

平成29年度
高レベル放射性廃棄物等の
地層処分に関する技術開発事業

可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発

報告書（第1分冊）

事業の概要・要旨

平成30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・技術高度化開発の開発成果を事業概要・要旨として取りまとめたものです。

報告書の構成

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	可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理
		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	事業名	1-1
1.1.2	事業の目的	1-1
1.1.3	平成29年度の実施内容	1-2
1.1.4	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	2-7
2.1.1	背景および目的	2-7
2.1.2	これまでの成果	2-7
2.1.3	平成29年度の実施内容	2-11
2.2	実証試験施設の整備（第2分冊：第2章）	2-1
2.2.1	実施概要	2-1
2.2.2	地下調査施設の性状調査	2-1
2.2.3	模擬PEMの設置	2-1
2.2.4	地下環境への影響	2-2
2.2.5	地上実証サイトの整備	2-3
2.3	搬送定置設備の実証的整備（第2分冊：第3章）	2-4
2.3.1	実施概要	2-4
2.3.2	エアベアリング方式の開発ステップ	2-4
2.3.3	エアベアリング要素試験装置	2-5
2.3.4	地下での要素試験	2-6
2.3.5	装置の改良	2-7
2.4	隙間充填技術の実証的整備（第2分冊：第4章）	2-8
2.4.1	実施概要	2-8
2.4.2	下部狭隘部の隙間充填技術の実証的整備	2-9
2.4.3	上部開放部の隙間充填技術の実証的整備	2-15
2.5	隙間充填材除去技術の実証的整備（第2分冊：第5章）	2-21
2.5.1	実施概要	2-21
2.5.2	除去技術の具体化	2-21
2.5.3	機械的除去技術	2-22
2.5.4	流体除去技術（ウォータージェット方式）	2-23
2.5.5	吸引による充填材の撤去	2-25
2.6	地層処分実規模試験施設の運用（第2分冊：第6章）	2-26
2.6.1	実施概要	2-26
2.6.2	施設の公開	2-26
2.6.3	可視化試験	2-26

2.6.4	来館者との対話記録の分析	2-27
第3章	可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理 / 回収可能性維持についての検討 (第3分冊)	3-1
3.1	はじめに.....	3-1
3.1.1	背景および目的	3-1
3.1.2	本年度の検討の概要	3-1
3.2	可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理 (第3分冊：第2章、別冊)	3-4
3.2.1	整理の背景と目的.....	3-4
3.2.2	検討会における議論の展開	3-4
3.2.3	検討会で得られた主要な成果 (要約)	3-6
3.3	回収可能性維持期間の検討 (第3分冊：第3章)	3-10
3.3.1	定量化に必要となる技術の現状整理.....	3-11
3.3.2	回収可能性維持のための技術要件についての考え方の検討	3-15
3.3.3	回収維持技術、回収技術などの整理と研究課題の抽出	3-22
3.4	回収可能性維持期間の影響に関する定量的評価 (第3分冊：第4章)	3-24
3.4.1	回収可能性維持期間の影響評価方法の検討.....	3-25
3.4.2	水理学的影響評価方法の検討.....	3-31
3.4.3	化学的・熱的影響評価方法の検討	3-46
3.4.4	課題の抽出.....	3-48
3.5	回収可能性維持期間に関する国際機関、諸外国の事例調査 (第3分冊：第5章) ...	3-50
3.5.1	国際機関の報告書の記述.....	3-50
3.5.2	諸外国における回収可能性維持期間.....	3-51
3.6	研究計画の更新 (第3分冊：第6章)	3-52

目 次

図 2.1.2-1	幌延 URL 試験坑道 2 の整備状況.....	2-8
図 2.1.2-2	エアベアリング方式による定置装置の整備状況.....	2-8
図 2.1.2-3	ペレット充填方式による隙間充填技術の整備状況.....	2-9
図 2.1.2-4	隙間充填材除去の作業手順の具体化、ウォータージェットによる切削予備試験	2-10
図 2.1.3-1	地下環境での搬送定置拐取技術の高度開発 年度展開.....	2-1
図 2.2.2-1	3D レーザースキャナによる試験坑道 2 の内空形状の取得	2-1
図 2.2.3-1	試験坑道 2 に設置した模擬 PEM、妻壁部の疑似 PEM.....	2-2
図 2.2.4-1	試験坑道 2 に整備時に設置した応力計（平成 28 年度実施）	2-2
図 2.2.5-1	地上実証試験サイトの断面模式図	2-3
図 2.2.5-2	地上建屋内に整備したコンクリート走行面.....	2-3
図 2.3.2-1	定置装置の開発ステップ模式図	2-5
図 2.3.3-1	エアベアリング要素試験装置.....	2-5
図 2.3.4-1	幌延 URL 試験坑道 2 での要素試験の様子.....	2-6
図 2.3.4-2	地下での要素試験時の取得データ	2-7
図 2.3.4-3	地下坑道面で定常時の牽引力、空気消費量と試験重量の関係.....	2-7
図 2.4.2-1	下部狭隘部の隙間充填技術の整備フロー	2-9
図 2.4.2-2	スクリーコンベア回転数による移送速度の変化.....	2-10
図 2.4.2-3	スクリーコンベアの移送による充填材の性状変化	2-10
図 2.4.2-4	未充填部の形成部位と試験に使用した狭隘部模擬土槽.....	2-11
図 2.4.2-5	狭隘部模擬土槽内の未充填部の形成状況（例：PEM 右側狭隘部）	2-11
図 2.4.2-6	模擬土槽内でのスクリー配置、および分担範囲.....	2-12
図 2.4.2-7	狭隘部充填の充填状況、密度分布	2-12
図 2.4.2-8	狭隘部充填装置外観	2-13
図 2.4.2-9	充填試験後の狭隘部内部の様子（コアサンプリング後）	2-14
図 2.4.2-10	下部狭隘部-上部開放部の境界の処置の検討例.....	2-14
図 2.4.3-1	上部開放部の隙間充填技術の整備フロー	2-15
図 2.4.3-2	混合したケイ砂の粒度分布	2-16
図 2.4.3-3	突き固め試験の結果	2-16
図 2.4.3-4	吹付け用充填材材料の製造プラント.....	2-17
図 2.4.3-5	吹付け試験の様子.....	2-18
図 2.4.3-6	吹付け確認試験に使用した、幌延 URL 模擬土槽.....	2-19
図 2.4.3-7	伸縮アームを有する吹付装置による吹付け施工試験	2-19
図 2.4.3-8	幌延 URL に吹付け施工試験 資機材の構成および材料フロー模式図	2-20
図 2.5.2-1	隙間充填材の除去工程の模式図	2-21
図 2.5.2-2	試験坑道 2 での隙間充填材の除去技術の適用箇所 模式図	2-22

図 2.5.3-1	機械的除去方式による充填材除去設備の概念検討例	2-22
図 2.5.3-2	本事業で対象とした機械的除去方式掘削ヘッドの模式図	2-23
図 2.5.4-1	流体除去方式（ウォータージェット）による充填材除去設備の概念検討例	2-23
図 2.5.4-2	ウォータージェット方式による奥行方向の切削試験の様子	2-24
図 2.5.4-3	ウォータージェット方式による奥行方向の切削 供試体の性状の影響	2-25
図 2.6.1-1	地層処分実規模試験施設	2-26
図 2.6.3-1	緩衝材ブロックの一体化挙動の可視化試験の様子	2-26
図 2.6.4-1	来館者との対話記録の分析例（質問の属性の経時変化）	2-27
図 3.1.2-1	回収可能性の維持についての検討に関する成果目標および5ヵ年計画	3-2
図 3.2.3-1	可逆性・回収可能性の制度としてのあり方に関する検討会での議論	3-8
図 3.2.3-2	検討会で示された回収可能性の維持に関する技術的アプローチの具体化に係る 技術検討の枠組み	3-9
図 3.3.2-1	回収可能性維持のための技術要件についての考え方の成果イメージと検討フ ロ ー	3-15
図 3.4.1-1	埋戻し材の膨潤圧を設定した解析結果例	3-25
図 3.4.1-2	埋戻し材の坑道変形に対する支持効果に関する解析結果例	3-26
図 3.4.1-3	吹付けコンクリートの剛性変化の速度を変えた解析結果例	3-27
図 3.4.2-1	水理学的影響の評価方法の検討項目と定量化に必要な技術検討項目との対応	3-31
図 3.4.2-2	不飽和特性曲線の設定（岩盤、EDZ、グラウトの場合）	3-33
図 3.4.2-3	3D パネルスケールモデルの解析領域の設定	3-34
図 3.4.2-4	3D パネルスケールモデル	3-35
図 3.4.2-5	3D パネルスケールモデルにおける境界条件の設定	3-35
図 3.4.2-6	Through-type の処分坑道掘削時の全水頭分布の経時変化（case1a）	3-36
図 3.4.2-7	Dead-end-type の処分坑道掘削時の全水頭分布の経時変化（case1b）	3-36
図 3.4.2-8	状態オプションの違いによる定常湧水量の比較（Through-type）	3-37
図 3.4.2-9	状態オプションの違いによる定常湧水量の比較（Dead-end-type）	3-37
図 3.4.2-10	湧水量への影響検討用解析モデル	3-38
図 3.4.2-11	メッシュ分割の違いと湧水量の経時変化の比較	3-39
図 3.4.2-12	EDZ 考慮における不飽和領域の経時変化（case9b）	3-40
図 3.4.2-13	解析モデルの概要	3-41
図 3.4.2-14	EDZ 考慮における飽和度分布の経時変化（case9b'）	3-42
図 3.4.2-15	処分坑道再冠水時の全水頭断面分布の経時変化（case16b : Dead-end-type）	3-43
図 3.4.2-16	EDZ を考慮したケースの再冠水解析における全水頭分布の経時変化図 （case19b）	3-44
図 3.4.2-17	EDZ を考慮したケースの再冠水解析における飽和度分布の経時変化図 （case19b'）	3-45

図 3.6-1	回収可能性の維持についての検討に関する 5 ヶ年計画の見直し	3-52
---------	--------------------------------------	------

表 目 次

表 2.4.3-1	吹付け部の平均乾燥密度	2-17
表 2.4.3-2	吹付け試験の結果	2-18
表 2.5.4-1	切削距離確認試験結果一覧	2-24
表 3.2.2-1	委員名簿（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）	3-5
表 3.2.2-2	本検討会で議論の対象として抽出した 13 の検討項目	3-5
表 3.2.2-3	検討会における検討の経緯	3-6
表 3.3-1	R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目	3-10
表 3.3.1-1	定量化に必要な技術の現状整理（その 1）	3-12
表 3.3.1-2	定量化に必要な技術の現状整理（その 2）	3-13
表 3.3.1-3	影響評価における解析技術等の取り組み状況	3-14
表 3.3.2-1	回収可能性維持を考慮した場合の技術要件の具体例（その 1）	3-19
表 3.3.2-2	回収可能性維持を考慮した場合の技術要件の具体例（その 2）	3-19
表 3.3.2-3	回収可能性維持を考慮した場合の技術要件の具体例（その 3）	3-20
表 3.3.2-4	回収可能性維持を判断するための指標例	3-21
表 3.3.3-1	定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術および回収技術に関する 研究課題	3-23
表 3.4.1-1	埋戻し材の坑道変形に対する支持効果に関する解析ケース	3-26
表 3.4.1-2	吹付けコンクリートの剛性変化の速度を変えた解析ケース	3-27
表 3.4.2-1	設定した物性値	3-33
表 3.4.3-1	化学的影響の検討対象となり得る項目	3-46
表 3.4.3-2	検討対象となる項目のまとめと次年度以降の取り組み	3-47

第1章 はじめに

1.1 事業概要

1.1.1 事業名

平成29年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業
可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発

1.1.2 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、国や研究開発機関等が、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の改定[1]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。

回収技術については、今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年度から24年度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）[2]~[7]及び平成23年度から26年度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）[8]~[11]において、操業における中核技術として、遠隔搬送・定置に関する技術調査や要素試験、さらには地上での適用試験などを通して、地質環境条件及び様々な処分概念への対応を踏まえ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塩水を利用した緩衝材除去技術について、地上施設における緩衝材除去試験を実施することにより適用性の検討を実施してきた。

さらに、人工バリア材料や処分場の操業に係る工学技術の実現性、操業技術、回収技術等を対象とした人工バリア材料等を用いる実規模施設を資源エネルギー庁の委託事業（具体的には、平成20年度から25年度まで実施した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））において整備してきた。これまでに開発してきた回収技術の高度化という観点においては、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、本事業は、可逆性・回収可能性の意義、処分プロセスや処分システムの安全性への影響等の社会・技術の両面での検討、これまで開発してきた搬送定置や緩衝材除去技術の地下での適用性確認、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通じて、国民の地層処分技術に関する安心感の醸成や可逆性・回収可能性に関する最終処分政策への反映に資するとともに、将来世代に対し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及び我が国における可逆性・回収可能性の概念や技術の整備を目的とする。

1.1.3 平成29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[12]で進められており、平成29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つの検討・研究開発項目を実施する。さらに、地層処分実規模試験施設の運用等を念頭に置き進める。

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(Prefabricated Engineered barrier system Module)－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対象については、地下での実証試験に向け、各々の開発計画を随時更新し、装置の設計・製作、地上での確認試験等を平成28年度に引き続き実施する。なお、製作にあたって、平成28年度までに製作した装置や部品は、資源エネルギー庁から提供を受けるものとする[13]。

1) 地下環境での実証試験サイトの整備

幌延深地層研究センター地下350m調査坑道に位置する試験坑道2に、平成28年度に整備した地下実証試験サイトについて、平成28年度に引き続き実証試験に必要な電源等の整備・維持管理を実施する。また試験坑道2の内空形状等のデータを取得し地下環境での実証試験計画に反映する。

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、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、機能確認試験を継続して実施する。平成28年

度までに製作した設備を用いて、地上に構築したコンクリート模擬坑道面でのPEMの定置・回収試験を実施する。また試験坑道2に構築した坑道面でエアベアリングの要素試験を実施し、坑道面に対するエアベアリングの浮上・走行特性を取得し、実証試験装置及び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、PEMの上部開放部と下部狭隘部に対して、充填技術の整備を行う。上部の開放部に適用する吹付け技術については、目標とする配合、乾燥粘土密度等を達成するため、吹付け材料の性状調査や予備試験等を実施し、適切な吹付け条件を取得するとともに、地下での充填試験に向けた装置の設計・製作等の試験の準備を実施する。下部の狭隘部に適用する充填技術については、これまでの充填要素試験の成果に基づき、地下実証試験に向けた装置の設計・製作を行う。また除去試験の対象となる充填部の品質確認技術についても検討を継続する。

隙間充填材の除去技術については、充填材料の性状に対応した除去技術の検討を継続して実施する。平成28年度に小型供試体を用いて実施したウォータージェット方式による充填材の切削試験の成果を踏まえ、切削条件等を具体化するための試験を実施する。またPEMから離れた部分の機械的な方式による除去技術についても検討を行う。これらを元に、幌延深地層研究センターで除去する充填部の大きさや形状を考慮した実証試験装置の設計・製作、除去副産物の処理方法等を具体化する。

3) 地層処分実規模試験施設の運用

資源エネルギー庁の地層処分実規模施設整備事業で整備した地層処分実規模試験施設を運用する。なお、運用にあたっては、平成27年度に策定した全体計画を基に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

特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針で明示された、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地質環境や人工バリアへの影響等についての調査研究として、平成27年度には縦置きブロック方式による定置概念を、平成28年度には横置きPEM定置概念を対象に定性的な検討を行った。

また、平成27年度及び平成28年度に取り組んだ可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理に向けた検討から、様々な処分概念や処分場の埋め戻し状態に対して回収可能性を維持したときの地質環境や人工バリアへの影響について今後定量的な検討を進めていく必要性が示され、以下に示す具体的な技術検討項目案が抽出された。

今後の技術検討項目案

- ①開放坑道の健全性（空間安定性）
- ②廃棄体からの熱影響
- ③埋め戻した坑道の再利用時の健全性（一度埋め戻した支保や覆工等の回収時における再利用の可否）
- ④再利用する坑道内の作業環境の制御性（既に存在する廃棄体の周囲の坑道再掘削に伴う湧水環境対策や放射線環境制御の可否）

- ⑤回収時の廃棄体容器の健全性
- ⑥回収可能性維持期間中の人工バリアや地下構造物の機能劣化（坑内の酸化性雰囲気継続、廃棄体からの熱影響ならびに坑道開放期間中の地下施設の湧水/水理環境に伴う機能劣化）
- ⑦回収維持期間中の坑道開放に伴う母岩への擾乱影響
- ⑧回収時間の短縮に向けた回収技術・装置の高度化
- ⑨回収作業手順の具体化（合理的な回収作業を考慮した施設レイアウト設計や坑道寸法設計等の工学的対策を含む）

平成29年度は、平成27年度及び平成28年度に取り組んだ可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理に向けた検討で得られた成果を取りまとめるとともに、上記の技術検討項目案のうち、①開放坑道の健全性、③埋め戻した坑道の再利用時の健全性ならびに⑥回収可能性維持期間中の人工バリアや地下構造物の機能劣化について、次の1)及び2)の観点から検討を進める。

1) 回収可能性維持期間の検討

回収可能性の維持期間に関連する事象の抽出と評価方法について処分場の成立性の観点を含めてまとめ、回収可能性維持のための技術要件についての考え方を検討する。また、回収維持技術、回収技術及び影響低減技術について現状の技術を基にまとめ、研究課題を抽出する。また、定量的評価によって、例示される回収可能性維持の期間に対する情報を基に、期間の決定のための評価基準について検討する。

2) 回収可能性維持期間の影響に関する定量的評価

平成28年度の検討を参考に、さらに水理的な評価を行う方法について具体化し、回収維持期間の坑道開放の影響の評価方法を示す。また、得られた結果を影響評価のためにさらに必要となる定量方法を具体化し、解析的評価方法を検討する。

3) 可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理

平成28年度までの検討結果に関して報告書として取りまとめる。報告書の内容、公表の方法、時期に関しては資源エネルギー庁の担当者と調整の上、実施する。

1.1.4 報告書の構成

本事業の実施内容は1.1.3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1章 参考文献

- [1] 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>.
- [2] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成19年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第1分冊）、2008年3月
- [3] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成20年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第1分冊）、2009年3月
- [4] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成21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）、2010年3月
- [5] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成22年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第1分冊）、2011年3月
- [6] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成23年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第1分冊）、2012年3月
- [7] 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）、2013年3月
- [8] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成23年度地層処分技術調査等事業 地層処分回収技術高度化開発 報告書、2012年3月
- [9] 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 地層処分回収技術高度化開発 報告書、2013年3月
- [10] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成25年度地層処分技術調査等事業 地層処分回収技術高度化開発 報告書、2014年3月
- [11] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成26年度地層処分技術調査等事業 地層処分回収技術高度化開発 報告書、2015年3月
- [12] 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、2016年3月
- [13] 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（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、2017年3月
- [14] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成28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年3月
- [15] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成28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年3月

第2章 地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発

2.1.1 背景および目的

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。これらに必要な個別の要素技術については第1章で述べたように、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。

2.1.2 これまでの成果

本事業の初年度である平成27年度に、本事業での対象とする高レベル放射性廃棄物の定置概念の検討を実施した[1]。わが国で検討されている処分孔縦置き定置方式と処分坑道横置き定置方式に対して、これまでに基盤研究で実施された遠隔搬送・定置技術や回収に係る工学技術が整備されてきた。「処分孔縦置き定置方式」については、地層処分実規模整備事業において実規模、実物の緩衝材ブロックの定置設備を整備し、真空把持装置の適用性やブロックの定置精度等の知見を得た[2]。また地層処分回収技術高度化開発において緩衝材除去システムを整備し、地上での実規模スケールでの実証的検討を行い、塩水を利用した緩衝材の除去に要する時間や塩水リユース設備の効率など実証的な知見を得た[3]。「処分坑道横置き定置方式(PEM) (Prefabricated Engineered barrier system Module)」については、地上施設で鋼殻に包まれた人工バリアを鋼殻容器ごと地下に搬送して、掘削した処分坑道に定置する処分方法である。PEMは直径約2.3m、長さ約3.3mの円筒型で、重量が約36.5tonである。処分システム工学要素技術開発において、PEMの製作、狭隘部での搬送・定置が可能なエアベアリング技術について実規模スケールでの要素試験、ペレット方式によるPEM-坑道間の隙間充填技術の検討が行われている[4]。一方、隙間充填材の除去やPEMの回収など、回収工程の要となる技術については未整備であることから、粘土系材料である隙間充填材を除去した後に想定される環境での走行試験や、回収作業を行うための前工程である隙間充填材の除去技術への要求項目の抽出等、工程の繋がりに留意した課題の設定、対策の検討、実証試験が必要である。

本事業において平成27年度に策定した回収の実証試験計画では、処分坑道横置き定置方式(PEM)について、地下で実証を行う。その際、上述した未整備の技術について、適宜、装置開発や特性に係る要素試験を積み重ねつつ取り組む計画とした。

(1) 地下実証試験サイトの整備

地下環境での回収実証試験を実施する場所として、平成 27 年度に日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター（以下「幌延 URL」という。）地下 350m に位置する試験坑道 2 を実証試験サイトとして選定した。試験坑道 2 は内径が約 4m、奥行きが約 25m の円形断面を有する。この坑道内で後述するエアベアリング方式の定置装置による PEM の回収試験を実施するため、鉄筋コンクリート製の組立台を現場打設で施工し、プレキャスト製の台座を設置した。



図 2.1.2-1 幌延 URL 試験坑道 2 の整備状況

(2) エアベアリング方式の定置装置の実証的整備

狭隘な坑道での PEM の搬送・定置に適用可能な技術として、エアベアリング方式による円形坑道上での重量物の運搬について検討されている[4]。本事業では定置技術を逆動線で使用して PEM を回収する計画とした。平成 28 年度までに、10 枚のエアベアリングを有する定置部、定置部を坑道内で移動させるためのモーターを有する搬送部、試験坑道内で遠隔にて装置を運転するための各センサー類・操作卓を製作した。地上に準備した鋼製模擬坑道にて、理想的な環境下での装置の走行特性を取得した。

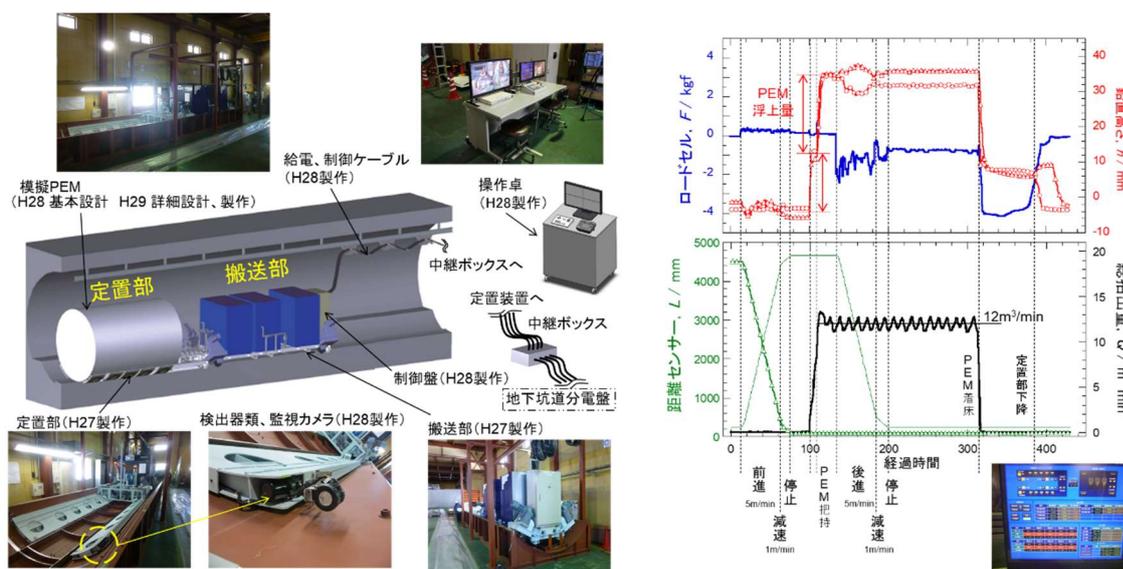


図 2.1.2-2 エアベアリング方式による定置装置の整備状況

(3) 隙間充填技術の実証的整備

処分坑道横置き方式（PEM）の回収は、隙間充填材の除去と PEM の坑道外への搬出が主たる工程となるため、回収の実証試験の対象として、定置された PEM および PEM-坑道間に隙間充填材が適切に施工された状態を構築する必要がある。既往の検討では、隙間充填材に緩衝材相当の粘土密度（ 1.37Mg/m^3 ）が求められており、15cm 程度の狭隘な隙間に対してペレット方式の適用性が示されている。また類似するペレットの移送技術として、遠隔操作技術高度化調査で実施したスクリー方式による緩衝材の施工試験がある。これらの成果の本事業への応用可能性を検討したうえで、隙間充填材の施工方法としてスクリー方式によるペレット充填を採用した。

平成 28 年度は PEM-坑道間の隙間充填技術については、充填材となるペレットの製造試験、充填材の配合、充填部へのペレットの移送試験、および充填部の品質管理方法の検討を実施した。実証試験サイトである試験坑道 2 内に定置した PEM の周囲の充填体積は大きく、大量のペレットが必要となることから、ブリケット法による高圧縮ペレットの製造試験を実施した。その結果、大きさ $20\text{mm}\times 30\text{mm}$ 、乾燥密度 2.0Mg/m^3 のペレットを効率よく製造出来ることを確認した。充填材の配合については確実に充填部の密度を達成するため、ブリケット法により造粒したペレットに 2mm 以下のクニゲル GX を重量比で 30%混合させた材料配合案を得た。

充填部が目標の密度を達成していることを非破壊で確認するため、誘電率計を用いて水分量から密度を計測する技術の検討を行い、適用の見通しを得た。これらの知見より、スクリーフィーダの配置等の装置の計画を進めていく。



図 2.1.2-3 ペレット充填方式による隙間充填技術の整備状況

(4) 隙間充填材除去技術の実証的整備

隙間充填材の除去技術については、まず除去作業の各工程で重要となる技術を抽出し、計画を具体化した。坑道において隙間充填材で覆われた状態の PEM を回収するために、充填材の除去技術に求められる要件は、充填材による PEM 拘束力の解放、回収装置が動作する環境の実現である。そのための充填材の除去工程は、①PEM-坑道間に密実に施工された充填材を掻き出すことが出来る状態とする“ほぐす”工程（副産物化）、②ほぐした充填材（副産物）を PEM-坑道間の隙間から掻き出す工程、③副産物を搬出装置に積込む工程、④坑道外への搬出の 4 つの主要な工程から構成され、①～④を PEM が搬出可能な状態になるまで行う。このうち除去作業の要とな

る①について、除去対象部分の形状、地下で確保可能な作業空間、PEM への影響等に留意し、機械的除去と水理的除去の組合せによる除去作業を計画した。

水理的除去については、回収技術高度化開発において、処分坑道竖置き定置方式に対して塩水を用いた緩衝材のスラリー化、吸引による除去、固液分離による塩水の再利用技術等の検討・実証試験を行った。本事業で対象とした処分坑道横置き定置方式 PEM では、塩水を溜めて充填材を浸漬することが出来ない、除去対象の物量が多いといった点が処分孔竖置き定置方式とは異なるため、除去に利用する流体の圧力を高めたウォータージェットによる充填材の切削要素試験を選定した。ウォータージェットによる充填材の切削性、充填材の飽和度や施工方法の影響、切削水（淡水／塩水）の影響等を調査するための予備試験を実施した。その結果、飽和度の高い充填材の除去が可能であり、同一飽和度であれば切削供試体の製法（締固め／ペレット充填）に因らず、切削効率は変わらないことを確認した。ウォータージェットは流体の運動エネルギーで対象物を切削するため、切削水の性状は効率に影響しないが、切削水に塩水を用いた場合は副産物がスラリー化し易く、除去工程のうち②～④が煩雑になることが懸念された。以上の結果より、水理的除去では除去後の工程や地下環境への影響が小さいことを加味し、切削水に淡水を用いることとした。予備試験で用いた 20MPa の水圧では、PEM の鋼殻と同様の素材である鋼製容器への影響は確認されないが、使用するノズルや噴射条件によってはコンクリートの表面性状が低下する恐れが示唆された。これは回収作業を行うエアベアリング方式の定置・回収装置の走行面に影響するため、ウォータージェットの噴射方向等を今後検討する予定である。

機械的除去については、一般的なトンネルや土木工事で使用される掘削技術の整理を行った。

今回の試験や整理結果を踏まえ、水理的な方法と機械的な方法を組み合わせ、試験坑道における充填材の除去技術について、①～④の一連の除去工程で必要となる技術の整備を進めていく。PEM-坑道間の隙間充填材について、これまでの基盤研究では、充填材に緩衝材相当の膨潤圧を持たせ、鋼殻内の緩衝材の膨出を抑制する方式について、ペレット方式の検討が進められてきた。一方、十分に飽和していないペレットでは、除去工程で重要となる①の工程が実証試験上不要となる。回収の実証試験の意義の観点からも、充填材の施工技術の見直しを含めた検討、技術の整備を進める。

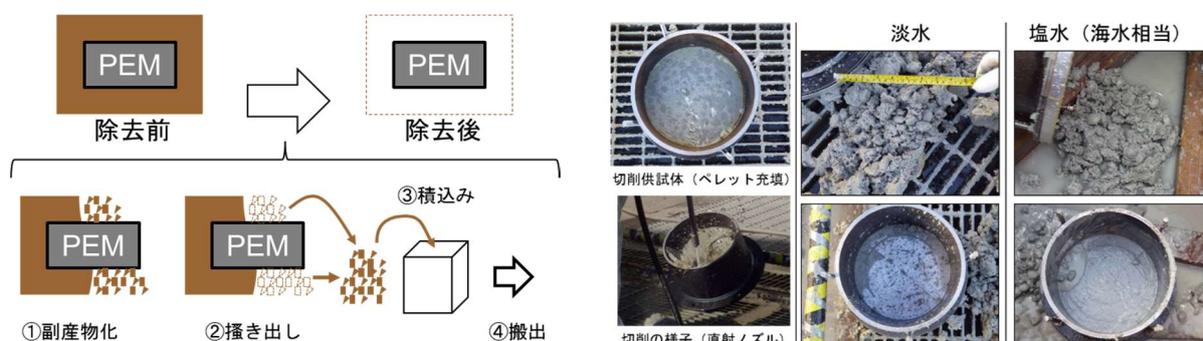


図 2.1.2-4 隙間充填材除去の作業手順の具体化、ウォータージェットによる切削予備試験

(5) 地層処分実規模試験施設の活用

地層処分実規模試験施設について、来館者への説明、試験の公開を継続して実施した。

2.1.3 平成29年度の実施内容

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対象については、地下での実証試験に向け、各々の開発計画を随時更新し、装置の設計・製作、地上での確認試験等を平成28年度に引き続き実施した。

地下環境での実証試験に向けた全体工程については、予定される5年間のなかで確実に実施するため、図2.1.3-1示すように各試験項目の実施順を見直し、平成30年度に試験坑道内へのPEMの設置と隙間充填の実施、平成31年度に充填材の除去とPEMの回収試験を行った後に、PEMの搬送・定置試験を実施する計画とした。

- (1)地下実証試験サイトの整備
- (2)搬送定置・回収技術の実証的整備
- (3)隙間充填技術の整備
- (4)隙間充填材除去技術の整備
- (5)地層処分実規模試験施設の活用

URLでの実証試験	H27	H28	H29	H30	H31
地下施設の整備 影響調査・維持管理	実証サイトの選定 設備の設計	地下設備施工 環境影響調査	維持管理・保守点検・資機材搬入出	組立台・支保のひずみ、応力計測	(撤去)
			組立台・支保のひずみ、応力計測		
PEMの定置	搬送定置装置 設計・製作	搬送定置装置 製作・機能確認	模擬PEM製作 → PEM設置		定置
PEM周辺の充填 下部狭隘部	予備試験	充填装置の設計・製作 充填部品質管理方法	技術整備 →	充填試験	
PEM周辺の充填 上部開放部	予備試験	充填装置の設計・製作 充填部品質管理方法	吹付け要素試験 → 吹付け試験準備	充填試験	
充填材の除去	検討	除去装置の設計	除去技術の検討 対象:吹付け →	除去技術整備	除去
PEM本体の回収	搬送定置装置 設計・製作	搬送定置装置 製作・機能確認	装置整備 要素試験@地下 →	定置(回収)装置整備	回収

図 2.1.3-1 地下環境での搬送定置拐取技術の高度開発 年度展開

2.2 実証試験施設の整備（第2分冊：第2章）

2.2.1 実施概要

エアベアリング方式による定置装置を用いた PEM の回収試験を地下で実施するため、平成28年度に試験坑道2に整備した組立台の形状計測等を実施し、走行面の性状、隙間充填部の形状を取得した。また、実証試験が既設坑道や周辺環境に及ぼす影響を評価するため組立台施工時に設置したコンクリート応力計と鋼製支保工応力計を用いた評価のベースラインとなるデータを継続的に取得した。さらに、地上にてコンクリート打設面上での定置装置の試験を実施するための設備を整備した。

2.2.2 地下調査施設の性状調査

平成28年度に幌延 URL 試験坑道2に整備した組立台等の地下実証試験設備について、定置装置が走行する組立台の状態や、隙間充填材を施工する坑道内の体積の見積り等に資するための性状調査を実施した。

試験坑道2の内空形状を、図 2.2.2-1 のように3D レーザースキャナを用いて点群の情報として取得した。また、現場打設したコンクリート製組立台に対しては、打設後の時間の経過とともにクラックの発生や進展が予想されるため、前述のレーザースキャナでは計測出来ない規模のクラックの存在や、幅などの性状を目視によって確認、記録した。



