

平成29年度
高レベル放射性廃棄物等の
地層処分に関する技術開発事業

可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発

報告書
(第3分冊)

可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理
/回収可能性の維持についての検討

平成30年3月

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

本報告書は、経済産業省からの委託研究として、公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した、平成29年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発のうち、可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理 および 回収可能性の維持についての検討の開発成果を取りまとめたものです。

報告書の構成

平成29年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発の報告書は、以下の分冊により構成されている。

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

目次

第1章	はじめに.....	1-1
1.1	背景および目的.....	1-1
1.2	本年度の検討の概要.....	1-2
第2章	可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理.....	2-1
2.1	整理の背景と目的.....	2-1
2.2	検討会における議論の展開.....	2-1
2.3	検討会で得られた主要な成果（要約）.....	2-3
第3章	回収可能性維持期間の検討.....	3-1
3.1	検討方針と検討項目の概要.....	3-1
3.2	定量化に必要な技術の現状整理.....	3-3
3.2.1	定量化に向けた技術検討に必要な技術の現状整理.....	3-4
3.2.2	解析技術等に関する取り組み状況の整理.....	3-1
3.3	回収可能性維持のための技術要件についての考え方の検討.....	3-16
3.3.1	検討方法および検討の流れ.....	3-16
3.3.2	国際機関等での回収可能性に係わる技術要件の取り扱いに関する調査・整理... 3-17	3-17
3.3.3	国内での回収可能性を考慮しない技術要件設定の経緯の調査・整理.....	3-20
3.3.4	既往の技術要件を参考にした回収可能性維持のための技術要件の設定方法と具体例の検討 3-30	3-30
3.3.5	基本方針の回収可能性確保の要求事項に基づく回収可能性維持技術要件の設定方法と具体例の検討.....	3-65
3.3.6	回収可能性維持に係る技術要件展開方法の二つのアプローチの比較.....	3-70
3.4	回収維持技術、回収技術などの整理と研究課題の抽出.....	3-73
3.4.1	定量化に必要な技術検討項目に対応する回収維持技術、回収技術の抽出、整理 3-74	3-74
3.4.2	回収維持技術、回収技術に関連する最新技術の調査.....	3-92
3.4.3	今後開発が必要な技術等の研究課題の抽出.....	3-104
第4章	回収可能性維持期間の影響に関する定量的評価.....	4-1
4.1	検討方針と検討項目の概要.....	4-1
4.1.1	定量評価の検討方針.....	4-1
4.1.2	検討項目の概要.....	4-5
4.2	回収可能性維持期間の影響評価方法の検討.....	4-6
4.2.1	力学的影響評価方法の検討.....	4-6
4.2.2	水理学的影響評価方法の検討.....	4-108
4.2.3	化学的・熱的影響評価方法の検討.....	4-223
4.3	回収可能性維持期間に係る情報の整理.....	4-238
4.3.1	開放坑道の健全性（空間安定性）.....	4-238
4.3.2	埋戻した坑道の再利用時の健全性.....	4-241

4.3.3	坑道開放期間中の継続する坑内湧水の影響.....	4-246
4.3.4	地下水の引き込みによる擾乱影響の程度と範囲	4-247
4.3.5	開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度	4-248
4.3.6	ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度.....	4-248
4.4	課題の抽出.....	4-250
4.4.1	力学的影響評価に関する課題.....	4-250
4.4.2	水理学的影響評価に関する課題.....	4-250
4.4.3	化学的・熱的影響評価に関する課題.....	4-253
第5章	回収可能性維持期間に関する国際機関、諸外国の事例調査.....	5-1
5.1	国際機関の事例調査	5-1
5.1.1	OECD/NEAにおける事例.....	5-1
5.1.2	IAEAのレポートでの事例.....	5-3
5.2	諸外国の事例調査.....	5-4
5.2.1	米国の事例.....	5-4
5.2.2	フランスの事例	5-5
5.2.3	スイスの事例	5-6
5.2.4	カナダの事例	5-8
5.3	国際機関および諸外国の回収可能性維持期間に関する調査のまとめ.....	5-9
5.3.1	国際機関の報告書の記述.....	5-9
5.3.2	諸外国における回収可能性維持期間.....	5-10
第6章	まとめ.....	6-1
6.1	研究計画の更新.....	6-1
6.1.1	研究計画の進捗状況と更新	6-1
6.2	検討のまとめ	6-3
6.2.1	可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理	6-3
6.2.2	回収可能性維持期間の検討	6-3
6.2.3	回収可能性維持期間の影響に関する定量的評価	6-6
6.2.4	回収可能性維持期間に関する国際機関、諸外国の事例調査	6-14

別冊：可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会報告書

目 次

図 1.2-1	回収可能性の維持についての検討に関する成果目標および5ヵ年計画	1-2
図 2.3-1	可逆性・回収可能性の制度としてのあり方に関する検討会での議論	2-5
図 2.3-2	検討会で示された回収可能性の維持に関する技術的アプローチの具体化に係る技術検討の枠組み	2-6
図 3.2.2-1	廃棄体の定置方式と回収可能性維持の状態オプション	3-1
図 3.2.2-2	埋戻されていない処分坑道の周辺岩盤における局所安全率の分布の経時変化[1]	3-2
図 3.2.2-3	処分坑道を埋戻されていない状態での温度分布および評価点での温度経時変化(縦置きブロック方式) [4]	3-3
図 3.2.2-4	処分坑道を埋戻されていない状態での温度分布および評価点での温度経時変化(横置き PEM 方式) [4]	3-3
図 3.2.2-5	埋戻した処分坑道の周辺岩盤(着目要素)における最大せん断ひずみの経時変化[1]	3-5
図 3.2.2-6	埋戻した処分坑道の吹付コンクリート(着目要素)における応力の経時変化[1]	3-5
図 3.2.2-7	熱環境解析の結果[5]	3-6
図 3.2.2-8	部分冷却方式による冷房設備の設計例[5]	3-6
図 3.2.2-9	湧水量とエロージョン量の関係[17]	3-9
図 3.3.3-1	国内の技術報告書における技術要件記述の変遷	3-20
図 3.3.3-2	安全確保の基本概念、安全機能および技術要件の関係[23]	3-26
図 3.3.3-3	技術要件が評価指標として適用される例	3-29
図 3.3.4-1	回収可能性維持のための技術要件についての考え方の成果イメージと検討フロー	3-30
図 3.3.5-1	基本方針からの回収可能性確保に係る要求事項	3-65
図 3.3.5-2	基本方針の要求項目からの技術要件への展開例	3-66
図 3.3.5-3	具体的な技術要件設定例の対象	3-67
図 3.3.5-4	横置き PEM の外殻に求められる技術要件例	3-68
図 3.3.5-5	基本方針と技術要件設定との関係	3-69
図 3.3.6-1	アプローチ①: NUMO の安全確保の技術要件からの展開方法	3-70
図 3.3.6-2	アプローチ②: 基本方針の要求事項から技術要件への展開方法	3-71
図 3.4.2-1	国土交通省が推進する i-Construction 推進コンソーシアムの体制[32]	3-92
図 3.4.2-2	CIM の概念[33]	3-93
図 3.4.2-3	CIM 導入による建設生産システムの生産性向上のイメージ[33]	3-94
図 3.4.2-4	国土交通省による橋梁点検ロボットの現場検証のイメージ[38]	3-95
図 3.4.2-5	配筋アシストロボ[39]	3-95
図 3.4.2-6	コンクリート床版の余寿命推定[40]	3-96

図 3.4.2-7	学習済みモデルの汎化性能の評価[41].....	3-97
図 3.4.2-8	学習データと学習曲線、認識結果から作成したひび割れ確度マップ[41]	3-97
図 3.4.2-9	路面性状測定車「ドクターパト」 [40].....	3-98
図 3.4.2-10	教師データ作成の流れ[40]	3-98
図 3.4.2-11	ひび割れの検出結果（ひび割れがある確率が高い箇所は赤色） [40].....	3-98
図 3.4.2-12	牽引式のレーダー探査と探査で得られた画像の例[40]	3-99
図 3.4.2-13	トンネルの断面形状に合わせて変形可能なガイドフレーム[40].....	3-100
図 3.4.2-14	打音検査装置（左）と検査結果（右、浮きが疑われる箇所は赤色） [40].	3-100
図 3.4.2-15	AR（拡張現実）を用いたアプリケーション[42].....	3-101
図 3.4.2-16	インフラの維持管理フローと基盤技術開発[45]	3-102
図 3.4.2-17	SIP（インフラ維持管理・更新・マネジメント技術）の実施体制[45].....	3-103
図 4.1.1-1	基本方針 1 の概要[1]	4-1
図 4.1.1-2	方針 2 の概要[1].....	4-2
図 4.1.1-3	定量的評価に係る手法の検討の概要[1]	4-4
図 4.1.1-4	変更した 4 ヶ年計画の工程表.....	4-4
図 4.2.1-1	力学的影響現象の解析フロー.....	4-8
図 4.2.1-2	吹付けコンクリートの物性値の経時変化	4-10
図 4.2.1-3	緩衝材と埋戻し材の物性値の経時変化	4-11
図 4.2.1-4	NUMO による埋戻し材の配合[6]	4-12
図 4.2.1-5	膨潤圧の経時変化[7].....	4-13
図 4.2.1-6	有効粘土密度と平衡膨潤圧の関係[7]	4-13
図 4.2.1-7	膨潤圧の作用位置と方向	4-14
図 4.2.1-8	新第三紀堆積岩－横置き方式の処分坑道内部の各材料の形状と寸法.....	4-14
図 4.2.1-9	新第三紀堆積岩－横置き方式の解析モデル	4-15
図 4.2.1-10	経過時間 10 年後の局所安全率の分布.....	4-17
図 4.2.1-11	経過時間 100 年後の局所安全率の分布.....	4-17
図 4.2.1-12	経過時間 1,000 年後の局所安全率の分布	4-18
図 4.2.1-13	経過時間 10,000 年後の局所安全率の分布	4-18
図 4.2.1-14	経過時間 10 年後の最大せん断ひずみの分布.....	4-19
図 4.2.1-15	経過時間 100 年後の最大せん断ひずみの分布.....	4-19
図 4.2.1-16	経過時間 1,000 年後の最大せん断ひずみの分布.....	4-20
図 4.2.1-17	経過時間 10,000 年後の最大せん断ひずみの分布	4-20
図 4.2.1-18	経過時間 10 年後の周辺岩盤の弾性係数の変化の分布	4-21
図 4.2.1-19	経過時間 100 年後の周辺岩盤の弾性係数の変化の分布	4-21
図 4.2.1-20	経過時間 1,000 年後の周辺岩盤の弾性係数の変化の分布.....	4-22
図 4.2.1-21	経過時間 10,000 年後の周辺岩盤の弾性係数の変化の分布.....	4-22
図 4.2.1-22	壁面近傍の弾性係数の経時変化（昨年度ケース 8、膨潤圧なし） [1].....	4-23
図 4.2.1-23	壁面近傍の弾性係数の経時変化（膨潤圧あり）	4-24

図 4.2.1-24	吹付けコンクリートにおける着目要素	4-24
図 4.2.1-25	着目要素における吹付けコンクリート応力の経時変化（昨年度ケース 8、膨潤 圧なし） [1]	4-25
図 4.2.1-26	着目要素における吹付けコンクリート応力の経時変化（膨潤圧あり）	4-25
図 4.2.1-27	壁面近傍で最大せん断ひずみが上限 $\gamma_{max}=1.340\%$ を超える肩部の要素	4-26
図 4.2.1-28	着目要素における最大せん断ひずみの経時変化.....	4-26
図 4.2.1-29	物性値の置き換えのイメージ.....	4-28
図 4.2.1-30	10 倍固くした場合の埋戻し材の物性値の経時変化.....	4-28
図 4.2.1-31	経過時間 10 年時の局所安全率の分布.....	4-31
図 4.2.1-32	経過時間 100 年時の局所安全率の分布	4-32
図 4.2.1-33	経過時間 1,000 年時の局所安全率の分布	4-33
図 4.2.1-34	経過時間 10,000 年時の局所安全率の分布	4-34
図 4.2.1-35	経過時間 10 年時の最大せん断ひずみの分布.....	4-35
図 4.2.1-36	経過時間 100 年時の最大せん断ひずみの分布.....	4-36
図 4.2.1-37	経過時間 1,000 年時の最大せん断ひずみの分布.....	4-37
図 4.2.1-38	経過時間 10,000 年時の最大せん断ひずみの分布	4-38
図 4.2.1-39	経過時間 10 年時における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布	4-39
図 4.2.1-40	経過時間 100 年時における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布	4-40
図 4.2.1-41	経過時間 1,000 年時における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布	4-41
図 4.2.1-42	経過時間 10,000 年時における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布	4-42
図 4.2.1-43	壁面近傍の弾性係数の経時変化（ケース a-1）	4-43
図 4.2.1-44	壁面近傍の弾性係数の経時変化（ケース a-10）	4-43
図 4.2.1-45	壁面近傍の弾性係数の経時変化（ケース n-1）	4-44
図 4.2.1-46	壁面近傍の弾性係数の経時変化（ケース n-10）	4-44
図 4.2.1-47	着目要素における最大せん断ひずみの経時変化.....	4-45
図 4.2.1-48	経過時間 0～500 年の最大せん断ひずみの経時変化	4-45
図 4.2.1-49	ケース a-1 における吹付けコンクリートの応力の経時変化	4-46
図 4.2.1-50	ケース a-10 における吹付けコンクリートの応力の経時変化	4-46
図 4.2.1-51	経過時間 0～500 年における肩部の吹付けコンクリートの応力の経時変化の比 較.....	4-47
図 4.2.1-52	新第三紀堆積岩－横置き方式の処分坑道の断面形状	4-48
図 4.2.1-53	新支保工等の剛性を求めるための解析モデル	4-48
図 4.2.1-54	支保工等の剛性の経時変化	4-49
図 4.2.1-55	溶脱期間を変えた場合の吹付けコンクリートの経時変化.....	4-52
図 4.2.1-56	掘削直後の局所安全率の分布.....	4-54
図 4.2.1-57	経過時間 1 年時の局所安全率の分布.....	4-55
図 4.2.1-58	経過時間 10 年時の局所安全率の分布.....	4-56
図 4.2.1-59	経過時間 100 年時の局所安全率の分布	4-57

図 4.2.1-60	経過時間 300 年時の局所安全率の分布	4-58
図 4.2.1-61	経過時間 1,000 年時の局所安全率の分布	4-59
図 4.2.1-62	経過時間 10,000 年時の局所安全率の分布	4-60
図 4.2.1-63	掘削直後の最大せん断ひずみの分布.....	4-61
図 4.2.1-64	経過時間 1 年時の最大せん断ひずみの分布.....	4-62
図 4.2.1-65	経過時間 10 年時の最大せん断ひずみの分布.....	4-63
図 4.2.1-66	経過時間 100 年時の最大せん断ひずみの分布.....	4-64
図 4.2.1-67	経過時間 300 年時の最大せん断ひずみの分布.....	4-65
図 4.2.1-68	経過時間 1,000 年時の最大せん断ひずみの分布.....	4-66
図 4.2.1-69	経過時間 10,000 年時の最大せん断ひずみの分布	4-67
図 4.2.1-70	掘削直後における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布	4-68
図 4.2.1-71	経過時間 1 年後における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布	4-69
図 4.2.1-72	経過時間 10 年後における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布	4-70
図 4.2.1-73	経過時間 100 年後における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布	4-71
図 4.2.1-74	経過時間 300 年後における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布	4-72
図 4.2.1-75	経過時間 1,000 年後における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布	4-73
図 4.2.1-76	経過時間 10,000 年後における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布	4-74
図 4.2.1-77	壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース A、図 4.2.1-22 再掲)	4-75
図 4.2.1-78	壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース B)	4-75
図 4.2.1-79	壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース C)	4-76
図 4.2.1-80	着目要素における最大せん断ひずみの経時変化.....	4-77
図 4.2.1-81	経過時間 0~500 年の最大せん断ひずみの経時変化	4-77
図 4.2.1-82	ケース A における吹付けコンクリートの応力の経時変化	4-78
図 4.2.1-83	ケース B における吹付けコンクリートの応力の経時変化	4-78
図 4.2.1-84	ケース C における吹付けコンクリートの応力の経時変化	4-79
図 4.2.1-85	経過時間 0~500 年における肩部の吹付けコンクリートの応力の経時変化の比較.....	4-79
図 4.2.1-86	支保工等の剛性の経時変化	4-80
図 4.2.1-87	試験坑道周辺の地質状況[9].....	4-81
図 4.2.1-88	計測機器の配置[9]	4-82
図 4.2.1-89	Ex.C 計測断面における岩盤変位計の配置パターン[9].....	4-82
図 4.2.1-90	解析モデル[9]	4-83
図 4.2.1-91	天盤内 1m、2m および 3m の鉛直方向変位の解析値と計測値の比較[9]	4-84
図 4.2.1-92	坑道底盤 1.2m 高さにおける水平方向のコンバージェンスの経時変化の比較[9]	4-85
図 4.2.1-93	左右肩部のコンバージェンスの計測値の平均と解析値の比較[9]	4-85
図 4.2.1-94	解析モデル[10]	4-87
図 4.2.1-95	壁面 50cm 付近の岩盤内変位の経時変化の比較[10]	4-87

図 4.2.1-96	安定性評価の限界値の時間変動と保持期間の変化のイメージ	4-89
図 4.2.1-97	主応力線図上にプロットした地圧測定結果[16]	4-91
図 4.2.1-98	時間依存性を考慮した破壊基準のイメージ	4-92
図 4.2.1-99	押し込み試験の概念と応力-ひずみ関係[17]、[18]	4-93
図 4.2.1-100	田下凝灰岩（気乾状態）に対する押し込み試験時のモールの応力円と包絡線 [18]	4-93
図 4.2.1-101	地圧データと包絡線の比較[18]	4-94
図 4.2.1-102	緩み領域の強度回復の概念[17]	4-94
図 4.2.1-103	一般化された破壊接近度のイメージ[19]	4-95
図 4.2.1-104	押し込み試験の室内試験結果とシミュレーションの比較[19]	4-96
図 4.2.1-105	道路トンネルにおける定期点検を対象とした維持管理の基本的なフロー	4-98
図 4.2.1-106	昨年度ケース7における吹付けコンクリート壁面の変位速度	4-100
図 4.2.1-107	鉄道トンネルにおける標準的な維持管理の手順[25]	4-101
図 4.2.1-108	幅と延長によるひび割れの評価の目安[25]	4-104
図 4.2.1-109	応力-ひずみ曲線と限界ひずみの関係[30]	4-106
図 4.2.1-110	載荷速度を変えた場合の一軸圧縮試験の応力-ひずみ曲線[31]	4-106
図 4.2.2-1	水理学的影響の評価方法の検討フロー	4-108
図 4.2.2-2	回収可能性維持状態のオプション[2]	4-109
図 4.2.2-3	水理学的影響の評価方法の検討項目と定量化に必要な技術検討項目との対応	4-109
図 4.2.2-4	HLW 処分施設の概念図[2]	4-111
図 4.2.2-5	パネルスケールモデルの解析領域イメージ[4]	4-112
図 4.2.2-6	処分パネルの例（Through-type）[4]	4-113
図 4.2.2-7	処分パネルの例（Dead-end-type）[4]	4-113
図 4.2.2-8	パネルスケールモデルの解析領域の設定	4-114
図 4.2.2-9	パネルスケールモデルにおける境界条件の設定	4-115
図 4.2.2-10	候補母岩と検討対象母岩[6]	4-118
図 4.2.2-11	不飽和特性曲線（岩盤、EDZ、グラウト）	4-124
図 4.2.2-12	不飽和特性曲線（支保工、インバート）	4-125
図 4.2.2-13	不飽和特性曲線（緩衝材）	4-126
図 4.2.2-14	不飽和特性曲線（埋戻し材）	4-127
図 4.2.2-15	地下施設配置検討結果（Trough-type）	4-129
図 4.2.2-16	地下施設配置検討結果（Dead-end-type）	4-129
図 4.2.2-17	3D パネルスケールモデル（Through-type）	4-130
図 4.2.2-18	3D パネルスケールモデル（Dead-end-type）	4-131
図 4.2.2-19	グラウト、キャップロックのモデル化（Through-type）	4-142
図 4.2.2-20	グラウト、キャップロックのモデル化（Dead-end-type）	4-143

図 4.2.2-21	連絡坑道掘削時の湧水量の経時変化 (case1a : Through-type)	4-145
図 4.2.2-22	連絡坑道掘削時の湧水量の経時変化 (case1b : Dead-end-type)	4-146
図 4.2.2-23	連絡坑道掘削時の定常状態全水頭分布 (case1a : Through-type)	4-147
図 4.2.2-24	連絡坑道掘削時の定常状態全水頭分布 (case1b : Dead-end-type)	4-148
図 4.2.2-25	処分坑道掘削時の湧水量の経時変化 (case1a : Through-type)	4-150
図 4.2.2-26	処分坑道掘削時の湧水量の経時変化 (case1b : Dead-end-type)	4-151
図 4.2.2-27	処分坑道掘削時の定常状態全水頭分布 (case1a : Through-type)	4-152
図 4.2.2-28	処分坑道掘削時の定常状態全水頭分布 (case1b : Dead-end-type)	4-153
図 4.2.2-29	処分坑道掘削時の全水頭分布の経時変化 (case1a : Through-type)	4-154
図 4.2.2-30	処分坑道掘削時の全水頭分布の経時変化 (case1b : Dead-end-type)	4-155
図 4.2.2-31	処分坑道掘削時の湧水量の経時変化の比較 (Through-type)	4-157
図 4.2.2-32	処分坑道掘削時の湧水量の経時変化の比較 (Dead-end-type)	4-158
図 4.2.2-33	処分坑道掘削時の定常全水頭分布の比較 (Through-type)	4-159
図 4.2.2-34	処分坑道掘削時の定常全水頭分布の比較 (Dead-end-type)	4-160
図 4.2.2-35	処分坑道埋戻時の湧水量の経時変化の比較 (case4a : Through-type)	4-162
図 4.2.2-36	処分坑道埋戻時の湧水量の経時変化の比較 (case4b : Dead-end-type)	4-163
図 4.2.2-37	処分坑道埋戻時の全水頭分布の経時変化 (case4a : Through-type)	4-164
図 4.2.2-38	処分坑道埋戻時の全水頭分布の経時変化 (case4b : Dead-end-type)	4-165
図 4.2.2-39	状態オプションの違いによる定常湧水量の比較 (Through-type)	4-167
図 4.2.2-40	状態オプションの違いによる定常湧水量の比較 (Dead-end-type)	4-167
図 4.2.2-41	湧水量への影響検討用 2D モデル (横置き PEM タイプ)	4-171
図 4.2.2-42	湧水量への影響検討用 3D モデル (縦置きタイプ : case6a)	4-171
図 4.2.2-43	2D、3D モデル解析での底部境界における全水頭の経時変化	4-172
図 4.2.2-44	2D、3D モデル解析で対象とする処分坑道の位置	4-173
図 4.2.2-45	メッシュ分割の違いと湧水量の経時変化の比較	4-174
図 4.2.2-46	感度解析条件と湧水量の経時変化の比較	4-176
図 4.2.2-47	キャップロックの有無と湧水量の経時変化の比較	4-177
図 4.2.2-48	縦置きタイプ (case6a) における不飽和領域の経時変化	4-179
図 4.2.2-49	EDZ 考慮 (case9b) における不飽和領域の経時変化	4-181
図 4.2.2-50	グラウト、EDZ 考慮 (case10b) における不飽和領域の経時変化	4-182
図 4.2.2-51	キャップロック考慮 (case11b) における不飽和領域の経時変化	4-183
図 4.2.2-52	解析モデルの概要	4-184
図 4.2.2-53	モデル下端の圧力境界	4-185
図 4.2.2-54	FEM 解析結果における坑道内湧水量 (図 4.2.2-46 再掲)	4-186
図 4.2.2-55	飽和度分布の比較 (閉鎖前 : 初期~30 日後)	4-187
図 4.2.2-56	飽和度分布の比較 (閉鎖前 : 90 日後~2 年後)	4-188
図 4.2.2-57	飽和度分布の比較 (閉鎖前 : 3 年後~5 年後)	4-189
図 4.2.2-58	飽和度分布の比較 (閉鎖前 : 6 年後~8 年後)	4-190

