

令和 4 年度

高レベル放射性廃棄物等の
地層処分にに関する技術開発事業

回収可能性技術高度化開発

報告書

令和 5 年 3 月

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

本報告書は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業として、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターと、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が実施した、令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業「回収可能性技術高度化開発」の事業報告書である。

目次

1. 諸言	1-1
1.1 事業の概要	1-1
1.1.1 事業名	1-1
1.1.2 事業目的	1-1
1.2 回収可能性に係わる技術検討のフレームワーク	1-2
1.2.1 技術開発・検討の目的	1-2
1.2.2 本事業での取り組み	1-4
1.3 実施内容	1-5
1.3.1 高レベル放射性廃棄物に対する廃棄体回収技術の高度化	1-5
1.3.2 回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備	1-7
1.3.3 地層処分実規模試験施設を活用した情報発信	1-8
1.3.4 事業成果の取りまとめ	1-8
2. 回収技術の高度化	2-1
2.1 技術開発の前提	2-1
2.1.1 基本方針への対応	2-1
2.1.2 回収時の地下施設の状態の設定	2-2
2.1.3 地下施設からの廃棄体の回収に必要な手順の具体化	2-2
2.1.4 回収作業に必要な技術の抽出	2-6
2.1.5 優先的に取り組む技術開発課題	2-6
2.2 処分孔縦置き方式の回収技術の高度化	2-8
2.2.1 迅速化に向けた技術開発の進め方	2-8
2.2.2 緩衝材除去技術の迅速化の目標設定	2-11
2.2.3 緩衝材除去システムの改良計画と試験規模	2-13
2.2.4 緩衝材除去特性の基礎的データの取得（噴射要素試験）	2-25
2.2.5 緩衝材除去手順の具体化と WJ 対応噴射リングの製作	2-28
2.2.6 予備試験による機能確認と試験条件の確定	2-33
2.2.7 フルスケールの緩衝材除去試験	2-35
2.2.8 処分孔縦置き方式の回収作業に対する、緩衝材除去技術の技術的実現性	2-44
2.2.9 今フェーズで得られた成果の総括	2-46
2.3 処分坑道横置き・PEM 方式の回収技術の高度化	2-47
2.3.1 迅速化に向けた技術開発の進め方	2-47
2.3.2 処分坑道横置き・PEM 方式の回収作業の迅速化における機械的除去技術	2-50
2.3.3 隙間充填材除去システムの要件定義	2-53
2.3.4 隙間充填材除去システムのアウトライン	2-57
2.3.5 機械的除去ユニットの成立性	2-65
2.3.6 機械的除去ユニットの機能確認	2-67
2.3.7 機械的除去技術の特性及び実際の回収事業に向けた課題	2-76
2.3.8 今フェーズで得られた成果の総括	2-89
3. 回収の容易性を高めた詳細設計オプションの整備	3-1

3.1 目的	3-1
3.2 処分坑道横置き・PEM方式を起点とした詳細設計オプションの適用例	3-2
3.2.1 隙間充填材の除去量の削減	3-2
3.2.2 坑道内の空間と作業性	3-3
3.2.3 隙間充填材の省略	3-4
3.3 詳細設計オプションの技術的実現性	3-6
3.3.1 小断面坑道の掘削技術	3-6
3.3.2 PEMー坑道壁面との固着の防止技術	3-8
3.4 狭隘空間での定置・回収に係る技術の実現性	3-13
3.4.1 狭隘空間での PEM の定置・回収に必要な機能の整理	3-13
3.4.2 定置／回収作業に対応した移送技術	3-16
2.1.6 装置化に向けた設計要件や機能の具体化	3-17
3.4.3 定置／回収装置の概念設計	3-19
3.5 検討内容及び成果の概要	3-23
4. 回収可能性の維持に伴う影響事象の定量化手法の整備	4-26
4.1 はじめに	4-26
4.1.1 目的	4-26
4.1.2 定量化手法の整備の方針	4-27
4.1.3 過年度までの成果及び本年度の実施内容	4-29
4.2 ストーリーボードの改善	4-32
4.2.1 重要なプロセスの整理	4-32
4.2.2 ストーリーボードの改善	4-32
4.3 技術課題のまとめ	4-43
4.3.1 地下構造物の安定性及び供用性に係るシナリオの作成	4-43
4.3.2 回収可能性維持期間の定量化手法の整理	4-47
4.3.3 技術課題のまとめ	4-48
4.4 本章の成果と今後の展開	4-56
4.4.1 本章の成果	4-56
4.4.2 今後の展開	4-56
5. 回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備	5-1
5.1 背景及び目的	5-1
5.2 実際の地下環境における支保部材の状態把握	5-1
5.2.1 室内物性試験および分析	5-2
5.3 坑道周辺地質環境の長期的な変化に関する解析	5-80
5.3.1 長期変化解析の概要	5-80
5.3.2 坑道周辺地質環境の長期変化解析に基づく安全評価への影響に関する概念検討	5-216
5.3.3 まとめと今後の課題	5-231
6. 地層処分実規模試験施設を活用した情報発信	6-1
6.1 実施内容	6-1
6.2 地層処分実規模試験施設の運営	6-1
6.2.1 施設の概要	6-1
6.2.2 施設の開館計画	6-2
6.2.3 来館者の対応計画	6-2

6.2.4 施設内の主な展示物	6-2
6.2.5 体感試験の実施	6-3
6.2.6 施設の維持管理について	6-4
6.3 本施設への来館状況	6-4
6.3.1 来館者数の変化	6-4
6.3.2 居住地別による来館者の推移	6-5
6.3.3 来館者の滞在時間	6-5
6.3.4 滞在時間別による質問数	6-6
6.3.5 体感試験による質問の変化	6-7
6.3.6 来館者の関心の方向	6-8
6.4 本年度の成果（結論：まとめ）	6-8
7. 本事業の総括	7-1

図目次

図 1.2-1 回収可能性が維持されている状態の模式図	1-4
図 2.1-1 回収可能性の維持状態と回収時の廃棄体の経路（状態 B）	2-2
図 2.1-2 状態 B の地下施設からの回収作業のシステム構成	2-4
図 2.1-3 状態 A の地下施設からの回収作業のシステム構成	2-4
図 2.1-4 状態 C の地下施設からの回収作業のシステム構成	2-4
図 2.1-5 廃棄体へのアクセスを確保する作業手順	2-5
図 2.1-6 処分坑道から坑底施設まで廃棄体を搬出する作業手順	2-5
図 2.1-7 地上への廃棄体搬出、及び地上での保管の作業手順	2-6
図 2.2-1 塩水による緩衝材除去の要素試験	2-8
図 2.2-2 緩衝材除去システムを構成する設備	2-9
図 2.2-3 噴射吸引設備による緩衝材の除去	2-9
図 2.2-4 緩衝材除去システム（噴射・吸引設備の仕様）	2-11
図 2.2-5 総合動作確認試験における除去作業時間の実績	2-11
図 2.2-6 処分孔縦置き方式のボトルネック抽出と目標時間	2-12
図 2.2-7 噴射・吸引設備に関する機能の抽出と設計対象	2-13
図 2.2-8 塩水供給・スラリー貯留設備に関する機能の抽出と設計対象	2-14
図 2.2-9 フルスケール試験装置の組立図（左）と 3D モデリングによる構造検証図（右）	2-14
図 2.2-10 緩衝材の施工管理結果（層厚、及び層厚から換算した乾燥密度）	2-15
図 2.2-11 従前の緩衝材除去システム上の循環システムの模式図	2-15
図 2.2-12 緩衝材除去システム内の作用流体の新規調整作業	2-16
図 2.2-13 緩衝材除去システム内の作用流体の供給作業	2-17
図 2.2-14 緩衝材除去システム内の作用流体の噴射作業	2-18
図 2.2-15 緩衝材除去システム内の除去生成物の撤去（吸引）作業	2-19
図 2.2-16 緩衝材除去システム内の除去生成物の処理作業	2-20
図 2.2-17 緩衝材除去システム内の除去生成物の固液分離作業	2-21

図 2.2-18	緩衝材除去システム内の上澄みの再調整作業	2-22
図 2.2-19	緩衝材除去システム内の作用流体の再生水調整作業	2-23
図 2.2-20	緩衝材除去システム内の環境・その他管理作業	2-24
図 2.2-21	1 次元の噴射要素試験の設備	2-25
図 2.2-22	直射ノズル斜め噴射による把持部周囲の除去	2-30
図 2.2-23	塩水 WJ による除去生成物	2-30
図 2.2-24	WJ 対応の噴射リングの外観	2-31
図 2.2-25	噴射試験時のトルネードノズルからの水流の様子	2-31
図 2.2-26	WJ 対応の噴射リングの設計図面	2-32
図 2.2-27	予備試験供試体の諸元	2-33
図 2.2-28	予備試験の動作イメージ	2-33
図 2.2-29	吸引ノズルの閉塞現象と問題点の推定	2-34
図 2.2-30	フルスケールの緩衝材除去時のリングの動作イメージ	2-35
図 2.2-31	試験装置ならびに試験設備（予備試験）	2-36
図 2.2-32	緩衝材除去の進行状況（フルスケール試験）	2-40
図 2.2-33	緩衝材の除去部上端深度と経過時間の関係（フルスケール試験）	2-42
図 2.2-34	緩衝材の除去部上端深度と鉛直方向除去速度の関係（フルスケール試験）	2-42
図 2.2-35	密度計測と形状計測の 2 つの結果を用いて算出した除去量（乾燥重量）の比較（フルスケール試験）	2-43
図 2.2-36	処分孔からオーバーバックを回収する作業手順（図 2.1-6 を改良）	2-44
図 2.3-1	幌延 URL における処分坑道横置き・PEM の回収実証試験の状況	2-48
図 2.3-2	処分坑道横置き・PEM 方式（デッドエンド型）における状態 B の模式図	2-48
図 2.3-3	除去技術に関する作業を分割・具体化した概念図	2-49
図 2.3-4	処分坑道横置き・PEM 方式の回収作業手順	2-52
図 2.3-5	各処分坑道のタイムライン（処分坑道横置き・PEM 方式）	2-52
図 2.3-6	処分坑道横置き・PEM 方式の処分施設（デッドエンド型）のレイアウト	2-52
図 2.3-7	想定したプラグの厚みと処分坑道の埋戻し範囲	2-53
図 2.3-8	処分坑道横置き・PEM 方式のボトルネック抽出と PEM 一体当りの目標作業時間	2-53
図 2.3-9	逐次方式及び一括方式の装置形状のイメージ	2-55
図 2.3-10	路面の不陸による除去装置への影響の例	2-56
図 2.3-11	自由断面方式と固定断面方式の切削部分の例	2-58
図 2.3-12	自由断面掘削方式の機械的除去装置概要図	2-58
図 2.3-13	固定断面掘削方式の機械的除去装置概要図	2-59
図 2.3-14	自由断面方式と固定断面方式の切削試験結果（切削刃への付着状況と除去生成物）	2-60
図 2.3-15	処分坑道横置き・PEM の隙間充填材除去システムのアウトライン	2-60
図 2.3-16	除去ユニットの配置と移動状況の例	2-62
図 2.3-17	切削部（ツインカッター）	2-65
図 2.3-18	排土部の概要	2-65
図 2.3-19	動作アームの例	2-66
図 2.3-20	切込み量 d と送り量 F による排土量 Q の算定（理論値）	2-68
図 2.3-21	切込み量 d と送り量 F の組合せとカッター能力の上限値の関係	2-68

図 2.3-22	吸引口の位置（ギャップの設定）	2-69
図 2.3-23	切削状況（ケース 1、ケース 3）	2-71
図 2.3-24	切削状況（ケース 6、ケース 7）	2-72
図 2.3-25	切削状況（ケース 2、ケース 4）	2-72
図 2.3-26	分離タンクへの回収量と回収率と切込み量との関係	2-73
図 2.3-27	路盤への落下量と落下率と切込み量との関係	2-73
図 2.3-28	カッターへの付着量と付着	2-74
図 2.3-29	分離タンクへの回収量、回収率とギャップとの関係	2-74
図 2.3-30	路盤への落下量、落下率とギャップとの関係	2-74
図 2.3-31	除去生成物の性状比較（分離タンク回収、路盤落下）（ $d = 50 \text{ mm}$ 、 $F = 3,630 \text{ mm/min}$ ）	2-75
図 2.3-32	除去生成物の付着のメカニズム	2-76
図 2.3-33	切削試験装置の概要	2-77
図 2.3-34	ベントナイト混合土の切削パターン（破壊形態）の分類	2-78
図 2.3-35	ベントナイト混合土の飽和度と切削パターンの関係	2-79
図 2.3-36	ベントナイト混合土のベントナイト配合率と切削パターンの関係	2-79
図 2.3-37	ベントナイト混合土の有効粘土密度と切削パターンの関係	2-79
図 2.3-38	ベントナイト混合土のコンシステンシー指数と切削パターンの関係	2-80
図 2.3-39	切削パターンの分類と特徴	2-81
図 2.3-40	切削面に生じる鉛直方向の応力	2-82
図 2.3-41	切削面に生じる鉛直方向の応力と有効粘土密度（上から $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ）	2-83
図 2.3-42	ソインカッター切削機構の概要	2-85
図 2.3-43	坑道における切削ステップ	2-86
図 2.3-44	隙間充填材除去装置の概念設計案のイメージ（1/2）（俯瞰図、排土板伸長）	2-87
図 2.3-45	隙間充填材除去装置の概念設計案のイメージ（2/2）（右後方より、排土板短縮）	2-88
図 3.2-1	処分坑道定置方式の定置方法のバリエーション	3-3
図 3.2-2	PEM を跨ぐ構造の機械的除去装置のイメージ図（左）	3-4
図 3.2-3	詳細設計オプション（隙間充填材の省略）を適用したイメージ	3-4
図 3.2-4	円形断面の坑道に対する PEM の操業技術の整備例	3-5
図 3.2-5	閉鎖後長期の安全性の観点から見た隙間幅の許容値（PEM 方式）	3-5
図 3.3-1	PEM 回収時における摺動スライダーへの反力	3-8
図 3.3-2	摺動スライダーの形状案	3-10
図 3.3-3	解析モデル（例：窒化珪素のスライダー形状）	3-11
図 3.3-4	最大主応力の分布（例：窒化珪素のスライダー形状）	3-11
図 3.3-5	PEM に摺動スライダーを取り付ける方法の例	3-12
図 3.4-1	分析に用いる表現	3-13
図 3.4-2	定置作業時に必要な 1 次機能の分析	3-14
図 3.4-3	定置作業時に必要な 2 次機能の分析	3-14
図 3.4-4	回収作業時に必要な 1 次機能の分析	3-15
図 3.4-5	回収作業時に必要な 2 次機能の分析	3-15
図 3.4-6	定置・回収作業で取り得る動作	3-16
図 3.4-7	推進動作に適用する技術の具体化の例	3-17

図 3.4-8	定置／回収装置の概念設計の流れ	3-20
図 3.4-9	定置／回収装置の概念設計の考え方	3-21
図 3.4-10	定置／回収装置の概念の具体化による概念設計	3-21
図 3.4-11	定置作業時（推進動作）の流れ	3-22
図 3.4-12	回収作業時（牽引動作）の流れ	3-22
図 4.1-1	回収可能性が維持される状態の模式図	4-26
図 4.1-2	回収可能性の維持に伴う影響事象の定量化手法の構築に係る検討フロー	4-28
図 4.1-3	ストーリーボードの例（2021 年度検討（原環センター・原子力機構, 2022））	4-30
図 4.1-4	検討対象とする処分坑道	4-31
図 4.2-1	「重要なプロセス」の要因整理（関連する THMC、基本となるプロセス）の例	4-35
図 4.2-2	ストーリーボード（処分場スケール）	4-37
図 4.2-3	ストーリーボード（ニアフィールドスケール、詳細スケール）（状態オプション A,B 共通、期間②）	4-38
図 4.2-4	ストーリーボード（ニアフィールドスケール、詳細スケール）（状態オプション A,B 共通、期間③）	4-39
図 4.2-5	ストーリーボード（ニアフィールドスケール、詳細スケール）（状態オプション A、期間④）	4-40
図 4.2-6	ストーリーボード（ニアフィールドスケール、詳細スケール）（状態オプション B、期間④）	4-41
図 4.3-1	スケールアップ/ダウンを含めた統合化のイメージ	4-55
図 4.3-2	坑道内のロックボルトの評価のイメージ	4-55
図 5.1-1	回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備における検討項目と本章での技術開発との関係	5-1
図 5.2-1	作成した吹付けコンクリート供試体の定置養生の状況	5-2
図 5.2-2	供試体受入れ時の状況と供試体外観（No.1 のみ例示）	5-2
図 5.2-3	試験に供する供試体の概要	5-4
図 5.2-4	透水試験試料	5-6
図 5.2-5	透水試験の予備検討結果	5-6
図 5.2-6	アウトプット法による透水試験の状況	5-7
図 5.2-7	水の浸透深さの計測方法	5-7
図 5.2-8	透水試験の試験系（「低透水性材料の透水試験方法」による）	5-8
図 5.2-9	中性化深さ測定試料	5-10
図 5.2-10	EPMA 用分析試料	5-10
図 5.2-11	一軸圧縮強度（補正後）	5-14
図 5.2-12	静弾性係数	5-14
図 5.2-13	ポアソン比	5-15
図 5.2-14	各試験体の応力—ひずみ関係	5-15
図 5.2-15	P 波速度	5-19
図 5.2-16	S 波速度	5-19
図 5.2-17	動ポアソン比	5-20
図 5.2-18	動せん断弾性係数	5-20
図 5.2-19	動弾性係数	5-21
図 5.2-20	割裂引張強度	5-22

図 5.2-21	2020 年度から 2022 年度まで実施した力学試験結果のまとめ (1)	5-25
図 5.2-22	2020 年度から 2022 年度まで実施した力学試験結果のまとめ (2)	5-26
図 5.2-23	気中養生試験体の透水係数 (3 点平均) の比較結果	5-28
図 5.2-24	拡散係数の算出結果	5-31
図 5.2-25	透水係数の算出結果	5-31
図 5.2-26	インプット法による透水試験体の浸透状況	5-31
図 5.2-27	地盤工学会基準に基づく透水係数 (3 点平均) の比較結果	5-33
図 5.2-28	透水係数の経時変化	5-34
図 5.2-29	流入出量の経時変化	5-35
図 5.2-30	各試料の空隙率	5-38
図 5.2-31	養生条件の違いによる健全部の空隙径分布の比較	5-39
図 5.2-32	気中養生試料の空隙径分布	5-40
図 5.2-33	水中養生試料の空隙径分布	5-41
図 5.2-34	中性化深さの測定結果	5-43
図 5.2-35	気中養生試験体におけるフェノールフタレイン噴霧後の断面 (色調を加工)	5-44
図 5.2-36	水中養生試験体におけるフェノールフタレイン噴霧後の断面 (色調を加工)	5-45
図 5.2-37	No.10～No.12 気中養生試料の元素濃度分布 (1/2)	5-47
図 5.2-38	No.10～No.12 気中養生試料の元素濃度分布 (2/2)	5-48
図 5.2-39	No.13～No.14 気中養生試料の元素濃度分布 (1/2)	5-49
図 5.2-40	No.13～No.14 気中養生試料の元素濃度分布 (2/2)	5-50
図 5.2-41	No.10～No.12 水中養生試料の元素濃度分布 (1/2)	5-51
図 5.2-42	No.10～No.12 水中養生試料の元素濃度分布 (2/2)	5-52
図 5.2-43	No.13～No.14 水中養生試料の元素濃度分布 (1/2)	5-53
図 5.2-44	No.13～No.14 水中養生試料の元素濃度分布 (2/2)	5-54
図 5.2-45	気中養生 No.10 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)	5-56
図 5.2-46	気中養生 No.10 の SEM/EDS 分析結果 (2/2)	5-57
図 5.2-47	気中養生 No.11 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)	5-58
図 5.2-48	気中養生 No.11 の SEM/EDS 分析結果 (2/2)	5-59
図 5.2-49	気中養生 No.12 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)	5-60
図 5.2-50	気中養生 No.12 の SEM/EDS 分析結果 (2/2)	5-61
図 5.2-51	気中養生 No.13 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)	5-62
図 5.2-52	気中養生 No.13 の SEM/EDS 分析結果 (2/2)	5-63
図 5.2-53	気中養生 No.14 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)	5-64
図 5.2-54	気中養生 No.14 の SEM/EDS 分析結果 (2/2)	5-65
図 5.2-55	水中養生 No.10 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)	5-66
図 5.2-56	水中養生 No.10 の SEM/EDS 分析結果 (2/2)	5-67
図 5.2-57	水中養生 No.11 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)	5-68
図 5.2-58	水中養生 No.11 の SEM/EDS 分析結果 (2/2)	5-69
図 5.2-59	水中養生 No.12 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)	5-70
図 5.2-60	水中養生 No.12 の SEM/EDS 分析結果 (2/2)	5-71
図 5.2-61	水中養生 No.13 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)	5-72
図 5.2-62	水中養生 No.13 の SEM/EDS 分析結果 (2/2)	5-73
図 5.2-63	水中養生 No.14 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)	5-74

図 5.2-64	水中養生 No.14 の SEM/EDS 分析結果 (2/2).....	5-75
図 5.2-65	水質分析結果(1/2)	5-76
図 5.2-66	水質分析結果(2/2)	5-77
図 5.3-1	解析の流れ	5-80
図 5.3-2	力学長期変化解析の初期状態.....	5-81
図 5.3-3	力学的長期変化解析の解析モデル	5-82
図 5.3-4	坑道周辺岩盤の透水係数増加率の経時変化	5-84
図 5.3-5	EDZ1 の透水係数の経時変化	5-85
図 5.3-6	EDZ2 の透水係数の経時変化	5-86
図 5.3-7	坑道周辺岩盤のヤング率の増加率の経時変化	5-87
図 5.3-8	坑道周辺岩盤のポアソン比の経時変化	5-88
図 5.3-9	解析モデル概念図.....	5-90
図 5.3-10	試験坑道 3 の断面図 (再掲)	5-90
図 5.3-11	解析メッシュ (坑道開放状態)	5-91
図 5.3-12	坑道近傍の解析メッシュ (坑道埋戻し状態)	5-91
図 5.3-13	水分特性曲線.....	5-93
図 5.3-14	比透水係数及び透気係数曲線 (母岩、EDZ1、EDZ2)	5-94
図 5.3-15	幌延の掘削グリーンベントナイト混合土の保水性試験結果.....	5-95
図 5.3-16	モンモリロナイト基準含水比で整理したベントナイト系材料の水分特性	5-95
図 5.3-17	クニゲル V1 の $\omega_{mon} - \psi$ のデータ (蒸留水)	5-96
図 5.3-18	推定された水分特性曲線 (混合土の乾燥密度: 1.2 Mg/m ³) (埋戻し材)	5-97
図 5.3-19	水分特性曲線 (埋戻し材)	5-97
図 5.3-20	比透水係数及び透気係数曲線 (埋戻し材)	5-98
図 5.3-21	EDZ1 の絶対浸透率の分布の変化.....	5-100
図 5.3-22	EDZ1 の比貯留係数の分布の変化.....	5-101
図 5.3-23	区分した EDZ1 (左)、主要なメッシュ要素 (右)	5-102
図 5.3-24	主要要素の絶対浸透率の経時変化 (EDZ1)	5-102
図 5.3-25	主要要素の比貯留係数の経時変化 (EDZ1)	5-102
図 5.3-26	絶対浸透率の経時変化図及び設定値 (EDZ1)	5-104
図 5.3-27	比貯留係数の経時変化図及び設定値 (EDZ1)	5-104
図 5.3-28	EDZ2 の絶対浸透率の分布の変化.....	5-105
図 5.3-29	EDZ2 の比貯留係数の分布の変化.....	5-106
図 5.3-30	区分した EDZ2 (左)、主要なメッシュ要素 (右)	5-107
図 5.3-31	主要要素の絶対浸透率の経時変化 (EDZ2)	5-107
図 5.3-32	主要要素の比貯留係数の経時変化 (EDZ2)	5-107
図 5.3-33	絶対浸透率の経時変化図及び設定値 (EDZ2)	5-109
図 5.3-34	比貯留係数の経時変化図及び設定値 (EDZ2)	5-109
図 5.3-35	境界条件.....	5-112
図 5.3-36	境界条件.....	5-112
図 5.3-37	掘削後の圧力分布 (モデル全体)	5-115
図 5.3-38	掘削後の圧力分布 (モデル全体)	5-116
図 5.3-39	掘削後の圧力分布 (坑道近傍)	5-117
図 5.3-40	掘削後の飽和度分布(坑道壁面から水平方向に 100m の範囲).....	5-118

図 5.3-41	掘削後の飽和度分布（坑道近傍）	5-119
図 5.3-42	掘削後の流向分布（気相）（坑道壁面から水平方向に 100m の範囲）	5-120
図 5.3-43	掘削後の流向分布（気相）（坑道近傍）	5-121
図 5.3-44	掘削後の流向分布（液相）（坑道近傍）	5-122
図 5.3-45	掘削後の単位間隙あたりの CH_4 のモル量（坑道周辺、気相）	5-124
図 5.3-46	掘削後の単位間隙あたりの CH_4 のモル量（坑道周辺、気相+液相）	5-125
図 5.3-47	掘削後の単位間隙あたりの CH_4 のモル量（坑道近傍、気相）	5-126
図 5.3-48	掘削後の単位間隙あたりの CH_4 のモル量（坑道近傍、気相+液相）	5-127
図 5.3-49	掘削後の単位間隙あたりの CO_2 のモル量（坑道周辺、気相）	5-128
図 5.3-50	掘削後の単位間隙あたりの CO_2 のモル量（坑道周辺、気相+液相）	5-129
図 5.3-51	掘削後の単位間隙あたりの CO_2 のモル量（坑道近傍、気相）	5-130
図 5.3-52	掘削後の単位間隙あたりの CO_2 のモル量（坑道近傍、気相+液相）	5-131
図 5.3-53	掘削後の単位間隙あたりの O_2 のモル量（坑道周辺、気相）	5-132
図 5.3-54	掘削後の単位間隙あたりの O_2 のモル量（坑道周辺、気相+液相）	5-133
図 5.3-55	掘削後の単位間隙あたりの O_2 のモル量（坑道近傍、気相）	5-134
図 5.3-56	掘削後の単位間隙あたりの O_2 のモル量（坑道近傍、気相+液相）	5-135
図 5.3-57	Case7 の圧力分布（モデル全体）	5-137
図 5.3-58	Case7 の圧力分布（坑道周辺）	5-138
図 5.3-59	Case7 の飽和度分布（坑道周辺）	5-139
図 5.3-60	Case7 の飽和度分布（坑道近傍）	5-140
図 5.3-61	水分特性曲線	5-141
図 5.3-62	Case7 の単位間隙あたりの CH_4 のモル量分布（坑道周辺、気相）	5-142
図 5.3-63	Case7 の単位間隙あたりの CH_4 のモル量分布（坑道周辺、気相+液相）	5-143
図 5.3-64	Case7 の単位間隙あたりの CH_4 のモル量分布（坑道近傍、気相）	5-144
図 5.3-65	Case7 の単位間隙あたりの CH_4 のモル量分布（坑道近傍、気相+液相）	5-145
図 5.3-66	Case7 の単位間隙あたりの CO_2 のモル量分布（坑道周辺、気相）	5-147
図 5.3-67	Case7 の単位間隙あたりの CO_2 のモル量分布（坑道周辺、気相+液相）	5-148
図 5.3-68	Case7 の単位間隙あたりの CO_2 のモル量分布（坑道近傍、気相）	5-149
図 5.3-69	Case7 の単位間隙あたりの CO_2 のモル量分布（坑道近傍、気相+液相）	5-150
図 5.3-70	Case7 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布（坑道周辺、気相）	5-152
図 5.3-71	Case7 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布（坑道周辺、気相+液相）	5-153
図 5.3-72	Case7 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布（坑道近傍、気相）	5-154
図 5.3-73	Case7 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布（坑道近傍、気相+液相）	5-155
図 5.3-74	Case8 の圧力分布（モデル全体）	5-157
図 5.3-75	Case8 の圧力分布（坑道周辺）	5-158
図 5.3-76	Case8 の飽和度分布（坑道周辺）	5-159
図 5.3-77	Case8 の飽和度分布（坑道近傍）	5-160
図 5.3-78	Case8 の単位間隙あたりの CH_4 のモル量分布（坑道周辺、気相）	5-162
図 5.3-79	Case8 の単位間隙あたりの CH_4 のモル量分布（坑道周辺、気相+液相）	5-163
図 5.3-80	Case8 の単位間隙あたりの CH_4 のモル量分布（坑道近傍、気相）	5-164
図 5.3-81	Case8 の単位間隙あたりの CH_4 のモル量分布（坑道近傍、気相+液相）	5-165
図 5.3-82	Case8 の単位間隙あたりの CO_2 のモル量分布（坑道周辺、気相）	5-167
図 5.3-83	Case8 の単位間隙あたりの CO_2 のモル量分布（坑道周辺、気相+液相）	5-168

図 5.3-84	Case8 の単位間隙あたりの CO ₂ のモル量分布 (坑道近傍、気相)	5-169
図 5.3-85	Case8 の単位間隙あたりの CO ₂ のモル量分布 (坑道近傍、気相+液相)	5-170
図 5.3-86	Case8 の単位間隙あたりの O ₂ のモル量分布 (坑道周辺、気相)	5-172
図 5.3-87	Case8 の単位間隙あたりの O ₂ のモル量分布 (坑道周辺、気相+液相)	5-173
図 5.3-88	Case8 の単位間隙あたりの O ₂ のモル量分布 (坑道近傍、気相)	5-174
図 5.3-89	Case8 の単位間隙あたりの O ₂ のモル量分布 (坑道近傍、気相+液相)	5-175
図 5.3-90	Case9 の圧力分布 (モデル全体)	5-177
図 5.3-91	Case9 の圧力分布 (坑道周辺)	5-178
図 5.3-92	Case9 の飽和度分布 (坑道周辺)	5-179
図 5.3-93	Case9 の飽和度分布 (坑道近傍)	5-180
図 5.3-94	Case9 の単位間隙あたりの CH ₄ のモル量分布 (坑道周辺、気相)	5-182
図 5.3-95	Case9 の単位間隙あたりの CH ₄ のモル量分布 (坑道周辺、気相+液相)	5-183
図 5.3-96	Case9 の単位間隙あたりの CH ₄ のモル量分布 (坑道近傍、気相)	5-184
図 5.3-97	Case9 の単位間隙あたりの CH ₄ のモル量分布 (坑道近傍、気相+液相)	5-185
図 5.3-98	Case9 の単位間隙あたりの CO ₂ のモル量分布 (坑道周辺、気相)	5-187
図 5.3-99	Case9 の単位間隙あたりの CO ₂ のモル量分布 (坑道周辺、気相+液相)	5-188
図 5.3-100	Case9 の単位間隙あたりの CO ₂ のモル量分布 (坑道近傍、気相)	5-189
図 5.3-101	Case9 の単位間隙あたりの CO ₂ のモル量分布 (坑道近傍、気相+液相)	5-190
図 5.3-102	Case9 の単位間隙あたりの O ₂ のモル量分布 (坑道周辺、気相)	5-192
図 5.3-103	Case9 の単位間隙あたりの O ₂ のモル量分布 (坑道周辺、気相+液相)	5-193
図 5.3-104	Case9 の単位間隙あたりの O ₂ のモル量分布 (坑道近傍、気相)	5-194
図 5.3-105	Case9 の単位間隙あたりの O ₂ のモル量分布 (坑道近傍、気相+液相)	5-195
図 5.3-106	Case10 の圧力分布 (モデル全体)	5-197
図 5.3-107	Case10 の圧力分布 (坑道周辺)	5-198
図 5.3-108	Case10 の飽和度分布 (坑道周辺)	5-199
図 5.3-109	Case10 の飽和度分布 (坑道近傍)	5-200
図 5.3-110	Case10 の単位間隙あたりの CH ₄ のモル量分布 (坑道周辺、気相)	5-202
図 5.3-111	Case10 の単位間隙あたりの CH ₄ のモル量分布 (坑道周辺、気相+液相)	5-203
図 5.3-112	Case10 の単位間隙あたりの CH ₄ のモル量分布 (坑道近傍、気相)	5-204
図 5.3-113	Case10 の単位間隙あたりの CH ₄ のモル量分布 (坑道近傍、気相+液相)	5-205
図 5.3-114	Case10 の単位間隙あたりの CO ₂ のモル量分布 (坑道周辺、気相)	5-207
図 5.3-115	Case10 の単位間隙あたりの CO ₂ のモル量分布 (坑道周辺、気相+液相)	5-208
図 5.3-116	Case10 の単位間隙あたりの CO ₂ のモル量分布 (坑道近傍、気相)	5-209
図 5.3-117	Case10 の単位間隙あたりの CO ₂ のモル量分布 (坑道近傍、気相+液相)	5-210
図 5.3-118	Case10 の単位間隙あたりの O ₂ のモル量分布 (坑道周辺、気相)	5-212
図 5.3-119	Case10 の単位間隙あたりの O ₂ のモル量分布 (坑道周辺、気相+液相)	5-213
図 5.3-120	Case10 の単位間隙あたりの O ₂ のモル量分布 (坑道近傍、気相)	5-214
図 5.3-121	Case10 の単位間隙あたりの O ₂ のモル量分布 (坑道近傍、気相+液相)	5-215
図 5.3-122	地質環境の安全機能「放射性物質の溶解の抑制」に関する要因分析図	5-218
図 5.3-123	地質環境の安全機能「遅い地下水流速による放射性物質の移行の抑制」に関する要因分析図	5-219
図 5.3-124	地質環境の安全機能「放射性物質の分散」に関する要因分析図	5-220
図 5.3-125	母岩の体積ひずみの経時変化	5-221

図 5.3-126	声問層と稚内層における間隙率－透水係数の関係	5-222
図 5.3-127	Case5 における周辺岩盤の透水係数の増加率.....	5-222
図 5.3-128	地質環境の安全機能「放射性物質の溶解の抑制」に関する要因分析図	5-225
図 5.3-129	地質環境の安全機能「遅い地下水流速による放射性物質の移行の抑制」に関する要因分析図.....	5-225
図 5.3-130	地質環境の安全機能「放射性物質の収着」に関する要因分析図	5-226
図 5.3-131	地質環境の安全機能「放射性物質の分散」に関する要因分析図.....	5-226
図 5.3-132	埋戻し材及び止水プラグの安全機能「坑道およびその周辺が卓越した放射性物質の移行経路となることの抑制」に関する要因分析図	5-226
図 5.3-133	坑道掘削から埋戻しを経て 1,000 年後における	5-230
図 5.3-134	坑道掘削から埋戻しを経て 1,000 年後における坑道周辺・近傍の物理量（単位体積中のメタン・酸素の物質質量; いずれも液相及び気相中の合計値）の分布の比較	5-231
図 6.2-1	地層処分実規模試験施設.....	6-1
図 6.2-2	施設内の主な展示物①	6-3
図 6.2-3	施設内の主な展示物②.....	6-3
図 6.2-4	ベントナイト体感試験	6-4
図 6.3-1	来館者数の推移（2010 年 4 月～2023 年 2 月）	6-5
図 6.3-2	来館者の属性（居住地別）	6-5
図 6.3-3	本施設での平均滞在時間.....	6-6
図 6.3-4	滞在時間別による質問数.....	6-6
図 6.3-5	来館者の見学方法別による質問の有無（2013 年以降）	6-7
図 6.3-6	見学方法別による質問内容別構成比（2013 年度以降）	6-7
図 6.3-7	質問内容別構成比（年度別）	6-8

表目次

表 1.2-1	回収可能性の維持に関する技術検討の枠組み	1-2
表 2.1-1	現行の定置概念に対する回収技術の整備状況	2-7
表 2.2-1	作用流体の新規調整作業における取得情報	2-16
表 2.2-2	作用流体の供給作業における取得情報	2-17
表 2.2-3	作用流体の噴射作業における取得情報	2-18
表 2.2-4	除去生成物の撤去（吸引）作業における取得情報	2-19
表 2.2-5	除去生成物の処理系統の判断（リユース系統 or 作業系外）のための取得情報....	2-20
表 2.2-6	除去生成物の固液分離作業における取得情報	2-21
表 2.2-7	上澄みの再調整作業における取得情報	2-22
表 2.2-8	作用流体の再生水調整作業における取得情報	2-23
表 2.2-9	環境・その他管理作業における取得情報.....	2-24
表 2.2-10	噴射水の液種、及び緩衝材の飽和度と除去効率の関係（トルネードノズル）	2-26
表 2.2-11	噴射条件と除去効率の関係（トルネードノズル）	2-26
表 2.2-12	WJ による緩衝材除去の基本条件と、作業への展開	2-28

表 2.2-13	オーバーパック側部緩衝材除去の噴射条件	2-35
表 2.2-14	フルスケール試験で取得したデータと本報告書での記載方法	2-37
表 2.2-15	緩衝材除去の進行履歴（１）（フルスケール試験）	2-38
表 2.2-16	緩衝材除去の進行履歴（２）（フルスケール試験）	2-39
表 2.2-17	緩衝材の流体的除去の技術的選択肢	2-45
表 2.3-1	PEM 回収における回収作業の順序と技術開発課題としての優先度	2-51
表 2.3-2	連続的な動作・作業を妨げる項目・課題・要因・対応	2-56
表 2.3-3	消耗品の交換、メンテナンスなどの間隔と除去作業への影響	2-57
表 2.3-4	試験体の配合	2-69
表 2.3-5	試験条件及び試験結果	2-70
表 3.3-1	円形小断面の坑道の掘削技術	3-7
表 3.3-2	セラミックスの主な物性値	3-9
表 3.4-1	定置作業／回収作業に適用する装置の設計要件や機能の整理	3-18
表 3.4-2	定置／回収装置の設計要件や機能	3-19
表 4.2-1	専門家との議論より得られた重要なプロセス	4-33
表 4.2-2	評価対象事象及びプロセスの変更例（状態オプション A、B 共通、期間②）	4-36
表 4.2-3	評価対象と考慮が必要なプロセスの例（状態オプション A、B 共通、期間②、金属）	4-42
表 4.3-1	専門家との議論より得られたシナリオ記述に係る留意点	4-44
表 4.3-2	評価対象と考慮が必要なプロセスの分析結果の例（状態オプション A、B 共通、期間②、金属）	4-45
表 4.3-3	サブシナリオのまとめ	4-46
表 4.3-4	定量化手法に係る留意点（金属）	4-50
表 4.3-5	定量化手法に係る留意点（セメント鉱物）	4-51
表 4.3-6	定量化手法に係る留意点（有機物）	4-52
表 4.3-7	定量化手法に係る留意点（鉱物（岩盤））	4-53
表 4.3-8	定量化手法に係る留意点（鉱物（緩衝材/埋戻し材））	4-54
表 5.2-1	支給したコンクリート供試体と用途	5-3
表 5.2-2	試験項目一覧	5-4
表 5.2-3	一軸圧縮試験方法および使用装置	5-5
表 5.2-4	EPMA 測定条件	5-11
表 5.2-5	各元素の分析方法，使用機器一覧	5-11
表 5.2-6	一軸圧縮強度試験結果（気中養生）	5-12
表 5.2-7	一軸圧縮強度試験結果（水中養生）	5-13
表 5.2-8	一軸圧縮強度試験 変形特性試験結果（気中養生）	5-13
表 5.2-9	一軸圧縮強度試験 変形特性試験結果（水中養生）	5-13
表 5.2-10	弾性波測定結果（気中養生）	5-16
表 5.2-11	弾性波測定結果（水中養生）	5-17
表 5.2-12	割裂引張強度試験結果（気中養生）	5-21
表 5.2-13	割裂引張強度試験結果（水中養生）	5-22
表 5.2-14	強度特性試験結果の一覧	5-24
表 5.2-15	アウトプット法による透水係数の算出結果（気中養生試験体）	5-28
表 5.2-16	インプット法による透水係数の算出結果（水中養生試験体）	5-30

表 5.2-17	供試体情報	5-32
表 5.2-18	加圧条件（高さ 25 mm の場合の条件設定値）	5-32
表 5.2-19	JGS 0312-2018 に基づく透水係数算出結果	5-32
表 5.2-20	水銀圧入式ポロシメータの測定結果	5-38
表 5.2-21	中性化深さの測定結果	5-43
表 5.2-22	材齢 2 年における中性化速度係数の算出結果	5-43
表 5.2-23	分析結果一覧	5-76
表 5.2-24	各試験における気中養生試験体と水中養生試験体の相違点	5-78
表 5.2-25	気中養生試験体と水中養生試験体の変質特性の相違点	5-79
表 5.3-1	解析ケース	5-81
表 5.3-2	坑道周辺岩盤の物性値	5-82
表 5.3-3	解析期間	5-89
表 5.3-4	移動物性	5-92
表 5.3-5	水分特性曲線（VG モデル）のパラメータ	5-92
表 5.3-6	水分特性曲線（VG モデル）のパラメータ	5-96
表 5.3-7	初期条件(1/2)	5-110
表 5.3-8	初期条件(2/2)	5-110
表 5.3-9	初期条件(1/3)	5-111
表 5.3-10	初期条件(2/3)	5-111
表 5.3-11	初期条件(3/3)	5-111
表 5.3-12	坑道の境界条件	5-112
表 5.3-13	地表面の境界条件	5-112
表 5.3-14	高レベル放射性廃棄物処分場の安全機能と構成要素の関係	5-217
表 5.3-15	力学解析で得られる情報と影響を及ぼしうる FEP または状態変数との対応	5-220
表 5.3-16	影響度評価の観点から重要と考えられる力学解析用パラメータ	5-220
表 5.3-17	水理解析で得られる情報と影響を及ぼしうる FEP または状態変数との対応	5-224
表 5.3-18	影響度評価の観点から重要と考えられる水理解析用パラメータ	5-224
表 5.3-19	抽出された FEP と状態変数との関連性	5-227
表 5.3-20	水理解析で得られる情報と重要度が高いと考えられる FEP との対応	5-228
表 5.3-21	影響度評価の観点から重要と考えられる解析用パラメータ（再掲）	5-228
表 6.2-1	2022 年度の実規模試験施設の開館計画	6-2

1. 諸言

1.1 事業の概要

1.1.1 事業名

令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（回収可能性技術高度化開発）（以下「本事業」という。）

1.1.2 事業目的

我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って既に放射性廃棄物が発生しており、その処理処分対策を着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物等の地層処分については、2000年に制定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」のもと、実施主体である原子力発電環境整備機構の設立を経て、最終処分法が定める3段階の調査ステップの最初の段階である文献調査に係る公募が2002年に開始された。

一方で、制度創設から10年以上を経た段階においても文献調査の実施に至っていない状況を踏まえ、原点に立ち返って何が根本的な課題であるかを追求することが必要であるとの認識のもと、国の審議会（総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会放射性廃棄物ワーキンググループ（以下「廃棄物WG」という。））において、我が国の最終処分政策の再構築に向けた議論が行われた。このような議論を経て、現世代として地層処分に向けた取組を進めることが再確認されるとともに、2015年5月に改定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」（以下「基本方針」という。）では、今後より良い処分方法が実用化された場合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、及び機構（原子力発電環境整備機構）は特定放射性廃棄物が最終処分施設に搬入された後においても、安全な管理が合理的に継続される範囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性（回収可能性）を確保することが定められた。

地層処分事業への可逆性の導入という新たな施策に対する社会の信頼感を更に高めて行くためには、それを裏付ける回収可能性という技術的能力に対する信頼性を高めていく必要があり、更に、基本方針が要求している回収可能性に係る調査研究課題（最終処分施設を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等に関する調査研究）に着実に取り組んで行く必要がある。本事業では、上述した回収可能性に係る技術的課題に取り組み、施策に対する社会の信頼感の更なる醸成に資することを目的とする。

1.2 回収可能性に係わる技術検討のフレームワーク

2015 年 5 月に改定された基本方針の第 4（特定放射性廃棄物の最終処分の実施に関する事項）において、“今後より良い処分方法が実用化された場合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、及び機構（原子力発電環境整備機構）は特定放射性廃棄物が最終処分施設に搬入された後においても、安全な管理が合理的に継続される範囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性（回収可能性）を確保するものとする”と示され、回収可能性の確保が明文化された。さらに、第 5（放射性廃棄物の最終処分に係る技術の開発に関する事項）では、“最終処分施設を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等について調査研究を進め、最終処分施設の閉鎖までの間の特定放射性廃棄物の管理の在り方を具体化する。当該技術開発等の成果については、最終処分事業や国の安全規制において有効に活用されることが重要である”として、回収可能性に係る調査研究の実施を要求している。

本節では、改定された基本方針を踏まえ、本事業で技術課題として設定している下記の課題について、その研究開発の目的や考え方を整理する。

○高レベル放射性廃棄物に対する廃棄体回収技術の高度化

- ・回収技術の高度化
- ・回収の容易性を高めた詳細設計オプションの開発

○回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備

1.2.1 技術開発・検討の目的

本事業の前身事業において、外部有識者で構成する「可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に関わる検討会」（以下「R&R 検討会」という。）を設置し、可逆性・回収可能性に関する多面的な検討を実施した（原環センター, 2017）。本検討会では、今後の具体的な制度の運用、研究開発の推進に向けて更なる検討が必要と考えられる事項（論点）について整理し、我が国における今後の運用や技術的な対応課題を取りまとめた。表 1.2-1 に R&R 検討会で整理された今後の技術的な対応課題（今後定量化が必要となる情報）を示す。

表 1.2-1 回収可能性の維持に関する技術検討の枠組み

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

これらは、段階的に進められる事業の各節目において、可逆性・回収可能性の観点での施策的或いは技術的な対応の評価や判断を支援する（必要となる）定量的な技術情報として、今後の更

なる議論や技術検討を進める上での“技術検討の枠組み”として整理されている。

同表に示された4つの課題に関して、以下に、本事業における課題の捉え方、並びに取組の技術開発や検討の考え方・進め方について要約整理する。

(1) 安全性への影響

安全性への影響とは、一定の確保すべき安全性のレベルに対してどのような影響があるかということを示す。確保すべき安全性のレベルについては、今後整備される安全規制制度からの要求が、その指標の1つになると考えられる。安全性は、操業期間中の安全性と、閉鎖後長期の安全性の2つの視点に分けることができる。更に、前者は回収可能性維持期間中の安全性と回収作業時の安全性に、後者は地層処分の閉鎖後長期の安全性を支える人工バリアと天然バリアに分けることができる。このように区分することで、安全性を論じる際の対象、安全性に影響を与える事象、安全性を定量的に扱う手法や工学的対策の検討など、課題の位置付けを明確にしつつ取り組むことが可能となる。

(2) 回収の容易性（回収作業時間）

回収の容易性を示すものとして、廃棄体へのアクセス性、回収作業の技術的な複雑さ、それに要する時間や費用など、幾つかの次元の異なる指標が想定される。R&R検討会では、回収の容易性を示す指標の1つとして、定量化が可能である“回収作業時間”を設定した。回収作業時間は廃棄体1体あたり或いは処分坑道1本あたりのような単位領域あたりの回収時間と、回収の対象となる廃棄体の全量回収に係る全体作業時間の2つに細分できる。単位領域あたりの回収時間は、回収工程の分析と各作業に要する時間からある程度定量的に見積もることが可能である。一方で全体作業時間は、単位領域当たりの回収時間と数量との単純な比例関係ではなく、処分場の地下施設の設計（地下施設の展開や坑道設計等）に対応した作業動線や物流容量、各作業の組合せの最適化・合理化を経て算出される。地下施設の施設設計が具体化できない現在の事業段階を踏まえ、当面は単位領域当たりの回収時間に焦点を当てて検討を進める。今後、全体作業時間を見積る上でも、単位領域当たりの回収時間は必須の情報となる。

(3) 回収可能性の維持期間

基本方針に示された「将来世代が最良の処分方法を選択できるようにする」については政策変更への対応と解釈することができ、そのような政策変更が可能な期間と条件について、「安全な管理が合理的に継続される範囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性（回収可能性）を確保する」ことが基本方針に示されている。

このような基本方針の要求を踏まえれば、可逆性・回収可能性の維持期間の終期はその意思決定の分岐判断（回収して別の管理方策に移行する／回収せずに地層処分施設を最終閉鎖する）ができる期間と考えることができる。これを踏まえ、本事業では、回収可能性の維持期間の終期を“回収／閉鎖措置の判断が可能な期間”と定義する。本定義を踏まえ、基本方針に示される「安全な管理が合理的に継続される範囲内」について、以下のように整理する。

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

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

(4) 回収可能性の導入に伴う費用

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

基本方針が調査研究を要求する背景となる回収可能性の維持期間の設定は、処分場への廃棄体の定置開始から、操業安全性（回収作業期間中の安全性を含む）及び閉鎖後長期の安全性に有意な影響を及ぼすよりも前と整理することができる。これらの期間を模式的に示すと図 1.2-1 のようになる。この関係は前述した「(1)安全性への影響」と「(2)回収の容易性（回収作業時間）」の2つの項目を定量化することで導出できるため、本事業では、これら2つを技術検討課題として設定して取り組むこととしている。「(3)回収可能性の維持期間」と「(4)回収可能性の導入に伴う費用」は、(1)と(2)の検討を踏まえて総合的に判断することができる。

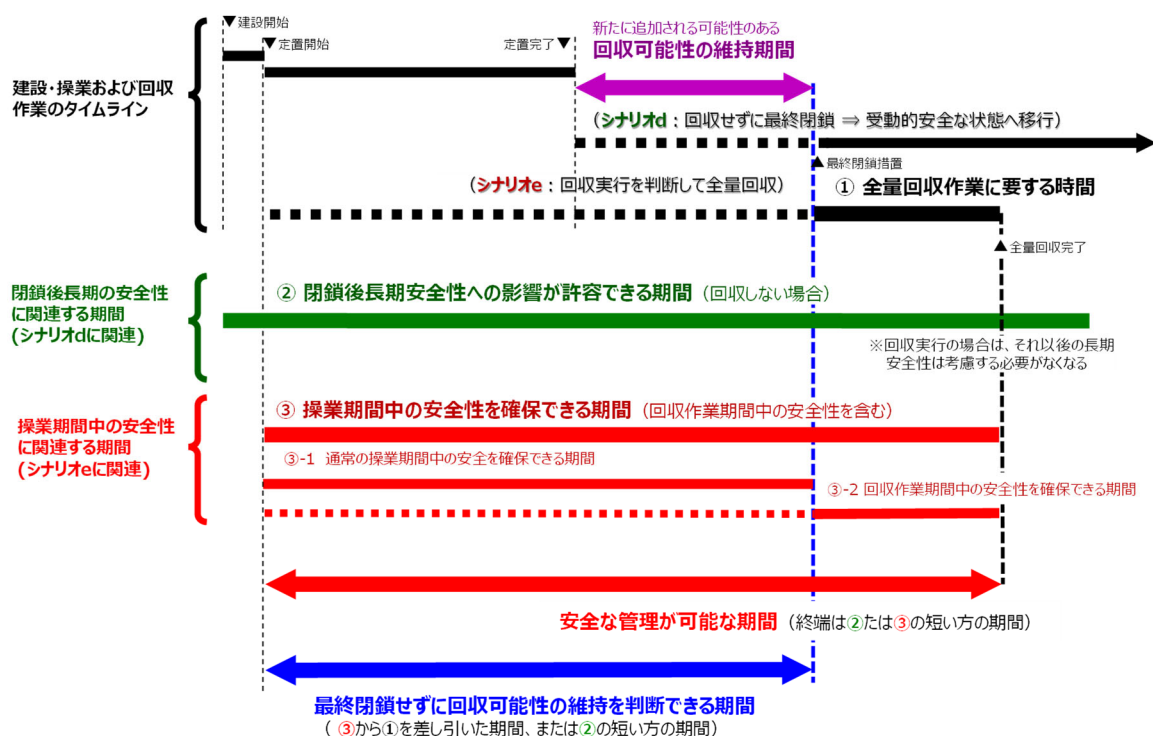


図 1.2-1 回収可能性が維持されている状態の模式図

1.2.2 本事業での取り組み

「(1)安全性への影響」については、ストーリーボードの整備手法を用いて影響を及ぼす要因やシナリオを包括的に整理し、既存の定量化技術の有無や開発が必要な技術・知見を評価手法の多様性に留意しつつ抽出するとともに、要因・シナリオの一部を先取りし（支保等のセメント系材料）、地下研を活用して先行的に知見の整備に着手する。

「(2)回収の容易性（回収作業時間）」については、現時点で具体化されている 2 つの候補概念（定置概念）を対象とした回収技術の高度化（技術的アプローチ 1）と、回収の容易性を高めることに寄与できる詳細設計オプションの開発・整備（技術的アプローチ 2）の 2 つの観点から、回収作業の技術的実現性の提示、確実かつ合理的な時間内での回収作業の実施に向けた技術開発を行う。

1.3 実施内容

回収可能性に係わる技術検討のフレームワーク、並びに技術対応課題及び課題に対する開発計画の進め方に関する整理を踏まえた本事業の実施内容を以下に示す。各実施内容の詳細および本年度の成果については第 2 章以降に示す。

1.3.1 高レベル放射性廃棄物に対する廃棄体回収技術の高度化

高レベル放射性廃棄物の廃棄体回収技術については、「処分孔堅置き方式」と「処分坑道横置き・PEM 方式」のそれぞれを対象として、定置済みの廃棄体の回収作業に必要な緩衝材や隙間充填材の除去技術及び廃棄体の取り出し技術の開発・整備が進められており、実規模スケールでの技術実証を経て回収作業の技術的実現性が示されている。

一方で、以下の理由から回収作業時間の迅速化が課題として残されている。

- ・回収作業に長時間を要すると、回収作業そのものにおける事故リスクの増加やその間の作業空間の健全性確保といった安全確保上のリスクが増す
- ・可逆性・回収可能性の導入という施策への更なる信頼感を醸成するには、社会が納得できる期間内に回収作業が完了できる必要がある

回収作業時間の迅速化という課題に対して、本事業では「回収技術の高度化」と「回収の容易性を高める詳細設計オプションの検討」の 2 つの方向から取り組む。

(1) 回収技術の高度化

高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の回収技術については、オーバーパックや PEM 外殻容器を回収操作におけるハンドリング対象の最小モジュールとして、これまでに研究開発および実規模スケールでの実証試験が実施されている。回収の実現性を示すことを最優先としてきたこれまでの研究開発では迅速な回収作業時間に焦点はあてられていないものの、得られた開発成果をとおして回収の迅速化に資する高度化のポイントが示唆されている。

そのような示唆を踏まえ、一連の回収作業工程において迅速化のポイントとなる工程／技術として、廃棄体を拘束する周囲の緩衝材や隙間充填材の除去技術に着目し、その迅速化に向けた要素技術の高度化に取り組む。

(a) オーバーパックの回収に係る技術の高度化

処分孔堅置き方式のオーバーパックに損傷を与えずに周囲の緩衝材を除去する「塩水による除去技術」を対象として、迅速化の検討を行い、これまでに開発整備した技術の改良あるいは新たな要素技術の開発を進め、実規模スケールでの実証試験を経てその有用性を確認・実証する。具体的には、2014 年度までに地層処分回収技術高度化開発で整備した緩衝材除去システムを活用して、高圧塩水を使用した流体的除去による除去時間の短縮化や緩衝材の除去範囲（除去量）の低減化に伴う時間の短縮化を図る。

本フェーズではこれまでに、処分孔縦置き方式（パネル型）に対して、処分坑道が埋め戻された状態から全量回収する場合の工程の具体化を行い、ボトルネックとなる緩衝材の除去作業の目安時間（作業短縮時間）を設定した。除去作業時間を短縮するための方策として塩水とウォータージェット（以下「WJ」という）を併用することとして、緩衝材除去システムの改良に向けた技術検討項目の整理し、開発計画を具体化した。

2022年度は、噴射要素試験の結果に基づき設定した動作条件にて、塩水 WJ によるフルスケールの緩衝材除去試験を実施し、緩衝材除去システムにより達成可能な除去時間の見通しを得る。そして、緩衝材除去システムの整備の一連の成果を取りまとめ、土質材料の除去に対する流体的除去技術の適用性を提示する。

(b) PEM の回収に係る技術の高度化

PEM と坑道との間に充填された埋戻し材（隙間充填材）の除去技術として開発された「流体的除去技術」と「機械的除去技術」に関して過年度に実施された実規模スケールの実証試験から、機械的除去技術の除去効率が、隙間充填材の性状（材料特性や飽和度など）に依存することが示唆された（ベントナイト混合土である隙間充填材の含水比の上昇による機械的な切削性の低下や、切削した副残物の再団粒化による連続的な捕集作業の停滞など）。また、実際の事業では、隙間充填材として掘削ズリにベントナイトを混合したものを導入することが想定されており、将来の幅広い材料仕様条件等を見据えて、これらの除去技術の適用性を確認する必要がある。このような背景を踏まえ、上述した除去技術に関して、隙間充填材の性状と除去効率の関係を評価し、除去技術の高度化（迅速化）に資するデータを取得する。

本フェーズではこれまでに、処分坑道横置き・PEM 方式（デッドエンド型）に関して全量回収する場合の工程を具体的し、隙間充填材除去作業の迅速化の目安時間（作業短縮時間）を設定した。また、除去後の PEM 回収作業（処分坑道外への搬出）との連携を考慮し、装置化に向けた概念検討を行うとともに、充填材の除去に係る物性値の取得計画を立案した。

2022年度は、切削・排土試験の結果を踏まえ、規模を大きくした供試体に対する除去試験を実施し、粘着性のある除去生成物による装置の閉塞、全断面除去を想定した場合の除去効率と除去する部位の順番など、連続的に効率よく隙間充填材を除去する機械的除去システムの実現における課題に対して見通しを付けるとともに、フルスケールの除去実証試験に向けた、試験設備の概念設計等を実施する。

(2) 回収の容易性を高めた詳細設計オプションの開発

我が国において検討や技術開発が進められている処分孔縦置き方式と処分坑道横置き・PEM 方式の 2 つの定置概念に対する回収作業の具体化、工程の検討を通して、作業時間の短縮の観点から、回収の容易性を高めるためのポイントを抽出・整理し、回収の容易性を高める詳細設計オプションの検討を進めてきた。同手法や考え方にに基づき創出される詳細設計オプションについて、その成立性を確認するとともに、有望なオプションの技術的実現性を示すために必要となる技術開発を進める。

これまでに、オーバーパックと PEM を各定置方式に対する回収時のハンドリングの最小コンポーネントとして、回収作業時間の短縮を可能とする詳細設計オプションを適用した詳細設計や定置方式に関する複数の案を作成した。これらについて、廃棄体からの熱影響の観点から処分場としての成立性が確保できる定置密度に関する知見を得た。また、詳細設計オプションに対する、製作・施工性などの技術的実現性の確保に向けた技術開発課題を抽出し、2 つの最小コンポーネントに共通する課題として整理した

2022 年度は、詳細設計オプションの実現性の向上に向け、NUMO の包括的技術報告書に示された処分坑道横置き・PEM 方式に対する、詳細設計オプションの回収作業の技術的実現性を検討する。

1.3.2 回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備

廃棄体の定置作業後に回収可能性の維持期間を設けることに伴い、坑道の開放期間が延長されることによる安全性への影響について、操業期間中の安全性、及び閉鎖後長期の安全性の双方の観点から、個々の影響に関する定量的な評価技術を整備する。

(1) 回収可能性の維持に伴う影響の定量化技術の高度化

回収可能性の維持期間を設けることによる安全性への影響の主な要因として、開放坑道に空気が継続的に供給されること、開放坑道からの坑内湧水の排水が継続的に行われることの 2 つが挙げられる。これらを要因とする個々の影響に関する定量化手法の整備に向けて、主に解析的手法の観点から予備検討を進めてきた。一方で、定量化技術としての信頼性や説明性の確保、更に将来の安全規制対応なども考慮すれば、建設から操業、(回収可能性の維持)、閉鎖、閉鎖後長期という一連の期間に生じる事象の時間変遷をより丁寧に考慮して、実現象としての影響の程度に応じた優先課題の評価、並びに定量化手法の整備における現象論的知見や経験則の適用など、より丁寧かつ包括的な視点で取り組む必要がある。

本フェーズではこれまでに、閉鎖後長期の安全評価シナリオのベースとなるストーリーボードとして建設・操業期間中の地層処分場の状態変遷を表現するため、処分坑道縦置き定置方式（新第三紀堆積岩類、パネル型）の建設・操業工程を分析し、建設・操業のタイムライン、経時変化の対象となりうる地層処分場の構成要素と使用材料を整理した。また、最新の FEP (IFEP) を参照した要因分析により、安全性に関連する状態変遷の因子や現象を整理した。併せてストーリーボードへの展開方法に関する検討を進め、閉鎖後長期の安全性についてはこれまでの展開手法を適用することとし、操業安全性（建設・定置・回収作業）については処分場の構成要素（長期の安全機能の割り当てがないもの）並びに使用材料の劣化に着目した性能評価の手法を適用することとした。

2022 年度は、前年度までに作成した第一第段階のストーリーボードについて、さまざまな分野の専門家との議論に基づき、検討対象とすべき事象の優先度や新たに追加検討すべき事象の有無、及びその重要度を整理し、回収可能性の維持の影響を考慮した第二段階のストーリーボードを作成する。

(2) 定量化に必要な物性値の取得

定置作業後に回収可能性の維持期間を設ける可能性を考慮していない従来の概念に対して、同期間を設ける可能性を考慮（追加）した場合に新たに考慮すべき具体的な事項として、以下が想定される。

- ・長期間にわたる開放坑道の健全性
- ・再掘削後の坑道安定性
- ・定置後の過渡的期間における人工バリアの状態変遷等の評価の前提となる環境条件の違い

上記のうち、回収作業時の安全性への影響に係る事項（坑道の空間安定性の評価の対象となる支保の劣化挙動、廃棄体の回収作業時の健全性）、および維持期間を経た後の閉鎖後長期の安全性に対する影響に係る事項に関連して、これらの評価において必要となる次の物性値を、地下研究施設等を活用して取得する。

(a) 実際の地下環境における支保部材（吹付けコンクリート、鋼製支保等）の状態把握

セメント系材料の Ca の溶脱と弾性係数の関係については実験室で精緻な試験が実施されている。実際の地下深部における吹付けコンクリートの挙動を確認することで、支保部材の劣化挙動の定量化に必要なデータを取得する。これまでに、幌延深地層研究センター（以下「幌延 URL」という）の坑道において実際に施工されている吹付けコンクリート支保工と同等なコンクリート供試体を作成し、各種物性の施工直後の初期値を計測するとともに、その後の原位置での変遷挙動の把握に向けて幌延 URL の坑道内にて定置・養生を開始した。

2022 年度は、2021 年度と同様のサンプリング・室内物性試験および分析を実施し、データの蓄積を図るとともに、3 か年の事業成果として、実際の地下環境下で生じるコンクリート供試体の変質メカニズムや物性変化との関係性等についての基礎的知見を提示する。また、地盤工学会基準の低透水性材料の透水試験法も適用し、その有効性を検討する。

(b) 実際の地下深部の坑道で生じる事象の整理

既設の地下研究施設で生じている事象を元に、実際の開放坑道で生じる事象を整理し、予察的な解析なども交え、回収可能性の維持期間の追加に伴う影響の定量化の対象とする事象を再確認する。

これまでに、実際の地下深部坑道である幌延 URL 深度 350m 坑道を対象として、国内外での研究成果も参照しつつ、現在の坑道周辺の地質環境概念モデルを構築するとともに、そのモデルに基づく予察的解析を実施した。

2021 年度は、2021 年度の解析結果を用い、ある時点から坑道埋戻した後の環境回復過程に関する解析を実施するとともに、得られた結果を分析し処分システムの安全性に及ぼす影響について予察的な検討を実施する。

1.3.3 地層処分実規模試験施設を活用した情報発信

上述したような回収可能性に係る関連技術を含めた地層処分の技術開発に関する着実な進捗や地層処分の技術的内容に関する理解を深めて頂くため、地層処分実規模試験施設を活用して、同施設を訪問する方々への理解促進に資する取組みを実施する。

具体的には、これまでの研究で開発（製作）した実証試験資機材を活用した施設の一般公開を行うとともに、来館者への説明や対話記録の収集・整理などを行う。

1.3.4 事業成果の取りまとめ

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業に対する回収可能性について、本事業の 3 か年の成果を踏まえて、現時点の技術的実現性を取りまとめる。

参考文献

公益財団法人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研究開発事業（可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書（第 3 分冊），2017.

2. 回収技術の高度化

第1章で述べたように、2015年5月に改定された基本方針において、廃棄体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、最終処分施設閉鎖までの間の廃棄体搬出の可能性（回収可能性）を確保することが要求されている。

本章では、1.3節に示した三つの設計課題のうち、回収作業時間の迅速化に向けた廃棄体回収技術の高度化に関する実施内容について報告する。

2.1 技術開発の前提

2.1.1 基本方針への対応

基本方針で示された回収は、処分事業の可逆性（政策変更）を技術的に担保するものとの意味合いで示されており、本技術開発は以下に示す前提の下で進める。

(1) オーバーパックの閉じ込め機能

基本方針が要求する可逆性・回収可能性に関して考慮すべきシナリオとして「回収可能性の維持期間を経て施設を閉鎖する」、「回収可能性の維持期間中に回収実行の判断を行い、全量回収する」の二つが挙げられる。この両シナリオを満足させるためには、閉鎖／回収実行の判断に因らず、その判断に至るまでの通常の操業（建設、廃棄体の搬送・定置、地下施設の部分的な埋戻しやプラグ設置など）が適用される品質管理体系のもとで適切に行われ、閉鎖後長期の安全性が確保されている必要がある。そのため、1,000年間は破損しないとする要件が設定されたオーバーパックは閉じ込め性能を維持しており、回収可能性の維持期間中において放射性物質の漏えいによる汚染は生じていないことを前提とする。

本技術開発では、建設・操業・回収の各段階における、緩衝材や Prefabricated Engineered barrier system Module（以下「PEM という」）の鋼殻、埋戻し材などのオーバーパックからの遮蔽厚さに応じた放射線環境を考慮し、遠隔操作による実施を見据えた回収技術の開発を行う。

(2) 定置済みの廃棄体の全量回収の実施

基本方針が要求する可逆性・回収可能性は、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余地を確保するためのものであり、そのような制度を担保する回収技術には、今後の技術の進展や他の変化の可能性に柔軟かつ適切に対応する観点が必要となる。

本技術開発では、回収の対象となる廃棄体は回収実行を判断した際に定置済みの全ての廃棄体を回収することとする。また、回収実行時には、地上での一時的な保管を含めて回収した廃棄体を扱う施設が新たな管理方法と共に用意されているはずであることから、回収後の廃棄体の扱いについては本検討の対象範囲から除外する。

(3) 回収作業時の操業安全性は確保されている

基本方針は安全な管理が合理的に継続される範囲内で回収可能性を維持することを要求していることから、回収作業時の作業安全（地下空洞の空間安定性など）は確保されている状態を前提とする。

そのような作業安全が確保されている状態について、本技術開発では、回収のために特別に施す対策（追加的な坑道の維持管理や再開放時の補修作業や回収作業時の養生など）は考慮しない

以上を前提とした本事業で高度化開発する回収技術は、事故や異常事象の発生といった安全性に関わる作業中の意図せぬ状態への対応を前提としていないが、例えば安全規制に対する是正措置としての回収など、回収技術そのものには共通部分がある。回収が必要となる場面や動機、回収シナリオなどの検討から技術的な要件の差分を抽出し、更なる改良による適用範囲の拡大など、技術の拡張性を念頭に置きつつ技術開発を進める。

回収可能性の維持期間中に処分坑道や主要坑道をどのような状態にしておくかは、開放しておく／埋め戻しておくといった処分場の状態に応じて得失が相反する処分場の安全性と回収手順の複雑さ（容易性）の観点から評価され決定される。実施主体が取りまとめた技術報告書によれば、処分坑道が埋め戻され力学プラグが設置された状態（以下「状態 B」という）で回収可能性を維持することが、二つのいずれの観点でも適用性が高いと評価されている（NUMO, 2021）。図 2.1 1 に現行の二つの定置方式における回収可能性の維持期間中における処分場の状態と回収時の廃棄体の搬出経路（搬出できるように開放すべき場所）を模式的に示す。



(1) 回収作業の範囲の設定

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

(2) “回収作業システム”としての手順の整理

状態 B の地下施設に定置された廃棄体を地上で保管するまでの手順は、複数の個別作業が時間的・空間的に繋がっている。さらに、それら一連の行為が整合を持ち、且つ一体となって“廃棄体の回収”という機能を発現することが必要である。以上のような回収手順を”回収作業システム”として整理した。システムという言葉の定義は、“複数の要素が有機的に関係しあい、全体としてまとまった機能を発揮している要素の集合体”とされている（広辞苑, 1995）。したがって、システムとは、境界、要素、要素間の相互影響の三因子から構成され、要素がさらにシステムとなる場合は、その要素は上位システムのサブシステムと捉えることとした。ここでは、システムの定義に基づき、回収作業システムの、境界、要素、要素間の関係性を設定する。回収システムの要素として、回収に係る個別作業を当てはめた。個別作業は任意に細分化できるが、適切に設定することが重要である。また、要素自体がさらに複数の要素から構成されるシステムであってよいので、作業の目的や作業の実施場所などを考慮して設定する。

ここでの三因子の定義方法は、本事業における技術開発の目的や検討の範囲、それらの位置付けなどを整理するために設定したものであり、システムの要素は必要に応じて細分化することや、追加・削除することができる。これにより、技術開発や検討の成果の拡張性を確保することが可能となる。

(3) 状態 B の地下施設に対する回収作業システム

状態 B の地下施設に対する回収作業システムを、境界、要素、要素間の関連性として整理した。

(a) システムの境界

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

(b) システムの要素

現行の二つの定置概念に対する廃棄体の回収作業として一般化し、三要素を設定した。一つ目の要素を“力学プラグの撤去”と“埋戻し材の撤去”を合わせた「廃棄体へのアクセス確保」とした。回収時の搬出対象（オーバーパック／PEM）が露出しないため、作業上の放射線防護の方策も変わるものと考えられる。

再開放後の処分坑道内の廃棄体を地上施設で保管するまでの手順を、作業場所境界である坑底施設で分割した。二つ目の要素を“回収対象を拘束する土質材料の除去”と“処分坑道から坑底施設までの輸送”を合わせた「廃棄体回収（地下）」、三つ目の要素を「地上への搬出・地上での保管」とした。

(c) 要素間の関係性

「廃棄体へのアクセス確保」、「廃棄体回収（地下）」、「地上への搬出・地上での保管」の三要素は、この順番で進行する。

(d) 状態 B からの回収作業システム構成

以上の設定より、状態 B に対する回収作業システムは図 2.1-2 の構造となる。

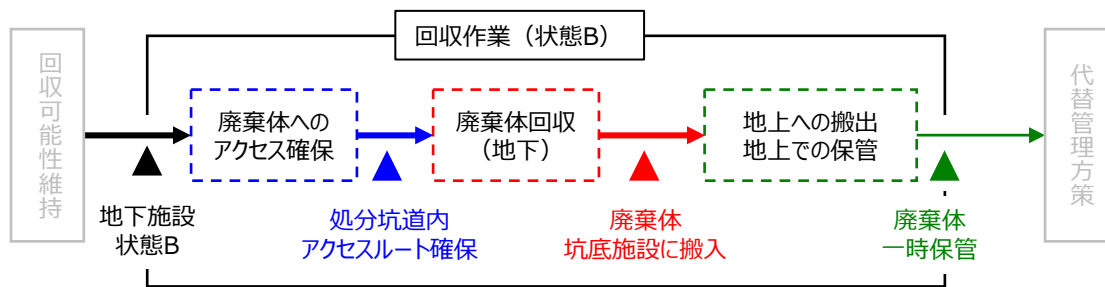


図 2.1-2 状態 B の地下施設からの回収作業のシステム構成
(実線：システムの境界、破線：要素の境界、▲：境界、矢印：要素間の繋がり)

(e) 他の地下施設の状態への拡張

状態 A からの回収作業システムは、状態 B のシステム構成から要素”廃棄体へのアクセス確保”を除いたものになる (図 2.1-3)。また、状態 C 場合は要素”処分坑道へのアクセス確保 (連絡坑道や主要坑道の再開放作業)”が追加されるが、この要素自体は“廃棄体へのアクセス確保”と同様の構成である (図 2.1-4)。このうち、“処分坑道へのアクセス確保”は、“廃棄体へのアクセス確保”と同様の作業となることから、状態 B の回収作業が全ての必要な要素を網羅していることになる。つまり、状態 B における回収作業に必要な技術を整備することで、様々な状態の地下施設からの回収に必要な技術を揃えることができる。

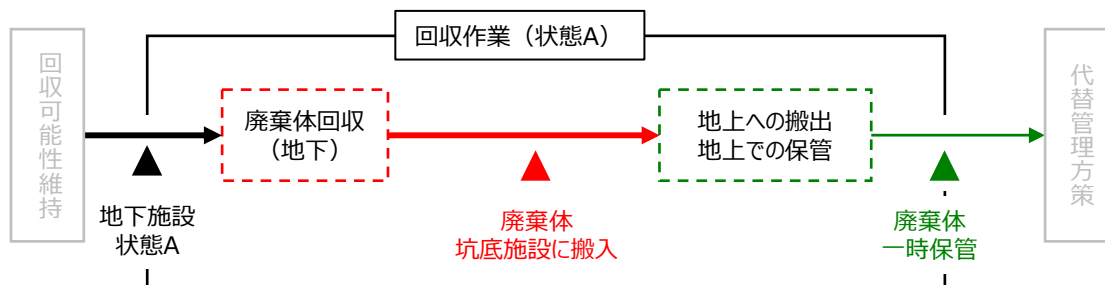


図 2.1-3 状態 A の地下施設からの回収作業のシステム構成
(実線：システムの境界、破線：要素の境界、▲：境界、矢印：要素間の繋がり)

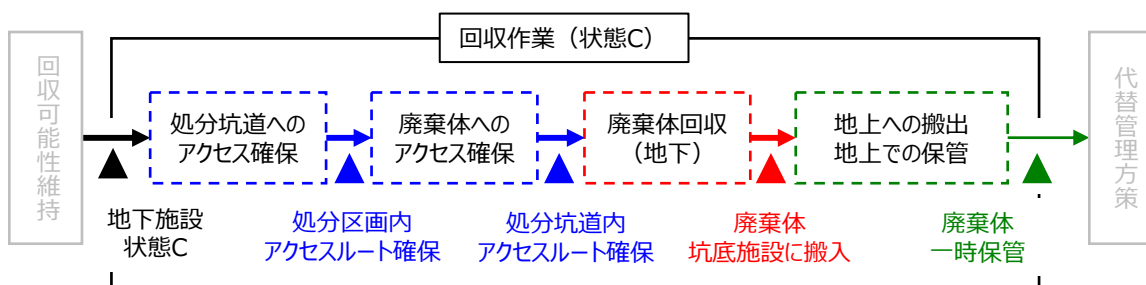


図 2.1-4 状態 C の地下施設からの回収作業のシステム構成
(実線：システムの境界、破線：要素の境界、▲：境界、矢印：要素間の繋がり)

(4) 回収手順と必要な技術の抽出

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

(a) 廃棄体へのアクセス確保

廃棄体へのアクセス確保では、処分坑道が埋め戻され力学プラグが施工された“状態 B”から、回収対象の廃棄体までの経路を確保するまでを作業範囲として、鉄筋コンクリート製の力学プラグの撤去、処分坑道の埋戻し材の掘削を抽出した（図 2.1-5）。

処分坑道定置方式では、処分坑道内の埋戻し材の掘削範囲によっては、回収対象の廃棄体（例えば、PEM）が坑道内に露出することも想定される。この場合、搬出時の作業安全性の確保を考慮したうえで廃棄体の損傷を防止する施工技術を選択する必要がある。この行為は、後続の作業（b）にも含めることとした。

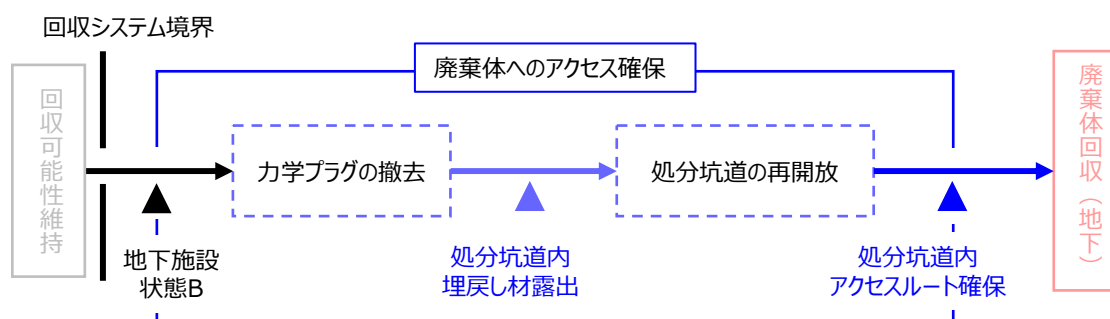


図 2.1-5 廃棄体へのアクセスを確保する作業手順

（実線：システムの境界、破線：要素の境界、▲：境界、矢印：要素間の繋がり）

(b) 廃棄体回収（地下）

埋戻し材を撤去した処分坑道内から廃棄体を搬出し、坑底施設まで搬入するまでを作業範囲として、回収対象を拘束する土質材料の除去、処分坑道からの搬出を要素として抽出した（図 2.1-6）。

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

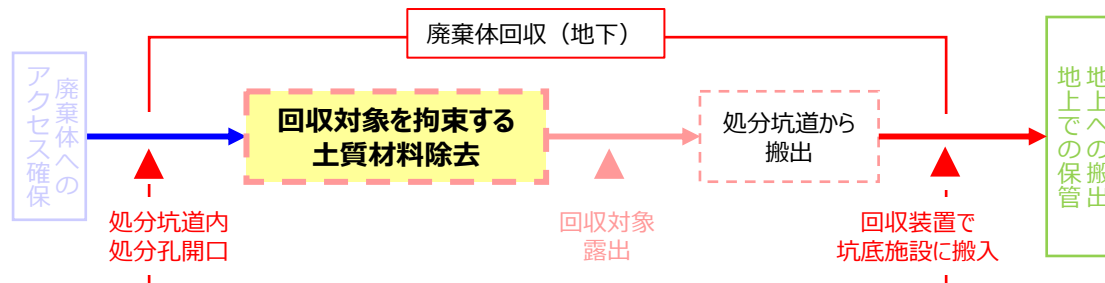


図 2.1-6 処分坑道から坑底施設まで廃棄体を搬出する作業手順

（実線：システムの境界、破線：要素の境界、▲：境界、矢印：要素間の繋がり）

(c) 地上への搬出、地上での保管

坑底施設に搬入された廃棄物を地上施設で一時保管の状態にするまでを作業範囲として、坑底施設での輸送車両への積替え、アクセス坑道（斜坑）を介した地上施設への輸送を抽出した（図 2.1-7）。

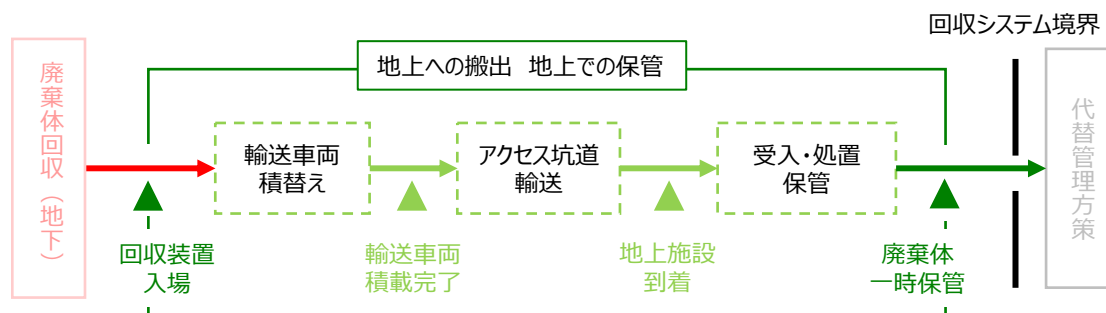


図 2.1-7 地上への廃棄体搬出、及び地上での保管の作業手順

（実線：システムの境界、破線：要素の境界、▲：境界、矢印：要素間の繋がり）

このように、システムの要素をサブシステムとして細分化する手順を反復し、階層構造の形で整理することで、各作業を構成する具体的な作業内容や作業に必要な技術、その技術で実現する状態などが明確になる。

2.1.4 回収作業に必要な技術の抽出

現行の二つの定置概念における、状態 B の回収作業に必要な技術を抽出し、技術の有無や開発段階を表 2.1-1 整理した。このように回収作業システムを構成する一連の技術は、開発レベルに差はあるものの揃っており、廃棄体の回収作業の技術的実現性はあると言える。今後、各技術について、回収作業を想定した具体化や実証試験などを行い、適用性を確認していくことで、回収に対する技術的実現性を向上させていくことが重要である。

2.1.5 優先的に取り組む技術開発課題

処分孔竖置き方式の緩衝材除去技術、処分坑道横置き・PEM 方式の隙間充填材除去技術は、作業の実施によっては回収対象の廃棄体が露出するが、この作業に適用可能な既存の装置や設備が存在しないため、基盤研究における優先的な技術開発の対象とした（表 2.1-1 内太枠）。これまでの要素試験やフルスケールの実証試験によって、除去作業が技術的に実施可能であることが示されている。一方、廃棄体一体あたりの除去作業に要する時間が数十時間となる見込みであり、回収作業のボトルネックとなることが懸念されている。個別作業時間の長時間化は、全量回収作業に要する時間の長期化にも繋がる課題である。

本事業では、回収作業の迅速化に向け、廃棄体周囲の土質材料の除去技術の高度化、実際の地層処分事業に対する技術の適用性の向上に資する課題・改良点を抽出することを目的とし、現行の二つの定置概念に対する流体的除去技術及び機械的除去技術の整備を実施した。

2.2 に処分孔竖置き方式のオーバーパック回収時の緩衝材の除去技術、2.3 に処分坑道横置き・PEM 方式の PEM 回収時の隙間充填材の除去技術の開発成果を示す。

表 2. 1-1 現行の定置概念に対する回収技術の整備状況

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

2.2 処分孔竖置き方式の回収技術の高度化

2.2.1 迅速化に向けた技術開発の進め方

(1) 開発背景

処分孔竖置き方式の回収技術として、オーバーパック回収時の緩衝材除去技術の整備が進められている。平成 23～26 年度地層処分回収技術高度化開発において、処分孔竖置き方式を対象に塩水による緩衝材除去システムの開発ならびに同システムの総合動作確認試験により、定置した状態からオーバーパックの回収が技術的に可能であることを示した（原環センター, 2015）。しかし、緩衝材除去に要する作業時間は 77 時間要する結果となり、回収工程を検討する上でボトルネックとなっている。

この課題に対し、本事業では、オーバーパックへ損傷を与える可能性が低い流体的除去による緩衝材除去を 20 時間以内に短縮することを目的として、ウォータージェット（以下「WJ」という）を用いた物理的な切削を原理とする、除去作業の迅速化に向けた開発に着手した。

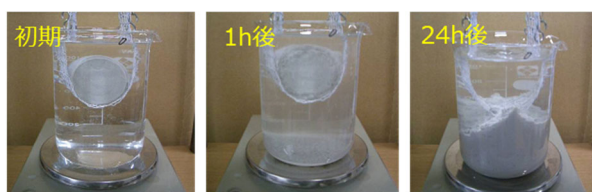
(2) 処分孔からのオーバーパックの回収作業における流体的除去技術

処分坑道が埋め戻された処分坑道からのオーバーパック回収手順は、力学プラグの撤去と埋戻し材の撤去作業である処分坑道の再開放作業の後、処分孔内の上部埋戻し材を除去しオーバーパック周囲の緩衝材を除去する。そして、処分孔内からオーバーパックを引き上げ、処分坑道からオーバーパックを坑底施設まで搬出する。オーバーパック周囲の緩衝材のように、廃棄体周囲の土質材料を除去する原理は、機械的、流体的、電氣的など複数あり、それぞれの特性や、除去生成物の特徴が整理されている（SKB, 2000）。これらの除去原理から、閉じ込め機能を有する人工バリアであるオーバーパックへの影響を考慮し、流体により緩衝材を除去する方式を選択した。

(3) 緩衝材除去に対する流体的除去技術の整備状況と課題

(a) 電解質による緩衝材のスラリー化の促進作用

流体的除去技術は、噴射する水圧、噴射する水質、ノズル形状などにバリエーションがある。開発当初は、オーバーパックへの影響の最小化の観点から低圧噴射を選択した（原環センター, 2009）。この場合、水流自体には切削能力が低いため、電解質溶液（塩水）による緩衝材のスラリー化促進作用を除去原理とした。電解質の種類、濃度、噴射方法など、除去装置の具体化、除去生成物の処理に係るデータ等を要素試験で取得した（図 2.2-1）。



NaCl 溶液中での崩壊挙動（原環センター, 2009）、



ノズルユニット化、除去効率の検証（原環センター, 2010）

図 2.2-1 塩水による緩衝材除去の要素試験

(b) 緩衝材除去システムの整備

要素試験の結果を踏まえ、4% NaCl 相当の電解質溶液による緩衝材のスラリー化促進効果を除去原理に選択した。緩衝材の除去によってオーバーパックが露出するため、放射線環境下での作業安全の観点から遠隔操作による除去作業を実現する装置開発を実施した。処分孔内からオーバーパックを引上げ可能な状態にするまでの作業手順の具体化、要件定義と機能展開を実施し図 2.2-2 に示す噴射吸引設備、塩水リユース設備、遠隔操作設備から構成される“緩衝材除去システム”を整備した。

この設備を用いたフルスケールの緩衝材除去試験を地上にて実施した（原環センター，2015）。低圧噴射のため塩水やスラリーの飛散はおさえられており、除去作業時の周辺環境は良好である。一方で、電解質溶液による緩衝材のスラリー化の原理は陽イオンの作用によるものであるため、1つの処分孔に対する除去作業に約 77 時間程度要することが課題として挙げられる。



噴射吸引設備



塩水リユース設備

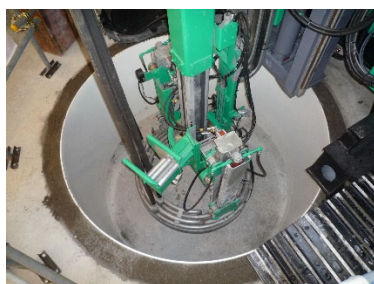


遠隔操作設備

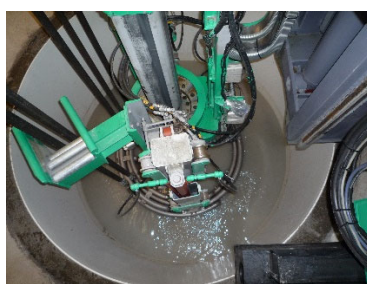
図 2.2-2 緩衝材除去システムを構成する設備
(原環センター，2015)

(i) 噴射吸引設備

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



除去前



除去作業中



除去後

図 2.2-3 噴射吸引設備による緩衝材の除去
(原環センター，2015)

(ii) 塩水リユース設備

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

そこで、吸引したスラリーから固形物を取り除き、濁度や濃度を調整した塩水を再利用するための塩水リユース設備を設けた。除去に使用する塩水にはスラリーの固液分離効果もあり、固形物の沈降速度と噴射水量のバランスから設備容量を適切に設計することで、地下での除去作業の技術的実現性が向上している。

(iii) 遠隔操作設備

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

緩衝材の除去技術は、このように実際の地下での作業を想定したシステム化、フルスケールの除去試験まで実施されており、技術の適用性は確認されているが、処分孔一つあたりの除去に要する 77 時間は、緩衝材の除去時間としては長く、迅速化が課題として抽出された。

(4) 本事業の実施範囲

処分孔竖置き方式における緩衝材除去を 20 時間以内にすることを目標に除去技術の高度化に取り組む。WJ による緩衝材の除去特性について、前述の緩衝材除去システムの噴射吸引設備の動作をパラメータとした噴射要素試験で取得するとともに、WJ 方式の除去試験に適用する試験装置を設計する。フルスケール試験では竖置き回収方式で想定されるフルスケール緩衝材（模擬廃棄体を含む）に対し、塩水 WJ による除去を実施し、緩衝材除去が目標の時間内で完了できる見通しを示すとともに、実際の回収作業への技術の適用性の向上に向けた、課題・改良点を抽出する。

2.2.2 緩衝材除去技術の迅速化の目標設定

(1) 既往の緩衝材除去システムにおける作業時間の実績

図 2.2-4 に、過年度に整備した緩衝材除去システムの主な仕様を示す（原環センター，2015）。



内容	緩衝材除去装置 仕様
噴射圧／噴射流量	0.6 MPa／7.8 L/min ×32 噴射口
吸引流量	250 L/min
噴射部径／降下速度	1,430 mm／3.6 m/min
移動速度／速度	キャタピラ駆動／1 km/hour
オーバーバック 転倒防止措置	オーバーバック把持機能の搭載
遠隔操作方法	無線によるリモートコントロール
除去状況監視方法	Web カメラ、3D スキャナ

図 2.2-4 緩衝材除去システム（噴射・吸引設備の仕様）

この緩衝材除去システムの各設備を統合した総合動作確認試験での供試体は、地上に設置した模擬坑道に掘削した処分孔内に転圧方式で作製した緩衝材を配置し、オーバーバックとの隙間をペレットで充填して定置済み廃棄体の環境を再現（模擬）ものである。設定した回収作業手順では、上部埋戻し材と緩衝材の一部は別の方法で除去することにしており、オーバーバックを露出させる緩衝材の除去は、オーバーバック上部に厚さ 500 mm 残した状態が初期状態となる。

図 2.2-5 に、総合動作確認試験時の除去作業の実績を示す。初期状態からオーバーバック把持部が露出するまでに 30 時間、オーバーバックを拘束する側部緩衝材の除去に 47 時間要し、全体で 77 時間の除去作業時間となった。

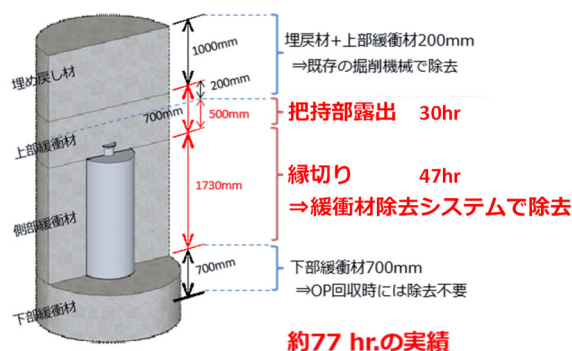


図 2.2-5 総合動作確認試験における除去作業時間の実績
(原環センター，2015)

(2) 作業時間の設定

埋戻し材が施工された状態 B の処分坑道に対する回収手順は、「処分坑道の再開放」と「オーバーバック回収」である。それぞれの作業には専用の機械や装置が必要となり交互に作業する場合は、その都度装置の入替作業が生じる。安全性や作業性を考慮すると、限られた空間である地下施設内での設備の入替は極力少なくすることが望ましい。そこで、本検討では「処分坑道の再開放」と「廃棄体の回収」を処分区画ごとに並行して作業することとした（第 3 章に詳述）。

処分区画ごとに「処分坑道の再開放」と「オーバーバック回収」を分離して、回収作業の所要時間をオーバーバック 1 本あたりとして見積った結果を図 2.2-6 に示す（原環センター，2020）。処分区画ごとに並行して作業するためには、それぞれ同程度の作業時間とする必要がある。

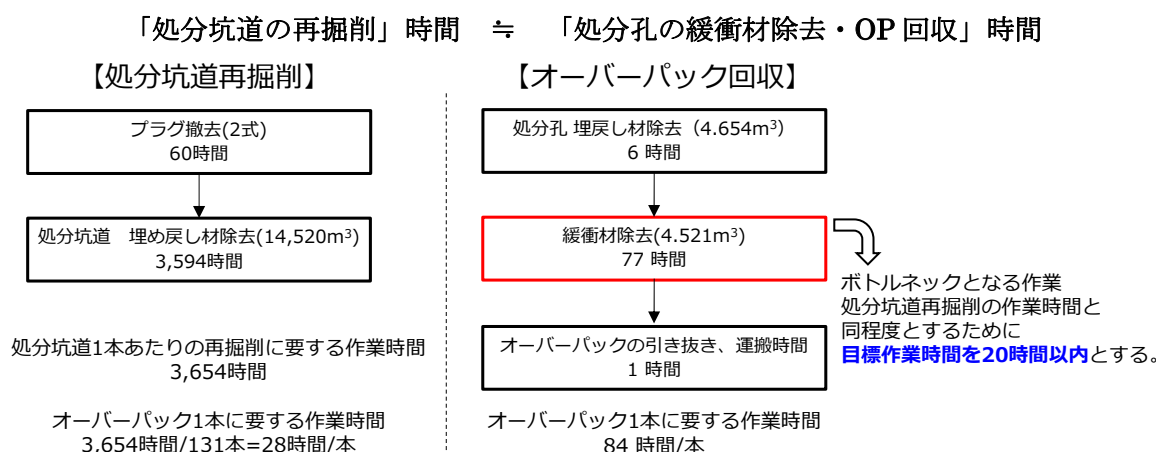


図 2.2-6 処分孔縦置き方式のボトルネック抽出と目標時間

図より、オーバーパック 1 本あたりの作業時間として、処分坑道の再開放から算出した作業時間は 28 時間／本、オーバーパック回収から算出した作業時間は 84 時間／本となった。両者の時間を同程度にするためには、オーバーパック回収 1 本に要する 84 時間を 28 時間まで短縮する必要がある。ここで仮定したオーバーパック回収の所要時間の内訳は、上部埋戻し材除去に 6 時間、処分孔からのオーバーパックを引き上げ・処分坑道からの搬出に 1 時間としたことを踏まえ、緩衝材除去作業の迅速化の目標を 20 時間を設定した。

(3) 除去作業時間の短縮に向けた技術的方策

塩水による緩衝材のスラリー化促進作用は、電解質の濃度や緩衝材への浸透が除去原理であるため、作業時間の短縮が原理上見込めない。そこで、炭素鋼製のオーバーパックへの損傷が生じない範囲で噴射圧力を上げ、ベントナイト混合土である緩衝材を物理的に切削する方式を、迅速化の方策として採用した。

(4) 除去作業に対する処分場の施設側からの制約への対応

緩衝材除去システムのうち噴射吸引設備は、処分坑道内の走行機能、処分孔上で位置決め機能、塩水を噴射し吸引する噴射リングの昇降機能を有している。この装置は実際の処分坑道断面での適用を想定し、坑道内に収まるように設計されている（図 2.2-2 左図）。WJ による迅速化においても、整備済みの噴射吸引設備の設計思想を踏襲し、坑道内での運用に支障が出ないように留意する。

除去生成物であるベントナイトスラリーから固形物を分離する塩水リユース設備については、スラリーの沈降速度から設定した固液分離槽の規模から図 2.2-2 中図のように据置型としている。緩衝材除去作業の迅速化によって、必要となる塩水の総量や除去生成物の性状も変わることが想定される。除去生成物の処理方法の技術的選択肢の検討に資するため、スラリーの性状に係る情報も併せて取得する。

2.2.3 緩衝材除去システムの改良計画と試験規模

試験装置の製作及び試験設備の整備にあたり、2.2.2 に整理した内容を踏まえ、フルスケールの緩衝材除去試験による除去技術の迅速化の技術的実現性の提示に向け、現況の緩衝材除去システムにおける課題・改良点を抽出するための整備手順を設定した。

(1) 噴射吸引設備の改良

現況の緩衝材除去システムの開発における検討成果、及び WJ 噴射要素試験の結果を踏まえて、緩衝材除去作業の迅速化に必要な機能を抽出、設計対象を設定した。図 2.2-7 に現況の噴射吸引設備に対する改良点を示す。現況の除去システムと噴射条件や使用するノズルが変わる。仕様上の定量的変更部分については、要素試験や予備試験などで確認していく。

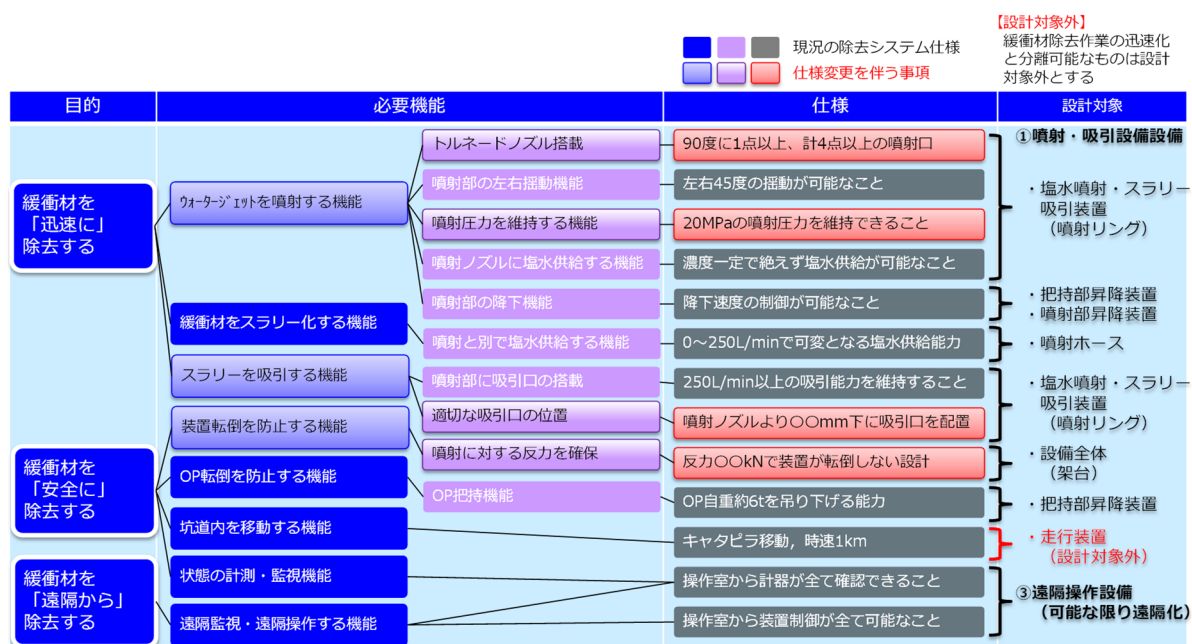


図 2.2-7 噴射・吸引設備に関する機能の抽出と設計対象

(2) 塩水リユース設備の改良

現況の緩衝材除去システムでは、77 時間の除去作業時間で消費する水量が 1,155 m³ を超えるため、地下環境での使用においては除去生成物から固形物を分離する塩水リユース設備が必須であった。噴射に使用するノズルによって塩水の消費量は変わるが、WJ 化により作業時間が短縮された場合、塩水リユース設備の規模や、スラリーの性状も変化する。図 2.2-8 に現況の噴射吸引設備に対する改良点を示す。仕様上の定量的変更部分については、要素試験や予備試験などで確認していく。

(3) 実施する試験規模

緩衝材除去技術については、除去システムの整備、総合動作確認試験により、システムとしての成立性が示されている。本事業で実施するフルスケール試験装置の設計・製作にあたっては、除去システムを構成する三つの設備全てを改良するのではなく、改良点の確認に焦点を絞って、試験の目的に合わせた規模や設備構成とする。図 2.2-9 に試験設備の詳細を示す。噴射吸引設備の昇降機能と噴射リングを製作し、フルスケールの模擬人工バリアに対する除去試験を実施する。

目的	必要機能	仕様	設計対象
塩水を「迅速に」供給する	スラリーを吸引する機能	吸引ポンプ	②塩水供給・スラリー貯留設備 ・吸引ポンプ ・配管・ホース ・サンドポンプ ・固液分離装置（要素試験まで） ・水槽 ・給水ポンプ ・計器類
	スラリーを固液分離する機能	固液分離装置（シックナー）	
	塩水の成分調整をする機能	成分調整水槽	
	減少した塩水を追加する機能	塩水製造設備	
塩水を「安全に」供給する	塩水を絶え間なく噴射する機能	塩水貯留水槽	・噴射ポンプ ・配管・ホース ・緊急時貯留水槽（設計対象外） ・減容化設備（設計対象外）
	塩水を一定圧力で噴射する機能	高圧対応の噴射ポンプ 高圧対応の配管系統	
	緊急時に循環水を逃がす機能	緊急時貯留水槽	
塩水を「遠隔から」供給する	スラッジを処理する機能	減容化設備	③遠隔操作設備（可能な限り遠隔化）
	状態の計測・監視機能		
	遠隔監視・遠隔操作する機能		

図 2.2-8 塩水供給・スラリー貯留設備に関する機能の抽出と設計対象

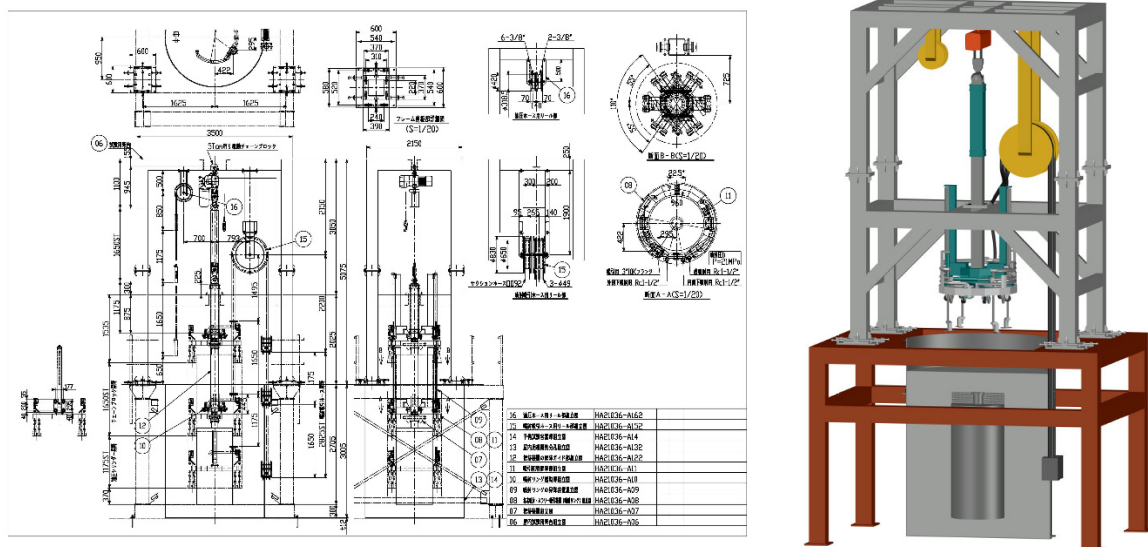


図 2.2-9 フルスケール試験装置の組立図（左）と 3D モデリングによる構造検証図（右）

(4) 除去対象とする供試体

供試体は、模擬処分孔内に緩衝材を充填することで製作した。模擬処分孔の中心には模擬オーバーパックを配置し、模擬オーバーパックの把持部周辺にできる隙間は隙間充填材で充填した。緩衝材はベントナイト混合土を所定の密度で締め固めたものである。

緩衝材の混練はアイリッヒミキサーを使用して、約 1,000kg ずつを 1 ロットとして実施した。供試体の仕様である飽和度 80% を目指し、混練後の目標含水比を 21.2% として加水調整した。緩衝材の締め固めは、各層の標準高さを 50mm として 50 層に分けて行った。

各層での施工管理結果と、乾燥密度に換算した結果を図 2.2-10 に示す。いずれの層でも管理値

である層厚±2mm 以内に収まり、また換算した乾燥密度は最小で 1.542Mg/m³、最大で 1.666Mg/m³、平均 1.607Mg/m³となった。

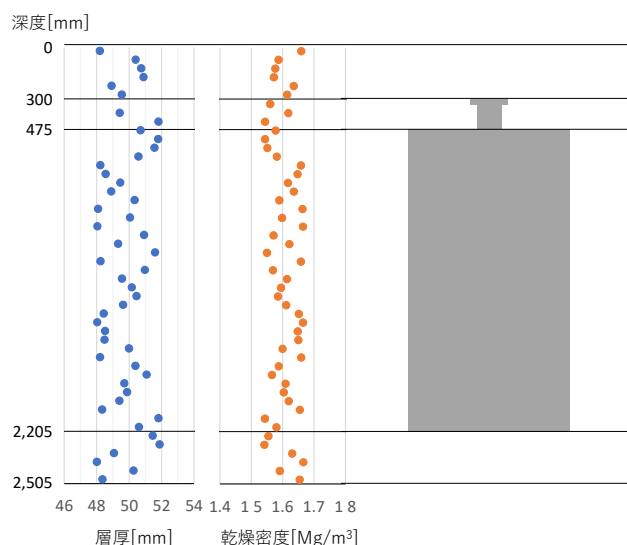


図 2.2-10 緩衝材の施工管理結果（層厚、及び層厚から換算した乾燥密度）

(5) WJ 化による緩衝材除去システムの計測・管理項目の更新

本事業では、過年度に整備した緩衝材除去システムを活用し、除去原理を塩水のスラリー化促進作用から電解質の高圧噴射による物理的な切削作用に変更することで、除去作業の迅速化を図る計画である。WJ 化によって従前の緩衝材除去システムに与える影響を把握するとともに、除去システムを構成する要素の改良点として整理することで、緩衝材除去システムとしての成立性を維持しつつ迅速化を実現する。

従前の緩衝材除去システムを流体の循環系として表したものが図 2.2-11 である。

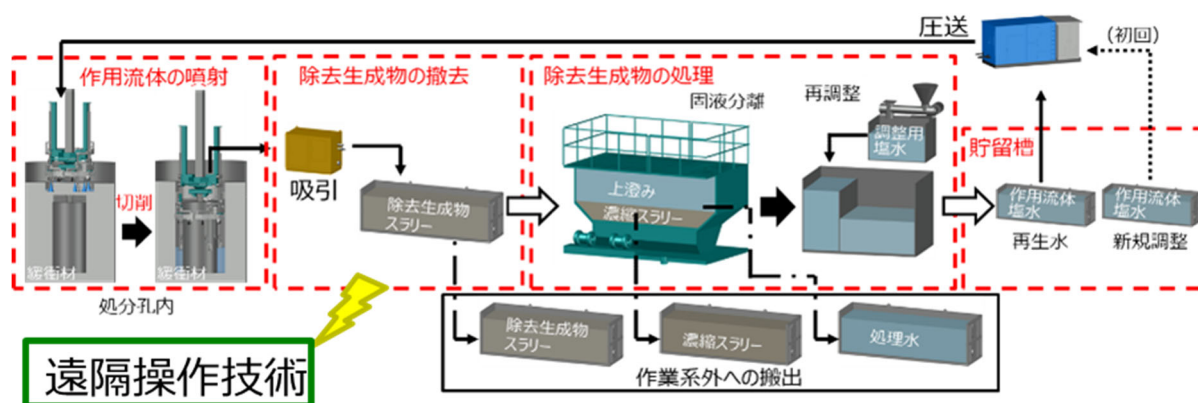


図 2.2-11 従前の緩衝材除去システム上の循環系統の模式図

循環系としての緩衝材除去システムを構成し、作業ごと（作用流体の噴射、除去生成物の撤去、塩水リユース、など）に分類、取得すべき情報を整理した。また、情報は、目的、項目、方法で整理した。情報取得計画は作業系内を対象とし、かつこれまでの試験、知見で緩衝材除去作業への影響が確認されたものを主な管理・計測項目として設定した。一方、現時点で緩衝材除去作業への影響が顕著でないと判断したものについては、「記録」として表示する。

(a) 作用流体の新規調整作業における管理・計測計画

作用流体の新規調整作業は図 2.2-12 中の濃色の部分である。「緩衝材を迅速に除去する」という目的を達成するために、設定した溶液を確認する行為が必要となる。処分孔竖置き方式の回収技術の情報取得計画では、循環系として構成した緩衝材除去システムの前後作業との関係を考慮しつつ、確認すべき項目とそれを特定するための管理・計測項目、管理・計測方法を表 2.2-1 のように計画した。

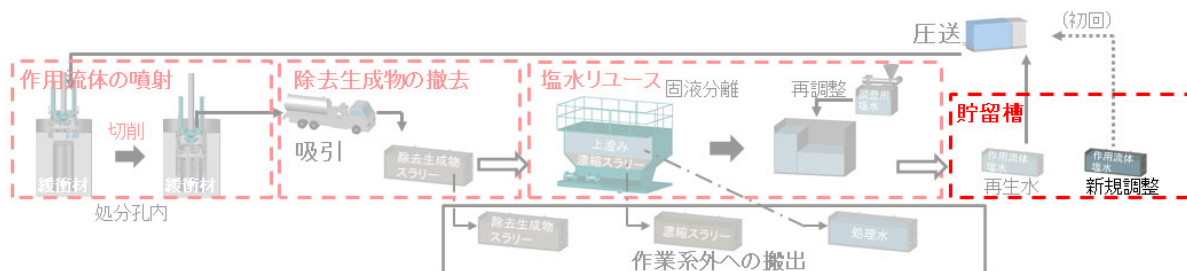


図 2.2-12 緩衝材除去システム内の作用流体の新規調整作業

表 2.2-1 作用流体の新規調整作業における取得情報

管理・計測目的	確認項目	管理・計測項目	管理・計測方法	摘要
・緩衝材を「迅速に」除去する ←設定した溶液を確認する	・主成分 (NaCl)	・溶質成分	・成分設定 (事前管理)	・処分場正立性から海水相当成分 ・経済合理性から並塩を選択
	・NaCl濃度 (4%)	・塩分濃度	・塩分濃度計測	・除去に対する他の成分の影響が小さいと 考え、電気伝導率測定を選択
	・貯留容量	・貯留容量	・貯留槽容積設定 (事前管理)	・最大容量は噴射流量×除去時間×安全 率
	・調整量	・体積	・水位計測 (×貯留槽面積) ・溶質と溶媒の供給量計測	・最大量は噴射流量×除去時間
	・動粘度	・粘度 ・密度 (SS、液固比)	・溶質、溶媒量計測からの理論値 ・溶質、溶媒量計測からの理論値	・圧送機械、配管系統の設計に用いる
	【記録】	・pH	・pH計測	・除去に影響するpHの増減は考えにくい ため、記録とする
	【記録】	・水温	・水温計測	・蒸発しない温度を前提とし、各種計測の 補正用として記録
注) 作用流体の再生水調整作業は別途。				

(b) 作用流体の供給作業における管理・計測計画

作用流体の供給作業は、図 2.2-13 中の濃色の部分である。「緩衝材を迅速に除去する」という目的を達成するために、設定した流量・圧力の供給を確認する行為が必要となる。処分孔竖置き方式の回収技術の情報取得計画では、循環系として構成した緩衝材除去システムの前後作業との関係を考慮しつつ、確認すべき項目とそれを特定するための管理・計測項目、管理・計測方法を表 2.2-2 のように計画した。

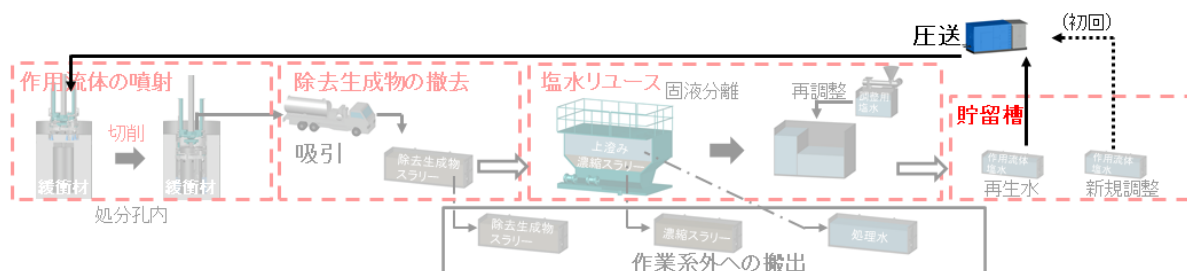


図 2.2-13 緩衝材除去システム内の作用流体の供給作業

表 2.2-2 作用流体の供給作業における取得情報

管理・計測目的	確認項目	管理・計測項目	管理・計測方法	摘要
・緩衝材を「迅速に」除去する ←設定した流量・圧力を供給する	・供給流量（参考値：230l/min）	・供給流量	・流量計測 ・水位（体積）/供給時間 計測（連続供給の場合、困難）	・ノズル仕様とノズル数、噴射圧力、設備規模から設定 ※ただし上限は吸引流量 ・圧送機械、配管系統の設計に用いる ・ノズル仕様から、供給量（総噴射流量）で管理可能 ※ノズル上限の20MPaが一般的に用いられるノズルである
	・供給圧力 （＝噴射ノズル口圧力20MPa+圧力損失）	・管路の圧力損失	・管路長さ設定（事前管理）	
			・管路高さ設定（事前管理）	
			・管路角度（経路）設定（事前管理）	
			・管路径設定（事前管理）	
			・管路材質設定（事前管理）	
		・水圧	・水圧計測	
注）供給流量の参考値は、第一段階の緩衝材除去システムの設備規模（約250l/min）を参考に、ノズル仕様（20MPa時28.7l/min）、ノズル数（8本）、噴射圧力（20MPa）を考慮して総合的に判断、設定。 注）供給圧力は、ノズル仕様（20MPa時28.7l/min）、ノズル数（8本）より、所定の噴射流量（230l/min）が管理できれば、「記録」でも良い。				

(c) 作用流体の噴射作業における管理・計測計画

作用流体の噴射作業は、図 2.2-14 中の濃色の部分である。「緩衝材を迅速に除去する」という目的に加えて、「緩衝材によるオーバーパックの拘束力を除荷する」という目的を達成するために、設定した流量・圧力で噴射する、設定した離隔・水深を保持する、設定した流量を吸引する、設定した除去形状で除去する、オーバーパック位置・装置動作・除去形状を確認する、オーバーパックの拘束力を確認する、といった行為が必要となる。処分孔竖置き方式の回収技術の情報取得計画では、循環系として構成した緩衝材除去システムの前後作業との関係を考慮しつつ、確認すべき項目とそれを特定するための管理・計測項目、管理・計測方法を表 2.2-3 のように計画した。

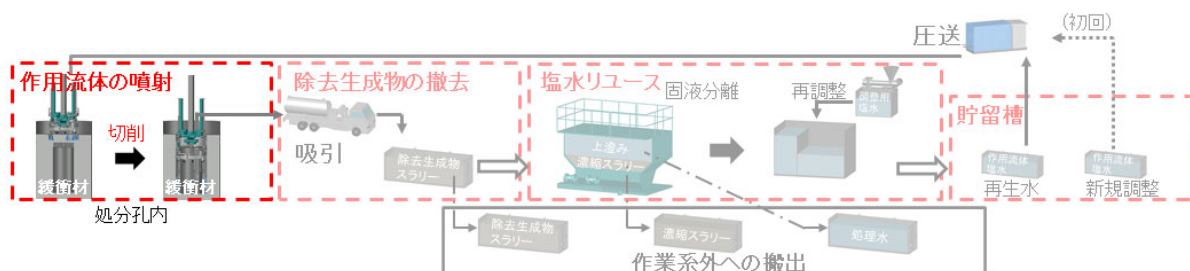


図 2.2-14 緩衝材除去システム内の作用流体の噴射作業

表 2.2-3 作用流体の噴射作業における取得情報

管理・計測目的	確認項目	管理・計測項目	管理・計測方法	摘要
<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材を「迅速に」除去する 緩衝材によるOPの拘束力を除荷する ←設定した流量・圧力を噴射する ←設定した離隔・水深を保持する ←設定した流量を吸引する ←設定した除去形状で除去する ←OP位置、装置動作、除去形状を確認する ←OPの拘束力を確認する 	・噴射ノズル口流量 (ノズル仕様と噴射圧力による)	・噴射流量	・流量設定 (事前管理)	・噴射総流量・圧力を設定したのち、ノズル仕様とノズル数から設定 ・ノズルが機能している範囲で供給量 (噴射総流量) とノズル数から管理可能
	・噴射総流量	・噴射流量	・流量計測	・「作用流体の供給作業」における、供給量で管理可能
	・噴射ノズル口圧力	・噴射圧力	・水圧設定 (事前管理)	・ノズル仕様から、供給量 (噴射総流量) で管理可能
	・噴射距離	・離隔 (ノズル→除去面)	・ノズル先端から離隔ガイド先端までの距離計測 (固定値の場合は事前管理)	・下降速度×動作秒数、またはエンコーダ計測 (固定値の場合はメジャーでも測定可能)
	・水深	・水深	・吸引ノズルから離隔ガイド先端までの距離設定 (固定値のため事前管理)	・吸引システムが正常に機能している範囲で左記で管理可能
	・除去形状 (設定)	・ノズル種類 (噴射形状)	・ノズル種類 (噴射形状) 設定 (事前管理)	・緩衝材によるOPの拘束力除荷を目的に、除去形状とそれを達成する方法 (ノズル種類 (噴射形状)、ノズル数・配置、揺動角度、揺動速度、噴射方向/角度) を設定
		・ノズル数・配置	・ノズル数・配置設定 (事前管理)	
		・揺動角度	・揺動角度設定 (事前管理)	
		・揺動速度	・揺動速度設定 (事前管理)	
	・OP位置、装置動作、除去形状 (確認)	・噴射方向/角度設定	・噴射方向/角度設定 (事前管理)	<ul style="list-style-type: none"> 除去によるOP傾斜等、迅速な除去の妨げになる事象防止のための把持動作管理 設定した除去形状を達成するための装置位置とOPの相対位置の管理 除去面の崩壊等、迅速な除去の妨げになる事象の管理 (特に、装置を下降させながら除去するシステムの場合) 高圧噴射の場合、噴霧のため連続計測は不可 定量的管理をする場合は、3次元計測を適用
		・OP中心位置 ・把持動作 ・緩衝材形状	・3次元計測 ・カメラ映像確認	
	・緩衝材によるOPの拘束状態	・緩衝材形状	・上記方法	・下降速度×動作秒数、またはエンコーダ計測を用いた連続計測
	・緩衝材によるOPの拘束力	・除去深度	・既知点から離隔ガイド先端までの距離計測	
【記録】	・緩衝材によるOPの拘束力	・引き抜き力計測 (OPの拘束力=引き抜き力-OP荷重)		・OP底部まで除去の場合は不要。ただし、底部までの除去が確実に実施されているかの確認のため、記録として取得

(d) 除去生成物の撤去（吸引）作業における管理・計測計画

除去生成物の撤去（吸引）作業は、図 2.2-15 中の濃色の部分である。「緩衝材を迅速に除去する」という目的を達成するために、設定した流量での除去生成物の撤去（吸引）を確認する行為が必要となる。処分孔縦置き方式の回収技術の情報取得計画では、循環系として構成した緩衝材除去システムの前後作業との関係を考慮しつつ、確認すべき項目とそれを特定するための管理・計測項目、管理・計測方法を表 2.2-4 のように計画した。

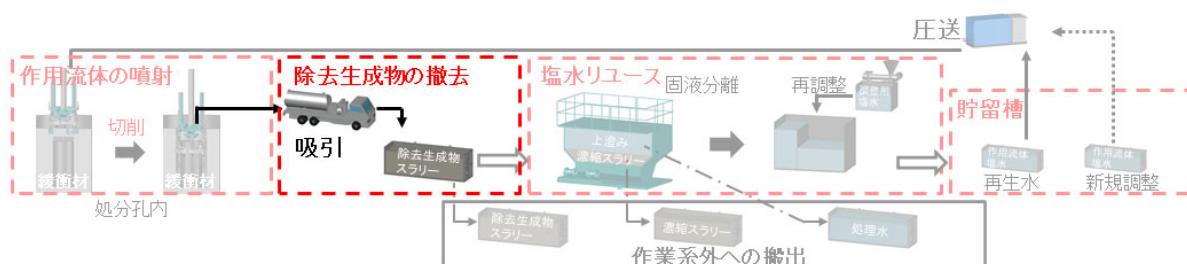


図 2.2-15 緩衝材除去システム内の除去生成物の撤去（吸引）作業

表 2.2-4 除去生成物の撤去（吸引）作業における取得情報

管理・計測目的	確認項目	管理・計測項目	管理・計測方法	摘要
・緩衝材を「迅速に」除去する ←設定した流量で除去生成物を撤去（吸引）する	・除去量	・吸引総量（噴射量+除去量） ・密度（SS、液固比）	・流量*計測時間/吸引時間 計測 ・水位（体積）/吸引時間 計測 ・体積・重量計測（濁度計測、SS濃度計測）	・真空吸引方式では、エアの吸引により流量の連続計測は困難。パッチ計測となる ・除去量算定を目的とする場合、連続計測とパッチ計測のどちらも適用可能
	・吸引総流量（吸引システムの正常な稼働）	・吸引総流量	・流量*計測時間/吸引時間 計測 ・水位（体積）/吸引時間 計測	・連続計測が望ましいが、真空吸引方式では、エアの吸引により連続計測は困難。パッチ計測となる
	・吸引圧力（＜大気圧）（吸引システムの正常な稼働）	・管路の圧力損失 ・水圧	・管路長さ設定（事前管理） ・管路高さ設定（事前管理） ・管路角度（経路）設定（事前管理） ・管路径設定（事前管理） ・管路材質設定（事前管理） ・水圧計測	・吸引機械、配管システムの設計、評価に用いる
	・動粘度	・粘度 ・密度（SS、液固比）	・粘度計測 ・体積・重量計測（濁度計測、SS濃度計測）	・吸引機械、配管システムの設計、評価に用いる ・連続計測とパッチ計測のどちらも適用可能
	・除去生成物の吸引状況	・固形物性状	・吸引系統配管径＞固形物寸法の設定（事前管理）	・作業中の管理は困難。事前の要素試験等で固形物性状を確認、吸引配管径を設定

(e) 除去生成物の処理系統の判断（リユース系統 or 作業系外）のための管理・計測計画

除去生成物の処理作業は、図 2.2-16 中の濃色の部分である。「緩衝材を迅速に除去する」という目的を達成するために、除去生成物の処理系統を判断する行為が必要となる。具体的には、発生する除去生成物をリユース系統で処理するのか、作業系外で処理するのか、を判断することになる。「緩衝材を迅速に除去する」という目的だけに着目すれば、ひとつの例として噴射総流量と固液分離能力との関係から以下の判断基準が適用できる。

- ・噴射総流量＜固液分離能力リユース系統を選択
- ・噴射総流量＞固液分離能力作業系外搬出

処分孔竖置き方式の回収技術の情報取得計画では、循環系として構成した緩衝材除去システムの前後作業との関係を考慮しつつ、除去生成物の処理系統の判断において確認すべき項目とそれを特定するための管理・計測項目、管理・計測方法を表 2.2-5 のように計画した。

一方で、固液分離能力は凝集剤などの添加材を使用できるか、できないかで、設備規模が大きく変化する。また、作業系内及び作業系外での設備配置スペースが影響するため、処分場の施設設計といった大きな枠組みの中で検討する必要がある。

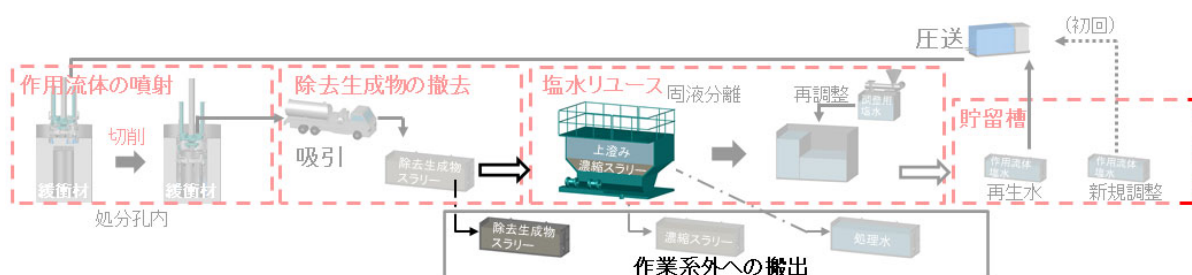


図 2.2-16 緩衝材除去システム内の除去生成物の処理作業

表 2.2-5 除去生成物の処理系統の判断（リユース系統 or 作業系外）のための取得情報

管理・計測目的	確認項目	管理・計測項目	管理・計測方法	摘要
・緩衝材を「迅速に」除去する （処分場施設設計に対する回収技術の運用への展開） ←噴射総流量＜固液分離能力の場合、リユース系統を選択 ←噴射総流量＞固液分離能力の場合、作業系外搬出	・固液分離能力	⇒	⇒	・「除去生成物の固液分離作業」にて取得
	・吸引総流量（in）	・吸引総流量	⇒	・「除去生成物の撤去（吸引）作業」にて取得
	・噴射総流量（out）＝供給流量	・供給流量	⇒	・「作用流体の供給作業」にて取得

(f) 除去生成物の固液分離作業における管理・計測計画

除去生成物の固液分離作業は、図 2.2-17 中の濃色の部分である。「緩衝材を迅速に除去する」という目的を達成するために、設定した上澄み流量の供給と、設定した上澄み成分への分離を確認する行為が必要となる。処分孔縦置き方式の回収技術の情報取得計画では、循環系として構成した緩衝材除去システムの前後作業との関係を考慮しつつ、確認すべき項目とそれを特定するための管理・計測項目、管理・計測方法を表 2.2-6 のように計画した。

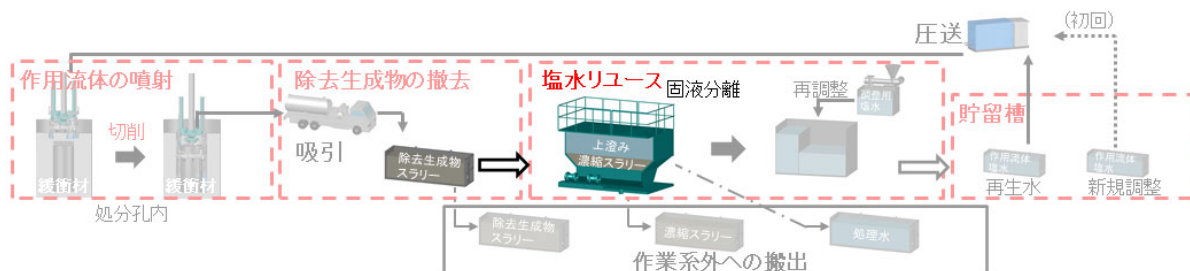


図 2.2-17 緩衝材除去システム内の除去生成物の固液分離作業

表 2.2-6 除去生成物の固液分離作業における取得情報

管理・計測目的	確認項目	管理・計測項目	管理・計測方法	摘要
<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材を「迅速に」除去する ←設定した上澄み流量を供給する ←設定した上澄み成分に分離する 	固液分離能力	・密度 (in) (SS、液固比)	・体積・重量計測 (・濁度計測、SS濃度計測)	・「除去生成物の撤去 (吸引) 作業」にて取得
		・添加材成分	・成分設定 (事前管理)	・効果、環境・除去への影響、「除去生成物の処理系統」を総合的に判断して設定
		・添加材添加量	・添加量設定 (事前管理)	・除去生成物の成分、密度による
		・固液分離能力	・吸引総流量 (in)	・「除去生成物の撤去 (吸引) 作業」にて取得
			・沈降速度設定 (事前管理)	<ul style="list-style-type: none"> ・沈降試験で取得 (高さ固定が条件) ・固液分離装置の設計、評価に用いる (基本式「沈降速度\geq上昇流速」)

(g) 上澄みの再調整作業における管理・計測計画

上澄みの再調整作業は、図 2.2-18 中の濃色の部分である。「緩衝材を迅速に除去する」という目的を達成するために、設定した再生水成分への調整、設定した再生水流量への調整を確認する行為が必要となる。処分孔竖置き方式の回収技術の情報取得計画では、循環系として構成した緩衝材除去システムの前後作業との関係を考慮しつつ、確認すべき項目とそれを特定するための管理・計測項目、管理・計測方法を表 2.2-7 のように計画した。

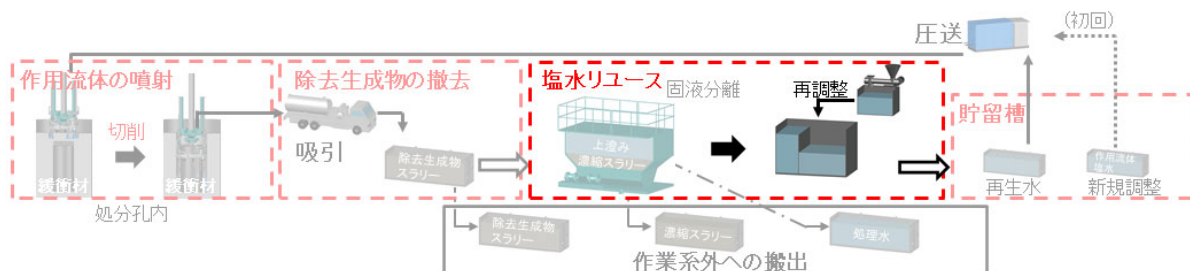


図 2.2-18 緩衝材除去システム内の上澄みの再調整作業

表 2.2-7 上澄みの再調整作業における取得情報

管理・計測目的	確認項目	管理・計測項目	管理・計測方法	摘要
<ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材を「迅速に」除去する ←設定した再生水成分に調整する ←設定した再生水流量に調整する 	・上澄みの性状	・密度 (SS、液固比)	・体積・重量計測 (・濁度計測、SS濃度計測)	・固液分離装置の設計、評価に用いる ・常時は再調整を伴わないため「作用流体の再生水調整作業」にて取得
	・上澄みのNaCl濃度	・塩分濃度	・塩分濃度計測	・除去に対する他の成分の影響が小さいと 考え、電気伝導率測定を選択 ・常時は再調整を伴わないため「作用流体 の再生水調整作業」にて取得
	・再調整水の主成分 (NaCl)	・溶質成分	・成分設定 (事前管理)	・処分場正立性から海水相当成分 ・経済合理性から並塩を選択
	・再調整水のNaCl濃度	・塩分濃度	・溶質、溶媒量計測	・再生水が設定した塩分濃度になるように、 溶質、溶媒量を調整
	・再調整水の量	➡	➡	・再調整水の量=供給流量-再生水流量 (「作用流体の再生水調整作業」にて取得)

(h) 作用流体の再生水調整作業における管理・計測計画

作用流体の再生水調整作業は、図 2.2-19 中の濃色の部分である。「緩衝材を迅速に除去する」という目的を達成するために、設定した溶液を確認する行為が必要となる。処分孔竖置き方式の回収技術の情報取得計画では、循環系として構成した緩衝材除去システムの前後作業との関係を考慮しつつ、確認すべき項目とそれを特定するための管理・計測項目、管理・計測方法を表 2.2-8 のように計画した。

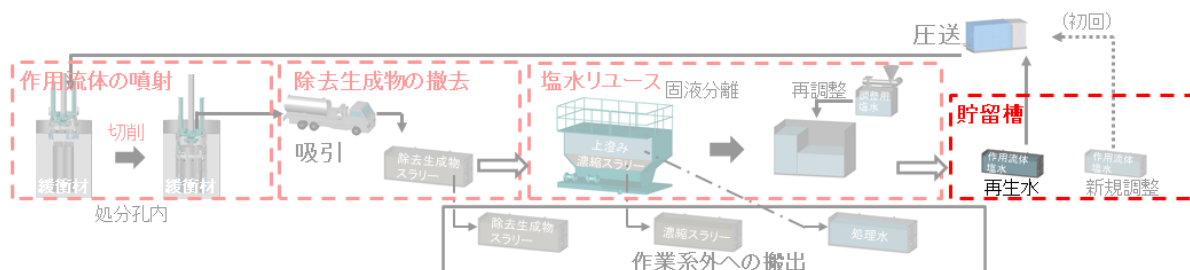


図 2.2-19 緩衝材除去システム内の作用流体の再生水調整作業

表 2.2-8 作用流体の再生水調整作業における取得情報

管理・計測目的	確認項目	管理・計測項目	管理・計測方法	摘要
・緩衝材を「迅速に」除去する ←設定した溶液を確認する	・主成分 (NaCl)	・溶質成分	・原子吸光分析 ・ICP発光分析	・影響の大小で項目追加 ・既往の試験では、除去に対する大きな影響は確認されていない
	・性状	・密度 (SS、液固比)	・体積・重量計測 （濃度計測、SS濃度計測）	・固液分離装置の設計、評価に用いる ・連続計測とバッチ計測のどちらも適用可能
	・NaCl濃度 (4%)	・塩分濃度	・塩分濃度計測	・除去に対する他の成分の影響が小さいと考え、電気伝導率測定を選択
	・貯留容量	・貯留容量	・貯留槽容積設定（事前管理）	・システム内のバッチ容量と供給流量のバランスによる （真空吸引方式では、吸引機械のバッチ容量×安全率）
	・再生水流量（上澄み流量）	・再生水流量	・水位（体積）計測	・再調整水の量＝供給流量－再生水流量 ・システム内にバッチ処理が含まれる場合、管理が複雑になるため水位（体積）管理が容易
	・動粘度	・粘度 ・密度 (SS、液固比)	・溶質、溶媒量計測からの理論値 ・溶質、溶媒量計測からの理論値	・圧送機械、配管システムの設計に用いる
	【記録】	・pH	・pH計測	・除去に影響するpHの増減は考えにくいいため、記録とする
	【記録】	・水温	・水温計測	・蒸発しない温度を前提とし、各種計測の補正用として記録

(i) 環境・その他管理作業における管理・計測計画

環境・その他管理作業は、図 2.2-20 中の濃色の部分である。「緩衝材を迅速に除去する」という目的を達成するために、作業あるいは作業環境を監視する行為が必要となる。処分孔竖置き方式の回収技術の情報取得計画では、循環系として構成した緩衝材除去システムの前後作業との関係を考慮しつつ、確認すべき項目とそれを特定するための管理・計測項目、管理・計測方法を表 2.2-9 のように計画した。

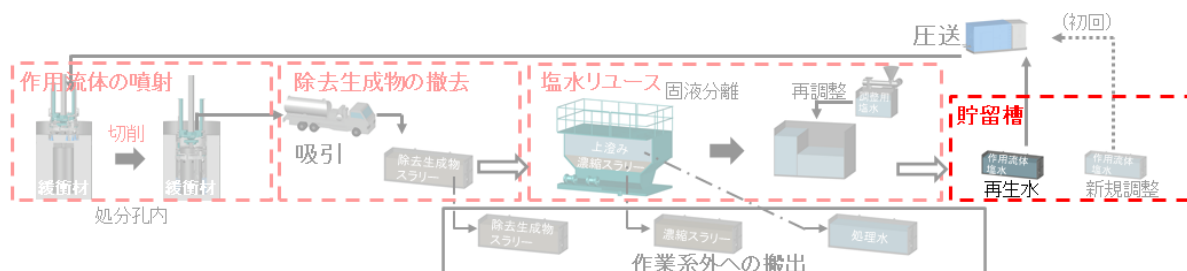


図 2.2-20 緩衝材除去システム内の環境・その他管理作業

表 2.2-9 環境・その他管理作業における取得情報

管理・計測目的	確認項目	管理・計測項目	管理・計測方法	摘要
・緩衝材を「迅速に」除去する ←作業を監視する	・設備動作、状態	・照度	・照度計測	・各設備の動作管理 ・漏水等の異常管理 ・定量的管理をする場合は、3次元計測を適用
		・動作状態	・3次元計測 ・カメラ映像確認	
		・音	・音（周波数）計測	・各設備の動作管理 （異音、異臭等の異常管理）
		・臭気	・臭気計測	
		・気温	・坑内温度計測	・各設備の使用限界管理
		・湿度	・坑内湿度計測	
		・線量	・坑内線量計測	・情報伝達の設計、評価に用いる
		・通信状態	・通信速度設定（事前管理）	

2.2.4 緩衝材除去特性の基礎的データの取得（噴射要素試験）

緩衝材除去システムの噴射吸引設備にある噴射リングは、複数の噴射ノズルと除去生成物の吸引口を有し、揺動と下降によってオーバーバック周囲の緩衝材を除去する。噴射リングの WJ 化のため、噴射条件と除去効率の関係を取得する要素試験を実施した（原環センター, 2022）。

(1) 噴射要素試験の概要

噴射ノズルと除去対象の緩衝材の組合せを要素として抽出した、要素試験設備を図 2.2-21 に示す。WJ による物理的な作用を維持しつつ、面状の除去も両立できるトルネードノズルを基本とした（原環センター, 2020）。要素試験におけるノズルの動きは、最も単純な片道の直線動作とした。試験後の供試体の溝形状を 3D 計測で取得した。

試験条件は、以下の 3 つの影響因子を考慮して設定した。

- ・ 除去作業時の管理に関連する因子： ノズル移動速度、被切削物との離隔、被切削上の水深
- ・ 除去作業と周辺環境への影響因子： 噴射する流体の液種
- ・ 定置後の経過時間による影響因子： 緩衝材の飽和度

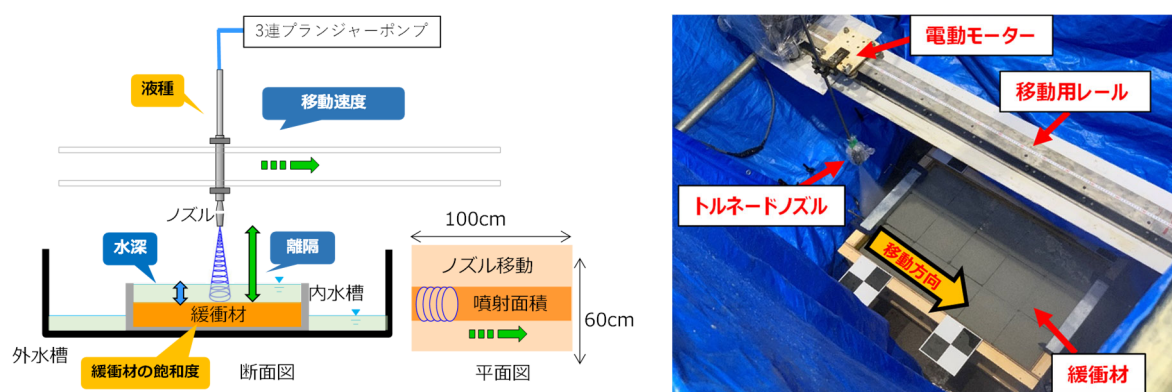


図 2.2-21 1 次元の噴射要素試験の設備

(2) トルネードノズル使用時の噴射条件と除去効率との関係

トルネードノズルを使用した際の、噴射条件と除去効率の関係を表 2.2-10、表 2.2-11 に示す。2021 年度は 3D 形状計測で得た除去後の溝の体積で除去効率を評価した。本年度は、除去作業時の噴射リングの揺動と下降動作を具体的に設定するため除去された溝の深さを評価指標に変更した。

(a) 水流の軌跡の影響

トルネードノズルからの水流の軌跡は円運動で、ノズル自体が移動することで、水流が被対象物に面状に作用する。位置によって作用する水流の密度が異なり、溝中央部では低く、端部で最大となる。そのため、中央部の深さは端部の 6~7 割程度になり、除去した溝の断面形状は中央が凸になる。除去効率から装置の下降動作を設定する際は、除去が遅れている部位、すなわち、中央の凸部分を考慮する必要がある。

噴射条件が除去効率に及ぼす影響の評価では、中央部の深さで行う。

表 2.2-10 噴射水の液種、及び緩衝材の飽和度と除去効率の関係（トルネードノズル）

条件	液種	離隔 (cm)	冠水位 (cm)	移動速度 (cm/min)	噴射方向 (入射角)	飽和度 (%)	除去幅 (cm)	除去深さ(cm)の平均と基本条件に対する効率				
								両端※1	能力比※2	中央※1	能力比※2	中央／両端
1	真水	25	5	50	鉛直	60	10.2	5.1	0.67	3.2	0.58	0.63
2	真水	25	5	50	鉛直	80	10.6	6.5	0.85	4.2	0.76	0.65
3	並塩 4%	25	5	50	鉛直	60	11.1	6.6	0.86	4.9	0.89	0.74
4	並塩 4%	25	5	50	鉛直	80	10.6	7.6	1	5.5	1	0.72

※1： 2021 年度に実施した噴射要素試験で取得した形状計測結果のうち、断面 3 カ所の平均値
※2： 条件 4 の効率を 1 とした場合の比

表 2.2-11 噴射条件と除去効率の関係 (トルネードノズル)

条件	液種	離隔 (cm)	冠水位 (cm)	移動速度 (cm/min)	噴射方向 (入射角)	飽和度 (%)	除去幅 (cm)	除去深さ(cm)の平均と基本条件に対する効率				
								両端※1	能力比※2	中央※1	能力比※2	中央／両端
4	並塩 4%	25	5	50	鉛直	80	10.6	7.6	1	5.5	1	0.72
5	並塩 4%	25	5	100	鉛直	80	10.4	3.6	0.47	2.4	0.43	0.67
6	並塩 4%	25	10	50	鉛直	80	10.5	5.1	0.67	3.8	0.69	0.75
7	並塩 4%	50	5	50	鉛直	80	19.7	1.7	0.22	0.1	0.02	0.06
8	並塩 4%	75	5	50	鉛直	80	20.5	0.3	0.04	0.0	0	0
9※3	並塩 4%	50	5	50	斜め	80						

※1： 2021 年度に実施した噴射要素試験で取得した形状計測結果のうち、断面 3 カ所の平均値
 ※2： 条件 4 の効率を 1 とした場合の比
 ※3： オーバーパック把持部の効率的な除去方法の検討のため実施

(b) 噴射する流体の液種の影響

真水による除去効率は、並塩 4%を使用した場合の 65～76%程度に低下する。

噴射する流体の液種の影響について、表 2.2-10 に示す結果のうち、供試体の飽和度が同じ条件の比較から評価した。並塩 4%に対する真水の除去効率は、飽和度 60%の場合 0.65（条件 1 / 条件 3）、飽和度 80%では 0.76（条件 2 / 条件 4）に低下した。供試体が溶液に接していた時間は数分程度であるため、電解質にスラリー化促進効果は低いと考えられる。一方、4%食塩水の比重は 1.03 程度で、真水と比較して 3%程度大きい。水流が持つ運動エネルギーの差の効果に因るものと示唆される。

一方で、電解質にはスラリー化促進の他に、凝集による固液分離の促進効果もある。

(c) 緩衝材の飽和度の影響

緩衝材の飽和度が高いほど除去効率が高い。また、幅広い飽和度に対して適用可能である。

緩衝材の飽和度は、定置から回収するまでの経過期間や処分孔内の湧水状況によって変化する。飽和度の影響について、表 2.2-10 に示す結果のうち、使用する液種が同じ条件の比較から評価した。飽和度 80%に対する飽和度 60%の除去効率は、真水使用時 0.76（条件 1 / 条件 2）、並塩 4%使用では 0.89（条件 3 / 条件 4）に低下した。

電解質溶液によるスラリー化促進作用による緩衝材の除去では、飽和度が高い供試体では溶液が浸透しづらく、電解質の作用が緩衝材中の拡散支配寄りとなることで除去効率が低下すること確認されている。

噴射条件と除去効率の関係は、“条件 4”を基本条件に設定し、その条件での結果と相対比較した。

(d) ノズルの移動速度の影響

緩衝材除去の作業時間は、1 層あたりの除去に要する時間（設定した角度を揺動する時間）とある深さを除去するために必要な層数から見積もることができる。ノズルの移動速度を上げると前者が短縮される。

ノズルの移動速度を 50 cm/min から 2 倍の 100 cm/min にした場合、除去幅はほぼ同じであるが、深さ方向の除去効率は 0.43（条件 5 / 条件 4）に低下する。移動速度は 2 倍であるが効率が 5 割未満に低下するため、必要な層数は 2 倍よりも多くなる。結果としてある深さの除去に要する時間、及びそれに伴い消費する水量は速度上昇の効果を下回る。

オーバーパック周囲の緩衝材の除去では、噴射リングは設定した角速度 ω (rad/s) で揺動する。この時、ノズルの移動速度 v (cm/s) は、リング上の取付け位置の r (cm) によって、 $v = r \times \omega$ (cm/s) となる。噴射リングの揺動速度を設定する際の基準円直径 (P.C.D) より外側のノズルは、設定よりも速く円弧移動するため、除去深さの低下に留意が必要である。

(e) 供試体上の水深（冠水位）の影響

流体的除去では除去生成物はスラリーとして処分孔から吸引・排出される。従前の緩衝材除去システムでは吸引ノズル先端を常時スラリー中に没した状態とし、気泡の巻き込みによる吸引効率の低下を抑制した。一方、供試体上の水は高圧水の減衰の要因ともなる。

供試体上の水深を 5 cm から 2 倍の 10 cm にした場合、除去幅はほぼ同じであるが、深さ方向の除去効率は 0.69（条件 6 / 条件 4）に低下する。供試体上の水深は、吸引によるスラリーの排出効率を確保した上で、出来るだけ浅くする方が、除去効率上有利と考えられる。

(f) ノズルー供試体間の離隔の影響

25 cm の離隔を基準とした場合、2 倍の 50 cm では深さ方向の除去率は 0.02（条件 7／条件 4）、3 倍の 75 cm ではほぼゼロ（条件 8／条件 4）まで低下する。

トルネードノズルの水流は、ノズル口を頂点とする円錐側面を成すため、被除去対象には円形に作用する。離隔が広がると相似形を維持したまま円錐の高さが増加し、この円周は離隔の変化率の二乗で長くなる。すなわち条件 4 と比較した場合、条件 7 は 1/4、条件 8 は 1/9 まで水流の単位長当たりのエネルギーが低下する。これに加えて、ノズルから放出された水流が広がりエネルギーが分散することによって、被対象物への物理的な作用も低下したと考えられる。

一方、離隔をさらに狭めた場合、除去深さは増加するが除去幅は狭くなる。噴射リングの下降に必要な幅を確保するためには、ノズルの配列数を増やす必要があるが、単位時間あたりに消費する水量も増加するため、吸引設備側の能力、並びに全体での使用水量とのバランスに留意が必要である。

(3) 緩衝材除去の基本条件と除去作業への展開

要素試験の結果を踏まえ、WJ による緩衝材除去の基本条件、及び除去作業時の運転管理に資するものを、表 2.2-12 に整理した。

表 2.2-12 WJ による緩衝材除去の基本条件と、作業への展開

因子	基本条件	緩衝材除去作業への展開
使用するノズルの種類	トルネード	除去深さと除去幅の両立
噴射する流体の液種	並塩 4%	除去生成物（スラリー）の固液分離の促進
被切削物との離隔	25 cm	除去幅と除去深さ、吸引設備能力のバランス
被切削物上の水深	5 cm	除去効率と吸引時の気泡巻き込みとのバランス
ノズル移動速度	50 cm/min	基準円上の速さとして設定

2.2.5 緩衝材除去手順の具体化と WJ 対応噴射リングの製作

(1) WJ 化による除去時間の短縮の実現性の見込み

表 2.2-11 に示した基本条件での能力を踏まえ、目安とした除去の実現性を検証した。

(a) 達成すべき下方への平均除去速度

回収作業上のボトルネック解消の観点から設定した、緩衝材の除去時間の短縮の目安はオーバーパッカー一体あたり、20 時間未満である。処分孔内の除去する緩衝材は、オーバーパッカー胴体の高さ 173 cm に、上部埋戻し材の除去で残した緩衝材の厚さ 50 cm を合わせた 223 cm であり、深さ方向の除去速度は 11.2 cm/h または 0.19 cm/min 以上を満たす必要がある。

(b) WJ の除去能力の過不足

基本条件で稼働するトルネードノズルを 1 本使用して除去を実施する場合を仮定し検証した。

基本条件での除去幅は約 10 cm であるから、直径 82 cm のオーバーパッカーの外側から 5cm の円周上を移動することで、オーバーパッカー周囲の緩衝材は幅 10 cm で除去できる。この時、約 290 cm の円周上を基本条件の 50 cm/min で移動するので、所要時間は約 6 分である。基本条件にお

ける除去深さは 5.5 cm であるから、除去速さは 0.91 cm/min となる。

以上より、本試験で使用するトルネードノズルは、目安とした除去速度を達成するのに十分な能力を有していると判断した。

(2) WJ 用の噴射リングの設計

緩衝材除去システムの噴射吸引設備は、揺動と下降の二つの動作で処分孔内のオーバーパック周囲の緩衝材を除去する。噴射要素試験の結果を基に、これらの動作による除去作業を実現する噴射リングを設計した（原環センター, 2022）。

(a) 緩衝材を除去する幅の設定

緩衝材を除去する目的はオーバーパックを拘束する力の解除であるから、できるだけ狭い方が除去生成物の発生量が減る点で有利である。

一方、この作業を実現する噴射吸引設備の寸法の設定では、以下の点を考慮する必要がある。

- ・ 噴射リングを上下動させる機構の成立性
処分坑道内を走行する噴射吸引設備の全高内に納まること。
オーバーパック下面まで、噴射リングを離隔 25 cm で管理できること。
- ・ 流体の循環系の成立性
噴射塩水の供給配管、除去生成物の吸引配管が納まること。
- ・ 遠隔操作の成立性
必要な計測機器等が設置できること。

従前の緩衝材除去システムの噴射吸引設備の設計で上下動の機構は検討済みであり、多段の伸縮機構の動作が必要とするオーバーパック周囲の空間幅は 20 cm である。

本事業でもこの幅を踏襲し、緩衝材を除去する幅を 20 cm とした。なお、供給／吸引配管や計測機器については、この幅に収まるように配置を工夫するものとした。

(b) 下方の噴射ノズルの配置と数量

基本条件でのトルネードノズルの除去幅は約 10 cm である。内側と外側、それぞれ 92 cm、112 cm の円周上にノズルを配置し、20 cm の除去幅を確保した。

(b) に示すトルネードノズルの能力の検証より、噴射リングの内側と外側に 1 本ずつノズルを実装することでも目安の時間内での除去は実現可能である。噴射リングに取り付けるノズルの本数(N)と除去作業には、以下のような関係がある。

○作業時間の短縮

ノズルが 1 本の場合と比較して、全周を除去するのに要する時間は $1/N$ 倍に短縮される。

○消費する水量

単位時間あたりの消費水量は N 倍になるため、塩水の供給能力、除去生成物の吸引能力は 1 本と比較して N 倍必要である。一方、処分孔一つあたりの作業時間が $1/N$ 倍になるため、除去作業全体ではノズル本数に依存しない。

○噴射リングの揺動角度

噴射リングと噴射吸引設備間には、塩水の供給配管、吸引用の配管、駆動用の油圧配管、計測機器の電力・信号線があり、揺動時の追従性に留意が必要である。揺動角度は、ノズルが 1 本の

場合は $\pm 180^\circ$ だが、 $\pm 180/N^\circ$ になり、配管類の取り回しの点では有利である。

従前の緩衝材除去システムの噴射リングの揺動角度は $\pm 45^\circ$ ($N=4$)で、除去作業時に配管類の取り回しはスムーズであった。本事業でも揺動角度が $\pm 45^\circ$ になるよう、内側と外側のノズルを一組として、90度対向で四カ所に設置することとした。

(c) 側方の噴射ノズル

下向きノズルではオーバーパック把持部周囲にジェットを当てることができないため、噴射リングから横あるいは斜め方向に噴射するノズルが必要である。トルネードノズルは離隔に対する除去効率の減衰が大きいので、図 2.2-22 に示すように直射ノズルで斜め方向に噴射し、すり鉢状に除去する方式を選択した。下方ノズルの検討で $\pm 45^\circ$ としたことを受け、斜め方向に噴射する直射ノズルは4本とした。

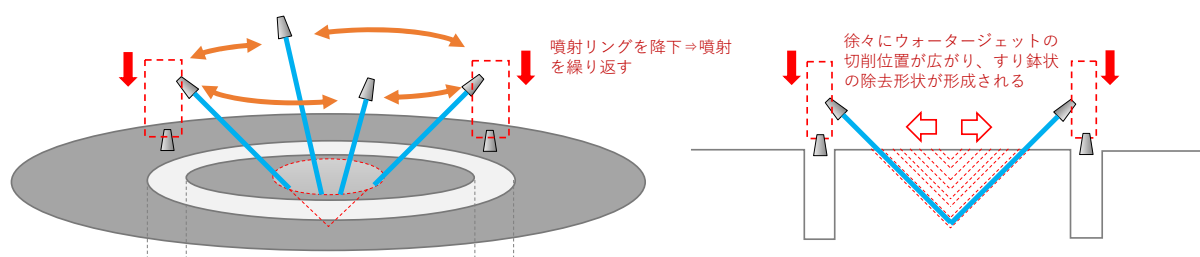


図 2.2-22 直射ノズル斜め噴射による把持部周囲の除去

(d) 除去生成物の吸引排出

基本条件での噴射要素試験時の除去生成物を図 2.2-23 に示す。除去生成物には塊はほとんど含まれず、液固比は 178 であった。塩水 WJ によって、緩衝材は吸引による排出が可能な除去生成物となることを確認した。

吸引用配管は、幅 20 cm に収まるよう、吸引用本管を 25A、吸引口は 15A を選択した。



図 2.2-23 塩水 WJ による除去生成物
基本条件時（原環センター・原子力機構，2022）

(e) その他付帯設備

処分孔内で噴射の基本条件の管理の省力化を見据え、除去生成物の吸引配管に離隔管理機能を持たせた。所定の離隔以下になると緩衝材上に着床するため、噴射リングの揺動の倣い運転で管理値である 5 cm が確保される。

(3) 噴射リングの外観

(a)~(e)の機能、及び寸法を踏まえて設計した WJ 対応の噴射リングの設計図面を図 2.2-26 に示す。この図面に基づいて製作した噴射リングの外観を図 2.2-24 に示す。設定した 20 MPa の水を供給し、予定通りに噴射できることを確認した (図 2.2-25)。



図 2.2-24 WJ 対応の噴射リングの外観



図 2.2-25 噴射試験時のトルネードノズルからの水流の様子

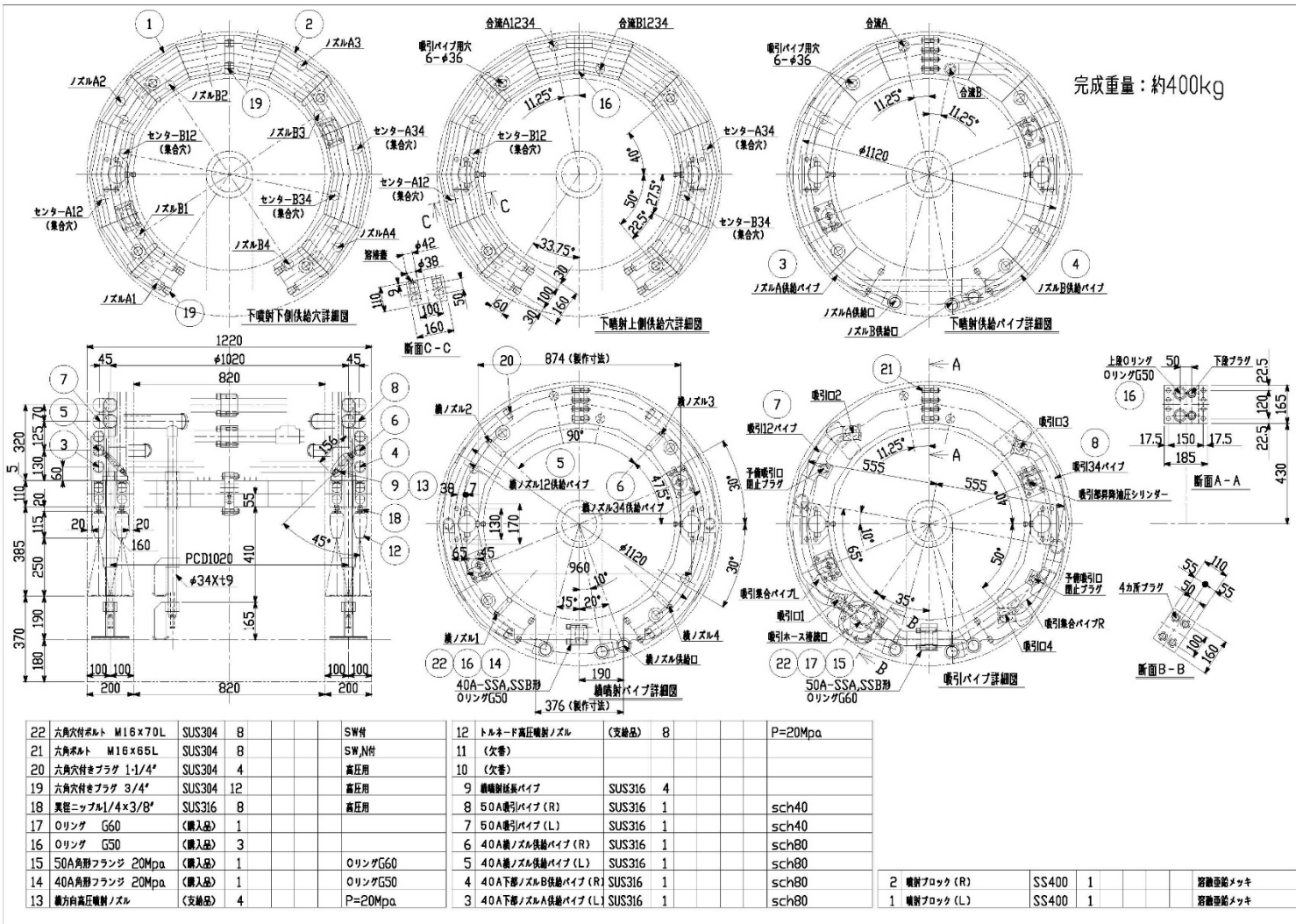


図 2.2-26 WJ 対応の噴射リングの設計図面

2.2.6 予備試験による機能確認と試験条件の確定

製作した試験装置・設備について、緩衝材を使用した予備試験により一連の動作を事前に確認、フルスケール試験に向けた課題の抽出と対策の検討を行った。

(1) 供試体

予備試験には緩衝材の締固め施工確認試験で作製した供試体を使用した。供試体の諸元を図 2.2-27 に示す。供試体は作製から試験に供するまで約 10 ヶ月経過しているため、飽和度は参考値とする。

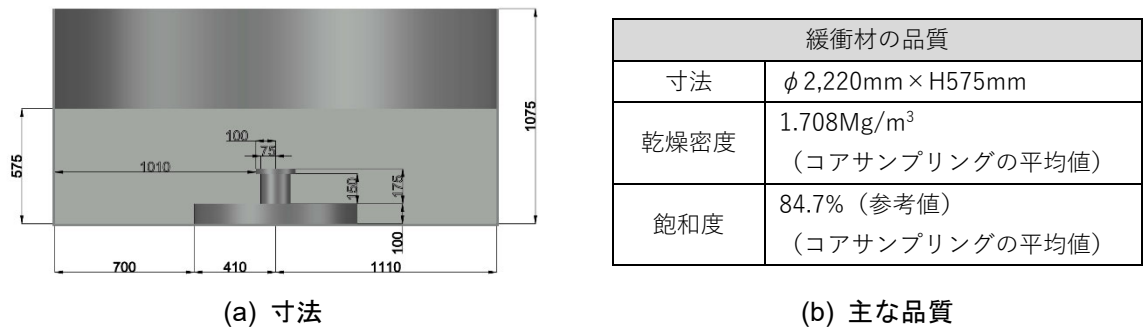


図 2.2-27 予備試験供試体の諸元

(2) 予備試験の対象

噴射リング下方の緩衝材の除去は一次元の要素試験から推測が可能である。ここでは、(c) に示した、把持部周囲の緩衝材の除去を対象とした。図 2.2-28 に下方トルネードノズルと斜め下方の直射ノズルを使用した把持部の除去手順を示す。実際に除去作業を実施し、除去手順、摺動速度、解砕状況を確認するとともに、除去生成物であるベントナイトスラリーの性状や、吸引の可否など、連続除去に必要な情報を取得した。

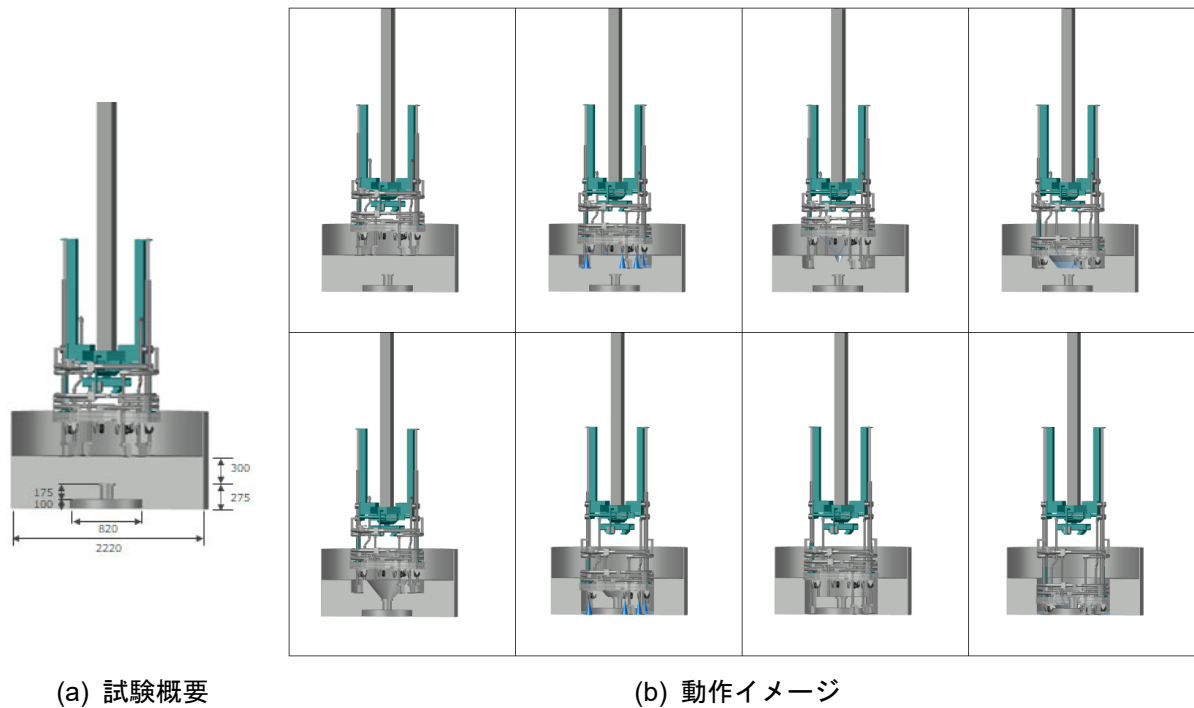


図 2.2-28 予備試験の動作イメージ

(3) 予備試験を受けた装置の改良、及び噴射条件の更新

図 2.2-29(a)は噴射時の様子である。緩衝材上の水深を 5 cm で管理する計画であったが、上昇した。それにより、WJ の水圧が減衰するため、計画した除去深さが実現できなかった。水位が上昇する要因として、吸引ノズルの閉塞が考えられる。

試験後に水を抜き、切削状況を確認したところ、図 2.2-29(b)に示すように、把持部上側の緩衝材が計画通りに解砕できていないことを確認した。噴射要素試験時よりも直射ノズルからの水流が広がらず、緩衝材が解砕ではなく切断されていた。これにより、緩衝材が大きな塊として除去されるため 15A の吸引口が塞がれたと考えられる。この予備試験の結果を踏まえ、以下の調整を行った。

(a) 把持部上側の緩衝材の確実な解砕

斜め下方の直射ノズルの噴射時の下降ピッチを半分にするすることで、緩衝材上を通過するジェットのパッチを狭める。これにより、切断により生じる塊が細くなることを期待する。

(b) 吸引配管の大口径化

当初設計では、15A の吸引配管を 4 本としたが、吸引口の閉塞を防止するため、3 inch の吸引口一本に集約した。

(c) 揺動角度の拡大

±45 度の揺動角度とした場合、折り返しの部分で揺動速度が安定せず、緩衝材除去が不十分になる傾向が見られた。これに対し、揺動角度±55 度に拡大し、20 度オーバーラップさせることにした。噴射リングの P.C.D 上の移動速度は 50 mm/min で固定したため、揺動一往復に要する時間は当初計画の 1.2 倍程度となるが、20 時間の目標に対しては軽微である。



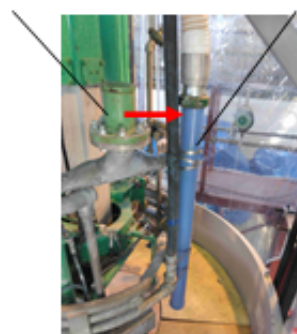
(a) 吸引ノズル閉塞による水位上昇



(b) 塊状除去物発生原因の推定

15A×4本に分配する元管

3吋管×1本



(c) 吸引ノズル閉塞対策

図 2.2-29 吸引ノズルの閉塞現象と問題点の推定

2.2.7 フルスケールの緩衝材除去試験

予備試験で確認された現象に対する対策を施した試験装置ならびに試験設備を用いて、フルスケールの供試体を対象とした流体的除去試験を実施した。

(1) フルスケール試験の動作手順

把持部周辺の緩衝材を除去する手順は予備試験と同様に、「鉛直・斜め方向交互噴射手順」を採用した。この除去手順は、除去の進行に合わせて噴射方向（鉛直、斜め）の切り替えを行い、模擬オーバーパック上部の緩衝材を塊状に縁切することなく除去することを想定した手順である。

オーバーパック側部の緩衝材を除去する手順は、揺動と下降の繰り返しである。噴射要素試験で設定した表 2.2-13 の条件で実施する。

図 2.2-30 にフルスケール試験時のリングの動作イメージを示す。

表 2.2-13 オーバーパック側部緩衝材除去の噴射条件

因子	基本条件	緩衝材除去作業への展開
使用するノズルの種類	トルネード	除去深さと除去幅の両立
噴射する流体の液種	並塩 4%	除去生成物（スラリー）の固液分離の促進
被切削物との離隔	25 cm	除去幅と除去深さ、吸引設備能力のバランス
被切削物上の水深	5 cm	除去効率と吸引時の気泡巻き込みとのバランス
ノズル移動速度	50 cm/min	基準円上の速さとして設定

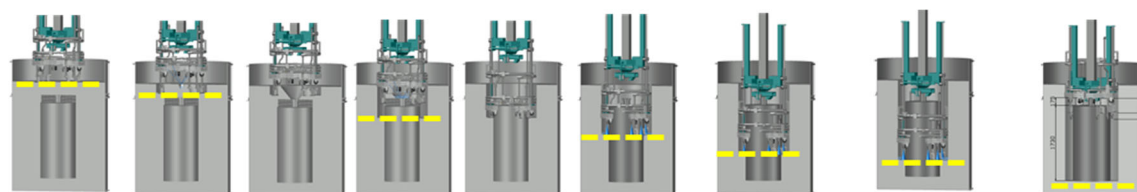


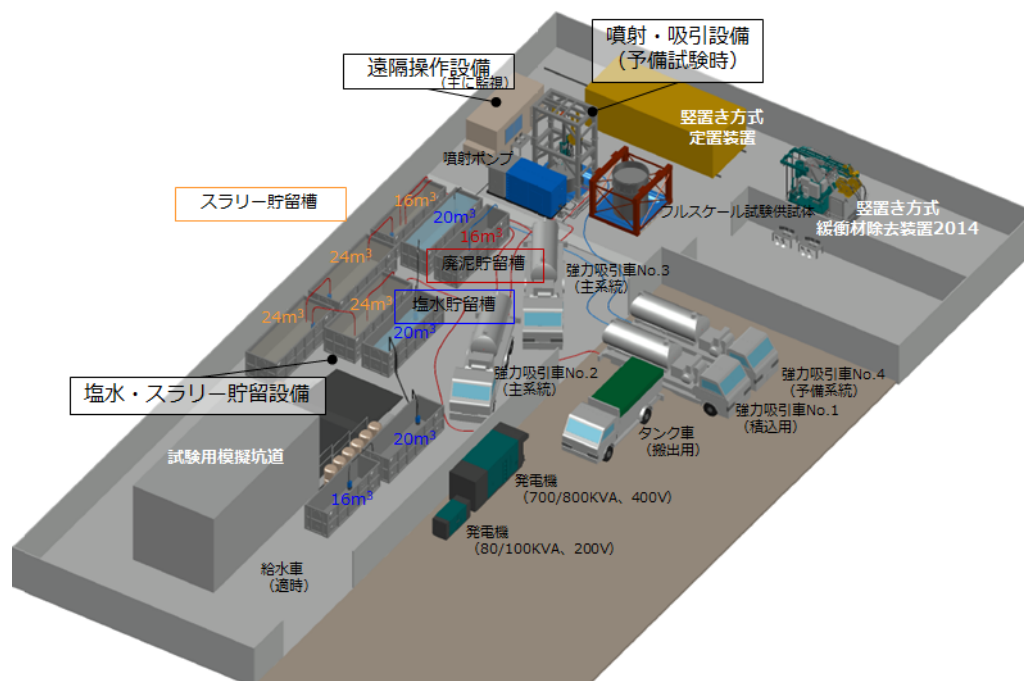
図 2.2-30 フルスケールの緩衝材除去時のリングの動作イメージ

(2) 試験装置及び試験設備

製作した試験装置、ならびに整備した試験設備を、全体配置計画図とともに図 2.2-31 に示す。

(3) フルスケール試験時の記録

時系列で記録したデータは、噴射時の計測値を抽出して編集・記載、噴射・吸引設備に付帯する計測は試験の進行履歴に反映して編集・記載、スラリー貯留槽でバッチごとに記録したデータは必要に応じて換算してバッチごとに編集・記載した。表 2.2-14 に試験時の記録方法を示す。



(a) 予備試験全体配置計画図



(b) 噴射・吸引設備



(c) 塩水・スラリー貯留設備



(d) 遠隔操作設備



(f) その他設備 (発電機)