図 2.2.2-1 3D レーザースキャナによる試験坑道2の内空形状の取得

2.2.3 模擬 PEM の設置

本事業における地下環境での実証試験は図 2.1.3-1 に示したように、平成30年度に PEM と坑道間に隙間充填材を施工する工程から開始する。回収試験で対象とする PEM は、過年度の PEM の製作技術の検討で示された鋼殻リング方式の PEM の寸法、重量、重心を再現し、鋼殻内部の緩衝材やオーバーパックは省略した厚板構造とした（以下「模擬 PEM」という。）。幌延 URL への搬入、地下坑道でのハンドリング等の制約を考慮して分割構造としたものを試験坑道2内に設置した。処分坑道横置き定置方式での坑道に連続的に PEM が定置されている状態を再現するため、模擬 PEM と坑道妻壁間には外径を PEM に合わせた“疑似 PEM”設置した（図 2.2.3-1）。

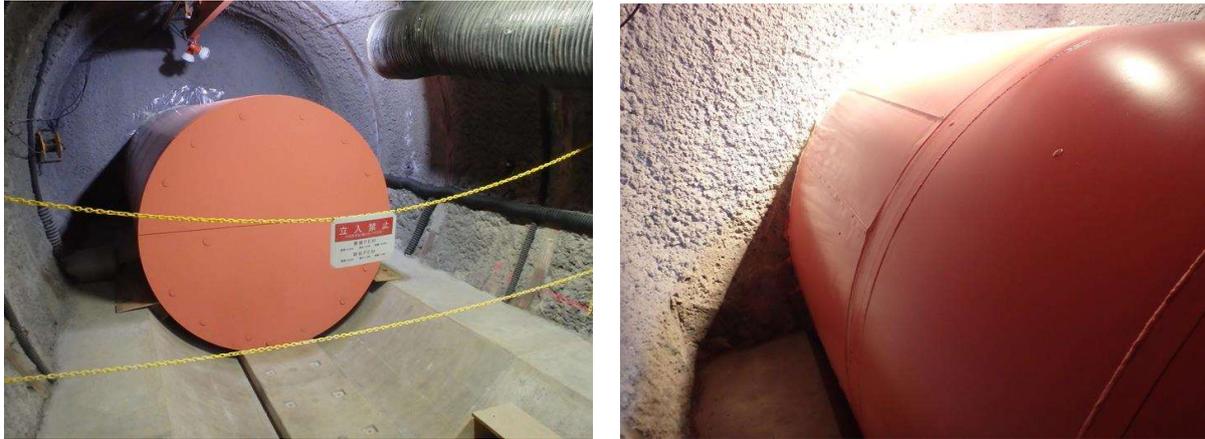


図 2.2.3-1 試験坑道 2 に設置した模擬 PEM、妻壁部の疑似 PEM

2.2.4 地下環境への影響

PEM の重量はオーバーパック、緩衝材、鋼殻を含めると約 36.5t となる。この重量部を試験坑道内で搬送・定置した場合に坑道へ与える影響を評価するため、平成 28 年度に実施した地下実証試験サイトの整備では、コンクリート応力計、鋼製支保工応力計を設置した。



(a)コンクリート応力計

(b)鋼製支保工応力計

図 2.2.4-1 試験坑道 2 に整備時に設置した応力計（平成 28 年度実施）

これらの応力計は台座上に設置される模擬 PEM や坑道内に施工される隙間充填材の重量、回収装置の移動による坑道等の周辺環境への影響評価に資する検証データとなる。本年度設置した模擬 PEM、次年度に施工予定の隙間充填材の施工時の応力計の挙動を記録し、数値解析による周辺環境への影響の再現解析の結果と今後参照していく。

2.2.5 地上実証サイトの整備

平成31年度に実施を予定する地下環境で PEM の回収試験に先立ち、隙間充填材を除去した後のコンクリート坑道面におけるエアベアリングの走行特性、運転パラメータを取得するため、地上での試験を計画した。幌延 URL 試験坑道2において現場コンクリート打設で施工した組立台とプレキャスト製の台座と同じものを地上建屋内に整備した。

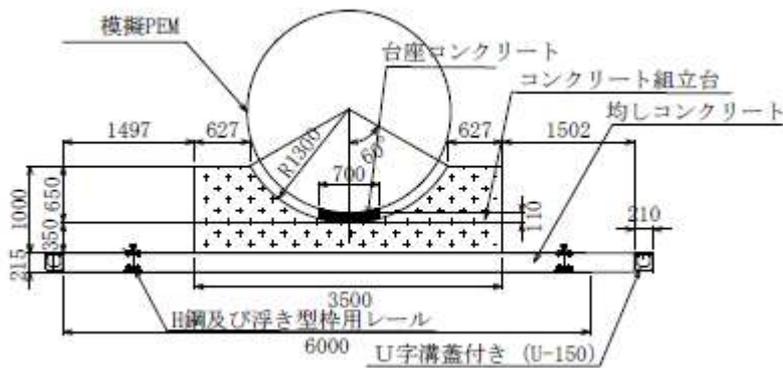


図 2.2.5-1 地上実証試験サイトの断面模式図



図 2.2.5-2 地上建屋内に整備したコンクリート走行面

2.3 搬送定置設備の実証的整備（第2分冊：第3章）

2.3.1 実施概要

本事業では、処分坑道横置き定置方式PEM方式を回収試験の対象とした。PEM-坑道間の隙間充填材の除去後のPEMの回収作業には回収専用機ではなく、狭隘な円形坑道での搬送・定置技術として開発されたエアベアリング方式の定置装置を用い、定置の逆動線でPEMを回収する計画である。エアベアリングはゴム製のトーラスバックを備えたものであり動作原理としては、トーラスバックに圧縮空気を送り込むことで膨らむことで品物を持ち上げると同時に、トーラスバックと走行面間に漏れ出る空気が膜を形成することで流体潤滑作用により摩擦を低減し、重量物を小さな力で移動させることを可能とするものである。一般的に工場内での輸送や、プラント建設での重量物の据付作業等に用いられる。エアベアリングの最大の利点として薄さが挙げられる。圧縮空気を送り込む前の畳まれた状態では数センチ程度の厚さであり、搬送対象の下に潜り込ませる際の隙間が僅かで済む。先述の円形坑道へのPEMの定置に適用した場合、PEMの外周に150mm程度の隙間があれば挿入可能であり、これは定置坑道の直径を小さくすることが可能で地層処分施設の工費の削減に貢献する。一方、動作の原理上、薄い空気膜を維持する必要があるため、走行面の性状に性能が大きく左右される。エアベアリングを適用することで得られる坑道直径の縮小と、エアベアリングを適用させるために坑道内壁への手当、すなわち、定置装置と処分坑道、機械技術と土木技術の折り合いが、エアベアリング機構の処分事業への適用時の鍵となる。本事業では、平成31年度に幌延URLにおけるPEMの回収試験に向けた、定置装置の整備を行うとともに、エアベアリングの地層処分事業への適用性評価に資する知見を取得することを目的とした。

2.3.2 エアベアリング方式の開発ステップ

エアベアリングは一般に平坦な走行面での搬送作業に適用される。平成15年度より、円形坑道のような曲率を有する面を対象とした試験を進めてきた[5]。これまでに、表面の凹凸等の欠陥や粗さが小さく均一な理想的な走行面である鋼製模擬坑道面での基本的な走行特性や、プレキャスト製のコンクリート坑道面での走行特性を取得する要素試験を実施し、走行面に欠陥やざらつきが無い環境では適用出来る技術であることを確認した。このエアベアリング機構を地下環境での回収試験に適用するためには、現場で打設されたコンクリート面での走行、充填材を除去した後の坑道面での走行、作業安全の確保が必須となる。平成31年度にこれらの項目を実現した定置装置で回収試験を実施するため、図2.3.2-1に模式的に示す開発ステップで整備を進めた。平成28年度までに、エアベアリング機構を有する定置部、定置部を前後に走行させる動力を有する搬送部、作業安全のためそれらを操作する遠隔操作部から成る定置装置（以下、実機という。）を製作した。本年度は、平成28年度に幌延URL試験坑道2にて現場打設にて整備した組立台上でのエアベアリングの走行特性を取得し、実機の走行特性の予察、運転パラメータの取得、地下での適用性を向上させるための改良点の洗い出し等、回収実証試験に向けた整備を進めるとともに、エアベアリングの適用性評価に係る知見とした。

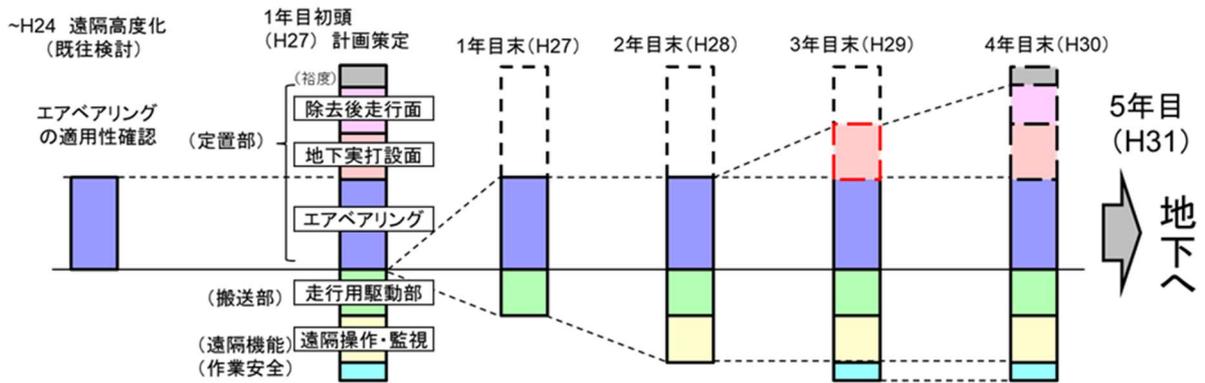


図 2.3.2-1 定置装置の開発ステップ模式図

2.3.3 エアベアリング要素試験装置

試験坑道 2 に整備した組立台上で実機が機能することを確認する手段として、最も説得力がある方法は、実機を持ち込み実際に作動させることである。しかしながら、地下への実機の搬入は大掛かりになる上、走行可能／不可能が確認出来るのみで、エアベアリングの適用性を把握するデータとしては不十分である。そこで、実機と同じエアベアリングを有する簡易的な要素試験装置を製作し、試験坑道 2 での走行試験を行った。

要素試験装置はエアベアリングの特性を把握するためにトーラスバックを最小限の 4 枚とし、エアベアリング毎に流量計と圧力計を取り付け、走行時の空気の消費状況を把握できるようにした。装置の四隅には坑道面からの高さを計測するための距離計を設け、走行時の浮上高さや姿勢を記録した。坑道内で要素試験装置は坑道妻側と坑口側に取り付けたウインチの牽引により走行し、ロードセルで牽引力、坑道に設置した距離計で坑道内の絶対値（装置位置）を記録した。これらの計測はデータロガーで逐次サンプリングし、試験坑道面の性状と比較・評価することが出来る。図 2.3.3-1 に試験坑道 2 に設置した要素試験装置を示す。

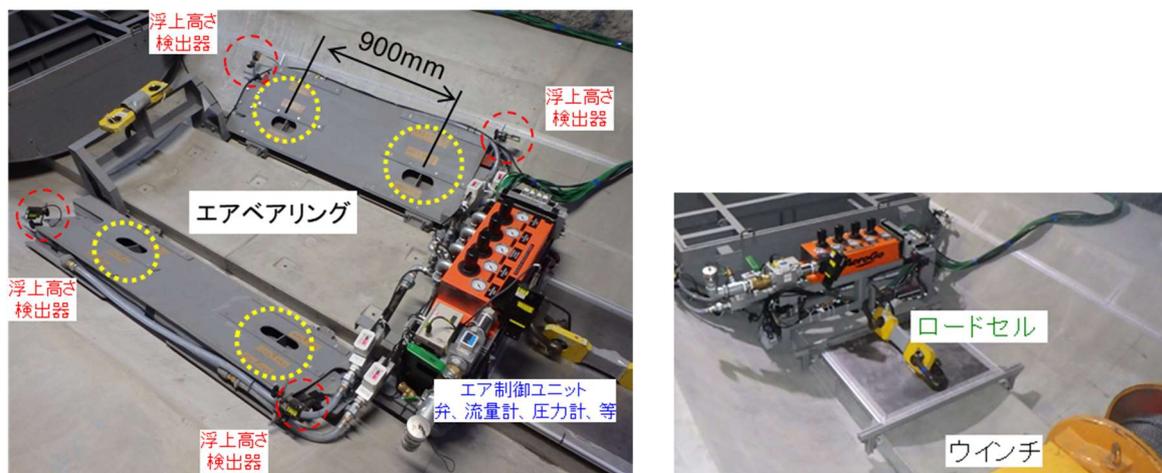


図 2.3.3-1 エアベアリング要素試験装置

実機のエアベアリング枚数は 10 枚で取り扱う模擬 PEM の重量は約 36.5 t であり、エア

ベアリング一枚当たり約3.65tを支える。要素試験装置へは一枚当たりの重量が実機と同様になるよう約14tのウェイトを載荷した。地下での試験に先立ち、地上にて鋼製模擬坑道面を用いた走行試験を実施した。平成28年度までに鋼製模擬坑道面で取得した実機の走行特性と比較し、要素試験装置が実機の特性を再現していることを確認した。

2.3.4 地下での要素試験

試験坑道2に要素試験装置を設置し、所定の重量を載荷した試験を実施した。実機では搬送部上のコンプレッサーから圧縮空気が供給されるが、要素試験では地下施設の既設圧空設備からの供給とした。図2.3.4-1に幌延URLでの要素試験の様子を示す。



図 2.3.4-1 幌延URL試験坑道2での要素試験の様子

要素試験では地上の鋼製模擬坑道で取得した運転パラメータを初期の設定値として試験を実施した。鋼製模擬坑道で走行可能な条件であった浮上高さ40~45mmとなる条件では走行面の気泡痕や粗度の影響で姿勢や浮上高さが安定せず、安全に搬送出来なかった。原因として、表面性状の悪化により空気の過大な漏れ等で空気膜が維持できないことが示唆された。そこで、空気量を増やしながらか走行試験を実施した結果、浮上高さが50~55mmになる条件で、組立台上全区間を走行出来ることを確認した。図2.3.4-2に浮上高さ55mmの条件での走行時に取得したデータの例を示す。試験坑道2の全区間で数往復の走行試験を実施した結果、供給圧力は約0.35MPa、全体空気の消費量が10.3m³/分であった。4枚のエアベアリングを備える要素試験装置においてPEM相当の重量部の搬送時に約2.6m³/分/枚の圧縮空気を消費することから、10枚のエアベアリングを備える実機の空気消費量を見積ると約30m³/分以上となる。走行試験時の牽引力は3.8~5.7kNであり、鋼製模擬坑道面上での牽引力と比較して若干高い値となった。

要素試験では、載荷重量を2t、26、14tの3種、牽引速度5m/分、3.5m/分の2種類で実施し、実際の現場打設面に対するエアベアリングの走行特性の評価に資するデータも併せて取得した。

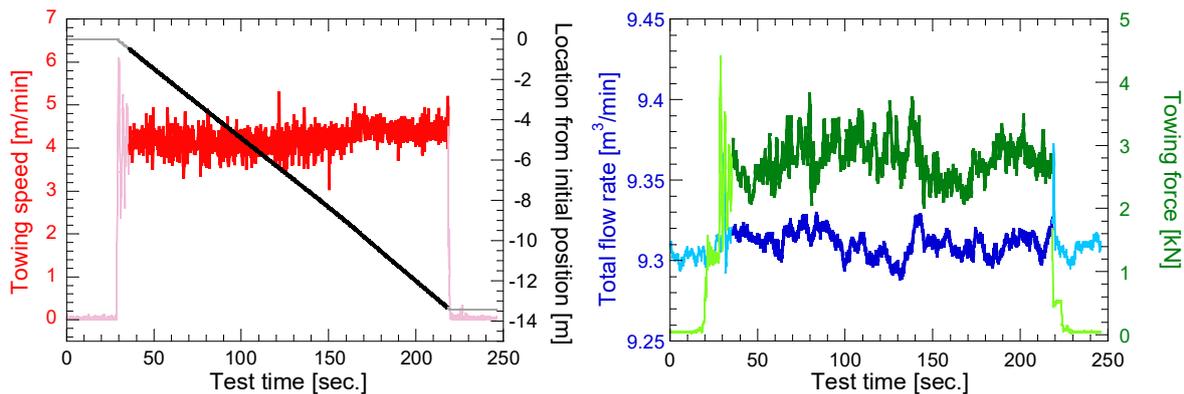


図 2.3.4-2 地下での要素試験時の取得データ
(浮上高さ設定値 55mm、試験総荷重 14.955t、牽引速度 5m/分、全区間)

地下での要素試験の結果、理想的な鋼製模擬坑道面と実打設面における走行特性の差が明らかになった。始動時／停止時の非定常な状態を除いた定常時の走行特性（図 2.3.4-2 中では濃い色で示した区間）をまとめ、载荷重量と装置重量の総和に対して整理すると図 2.3.4-3 のような傾向が得られた。牽引力は始動時、流量は走行面の影響を受けるため、地下での要素試験の結果の分析を進め、実機の運転パラメータへの反映、充填材除去後の走行面での特性評価を進めていく。

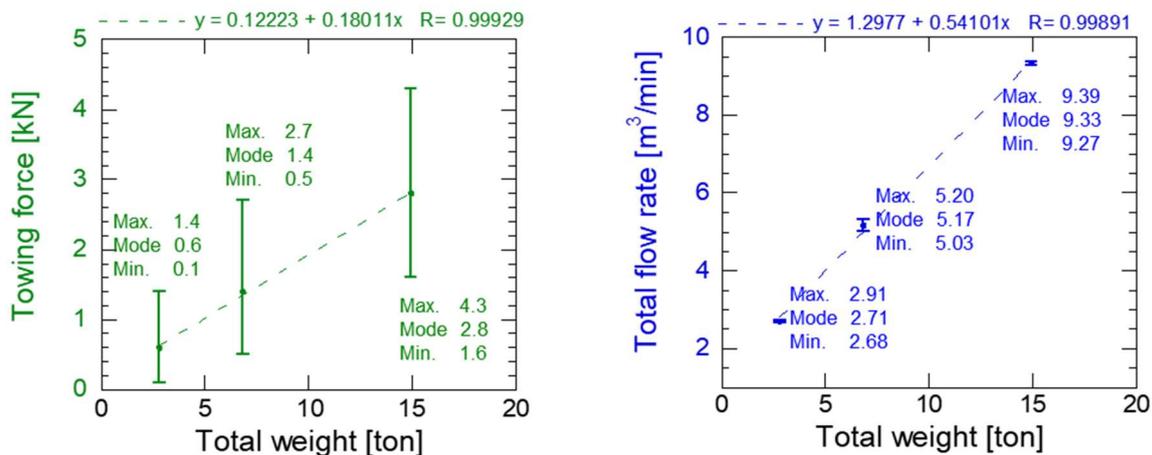


図 2.3.4-3 地下坑道面で定常時の牽引力、空気消費量と試験重量の関係

2.3.5 装置の改良

平成 28 年度までに製作した定置部の各エアベアリングへの流量を遠隔監視するための個別流量計を設置した。また運転者が装置の状態を的確に把握できるよう、浮上高さや流量等の経時変化をグラフとして表示できる機能を付加した。

2.4 隙間充填技術の実証的整備（第2分冊：第4章）

2.4.1 実施概要

処分坑道横置き定置方式(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と坑道の間空間(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[4]。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。本事業のスコップであるPEMの回収技術では、隙間充填材の除去技術が中核となる。隙間充填材の除去技術の実証的整備では、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。

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[4]や吹付け方式[6]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[7]、事業者のニーズ[6]、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/m^3 [4]、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/m^3 [6]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。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を検証することもスコップとした。

2.4.2 下部狭隘部の隙間充填技術の実証的整備

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。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。これまでの狭隘部への充填技術の開発としては、純ベントナイトで製造した真球形状の大小球ペレットを重力落下で充填するものがある。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 30 年度に地下で予定する試験ではこれら充填部の品質に係る項目を充填材の施工プロセスで実現するため、品質管理の観点からプロセス管理に資する知見を取得する試験を段階的に実施した。以下に段階的な充填試験（ステップ 0～ステップ 4）の概要を示す。

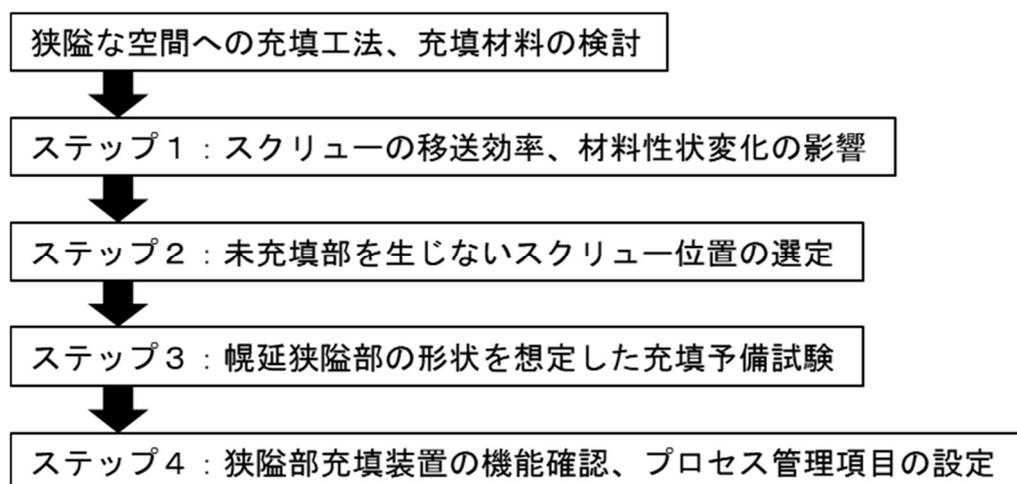


図 2.4.2-1 下部狭隘部の隙間充填技術の整備フロー

(1) ステップ1：隙間充填装置の基本性能確認試験、及び充填材移送前後の性状変化確認

ステップ1では、本試験で狭隘部の充填に採用したスクリーコンベア単体での移送試験を実施した。試験に使用したスクリーコンベアは一度に充填する PEM 周囲の隙間が奥行きを考慮し 7m とした。スクリーの回転数により単位時間当たりの移送量を調整出来ること、コンベア内が空の状態から充填材を投入し、出口からの排出量が定常になるまでの時間を取得した。図 2.4.2-2 にスクリーコンベアの回転数による移送速度を示す。単位時間当たりの移送量としては、17rpm では約 6kg、34rpm では 12.5kg となり、回転速度に依存することを確認した。材料投入後、排出が安定するまでの時間は 17rpm で約 5 分以降、34rpm では 3 分以降であり、一旦内部が満たされた後は、再始動しても安定して排出される。

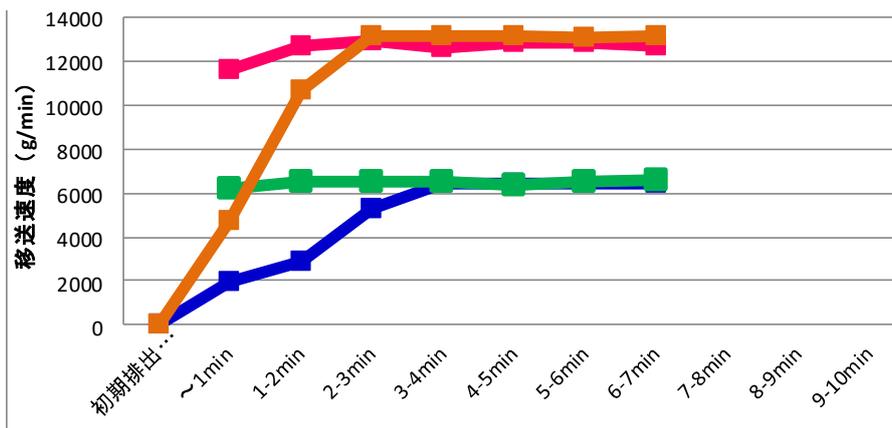


図 2.4.2-2 スクリューコンベア回転数による移送速度の変化

解砕し粒度分布を調整したペレットの移送前後の粒度分布を図 2.4.2-3 に例示する。移送前後で粒度分布が若干大側へ移行するが、大きく変化しないことを確認した。移送前後のかさ密度を比較すると、移送後は若干高くなる傾向がみられた。

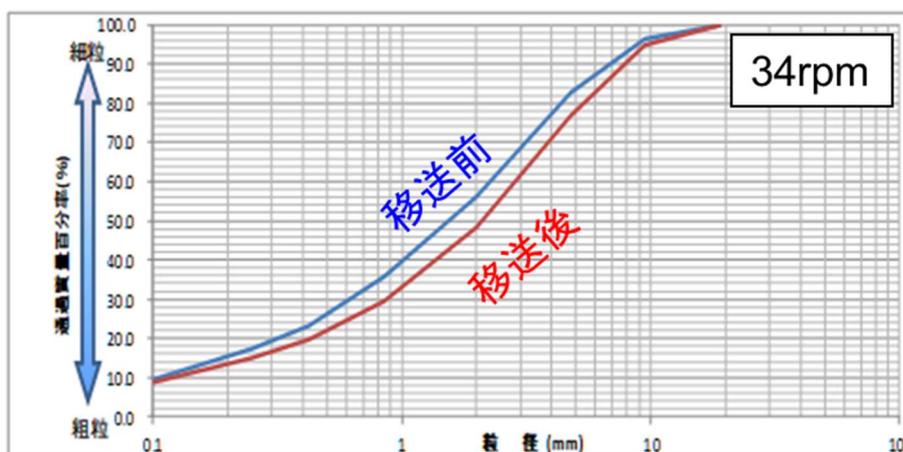


図 2.4.2-3 スクリューコンベアの移送による充填材の性状変化

(2) ステップ2：未充填部を生じないスクリー位置の選定

ステップ2では、未充填部が生じないようなスクリーの配置の検討を実施した。狭隘部の形状を再現した模擬土槽の上部からペレットを流下させると、PEM 鋼殻に相当する内壁にペレットが体積して形成する法面が接触するため、台座付近には図 2.4.2-4 に示すような幾何学的に未充填部が形成される。この未充填部分を解消するため、狭隘部下部にスクリーコンベアを1本追加で配置し、片側の狭隘部に対し上下2本のスクリーコンベアで充填することを基本とした。各スクリーコンベアが担当する充填範囲を検証するため、内壁を透明なアクリルとした模擬土槽を用いた試験を実施し、内壁への接触／非接触を未充填部の形成状況として記録した。また充填部からシンウォールによるサンプリング等でかさ密度を簡易的に取得した。

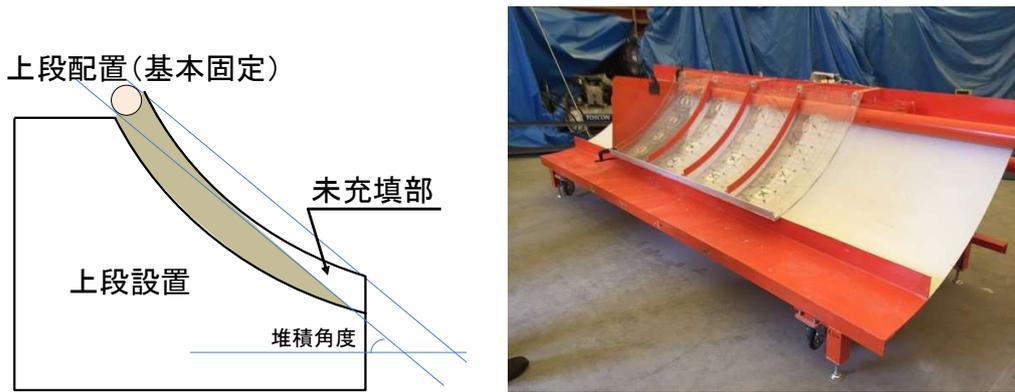


図 2.4.2-4 未充填部の形成部位と試験に使用した狭隘部模擬土槽

図 2.4.2-5 に PEM 右側の狭隘部を想定した充填試験の結果を示す。上段スクリーのみでは下部に青で示した未充填部が、下段スクリーで補完出来ることを確認した。コンベアの回転速度は充填速度のみに影響し、充填／未充填部の形成、密度に顕著な依存性は認められなかった。模擬土槽に対するスクリーコンベアの後退速度については、充填部の体積と移送速度から求められる理論速度よりも若干遅くすることで、密度や分布の差等の充填品質の向上が認められた。また、スクリーコンベアの鋼管に仕切り板を取り付け、手前側への充填材のせり出しを抑制する方が、ペレットの粗粒分と細粒分の分離が少なく、品質管理が容易になることを確認した。

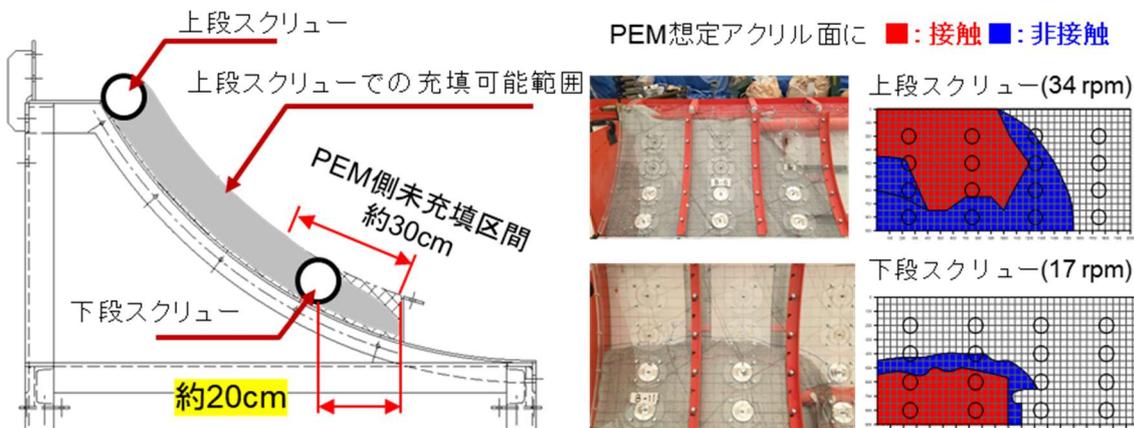


図 2.4.2-5 狭隘部模擬土槽内の未充填部の形成状況（例：PEM 右側狭隘部）

(3) ステップ3：幌延狭隘部を想定した充填予備試験

ステップ2で取得した上下の配置を基に、上段／下段スクリューを同時に作動させ、狭隘部模擬土槽を一括で充填する試験を実施し、上下コンベアの分担の確認、移送速度の設定、充填部の密度を確認した。スクリューの分担範囲はステップ2より上段：下段＝3：1を基本とし、上段スクリュー回転速度を固定し、下段スクリューの回転速度を調整した（図 2.4.2-6）。また効果が認められたスクリューパイプへの仕切り板は全試験で採用した。

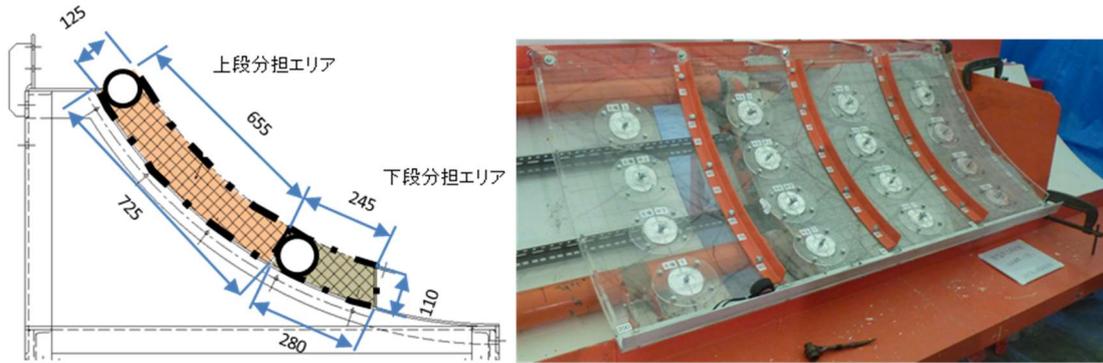


図 2.4.2-6 模擬土槽内でのスクリュー配置、および分担範囲

図 2.4.2-7 に PEM 左側の狭隘部を模し、上段スクリューを 34rpm、下段スクリューを 13.7rpm で作動させた場合の模擬土槽内の充填状況、および密度分布を示す。上下2本スクリューにより全断面を充填出来ることを確認した。シンウォールによる密度分布計測の結果、長手方向では差が見られないが、上側の密度が低くなる傾向がある。これは蓋がない模擬土槽の上から充填材が逃げってしまうため、スクリューの押し込み効果が得られないことに起因すると考えられる。ステップ4での充填装置の動作確認試験、及び幌延 URL での充填試験では、上部への充填材の逃げを防止するための蓋を仮設する等の対策を講じることとした。

