不飽和領域が生じると、その壁面から大気中の酸素が周辺岩盤に拡散していくと考えられる。その脱ガスや酸素供給により地下水の pH が変化する。また、吹付けコンクリートのセメント成分が地下水と接触することで溶脱や高 pH 水が生じるようになる。このような地下水の酸化還元状態の変化や pH の変化により、周辺岩盤を構成する鉱物が溶解し、二次鉱物が生成されることが考えられ、さらに、周辺岩盤における地下水の pH や酸化還元電位、透水性が変化することにつながる。埋め戻し後は、壁面から大気中の酸素の供給は止まるものの、埋め戻し材や緩衝材中に存在している酸素が、影響するものと考えられる。さらに、埋め戻しから再冠水の期間はベースラインへの回復過程となるが、その過程において、周辺岩盤における地下水の pH や酸化還元電位がどの程度の範囲まで影響を受けるのか、あるいはどの程度の時間で回復するのかが検討対象となる。再掘削した場合は、坑道構築後と同様の現象が再び起こるものと考えられる。

ファーストフィールドで起こる現象に関連する技術検討項目は、「地下水の引き込みによる擾乱影響の程度と範囲」と「ベースラインへの回復過程と回復の程度」が対象となる。図中、赤色と青色の違いは、化学組成の異なる地下水を表現している。この図は、処分坑道近傍の変化は示していない。処分場の地下施設が構築された直後には、坑道が存在している地下深部の地質環境は還元状態である。地表面直下の地下水面近傍は酸化状態であり、地下の深度が深まるにつれ、地質環境の影響も受け、地下水組成、pH、ORP が変化していくことが知られている。この変化は、与えられる場によって決まるものであるが、ここでは、地下深部環境にある地下水とは異なる地表面直下の地下水が、地下施設が構築された後、坑道が開放されていることにより坑道内に湧水が発生し、湧水が継続することにより、地下水面近くの地下水が徐々に地下深部に引き込まれることを対象とする。この引き込みの程度と進行は地質環境にも依存するが、本検討においては、一連の手法の提示を目的として、地質は地上から深部まで等価な透水性を持つものとして扱う。また、坑道が埋め戻された後は、還元状態の地下水の供給や地下水と岩石の化学反応等により、地下施設周辺の地質環境が還元状態に回復していくことが予想される。この引き込みと回復を時間の要素を加えて、定量化することが、回収を維持することによる影響の定量化することになる。

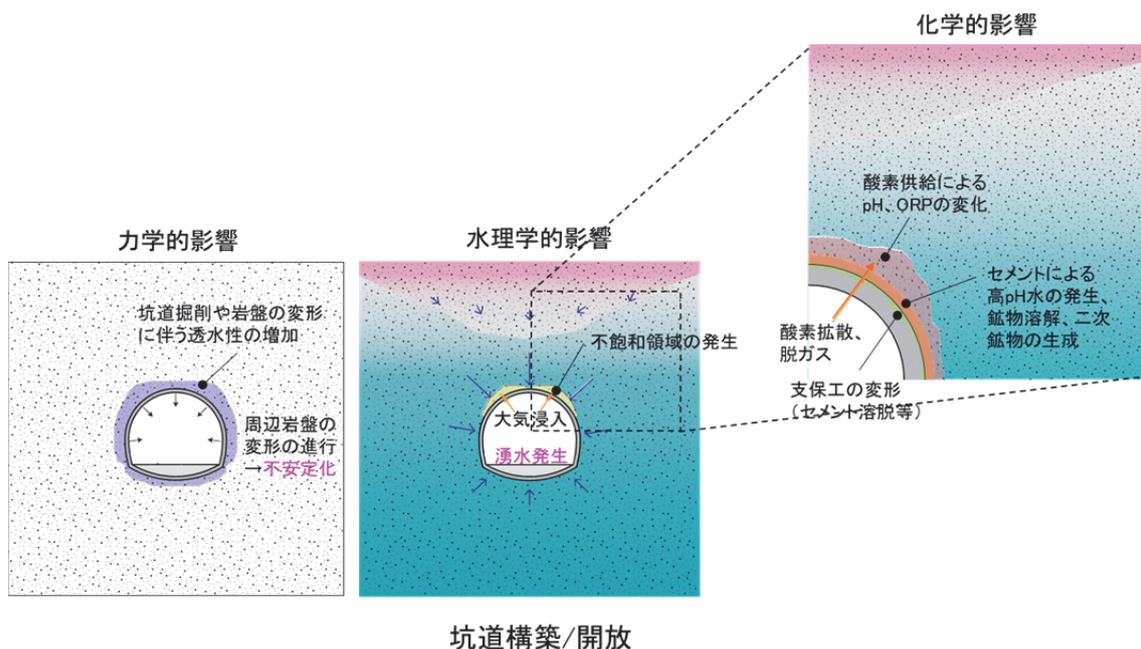


図 3.3.2-1 ニアフィールドにおいて起こりうる現象のイメージ

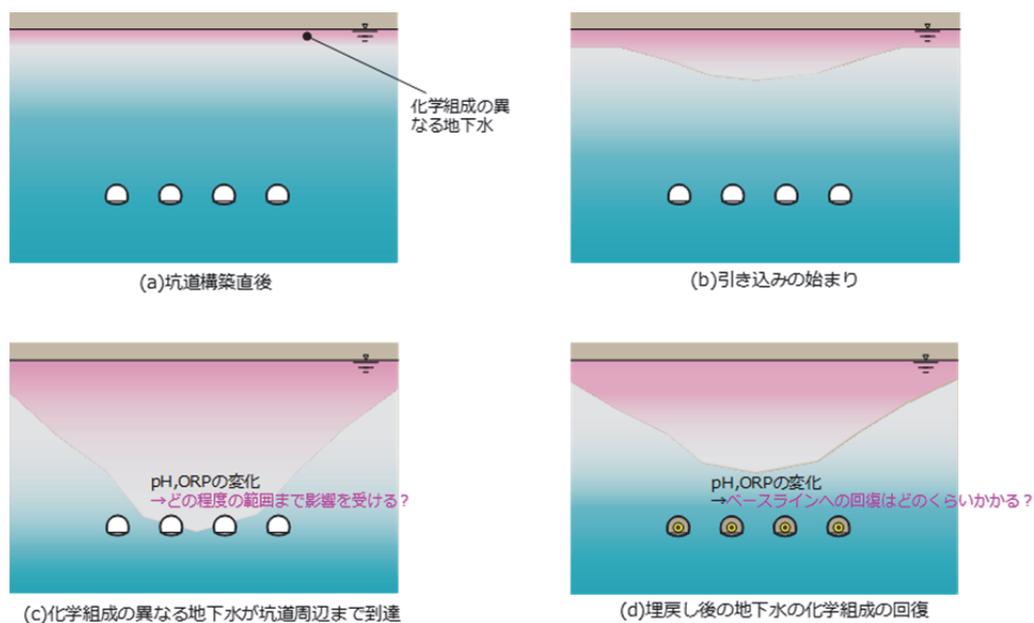


図 3.3.2-2 ファーフールドにおいて起こりうる現象のイメージ

(2) 影響評価項目ごとの分類

技術検討項目の評価対象とする現象や影響を与えている現象の関連性を示した図を図 3.3.2-3 と図 3.3.2-4 に示す。これらの図を基に、力学的・水理学的・化学的影響評価ごとに分類して、各影響評価項目で考慮する現象とそれらに影響を与えている現象を表 3.3.2-1 のように整理した。この表において、太字で示したものが各影響評価項目において考慮する現象で

あり、印に続いて示された項目が、それに影響を与えている現象を示している。また、この表で示した項目や現象は、6つの技術検討項目を包含されたものである。表 3.3.2-1 より、考慮する現象と影響を与えている現象が、相互に影響を及ぼしあっていることが分かる。

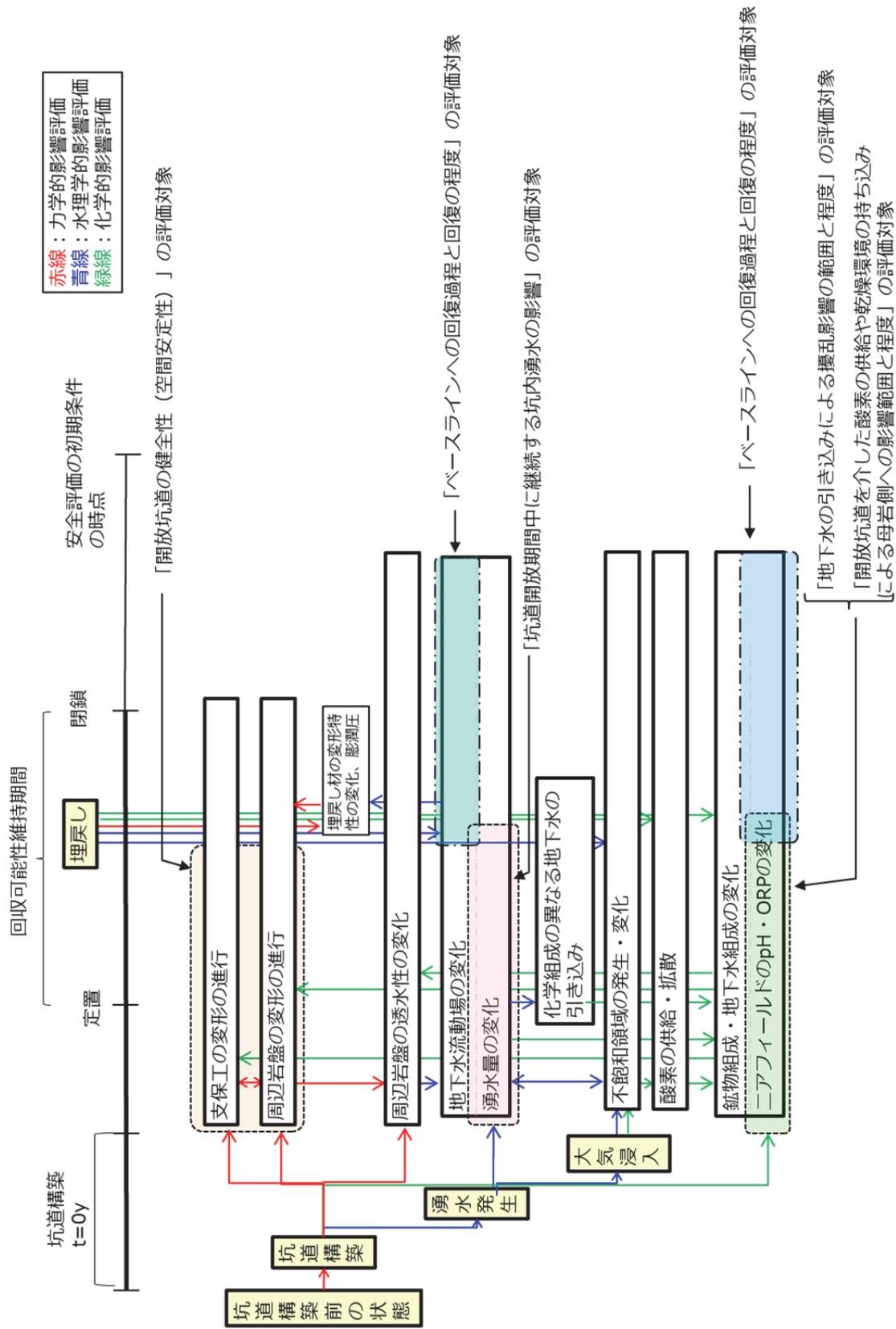


図 3.3.2-3 技術検討項目の評価対象とする現象と影響を与えている現象の関連性（再利用時の健全性以外）

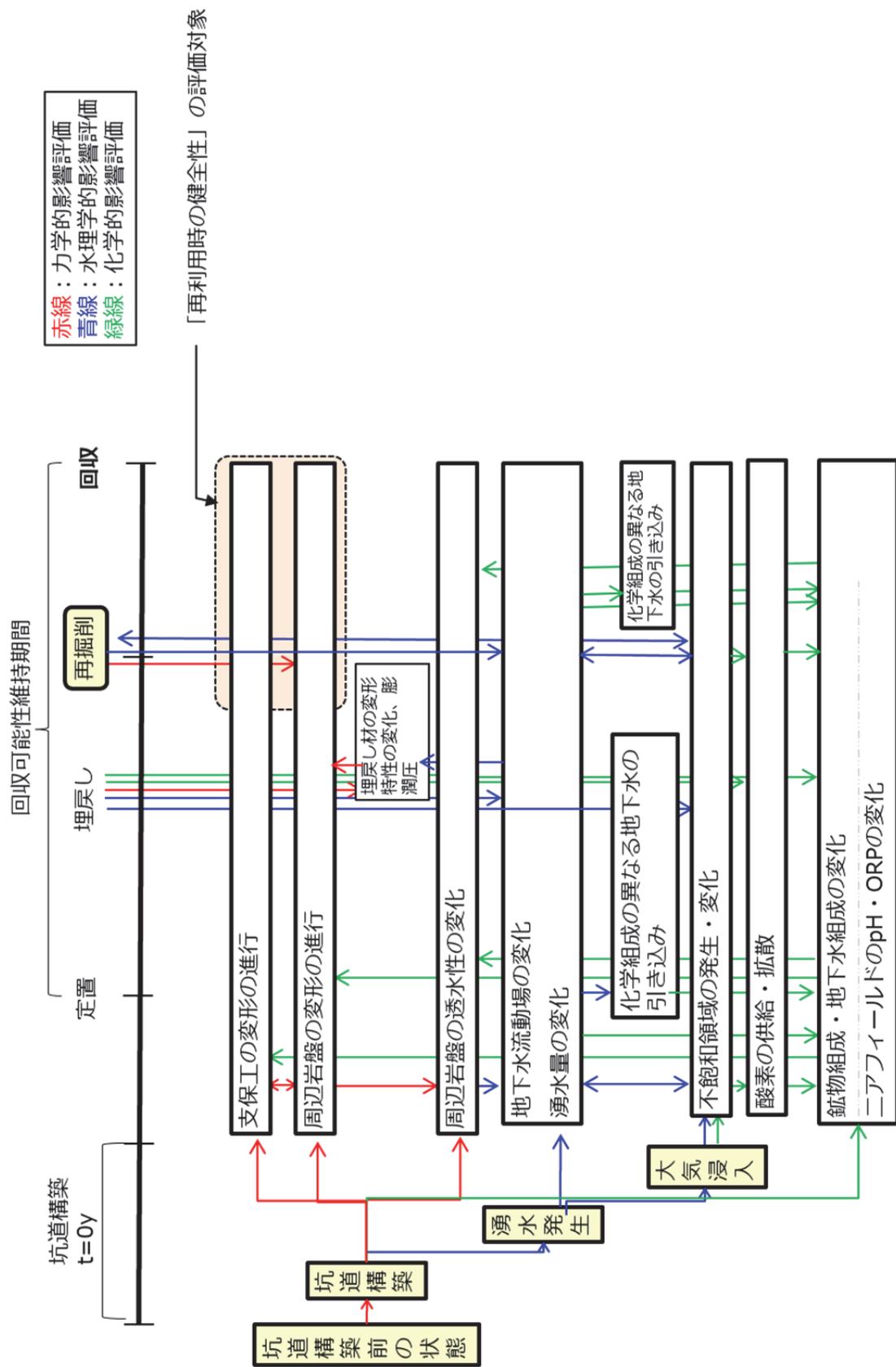


図 3.3.2-4 「再利用時の健全性」の評価対象とする現象と影響を与えている現象の関連性

表 3.3.2-1 各影響評価項目で考慮する現象とそれらに影響を与えている現象

影響評価項目	力学的影響	水理学的影響	化学的影響
考慮する現象と影響を与えている現象	<p>周辺岩盤の変形の進行</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 坑道掘削時の応力再配分 ● 周辺岩盤のクリープ変形 ● 化学的影響による変形・強度特性の変化 ● 飽和に伴う埋戻し材の膨潤圧の発生 ● 飽和に伴う埋戻し材の変形特性の変化 ● 支保工の変形の進行 ● 再掘削時の解放力 <p>支保工の変形の進行</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 周辺岩盤の変形の進行 ● 化学的影響による変形・強度特性の変化 <p>周辺岩盤の透水性の変化</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 坑道掘削時の応力再配分 ● 周辺岩盤の変形の進行 	<p>地下水流動場の変化、湧水量の変化</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 坑道壁面からの湧水の発生 ● 不飽和領域の発生・変化 ● 周辺岩盤の透水性の変化 ● 坑道の埋戻し ● 再掘削時の湧水の発生 <p>不飽和領域の発生・変化</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 坑道壁面からの大気の浸入 ● 地下水流動場の変化 ● 坑道の埋戻し ● 再掘削時の大気の浸入 <p>FFの化学組成の異なる地下水の引き込み</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 地下水流動場の変化 	<p>酸化還元反応による鉱物組成・地下水組成・pH及びORPの変化</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 地下水流動場の変化、湧水量の変化 ● 酸素の供給・拡散 ● FFの化学組成の異なる地下水の引き込み ● 支保工からの高pH水・セメント溶脱 ● 埋戻し材の鉱物組成・間隙水組成 <p>酸素の供給、拡散</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 不飽和領域の発生、変化 ● 埋戻し材内の酸素 <p>支保工からの高pH水・セメント溶脱</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 酸化還元反応による鉱物組成・地下水組成・pH及びORPの変化 <p>周辺岩盤の透水性の変化</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 酸化還元反応による間隙構造の変化

凡例
 太字：影響評価項目において考慮する現象
 ●：影響を与えている現象

(3) 各技術検討項目における評価手法

1) 開放坑道の健全性（空間安定性）

本技術検討項目における評価手法として、図 3.3.2-5 に示す流れを考えた。開放坑道の健全性（空間安定性）においては、評価対象とする現象や量は、坑道構築直後から埋め戻しまでの期間における、「周辺岩盤の変形の進行」と「支保工の変形の進行」が考えられる。従って、力学的影響評価において、相互に影響を及ぼし合うこの2つの変形の進行の時間変化を算出し、ひずみの進行により、坑道の安定性についての評価を行う。

一方、岩盤の変形は岩盤の持つ物理特性が設定条件（与条件）となるが、支保工の変形に対しては、化学的影響であるコンクリートの溶脱によるコンクリートの強度変化を解析的に評価できると考える。コンクリートの溶脱は、コンクリートに接触する水の量と接触する時間によってその量が決まると考えられるため、支保工周辺の湧水量がコンクリートの溶脱の化学的影響評価の与条件となる。そこで、力学的影響評価からは周辺岩盤の透水性の時間変化を水理学的影響評価に引き渡し、水理学的影響評価では、得られた流動経路、坑道湧水量（動水勾配）を条件の設定として化学的影響評価に引き渡す。化学的影響評価では、地化学状態の時間変化を算出し、コンクリートの溶脱についての評価を行い、カルシウム溶脱率から支保工の劣化の進行を算出し、力学解析で設定する条件として使用できる。

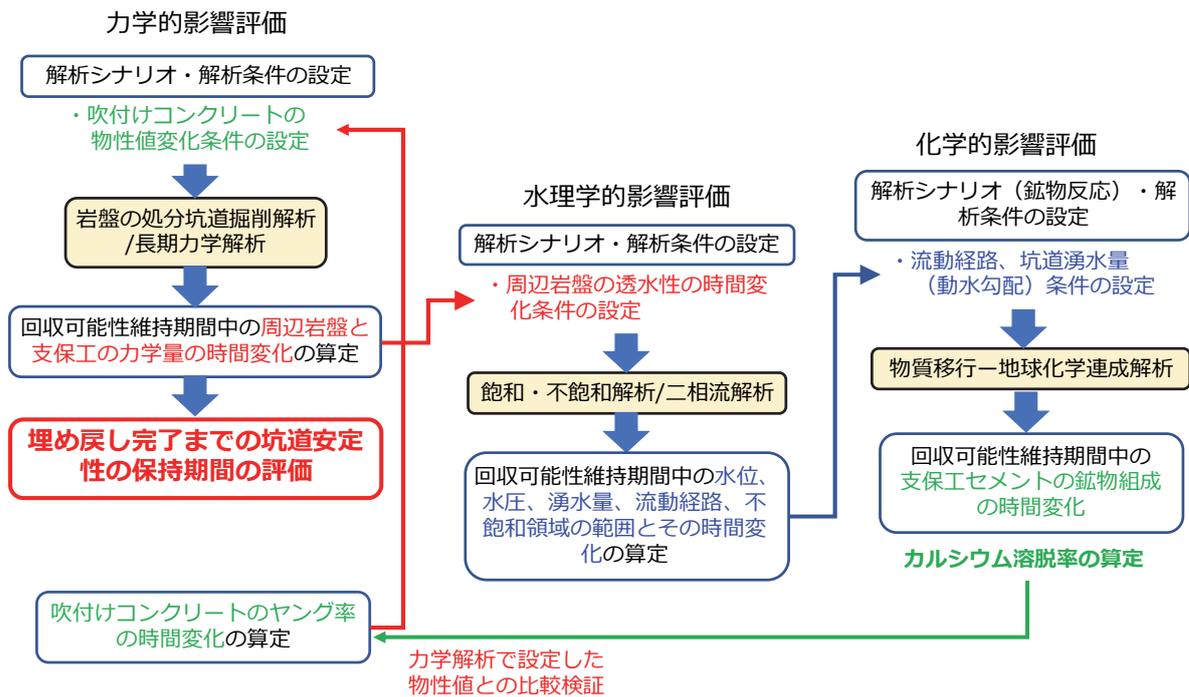


図 3.3.2-5 「開放坑道の健全性（空間安定性）」に関する評価手法のフロー

2) 埋め戻した坑道の再利用時の健全性

埋め戻した坑道の再利用時の健全性において、評価対象とする現象や量は、埋め戻し後から再掘削開始して、回収完了までの期間における「周辺岩盤の変形の進行」と「支保工の変形の進