図 2.2-31 試験装置ならびに試験設備 (予備試験)

表 2.2-14 フルスケール試験で取得したデータと本報告書での記載方法

計測位置	計測機器	取得したデータ	本報告書での記載
塩水貯留槽	塩分濃度計	1 秒ごとの計測値	噴射時の計測値を編集
	pH 計	1 秒ごとの計測値	噴射時の計測値を編集
	温度計（塩分濃度計付属）	1 秒ごとの計測値	噴射時の計測値を編集
	流量計	1 秒ごとの計測値	噴射時の計測値を編集
	圧力計	1 秒ごとの計測値	噴射時の計測値を編集
噴射・吸引 設備	エンコーダー	操作盤より読み取った値 を手動記録	試験の進行履歴に反映
	3D スキャナ	試験開始前,1 日目終了後, 試験終了後の点群データ	除去量として換算して記載
	ウェブカメラ	試験中の映像データ	試験の進行履歴とともに切り 抜いて記載
	ロードセル （噴射終了後に取り付け）	0.01 秒ごとの計測値	模擬オーバーパック引き上げ 時の計測値を編集
スラリー貯留 槽	塩分濃度計	1 秒ごとの計測値	バッチごとの計測値を編集
	温度計（塩分濃度計付属）	1 秒ごとの計測値	バッチごとの計測値を編集
	メジャー	バッチごとに手動記録	バッチごとに吸引流量（総量） として換算して編集
	メスシリンダー	バッチごとに手動記録	バッチごとに密度へ換算して 記載
	電子天秤	バッチごとに手動記録	
	圧力計	記録なし（試験中の監視に使用）	
	粘度計	バッチごとに手動記録	バッチごとの計測値を記載
	流量計（二次移送時）	1 秒ごとの計測値	吸引流量（総量）として換算後、 メジャーでの換算値と比較

(4) フルスケール試験の緩衝材除去進行履歴

フルスケール試験の緩衝材除去進行履歴を表 2.2-15、表 2.2-16 に、除去進行状況を図 2.2-32 に示す。表 2.2-15 に青字で示した項目は、予備試験で明らかになった課題に対する改良の効果である。吸引口の閉塞による作業の中断や、WJ が当たらずに OP 把持部周囲に緩衝材が残る課題は、吸引口の改良や、運転パラメータの見直しで改善できることを確認した。また、表 2.2-16 に赤字で示した項目は、連続運転で明らかになった課題である。トルネードノズルを使用した WJ では、配管が噴射時に振動するため、疲労により破断する可能性が示唆された。

フルスケール試験での累積噴射時間は 273.2 分（約 4.6 時間）、うち鉛直方向への噴射が 176.1 分、斜め方向への噴射が 97.1 分となった。なお、ノズル位置及びガイド位置の表記は試験装置の高さ表示値であり、模擬オーバーパック把持部上面を±0mm として上をプラス、下をマイナスとする。

表 2.2-15 緩衝材除去の進行履歴（１）（フルスケール試験）

段階	内容	噴射時間 (min)	累積 噴射時間 (min)	開始時 ガイド位置 (mm) ※1	終了時 ガイド位置 (mm) ※1	推定 除去深度 (mm)	排水 バッチ	備考
本1	鉛直方向噴射	20.1	20.1	300	100	200	1	・ノズルの下降はオートメーション操作を基本とし、数分に1回の頻度でマニュアル下降させた。 ・揺動時に抵抗を感じた場合は、マニュアル操作によりガイドを若干上昇させてから再度噴射をおこなった。 ・吸引配管の改良により水位が既定より上昇することは無かった。
配管切替							-	ねじ込み接続による配管切替。ボールバルブ採用により即時切替可
本2	斜め方向噴射	63.7	83.7	100	100	200	2	・予備試験結果を踏まえ、1揺動につき17～18mmずつの下降速度とした。 ・噴射リング反転機能の上限圧力の改良および揺動角度の改良により除去不十分な箇所は認められなかった。
配管切替							-	-
本3	鉛直方向噴射	35.3	119.0	100	-518	818	3	・リング下降が妨げられたため、再度縦方向噴射を実施し、リング下降深さを確保した。斜め噴射によって解砕されずに残った除去物が側溝に落ちたものと推定されるが、吸引配管の改良により問題なく吸引できた。
配管切替							-	-
本4 本5	斜め方向噴射	22.4 11.1	144.4 152.5	-260 -365	-365 -518	818	4	・1揺動につき17～18mmずつの下降速度とした。 ・OP上部のペレットが崩れて把持部が露出したため、以降はガイドをフリー下降させてOP上部を洗浄した。
配管切替							-	-
本6	鉛直方向噴射	17.9	170.4	-400	-518	818	5	・斜め噴射によって解砕されずに残ったと想定される除去物（側溝に落ちたもの）を、鉛直方向噴射で解砕、除去した。
噴射終了							-	-

※1 終了時の離隔ガイドは、除去面と接する。模擬オーバーパック頭部を0とした場合の値であり、緩衝材厚さ300mmのため、開始時は+300mmと表示される。

表中青字表記は、予備試験で明らかになった課題に対する改良後の効果を示す。

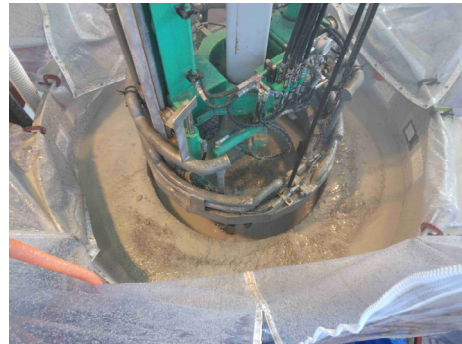
表 2.2-16 緩衝材除去の進行履歴（２）（フルスケール試験）

段階	内容	噴射時間 (min)	累積 噴射時間 (min)	開始時 ガイド位置 (mm) ※1	終了時 ガイド位置 (mm) ※1	推定 除去深度 (mm)	排水 バッチ	備考
本7	鉛直方向噴射	29.8	200.2	-518	-1048	1348	6	・ノズルの下降はオートメーション操作を基本とし、数分に1回の頻度でマニュアル下降させた。 ・揺動時に抵抗を感知した場合は、マニュアル操作によりガイドを若干上昇させてから再度噴射をおこなった。
改良した吸引配管接触部緩衝材の人力斫り 把持装置による模擬オーバーバック（模擬OP）把持							-	・斫り部は除去形状計測システムにより体積算出、評価する。 ・以降は模擬OPが転倒しないよう、把持した状態で噴射を続行した。
本8-1	鉛直方向噴射	19.3	219.4	-881	-1264	1564	7	・圧力降下を確認。ノズルの締め直しをおこない継続するが改善されず一時中断 ・延長噴射ノズルネジ部の破断を確認したため、標準噴射ノズルに切替えた。
委員向けデモ噴射実施							8	-
本8-2	鉛直方向噴射	30.0	249.4	-1216	-1533 ガイドの下限	2040 メジャー 計測	8	・噴射リングが下限に到達したため、噴射を中断した。 ・除去深度を計測したところ、4方向の平均で模擬OP頭部から-1,740mm（除去深度2,040mm）であった。
段取替え							9	・改良した3吋吸引配管の位置を水深5cmが確保できるように設置し噴射を継続することとした。 ・本8-2中にバキューム切り替えを実施したため排水。
本8-3	鉛直方向噴射	23.8	273.2	-1533	-1533 ガイドの下限	2065 メジャー 計測	10	・噴射リングは下限に到達しているため、吸引配管のみ下降させながら除去を継続した。 ・一定時間経過後に噴射を終了して除去深度を計測したところ、4方向の平均で模擬OP頭部から-1,765mm（除去深度2,065mm）であった。なお、模擬OP底部は模擬OP頭部から-1,905mm（除去深度2,205mm）である。
噴射終了							-	-

※1 終了時の離隔ガイドは、除去面と接する。模擬オーバーバック頭部を0とした場合の値であり、緩衝材厚さ 300mm のため、開始時は+300mm と表示される。
表中赤字表記は、フルスケールの除去試験で明らかになった課題である。



(a) 試験前



(b) 段階 1 終了



(c) 段階 2 終了



(d) 段階 3 終了



(e) 段階 4 終了



(f) 段階 6 終了



(g) 段階 7 終了



(h) 段階 8-2 終了

図 2.2-32 緩衝材除去の進行状況（フルスケール試験）

(5) フルスケール試験結果のまとめ

フルスケール試験は、本業務で整備した第二段階の緩衝材除去システムを用いて、目標とする20時間以内での緩衝材除去の工学的実現性を示すことを最大の目的と位置付けた。ここでは、除去時間、除去速度の観点でフルスケール試験を取りまとめ、評価した。また、緩衝材の除去量を正確に算出することは、遠隔操作で実施する緩衝材除去システムにおいて重要な情報と位置付けられる。緩衝材の除去量は、作業中の安全や作業終了の目安等になり得るからである。本年度は、密度計測と形状計測の2つの結果を用いて除去量（乾燥重量）を算出した。この2つの算出方法の適用性について予備試験の結果も踏まえて評価した。

(a) 緩衝材の除去時間、除去速度の評価

緩衝材の鉛直方向への除去に着目し、緩衝材の除去部上端深度と経過時間の関係を図 2.2-33 に、緩衝材の除去部上端深度と鉛直方向除去速度の関係を図 2.2-34 にまとめた。図 2.2-33 中のフルスケール試験の進行計画は、1回の揺動（110°）に要する時間を117.5秒、1回の揺動で除去する深さを55.7mm、即ち鉛直方向への除去速度は28.4mm/minとして算出したものである。

各段階のスタート時は除去速度が遅いが、これは噴射ポンプの起動から規定圧力の20MPaに上がるまでの時間を含めているためである。

鉛直方向への噴射時は、オートメーション操作によるフリー下降とマニュアル操作による下降を併用し、動作手順で計画した通りの下降速度を保つことを基本としたが、揺動途中で抵抗を感知し、反転機能が働いた場合、揺動を止めて少し装置を上昇させて再度噴射を続けるという手順を繰り返した。除去速度が計画の28.4mm/min未満となっている箇所は、この影響が大きい。

「段階6」開始時（経過時間152.5分）、除去深度が上昇しているのは、「段階5」で斜め方向噴射が終了して鉛直方向噴射に切り替えたものの、ペレット等が解砕されずに鉛直方向噴射の除去面に堆積したためである。この堆積物は、「段階3」の終了時ガイド位置から100mmほど上昇させて鉛直方向噴射を行い、解砕した。

「段階8-1」開始時（経過時間200.2分）、除去深度が上昇しているのは、「段階7」終了後に吸引配管接触部の緩衝材を人力で研り、この際に発生した塊状除去生成物が鉛直方向噴射の除去面に堆積したためである。「段階7」の終了時ガイド位置から150mmほど上昇させて鉛直方向噴射を行い、解砕した。

緩衝材の除去部上端深度と経過時間の関係（図 2.2-33）から、緩衝材除去システムを用いて5時間弱（273分）でフルスケールの緩衝材除去が可能であることが示された。フルスケール試験では、斜め方向噴射を2段階で行っている。1段階目の除去では、計画に対して若干時間を要した。2段階目の除去は、ペレット充填エリアにおいてペレットが解砕されずに鉛直方向噴射の除去面に堆積したため、計画に対して短い時間で除去が完了した。なお、ペレットが鉛直方向噴射の除去面に堆積したことによる除去作業に対する不具合は認められなかった。緩衝材の製作方法は様々であり、仮に今回ペレット充填したOP把持部周囲が結着した緩衝材（吹付け工法、撒出し転圧工法、など）であったとしても、1段階目の斜め方向噴射時の結着した緩衝材の除去時間を見る限り、大幅に時間を要することはないと考えられる。

緩衝材の除去部上端深度と鉛直方向除去速度の関係（図 2.2-34）を見ると、進行計画の除去速度（28.4mm/min）付近やそれを上回る速度が複数点見られる。これは、フルスケール試験の鉛直方向ノズル（トルネードノズル）の切削能力が、2021年度のノズル1本で実施した要素試験と同等の能力を発揮したことに他ならない。一方、本年度のフルスケール試験は一回しか試験することができず慎重に試験を実施したこと、予備試験結果を受けての対策が緊急対応であったこと等

が要因で、進行計画の除去速度を下回った点が複数存在したことも事実である。速度遅延の原因は明確であり、装置設計や装置の運用計画の面に対応可能である。

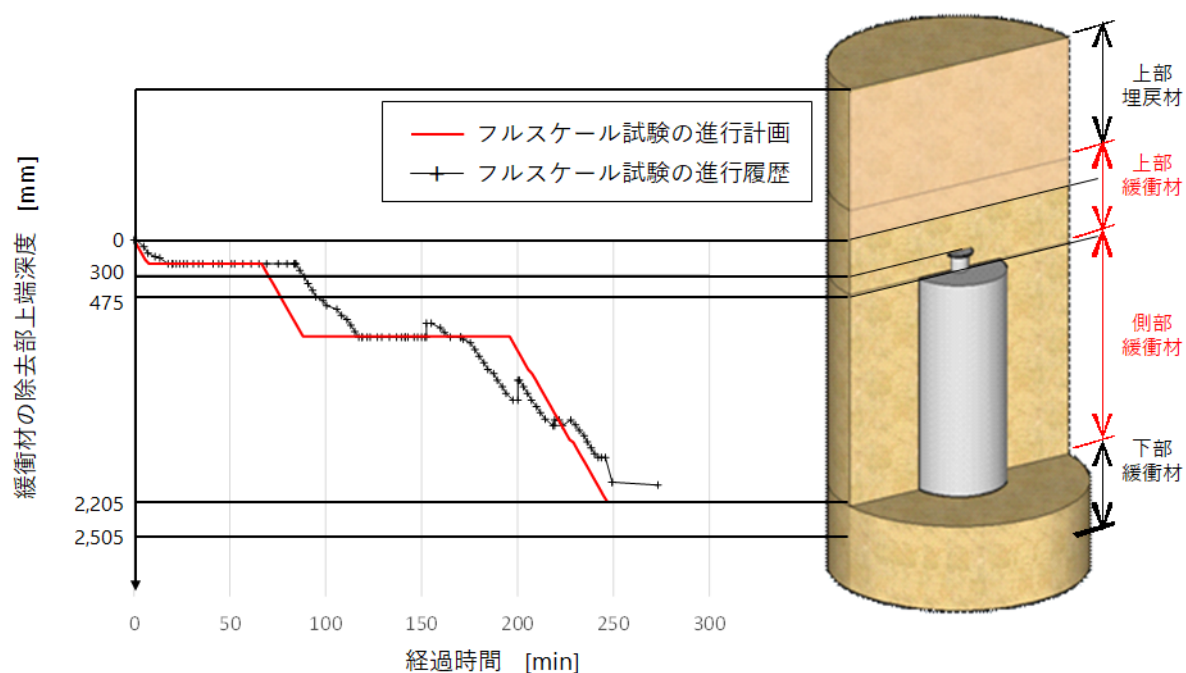


図 2.2-33 緩衝材の除去部上端深度と経過時間の関係（フルスケール試験）

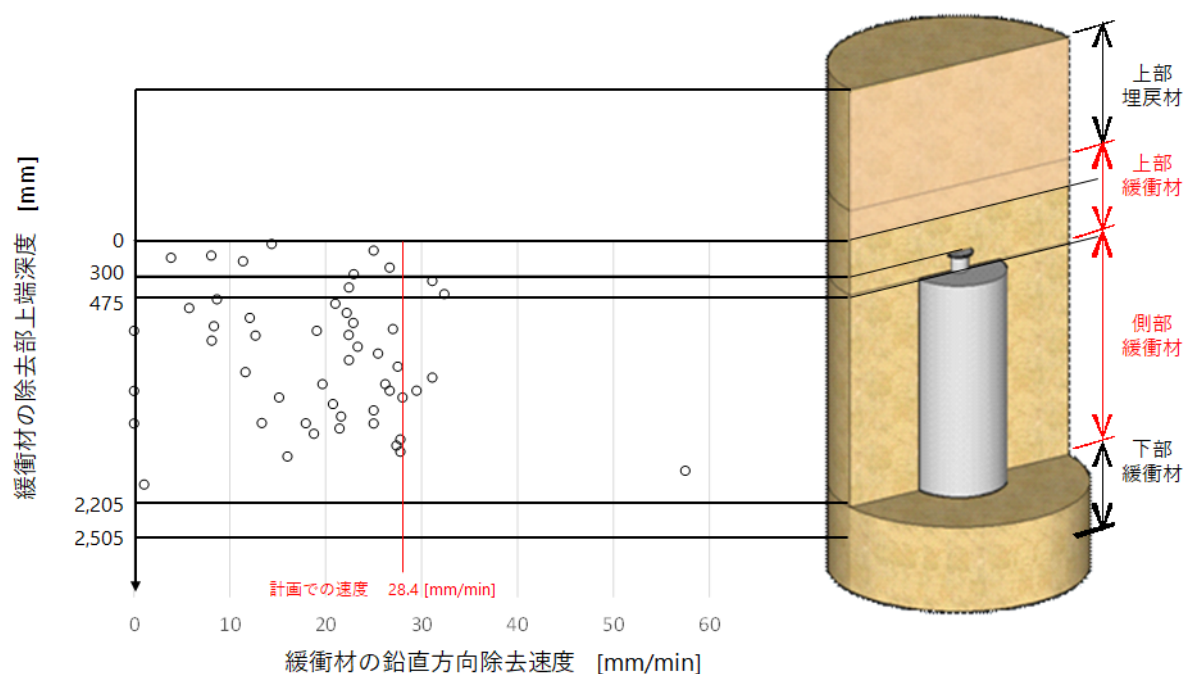


図 2.2-34 緩衝材の除去部上端深度と鉛直方向除去速度の関係（フルスケール試験）

(b) 緩衝材の除去量算出方法の評価

密度計測と形状計測の2つの結果を用いて算出した除去量(乾燥重量)を比較すると、図 2.2-35 のようになる。把持部周辺供試体の除去完了後の、形状計測システムから推定した除去量(乾燥重量)と比べ、密度計測結果から算出したバッチ5までの累計除去量(乾燥重量)は、若干少なく推定されている。これは、バッチ3、4、5において、隙間充填部分のベントナイトペレットが塊状除去物として吸引されてスラリー貯留槽に沈殿し、密度計測用のサンプリングに含まれなかったためと推測される(スラリー状除去物をサンプリングしているため)。

密度計測と形状計測の2つの結果を用いて算出した除去量(乾燥重量)は概ね一致しており、どちらの算出方法も精度よく算出できたと考えられる。ただし、上述のように密度計測は塊状除去物を計上していない可能性が、形状計測は液体の反射によって点群数が制限される可能性が考えられる。特別な制約がない限り、両算出方法によって除去量(乾燥重量)を管理・計測することが望ましい。

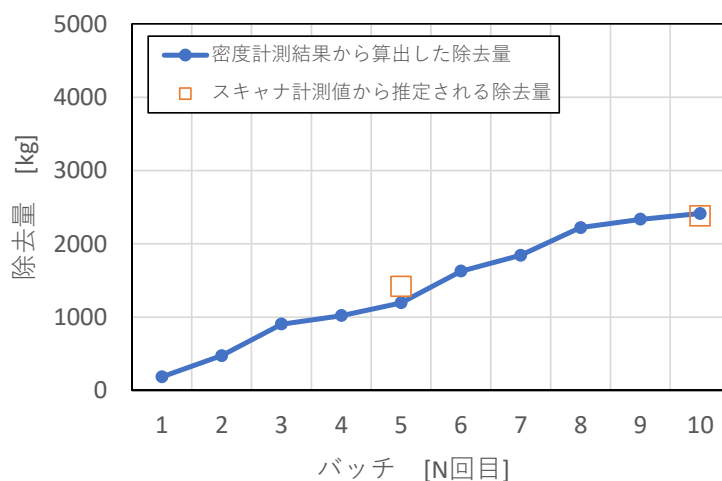
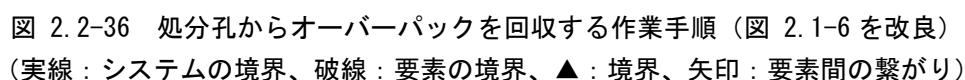


図 2.2-35 密度計測と形状計測の2つの結果を用いて算出した除去量(乾燥重量)の比較(フルスケール試験)

WJ 化により迅速化した緩衝材除去技術による緩衝材の除去に要する時間は、目標とした 20 時間の作業時間に対して 5 時間弱となり、過年度に整備した緩衝材除去システムの実績であった 77 時間を大幅に短縮できる見通しを得た。処分孔竖置き方式の緩衝材除去作業に対する、流体的除去技術の整備結果を総括し、回収手順上の緩衝材除去作業の技術の実現性、及び更なる実現性向上に向けた技術開発課題を整理する。

図 2.1-6 に示した廃棄体の回収（地下）の作業手順を、処分孔竖置き方式の回収手順にしたものを図 2.2-36 に示す。



作業の起点は、オーバーバック上部に厚さ 50 cm、側部と処分孔との間に厚さ 70 cm の緩衝材が施工されている状態である。上部緩衝材の厚さは、前作業である上部埋戻し材除去作業の結果であり、この残存する緩衝材厚さは、上部埋戻し材の除去技術の作業精度に依存する。上部埋戻し材の除去技術については、オーバーバックまで離隔があるため、通常の掘削技術の適用が考えられている。

安全な回収作業の実施のため、前後の個別作業の分界点を合理的に選択することが重要である。

WJ による除去作業時間の短縮は、同時に使用する塩水量、スラリー状の除去生成物の発生量の削減にも繋がる。噴射リングの消費水量は約 15 m³/h であったため、5 時間弱の作業では処分孔 1 つあたりの消費水量は約 75 m³ となる。発生するスラリーも同程度の量となり、噴射する塩

水と吸引したスラリーを逐次搬入出する作業の実現の見通しがある。これは、除去生成物の処理方法に、塩水リユース設備による原位置処理、地上または地下に設置した処理プラントでの処理など、技術的選択肢が増えることを意味しており、流体的除去技術の適用性向上に繋がると考えられる。

除去生成物の処理技術を具体化するため、塩水／真水それぞれのベントナイトスラリーの特性の把握、凝集剤の添加による固液分離特性の基礎データの取得などを進め、地下の空間的制約下での設備規模に応じた処理設備の具体化を進めることが重要である。

(3) 除去方法の選択肢

表 2.2-10 に示した要素試験で取得された噴射水の種類と除去効率の関係、緩衝材除去システムで採用した低压塩水による除去、本事業で実施した塩水 WJ による試験結果より、流体的除去技術には、表 2.2-17 に示す方式が技術的選択肢として得られたことになる。本事業の技術開発の主目的である回収作業の迅速化の観点では、塩水 WJ が最も作業時間が短く適用性が高い技術となる。一方、回収後の処分孔を再利用する場合など、使用した塩水の影響が懸念される際は、作業時間と周辺環境への影響の観点から真水 WJ の適用性が高くなると考えられる。

回収作業の迅速化以外の技術選択の評価項目を整備することで、最適な方式が選択できると考えられる。これらに加え、原位置の湧水を使用した WJ 方式も選択肢となり得ると考えられる。

表 2.2-17 緩衝材の流体的除去の技術的選択肢

噴射方式	(a) 塩水 低压噴射	(b) 塩水 WJ	(c) 真水 WJ
噴射水性状	4%並塩溶液	4%並塩溶液	真水
噴射圧	0.6 MPa	20 MPa	20 MPa
使用ノズル（下方※1）	直射	トルネード	トルネード
試験実施規模	フルスケール	フルスケール	一次元要素試験
処分孔 1 つあたりの 作業時間※2（飽和度）	78 時間（60%）	4~5 時間（80%）	5.2~6.5 時間（80%）
坑道内環境	良好	塩水・スラリーが 霧状に飛散	真水・スラリーが 霧状に飛散
消費水量※3	1,170 m ³	75 m ³	97.5 m ³
塩水リユース設備	必須	選択可	適用不能※4
適用例	地下水組成が海水の 場合の部分回収	処分孔の再利用を前提 としない全量回収	処分孔の再利用を想定 する全量回収
※1：オーバーバック側部の緩衝材除去用 把持部露出用の直射ノズルが別途設けられている ※2：上部緩衝材 50 cm、側部緩衝材 175 cm を連続除去した場合の正味の作業時間 ※3：単位時間あたりの消費水量を 15 m ³ /h とした場合の概算値 ※4：真水には固液分離促進効果が期待できないため			

(4) 全体回収作業時間に対する効果

緩衝材除去作業の大幅な短縮により、再開放後の処分坑道からのオーバーバック一体を回収作業に要する作業時間は、平均で 12 時間となった上部埋戻し材の除去から、オーバーバック搬出までの一連の作業時間の短縮は、全体回収作業時間の短縮に対しては直接的な効果ではなく、回収作業に投入する装置台数の合理化に貢献する。

2.2.9 今フェーズで得られた成果の総括

処分孔豎置き方式の回収作業の迅速化に向け、緩衝材除去作業を短縮する技術開発を実施し、以下の成果を得た。

- ・ 処分孔からのオーバーバック回収作業上のボトルネックである緩衝材の除去の迅速化に向け、整備済みの緩衝材除去システムを WJ 化した。目標とする時間を、回収作業工程の組立から、20 時間と設定し、技術開発課題の整理、優先順位付けを行い、効果的な整備を実施した
- ・ WJ 化により、緩衝材の除去に要する時間が 77 時間から 5 時間程度に短縮された。これにより、オーバーバック 1 体の回収作業時間の平均は、12 時間／体となる見通しを得た。更なる回収作業時間の短縮は、処分孔上部埋戻し材の除去やオーバーバック搬出に係る装置の高度化、作業工程の最適化が必要である。
- ・ 既存の緩衝材除去システムでは消費水量が 1,170 m³ と見積もられることから“塩水リユース設備”が必須であった。WJ 化による除去作業時間の短縮によって消費水量が 75 m³ 程度となる見込みであり、貯留タンクの縮小やタンク車による逐次供給方式など、システムの運用上の柔軟性が増した。これは、回収作業計画の具体化の他に、処分場の地下施設の設計上のスペースの配置等にも寄与する知見となる。
- ・ これまでの基盤研究における流体的除去の技術開発によって、塩水＋低圧噴射、塩水＋高圧噴射、真水＋高圧噴射の 3 つの選択肢の技術的実現性が示された。適切な技術を選択することで、地層処分事業の様々な動機、場面における回収の技術的実現性を見通しを得た。

2.3 処分坑道横置き・PEM 方式の回収技術の高度化

2.3.1 迅速化に向けた技術開発の進め方

処分坑横置き・PEM 方式では、幌延深地層研究センター（以下「幌延 URL」という）で処分坑道と PEM の間の隙間充填材の除去試験が小型バックホウとオーガアタッチメントの組合せで実施された（原環センター, 2020）。一方、除去作業に長時間を要したこと、隙間充填材の切削から搬出までのシステム化された方式ではなかったことから、実用化に向けては、除去作業の迅速化と装置のシステム化を主な目標とした技術開発が必要である。そこで、本事業では、PEM の回収作業への適用性が高い技術の選定、その技術に求められる要件の整理、技術開発課題の設定及び要素試験の実施、得られたデータを利用した隙間充填材除去装置の装置概念の具体化を実施した。

(1) 処分坑道からの PEM の回収作業における機械的除去技術

PEM の回収は、処分坑道と PEM の間の隙間充填材を撤去し、その後 PEM を回収する手順が合理的である。隙間充填材はベントナイト混合土と想定される。処分坑道に充填されたベントナイト混合土を撤去する技術としては、一般土木のトンネル掘削技術が参考となる。直径約 5m 程度の処分坑道に定置された PEM 一体当りの隙間充填材の体積は約 41m³ であるが、トンネル掘削工事の規模としても問題はなく、PEM を損傷させることなく隙間充填材の除去が可能と考えられる。したがって、横置き・PEM の回収作業における隙間充填材の除去技術としては、トンネル掘削工事で採用されている機械的除去技術を選択する。なお、処分坑縦置き方式のオーバーパック回収技術として WJ 技術が採用されているが、この場合は縦型の処分坑のみの比較的狭い空間を対象として 1 孔ずつ緩衝材の除去を行っている。一方、処分坑道横置き・PEM の場合は水平の処分坑道 1 本分の大きな空間が対象となるため、使用する流体や発生するスラリーが膨大となり、隙間充填材の除去技術としての適用性は低い。

(2) 隙間充填材に対する機械的除去技術の整備状況と課題

処分坑道横置き・PEM 方式の回収技術については、幌延 URL 地下 350 m 試験坑道において、機械的除去技術を用いた PEM と坑壁間の隙間充填材撤去の地下実証試験が行われた（原環センター, 2020.）。図 2.3-1 に実証試験の状況を示す。実証試験では、機械的除去技術として小型バックホウにオーガアタッチメント（φ20 cm）を取り付けた除去装置を使用した。隙間充填材はベントナイト混合土（クニゲル V1：ケイ砂＝50%：50%、含水比 15.8%、目標乾燥密度 1.6 Mg/cm³）である。実証試験の結果、約 0.01 m³ の除去時間が約 1 分であった。これより PEM 一体当たりの除去時間は約 68 時間となる。この時間は隙間充填材の除去時間としては長く、除去作業の迅速化は課題の一つである。

小型バックホウとオーガによる機械的除去技術については、地下施設的环境下において PEM 一体を対象とした実証試験で隙間充填材除去が可能であることを実証したものの、複数の PEM を連続して回収する場合への適用や PEM の回収時間の短縮のためには、処分坑道と PEM の間の狭隘な空間で隙間充填材を効率よく短時間で除去でき、除去生成物の搬出までの一連の機能を具備した機械的除去装置の開発が必要である。



小型バックホウによる切削状況



オーガーアタッチメント (φ20 cm)

図 2.3-1 幌延 URL における処分坑道横置き・PEM の回収実証試験の状況

(3) 機械的除去技術のシステム化までの手順

現行の処分坑道横置き・PEM 方式の処分坑道が埋め戻され力学プラグが設置された状態（以下「状態 B」という）を対象として、隙間充填材の除去作業を迅速化する除去装置の実現に向けて、処分孔縦置方式の緩衝材除去装置と同等の技術開発レベルにするために必要な開発プロセスを検討する。図 2.3-2 に処分坑道横置き・PEM のデッドエンド型処分坑道の状態 B の模式図を示す。

機械的除去技術のシステム化までの手順は以下の通りである。

- ① 機械的除去システムの要件定義
除去作業の工程を分割・整理し、必要な要件（作業・機能など）を定義する。
- ② 隙間充填材除去に対する機械的除去方法の選択
必要な要件を備えた除去方法・装置に対して考慮すべき制約や条件を検討する。
- ③ 隙間充填材除去装置のアウトラインの設定
①、②から、隙間充填材除去装置のアウトラインと技術開発の優先順位を検討する。
- ④ 装置設計に必要なデータの取得
技術開発の優先順位にしたがって要素試験を実施し、装置設計に必要なデータを取得する。
- ⑤ 装置の概念の具体化
③、④を繰り返し、装置概念を具体化し、実用的な装置の実現へ繋げる。



図 2.3-2 処分坑道横置き・PEM 方式（デッドエンド型）における状態 B の模式図

(a) 機械的除去システムの要件定義

隙間充填材の除去技術に関する作業は、図 2.3-3 に示すように、隙間充填材の「解砕（切削）」、「捕集・回収」、「積み込み」、「搬出」の四つの工程で構成される。ここで、搬出作業は既存の設備で実施できるため、隙間充填材の機械的除去装置が具えるべき要件は、隙間充填材の「解砕（切削）」、「捕集・回収」、「積み込み」である。

① 解砕（切削）

PEM と処分坑道との隙間に固着した隙間充填材を解砕し、隙間から取り出せる状態にする工程である。

② 捕集・回収

隙間充填材を解砕して除去生成物になった後、除去生成物を後段の積み込み部へ送るために捕集・回収する。捕集・回収する方法の一つであるバキューム方式では、吸引ホースで真空ポンプに接続された吸引口で除去生成物を捕集し、吸引ホースの途中に設置された分離タンクで除去生成物を回収する。

③ 積み込み

回収した除去生成物を坑道外へ搬出するための準備の工程である。ベルトコンベヤや搬出用のベッセルへの積み込み等が相当する。

④ 搬出

除去生成物を処分坑道の外へ搬出する工程となる。除去生成物を積載した車両、またはベルトコンベヤによる連続的な搬出も含まれる。ただし、これ以降の工程は一般土木分野における土質材料の移送手段の適用が可能であるため、本開発の対象外とした。

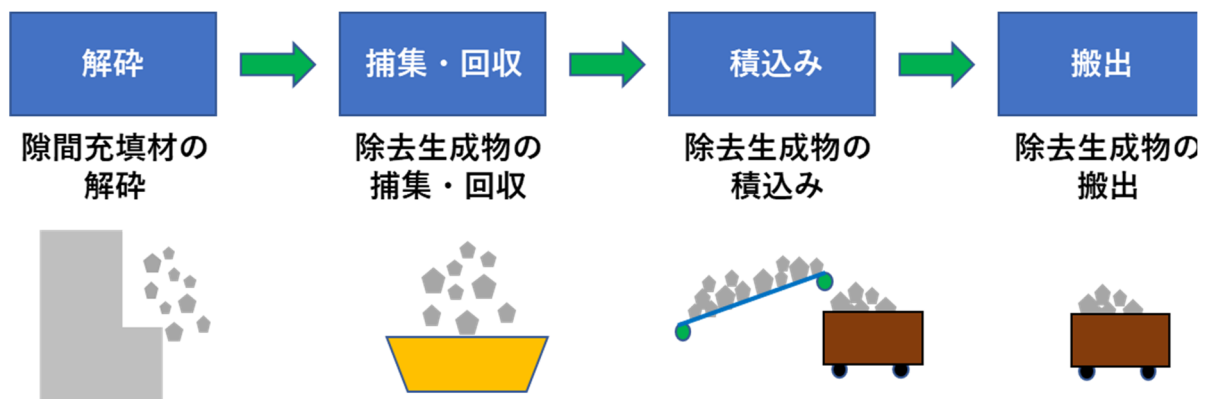


図 2.3-3 除去技術に関する作業を分割・具体化した概念図

(b) 隙間充填材除去に対する機械的除去方法の選択

「(a)機械的除去技術のシステムの要件定義」で示した要件を備えた、隙間充填材除去装置の開発に当たっては、必要となる装置・設備が処分坑道の狭隘な空間に配置されるため、その動作範囲や性能に制約がある。また、装置の一部または全部が処分坑道と PEM の間のさらに狭隘な空間に配置されることも考えられるため、機器の形状寸法や性能のバランス等から機器の選択を行うなどが必要となる。隙間充填材はベントナイト混合土が想定されるが、その配合は確定していない。隙間充填材が具体化した際に、技術の適用性の評価や作業時間の試算に資するため、切削時の機械的除去特性と隙間充填材の土質材料特性の関係も明らかにしておくことが重要である。

(c) 隙間充填材除去システムのアウトラインの設定

(a)と(b)から、処分坑道の空間的な制約を考慮して、隙間充填材除去システムのアウトラインを描き、必要な機能を抽出して技術開発の優先順位付けを行う。

(d) 装置設計に必要なデータの取得

技術開発の優先順位に従い、装置の構成要素、機能を具体化するために必要な情報を要素試験等で取得する。

(e) 装置の概念の具体化

(c)隙間充填材除去システムのアウトラインの設定から(d)装置設計に必要なデータの取得を繰り返すことにより、装置概念を具体化し、実用的な装置の実現へ繋げていくことができる。

(f) 実機による機能確認

上記の作業を経て実際に装置化し、実証試験等を実施して機械的な方式による隙間充填材除去システムの技術的実現性を提示する。

以上に加え、隙間充填材の仕様が具体化した際に、技術の適用性の評価や作業時間の試算に資するため、ベントナイト混合土である隙間充填材の機械的除去作業とベントナイト混合土の材料特性の関係を明らかにしておく。

(4) 本事業の実施範囲

本事業では、(3)に挙げた開発プロセスのうち、(a)～(c)及び(d)と(e)の一部を実施した。

2.3.2 処分坑道横置き・PEM 方式の回収作業の迅速化における機械的除去技術

(1) 処分坑道横置き・PEM 方式における PEM 回収に必要な技術

表 2.3-1 に処分坑道横置き・PEM 方式において、“状態 B”からの PEM 回収に必要な作業の順序と技術開発課題としての優先度を示す。PEM の回収作業は処分坑道の入り口に設置された力学プラグの撤去から着手される。RC 構造物である力学プラグは、狭所での作業ではあるが通常の解体技術によって解体可能である。次は処分坑道の再解放であるが、PEM 回収のための隙間充填材の除去及び PEM の回収（把持及び処分坑道からの搬出）が処分坑道の再解放に該当する。隙間充填材の除去は、PEM の回収作業のための特有な技術であり、技術開発課題の優先度が高い。PEM の把持及び処分坑道からの搬出については、PEM の定置作業の逆の作業であるため、定置技術、経験、ノウハウを活用して対応可能と考えられる。その後の地下施設から地上施設までの搬出から代替管理方策への移行準備については、PEM の定置の際の技術や一般産業の技術で対応可能である。

したがって、処分坑道横置き・PEM 方式における PEM 回収において、技術開発課題として最も優先度が高い技術は隙間充填材の除去技術である。

表 2.3-1 PEM 回収における回収作業の順序と技術開発課題としての優先度

回収作業の手順	技術開発課題としての優先度
力学プラグの撤去	狭所での RC 構造物撤去、通常の解体技術の応用
坑道の再解放（既設の処分坑道を再利用）	隙間充填材の除去及び PEM 回収作業が兼ねる
隙間充填材の除去	PEM を露出、回収作業に特有の技術、優先度が高い
PEM の把持及び処分坑道からの搬出	PEM を搬送する技術、定置と同等の技術と想定
地下施設から地上施設までの搬出	PEM を搬送する技術、定置と同等の技術と想定
地上施設での保管・管理	核種漏洩等の危険や技術上の問題はない
代替管理方策への移行準備 （例：ガラス固化体の取り出し）	緩衝材、オーバーパックスの開封作業、一般産業の技術の応用

(2) 隙間充填材の除去技術の迅速化の目安

隙間充填材の除去作業については、幌延 URL での実証試験で PEM 一体当たりの除去時間が約 68 時間とされており、除去作業の迅速化が開発課題となっている。そこで、“状態 B” から PEM の回収までにかかる作業時間の分析から、隙間充填材の除去作業を迅速化するための目安（隙間充填材除去の目標時間）を設定した。

処分坑道横置き・PEM 方式において“状態 B”から回収に必要な作業手順を図 2.3-4 に示す。なお、隙間充填材の除去には「隙間充填材除去-1：PEM を拘束している隙間充填材との縁切り」と「隙間充填材除去-2：PEM の回収装置が必要とする動作環境の構築」の二段階の除去作業を想定したものである。「PEM の回収装置が必要とする動作環境の構築」の作業時間については、回収装置の仕様（除去に関する条件）に依存するため現時点で推定できないことから、ボトルネック抽出のための隙間充填材除去の作業時間は 12,000 時間を代表値として取り扱う。

隙間充填材除去作業と PEM の回収作業はそれぞれの装置を入れ替える必要があるため、処分坑道ごとに並行して作業する場合、図 2.3-5 に示すように作業を 3 分割することが合理的であると考えられる。また、処分坑道ごとに「プラグ撤去から隙間充填材の除去」、「PEM の回収」を並行して作業を進め、それぞれの作業時間を同程度にすることができれば、最も効率的である。そこで、各作業時間を分析し、ボトルネックとなる作業を抽出して、それを解消するための目標作業時間を設定した。図 2.3-6 に分析の対象とした処分坑道横置き・PEM 方式の処分施設のレイアウトを示す。

処分坑道 1 本分のプラグ 1 か所（41.3 m³）の撤去と埋戻し材（330 m³）の除去に要する時間は、地上への運搬も含めて 112 時間と試算した（図 2.3-7 参照）。これに、坑道 1 本分の隙間充填材（8,640 m³）の除去及び地上への運搬時間の代表値とした 12,000 時間を足すと、処分坑道 1 本あたりのプラグ撤去から隙間充填材の除去までは、合計 12,112 時間となる。

図 2.3-8 にそれぞれの作業時間をまとめて比較したものを示す。PEM の回収に要する時間については、1 本の処分坑道に定置された 209 体の PEM を処分坑道から回収して地上への輸送用トラックに積み替えるまでの時間が、全体で 1,045 時間、PEM 一体あたりで 5 時間となる。同図に示すように、PEM 一体当りの作業時間で比較すると、回収に要する時間が 5 時間に対して、プラグ撤去から隙間充填材の除去に要する時間は 58 時間となった。58 時間のうち 57.4 時間（12,000 時間/209 体）が隙間充填材の除去に要する時間であることから、この作業がボトルネックとなっている。そこで、このボトルネックを解消するための隙間充填材除去作業迅速化の目標時間として、PEM 一体当たりの隙間充填材の除去時間を 5 時間未満と設定した。ただし、この目標時間の達成は難易度が高いため、処分坑道縦置き方式で目標設定した緩衝材除去作業の目標時間 25 時間

を第二の目標時間として設定することとした。

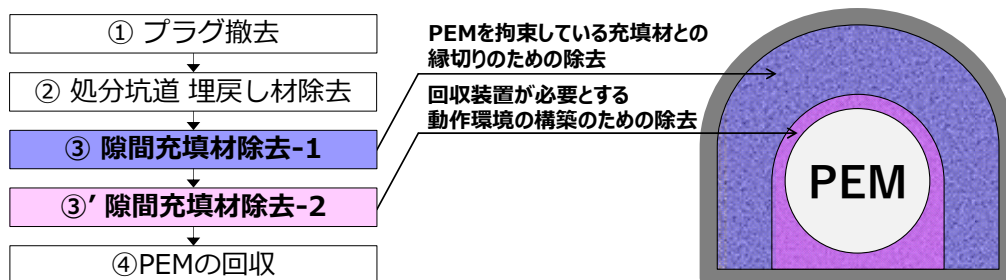


図 2.3-4 処分坑道横置き・PEM方式の回収作業手順

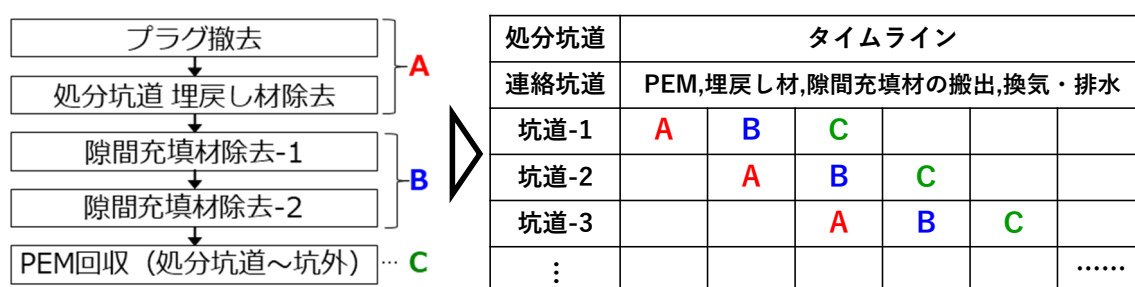


図 2.3-5 各処分坑道のタイムライン（処分坑道横置き・PEM方式）

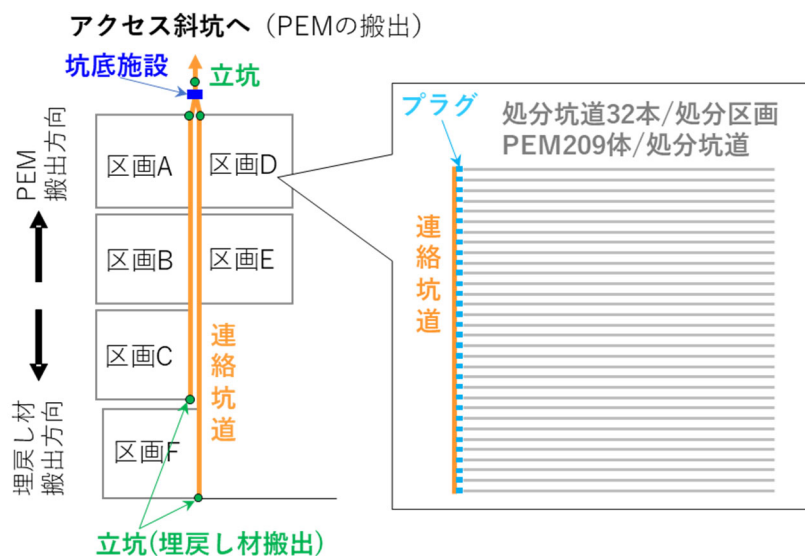


図 2.3-6 処分坑道横置き・PEM方式の処分施設（デッドエンド型）のレイアウト

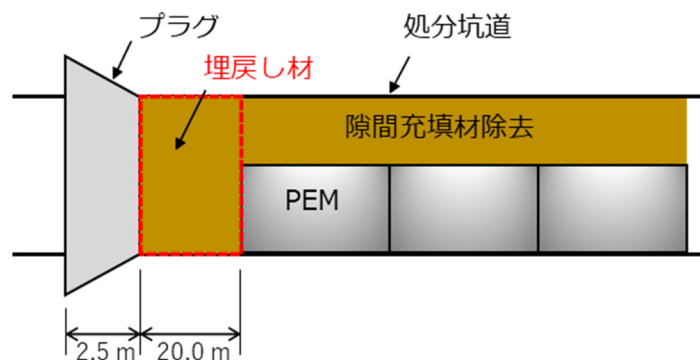


図 2.3-7 想定したプラグの厚みと処分坑道の埋戻し範囲

【プラグ撤去～隙間充填材除去】

プラグ撤去(1式),埋戻し材除去(330 m³)
112時間

隙間充填材の除去(8,640 m³)
12,000時間

処分坑道1本あたりの作業時間
12,112時間

PEM 1体に要する作業時間
12,112時間/209本=58時間/体



ボトルネックとなる作業
PEM回収の作業時間と
同程度とするために
**目標作業時間を
5時間/体以内とする**

【PEM回収】

PEM(209体)を坑底施設まで運搬する時間
1,045時間

処分坑道1本あたりの作業時間
1,045時間

PEM 1体に要する作業
1,045時間/209本= 5時間/体

図 2.3-8 処分坑道横置き・PEM方式のボトルネック抽出とPEM 1体当りの目標作業時間

(3) 除去技術に対する処分場の施設側からの制約

本業務における隙間充填材の除去技術の開発では、処分坑道横置き・PEM 関連のサイト条件や仕様等が未定であるため、検討に当たっては、以下の仮定や前提条件を設定した。

処分坑道としては、新第三紀堆積岩類を対象とした断面を使用した。回収時の処分坑道及び PEM は設計通りの形状、配置であると仮定した。

「2.3.2(2)隙間充填材の除去技術の迅速化の目安」においては、隙間充填材の撤去時間や PEM の回収時間を、隙間充填材の地上でのダンプトラックの走行速度や輸送距離等を仮定して算定している。処分坑道の再解放時に除去生成物を地上まで輸送する際には建設・操業時の既存設備を利用することから、その能力によっては PEM 回収の全体作業時間の短縮に影響を与える可能性がある。

隙間充填材除去装置の待機場所やメンテナンスエリアの必要面積、設備については検討していない。そのため、場合によっては地下坑道の拡張や追加が必要となる。

2.3.3 隙間充填材除去システムの要件定義

(1) 隙間充填材除去装置の一連の動作の具体化

隙間充填材除去装置の設計要件、機能・性能などの設定に資するため、手順・内容を具体化する。

- ・待機：指定された場所に、出番まで留置

隙間充填材除去装置は指定された駐機場所に待機し、施工計画にしたがって作業場所まで移動し除去作業を行う。待機時間を利用してメンテナンス等を行うことが想定されるため、待機場所の広さは同時に駐機する台数やメンテナンスに必要なスペースを考慮して決定される。待機場所の位置は作業場所である処分坑道までの移動距離が短いほうが望ましい。

- ・入場：待機場所から作業場所までの移動
移動距離、移動経路上の障害、坑口からの距離、走行速度、入替えに関連する。
- ・準備：入場後、作業に必要な前準備
入場直後や作業中の盛替え（一掘進長ごとの段取り）等を行う。
- ・作業：隙間充填材の除去、装置・設備に主として求められている行為の実行
装置の切削・排土能力、除去速度
- ・確認：行為の完了の判断
逐次方式では“除去作業完了”、一括方式では、“次の掘進への移行の是非”の確認が必要である（次項参照）。
- ・始末：後続の作業のための処置
- ・退場：作業場所から待機場所までの移動（※入場と同じ）
- ・メンテナンス：パフォーマンスの維持
装置の運用計画、装置台数の具体化に関連する。

(2) 隙間充填材除去装置の基本コンセプト

デッドエンド型のレイアウトに適用する、隙間充填材の除去と PEM の回収は以下の 2 通りの方式が考えられる。

- ・逐次方式：隙間充填材の除去と PEM の回収を PEM 一つ一つに対して繰り返す方式
- ・一括方式：複数本の PEM または処分坑道 1 本分全ての PEM の隙間充填材の除去を行い、その後 PEM を回収する方式

隙間充填材の除去作業と PEM の回収作業ではそれぞれの装置の入替えが必要になるため、逐次方式では、PEM 一体ごとに装置の入替時間が発生する。一方、一括方式では一度の除去・回収作業で複数本の PEM を対象としていることから、一括方式は逐次方式に比べて装置の入替回数が少なくなり、工期の短縮が期待できる。二つの方式の装置形状のイメージを図 2.3-9 に示す。

逐次方式では、PEM 一体分（3.356 m）の隙間充填材を除去するため、切削・捕集装置のみが処分坑道と PEM の間に挿入できればよく、その他の装置は PEM がない状態の処分坑道に設置することができる。一括方式で施工する場合の隙間除去装置は、複数の PEM を残置したままの状態でも隙間充填材の掘削と排土、前進を繰り返すこととなるため、装置は PEM と処分坑道の間の逆 U 字型の空間に配置する必要がある。処分坑道の坑口まで搬出した除去生成物は従来の方法（設備）で処分坑道外へ搬出可能である。

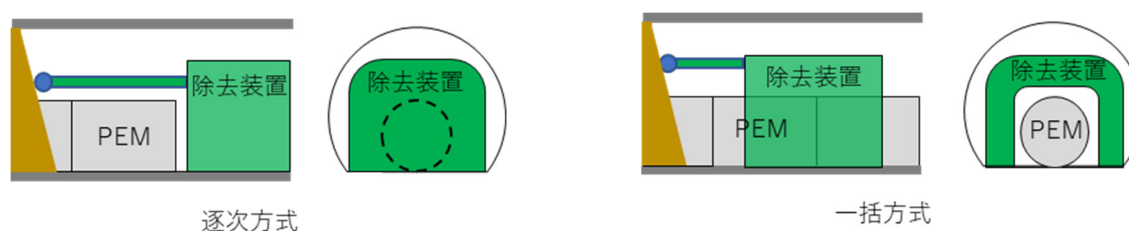


図 2.3-9 逐次方式及び一括方式の装置形状のイメージ

(3) 一括方式の除去装置が成立するための要件

以下に一括方式の隙間充填材除去装置成立するための要件を示す。①～③は一括方式でも逐次方式でも共通の要件になり得る。

① 除去により生じる空間に装置・設備が納まること（装置断面形状の制約）

一括方式では、複数（最大で処分坑道 1 本分）の PEM の隙間充填材の除去を行うため、切削アームとその後続の一連の装置全体が PEM と処分坑道の隙間に納まる必要がある。逐次方式では、切削アームを PEM と処分坑道の隙間に納めることができれば、その他の装置は PEM のない処分坑道に設置できる。したがって、装置全体を処分坑道と PEM の間に納めることが困難または収めることができて要求性能を満たせない場合は、逐次方式を選択することとなる。

装置全体が処分坑道と PEM の間に納まるかどうかに関連する因子は以下のとおりである。

- ・装置の最外寸：処分坑道内空、孔壁に残存する隙間充填材の厚さ、余裕代
- ・装置の最内寸：PEM 外寸、PEM に付着する隙間充填材の厚さ、余裕代
- ・装置の足もと：坑道の路盤の状況、路盤に残存する隙間充填材・除去生成物の厚さ、状態

※後続の「除去工程 2（仕上げ）」、「PEM 回収」の装置寸法とも関連

（最も空間を要求する設備、装置に依存）

② 「①」の空間を実現できる能力を有すること（除去範囲に対する要求）

上記①の処分坑道と PEM の間の空間は、装置自身が切削・排土を行って構築するため、隙間充填材除去装置は、切削・排土を繰り返して、装置全体が通過できる空間を構築できることが必要である。装置の設計の観点からはできるだけ広い空間を確保したほうが有利であるため、処分坑道の壁面や PEM 鋼殻の際まで除去できれば有利であるが、壁面との接触や PEM 本体を損傷させるリスクを考慮する必要がある。なお、装置の監視・制御を高度に行い、装置の動きを工夫する等で上記のリスクを低減させ、掘削で得られた空間を最大限に利用する方法も考えられる。

③ 「②」で発生した“除去生成物”を後方に排出できること（排土能力に対する要求）

「②」で生じた除去生成物を後方へ排出する機能が必要である。そのためには、排土設備には除去生成物の発生量に応じた適切な排土能力が要求される。また、除去生成物を取りこぼしなく捕集して排土設備へ受け渡すことが重要である。取りこぼしが多くなって処分坑道の路盤に堆積すると装置の走行路面に不陸が生じる。図 2.3-10 に示すように取りこぼしによる不陸が大きくなって影響が無視できなくなると、一旦作業を中断して不陸を解消する作業が必要になり、一括方式での隙間充填材除去が困難になる。

取りこぼしを少なくするには、除去生成物の発生・飛散状況を考慮した捕集方法・設備の工夫や取りこぼした除去生成物の回収方法を確保しておくことが必要となる。取りこぼしによる路面の不陸については、その許容量（装置本体の位置のズレに対する切削範囲の補正能力）を予め設

定しておく必要がある。

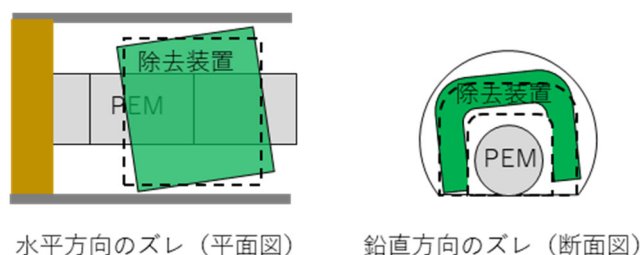


図 2.3-10 路面の不陸による除去装置への影響の例

④ 連続的な動作・作業を妨げる恐れが無いこと（パフォーマンス維持のメンテ、調整の頻度）

隙間充填材除去作業は、坑道壁面の剥離、PEM のズレなどの外的要因を除いて、所定の作業を連続して実施できることが求められる。ここで対象とするのは、除去装置自体によるもので、合理的に対策を講じて、なお残る原理的に避けることができないものである。装置の故障・破損などの不具合は含まない。表 2.3-2 に隙間充填材の除去作業において、連続的な動作・作業を妨げる項目、課題、要因と対応を示す。要因によっては要求される作業効率（時間当たりの作業量）が原理的に実現できない場合もあり得る。

表 2.3-2 連続的な動作・作業を妨げる項目・課題・要因・対応

項目	課題	要因	対応
切削	効率の低下、切削不能状態の発生	ベントナイト系混合土である隙間充填材の切削でのビットの摩耗	消耗品の交換頻度
		切削機構への除去生成物の付着の蓄積	メンテの頻度
		連続的な切削作業によるピットの過熱	クールダウンの頻度
排土	効率の低下、排土不能状態の発生	排土機構自体の原理上の能力が、除去生成物の発生に対して不足	排土が作業を律速
		排土機構への除去生成物の付着の蓄積、最終的に閉塞	メンテの頻度
		取りこぼし対策の付加装置の能力の不足、最終的に前進不能	作業中断、装置メンテ
装置の過熱	閉鎖空間での過熱（電動モーター、作動油）に対する排熱能力の不足		クールダウンの頻度

除去装置の消耗品の交換、メンテナンスは除去作業を中断し、所定のメンテナンスエリアまで装置を移動させて行うことが予想される。そのため、消耗品の交換やメンテナンスの所要時間・頻度、実施するタイミングによっては、作業速度、作業計画に影響を与えることとなる。表 2.3-3 に消耗品の交換、メンテナンスなどの間隔と逐次方式及び一括方式の除去作業への影響を示す。除去装置の消耗品の交換やメンテナンスの所要時間・頻度によっては、予備機を用意して除去作

業の中断時間を極力短縮するような運用方法を検討することも有効と考えられる。

表 2.3-3 消耗品の交換、メンテナンスなどの間隔と除去作業への影響

消耗品の交換、メンテナンスなどの間隔	除去作業への影響
PEM 一体分を除去するよりも短い	逐次方式ですら PEM 一体の除去作業が途中で中断され、メンテナンスなどの時間を要する
PEM 一体分 + α を除去する程度	逐次方式は成立するが、PEM 2 体分以上でなければ一括方式は成立しない
PEM 複数体分を除去する程度	一括方式では、連続的に除去した PEM の数に応じて、処分坑道からの装置の出し入れ時間とメンテナンスなどの所要時間が削減可能となる
処分坑道 1 本を除去するより長い	一括方式の施工効率が最も高い状態となる

⑤ 作業安全性が確保できること（遠隔操作への合理的な対応）

隙間充填材除去装置の設計に当たっては、危険源の除去や危険源への接近不要化など機械及び制御システムの適切な設計が必須となる。また、安全防护としてインターロックや非常停止機能、信号・警報装置などが必要となる。

処分坑道横置き・PEM 方式における隙間充填材除去の作業安全にかかわる作業環境に関して、は、ガラス固化体からの放射線と熱の影響が挙げられる。処分坑道に定置された PEM の表面から 1 m の距離における空間線量率は、定置の時点において $1 \mu\text{Sv/h}$ よりも低い（NUMO, 2021）、作業員に対する放射線防護の観点からは遠隔操作が望ましい。

PEM の温度は処分坑道への定置後約 20 年で最高温度 83.2°C に達し、100 年程度で 67°C 程度になる（NUMO, 2021）。そのため、隙間充填材除去作業時に PEM が露出した処分坑道内は、高温、高湿度になっていると予想され、作業員が現場で作業する環境としては非常に厳しい。

以上より、処分坑道横置き・PEM 方式における隙間充填材除去作業は、作業員が原位置で従事するのではなく遠隔操作で実施することが必要となる。

2.3.4 隙間充填材除去システムのアウトライン

実際に装置最前面で隙間充填材を切削する部分を具体化し、PEM と処分坑道との間で動作する装置全体のアウトラインを設定する。このアウトラインを基本に要素試験等を通して装置具体化を進める。

(1) 隙間充填材を解砕する方式の選定

機械的除去装置を検討するにあたり、地下の狭隘な環境でベントナイト混合土を解砕する作業に対して最も適用性が高いと考えられる、一般土木分野におけるトンネル掘削方式を調査した。一般土木分野におけるトンネル掘削方式は以下の通りである。

- ・自由断面掘削方式
 - ブーム掘削機（掘削部：ロードヘッダ、ツインカッター）
 - バックホウ
- ・固定断面掘削方式
 - TBM 工法

シールド工法

適用地質に着目すると、ベントナイト混合土である隙間充填材の性状に近いと考えられる軟岩、未固結地山に適用性がある掘削方式は、自由断面掘削方式のロードヘッダ等のブーム掘削機と固定断面掘削方式のシールド工法が挙げられる。これらの切削方式の切削部分で隙間充填材の切削への適用を考慮した切削部分の例を図 2.3-11 に示す。また、これらの掘削方式をベースに、隙間充填材の機械的除去装置を具体化した装置概要を図 2.3-12 と図 2.3-13 に示す。



自由断面掘削方式



固定断面掘削方式

図 2.3-11 自由断面方式と固定断面方式の切削部分の例

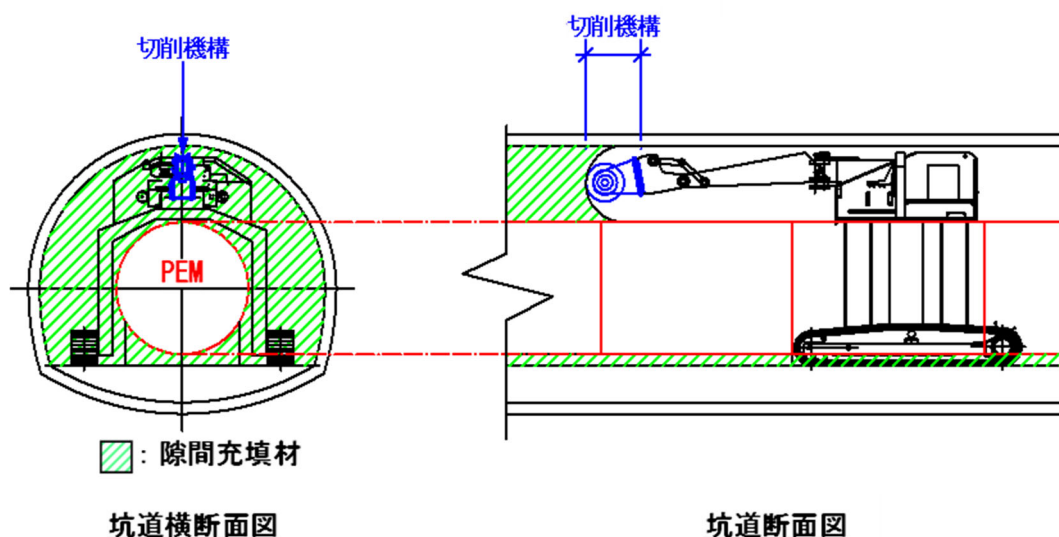


図 2.3-12 自由断面掘削方式の機械的除去装置概要図

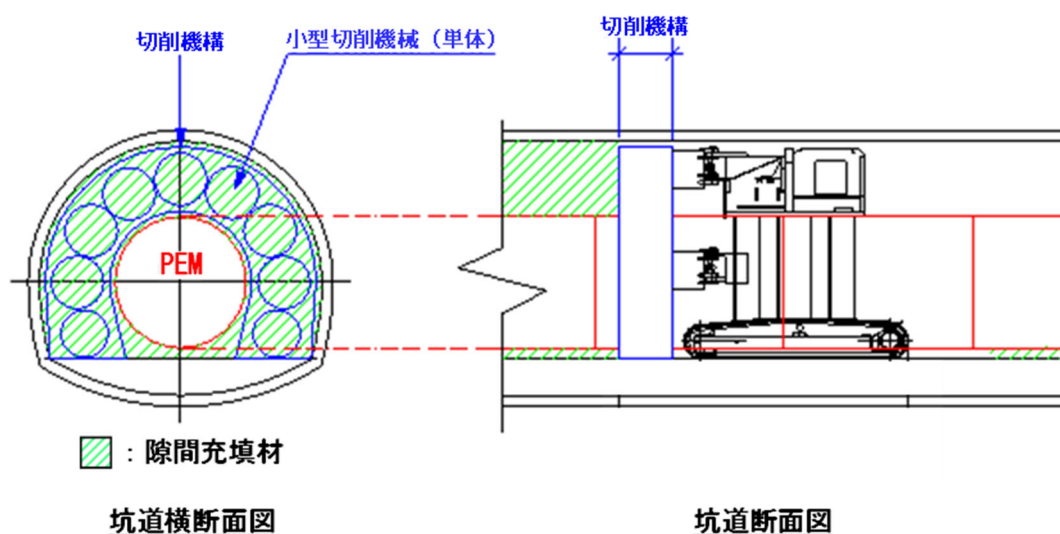


図 2.3-13 固定断面掘削方式の機械的除去装置概要図

固定断面方式は、サイズの異なる複数の切削機構を配置することにより、中央の PEM を避けつつ、坑道断面形状に合わせた連続掘削を実現することができる。全体の構造が PEM を跨いで全断面掘削方式で掘り進めるため、連続掘削が可能となることによる回収作業速度の向上が期待される。これに加えて坑道の形状に合わせた掘削断面形状にできることから、隙間充填材の残存が少ないこと、切削範囲が固定されるため PEM と接触するリスクを低減できることがメリットとして挙げられる。また、ビット以外の切削機構も装着することが可能であるため、隙間充填材の性状に応じた切削機構を柔軟に選択することが可能である。デメリットとしては、複雑な機構であることや排土設備が必要であることなどから、開発コストが高くなる可能性があることが挙げられる。

自由断面方式は、坑道内の隙間充填材に対してヘッダをアームの届く範囲で動かして切削する機構であり、門型のベースマシンに取り付けられ PEM を定置したまま連続して隙間充填材を除去できる。自由断面掘削であるので除去範囲の自由度が高いことがメリットとして挙げられるが、一方で PEM と接触する可能性があることがデメリットとなる。開発コストについては、既存の自由断面掘削機の仕組みを踏襲し、切削部分を軟岩用からベントナイト混合土用に特化したものに変更することを基本とすれば、相対的に低くなると考えられる。

(2) 解砕方式の選定

絞り込んだ 2 方式を対象として、隙間充填材を模擬したベントナイト混合土を切削する要素試験を実施した。図 2.3-14 に自由断面方式と固定断面方式の試験結果のうち切削刃への付着と除去生成物の状況を示す。試験結果から、いずれの方式でも切削不能となるような大きな負荷は生じなかったものの、自由断面方式は固定断面方式に比べて除去生成物のサイズが小さいことから後続する排土機構への連携性を念頭に、切削機構には自由断面方式を選択した。また、自由断面方式は切削部を付けたアームを操作するため、様々な断面形状への柔軟性が高いこともメリットである。除去生成物の排土方式は、2019 年度の知見からバキュームによる吸引方式を選択した。

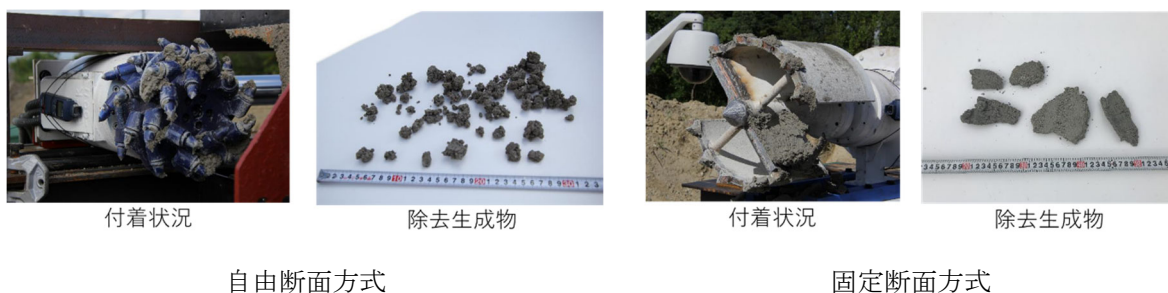


図 2.3-14 自由断面方式と固定断面方式の切削試験結果（切削刃への付着状況と除去生成物）
（ベントナイト混合率 50%、乾燥密度 1.66 Mg/cm³、有効粘土密度 1.21 Mg/cm³、含水比 22%）

(3) 装置のアウトラインと中核を担う除去ユニット

2.3.3 隙間充填材の要件定義と上記解砕方式の選定から、装置のアウトラインを図 2.3-15 により想定した。本アウトラインは、複数の PEM の周囲の隙間充填材を連続して除去できるように、装置は PEM を跨ぐ構造となっている。装置の先端部分は隙間充填材を切削・捕集する部分である。その後真空ポンプで除去生成物を吸引してタンクに分離・回収する装置が続き、最後は搬出装置への積込み部である。これらは類似する装置が存在しないので、既存のコンポーネントを組み合わせたものであり、隙間充填材の除去に適用させるためには、処分坑道と PEM の間の狭い空間に配置可能で所定の能力を備えたコンポーネントを開発する必要がある。コンポーネントの中で隙間充填材の切削・捕集部は本アウトラインの中核部分であるため、隙間充填材の切削方法及び除去生成物の捕集方法の開発は最も重要である。したがって、隙間充填材除去技術の開発は、機械的除去技術の主要な要素技術である切削・排土機構（除去ユニット）の成立性の検討から着手する。

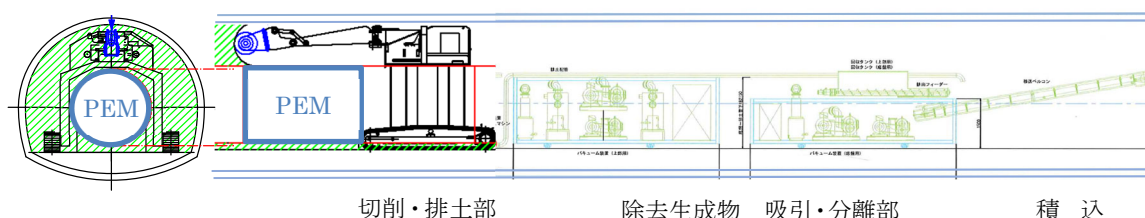


図 2.3-15 処分坑道横置き・PEM の隙間充填材除去システムのアウトライン

(4) 全断面除去に必要な付帯設備（路盤上の隙間充填材の除去）

処分坑道横置き・PEM 方式の処分坑道では、PEM は処分坑道中央の所定の位置に定置されている。処分坑道と PEM の間の隙間充填材の除去作業では、除去対象物の断面形状が終始同一で、処分坑道が直線状であることから、除去作業は一定の作業手順の反復となる。これらは、隙間充填材除去システムの遠隔化、省力化、自動化にとって有利な条件となる。

ただし、図 2.3-15 に示すように隙間充填材除去システムは隙間充填材を除去した路盤を走行して奥へ進んでいくため、路盤上に除去しなかった隙間充填材や回収できなかった除去生成物があると、除去装置のタイヤやクローラなどが除去生成物などに乗り上げ、図 2.3-10 に示すように路面の不陸による除去装置への影響が懸念される。具体的には、除去装置は本来の想定された位置からの水平・鉛直方向のズレやネジレ現象により、PEM や坑壁への除去装置の接触や除去作業の中断が考えられる。

これらを防止するためには、①除去ユニットを巧みに制御し、処分坑道の路盤を切削しないように隙間充填材及び除去生成物をすべて除去する、②処分坑道の路盤と走行部が直に接するように、路盤上を清掃する付帯設備を設ける、二つの対策が考えられる。これらの対策の中で、①除去ユニット案は、(1)吸引排土できなかった除去生成物が路盤上に堆積する可能性がある、(2)除去作業によって処分坑道の路盤を切削してしまうことを防ぐため、隙間充填材を数 cm 程度残す必要がある可能性が考えられることから、結果として、路盤上に除去生成物や隙間充填材が残存する可能性がある。

以上より、処分坑道の路盤の除去生成物や隙間充填材を除去する対策としては、②路盤上を清掃する付帯設備を設ける案を選択することとする。この付帯設備は除去ユニットとの組合せで使用されることから、付帯設備に必要な機能や仕様の検討は、除去ユニットの整備結果から以下の情報を得た後に着手することとする。

- ・ 除去ユニットの捕集率：除去する隙間充填材の全体量に対する、吸引回収できた量の割合である。残りは捕集されずに路盤上などに落下・堆積する。
- ・ 除去ユニットの切削の下限域：除去ユニットと処分坑道の路盤との干渉を避けるため、路盤上の隙間充填材を一定の厚さで残置する必要がある。残置する厚さ（切削の下限域）は、切削部分の下側に設置される吸引アタッチメントの寸法を考慮して設定する。
- ・ 除去ユニットの操作の正確性：所定の重量と大きさを有する除去ユニットをどの程度正確に制御できるかに関して、路盤・坑壁・PEM とのマージンを除去ユニットの移動機構、制御方法などから検討する。これらの検討から、路盤に残存する隙間充填材の厚さを設定する。

(5) 除去ユニットの能力に基づく、除去装置単体の能力の定量化の考え方

隙間充填材の除去ユニット単体の能力を設定する方法には、以下の二つのアプローチがある。

アプローチ 1：目標となる除去能力（隙間充填材の除去速度、除去装置の掘進速度）から除去ユニット単体の能力を設定する

アプローチ 2：除去ユニットの能力を把握してから、装置全体を組み立てる

以下に二つのアプローチについて具体的に述べる。

アプローチ 1：目標となる除去能力から除去ユニット単体の能力を設定する

アプローチ 1 の手順は以下の Step となる。

Step1：目標となる隙間充填材の除去能力の設定に関しては、2.3.2(2)において、隙間充填材の除去作業の迅速化の目安として PEM 一体当たりの隙間充填材の除去時間を 5 時間未満と設定した。PEM 全長を 3.4 m とすれば、隙間充填材の除去に伴う除去装置の掘進速度は 0.7 m/h 以上となる。PEM 一体当たりの隙間充填材の体積で表すと除去速度は $8.4 \times \alpha \text{ m}^3/\text{h}$ （ α ：切削に伴う土量変化率）以上となる。

Step2：上記の能力を確保するために必要な除去ユニットの個数を検討し、除去ユニット単体の能力を設定する。図 2.3-16 除去ユニットの配置と移動状況図 2.3-16 に示すように、処分坑道と PEM の間の隙間充填材の断面が馬蹄形であるため、除去ユニットを動作させるブームやレ

ールの構造を考慮すると、断面を分割して複数の除去ユニットによって除去作業を実施するほうが合理的である。除去ユニットの個数に応じて断面を分割し、それぞれの除去ユニットや駆動装置が干渉しないような配置や動作方法を検討する必要がある。また、装置全体が馬蹄形の狭隘な空間に配置できなければならないため、空間的な制約から設置できる除去ユニットの個数や駆動装置の形状、能力が制限される。これらの検討から、Step1 の目標掘進速度である 0.7 m/h を達成できる除去ユニット単体の能力を設定する。

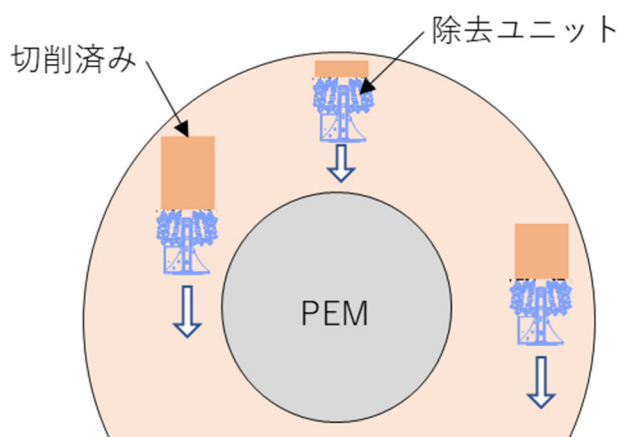


図 2.3-16 除去ユニットの配置と移動状況の例

Step3: Step2 で設定した除去ユニット単体の機能・能力を確認するため、切削・排土試験を行う。

試験では、隙間充填材として想定される配合のベントナイト混合土を対象として実際の除去作業を模擬した切削・排土試験を行う。除去ユニットのカッターは既存コンポーネントの中から実機での使用を想定して選定する。切削・排土試験で以下の情報を取得する。

- ・ 解砕能力：解砕能力に関連する切削試験のパラメータは、カッターの回転数 N 、隙間充填材の切削深さである切込み量 d 、カッターの移動速度である送り量 F である。ただし、既存コンポーネントを使用しているため、技術開発を行って隙間充填材除去用に最適化する余地は残されている。
- ・ 排土能力：排土能力では、切削した除去生成物の捕集率と吸引能力が重要である。捕集率は、切削した除去生成物に対して吸引アタッチメントで捕集した割合であり、吸引アタッチメントの形状やカッターへの設置位置が重要である。吸引能力については、除去生成物の発生量、発生位置と回収位置の高低差、吸引ホースの径を考慮して真空源の能力と台数を検討する必要がある。なお、除去生成物は切削により見かけの体積が増大する（土量変化率）。排土能力に関連するパラメータは、捕集率、吸引能力（ m^3/h ）、除去生成物の土量変化率である。
- ・ 連続運転の可否：除去生成物のカッターへの付着や吸引口の閉塞は、除去作業の中断につながる可能性のある現象であり、試験ではこれらの現象の発生状況や条件を整理しておく必要がある。

Step4: Step3 までの結果を判定し、除去ユニットの最適化を行う。必要に応じてフィードバック

を行う。また、実用化に向けては、処分坑道内の狭隘な空間での作業を想定した検討が必要である。

- ・解砕能力：切削試験の結果より切削1レイヤ当たりの切込み量 d を設定すると、PEM 一体当たりの切削の繰り返し回数は $3.4 \text{ m} \div d$ 回となる。送り量 F から繰り返し回数を考慮した PEM 一体当たりの隙間充填材の除去速度（除去装置の掘進速度）を算定し、目標掘進速度である 0.7 m/h を達成しているかどうかを確認する。
- ・吸引能力：除去生成物を捕集・吸引・回収する排土システムは、切削による土量変化率を考慮したうえで隙間充填材の解砕能力以上の能力が必要である。真空源は狭隘な処分坑道に設置されるため、設置できる設備規模から能力に制約を受けることを考慮する必要がある。吸引アタッチメントはカッターの下部に取り付けられているため、カッター本体を路盤付近まで移動させることができず、路盤付近の隙間充填材の切削が困難となる。路盤に残置されている隙間充填材を除去する必要性の有無も含めて検討する必要がある。
- ・捕集率：捕集アタッチメントの形状、位置の工夫などにより、捕集率を向上させることができるが、捕集できなかった除去生成物は下部へ落下して除去装置が走行する処分坑道の路面に堆積するため、堆積物に対する対策が必要となる。堆積物に対する対策のために付帯設備を設置する際は、除去装置の形状や配置等への付帯設備の影響を考慮する必要がある。
- ・付着・閉塞：切削刃等への付着や除去生成物を移送する吸引ホース等の閉塞は、連続運転を進める上での課題であり、付着や閉塞を防止する対策が必要である。（2.3.3(2)④参照）

アプローチ2：除去ユニットの能力を把握してから、装置全体を組み立てる

アプローチ2の手順は以下の Step となる。

Step1：アプローチ1のStep3から除去ユニット単体の能力を設定する。

既存のコンポーネントから隙間充填材の除去作業に適用性が高いものを選定して除去ユニットを試作し、実際の除去作業を模擬した切削・排土試験を実施して、解砕能力、排土能力、連続運転の可否に関する情報を取得する。

Step2：アプローチ1のStep4から除去ユニットの最適化を図る。

Step1の結果から除去ユニットの能力を評価し、除去ユニットの最適化を図る。

Step3：除去ユニットの能力から、除去装置全体の構造、能力を設定し、除去装置単体の能力を設定する。

Step2で最適化された除去ユニットの能力から、処分坑道と PEM の間の馬蹄形の狭隘な区間への配置を考慮した除去装置の能力、構造、寸法、配置等を検討し、除去ユニットを含む除去装置単体の能力を設定する。

Step4：目的の除去能力を実現するための装置台数を設定し、除去作業計画の最適化を図る。

Step3での結果から、除去ユニットを含む除去装置単体の除去能力が除去作業の迅速化の目標

時間（PEM 一体当り 5 時間未満）を達成できない場合は、目標を達成するために必要な台数を設定する。複数の除染装置の運用では、他の作業との連携や除去装置のメンテナンスの時期の間隔や頻度等を考慮して、隙間充填材除去作業計画の最適化を図ることが重要である。

上記の二つのアプローチは切削・排土試験を行うことは同じであるため、開発段階では二つのアプローチを必要に応じて適用することが有効である。装置単体の能力が設定（定量化）できれば、隙間充填材除去の目標時間：5 時間未満を実現するための装置台数、作業計画が具体化できるようになる。目標時間達成のためには除去ユニットを最適化していくことが重要であり、除去ユニットの成立性の検討から着手する。

2.3.5 機械的除去ユニットの成立性

(1) 除去ユニットの構成要素

除去ユニットは切削と排土を連続的に行う部位である。隙間充填材の切削試験を実施して以下の装置を選定、開発する必要がある。

(a) 切削部

壁状の隙間充填材の切削装置は横回転型のカッタードラム（ツインカッター）を選択した（図 2.3-17）。回転するピックが隙間充填材を解砕し、除去生成物はカッター下部から手前側に飛散するため、除去生成物を捕集する排土部の設置が容易である。ツインカッターの切込み量（切削深さ）や送り量（カッターの移動速度）をパラメータとして、隙間充填材の除去速度を設定することができる。



図 2.3-17 切削部（ツインカッター）

(b) 排土部

排土部は、図 2.3-18 に示すように、切削により発生した除去生成物の捕集する吸引アタッチメント、分離タンク、吸引設備とそれらを接続する吸引ホースから構成される。吸引アタッチメントは捕集した除去生成物を吸引ホースへ導くための受け皿で、飛散する除去生成物の捕集率を向上させるため、形状寸法や壁面からの距離等が重要である。分離タンクは除去生成物である固形物を分離するタンクであり、ここで除去生成物を回収する。吸引設備は真空ポンプで吸引の動力源である。吸引ホースは5インチのサクションホースである。

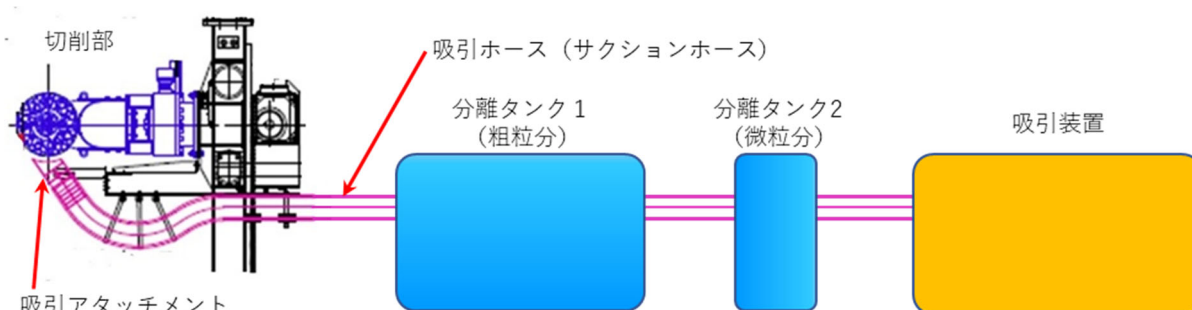


図 2.3-18 排土部の概要

(c) 動作アーム

動作アームは、切削部と吸引アタッチメントを一体として移動させ、所定の位置（始点）から別の位置（終点）まで所定の速度で移動させることができる装置である。図 2.3-19 に動作アームの例を示す。

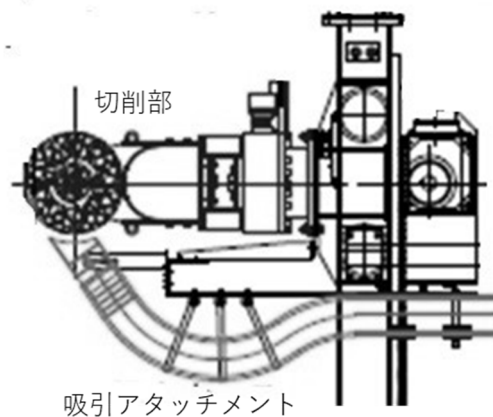


図 2.3-19 動作アームの例

(2) 除去ユニット成立の基本条件

除去ユニットは隙間充填材除去装置の要となる装置である。ここでは、機械的除去試験において各部位に求められる機能を整理する。

(a) カッタードラム（ツインカッター）

カッタードラム（ツインカッター）はベントナイト混合土である隙間充填材を解砕し吸引アタッチメントへ送る機能が求められる。そのため、所定の速さで連続的な作業を行い、機械的強度を備えていることが必要である。粘土（ベントナイト）用の製品はないため、既存のコンポーネントの中から軟岩掘削用を用いることとする。軟岩掘削用のため、強度や速度に関しては十分な機能を有していると考えられる。除去生成物の付着に関しては、ベントナイト混合土の材料特性から付着の可能性があるため、機械的除去試験において確認する必要がある。

(b) 吸引アタッチメント

吸引アタッチメントは飛散する除去生成物の捕集率を向上させることが求められており、形状寸法や壁面からの距離等が重要である。壁面からの距離の設定では、除去生成物の飛散経路を検討して最も捕集率が高くなると想定される位置を特定し、試験で確認する必要がある。なお、形状寸法や壁面からの位置の設定に当たっては、ツインカッターの切削動作の妨げにならないことが条件である。

(c) その他排土部

吸引アタッチメント以外の排土部は、吸引ホース、分離タンク（粗粒分、細粒分）、吸引装置（真空ポンプ）で構成され、全て既存のコンポーネントである。求められる機能は吸引能力であり、真空ポンプの仕様が最も重要である。切削部で発生する除去生成物を吸引排土するために必要な能力が求められるため、切削部の切削能力とのバランスを考慮する必要がある。また、処分坑道内に配置するため、装置の形状寸法、重量、設置台数に制限があること、吸引ホースの高低差や勾配についても留意する必要がある。

2.3.6 機械的除去ユニットの機能確認

隙間充填材を模擬したベントナイト混合土を対象とした切削試験を実施し、前項で整理した機械的除去ユニットの成立性や隙間充填材除去への適用性について評価した。

(1) 除去ユニットの成立範囲（試験条件の設定範囲）

(a) 切削試験の主要パラメータの関係

切削試験のパラメータである切込み量、送り量、切削量の関係は以下の通りである。

$$Q=d \times F \times b$$

Q：切削量（m³/min）

d：切込み量（mm）

F：送り量（mm/min）

b：ツインカッターの切削幅（一定）470 mm

排土量（吸引量）は土量変化率を考慮して以下の通りとなる。

$$Q'=Q \times L$$

Q'：排土量（吸引量）（m³/min）

L：土量変化率

(b) バキューム能力による試験条件の設定範囲

事前にバキューム吸引能力確認試験を行い、バキューム設備の吸引能力が一台当たり 0.15 m³/min（公称吸引能力）であることを確認した。ツインカッター1 台にはバキューム設備を 2 台使用するため、排土量 Q' の設定範囲は以下の通りとなる。図 2.3-20 にバキューム設備能力による上限値（切込み量 d と送り量 F の組合せ）を示す。

$$\text{バキューム設備能力による吸引量 } Q' \text{ の設定範囲 } \quad Q' \leq 0.30 \text{ m}^3/\text{min}$$

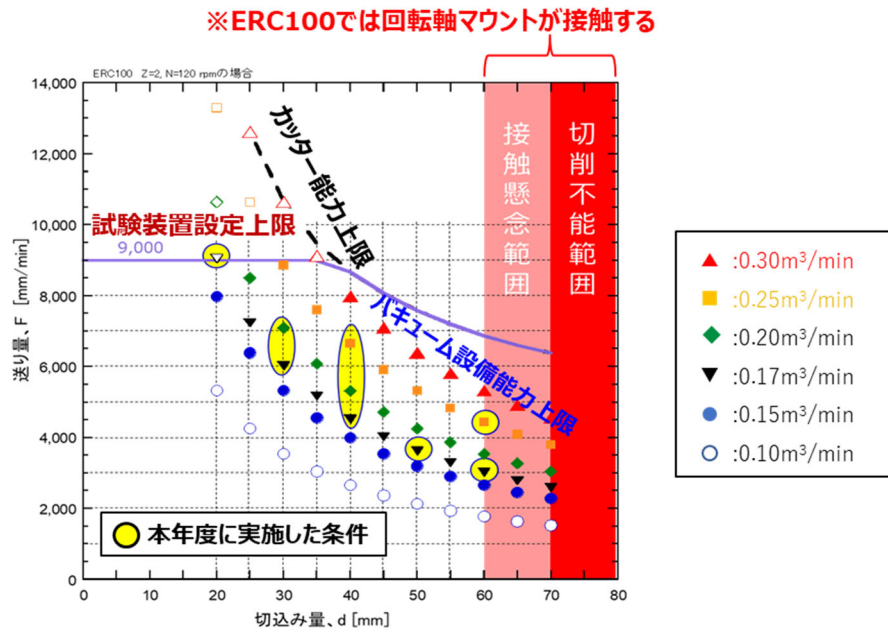


図 2.3-20 切込み量 d と送り量 F による排土量 Q' の算定（理論値）

(c) カッター能力（切込み量 d と送り量 F の組合せ）による試験条件の設定範囲

カッターの送り量 F は、カッターの回転によって 1 本目のピックが切削し、カッターが回転して次のピックが切削するまでの間に、カッターの移動距離が切削深さを超えない速度に制限される必要があり、切込み量 d と送り量 F の組合せで決定される（図 2.3-21 参照）。ツインカッター ERC100 が同一円周上にピックが 2 本セットされているとした場合の切込み量 d と送り量 F の組合せの上限値を図 2.3-20 に示す。

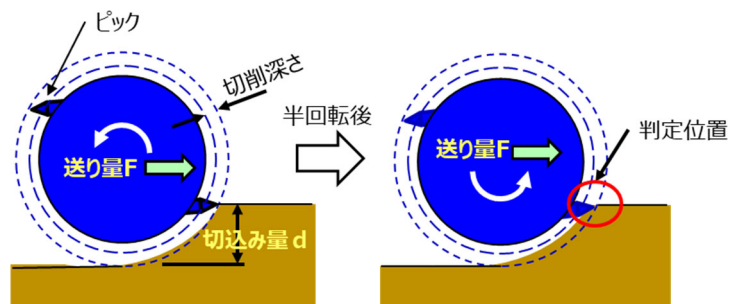


図 2.3-21 切込み量 d と送り量 F の組合せとカッター能力の上限値の関係

(d) 試験装置の能力（送り量 F ）による試験条件の設定範囲

試験装置の能力であるカッターの送り量 F の上限値は、装置の仕様から以下の通りである。図 2.3-20 に試験装置（送り量 F ）の上限値を示す。

試験設備の能力による送り量 F の設定範囲 $F \leq \text{約 } 9,000 \text{ mm/min}$

(e) 試験条件の設定範囲

上記の検討から、試験条件（切込み量 d と送り量 F ）を設定した。なお、ツインカッターの構

造から、回転軸マウントが試験体に接触するリスクを避けるため、図 2.3-20 に示すように切込み量 d を最大 60 mm とした。排土量 Q' については、図 2.3-20 の設定範囲において広範な試験条件の試験が可能な切削量である $0.17 \text{ m}^3/\text{min}$ の場合の試験をシリーズで実施し、排土量が $0.20 \text{ m}^3/\text{min}$ 、 $0.25 \text{ m}^3/\text{min}$ についても一部実施した。

(f) その他の試験条件

(i) 試験体

切削試験に用いた試験体（ベントナイト混合土）の配合を表 2.3-4 に示す。この配合は地下実証試験（原子力環境整備促進・資金管理センター、2022）において円滑な切削・排土が困難となった条件と同様としている。試験体製作においては1層の仕上がり厚を 10 cm とし、ランマーとプレートを用いて締固めた。転圧の層境の接着性を向上させるため、転圧後は表面をドライバー等で浅く切込を入れ、ほぐしてから次層のベントナイト混合土を撒き出した。

表 2.3-4 試験体の配合

ベントナイト 配合率(%)	珪砂(%)		乾燥密度 (Mg/m^3)	有効粘土密度 (Mg/m^3)	含水比 (%)	飽和度 (%)	コンシステンシー 指数(—)
	3号	5号					
50	25	25	1.66	1.21	22	93	0.989

(ii) ギャップの設定

ギャップ L_x は試験体表面から吸引口先端までの水平距離であり、20 cm～100 cm の範囲で設定した。カッターの下端部から吸引口先端上部までの鉛直距離 L_z は、約 75 mm で一定とした（図 2.3-22 参照）。

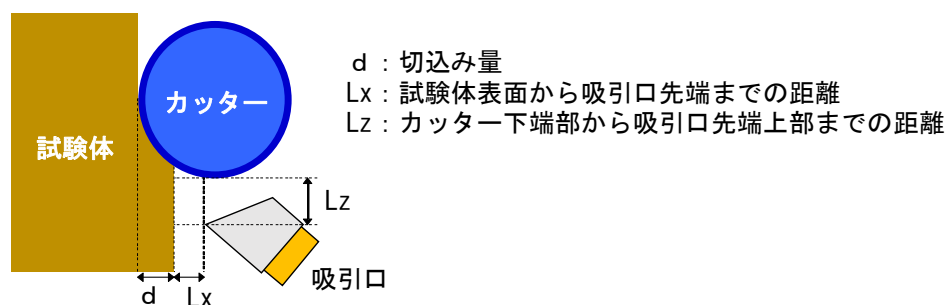


図 2.3-22 吸引口の位置（ギャップの設定）

(2) 試験結果

前項の検討から設定した試験条件と試験結果の一覧を表 2.3-5 に示す。測定値のうち不明量とは、想定切削重量から分離タンク回収量等回収した重量の合計を引いたものであり、周囲に飛散して回収できなかった量である。ケース 1 では、切削終了直前に試験下端部が崩落落下し、その部分を切削量から除去しているため、不明量が多くなっている。また、落下した部分はケース 4、6、8 の切削領域まで達していたため、それらのケースでは落下した量を推定して想定切削量を少なくしている。また、ケース 2 では、送り量 F が上限値 $9,000 \text{ mm}/\text{min}$ を超える速度で実施した。

表 2.3-5 試験条件及び試験結果

No	設定値					測定値				
	想定排土量 Q (m ³ /min)	送り量※ F (mm/min)	切込み量 d (mm)	ギャップ Lx (mm)	想定 切削重量 (kg)	分離タンク 回収量 (kg)	床面への 落下量 (kg)	カッター 付着量 (kg)	吸引口 付着量 (kg)	不明量 (kg)
1	0.25	4,730	60	60	103	28	22	21	1	31
2	0.20	11,300	20	100	30	10	8	1	0	11
3	0.25	6,830	40	80	73	36	18	16	0	3
4	0.17	6,090	30	20	48	28	6	10	0	4
5	0.20	7,040	30	20	53	32	7	10	1	3
6	0.17	4,520	40	20	67	40	9	13	1	4
7	0.20	5,440	40	20	72	39	9	15	0	9
8	0.17	3,630	50	20	87	55	11	20	0	1
9	0.17	2,960	60	20	111	72	15	15	1	8
10	0.17	9,030	20	20	35	21	3	6	0	5
11	0.17	9,100	20	60	35	23	6	7	0	-1

※送り量はカッターの移動距離と移動時間（測定値）から算出した値を記載している

(3) 試験中の事象

(a) 試験条件（切込み量、送り量）と切削面の状況の関係

試験では、切込み量 d を 20、30、40、50、60 mm と変化させ、送り量 F は、想定排土量 0.17、0.20、0.25 m³/min に合致するように切込み量に応じて 2,960～11,300 mm/min 範囲で設定した。ここでは切込み量と送り量の組合せと切削面の状況について検討する。

図 2.3-23 にケース 1 とケース 3 の切削状況を示す。ケース 1 とケース 2 の送り量と切込み量の組合せは、(4,730 mm/min、60 mm)、(6,830 mm/min、40 mm) であるが、両ケースとも想定排土量が 0.25 m³/min である。ケース 1 では開始位置から数十 cm 程度切削した時点で、切削面が乱れ下端部では試験体が一部落下した。ケース 3 でも切削面の乱れはあるがケース 1 より乱れは大きくない。これより、同じ排土量であっても切込み量を小さくして送り量を早くしたほうが切削面の乱れは小さく切削が良好となる傾向がある。なお、ケース 1 で試験体下部の一部が落下したが、実際の坑道における隙間充填材のように試験体が坑道床まで連続して設置されていれば、試験体の下端部が落下する現象は生じないと考えられる。

図 2.3-24 に切込み量が同じケースとしてケース 6、ケース 7 の切削状況を示す。両ケースの切込み量は図のケース 3 と同様に 40 mm である。3 ケースの比較から同じ切込み量であれば、送り量が遅いほうが切削面の乱れは少なくなる傾向がみられた。

図 2.3-25 に切込み量が 20 mm、30 mm のケース 2、ケース 4 の切削状況を示す。切込み量が 40 mm のケース 3、6、7 及びケース 1 と比較すると、切込み量が小さいほうが切削面が良好となる傾向がみられる。

実際に処分坑道での隙間充填材除去作業を想定した場合、切込み量が大きいほど所定の掘削長（奥行の長さ）に対して切削回数は少なくなり、隙間充填材除去装置の位置決め等の段取り回数も減るため作業時間は短くなる。そのため、切込み量が多いほうが望ましいが、切削面の状況からは切込み量は小さいほうが有利である。今回の試験では軟岩掘削用のカッターを使用しているため、ベントナイト混合土用のカッターが開発された場合は、切込み量、送り量と切削面の状況について確認する必要がある。実際に処分坑道での隙間充填材除去作業を想定した場合、切込み量が大きいほど所定の切削深さに対する切削回数は少なくなり、隙間充填材除去装置の位置決め

等の段取り回数も減るため作業時間は短くなる。また、同じ切込み量であれば送り量が大きいほど切削時間が短くなるため、作業時間は短くなる。

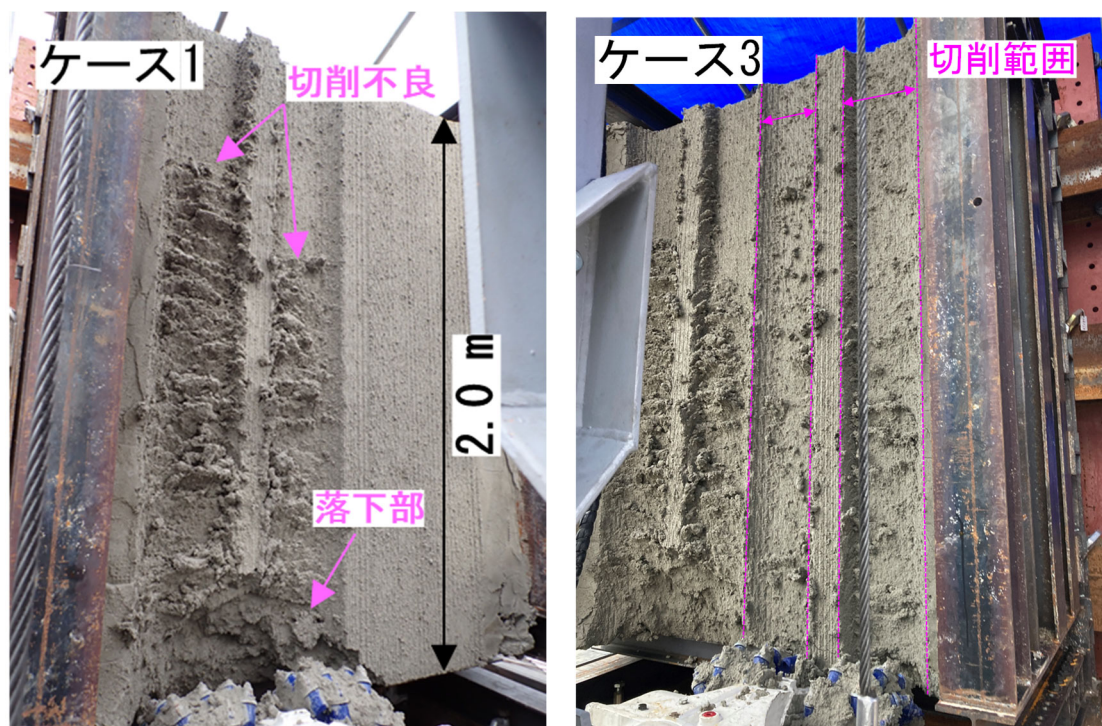


図 2.3-23 切削状況（ケース 1、ケース 3）

（左：ケース 1($d=60$ mm, $F = 4,730$ mm/min)、右：ケース 3($D=40$ mm, $F=6,830$ mm/min))
（想定排土量：0.25 m³/min）

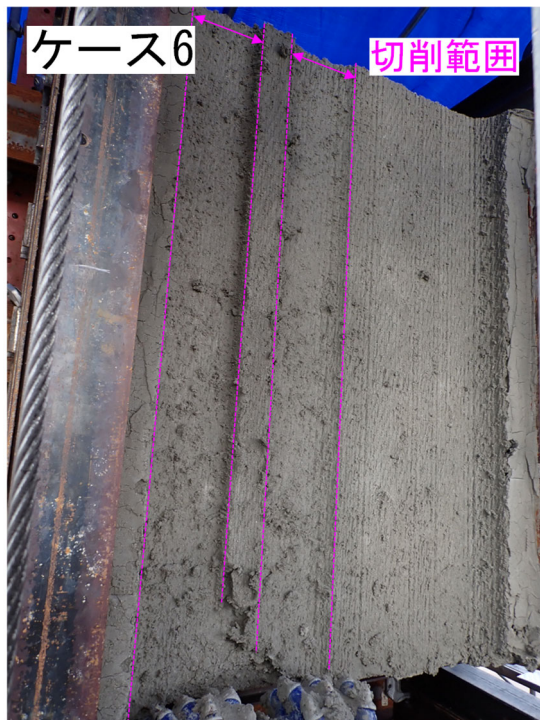


図 2.3-24 切削状況（ケース 6、ケース 7）

左：ケース 6($d=40$ mm, $F=4,520$ mm/min)、右：ケース 7($d=40$ mm, $F=5,400$ mm/min)

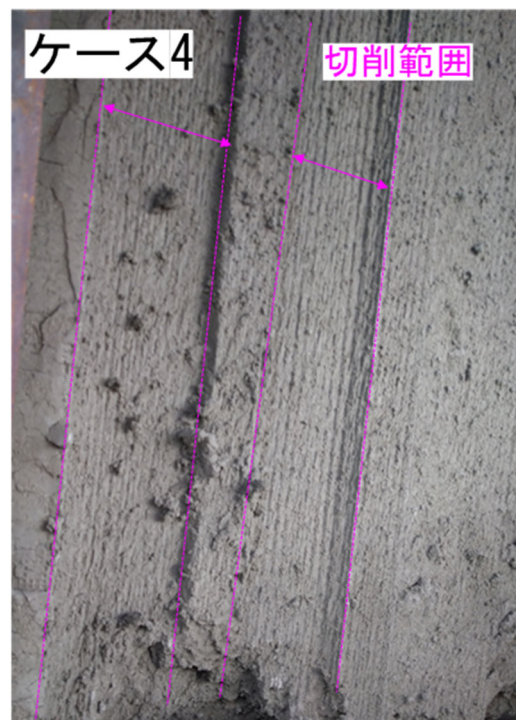
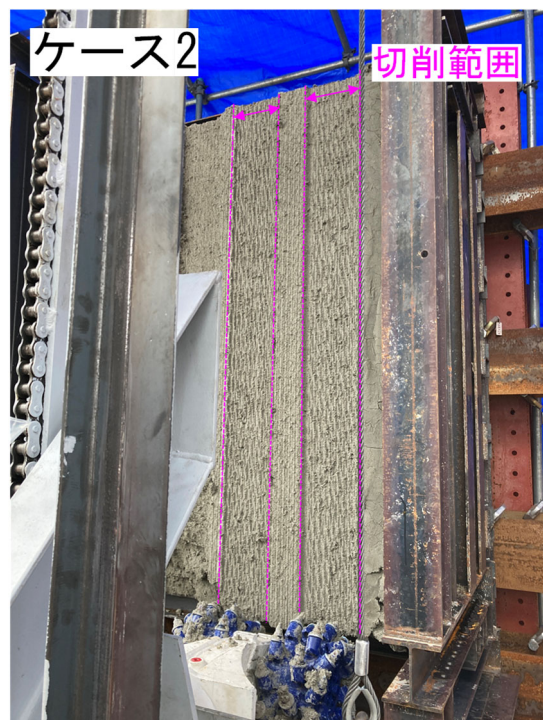


図 2.3-25 切削状況（ケース 2、ケース 4）

（左：ケース 2($d=20$ mm, $F = 11,300$ mm/min)、右：ケース 4($d=30$ mm, $F=6,090$ mm/min))

(b) 試験条件と分離タンクへの回収等の関係

ここでは、分離タンクへの隙間充填材の回収、路盤への落下、カッターへの付着に対する試験条件の影響を検討する。

図 2.3-26 に分離タンクへの除去生成物の回収量、回収率と切込み量の関係を示す。切込み量は切削量と比例するため、回収量も切込み量に対して比例関係にある。回収率は切込み量に拘らず約 60%であった。路盤への落下に関しては、図 2.3-27 に示すように落下量は切込み量に比例して増加しているが、落下率は約 15%である。カッターへの付着に関しては、図 2.3-28 に示すように切込み量 60 cm を除けば切込み量と付着量は比例関係にある。付着率については、切込み量 60 cm 以外は約 20%である。以上より、分離タンクへの除去生成物の回収率は約 60%、路盤への落下率は約 15%、カッターへの付着率は約 20%であり、周囲に飛散して回収できなかった量（不明量）は約 5%であった。

図 2.3-29 に分離タンクへの除去生成物の回収量、回収率とギャップの関係を示す。回収量については、ギャップが 80 mm のケースは切込み量が 40 mm のためか収量が多くなっているが、回収率ではギャップが 60 mm まではほぼ一定の 60%であり、ギャップが 80 cm 以上で徐々に低下している。路盤への落下に関しては、図 2.3-30 に示すようにギャップが 80 mm のケースは切込み量が 40 mm のため落下量が多くなっているが、落下率ではギャップが大きくなると落下率が上昇する傾向を示している。以上より、分離タンクへの回収率及び路盤への落下率から、ギャップは小さいほうが望ましいことが示された。

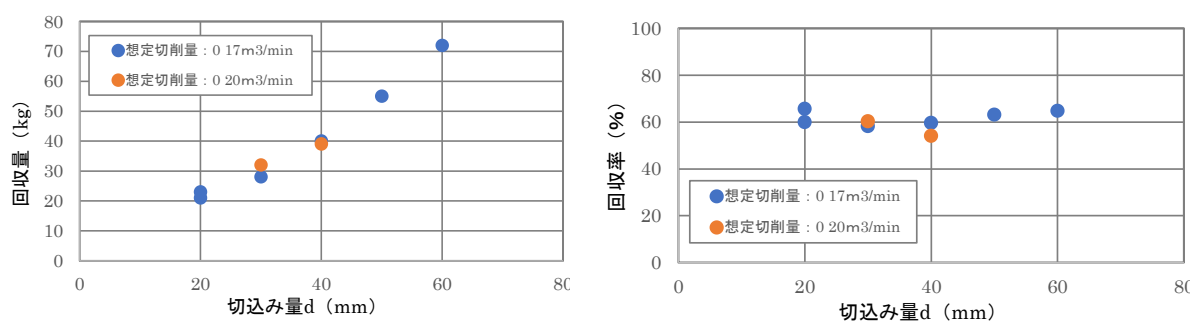


図 2.3-26 分離タンクへの回収量と回収率と切込み量との関係

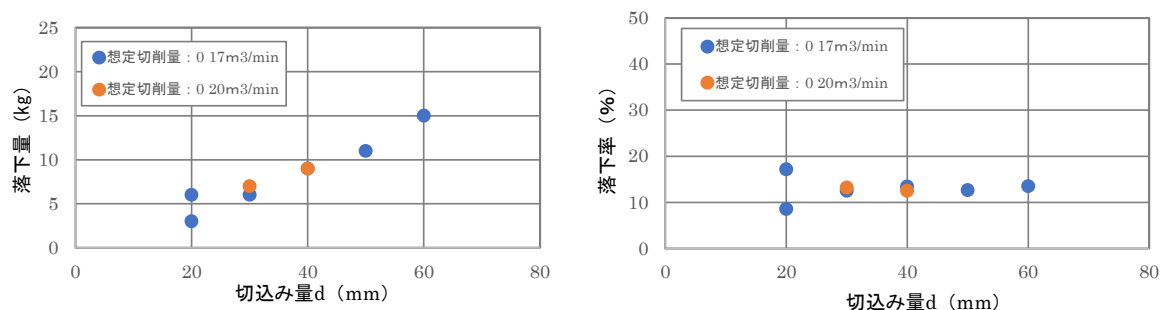


図 2.3-27 路盤への落下量と落下率と切込み量との関係

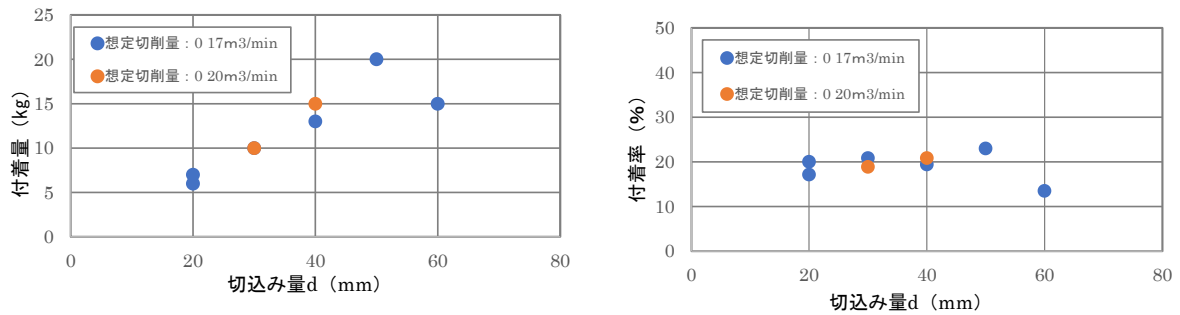


図 2.3-28 カッターへの付着量と付着

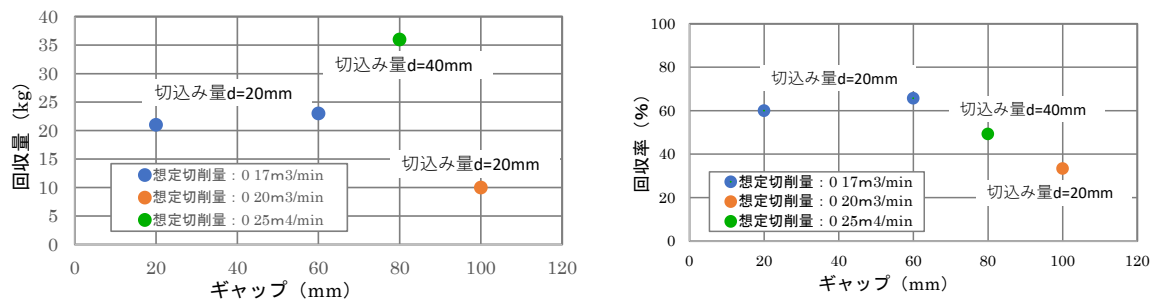


図 2.3-29 分離タンクへの回収量、回収率とギャップとの関係

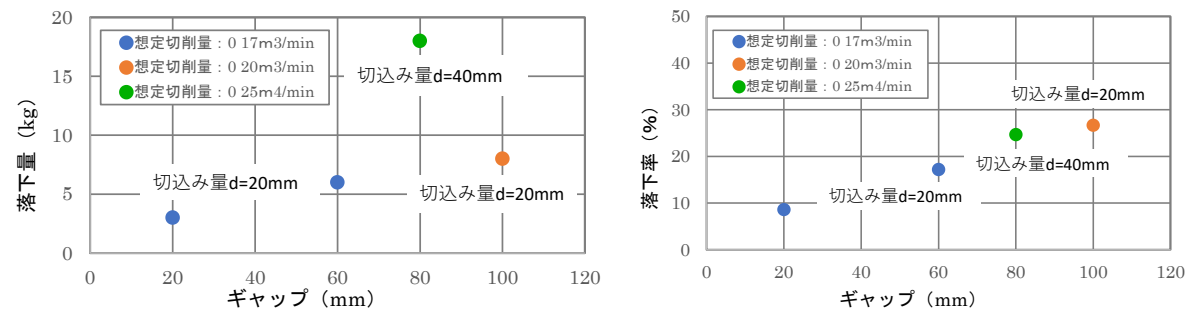


図 2.3-30 路盤への落下量、落下率とギャップとの関係

(4) 除去生成物の性状

分離タンクで回収した除去生成物と路盤に落下した除去生成物の比較を図 2.3-31 に示す。分離タンクで回収した除去生成物は、粒径が最大で 10 cm 程度であり、路盤に落下したものと比べて角が取れて丸くなり、寸法もやや小さくなる傾向であった。分離タンクで回収されたものは吸引ホースを通過する過程で角が取れたものと考えられる。なお、除去生成物の形状寸法に切込み量や送り量の違いによる影響は認められず、どのケースも同程度であった。

土量変化率は以下の通りであった。分離タンクで回収された除去生成物は、吸引ホースを通過する間に角が取れて充填率が高くなり、土量変化率が小さくなったと考えられる。

- ・分離タンクで回収した除去生成物：2.19
- ・路盤に落下した除去生成物：2.36



分離タンク回収



路盤落下

図 2.3-31 除去生成物の性状比較（分離タンク回収、路盤落下）（ $d = 50 \text{ mm}$ 、 $F = 3,630 \text{ mm/min}$ ）

(5) 機械的除去ユニットによる迅速化の効果

隙間充填材の除去作業迅速化においては、PEM 一体当たりの隙間充填材除去の目標時間を 5 時間以内と設定している。PEM 一体当たりの隙間充填材の体積が 41.1 m^3 （新第三紀堆積岩類の場合）であるため、土量変化率（2.19）を考慮した排土量と目標達成に必要な除去速度は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \text{PEM 一体当たりの排土量} & 41.1 \times 2.19 = 90 \text{ m}^3 \\ \text{目標達成に必要な除去速度} & 90 \div 5 = 18 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

除去装置に搭載する除去ユニットの台数を 2 台と仮定すると、除去ユニット一台当たりの必要除去速度は以下の通りである。

$$\text{目標達成に必要な除去ユニット一台当たりの除去速度} \quad 18 \div 2 = 9 \text{ m}^3/\text{h}$$

切削試験結果より、除去ユニット一台当たりの最大除去速度は、以下の通りであった。

$$\text{切削試験における最大除去速度（除去ユニット一台当たり）} \quad 0.25 \times 60 = 15 \text{ m}^3/\text{h}$$

隙間充填材の除去に要する時間は、隙間充填材の切削・回収時間だけではなく、ロスタイム（カッターや装置の移動、除去生成物の搬出等に要する時間）も含める必要がある。上記で求めた除去速度にはロスタイムは含まれていないため、除去ユニットを 2 台使用した場合の一台当たりの除去速度（ $15 \text{ m}^3/\text{h}$ ）が、ロスタイムを考慮した除去作業全体として PEM 一体当たりの目標時間（ $9 \text{ m}^3/\text{h}$ ）を達成しているかどうかは確認できない。ただし、除去作業の目標時間は除去装置 1 台で達成する必要がないため、同時に複数台の除去装置で除去作業を行えば達成できる見通しは得られたと考えられる。実際の除去作業では、除去作業中の台数にメンテ・待機中の台数を加えた複数台で運用することになると想定される。

幌延 URL において、坑道と PEM の間の隙間充填材の除去試験が小型バックホウとオーガータッチメントの組合せで実施され、見かけの除去速度は約 $0.6 \text{ m}^3/\text{h}$ （約 1 分で 0.01 m^3 掘削）であった。今回の切削試験では除去速度が最大 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ となり、幌延 URL の実施例に対して除去速度は約 25 倍迅速化できた。

2.3.7 機械的除去技術の特性及び実際の回収事業に向けた課題

(1) ベントナイト混合土の切削に適したカッタードラム構造の考察

切削試験では、軟岩掘削用のカッターを使用したため、除去生成物がカッターに付着した。後述する切削抵抗試験の切削パターンの観察結果より、切削試験に使用したベントナイト混合土は延性的であって細かく解砕されにくいため、除去生成物が塊でチップポケットと呼ばれる窪みに入って固着し、さらにその周囲に除去生成物が付着していったと考えられる（図 2.3-32 参照）。

隙間充填材の除去作業では、カッターへの付着量を抑制することが必須であるため、実用化に向けては、ベントナイト混合土に対して付着の少ないカッターの開発が必要である。切削試験結果から、延性的な除去生成物が堆積しにくい切削部の構造として、軟岩掘削用カッターに使用されている円錐状のピックではなく、平板上の刃（薄刃）を採用することも有効である可能性がある。また、除去生成物はバキュームによる吸引で回収するため、サイズはできるだけ小さいほうが望ましい。薄刃で切削され、延性的で連続した除去生成物を小さく破碎するためには、切削後にせん断破壊を発生させるような対策が必要かもしれない。付着した除去生成物をカッターから除去する方法としてコンプレッサーの利用が考えられる。ベントナイト用の付着の少ないカッターの開発に関しては、切削試験（室内試験）から得られる切削パターンとベントナイト混合土の性状についての知見の活用が重要である。

なお、切削試験結果から、ベントナイト配合率 50% で最も付着が発生しやすいことが想定されるため、実際の隙間充填材で想定されるベントナイト配合率や隙間充填材に使用される現地発生土の最大粒径、粒度分布によっては隙間充填材の材料特性が異なることも考えられるため、今後の検討が必要である。

軟岩掘削用カッター

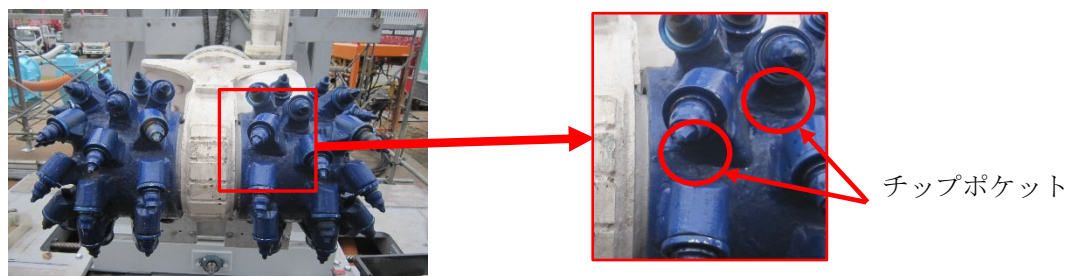


図 2.3-32 除去生成物の付着のメカニズム

(2) 隙間充填材の仕様の幅に対する機械的除去技術の適用性

(a) 切削試験（室内試験）

回収時のベントナイト混合土の性状は、処分場の個々の構成要素に割り当てられる要件や仕様、隙間充填材の施工後から PEM 回収までの時間経過における過渡期の状態変化に依存するため、様々な仕様や状態のベントナイト混合土に対して除去技術の適用性を確認しておく必要がある。

そこで、実際の除去作業における隙間充填材の切削メカニズムを把握するため、一次元の切削試験を実施した。切削試験装置の概要を図 2.3-33 に示す。切削刃の角度は 30、45、60 度として、試験では切削刃に作用する荷重（切削力）をロードセルにより測定し、切削パターン（破壊形態）を目視確認した。隙間充填材のベントナイト混合土の仕様については、ベントナイト配合率が 15%（貧配合想定）、50%（貧配合と富配合の中間想定）、70%（富配合側想定）、100%（ベントナイトペレット想定）の計 4 ケースの試料を検討対象とした。

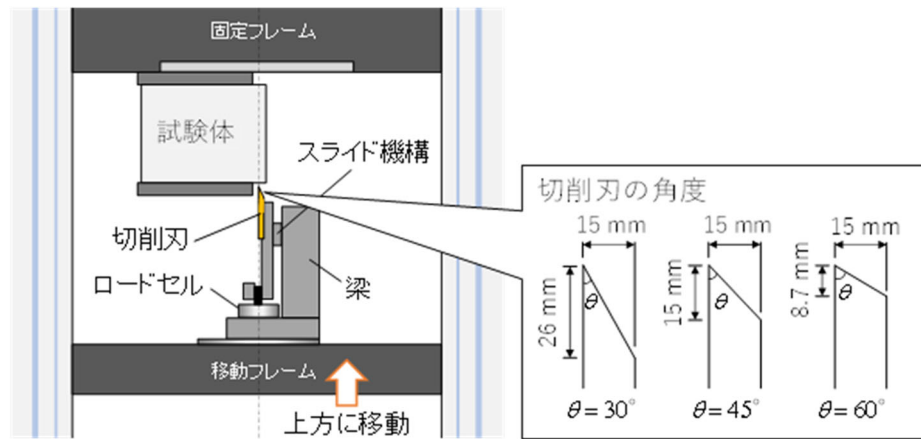


図 2.3-33 切削試験装置の概要

(b) 試験結果

(i) 切削パターンとベントナイト混合土の材料特性の関係

2021 年度及び 2022 年度に実施した切削試験結果から、切削パターンとベントナイト混合土の配合等との関係について検討した。図 2.3-34 に示すように切削パターン（破壊形態）を 0（除去生成物に亀裂が見られない、延性的）から 4（上方に割裂による亀裂が生じており、除去生成物は不連続である、脆性的）の 5 段階に分類した。

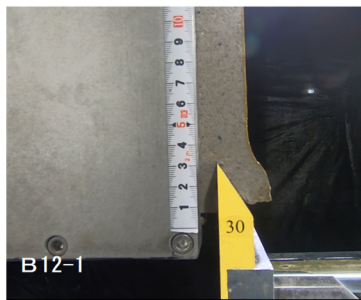
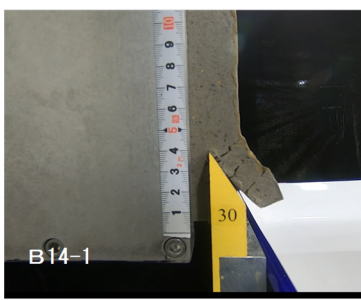
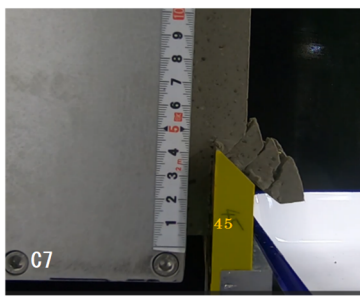

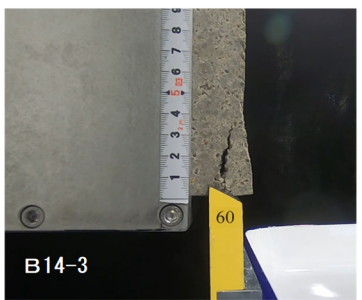
切削パターン	0	切削パターン	1	切削パターン	2
特徴	・除去生成物に亀裂が見られない ・延性的	特徴	・除去生成物にせん断による亀裂が生じているが、連続している	特徴	・除去生成物にせん断による亀裂が生じており、不連続である
					
切削パターン	3	切削パターン	4		
特徴	・上方に割裂による亀裂が生じているが、連続している	特徴	・上方に割裂による亀裂が生じ、不連続である ・脆性的		
					

図 2.3-34 ベントナイト混合土の切削パターン（破壊形態）の分類

図 2.3-35 にベントナイト混合土の飽和度と切削パターンの関係を示す。図 2.3-35 の率は各飽和度で切削パターンを示す数字の個数（データの数）を集計し、その中での各数字の割合を示している。図 2.3-36～図 2.3-38 も同様である。図 2.3-35 より、飽和度 80%以上でベントナイト混合土の性状が延性的になり、飽和度が大きくなるにしたがってベントナイト混合土は延性的な傾向が強くなっている。

図 2.3-36 にベントナイト混合土のベントナイト配合率と切削パターンの関係を示す。ベントナイト混合土の性状はベントナイト配合率 50%において最も延性的な傾向を示している。図 2.3-37 にベントナイト混合土の有効粘土密度と切削パターンの関係を示す。有効粘土密度 1.0～1.2 Mg/m³に延性的な傾向がみられるが、有効粘土密度 0.9、0.8 Mg/m³のデータがないため、有効粘土密度 1.0 Mg/m³未満の性状は明確ではない。

図 2.3-38 にベントナイト混合土のコンシステンシー指数と切削パターンの関係を示す。コンシステンシー指数 0.98 を除くとコンシステンシー指数 1.0 以下の塑性状のベントナイト混合土の性状が延性的な傾向を示している。

除去要素試験で使用した試験体の配合は、ベントナイト配合率 50%、飽和度 93%、有効粘土密度 1.21 Mg/m³、コンシステンシー指数 0.989 であり、延性的な傾向を示すベントナイト混合土であったといえる。そのため、カッターへの除去生成物の付着が多くなったものと考えられる。

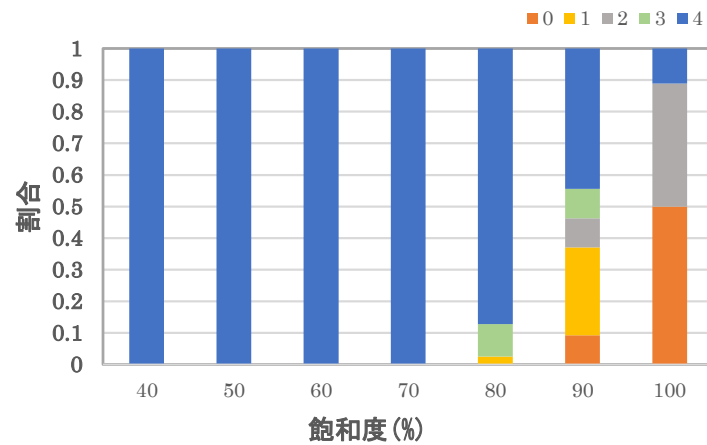


図 2.3-35 ベントナイト混合土の飽和度と切削パターンとの関係

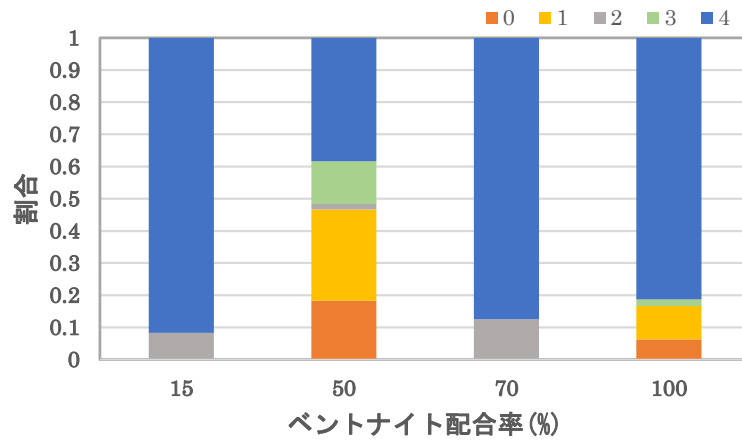


図 2.3-36 ベントナイト混合土のベントナイト配合率と切削パターンとの関係

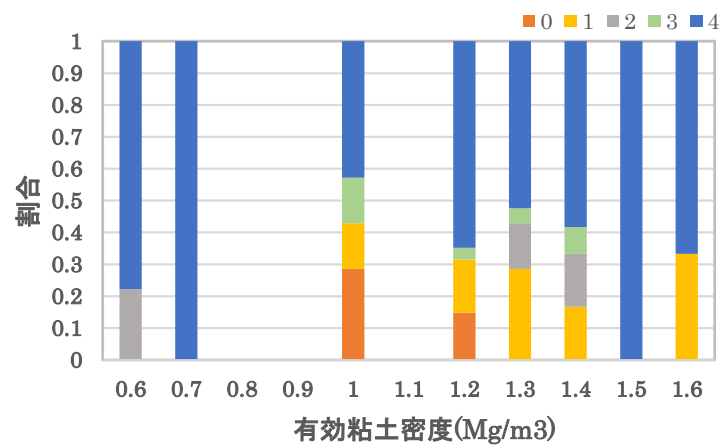


図 2.3-37 ベントナイト混合土の有効粘土密度と切削パターンとの関係

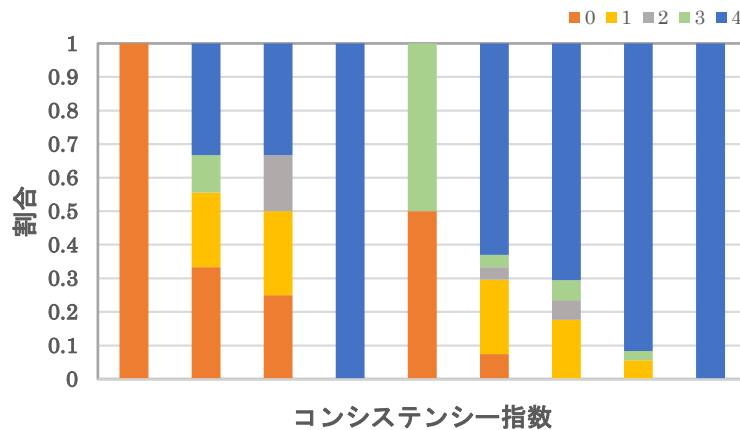


図 2.3-38 ベントナイト混合土のコンシステンシー指数と切削パターンの関係

(ii) 切削パターンと切削力の関係による切削試験の評価

ここでは、切削パターンと切削力の関係を検討するため、切削試験を撮影した画像データから目視によって切削パターンを分類した。(i) 切削パターンとベントナイト混合土の材料特性の関係では切削パターンを五つに分類したが、ここでは散布図を用いてデータを分析することから評価が容易にできるように分類の種類を減らして、図 2.3-39 に示す三つの切削パターンに試験結果を分類した。図 2.3-40 に切削力と接触面の鉛直方向に作用する応力の関係を示す。切削パターン別に凡例を変えた有効粘土密度と切削面鉛直方向の応力の散布図を図 2.3-41 に示す。これより切削パターンと切削面鉛直応力を見ると、せん断(△: パターン 1) は有効粘土密度が 1.2 Mg/m^3 以上で切削面鉛直方向の応力が $500 \sim 1,500 \text{ kPa}$ の範囲に多く分布していることがわかる。また、除去生成物が完全に連続であり、隙間充填材の除去において最も困難となると考えられるせん断(×: パターン 0) は有効粘土密度が $1.0 \sim 1.2 \text{ Mg/m}^3$ 、切削面鉛直方向の応力が 500 kPa 以下の範囲に分布している。これより「せん断」が生じる隙間充填材の条件は、飽和度 80%以上、有効粘土密度 1.0 Mg/m^3 以上となる。さらに「せん断(×: パターン 0)」に限定して条件を考えると飽和度 90%以上、有効粘土密度 $1.0 \sim 1.2 \text{ Mg/m}^3$ となり、機械的除去要素試験の試験体は飽和度 93%、有効粘土密度 1.21 Mg/m^3 であることから「せん断(パターン 0)」と「せん断(パターン 1)」のほぼ境界上にあり、この分類においても隙間充填材の除去において困難なケース設定がされていたと考えられる。ただし、試験体の飽和度がさらに高い場合は、切削部の付着量や除去生成物の寸法が増加する可能性がある。

また、切削パターンについては引張強度の観点からも考察が必要であり、畑村らは粘着力が引張強度より小さいときにせん断破壊が生じるとしている(畑村・千々岩, 1974)。しかし、塑性状の土の引張強度を正確に取得することは容易ではなく、現時点で取得されている図 2.3-41 に示すベントナイト混合土のデータでは不足しているため、本試験の検証は今後の課題である。

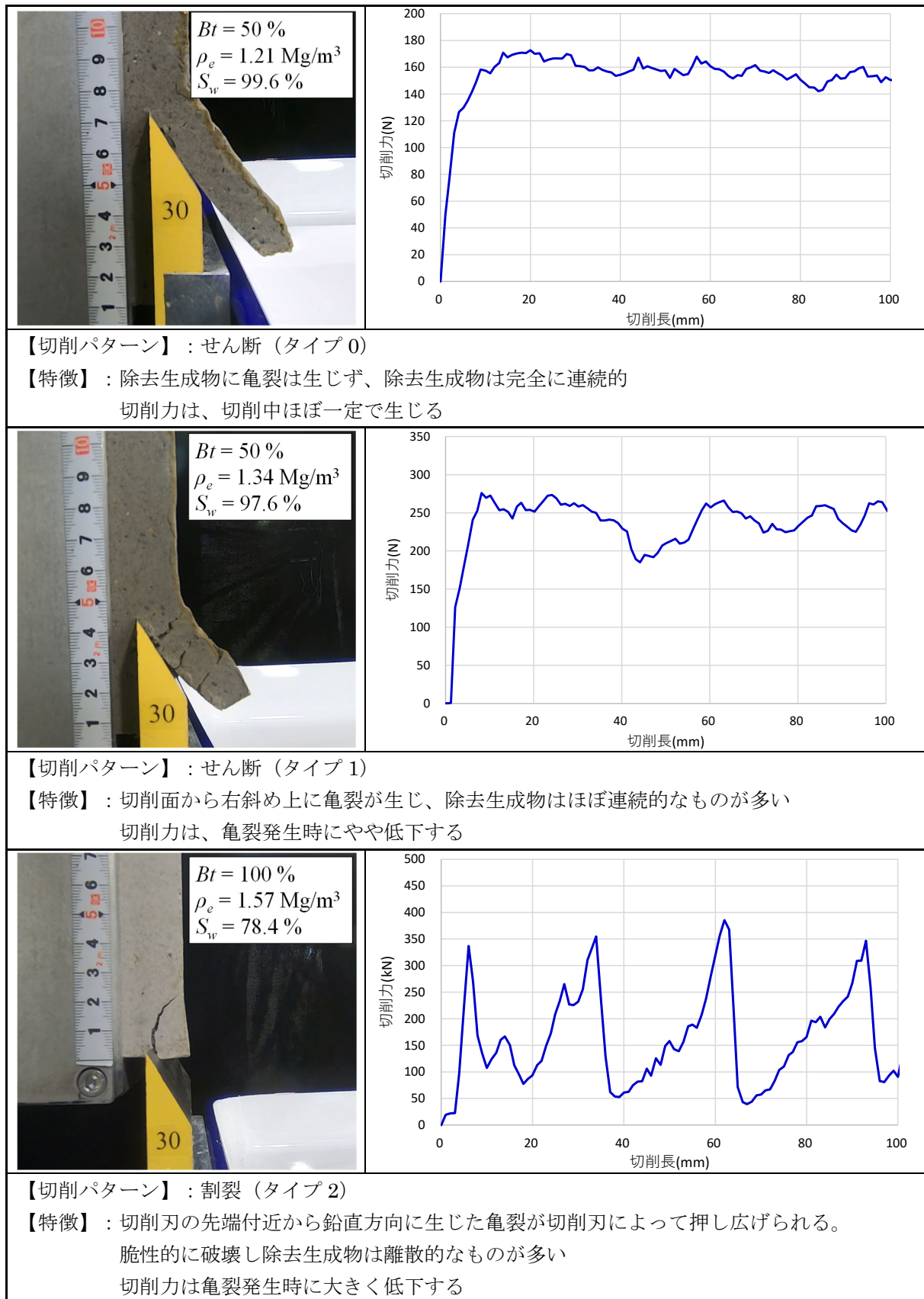


図 2.3-39 切削パターンの分類と特徴
 （原環センター・原子力機構，2022）

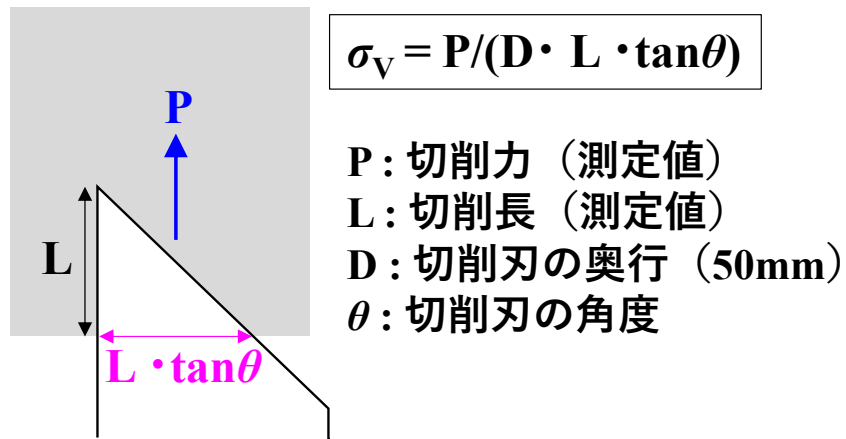


図 2.3-40 切削面に生じる鉛直方向の応力

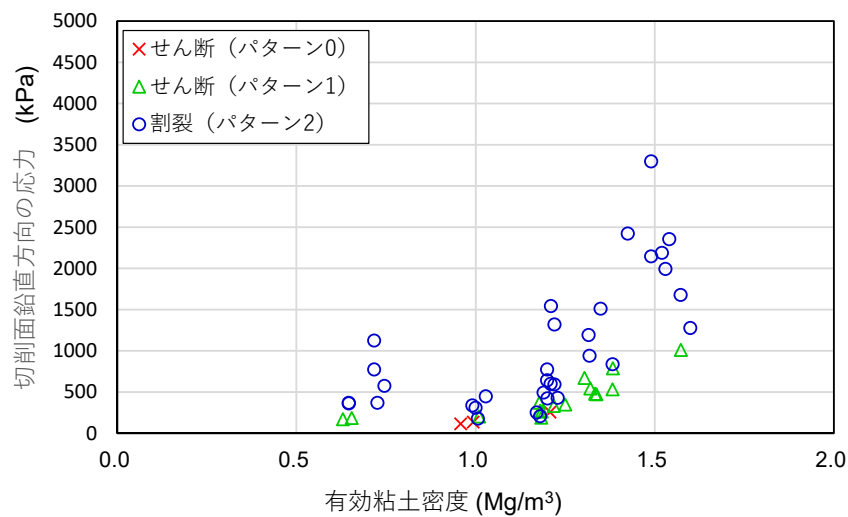
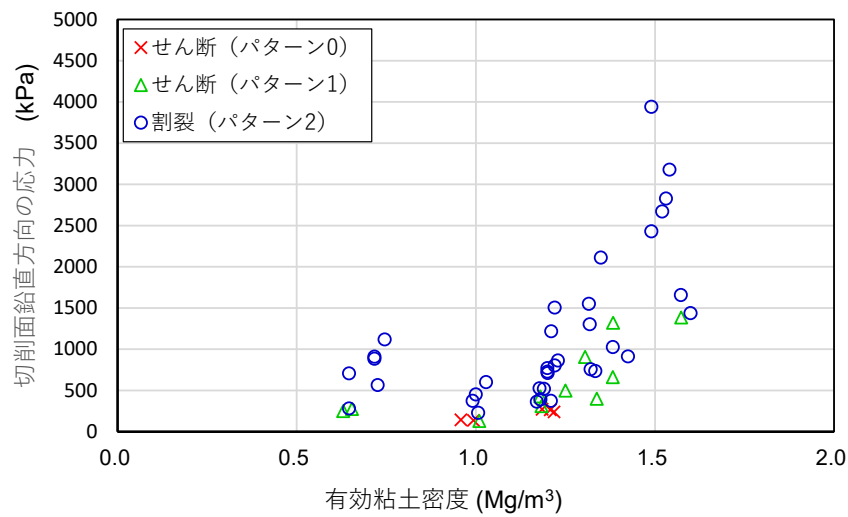
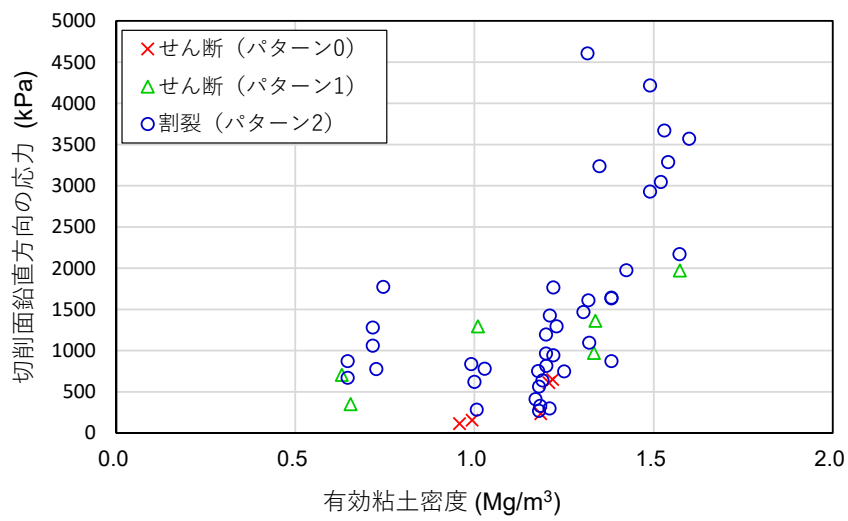


図 2.3-41 切削面に生じる鉛直方向の応力と有効粘土密度 (上から $\theta = 30^\circ$, 45° , 60°)

(3) 機械的除去装置の概念設計

これまでの試験や検討結果から、隙間充填材除去装置を具体化するうえで装置が具備すべき機能等を検討し、機械的除去装置の概念設計案を作製した。

(a) 切削機構の検討

隙間充填材除去装置の具体化に当たり、最も重要となる「除去ユニットを駆動させる切削機構」については切削試験等から得られた知見から以下のように検討した。図 2.3-43 に切削機構の概要と切削作業の STEP を示す。

除去ユニットの台数が多いと除去速度が向上して除去作業の迅速化にとっては有利であるが、馬蹄形状で狭隘な作業空間と除去ユニットの移動範囲を考慮すると除去ユニットの台数を 2 台とし、作業範囲を左右に 2 分割する方式が合理的である。切削試験結果から除去ユニットは鉛直下向きに動作させる必要があるため、逆 J 型の Cutter ガイドレール上を除去ユニットが走行し、その Cutter ガイドレールを上下・左右に移動させ、傾斜させる装置を組み合わせた切削機構とした。切削作業は、処分坑道の頂部から開始し、STEP4 までは Cutter ガイドレールを上下に移動させることで切削する。坑壁付近の切削となる STEP5 では Cutter ガイドレールを水平方向に移動させて切削する。

(b) 付帯設備

切削試験では除去生成物の約 15% が路盤に落下した。そのため、路盤に落下した除去生成物を回収する装置が必要である。加えて、路盤に近い隙間充填材の切削は、除去ユニットが路盤コンクリートを損傷させるリスクがあるため、別の除去方法を適用する必要がある。そこで、除去ユニットで隙間充填材を除去した後に残存した路盤付近の隙間充填材の除去と路盤に落下した除去生成物の回収を同時に行う設備を設置する。

除去ユニットによる切削後には、PEM の周囲には不規則な形状の隙間充填材が残置されている。そこで、PEM 周囲に一定の厚みで隙間充填材が残るように余分な部分を除去する設備を設置する。

(c) 概念設計案

図 2.3-44、図 2.3-45 に隙間充填材除去装置の概念設計案のイメージ図を示す。概念設計では必要な設備や部材を組合せて配置する段階まで実施した。設備や部材の構造検討（設備や部材の強度のチェック等）を実施していないため、詳細設計では部材の仕様変更等が必要と考えられる。なお、イメージ図では、切削試験で使用した軟岩掘削用のツインカッターを記載しているが、今後開発されるベントナイト用のカッターに変更する予定である。

隙間充填材除去装置の概要と作業手順は以下の通りである（図参照）。

- 切削機構は左右に 1 セットずつ配置する。
- 除去ユニット（白、黄）は Cutter ガイドレール（水色）上を走行して切削する。除去生成物はバキュームで吸引され、分離タンク（紫）で回収し、搬出する。なお、除去ユニットから分離タンクへ向かう吸引ホースの記載を一部省略している。
- 除去ユニット、Cutter ガイドレールの上下移動装置（赤）、左右移動装置（緑）が連動して動くことにより、馬蹄形の切削領域の中でカッターを鉛直方向に移動させて切削することができる。
- 路盤付近の切削では、ツインカッターに設けられたヒンジを使って除去ユニットを傾けることで切削する（図 2.3-43）。ただし、路盤近傍の隙間充填材の完全な切削・排土は困難

であり、切削できない隙間充填材が残る。

- カッターガイドレールの傾きを調整するピッチ装置（オレンジ）を装備している。
- 1 レイヤ切削するごとにピッチ装置とその前側を前進させ、所定の回数の切削が完了した段階で、ピッチ装置とその前側を元の位置まで後退させる。
- 装置全体を前進させて所定の位置にセットしたら、切削を開始する。以下、同様の作業を繰り返す。
- PEM の周囲の隙間充填材については、除去ユニットによる切削後に不規則に残置された部分をスクレーパ（ピンク）で所定の厚さを残して除去し、PEM の左右の路盤に落下させる。
- PEM の左右に落下した除去生成物と上記の路盤に残された隙間充填材は排土板で前方に移動させ、除去ユニットによる次の切削・排土の際に回収する。

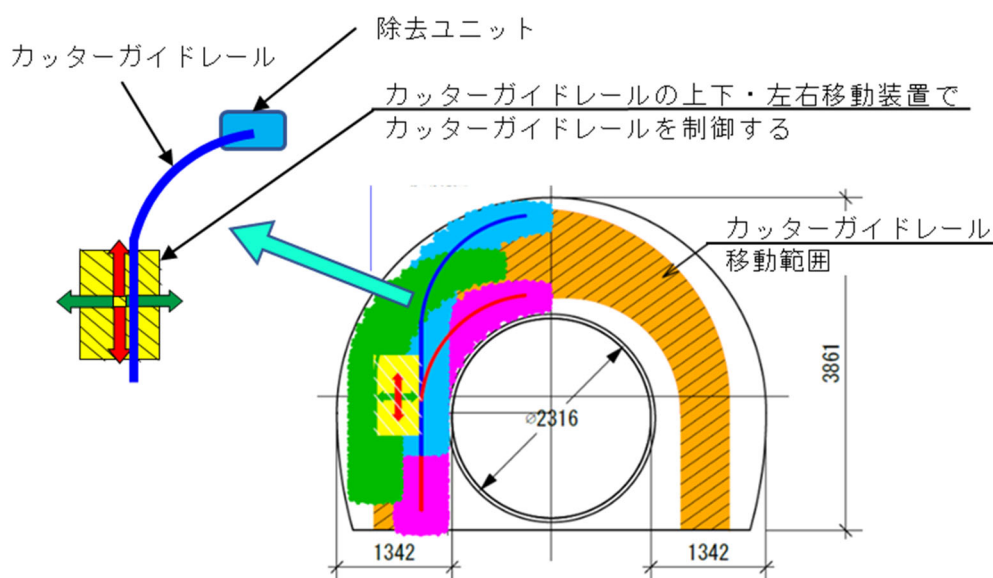
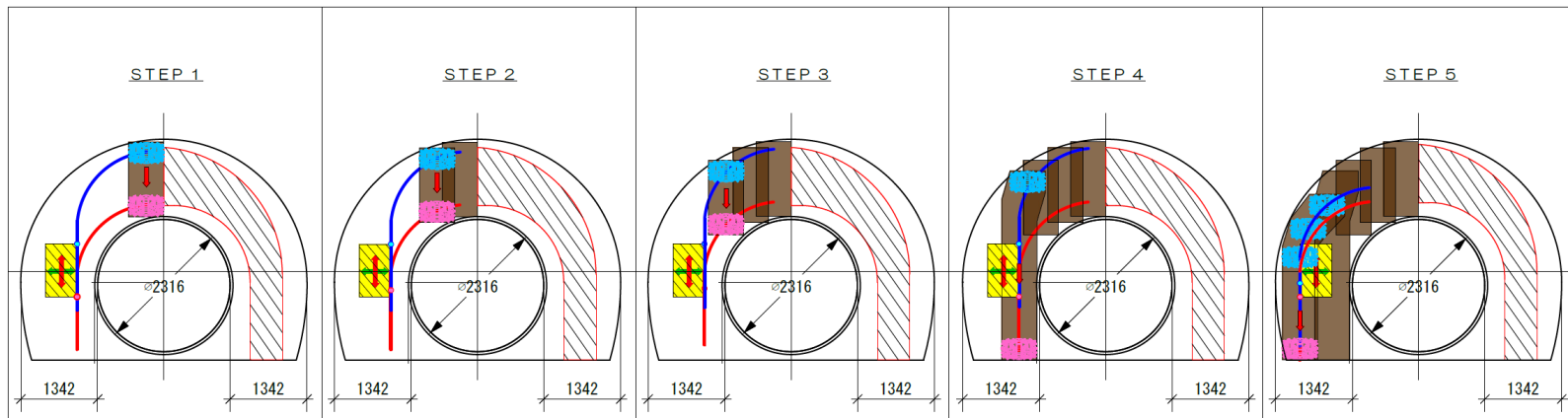


図 2.3-42 ツインカッター切削機構の概要

切羽切削機ステップ図（横断方向）



切羽切削機ステップ図（縦断方向）

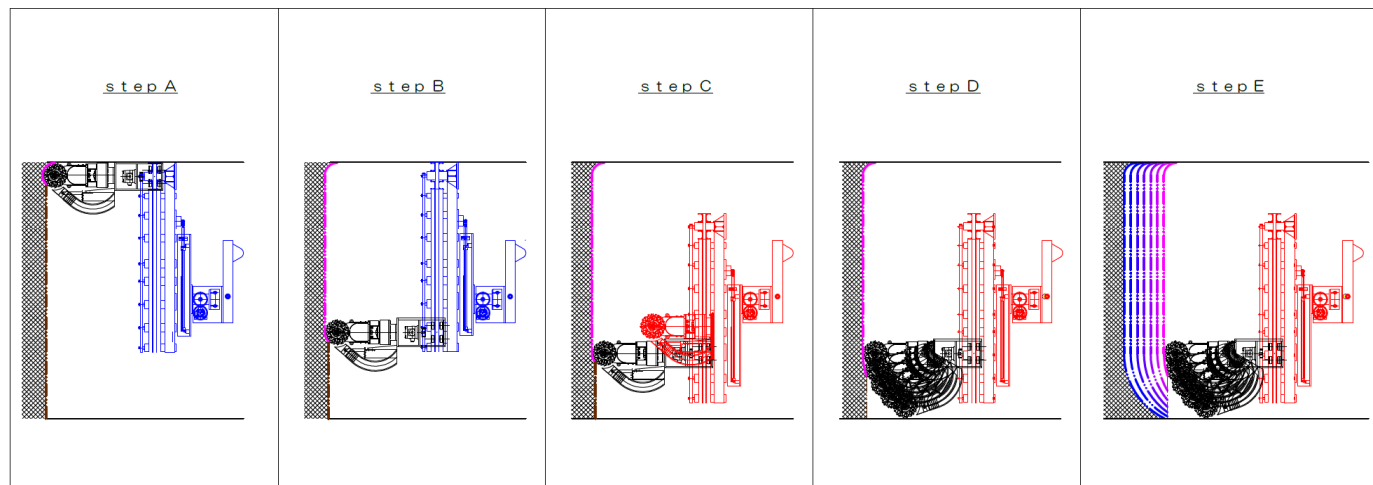


図 2.3-43 坑道における切削ステップ

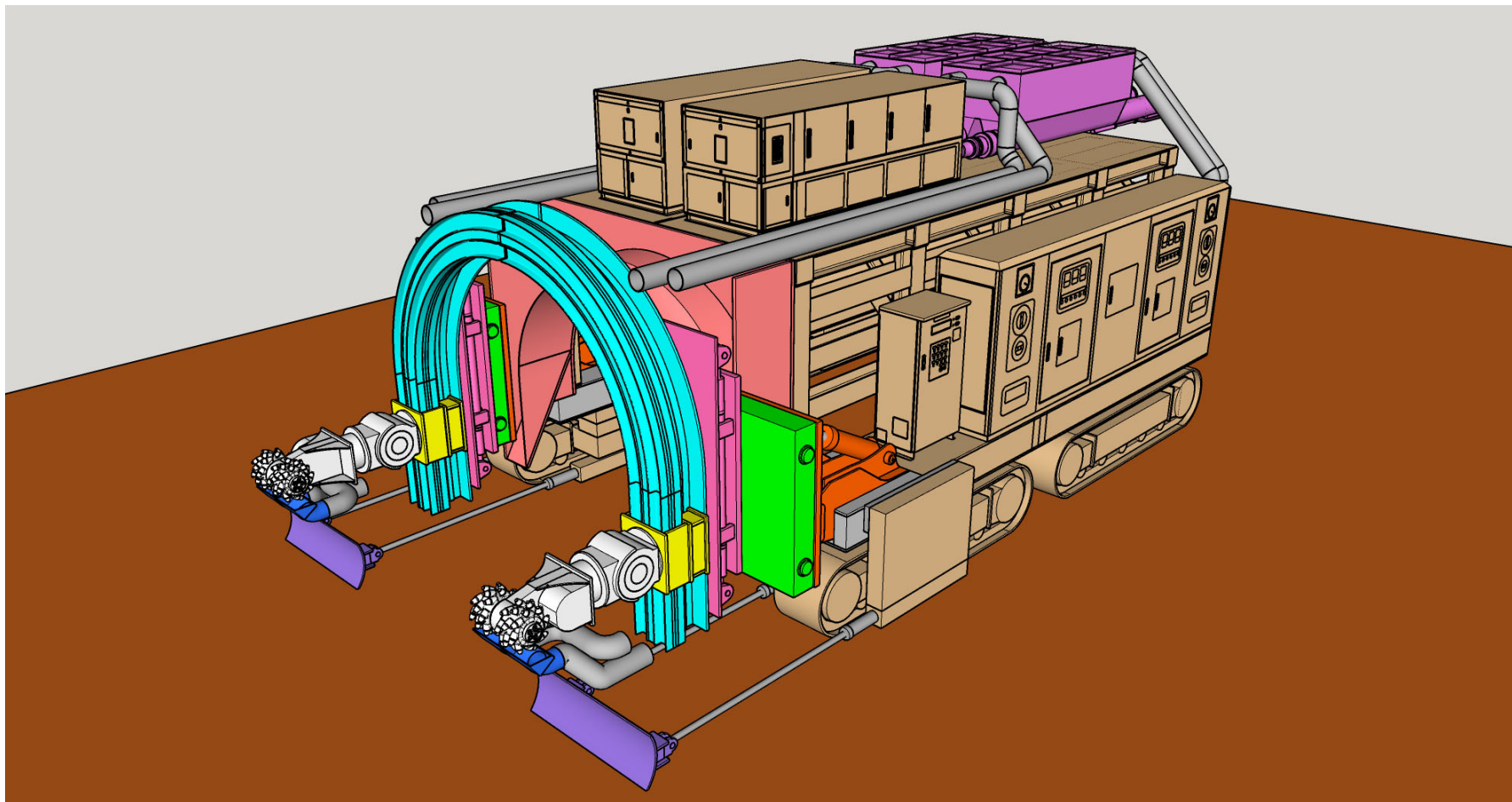


図 2.3-44 隙間充填材除去装置の概念設計案のイメージ (1/2) (俯瞰図、排土板伸長)

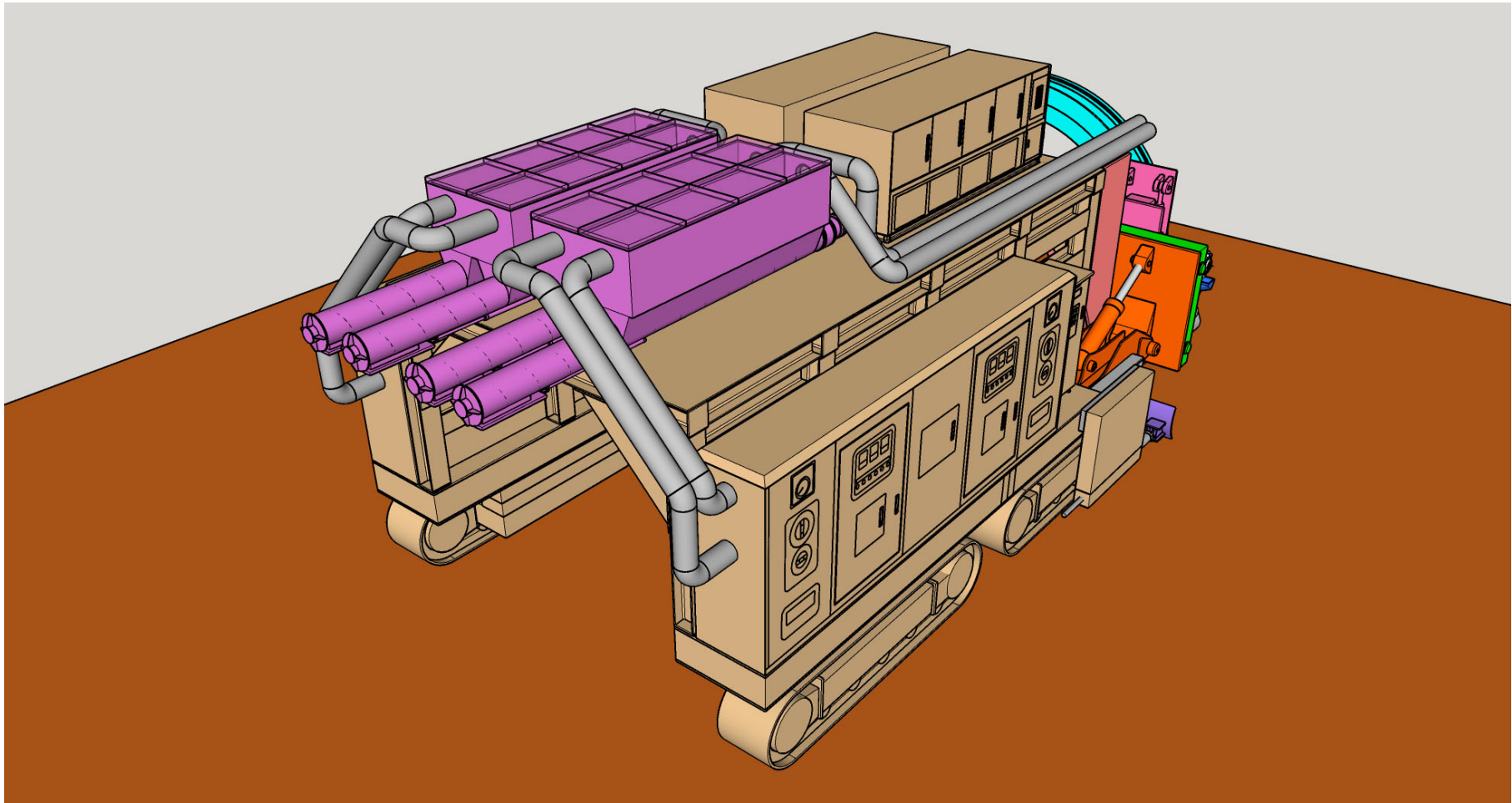


図 2.3-45 隙間充填材除去装置の概念設計案のイメージ (2/2) (右後方より、排土板短縮)

(d) 遠隔化を前提としたシステム化

隙間充填材の除去は PEM が残された状態での作業となる。隙間充填材が除去され PEM が露出した状態では、PEM から放出される放射線及び熱の影響を考慮する必要がある。放射線については、PEM の表面から 1 m の距離における空間線量率は、定置の時点において $1 \mu\text{Sv/h}$ よりも低い(MUMO, 2021)、作業員に対する放射線防護の観点からは遠隔操作が望ましい。熱に関しては、PEM の温度は処分坑道への定置後約 20 年で最高温度 83.2°C に達し、100 年程度で 67°C 程度になる(NUMO, 2021)。そのため、隙間充填材除去作業時に PEM が露出した処分坑道内は、高温、高湿度になっていると予想され、作業員が現場で作業する環境としては非常に厳しい。

以上より、隙間充填材の機械的除去装置は作業員の搭乗や立ち入りを不要とする遠隔化を前提としたシステム化が必須である。

遠隔化のための主な必要設備は以下の通りである。

- ・坑道内における現地状況、装置位置の把握、姿勢制御等を行うためのセンサー
- ・360 度カメラ、VR などの導入
- ・機械の作動状況（油温、振動、異音など）を遠隔で把握するためのシステムの開発
- ・自動運転技術の開発

2.3.8 今フェーズで得られた成果の総括

今フェーズ（2020 年度～2022 年度）で得られた成果は以下の通りである。

(1) 過年度の成果

- 隙間充填材除去作業迅速化の目標時間として、PEM 一体当り 5 時間未満を設定した。
- 隙間充填材の切削方式として自由断面掘削方式と固定断面掘削方式を選択し、両方式によるベントナイト混合土を切削する要素試験を実施して、自由断面掘削方式は固定断面掘削方式に比べて除去生成物のサイズが小さいことから、後続する排土機構への連携性を念頭に切削機構として自由断面掘削方式を選択した。
- 粘土用の切削装置が存在しないため、自由断面方式の切削装置として既存コンポーネントの中からロードヘッダを選択した。
- 排土機構はバキューム方式とした。
- 隙間充填材除去装置は PEM を跨ぎ、全断面掘削方式で除去生成物を切削・排土する。
- 吸引能力確認試験から吸引ホースのサイズとして 5B（口径 127 mm）を選択し、吸引口の形状を検討した。

(2) 今年度の成果

- 過年度に選択したロードヘッダは隙間充填材に貫入する際に切削部へ隙間充填材が付着することで切削効率の低下、除去生成物の粒径が大きくなるという課題が示された。そこで、ロードヘッダと同様の切削機構を有し、貫入が不要で切削面に対して垂直に切削可能なツインカッターに変更した。
- 今年度は、ツインカッターとバキューム吸引による排土機構を組み合わせた機械的除去試験を実施し、隙間充填材除去システムの要となる機械的除去ユニットの適用性を既存のコンポーネント（軟岩掘削用）を使用した機械的除去試験で確認し、隙間充填材除去用の切削部の開発に資する知見が得られた。
- 除去生成物の回収に必要な排土設備（吸引ホース、分離タンク、バキューム装置）の適用性、設備の能力等をバキューム吸引能力確認試験及び機械的除去試験で確認した。

- 除去作業の迅速化の目標であった PEM 一体当たりの除去時間：5 時間未満を達成するためのデータが得られた。
- 切削試験（室内試験）及び機械的除去試験におけるカッターへの除去生成物の付着状況からベントナイト混合土の材料特性とカッターへの付着に関する考察を行い、ベントナイト混合土の配合とカッターへの付着の関係に関するデータが得られた。
- これまでの成果・知見から、隙間充填材除去システムの概念設計案を作成した。

(3) 今後の課題

今後の課題は以下の通りである。

- 隙間充填材のベントナイト配合率や飽和度等の材料特性によってはカッターへの付着が多くなる傾向があるため、付着の少ないベントナイト混合土用のカッターを開発する。
- 室内試験等を実施して、カッターへの隙間充填材の付着とベントナイト混合土の材料特性との関係を検討する。
- 上記課題を解決する技術・装置を組み込んだ除去システムの概念設計の具体化を進める。
- 概念設計では遠隔操作化を前提とする。
- 原位置または模擬処分坑道での実証試験を行う。

参考文献

SKB, Techniques for freeing deposited canisters, SKB-TR-00-15, 2000.

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委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書，2009.

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委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書，2010.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 26 年度地層処分技術調査等事業 地層処分回収技術高度化開発 平成 23 年度～平成 26 年度 総括報告書，2015.

原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 31 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 平成 27 年度～平成 31 年度 5 カ年とりまとめ報告書，2020.

原子力環境整備促進・資金管理センター・日本原子力研究開発機構：令和 2 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（回収可能性技術高度化開発）報告書，2021.

原子力環境整備促進・資金管理センター・日本原子力研究開発機構：令和 3 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（回収可能性技術高度化開発）報告書，2022.

原子力発電環境整備機構：包括的技術報告：我が国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，NUMO-TR-20-03，2021.

広辞苑第 6 版 岩波書店，1995.

畑村 洋太郎・千々岩 健児：土の切削機構の解明（第 1 報，土の切削パターンについて），日本機械学会論文集第 3 部，40 巻 338 号，pp.2945-2955，1974.

東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社，土木工事積算基準 令和 2 年度版，2020.