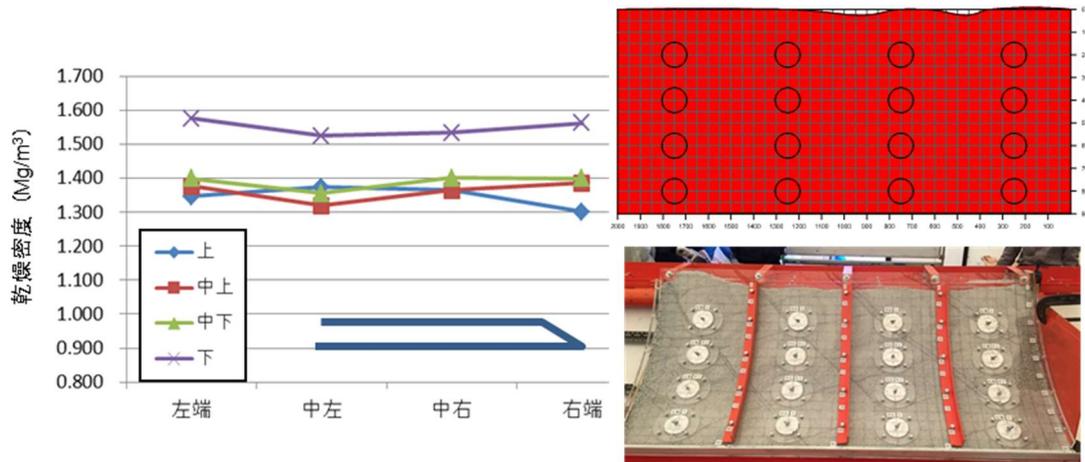


図 2.4.2-7 狭隘部充填の充填状況、密度分布

(4) ステップ4：狭隘部充填装置の機能確認、プロセス管理項目の設定

ステップ1からステップ3までの過程で得たスクリーコンベアの移送による充填材の性状変化、回転速度による移送量の制御、設置位置による未充填部の発生の防止、スクリーコンベアの後退速度、上下段の充填部分担等の結果を反映させ、幌延 URL にて PEM 左右の狭隘部を充填するための充填装置を製作した（図 2.4.2-8）。4本のスクリーコンベアが前後進する走行架台に取り付けられており、組立台に設置されるレール上を走行する。

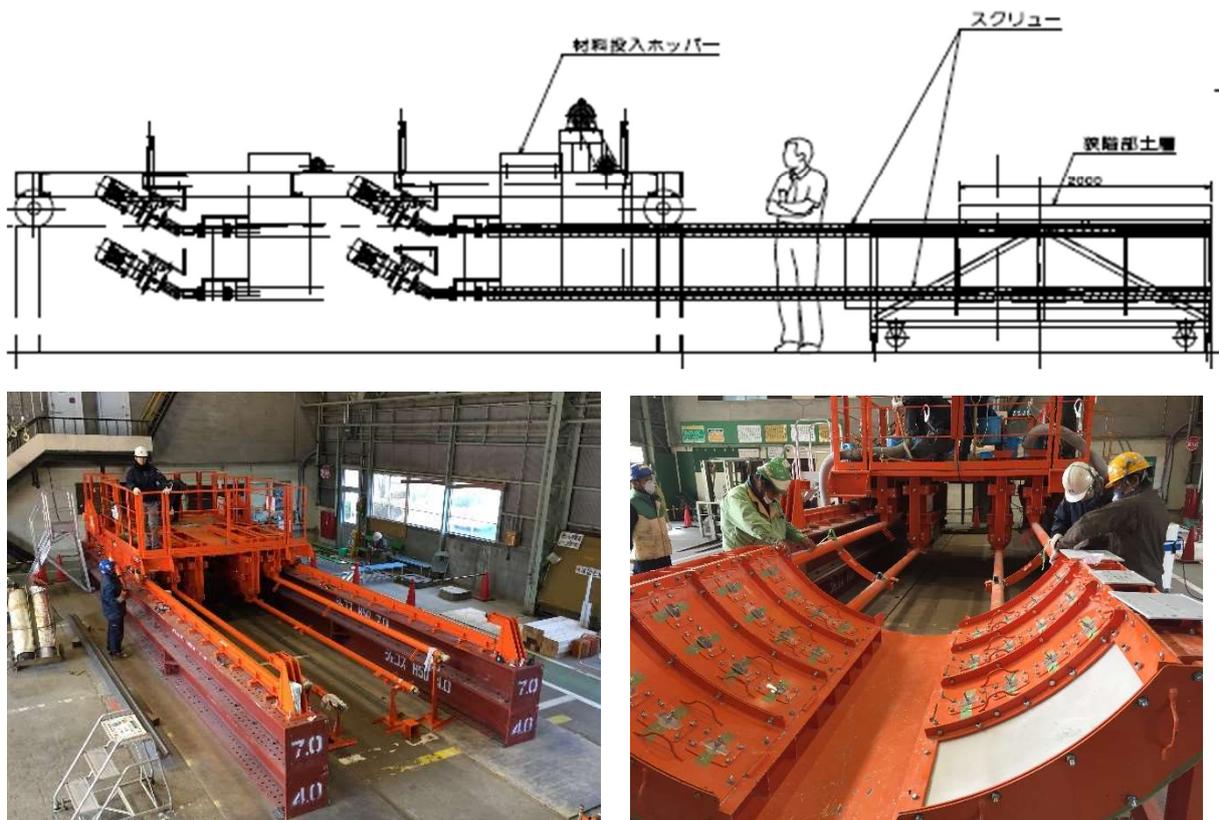
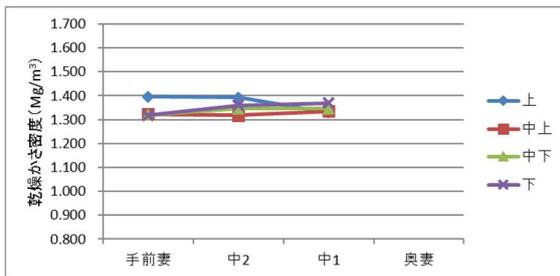


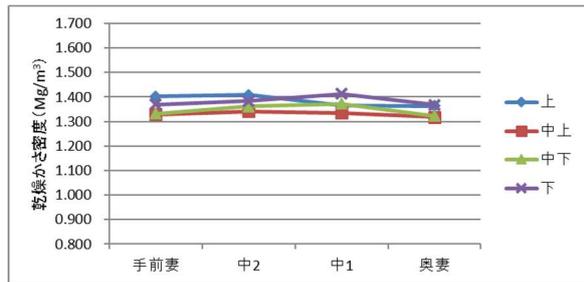
図 2.4.2-8 狭隘部充填装置外観

ステップ4の充填試験で使用した土槽は、スクリーによる押込み効果を得るため、PEM側のアクリル製内壁を鋼製に変更し、充填材が逃げる上部に蓋を設けた。この充填装置を用いた充填試験の結果を図 2.4.2-9 に示す。

充填後に PEM に相当する土槽内側壁に設けたサンプリング窓からシンウォールを打ち込み、かさ密度を測定した結果、概ね目標とした乾燥密度である 1.37Mg/m^3 付近の密度となることを確認した。また土槽内側壁を取り外し未充填部の有無を目視で確認したところ、未充填部は確認出来ず、適切に充填が行われたことを確認した。



左土槽



右土槽

図 2.4.2-9 充填試験後の狭隘部内部の様子 (コアサンプリング後)

(5) 幌延 URL でのペレット充填の施工試験計画

ステップ4までの成果を元に、平成30年度に幌延 URL 試験坑道2で実施予定の下部狭隘部の充填試験に向けた試験工程の具体化の検討も併せて実施した。一例として、下部狭隘部と上部開放部の境界については、ステップ4にて蓋をすることが密度管理上有効であることを確認したため、に示すように充填試験時は鉄板を設置し、吹付け試験前にベントナイトブロックを設置し、除去試験時に不連続な除去対象とならないような工夫を検討した。

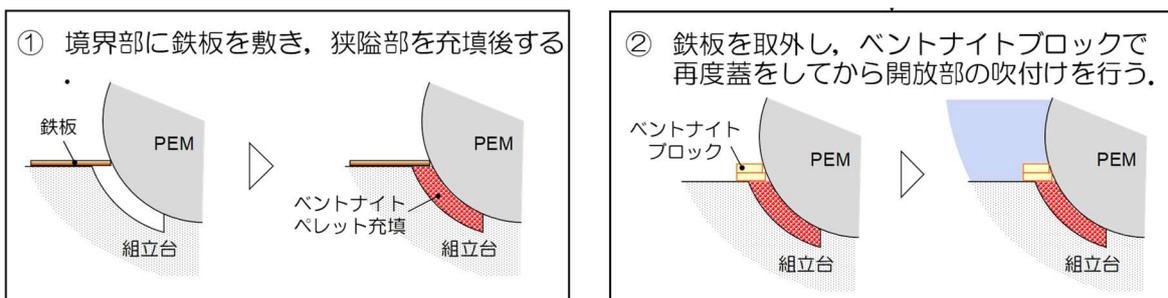


図 2.4.2-10 下部狭隘部-上部開放部の境界の処置の検討例

2.4.3 上部開放部の隙間充填技術の実証的整備

上部開放部の形状は、直径 4m の円形坑道底部に施工した組立台上の台座に直径約 2.3m の PEM を定置した際に生じる側部約 70cm、上部約 1.4cm の大空間である。この空間への充填方法として下部狭隘部と同様にペレットによる充填方式を検討し、ブリケット法により作製したペレットの適用試験を平成 28 年度まで実施した。一方、本事業の工程や実証試験サイトの制約上、充填したペレットに吸水させることが出来ず、後続の除去試験では乾燥したペレットを除去対象とせざるを得ず、充填試験に適応した除去対象を構築する必要が生じた。本年度よりペレット充填技術の検討は下部狭隘部へ継承し、上部開放部は吹付けによる充填方法の検討を開始した。上部開放部に適用する充填材に求められる要件は下部狭隘部と同様に低透水性の確保および緩衝材の鋼殻外への膨出抑制であるが、ベントナイト：ケイ砂=50：50、乾燥密度 1.6Mg/m³ を施工試験の目標値とした[6]。

吹付けによる充填方式での品質管理では、吹付けに用いる混合土の性状、目標の密度を得る吹付け条件、未充填部が生じない吹付け施工手順、充填部の体積に対する充填質量から求められる全体の密度（かさ密度）と、密度のバラつき（密度分布）が重要である。平成 30 年度に地下で予定する試験ではこれら充填部の品質に係る項目を充填材の施工プロセスで実現するため、品質管理の観点からプロセス管理に資する知見を取得する試験を段階的に実施した。以下に段階的な充填試験（ステップ 1～ステップ 4）の概要を示す。

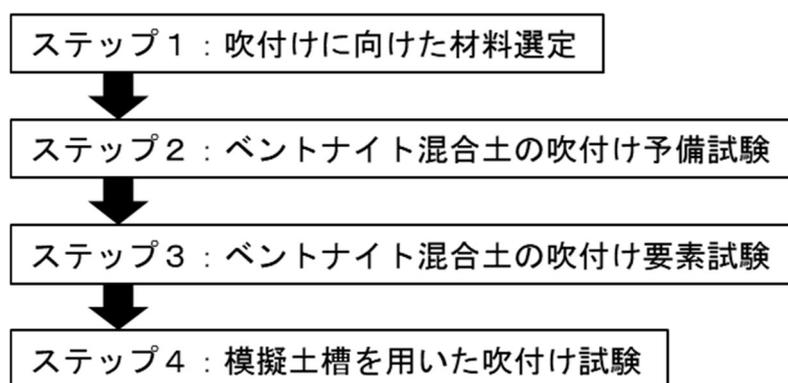


図 2.4.3-1 上部開放部の隙間充填技術の整備フロー

(1) ステップ1：混合するケイ砂の粒度の選定

実際の作業段階では吹付けに使用する混合土としてベントナイトに掘削ズリを配合したものが検討されているが、本事業では掘削ズリの代わりに性状が明らかなケイ砂とし、ベントナイト：ケイ砂=50：50で混合したものとした。土粒子の粒径分布は土の締固め特性に影響するため、乾燥密度 1.6Mg/m³ を達成するためにベントナイトに混合するケイ砂の性状を確認する土質試験を実施した。試験ではケイ砂の粒度をパラメータとし、JIS A1210『突固めによる土の締固め試験法』に則り、締固め曲線を取得した。

混合するケイ砂として、3号、5号、両者を同重量混合した図 2.4.3-2 に示す3種類とした。また初期含水比は最適含水比を中心に±5%の範囲とした。

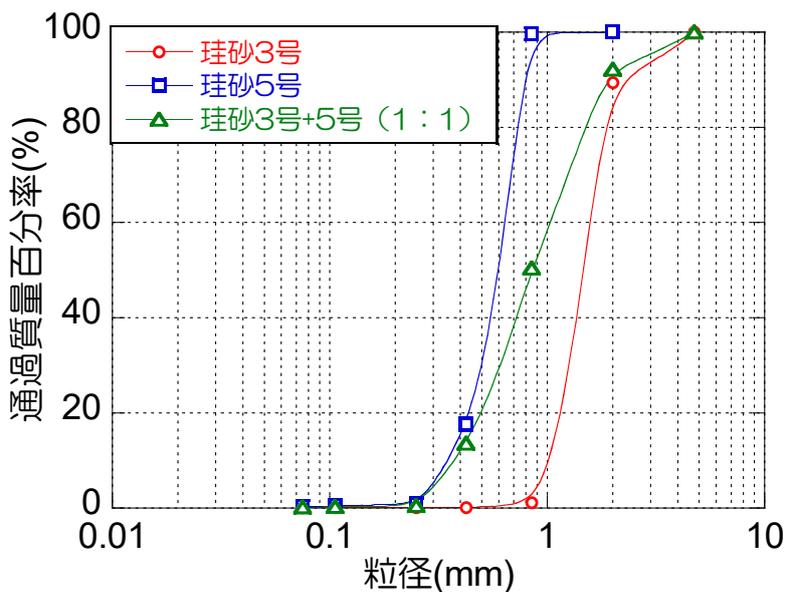


図 2.4.3-2 混合したケイ砂の粒度分布

突固め試験の結果を図 2.4.3-3 に示す。粒度分布が比較的良好な3号+5号同質量混合物の締固め特性が良いことを確認した。

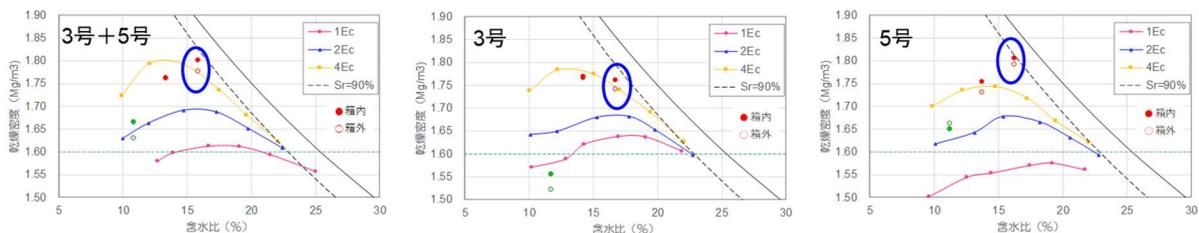


図 2.4.3-3 突き固め試験の結果

(2) ステップ2：吹付け条件選定のための基礎データの取得

本試験では、除去試験の対象を構築することを主目的とし、充填材料の製造から吹付け作業までを汎用機を使用した。吹付けに使用する充填材は現場で製造し、ケイ砂投入サイロとベントナイト投入サイロから混練ミキサーへ計量後送られ、含水比調整後に団塊を取り除いて吹付け機へ投入した（図 2.4.3-4）。



混練、含水比調整

製造プラント外観

吹付け機（ニードガン）

図 2.4.3-4 吹付け用充填材材料の製造プラント

ステップ1で取得した締固め特性を基に、板及び箱に対して空圧 0.7MPa、吹付け機 の材料供給部の回転数を 5rpm、吹付けノズル先端から板までの離隔を約 1m に固定し、吹付け試験を実施した。ノズルの閉塞等の反力発生による作業の危険性を考慮し、吹付ノズルを油圧ショベルのアームに固定して実施した。吹付け後、サンプリングし含水比、乾燥密度を取得した。

表 2.4.3-1 吹付け試験の結果を示す。最適含水比より高い条件ではノズル等の閉塞の恐れがあり試験条件から除外した。結果を図 2.4.3-3 の締固め曲線上に合わせて示す。最適含水比で吹付けた場合飽和度 90%曲線に近似し、含水比を上げて密度増加は見込めない。締固めエネルギー 2Ec 以上で目標乾燥密度(1.6Mg/m³)を達成した。3号と5号の同質量混合物の締固め性能が良いことと、既往のベントナイト混合土吹付けの材料として多く使用されている実績があるため、以降の吹付試験では、3号と5号の同重量混合物を使用した。

表 2.4.3-1 吹付け部の平均乾燥密度

ケイ砂	目標	W _{op.} -5.0%		W _{op.} -2.5%		W _{op.}		W _{op.} <
	吹付け対象	箱	板	箱	板	箱	板	
3号+5号	目標初期含水比	10.8	10.8	12.3	12.3	15.8	15.8	吹付け装置閉塞の恐れがあるため未実施
	乾燥密度(Mg/m ³)	1.67	1.63	1.76	1.76	1.80	1.78	
3号	目標初期含水比	11.7	11.7	14.2	14.2	16.7	16.7	
	乾燥密度(Mg/m ³)	1.56	1.56	1.77	1.77	1.74	1.76	
5号	目標初期含水比	11.2	11.2	13.7	13.7	16.2	16.2	
	乾燥密度(Mg/m ³)	1.65	1.66	1.76	1.73	1.81	1.79	

(3) ステップ3： 吹付け条件の選定試験

吹付け用の混合土の性状として、3号+5号の同質量混合物、含水比を最適含水比に調整する結果を得た。次に、この混合土を使用し、吹付作業時の空気量と吹付機の回転数（材料供給速度に対応）の最適条件を板への吹付試験で調査した。空気量の影響として、少ない場合は付着力が弱く辛うじて目標の1.6Mg/m³を達成する一方で、空気量が多くなると吹付けた材料が吹き飛ばされ、結果的にリバウンド率が増加した。試験の結果、吹付け時の空気量が10~12m³/min、吹付機の回転数は5rpmが適切と判断した。一方、この吹付け条件では反力が大きく、人吹きでは安全が確保できない恐れがあるため、吹付ノズルを油圧ショベルに取り付けて実施した。

幌延URL試験坑道2における開放部は、PEM側部の幅がおよそ690mmであることから、幅690mm、奥行き1,000mmの試験土槽を使用し、水平吹き場合は箱型、斜め吹き場合は一面を欠いた箱へ施工した。吹付試験時には土槽周囲をシートで覆い、吹付け時のリバウンド材を全て捕集した。吹付け終了後、土槽及びシート上のリバウンド材の重量を測定し、リバウンド率を評価した。また、吹付けた土槽からコアサンプリングを行い、乾燥密度を評価した。



機械吹き試験の様子



吹付け後の土槽（斜め吹き）



リバウンド率の測定

図 2.4.3-5 吹付け試験の様子

吹付け試験の結果を表 2.4.3-2 に示す。吹付け方向に因らず、エア量が増加すると乾燥密度と共にリバウンド率が上昇することを確認した。本事業での吹付けによる隙間充填技術の施工では、1.6Mg/m³を目標値としており、エア量が10m³/minが適切な吹付け条件であると言える。

表 2.4.3-2 吹付け試験の結果

吹付け方向	エア量 (m ³ /min)	回転数 (rpm)	吹付け量 (kg)	リバウンド率 (%)	乾燥密度(Mg/m ³)
垂直	10	5	541.6	26.4	1.610
	12	5	466.8	38.8	1.757
斜め	10	5	519.6	24.4	1.655
	12	5	475.2	35.8	1.758

(4) ステップ4：地下環境を想定した吹付け予備試験

ステップ1からステップ3までの過程で得た、吹付け用混合土の配合、含水率、吹付け条件、密度分布等の結果を反映させ、幌延 URL にて PEM 上部の開放部を充填するための吹付け確認試験を実施した。試験では吹付ノズルを有する自走式装置を使用し、実際の吹付け空間を再現した模擬土槽を準備して実施した（図 2.4.3-6）。

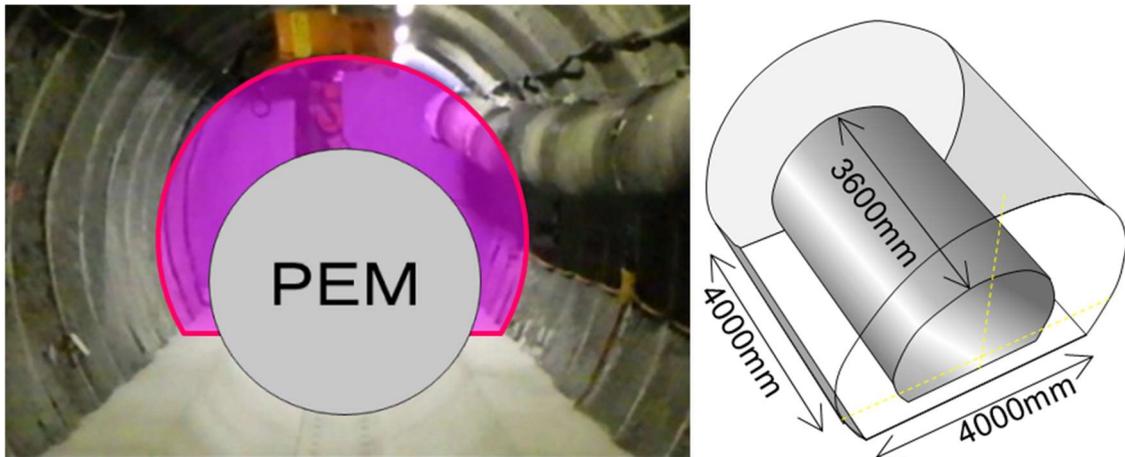


図 2.4.3-6 吹付け確認試験に使用した、幌延 URL 模擬土槽



図 2.4.3-7 伸縮アームを有する吹付装置による吹付け施工試験

作業員によるノズルの把持は吹付け時の反動による危険性が高いため、実際の吹付け施工試験は伸縮アームを有する吹付け機械を使用した（図 2.4.3-7）。

試験坑道2の上部開放部模擬坑道を用い、実際の坑道空間を想定した吹付け機械の動きの制約、ノズルの挿入方向や角度等を確認するとともに、実際に吹付け試験を実施した。吹付け部の密度管理方法として、コアサンプリング、投入重量と出来形計測よるかき密度評価、誘電率法を適用し、吹付け試験後の密度と吹付け作業姿勢の関連を調査した。またリバウンド率の評価も実施した。試験の結果、PEM側部や坑道際部などのノズルが届きにくい箇所に対しては若干密度が低くなる傾向が見られたことから、吹付け装置のアームやノズル稼働域の調整などにより吹付け面に対して垂直に吹付けが行えるよう施工手順等の工夫を実施する。

(5) 幌延 URL での吹付け方式による施工試験計画

平成 30 年度の実証試験では、幌延 URL の地上ヤードでベントナイト混合土の製造・保管を行い、製造した材料を吹付けに使用する分の材料を適宜地下へ運搬する計画とした。図 2.4.3-8 に材料製造プラント、ならびに計画した実証試験の作業の流れを示す。

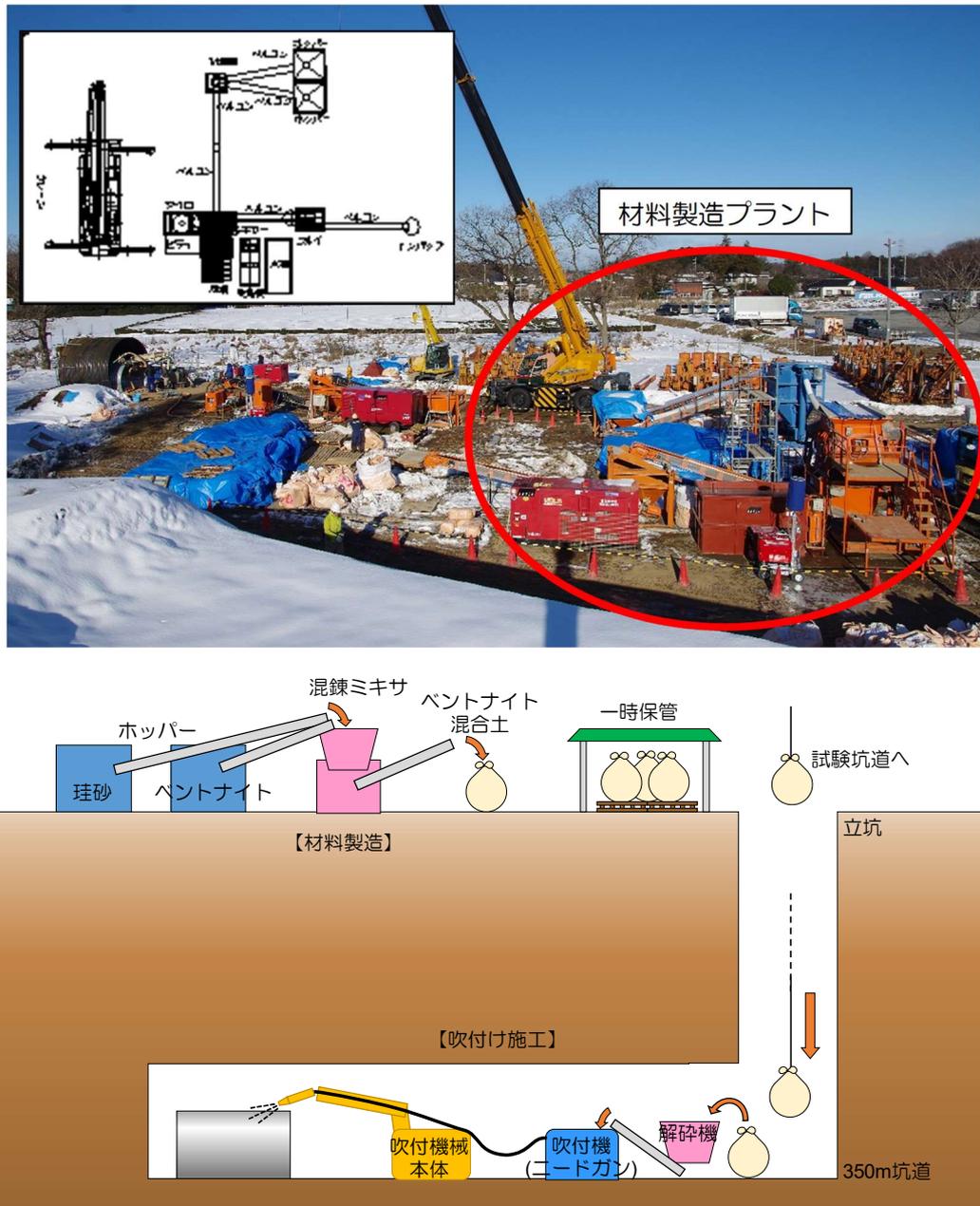


図 2.4.3-8 幌延 URL に吹付け施工試験 資機材の構成および材料フロー模式図

2.5 隙間充填材除去技術の実証的整備（第2分冊：第5章）

2.5.1 実施概要

実施概要隙間充填材の除去技術については、充填材料の性状に対応した除去技術の検討を継続して実施する。平成28年度に小型供試体を用いて実施したウォータージェット方式による充填材の切削試験の成果を踏まえ、切削条件等を具体化するための試験を実施した。また PEM から離れた部分の機械的な方式による除去技術についても検討した。これらを元に、幌延 URL で除去する充填部の大きさや形状を考慮した実証試験装置の設計・製作、除去副産物の処理方法を具体化した。

2.5.2 除去技術の具体化

図 2.5.2-1 は除去の作業工程を模式的に示したものである。充填材除去は PEM-坑道間の充填材を搬出可能な状態にした上で、坑道外へ搬出する作業を、PEM の回収作業が出来るまで続ける作業と言える。PEM の回収作業に先立ち実施される隙間充填材の除去技術に求められる条件としては、横置き PEM 定置方式の隙間充填材を除去できること、除去時には PEM に影響を与えないこと、除去後に PEM の回収、搬送が可能な状態になることなどが挙げられる。

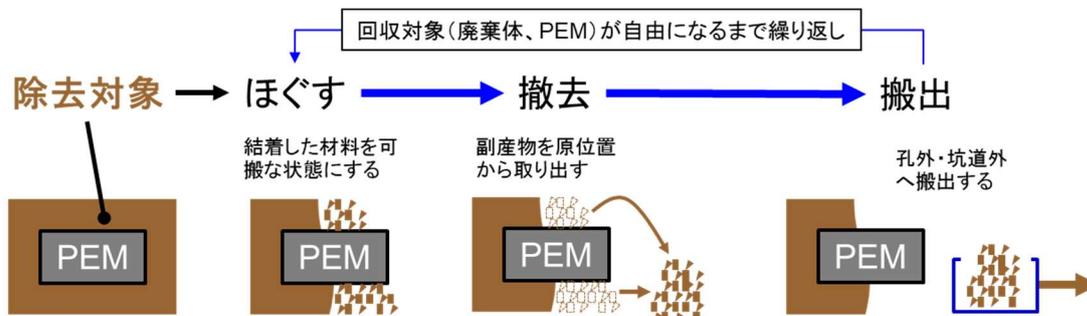


図 2.5.2-1 隙間充填材の除去工程の模式図

廃棄体の周囲に施工された粘土系材料の除去技術として SKB の検討事例があり、機械方式、流体方式、加熱方式等が比較されている[8]。地下環境での PEM の回収実証試験は幌延 URL 試験坑道2で実施を計画しているが、PEM 上部は開放空間、PEM 下部は狭隘空間となっている。充填材の除去作業時に PEM 鋼殻に与える影響を避ける観点から除去技術を選定した。上部開放部のうち坑道近傍部は PEM から離れているため除去効率を重視した機械的除去方式、上部開放部のうち PE 近傍ならびに下部狭隘部は PEM 鋼殻へ与える影響が小さい流体除去方式を選定した。流体除去では切削水の運動エネルギーで対象を粉砕するウォータージェット方式を採用した。各除去技術の適用範囲を図 2.5.2-2 に模式的に示す。

前述の機械的除去方式、流体除去方式は施工された充填材を“ほぐす”技術である。除去工程ではほぐされた充填材を坑道外に搬出する必要がある。処分坑道横置き定置方式では、PEM と作業機械が同一坑道内に位置し、切羽に PEM が露出した状態となる。このような坑道では“ほぐす作業”と“撤去作業”を同一切羽で行うことは困難であると考えられる。そのため“ほぐす作業”と連続的に適用出来る撤去技術が適切と考えられ、本事業では吸引による撤去技術を採用することにした。吸引による撤去は、機械的除去方式による液固比が低い切削材から、ウォータージェットによって液固比が高いスラリー化したものまで幅広く適用出来ると考えられる。

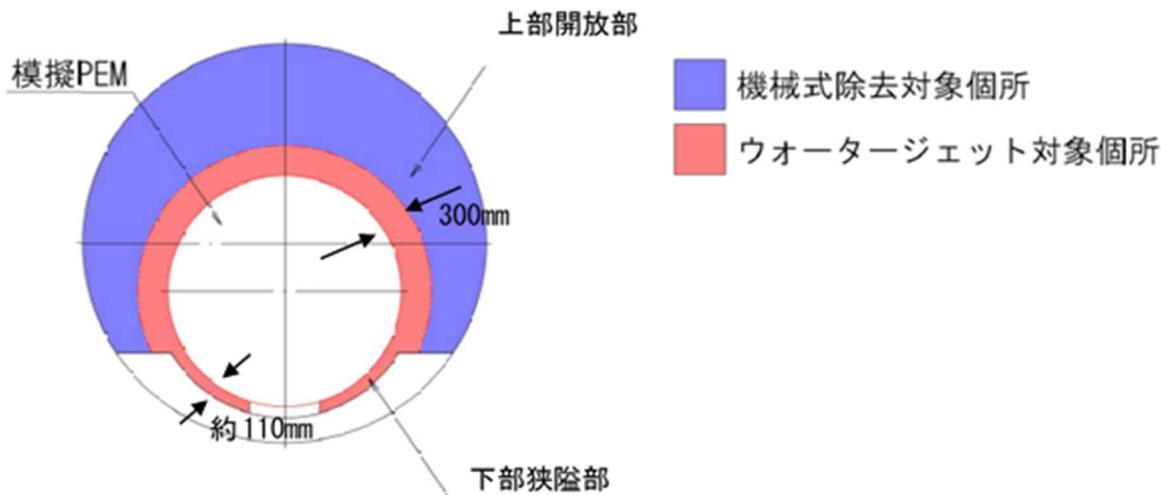


図 2.5.2-2 試験坑道 2 での隙間充填材の除去技術の適用箇所 模式図

2.5.3 機械的除去技術

PEM から離れた部分では大量の充填材を効率的に除去する必要がある。材料を破碎する方式を比較し、オーガ（アースオーガ）による機械的な方式による除去（機械式除去）を選定した。また、切削した充填材の撤去には真空吸引を用いた。なお、機械式除去の範囲は下部狭隘部の幅が約 15cm であることから、機械的除去装置の操作時の余裕を考慮して PEM から 30cm 以上離れた領域とした。

図 2.5.3-1 は処分坑道横置き定置方式 PEM 方式に対し、機械的除去技術を適用した場合の除去設備の構成概念である。遠隔監視・操作により装置前方で充填材を切削し、装置後方のフレコンバックへ連続的に積み込む方式となっている。本事業では、このような除去設備のうち、コアとなる前方の除去装置の部分を整備対象とした。図 2.5.3-2 に掘削ヘッドを模式的に示す。平成 31 年度の地下での隙間充填材の除去試験に向け、今後整備を進めていく。