図 4.2.2-59	飽和度分布の比較（閉鎖前：9年後～10年後）	4-191
図 4.2.2-60	坑道内湧水量（case9b'）	4-191
図 4.2.2-61	パネルスケールモデルでの坑道周辺のメッシュ分割	4-199
図 4.2.2-62	処分坑道再冠水時の全水頭分布の経時変化（case16b：Dead-end-type）	4-201
図 4.2.2-63	処分坑道再冠水時の全水頭分布の経時変化（case16a：Through-type）	4-202
図 4.2.2-64	処分坑道再冠水時の全水頭分布の経時変化（case17b：Dead-end-type）	4-203
図 4.2.2-65	再冠水解析における 2D 処分坑道詳細モデルの比較	4-205
図 4.2.2-66	再冠水解析における 2D 処分坑道詳細モデルの底部境界水頭の経時変化	4-206
図 4.2.2-67	再冠水解析（case18b：基本ケース）における不飽和領域の経時変化	4-207
図 4.2.2-68	再冠水解析（case19b：EDZ あり）における不飽和領域の経時変化	4-208
図 4.2.2-69	再冠水解析（case20b：EDZ+グラウトあり）における不飽和領域の経時変化	4-209
図 4.2.2-70	再冠水解析（case21b：キャップロック考慮）における不飽和領域の経時変化	4-210
図 4.2.2-71	再冠水解析（case18b：基本ケース）における全水頭分布の経時変化	4-211
図 4.2.2-72	再冠水解析（case19b：EDZ あり）における全水頭分布の経時変化	4-212
図 4.2.2-73	再冠水解析（case20b：EDZ+グラウトあり）における全水頭分布の経時変化	4-213
図 4.2.2-74	再冠水解析（case21b：キャップロック考慮）における全水頭分布の経時変化	4-214
図 4.2.2-75	解析モデル概要図（深度：GL-500m 周辺の拡大図）	4-216
図 4.2.2-76	飽和度分布の比較（再冠水時：初期～30 日後）	4-217
図 4.2.2-77	飽和度分布の比較（再冠水時：90 日後～2 年後）	4-218
図 4.2.2-78	EDZ 領域に形成された不飽和領域の再冠水過程（case19b'）	4-219
図 4.2.2-79	ベントナイト流出評価のための湧水量の提示の例	4-222
図 4.2.2-80	3D モデル解析での底部境界における全水頭の経時変化	4-222
図 4.2.3-1	PID の枠組みの例（横置き・PEM 方式、廃棄体を回収しない場合） [1]...	4-223
図 4.2.3-2	調査内容と手順	4-224
図 4.2.3-3	水理学的影響評価結果から化学的影響評価へのデータの引き渡す情報との関係	4-235
図 4.2.3-4	坑道近傍の地球化学的解析用 1 次元モデルの概念	4-236
図 4.3.1-1	昨年度ケース 7 における肩部の要素の最大せん断ひずみの経時変化 [1]	4-239
図 4.3.1-2	昨年度ケース 7 における着目要素の吹付けコンクリート応力の経時変化 [1]	4-239
図 4.3.1-3	Through-type における連絡坑道と処分坑道からの湧水量（図 4.2.2-25(a)再掲）	4-240
図 4.3.1-4	Dead-end-type における連絡坑道と処分坑道からの湧水量（図 4.2.2-26(a)再掲）	4-241

図 4.3.2-1	昨年度ケース 8 における経過時間 200 年後の主応力.....	4-243
図 4.3.2-2	肩部の要素における最大せん断ひずみの経時変化（昨年度ケース 8） [1]..	4-243
図 4.3.2-3	着目要素における吹付けコンクリート応力の経時変化（昨年度ケース 8 図 4.2.1-25 再掲） [1].....	4-244
図 4.3.3-1	ベントナイト流出評価のための湧水量の提示例（図 4.2.2-79 再掲）	4-247
図 4.3.4-1	坑道近傍の地球化学的解析用 1 次元モデルの概念（図 4.2.3-4 再掲）	4-248
図 4.3.6-1	処分坑道再冠水時の全水頭分布の経時変化（図 4.2.2-62 再掲）	4-249
図 5.1.1-1	OECD/NEA レポートで示された R-Scale[1]	5-2
図 5.2.1-1	ユッカマウンテンでの廃棄体定置概念と回収可能性維持期間の状態[5]	5-5
図 5.2.1-2	DOE が検討している回収可能性維持期間とその対応[5].....	5-5
図 5.2.2-1	フランス ANDRA が開発した回収性を考慮した廃棄体定置概念[7].....	5-6
図 5.2.2-2	処分事業段階における Industrial pilot phase[8].....	5-6
図 5.2.3-1	長期監視付処分概念（EKRA 概念[9]）	5-7
図 5.2.4-1	Phased Adaptive Management での処分事業工程と回収可能性維持期間[10]	5-8
図 5.2.4-2	NWMO が計画する廃棄体定置の概念と実証施設[11]	5-9
図 6.1.1-1	回収可能性の維持についての検討に関する成果目標および 5 ヶ年計画[1] (再掲)	6-1
図 6.1.1-2	回収可能性の維持についての検討に関する 5 ヶ年計画の見直し.....	6-3

表 目 次

表 2.2-1	委員名簿（可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会）	2-2
表 2.2-2	本検討会で議論の対象として抽出した 13 の検討項目	2-2
表 2.2-3	検討会における検討の経緯	2-3
表 3.1-1	R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目	3-2
表 3.2-1	定量化に必要な各技術検討項目に対する個別番号表記の対応表	3-3
表 3.2.1-1	定量化に必要となる技術の現状整理（定量化に必要な技術検討項目 i ~ v）	3-6
表 3.2.1-2	定量化に必要となる技術の現状整理（定量化に必要な技術検討項目 vi ~ xi）	3-9
表 3.2.2-1	定量化に必要な技術検討項目に対する解析技術等に関する取り組み状況（定量化に必要な技術検討項目 i ~ ii）	3-4
表 3.2.2-2	腐食深さの定置条件、および時間依存性比較[4]	3-7
表 3.2.2-3	定量化に必要な技術検討項目に対する解析技術等に関する取り組み状況（定量化に必要な技術検討項目 iii ~ v）	3-8
表 3.2.2-4	定量化に必要な技術検討項目に対する解析技術等に関する取り組み状況（定量化に必要な技術検討項目 vi ~ viii）	3-11
表 3.2.2-5	定量化に必要な技術検討項目に対する解析技術等に関する取り組み取組状況（定量化に必要な技術検討項目 ix ~ xi）	3-13
表 3.2.2-6	定量化に必要な各技術検討項目に対する解析技術等に関する取り組み状況の概要	3-15
表 3.3.3-1	オーバーパックに対する基本要件[18]	3-21
表 3.3.3-2	オーバーパックの設計要件[18]	3-21
表 3.3.3-3	放射性核種の隔離のための緩衝材の設計要件[18]	3-22
表 3.3.3-4	緩衝材の設計要件[18]	3-22
表 3.3.3-5	オーバーパックの設計要件[24]	3-23
表 3.3.3-6	緩衝材の設計要件[24]	3-24
表 3.3.3-7	支保工に対する要件[24]	3-24
表 3.3.3-8	地上施設の設計要件[24]	3-25
表 3.3.3-9	地下施設の設計要件[24]	3-26
表 3.3.3-10	技術要件の設定の考え方[23]	3-27
表 3.3.3-11	事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係[23]	3-28
表 3.3.3-12	設計因子[24]	3-29
表 3.3.4-1	事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係[3]	3-32
表 3.3.4-2	地下施設の技術要件（NUMO, 2004 に一部加筆）[3]	3-32
表 3.3.4-3	回収可能性維持を考慮した場合の技術要件の具体例（定量化に必要な技術検討項目 i ~ ii）	3-34

表 3.3.4-4	回収可能性維持を考慮した場合の技術要件の具体例(定量化に必要な技術検討項目 iii～iv)	3-37
表 3.3.4-5	回収可能性維持を考慮した場合の技術要件の具体例(定量化に必要な技術検討項目 v)	3-39
表 3.3.4-6	高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係[3]	3-41
表 3.3.4-7	オーバーパックの技術要件(基本的なバリア性能の確保)[3]	3-41
表 3.3.4-8	オーバーパックの長期健全性の維持に関する技術要件[3]	3-43
表 3.3.4-9	緩衝材の技術要件(基本的なバリア性能の確保)[3]	3-43
表 3.3.4-10	緩衝材の技術要件(長期健全性の維持)[3]	3-45
表 3.3.4-11	埋め戻し材・止水プラグの技術要件(基本的なバリア性能の確保)[3]	3-45
表 3.3.4-12	埋め戻し材、止水プラグの長期健全性の維持に関する技術要件[3]	3-46
表 3.3.4-13	回収可能性維持を考慮した場合の技術要件の具体例(定量化に必要な技術検討項目 vi～viii)	3-47
表 3.3.4-14	閉鎖後長期の安全確保の基本概念と安全機能[3]	3-49
表 3.3.4-15	母岩の好ましい特性[3]	3-49
表 3.3.4-16	回収可能性維持を考慮した場合の技術要件の具体例(定量化に必要な技術検討項目 ix～xi)	3-52
表 3.3.4-17	回収可能性維持を判断するための指標の例(定量化に必要な技術検討項目 i～ii)	3-55
表 3.3.4-18	回収可能性維持を判断するための指標の例(定量化に必要な技術検討項目 iii～iv)	3-57
表 3.3.4-19	回収可能性維持を判断するための指標の例(定量化に必要な技術検討項目 v)	3-59
表 3.3.4-20	回収可能性維持を判断するための指標の例(定量化に必要な技術検討項目 vi～viii)	3-62
表 3.3.4-21	回収可能性維持を判断するための指標の例(定量化に必要な技術検討項目 ix～xi)	3-64
表 3.3.5-1	回収可能性を維持することに対する技術的な要件例	3-65
表 3.3.5-2	基本方針の要求事項からの技術要件設定例	3-66
表 3.4.1-1	技術要素マップの技術体系を構成する技術群の内容と要件[1]	3-74
表 3.4.1-2	技術要素マップの技術体系を構成する技術群の展開(技術群 A および技術群 B : 維持更新と回収技術)[1]	3-75
表 3.4.1-3	技術要素マップの技術体系を構成する技術群の展開(技術群 C および技術群 D : 閉鎖後長期の安全性)[1]	3-75
表 3.4.1-4	技術要素マップの技術体系を構成する技術群の展開(技術群 E および技術群 F : 事業期間中の安全性)[1]	3-76
表 3.4.1-5	技術要素展開表 技術群 A. 坑道維持更新技術「A-1 支保工等の維持管理・更新技術」[1]	3-77

表 3.4.1-6	技術要素展開表 技術群 A. 坑道維持更新技術「A-2 排水・換気設備、その他（電源・防災・避難等）の維持管理・更新技術」[1]	3-78
表 3.4.1-7	回収維持技術および回収技術の整理（定量化に必要な技術検討項目 i～ii）	3-79
表 3.4.1-8	技術要素展開表 技術群 A. 坑道維持更新技術「A-2 排水・換気設備、その他（電源・防災・避難等）の維持管理・更新技術」[1]	3-80
表 3.4.1-9	PEM を対象とした回収手順の例と作業項目、必要技術の整理[1]（赤枠加筆）	3-81
表 3.4.1-10	回収維持技術および回収技術の整理（定量化に必要な技術検討項目 iii～iv）	3-83
表 3.4.1-11	技術要素展開表 技術群 B. 回収技術「B-2 廃棄体（PEM）回収・搬出技術」[1]	3-84
表 3.4.1-12	PEM を対象とした回収手順の例と作業項目、必要技術の整理[1]（赤枠加筆）	3-85
表 3.4.1-13	回収維持技術および回収技術の整理（定量化に必要な技術検討項目 v）	3-86
表 3.4.1-14	技術要素展開表 技術群 D. 回収技術「D-1 坑道維持更新技術の高度化」[1]	3-88
表 3.4.1-15	回収維持技術および回収技術の整理（定量化に必要な技術検討項目 vi～viii）	3-89
表 3.4.1-16	回収維持技術および回収技術の整理（定量化に必要な技術検討項目 ix～xi）	3-91
表 3.4.3-1	定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術および回収技術とその研究課題（定量化に必要な技術検討項目 i～ii）	3-106
表 3.4.3-2	定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術および回収技術とその研究課題（定量化に必要な技術検討項目 iii～iv）	3-109
表 3.4.3-3	定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術および回収技術とその研究課題（定量化に必要な技術検討項目 v）	3-111
表 3.4.3-4	定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術および回収技術とその研究課題（定量化に必要な技術検討項目 vi～viii）	3-114
表 3.4.3-5	定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術および回収技術とその研究課題（定量化に必要な技術検討項目 ix～xi）	3-117
表 4.2.1-1	新第三紀堆積岩の解析用物性値	4-9
表 4.2.1-2	クリープ挙動を支配する物性値	4-9
表 4.2.1-3	埋戻し材の坑道変形に対する支持効果に関する解析ケース	4-27
表 4.2.1-4	埋戻し材の坑道変形に対する支持効果に関する解析ケース	4-51
表 4.2.1-5	解析に用いられたパラメータ[9]	4-83
表 4.2.1-6	同定されたコンプライアンス可変型モデルのパラメータ[10]	4-86
表 4.2.1-7	解析に用いられた岩盤の物性値[10]	4-86

表 4.2.1-8	道路トンネルの点検要領類の位置付けおよび適用範囲.....	4-97
表 4.2.1-9	維持管理便覧に示された点検の定義[23]	4-97
表 4.2.1-10	本体工における対策区分[23].....	4-98
表 4.2.1-11	変状の種類[23].....	4-99
表 4.2.1-12	変形速度に対する判定の目安[23]	4-100
表 4.2.1-13	鉄道トンネル維持管理に示された検査の定義[25].....	4-102
表 4.2.1-14	標準的な健全度と変状の程度等の関係[25].....	4-102
表 4.2.1-15	個別検査におけるトンネル構造の安定性の照査例[25]	4-103
表 4.2.2-1	透水係数と間隙率の設定値	4-118
表 4.2.2-2	比貯留係数の設定値	4-119
表 4.2.2-3	飽和透過係数の設定値.....	4-122
表 4.2.2-4	不飽和特性の設定用パラメータ一覧表	4-123
表 4.2.2-5	透水係数と間隙率の設定値 (表 4.2.2-1 の再掲)	4-136
表 4.2.2-6	パネルスケールモデルによる解析ケース	4-141
表 4.2.2-7	非定常解析のための解析時間ステップ、時間間隔.....	4-144
表 4.2.2-8	処分坑道掘削時の湧水量の算出結果 (基本ケース : case1a、case1b)	4-149
表 4.2.2-9	処分坑道掘削時の定常湧水量の算出結果 (Through-type)	4-156
表 4.2.2-10	処分坑道掘削時の定常湧水量の算出結果 (Dead-end-type)	4-156
表 4.2.2-11	状態オプションの違いによる定常湧水量の算出結果 (Through-type) ...	4-166
表 4.2.2-12	状態オプションの違いによる定常湧水量の算出結果 (Dead-end-type) .	4-166
表 4.2.2-13	処分坑道詳細モデル等による解析ケース	4-170
表 4.2.2-14	「処分坑道詳細モデル」等による解析ケース (表 4.2.2-13 再掲)	4-178
表 4.2.2-15	FDM による解析ケース	4-185
表 4.2.2-16	再冠水評価のためのパネルスケールモデルによる解析ケース.....	4-199
表 4.2.2-17	再冠水評価のための 2D 処分坑道詳細モデルによる解析ケース.....	4-205
表 4.2.2-18	FDM による解析ケース	4-216
表 4.2.3-1	化学的影響の検討対象となり得る項目	4-225
表 4.2.3-2	閉鎖前の作業環境の安全性に関する影響評価における着目点との関連性 ..	4-226
表 4.2.3-3	閉鎖後の長期安全性に関する影響評価における着目点との関連性	4-226
表 4.2.3-4	人工部材 (セメント系材料および鋼材) の変質が閉鎖前の作業環境の安全性に及ぼす影響の大きさ	4-227
表 4.2.3-5	高 pH 地下水による天然バリアの変質が閉鎖前の作業環境の安全性に及ぼす影響の大きさ	4-228
表 4.2.3-6	鋼材や PEM 容器の腐食による水素ガス発生が閉鎖前の作業環境の安全性に及ぼす影響の大きさ	4-229
表 4.2.3-7	坑道近傍の岩盤の乾燥風化が閉鎖前の作業環境の安全性に及ぼす影響の大きさ	4-229
表 4.2.3-8	高 pH 地下水による天然バリアの変質が閉鎖後の長期安全性に及ぼす影響の大	

かさ	4-230
表 4.2.3-9 坑道近傍の岩盤の風化が閉鎖後の長期安全性に及ぼす影響の大きさ	4-231
表 4.2.3-10 予想される影響の大きさのまとめ	4-232
表 4.2.3-11 検討対象となる項目のまとめと次年度以降の取り組み	4-234
表 4.3.2-1 処分坑道掘削時の定常湧水量の算出結果（Through-type、表 4.2.2-9 再掲）	4-245
表 4.3.2-2 処分坑道掘削時の定常湧水量の算出結果（Dead-end-type、表 4.2.2-10 再掲）	4-245

第1章 はじめに

1.1 背景および目的

我が国における高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る回収可能性に関する議論は、特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（以下、「最終処分法」という。）が制定される以前から、原子力委員会高レベル放射性廃棄物処分懇談会において議論が行われている。また、最終処分法の制定後では、安全規制制度の整備に向けた検討の中で、当時の原子力安全委員会や総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会において、主に安全性に係る不測の事態への対応等の観点から、定置済みの廃棄物の回収可能性について議論が進められた。

一方で、最終処分法の制定から10年以上を経た現段階においても事業に進展が見られない状況に加え、平成23年3月に発生した東北地方太平洋沖地震や東京電力福島第一原子力発電所事故の結果として、原子力発電や科学技術に対する国民の不安や懸念が高まるなど、地層処分事業を取り巻く社会環境に変化も見られた。このような中、平成25年より、総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会 放射性廃棄物ワーキンググループ[1]（以下、「廃棄物WG」という。）において、これまでの取組を繰り返すのではなく、最終処分政策の枠組みを見直し、原点に立ち返って何が根本的な課題であるかを追求することが必要であるとの認識のもと、我が国の最終処分政策の再構築に向けた議論が行われた。同WGでは、将来世代の選択の柔軟性の確保という観点から地層処分事業における可逆性・回収可能性のあり方等に関する議論が進められ、同WGの中間とりまとめ（平成26年5月）を経て、平成27年5月に改定された特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針[2]（以下、「基本方針」という。）によって、最終処分事業の可逆性の担保、及び最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性（回収可能性）を確保することが定められた。

このような経緯のもと、基本方針によって定められた最終処分事業における可逆性・回収可能性の確保のために、次のような観点で更なる検討や調査研究を進めることが望まれる。

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

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

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

資源エネルギー庁では、上記のような廃棄物WGにおける議論の進展に応じて、示された課題に対応すべく、平成25～26年度に回収可能性を維持できる期間に関する検討に取り組んできた[3]。本事業は、その検討成果を踏まえ、平成27年度より着手しているものであり、上記の背景

を踏まえ、以下の2つを目的としている。

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

本第3分冊では、上記の目的に対応した検討や調査研究に係る取組の成果を取りまとめたもので、以下に、本事業における検討概要を整理したうえで、第2章以降にそれぞれの本年度の検討結果等を詳述する。

1.2 本年度の検討の概要

可逆性・回収可能性に関する我が国における今後の具体的な制度の運用や研究開発の推進に向けて更なる検討が必要と考えられる事項の整理を目的として、大学等に所属する外部有識者の協力のもとで「可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会」（以下、「R&R 検討会」という）を平成27年度に設置し、2カ年にわたって可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理に向けた多面的な検討を進めた。

また、処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等に関しては、図1.2-1に示す成果目標を達成するために、平成27年度に5カ年計画を策定して検討を開始した（以下、「回収可能性の維持についての検討」という）。平成27～28年度には、回収可能性を維持したことによる影響を受ける因子の抽出と影響範囲等の分析、及び一定の期間回収可能性を維持するために必要となる技術の現状調査と課題を含めた整理を進めた。これらの当初の2カ年の取組では、“縦置きブロック定置方式”及び“横置きPEM（Prefabricated Engineered Barrier System Module）定置方式”を対象として定性的な分析に基づき検討や整理を行うとともに、平成28年度からは回収可能性を維持することによる影響の定量的な評価を行うための技術の整備に向けて、坑道の安定性に関する定量的評価の条件や適用可能な解析手法の検討に着手した[4][5]。



図 1.2-1 回収可能性の維持についての検討に関する成果目標および5カ年計画

本年度は、以下のような検討を行う。

(1) 可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理（第2章、別冊）

1.1節に示した背景を踏まえ、可逆性・回収可能性に関する我が国における今後の具体的な制度の運用や研究開発の推進に向けて更なる検討が必要と考えられる事項の整理を目的として、平成27～28年度の本事業のもとでR&R検討会を設置して議論を進めた。本年度は、2カ年に渡る検討会における議論で得られた成果の取りまとめを行う。

また平成28年度のR&R検討会において、様々な処分概念や処分場の埋め戻し状態に対して、回収可能性を維持したときの地質環境や人工バリアへの影響について定量的に検討していくべき具体的な今後の技術検討項目案として以下の9項目を整理している。

- ①開放坑道の健全性（空間安定性）
- ②廃棄体からの熱影響
- ③埋め戻した坑道の再利用時の健全性（一度埋め戻した支保や覆工等の回収時における再利用の可否）
- ④再利用する坑道内の作業環境の制御性（既に存在する廃棄体の周囲の坑道再掘削に伴う湧水環境対策や放射性環境制御の可否）
- ⑤回収時の廃棄体容器の健全性
- ⑥「回収可能性維持期間中の人工バリアや地下構造物の機能劣化（坑内の酸化性雰囲気継続、廃棄体からの熱影響ならびに坑道開放期間中の地下施設の湧水/水理環境に伴う機能劣化）」
- ⑦回収維持期間中の坑道開放に伴う母岩への擾乱影響
- ⑧回収時間の短縮に向けた回収技術・装置の開発
- ⑨回収作業手順の具体化（合理的な回収作業を考慮した施設レイアウト設計や坑道寸法設計等の工学的対策を含む）

本年度の回収可能性の維持についての検討に関しては、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関する調査研究の推進のために、上記9項目のうち、①、③、⑥の3項目を主たる検討項目とし、処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の必要技術の把握、および回収可能性維持期間の定量的評価方法の例示を目的とする。回収可能性維持のための技術の抽出や技術に求められる要件の整理を(2)に、影響を定量的に評価するための手法の検討を(3)で示す。

(2) 回収可能性維持期間の検討（第3章）

定量的に検討していくべき具体的な今後の技術検討項を踏まえた上で、影響評価の取り組み状況の整理、回収可能性維持を考慮した場合に付加される技術要件（多重バリアシステムの構成要素の安全機能に基づいて、その性能が確保されるように設定する要件[6]）についての考え方の検討、回収維持技術^{*1}、回収技術^{*2}などの整理と研究課題の抽出を行う。

(3) 回収可能性維持期間の影響に関する定量的評価（第4章）

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

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

(4) 回収可能性維持期間に関する国際機関、諸外国の事例調査（第5章）

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

(5) 研究計画の更新（第6章）

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

※1 回収維持状態を維持するのに必要な技術で、維持管理技術や構造物の補修技術等

※2 回収作業に必要な技術で、埋戻し材の除去技術、廃棄体の再把握、搬送技術等

第1章 参考文献

- [1] 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 放射性廃棄物ワーキンググループ：放射性廃棄物 WG 中間とりまとめ，経済産業省ホームページ，http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/genshiryoku/houshasei_haikibutsu_wg/report_001.pdf，2014.
- [2] 経済産業省：特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（平成27年5月22日閣議決定），経済産業省ホームページ，<http://www.meti.go.jp/press/2015/05/20150522003/20150522003-1.pdf>.
- [3] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成26年度 地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）平成23年度～平成26年度 総括報告書，2015.
- [4] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成27年度地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書 第2編，2016.
- [5] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成28年度地層処分技術調査等事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 報告書（第2分冊：その1），2017.
- [6] 原子力発電環境整備機構：処分場の安全機能と技術要件（2010年度版），NUMO-TR-10-11，2011.