3. 回収の容易性を高めた詳細設計オプションの整備

3.1 目的

回収の容易性を示す指標の1つである回収作業時間は、回収可能性の維持が安全性に及ぼす影響とともに、回収可能性の維持期間を設定する上で重要な定量化項目である。回収作業時間の短縮は、回収作業そのものの安全性に対する不確実性の低減、回収可能性の技術的信頼性の確保に寄与する。この迅速化という技術開発課題に対して、回収方法（技術・装置）の開発や運用に重点を置いた技術的アプローチ1として、回収作業上のボトルネックとなる廃棄体の周囲の土質材料の除去技術の高度化を進めている（第2章）。一方で、処分場の施設設計に対応した作業動線や物流容量などにより、技術の高度化を実現した場合であっても、ある程度の回収作業時間は必要になる。これに対し、回収をより容易にするための方法を設計に考慮する技術的アプローチ2による更なる迅速化について検討を進めている。

これまでに、我が国において検討や技術開発が進められている処分孔縦置き方式と処分坑道横置き・PEM方式の2つの定置概念に対する回収作業の具体化、工程の検討を通して、作業時間の短縮の観点から、回収の容易性を高めるためのポイントを抽出・整理し、回収の容易性を高める詳細設計オプションの検討を進めてきた。また、オーバーパックとPEMを各定置方式に対する回収時のハンドリングの最小コンポーネントとして、回収作業時間の短縮を可能とする詳細設計オプションを適用した詳細設計や定置方式に関する複数の案を作成した。現時点においては、「回収可能性」に重点を置いたものとなっている。今後は「閉鎖前の安全性」、「閉鎖後長期の安全性」、「工学的成立性」、「経済的合理性」とった他の設計因子（NUMO, 2021）、それらを具体化した評価項目（原環センター, 2021）の観点からも適時検討を加え、適切に更新・改良を加えていくこと（最適化）が必要である。

本年度は、昨年度検討した処分坑道横置き・PEM方式の回収の容易性を高める詳細設計オプションの検討である、隙間充填材を不要とする狭隘円形断面坑道へのPEM定置について、PEMの搬送・定置・回収の観点から技術的実現性の提示に向けた検討を実施した。

3.2 処分坑道横置き・PEM 方式を起点とした詳細設計オプションの適用例

処分坑道が埋め戻された状態 B の地下施設から PEM を回収するためには、PEM－坑道間に施工された隙間充填材を除去した後、PEM を処分坑道から搬出する手順である。第 2 章で述べたように、隙間充填材の除去作業を迅速化する機械的除去技術の整備が進められている。このような、技術や設備の開発に重点をおき回収作業時間の短縮を図る方針を、技術的アプローチ 1 と定義する。技術的アプローチ 1 による回収作業時間の短縮は、個々の装置の能力高める技術開発と、既定の処分施設に対する作業手順の合理化・最低化によって実現される。一方で、技術的アプローチ 1 によってもある程度の期間を要する。さらなる回収作業時間の短縮の要求への対応として、回収の容易性を処分場設計に考慮する技術的アプローチ 2 による検討を実施した。本検討は、以下に挙げる前提条件の範囲で実施した

- ・ 現行の処分坑道横置き・PEM 方式をベースとした検討
- ・ 現行の作業動線、換気経路の考え方を踏襲
- ・ 閉鎖後長期の安全性への影響に留意し、人工バリア構成は現行概念を踏襲

現行の処分坑道横置き・PEM 方式の設計に対して回収の容易性を高める詳細設計オプションを適用すると、処分場のレイアウトの変更が生じる。更新された処分場の施設設計に対し、現行の定置方式に対して開発された回収技術の適用について、技術的アプローチ 1 による容易性向上の余地についても再検討する。


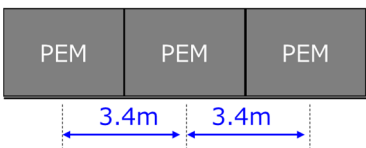
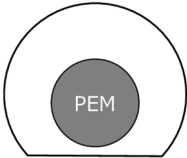
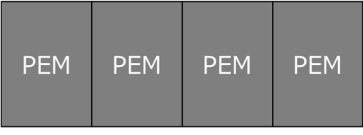
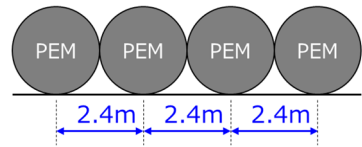
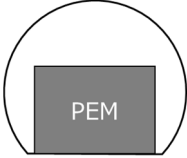
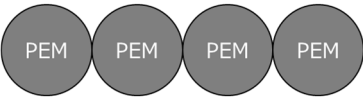
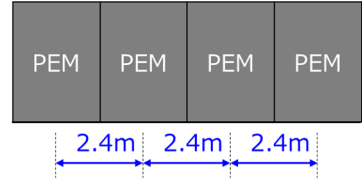
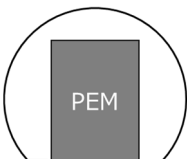
3.2.1 隙間充填材の除去量の削減

技術的アプローチ 1 による回収作業時間の短縮の最も単純な方法は、装置台数を増やした同時作業の実施である。この方法では、地下施設の空間的な制約や、地上までの物流動線が影響する。

PEM を回収する際の前段の作業である隙間充填材除去に要する時間の短縮は、隙間充填材の除去技術の高度化の他に、除去対象である隙間充填材の量自体の削減が必要となる。

現行の処分坑道横置き・PEM 方式における PEM は、直径 2,316 mm、長さ 3,356 mm の円柱形状である。この外寸は、処分坑道横置き方式における定置間隔 3.33m を出発点とし、PEM 方式の検討や PEM の製作試験の成果を踏まえて設定されている。施設設計に対する詳細設計オプションの検討では、この PEM 形状を前提とする。

処分坑道に PEM を定置する場合、人工バリアとしての定置方向である縦置き／横置き、円柱形状の PEM の並べ方として直列／並列があり、その組合せとして図 3.2-1 に示す 3 通りが考えられる。現行の処分坑道横置き・PEM 方式は(a)の横置き直列型に相当する。これに対して、図中の(b)や(c)のように PEM を並列で定置すると、処分坑道長が PEM 一体あたり約 1 m 短縮される。処分坑道の断面積を固定すると、この分だけ隙間充填材の量が削減されることになる。

	上面から	側面から	断面から
(a) 横置き 直列型			
(b) 横置き 並列型			
(c) 縦置き 並列型			

※本図中では、便宜上 PEM 全長を 3.4m、PEM 外径を 2.4m としている。

図 3.2-1 処分坑道定置方式の定置方法のバリエーション

3.2.2 坑道内の空間と作業性

処分坑道定置方式における坑道再開放は、廃棄体周囲の土質材料の除去を兼ねるため、ある空間を占める廃棄体が存在する環境下での作業となる。定置方向の違いによって、図 3.2-1 のように PEM 周囲の隙間充填材の施工領域の形状が大きく異なる。直列型は処分坑道内の断面形状が画一であり、除去作業の単純化やある断面形状に対する除去装置の開発が実施し易いと考えられる。一方、並列型では坑道長手方向に対して、断面形状が周期的に変化するため、例えば PEM を回り込むような動作が必要になる。さらに、処分坑道断面に対する PEM の投影面積が大きくなるため、装置や動作に対する空間的な制約が直列型よりも大きくなる。このように、掘削ブリの発生量削減を目的とした PEM の定置方向の変更の効果と、定置方向による除去作業性効率はトレードオフの関係にあると考えられる。再開放作業自体の効率が低くなる場合、再開放作業を実施するパーティー数を増やす必要が生じるため、地下環境での運用が新たな制約条件となる可能性がある。

処分坑道内での作業性に及ぼす PEM の定置方向の影響としては、画一的な坑道断面となる横置き直列型が有利であると考えられるが、この場合坑道の短縮による発生土（除去生成物）の削減という詳細設計オプションは成立しない。直列方式の条件下で発生土を削減するには、処分坑道断面積を縮小する必要がある。ただし坑道断面は PEM の搬送定置装置の動作空間の確保の観点から設定されており、縮小するにはコンパクトな搬送定置装置と隙間充填技術の開発が必要である。

現在実施中の処分坑道横置き・PEM 方式の回収技術の高度化開発（2.3 節参照）において、PEM

1 体分の充填材の除去 → PEM 1 体の回収」という手順を繰り返す場合、除去装置と回収装置の入れ替え作業に伴う時間的なロスが課題として挙げられている。これに対して、処分坑道に定置される複数の PEM の周りの隙間充填材の除去作業を先行して連続で実施し、その後に PEM 回収する作業手順を検討している。処分坑道に PEM が定置された状態でも坑道内での隙間充填材の除去を実施できる、PEM を跨ぐ構造の隙間充填材の除去装置（図 3.2-2）の実現に向けた技術開発を実施している。

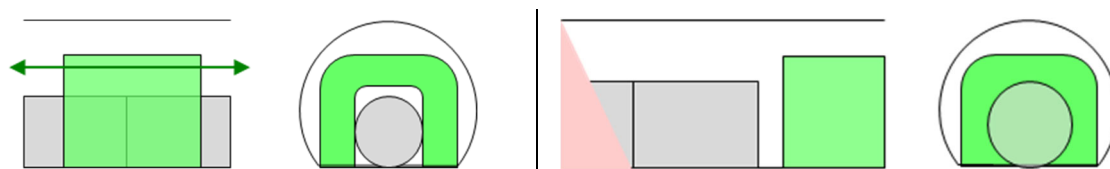


図 3.2-2 PEM を跨ぐ構造の機械的除去装置のイメージ図（左）

以上のように、処分坑道横置き・PEM 方式においては、処分坑道の短尺化や処分坑道断面の縮小による掘削ズリ（隙間充填材）の発生量の低減が必ずしも回収作業時間の迅速化に繋がらないことが示唆されている。

3.2.3 隙間充填材の省略

これに対し、処分坑道内の隙間充填材を省略し、処分坑道の再開放作業自体を不要とする詳細設計オプションの適用を検討した。図 3.2-3 に詳細設計オプションの適用イメージを示す。

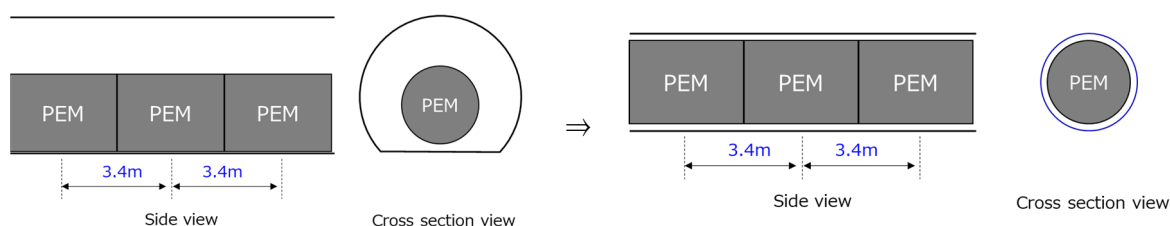


図 3.2-3 詳細設計オプション（隙間充填材の省略）を適用したイメージ

円形小断面への定置・回収技術については、PEM 周囲の隙間が十数 cm となる場合の定置から回収までの一連の技術について実証が行われている（図 3.2-4）。ただし、十数 cm 程度の隙間の場合、隙間の残存が閉鎖後長期の安全性の観点で許容できないため、隙間充填材の施工が、回収の除去作業は必須である。



搬送定置・回収技術
エアベアリング方式



隙間充填技術
スクリーフィーダ方式



隙間充填材除去技術
WJ 方式

図 3.2-4 円形断面の坑道に対する PEM の操業技術の整備例

閉鎖後長期の安全性への影響の観点から、PEM 周囲に許容できる隙間の幅を計算した（原環センター・原子力機構, 2021）。PEM 内部の緩衝材が隙間を埋めることを想定し、基本的な設計要件に対する緩衝材の仕様範囲を満たすことができるか検証した（NUMO, 2021）。基準値は、最も高い有効粘土密度を要求する「Ca 型化した緩衝材が塩水環境中で自己修復性を発現する下限値」とした。図 3.2-5 に、隙間幅と有効粘土密度の関係を示す。PEM 内部の緩衝材を乾燥密度 1.7 Mg/m^3 で製作した場合、隙間の幅が 91 mm 未満であれば、緩衝材のかさ密度の観点では成立することが示された。PEM 内部からの緩衝材の膨出による隙間の閉塞挙動、巨視的な密度分布、安全評価上の坑道長手方向の透水性など、確認すべき項目や課題は存在するが、PEM 周囲に隙間を存置する定置方式が成立する見通しを得た。

以上より、現行の処分坑道横置き・PEM 方式に対する施設設計への詳細設計オプション適用例として、隙間充填材の省略を選択した。

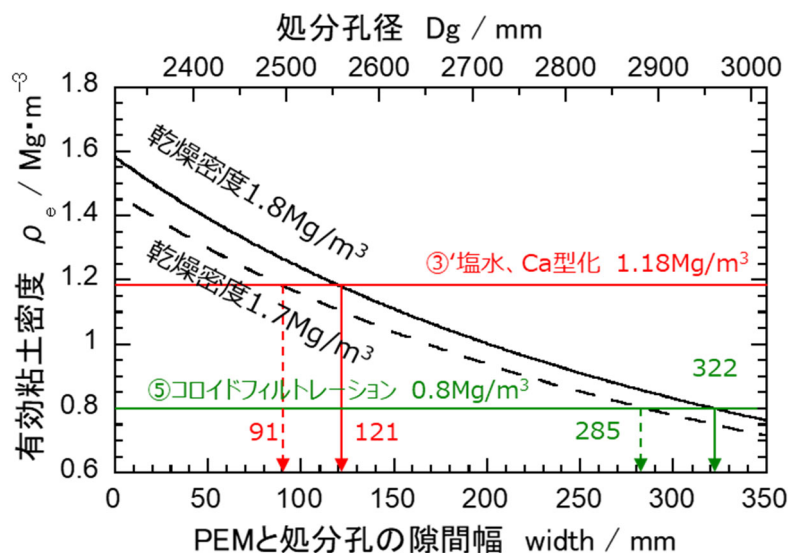


図 3.2-5 閉鎖後長期の安全性の観点から見た隙間幅の許容値（PEM 方式）

3.3 詳細設計オプションの技術的実現性

隙間充填材を省略した横置き・PEM 方式は再開放作業自体が無くなるため、PEM を搬出するのに要する時間が、そのまま回収作業時間になる。しかしながら、幅 91 mm の隙間幅では、これまでに整備してきたエアベアリング方式の搬送・定置技術が適用できない。

この詳細設計オプションについて、円形処分坑道の掘削技術について技術動向を調査、重量物である PEM の搬送定置・回収に関わる技術の観点から、技術的実現性を検討した。

3.3.1 小断面坑道の掘削技術

最終的な小断面円形坑道の仕上がり内径は、PEM の外径 2,316mm に隙間の許容幅 91mm を踏まえ直径 2.4m 程度を目安とした。掘削まま、ケーシングや支保の設置の有無によって、掘削する坑道径は設定する必要がある。我が国では 3 種類の岩盤を母岩候補として取り上げているが (NUMO, 2021)、本検討では、工学的な観点から「軟岩」と「硬岩」という分類で適用する掘削工法と支保材の設置方法について整理する。

水平円形坑道の掘削技術について調査した結果を表 3.3-1 に示す。軟岩の場合、ドリルカッター工法、大口径推進工法とも適用が可能で、推進管として鋼製ケーシング、ヒューム管の使用が可能である。無水で掘削できるかは、岩盤の強度に依存する。岩盤との間隙が発生するため、充填が必要な場合、ヒューム管の方が対応は容易である。どちらの場合も浸透してくる地下水の排水ドレーンが必要となる。硬岩の場合、プッシュ・リーミング工法が最も適用性が高い。基本的に支保工は必要ないが、掘削後の鋼製ケーシングの挿入は可能である。地下水の浸透、掘削水の排水のため、処分孔は坑口方向に傾斜をつける必要がある。

なお、パイロットボーリング孔が必要となる「4)プッシュ・リーミング工法」や「5)レイズボーリング工法」は、デッドエンド型の処分区画の掘削には適用できない。

掘削した小断面円形坑道は、空洞安定性や作業時の作業性などの観点から、掘削したままの裸孔、鋼製ケーシングやコンクリート製ヒューム管の設置などが考えられる。掘削坑道を鞘として管材を設置する場合、使用材料による坑道壁面の性状だけではなく、繋ぎ目の存在、止水機能の有無も、作業時の環境条件となる。また、表 3.3-1 に示す各掘削技術により実現可能な坑道延長は、処分坑道長を決定する因子の一つとなる。

目的の断面を有する処分坑道が建設された後は、この坑道に PEM を定置するための技術が必要であるが、これまでに整備したエアベアリング方式の定置装置の適用可能な隙間よりも狭い。このような狭隘空間での PEM を定置・回収するために必要な条件、及び装置について検討した。

表 3.3-1 円形小断面の坑道の掘削技術

掘削工法	特徴	支保材	実績	軟岩への適用性	硬岩への適用性
NATM					
1)ドリルカッター工法	鋼製ケーシングを坑口で油圧ジャッキで推進しつつドリルカッターで掘削しオーガーで掘削ずりを排出する。無水掘削可能	・鋼製ケーシング ・ヒューム管	・ANDRA (φ700mm)	・実績があり適用できる ・径が大きくなった場合押し管の選択が必要	・口径が大きくなった場合、ドリルカッターでは無水での掘削が難しい
2 大口径推進工法	坑口にセットした油圧ジャッキで管を押しながら刃先で岩盤を掘削。無水掘削可能	・鋼製ケーシング ・ヒューム管	地盤：多数あり 岩盤：実用機械が存在	・ヒューム管を用いた実績が十分ある。 ・掘削面に泥水が必要	・刃先を硬岩用とし泥水推進掘削で対応できる。 ・推進力の吟味が必要
3)マイクロTBM	オープン/シールドタイプのマイクロTBMは、掘進動力を内蔵し掘削できる。径が大きくなると機械長も長くなる。	・鋼製ケーシング ・コンクリートセグメント ・ヒューム管 ・無支保	・ANDRA ・SKB(比較対象として検討)	・小型TBMは適用可能（マイクロTBMではなく）但しマシンの短縮化が必須 ・挿入管の選択が必要	・オープンタイプの適用が可能 ・マシンの組立・発進空間の確保が必要 ・支保なしでも掘削可能
4)プッシュ・リーミング工法	パイロットボーリング孔に反力を得て、刃先を回転しながら掘削面を前進させる。極めて精度が高く仕上がる。	・鋼製ケーシング ・ヒューム管 ・無支保	・SKB (φ1,850mm)	・軟岩への適用も可 ・支保材が必要 ・掘削水、泥水が必要	・SKBの実績もあり適用可能 ・掘削ずりの排出に工夫が必要 ・掘削水・泥水が必要
5)レイズボーリング工法 (プル・リーミング工法)	パイロットボーリング孔に内蔵したケーブル等を牽引することで回転する刃先が岩盤を掘削する。	・鋼製ケーシング ・ヒューム管 ・無支保	・WIPP換気立坑 ・HRL立坑	・軟岩系にも適用可能 ・支保材が必要 ・掘削水、泥水が必要 ・両側に作業坑道が必要	・プル・リーミングでの掘削可能、支保必要なし ・掘削ずりの排出に工夫が必要 ・掘削水、泥水が必要 ・両側に作業坑道が必要
6)推進工法	推進管の先端に掘進機を取り付け、後方のジャッキで押し進める。推進管を付け足して処置の管路を構築する。	・鋼製ケーシング ・ヒューム管	・下水道管、など	・地下深部での適用事例はない。	・地下深部での適用事例はない。

3.3.2 PEM－坑道壁面との固着の防止技術

処分坑道の壁面は表 3.3-1 に示すように、裸孔、鋼製ケーシング、コンクリート製セグメント、ヒューム管などが考えられる。これに対して PEM は炭素鋼製の鋼殻である。回収可能性の維持期間中に生じた腐食により、坑道壁面材料と腐食生成物で固着する懸念がある。これに対し、PEM と坑道内壁の固着を防ぐため、化学的に不活性な材料で製作された部材を PEM-坑道間に設置する方法を検討した。

(1) 解析条件

(a) 摺動スライダーに作用する荷重

回収時の摺動スライダーへの荷重としては、自重による反力、摺動時の摩擦力が想定される。PEM1 体に対して、4 個の摺動スライダーを取り付けた場合について作業荷重を設定した。

物体は 3 点が接地した状態で安定するため、PEM を剛体と仮定しても製作上の誤差などにより、静止時は 3 点支持になると考えられる。また、摺動時は 3 点支持から 2 点支持を経て新たな 3 点支持に落ちつく動作を繰り返すと考えられる。よって、摺動スライダーへの反力を求める際には、前後の 2 点支持になった時を想定することにした。

PEM の中心を荷重 P で引張った時の反力の状況を図 3.3-1 に示す。ここで、 W は PEM の自重、 P は牽引力、 H_A と H_B は A 点と B 点の水平反力、 R_A と R_B は A 点と B 点の鉛直反力、 R_{Br} は R_B の半径方向の分力、 $R_{B\theta}$ は R_B の円周方向の分力である。なお、摺動スライダーの取り付け位置の円周方向の角度 θ については $\theta=30^\circ$ と設定した。また、摺動スライダーの前後の取付位置については、両者が接近しすぎると、牽引時に A 点側が浮いてしまうこと、また、両者を離れた方が鉛直反力の差が小さくなるので、なるべく両者は離れた方が良いと考えられる。

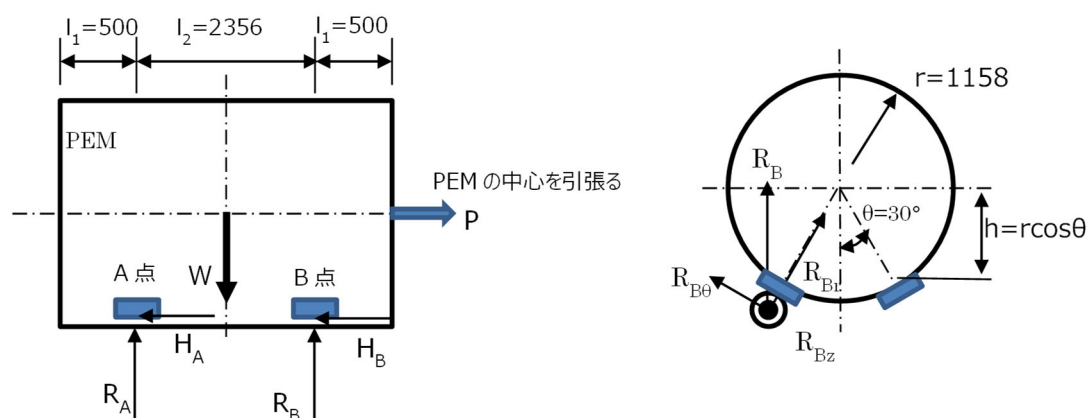


図 3.3-1 PEM 回収時における摺動スライダーへの反力

図 3.3-1 のような状況の場合、B 点側の鉛直反力 R_B の方が A 点側の鉛直反力 R_A よりも大きくなるので、摺動スライダーに作用する荷重は、B 点側だけで算定することにする。

摩擦係数を f とすると、鉛直方向の力のつり合い、水平方向の力のつり合い、および B 点廻りのモーメントのつり合いから、鉛直反力 R_B は、 $R_B = W \cdot \{1/2 - (h \cdot f \cdot \cos \theta) / l_2\} W$ となる。また、摩擦係数を、 $f=0.5$ とすると、 $R_B=250(\text{kN})$ 、半径方向分力 R_{Br} と、円周方向分力 $R_{B\theta}$ 、水平反力 H_B は、それぞれ、 $R_{Br}=R_B \cdot \cos \theta=216(\text{kN})$ 、 $R_{B\theta}=R_B \cdot \sin \theta=125(\text{kN})$ 、 $H_B=R_{Br} \cdot f=108(\text{kN})$ となる。

なお、PEMの定置時の反力については、図 3.3-1 の左図とは逆方向に PEM の右面を左方向に押し込むものとして、摩擦係数が回収時と同一とすると、鉛直反力 R_A と R_B の値は、回収時と入れ替わるだけである。また、水平反力 H_A と H_B は、方向が逆となって、両者の値が入れ替わるだけである。

(b) スライダー部材の候補材料と物性値

摺動スライダーの材料には、機械的特性、特に強度に優れたものを選ぶ必要がある。定置孔の壁面との固着を防ぐため、化学的に安定なセラミックスをも選定した。セラミックスは、鋼材と比較すると、脆性的であり強度のばらつきも大きいことや、強度に及ぼす寸法の効果がある。ここでは、セラミックスに絞って検討することにした。本検討では代表的なセラミックスである窒化珪素 (Si_3N_4) とジルコニア (ZrO_2) を対象とする。表 3.3-2 にセラミックスの主な物性値を示す(京セラ, 2020 を基に作成)。

表 3.3-2 セラミックスの主な物性値

材質			窒化珪素	ジルコニア
材質記号			SN240	Z701N
3 点曲げ強度	MPa	JIS G 1601	1,020	1,470
ヤング率	GPa	JIS R 1602	300	220
ポアソン比	-		0.28	0.31

セラミックスの強度評価では、強度のばらつきを考慮するためにワイブル統計に基づく方法が用いられており、実際には材質ごとのワイブル係数が必要である。本検討における評価では、便宜的に 3 点曲げ試験による破壊応力の累積破壊確率の結果(北住ら, 1989) から、窒化珪素のワイブル係数を $m=9.30$ 、ジルコニアのワイブル係数を $m=13.8$ と設定した。

(c) 強度評価の方法

セラミックス部材の強度評価は、寸法効果と破壊確率を考慮して行われている。ここでは、日本セラミックス協会が発行した図書の方法を踏襲した(日本セラミックス協会, 1979)。

(d) 摺動スライダーの形状案

以下の点を踏まえて摺動スライダーの形状を設定した。摺動スライダーと鋼製ケーシングの接地圧を考慮すると、摺動スライダーの接触面の曲率は、鋼製ケーシングの内側の曲率と合致していること。

- ・ 定置・回収時での摺動時、鋼製ケーシング内の腐食生成物や段差を乗り越えられるように、前方・後方にテーパがある形状となっていること。
- ・ 製造プロセスを考慮すると、摺動スライダーが PEM 側面に接する側(底面)は平面になっていること。
- ・ 製作上、最大寸法は材質によって異なること。

摺動スライダーの形状案を図 3.3-2 に示す。曲面となっている部分が坑道の壁面に接する。

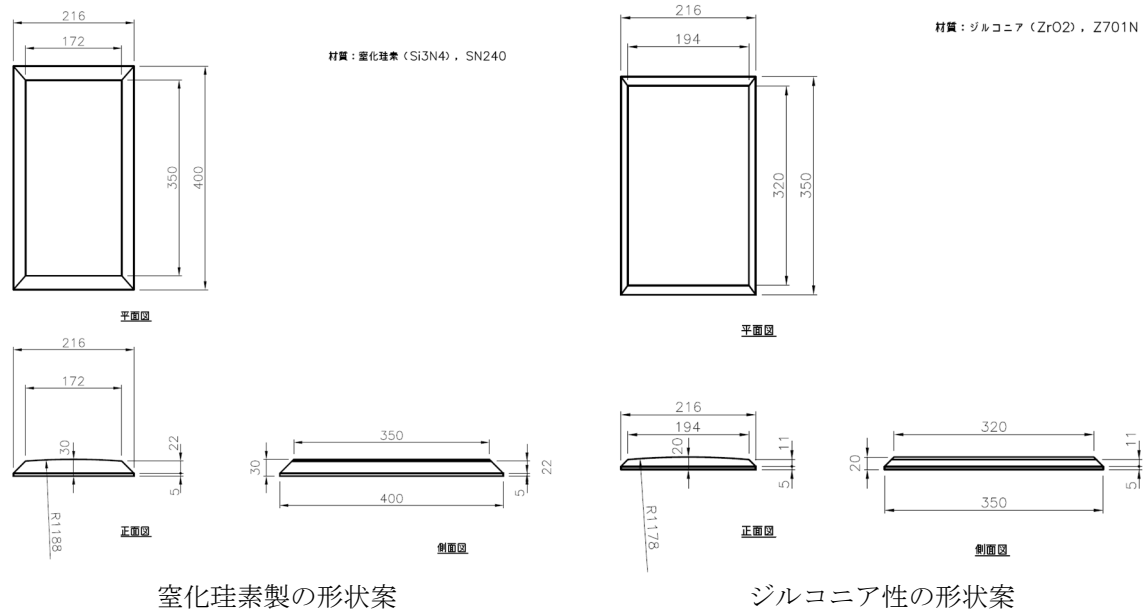


図 3.3-2 摺動スライダーの形状案

(2) 応力解析の結果と強度評価

応力解析に用いた解析モデル（例：窒化珪素）を図 3.3-3 に示す。摺動スライダーに作用させる荷重（反力、摩擦力）は、摺動スライダーの上面に均等に作用することが最も理想的であるが、摺動スライダーの上面と処分孔の壁面が均等に接しない場合も想定されることから、厳しくなる条件として、(1)解析条件の(a)に示された力を上面中央部の長さで除して、上面中央部に線荷重として作用させることにした。境界条件として、底面の面外方向変位と、側面の内、PEM の取付け穴に接する面の面外方向の変位は固定とした。

窒化珪素の場合の最大主応力の分布を図 3.3-4 に示す。反力や摩擦力を線荷重として上面の中央部に作用させたことにより、その中央部で最大主応力が大きくなっている領域が生じている。最大主応力の最大値は、 $\sigma_{\max}=76.4(\text{MPa})$ となった。この応力状態から有効体積を求めると、 $VE2=6,938(\text{mm}^3)$ となり、部材の平均強度は、 $\mu_2=417(\text{MPa})$ となる。

破壊確率 F については、PEM1 体に 4 枚の摺動スライダーが設置されることから、廃棄体 4 万本を考慮すると、摺動スライダーの全数は 16 万枚となる。そして、1 枚も破損しないとすると、破壊確率は、 $1/160,000=6.25 \times 10^{-6}$ 以下と設定する必要がある。よって、破壊確率を $F=5 \times 10^{-5}$ とすることにした。そして、窒化珪素のワイブル係数は、 $m=9.30$ としたことにより、安全係数は $Sp=3.52$ となる。窒化珪素の破壊確率 F に相当する応力 σ_R は、 $\sigma_R=\mu/Sp=417/3.52=118(\text{MPa})$ と評価された。その結果、 $\sigma_{\max}=76.4(\text{MPa}) \leq \sigma_R=118(\text{MPa})$ となって、強度評価上、窒化珪素を用いたセラミックスで摺動スライダーが実現できる見通しを得た。

ジルコニアを用いたセラミックスでも同様に、摺動スライダーが実現できる見通しを得た。

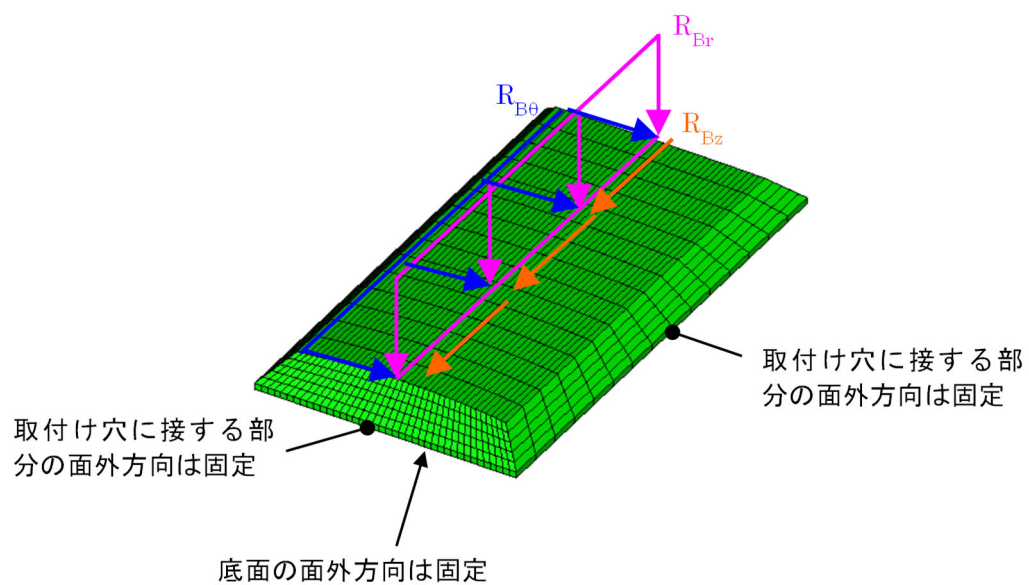


図 3.3-3 解析モデル（例：窒化珪素のスライダー形状）

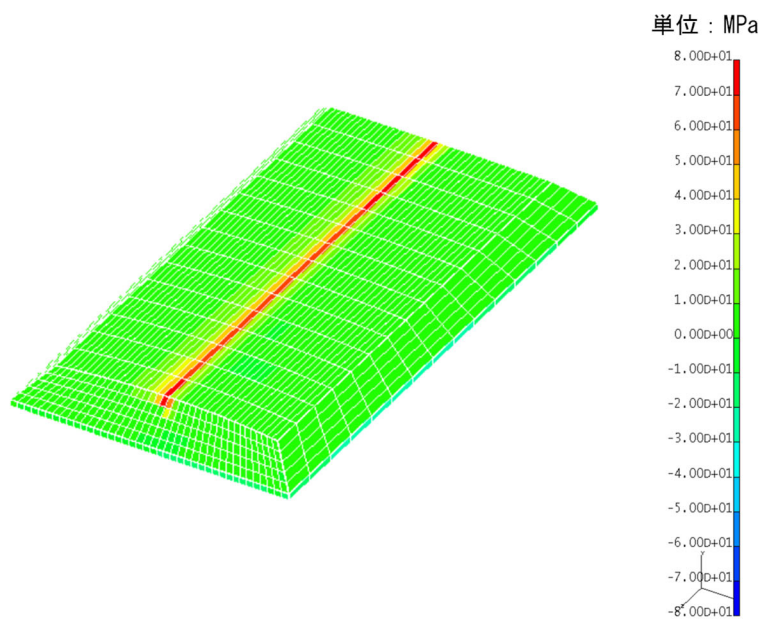


図 3.3-4 最大主応力の分布（例：窒化珪素のスライダー形状）

(3) 摺動スライダの取り付け方の検討

摺動スライダを取り付ける方法として、機械加工された窪みに摺動スライダをはめ込んで底面を接着剤で接合する方法、蟻継ぎ形状の溝に摺動スライダを差し込んで、ロック・キーを溶接することで脱落を防止する方法の2方式が ANDRA では検討されている。いずれの方法でも PEM に用いる場合、窪みや蟻継ぎ形状の溝を PEM 鋼殻に設ける必要がある。現行の PEM の外殻厚さは 28mm であるので、この鋼殻に窪みや蟻継ぎ形状の溝を設ける際は、強度の低下に留意が必要である。鋼殻の厚さを一様に増やすことは、PEM の重量が増えることになる。よって、図 3.3-5 に示すように摺動スライダを設置する部分のみ強度が確保できるように、鋼製リングに窪みや蟻継ぎ形状の溝を設けて、それに摺動スライダを装着して、PEM 容器に鋼製リングを溶接する方法が考えられる。これにより、摺動スライダを取り付けるための窪みや蟻継ぎ形状の溝の寸法を確保しつつ、重量を無駄に増やさないことが可能となる。

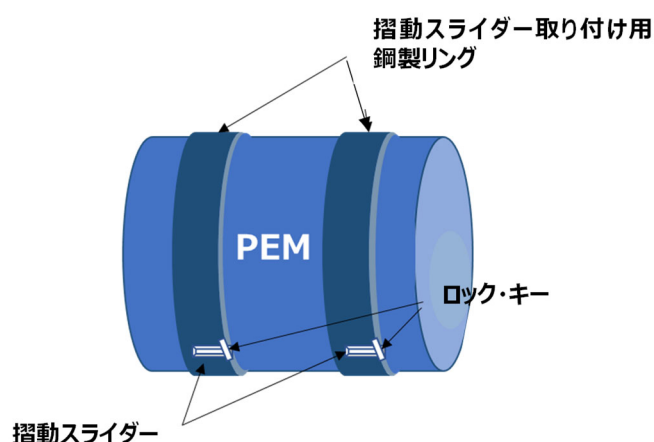


図 3.3-5 PEM に摺動スライダを取り付ける方法の例

(4) セラミックス製摺動スライダの技術開発課題

今回実施した強度評価は、セラミックス製摺動スライダによる PEM の移送の技術的実現性を確認するための簡易的なものである。解析で必要となる物性値やワイブル係数は、同一素材であっても製品ごとに幅をもつ。実際にセラミックス製のスライダを製作して確認する必要がある。

セラミックスは材料自体の特性上、寸法が大きくなると相対的に強度が低下する。今回設定した無垢材ではその影響が顕著になる可能性がある。一方、セラミックスの要件は、定置環境下で不活性であり、PEM と坑道壁面の固着を防止する数ミリの隙間を確保することにある。また、摺動距離は最大で処分坑道内の往復（往路は定置、復路は回収）であるため、損耗量を予め設計に反映することも考えられる。このような観点から、無垢材のほかに、強度を担保する母材へのコーティングもスライダ製作の手法の候補になると考えられる。

定置・回収時の移動距離に対する、手動スライダの損耗量は、処分坑道長を決定する因子の一つとなる。

3.4 狭隘空間での定置・回収に係る技術の実現性

本技術を適用する地層処分場の施設設計は、処分場の設計因子に基づく多面的な検討によって具体化されるため、現状では未定である。また、本業務の対象である狭隘空間での重量物の移送技術も、処分場設計を具体化する際の因子の一つとなる。

そこで、技術検討上の前提条件を仮定し、以下の手順で検討を進めた。

実施内容Ⅰ．狭隘空間での PEM の定置・回収に必要な機能の整理

実施内容Ⅱ．定置作業／回収作業に対応した移送技術の検討

実施内容Ⅲ．定置作業／回収作業に適用する装置概念の具体化

3.4.1 狭隘空間での PEM の定置・回収に必要な機能の整理

処分坑道に廃棄体を定置する場合、定置場所と作業動線が重なることになる。処分区画がパネル型で処分坑道に両端からアクセスできる場合でも、今回の検討対象の様に、空間が十分でない条件では廃棄体を一体定置した後は、片側の坑口からのみのアクセス、つまりデッドエンド型になる。ここでは現行の処分坑道・横置き PEM 方式を出発点として、デッドエンド型の処分坑道に対して PEM を定置・回収する場合を検討対象とする。

作業に必要な機能の分析をから着手した。なお、以降で定置・回収作業時に想定される方法、動作、機能、及び技術などの分析を行う際に、図 3.4-1 に示す表現を用いることとする。



図 3.4-1 分析に用いる表現

(1) 定置作業時に必要な機能の分析

デッドエンド型の処分坑道へ PEM を定置する場合、装置は PEM を後方から押す動作、すなわち推進動作になる。

定置作業時に PEM を推進する際には、「PEM を持ち上げて動かす」方法と「PEM を滑らせて動かす」方法がそれぞれ考えられる。図 3.4-2 に示すように、「PEM を持ち上げて動かす」方法では、「PEM を持つ」機能、「PEM を上げる」機能、「PEM を坑道縦断方向へ動かす」機能、「PEM を下ろす」機能が必要と考えられる。また、「PEM を滑らせて動かす」方法では、推進では「PEM を押す」機能、牽引では「PEM を引く」機能が必要と考えられる。ここではこれらの機能を 1 次機能として整理した。

図 3.4-2 にて整理した定置作業に係る 1 次機能は、その機能を果たすための 2 次的な機能があり、複数の選択肢として有することがあると考えられる。これらの機能を 2 次機能として図 3.4-3 に整理した。

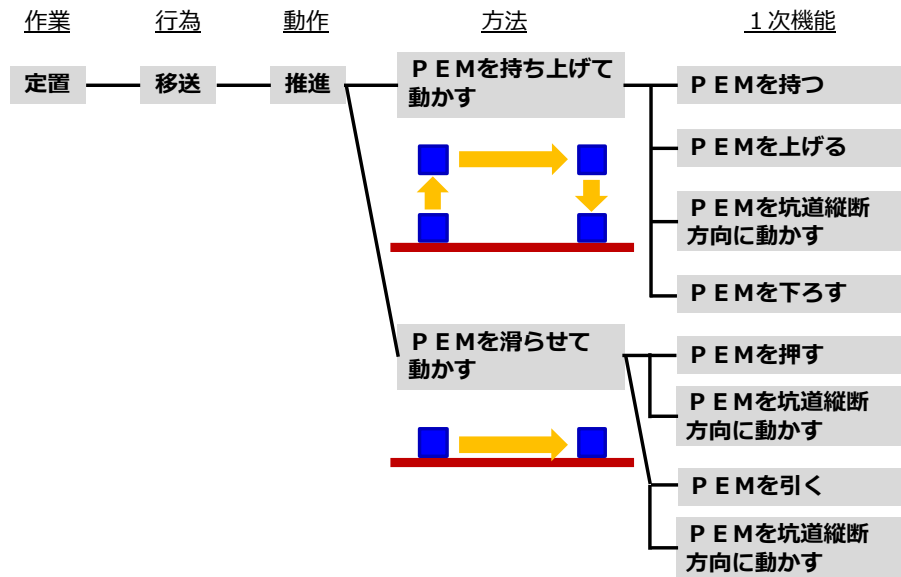


図 3.4-2 定置作業時に必要な 1 次機能の分析

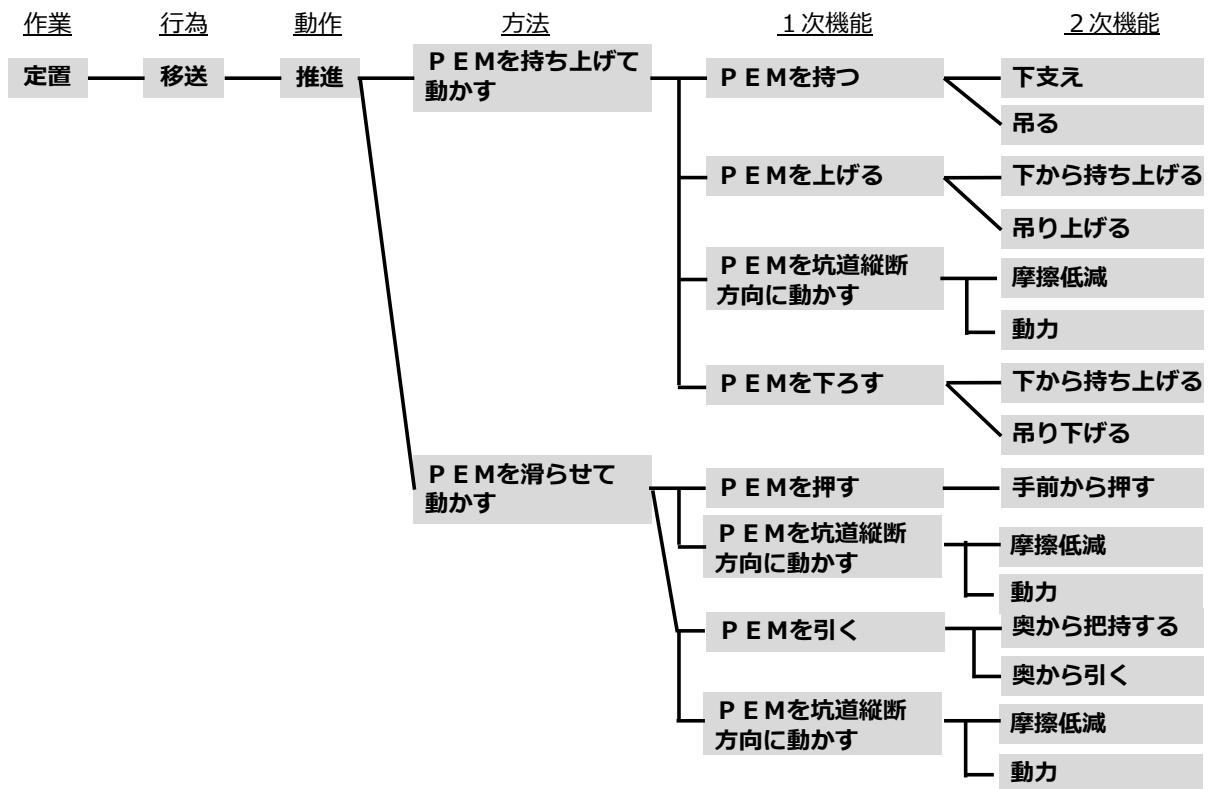


図 3.4-3 定置作業時に必要な 2 次機能の分析

(2) 回収作業時に必要な機能の分析

回収作業は処分坑道の坑口から装置が入場し、PEM を手前に引き出す動作、すなわち牽引動作になる。牽引についても同様に、「PEM を持ち上げて動かす」方法と「PEM を滑らせて動かす」方法がそれぞれ考えられる。図 3.4-4 に示すように、「PEM を持ち上げて動かす」方法では、「PEM を持ち上げる」機能、「PEM を坑道縦断方向に動かす」機能、「PEM を下ろす」機能が必要と考えられる。また、「PEM を滑らせて動かす」方法では、推進では「PEM を押す」機能、牽引では「PEM を引く」機能が必要と考えられる。ここではこれらの機能を 1 次機能として整理した。

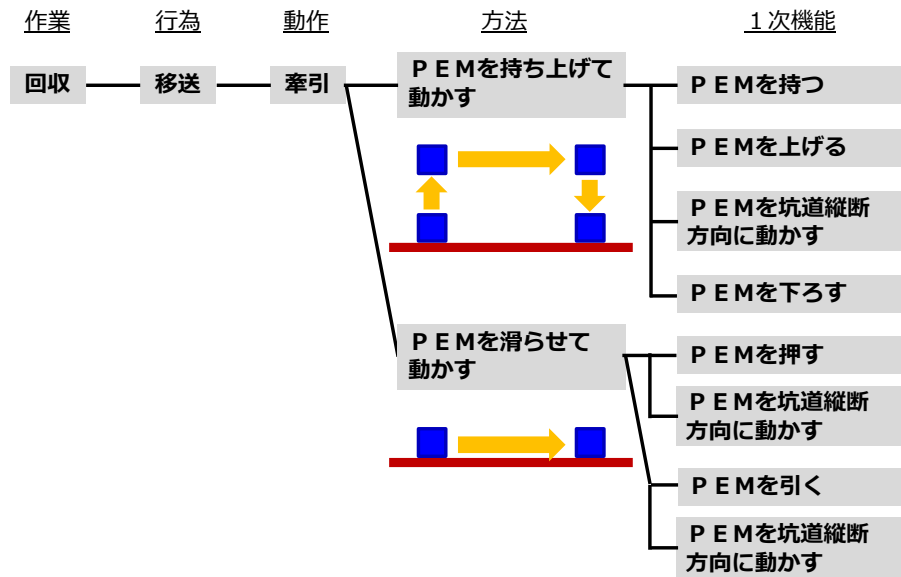


図 3.4-4 回収作業時に必要な1次機能の分析

図 3.4-4 にて整理した回収作業に係る1次機能は、その機能を果たすための2次的な機能があり、複数の選択肢として有することがあると考えられる。これらの機能を2次機能として図 3.4-5 に整理した。

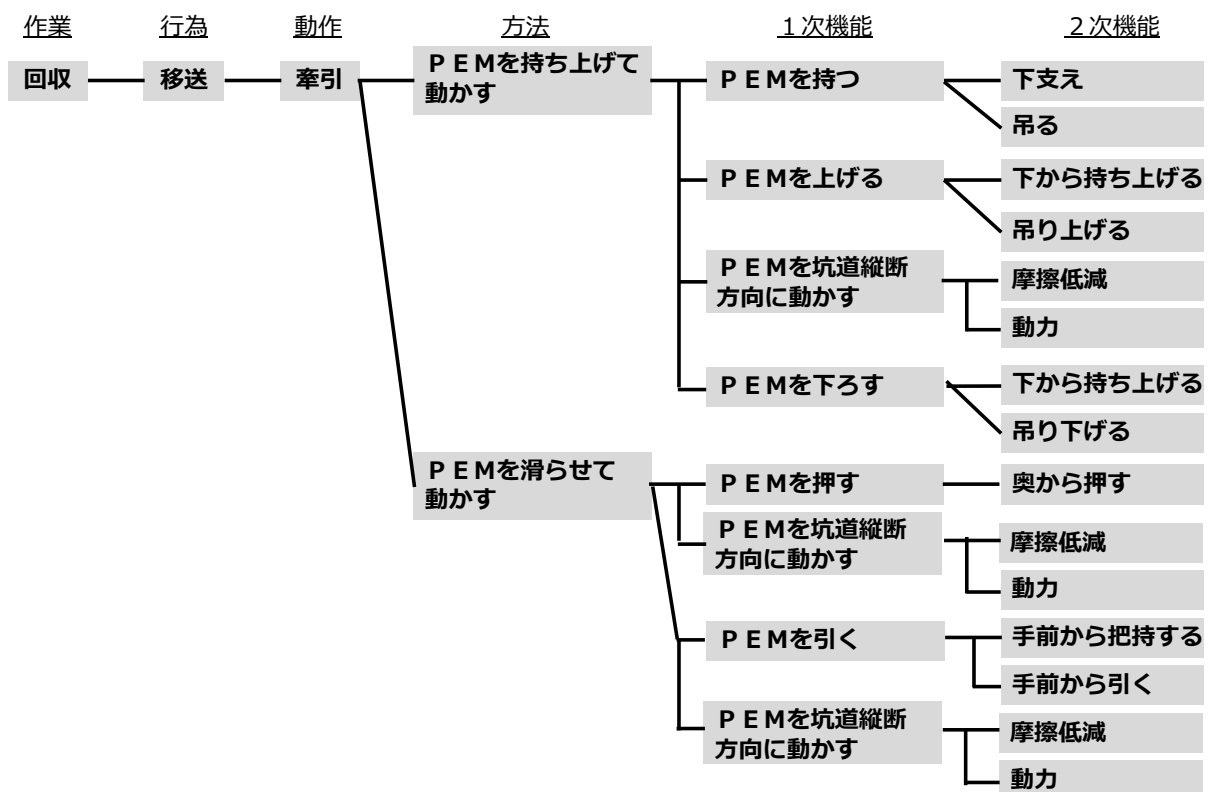


図 3.4-5 回収作業時に必要な2次機能の分析

以下に2次機能について分析する。

1次機能「PEMを持つ」を果たすための2次機能には、「下支え」機能または「吊る」機能の選択肢があると考えられる。

1次機能「PEMを上げる」及び「PEMを下ろす」についての2次機能は、「PEMを持つ」機能と PEM の重力の伝え方（底盤に力を伝える場合と天端に力を伝える場合）の組み合わせにより、整理できる。この整理から、1次機能「PEMを上げる」及び「PEMを下ろす」の2次機能には「下から持ち上げる」機能及び「吊り上げる」機能の選択肢があると考えられる。

1次機能「PEMを坑道縦断方向に動かす」は、PEMの重力の伝え方（底盤に力を伝える場合と天端に力を伝える場合）ごとに分析すると、「摩擦低減」及び「動力」の2次機能があると考えられる。

(3) 定置と回収の動作

定置作業において、PEMを奥から押す動作は、定置装置が坑道内に入場できないため、不適格である。また、回収作業において、PEMを引く動作は、定置装置が坑道内から退場できないため、不適格である。図 3.4-6 に狭隘坑道で選択が可能な動作を示す。

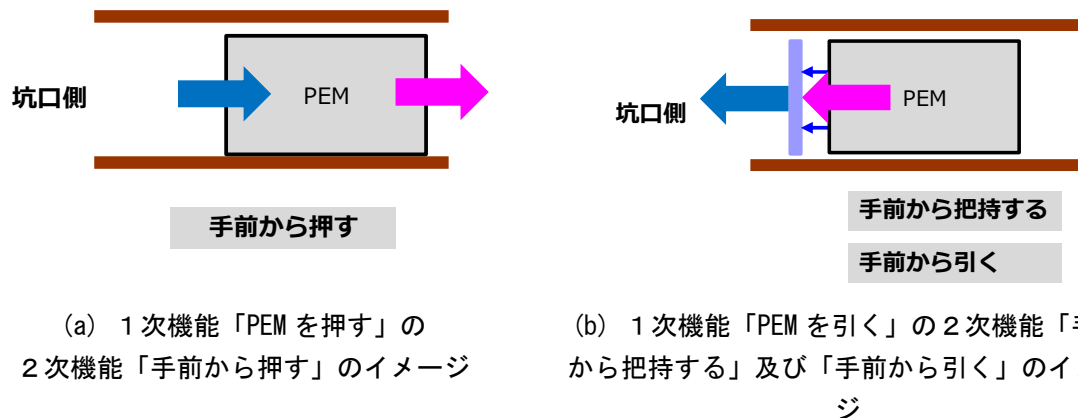


図 3.4-6 定置・回収作業で取り得る動作

3.4.2 定置／回収作業に対応した移送技術

図 3.4-6 に示す動きが狭隘坑道での PEM の定置・回収装置に求められる動作である。図 3.4-2～図 3.4-5 に示した定置・回収作業の実施に必要な機能展開のうち、上位にある選択肢が「PEMを持ち上げて動かす」／「PEMを滑らせて動かす」である。両者の違いは、PEMの自重の預け方である。

(1) PEMを持ち上げて動かす場合

PEMの自重を装置が受け、装置の走行体を介して路盤に荷重を伝達するものである。装置の走行体はタイヤ、コロなど重量物の輸送に適したものが選択可能であるが、PEMの荷重をさせる構造強度が求められること、狭隘空間での昇降機能の実現が必要となる。

(2) PEMを滑らせて動かす場合

PEMの自重は、直接路盤に伝達されるため、装置は PEM の荷重に耐え得る構造強度は不要である。一方、坑道内での移動は滑りのため、PEM-坑道間の摩擦が大きな因子となる。この摩擦に対抗して PEM を動かすため、装置には反力確保と推進・牽引力が求められる。

(3) 「PEM 滑らせて動かす」方式の選択

狭隘な坑道内での装置化を見据え、推進動作／牽引動作に適用する技術の具体化するため、PEM の扱う方法として、「PEM を滑らせて動かす」を選定した。

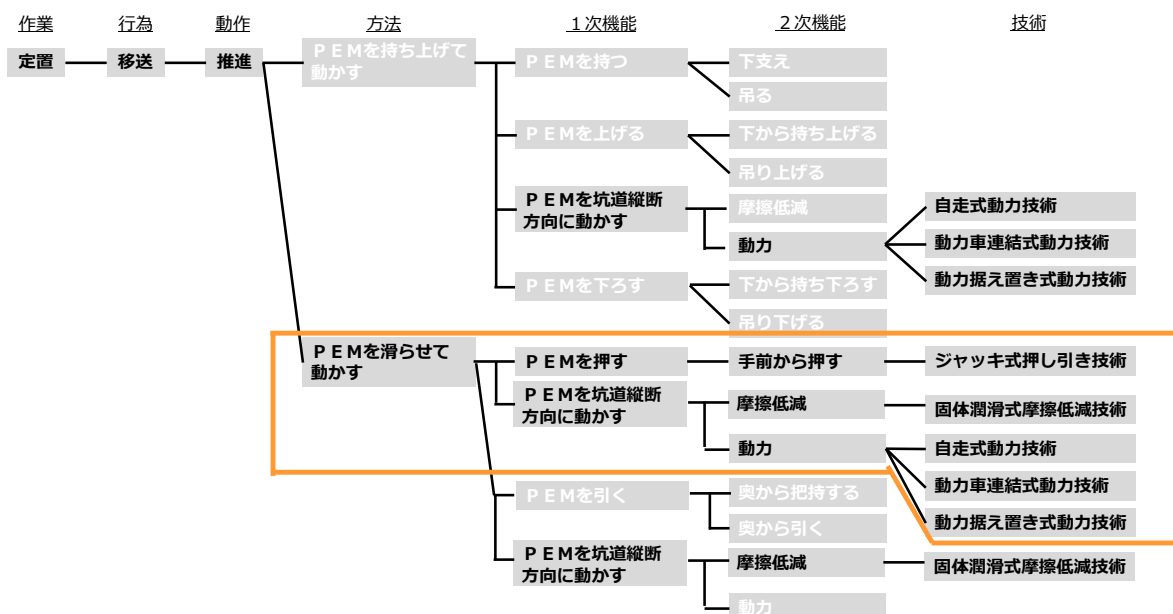


図 3.4-7 推進動作に適用する技術の具体化の例

2.1.6 装置化に向けた設計要件や機能の具体化

装置化に向けて設計要件や機能の具体化を行う。設計要件や機能は定置作業（推進動作）及び回収作業（牽引動作）に適用する技術及び作業手順に基づく定性的な内容となる。以下に、設計要件や機能の具体化について述べる。

(1) 定置作業に係る設計要件や機能の内容

定置作業（推進動作）に適用する技術、作業手順に基づき、定置作業に係る設計要件の内容をまとめ、対応する詳細な機能を以下に示す。

定置作業に係る設計要件の内容

- ・連絡坑道において処分坑道入り口に PEM を位置合わせできること（動作の空間的制約要件）
- ・連絡坑道から処分坑道内へ PEM を推進できること（動作の空間的制約要件、荷重要件）
- ・連絡坑道において処分坑道入り口にジャッキを位置合わせできること（動作の空間的制約要件）
- ・処分坑道内で PEM を推進できること（荷重要件）
- ・推進時に反力をとれること（荷重要件）
- ・処分坑道内に進入／退出できること（動作の空間的制約要件）
- ・処分坑道内で移動できること（動作の空間的制約要件）

定置作業に係る詳細な機能の内容

- ・装置の坑道内での移動機能
- ・PEM の推進機能
- ・反力をとるための反力板等張り出し機能

(2) 回収作業に係る設計要件や機能の内容

回収作業（牽引動作）に適用する技術、及び作業手順に基づき、定置作業に係る設計要件の内容をまとめ、対応する詳細な機能を以下に示す。

回収作業に係る設計要件の内容

- ・連絡坑道において処分坑道入り口にジャッキを位置合わせできること（動作の空間的制約要件）
- ・処分坑道内に進入／退出できること（動作の空間的制約要件）
- ・処分坑道内で移動できること（動作の空間的制約要件）
- ・処分坑道内で PEM を把持できること（動作の空間的制約要件）
- ・処分坑道内で PEM を牽引できること（荷重要件）
- ・牽引時に反力をとれること（荷重要件）
- ・処分坑道内から連絡坑道へ PEM を牽引できること（動作の空間的制約要件、荷重要件）
- ・連絡坑道において処分坑道入り口で PEM を受け取るために位置合わせできること（動作の空間的制約要件）

回収作業に係る詳細な機能の内容

- ・装置の坑道内での移動機能
- ・PEM の把持機能
- ・PEM の牽引機能
- ・反力をとるための反力板等張り出し機能

(3) 定置作業／回収作業に適用する装置の設計要件や機能

(1)で整理した定置作業に係る設計要件と(2)で整理した回収作業に係る設計要件を統合して、定置作業／回収作業に適用する装置の設計要件や機能として表 3.4-1 に示す。

表 3.4-1 定置作業／回収作業に適用する装置の設計要件や機能の整理

設計要件	設計要件の内容	詳細な機能
連絡坑道内での収容性・移動性	連絡坑道内において処分坑道入り口に PEM 及びジャッキを推進／牽引のために位置合わせできること	移動機能
推進／牽引力の確保	連絡坑道から処分坑道内へ PEM を推進し、処分坑道内から連絡坑道へ PEM を牽引できること 処分坑道内で PEM を推進／牽引できること	推進／牽引機能
反力の確保	PEM の推進／牽引時に反力をとれること	反力板張り出し機能
処分坑道内での収容性・移動性	処分坑道内に進入、移動し、処分坑道から退出できること	移動機能
把持力の確保	牽引時に処分坑道内で PEM を把持できること	把持機能

3.4.3 定置／回収装置の概念設計

(1) 各要素の性能の設定

定置／回収装置の各要素の性能を設定するため、表 3.4-1 にて整理した定置作業／回収作業に適用する装置の設計要件を、処分坑道内で PEM の定置作業／回収作業を行うことを念頭に入れて定置／回収装置の設計要件として再整理して表 3.4-2 に示す。表中、連絡坑道内での作業に係る設計要件の対象は搬送・移載装置（台車）となり、ここでは該当しないため灰色のハッチをかけている。

表 3.4-2 定置／回収装置の設計要件や機能

設計要件	設計要件の内容	詳細な機能
連絡坑道内での収容性・移動性	連絡坑道内において処分坑道入り口に PEM 及びジャッキを推進／牽引のために位置合わせできること	移動機能
推進／牽引力の確保	連絡坑道から処分坑道内へ PEM を推進し、処分坑道内から連絡坑道へ PEM を牽引できること 処分坑道内で PEM を推進／牽引できること	PEM の推進／牽引機能
反力の確保	PEM の推進／牽引時に反力をとれること	反力機能（反力板張り出し坑道壁面突っ張り）
処分坑道内での収容性・移動性	処分坑道内に進入、移動し、処分坑道から退出できること	移動機能
把持力の確保	牽引時に処分坑道内で PEM を把持できること	PEM の把持機能

上記の設計要件と前述で整理した許容寸法を考慮すると、空間的な制約が厳しいことがわかる。定置／回収装置の概念はできるだけ単純な構造、機構からなるものを目指すこととする。装置の合理化や最適化は今後の課題とする。表 3.4-2 の設計要件（推進／牽引、反力、収容性・移動、把持）を満足する装置の概念設計には、一般的な建設機械や各種装置に多く適用される油圧シリンダを用いることを基本とすることとした。

油圧シリンダは、一般機器としての汎用性も高く、様々な機器との組合せが可能である。定置／回収装置が作業を行う処分坑道が狭隘空間であるという条件を考慮した場合、装置及び周辺機器への大きさに限りが生じることから、比較的コンパクトな機器で構成でき、かつ、大きな推力や牽引力を得ることが可能な油圧式は機能として適した技術であると考えられる。また、物質特性として油は水や空気と比べ粘性もあり、周囲環境温度の変化による影響も相対的に少ないメリットも考えられる。これらを踏まえ、油圧シリンダを用いることを基本とする。

PEM の把持には、「機械式把持技術」を適用することとした。「機械式把持技術」にはツイストロックやチャック、ボルト等によるねじ込みなどの方法がある。回収作業時には狭隘な処分坑道に装置が侵入し、照明等が設置されていない環境で把持の操作を行う可能性があることを考慮して、本検討ではまずはより動作が単純なチャックにより PEM を把持することを優先して検討することとした。他のツイストロックやボルト等によるねじ込みなどの方法も適用可能性はあり、図 3.4-1 に示す制動技術や計測技術、遠隔操作技術と併せた検討が必要と考えられる。また、い

ずれの「機械式把持技術」においても、PEMに把持される構造を付加することが求められ、これは今後の検討課題となる。

表 3.4-2 の設計要件（推進／牽引、反力、収容性・移動、把持）に対する詳細な機能と、詳細機能に対応するための要素、各要素の性能を設定する概念設計の流れを図 3.4-8 に示す。図中の矢印は概念設計の大まかな流れであり、実際には必要に応じて前の段階に戻る検討を繰り返す。また、本検討は概念設計であるため、構造計算等によるフレームの強度評価は行わないが、フレーム等の大きさや厚さは作用する荷重等に対して耐えうると考えられるものを設定する。定置／回収装置は図 3.4-8 に示す要素から構成される。



図 3.4-8 定置／回収装置の概念設計の流れ

また、定置／回収装置の概念設計の考え方を整理して図 3.4-9 に示す。概念設計においては、各要素に既存技術や既存の製品を適用することを基本とする。装置を構成する要素の一つである油圧シリンダについては、建設機械用複動油圧シリンダの適用を想定して検討する。また、フレームの材質は一般構造用圧延鋼材の適用を基本として、特殊な材料を用いることは前提としないこととする。

要素	要素の性能	既存技術
油圧シリンダ 建設機械用複動油圧シリンダ	必要推力 荷重 ・推進／牽引する重量 ・支持する重量 ・反力 など	仕様 ・仕様：ストローク長、内径、理論出力（押側／引側考慮） ・必要本数
フレーム 一般構造用圧延鋼材など	荷重に対する強度 荷重 ・支持する重量 ・ジャッキ推力／引力 など	仕様 ・材料 ・形状、構造（シリンダ配置含む） 詳細な構造計算（構造解析）による検討が必要

図 3.4-9 定置／回収装置の概念設計の考え方

(2) 定置／回収装置の概念の具体化による概念設計

上記を踏まえ、定置／回収装置の概念を具体化した概念設計図を図 3.4-10 に示す。定置／回収装置は、アウターフレームとインナーフレームからなる装置であり、アウターフレームには推進／牽引時に坑道の天端に反力をとる突っ張り機構が備わっている。この装置はシリンダの伸縮によりアウターフレームとインナーフレームを動かして PEM の推進や牽引を行うが、同時に、インナーフレームに備わっているジャッキアップユニットを用いて、アウターフレームとインナーフレームを交互に動かして尺取虫のように処分坑道内を移動する。PEM の把持はインナーフレームに設置されたチャックユニットにて行う。

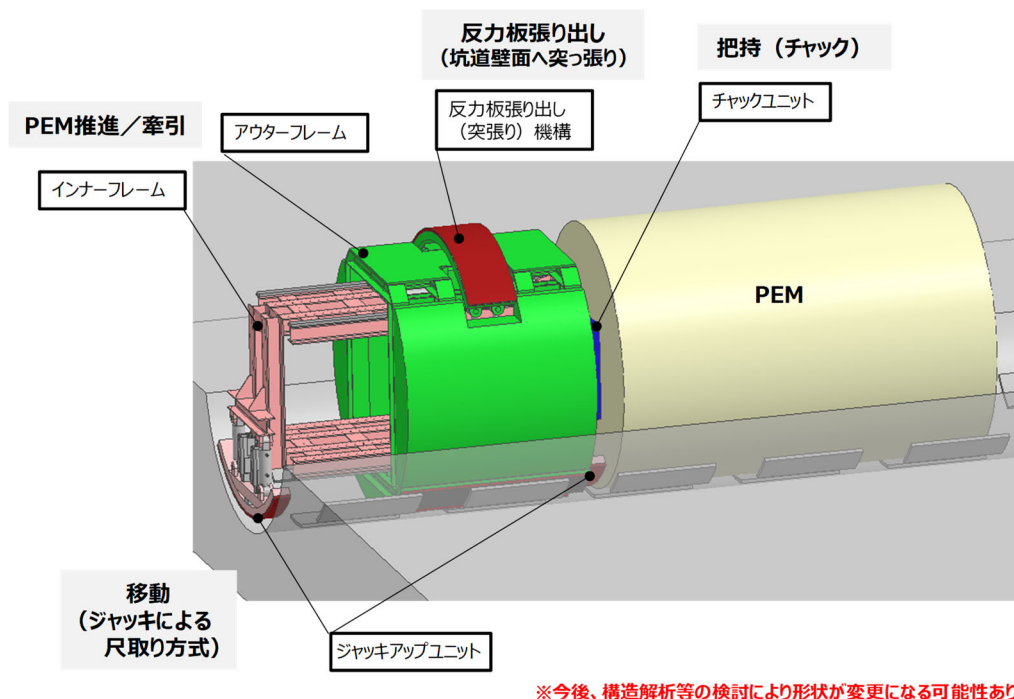


図 3.4-10 定置／回収装置の概念の具体化による概念設計

上記で概念設計した定置／回収装置を用いて定置作業（推進動作）及び回収作業（牽引動作）を行う際の一連の動作の流れを図 3.4-11 及び図 3.4-12 に示す。

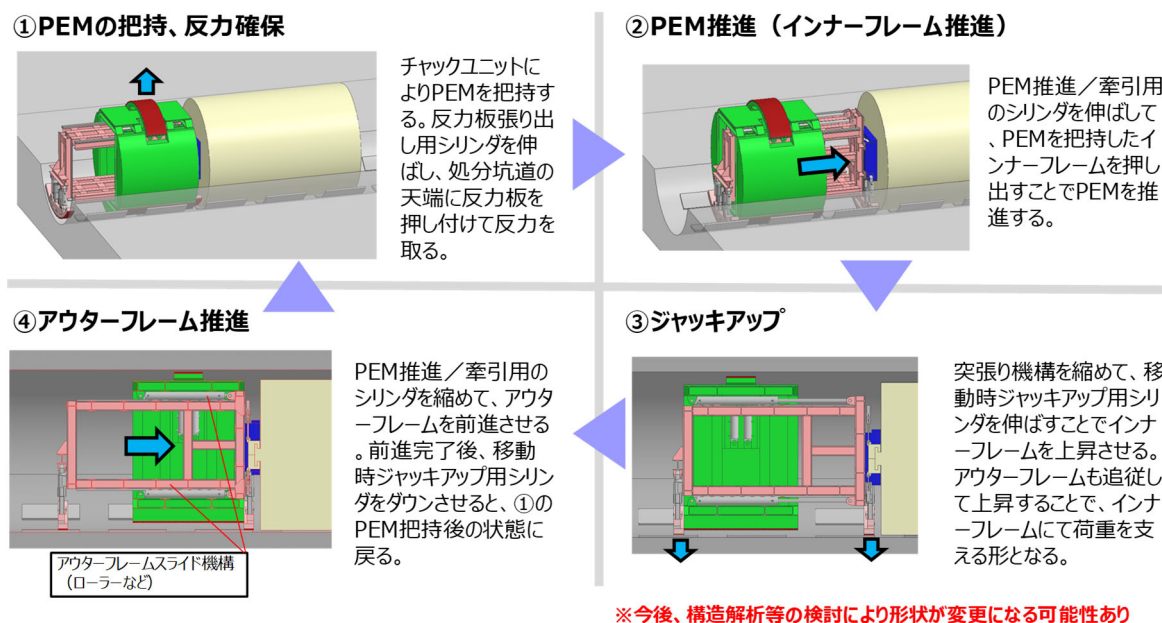


図 3.4-11 定置作業時（推進動作）の流れ

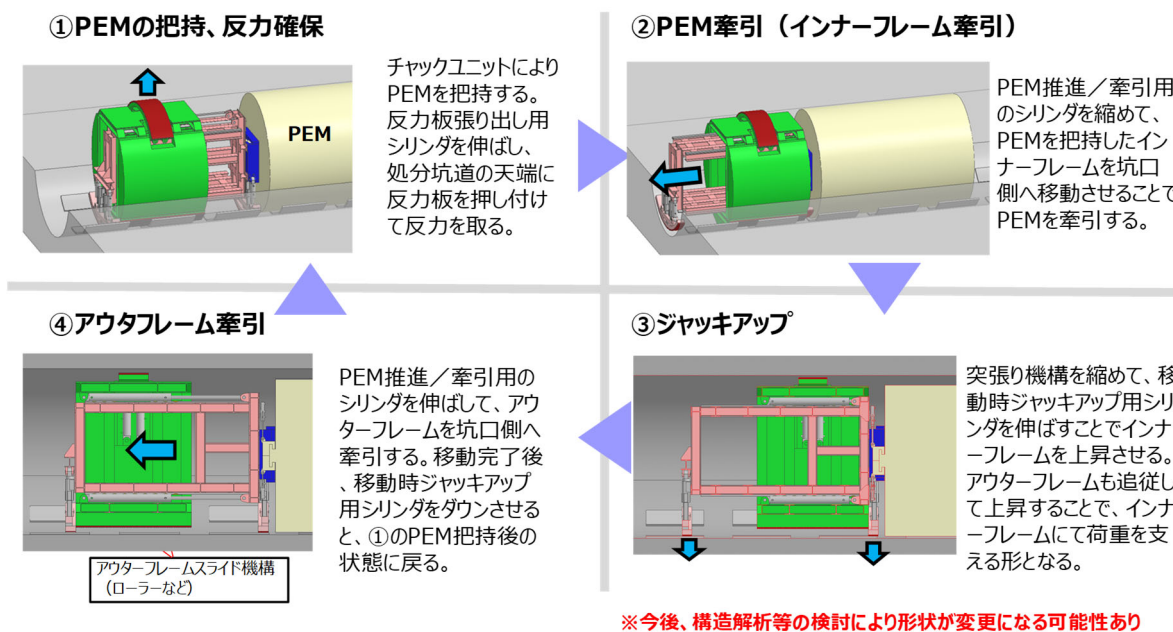


図 3.4-12 回収作業時（牽引動作）の流れ

3.5 検討内容及び成果の概要

- ・ 小断面坑道への PEM 定置方式（詳細設計オプション）の成立性を示すための課題の一つである、狹隘空間での重量物の移送技術の調査・検討を行う上で、まず初めに、基軸となる処分場の設計因子について改めて確認を行った。ここでは包括的技術報告書（NUMO,2019）に示された設計因子と要求事項の内容を確認した。次に、狹隘空間での重量物の移送技術の調査及び検討において参照する技術要件を確認して整理した。その上で、仕様書で示された理想的な前提条件に加えて、設計因子と要求事項の内容を踏まえた本検討の出発点となる条件を整理してまとめた。
- ・ 狹隘空間での重量物の移送技術が適用される定置・回収作業時に想定される動作の分析を行った。この定置・回収作業で想定される動作の分析に基づき、狹隘空間での重量物の移送技術に必要な機能を分析した。
- ・ 上記にてまとめた前提条件、及び、必要な機能の分析結果から、定置・回収作業に適用する狹隘空間での重量物の移送技術について既存の技術動向の調査を行い、整理を行った。調査において、既存の技術や製品のうち、そのままでは本検討の条件に対して適用が困難なものについて、専用機材の開発・製作によって適用が見込める場合は、その技術を課題と共に整理した。

- ・ 定置作業／回収作業に対応した移送技術の検討
整理した狹隘空間での重量物の移送技術を踏まえ、定置作業及び回収作業時に行う推進動作／牽引動作に適用する技術と、その技術に対応した作業手順を具体化した。検討では、PEM を移送する際に必要となる力を低減するものと、狹隘空間で、重量物を推進／牽引で移送する動力源の組合せに留意して具体化を行った。

- ・ 定置作業／回収作業に適用する装置概念の具体化
定置作業／回収作業それぞれに適用する技術と作業手順の選択を行った。装置化に向け、設計要件や機能などを具体化し、定置／回収装置の概念設計を実施した。装置の概念設計においては、各要素の性能の設定、既存技術の有無、装置化に向けた課題などを合わせてまとめた。

- ・ 今後の展開
小断面坑道への PEM 定置方式の技術的成立性の提示に向けた技術開発課題として、大深度での小口径坑道の建設、回収作業の実施までの PEM-坑道間の固着の防止、狹隘空間での重量物の移送などが挙げられている。このうち、本検討では狹隘空間での重量物の移送技術の実現性の提示に向けた検討を行った。

小断面坑道への PEM 定置方式の技術的成立性の提示に向けては、今回検討した狹隘空間での重量物の移送だけでなく、全ての技術開発課題に取り組むことが有効と考えられる。それぞれの技術開発の概略の展開案を以下に述べる。

○狹隘空間での重量物の移送技術としての定置／回収装置の装置化に向けた課題への取り組み、及び、搬送・移載装置（台車）の装置化に向けた課題への取り組み

定置／回収装置の装置化に向けた以下の課題への取り組み

- ・ PEM の推進／牽引時のチャック機構の追従に関する課題
- ・ 定置／回収装置の回転に関する課題

- ・作業環境に対する装置化に向けた課題
 - ・構造解析等の実施による定置／回収装置の基本設計及び装置化に向けた詳細設計
- 搬送・移載装置（台車）の装置化に向けた以下の課題への取り組み
- ・定置／回収装置の設計の進捗を踏まえ、かつ、運用を考慮した搬送・移載装置（台車）概念の合理化の検討
 - ・作業環境に対する装置化に向けた課題
 - ・構造解析等の実施による搬送・移載装置（台車）の基本設計及び装置化に向けた詳細設計

○大深度での小口径坑道の建設に関する坑道の設計と施工方法の具体化に向けた検討

- ・大深度地下の岩盤における PEM を定置する処分坑道（円形小断面坑道）の設計の具体化
- ・大深度地下の岩盤における処分坑道（円形小断面坑道）の掘削技術の具体化

○回収作業の実施までの PEM・坑道間の固着の防止に関する調心用スペーサーの摩擦や摩耗に関する調査・試験、調心用スペーサーの設計・試作

- ・坑内環境において不活性な素材の調心用スペーサーの摩擦や摩耗に関する調査・試験
- ・定置／回収作業時の強度評価
- ・調心用スペーサーの設計（材料、形状）、製作、加工に関する調査、試作

○PEM 容器の把持部及び補強の検討

- ・ PEM 容器の要件の具体化
- ・定置／回収装置の把持技術に対応する PEM 容器の把持部の検討
- ・ PEM に作用する定置作業／回収作業時のハンドリングを考慮した推進力及び牽引力等に対する PEM 容器の補強方法の検討

参考文献

- 北住順一，谷口佳文，星出敏彦，山田敏郎：各種セラミック材料における強度特性およびその欠陥寸法分布との関係（第 1 報 静的強度），材料，No.38，Vol.434，pp.1254-1261，1989.
- 原子力発電環境整備機構：包括的技術報告：我が国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，NUMO-TR-20-03，2021.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター・日本原子力研究開発機構：令和 2 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（回収可能性技術高度化開発）報告書，2021.
- 日本セラミックス協会編集委員会基礎工学講座小委員会：セラミックスの機械的性質，セラミックス基礎工学講座シリーズ 1，1979.

4. 回収可能性の維持に伴う影響事象の定量化手法の整備

4.1 はじめに

4.1.1 目的

回収可能性維持期間を設けたことによる影響の主な要因として、開放坑道に空気が継続的に供給されること、開放坑道からの坑内湧水の排水が継続的に行われることの二つが挙げられる。平成 27 年 5 月に改定された基本方針の第 5（放射性廃棄物の最終処分に係る技術の開発に関する事項）において、“最終処分施設を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等について調査研究を進め、最終処分施設の閉鎖までの間の特定放射性廃棄物の管理の在り方を具体化する。当該技術開発等の成果については、最終処分事業や国の安全規制において有効に活用されることが重要である”として、回収可能性に係る調査研究の実施を要求している。

これまでに「開放坑道に空気が継続的に供給されること」、「開放坑道からの坑内湧水の排水が継続的に行われること」を要因とする個々の影響に関する定量化手法の整備に向けて、主に解析的手法の観点から予備検討を進めてきた（原環センター, 2020）。一方で、定量化技術としての信頼性や説明性の確保、更に将来の安全規制対応なども考慮すれば、建設から操業、（回収可能性の維持）、閉鎖、閉鎖後長期という一連の期間に生じる事象の時間変遷をより丁寧に考慮して、実現象としての影響の程度に応じた優先課題の評価、並びに定量化手法の整備における現象論的知見や経験則の活用可能性など、より丁寧かつ包括的な視点で取り組む必要性が示唆された。

回収可能性の維持に伴う影響は図 4.1-1 に模式的に示したように、【第 2 章：回収の迅速化に向けた技術の高度化】と【第 3 章：回収の容易性を高めた代替設計オプションの開発】の成果から定量的に示される回収の容易性（回収作業時間）と併せて、基本方針に示される回収可能性の維持期間の上限となる“安全な管理が継続できる範囲”を設定するための重要な要素である。

本章では、回収可能性の維持に伴う影響について、操業期間中の安全性と閉鎖後長期の安全性の二つの観点から、定量化手法の整備に向けた本年度の検討結果を整理する。

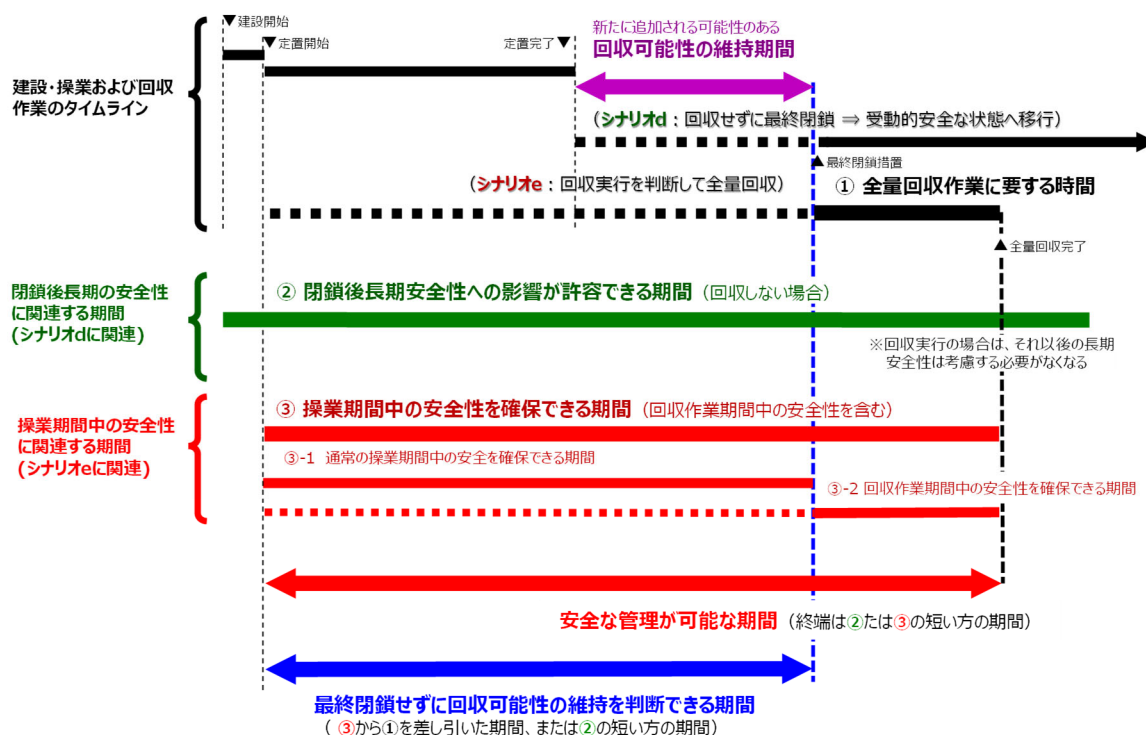


図 4.1-1 回収可能性が維持される状態の模式図

4.1.2 定量化手法の整備の方針

処分場が建設されるサイトの地下環境特性の多様性、処分場の概念・設計のバリエーション並びに回収可能性の維持期間中の地下施設の状態などに応じて操業期間中及び閉鎖後長期の安全性に影響を与えるものと受けるものの関係やその程度は変化する。さらに、その関係や影響の程度は、影響が継続する期間（回収可能性維持期間）に応じて変化する。特に、図 4.1-1 に示す回収可能性維持期間と操業期間中及び閉鎖後長期の安全性が確保される期間の関係に関する考え方は、新たに構築される処分概念・設計（第3章に詳述）に対しても共通である。計画された全ての廃棄体の定置後に新たに追加される可能性のある回収可能性維持期間に伴う安全性への影響の定量化手法の整備では、以下の項目に留意して進める。

- 回収可能性の維持に伴う影響の定量化項目の更新
- 異なる処分概念への展開
- 閉鎖後長期の安全評価との関係
- 盛り込む事象の妥当性の確保

上述のような留意点を踏まえた定量化の手法としては、試験データや実測値などの実際に観測された事実に基づく外挿や定数化、数値解析手法による予測などが挙げられるが、いずれの手法においても地層処分システム全体のふるまいに関する理解が重要である。これまで、安全性に影響を及ぼす主要な要因とシナリオを抽出し、既存の予測解析手法の適用性の確認（トップダウン・アプローチ）を実施（原環センター、2020）してきたが、将来の安全規制対応を念頭おけば高い説明性が求められることから、信頼性が高い評価手法やより確からしい定量値の提供が可能な予測評価手法及び知見の整備に向け、安全性に影響を及ぼす要因やシナリオの整理を行い、実現象としての影響の程度に応じた優先課題の評価並びに定量化手法の整備における現象論的知見や経験則の活用性など、より包括的な視点で定量化手法の整備（ボトムアップ・アプローチ）に取り組むこととした。

閉鎖後長期の安全評価の基本手順では、地層処分システム全体のふるまいを俯瞰でき、時間・空間スケールに関する整合性を確認できる表現方法として、ストーリーボードが導入されている（NUMO, 2021）。ここでは、操業期間中及び閉鎖後長期の安全性が確保される期間において安全性に影響を及ぼす要因やシナリオの整理を行うため、「地下構造物の安定性及び供用性」を対象として、ストーリーボードによる整理を実施することとした。検討フローを図 4.1-2 に示す。

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

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

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

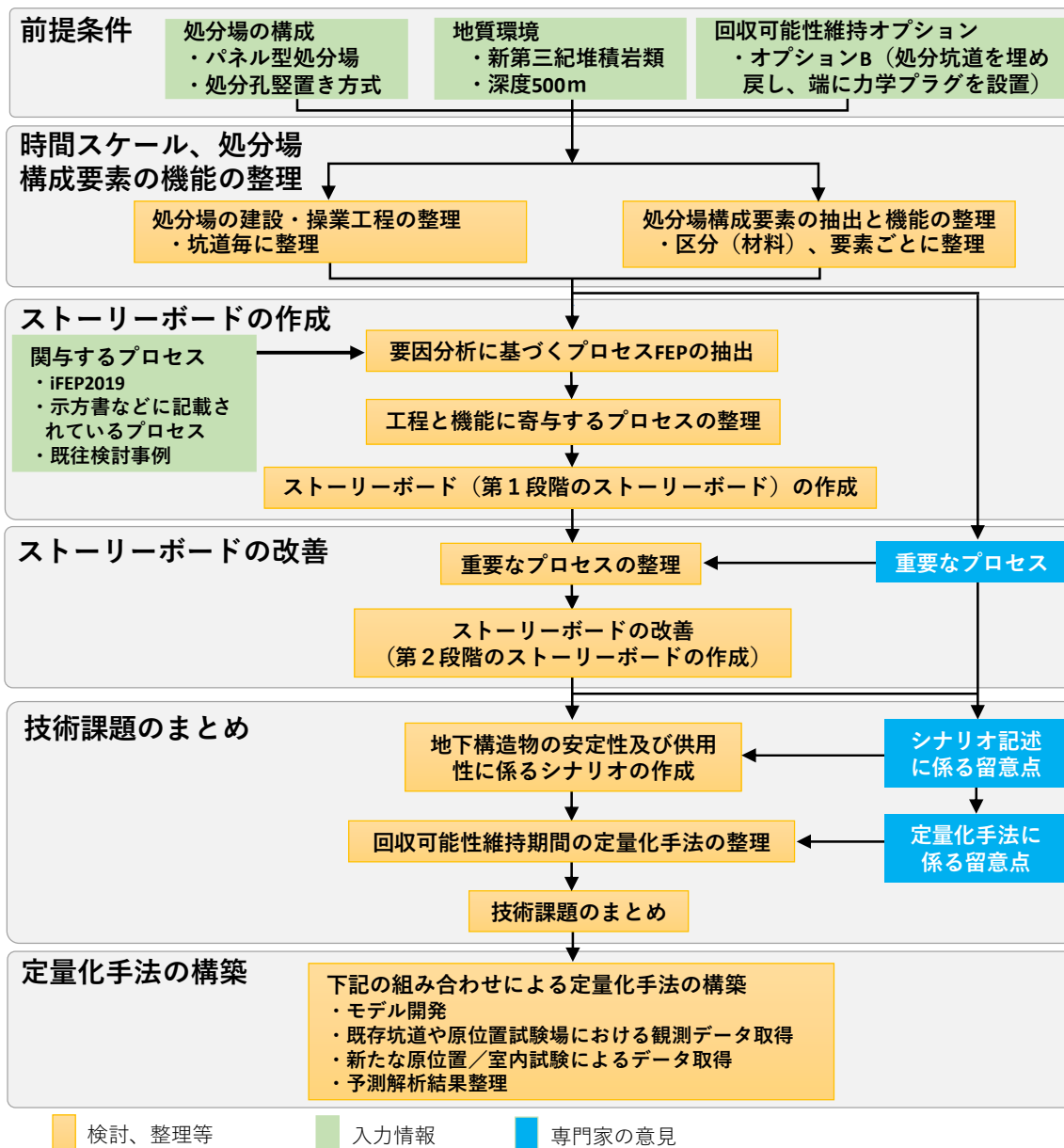


図 4.1-2 回収可能性の維持に伴う影響事象の定量化手法の構築に係る検討フロー

4.1.3 過年度までの成果及び本年度の実施内容

処分場が建設される地質環境特性、回収可能性の維持の状態、他の定置概念への展開を見据え、NUMO の包括的技術報告書（NUMO, 2021）において示された岩種、処分場の構成、処分形態を参考として、新第三紀堆積岩類の特性を前提とし、処分深度は、深部環境で還元性環境が想定される深度である 500m と設定した。また、処分場の構成としては、アクセス立坑、アクセス斜坑、連絡坑道、処分坑道からなるパネル型の処分場とし、処分形態は処分孔堅置き方式とし、処分孔は、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、埋戻し材で構成され、回収可能性維持の状態オプションは、状態オプション B（処分孔堅置き・ブロック方式）をリファレンスとした。

2020 年度は、回収可能性の維持に伴う安全性への影響の定量化手法の整備に向けたストーリーボードの全体開発計画を作成するとともに、時間・空間スケールの把握のため、レファレンスの建設・操業工程の分析を行った。その結果、処分場の建設開始から廃棄体の定置完了を経て、廃棄体の回収完了までの期間を安全評価における時間スケールの一つである「T₁: 処分場閉鎖から再冠水完了までの期間」よりも前の“建設・操業期間”を含む時間スケール T₀ と定義した。また、空間スケールについては、処分場スケール、ニアフィールドスケール、詳細スケールに加えて、処分場の状態変遷を評価する上で、関連する FEP（Features, Events and Processes）の抽出をし易くするために、処分場構成要素を抽出・細分化し、最小単位を区分（金属、セメント鉱物¹、有機物、鉱物（岩盤）、鉱物（緩衝材／埋戻し材））とする階層で整理した。

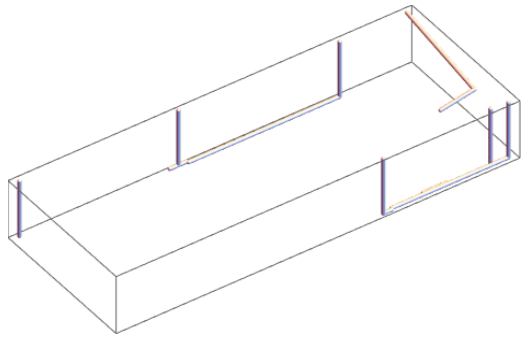
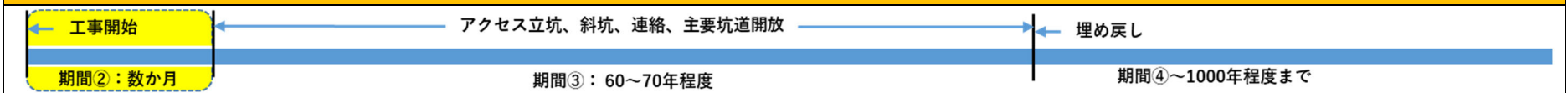
2021 年度は、処分場の建設・操業の期間及び処分場閉鎖から再冠水完了までの期間を対象に、処分場構成要素に要求される機能に影響を与えるプロセスを抽出し、「地下構造物の安定性」及び「供用性」に着目した処分システムの状態変遷に関わる知見を集約した通常の操業手順に沿ったストーリーボード（第 1 段階のストーリーボード）を作成した（図 4.1-3（原環センター・原子力機構, 2022））。これを踏まえ、回収可能性維持期間を設けた場合や回収可能性維持の状態オプションが異なる場合について、回収可能性維持期間を設けない場合の工程との違いを提示した。

2022 年度は、さまざまな分野の専門家との議論に基づき、処分場の変遷において重要なプロセスを抽出・整理し、第 1 段階のストーリーボードを改善する。また、このようにして改善したストーリーボードに基づき、専門家からの意見を参考に具体的に定量化すべきプロセスをシナリオとして整理するとともに、回収可能性維持期間の定量化に向けた考え方及び必要となる手法を整理する。さらに、技術課題を整理する。2021 年度までの検討においては処分場を構成するすべての坑道を対象としたが、本年度の検討においては、先行的に最初に建設されるパネル 1 における処分坑道を対象に検討を実施することとした。

図 4.1-4 に、検討対象とする処分坑道を状態オプション別に状態変遷とともに示す。図中のマーカーの色は THMC に対応しており、それぞれ熱（赤色）、水理（青色）、力学（灰色）、化学（黄色）を示す。

¹ セメント水和物を意味する。

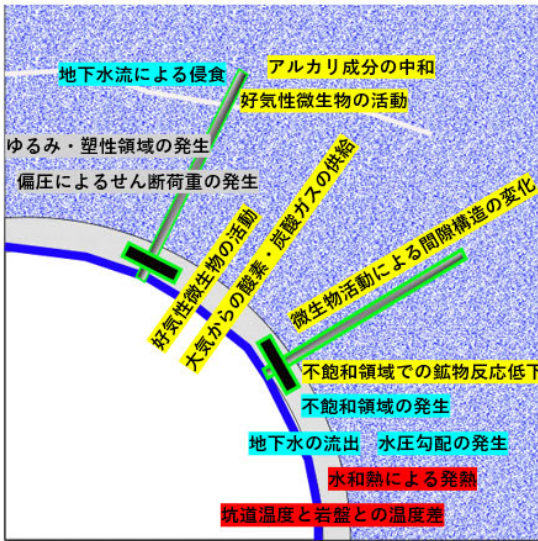
アクセス立坑 期間②（状態オプション B、回収可能性維持期間を設けない場合）



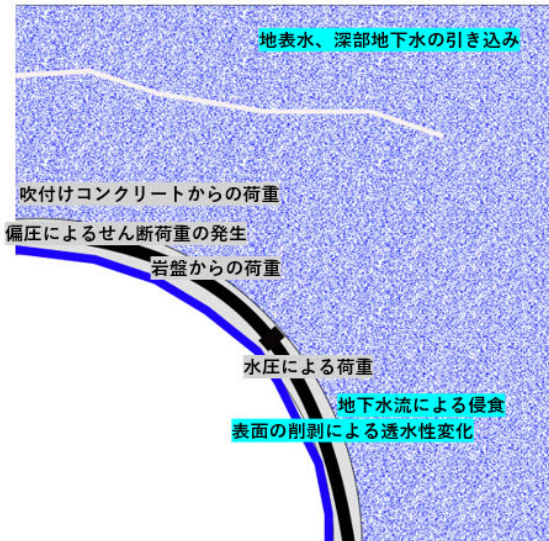
処分場スケール

- ・ アクセス立坑、アクセス斜坑、連絡坑道が掘削され、処分場閉鎖まで開放された状態に置かれる
- ・ これらの坑道の掘削に伴い、坑道への地下水の流出が始まり、処分場スケールの流向や流速が動的に変化する

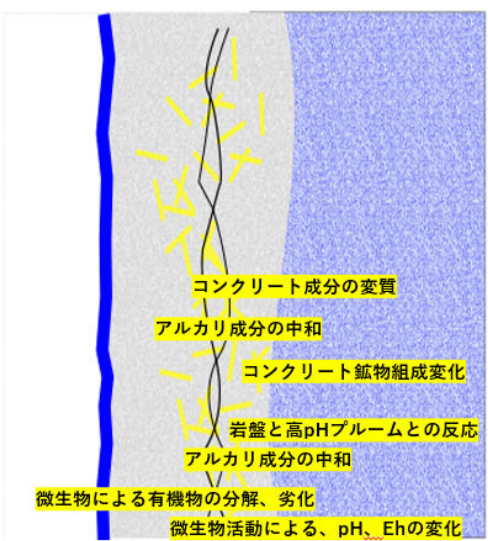
ニアフィールドスケール



ニアフィールドスケール(別断面)



詳細スケール

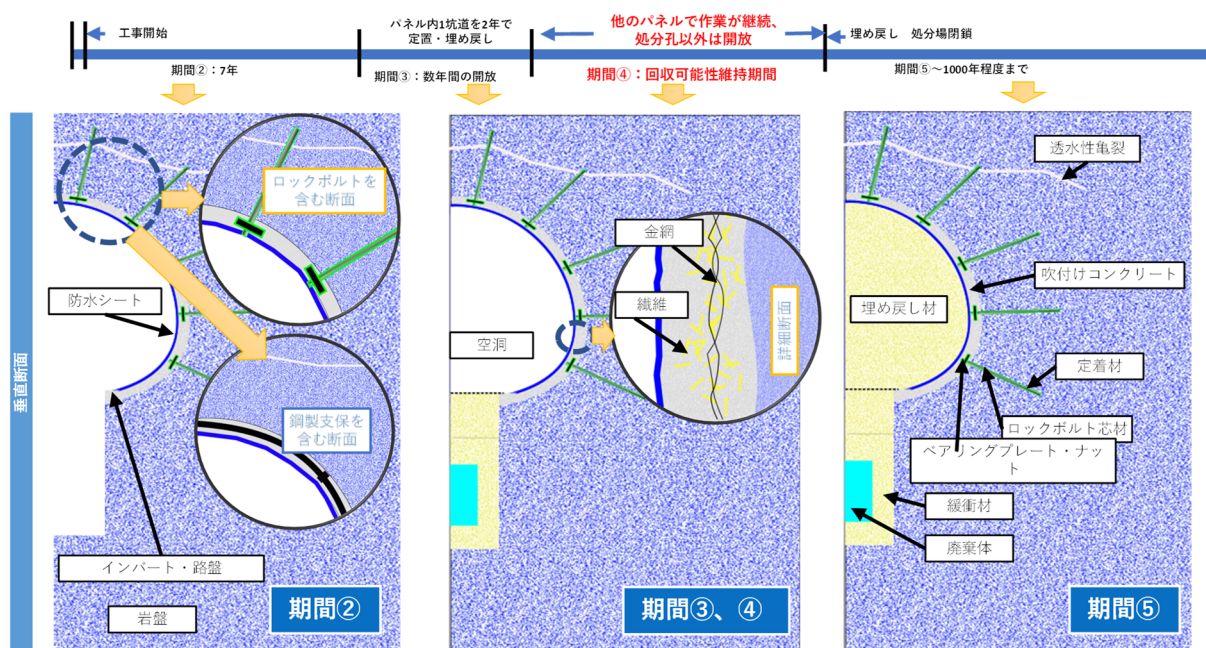


評価対象とする事象

区分	影響先	パラメータ	評価対象事象	吹付けコンクリート施工後
				0～数ヶ月程度 期間②
金属 ロックボルト 鋼製支保 金網	厚さ、形状	腐食の速度 腐食の形態	金属の腐食速度、腐食形態	大気からの酸素・炭酸ガスの供給 腐食面及びロックボルト孔から大気成分が供給される 高pHブルームの発生 吹付けコンクリートからの高 pH ブルームが発生する
			被覆の形成	不飽和領域の発生、地下水の流出 地下水の流出に伴い不飽和領域が発生し、大気が不飽和領域に流入
			不飽和領域の発生、ガスの蓄積	応力腐食割れの発生 予想されない
			応力腐食割れの発生	好気性微生物の活動 好気性微生物活動により腐食速度、形態に影響を及ぼす地下水の pH と Eh が変化
			微生物影響下での腐食速度、形態	好気性微生物活動による腐食速度、形態によるせん断荷重の発生 坑道温度と岩盤との温度差
	強度・特性	材料の特性	力学特性の温度変化	水素化による強度変化 予想されない
			水素化による強度変化	予想されない
	作用荷重	ガス発生による荷重 材料の膨張 処分深度や荷重に伴う荷重 ガス発生	ガス圧による作用荷重	予想されない
			水圧・地圧の作用	予想されない
			副次的効果	ゆるみ・塑性領域の発生 偏圧によるせん断荷重の発生 坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
セメント 鉱物 吹付けコンクリート	厚さ、形状	コンクリートの変質・劣化	セメントと地下水の反応にともなうコンクリート材料の変質速度（劣化の速さ）	アルカリ成分の中和 坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
			微生物活動に伴うコンクリート材料の変質速度（劣化の速さ）	好気性微生物の活動 好気性微生物活動により腐食速度、形態に影響を及ぼす地下水の pH と Eh が変化しコンクリート劣化に影響を与える
	強度・特性	コンクリートの劣化・劣化	変質・劣化の形態	アルカリ成分の中和 コンクリート成分の変質 不飽和領域での鉱物反応低下
			収縮性の変化	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
	作用荷重	材料の温度影響 氷凍物による荷重作用 ガス圧による荷重作用 水圧・岩盤からの荷重作用	材料の温度影響	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
			氷凍物による荷重作用	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
	副次的効果	コンクリート変質の劣化 透水性への影響 間隙構造の変化の水理への影響	コンクリート変質の劣化	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
			透水性への影響	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
	副次的効果	間隙構造の変化の水理への影響	間隙構造の変化の水理への影響	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
			副次的効果	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
有機物 繊維 防水シート 排水材	強度・特性	素材の劣化	温度変化による素材の劣化	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
			微生物活動に伴う素材の劣化	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
	作用荷重	荷重	ガス圧による荷重作用	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
			水圧・岩盤からの荷重作用	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
	副次的効果	シート表面または境界部 周辺のコンクリートの劣化	シート表面または境界部の劣化	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
			周辺のコンクリートの劣化	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
	副次的効果	金属腐食 食肉腐食への影響 水質変化 地下水組成 発熱	金属腐食	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
			食肉腐食への影響	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
	副次的効果	水質変化	水質変化	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
			地下水組成	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
鉱物(岩盤)	厚さ、形状 強度・特性	岩盤の変質・劣化、変形	亀裂状態や岩盤間隙構造の変化	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
			応力開放による変形	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
	作用荷重	岩盤の変形	水圧による変形	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
			岩盤からの荷重作用	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
	副次的効果	岩盤表面、亀裂表面の状態 透水性への影響 地下水化学組成の変化 温度変化	岩盤表面、亀裂表面の状態	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
			透水性への影響	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
	副次的効果	地下水化学組成の変化	地下水化学組成の変化	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
			温度変化	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
	副次的効果	温度変化	温度変化	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差
			副次的効果	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤との温度差

図 4.1-3 ストーリーボードの例（2021 年度検討（原環センター・原子力機構，2022））

状態 A（処分坑道が解放された状態で回収可能性を維持）



状態 B（処分坑道を埋戻し、端部に力学プラグを設置した状態で回収可能性を維持）

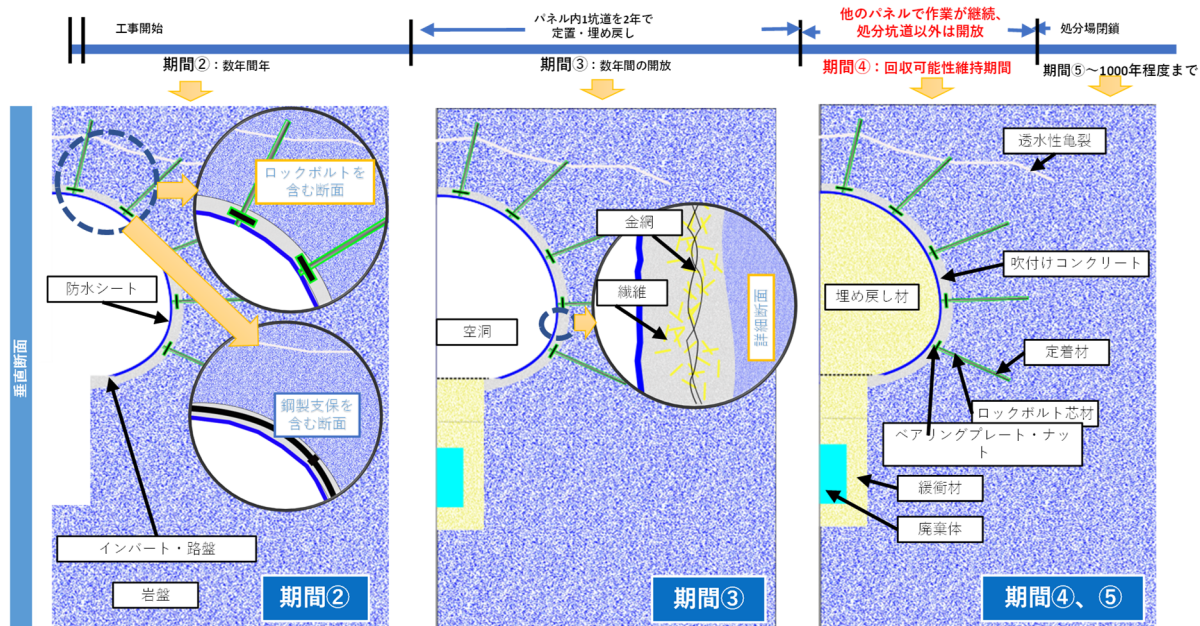


図 4.1-4 検討対象とする処分坑道

4.2 ストーリーボードの改善

4.2.1 重要なプロセスの整理

2021 年度における検討では、状態オプションごとに各期間で考慮すべきプロセスを整理してストーリーボードを作成した。この際、プロセスの重要度による分類を実施していないことから、専門的な観点から、不要なプロセスや必要なプロセスで欠けているものなどが混在している可能性があること、また、多くの専門家が共有できるような分かり易い表示方法に改める必要があることから、さまざまな分野の専門家に幅広く意見を求めた。本検討の対象を「地下構造物の安定性及び供用性」であることから、専門家は、岩盤（力学、水理）、支保（コンクリート材料・構造）、性能評価の分野とした（専門家との議論の詳細については付属書 4.1 を参照）。

表 4.2-1 に専門家との議論より得られた「重要なプロセス」を示す。結果は、① 鋼材の腐食に係るプロセス、② セメント材料劣化に係るプロセス、③ 坑道全体の環境変化に係るプロセス、④ 岩盤中の環境変化に係るプロセスに分類できる。これらの「重要なプロセス」は、単独のプロセスではなく時間的な変遷や環境条件の変遷に係るものが多いことから、関連する熱（T）、水理（H）、力学（M）、化学（C）への分類とさらに基本となるプロセスに分解した。整理例を図 4.2-1 に示す（全ての「重要なプロセス」の要因整理した結果については付属書 4.2 を参照）。例えば、「建設時初期のトンネル軸方向の温度伸縮によるひび割れや施工継目から漏水が発生し、鋼材の腐食が進行する」というプロセスは、温度変化（T）による水理変化（H）及び力学変化（M）からなり、具体的には以下のような基本となるプロセスに分解できる。

- ・ 吹付けコンクリートの敷設に伴い水和熱が発生する。
- ・ 水和熱の低下によりコンクリートは収縮し鋼製支保などとの境界で間隙が発生する。
- ・ 間隙での地下水流動が変化し、金属部品に酸素が供給される。
- ・ 供給された酸素による腐食によって、鋼材が腐食し肉厚が減少する。
- ・ 肉厚の減少に伴い鋼製支保の力学強度が低下する。

上述の整理に基づき抽出した基本となるプロセスをストーリーボードに示している区分で統合した評価対象とする事象に反映し、評価対象事象及びプロセスを変更した例を表 4.2-2 に示す。（すべての区分の評価対象事象及びプロセスの変更については付属書 4.3 に記載）。修正の過程が分かるように、新規に追加したものは○、削除したものは△とするとともに、一部、表現を変更した。

4.2.2 ストーリーボードの改善

ストーリーボードは、処分場の状態変遷に係るプロセスの取りまとめ手法の一つであり、時間的・空間的な違いによって、どのようなプロセスが発生し、どのようなプロセスを評価する必要があるのかを俯瞰して把握することを可能とするものである。したがって、時間、処分場スケール、ニアフィールドスケール、詳細スケールの各状態が分かるとともに、評価対象とする区分とプロセスの THMC 及びその関係が分かるように、ストーリーボードを改善した。状態オプション A（処分坑道が開放された状態）及び状態オプション B（処分坑道が埋め戻され、端部に力学プラグが設置された状態）の 2 種類の回収可能性が維持された状態に対して、改善したストーリーボードを図 4.2-2～図 4.2-6 に示す。さらに、区分ごとに評価対象と考慮が必要なプロセスの例を表 4.2-3 に示す。（すべての区分の評価対象事象については付属書 4.4 に記載）。

表 4.2-1 専門家との議論より得られた重要なプロセス

① 鋼材の腐食に関するプロセス

建設時初期のトンネル軸方向の温度伸縮によるひび割れや施工継目から漏水が発生し、鋼材の腐食が進行する。
通常の施工範囲の温度環境においては 10℃の温度上昇で鋼材の腐食速度は約 2 倍となる。
鋼材への接触水(地下水)に塩化物が含まれると腐食速度は上昇するが、塩濃度よりも溶存酸素濃度が金属の腐食速度に影響を与える。
埋め戻されている坑道では二酸化炭素・酸素の供給は限られており、鋼材の腐食速度は小さい。
坑道が開放されている状態では、オーバーパックへの酸素供給の評価が必要である。
金属腐食は酸素濃度に律速する。不飽和の状態での酸素の拡散速度が水中より大きく、そのため飽和している状態のほうが腐食速度は遅くなる。また、塩素が多いと溶存酸素濃度が低下するため、海中では気中よりも腐食し難い。

② セメント材料劣化に関するプロセス

吹付けコンクリートと防水シートの密着性は、境界面の地下水流動に影響し、地下水へ溶存する成分の移動や流速によるコンクリートの劣化に影響する。
温度が高くなると二酸化炭素の拡散速度が速くなり、セメントの中性化が進む。水中よりも気中での拡散速度が大きく、中性化速度は相対湿度 70%程度で最大となる。一方で、乾燥が進むと、二酸化炭素や水酸化カルシウムが溶存するために必要な液状水が減少するため、中性化速度は低下する。
坑道閉鎖後、発熱影響で場が高温となる場合、モルタルは劣化する。
アルミ成分を多く含むセメント系材料は硬化過程で高温下(65～70℃以上)になるとエトリンガイトが分解し、エトリンガイトの成分(アルミン酸イオンや硫酸イオンなど)は C-S-H に収着される。硬化した後に C-S-H に収着されていた成分が放出されると、エトリンガイトが再生成され膨張する現象(DEF: 遅れエトリンガイト)が起こる。
吹付けコンクリートやグラウト材などの急結材の初期の強度は、エトリンガイトで確保されている場合が多い。
DEF は打ち込み温度が重要であり、65～70℃以上になるとエトリンガイトが溶解し、温度が低下すると硫酸イオンがアルミネートやモノサルフェートと反応しエトリンガイトが生成され膨張し割れが発生する。
セメント内部で酸素は消費されないことから OPC コンクリートは酸素を固定化しない。スラグを使用したコンクリートでは硫黄成分が影響し酸素を吸収する。
温度が 50℃になるとコンクリート中の骨材の線膨張係数の相違から割れが発生する場合がある。
セメント硬化体内部では拡散や移流により運ばれる塩素が固定化される(フリーデル氏塩)。炭酸ガスの拡散などにより炭酸化するとフリーデル氏塩が分解するため、固定化された塩素が遊離する。

③ 岩盤中の環境変化に関するプロセス

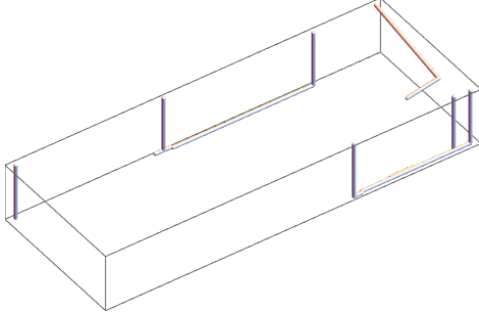
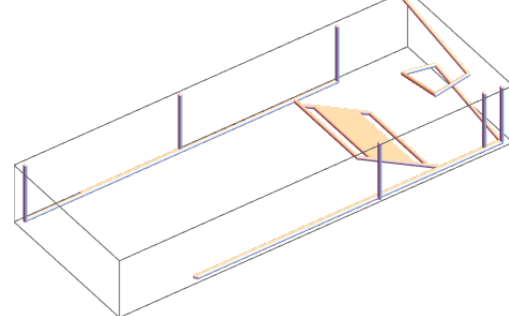
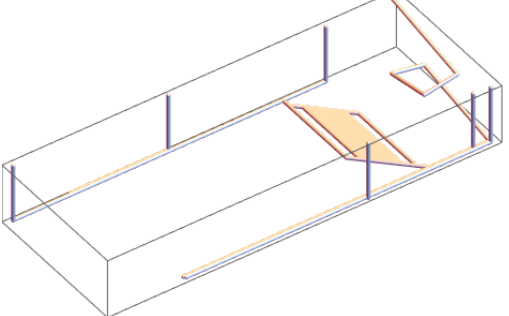
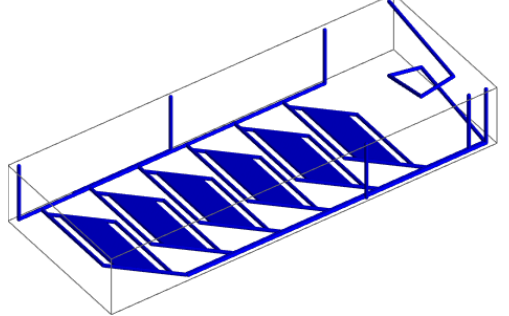
堆積岩中に卓越した流路が存在する場合においては、流路近傍で堆積岩が地下水により侵食される可能性がある、浅い所の例ではあるが、これによって地盤の陥没事故の事例がある。
廃棄体の熱で岩盤が膨張し、熱変形する可能性について考慮が必要である。
亀裂は圧縮融解し固結する。しかし、亀裂に湧水があると亀裂内に沈殿する鉱物が流出する可能性があり、そのようなケースにおいて透水性は上昇する。
廃棄体定置後の温度差による岩盤内の水の上昇流は考慮する必要がある。
圧力融解の生じる時間スケールは、実験結果（おそらく 100℃以下）では数日～数ヶ月程度というかなり早い期間で現象が生じている。
岩盤内の不飽和領域に浸入する酸素はすみやかに消費されると予想され、坑道内が酸欠となる可能性は否定できない。
回収可能性の維持のため開放が想定される坑道は地下水の排出が予想され、この期間は周囲の地下水を引いてくることになることが想定される。

④ 坑道全体の環境変化に関するプロセス

坑道閉鎖後の廃棄体からの発熱に伴う温度変化は、坑道閉鎖前より大きくなる。
吹付けコンクリートやグラウト材などの急結材の初期の強度は、エトリンガイトで確保されている場合が多い。
裏面排水層は長期的には、岩盤セメント境界面で溶脱が生じる。数百年のオーダーの現象であり、Ca が溶けると強度は 1/10 程度低下する。
一般的には鉱物変遷に係る化学反応は温度が高いと進む。鉱物が溶けて析出する場合、「流速が早い場合は流出する」、「堆積する場合には亀裂を塞ぐ効果」の二つが考えられる。鉱物組成の観点から花崗岩よりも堆積岩（泥岩など）の方が変化が大きいものと予想される。力学というよりも化学的な作用の意味合いが強い。
緩衝材の不飽和領域での水蒸気の拡散が予想されるのであれば、オーバーパックスの腐食に関する評価方法（局所的に腐食する）が異なる可能性がある。特に状態オプション A の場合には再評価すべきである。
状態オプション B において坑道の端点に敷設されるプラグ（力学プラグ）は、長期間大気に晒されることになる。力学的な挙動や内部の鉄筋・鉄骨の腐食の評価は、不可欠である。
吹付けコンクリートと岩盤との境界は一体化することにより、力学的な安定性に寄与している。

表 4. 2-2 評価対象事象及びプロセスの変更例（状態オプション A、B 共通、期間②）

区分	影響先	パラメータ	評価対象事象	吹付けコンクリート施工後	変更、追加
				7 年程度	
				期間②	
金属 ロックボルト 鋼製支保 金網	厚さ、形状	腐食の速度 腐食の形態	金属の腐食速度、腐食形態	大気からの酸素・炭酸ガスの供給 掘削面及びロックボルト孔から大気成分が供給される	大気成分の拡散・浸入 ：名称変更 ○ 間隙の発生と大気成分の浸入 ：追加
			被膜の形成	高 pH ブルームの発生 吹付けコンクリートからの高 pH ブルームが発生する	不動態被膜の形成 ：名称変更
			不飽和領域の発生、ガスの蓄積	不飽和領域の発生地下水の流出 地下水の流出に伴い不飽和領域が発生し、大気の不飽和領域に浸入	地下水の流出・不飽和領域の発生 ○ 不飽和領域での大気成分の拡散 ：追加 ○ 金属表面への塩の蓄積 ：追加
			応力腐食割れの発生	圧縮場であり、応力腐食割れの可能性は小さい	△
			微生物影響下での腐食速度・形態	好気性微生物の活動 好気性微生物活動により腐食速度・形態に影響を及ぼす地下水の pH と Eh が変化	微生物活動による腐食速度の変化
	強度・特性	材料の特性	力学特性の温度変化	坑道温度と岩盤との温度差 坑道温度と岩盤温度差による温度勾配の発生と吹付けコンクリートの発熱	温度変化による強度変化 ：名称変更
			水素脆化による強度変化	予想されない	
	作用荷重	ガス発生による荷重	ガス圧による作用荷重	予想されない	
		材料の膨張	腐食膨張による作用荷重	予想されない	
		処分深度や岩質に伴う荷重	水圧・地圧の作用	ゆるみ・塑性領域の発生 偏圧によるせん断荷重の発生 重量物移動によるせん断荷重の発生 水圧勾配の発生 坑道表面は大気圧となり地下水の流出に伴い水圧勾配が発生する。坑道開放による荷重変化がゆるみ域・組成領域を形成する。底板においては操業中の重量物に伴う荷重が発生する	ゆるみ・塑性領域の発生 偏圧によるせん断荷重の発生 △ 重量物移動によるせん断荷重の発生 ：削除 ○ 岩盤との構造材の一体化 ：追加 水圧勾配の発生
	副次的効果	ガス発生	排水・不飽和化	予想されない	地下水の流出・飽和領域の発生による熱特性の変化 掘削による温度変化 セメント材料からの水和熱
セメント 鉱物 吹付けコンクリート インバート	厚さ、形状	コンクリートの変質・劣化	セメントと地下水の反応にともなうコンクリート材料の変質速度（劣化の深さ）	アルカリ成分の中和 地下水流による侵食 坑道面に接する吹付けコンクリートは、酸素・炭酸ガスの拡散により変質する	コンクリート中への大気成分の拡散・浸入 ：名称変更 △ 地下水流による侵食 ：削除：期間的に考慮の必要は無い
			微生物活動に伴うコンクリート材料の変質速度（劣化の深さ）	好気性微生物の活動 好気性微生物活動により腐食速度・形態に影響を及ぼす地下水の pH と Eh が変化しコンクリート劣化に影響を与える	微生物活動による鉱物変化 ：削除、特殊な地下水性状に限られる
	強度・特性	コンクリートの変質・劣化	変質・劣化の形態	アルカリ成分の中和 コンクリート成分の変質 不飽和領域での鉱物反応低下 坑道面に接する吹付けコンクリートは酸素・炭酸ガスの拡散により変質し、力学的な強度が変化する。インバート部は排水に伴う地下水との接触が予想される	大気成分の拡散・浸入 ：名称変更 △ コンクリート成分の変質 ：削除：期間の長さを考慮 △ 不飽和領域での鉱物反応低下 ：削除：酸素・炭酸ガスの影響が顕著になる低下⇒上昇：期間の長さを考慮
			収着性の変化	コンクリート鉱物組成変化 坑鉱物変化は収着性を変化させる	△ コンクリート鉱物組成変化 ：削除：期間の長さを考慮
			材料の温度影響	坑道温度と岩盤との温度差 温度勾配の発生、セメントの水和熱はセメント鉱物と地下水の反応に影響を及ぼす	温度変化、温度勾配の発生 ：名称変更 ○ 温度変化による膨張・収縮 ：追加 ○ 接合部での間隙の発生 ：追加
	作用荷重	－	沈殿物による荷重作用 ガス圧による荷重作用	予想されない 予想されない	
			水圧、岩盤からの荷重作用	ゆるみ・塑性領域の発生 偏圧によるせん断荷重の発生 重量物移動によるせん断荷重の発生 水圧勾配の発生	ゆるみ・塑性領域の発生 偏圧によるせん断荷重の発生 ○ 岩盤との一体化 ：追加 △ 重量物移動によるせん断荷重の発生 ：削除 水圧勾配の発生
	副次的効果	コンクリート表面の変質	微生物活動に伴う表面の変化	微生物活動による間隙構造の変化 ロックボルト孔中の微生物活動におけるコロニー生成は透水性及び定着材の鉱物組成の変化に寄与する可能性がある	△ 微生物活動による間隙構造の変化 ：削除：特殊な地下水性状に限られる
		透水性への影響	間隙構造の変化の水理への影響	表面の削剥による透水性変化 岩盤内部の流速が大きな位置（例えば、流水亀裂）においては、セメントが侵食される透水性が変化する	△ 表面の削剥による透水性変化 ：削除：期間的に考慮の必要は無い 地下水の流出・不飽和領域の発生 ：修正・追加 セメント材料からのアルカリブルーム ：修正・追加

期間②パネル建設	期間③廃棄体定置		期間④処分坑道埋戻し など
<p>立坑の掘削中</p> <p>処分場建設開始から7年後まで</p> <p>排水は、アクセス立坑と斜坑、連絡坑道</p>	<p>パネル1建設中</p> <p>処分場建設後5年～9年後掘削開始</p> <p>操業10年～17年後</p> <p>処分場閉鎖11年～18年後</p> <p>排水は、アクセス立坑と斜坑、連絡坑道主要坑道、処分パネル</p>	<p>パネル6建設中</p> <p>処分場建設後43年～50年後掘削開始</p> <p>操業43年～51年後</p> <p>処分場閉鎖11年～18年後</p>	<p>処分場閉鎖</p> <p>閉鎖開始60年後</p> <p>閉鎖終了68年後</p>
 <p>水位面の変化</p>	 <p>水位面の変化 地表水・深層水の移動</p> <p>岩盤内の土粒子の移動 岩盤の陥没</p>	 <p>水位面の変化 地表水・深層水の移動</p> <p>地下水組成の変化</p> <p>岩盤内の土粒子の移動 岩盤の陥没</p>	 <p>水位面の回復</p> <p>地表水組成の変化</p>
<p>・ 地表まで到達する坑道周辺の水位面が低下する。</p>	<p>・ 地下深部の掘削、地下水の流出の地表面水位への影響は小さい(層序が存在するため)</p> <p>・ 地下水の流出経路では、土粒子が移動し、空洞が発生する可能性がある。</p>	<p>・ 地下深部の掘削、地下水の流出の地表面水位への影響は小さい(層序が存在するため)</p> <p>・ 地下水の流出経路では、土粒子が移動し、空洞が発生する可能性がある。</p>	<p>・ 地表水面、坑道周辺の地下水の流速、不飽和部分は回復が見込まれるが、不飽和部分の残存は可能性がある。</p>

赤色：熱 青色：水理 灰色：力学 黄色：化学

図 4.2-2 ストーリーボード (処分場スケール)

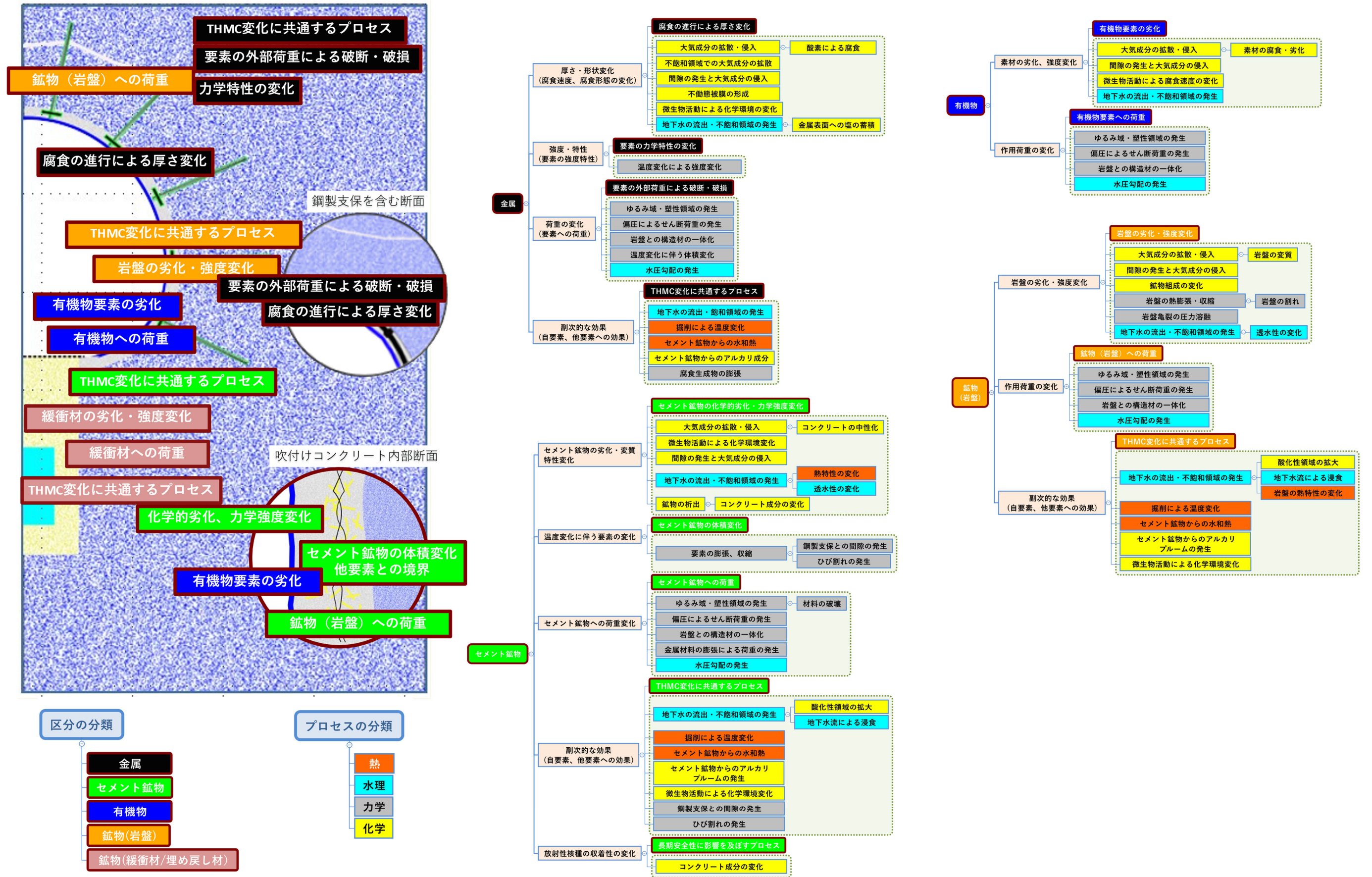


図 4.2-3 ストーリーボード（ニアフィールドスケール、詳細スケール）（状態オプション A,B 共通、期間②）

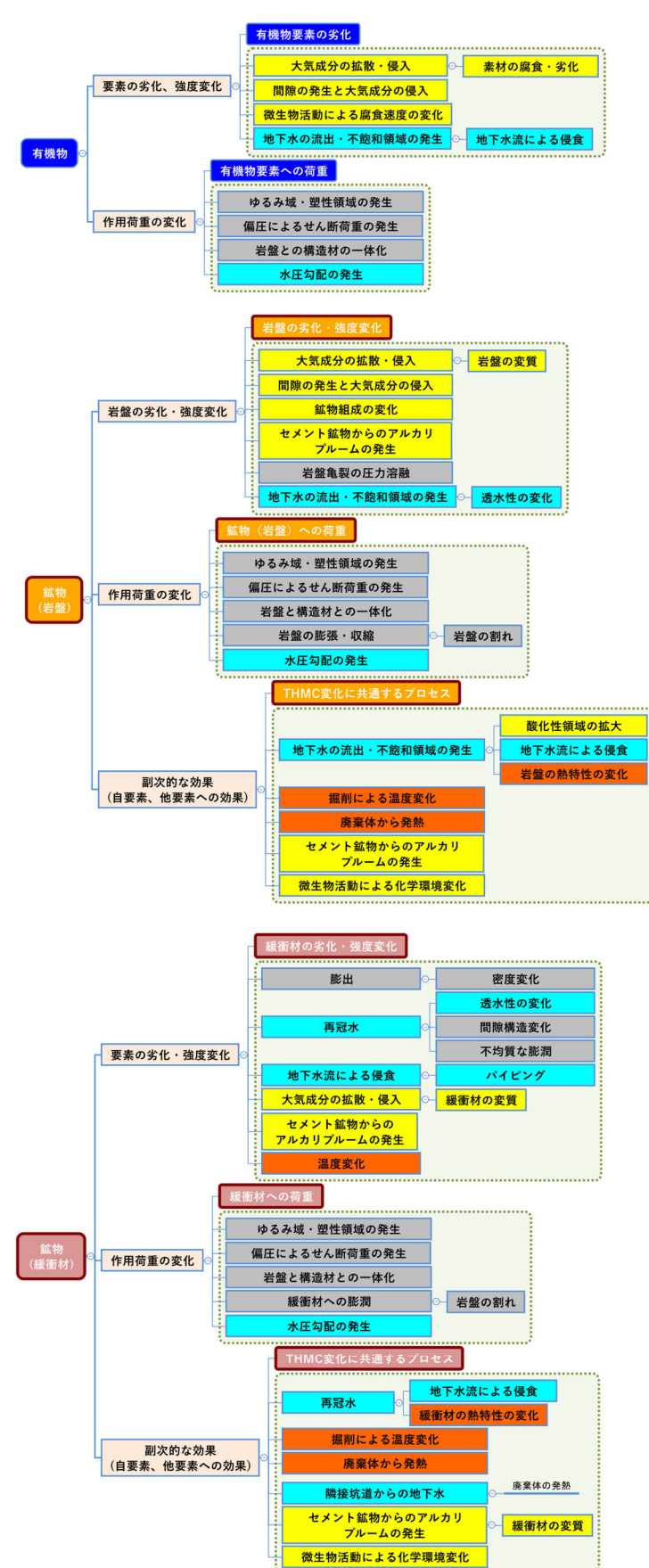
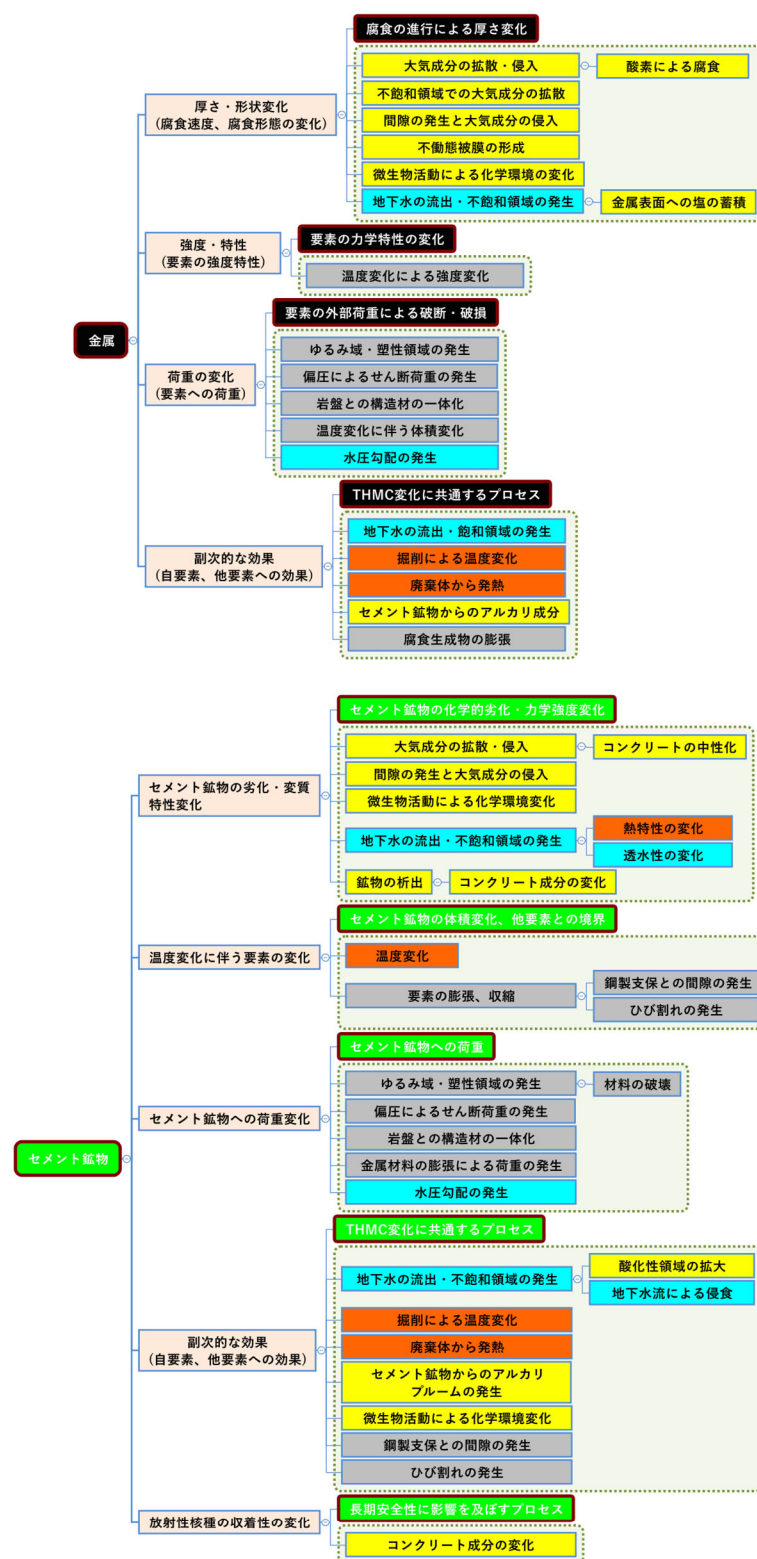
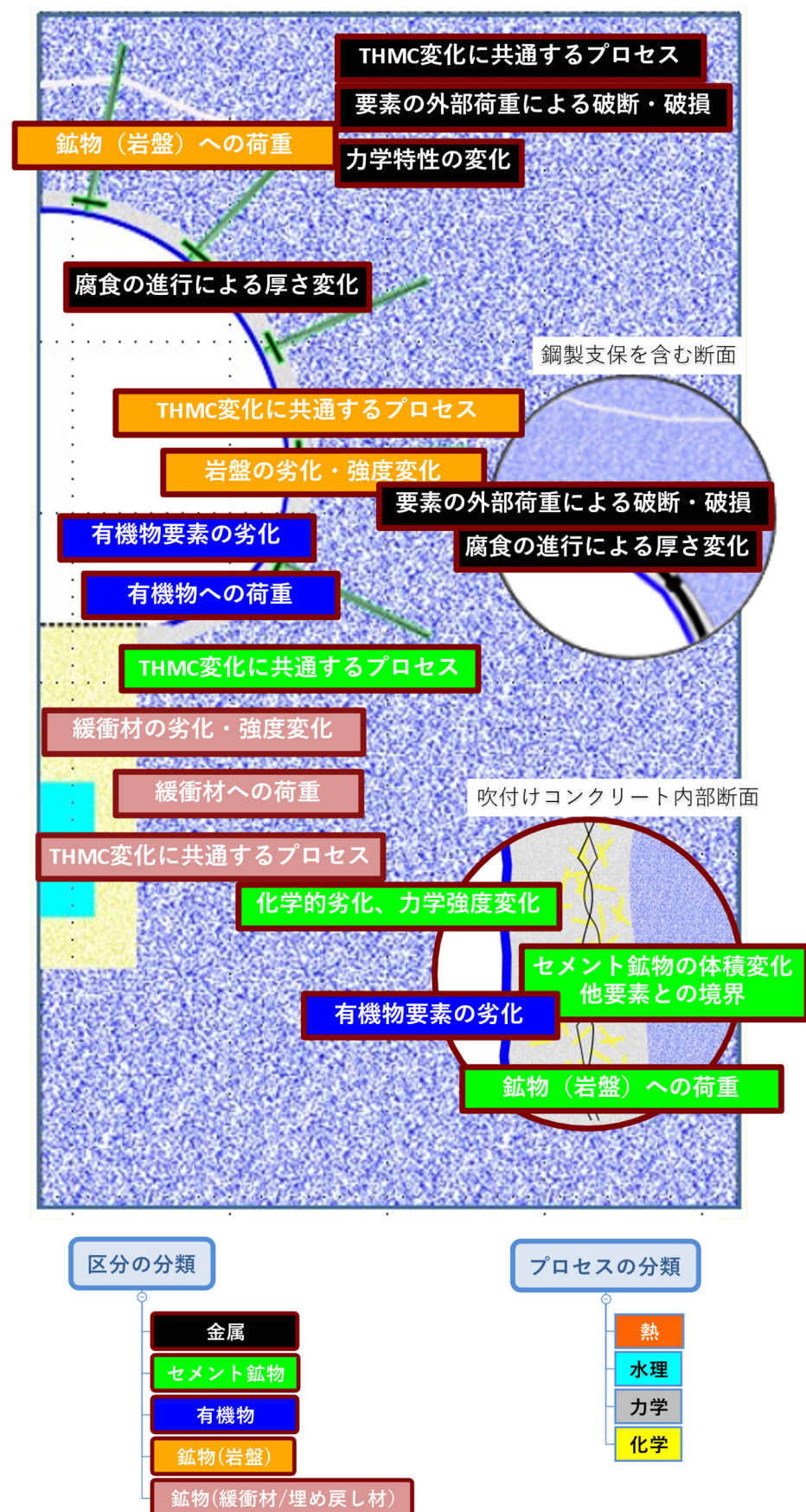


図 4.2-4 ストーリーボード（ニアフィールドスケール、詳細スケール）（状態オプション A, B 共通、期間③）

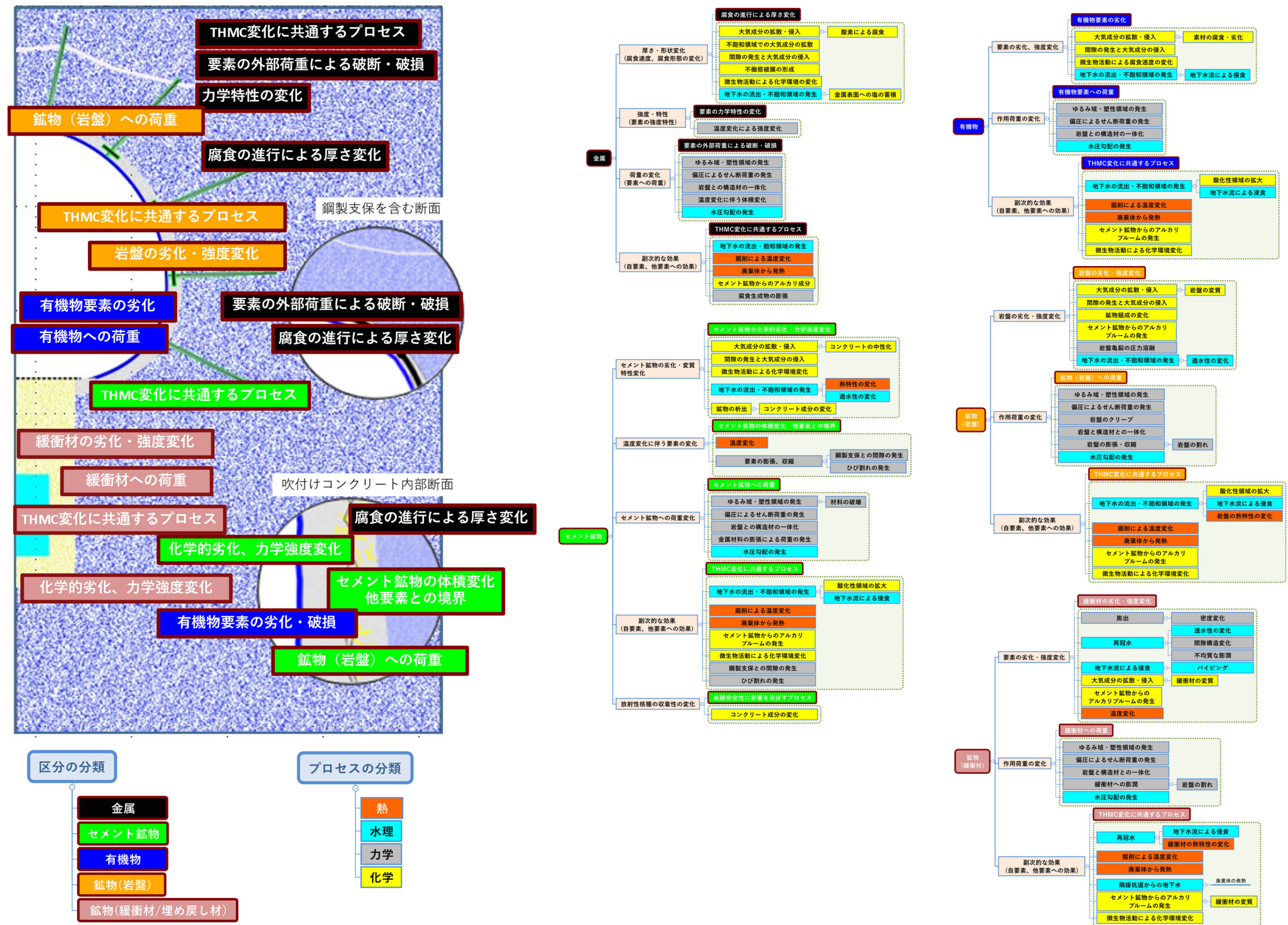
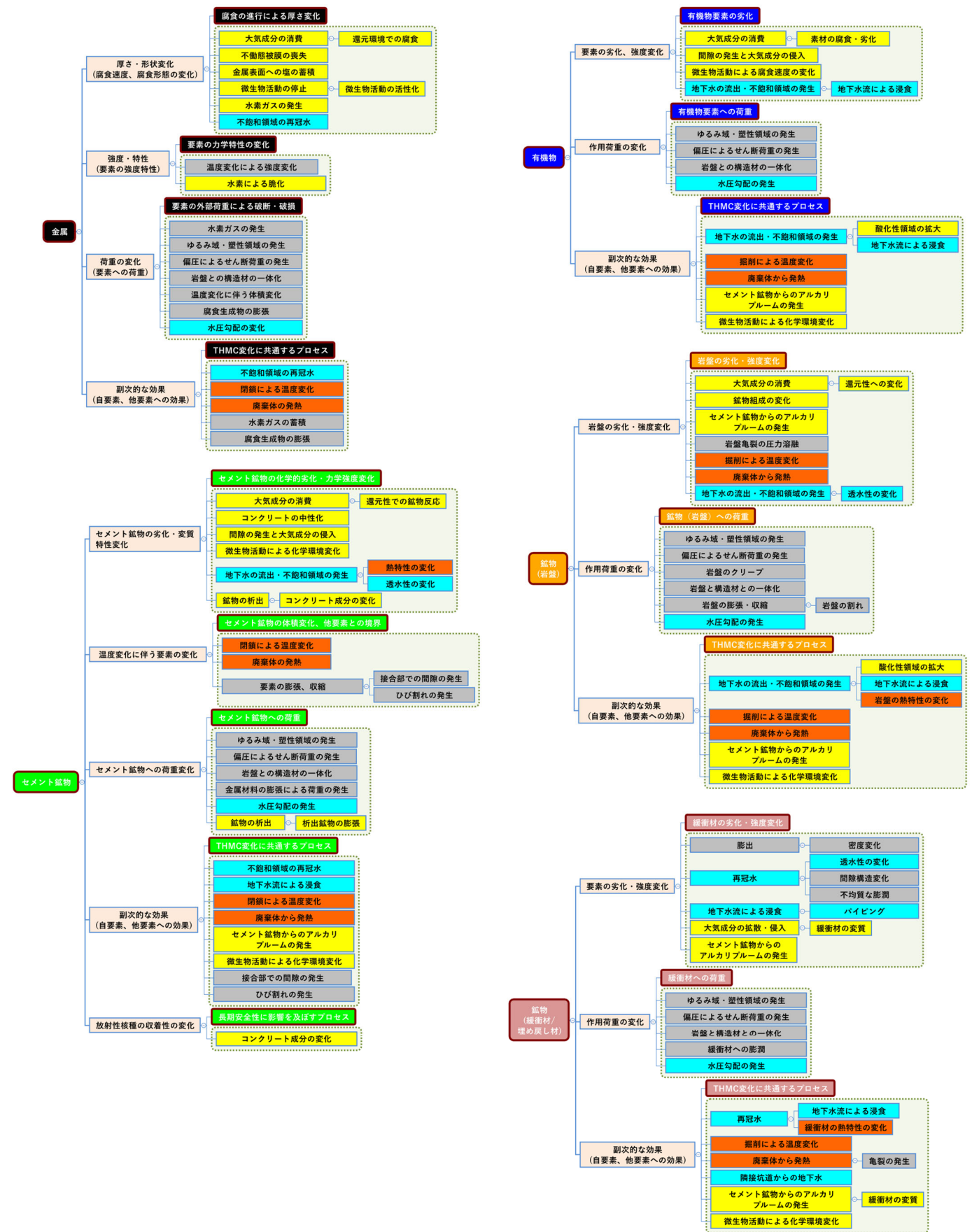


図 4.2-5 ストーリーボード（ニアフィールドスケール、詳細スケール）（状態オプション A、期間④）



4-41

表 4.2-3 評価対象と考慮が必要なプロセスの例（状態オプション A、B 共通、期間②、金属）

区分	影響先	パラメータ	評価対象事象	考慮が必要なプロセス
				廃棄体定置前 数年
				期間②
金属 ロック ボルト 鋼製支 保 金網	厚さ、形状	腐食の速度 腐食の形態	金属の腐食速度、腐食形態	大気成分の拡散・侵入 酸素による腐食 間隙の発生と大気成分の侵入 腐食の進行による厚さ変化 掘削面及びロックボルト孔から大気成分が供給される。供給された酸素と接触する金属材料は腐食する
			被膜の形成	不動態被膜の形成 吹付けコンクリートやロックボルト定着材からの高 pH 成分と接触する金属材料は不動態被膜性形成し腐食速度を低下させる
			不飽和領域の発生、ガスの蓄積	地下水の流出・不飽和領域の発生 不飽和領域での大気成分の拡散 金属表面への塩の蓄積 坑道開放による地下水の流出は孔壁近傍に不飽和領域を発生させ、温度影響も複合し塩が不飽和部分や金属との境界面に析出する
			応力腐食割れの発生	応力腐食割れの発生 圧縮場であり、応力腐食割れの可能性は小さい
			微生物影響下での腐食速度・形態	微生物活動による化学環境の変化
	強度・特性	材料の特性	力学特性の温度変化	温度変化による強度変化 金属材料の力学特性は、温度によって変化する
			水素脆化による強度変化	この期間では予想されない
	作用荷重	ガス発生による荷重	ガス圧による作用荷重	この期間では予想されない
		材料の膨張	腐食膨張による作用荷重	この期間では予想されない
		処分深度や岩質に伴う荷重	水圧・地圧の作用	ゆるみ・塑性領域の発生 偏圧によるせん断荷重の発生 岩盤との構造材の一体化 材料の破壊 水圧勾配の発生 坑道開放による荷重変化がゆるみ域・塑性領域を形成し岩盤及び構造材に荷重を及ぼす。構造材は、岩盤と一体化することにより耐荷重性を上昇させる。底板においては操業中の重量物に伴う荷重が発生する、坑道表面は大気圧となり地下水の流出に伴い水圧勾配が発生する
	副次的効果	ガス発生	排水・不飽和化	この期間では予想されない
		自他への効果	THMC の変化	地下水の流出・不飽和領域の発生 掘削による温度変化 セメント材料からの水和熱 セメント材料からのアルカリブルームの発生 不飽和領域の発生、温度変化、地下水の化学的な変化は、自己プロセス、他の区分でのプロセスに影響を与える

4.3 技術課題のまとめ

4.3.1 地下構造物の安定性及び供用性に係るシナリオの作成

地下構造物の安定性及び供用性は、岩盤を含む坑道全体の力学的な状態を定量化し、これと別途設定した基準を照らし合わせることによって判断される。そのためには、地下構造物の安定性及び供用性に必要な機能が喪失する原因とそのプロセスを抽出し、シナリオとして整理したうえで、具体的に定量化する必要がある。前節に示したように、ボトムアップ・アプローチ的な手法としてストーリーボードの作成と改善を実施し、定量化すべきプロセスを抽出した。しかしながら、定量化においては、定量化の対象となるプロセスとそのプロセスに影響を与える THMC の環境条件を考慮するとともに、プロセスの連成を処分場構成要素の力学的安定性に結び付ける必要がある。すべてのプロセスの連成を考慮して力学的安定性の定量化を実施する必要があるが、知見やデータの不足や定量化手法が無いこと、定量化の対象が多岐にわたることからの場合分けの多さなどにより、THMC の環境変遷と連成した力学的安定性の変遷を、そのままシナリオとして記述し、定量化することは現状困難である。そのため、特定の処分場構成要素のプロセスの変遷をサブシナリオと定義し、これを具体的に定量化すべきプロセスとして個別に定量化する。サブシナリオに基づいて定量化した結果の空間的に異なるスケールの要素への展開や、別要素の定量化した結果と統合することで、岩盤を含む坑道全体の力学的な状態の定量化が可能となる。サブシナリオは、専門家との議論より得られた「シナリオ記述に係る留意点」(表 4.3-1)を参考に、ストーリーボード作成時に整理した評価対象と考慮が必要なプロセス(表 4.2-3)を分析して抽出した(表 4.3-2)(時間ごとのすべての区分の分析結果については付属書 4.5 に記載)。具体的には、区分ごとに力学的な安定性及び供用性の定量化に必要な要素の形状、力学特性、荷重などのパラメータとその挙動、及び THMC の変遷からみたときのパラメータの影響について整理し、それらをサブシナリオとしてまとめた。さらに、同じ区分で空間的配置の相違で異なる要素ごとに留意する条件も示した。このようにして抽出したサブシナリオを区分別、時間別にまとめた結果を表 4.3-3 に示す。全体で 74 (金属: 16、セメント鉱物: 12、有機物: 16、鉱物(岩盤): 18、鉱物(緩衝材/埋戻し材): 12) のサブシナリオを抽出した。

表 4.3-1 専門家との議論より得られたシナリオ記述に係る留意点

300 年といった長期を考えると、防水シートは機能しないと推測される。また、ロックボルト、支保工は腐食しコンクリート部は剥落する。
300 年といった長期を考えると、コンクリートと埋戻し材の境界部に水みちができないとは言えない。
長期的にはロックボルトは腐食する(機能を喪失する)と考えることが妥当である。
ロックボルトは、50 年オーダーの期間においては腐食・機能低下する可能性ある。
溶脱よりも鋼材腐食のほうが早いイメージがある。
セメントの溶脱速度よりも鋼材腐食速度のほうが早いイメージがある。
処分施設を作るような実際の岩盤では、トンネルによる地下水位が地表面まで影響を受けるようなことは考えにくい。
10 年程度経過した時点では、処分坑道などの性能に大きな変化があるとは考えにくい。
地下水にとって 300 年はそれほど長くない(300 年程度で大幅な変化は予想されない)。
立坑掘削後、周辺の地下水位形状は漏斗状にはならない(砂岩はなる)ので、飽和ラインはガタガタした形状となると推測される。
300 年程度の期間を考えた場合、岩盤にはセメント成分のアルカリ影響(高 pH)は、ないとは言えない。
アップコーニングの可能性はここで考慮している期間では少ないと予想される。
300 年程度の水理的(地下水位が?)は 1000 年程度、影響を及ぼす可能性がある。
防水シートは、接軸部から力学的要因により破損するものと予想される。その他の劣化要因は思い当たらない。

表 4.3-2 評価対象と考慮が必要なプロセスの分析結果の例（状態オプション A、B 共通、期間②、金属）

定量化が必要なパラメータ及びその挙動	
要素の形状に依存する耐荷重性能の変遷	<ul style="list-style-type: none">・ 要素の耐荷重性は要素の厚さなどの物理的な厚さや形状に依存して発現される。・ 金属材料を用いた要素の場合、物理的な厚さや形状は腐食の進行により変化する。・ 腐食量は要素に供給される酸素量や要素に接する地下水の化学条件（pH、Eh、イオン種）、温度によって決定される。・ また、地下水の化学環境は支保コンクリート内部や岩盤内部の飽和・不飽和環境に依存する。
要素の力学特性の変遷	<ul style="list-style-type: none">・ 要素（材料）の力学特性は温度依存性を有することから、周辺の温度の変化に対応し変化する。
要素への荷重作用	<ul style="list-style-type: none">・ 要素への荷重作用は、岩盤の掘削に伴うゆるみ域や塑性領域の発生、岩盤内の偏圧によるせん断荷重、支保敷設に伴う岩盤と支保工の一体化、坑道開放による水圧勾配の発生に影響を受ける。
自区分、他区分に影響を及ぼす変遷	<ul style="list-style-type: none">・ 地下水の流動状況は温度に影響を与える。・ コンクリートと金属要素との境界の間隙の発生は、化学環境の変遷に影響を与える・ 金属材料の腐食生成物は、周辺の要素、及び自己要素への荷重の原因となる。
THMC の変遷からみたときのパラメータの影響	
温度変化	<ul style="list-style-type: none">・ 掘削により坑道内部は大気温（作業環境の設定に依存）に変動し、岩盤内部との温度差により温度勾配が生じる。また、吹付けコンクリートから水和熱が発生し、温度は動的に推移する。これらの温度変化は、鋼材の力学的特性（ヤング率など）に影響を与える。
力学的な変化	<ul style="list-style-type: none">・ 金属材料、特に耐荷重性を要求される材料であるロックボルト、鋼製支保工への作用荷重はゆるみ域や塑性領域発生、岩盤の偏圧によるせん断荷重、水圧により異なる。構造物に一樣に同じ作用荷重が発生するものではなく、場所によって異なる荷重が生じる。荷重が大きな場合には金属表面への大気成分の通り道となるひび割れを発生させる。・ 鋼製支保工やロックボルトは不連続な岩盤及び、支保コンクリートと岩盤を縫い合わせるにより坑道全体を一体化する効果がある。・ 温度変化による要素の体積変化は作用荷重の原因となる。
水理的变化	<ul style="list-style-type: none">・ ひび割れなどの間隙の発生は大気成分の移動経路となり、ひび割れ部分に接触する金属材料の腐食に寄与する。・ 飽和・不飽和領域の発生は腐食に係る化学環境に影響する。乾燥過程での不飽和領域の発生は溶存成分である塩類の析出を生じ、鋼材の腐食速度を促進する。
化学的变化	<ul style="list-style-type: none">・ 大気成分の構造内部への拡散や移行は亀裂や隙間の発生に影響を受ける。・ 大気成分の構造内部への拡散と吹付コンクリートからの高ブルームは pH、Eh の空間的な勾配を発生させることから、金属材料の施工位置によっては異なる環境となる。・ 吹付けコンクリート中に位置する金属材料はコンクリート中の高 pH 環境により不動態被膜を形成し腐食速度を低下させる。・ 吹付けコンクリート中に拡散する炭酸ガスはコンクリート成分の反応によりコンクリートを中性化することから金属材料の表面の pH を下げる。・ 乾燥過程での不飽和領域の発生は溶存成分である塩類の析出を生じ、鋼材の腐食速度を促進する。・ 硫酸塩還元菌などの活動は、地下水化学環境を変化させ、腐食速度に影響を与える。
想定されるサブシナリオ	
	<ul style="list-style-type: none">・ 支保コンクリート内部や岩盤内部の化学環境、化学条件の分布、飽和・不飽和環境、温度の時間的な変遷を考慮した鋼材の腐食。・ 鋼材の部品（ボルト、ナットなど）の吹付けコンクリートとの位置関係を考慮した腐食。・ 支保コンクリートとの隙間や支保コンクリートのひび割れ中の水理環境と化学環境を考慮した鋼材腐食。
空間的配置の相違で異なる要素ごとに留意する条件	
ロックボルト	<ul style="list-style-type: none">・ ロックボルトは数メートルの長さを岩盤奥方向に展開される。そのため坑道表面部分と岩盤内部での環境が異なり、電位差が生じる可能性がある。・ ロックボルトを固定する定着材の岩盤内部での劣化にも依存する。・ ロックボルトの坑道表面部分にはベアリングプレートが配置され、坑道壁面に近いことから腐食に関する考慮が必要。
鋼製支保	<ul style="list-style-type: none">・ 鋼製支保工は、坑道全体に展開される。そのため、空間的な場所により腐食の状態が異なる。支保工に関する設計上、鋼製支保が吹付コンクリート内部に位置するかどうかにも影響される。
補強の金網	<ul style="list-style-type: none">・ 金網の機能は構造的な耐圧性上昇より、吹付けコンクリートの割れ防止にある。・ 吹付けコンクリート内部に位置することからこの期間での劣化は予想されないが、セメント材料のひび割れ部分位置では機能を喪失する可能性がある。

表 4.3-3 サブシナリオのまとめ

	期間②（掘削後）	期間③（廃棄体定置後）（状態オプション A の期間④含む）	期間④（埋戻し後）（状態オプション B）
金属	<ul style="list-style-type: none">・ 支保コンクリート内部や岩盤内部の化学環境、化学条件の分布、飽和・不飽和環境、温度の時間的な変遷を考慮した鋼材の腐食。・ 鋼材の部品（ボルト、ナットなど）の吹付けコンクリートとの位置関係を考慮した腐食。・ 支保コンクリートとの隙間や支保コンクリートのひび割れ中の水理環境と化学環境を考慮した鋼材の腐食。	<ul style="list-style-type: none">・ 支保コンクリート内部や岩盤内部の地下水化学環境、飽和・不飽和の水理環境、温度の時間的な変遷を考慮した鋼材の腐食。・ 鋼材の部品（ボルト、ナットなど）の吹付けコンクリートとの位置関係を考慮した腐食。・ 支保コンクリートとの隙間や支保コンクリートのひび割れ中の水理環境と化学環境に依存した鋼材の腐食。・ 岩盤のクリープ変形を含む、外部からの荷重による、鋼材への負荷。・ 支保や岩盤の破壊に影響を与える鋼材腐食部の体積膨張。	<ul style="list-style-type: none">・ 坑道閉鎖前の、Eh や pH の変遷、不飽和領域の変遷、残存する塩を考慮した、酸化還元環境の空間的な変動と腐食挙動の変化に対応する鋼材の腐食。・ 鋼材の部品の吹付けコンクリートとの位置関係に依存した腐食。・ 残存する支保コンクリートとの隙間や支保コンクリートのひび割れ中の水理環境と化学環境に依存した鋼材の腐食。・ 岩盤のクリープ変形を含む、外部からの荷重による、鋼材への負荷。・ 支保コンクリートとの隙間や支保コンクリートのひび割れ中の水理環境と化学環境に依存した鋼材の腐食。・ 水素の発生と水素脆化による鋼材の強度変化。・ 深部地下、または地表及び他坑道からの酸素などの供給による鋼材の腐食。・ 鋼材の破断、破損に依存した坑道の耐荷重性能の変化。
セメント鉱物	<ul style="list-style-type: none">・ 吹付けコンクリートの温度変化、セメント成分の変質や劣化に依存したセメント内での鉱物の析出。・ 吹付けコンクリートの温度変化によるセメント材料の膨張・収縮に依存した亀裂や間隙の発生。・ 岩盤内部での Eh などの化学的勾配の発生や分布に影響を与える、セメント鉱物からのアルカリブルームの発生。	<ul style="list-style-type: none">・ 吹付けコンクリートの温度変化、セメント成分の変質や劣化に依存したセメント内での鉱物の析出。・ 吹付けコンクリートの温度変化によるセメント材料の膨張・収縮に依存した亀裂や間隙の発生。・ 岩盤内部での Eh などの化学的勾配の発生や分布に影響を与える、セメント鉱物からのアルカリブルームの発生。・ 温度の上昇が大きな部分での膨張性鉱物の生成と膨張性鉱物による荷重の発生。	<ul style="list-style-type: none">・ 坑道の埋戻しによる温度変化、水理変化に対応するセメント成分の変質や劣化。・ 吹付けコンクリートの温度変化、セメント成分の変質や劣化に依存したセメント内での鉱物の析出。・ 温度変化による膨張性鉱物の発生。・ 吹付けコンクリートの温度変化によるセメント材料の膨張・収縮に依存した亀裂や間隙の発生。・ 岩盤内部での Eh などの化学的勾配の発生や分布に影響を与える、セメント鉱物からのアルカリブルームの発生。
有機物	<ul style="list-style-type: none">・ 坑道からの出水による防水シートへの圧力の発生。・ 大気影響、セメント影響による有機材料の劣化。・ 嫌気性、酸化性微生物の活性化による有機材料の劣化。・ 外部からの荷重変化による強化繊維の破断。	<ul style="list-style-type: none">・ 坑道からの出水による防水シートへの圧力の発生。・ 大気の侵入やセメントからのアルカリブルームによる有機材料の腐食や劣化。・ 有機物と微生物の反応による地下水化学環境の変化と有機材料の腐食や劣化。・ 嫌気性、酸化性微生物の活性化による有機材料の腐食や劣化。・ コンクリートの耐荷重性能に影響を与える強化繊維の腐食や劣化。・ 外部からの荷重変化による強化繊維の破断。	<ul style="list-style-type: none">・ 埋戻し材の膨潤による防水シートへの圧力の発生。・ 大気成分の消費やセメントからのアルカリブルームによる有機材料の腐食や劣化。・ 有機物と微生物の反応による地下水化学環境の変化と有機材料の腐食や劣化。・ コンクリートの耐荷重性能に影響を与える強化繊維の腐食や劣化。・ 外部からの荷重変化による強化繊維の破断。・ 吹付けコンクリートの耐荷重性能の変化に影響する強化繊維の劣化。
鉱物（岩盤）	<ul style="list-style-type: none">・ 岩盤と支保工の一体化による坑道の耐荷重性能の変化。・ 地下水の坑道への流出を考慮した岩盤中の飽和・不飽和分布の変化と岩盤中の化学環境の変遷。・ 大気成分の侵入による Eh 勾配の発生。・ 支保コンクリートの利用と地下水流動を考慮した岩盤中の pH 分布の変遷。・ 岩盤の応力開放と圧力融解による透水性などの変化。	<ul style="list-style-type: none">・ 支保工の変質、劣化に依存した岩盤を含む坑道の耐荷重性能の変化。・ 地下水の坑道への流出を考慮した岩盤中の、飽和・不飽和分布の変化。・ 大気成分の侵入による Eh 勾配の発生。・ 支保コンクリートの利用と地下水流動を考慮した岩盤中の化学環境分布の変化と岩盤の劣化。・ 坑道の開放による岩盤中の圧力融解による透水性などの変化。・ 廃棄体からの熱による岩盤の温度、温度勾配の変化と岩盤の割れの発生。	<ul style="list-style-type: none">・ 支保工の変質、劣化に依存した岩盤を含む坑道の耐荷重性能の変化。・ 緩衝材、埋戻し材の再冠水や地下水の坑道への流出を考慮した岩盤中の、飽和・不飽和分布の変化。・ 大気成分の消費による Eh 勾配の変化。・ 支保コンクリートの利用と地下水流動を考慮した岩盤中の化学環境分布と岩盤と岩盤の劣化。・ 坑道の開放による岩盤中の圧力融解による透水性などの変化。・ 廃棄体からの熱による岩盤の温度、温度勾配の変化と岩盤の割れの発生。・ 廃棄体からの熱による温度勾配に依存した地下水流動の変化。
鉱物（緩衝材／埋戻し材）	（なし）	<ul style="list-style-type: none">・ 緩衝材の再冠水と化学環境の変化。・ 廃棄体の発熱に依存した温度上昇と緩衝材の再冠水挙動の変化。・ 坑道閉鎖に依存した地下水化学環境の変化に応じた緩衝材や埋戻し材の変質・劣化。・ 廃棄体の発熱に依存した緩衝材の化学的変質。・ オーバーバックの重量による緩衝材の変形。・ 緩衝材と岩盤の地下水流動による緩衝材の侵食、パイピング埋戻し材と吹付けコンクリート、防水シート間の地下水流動と埋戻し材の侵食やパイピングの発生。	<ul style="list-style-type: none">・ 埋戻し材の再冠水と化学環境の変化。・ 廃棄体の発熱による温度上昇と緩衝材の再冠水挙動の変化。・ 坑道閉鎖に依存した地下水化学環境の変化に応じた緩衝材や埋戻し材の変質・劣化。・ 廃棄体の発熱に依存した緩衝材の化学的変質。・ オーバーバックの重量による緩衝材の変形。・ 緩衝材と岩盤の地下水流動による緩衝材の侵食、パイピング埋戻し材と吹付けコンクリート、防水シート間の地下水流動と埋戻し材の侵食やパイピングの発生。

4.3.2 回収可能性維持期間の定量化手法の整理

鉄道用又は軌道用の鉄筋コンクリート造のトンネルの減価償却資産としての耐用年数は、60年（大蔵省、1965）とあるが、回収可能性維持期間は、建設・操業を含めるとこの既存の構造物に想定する耐用年数を超える可能性があるため、建設時の要素（各部位：支保工と岩盤）の劣化に伴う耐荷重性能の変化の考慮が必要になる。したがって、これらの定量化では、「類似条件での経験・知見の活用」や「解析的手法の適用」が必要になる。一般の地下構造物の安定性に関しては、有限要素法解析などから得られたせん断ひずみ分布などとせん断強度とを比較した局所安全率や限界ひずみとの比較結果などを、類似条件での経験・知見に基づいて設置した基準と照らし合わせるなどの評価に基づき判断される。また、共用性に関しては、湧水量と排水量の差異、安定性には直接かかわらないような坑道の形状変化や、支保コンクリートの部分的な剥離や崩落といった事象などと類似条件での経験・知見に基づき判断される（例えば、農林水産省、2016）。「類似条件での経験・知見の活用」では、既存トンネルなどの調査結果に基づく地山条件や作用する荷重などの「解析的手法の適用」で必要となる条件の設定や、安定性及び供用性の判断基準が設定される。また、「解析的手法の適用」で計算負荷が大きなモデルの場合にはモデルの単純化や、簡略化が必要となり、調査データに基づく統計的なモデル（実験式など工学的なモデル）の開発も必要になる。

「解析的手法の適用」では、有限要素法（FEM）や有限体積法（FVM）、有限差分法（FDM）、離散化要素法（DEM）といった数値近似モデルが適用されることが多い。また、各現象の環境条件の設定として連成モデルの適用により、THMCの空間的、時間的分布の設定も必要となる。個別現象について、金属材料の腐食量の定量化においては、電気化学的に腐食反応を評価する方法が適用や、スケールアップには均質化の基づく連続体モデルの適用されている（例えば、藤本・岡田、2011）。岩盤の不均質性を考慮するためには、岩盤の均質化や確率論的な取り扱いが不可欠となる。岩盤の水理環境の変遷の定量化では、亀裂の特性の統計量に基づく連続体による評価や確率論的手法で複数のリアライゼーションとして取り扱う手法がある（例えば、NUMO、2011）。化学反応に関する定量化は平衡論や速度論の理論的な定式化により評価されている。

地下構造物の安定性及び供用性を評価においては、上述の手法を組み合わせ定量化することになるため、①特定の要素におけるプロセスそのものの定量化と、②空間的、時間的スケールの異なる定量化結果を安全性及び供用性の判断に用いる量として取り扱うためにスケールアップ/ダウンを含めた統合を実施する必要がある。

4.3.3 技術課題のまとめ

(1) 個別のプロセスに関する課題

表 4.3 4～表 4.3 8に専門家との議論より得られた定量化手法に係る留意点を区分ごとに整理した結果を示す。結果は、必ずしも個別プロセスの定量化の範囲に限らず、現場でのデータ取得方法や坑道全体に関する課題、定量化に用いるデータの所在、調査、定量化における解析手法に関する内容と幅広いものである。なお、複数の区分に影響を与える可能性のある留意点はそれぞれの区分に記載した。

支保工については、特に、吹付けコンクリートの熱収縮による、鋼製支保などとの隙間の発生やひび割れの発生に伴う、内部への酸素の侵入と内部の金属部品である鋼製支保工やロックボルト腐食の進行の評価が重要であり、これらの鋼材の腐食挙動の評価が重要と考えられる。一方で、岩盤を含む坑道の力学状態の定量化においては、ロックボルトなどの主要な支保工と岩盤の関係を明示的に定量化がなされていない場合が多く、定量化するための課題の一つとして考えられる。ロックボルトの経年変化についてはデータが少なく、腐食モデルの構築には検証が必要となることから既存のトンネルなどでの健全性に関するデータ取得も課題である。また、セメント鉱物内での温度環境の変遷によっては、膨張性の鉱物の発生が懸念され、廃棄体に近い部分のコンクリート構造物であるインバートや坑道下部の温度変化と合わせコンクリートの劣化・変遷の定量化も必要である。また、これらの鋼材の腐食やコンクリートの劣化の定量化においては、断層や層理・節理などを含む岩盤を対象とすることから、環境条件としての岩盤の THMC の変遷の定量化も重要である。これらは、解析的なアプローチのみではなく、モニタリングなどによる観測データと組み合わせることも重要である。

(2) 個別評価の統合化に関する課題

本検討で示したサブシナリオに示された区分ごとのプロセスを定量化する際には、環境条件としての岩盤などの THMC データを処分場スケールから、ニアフィールドスケール、詳細スケールに受け渡す（スケールダウン）が必要となる。また、地下構造物の安全性及び供用性を評価するためには、サブシナリオに示された詳細スケールにある区分ごとのプロセスの定量化結果をニアフィールドスケールにスケールアップし、関連する他の区分の定量化結果などと統合する必要がある。このように、空間的・時間的スケールの異なる定量化結果をスケールアップ/ダウンを含めて統合化することにより安全性及び供用性の評価が可能となる。図 4.3 1 にスケールアップ/ダウンを含めた統合化のイメージ、また、図 4.3 2 に坑道内のロックボルトの評価のイメージを示す。例えば、坑道に複数本敷設されるロックボルトの腐食を定量化する場合においては、ロックボルトの敷設位置ごとに地下水流動などの水理環境や、岩盤の不均質性を考慮した大気成分の拡散・侵入による pH や Eh の分布などの化学環境が異なることから、ロックボルトごとに腐食量を定量化する必要がある。この場合、それぞれ敷設位置の環境条件を設定するためのスケールダウンと詳細スケールにおける金属の腐食評価結果から 1 本のロックボルトへのスケールアップなどが必要となる。さらに、坑道の力学的安定性は、坑道に敷設される複数のロックボルトの腐食量によって評価される。その他、環境条件によっては地下水による定着材の侵食や外力と腐食の複合作用によるロックボルトの破断などの懸念事象についても評価する必要がある。これらの状況を考慮した一つの手法による力学的な定量化は難しいため、スケールごとに異なる定量化結果を統合することが不可欠となる。

また、解析的な定量化は行わず、既存坑道の調査に基づく劣化曲線（例えば、農林水産省, 2016）を用いて、寿命の予測評価も可能である。このためには、対象となる岩盤などの多数のデータを収集して、劣化曲線を作成し評価することになる。また、部分的なデータを収集（例えばロック

ボルトの腐食のデータ）し、統計的または確率的な手法で要素ごとの寿命を推定することも可能である。これと同様に、部分的な解析（例えば、鋼材の一部分の腐食量を解析的に定量化）や劣化曲線の作成を実施して、化学環境の確率分布などの不確実性を取り込んだニアフィールドスケールの定量化結果にアップスケールして、劣化挙動を確率的に表現することも可能である。

今回得た専門家からの留意点においては、現象の理解やモデル化のために既存坑道の調査やデータ取得の重要性も示されている。取得データは、劣化曲線などの作成だけではなく、個別プロセスを解析的に定量化する場合の検証やインプット用のデータセットに有用である。

表 4.3-4 定量化手法に係る留意点（金属）

金属の腐食に関する留意点
<ul style="list-style-type: none"> ・ ロックボルトの初期の力学的安定性への寄与は重視されていない。 ・ ロックボルトについては、（現状の解析技術においては）その効果を示すことが難しい。 ・ ロックボルトの劣化は、これまでの事例から定着部よりも鋼材腐食によるものが多い。
腐食速度や腐食量を定量化するための留意点
<ul style="list-style-type: none"> ・ 坑道全体の力学的な評価は難しく、（特に金属部品に関しては、）環境の変遷を踏まえ、部品ごとに単独に腐食量を評価し、（ロックボルト本体、プレートナット、鋼製支保本体、ホルトナットの）部品が機能喪失に至る時間の最小値を取るなどの手法が有効となるかもしれない。 ・ ロックボルトや鋼製支保工の長期の腐食でデータは取得すべきである。国や自治体が有する使用されていないトンネルなどのデータの取得はできないのか。 ・ グラウト材に関しては隙間からの浸入水により PC アンカーで接着部の劣化の事例がある。 ・ 水没した RC 構造物の事例は港湾研で調査している可能性がある。 ・ 東京の地下鉄（100 年）では、処分坑道などの性能（特に水理的）にそれほど影響していないと報告されている。 ・ 再掘削事例について：トンネルなどの類似構造物で、閉塞したものには炭鉱（安全性が懸念される場合）や防空壕があるが、閉塞後に再掘削した事例や報告は見当たらない。 ・ 釧路のコールマインで再冠水した坑道があったと記憶しているが、中に入れるかは不明。 ・ 供用性を失う可能性については、坑道の変位や湧水量の変化を継続して観測することが重要である。 ・ 鋼材腐食の予測については電気化学的な手法で可能であるが、ただし、均一腐食や孔食に対し、小さい領域を対象に解析するものである。 ・ 塩分環境下（塩害）における腐食速度については塩害が発生した時の腐食の進展が早いため、金属腐食速度を評価の対象とせず塩化物イオン拡散濃度により判断している。 ・ 塩素が寄与する金属腐食は、Cl/OH で表されるが示方書は Cl 濃度を用いている。現場計測データのバラツキが大きいため、示方書では室内実験を基に設定している。 ・ 構造物全体の腐食劣化を対象とする場合は局所的な計算の拡張は、計算速度などにより現実的ではない。この小さい領域を元に工学的なモデル（数式化など）を用いて総合的に評価するのが現実的である。 ・ 強度のバラツキなどに対する確率論的な検討は実施されている。 ・ 坑道構造物の劣化曲線のイメージは、形状の変化に伴いひび割れが生じ、水が浸入することで劣化が加速する。 ・ ヨーロッパでは複数の現象を扱う CODE-BRIGHT がスタンダードとなっている。多くの連成問題を解くことができるが、入力パラメータも多く、何が原因となり変化しているのかわかりにくい欠点がある。 ・ データの取り扱い方法は「信頼性工学」的な標準的な手法の導入を試みることを推奨する。 ・ 不確実性を定量化し評価するための手法に用いているソフトウェアは開発されている。
腐食速度や腐食量を定量化するために必要となる環境条件の定量化に関する留意点
<ul style="list-style-type: none"> ・ グラウトの長期安定性に関するデータは少なく、再掘削時に事前に止水状況を確認する必要がある。 ・ 数百年のオーダーでは、酸素などの不飽和帯への拡散は考慮が必要な期間である。 ・ 岩盤の不均質をどう評価するのかによりプロセス評価（THMC）の結果が異なる。 ・ 掘削領域の THMC を調査したことがあるが、資料はほとんどない。 ・ 最近では光ファイバーを用いて、ひずみ、温度を測定できる技術が進展している。圧力についてはこれらの量からの推定とはなるが、モニタリングの一部として適用できる。 ・ 微生物影響事例としては、下水道トンネルの事例が考えられる。下水には硫酸塩が多量に含まれるため嫌気性微生物で硫化水素、その硫化水素を好気性微生物が分解し硫酸が生成される。 ・ ロックボルトの劣化は、これまでの事例から定着部よりも鋼材腐食によるものが多い。 ・ 不飽和の範囲については、GPR（誘電率分布）によるモニタリングで評価できると思われる。 ・ THMC の相互作用がどうなるのか検討すべき。モニタリングし評価する上で影響がある。 ・ 不飽和領域の坑道閉鎖後の再冠水に対する評価は、亀裂の不飽和変遷についての実験ができないため飽和－不飽和のモデル化は難しい。 ・ 不飽和領域の坑道閉鎖後の再冠水に対する評価は、堆積岩の場合には二層流解析を利用して表現できるかもしれないが、取得しにくい設定パラメータが多いという問題がある。 ・ 長期ではなく回収可能性の期間中を対象とした亀裂（透水性亀裂）による不確実性を統計手法によって評価しておくことは価値がある。行程が進み実測により、どの程度のばらつきなのかを評価することで、ばらつきの絞り込みを行える。モデルを徐々にキャリブレーションして評価にフィードバックしていくことができる。

表 4.3-5 定量化手法に係る留意点（セメント鉱物）

セメントの変質や劣化に関する留意点
<ul style="list-style-type: none"> ・ 高温（60℃程度）でコンクリートが割れる現象は熱膨張であると想定されるが ASR を否定するものではない。骨材の温度による判定及び試験的な観察が必要である。 ・ ASR の予測モデルの構築においては、コンクリートのアルカリ含有量によってゲルの膨張量に変化し、反応物（ゲル）の粘性が高い場合において膨張圧が高くなる。 ・ ASR の予測モデルの構築においては、コンクリートのアルカリ含有量によってゲルの膨張量が変わること、また、反応物の粘性が高い場合膨張圧が高いといった現象がある。 ・ DEF（遅れエトリンガイト）や ASR は、岩盤の鉱物組成によって発生時期が異なる。その発生予測は、水の供給状況の予測になるので難しい。 ・ 膨張によるひび割れ程度を細骨材と粗骨材と比較すると粗骨材のほうが大きい。これは、骨材の界面で剥離が生じること、空隙径が大きいほど応力集中が大きいことによるものと予想される。 ・ 一般的にコンクリートの表面はセメント成分が多いため Ca の溶脱は遅いが、下層には砂が含まれセメント成分が少ないため、下層に溶脱が達すると溶脱速度は早くなると予想される。
セメント鉱物の変質や劣化を定量化するための留意点
<ul style="list-style-type: none"> ・ 釧路のコールマインで再冠水した坑道があったと記憶しているが、中に入れるかは不明。 ・ 供用性を失う可能性については、坑道の変位や湧水量の変化を継続して観測することが重要である。 ・ 最近では光ファイバーを用いて、ひずみ、温度を測定できる技術が進展している。圧力についてはこれらの量からの推定とはなるが、モニタリングの一部として適用できる。 ・ 強度のバラツキなどに対する確率論的な検討は実施されている。 ・ 坑道構造物の劣化曲線のイメージは、形状の変化に伴いひび割れが生じ、水が浸入することで劣化が加速する。 ・ ヨーロッパでは複数の現象を扱う CODE-BRIGHT がスタンダードとなっている。多くの連成問題を解くことができるが、入力パラメータも多く、何が原因となり変化しているのかわかりにくい欠点がある。 ・ データの取り扱い方法は「信頼性工学」的な標準的な手法の導入を試みることを推奨する。 ・ 不確実性を定量化し評価するための手法に用いているソフトウェアは開発されている。 ・ ひび割れのモニタリングは画像診断などで可能になりつつある。 ・ コンクリートの飽和度は、電気的に水分計で計測する方法がある。 ・ コンクリートの中性化進行速度式は一般的に知られている。 ・ 外力によるひび割れ解析は現状の技術で可能（ミクロ、マクロ）だが、化学反応に伴うひび割れの解析は、現状では再現できていない。
セメント鉱物の変質や劣化を定量化するために必要となる環境条件の定量化に関する留意点
<ul style="list-style-type: none"> ・ グラウトの長期安定性に関するデータは少なく、再掘削時に事前に止水状況を確認する必要がある。 ・ 数百年のオーダーでは、酸素などの不飽和帯への拡散は考慮が必要な期間である。 ・ 岩盤の不均質をどう評価するのかによりプロセス評価（THMC）の結果が異なる。 ・ 掘削領域の THMC を調査したことがあるが、資料はほとんどない。 ・ 微生物影響事例としては、下水道トンネルの事例が考えられる。下水には硫酸塩が多量に含まれるため嫌気性微生物で硫化水素、その硫化水素を好気性微生物が分解し硫酸が生成される。 ・ 不飽和の範囲については、GPR（誘電率分布）によるモニタリングで評価できると思われる。 ・ THMC の相互作用がどうなるのか検討すべき。モニタリングし評価する上で影響がある。 ・ 不飽和領域の坑道閉鎖後の再冠水に対する評価は、亀裂の不飽和変遷についての実験ができないため飽和－不飽和のモデル化は難しい。 ・ 不飽和領域の坑道閉鎖後の再冠水に対する評価は、堆積岩の場合には二層流解析を利用して表現できるかもしれないが、取得しにくい設定パラメータが多いという問題がある。 ・ 長期ではなく回収可能性の期間中を対象とした亀裂（透水性亀裂）による不確実性を統計手法によって評価しておくことは価値がある。行程が進み実測により、どの程度のばらつきなのかを評価することで、ばらつきの絞り込みを行える。モデルを徐々にキャリブレーションして評価にフィードバックしていくことができる。

表 4.3-6 定量化手法に係る留意点（有機物）

有機物の変質や劣化を定量化するための留意点
<ul style="list-style-type: none"> ・ 供用性を失う可能性については、坑道の変位や湧水量の変化を継続して観測することが重要である。 ・ 最近では光ファイバーを用いて、ひずみ、温度を測定できる技術が進展している。圧力についてはこれらの量からの推定とはなるが、モニタリングの一部として適用できる。 ・ 坑道構造物の劣化曲線のイメージは、形状の変化に伴いひび割れが生じ、水が浸入することで劣化が加速する。 ・ ヨーロッパでは複数の現象を扱う CODE-BRIGHT がスタンダードとなっている。多くの連成問題を解くことができるが、入力パラメータも多く、何が原因となり変化しているのかわかりにくい欠点がある。 ・ データの取り扱い方法は「信頼性工学」的な標準的な手法の導入を試みることを推奨する。 ・ 不確実性を定量化し評価するための手法に用いているソフトウェアは開発されている。
有機物の変質や劣化を定量化するために必要となる環境条件の定量化に関する留意点
<ul style="list-style-type: none"> ・ グラウトの長期安定性に関するデータは少なく、再掘削時に事前に止水状況を確認する必要がある。 ・ 数百年のオーダーでは、酸素などの不飽和帯への拡散は考慮が必要な期間である。 ・ 岩盤の不均質をどう評価するのかによりプロセス評価（THMC）の結果が異なる。 ・ 掘削領域の THMC を調査したことがあるが、資料はほとんどない。 ・ 微生物影響事例としては、下水道トンネルの事例が考えられる。下水には硫酸塩が多量に含まれるため嫌気性微生物で硫化水素、その硫化水素を好気性微生物が分解し硫酸が生成される。 ・ 不飽和の範囲については、GPR（誘電率分布）によるモニタリングで評価できると思われる。 ・ THMC の相互作用がどうなるのか検討すべき。モニタリングし評価する上で影響がある。 ・ 不飽和領域の坑道閉鎖後の再冠水に対する評価は、亀裂の不飽和変遷についての実験ができないため飽和－不飽和のモデル化は難しい。 ・ 不飽和領域の坑道閉鎖後の再冠水に対する評価は、堆積岩の場合には二層流解析を利用して表現できるかもしれないが、取得しにくい設定パラメータが多いという問題がある。 ・ 長期ではなく回収可能性の期間中を対象とした亀裂（透水性亀裂）による不確実性を統計手法によって評価しておくことは価値がある。行程が進み実測により、どの程度のばらつきなのかを評価することで、ばらつきの絞り込みを行える。モデルを徐々にキャリブレーションして評価にフィードバックしていくことができる。

表 4.3-7 定量化手法に係る留意点（鉱物（岩盤））

岩盤の変質や劣化に関する留意点
<ul style="list-style-type: none"> ・ 岩盤の不均質をどう評価するのかによりプロセス評価（THMC）の結果が異なる。 ・ 岩盤の不均質性のスケールは数十 cm～数 m が対象のサイズとなり、それらの広域的な広がりや局所的存在の把握が重要。 ・ 300 年経過した場合、岩盤の不均質さの水理的な影響は大きいと考えられる。均質で評価することには不安が残る。 ・ 不均質性の程度、出水の程度など、観測することが重要。 ・ 被圧帯があれば、一般的には、建設前に調査がされていることが前提となる。 ・ 第 3 紀の岩盤で層方向が縦（褶曲などによる、層理方向？）は確認が必要。 ・ 全体（広域）の地下水流動を評価した上で対象近傍の水理的评价をすべき。
岩盤の変質や劣化を定量化するために必要となる留意点
<ul style="list-style-type: none"> ・ 供用性を失う可能性については、坑道の変位や湧水量の変化を継続して観測することが重要である。 ・ 最近では光ファイバーを用いて、ひずみ、温度を測定できる技術が進展している。圧力についてはこれらの量からの推定とはなるが、モニタリングの一部として適用できる。 ・ 坑道構造物の劣化曲線のイメージは、形状の変化に伴いひび割れが生じ、水が浸入することで劣化が加速する。 ・ ヨーロッパでは複数の現象を扱う CODE-BRIGHT がスタンダードとなっている。多くの連成問題を解くことができるが、入力パラメータも多く、何が原因となり変化しているのかわかりにくい欠点がある。 ・ データの取り扱い方法は「信頼性工学」的な標準的な手法の導入を試みることを推奨する。 ・ 不確実性を定量化し評価するための手法に用いているソフトウェアは開発されている。 ・ 数百年のオーダーでは、酸素などの不飽和帯への拡散は考慮が必要な期間である。 ・ 不飽和の範囲については、GPR（誘電率分布）によるモニタリングで評価できると思われる。 ・ 長期ではなく回収可能性の期間中を対象とした亀裂（透水性亀裂）による不確実性を統計手法によって評価しておくことは価値がある。行程が進み実測により、どの程度のばらつきなのかを評価することで、ばらつきの絞り込みを行える。モデルを徐々にキャリブレーションして評価にフィードバックしていくことができる。 ・ 釧路のコールマインで再冠水した坑道があったと記憶しているが、中に入れるかは不明。 ・ 初期の掘削段階では類似岩盤などの統計的な物性値を設定し、調査の進展に伴って物性値を精緻化する。 ・ 変形を測ることで水の状態を評価できる。例えば、水が排出されている個所は変形が大きい場合が多い。 ・ 坑道を掘削しつつ亀裂情報を把握・評価するためには先進ボーリングのログ（記録）を確実に取ること。 ・ 先進ボーリングや切羽での湧水量、岩盤など級を継続して評価することが必要で、調査の進展に合わせ解析モデルやパラメータをリバイスすることが重要。 ・ 掘削機械の先端にセンサーを取り付けてデータを取得している論文も見受けられるが、それをどう評価し生かすかの研究やとりまとめが必要。 ・ 裏面排水の湧出の確認方法では、懸念される箇所で温度を付加し、上下の戻りを見るといった方法がある（水があるところは温度が下がる）。 ・ 変形問題に関しては精度良く計算できる（陰解法の使用）MPM という手法が最近使用されている。 ・ 不均質性場における水理解析コードは、多く存在する。 ・ 湧水と岩盤の安定性が相関するのであれば、現在採用されている亀裂などでの地下水流動手法を用いて、複数リアライゼーションにより評価する方法は役立つ可能性がある。
岩盤の変質や劣化を定量化するために必要となる環境条件の定量化に関する留意点
<ul style="list-style-type: none"> ・ グラウトの長期安定性に関するデータは少なく、再掘削時に事前に止水状況を確認する必要がある。 ・ 掘削領域の THMC を調査したことがあるが、資料はほとんどない。 ・ 微生物影響事例としては、下水道トンネルの事例が考えられる。下水には硫酸塩が多量に含まれるため嫌気性微生物で硫化水素、その硫化水素を好気性微生物が分解し硫酸が生成される。 ・ THMC の相互作用がどうなるのか検討すべき。モニタリングし評価する上で影響がある。 ・ 不飽和領域の坑道閉鎖後の再冠水に対する評価は、亀裂の不飽和変遷についての実験ができないため飽和－不飽和のモデル化は難しい。 ・ 不飽和領域の坑道閉鎖後の再冠水に対する評価は、堆積岩の場合には二層流解析を利用して表現できるかもしれないが、取得しにくい設定パラメータが多いという問題がある。 ・ ロックボルトの劣化は、これまでの事例から定着部よりも鋼材腐食によるものが多い。 ・ 緩衝材中の飽和不飽和条件の評価は TUFF などによる気液 2 相流の解析がなされている。 ・ 不均質な岩盤中の不飽和のフロントを精度良く評価するのは難しい。現象としては亀裂に沿って不飽和化すると想定される。

表 4.3-8 定量化手法に係る留意点（鉱物（緩衝材/埋戻し材））

緩衝材や埋戻し材の変質や劣化に関する留意点
<ul style="list-style-type: none"> ・ 緩衝材や埋戻し材の偏膨潤、不飽和領域の残存は、領域でのパイピングの原因となり得るため、再冠水過程の評価が不可。
緩衝材や埋戻し材の変質や劣化の定量化に関する留意点
<ul style="list-style-type: none"> ・ 供用性を失う可能性については、坑道の変位や湧水量の変化を継続して観測することが重要である。 ・ 最近では光ファイバーを用いて、ひずみ、温度を測定できる技術が進展している。圧力についてはこれらの量からの推定とはなるが、モニタリングの一部として適用できる。 ・ ヨーロッパでは複数の現象を扱う CODE-BRIGHT がスタンダードとなっている。多くの連成問題を解くことができるが、入力パラメータも多く、何が原因となり変化しているのかわかりにくい欠点がある。 ・ 一般的な地盤統計学などを用いた亀裂を考慮したモデルでの水理的な評価結果は、施工時の情報を逐次反映することで不確実性を絞り込むことができる。 ・ データの取り扱い方法は「信頼性工学」的な標準的な手法の導入を試みることを推奨する。 ・ 不確実性を定量化し評価するための手法に用いているソフトウェアは開発されている。
緩衝材や埋戻し材の変質や劣化を定量化するために必要となる環境条件の定量化に関する留意点
<ul style="list-style-type: none"> ・ グラウトの長期安定性に関するデータは少なく、再掘削時に事前に止水状況を確認する必要がある。 ・ 数百年のオーダーでは、酸素などの不飽和帯への拡散は考慮が必要な期間である。 ・ 岩盤の不均質をどう評価するのかによりプロセス評価（THMC）の結果が異なる。 ・ 掘削領域の THMC を調査したことがあるが、資料はほとんどない。 ・ 微生物影響事例としては、下水道トンネルの事例が考えられる。下水には硫酸塩が多量に含まれるため嫌気性微生物で硫化水素、その硫化水素を好気性微生物が分解し硫酸が生成される。 ・ 不飽和の範囲については、GPR（誘電率分布）によるモニタリングで評価できると思われる。 ・ THMC の相互作用がどうなるのか検討すべき。モニタリングし評価する上で影響がある。 ・ 不飽和領域の坑道閉鎖後の再冠水に対する評価は、堆積岩の場合には二層流解析を利用して表現できるかもしれないが、取得しにくい設定パラメータが多いという問題がある。 ・ ベントナイト中（緩衝材中）の飽和不飽和条件の評価は TUFF などによる気液 2 相流の解析がなされている。 ・ 長期ではなく回収可能性の期間中を対象とした亀裂（透水性亀裂）による不確実性を統計手法によって評価しておくことは価値がある。行程が進み実測により、どの程度のばらつきなのかを評価することで、ばらつきの絞り込みを行える。モデルを徐々にキャリブレーションして評価にフィードバックしていくことができる。

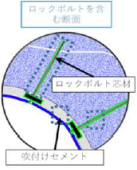
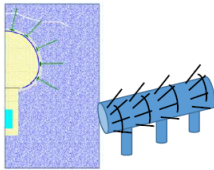
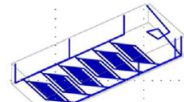
空間イメージ	定量化のスケール	定量化する領域	定量化項目
	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤亀裂の一部 ・コンクリート内部 ・コンクリート亀裂部 ・要素の表面の一部 ・要素間の境界 (数mm～数cm) 	ロックボルトの表面の一部 鋼製支保工の表面の一部 吹付けコンクリート内部の一部 岩盤の一部	<div> <div>要素の形状、厚さ、力学特性の変化</div> <div>要素の劣化等を評価する前提となるTHMC</div> </div> <div> <div>坑道の安定性及び供用性の評価の基となる形状や力学的特性時間変遷と空間分布</div> <div>空間構造を詳細化または統合した際のTHMC</div> </div> <div> <div>評価対象の構造の耐力または評価対象の要素の耐力</div> <div>要素の変遷を評価するために必要なTHMCの広域分布</div> <div>境界条件となる環境条件</div> </div>
	<ul style="list-style-type: none"> ・坑道断面規模 ・コンクリート亀裂部 ・要素サイズ ・要素間の境界 (数m～数百m) 	(2D) 坑道断面に位置するロックボルト、鋼製支保工、吹付けコンクリート、岩盤 (3D) 坑道の奥行を含む領域に含まれるロックボルト、ロックボルト、鋼製支保工、吹付けコンクリート、岩盤	
	<ul style="list-style-type: none"> ・処分場規模 (数百m～数km) 	処分場を含む広域空間 (地表面を含む)	

図 4.3-1 スケールアップ/ダウンを含めた統合化のイメージ

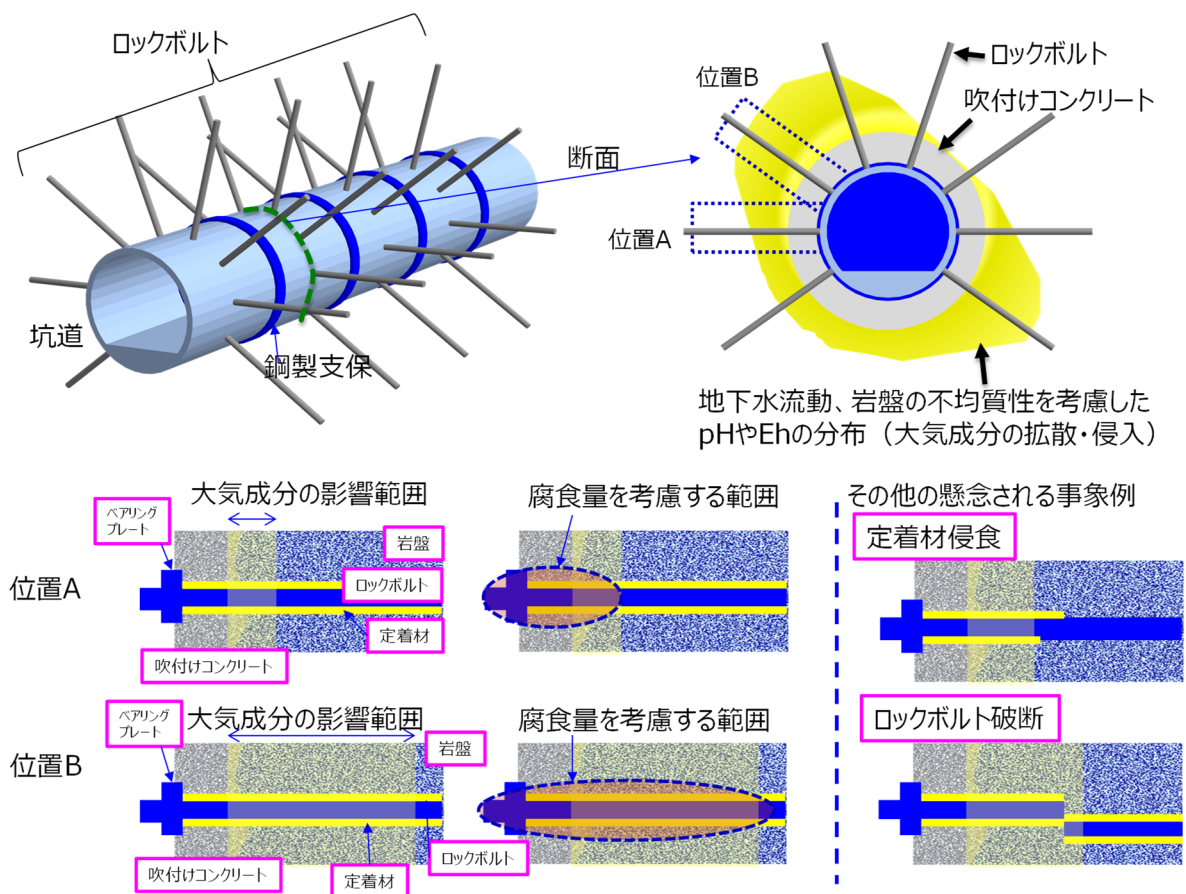


図 4.3-2 坑道内のロックボルトの評価のイメージ

4.4 本章の成果と今後の展開

4.4.1 本章の成果

回収可能性維持期間と操業期間中及び閉鎖後長期の安全性が確保される期間に、回収可能性の維持に伴う安全性への影響の定量化手法の整備として、ストーリーボードを用いて、定量化すべきシナリオ及び定量化手法を整理するとともに、技術課題のとりまとめを行った。

これまでに、初年度に作成した全体開発計画に基づき、レファレンスの建設・操業工程の分析、処分場構成要素の抽出と機能の整理を実施し、その結果を用いて、処分場構成要素に要求される機能に影響を与えるプロセスを抽出し、「地下構造物の安定性及び供用性」に着目した処分システムの状態変遷に関わる知見を集約したストーリーボード（第1段階のストーリーボード）を作成した。

本年度は、さまざまな分野の専門家との議論に基づき、処分場の変遷において重要なプロセスを抽出・整理し、第1段階のストーリーボードを改善するとともに、専門家からの意見を参考に定量化すべきシナリオの抽出、定量化手法を含めた技術課題を整理した。

第1段階のストーリーボードは、重要度による分類を実施していないことから、さまざまな分野の専門家の意見を参考に、必要なプロセスの追加や不要なプロセスを削除するとともに、多くの専門家が共有できるような分かり易い表示方法に改めるなど、改善した。地下構造物は多くの要素が統合されたものであり、要素ごとの THMC が相互に影響すること、要素ごと、THMC ごとにスケールが異なることから、一つのシナリオとして表現するためには、複数のプロセスの変遷を統合する必要があるため、特定の要素のプロセスの変遷をサブシナリオと定義し、ストーリーボード及び専門家の意見を参考に区分別、時間別に 74 のサブシナリオを抽出した。また、サブシナリオの定量化においては、「類似条件での経験・知見の活用」や「解析的手法の適用」が必要になることを提示するとともに、専門家との議論を参考に個別のプロセス及び個別評価の統合化に向けて課題を整理した。特に、吹付けコンクリートの熱収縮を起因とする鋼製支保工やロックボルト腐食の進行の評価や、ロックボルトの支保工としての効果の定量化や経年変化について、課題が残ることが分かった。

以上のように、回収可能性の維持に伴う影響について、地下構造物の安定性及び供用性の定量化手法の整備に向け、昨年作成したストーリーボードを改善するとともに、それを用いて定量化すべきプロセスをサブシナリオの形式で整理し、定量化にあたっての課題を抽出することができ、本年度の目標は当初の予定通り達成できた。

4.4.2 今後の展開

今後、地下構造物の安定性及び供用性に向けた定量化手法の構築に向け、サブシナリオごとに「類似条件での経験・知見の活用」や「解析的手法の適用」による定量化手法の具体化を行っていくとともに、さらに、専門家との議論で抽出された個別のプロセスにおける課題解決を図っていく必要がある。

また、今回、地下構造物の安全性及び供用性の検討において定量化すべきプロセスを抽出するために、ボトムアップ・アプローチとして前年度までに作成したストーリーボードについて、地下施設の安定性及び供用性に係る分野の専門家との議論に基づき、改めて重要なプロセスを抽出・整理して、改善を実施した。今後、さらにストーリーボードを使い易く、内容の向上をはかるためには、専門分野を拡充した専門家との議論や知見の拡充により見直していく必要がある。また、ステークホルダーとの議論など、ストーリーボードの用途によっては、異なる専門分野における議論に基づいた改善を実施していくことが重要である。

参考文献

- 大蔵省，減価償却資産の耐用年数等に関する省令，昭和 40 年大蔵省令第 15 号，1965.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する研究開発事業（可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書，2020.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター・日本原子力研究開発機構，令和 2 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（回収可能性技術高度化開発）報告書，2021.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター・日本原子力研究開発機構，令和 3 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（回収可能性技術高度化開発）報告書，2022.
- 原子力発電環境整備機構，地層処分事業のための安全評価技術の開発(I)-シナリオ構築技術の高度化，NUMO-TR-10-09，2011.
- 原子力発電環境整備機構，包括的技術報告書：わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築—，2021.
- 農林水産省，農業水利施設の機能保全の手引き「水路トンネル」，平成 28 年 8 月，2016.
- 藤本慎司，岡田信宏，腐食の予知と腐食現象の数値モデリング，まてりあ 50 巻 7 号，274-278，日本金属学会，2011.