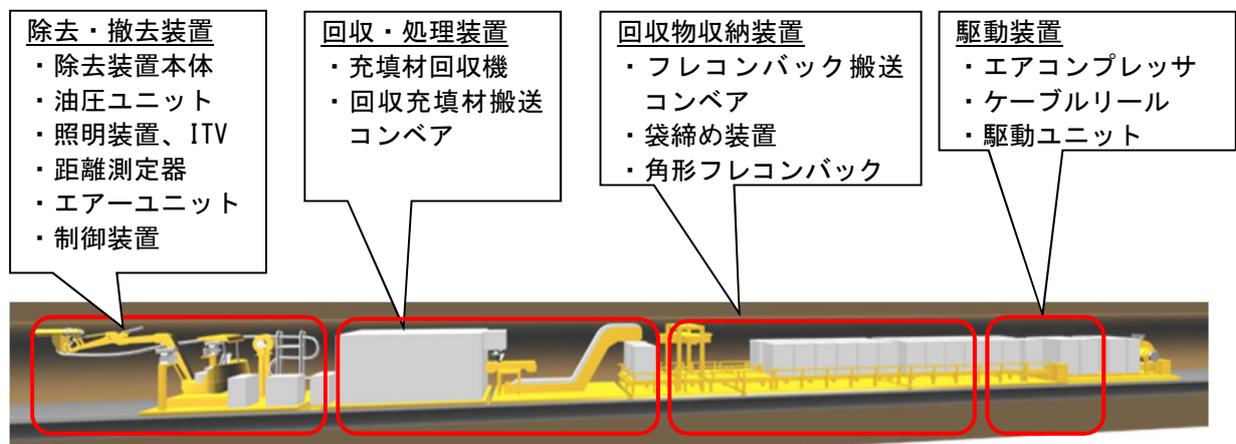


図 2.5.3-1 機械的除去方式による充填材除去設備の概念検討例

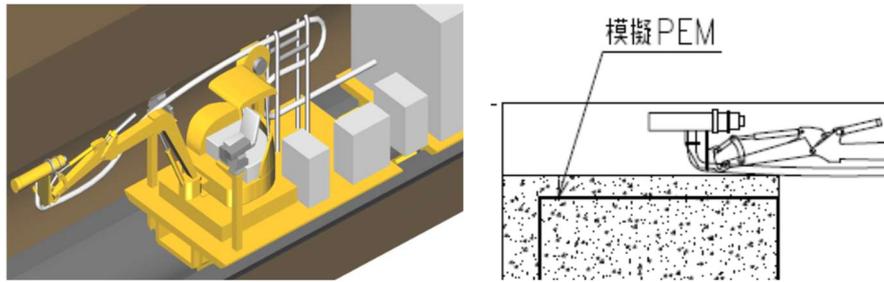


図 2.5.3-2 本事業で対象とした機械的除去方式掘削ヘッドの模式図

2.5.4 流体除去技術（ウォータージェット方式）

(1) 除去設備の概念設計

ウォータージェット方式による除去は、PEM から 300mm 以内の充填材除去に用いられ、高圧水流の噴射と吸引工法による回収により除去を実施する。ウォータージェット方式による隙間充填材除去設備の技術概念例を図 2.5.4-1 に示す。除去設備は除去・撤去装置、水処理装置、回収物収納装置および駆動装置などから構成されている。設備先頭の除去・撤去装置の技術概念を図 2.5.4-2 に示すが、除去・撤去装置では 2 本のアームの先にノズルが取り付けられており、高圧の水噴射により充填材を除去してゆく。またウォータージェットアームの下方には、バキュームアームを設置し、除去した充填材や水を回収し、後方の水処理装置へ送る。除去した充填材は回収物収納装置で廃棄用ドラム缶まで搬送される。設備の動力は、機械的な方法による充填材除去設備と同様に電力とし、走行機能としてはエアパレットによる走行を設定しているため、最後尾にはエアコンプレッサを搭載した駆動装置を配置している。前方の視認のための ITV カメラ・照明設備および距離測距器等により遠隔操作等を行うとする。

本事業では、このような除去設備のうち、コアとなる前方の除去装置の部分を整備対象とした。

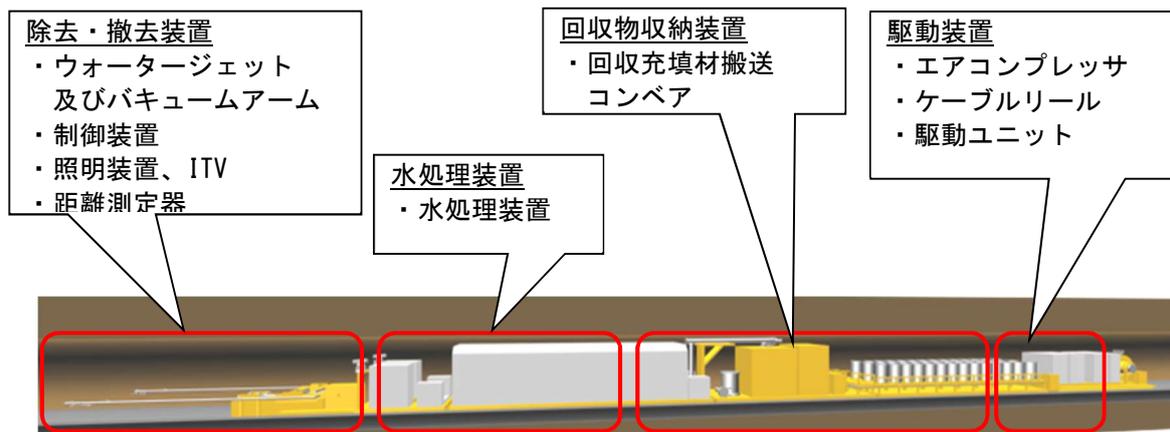


図 2.5.4-1 流体除去方式（ウォータージェット）による充填材除去設備の概念検討例

(2) ウォータージェットによる充填材切削試験

ウォータージェットにより除去する充填材は図 2.5.2-2 に示した PEM 近傍であり、上部はベントナイト：ケイ砂＝50%：50%の吹付け材、下部はベントナイト 100%のペレット材である。平成 28 年度には厚さ 10cm 程度の供試体を用い、ウォータージェットによる充填材の切削試験を実施し、直射ノズルで 20MPa の水圧で含水した充填材が切削出来ること、金属容器へ与える影響

が無いことを確認した[7]。一方 PEM の全長は約 3.4m であることから、奥行き方向の切削能力を取得する必要がある。本年度は直径を狭隘部の代表的な幅である 15cm、長さ方向 1m のセル内に作製した充填材に対して切削試験を実施した。試験の様子を図 2.5.4-2 に示す。

切削試験の結果を表 2.5.4-1 に示す。今後、奥行き方向の切削性、ジェット周囲の切削穴の広がり等の成果を元に、PEM 周囲の充填材へのウォータージェットの当て方を具体化、除去装置の製作を実施する。

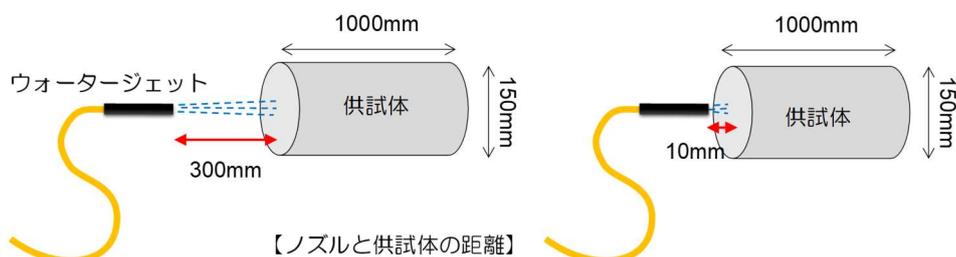


図 2.5.4-2 ウォータージェット方式による奥行方向の切削試験の様子

表 2.5.4-1 切削距離確認試験結果一覧

名称	材料	飽和度 (%)	ノズル距離 (cm)	経過時間(sec)		
				5	10	20
				切削距離 (cm)		
V1_Sr95%_距離 30cm	粉体ベントナイト	95	30	10.5	14.5	18.5
V1_Sr95%_距離 1cm	粉体ベントナイト	95	1	9.5	17.5	23
V1_Sr45%_距離 1cm	粉体ベントナイト	45	1	50	80	100
V1sand_Sr95%_距離 1cm	ベントナイト混合土	95	1	11.5	15	27
V1sand_Sr95%_距離 1cm	ベントナイト混合土	95	1	15	21	27
V1sand_Sr60%_距離 1cm	ベントナイト混合土	60	1	32	32	50
V1 狭隘部_Sr30%_距離 1cm	加工充填材	30	1	100	-	-

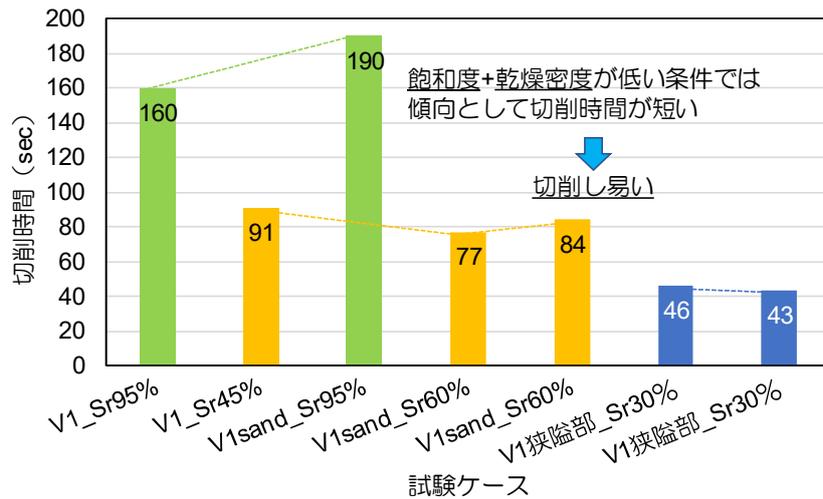


図 2.5.4-3 ウォータージェット方式による奥行方向の切削 供試体の性状の影響

2.5.5 吸引による充填材の撤去

機械的方式、流体方式で切削した充填材について、選定した吸引方式により連続的に撤去が可能であるか予備的な検討を実施した。ウォータージェットによる切削後の除去物の回収を、強力吸引車およびウェルデンポンプを用いて行った。ウェルデンポンプのホース径は 2 インチ、ウェルデンポンプは 3 インチを使用した。ウェルデンポンプは切削水の吸引は可能であるが、除去物の吸引はできなかった。一方で強力吸引による回収は、ホース径 3 インチ以下に切削ができれば回収が可能であることが確認した。

2.6 地層処分実規模試験施設の運用（第2分冊：第6章）

2.6.1 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 2.6.1-1 地層処分実規模試験施設

2.6.2 施設の公開

平成 29 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 29 年度は延べ 5,452 人の方が施設を訪れ、平成 22 年 4 月の施設開館からの累計は 49,142 人となった（平成 30 年 2 月 28 日までの集計）。

幌延町で 7 月 22 開催されるおもしろ科学館 2017 in 幌延に合わせ、緩衝材定置試験装置を使用した定置試験を公開した。二日間で 572 名が施設を訪れた。

2.6.3 可視化試験

地層処分実規模試験では処分孔堅置き定置方式ブロック方式について、実物の緩衝材ブロック、ブロックを組立てたカットモデルを公開している。これまで来館者からブロック同士の隙間について質問を受けた場合、地下水による膨潤で隙間が塞がることを口頭で説明した。今回、ブロック同士が一体化していく過程を来館者に体感してもらうため、過年度から実施中の可視化試験の供試体ブロックを改良した試験を公開した。図 2.6.3-1 に小型緩衝材ブロックを用いた可視化試験の様子を示す。

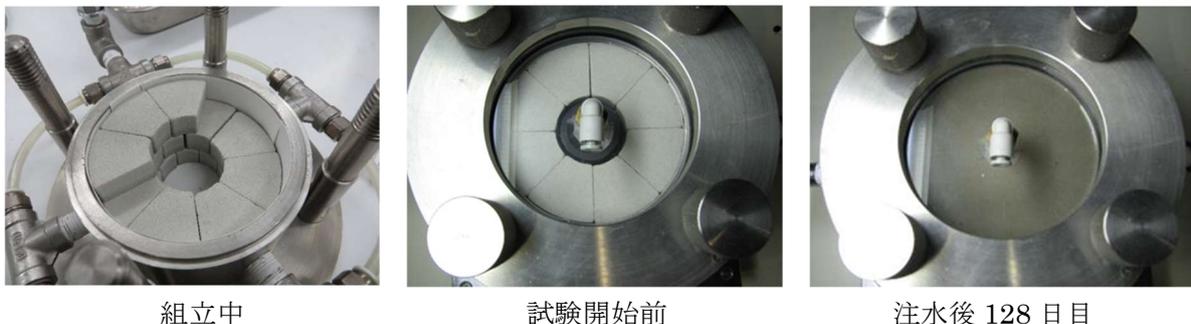


図 2.6.3-1 緩衝材ブロックの一体化挙動の可視化試験の様子

2.6.4 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られる。図 2.6.4-1 に対話記録の分析のうち、来館者との対話のトピックスの割合の変化を例として示す。

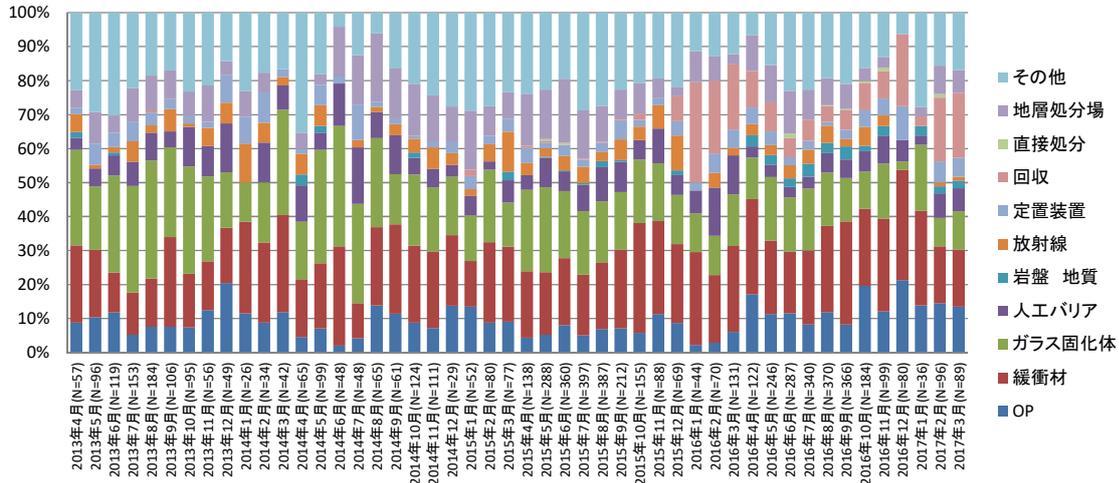


図 2.6.4-1 来館者との対話記録の分析例（質問の属性の経時変化）

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 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、2016 年 3 月
- [2] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 24 年度原子力発電施設広聴・広報等委託事業（地層処分実規模設備整備事業）報告書、2013 年 3 月
- [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 報告書、2015 年 3 月
- [4] 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
- [5] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 15 年度地層処分技術調査等 遠隔操作技術高度化調査 報告書（2 / 2）、2004 年 3 月
- [6] 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。
- [7] 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
- [8] SKB,TR-00-15, Techniques for freeing deposited canisters, 2000.1

第3章 可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理

／回収可能性維持についての検討（第3分冊）

3.1 はじめに

3.1.1 背景および目的

高レベル放射性廃棄物処分における廃棄体の回収可能性に関して、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[1]（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・回収可能性の確保のために、次のような観点で更なる検討や調査研究を進めることが望まれる。

- 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（論点）についての整理
- 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、上記のような示された課題に対応すべく、以下の2つを目的として、平成27年度より本事業に取り組んできている。

- ・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 本年度の検討の概要

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の整理を目的として、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、2ヵ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た。

また、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しては、図3.1.2-1に示す成果目標を達成するために、平成27年度に5ヵ年計画を策定して検討を開始した（以下、「回収可能性の維持についての検討」という）[2]、[3]。

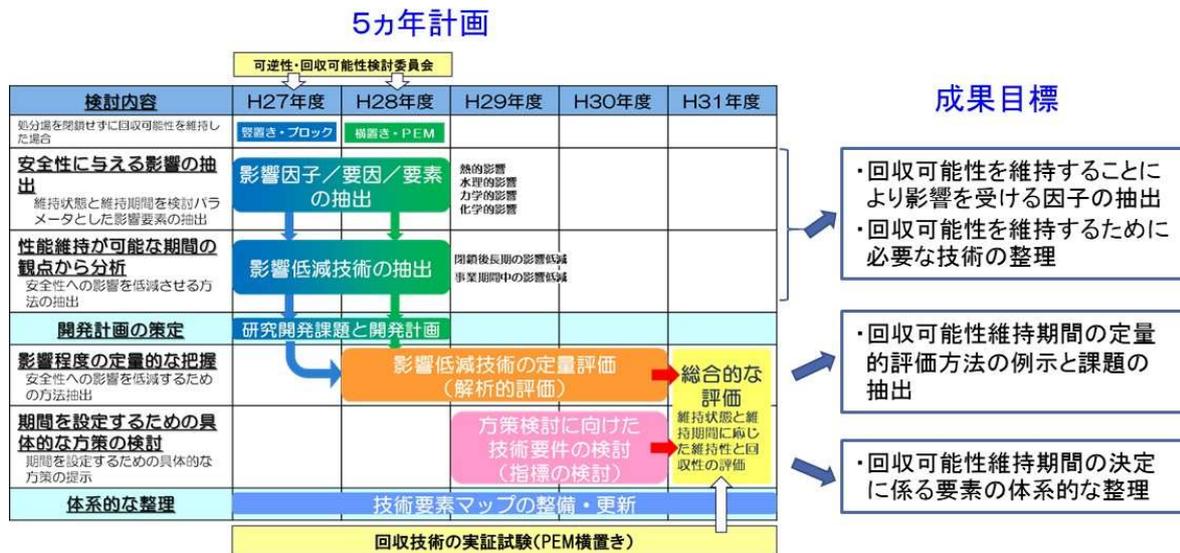


図 3.1.2-1 回収可能性の維持についての検討に関する成果目標および5カ年計画

本年度は、以下のような検討を行う。

(1) 可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理（第3分冊：第2章、別冊）

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の整理を目的として、平成27～28年度の本事業のもとでR&R検討会を設置して議論を進めた。本年度は、2カ年に渡る検討会における議論で得られた成果の取りまとめを行う。

また本年度の回収可能性の維持についての検討に関しては、第1章で述べたように、平成28年度のR&R検討会において整理した、様々な処分概念や処分場の埋め戻し状態に対して、回収可能性を維持したときの地質環境や人工バリアへの影響について定量的に検討していくべき具体的な今後の技術検討項目の9項目のうち、

- ①開放坑道の健全性（空間安定性）
- ③埋め戻した坑道の再利用時の健全性（一度埋め戻した支保や覆工等の回収時における再利用の可否）
- ⑥「回収可能性維持期間中の人工バリアや地下構造物の機能劣化（坑内の酸化性雰囲気継続、廃棄体からの熱影響ならびに坑道開放期間中の地下施設の湧水/水理環境に伴う機能劣化）」の3項目を主たる検討項目とし、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のために、処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の必要技術の把握、および回収可能性維持期間の定量的評価方法の例示を目的とする。回収可能性維持のための技術の抽出や技術に求められる要件の整理を(2)に、影響を定量的に評価するための手法の検討を(3)で示す。

(2) 回収可能性維持期間の検討（第3分冊：第3章）

定量的に検討していくべき具体的な今後の技術検討項を踏まえた上で、影響評価の取り組み状況の整理、影響評価の取り組み状況の整理、回収可能性維持を考慮した場合に付加される技術要件（多重バリアシステムの構成要素の安全機能に基づいて、その性能が確保されるように設定する要件[4]）についての考え方の検討、回収維持技術^{※1}、回収技術^{※2}などの整理と研究課題の抽出を行う。

(3) 回収可能性維持期間の影響に関する定量的評価（第3分冊：第4章）

定量的に検討していくべき具体的な今後の技術検討項、および昨年実施した力学的評価方法の検討結果も踏まえ、力学的・水理学的・化学的・熱的影響の定量評価を行う方法について具体化し、回収維持期間の坑道開放の影響の評価方法を示す。

さらに、最終処分施設を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響から、維持期間の決定に係る要素の体系的な整理を進めるために、以下の(4)の調査を行う。また、本年度は5ヵ年計画の中間の年であり、R&R検討会の成果が取りまとめられるためこれを反映し、これまでに進めた検討を基に、研究計画の見直しを行う((5))。

(4) 回収可能性維持期間に関する国際機関、諸外国の事例調査（第3分冊：第5章）

回収可能性維持期間に係わる国際機関や諸外国での事例調査を行い、維持期間設定に対する考え方や背景および期間決定の技術的な観点からの因子等について取りまとめる。

(5) 研究計画の更新（第3分冊：第6章）

R&R検討会の検討結果、さらにこの3年間の回収可能性の維持についての検討結果を基に研究計画の見直しを行う。

※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、埋戻し材の除去技術、廃棄体の再把握、搬送技術等

3.2 可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理（第3分冊：第2章、別冊）

3.2.1 整理の背景と目的

前節で述べたように、放射性廃棄物ワーキンググループ¹による議論を経て、現世代として地層処分に向けた取組を進めることが再確認されるとともに、2015年5月に改定された基本方針では、今後より良い処分方法が実用化された場合等に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにするため、基本的に最終処分に関する政策や最終処分事業の可逆性を担保すること、及び原子力発電環境整備機構（NUMO）は特定放射性廃棄物が最終処分施設に搬入された後においても、安全な管理が合理的に継続される範囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性（回収可能性）を確保することが定められた。

こうした背景を踏まえ、可逆性及び回収可能性（以下、「可逆性・回収可能性」という。）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の整理を目的として、平成27～28年度の本事業のもとで「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、「検討会」という。）を設置して議論を進め、本年度に、2カ年に渡る検討会における議論で得られた成果の取りまとめを行った。

以下に、2カ年に渡る検討会における議論の展開及び検討会で得られた成果を要約する。検討会における議論や得られた成果の詳細は、第3分冊の別冊に取りまとめて整理しているので参照されたい。

3.2.2 検討会における議論の展開

上記の目的に資する議論を進めるため、大学等に所属する外部有識者の協力のもとで検討会を設置し（表 3.2.2-1）、技術及び社会科学の双方に配慮しつつ議論を展開した。

具体的な進め方として、最初に、可逆性・回収可能性の導入に至る我が国の議論や制度を整理・共有するとともに、国際機関を含む諸外国において先行的に行われた検討や取組の動向等を参照し、そこで論点や課題とされた事項等を本検討会における検討項目として抽出した（表 3.2.2-2）。検討会では、これらの個々の検討項目に対して、以下に留意しつつ順次議論を進めた。2カ年にわたる検討の経緯は表 3.2.2-3 のとおりである。

- ・基本方針の規定内容を出発点として、これまでの廃棄物WGや安全規制制度に係る議論を含めた我が国におけるこれまでの検討経緯などに留意しつつ議論を展開する。
- ・安全性の観点で、今後整備される安全規制制度の検討に委ねるべき事項があり得ること、特に回収可能性に係る技術的観点では共通する部分があり得ることに留意する。

なお、可逆性・回収可能性の定義に関して、廃棄物WGでは国際的な共通理解として得られた定義を参照しつつ議論が進められてきた。そのような経緯を踏まえ、本検討会でも同様に、可逆性及び回収可能性について、以下に示す国際機関が主導したプロジェクトで示された定義を踏襲

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。2014年5月に「放射性廃棄物WG 中間とりまとめ」が行われ（総合資源エネルギー調査会, 2014）、下記 URL で公開されている。
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/genshiryoku/houshasei_haikibutsu_wg/report_001.pdf

した²。

・可逆性 (Reversibility)

原則として、処分システムを実現していく間に行われる決定を元に戻す、或いは検討し直す能力を意味する。後戻り (Reversal) とは、決定を覆し、以前の状態に戻す行為である。

・回収可能性 (Retrievability)

原則として、処分場に定置された廃棄物或いは廃棄物パッケージ全体を取り出す能力を意味する。回収 (Retrieval) とは、廃棄物を取り出す行為である。回収可能性があるということは、回収が必要となった場合に回収ができるようにするための対策を講じることを意味している。

表 3.2.2-1 委員名簿 (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)

(50音順、敬称略)

委員氏名	勤務先 役職名
芥川 真一	神戸大学大学院工学研究科 教授
小松崎 俊作	東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 講師
佐藤 正知	北海道大学 名誉教授
竹内 真司	日本大学文理学部地球システム科学科 准教授
(主査) 新堀 雄一	東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻 教授
三谷 泰浩	九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 教授

注) 勤務先・役職は平成 28 年度当時のもの。

表 3.2.2-2 本検討会で議論の対象として抽出した 13 の検討項目

● 可逆性・回収可能性を必要とする動機	● 回収可能性に係る戦略・計画の策定
● 可逆性・回収可能性を必要とする動機の事業段階に応じた変化	● 研究開発・実証
● 可逆性・回収可能性の実行に係る判断基準・判断指標	● 閉鎖せずに回収可能性を維持する場合の施設設計や安全性への影響
● 回収の技術的な実現性	● モニタリング等の役割
● 回収の容易性	● 費用
● 回収後の廃棄体の管理	● 意思決定のホールドポイントに係る留意事項
● 処分場設計への技術的要求	

² Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel Final Report of the NEA R&R Project (2007-2011)より

表 3.2.2-3 検討会における検討の経緯

<p>○第1回（平成27年9月18日）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 本検討会の設置について（背景、目的、議論の進め方） ● 総合資源エネルギー調査会放射性廃棄物WGでの最近の議論の状況について ● 可逆性・回収可能性に関する海外の議論における主な論点について <p>○第2回（平成27年11月17日）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 第2回以降の議題展開案等について ● わが国の現行の制度等について ● 可逆性・回収可能性の制度的位置付けについて <p>○第3回（平成27年12月25日）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 諸外国の回収概念の検討・開発事例等について ● 回収概念の共有に向けた本検討会における「検討用シナリオ」について ● 回収可能性の維持に関する技術的な実現性と容易性について <p>○第4回（平成28年1月20日）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 回収後の廃棄体管理について <p>○第5回（平成28年6月23日）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 可逆性・回収可能性を必要とする動機の再整理について ● 回収可能性の維持に係る技術的な取組における留意事項について <p>○第6回（平成28年9月30日）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 回収可能性の維持に係る技術的な取組に関する計画策定の考え方について（その1） ● 可逆性・回収可能性とモニタリングの関係について <p>○第7回（平成28年11月22日）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 回収可能性の維持に係る技術的な取組に関する計画策定の考え方について（その2） ● その他留意すべき事項について <p>○第8回（平成29年2月14日）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 回収可能性の維持に係る技術的な取組に関する計画策定の考え方について（その3） ● 検討会の最終取りまとめについて

3.2.3 検討会で得られた主要な成果（要約）

表 3.2.2-2 に示す 13 の検討項目に関する議論を経て、成果の取りまとめでは、個々の検討項目の関連性や類似性を踏まえて、次の 3 つの観点から整理している。

- ・可逆性・回収可能性の制度としてのあり方
- ・回収可能性に関する技術的アプローチのあり方
- ・当面の進め方と関係組織の役割

ここでは、これらの成果を制度面及び技術面の2つの観点から次のように要約する（詳細は別冊を参照されたい）。

○我が国では、基本方針で可逆性・回収可能性の維持を規定して将来世代の柔軟性を確保しており、諸外国と同様の制度整備状況にあるといえる。但し、将来の可逆性・回収可能性の実行に係る費用負担など、今後の事業進展の状況によって課題となる可能性のある事項が認識された（図 3.2.3-1）。

○技術面では、基本方針で示されている回収可能性を維持した場合の影響等に関する調査研究や回収技術の開発が進められている。但し、安全性、回収の容易性、維持期間ならびに費用などが、回収可能性を維持することに関してトレードオフの関係にあり、これらの関係が、回収可能性の維持に関する技術的アプローチ（回収の容易性をどの程度設計に反映するか等）によって異なることが認識された。

このような認識のもと、本検討会において、今後の技術的アプローチの具体化や将来の判断等の場面で必要となる定量的な情報を想定し、これらの定量化に必要な技術検討項目を抽出して、“技術検討のフレームワーク”（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）として整理した（図 3.2.3-2）。当面の進め方としては、同フレームワークの中で例示した“定量化に必要な技術検討項目”から展開される研究開発を着実に進めていく必要がある。

- 基本方針によって導入された可逆性・回収可能性の概念と関連する他の制度との関係を下図のように整理。但し、将来の実行の際には以下に留意が必要。
 - 現世代の責任として可逆性・回収可能性を担保する形で安全な地層処分を着実に進める結果として、事業の進展とともに将来の柔軟性は制約される（事業進展とともに、回収の容易性は低減し、回収費用は増加する）。
 - 将来の政策転換に伴う相応の負担も想定される（政策転換に係る費用や廃棄物の回収・移動に係る費用や作業リスクなど）。
- 次のような諸外国の制度や検討状況を踏まえると、我が国の制度整備状況は同様のレベルにあると整理できる。
 - 将来の実行に不確実性のある可逆性・回収可能性に対する規定は、一部の国における可逆性・回収可能性の維持期間に関する規定を除き、詳細な要求は示されていない。
 - 諸外国では、将来の回収費用を現世代が負担する処分費用として積み立てている事例はない。国際的には、費用負担のあり方に関して議論の余地が残されていることが認識されている。
 - 将来の可逆性・回収可能性の実行判断に係る基準や指標ならびに判断に至る評価の方法や枠組みを予め定めることには限界があるとの国際的な共通理解がある。

基本方針によって導入された可逆性・回収可能性の概念と関連する他の制度との関係

《将来世代の意思決定の柔軟性の確保》

現時点で想定される具体的な動機の例

段階プロセスへの信頼醸成
決定変更の柔軟性確保
概念や技術への信頼獲得期間の確保
代替技術への対応
社会環境変化への対応
廃棄物の資源価値への対応
安全性に係る課題への対応
(上記以外にも、他の細かな具体的な動機が想定し得る)

現時点で予見できない将来の具体的な動機

(将来の新たな動機)
(事業進展に伴うステークホルダや関心の変化等に応じた動機)
(…)

基本方針によって導入された
「可逆性・回収可能性」

- 将来の予見できない事項に対して、将来世代が柔軟性を持って対処が可能。
⇒現時点で想定される細かな具体的な動機を含めた**将来のあらゆる動機を許容**
- 将来の可逆性・回収可能性の実行は、予め特定の動機を特定（限定）するのではなく、将来世代による自らの新たな動機付けを含む多様な動機を許容。
⇒現時点で想定される具体的な**動機の幾つかを特定して対応させるものではない**

最終処分法に基づくサイト選定段階における地域に配慮した制度や今後検討が進められる安全規制制度は、動機や期間を限定して可逆性・回収可能性を担保する。

図 3.2.3-1 可逆性・回収可能性の制度としてのあり方に関する検討会での議論

定量化すべき情報		回収可能性の維持に関する技術的アプローチ						左記の定量化に必要な技術検討項目(例)
		堅置き方式			横置き方式[PEM]			
		OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3	
1.安全性への影響	(1)操業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 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)回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性 ※回収作業時に一度埋め戻した坑道を掘削して再利用することを想定した場合 a.埋め戻した坑道の再利用時の健全性 b.再利用する坑道内の安全な作業環境確保策の実施可否 2)回収時の廃棄体容器の健全性
	(2)閉鎖後長期の安全性への影響: 回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合、人工バリアや天然バリア(母岩)に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響							1)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う人工バリア等に期待する安全機能への影響 a.開放坑道を介した空気(酸素)の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響 b.廃棄体からの熱による影響 c.坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響 2)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う天然バリア(母岩)に期待する安全機能への影響 a.化学組成の異なる地下水の引き込み b.開放坑道を介した空気(酸素)の持ち込みによる母岩側への影響、など
2.回収の容易性(回収作業時間)	(1)単位ユニットあたりの回収時間(廃棄体1体又は処分坑道1本)							1)より合理的な回収作業の実現に向けた技術検討/研究開発 a.回収時間の短縮に向けた回収方法(技術・装置)の高度化 b.回収作業手順の具体化
	(2)全ての廃棄体回収に係る全体作業時間							2)より回収の容易性を高めた処分場の設計開発
3.最終閉鎖せずに回収可能性を維持できる期間								(固有の技術検討項目は想定されない。上記1.の安全性への影響に関する技術検討結果等に基づき定量化する。)
4.回収可能性に係る費用								(固有の技術検討項目は想定されない。上記1.~3.の技術検討結果等に基づき定量化する。)



図 3.2.3-2 検討会で示された回収可能性の維持に関する技術的アプローチの具体化に係る技術検討の枠組み

3.3 回収可能性維持期間の検討（第3分冊：第3章）

前節および第3分冊の別冊で示されるように、R&R検討会において、回収可能性を維持したときの地質環境や人工バリアへの影響について定量的に検討していくべき具体的な技術検討項目（以下、「定量化に必要な技術検討項目」という）が整理された。この定量化に必要な技術検討項目が、回収可能性維持に係る今後の更なる議論や技術検討を進める上での“検討のベース”と位置付けたことから、本節では表3.3-1に示す「1.安全性への影響」に関する定量化に必要な技術検討項目を対象に、定量化に必要な技術の現状整理、回収可能性維持のための技術要件についての考え方の検討、回収維持技術、回収技術などの整理と研究課題の抽出、といった定性的な検討を行った。

表 3.3-1 R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目

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) ① 回収可能性維持期間中の開放坑道の安全性への影響	1)開放坑道内の作業空間の安全性 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		
	② 回収作業時の安全性への影響（回収を実施する場合）	1)回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性 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。		
	(2) 閉鎖後長期の安全性への影響 ：回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合の、人工バリアや天然バリア（母岩）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響	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。

3.3.1 定量化に必要な技術の現状整理

本項では、定量化に必要な技術検討項目を対象に、現状での知見や着眼点の整理を行い、必要となる技術の抽出を行った。整理結果の概要を表 3.3.1-1 および表 3.3.1-2 に示す。表に示されるように、定量化に向けた技術検討に必要な技術としては、影響評価技術や原位置の状態把握のための計測技術が挙げられる。