第2章 可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理

2.1 整理の背景と目的

第1章で述べたように、放射性廃棄物ワーキンググループ¹による議論を経て、現世代として地層処分に向けた取組を進めることが再確認されるとともに、2015年5月に改定された基本方針では、今後より良い処分方法が実用化された場合等に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにするため、基本的に最終処分に関する政策や最終処分事業の可逆性を担保すること、及び原子力発電環境整備機構（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。

こうした背景を踏まえ、可逆性及び回収可能性（以下、「可逆性・回収可能性」という。）に関する我が国における今後の具体的な制度の運用や研究開発の推進に向けて更なる検討が必要と考えられる事項の整理を目的として、平成27～28年度の本事業のもとで「可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会」（以下、「検討会」という。）を設置して議論を進め、本年度に、2カ年に渡る検討会における議論で得られた成果の取りまとめを行った。

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

2.2 検討会における議論の展開

上記の目的に資する議論を進めるため、大学等に所属する外部有識者の協力のもとで本検討会を設置し（表2.2-1）、技術及び社会科学の双方に配慮しつつ議論を展開した。

具体的な進め方として、最初に、可逆性・回収可能性の導入に至る我が国の議論や制度を整理・共有するとともに、国際機関を含む諸外国において先行的に行われた検討や取組の動向等を参照し、そこで論点や課題とされた事項等を本検討会における検討項目として抽出した（表2.2-2）。検討会では、これらの個々の検討項目に対して、以下に留意しつつ順次議論を進めた。2カ年にわたる検討の経緯は表2.2-3のとおりである。

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

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

¹ 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 放射性廃棄物ワーキンググループ。2014年5月に「放射性廃棄物WG 中間とりまとめ」が行われ（総合資源エネルギー調査会, 2014）、下記 URL で公開されている。
http://www.meti.go.jp/committee/souguenergy/denryoku_gas/genshiryoku/houshasei_haikibutsu_wg/report_001.pdf

した²。

・可逆性 (Reversibility)

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

・回収可能性 (Retrievability)

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

表 2.2-1 委員名簿 (可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会)

(50音順、敬称略)

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

注) 勤務先・役職は平成 28 年度当時のもの。

表 2.2-2 本検討会で議論の対象として抽出した 13 の検討項目

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

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

表 2.2-3 検討会における検討の経緯

○第1回（平成27年9月18日）

- 本検討会の設置について（背景、目的、議論の進め方）
- 総合資源エネルギー調査会放射性廃棄物WGでの最近の議論の状況について
- 可逆性・回収可能性に関する海外の議論における主な論点について

○第2回（平成27年11月17日）

- 第2回以降の議題展開案等について
- わが国の現行の制度等について
- 可逆性・回収可能性の制度的位置付けについて

○第3回（平成27年12月25日）

- 諸外国の回収概念の検討・開発事例等について
- 回収概念の共有に向けた本検討会における「検討用シナリオ」について
- 回収可能性の維持に関する技術的な実現性と容易性について

○第4回（平成28年1月20日）

- 回収後の廃棄体管理について

○第5回（平成28年6月23日）

- 可逆性・回収可能性を必要とする動機の再整理について
- 回収可能性の維持に係る技術的な取組における留意事項について

○第6回（平成28年9月30日）

- 回収可能性の維持に係る技術的な取組みに関する計画策定の考え方について（その1）
- 可逆性・回収可能性とモニタリングの関係について

○第7回（平成28年11月22日）

- 回収可能性の維持に係る技術的な取組みに関する計画策定の考え方について（その2）
- その他留意すべき事項について

○第8回（平成29年2月14日）

- 回収可能性の維持に係る技術的な取組みに関する計画策定の考え方について（その3）
- 検討会の最終取りまとめについて

2.3 検討会で得られた主要な成果（要約）

表 2.2-2 に示す 13 の検討項目に関する議論を経て、成果の取りまとめでは、個々の検討項目の関連性や類似性を踏まえて、次の 3 つの観点から整理している。

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

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

- 我が国では、基本方針で可逆性・回収可能性の維持を規定して将来世代の柔軟性を確保しており、諸外国と同様の制度整備状況にあるといえる。但し、将来の可逆性・回収可能性の実行に係る費用負担など、今後の事業進展の状況によって課題となる可能性のある事項が認識された（図 2.3-1）。
- 技術面では、基本方針で示されている回収可能性を維持した場合の影響等に関する調査研究や回収技術の開発が進められている。但し、安全性、回収の容易性、維持期間ならびに費用などが、回収可能性を維持することに関してトレードオフの関係にあり、これらの関係が、回収可能性の維持に関する技術的アプローチ（回収の容易性をどの程度設計に反映するか等）によって異なることが認識された。

このような認識のもと、本検討会において、今後の技術的アプローチの具体化や将来の判断等の場面で必要となる定量的な情報を想定し、これらの定量化に必要となる技術検討項目を抽出して、“技術検討のフレームワーク”（回収可能性の維持に関する技術的アプローチの具体化に係る技術検討の枠組み）として整理した（図 2.3-2）。当面の進め方としては、同フレームワークの中で例示した“定量化に必要となる技術検討項目”から展開される研究開発を着実に進めていく必要がある。

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

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

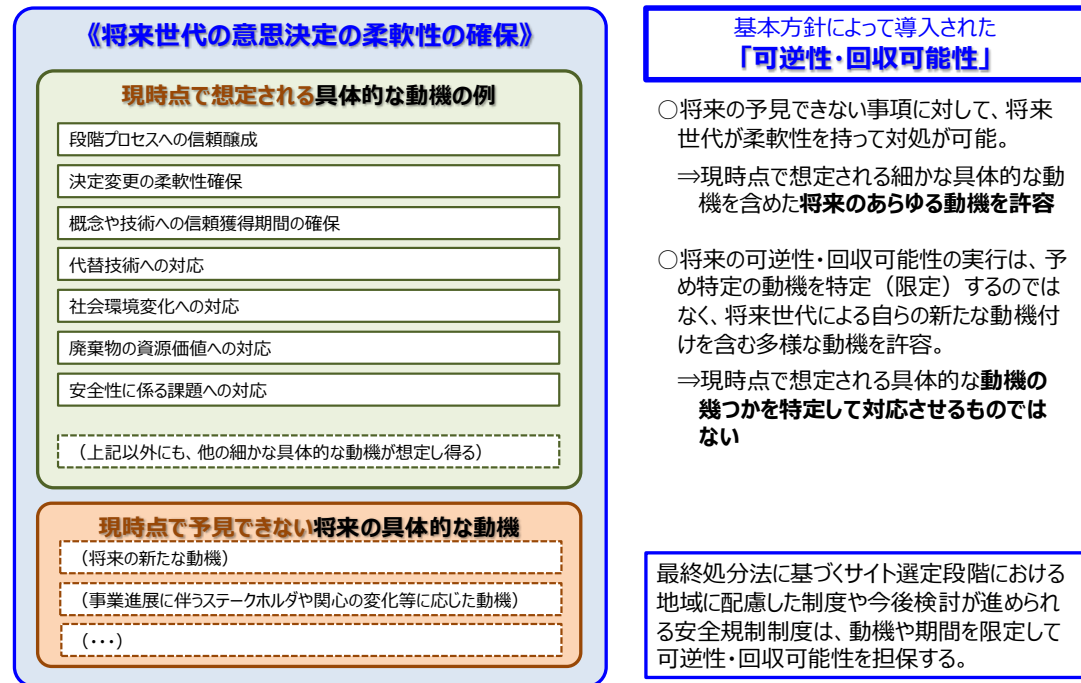


図 2.3-1 可逆性・回収可能性の制度としてのあり方に関する検討会での議論

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

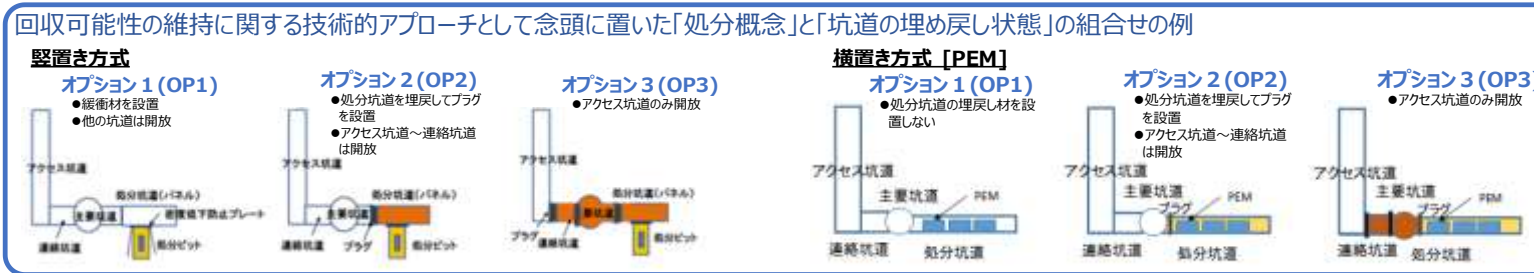


図 2.3-2 検討会で示された回収可能性の維持に関する技術的アプローチの具体化に係る技術検討の枠組み

第3章 回収可能性維持期間の検討

3.1 検討方針と検討項目の概要

前章および別冊で示されるように、R&R 検討会において、回収可能性を維持したときの地質環境や人工バリアへの影響について定量的に検討していくべき具体的な技術検討項目（以下、「定量化に必要な技術検討項目」という）が整理された。この定量化に必要な技術検討項目が、回収可能性維持に係る今後の更なる議論や技術検討を進める上での“検討のベース”と位置付けたことから、この観点から新たに取り組むべき技術課題を具体化していく必要がある。

本章では表 3.1-1 に示す「1.安全性への影響」に関する定量化に必要な技術検討項目を対象に、定量化に必要な技術の現状整理、回収可能性維持を考慮した場合に付加される技術要件についての考え方の検討、といった定性的な検討を行う。また、平成 27 年度および平成 28 年度の回収可能性の維持についての検討結果[1]、[2]から、定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術^{※1}、回収技術^{※2}などの整理と研究課題の抽出を行う。

各検討項目の概要を以下に示す。

(1) 定量化に必要な技術の現状整理 (3.2 節)

定量化に必要な技術検討項目を対象に、必要となる技術の現状整理と影響評価技術である実験や解析技術を用いた取り組み状況の整理を行う。

(2) 回収可能性維持のための技術要件についての考え方の検討 (3.3 節)

操業から閉鎖までの安全確保に係る技術要件（あるいは設計要件）[3]に対して、操業後、閉鎖せずに回収可能性を維持することにより、さらに付加される要件がある可能性が考えられる。この回収可能性維持期間の安全性を確保するために定量化に必要な技術検討項目を対象に、技術に対する要件を検討し、その案と考え方を示す。

(3) 回収維持技術、回収技術などの整理と研究課題の抽出 (3.4 節)

定量化に必要な技術検討項目を対象に、現状で適用できる回収維持技術、回収技術を整理し、今後開発が必要な技術等に対する課題を抽出する。

※1 回収維持状態を維持するのに必要な技術で、維持管理技術や構造物の補修技術等

※2 回収作業に必要な技術で、埋戻し材の除去技術、廃棄体の再把握、搬送技術等

表 3.1-1 R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目

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

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

3.2 定量化に必要な技術の現状整理

本節では、定量化に必要な技術検討項目を対象に、必要となる技術の現状整理と影響評価技術である実験や解析技術を用いた取り組み状況の整理を行う。整理にあたっては、表 3.2-1 に示すように定量化に必要な各技術検討項目に i ~xiの個別番号を付けて表記する。

表 3.2-1 定量化に必要な各技術検討項目に対する個別番号表記の対応表

定量化すべき情報		定量化に必要な技術検討項目	各技術検討項目に対する個別番号	
1. 安全性への影響	(1) 操業期間中の安全性への影響	① 回収可能性維持期間中の開放坑道の安全性への影響	1) 開放坑道内の作業空間の安全性 a. 開放坑道の健全性（空間安定性） b. 開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響	a. ⇒技術検討項目 i b. ⇒技術検討項目 ii
		② 回収作業時の安全性への影響（回収を実施する場合）	1) 回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性 a. 埋め戻した坑道の再利用時の健全性 b. 再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響	a. ⇒技術検討項目 iii b. ⇒技術検討項目 iv
		2) 回収時の廃棄体容器の健全性	⇒技術検討項目 v	
	(2) 閉鎖後長期の安全性への影響	1) 回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う人工バリア等に期待する安全機能への影響 a. 開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響 b. 廃棄体からの熱による影響 c. 坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響	a. ⇒技術検討項目 vi b. ⇒技術検討項目 vii c. ⇒技術検討項目 viii	
2) 回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う天然バリア（母岩）に期待する安全機能への影響 a. 地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込みの影響） b. 開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度 c. ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度		a. ⇒技術検討項目 ix b. ⇒技術検討項目 x c. ⇒技術検討項目 xi		

3.2.1 定量化に向けた技術検討に必要な技術の現状整理

定量化に必要な技術検討項目を対象に、現状での知見や着眼点の整理を行い、必要となる技術の抽出を行った。

(1) 操業期間中の安全性への影響に関する定量化に必要な技術検討項目

1) 定量化に必要な技術検討項目 i 開放坑道の健全性（空間安定性）

土木分野では、山岳トンネルの支保工として吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工や覆工コンクリートが支保工として用いられている。また、地下発電所のように空洞規模の大きい場合にはロックアンカーなども支保工として使用されている。開放坑道の健全性は坑道周辺岩盤の健全性や支保工の健全性に影響を受けるため、これらの健全性を把握する必要がある。

また、道路トンネルや鉄道トンネルの設計では、多くの場合、岩種・岩級と支保工の等級をリンクさせたパターン設計が行われ、周辺岩盤や支保工をモデル化して解析による設計も行われている。また、供用中のトンネルの維持管理ではトンネルの状況を観察、計測によってトンネルの健全性が判断されている。そのため、開放坑道の健全性を把握するためには、原位置での支保工や岩盤の異常や劣化を把握する技術が、また、開放坑道の健全性を回復するために支保工や周辺岩盤を補修・更新する技術が必要となる。

開放坑道の健全性の定量化に必要な技術を以下に示す。

- 開放坑道の健全性評価技術（支保や覆工等の健全性）（周辺岩盤の健全性）
- 支保や覆工等および周辺岩盤の原位置状態把握技術

2) 定量化に必要な技術検討項目 ii 開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響

廃棄体から発生する崩壊熱の影響については、定置後坑道を埋め戻すことを前提に、定置した緩衝材の熱変質の可能性を考慮し、緩衝材の最高温度が 100℃以下となるように処分坑道の離隔距離や廃棄体の埋設間隔が決定されている。廃棄体の定置後に坑道を埋め戻さずにした場合、廃棄体からの発熱は作業空間の温度を上昇させ、作業が不可能になる可能性がある。坑内温度を低下させる方法として、既存技術では換気による冷却が一般的であり、冷水を散布する方法も鉱山で実施されたことがある。廃棄体から発生する崩壊熱の影響を評価するためには、熱伝達・熱伝導等の解析技術や熱影響の評価技術が必要となる。

開放坑道内への廃棄体からの熱影響の定量化に必要な技術を以下に示す。

- 開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響に関する評価技術
- 熱伝達・熱伝導解析技術

3) 定量化に必要な技術検討項目 iii 埋め戻した坑道の再利用時の健全性

埋戻した坑道を再利用は土木構造物では事例がなく、鉱山等で水没させた坑道を再利用した例がある。埋め戻した坑道を再利用するには、坑道の再開放時に、周辺岩盤や埋め戻す前に施工した支保工等の健全性の判断が必要となる。

長期間供用しているトンネルの健全性は維持管理により判断されているが、埋め戻し後の変化を追跡した事例はないことから、開放坑道の健全性評価に加えて、埋め戻しによる状態変遷の予

測手法が必要になる。また、処分坑道の再利用では狭隘空間での再掘削や支保工の補修が生じるため、既存技術の高度化や遠隔化も必要になる。

一方、埋め戻している期間中の支保工や周辺岩盤は、開放状態にある場合より劣化程度が小さくなると考えられる。

埋め戻した坑道の再利用時の健全性の定量化に必要な技術を以下に示す。

- 埋め戻した坑道の再利用時の健全性評価技術（支保や覆工等の健全性）（周辺岩盤の健全性）
- 支保や覆工等および周辺岩盤の原位置状態把握技術

4) 定量化に必要な技術検討項目 iv 再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響

埋戻し材を撤去した坑道では、回収する時期にも依存するが、廃棄体からの発熱で坑道壁面の温度が高い状態になっている場合がある。また、廃棄体からの発熱も継続しているため、開放坑道内（作業空間）への廃棄体の熱影響と同様に、熱伝導・熱伝達の解析技術や熱影響の評価技術が必要となる。坑内温度や厚壁温度を低下させる方法として、既存技術では換気による冷却が一般的であり、冷水を散布する方法も鉱山で実施されたことがある。

再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響の定量化に必要な技術を以下に示す。

- 再利用する坑道内（作業空間）へ廃棄体からの熱影響に関する評価技術
- 熱伝達・熱伝導解析技術

5) 定量化に必要な技術検討項目 v 回収時の廃棄体容器の健全性

回収では廃棄体を再把握して搬送するため、回収時の廃棄体が再把握、搬送に耐えうるかどうかの健全性の評価が必要となる。埋め戻された状態にあった廃棄体は腐食により外殻や把握部の強度が低下している可能性があり、開放坑道が維持されている場合でも、表面の高温状態と塩分濃度の高い水滴に接することで局部的な腐食が進展している可能性もある。そのため、健全性に応じた廃棄体の回収・搬出技術も必要となる。

回収時の廃棄体容器の健全性の定量化に必要な技術を以下に示す。

- 定置済み廃棄体容器の健全性評価技術（安全に再把握でき、運搬に耐えること）

上記 1)～5)を整理した結果を表 3.2.1-1 に示す。

表 3.2.1-1 定量化に必要な技術の現状整理（定量化に必要な技術検討項目 i ~ v）

定量化すべき情報		定量化に必要な技術検討項目 及び技術検討の視点		技術検討項目の定量化に必要な技術の現状整理	定量化に必要な技術 (評価技術)	
1 ・ 安全 性 へ の 影 響	(1) 操業 期間中の 安全性へ の影響	①回収可能性 維持期間中の 開放坑道の安 全性への影響	1) 開放坑道内の作業空間の安全性 保守管理のために開放坑道内に人が出入りするた め、開放坑道内の作業空間の安全性確保の観点から、以下の評価・検討や 技術の具体化を行う。	a.開放坑道の健全性（空間安定性）	・山岳トンネルの支保工として吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工や覆工コンクリートが支保工として用いられており、開放坑道の健全性は、坑道周辺岩盤の健全性や支保工の健全性に影響を受けるため、これらの健全性を把握する必要がある。また、供用中のトンネルの維持管理ではトンネルの状況を観察、計測によってトンネルの健全性が判断されている。 ・開放坑道の健全性を把握するためには、原位置での支保工や岩盤の異常や劣化を把握する技術が、また、開放坑道の健全性を回復するために支保工や周辺岩盤を補修・更新する技術が必要となる。	○開放坑道の健全性評価技術（支保や覆工等の健全性）（周辺岩盤の健全性） ○支保や覆工等および周辺岩盤の原位置状態把握技術
				b.開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響	・廃棄体から発生する崩壊熱の影響については、設置後坑道を埋め戻すことを前提に、設置した緩衝材の熱変質の可能性を考慮し、緩衝材の最高温度が100℃以下となるように処分坑道の離隔距離や廃棄体の埋設間隔が決定されている。 ・廃棄体から発生する崩壊熱の影響を評価するためには、熱伝達・熱伝導等の解析技術や熱影響の評価技術が必要となる。	○開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響に関する評価技術 ○熱伝達・熱伝導解析技術
	②回収作業時の 安全性への 影響（回収を 実施する場合）	1) 回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性 一度埋め戻した坑道の再掘削/際利用を前提とする場合に、回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性確保の観点から、以下の評価・検討や技術の具体化を行う。	a.埋め戻した坑道の再利用時の健全性	・埋め戻した坑道を再利用は土木構造物では事例がなく、鉱山等で水没させた坑道を再利用した例がある。 ・埋め戻した坑道を再利用するには、坑道の再開放時に、周辺岩盤や埋め戻す前に施工した支保工等の健全性の判断が必要となる。 ・長期間供用しているトンネルの健全性は維持管理により判断されているが、埋め戻し後の変化を追跡した事例はないことから、開放坑道の健全性評価に加えて、埋め戻しによる状態変遷の予測手法が必要になる。	○埋め戻した坑道の再利用時の健全性評価技術（支保や覆工等の健全性）（周辺岩盤の健全性） ○支保や覆工等および周辺岩盤の原位置状態把握技術	
			b.再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響	・埋戻し材を撤去した坑道では、回収する時期にも依存するが、廃棄体からの発熱で坑道壁面の温度が高い状態になっている場合がある。また、廃棄体からの発熱も継続しているため、開放坑道内（作業空間）への廃棄体の熱影響と同様に、熱伝導・熱伝達の解析技術や熱影響の評価技術が必要となる。	○再利用する坑道内（作業空間）へ廃棄体からの熱影響に関する評価技術 ○熱伝達・熱伝導解析技術	
		2) 回収時の廃棄体容器の健全性 回収装置による把持・取り出しの際には、廃棄体容器に一定の機械強度が要求されることから、廃棄体容器の健全性に関する評価や検討を行う。		・回収では廃棄体を再把持して搬送するため、回収時の廃棄体が再把持、搬送に耐えうるかどうかの健全性の評価が必要となる。 ・埋め戻された状態にあった廃棄体は腐食により外殻や把持部の強度が低下している可能性があり、開放坑道が維持されている場合でも、表面の高温状態と塩分濃度の高い水滴に接することで局部的な腐食が進展している可能性もある。そのため、健全性に応じた廃棄体の回収・搬出技術も必要となる。	○設置済み廃棄体容器の健全性評価技術 (安全に再把持でき、運搬に耐えること)	

(2) 閉鎖後長期の安全性への影響に関する定量化に必要な技術検討項目

1) 定量化に必要な技術検討項目 vi 開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響

回収可能性維持期間中の処分場の状態や維持期間の長さにも依存するが、定置後長期に坑道を開放した場合、換気によるニアフィールドの酸化雰囲気拡大、酸素持ち込みによる微生物活動の活発化などにより、金属材料の腐食速度の増加による水素ガスの発生、鋼製支保やコンクリート構造物の酸化環境での劣化促進、ベントナイトの変質など、人工バリアの機能変化が生じる可能性がある。人工バリアの機能変遷を評価する技術とともに、原位置で現状を把握する技術が必要となる。

開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響の定量化に必要な技術を以下に示す。

○維持期間中（操業期間中）の場の擾乱影響を考慮した人工バリア（及び他の地下構造物）の機能変遷挙動評価技術

○人工バリア及び他の地下構造物の原位置状態把握技術

2) 定量化に必要な技術検討項目 vii 廃棄体からの熱による影響

廃棄体の定置後長期に坑道を開放し、換気が十分でない場合あるいは換気が停止した場合、例えば、PEMの外殻温度が高くなり、内部のベントナイトが100℃以上になる可能性が否定できない。廃棄体を定置した後、坑道を開放した状態において、廃棄体からの熱が人工バリア等の安全機能への影響の有無を定量的に評価する必要がある。開放坑道のままで熱影響を提言するためには、換気が最も有効と考えられることから、換気の維持管理や更新技術が重要となる。

人工バリア等への廃棄体からの熱による影響の定量化に必要な技術を以下に示す。

○維持期間中（操業期間中）の場の擾乱影響を考慮した人工バリア（及び他の地下構造物）の機能変遷挙動評価技術

○人工バリア及び他の地下構造物の原位置状態把握技術

3) 定量化に必要な技術検討項目 viii 坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響

処分坑道を含め地下施設では処分場を閉鎖するまで、発生する湧水を排水しなければならない。回収可能性維持により坑道を開放しておく場合、坑道の健全性と共に排水システムの維持管理や更新が必要となる。また、坑道内の排水に伴い、ニアフィールドは不飽和環境となり、換気による酸素供給と相関して金属材料の腐食促進、ブロック縦置き方式でのベントナイト流出の可能性、支保材等の劣化を促進する環境が形成されるため、定量的な評価でその影響程度を把握しておく必要がある。

坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響の定量化に必要な技術を以下に示す。

○維持期間中（操業期間中）の場の擾乱影響を考慮した人工バリア（及び他の地下構造物）の機能変遷挙動評価技術

○人工バリア及び他の地下構造物の原位置状態把握技術

4) 定量化に必要な技術検討項目 ix 地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込みの影響）

回収可能性維持のために廃棄体を定置した処分坑道を長期に開放しておく場合、換気や排水行為が周辺母岩の地質環境特性を変化させ、天然バリアの核種閉じ込め機能を低下させる可能性がある。このような擾乱は、処分場の立地環境、開放している期間、着目するスケールによっても程度や範囲が異なり、また、長期安全性への影響の観点からは、擾乱された環境がどの程度の期間で回復あるいは安定な環境となるかを定量的に推定しておくことが重要となる。

地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度の定量化に必要な技術を以下に示す。

- 維持期間中（操業期間中）の母岩への擾乱影響評価技術
- 母岩の原位置状態把握技術

5) 定量化に必要な技術検討項目 x 開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度

回収可能性維持のために廃棄体を定置した処分坑道を長期に開放しておく場合、換気や排水行為が周辺母岩の地質環境特性を変化させ、天然バリアの核種閉じ込め機能を変動させる可能性がある。このような擾乱は、開放している期間の長さ、着目するスケール、処分場の地質環境によっても程度が異なり、また、長期安全性への影響の観点からは擾乱された環境がどの程度の期間で回復あるいは安定な環境となるかを定量的に推定しておくことが重要となる。

開放坑道を介した酸素の供給や環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度の定量化に必要な技術を以下に示す。

- 維持期間中（操業期間中）の母岩への擾乱影響評価技術
- 母岩の原位置状態把握技術

6) 定量化に必要な技術検討項目 xi ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度

ベースラインとする地質環境特性は、建設・操業前に取得される地表、地下等の特性値で、通常の変動を把握するためある期間継続して取得される。回収維持期間の坑道内の排水と換気によりベースラインに与える影響とその回復状況を定量的に予測した事例はこれまでない。また、ベースラインの擾乱が天然バリアの安全機能に与える影響について検討された事例はない。特に地下深部でのベースラインの擾乱が天然バリアの安全機能に与える影響を評価するならば、ベースラインの活用方策の検討が必要である。

ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度の定量化に必要な技術を以下に示す。

- 維持期間中（操業期間中）の母岩への擾乱影響評価技術
- 母岩の原位置状態把握技術

上記 1)～6)を整理した結果を表 3.2.1-2 に示す。

表 3.2.1-2 定量化に必要な技術の現状整理 (定量化に必要な技術検討項目 vi ~xi)