行」が考えられる。再利用時の坑道の健全性を評価するためには、1)の開放坑道の健全性と同様の手法を用いることができるが、評価の対象となる期間と事象を付加することになる。すなわち、評価対象として、回収可能性維持期間を経た、埋め戻し期間と再掘削の影響を考慮することが必要である。埋め戻し材の変形特性や膨潤圧は、再掘削開始するまでの期間の岩盤の変形の履歴に影響を与えるので、間接的には影響を与えていると考えられる。評価手法の流れとしては、図 3.3.2-5 に示したものと大きくは変わらず、影響評価の対象が増えることになる(以下、各項目の評価手法のフローは第3分冊を参照)。

3) 坑道開放期間中の坑内湧水の影響

坑道開放期間中の坑内湧水の影響の評価対象とする現象や量は、坑道構築直後から閉鎖までの期間における湧水量の変化である。湧水は人工バリアや、周辺部材に影響を及ぼすと考えられる。最も影響が懸念されるのは、緩衝材に対する影響であり、縦置きブロック方式による定置では、処分孔への湧水により緩衝材が流出することが懸念されている。湧水量によって、緩衝材の流出量が見積もれることが既往の研究[8]で示されており、湧水量を評価することにより、緩衝材の流出も評価することができると考えられる。本項目は、水理学的影響評価が主であるが、力学評価による透水性の変化が水理学的影響評価の条件に反映される。また、周辺岩盤の透水性の変化に対して影響を与える現象としては、酸化還元を含む岩石-水反応による岩盤の間隙構造の変化も含まれるため、化学的影響評価によって得られる透水性の変化も水理学的影響評価の条件設定として使用できる。

4) 地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度

地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度の評価の対象とする現象は、坑道構築直後から埋め戻しまでの期間におけるファーストフィールドの化学組成の異なる地下水の引き込みである。地下水の引き込みによる、酸化還元環境、岩石-水反応による鉱物組成・地下水組成・pH及び酸化還元電位の変化が起こる。この変化の内、本検討において評価の指標となる値として着目したのは、pH及び酸化還元電位の変化である。そのため、評価手法としては化学的影響評価が主となるが、透水性や湧水量が影響を变化の進行に影響を与えるため、水理学的評価も必要である。

5) 開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度

開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度において、評価対象とする現象は、処分坑道を対象とした場合、坑道構築直後から埋戻しまでの期間における鉱物組成・地下水組成・pH及び酸化還元電位の変化である。4)と同様、この内、pH及び酸化還元電位の変化が処分機能の要件を満たすための指標となる。そのため、評価手法としては化学的影響評価が主となるが、坑道の開放に伴って生じる可能性のある不飽和領域の範囲とその時間変化がpH及び酸化還元電位の変化に影響を与えるため、水理学的評価も必要である。そのため、水理的な不飽和領域の拡大範囲の評価も必要と考えられる。また、pH及び酸化還元

電位の変化と同時に、鉱物変化も起こり得るため、鉱物の変化（溶解、二次鉱物の生成）に伴う間隙率の変化や透水性の変化に影響が及ぶ。この時、回収可能性維持期間における鉱物変化は、瞬時反応、または比較的反応速度の速い鉱物反応によるものに限定される。評価対象とする領域は坑道周辺のニアフィールドとなる。

6) ベースラインへの回復過程と回復の程度

ベースラインへの回復過程と回復の程度における評価対象とする現象や量は、上記の 4)及び 5)の影響を引き継ぎ、埋戻し後から安全評価の初期条件とする時点までの期間における水理学的影響評価である地下水流動場の変化と、化学的影響評価のである鉱物組成・地下水組成・pH及び酸化還元電位の変化の2つとなる。

水理学的影響評価では、坑道掘削後の地下水水位の低下と再冠水による水位の回復を評価しなければならない。また、湧水が続くことによる不飽和領域の発生と進展、及び再冠水による不飽和領域の飽和過程の評価も必要となる。そのため、解析手法として、二相流解析の必要性についても検討を行う。

化学的影響評価は 4)、5)と同様に pH 及び酸化還元電位の変化を対象とする。鉱物組成・地下水組成の変化は可逆的なものと非可逆的なものがあり、回復には含まれないと考えられる。ただし、開放時（回収維持期間）における鉱物組成・地化学組成の変化によって、pH 及び酸化還元電位の回復に要する時間には影響を与える。評価対象とする領域は、ニアフィールドとファールフィールドの両方になると考えられる。

3.3.3 回収可能性維持期間の影響評価方法の検討

ここでは、R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目に対する、回収可能性を維持した場合の安全性への影響の定量的評価方法を示す。今年度の検討においては、昨年度に引続き水理学的な影響の評価方法についての検討を進め、さらに水理学的な影響評価から得られた化学的な影響に反映できる情報を抽出して、化学的な影響の評価方法について検討した。水理学的及び化学的な影響の評価方法の検討として、「地下水の引き込み」に関する検討を行った。この結果を基に、化学的影響評価として、坑道の支保工への湧水の影響に関する横置き処分坑道における坑壁に施工される吹付コンクリートを対象としたセメントの溶脱現象について、解析的に評価した。さらに、力学的影響での坑道安定性の評価[4]、[6]で設定した、支保工の劣化の進行と比較すべく、得られた溶脱率を基にセメントのヤング率を算定し、設定値の妥当性を検討した。

(1) 水理学的影響評価

水理学的影響の評価は、直接アウトプットとして示せるものと、化学的な影響を評価する際のインプット情報となり得るものがあり、複数の技術検討項目にまたがって利用できる評価方法である。そこで、ここではまず、水理学的な影響についての影響評価方法の全般について検討した。

必要となる水理学的な影響評価手法について、本検討における前提条件を踏まえて整理を行い、具体的な解析手法の選定から解析手順や感度解析項目や条件設定と、具体的な解析事例を示す。

これにより、水理学的な影響評価における現状技術の把握と評価における課題について抽出した結果を示す。

そのための検討が、以下の 3 項目である。この項目は直接技術検討項目について評価方法とはならないが、回収可能性維持期間の影響を評価する手法としての水理解析方法として必要な検討となる。

- 岩盤の透水係数の違いに関する検討
- 岩盤の不飽和特性の違いに関する検討
- 水理学的影響評価手法の適用性評価検討

また、これらの検討の結果も踏まえて、技術検討項目の一つである、「地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度」についての評価方法を例示する。

1) 解析手法と解析条件

水理学的な影響評価にあたり、本検討では一般的な解析手法として以下の 2 つを選定した。

飽和・不飽和解析手法 : Dtransu-3D・EL (FEM 系)
空気の流れを考慮しない解析手法

二相流 (多相流) 解析手法 : TOUGH2 (IFDM 系)
空気の流れを考慮する解析手法

ともに地下水流動を対象とした解析コードとして適用実績が多く、解析コード自体の妥当性確認も行われている。また、本検討では、回収可能性維持期間中の坑道周辺の不飽和領域の発生や経時変化、再冠水によるベースラインへの回復評価を実施することから、「空気の流れの取り扱い」が異なる 2 種類の評価手法を用いて、解析手法の適用性を確認することを目的とした場合の比較すべき解析コードの選定としては妥当であると判断した。

解析条件の詳細については、第 3 分冊を参照されたい。

2) 回収可能性維持期間の影響を評価する手法の検討

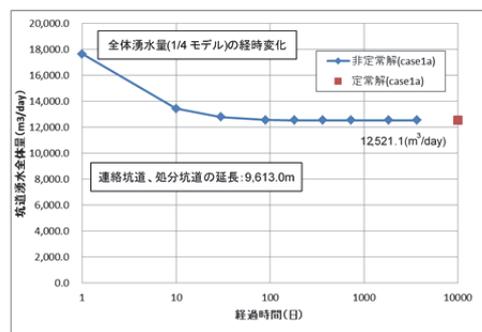
a 岩盤の透水係数の違いに関する検討

岩盤の透水係数の設定については、湧水量と定常に至るまでの時間に影響することから、透水性の設定の影響を把握することが必要である。岩盤 (母岩) の透水性の違いに関する湧水量や再冠水挙動に関する影響について感度解析を実施し、回収可能性維持期間との関連について把握することを目的に検討を行った。

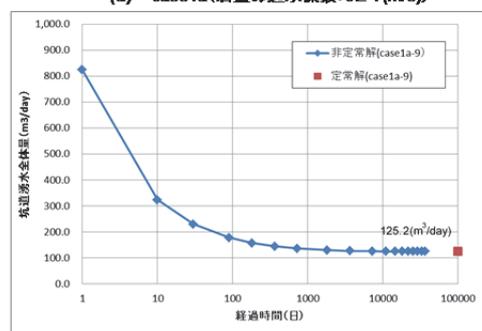
坑道掘削時、回収可能性維持期間中の影響について、岩盤の透水係数の違いに関してパネルスケールモデルを対象とし、飽和・不飽和解析手法を用いて検討した。解析条件については平成 29 年度検討[4]における「パネルスケールモデル」による解析ケース case1a を用いた。解析ケース等の詳細は第 3 分冊を参照されたい。

透水係数が違う条件での処分坑道掘削時の湧水量の経時変化の比較を図 3.3.3-1 に示す。これより、岩盤の透水係数の違いによる湧水量に経時変化は理論通りであることがわかる。また、処分坑道掘削時の定常湧水量を算出した結果、透水係数に関わらず、連絡坑道と処分坑道の全

体湧水量に対する割合も変わらなかった。湧水量の経時変化に着目すると、岩盤の透水性が大きい方が定常状態に落ち着く時間が早く、透水性が小さいほど時間が掛かることになる。岩盤の透水性が 10^{-9} 乗オーダーの場合、掘削影響が落ち着く時間としては、約30年程度と示された。



(a) case1a(岩盤の透水係数: $3E-7$ (m/s))



(b) case1a-9(岩盤の透水係数: $3E-9$ (m/s))

湧水量の絶対値については、解析条件等に依存するため取扱いに注意を要する。

図 3.3.3-1 処分坑道掘削時の湧水量の経時変化 (case1a,case1a-9)

坑道掘削時の経時変化の他に、再冠水時の経時変化についても検討を行った結果(第3分冊参照)も含め、透水係数の違いが技術検討項目に関わる知見を以下に示す。

- 坑道開放期間中の継続する坑内湧水の影響について

本検討での岩盤条件は、均質・多孔質媒体であったことから、岩盤の透水係数と湧水量は比例関係にあると考えてよい。湧水量は岩盤の透水性の影響が大きいため、岩盤の透水係数の不均質性や不確実性の影響が大きいと見える。そのため、岩盤の不均質性、不確実性の影響に対する検討が今後必要である。

- 地下水の引き込みによる擾乱影響の程度と範囲について

岩盤の透水係数が小さいほど、地下水流動場の変動スピードは小さくなり、坑道開期間中の地下水の引き込みによる擾乱影響は、岩盤の透水係数に反比例して掘削影響の伝達時間が長くなると考えてよい。

- ベースラインへの回復過程と回復の程度について

岩盤の透水係数が小さいほど、地下水流動場の変動スピードは小さくなり、岩盤の透水係数に反比例してベースラインへの回復時間が長くなると考えてよい。本検討で用いた岩盤の透水係数 (3×10^{-9} m/s) の場合は、約30年~100年程度で地下水流動場がベースラ

インへ回復する結果が得られた。水理学的な回復期間よりも地化学的なベースラインへの回復期間の評価が重要になると考えられる。

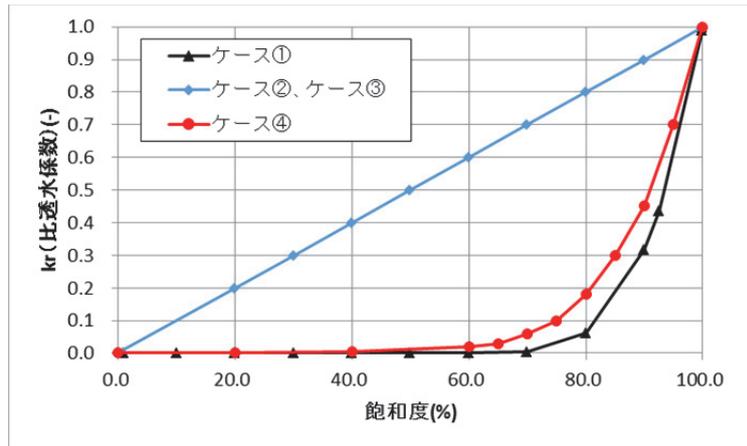
b 岩盤の不飽和特性の違いに関する検討

昨年度の検討により、岩盤の不飽和特性の設定により、不飽和領域の評価結果に対しての影響が大きいことが分かった。そのため、不飽和領域評価にあたり、岩盤の不飽和特性の違いによる感度解析を実施し、評価結果への影響について把握するとともに、本検討で用いる不飽和特性の設定を行うことを目的として、不飽和特性について検討した。

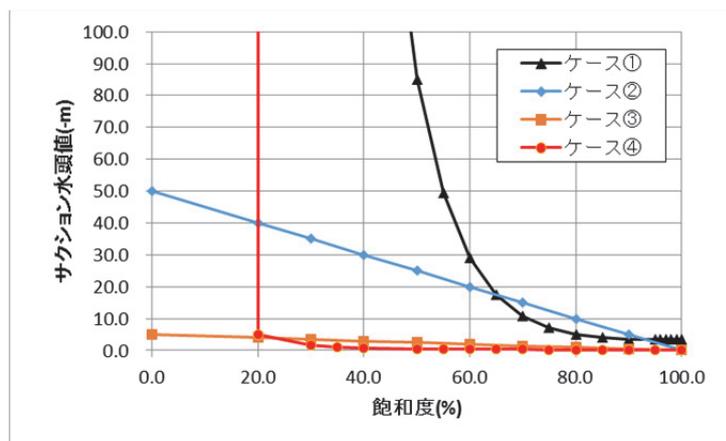
検討にあたり、不飽和特性の違いによる感度解析を行った。文献調査結果（第3分冊参照）を踏まえ、岩盤の不飽和特性の異なる4ケースを設定し、飽和・不飽和解析手法（FEM）を用いた「処分坑道詳細モデル」による不飽和領域評価に対する感度解析を行った。

- ・ケース : 平成29年度の設定条件[4]
- ・ケース : 簡易な直線関数関数（サクシヨン水頭の最小値：-50m）
- ・ケース : 簡易な直線関数関数（サクシヨン水頭の最小値：-5m）
- ・ケース : 陸水シミュレーション条件（登坂ら[9]参照）

各ケースの不飽和特性として相対浸透率関数と毛管圧力関数のグラフを図3.3.3-2に示す。EDZを考慮した場合の影響、非定常解析による圧力水頭分布の比較などを行った結果、ケースが不飽和領域での低透水性を表現できていることから、ケースの条件が望ましいと考えられた。



(a) 相対浸透率関数



(b) 毛管圧力関数

図 3.3.3-2 感度解析に用いた不飽和特性曲線の比較

不飽和領域評価に用いる不飽和特性に関する感度解析を行った結果について、各技術検討項目に対しての影響を以下にまとめる。

- 坑道開放期間中の継続する坑内湧水の影響について

坑内湧水量に対しては、坑道周辺の不飽和領域の発生や不飽和特性の違いによる影響は小さいことがわかった。

- 地下水の引き込みによる擾乱影響の程度と範囲について

坑内湧水量や周辺地下水の擾乱影響に対しては、不飽和領域の有無や不飽和特性の違いの影響は小さい。よって、坑道周辺の不飽和領域の発生よりも、岩盤の不均質性、不確実性による影響の方が重要であると考えられる。

- 開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度について

EDZのような高透水部の影響により、不飽和領域が発生する可能性があるため、適切な不飽和領域に対する評価手法が必要である。ただし、岩盤に対する不飽和特性の実測例は少ないため、適切なデータ取得が必要である。

飽和・不飽和解析における不飽和特性の設定は評価結果に及ぼす影響が大きいいため、適切な不飽和特性の設定が必要である。さらに、坑道開放時の不飽和領域評価においては、従来の飽和・不飽和解析手法、二相流解析手法に対しても、坑壁境界条件として蒸発散を考慮した検討、そのためのデータ取得の必要性について検討する必要がある。

- ベースラインへの回復過程と回復の程度について

ベースラインへの回復に関しては、坑道開放時に形成された不飽和領域などがどのようにして飽和されるかについて評価する必要がある。再冠水の対象は岩盤だけでなく、「埋め戻し材」なども含まれるため、埋め戻し材の不飽和特性について適切な評価を行うためのデータ取得が必要であると考えられる。

本検討では、約 30 年～100 年くらいまでにはベースラインに戻る可能性がある結果が得られているが、地下水位が低下しない条件の予測結果であり、地下水位が低下する場合の方がベースラインへの回復期間は長くなる可能性があるため、さらに検討が必要である。

- 水理学的影響評価手法の適用性評価検討

坑道掘削時の不飽和領域評価、及び処分坑道閉鎖時の再冠水評価に対する水理学的影響評価手法（飽和・不飽和解析手法と二相流解析手法）の適用性について、不飽和領域評価や再冠水評価の観点から比較検討を行い、評価手法としての適用性について検討した。

本検討で実施した解析条件（坑道掘削及び再冠水）では、水圧分布に関して、二相流解析（TOUGH2）と飽和・不飽和流解析（Dtransu-3D・EL）はほぼ同様の結果となり、どちらの解析手法を選択しても同様の評価結果が得られることを確認した。

限界毛管圧が働く場合には、二相流解析では不飽和領域が生じないが、飽和・不飽和流解析では不飽和領域と見なされる領域が生じる場合があることがわかった。この場合、空気の動きを考慮できる二相流解析の方がより現実的な評価を行っていると考えられる。

掘削後の坑道湧水量に関して、二相流解析と飽和・不飽和流解析で異なる値となった。これは、飽和・不飽和流解析が境界圧力の経時変化を考慮できる一方、TOUGH2 は考慮できないという機能的な制約を有するためである。現状では掘削過程の湧水量を詳細に評価したい場合には、Dtransu-3D・EL を選択した方がよいと考えられる。

再冠水解析においては、二相流解析では不飽和領域（EDZ、埋め戻し土）内の空気が水圧回復に伴い溶解することを考慮できるものの、二相流解析手法、飽和・不飽和解析手法による評価結果の違いは顕著ではない結果が得られた（図 3.3.3-3）。ただし、二相流解析の方が地下水に溶解した空気の移流現象を評価できる点で飽和・不飽和解析手法よりも優れていると言える。

一方、本検討では、初期条件として地下水中の溶存ガスを考慮すると、二相流解析での収束解が得られない現象が発生したため、地下水中には溶存ガスがない条件で検討を実施した。脱ガスによる現象は幌延 URL でのメタンなど、実際に観測されている現象であることから適切な評価を実施する必要があると考えられ、二相流解析条件の見直しを含めて検討が必要である。