また、定量化に必要な技術検討項目を対象に、処分場が決まっていない段階で汎用的な検討を行うという観点から、閉鎖後長期の予測まで一貫して適用可能な影響評価技術である実験や解析技術を用いた取り組みを主に整理した。なお、定量化に必要な技術検討項目に対応する影響評価技術には、原位置状態把握技術も含まれるが、これらは回収維持技術および回収技術の一部として本検討では位置づけ、3.3.3 項の回収維持技術および回収技術の整理で取り扱う。整理結果の概要を表 3.3.1-3 に示す。また、表中の定量化に必要な技術検討項目に対応する指標は、3.3.2(3)の回収可能性維持のための技術要件についての考え方の検討に基づき整理したものである。表中の取り組み状況において、本事業における検討例を除いて、既往の類似検討例が現段階ではないものについては、今後定量的評価のための解析技術等の整備が必要であり、取り組むべき課題としての優先度は高いと考えており、本事業の中で昨年度から一部着手し、本年度と来年度に検討の実施が予定されている。

表 3.3.1-1 定量化に必要な技術の現状整理 (その1)

定量化すべき情報		定量化に必要な技術検討項目 及び技術検討の視点		技術検討項目の定量化に必要な技術の現状整理	定量化に必要な技術 (評価技術)	
1 ・ 安全 性 へ の 影 響	(1) 操業 期間中の 安全性へ の影響	①回収可能性 維持期間中の 開放坑道の安 全性への影響	1) 開放坑道内の作業空 間の安全性 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)	・山岳トンネルの支保工として吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工や覆工コンク リートが支保工として用いられており、開放坑道の健全性は、坑道周辺岩盤の健全性や支保工 の健全性に影響を受けるため、これらの健全性を把握する必要がある。また、供用中のトンネ ルの維持管理ではトンネルの状況を観察、計測によってトンネルの健全性が判断されている。 ・開放坑道の健全性を把握するためには、原位置での支保工や岩盤の異常や劣化を把握する技 術が、また、開放坑道の健全性を回復するために支保工や周辺岩盤を補修・更新する技術が必要 となる。	○開放坑道の健全性評価技 術 (支保や覆工等の健全 性) (周辺岩盤の健全性) ○支保や覆工等および周辺 岩盤の原位置状態把握技術
			b.開放坑道内 (作業空 間) への廃棄体からの熱 影響	・廃棄体から発生する崩壊熱の影響については、定置後坑道を埋め戻すことを前提に、定置し た緩衝材の熱変質の可能性を考慮し、緩衝材の最高温度が100℃以下となるように処分坑道の 離隔距離や廃棄体の埋設間隔が決定されている。 ・廃棄体から発生する崩壊熱の影響を評価するためには、熱伝達・熱伝導等の解析技術や熱影 響の評価技術が必要となる。	○開放坑道内 (作業空間) への廃棄体からの熱影響に 関する評価技術 ○熱伝達・熱伝導解析技術	
	②回収作業時 の安全性への 影響 (回収を 実施する場 合)	1) 回収時に再利用する 坑道内の作業空間の安全 性 一度埋め戻した坑道の再 掘削/際利用を前提とす 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	・埋戻した坑道を再利用は土木構造物では事例がなく、鉱山等で水没させた坑道を再利用した 例がある。 ・埋め戻した坑道を再利用するには、坑道の再開放時に、周辺岩盤や埋め戻す前に施工した支 保工等の健全性の判断が必要となる。 ・長期間供用しているトンネルの健全性は維持管理により判断されているが、埋め戻し後の変 化を追跡した事例はないことから、開放坑道の健全性評価に加えて、埋め戻しによる状態変遷 の予測手法が必要になる。	○埋め戻した坑道の再利用 時の健全性評価技術 (支保 や覆工等の健全性) (周辺 岩盤の健全性) ○支保や覆工等および周辺 岩盤の原位置状態把握技術	
		b.再利用する坑道内 (作 業空間) への廃棄体から の熱影響	・埋戻し材を撤去した坑道では、回収する時期にも依存するが、廃棄体からの発熱で坑道壁面 の温度が高い状態になっている場合がある。また、廃棄体からの発熱も継続しているため、開 放坑道内 (作業空間) への廃棄体の熱影響と同様に、熱伝達・熱伝導の解析技術や熱影響の評 価技術が必要となる。	○再利用する坑道内 (作業 空間) へ廃棄体からの熱影 響に関する評価技術 ○熱伝達・熱伝導解析技術		
	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。		・回収では廃棄体を再把持して搬送するため、回収時の廃棄体が再把持、搬送に耐えるかど うかの健全性の評価が必要となる。 ・埋め戻された状態にあった廃棄体は腐食により外殻や把持部の強度が低下している可能性が あり、開放坑道が維持されている場合でも、表面の高温状態と塩分濃度の高い水滴に接するこ とで局所的な腐食が進展している可能性もある。そのため、健全性に応じた廃棄体の回収・搬 出技術も必要となる。	○定置済み廃棄体容器の健 全性評価技術 (安全に再把持でき、運搬 に耐えること)		

表 3.3.1-2 定量化に必要な技術の現状整理（その2）

定量化すべき情報	定量化に必要な技術検討項目 及び技術検討の視点	技術検討項目の定量化に必要な技術の現状整理	定量化に必要な技術 (評価技術)	
<p>1. 安全性への影響</p> <p>(2) 閉鎖後長期の安全性への影響 ：回収可能性維持期間中の後に回収せずに最終閉鎖する場合の、人工バリアや天然バリア（母岩）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響</p>	<p>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あんぜんきのうへの影響を下記観点から評価する。</p>	<p>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</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・換気によるニアフィールドの酸化雰囲気拡大、酸素持ち込みによる微生物活動の活発化などにより、金属材料の腐食速度の増加による水素ガスの発生、鋼製支保やコンクリート構造物の酸化環境での劣化促進、ベントナイトの変質など、人工バリアの機能変化が生じる可能性がある。 ・人工バリアの機能変遷を評価する技術とともに、原位置で現状を把握する技術が必要となる。 	<p>○維持期間中（操業期間中）の場の擾乱影響を考慮した人工バリア（及び他の地下構造物）の機能変遷挙動評価技術</p> <p>○人工バリア及び他の地下構造物の原位置状態把握技術</p>
	<p>b.廃棄体からの熱による影響</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体を設置した後、坑道を開放した状態において、廃棄体からの熱が人工バリア等の安全機能への影響の有無を定量的に評価する必要がある。 ・開放坑道のままで熱影響を提言するためには、換気が最も有効と考えられることから、換気の維持管理や更新技術が重要となる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・処分坑道を含め地下施設では処分場を閉鎖するまで、発生する湧水を排水しなければならない。回収可能性維持により坑道を開放しておく場合、坑道の健全性と共に排水システムの維持管理や更新が必要となる。 ・坑道内の排水に伴い、ニアフィールドは不飽和環境となり、換気による酸素供給と相関して金属材料の腐食促進、ブロック設置方式でのベントナイト流出の可能性、支保材等の劣化を促進する環境が形成されるため、定量的な評価でその影響程度を把握しておく必要がある。 	
	<p>c.坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・回収可能性維持のために廃棄体を設置した処分坑道を長期に開放しておく場合、換気や排水行為が周辺母岩の地質環境特性を変化させ、天然バリアの核種閉じ込め機能を低下させる可能性がある。 ・このような擾乱は、処分場の立地環境、開放している期間、着目するスケールによっても程度や範囲が異なり、また、長期安全性への影響の観点からは、擾乱された環境がどの程度の期間で回復あるいは安定な環境となるかを定量的に推定しておくことが重要となる。 		
	<p>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わる次のような影響を評価する。</p>	<p>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）</p>		<ul style="list-style-type: none"> ・回収可能性維持のために廃棄体を設置した処分坑道を長期に開放しておく場合、換気や排水行為が周辺母岩の地質環境特性を変化させ、天然バリアの核種閉じ込め機能を変動させる可能性がある。 ・このような擾乱は、開放している期間の長さ、着目するスケール、処分場の地質環境によっても程度が異なり、また、長期安全性への影響の観点からは擾乱された環境がどの程度の期間で回復あるいは安定な環境となるかを定量的に推定しておくことが重要となる。
	<p>b.開放坑道を介した酸素の供給や環総環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・回収可能性維持のために廃棄体を設置した処分坑道を長期に開放しておく場合、換気や排水行為によりベースラインに与える影響とその回復状況を定量的に予測した事例はこれまでない。 ・また、ベースラインの擾乱が天然バリアの安全機能に与える影響について検討された事例はない。特に地下深部でのベースラインの擾乱が天然バリアの安全機能に与える影響を評価するならば、ベースラインの活用方策の検討が必要である。 		
	<p>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</p>	<p>・回収維持期間中の坑道内の排水と換気によりベースラインに与える影響とその回復状況を定量的に予測した事例はこれまでない。</p> <p>・また、ベースラインの擾乱が天然バリアの安全機能に与える影響について検討された事例はない。特に地下深部でのベースラインの擾乱が天然バリアの安全機能に与える影響を評価するならば、ベースラインの活用方策の検討が必要である。</p>		

表 3.3.1-3 影響評価における解析技術等の取り組み状況

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」			解析技術等の取り組み状況
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	
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	<p>1)開放坑道内の作業空間の安全性</p> <p>a.開放坑道の健全性（空間安定性）</p> <p>b.開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響</p> <p>a. 指標：岩盤のひずみおよび応力、支保材料の応力</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 設置方式 や状態 オプション を考慮した、力学解析 による 坑道安定性 に関する 解析的評価手法 と解析結果例 を提示。（H28RWMC 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発報告書） <p>b. 指標：坑内気温</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 状態オプションを考慮した、非定常三次元熱伝導解析による換気の無い状態での廃棄体からの熱影響に関する解析的評価手法と解析結果例を提示。（H26RWMC 地層処分回収技術高度化開発報告書） ・ 事業期間中の換気（冷房などの空調）を考慮した解析的評価手法は確立されており、処分場レイアウトを考慮した NUMO による設計検討例がある。（H29 土木学会年次学術講演会, No. VII-038）
		② 回収作業時の安全性への影響（回収を実施する場合）	<p>1)回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性</p> <p>a.埋め戻した坑道の再利用時の健全性</p> <p>b.再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響</p> <p>2)回収時の廃棄体容器の健全性</p> <p>a. 指標：岩盤のひずみおよび応力、支保材料の応力</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 設置方式 や状態 オプション を考慮した、力学解析 による 坑道安定性 に関する 解析的評価手法 と解析結果例 を提示。（H28RWMC 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発報告書） <p>b. 再掘削／再利用時は建設時と同様の定量的評価方法が適用可能。</p> <p>指標：オーバーバックとその溶接部の材料、形状・厚さ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 空気・地下水・ベントナイトと接触していると想定した埋め戻し状態における廃棄体容器（炭素鋼）の腐食程度に関して解析的手法と解析結果例を提示。（H26RWMC 地層処分回収技術高度化開発報告書） ⇒PEM 容器が炭素鋼の場合は、上記評価手法が適用可能。
		(2) 閉鎖後長期の安全性への影響 ：回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合の、人工バリアや天然バリア（母岩）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響	<p>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</p> <p>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</p> <p>b.廃棄体からの熱による影響</p> <p>c.坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響</p> <p>a. 指標：オーバーバックとその溶接部の材料、形状・厚さ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 空気・地下水・ベントナイトと接触していると想定した埋め戻し状態を設定し、空気（酸素）の影響による炭素鋼の腐食程度の解析的手法と解析結果例を提示。（H26RWMC 地層処分回収技術高度化開発報告書） ・ 人工バリアの評価手法については検討例あり。（H19～H24JAEA 処分システム化学影響評価高度化開発報告書、H25～H28RWMC 処分システム工学確認報告書） <p>b. 指標：オーバーバックとその溶接部の材料、形状・厚さ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 廃棄体容器については耐熱性に対する設計がされ、耐食性や耐圧性への影響も考慮した検討例がある。（H25～H28RWMC 処分システム工学確認報告書） <p>指標：緩衝材の材料</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 緩衝材は、温度環境の定量的評価に基づき、変質が生じないように設計等により対策を講じる。（H26RWMC 地層処分回収技術高度化開発報告書） <p>c. 指標：ベントナイト含有率、乾燥密度（密度）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 緩衝材の流出現象については、既往研究の試験によりデータが取得されている。（H24RWMC 処分システム工学要素技術高度化報告書） ・ 坑内湧水量については、状態オプションを考慮した坑道開放期間中に継続する坑内湧水量の解析的評価を現在実施中。
	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	<p>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）</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>a. 指標：酸化還元電位，地下水の pH，地下水組成，鉱物組成など</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 地下水流動の程度に関する解析的評価手法は存在するが、擾乱影響の評価実施例は見当たらないため、評価方法に関する調査を実施中。 <p>b. 指標：酸化還元電位，地下水の pH，地下水組成，鉱物組成など</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 評価実施例は見当たらないため、影響評価手法に関する調査を実施中。 <p>c. 指標：流速</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 状態オプションを考慮し、閉鎖後の再冠水に要する時間に着目した解析的評価を実施中。ベースラインへの回復過程・程度は、広域の地形・地質、涵養量等を仮定すれば解析的評価は可能。 	

3.3.2 回収可能性維持のための技術要件についての考え方の検討

本項では、定量化に必要な技術検討項目を対象に、それぞれに関連する技術に求められる回収可能性維持を考慮した場合に付加される技術要件設定の考え方を検討する。

(1) 検討方法および検討の流れ

回収可能性維持のための技術要件についての考え方については、以下の二つのアプローチで検討することが可能である。

- ① 基本方針が示されるより前に、第2次取りまとめ[5]や NUMO がこれまで設定してきた操業から閉鎖までの安全確保に係る技術要件（あるいは設計要件）を参考に、回収可能性を維持することにより付加される技術要件設定の考え方を検討
- ② 回収可能性維持に係る「基本方針」[1]を最上位として、回収可能性維持に係わる基本方針からの要求事項について、下位の個々の部分に段階的に詳細化して検討

本項の検討では、主として①のアプローチによって設定方法と具体例を検討することにより整理した。検討のフロー図を図 3.3.2-1 に示す。NUMO の「処分場の安全機能と技術要件（2010年度）」[4]の技術要件では、処分場の構成要素に対して技術要件が設定されていることから、本検討でもこれを踏襲して、最初に、定量化に必要な各技術検討項目に関する検討対象の整理を行う。操業期間中の定量化に必要な技術検討項目に関する検討対象は安全対策が施される構成要素とし、閉鎖後長期の検討対象は安全機能を有する構成要素として整理する。次に、整理した定量化に必要な技術検討項目ごとの構成要素に関して NUMO の技術要件を示す。そして、それらに対して、回収可能性維持を考慮した場合の考え方について具体例を挙げて提示する。また、検討した技術要件の具体例について、回収可能性維持を判断するための指標の整理も行った。

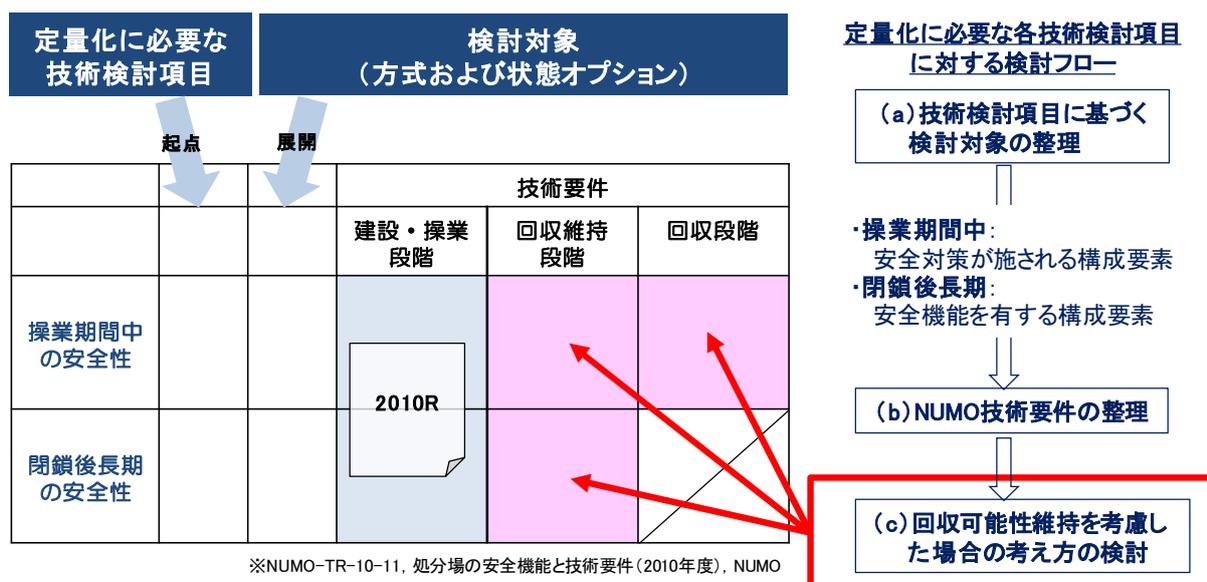


図 3.3.2-1 回収可能性維持のための技術要件についての考え方の成果イメージと検討フロー

(2) 技術要件の設定方法と具体例の検討

定量化に必要な各々の技術検討項目を対象に、前項で示した検討方法によって技術要件の設定方法と具体例の検討を行った。ここでは、回収可能性維持を考慮した場合に新たに検討が必要となる項目について検討結果を例示する。

1) 再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響（表 3.3.2-1）

(a) 定量化に必要な技術検討項目に基づく検討対象の整理

検討対象は埋め戻された坑道となるため、状態オプションによって対象となる坑道の種類は増減する。最も多くの種類が対象となるのは縦置きブロック方式および横置き PEM (Prefabricated Engineered Barrier System Module) 方式ともに状態オプション3 (OP3) のケースであり、連絡坑道、主要坑道および処分坑道が対象となる。

(b) NUMO 技術要件の整理

NUMO の技術要件[4]では、「事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係」のうち、一般労働安全の「作業環境の維持」に「換気経路の確保」として安全対策が示されており、その構成要素には地下施設が挙げられている。また、地下施設の技術要件のうち、アクセス坑道、連絡坑道および処分坑道（処分孔）の技術要件として「安全に建設・操業・閉鎖が実施できること」が示されている

(c) 回収可能性維持を考慮した場合の考え方の検討

上記の NUMO の技術要件では、坑道を再掘削／再利用することを想定した検討となっていないが、再利用時にも操業時と同様の安全確保が求められる。すなわち、回収可能性維持を考慮した場合の回収段階においても安全確保が求められ、安全に操業（回収）が実施できることが必要と考えられる（表 3.3.2-1 の黄色マーカー参照）。具体的には、処分深度 1000m、地表温度 15℃、地温勾配 0.03℃/m とした場合、坑道周辺の岩盤温度は 45℃となることから、廃棄体の有無にかかわらず、一般労働安全を確保するためには換気などの対策が必要となる。

2) 回収時の廃棄体容器の健全性（表 3.3.2-2）

(a) 定量化に必要な技術検討項目に基づく検討対象の整理

検討対象は廃棄体容器（オーバーパック）であるため、定置方式や状態オプションによる検討対象の違いは無い。なお、横置き PEM 方式では、PEM 容器（鋼殻）の構造健全性が確保されている場合は PEM ごと搬出する方法が考えられ、構造健全性が確保できない場合は定置された PEM から廃棄体容器を取り出して回収する方法が考えられる。

(b) NUMO 技術要件の整理

NUMO の技術要件[4]では、「事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係」のうち、放射線安全の「作業時閉じ込め／廃棄体から放射性物質の漏洩の防止」に「搬送時の落下・転倒・衝突時の廃棄体への衝撃の緩和」として安全対策が示されており、その構成要素にはオーバーパックなどが挙げられている。ここでは安全対策としての記載のみであり、技術要件については示されていないが、「処分場の安全機能と技術要件（2010年度版）[6]」には設計要件として「耐圧性を有すること（埋設後作用する機械的荷重に対して構造健全性を維持し、閉じ込め性を損なわないこと）」がある。また、閉鎖後長期の「多重バリアシステムの構成要素の技術要件」にオーバーパックの技術要件（基本的なバリア性能の確保）として構造健全性（埋設後作用する機械的荷重に対して構造健全性を維持すること）がある。

なお、PEM 容器は廃棄体および緩衝材を一体化させることによる、品質管理・品質確保の容易性向上や物流の効率性向上を目的とした構成要素であり、作業時の PEM に技術要件は設定されていない。

(c) 回収可能性維持を考慮した場合の考え方の検討

回収可能性維持を考慮した場合の回収段階においても、上記を技術要件として適用できると考えられる（表 3.3.2-2 の黄色マーカー参照）。

作業時の PEM 容器に技術要件は設定されておらず、本検討でも技術要件の設定は行わないが、回収時の PEM 容器の望ましい特性として、「構造健全性が維持されていること」を挙げることができる。

3) 坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響（表 3.3.2-3）

(a) 定量化に必要な技術検討項目に基づく検討対象の整理

検討対象は閉鎖後長期の安全性に対して安全機能を有する人工バリアおよび地下構造物となる。人工バリアはオーバーパックおよび緩衝材が構成要素であり、地下構造物は埋め戻し材および止水プラグが構成要素である。坑内湧水により機能劣化が生じる可能性のある構成要素として、オーバーパック、緩衝材、埋め戻し材および止水プラグがあげられ、安全機能を有するすべての構成要素が対象となる。

(b) NUMO 技術要件の整理

NUMO の技術要件[4]では、「閉鎖後長期の安全確保の安全機能と構成要素の関係」としてそれぞれの構成要素について以下のように述べられている。

オーバーパックに関する安全機能は、閉鎖後閉じ込めの「放射性物質の浸出抑制」に「発熱が著しい期間の地下水接触防止」、および、「放射性物質の移行抑制」に「放射性物質の溶解度制限」が示されている。これによりオーバーパックの技術要件として挙げられているもののうち、坑内湧水による影響を考慮すべき技術要件として「耐食性」が示されている。

緩衝材に関する安全機能は、閉鎖後閉じ込めの「放射性物質の移行抑制」に「放射性物質の溶解度制限」、「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止・抑制」および「収着による放射性物質の移行遅延」が示されている。これにより緩衝材の技術要件として挙げられているもののうち、坑内湧水による影響を考慮すべき技術要件（長期健全性の維持）として、「緩衝材流出の抑制」が示されている。

埋め戻し材に関する安全機能は、閉鎖後閉じ込めの「放射性物質の移行抑制」に「アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制」が示されている。これにより埋め戻し材の技術要件として挙げられているもののうち、坑内湧水による影響を考慮すべき技術要件として「施工時の隙間の充てん」が示されている。

止水プラグに関する安全機能は、閉鎖後閉じ込めの「放射性物質の移行抑制」に「アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制」が示されている。これにより止水プラグの技術要件として挙げられているもののうち、坑内湧水による影響を考慮すべき技術要件として「施工時の隙間の充てん」が示されている。

(c) 回収可能性維持を考慮した場合の考え方の検討

回収可能性維持を考慮した場合の回収維持段階においても、オーバーパック、緩衝材に関して、上記の技術要件が適用できると考えられる。埋め戻し材および止水プラグについては、緩衝材と同様の考え方で「ベントナイト流出の抑制」が考えられる（表 3.3.2-3 の黄色マーカー参照）。

表 3.3.2-1 回収可能性維持を考慮した場合の技術要件の具体例 (その1)

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(例)」				技術要件								
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)						建設・操業(定置まで)段階 (NUMO-TR-10-11)	回収維持段階	回収段階
				堅置き方式			横置き方式[PEM]					
			OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3				
1. 安全性への影響	(1) 操業期間中の安全性への影響	(2) 回収作業時の安全性への影響 (回収を実施する場合)	1)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							a. 空洞の力学的安定性が確保されること (表 4-6) b. 安全に建設・操業・閉鎖が実施できること (表 4-6) ※ a. は従来の建設・操業段階と同じ、b. は従来の操業段階と同じ		a. 空洞の力学的安定性が確保されること b. 安全に操業(回収)が実施できること

※黄色マーカーは建設・操業(定置まで)段階で記載がなかったもの

表 3.3.2-2 回収可能性維持を考慮した場合の技術要件の具体例 (その2)

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(例)」				技術要件								
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)						事業段階		
				堅置き方式			横置き方式[PEM]			建設・操業段階 (NUMO-TR-10-11)	回収維持段階	回収段階
			OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3				
1. 安全性への影響	(1) 操業期間中の安全性への影響	(2) 回収作業時の安全性への影響 (回収を実施する場合)	2)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。							・廃棄体から放射性物質の漏洩の防止 (操業時閉じ込め(オーバーバック)) (表 4-4) ※安全対策としての記載のみ ・構造健全性 (オーバーバック) (表 3-7) ※閉鎖後長期の安全確保としての記述		・廃棄体容器 (オーバーバック) の構造健全性が維持されること ※PEMには要件ではないが望ましい特性を検討

・黄色マーカーは建設・操業段階で記載がなかったもの

表 3.3.2-3 回収可能性維持を考慮した場合の技術要件の具体例 (その3)

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(例)」		検討対象(イメージ)						技術要件		
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	縦置き方式			横置き方式[PEM]			事業段階		
		OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3	建設・操業段階 (NUMO-TR-10-11)	回収維持段階	回収段階
1. 安全性への影響	(2) 閉鎖後長期の安全性への影響 : 回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合、人工バリアや天然バリア(母岩)に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響	<p>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</p> <p>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。</p> <p>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</p> <p>b.廃棄体からの熱による影響</p> <p>c.坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響</p>						<p>a. ・オーバーバック: 耐食性(表 3-7)</p> <p>・緩衝材: ー</p> <p>・埋め戻し材: ー</p> <p>・止水プラグ: ー</p> <p>b. ・オーバーバック: 耐熱性(表 3-8)</p> <p>・緩衝材: 耐熱性(表 3-11)</p> <p>・埋め戻し材: ー</p> <p>・止水プラグ: ー</p> <p>c. ・オーバーバック: 耐食性(表 3-7)</p> <p>・緩衝材: 緩衝材流出の抑制(表 3-11)</p> <p>・埋め戻し材: 施工時の隙間充てん(自己シール性)(表 3-14)</p> <p>・止水プラグ: 施工時の隙間充てん(自己シール性)(表 3-14)</p> <p>※影響の対象となる安全機能を有する構成要素の技術要件</p>	<p>a. ・オーバーバック: 耐食性</p> <p>・緩衝材: ー</p> <p>・埋め戻し材: ー</p> <p>・止水プラグ: ー</p> <p>b. ・オーバーバック: 耐熱性</p> <p>・緩衝材: 耐熱性</p> <p>・埋め戻し材: ー</p> <p>・止水プラグ: ー</p> <p>c. ・オーバーバック: 耐食性</p> <p>・緩衝材: 緩衝材流出の抑制</p> <p>・埋め戻し材: ベントナイト成分流出の抑制</p> <p>・止水プラグ: ベントナイト成分流出の抑制</p>	

・黄色マーカーは建設・操業段階で記載がなかったもの

(3) 回収可能性維持を判断するための指標の検討

前述した技術要件の具体例について、回収可能性維持を判断するための指標の例を整理した。指標は、「処分場の安全機能と技術要件（2010年度）[4]」、「地層処分事業の安全確保（2010年度版）[7]」、および法令等に基づき整理を行った。整理結果の概要を表 3.3.2-4 に示す。なお、開放坑道の健全性（空間安定性）および埋め戻した坑道の再利用時の健全性における指標の一つとして支保材料の応力が挙げられるが、支保材料は岩盤に応じて種類が変わるため、それに対応して部材ごとに指標を設定することが考えられる。また、開放坑道内（作業空間）および再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響における指標は坑内気温と考えられ、建設・操業時も同様で、労働安全衛生規則[8]の第六百十一条に準じる必要がある。

表 3.3.2-4 回収可能性維持を判断するための指標例

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」			回収可能性維持期間を判断するための指標案	
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		
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健全性への影響	<p>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</p>	<p>a. 岩盤のひずみおよび 応力、支保材料の応力（設計項目） b. 坑内気温（坑内における気温：三十七度以下 [労働安全衛生規則]）</p>
		② 回収作業時の安全性への影響（回収を実施する場合）	<p>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</p> <p>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。</p>	<p>a. 岩盤のひずみおよび 応力、支保材料の応力（設計項目） b. 坑内気温（坑内における気温：三十七度以下 [労働安全衛生規則]）</p> <p>・オーバーバックとその溶接部の材料、形状・厚さ（設計項目の一部）</p>
	(2) 閉鎖後長期の安全性への影響 ：回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合、人工バリアや天然バリア（母岩）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響	<p>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</p> <p>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</p>	<p>a. ・オーバーバック：本体と溶接部の材料、形状・厚さ（設計項目の一部） ・緩衝材：－ ・埋め戻し材：－ ・止水プラグ：－</p> <p>b. ・オーバーバック：材料（設計項目の一部） ・緩衝材：材料 ・埋め戻し材：－ ・止水プラグ：－</p> <p>c. オーバーバック：本体と溶接部の材料、形状・厚さ（設計項目の一部） ・緩衝材：ベントナイト含有率、乾燥密度（密度） ・埋め戻し材：ベントナイト含有率、乾燥密度（密度） ・止水プラグ：ベントナイト含有率、乾燥密度（密度）</p> <p>a. 酸化還元電位、地下水の pH、地下水組成、銻物組成など b. 酸化還元電位、地下水の pH、地下水組成、銻物組成など c. 流速（流量）など</p>	

3.3.3 回収維持技術、回収技術などの整理と研究課題の抽出

本項では、定量化に必要な技術検討項目を対象として、回収維持技術および回収技術の整理と研究課題の抽出を行った。なお、3.3.1 項で述べたように、本検討では、原位置状態把握技術を回収維持技術および回収技術の一部として位置づけている。

平成 27 年度および平成 28 年度の本事業の検討[2]、[3]を参考に、現状適用できる技術の整理を行うと共に、回収維持技術および回収技術に関連する最新技術の研究開発状況について調査を行った。なお、回収技術の研究開発は、本事業の実証試験にて行われており、これが最新技術に該当する。そのため、ここでは特に回収維持技術に関連するインフラの維持管理分野での最新の研究開発状況および動向について調査を行った。そして、その最新技術の調査結果を踏まえ、定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術および回収技術に関して、今後開発が必要な技術等の研究課題を抽出し、整理を行った。定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術および回収技術に関する研究課題を抽出して整理した表を表 3.3.3-1 に示す。

表 3.3.3-1 より、回収維持技術および回収技術の研究課題に共通しているのは、処分場の地下坑道が大深度に建設されること、処分坑道とその領域が長大であること、回収可能性維持状態によっては坑道内が狭隘な空間となることであり、そのような場所での作業に対して作業期間中の一般労働安全が求められることである。また、作業領域が放射線管理区域に指定された場合には、放射線安全の確保に関しての技術が重要な課題となる。したがって、共通した研究課題として、遠隔操作により対応する技術が挙げられる。加えて、回収可能性維持期間中の埋戻し状態にもよるが、各種の機器やシステム、対策技術等の更新や置き換えは簡単ではないことから、それらの長期健全性の維持が研究課題として挙げられる。

表 3.3.3-1 定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術および回収技術に関する研究課題

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」		関連する回収維持技術、回収技術	研究課題	
定量化すべき情報				
1. 安全性への影響	(1) 作業期間中の安全性への影響	① 回収可能性維持期間中の開放坑道の安全性への影響 1)開放坑道内の作業空間の安全性 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	【回収維持技術】 a. 支保工等の維持管理・更新技術（異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術） b. 換気設備の維持管理・更新技術（異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術） ※他に、作業空間の安全性確保のために、排水設備などの維持管理・更新技術、放射線防護に関する技術などがある。	【回収維持技術】 a. 大深度・長大・狭隘な空間に対応可能な支保工等の維持管理・更新技術の高度化（特に、横置き方式 OP1 の場合の狭隘空間への対応） ・遠隔操作可能なロボット等による支保工等の維持管理・更新技術 ・長期健全性維持可能な計測器および計測システム b. 大深度・長大・狭隘な空間に対応可能な換気設備の維持管理・更新技術の高度化（特に、横置き方式 OP1 の場合の狭隘空間への対応） ・遠隔操作による換気設備の維持管理・更新技術 ・長期健全性維持可能な計測器および計測システム
		② 回収作業時の安全性への影響（回収を実施する場合） 1)回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性 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	【回収技術】 a. 廃棄体へのアクセス技術（ブラグ・埋め戻し材除去技術、支保工等の維持管理・更新技術、異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術） b. 換気設備の再設置・維持管理・更新技術（再設置技術、異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術） ※他に、作業空間の安全性確保のために、排水設備などの再設置・維持管理・更新技術、放射線防護に関する技術などがある。	【回収技術】 a. 大深度・長大・狭隘な空間に対応可能な廃棄体へのアクセス技術の高度化（特に、横置き方式 OP2,OP3 の場合の狭隘空間への対応） ・遠隔操作可能なロボット等による廃棄体へのアクセス技術 ・長期健全性維持可能な計測器および計測システム b. 大深度・長大・狭隘な空間に対応可能な換気設備の再設置・維持管理・更新技術の高度化（特に、横置き方式 OP2,OP3 の場合の狭隘空間への対応） ・遠隔操作による換気設備の維持管理・更新技術 ・長期健全性維持可能な計測器および計測システム
		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。	【回収技術】 ・廃棄体回収・搬出技術 ・横置き方式では、PEM 容器の構造健全性評価技術、PEM 容器の構造健全性が保持されている場合は PEM 搬出技術、PEM 容器の構造健全性が保持されていない場合は PEM から廃棄体を取り出す技術	【回収技術】 ・横置き方式では、遠隔操作可能なロボット等による、PEM 容器の構造健全性評価技術・構造健全性が保持されていない PEM 容器からの廃棄体取り出し・回収・搬出技術の実証と高度化 ・縦置き方式、および横置き方式の健全な PEM 容器の回収技術についてはさらなる高度化（現在実証中）
	(2) 閉鎖後長期の安全性への影響 ：回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合、人工バリアや天然バリア（母岩）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響	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	【回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）】 a. — b. 換気設備の維持管理・更新技術（異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術） c. 排水設備の維持管理・更新技術（異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術）、湧水抑制対策技術	【回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）】 a. — b. 大深度・長大・狭隘な空間に対応可能な換気設備の維持管理・更新技術の高度化（特に、横置き方式 OP1 の場合の狭隘空間への対応） ・遠隔操作による換気設備の維持管理・更新技術 ・長期健全性維持可能な計測器および計測システム c. 大深度・長大・狭隘な空間に対応可能な技術の高度化（特に、横置き方式 OP1 の場合の狭隘空間への対応） ・遠隔操作による排水設備の維持管理・更新技術 ・長期健全性維持可能な計測器および計測システム ・長期健全性維持可能な湧水抑制対策技術（グラウト技術）
		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わ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	【回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）】 a. 湧水抑制対策技術（グラウト技術） b. — c. 湧水抑制対策技術	【回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）】 a. 湧水抑制対策技術（グラウト技術）の高度化 ・長期健全性維持可能な湧水抑制対策技術（グラウト技術） ・長期健全性維持可能な計測器および計測システム b. 還元環境回復促進技術の開発 c. 湧水抑制対策技術（グラウト技術）の高度化 ・長期健全性維持可能な湧水抑制対策技術（グラウト技術） ・長期健全性維持可能な計測器および計測システム