5. 回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備

・定量化に必要な物性値の取得・

5.1 背景及び目的

定置作業後に回収可能性の維持期間を設ける可能性を考慮していない従来の概念に対して、同期間を設ける可能性を考慮する場合に新たに考慮すべき事項として、長期間にわたる開放坑道の健全性の維持や再掘削後の坑道安定性の確保、並びに定置後の過渡的期間における人工バリアの状態変遷などの評価の前提となる環境条件の違いなどが挙げられる。本節では、「平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 平成 27 年度～平成 31 年度 5 ヶ年取りまとめ報告書」においても課題として挙げられていた、実際の地質環境条件下で生じる現象についての理解、実験によるデータの拡充並びに定量化手法の整備を 3 ヶ年の事業目標とした。

具体的には、地質環境条件について非常に多岐にわたり詳細なデータなどが取得されている日本原子力機構が保有する幌延深地層研究センター（以下「幌延 URL」という）を事例としてとりあげ、図 5.1-1 に示す性能性維持期間中の開放坑道の安全性への影響、②天然バリア（母岩）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響の評価に資する物性値の取得・設定の方法を提示する形でのアプローチをとることとし、以下 2 つの項目を設定し技術開発を進めることとした。

- (1) 実際の地下環境における支保部材の状態把握
- (2) 実際の地下深部の坑道で生じる事象の整理

以降、上記について得られた成果を概説する。

定量化すべき項目（トレードオフの関係にある 4 項目）		処分孔設置方式			横置き・PEM方式		
		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 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) は 5 つの小項目	(2) 閉鎖後長期の安全性への影響						
(2) は 6 つの小項目	① 人工バリアに期待する閉鎖後長期の安全機能への影響						
	② 天然バリア（母岩）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響						

図 5.1-1 回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備における検討項目と本章での技術開発との関係

5.2 実際の地下環境における支保部材の状態把握

坑道開放状態下の支保部材の状態把握の検討を定量的に実施するためには、支保部材の最初の状態（初期状態）が定量的に把握されていることが必要となる。幌延 URL は、深度 350 m までの坑道掘削が行われており、そのためにコンクリート支保工が設置されているが、本事業で求められるような「性能性維持期間中の開放坑道の安全性」を定量的に示すために必要な情報は設置時には取得されていない。このため、本検討の初年度であった 2020 年は、実際に施工されているコンクリート支保工自体を再現し、それに対して今後の定量的な評価や変化のメカニズムの検討に必要な初期状態を把握するとともに、今後の経年変化を把握するために再現したコンクリートを随時サンプリングが可能な状態で坑道内に定置した（図 5.2-1）。2021 年は、坑道内に定置したサンプルを採取し、それを用いた室内物性試験や詳細な分析などを実施するとともに、2020 年の初期状態での試験結果と比較・検討した。

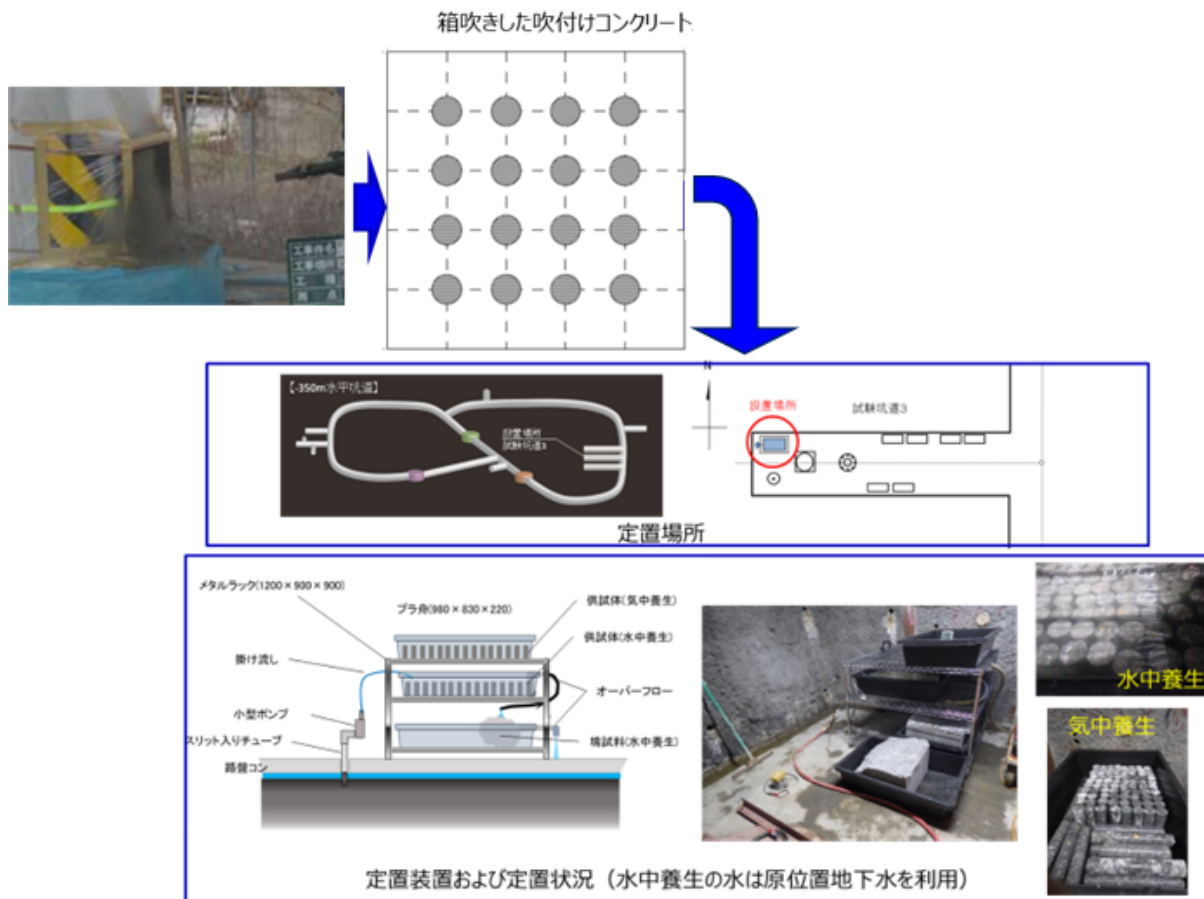


図 5.2-1 作成した吹付けコンクリート供試体の定置養生の状況

5.2.1 室内物性試験および分析

図 5.2-1 の場所にて2020年度から定置養生している吹付けコンクリート円柱供試体(φ5 cm、高さ 10 cm)をサンプリングし室内試験と分析等に供した。数量表を表 5.2-1 に、供試体受入れ時の状況と供試体の外観を図 5.2-2 に示す。



図 5.2-2 供試体受入れ時の状況と供試体外観（No.1 のみ例示）

試料の保管・養生では、吹付けコンクリート円柱供試体は、試験に供するまで $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ の恒温室にて水中養生および気中養生した。なお、水中養生に用いた養生水は、原位置の地下水である。

表 5.2-1 支給したコンクリート供試体と用途

項目		一覧供試体の識別番号と分析項目（気中養生供試体・水中養生供試体共通）																							分析点数																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
試料形状	試験項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	気中養生	水中養生	計																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
φ50×100mm	一軸圧縮試験※1	○	○	○	○	○	○	○	○	○															9	9	18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	弾性波測定※1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			

※1：弾性波測定および一軸圧縮試験は同一供試体を使用

●：予備検討に使用

(1) 試験概要

コンクリート供試体の物性変化を把握するための室内物性試験および分析を実施した。供試体は2020年度に作製したものであり、大気中・水中条件下で地下施設内に定置されていた。また、水中養生しているコンクリートについては、養生水の分析も併せて実施した。試験項目一覧を表5.2-2に、試験に供する供試体の概要を図5.2-3に示す。

一軸圧縮強度および弾性波は、φ50 mm×H100 mmの供試体を用いて測定し、弾性波の測定後に同一試料を用いて一軸圧縮試験を行った。圧裂試験、空隙率測定、中性化深さ、EPMAおよびSEM/EDS分析は同一の供試体を用いて実施した。φ50 mm×H100 mmの供試体を高さ半分に切断し、φ50 mm×H50 mmの供試体で圧裂試験を行い、もう一方の供試体から空隙率、中性化深さ、EPMAおよびSEM/EDS用試料を採取した。透水試験については、φ50 mm×H100 mmの供試体を高さ50 mmもしくは25 mmとなるように切断し、暴露面から通水するケースと切断面から通水するケースの2ケースで試験を実施した。

空隙率測定は数 mm 程度の大きさの比較的小さい試料を用いて分析できるため、表層から5 mm 程度から試料を採取する変質部と内部から試料を採取する健全部に分けて分析を実施した。また、SEM/EDS分析やEPMA分析についても、変質部と健全部のいずれも分析範囲となるように試料を採取した。さらに、透水試験については、暴露面（変質部）から通水させたケースと切断面（健全面）から通水させたケースに分けて試験を実施した。

表 5.2-2 試験項目一覧

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

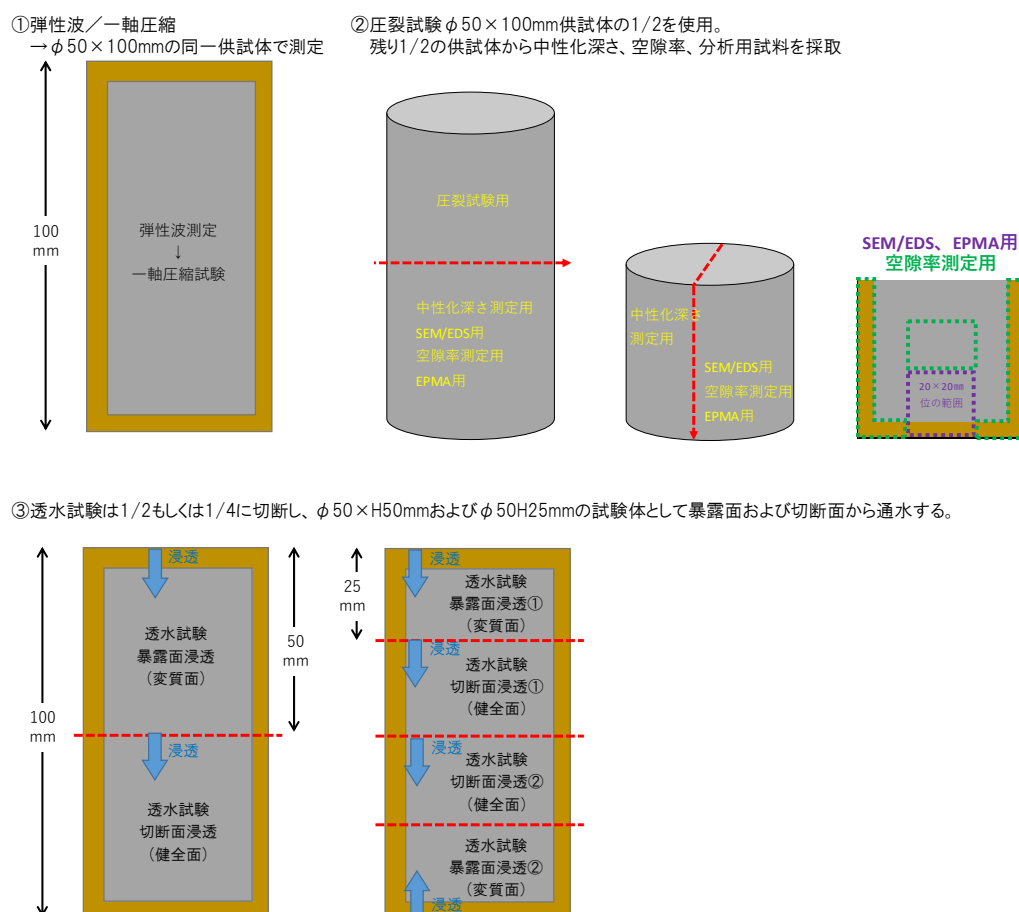


図 5.2-3 試験に供する供試体の概要

(2) 試験方法

(a) 強度特性

(i) 一軸圧縮試験

一軸圧縮強度に用いた供試体は、弾性波測定と同一の供試体とした。弾性波測定後の供試体にひずみゲージを貼り付けて、試験を実施した。一軸圧縮試験の方法及び使用した装置を表 5.2-3 に示す。

表 5.2-3 一軸圧縮試験方法および使用装置

項目	内容
一軸圧縮強度	JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に準拠
静弾性係数及びポアソン比	JIS A1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠
装置	・ 耐圧試験機：(株)前川試験機製作所 ACA-100A ・ データロガー：(株)東京測器研究所 TDS-540 ・ ひずみゲージ：(株)東京測器研究所 PFL-30-11

(ii) 弾性波測定（P、S 波）

弾性波測定を JGS2110-2009「パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法」に準拠し実施した。以下に使用装置を示す。

- ・ 装置：超音波速度測定装置 応用地質(株) ソニックビューアーSX MODEL-5251C

(iii) 圧裂試験

φ 50×100 mm の供試体を φ 50×50 mm の半分に切断し、切断した半分の供試体を用いて圧裂試験を実施した。圧裂試験は JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準拠した。なお、供試体の半分は後述の空隙率測定、中性化深さの測定、SEM/EDS および EPMA の分析に供した。以下に使用装置を示す。

- ・ 装置：耐圧試験機 (株)前川試験機製作所 ACA-100A

(b) 透水性（透水試験）

(i) アウトプット法、インプット法（コンクリート総覧，1998）

透水試験試料を図 5.2-4 に示す。透水試験には、2021 年度と同様、円柱供試体を切断し採取した長さ（高さ）50 mm の供試体とともに、今後の継続的な透水試験の実施を勘案し 25 mm の試験体も作成し試験に供した。また、2021 年度と同様、中性化層を含む変質面から通水したケースと健全面から通水したケースの 2 ケースについて実施した。なお、2021 年度の試験結果を考慮し、透水試験方法をアウトプット法もしくはインプット法のどちらを選択するかについては予備検討の結果をもとに決定した。具体的には、気中養生試験体および水中養生試験体の各 1 検体を φ 50×H50 mm および φ 50×H25 mm に切り出して予備検討を行い、予備検討の結果から、透水試験方法を決定することとした。0.5 MPa の通水圧で試験を開始し、経過を観察した。その結果、気中養生試験体 φ 50×H25 mm は翌日に通水したことを確認し、気中養生試験体 φ 50×H50 mm は 7 日後に通水したことを確認した。一方、水中養生試験体は φ 50×H25 mm および φ 50×H50 mm とともに通水する傾向は認められず、1 カ月経過後も通水を確認できなかった（図 5.2-5）。このため、供試体の長さによらず、気中養生試験体はアウトプット法、水中養生試験体はインプット法により透水試験を実施することとした。

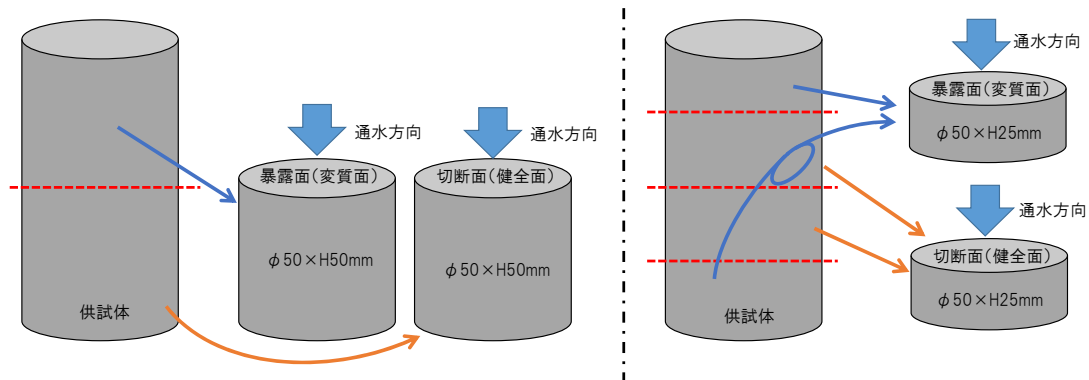
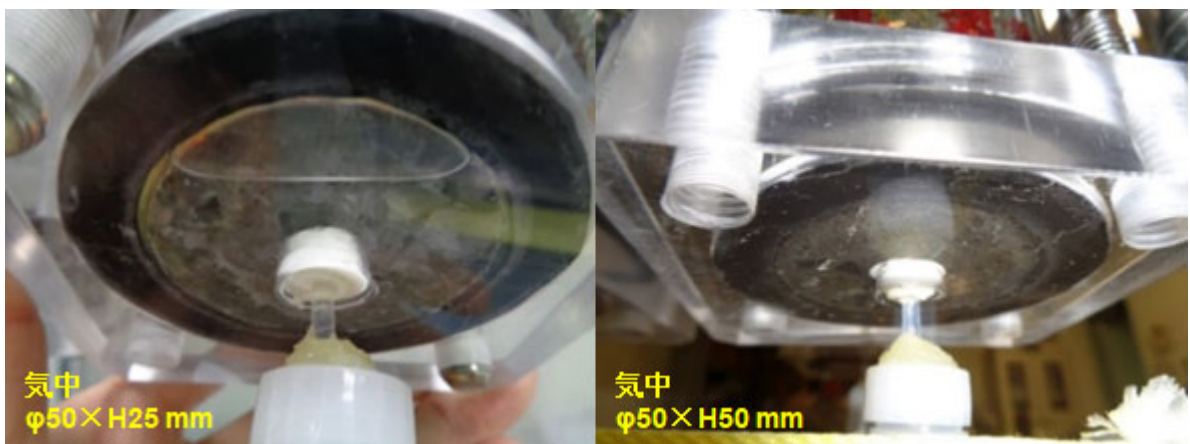
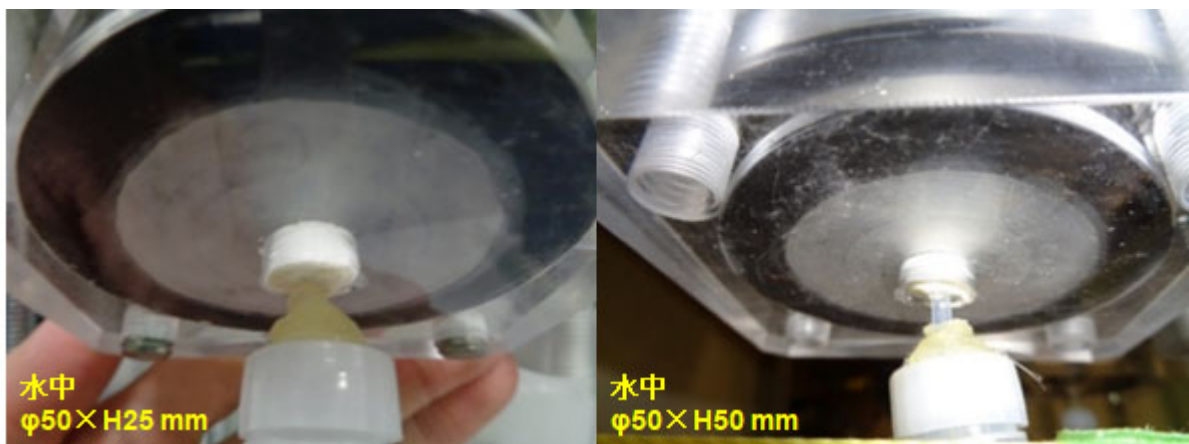


図 5.2-4 透水試験試料



(a) 気中養生



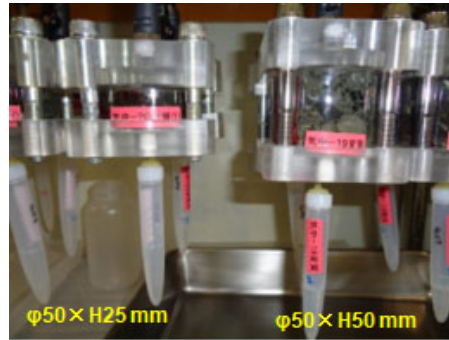
(b) 水中養生

図 5.2-5 透水試験の予備検討結果

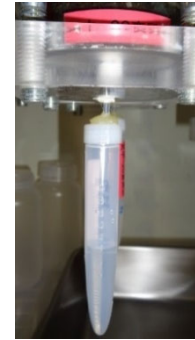
アウトプット法による透水試験の状況を図 5.2-6 に示す。アウトプット法による透水試験は、参考文献（コンクリート総覧，1998）の水密性の解説に関する項を参考に実施した。アウトプット法で実施した気中養生試験体を水中に1週間浸漬させ、試験体が水分を含んだ状態にした。その後、アクリルパイプと試験体の隙間を樹脂で埋め、セルにセットして通水を開始した。通水を確認後、所定の期間中における通水量を計測し、透水係数を算出した。



(a) 試験装置



(b) 試験セル



(c) 通水

図 5.2-6 アウトプット法による透水試験の状況

インプット法による透水試験も、同様に、参考文献（コンクリート総覧，1998）の水密性の解説に関する項を参考に実施した。インプット法で実施した水中養生試験体は、土木学会のコンクリート標準示方書[基準編]「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法（案）」を参考に、40℃で28日間以上乾燥させ、24時間の質量変化が0.1%以下であることを確認して乾燥を終了した。乾燥終了後、アクリルパイプと試験体の隙間を樹脂で埋め、セルにセットして通水を開始した。試験を開始してから数週間で供試体を割裂し、浸透深さを測定した。測定した浸透深さから拡散係数を算出し、透水係数へ換算した。水の浸透深さの計測方法を図5.2-7に示す。

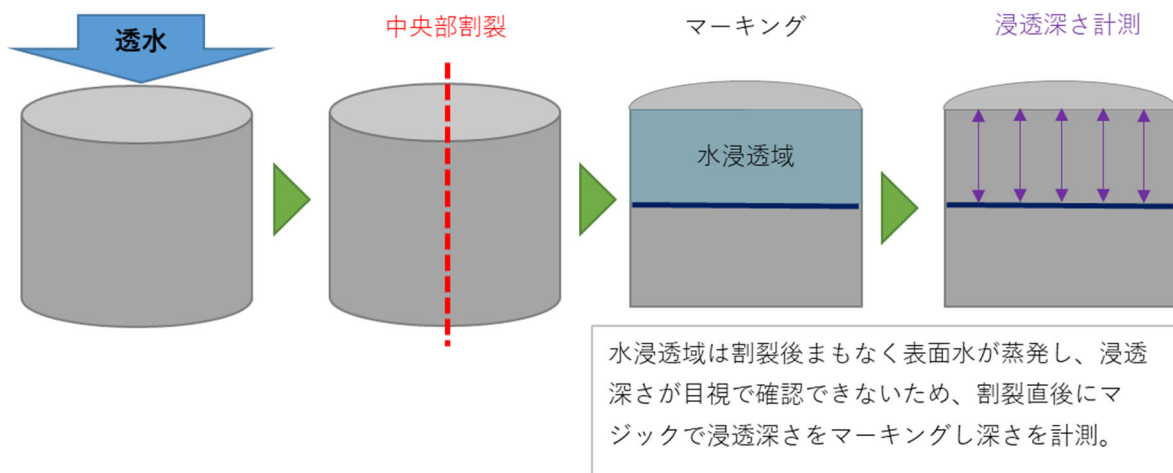


図 5.2-7 水の浸透深さの計測方法

(ii) 地盤工学会基準（JGS 0312-2018）による透水試験

前述の透水試験方法はコンクリートの物性計測で一般に適用されているものであるが、難透水性材料の透水性を、ダルシー則に基づき厳密に測定するための基準化（「JGS 0312-2018 低透水性材料の透水試験方法」）が地盤工学会では行われており、2022年度は比較のためにこの方法による透水試験も実施した。同基準における試験系の概念図を図5.2-8に示す。

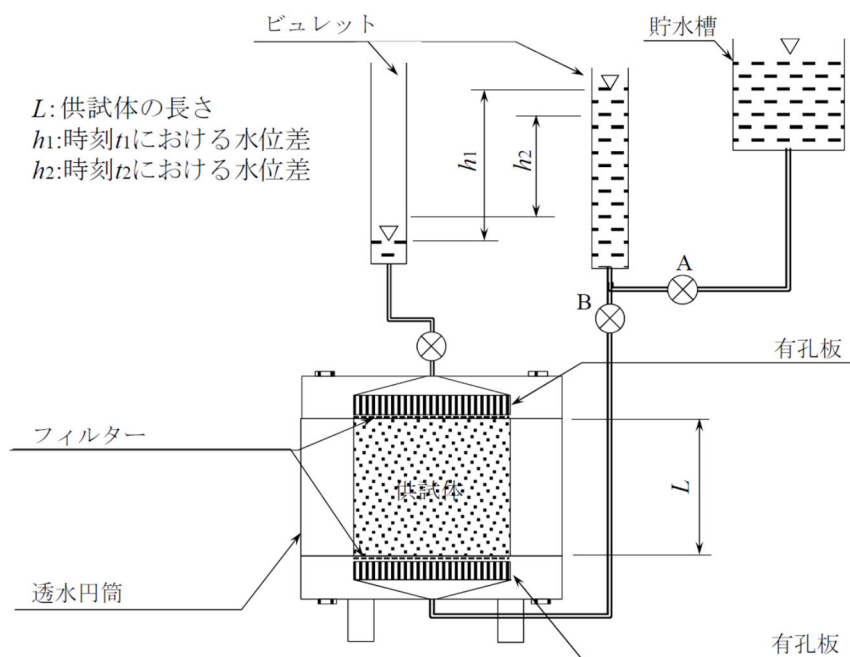


図 5.2-8 透水試験の試験系（「低透水性材料の透水試験方法」による）

具体的な試験手順は以下の通りである。

供試体の作成・試験体の組立

試験容器はステンレス製透水試験容器（直径 50 mm、高さ 25 mm の円筒形）を使用した。試験の材料は過年度までに作成して養生中の柱状コンクリート供試体を成形して使用した。図 5.2-8 に示す試験系の組み立てを行った。試験容器（透水円筒）の給水側にビュレットと貯水槽を連結、容器の排水側にもビュレットを連結した。

試験実施

供試体を真空脱気装置に定置し事前飽和を行った。事前飽和は 1 か月間とした。

供試体への通水を開始し、供試体を飽和させた。飽和の終了は、時間あたりの給水量と排水量について、測定値の平均値からの変動が±50%におさまることによって飽和完了とみなした。このとき、背圧を作用させる場合には、給水側及び排水側のビュレットに圧力を付加し、供試体への水の流入がおさまったことを確認した。

ビュレットの断面積 a (mm²) を求め、各ビュレット水面から測った高さ h_1 (mm) を設定した。

供試体への給水経路のバルブ B を閉じ、貯水槽からビュレットにつながる経路のバルブ A を開いて貯水槽の水をビュレットに満たし、バルブ A を閉じた。時刻 t_1 における h_1 を記録した後、バルブ B を開いて時刻 t_2 における h_2 を記録した。

上記の水位計測操作を繰り返し、透水係数の値がほぼ一定となったことを確認した後、3 回以上の測定を行った。測定値の平均値からの変動が±50%におさまることではほぼ一定とみなした。ビュレットと同条件で設置された水の水温 T (°C) を測定した。試験後の供試体の含水比 w_f (%) を求めた。

透水係数の評価

計測した流出水量に基づいて透水係数の計算を行った。このとき、流出水量を3回以上測定し、透水係数の代表値を求めた。その代表値は、原則として、各回で求めた透水係数(15℃)の算術平均値とした。代表値の有効数字は2桁とした。透水係数の評価は排水側にもビュレットを連結しているため、排水側のビュレットの断面積と水位の変化も考慮することにより、測定時の水温 $T(^{\circ}\text{C})$ における透水係数 $k_T(\text{m/s})$ を次式によって算出した。

$$k_T = \ln 10 \frac{(a_{in} \times a_{out})L}{(a_{in} + a_{out})A(t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \times \frac{1}{1000} \quad \text{式 5.2-1}$$

ここに、 k_T : 透水係数 (m/s)

a_{in} : 流入側のビュレットの断面積 (mm^2)

a_{out} : 流出側のビュレットの断面積 (mm^2)

L : 供試体の長さ (mm)

A : 供試体の断面積 (mm^2)

$t_2 - t_1$: 測定時間 (s)

h_i : 時刻 t_i における水位差 (mm)

さらに、温度 15℃における透水係数 $k_{15}(\text{m/s})$ は、次式によって算出し、四捨五入によって有効数字3桁に丸めた。

$$k_{15} = k_T \times \frac{\eta_T}{\eta_{15}} \quad \text{式 5.2-2}$$

(c) 空隙率

JIS R 1655-2003「ファインセラミックの水銀圧入法による成形体気孔分布試験方法」を参考に水銀圧入法による空隙率を測定した。空隙率の測定は、変質部および健全部を対象に実施した。

測定では、コンクリートコアから粗骨材を除去したモルタル部分を 2.5～5 mm 角に調製した後、真空乾燥デシケータ中で乾燥処理した。乾燥した試料を水銀圧入式ポロシメータで測定した。以下に測定条件を示す。

- ・装置：オートポア IV9500 (マイクロメリティクス社製)
- ・条件：測定範囲 0.5～60,000psi (孔径 0.03～300 μm 相当)，水銀表面張力 484 mN/m
接触角=130°

(d) 炭酸化（中性化）深さ

炭酸化（中性化）深さの測定試料を図 5.2-9 に示す。圧裂試験の試験体採取後の $\phi 50 \times 50 \text{ mm}$ の供試体の中央部をダイヤモンドカッターで切断し、その切断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、中性化深さを測定した。中性化深さの測定は JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠した。測定は切断面を除く暴露面3方向を対象とし、1方向につき中央部（端部から 25 mm 程度）と中央から両側へ 10 mm 間隔の位置の3点とし、合計9点を測定した平均値を中性化深さとした。なお、中性化深さの測定をフェノールフタレイン溶液噴霧から2時間半後に行った。また、試験体が小さいことや水中養生試験体の中性化深さが小さかったため、測定単位を 0.01 mm とした。

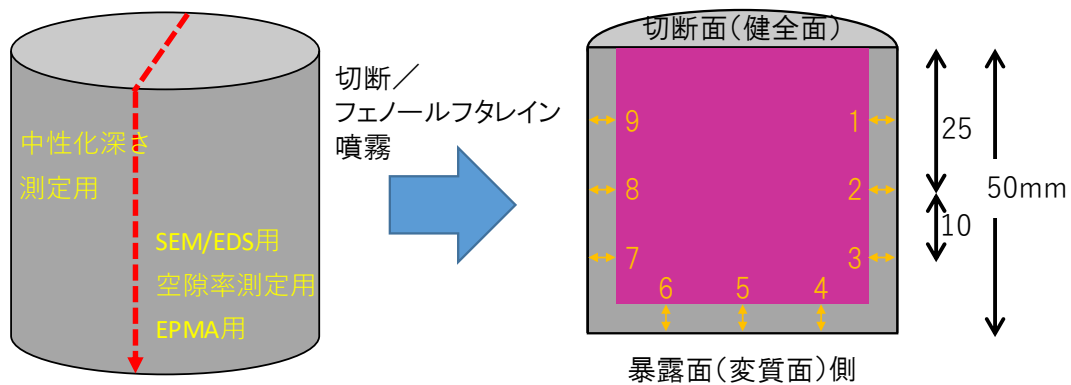


図 5.2-9 中性化深さ測定試料

(e) 元素濃度分布

EPMA 用分析試料を図 5.2-10 に示す。分析試料を約 20×20 mm 角の大きさに切り出し、樹脂包埋した後に分析面を鏡面研磨した。分析面には導電性を付与するため炭素蒸着後、EPMA (電子線マイクロアナライザー) による面分析を実施した。分析範囲は、中性化深さの測定結果によって決定し、変質部が多い気中養生試験体は 20×20 mm とし、変質部がごく表層である水中養生試験体については表層を含めた 4×4 mm の領域とし、元素濃度分布を測定した。EPMA の測定条件を表 5.2-4 に示す。

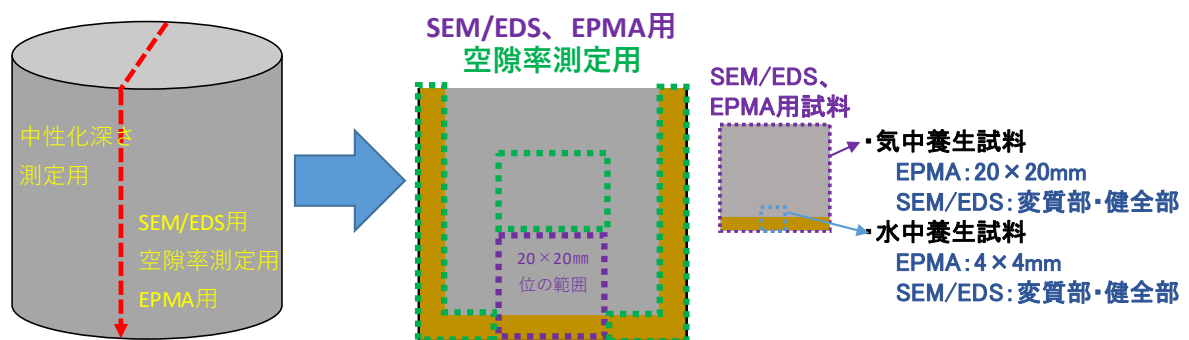


図 5.2-10 EPMA 用分析試料

(f) SEM/EDS 分析

図 5.2-10 のように作製した研磨試料を用いて SEM/EDS 分析による元素分析を実施した。測定については、表層近くの変質部および表層から遠い健全部について測定した。SEM/EDS 分析においては、C-S-H の Ca/Si モル比を主に分析した。

SEM/EDS の測定条件を以下に示す。

- ・装置：日本電子株式会社製 IT-300HR
- ・条件：加速電圧 15 kV、プローブカレント 60 mA、ワーキングディスタンス 10.0 mm

表 5.2-4 EPMA 測定条件

装 置	条 件	
使用装置	JXA-8100（日本電子社製）	
加速電圧	15kV	
照射電流	10nA	
測定時間	40msec/ピクセル	
分析元素	Ca, Si, Al, Fe, Mg, S, Na, K, Cl, C	
分析条件	気中養生試料	水中養生試料
プローブ径	20μm	5μm
ピクセルサイズ	50×50μm	10×10μm
ピクセル数	400×400（面分析範囲 20×20mm）	400×400（面分析範囲 4×4mm）

(g) 水質分析

水中養生に使用している地下水の水質分析を実施した。表 5.2-5 に、各元素の分析方法、使用機器一覧を示す。

表 5.2-5 各元素の分析方法，使用機器一覧

分析項目	分析方法	分析装置
pH, 水温	ガラス電極法	堀場製作所 HORIBA F-55
ナトリウム	原子吸光分析法	日立製作所 HITACHI Z-2010
カリウム	原子吸光分析法	
カルシウム	原子吸光分析法	
マグネシウム	原子吸光分析法	
塩素イオン	イオンクロマトグラフ法	東ソー TOSOH IC-2010
硫酸イオン	イオンクロマトグラフ法	
アルミニウムイオン	誘導結合高周波プラズマ質量分析法	アジレント・テクノロジー Agilent 7700
シリカ	誘導結合高周波プラズマ質量分析法	
炭酸水素イオン	滴定法	—

(3) 試験結果

(a) 強度特性

(i) 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験および変形特性試験の測定結果を表 5.2-6～表 5.2-9 に示す。一軸圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比の各供試体データ及び平均値等のデータをまとめたものを図 5.2-11～図 5.2-13 に示す。また、応力-ひずみ曲線および縦ひずみと横ひずみの関係を図 5.2-14 に示す。

一軸圧縮強度および静弾性係数ともに平均値は、気中養生よりも水中養生の方が大きくなった。気中養生よりも水中養生の方が間隙に水分が満たされた環境であるため、水和反応が促進され、強度増加に寄与したことが考えられる。また、水中養生試験体のうち、「水中-1」の圧縮強度が著しく低くなる結果となった。吹付けコンクリートの施工では、モルタルや骨材が跳ね返ることもあり、不均質に施工される可能性が場所打ちコンクリートに比べて高い。また、試験体の寸法が $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$ と比較的小さいため、骨材の粒径分布による影響も相対的に大きいことが要因と考えられる。さらに、「水中-1」における応力-ひずみ曲線や縦ひずみと横ひずみの関係も他の試料と少し異なる傾向を示した。

表 5.2-6 一軸圧縮強度試験結果（気中養生）

供試体番号	気-1	気-2	気-3	気-4	気-5	気-6	気-7	気-8	気-9
直径(mm)	49.6	49.7	49.6	49.8	49.6	49.7	49.6	49.7	49.7
	49.7	49.6	49.6	49.8	49.7	49.7	49.6	49.7	49.6
	49.7	49.6	49.6	49.8	49.6	49.6	49.7	49.6	49.5
	49.7	49.7	49.6	49.4	49.6	49.6	49.6	49.7	49.6
	49.7	49.7	49.6	49.8	49.6	49.6	49.6	49.6	49.6
	49.7	49.7	49.6	49.8	49.6	49.7	49.6	49.6	49.7
平均直径(mm)	49.7	49.6	49.6	49.7	49.6	49.6	49.6	49.6	49.6
断面積(mm ²)	1940	1932	1932	1940	1932	1932	1932	1932	1932
高さ 最大値(mm)	100.7	101.2	102.5	101.3	101.0	101.9	100.8	102.0	102.7
高さ 最小値(mm)	100.6	101.0	102.4	101.2	100.9	101.8	100.6	101.9	102.6
平均高さ(mm)	100.6	101.1	102.4	101.3	101.0	101.9	100.7	102.0	102.7
気中質量(g)	469.4	473.1	480.1	470.6	470.4	475.7	469.9	477.5	473.5
見掛けの密度(g/cm ³)	2.41	2.42	2.43	2.39	2.41	2.42	2.42	2.42	2.39
見掛けの密度 平均値(g/cm ³)	2.41								
最大荷重(kN)	135	118	115	128	139	113	104	106	119
補正前の圧縮強度(N/mm ²)	69.6	61.1	59.5	66.0	71.9	58.5	53.8	54.9	61.6
高さとの比	2.02	2.04	2.06	2.04	2.04	2.05	2.03	2.06	2.07
補正係数	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
補正後の圧縮強度(N/mm ²)	69.6	61.1	59.5	66.0	71.9	58.5	53.8	54.9	61.6
補正後の圧縮強度 平均値(N/mm ²)	61.9								

・ 圧縮強度=最大荷重／断面積

・ 補正後の圧縮強度=補正前の圧縮強度×補正係数

表 5.2-7 一軸圧縮強度試験結果（水中養生）

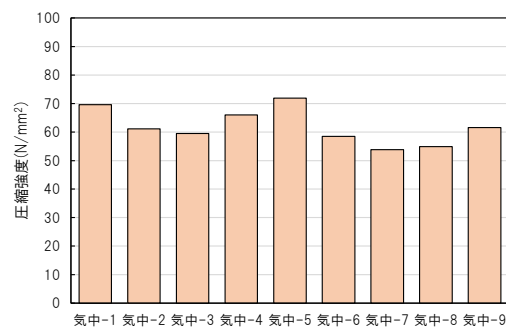
供試体番号	水-1	水-2	水-3	水-4	水-5	水-6	水-7	水-8	水-9
直径(mm)	49.7	49.7	49.7	49.6	49.7	49.7	49.6	49.7	49.6
	49.7	49.7	49.7	49.6	49.6	49.7	49.5	49.7	49.6
	49.7	49.7	49.7	49.6	49.7	49.7	49.6	49.7	49.6
	49.7	49.7	49.7	49.6	49.6	49.7	49.6	49.7	49.6
	49.7	49.7	49.7	49.6	49.7	49.7	49.6	49.7	49.6
	49.6	49.7	49.7	49.6	49.6	49.7	49.5	49.7	49.6
平均直径(mm)	49.7	49.7	49.7	49.6	49.7	49.7	49.6	49.7	49.6
断面積(mm ²)	1940	1940	1940	1932	1940	1940	1940	1940	1932
高さ 最大値(mm)	101.4	101.1	100.7	101.3	100.9	100.3	100.9	101.3	100.0
高さ 最小値(mm)	101.4	101.0	100.5	101.2	100.8	100.2	100.6	101.2	100.1
平均高さ(mm)	101.4	101.1	100.6	101.3	100.9	100.3	100.7	101.3	100.0
気中質量(g)	459.4	474.8	468.5	475.1	461.0	462.8	467.2	472.6	457.0
見掛けの密度(g/cm ³)	2.34	2.42	2.40	2.43	2.36	2.38	2.40	2.40	2.36
見掛けの密度 平均値(g/cm ³)	2.39								
最大荷重(kN)	107	155	165	164	136	128	141	162	135
補正前の圧縮強度(N/mm ²)	55.2	79.9	85.1	84.9	70.1	66.0	73.0	83.5	69.9
高さと直径との比	2.04	2.03	2.02	2.04	2.03	2.02	2.03	2.04	2.02
補正係数	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
補正後の圧縮強度(N/mm ²)	55.2	79.9	85.1	84.9	70.1	66.0	73.0	83.5	69.9
補正後の圧縮強度 平均値(N/mm ²)	74.2								

表 5.2-8 一軸圧縮強度試験 変形特性試験結果（気中養生）

供試体番号	気-1	気-2	気-3	気-4	気-5	気-6	気-7	気-8	気-9
見掛けの密度(g/cm ³)	2.41	2.42	2.43	2.39	2.41	2.42	2.42	2.42	2.39
見掛けの密度 平均値(g/cm ³)	2.41								
補正前の圧縮強度(N/mm ²)	69.6	61.1	59.5	66.0	71.9	58.5	53.8	54.9	61.6
高さと直径との比	2.02	2.04	2.06	2.04	2.04	2.05	2.03	2.06	2.07
補正係数	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
補正後の圧縮強度(N/mm ²)	69.6	61.1	59.5	66.0	71.9	58.5	53.8	54.9	61.6
補正後の圧縮強度 平均値(N/mm ²)	61.9								
静弾性係数(kN/mm ²)	38.3	37.2	36.4	39.2	35.2	37.4	34.8	40.5	37.4
静弾性係数 平均値(kN/mm ²)	37.4								
ポアソン比	0.230	0.239	0.229	0.288	0.212	0.272	0.222	0.244	0.213
ポアソン比 平均値	0.239								

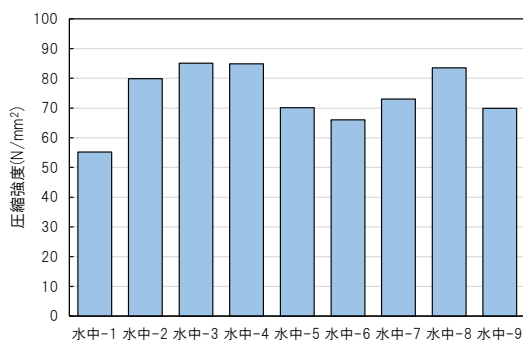
表 5.2-9 一軸圧縮強度試験 変形特性試験結果（水中養生）

供試体番号	水-1	水-2	水-3	水-4	水-5	水-6	水-7	水-8	水-9
見掛けの密度(g/cm ³)	2.34	2.42	2.40	2.43	2.36	2.38	2.40	2.40	2.36
見掛けの密度 平均値(g/cm ³)	2.39								
補正前の圧縮強度(N/mm ²)	55.2	79.9	85.1	84.9	70.1	66.0	73.0	83.5	69.9
高さと直径との比	2.04	2.03	2.02	2.04	2.03	2.02	2.03	2.04	2.02
補正係数	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
補正後の圧縮強度(N/mm ²)	55.2	79.9	85.1	84.9	70.1	66.0	73.0	83.5	69.9
補正後の圧縮強度 平均値(N/mm ²)	74.2								
静弾性係数(kN/mm ²)	33.6	42.6	43.6	42.7	37.0	42.3	39.8	44.0	38.7
静弾性係数 平均値(kN/mm ²)	40.5								
ポアソン比	0.175	0.229	0.249	0.217	0.232	0.259	0.247	0.232	0.229
ポアソン比 平均値	0.230								



(a) 氣中養生

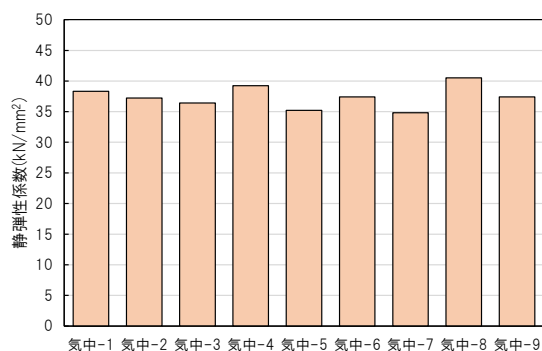
氣中養生	補正圧縮強度 (N/mm2)
最大值	71.9
最小値	53.8
平均値	61.9
中央値	61.1
標準偏差	6.21



(b) 水中養生

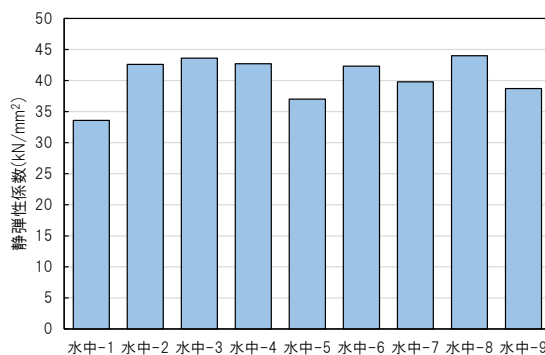
水中養生	補正圧縮強度 (N/mm2)
最大值	85.1
最小値	55.2
平均値	74.2
中央値	73.0
標準偏差	10.1

図 5.2-11 一軸圧縮強度（補正後）



(a) 氣中養生

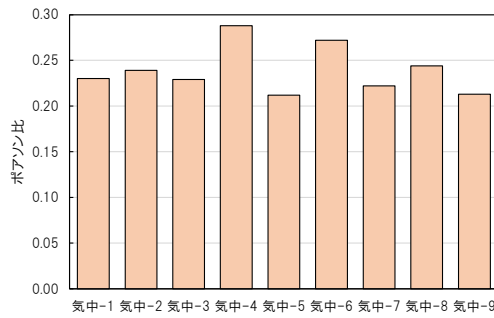
氣中養生	静弾性係数 (kN/mm2)
最大值	40.5
最小値	34.8
平均値	37.4
中央値	37.4
標準偏差	1.81



(b) 水中養生

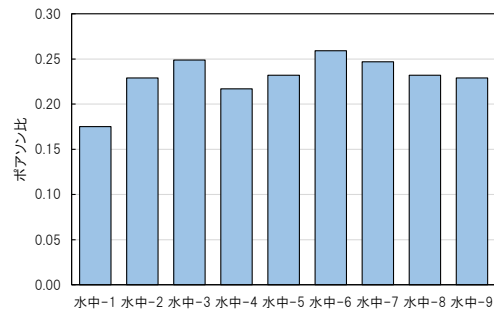
水中養生	静弾性係数 (kN/mm2)
最大值	44.0
最小値	33.6
平均値	40.5
中央値	42.3
標準偏差	3.50

図 5.2-12 静弾性係数



気中養生	ポアソン比
最大値	0.288
最小値	0.212
平均値	0.239
中央値	0.230
標準偏差	0.026

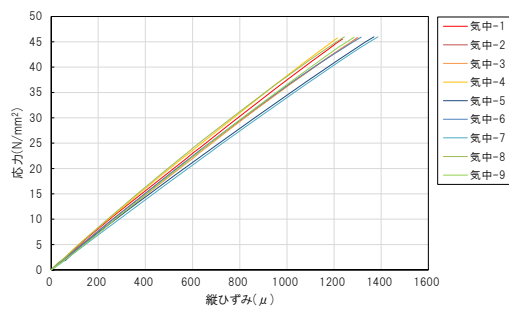
(a) 気中養生



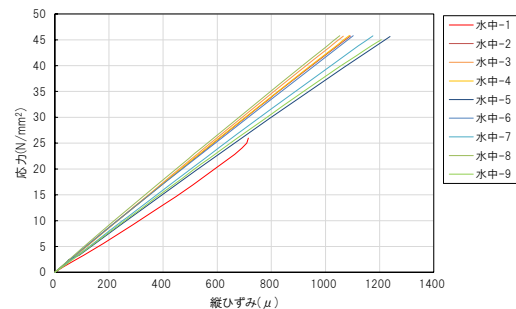
水中養生	ポアソン比
最大値	0.259
最小値	0.175
平均値	0.230
中央値	0.232
標準偏差	0.024

(b) 水中養生

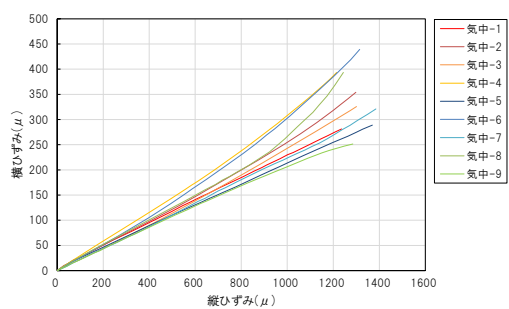
図 5.2-13 ポアソン比



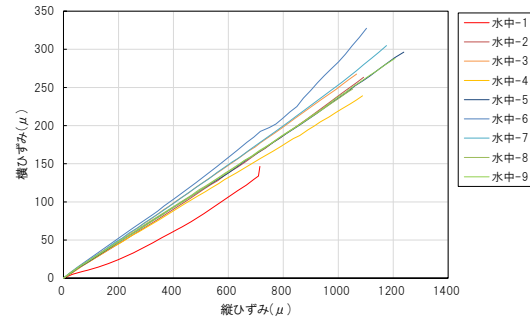
(a) 応力—ひずみ関係：気中養生



(b) 応力—ひずみ関係：水中養生



(c) 縦ひずみと横ひずみの関係：気中養生



(d) 縦ひずみと横ひずみの関係：水中養生

図 5.2-14 各試験体の応力—ひずみ関係

(ii) 弾性波測定 (P、S 波)

弾性波測定の結果を表 5.2-10 および表 5.2-11 に示す。また、各供試体のデータおよび平均値等をまとめたものを図 5.2-15～図 5.2-19 に示す。

動せん断弾性係数、動弾性係数ともに平均値は気中養生より水中養生の方が大きくなり、一軸圧縮強度および静弾性係数と整合する結果となった。

表 5.2-10 弾性波測定結果 (気中養生)

供試体番号	気-1		気-2		気-3		気-4		気-5		気-6		気-7		気-8		気-9	
平均直径(cm)	4.96		4.96		4.96		4.97		4.96		4.95		4.96		4.96		4.96	
平均高さ(cm)	10.07		10.11		10.25		10.13		10.10		10.20		10.07		10.20		10.29	
体積(cm3)	194.57		195.35		198.05		196.52		195.15		196.29		194.57		197.08		198.82	
気中質量(g)	461.56		464.68		471.47		463.00		462.35		497.69		461.81		469.94		464.93	
見掛けの密度 (g/cm3)	2.372		2.379		2.381		2.356		2.369		2.383		2.373		2.384		2.338	
見掛けの密度 平均値(g/cm3)	2.371																	
P波透過時間 (μsec)	20.1	20.3	20.6	20.3	20.6	20.4	20.4	20.6	20.6	20.3	20.1	20.2	20.2	20.2	20.4	20.4	20.5	20.8
P波速度 (km/sec)	5.01	4.96	4.91	4.98	4.98	5.02	4.97	4.92	4.90	4.98	5.07	5.05	4.99	4.99	5.00	5.00	5.02	4.95
P波速度 平 均 値 (km/sec)	4.99		4.95		5.00		4.95		4.94		5.06		4.99		5.00		4.99	
S波透過時間 (μsec)	38.8	39.6	39.8	38.4	39.6	38.4	40.6	40.5	38.0	39.6	40.1	39.5	38.5	39.8	40.4	39.1	39.9	39.5
S波速度 (km/sec)	2.60	2.54	2.54	2.63	2.59	2.67	2.50	2.50	2.66	2.55	2.54	2.58	2.62	2.53	2.52	2.61	2.58	2.61
S波速度 平 均 値 (km/sec)	2.57		2.59		2.63		2.50		2.61		2.56		2.58		2.57		2.60	
動ポアソン比	0.319		0.312		0.309		0.329		0.306		0.328		0.318		0.320		0.314	
動ポアソン比 平均値	0.317																	
動せん断弾性 係数 (MN/m2)	1.57E+04		1.60E+04		1.65E+04		1.47E+04		1.61E+04		1.56E+04		1.58E+04		1.58E+04		1.58E+04	
(kN/mm2)	15.7		16.0		16.5		14.7		16.1		15.6		15.8		15.8		15.8	
動せん断弾性 係数 平 均 値 (MN/m2)	1.58E+04																	
(kN/mm2)	15.8																	
動弾性係数 (MN/m2)	4.13E+04		4.19E+04		4.31E+04		3.92E+04		4.22E+04		4.15E+04		4.17E+04		4.16E+04		4.15E+04	
(kN/mm2)	41.3		41.9		43.1		39.2		42.2		41.5		41.7		41.6		41.5	
動弾性係数 平 均 値 (MN/m2)	4.16E+04																	
(kN/mm2)	41.6																	

表 5.2-11 弾性波測定結果（水中養生）

供試体番号	水-1		水-2		水-3		水-4		水-5		水-6		水-7		水-8		水-9	
平均直径 (cm)	4.96		4.96		4.97		4.96		4.96		4.96		4.96		4.96		4.96	
平均高さ (cm)	10.13		10.12		10.15		10.14		10.10		10.03		10.07		10.13		10.00	
体積(cm3)	195.73		195.54		196.91		195.93		195.15		193.80		194.57		195.73		193.22	
気中質量(g)	459.25		474.71		468.70		475.19		460.81		462.69		467.10		472.64		457.08	
見掛けの密度 (g/cm3)	2.346		2.428		2.380		2.425		2.361		2.387		2.401		2.415		2.366	
見掛けの密度 平均値 (g/cm3)	2.390																	
P波透過時間 (μsec)	20.0	20.1	18.5	18.7	19.1	18.8	19.1	19.2	19.8	19.7	19.7	19.8	19.5	19.6	19.8	19.6	19.9	19.9
P波速度 (km/sec)	5.07	5.04	5.47	5.41	5.31	5.40	5.31	5.28	5.10	5.13	5.09	5.07	5.16	5.14	5.12	5.17	5.03	5.03
P波速度 平均値 (km/sec)	5.06		5.44		5.36		5.30		5.12		5.08		5.15		5.15		5.03	
S波透過時間 (μsec)	37.6	36.2	34.8	33.6	35.2	36.0	36.4	36.0	36.2	37.7	37.2	37.7	36.6	37.6	37.0	36.1	37.2	37.6
S波速度 (km/sec)	2.69	2.80	2.91	3.01	2.88	2.82	2.79	2.82	2.79	2.68	2.70	2.66	2.75	2.68	2.74	2.81	2.69	2.66
S波速度 平均値 (km/sec)	2.75		2.96		2.85		2.81		2.74		2.68		2.72		2.78		2.68	
動ポアソン比	0.290		0.290		0.303		0.304		0.299		0.307		0.307		0.294		0.302	
動ポアソン比 平均値	0.300																	
動せん断弾性係数 (MN/m2)	1.77E+04		2.13E+04		1.93E+04		1.92E+04		1.77E+04		1.71E+04		1.78E+04		1.87E+04		1.70E+04	
(kN/mm2)	17.7		21.3		19.3		19.2		17.7		17.1		17.8		18.7		17.0	
動せん断弾性係数 平均値 (MN/m2)	1.84E+04																	
(kN/mm2)	18.4																	
動弾性係数 (MN/m2)	4.58E+04		5.49E+04		5.04E+04		4.99E+04		4.61E+04		4.48E+04		4.64E+04		4.83E+04		4.42E+04	
(kN/mm2)	45.8		54.9		50.4		49.9		46.1		44.8		46.4		48.3		44.2	
動弾性係数 平均値 (MN/m2)	4.79E+04																	
(kN/mm2)	47.9																	

なお、

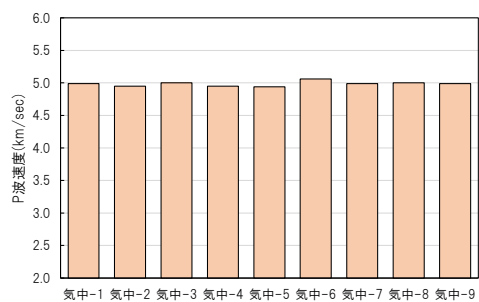
$$\text{動ポアソン比} = \frac{(\text{P波透過速度}/\text{S波透過速度})^2 - 2}{2 \times \{(\text{P波透過速度}/\text{S波透過速度})^2 - 1\}}$$

$$\text{動せん断弾性係数} = 10^3 \times \text{見かけの密度} \times (\text{S波透過速度})^2$$

$$\text{動弾性係数} = 2(1 + \text{動ポアソン比}) \times \text{動せん断弾性係数}$$

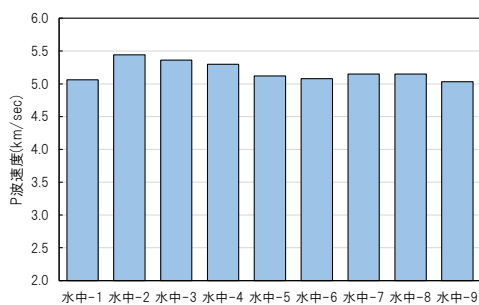
$$\text{P波速度} = 10 \times \frac{\text{高さ}}{\text{P波透過時間}}$$

$$\text{S波速度} = 10 \times \frac{\text{高さ}}{\text{S波透過時間}}$$



(a) 氣中養生

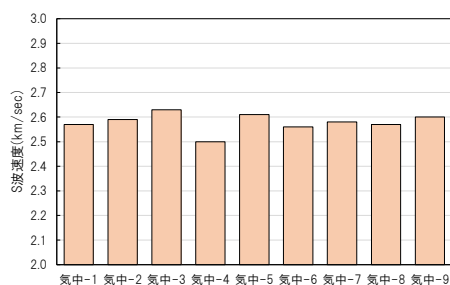
氣中養生	P 波 速 度 (km/sec)
最大值	5.06
最小值	4.94
平均值	4.99
中央值	4.99
標準偏差	0.04



(b) 水中養生

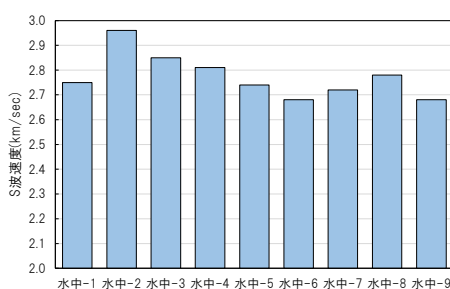
水中養生	P 波 速 度 (km/sec)
最大值	5.44
最小值	5.03
平均值	5.19
中央值	5.15
標準偏差	0.14

図 5.2-15 P 波速度



(a) 氣中養生

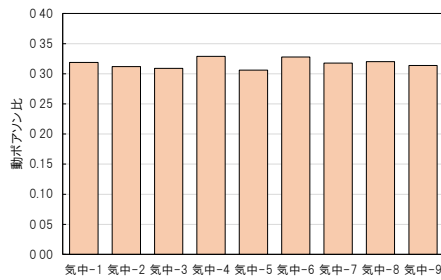
氣中養生	S 波 速 度 (km/sec)
最大值	2.63
最小值	2.50
平均值	2.58
中央值	2.58
標準偏差	0.04



(b) 水中養生

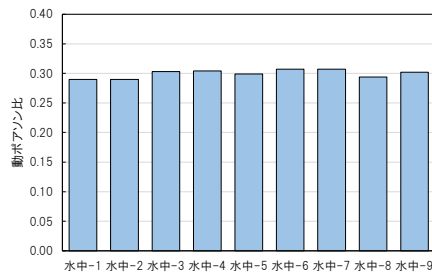
水中養生	S 波 速 度 (km/sec)
最大值	2.96
最小值	2.68
平均值	2.77
中央值	2.75
標準偏差	0.09

図 5.2-16 S 波速度



(a) 気中養生

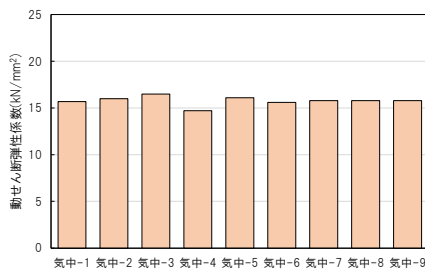
気中養生	動ポアソン比
最大値	0.329
最小値	0.306
平均値	0.317
中央値	0.318
標準偏差	0.008



(b) 水中養生

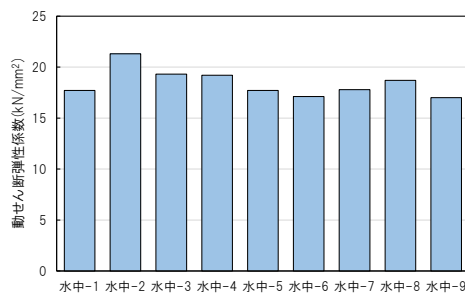
水中養生	動ポアソン比
最大値	0.307
最小値	0.290
平均値	0.300
中央値	0.302
標準偏差	0.007

図 5.2-17 動ポアソン比



(a) 気中養生

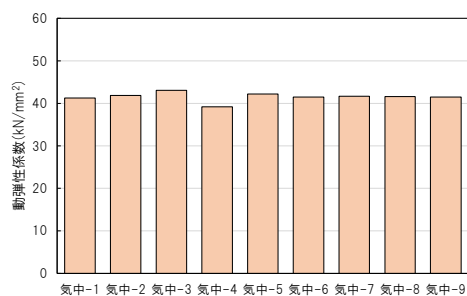
気中養生	動せん断弾性係数 (kN/mm²)
最大値	16.5
最小値	14.7
平均値	15.8
中央値	15.8
標準偏差	0.5



(b) 水中養生

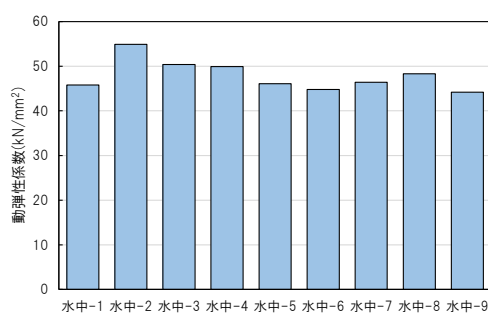
水中養生	動せん断弾性係数 (kN/mm²)
最大値	21.3
最小値	17.0
平均値	18.4
中央値	17.8
標準偏差	1.4

図 5.2-18 動せん断弾性係数



(a) 気中養生

気中養生	動弾性係数 (kN/mm ²)
最大値	43.1
最小値	39.2
平均値	41.6
中央値	41.6
標準偏差	1.0



(b) 水中養生

水中養生	動弾性係数 (kN/mm ²)
最大値	54.9
最小値	44.2
平均値	47.9
中央値	46.4
標準偏差	3.4

図 5.2-19 動弾性係数

(iii) 圧裂試験

割裂引張強度試験の結果を表 5.2-12 および表 5.2-13 に、各供試体の結果および平均値等の値を図 5.2-20 に示す。割裂引張強度においても平均値が気中養生より水中養生の方が大きくなり、その他の強度特性試験と整合する結果であった。

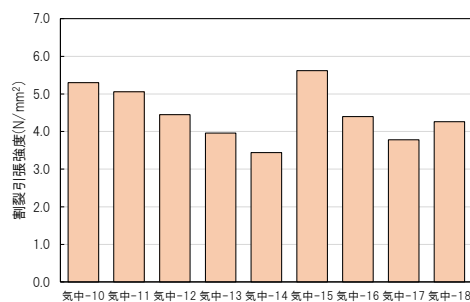
表 5.2-12 割裂引張強度試験結果（気中養生）

供試体番号	気-10	気-11	気-12	気-13	気-14	気-15	気-16	気-17	気-18
直径(mm)	49.7	49.7	49.7	49.7	49.7	49.7	49.9	49.7	49.7
	49.7	49.7	49.7	49.8	49.7	49.7	49.9	49.7	49.7
	49.7	49.7	49.7	49.7	49.7	49.8	49.9	49.8	49.7
平均直径(mm)	49.7	49.7	49.7	49.7	49.7	49.7	49.9	49.7	49.7
破断面長さ(mm)	50.2	50.6	50.7	50.0	50.9	49.1	48.9	46.9	51.7
	50.4	50.2	51.0	50.3	51.0	49.3	49.0	47.2	51.6
平均破断面長さ(mm)	50.3	50.4	50.9	50.2	51.0	49.2	49.0	47.1	51.7
質量(g)	232.0	232.9	236.3	232.3	238.7	229.3	222.6	214.8	240.3
見掛けの密度(g/cm ³)	2.38	2.38	2.39	2.39	2.41	2.40	2.32	2.35	2.40
見掛けの密度 平均値(g/cm ³)	2.38								
最大荷重(kN)	20.8	19.9	17.7	15.5	13.7	21.6	16.9	13.9	17.2
割裂引張強度(N/mm ²)	5.30	5.06	4.45	3.96	3.44	5.62	4.40	3.78	4.26
割裂引張強度 平均値(N/mm ²)	4.47								

表 5.2-13 割裂引張強度試験結果（水中養生）

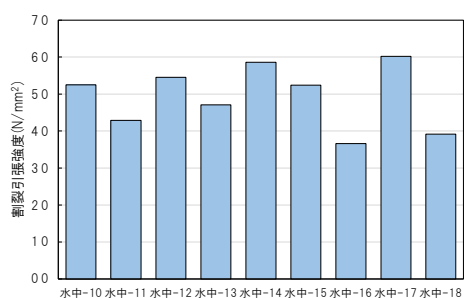
供試体番号	水-10	水-11	水-12	水-13	水-14	水-15	水-16	水-17	水-18
直径(mm)	49.7	49.8	49.9	50.0	49.7	49.8	49.7	49.9	49.9
	49.7	49.8	49.9	49.9	49.7	49.8	49.7	49.9	49.9
	49.7	49.8	49.9	49.9	49.7	49.8	49.7	49.9	49.9
平均直径(mm)	49.7	49.8	49.9	49.9	49.7	49.8	49.7	49.9	49.9
破断面長さ(mm)	50.5	50.5	50.1	50.1	50.3	50.2	49.9	50.4	50.5
	50.5	50.3	50.4	50.0	50.6	50.3	50.0	50.3	50.3
平均破断面長さ(mm)	50.5	50.4	50.3	50.1	50.5	50.3	50.0	50.4	50.4
質量(g)	234.8	227.3	233.8	234.6	234.0	235.7	232.9	225.6	230.8
見掛けの密度(g/cm3)	2.40	2.32	2.38	2.39	2.39	2.41	2.40	2.29	2.34
見掛けの密度 平均値(g/cm3)	2.37								
最大荷重(kN)	20.7	16.9	21.5	18.5	23.1	20.6	14.3	23.8	15.5
割裂引張強度(N/mm2)	5.25	4.29	5.45	4.71	5.86	5.24	3.66	6.02	3.92
割裂引張強度 平均値(N/mm2)	4.93								

$$\text{割裂引張強度} = \frac{2 \times \text{最大荷重}}{\pi \times \text{直径} \times \text{破壊断面長さ}}$$



気中養生	割裂引張強度 (N/mm2)
最大値	5.62
最小値	3.44
平均値	4.47
中央値	4.40
標準偏差	0.73

(a) 気中養生



水中養生	割裂引張強度 (N/mm2)
最大値	6.02
最小値	3.66
平均値	4.93
中央値	5.24
標準偏差	0.84

(b) 水中養生

図 5.2-20 割裂引張強度

(iv) 強度特性のまとめ

2020 年度に取得した材齢約 2 年の強度特性（平均値）を過年度の試験結果とともに表 5.2-14 および図 5.2-21、図 5.2-22 に示す。

気中養生試験体の一軸圧縮強度は材齢 1 年から低下する結果となった。その要因として中性化の進行が考えられ、試験体の全面から 5 mm 程度中性化が進行しているとして、 $\phi 50 \times 100$ mm 試験体中の中性化領域の割合を算出すると約 40%が中性化していることとなる。圧縮強度試験は脆弱な部分から破壊されるため、中性化領域が多くなるとその部分から破壊されていき、強度低下が生じる可能性がある。既往の研究（中村，2017）においても、大量に混和材を用いたコンクリートが中性化の影響により、強度が低下しているとの報告もあり、HFSC コンクリートもフライアッシュおよびシリカフュームを大量に用いたコンクリートであるため、既往の報告と同様な傾向が認められたと考えられる。一方、材齢 28 日より材齢 1 年で若干低い値を示した気中養生試験体の動せん断弾性係数および動弾性係数について、材齢 1 年と材齢 2 年ではほぼ同程度であった。したがって、材齢 28 日の動せん断弾性係数および動弾性係数が大きくなった要因は、見掛け密度が材齢 1 年および 2 年の気中養生試験体より大きくなっているためと考えられ、材齢 28 日の P 波および S 波速度が想定より大きくなったことにより、動せん断弾性係数および動弾性係数も大きくなったと推察される。

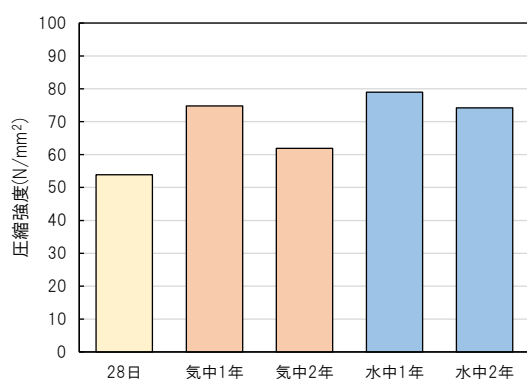
水中養生試験体の一軸圧縮強度および静弾性係数は材齢 1 年から低下する結果となった。その要因として、「水中-1」の圧縮強度がその他の試験体に比べて、著しく低い結果となったことが考えられる。「水中-1」を除いた試験体 8 本における圧縮強度の平均が約 77 N/mm^2 であるため、材齢 1 年とほぼ同程度の圧縮強度を有していたと考えられる。静弾性係数についても圧縮強度試験と同時にデータを採取する項目であるため、材齢 1 年と比較すると低下しているが、「水中-1」を除いた試験体 8 本における静弾性係数の平均は約 41 kN/mm^2 であるため、材齢 1 年と同程度の静弾性係数を有していたと考えられる。また、水中養生試験体の場合、割裂引張強度についても材齢 1 年と比較すると低下する結果となった。吹付けコンクリートは普通コンクリートに比べて施工による影響が大きいことに加えて、試験体の寸法が $\phi 50 \times 100$ mm と比較的小さいため、骨材の分布による影響も大きい。さらに、コア試験体を横にして載荷するため、コア試験体の側面の平滑度も試験結果に影響を及ぼす。コンクリート自体が圧縮に強く、引張に弱い材料であるため、圧縮強度試験に比べて圧裂試験では、これら要因がより顕著に結果として表れる。これらの複合的な要因が積み重なったことにより、材齢 2 年で割裂引張強度が低下したと推察される。水中養生試験体では材齢 2 年を経過しても変質部がごく表層のみであったため、強度特性に溶脱の影響は見られなかった。

表 5.2-14 強度特性試験結果の一覧

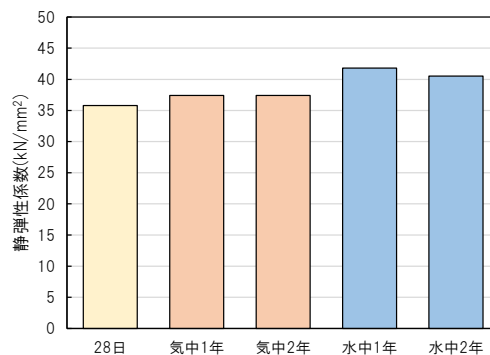
試験項目	R2 年度測定※1		R3 年度測定データ※2				R4 年度測定データ			
			気中養生		水中養生		気中養生		水中養生	
	材齢 28 日	標準 偏差	材齢 1 年	標準 偏差	材齢 1 年	標準 偏差	材齢 2 年	標準 偏差	材齢 2 年	標準 偏差
一軸圧縮強度 (N/mm ²)	53.9	3.3	74.8	5.4	79.0	5.8	61.9	6.2	74.2	10.1
静弾性係数 (kN/mm ²)	35.8	1.2	37.4	3.5	41.8	2.6	37.4	1.8	40.5	3.5
ポアソン比	0.21	0.02	0.220	0.026	0.227	0.015	0.239	0.026	0.230	0.024
見掛けの密度 (g/cm ³)	2.38	0.01	2.35	0.02	2.40	0.02	2.37	0.01	2.39	0.03
P 波速度 (km/sec)	5.61	0.18	5.03	0.06	5.18	0.09	4.99	0.04	5.19	0.14
S 波速度 (km/sec)	2.58	0.05	2.55	0.05	2.70	0.07	2.58	0.04	2.77	0.09
動ポアソン比	0.37	0.01	0.327	0.008	0.308	0.015	0.317	0.008	0.300	0.007
動せん断弾性係数 (kN/mm ²)	15.9	0.6	15.4	0.7	17.5	0.9	15.8	0.5	18.4	1.4
動弾性係数 (kN/mm ²)	43.3	1.5	40.7	1.6	45.9	1.9	41.6	1.0	47.9	3.4
割裂引張強度 (N/mm ²)	3.70	0.35	4.36	0.78	5.43	0.87	4.47	0.73	4.93	0.84

※1 2020 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（回収可能性技術高度化開発）報告書

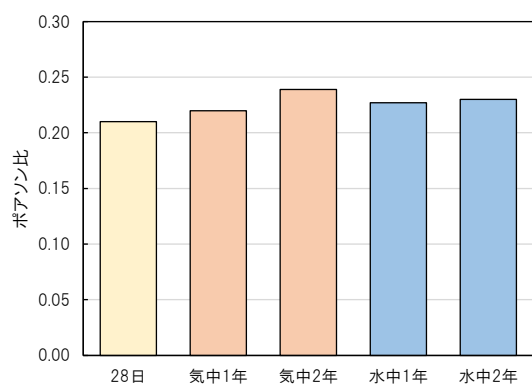
※2 2021 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（回収可能性技術高度化開発）報告書



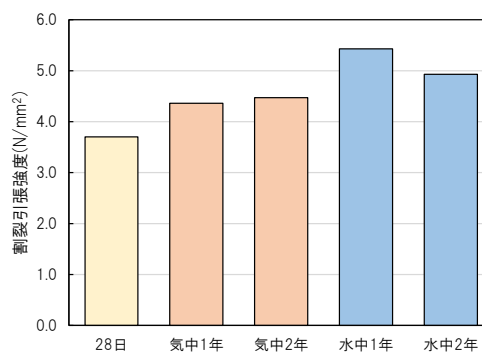
(a) 各材齢における圧縮強度



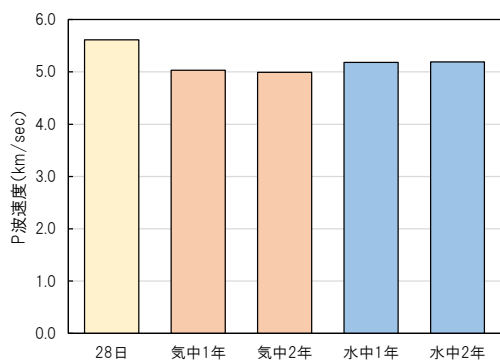
(b) 各材齢における静弾性係数



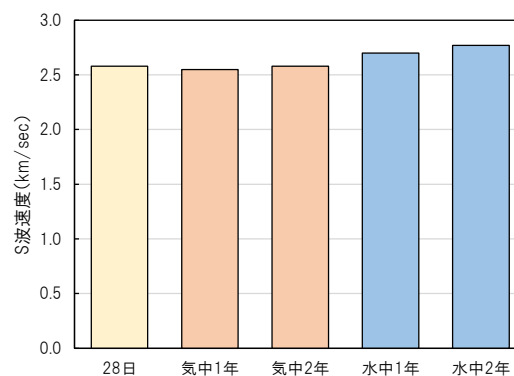
(c) 各材齢におけるポアソン比



(d) 各材齢における割裂引張強度

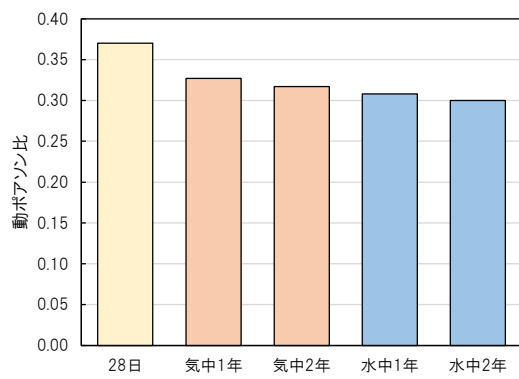


(e) 各材齢における P 波速度

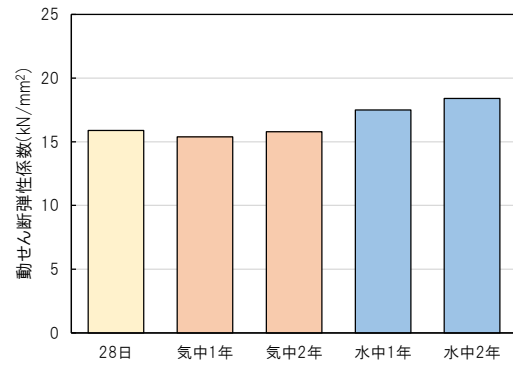


(f) 各材齢における S 波速度

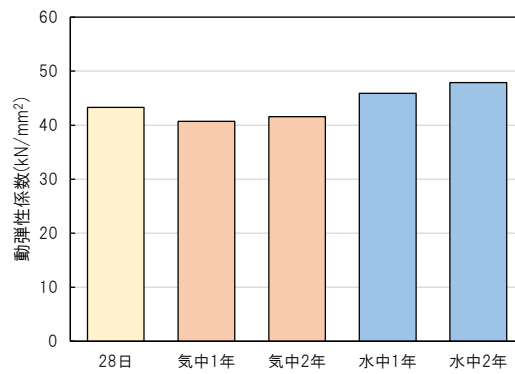
図 5.2-21 2020 年度から 2022 年度まで実施した力学試験結果のまとめ (1)



(a) 各材齢における動ポアソン比



(b) 各材齢における動せん断弾性係数



(c) 各材齢における動弾性係数

図 5.2-22 2020 年度から 2022 年度まで実施した力学試験結果のまとめ (2)

(b) 透水性

(i) アウトプット法

気中養生試験体 10 点に対してアウトプット法による透水試験を実施した。0.5 MPa の水圧で試験を行い、流出液は試験体の排出面に配したビニール容器で回収して、1 週間ごとに流出液の回収重量を計測した。回収した流出液の重量や試験体の寸法などの測定結果を参考文献（コンクリート総覧、1998）に記される式（式 5.2-3）に代入して透水係数を算出し、3 週間（3 点）分の平均値を本試験の結果とした。アウトプット法による透水係数の算出結果を表 5.2-15 に、試験体高さの異なる気中養生試験体の透水係数の比較結果を図 5.2-23 にそれぞれ示す。なお、図表に記載した試験体名は、気中養生試験体は「気」、水中養生試験体は「水」と略し、続けて「試験体 No.」を示した。また、透水液の浸透面を変質部とした試験体を「変」、透水液の浸透面を健全部とした試験体を「健」と示した。さらには高さ 25 mm とした試験体は同一試験体 No.から変質面で 2 体、健全面で 2 体採取しているため、試験体名の最後に①もしくは②と記載した。

透水試験の結果、浸透面および試験体の高さにかかわらず、透水係数の差はオーダーレベルでは確認されず、同一条件で養生した試験体の変動の範囲であると判断した。また、溶液の浸透面の状態が透水係数に与える影響を同一試験体で比較すると、「気-19」では浸透面を変質部とした方が健全部とした試験体より透水係数が大きい結果となった。一方、「気-20」では浸透面を変質部とした試験体の透水係数が健全部より大きい「気-20 変①」と小さい「気-20 変②」に分かれる結果となった。しかし、浸透面の違いによる差は前述の同一条件で養生した試験体の変動の範囲と同程度であり、明らかな影響ではなかった。

さらに、試験体の高さが透水係数に与える影響についても、透水係数は変動の範囲内であった。式 5.2-1 に示すように、試験体の高さと流出量は比例関係にあるため、同一条件の試験体であれば高さによって透水係数は変動しない。本試験においても、試験体の高さが短くなると流出量が多くなっており、透水係数についても変動の範囲内であったことから、既往の研究事例と同様な傾向を示した。

$$K = \rho \times ((Q \times h) / (P \times A))$$

式 5.2-3

K：透水係数 (cm/s)、本試験では「m/s」で示す。

ρ ：水の単位質量 (kg/cm³)、本試験では「0.001 kg/cm³」とする。

Q：流入量または流出量 (cm³/s)

h：試験体長さ (cm)、本試験では「高さ」で示す。

P：試験水圧 (kgf/cm²)、本試験では「MPa」で示す。

A：供試体の断面積 (cm²)

表 5.2-15 アウトプット法による透水係数の算出結果（気中養生試験体）

試験条件		寸法(mm)		水圧 (MPa)	流出量×10-9(kg/s)			透水係数×10 ⁻¹² (m/s)			
試験体名	サイズ	直径※1	高さ※2		1	2	3	1	2	3	平均
気-15 変	H50	49.7	49.9	0.5	6.28	5.83	5.42	3.17	2.94	2.74	2.95
気-16 変	H50	49.8	51.2	0.5	4.73	4.38	4.12	2.44	2.25	2.12	2.27
気-17 健	H50	49.7	51.9	0.5	6.26	5.76	5.46	3.28	3.02	2.86	3.06
気-18 健	H50	49.7	51.0	0.5	4.75	4.39	4.13	2.45	2.26	2.13	2.28
気-19 変	H50	49.7	49.9	0.5	10.1	10.4	10.4	5.08	5.26	5.22	5.19
気-19 健	H50	49.7	51.4	0.5	9.42	8.19	7.72	4.89	4.25	4.01	4.39
気-20 変①	H25	49.7	24.3	0.5	13.2	13.9	13.6	3.23	3.42	3.35	3.33
気-20 変②	H25	49.7	25.4	0.5	8.22	8.34	8.65	2.11	2.14	2.22	2.16
気-20 健①	H25	49.8	24.9	0.5	11.9	12.3	13.0	2.99	3.10	3.25	3.11
気-20 健②	H25	49.7	25.3	0.5	10.5	10.6	11.4	2.68	2.70	2.91	2.76

※1 コア供試体の上下高さの 1/4 付近及び高さの中央付近で、互いに直交する 2 方向の直径を 0.1mm まで測定し、その平均値を供試体の平均直径とした。

※2 コア供試体の高さは、4 か所において 0.1mm まで測定し、最大値と最小値の平均値を供試体の平均高さとした。

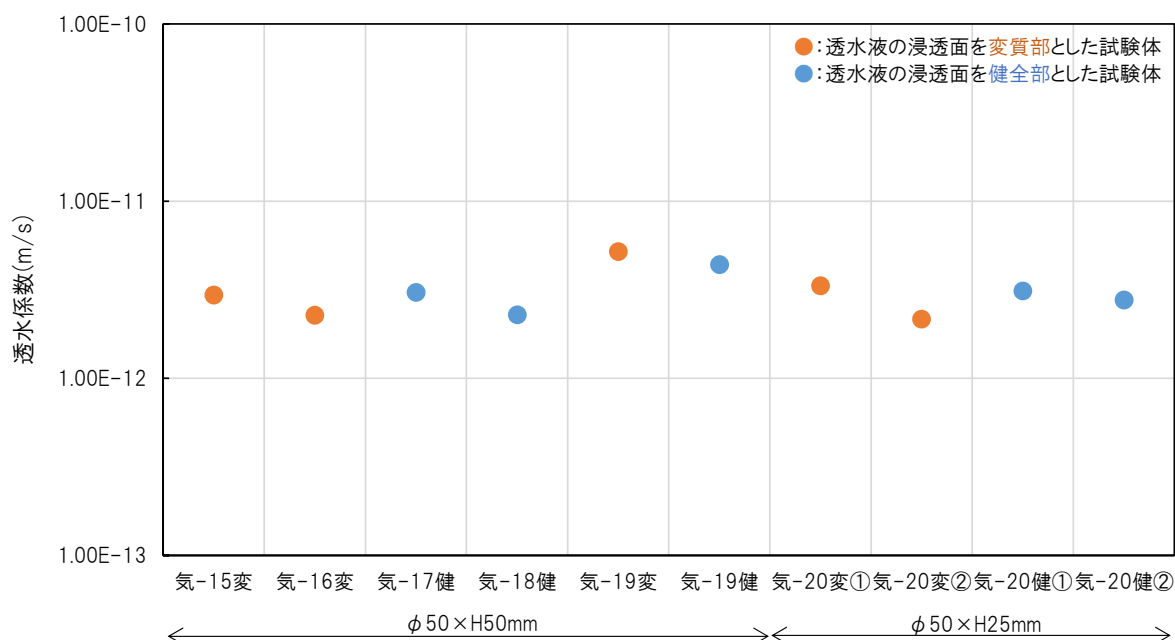


図 5.2-23 気中養生試験体の透水係数（3 点平均）の比較結果

(ii) インプット法

予備検討によりアウトプット法でのデータ取得が困難と判断した水中養生試験体 10 点に対してインプット法による透水試験を実施した結果を表 5.2-16 に示す。この方法では、0.5 MPa の水圧を数週間保持し、接液面（加圧面）から浸透した溶液の深さを計測し、拡散係数を算出するが、水中養生試験体は排出面から溶液が流出しないため、アウトプット法のように流出した溶液の重量より直接透水係数を算出することができない。

そこで、本試験では 2 つの方法を用い透水係数を算出した。1 つ目の算出方法は参考文献（コンクリート総覧, 1998）に記載されている浸透水量法を参考に、溶液が浸透した深さを単純に透水試験で試験体に浸透した水の体積とする仮定条件を設けた上での透水係数の算出方法である。この方法では、定常状態として透水係数を算出していることとなるため、実際より大きくなる傾向にある。2 つ目の算出方法は、参考文献（村田, 2002）を参考にし、本試験の静弾性係数、ポ

アソソ比および空隙率の平均値と各試験体の拡散係数から透水係数を算出する方法である。インプット法による透水係数の算出結果を表 5.2-16 に示す。なお、拡散係数の算出には、参考文献（コンクリート総覧，1998）に記される式（式 5.2-4）を用いた。仮定条件を設け算出した透水係数の算出には式 5.2-5、拡散係数から算出した透水係数の算出には式 5.2-6 を用いた。

拡散係数の算出結果を図 5.2-24 に、透水試験の算出結果を図 5.2-25 に示す。透水試験の結果、図 5.2-26 に示すように、インプット法により、実施した試験体すべてに水の浸透を目視で確認できた。水の浸透深さは、「水-17 健」で若干浅く、「水-19 健」で若干深くなったため、その結果が拡散係数にも現れたが、その他の試料においては同一オーダーの拡散係数であり、同一条件で養生した試験体の変動の範囲内であると判断した。また、溶液の浸透面の状態や試験体の高さが拡散係数に与える影響を同一コア試料で比較すると、「水-19」では浸透面を健全部とした方が変質部とした試験体より拡散係数が大きい結果となったが、「水-20」では浸透面を変質部とした試験体の透水係数が健全部より大きくなっており、明確な傾向は認められなかったが、溶脱が考えられる変質部がごく表層のみあることから、水中養生試験体については浸透面による差は小さいと推測した。また、2022 年度は試験体の高さを変えて透水試験を実施したが、拡散係数の算出では試験体の高さを考慮しておらず、試験期間と試験期間中に水が浸透した深さにより算出するため、試験体の高さが拡散係数に与える影響についてはないと考えられる。

本試験では、気中養生試験体と水中養生試験体の水密性を比較するために、水中養生試験体においても透水係数を算出したが、インプット法から算出した透水係数はアウトプット法と条件が異なるため参考値の範囲と考えている。予備検討では、気中養生試験体と水中養生試験体ともにアウトプット法で試験を実施し、溶液が流出した気中養生試験体と溶液が流出しなかった水中養生試験体では水密性が異なることは明白であり、透水係数の算出結果においても水中養生試験体の方が低い値を示した。

透水係数の算出方法の違いを比較すると、流入量から算出した透水係数（式 5.2-3）の方が拡散係数から算出した透水係数（式 5.2-4）より 1 桁高い値を示した。流入量から透水係数を算出する方法では流速を一定とした定常状態と仮定しているため、浸透面からの距離がどの深さであっても圧力は一定と考えられている。一方、拡散係数から算出する方法は、時間や浸透面からの深さによって流速が変化することとしており、試験開始直後は水の浸透が速いが、深部に向かうにつれて圧力が低下していき、水の浸透が遅くなることを反映している。以上の違いにより、流速を一定とした流入量による透水係数と拡散係数から算出する透水係数では差が生じたと推察される。

$$\beta_i^2 = \alpha \times (D_m^2 / (4 \times t \times \xi^2)) \quad \text{式 5.2-4}$$

β_i : 拡散係数 (cm²/s)、本試験では「m²/s」で示す。

α : 水圧を加えた時間に関する係数 (=t^{3/7})

D_m : 水の浸透深さ (cm)

t : 水圧を加えた時間 (s)

ξ : 水圧の大きさに関する係数 (水圧 0.5 MPa の時、0.724)

$$K = \rho \times (q/s) \times (D_m / (P \times A)) \quad \text{式 5.2-5}$$

K : 透水係数 (cm/s)、本試験では「m/s」で示す。

ρ : 水の単位質量 (kg/cm³)、本試験では「0.001 kg/cm³」とする。

P : 圧力 (kgf/cm²)

A : 断面積 (cm²)
q : 流入量 (cm³)
s : 試験期間 (s)

$$\beta_t^2 = kK/\rho$$

式 5.2-6

ここで、k : 平均体積弾性率 (kgf/cm²) は以下の式で算出。

$$\frac{1}{k} = \frac{v}{k_c} + \frac{(1-v)}{k_w}, \quad k_c = \frac{E_c}{3(1-2\gamma)}$$

kc : コンクリートの体積弾性係数 (kN/mm²)

kw : 水の体積弾性係数 (kN/mm²)、本試験では「2.45 k/mm²」とする。

v : コンクリートの体積比、本試験では「1-空隙量」とし、「0.9042」とする (空隙量は空隙率の平均)

Ec : コンクリートの静弾性係数 (kN/mm²)、本試験では「40.5 k/mm²」とする (試験結果)

γ : ポアソン比、本試験では「0.230」とする (試験結果)

表 5.2-16 インプット法による透水係数の算出結果 (水中養生試験体)

試験条件		拡散係数の算出条件		拡散係数 ×10 ⁻⁸ (m ² /s)	透水係数への換算条件			透水係数×10 ⁻¹³ (m/s)	
試験体名	サイズ	水圧 (MPa)	平均浸透 深 さ ※ ¹ (mm)		直径※ ² (mm)	流入量※ ³ (g)	試験期間 (秒)	式 1.2-3 から算出 ※ ⁴	式 1.2-4 から算出 ※ ⁵
水-15 変	H50	0.5	23.30	5.55	49.9	3.84	1207800	7.43	0.41
水-16 変	H50	0.5	26.97	7.43	49.8	2.96	1207800	6.65	0.55
水-17 健	H50	0.5	15.86	2.57	49.9	4.21	1207800	5.54	0.19
水-18 健	H50	0.5	29.86	9.11	49.9	5.39	1207800	13.4	0.67
水-19 変	H50	0.5	21.93	4.91	49.7	3.87	1207800	7.10	0.36
水-19 健	H50	0.5	35.14	12.6	49.8	4.56	1207800	13.4	0.93
水-20 変①	H25	0.5	21.47	7.01	49.8	3.20	601200	11.5	0.52
水-20 変②	H25	0.5	21.48	7.02	49.8	2.62	601200	9.42	0.52
水-20 健①	H25	0.5	20.44	6.36	49.7	2.60	601200	8.90	0.47
水-20 健②	H25	0.5	20.53	6.41	49.7	2.66	601200	9.14	0.47

※1 割裂面における水の浸透深さを 5 箇所測定した平均値とする。

※2 コア供試体の上下高さの 1/4 付近及び高さの中央付近で、互いに直交する 2 方向の直径を 0.1mm まで測定し、その平均値を供試体の平均直径とする。

※3 透水試験後に試験体重量が増加した分 (計算上は g を cm³ と仮定する)

※4 溶液が浸透した深さを供試体の高さ、浸透した水の重量を移動する水の体積と仮定して算出した透水係数。

※5 本試験結果の静弾性係数、ポアソン比、空隙率の平均値と各試験体の拡散係数から算出した透水係数。

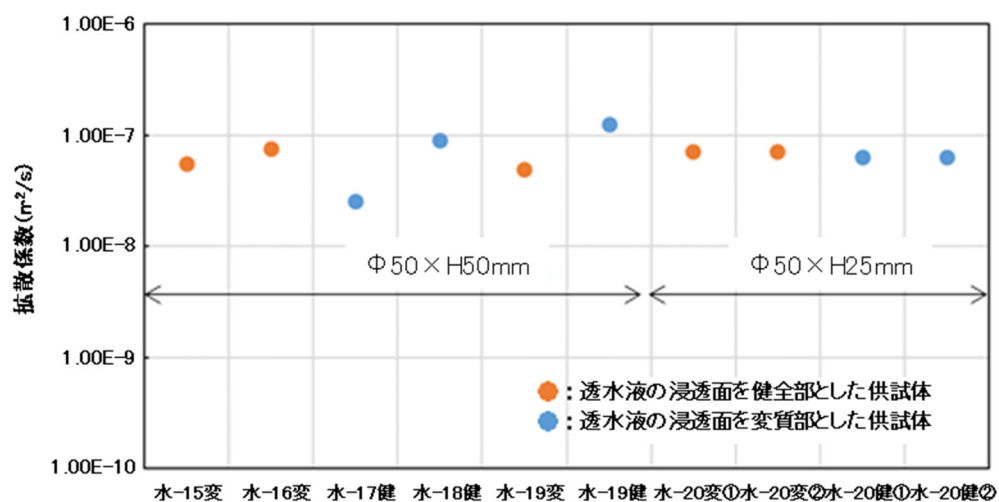


図 5.2-24 拡散係数の算出結果

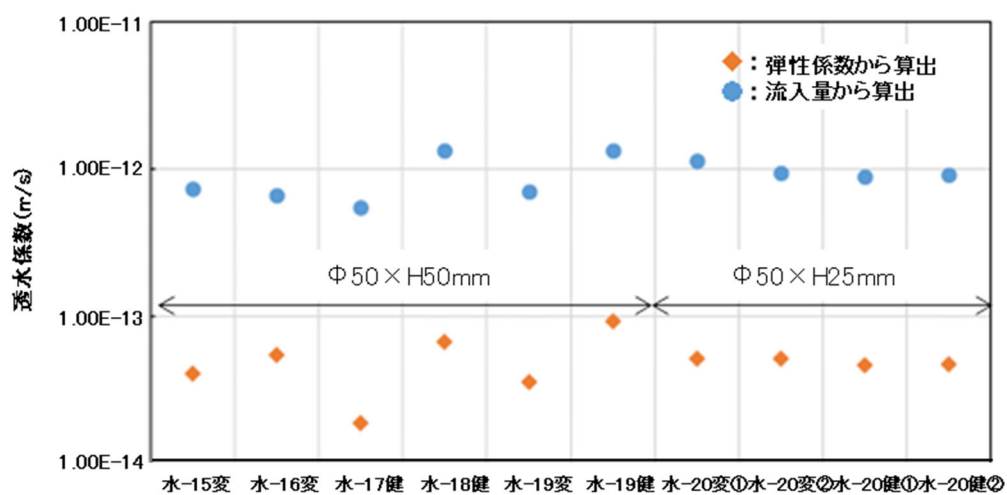
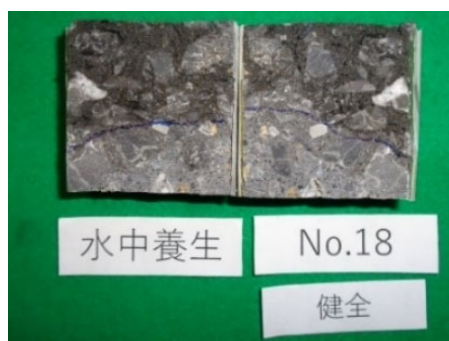


図 5.2-25 透水係数の算出結果



(a) 健全部



(b) 変質部

図 5.2-26 インプット法による透水試験体の浸透状況

(iii) 地盤工学会基準（JGS 0312-2018）に基づく透水試験

表 5.2-17 に供試体情報を示す。また、
表 5.2-18 に加圧条件を示す。

表 5.2-17 供試体情報

		試料番号							
		気 -21- 変①	気 -21- 変②	気 -21- 健①	気 -21- 健②	水 -21- 変①	水 -21- 変②	水 -21- 健①	水 -21- 健②
寸 法	高さ平均値 (mm) *	23.3	23.2	24.3	24.6	22.9	25.0	24.3	24.5
	直径平均値 (mm) *	49.6	49.6	49.6	49.6	49.7	49.8	49.8	49.7
	断面積 (mm ²)	1932	1930	1936	1930	1944	1945	1945	1942
	体積 (mm ³)	45020	44799	47086	47520	44432	48695	47172	47562

*計測は小数点以下第 2 位まで

表 5.2-18 加圧条件（高さ 25 mm の場合の条件設定値）

流入側 (kPa)	300
流出側 (kPa)	0
設定動水勾配 (-)	1227

透水試験の結果を表 5.2-19 および図 5.2-27 に取りまとめた。さらに試験中の透水係数の経時変化図を図 5.2-28 に、図 5.2-29 には同じく試験中の供試体への注水/排水流量の経時変化図を示す。気中養生した 4 供試体の試験結果は 10^{-12} m/s オーダーであり、浸透面を変質部とした場合と健全部とした場合にオーダーが変わるような極端な差は認められなかった。ただし、1 本高さ 10 cm の供試体を 4 分割してそれぞれの試験体を作成しており、隣り合う供試体、すなわち「気-21 変①」と「気-21 健①」、および「気-21 変②」と「気-21 健②」を比較すると、いずれも健全部から通水した供試体の方が透水係数は小さい結果となった。さらに図 5.2-29 に示した注水量と排水量の推移を確認すると、「気-21 変①」を除いた 3 供試体では注水量と排水量は 10%未満（地盤工学会基準の目安は 50%以内）であり、精度の高い測定が実現できている。

水中養生した供試体については 10^{-13} ~ 10^{-14} m/s オーダーの透水係数が得られているものの、図 5.2-28 に経時変化を示しているように時間変化に伴う透水係数のばらつきが収束しているとはいえない状況である。試験の具体的な状況として、水中養生供試体への注水流量は 0.01 cc/日のオーダーであってわずかな目盛の読みによって透水係数算出結果が変動している。また注水量と排水量のバランスも取れておらず、完全飽和に向けた過渡的な状況にあるものと考えられる。

表 5.2-19 JGS 0312-2018 に基づく透水係数算出結果

試験体名	透水係数(m/s)			
	1	2	3	平均
気-21 変①	2.13E-12	2.05E-12	1.45E-12	1.88E-12
気-21 変②	5.68E-12	5.48 E-12	5.68 E-12	5.61E-12
気-21 健①	9.73E-12	9.31E-13	9.51E-13	9.52E-13
気-21 健②	3.04E-12	2.96E-12	3.04E-12	3.01E-12
水-21 変①	1.98E-14	1.98E-14	1.22E-14	5.39E-14
水-21 変②	1.08E-14	3.25E-14	2.97E-14	2.43E-14
水-21 健①	4.20E-14	4.19E-14	7.18E-14	5.19E-14
水-21 健②	3.18E-14	3.18E-14	1.45E-14	2.60E-14

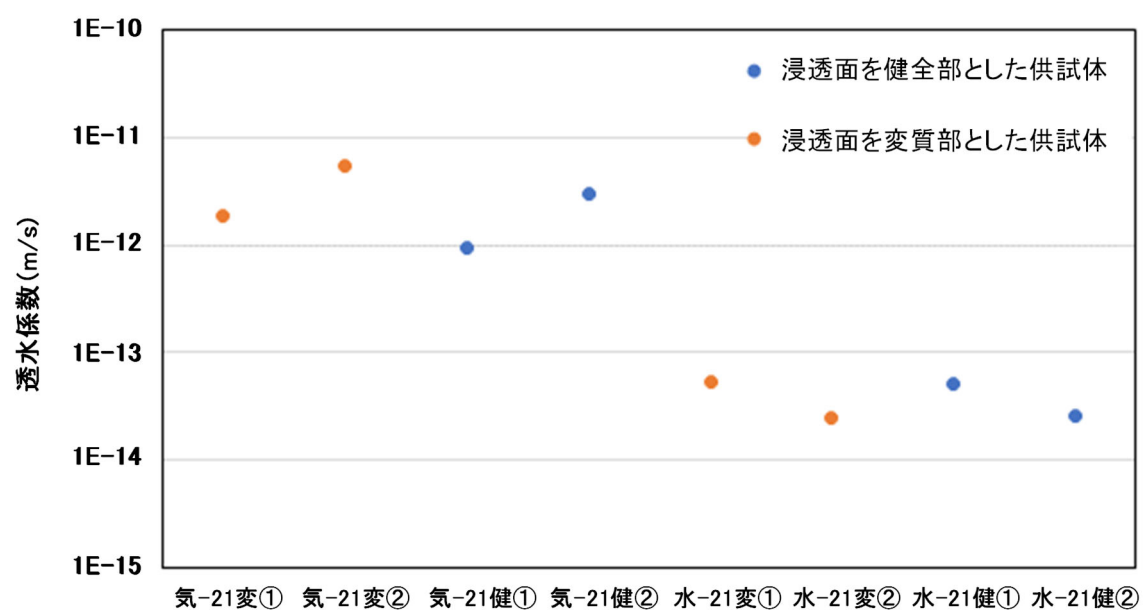
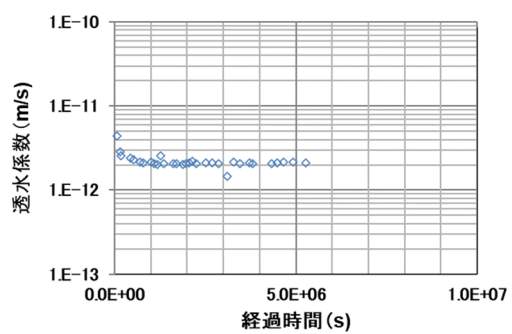
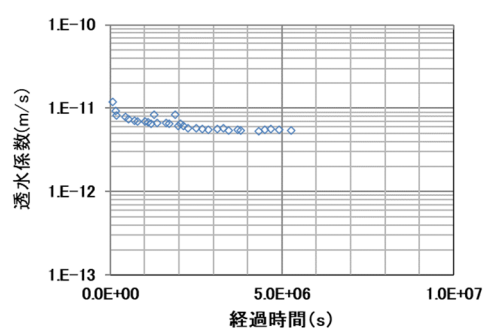


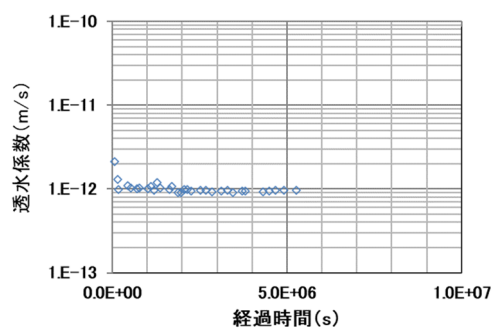
図 5.2-27 地盤工学会基準に基づく透水係数（3点平均）の比較結果



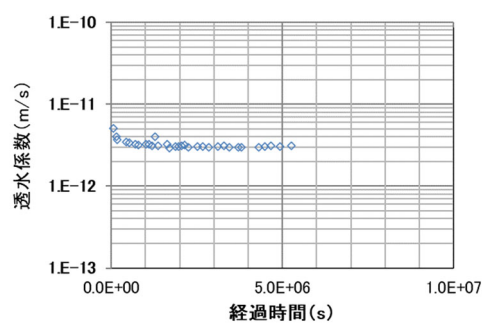
(a) 気-21 変①



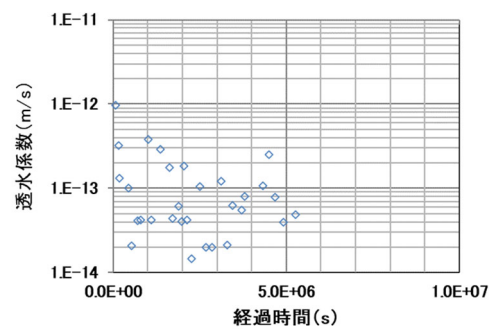
(b) 気-21 変②



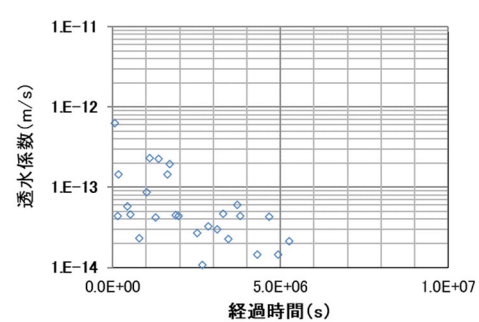
(c) 気-21 健①



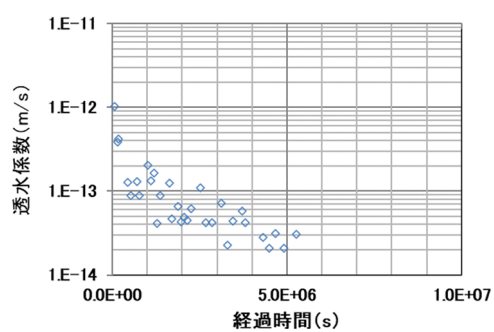
(d) 気-21 健②



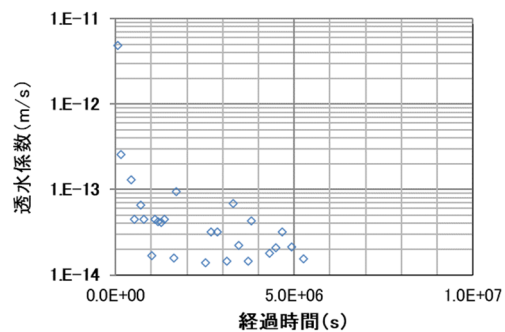
(e) 水-21 変①



(f) 水-21 変②

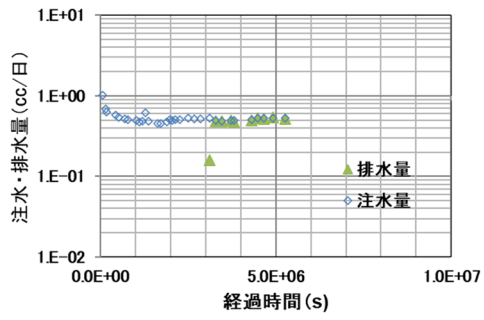


(g) 水-21 健①

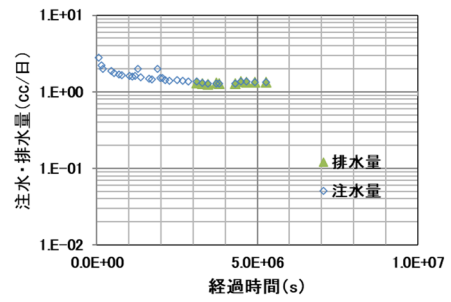


(h) 水-21 健②

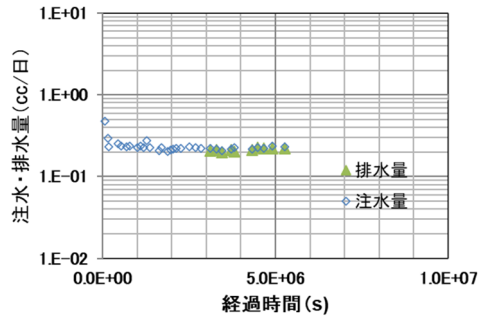
図 5.2-28 透水係数の経時変化



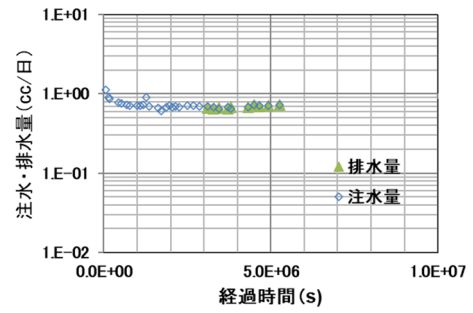
(a) 気-21 変①



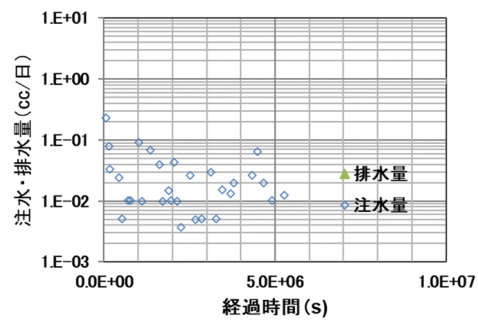
(b) 気-21 変②



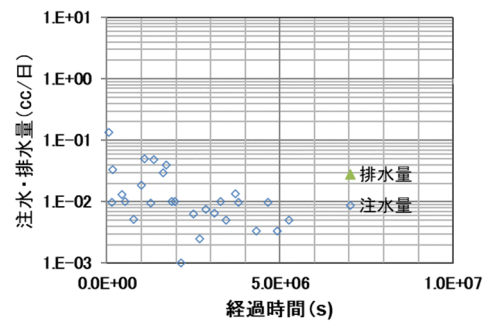
(c) 気-21 健①



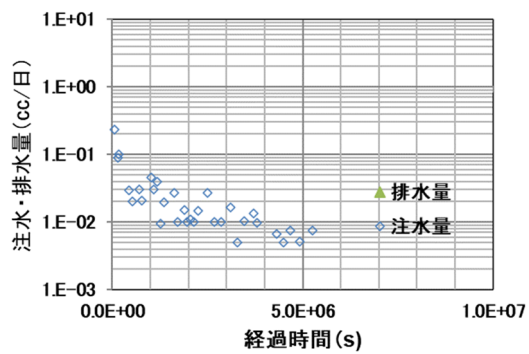
(d) 気-21 健②



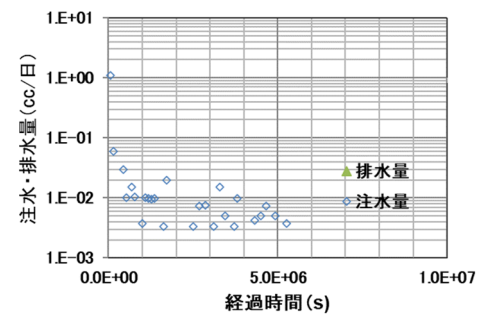
(e) 水-21 変①



(f) 水-21 変②



(g) 水-21 健①



(h) 水-21 健②

図 5.2-29 流入出量の経時変化

(iv) 吹付けコンクリートの透水性のまとめ

気中養生供試体に対して適用したアウトプット法は、地盤工学会基準の試験に比べて供試体の上下端面での水位変動の評価や、供試体飽和状況の確認についての厳密性に欠けるものの、本検討における試験結果はほぼ同等の透水係数の値が得られている。これはまず水位変動の評価に関しては、試験の背圧（注水側の水圧）を 0.5 MPa という土質関係の透水試験よりも大きな値を作用させていることから、供試体の上下端面で生じうる数 cm 程度（ 1 kPa 以下）の水位変動の影響が相対的に小さいためと考えられる。飽和の確認についても、アウトプット法では規格・基準として飽和を確認する手段は提示されていないものの、本検討では事前に 1 週間浸水させたことである程度の飽和状態に達したものと考えられる。今後の透水試験方法としても、ある程度大きな注水側水圧を作用させ、経験的に十分と想定される飽和期間を確保することで、 10^{-12} m/s オーダーの透水係数であればアウトプット法の試験によってある程度の測定精度は確保できるものと想定できる。

一方、水中養生供試体に対して適用したインプット法に関しては、図 5.2-25 に示したように弾性係数から算出した透水係数と浸透深さ（流入量）から算出した透水係数との間に 1 オーダー程度の差があり、いずれの値が正しいかという判断もできない状況であった。水の浸透問題に関してより厳密な試験法である地盤工学会基準の試験においても、基準で示されている適用限界下限値 10^{-13} m/s を下回る値が推定されていることから、水中養生供試体の精密な透水係数評価は困難な課題であることを改めて確認した。

(c) 空隙率

水銀圧入式ポロシメータの測定結果を表 5.2-20 に、各試験体の空隙率を図 5.2-30 に示す。養生条件の違いによる健全部の空隙径分布の比較を図 5.2-31、気中養生試料における空隙径分布を図 5.2-32、水中養生試料における空隙径分布を図 5.2-33 に示す。

健全部の空隙率を養生条件で比較すると、気中養生試験体と水中養生試験体ではほとんど同程度の空隙率であった。一方、図 5.2-31 に示す空隙径分布で比較すると、水中養生試料は、空隙径 $0.01\ \mu\text{m}$ 以下の空隙が多く存在しているのに対し、気中養生試料は空隙径 $0.01\sim 0.1\ \mu\text{m}$ の空隙径が多く存在している結果が認められた。これらの空隙径分布により、空隙率が同程度であっても気中養生試料より水中養生試料の方がセメントの水和反応が進み、より緻密な構造となっているものと推定される。また、水中養生試料の方が気中養生試料に比べて緻密な構造のため、強度特性も水中養生試料の方が気中養生試料より大きくなったと考えられる。

変質部と健全部を比較すると、気中養生試料の空隙率は、「気-11」を除き、変質部の方が健全部より大きくなる傾向を示した。また、図 5.2-32 に示す空隙径分布を比較すると、変質部では空隙径 $0.01\sim 0.1\ \mu\text{m}$ の空隙が健全部よりも多く、 $0.01\ \mu\text{m}$ 以下の微細な空隙が健全部よりも減少しており、この傾向はすべての試料で同様に確認できた。HFSC の主要な水和物 C-S-H は、数 nm の微細な空隙を有する。気中養生試料の変質部は中性化が進んだ部分であり、C-S-H が中性化して分解したことにより、C-S-H が有する $0.01\ \mu\text{m}$ の空隙が減少し、それ以上の大きな空隙が増加したと考えられる。気中養生試料において、変質部の空隙径分布から健全部に比べて微細な空隙の減少と大きな空隙の増加を確認でき、これらの空隙径分布の差が概ね空隙率にも表れたと考えられる。材齢 1 年から材齢 2 年にかけて中性化が進んだことにより、大きな空隙のある変質部が試験体中に増加し、圧縮強度の低下につながったと考えられる。

一方、水中養生試料では、「水-10」、「水-12」で変質部の方が健全部より空隙率が大きくなっていたが、「水-11」、「水-13」および「水-14」で健全部の方が変質部より空隙率が大きくなっており、同一の傾向が認められなかった。図 5.2-33 に示す空隙径分布においても、水中養生試料の健全部と変質部では明確な差が認められず、同程度の空隙径分布が得られた。水中養生試料における変質部はセメント成分の溶脱が考えられるが、変質部がごく表層のみで試料採取範囲が限られているため、変質部と健全部による差がほとんど見られなかったと考えられる。

表 5.2-20 水銀圧入式ポロシメータの測定結果

試料 No.	養生条件	健全部			変質部（供試体境界付近で、炭酸化（中性化）が進行している領域）		
		空隙率	見かけ密度	かさ密度	空隙率	見かけ密度	かさ密度
		(%)	(g/cm3)	(g/cm3)	(%)	(g/cm3)	(g/cm3)
気-10	気中養生	8.14	2.48	2.28	11.32	2.50	2.22
気-11		9.32	2.45	2.22	9.17	2.55	2.31
気-12		9.27	2.43	2.21	10.42	2.52	2.26
気-13		10.42	2.43	2.17	10.77	2.50	2.23
気-14		8.59	2.46	2.25	10.85	2.50	2.23
平均		9.15	2.45	2.23	10.51	2.51	2.25
水-10	水中養生	9.11	2.42	2.20	9.48	2.43	2.20
水-11		10.95	2.38	2.12	10.66	2.43	2.17
水-12		8.16	2.47	2.27	9.59	2.44	2.20
水-13		9.68	2.42	2.19	8.80	2.46	2.24
水-14		10.00	2.43	2.19	9.24	2.45	2.22
平均		9.58	2.42	2.19	9.55	2.44	2.21

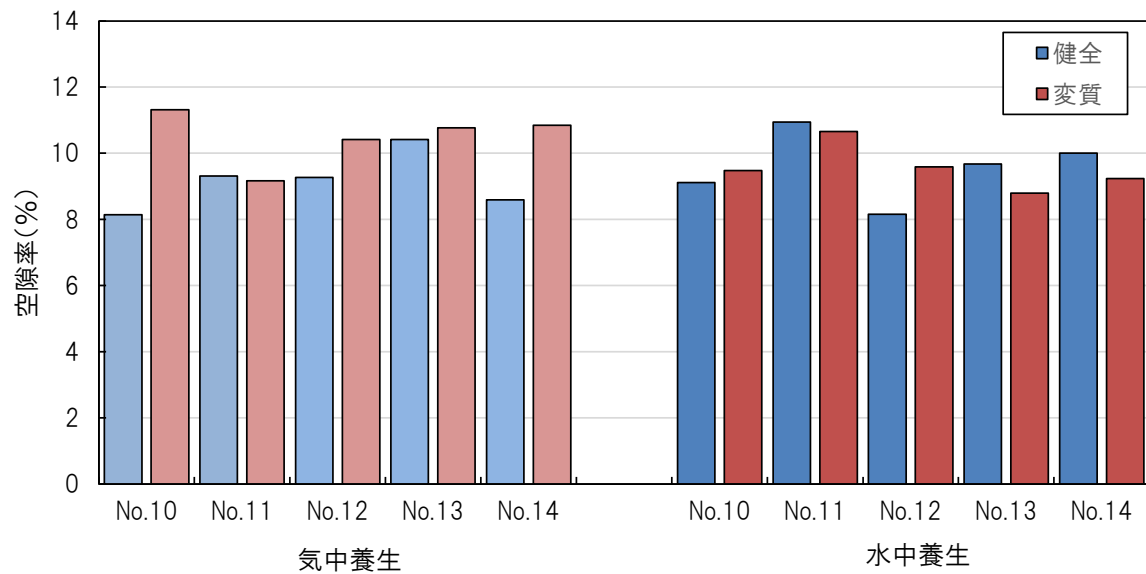
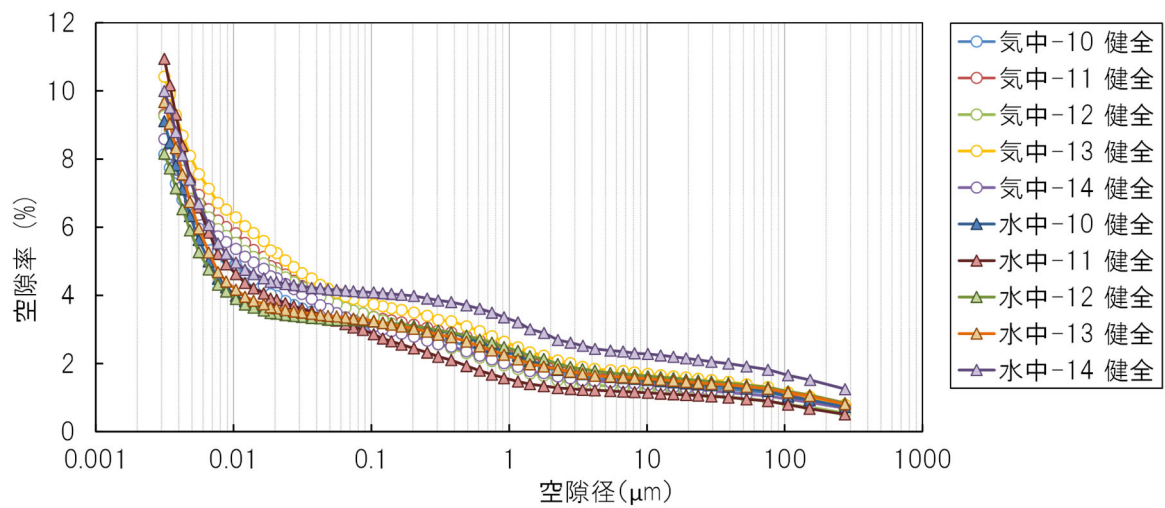
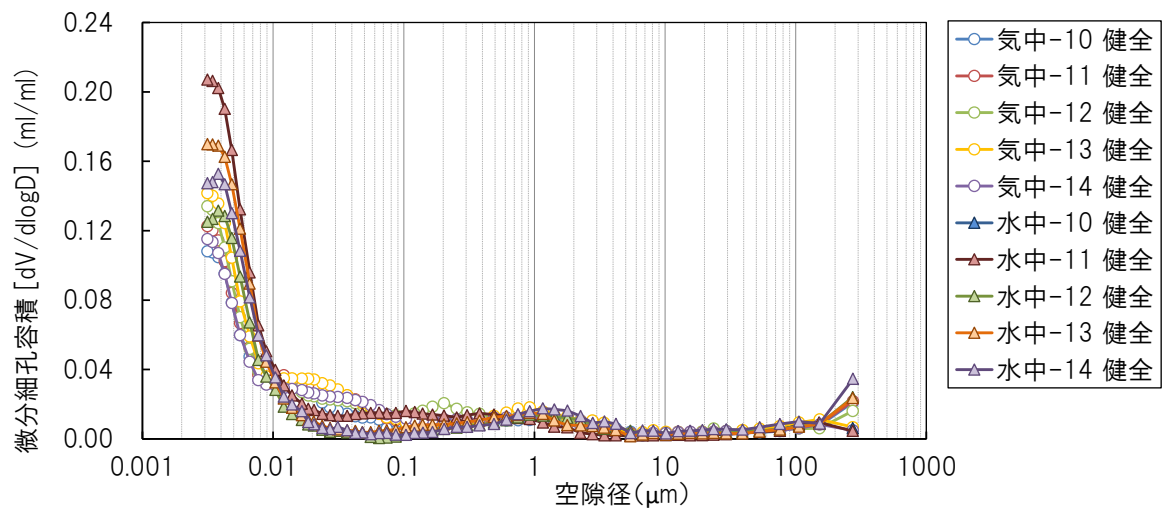


図 5.2-30 各試料の空隙率

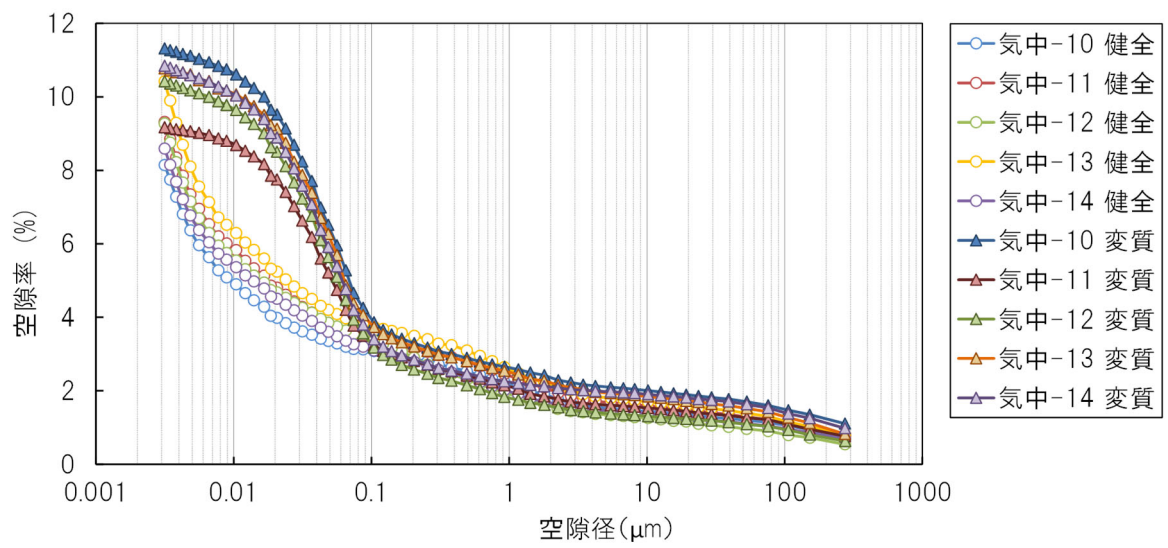


(a) 累積空隙率

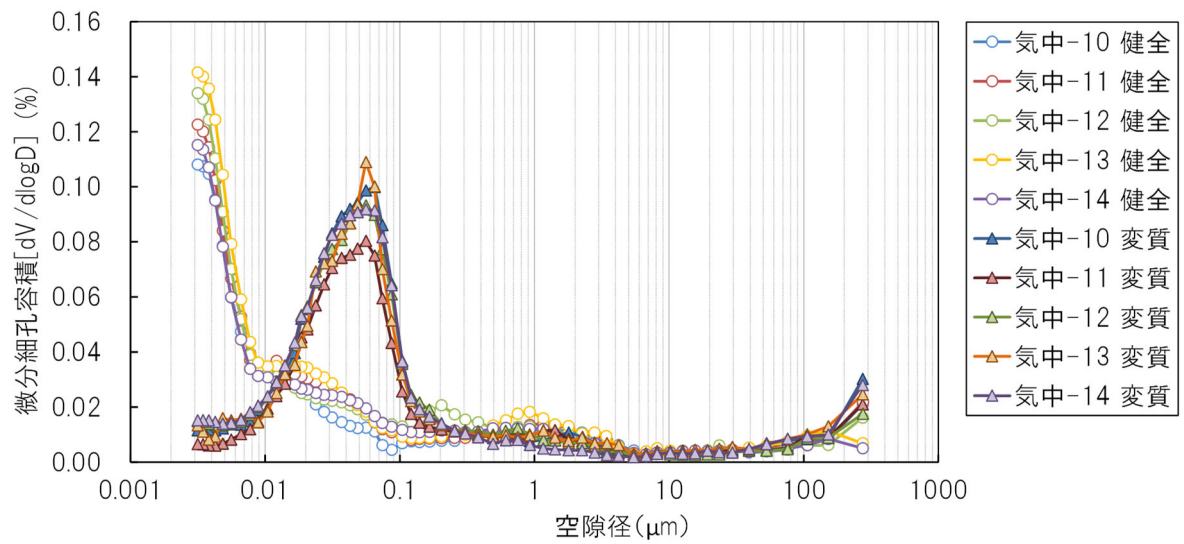


(b) 微分細孔容積

図 5.2-31 養生条件の違いによる健全部の空隙径分布の比較

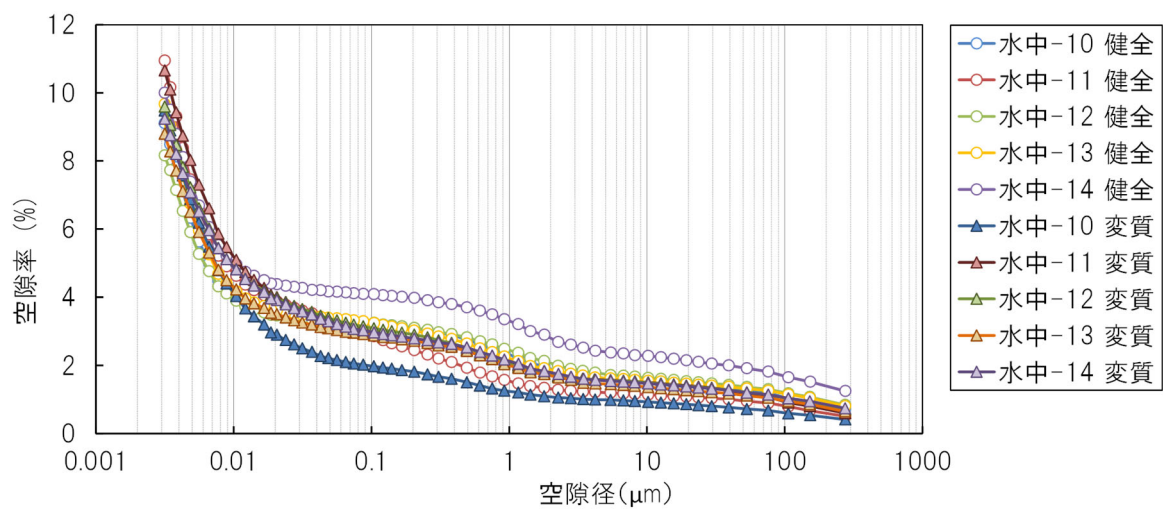


(a) 累積空隙率

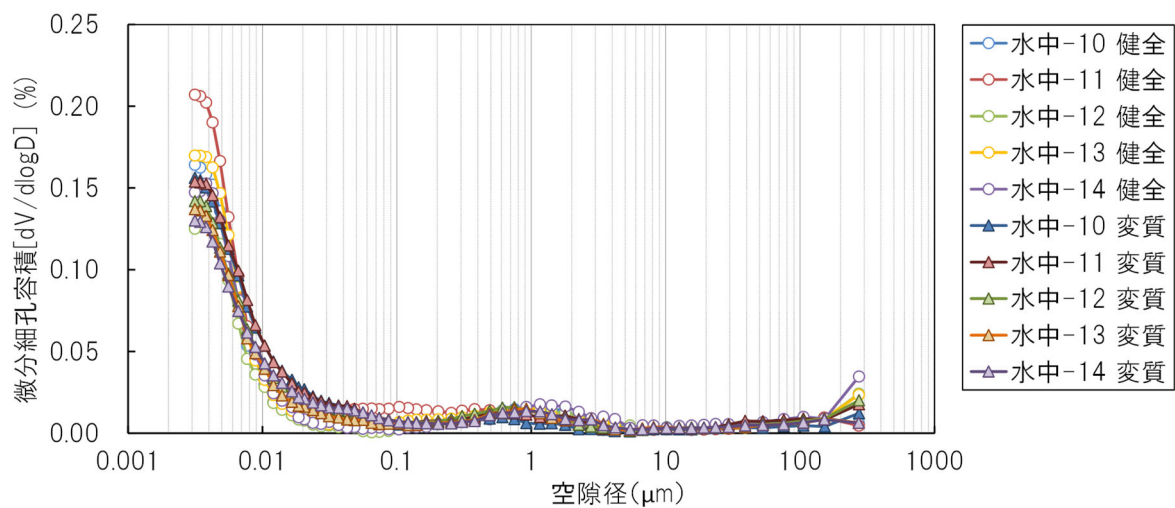


(b) 微分細孔容積

図 5.2-32 気中養生試料の空隙径分布



(a) 累積空隙率



(b) 微分細孔容積

図 5.2-33 水中養生試料の空隙径分布

(d) 炭酸化（中性化）深さ

炭酸化（中性化）深さの測定結果を表 5.2-21 および図 5.2-34、材齢 2 年における中性化速度係数の算出結果を表 5.2-22、フェノールフタレイン噴霧後の断面を図 5.2-35 および図 5.2-36 に示す。なお、表中の断面写真は呈色した部分と呈色していない部分が識別しやすいように加工したものである。

気中養生試験体は、表層から平均 5.7 mm までフェノールフタレインが赤く呈色しない領域が確認され、炭酸化（中性化）していることを確認した。一方、水中養生試験体の中性化深さの平均値は 0.67 mm であり、赤く呈色しない範囲は 1 mm 以下とごく狭い領域であることが確認された。水中養生試験体の場合、炭酸化（中性化）の他にセメント成分の溶脱による変質も想定されたが、いずれの変質もほとんど進んでいないものと考えられる。炭酸化（中性化）は、二酸化炭素濃度の他に、温度や湿度の影響も受ける。温度が高く、湿度が 40～60%程度の条件において中性化が進みやすいことが明らかとなっており、著しく乾燥している状態もしくは濡れている状態では炭酸化（中性化）が進みにくいとされている。水中養生試験体は常に水分を含んでいる状態であるため、中性化が進みにくいため、測定結果もほとんど中性化していない結果となった。

ここで、コンクリートの中性化深さは、経過時間の平方根に比例する以下の式（式 5.2-7）で表される。

$$X = A\sqrt{t} \quad \text{式 5.2-7}$$

ここで、X：中性化深さ（mm）

t：経過時間（年）

A：中性化速度係数（mm/√年）

式 5.2-7 を用いて実測の中性化深さから材齢 2 年における中性化速度係数を算出すると、気中養生試験体の中性化速度係数は 4.04 mm/√年、水中養生試験体の中性化速度係数は 0.67 mm/√年となった。一方、中性化速度係数については、土木学会 コンクリート標準示方書【設計編】において、普通ポルトランドセメント（以下、OPC）を用いたコンクリートなどの実験データに基づいた回帰式で表されている（式 5.2-8）。本試験に用いている試験供試体作成時の吹付けコンクリートの配合を参考にして、単位水量および単位結合材量を式 5.2-8 へ代入して中性化速度係数を予測すると約 4.3 mm/√年と算出された。したがって、気中養生試験体の中性化の進行と式 5.2-8 から算出した中性化速度係数の予測値が同程度であることを確認でき、特異的な現象が生じていないものと考えられる。また、部分的に炭酸化（中性化）深さが大きくなっている箇所が認められたものの、本試験に用いた試験体が HFSC であることや吹付けコンクリートであるため、フライアッシュを用いたコンクリートより中性化の進行が速くなっているといった現象は生じていないと考えられる。

$$\alpha_p = -3.57 + 9.0 \times W/B \quad \text{式 5.2-8}$$

ここに、 α_p ：中性化速度係数の予測値（mm/√年）

W/B：有効水結合材比 = $W / (C_p + k \cdot A_d)$

W：単位体積当たりの水の質量

B：単位体積当たりの有効結合材の質量

Cp：単位体積当たりのポルトランドセメントの質量

Ad：単位体積当たりの混和材の質量

k：混和材の種類により定まる定数（フライアッシュ；k = 0）

表 5.2-21 中性化深さの測定結果

試料 No.	測定結果 (mm)									試験体 平均	養生別 平均
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
気-10	5.85	4.54	6.58	3.03	3.45	4.09	5.94	6.43	4.79	4.97	5.72
気-11	8.60	4.95	4.73	3.64	4.56	4.16	6.08	12.32	4.71	5.97	
気-12	4.75	5.58	6.55	4.82	4.27	4.86	5.35	7.36	4.87	5.38	
気-13	9.90	5.54	6.22	5.49	5.02	4.97	4.45	8.64	5.27	6.17	
気-14	5.50	7.02	5.35	4.34	3.71	4.22	7.02	8.34	9.35	6.09	
水-10	0.61	0.6	0.56	0.70	1.05	0.79	0.85	0.84	0.64	0.74	0.67
水-11	0.61	0.93	1.10	0.30	0.68	0.65	0.91	0.88	0.43	0.72	
水-12	0.91	1.02	0.91	0.45	0.63	0.46	0.30	0.69	0.50	0.65	
水-13	0.35	0.28	0.38	0.27	0.46	0.28	0.26	1.33	0.76	0.49	
水-14	1.13	1.50	1.23	0.31	0.42	0.37	0.69	0.43	0.81	0.77	

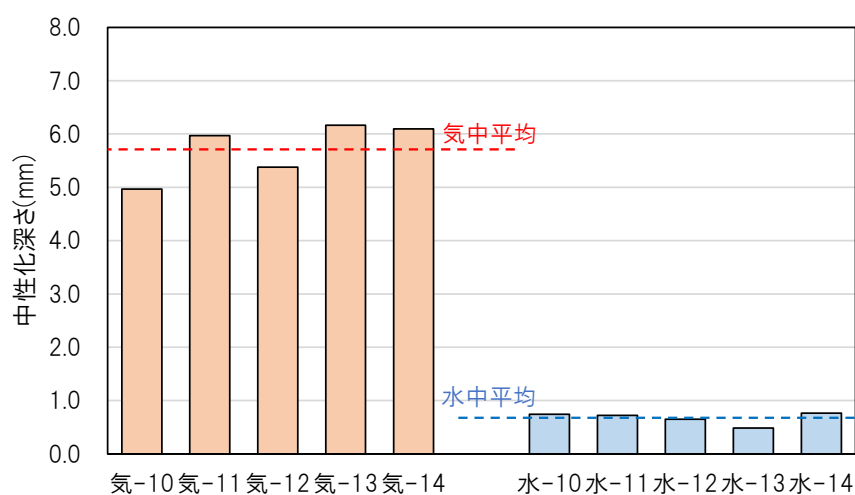
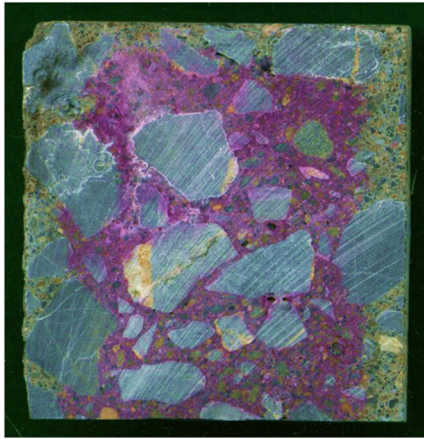


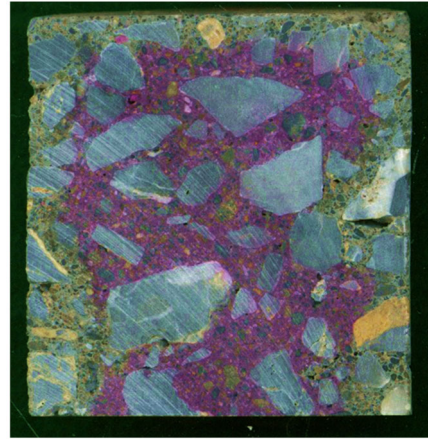
図 5.2-34 中性化深さの測定結果

表 5.2-22 材齢 2 年における中性化速度係数の算出結果

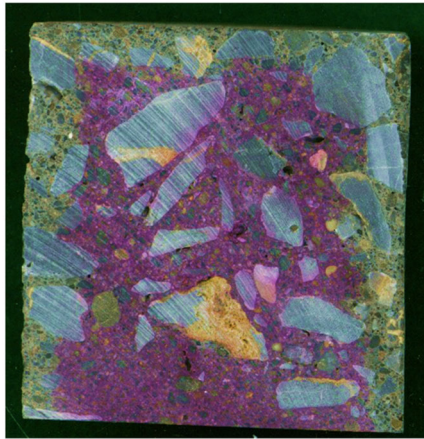
	中性化深さ (mm)	経過時間 (年)	中性化速度係数 (mm√年)
気中養生試験体	5.72	2	4.04
水中養生試験体	0.67	2	0.47
土木学会予測式	—	—	4.31



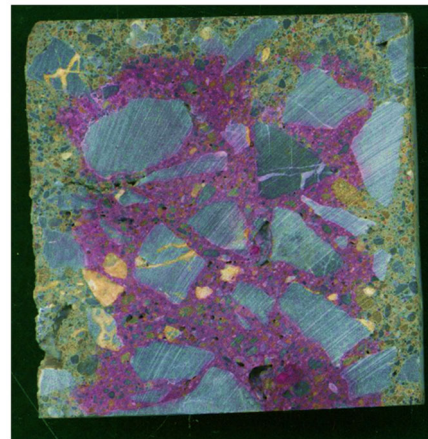
(a) 気中-10



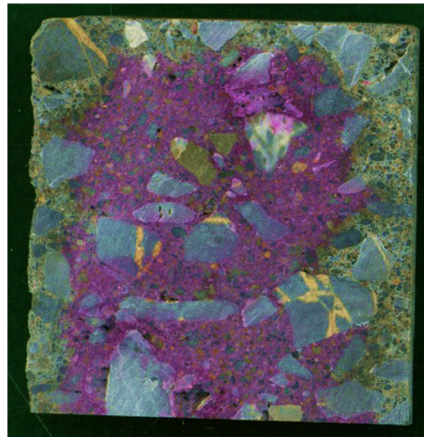
(b) 気中-11



(c) 気中-12



(d) 気中-13



(e) 気中-14

中性化深さ

気中-10:4.97mm

気中-11:5.97mm

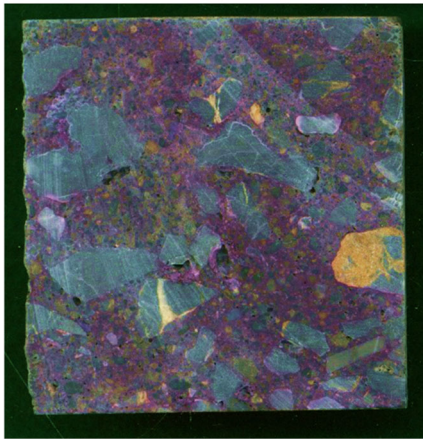
気中-12:5.38mm

気中-13:6.17mm

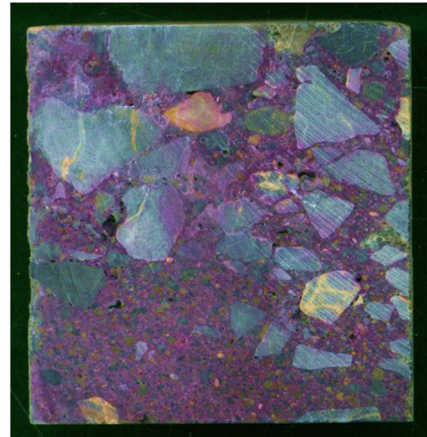
気中-14:6.09mm

(f) 各試料の中性化深さ

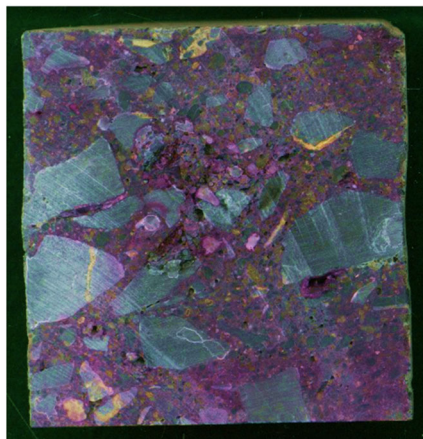
図 5.2-35 気中養生試験体におけるフェノールフタレイン噴霧後の断面（色調を加工）



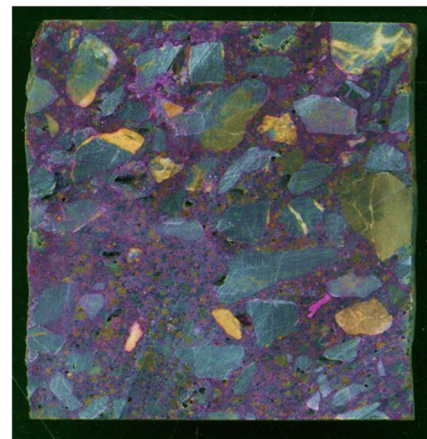
(a) 水中-10



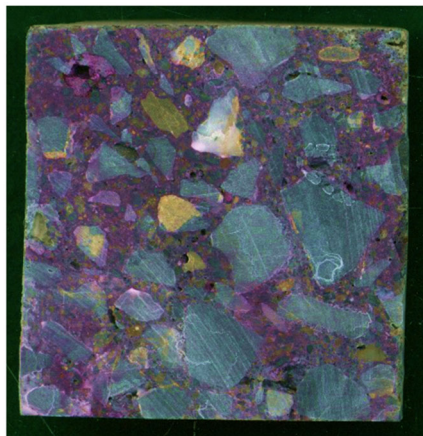
(b) 水中-11



(c) 水中-12



(d) 水中-13



(e) 水中-14

中性化深さ

水中-10:0.74mm

水中-11:0.72mm

水中-12:0.65mm

水中-13:0.49mm

水中-14:0.77mm

(f) 各試料の中性化深さ

図 5.2-36 水中養生試験体におけるフェノールフタレイン噴霧後の断面（色調を加工）

(e) 元素濃度分布

気中養生試料の元素濃度分布の結果を図 5.2-37～図 5.2-40 に示す。なお、カラーバーの元素濃度の単位は、酸化物 (mass%) として示している。

中性化深さの測定結果より、気中養生試料では 5～6 mm 程度中性化していた。中性化領域に相当する表層から約 5 mm の範囲では、CaO 濃度が試料内部より低下している。中性化部では、大気中との二酸化炭素との反応により、Ca 成分を含有する水和物が炭酸化し、炭酸カルシウムとなっていると考えられるが、気中養生の試料であるため Ca 成分が外部へと浸出していることは考えにくい。炭酸化反応の影響により、組織が粗な状態となり空隙が増加したため CaO 濃度が低下して見えているものと推定される。前出の気中養生試料の変質部および健全部の空隙率分布の測定結果においても、健全部では見られない空隙径 0.02～0.1 μm 程度の空隙が変質部では増加していることから整合する結果となっていた。SiO₂ 濃度については違いが分かりにくい、No.10、No.11、No.13 の試料について骨材以外のペースト部分は、表層から 5 mm 程度の範囲で若干濃度が低下して見えている。Ca と同様に、Si 成分の減少ではなく微細構造の影響が表れているものと考えられる。SO₃ 濃度は、中性化している表層の範囲において内部より濃度が低下していることが確認された。中性化部では、Ca(OH)₂ や C-S-H の炭酸との反応の他に、エトリンガイト等のカルシウム硫酸塩水和物も炭酸との反応により分解し、溶解した S が健全部へと移動し、中性化していない領域において S の濃縮が見られると報告されている。SO₃ の濃縮部は本試験結果では確認できないが、表層において S の濃度低下が見られていることから SO₃ を含む水和物の分解が生じているものと推定される。CO₂ 濃度では、中性化が内部に比較して濃度が高くなっている。中性化部では炭酸カルシウムの生成により CO₂ 濃度が増加したことが考えられるが、一方で、空隙が多くなると、試料を樹脂コーティングする際に残る大気の影響を受け CO₂ 濃度は高くなる可能性もあり、CO₂ の濃度分布には両者の影響が表れている可能性もある。