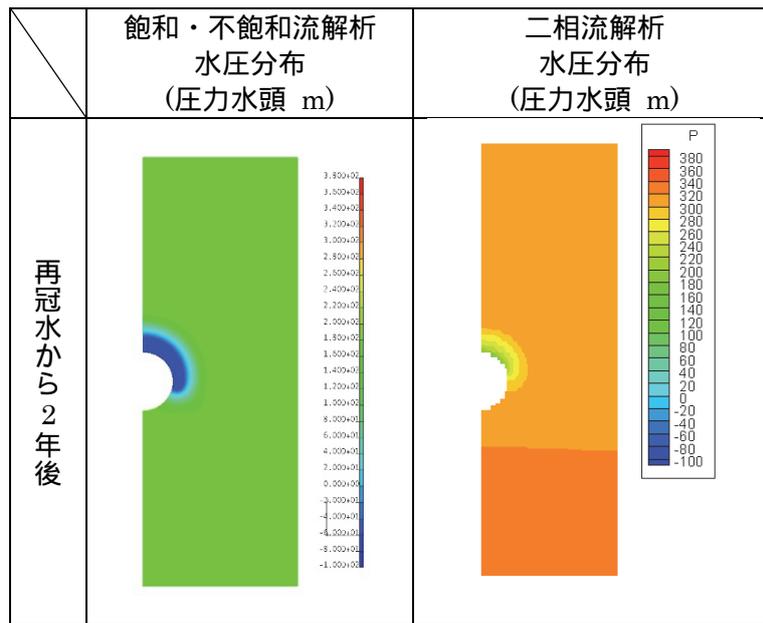


図 3.3.3-3 飽和・不飽和解析手法と二相流解析手法の再冠水解析の水圧分布（2年後）

3) 「地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度」に関する水理学的影響の評価方法

岩盤に対する化学的な影響が大きくなる条件としては、回収維持期間中、長期に渡って地下水位が低下し化学反応が継続する場合であると考えられる。そこで、処分坑道掘削に伴い地下水位の低下が生じない場合（海域の場合）、地下水位の低下が生じる場合（陸域の場合）の違いについて飽和・不飽和解析手法を用いた感度解析を実施した。地下水位の低下が生じない場合については、平成 29 年度に検討しているため、今年度は、地下水位が低下する場合の水理学的影響評価方法について検討を行った。また、化学組成の異なる地下水の流動（例えば、降雨の浸透や、海岸域での塩淡水境界の移動など）について可視化する方法の検討を行った。

a 地下水位が低下する場合の水理学的影響評価方法

地下施設の掘削により坑道湧水が発生すると地表付近の地下水面が低下する可能性があるが、これは湧水量と地表付近からの涵養量のバランスによるものであり、坑道湧水量に対して涵養量が多い場合（例えば、海底から涵養の場合）は水位の低下は発生しないが、内陸での処分の場合など地表からの降雨涵養量が少ない場合は地下水位が低下する場合が想定される。

国内の降雨涵養量の平均値は約 1mm/day（約 350～400mm/y）と言われているが、これは地表面から表土に浸透する涵養量の平均値であり、地表の植生、勾配、標高などにより降雨涵養量の分布は異なる傾向にある。また、表層から岩盤への涵養量については、降雨涵養量と比較するとさらに小さいことが予測される。地下水位が低下する場合、解析モデル上面からの涵養のための動水勾配は、圧力勾配が作用しない重力場での最大 1 の下向き動水勾配となる。よって、岩盤の飽和透水係数と動水勾配の関係から、岩盤の透水係数が 3×10^{-9} m/s の場合、可能な涵養量は最大で約 95 mm/y となる。これより、地表付近から最大約 95 mm/y の涵養条件に対して、坑道からの湧水量が多い場合は地下水位の低下が発生し、湧水量が少なければ地下水

位は低下しない。原位置の条件を考慮する場合の検討では、水理地質構造、透水性を反映した検討となるため、地下水面を形成する要因となる降雨涵養量の設定は難しく、実測された地下水位を再現できる降雨涵養量を感度解析的に設定する方法が用いられるが、本検討では「パネルスケールモデル」の上面に涵養量を考慮することにより、地下水位が低下する現象を示した。ケース設定、モデルについては、第3分冊を参照されたい。

降雨涵養量の違いによる地下水位低下の経時変化を図 3.3.3-4 に示す。降雨涵養量に依存して、水位低下の影響範囲が狭くなることが示された。地下水位が低下した領域については、閉鎖後の再冠水挙動評価によるベースラインへの回復に対する影響を及ぼすと考えられる。今後、地下水位低下時の再冠水挙動評価を実施することが必要である。

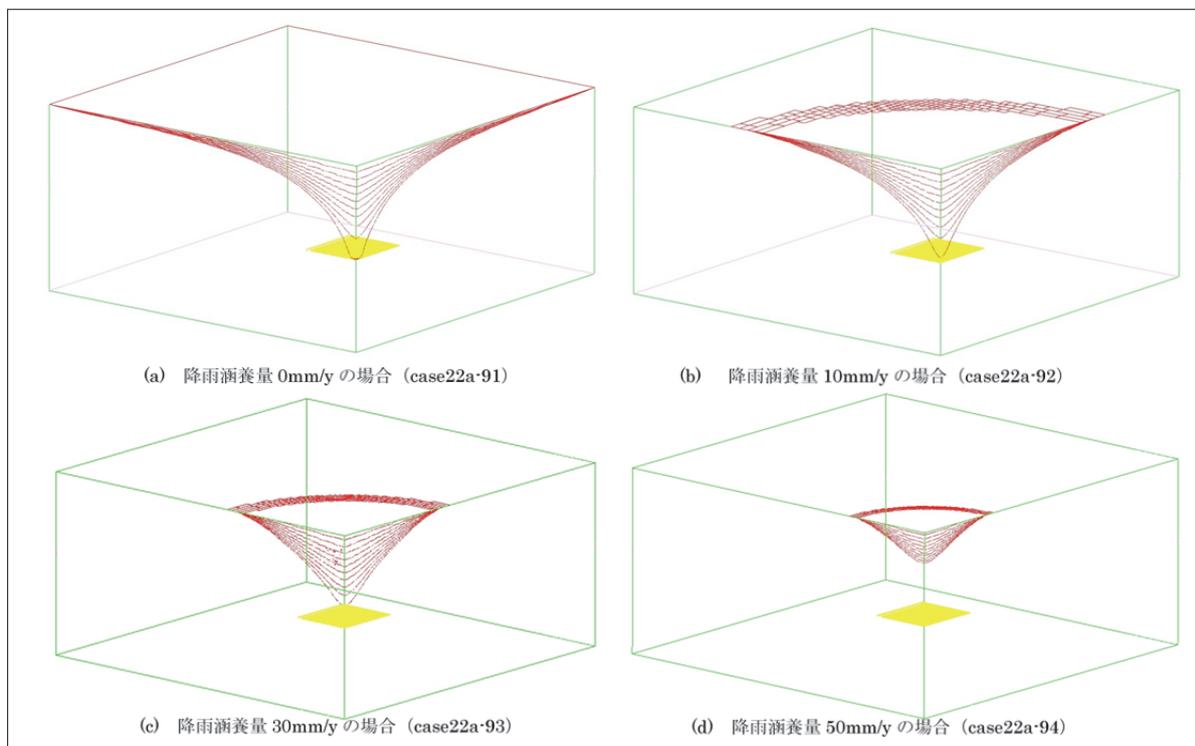


図 3.3.3-4 降雨涵養量の違いによる地下水位低下の経時変化

より簡易なモデルにより、地下水位低下時のグラウトの効果、キャップロックの影響を把握することを目的として、「パネルスケールモデル」からの「切り出しモデル」を作成し、検討を行った。ここでは、地下水の引き込みが顕著なケースとして、降雨涵養量 = 0 とする解析を行った。実際には、降雨涵養量が 0 という環境はあり得ないが、降雨涵養量の考慮は計算負荷が大きくなることもあり、検討のためのケースとして設定した。解析条件、境界条件については、第3分冊を参照されたい。

解析結果として坑道湧水量の経時変化を図 3.3.3-5 に示す。グラウトの効果は掘削後の初期段階で顕著であり、長期的にも湧水量の低減効果があると言える。グラウトによる遮水対策は、坑道湧水量の低減だけでなく、周辺地下水の低下抑制の効果があると言える。キャップロック

が存在すると、湧水量が少なくなることが認められた。

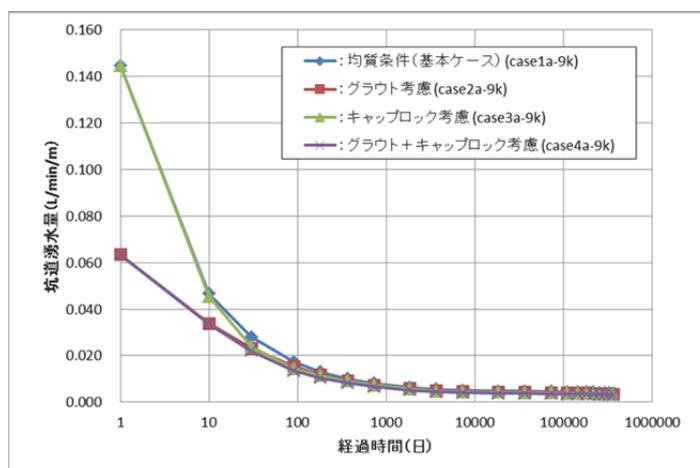


図 3.3.3-5 「切り出しモデル」解析結果の坑道湧水量の経時変化
100000 日 274 年

グラウトが存在する場合の地下水位低下の状況、及びキャップロックが存在する場合についても検討した。グラウトが存在しても不飽和領域は見られなかったが、キャップロックが存在する場合には坑道からの湧水量の影響によりキャップロックと処分坑道の間不飽和領域が発生する可能性があることが示された。水理地質構造の影響が大きいと考えられる。本検討においては地表面から処分場までを均一なモデルとして扱っているが、実際の地下環境での評価では、地質環境により地下水位の低下は大きく変わってくることが推測されるため、場の設定が重要であると考えられる。グラウトによる坑道湧水量の低減により、水理地質構造の影響による不飽和領域の発生の可能性が低減されると考えられる。

ここでは地下水位が低下する条件に対しても、飽和・不飽和解析手法による水理的な影響評価が可能であることを示した。本年度は地下水位が低下した状態からの再冠水検討していないが、再冠水に伴う非線形性の影響を含めて今後再冠水時の検討を実施する必要がある。

b 地下水流動の可視化方法の検討

坑道掘削に伴う「地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込み影響など）」を可視化する方法について、検討を行った。

地下水流動可視化の例としては、流線（あるいは流跡線）による方法がある。一般的には仮想の粒子の軌跡をトレースした流跡線が用いられる。流跡線による可視化の例を図 3.3.3-6 に示す。図 3.3.3-6 は、解析モデル上面（地表付近）から等間隔に配置された粒子の流動場での軌跡を示したものであり、経過時間とともに掘削された処分坑道へ流動している様子が示されている。

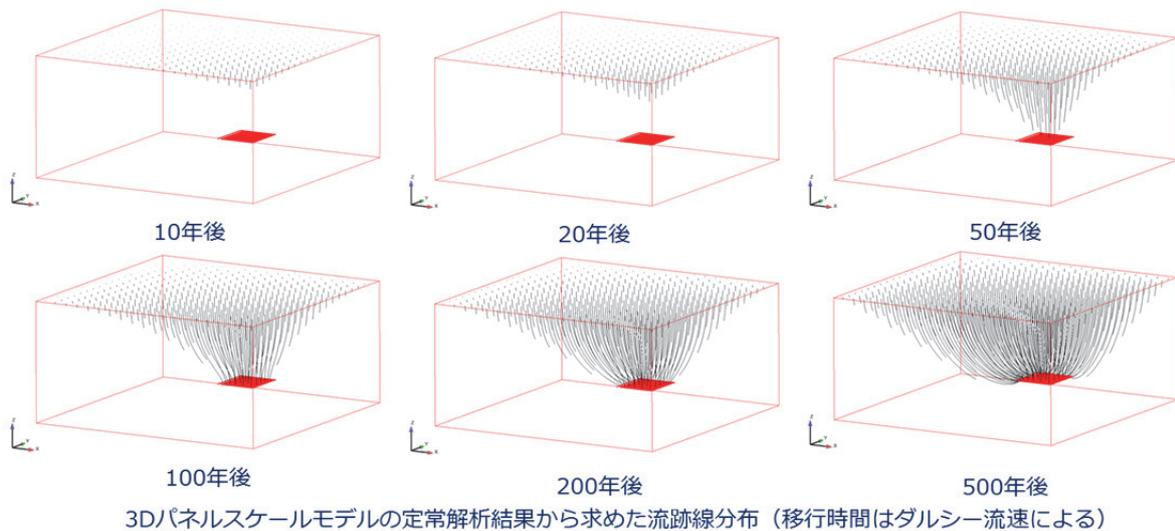


図 3.3.3-6 流跡線による地下水流動の可視化の例

モデル上面から涵養される地下水は化学組成が異なるものと想定し、異なる地下水の境界(流動フロント)の動きを可視化する方法として、流跡線を利用した方法について検討した。

流跡線演算結果を用いた地表水の流動フロントの経時変化を図 3.3.3-7 に示す。地下水に溶け込んだ物質(塩分など)を対象とした物質移行解析の場合には、物質の流動状況を濃度分布で表現することができるが、移流のみを対象とした場合には分散現象による流動フロント周辺の物質濃度分布を表現することが難しい。すなわち、図 3.3.3-7 に示されるように流動フロントが明確になっているため現実的でないことから、流動フロントの平均的な位置として評価する必要があることに注意する必要がある。水質の異なる地下水の流動状況の可視化に関しては、仮想の物質を想定し供給源から濃度 1 で物質が供給される条件での物質移行解析を行う方法が適切ではないかと考えられる。

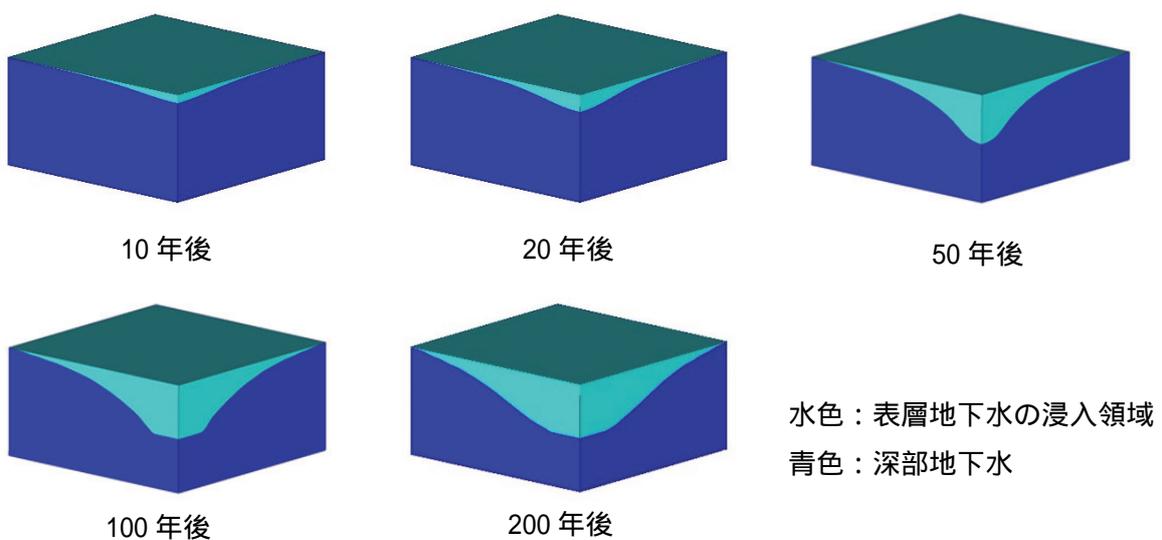


図 3.3.3-7 地下水流動フロントの経時変化に関する可視化の例(3D表示)

(2) 化学的影響評価

水理学的影響評価の結果も踏まえて、回収可能性維持による化学的影響評価のため、ファーフールド(地表～坑道)あるいはニアフィールド(坑道近傍)を対象とした解析モデルを構築し、物質輸送・化学反応連成解析定量的な評価方法について例示する。本年度は、回収可能性の維持による地下水の pH 及び ORP (酸化還元電位) の変化、ならびに支保工などの地下構成要素(セメント系材料)の劣化挙動についての検討を行った。

1) 化学的影響評価の対象と検討方針

技術検討項目と対象となる事項については、前述の 3.3.2 項に整理したが、化学的影響として直接影響が懸念されている事項は以下の項目である。

a 化学的影響として懸念される事項

● 坑道への地下水の引き込みによる岩盤や支保工への影響

坑道が長期間に渡って開放状態に維持されることにより、支保工においては、坑道へ流入する地下水によって吹付けコンクリートの溶脱が進行し、坑道の安定性が損なわれる恐れがある。また、坑道に向かって元々の組成とは異なる地下水が移動してくることにより、坑道周辺の母岩の間隙水に pH 及び ORP の変化が起こり、これらが核種の母岩あるいはコロイドへの収着性に影響を及ぼす可能性がある。加えて、これら pH 及び ORP の変化の影響が、坑道を埋め戻した後も長期間残留する可能性も考えられる。

● 開放坑道を介した空気成分の供給による支保工や母岩への影響

開放坑道に空気が持ち込まれることにより、その成分である酸素や二酸化炭素が支保工へ供給され、鋼材の腐食が進行し、坑道の安定性が損なわれる恐れがある。また、酸素や二酸化炭素が支保工を介して岩盤へと供給されることにより、間隙水に pH 及び ORP の変化が起こり、これらが核種の母岩あるいはコロイドへの収着性に影響を及ぼす可能性がある。加えて、これら pH 及び ORP の変化の影響が、坑道を埋め戻した後も長期間残留する可能性も考えられる。

● 開放坑道への乾燥環境の持ち込みによる支保工や岩盤への影響

先に述べた支保工や岩盤への空気成分の供給は、支保工や岩盤が水で飽和している場合は緩慢であると考えられるが、開放坑道に乾燥環境が持ち込まれると、坑道壁面から水が蒸発し、岩盤内に不飽和領域が形成される可能性がある。不飽和領域が形成されると、気体透過率が大きくなることにより支保工や岩盤への空気成分の供給が促進され、影響の表れ方が顕著になるとともに、その影響の残留期間も長くなる可能性がある。

b 検討方針

● 検討対象とする事項

本年度は、先に挙げた化学的影響として懸念される事項のうち、坑道への地下水の引き込みによる岩盤や支保工への影響について、数値解析による検討を行うこととした。具体的には、地下水の流れと地球化学的反応を単純化した一次元モデルによる検討を行う。なお、開放坑道を介した空気成分の供給による支保工や母岩への影響と、開放坑道への乾燥環境の持ち込みによる支保工や岩盤への影響については、モデルを単純化することが困難であり、ひいては数値解析の負荷が非常に高くなると予想されることから、今年度は今後の検討に備えた具体的な解析手順の検討を行うこととした。

● 考慮するメカニズム

本年度の検討では、物質輸送と化学反応とを同時に考慮できるように、水理 熱 化学を連成させた解析モデルが必要であるため、連成を考慮した解析モデルにおいて考慮されるべきメカニズムを取り入れる。考慮されるべきメカニズムは、間隙流体の移動、流体を媒体とした物質輸送、化学物質の吸脱着、種々の化学反応である（詳細は第3分冊参照）。ただし今年度は、化学物質の吸脱着についてはパラメータの設定が複雑であることから考慮していない。また、熱については一定温度下での検討を行い、熱の影響については検討の対象とはしなかった。

● 解析モデルの次元

浸透流による物質輸送と地球化学的反応を連成させた解析は、計算の負荷が非常に大きいことから、本年度は地表から坑道までの主要な流れの経路に着目した一次元モデルを構築し、一次元の解析を行うこととした。

c 解析モデルの構築と解析条件の設定

地盤中の流体流れによる物質輸送と地球化学的反応を連成させた解析コードとして様々なものが存在している。地球化学的反応の解析コードとしては、豊富な機能を有する PHREEQC[10] が主流となっており、これを利用した物質輸送との連成解析コードもいくつか存在する。代表的なものとして PHAST[11]があり、地層処分分野では第2次 TRU レポート[12]の検討で使用された PHREEQC-Trans[13]が挙げられる。

上記のうち、PFLOTRAN は、三次元多孔質媒体中の多相流、化学反応、吸脱着、熱輸送等を考慮可能な比較的新しい連成解析コードである。PFLOTRAN の特徴として、次のようなものが挙げられる。本検討では、今後モデル規模を拡大したり、様々なメカニズムを考慮した検討を行ったりする可能性があることから、大規模並列計算に対応しており、解析できる事象が多く、かつ今後の発展性が望める PFLOTRAN を採用することとした。

今年度の検討は、坑道への地下水の引き込みによる岩盤や支保工への影響と、再冠水後の地下水組成の回復を検討するための、地表から坑道までを含む一次元ファーフールドモデルを構築した。図 3.3.3-8 に、モデルの構造の概念図を示す。モデルは、地表から 500m 下の処分坑道壁面までを鉛直一次元でモデル化したものである。下端の処分坑道の近傍には、支保、EDZ、

グラウト領域がモデル化されており、これらの幅（一次元モデル上の長さ）は水理解析での設定と同一である。なお、グラウトの影響に関する検討を実施しないため、この領域の物性は岩盤と同一とした。また、コンクリートの透水係数は岩盤相当とした。覆工コンクリートなどの透水係数は、これよりも低い透水係数であるが、ここでは、吹付コンクリートを対象としたため、通常より高い透水係数を設定した。このほかの、解析必要なパラメータや以下に述べる解析モデルのパラメータ等の詳細は第3分冊を参照されたい。