定量化すべき情報		定量化に必要な技術検討項目 及び技術検討の視点		技術検討項目の定量化に必要な技術の現状整理	定量化に必要な技術 (評価技術)
1 ・ 安 全 性 へ の 影 響	(2) 閉鎖後長期の安全性 への影響 ：回収可能性維持期間中 の後に回収せずに最終閉 鎖する場合の、人工バ リアや天然バリア (母岩) に期待する閉鎖後長期の 安全機能への影響	1) 回収可能性維持期間 中の開放坑道の存在に伴 う人工バリア等に期待す る安全機能への影響 維持期間中の開放坑道の 存在を踏まえ、人工バ リア (及び他の地下構造 物) に期待する閉鎖後長 期のあんぜんきのうへの 影響を下記観点から評価 する。	a.開放坑道を介した空気 (酸素) の持ち込みによ る人工バリア等の地下構 造物の機能劣化等の影響	・換気によるニアフィールドの酸化雰囲気拡大、酸素持ち込みによる微生物活動の活発化などにより、金属材料の腐食速度の増加による水素ガスの発生、鋼製支保やコンクリート構造物の酸化環境での劣化促進、ベントナイトの変質など、人工バリアの機能変化が生じる可能性がある。 ・人工バリアの機能変遷を評価する技術とともに、原位置で現状を把握する技術が必要となる。	○維持期間中 (操業期間 中) の場の擾乱影響を考慮 した人工バリア (及び他の 地下構造物) の機能変遷挙 動評価技術 ○人工バリア及び他の地下 構造物の原位置状態把握技 術
			b.廃棄体からの熱による 影響	・廃棄体を定置した後、坑道を開放した状態において、廃棄体からの熱が人工バリア等の安全機能への影響の有無を定量的に評価する必要がある。 ・開放坑道のままで熱影響を提言するためには、換気が最も有効と考えられることから、換気の維持管理や更新技術が重要となる。	
			c.坑道開放期間中に継続 する坑内湧水の影響	・処分坑道を含め地下施設では処分場を閉鎖するまで、発生する湧水を排水しなければならない。回収可能性維持により坑道を開放しておく場合、坑道の健全性と共に排水システムの維持管理や更新が必要となる。 ・坑道内の排水に伴い、ニアフィールドは不飽和環境となり、換気による酸素供給と相関して金属材料の腐食促進、ブロック設置方式でのベントナイト流出の可能性、支保材等の劣化を促進する環境が形成されるため、定量的な評価でその影響程度を把握しておく必要がある。	
	2) 回収可能性維持期間 中の開放坑道の存在に伴 う天然バリア (母岩) に 期待する安全機能への影 響 維持期間中の開放坑道の 存在を踏まえ、天然バ リア (母岩) に期待される 閉鎖後長期の安全機能に 係わる次のような影響を 評価する。	a.地下水の引き込み による擾乱影響の範囲と 程度 (化学組成の異なる 地下水の引き込みの影響)	・回収可能性維持のために廃棄体を定置した処分坑道を長期に開放しておく場合、換気や排水行為が周辺母岩の地質環境特性を変化させ、天然バリアの核種閉じ込め機能を低下させる可能性がある。 ・このような擾乱は、処分場の立地環境、開放している期間、着目するスケールによっても程度や範囲が異なり、また、長期安全性への影響の観点からは、擾乱された環境がどの程度の期間で回復あるいは安定な環境となるかを定量的に推定しておくことが重要となる。	○維持期間中 (操業期間 中) の母岩への擾乱影響評 価技術 ○母岩の原位置状態把握技 術	
		b.開放坑道を介した酸 素の供給や環総環境の持 ち込みによる母岩側への 影響範囲と程度	・回収可能性維持のために廃棄体を定置した処分坑道を長期に開放しておく場合、換気や排水行為が周辺母岩の地質環境特性を変化させ、天然バリアの核種閉じ込め機能を変動させる可能性がある。 ・このような擾乱は、開放している期間の長さ、着目するスケール、処分場の地質環境によっても程度が異なり、また、長期安全性への影響の観点からは擾乱された環境がどの程度の期間で回復あるいは安定な環境となるかを定量的に推定しておくことが重要となる。		
		c.ベースライン (建設前 の元の地下環境の状態) への回復過程と回復の程 度	・回収維持期間中の坑道内の排水と換気によりベースラインに与える影響とその回復状況を定量的に予測した事例はこれまでない。 ・また、ベースラインの擾乱が天然バリアの安全機能に与える影響について検討された事例はない。特に地下深部でのベースラインの擾乱が天然バリアの安全機能に与える影響を評価するならば、ベースラインの活用方策の検討が必要である。		

3.2.2 解析技術等に関する取り組み状況の整理

前項で、定量化に向けた技術検討に必要な技術として、影響評価技術や原位置の状態把握のための計測技術を抽出した。ここでは、定量化に必要な技術検討項目を対象に、処分場が決まっていない段階で汎用的な検討を行うという観点から、閉鎖後長期の予測まで一貫して適用可能な影響評価技術である実験や解析技術を用いた取り組みを主に整理する。なお、定量化に必要な技術検討項目に対応する影響評価技術には、原位置状態把握技術も含まれるが、これらは回収維持技術および回収技術の一部として本検討では位置づけ、3.4 節の回収維持技術および回収技術の整理で取り扱う。

定量化に必要な技術検討項目に対応する指標は、3.3 節の回収可能性維持のための技術要件についての考え方の検討に基づき整理したものを用いる。

また、定量化に必要な各技術検討項目を整理する際には、図 3.2.2-1 に示すとおり、廃棄体の定置方式および緩衝材製作・施工方法と、回収可能性維持の状態オプションを考慮する。定置方式および緩衝材製作・施工方法については、豎置きブロック方式と横置き PEM 方式を対象とする。

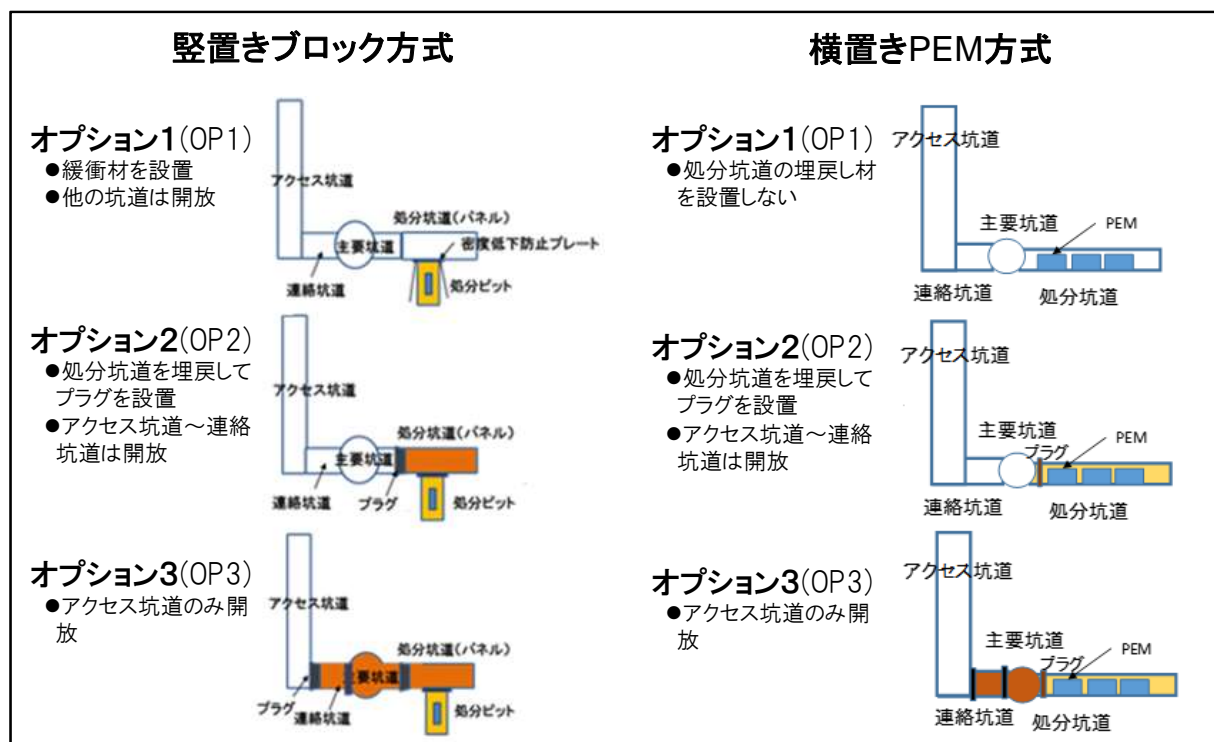


図 3.2.2-1 廃棄体の定置方式と回収可能性維持の状態オプション

(1) 作業期間中の安全性への影響に関する定量化に必要な技術検討項目

1) 定量化に必要な技術検討項目 i 開放坑道の健全性（空間安定性）

坑道の安定性の指標として、岩盤のひずみおよび応力、支保材料の応力を用い、深成岩および新第三紀堆積岩を対象とし、原子力発電環境整備機構（以下、「NUMO」と称する）の処分坑道仕様を参考に、状態オプションを考慮した、坑道安定性に関する解析的評価手法と解析結果例の提示と、坑道安定性への影響低減技術適用時の効果に関する検討を本事業にて実施した[1]。

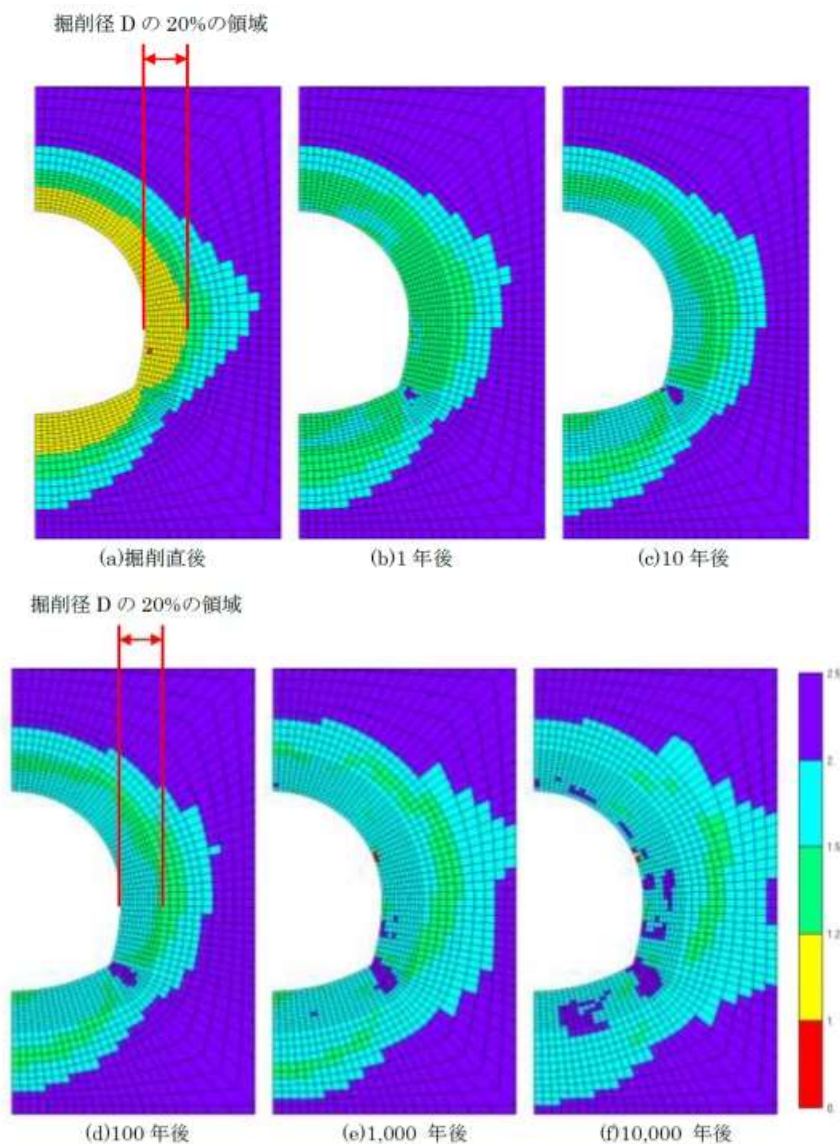


図 3.2.2-2 埋戻されていない処分坑道の周辺岩盤における局所安全率の分布の経時変化[1]

なお本事業の今年度の検討において、各材料の物性変化特性を変えた検討（4.2.1 項）や処分坑道の部材や周辺地質環境への化学的影響評価手法の調査（4.2.3 項）を実施している。

2) 定量化に必要な技術検討項目 ii 開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響
 作業空間への熱影響の指標は坑内気温となる。深成岩（地温が高い地質環境条件）を対象とし、状態オプションを考慮した、換気の無い状態での廃棄体からの熱影響に関する解析的評価手法と解析結果例が提示されている[4]。

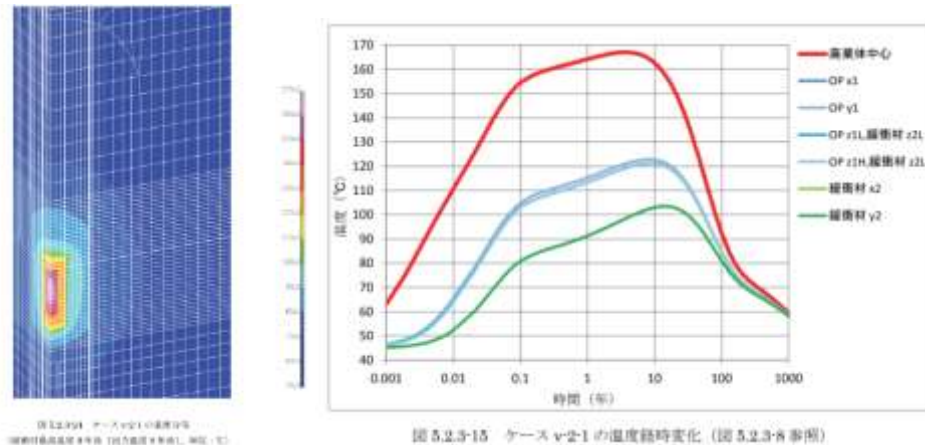


図 3.2.2-3 処分坑道を埋戻されていない状態での温度分布および評価点での温度経時変化（縦置きブロック方式）[4]

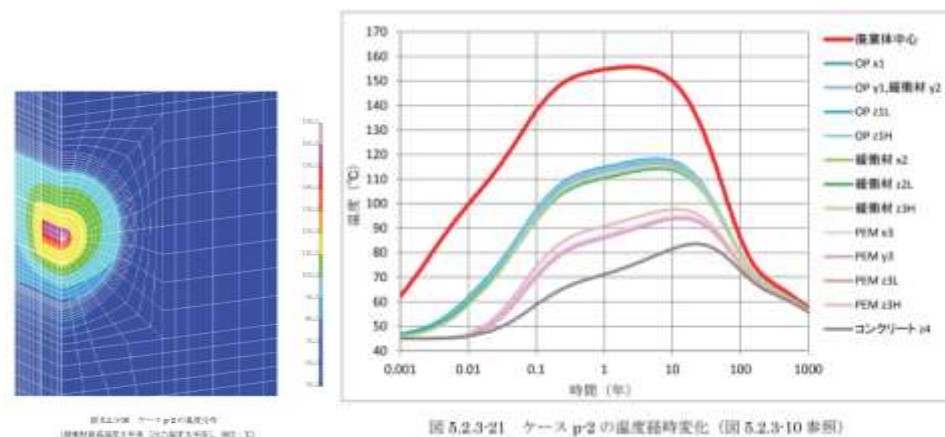


図 3.2.2-4 処分坑道を埋戻されていない状態での温度分布および評価点での温度経時変化（横置き PEM 方式）[4]

また、事業期間中の換気（冷房などの空調）を考慮した解析的評価手法は確立されており、処分場レイアウトを考慮した NUMO による設計検討例がある[5]。

なお、換気を考慮した解析的評価手法は一般のトンネルの建設計画時にも用いられており、換気技術は「ずい道等建設工事における換気技術指針（設計及び粉じん等の測定）[6]」に基づき設計される。

上記 1)～2)を整理した結果を表 3.2.2-1 示す。

表 3.2.2-1 定量化に必要な技術検討項目に対する解析技術等に関する取り組み状況（定量化に必要な技術検討項目 i ~ ii）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」, 例示された「今後の技術検討項目(例)」			検討対象(イメージ)						取り組み方法と状況	備考
定量化すべき情報			掘削方式			換気方式(PEM)				
OP1	OP2	OP3	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	1) 開放坑道内の作業空間の安全性 保守管理のために開放坑道内に人が出入りするため、開放坑道内の作業空間の安全性確保の観点から、以下の評価・検討や技術の具体化を行う。 a. 開放坑道の健全性（空間安定性） b. 開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響							<p>a. 坑道の安定性の指標は岩盤のひずみおよび応力、支保材料の応力として、深成岩および新第三紀堆積岩を対象とし、NUMO の処分坑道仕様を条件とし、状態 OP を考慮した。坑道安定性に関する解析的評価手法と解析結果例の提示。坑道安定性への影響軽減技術適用時の効果例も提示（H26RWMC 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 RWMC 報告書）。</p> <p>図 3.2.2-1 開放坑道が掘削安全確保の目安（イメージ）</p> <p>b. 作業空間への熱影響の指標は坑内気温となる。深成岩（地温が高い地質環境条件）を対象とし、状態 OP を考慮した。換気の無い状態での廃棄体からの熱影響に関する解析的評価手法と解析結果例の提示（H26RWMC 地盤処分回収技術高度化開発報告書）。</p> <p>図 3.2.2-2 開放坑道が掘削熱影響の目安（イメージ）</p>
									<p>b. 換気を考慮した解析的評価手法は一般のトンネルの建設計画時にも用いられており、換気技術は「ずい道等建設工事における換気技術指針（設計及び樹じん等の測定）」に基づき設計する。</p> <p>また、事業期間中の換気（冷房などの空調）を考慮した解析的評価手法は確立されており、処分場レイアウトを考慮した NUMO による設計検討例あり（H29 土木学会年次学術講演会, No. VII-038）。</p>	

3) 定量化に必要な技術検討項目 iii 埋め戻した坑道の再利用時の健全性

坑道の安定性の指標として、岩盤のひずみおよび応力、支保材料の応力を用い、深成岩および新第三紀堆積岩を対象とし、NUMOの処分坑道仕様を参考に、状態オプションを考慮した、坑道安定性に関する解析的評価手法と解析結果例の提示と、坑道安定性への影響低減技術適用時の効果に関する検討を本事業にて実施した[1]。

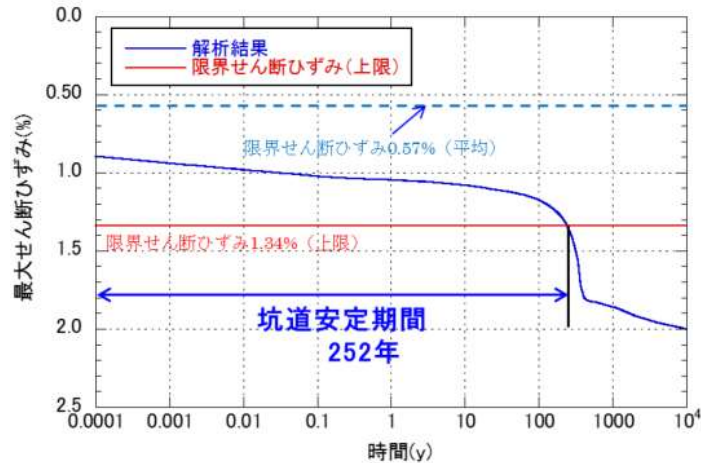


図 3.2.2-5 埋戻した処分坑道の周辺岩盤（着目要素）における最大せん断ひずみの経時変化[1]

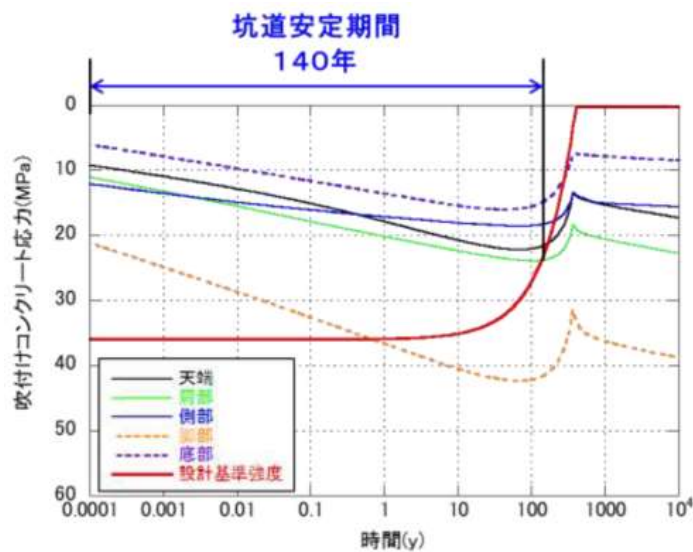


図 3.2.2-6 埋戻した処分坑道の吹付コンクリート（着目要素）における応力の経時変化[1]

なお本事業の今年度の検討において、埋戻し材の膨潤圧や支持効果や各材料の物性変化特性を変えた検討(4.2.1 項)、処分坑道の部材や周辺地質環境への化学的影響評価手法の調査(4.2.3 項)を実施している。

4) 定量化に必要な技術検討項目 iv 再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響
 作業空間への熱影響の指標は坑内気温となる。事業期間中の換気（冷房などの空調）を考慮した解析的評価手法は確立されており、処分場レイアウトを考慮した NUMO による設計検討例がある[5]。

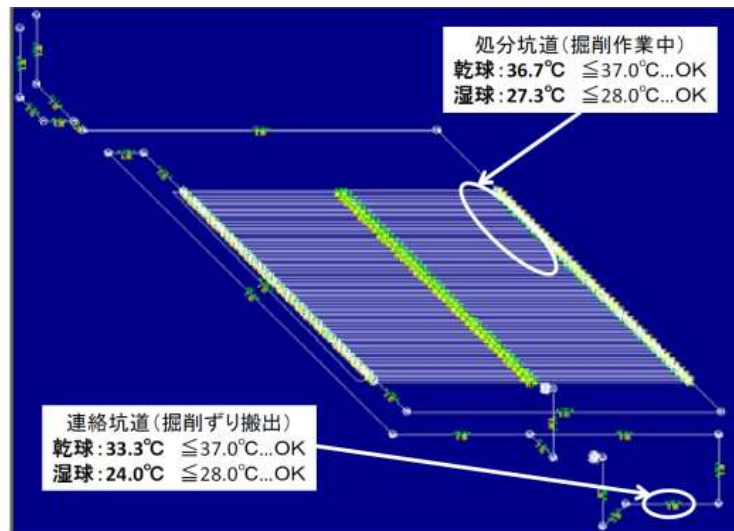


図 3.2.2-7 熱環境解析の結果[5]

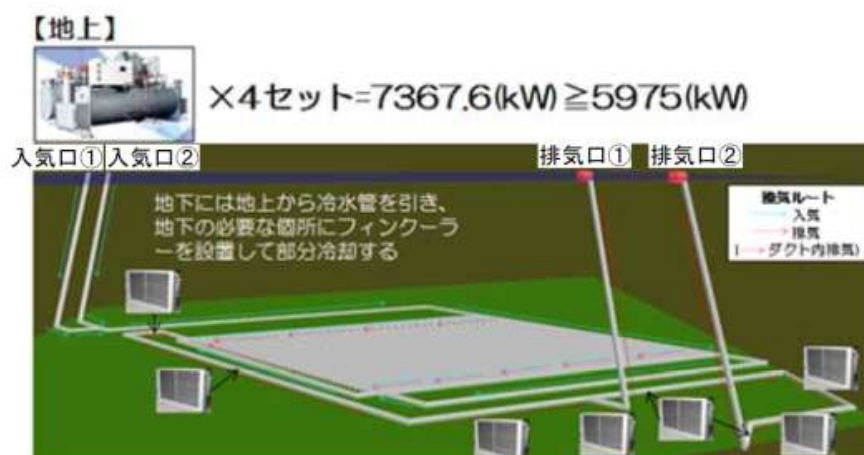


図 3.2.2-8 部分冷却方式による冷房設備の設計例[5]

再掘削／再利用時は建設時と同様の定量的評価方法が適用可能と考えられる。

5) 定量化に必要な技術検討項目 v 回収時の廃棄体容器の健全性

廃棄体容器の健全性の指標はオーバーパックとその溶接部の材料、形状・厚さとなる。廃棄体容器（炭素鋼）の腐食評価に関して、空気・地下水・ベントナイトと接触していると想定した埋め戻し状態を設定し、それぞれの腐食見積の程度の例を提示した検討例がある[4]。

PEM 容器の材質を炭素鋼とした場合、評価手法は上記の検討例（廃棄体容器）と同様となると考えられる。

表 3.2.2-2 腐食深さの定置条件、および時間依存性比較[4]