水中養生試料の元素濃度分布の結果を図 5.2-41～図 5.2-44 に示す。なお、カラーバーの元素濃度の単位は、酸化物 (mass%) として示している。

水中養生試料では、固相外部に薄い沈殿層が見られ、炭酸カルシウムであると考えられる。固相内部では、表層から 1 mm 程度の範囲において、CaO 濃度の低下が見られた。この範囲では、水中養生試料においては Ca が養生水へ浸出しているものと考えられる。MgO、Na₂O および K₂O は表層から 0.5 mm 程度で濃度が高い範囲が見られた。地下水成分がコンクリートへと浸透しているものと考えられる。また、気中養生試料では、0.2%以下であった Cl 濃度が、水中養生試料では、0.2～0.4%程度の濃度分布が見られ、気中養生試料よりも濃度が高く現れている。これも養生水である地下水成分の Cl がコンクリートへ浸透したものと考えられる。表層から 0.5 mm 程度の範囲において、CO₂ 濃度が高くなっている。気中養生試料と同様に炭酸カルシウムのような炭酸塩が沈殿している影響および空隙が増加したことによる影響が表れているものと考えられる。

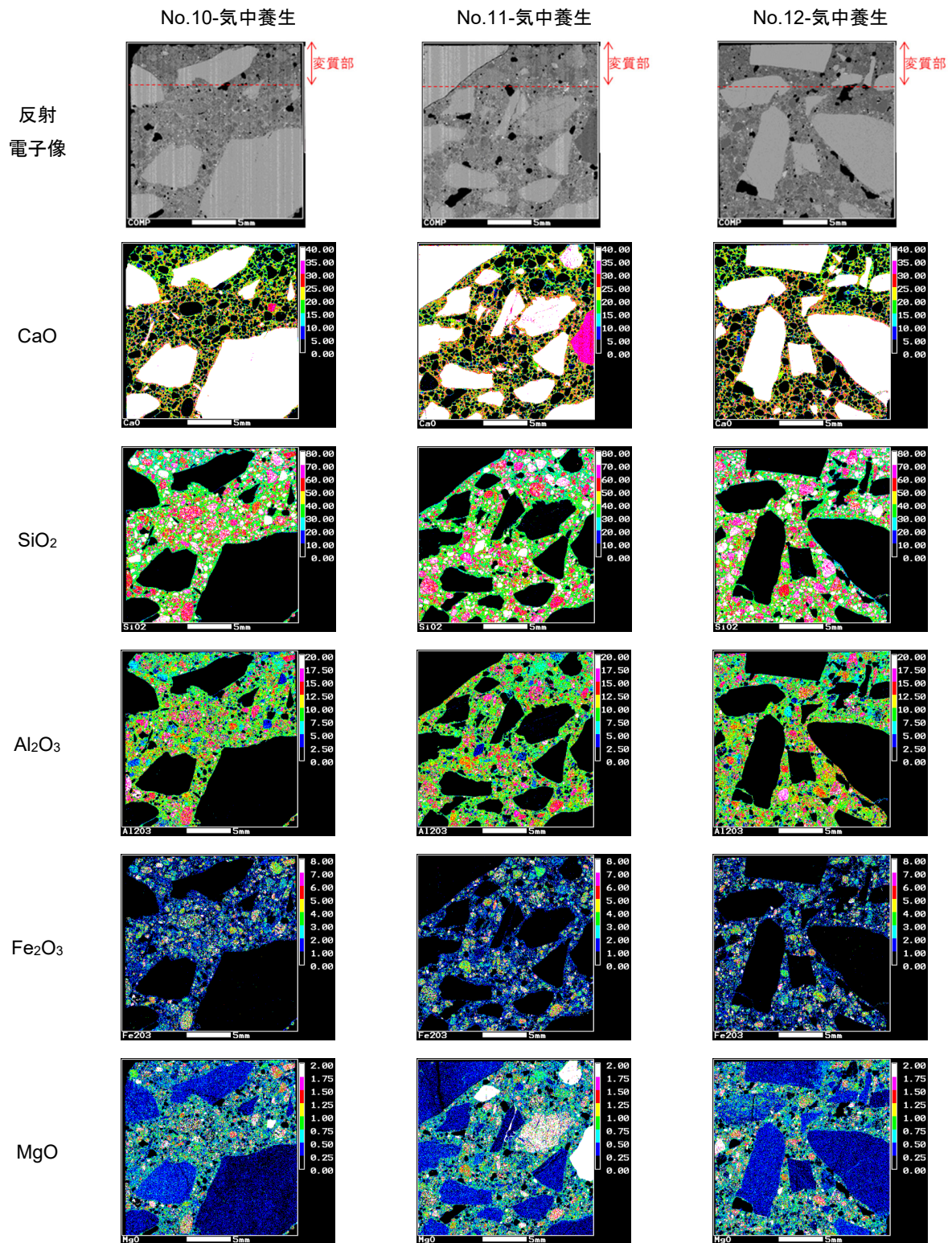


図 5.2-37 No. 10～No. 12 気中養生試料の元素濃度分布 (1/2)
(カラーバーの単位は mass%)

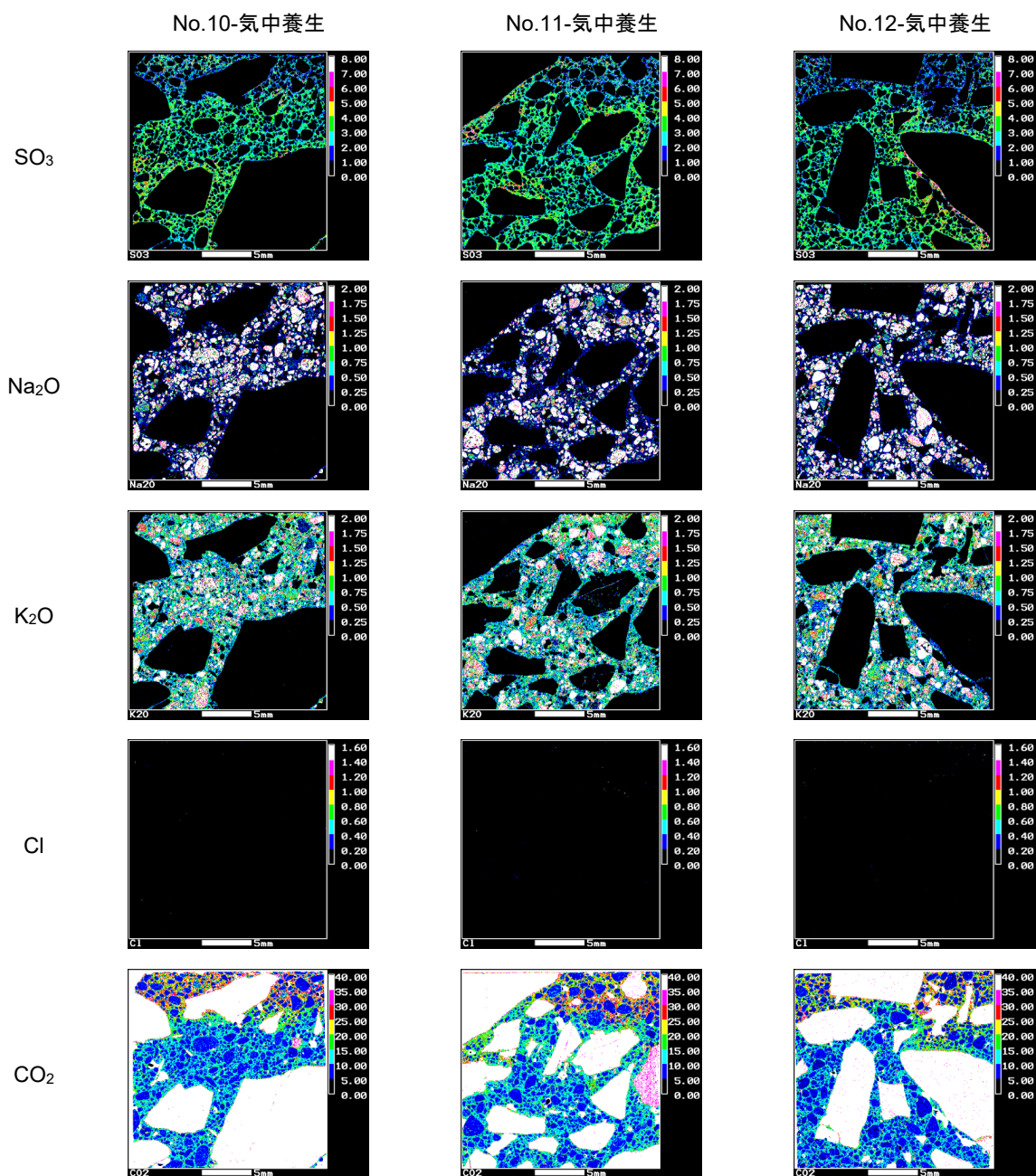


図 5.2-38 No. 10~No. 12 気中養生試料の元素濃度分布 (2/2)
(カラーバーの単位は mass%)

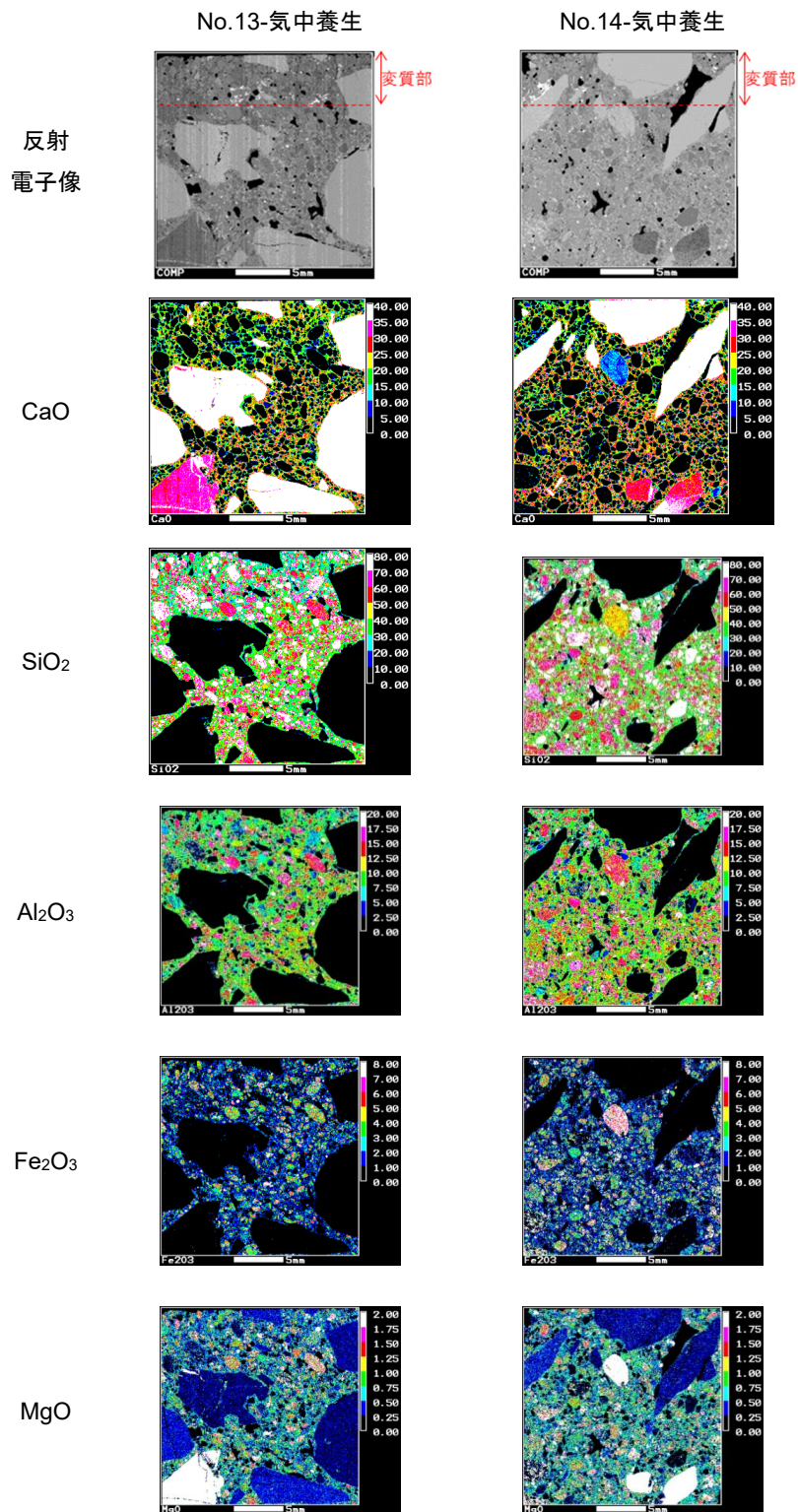


図 5.2-39 No. 13～No. 14 気中養生試料の元素濃度分布 (1/2)
(カラーバーの単位は mass%)

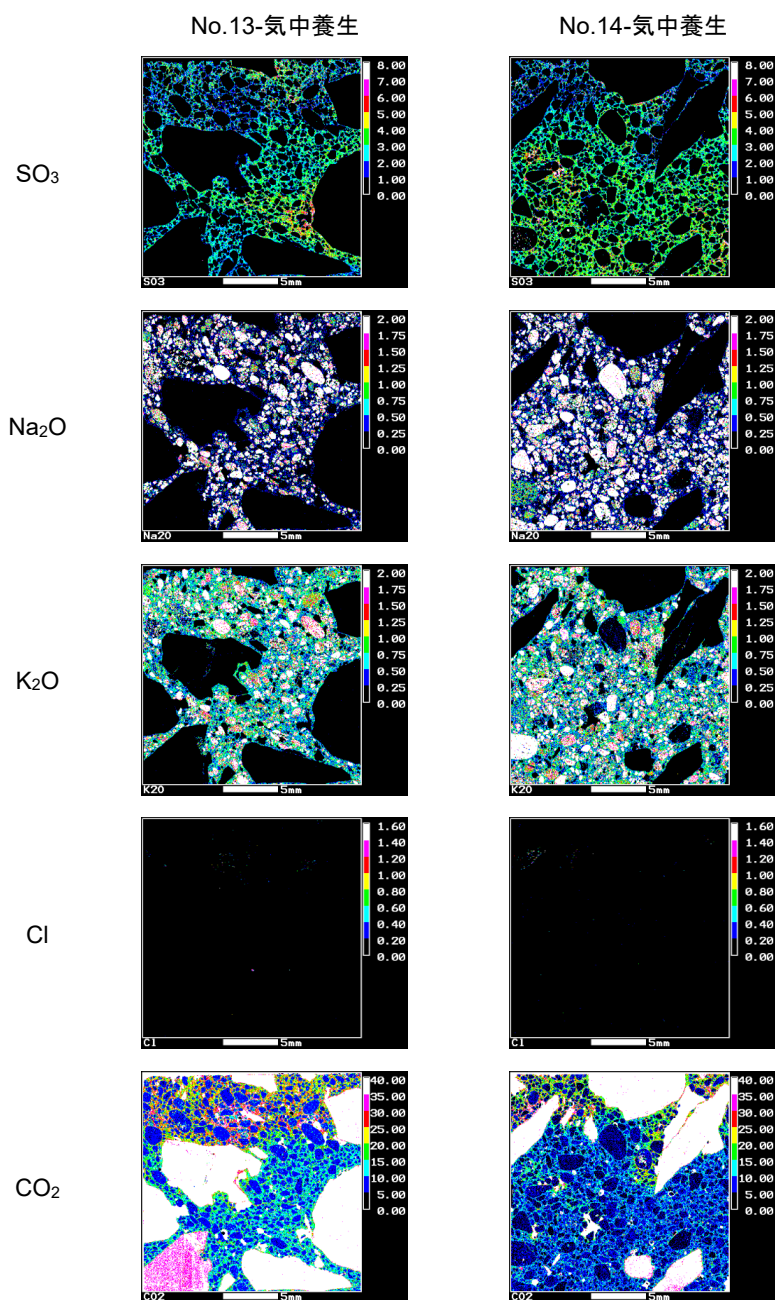


図 5.2-40 No. 13~No. 14 気中養生試料の元素濃度分布 (2/2)
(カラーバーの単位は mass%)

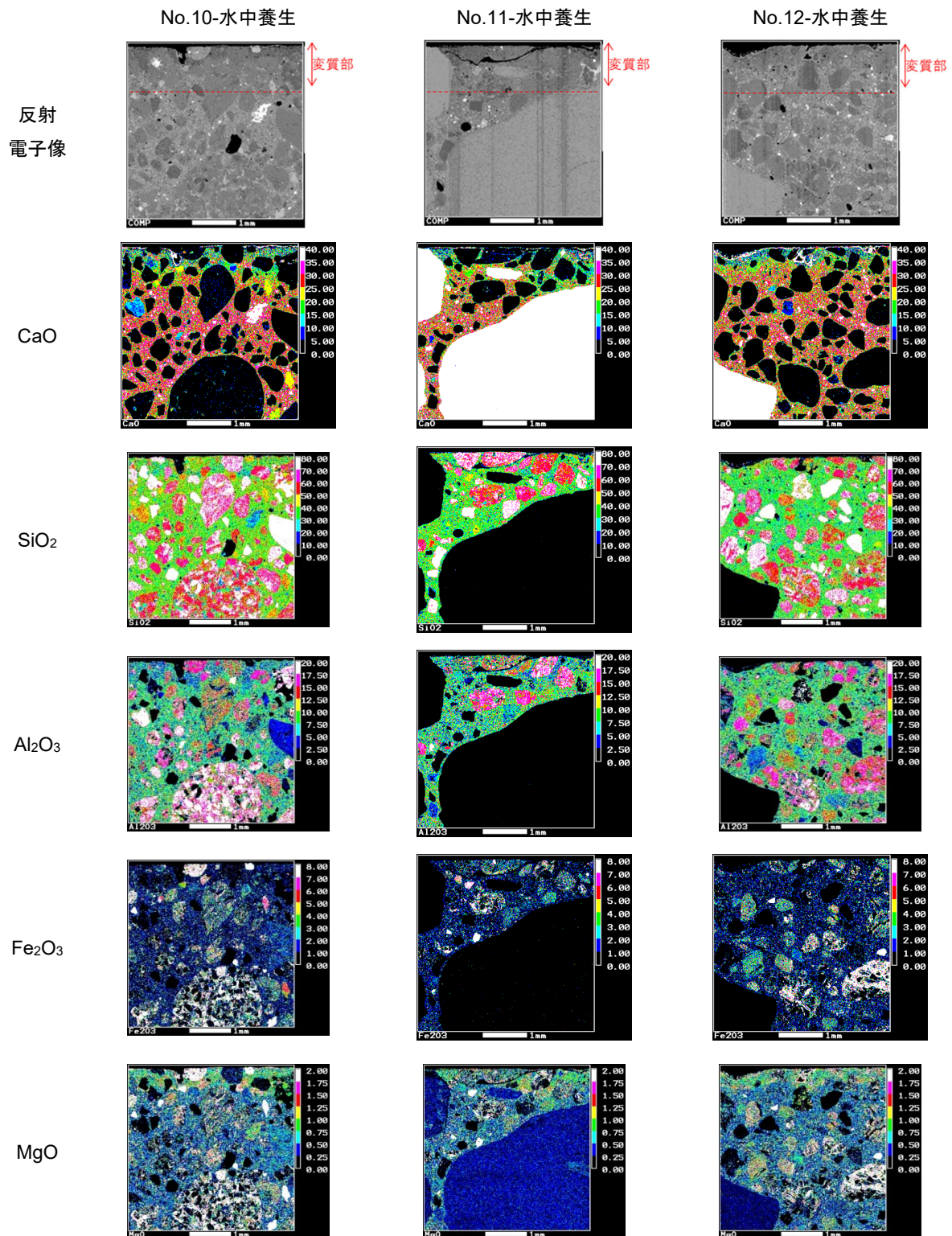


図 5.2-41 No. 10～No. 12 水中養生試料の元素濃度分布 (1/2)
(カラーバーの単位は mass%)

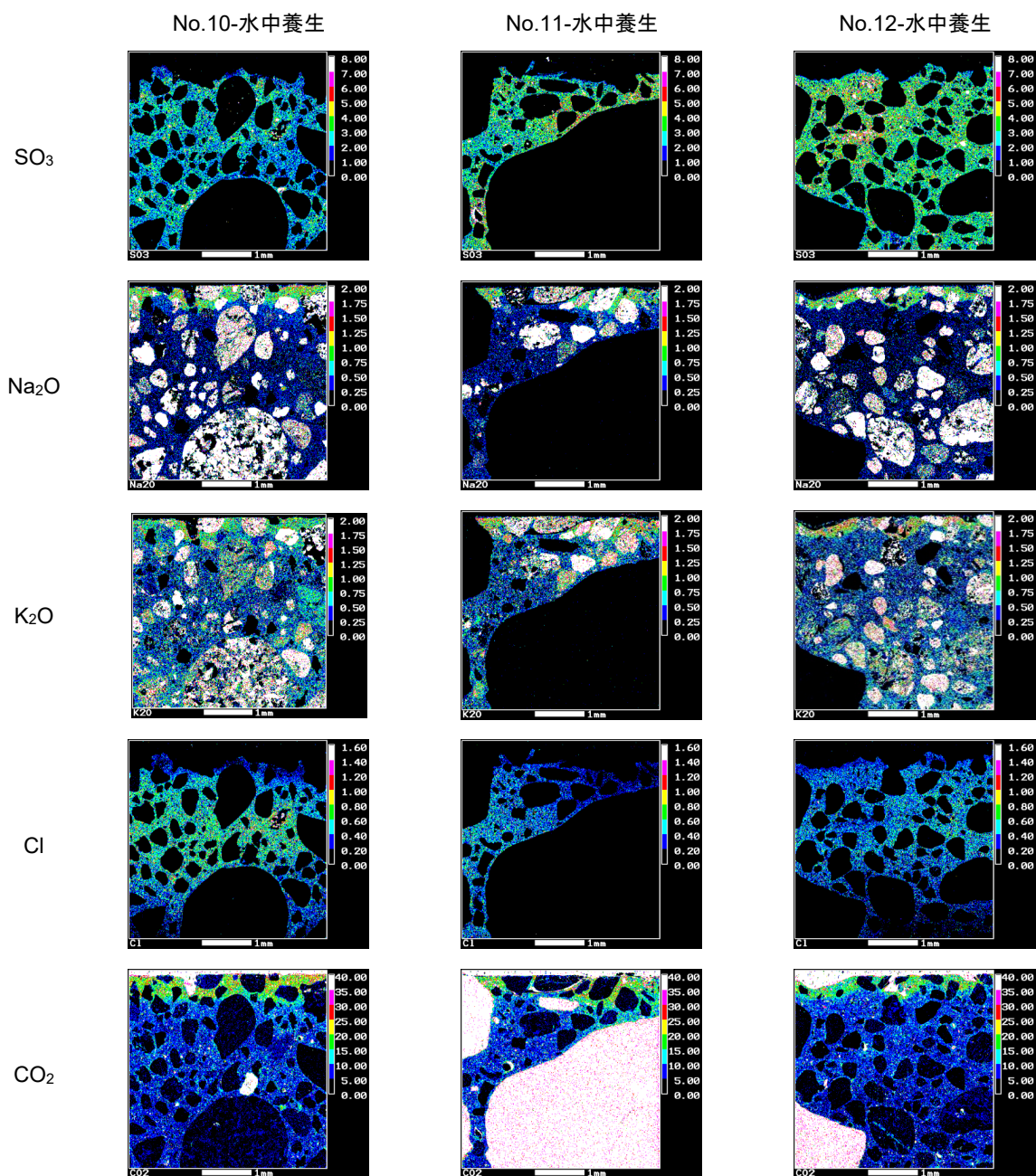


図 5.2-42 No. 10~No. 12 水中養生試料の元素濃度分布 (2/2)
(カラーバーの単位は mass%)

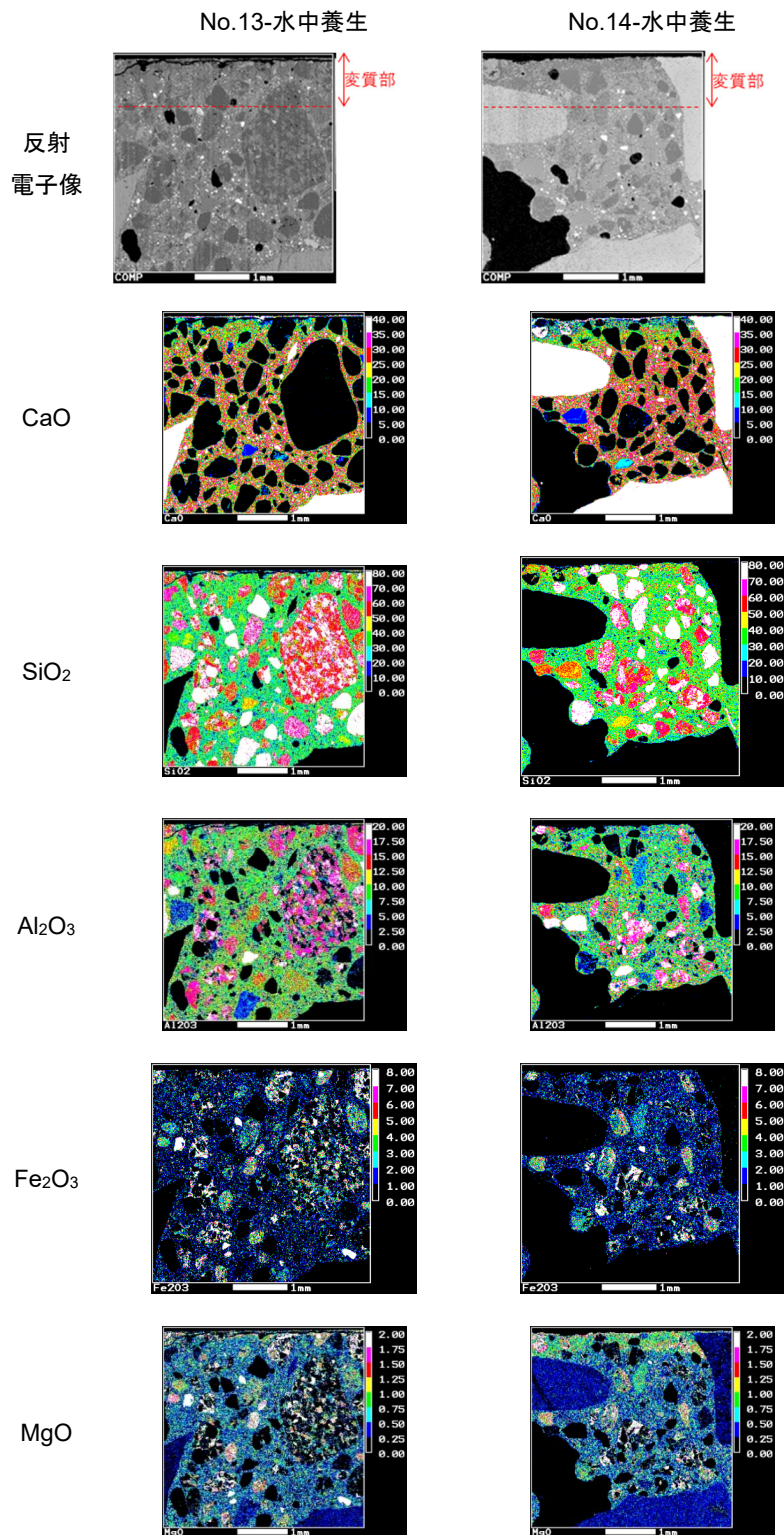


図 5.2-43 No. 13~No. 14 水中養生試料の元素濃度分布 (1/2)
(カラーバーの単位は mass%)

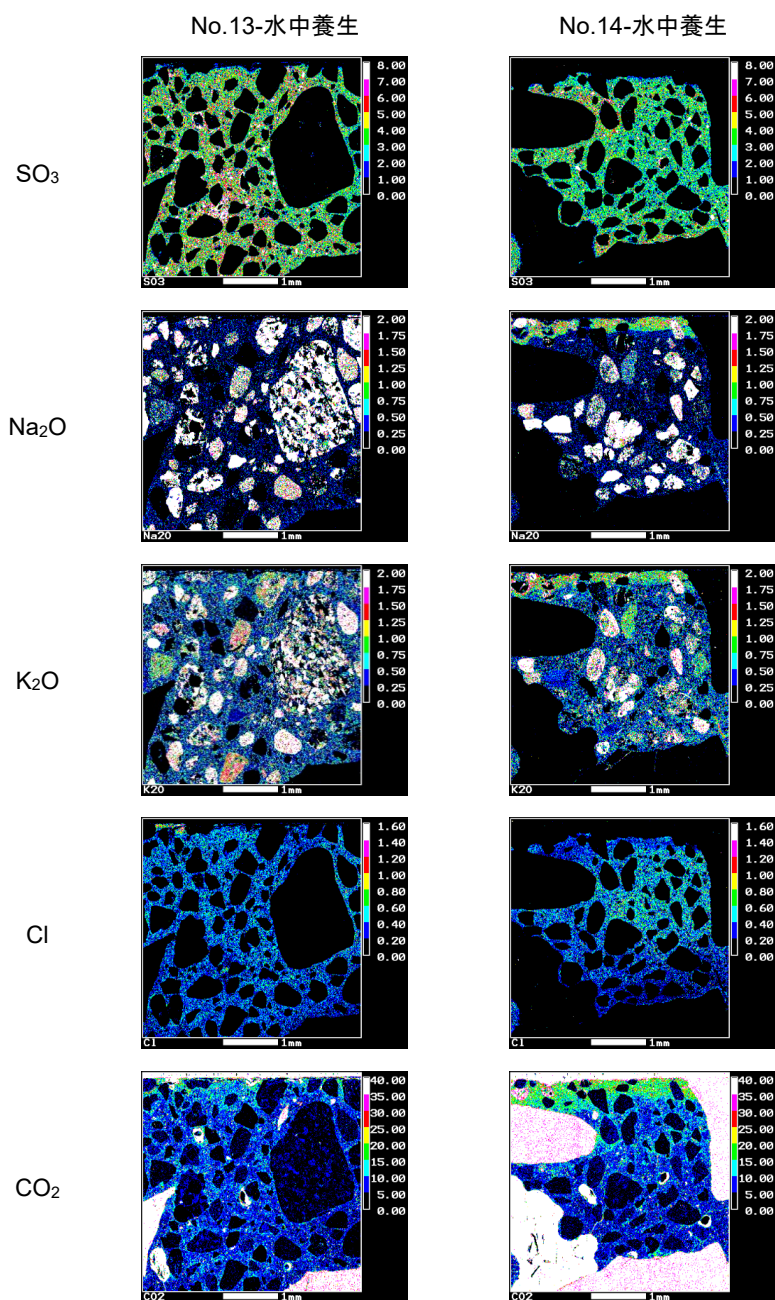


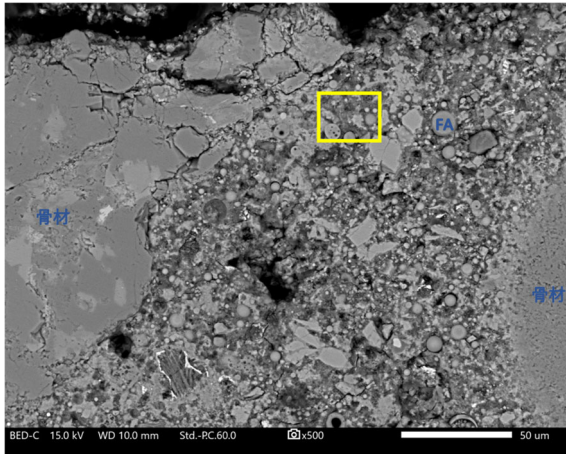
図 5.2-44 No. 13~No. 14 水中養生試料の元素濃度分布 (2/2)
(カラーバーの単位は mass%)

(f) SEM/EDS 分析

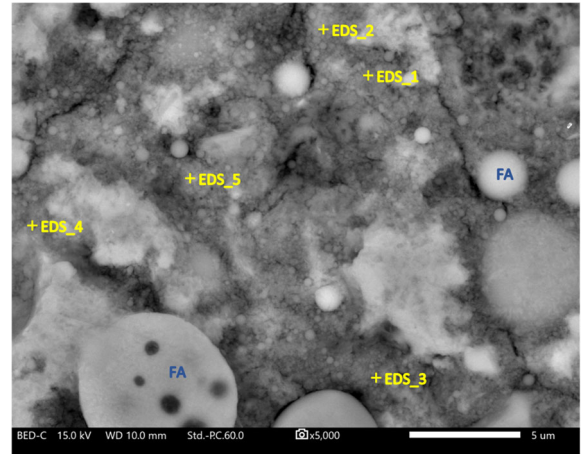
気中養生試料の SEM/EDS 分析結果を図 5.2-45～図 5.2-54 に、水中養生試料の SEM/EDS 分析結果を図 5.2-55～図 5.2-64 にそれぞれ示す。なお、いずれの図も(a)、(b)は変質部、(c)、(d)は健全部の結果である。

気中養生試料の変質部は、ペースト部においていずれの試料も健全部に比べ、暗い部分が多く見られた。暗く観察された領域では、固相も存在するが間隙も多くなっていることが確認された。変質部では炭酸カルシウムが多く見られ、炭酸化が生じている変質部において微細組織が粗な状態になっていることがわかった。変質部において空隙率が増加した結果と整合していた。また、変質部の C-S-H の C/S の Ca/Si モル比 (C/S と記載) は、0.3 程度とかなり小さい値を示した。HFSC の水和物は、ポゾラン反応により、OPC の水和で生成した水酸化カルシウムは消費され、ほぼ C-S-H で構成されている。気中試験体の変質部では、C-S-H の炭酸化が進み、炭酸カルシウムとシリカゲルに分解しているものと考えられる。C-S-H の炭酸化反応による体積変化を炭酸カルシウムとシリカゲルの密度から算出した場合、C/S=1.5 では体積が増加し、組織が緻密化し、C/S=1.0 以下では体積が減少し多孔化すると報告されている (小林, 1991)。HFSC コンクリート中の C-S-H の C/S は健全部においても C/S=1.0~1.2 程度であり、OPC セメントコンクリート (C/S=2.0) よりも C/S の低い C-S-H が生成している。また、炭酸化により体積が増加する水酸化カルシウムも存在しないため、気中養生試験体の変質部においては、C-S-H の炭酸化により組織が粗となったものと考えられる。健全部については、いずれの試料も緻密な試料であり、微細組織からは試料ごとの違いは見られなかった。また、残存する未水和セメントの割合も多くないことから水和も進んだ状態であった。一方、観察されたフライアッシュ粒子については、表面に水和層が見えるものの、未水和のフライアッシュ粒子も多く、反応率としてはそれほど高くないと推測される。HFSC の場合、初期段階でシリカフェームが反応し、水酸化カルシウムの消費と間隙水の pH の低下が生じるため、フライアッシュの反応自体は 1 年以上の期間においては停滞することが考えられる。本試料ではこのことを裏付ける結果となっているものと推察された。

水中養生試料の変質部においては、試料の表層に炭酸カルシウムの層が確認され、内部では炭酸カルシウムの生成は少なかった。炭酸カルシウム層は、SEM の観察結果から試料外部に存在することから、セメントペーストから試料表面に溶出した Ca が養生水中の炭酸イオンと反応により沈殿し、炭酸カルシウム層を形成したと考えられる。そのため、試料表層近い領域では暗く観察され、Ca 成分の溶脱により粗な状態になっていた。EDS による分析結果においても C-S-H の C/S が低く、Ca が極端に少なくなっていた。水中養生の表層においては C-S-H が溶解し、Ca が外部へ移動したことにより、組織が粗な状態になっているものと考えられる。また、EPMA による Na、K の濃度分布において、濃度の高い範囲が確認された。EDS の結果からも健全部より Na および K が高く検出されている箇所があり、養生水からの成分移動であると推察された。健全部については、気中養生の健全部と観察できる状態には違いはなく、緻密な組織となっていた。また、C-S-H の C/S についても気中養生の健全部と同程度の値であった。



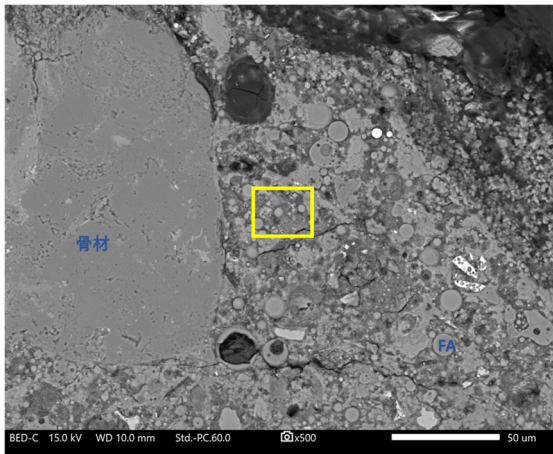
(a) 変質部① (500 倍)



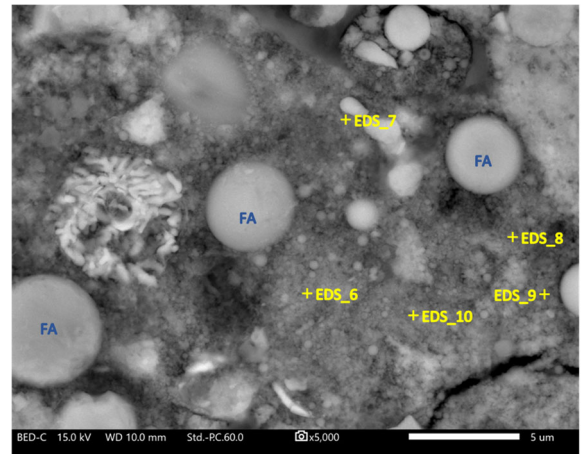
(b) 変質部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_1	15.04	41.20	7.51	0.43	0.61	1.41	0.31	—	66.51	0.39	0.21
EDS_2	15.68	40.58	8.78	0.67	0.65	1.41	0.36	1.00	69.13	0.41	0.26
EDS_3	13.02	34.30	7.09	0.67	0.51	1.23	0.13	—	56.95	0.41	0.24
EDS_4	12.03	44.27	7.68	0.66	0.59	1.26	0.24	0.98	67.71	0.29	0.20
EDS_5	14.69	43.87	8.63	1.17	1.44	1.29	0.20	0.97	72.26	0.36	0.23

(c) 変質部① (各部の元素組成)



(d) 変質部② (500 倍)

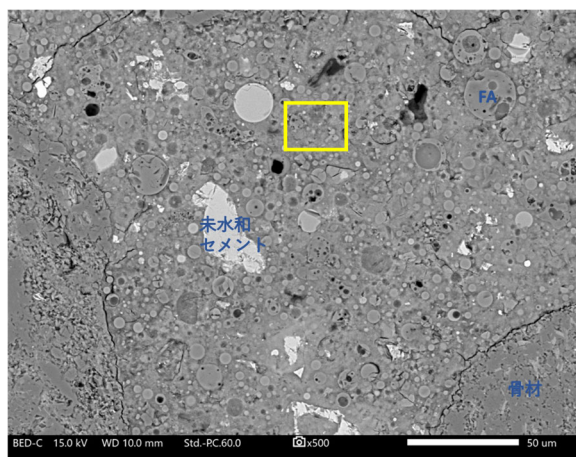


(e) 変質部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

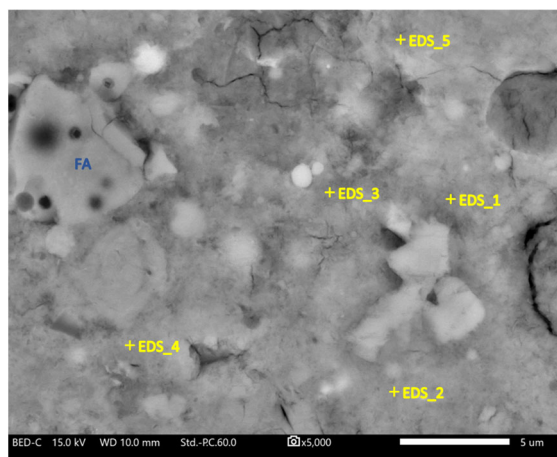
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	合計	C/S	A/S
EDS_6	9.27	47.92	9.08	0.38	0.62	1.90	0.26	—	—	69.43	0.21	0.22
EDS_7	9.38	41.27	8.60	0.48	0.51	1.37	0.18	—	—	61.79	0.24	0.25
EDS_8	10.03	33.87	8.10	—	0.70	0.91	—	1.92	—	55.53	0.32	0.28
EDS_9	8.92	39.02	8.65	0.46	0.93	1.22	0.20	1.70	—	61.10	0.24	0.26
EDS_10	12.99	45.87	8.74	0.62	0.68	1.14	0.27	—	0.43	70.74	0.30	0.22

(f) 変質部② (各部の元素組成)

図 5.2-45 気中養生 No. 10 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)



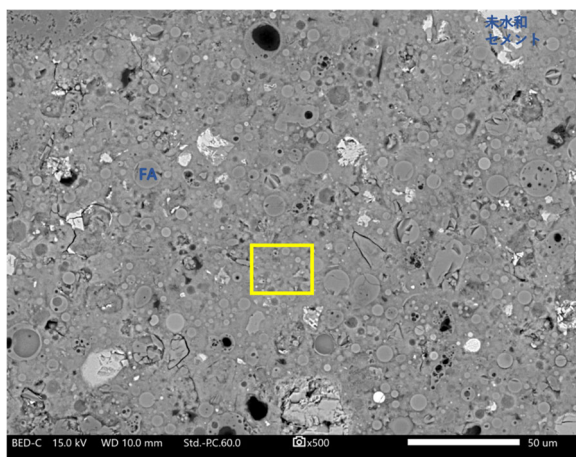
(a) 健全部① (500 倍)



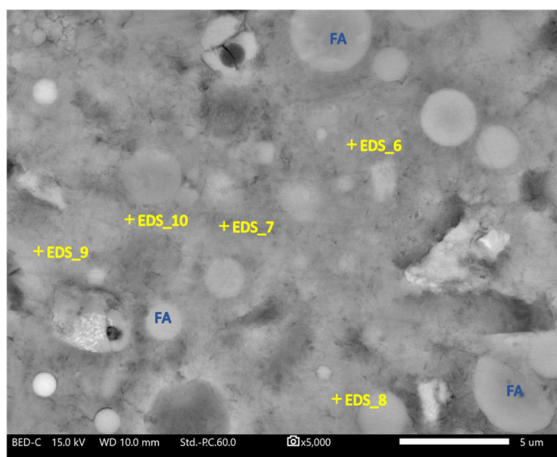
(b) 健全部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	合計	C/S	A/S
EDS_1	28.17	29.07	5.78	5.71	0.69	0.56	0.20	—	—	70.18	1.04	0.23
EDS_2	21.80	29.27	3.95	3.41	0.25	0.45	0.18	—	—	59.31	0.80	0.16
EDS_3	25.77	29.65	5.69	3.62	0.36	0.77	0.12	—	—	65.98	0.93	0.23
EDS_4	26.16	29.75	9.00	6.80	0.44	0.41	0.04	—	—	72.60	0.94	0.36
EDS_5	26.44	25.42	6.93	5.49	0.37	0.60	0.05	1.53	0.79	67.62	1.11	0.32

(c) 健全部① (各部の元素組成)



(d) 健全部② (500 倍)

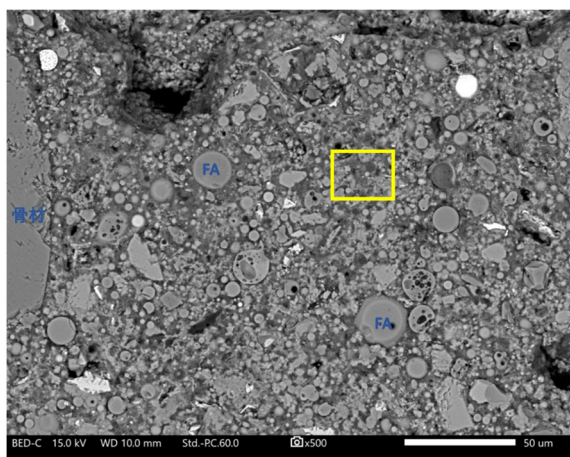


(e) 健全部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

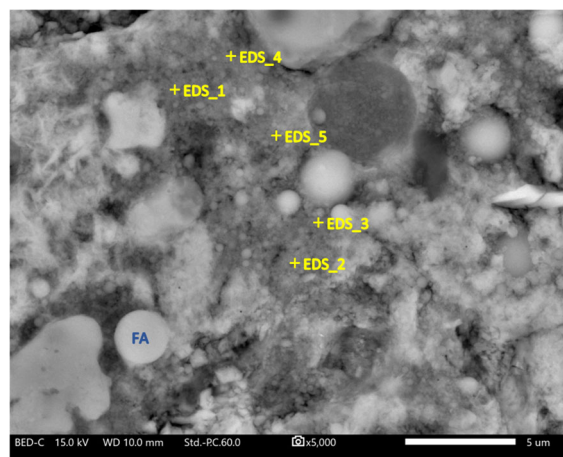
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	合計	C/S	A/S
EDS_6	26.58	30.84	6.50	2.95	0.29	1.10	0.27	—	—	68.53	0.92	0.25
EDS_7	25.28	24.44	10.75	4.92	0.57	0.37	0.20	1.83	—	68.36	1.11	0.52
EDS_8	27.47	32.42	4.62	2.66	0.26	0.42	0.00	—	—	67.85	0.91	0.17
EDS_9	30.69	30.76	5.67	3.28	0.28	0.32	0.18	—	0.73	71.91	1.07	0.22
EDS_10	26.35	33.41	5.42	3.09	0.16	0.40	0.20	—	—	69.03	0.85	0.19

(f) 健全部② (各部の元素組成)

図 5.2-46 気中養生 No. 10 の SEM/EDS 分析結果 (2/2)



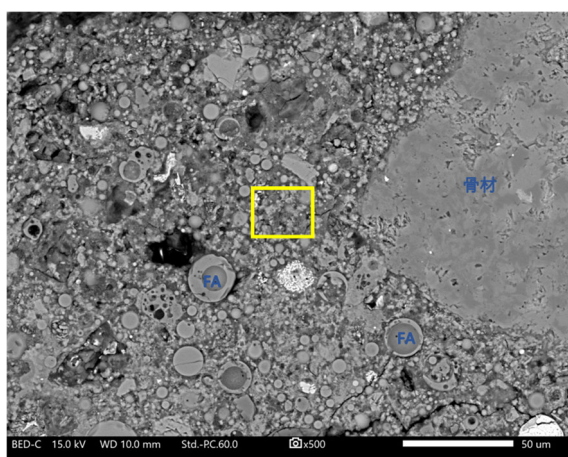
(a) 変質部① (500 倍)



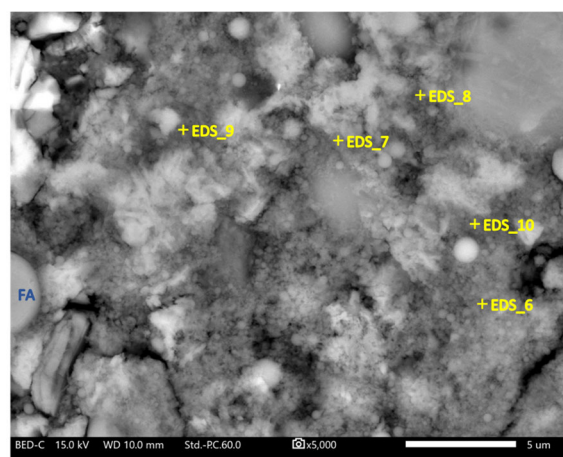
(b) 変質部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_1	11.31	45.60	7.15	0.73	0.60	1.05	0.32	—	66.76	0.27	0.18
EDS_2	11.59	43.99	8.26	0.78	1.17	1.02	0.24	1.21	68.26	0.28	0.22
EDS_3	12.17	40.52	9.91	0.77	1.90	1.05	0.30	1.29	67.91	0.32	0.29
EDS_4	9.47	39.21	5.76	0.56	0.48	1.12	0.28	—	56.88	0.26	0.17
EDS_5	9.66	48.82	9.10	0.72	1.63	1.21	0.38	—	71.52	0.21	0.22

(c) 変質部① (各部の元素組成)



(d) 変質部② (500 倍)

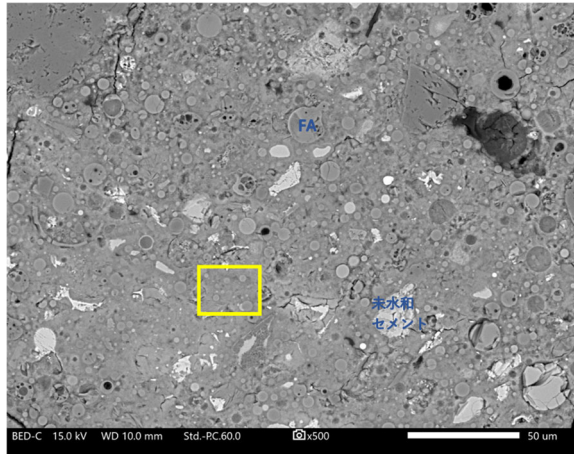


(e) 変質部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

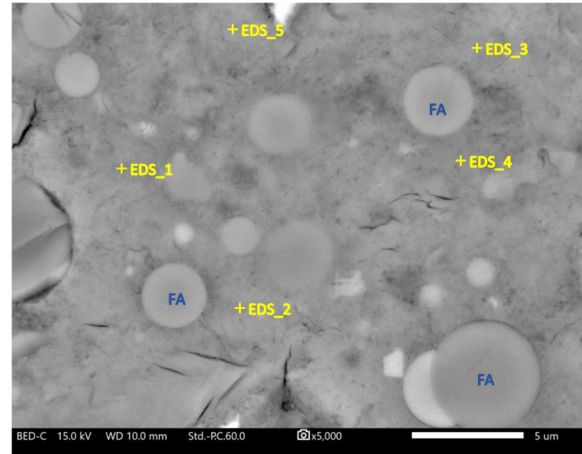
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_6	11.02	46.64	9.38	—	0.70	1.48	0.32	—	69.54	0.25	0.24
EDS_7	12.04	44.52	9.46	0.96	0.50	1.75	0.21	1.50	70.94	0.29	0.25
EDS_8	10.10	37.09	9.37	0.35	0.34	1.42	0.20	1.32	60.19	0.29	0.30
EDS_9	12.31	46.86	8.36	0.86	0.82	1.19	0.25	—	70.65	0.28	0.21
EDS_10	13.96	40.26	9.36	0.72	1.13	0.86	0.23	1.54	68.06	0.37	0.27

(f) 変質部② (各部の元素組成)

図 5.2-47 気中養生 No. 11 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)



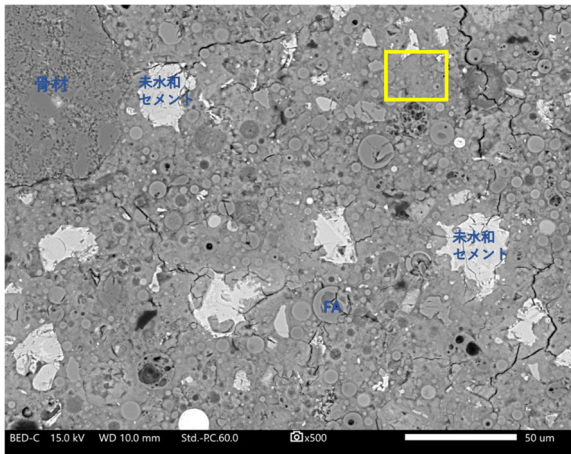
(a) 健全部① (500 倍)



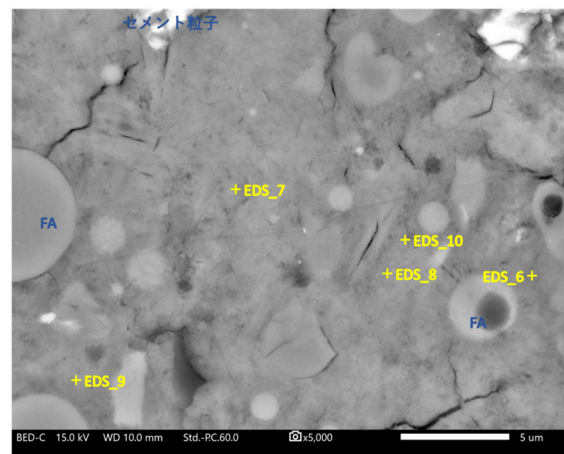
(b) 健全部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	合計	C/S	A/S
EDS_1	29.92	26.03	5.16	4.81	0.32	0.49	0.10	—	66.83	1.23	0.23
EDS_2	21.43	28.93	8.91	3.53	0.54	0.74	0.05	—	64.13	0.79	0.36
EDS_3	23.09	26.47	5.46	1.76	2.74	0.09	0.12	1.49	61.22	0.93	0.24
EDS_4	29.63	30.23	5.71	4.65	0.45	0.54	0.14	—	71.35	1.05	0.22
EDS_5	28.90	32.80	6.19	3.94	0.33	0.50	0.28	—	72.94	0.94	0.22

(c) 健全部① (各部の元素組成)



(d) 健全部② (500 倍)

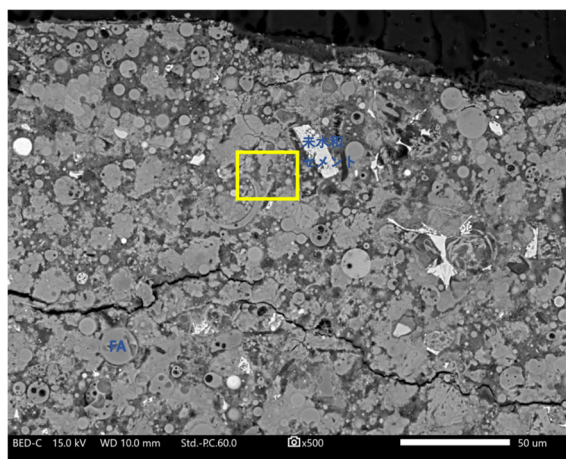


(e) 健全部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

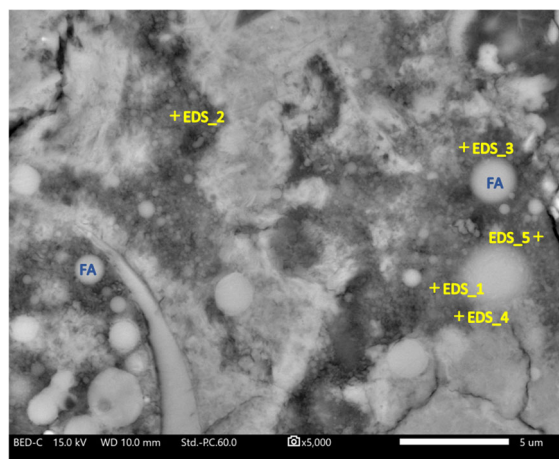
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	合計	C/S	A/S
EDS_6	25.70	34.56	5.31	2.95	0.25	0.53	0.13	69.43	0.80	0.18
EDS_7	29.49	25.75	3.79	3.32	0.51	0.18	0.01	63.05	1.23	0.17
EDS_8	30.20	31.49	6.06	4.73	0.43	0.32	0.09	73.32	1.03	0.23
EDS_9	29.39	29.89	5.22	3.67	0.79	0.47	0.08	69.51	1.05	0.21
EDS_10	27.86	24.82	4.94	4.32	0.21	0.27	0.07	62.49	1.20	0.23

(f) 健全部② (各部の元素組成)

図 5.2-48 気中養生 No. 11 の SEM/EDS 分析結果 (2/2)



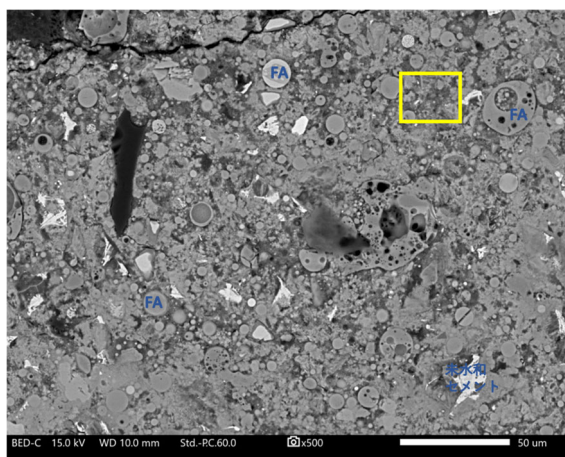
(a) 変質部① (500 倍)



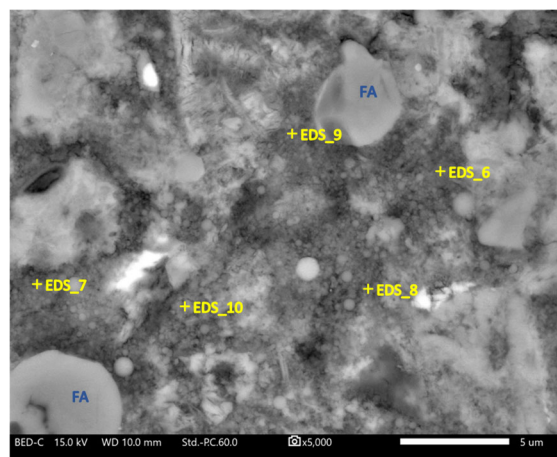
(b) 変質部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	合計	C/S	A/S
EDS_1	14.55	38.96	8.40	1.23	0.67	0.80	0.24	1.33	—	66.18	0.40	0.25
EDS_2	15.34	38.54	5.55	9.29	0.60	0.92	0.24	—	—	70.48	0.43	0.17
EDS_3	13.55	42.63	5.93	0.71	1.27	0.68	0.18	1.13	—	66.08	0.34	0.16
EDS_4	9.79	35.36	9.21	0.51	0.63	0.88	0.31	1.45	0.71	58.85	0.30	0.31
EDS_5	10.69	45.73	9.83	0.79	1.68	0.93	0.36	1.58	—	71.59	0.25	0.25

(c) 変質部① (各部の元素組成)



(d) 変質部② (500 倍)

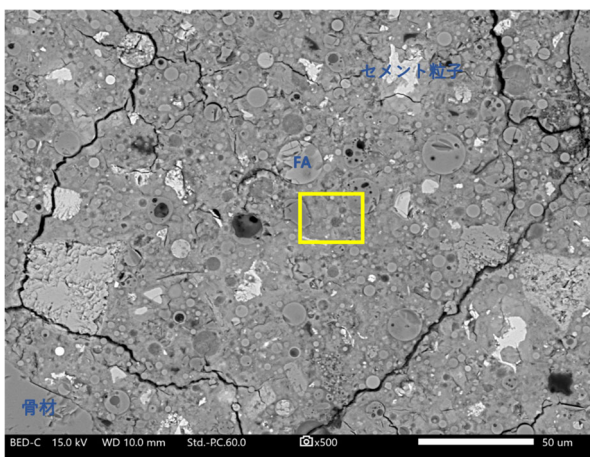


(e) 変質部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

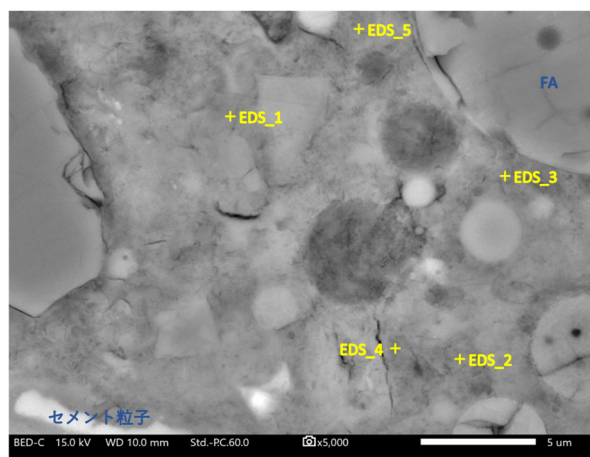
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_6	9.79	47.40	4.92	0.54	0.48	0.86	0.08	—	64.07	0.22	0.12
EDS_7	14.82	42.73	8.17	0.89	0.43	0.75	0.20	—	67.99	0.37	0.23
EDS_8	11.87	46.53	7.51	0.75	0.75	0.74	0.15	—	68.30	0.27	0.19
EDS_9	8.98	45.18	6.87	1.95	0.45	1.01	0.15	—	64.59	0.21	0.18
EDS_10	13.07	43.66	9.80	0.84	1.06	0.86	0.14	1.61	71.04	0.32	0.26

(f) 変質部② (各部の元素組成)

図 5.2-49 気中養生 No. 12 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)



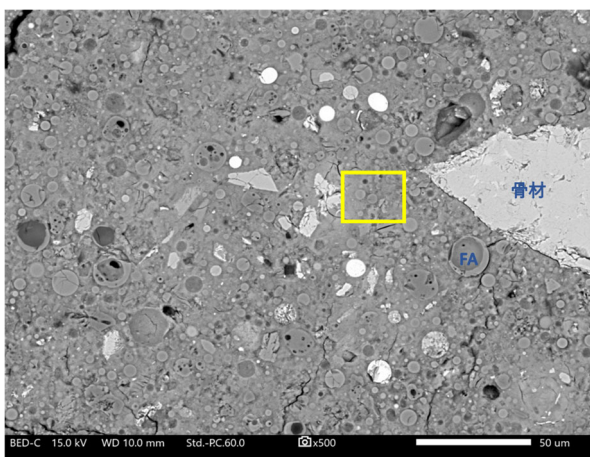
(a) 健全部① (500 倍)



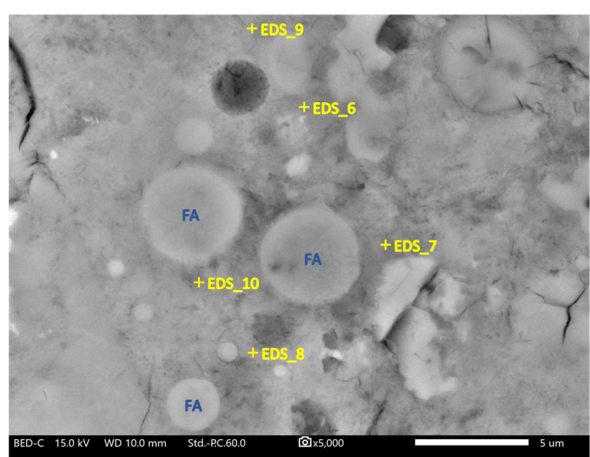
(b) 健全部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	合計	C/S	A/S
EDS_1	28.66	20.34	8.59	7.83	2.13	0.43	0.1	—	—	68.08	1.51	0.50
EDS_2	26.4	22.77	8.25	4.25	0.53	0.63	0.19	0.82	2.56	66.40	1.24	0.43
EDS_3	23.7	28.84	9.12	5	0.3	0.62	0.09	—	—	67.67	0.88	0.37
EDS_4	29.22	20.34	7.48	6.76	0.17	0.44	0.12	—	—	64.53	1.54	0.43
EDS_5	27.17	23.23	9.88	5.71	0.62	0.31	0.15	—	1.73	68.80	1.25	0.50

(c) 健全部① (各部の元素組成)



(d) 健全部② (500 倍)

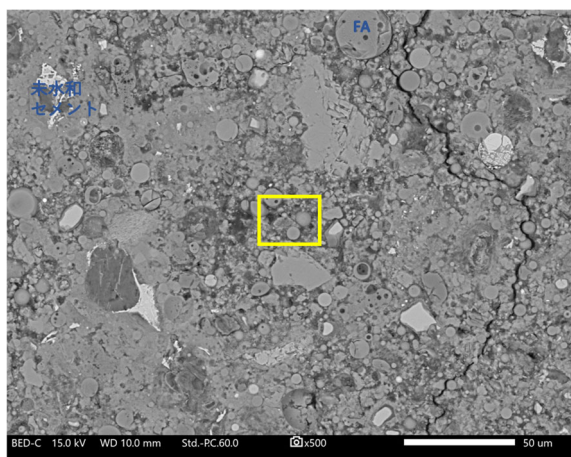


(e) 健全部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

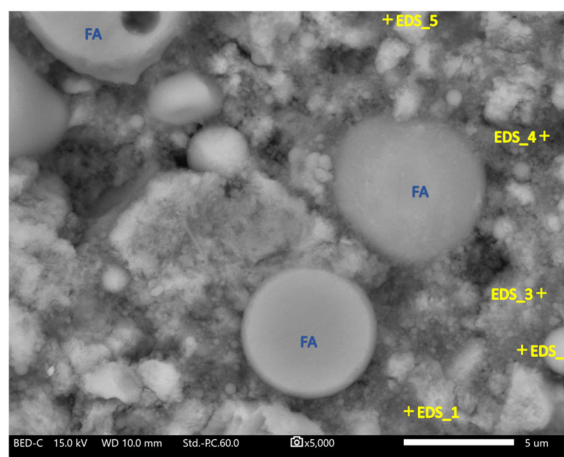
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	合計	C/S	A/S
EDS_6	26.16	33.60	7.31	3.30	0.26	0.70	0.11	71.44	0.83	0.26
EDS_7	27.67	21.78	5.41	4.62	0.13	0.63	0.01	60.25	1.36	0.29
EDS_8	30.41	30.60	4.20	2.98	0.12	0.35	0.08	68.74	1.06	0.16
EDS_9	30.95	24.44	7.58	6.01	0.29	0.28	0.04	69.59	1.36	0.37
EDS_10	25.96	28.28	5.65	2.15	0.23	0.52	0.11	62.90	0.98	0.24

(f) 健全部② (各部の元素組成)

図 5.2-50 気中養生 No. 12 の SEM/EDS 分析結果 (2/2)



(a) 変質部① (500 倍)



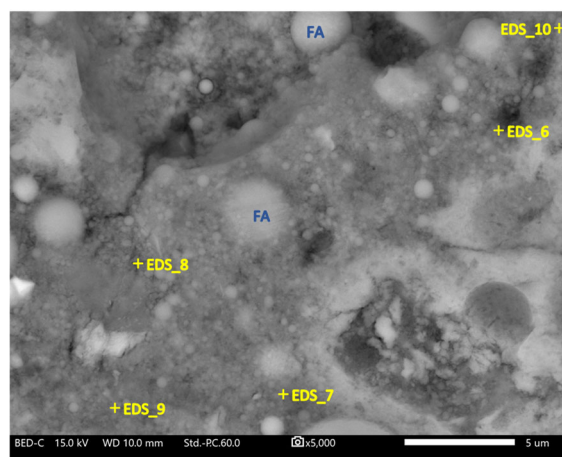
(b) 変質部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	合計	C/S	A/S
EDS_1	18.09	25.22	8.91	5.97	0.33	0.36	—	—	0.87	1.01	60.76	0.77	0.42
EDS_2	16.60	31.56	13.53	2.38	0.39	0.83	0.25	—	1.24	—	66.78	0.56	0.51
EDS_3	13.90	28.93	8.17	2.09	0.30	0.87	0.17	—	0.79	—	55.22	0.51	0.33
EDS_4	15.69	27.10	4.18	1.49	0.36	0.54	—	—	0.77	—	50.13	0.62	0.18
EDS_5	19.73	25.79	5.54	4.76	1.00	0.57	—	0.60	0.71	—	58.70	0.82	0.25

(c) 変質部① (各部の元素組成)



(d) 変質部② (500 倍)

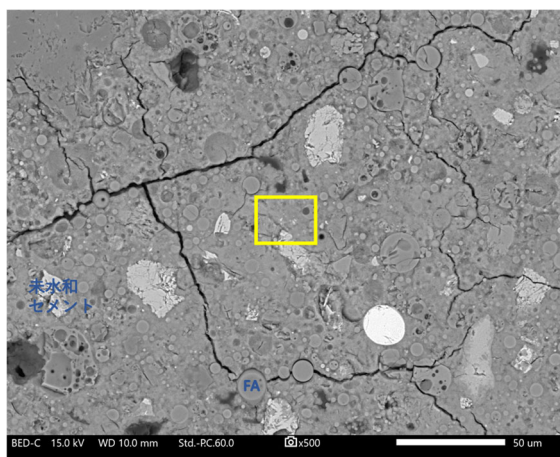


(e) 変質部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

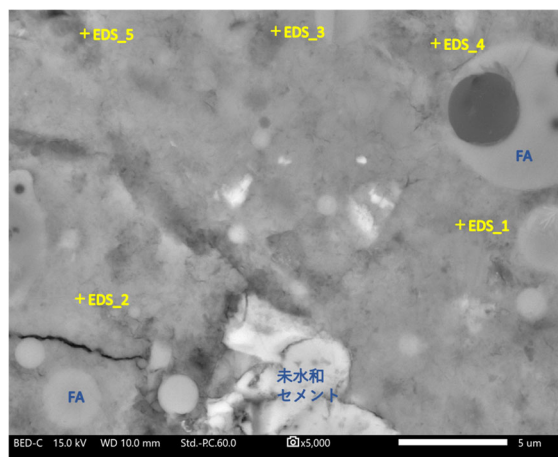
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_6	13.21	42.06	6.65	0.59	0.85	0.97	—	0.55	64.88	0.34	0.19
EDS_7	7.64	48.05	9.97	0.91	0.47	1.02	0.41	1.86	70.33	0.17	0.12
EDS_8	8.19	48.68	6.59	—	1.09	1.07	0.14	0.96	66.72	0.18	0.08
EDS_9	10.02	44.19	7.30	0.59	0.62	0.73	0.15	0.40	64.00	0.24	0.10
EDS_10	11.27	43.99	6.60	1.13	0.86	0.90	—	—	64.75	0.27	0.09

(f) 変質部② (各部の元素組成)

図 5.2-51 気中養生 No. 13 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)



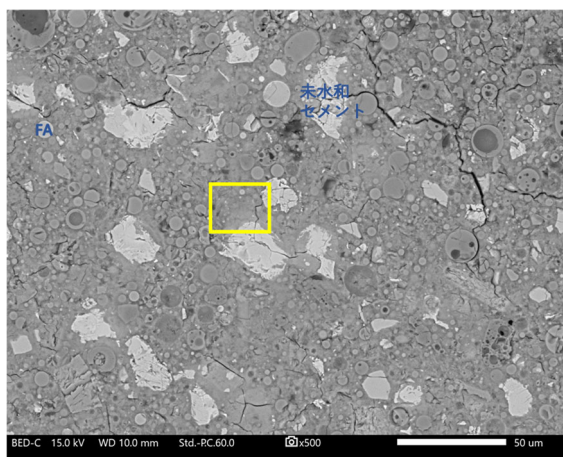
(a) 健全部① (500 倍)



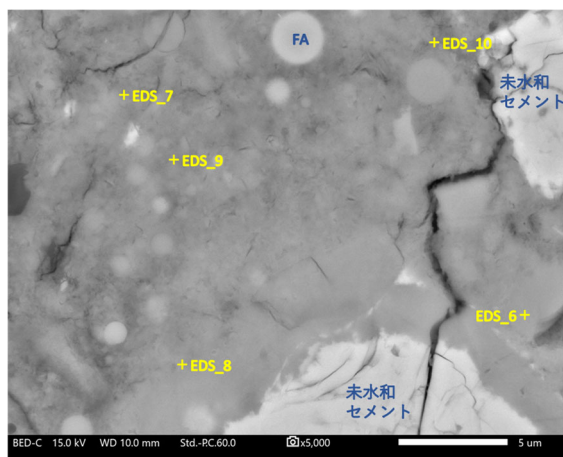
(b) 健全部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	合計	C/S	A/S
EDS_1	26.96	30.36	6.64	3.88	0.53	0.53	0.13	—	—	69.03	0.95	0.26
EDS_2	36.09	29.38	4.86	2.45	0.27	—	—	—	—	73.05	1.32	0.19
EDS_3	23.93	26.70	8.26	1.98	0.36	0.72	0.23	1.88	2.08	66.14	0.96	0.36
EDS_4	27.94	29.86	6.09	3.23	—	0.41	—	—	—	67.53	1.00	0.24
EDS_5	26.95	28.80	3.74	2.92	0.44	0.20	—	0.85	—	63.90	1.00	0.15

(c) 健全部① (各部の元素組成)



(d) 健全部② (500 倍)

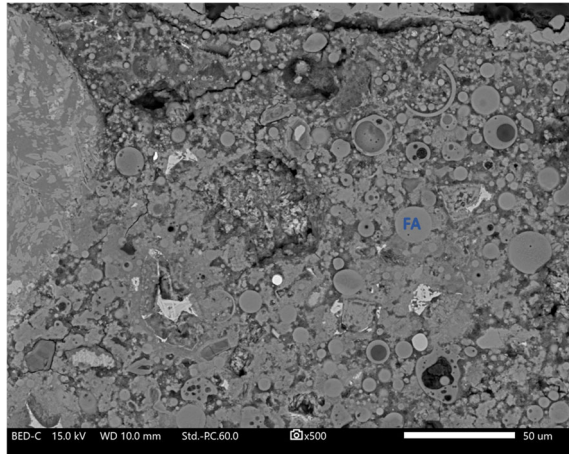


(e) 健全部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

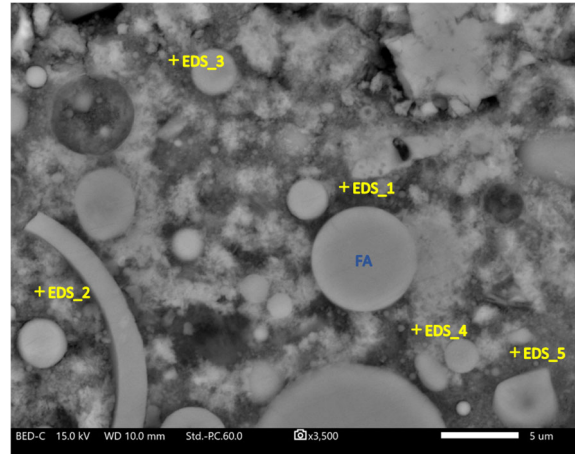
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	合計	C/S	A/S
EDS_6	27.65	25.03	7.75	6.69	0.28	0.32	—	0.88	68.60	1.18	0.36
EDS_7	26.60	20.22	5.71	4.78	0.27	—	—	1.45	59.03	1.41	0.33
EDS_8	24.75	24.50	7.02	6.89	0.43	0.15	0.26	—	64.00	1.08	0.34
EDS_9	30.74	22.24	6.39	6.63	0.16	0.29	0.12	—	66.57	1.48	0.34
EDS_10	25.43	32.66	5.63	4.14	0.41	0.55	—	0.72	69.54	0.83	0.20

(f) 健全部② (各部の元素組成)

図 5.2-52 気中養生 No. 13 の SEM/EDS 分析結果 (2/2)



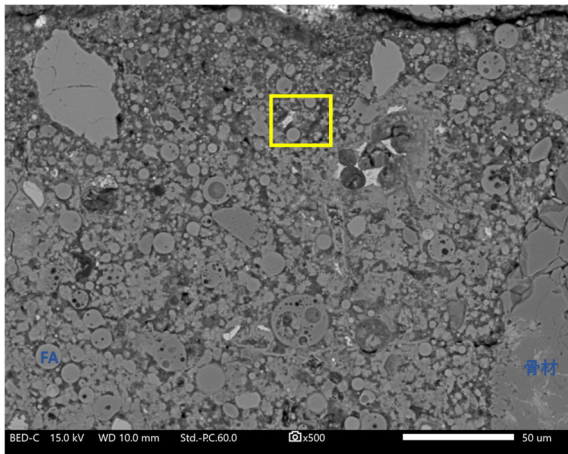
(a) 変質部① (500 倍)



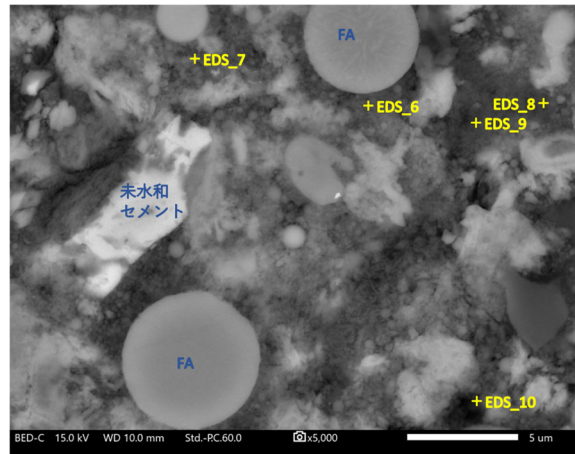
(b) 変質部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	合計	C/S	A/S
EDS_1	17.85	34.28	7.46	0.56	0.56	0.83	—	0.25	0.98	—	62.77	0.56	0.26
EDS_2	14.98	35.86	5.96	0.99	1.04	0.98	—	—	0.86	—	60.67	0.45	0.20
EDS_3	13.18	40.80	9.07	1.00	0.72	0.61	—	0.30	1.19	0.69	67.56	0.35	0.26
EDS_4	15.55	35.60	7.38	0.87	0.81	1.02	1.38	0.27	—	—	62.88	0.47	0.24
EDS_5	11.80	31.52	8.19	0.98	0.54	1.92	—	0.60	2.21	—	57.76	0.40	0.31

(c) 変質部① (各部の元素組成)



(d) 変質部② (500 倍)

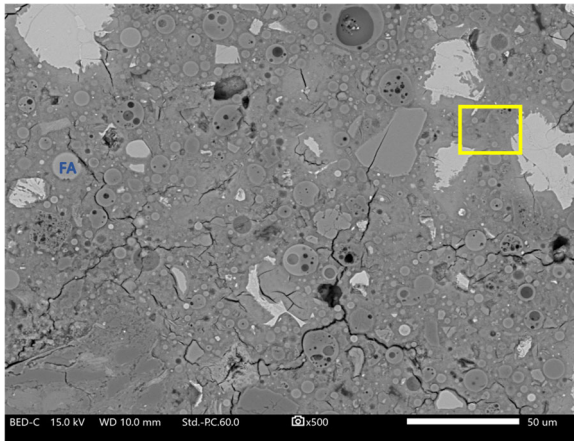


(e) 変質部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

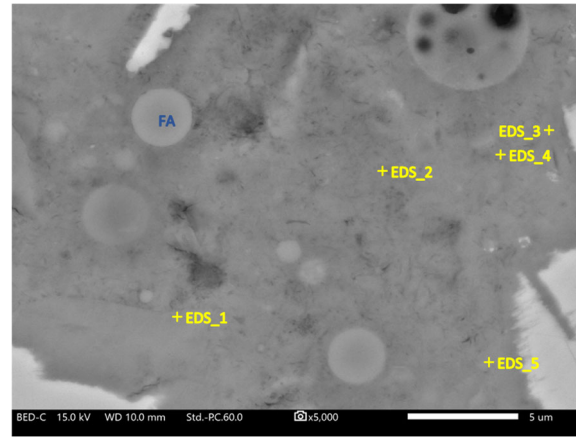
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_6	9.63	36.57	9.84	1.48	0.79	0.50	0.66	0.22	1.61	61.30	0.28	0.32
EDS_7	18.17	37.50	6.68	0.93	0.69	1.67	—	0.19	0.95	66.78	0.52	0.21
EDS_8	11.22	36.10	8.17	1.16	1.01	0.77	—	0.22	1.15	59.80	0.33	0.27
EDS_9	13.41	31.65	7.52	1.21	1.09	1.20	—	0.09	—	56.17	0.45	0.28
EDS_10	10.29	33.03	8.41	0.42	1.18	0.61	—	0.19	2.12	56.25	0.33	0.30

(f) 変質部② (各部の元素組成)

図 5.2-53 気中養生 No. 14 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)



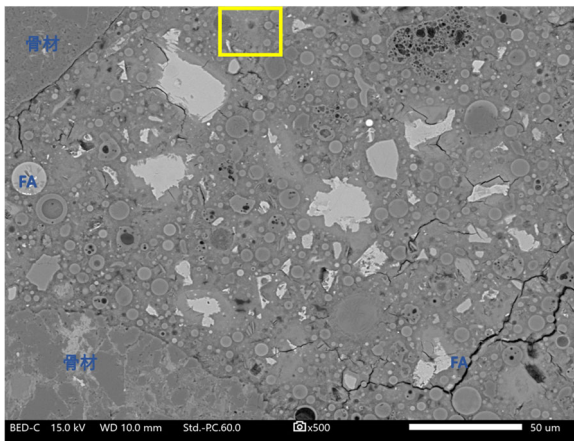
(a) 健全部① (500 倍)



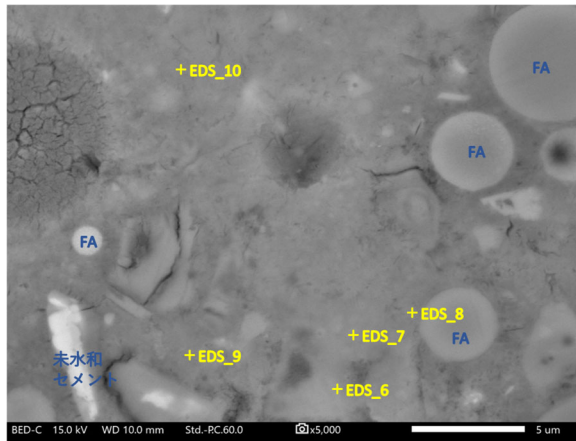
(b) 健全部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_1	36.14	22.96	2.52	4.15	0.57	—	—	—	1.27	67.61	1.69	0.13
EDS_2	31.52	22.08	5.15	3.67	1.35	—	1.00	0.74	1.75	67.26	1.53	0.27
EDS_3	30.47	22.47	2.72	2.45	0.56	—	—	—	0.80	59.47	1.45	0.14
EDS_4	30.90	28.39	4.89	3.69	2.27	0.28	—	—	0.65	71.07	1.17	0.20
EDS_5	33.47	27.80	3.88	5.19	0.48	—	—	—	1.39	72.21	1.29	0.16

(c) 健全部① (各部の元素組成)



(d) 健全部② (500 倍)

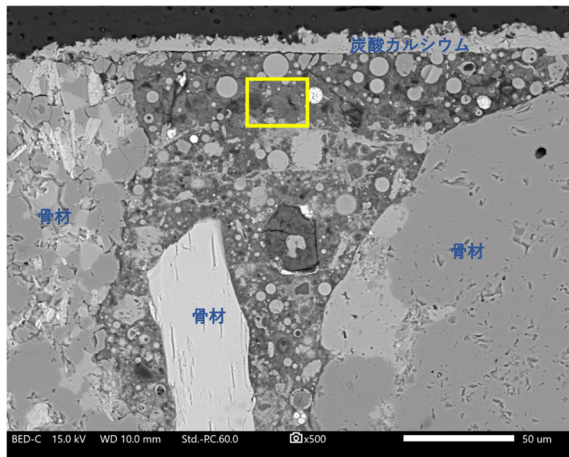


(e) 健全部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

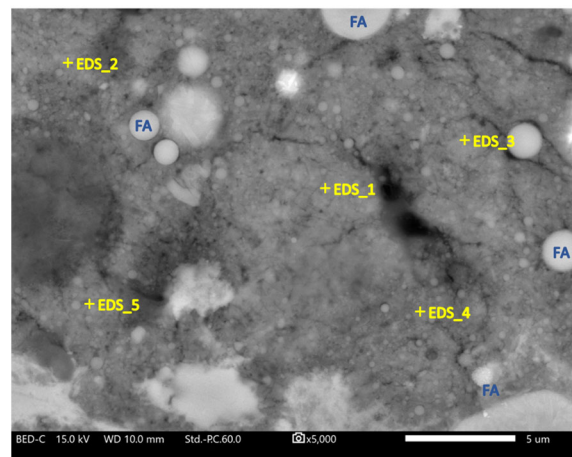
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_6	27.08	23.98	3.03	1.54	0.60	0.30	0.01	0.69	0.90	58.13	1.21	0.15
EDS_7	27.50	26.07	3.79	2.68	0.61	0.43	—	—	—	61.08	1.13	0.17
EDS_8	26.66	30.48	8.35	5.41	0.53	0.67	—	—	—	72.10	0.94	0.32
EDS_9	27.56	30.56	6.77	4.24	0.72	0.30	—	0.75	1.09	71.99	0.97	0.26
EDS_10	34.01	26.95	3.28	2.54	0.98	—	—	—	1.49	69.25	1.35	0.14

(f) 健全部② (各部の元素組成)

図 5.2-54 気中養生 No. 14 の SEM/EDS 分析結果 (2/2)



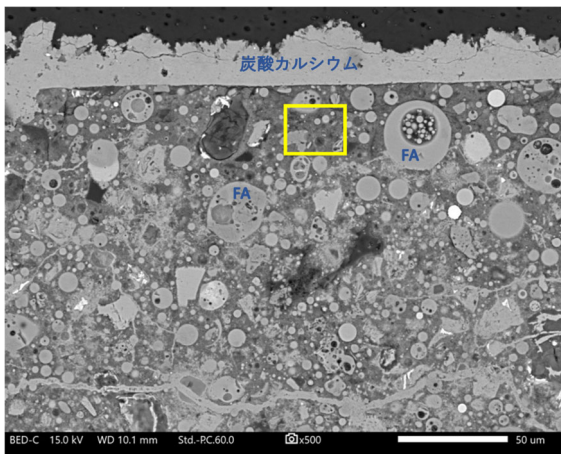
(a) 変質部① (500 倍)



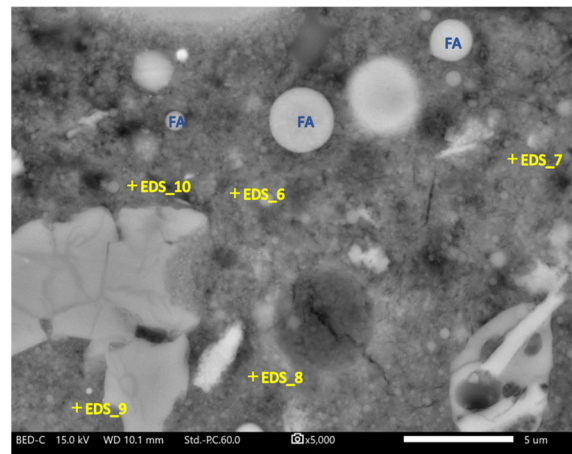
(b) 変質部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_1	1.92	52.68	6.35	1.30	1.22	1.61	1.31	66.39	0.04	0.14
EDS_2	2.44	57.23	7.69	0.62	1.43	1.89	1.45	72.75	0.05	0.16
EDS_3	1.89	54.58	6.48	0.77	1.22	1.66	0.79	67.39	0.04	0.14
EDS_4	3.09	49.38	7.17	2.59	1.02	1.76	1.51	66.52	0.07	0.17
EDS_5	9.94	42.19	6.75	1.40	1.13	1.96	1.26	64.63	0.25	0.19

(c) 変質部① (各部の元素組成)



(d) 変質部② (500 倍)

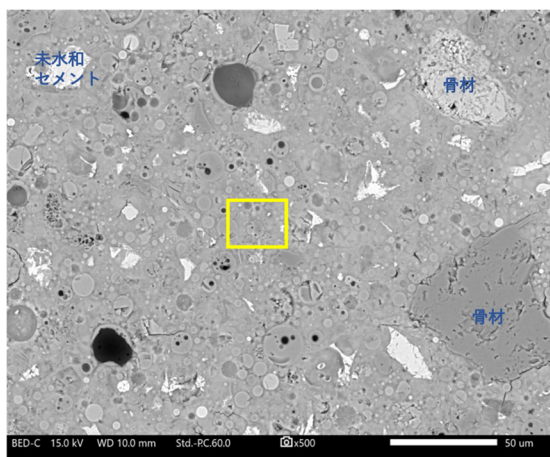


(e) 変質部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

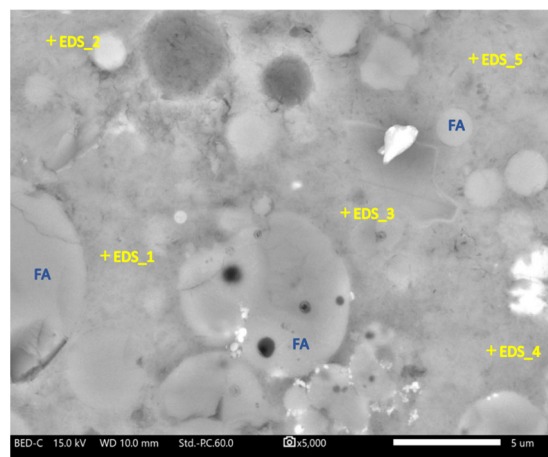
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_6	2.40	49.71	7.94	0.54	1.27	1.81	0.94	64.61	0.05	0.19
EDS_7	6.12	41.74	6.46	0.58	1.10	1.49	0.75	58.24	0.16	0.18
EDS_8	4.29	55.65	7.80	0.70	1.15	2.33	0.65	72.57	0.08	0.17
EDS_9	1.35	59.63	4.06	0.38	0.72	0.86	0.56	67.56	0.02	0.08
EDS_10	2.49	53.07	7.34	0.73	1.33	1.41	1.59	67.96	0.05	0.16

(f) 変質部② (各部の元素組成)

図 5.2-55 水中養生 No. 10 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)



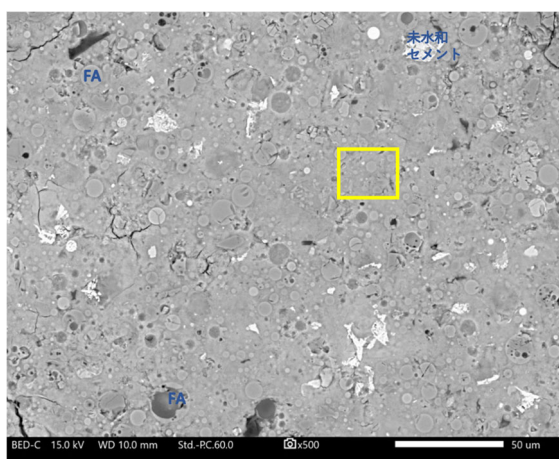
(a) 健全部① (500 倍)



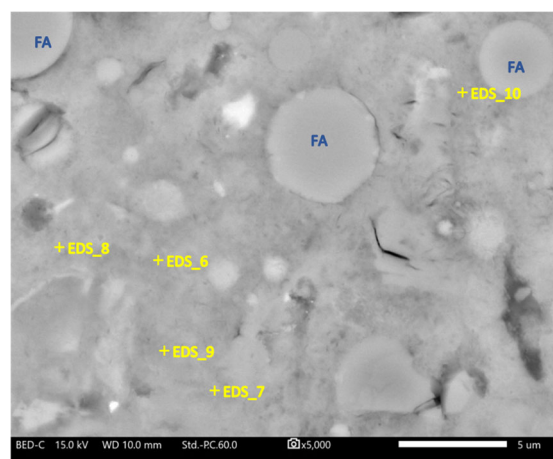
(b) 健全部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	合計	C/S	A/S
EDS_1	26.45	33.96	5.90	3.94	0.16	0.69	0.18	0.67	—	71.95	0.83	0.20
EDS_2	26.39	26.23	6.61	6.22	0.41	0.42	0.23	4.80	—	71.31	1.08	0.30
EDS_3	29.81	24.41	8.21	6.33	0.48	0.21	0.16	0.51	1.32	71.44	1.31	0.40
EDS_4	30.35	23.81	7.27	6.27	0.21	0.38	0.17	—	—	68.46	1.37	0.36
EDS_5	31.43	24.28	7.81	7.50	0.39	0.23	0.21	0.68	—	72.53	1.39	0.38

(c) 健全部① (各部の元素組成)



(d) 健全部② (500 倍)

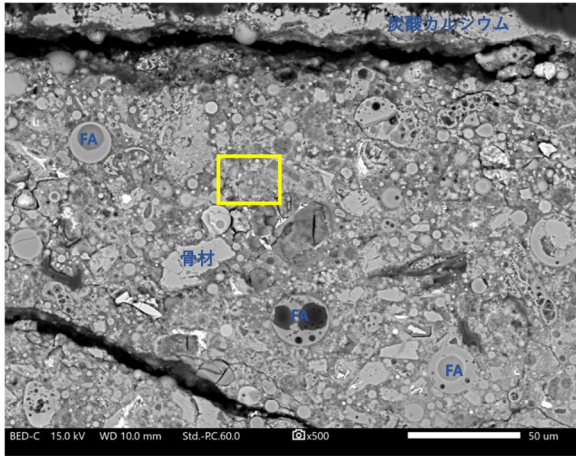


(e) 健全部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

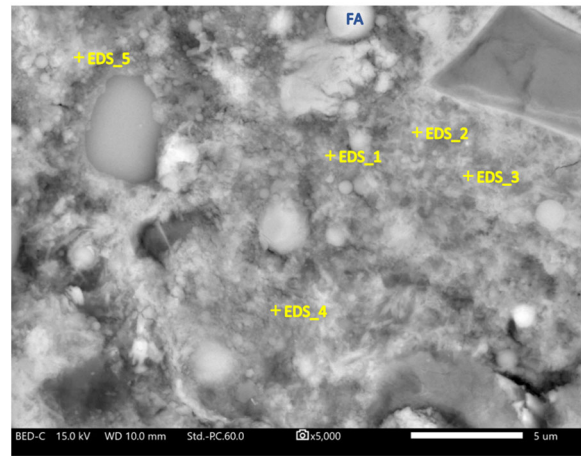
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_6	29.87	27.80	6.44	4.92	0.37	0.58	0.14	—	70.12	1.15	0.27
EDS_7	29.38	27.76	7.30	5.26	0.20	0.61	0.22	—	70.73	1.13	0.31
EDS_8	30.42	27.25	7.61	4.93	0.09	0.40	0.12	1.40	72.22	1.20	0.33
EDS_9	31.10	27.46	7.15	5.06	0.26	0.61	0.15	—	71.79	1.21	0.31
EDS_10	28.87	30.25	6.61	3.28	0.46	0.35	0.16	—	69.98	1.02	0.26

(f) 健全部② (各部の元素組成)

図 5.2-56 水中養生 No. 10 の SEM/EDS 分析結果 (2/2)



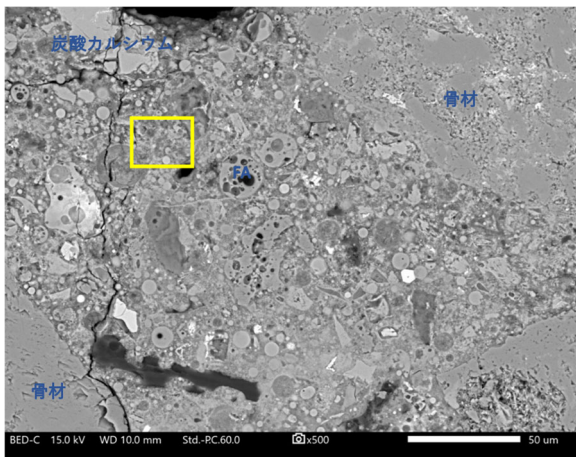
(a) 変質部① (500 倍)



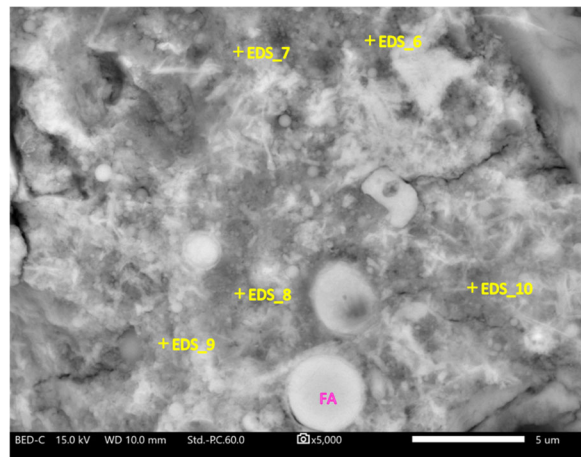
(b) 変質部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_1	13.27	34.81	6.14	0.39	1.52	0.63	1.05	57.81	0.41	0.21
EDS_2	19.84	36.70	5.61	0.47	1.22	0.99	—	64.83	0.58	0.18
EDS_3	16.49	49.35	4.86	0.51	0.82	0.67	—	72.70	0.36	0.12
EDS_4	14.78	42.14	5.65	0.73	1.56	1.17	0.96	66.99	0.38	0.16
EDS_5	36.02	21.78	5.99	1.05	0.74	1.22	—	66.80	1.77	0.32

(c) 変質部① (各部の元素組成)



(d) 変質部② (500 倍)

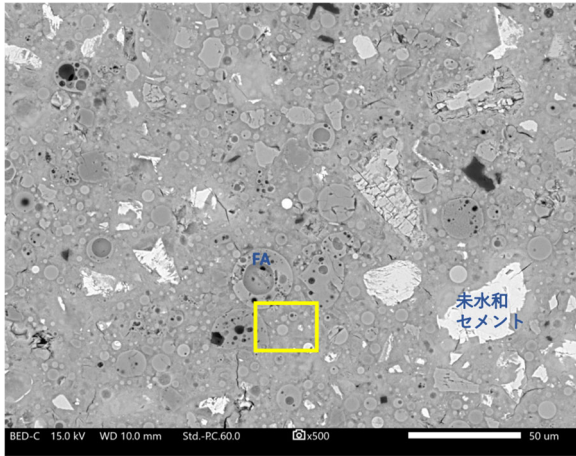


(e) 変質部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

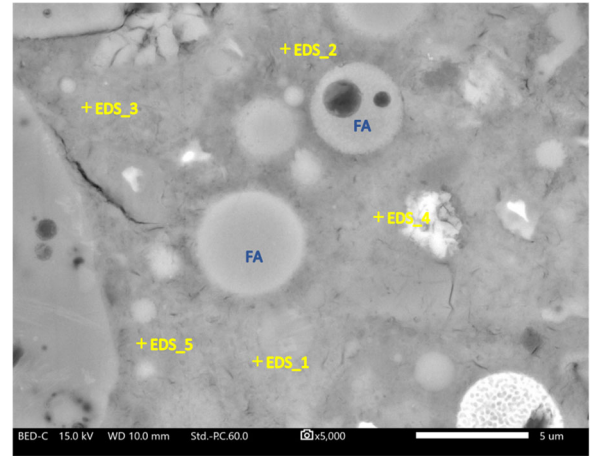
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_6	19.95	38.35	5.14	0.85	1.06	0.81	—	66.16	0.56	0.16
EDS_7	7.01	48.73	6.41	0.48	1.83	0.74	0.49	65.69	0.15	0.16
EDS_8	21.84	25.79	3.01	0.75	0.73	0.32	0.40	52.84	0.91	0.14
EDS_9	16.83	37.29	5.85	0.56	1.47	0.46	0.97	63.43	0.48	0.18
EDS_10	15.15	38.42	6.10	0.42	1.25	0.69	1.00	63.03	0.42	0.19

(f) 変質部② (各部の元素組成)

図 5.2-57 水中養生 No. 11 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)



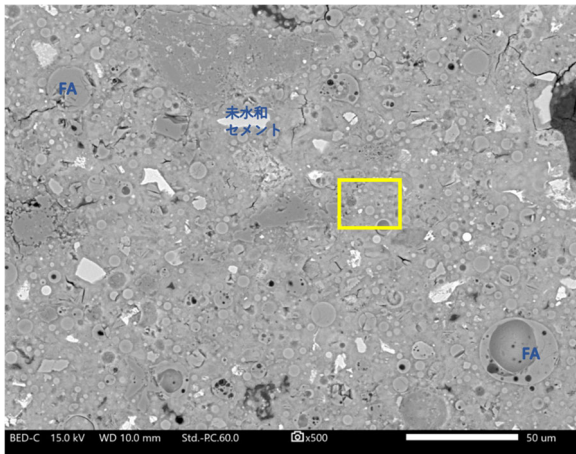
(a) 健全部① (500 倍)



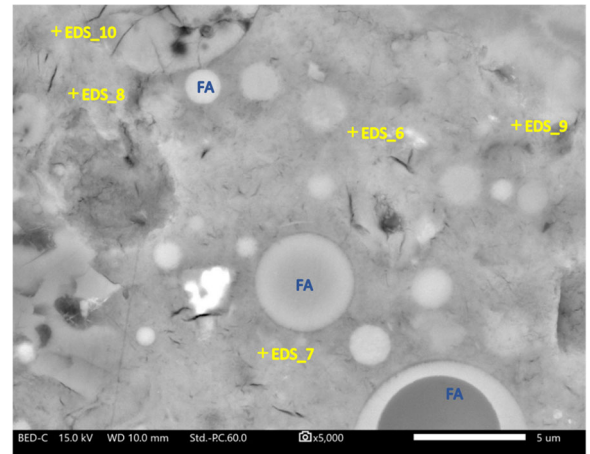
(b) 健全部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_1	25.27	28.36	8.07	3.83	0.32	0.61	0.14	—	66.60	0.95	0.34
EDS_2	25.69	25.10	5.50	4.33	0.28	0.51	0.13	0.66	62.20	1.10	0.26
EDS_3	29.50	23.97	12.01	8.36	0.16	0.44	0.17	—	74.61	1.32	0.59
EDS_4	29.35	33.82	5.56	4.30	0.33	0.44	0.18	—	73.98	0.93	0.19
EDS_5	25.15	29.47	5.08	3.05	0.32	0.66	0.10	—	63.83	0.91	0.20

(c) 健全部① (各部の元素組成)



(d) 健全部② (500 倍)

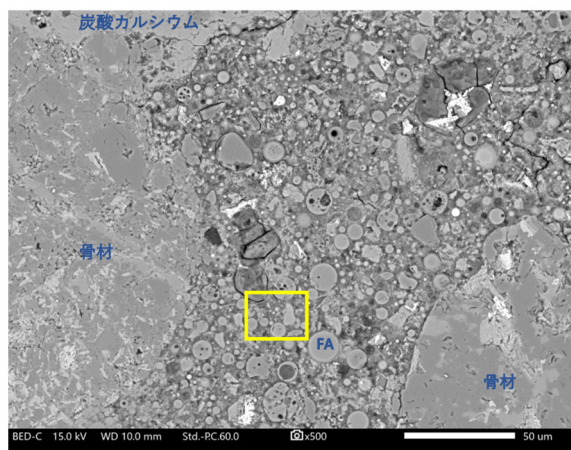


(e) 健全部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

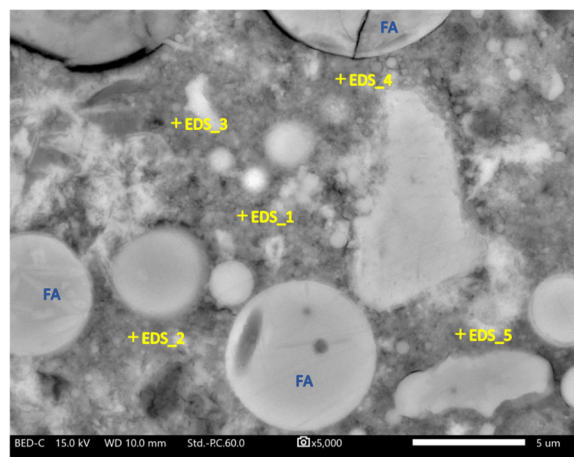
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	合計	C/S	A/S
EDS_6	27.18	33.88	5.81	3.79	0.69	0.50	0.16	—	—	72.01	0.86	0.20
EDS_7	27.97	21.48	5.17	4.44	0.35	0.38	0.19	0.52	—	60.50	1.40	0.28
EDS_8	29.02	24.81	4.44	4.04	0.30	0.41	0.10	0.95	—	64.07	1.25	0.21
EDS_9	25.26	35.86	4.12	3.94	0.72	0.26	0.12	1.40	—	71.68	0.75	0.14
EDS_10	28.98	27.84	5.08	3.81	0.94	0.31	0.13	4.71	0.81	72.61	1.12	0.22

(f) 健全部② (各部の元素組成)

図 5.2-58 水中養生 No. 11 の SEM/EDS 分析結果 (2/2)



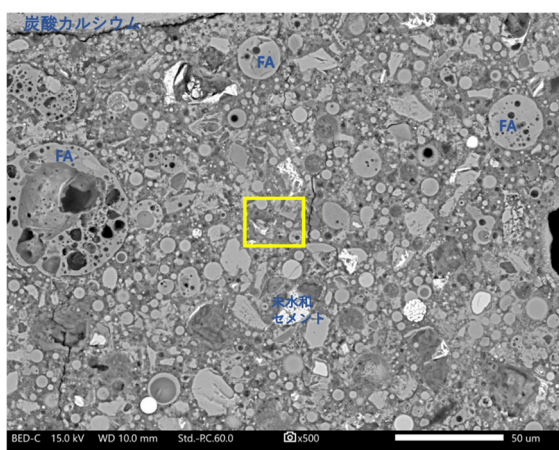
(a) 変質部① (500 倍)



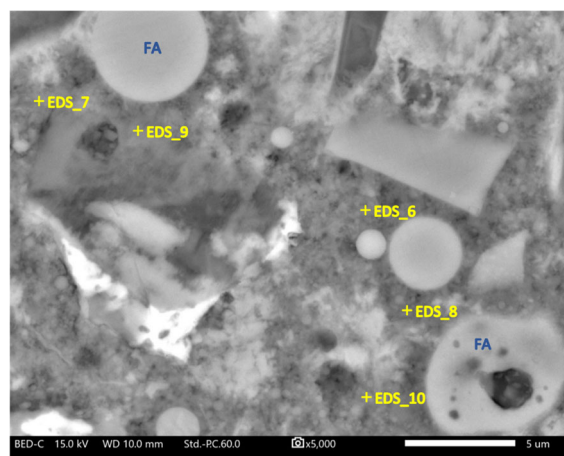
(b) 変質部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_1	6.26	50.95	8.49	0.52	1.55	1.52	0.58	69.87	0.13	0.20
EDS_2	3.99	54.12	6.91	0.53	1.88	1.12	—	68.55	0.08	0.15
EDS_3	4.07	57.74	10.73	0.43	1.75	1.43	—	76.15	0.08	0.22
EDS_4	5.72	51.36	9.37	0.65	1.76	1.00	1.06	70.92	0.12	0.22
EDS_5	7.44	60.61	4.83	0.33	1.14	0.60	0.35	75.30	0.13	0.09

(c) 変質部① (各部の元素組成)



(d) 変質部② (500 倍)

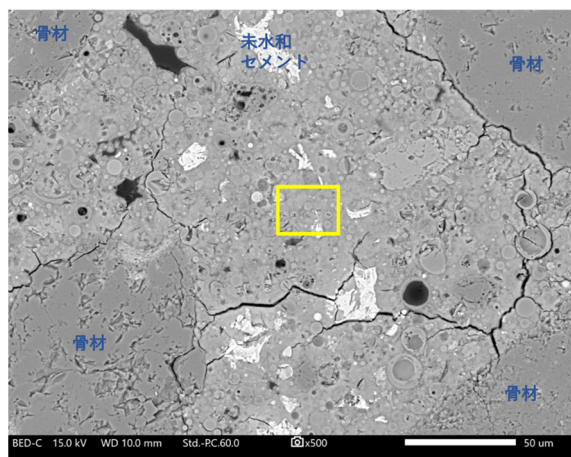


(e) 変質部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

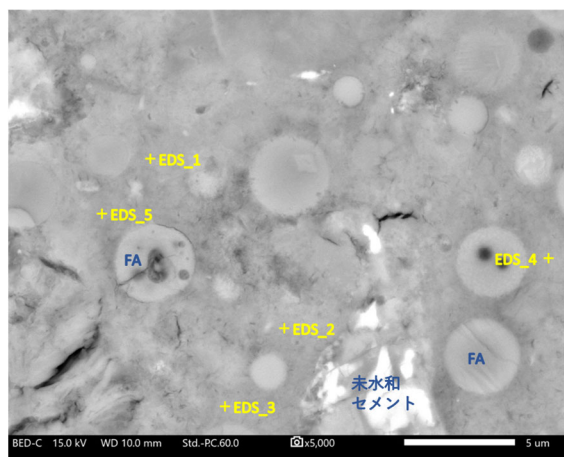
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_6	6.75	48.85	8.41	0.75	1.25	1.54	1.35	68.90	0.15	0.20
EDS_7	5.28	54.84	8.90	0.74	1.24	1.49	—	72.49	0.10	0.19
EDS_8	8.63	44.99	9.26	0.51	1.27	1.13	1.18	66.97	0.21	0.24
EDS_9	4.82	44.06	11.40	2.63	1.43	1.55	1.56	67.45	0.12	0.30
EDS_10	10.23	45.83	7.91	0.66	1.41	1.29	—	67.33	0.24	0.20

(f) 変質部② (各部の元素組成)

図 5.2-59 水中養生 No. 12 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)



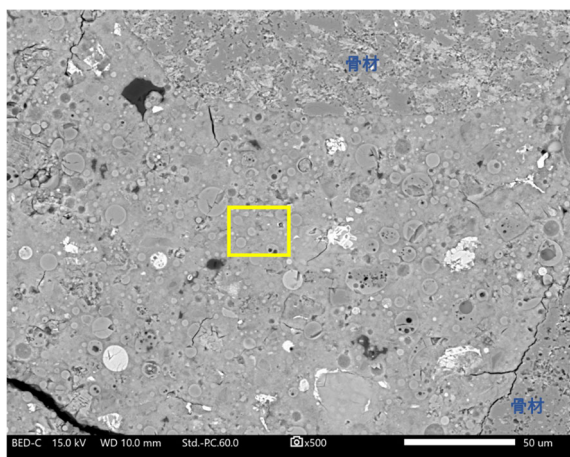
(a) 健全部① (500 倍)



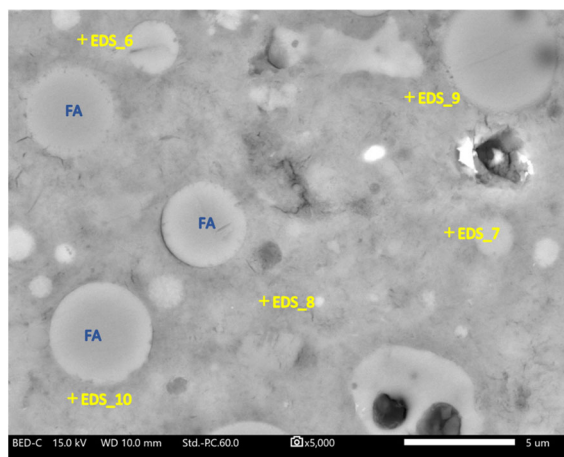
(b) 健全部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	合計	C/S	A/S
EDS_1	31.33	30.53	5.51	4.84	0.57	0.44	0.08	—	—	73.30	1.10	0.21
EDS_2	29.87	29.00	4.40	3.48	0.37	0.55	0.13	—	—	67.80	1.10	0.18
EDS_3	27.85	31.93	4.36	3.22	0.25	0.42	0.10	—	—	68.13	0.93	0.16
EDS_4	28.07	26.46	5.73	3.80	0.30	0.62	0.17	1.09	0.92	67.16	1.14	0.26
EDS_5	31.75	31.26	6.50	4.39	0.29	0.49	0.19	—	—	74.87	1.09	0.25

(c) 健全部① (各部の元素組成)



(d) 健全部② (500 倍)

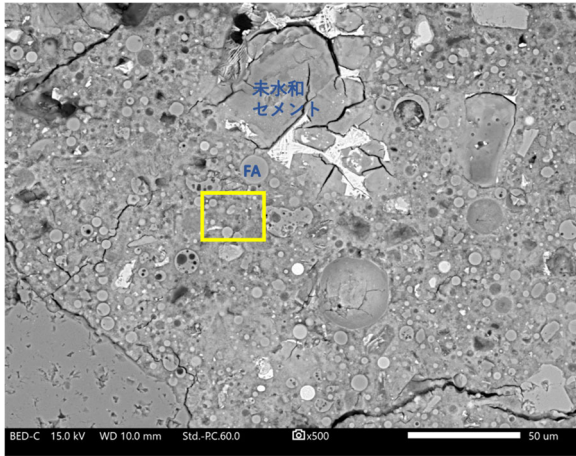


(e) 健全部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

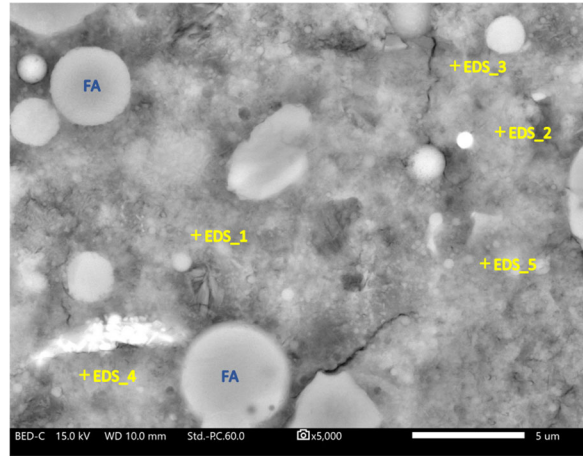
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_6	24.61	27.58	9.07	3.70	0.27	0.78	0.12	1.14	67.27	0.96	0.39
EDS_7	28.77	21.42	5.80	4.96	0.31	0.51	0.09	1.47	63.33	1.44	0.32
EDS_8	27.34	28.06	3.53	2.52	0.37	0.49	0.13	—	62.44	1.04	0.15
EDS_9	20.13	33.59	6.35	1.63	0.32	0.51	0.18	1.52	64.23	0.64	0.22
EDS_10	25.77	28.37	4.90	2.42	0.21	0.63	0.10	—	62.40	0.97	0.20

(f) 健全部② (各部の元素組成)

図 5.2-60 水中養生 No. 12 の SEM/EDS 分析結果 (2/2)



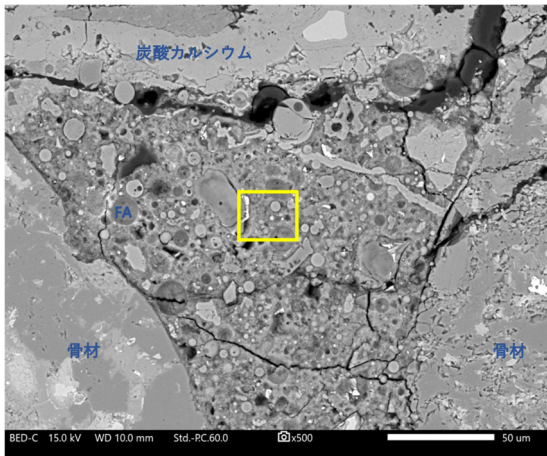
(a) 変質部① (500 倍)



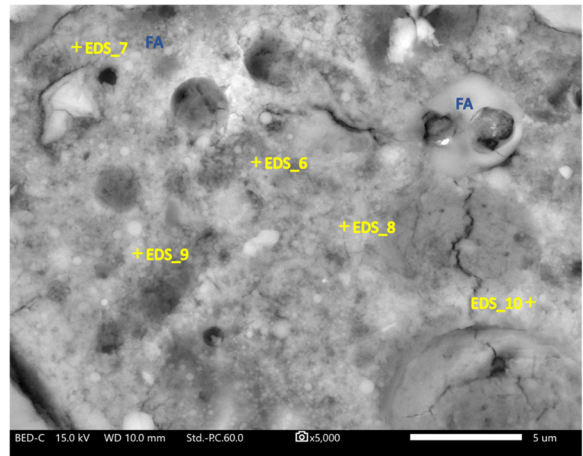
(b) 変質部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	合計	C/S	A/S
EDS_1	20.53	32.10	6.20	2.30	0.24	0.45	0.20	0.38	0.84	—	63.24	0.69	0.23
EDS_2	23.27	36.19	6.07	3.30	0.28	0.28	0.05	0.51	—	—	69.95	0.69	0.20
EDS_3	14.85	48.12	4.99	1.67	0.11	0.57	0.13	0.27	—	—	70.71	0.33	0.12
EDS_4	16.92	33.26	6.09	2.00	0.53	0.76	0.08	0.32	1.88	5.05	66.89	0.55	0.22
EDS_5	20.48	39.24	7.87	2.87	0.37	0.30	0.00	0.42	—	—	71.55	0.56	0.24

(c) 変質部① (各部の元素組成)



(d) 変質部② (500 倍)

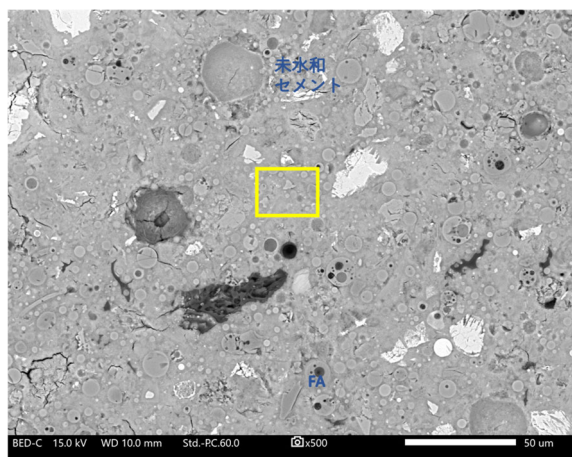


(e) 変質部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

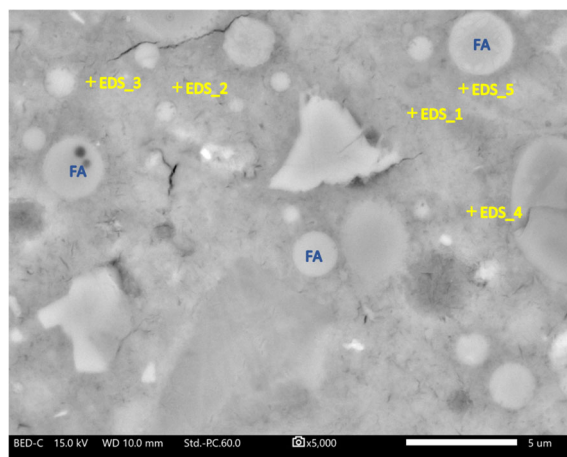
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	合計	C/S	A/S
EDS_6	15.13	39.26	8.96	0.59	2.42	0.46	0.21	0.47	0.70	0.36	68.56	0.41	0.27
EDS_7	18.95	40.54	8.07	0.47	1.10	0.41	0.31	0.18	—	—	70.03	0.50	0.23
EDS_8	16.48	38.33	7.51	0.74	1.13	0.32	0.13	0.29	0.61	—	65.54	0.46	0.23
EDS_9	15.86	41.64	8.01	0.54	1.28	0.57	0.23	0.38	1.26	—	69.77	0.41	0.23
EDS_10	16.34	46.56	9.56	0.48	1.27	0.56	0.31	0.39	1.08	—	76.55	0.38	0.24

(f) 変質部② (各部の元素組成)

図 5.2-61 水中養生 No. 13 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)



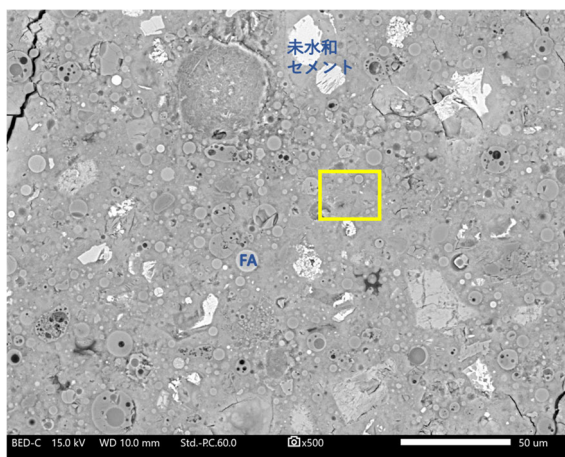
(a) 健全部① (500 倍)



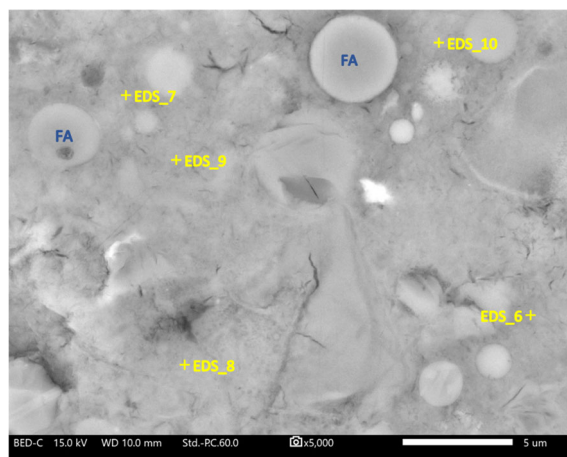
(b) 健全部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_1	29.87	22.37	9.25	6.87	1.40	0.20	0.13	0.65	70.74	1.43	0.49
EDS_2	29.12	19.54	8.86	5.31	0.52	0.43	0.14	1.30	65.22	1.60	0.53
EDS_3	25.90	21.87	4.93	2.93	0.22	0.30	0.07	1.23	57.45	1.27	0.27
EDS_4	31.13	30.34	3.45	2.93	0.23	0.42	0.14	—	68.64	1.10	0.13
EDS_5	29.77	21.26	11.00	6.32	0.81	0.32	0.06	0.78	70.32	1.50	0.61

(c) 健全部① (各部の元素組成)



(d) 健全部② (500 倍)

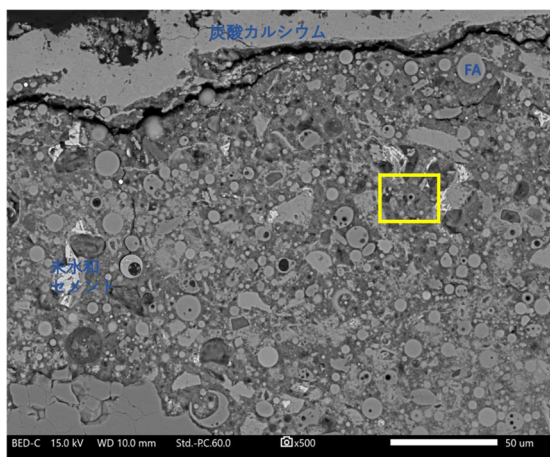


(e) 健全部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

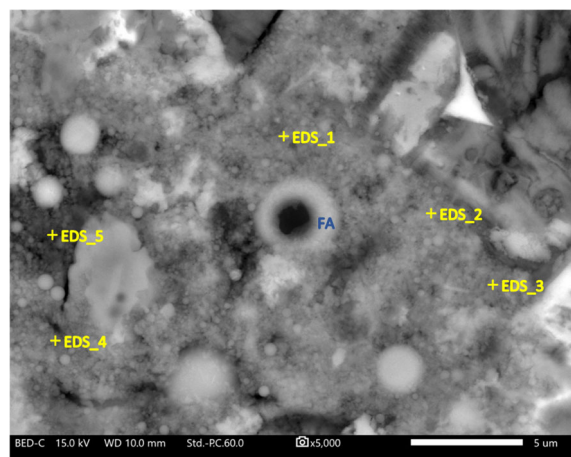
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_6	26.59	25.52	5.45	4.58	0.30	0.50	0.12	0.99	64.05	1.12	0.25
EDS_7	27.41	30.23	7.81	4.15	0.26	0.39	0.01	1.31	71.57	0.97	0.30
EDS_8	30.82	33.14	3.71	3.33	0.31	0.27	0.13	0.37	72.08	1.00	0.13
EDS_9	26.93	30.37	6.87	3.43	0.25	0.45	0.28	0.60	69.18	0.95	0.27
EDS_10	23.72	28.68	7.35	3.68	0.51	0.70	0.13	1.23	66.00	0.89	0.30

(f) 健全部② (各部の元素組成)

図 5.2-62 水中養生 No. 13 の SEM/EDS 分析結果 (2/2)



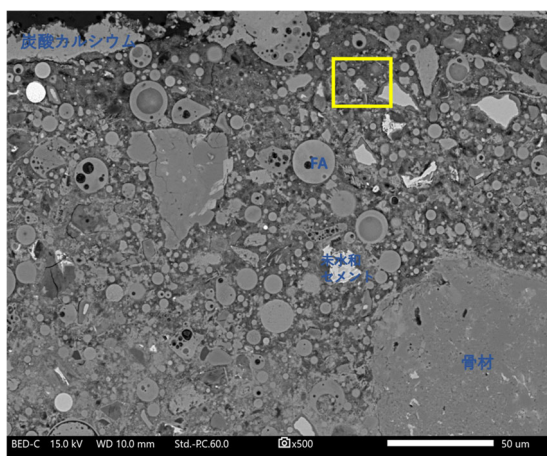
(a) 変質部① (500 倍)



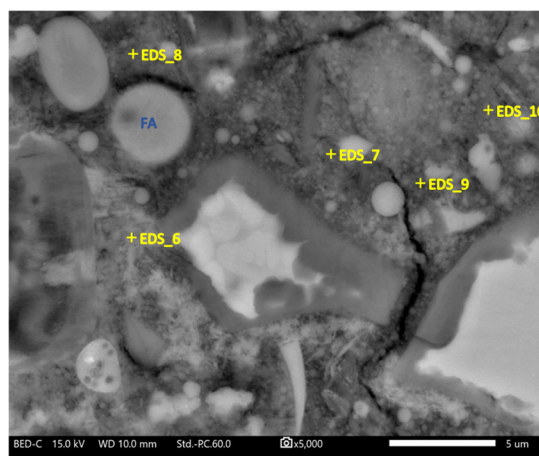
(b) 変質部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_1	4.12	58.20	7.41	0.59	1.23	1.61	1.21	74.37	0.08	0.15
EDS_2	7.14	48.13	7.17	2.68	1.03	1.75	1.88	69.78	0.16	0.18
EDS_3	6.52	50.36	7.01	2.69	0.96	1.58	1.88	71.00	0.14	0.16
EDS_4	4.60	42.17	3.76	0.43	1.36	0.51	0.95	53.78	0.12	0.11
EDS_5	5.80	41.81	5.98	0.51	1.60	0.85	2.24	58.79	0.15	0.17

(c) 変質部① (各部の元素組成)



(d) 変質部② (500 倍)

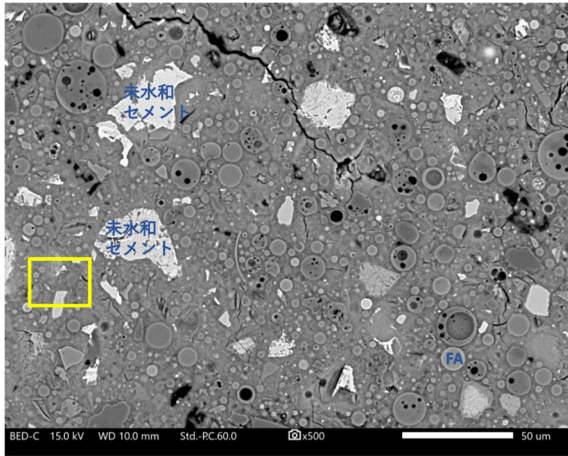


(e) 変質部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

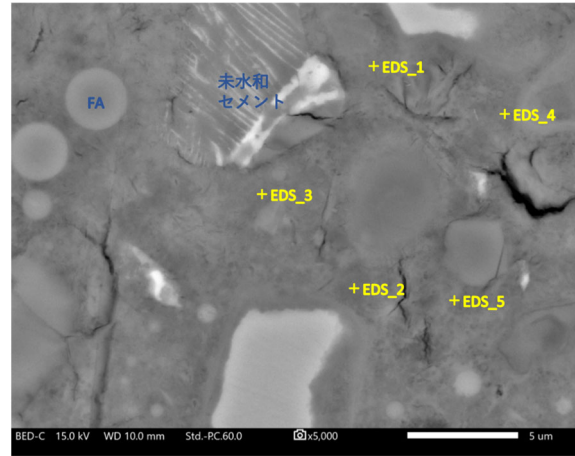
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	合計	C/S	A/S
EDS_6	10.24	44.23	9.35	0.72	1.04	1.16	0.88	—	67.62	0.25	0.25
EDS_7	3.43	49.90	10.19	0.85	1.36	1.21	—	—	66.94	0.07	0.24
EDS_8	3.64	48.82	7.86	1.19	0.87	1.16	—	—	63.54	0.08	0.19
EDS_9	5.99	47.98	10.68	1.45	1.46	1.22	0.76	0.55	70.09	0.13	0.26
EDS_10	4.07	53.55	9.92	0.72	1.10	1.18	0.80	—	71.34	0.08	0.22

(f) 変質部② (各部の元素組成)

図 5.2-63 水中養生 No. 14 の SEM/EDS 分析結果 (1/2)



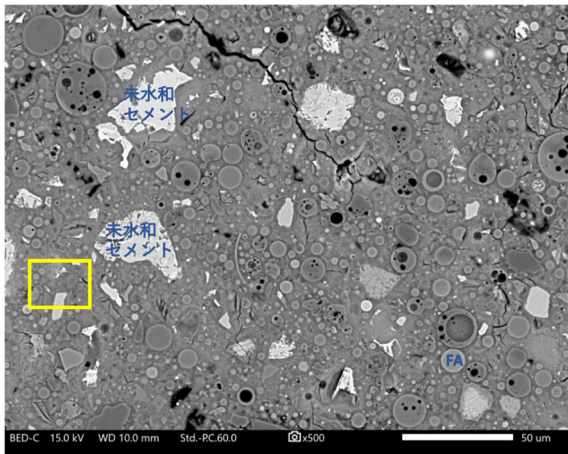
(a) 健全部① (500 倍)



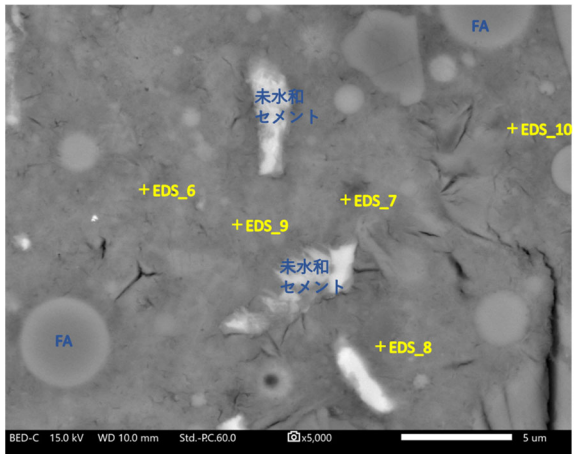
(b) 健全部① (5000 倍 : (a) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_1	29.20	27.25	7.74	5.58	0.24	0.39	—	0.94	71.34	1.15	0.33
EDS_2	21.32	21.63	7.34	4.05	0.17	1.02	—	0.98	56.51	1.06	0.40
EDS_3	28.38	28.42	8.23	5.82	0.46	0.50	0.15	1.15	73.11	1.07	0.34
EDS_4	29.21	32.59	6.76	5.64	0.23	0.43	0.25	—	75.11	0.96	0.24
EDS_5	28.95	26.31	10.96	8.36	0.31	0.47	—	0.85	76.21	1.18	0.49

(c) 健全部① (各部の元素組成)



(d) 健全部② (500 倍)



(e) 健全部② (5000 倍 : (d) の黄色四角領域)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	合計	C/S	A/S
EDS_6	29.66	30.52	5.61	5.08	0.19	—	0.27	—	71.33	1.04	0.22
EDS_7	30.97	21.87	6.6	6.07	—	—	—	—	65.51	1.52	0.36
EDS_8	30.25	25.47	4.97	4.06	0.37	—	—	1.14	66.26	1.27	0.23
EDS_9	31.08	38.33	5.13	4.52	—	0.61	—	—	79.67	0.87	0.16
EDS_10	29.94	27.32	9.16	8.75	0.6	—	—	—	75.77	1.17	0.40

(f) 健全部② (各部の元素組成)

図 5.2-64 水中養生 No. 14 の SEM/EDS 分析結果 (2/2)

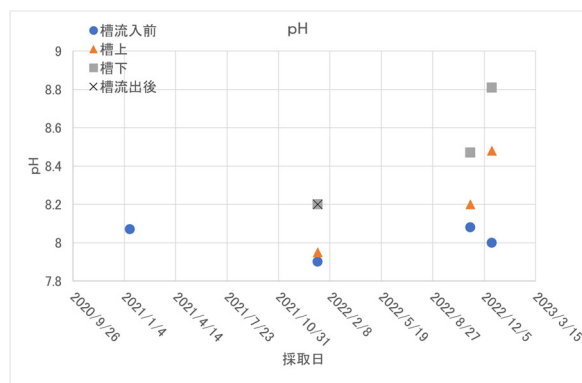
(g) 水質分析

3 か所で採取した水の分析を実施した。表 5.2-23 に結果を記す。各年度で水質に変化が生じているのかを確認するため図 5.3-65 と図 5.2-66 に過年度までの水質分析結果と併せて示す。これらの図から以下のことがわかる。

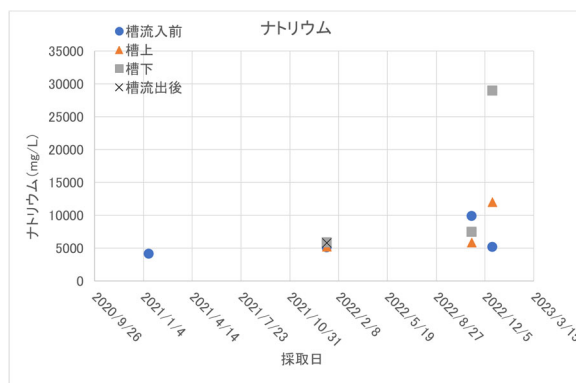
- ・ pH に着目すると、槽流入前の pH は概ね 8 であるが、上側槽、下側槽に行くにつれて高くなる傾向がみられる。
- ・ 元素濃度に着目すると、各槽から採取した水の濃度は、流入前の地下水の濃度とあまりかわらない。しかし、2022 年 12 月に採取した水試料については、カルシウムを除く全元素の濃度が、流入前の濃度と比較して高くなっている。これは、槽下から外部に流出する量が減少したため、濃縮された可能性が考えられる。

表 5.2-23 分析結果一覧

採取日	2022 年 11 月 8 日			2022 年 12 月 20 日		
試料名	槽流入前	上側槽内	下側槽内	槽流入前	上側槽内	下側槽内
分析項目						
pH	8.08	8.20	8.47	8.00	8.48	8.81
温度 (°C)	21.2	21.8	21.1	21.2	21.8	22.7
ナトリウム (mg/L)	9900	5900	7500	5200	12000	29000
カリウム (mg/L)	140	97	110	93	200	380
カルシウム (mg/L)	69	61	62	56	74	70
マグネシウム (mg/L)	100	85	83	95	130	190
塩素イオン (mg/L)	8900	9400	12000	7400	14000	28000
硫酸イオン (mg/L)	650	740	930	550	1100	2500
アルミニウム (mg/L)	0.015	0.017	0.021	0.011	0.028	0.039
シリカ (mg/L)	17	19	22	27	44	67
炭酸水素イオン (mg/L)	1200	1300	1600	1400	2400	3900

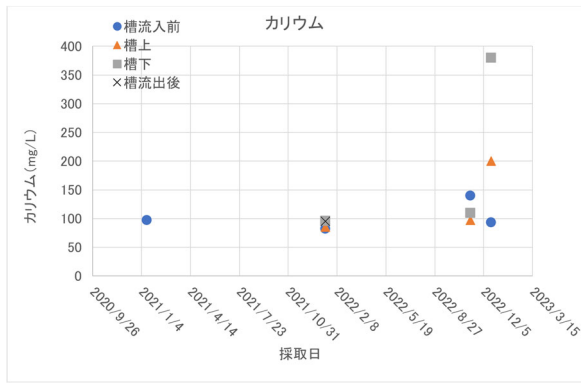


(a) pH

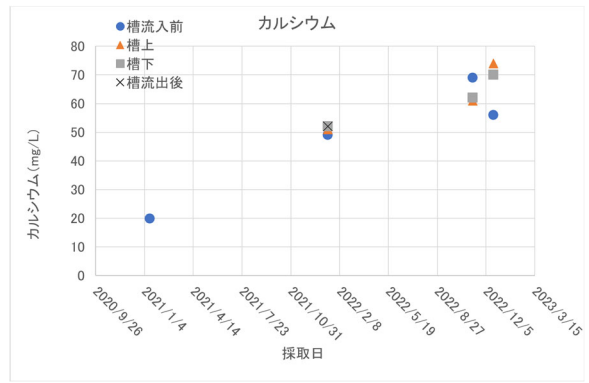


(b) Na

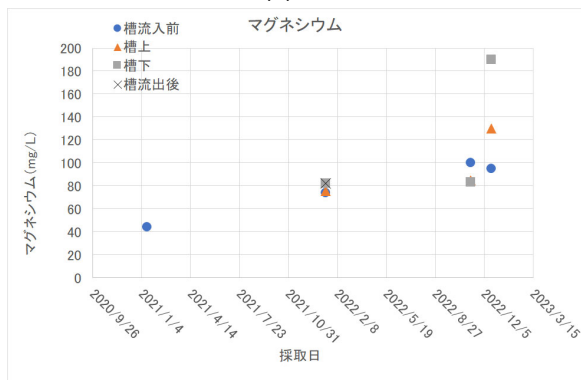
図 5.2-65 水質分析結果(1/2)



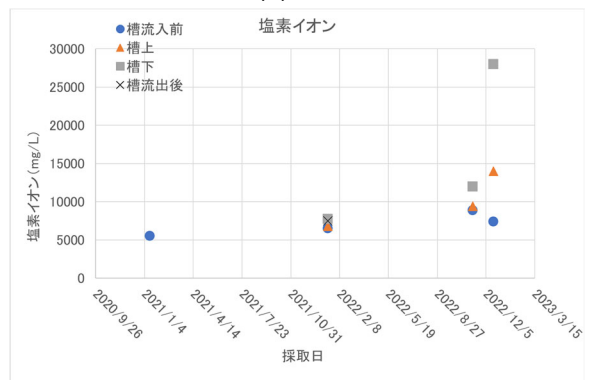
(c) K



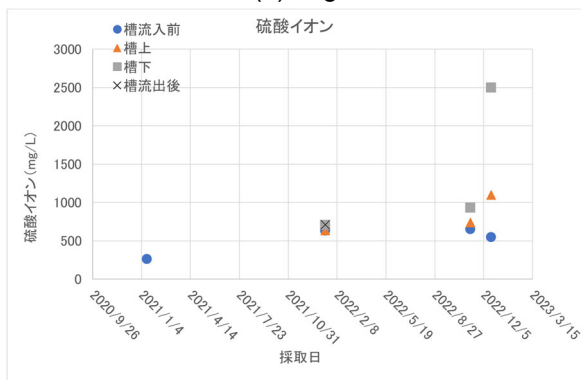
(d) Ca



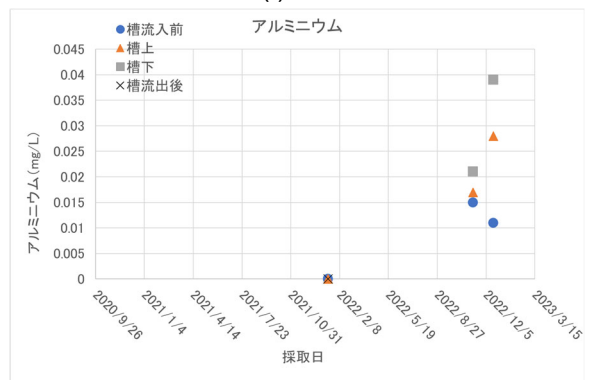
(e) Mg



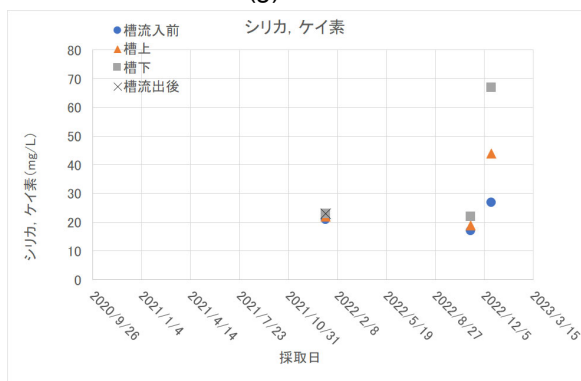
(f) Cl



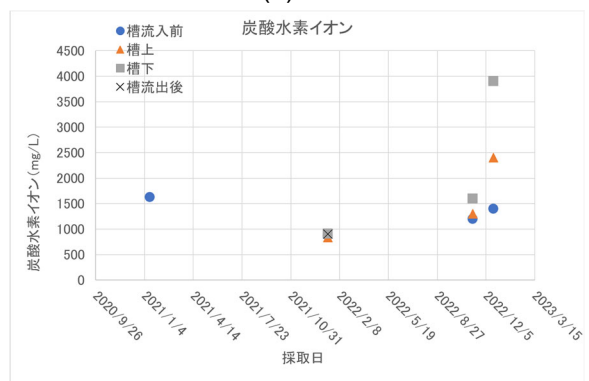
(g) SO₄



(h) Al



(i) Si



(j) HCO₃

図 5.2-66 水質分析結果 (2/2)

(4) 吹付けコンクリート供試体の室内物性試験および分析結果のまとめ

(a) 物理特性における気中養生試験体と水中養生試験体の相違点

2020 年度から実施してきた気中養生試験体と水中養生試験体の相違点を表 5.2-24 に示す。水中養生試験体の方が気中養生試験体よりセメントの水和反応が進み、コンクリートの空隙構造が緻密になるため、圧縮強度、割裂引張強度および静弾性係数は大きくなり、透水係数は小さくなった。また、材齢 2 年では、水中養生試験体の圧縮強度は材齢 1 年と同程度であったが、気中養生試験体は中性化の進行により、わずかに圧縮強度の低下が確認された。さらに、超音波の透過速度は空隙量に加えて、試験体の含水状態の影響を受け、固体＞液体＞気体の順に透過速度が大きくなる。そのため、透過速度を用いて算出する動せん断弾性係数および動弾性係数においては、水和反応による空隙構造の緻密化および含水状態によって、水中養生試験体の方が気中養生試験体より大きくなった。なお、気中養生試験体における圧縮強度以外の強度特性については中性化の影響をあまり受けておらず、水中養生試験体については表層 1 mm 程度の範囲で溶脱があるものの、強度特性に大きく影響を及ぼしていなかった。

表 5.2-24 各試験における気中養生試験体と水中養生試験体の相違点

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

(b) 化学的変質特性における気中養生試験体と水中養生試験体の相違点

2020 年度から実施してきた EPMA および SEM/EDS の測定結果より気中養生試験体と水中養生試験体の変質特性の相違点を表 5.2-25 に示す。フェノールフタレインの呈色反応による中性化深さの測定では、pH が低下すると赤色を示さず、その範囲が中性化深さとして計測される。気中養生および水中養生のいずれの供試体も試料表面に中性化が生じているが、変質反応としては別の反応に起因している。気中養生試験体における変質は炭酸化反応であり、水中養生試験体では成分の溶脱による変質である。本試験の条件においては、水中養生試験体よりも気中養生試験体の方が変質範囲は深く、炭酸化反応による影響の方が大きくなっていると判断される。炭酸化反応の場合、CO₂ の固相への固定により組織が緻密化する場合もあるが、HFSC コンクリートの場合は、C/S が低い C-S-H が主要なセメント水和鉱物となり、炭酸化により多孔化する結果となった。空隙の増加は、圧縮強度の低下となって物理特性に影響を及ぼしていた。水中養生においても成分の溶脱により微細構造は多孔化するが、材齢 1 年から 2 年にかけて大きく進行する状況は確認されず、変質領域は表層の狭い範囲だったため、強度への影響は認められなかったものと考えられる。

表 5.2-25 気中養生試験体と水中養生試験体の変質特性の相違点

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

(c) 既存の知見との比較

OPC コンクリートに比べてセメント量が少なく、初期における強度発現が低い HFSC コンクリートは、圧縮強度を設計基準強度以上とするために、OPC コンクリートより低水結合材比に設定する。また、低水結合材比による流動性の低下を、高性能 AE 減水剤の添加によって抑制することが多い。本試験の HFSC コンクリートは材齢 28 日で 53.9 N/mm² であり、吹付けコンクリートの強度特性としては十分な性能を有している。さらに、HFSC コンクリートはシリカフュームおよびフライアッシュを含んでおり、長期に渡って強度発現が継続し、コンクリートが密実となるため、水中養生していた試験体は材齢 1 年までに強度が増大する結果となった。空隙率や透水係数についても OPC コンクリートより小さくなると推察される。

一方、中性化についてはセメント量が少ないため、OPC コンクリートに比べて進行が速くなる傾向にある。一般的な OPC コンクリートは中性化により空隙構造が緻密化するため、強度は増大する傾向にある。HFSC コンクリートの場合、セメント量が少なく、シリカフュームおよびフライアッシュの量が多い配合であるため、OPC コンクリートのような傾向ではなく、中性化により空隙構造が粗大化することがあると報告されている(佐々木ほか, 2007)。本試験においても、材齢 1 年から材齢 2 年にかけて気中養生試験体の強度低下が認められ、同様な傾向を示した。

一般的には、吹付けコンクリートに求められている性能が短期強度であるが、回収可能性維持の観点から、長期材齢における吹付けコンクリートの特性や変質の確認は重要なデータの蓄積、大量に混和材を含んだコンクリートにおける特性や変質の確認、変質した試験体の強度特性のデータ収集が、社会の信頼感を更に高めていく上で、重要であると考えられる。

5.3 坑道周辺地質環境の長期的な変化に関する解析

本章では、2020 年度の子察的解析と、2021 年度の長期変化解析において実施した坑道周辺地質環境の解析結果を踏まえた上で、事例として幌延深地層研究センター（以下「幌延 URL」という）の深度 350 m 坑道周辺部を対象に、坑道閉鎖後における坑道周辺の地質環境の経時変化の解析を実施する。2022 年度は、2021 年度までに得られた知見などを活用しつつ、より現実に即した解析を行うことを志向したモデルやパラメータの見直し等を行った。

5.3.1 長期変化解析の概要

本節の検討では、2021 年度までに事例とした幌延 URL の坑道周辺の地質環境概念モデルの構築と、その概念モデルに基づく 1000 年間の坑道開放状態を仮定した解析評価を行い、長期にわたる坑道開放が坑道周辺地質環境の変化に及ぼす影響を評価してきた。2022 年度は、最終的な目標であった、坑道を埋め戻した後の坑道周辺の地質環境の回復過程の解析を実施するとともに、その解析結果を踏まえた地層処分システムの安全評価等への影響について概念的な検討を実施した。さらに、この際、2021 年度までの知見を踏まえた、より現実に近いモデル化やパラメータの見直しを行うとともに、それらを用い 1000 年の坑道開放状態の再解析も実施した。以降に、これらの成果について詳述する。

(1) 2022 年度の解析の流れ

解析の流れを図 5.3-1 に示す。始めに、2021 年度までの解析評価と同様に、坑道掘削時の坑道周辺岩盤における EDZ の状態等を初期条件とした坑道開放状態の力学的長期変化を解析し、坑道開放坑期間中の坑道周辺岩盤の透水係数や弾性係数の経時変化を求め、次に、この経時変化を基に岩盤の水理特性を設定して、坑道開放状態の水理学的長期変化解析(多成分気液二相流解析)を行った。そして、設定した坑道開放期間(本解析では 50,100,200,300 年)に達したところで、その状態を初期条件とし坑道を埋め戻した後の水理学的長期変化解析(多成分気液二相流解析)を実施し、坑道周辺地質環境の回復状況を解析評価した。なお、坑道を埋め戻した後の解析では、岩盤の物性値の変化はないものとし、解析対象期間は坑道開放期間を含めて 1,000 年間とした。

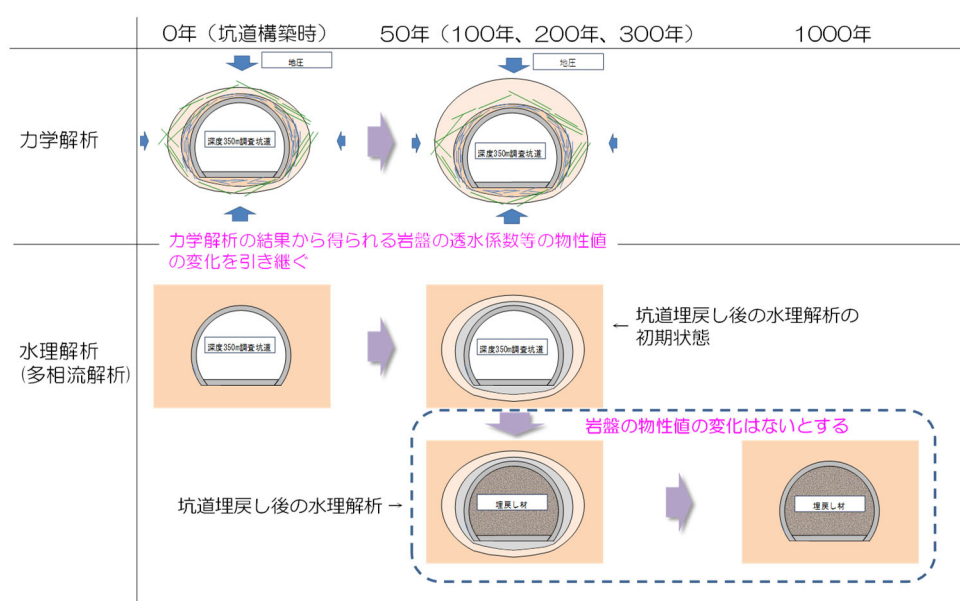


図 5.3-1 解析の流れ

(2) 解析ケースの設定

本解析では、岩盤の物性値等は、岩盤のクリープ変形が早くすすみ EDZ の長期的な変化が保守的になる 2021 年度の力学的・水理学的長期変化解析の Case5 をベースに設定した。解析ケースは、前述の条件を踏まえ、表 5.3-1 のように設定した。

表 5.3-1 解析ケース

解析ケース	Case7	Case8	Case9	Case10
坑道開放期間	50 年	100 年	200 年	300 年

(a) 力学的長期変化解析

力学的長期変化解析における EDZ を含む岩盤、支保工のモデル化・パラメータの設定については、2020 年度、2021 年度と同様であるため、詳細は過年度の報告書（原子力機構・原環境整センター，2021；2022）を参照されたい。図 5.3-2 図 5.1-1 は、2021 年度までに構築した坑道周辺の岩盤力学概念モデルを示しており、本解析も同様のモデルを用いた。

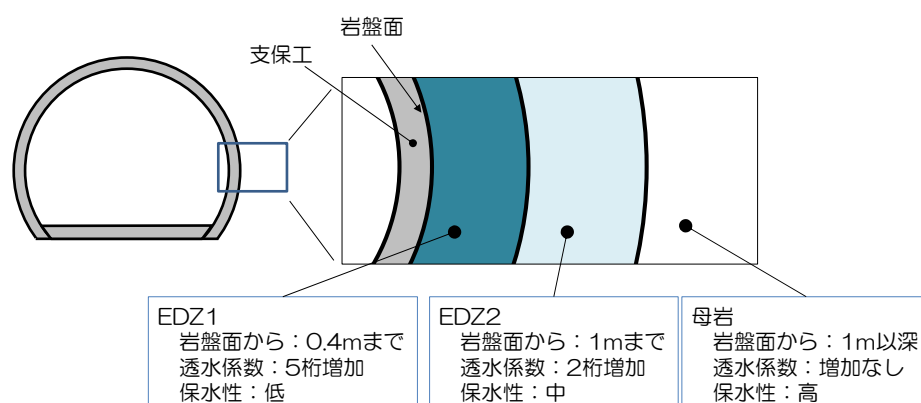


図 5.3-2 力学長期変化解析の初期状態

(i) 解析条件の設定

坑道周辺岩盤の物性値を表 5.3-2 に示す。なお、本解析では、掘削に伴う支保工設置時の応力解放率 78%で、支保工は弾性体（等価ヤング率 E は $E=22.5$ GPa、等価ポアソン比 ν は、 $\nu=0.20$ ）としてモデル化している。

初期応力は、鉛直応力 $\sigma_z=5.63$ MPa、水平応力 $\sigma_x=5.06$ MPa とし、主応力の方向は、鉛直・水平に一致するものとしている。

また、後述の水理学的長期変化解析で重要となる、坑道周辺岩盤の透水性変化のモデル化にあたっては、母岩の部分は長期変形によってせん断破壊が、EDZ の部分は引張破壊が生じることにより発生すると仮定し、せん断破壊き裂および引張破壊き裂を対象とした室内透水試験結果から、応力変化と透水性変化をモデル化し解析に組み込んだ。

力学解析のモデルは、図 5.3-3 に示す通りであり、平面ひずみ条件を仮定した 2 次元解析としている。2020 年度、2021 年度と同じものである。また解析コードは、市川・亀村による有限要素法の解析コードを基にして、前述のクリープ変形を表現するコンプライアンス可変型構成方程式の構成則や、透水性変化のアルゴリズムを組み込んだ外注先が独自に開発したものをを用いた。

表 5.3-2 坑道周辺岩盤の物性値

	母岩	EDZ1	EDZ2
一軸圧縮強度 (MPa)	15.4	1.73	3.49
ヤング率 (GPa)	1.82	0.172	0.461
ポアソン比 (-)	0.17	0.17	0.17
粘着力 (MPa)	5.9	0.577	1.09
内部摩擦角 (°)	26.0	22.9	26.0
時間依存性を示すパラメータ n_0	18	18	18
破壊進行性を表すパラメータ m	18	18	18
透水係数の初期値 (m/s)	8.2×10^{-12}	8.2×10^{-7}	8.2×10^{-10}

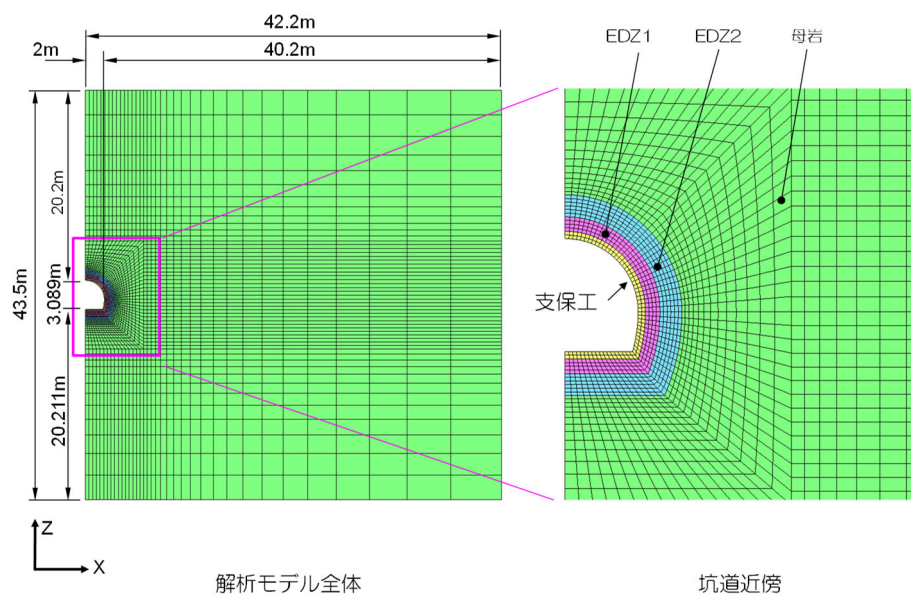


図 5.3-3 力学的長期変化解析の解析モデル

(ii) 解析結果

坑道周辺岩盤の透水係数の増加率の経時変化を図 5.3-4 に示す。これらの図は、EDZ1、EDZ2、母岩のいずれの領域においても、母岩の透水係数の初期値 (8.2×10^{-12} m/s) に対する倍率で示されている。これらの図によると、EDZ1 と EDZ2 では透水係数の経時変化が見られる。一方、母岩では透水係数の経時変化は見られず、EDZ の領域は拡大しなかった。これは、坑道開放期間中、母岩ではせん断破壊が発生しなかったためであるが、支保工を弾性体としてモデル化しているため、岩盤の変形を抑え込んで拘束圧が増えたことにより見かけの岩盤強度が増加したためである。

EDZ1 と EDZ2 では、透水係数の変化が見られたために、より詳細な変化を見るために、増加率でなく透水係数のそのもの値を図 5.3-5 と図 5.3-6 に示す。掘削後 1 年までの間に EDZ1 の底盤部、側壁部、天端部において、透水係数の増加が見られた。特に、底盤部の中央部の増加が著しい。ただし、EDZ1 の透水係数に経時変化はあまり見られなかった。

EDZ2 においても、掘削後 1 年までの間に透水係数の変化が見られた。その後、底盤部および側壁部の内側において透水係数の緩やかな増減の変化が見られたが、それ以外の隅角部や側壁部の外側などでは、あまり変化が見られなかった。

坑道周辺岩盤のヤング率の増加率の経時変化を図 5.3-7 に示す。この図では、EDZ1、EDZ2、母岩の境界を桃色線で区分しており、表 5.3-2 の EDZ1、EDZ2、母岩それぞれのヤング率の初期値からの変化を示している。この図によると、掘削後 1 年までの間に、底盤部の EDZ1 と EDZ2 のヤング率の低下が顕著である。また、側壁部や天端の EDZ1 でもヤング率の低下が見られる。その後も底盤部では EDZ1 と EDZ2 共に低下した領域が拡大し続けた。さらに、側壁部の EDZ1 と EDZ2 境界付近でも低下した領域が見られた。このようなヤング率が低下した領域は、クリープ変形が起きている領域であることを示している。また、クリープ変形の進行によって破壊が進み、それによって応力レベルが低下し、透水性が増加したことを示唆している。

また、坑道周辺岩盤のポアソン比の経時変化を図 5.3-8 に示す。図 5.3-7 から分かる通り、岩盤のクリープ変形が進行してヤング率が低下すると、岩盤のコンプライアンスが増加したことになり、ポアソン比は増加することになる。よって、この図は、ヤング率の変化と対応した変化を示している。

2022 年度の水理学的長期変化解析では、ここで得られた岩盤の透水係数、ヤング率、ポアソン比の経時変化の情報を条件設定に用いた。

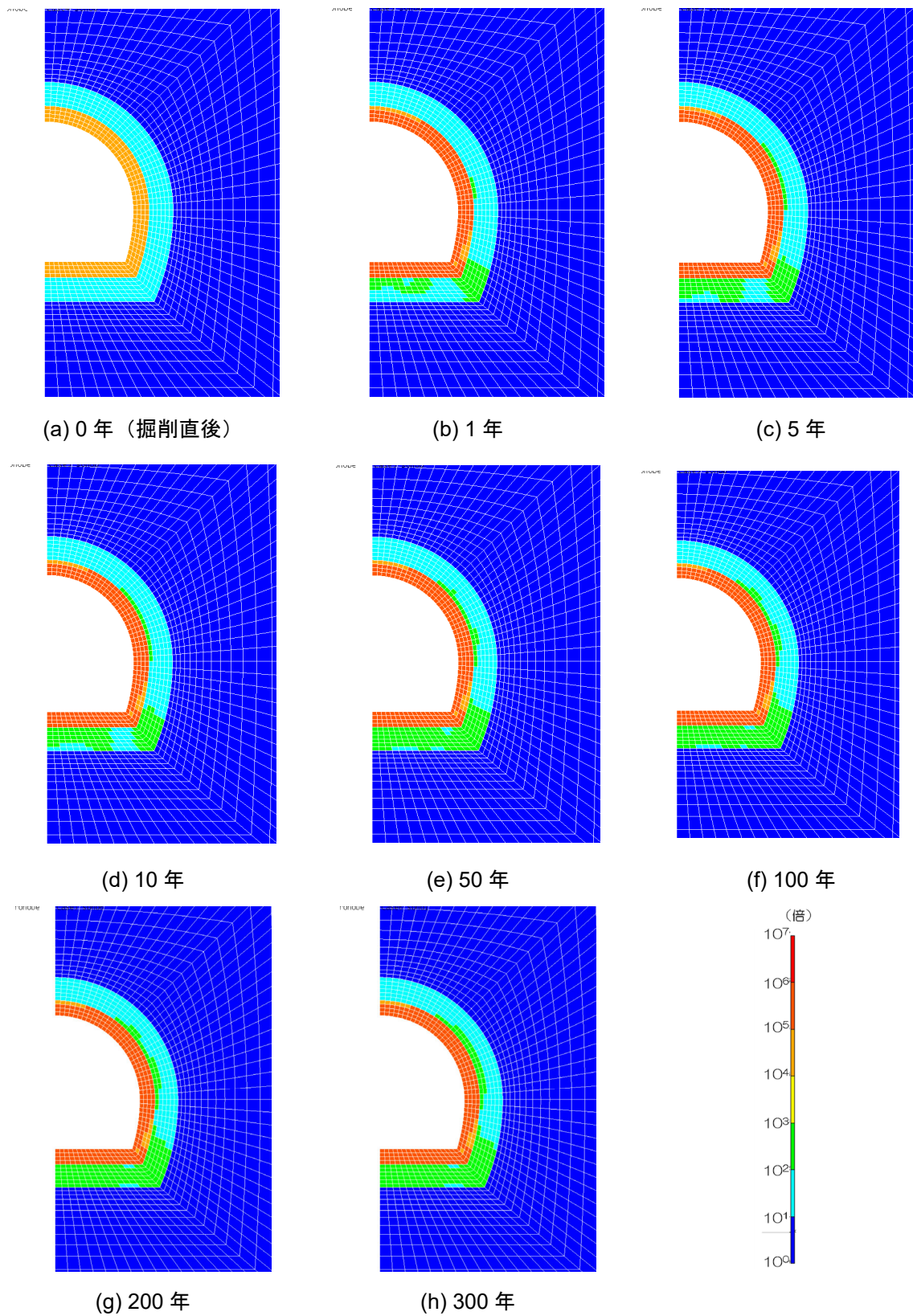
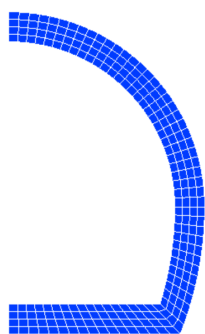
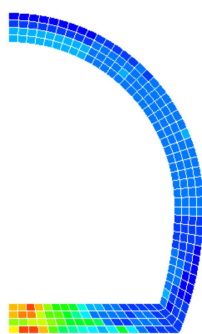


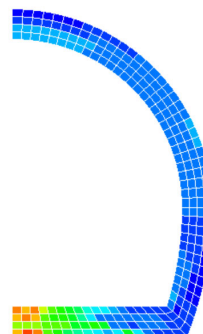
図 5.3-4 坑道周辺岩盤の透水係数増加率の経時変化



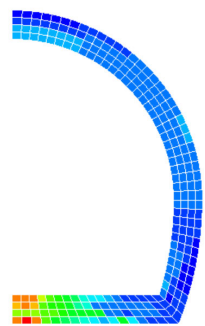
(a) 0 年（掘削直後）



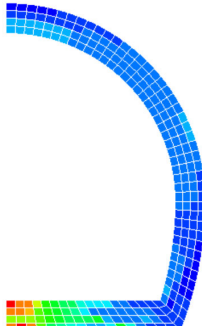
(b) 1 年



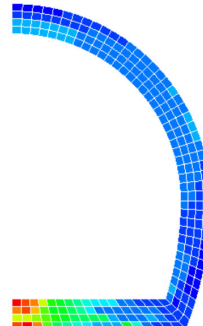
(c) 5 年



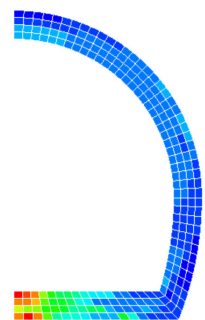
(d) 10 年



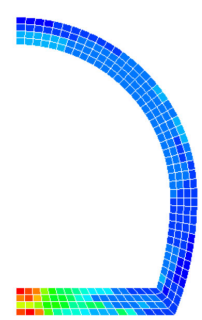
(e) 50 年



(f) 100 年



(g) 200 年



(h) 300 年

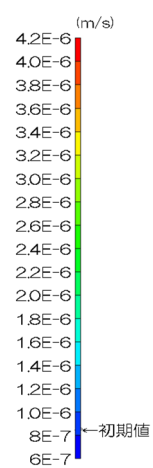


図 5.3-5 EDZ1 の透水係数の経時変化

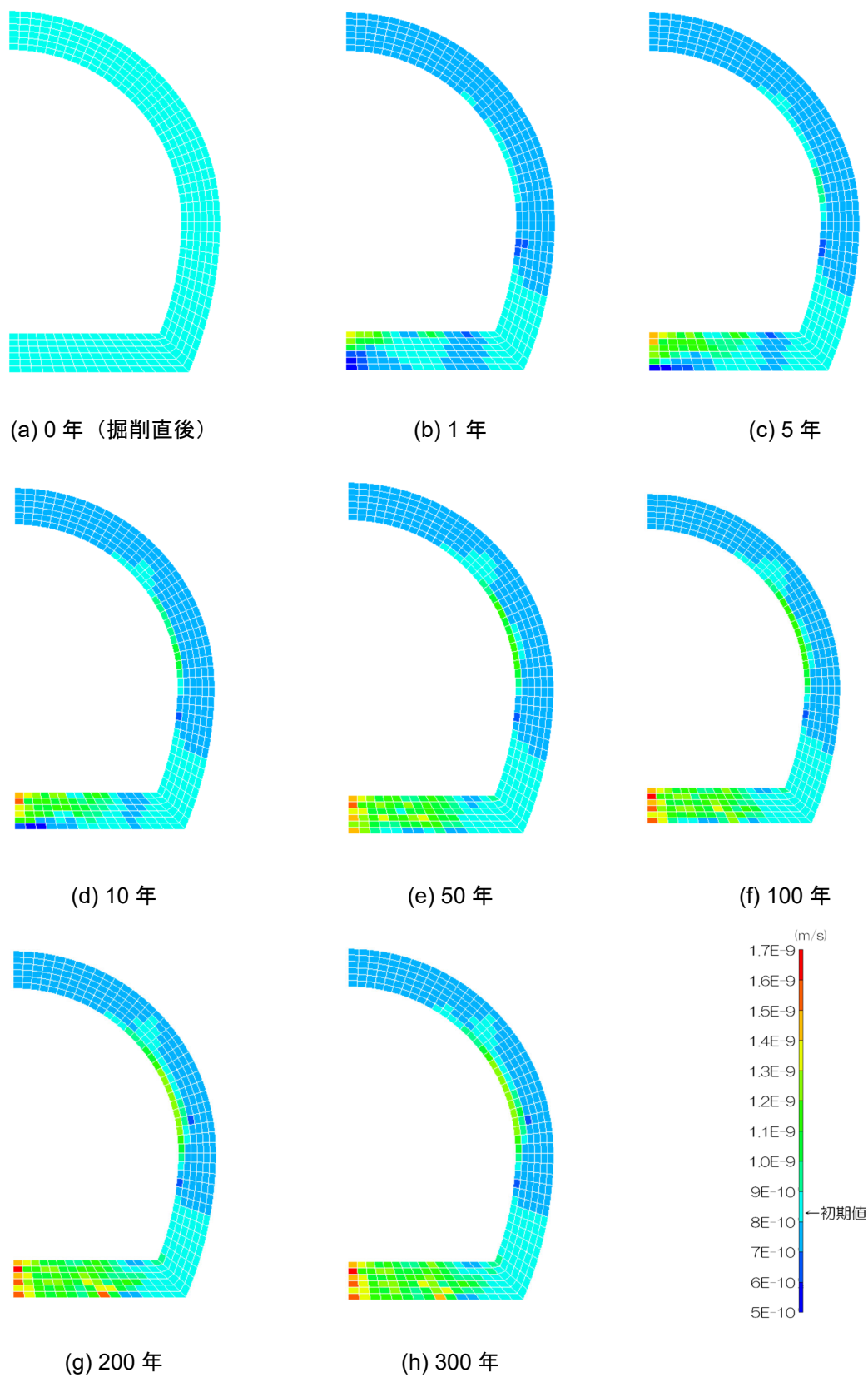


図 5.3-6 EDZ2 の透水係数の経時変化

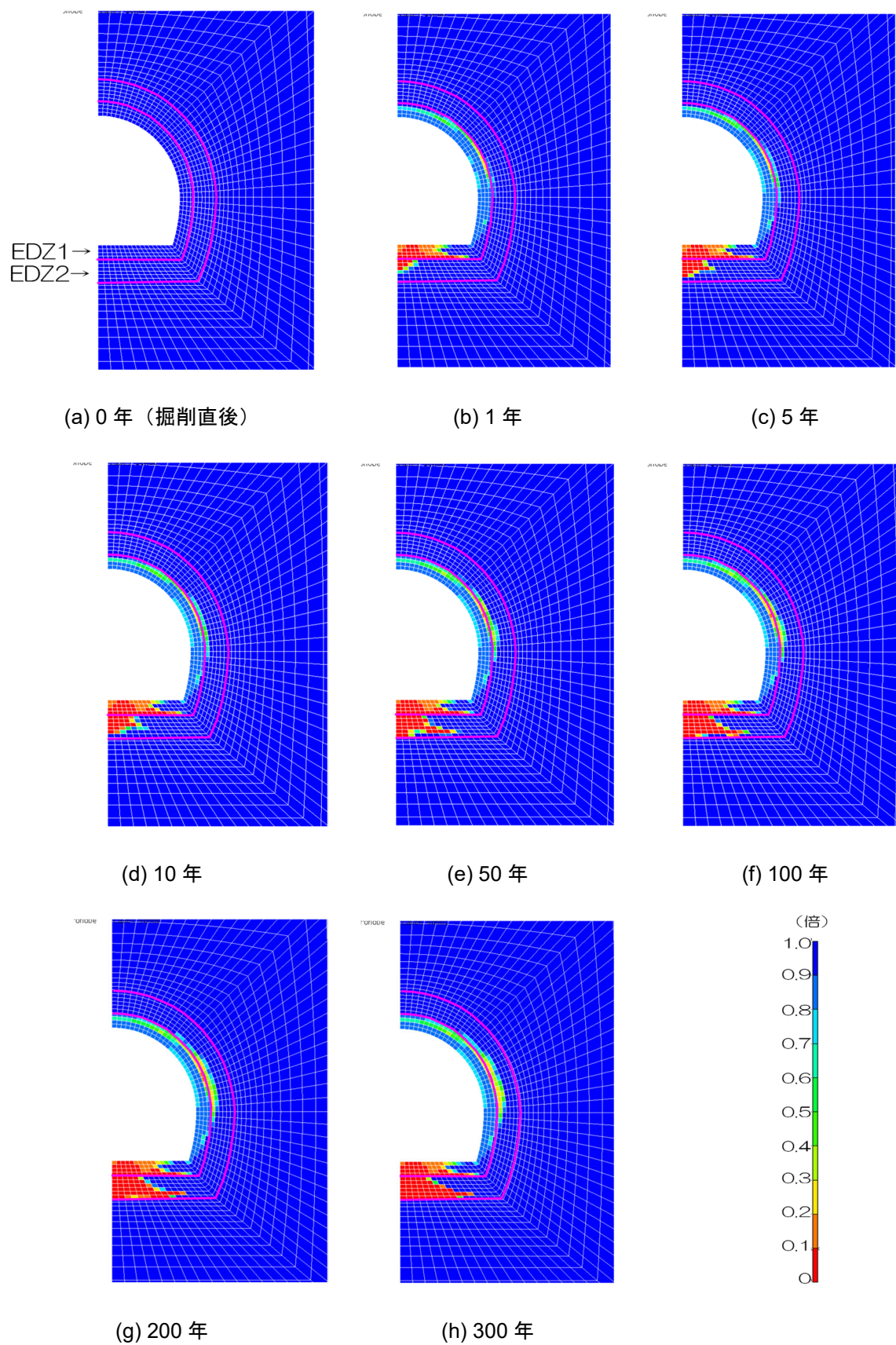


図 5.3-7 坑道周辺岩盤のヤング率の増加率の経時変化

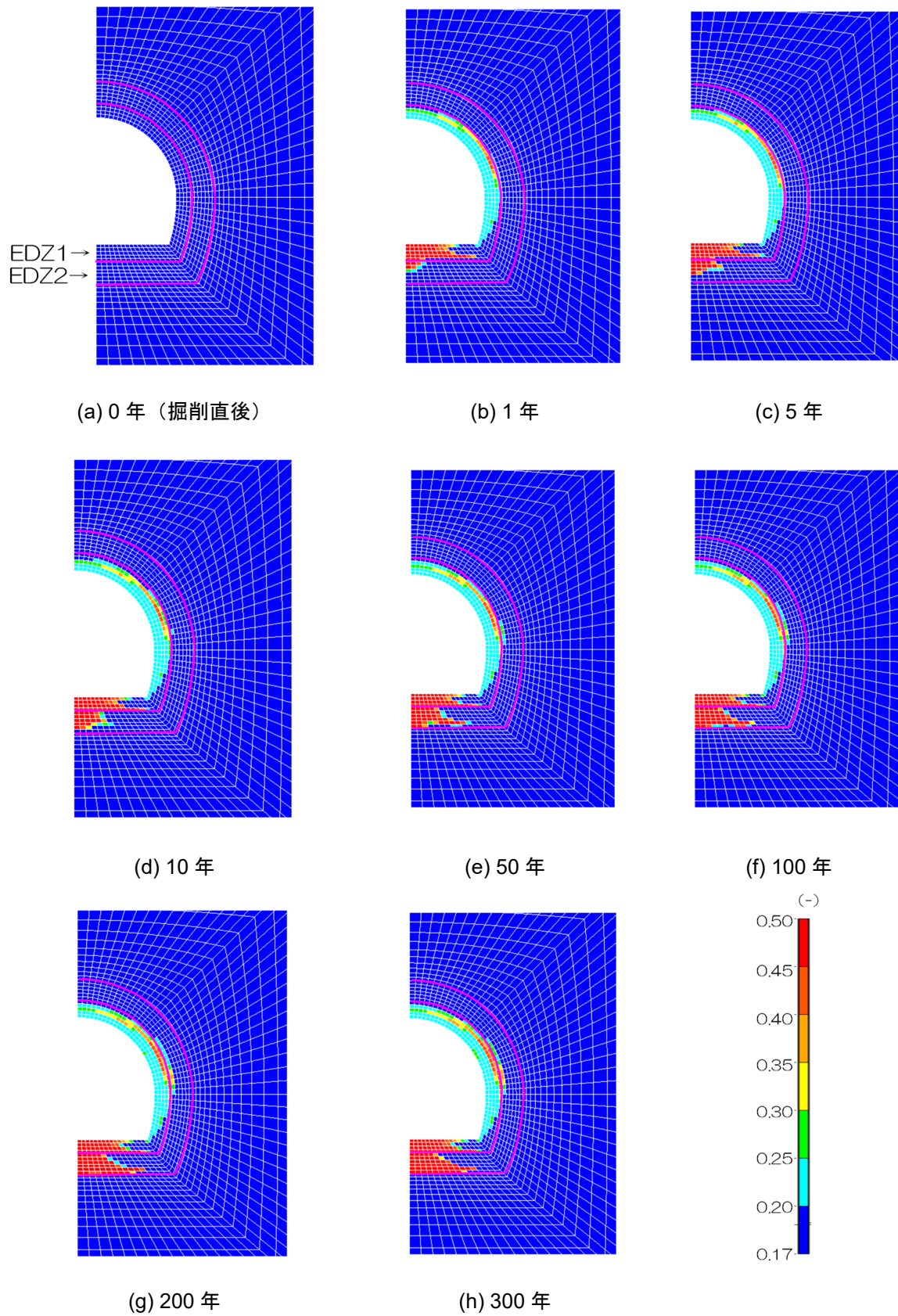


図 5.3-8 坑道周辺岩盤のポアソン比の経時変化

(b) 水理学的長期変化解析

2022 年度は、2021 年度までの力学的長期変化解析結果に基づく 1000 年までの坑道開放状態の再解析を実施するとともに、その結果を用いた坑道埋戻し後の坑道周辺地質環境の回復状況の解析を実施した。