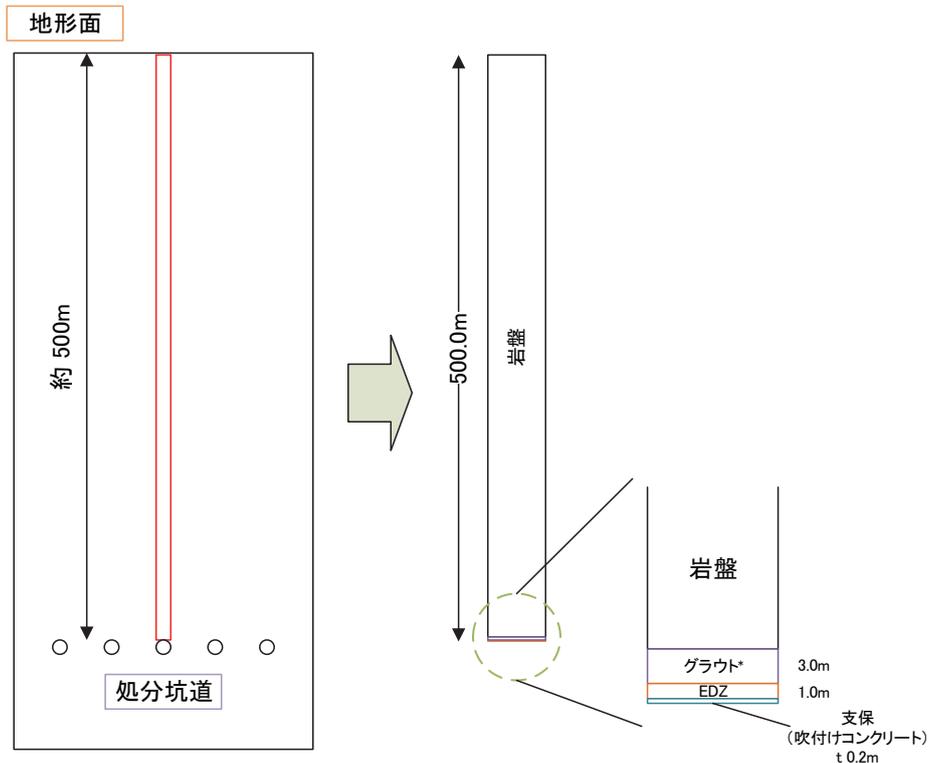


図 3.3.3-8 ファーフィールドモデルの概念図

2) 坑道への地下水の引き込みによる母岩や支保工への影響の検討

a 坑道開放時

(a) 母岩への影響検討

坑道開放時における地表からの地下水の引き込み状況について、モデル上端の地下水組成が高 Cl 濃度、高 CO_3^{2-} の場合と、低 Cl 濃度、低 CO_3^{2-} の場合の 2 ケースについて解析を実施した（地下水の組成は第3分冊参照）。この解析は引き込みの状況が明確になるよう、コンクリートの透水係数を標準のケースよりも 1 桁高く（ $3 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ ）設定している。元の地下水が高 Cl 濃度である場合について、坑道掘削からの各時点における岩盤中の黄鉄鉱と方解石の体積割合、地下水の pH と ORP (Eh 値) の分布ならびに Ca^{2+} 及び HCO_3^- (炭酸水素イオン) の分布を図 3.3.3-9 に示す。

黄鉄鉱の体積割合の分布、及び方解石が溶解・消失する範囲とともに、ごく表層に限られていた。また、本ケースでは地表から供給された地下水中の酸素がごく表層で消費されるため、岩盤中の ORP はほぼ元の値に維持されると予想された。

地下水の pH と Eh の分布に着目すると、pH の前線は時間の経過とともにモデル深部へ進行し、100 年後には先端が坑道付近に達している。これは、移流分散による表層地下水の移動現象を反映したものと考えられる。また、Eh は pH とほぼ対応した分布になっており、元の値から大きく変化せず、還元状態のままであった。

元の地下水が低 Cl⁻濃度である場合についても同等の状況を示したが、このケースでは元の地下水の Eh と表層地下水のそれとに差があるため、変化の幅が高 Cl⁻のケースよりは大きくなったが、全体的に還元状態のままであることには変わりがなかった。

地下水の引き込みによる母岩への影響が大きくなるシナリオとして、坑道開放によって地下水位が低下し、岩盤内に不飽和領域が形成されて、酸素が気体の状態で岩盤中へ浸入する場合が考えられる。PFLOTRAN を用いてこのような検討を行うには、間隙流体の流れを二相流として取り扱う必要がある。

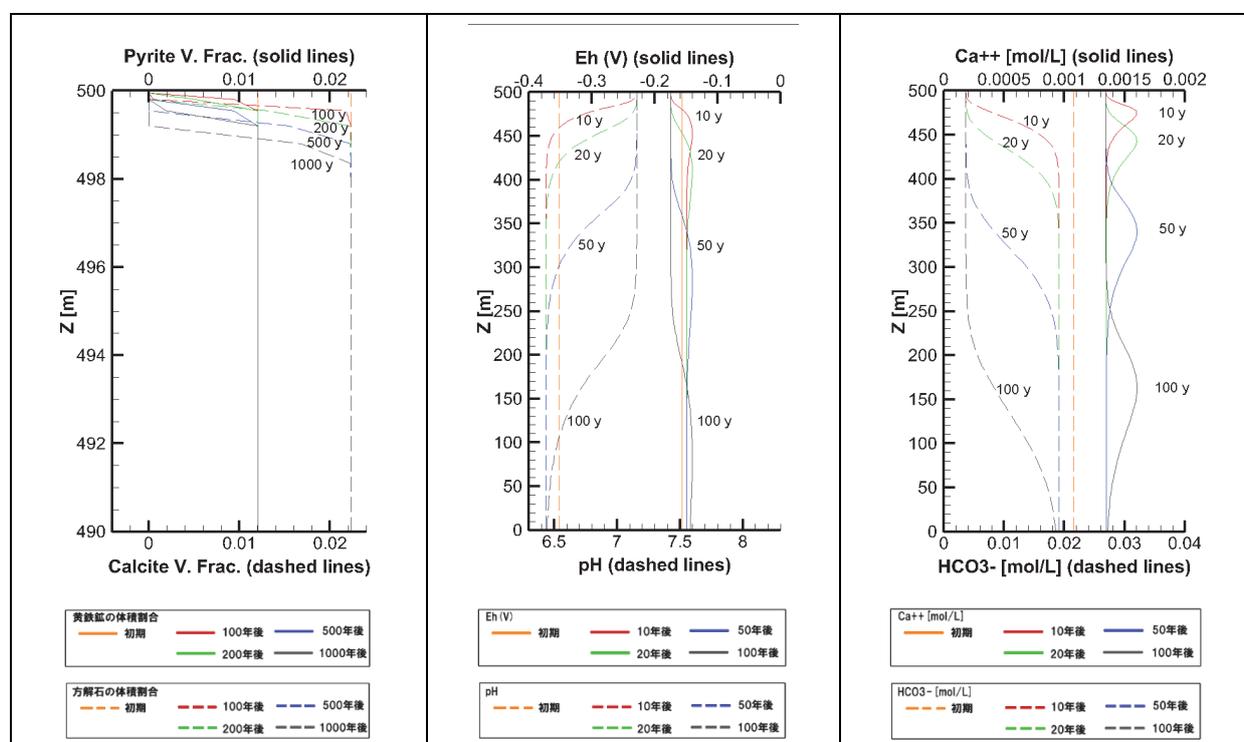


図 3.3.3-9 岩盤中の黄鉄鉱と方解石の体積割合、地下水の pH と Eh 並びに Ca²⁺及び HCO₃⁻の分布 (透水係数：高透水，高 Cl⁻濃度地下水)

(b) 支保工への影響検討

坑道への地下水の引き込みによる支保工の吹付けコンクリートの変質を検討した結果について、高 Cl⁻ と低 Cl⁻のケース、同組成で速度論係数（化学反応の速度の指標）が標準の場合と速いケース、それぞれについて透水係数が高い場合と標準（ 3×10^{-9} m/s）のケースについて解析を実施した。

高 Cl⁻濃度地下水、速度論係数が標準の場合の結果を図 3.3.3-10 に示す。高透水のケースでは支保工の吹付けコンクリート内の pH は地下水相当の値まで急激に低下し、100 年以降

に徐々に上昇していく傾向を示した。また、ポルトランドライトは 60 年後までに消失した。なお、pH が 100 年以降に上昇するのは、表層地下水と混合した地下水が到達するためである。一方、同様の設定で透水係数が小さいケースでは、pH の低下は段階的でゆるやかであり、かつ方解石（カルサイト）の沈殿が多く生じるという傾向を示した。これは、透水係数が低い場合、岩盤中の pH の低い地下水の浸入が抑えられるために間隙水の pH の低下が起こりにくいことと、方解石の沈殿が起こりうる pH が維持されたためと考えられる。

低 Cl⁻濃度地下水、速度論係数が標準の場合の結果を図 3.3.3-11 に示す。支保工の吹付けコンクリート内の pH は各セメント鉱物の溶解に対応して段階的に低下する結果となった。また、セメント鉱物のうち、ポルトランドライトは高 Cl⁻濃度地下水と同様に 60 年後までに消失した。高 Cl⁻濃度地下水のケースと異なり、pH が急速に低下しないのは、地下水の pH が比較的高いことと、地下水の炭酸濃度が小さく、緩衝能が低いために、セメント鉱物の溶解によって pH が維持されるためと考えられる。

同様の設定で透水係数が小さいケースの場合は、セメント鉱物の溶解と pH の低下がさらにゆるやかであった。また、速度論係数と透水係数の両方を小さくしたケース、pH はほとんど変化せず、セメント鉱物の溶解はさらに小さかった。

以上のように、支保工の吹付けコンクリートの変質は、元の岩盤中の地下水組成、岩盤の透水係数の設定、及び速度論係数の設定によって異なる結果となった。これは、化学的影響の検討において、これらのパラメータの設定が重要な意味を持つことを示唆している。鉱物の溶解速度には岩盤の透水係数と速度論係数が、溶解・沈殿する鉱物の種類や pH の変化には、岩盤中の地下水組成が大きく関係していると推察される。

なお、本年度の検討では、支保工の透水係数を岩盤と同一の大きめの値とし、かつ支保工内を地下水が通過する設定としているため、セメント鉱物の溶脱を過剰に評価している可能性があると考えられる。

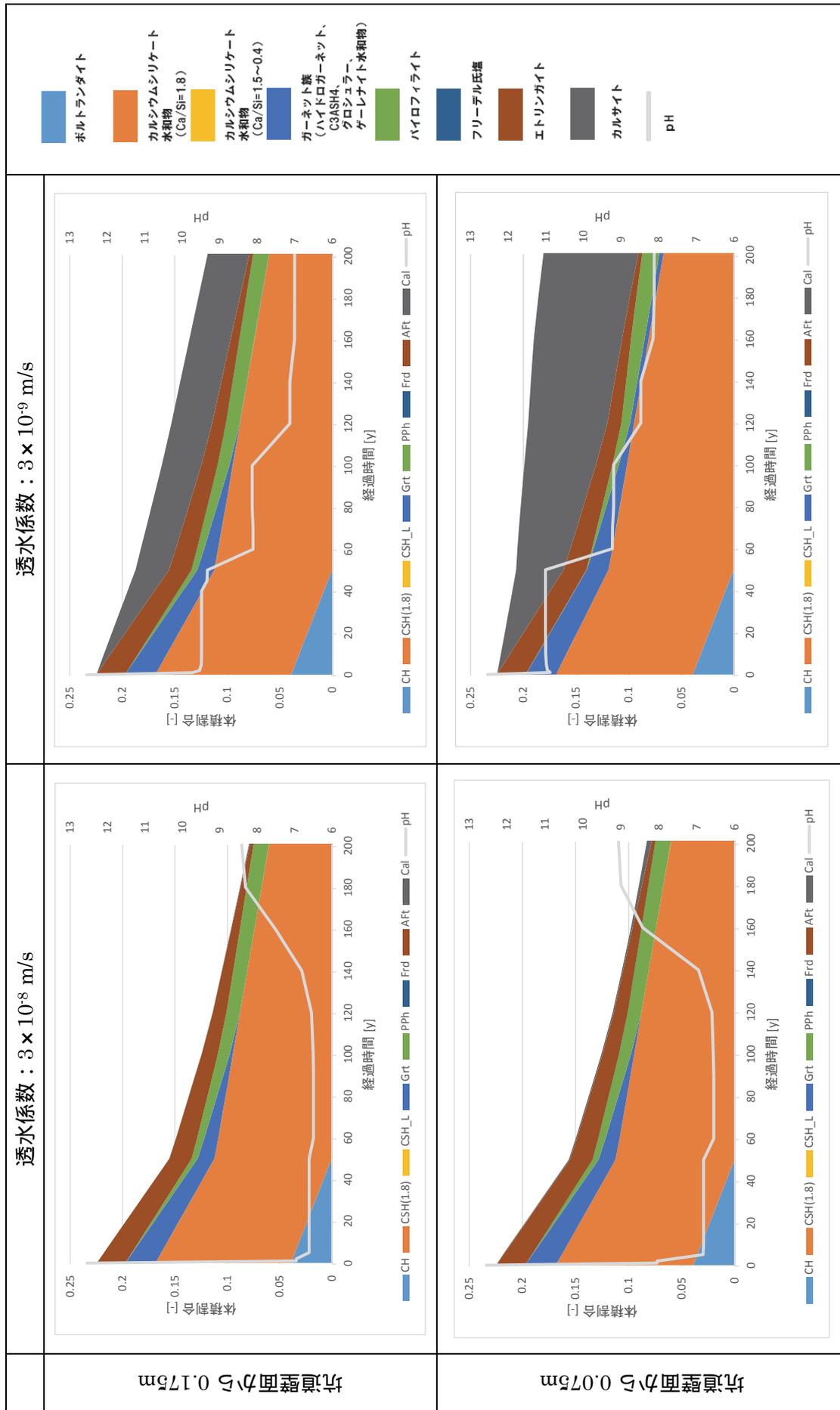


図 3.3.3-10 坑道掘削時点からの吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の変化 (高 Cl-濃度地下水, 速度論係数: 標準)

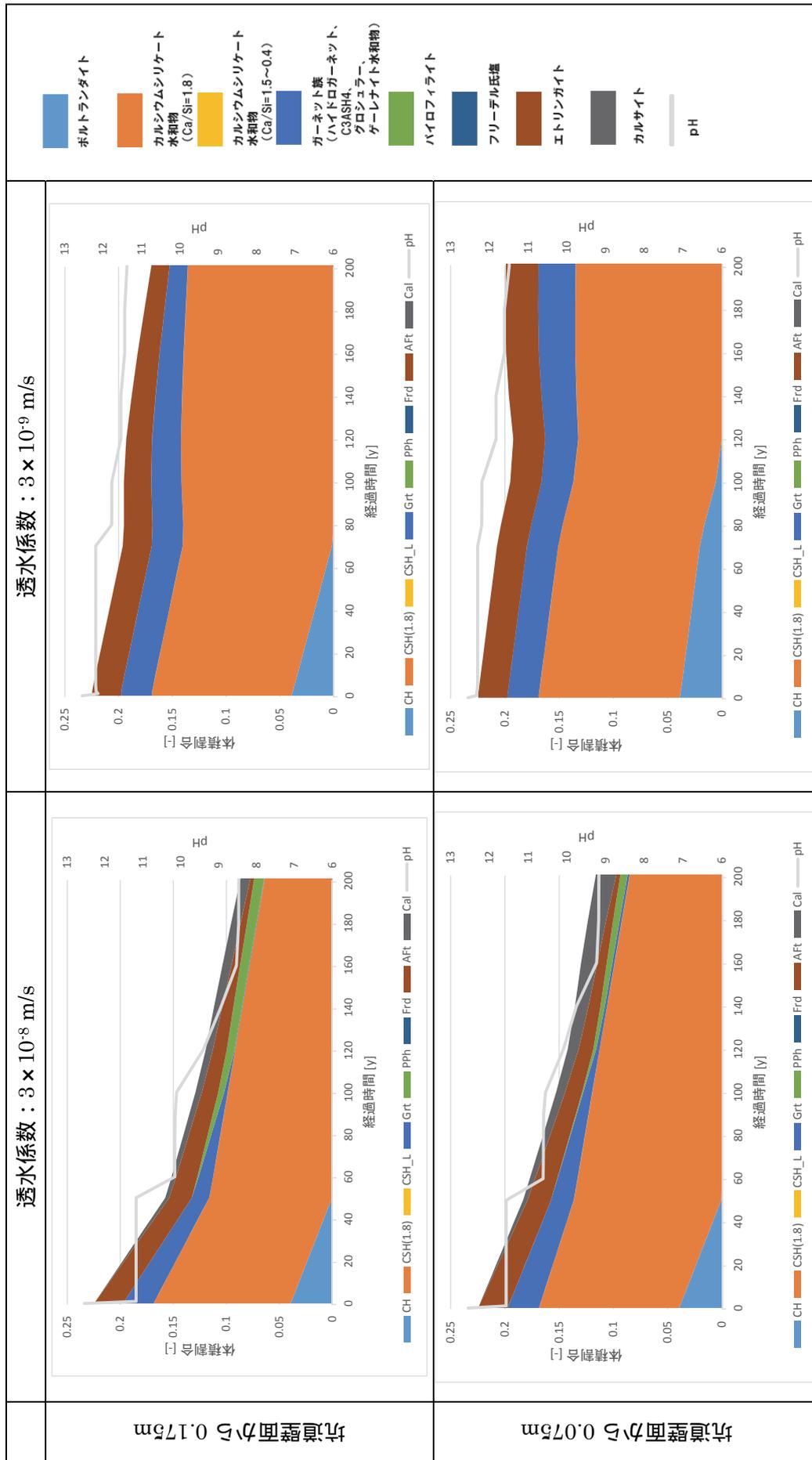


図 3.3.3-11 坑道掘削時点からの吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の変化（低 Cl⁻濃度地下水，速度論係数：標準）

b 再冠水時

再冠水後のケースについても2種の地下水(元の地下水が高Cl-濃度、及び低Cl-濃度)について、坑道掘削からの各時点における地下水のpHとORP(Eh値)の分布ならびにCa²⁺及びHCO₃⁻(炭酸水素イオン)の分布を得た。透水係数は3×10⁻⁸ m/sである。

図 3.3.3-12 に高Cl-濃度のケースの結果を示す。いずれのケースも地下水の流れがなく、物質移行は拡散によって生じるのみなので、坑道上部の地下水組成が変化する範囲は、1000年後でも岩盤の下端から18m程度に限られる結果となった。

本年度の検討では、再冠水の前後で地下水位が変化せず、坑道周辺に地下水の流れが生じないため、岩盤中の地下水が周辺の元の地下水と混合するには長い時間を要する結果となった。また、地球化学的反応の考慮対象とする母岩の鉱物が限られていたため、pHの変化は緩慢であった。考慮対象とする岩盤中の鉱物の種類を増やすことにより、pHの変化がより現実的になるものと予想される。

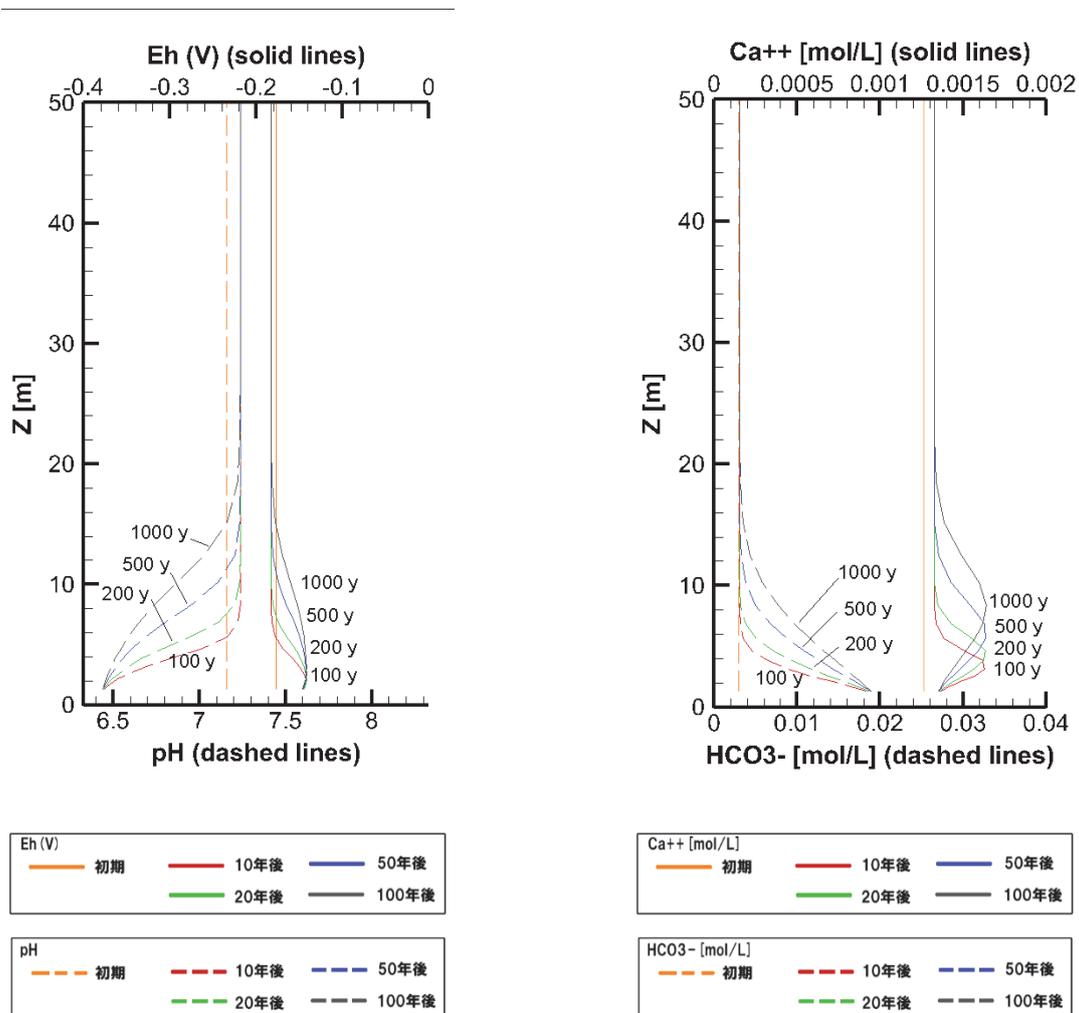


図 3.3.3-12 再冠水時の岩盤地下水のpHとEhならびにCa²⁺及びHCO₃⁻の分布
(透水係数: 3×10⁻⁸ m/s, 高Cl-濃度地下水)