10年間												
温度(°C)	大気/湿度(R.H.)				地下水/溶存酸素(DO)					ベントナイト		
	40%	60%	80%	100%	8ppm	3ppm	1ppm	0.3ppm	0.1ppm	海洋性	非海洋性	
15			0.13	0.99	0.54	0.20	0.07	0.02	0.01	0.95	0.40	
30		0.05	0.23	1.28	0.68	0.26	0.09	0.03	0.01	0.95	0.40	
45		0.14	0.32	1.57	0.83	0.31	0.10	0.03	0.01	0.47	0.19	
60	0.06	0.23	0.41	1.86	0.97	0.37	0.12	0.04	0.01	0.47	0.19	
75	0.15	0.32	0.50	2.15	1.12	0.42	0.14	0.04	0.02	0.95	0.40	
90	0.24	0.42	0.56	2.44	1.26	0.48	0.16	0.05	0.02	0.95	0.40	
105	0.33	0.51	0.69	2.73	1.41	0.53	0.18	0.06	0.02	0.95	0.40	
120										0.47	0.19	
135										0.47	0.19	
150										0.00	0.00	
100年間												
温度(°C)	大気/湿度(R.H.)				地下水/溶存酸素(DO)					ベントナイト		
	40%	60%	80%	100%	8ppm	3ppm	1ppm	0.3ppm	0.1ppm	海洋性	非海洋性	
15			0.43	0.99	1.69	0.64	0.21	0.07	0.02	3.00	1.25	
30		0.16	0.72	1.28	2.15	0.81	0.27	0.08	0.03	3.00	1.25	
45		0.45	1.01	1.57	2.62	0.98	0.33	0.10	0.04	1.50	0.60	
60	0.18	0.74	1.30	1.86	3.08	1.16	0.39	0.12	0.04	1.50	0.60	
75	0.47	1.03	1.59	2.15	3.54	1.33	0.45	0.14	0.05	3.00	1.25	
90	0.76	1.32	1.88	2.44	4.00	1.50	0.51	0.16	0.06	3.00	1.25	
105	1.05	1.61	2.17	2.73	4.46	1.68	0.56	0.17	0.06	3.00	1.25	
120										1.50	0.60	
135										1.50	0.60	
150										0.00	0.00	
備考	時間のべき乗(1/2)				時間のべき乗(1/2)					時間に線形		
	<0.1mm	0.1~1mm	>1mm									

上記 3)~5)を整理した結果を表 3.2.2-3 に示す。

表 3.2.2-3 定量化に必要な技術検討項目に対する解析技術等に関する取り組み状況（定量化に必要な技術検討項目 iii ~ v）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」			R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」						取り組み方法と状況	備考
定量化すべき情報	定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点	検討対象(イメージ)	監業方式			積業方式[PEM]				
			OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3		
1. 安全性への影響	② 回収作業中の安全性への影響 (回収を実施する場合)	1) 回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性 一度埋め戻した坑道の再掘削/再利用を前提とする場合に、回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性確保の観点から、以下の評価・検討や技術の具体化を行う。 a. 埋め戻した坑道の再利用時の健全性 b. 再利用する坑道内(作業空間)への廃棄体からの影響							<p>a. 坑道の安定性の指標を岩盤のひずみおよび応力、支保材料の応力として、深成岩および新第三紀堆積岩を対象とし、NUMO の処分坑道仕様を条件とし、状態 OP を考慮した、坑道安定性に関する解析的評価手法と解析結果例の提示。坑道安定性への影響低減技術適用時の効果例も提示 (H26RWMC 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発報告書)。</p> <p>b. 作業空間への熱影響の指標は坑内気温となる。事業期間中の換気(冷房などの空調)を考慮した解析的評価手法は確立されており、処分場レイアウトを考慮した NUMO による設計検討例あり (H29 土木学会年次学術講演会, No. VII-038)。</p>	<p>a. H29 は埋戻し材の膨張圧や支持効果、各材料の物性変化特性を変えた検討を実施中。また、H29 は処分坑道の部材や周辺地質環境への化学的影響評価手法の調査を実施中。</p> <p>b. 再掘削/再利用時は建設時と同様の定量的評価方法が適用可能と考えられる。</p>
		2) 回収時の廃棄体容器の健全性 回収装置による摺持・取り出しの際には、廃棄体容器に一定の機械強度が要求されることから、廃棄体容器の健全性に関する評価や検討を行う。							<p>・廃棄体容器の健全性の指標はオーバーバックとその溶接部の材料、形状・厚さとなる。廃棄体容器(炭素鋼)の腐食評価に関して、空気・地下水・ベンチナイトと接触していると想定した埋め戻し状態を設定し、それぞれの腐食見積の程度例を提示 (H26RWMC 地層処分回収技術高度化開発報告書)。</p> <p>・PEM 容器の材質は炭素鋼とした場合、評価手法は左記の設計検討例(廃棄体容器)と同様となる。</p>	

(2) 閉鎖後長期の安全性への影響に関する定量化に必要な技術検討項目

1) 定量化に必要な技術検討項目 vi 開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響

廃棄体容器の空気による機能劣化の指標はオーバーパックとその溶接部の材料、形状・厚さとなる。廃棄体容器（炭素鋼）に対する空気による影響としての腐食評価に関して、空気・地下水・ベントナイトと接触していると想定した埋め戻し状態を設定し、それぞれの腐食見積の程度の検討例がある[4]。

また、状態オプションの設定は異なる可能性はあるが、人工バリアの評価手法について多くの検討例がある[7]、[8]、[9]、[10]、[11]、[12]、[13]、[14]、[15]、[16]。

2) 定量化に必要な技術検討項目 vii 廃棄体からの熱による影響

廃棄体容器に対する熱影響の指標は材料であり、耐熱性に対する設計がされるが、耐食性や耐圧性への影響も考慮した検討例がある[13]、[14]、[15]、[16]。

緩衝材（ベントナイト）に対する熱影響の指標は材料であり、温度環境の定量的評価に基づき、設計等により変質が生じないように対策を講じるため、変質に関わる因子より考慮しないとした検討例がある[4]。

3) 定量化に必要な技術検討項目 viii 坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響

緩衝材、埋め戻し材および止水プラグに対する坑内湧水の影響の指標はベントナイト含有率および乾燥密度（密度）となる。緩衝材の流出現象については、既往研究の試験によりデータが取得されている[17]。

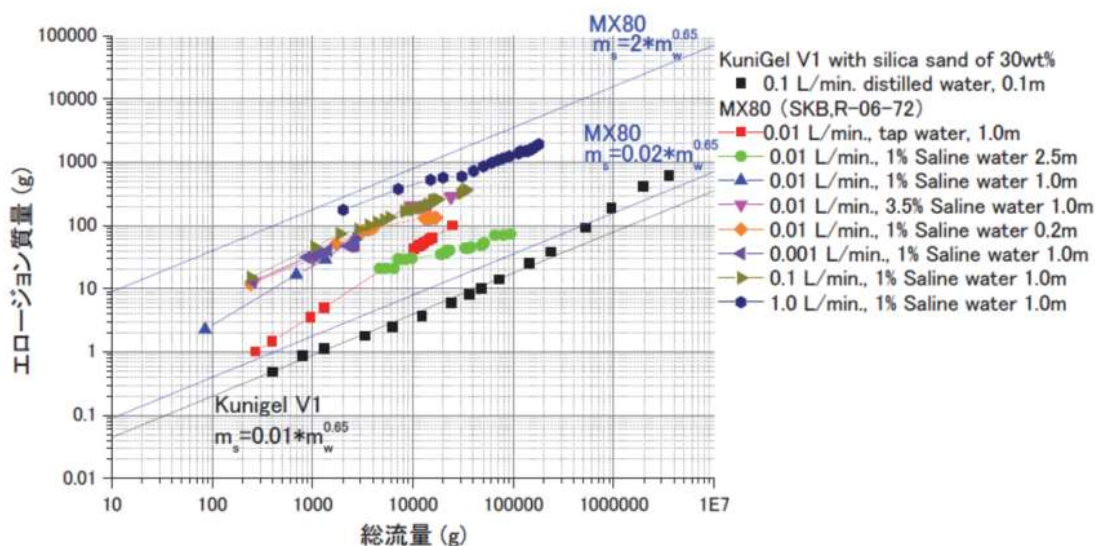


図 3.2.2-9 湧水量とエロージョン量の関係[17]

なお、坑内湧水量については、新第三紀堆積岩を対象とし、NUMO の処分坑道仕様を参考に、状態オプションを考慮した、坑道開放期間中に継続する坑内湧水量の解析的評価に関する検討を、

本事業の今年度において実施しており、坑内湧水量の解析的評価手法とその結果を例示している(4.2.2項)。

上記 1)～3)を整理した結果を表 3.2.2-4 に示す。

表 3.2.2-4 定量化に必要な技術検討項目に対する解析技術等に関する取り組み状況（定量化に必要な技術検討項目 vi～viii）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」の例と、例示された「今後の技術検討項目(例)」		検討対象(イメージ)						取り組み方法と状況	備考
定量化すべき情報	定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点	製造方式			構築方式(PEM)				
		OP1	OP2	OP3	QP1	QP2	QP3		
<p>1. 安全性への影響</p> <p>(2) 閉鎖後長期の安全性への影響</p> <p>：回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合、人工バリアや天然バリア(母岩)に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響</p>	<p>1)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う人工バリア等に期待する安全機能への影響</p> <p>維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ、人工バリア(及び他の地下構築物)に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響を下記観点から評価する。</p> <p>a.開放坑道を介した空気(設置)の持ち込みによる人工バリア等の地下構築物の機能劣化等の影響</p> <p>b.廃棄体からの熱による影響</p> <p>c.坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響</p>							<p>a. 廃棄体容器の空気による機能劣化の指標はオーバーパックとその接続部の材料、形状・厚さとなる。廃棄体容器(炭素鋼)に対する空気による影響としての調査評価に関して、空気・地下水・ベントナイトと接触していると想定した埋め戻し状態を設定し、それぞれの調査見積の程度の例を提示 (H26RWMC 地層処分回収技術高度化開発報告書)。</p> <p>また、状態 OP の設定は異なる可能性はあるが、人工バリアの評価手法について検討例あり (H19～H24JAEA 処分システム化学影響評価高度化開発報告書、H25～H28RWMC 処分システム工学確認報告書)。</p> <p>b. 廃棄体容器に対する熱影響の指標は材料であり、耐熱性に対する設計がされるが、耐食性や耐圧性への影響も考慮した検討例あり (H25～H26RWMC 処分システム工学確認報告書)。</p> <p>緩衝材(ベントナイト)に対する熱影響の指標は材料であり、温度環境の定量的評価に基づき、設計等により変質が生じないように対策を講じるため、変質に関わる因子より考慮しないとした検討例あり (H26RWMC 地層処分回収技術高度化開発報告書)。</p> <p>c. 緩衝材、埋め戻し材および止水プラグに対する坑内湧水の影響の指標はベントナイト含有率および乾燥密度(密度)となる。</p> <p>緩衝材の流出現象については、既往研究の試験によりデータが取得されている (H24RWMC 処分システム工学調査技術高度化報告書)。</p>	<p>a. —</p> <p>b. —</p> <p>c. H29 は坑内湧水量の解析的評価手法とその結果を例示予定。</p>
		<p>図 3.2.2-4-1 オープン V1 の坑内湧水量とロープマン量の関係</p>						<p>なお、坑内湧水量については、新第三紀堆積岩を対象とし、NUMO の処分坑道仕様を条件とし、状態 OP を考慮した、坑道開放期間中に継続する坑内湧水量の解析的評価例は現在実施中。</p>	

- 4) 定量化に必要な技術検討項目 ix 地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込みの影響）

擾乱影響の指標は酸化還元電位、地下水の pH、地下水組成、鉍物組成などであるが、評価実施例は見当たらない。ただし、地下水流動の程度に関する解析的評価手法は存在する。

なお本事業の今年度の検討において、処分坑道の部材や周辺地質環境への化学的影響評価手法の調査を実施している（4.2.3 項）。また平成 30 年度には、化学的定量評価手法やその解析結果を例示予定である。

- 5) 定量化に必要な技術検討項目 x 開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度

酸素供給や乾燥環境の天然バリアへの影響の指標は酸化還元電位、地下水の pH、地下水組成、鉍物組成などであるが、評価実施例は見当たらない。

本事業の今年度の検討において、処分坑道の部材や周辺地質環境への化学的影響評価手法の調査を実施している（4.2.3 項）。

- 6) 定量化に必要な技術検討項目 xi ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度

ベースラインへの回復過程や程度への影響の指標は流速として、広域の地形・地質、涵養量等を仮定すれば解析的評価は可能である。

本事業の今年度の検討において、再冠水時間に関する定量的評価手法、結果を例示している（4.2.2 項）。

上記 4)～6)を整理した結果を表 3.2.2-5 に示す。

表 3.2.2-5 定量化に必要な技術検討項目に対する解析技術等に関する取り組み取組状況（定量化に必要な技術検討項目 ix～xi）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」		R&R 検討会で示された「今後の技術検討項目(例)」						取り組み方法と状況	備考
定量化すべき情報	定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点	検討対象(イメージ)							
		観測方式			観測方式(PEM)				
		OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3		
<p>1. 安全性</p> <p>(2) 閉鎖後長期の安全性への影響</p> <p>：回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合の、人工バリアや天然バリア(母岩)に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響</p>	<p>2)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う天然バリア(母岩)に期待する安全機能への影響</p> <p>維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ、天然バリア(母岩)に期待される閉鎖後長期の安全機能に係わる次のような影響を評価する。</p> <p>a.地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度(化学組成の異なる地下水の引き込みの影響)</p> <p>b.開放坑道を介した酸堿の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度</p> <p>c.ベースライン(建設前の元の地下環境の状態)への回復過程と回復の程度</p>							<p>a. 擾乱影響の指標は酸化還元電位、地下水の pH、地下水組成、鉱物組成などであるが、評価実施例は見当たらないため、評価方法に関する調査を実施中。ただし、地下水流動の程度に関する解析的評価手法は存在する。</p> <p>b. 酸堿供給や乾燥環境の天然バリアへの影響の指標は酸化還元電位、地下水の pH、地下水組成、鉱物組成などであるが、評価実施例は見当たらないため、影響評価手法に関する調査を実施中。</p> <p>c. ベースラインへの回復過程や程度への影響の指標は流速として、新第三紀堆積岩を対象とし、NUMO の処分坑道仕様を条件とし、状態 OP を考慮した、閉鎖後の再冠水に要する時間に着目した解析的評価を実施中。ベースラインへの回復過程・程度は、広域の地形・地質、運搬量等を仮定すれば解析的評価は可能。</p>	<p>a. H29 は処分坑道の部材や周辺地質環境への化学的影響評価手法の調査を実施中。また、H30 に地下水流動に関する定量的評価手法、結果を例示予定。</p> <p>b. H29 は処分坑道の部材や周辺地質環境への化学的影響評価手法の調査を実施中。</p> <p>c. H29 は再冠水時間に關する定量的評価手法、結果を例示予定。</p>

(3) 解析技術等の取り組みに対する優先度

定量化に必要な技術検討項目に対する取り組み方法とその状況の整理の詳細は、前項の表 3.2.2-1、表 3.2.2-3、表 3.2.2-4、表 3.2.2-5 で示した通りであり、これらを整理した概要を表 3.2.2-6 に示す。表中の取り組み状況において、本事業における検討例を除いて、既往の類似検討例が現段階ではないものについては、今後、定量的評価のための解析技術等の整備が必要であり、取り組むべき課題としての優先度は高いと考えており、本事業の中で昨年度から一部着手し、本年度と来年度に検討の実施が予定されている[1]、[2]。一方で、表中の取り組み状況において、既往の類似検討例がある検討項目は、優先度は低いと考えられる。なお、検討項目 viii については、人工バリアへの影響評価については別事業であるである処分システム工学検証等にて検討が進められており、その評価の与条件となる坑内湧水量・処分孔湧水量の解析的な評価手法の検討を本事業で実施中である。

表 3.2.2-6 定量化に必要な各技術検討項目に対する解析技術等に関する取り組み状況の概要

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目」			解析技術等の取り組み状況
定量化すべき情報		定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点	
1. 安全性への影響	(1) 操業期間中の安全性への影響	① 回収可能性維持期間中の開放坑道の安全性への影響	<p>1)開放坑道内の作業空間の安全性</p> <p>a.開放坑道の健全性（空間安定性）</p> <p>b.開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響</p> <p>a. 指標：岩盤のひずみおよび応力、支保材料の応力 ・定置方式 や状態オプション を考慮した、力学解析 による 坑道安定性 に関する 解析的評価手法 と解析結果例 を提示． （H28RWMC 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発報告書）</p> <p>b. 指標：坑内気温 ・状態オプションを考慮した、非定常三次元熱伝導解析による換気の無い状態での廃棄体からの熱影響に関する解析的評価手法と解析結果例を提示．（H26RWMC 地層処分回収技術高度化開発報告書） ・事業期間中の換気（冷房などの空調）を考慮した解析的評価手法は確立されており、処分場レイアウトを考慮した NUMO による設計検討例がある．（H29 土木学会年次学術講演会, No. VII-038）</p>
		② 回収作業時の安全性への影響（回収を実施する場合）	<p>1)回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性</p> <p>a.埋め戻した坑道の再利用時の健全性</p> <p>b.再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響</p> <p>2)回収時の廃棄体容器の健全性</p> <p>a. 指標：岩盤のひずみおよび応力、支保材料の応力 ・定置方式 や状態オプション を考慮した、力学解析 による 坑道安定性 に関する 解析的評価手法 と解析結果例 を提示． （H28RWMC 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発報告書）</p> <p>b. 再掘削／再利用時は建設時と同様の定量的評価方法が適用可能。 指標：オーバーバックとその溶接部の材料、形状・厚さ ・空気・地下水・ベントナイトと接触していると想定した埋め戻し状態における廃棄体容器（炭素鋼）の腐食程度に関して解析的手法と解析結果例を提示．（H26RWMC 地層処分回収技術高度化開発報告書） ⇒PEM 容器が炭素鋼の場合は、上記評価手法が適用可能。</p>
	(2) 閉鎖後長期の安全性への影響 ：回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合の、人工バリアや天然バリア（母岩）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響	1)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う人工バリア等に期待する安全機能への影響	<p>a.開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響</p> <p>b.廃棄体からの熱による影響</p> <p>c.坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響</p> <p>a. 指標：オーバーバックとその溶接部の材料、形状・厚さ ・空気・地下水・ベントナイトと接触していると想定した埋め戻し状態を設定し、空気（酸素）の影響による炭素鋼の腐食程度の解析的手法と解析結果例を提示．（H26RWMC 地層処分回収技術高度化開発報告書） ・人工バリアの評価手法については検討例あり。 （H19～H24JAEA 処分システム化学影響評価高度化開発報告書、H25～H28RWMC 処分システム工学確認報告書）</p> <p>b. 指標：オーバーバックとその溶接部の材料、形状・厚さ ・廃棄体容器については耐熱性に対する設計がされ、耐食性や耐圧性への影響も考慮した検討例がある。 （H25～H28RWMC 処分システム工学確認報告書） 指標：緩衝材の材料 ・緩衝材は、温度環境の定量的評価に基づき、変質が生じないように設計等により対策を講じる。 （H26RWMC 地層処分回収技術高度化開発報告書）</p> <p>c. 指標：ベントナイト含有率、乾燥密度（密度） ・緩衝材の流出現象については、既往研究の試験によりデータが取得されている。 （H24RWMC 処分システム工学要素技術高度化報告書） ・坑内湧水量については、状態オプションを考慮した坑道開放期間中に継続する坑内湧水量の解析的評価を現在実施中。</p>
			2)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う天然バリア(母岩)に期待する安全機能への影響

3.3 回収可能性維持のための技術要件についての考え方の検討

3.3.1 検討方法および検討の流れ

本節では、定量化に必要な技術検討項目を対象に、それぞれに関連する技術に求められる回収可能性維持を考慮した場合に付加される技術要件（多重バリアシステムの構成要素の安全機能に基づいて、その性能が確保されるように設定する要件）設定の考え方を検討する。

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

- ① 基本方針が示されるより前に、第2次取りまとめ[18]や NUMO が設定した操業から閉鎖までの安全確保に係る技術要件（あるいは設計要件）を参考に、回収可能性を維持することにより付加される技術要件設定の考え方を検討
- ② 回収可能性維持に係る「基本方針」[19]を最上位として、基本方針からの要求事項について、下位の個々の部分に段階的に詳細化して検討

本節の検討では、まずは 3.3.2 項にて、これまで国際機関等で検討されてきた回収可能性維持に係わる技術要件について整理を行う。具体的には、OECD/NEA と IAEA の回収可能性に係わる報告書を調査し、技術要件あるいは設計要件に関連する記述を抽出し、整理する。3.3.3 項では、基本方針が示される以前に国内で検討されてきた回収可能性を考慮していない技術要件について、設定の経緯等について調査と整理を行う。そして 3.3.4 項では、既往の回収可能性を考慮していない技術要件を参考にして、定量化に必要な技術検討項目に必要とされる技術を対象とし、回収可能性維持を考慮した場合に付加される技術要件を検討する（上記のアプローチ①）。3.3.5 項では、基本方針の回収可能性確保に関する要求事項を階層構造化し、回収可能性維持に係わる技術要件を展開する方法の検討（上記のアプローチ②）と具体例を提示する。最後に 3.3.6 項として、国際機関での技術要件の考え方等を参照し、アプローチ①とアプローチ②の二つの技術要件検討の方法について、それぞれの特徴を比較する。

3.3.2 国際機関等での回収可能性に係わる技術要件の取り扱いに関する調査・整理

(1) OECD/NEA R&R Report, 2011[20]

本レポートは、可逆性と回収可能性に係る各国の取組みについてワーキンググループで議論した事項とワーキンググループに参画した各国の状況を含め取りまとめている。しかし、回収可能性維持に係わる「技術要件」については直接的には言及されていない。レポートには、回収可能性に関し、段階的な事業展開の中で「回収可能性維持の戦略」が示され、その中で「技術的要素と課題」について「考慮すべき因子」として、下記の事項が記述されている（日本語は、NUMOが作成したレポートの和訳文書から抜粋）。

回収可能性に係る技術開発は、全体設計と開発プロセスのごく一部でしかないという点も認識しておく必要がある。処分場開発を進める中で、回収可能性に関する戦略的な意思決定を行う必要がある（日本語版レポート[21]のページ：p69）。どちらの戦略を選定しても考慮すべき事項は同じであるが、技術要件は異なる可能性がある。

戦略1：処分場の設計は変更せずに回収方法の開発に重点をおく

戦略2：回収を容易にするために設計変更重点をおく

上記の記述では、回収可能性維持へのアプローチとしては二つの戦略があり、その考え方によっては「技術要件」が異なってくることを示唆している。ここでの「技術要件」とは、回収に係る技術の整備に向けて、定置作業と同じレベルでの回収作業の実現性を高める技術開発に向けての要件およびより定置・回収を容易とする概念構築のための設計に係る要件を意図している。

R&R レポートで技術要件に関連がある記述の抜粋を以下に示す。（R&R レポート、日本語翻訳版[21]の抜粋ページ。点線内の抜粋文書への下線と赤字は筆者が記述）

【p60】廃棄物を回収しようとする場合、回収を容易にするための労力に影響する因子は、
(i)処分場概念、バリア、およびサイト条件、
(ii)回収可能性が求められているとすると、その時間スケール、
(iii)廃棄物の回収が行われるときに処分場の状態変遷、
である。そのような回収が実際にできるかどうかについては、作業者の安全性、費用の最小化、他の技術的
要件を考慮しなければならない。・・・「技術的要件はi, ii, iiiの前提や条件によって異なってくる可能性有り」

【p61】回収計画で考慮すべき重要な因子は、コスト、時間スケール、リスクの低減、障害の特定と軽減、経年した廃棄物と廃棄物パッケージの複雑さ、インベントリーに関する知識の程度、作業量（回収する廃棄物の量）、必要となる下流側プロセス（再パッケージ化、調整、処理、最終的な廃棄物の処分）である。操業前段階の回収戦略を作成する際に特に関心が集まるのは、母岩の特性と処分場設計の固有の内容、例えば、処分場空洞ならびに処分場と地表との連絡坑道の埋戻しと閉塞の程度である。さらに、回収のタイミング、廃棄物を定置してからその回収までの時間遅れ、その回収も回収の実現可能性と実際に行われるのかどうかに影響する。・・・「考慮すべき因子」は「技術要件」と同義語と考えられる

【p61】処分場概念、サイト固有の環境とその後の劣化プロセスに依存するが、廃棄物容器には、例えば、余分に長い設計寿命、安全な回収を確保するための頑健な容器設計、容器に吊り上げ／ハンドリング装置を付けるなどの特別な設計要件が課される場合がある。これに関しては、選定された材料は十分な腐食代を持たせて長期間にわたって耐食性がなければならない。また、容器の頑健性は回収の準備プロセスがある場合（緩衝材の除去、掃除など、定置セルの準備プロセス）には健全性を継続して維持できるようにする必要があり、また、取り付けられたハンドリング装置は、回収可能性のある期間、機能を残さなければならない。・・・「技術要件」の例

(2) IAEA Technical Report, 2009 “ IAEA, 2009, Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability[22]

本レポートには、回収可能性維持に係わる「技術要件：Technical Requirements」という用語は見出せないが、「設計対策：design measures」として、回収可能性を設計で考慮すべき以下の事項が言及されている。

作業期間中について設計で対応すべき事項：

- ✓ 作業環境温度
- ✓ 放射線防護
- ✓ 坑道の力学的安定性
- ✓ 回収設備のメンテナンスと保全
- ✓ 損傷と修復
- ✓ モニタリング

閉鎖後安全に係る事項として設計で対応すべき事項：

- ✓ 処分システムの安全機能を確保するための方策
- ✓ 発生する不確実性への対応策

基本的に本レポートで記述されている事項は、処分坑道や処分空洞が開放された状態で回収可能性を維持する場合の設計対策としての要求事項が記述されている。閉鎖まで設計対策には、回収時の安全性確保も含まれている。また IAEA が対象とする回収は全数ではなく、少数の廃棄体を回収し、その後再定置することも考慮していることから、回収可能性維持には、加工や溶接などの設備からなる地表施設や搬送・定置設備の維持も含まれる。

設計対策として整理された事項には、坑道や空洞を開放しておくことによる周辺環境の影響については記述されていないが、長期の安全性への観点からは、処分システムの安全機能への有害な影響を及ぼさないこととしての記述がある。

以下、技術要件に関連する記述を参考のためにレポートから抜粋する。(日本語訳は筆者)

3.6.1. Design measures

In addressing operational safety, the following should be taken into account, noting that such considerations are not exclusively pertinent to retrievability:

— **Ambient temperature (環境温度)**: Heat-generating waste will cause the temperature to rise in the disposal cells, connecting tunnels and the host rock. The temperature in the repository must be maintained at a level that allows people to work under regular environmental conditions and the mechanical equipment to function properly (e.g. during waste retrieval). An elevated temperature may require adequate ventilation and cooling;

— **Radiation protection (放射線防護)**: Maintenance work and surveillance activities in the vicinity of the emplacement cells could lead to additional radiation exposures for the operating personnel. Appropriate design measures may include utilization of robust equipment with reduced maintenance needs, integration of sensors in support structures during construction, remote data acquisition and centralized data handling facilities. Additional radiation shielding may be introduced into the disposal cell after waste emplacement to reduce subsequent worker radiation exposures;

— **Geomechanical stability (力学的な安定性)**: Underground openings must be maintained for extended periods during a prolonged operational phase (relative to early closure). Additional structural components (e.g. rock bolts, thick liners) may be needed to ensure the stability of tunnels, emplacement cells, drifts and shafts. Other design measures could involve the use of long lived materials such as stainless steel rather than carbon steel, or the inclusion of provisions to limit lining degradation (e.g. control measures to minimize groundwater and air access). The possibility of failure (e.g. due to rock falls, flooding and other geohazards) depends broadly on the timescale over which the repository remains accessible. Should such events occur, post-accident recovery may prove difficult and may ultimately complicate the optimized closure of the facility;

— **Maintenance and preservation of infrastructure for retrieval (回収のための設備のメンテナンスと保全)**: A large network of surface and underground infrastructure (e.g. reception area, encapsulation plant, ventilation, monitoring and water handling systems, package emplacement and retrieval equipment, etc.) may need to be kept in service, be readily replaceable or be refurbished during the required retrieval period. These systems must be periodically inspected, maintained and refurbished. Such activities may have associated worker dose and conventional safety implications. Extended maintenance, replacement and refurbishment of repository infrastructure may increase radiological and conventional risks to operators;

— **Monitoring (モニタリング)** (see Section 4.4): There may be conventional and radiological safety implications associated with any prolonged period of monitoring in support of retrievability;

— **Fault situations and recovery (損傷と修復)**: In any period of operations, there are risks associated with fault situations (e.g. loss of electrical power, flooding, rock fall, dropped packages) and there will be conventional and radiological hazards associated with fault recovery.