(i) 解析の概要

解析には、多成分三相系の流体解析コードである TOUGH3 の TMVOC モジュールを用いた。同モジュールにおいて、取り扱える相は水相、気相及び非水溶性液体（NAPL）であり、取り扱える成分は、水、非凝縮性ガス（取り扱う圧力、温度の範囲内で、液化しないガス；Non-Condensable Gases; NCG）及び揮発性有機化合物（water-soluble Volatile Organic Chemicals; VOC）である。水及び VOC については、蒸気（気体）も考慮することが可能である。また、NCG については CH₄、CO₂、O₂、N₂、エタン、エチレン、アセチレン及び空気を標準で考慮可能であり、VOC については、ユーザーが物性を指定することにより、任意の成分を考慮可能である。TMVOC モジュールは、これらの相及び成分について、多孔質媒体中の浸透流、水相への溶解及び水相からの気化並びに溶解物質の移流分散等の計算が可能である。本解析では、相として水及び NCG のみを考慮し、うち NCG の成分としては、CH₄、CO₂、O₂、N₂を考慮した。また、解析は等温条件で行った。

(ii) 解析期間

本解析では、2021 年度の解析の Case 5 について 1000 年の坑道開放状態の再解析を実施した後、その解析における 50 年後、100 年後、200 年後、300 年後の結果を初期条件として坑道埋戻し状態の解析を実施した。坑道開放状態及び坑道埋戻し状態の解析ケースを表 5.3-3 に示す。なお、坑道開放状態の水理解析は、Case7 から Case10 の 4 ケースすべてに共通の解析である。以下、一部の解析条件及び解析結果は、坑道開放状態と坑道埋戻し状態に分けて記載する。

表 5.3-3 解析期間

解析 ケース	坑道開放状態 の解析期間	坑道埋戻し状態 の解析期間	坑道開放状態 + 坑道埋戻し状態 の解析期間
Case7	50 年	950 年	1000 年
Case8	100 年	900 年	
Case9	200 年	800 年	
Case10	300 年	700 年	

(iii) 解析モデル・解析メッシュ

水理学的長期変化解析では、力学的長期変化解析の解析モデルと同様に二次元解析モデルを用いた。モデル化は坑道中心を軸とし半断面で実施し、モデル領域の大きさは 2021 年度の検討結果を踏まえ、地表から坑道中心までの距離を 350 m、坑道からモデル下端までの距離を 1000 m、左右対象軸からモデル側方までの距離を 1000 m とした（図 5.3-9）。

坑道の形状は、力学的長期変化解析と同様に、幌延 URL の深度 350 m の試験坑道 3（図 5.3-10）を模したものとした。ただし、力学的長期変化解析のモデルとは異なり、水理学的長期変化解析では、長期的解析の実現上の制約から、支保工はモデル化せず、その領域は坑道として扱った。

坑道周辺は、力学的長期変化解析の解析モデルと同様に、EDZ が形成され、岩盤面から 0.4m までの領域を EDZ1、EDZ1 の外側で岩盤面から 1.0 m までの領域を EDZ2 とした。EDZ2 の周

辺は母岩とした。

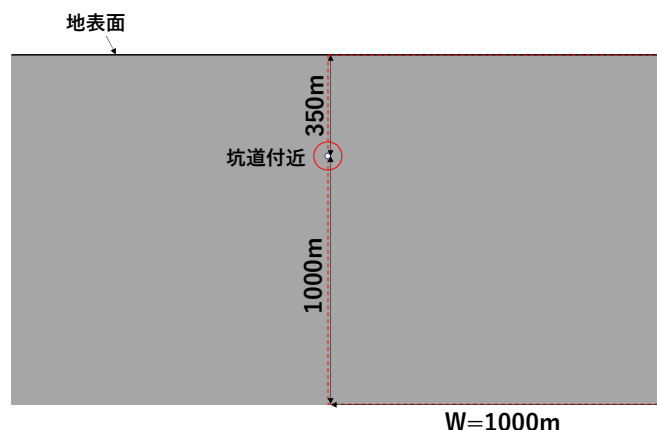


図 5.3-9 解析モデル概念図

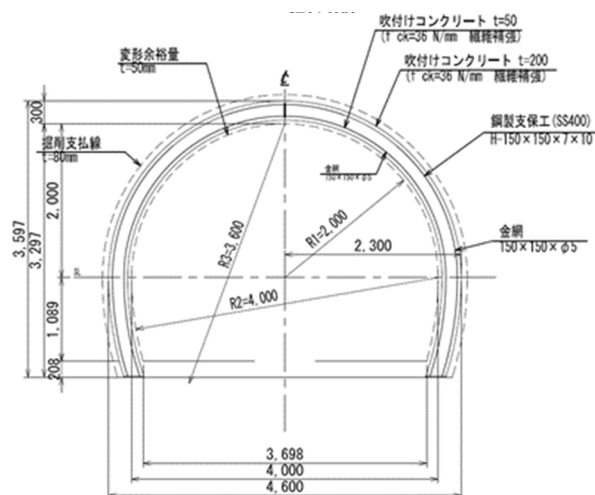


図 5.3-10 試験坑道 3 の断面図（再掲）

坑道開放状態の水理学的長期変化の再解析では、解析時間をより短縮し、より現実に即した坑道埋戻し後の解析までを達成するため、2021 年度の長期変化解析に用いた解析メッシュを変更した。

坑道開放状態の水理解析で用いた解析メッシュを図 5.3-11 に示す。同図には、坑道付近の拡大図も併せて示す。坑道中心から水平方向 3.8m、鉛直上方向 3.8m、鉛直下方向 2.8m の範囲は、2021 年度の長期変化解析のメッシュと同様に、1 辺 10cm の正方形メッシュとした。坑道近傍よりも外は三角形メッシュとし、坑道からモデル境界に向かって要素サイズが大きくなるように作成した。これは、コネクト数（要素間の接続の数）を少なくし、解析時間を短縮させるためである。その結果、要素数は 11949、コネクト数は 19062 となり、2021 年度の長期変化解析のモデル（要素数; 35100、コネクト数; 69805）に比べ、要素数は約 1/3、コネクト数は約 1/4 となった。坑道の要素については、坑道壁面での気相圧力とガス組成を実質的に固定境界条件とするため、計算上の体積を実体積の 1050 倍とした。さらに、モデル上端には地表面に接する大気相当の要素をつけ、地表面での気相圧力とガス組成を実質的に固定境界条件とするため、この要素についても計算上の体積を実体積の 1050 倍とした。なお、EDZ1 と EDZ2 については、絶対浸透率分

布と比貯留係数分布に力学的長期変化解析の結果を反映させるため、それぞれを細区分した。その区分方法は後述する。

坑道埋戻し状態の水理解析で用いた解析メッシュは、坑道開放状態の水理解析で用いた解析メッシュの坑道部分を埋戻し材に変更したものである。坑道近傍の坑道埋戻し状態の解析メッシュを図 5.3-12 に示す。埋戻し材の要素については、坑道の要素と異なり、計算上の体積は実際のサイズどおりとした。

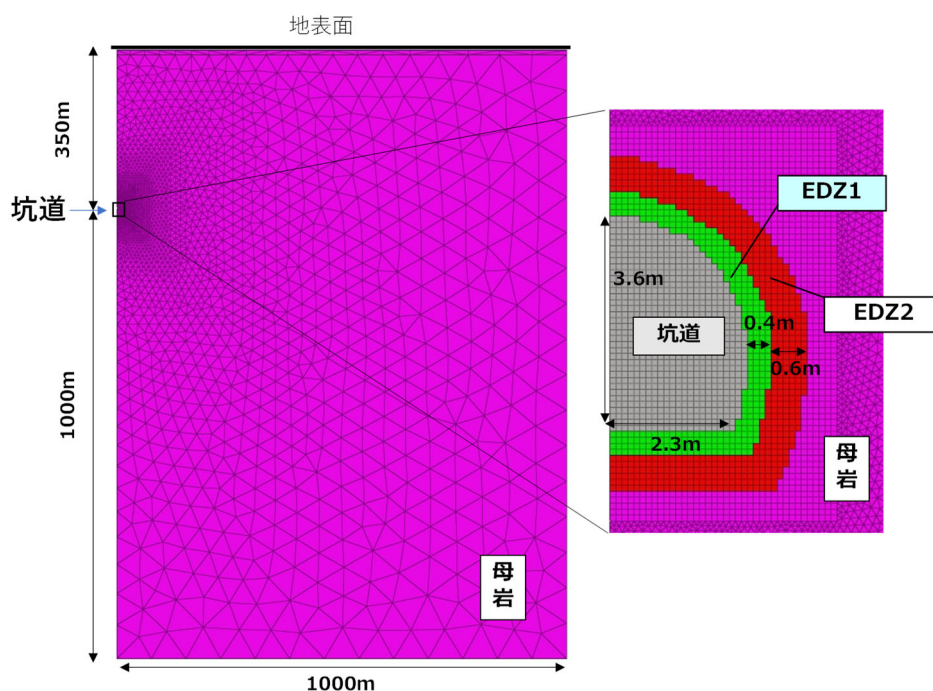


図 5.3-11 解析メッシュ（坑道開放状態）

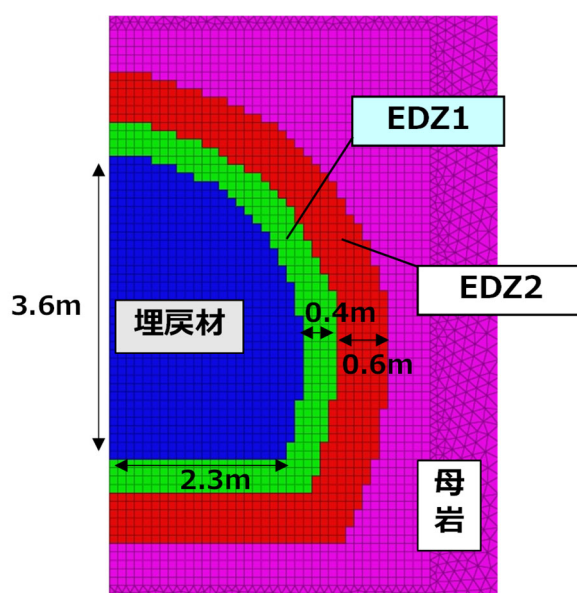


図 5.3-12 坑道近傍の解析メッシュ（坑道埋戻し状態）

(iv) 物性値

モデル化した各材料（母岩、EDZ1、EDZ2、埋戻し材）の移動物性及び水分特性について、以下に記述する。2022年度は、より現実に即した形で、モデルおよびパラメータの一部を見直した。具体的には、EDZ1を新たにモデル上に考慮するとともに、それを踏まえた各設定の設定方法の見直し、埋戻し材部分の設定値の見直しを実施した。

2021年度の長期変化解析の水理解析にて設定したEDZ1及びEDZ2の絶対浸透率及び比貯留係数、埋戻し材の絶対浸透率及び有効間隙率を表5.3-4に示す。

表 5.3-4 移動物性

材料名	絶対浸透率 [m ²]	透水係数 [m/s]	比貯留係数 [1/m]	有効間隙率
母岩	9.5 × 10 ⁻¹⁹	8.2 × 10 ⁻¹²	6.76 × 10 ⁻⁶	0.4
EDZ1	絶対浸透率の基準値は 9.5 × 10 ⁻¹⁴ m ² （透水係数は 8.2 × 10 ⁻⁷ m/s）、比貯留係数の基準値は、2.15 × 10 ⁻⁵ [1/m] ^{※3} である（基準値は力学長期変化解析の初期値である）。解析設定値は、力学長期変化解析の結果を踏まえ基準値に対してある倍率を乗じた値とした。			
EDZ2	絶対浸透率の基準値は 9.5 × 10 ⁻¹⁷ m ² （透水係数は 8.2 × 10 ⁻¹⁰ m/s）、比貯留係数の基準値は、5.47 × 10 ⁻⁵ [1/m] ^{※3} である（基準値は力学長期変化解析の初期値である）。解析設定値は、力学長期変化解析の結果を踏まえ基準値に対してある倍率を乗じた値とした。			
埋戻し材	3.3 × 10 ⁻¹⁸	2.8 × 10 ⁻¹¹	0.0	0.532

(v) 水分特性

1) 母岩、EDZ1、EDZ2

母岩、EDZ1、EDZ2の水分特性曲線は、式5.3-1で示される van Genuchten モデル（以下、VGモデルと記す。）で表現した。

$$C_p = \alpha^{-1} \left(S^{\frac{1}{\lambda}} - 1 \right)^{1-\lambda} \quad \text{式 5.3-1}$$

ここで、 S は飽和度であり、 α 、 λ が水分特性パラメータである。うち、 α は保水性に寄与するパラメータであり、小さいほど保水性が大きくなる。また、 λ は曲線の形状を決めるパラメータである。

母岩の α は幌延における研究事例（Miyakawa et al., 2019）と同一の値とした。また、EDZ1、EDZ2の α については、保水性がEDZ1<EDZ2<母岩となるように、これとは逆順に母岩よりも大きい値を設定した。 λ についても、母岩、EDZ1、EDZ2で幌延における研究事例と同一の値を設定した。以上の設定は、2021年度の解析と基本的に同一である。設定した水分特性パラメータを表5.2-1に示す。また、母岩、EDZ1、EDZ2それぞれの水分特性曲線を図5.3-13に示す。

表 5.3-5 水分特性曲線（VGモデル）のパラメータ

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

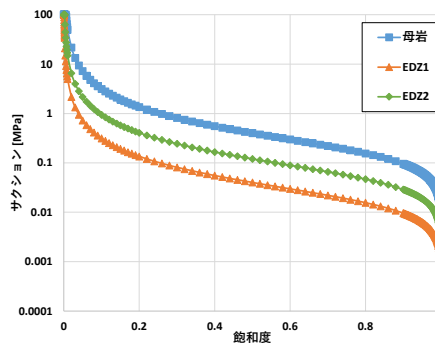


図 5.3-13 水分特性曲線

比透水係数及び比透気係数については、Verma モデルで表現した。比透水係数 k_{rl} 及び比透気係数 k_{rg} 、を式 5.3-2 および式 5.3-3 に示す。比透水係数 k_{rl} も、幌延における研究事例に基づき設定したが、比透気係数 k_{rg} は、幌延における研究事例における $k_{rg} = 1 - 2.1(S - 0.3) + (S - 0.3)^2$ よりも、特に高飽和度側における k_{rg} が小さくなるように設定した。比透水係数及び比透気係数曲線を図 5.3-14 に示す。

$$k_{rl} = 2.9(S - 0.3)^3 \quad \text{式 5.3-2}$$

$$k_{rg} = 1 - 2.83(S - 0.3) + 2.02(S - 0.3)^2 \quad \text{式 5.3-3}$$

なお、幌延における研究事例にて $k_{rg} = 1 - 2.1(S - 0.3) + (S - 0.3)^2$ を用いた根拠は、幌延を対象とした同様の研究成果（山本ほか, 2007）で、この比透気係数 k_{rg} のモデルを用いて、地上からのボーリング孔である HDB-8 孔の区間 2 の揚水水理試験時に取得された地下水とガスの流量を再現していたことによる。ただし、岩盤領域で圧力が低下した状態の時に発生する気化ガスは、当初独立した気泡として発生し、気泡が相互に連絡している可能性が低く、飽和度が高い領域では封入不飽和状態、つまり、気相部分が連続していない不飽和状態となる可能性が高い。また、不飽和土の透気係数に関する既往の研究（神谷ほか, 2008）では、飽和度が高い領域では比透気係数がかかなり小さいと考えられる実験結果が得られていた。そこで、関数形は同一とし、飽和度の高い領域では、より比透気係数が小さくなるようにパラメータ設定を変更している。また、このように比透気係数を小さくすると解析にかかる時間を短縮できるメリットもある。

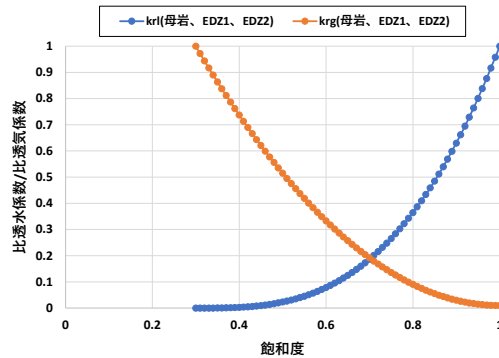


図 5.3-14 比透水係数及び透気係数曲線（母岩、EDZ1、EDZ2）

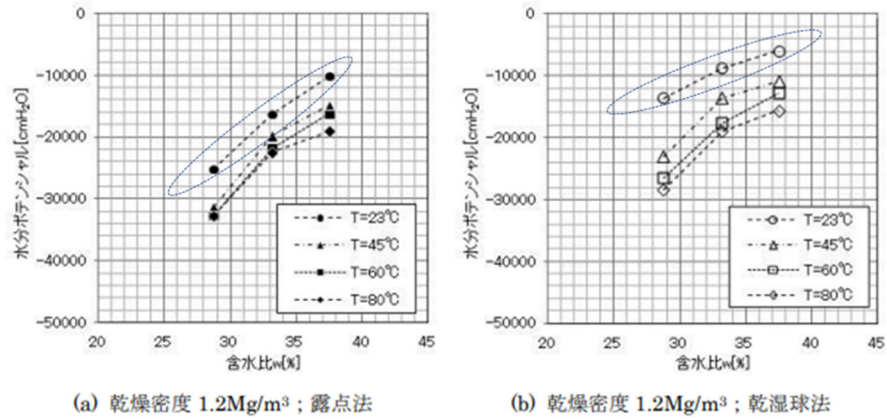
2) 埋戻し材

埋戻し材については、様々なメリットがあるため、現状では将来処分場を建設する時に発生する現地の掘削ズリを材料として使用することが基本的な考え方である。しかし、緩衝材のような高配合のベントナイト混合土については、TRU 第 2 次取りまとめに記載されているような水分特性曲線のデータがある（電気事業連合・核燃料サイクル開発機構，2005）が、幌延を事例とし埋戻し材としての使用を想定した掘削ズリとベントナイト混合土については、水分特性や不飽和の透過性のデータは、参考文献（杉田ほか，2020）によるもののみであり未だ十分でない。

そこで、まず、参考文献（杉田ほか，2020）で示される取得データを、本解析用パラメータとして使用することの妥当性を検討した上で、埋戻し材の水分特性曲線の設定をすることとした。なお、比透水係数及び比透気係数については、適当な研究事例がないことから、水分特性曲線から Mualem-van Genuchten モデルで推定することとした。

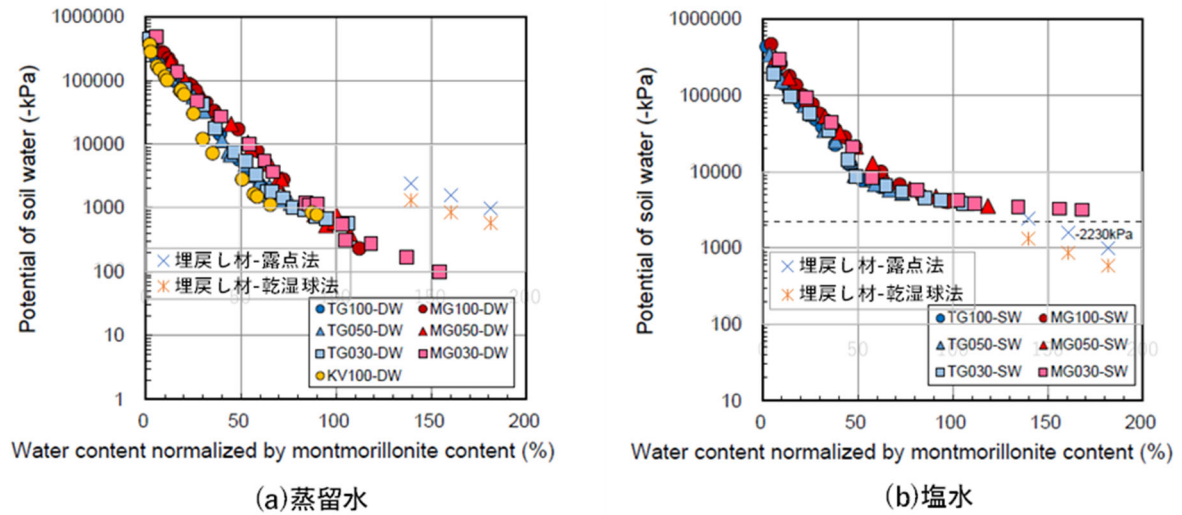
参考文献（杉田ほか，2020）で示される幌延掘削ズリとベントナイトの混合土（ベントナイト混合率 40wt%、乾燥密度 1.2 Mg/m^3 ）についての保水性試験値を図 5.3-15 に示す。これらの試験値は、露点法と乾湿球法によって取得されたものである。

ところで、ベントナイト混合土の水分ポテンシャル ψ は、モンモリロナイト基準含水比 ω_{mon} ($= \omega/R_{mon}$; R_{mon} はモンモリロナイト含有率) を用いると、ベントナイトの種類や混合比によらず、概ね一本の曲線で表すことができるとされている（鈴木ほか，1996；1999；山本ほか，2022）。山本ほか、蒸留水(DW)及び塩水(SW)で水分調整したベントナイト系材料の測定データを、モンモリロナイト基準含水比で整理した水分特性のグラフに先の保水性試験結果をプロットしたものを図 5.3-16 に示す。これをみると、蒸留水(図 5.3-16 (a))でなく、塩水(図 5.3-16 (b))で水分調整したベントナイトの水分特性との連続性が高い結果となり、参考文献（杉田ほか，2020）の水分ポテンシャル測定値には、塩水系地下水由来の浸透ポテンシャルが含まれていると推察される（浸透ポテンシャルとは、溶質の存在による水のエネルギー変化分）。浸透ポテンシャルは、埋戻し材へ浸潤する水（塩水系地下水）の駆動力にならないと考えられるので、本解析では浸透ポテンシャルが含まれる水分特性曲線を用いるのは好ましくない。このため、参考文献（杉田ほか，2020）のデータは、本解析の水分特性曲線には使用せず、代わりに、蒸留水で水分調整したクニゲル V1 の $\omega_{mon} - \psi$ のデータ（山本ほか，2022；図 5.3-17）に基づき、幌延掘削ズリーベントナイト混合土の水分特性曲線を推定して用いることとした。



水色破線内は、T=23℃のデータ

図 5.3-15 幌延の掘削ズリーベントナイト混合土の保水性試験結果



杉田ほかのデータを×、＊で加筆

図 5.3-16 モンモリロナイト基準含水比で整理したベントナイト系材料の水分特性

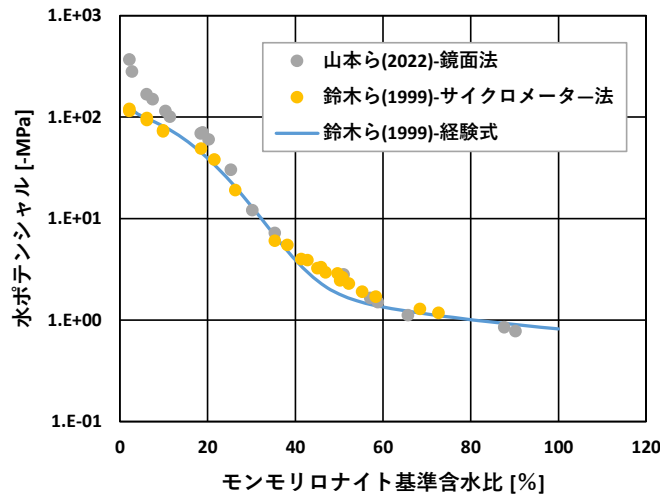


図 5.3-17 クニゲル V1 の $\omega_{mon} - \psi$ のデータ（蒸留水）

具体的には、まず、ベントナイトのモンモリロナイト含有率 R_{mon} を、クニゲル V1 の値である 0.51（杉田ほか，2020；山本ほか，2022）とした。次に、クニゲル V1 について得られている $\omega_{mon} - \psi$ 関係（測定データ）を混合土の $\theta - \psi$ 関係に変換し、van Genuchten モデルでフィッティングしてパラメータを求めた。（ θ は体積含水率、 ω_{mon} から θ の算出は、式 5.3-4 および式 5.3-5 を用いて実施）。van Genuchten 式を、式 5.3-6 に、フィッティングして求めたパラメータを表 5.3-6 に、フィッティングして推定した水分特性曲線のグラフを図 5.3-18 に示す。TOUGH3 では、入力データとして、水分特性曲線の上限を設定することができるため、ここでは 100 MPa と設定した。設定後の水分特性曲線のグラフを図 5.3-19 に示す。

$$\omega = \omega_{mon} R_{mon} R_b \quad \text{式 5.3-4}$$

$$\theta = \omega \rho_d / \rho_w \quad \text{式 5.3-5}$$

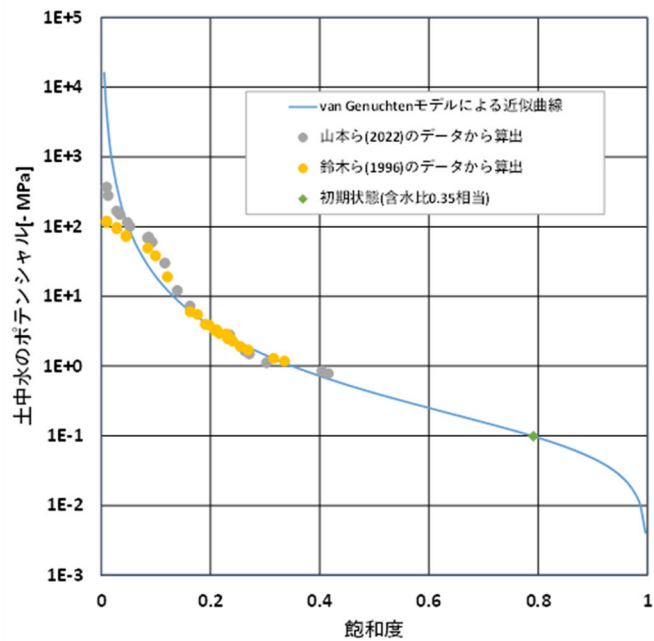
ここで、 R_{mon} ：使用するクニゲル V1 のモンモリロナイト含有率（0.51）（杉田ほか，2020；山本ほか，2022）、 R_b ：混合土のベントナイト混合率（0.4）、 ρ_d ：混合土の乾燥密度（1.2 Mg/m³）、 ρ_w ：水の密度（0.997 Mg/m³）である

$$C_p = \alpha^{-1} \left(S^{\frac{1}{\lambda}} - 1 \right)^{1-\lambda} \quad \text{式 5.3-6}$$

ここで、 S は飽和度であり、 α 、 λ が水分特性パラメータである。

表 5.3-6 水分特性曲線（VG モデル）のパラメータ

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



ここでは、横軸は、体積含水率 θ と有効間隙率0.532を用いて算出した飽和度とした

図 5.3-18 推定された水分特性曲線（混合土の乾燥密度：1.2 Mg/m³）（埋戻し材）

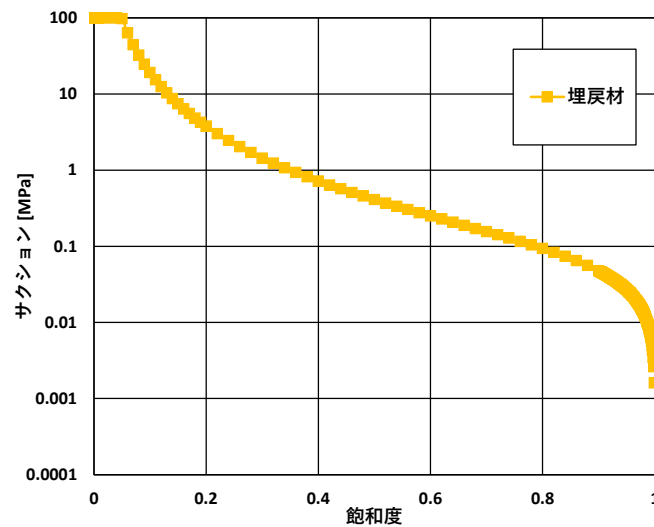


図 5.3-19 水分特性曲線（埋戻し材）

比透水係数及び比透気係数については、Mualem-van Genuchten モデルで表現した。比透水係数 k_{rl} 及び比透気係数 k_{rg} を式 5.3-7 および式 5.3-8 に示す。パラメータ λ は、van Genuchten モデルと同一パラメータ 0.299 とした。比透水係数及び比透気係数曲線を図 5.3-20 に示す。

$$k_{rl} = \sqrt{S} \left\{ 1 - \left(1 - [S]^{\frac{1}{\lambda}} \right)^{\lambda} \right\}^2 \quad \text{式 5.3-7}$$

$$k_{rg} = 1 - k_{rl} \quad \text{式 5.3-8}$$

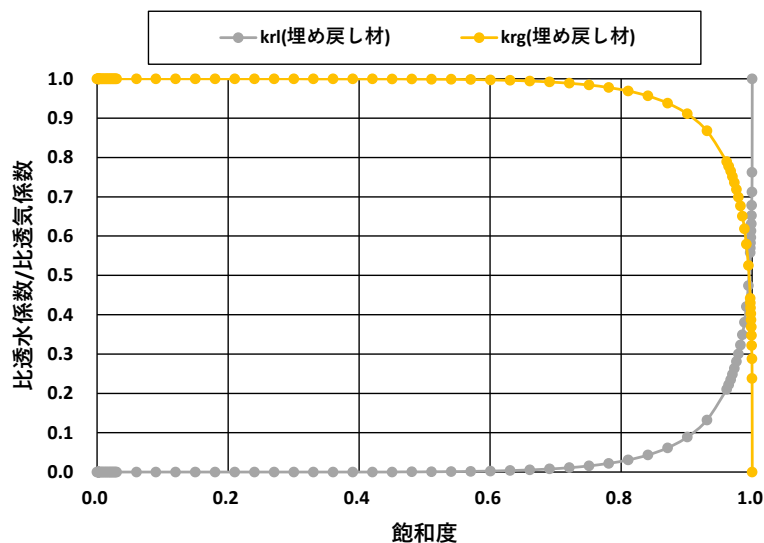


図 5.3-20 比透水係数及び透気係数曲線（埋戻し材）

(vi) 力学的長期変化解析結果を踏まえた EDZ の絶対浸透率分布及び比貯留係数分布の設定

1) EDZ1

EDZ1 の領域の絶対浸透率及び比貯留係数は、力学的長期変化解析の結果を踏まえて場所・時間により変化させることとし、下記の手順で設定した。

- イ) 力学的長期変化解析の結果を踏まえた絶対浸透率及び比貯留係数分布の変化に基づいて、EDZ1 を区分。（区分された領域内で一律の値を設定する方針とする。）
- ロ) 区分された領域から、代表的なメッシュ要素を抽出。
- ハ) その要素の絶対浸透率及び比貯留係数の変化を抽出。
- ニ) 代表要素の絶対浸透率及び比貯留係数の変化を比較し、領域間の類似性から更なる設定の簡略化を検討して、最終的な設定を決定。

EDZ1 の絶対浸透率分布は、室内透水試験より得られた有効拘束圧と透水係数の関係を用いて、力学的長期変化解析により得られた平均主応力の場所・時間による変化から、母岩に対する浸透率の倍率を解析領域全体で算出して求めた。坑道近傍の EDZ1 の絶対浸透率分布の変化を図 5.3-21 に示す。

EDZ1 の比貯留係数分布は、力学的長期変化解析で得られたヤング率 E 及びポアソン比 ν の場所・時間による変化をもとに、以下の式 5.3-9 から式 5.3-12 により算出した。比貯留係数 S_s は、固体粒子が非圧縮の場合、式 5.3-9 のように表すことができる。

$$S_s = \rho_f g \left(\frac{1}{K_v} + \frac{\phi}{K_f} \right) \quad \text{式 5.3-9}$$

ここで、 ρ_f は水の密度、 g は重力加速度、 ϕ は間隙率、 K_f は水の体積弾性係数である。 K_v は、垂直方向の一次元的な変形のみを考える場合の体積弾性係数であり、せん断弾性係数 G と体積弾性係

数 K を用いて式 5.3-10 のように表すことができる。

$$K_v = \left(K + \frac{4}{3}G \right) \quad \text{式 5.3-10}$$

ここで、体積弾性係数 K とせん断弾性係数 G は、ヤング率 E 及びポアソン比 ν を用いてそれぞれ以下のように表すことができる。

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad \text{式 5.3-11}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{式 5.3-12}$$

このようにして求めた EDZ1 の比貯留係数分布の変化を図 5.3-22 に示す。

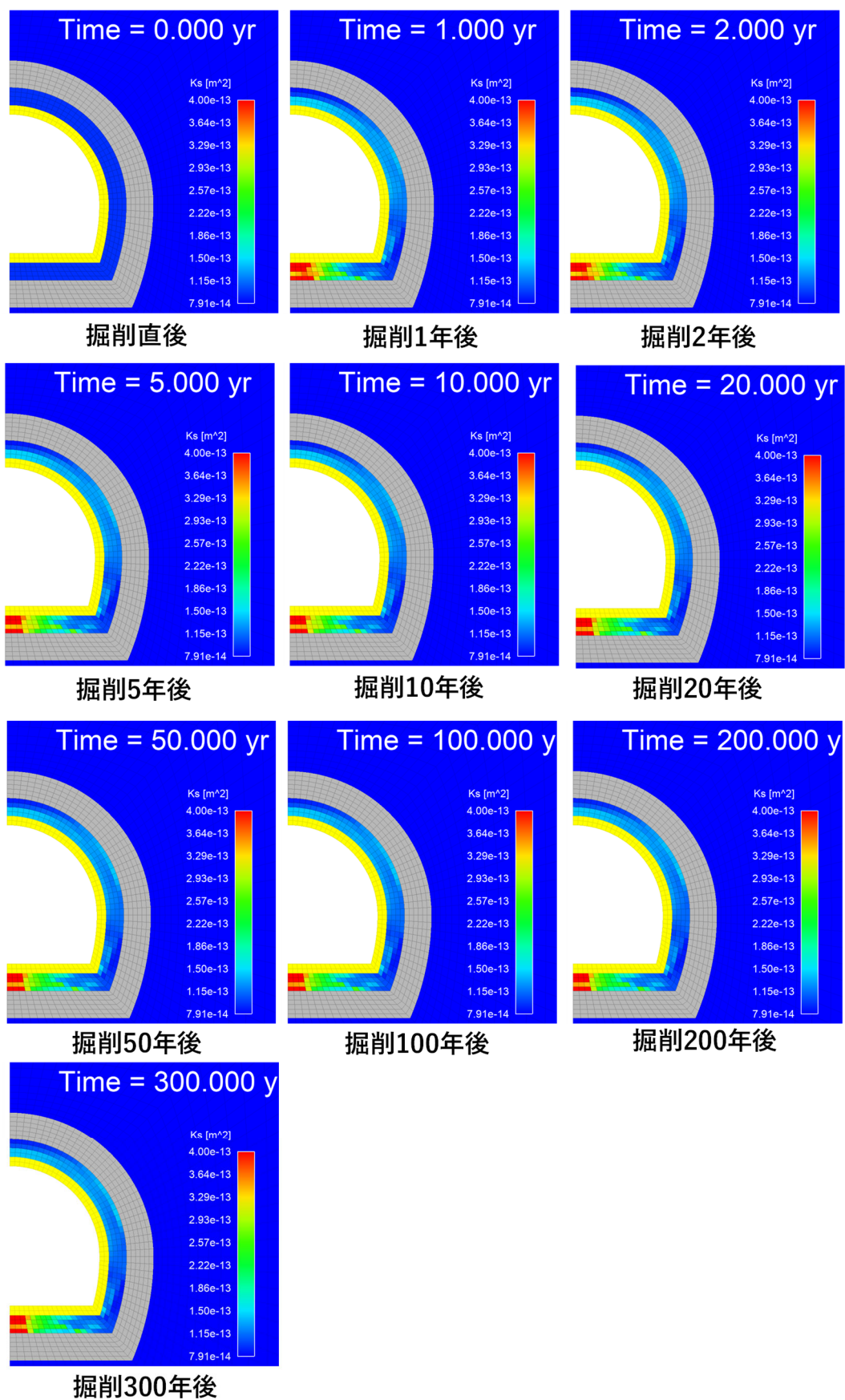


図 5.3-21 EDZ1 の絶対浸透率の分布の変化

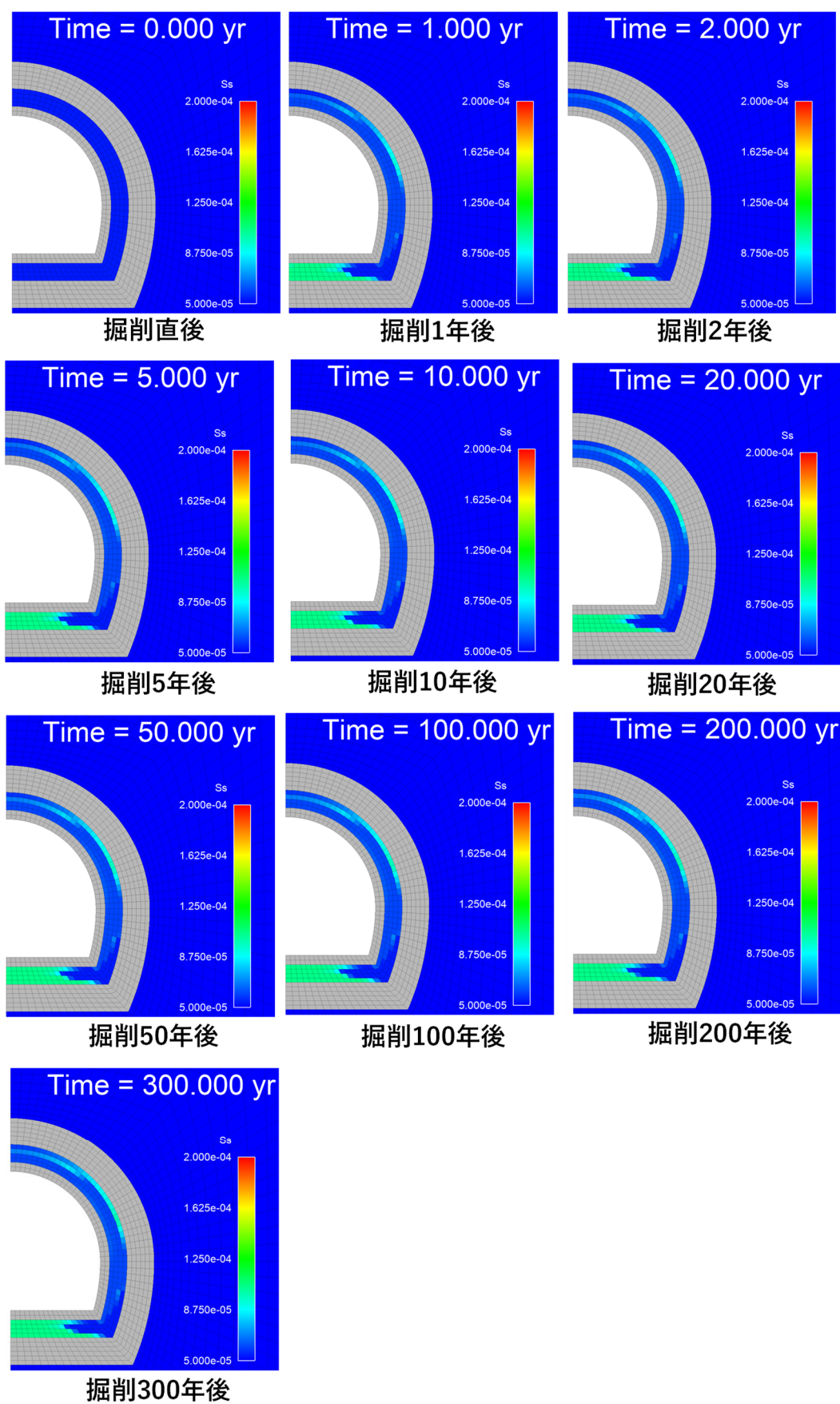


図 5.3-22 EDZ1 の比貯留係数の分布の変化

次に、絶対浸透率分布及び比貯留係数分布の経時変化（図 5.3-21 および図 5.3-22）を元に、パラメータ設定のための領域区分を実施した。EDZ1 における領域区分を図 5.3-23（左）に、区分された領域から抽出したパラメータ設定に用いた代表的なメッシュの要素番号及び位置を図 5.3-23（右）に示す。また、これらの代表要素の絶対浸透率の経時変化を図 5.3-24 に、比貯留係数の経時変化を図 5.3-25 に示す。

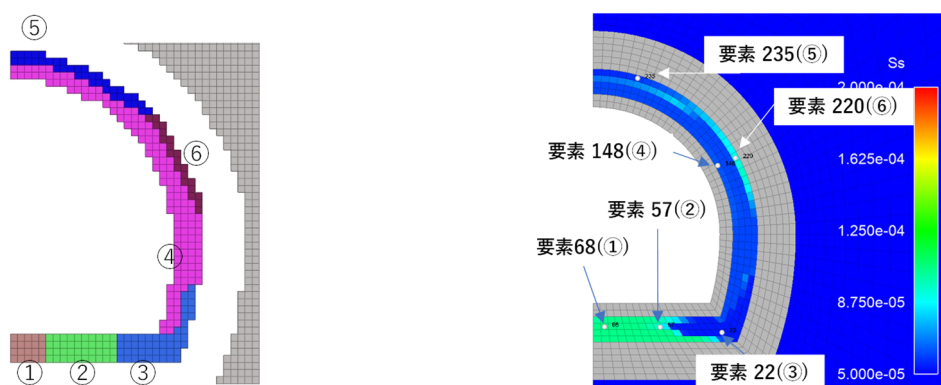


図 5.3-23 区分した EDZ1（左）、主要なメッシュ要素（右）

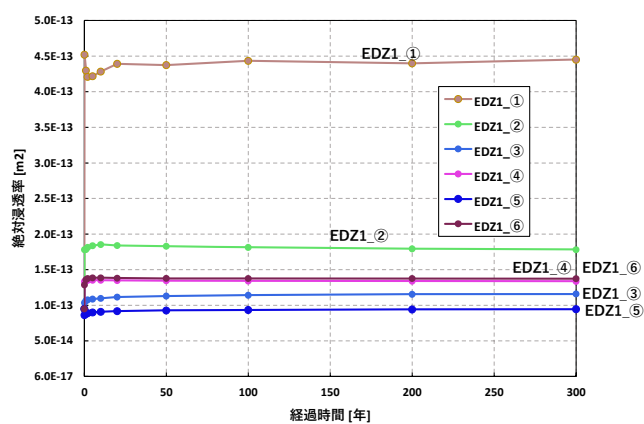


図 5.3-24 主要要素の絶対浸透率の経時変化（EDZ1）

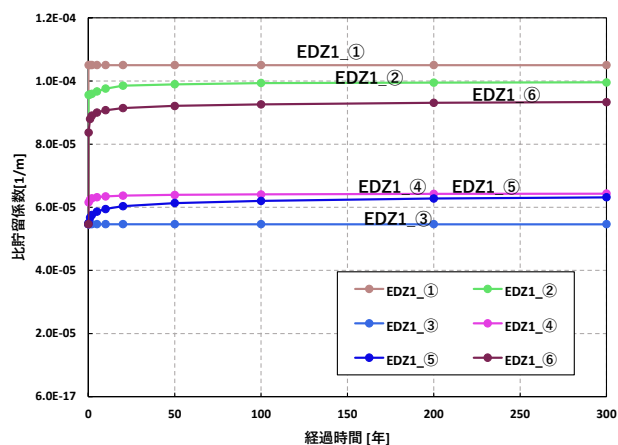


図 5.3-25 主要要素の比貯留係数の経時変化（EDZ1）

最後に、絶対浸透率の設定について、代表要素の値の変化を比較・検討した上で以下の考え方で簡略化した。最終的な、EDZ1 の絶対浸透率の設定値を図 5.3-26 に示す。

(坑道開放状態)

- ・ 区分③～⑥は、絶対浸透率の値と変化がほぼ同じであるため、③～⑥に同じ値を与える。なお、③～⑥の領域の絶対浸透率は、その中で中間の値である区分③における主要要素の経時変化値とする。
- ・ 10 年以降の絶対浸透率の経時変化が小さいため、10 年以降は時間平均した絶対浸透率を設定する。
- ・ 0-10 年という短い期間で絶対浸透率が変化しても、水理解析結果に影響を与えないと考えられるため、0-10 年は時間平均した絶対浸透率を設定する。

(坑道埋戻し状態)

- ・ 坑道埋戻し状態の解析の絶対浸透率は、掘削解析終了時の値（10-300 年の時間平均値）とする。

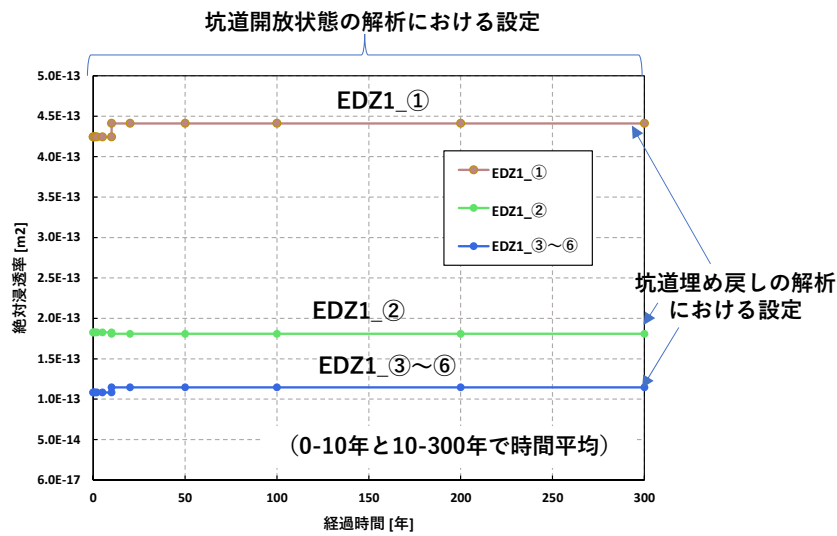
また、比貯留係数についても同様に、以下の考え方で簡略化した。この方法で考えた EDZ1 の比貯留係数の設定値を図 5.3-27 に示す。

(坑道開放状態)

- ・ 区分③～⑤は、比貯留係数がほぼ同じであり、③～⑤に同じ値を設定する。
- ・ ③～⑤において、⑤が比貯留係数の中間の値を示す。これを踏まえ、③～⑤の比貯留係数は、⑤の主要要素の経時変化値とする。
- ・ 10 年以降の比貯留係数の経時変化が小さいため、10 年以降は時間平均した絶対浸透率を設定する。
- ・ 0-10 年という短い期間で比貯留係数が変化しても、水理解析結果に影響を与えないと考えられるため、0-10 年は時間平均した絶対浸透率を設定する。

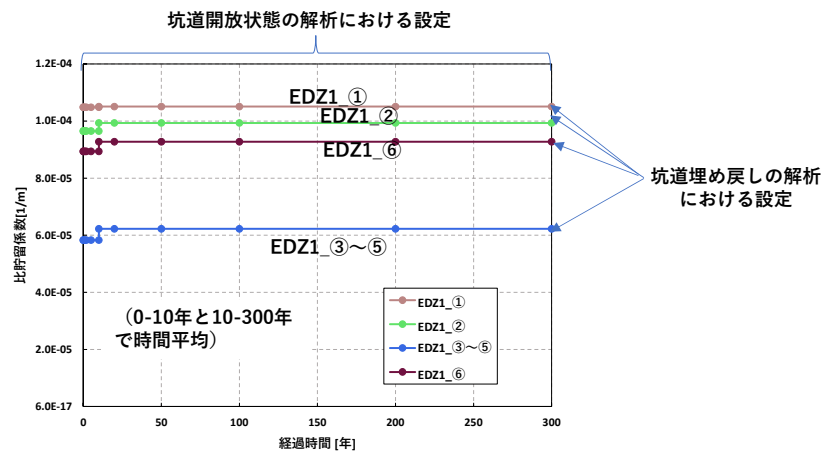
(坑道埋戻し状態)

- ・ 坑道埋戻し状態の解析の比貯留係数は、掘削解析終了時の値（10-300 年の時間平均値）とする。



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

図 5.3-26 絶対浸透率の経時変化図及び設定値 (EDZ1)



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

図 5.3-27 比貯留係数の経時変化図及び設定値 (EDZ1)

2) EDZ2

EDZ2 の絶対浸透率分布及び比貯留係数分布も、力学的長期変化解析の結果を踏まえて場所・時間により変化させることとし、1) の EDZ1 と同様の考え方に基づき設定した。具体的には、絶対浸透率分布は、室内透水試験より得られた有効拘束圧と透水係数の関係を用いて、力学的長期変化解析により得られた平均主応力の場所・時間による変化から、母岩に対する浸透率の倍率を解析領域全体で算出した。坑道近傍の EDZ2 の絶対浸透率分布の変化を図 5.3-28 に示す。また、EDZ2 の比貯留係数分布も、EDZ1 同様力学的長期変化解析で得られたヤング率 E 及びポアソン比 ν の場所・時間による変化をもとに前出の式 5.3-9 から式 5.3-12 により算出した。このようにして求めた EDZ2 の比貯留係数分布の変化を図 5.3-29 に示す。

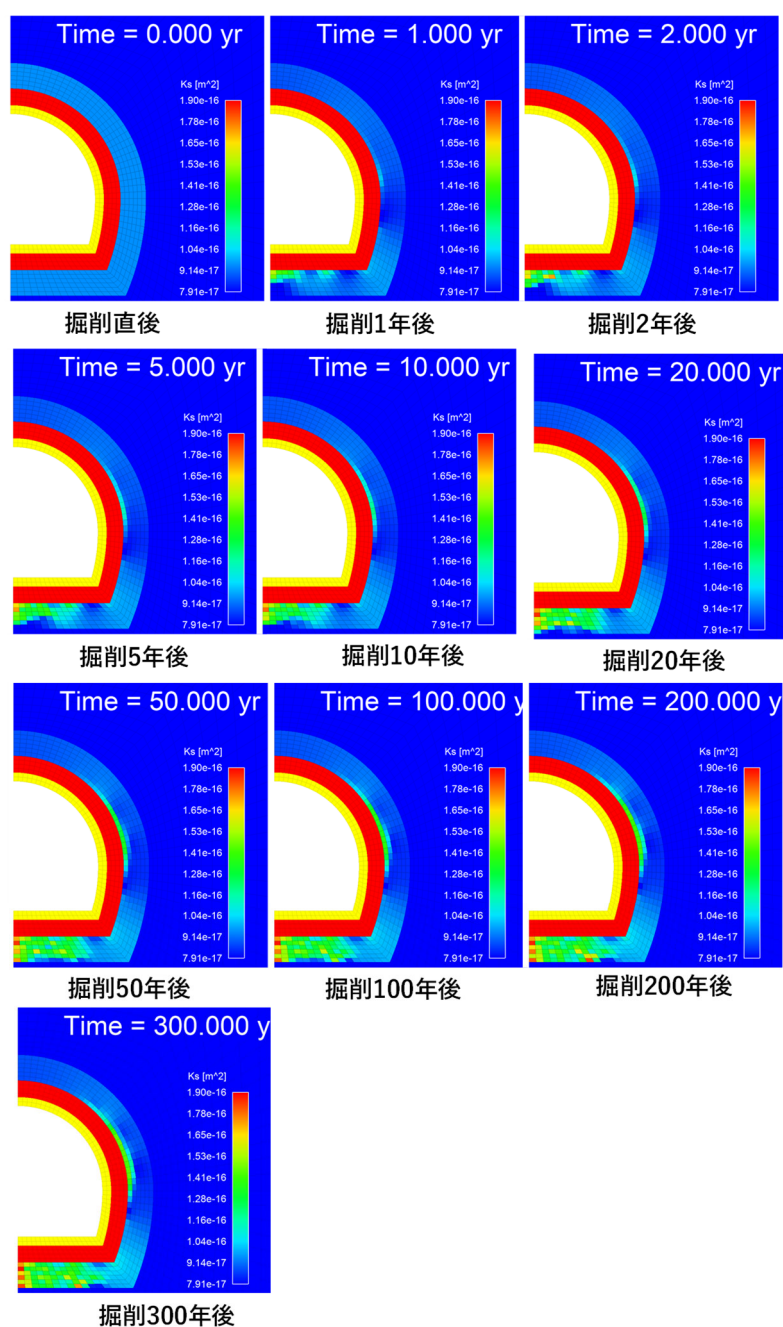


図 5.3-28 EDZ2 の絶対浸透率の分布の変化

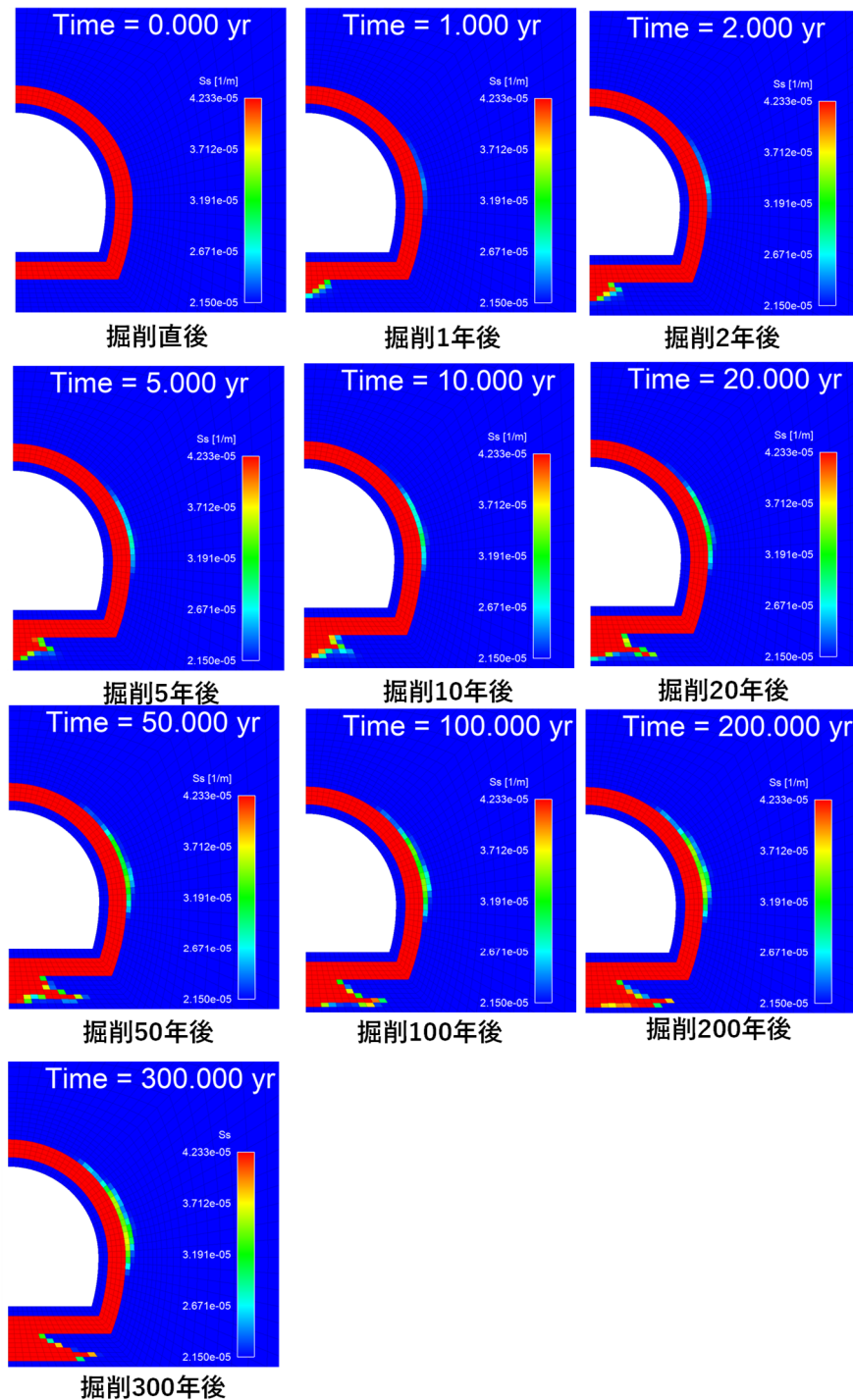


図 5.3-29 EDZ2 の比貯留係数の分布の変化

次に、これらの結果に基づく EDZ2 の領域区分を図 5.3-30 (左) に、区分された領域から抽出した代表的なメッシュの要素番号及び位置を図 5.3-30 (右) に示す。また、これらの代表要素の絶対浸透率の経時変化を図 5.3-31 に、比貯留係数の経時変化を図 5.3-32 に示す。

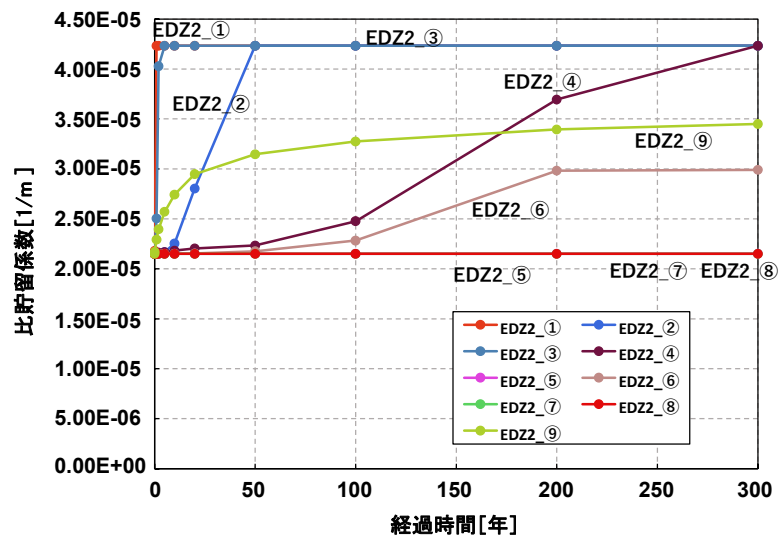


図 5.3-32 主要要素の比貯留係数の経時変化 (EDZ2)

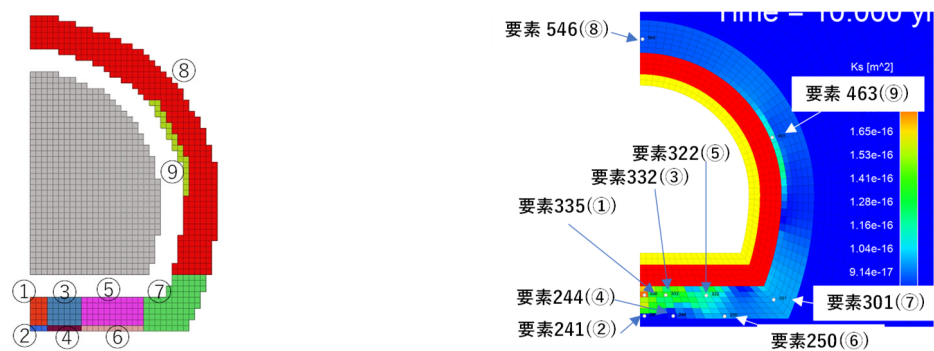


図 5.3-30 区分した EDZ2 (左)、主要なメッシュ要素 (右)

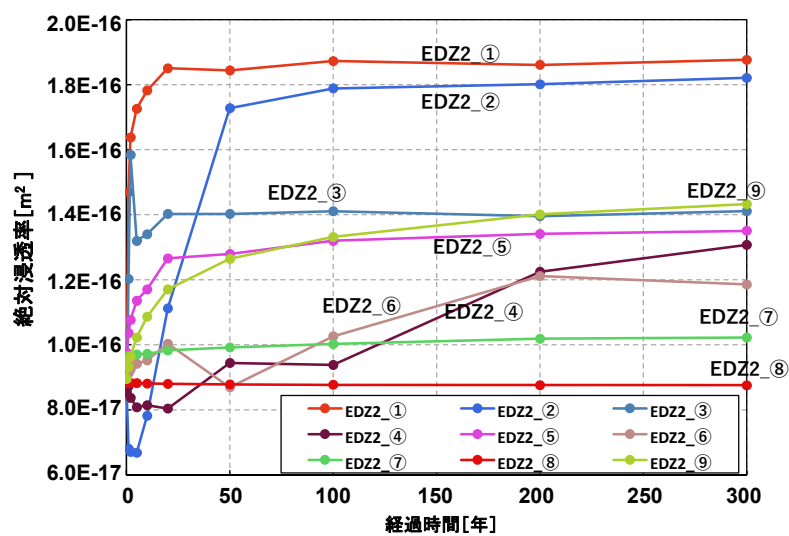


図 5.3-31 主要要素の絶対浸透率の経時変化 (EDZ2)

絶対浸透率は、EDZ1と同様、代表要素の値の変化を比較・検討し簡略化した。この方法で考えたEDZ2の絶対浸透率の設定値を図5.3-33に示す。

(坑道開放状態)

- ・ 1.5倍程度の絶対浸透率の違いは水理解析に影響しないと考え、①と②は同じ値、③～⑥で同じ値、⑦～⑨で同じ値を設定。なお、それぞれの絶対浸透率は、区分①、⑤、⑦における主要要素の経時変化値とする（3つ以上の区分で同じ値にする場合は中間の値、2つの区分で同じ値にする場合は区分の範囲が大きい方の値とした）。
- ・ ①、③～⑨は、10年以降の絶対浸透率の経時変化が約1.5倍以内に収まることを踏まえ、10年以降は時間平均した絶対浸透率を設定する（②は、10年以降も変化はあるが、同じ値を設定する①よりも範囲が狭く、①の主要要素の経時変化を設定しても大きく影響しないとした）。
- ・ 0-10年という短い期間で絶対浸透率を変化しても、水理解析結果に影響を与えないと考えられるため、0-10年は時間平均した絶対浸透率を設定する。

(坑道埋戻し状態)

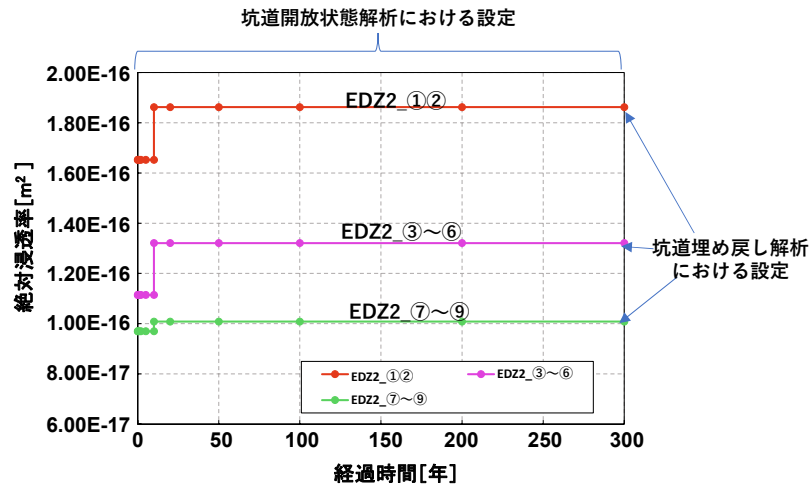
- ・ 坑道埋戻し解析の絶対浸透率は、掘削解析終了時の値（10-300年の時間平均値）とする。また、比貯留係数についても、以下の考え方で簡略化した。この方法で考えたEDZ2の比貯留係数の設定値を図5.3-34に示す。

(坑道開放状態)

- ・ 前ページの絶対浸透率の設定では、①、②で同じ値、③～⑥で同じ値、⑦～⑨で同じ値を設定した。①、②において、範囲が広い①の主要要素の値とする。③～⑥は、中間の値の④とする。⑦～⑨は範囲が広い⑧の主要要素の値とする。
- ・ 時間変化に対しては、絶対浸透率の設定と同様に0-10年と10-300年の時間平均値とする。

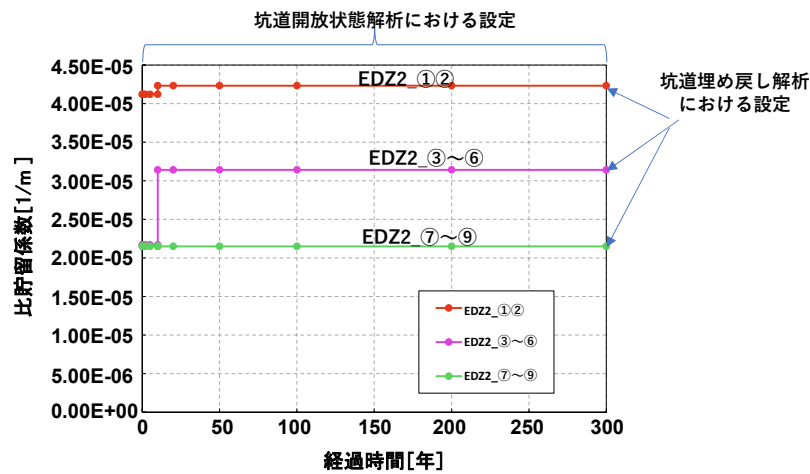
(坑道埋戻し状態)

- ・ 坑道埋戻し解析の比貯留係数は、掘削解析終了時の値（10-300年の時間平均値）とする。



絶対浸透率[m²]			
区分	抽出した要素	坑道掘削から0-10年	坑道掘削から10-1000年
EDZ2①	要素335(①)	1.65E-16	1.86E-16
EDZ2②			
EDZ2③			
EDZ2④	要素322(⑤)	1.11E-16	1.32E-16
EDZ2⑤			
EDZ2⑥			
EDZ2⑦	要素301(⑦)	9.69E-17	1.01E-16
EDZ2⑧			
EDZ2⑨			

図 5.3-33 絶対浸透率の経時変化図及び設定値 (EDZ2)



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

図 5.3-34 比貯留係数の経時変化図及び設定値 (EDZ2)

(vii) 初期・境界条件

1) 初期条件

坑道開放状態の水理解析

母岩、EDZ1 及び EDZ2 の初期条件の設定を表 5.3-7 および表 5.3-8 に示す。初期圧力については、岩盤の領域全体で水位が G.L. -10 m としたときの静水圧分布とした。静水圧分布を設定するにあたり、水面(G.L. -10m)における空気の圧力は、標準大気圧相当の値(101300 Pa)とした。初期飽和度については、岩盤の領域で飽和状態とした。

岩盤中の液相中に溶解したガス成分としては、メタン及び二酸化炭素のみを考慮し、その初期溶解量 (モル分率) は、幌延の研究事例 (Miyakawa et al., 2019) による溶解量の設定を参考に、ヘンリー一定数を用いて深度に比例した設定とした。なお、メタン及び二酸化炭素のヘンリー一定数は、25.5℃における値とし、それぞれ 4.37×10^9 Pa、 1.70×10^8 Pa とした。これらは、TOUGH3 により内部的に計算され、設定される値である。

表 5.3-7 初期条件 (1/2)

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

表 5.3-8 初期条件 (2/2)

材料名	初期溶解量 CH ₄ (モル分率)	初期溶解量 CO ₂ (モル分率)	初期溶解量 O ₂ (モル分率)	初期溶解量 N ₂ (モル分率)
母岩	(初期圧力)/(ヘンリー一定数) $\times 0.922$	(初期圧力)/(ヘンリー一定数) $\times 0.0177$	0	0
EDZ1				
EDZ2				

坑道埋戻し状態の水理解析

母岩、EDZ1、EDZ2 及び埋戻し材の初期条件の設定を表 5.3-9、表 5.3-10 および表 5.3-11 に示す。

母岩、EDZ1 及び EDZ2 の初期圧力、初期飽和度、初期の気相のモル分率及び液相中のガス成分の初期溶解量は、坑道開放状態の水理解析の X 年後の結果 (X は、Case7 が 50、Case8 が 100、Case9 が 200、Case10 が 300) を初期条件とした。

埋戻し材の気相の初期圧力は、標準大気圧に相当する 101300 Pa とした。また、埋戻し材の初期飽和度は、幌延での検討事例 (中山ほか, 2016) による土粒子密度の試験値 (ベントナイト 2.744 g/cm³、幌延掘削ズリ 2.483 g/cm³) から混合比に相当する土粒子密度を求め、これと埋戻し材の転圧試験での目標乾燥密度 (1.2 Mg/m³) 及び目標含水比(0.35)から算出した飽和度とした。

埋戻し材の初期の気相のモル分率は、窒素、酸素及び二酸化炭素について、標準大気組成を参考に設定した。また、埋戻し材の初期の溶解量 (液相のモル分率) は、ヘンリーの法則 $P = K\chi$ が成り立つように設定した (ここで、 P は初期の分圧、 K はヘンリー一定数、 χ は液相のモル分率である)。なお、メタン、二酸化炭素、酸素及び窒素のヘンリー一定数は、それぞれ 25.5℃における値とし、

4.37×10⁹ Pa、1.70×10⁸ Pa、4.43×10⁹ Pa、8.82×10⁹ Pa とした。

表 5.3-9 初期条件 (1/3)

材料名	初期圧力(Pa)	温度(℃)	初期飽和度
母岩	坑道開放状態の水理解析の X 年後の結果 (X は、Case7 が 50、Case8 が 100、Case9 が 200、Case10 が 300)	25.5	坑道開放状態の水理解析の X 年後の結果 (X は、Case7 が 50、Case8 が 100、Case9 が 200、Case10 が 300)
EDZ1			
EDZ2			
埋戻し材	101300		0.791

表 5.3-10 初期条件 (2/3)

材料名	初期の気相の CH ₄ (モル分率)	初期の気相の CO ₂ (モル分率)	初期の気相の O ₂ (モル分率)	初期の気相の N ₂ (モル分率)
母岩	坑道開放状態の水理解析の X 年後の結果 (X は、Case7 が 50、Case8 が 100、Case9 が 200、Case10 が 300)			
EDZ1				
EDZ2				
埋戻し材	0	0	0.21	0.79

表 5.3-11 初期条件 (3/3)

材料名	初期溶解量 CH ₄ (モル分率)	初期溶解量 CO ₂ (モル分率)	初期溶解量 O ₂ (モル分率)	初期溶解量 N ₂ (モル分率)
母岩	坑道開放状態の水理解析の X 年後の結果 (X は、Case7 が 50、Case8 が 100、Case9 が 200、Case10 が 300)			
EDZ1				
EDZ2				
埋戻し材	0	0	(初期圧力)/(ヘンリ一定数)×0.21	(初期圧力)/(ヘンリ一定数)×0.79

2) 境界条件

坑道開放状態の水理解析

境界条件の区分を図 5.3-35 に示す。坑道面と地表面を除く境界は、気相及び液相に対して不透過境界とした。坑道面は、液相及び気相に対して浸透可能な境界とした。また、地表面は、気相のみが浸透可能で、液相に対しては不透過な境界とした。

坑道面の境界条件を表 5.3-12 に示す。坑道の圧力は大気圧相当の値、坑道の気相のモル分率は、大気組成相当の値で、それぞれ一定値とした (ディリクレ条件)。なお、坑道面における水の蒸発を考慮した設定を行った。具体的には、坑道内の相対湿度に対応する水ポテンシャルを式 5.3-13 に示すケルビンの式で算出し、坑道内の全ての要素に設定した。

また、地表面の境界条件を表 5.3-13 に示す。地表面の圧力は大気圧相当の値、地表面の気相のモル分率は大気組成相当の値で、それぞれ一定値とした (ディリクレ条件)。

$$\Psi = \frac{RT}{V_w} \ln \left(\frac{e}{e_0} \right) \quad \text{式 5.3-13}$$

ここで、 Ψ が水ポテンシャル [Pa]、 R が気体定数 [J mol⁻¹ K]、 e/e_0 が相対湿度、 T が絶対温度 [K]、 V_w が水のモル容積 [m³ mol⁻¹]である。坑道内の相対湿度は、参考文献(宮川ほか, 2021)により 50%とした。

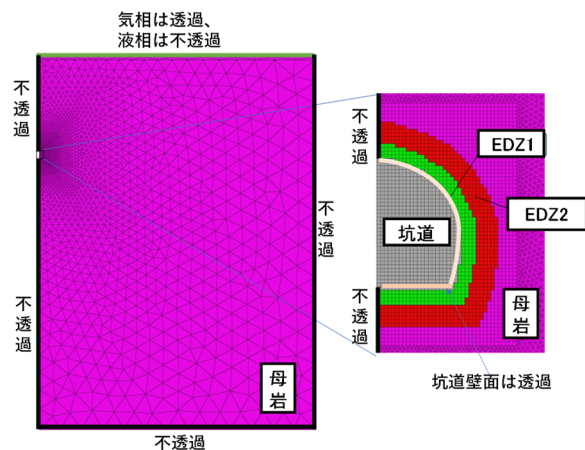


図 5.3-35 境界条件

表 5.3-12 坑道の境界条件

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

表 5.3-13 地表面の境界条件

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

坑道埋戻し状態の水理解析

境界条件の区分を図 5.3-36 に示す。地表面を除く境界は、気相及び液相に対して不透過境界とした。地表面は、気相のみが浸透可能で、液相に対しては不透過な境界とした。

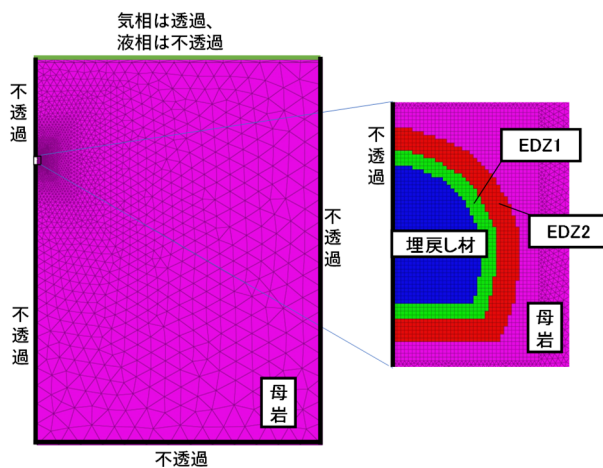


図 5.3-36 境界条件

(viii) その他の設定

基本的に、有限の値であれば、坑道の絶対浸透率や有効間隙率が異なっても解析結果に影響を

与えないが、坑道の解析条件を設定した。坑道の絶対浸透率及び有効間隙率は、それぞれ $9.5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 、0.4 とした。

また、TOUGH3 を用いた解析では、収束が良ければ（繰り返し計算が 3 回以内であれば）時間増分 Δt を 2 倍に、収束が悪ければ（繰り返し計算を 8 回実施しても収束しなければ） Δt を 1/4 倍にした。しかし、埋戻し状態の解析においては、収束の良い状態と悪い状態が繰り返され、実計算回数が多大になることがあった。解析途中に上記の繰り返しが発生した場合、対策として、 Δt がある値以上にならないよう、適宜設定した。

なお、後述する気相の単位間隙あたりのモル量および気相のガスと液相に溶解したガスの合計モル量は、以降に示す式 5.3-14 から式 5.3-17 で計算している。ここでは、 CH_4 を例として示すが、 CO_2 および O_2 も同様である。 CH_4 の合計モル量 CH_4 のモル量 $C_{g_CH_4}$ は、次の式で求めた。

$$C_{g_CH_4} = (1 - S)C_g X_{g_CH_4} \quad \text{式 5.3-14}$$

ここでは、 S は水飽和度、 C_g は気相の合計モル密度 (mol/m^3)、 $X_{g_CH_4}$ は気相の CH_4 のモル分率である。また、 C_g は、理想気体の状態方程式（以下の式）より求めた。

$$C_g = \frac{P}{RT} \quad \text{式 5.3-15}$$

ここで、 P は気相の圧力 (Pa)、 R は気体定数 ($8.314 \text{ J/(K} \cdot \text{mol)}$)、 T は解析上の設定温度 (25.5°C ; 298.65 K) である。単位間隙あたりの液相に溶解した CH_4 のモル量 $C_{l_CH_4}$ は、次の式で求めた。

$$C_{l_CH_4} = S \frac{1000 \rho_{H_2O}}{M_{H_2O}} X_{l_CH_4} \quad \text{式 5.3-16}$$

ここで、 S は水飽和度、 ρ_{H_2O} は液相の密度 ($1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ と仮定)、 M_{H_2O} は水のモル質量 (18.0 g/mol)、 $X_{l_CH_4}$ は液相中の CH_4 のモル分率である。単位間隙あたりの気相の CH_4 と液相に溶解した CH_4 の合計モル量 $C_{g+l_CH_4}$ は、以下の式で求めた。

$$C_{g+l_CH_4} = C_{g_CH_4} + C_{l_CH_4} \quad \text{式 5.3-17}$$

(c) 解析結果

(i) EDZ1 を考慮した坑道開放期間 1000 年の水理学的長期変化解析

1) 圧力分布・飽和度分布・気相および液相の流向分布

圧力分布の変化を図 5.3-37 から図 5.3-39 に示す。表示範囲は、図 5.3-37 が解析モデル全体、図 5.3-38 が坑道壁面から水平方向に 100 m の範囲（坑道周辺）、図 5.3-39 が坑道壁面から水平方向に 7m の範囲（坑道近傍）である。後述する解析結果の表示範囲は同じ形で整理している。坑道周辺の圧力（全圧）は、時間の経過とともに、坑道を中心として同心円状に低下していく。

飽和度分布の変化を、図 5.3-40 および図 5.3-41 に示す。坑道周辺の飽和度低下領域も、圧力同様、時間の経過とともに、坑道を中心として同心円状に低下していく。

気相の流向分布の変化を、図 5.3-42 および図 5.3-43 に、液相の流向分布の変化を図 5.3-44 にそれぞれ示す。気相および液相のいずれにおいても、掘削の直後から、圧力勾配の方向に沿った形でかつ坑道に向かう流れの向きとなっている。

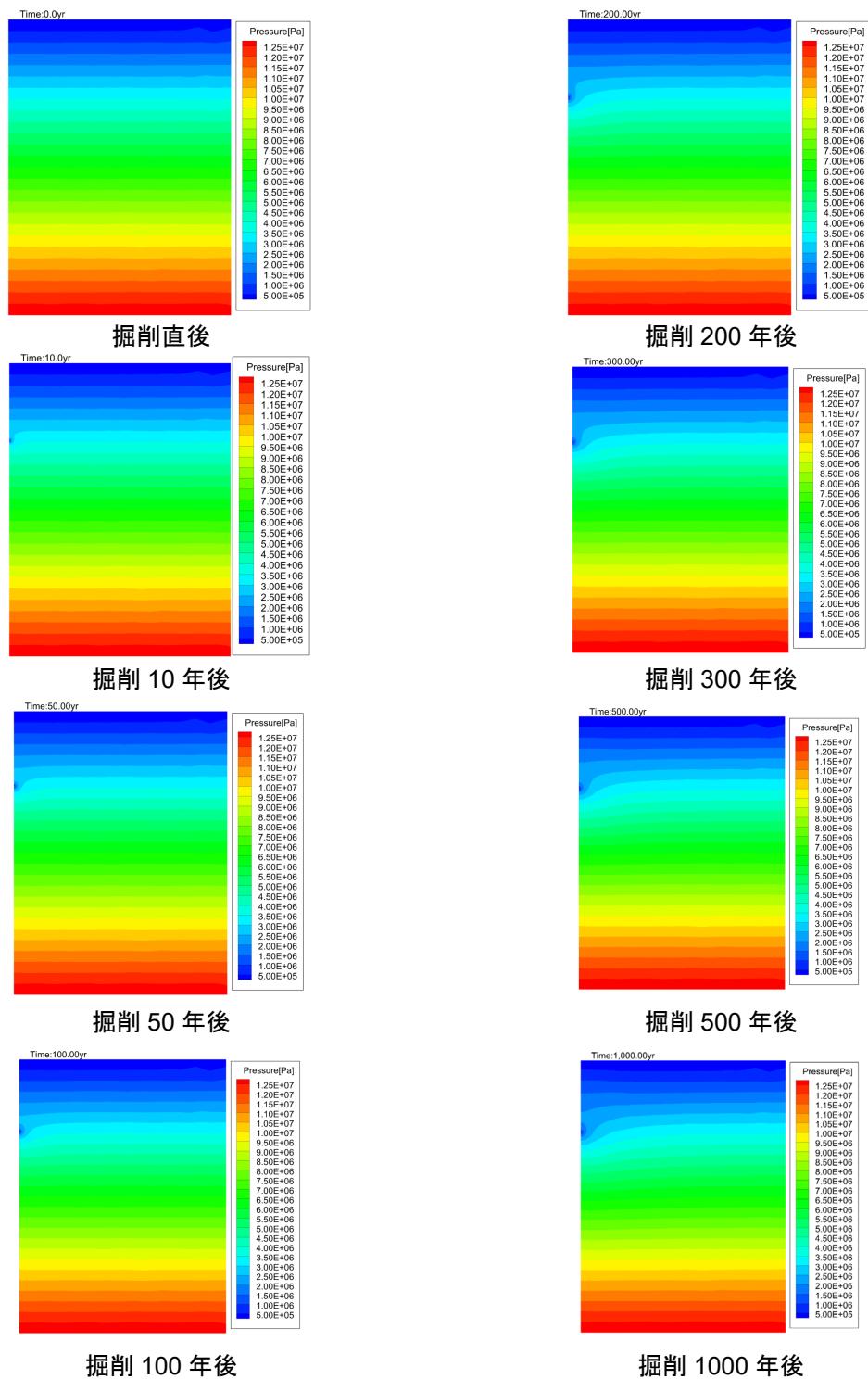
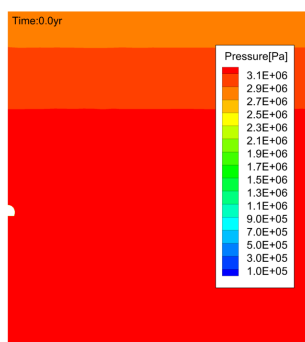
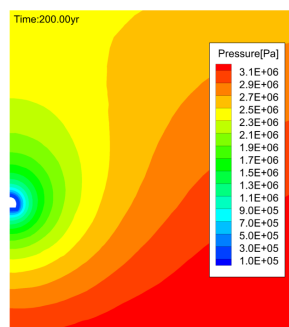


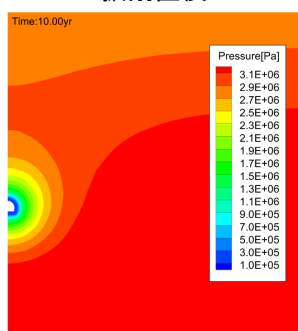
図 5.3-37 掘削後の圧力分布（モデル全体）



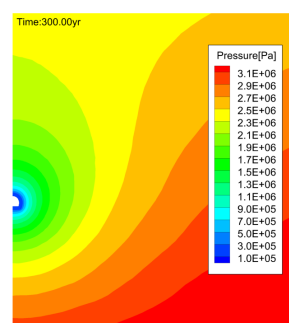
掘削直後



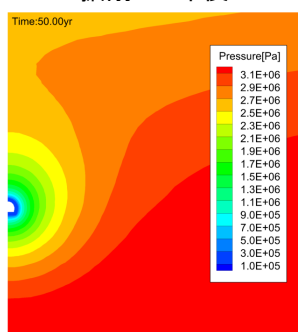
掘削 200 年後



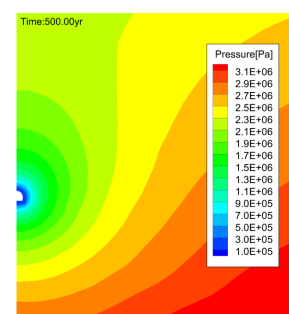
掘削 10 年後



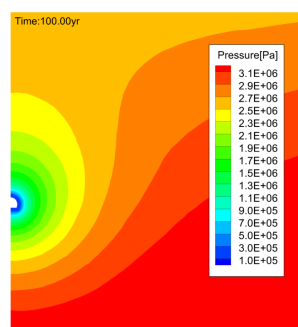
掘削 300 年後



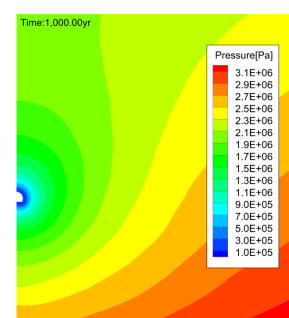
掘削 50 年後



掘削 500 年後 (2022 年度)

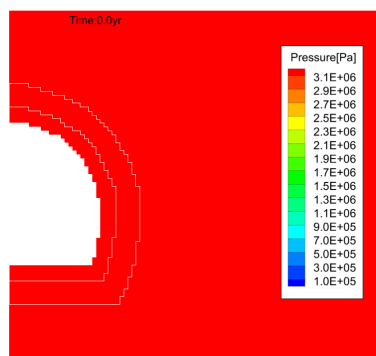


掘削 100 年後

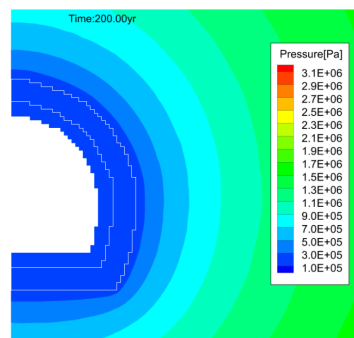


掘削 1000 年後

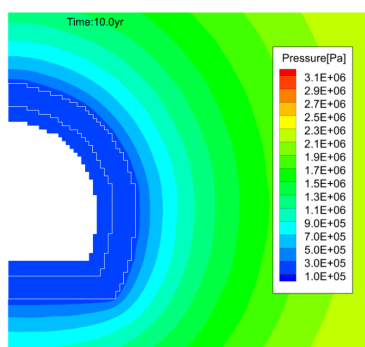
図 5.3-38 掘削後の圧力分布 (モデル全体)



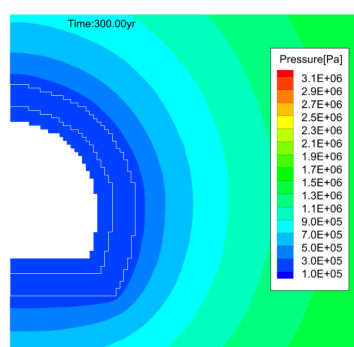
掘削直後



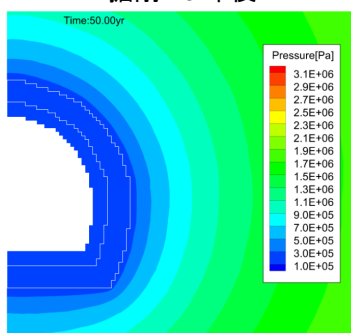
掘削 200 年後



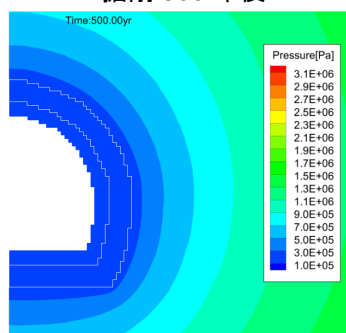
掘削 10 年後



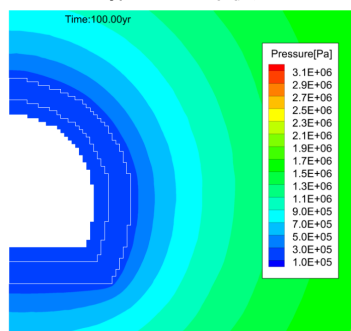
掘削 300 年後



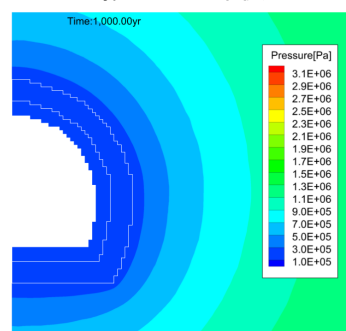
掘削 50 年後



掘削 500 年後

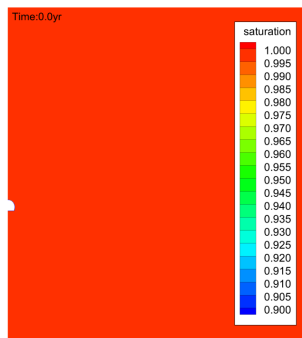


掘削 100 年後

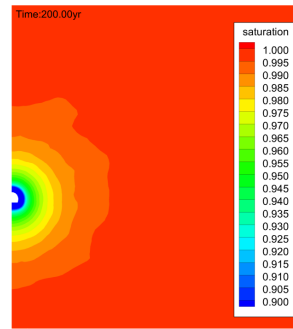


掘削 1000 年後

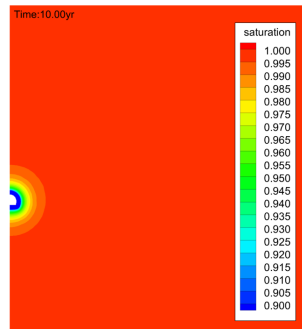
図 5.3-39 掘削後の圧力分布（坑道近傍）



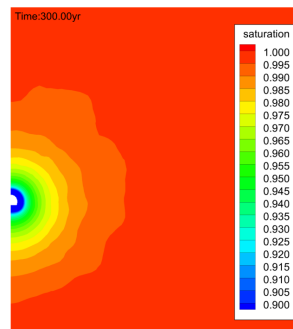
掘削直後



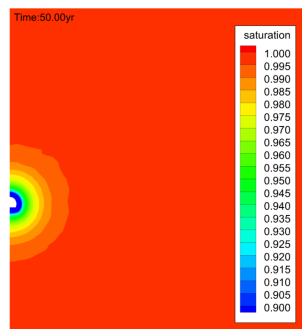
掘削 200 年後



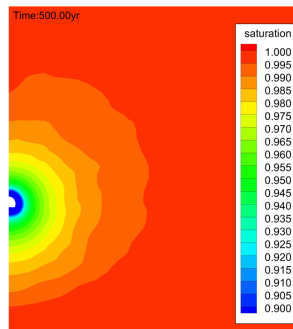
掘削 10 年後



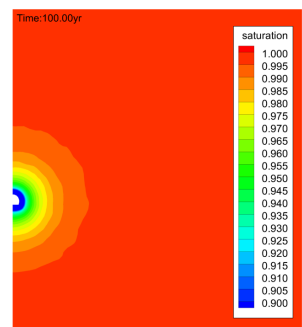
掘削 300 年後



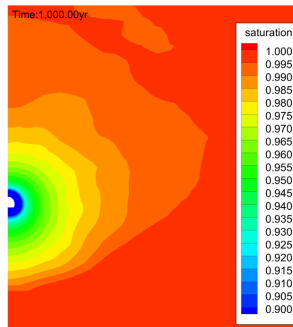
掘削 50 年後



掘削 500 年後

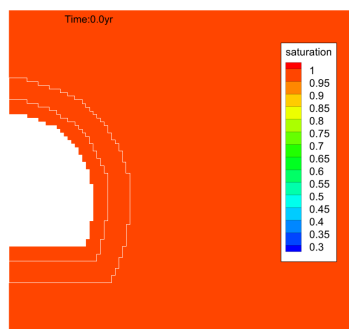


掘削 100 年後

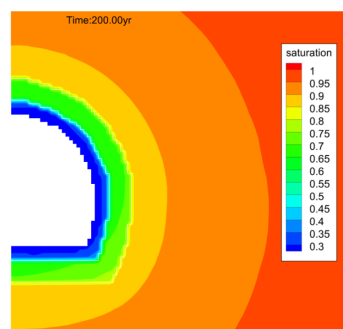


掘削 1000 年後

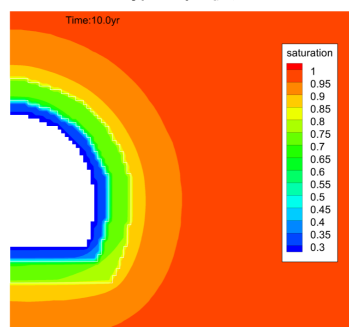
図 5.3-40 掘削後の飽和度分布 (坑道壁面から水平方向に 100m の範囲)



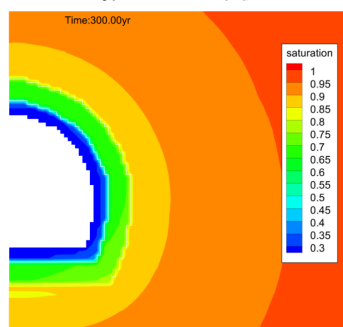
掘削直後



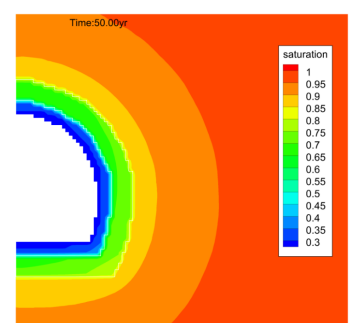
掘削 200 年後



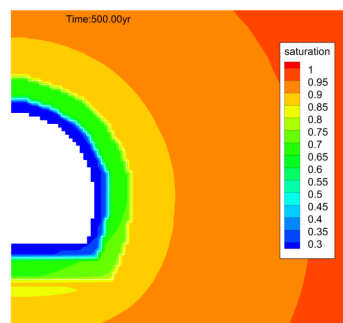
掘削 10 年後



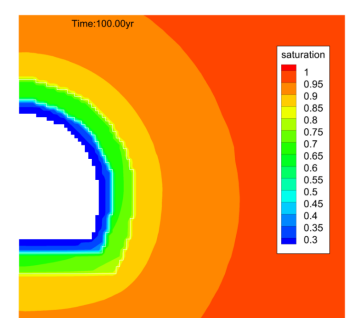
掘削 300 年後



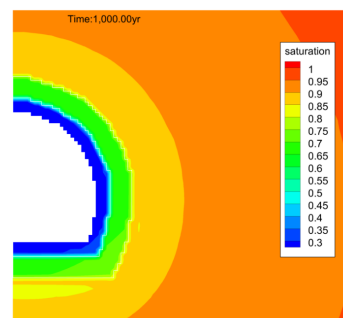
掘削 50 年後



掘削 500 年後

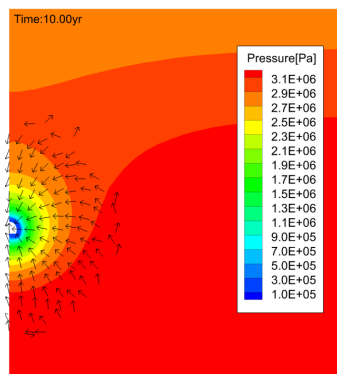


掘削 100 年後

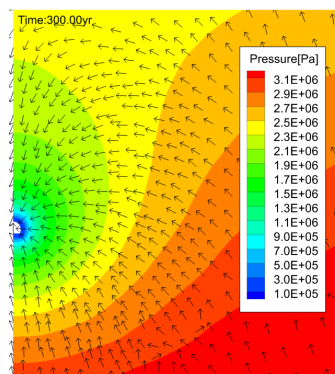


掘削 1000 年後

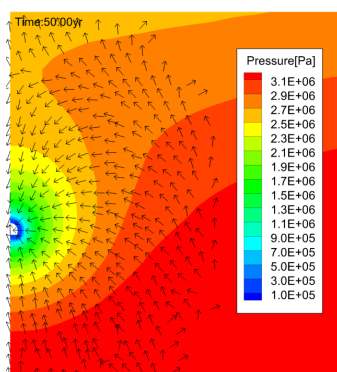
図 5.3-41 掘削後の飽和度分布（坑道近傍）



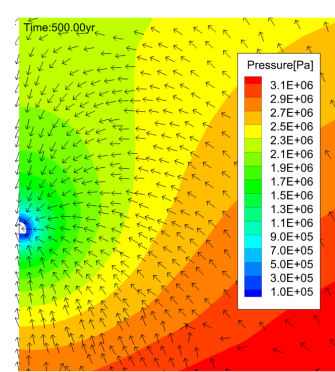
掘削 10 年後



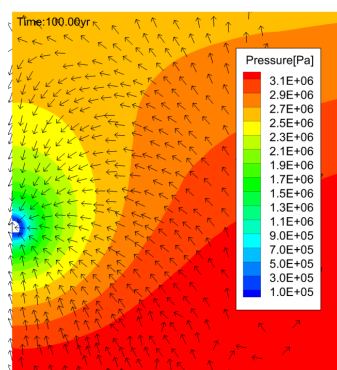
掘削 300 年後



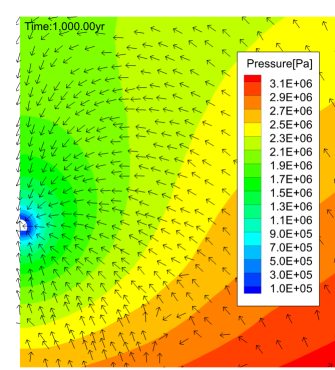
掘削 500 年後



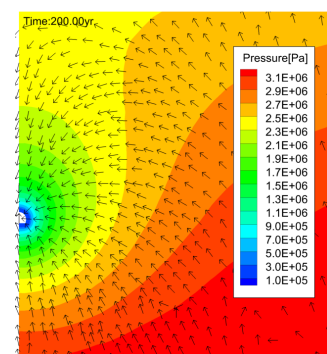
掘削 500 年後



掘削 100 年後

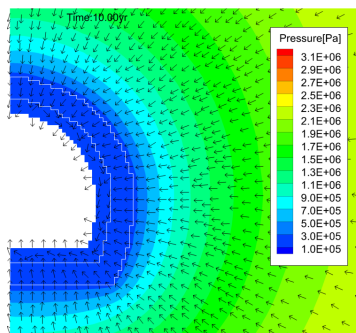


掘削 1000 年後

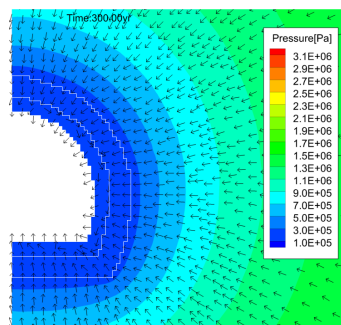


掘削 200 年後

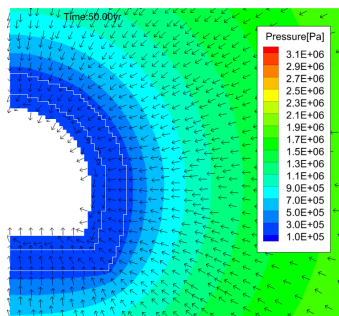
図 5.3-42 掘削後の流向分布（気相）（坑道壁面から水平方向に 100m の範囲）



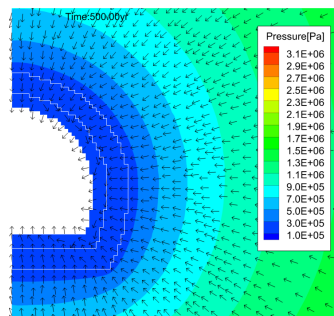
掘削 10 年後



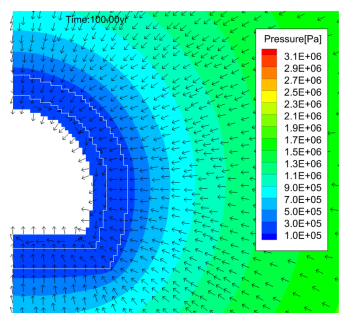
掘削 300 年後



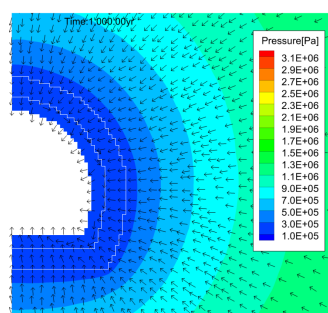
掘削 50 年後



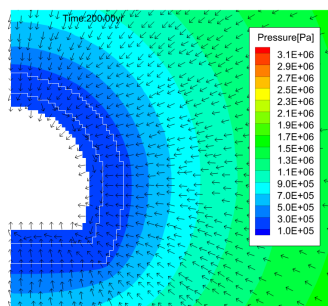
掘削 500 年後



掘削 100 年後

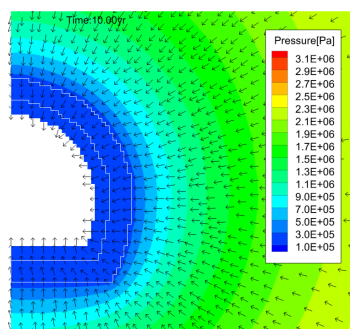


掘削 1000 年後

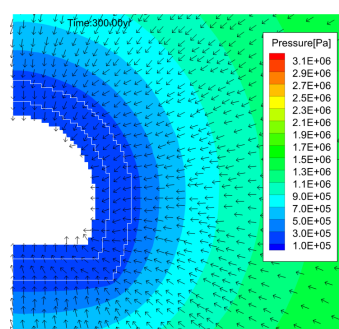


掘削 200 年後

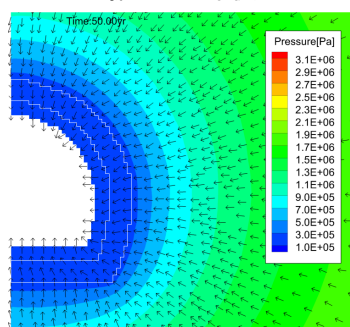
図 5.3-43 掘削後の流向分布（気相）（坑道近傍）



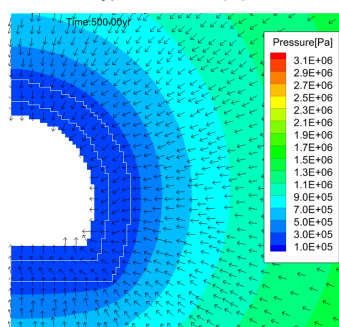
掘削 10 年後



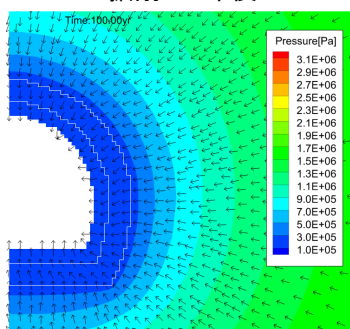
掘削 300 年後



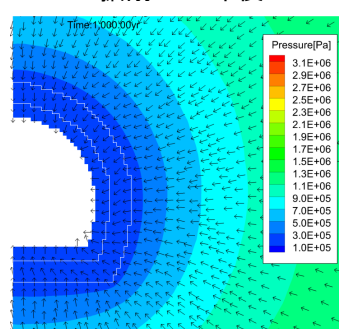
掘削 50 年後



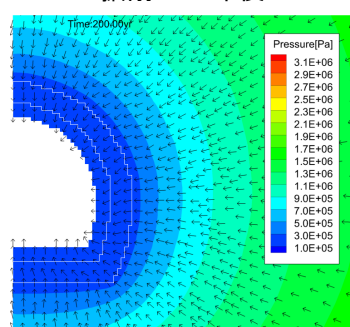
掘削 500 年後



掘削 100 年後



掘削 1000 年後



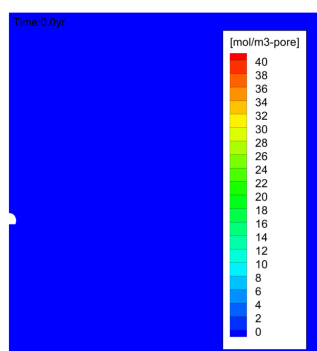
掘削 200 年後

図 5.3-44 掘削後の流向分布（液相）（坑道近傍）

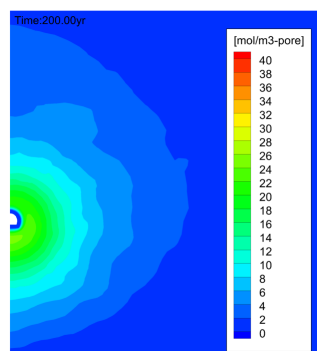
2) 単位間隙あたりの「気相の CH₄、CO₂、O₂ のモル量」及び「気相の CH₄、CO₂、O₂ と液相に溶解した CH₄、CO₂、O₂ の合計モル量」

単位間隙あたりの気相の CH₄ のモル量 $C_{g_CH_4}$ の分布の変化および単位間隙あたりの気相の CH₄ と液相に溶解した CH₄ の合計モル量 $C_{g+l_CH_4}$ の分布の変化を図 5.3-45 から図 5.3-48 に、単位間隙あたりの気相の CO₂ のモル量 $C_{g_CO_2}$ の分布の変化および単位間隙あたりの気相の CO₂ と液相に溶解した CO₂ の合計モル量 $C_{g+l_CO_2}$ の分布の変化を図 5.3-49 から図 5.3-52 に、単位間隙あたりの気相の O₂ のモル量 $C_{g_O_2}$ の分布の変化および単位間隙あたりの気相の O₂ と液相に溶解した O₂ の合計モル量 $C_{g+l_O_2}$ の分布の変化を図 5.3-53 から図 5.3-56 にそれぞれ示す。

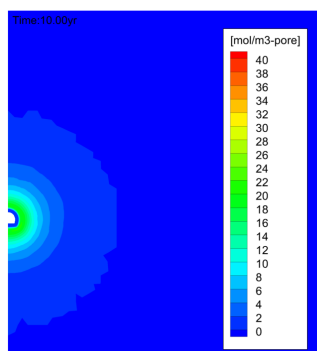
坑道周辺の気相の CH₄、CO₂ のモル量 $C_{g_CH_4}$ の分布は、初期の溶存濃度が相対的に高いため、飽和度変化の影響をうける形で坑道周辺の広範囲まで広がるが、EDZ およびその近傍より坑道側では母岩側からの流入が少ないことと坑道への流出により濃度は低い状態が長期間保たれている。一方、単位間隙あたりの気相の O₂ のモル量 $C_{g_O_2}$ の分布の変化はそれらとは異なり、坑道側からの O₂ が EDZ1、EDZ2 に向かって徐々に浸透していくことがわかる。それぞれの気相と液相に溶解したガスの合計モル量 C_{g+l} も、これと同様の傾向となっている。



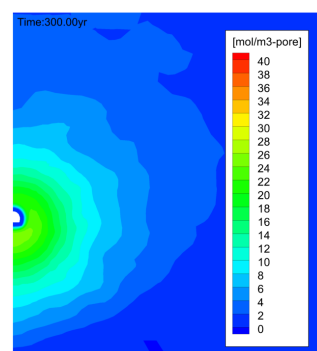
掘削直後



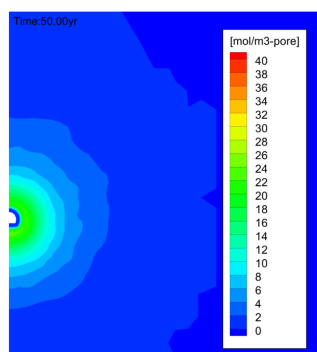
掘削 200 年後



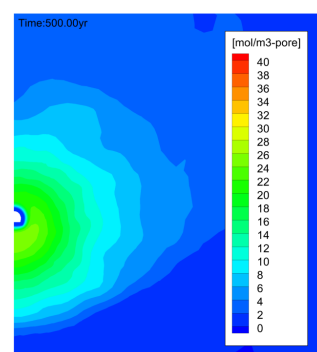
掘削 10 年後



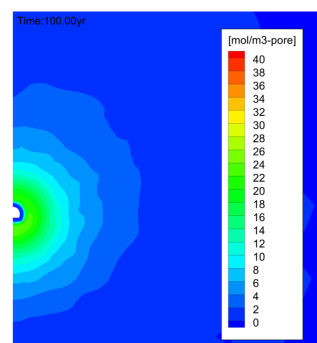
掘削 300 年後



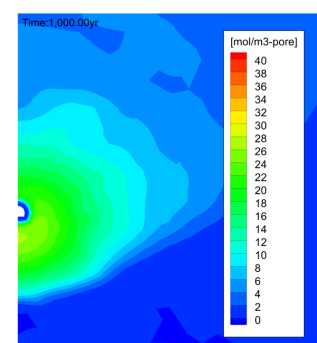
掘削 50 年後



掘削 500 年後

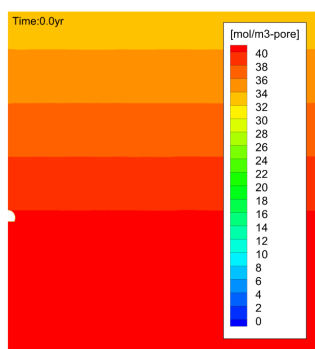


掘削 100 年後

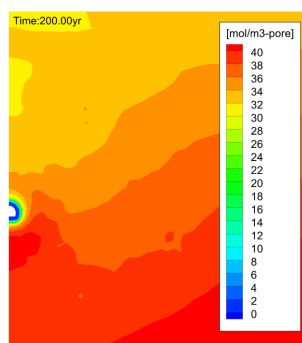


掘削 1000 年後

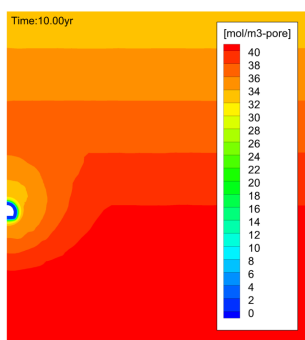
図 5.3-45 掘削後の単位間隙あたりの CH_4 のモル量（坑道周辺、気相）



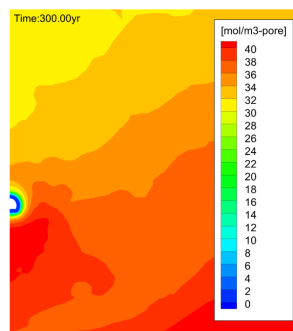
掘削直後



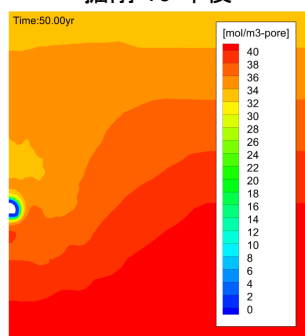
掘削 200 年後



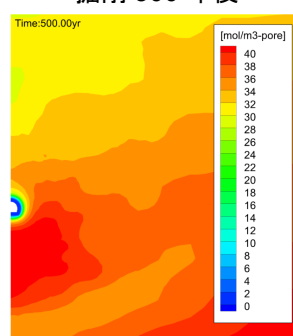
掘削 10 年後



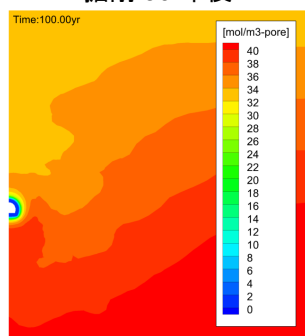
掘削 300 年後



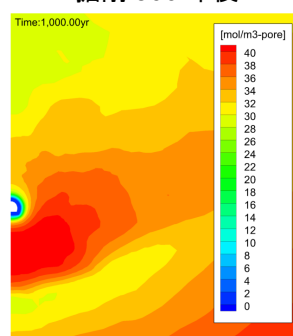
掘削 50 年後



掘削 500 年後

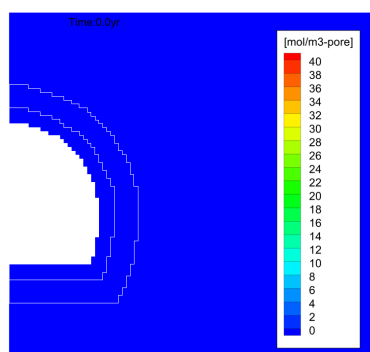


掘削 100 年後

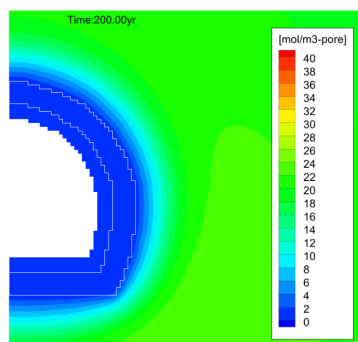


掘削 1000 年後

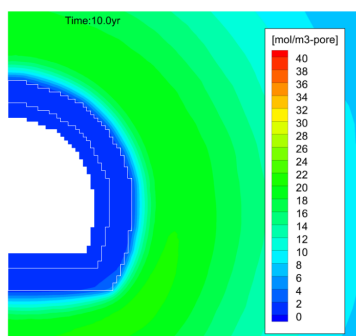
図 5.3-46 掘削後の単位間隙あたりの CH_4 のモル量（坑道周辺、気相+液相）



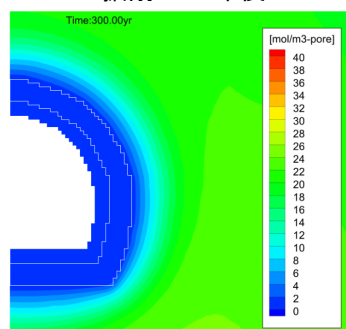
掘削直後



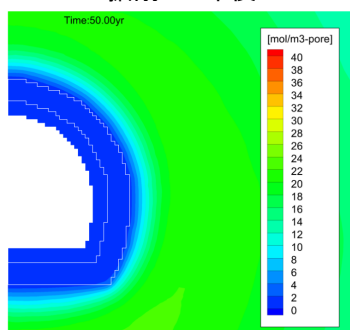
掘削 200 年後



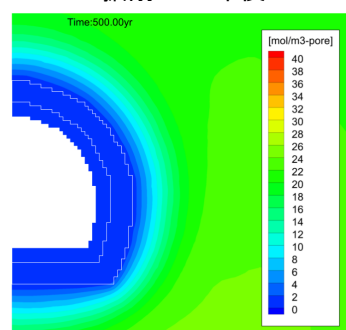
掘削 10 年後



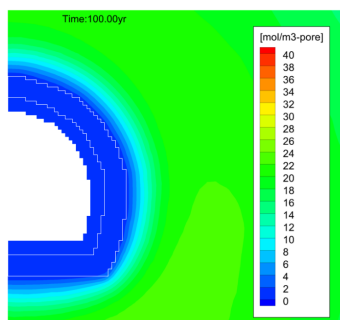
掘削 300 年後



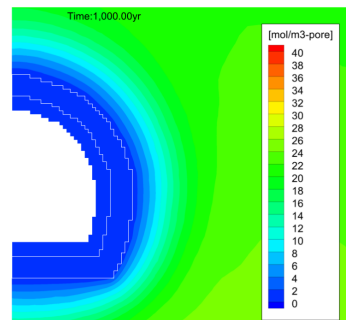
掘削 50 年後



掘削 500 年後

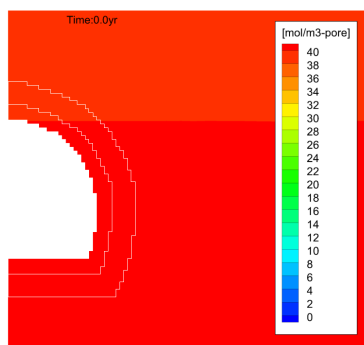


掘削 100 年後

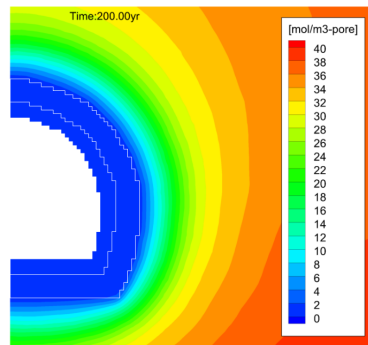


掘削 1000 年後

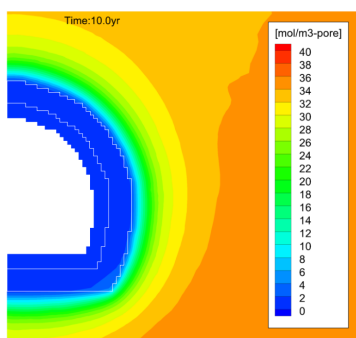
図 5.3-47 掘削後の単位間隙あたりの CH_4 のモル量（坑道近傍、気相）



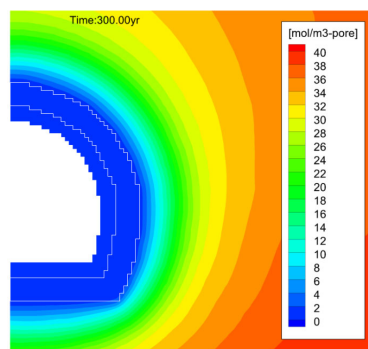
掘削直後



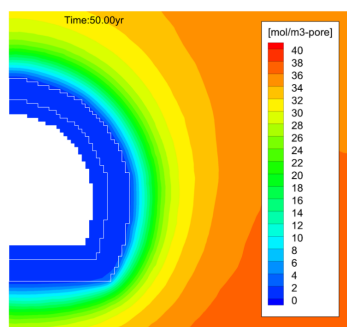
掘削 200 年後



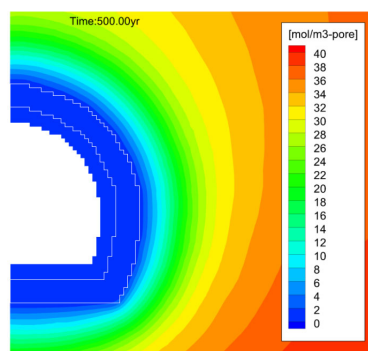
掘削 10 年後



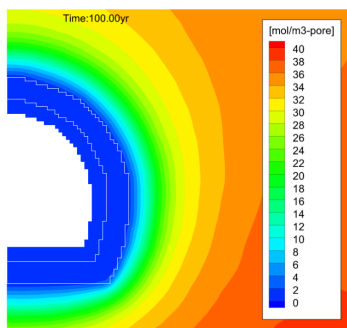
掘削 300 年後



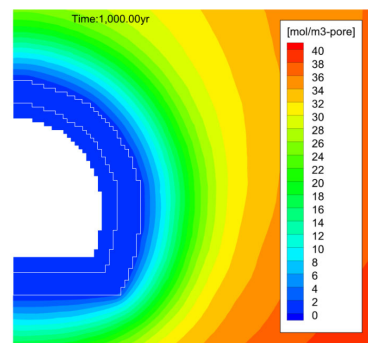
掘削 50 年後



掘削 500 年後

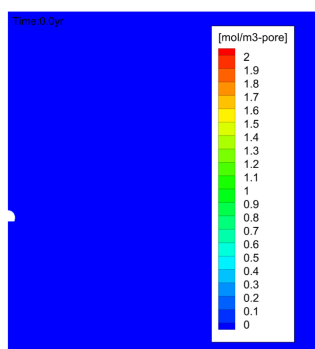


掘削 100 年後

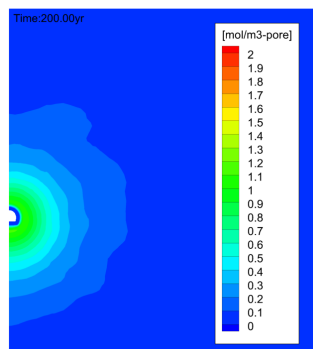


掘削 1000 年後

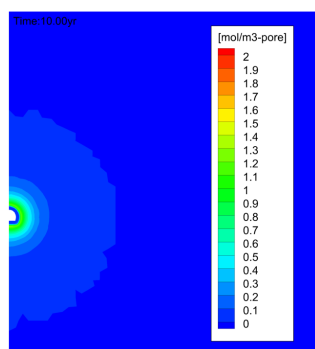
図 5.3-48 掘削後の単位間隙あたりの CH_4 のモル量（坑道近傍、気相+液相）



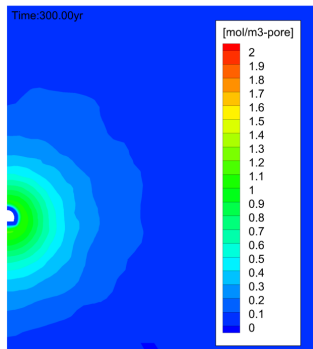
掘削直後



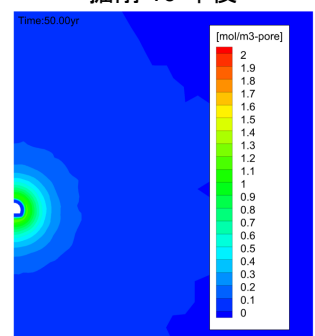
掘削 200 年後 (2022 年度)



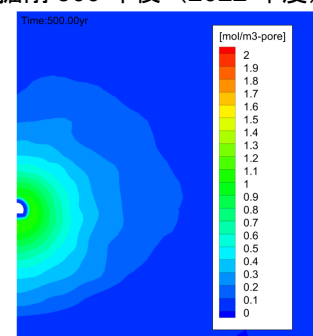
掘削 10 年後



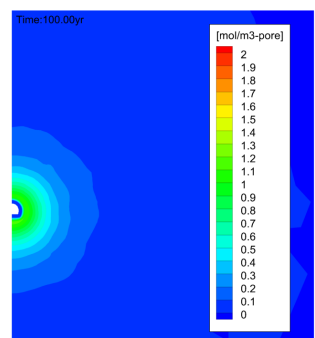
掘削 300 年後 (2022 年度)



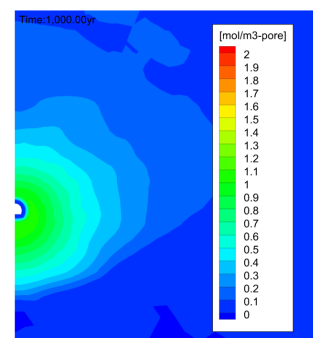
掘削 50 年後



掘削 500 年後 (2022 年度)

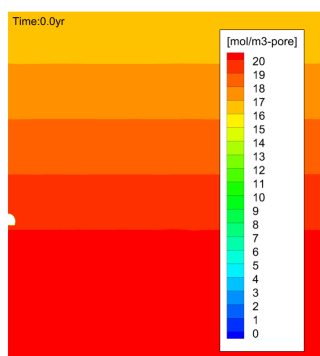


掘削 100 年後 (2022 年度)

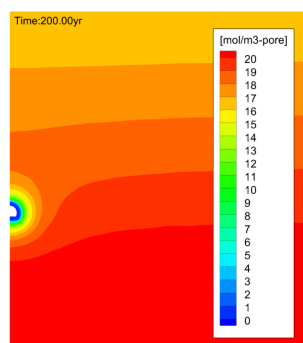


掘削 1000 年後 (2022 年度)

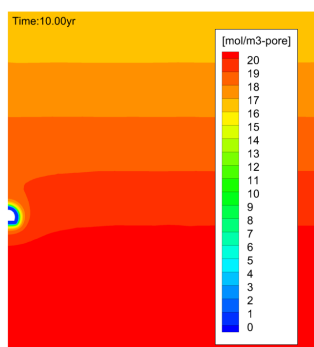
図 5.3-49 掘削後の単位間隙あたりの CO_2 のモル量 (坑道周辺、気相)



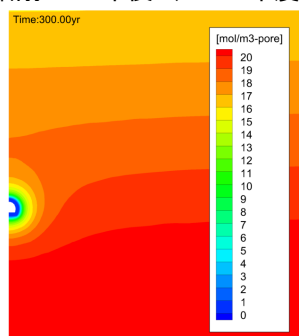
掘削直後（2022 年度）



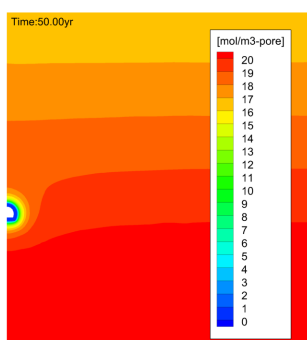
掘削 200 年後（2022 年度）



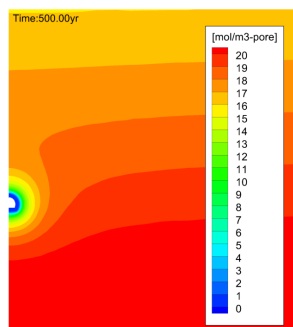
掘削 10 年後（2022 年度）



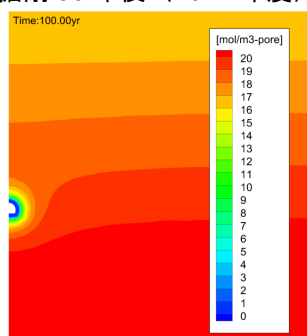
掘削 300 年後（2022 年度）



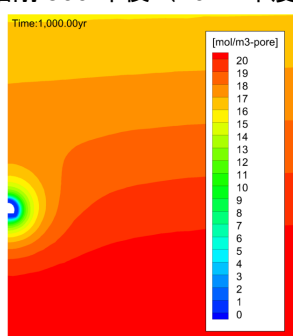
掘削 50 年後（2022 年度）



掘削 500 年後（2022 年度）

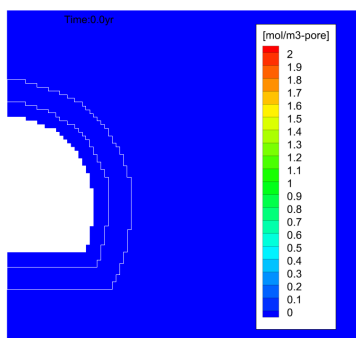


掘削 100 年後（2022 年度）

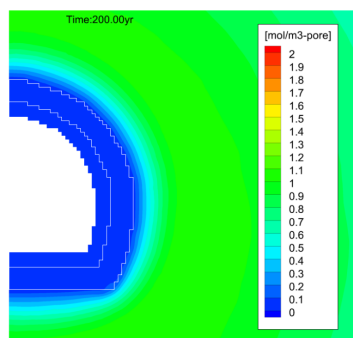


掘削 1000 年後（2022 年度）

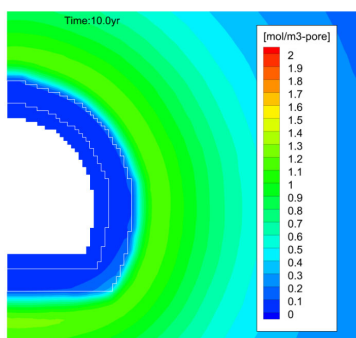
図 5.3-50 掘削後の単位間隙あたりの CO_2 のモル量（坑道周辺、気相+液相）



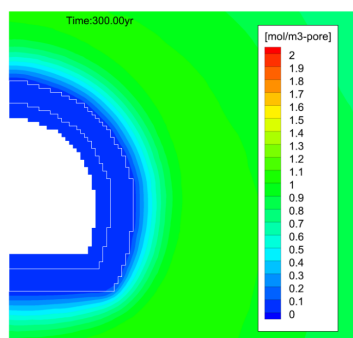
掘削直後（2022 年度）



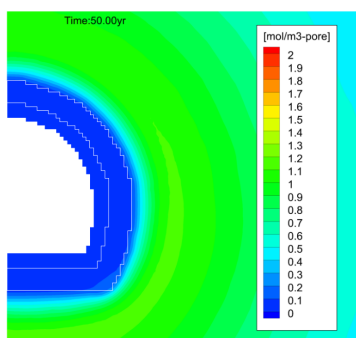
掘削 200 年後（2022 年度）



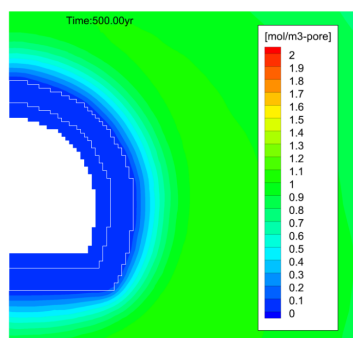
掘削 10 年後（2022 年度）



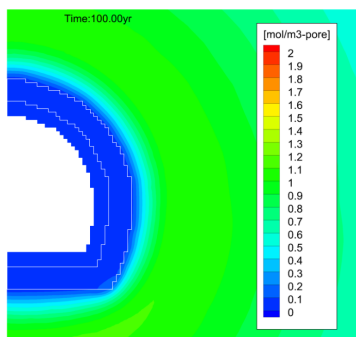
掘削 300 年後（2022 年度）



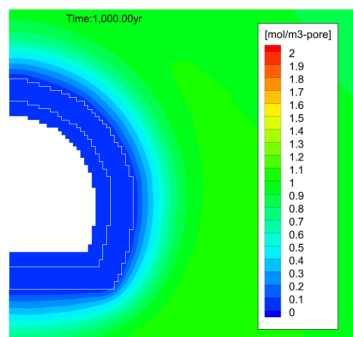
掘削 50 年後（2022 年度）



掘削 500 年後（2022 年度）

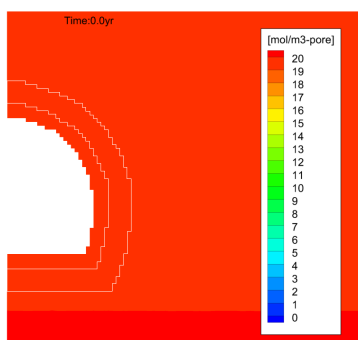


掘削 100 年後（2022 年度）

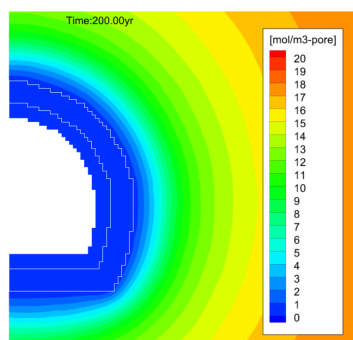


掘削 1000 年後（2022 年度）

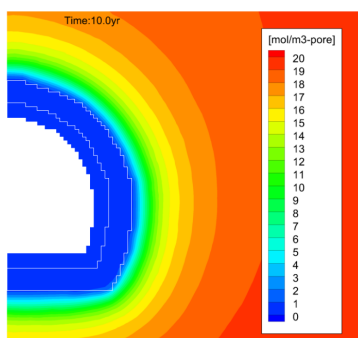
図 5.3-51 掘削後の単位間隙あたりの CO_2 のモル量（坑道近傍、気相）



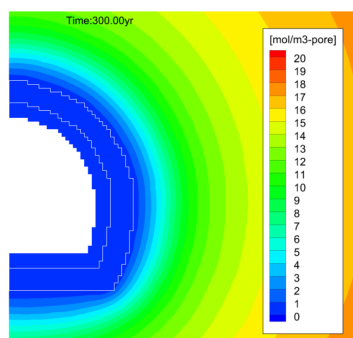
掘削直後（2022 年度）



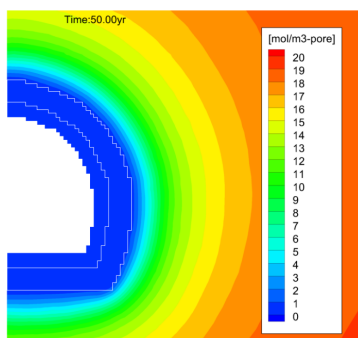
掘削 200 年後（2022 年度）



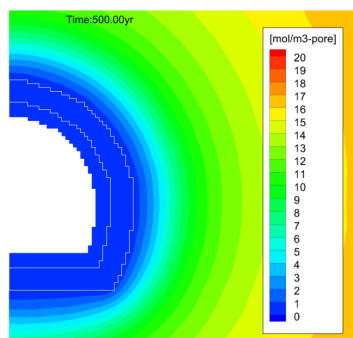
掘削 10 年後（2022 年度）



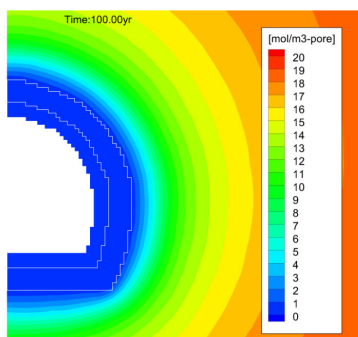
掘削 300 年後（2022 年度）



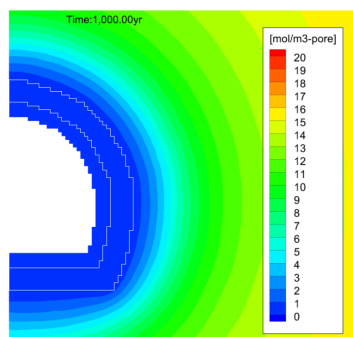
掘削 50 年後（2022 年度）



掘削 500 年後（2022 年度）

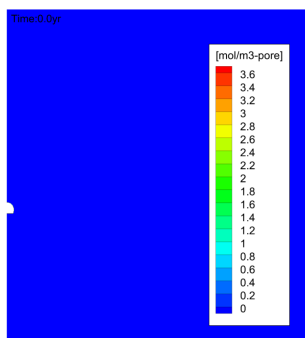


掘削 100 年後（2022 年度）

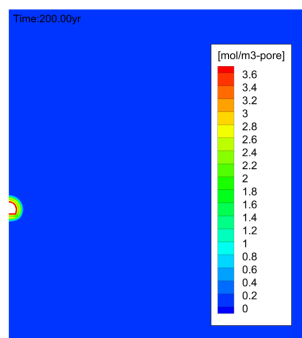


掘削 1000 年後（2022 年度）

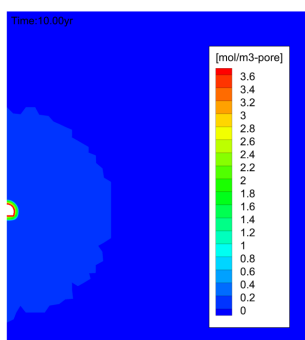
図 5.3-52 掘削後の単位間隙あたりの CO_2 のモル量（坑道近傍、気相+液相）



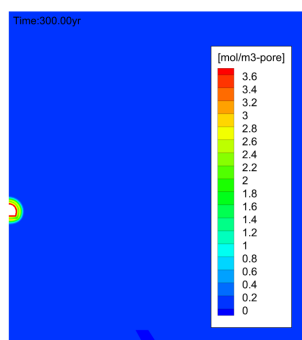
掘削直後（2022 年度）



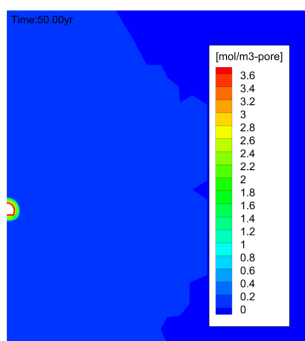
掘削 200 年後（2022 年度）



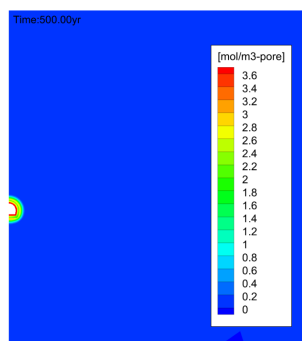
掘削 10 年後（2022 年度）



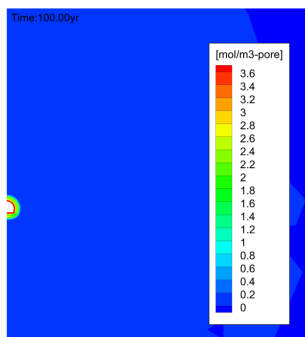
掘削 300 年後（2022 年度）



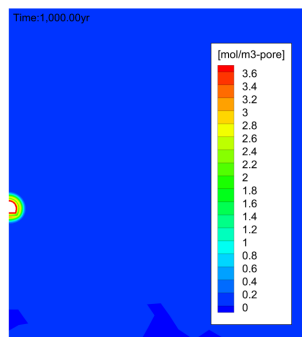
掘削 50 年後（2022 年度）



掘削 500 年後（2022 年度）

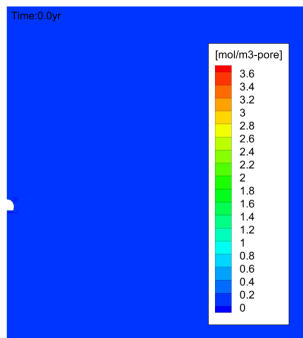


掘削 100 年後（2022 年度）

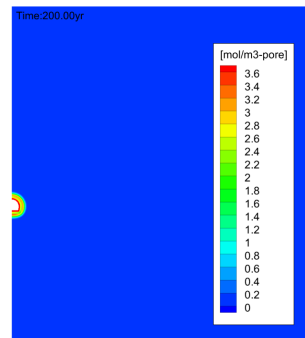


掘削 1000 年後（2022 年度）

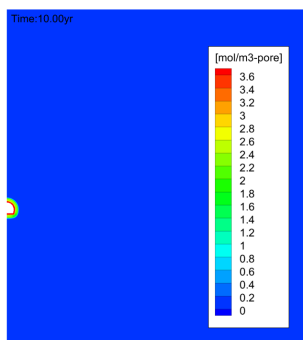
図 5.3-53 掘削後の単位間隙あたりの O_2 のモル量（坑道周辺、気相）



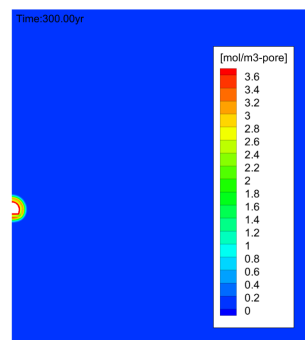
掘削直後（2022 年度）



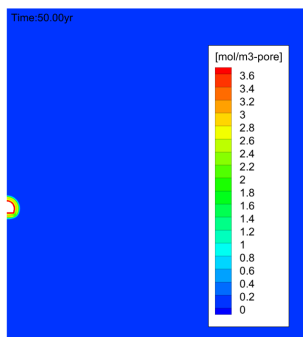
掘削 200 年後（2022 年度）



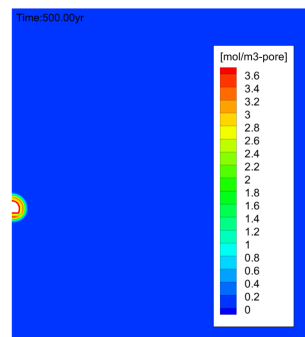
掘削 10 年後（2022 年度）



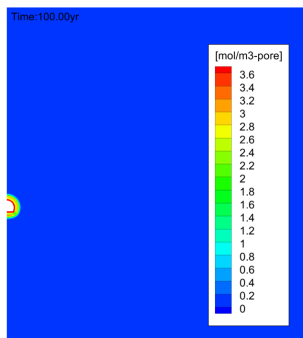
掘削 300 年後（2022 年度）



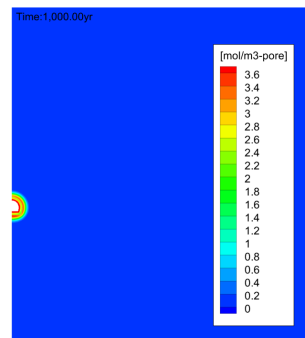
掘削 50 年後（2022 年度）



掘削 500 年後（2022 年度）

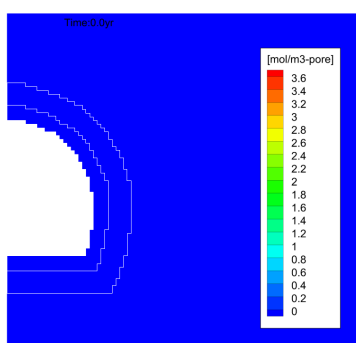


掘削 100 年後（2022 年度）

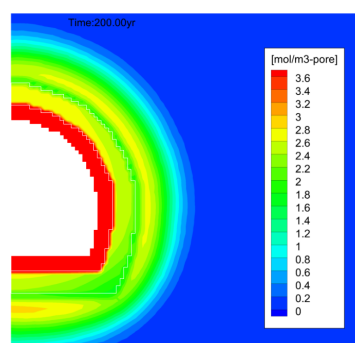


掘削 1000 年後（2022 年度）

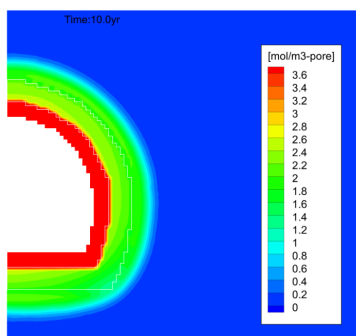
図 5.3-54 掘削後の単位間隙あたりの O_2 のモル量（坑道周辺、気相+液相）



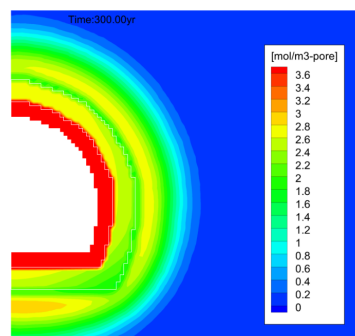
掘削直後（2022 年度）



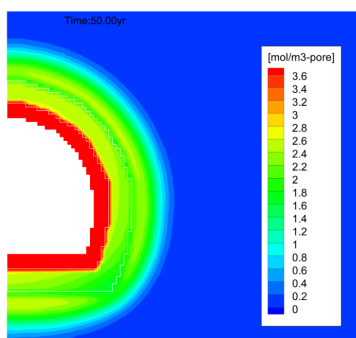
掘削 200 年後（2022 年度）



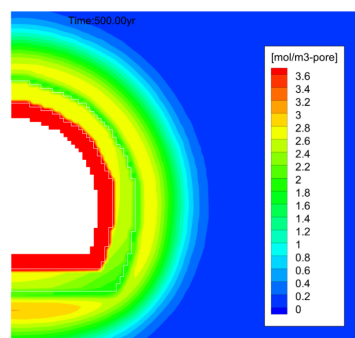
掘削 10 年後（2022 年度）



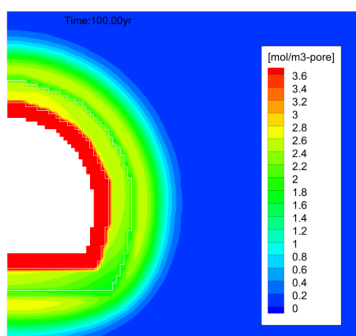
掘削 300 年後（2022 年度）



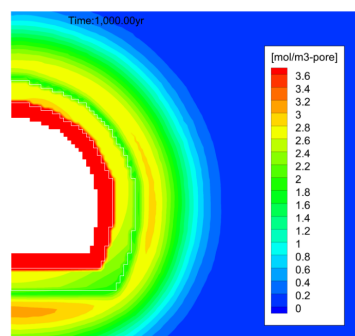
掘削 50 年後（2022 年度）



掘削 500 年後（2022 年度）

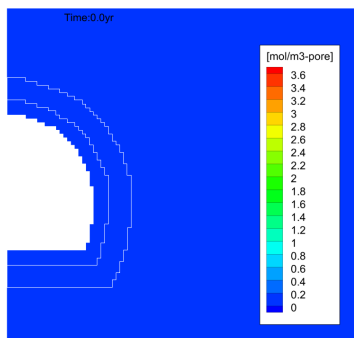


掘削 100 年後（2022 年度）

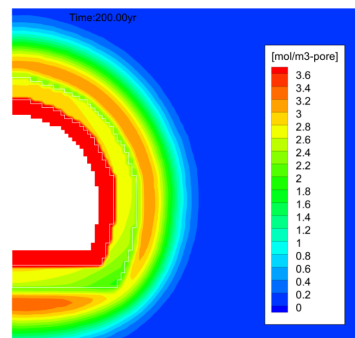


掘削 1000 年後（2022 年度）

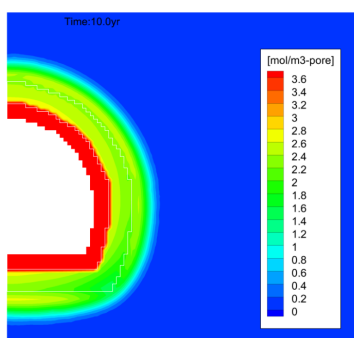
図 5. 3-55 掘削後の単位間隙あたりの O_2 のモル量（坑道近傍、気相）



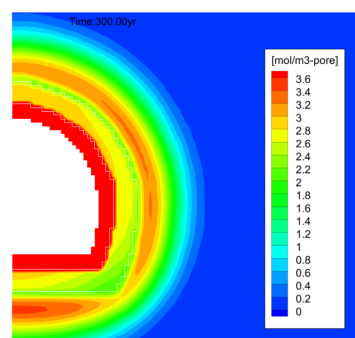
掘削直後（2022 年度）



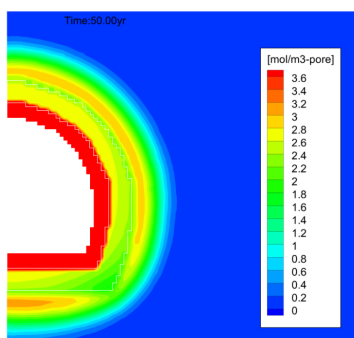
掘削 200 年後（2022 年度）



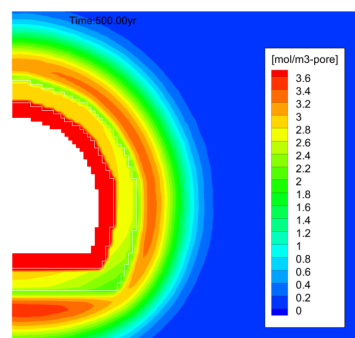
掘削 10 年後（2022 年度）



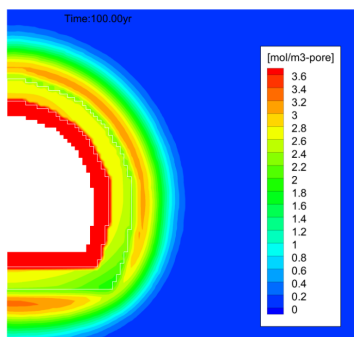
掘削 300 年後（2022 年度）



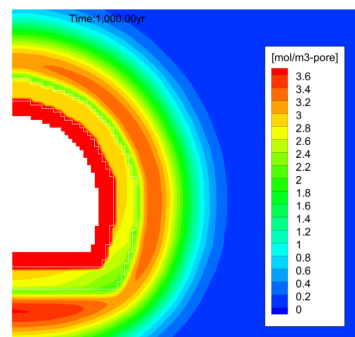
掘削 50 年後（2022 年度）



掘削 500 年後（2022 年度）



掘削 100 年後（2022 年度）



掘削 1000 年後（2022 年度）

図 5.3-56 掘削後の単位間隙あたりの O_2 のモル量（坑道近傍、気相+液相）

(ii) 坑道埋戻し状態の水理解析

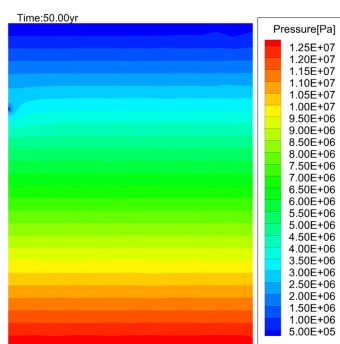
前述の坑道埋戻し前の初期状態を引き継ぎ、坑道埋戻し時点から 20、50、100、200、500 年後と、各ケースの解析終了時（埋戻しから、Case7 は 950 年後、Case8 は 900 年後、Case9 は 800 年後、Case10 は 700 年後）の時点における解析結果図を示す。

1) Case7（開放 50 年+埋戻し 950 年）

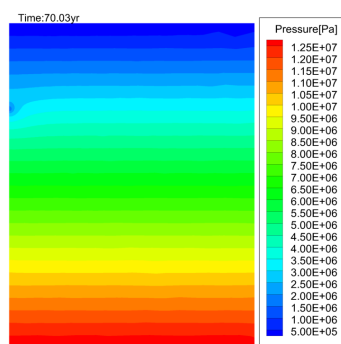
圧力分布、飽和度分布

Case7 の水理解析における圧力分布の変化を図 5.3-57 と図 5.3-58 に示す。時間の経過とともに坑道周辺の圧力が回復し、950 年後には静水圧分布にほぼ近い状態となる。

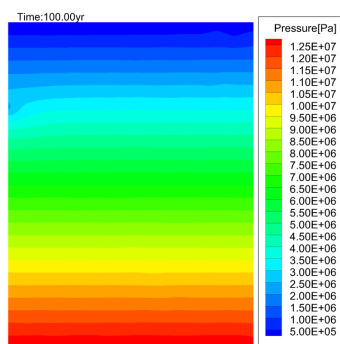
飽和度分布の変化を図 5.3-59 と図 5.3-60 に示す。埋戻し材への浸潤は、坑道隅角部及び下部から頂部へと進行し、埋戻しから 600 年後にほぼ飽和に至り、950 年後には坑道掘削前の初期状態に戻る。EDZ の飽和度の上昇は、埋戻し材よりも遅れており、特に EDZ の上部は不飽和領域が遅くまで残りやすい。また、EDZ2 よりも EDZ1 の方が飽和度の上昇が遅い。飽和する順番が埋戻し材、EDZ2、EDZ1 の順番になる理由は、同じ飽和度では、サクション圧の絶対値が、埋戻し材 > EDZ2 > EDZ1（図 5.3-61 参照）であり、この順番で吸水しやすいためである。



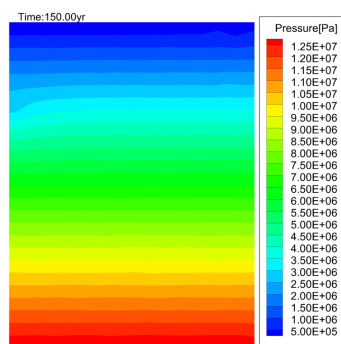
埋戻し直後



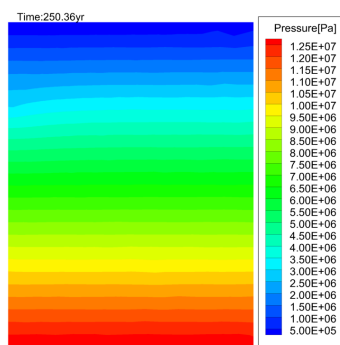
埋戻し 20 年後



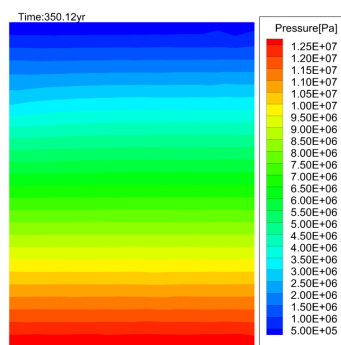
埋戻し 50 年後



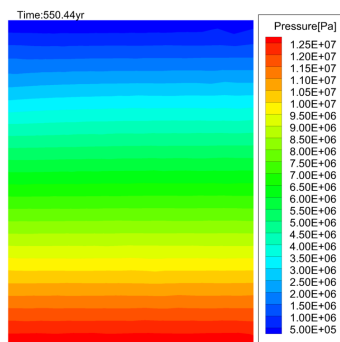
埋戻し 100 年後



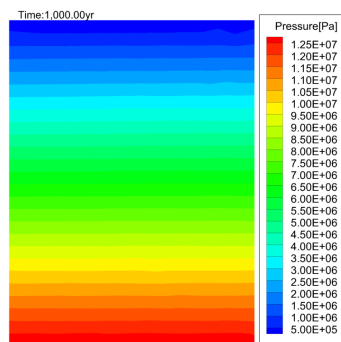
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

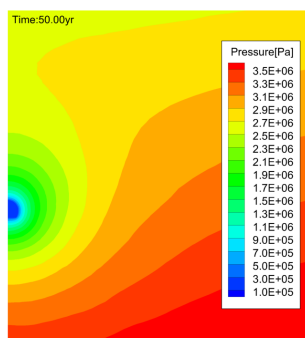


埋戻し 500 年後

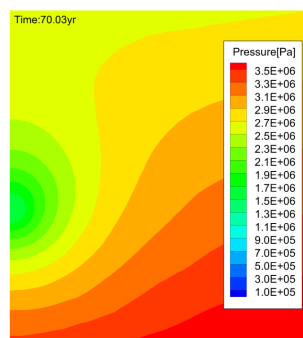


埋戻し 950 年後

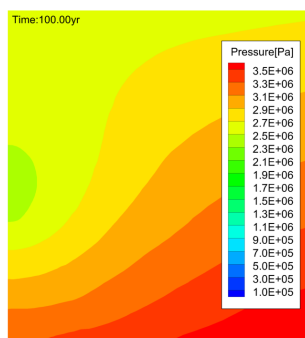
図 5.3-57 Case7 の圧力分布（モデル全体）



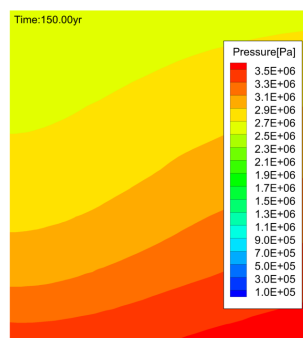
埋戻し直後



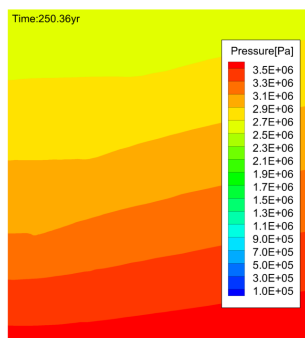
埋戻し 20 年後



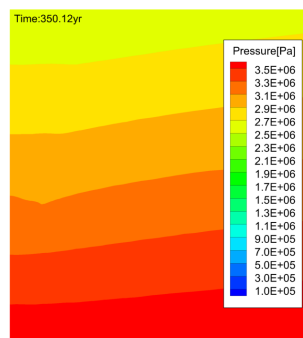
埋戻し 50 年後



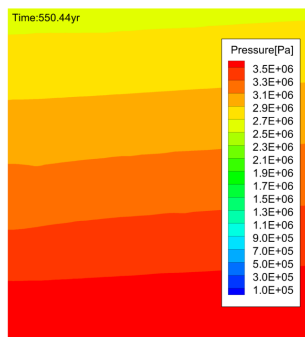
埋戻し 100 年後



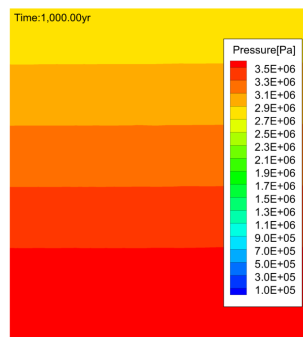
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

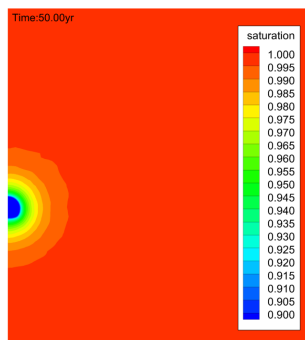


埋戻し 500 年後

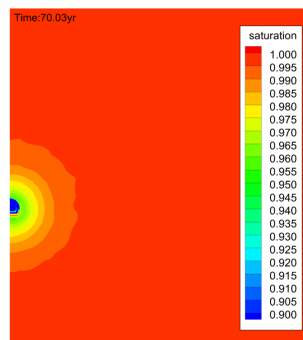


埋戻し 950 年後

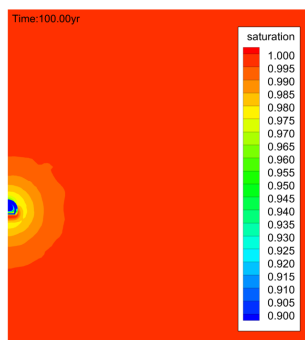
図 5. 3-58 Case7 の圧力分布（坑道周辺）



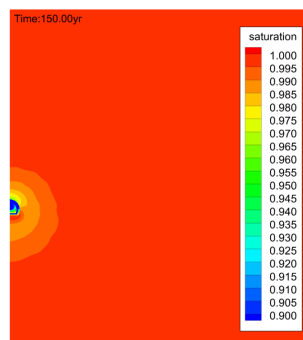
埋戻し直後



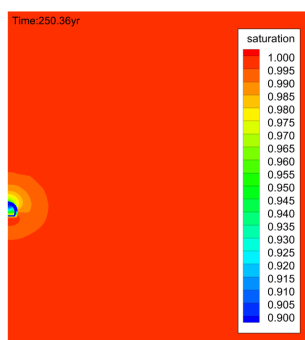
埋戻し 20 年後



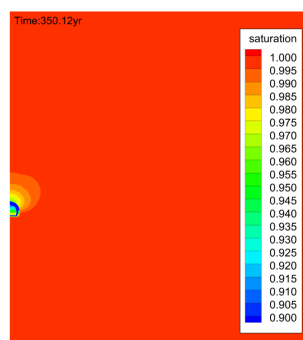
埋戻し 50 年後



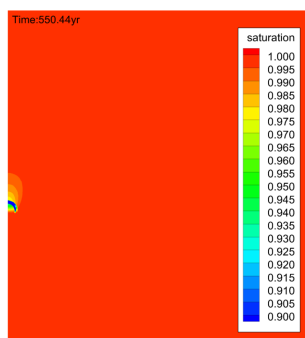
埋戻し 100 年後



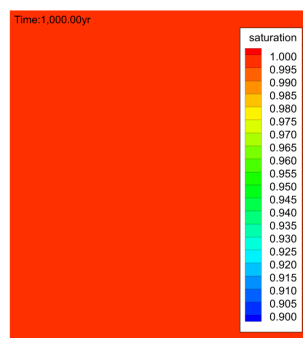
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

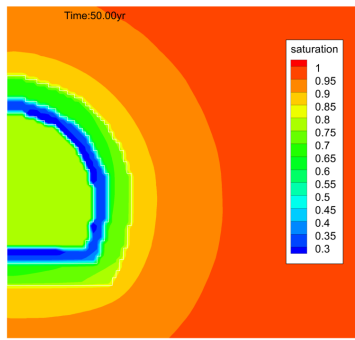


埋戻し 500 年後

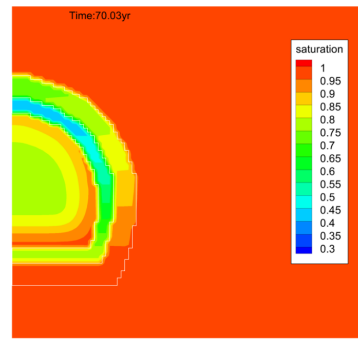


埋戻し 950 年後

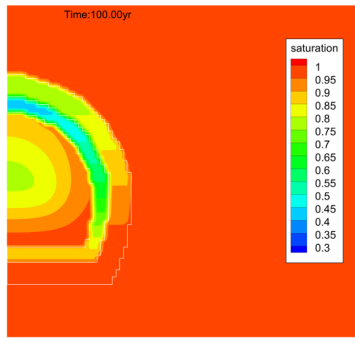
図 5.3-59 Case7 の飽和度分布（坑道周辺）



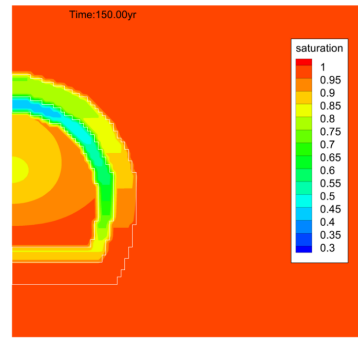
埋戻し直後



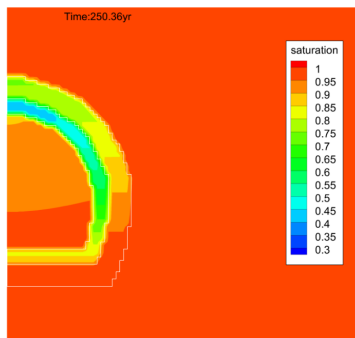
埋戻し 20 年後



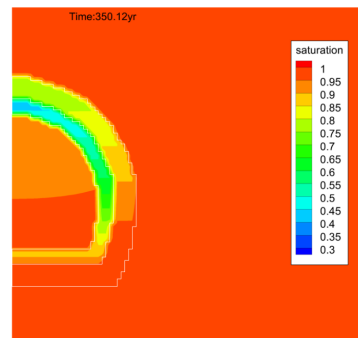
埋戻し 50 年後



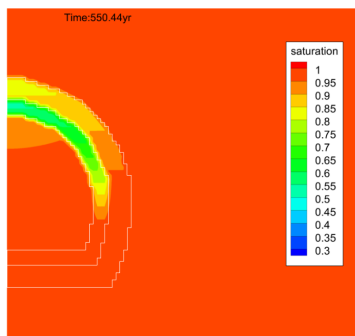
埋戻し 100 年後



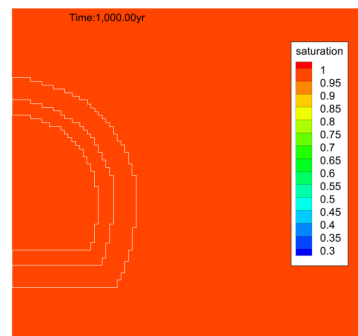
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後



埋戻し 500 年後



埋戻し 950 年後

図 5.3-60 Case7 の飽和度分布（坑道近傍）

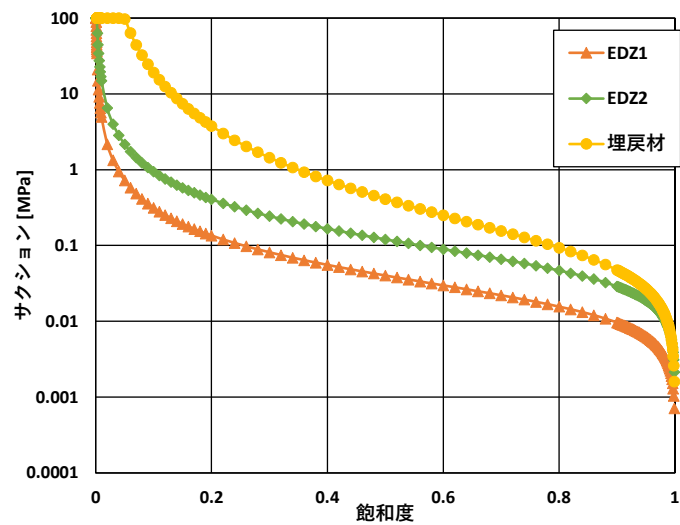


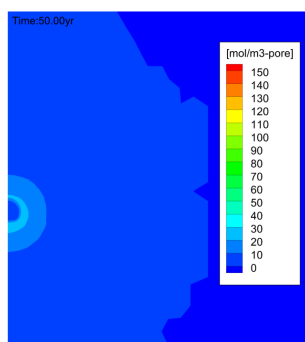
図 5.3-61 水分特性曲線

単位間隙あたりの「気相の CH_4 のモル量」及び「気相の CH_4 と液相に溶解した CH_4 の合計モル量」

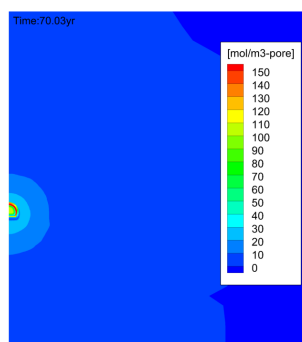
Case7 の単位間隙あたりの気相の CH_4 のモル量 $C_{g_CH_4}$ の分布の変化を図 5.3-62 と図 5.3-64 図に、単位間隙あたりの気相の CH_4 と液相に溶解した CH_4 の合計モル量 $C_{g+l_CH_4}$ の分布の変化を図 5.3-63 と図 5.3-65 にそれぞれ示す。

間隙中の気相 CH_4 モル量の変化は、不飽和領域分布の変化にほぼ対応している。埋戻しから 200 年後までは、EDZ1 及び EDZ2 内の気相及び液相の合計 CH_4 モル量が増加している。これは、母岩から浸潤してきた CH_4 を含む液相が圧力の低い坑道周辺に移動し、脱ガスした CH_4 が EDZ1 及び EDZ 中に移動するためと考えられる。

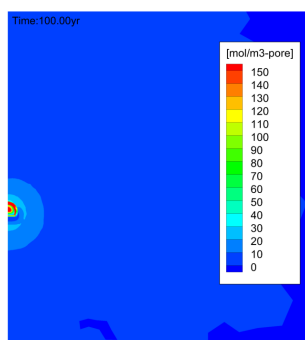
EDZ1 及び EDZ2 内の気相及び液相の合計 CH_4 モル量が埋戻しから 200 年後まで増加した後は徐々に減少しており、気相の CH_4 が液相に再溶解し拡散していると考えられる。