(3) 力学的影響評価

化学的影響評価の結果を基に、昨年度までの力学的解析の条件としていた支保工等のパラメータの妥当性を検討する。また、技術検討項目「埋め戻した坑道の再利用時の健全性」についての検討として、回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性に関連して、再掘削時の力学的影響評価方法についても検討を行う。

1) 支保工等のパラメータの妥当性の検討

a 検討の背景

処分坑道の掘削後に、支保工が時間経過とともに劣化すると、強度や剛性が低下することから、支保工の内圧効果が減少して坑道周辺岩盤の長期的な変形挙動に影響を与えられとされる。よって、支保工の劣化は、坑道安定性の保持期間に影響を与えることが想定されている。

支保工の構成材料であるコンクリートには、地下水との接触によるセメント水和物の成分の溶脱、鋼材の腐蝕膨張によるひび割れ、アルカリ骨材反応によるひび割れ、CO₂の浸透による中性化などの劣化現象が起きる。このようなセメント系材料の劣化現象に関して、昨年度までの検討[4]、[6]では地下水との接触によるセメント水和物からのカルシウムの溶脱の影響を支保工の剛性の低下として考慮した。コンクリートの溶脱特性については、既往の研究[14]を参考に設定していた。また、昨年度の検討で、このコンクリートの溶脱特性が坑道安定性の保持期間に対して大きな影響を与えることが明らかになったことから、その特性を把握することは予測精度向上のためには重要であることが示されている[4]、[6]。

そこで、前節の化学的影響評価の検討の結果を基にして、コンクリートの溶脱に伴う力学特性を評価し、昨年度まで用いていた支保工のパラメータの妥当性を検討することとした。

昨年度までの検討では、山本らの研究[14]を基に人工バリアのコンクリート系材料の溶脱速度を吹付けコンクリートの溶脱速度に適用している。吹付けコンクリートのヤング率は初期値の 1/10 になるものとしている。経時変化を図 3.3.3-13 に示す。また、溶脱進行中の物性値については、線形補間することにして、溶脱完了後は一定となると仮定していた。

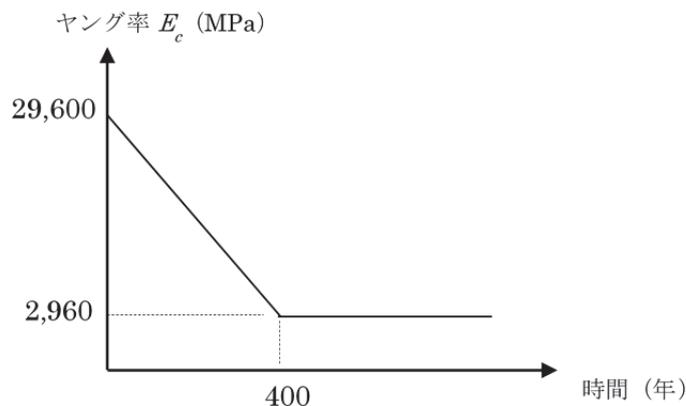


図 3.3.3-13 吹付けコンクリートのヤング率の経時変化

b 化学的影響評価の結果に基づくパラメータの妥当性の検討

(a) 既存の室内試験による溶脱率とコンクリートの力学特性の関係

化学的影響評価では、吹付コンクリートの鉱物組成の経時変化を例示した。この結果を基に、力学特性を算出することが必要となる。

カルシウムの溶脱率と一軸圧縮強度の関係に関して、西村らの研究[15]では、戸井田ら[16]の室内試験結果に基づく「第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ」[12]の成果を導入して、カルシウム溶脱によるコンクリートの一軸圧縮強度の低下を以下の式で評価している。

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{c0}}{\exp\left(\ln\left(\frac{\sigma_{c0}}{\sigma_{c(\min)}}\right) \times \left(\frac{LC}{100}\right)\right)} \quad \text{式 3.3.3-1}$$

ここに、 σ_c は一軸圧縮強度、 σ_{c0} は初期一軸圧縮強度、 $\sigma_{c(\min)}$ は最小一軸圧縮強度、 LC はカルシウムの溶脱率[%]である。なお、最小一軸圧縮強度については、西村らの研究[15]と同様に、初期値の1/100になると仮定した。

戸井田ら[16]は、供試体から溶け出したカルシウム量から、溶脱率を以下の様に定義している。

$$\text{溶脱率[\%]} = \frac{\text{溶脱量}}{\text{初期試料中に含まれるカルシウム量}} \times 100 \quad \text{式 3.3.3-2}$$

ここに、溶脱量=液相中のカルシウム濃度×作用水量、初期試料中に含まれるカルシウム量=供試体体積×初期試料中の単位セメント量×セメント中に含まれるカルシウムの質量割合である。また、コンクリートのヤング率は、一軸圧縮強度との関係から以下のように示される[17]。

$$E = E_0 \times \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}}\right)^{0.5} \quad \text{式 3.3.3-3}$$

ここに、 E はある任意時点におけるヤング率、 E_0 は初期ヤング率、 σ_c はある任意時点における一軸圧縮強度、 σ_{c0} は初期一軸圧縮強度である。

したがって、化学的影響評価の結果から、吹付けコンクリートからのカルシウムの溶脱率を求めることができれば、式 3.3.3-1 と式 3.3.3-3 より、吹付けコンクリートのヤング率を推定することができる。

(b) 化学的影響評価に基づくカルシウム量の推移

化学的影響評価の結果から得られた高 Cl 地下水のケースを基に、吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化を表 3.3.3-1 に示す。得られた鉱物の存在割合に対して、表 3.3.3-2 に示した各鉱物の吹付けコンクリート単位体積中のモル数と1モルあたりのカルシウム数を掛けると、鉱物ごとの単位体積当たりのカルシウム量が得られる。カルシウム量を初期鉱物と二次鉱物に分類して集計すると、初期鉱物または二次鉱物に含まれる吹付けコンクリート単位体積当たりのカルシウム量が得られる。さらに、それらを初期のカルシウム量で除することで、初期量に対する比率が得られる。

カルシウム量の初期量に対する比率を図 3.3.3-14 に示す。この図において、カルシウム量の比率の合計が、1とならないのは、カルシウムが地下水に溶けて流出したためである。初期鉱物と二次鉱物に含まれるカルシウム量の比率の合計と初期量の差が、カルシウムの溶脱率となる。

表 3.3.3-1 吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化（高 Cl-濃度地下水，速度論係数：標準，透水係数： 3×10^{-9} ）

時刻 [y]	ホルトガイト		カルシウムシリケート水和物〔()内は、Ca/Si比〕		ハイドロガーネット		ゲルナト水和物		クロムター		葉ろう石		フリーデルト		エトリカト		方解石		灰矽カーネット																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	初期鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
0	3.938E-02	1.290E-01	4.899E-06	4.931E-06	5.258E-06	5.471E-06	5.732E-06	5.944E-06	6.098E-06	6.383E-06	6.689E-06	7.009E-06	7.352E-06	7.718E-06	8.101E-06	8.500E-06	8.917E-06	9.352E-06	9.808E-06	1.028E-05	1.078E-05	1.129E-05	1.181E-05	1.234E-05	1.288E-05	1.343E-05	1.399E-05	1.455E-05	1.512E-05	1.569E-05	1.626E-05	1.684E-05	1.742E-05	1.800E-05	1.858E-05	1.916E-05	1.975E-05	2.033E-05	2.092E-05	2.151E-05	2.210E-05	2.269E-05	2.328E-05	2.387E-05	2.446E-05	2.505E-05	2.564E-05	2.623E-05	2.682E-05	2.741E-05	2.800E-05	2.859E-05	2.918E-05	2.977E-05	3.036E-05	3.095E-05	3.154E-05	3.213E-05	3.272E-05	3.331E-05	3.390E-05	3.449E-05	3.508E-05	3.567E-05	3.626E-05	3.685E-05	3.744E-05	3.803E-05	3.862E-05	3.921E-05	3.980E-05	4.039E-05	4.098E-05	4.157E-05	4.216E-05	4.275E-05	4.334E-05	4.393E-05	4.452E-05	4.511E-05	4.570E-05	4.629E-05	4.688E-05	4.747E-05	4.806E-05	4.865E-05	4.924E-05	4.983E-05	5.042E-05	5.101E-05	5.160E-05	5.219E-05	5.278E-05	5.337E-05	5.396E-05	5.455E-05	5.514E-05	5.573E-05	5.632E-05	5.691E-05	5.750E-05	5.809E-05	5.868E-05	5.927E-05	5.986E-05	6.045E-05	6.104E-05	6.163E-05	6.222E-05	6.281E-05	6.340E-05	6.399E-05	6.458E-05	6.517E-05	6.576E-05	6.635E-05	6.694E-05	6.753E-05	6.812E-05	6.871E-05	6.930E-05	6.989E-05	7.048E-05	7.107E-05	7.166E-05	7.225E-05	7.284E-05	7.343E-05	7.402E-05	7.461E-05	7.520E-05	7.579E-05	7.638E-05	7.697E-05	7.756E-05	7.815E-05	7.874E-05	7.933E-05	7.992E-05	8.051E-05	8.110E-05	8.169E-05	8.228E-05	8.287E-05	8.346E-05	8.405E-05	8.464E-05	8.523E-05	8.582E-05	8.641E-05	8.700E-05	8.759E-05	8.818E-05	8.877E-05	8.936E-05	8.995E-05	9.054E-05	9.113E-05	9.172E-05	9.231E-05	9.290E-05	9.349E-05	9.408E-05	9.467E-05	9.526E-05	9.585E-05	9.644E-05	9.703E-05	9.762E-05	9.821E-05	9.880E-05	9.939E-05	1.000E-04	1.006E-04	1.012E-04	1.018E-04	1.024E-04	1.030E-04	1.036E-04	1.042E-04	1.048E-04	1.054E-04	1.060E-04	1.066E-04	1.072E-04	1.078E-04	1.084E-04	1.090E-04	1.096E-04	1.102E-04	1.108E-04	1.114E-04	1.120E-04	1.126E-04	1.132E-04	1.138E-04	1.144E-04	1.150E-04	1.156E-04	1.162E-04	1.168E-04	1.174E-04	1.180E-04	1.186E-04	1.192E-04	1.198E-04	1.204E-04	1.210E-04	1.216E-04	1.222E-04	1.228E-04	1.234E-04	1.240E-04	1.246E-04	1.252E-04	1.258E-04	1.264E-04	1.270E-04	1.276E-04	1.282E-04	1.288E-04	1.294E-04	1.300E-04	1.306E-04	1.312E-04	1.318E-04	1.324E-04	1.330E-04	1.336E-04	1.342E-04	1.348E-04	1.354E-04	1.360E-04	1.366E-04	1.372E-04	1.378E-04	1.384E-04	1.390E-04	1.396E-04	1.402E-04	1.408E-04	1.414E-04	1.420E-04	1.426E-04	1.432E-04	1.438E-04	1.444E-04	1.450E-04	1.456E-04	1.462E-04	1.468E-04	1.474E-04	1.480E-04	1.486E-04	1.492E-04	1.498E-04	1.504E-04	1.510E-04	1.516E-04	1.522E-04	1.528E-04	1.534E-04	1.540E-04	1.546E-04	1.552E-04	1.558E-04	1.564E-04	1.570E-04	1.576E-04	1.582E-04	1.588E-04	1.594E-04	1.600E-04	1.606E-04	1.612E-04	1.618E-04	1.624E-04	1.630E-04	1.636E-04	1.642E-04	1.648E-04	1.654E-04	1.660E-04	1.666E-04	1.672E-04	1.678E-04	1.684E-04	1.690E-04	1.696E-04	1.702E-04	1.708E-04	1.714E-04	1.720E-04	1.726E-04	1.732E-04	1.738E-04	1.744E-04	1.750E-04	1.756E-04	1.762E-04	1.768E-04	1.774E-04	1.780E-04	1.786E-04	1.792E-04	1.798E-04	1.804E-04	1.810E-04	1.816E-04	1.822E-04	1.828E-04	1.834E-04	1.840E-04	1.846E-04	1.852E-04	1.858E-04	1.864E-04	1.870E-04	1.876E-04	1.882E-04	1.888E-04	1.894E-04	1.900E-04	1.906E-04	1.912E-04	1.918E-04	1.924E-04	1.930E-04	1.936E-04	1.942E-04	1.948E-04	1.954E-04	1.960E-04	1.966E-04	1.972E-04	1.978E-04	1.984E-04	1.990E-04	1.996E-04	2.002E-04	2.008E-04	2.014E-04	2.020E-04	2.026E-04	2.032E-04	2.038E-04	2.044E-04	2.050E-04	2.056E-04	2.062E-04	2.068E-04	2.074E-04	2.080E-04	2.086E-04	2.092E-04	2.098E-04	2.104E-04	2.110E-04	2.116E-04	2.122E-04	2.128E-04	2.134E-04	2.140E-04	2.146E-04	2.152E-04	2.158E-04	2.164E-04	2.170E-04	2.176E-04	2.182E-04	2.188E-04	2.194E-04	2.200E-04	2.206E-04	2.212E-04	2.218E-04	2.224E-04	2.230E-04	2.236E-04	2.242E-04	2.248E-04	2.254E-04	2.260E-04	2.266E-04	2.272E-04	2.278E-04	2.284E-04	2.290E-04	2.296E-04	2.302E-04	2.308E-04	2.314E-04	2.320E-04	2.326E-04	2.332E-04	2.338E-04	2.344E-04	2.350E-04	2.356E-04	2.362E-04	2.368E-04	2.374E-04	2.380E-04	2.386E-04	2.392E-04	2.398E-04	2.404E-04	2.410E-04	2.416E-04	2.422E-04	2.428E-04	2.434E-04	2.440E-04	2.446E-04	2.452E-04	2.458E-04	2.464E-04	2.470E-04	2.476E-04	2.482E-04	2.488E-04	2.494E-04	2.500E-04	2.506E-04	2.512E-04	2.518E-04	2.524E-04	2.530E-04	2.536E-04	2.542E-04	2.548E-04	2.554E-04	2.560E-04	2.566E-04	2.572E-04	2.578E-04	2.584E-04	2.590E-04	2.596E-04	2.602E-04	2.608E-04	2.614E-04	2.620E-04	2.626E-04	2.632E-04	2.638E-04	2.644E-04	2.650E-04	2.656E-04	2.662E-04	2.668E-04	2.674E-04	2.680E-04	2.686E-04	2.692E-04	2.698E-04	2.704E-04	2.710E-04	2.716E-04	2.722E-04	2.728E-04	2.734E-04	2.740E-04	2.746E-04	2.752E-04	2.758E-04	2.764E-04	2.770E-04	2.776E-04	2.782E-04	2.788E-04	2.794E-04	2.800E-04	2.806E-04	2.812E-04	2.818E-04	2.824E-04	2.830E-04	2.836E-04	2.842E-04	2.848E-04	2.854E-04	2.860E-04	2.866E-04	2.872E-04	2.878E-04	2.884E-04	2.890E-04	2.896E-04	2.902E-04	2.908E-04	2.914E-04	2.920E-04	2.926E-04	2.932E-04	2.938E-04	2.944E-04	2.950E-04	2.956E-04	2.962E-04	2.968E-04	2.974E-04	2.980E-04	2.986E-04	2.992E-04	2.998E-04	3.004E-04	3.010E-04	3.016E-04	3.022E-04	3.028E-04	3.034E-04	3.040E-04	3.046E-04	3.052E-04	3.058E-04	3.064E-04	3.070E-04	3.076E-04	3.082E-04	3.088E-04	3.094E-04	3.100E-04	3.106E-04	3.112E-04	3.118E-04	3.124E-04	3.130E-04	3.136E-04	3.142E-04	3.148E-04	3.154E-04	3.160E-04	3.166E-04	3.172E-04	3.178E-04	3.184E-04	3.190E-04	3.196E-04	3.202E-04	3.208E-04	3.214E-04	3.220E-04	3.226E-04	3.232E-04	3.238E-04	3.244E-04	3.250E-04	3.256E-04	3.262E-04	3.268E-04	3.274E-04	3.280E-04	3.286E-04	3.292E-04	3.298E-04	3.304E-04	3.310E-04	3.316E-04	3.322E-04	3.328E-04	3.334E-04	3.340E-04	3.346E-04	3.352E-04	3.358E-04	3.364E-04	3.370E-04	3.376E-04	3.382E-04	3.388E-04	3.394E-04	3.400E-04	3.406E-04	3.412E-04	3.418E-04	3.424E-04	3.430E-04	3.436E-04	3.442E-04	3.448E-04	3.454E-04	3.460E-04	3.466E-04	3.472E-04	3.478E-04	3.484E-04	3.490E-04	3.496E-04	3.502E-04	3.508E-04	3.514E-04	3.520E-04	3.526E-04	3.532E-04	3.538E-04	3.544E-04	3.550E-04	3.556E-04	3.562E-04	3.568E-04	3.574E-04	3.580E-04	3.586E-04	3.592E-04	3.598E-04	3.604E-04	3.610E-04	3.616E-04	3.622E-04	3.628E-04	3.634E-04	3.640E-04	3.646E-04	3.652E-04	3.658E-04	3.664E-04	3.670E-04	3.676E-04	3.682E-04	3.688E-04	3.694E-04	3.700E-04	3.706E-04	3.712E-04	3.718E-04	3.724E-04	3.730E-04	3.736E-04	3.742E-04	3.748E-04	3.754E-04	3.760E-04	3.766E-04	3.772E-04	3.778E-04	3.784E-04	3.790E-04	3.796E-04	3.802E-04	3.808E-04	3.814E-04	3.820E-04	3.826E-04	3.832E-04	3.838E-04	3.844E-04	3.850E-04	3.856E-04	3.862E-04	3.868E-04	3.874E-04	3.880E-04	3.886E-04	3.892E-04	3.898E-04	3.904E-04	3.910E-04	3.916E-04	3.922E-04	3.928E-04	3.934E-04	3.940E-04	3.946E-04	3.952E-04	3.958E-04	3.964E-04	3.970E-04	3.976E-04	3.982E-04	3.988E-04	3.994E-04	4.000E-04	4.006E-04	4.012E-04	4.018E-04	4.024E-04	4.030E-04	4.036E-04	4.042E-04	4.048E-04	4.054E-04	4.060E-04	4.066E-04	4.072E-04	4.078E-04	4.084E-04	4.090E-04	4.096E-04	4.102E-04	4.108E-04	4.114E-04	4.120E-04	4.126E-04	4.132E-04	4.138E-04	4.144E-04	4.150E-04	4.156E-04	4.162E-04	4.168E-04	4.174E-04	4.180E-04	4.186E-04	4.192E-04	4.198E-04	4.204E-04	4.210E-04	4.216E-04	4.222E-04	4.228E-04	4.234E-04	4.240E-04	4.246E-04	4.252E-04	4.258E-04	4.264E-04	4.270E-04	4.276E-04	4.282E-04	4.288E-04	4.294E-04	4.300E-04	4.306E-04	4.312E-04	4.318E-04	4.324E-04	4.330E-04	4.336E-04	4.342E-04	4.348E-04	4.354E-04	4.360E-04	4.366E-04	4.372E-04	4.378E-04	4.384E-04	4.390E-04	4.396E-04	4.402E-04	4.408E-04	4.414E-04	4.420E-04	4.426E-04	4.432E-04	4.438E-04	4.444E-04	4.450E-04	4.456E-04	4.462E-04	4.468E-04	4.474E-04	4.480E-04	4.486E-04	4.492E-04	4.498E-04	4.504E-04	4.510E-04	4.516E-04	4.522E-04	4.528E-04	4.534E-04	4.540E-04	4.546E-04	4.552E-04	4.558E-04	4.564E-04	4.570E-04	4.576E-04	4.582E-04	4.588E-04	4.594E-04	4.600E-04	4.606E-04	4.612E-04	4.618E-04	4.624E-04	4.630E-04	4.636E-04	4.642E-04	4.648E-04	4.654E-04	4.660E-04	4.666E-04	4.672E-04	4.678E-04	4.684E-04	4.690E-04	4.696E-04	4.702E-04	4.708E-04	4.714E-04