In addressing post-closure safety, the following should be taken into account:

— **Safety functions of disposal system (処分システムの安全機能)**: It is fundamentally important that any design measures and operational conditions implemented to assure retrievability do not have any significant detrimental effects upon the safe performance of the disposal system;

— **Uncertainties (不確実性)**: Retrievability should not introduce additional materials other than those necessary for the emplacement operations. If additional materials are introduced to facilitate retrieval, they might increase the complexity of the disposal system and in turn introduce additional uncertainties relating to the long term performance of the repository.

閉鎖後の安全については、回収可能性維持に係わるいかなる設計対策も処分システムの安全性に著しく有害な影響を及ぼすことがあってはならないこと、そして回収性を容易とするために定置に用いる資材以外のものを持ち込むことで、長期安全性能への不確実性を増大させてはならないとしている。

3.3.3 国内での回収可能性を考慮しない技術要件設定の経緯の調査・整理

わが国の HLW 地層処分を対象とした報告書の中で、「設計要件」という用語が「第2次取りまとめ」[18]に見ることができる。そこでは、人工バリアへの安全確保に係る基本要件から出発し、各バリア要素に期待する機能と役割を明確にし、具現化するために、「設計要件」を設定している。この考え方は、一部その後、追記・修正されているが、NUMOの「安全確保レポート2010年度版」[23]でも踏襲されている。

図 3.3.3-1 にこれまでの主要な報告書における技術要件（あるいは「設計要件」）に関する記述の変遷を整理して示す。これまでの技術報告書では、HLW 地層処分の安全性と技術的な成立性に係る技術要件や設計要件が記述されているが、回収可能性の維持に係わる要件は提示されていない。

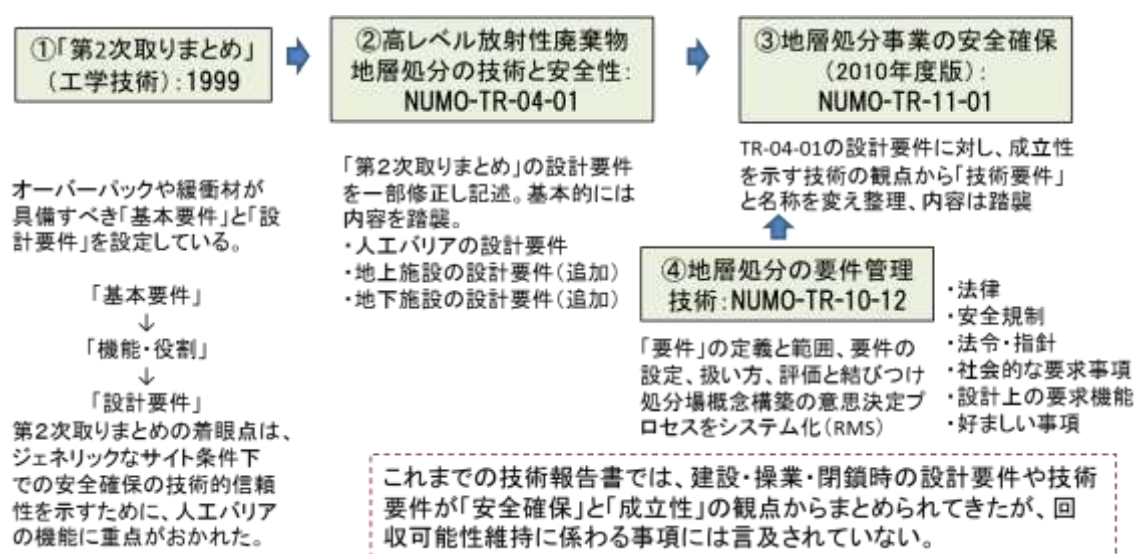


図 3.3.3-1 国内の技術報告書における技術要件記述の変遷

(1) 第2次取りまとめ(工学技術): サイクル機構、1999年、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-[18]

本報告書では、工学技術編の中で、「基本要件」として「安全確保のための要件」と「人工バリアが成立するための要件」が設定され、それぞれの要件に対し、「機能・役割」を定め、設計上考慮すべき要件(設計要件)として取りまとめられている。

下記の例(第2次取りまとめより抜粋)では、人工バリアの主要な要素であるオーバーバックと緩衝材に対する安全確保と成立性の観点からの要件を設定し、それらを具体的な設計要件として整理している。第2次取りまとめで提示された設計要件には、製作や施工の実現性の観点からの技術要件も含まれている。

表 3.3.3-1 オーバーパックに対する基本要件[18]

地層処分における安全確保のための要件	放射性核種の閉じ込め（ガラス固化体に地下水を所定の期間接触させない）
人工バリアが成立するための要件	他の人工バリア（ガラス固化体および緩衝材）に有意な影響を与えないこと 製作・施工が技術的に可能であること

表 3.3.3-2 オーバーパックの設計要件[18]

基本的な要件	機能・役割	設計上考慮すべき項目（設計要件）	内 容
放射性核種の隔離のための要件	放射性核種の物理的閉じ込め ガラス固化体に地下水を所定の期間接触させないこと	閉じ込め性を有すること	操業時に放射性物質の外部環境への漏出を防ぐこと 廃棄体埋設後、地下水の浸入を防ぐこと
		耐食性を有すること	廃棄体埋設後、所定の期間、腐食によって閉じ込め性が損なわれないこと
		耐圧性を有すること	埋設後作用する機械的荷重に対して構造健全性を維持し、閉じ込め性を損なわないこと
		放射線遮へい性を有すること	ガラス固化体からの放射線による水の放射線分解にともなって生成される酸化性化学種により、腐食が促進されないこと
		耐放射線性を有すること	ガラス固化体からの放射線によって、耐圧性が有意な影響を受けないこと
		耐熱性を有すること	ガラス固化体からの発熱に対し、閉じ込め性、耐食性および耐圧性が有意な影響を受けないこと
人工バリアが成立するための要件	所要の期間、他の人工バリアに有意な影響を与えないこと	十分な内空間を有すること	オーバーパックの変形やガラス固化体の熱膨張により、ガラス固化体が機械的に破損しないこと
		良好な熱伝導性を有すること	ガラス固化体の発熱を外部に伝え、ガラス固化体の安定な形態を損なうような熱による変質を生じさせないこと
		放射線遮へい性を有すること	ガラス固化体からの放射線によって、緩衝材の材料特性が変化しないこと
		化学的緩衝性を有すること ¹⁾	周囲の地下水を腐食生成物によって還元性環境に緩和すること
	製作・施工が技術的に可能であること	製作性を有すること	既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術に基づいた構造であること
		遠隔封入性を有すること ²⁾	ガラス固化体の遠隔操作による封入が、既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術により、ガラス固化体の安定な形態を損なうことなく、可能な構造であること
		遠隔定置性を有すること ³⁾	廃棄体の遠隔操作による定置が、既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術により、ガラス固化体の安定な形態を損なうことなく、可能な構造であること

表 3.3.3-3 放射性核種の隔離のための緩衝材の設計要件[18]

安全確保のための要件	機能/役割	設計上考慮すべき項目 (設計要件)	内 容
放射性核種の移行抑制	地下水の移動の抑制	①低透水性を有すること	低透水性を有することにより緩衝材中の地下水の動きを遅くして、結果的に緩衝材中の物質の移動が遅くなるようにするとともに、ガラス固化体の溶解速度や核種の溶出を抑制すること
	溶解した核種の収着	②高い収着性を有すること	ガラス固化体から放射性核種が溶解した場合、それを収着することによって放射性核種の移動を抑制すること
	コロイドの移動の防止	③コロイドフィルトレーション機能を有すること	放射性核種がコロイドとして移動することを妨げること
	地下水環境の変動の緩和	④化学的緩衝性を有すること ^{*1}	地下水の pH や還元性等を化学的に緩衝することにより地下水の化学的条件を好ましいものとする

*1: この特性を有していれば、人工バリアの機能向上に寄与することが期待される特性。

表 3.3.3-4 緩衝材の設計要件[18]

基本的な要件	機能・役割	設計上考慮すべき項目 (設計要件)	内 容
放射性核種の隔離のための要件	地下水の移動の抑制	低透水性を有すること	低透水性を有することにより緩衝材中の地下水の動きを遅くして、結果的に緩衝材中の物質の移動が遅くなるようにするとともに、ガラス固化体の溶解速度や核種の溶出を抑制すること
	溶解した核種の収着	高い収着性を有すること	ガラス固化体から放射性核種が溶出した場合、それを収着することによって放射性核種の移行を抑制すること
	コロイドの移行防止	コロイドフィルトレーション機能を有すること	放射性核種がコロイドとして移行することを妨げること
	地下水の化学的環境の変動の緩和	化学的緩衝性を有すること ^{*1}	地下水の pH や還元性等を化学的に緩衝することにより地下水の化学的条件を好ましいものとする
人工バリアが成立するための要件	製作・施工が可能であること	自己シール性を有すること	地下水の浸入にともなう膨潤によって、定置時の周辺岩盤とのすき間や緩衝材内に生じたすき間を充填できること
	施工可能な特性を有すること	施工可能な締固め特性を有すること 施工可能な強度を有すること	既存の技術によって所要の密度が得られるような締固め特性を有すること ブロック方式による施工を想定した場合、据え付け時のハンドリングに必要な力学的特性を有すること
	所要の期間、人工バリアに有意な影響を及ぼさないこと	応力緩衝性を有すること	廃棄体埋設後、オーバーバックの機能が維持される期間、緩衝材が変形能を有することによりオーバーバックの腐食膨張と岩盤のクリープ変形を力学的に緩和できること
		オーバーバックを力学的に安定に支持できること	廃棄体埋設後、オーバーバックの機能が維持される期間、オーバーバックを力学的に安定に支持でき、地震に対しても健全性を維持できる力学的特性を有すること
		ガラス固化体および緩衝材の変質の抑制	良好な熱伝導性を有することにより、ガラス固化体の発熱を外部に伝え、ガラス固化体の安定な形態を損なうような熱による変質を生じさせないこと 人工バリアの性能にかかわる熱移動、水分移動、核種移行、応力緩和などに関する性質に有意な影響を及ぼすような緩衝材の熱的な変質が生じないこと

(2) NUMO-TR-04-01 に示された設計要件

「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性－「処分場の概要」の説明資料－，NUMO-TR-04-01」[24]では、第2次取りまとめで示された内容を、実施主体であるNUMOが確認することで引き継いだ形で作成されている。安全確保策とされた基本的な要件（放射性核種の閉じ込めと隔離）を設計上考慮する項目（設計要件）とし、第2次取りまとめでの設計要件を一部修正して踏襲している。修正点は、閉じ込め性が放射性核種の隔離に含まれている点があげられる。

特徴としては、「地上施設への設計要件」と「地下施設への設計要件」および「支保工への要件」が電気事業連合会の「高レベル放射性廃棄物の地層処分の事業化に向けた検討、1999年」で検討結果を受けて追加されている点がある。内容的には製作や施工の実現性への技術的要件も含まれている。

表 3.3.3-5 オーバーパックの設計要件[24]

(核燃料サイクル開発機構, 1999a を一部修正)

基本的な要件	機能・役割	設計上考慮すべき項目 (設計要件)	内 容
放射性核種の隔離	放射性核種の物理的閉じ込めに地下水を所定の期間接触させないこと	閉じ込め性を有すること	操業時に放射性物質の外部環境への漏出を防ぐこと 廃棄体埋設後、地下水の浸入を防ぐこと
		耐食性を有すること	廃棄体埋設後、所定の期間、腐食によって閉じ込め性が損なわれないこと
		耐圧性を有すること	埋設後作用する機械的荷重に対して構造健全性を維持し、閉じ込め性を損なわないこと
		放射線遮へい性を有すること	ガラス固化体からの放射線による水の放射線分解にともなって生成される酸化性化学種により、腐食が促進されないこと
		耐放射線性を有すること	ガラス固化体からの放射線によって、耐圧性が有意な影響を受けないこと
		耐熱性を有すること	ガラス固化体からの発熱に対し、閉じ込め性、耐食性及び耐圧性が有意な影響を受けないこと
人工バリアの成立性	所要の期間、他の人工バリアに有意な影響を与えないこと	十分な内空間を有すること	オーバーパックの変形やガラス固化体の熱膨張により、ガラス固化体が機械的に破損しないこと
		良好な熱伝導性を有すること	ガラス固化体の発熱を外部に伝え、ガラス固化体の安定な形態を損なうような熱による変質を生じさせないこと
		放射線遮へい性を有すること	ガラス固化体からの放射線によって、緩衝材の材料特性が変化しないこと
		化学的緩衝性を有すること ¹⁾	周囲の地下水を腐食生成物によって還元性環境に緩和すること
	製作・施工が技術的に可能であること	製作性を有すること	既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術に基づいた構造であること
		遠隔封入性を有すること ²⁾	ガラス固化体の遠隔操作による封入が、既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術により、ガラス固化体の安定な形態を損なうことなく、可能な構造であること
		遠隔定置性を有すること ²⁾	廃棄体の遠隔操作による定置が、既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術により、ガラス固化体の安定な形態を損なうことなく、可能な構造であること

表 3.3.3-6 緩衝材の設計要件[24]

(核燃料サイクル開発機構, 1999a を一部修正)

基本的な要件	機能・役割	設計上考慮すべき項目 (設計要件)	内 容
放射性核種の移行抑制	地下水の移動の抑制	低透水性を有すること	低透水性を有することにより緩衝材中の地下水の動きを遅くして、結果的に緩衝材中の物質の移動が遅くなるようにするとともに、ガラス固化体の溶解速度や核種の溶出を抑制すること
	溶解した核種の収着	高い収着性を有すること	ガラス固化体から放射性核種が溶出した場合、収着により放射性核種の移行を抑制すること
	コロイドの移行防止	コロイドフィルトレーション機能を有すること	コロイドとしての放射性核種の移行を抑制すること
	地下水の化学的環境の変動の緩和	化学的緩衝性を有すること ¹⁾	地下水の pH や還元性などを化学的に緩衝することにより地下水の化学的条件を好ましいものとする
人工バリア成立性	製作・施工が可能であること	自己シール性を有すること	地下水の浸入にともなう膨潤によって、定置時の周辺岩盤とのすき間や緩衝材内に生じたすき間を充填できること
	施工可能な特性を有すること	施工可能な締固め特性を有すること	既存の技術によって所要の密度が得られるような締固め特性を有すること
		施工可能な強度を有すること	ブロック方式による施工を想定した場合、据え付け時のハンドリングに必要な力学的特性を有すること
	所要の期間、人工バリアに有意な影響を及ぼさないこと	応力緩衝性を有すること	変形能を有すること
オーバーバックを力学的に安定に支持できること		力学的に安定に支持できる強度を有すること	廃棄体埋設後、オーバーバックの機能が維持される期間、オーバーバックを力学的に安定に支持でき、地震に対しても健全性を維持できる力学的特性を有すること
	ガラス固化体及び緩衝材の変質の抑制	良好な熱伝導性を有すること	良好な熱伝導性を有することにより、ガラス固化体の発熱を外部に伝え、ガラス固化体の安定な形態を損なうような熱による変質を生じさせないこと 人工バリアの性能にかかわる熱移動、水分移動、核種移行、応力緩和などに関する性質に有意な影響を及ぼすような緩衝材の熱的な変質が生じないこと

表 3.3.3-7 支保工に対する要件[24]

(電力中央研究所・電気事業連合会, 1999 を編集, 一部修正)

設計要件	概要
力学的安定性 (本来的に必要な機能)	・建設～閉鎖までの期間において、周辺岩盤を安定に保持
化学的安定性 (人工バリアを保護する機能)	・コンクリートと緩衝材の接触により、緩衝材が許容限度を超えて劣化することを回避 ・コンクリートの劣化により、支保工部分が許容限度を超えた高透水性ゾーンとなることを回避
施工性 (付随して期待する機能)	・地山の安定のため早期架設が可能で初期強度の発現が早い支保工を選択

表 3.3.3-8 地上施設の設計要件[24]

(電力中央研究所・電気事業連合会, 1999 を参考に作成)

施設名	設計要件
ガラス固化体受入・封入・検査施設	<ul style="list-style-type: none"> 閉じ込め性を有する廃棄体を製作することができること ガラス固化体が発生する熱を、輸送容器表面、ガラス固化体及び廃棄体表面から適切に除去できること 仮に電源が停止した場合にも移送物の落下を防止できるとともに、万一の移送物の落下によっても移送物の著しい損傷を防止できること 誤操作防止を考慮するとともに、仮に誤操作が行われても安全性が損なわれないこと ガラス固化体及び廃棄体を取り扱う室からの排気を適切に処理できることに加え、万一放射性物質が、ガラス固化体や廃棄体から漏洩した場合でも、それぞれを取り扱う室から放射性物質が漏れ出すことがないよう、取り扱い室を負圧に維持できること ガラス固化体及び廃棄体の検査ができること
緩衝材製作・検査施設	<ul style="list-style-type: none"> 操業に必要とされる数量の緩衝材を確実に製作できること 所定の品質の緩衝材を製作できること 製作された緩衝材を安全にかつ所定の品質を維持して、確実に保管できること 緩衝材原料の受入から地下施設への搬送までの各工程が円滑に行えること
プラグ製造施設	<ul style="list-style-type: none"> 操業あるいは閉鎖時に必要量のベントナイトプラグ材を確実に製作できること 所定の品質のベントナイトプラグ材を製作できること 製作されたベントナイトプラグ材を安全にかつ所定の品質を維持して、確実に保管できること ベントナイトプラグ材原料の受入から地下施設への搬送までの各工程が円滑に行えること
埋め戻し材製作・検査施設	<ul style="list-style-type: none"> 操業、閉鎖に必要とされる数量の埋め戻し材を確実に製作できること 所定の品質の埋め戻し材を製作できること 製作された埋め戻し材を安全にかつ所定の品質を維持して、確実に保管できること 埋め戻し材原料の受入から地下施設への搬送までの各工程が円滑に行えること
管理棟	<ul style="list-style-type: none"> 建設、操業、閉鎖等に必要情報を確実に収集し、管理できること
坑道換気施設	<ul style="list-style-type: none"> 処分場の建設、操業、閉鎖段階に必要とされる換気容量を確実に処理できること 建設、閉鎖時においては、作業において発生する粉塵、排ガス等を処理できること 操業時においては、放射線管理区域内の換気が確実にできること
排水処理施設	<ul style="list-style-type: none"> 処分場の建設、操業、閉鎖段階に必要とされる排水処理容量を確実に処理できること 建設、閉鎖時においては、作業において発生する地下施設内の湧水等を処理できること 操業時においては、放射線管理区域内の排水処理が確実にできること
廃棄物処理施設	<p>液体廃棄物処理施設</p> <ul style="list-style-type: none"> 排水の漏洩防止、漏洩の検出、漏洩発生時の拡大を防止できること 予想される排水発生量に対して、十分な貯蔵容量を有すること 万一、放射性物質の漏洩によって排水が汚染された場合、適切な処理がなされ得ること <p>固体廃棄物保管施設</p> <ul style="list-style-type: none"> 固体廃棄物をドラム缶等に封入し、専用の貯蔵室に保管（廃棄）できること 予想される固体廃棄物の発生量に対して、十分な貯蔵容量を有すること
保安施設	<ul style="list-style-type: none"> 防火管理 犯罪等に対するセキュリティの確保 放射線業務従事者等の放射線管理区域への出入り及び物品の放射線管理区域への搬出入に対して、出入り管理、汚染監視及び各個人の被ばく監視ができること 処分施設内外の主要な箇所における線量当量率、空気中の放射線物質濃度、放射線管理区域からの湧水中の放射性物質濃度等を測定、監視できること 放射線監視設備からの主要な情報は、制御室において集中して監視できること 排気口の放射線監視設備については、特に多重性を付与すること 施設内の火事等に対し防消火できること 施設外部からの危害や犯罪行為に対処できること
ユーティリティ施設	<ul style="list-style-type: none"> 建設、操業、閉鎖時に確実に各施設へ所要の電力、上水、工業用水、スチーム等を供給できること
掘削土置き場	<ul style="list-style-type: none"> 所要数量の掘削土を保管できること 周辺的一般公衆や環境に影響を与えないため、掘削土置き場からの粉塵や雨天に伴う泥水等を適切に処理できること
コンクリート供給施設	<ul style="list-style-type: none"> 建設時等に必要コンクリート量を供給できること

表 3.3.3-9 地下施設の設計要件[24]

(核燃料サイクル開発機構, 1999a を参考に作成)

坑道	設計要件
アクセス坑道 連絡坑道	<ul style="list-style-type: none"> ・安全に建設・操業・閉鎖が実施できること ・空洞の力学的安定性が確保されること ・建設に必要な空間が確保できること ・建設関連の物流経路が確保できること ・地理、地形、地質等の設計上の前提となる条件を満たすこと ・操業に必要な空間が確保できること ・廃棄体を含む操業関連の物流経路が確保できること ・閉鎖に必要な空間が確保できること ・核種移行遅延性能に有意な影響を与えないように配慮がなされること
処分坑道 (処分孔)	<ul style="list-style-type: none"> ・安全に建設・操業・閉鎖が実施できること ・空洞の力学的安定性が確保されること ・建設に必要な空間が確保できること ・建設関連の物流経路が確保できること ・地理、地形、地質等の設計上の前提となる条件を満たすこと ・操業に必要な空間が確保できること ・廃棄体を含む操業関連の物流経路が確保できること ・閉鎖後長期安全性を有すること ・核種移行遅延性能に有意な影響を与えないように配慮がなされること ・長期的に健全であること ・人工バリアが安定するように埋め戻されること

(3) NUMO-TR-11-01 における技術要件

「地層処分事業の安全確保 (2010 年度版) - 確かな技術による安全な地層処分の実現のために -」, NUMO-TR-11-01 [23]では、NUMO の「処分場の安全機能と技術要件 (2010 年度版)、NUMO-TR-10-11, 2011」 [3]をベースとして、技術要件の設定の考え方について、安全確保の基本概念から展開し、主として人工バリア要素の設計で対応する事項として記述されている。

技術要件は、以下の 3 項目に大別され、図 3.3.3-2 に示す安全確保基本概念から専門的な判断で下層に展開されている。これらの技術要件は、回収可能性維持は考慮されていないが、建設・操業から閉鎖までの安全確保と閉鎖後の安全確保の基本概念からスタートしている。

- ・「基本的なバリア性能の確保」
- ・「バリアの長期健全性の維持」
- ・「工学的実現性の確保」



図 3.3.3-2 安全確保の基本概念、安全機能および技術要件の関係[23]

回収可能性維持の技術要件への展開を考慮した場合、表 3.3.3-10 に示す回収を考慮しない場合の 3 つの要求事項の説明にある項目に対し、回収可能性維持を考慮した場合の影響が許容される範囲内とするように技術要件を設定することになる。

表 3.3.3-10 技術要件の設定の考え方[23]