3.4 回収可能性維持期間の影響に関する定量的評価（第3分冊：第4章）

本節では、回収可能性を維持したことによる坑道および周辺地質環境への影響の評価方法を示すために、評価方法の具体化を行う。評価を行う際の検討方針として、下記の2つの方針を昨年度に設定している[3]。

方針1：回収可能性維持状態、維持期間の違いを考慮した検討を行う

- ・維持状態：維持状態：埋戻し状態の違いによる影響を定量的に把握する
(安全性を評価する際に考慮すべき材料・部材を考慮)

- ・維持期間：時間依存性による、物性の変化や境界条件の変化を考慮した評価する

方針2：影響の定量的評価手法と安全性に対する影響低減技術の効果を明確にした検討を行う

- ・評価方法：熱・水理学・力学・化学（THMC）各影響を明瞭に把握するため、連成解析ではなく其々の解析で評価する

- ・低減技術：初期品質向上技術、維持管理・修繕技術を適用した場合の効果を把握する

これらの方針を基に、解析的検討のための具体的な手法や手順の4ヵ年計画を策定し、昨年度は、力学的影響の評価方法の検討として、坑道安定性に関する解析手法の検討に着手した[3]。定量的に評価するための条件を検討し、既往の検討の設計例等に基づき[5]、[9]、前提条件、岩盤や支保工など各材料の構成則を設定し、時間依存性を考慮できる解析手法により坑道安定性の評価方法の検討を行った。

一方で、前節でも述べたように、定量化に必要な技術検討項目を検討のベースと位置付けたことから、定量化に必要な技術検討項目に対する定量評価の検討も加えることとした。定量化に必要な技術検討項目については、表 3.3.1-3 に示されたように、過去に類似の検討がされているもの、または現在、別の事業で検討しているものがある。従って本事業では、既往の類似検討例が現段階ではなく、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以下の6項目に対して、影響の評価方法を示すために、評価方法の具体化を行う必要がある。また以下の項目に関しては、表 3.3.2-4 に示す指標案を考慮すると、THMCの複数の影響評価に関わってくることが分かる。

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

なお、「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」については、上述したように、既に昨年度より対応した検討を力学的影響評価方法の検討で始めている[3]。

また、昨年度は硬岩系と軟岩系の両岩盤を検討対象としていたが、今年度の検討からは硬岩系岩盤は外部機関で検討されることになったため、軟岩系（堆積岩系）についての検討を行うこととなった。上記の検討方針のもと、本年度は、回収可能性維持期間の影響評価方法の検討と課題を抽出した。

3.4.1 回収可能性維持期間の影響評価方法の検討

(1) 力学的影響評価方法の検討

1) 埋戻し材の膨潤圧を設定した検討

昨年度の検討では、埋戻し材から生じる膨潤圧を考慮していなかったことから、埋戻し材の膨潤圧を考慮した場合に、坑道の周辺岩盤の長期的な変形挙動にどのような影響を与えるのかを確認を行った。解析条件や構成則に関しては昨年度と同様とし、昨年度の検討における新第三紀堆積岩—横置き—状態オプション②（PEM 設置後、処分坑道まで埋戻し）のケース8（以下、「昨年度ケース8」と称する）に対して、埋戻し材の膨潤圧を考慮した場合の解析を行った。

埋戻し材の膨潤圧については、NUMO の公開資料に示された埋戻し材の仕様の設定例[10]より、埋戻し材の有効粘土密度を 1.15Mg/m^3 とし、菊池・棚井による有効粘土密度と平衡膨潤圧の関係[11]から、地下水の水質条件を降水系と仮定して、膨潤圧を 0.38MPa と設定した。なお、菊池・棚井の試験結果[11]では、蒸留水の場合、経過時間 10 時間程度で膨潤圧が平衡状態に達しており、解析期間に対して埋戻し材の膨潤圧は瞬間的に平衡状態に達するものと考えられることから、膨潤圧の経時変化は考慮しないものとした。

解析結果の一例を図 3.4.1-1 に示す。1000 年後の最大せん断ひずみの分布は、昨年度ケース8と膨潤圧を考慮した本解析結果を比較すると顕著な違いは見られないが、膨潤圧を考慮した本解析結果の方が最大せん断ひずみの高い領域の広がり若干小さくなり、膨潤圧の作用によりクリープ変形が抑制されたことによる影響が僅かではあるが現れている。また昨年度の検討と同様に、肩部において最大せん断ひずみが限界せん断ひずみ（上限）の $\gamma_{\max}=1.340\%$ を超える期間（坑道安定性の保持期間）を評価したところ、その期間は膨潤圧の作用によって昨年度より 20%程度延長された。

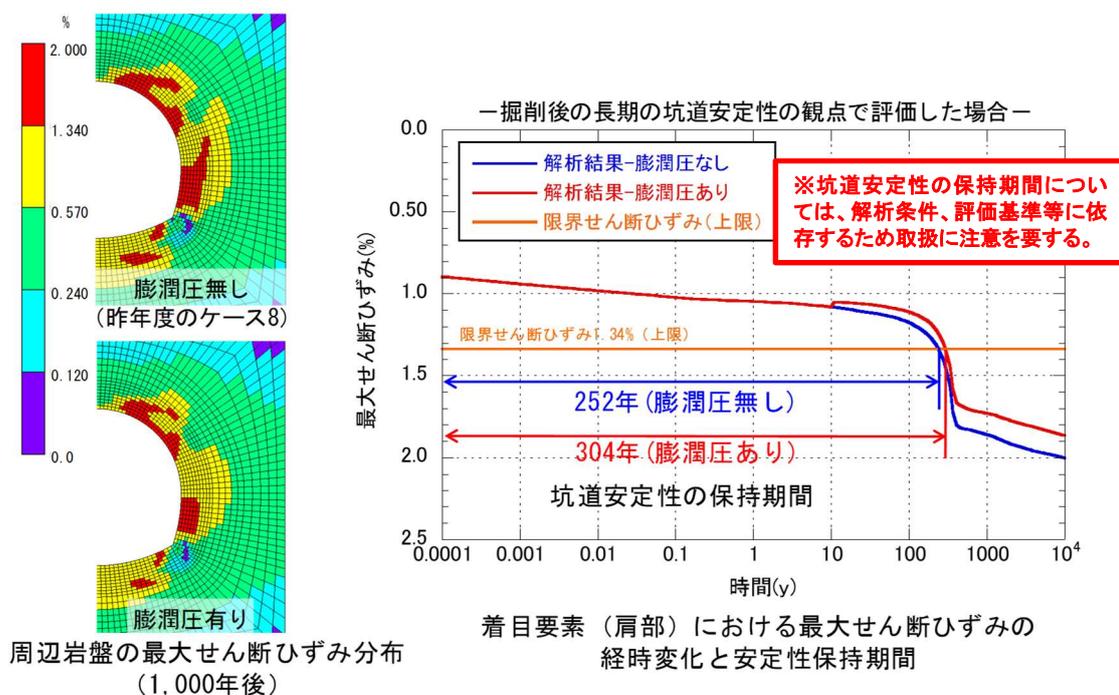


図 3.4.1-1 埋戻し材の膨潤圧を設定した解析結果例

2) 埋戻し材の坑道変形に対する支持効果に関する検討

昨年度の検討では、処分坑道の埋戻しの有無が坑道安定性に影響を与えていなかったことから、ここでは坑道の変形に対して埋戻し材の支持効果を把握するために、表 3.4.1-1 に示すように、昨年度ケース 8 を対象として、埋戻し材の初期剛性を昨年度の検討より 10 倍固くした解析（ケース a-10）を行った。また支保工とインバートが埋戻し材に置き換わることは現実にはあり得ないが、坑道の変形に対して支保工と埋戻し材のいずれが有意な影響を与えているのかを把握するために、支保工とインバートが埋戻し材に置き換わる解析も行った（ケース n-1 および n-10）。

表 3.4.1-1 埋戻し材の坑道変形に対する支持効果に関する解析ケース

		埋戻し材の初期剛性	
		39MPa 【昨年度と同じ】	390MPa 【昨年度の 10 倍】
埋戻し材設置後の支保工とインバート	あり【a】	ケース a-1 (=昨年度ケース 8)	ケース a-10
	埋戻し材に置き換わる【n】	ケース n-1	ケース n-10

解析結果の一例を図 3.4.1-2 に示す。埋戻し材の初期剛性を 10 倍にした場合、最大せん断ひずみ分布やその経時変化、そして肩部における最大せん断ひずみが限界せん断ひずみ（上限）の $\gamma_{max}=1.340\%$ を超える期間（坑道安定性の保持期間）はほとんど変わらない結果となり、埋戻し材の初期剛性の違いが周辺岩盤の変形抑制や坑道安定性の保持期間の延長に対してほとんど効果がないことが分かった。また、支保工がある場合（ケース a-1 とケース 10）と、埋戻し後に支保工がなくなる場合（ケース n-1 とケース n-10）を比較すると、支保工がある場合の方が変形は抑えられていて、保持期間が長くなっていることが分かった。

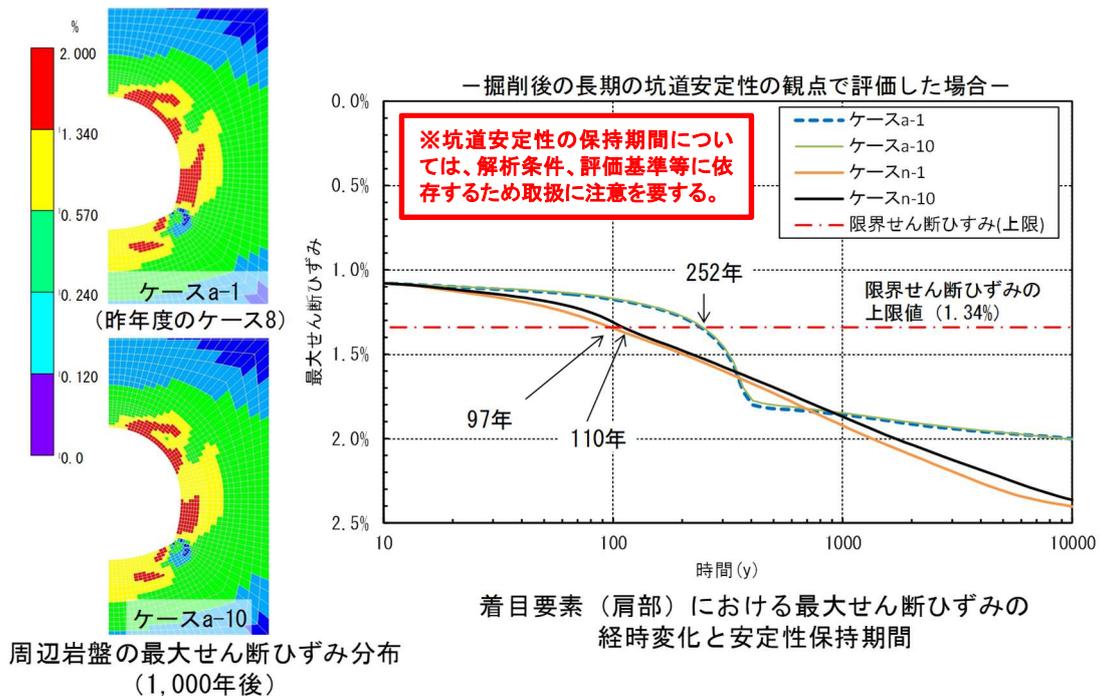


図 3.4.1-2 埋戻し材の坑道変形に対する支持効果に関する解析結果例

3) 各材料の物性変化特性の条件を変えた検討

昨年度の検討では、各材料の物性値の違いによって解析結果がどのように変わるのかについての知見は得られていなかったことから、ここでは昨年度ケース8を対象として、坑道安定性の保持期間に大きな影響を与えるパラメータであると考えられる吹付けコンクリートの溶脱に起因する剛性変化の速度を変えた場合の解析を行うことにした。昨年度ケース8では、吹付けコンクリートの剛性は、400年後に1/10になるものとしていたが、今年度の解析では表3.4.1-2に示すように、200年後に1/10になる場合と800年後に1/10になる場合を想定した解析を行った。

表 3.4.1-2 吹付けコンクリートの剛性変化の速度を変えた解析ケース

ケース名	1/10 となるまでの期間 (溶脱期間)
ケース A (=昨年度ケース8)	400年
ケース B	200年
ケース C	800年

解析結果の一例を図3.4.1-3に示す。300年後の最大せん断ひずみ分布は、剛性が1/10になるまでの期間(溶脱期間)が短い方が最大せん断ひずみの大きい領域が肩部や側部に広がる結果となった。また、肩部にける最大せん断ひずみが限界せん断ひずみ(上限)の $\gamma_{max}=1.340\%$ を超える期間(坑道安定性の保持期間)はケースによって大きく異なり、「3.4.1(1)1 埋戻し材の膨潤圧を設定した検討」の結果と比較してみると、埋戻し材よりも吹付けコンクリートの物性が坑道安定性の保持期間に大きく影響することが分かった。

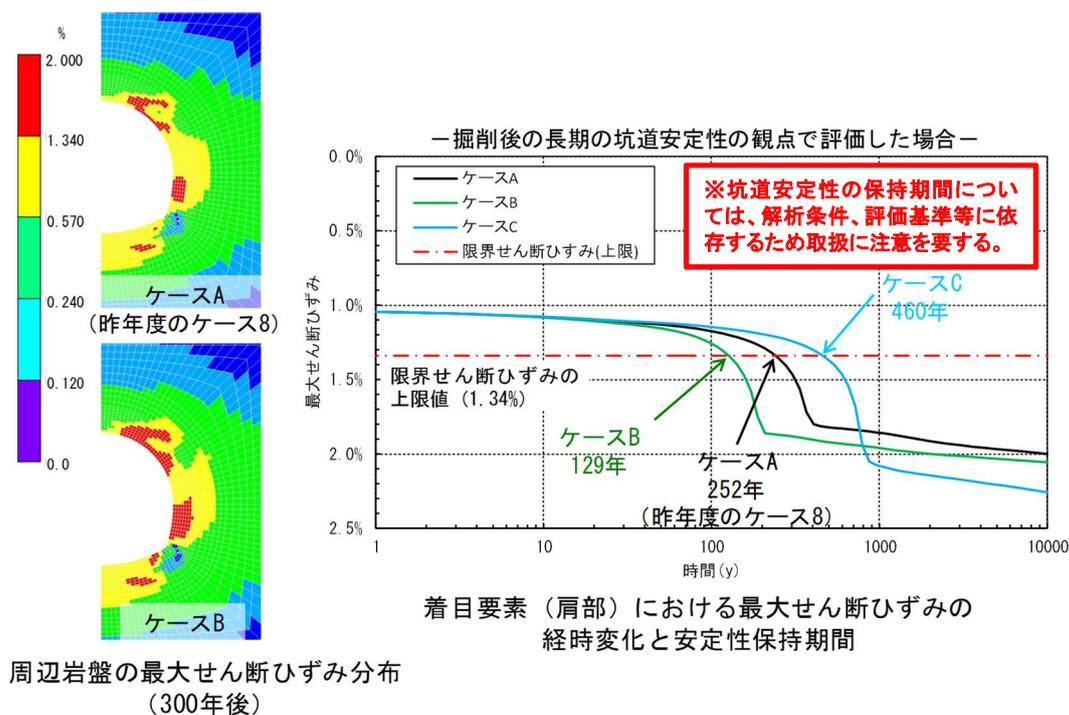


図 3.4.1-3 吹付けコンクリートの剛性変化の速度を変えた解析結果例

4) コンプライアンス可変型モデルの妥当性確認

昨年度および今年度の処分坑道の力学的影響評価における岩盤の構成則には大久保らのコンプライアンス可変型モデル[12]を用いている。ここでは、コンプライアンス可変型モデルの構成則の妥当性確認を示すことを目的として、解析と計測を比較して妥当性確認を行った例[13]、[14]、[15]について文献調査を行った。

調査した結果、岩盤のコンプライアンス可変型モデルに関して、実際の坑道との計測例による妥当性確認の事例はあったが、数多く存在しているわけではない。また、妥当性確認の事例における現地の計測は1年程度の計測であり、あまり長くないことから長期間の計測例と比較できているわけではない。したがって、今後、現地計測との比較事例を積み上げる必要があるとともに、長期間にわたる計測例とも比較する必要がある。

さらに、本検討において使用したコンクリートの溶脱による劣化を考慮した構成則や、緩衝材および埋戻し材の飽和の進行を考慮した構成則は仮定したものであるため、これらの構成則も課題として残っている。特に、吹付けコンクリートの特性は坑道安定性の保持期間に大きく影響を及ぼすことが、本検討でも明らかになっていることから、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だと考える。溶脱現象は地下水の水質や流速に依存すると考えられることから、それらを考慮できることが望ましいと考えられる。

5) 坑道安定性の評価基準の考え方の再整理

昨年度の検討では、坑道安定性の保持期間は、岩盤の応力や最大せん断ひずみ、吹付けコンクリートの応力によって評価していた。これらの評価基準は従来から空洞安定設計に使っていたものを踏襲しており、Mohr-Coulomb の破壊基準や限界せん断ひずみ等の限界値は経過時間によらず一定値として扱っていた。これに対して、回収維持可能性期間は従来の土木構造物の設計で考えていた期間よりも長いことも想定されることから、より長期間に対応した評価基準を用いる必要も考えられる。長期間に対応した坑道安定性の評価基準に資することを目的として、既往の研究事例やトンネルの維持管理に用いている指標等を調査した。その結果、以下のようなことが分かった。

- 坑道周辺岩盤に関して、時間と共に岩盤の強度が低下していると解釈している事例[16]、[17]や、逆に、軟弱な地山の強度の増加が見られる事例[18]があった。これらから、坑道周辺岩盤の強度やひずみの限界値は、初期値からの低下も増加もいずれも起こり得ると考えらえる。
- 大久保ら[19]、[20]は、岩盤の長期的な破壊基準を提案している。適用する際の問題点としては、応力状態が破壊基準に達した場合、長期的には不安定と言えても、どの時点で不安定になるのかは分からないことが挙げられる。
- 大久保ら[19]は、時間依存性を考慮した Mohr-Coulomb の破壊基準の式も示している。課題としては、一種類の岩種の試験結果から導いていることから、他の岩種でも成り立つのかは明らかではないことが挙げられる。また、圧縮試験の载荷時間と坑道安定性の保持期間の関係についても検討が必要である。
- 雷ら[21]は、破壊した岩石の強度回復過程のシミュレーション方法を提案していて、室内試験結果をある程度、再現することができたとしている。ただし、回収可能性維持期間の影響の検討に適用するために、現象の理解も含めて、破壊から圧縮・強度増加への変わる条件、および強度回復後の岩盤の構成則の構築・検証などの課題がある。
- 長期間に対応した岩盤のひずみに対する基準については、研究事例は見当たらなかった。したがって、時間依存性を考慮できる応力の破壊基準と同様に、载荷時間を変えた場合の一軸圧縮試験のデータを拡充したうえで、検討することが望まれる。
- 道路トンネルの維持管理便覧[22]、および鉄道トンネル維持管理[23]を調査した結果、処分坑道との構造の違いや、維持管理において着目している変状などを考慮すると、維持管理の点検要領に示されている指標のうち、変形速度以外の指標を解析に適用することはできないと考えらえる。

本検討では回収可能性維持期間における坑道周辺岩盤への影響として、クリープ変形だけを考慮していて、破壊した岩盤の強度が回復する現象については考慮していなかった。今後、強度回復も考慮するのであれば、力学的解析の枠組みに新たな現象を加えることを意味している。ただし、強度回復の現象を回収可能性維持期間の影響の評価に組み込むためには、現在の研究状況は、まだ十分ではないと考えらえる。組み込んでいくためには、現象理解も含めて、破壊から回復へ向かう条件、および強度回復過程の岩盤に対する構成則の構築・検証の研究は、非常に難しい課

題ではあるが、必要だと考えられる。

現在、トンネルの維持管理の点検要領に示されている指標については、構造の違いや着目している現象を考慮すると、回収可能性維持期間の坑道安定性の指標に適用することは難しいと考えられる。ただし、点検要領に示されている維持管理のフローや考え方、着目すべき変状等については、地層処分場の坑道の維持管理を考えていく上では参考になると考えられる。特に、地下施設の維持管理のプロセスにおいて、坑道の現状の挙動理解や今後の変状予測などに、本検討で開発したような評価手法が適用できると考えられる。

3.4.2 水理学的影響評価方法の検討

(1) 水理学的影響の評価方法の検討

昨年度検討した水理学的影響評価に対する定量的な評価手法および手順[3]に関して、本年度は若干の見直しを行った。水理学的影響の評価は、処分定置方式・埋戻し状態・坑道開放期間の違いを考慮した地下水流動解析により、セメント系部材の劣化等の影響に関連する坑道の湧水量の時間変化や、化学的な評価に影響が大きいと考えられる不飽和領域の発生、また閉鎖後の再冠水に要する時間やベントナイト流出への影響に着目した評価を実施する。水理学的影響の評価方法の検討項目と関連する定量化に必要な技術検討項目との対応を図 3.4.2-1 に示す。定量化に必要な技術検討項目は、いずれも水理学的影響評価だけでなく、化学的影響評価も関連していることとなる。従って、水理学的影響の評価方法の検討より得られたデータについては、次の化学的影響評価の条件等へと引き渡すこととなる。また解析結果より、影響低減技術の整理も行った。

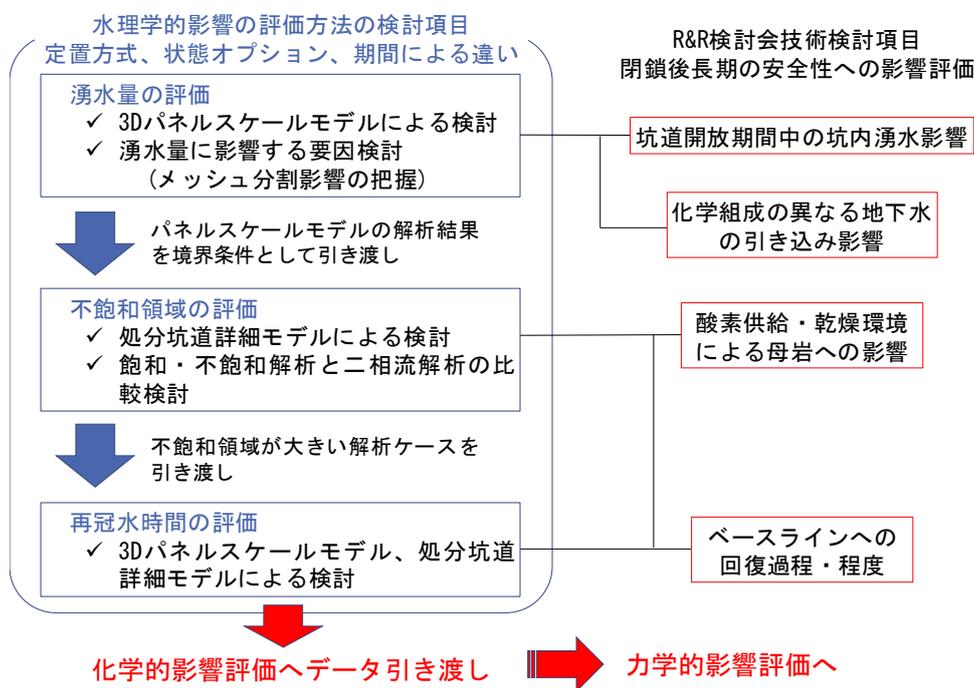


図 3.4.2-1 水理学的影響の評価方法の検討項目と定量化に必要な技術検討項目との対応

以下に、検討条件や手法の概要を述べる。

1) 対象岩盤および不均質性

対象岩盤は新第三紀堆積岩である。岩盤の透水性に関しては、サイトスペシフィックな条件の1つであり、不均質性、不確実性を有するため湧水量への影響が大きいと考えられる。しかし、本検討では、処分定置方式・埋戻し状態・坑道開放期間の違いなどに対する影響の把握であり、岩盤の不均質性を考慮するとそれぞれの影響を把握することが難しくなり、湧水量の相対的な比較を行うためにも、岩盤条件は均質とし、不均質性は取り扱わないこととする。

2) 解析モデルおよび処分形態

処分場の全体湧水量を推定する上では、処分場全体をモデル化した処分場スケール（数十 km

領域) 規模が望ましいが、解析の規模が大きくなり効率的ではないため、処分坑道+連絡坑道からなる1ヶ所の処分パネルのみを対象とした、パネルスケールモデルでの非定常地下水流動解析を実施する。NUMO[9]では、Through-type と Dead-end-type の2種類の処分パネル概念が検討されていることから、本検討ではこれらを踏襲し、レイアウトの違いによる影響を評価するため、2種類の処分パネルを対象とした検討を実施する。なお、堆積岩を対象とした場合、Through-type は縦置き方式、Dead-end-type は横置き PEM 方式に対応するものとする。

一方、解析の規模を考慮すると、パネルスケールモデルにおいても処分坑道を詳細にモデル化することは困難で、湧水量に影響する要因検討や不飽和領域の発生に対する影響を把握するためにも、支保工や EDZ (Excavation Damerged Zone) 等の処分坑道周辺を細かくモデル化した処分坑道詳細モデルによる検討も実施する。

また、地下施設の寸法に関しては、昨年度実施した力学解析に用いた坑道寸法、離間距離等を用いてモデル化する。

3) 状態オプションおよび回収可能性維持期間

回収可能性維持の状態オプションは、処分坑道を開放した状態と処分坑道を埋戻した状態(連絡坑道のみ開放)を想定し、回収可能性維持期間は、100~300年とする。

4) 掘削・埋戻し工程

非定常地下水流動解析を行う場合、坑道の掘削工程や埋戻し工程を反映した検討を実施することが望ましいが、本検討の掘削工程については、以下のようにする。

- ① 全連絡坑道を瞬時に掘削(逐次掘削ではなく)することとして、連絡坑道開放条件を解析
- ② 連絡坑道掘削時の水圧条件を処分坑道掘削時の初期条件として、全処分坑道を瞬時に掘削(逐次掘削ではなく)することとして、処分坑道開放条件を解析

これにより、連絡坑道影響を反映した処分坑道掘削後の水理学的な時間変化を考慮した解析を実施することができる。同様に埋戻し工程についても、処分坑道掘削時の水圧条件を初期条件として、全処分坑道を瞬時に埋戻した解析を実施することにより、処分坑道埋戻状態での水理学的な時間変化を考慮した解析を実施する。

5) 解析コード

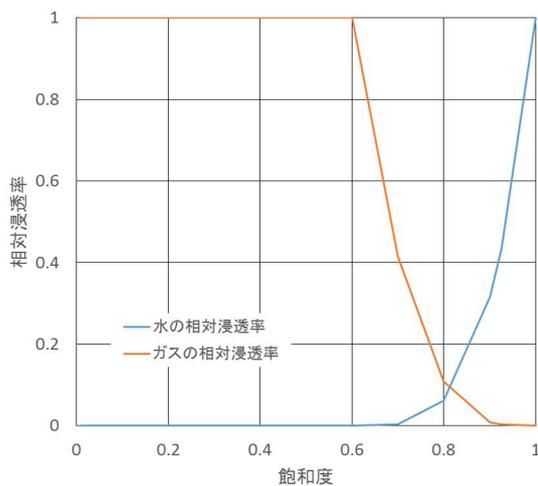
3次元飽和・不飽和、非定常地下水流動解析の実施にあたり、公開コードとなっている Dtransu3D・EL を用いる。本解析コードは適用実績も多く、解析コード自体の妥当性検証も行われており、FEM 解析手法として適用性が高いと判断される。ただし、不飽和領域の発生に関しては、二相流解析手法である TOUGH2 による評価手法の適用についても検討を行い、より適切な解析手法の比較検討を行う。本解析コードは米国ローレンスバークレイ国立研究所の FDM 多相流解析3次元コードで、適用実績も多く、解析コード自体の妥当性検証も行われており、FDM 解析手法、多相流解析手法として適用性が高いと判断される。

6) 物性値

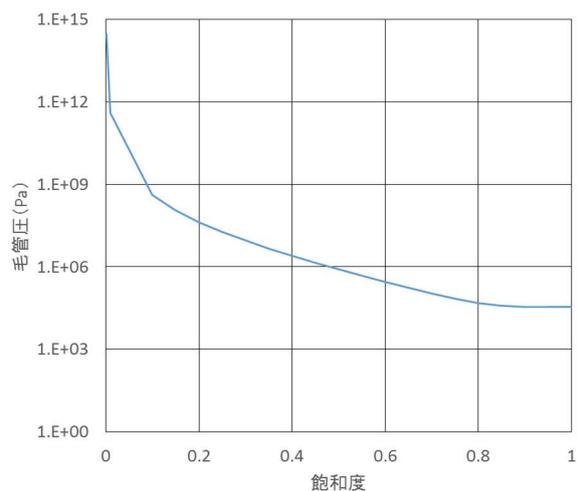
各材料の物性等の設定にあたっては、NUMO 配布資料[10]、既存文献[5]、[24]を踏まえて、表 3.4.2-1 に示す値を設定する。本検討では、非定常解析を実施し、不飽和領域の発生を考慮する必要があるため、比貯留係数および不飽和特性についての設定を行う必要がある。比貯留係数については、各部材の力学物性（弾性係数、ポアソン比など）から算出した。不飽和特性に関しても、既存の検討結果[5]、[24]を踏まえ、設定を行った。また岩盤、EDZ、グラウトに設定した不飽和特性曲線を図 3.4.2-2 に示す。

表 3.4.2-1 設定した物性値

構造物	飽和透過係数 (m/s)		間隙率 (%)	比貯留係数 S_g (1/m)	備考
緩衝材	水	1.005E-12	40	1.186E-04	縦置きのみ使用（PEMIは無視） ベントナイト（70wt%）+ケイ砂（30wt%）の混合材料を想定
	ガス	5.014E-14			
埋戻し材	水	7.353E-12	33	1.183E-04	ベントナイト（15wt%）+骨材（85wt%）の混合材料を想定
	ガス	3.669E-13			
支保工/ インバート	水	3.000E-07	25	1.382E-06	岩盤と同じ 健全時および劣化時共通
	ガス	1.497E-08			
軟岩系岩盤	水	3.000E-07	25	3.158E-06	NUMO配布資料
	ガス	1.497E-08			
EDZ (軟岩系岩盤)	水	3.000E-05	25	8.442E-06	透過係数：昨年度力学検討結果より、100年後に約5倍、10,000年後に約7倍⇒岩盤×100 間隙率：岩盤と同じ
	ガス	1.497E-06			
グラウト	水	3.000E-08	25	3.158E-06	透過係数：1 Lu (1.333 × 10 ⁻⁷ m/s) 以下の設定⇒岩盤×0.1 間隙率：岩盤と同じ
	ガス	1.497E-09			



(a) 相対浸透率関数



(b) 毛管圧力関数

図 3.4.2-2 不飽和特性曲線の設定（岩盤、EDZ、グラウトの場合）

(2) 湧水量の評価

1) 3D パネルスケールモデルによる検討

ここでは、坑道の湧水量の時間変化の定量化を行うために、3D パネルスケールモデルを作成し、処分定置方式・埋戻し状態・坑道開放期間の違いを考慮した地下水流動解析を行った。解析負荷が小さいモデル化を行うために、図 3.4.2-3 および図 3.4.2-4 に示すように、対称性を考慮した、1 パネルの 1/4 切り出しモデルを作成した。解析領域は、1 パネル領域が約 1km 四方であると想定し、地下施設の影響領域として平面的に 4km 四方を対象とした。深度方向については、地表面から処分深度 GL-500m（堆積岩を対象として）を考慮し、底部境界深度を GL-1,000m まで考慮することとする。対称性を維持するには境界条件の対称性も必要となるが、このように対称性を考慮することにより解析モデル規模の縮小が可能である。また、2 種類の処分パネル（Through-type と Dead-end-type）とも 1 パネルあたり廃棄体 5,000 本定置することを想定し、同数の廃棄体を対象とすることにより単位廃棄体あたりの比較ができる地下施設寸法の坑道モデルとした。

境界条件については、1/4 切り出しモデルの対称性を考慮し、図 3.4.2-5 に示すように解析領域の外周側面及び上面については地表面標高（ $H=0\text{m}$ ）の水頭固定境界、対称面となる側面および底面については不透水境界とした。本設定は、海底下のような処分場の上部から無限の地下水供給がある場合に相当するものであり、湧水量の算出条件としては保守的（湧水量が多くなる）な条件設定となる。地下坑道の掘削面については、浸出面境界（湧水発生時は大気圧境界、不飽和領域発生時は不透水境界）として、境界条件非線形問題として取り扱った。また、非定常地下水流動解析における初期条件に必要な初期水頭値については、境界条件を考慮し、静水圧分布条件（ $H=0\text{m}$ ）を与えるものとした。