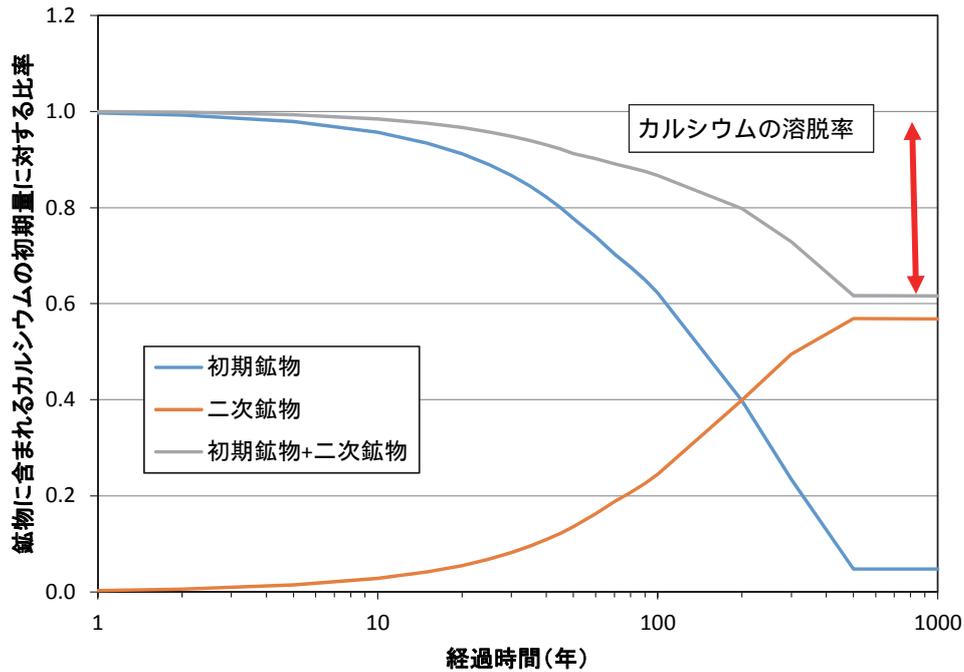


図 3.3.3-14 鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率
 (高 Cl⁻濃度地下水, 速度論係数: 標準, 透水係数: 3×10^{-9})

図 3.3.3-14 に示したように、経過時間 500 年以降、初期鉱物に含まれるカルシウム量は 0 にならず、その変化が止まっている。これは、初期鉱物中の反応に寄与する鉱物、ポルトランドライト等が全てなくなり、反応に寄与していないカルシウム鉱物だけが残ったためである。

また、このケースでは二次鉱物に含まれるカルシウムの量が多く、溶脱率が比較的小さくなる結果になった。これは、二次鉱物の方解石（カルサイト； CaCO_3 ）が生成されて支保工の中に析出したためと考えられる（表 3.3.3-1 参照）。ここで示した高 Cl⁻濃度地下水，速度論係数：標準，透水係数： 3×10^{-9} ケースは、他の高 Cl⁻濃度のケースよりも、地下水の流速、反応速度、pH のバランスが取れていたと考えられる。

化学的影響評価で設定した各ケースについて溶脱率を算出したところ、岩盤と支保工の透水係数が大きい場合は、溶脱率は大きくなる傾向があること、また、セメント鉱物の速度論係数が大きい場合も、溶脱率は大きくなる傾向があること、さらに、地下水組成が高 Cl⁻濃度の場合も溶脱率は大きくなる傾向があることが分かった。

(c) 化学的影響評価から得られたパラメータとの比較

上述したように、式 3.3.3-1、式 3.3.3-3 を用いると、化学的影響評価による溶脱率から吹付けコンクリートのヤング率を推定することができる。化学的影響評価の結果から得られたヤング率と力学的影響評価で想定したヤング率の比較を図 3.3.3-15 に示す。この結果は、高 Cl⁻地下水の場合の結果である。この結果より、化学的影響評価の結果から推定した吹付けコンクリートのヤング率の経時変化は、地下水組成などの条件によって大きく変わることが分かった。透水係数が 3×10^{-9} の場合が黄色の線であり、 3×10^{-9} と大きく差があることがわか

る。透水係数の影響が最も大きいという結果であった。

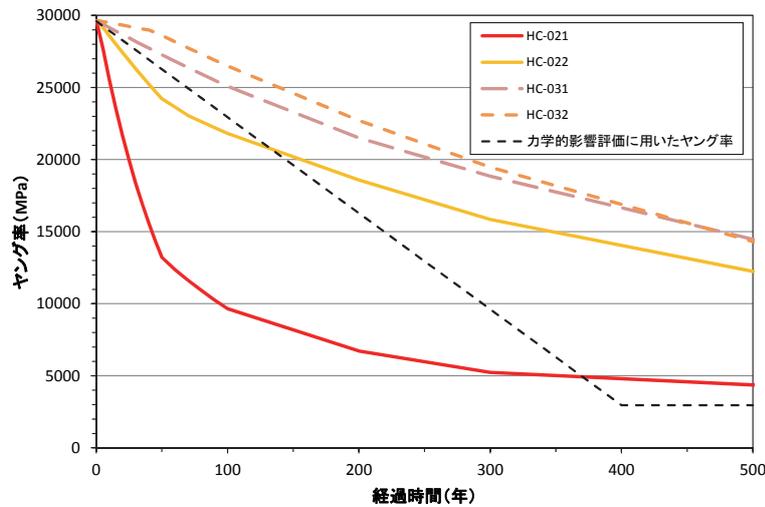


図 3.3.3-15 高 Cl ケースのヤング率と力学的影響評価に用いたヤング率の比較

2) 再掘削時の力学的影響評価方法の検討

a 検討の背景と目的

R&R 検討会が提示した技術検討項目の一つに、「埋め戻した坑道の再利用時の健全性」が挙げられている。これは、処分坑道に廃棄体を定置して埋め戻した後、何らかの理由により廃棄体を回収することを決定し、一度埋め戻した坑道の再掘削/再利用を行う場合、回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性確保から、坑道の安定性について評価や検討を行うことを示している。昨年度までは、開放した状態や埋め戻した状態での坑道の健全性、埋め戻し材の膨潤圧の影響や支保効果については検討を行ってきた。一方、再利用時については、その影響評価方法の検討も含めて検討を実施していなかった[4]、[6]。

一度埋め戻した坑道の再掘削/再利用した時の坑道の力学的影響については、再掘削という工程が加わるものの、従来から行われている坑道の掘削解析や昨年度まで実施してきた「開放坑道の健全性(空間安定性)」の検討方法の延長線上で評価することができると考えられる。ここでは、具体的な検討手順や課題を示すことを目的とした。

b 再掘削時の力学的影響評価方法

(a) 検討方針

再掘削時の力学的影響評価方法は、昨年度まで検討してきた力学的影響評価方法と同様に、回収可能性維持期間中の力学的安定性を評価できる必要があることから、時間依存性を考慮することができる解析手法であることが求められる。坑道の力学的安定性は周辺岩盤と支保工が一体となって機能することにより確保されることから、岩盤や支保工の材料ごとに、一般的に用いられている安定性の評価指標に基づく判定により、坑道安定性の保持期間を検討するものとする。

(b) 評価対象及び考慮する現象

再掘削を行う場合、処分場地下施設の建設、廃棄体の定置・埋め戻し、再掘削、開放状態の継続という工程が想定される。しかし、定置・埋め戻しまでは、既に昨年度までに検討がなされていることから、ここでは、再掘削から回収完了まで開放状態が継続されている期間の、岩盤や支保工の変形の進行による坑道安定性を評価対象とする。

この場合、再掘削時の力学的影響評価において考慮しなければならない要素は岩盤と支保工となる。岩盤に関して、主に考慮する現象として昨年度までの検討と同じとすれば、長期的なクリープ変形と変形に伴う透水性変化が挙げられる。また、支保工に関して、主に考慮する現象としては、地下水との接触に伴うカルシウムイオンの溶脱による支保工の剛性の低下が挙げられる。

(c) 再掘削の考慮方法

再掘削時の力学的影響評価では、再掘削時に坑道内にあった埋め戻し材を撤去するという事象が新たに加わることから、その事象をどの様に力学的影響評価方法に組み込むかがポイントとなる。

処分坑道を埋め戻した直後では、埋め戻し材にはその自重しか作用しておらず、坑道壁面からの作用力は無い状態となっている。その後、周辺岩盤のクリープ変形により坑道の内側に変形が進むようになると、埋め戻し材には坑道壁面からの圧縮力が作用するようになる。一方、坑道壁面には、この圧縮力の反作用力が働いている状態となっている。このような応力状態は、従来の坑道掘削解析における掘削前の状態と同様ともいえる。したがって、再掘削のタイミングで埋め戻し材の再掘削に伴う等価な荷重、すなわち掘削解放力を坑道壁面に作用させれば、解析上、再掘削を考慮できたことになる。再掘削に伴う掘削解放力の算定には、従来からの二次元の掘削解析の方法[18]を準用することができる。解析手法については、第3分冊を参照されたい。

3.4 回収容易性に関する検討

3.4.1 検討方針と検討項目の概要

OECD/NEA の Reversibility and Retrievability プロジェクト（以下、「R&R プロジェクト」という。）では、高レベル放射性廃棄物及び使用済燃料の深地層処分のための可逆性と回収可能性に関し、その概念に関する問題の範囲と考え方について NEA 加盟国による調査・議論が行われた。この R&R プロジェクトの議論をとおして、地層処分が有する特徴や概念に対して、“閉鎖後の一定期間までは回収が技術的に可能である”との国際的な共通認識がある。そのような認識のもと、回収の実現性に関する議論が回収の容易性に関する議論へと帰結する可能性が示唆されるとともに、回収可能性の実現性を示していくうえでの技術的な取組の方向性（回収可能性に関する戦略）が示されている[19]。R&R 検討会では、この回収可能性に関する技術的な取組の方向性を我が国でも採用し得るものとして、次の2つの共存可能な技術的アプローチが存在し得るとしてまとめた[4]。

技術的アプローチ 1：回収方法（技術・装置）の開発に重点をおくアプローチ

技術的アプローチ 2：回収をより容易にするための方法を設計に考慮するアプローチ

技術的アプローチ 1 は、処分場の設計の種類や内容を問わず、回収実施の際に必要な回収方法（技術・装置）を開発しておくアプローチで、処分孔縦置き定置方式を対象に塩水を利用した緩衝材除去技術の実証試験が実施され、緩衝材除去システムの整備、技術の適用性等が評価された[3]。また本事業においても、処分坑道横置き定置方式を対象に、PEM - 坑道間の充填材の除去技術や重量物である PEM の回収技術の整備及び適用性評価を進めている[20]。一方、技術的アプローチ 2 は、回収の容易性を設計（開発）に考慮するアプローチで、回収をより容易にするための方法や程度との関係で、表 3.4.1-1 に示すような多様な考え方や方法が想定されている[4]。

表 3.4.1-1 回収の容易性を設計に考慮する際の多様な方法の例[4]

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

3.1.2 項で述べたように、R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目（表 3.1.2-1）には、上述した回収可能性に関する技術的アプローチ 2 に対応した項目が「2. 回収の容易性」にまとめられている。表 3.1.2-1 の「1」より合理的な回収作業の実現に向けた技術検討 / 技術開発」に関しては、上述したように処分坑道横置き定置方式を対象に本事業の“地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発”を進めていることから、ここでは“回収可能性の維持についての検討”

の一環として、表 3.1.2-1 の「2) より回収の容易性を高めた処分場の設計開発」に着手することとした。そのような検討の進め方として、次の 2 つの方針に基づき検討を進めることとした。

検討方針 1：現時点で有望とされる 2 つの処分概念（以下、「基本概念」という。）を前提に、埋め戻し状態のバリエーションや開放坑道の水没オプション等の設計オプションに関する有効性や優劣の比較検討に着手する

検討方針 2：新たな代替設計オプションの検討に向けて、諸外国の処分概念やこれまでに検討された処分概念、ならびに多様な設計オプションを調査・整理し、回収の容易性を高めることに資する代替設計オプションを抽出する

（有効性の検討では、トレードオフの関係を定量化して総合的に判断する必要がある）

なお、R&R プロジェクトで示されたように、回収の実現性に関する議論が回収の容易性に関する議論へと帰結する可能性があることから、今後のサイト選定の進捗に応じたステークホルダとの議論に向けた準備として、回収の容易性を高めた設計オプションの検討を進めておく必要がある。ただし、このような設計オプションの検討では、事業の進展に伴い最適化される処分場設計の開発プロセスのなかで、操業時及び閉鎖後長期の安全性を確保するだけでなく、可逆性・回収可能性に関する社会のニーズの変化への対応などに留意しつつ、柔軟に進めていく必要がある。

NUMO の「設計オプション」の定義では、現時点で有望な処分概念の 1 つとしている「竖置き方式」における人工バリア構成要素（基本概念ではベントナイトブロック、鋼製オーバーパック、ガラス固化体の組み合わせ）の仕様を、周辺環境や要件に対応させて変化させた代替案を設計オプションと呼ぶこととしている。また、処分場レイアウトも重要な検討対象とはなるが、地質環境が具体化されていないジェネリックな現段階では、処分深度や断層や破碎帯の空間分布に考慮した処分場レイアウトを具体化できないため、本検討では、定置方法のみを対象とした代替掘削オプションの技術的な検討を進めることとする。

以上の検討方針を踏まえて、より回収の容易性を高めた処分場の設計開発を行うために、図 3.4.1-1 に示す検討の流れに沿って検討を進める。なお、図には、平成 31 年度までを見据えた検討の流れを示している。この流れに沿って、今年度の検討の概要を以下に述べる。

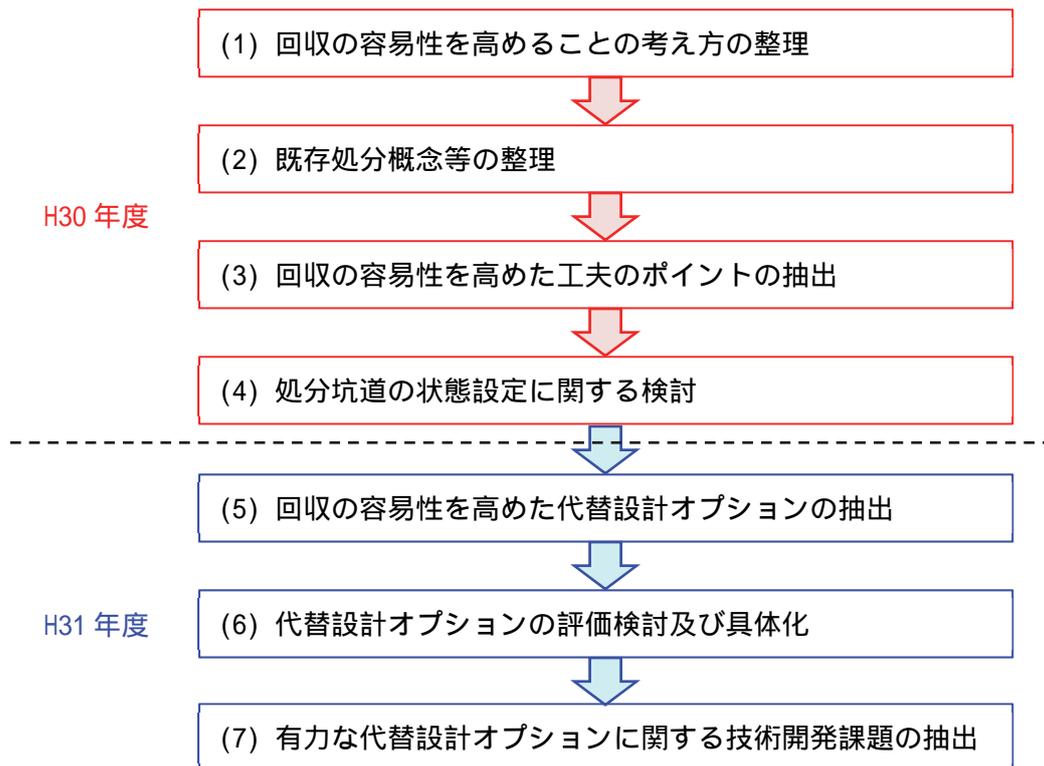


図 3.4.1-1 回収の容易性に係る検討の流れ

3.4.2 回収の容易性を高めること考え方の整理

(1) 回収の容易性向上の視点の整理

ここでは、より回収の容易性を高めた処分場の設計開発を進めていく上で、回収の容易性の考え方として、回収の容易性として何を高めるか、また何を変えることでその容易性が高まるのか等の検討を行い、回収の容易性向上を考えるうえでの視点の整理を行った。

前述の定量化に必要な技術検討項目の「2. 回収の容易性」の定量化の対象として、“回収作業時間”を設定されていること、OECD/NEAの検討では、“廃棄体の回収作業”を容易にすることが重要とされていることを踏まえると、より回収の容易性を高めた処分場の設計開発を進めていく上では、“廃棄体の回収作業時間”を短縮することが指標の1つになり得ると考えられる。しかし、ジェネリックな検討を行う現段階においては、全ての廃棄体を回収するための時間を定量的に示すことはできないことから、回収時間を他の視点に置き換える必要がある。そこで、前節の表 3.4.1-1 にも示した、

- 回収可能性の維持期間内において、廃棄体へのアクセスを容易にしておく
- 回収可能性の維持期間内において、可能性のある将来の回収作業が容易となるようにしておく

の2つについて、設計への考慮の考え方を基に、を“アクセス性”、を“ハンドリング性”として、それらに関する回収容易性向上の視点を以下のように整理した。

廃棄体へのアクセス性の向上

廃棄体へのアクセスが容易であれば、廃棄体の回収作業の容易性が高まり、結果として回収作業時間の短縮も可能であると考えられる。廃棄体へのアクセス性の向上を図るには、次のような要素が考慮事項としてあげられる。なお、本検討では、処分場レイアウト設計は検討の対象外としたことから、ここでのアクセス性とは、処分坑道から廃棄体までのアクセス性となる。

- ・ 処分坑道から廃棄体までのアクセス経路を確保するための作業量の少なさ
- ・ 処分坑道から廃棄体までの物理的な距離

それぞれの要素における考慮対象物や考慮事項の例を表 3.4.2-1 に示す。この表に示すような考慮事項を踏まえながら、アクセス性が向上する代替設計オプションの検討を進めていくこととする。ただし、「廃棄体までの物理的な距離」に大きく関与するのは処分場のレイアウトであることから、本検討におけるアクセス性に関しては、主として「廃棄体までのアクセス経路を確保するための作業量の少なさ」となると考えられる。

表 3.4.2-1 アクセス性向上の要素における考慮事項の例

アクセス性向上の要素	容易性向上に対する考慮事項の例
廃棄体までのアクセス経路を確保するための作業量の少なさ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 埋め戻し材や緩衝材等の撤去する作業量 (撤去物の物量・重量・形状・状態、等を考慮) ・ 坑道の安定性を確保するための作業量 (坑道の大きさ・形状、支保工の耐久性、等を考慮) ・ アクセスまでの環境を確保するための作業量 (排水、換気、維持管理、等を考慮)
廃棄体までの物理的な距離の短さ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 処分場レイアウトの工夫 (本検討では検討対象外) ・ 1本の処分坑道 / 処分孔の短縮

廃棄体のハンドリング性向上

廃棄体までのアクセスが確保できた後に、廃棄体の回収作業自体の容易性が高まれば、回収作業時間の短縮もできると考えられる。廃棄体のハンドリング性の向上を図るには、作業性が重要であり、「物量」、「重量と形状」、「健全性」、「動線」、「環境」という要素が考えられる。これらの要素は以下のように解釈となる。