技術要件の分類	説明
基本的なバリア性能の確保	安全機能に直接的に関係するもので、安全確保の観点から設計において必ず確保する性能として、技術要件を設定する。例えば、緩衝材の低透水性など。
バリアの長期健全性の維持	閉鎖後長期間にわたり多重バリアシステムの性能が維持されるよう人工バリア材料の長期的な特性や、バリア材料間の相互作用の理解に基づいて、設計上の対策を検討し、技術要件を設定する。例えば、セメントーベントナイト相互作用の考慮など。
工学的実現性の確保	実現性が見通しのある技術を用いて、サイトの地質環境特性において、安全機能を合理的に確保するように、設計上の対策を検討し、技術要件を設定する。例えば、緩衝材の施工技術など。

NUMO の安全確保策では、閉鎖までの安全対策への要求事項に対しては、表 3.3.3-11 に示すように「放射線安全」と「一般労働安全」としてとしているが、これらは廃棄体や地下施設への設計要件として整理することができる。すなわち要件と対策は対であり、要件に対して設計や施工で対策を講じることになる。

表 3.3.3-11 事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係[23]

基本的な安全対策		安全対策	構成要素	
放射線安全	作業時 閉じ込め	廃棄体から放射性物質の漏えいの防止	廃棄体の密封性 搬送時の落下・転倒・衝突時の廃棄体への衝撃の緩和	廃棄体 廃棄体搬送機器・設備
		施設からの放射性物質の過大な放出の防止	負圧管理および遠隔操作	廃棄体受入施設
		放射線遮へい	遮へい壁による放射線の遮へい 搬送容器による放射線の遮へい	廃棄体受入施設 廃棄体定置機器・設備 廃棄体搬送機器・設備
	放射線被ばく管理	管理区域の設定	放射線管理区域の設定	廃棄体受入・封入・検査施設 地下施設の一部
		被ばく管理・モニタリング	作業従事者の被ばく管理および放射線取り扱い作業従事時間の制限、放射線モニタリングの実施	管理区域内(地上, 地下)
			モニタリングポストの設置	施設屋外
	一般労働安全	作業環境の維持	空洞の力学的安定性の確保*	地上施設 地下施設
換気経路の確保				
排水対策				
災害の発生・拡大の防止		防火対策		
		そのほかの災害防止対策		
災害時の避難経路の確保	避難経路の確保			

(* 地下施設でのみ考慮する安全対策)

(4) NUMO-TR-10-12 で示された要件

「地層処分の要件管理技術, NUMO-TR-10-12」[25]では、「要件」の使い方について以下に記述されている。

「地層処分の目標は、閉鎖後長期の安全確保と事業期間中の安全確保である(NUMO, 2011a)。これらの目標に基づいて詳細化した要件を、実際のサイト選定や処分場の設計、安全評価に展開し、業務を実施することで、着実に地層処分の安全性を確保していく。(報告書からの抜粋)」

要件管理に用いる「要件」の定義は以下に記述され、最上位の要件(「必須の要件」と呼ぶ)としては最終処分法や安全規制および法令・指針からの要件および設計上の機能からの要件がそれにあたるとしている。このことから、回収可能性維持に対する必須の要件には、「基本方針、2016」に記載された事項が相当すると考えられる。

NUMO-TR-10-12 に記述された要件の定義(下線は筆者が追記)を以下に示す。

4.2.3 要件

処分事業において満たさなければならない要件は、例えば最終処分法、国による安全規制のための指針・基準（安全審査指針や処分場の技術基準）、労働安全衛生法など法令・指針類に定められた事項、社会的な要求事項に基づき設定されるものである。このほか、設計上の機能として必ず満たさなければならない要求機能などがある。NUMOの要件管理においては、これらを「必須の要件」として扱う。

一方、必ずしも満たさなくてもよいが、できれば具備していた方がよいと考えられるものも存在する。安全性や工学的成立性に関連する必ず満足しなければならない要求事項は満足しているものの、それらをより向上させるような好ましい機能、あるいは経済性の観点から好ましいことなどがこれに該当する。このような「好ましい事項」についても、意思決定の際には考慮されるため、要件管理の対象となる。特に好ましい要件は、後述する選択の意思決定において用いられる。

要件管理の対象としては、「要求事項を満足しているものの、それらをより向上させるような好ましい機能、あるいは経済性の観点から好ましいこと」も含まれ、選択の意思決定のための指標として、以下に示す「7項目の設計因子」が要件管理報告書で提示された。

NUMO-TR-04-01[24]では、段階的なサイト選定段階に伴う処分場概念構築において、表 3.3.3-12 に示す「設計因子：Design Factors」を基軸として構造化（概念構築作業の体系化）するとされた。

表 3.3.3-12 設計因子[24]

- 閉鎖後安全性 (Long-term Safety)
- 操業安全性 (Operational Safety)
- 工学的成立性／品質保証 (Engineering Feasibility / Quality Assurance)
- 工学的信頼性 (Engineering Reliability)
- サイト特性調査とモニタリング (Site Characterization and Monitoring)
- 回収可能性 (Retrievability)
- 環境影響 (Environmental Impact)
- 社会経済的側面 (Socio-economic Aspects)

これらの設計因子は、処分場概念を反復的に構築していく過程で見直され、より適切なものへと改良が行われる。設計因子をさらに下位の属性（要件、検討項目や制約条件）に展開していくことにより、包括的で緻密な評価構造が得られる。

図 3.3.3-3 に示した設計因子から導かれる技術要件は、処分概念や処分方策オプションを比較するための評価指標としても適用されることを示している。

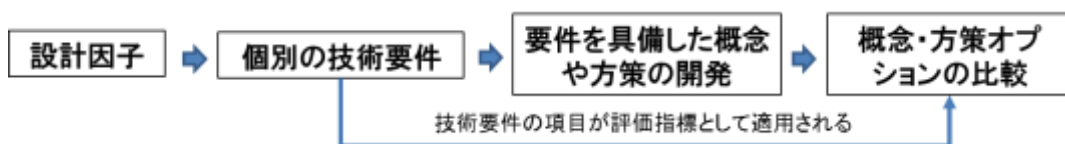


図 3.3.3-3 技術要件が評価指標として適用される例

3.3.4 既往の技術要件を参考にした回収可能性維持のための技術要件の設定方法と具体例の検討

本項では、既往の回収可能性を考慮していない技術要件を参考にして、定量化に必要な技術検討項目のうち、「1.安全性への影響」に関する定量化に必要な技術検討項目を対象に、回収可能性維持を考慮した場合に付加される技術要件の考え方について、設定方法と具体例を検討することにより整理する（3.3 節の冒頭で述べたアプローチ①による検討）。検討のフローを図 3.3.4-1 に示す。整理にあたっては、表 3.2-1 において示した定量化に必要な各技術検討項目に $i \sim xi$ の個別番号を付けて表記する。検討で参考にする技術要件は、NUMO の既往検討「処分場の安全機能と技術要件（2010 年度）」[3]とする。参考とする NUMO の技術要件では、処分場の構成要素に対して技術要件が設定されていることから、本検討でもこれを踏襲し、技術要件の検討対象を整理する。定量化に必要な技術検討項目は操業期間中と閉鎖後長期の安全性への影響に大別されていることから、操業期間中の定量化に必要な技術検討項目に関する検討対象は安全対策が施される構成要素とし、閉鎖後長期の検討対象は安全機能を有する構成要素として整理する。次に、整理した定量化に必要な技術検討項目ごとの構成要素に関して NUMO の技術要件で示している内容を整理する。最後に、それらに対して、回収可能性維持を考慮した場合の考え方について具体例を挙げて示す。なお、処分場が置かれる環境は、技術要件ではなく、『技術選定時の条件』となる。

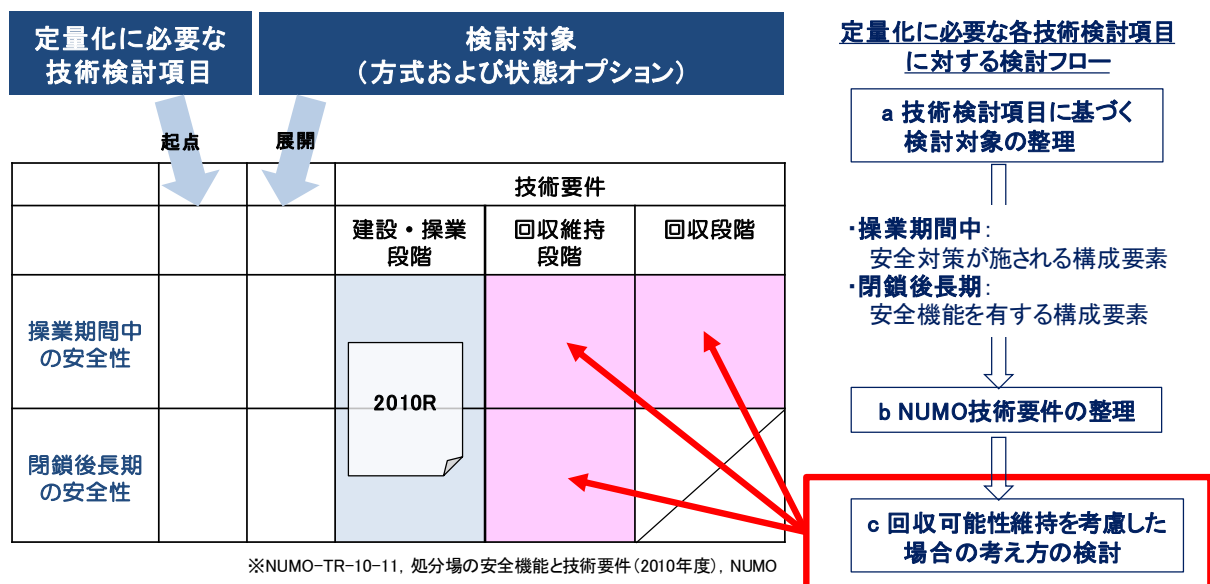


図 3.3.4-1 回収可能性維持のための技術要件についての考え方の成果イメージと検討フロー

また、検討した技術要件の具体例について、回収可能性維持を判断するための指標を整理して示す。指標は、「地層処分事業の安全確保（2010 年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－, NUMO-TR-11-01」[23]、「「処分場の安全機能と技術要件（2010 年度版）、NUMO-TR-10-11, 2011」[3]、各種法令等に基づき整理する。

(1) 技術要件の具体例の検討結果

1) 定量化に必要な技術検討項目 i 開放坑道の健全性（空間安定性）

a 定量化に必要な技術検討項目に基づく検討対象の整理

検討対象は埋め戻されていない坑道となるため、状態オプションによって対象となる坑道の種類は増減する。最も多くの種類が対象となるのは縦置きブロック方式および横置き PEM 方式ともに状態オプション 1（OP1）のケースであり、アクセス坑道、連絡坑道、主要坑道および処分坑道が対象となる。

b NUMO 技術要件の整理

NUMO の技術要件[3]では、「事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係」のうち、一般労働安全の「作業環境の維持」に「空洞の力学的安定性の確保」として安全対策が示されており、その構成要素には地下施設が挙げられている。また、地下施設の技術要件のうち、アクセス坑道、連絡坑道および処分坑道（処分孔）の技術要件として「空洞の力学的安定性が確保されること」が示されている（表 3.3.4-1、表 3.3.4-2）。

c 回収可能性維持を考慮した場合の考え方の検討

回収可能性維持を考慮した場合の回収維持段階においても、上記の技術要件が適用できると考えられる（表 3.3.4-3）。

表 3.3.4-1 事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係[3]

基本的な安全対策		安全対策	構成要素	
放射線安全	作業時 閉じ込め	廃棄体から放射性物質の漏えいの防止	廃棄体の密封 搬送時の落下・転倒・衝突時の廃棄体への衝撃の緩和	廃棄体 オーバーバック 廃棄体搬送機器・設備
		施設からの放射性物質の過大な放出の防止	負圧管理および遠隔操作	廃棄体受入建屋
	放射線遮へい	遮へい壁による放射線の遮へい 搬送容器による放射線の遮へい	廃棄体受入建屋 廃棄体位置機器・設備 廃棄体搬送機器・設備	
放射線被ばく管理	管理区域の設定	放射線管理区域の設定	廃棄体受入・封入・検査施設 地下施設の一部	
	被ばく管理・モニタリング	作業従事者の被ばく管理および放射線取扱作業従事時間の制限、放射線モニタリングの実施	管理区域内（地上、地下）	
	モニタリングポストの設置	モニタリングポストの設置	施設屋外	
一般労働安全	作業環境の維持	空洞の力学的安定性の確保*	地上施設 地下施設	
		換気経路の確保		
		排水対策		
	災害の発生・拡大の防止	防火対策 その他の災害防止対策		
災害時の避難経路の確保	避難経路の確保			

(*地下施設でのみ考慮する安全対策)

表 3.3.4-2 地下施設の技術要件 (NUMO, 2004 に一部加筆) [3]

坑道	技術要件
アクセス坑道 連絡坑道	<ul style="list-style-type: none"> 安全に建設・操業・閉鎖が実施できること 空洞の力学的安定性が確保されること 建設に必要な空間が確保できること 建設関連の物流経路が確保できること 地理、地形、地質等の設計上の前提となる条件を満たすこと 操業に必要な空間が確保できること 廃棄体を含む操業関連の物流経路が確保できること 閉鎖に必要な空間が確保できること 核種移行遅延性能に有意な影響を与えないように配慮がなされること
処分坑道 (処分孔)	<ul style="list-style-type: none"> 安全に建設・操業・閉鎖が実施できること 空洞の力学的安定性が確保されること 建設に必要な空間が確保できること 建設関連の物流経路が確保できること 地理、地形、地質等の設計上の前提となる条件を満たすこと 操業に必要な空間が確保できること 廃棄体を含む操業関連の物流経路が確保できること 閉鎖後長期安全性を有すること 核種移行遅延性能に有意な影響を与えないように配慮がなされること 長期的に健全であること 人工バリアが安定するように埋め戻されること

2) 定量化に必要な技術検討項目 ii 開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響

a 定量化に必要な技術検討項目に基づく検討対象の整理

検討対象は埋め戻されていない坑道となるため、状態オプションによって対象となる坑道の種類は増減する。最も多くの種類が対象となるのは縦置きブロック方式および横置き PEM 方式ともに状態オプション 1（OP1）のケースであり、アクセス坑道、連絡坑道、主要坑道および処分坑道が対象となる。

b NUMO 技術要件の整理

NUMO の技術要件[3]では、「事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係」のうち、一般労働安全の「作業環境の維持」に「換気経路の確保」として安全対策が示されており、その構成要素には地下施設が挙げられている。また、地下施設の技術要件のうち、アクセス坑道、連絡坑道および処分坑道（処分孔）の技術要件として「安全に建設・操業・閉鎖が実施できること」が示されている（表 3.3.4-1、表 3.3.4-2）。

c 回収可能性維持を考慮した場合の考え方の検討

回収可能性維持を考慮した場合の回収維持段階においても、上記の技術要件が適用できると考えられる。なお、例えば、処分深度 1000m、地表温度 15℃、地温勾配 0.03℃/m とした場合、坑道周辺の岩盤温度は 45℃となることから、廃棄体の有無にかかわらず、一般労働安全を確保するためには換気などの対策が必要となる（表 3.3.4-3）。

表 3.3.4-3 回収可能性維持を考慮した場合の技術要件の具体例（定量化に必要な技術検討項目 i ~ ii）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」			検討対象(イメージ)						技術要件			
定量化すべき情報			定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点	検査方式						建設・操業（定置まで）段階 (NUMO-TR-10-11)	回収維持段階	回収段階
				縦置き方式			横置き方式[PEM]					
			OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3				
1.	(1)	①	<p>1)開放坑道内の作業空間の安全性</p> <p>保守管理のために開放坑道内に人が出入りするため、開放坑道内の作業空間の安全性確保の観点から、以下の評価・検討や技術の具体化を行う。</p> <p>a. 開放坑道の健全性（空間安定性）</p> <p>b. 開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響</p>							<p>a. 空洞の力学的安定性が確保されること（表 4-6）</p> <p>b. 安全に建設・操業・閉鎖が実施できること（表 4-6）</p>	<p>a. 空洞の力学的安定性が確保されること</p> <p>b. 安全に操業（回収維持）が実施できること</p>	

3) 定量化に必要な技術検討項目 iii 埋め戻した坑道の再利用時の健全性

a 定量化に必要な技術検討項目に基づく検討対象の整理

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

b NUMO 技術要件の整理

NUMO の技術要件[3]では、「事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係」のうち、一般労働安全の「作業環境の維持」に「空洞の力学的安定性の確保」として安全対策が示されており、その構成要素には地下施設が挙げられている。また、地下施設の技術要件のうち、アクセス坑道、連絡坑道および処分坑道（処分孔）の技術要件として「空洞の力学的安定性が確保されること」が示されている（表 3.3.4-1、表 3.3.4-2）。

c 回収可能性維持を考慮した場合の考え方の検討

上記の NUMO の技術要件[3]は、坑道を再掘削／再利用することを想定した検討となっていないが、再掘削／再利用時にも建設・操業時と同様の安全確保が求められる。すなわち、回収可能性維持を考慮した場合の回収段階においても、上記の技術要件が適用できると考えられる（表 3.3.4-4）。

4) 定量化に必要な技術検討項目 iv 再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響

a 定量化に必要な技術検討項目に基づく検討対象の整理

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

b NUMO 技術要件の整理

NUMO の技術要件[3]では、「事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係」のうち、一般労働安全の「作業環境の維持」に「換気経路の確保」として安全対策が示されており、その構成要素には地下施設が挙げられている。また、地下施設の技術要件のうち、アクセス坑道、連絡坑道および処分坑道（処分孔）の技術要件として「安全に建設・操業・閉鎖が実施できること」が示されている（表 3.3.4-1、表 3.3.4-2）。

c 回収可能性維持を考慮した場合の考え方の検討

上記の NUMO の技術要件[3]は、坑道を再掘削／再利用することを想定した検討となっていないが、再利用時にも操業時と同様の安全確保が求められる。すなわち、回収可能性維持を考慮した場合の回収段階においても安全確保が求められ、安全に操業（回収）が実施できることが必要と考えられる。具体的には、処分深度 1000m、地表温度 15℃、地温勾配 0.03℃/m とした場合、坑道周辺の岩盤温度は 45℃となることから、廃棄体の有無にかかわらず、一般労働安全を確保するためには換気などの対策が必要となる（表 3.3.4-4）。

表 3.3.4-4 回収可能性維持を考慮した場合の技術要件の具体例（定量化に必要な技術検討項目 iii～iv）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」			検討対象(イメージ)						技術要件			
定量化すべき情報			定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点	搬置き方式			搬置き方式[PBM]			建設・操業(定置まで)段階 (NUMO-TR-10-11)	回収維持段階	回収段階
				OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3			
1.	(1) 安全性への影響	(2) 操業期間中の安全性への影響 (回収を実施する場合)	1)回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性 一度埋め戻した坑道の再掘削/再利用を前提とする場合に、回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性確保の観点から、以下の評価・検討や技術の具体化を行う。 a.埋め戻した坑道の再利用時の健全性 b.再利用する坑道内(作業空間)への廃棄体からの熱影響							a. 空間の力学的安定性が確保されること(表4-6) b. 安全に建設・操業・閉鎖が実施できること(表4-6) ※a.は従来の建設・操業段階と同じ、b.は従来の操業段階と同じ。		a. 空間の力学的安定性が確保されること b. 安全に操業(回収)が実施できること

※黄色マーカーは建設・操業(定置まで)段階で記載がなかったもの

5) 定量化に必要な技術検討項目 v 回収時の廃棄体容器の健全性

a 定量化に必要な技術検討項目に基づく検討対象の整理

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

b NUMO 技術要件の整理

NUMO の技術要件[3]では、「事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係」のうち、放射線安全の「作業時閉じ込め／廃棄体から放射性物質の漏洩の防止」に「搬送時の落下・転倒・衝突時の廃棄体への衝撃の緩和」として安全対策が示されており、その構成要素にはオーバーパックなどが挙げられている。ここでは安全対策としての記載のみであり、技術要件については示されていないが、2004R[24]には設計要件として「耐圧性を有すること（埋設後作用する機械的荷重に対して構造健全性を維持し、閉じ込め性を損なわないこと）」がある。また、閉鎖後長期の「多重バリアシステムの構成要素の技術要件」にオーバーパックの技術要件（基本的なバリア性能の確保）として構造健全性（埋設後作用する機械的荷重に対して構造健全性を維持すること）がある（表 3.3.4-1、表 3.3.4-7）。

なお、PEM 容器は廃棄体および緩衝材を一体化させることによる、品質管理・品質確保の容易性向上や物流の効率性向上を目的とした構成要素であり、作業時の PEM に技術要件は設定されていない。本検討では、「望ましい特性」を検討することとし、3.3.4 項の(2)にて別途詳述する。

c 回収可能性維持を考慮した場合の考え方の検討

回収可能性維持を考慮した場合の回収段階においても、上記を技術要件として適用できると考えられる（表 3.3.4-5）。

表 3.3.4-5 回収可能性維持を考慮した場合の技術要件の具体例（定量化に必要な技術検討項目 v）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」			検討対象(イメージ)						技術要件			
定量化すべき情報			定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点	搬置き方式			搬置き方式(PEM)			建設・操業(定置まで)段階 (NUMO-TR-10-11)	回収維持段階	回収段階
	(1)	(2)		OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3			
1. 安全性への影響	① 操業期間中の安全性への影響	② 回収作業時の安全性への影響(回収を実施する場合)	2)回収時の廃棄体容器の健全性 回収装置による把持・取り出しの際には、廃棄体容器に一定の機械強度が要求されることから、廃棄体容器の健全性に関する評価や検討を行う。							<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体から放射性物質の漏洩の防止（操業時間し込み(オーバーバック)）(表 4-4) ※安全対策としての記載のみ ・構造健全性（オーバーバック）(表 3-7) ※閉鎖後長期の安全確保としての記述 		<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体容器（オーバーバック）の構造健全性が維持されること ※PEMには要件ではない （望ましい特性を検討）

※黄色マーカーは建設・操業(定置まで)段階で記載がなかったもの

6) 定量化に必要な技術検討項目 vi 開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響

a 定量化に必要な技術検討項目に基づく検討対象の整理

検討対象は閉鎖後長期の安全性に対して安全機能を有する人工バリアおよび地下構造物となる。人工バリアはオーバーパックおよび緩衝材が構成要素であり、地下構造物は埋め戻し材および止水プラグが構成要素である。これらのうち、空気に触れることにより機能劣化が生じる可能性のある構成要素はオーバーパックである。ただし、全ての定置方式および状態オプションにおいて、回収維持段階ではオーバーパックが持ち込まれた空気に触れない設定となっている。

b NUMO 技術要件の整理

NUMO の技術要件[3]では、「閉鎖後長期の安全確保の安全機能と構成要素の関係」のうち、オーバーパックに関する安全機能は、閉鎖後閉じ込めの「放射性物質の浸出抑制」に「発熱が著しい期間の地下水接触防止」、および、「放射性物質の移行抑制」に「放射性物質の溶解度制限」が示されている。これにより、オーバーパックの技術要件として、「耐食性」が示されている（表 3.3.4-6、表 3.3.4-7）。

c 回収可能性維持を考慮した場合の考え方の検討

回収可能性維持を考慮した場合の回収維持段階においても、上記の技術要件が適用できると考えられる（表 3.3.4-13）。

表 3.3.4-6 高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係[3]

基本概念	安全機能		構成要素
隔離	地質の長期的な変動からの防護 ^{*1}		天然バリア
	人の接近の抑制 ^{*1}		
閉鎖後閉じ込め	放射性物質の浸出抑制	ガラスマトリクスによる浸出抑制	廃棄体
		発熱が著しい期間の地下水接触の防止	オーバーバック
	放射性物質の移行抑制	放射性物質の溶解度制限 ^{*2}	天然バリア, 人工バリア
		移流による移行の抑制	緩衝材
		コロイド移行の防止・抑制	
		収着による放射性物質の移行遅延	
		遅い地下水流動	天然バリア
		分散による移行率の低減	
アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制		閉鎖用埋め戻し等	

*1 適切なサイトを選定することにより確保する機能

*2 還元環境を保つことなどにより確保する機能

表 3.3.4-7 オーバーバックの技術要件（基本的なバリア性能の確保）[3]

安全機能		技術要件	技術要件の説明	設計項目
放射性物質の浸出抑制	発熱が著しい期間の地下水接触の防止	耐食性	所定の期間、腐食により安全機能が損なわれないこと	オーバーバックの設計（材料設計、形状・厚さの設計）
		構造健全性	埋設後作用する機械的荷重に対して構造健全性を維持すること	オーバーバックの設計（材料設計、形状・厚さの設計）
		溶接部耐食性・構造健全性	溶接部の機械強度、耐食性が母材と比較して著しく劣らないこと	オーバーバックの溶接設計（材料設計、蓋構造設計、溶接法、溶接条件）