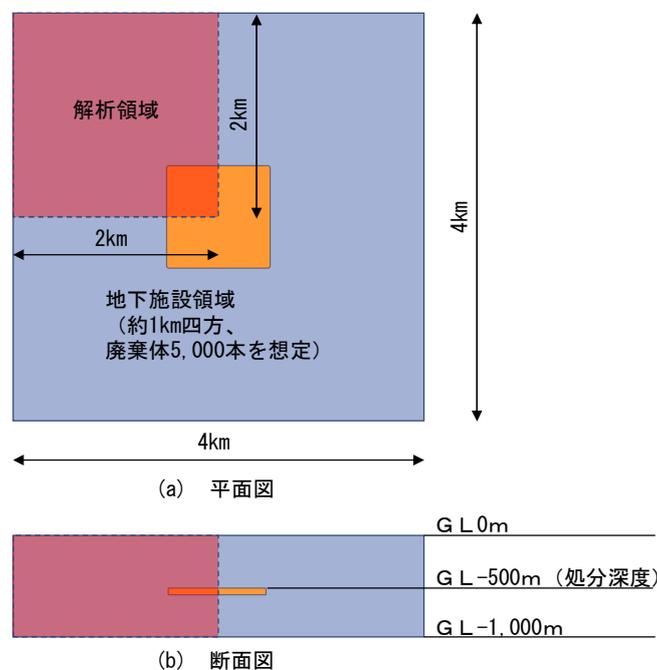


図 3.4.2-3 3D パネルスケールモデルの解析領域の設定

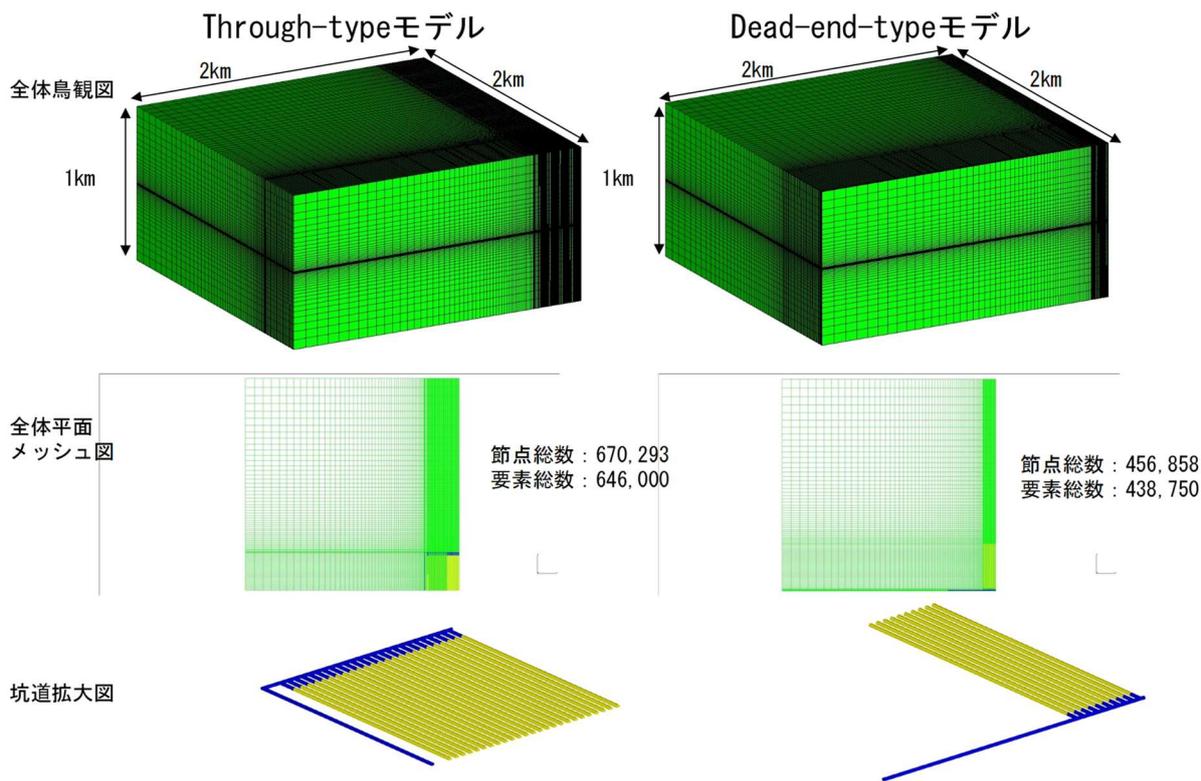


図 3.4.2-4 3D パネルスケールモデル

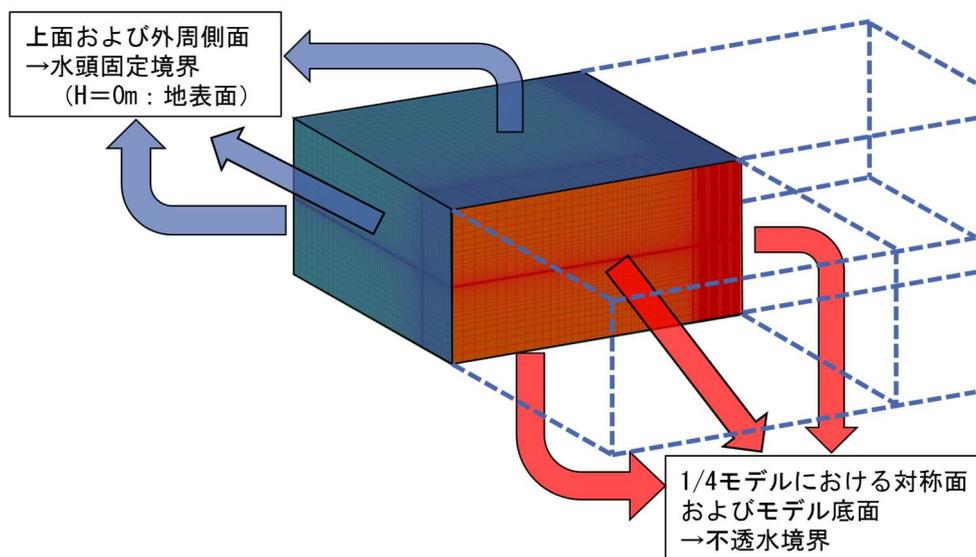


図 3.4.2-5 3D パネルスケールモデルにおける境界条件の設定

解析結果の例として、処分坑道掘削時の全水頭分布の経時変化を図 3.4.2-6 および図 3.4.2-7 に示す。回収可能性維持期間として 100 年～300 年を想定していたが、坑道掘削の影響はほぼ 1 年程度で定常状態となり、長期間にわたる地下水流動への影響は発生しない結果となった。本検討では、均質等価多孔質体で、処分場周辺の地下水位の低下が発生しない条件での解析であったこ

とから、短時間で定常状態になったと考えられる。同様に処分坑道埋戻し状態の場合においても、数年から10年程度で湧水量が定常状態となる結果が得られた。

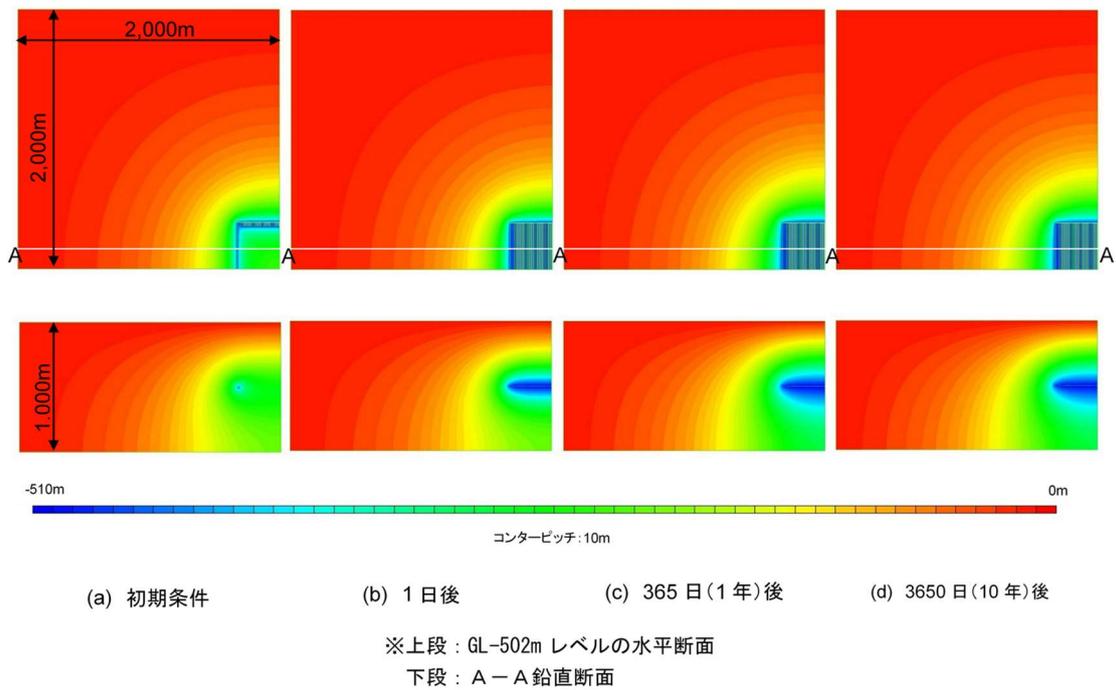


図 3.4.2-6 Through-type の処分坑道掘削時の全水頭分布の経時変化 (case1a)

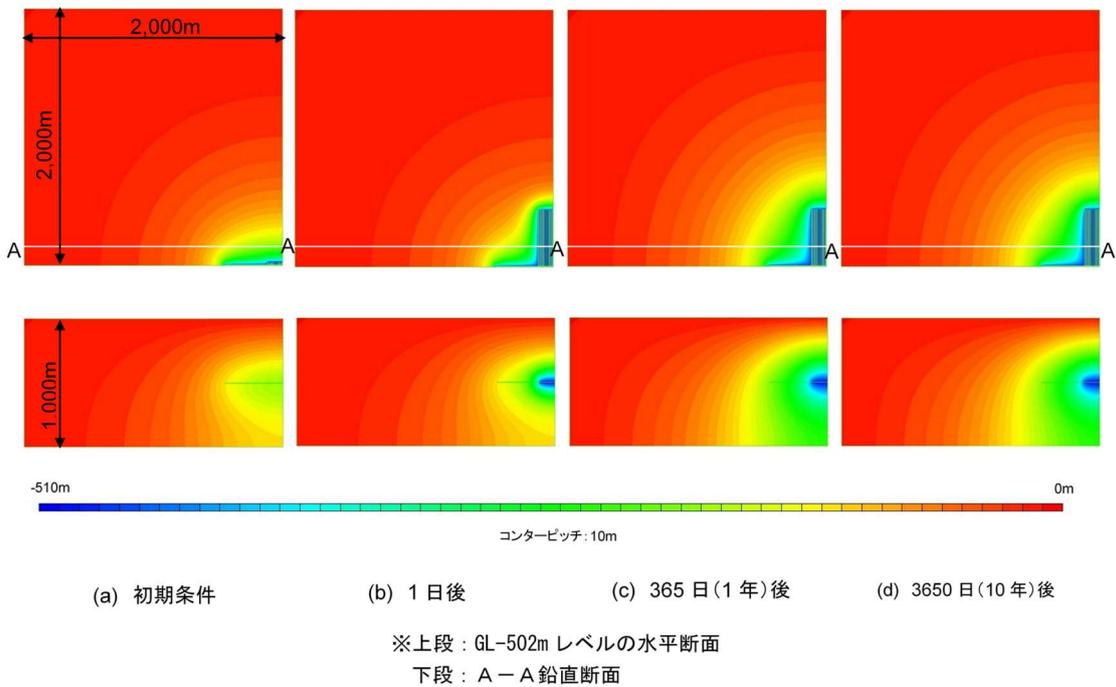


図 3.4.2-7 Dead-end-type の処分坑道掘削時の全水頭分布の経時変化 (case1b)

処分パネルの違いに着目すると、図 3.4.2-6 および図 3.4.2-7 に示されるように、Through-type は坑道開放による周辺地下水への影響が Dead-end-type よりも広範囲となる。また、連絡坑道掘削時、処分坑道開放状態 (case1a、case1b)、処分坑道埋戻状態 (case4a、case4b) の解析結果における定常湧水量の比較グラフを図 3.4.2-8 および図 3.4.2-9 に示す。単位廃棄物あたりの坑道延長 (連絡坑道+処分坑道) が長くなる Through-type (坑道延長: 9,613.0m) の方が、Dead-end-type (坑道延長: 4,817.9m) よりも湧水量が多くなることから、周辺地下水影響の低減の観点からは Dead-end-type の方が有利であり、処分坑道を埋戻すことで Dead-end-type はさらに影響を低減できると考えられる。状態オプションの違いに着目すると、湧水処理の観点からは処分坑道開放状態よりも埋戻状態の方が有利であることは明らかである。なお、処分坑道埋戻し後の連絡坑道の定常状態湧水量は、処分坑道位置の透水性が岩盤よりも小さい埋戻材に置き換わっているため、連絡坑道掘削時よりも湧水量が少なくなった。

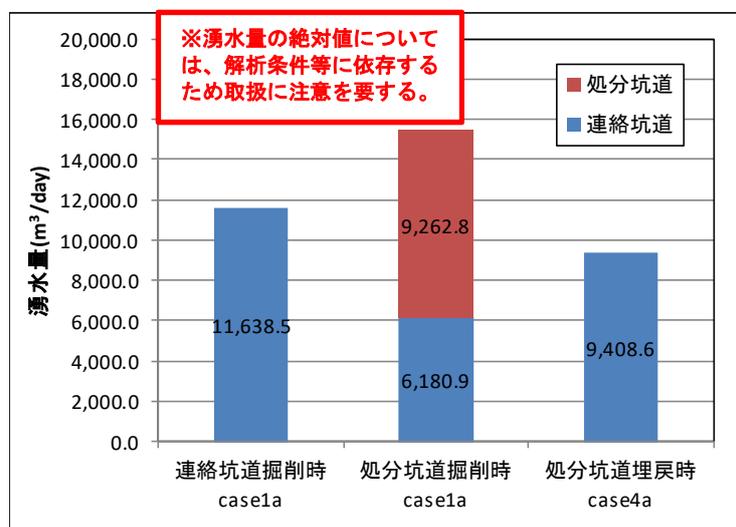


図 3.4.2-8 状態オプションの違いによる定常湧水量の比較 (Through-type)

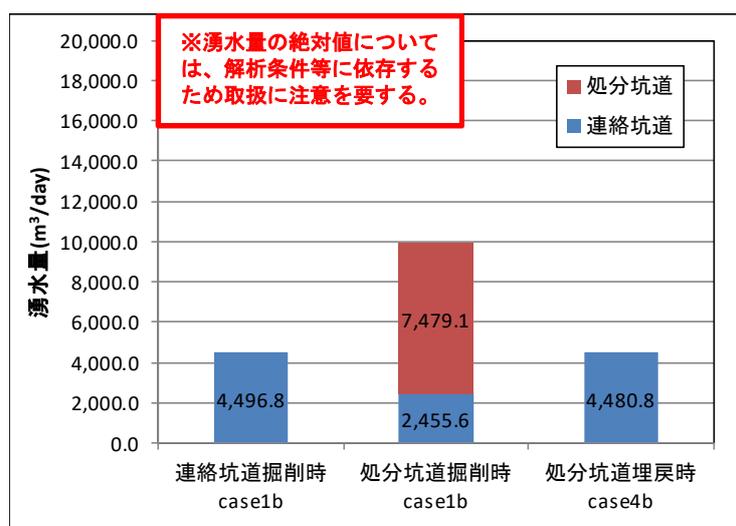


図 3.4.2-9 状態オプションの違いによる定常湧水量の比較 (Dead-end-type)

2) 湧水量に影響する要因検討

湧水量評価に用いた解析手法である FEM については、空間の離散化誤差を有することが知られており、湧水量の定量化結果については、メッシュ分割の影響による誤差が含まれている。ここでは、パネルスケールモデル解析から得られた湧水量の精度について検証すること目的として、処分坑道の形状、大きさに対するメッシュ分割影響を把握するため、2D あるいは 3D の処分坑道詳細モデル、パネルスケールモデルと同じメッシュ分割のパネルモデル、節点のみで坑道を再現したメッシュとなる節点モデルによる湧水量算出を行い、湧水量に対するメッシュ分割の違いによる影響の定量化を行った。検討用の解析モデルを図 3.4.2-10 に示す。横置き PEM タイプは 2D モデル、堅置きタイプは処分孔を有するため 3D モデルとした。解析領域については、坑道の離間距離を考慮し 2D モデルでは 1/2 モデル、3D モデルでは 1/4 領域を対象としている。

処分坑道の中央部であれば、3D パネルスケールモデルの解析結果よりほぼ鉛直方向が卓越している領域であることから、境界条件については、側方は不透水境界とし、上面 (GL0m) は水頭固定境界、底面 (GL-604.78m、処分深度から約 100m 深部) は 3D パネルスケールモデルの解析結果から得られる全水頭の経時変化を考慮した境界条件を与えることとした。初期条件に関しては、解析領域内は全水頭=0 とした。

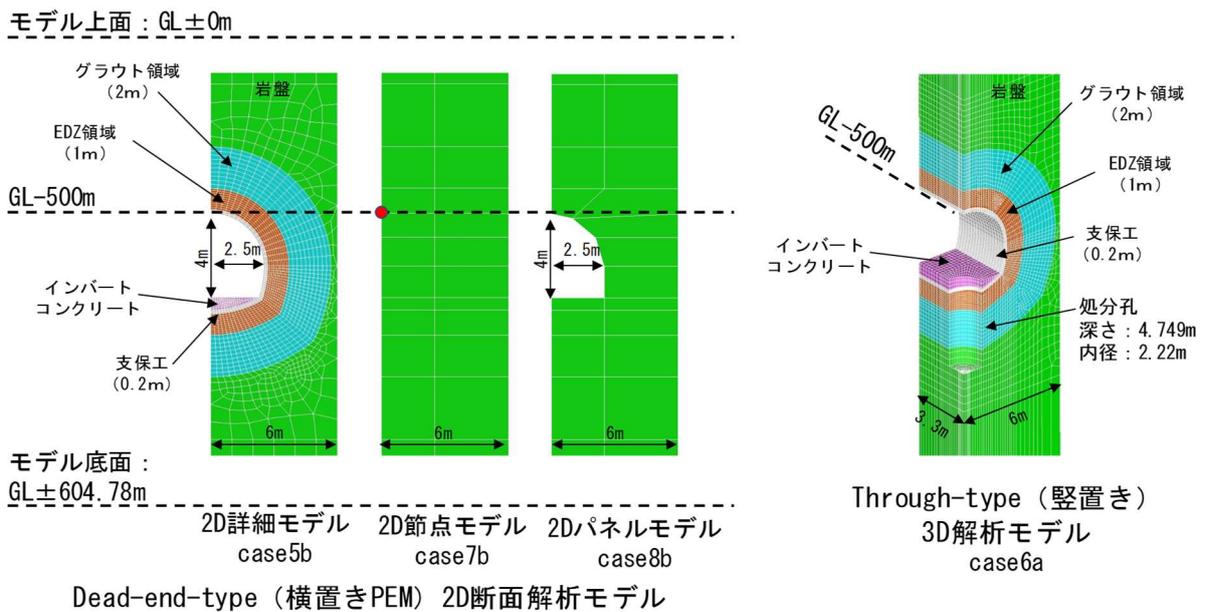


図 3.4.2-10 湧水量への影響検討用解析モデル

異なるメッシュ分割形状での処分坑道からの湧水量の算出結果についての湧水量の経時変化を図 3.4.2-11 に示す。図 3.4.2-11 より、定常状態での湧水量を比較すると、メッシュ分割の影響はほぼ 10%以内の範囲であった。本検討条件では、節点モデル (case7b) の湧水量が約 10%と少なめに算出される結果となるのに対し、詳細モデルと 3D 堅置きモデル (case6a) については、処分孔の有無によらず、単位長さあたりの湧水量は約 4%の増加となった。すなわち、堅置き方式の処分孔の湧水量に対する影響は小さいと考えられる。またパネルモデル (case8b) の湧水量についても、詳細モデル (case5b) とほぼ同じ結果となった。これより、パネルスケールモデルによ

る湧水量の算出結果に関しては、処分坑道を詳細にモデル化した場合と同程度の精度を有していると考えられる。ただし、本結論はメッシュ分割による FEM 解析モデルの空間的な離散化影響に対するもので、不均質媒体に関しては、メッシュ分割の違いにより物性値の分布が異なる可能性があることに注意しなければならない。

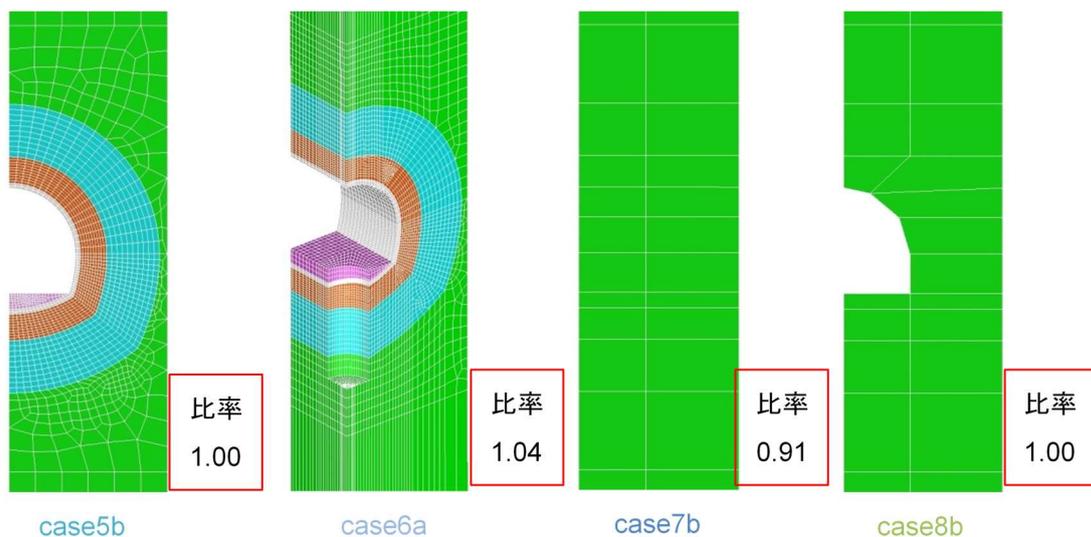
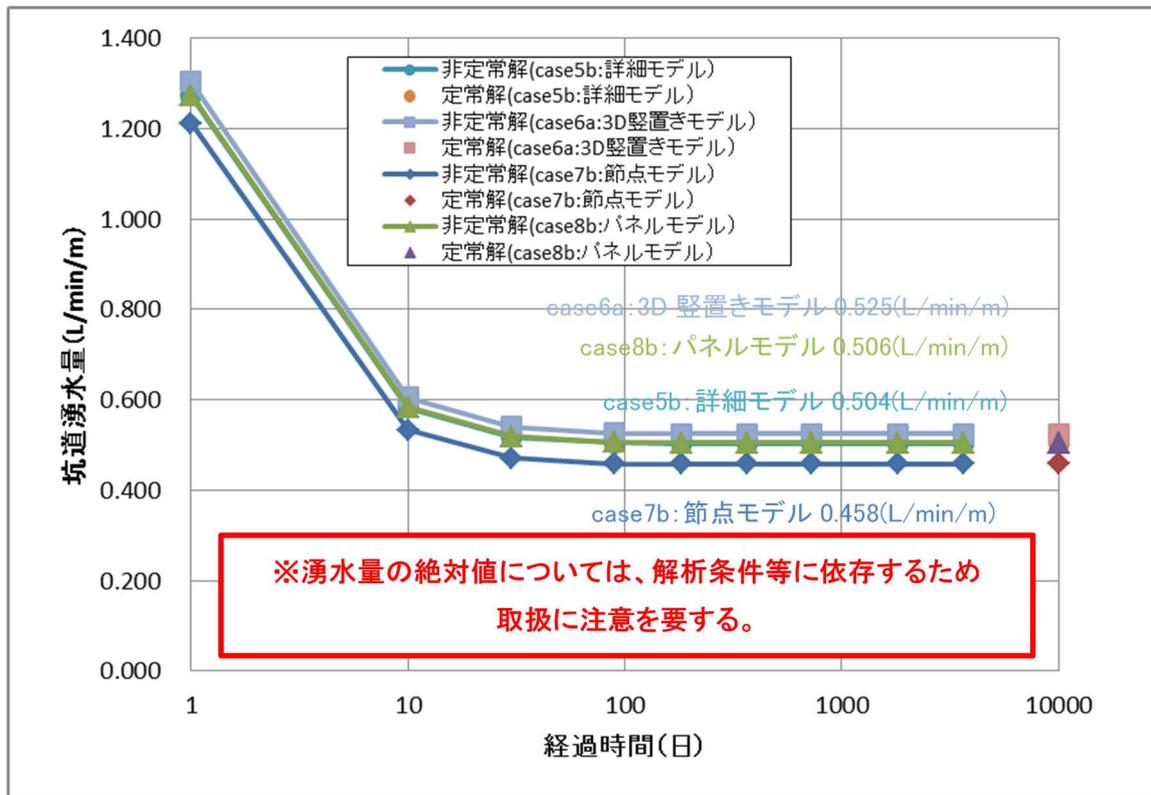


図 3.4.2-11 メッシュ分割の違いと湧水量の経時変化の比較

(3) 処分坑道周辺の不飽和領域評価

1) 処分坑道詳細モデルによる検討

処分坑道開放に伴い坑道周辺に発生する可能性がある不飽和領域の分布、時間変化等の把握を目的とし、処分坑道周辺の状態 (EDZの有無、グラウトの有無など) の違いに対して、図 3.4.2-10 に示す処分坑道詳細モデルによる飽和・不飽和解析を実施した。なお、湧水量算出を実施したパネルスケールモデルによる解析では、解析領域内に不飽和領域は発生しなかった。

処分坑道詳細モデルによる解析を行った結果、EDZがない場合には、不飽和領域は発生しない結果が得られた。解析結果例として、EDZを考慮したケースの不飽和領域の経時変化図を図 3.4.2-12 に示す。EDZ (岩盤より2オーダー大きい想定) が存在すると、坑道上部に不飽和領域が発生し、その影響が坑道上方へ大きく拡がり、3ヶ月程度で進展が遅くなる結果が得られた。ただし、EDZの外側にグラウト領域が存在する場合の解析結果では、不飽和領域はEDZ領域内に収まり、周辺へは拡大しない結果が得られた。飽和・不飽和解析では、不飽和領域の透水性を飽和領域よりも小さい値で評価することにより、簡易に不飽和領域内の流動を制限する方法であり、不飽和特性曲線の設定により、不飽和領域の評価結果が大きく異なる可能性がある。本検討における不飽和特性を確認すると、解析結果の負の圧力水頭値 (最大約-3.5m程度) の場合、不飽和領域の要素の透水性はほぼ飽和透水性と同じであることがわかったため、本検討で得られた不飽和領域は厳密には不飽和領域とは断定できないと考えられる。今後、感度解析等により影響の確認をすることが必要となる。

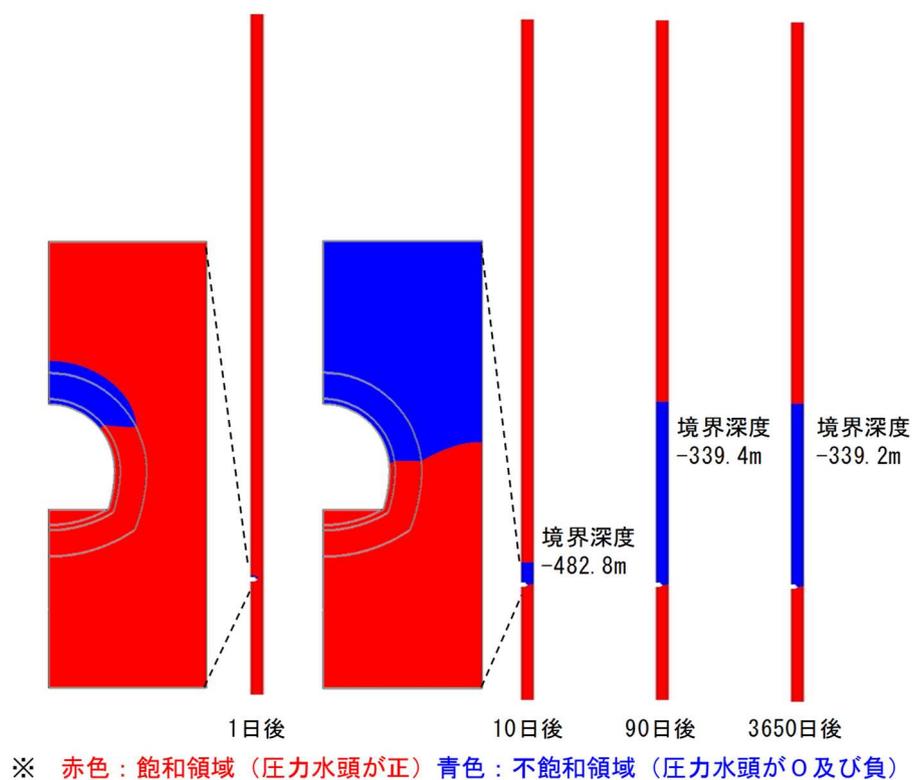


図 3.4.2-12 EDZ 考慮における不飽和領域の経時変化 (case9b)

2) 飽和・不飽和解析と二相流解析の比較検討

不飽和領域の発生に関して、二相流解析手法による評価手法の適用についても検討を行い、飽和不飽和解析手法との比較検討を行った。ただし、解析手法が異なることから、解析モデルや境界条件設定などが異なる。解析モデルの概要を図 3.4.2-13 に示す。また、境界条件は以下の通りとなる。

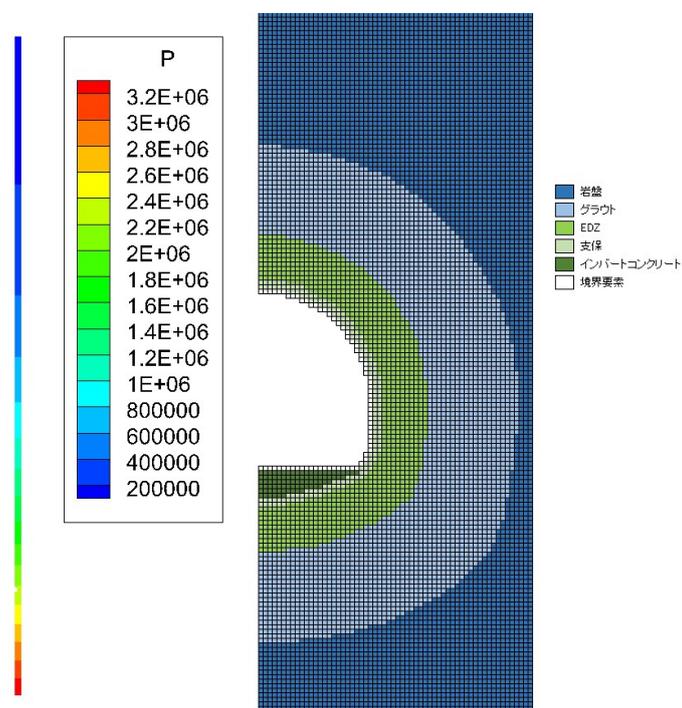
両側境界：不透水境界

上端境界：飽和度 100%の大気圧境界

下端境界：飽和度 100%の圧力境界

空洞壁面：飽和度 0%の大気圧境界

なお、下端の圧力境界は、飽和不飽和解析の 2D モデルの下端境界圧（閉鎖前、および再冠水時）の圧力を参考に、両者の平均的な圧力を一定期間与えた。



(a)モデル全体図 (H600m×W6m) (b)空洞周辺の構成 (深度：GL-500m 周辺の拡大図)

図 3.4.2-13 解析モデルの概要

解析結果例として、EDZ を考慮したケースの不飽和領域の経時変化図を図 3.4.2-14 に示す。EDZ が無い場合は、飽和・不飽和解析結果と同様に、不飽和領域は発生しない結果が得られた。一方、EDZ を考慮すると、EDZ 領域に不飽和領域が発生するものの、上方へ大きく広がる結果とはならなかった。また坑道内の湧水量から判断すると、約 2 年後 (730 日後) に定常状態となり、単位長さあたりの坑道内湧水量は 0.413 (ℓ/min/m) に落ち着く。この状態を飽和不飽和解析結果 (図 3.4.2-11 参照) と比較すると、飽和不飽和解析結果では約 100 日後に定常状態となり、単位長さあたりの坑道内湧水量は 0.509 (ℓ/min/m) に落ち着いている。この違いは、間隙空気の流れの影響と考えられ、二相流解析手法は液相と気相のマスバランスを考慮した解析手法であることから、坑道周辺の不飽和領域評価手法として適していると考えられる。ただし解析結果では、

坑道下部の EDZ 領域までも不飽和領域となった。坑道湧水は主にインバート部から発生すると考えられ、インバート部は飽和状態である可能性が高いため、実現象と比較すると二相流解析結果は矛盾している可能性が考えられる。二相流解析においても、不飽和特性曲線を用いているため、解析に用いた物性の影響が大きいと考えられ、飽和不飽和解析と同様に不飽和領域の発生に影響する要因について感度解析を実施し、より適切な解析手法、解析条件の設定について検討を継続する必要がある。