- ・ 物量：回収対象物の少なさ
- ・ 重量と形状：回収対象物の扱いやすさ
- ・ 健全性：回収対象物の健全性
- ・ 動線：回収対象物の動作の少なさ

- ・環境：作業環境の確保

ハンドリング性向上の各要素における考慮対象物や考慮事項の例を表 3.4.2-2 に示す。アクセス性と同様に、この表の考慮事項を踏まえて、ハンドリング性が向上する代替設計オプションの検討を進めていくこととする。また、「動線」及び「環境」については、処分場レイアウトにも関与するため検討対象外とし、本検討においては主として処分坑道や処分孔に対する「動線」及び「環境」が検討となる。

表 3.4.2-2 ハンドリング性向上の要素における考慮事項の例

ハンドリング性 向上の要素		要素の解釈	容易性向上に対する考慮事項の例
作業性	物量	回収対象物の少なさ	1 回の回収作業で扱う廃棄体の本数
	重量と形状	回収対象物の扱いやすさ	1 回の回収作業で扱う PEM 等の重量、大きさ、形状、
	健全性	回収対象物の健全性	オーバーパックや PEM 等の健全性
	動線	回収対象物の動作の少なさ	回収時の方向転換、上下運動、往復等の回数
	環境	作業環境の確保	作業空間の大きさ、作業環境の維持

以上のような廃棄体へのアクセス性およびハンドリング性に加えて、回収の維持期間における坑道等の維持管理が容易にできるか、ということも代替概念オプションの検討では重要な指標となると考えられることから、本検討では、回収維持期間中における維持管理作業の容易性についても念頭に置くこととする。

(2) 我が国の処分環境条件として求められる事項の整理

1) 設計因子と要求事項への対応性

NUMO の包括的技術報告書 (レビュー版) [21] で示された設計因子と要求事項は、処分場や人工バリアの仕様設定に至る設計フローのなかで考慮すべき上位の要件である (図 3.4.2-1)。回収可能性については、施設の最終閉鎖までの回収可能性維持期間による短期・長期の安全性に有意な影響を及ぼさないことが要求事項となっている。

本検討を通して抽出される代替設計オプションを対象に、我が国の処分環境条件に即しているかを評価する場合、これらの設計因子と要求事項を満足できる見通しがあること (対応性) が必要となる。

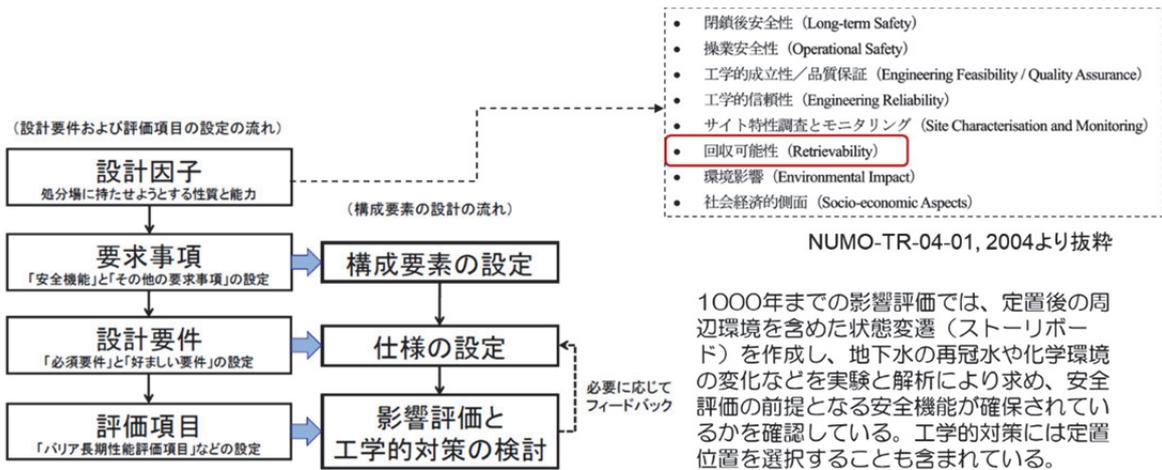


図 3.4.2-1 設計仕様設定までの流れ（[21]に一部加筆）

2) 処分システムに期待する安全機能への適合性

NUMOの包括的技術報告書（レビュー版）[21]には、閉鎖前及び閉鎖後長期の安全性を確保するうえで処分システム（或いはシステムを構成するこの要素）に期待する安全機能と構成要素が示された。例えば、閉鎖後長期の安全性に関する安全機能を維持させるという観点から個々のバリア等に対する設計要件や仕様が設定される。回収の容易性を高めた代替設計オプションの抽出においては、施工品質が適切なレベルにできるか（品質保証）、施工された人工バリア等が閉鎖後の長期にわたり期待通りの性能を発揮するか（性能評価）という点について確かめる必要があり、閉鎖前及び閉鎖後長期の安全性に関する安全機能の維持の観点から、その代替設計オプションの適合性を示す必要がある。

3) 本事業段階で考慮すべき評価事項への適合性

1)で述べたように、設計の流れは、設計因子を基軸として設定した要求事項に対して、それを満足させるための処分場の構成要素を設定し、構成要素ごとに要求事項で示される必要な性能が確保されるように設計要件を設定することとなる。従って、回収の容易性を高めた代替設計オプションでも同様に、地下施設設置深度、人工バリア、坑道等の設計要件に対する適合性や対応性を確認していく必要がある。一方で、代替設計オプションを抽出・具体化していく（人工バリアや坑道等の設計を具体化）過程においても、可能な範囲で適合性の評価を行うことで、有力な代替設計オプションの抽出検討を進めることができると考えられる。そこで、本事業における検討の段階から、先行的に考慮することが可能な評価事項を以下に挙げる。

- 1) 坑道安定性評価：NUMOの包括的技術報告書（レビュー版）によれば、地下施設設置深度における坑道に対して、現実的な支保工の設計（設定仕様）で坑道の力学的安定性を確保することとされている。また坑道の設計要件として、建設・操業が安全かつ円滑に行われるように坑道の力学的安定性が確保されるべきことが示されている。

- 2) ベントナイト制限温度評価：地下施設設置深度の設計要件では、緩衝材に対して地温の増大に伴う温度上昇も考慮した上で、合理的な廃棄体占有面積で緩衝材の温度が制限温度（100）を超えないように抑える必要がある。
- 3) 湧水量評価：閉鎖前の安全性に関する安全機能として、排水能力があり、オーバーパックの設計要件である耐食性にも影響する可能性がある。湧水量の評価は、想定される坑道内への湧水量をレイアウト設計に対応させて解析的に求めて、排水システムの設計を行うこととなる。坑内湧水量は、処分場サイトの地質環境条件に依存するものであるが、仮想地質モデル等を利用して、代替設計オプションに対して処分坑道の湧水量の評価が可能である。
- 4) 工学的成立性の評価：処分概念の工学的成立性の要求事項としては、建設・操業・閉鎖の各工程が計画期間中に完了すること、適用する技術の性能が実証されていることがある。現状の利用可能な技術(および開発の見通し)から、それらを評価することが可能である。

3.4.3 既存処分概念等の整理

国内外でこれまでに検討されてきた処分概念(ここでは、処分場概念と定置・回収概念をいう)を調査し、前項で設定したアクセス性とハンドリング性の回収容易性向上の視点から、回収の容易性を高めていると考えられる設計考慮事項、または回収の容易性を意図して定置概念を開発していなくても、結果として回収の容易性が高まっている事項等について整理を行った。

(1) 海外の処分概念の調査

海外の処分概念の調査は、報告書が公表されている以下の8か国を対象とした。

フランス
米国
スウェーデン
フィンランド
スイス
ベルギー
ドイツ
カナダ

調査の対象とした上記の国は、ガラス固化体、使用済燃料の地層処分を基本概念とし、多重バリアシステムによる安全確保、母岩の地質環境特性に対応した処分・定置概念の構築、何らかの方法で回収可能性を考慮している。なお上記の国のうち、回収容易性を意図して定置概念を構築している国は、フランスのみとなる。

各国の処分概念の調査の詳細については、第3分冊を参照されたい。

(2) 国内の処分概念の調査

これまでの我が国における処分概念（処分場、定置・回収概念をいう）の開発や設計検討は、以下の報告書に取りまとめられている。

- 第1次取りまとめ（動力炉核燃料開発事業団（平成4年）「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 平成3年度」PNC TN1410 92-081）
- 事業化電共研レポート（電力中央研究所、電気事業連合会（平成11年9月）「高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術」
- 第2次取りまとめ（核燃料サイクル機構（平成11年11月）「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-」JNC TN1410 99-020）
- NUMO（2004）「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性」NUMO-TR-04-01
- NUMO（2004）「Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments」TR-04-03
- NUMO（2011）「地層処分事業の安全確保（2010年度版） - 確かな技術による安全な地層処分の実現のために - 」NUMO-TR-11-01

これらの報告書において、何らかの形で回収可能性に言及したのは、2002年以降に開始されたNUMOの処分概念オプションの検討からである（成果は、NUMO-TR-04-03[22]にまとめられている）。それまでの処分概念の検討では、回収可能性について概念開発上考慮されていない（1990年代ではガラス固化体の地層処分の実現性明示に着目しており、回収可能性の議論は使用済燃料の直接処分の問題であると考えられていたことも背景にある）。

本検討では、回収可能性に関する記載がある2004年以降の報告書に関して、処分概念を調査し、容易性向上の視点からの整理を行った。詳細は第3分冊を参照されたい。

(3) 国内外の処分概念の調査のまとめ

国内外の既往処分概念からのアクセス性とハンドリング性の視点で回収容易性向上に寄与していると判断されたポイントを一覧表として、表 3.4.3-1 国内外の処分概念における回収の容易性向上の視点からのポイントにまとめた。

海外の処分概念においては、各国とも母岩の特性を考慮してバリアシステムと定置概念を構築していることから、表に示すような回収の容易性向上の視点からのポイントの全てが、我が国の処分環境において適用できるポイントとはならないことに注意が必要である。

表 3.4.3-1 国内外の処分概念における回収の容易性向上の視点からのポイント

調査対象	アクセス性向上の視点からのポイント	ハンドリング性向上の視点からのポイント
フランス	<ul style="list-style-type: none"> 埋め戻し材を必要としない小口径坑道への横置き定置 小口径定置坑道に設置するケーシングの長期健全性の確保 	<ul style="list-style-type: none"> 大口径坑道から小口径坑道への廃棄体定置時と逆動線となる回収による作業性確保 廃棄体容器外周のセラミックランナーによるケーシング内の移動容易性 廃棄体容器の長期健全性の確保
米国	<ul style="list-style-type: none"> 埋め戻し材を必要としない横置き定置 	<ul style="list-style-type: none"> 複数の廃棄体を格納する大型容器による作業物量の減少 定置時と逆動線となる回収による作業性確保 廃棄体容器の長期健全性の確保
スウェーデン	<ul style="list-style-type: none"> 埋め戻し材を必要としない小口径横孔への横置き定置 緩衝材の除去が不要と考えられるベントナイト緩衝材とキャニスターを組み合わせたスーパーコンテナ 	<ul style="list-style-type: none"> 大口径作業坑道から小口径坑道への廃棄体定置時と逆動線回収による作業性確保 高い耐腐食性容器による長期健全性の確保
フィンランド スウェーデンと同様の定置概念、フィンランドのみのポイントを記載	<ul style="list-style-type: none"> 撤去しやすいベントナイトブロックと粒状ベントナイトでの処分坑道埋め戻し 比較的短い（60m程度）定置坑道の櫛型配置 	<ul style="list-style-type: none"> なし
スイス	<ul style="list-style-type: none"> 撤去しやすい粒状ベントナイトを用いた埋め戻し 	<ul style="list-style-type: none"> 大口径の定置坑道での作業性確保
ベルギー	<ul style="list-style-type: none"> 定置坑道支保工のセグメント利用による長期間の坑道安定性の確保 小口径坑道による埋め戻し材量削減 緩衝材の除去が不要と考えられるスーパーコンテナ 	<ul style="list-style-type: none"> スーパーコンテナによる健全性の向上 大口径坑道から小口径坑道への複数廃棄体定置と逆動線となる回収による作業性確保
ドイツ	<ul style="list-style-type: none"> 長さの短い大口径坑道への定置 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体容器の長期健全性の確保 複数の廃棄体を格納する容器による作業物量の減少 大口径定置坑道による作業空間確保
カナダ	<ul style="list-style-type: none"> 埋め戻し材量が削減できる矩形バッファーボックスを用いた矩形坑道断面定置 	<ul style="list-style-type: none"> 矩形坑道断面に矩形バッファーボックスの2段定置と逆動線となる回収作業単純化
NUMO-TR-04-03 NUMO-TR-11-01	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材除去の削減が期待できる PEM 乾燥ベントナイト（温度への耐久性を向上）の利用による埋設密度の増加（坑道距離の短縮＝埋め戻し材撤去作業量の削減） 処分坑道の埋め戻し材の撤去量が減る1処分孔の複数廃棄体定置 	<ul style="list-style-type: none"> 複数の固化体のオーバーパック格納による作業物量の減少 大口径の定置坑道による作業性確保

3.4.4 回収の容易性を高めた工夫のポイントの抽出

本項では、回収の容易性向上の視点、及び、前節の国内外の既往処分概念からアクセス性とハンドリング性の視点で回収容易性向上に寄与していると判断されたポイントを踏まえて、回収の容易性を高めた定置方法に関する工夫のポイントの抽出を行った。抽出した工夫のポイントの例

を表 3.4.4-1 に示す。表に示すような工夫のポイントを組み合わせることで、代替設計オプションの検討を進めることができると考えられる。表 3.4.4-1 に示す工夫のポイント例の中から、以下の6つについて、工夫のポイントのイメージ例と合わせて特徴と留意事項について整理した。それぞれの工夫のポイントについては、第3分冊を参照されたい。

- 小口径坑道への定置
- 高耐久性のセグメント
- 高耐久性のケーシング
- 複数のガラス固化体格納容器
- 大規模空洞
- 集積定置

なお、廃棄体までのアクセス性向上の工夫のポイント例の中で、埋め戻しをしない、すなわち埋め戻しの状態設定については、3.4.5項で述べる。また、工夫のポイントは、ここに挙げた例が全てではないと考えられ、代替オプションの検討を進めながら、さらに付加される可能性がある。

工夫のポイントの例として、小口径坑道への定置の例を示す。

工夫のポイント例：大口径作業坑道から小口径坑道への定置

回収の容易性向上の視点からの工夫のポイント例として、大口径作業坑道から小口径の定置坑道のイメージ例を図 3.4.4-1 に示す。廃棄体を定置する坑道の断面積を小さくすることで、埋め戻し材や緩衝材等の撤去量が削減し、撤去のための作業量も削減することとなる。一方で、埋め戻し材や緩衝材等の撤去作業量を削減するために小口径坑道にすると、回収時の作業性を高めるための空間を確保ができなくなることからハンドリング性が悪くなってしまう。そこで、図のイメージ例は、大口径の作業坑道と小口径の定置坑道への定置を取り入れたものとなっており、これにより定置・回収装置を据え付ける作業坑道は、回転、方向転換などの作業性を十分確保できると考えられる。また定置する小口径坑道の長さを短くすることで、廃棄体の回収時におけるスタックの防止効果もある。なお、定置する小口径坑道に複数の廃棄体を定置する場合は、熱の評価が必要となる。加えて、横置きの場合は作業坑道が長くなり、縦置きの場合は荷重に対する容器等の耐圧性といったことも留意事項として考えられる。

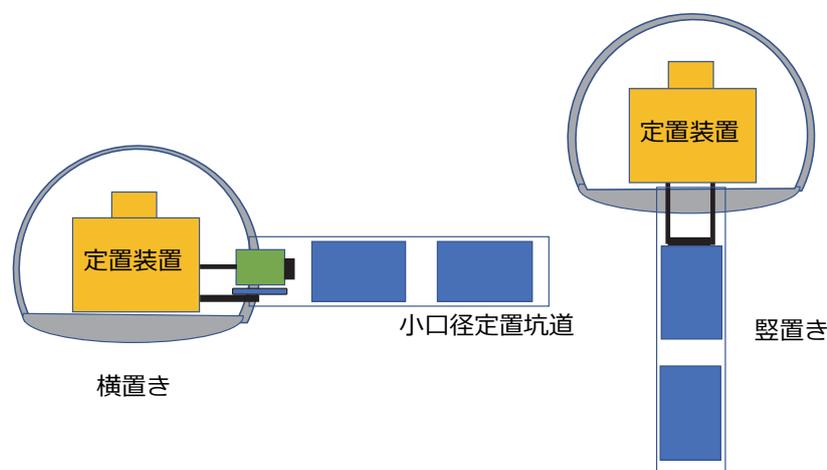


図 3.4.4-1 工夫のポイントのイメージ例：大口径作業坑道から小口径坑道への定置

表 3.4.4-1 回収の容易性向上の視点からの工夫のポイント例

回収容易性向上の視点		容易性向上のポイント	工夫のポイント例
廃棄体までのアクセス性向上	廃棄体までのアクセス経路を確保するための作業量の少なさ	・埋め戻し材や緩衝材等の撤去作業量を削減	<ul style="list-style-type: none"> ・埋め戻しをしない（埋め戻しの状態設定） ・撤去が容易な材料の使用 ・小口径定置坑道、小口径処分孔の採用 ・PEM タイプの一体型廃棄体の使用 ・温度耐久性を向上させた材料使用による廃棄体の高埋設密度定置 ・1 処分孔に複数の廃棄体を定置する定置方法の採用
		・坑道や処分孔の安定性を確保するための作業量を削減	<ul style="list-style-type: none"> ・高耐久性の支保工の設置 ・高耐久性のケーシングの設置 ・保守作業、維持管理をしやすい坑道形状の採用
廃棄体のハンドリング性向上	物量	・1 回の回収作業における廃棄体本数を増加	・ガラス固化体を複数格納できる容器の使用
	重量と形状	・回収対象物の形状を扱いやすくする	<ul style="list-style-type: none"> ・人工バリアの合理化（PEM の緩衝材厚さの減少など） ・金属容器の材質変更（チタン等） ・矩形容器の使用 ・把持のための治具を取り付けた容器の採用
	健全性	・回収対象物の健全性を確保	<ul style="list-style-type: none"> ・高耐久材料の容器の使用 ・厚くした容器の使用
	動線	・回収対象物の動作を削減	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体の定置時と逆動線となる定置方法の採用 ・大口径の作業坑道と小口径の定置坑道を組み合わせた定置方法の採用
	環境	・作業性を高めるための空間を確保	<ul style="list-style-type: none"> ・大口径の定置坑道の採用 ・大口径の作業坑道と小口径の定置坑道の採用 ・放射線防護を考えた定置方法の採用

3.4.5 処分坑道の状態設定に関する検討

前項の廃棄体までのアクセス性向上の工夫のポイント例の中で、埋め戻し材、回収作業を阻害するものであることから、埋め戻しをしない方が回収の容易性の点では向上することとなる。従ってここでは、処分坑道の埋め戻しの状態設定が回収容易性向上に対してどのようなメリット・デメリットがあるか、技術的な観点から検討した。

(1) 処分坑道の状態設定

本節では、平成 27 年、28 年度の回収可能性維持の影響検討[5]、[6]で検討した状態設定に処分坑道の水没させた場合を追加し、図 3.4.5-1 に示す横置き PEM 方式を対象に、回収するケースと回収しないケースを考慮して回収容易性向上の観点から技術的なメリットとデメリットを吟味する。



図 3.4.5-1 処分坑道の状態設定のイメージ (横置き PEM 方式の場合)

(2) 状態設定の展開と特徴

それぞれの状態設定に対して、建設から回収可能性維持期間、回収する場合、回収しない場合の作業展開を以下のように仮定し、作業の特徴を整理した。なお、建設から閉鎖までの作業についてはまだ明確に規定されていないものも多いため、現時点で考えられる以下の条件を仮定して検討を行った。

- ・ PEM が定置された処分坑道は放射線管理下にあるものとした。
- ・ 状態設定ごとの整理と比較のため、状態設定 ①の埋め戻し状態における PEM 定置後の埋め戻し作業は回収可能性維持期間の作業に含めることとした。
- ・ 水没状態について、強制的に注水して水没させる方法や坑道内への湧水により自然に水没させる方法などがあるが、ここでは方法は限定しないこととした。
- ・ 全ての状態設定について、回収作業後は現状復旧の観点から坑道を埋め戻すこととした。

1) 状態設定 (基本ケース): PEM 定置後処分坑道を埋め戻した状態で回収可能性を維持
状態設定 ①は、NUMO レビュー版における回収可能性維持の基本ケースとしている状態と設定した。この状態では処分坑道に PEM 定置後、坑道は埋め戻され、坑道端部には力学プラグが設置される。(図 3.4.5-2)。PEM 定置後の処分坑道端部には力学プラグが設置されることから、本検討では処分坑道に対する回収可能性維持期間中の維持作業は行われないと設定した。