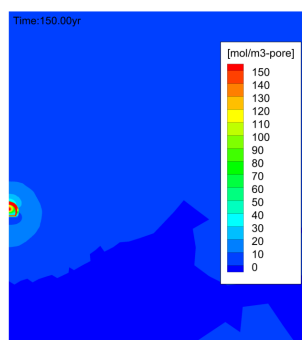
埋戻し直後



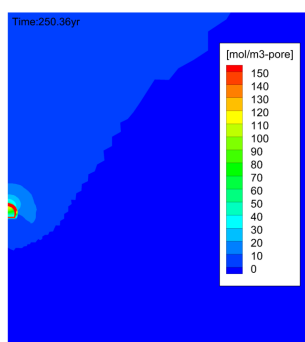
埋戻し 20 年後



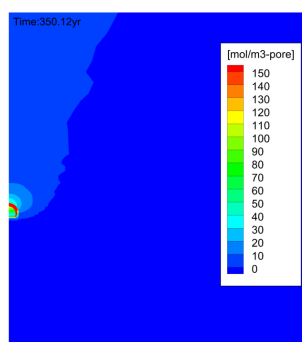
埋戻し 50 年後



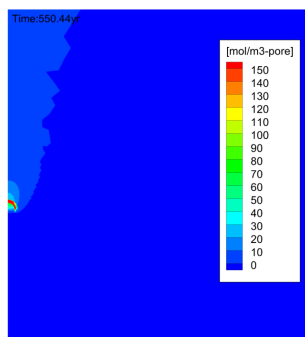
埋戻し 100 年後



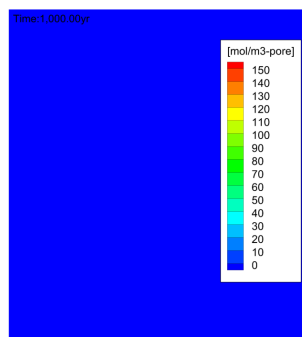
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

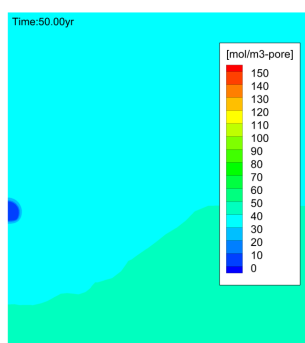


埋戻し 500 年後

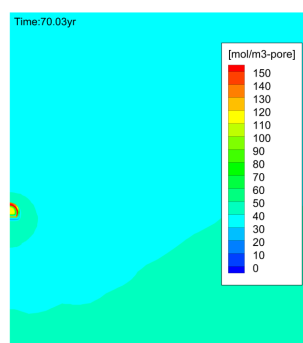


埋戻し 950 年後

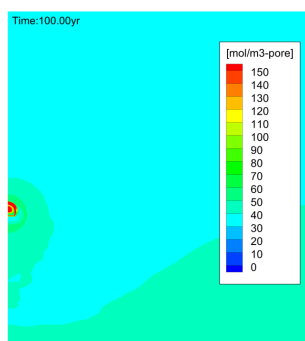
図 5.3-62 Case7 の単位間隙あたりの CH_4 のモル量分布（坑道周辺、気相）



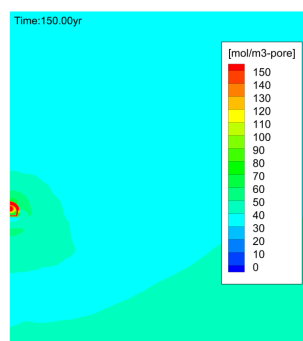
埋戻し直後



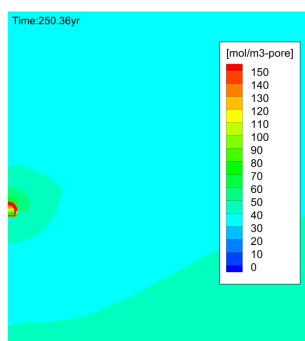
埋戻し 20 年後



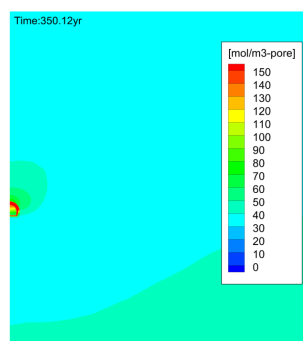
埋戻し 50 年後



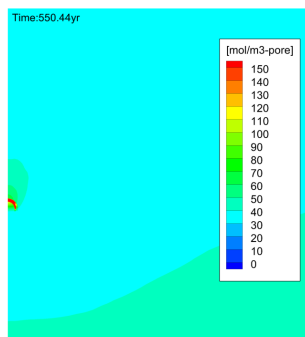
埋戻し 100 年後



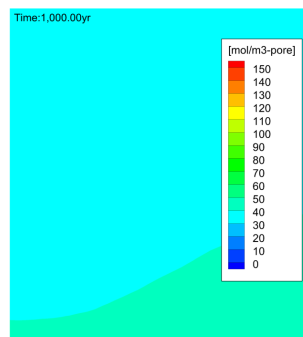
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

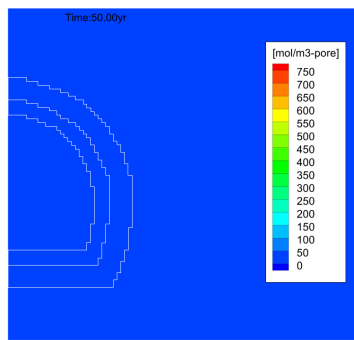


埋戻し 500 年後

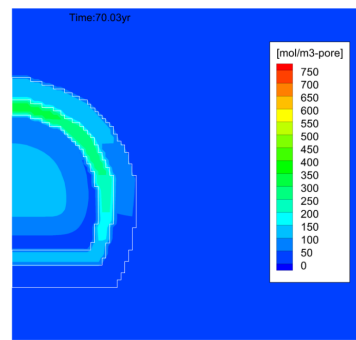


埋戻し 950 年後

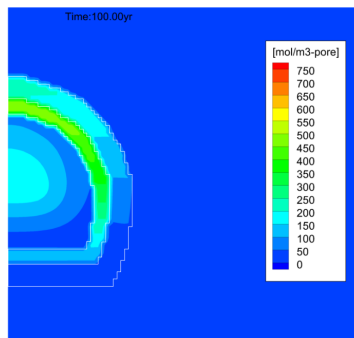
図 5.3-63 Case7 の単位間隙あたりの CH₄ のモル量分布（坑道周辺、気相+液相）



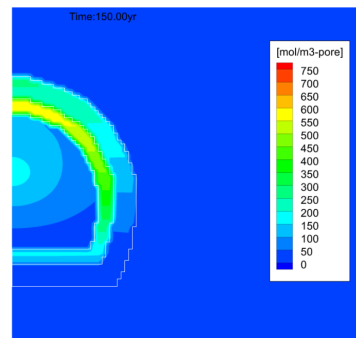
埋戻し直後



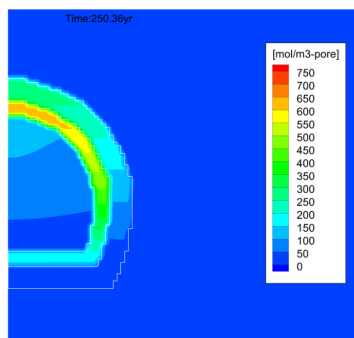
埋戻し 20 年後



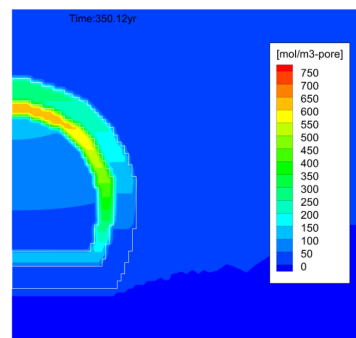
埋戻し 50 年後



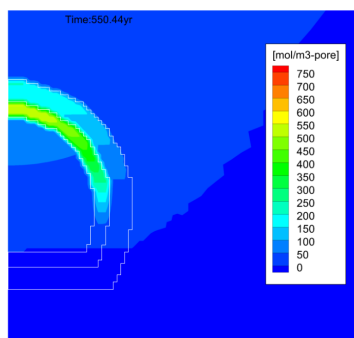
埋戻し 100 年後



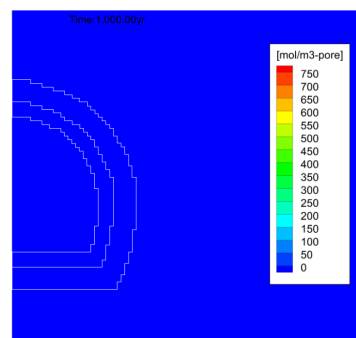
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

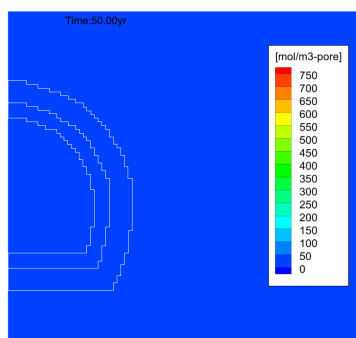


埋戻し 500 年後

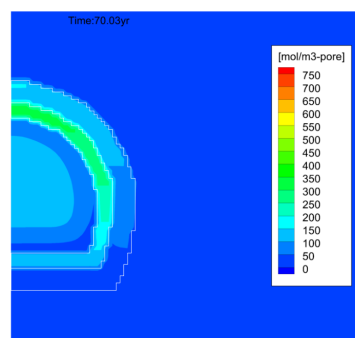


埋戻し 950 年後

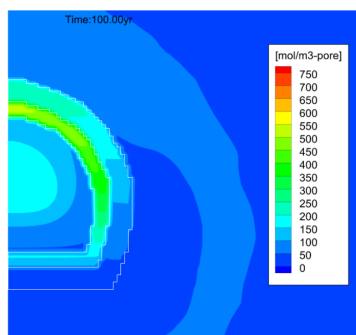
図 5.3-64 Case7 の単位間隙あたりの CH_4 のモル量分布（坑道近傍、気相）



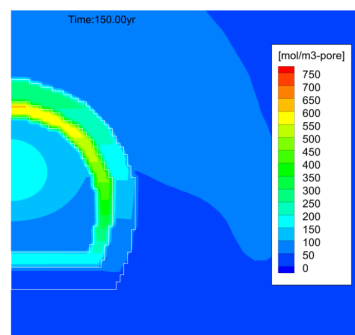
埋戻し直後



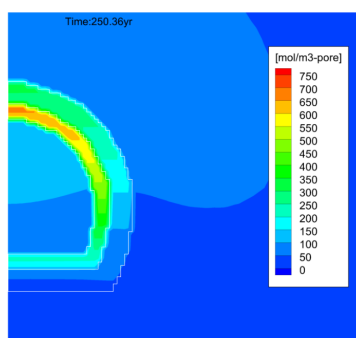
埋戻し 20 年後



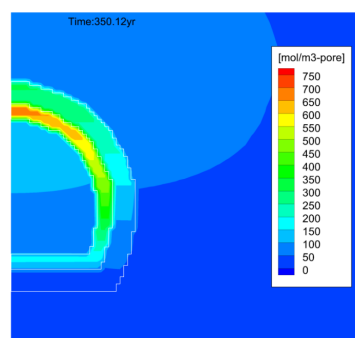
埋戻し 50 年後



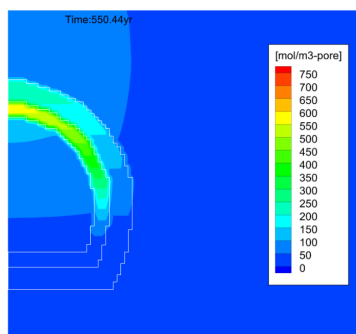
埋戻し 100 年後



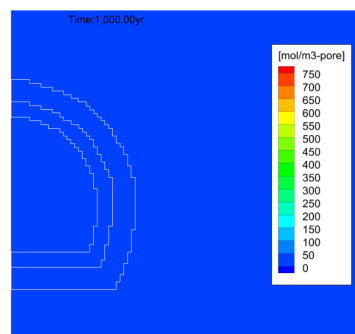
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後



埋戻し 500 年後



埋戻し 950 年後

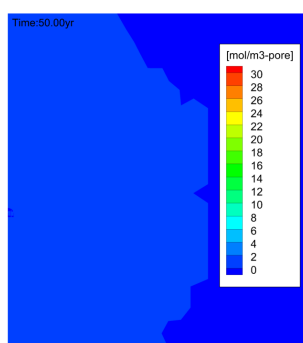
図 5.3-65 Case7 の単位間隙あたりの CH_4 のモル量分布（坑道近傍、気相+液相）

単位間隙あたりの「気相の CO₂ のモル量」及び「気相の CO₂ と液相に溶解した CO₂ の合計モル量」

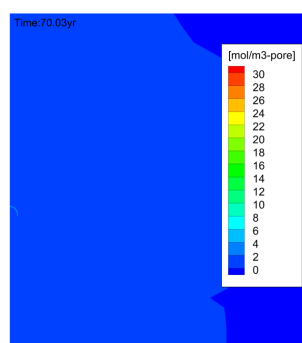
Case7 の単位間隙あたりの気相の CO₂ のモル量 C_{g,CO_2} の分布の変化を図 5.3-66 と図 5.3-68 に、単位間隙あたりの気相の CO₂ と液相に溶解した CO₂ の合計モル量 C_{g+L,CO_2} の分布の変化を図 5.3-67 と図 5.3-69 にそれぞれ示す。

間隙中の気相 CO₂ モル量の変化は、不飽和領域分布の変化にほぼ対応している。埋戻しから 200 年後までは、EDZ1 及び EDZ2 内の気相及び液相の合計 CO₂ モル量が増加している。これは、母岩から浸潤してきた CO₂ を含む液相が圧力の低い坑道周辺に移動し、脱ガスした CO₂ が EDZ1 及び EDZ 中に移動するためと考えられる。

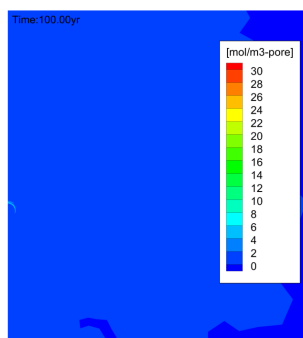
EDZ1 及び EDZ2 内の気相及び液相の合計 CO₂ モル量が埋戻しから 200 年後まで増加した後、徐々に減少しており、気相の CO₂ が液相に再溶解し拡散していると考えられる。



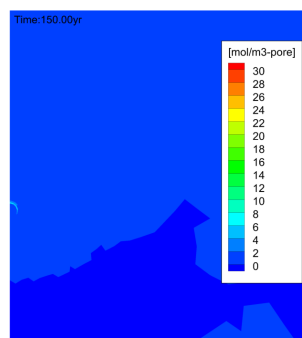
埋戻し直後



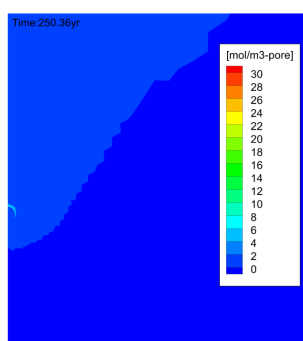
埋戻し 20 年後



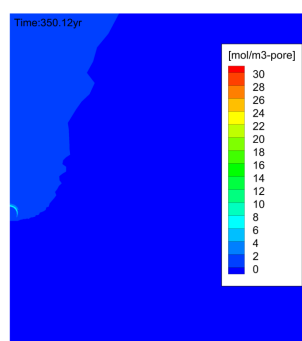
埋戻し 50 年後



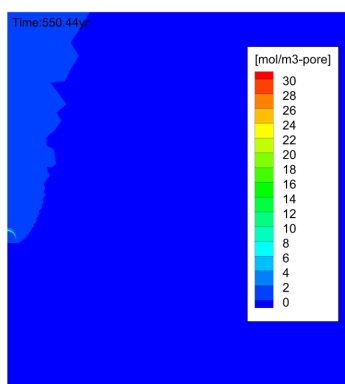
埋戻し 100 年後



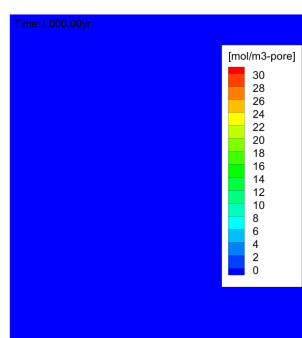
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

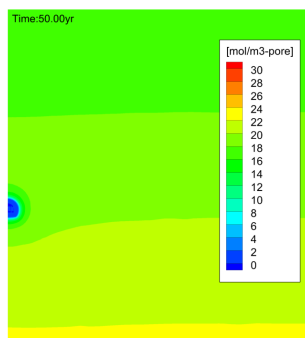


埋戻し 500 年後

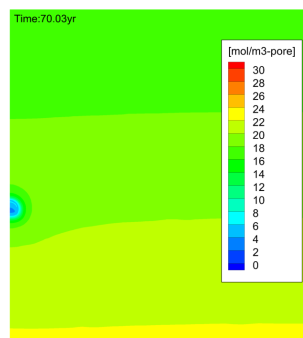


埋戻し 950 年後

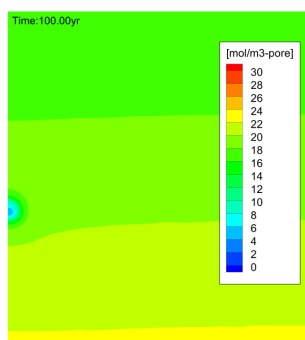
図 5.3-66 Case7 の単位間隙あたりの CO_2 のモル量分布（坑道周辺、気相）



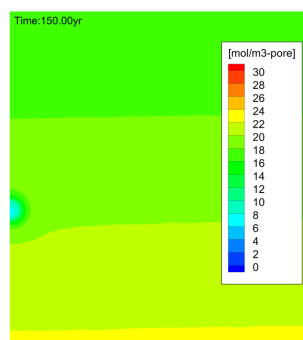
埋戻し直後



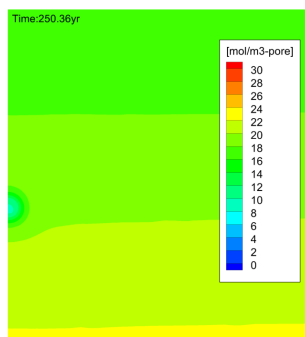
埋戻し 20 年後



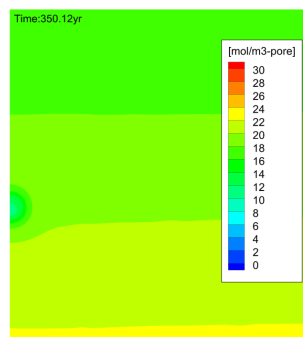
埋戻し 50 年後



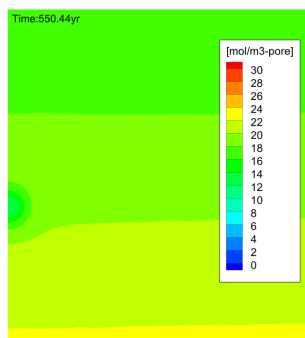
埋戻し 100 年後



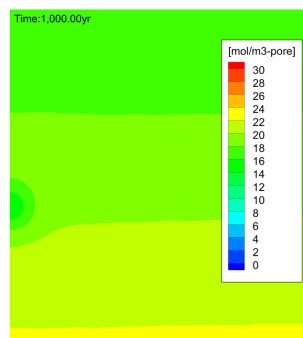
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

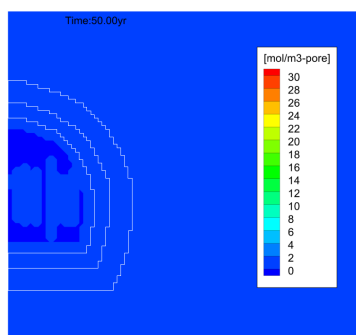


埋戻し 500 年後

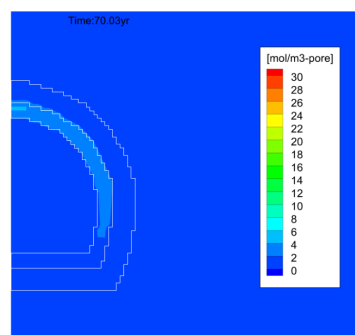


埋戻し 950 年後

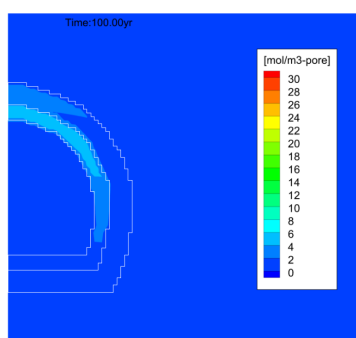
図 5.3-67 Case7 の単位間隙あたりの CO₂ のモル量分布（坑道周辺、気相+液相）



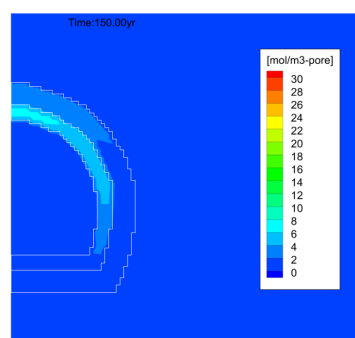
埋戻し直後



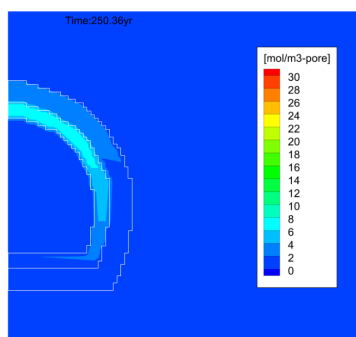
埋戻し 20 年後



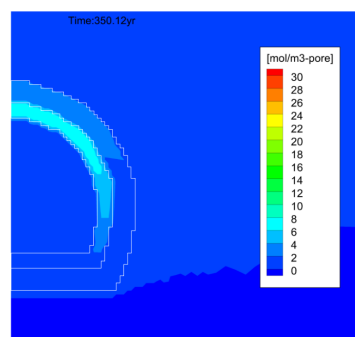
埋戻し 50 年後



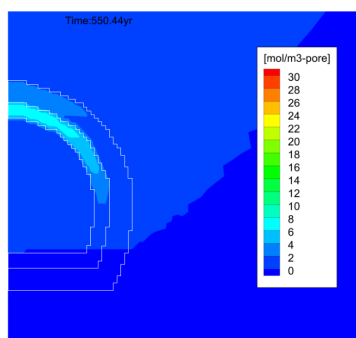
埋戻し 100 年後



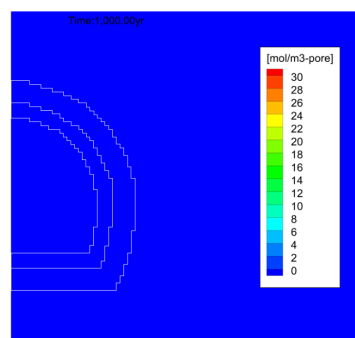
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

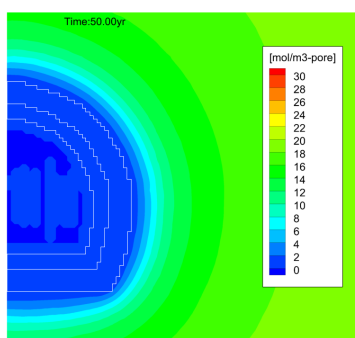


埋戻し 500 年後

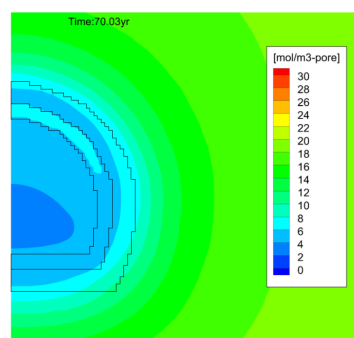


埋戻し 950 年後

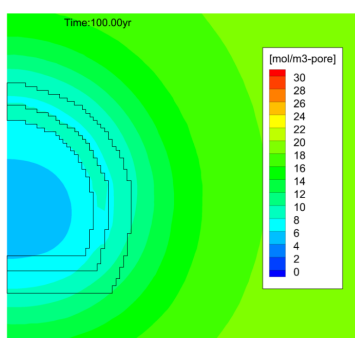
図 5.3-68 Case7 の単位間隙あたりの CO₂ のモル量分布（坑道近傍、気相）



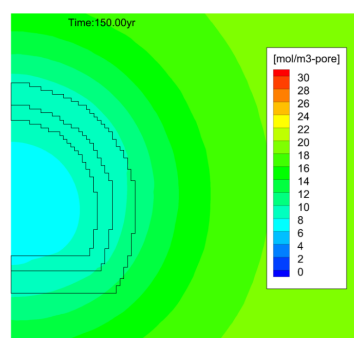
埋戻し直後



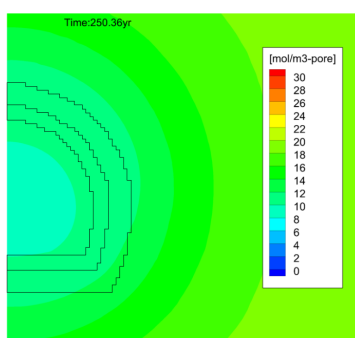
埋戻し 20 年後



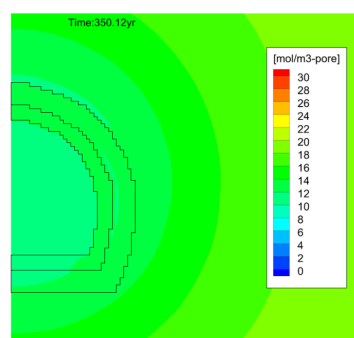
埋戻し 50 年後



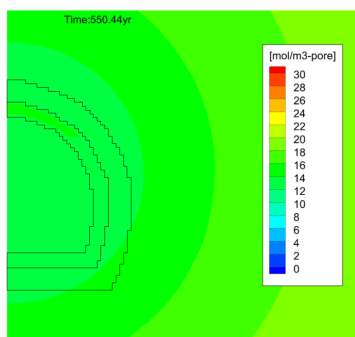
埋戻し 100 年後



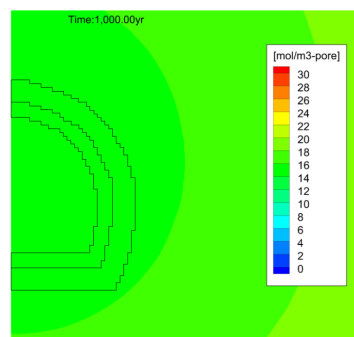
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後



埋戻し 500 年後



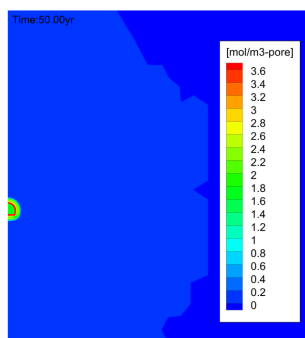
埋戻し 950 年後

図 5.3-69 Case7 の単位間隙あたりの CO₂ のモル量分布（坑道近傍、気相+液相）

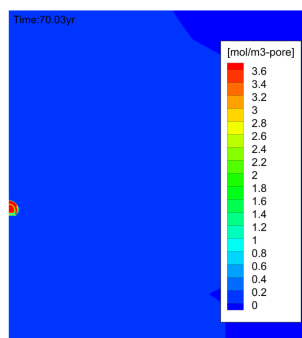
単位間隙あたりの「気相の O_2 のモル量」及び「気相の O_2 と液相に溶解した O_2 の合計モル量」

Case7 の単位間隙あたりの気相の O_2 のモル量 C_{g,O_2} の分布の変化を図 5.3-70 と図 5.3-72 に、単位間隙あたりの気相の O_2 と液相に溶解した O_2 の合計モル量 C_{g+l,O_2} の分布の変化を図 5.3-71 と図 5.3-73 にそれぞれ示す。

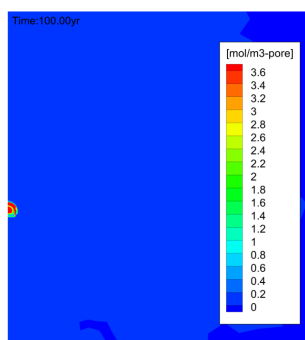
埋戻しから 20 年後にかけて、埋戻し材及び EDZ2 内の気相及び液相の合計 O_2 モル量が増加している。この増加は、EDZ1 や坑道下部の岩盤の O_2 が移動してきたことによるものと推察される。20 年以降は埋戻し材及び EDZ2 内にて気相及び液相の合計 O_2 モル量が減少しており、気相の O_2 が液相に再溶解し拡散していると考えられる。なお、液相に再溶解した O_2 は坑道の上方に移動する。



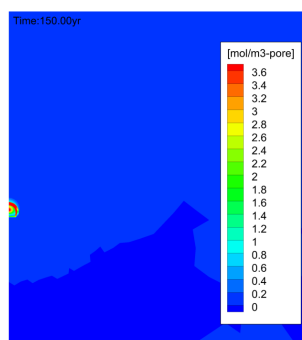
埋戻し直後



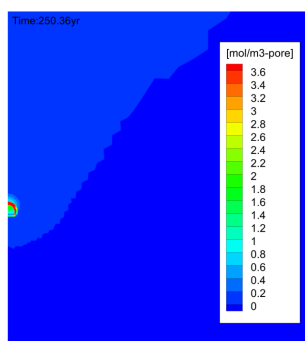
埋戻し 20 年後



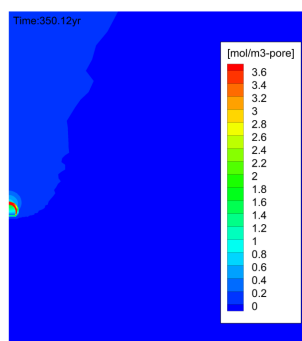
埋戻し 50 年後



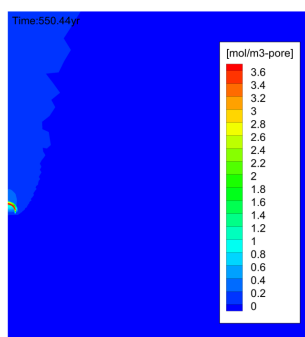
埋戻し 100 年後



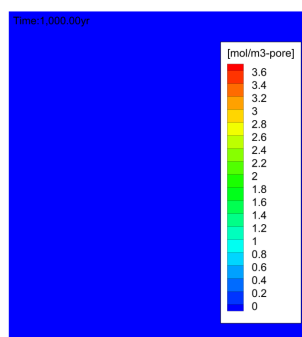
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

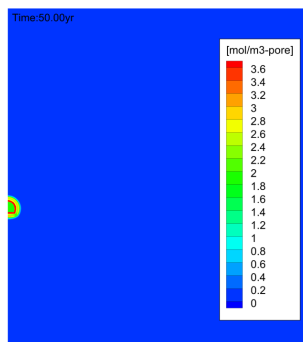


埋戻し 500 年後

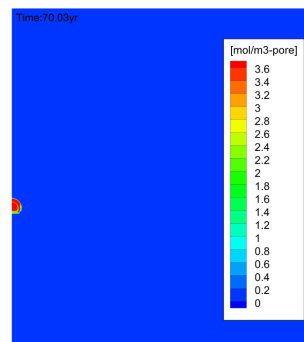


埋戻し 950 年後

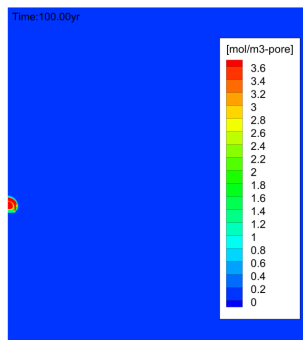
図 5. 3-70 Case7 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布（坑道周辺、気相）



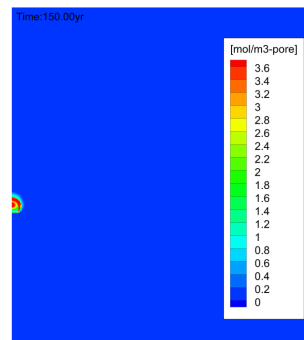
埋戻し直後



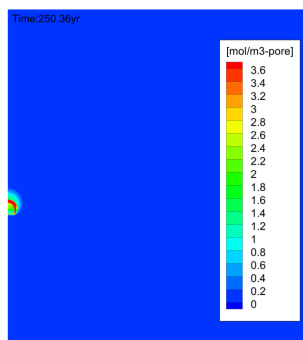
埋戻し 20 年後



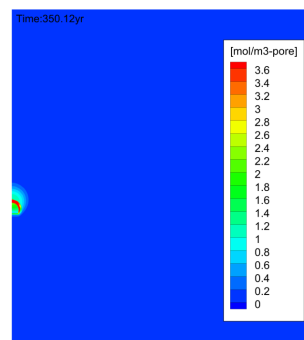
埋戻し 50 年後



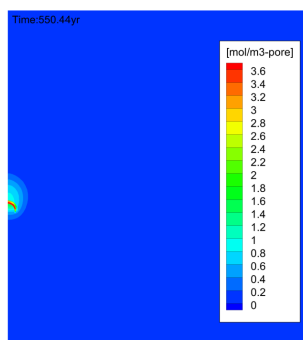
埋戻し 100 年後



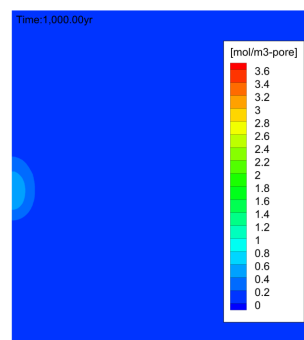
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

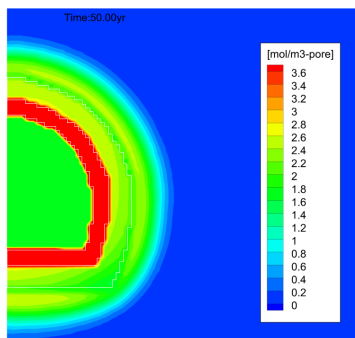


埋戻し 500 年後

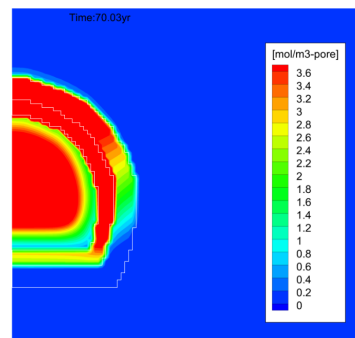


埋戻し 950 年後

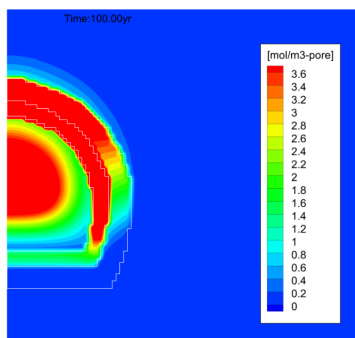
図 5.3-71 Case7 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布 (坑道周辺、気相+液相)



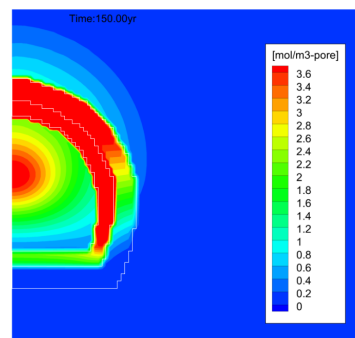
埋戻し直後



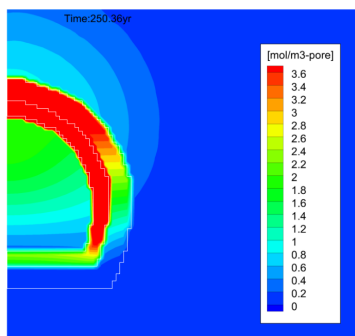
埋戻し 20 年後



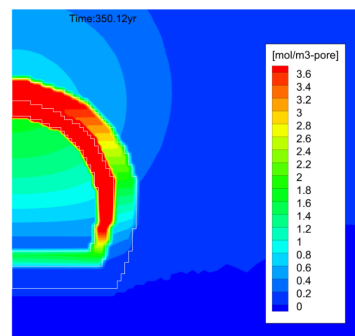
埋戻し 50 年後



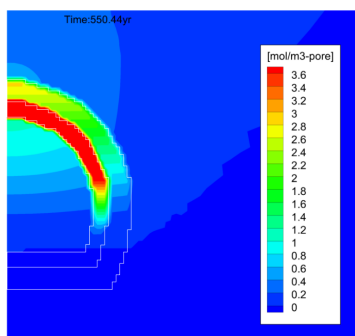
埋戻し 100 年後



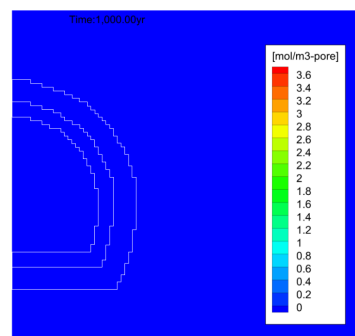
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

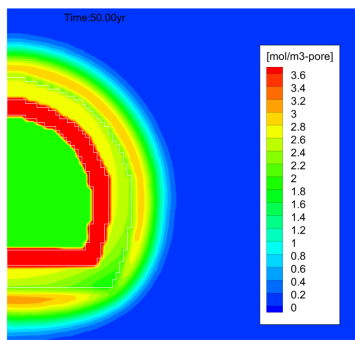


埋戻し 500 年後

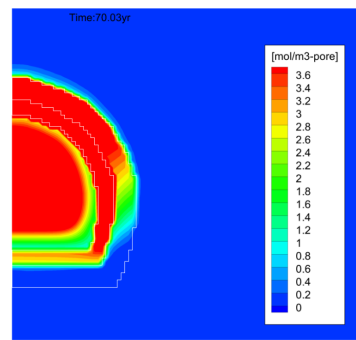


埋戻し 950 年後

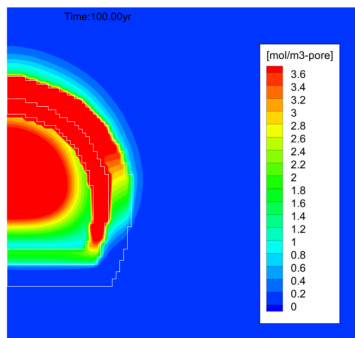
図 5.3-72 Case7 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布 (坑道近傍、気相)



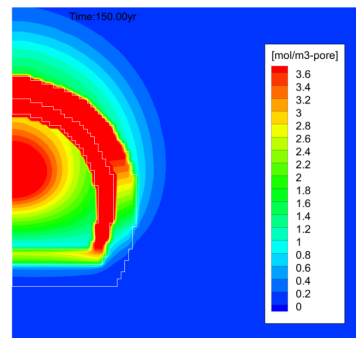
埋戻し直後



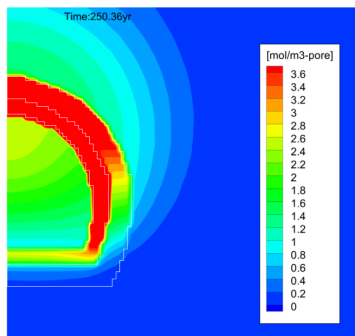
埋戻し 20 年後



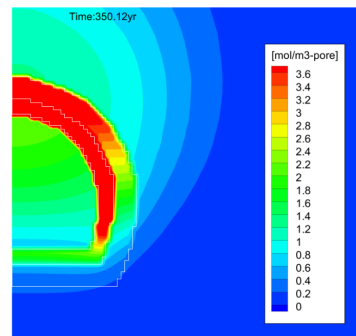
埋戻し 50 年後



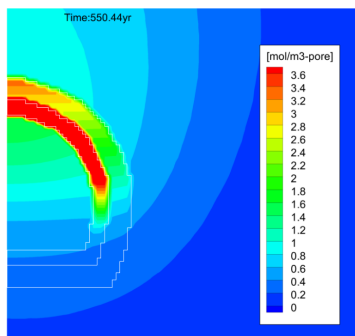
埋戻し 100 年後



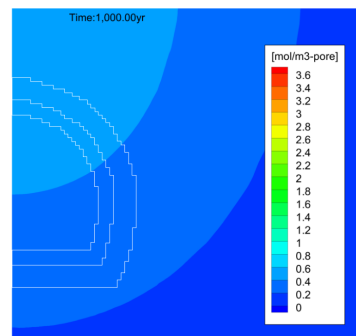
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後



埋戻し 500 年後



埋戻し 950 年後

図 5.3-73 Case7 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布（坑道近傍、気相+液相）

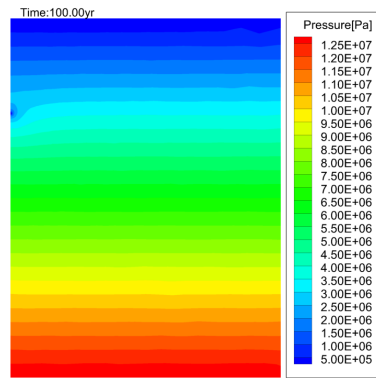
2) Case8 (開放 100 年+埋戻し 900 年)

圧力分布、飽和度分布

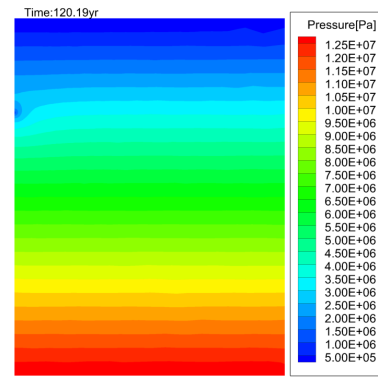
Case8 の水理解析における圧力分布の変化を図 5.3-74 と図 5.3-75 に示す。時間の経過とともに坑道周辺の圧力が回復し、900 年後には静水圧分布にほぼ近い状態となる。Case7 (開放 50 年+埋戻し 950 年) と埋め戻してから同時刻の圧力分布を比較すると、Case8 (開放 100 年+埋戻し 900 年) の方が、圧力の回復速度が遅い。これは、Case8 の方が Case7 よりも坑道開放期間が長く、埋戻し直後の坑道周辺の不飽和領域が広いためである。

Case8 の飽和度分布の変化を図 5.3-76 と図 5.3-77 に示す。埋戻し材への浸潤は、坑道隅角部及び下部から頂部へと進行し、埋戻しから 700 年後にほぼ飽和する。EDZ の飽和度の上昇は、埋戻し材よりも遅れた。特に EDZ の上部は不飽和領域が遅くまで残りやすい。また、EDZ2 よりも EDZ1 の方が飽和度の上昇が遅い。飽和する順番が埋戻し材、EDZ2、EDZ1 の順番になる理由は、同じ飽和度では、サクション圧の絶対値が、埋戻し材>EDZ2>EDZ1 であり、この順番で水を吸いやすいためである。埋戻しから 900 年後の時点でも、坑道頂部の EDZ1 は不飽和状態である。

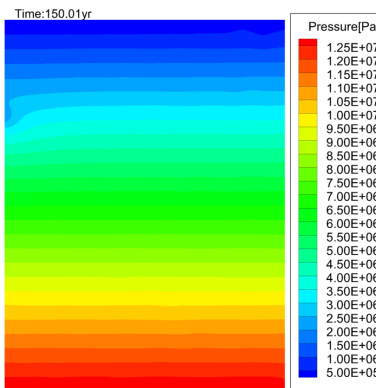
Case7 (開放 50 年+埋戻し 950 年) と埋戻してから同時刻の飽和度分布を比較すると、Case8 (開放 100 年+埋戻し 900 年) の方が、飽和状態に戻る速度が遅い。これは、Case8 の方が Case7 よりも坑道開放期間が長く、埋戻し直後の坑道周辺の不飽和領域が広いためである。



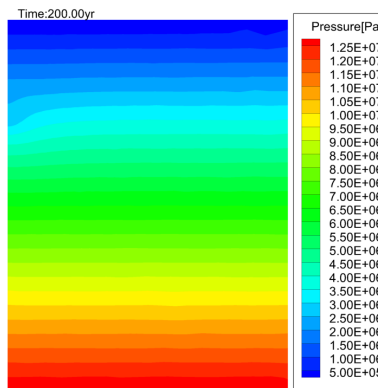
埋戻し直後



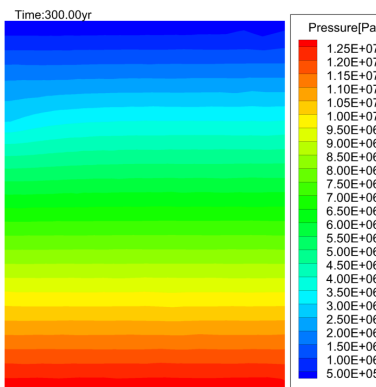
埋戻し 20 年後



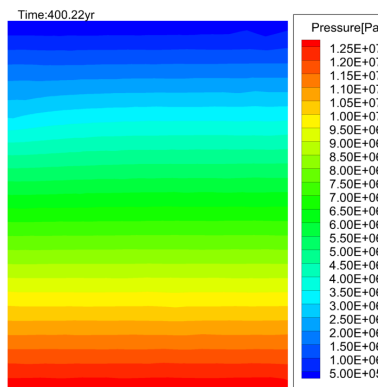
埋戻し 50 年後



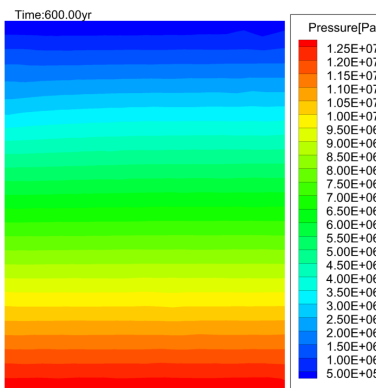
埋戻し 100 年後



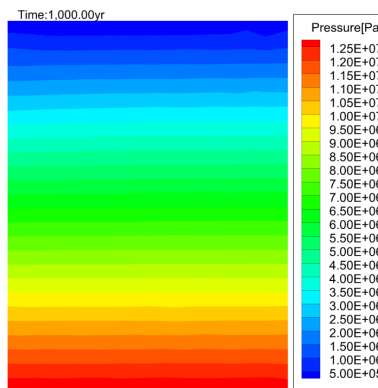
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

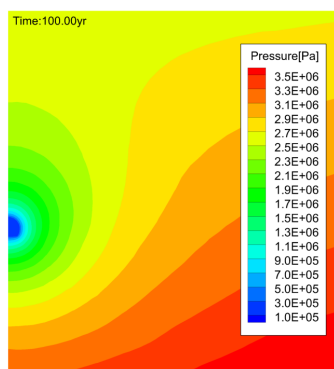


埋戻し 500 年後

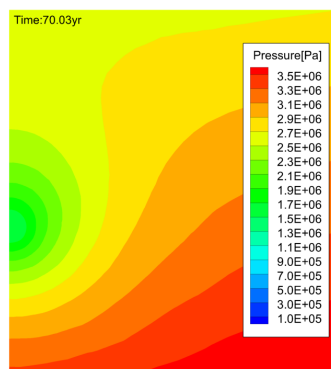


埋戻し 900 年後

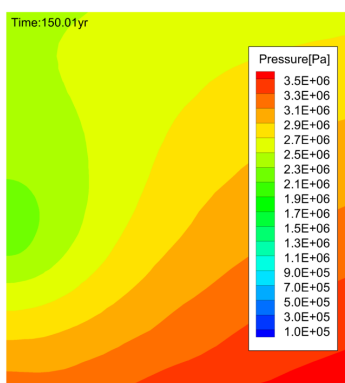
図 5. 3-74 Case8 の圧力分布（モデル全体）



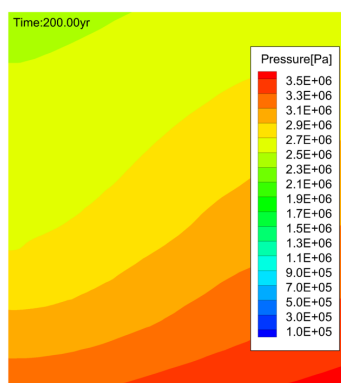
埋戻し直後



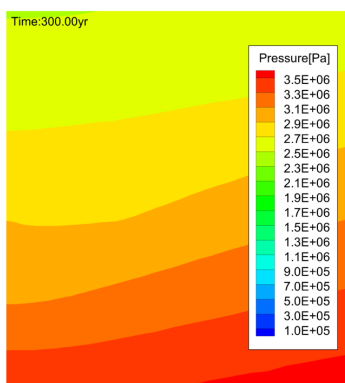
埋戻し 20 年後



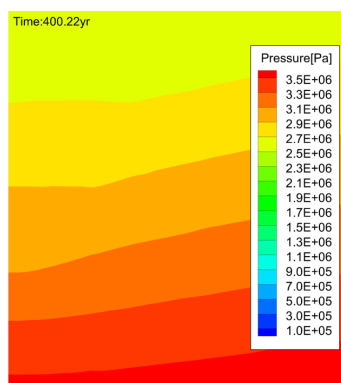
埋戻し 50 年後



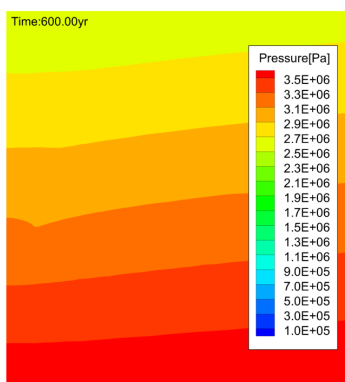
埋戻し 100 年後



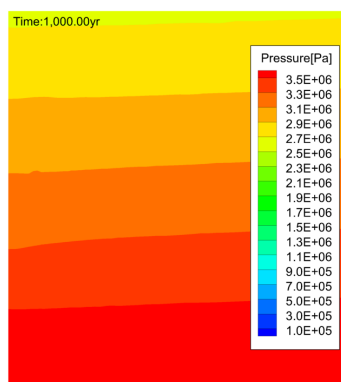
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

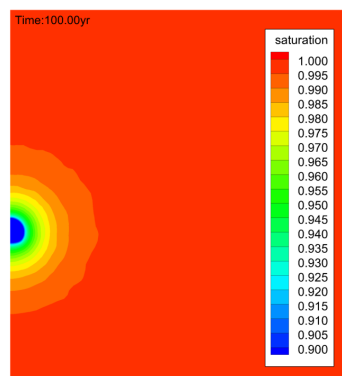


埋戻し 500 年後

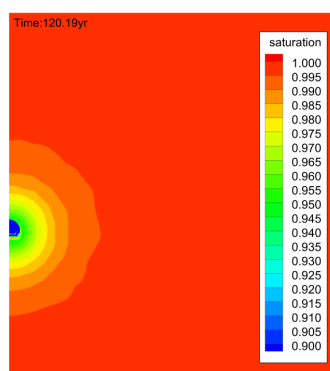


埋戻し 900 年後

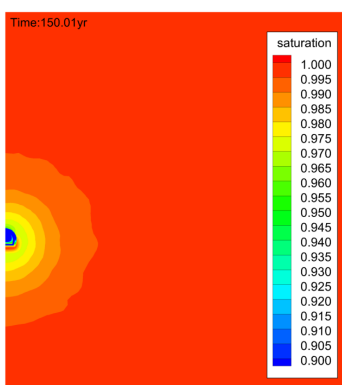
図 5. 3-75 Case8 の圧力分布（坑道周辺）



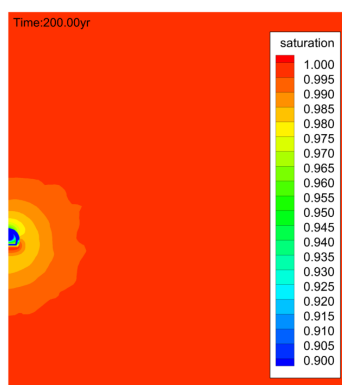
埋戻し直後



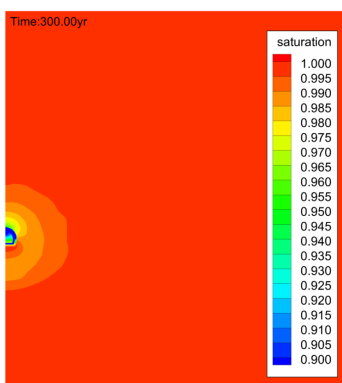
埋戻し 20 年後



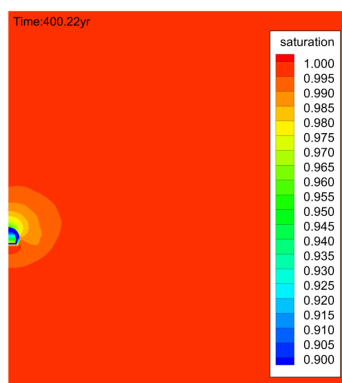
埋戻し 50 年後



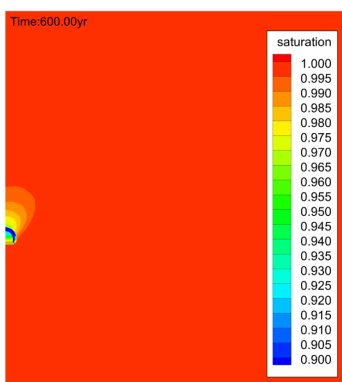
埋戻し 100 年後



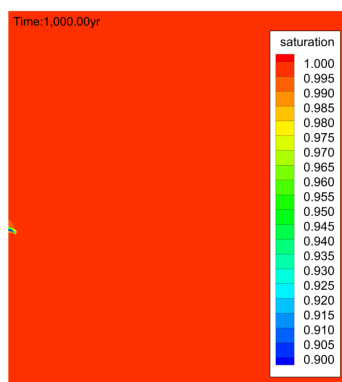
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

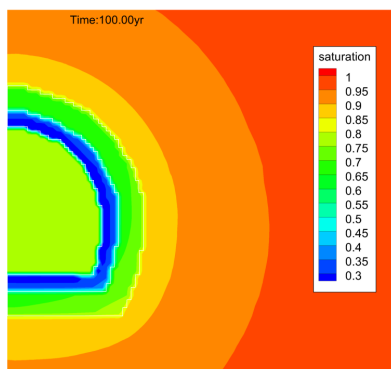


埋戻し 500 年後

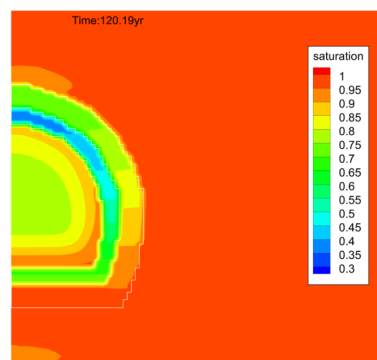


埋戻し 900 年後

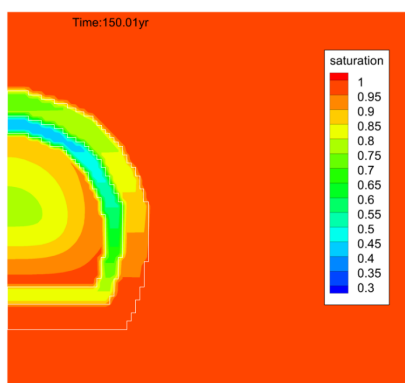
図 5. 3-76 Case8 の飽和度分布（坑道周辺）



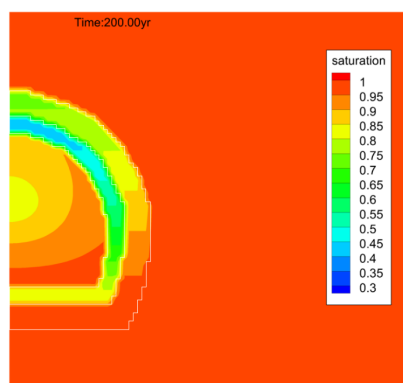
埋戻し直後



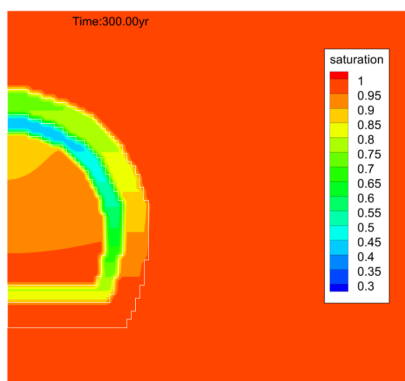
埋戻し 20 年後



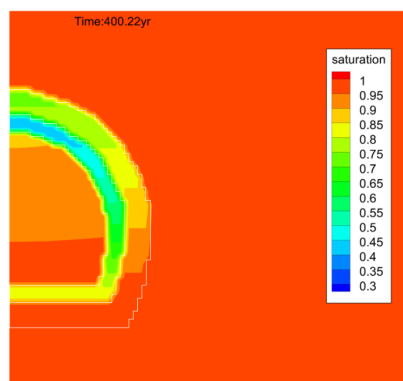
埋戻し 50 年後



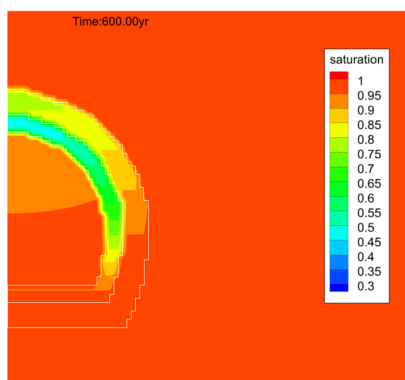
埋戻し 100 年後



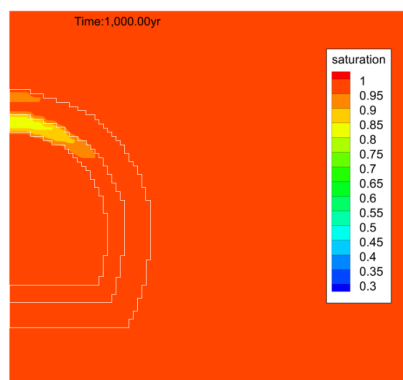
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後



埋戻し 500 年後



埋戻し 900 年後

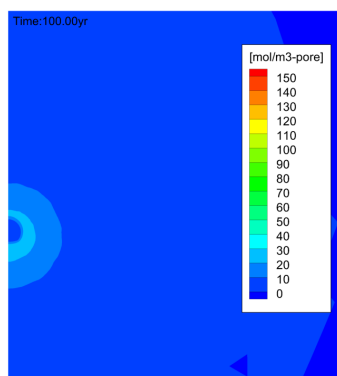
図 5.3-77 Case8 の飽和度分布（坑道近傍）

単位間隙あたりの「気相の CH₄ のモル量」及び「気相の CH₄ と液相に溶解した CH₄ の合計モル量」

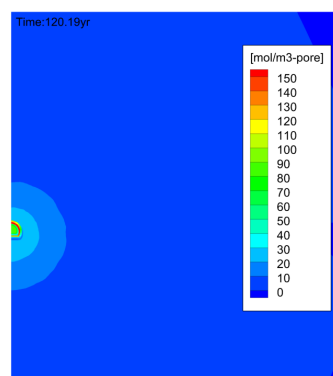
Case8 の単位間隙あたりの気相の CH₄ のモル量 $C_{g_CH_4}$ の分布の変化を図 5.3-78 と図 5.3-80 に、単位間隙あたりの気相の CH₄ と液相に溶解した CH₄ の合計モル量 $C_{g+l_CH_4}$ の分布の変化を図 5.3-79 と図 5.3-81 にそれぞれ示す。

間隙中の気相 CH₄ モル量の変化は、不飽和領域分布の変化にほぼ対応している。埋戻しから 300 年後までは、EDZ1 及び EDZ2 内の気相及び液相の合計 CH₄ モル量が増加している。これは、母岩から浸潤してきた CH₄ を含む液相が圧力の低い坑道周辺に移動し、脱ガスした CH₄ が EDZ1 及び EDZ 中に移動するためと考えられる。EDZ1 及び EDZ2 内の気相及び液相の合計 CH₄ モル量が埋戻しから 300 年後まで増加した後は徐々に減少しており、気相の CH₄ が液相に再溶解し拡散していると考えられる。

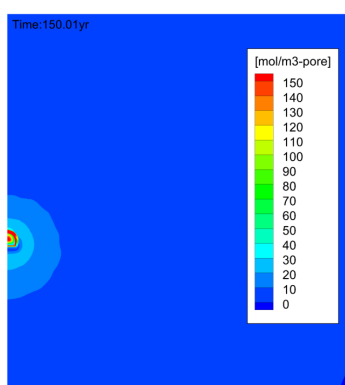
Case7（開放 50 年+埋戻し 950 年）と埋め戻してから同時刻の気相及び液相の合計 CH₄ モル量分布を比較すると、Case8（開放 100 年+埋戻し 900 年）の方が、気相及び液相の合計 CH₄ モル量が元の状態に戻る速度が遅い。これは、Case8 の方が Case7 よりも坑道開放期間が長く、埋戻し直後の坑道周辺の不飽和領域が広いためである。



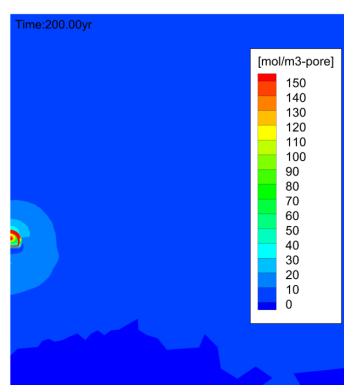
埋戻し直後



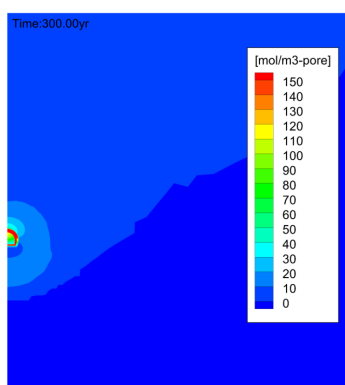
埋戻し 20 年後



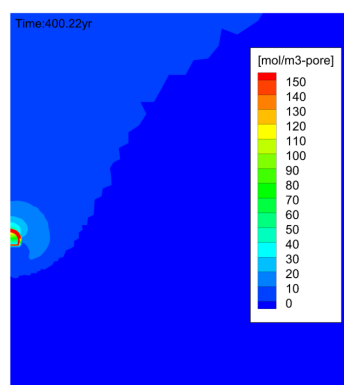
埋戻し 50 年後



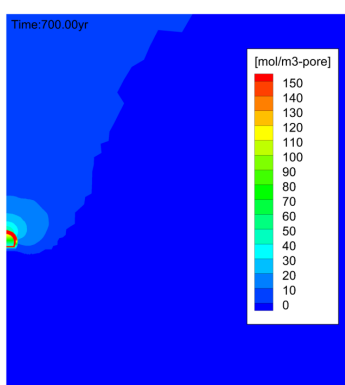
埋戻し 100 年後



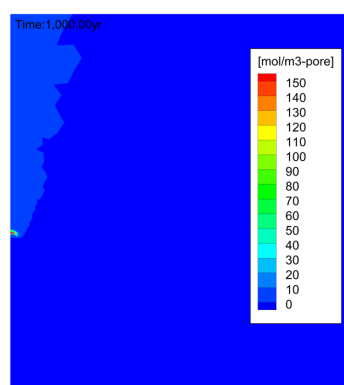
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

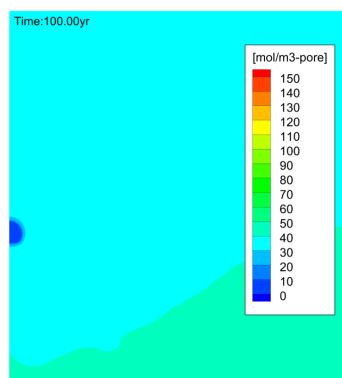


埋戻し 500 年後

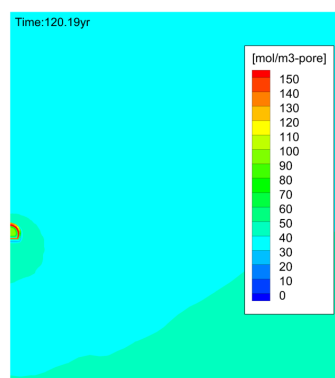


埋戻し 900 年後

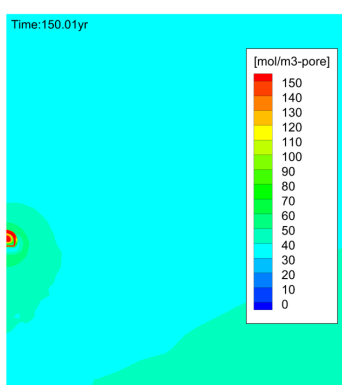
図 5.3-78 Case8 の単位間隙あたりの CH₄ のモル量分布（坑道周辺、気相）



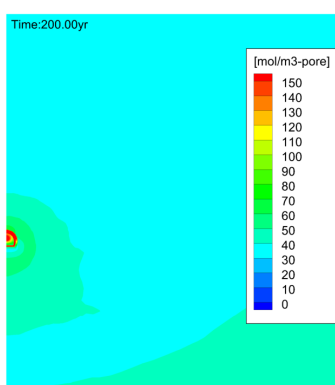
埋戻し直後



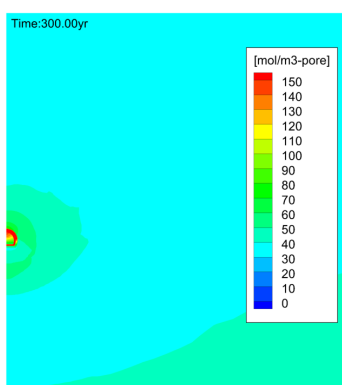
埋戻し 20 年後



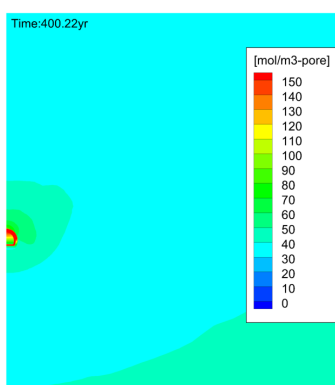
埋戻し 50 年後



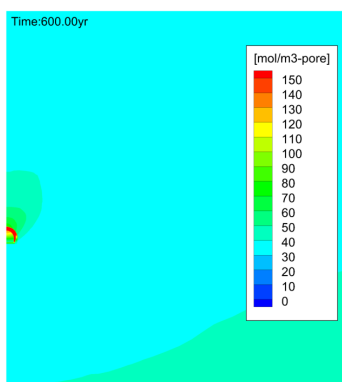
埋戻し 100 年後



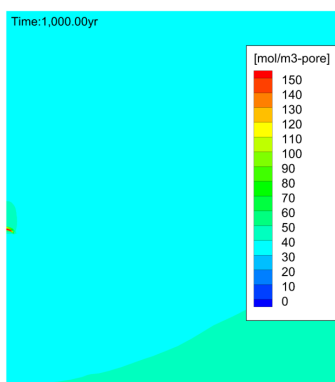
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

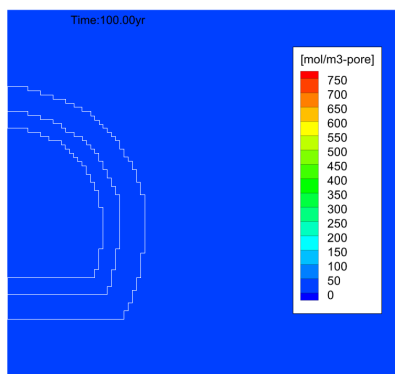


埋戻し 500 年後

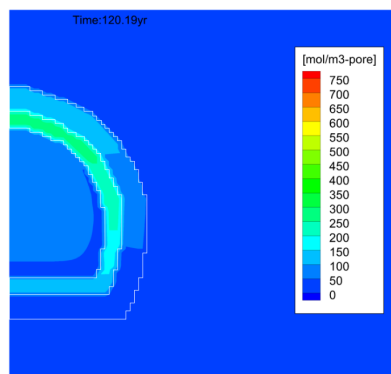


埋戻し 900 年後

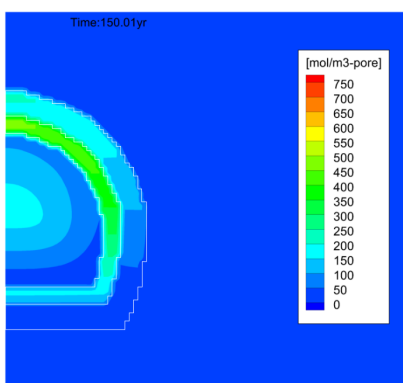
図 5.3-79 Case8 の単位間隙あたりの CH₄ のモル量分布（坑道周辺、気相+液相）



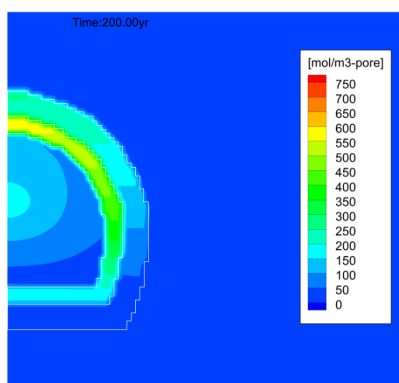
埋戻し直後



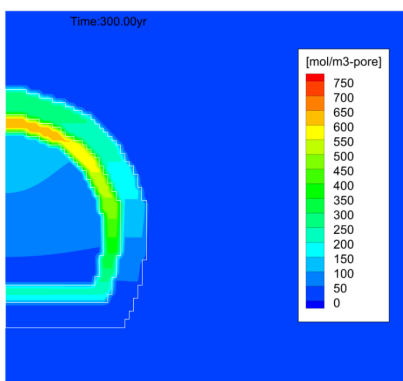
埋戻し 20 年後



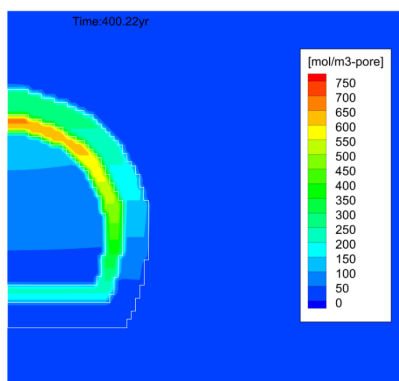
埋戻し 50 年後



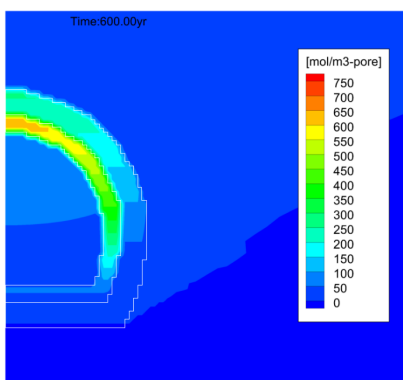
埋戻し 100 年後



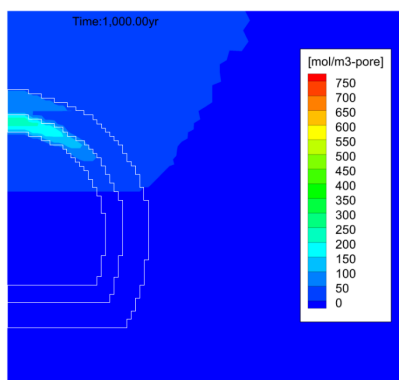
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

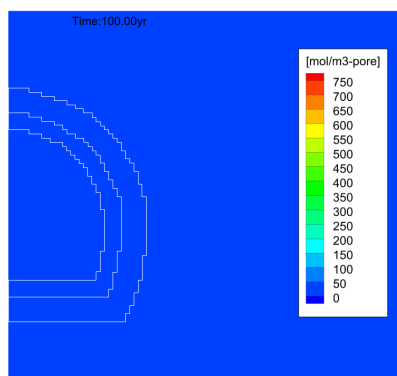


埋戻し 500 年後

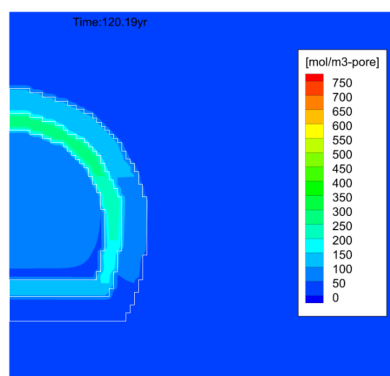


埋戻し 900 年後

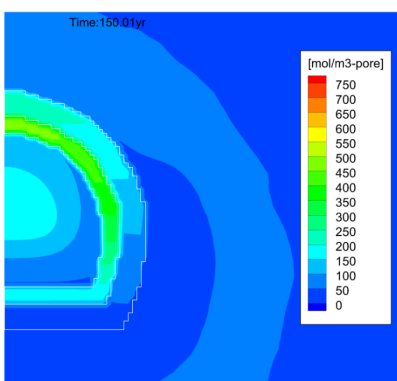
図 5.3-80 Case8 の単位間隙あたりの CH_4 のモル量分布（坑道近傍、気相）



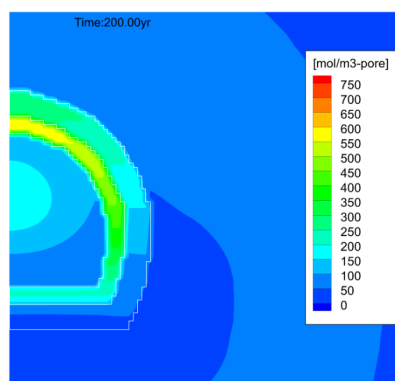
埋戻し直後



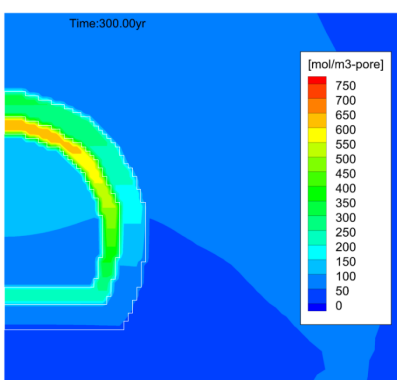
埋戻し 20 年後



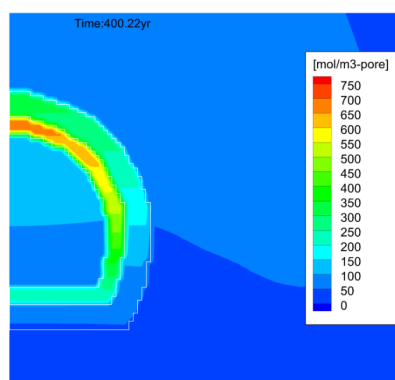
埋戻し 50 年後



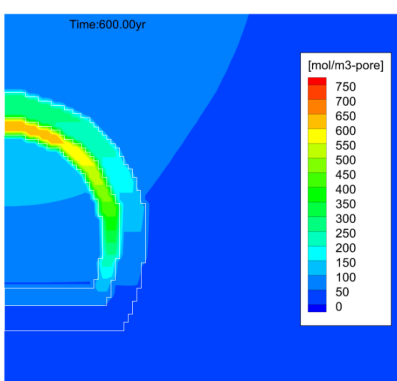
埋戻し 100 年後



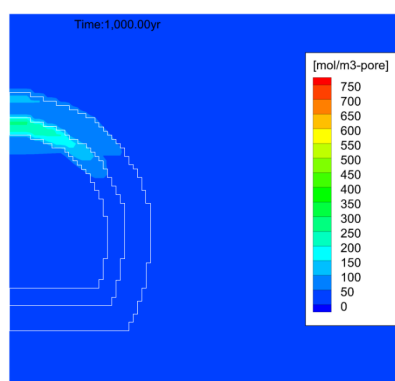
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後



埋戻し 500 年後



埋戻し 900 年後

図 5.3-81 Case8 の単位間隙あたりの CH_4 のモル量分布（坑道近傍、気相+液相）

単位間隙あたりの「気相の CO₂ のモル量」及び「気相の CO₂ と液相に溶解した CO₂ の合計モル量」

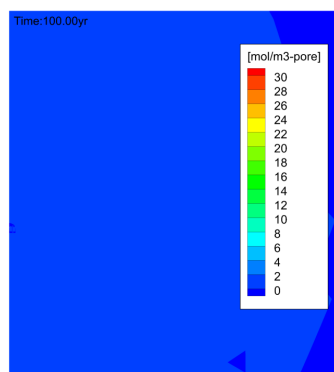
Case8の単位間隙あたりの気相のCO₂のモル量 C_{g,CO_2} の分布の変化を図 5.3-82と図 5.3-84に、単位間隙あたりの気相のCO₂と液相に溶解したCO₂の合計モル量 C_{g+L,CO_2} の分布の変化を図 5.3-83と図 5.3-85にそれぞれ示す。

間隙中の気相CO₂モル量の変化は、不飽和領域分布の変化にほぼ対応している。

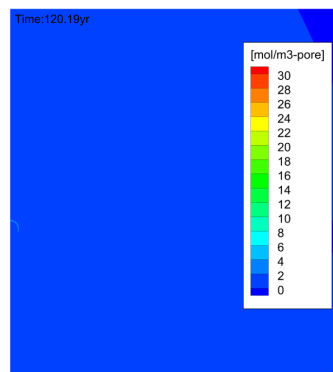
埋戻しから300年後までは、EDZ1及びEDZ2内の気相及び液相の合計CO₂モル量が増加している。これは、母岩から浸潤してきたCO₂を含む液相が圧力の低い坑道周辺に移動し、脱ガスしたCO₂がEDZ1及びEDZ2中に移動するためと考えられる。

EDZ1及びEDZ2内の気相及び液相の合計CO₂モル量が埋戻しから300年後まで増加した後は徐々に減少しており、気相のCO₂が液相に再溶解し拡散していると考えられる。

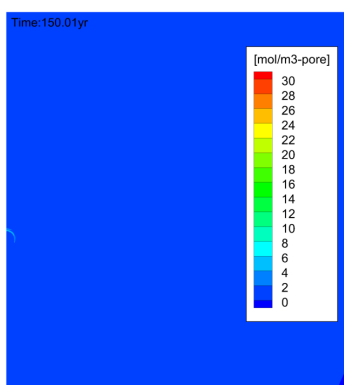
Case7（開放50年+埋戻し950年）と埋め戻してから同時刻の気相及び液相の合計CO₂モル量分布を比較すると、Case8（開放100年+埋戻し900年）の方が、気相及び液相の合計CO₂モル量が元の状態に戻る速度が遅い。これは、Case8の方がCase7よりも坑道開放期間が長く、埋戻し直後の坑道周辺の不飽和領域が広いためである。



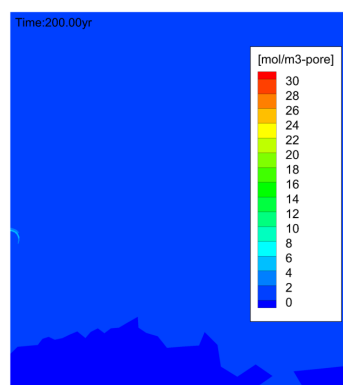
埋戻し直後



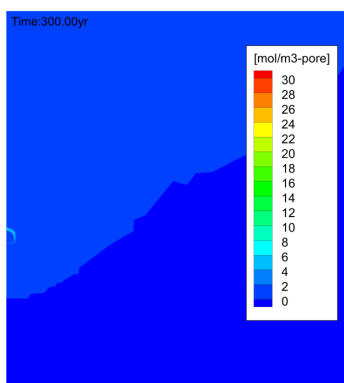
埋戻し 20 年後



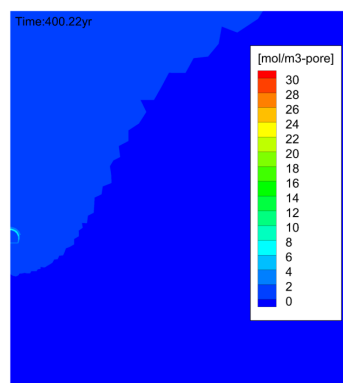
埋戻し 50 年後



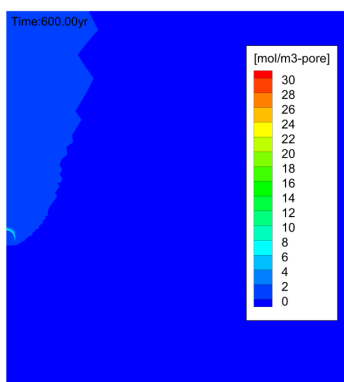
埋戻し 100 年後



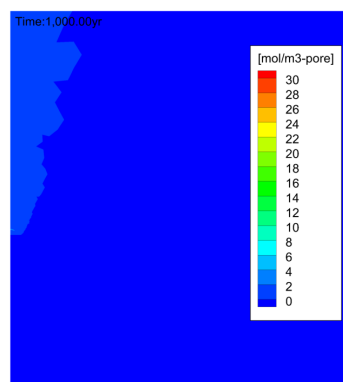
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

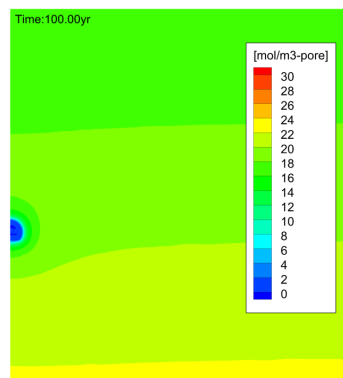


埋戻し 500 年後

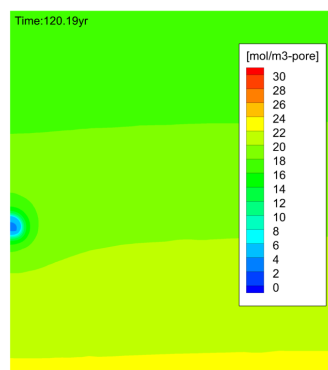


埋戻し 900 年後

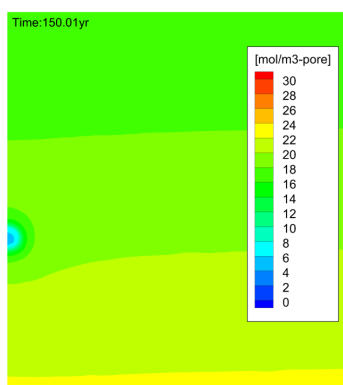
図 5.3-82 Case8 の単位間隙あたりの CO₂ のモル量分布（坑道周辺、気相）



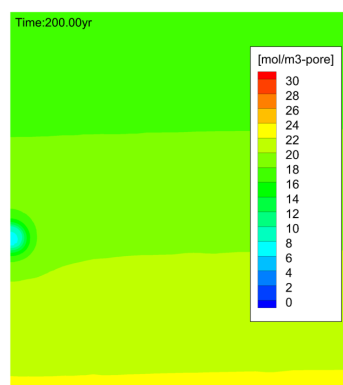
埋戻し直後



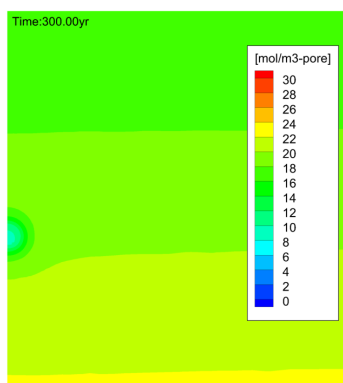
埋戻し 20 年後



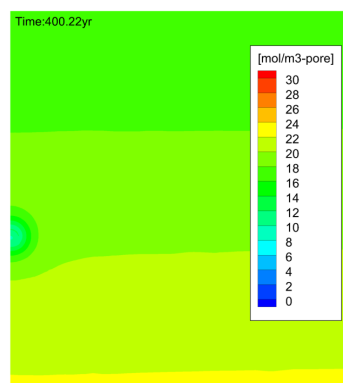
埋戻し 50 年後



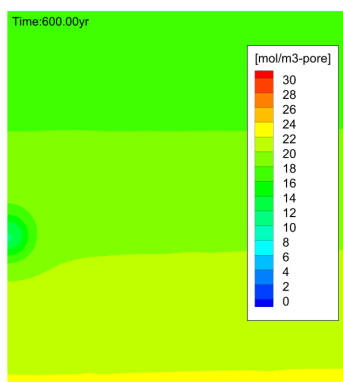
埋戻し 100 年後



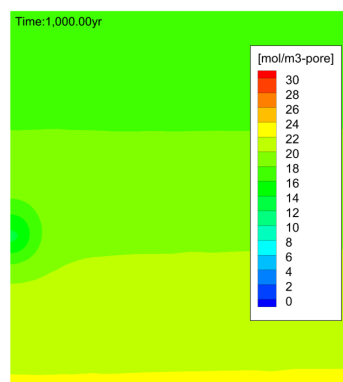
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

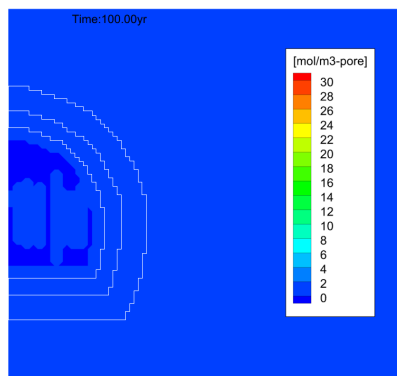


埋戻し 500 年後

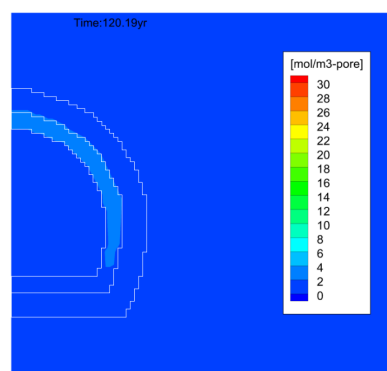


埋戻し 900 年後

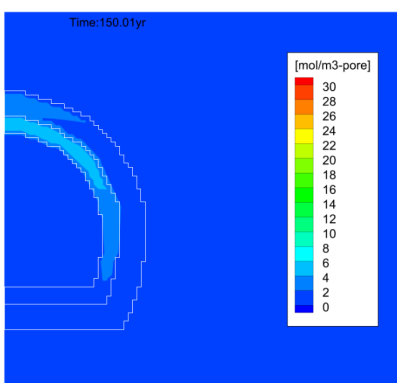
図 5.3-83 Case8 の単位間隙あたりの CO₂ のモル量分布（坑道周辺、気相+液相）



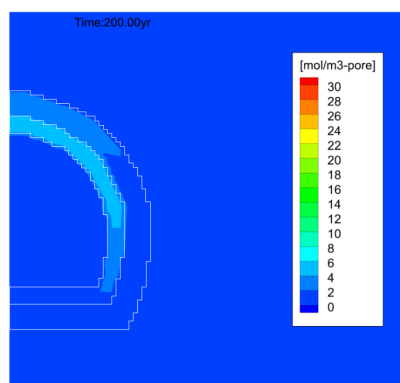
埋戻し直後



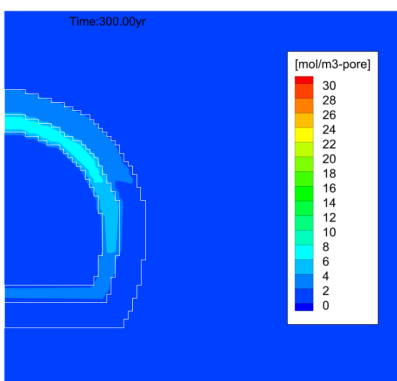
埋戻し 20 年後



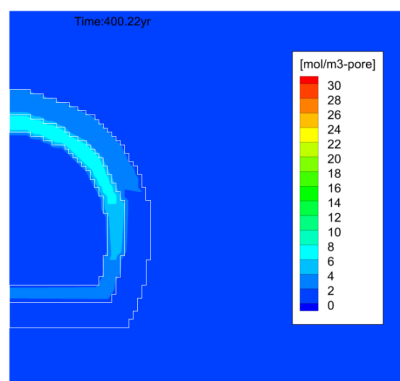
埋戻し 50 年後



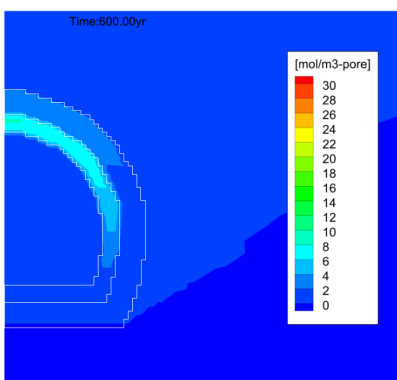
埋戻し 100 年後



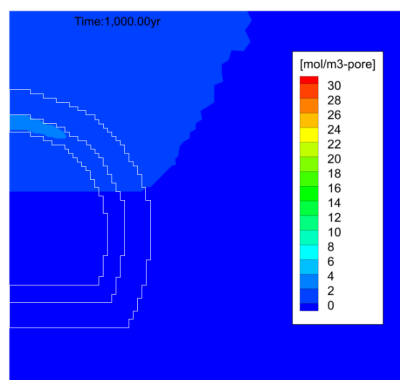
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

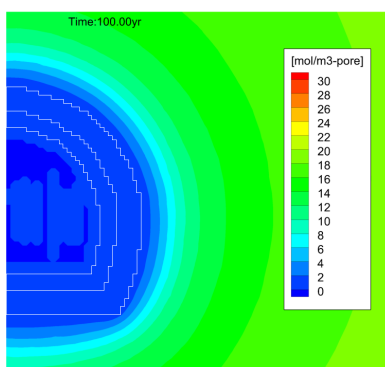


埋戻し 500 年後

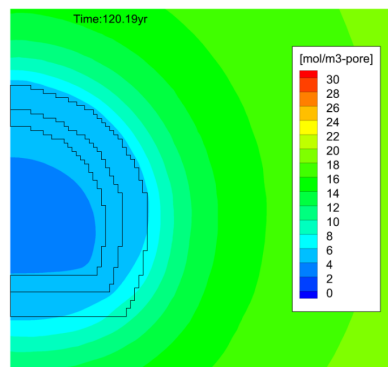


埋戻し 900 年後

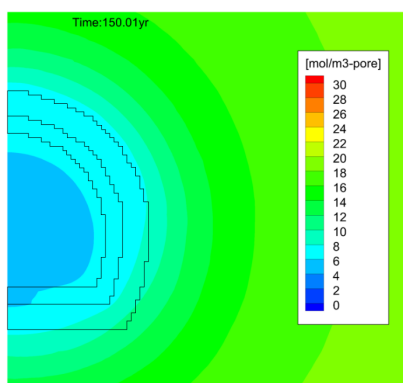
図 5.3-84 Case8 の単位間隙あたりの CO₂ のモル量分布（坑道近傍、気相）



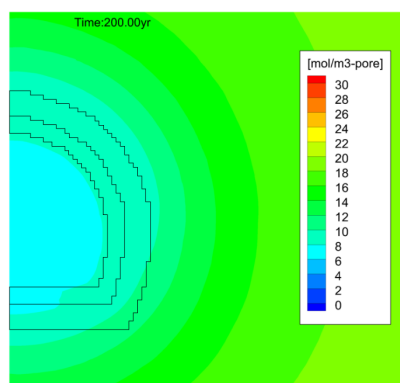
埋戻し直後



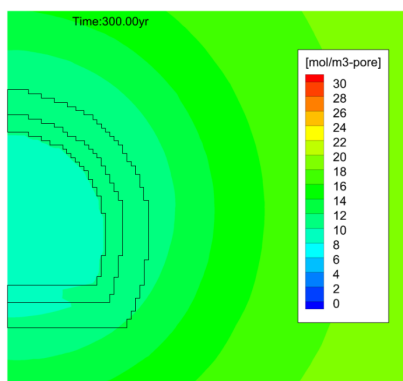
埋戻し 20 年後



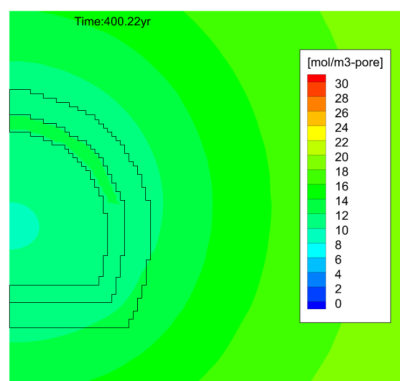
埋戻し 50 年後



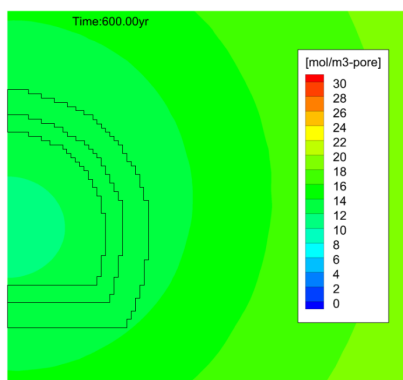
埋戻し 100 年後



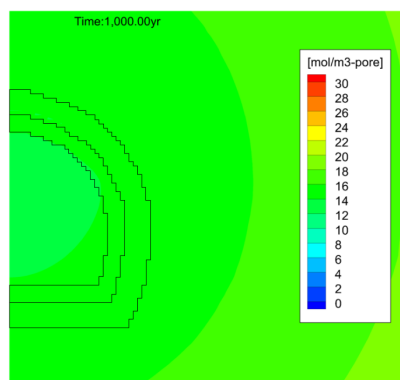
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後



埋戻し 500 年後



埋戻し 900 年後

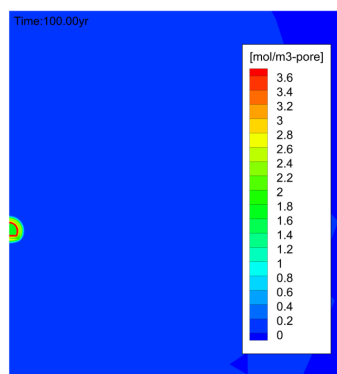
図 5.3-85 Case8 の単位間隙あたりの CO₂ のモル量分布（坑道近傍、気相+液相）

単位間隙あたりの「気相の O_2 のモル量」及び「気相の O_2 と液相に溶解した O_2 の合計モル量」

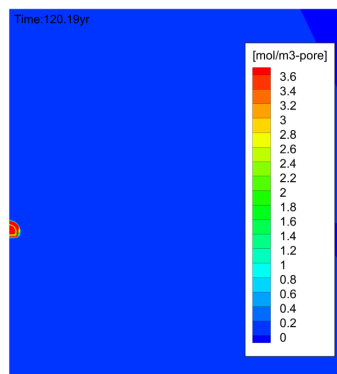
Case8 の単位間隙あたりの気相の O_2 のモル量 C_{g,O_2} の分布の変化を図 5.3-86 と図 5.3-88 に、単位間隙あたりの気相の O_2 と液相に溶解した O_2 の合計モル量 C_{g+l,O_2} の分布の変化を図 5.3-87 と図 5.3-89 にそれぞれ示す。

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

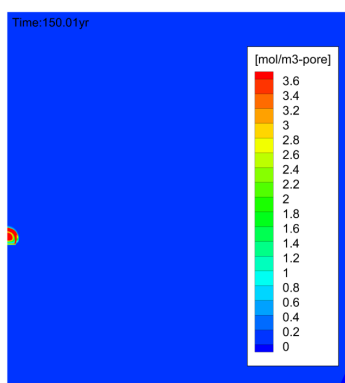
Case7（開放 50 年+埋戻し 950 年）と埋め戻してから同時刻の気相及び液相の合計 O_2 モル量分布を比較すると、Case8（開放 100 年+埋戻し 900 年）の方が、気相及び液相の合計 O_2 モル量が元の状態に戻る速度が遅い。これは、Case8 の方が Case7 よりも坑道開放期間が長く、埋戻し直後の坑道周辺の不飽和領域が広いためである。



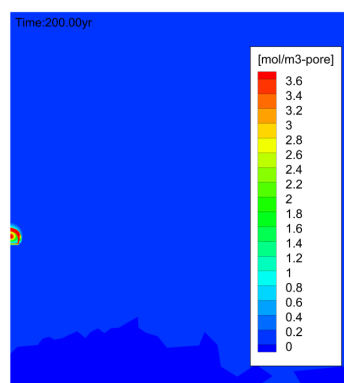
埋戻し直後



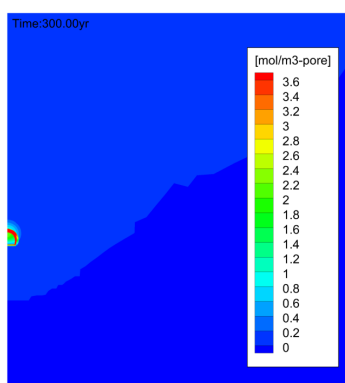
埋戻し 20 年後



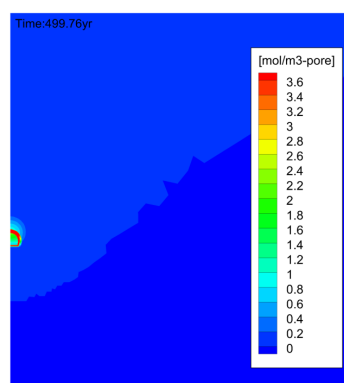
埋戻し 50 年後



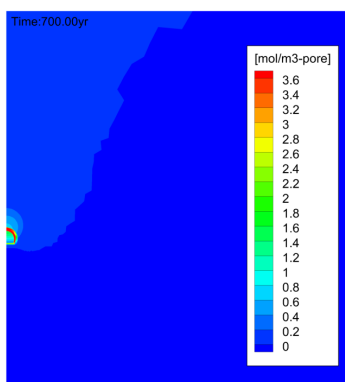
埋戻し 100 年後



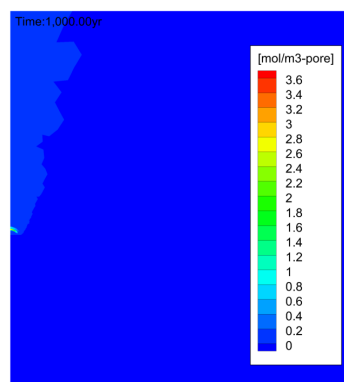
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

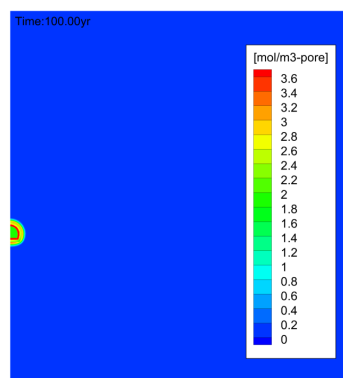


埋戻し 500 年後

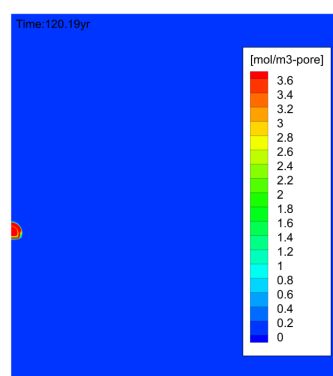


埋戻し 900 年後

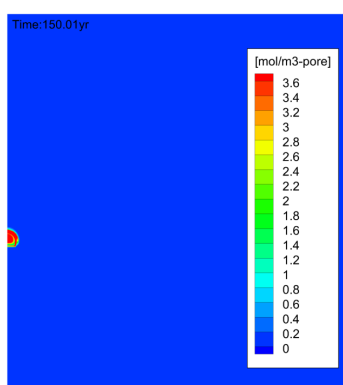
図 5.3-86 Case8 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布 (坑道周辺、気相)



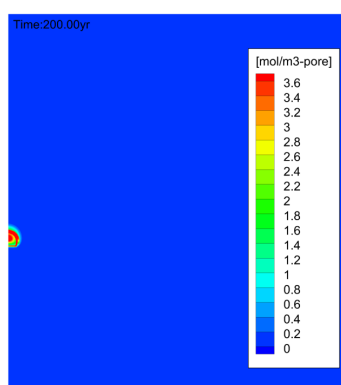
埋戻し直後



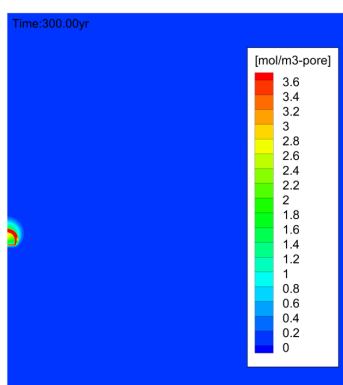
埋戻し 20 年後



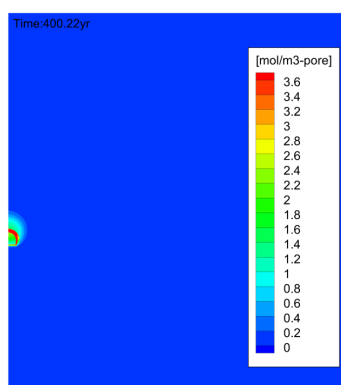
埋戻し 50 年後



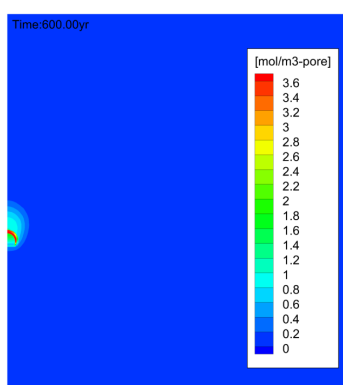
埋戻し 100 年後



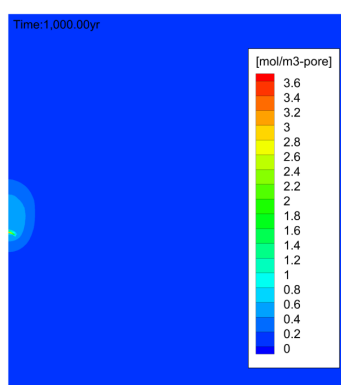
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

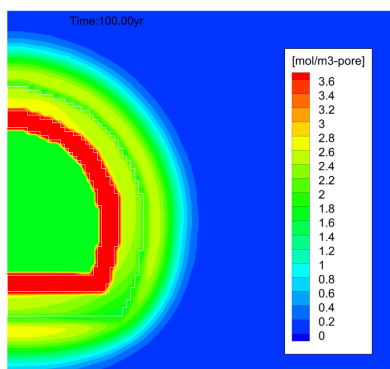


埋戻し 500 年後

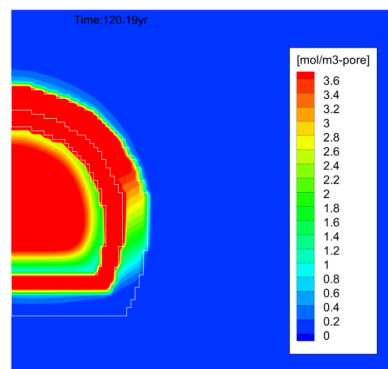


埋戻し 900 年後

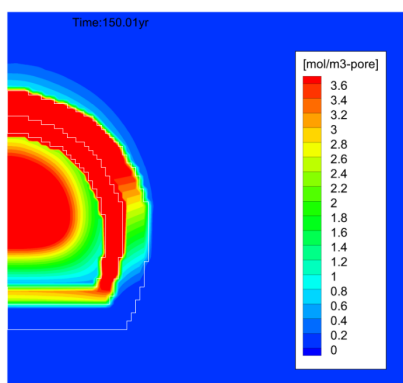
図 5.3-87 Case8 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布 (坑道周辺、気相+液相)



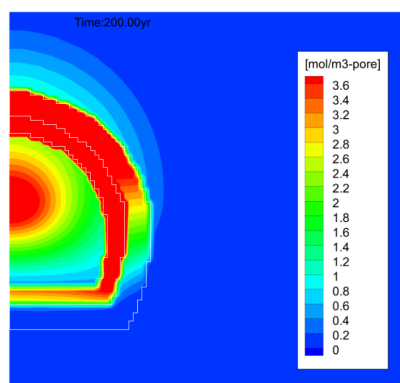
埋戻し直後



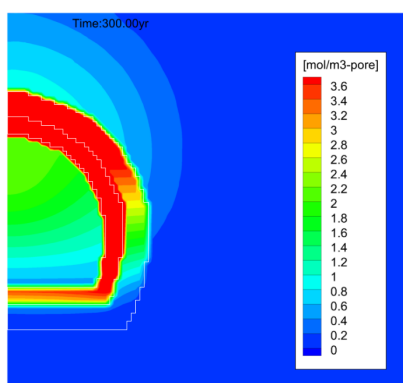
埋戻し 20 年後



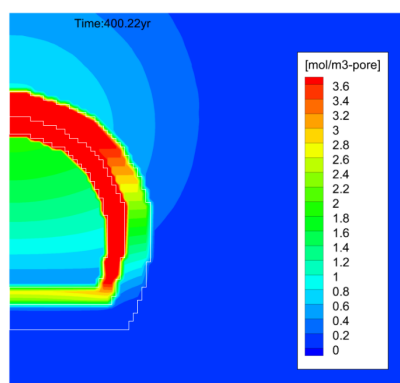
埋戻し 50 年後



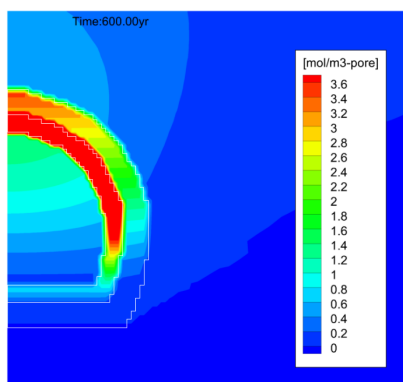
埋戻し 100 年後



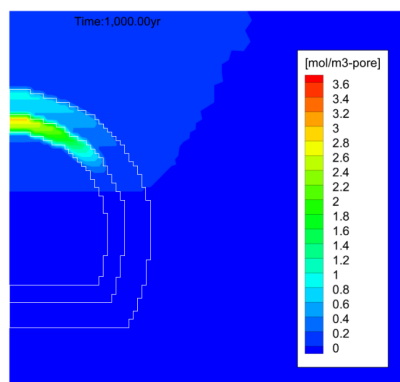
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

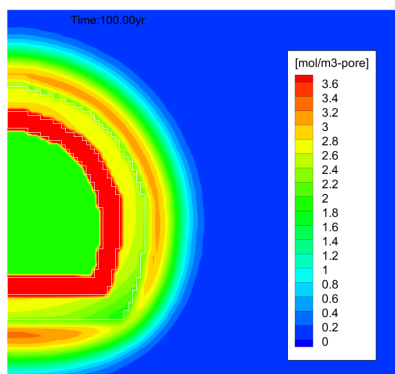


埋戻し 500 年後

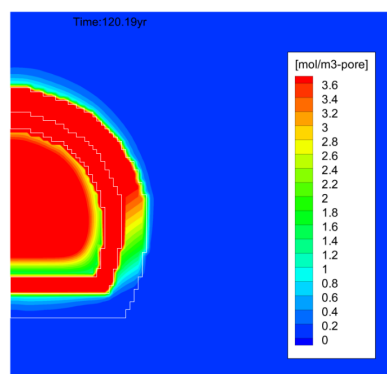


埋戻し 900 年後

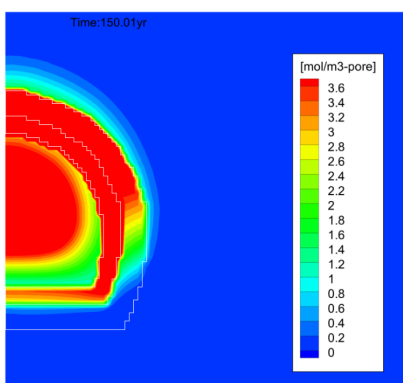
図 5.3-88 Case8 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布 (坑道近傍、気相)



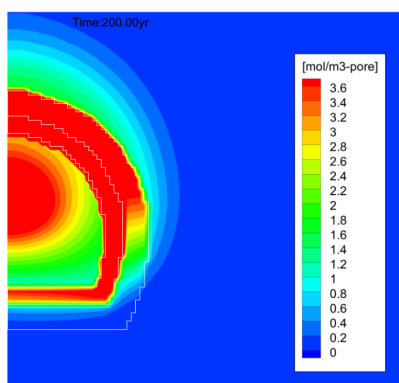
埋戻し直後



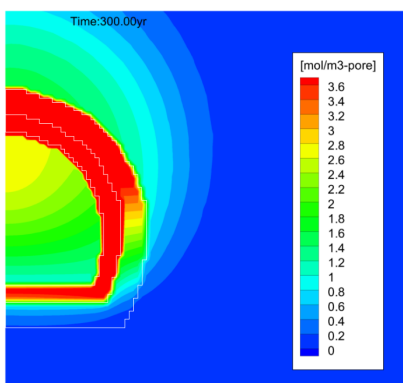
埋戻し 20 年後



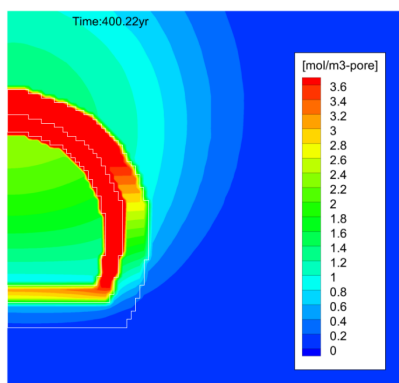
埋戻し 50 年後



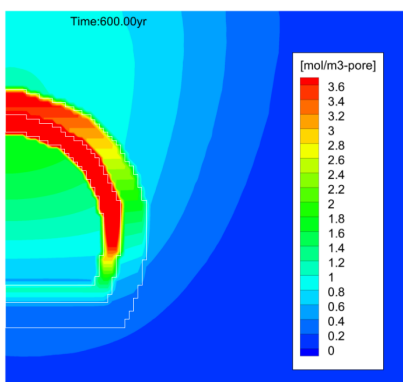
埋戻し 100 年後



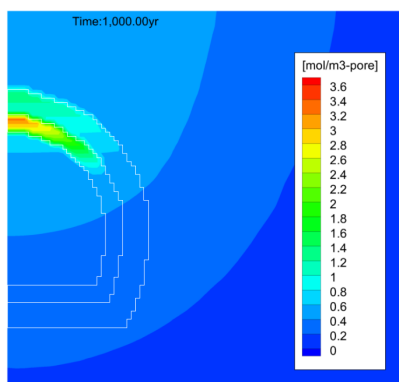
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後



埋戻し 500 年後



埋戻し 900 年後

図 5.3-89 Case8 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布（坑道近傍、気相+液相）

3) Case9 (開放 200 年+埋戻し 800 年)

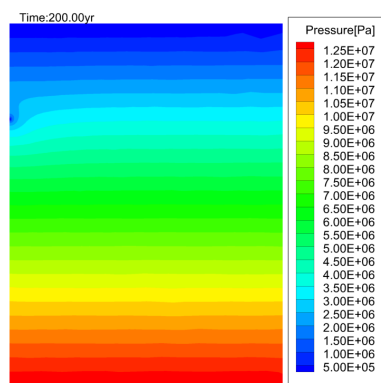
圧力分布、飽和度分布

Case9 の水理解析における圧力分布の変化を図 5.3-90 と図 5.3-91 に示す。時間の経過とともに坑道周辺の圧力が回復していく。埋戻しから 800 年後の時点では、まだ静水圧分布に到っていない。

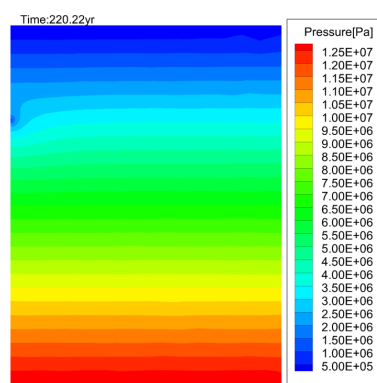
Case8 (開放 100 年+埋戻し 900 年) と埋め戻してから同時刻の圧力分布を比較すると、Case9 (開放 200 年+埋戻し 800 年) の方が、圧力の回復速度が遅い。これは、Case9 の方が Case8 よりも坑道開放期間が長く、埋戻し直後の坑道周辺の不飽和領域が広いためである。

Case9 の水理解析における飽和度分布の変化を図 5.3-92 と図 5.3-93 に示す。埋戻し材への浸潤は、坑道隅角部及び下部から頂部へと進行する。EDZ の飽和度の上昇は、埋戻し材よりも遅れた。特に EDZ の上部は不飽和領域が遅くまで残りやすい。また、EDZ2 よりも EDZ1 の方が飽和度の上昇が遅い。飽和する順番が埋戻し材、EDZ2、EDZ1 の順番になる理由は、同じ飽和度では、サクション圧の絶対値が、埋戻し材 > EDZ2 > EDZ1 であり、この順番で水を吸いやすいためである。埋戻しから 800 年後の時点でも、岩盤は飽和状態であるが、坑道頂部の埋戻し材、EDZ1 及び EDZ2 は不飽和状態である。

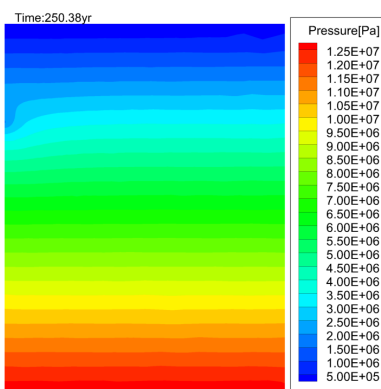
Case8 (開放 100 年+埋戻し 900 年) と埋め戻してから同時刻の飽和度分布を比較すると、Case9 (開放 200 年+埋戻し 800 年) の方が、飽和状態に戻る速度が遅い。これは、Case9 の方が Case8 よりも坑道開放期間が長く、埋戻し直後の坑道周辺の不飽和領域が広いためである。



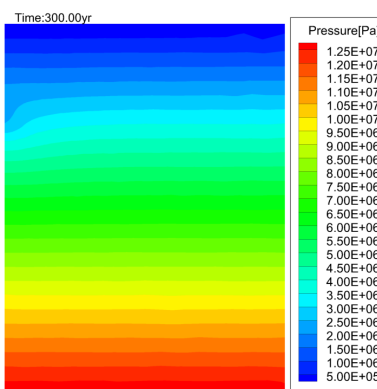
埋戻し直後



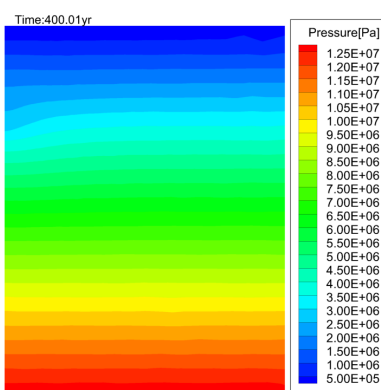
埋戻し 20 年後



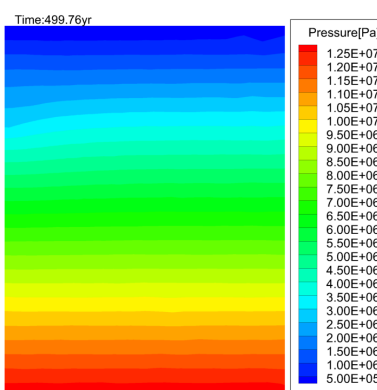
埋戻し 50 年後



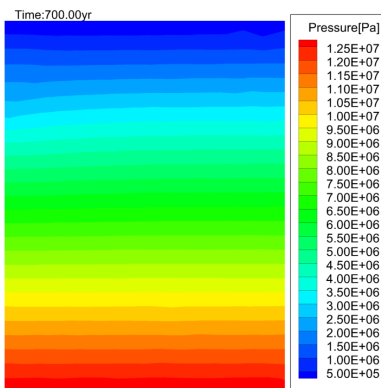
埋戻し 100 年後



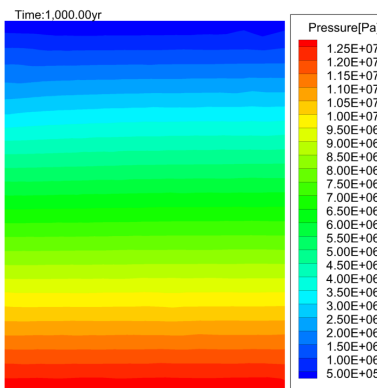
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

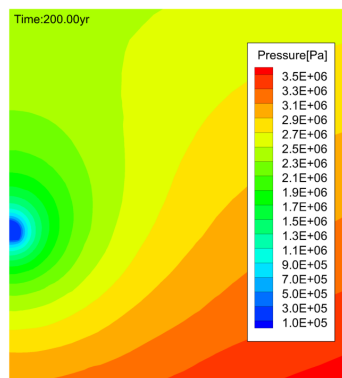


埋戻し 500 年後

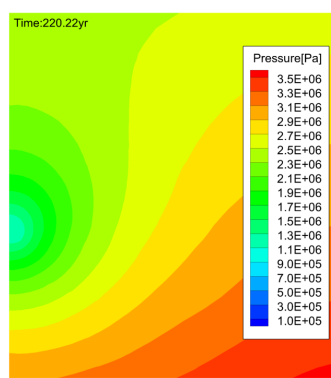


埋戻し 800 年後

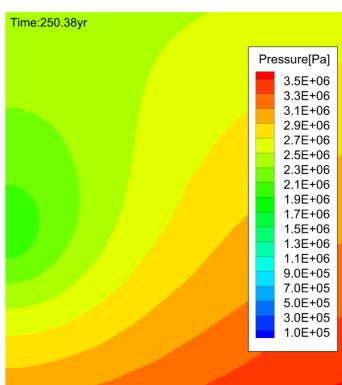
図 5.3-90 Case9 の圧力分布（モデル全体）



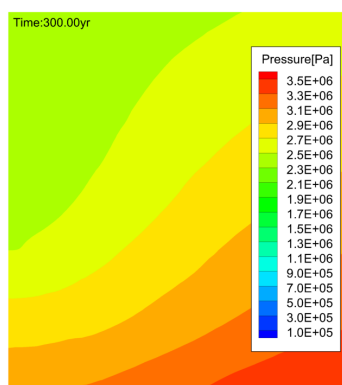
埋戻し直後



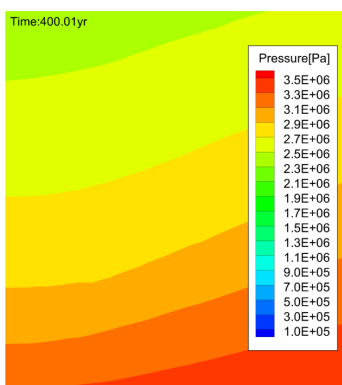
埋戻し 20 年後



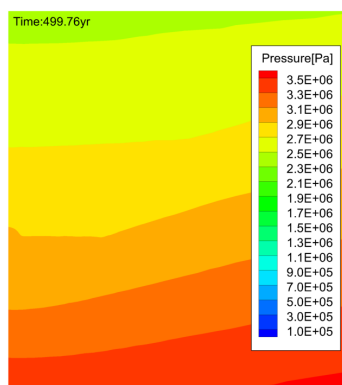
埋戻し 50 年後



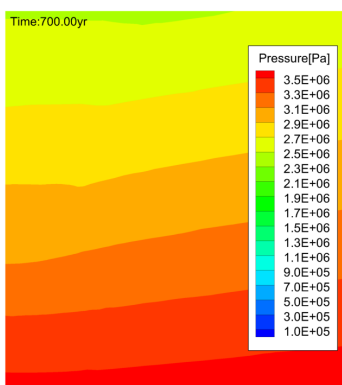
埋戻し 100 年後



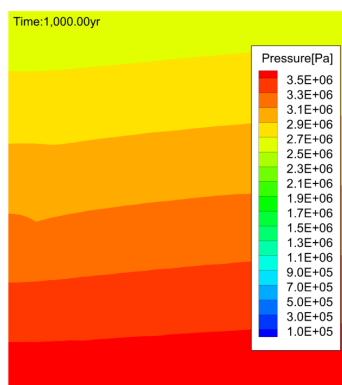
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

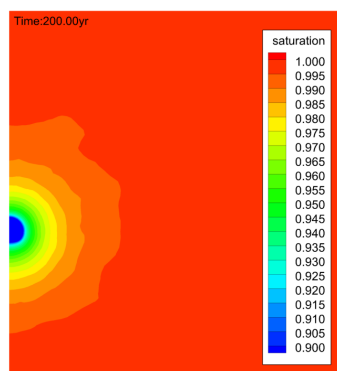


埋戻し 500 年後

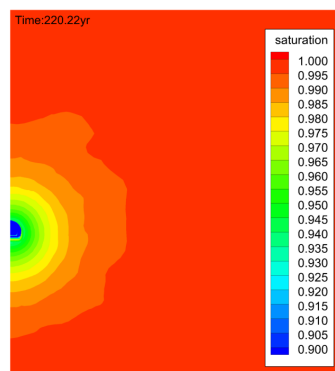


埋戻し 800 年後

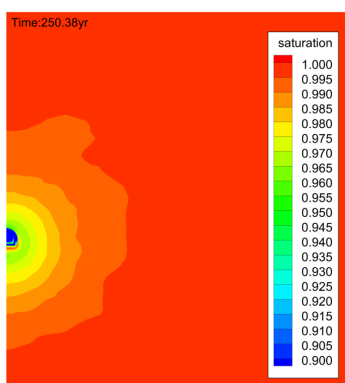
図 5. 3-91 Case9 の圧力分布（坑道周辺）



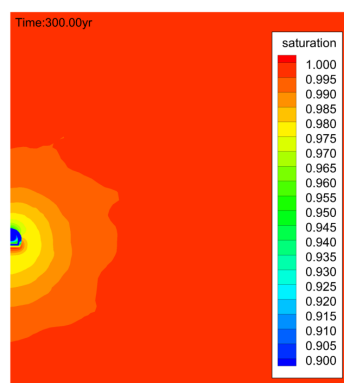
埋戻し直後



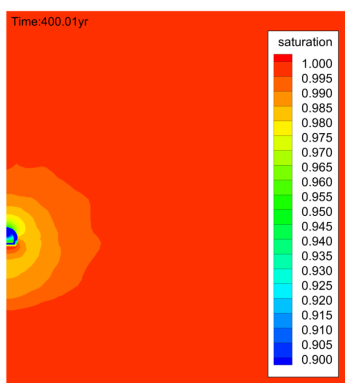
埋戻し 20 年後



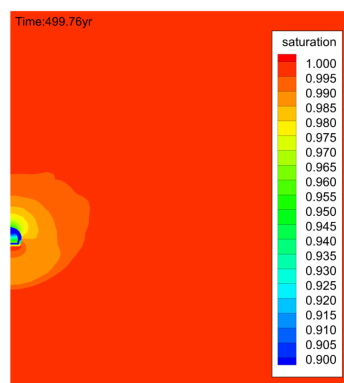
埋戻し 50 年後



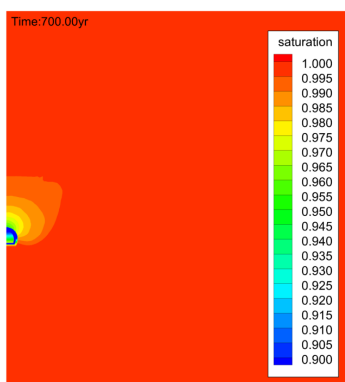
埋戻し 100 年後



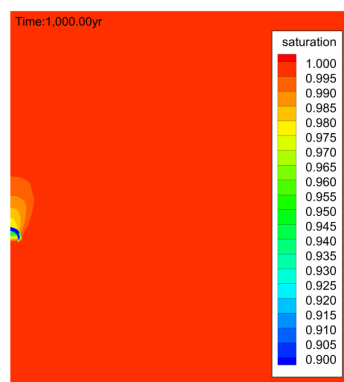
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

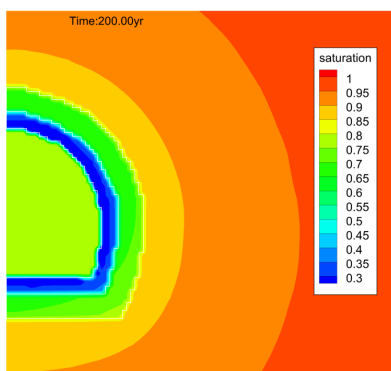


埋戻し 500 年後

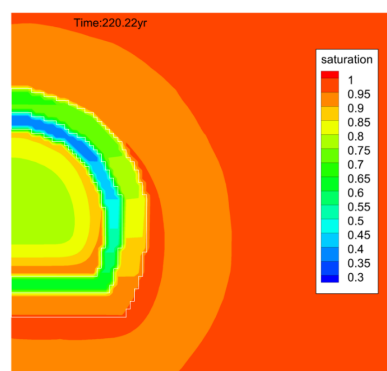


埋戻し 800 年後

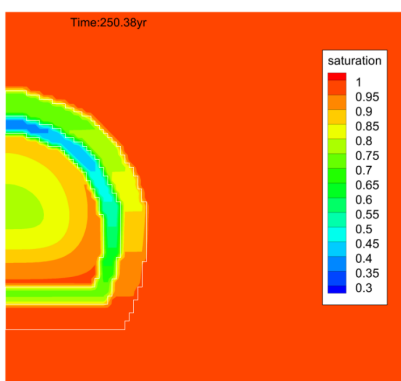
図 5. 3-92 Case9 の飽和度分布（坑道周辺）



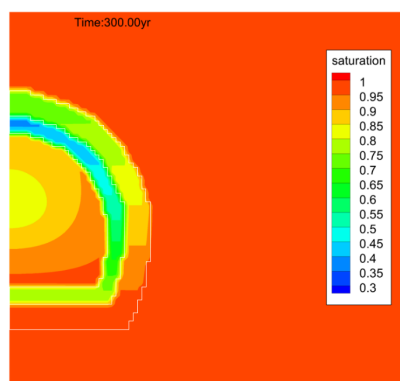
埋戻し直後



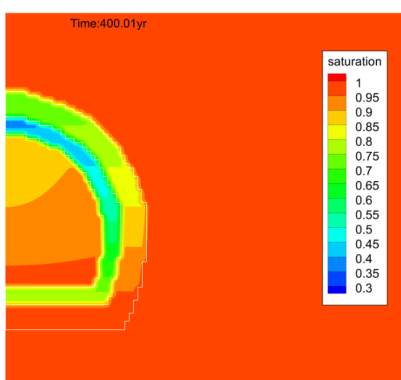
埋戻し 20 年後



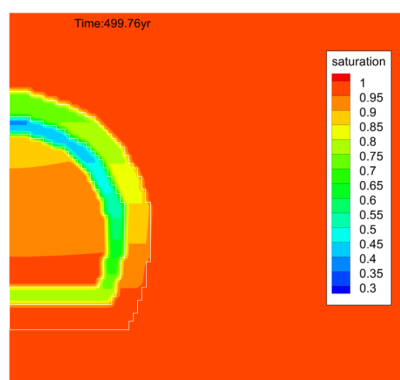
埋戻し 50 年後



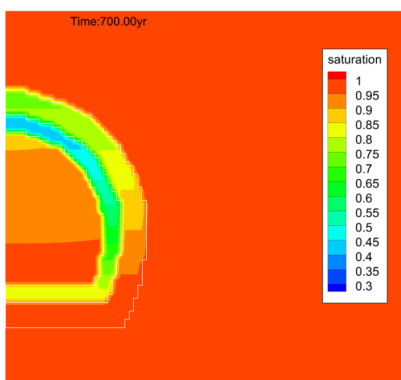
埋戻し 100 年後



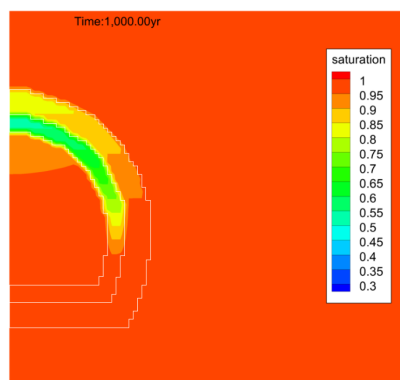
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後



埋戻し 500 年後



埋戻し 800 年後

図 5.3-93 Case9 の飽和度分布 (坑道近傍)

単位間隙あたりの「気相の CH₄ のモル量」及び「気相の CH₄ と液相に溶解した CH₄ の合計モル量」

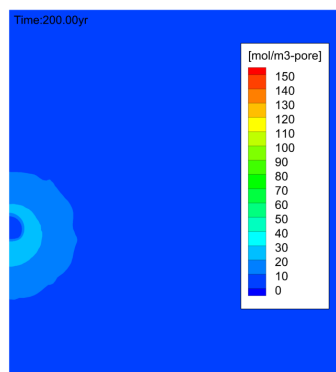
Case9 の単位間隙あたりの気相の CH₄ のモル量 $C_{g_CH_4}$ の分布の変化を図 5.3-94 と図 5.3-96 図に、単位間隙あたりの気相の CH₄ と液相に溶解した CH₄ の合計モル量 $C_{g+l_CH_4}$ の分布の変化を図 5.3-95 と図 5.3-97 にそれぞれ示す。

間隙中の気相 CH₄ モル量の変化は、不飽和領域分布の変化にほぼ対応している。

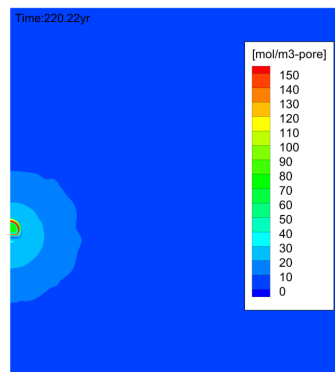
埋戻しから 500 年後までは、EDZ1 及び EDZ2 内の気相及び液相の合計 CH₄ モル量が増加している。これは、母岩から浸潤してきた CH₄ を含む液相が圧力の低い坑道周辺に移動し、脱ガスした CH₄ が EDZ1 及び EDZ 中に移動するためと考えられる。

EDZ1 及び EDZ2 内の気相及び液相の合計 CH₄ モル量が埋戻しから 500 年後まで増加した後は徐々に減少しており、気相の CH₄ が液相に再溶解し拡散していると考えられる。

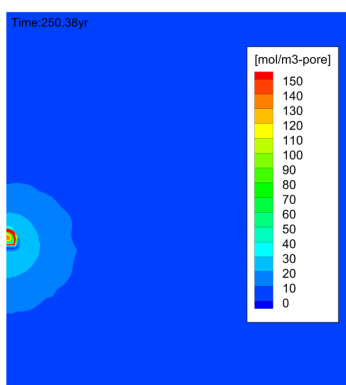
Case8（開放 100 年+埋戻し 900 年）と埋め戻してから同時刻の気相及び液相の合計 CH₄ モル量分布を比較すると、Case9（開放 200 年+埋戻し 800 年）の方が、気相及び液相の合計 CH₄ モル量が元の状態に戻る速度が遅い。これは、Case9 の方が Case8 よりも坑道開放期間が長く、埋戻し直後の坑道周辺の不飽和領域が広いためである。



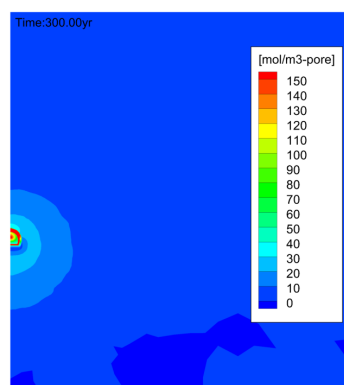
埋戻し直後



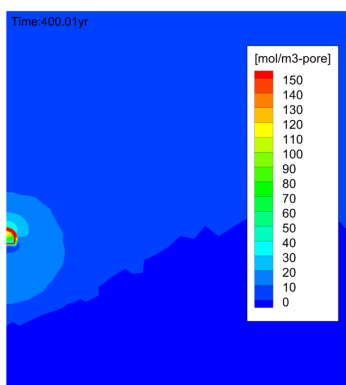
埋戻し 20 年後



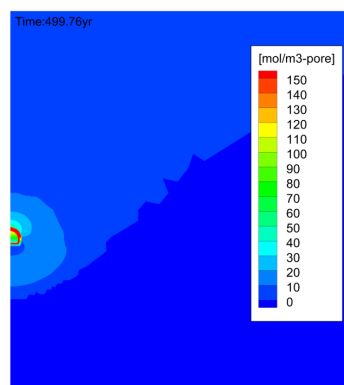
埋戻し 50 年後



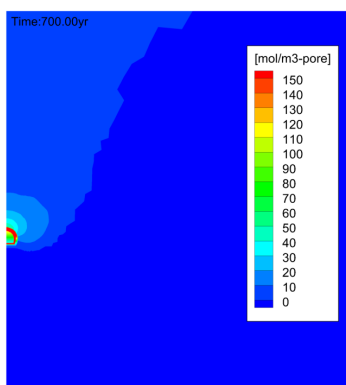
埋戻し 100 年後



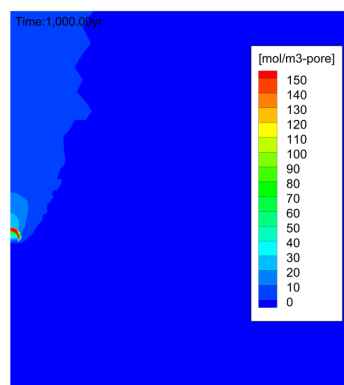
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

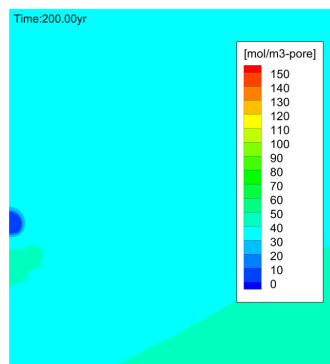


埋戻し 500 年後

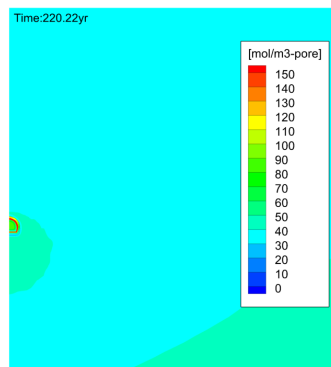


埋戻し 800 年後

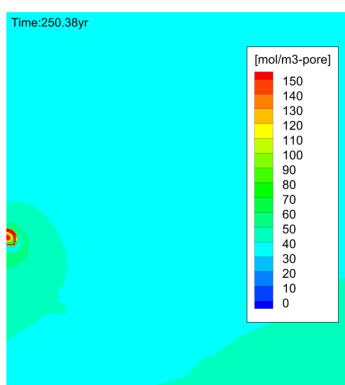
図 5.3-94 Case9 の単位間隙あたりの CH₄ のモル量分布（坑道周辺、気相）



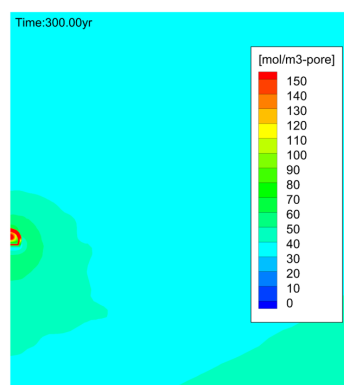
埋戻し直後



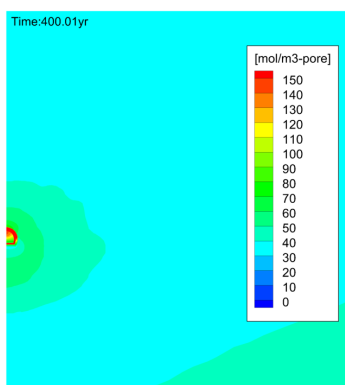
埋戻し 20 年後



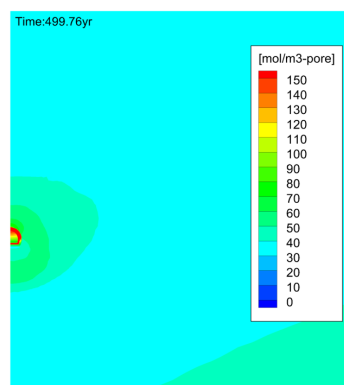
埋戻し 50 年後



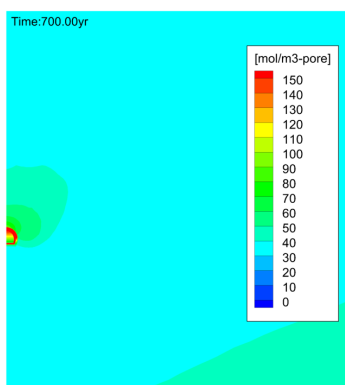
埋戻し 100 年後



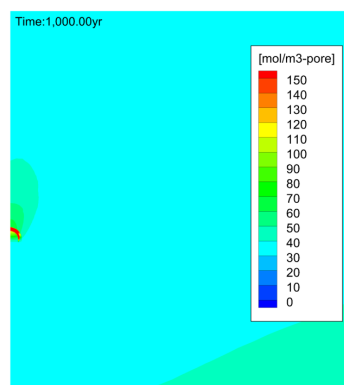
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

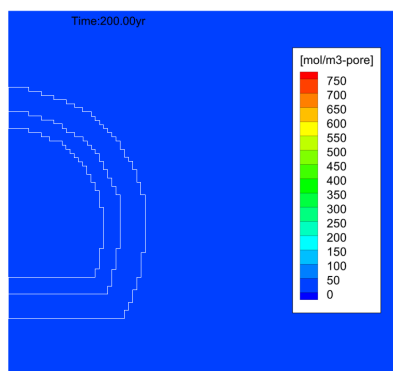


埋戻し 500 年後

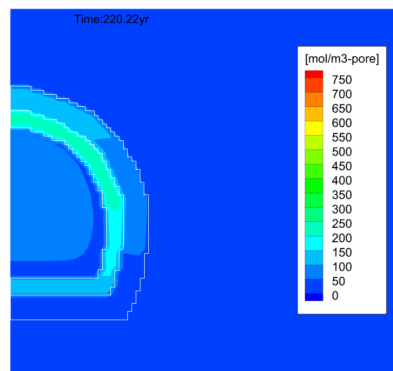


埋戻し 800 年後

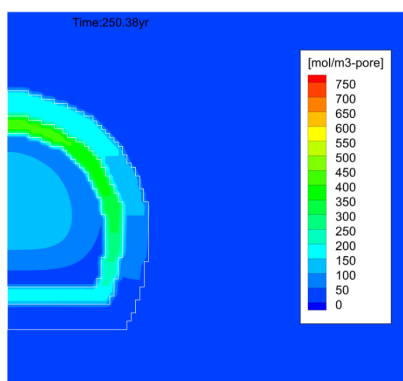
図 5.3-95 Case9 の単位間隙あたりの CH₄ のモル量分布（坑道周辺、気相+液相）



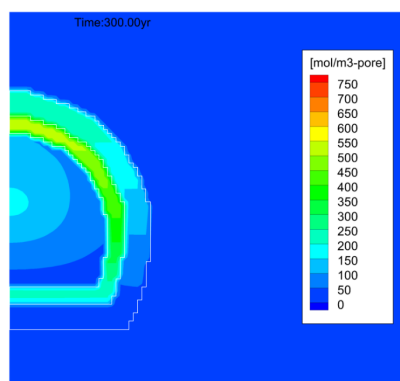
埋戻し直後



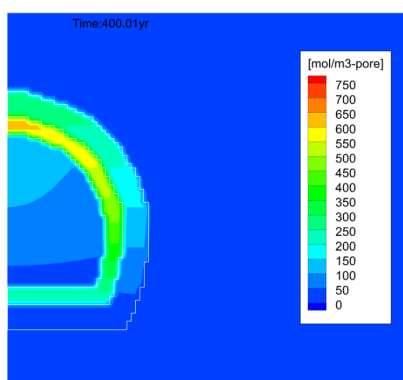
埋戻し 20 年後



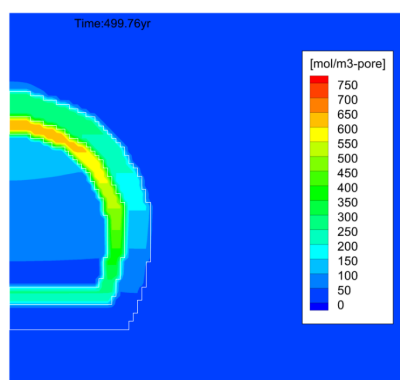
埋戻し 50 年後



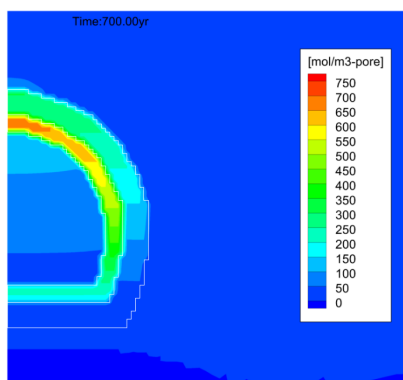
埋戻し 100 年後



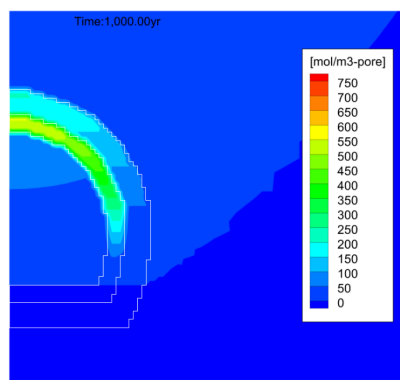
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

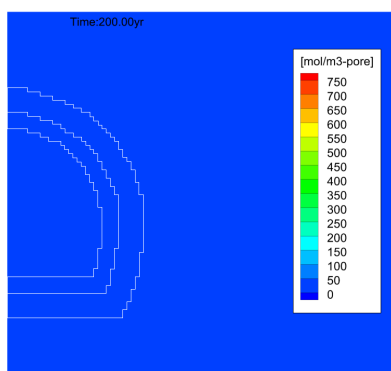


埋戻し 500 年後

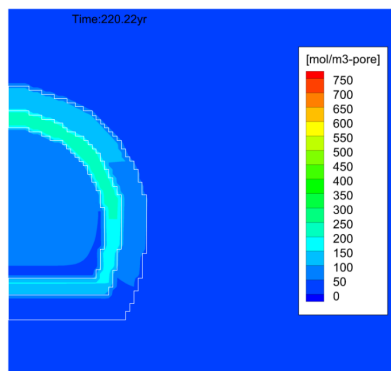


埋戻し 800 年後

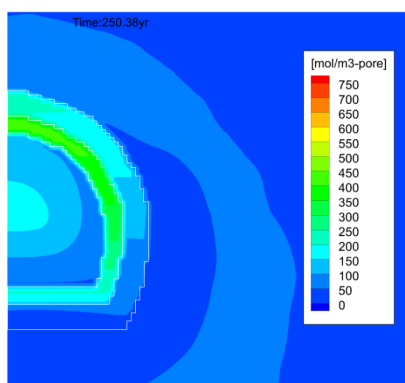
図 5.3-96 Case9 の単位間隙あたりの CH_4 のモル量分布（坑道近傍、気相）



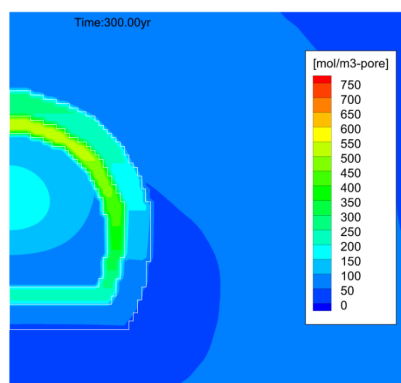
埋戻し直後



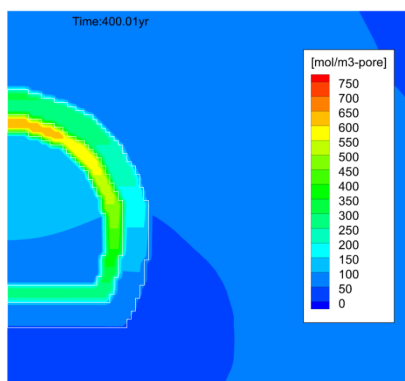
埋戻し 20 年後



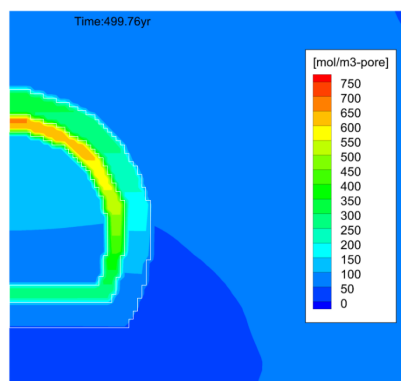
埋戻し 50 年後



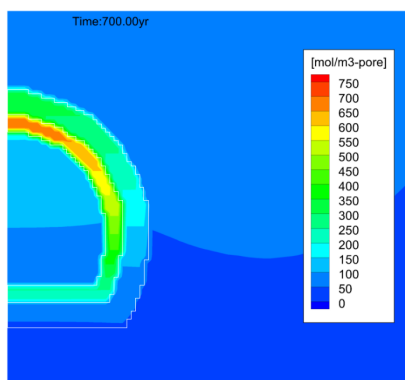
埋戻し 100 年後



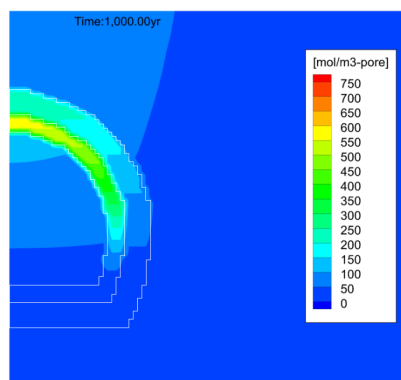
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後



埋戻し 500 年後



埋戻し 800 年後

図 5.3-97 Case9 の単位間隙あたりの CH_4 のモル量分布（坑道近傍、気相+液相）

単位間隙あたりの「気相の CO₂ のモル量」及び「気相の CO₂ と液相に溶解した CO₂ の合計モル量」

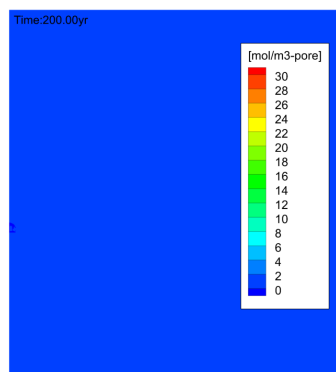
Case9 の単位間隙あたりの気相の CO₂ のモル量 $C_{g_CO_2}$ の分布の変化を図 5.3-98 と図 5.3-100 に、単位間隙あたりの気相の CO₂ と液相に溶解した CO₂ の合計モル量 $C_{g+l_CO_2}$ の分布の変化を図 5.3-99 と図 5.3-101 にそれぞれ示す。

間隙中の気相 CO₂モル量の変化は、不飽和領域分布の変化にほぼ対応している。

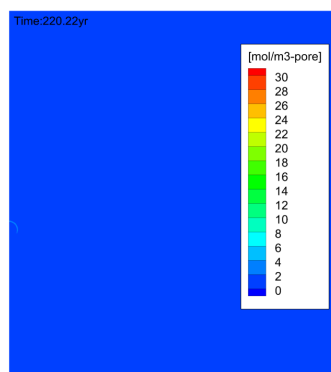
埋戻しから 500 年後までは、EDZ1 及び EDZ2 内の気相及び液相の合計 CO₂モル量が増加している。これは、母岩から浸潤してきた CO₂を含む液相が圧力の低い坑道周辺に移動し、脱ガスした CO₂が EDZ1 及び EDZ2 中に移動するためと考えられる。

EDZ1 及び EDZ2 内の気相及び液相の合計 CO₂モル量が埋戻しから 500 年後まで増加した後は徐々に減少しており、気相の CO₂が液相に再溶解し拡散していると考えられる。

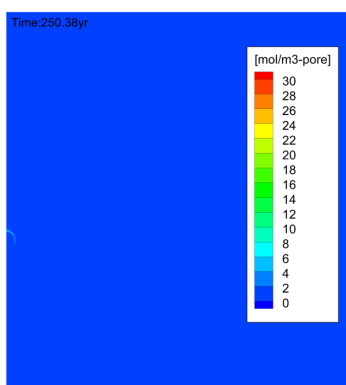
Case8（開放 100 年+埋戻し 900 年）と埋め戻してから同時刻の気相及び液相の合計 CO₂モル量分布を比較すると、Case9（開放 200 年+埋戻し 800 年）の方が、気相及び液相の合計 CO₂モル量が元の状態に戻る速度が遅い。これは、Case9 の方が Case8 よりも坑道開放期間が長く、埋戻し直後の坑道周辺の不飽和領域が広いためである。



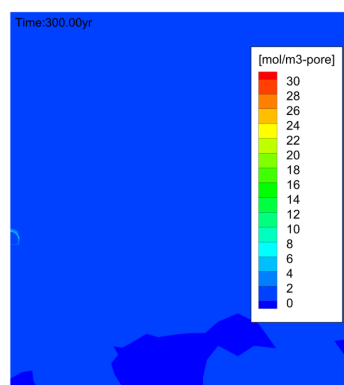
埋戻し直後



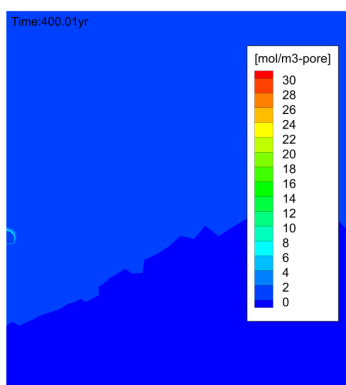
埋戻し 20 年後



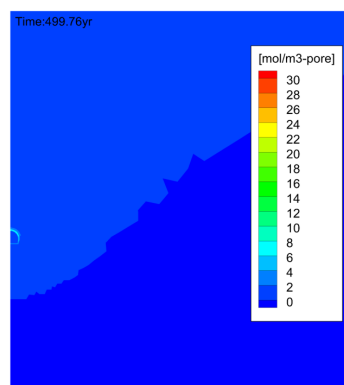
埋戻し 50 年後



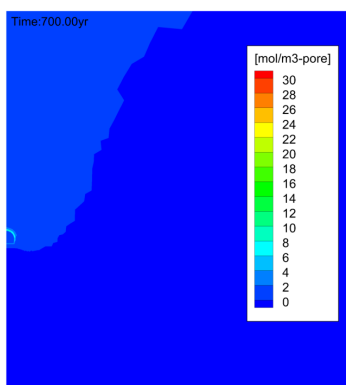
埋戻し 100 年後



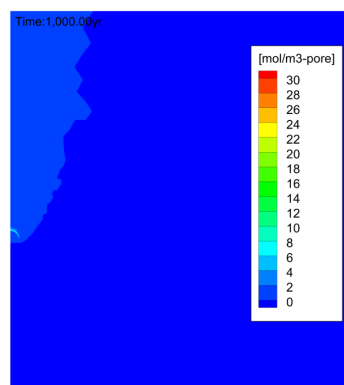
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

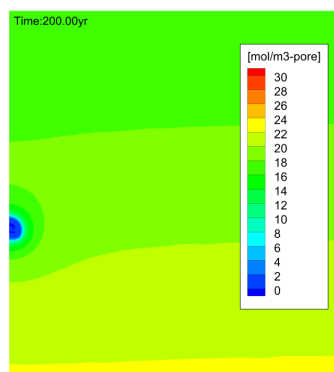


埋戻し 500 年後

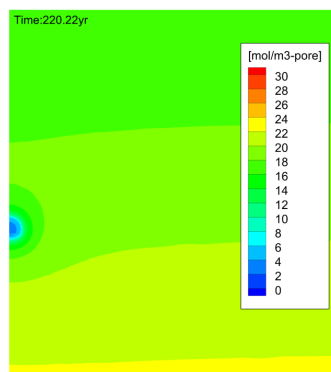


埋戻し 800 年後

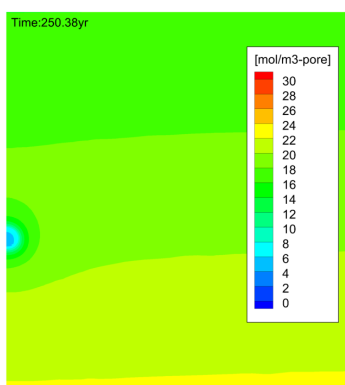
図 5.3-98 Case9 の単位間隙あたりの CO₂ のモル量分布（坑道周辺、気相）



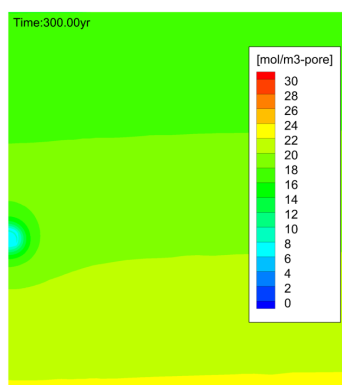
埋戻し直後



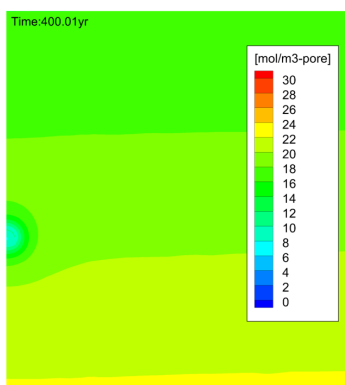
埋戻し 20 年後



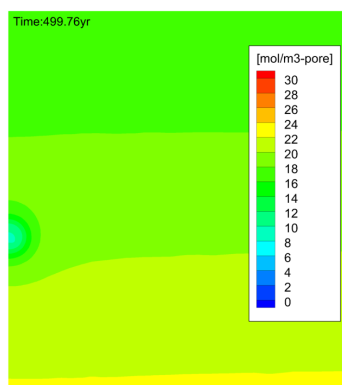
埋戻し 50 年後



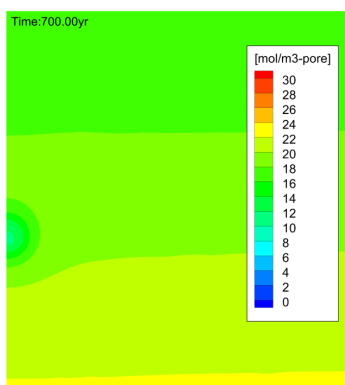
埋戻し 100 年後



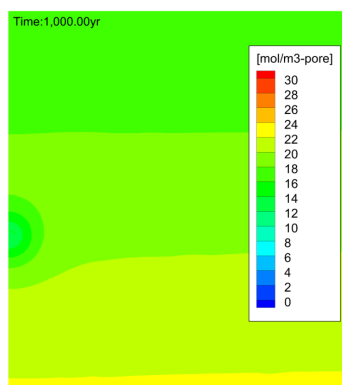
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

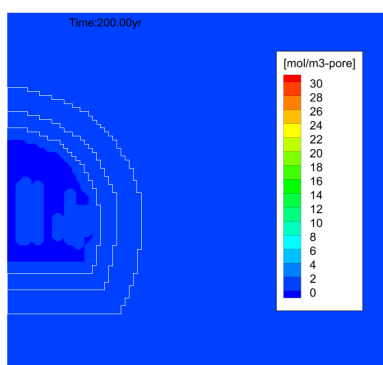


埋戻し 500 年後

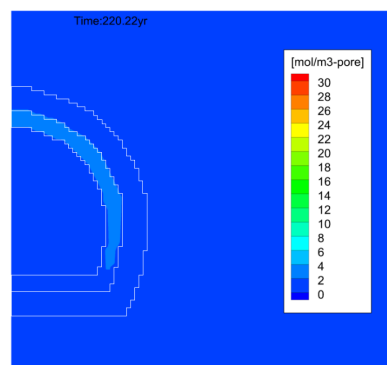


埋戻し 800 年後

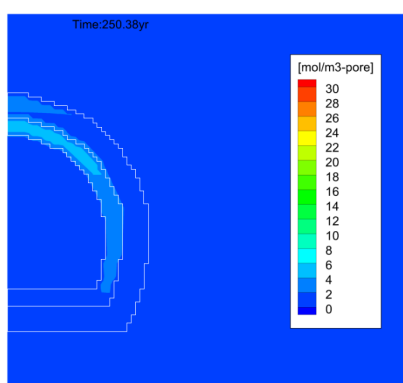
図 5.3-99 Case9 の単位間隙あたりの CO₂ のモル量分布（坑道周辺、気相+液相）



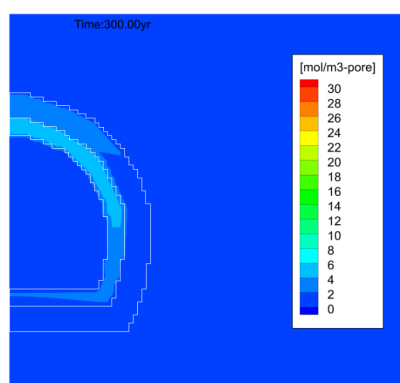
埋戻し直後



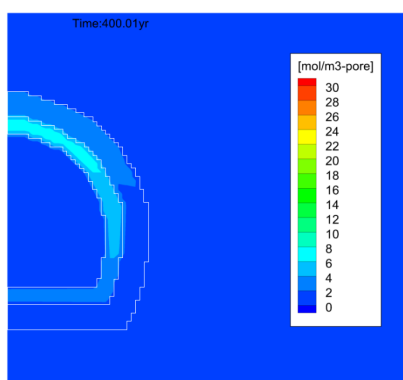
埋戻し 20 年後



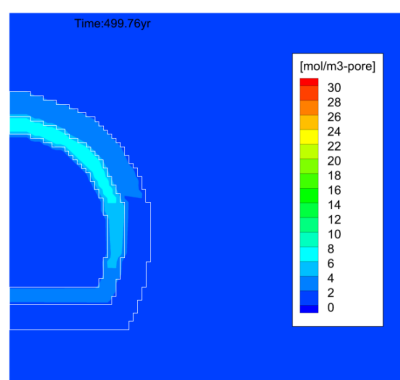
埋戻し 50 年後



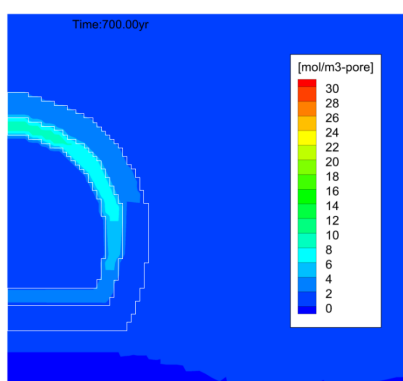
埋戻し 100 年後



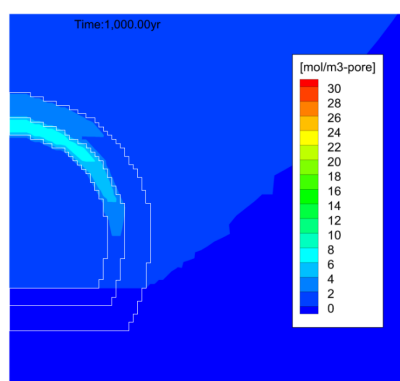
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

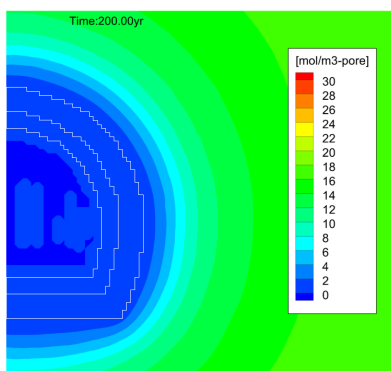


埋戻し 500 年後

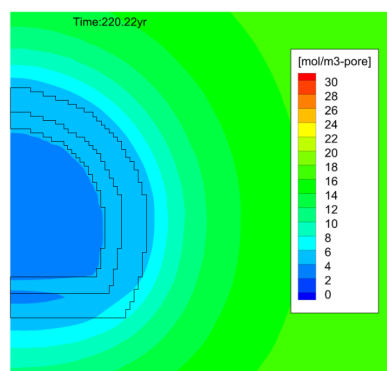


埋戻し 800 年後

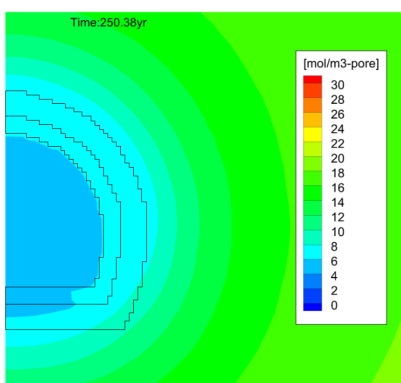
図 5.3-100 Case9 の単位間隙あたりの CO_2 のモル量分布（坑道近傍、気相）



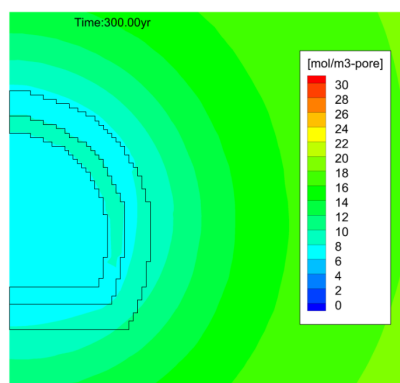
埋戻し直後



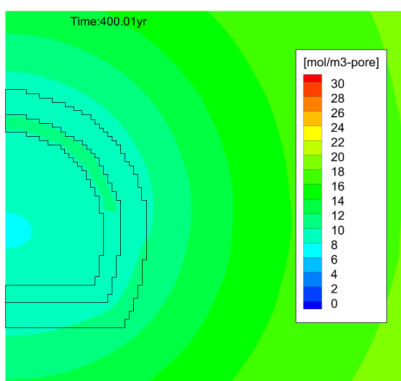
埋戻し 20 年後



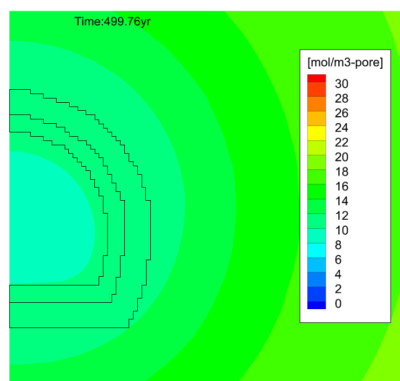
埋戻し 50 年後



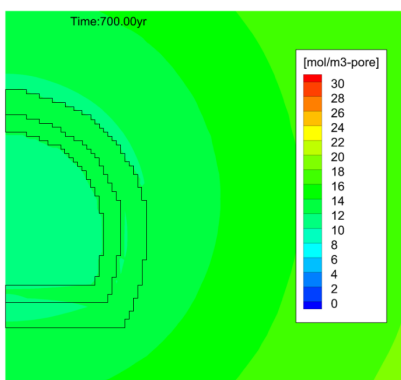
埋戻し 100 年後



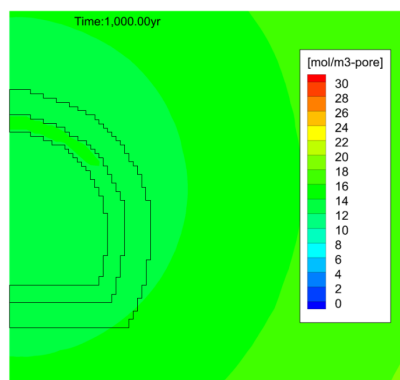
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後



埋戻し 500 年後



埋戻し 800 年後

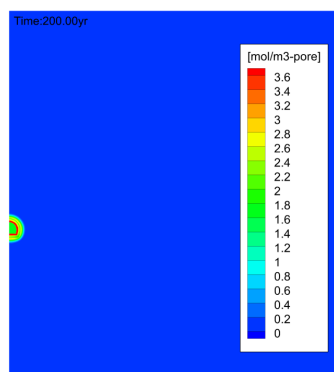
図 5.3-101 Case9 の単位間隙あたりの CO₂ のモル量分布（坑道近傍、気相+液相）

単位間隙あたりの「気相の O_2 のモル量」及び「気相の O_2 と液相に溶解した O_2 の合計モル量」

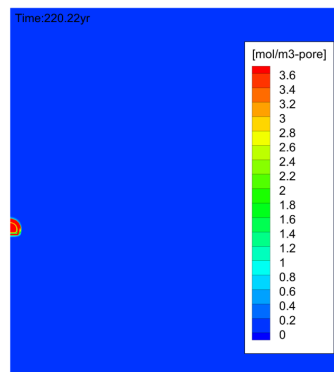
Case9の単位間隙あたりの気相の O_2 のモル量 C_{g,O_2} の分布の変化を図 5.3-102と図 5.3-104に、単位間隙あたりの気相の O_2 と液相に溶解した O_2 の合計モル量 C_{g+L,O_2} の分布の変化を図 5.3-103と図 5.3-105にそれぞれ示す。

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

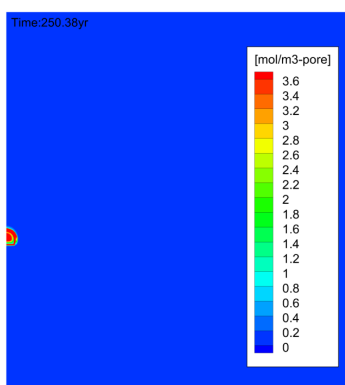
Case8（開放100年+埋戻し900年）と埋め戻してから同時刻の気相及び液相の合計 O_2 モル量分布を比較すると、Case9（開放200年+埋戻し800年）の方が、気相及び液相の合計 O_2 モル量が元の状態に戻る速度が遅い。これは、Case9の方がCase8よりも坑道開放期間が長く、埋戻し直後の坑道周辺の不飽和領域が広いためである。



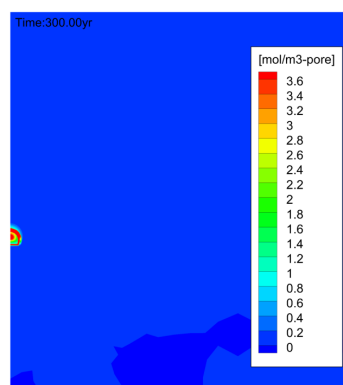
埋戻し直後



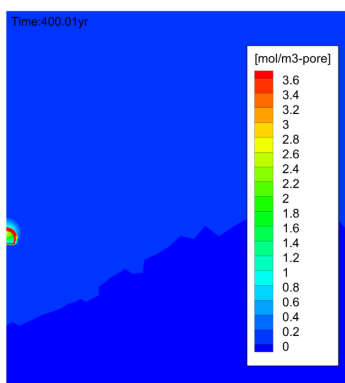
埋戻し 20 年後



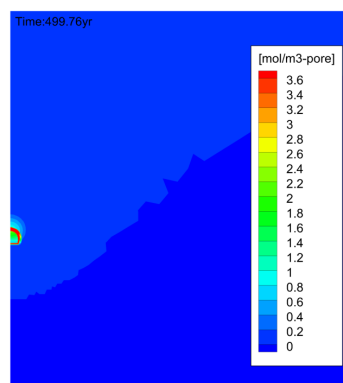
埋戻し 50 年後



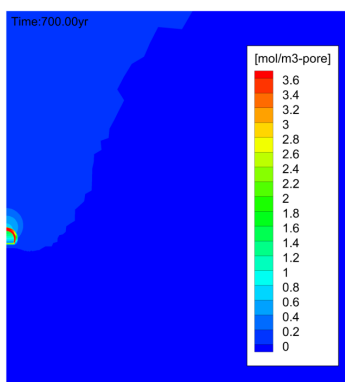
埋戻し 100 年後



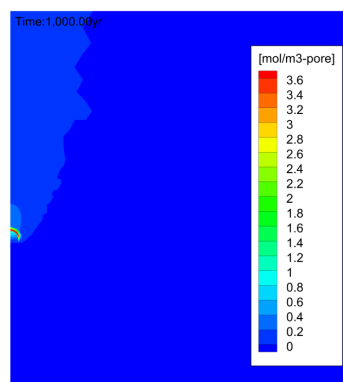
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

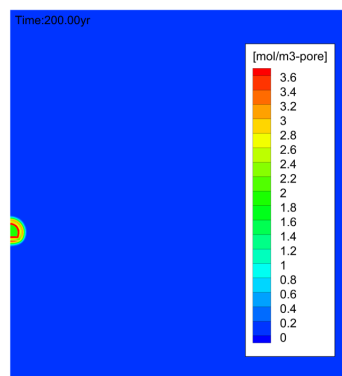


埋戻し 500 年後

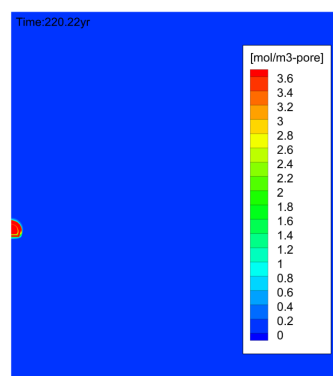


埋戻し 800 年後

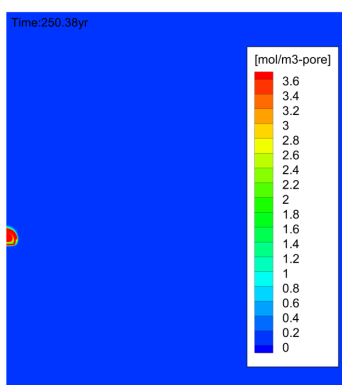
図 5.3-102 Case9 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布（坑道周辺、気相）



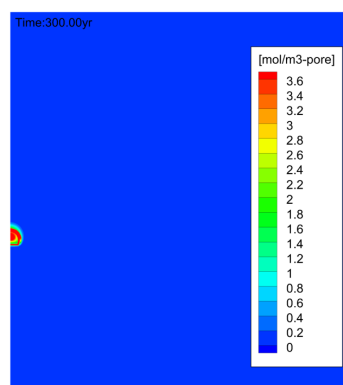
埋戻し直後



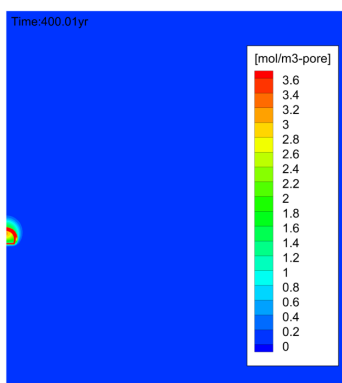
埋戻し 20 年後



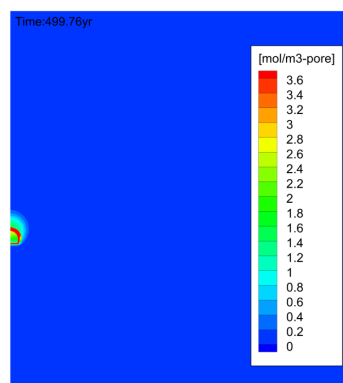
埋戻し 50 年後



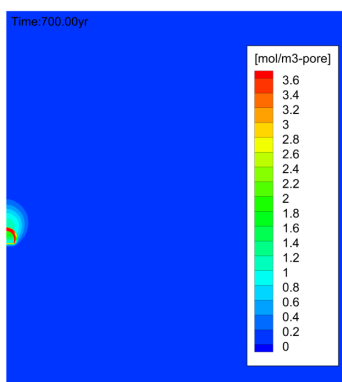
埋戻し 100 年後



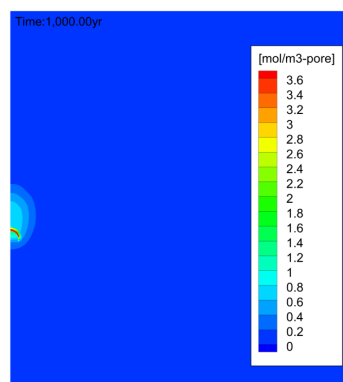
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