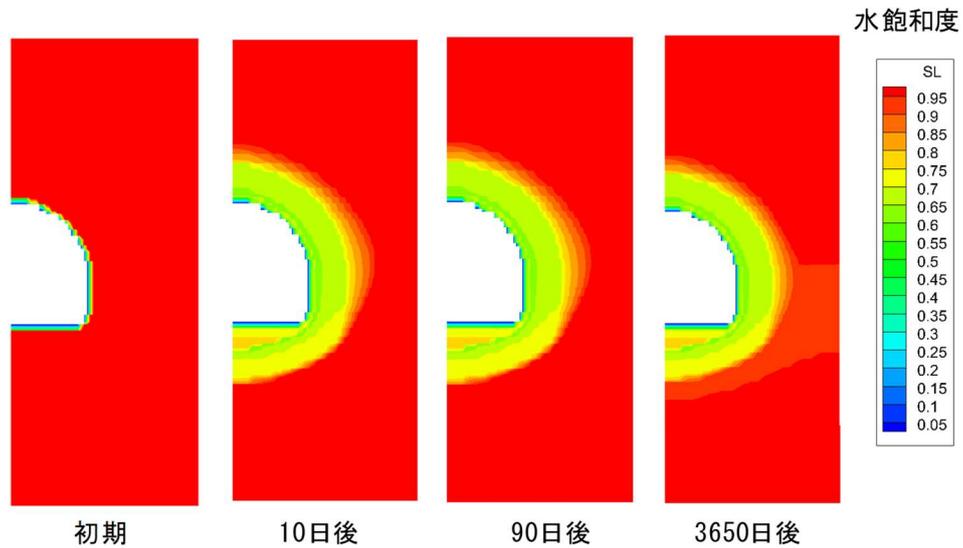


図 3.4.2-14 EDZ 考慮における飽和度分布の経時変化 (case9b')

(4) 再冠水時間の評価

ここでは、回収可能性維持を想定した地下水流動解析結果を初期値とし、閉鎖後の再冠水挙動に関する非定常地下水流動解析により、処分場の再冠水時間の把握を行った。再冠水時間に対する評価として、3D パネルスケールモデル、および処分坑道詳細モデルによる検討を実施した。

1) 3D パネルスケールモデルによる検討

パネルスケールモデルの掘削解析では岩盤中の不飽和領域は発生しなかった。従って、本検討では埋戻し材の再冠水に対する飽和・不飽和解析となり、埋戻し材の再冠水に対する再冠水時間の把握と処分形態の違いによる再冠水過程に着目した検討となる。埋戻し土内の初期条件（水頭値の設定）については、初期飽和度（0.567）から不飽和特性曲線に基づき算出される圧力水頭（-73.625m）を埋戻し土内部の節点の初期水頭値として与えることとした。また、解析条件としては、処分坑道のみ閉鎖（埋戻）された状態を想定し、連絡坑道の閉鎖は考慮していない。

不飽和領域（圧力水頭が負）の経時変化は、閉鎖後短時間（数日程度）で飽和（圧力水頭が正）となる結果が得られたことから、再冠水の再現については飽和後の動水勾配（全水頭分布）の経時変化により判断することとした。パネルスケールモデルではメッシュが粗く埋戻し土内部の節点が坑道 1 本あたり 2 点しかないため、飽和・不飽和解析手法では坑道埋戻部の要素の飽和度が短時間に不飽和に達するためであると考えられる。解析結果例として、Dead-end-type の処分坑道再冠水時の全水頭断面分布の経時変化を図 3.4.2-15 に示す。処分形態の違いによらず、分坑道周辺の全水頭分布については約半年から 1 年程度で定常状態となり、埋戻し土内部に関しては周辺の全水頭分布と一致するのには、掘削時とほぼ同様な 10 年程度の期間となった。

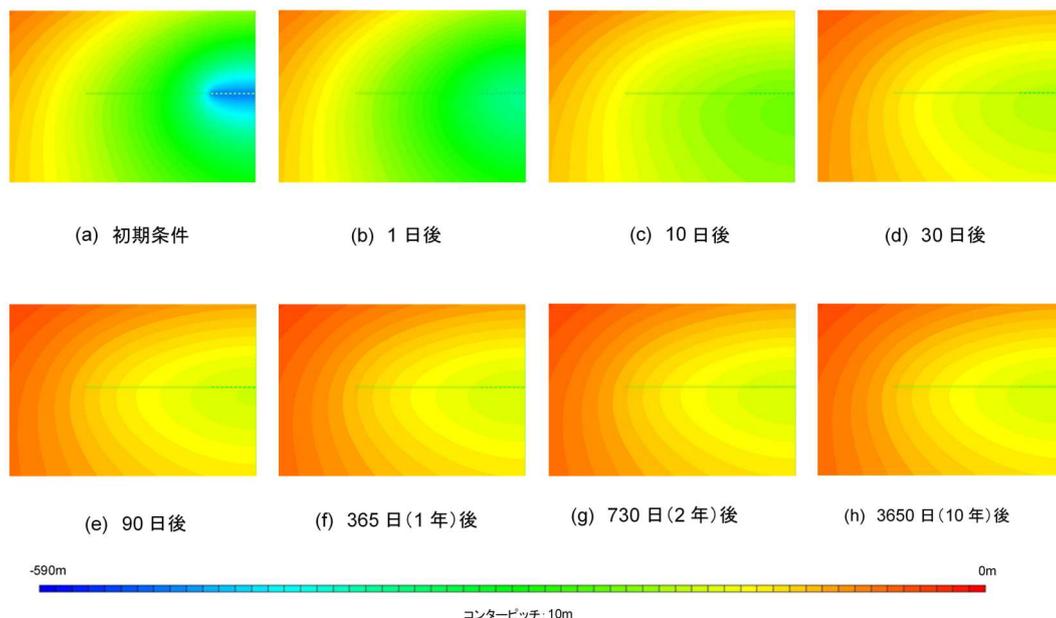


図 3.4.2-15 処分坑道再冠水時の全水頭断面分布の経時変化 (case16b : Dead-end-type)

2) 2D 処分坑道詳細モデルによる検討

横置き PEM 方式の 2D 処分坑道詳細モデルを用いて、飽和・不飽和解析による処分坑道周辺の再冠水時間の把握を行った。なお、PEM についてはモデル化を行っていない。埋戻土内の初期条件は、前述のパネルスケールモデルと同様である。

閉鎖後の処分坑道の不飽和領域については、埋戻し後、1 日程度で周辺岩盤は飽和し、埋戻土のみが不飽和状態であるが、埋戻土内も約 30 日で飽和状態となる結果となったことから、全水頭分布による評価を行った。解析結果例として、EDZ を考慮したケースの再冠水解析における全水頭分布の経時変化図を図 3.4.2-16 に示す。全水頭分布では、埋戻土内部の水圧が周辺岩盤中と同じ状態になるのは約 2 年程度となる結果となった。

埋戻土中の全水頭分布に着目した理由は、埋戻土の初期水頭が小さく、透水性が小さい ($7.353E-12\text{m/s}$) ために埋戻土内に動水勾配が発生することによるが、飽和・不飽和解析では厳密な二相流状態を解析できていないため、二相流解析による評価が必要と考えられる。

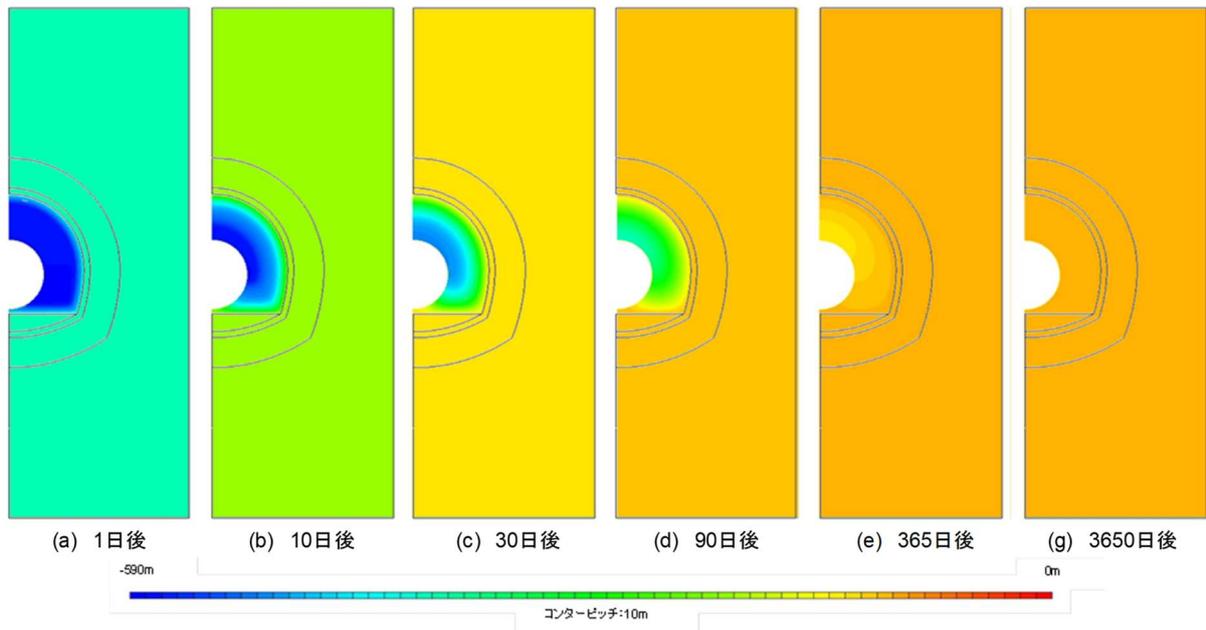


図 3.4.2-16 EDZ を考慮したケースの再冠水解析における全水頭分布の経時変化図 (case19b)

3) 飽和・不飽和解析と二相流解析の比較検討

再冠水時間の評価に関して、二相流解析手法による評価手法の適用についても検討を行い、飽和不飽和解析手法との比較検討を行った。解析モデルは不飽和領域評価と同じモデルを用いた。また、左右、および上下端の境界条件設定は、不飽和領域評価のケースと同様の設定とした。

解析結果例として、EDZ を考慮したケースの不飽和領域の経時変化図を図 3.4.2-17 に示す。EDZ の領域に形成された不飽和領域は再冠水開始から 10 日後には飽和状態に戻り、再冠水開始から約 2 年後には埋戻し材が飽和状態に戻る結果となった。なお、再冠水開始から 10 日後までに不飽和領域が飽和される過程は、EDZ の底部から次第に上方に向かって飽和された。

これらの時間スケールは岩盤や EDZ の透水係数の設定に左右されるものではあるが、EDZ 内に形成された不飽和領域が再冠水の妨げになる（再冠水に要する時間を長くする）可能性は低いものと考えられる。飽和不飽和解析結果と比較すると、「再冠水」評価の定義が異なるものの、EDZ 中は比較的短時間で飽和し、埋戻し材の飽和には 2 年程度かかると点ではほぼ同じ評価結果と思われるが、埋戻後の気相の状態変化について考慮している二相流解析手法の方が再冠水評価には適していると考えられる。今後の化学的な評価に繋げるためには、各材料（岩盤、EDZ、グラウト、支保、インバート）の透水性の設定によりこの時間スケールがどの程度左右される可能性があるかという観点での不確実性評価を行う必要があるものと考えられる。

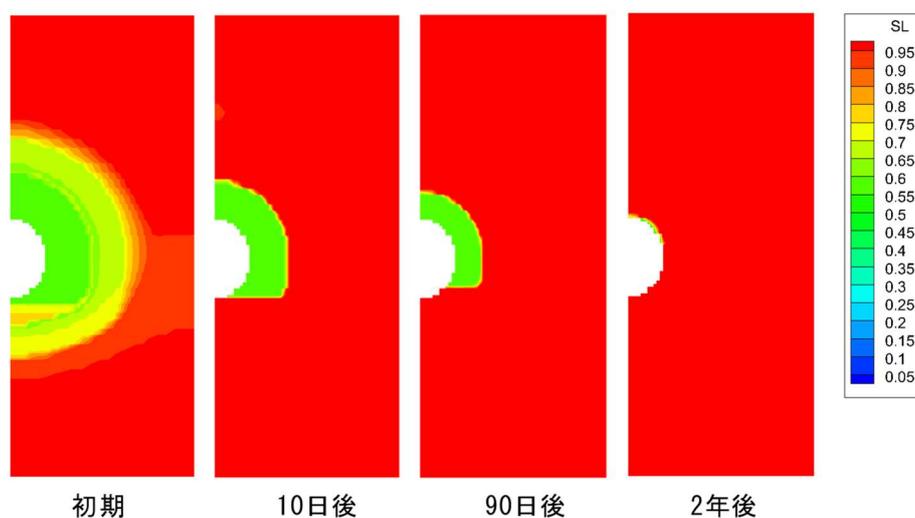


図 3.4.2-17 EDZ を考慮したケースの再冠水解析における飽和度分布の経時変化図 (case19b')

3.4.3 化学的・熱的影響評価方法の検討

平成 30 年度に実施予定の解析モデルを用いた影響評価に備えて、効果的な検討方法を構築するため、現状技術把握のための既往検討の調査を行った。

化学的・熱的影響をモデルにより評価する場合、それぞれの評価の中核となる解析手法は、前者が地球化学的反応解析で、後者が伝熱あるいは熱流体解析である。地球化学的反応解析を行う場合には、解析モデルに取り入れる化学種や反応（化学量論式）が増えるほど、変数や方程式の数も増え、計算により多くの労力が必要になる。このため、地球化学的反応の数値解析に当たっては、モデルパラメータの検討に加えて、現実的な時間で解析を実施するために、モデルの次元を減らしたり、モデルに取り入れる化学種及び反応をなるべく絞り込んだりする工夫が必要になる。以上のことから、化学的影響と熱的影響とを比較した場合、前者の方が効率的かつ効果的な検討方法を構築する必要性がより高いことから、ここでは主に化学的影響評価方法についての調査を実施した。

前述の通り、化学的影響評価を効率的かつ効果的に実施するには、モデルに取り入れる化学種及び反応をなるべく絞り込む工夫が必要になる。そこで、平成 28 年度までに作成されたプロセス・インフルエンス・ダイアグラム（PID）[2]、[3]において化学的・熱的影響として分類されているものを抽出し、それぞれについて、予想される相対的な影響の大きさを検討した。抽出して整理した結果を表 3.4.3-1 に示す。

表 3.4.3-1 化学的影響の検討対象となり得る項目

PID 等で挙げられた項目	今回の整理結果
・ 支保の変質・劣化	① 坑道を構成する人工部材の変質 ・ セメント系材料（グラウト、ロックボルト定着材、支保コンクリート、インパートコンクリートなど） ・ 鋼材（ロックボルト、支保工）
（該当なし）	② （セメント系材料に起因する）高 pH 地下水による天然バリアの変質
・ 腐食による水素ガスの発生	③ 鋼材、PEM 容器の腐食による水素ガス発生
・ 酸化的雰囲気形成とその回復	④ 坑道近傍の岩盤の乾燥風化（但し、乾燥が進む場合） ⑤ 操業段階（掘削、埋め戻し）における化学的環境の変化
・ 微生物活動の変化	⑥ 微生物活動の変化

表 3.4.3-1 に整理した化学的影響の検討対象となり得る項目が着目すべき点に及ぼしうる影響の大きさの程度、および評価方法の現状を把握するために文献調査を行い、整理した。その結果、次年度の化学的影響評価において取り組むべき課題を表 3.4.3-2 のように選定した。

表 3.4.3-2 検討対象となる項目のまとめと次年度以降の取り組み

化学的影響の検討対象となり得る項目	回収可能性維持による安全性への影響の大きさ		評価技術（主に水理—化学）	次年度以降の取り組み
	閉鎖前の作業環境の安全性に関する影響	閉鎖後の長期安全性に関する影響		
① 人工部材（セメント系材料、鋼材）の変質	小 （補修頻度の観点で大）	中～大	セメント：有 鋼材：ある程度有	◎ （溶脱を中心）
② 高 pH 地下水による天然バリアの変質	小	小	有 透水、力学：途上	△
③ 鋼材、PEM 容器の腐食による水素ガス発生	中 （回収する場合）	小	不足あり （モデル化はやや困難）	○ （回収の観点から）
④ 坑道近傍の岩盤の風化	小～中	小～中	ある程度有	○ （風化範囲）
⑤ 操業段階（掘削、埋め戻し）における化学的環境の変化	小～中	中	有	◎ （背景として必須）
⑥ 微生物活動の変化	小～大	中～大	不足	○ （例示）

◎：重点的、○：補足的、△：予定なし

3.4.4 課題の抽出

上記の検討結果を踏まえて、回収可能性維持期間の安全性に対する影響についての評価を行うことによる課題を抽出した。

(1) 力学的影響評価に関する課題

本検討で用いた岩盤のコンプライアンス可変型モデルに関して、実際の坑道との計測例による妥当性確認の事例は多くなかったこと、妥当性確認の事例における計測は1年程度の計測であった。したがって、今後、現地計測との比較事例を積み上げる必要があるとともに、長期間にわたる計測例とも比較する必要がある。

本検討において使用したコンクリートの溶脱による劣化を考慮した構成則や、緩衝材および埋戻し材の飽和の進行を考慮した構成則は仮定したものであるため、課題として残っている。特に、吹付けコンクリートの特性は、坑道安定性の保持期間に大きく影響を及ぼす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と考えられる。

長期間に対応した応力に対する破壊基準については、幾つか提案されているものがあったが、回収可能性維持期間の評価に適用するためには不十分であった。また、長期間に対応したひずみに対する研究事例は見当たらなかった。今後、載荷時間を変えた圧縮試験のデータの拡充を図った上で、検討を行う必要があると考えられる。

強度回復現象に関しては、これを回収可能性維持期間の影響の評価に組み込むためには、現在の研究状況はまだ十分ではないことから、今後、現象理解も含めて、強度回復の条件、および強度回復過程の構成則の研究が必要と考えられるが、非常に難しい課題である。

(2) 水理学的影響評価に関する課題

1) 水理学的影響の評価方法について

a 解析モデル規模と解析負荷の増大への対応

実際にサイトを対象として回収維持期間を想定した非定常解析の実施するにあたっては、解析モデルの規模が大きくなると、様々な要因の影響により解析負荷が増すため、解析の目的に応じた評価方法の検討が必要になる。

b 解析モデルの妥当性確認のための水理モニタリング

多孔質媒体を対象とした評価手法はほぼ確立されており、解析コード自体の検証 (Verification) は実施されているため、評価対象に対する解析モデルの妥当性の確認 (Validation) が重要になる。解析モデルの妥当性確認のためには、適切な実測データの把握が不可欠となる。

c 不確実性の定量化のための検討

対象となる媒体は自然の地盤、岩盤であり、不均質性、不確実性を有している。適用する評価手法では考慮されていない自然現象を有する場合も想定される。処分事業においては、長期的な安全性の確保が重要な要求であるが、安全性に影響を及ぼす因子に対する不確実性の定量化を試みる必要がある。

2) 閉鎖前の作業環境の安全性、閉鎖後の長期安全性の評価について

a 坑道の施工工程を考慮した検討

湧水量に関しては、解析条件の簡略化のため瞬時掘削を想定したが、実際には坑道掘削は瞬時ではなく、施工工程を有するため現実的な評価のためには、施工工程を反映した検討が必要と考えられる。今後は具体的な施工工程を考慮した評価による影響を把握することが必要と思われる。

b 岩盤の不均質性を考慮した検討

実際の岩盤条件は不均質、不確実性を有しており、均質条件、決定論的な評価では、不均質性、不確実性の影響を評価することはできない。今後は不均質性、不確実性を考慮した検討が必要と考えられる。

c 不飽和領域評価手法の見極め

不飽和領域の評価手法として、パラメータ設定の影響等の感度解析を実施するとともに、より適切な解析手法、解析条件の設定について検討を継続する必要がある。また、解析手法の検証するためには、実測データや実験データについても取得する必要がある。入力パラメータとなるデータのみでなく、解析手法やモデル化の妥当性を確認するための検証データの取得についても検討する必要がある。

d サイトスケールでの再冠水評価手法の適用性検討

処分場の再冠水評価に対しては二相流解析手法が適していると考えられるものの、今後サイトスケールの再冠水現象の評価に手法として適用するにあたっては、モデル化等について検討する必要があり、必要に応じて FEM 解析手法の適用を考慮する必要があると思われる。

(3) 化学的影響評価に関する課題

地球化学的反応解析に用いられる熱力学データは、その信頼性向上のため、最新の知見に基づいて継続的に更新されており、近年はその入手も容易になっている。しかしながら、熱力学データには不確実性が多いため、データの継続的な整備が求められる。

鉱物の溶解は、緩慢であるのに加えて、機構が複雑であるため、平衡論的な扱いが難しいものが多い。このため、鉱物によっては、実測に合うような速度論的溶解モデルが示されている。しかし、処分環境を対象とした解析ではその全てを考慮することはできず、解析の目的に応じた鉱物および溶解モデルの取捨選択が必要になる。この過程は経験的知識や試行錯誤によるところが大きいのが現状であり、手法の体系化が求められる。

3.5 回収可能性維持期間に関する国際機関、諸外国の事例調査（第3分冊：第5章）

本節では、今後、回収可能性維持期間が決められる際に考慮されるべき因子等を検討していくために、回収可能性維持期間に係わる国際機関での議論や報告書での記述事項および地層処分を進める諸外国での事例調査を行い、維持期間設定に対する考え方や背景および期間決定の技術的な観点からの因子等について取りまとめた。

3.5.1 国際機関の報告書の記述

調査の対象としたのは、OECD/NEA のレポート[25]、[26]、および IAEA の技術報告書[27]である。IAEA の技術報告書には回収可能性維持の期間に係る直接的な記述は見当たらなかったが、OECD/NEA の R&R レポート[25]には以下の記載がある（NUMO の和訳版より抜粋）。

処分場の設計にもよるが、回収可能性の要件があることによって、処分場を開放したままにしておく期間が、回収可能性の要件がない場合に必要な開放期間よりも長くなることもある。このように閉鎖時期を遅らせることが必要と考えられる理由は様々である。例えば、規制の遵守、廃棄物が出す熱の管理、性能確認計画（廃棄物が設計要件に従って定置されていることを確認するためのモニタリング計画）を完了できるようにすること、実施された処分方法に対するさらなる社会的信頼構築の機会を与えることなどである。

上記の記述の内、回収可能性維持のために「閉鎖時期」を遅らせる場合の理由として、以下の4項目が例として挙げられている。

- ▶ 規制の遵守・・・例えば、規制要求となる閉鎖措置計画申請に向けての準備の期間
- ▶ 廃棄物が出す熱の管理・・・例えば、廃棄体の熱を所定まで下がるまでにかかる期間
- ▶ 性能確認計画（モニタリング計画）・・・例えば、バリアに期待する安全機能を確認するために必要となる期間
- ▶ 社会的信頼構築・・・例えば、パッシブセーフティへの移行が社会的に受容されるまでの期間

これらの内、規制の遵守、熱管理、性能確認計画の項目は、科学・技術的な観点から維持期間の必要性を決定する因子となる。社会的信頼構築については、閉鎖措置を行い、パッシブセーフティに移行するために、地域住民を含めステークホルダーからの理解を得られるまでの期間であるが、そのためには、先ず、規制から求められる閉鎖要件への対応の期間があって、その後の期間を決定する因子は受容性という定性的なものとなる。

3.5.2 諸外国における回収可能性維持期間

調査の対象とする国は、回収可能性が国あるいは規制主体から要求されている、または実施主体が独自に検討している国の内、維持期間について言及している以下の国を選定する。

- ①米国：ユッカマウンテンでの処分に対する規制当局（NRC）からの要求と対応[28]、[29]
- ②フランス：2006 Planning Act からの要求と対応[30]、[31]、[32]
- ③カナダ：NWMO の処分方針（A Way Forward）での設定[33]
- ④スイス：専門家グループ EKRA からの勧告（新原子力法に反映）[34]、[35]

処分計画が進んでいるフィンランド、スウェーデンでは、回収可能性を示す技術の実証試験を実施しているが、回収可能性維持期間は特に規定せず、原則「閉鎖まで」としている。

調査した米国、フランス、スイス、カナダにおける回収可能性維持期間に関する記述の中で、期間について言及されているのは、以下の事項である。これらはいずれも維持期間を決める因子となる。

- ▶ 規制主体が性能確認を要求しているのは米国のみである。ユッカマウンテンの定置概念は定置後埋め戻すことがないことから、定置したのち 50 年内での性能確認（特に使用済燃料の直接処分では廃棄体からの熱影響が周辺母岩に与える影響が性能確認上重要な事項となる）を求め、それを超える場合は DOE からの申請を受け、NRC が判断するとしている。実施主体である DOE は 50 年で影響を確認するのは困難であることから 300 年程度も期間も視野に入れたモニタリング計画を立案している。
- ▶ フランス、スイス、カナダでは、性能確認というタームは使わず、実証試験（パイロット）施設で実施するバリア機能のモニタリング結果で処分施設の閉鎖を申請することとしている。いずれの国も、廃棄体定置後処分坑道は埋め戻し、閉鎖までアクセス坑道のみを開放状態とすることを基本としている。
- ▶ その期間としてフランスでは、規制要件として 100 年以上を要求されている。スイスでは期間の要求はないが、実績から 100 年程度を目安としており、カナダでは技術開発目標として 30 年の操業後 70 年程度を実施主体が設定している。きせずして 3 か国では、定置を含めて 100 年という期間が取り上げられている。
- ▶ スイスでは、回収可能性を維持するために多大な費用をかけないことが法律と規制当局から要求されている。多大な費用とする判断は、R&R レポート[25]にあったいわゆる程度の問題に置き換えられる。

3.6 研究計画の更新（第3分冊：第6章）

前述したように、R&R 検討会において整理された定量化に必要な技術検討項目が、回収可能性維持に係る今後の更なる議論や技術検討を進める上での“検討のベース”と位置付けたことから、定量化に必要な技術検討項目の観点から新たに取り組むべき技術課題を具体化していく必要がある。本年度より、定量化すべき情報のうち「1.安全性への影響」に関する定量化に必要な技術検討項目に関する定性的・定量的検討を進めているが、平成30年度以降も引き続き検討を進めていくこととなる。また平成30年度以降は、もう一つの定量化すべき情報である「2.回収の容易性（回収作業時間）」の検討を視野に入れ、定量化に必要な技術検討項目（例）の「2」より回収の容易性を高めた処分場の設計開発」の検討に取り組む計画とする。

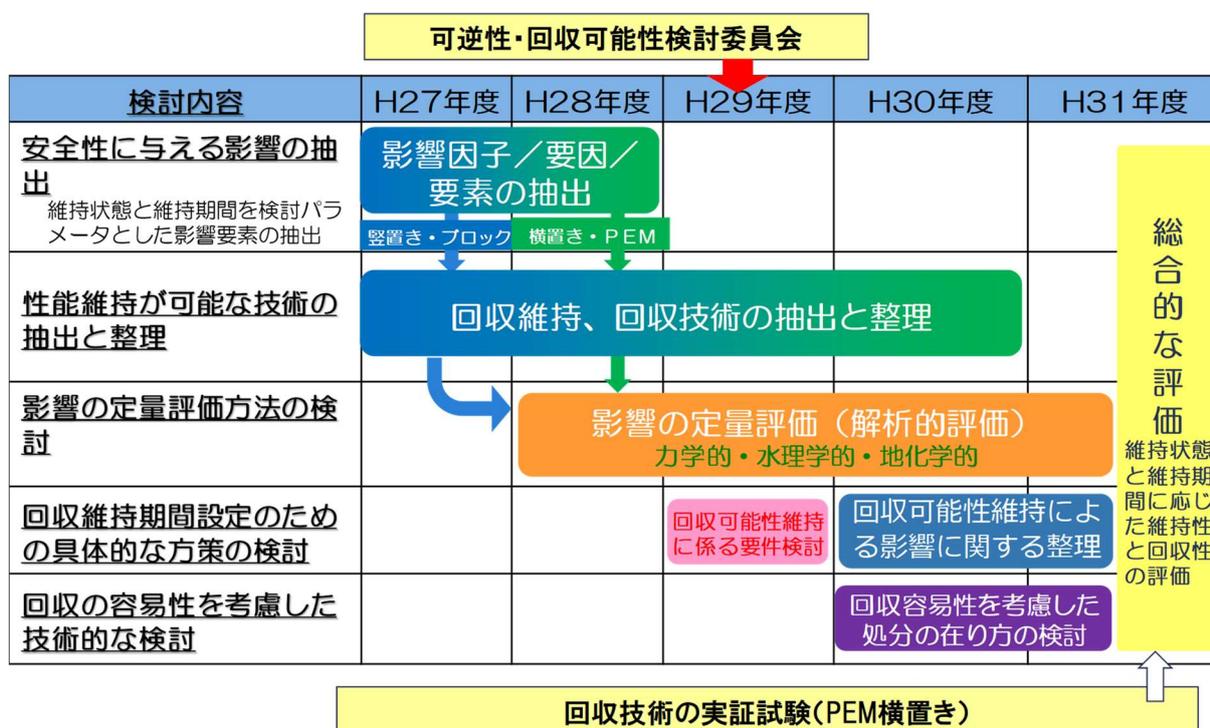


図 3.6-1 回収可能性の維持についての検討に関する5ヵ年計画の見直し

第3章 参考文献

- [1] 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>.
- [2] 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.
- [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.
- [4] 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.
- [5] 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，JNC TN1400 99-022，1999年.
- [6] 原子力発電環境整備機構：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性－「処分場の概要」の説明資料－，NUMO-TR-04-01，2004.
- [7] 原子力発電環境整備機構：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-11-01，2011.
- [8] 厚生労働省：労働安全衛生規則，平成29年11月改正.
- [9] Yamamoto, Y et al.: Repository Design in Safety Case Development. Proceedings of the 16th International High-Level Radioactive Waste Management Conference, IHLRWM2017, Charlotte, NC, USA, April 9-13, 2017.
- [10] 原子力発電環境整備機構：セーフティケースに関する外部専門家ワークショップ，原子力環境整備機構ホームページ，<http://www.numo.or.jp/topics/201616092916.html>，2016.
- [11] 菊池広人，棚井憲治：幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験（試験報告），JNC TN8430 2004-005，核燃料サイクル開発機構 東海事業所，2005.
- [12] 大久保誠介，金豊年：非線形粘弾性モデルによる円形坑道周辺岩盤のシミュレーション，資源と素材 109，209-214，1993.
- [13] 羽柴公博，福井勝則，畠山正樹：開始から19年が経過した田下凝灰岩のクリープ試験，第14回岩の力学国内シンポジウム講演集，神戸，1月10～12日，講演番号003，2017.
- [14] 緒方義弘，山口勉，厨川道雄，大久保誠介，西松裕一：粘弾性的挙動を示す岩盤の坑道掘進に伴う時間依存性変形のシミュレーション，資源と素材 110，1082-1088，1994.
- [15] 佐藤伸，納多勝，丹生屋純夫，畑浩二，松井裕哉，見掛信一郎：長期岩盤挙動評価技術への適用性検討（その2）コンプライアンス可変型モデルのパラメータ設定方法と岩盤挙動評価への適用性検討，第41回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，東京，1月12～13日，p.208-213，2012.

- [16] 里優, 竹田直樹, 亀村勝美: 強度の時間依存性に着目した岩盤の解析, 第 18 回土質工学研究発表会講演集, 郡山, 817-820, 1983.
- [17] 松長剛, 熊坂博夫, 小島芳之, 朝倉俊弘: 地山強度の経時劣化を考慮したトンネル変状の予測と対策に関する研究, 土木学会論文集 No.799/III-72, 75-88, 2005.
- [18] 北田正彦, 櫻井春輔, 芥川真一, 岡部幸彦, 進士正人: 在来工法で建設されたトンネルの拡幅時変形挙動とグラウンドリングに関する考察, 土木学会論文集 F Vol.65, No.2, 119-127, 2009.
- [19] 大久保誠介, 福井勝則, 新孝一: 岩盤の破壊基準と長期強度に関する一考察, 資源と素材 115, 213-218, 1999.
- [20] 大久保誠介, 羽柴公博, 福井勝則: 岩石の長期強度に関する一考察, Journal of MMIJ 129, 635-641, 2013.
- [21] 雷鳴, 大久保誠介, 福井勝則, 羽柴公博: 破砕した岩石の押し込み試験のシミュレーション, Journal of MMIJ 126, 64-71, 2010.
- [22] 公益財団法人日本道路協会: 道路トンネル維持管理便覧【本体工編】, 丸善出版, 東京, 2017.
- [23] 国土交通省鉄道局, 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編) トンネル, 丸善出版, 2007.
- [24] 安藤賢一, 納多勝, 山本幹彦, 三原守弘: TRU 廃棄物処分におけるガス発生・移行解析(研究報告), 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2005-026, 2005.
- [25] 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).
- [26] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY: Reversibility of Decisions and Retrievability of Radioactive Waste, 2011.
- [27] IAEA: Nuclear Energy Series, Geological Disposal of Radioactive Waste Technological Implication for Retrievability, 2009.
- [28] 米国原子力規制委員会 (NRC): 規制基準 10 CFR Part 63 「ネバダ州ユッカマウンテンで提案されている地層処分場における高レベル放射性廃棄物の処分」, 2009.
- [29] 米国エネルギー省 (DOE): Yucca Mountain Science and Engineering Report, 2002.
- [30] フランス法令: 放射性廃棄物等管理計画法, 2006.
- [31] ANDRA: Dossier, 2005.
- [32] ANDRA: Position Paper on Reversibility, 2016.
- [33] EKRA: Expert Group on Disposal Concepts for Radioactive Waste Disposal Concepts for. Radioactive Waste Final Report, 2000.
- [34] NWMO: A Way Forward, 2005.
- [35] NWMO: Description of a Deep Geological Repository and Centre of Experties for Canada's Used Nuclear Fuel, 2015.