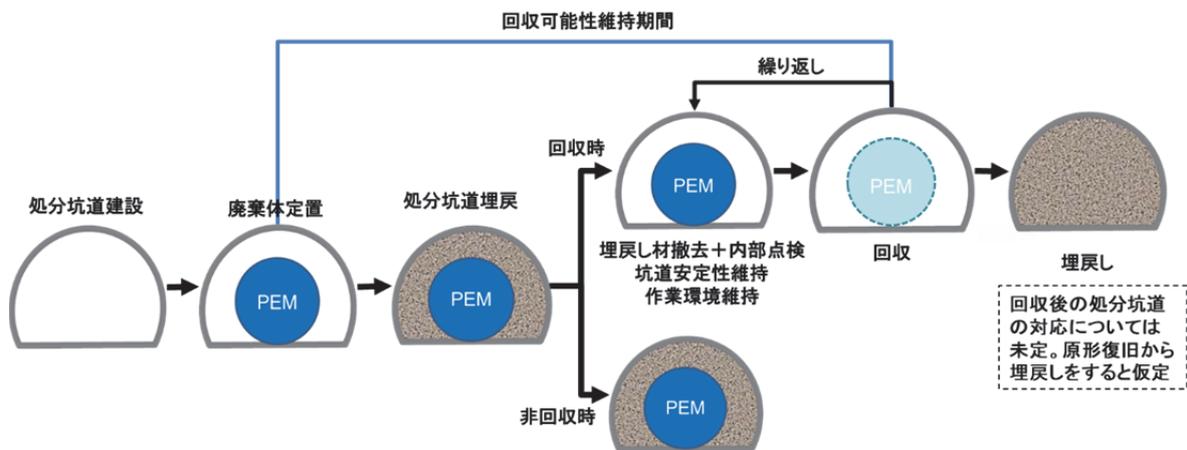


図 3.4.5-2 状態設定 : PEM 定置後処分坑道を埋め戻し状態とした場合の作業展開

2) 状態設定 : PEM 定置後処分坑道を開放状態で回収可能性維持

状態設定 は、処分坑道に PEM を定置したのち、閉鎖措置が決定されるまで処分坑道を開放した状態に置くことで回収可能性を維持する状態である (図 3.4.5-3)。

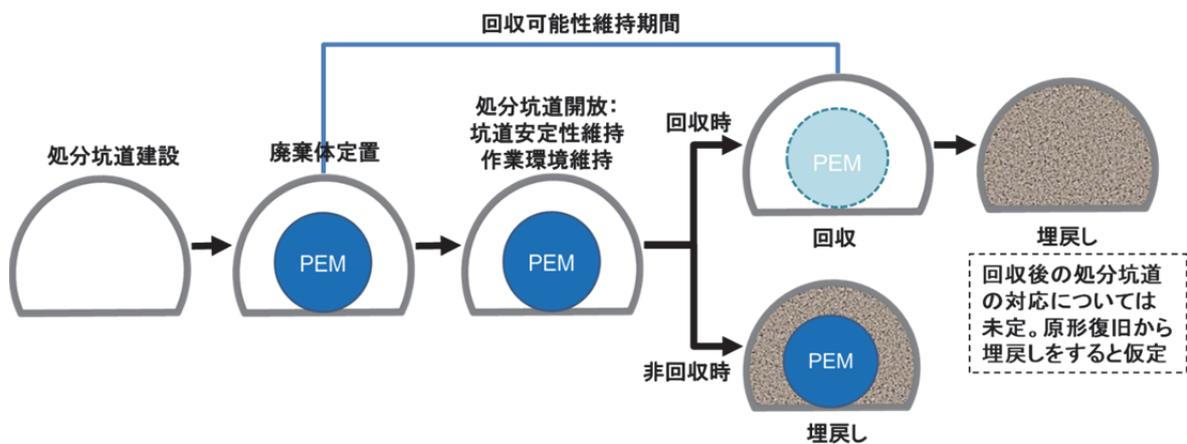


図 3.4.5-3 状態設定 : PEM 定置後処分坑道を開放状態とした場合の作業展開

3) 状態設定 : PEM 定置後処分坑道を開放状態で回収可能性維持

状態設定 は、処分坑道に PEM を定置したのち、坑道内を水没させて回収可能性を維持する状態である (図 3.4.5-4)。

水没状態の対象範囲は、処分場の全地下坑道を対象とする場合と一部の坑道を対象とする場合が考えられる。全地下坑道を対象とする場合は、例えば、地下施設の坑口まで水没させることが想定される。一部の坑道を対象として部分的に水没状態とする場合としては、例えば、アクセス坑道、主要坑道を開放したままで、処分坑道のみを水没させることなどが想定されるが、水没領域を限定するためには処分坑道の端部にバルクヘッド (隔壁) を設置する必要がある。

前者のように全地下坑道を水没させた後、再開した事例はほとんど見当たらないが、国内では

北海道の幌内炭鉱（1977年）で2年間水没させた例が記録に残されている[23]。後者のように一部の坑道を水没させる例は、青函トンネルの大出水事故（1974年12月）でバルクヘッドの設置により、全坑道の水没を防いだ例がある。どちらの例も水没させることを意図した設計はなされておらず、水没の与える影響についても評価されていない。

このように、PEM 定置後に処分坑道を水没状態にした後の維持作業については、長い回収可能性維持期間中に水没状態にある坑道内でどのような事象が発生するかは経験がなく、また評価事例もないため、坑道安定性等の維持作業の必要性や必要な技術を判断するのに十分な情報がないのが現状である。従って、水没後の維持作業について具体的に想定することは難しく、本検討において十分に検討できない可能性もあることに注意が必要である。ここでは、処分坑道のみを部分的に水没させる状態を考え、想定される追加作業を整理した（詳細は第3分冊を参照）。

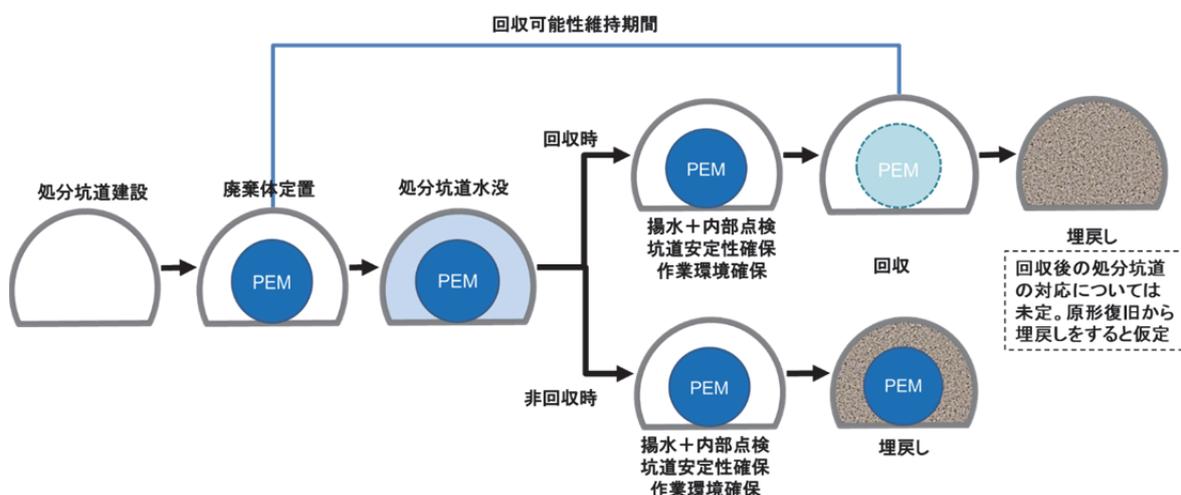


図 3.4.5-4 状態設定 : PEM 定置後地下施設全体を水没状態とした場合の作業展開

(3) 各状態設定で想定した作業に伴う負荷と安全性への影響

状態設定の違いを把握するために、前項で整理した作業の展開を踏まえて、以下の作業への負荷、及び安全性への影響について検討を行った。

- 維持作業の負荷
- 回収作業への負荷
- 閉鎖前の安全性への影響
- 長期安全性への影響（回収可能性を維持しつつ最終的に回収しない場合に相当）

以上の状態設定の違いによる維持作業、回収作業への負荷、閉鎖前と閉鎖後長期への安全性への影響について、表 3.4.5-1 に取りまとめた。

表 3.4.5-1 処分坑道の状態設定の違いによる各作業の負荷及び安全性への影響

処分坑道の状態	維持作業の負荷	回収作業への負荷	閉鎖前の安全性 (回収しない場合に含む)	閉鎖後の安全性 (回収しない場合に相当)
 <p>状態設定①:基本ケース PEM定置後埋戻し</p>	<ul style="list-style-type: none"> PEM定置後、処分坑道は順次埋戻し、坑道端部に力学プラグが設置されることから、維持作業は行われなない。 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道ごとにプラグ、埋戻し材を撤去し、PEMが存在する狭径かつ放射線管理下で、坑道安定性の確認、換気・排水をしつつ作業環境を整えPEMを回収するため、作業負荷は大きい。 	<ul style="list-style-type: none"> 維持作業は行われなない。 回収作業への一般労働安全、及び放射線安全への対策が必要。 回収しない場合は、埋戻し作業が発生しなない。 	<ul style="list-style-type: none"> 埋め戻しが適切に実施されれば閉鎖後の安全性は確保される。
 <p>状態設定②: PEM定置後坑道開放</p>	<ul style="list-style-type: none"> PEMが存在する狭径かつ放射線管理下の全処分坑道での遠隔操作による保守点検・補修・更新のための維持作業の負荷は大きい。 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道が開放・維持されているため回収作業の負荷は小さい。 処分坑道の安定性確保や作業環境維持の作業は維持作業の継続。 	<ul style="list-style-type: none"> 維持作業への一般労働安全、及び放射線安全への対策が必要。 回収作業への一般労働安全、及び放射線安全への対策が必要。 回収しない場合は、埋戻し作業への一般労働安全、及び放射線安全への対策が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道を長期間開放しておくことの閉鎖後安全性への影響については十分把握されなないが、良い影響は及ぼさなない。 維持期間中は開放坑道のため人工バリアの安全機能への影響を評価する情報を得られる段階を請じられる。
 <p>状態設定③: PEM定置後水没</p>	<ul style="list-style-type: none"> PEM定置後、坑道端部にバルクヘッドが設置され、坑道は水没することから坑道に対する維持作業は発生しなないが、バルクヘッドの維持管理が必要。 ※仮に維持作業を行う場合は、狭径かつ放射線管理下で、場合によっては高水圧作用下のため負荷は大きい。 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道内の排水と排水処理、バルクヘッドの撤去後、PEMが存在する狭径かつ放射線管理下での坑道の安定性確認、作業環境の回復などの作業後にPEMを回収するため負荷は非常に大きい。 	<ul style="list-style-type: none"> 水没させた坑道内の維持作業は行われなない。 回収作業への一般労働安全、及び放射線安全への対策が必要。 回収しない場合は、埋戻し作業への一般労働安全、及び放射線安全への対策が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道を回収可能性維持期間中水没させておくことの地質環境特性や人工バリアに関する閉鎖後安全性への影響については十分把握されなない。 維持期間中、水没状態で情報を得ることは難しい。

(4) 状態設定のまとめと技術課題

回収容易性向上の視点から、廃棄体へのアクセス性の観点から廃棄体を定置した処分坑道の状態設定3種類について、様々な条件を仮定し、それに基づき想定される作業に関する概略の定性的な検討を実施した結果を以下にまとめる。

- 回収可能性維持期間中の作業への負荷は、坑道を開放状態におく状態設定では狭隘空間及び放射線影響下ではあるものの、作業自体は可能であり、負荷は大きい。埋め戻し状態では維持作業が行われないと想定して負荷が最も小さくなる。水没状態は処分坑道内に対する維持作業は発生しないが、処分坑道端部のバルクヘッドの維持作業が発生するため、埋め戻し状態よりも作業負荷は増えると考えられる。ただし、水没状態については、維持作業の必要性と作業内容が不明なため現時点では判断できない。
- 回収する場合の作業は、埋め戻し状態と水没状態で坑道を開放する作業が発生するため、負荷が大きく、開放状態の場合は最も負荷は小さくなる。
- 回収しない場合、開放状態と水没状態では作業が発生する。開放状態では埋め戻し作業があるが、維持管理されてきた坑道での作業であり、埋め戻し状態における PEM 定置時の埋め戻しと同様となる。水没状態では、埋め戻し前に排水作業と排水の処理作業が発生し、また排水時に急激に材料品質の変質と劣化が開放状態や埋め戻し状態より速く進む可能性があり、埋め戻し前の確認が必要となるため作業負荷は大きいと考えられる。
- 閉鎖前の安全性は、維持及び回収時、埋め戻し時の作業数と作業の種類に依存する。最も安全性に影響を及ぼす作業は、PEM が定置された処分坑道の安定性確認と補修に係る作業となる。長く狭隘な空間かつ放射線影響下での作業では、遠隔操作ロボット等を用いて安全性への影響を低減する必要がある。
- 閉鎖後長期の安全性に係る影響については、特に水没状態の影響についての情報がなく、現状では評価が難しい。埋め戻し状態では基本概念と同様である。開放状態では維持期間の長さに応じて影響が生じる可能性があるが、一方で人工バリア等に関する情報を得られる手段を講じやすいという利点がある。

前項で整理した作業への負荷や安全性への影響を踏まえて、状態設定の違いによる施工性の観点からの技術課題を整理した。

○埋め戻し状態においては、狭隘空間かつ放射線管理下での回収作業に対する難易度が高いことから、以下の技術課題が考えられる。なお、下記のうち上2つの項目の一部については、本事業の“地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発”で実証中である。

- ・狭隘空間かつ放射線管理下での遠隔操作による埋め戻し材の機械的な撤去技術の実証
- ・PEMの回収技術（難易度はPEM容器の健全性に依存）の実証
- ・埋め戻し材撤去後の狭隘空間かつ放射線管理下での遠隔操作による坑道安定性点検・補修技術の開発と実証

○開放状態においては、狭隘空間かつ放射線管理下での回収維持作業に対する難易度が高いことから、以下の技術課題が考えられる。

- ・長い処分坑道で狭隘空間かつ放射線管理下での遠隔操作による坑道安定性点検・補修技術の開発と実証

○水没状態については、狭隘空間かつ放射線管理下での回収作業、及び回収しないで埋め戻す作業に対する難易度が高いが、まずは回収可能性維持期間中に水没させることで生じる事象や影響の検討、維持作業の必要性及び必要となる具体的な作業や技術の検討を要する。現段階で施工性の観点からの技術課題は以下が考えられる。

- ・バルクヘッド設計と構築、排水、解体技術の開発と実証
- ・回収の有無にかかわらず水没状態から開放状態とする段階での遠隔による処分坑道の安定性点検・補修技術の開発と実証

以上の結果をまとめると、全ての状態設定で想定される狭隘空間かつ放射線管理下での坑道安定性維持および埋め戻し時の作業困難性への対応策として、遠隔操作による点検・補修・更新及び埋め戻しに係る技術課題が最も重要と考えられる。また上述したような回収に関連する施工性の課題とは異なるが、全ての状態設定で想定される狭隘空間かつ放射線管理下での埋め戻し時の作業困難性への対応策として、遠隔操作による埋め戻し充填に係る技術課題も考えられる。処分坑道の水没状態においた場合は、上記の技術課題に加えて、水没させることで生じる事象や影響の検討、維持作業の必要性及び必要となる具体的な作業や技術の検討とバルクヘッドに関する技術課題も生じることとなる。

3.4.6 回収容易性に関する今後の検討

本年度に得られた上記の成果を踏まえ、今後、回収の容易性を高めた代替設計オプションの抽出や具体化等を行っていく予定である。本年度に抽出した定置方法に関する工夫のポイントの例については、採用するうえでトレードオフの関係となるものも存在する。従って、代替設計オプションを検討していく上では、どちらの工夫のポイントを採用した方が廃棄体の回収作業時間を短縮できるかの定性的な判断は難しいことから、回収容易性だけでなく、実現可能性、操業及び閉鎖後長期の安全性、維持管理の容易性等について総合的に判断しながら、代替設計オプションの抽出を行っていくこととする。そして、抽出した代替設計オプションに対しては、坑道安定性、ベントナイト制限温度、湧水量、工学的成立性といった、現時点で評価が可能なものについての評価を行う。このような検討を進めることにより、有力な代替設計オプションをさらに抽出できると考えられる。特にベントナイト制限温度に関しては、処分場サイトの地質条件に大きく依存しないことから、現時点での評価が可能で、影響の程度によっては対策の検討等も実施できると考えられる。また、工学的成立性についても評価し、適用する技術の性能を実証していくことを考える必要がある。小口径定置坑道を構築する工法（掘削、ケーシング設置）、大規模空洞の構築方法の検討、使用する材料の選定とその耐久性評価のための試験、基本概念よりも重量のある PEM やオーバーパックを扱う場合の遠隔操作による定置・回収作業時の技術・装置や安全性

といった検討など行っていくことが想定される。将来的には、有力な代替設計オプションの構築及び操業で用いられる各技術に対して、試作や小規模実証試験などによる工学的な成立性の確認に加え、回収に係る各作業や工程に要する所要時間（サイクルタイム）を実証試験などにより把握して、回収の容易性を示していく必要がある。また、実証試験により得られた結果を分析して回収の作業手順の中で、回収時間に影響が大きい工程を把握することは、回収作業や工程の工夫や、回収装置を高度化するための有用な情報になると考えられる。

第3章 参考文献

- [1] 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 放射性廃棄物ワーキンググループ：放射性廃棄物 WG 中間とりまとめ，経済産業省ホームページ，http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/genshiryoku/houshasei_haikibutsu_wg/report_001.pdf，2014．
- [2] 経済産業省：特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（平成 27 年 5 月 22 日閣議決定），経済産業省ホームページ，<http://www.meti.go.jp/press/2015/05/20150522003/20150522003-1.pdf>．
- [3] 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．
- [4] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 報告書（第 3 分冊），2018．
- [5] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 27 年度地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書 第 2 編，2016．
- [6] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 28 年度地層処分技術調査等事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 報告書（第 2 分冊：その 1），2017．
- [7] 原子力発電環境整備機構：処分場の安全機能と技術要件（2010 年度版），NUMO-TR-10-11，2011．
- [8] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 29 年度地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学確証技術開発）人工バリア品質 / 健全性評価手法の構築（その 2） - 緩衝材，2018．
- [9] 登坂博行，小島圭二，三木章生，千野剛史：地表流と地下水流を結合した 3 次元陸水シミュレーション手法の開発，地下水学会誌，第 38 巻，第 4 号，p.253-267，1996．
- [10] Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J.: Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3—A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations, U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, <https://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/>, 2013.
- [11] Parkhurst, D.L., Kipp, K.L., and Charlton, S.R.: PHAST Version 2—A program for simulating groundwater flow, solute transport, and multicomponent geochemical reactions: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6—A35, <https://pubs.usgs.gov/tm/06A35/>, 2010.
- [12] 電気事業連合会，核燃料サイクル開発機構：TRU 廃棄物処分技術検討書 - 第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ - ，JNC TY1400 2005-013，FEPC TRU - TR-2005-02，2005．
- [13] 電気事業連合会，核燃料サイクル開発機構：TRU 廃棄物処分技術検討書 - 第 2 次 TRU 廃

- 棄物処分研究開発取りまとめ - , JNC TY1400 2005-013 , FEPC TRU-TR2-2005-02 , 根拠資料集 4-2 , 2005 .
- [14] 山本修一, 佐藤伸, 武内邦文, 佐々木規行: トンネル型処分施設における人工バリアの長期力学挙動解析 . 土木学会年次学術講演会講演論文集, 仙台 , CS05-47 , p.261-262 , 2008 .
- [15] 西村繭果, 棚井憲治, 高治和彦, 重野義政, 下河内隆文: ニアフィールドの長期力学連成解析手法の構築 . 日本原子力研究開発機構 , JAEA-Research 2007-004 , 2007 .
- [16] 戸井田克, 笹倉剛, 横関康祐, 小林一三, 渡邊賢三, 芦澤良一: 人工バリア材料の力学物性取得試験 , 核燃料サイクル開発機構 業務契約報告書 , JNC TJ8400 2004-036 , 2005 .
- [17] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 , 日本建築学会 , 1992 .
- [18] 市川康明: 地盤力学における有限要素法入門 , 日科技連出版社 , 東京 , pp.111-112 , 1990 .
- [19] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY: Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel, NEA/RWM/R(2011)4, Paris, 2011 (full report).
- [20] 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 報告書(第2分冊), 2018 .
- [21] 原子力発電環境整備機構: 「包括的技術報告: わ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 - (レビュー版)」, 2018 .
- [22] NUMO: Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments TR-04-03, 2004.
- [23] 竹川雅治, 平尾武久: 1975 年 (昭和 50 年) の北炭幌内炭鉱ガス爆発大災害と労働組合 , 産研論集 , No.18 , pp.97-127 , 1997 .