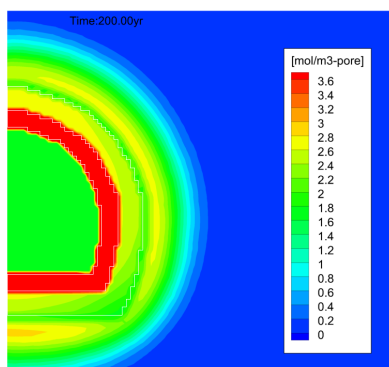


埋戻し 500 年後

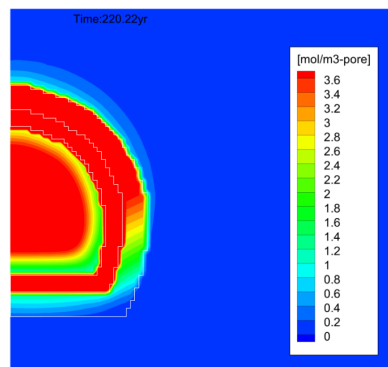


埋戻し 800 年後

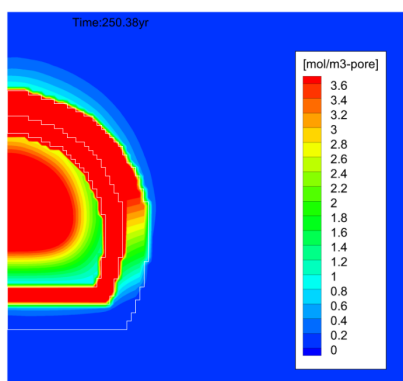
図 5.3-103 Case9 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布（坑道周辺、気相+液相）



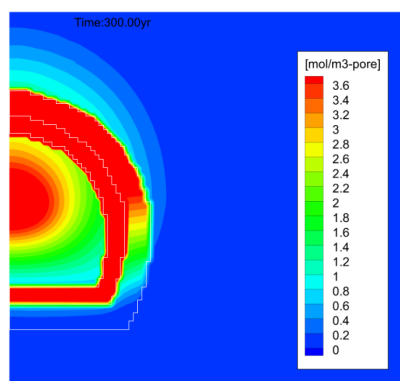
埋戻し直後



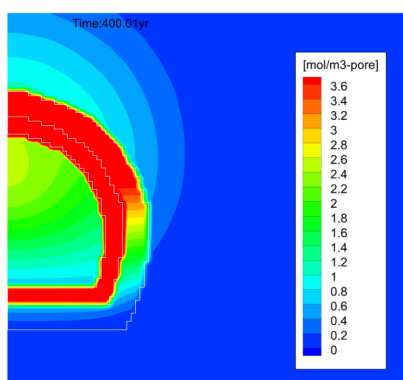
埋戻し 20 年後



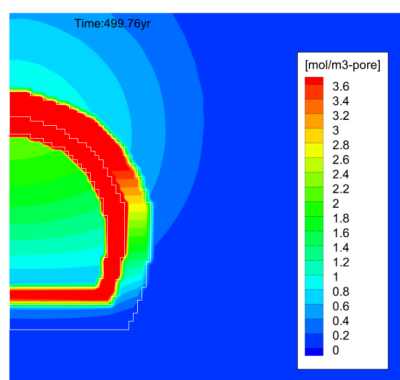
埋戻し 50 年後



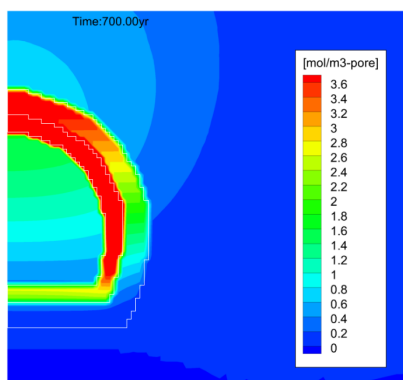
埋戻し 100 年後



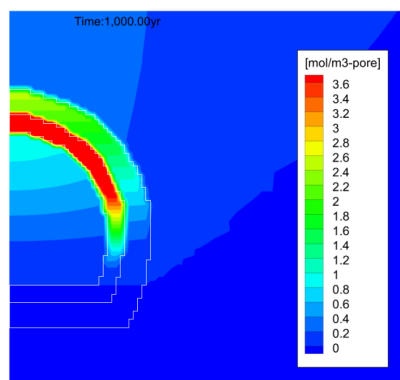
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

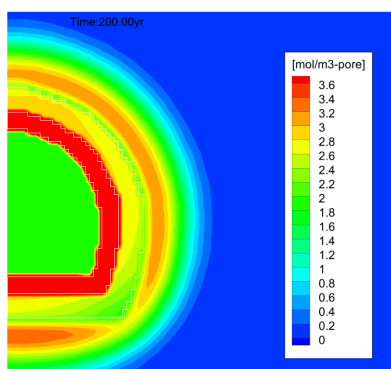


埋戻し 500 年後

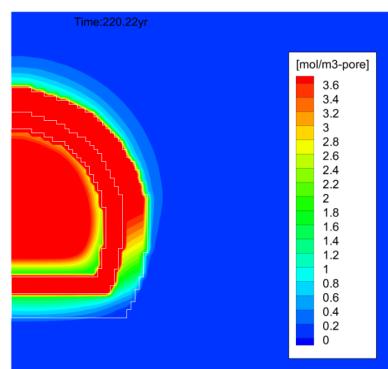


埋戻し 800 年後

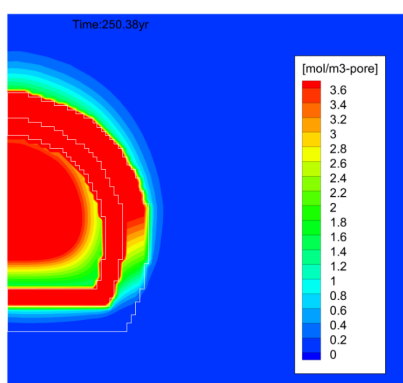
図 5.3-104 Case9 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布（坑道近傍、気相）



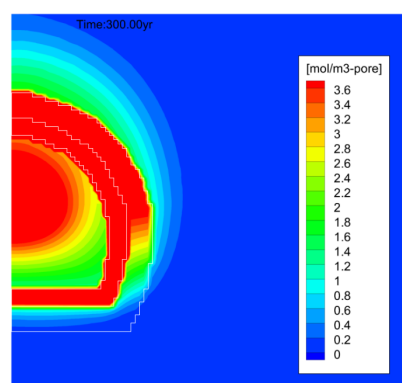
埋戻し直後



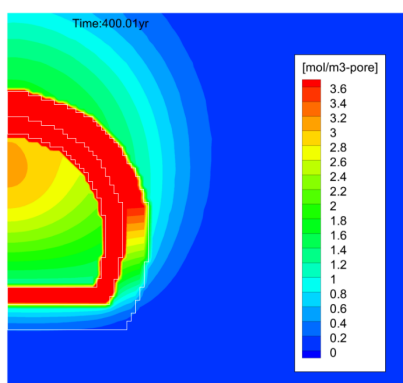
埋戻し 20 年後



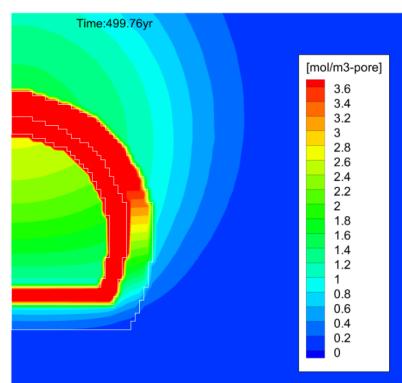
埋戻し 50 年後



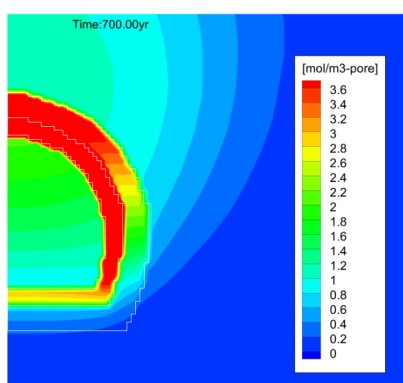
埋戻し 100 年後



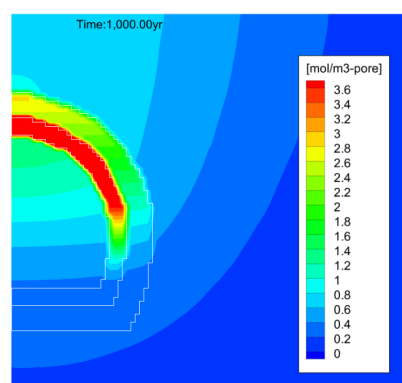
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後



埋戻し 500 年後



埋戻し 800 年後

図 5.3-105 Case9 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布（坑道近傍、気相+液相）

4) Case10（開放 300 年+埋戻し 700 年）

圧力分布、飽和度分布

Case7 の水理解析における圧力分布の変化を図 5.3-106 と図 5.3-107 に示す。時間の経過とともに坑道周辺の圧力が回復していく。埋戻しから 700 年後の時点では、まだ静水圧分布に到っていない。

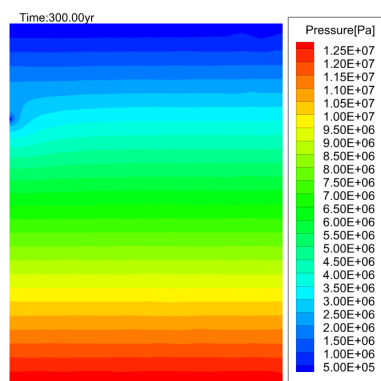
Case9（開放 200 年+埋戻し 800 年）と埋め戻してから同時刻の圧力分布を比較すると、Case10（開放 300 年+埋戻し 700 年）の方が、圧力の回復速度が遅い。これは、Case10 の方が Case9 よりも坑道開放期間が長く、埋戻し直後の坑道周辺の不飽和領域が広いためである。

Case10 の水理解析における飽和度分布の変化を図 5.3-108 と図 5.3-109 に示す。

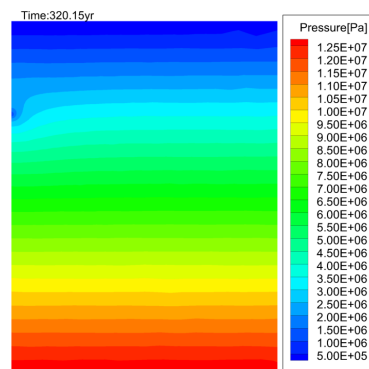
埋戻し材への浸潤は、坑道隅角部及び下部から頂部へと進行する。EDZ の飽和度の上昇は、埋戻し材よりも遅れた。特に EDZ の上部は不飽和領域が遅くまで残りやすい。また、EDZ2 よりも EDZ1 の方が飽和度の上昇が遅い。飽和する順番が埋戻し材、EDZ2、EDZ1 の順番になる理由は、同じ飽和度では、サクション圧の絶対値が、埋戻し材> EDZ2 > EDZ1 であり、この順番で水を吸いやすいためである。

埋戻しから 700 年後の時点でも、岩盤は飽和状態であるが、坑道頂部の埋戻し材、EDZ1 及び EDZ2 は不飽和状態である。

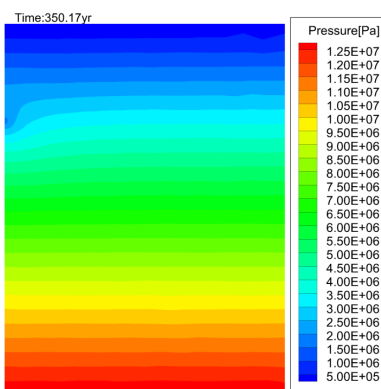
Case9（開放 200 年+埋戻し 800 年）と埋め戻してから同時刻の飽和度分布を比較すると、Case10（開放 300 年+埋戻し 700 年）の方が、飽和状態に戻る速度が遅い。これは、Case10 の方が Case9 よりも坑道開放期間が長く、埋戻し直後の坑道周辺の不飽和領域が広いためである。



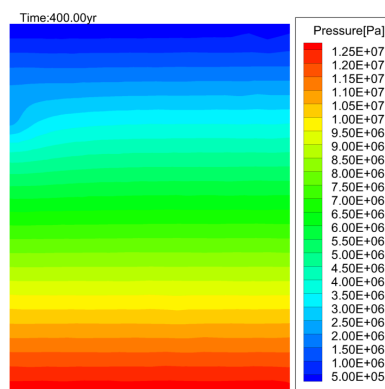
埋戻し直後



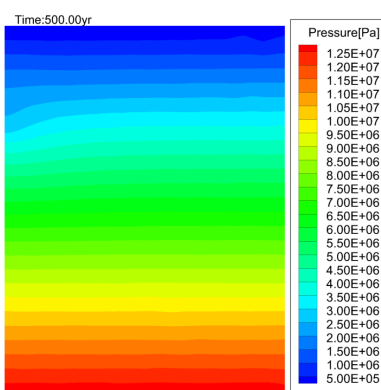
埋戻し 20 年後



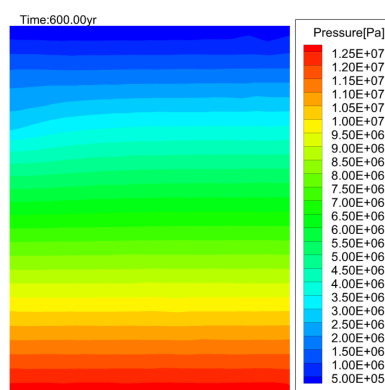
埋戻し 50 年後



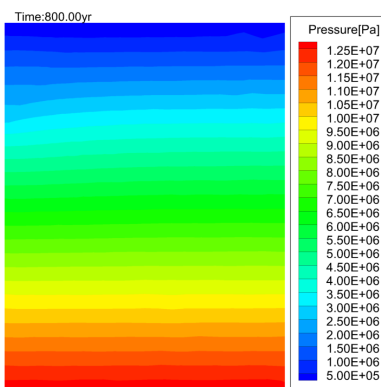
埋戻し 100 年後



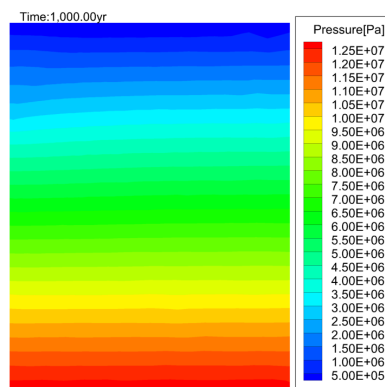
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

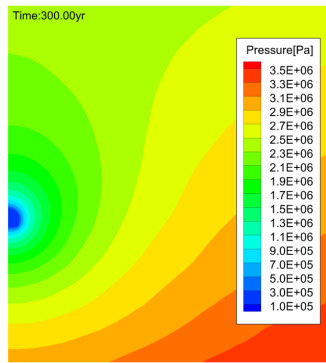


埋戻し 500 年後

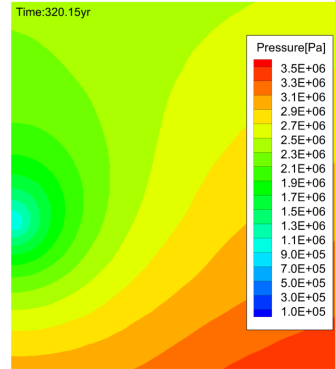


埋戻し 700 年後

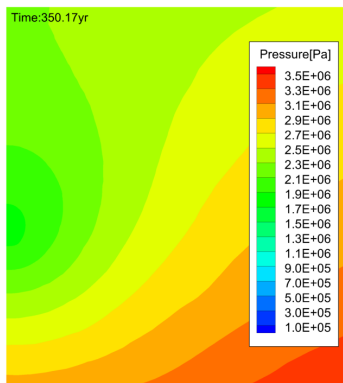
図 5.3-106 Case10 の圧力分布（モデル全体）



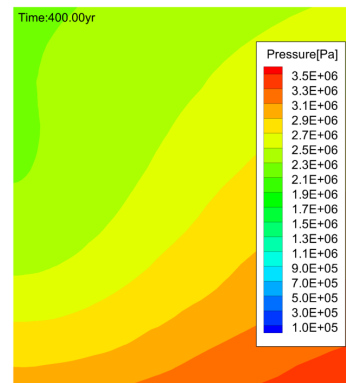
埋戻し直後



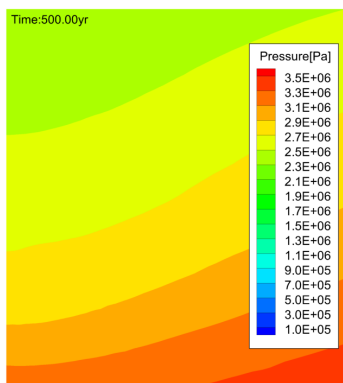
埋戻し 20 年後



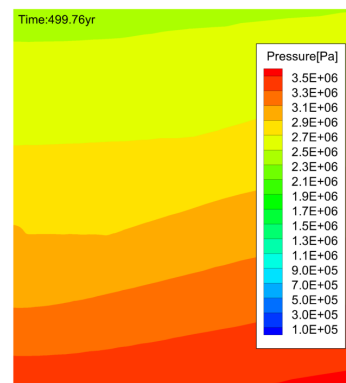
埋戻し 50 年後



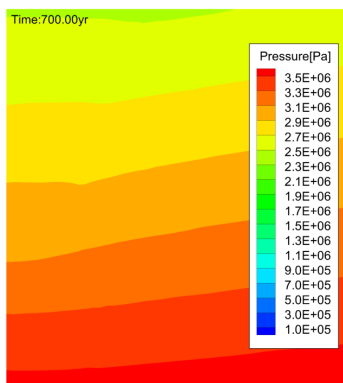
埋戻し 100 年後



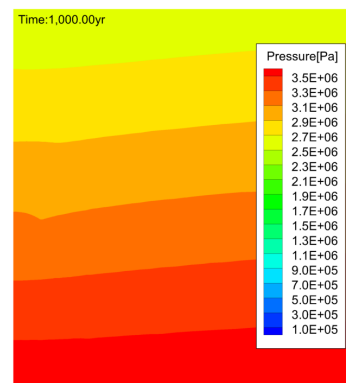
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

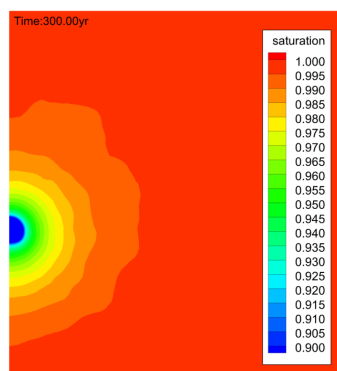


埋戻し 500 年後

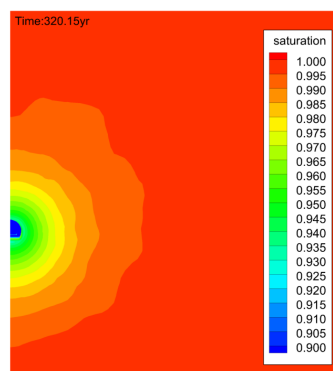


埋戻し 700 年後

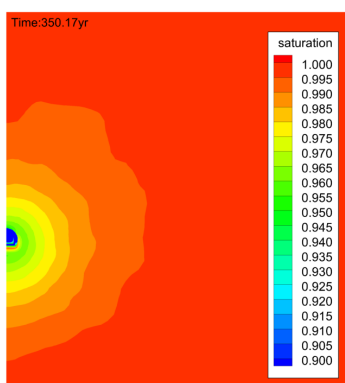
図 5. 3-107 Case10 の圧力分布（坑道周辺）



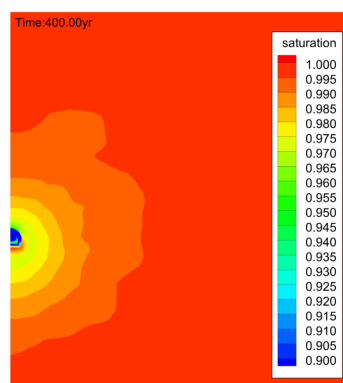
埋戻し直後



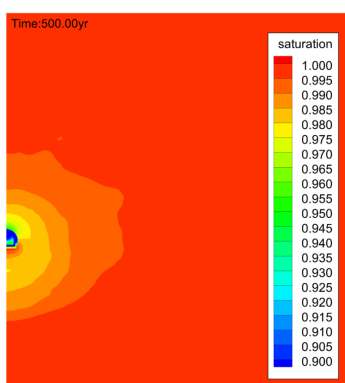
埋戻し 20 年後



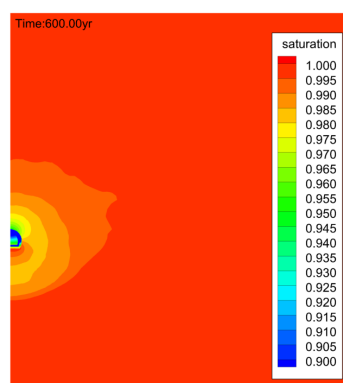
埋戻し 50 年後



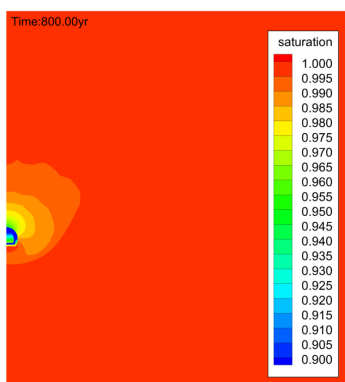
埋戻し 100 年後



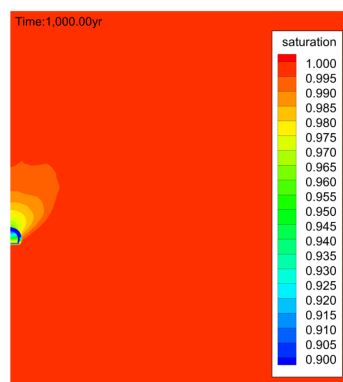
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

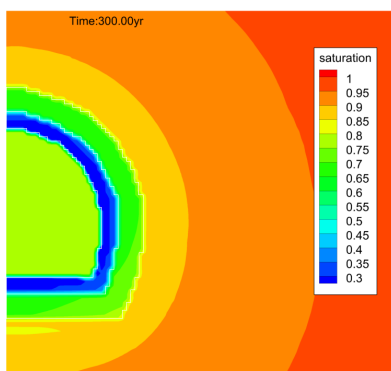


埋戻し 500 年後

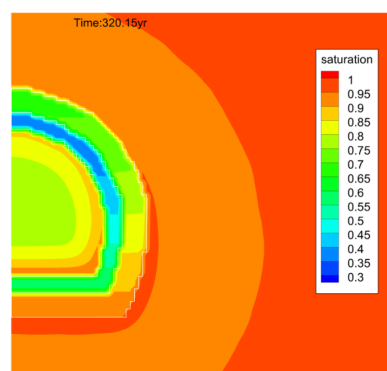


埋戻し 700 年後

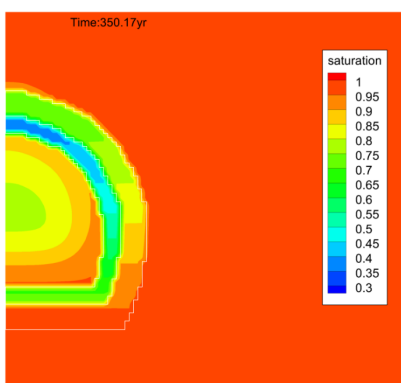
図 5.3-108 Case10 の飽和度分布（坑道周辺）



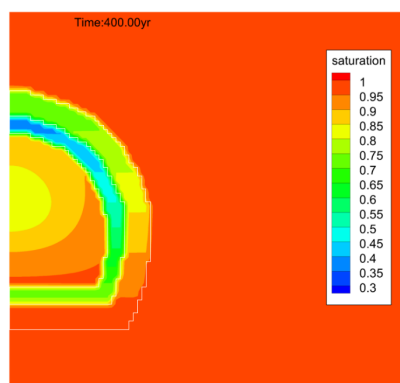
埋戻し直後



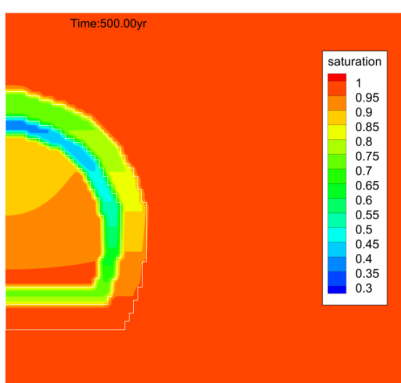
埋戻し 20 年後



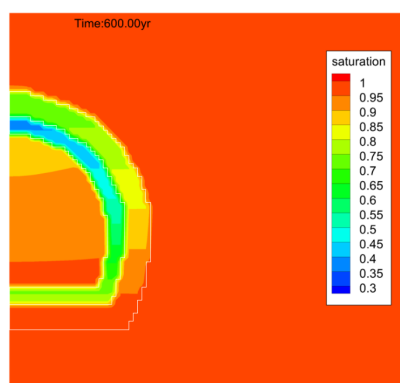
埋戻し 50 年後



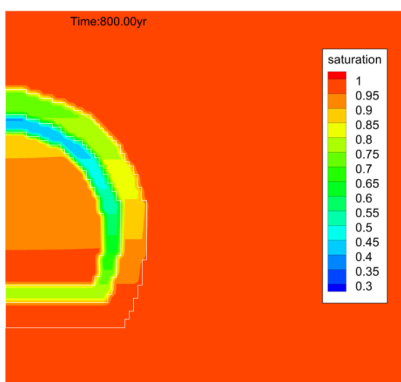
埋戻し 100 年後



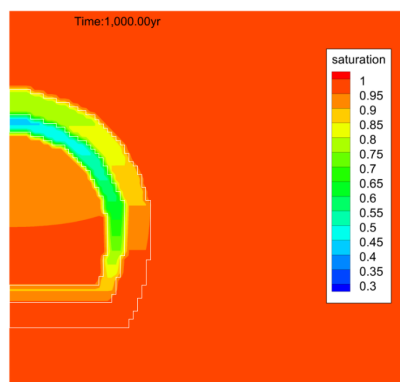
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後



埋戻し 500 年後



埋戻し 700 年後

図 5.3-109 Case10 の飽和度分布（坑道近傍）

単位間隙あたりの「気相の CH₄ のモル量」及び「気相の CH₄ と液相に溶解した CH₄ の合計モル量」

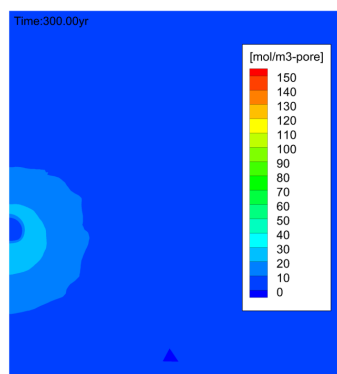
Case10の単位間隙あたりの気相のCH₄のモル量 C_{g,CH_4} の分布の変化を図 5.3-110と図 5.3-112に、単位間隙あたりの気相のCH₄と液相に溶解したCH₄の合計モル量 C_{g+l,CH_4} の分布の変化を図 5.3-111と図 5.3-113にそれぞれ示す。

間隙中の気相CH₄モル量の変化は、不飽和領域分布の変化にほぼ対応している。

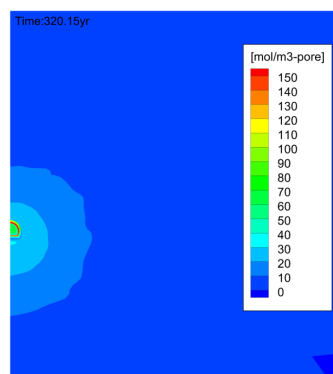
埋戻しから500年後までは、EDZ1及びEDZ2内の気相及び液相の合計CH₄モル量が増加している。これは、母岩から浸潤してきたCH₄を含む液相が圧力の低い坑道周辺に移動し、脱ガスしたCH₄がEDZ1及びEDZ中に移動するためと考えられる。

EDZ1及びEDZ2内の気相及び液相の合計CH₄モル量が埋戻しから500年後まで増加した後は徐々に減少しており、気相のCH₄が液相に再溶解し拡散していると考えられる。

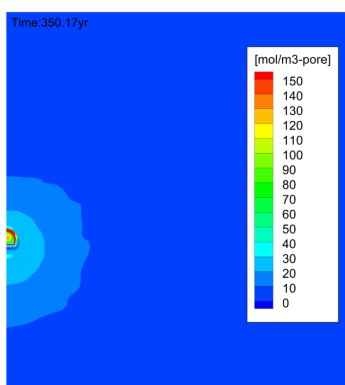
Case9（開放200年+埋戻し800年）と埋め戻してから同時刻の気相及び液相の合計CH₄モル量分布を比較すると、Case10（開放300年+埋戻し700年）の方が、気相及び液相の合計CH₄モル量が元の状態に戻る速度が遅い。これは、Case10の方がCase9よりも坑道開放期間が長く、埋戻し直後の坑道周辺の不飽和領域が広いためである。



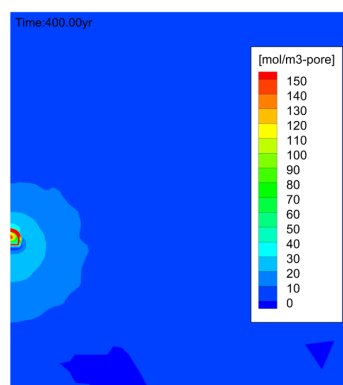
埋戻し直後



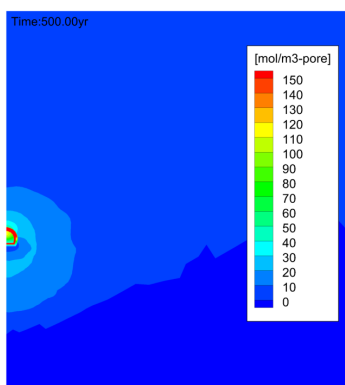
埋戻し 20 年後



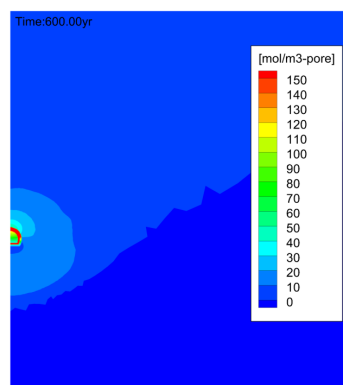
埋戻し 50 年後



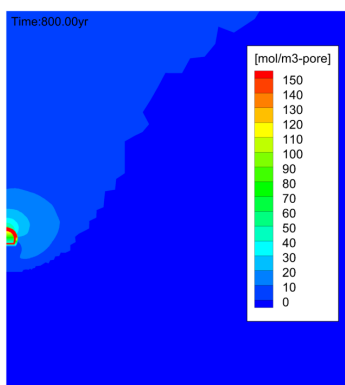
埋戻し 100 年後



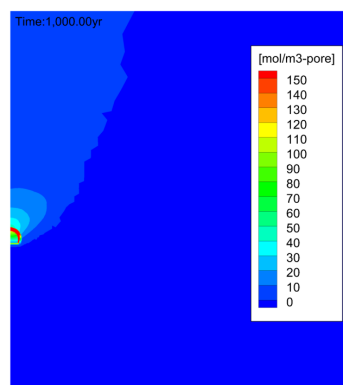
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

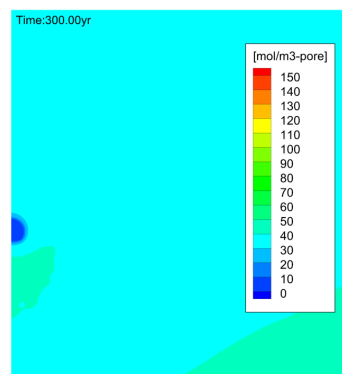


埋戻し 500 年後

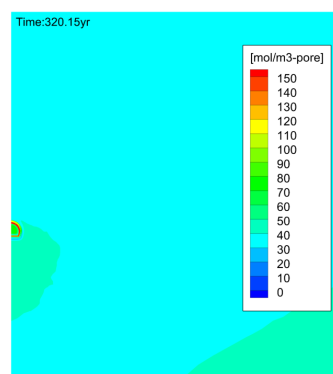


埋戻し 700 年後

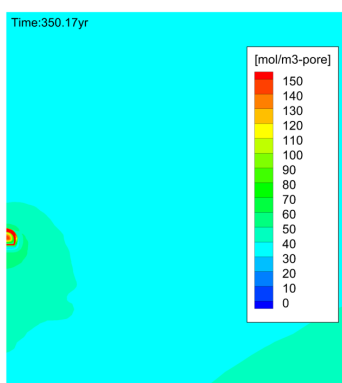
図 5.3-110 Case10 の単位間隙あたりの CH₄ のモル量分布（坑道周辺、気相）



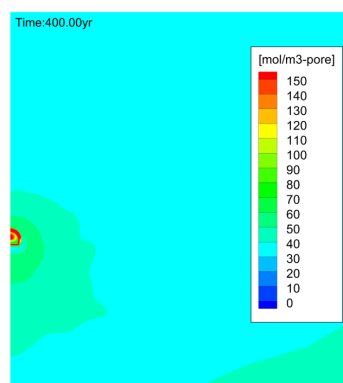
埋戻し直後



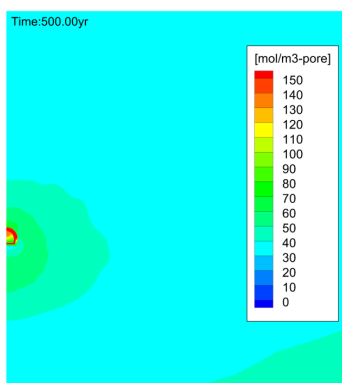
埋戻し 20 年後



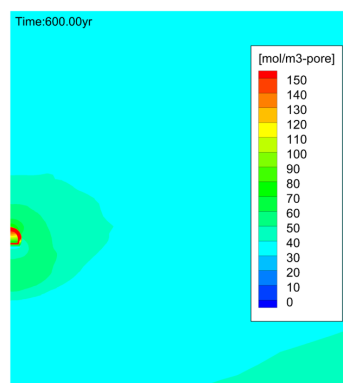
埋戻し 50 年後



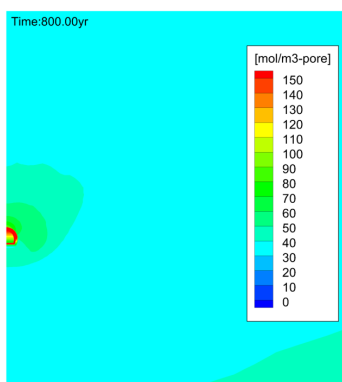
埋戻し 100 年後



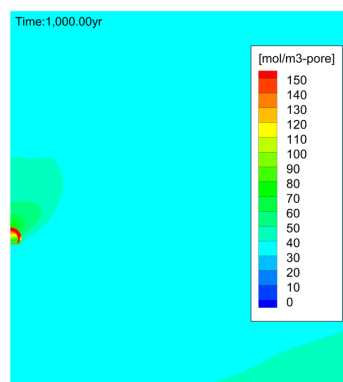
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

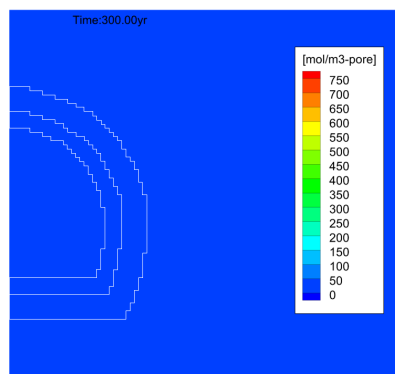


埋戻し 500 年後

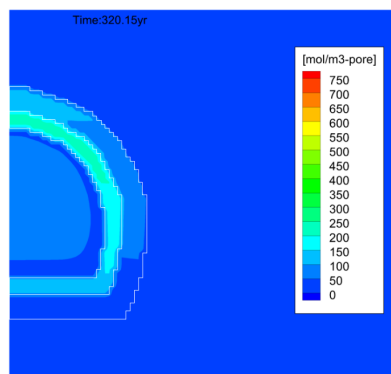


埋戻し 700 年後

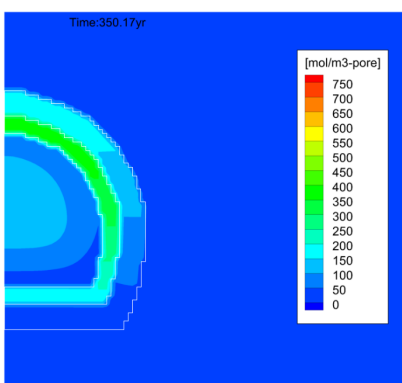
図 5.3-111 Case10 の単位間隙あたりの CH₄ のモル量分布（坑道周辺、気相+液相）



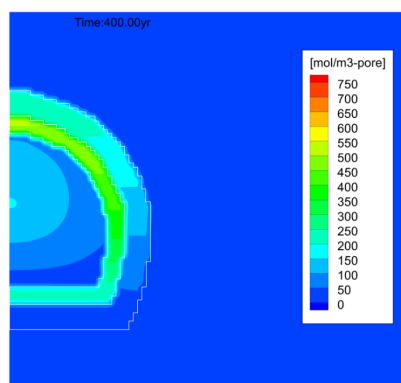
埋戻し直後



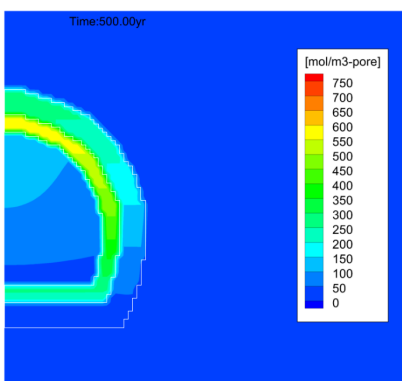
埋戻し 20 年後



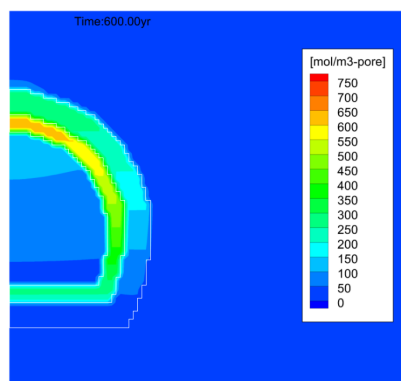
埋戻し 50 年後



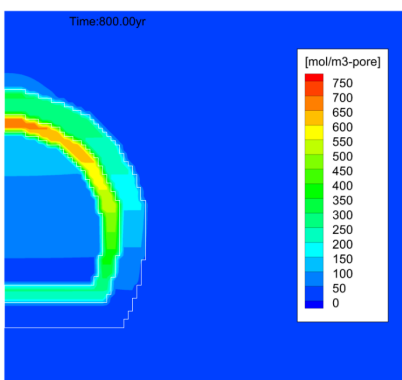
埋戻し 100 年後



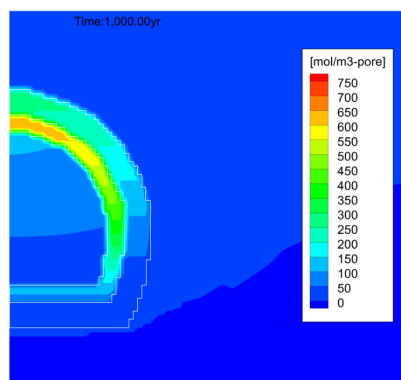
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

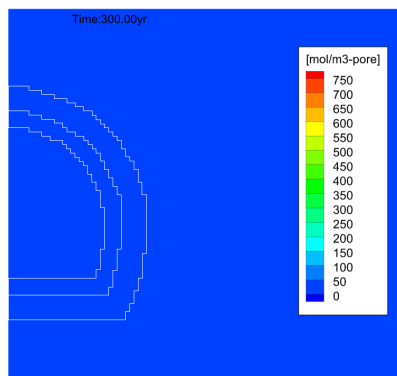


埋戻し 500 年後

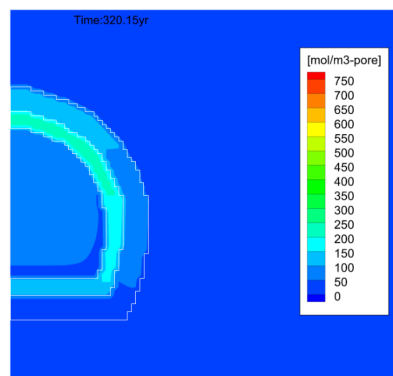


埋戻し 700 年後

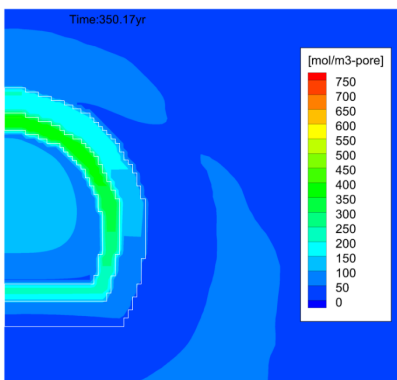
図 5.3-112 Case10 の単位間隙あたりの CH_4 のモル量分布（坑道近傍、気相）



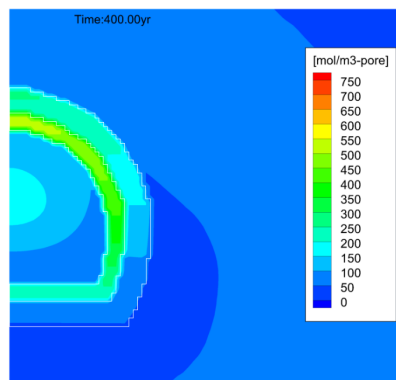
埋戻し直後



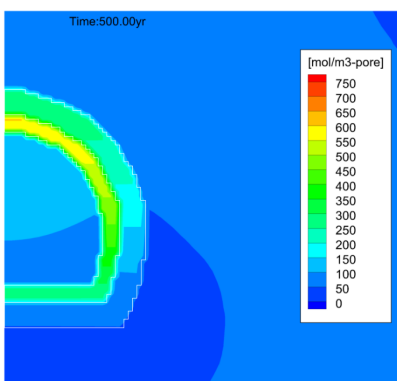
埋戻し 20 年後



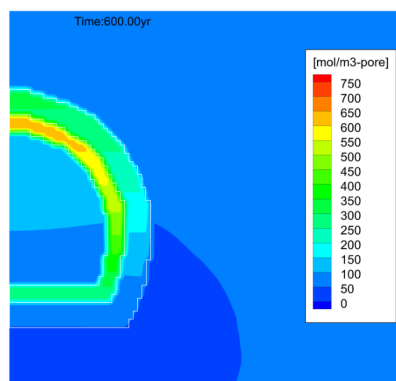
埋戻し 50 年後



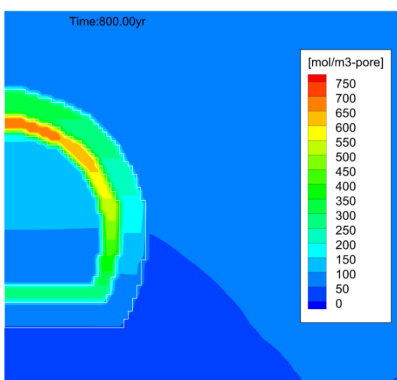
埋戻し 100 年後



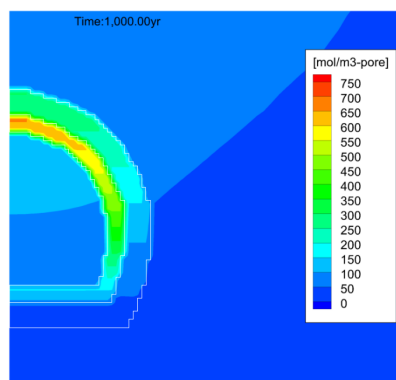
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後



埋戻し 500 年後



埋戻し 700 年後

図 5.3-113 Case10 の単位間隙あたりの CH₄ のモル量分布（坑道近傍、気相+液相）

単位間隙あたりの「気相の CO₂ のモル量」及び「気相の CO₂ と液相に溶解した CO₂ の合計モル量」

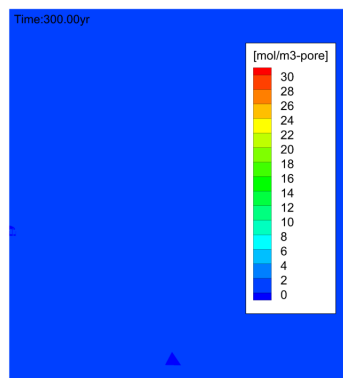
Case10 の単位間隙あたりの気相の CO₂ のモル量 C_{g,CO_2} の分布の変化を図 5.3-114 と図 5.3-116 に、単位間隙あたりの気相の CO₂ と液相に溶解した CO₂ の合計モル量 C_{g+l,CO_2} の分布の変化を図 5.3-115 と図 5.3-117 にそれぞれ示す。

間隙中の気相 CO₂ モル量の変化は、不飽和領域分布の変化にほぼ対応している。

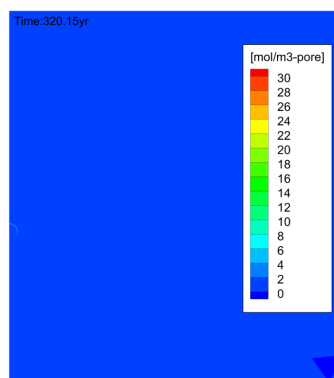
埋戻しから 500 年後までは、EDZ1 及び EDZ2 内の気相及び液相の合計 CO₂ モル量が増加している。これは、母岩から浸潤してきた CO₂ を含む液相が圧力の低い坑道周辺に移動し、脱ガスした CO₂ が EDZ1 及び EDZ2 中に移動するためと考えられる。

EDZ1 及び EDZ2 内の気相及び液相の合計 CO₂ モル量が埋戻しから 500 年後まで増加した後は徐々に減少しており、気相の CO₂ が液相に再溶解し拡散していると考えられる。

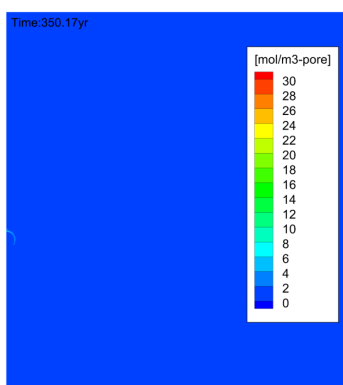
Case9（開放 200 年+埋戻し 800 年）と埋め戻してから同時刻の気相及び液相の合計 CO₂ モル量分布を比較すると、Case10（開放 300 年+埋戻し 700 年）の方が、気相及び液相の合計 CO₂ モル量が元の状態に戻る速度が遅い。これは、Case10 の方が Case9 よりも坑道開放期間が長く、埋戻し直後の坑道周辺の不飽和領域が広いためである。



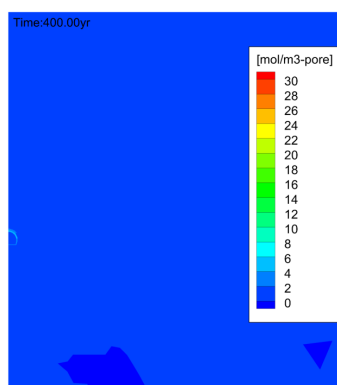
埋戻し直後



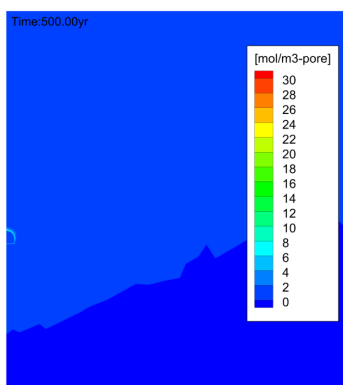
埋戻し 20 年後



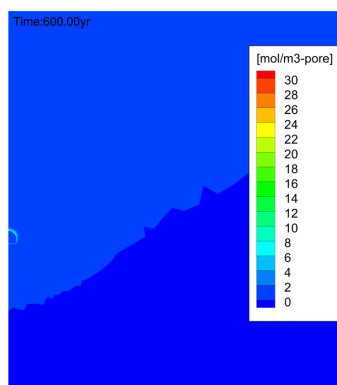
埋戻し 50 年後



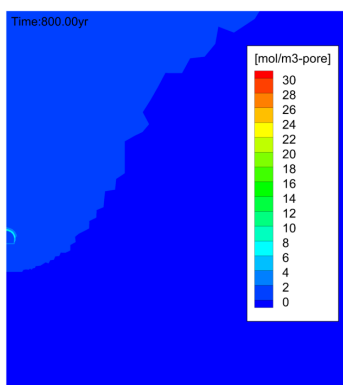
埋戻し 100 年後



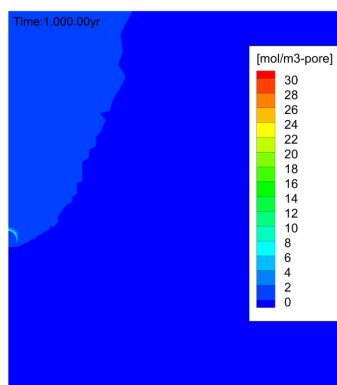
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

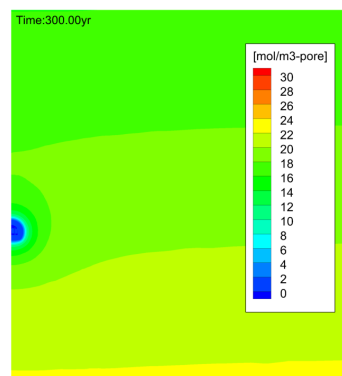


埋戻し 500 年後

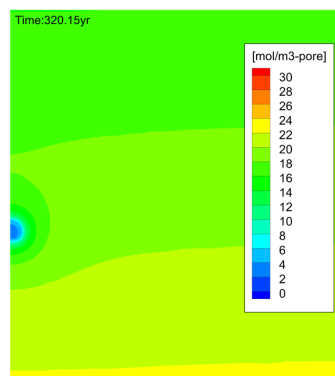


埋戻し 700 年後

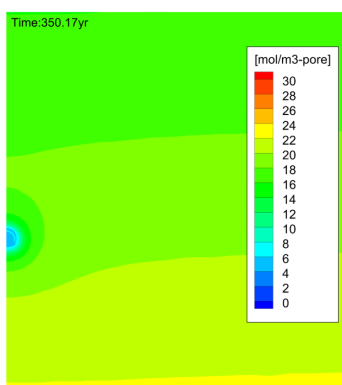
図 5.3-114 Case10 の単位間隙あたりの CO_2 のモル量分布（坑道周辺、気相）



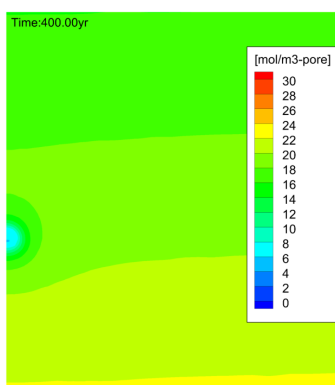
埋戻し直後



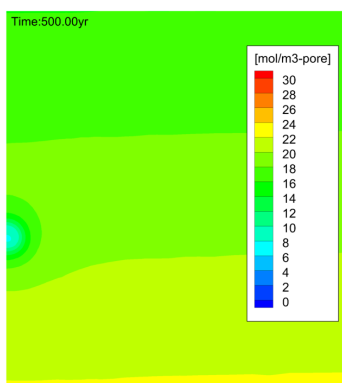
埋戻し 20 年後



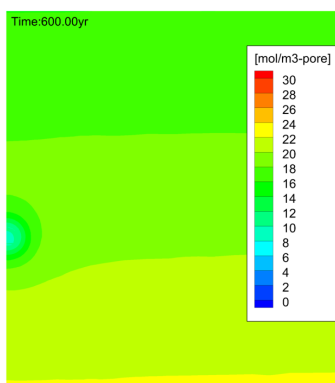
埋戻し 50 年後



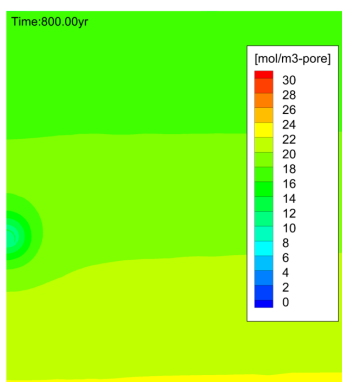
埋戻し 100 年後



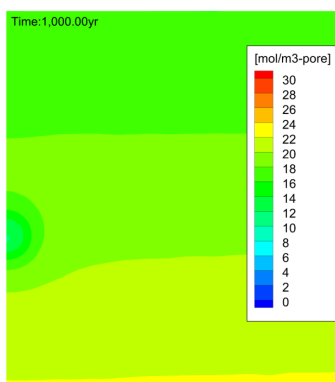
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

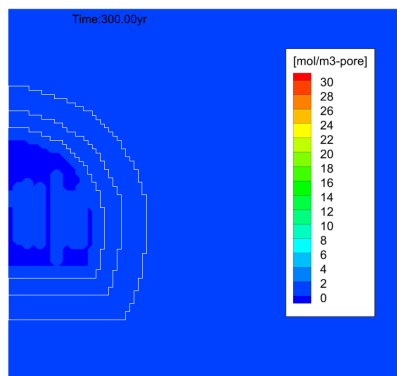


埋戻し 500 年後

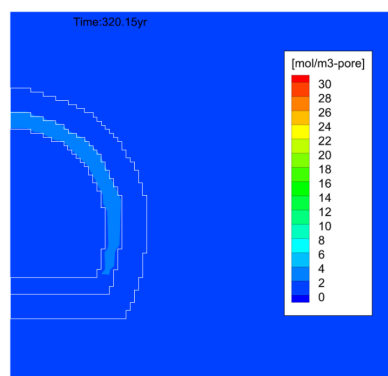


埋戻し 700 年後

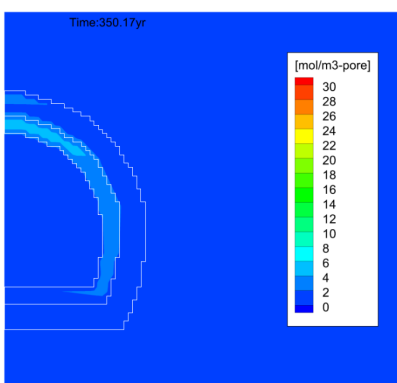
図 5.3-115 Case10 の単位間隙あたりの CO₂ のモル量分布（坑道周辺、気相+液相）



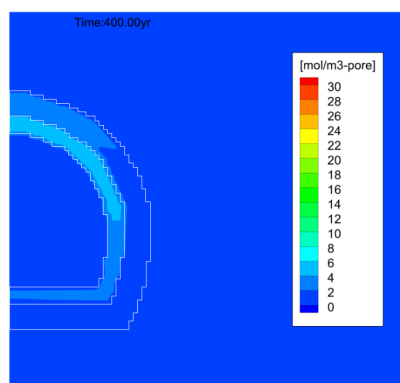
埋戻し直後



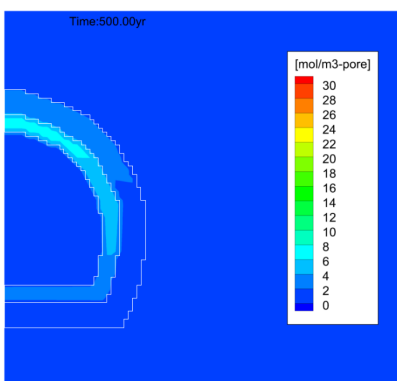
埋戻し 20 年後



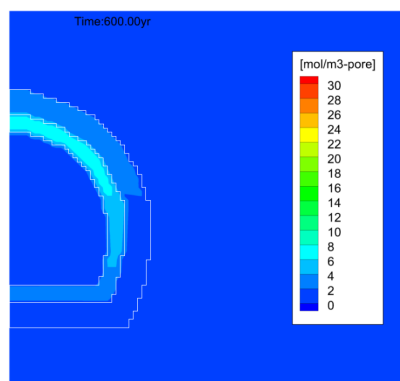
埋戻し 50 年後



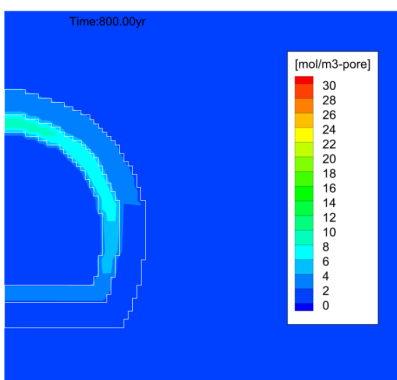
埋戻し 100 年後



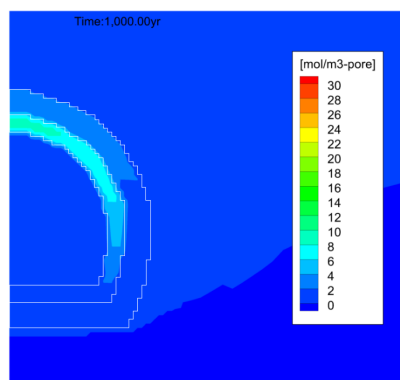
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

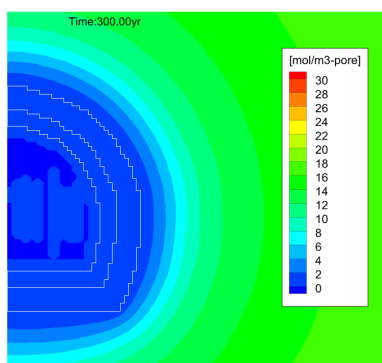


埋戻し 500 年後

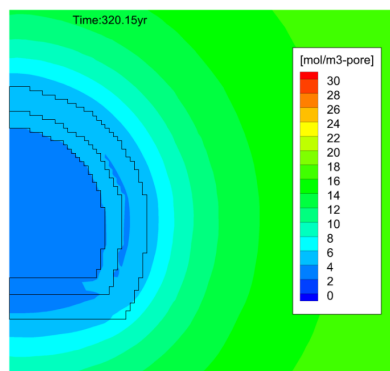


埋戻し 700 年後

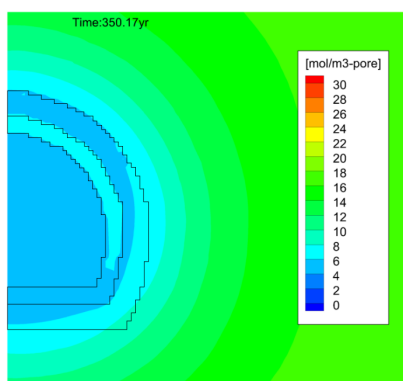
図 5.3-116 Case10 の単位間隙あたりの CO_2 のモル量分布（坑道近傍、気相）



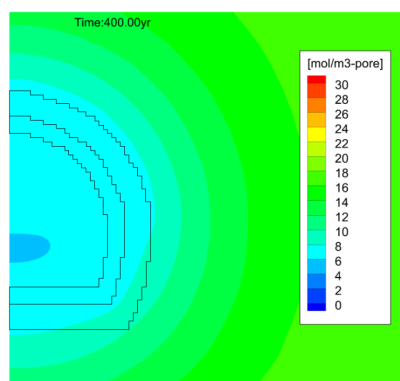
埋戻し直後



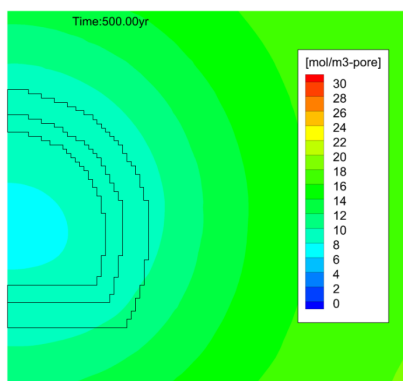
埋戻し 20 年後



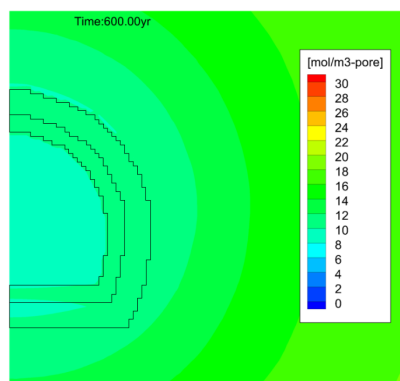
埋戻し 50 年後



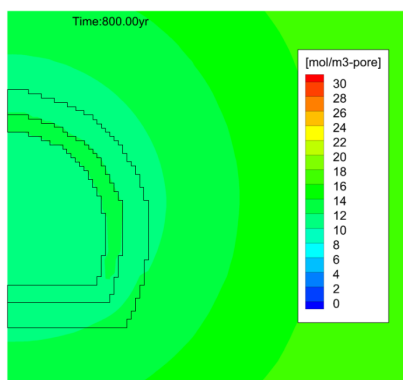
埋戻し 100 年後



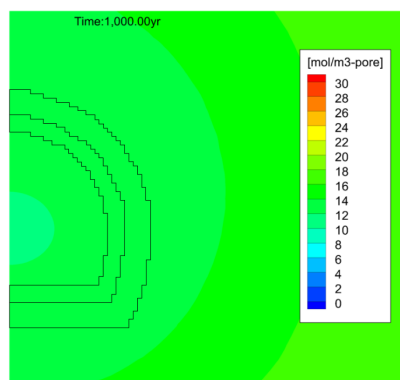
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後



埋戻し 500 年後



埋戻し 700 年後

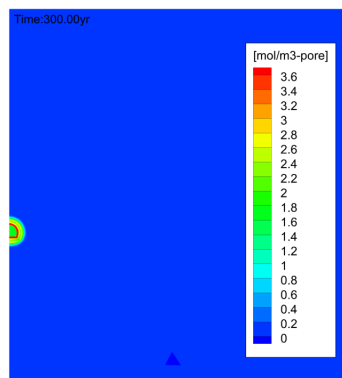
図 5.3-117 Case10 の単位間隙あたりの CO₂ のモル量分布（坑道近傍、気相+液相）

単位間隙あたりの「気相の O_2 のモル量」及び「気相の O_2 と液相に溶解した O_2 の合計モル量」

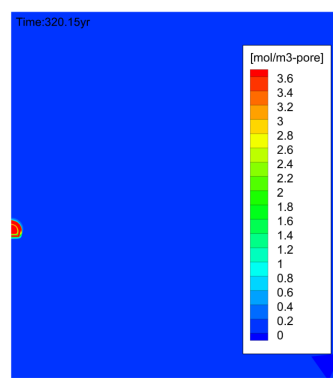
Case10 の単位間隙あたりの気相の O_2 のモル量 C_{g-O_2} の分布の変化を図 5.3-118 と図 5.3-120 に、単位間隙あたりの気相の O_2 と液相に溶解した O_2 の合計モル量 C_{g+L-O_2} の分布の変化を図 5.3-119 と図 5.3-121 にそれぞれ示す。

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

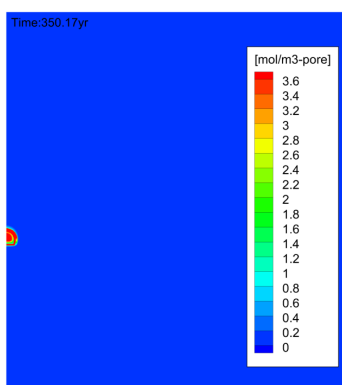
Case9（開放 200 年+埋戻し 800 年）と埋め戻してから同時刻の気相及び液相の合計 O_2 モル量分布を比較すると、Case10（開放 300 年+埋戻し 700 年）の方が、気相及び液相の合計 O_2 モル量が元の状態に戻る速度が遅い。これは、Case10 の方が Case9 よりも坑道開放期間が長く、埋戻し直後の坑道周辺の不飽和領域が広いためである。



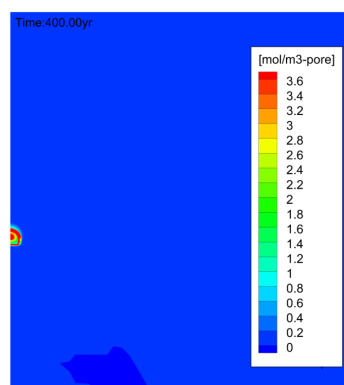
埋戻し直後



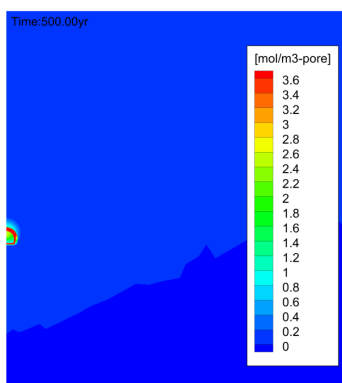
埋戻し 20 年後



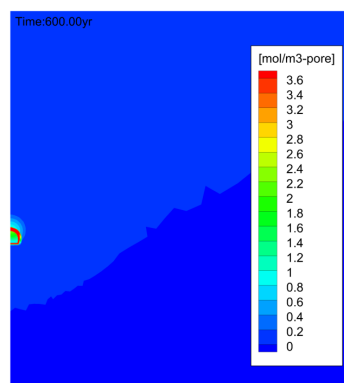
埋戻し 50 年後



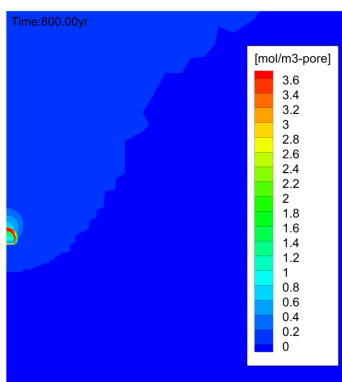
埋戻し 100 年後



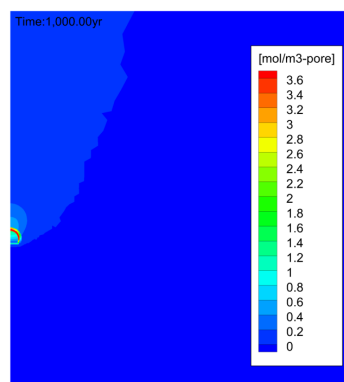
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

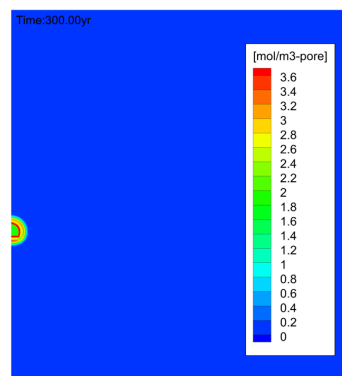


埋戻し 500 年後

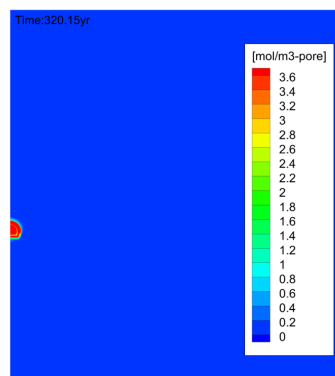


埋戻し 700 年後

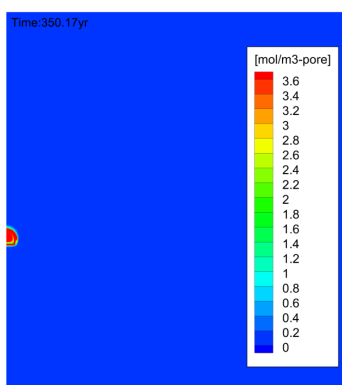
図 5.3-118 Case10 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布（坑道周辺、気相）



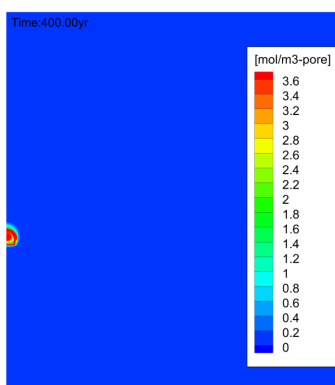
埋戻し直後



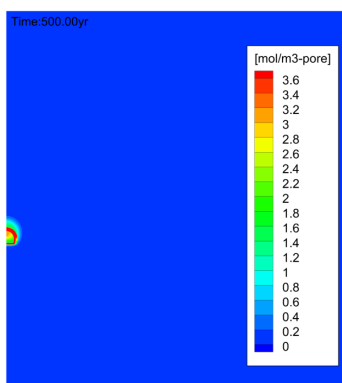
埋戻し 20 年後



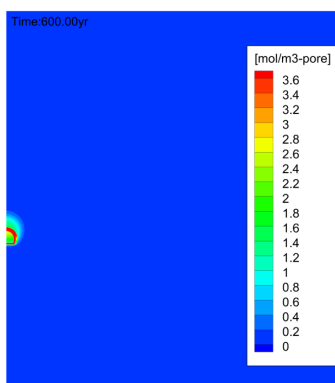
埋戻し 50 年後



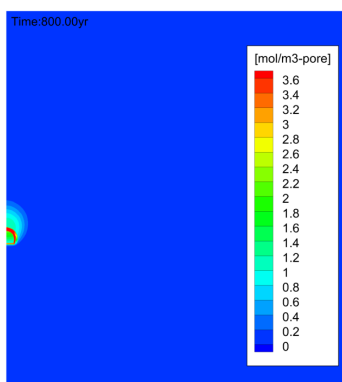
埋戻し 100 年後



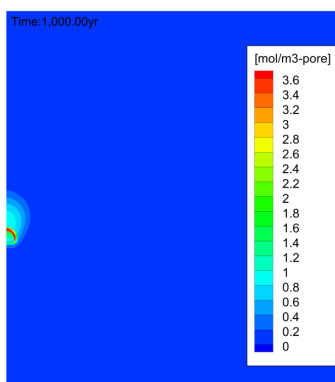
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

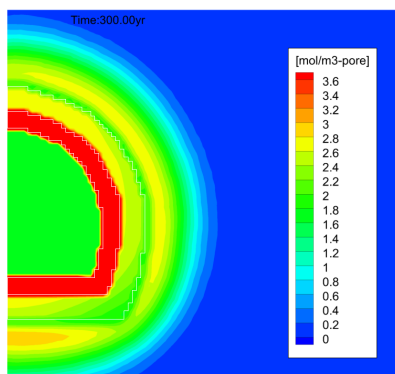


埋戻し 500 年後

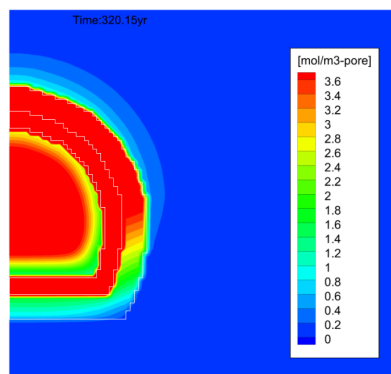


埋戻し 700 年後

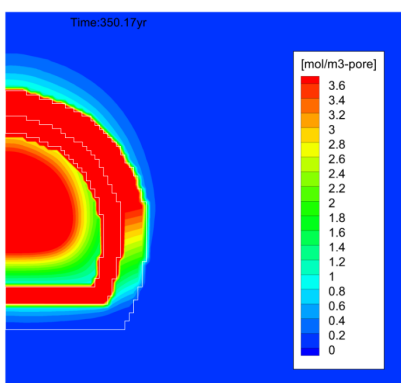
図 5.3-119 Case10 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布 (坑道周辺、気相+液相)



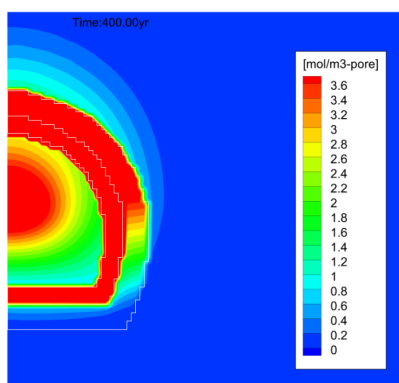
埋戻し直後



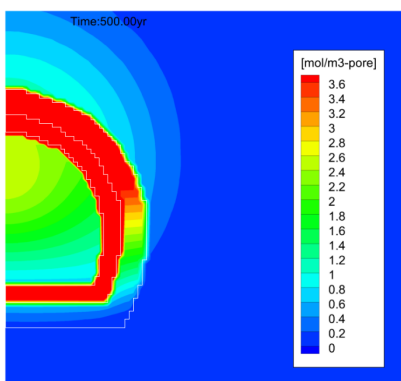
埋戻し 20 年後



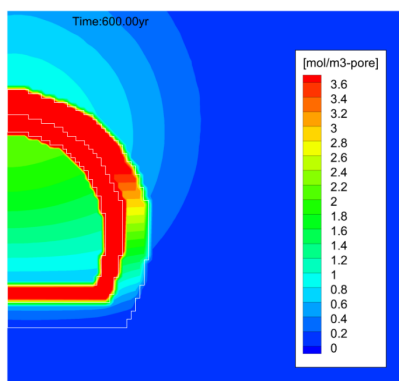
埋戻し 50 年後



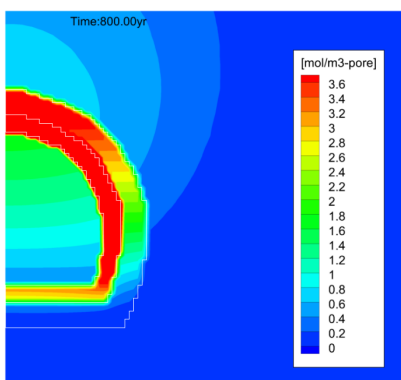
埋戻し 100 年後



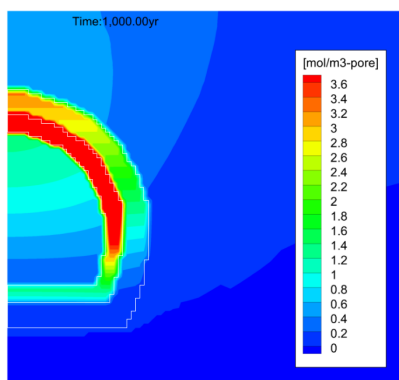
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後

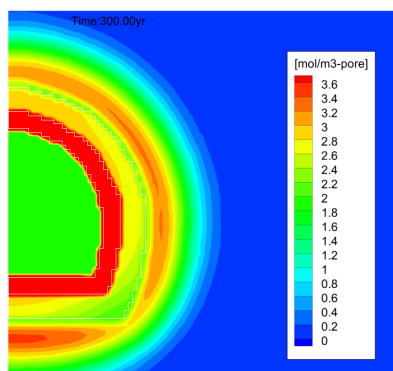


埋戻し 500 年後

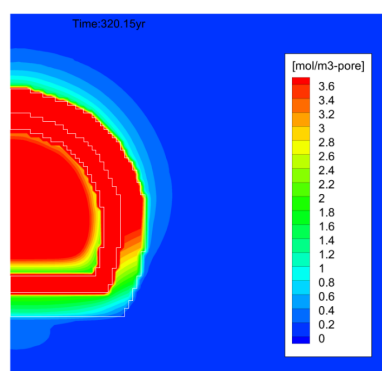


埋戻し 700 年後

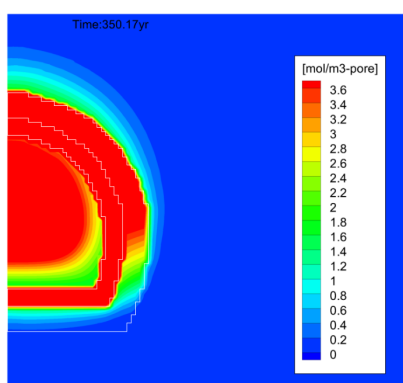
図 5.3-120 Case10 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布（坑道近傍、気相）



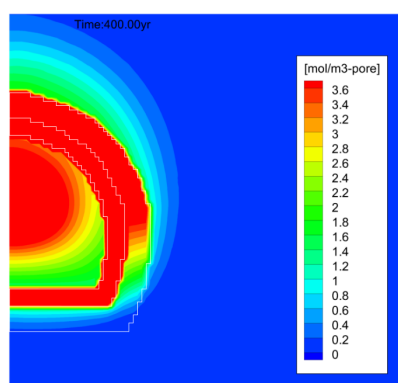
埋戻し直後



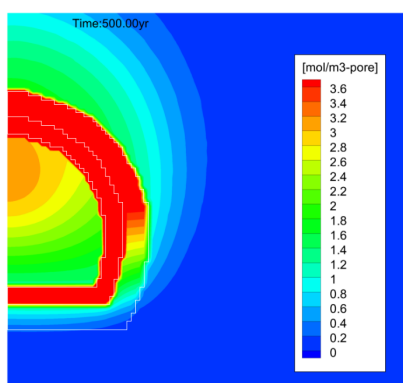
埋戻し 20 年後



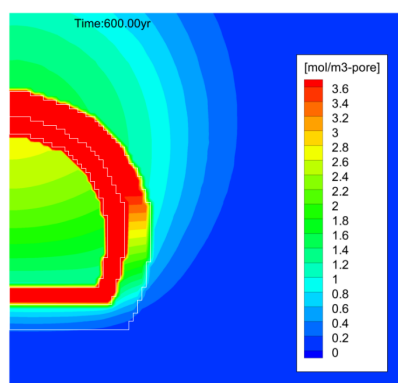
埋戻し 50 年後



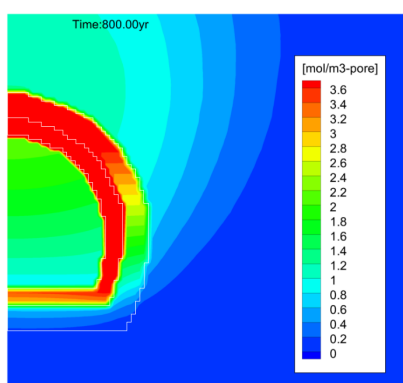
埋戻し 100 年後



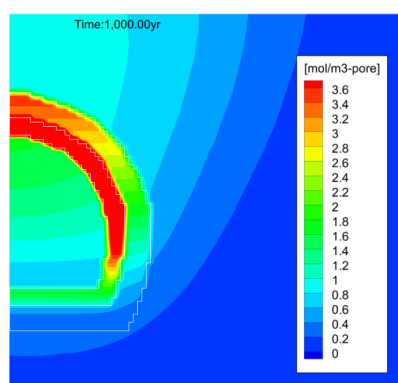
埋戻し 200 年後



埋戻し 300 年後



埋戻し 500 年後



埋戻し 700 年後

図 5.3-121 Case10 の単位間隙あたりの O_2 のモル量分布 (坑道近傍、気相+液相)

(iii) 水理学的長期変化解析の考察とまとめ

坑道開放状態の水理学的長期変化解析では、時間の経過とともに、坑道周辺の圧力低下領域が拡大し、坑道周辺の飽和度低下領域が坑道を中心とする同心円状に拡大した。また、時間の経過とともに、坑道周辺の間隙に含まれる気相 CH_4 モル量、気相 CO_2 モル量が増加し、その領域が坑道外側の岩盤へと拡大した。これは、高圧の地下水中に溶解していたガスが、坑道周辺の圧力低下領域の拡大によって低圧になることにより気化する領域が増えたためと考えられる。加えて、坑道掘削後、坑道近傍の EDZ に気相の O_2 が坑道から侵入し、それが徐々に岩盤へと拡大していく。なお、EDZ は、 CH_4 と CO_2 が気相と液相ともにほぼ存在しないが、 O_2 は存在している。これは、気化した CH_4 及び CO_2 が絶対浸透率が低い岩盤から絶対浸透率が高い EDZ へ移動するよりも、坑道から絶対浸透率が高い EDZ に侵入しやすいことを示していると考えられる。

坑道開放から 50 年、100 年、200 年、300 年後のそれぞれの状態を初期条件とし、坑道埋戻し後の水理学的長期変化解析を実施した。以下に、坑道周辺の回復までの変遷結果を示す。

圧力について述べると、時間の経過とともに坑道周辺の圧力が回復した。坑道開放期間が違っても、同じ埋戻し状態の期間において、圧力は、オーダーが変わるほどの差は無いと考えられる。

飽和度について述べると、不飽和領域は徐々に減少した。EDZ の飽和度の上昇は、埋戻し材よりも遅れた。特に EDZ の上部は不飽和領域が遅くまで残りやすい。また、EDZ2 よりも EDZ1 の方が飽和度の上昇が遅い。飽和する順番が埋戻し材、EDZ2、EDZ1 の順番になる理由は、同じ飽和度では、サクシオン圧の絶対値が、埋戻し材 > EDZ2 > EDZ1 であり、この順番で水を吸いやすいためである。坑道開放期間が違っても、同じ埋戻し状態の期間において、飽和度は、オーダーが変わるほどの差は無い。

CH_4 及び CO_2 について述べると、埋戻しからある程度の期間、例えば、Case7 であれば 200 年まで、Case10 であれば 500 年の間は、EDZ1 及び EDZ2 内の気相及び液相の合計 CH_4 モル量及び合計 CO_2 モル量が増加している。これは、母岩から浸潤してきた CH_4 を含む液相が圧力の低い坑道周辺に移動し、脱ガスした CH_4 が EDZ1 及び EDZ 中に移動するためと考えられる。EDZ にて増加した気相及び液相の合計 CH_4 モル量及び合計 CO_2 モル量は、徐々に減少しており、気相の CH_4 及び CO_2 が液相に再溶解し拡散していると考えられる。

O_2 について述べると、埋戻しから 20 年後にかけて、埋戻し材及び EDZ2 内の気相及び液相の合計 O_2 モル量が増加している。この増加は、EDZ1 や坑道下部の岩盤の O_2 が移動してきたことによるものと推察される。50 年以降は埋戻し材及び EDZ2 内にて気相及び液相の合計 O_2 モル量が減少しており、気相の O_2 が液相に再溶解し拡散していると考えられる。なお、液相に再溶解した状態 O_2 は坑道の上方に移動する。また、Case7 から Case10 にすべてにおいて坑道開放状態と埋戻し状態合わせて 1000 年後においても、母岩中に単位間隙当たりの気相及び液相の合計 O_2 モル量は $0.4 \text{ mol/m}^3\text{-pore}$ 以上である。

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

5.3.2 坑道周辺地質環境の長期変化解析に基づく安全評価への影響に関する概念検討

ここでは、2020 年度～2022 年度まで実施した坑道周辺地質環境の長期変化に関する解析結果

を分析することで、安全評価上考慮する必要がある影響因子について、既存の FEP リスト等を参考としつつ抽出するとともに、その影響の大きさ等についての概念的な検討を行った。

(1) 検討方法

(a) 参照した FEP リストと安全機能との関連性

この概念検討では、まず、既存の FEP リストとして、NUMO が包括的技術報告書（NUMO, 2021）において整理した「NUMO FEP」および、FEP と処分場の構成要素および安全機能の関連性について参照・整理することにした。

NUMO の包括的技術報告書によると、高レベル放射性廃棄物処分場の安全機能と構成要素の関係は、表 5.3-14 のように整理されている。

表 5.3-14 高レベル放射性廃棄物処分場の安全機能と構成要素の関係

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

2020 年度～2022 年度までの坑道周辺地質環境の長期変化解析の対象としているのは、すべての構成要素でなく、「地質環境」と「埋戻し材」の 2 つである。また、基本概念の内、「隔離」とは、廃棄物と生活圏との物理的な距離を確保することで、安全機能を達成するものであるため、回収可能性維持の観点からは直接関連はない。よって、「隔離」に関連する安全機能については、検討対象外とし、「地質環境」に期待されている以下の安全機能について検討することとした。

- 放射性物質の溶解の抑制
- 遅い地下水流速による放射性物質の移行の抑制
- 放射性物質の吸着
- 放射性物質の分散

また、「埋戻し材」については、以下の安全機能について検討することとした。

- 坑道およびその周辺が卓越した放射性物質の移行経路となることの抑制

NUMO の包括的技術報告書では、これらの安全機能と状態変数の因果関係について整理が行われており、FEP の状態変数への影響の有無を検討して、各状態変数と FEP の関係を状態変数

関連図に追記した図（要因分析図）を作成している。要因分析図では、状態変数に影響を有する FEP が状態変数と線で結んで示されている。NUMO によって作成された状態変数の例を図 5.3-122 に示す。また、NUMO は、要因分析で抽出した FEP が、状態変数を介して安全機能への影響を及ぼす可能性やその程度についても分析し、影響分析表としてまとめている。本検討における解析結果の分析には、これらの要因分析図や影響分析表を参照することにする。

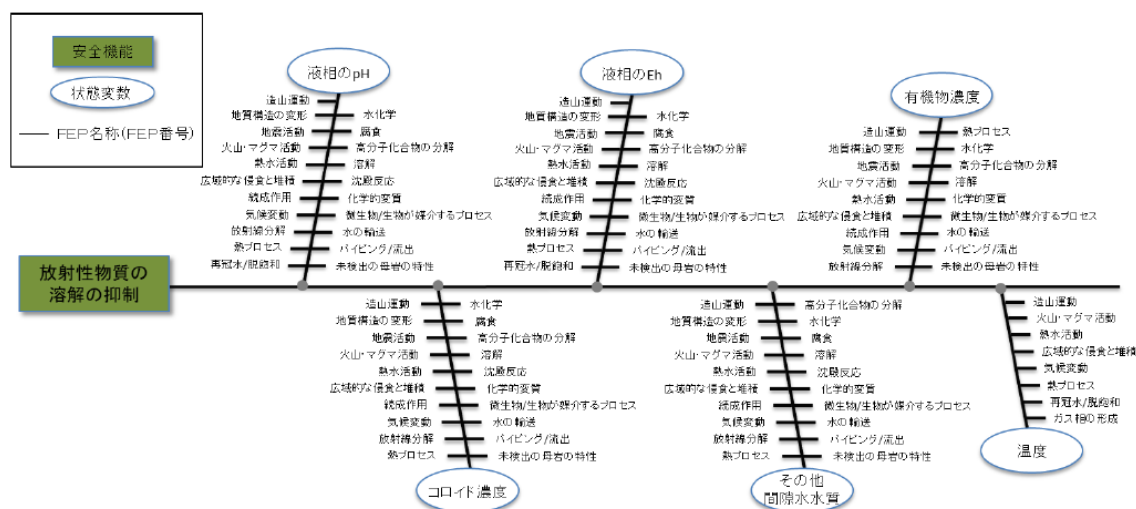


図 5.3-122 地質環境の安全機能「放射性物質の溶解の抑制」に関する要因分析図

(b) 検討方法の概要

前章までの解析結果、例えば、力学的長期変化解析から直接得られる情報（物理量）としては、岩盤の変位、応力、ひずみが得られる。また、EDZ の範囲や透水係数が得られる。要因分析図等に基づいて、安全機能と関連性を有する FEP の中から、解析から得られる情報が影響を及ぼしうるものを抽出する。そして、長期変化解析の結果を参考にして、FEP への影響、その FEP が関連する状態変数への影響について検討することにした。ただし、解析から得られる情報が、FEP や状態変数として、そのまま表れているとは限らない場合もあることから、影響の検討は定性的なものになる可能性もある。

(2) 安全評価への影響に関する概念検討

(a) 力学的長期変化解析に基づく概念検討

(i) 検討の方針と手順

2022 年度までに実施した坑道周辺地質環境の長期変化解析の解析では、坑道埋戻し後の力学的長期変化解析は行っていないことから、2021 年度に実施した坑道開放期間 1,000 年間の解析結果を分析し検討を行った。

力学的長期変化解析で得られる情報は、支保工や岩盤の変位、ひずみ、応力の他、EDZ の範囲や透水係数も評価している。このため、まず、これらの情報が要因分析図の FEP や状態変数として、現れているかを確認し、現れている場合は、その FEP や状態変数は、本解析で得られた力学的情報の影響を受け得るものとして抽出した。また、直接現れていない場合には、要因分析図の FEP や状態変数に対して、得られた情報が影響を与える可能性があるのか否かを吟味し、FEP や状態変数を抽出することにした。

この結果を踏まえ、力学的長期変化解析からその影響度を定量的、または定性的に評価できる

か整理するとともに、FEP や状態変数に影響を及ぼす力学的長期変化解析で得られる情報から、FEP や状態変数への影響度の評価上重要と思われる解析用パラメータについても示し、最後に、力学的長期変化解析で得られる情報が、FEP や状態変数にどのような影響を及ぼすのかを定量的、あるいは定性的に示した。以降その結果について述べる。

(ii) 力学解析で得られる情報と抽出された FEP または状態変数との関連性

これまでの検討で実施した力学的長期変化解析では、支保工や岩盤の変位、応力、ひずみの経時変化、EDZ の範囲や透水係数の経時変化も得られているが、坑道埋戻し後の力学的長期変化解析を行っていないため、埋戻し材の情報（物理量）は得られていない。よって、包括的技術報告書に示された NUMO の要因分析図の内、「地質環境」に関するものを対象にして、FEP または状態変数の抽出を行った。

「地質環境」に関する 4 つの要因分析図と影響分析表の記載内容を参照し、力学的長期変化解析で得られる情報（物理量）と、「遅い地下水流速による放射性物質の移行の抑制」と「放射性物質の分散」の要因分析図を構成する FEP の内、「クリープ」と「処分場の力学的影響」が関連するものとした。さらに、影響分析表を参照すると、「クリープ」については、岩盤のクリープ変形の時間的変遷や分散・透水性への影響についての記載が、「処分場の力学的影響」については、坑道周辺の EDZ は核種移行に影響を与える可能性があることや、止水プラグ等による工学的対策に関する記載がなされている。そして、この「クリープ」と「処分場の力学的影響」は、いずれも状態変数の「間隙構造」に関連付けられている。「遅い地下水流速による放射性物質の移行の抑制」と「放射性物質の分散」に関する要因分析図と抽出された FEP または状態変数の関連を図 5.3-123 と図 5.3-124 に示す。これらの図において、力学解析で得られる情報の影響を受けると抽出された FEP に桃色の下線が付いており、それと関連する状態変数は、桃色の線で囲まれている。

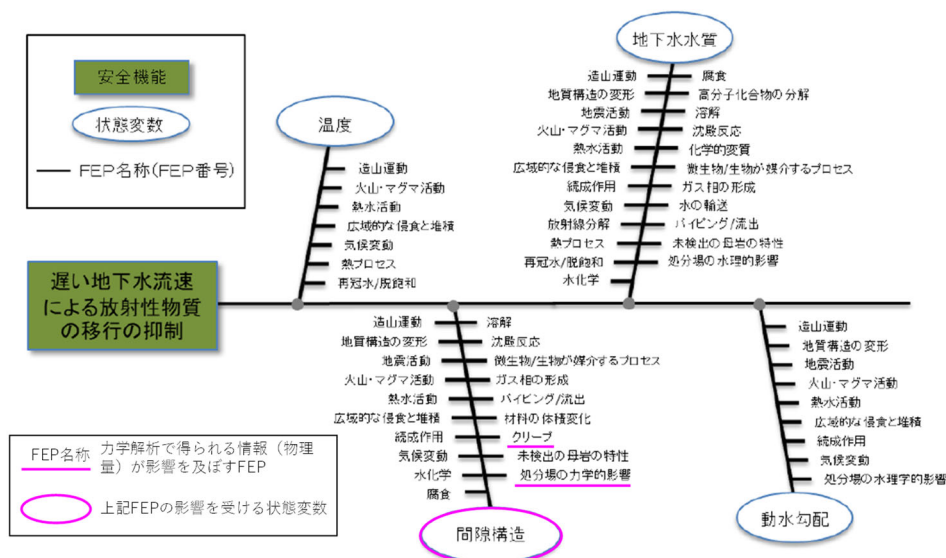


図 5.3-123 地質環境の安全機能「遅い地下水流速による放射性物質の移行の抑制」に関する要因分析図

(力学解析で得られる情報が影響を及ぼす FEP に下線を加筆)

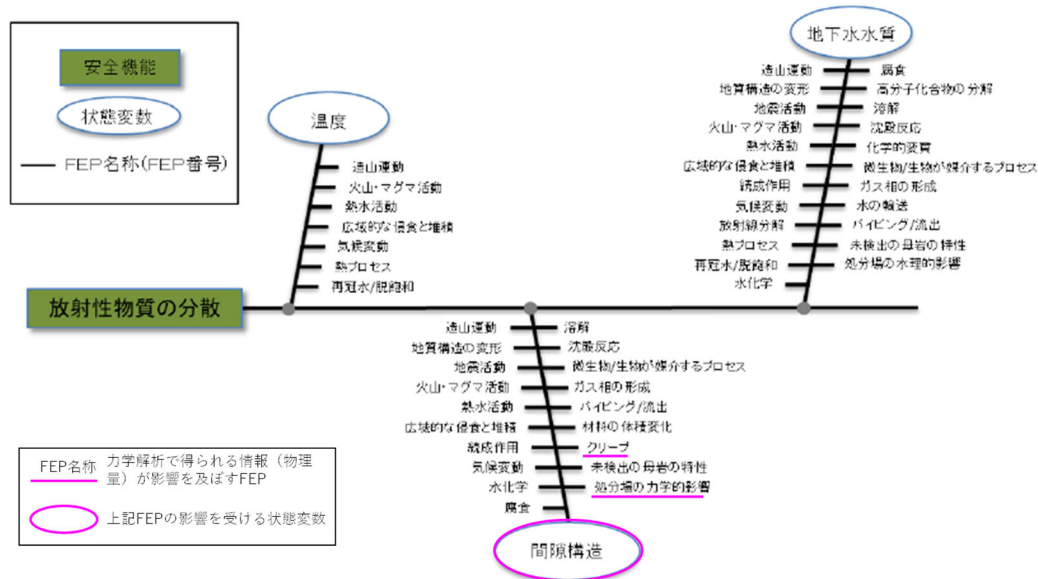


図 5.3-124 地質環境の安全機能「放射性物質の分散」に関する要因分析図
(力学解析で得られる情報が影響を及ぼす FEP に下線を加筆)

以上の結果をまとめたものを表 5.3-15 に示す。同表で、「一次的」としているものは、力学的長期変化解析により直接得られる情報であり、二次的とあるのは、その解析の情報と他の情報と組み合わせることにより得られるものであることを示している。また、影響度の評価が定性的・定量的に可能か否か、評価上重要と思われる解析用パラメータについても併せて整理した（表 5.3-16）。

表 5.3-15 力学解析で得られる情報と影響を及ぼしうる FEP または状態変数との対応

力学解析で得られる情報		影響を受けうる FEP または状態変数	影響度の評価		重要な解析用パラメータ
一次的	二次的		定性的	定量的	
母岩のひずみ	母岩の間隙率、透水係数	クリープ	○	○	(a)、(b)
EDZ の幅、透水係数		処分場の力学的影響	○	○	(a)、(b)、(c)

表 5.3-16 影響度評価の観点から重要と考えられる力学解析用パラメータ

記号	重要と考えられる力学解析用パラメータ
(a)	母岩の変形特性、強度特性、クリープ特性
(b)	初期地圧
(c)	せん断破壊後の透水係数（例、ひずみー透水係数関係）

(iii) FEP および状態変数に与える影響

1) クリープ

(ii)までの検討に基づき、まず母岩のクリープ変形の影響について検討を行った。2021 年度の力学的長期変化解析では、クリープ変形が標準的な場合と速い場合の 2 ケースの解析結果があるが、この内クリープ変形が早く保守側の評価と考えられる Case5 を基に検討を行った。力学的長期変化解析からは、母岩のひずみの経時変化が得られ、かつそれから求められる体積ひずみと母岩の間隙構造の変化には関連性があることから、クリープ変形が間隙構造に与える影響を検討した。

2021 年度の解析結果から算出した母岩の体積ひずみの経時変化を図 5.3-125 に示す。堆積岩の場合、体積ひずみは骨格部分と間隙部分の両方の圧縮・膨張が合わされたものとして生じると考えられるが、ここでは保守的に骨格部分の応力による圧縮・膨張がなく、間隙部分の圧縮・膨張で体積ひずみが生じるとみなす。

例えば、坑道掘削前の稚内層の間隙率を 40%とすると、坑道掘削および坑道の開放期間中の体積ひずみは-0.19~0.25(%)であったので、母岩の間隙率は 39.9~40.1(%)で変動することになる。一方、地上からの調査研究段階(第 1 段階)の結果(太田ほか, 2007)では、稚内層の間隙率と透水係数の関係は図 5.3-126 のように示されており、今回評価された変動幅では母岩の透水係数はほとんど変化せず、母岩のクリープが安全評価に与える影響はほぼないと評価することができる。

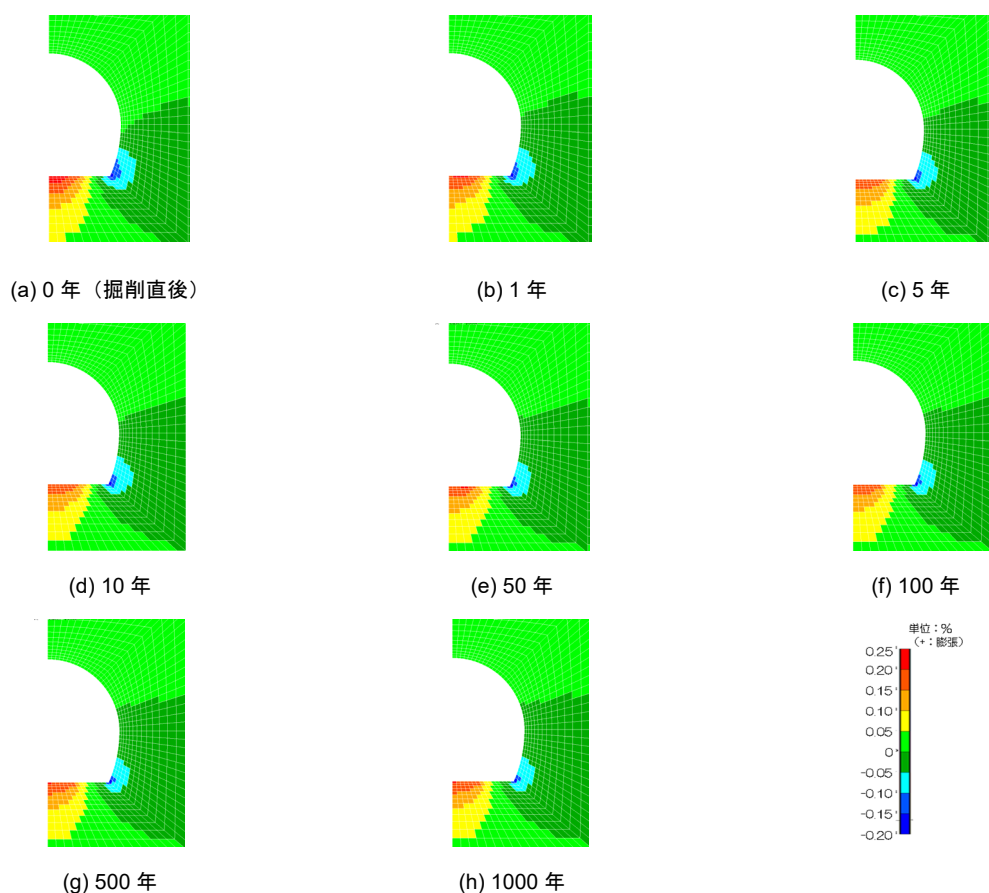


図 5.3-125 母岩の体積ひずみの経時変化

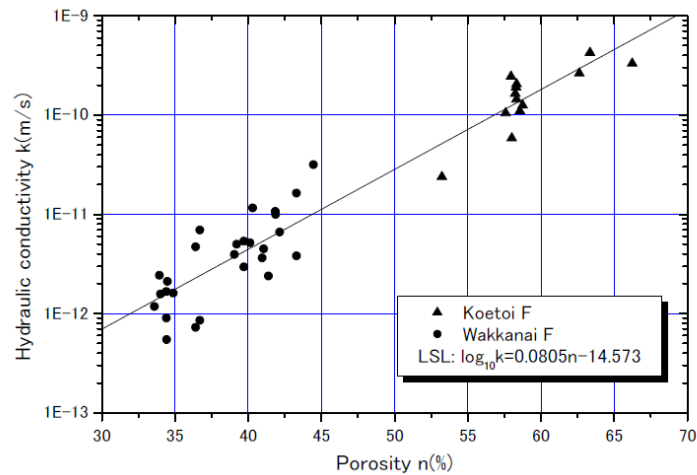


図 5.3-126 声問層と稚内層における間隙率－透水係数の関係

2) 処分場の力学的影響

NUMO の影響分析表によると、処分場の力学的影響に関しては、処分場の坑道等の掘削によって発生する掘削損傷領域（EDZ）は、坑道壁面から 0.5～1.5 m の領域で透水性が増加すると考えられ、核種の移行経路や移行に係る水理場に影響を与える可能性があるが、連結した流路にならないように止水プラグ等による工学的対策がなされると記載されている。

このため、本解析で得られた EDZ の幅や透水性の変化に基づき検討を進めた。2021 年度の力学的長期変化解析の Case5 における透水係数の経時変化を図 5.3-127 に示す。この図では、EDZ1、EDZ2、母岩のいずれの領域において、母岩の透水係数（8.2E-12 m/s）に対する倍率で表されているが、EDZ1 と EDZ2 では透水係数の増加は見られるが、母岩では力学的にせん断破壊が起こらず EDZ の拡大は起きていない。長期的にも EDZ の幅は拡大していないことから、止水プラグ等による工学的対策により、安全機能にあたる影響は回避可能と考えられる。

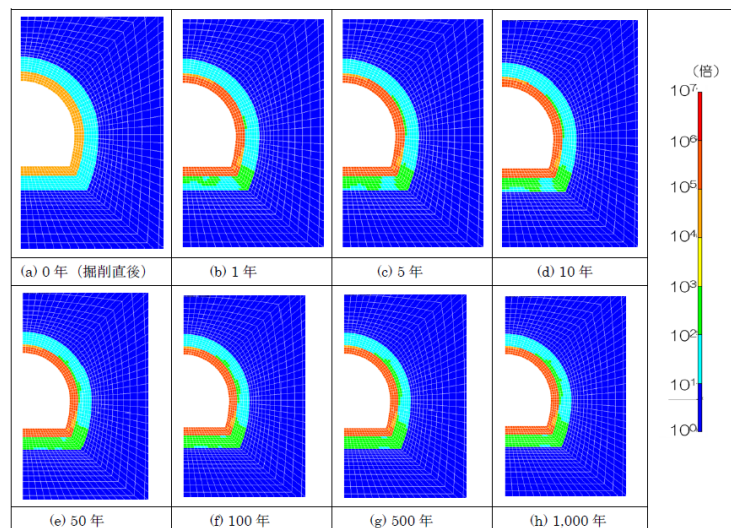


図 5.3-127 Case5 における周辺岩盤の透水係数の増加率

(b) 水理学的長期変化解析に基づく概念検討

本項では、まず前節で示した安全機能に関する要因分析図に基づき、これらの安全機能と関連性を有する FEP の中から、水理学的解析により得られる情報（物理量）が影響を及ぼしうるものを抽出した。次に、抽出された FEP の中から、多くの状態変数との関連性を有するものを、重要度の高いものとして選定した。そして、前述の坑道埋戻し後の水理学的長期変化解析結果を参考に、FEP への影響、更にはその FEP が関連を有する状態変数への影響について検討した。

(i) 検討の方針と手順

水理学的長期変化解析で得られる情報は、先に挙げた要因分析図中に、FEP や状態変数としてそのまま表れているとは限らない。例えば本業務で扱った多成分気液二相流モデルの場合、水理学的解析の解として得られる情報は気相圧力、液相飽和度及びガス成分の分圧であるが、これらは先の要因分析図には表れていない。しかし、水理学的解析の解からは液相の流向・流速が得られ、これは FEP の一つである「水の輸送」と直接関連する。このように、解析で得られる情報には、それ自体が FEP や状態変数ではないものの、状態変数や FEP に影響を及ぼしうるものがある。

そこで、ここでは前掲の要因分析図から、水理解析で得られる情報の影響を受けうる FEP を抽出し、水理学的解析で得られる情報との対応付けを行った上で、それら FEP の安全評価上の重要性を、次に示す 2 つの指標を用いて概略的に評価し、整理することとした。

a. より多くの状態変数との関連性を有する FEP ほど、安全評価上の重要度が高い。
b. パラメータの変動の影響をより大きく受ける FEP ほど、安全評価上の重要度が高い。

ここで、影響度を検討する対象は、FEP と関連付けられた状態変数までを範ちゅうとした。何故なら、水理学的解析で得られるある情報が FEP に影響を及ぼし、変化させることが予察できても、それが状態変数に及ぼす影響が分からないのであれば、結局安全機能への影響度を測ることができないからである。

このため、まず、前述の要因分析図から、水理学的解析で得られる情報が影響を及ぼしうる FEP を抽出し、水理解析結果からその影響度を定量的あるいは定性的に評価できるかについて整理した。

次に、上記の指標 a による FEP の重要度評価を行うため、抽出された FEP について、要因分析図上での状態変数との関連性を調べ、より多くの関連性を有する FEP を重要度の高いものとして選出した。そして、それら FEP に影響を及ぼす水理学的解析で得られる情報から、FEP への影響度の評価上重要と考えられる解析用パラメータを示した。

最後に、上記の指標 b による重要度評価を行う目的で、埋戻し後までの水理学的長期変化解析の結果を踏まえた検討を行った。具体的には、坑道掘削から埋戻しを経て 1,000 年後の時点において、解析により得られる坑道の周辺あるいは近傍の物理量（情報）が設定した坑道開放期間の違いによりどの程度変化するかを、可能な範囲で定量的に示すよう試みた。そして、その違いが FEP 及び状態変数にどのような影響を及ぼしうるかを検討し、大きな影響を受けると考えられる FEP を重要度の高いものとして選定した。

(ii) 水理解析で得られる情報と FEP または状態変数との関連性

NUMO は、地質環境並びに埋戻し材（止水プラグを含む）の安全機能に関する要因分析図として、地質環境について 4 つを、埋戻し材について 1 つをそれぞれ示している。ここでは、同要因

分析図に挙げられている FEP から、水理解析で得られる情報の影響を受けうるものを抽出し、解析で得られる情報と対応させて整理した。また、抽出した各 FEP について、水理解析で得られる情報からの影響度評価の可能性と、影響度の大きい水理解析上のパラメータについても検討した。

表 5.3-17 に、水理解析で得られる情報とそれが影響を及ぼしうる FEP 又は状態変数との対応を示す。同表で、力学解析と同様、一次的とあるのは水理解析により解として得られる情報を、二次的とあるのは、水理解析の解から他の解析パラメータと組み合わせることにより得られる情報を意味する。また、FEP 又は状態変数は、水理解析で得られる情報と関連し、その影響を受けうるものを節で示した要因分析図から抽出したものである。同表にはさらに、水理解析で得られる情報から FEP への影響度を定性的・定量的に評価できるか否かと、評価上重要と考えられる解析用パラメータについても、表 5.3-18 を参照する形で併せて示した。

表 5.3-17 水理解析で得られる情報と影響を及ぼしうる FEP または状態変数との対応

水理解析で得られる情報		影響を受けうる FEP 又は状態変数	影響度の評価		重要な解析用 パラメータ
一次的	二次的		定性的	定量的	
圧力 (液相)飽和度	液相の圧力	動水勾配	○	○	(a)
圧力 (液相)飽和度	液相の流向・ 流速	水の輸送	○	○	(a)
		パイピング／ 流出	○	×	(a), (c)
		再冠水／脱飽和	○	○	(a), (b)
		処分場の 水理的影響	○	×	(a), (b)
(液相)飽和度	—	ガス相の形成	○	○	(a), (b)
ガス成分の 分圧	ガス成分の 物質質量	水化学	○	×	(a), (b)
圧力 (液相)飽和度	—	微生物／生物が 媒介するプロセス	○	×	(a), (b)
ガス成分の 分圧	ガス成分の 物質質量				

表 5.3-18 影響度評価の観点から重要と考えられる水理解析用パラメータ

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

(iii) 抽出された FEP と状態変数及び安全機能との関連性

前出の表 5.3-17 に抽出された、水理解析で得られる情報の影響を受けうる FEP について、状態変数及び安全機能との関連性を、地質環境の安全機能並びに埋戻し材の安全機能に関する要因分析図中に示すこととした。

地質環境の安全機能のうち、「放射性物質の溶解の抑制」に関する要因分析図を図 5.3-128 に、「遅い地下水流速による放射性物質の移行の抑制」に関する要因分析図を図 5.3-129 に、「放射性物質の収着」に関する要因分析図を図 5.3-130 に、「放射性物質の分散に関する」要因分析図を図 5.3-131 に示す。なお、これらの図では、水理解析で得られる情報の影響を受けうるとして抽出された FEP に青色の下線が付いており、またそれと関連する状態変数は、青色の線で囲まれ

ている。また、図 5.3-132 には、埋戻し材（止水プラグを含む）の安全機能のうち、「坑道およびその周辺が卓越した放射性物質の移行経路となることの抑制」に関する要因分析図を再掲する。同図中の FEP や状態変数にも、前述の青色の下線や囲みを付した。

前掲表 5.3-17 に示した通り、水理解析で得られる情報はいくつかの FEP に影響を及ぼしうる。そして図 5.3-128 から図 5.3-132 に示すように、その FEP と関連する状態変数も、FEP の影響を受けて変化すると考えられている。

これらの FEP が水理解析で得られる情報から受ける影響の度合いは、前掲表 5.3-17 に示したように、定性的あるいは定量的に評価可能と考えられる。しかしながら、これらの FEP に対する影響度が分かったとしても、それを用いて状態変数への影響度を評価することは、状態変数がその他多くの FEP の影響も受けることから、難しいと考えられる。

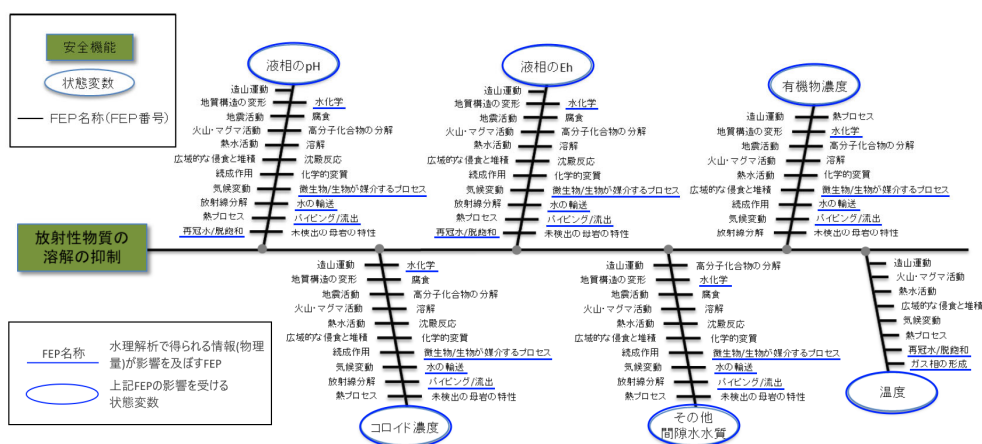


図 5.3-128 地質環境の安全機能「放射性物質の溶解の抑制」に関する要因分析図
(水理解析で得られる情報が影響を及ぼす FEP に下線を加筆)

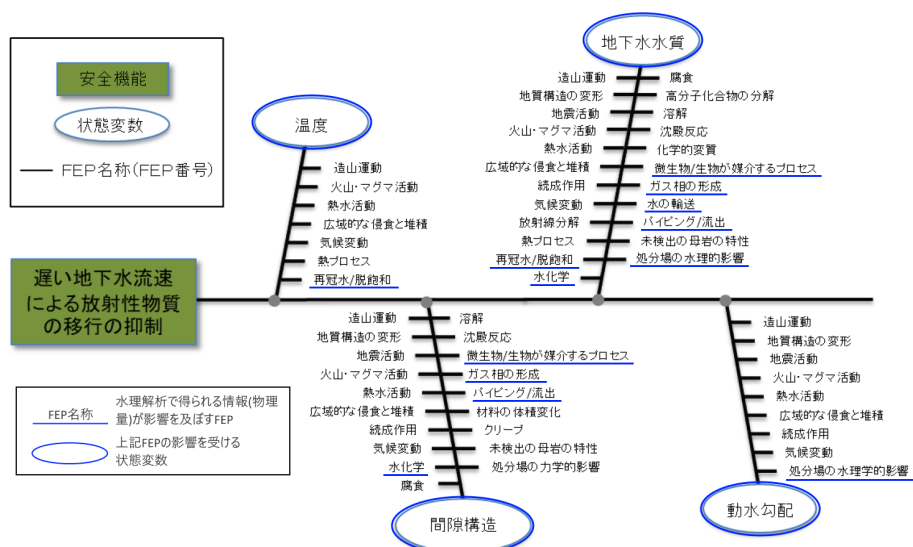


図 5.3-129 地質環境の安全機能「遅い地下水流速による放射性物質の移行の抑制」に関する要因分析図
(水理解析で得られる情報が影響を及ぼす FEP に下線を加筆)

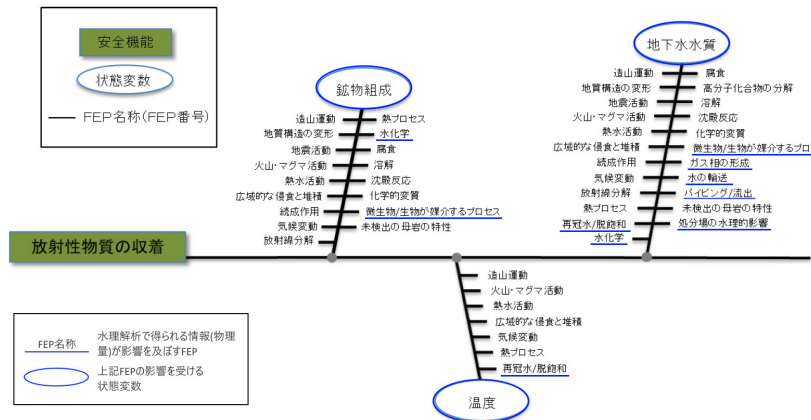


図 5.3-130 地質環境の安全機能「放射性物質の収着」に関する要因分析図
(水理解析で得られる情報が影響を及ぼす FEP に下線を加筆)

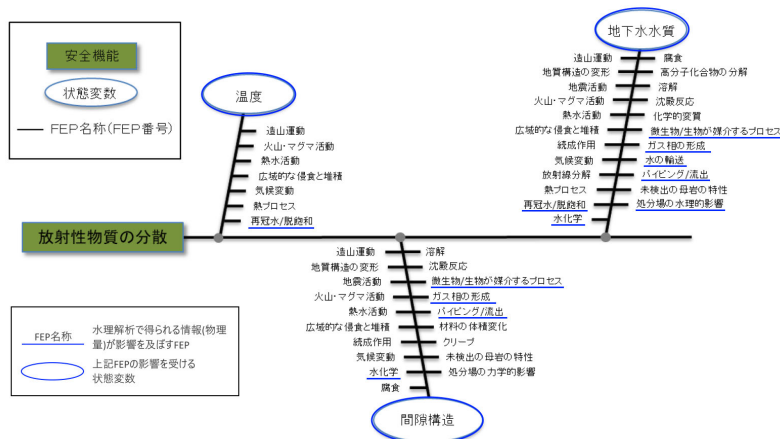


図 5.3-131 地質環境の安全機能「放射性物質の分散」に関する要因分析図
(水理解析で得られる情報が影響を及ぼす FEP に下線を加筆)

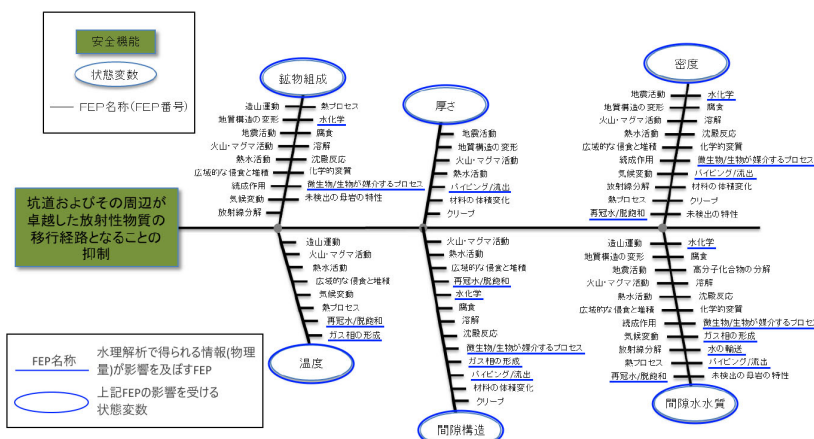


図 5.3-132 埋戻し材及び止水プラグの安全機能「坑道およびその周辺が卓越した放射性物質の移行経路となることの抑制」に関する要因分析図
(水理解析で得られる情報が影響を及ぼす FEP に下線を加筆)

ここでは(iii)までに述べた結果に基づき検討を進めるために、安全評価上の重要度の簡易的な指標として、「より多くの状態変数との関連性を有する FEP ほど重要度が高い」という考え方を採用することとした。前掲の要因分析図に基づいて、抽出された FEP と状態変数との関連性を整理すると、表 5.3-19 のようになり、より多くの状態変数と関連性を有する FEP としては、「水化学」「微生物／生物が媒介するプロセス」「パイピング／流出」及び「水の輸送」が挙げられた。

表 5.3-19 抽出された FEP と状態変数との関連性

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

上記を踏まえて、重要度の高い FEP を選出し、それに影響を及ぼす水理解析結果の情報を併せて示すと、表 5.3-20 のようになる。同表には、水理解析で得られる情報から FEP への影響度を定性的・定量的に評価できるか否かと、評価上重要と考えられる解析用パラメータについても、表 5.3-21 を参照する形で併せて示した。これらの結果から、水理解析結果から得られる情報からは、「水の輸送」「パイピング／流出」「水化学」「微生物／生物が媒介するプロセス」に対して、定性的な影響度評価の情報が得られ、うち「水の輸送」については、定量的な影響度評価を行うことが可能と考えられる。

表 5.3-20 水理解析で得られる情報と重要度が高いと考えられる FEP との対応

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

表 5.3-21 影響度評価の観点から重要と考えられる解析用パラメータ（再掲）

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

(iv) 坑道開放期間が埋戻し後の FEP 及び状態変数に与える影響

(iv)までで示した検討結果を踏まえ、坑道掘削から埋戻しを経て 1,000 年後までの長期変化解析結果から、同 1,000 年後の時点において解析により得られる坑道の周辺あるいは近傍の物理量（情報）が坑道開放期間の違いによりどの程度変化するかを、可能な範囲で定量的に示すよう試みた。また、その違いによる FEP への影響、さらには状態変数への影響について考察を加えた。

後掲図 5.3-133 及び図 5.3-134 には、埋戻し解析の Case7 から Case10 について、坑道掘削から埋戻しを経て 1,000 年後の坑道周辺又は近傍における圧力、(液相)飽和度、単位体積当たりのメタン(CH_4)の物質質量及び同じく酸素(O_2)の物質質量の分布を比較する形で示す。なお、メタン及び酸素の物質質量は、液相及び気相中の合計値（即ち、単位体積当たりの岩盤又は埋戻し材中の量）である。

それぞれの物理量について、ケースすなわち坑道開放期間と埋戻し後の経過時間による分布の違いと、それによる FEP や状態変数への影響をまとめると、次の通りである。

1) 圧力

1,000 年後の坑道周辺の圧力分布は、坑道開放期間（50 年～300 年）とそれに連動した埋戻し後の経過時間（950 年～700 年）の違いにより異なり、坑道開放期間が短く、埋戻し後の経過時間が長いほど、静水圧分布に近い状態となっている。このことから、同じ坑道掘削からの経過時刻で比較すると、坑道周辺の圧力分布は、坑道開放期間が長いほど定常状態である静水圧分布からの乖離が大きいと結論付けられる。

このとき、圧力分布の影響を受ける坑道周辺の「動水勾配」や「水の輸送」は、坑道開放期間が長いほど岩盤中での値が大きくなると考えられる。但し、圧力は時間の経過とともに終極的には定常となるため、その影響が長期間残留することは考えられない。

2) (液相)飽和度

1,000 年後の坑道近傍の飽和度分布は、坑道開放期間とそれに連動した埋戻し後の経過時間の違いにより、特に EDZ 内で大きく異なっている。具体的には、坑道開放期間が長く、埋戻し後の経過時間が短いほど、坑道の頂部から側部にかけての EDZ の飽和度低下領域が広く、飽和度の値も小さくなっている。例えば、Case 7 と Case 10 とで坑道の頂部付近の EDZ1 内の飽和度を比較すると、最大で 0.5 程度異なる。このことから、同じ坑道掘削からの経過時刻で比較すると、坑道近傍の EDZ 内の飽和度は、坑道開放期間が長いほど坑道の頂部から側部にかけてより広い領域で低下し、その低下幅も大きくなると結論付けられる。

このとき、飽和度の影響を受けるとされている「水の移動」「温度」などの FEP は、坑道開放期間の長さの影響を受けて変化する可能性が考えられる。但し、圧力と同様に、飽和度も時間の経過とともに終極的には定常（飽和状態）となるため、その影響が長期間残留することは考えられない。

3) 単位体積当たりのメタン(CH₄)の物質量

1,000 年後の坑道近傍のメタンの物質量は、坑道開放期間とそれに連動した埋戻し後の経過時間の違いにより、EDZ 及び埋戻し材内で比較的大きく異なっている。具体的には、坑道開放期間が長く、埋戻し後の経過時間が短いほど、坑道の頂部から側部にかけての EDZ 及び埋戻し材内のメタンの物質量が多くなっている。このメタンの物質量分布は、前述の飽和度分布と形状がほぼ一致しており、このことから、メタンは主に EDZ や埋戻し材の気相間隙中に存在すると推察される。但し、後掲図 5.3-134 からわかるように、坑道開放期間が長くなると、坑道上方の母岩に EDZ から移行したメタンの領域が形成され、時間の経過とともに拡大する傾向にある。

以上をまとめると、同じ坑道掘削からの経過時刻で比較した場合、坑道近傍の単位体積当たりのメタン(CH₄)の物質量は、坑道開放期間が長いほど坑道の頂部から側部にかけての EDZ 及び埋戻し材内で大きくなると結論付けられる。このとき、液相中の溶解ガス種の影響を受ける「液相の pH, Eh」「地下水水質」などの FEP は、坑道開放期間の長さの影響を受けて変化する可能性が考えられる。

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

4) 単位体積当たりの酸素(O₂)の物質量

1,000 年後の坑道近傍の酸素の物質量は、前述のメタンの物質量と同様に、坑道開放期間とそれに連動した埋戻し後の経過時間の違いにより、EDZ 及び埋戻し材内で比較的大きく異なっている。具体的には、坑道開放期間が長く、埋戻し後の経過時間が短いほど、坑道の頂部から側部及び底部にかけての EDZ、並びに埋戻し材内の酸素の物質量が多くなっている。また、酸素の物質量分布は、前述の飽和度分布と形状が類似しており、このことから、酸素の多くは EDZ や埋戻し材の気相間隙中に存在すると推察される。但し、後掲図 5.3-134 からわかるように、坑道開放期間が長くなると、坑道上方の母岩に坑道から移行した酸素の領域が形成され、時間の経過とともに拡大する傾向にある。

以上をまとめると、同じ坑道掘削からの経過時刻で比較した場合、坑道近傍の単位体積当たりの酸素(O₂)の物質量は、坑道開放期間が長いほど坑道の頂部から側部及び底部にかけての EDZ、並びに埋戻し材内で大きくなると結論付けられる。このとき、液相中の溶解ガス種の影響を受け

る「液相の pH, Eh」「地下水水質」などの FEP は、坑道開放期間の長さの影響を受けて変化する可能性が考えられる。

酸素物質と大きく関連している飽和度は、時間の経過とともに終極的には定常（飽和状態）となるため、酸素は地下水に溶解していき、最終的には全体的に拡散して稀薄な濃度になっていくと予想される。加えて、実際の岩盤中には酸素と反応する鉱物や、酸素を利用する微生物が存在するため、本解析のように酸素の消費を考慮しない場合よりも、物質量ははるかに早く低減していく可能性がある。但し、酸素は元々岩盤内に存在しなかったものであるため、その残留による影響については、定量的な検討を行うことが望ましい。

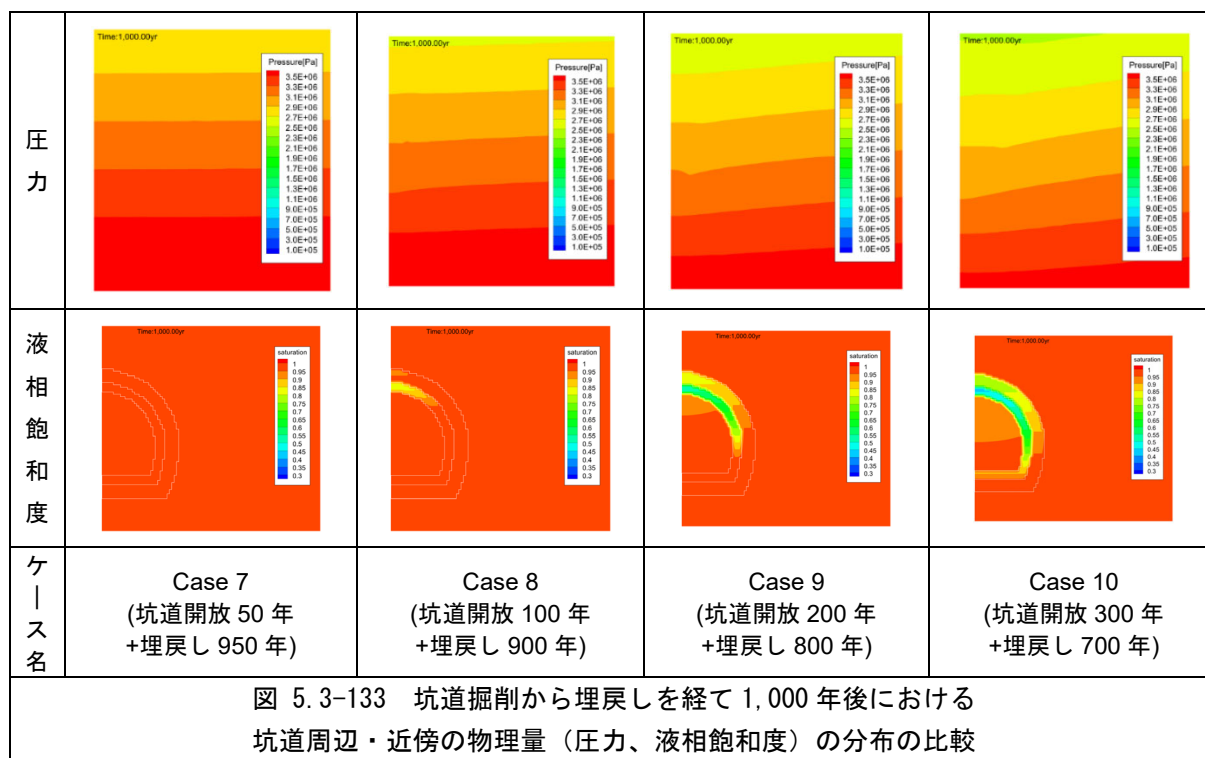
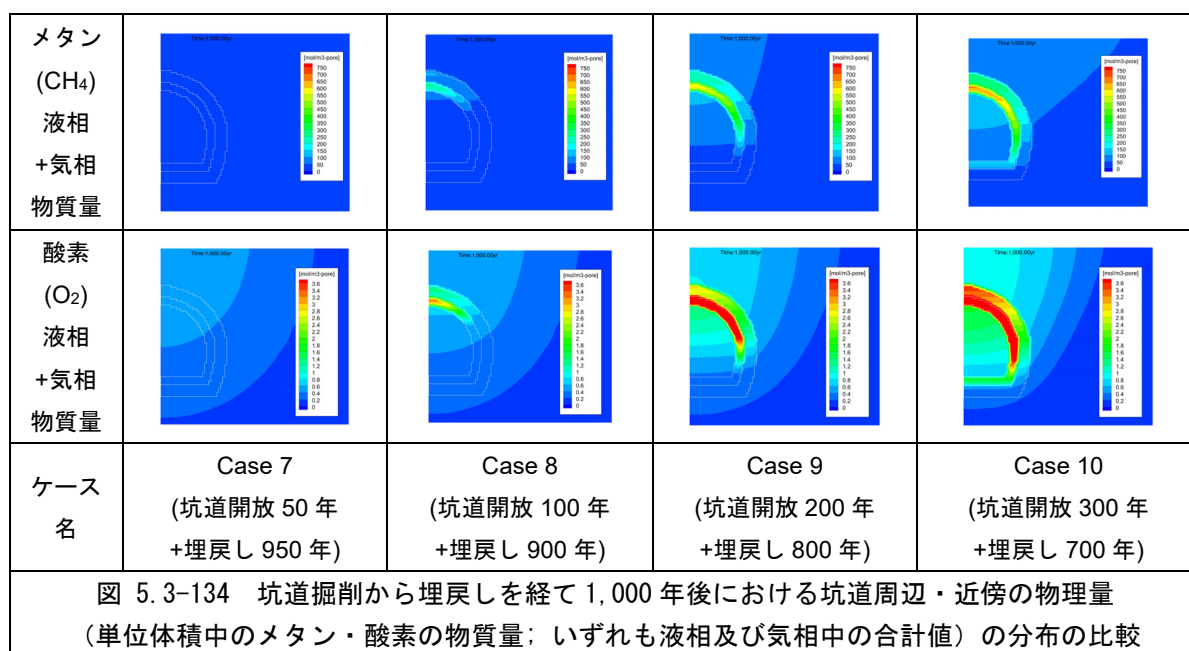


図 5.3-133 坑道掘削から埋戻しを経て 1,000 年後における
坑道周辺・近傍の物理量（圧力、液相飽和度）の分布の比較



5.3.3 まとめと今後の課題

本節の検討では、回収可能性の維持に伴う影響評価手法の整備に資するため、幌延の地質環境を事例とした解析的検討を 2020 年度から 3 ヶ年にわたり実施してきた。

具体的には、まず実在する幌延 URL 地下施設の坑道周辺地質環境を対象とした、概念モデルの構築およびそれに基づく力学的・水理学的長期変化解析手法の整備を実施し、2022 年度にもっとも現実に即した坑道維持およびその後の坑道周辺地質環境の回復過程の解析的評価を実施し、坑道維持期間が埋戻し後の地質環境の回復状況に及ぼす影響を検討した。そしてその結果に基づき、実際の地層処分で想定される安全評価への影響についても概念的な検討を行った。

以下にその結果のまとめと今後の課題について示す。

(1) 坑道周辺地質環境の長期変化に関する解析に関する総括

5.3 節の検討は、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の評価技術の整備を目標として実施してきたが、これについて 2020 年度以前の研究で得られた課題を踏まえ、実際の地下深部の坑道で生じる事象の整理という形で進めることとし、幌延 URL 地下施設の坑道周辺地質環境を事例とした回収可能性の維持期間が及ぼす影響を解析的に評価できる体系を整備した。

具体的には、幌延 URL 地下施設の建設等で得られた様々な既往の知見に基づき、対象となる新第三紀堆積岩および多量の溶存ガスが地下水中に賦存する環境を踏まえた坑道周辺地質環境の力学的・水理学的概念モデルを構築するとともに、そのような地質環境を対象とした長期変化解析のため、力学的には長期的な変形を考慮できるモデルによる変形解析を実施し室内試験などの結果から設定した透水性と応力・変形との関係を利用して坑道周辺部の長期的な透水性等の変化を表現できる手法を構築した。この透水性等の変化を水理学的な解析に反映する手法も合わせて検討したうえで、多量の溶存ガスが賦存する地質環境の長期的な変化を評価するため国際的にも利用されている多成分 2 層流解析コード(TOUGH)を用いた解析評価を実施した。この際、計算

時間の問題なども生じたため、2020 年度、2021 年度の解析を踏まえ、2022 年度には 2020 年度の概念モデルを忠実に反映したモデル化・解析を可能とした。

最終年度となる 2022 年度は、この結果を踏まえ、最終目標である閉鎖後長期の安全機能への影響の評価の方法論について、NUMO から公開されている包括的技術報告書の FEP 等を参照しつつ予察的な検討を行った。

以上の 3 カ年の解析評価を通じ、将来の処分事業において地質環境が決定されれば、それに対応した閉鎖後長期の安全機能への影響の評価技術の一例を示すことができたと考えている。

(2) 今後の研究の方向性について

(1)で述べたような成果が得られた一方で、今回の解析評価は、幌延の地下 350m の坑道周辺を事例としたものであり、結晶質岩などの異なる地質環境や深度によって回収可能性維持期間が安全評価におよぼす影響度合いは変わるものである。また、今回の解析的評価を通じ、より現実的な評価を行うための課題がいくつか抽出されているため、それを合わせて以下に示しておく。

- ・ 坑道を深度 350m に設定したが、実際の地層処分は、より深い深度で実施される可能性がある。そのため、より深い深度において解析によって坑道周辺の回復までの変遷を確認する必要があると考えられる。
- ・ 初期は静水圧として地下水流動場がない設定をしたが、実際には地下水流動場があると考えられる。そのため、対象となる地質環境に応じた地下水流動場の設定とそれに基づく評価が今後必要になると考えられる。
- ・ 水理学的長期変化解析では支保をモデル化していないが、実際には、支保で坑道を支える可能性があり、支保のモデル化が必要と考えられる。また、力学的長期変化解析では支保工は弾性体としてモデル化しており経過時間の影響を受けないと仮定しているが、実際には 1.2 節の検討のように時間的に物性が変わりうる可能性があり、現実的な EDZ の経時変化の評価のためにそのような影響を考慮する必要がある。
- ・ 本解析評価では、化学変化の影響を考えていないが、実際には、母岩中のパイライトと O₂ の反応により、間隙中の O₂ が消費されるなど岩石との化学反応等が発生し、水理解析のみではその反応を検討することができない。水理解析と化学解析との連成解析をできるようにすることが望ましい。
- ・ 気体の透過性の違いによって坑道周辺の不飽和度の差が確認されたが、気体の透過性のデータの取得は難しく、解析にあたり、適切な気体の透過性を設定する必要がある。また、酸素のように、一般的な地下の地質環境ではほとんど存在しない物質については、その残留による影響について注意深い検討を行うことが望ましい。

参考文献

- 太田久仁雄・阿部寛信・山口雄大・國丸貴紀・石井英一・操上広志・戸村豪治・柴野一則・濱克宏・松井裕哉・新里忠史・高橋一晴・丹生屋純夫・大原英史・浅森浩一・森岡宏之・舟木泰智・茂田直孝・福島龍朗, 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」, JAEA-Reserch 2007-044, 2007.
- 笠井芳夫編著, コンクリート総覧, 技術書院, 1998.
- 神谷浩二・井上光弘: 水分特性曲線を用いて不飽和土の透気係数と飽和度の関係を推定する関数モデルの考察, 土木学会論文集 C Vol.64, No.3, p.650~p.651, 2008.
- 原子力発電環境整備機構, 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—, NUMO-TR-20-03, 2021.
- 原子力発電環境整備機構, 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—, 付属書 6-7 状態変数に影響を及ぼす FEP の抽出(要因分析図の作成), NUMO-TR-20-03, 2021.
- 原子力発電環境整備機構, 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—, 付属書 6-9 安全機能への影響分析表, NUMO-TR-20-03, 2021.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター・国立研究開発法人日本原子力研究開発機構, 令和2年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(回収可能性技術高度化開発)報告書, p.5-1~p.5-95, 2021.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター・国立研究開発法人日本原子力研究開発機構: 令和3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(回収可能性技術高度化開発)報告書, p.5-1~p.5-198, 2022.
- 地盤工学会, 新規制定地盤工学会基準・同解説 低透水性材料の透水試験方法(JGS 0312-2018), 地盤工学会, 2018.
- 土木学会コンクリート委員会基準関連小委員会, 2018年制定 コンクリート標準示方書[基準編], 土木学会, 2018.
- 土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改定小委員会, 2017年制定 コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会, 2017.
- 小林一輔, コンクリートの炭酸化に関する研究, 土木学会論文集, Vol.433/V-15, pp1-14, 1991.
- 佐々木謙二・佐伯竜彦, C-S-H の組成がコンクリートの耐久性に及ぼす影響, 材料, Vol.56, No.8, pp.699-706, 2007.
- 杉田裕・菊池広人・星野笑美子, 幌延深地層研究計画で得られた掘削土を用いた埋戻し材の特性試験(受託研究), 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2020-017, 2020.
- 鈴木英明・藤田朝雄, 緩衝材の不飽和水理特性(試験報告), JNC TN8430 90-010, 1999.
- 鈴木英明・藤田朝雄・菅野毅, 緩衝材の水分ポテンシャルと水分拡散係数, PNC TN8410 96-117, 1996.
- 電気事業連合・核燃料サイクル開発機構, TRU 廃棄物処分技術検討書—第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005.
- 中村英佑, 低炭素社会構築に資する大量に混和材を用いたコンクリートの耐久設計に関する研究, 博士学位論文, 東北大学大学院, 2017.
- 中山雅・大野宏和・棚井憲治・杉田裕・藤田朝雄, 幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験—坑道の埋戻し材に関する検討—, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research

2016-002, 2016.

宮川和也・青柳和平・赤木俊文・山本肇, 幌延深地層研究センター地下施設における坑道周辺の堆積岩を対象とした不飽和領域の形成及び岩盤中への酸素の侵入要因に関する数値解析データ, JAEA-Data 2021-002, 2021.

村田二郎, コンクリートの水密性とコンクリート構造物の水密設計, 技報堂, 2002.

山本肇・下茂道人・國丸貴紀・操上広志, 幌延深地層研究計画における立坑掘削時の地下水からの脱ガスの予察解析, 第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.293-298, 2007.

山本陽一・後藤孝裕・北川義人・渡邊保貴・横山信吾・新橋美里, 国内産ベントナイト及びベントナイト混合土の基本特性データ, NUMO-電中研共同研究, NUMO-TR-21-02, 2022.

Miyakawa, K., Aoyagi, K., Akaki, T., Yamamoto, H.: The effect of dissolved gas on rock desaturation in artificial openings in geological formations, YSRM2019 & REIF2019, Okinawa, pp.834-839, 2019.

6. 地層処分実規模試験施設を活用した情報発信

6.1 実施内容

地層処分実規模試験施設（以下、「本施設」という。）は、地層処分に使用される人工バリア材の性質、緩衝材定置技術など操業に係る工学技術の実現性、地層処分の安全確保の考え方など、実規模・実物（実際の放射性廃棄物は使用しない）を基本とした展示物をとおして、実感・体感することにより、来館者へ地層処分について理解を促すための施設である。

本事業において、本施設の維持管理及び本施設を活用した情報発信の状況について報告する。

6.2 地層処分実規模試験施設の運営

6.2.1 施設の概要

本施設は、北海道天塩郡幌延町にある国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という）幌延深地層研究センター（以下「幌延 URL」という）の敷地内にあり、隣接している原子力機構「ゆめ地創館」との一体的な運営を実施している。2010 年 4 月から一般公開を開始し、開館以来、実規模・実物の展示を基本として、これまでの工学技術に関する研究開発で使用した装置や、それらを用いた試験を一般に公開してきた（原環センター, 2022）。

我が国で先行して検討・評価が進められている「処分孔縦置き・ブロック方式」及び「処分坑道横置き・PEM 方式」の二つの定置概念に対応する人工バリアや開発装置を中心とし、地層処分への理解促進のための展示を行っている。本施設の外観および施設内全景を図 6.2-1 に示す。



(a) 実規模試験施設 外観



(b) 実規模試験施設内 全景（1F）

図 6.2-1 地層処分実規模試験施設

6.2.2 施設の開館計画

本施設を活用した一般公開における情報発信及び運営計画や方法を年度当初に計画した。本施設は隣接する「ゆめ地創館」と一体となった運営を行うことを基本として、両施設の開館日時を整合させている。2022 年度の開館計画を表 6.2-1 示す。

表 6.2-1 2022 年度の実規模試験施設の開館計画

開館期間	2022 年 4 月 1 日～2023 年 3 月 31 日
開館時間	9:00～16:00
休館日	毎週月曜日（休館日が祝日または振替休日の場合は水曜日） 年末年始（12 月 29 日～1 月 3 日）
年間開館日数	308 日

6.2.3 来館者の対応計画

来館者への対応について、以下の内容を基本計画として設定しており、これらは 2010 年 4 月の本施設開館当初から継続して実施しているものである。

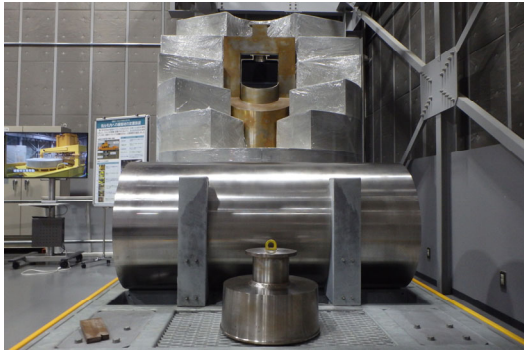
- ・ 施設、試験、事業概要等の説明
施設来館者に本事業の概要、展示物、実施中の試験等の説明を行う。
- ・ 対話内容の記録と整理
説明時のやり取り、来館者からの質問等、対話内容を記録し、来館者記録として整理する。
- ・ 体感型試験の実施、補助
図 6.2-4に示した、来館者体感型試験の実施、補助を行う。

2021 年度に引き続き、新型コロナウイルス感染症対策による社会的距離の確保の観点から、積極的な説明および質疑応答をベースとした対話記録の収集の自粛や、粘土試験の中止など、通常の開館時の運営方法から一部内対応の変更を行いながらの運営となった。

しかし、2022 年度は、社会情勢を考慮しながらの状況ではあるが、来館者の要望に添えるよう希望者には施設の詳細な説明や粘土試験の体験など徐々に再開させることとした。また、ゆめ地創館との連携協力として、各施設内を巡りながら見学を行う参加型のスタンプラリーや、施設への来館を促す案内広告の作成協力、夏季休暇期間に合わせて行われた、施設内の展示物などから質問の答えを見出すクイズラリーへの協力対応など、来館者が地層処分への理解を深めて頂けるような工夫やアイデアなどについては積極的に運営方法に取り入れる事とした。

6.2.4 施設内の主な展示物

高レベル放射性廃棄物の地層処分の人工バリアとして、処分孔縦置き・ブロック方式の人工バリア構成を例に、実際の大きさを体感して頂けるような実規模・実物での展示を行っている。（図 6.2-2）また、実際に触れることができる人工バリアのカットモデルや実物の緩衝材ブロックの展示を行う事で、厚さや大きさ、ならびに重量感を体感することができる。



(a) 人工バリアカットモデルとオーバーパック

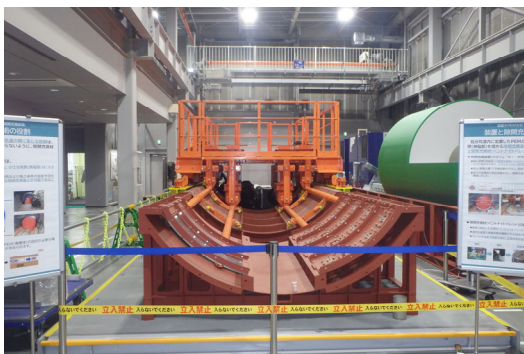


(b) 緩衝材ブロック

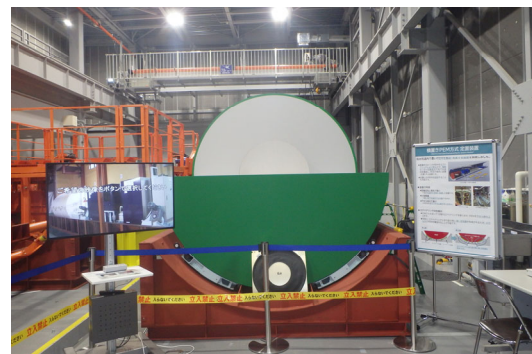
図 6.2-2 施設内の主な展示物①

また、処分坑道横置き・PEM 方式の操業技術として、スクリーフィーダ方式の隙間充填装置、エアベアリング方式の定置・回収装置を展示している。(図 6.2-3)。これらの装置は、幌延 URL 地下 350 m にて回収実証試験が行われた際に、実際に使用したものであり、我が国における操業技術の開発に関する着実な進展や技術の実用性や信頼性を来館者に理解して頂くうえで重要な役割を担っている。

エアベアリング方式の定置・回収装置については、機構の仕組みを分かりやすく理解して頂くために、廃棄体の定置作業時の装置の全体構成が理解出来るよう、PEM カットモデルを上部に設置し展示している。さらに装置の段階的な技術開発に関わる解説映像や地下での実証試験の映像モニタをパネルと展示装置に関わる補助資料として共に展示している。



(a) 隙間充填装置



(b) 横置き PEM 定置・回収装置

図 6.2-3 施設内の主な展示物②

6.2.5 体感試験の実施

本施設内に図 6.2-4 のように緩衝材ブロックの原材料であるベントナイトを使用した止水試験や色水体験を実施している。ベントナイトの特性として、水に触れると膨潤するといった自己修復性や止水効果などを実際に体験・実感することで、理解や関心を深めることを目的としている。地層処分における緩衝材の役割として、ベントナイトの特性である膨潤性・増粘性・吸水性・吸着性を実際に体験することにより、ガラス固化体を保護する役割や周囲からの地下水の浸透やその中での流れを抑制し、地下水に溶出した放射性核種を収着するといった、緩衝材の性質や必要性について来館者が地層処分への理解を深めることが出来るよう配慮している。



(a) ベントナイト体感試験コーナー



(b) ベントナイト止水試験体験

図 6.2-4 ベントナイト体感試験

6.2.6 施設の維持管理について

本施設は、資源エネルギー庁からの貸与を受け施設の運営とともに維持管理を行っている。本施設の一般公開から十年程経過した 2020 年度には、日常の運営や来館者の安全確保の観点から、老朽化が見られる施設に対しての改修工事を行った（原環センター,2020）。

改修工事が終了したのち、来館者の動向の調査を行いながら理解促進のための効率的な配置場所を検討しつつ、本施設内における展示物の配置転換などの措置を行った。配置転換後には、来館者や説明員の安全管理のため非常時における避難経路の見直しを行うなどの消防計画の再作成措置を講じた。また、降雪期には避難経路確保のため、非常口を含めた非常階段、ゆめ地創館駐車場との連絡スロープなど本施設周辺の除雪作業を実施した。さらに、空調機器の安全運転管理に関連し、事務所等屋根部など空調機室外機周辺の除雪作業も定期的に実施した。

また、本施設内に展示中であるオーバパック・人工バリアカットモデル・緩衝材ブロックなど、外観上の変化（ひび割れなど）を定期的に確認しながら、適正な管理を行う観点及び、来館者が快適に見学できる環境を整えるため、本施設内外の温度および本施設内の湿度の管理を行っている。特に降雪期については翌朝の開館時に室温が極度に低くならないよう管理するために、夜間暖房運転を行うなどの措置を講じている。

その他として、本施設の設備である、エレベーター、天井クレーン、受電設備および消防設備については法令に基づき定期的な点検を実施している。点検作業時については、作業の一時中断や作業場所への関係者以外の立入禁止措置など、来館者が安全に見学できるような対策を講じながら、安全第一で本施設の管理・運営を行っている。

6.3 本施設への来館状況

6.3.1 来館者数の変化

2022 年度 2 月末までの来館者数は 3,917 人であり、新型コロナウイルス感染症の影響を受けた 2020 年度や 2021 年度の過去 2 年間と比較すると微増ではあるが増加傾向がみられた。しかし引き続き、来館者数は新型コロナウイルス感染症の影響を受ける前の 2019 年以前と比較すると来館者数は減少している。これらは、毎年夏期に開催されていた“おもしろ科学館 in ほろのべ”の集客が見込まれるイベントなどの中止が影響していると考えられる。なお、2010 年 4 月の施設開館からの累計来館者数は 69,395 人となった。（2023 年 2 月 28 日現在）

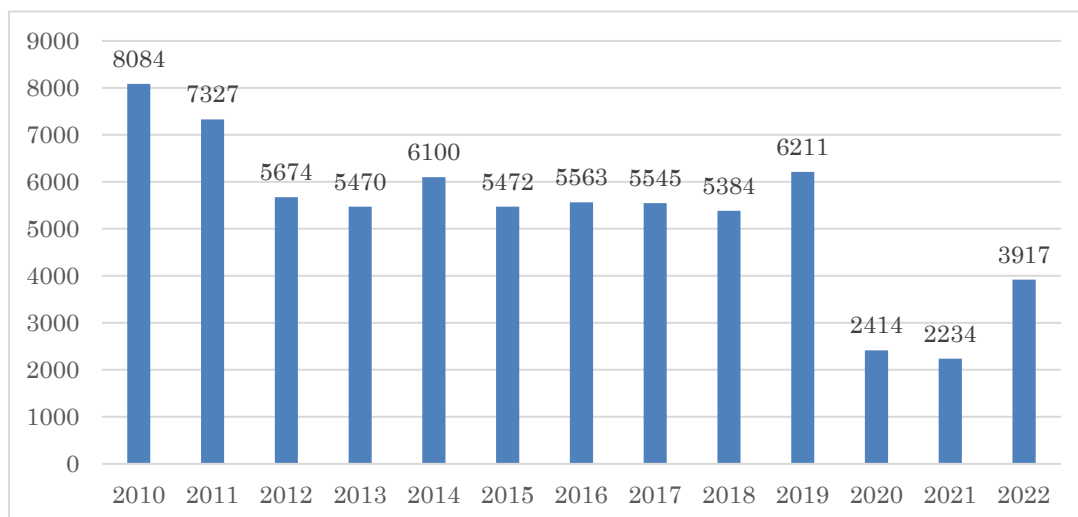


図 6.3-1 来館者数の推移（2010 年 4 月～2023 年 2 月）

6.3.2 居住地別による来館者の推移

2022 年度の来館者の居住地の割合を図 6.3-2 に示す。居住地別では、道外からの来館者の割合が減少した 2020 年度および 2021 年度と比較すると増加傾向が見られた。来館者数についても、徐々に回復傾向が見られることから、施設への来館者の居住地別の属性については新型コロナウイルス感染症の影響を受けた 2019 年度以前の状態へと近づきつつあることが伺える。広く情報発信を目的としている本施設ではあるが、立地条件により、来訪条件が多岐に及ぶことから、実際に来館して頂いた来館者が、本施設における取り組みなどを理解し多方面に伝達して頂くことで、更なる来館者の増加へと繋がるような工夫が必要であると考えます。

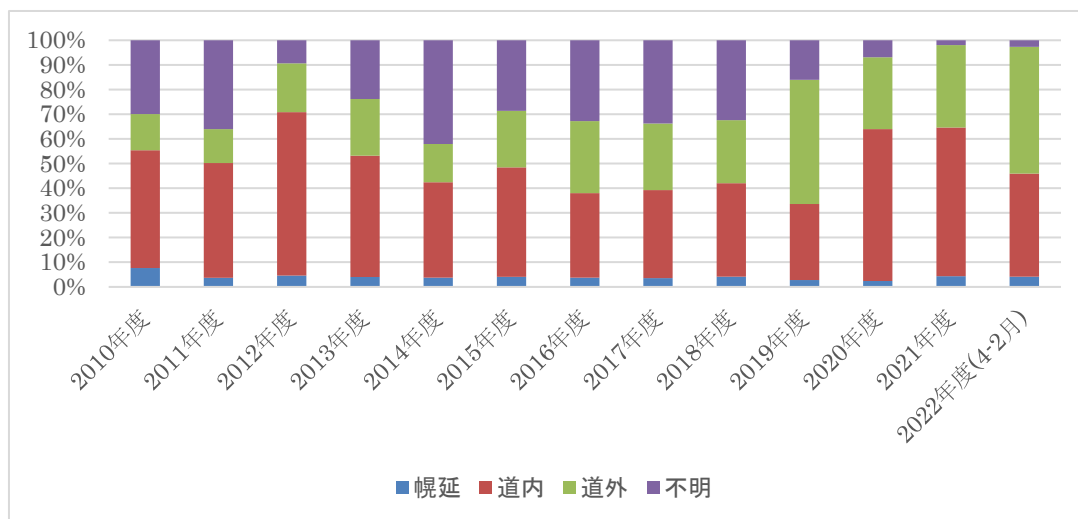


図 6.3-2 来館者の属性（居住地別）

6.3.3 来館者の滞在時間

本施設内の年度別における来館者の平均滞在時間を図 6.3-3 に示す。新型コロナウイルス感染症対策のため、積極的な案内の自粛による自由見学が主であった 2020 年度には本施設の平均滞在時間が 6 分台まで短縮していたが、2021 年度からは 10 分台まで回復した。これらは自由見学

を基本としつつ、希望者については施設内の案内を再開したことが要因の一つとして考えられる。

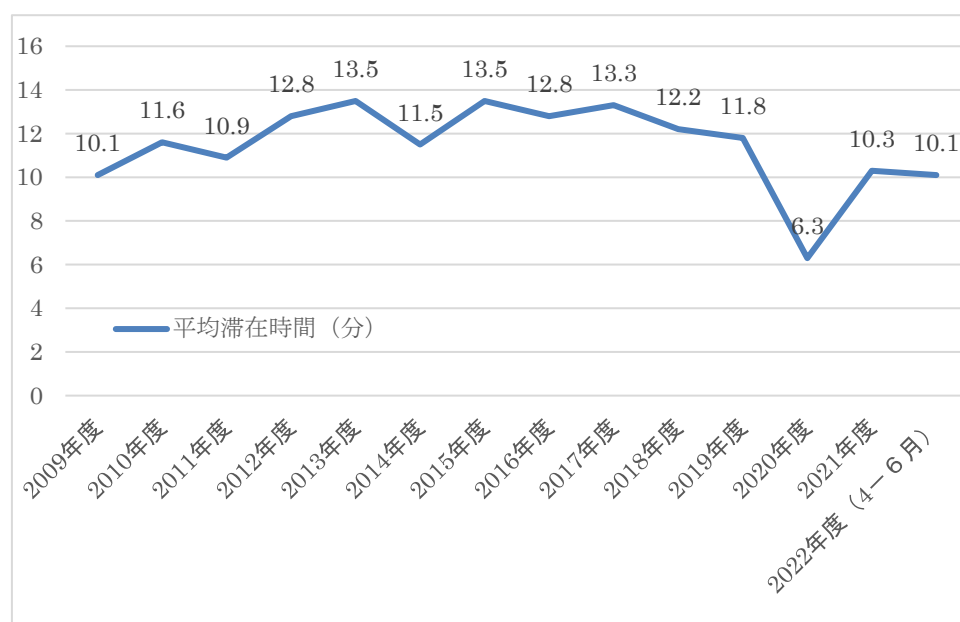


図 6.3-3 本施設での平均滞在時間

6.3.4 滞在時間別による質問数

本施設での滞在時間別による質問数の割合を図 6.3-4 に示す。滞在時間が 5 分未満の来館者の質問率は 1 割に満たないが、10 分以上滞在している来館者については約半数が質問をしている。自由見学の場合は滞在時間が短い傾向が見られ、同時に質問数の割合も低くなっている。説明員による案内を聞くことにより、本施設の展示物や地層処分事業に興味・関心を抱くことが来館者からの質問に繋がると考えられる。また、説明員による案内を受けながら、パネルや映像資料でさらに理解を深め、来館者との質疑応答をすることが理解促進には重要であるとする。

また、本施設の平均滞在時間が約 10 分程度であることから、質問数が増加し始める 10 分程度の滞在時間を踏まえた有効的な案内方法の検討を行う必要があると考える。

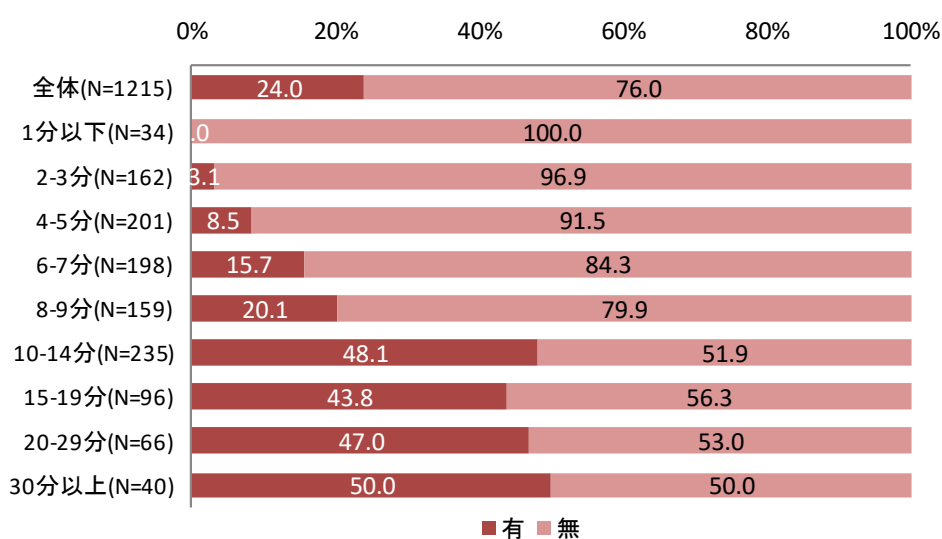


図 6.3-4 滞在時間別による質問数

6.3.5 体感試験による質問の変化

本施設では先述のように体感試験としてベントナイトを使用した体感試験を実施している。ベントナイト実験を行った来館者のうち61.7%が質問をしており、ベントナイト実験を行わなかった来館者からの質問率は46.3%となっている。一方、説明者なしの自由見学をしたグループの質問率は6.3%となっており、実際に実験を行った来館者からの質問は多い傾向が見られた（図 6.3-5）。また、実際にベントナイト実験を体験した来館者からは、「ベントナイトの産地は？」、「ベントナイトに硅砂を入れる理由は？」、「緩衝材ブロックの隙間はどうなる？」など緩衝材に関する具体的な質問が多く見られるなど自らから体感したことによって感じた疑問点などについて質問するなど、来館者が自らによって理解を深めようとするきっかけにもなっていることが伺える（図 6.3-6）。

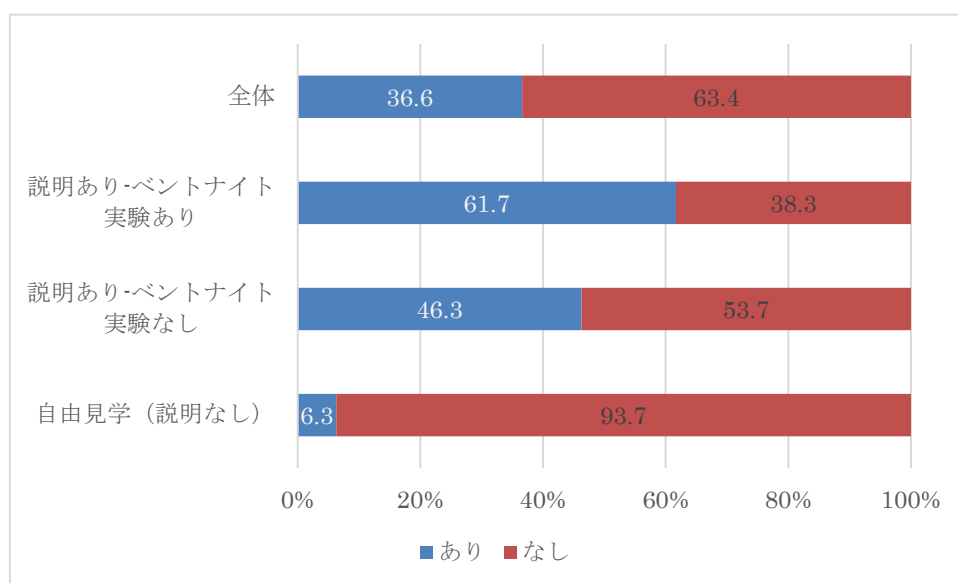


図 6.3-5 来館者の見学方法別による質問の有無（2013 年以降）

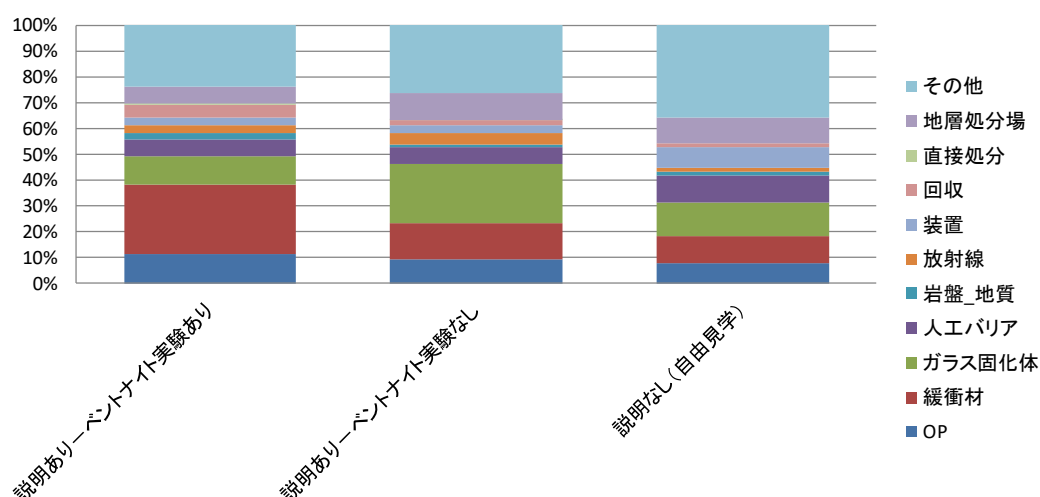


図 6.3-6 見学方法別による質問内容別構成比（2013 年度以降）

6.3.6 来館者の関心の方向

本施設における年度別の質問内容の構成比を図 6.3-7 に示す。実際に本施設を見学し、実際に展示しているオーバーパックやガラス固化体、緩衝材も含め人工バリアに関わる質問が約半数を占めている。また、来館者から質問内容については「どのように」など、具体的な方法を質問する来館者が増加している。展示中の装置についても「どのように動く（動かす）のか?」、「どのような機能なのか?」など、装置の動作に関わる具体的な質問が多く見られた。緩衝材ブロックの隙間についての質問については、「安全?」「大丈夫?」といった質問は少なく、「どのように隙間を埋めるのか」など、具体的な問題解決方法などを質問する傾向が見られた。

その他の項目について地層処分事業の多岐に渡る質問が見られ、2020 年度に開始された北海道寿都町、神恵内村での文献調査についての質問など、本施設の展示物とは直接の関係はないものの、社会情勢を反映した質問も多く見られた。

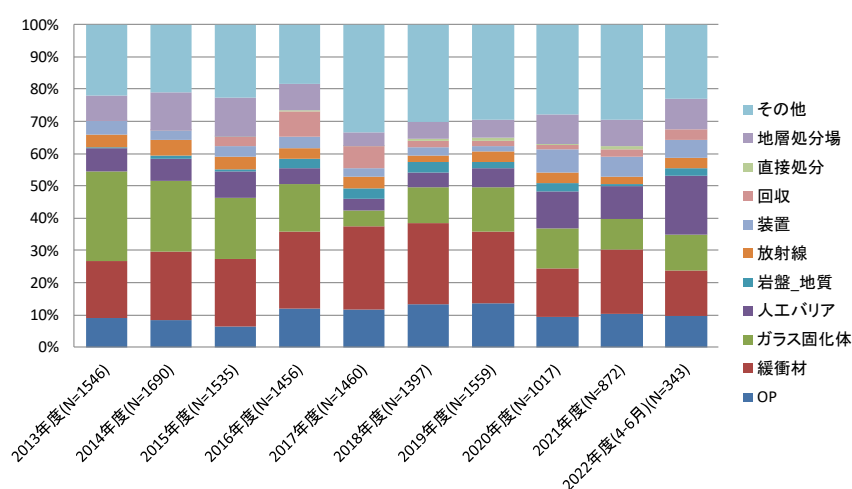


図 6.3-7 質問内容別構成比（年度別）

6.4 本年度の成果（結論：まとめ）

本年度は、2021 年度に引き続き新型コロナウイルス感染症対策を行いながらの運営となった。2021 年度は臨時休館などの措置を取る必要が講じられたが、本年度は当初計画通りの開館日数を確保することができたことで、来館者数も館者数も徐々にではあるが回復傾向が見られた。新型コロナウイルス感染症対策を継続しながらではあるが、来館者に施設内で有効的に理解を深めて頂くための工夫などを検討しながら運営を行った。本施設での滞在時間も 2019 年度は約 6 分台まで短縮していたが、2021 年度からは約 10 分台まで回復しており、自由見学では詳細な説明が出来ないことから、来館者への施設内の案内や、ベントナイト実験などの体感試験への参加は本施設の取り組みなどを理解して頂くうえで重要であると考え。日常において聞きなれない専門用語が多いとされる地層処分に関わる情報を発信するためには、一方的な情報発信ではなく、来館者からの質問を引き出すことで、来館者が理解に苦しまない言葉を使用しながら、丁寧な情報発信をする必要があると考える。そのため、来館者と実際に施設内の案内を含め、質問や意見を聞きながら対話を行うことが重要であると考え。

また、地層処分事業に関心が高まっている社会情勢も踏まえ、来館者からの意見や質問を直接聞くことができる有効な場所であることから、積極的な来館者への施設案内の再開も踏まえ、来館者との対話記録を記録し、対話記録から来館者の関心の方向性について今後も分析を継続していく。そして、情報発信者サイドと受信者である来館者の双方がお互いの認識を理解するために

必要な情報発信方法を見出し、施設案内マニュアルの更新に繋げることが理解促進には重要である
と考える。

参考文献

原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書，2020.

原子力環境整備促進・資金管理センター・日本原子力研究開発機構：令和 3 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（回収可能性技術高度化開発）報告書，2022.

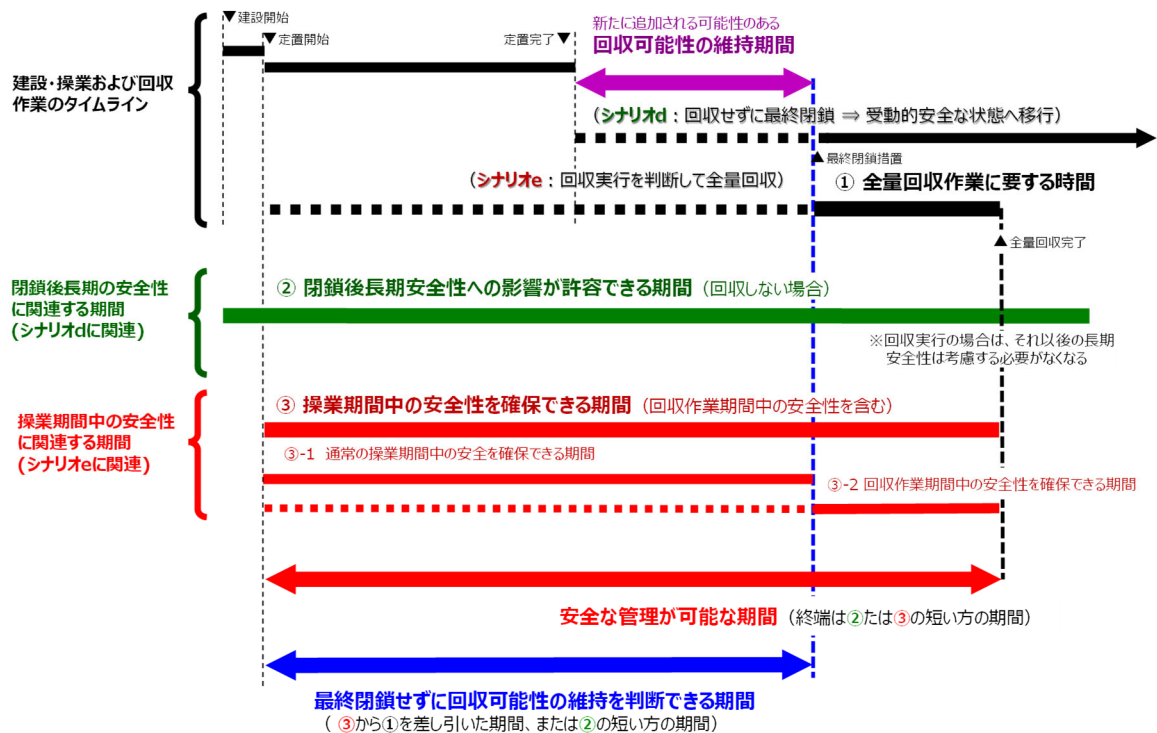
7. 本事業の総括

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

・回収可能性が維持されている状態の定義と開発方針の設定

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

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



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

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

・回収技術の高度化開発による回収作業の技術的実現性の提示

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

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

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

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

・回収可能性の維持に伴う安全性への影響の定量化手法の開発

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

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