7) 定量化に必要な技術検討項目 vii 廃棄体からの熱による影響

a 定量化に必要な技術検討項目に基づく検討対象の整理

検討対象は閉鎖後長期の安全性に対して安全機能を有する人工バリアおよび地下構造物となる。人工バリアはオーバーパックおよび緩衝材が構成要素であり、地下構造物は埋め戻し材および止水プラグが構成要素である。これらのうち、廃棄体からの熱により機能劣化が生じる可能性のある構成要素はオーバーパックおよび緩衝材である。なお、埋め戻し材および止水プラグもベントナイトを含むため、緩衝材と同様に廃棄体からの熱による影響を受ける可能性はある。しかし、第2次取りまとめの熱伝導解析の結果から、埋め戻し材および止水プラグは緩衝材よりも廃棄体から離れた位置に設置されるため、熱影響は緩衝材よりも大幅に小さいことが示されている[18]。熱伝導解析結果によると、熱影響を最も受けやすいのは廃棄体に近い緩衝材の内側となる。すなわち、埋め戻し材や止水プラグに熱影響が及ぶよりも前に、熱による緩衝材の変質が生じることになるため、緩衝材は技術要件の検討対象となるが、埋め戻し材および止水プラグはここでは対象としない。なお、NUMOの技術要件でも埋め戻し材および止水プラグには技術要件は耐熱性に関する検討対象とされていない。

b NUMO 技術要件の整理

NUMOの技術要件[3]では、「閉鎖後長期の安全確保の安全機能と構成要素の関係」のうち、オーバーパックに関する安全機能は、閉鎖後閉じ込めの「放射性物質の浸出抑制」に「発熱が著しい期間の地下水接触防止」、および、「放射性物質の移行抑制」に「放射性物質の溶解度制限」が示されている。これにより、オーバーパックの技術要件として挙げられているもののうち、廃棄体からの熱による影響を考慮すべき技術要件として「耐熱性」が示されている（表 3.3.4-6、表 3.3.4-7）。

また、「閉鎖後長期の安全確保の安全機能と構成要素の関係」のうち、緩衝材に関する安全機能は、閉鎖後閉じ込めの「放射性物質の移行抑制」に「放射性物質の溶解度制限」、「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止・抑制」および「収着による放射性物質の移行遅延」が示されている。これにより、緩衝材の技術要件として挙げられているもののうち、廃棄体からの熱による影響を考慮すべき技術要件として、「耐熱性」が示されている（表 3.3.4-6、表 3.3.4-9）。

c 回収可能性維持を考慮した場合の考え方の検討

回収可能性維持を考慮した場合の回収維持段階においても、上記の技術要件が適用できると考えられる（表 3.3.4-13）。

表 3.3.4-8 オーバーパックの長期健全性の維持に関する技術要件[3]

技術要件	技術要件の説明	設計項目
耐熱性	廃棄体からの発熱により耐食性や強度が著しく低下しないこと	オーバーパックの設計 (材料設計)
耐放射線性	放射線脆化が著しくないこと	オーバーパックの設計 (材料設計)
残置物との相互作用の影響の低減	コンクリートなどの残置物との相互作用により安全機能が著しく低下しないこと	坑道の設計 (支保工の材料設計)
バリア材料間の相互作用の影響の低減	人工バリア材料間の相互作用により安全機能が著しく低下しないこと	オーバーパックの設計 (材料設計)
ガラス固化体の過熱の防止	良好な熱伝導性を有すること	オーバーパックの設計 (材料設計, 形状・厚さの設計)

表 3.3.4-9 緩衝材の技術要件（基本的なバリア性能の確保）[3]

安全機能		技術要件	技術要件の説明	設計項目
放射性物質移行の抑制	移流による移行抑制	低透水性	緩衝材中の地下水の動き（移流）を抑制し、結果的に放射性物質の移行を遅延すること	緩衝材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計)
	コロイド移行の防止・抑制	コロイドろ過能	放射性物質がコロイドとして移行することを防止または抑制すること	緩衝材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計)
	取着による放射性物質移行の遅延	取着性	ガラス固化体から溶出した放射性物質を取着することにより遅延する	緩衝材の設計 (材料設計)

8) 定量化に必要な技術検討項目 viii 坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響

a 定量化に必要な技術検討項目に基づく検討対象の整理

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

b NUMO 技術要件の整理

NUMO の技術要件[3]では、「閉鎖後長期の安全確保の安全機能と構成要素の関係」のうち、オーバーパックに関する安全機能は、閉鎖後閉じ込めの「放射性物質の浸出抑制」に「発熱が著しい期間の地下水接触防止」、および、「放射性物質の移行抑制」に「放射性物質の溶解度制限」が示されている。これにより、オーバーパックの技術要件として挙げられているもののうち、坑内湧水による影響を考慮すべき技術要件として「耐食性」が示されている(表 3.3.4-6、表 3.3.4-7)。

NUMO の技術要件[3]では、「閉鎖後長期の安全確保の安全機能と構成要素の関係」のうち、緩衝材に関する安全機能は、閉鎖後閉じ込めの「放射性物質の移行抑制」に「放射性物質の溶解度制限」、「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止・抑制」および「収着による放射性物質の移行遅延」が示されている。これにより、緩衝材の技術要件として挙げられているもののうち、坑内湧水による影響を考慮すべき技術要件(長期健全性の維持)として、「緩衝材流出の抑制」が示されている(表 3.3.4-6、表 3.3.4-10)。

NUMO の技術要件[3]では、「閉鎖後長期の安全確保の安全機能と構成要素の関係」のうち、埋め戻し材に関する安全機能は、閉鎖後閉じ込めの「放射性物質の移行抑制」に「アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制」が示されている。これにより、埋め戻し材の技術要件として挙げられているもののうち、坑内湧水による影響を考慮すべき技術要件として「施工時の隙間の充てん」が示されている(表 3.3.4-6、表 3.3.4-11、表 3.3.4-12)。

NUMO の技術要件[3]では、「閉鎖後長期の安全確保の安全機能と構成要素の関係」のうち、止水プラグに関する安全機能は、閉鎖後閉じ込めの「放射性物質の移行抑制」に「アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制」が示されている。これにより、止水プラグの技術要件として挙げられているもののうち、坑内湧水による影響を考慮すべき技術要件として「施工時の隙間の充てん」が示されている(表 3.3.4-6、表 3.3.4-11、表 3.3.4-12)。

c 回収可能性維持を考慮した場合の考え方の検討

回収可能性維持を考慮した場合の回収維持段階においても、オーバーパック、緩衝材に関して、上記の技術要件が適用できると考えられる。埋め戻し材および止水プラグについては、緩衝材と同様の考え方で「ベントナイト流出の抑制」が考えられる(表 3.3.4-13)。

表 3.3.4-10 緩衝材の技術要件（長期健全性の維持）[3]

技術要件	技術要件の説明	設計項目
自己修復性	施工後変形などにより隙間が生じたとしても、自己修復できること	緩衝材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計)
耐熱性	廃棄体の発熱により緩衝材の機能が著しく低下しないこと	地下施設の設計 (坑道離間距離, 廃棄体ピッチ)
耐放射線性	廃棄体の放射線により緩衝材の機能が著しく低下しないこと	緩衝材の設計 (材料設計)
緩衝材流出の抑制	地下水流による緩衝材の流出が著しくないこと	地下施設の設計
残置物との相互作用の影響の低減	コンクリートなどの残置物との相互作用により安全機能が著しく低下しないこと	坑道の支保設計 (材料設計)
バリア材料間の相互作用の影響の低減	人工バリア材料間の相互作用により安全機能が著しく低下しないこと	緩衝材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計)
ガラス固化体の過熱の防止	良好な熱伝導性を有すること	緩衝材の設計 (材料設計)
オーバーパックの保護 (物理的緩衝性)	オーバーパックの腐食膨張, 岩盤の変形を緩和し, オーバーパックを機械的な破壊から保護するよう, 物理的緩衝性を有すること	緩衝材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計)
オーバーパックの沈下の防止	廃棄体オーバーパックを力学的に支持すること	緩衝材の設計 (材料設計)
施工時の隙間の充填(自己シール性)	施工時の隙間を充填するよう, 膨潤性を有すること	緩衝材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) 操業システムの設計 (施工技術)

表 3.3.4-11 埋め戻し材・止水プラグの技術要件（基本的なバリア性能の確保）[3]

安全機能		技術要件	技術要件の説明	設計項目
放射性物質の移行抑制	アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制	低透水性	地下水の流れを抑制すること	埋め戻し材の設計 (材料設計) 止水プラグの設計 (材料設計, 配置設計)

表 3.3.4-12 埋め戻し材、止水プラグの長期健全性の維持に関する技術要件[3]

技術要件	技術要件の説明	設計項目
施工時の隙間の充てん (自己シール性)	施工時の隙間を充てんするよう、膨潤性を有すること	埋戻し材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) 止水プラグの設計 (材料設計, 配置設計)
残置物, 材料間の相互作用の影響の低減	コンクリートなどの残置物や材料間の相互作用により安全機能が著しく低下しないこと	埋戻し材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) 止水プラグ, 力学プラグの設計 (材料設計, 配置設計)

表 3.3.4-13 回収可能性維持を考慮した場合の技術要件の具体例（定量化に必要な技術検討項目 vi～viii）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」		検討対象(イメージ)						技術要件			
定量化すべき情報	定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点	駆逐方式			駆逐方式[REM]			建設・操業（定置まで）段階 (NUMO-TR-10-11)	回収維持段階	回収段階	
		OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3				
1. 安全性への影響	(2) 閉鎖後長期の安全性への影響 ：回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合、人工バリアや天然バリア（母岩）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響	1)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う人工バリア等に期待する安全機能への影響 維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ、人工バリア（及び他の地下構造物）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響を下記観点から評価する。 a.開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響 b.廃棄体からの熱による影響 c.坑道開放期間中に継続する坑内満水の影響							a. ・オーバーバック：耐食性(表 3-7) ・緩衝材：－ ・埋め戻し材：－ ・止水プラグ：－ b. ・オーバーバック：耐熱性(表 3-6) ・緩衝材：耐熱性(表 3-11) ・埋め戻し材：－ ・止水プラグ：－ c. オーバーバック：耐食性(表 3-7) ・緩衝材：緩衝材流出の抑制(表 3-11) ・埋め戻し材：施工時の隙間充てん(自己シール性)(表 3-14) ・止水プラグ：施工時の隙間充てん(自己シール性)(表 3-14) ※影響の対象となる安全機能を有する構成要素の技術要件	a. ・オーバーバック：耐食性 ・緩衝材：－ ・埋め戻し材：－ ・止水プラグ：－ b. ・オーバーバック：耐熱性 ・緩衝材：耐熱性 ・埋め戻し材：－ ・止水プラグ：－ c. オーバーバック：耐食性 ・緩衝材：緩衝材流出の抑制 ・埋め戻し材： ベントナイト成分流出の抑制 ・止水プラグ： ベントナイト成分流出の抑制	

※黄色マーカーは建設・操業(定置まで)段階で記載がなかったもの

9) 定量化に必要な技術検討項目 ix 地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込みの影響）

a 定量化に必要な技術検討項目に基づく検討対象の整理

検討対象は閉鎖後長期の安全性に対して安全機能を有する天然バリア（母岩）となり、天然バリアの構成要素は母岩そのものである。

b NUMO 技術要件の整理

NUMO の技術要件[3]では、「閉鎖後長期の安全確保の安全機能と構成要素の関係」のうち、天然バリアに関する安全機能は、隔離の「地質の長期的変動からの防護」、および、「人の接近の抑制」が示されており、どちらも適切なサイトを選定することにより確保する機能であるとされている。また、母岩の好ましい特性の分類として、「熱環境」、「水理場」、「力学場」、および「化学環境」が示されている。このうち、地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込みの影響）に関する特性の分類は「化学環境」であり、好ましい特性は「閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶性、収着遅延性とバリア材料の安定性に適していること」であると考えられる（表 3.3.4-14、表 3.3.4-15）。

c 回収可能性維持を考慮した場合の考え方の検討

回収可能性維持を考慮した場合の回収維持段階においても、上記の技術要件が適用できると考えられる（表 3.3.4-13）。

表 3.3.4-14 閉鎖後長期の安全確保の基本概念と安全機能[3]

基本概念	安全機能	安全機能の説明
隔離	地質の長期的な変動からの防護	生活環境から十分離された安定な地下深部に廃棄物を埋設し、侵食のような地形変動から防護すること
	人の接近の抑制	偶発的な人の接近の可能性を低減するため、人が特殊な技術を用いることなしには廃棄物に接近することが困難であること
閉鎖後閉じ込め	放射性物質の浸出抑制	廃棄体からの放射性物質の浸出を抑制し、地下水への放出率を低下させるとともに、放射性物質を廃棄体近傍に保持することで放射能を減衰させること
	放射性物質の移行抑制	浸出した放射性物質の移行を抑制することにより、放射性物質移行率を低下させるとともに、遅延により放射能を減衰させること

表 3.3.4-15 母岩の好ましい特性[3]

分類	好ましい特性
熱環境	閉鎖後の処分場の温度が低いこと
水理場	閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流速が遅いこと
力学場	閉鎖後の処分場とその周辺の変形が小さいこと
化学環境	閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶解性、収着遅延性とバリア材料の安定性に適していること

10) 定量化に必要な技術検討項目 x 開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度

a 定量化に必要な技術検討項目に基づく検討対象の整理

検討対象は閉鎖後長期の安全性に対して安全機能を有する天然バリア（母岩）となり、天然バリアの構成要素は母岩そのものである。

b NUMO 技術要件の整理

NUMO の技術要件[3]では、「閉鎖後長期の安全確保の安全機能と構成要素の関係」のうち、天然バリアに関する安全機能は、隔離の「地質の長期的変動からの防護」、および、「人の接近の抑制」が示されており、どちらも適切なサイトを選定することにより確保する機能であるとされている。また、母岩の好ましい特性の分類として、「熱環境」、「水理場」、「力学場」、および「化学環境」が示されている。このうち、開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度に関する特性の分類は「化学環境」であり、好ましい特性は「閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶性、収着遅延性とバリア材料の安定性に適していること」であると考えられる（表 3.3.4-14、表 3.3.4-15）。

c 回収可能性維持を考慮した場合の考え方の検討

回収可能性維持を考慮した場合の回収維持段階においても、上記の技術要件が適用できると考えられる（表 3.3.4-13）。

11) 定量化に必要な技術検討項目xi ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度

a 定量化に必要な技術検討項目に基づく検討対象の整理

検討対象は閉鎖後長期の安全性に対して安全機能を有する天然バリア（母岩）となり、天然バリアの構成要素は母岩そのものである。

b NUMO 技術要件の整理

NUMO の技術要件[3]では、「閉鎖後長期の安全確保の安全機能と構成要素の関係」のうち、天然バリアに関する安全機能は、隔離の「地質の長期的変動からの防護」、および、「人の接近の抑制」が示されており、どちらも適切なサイトを選定することにより確保する機能であるとされている。また、母岩の好ましい特性の分類として、「熱環境」、「水理場」、「力学場」、および「化学環境」が示されている。このうち、ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度に関する特性の分類は「水理場」であり、好ましい特性は「閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流速が遅いこと」であると考えられる（表 3.3.4-14、表 3.3.4-15）。

c 回収可能性維持を考慮した場合の考え方の検討

回収可能性維持を考慮した場合の回収維持段階においても、上記の技術要件が適用できると考えられる（表 3.3.4-13）。

表 3.3.4-16 回収可能性維持を考慮した場合の技術要件の具体例（定量化に必要な技術検討項目 ix～xi）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」		検討対象(イメージ)						技術要件		
定量化すべき情報	定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点	設置方式			掘削方式(PEM)			建設-操業(定置まで)段階 (NUMO-TR-10-11)	回収維持段階	回収段階
		OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3			
1. 安全性への影響	(2) 自然障壁層の安全条件への影響 ：回収可能性維持期間の後に回収せずに最終処分する場合、人工バリア(母岩)に期待する自然障壁層の安全機能への影響	<p>2)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う天然バリア(母岩)に期待する安全機能への影響</p> <p>維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ、天然バリア(母岩)に期待される閉鎖後長期の安全機能に係わる次のような影響を評価する。</p> <p>a. 地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度(化学組成の異なる地下水の引き込みの影響)</p> <p>b. 開放坑道を介した酸堿の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度</p> <p>c. ベースライン(建設前の元の地下環境の状態)への回復過程と回復の程度</p>						<p>a. 閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶性、収着遅延性とバリア材料の安定性に達していること(表3-6)</p> <p>b. 閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶性、収着遅延性とバリア材料の安定性に達していること(表3-6)</p> <p>c. 閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流速が遅いこと(表3-6)</p> <p>※対象となる安全機能を有する構成要素の技術要件</p>	<p>a. 閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶性、収着遅延性とバリア材料の安定性に達していること(好ましい特性)</p> <p>b. 閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶性、収着遅延性とバリア材料の安定性に達していること(好ましい特性)</p> <p>c. 閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流速が遅いこと(好ましい特性)</p>	

(2) PEM 容器に関する望ましい特性について

PEM (Prefabricated Engineered barrier system Module) 方式は、操業工程における人工バリアの品質の信頼性向上と地下での操業にかかわる作業を軽減するための検討(搬送・定置作業に対する精度や物流の観点からの改善検討)の中で、人工バリアをあらかじめ地上施設で一体型のモジュールに組み上げた上で搬送・定置するものである[3]。PEM 方式の利点は、地上施設での組立てによる品質の信頼性向上と搬送・定置作業の効率化が期待できる点であり、横置き PEM 方式は、技術開発の到達レベル、作業効率の向上の見通しなどの観点から、現段階で有望と考えられる操業技術のオプションとして選定されている[3]。

3.2.2(1)5)で述べたとおり、「定量化に必要な技術検討項目 v 回収時の廃棄体容器の健全性」に関して、操業時の PEM 容器に技術要件は設定されておらず、本検討でも技術要件の設定は行わない。

しかし、廃棄体容器(オーバーパック)回収時に PEM 容器(鋼殻)の構造健全性が確保されている場合には、PEM 容器ごと搬出することが可能であるため、定置時と同様に回収作業の効率化が期待できる。よって、回収時の PEM 容器の「望ましい特性」として、「構造健全性が維持されていること」を挙げるができる。

PEM 方式では廃棄体、緩衝材、鋼製セルを含めて約 35t と比較的重量が重いため、搬送・定置の操業工程において、空間的制約が大きい処分坑道内での水平方向への搬送・定置の機構、PEM 容器と処分坑道との隙間の充填技術に着目した技術開発が進められている[3]。回収時にも処分坑道内での空間的制約の中で回収・搬送する技術が求められるが、機構は搬送・定置時と概ね同様となることが考えられる。

(3) 技術要件の具体例に対応した回収可能性維持を判断するための指標の検討例

3.3.4 項の(1)で検討した技術要件の具体例について、回収可能性維持を判断するための指標の例を整理して示す。指標は、「地層処分事業の安全確保(2010年度版)―確かな技術による安全な地層処分の実現のために―, NUMO-TR-11-01」[23], 「地層処分事業の安全確保(2010年度版)―確かな技術による安全な地層処分の実現のために―, NUMO-TR-11-01」[3]、法令等に基づき整理する。

1) 定量化に必要な技術検討項目 i 開放坑道の健全性(空間安定性)

回収維持段階における技術要件として「空洞の力学的安定性が確保されること」を示した。上記の技術要件に対して、開放坑道の健全性(空間安定性)に関する回収可能性維持を判断するための指標として、坑道設計時の指標となる岩盤のひずみおよび応力、支保部材の応力が相当すると考えられる(表 3.3.4-17)。

なお、支保部材は岩盤に応じて種類が変わるため、それに対応して部材ごとに指標を設定することが考えられる。

2) 定量化に必要な技術検討項目 ii 開放坑道内(作業空間)への廃棄体からの熱影響

回収維持段階における技術要件として「安全に操業(回収維持)が実施できること」を示した。上記の技術要件に対して、開放坑道内(作業空間)への廃棄体からの熱影響に関する回収可能性維持を判断するための指標として、労働安全衛生規則[26]の第六百十一条に「事業者は、坑内における気温を三十七度以下としなければならない。ただし、高温による健康障害を防止するため必要な措置を講じて人命救助又は危害防止に関する作業をさせるときは、この限りでない。」とあり、これが相当すると考えられる(表 3.3.4-17)

その他、労働安全衛生規則に準じて、廃棄体からのふく射熱等による熱影響がある場合には指標となる可能性がある。坑内気温等などの指標の適用は、建設・操業時も同様であり、回収維持段階でも法令を順守するための対策をとる必要がある。

表 3.3.4-17 回収可能性維持を判断するための指標の例（定量化に必要な技術検討項目 i ~ ii）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」			技術要件						回収可能性維持期間を判断するための指標		
定量化すべき情報			検討対象(イメージ)								
			堅置き方式			横置き方式[PEM]					
			OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3	回収維持段階	回収段階	
1.	(1)	①	1)開放坑道内の作業空間の安全性 保守管理のために開放坑道内に人が出入りするため、開放坑道内の作業空間の安全性確保の観点から、以下の評価・検討や技術の具体化を行う。 a.開放坑道の健全性（空間安定性） b.開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響							a. 空洞の力学的安定性が確保されること b. 安全に操業（回収維持）が実施できること	a. 岩盤のひずみおよび応力、支保材料の応力（設計項目） b. 坑内気温（坑内における気温：三十七度以下[労働安全衛生規則]）

3) 定量化に必要な技術検討項目 iii 埋め戻した坑道の再利用時の健全性

回収維持段階における技術要件として「空洞の力学的安定性が確保されること」を示した。上記の技術要件に対して、開放坑道の健全性（空間安定性）に関する回収可能性維持を判断するための指標として、坑道設計時の指標となる岩盤のひずみおよび応力、支保部材の応力が相当すると考えられる（表 3.3.4-18）。

支保部材は岩盤に応じて種類が変わるため、それに対応して部材ごとに指標を設定することが考えられる。

4) 定量化に必要な技術検討項目 iv 再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響
回収段階における技術要件として「安全に操業（回収）が実施できること」を示した。

上記の技術要件に対して、開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響に関する回収可能性維持を判断するための指標として、労働安全衛生規則[26]の第六百十一条に「事業者は、坑内における気温を三十七度以下としなければならない。ただし、高温による健康障害を防止するため必要な措置を講じて人命救助又は危害防止に関する作業をさせるときは、この限りでない。」とあり、これが相当すると考えられる（表 3.3.4-18）。

その他、労働安全衛生規則に準じて、廃棄体からのふく射熱等による熱影響がある場合には指標となる可能性がある。坑内気温等などの指標の適用は、建設・操業時も同様であり、回収段階でも法令を順守するための対策をとる必要がある。

表 3.3.4-18 回収可能性維持を判断するための指標の例（定量化に必要な技術検討項目 iii～iv）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」			技術要件						回収可能性維持期間を判断するための指標		
定量化すべき情報			検討対象(イメージ)								
			堅置き方式			横置き方式[PEM]					
1. 安全性への影響	(1) 操業期間中の安全性への影響	② 回収作業時の安全性への影響(回収を実施する場合)	OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3	回収維持段階	回収段階	

※黄色マーカーは建設・操業(定置まで)段階で記載がなかったもの

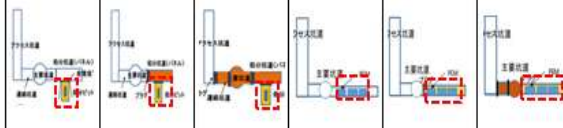
5) 定量化に必要な技術検討項目 v 回収時の廃棄体容器の健全性

回収段階における技術要件として「廃棄体容器（オーバーパック）の構造健全性が維持されること」を示した。NUMO の技術要件[3]では、廃棄体容器（オーバーパック）の構造健全性について、技術要件に対する設計項目として以下が示されている（表 3.3.4-7）。

- ・オーバーパックの設計：材料設計、形状・厚さ
- ・オーバーパック溶接設計：材料設計、蓋構造設計、溶接法、溶接条件

したがって、回収段階における技術要件に対する、回収時の廃棄体容器の健全性に関する回収可能性維持を判断するための指標として、オーバーパックとその溶接部の材料および形状・厚さが相当すると考えられる（表 3.3.4-19）。

表 3.3.4-19 回収可能性維持を判断するための指標の例（定量化に必要な技術検討項目 v）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」			技術要件						回収可能性維持期間を判断するための指標		
定量化すべき情報			検討対象(イメージ)								
			堅置き方式			横置き方式[PEM]					
定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点			OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3	回収維持段階	回収段階	
1. 安全性への影響	(1) 設置期間中の安全性への影響	(2) 回収作業時の安全性への影響(回収を実施する場合)	<p>2)回収時の廃棄体容器の健全性</p> <p>回収装置による把持・取り出しの際には、廃棄体容器に一定の機械強度が要求されることから、廃棄体容器の健全性に関する評価や検討を行う。</p> 							<p>・廃棄体容器（オーバーバック）の構造健全性が維持されること</p> <p>※PEM には要件ではなく望ましい特性を検討</p>	<p>・オーバーバックとその溶接部の材料、形状・厚さ（設計項目の一部）</p>

※黄色マーカーは建設・操業(定置まで)段階で記載がなかったもの

6) 定量化に必要な技術検討項目 vi 開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響

回収維持段階における技術要件として廃棄体容器（オーバーパック）に対して「耐食性」を示した。NUMO の技術要件[3]では、オーバーパックの耐食性について、技術要件に対する設計項目として以下が示されている（表 3.3.4-7）。

- ・オーバーパックの設計：材料設計、形状・厚さ
- ・オーバーパック溶接設計：材料設計、蓋構造設計、溶接法、溶接条件

したがって、回収維持段階における技術要件に対する、開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響に関する回収可能性維持を判断するための指標として、オーバーパックとその溶接部の材料および形状・厚さが相当すると考えられる（表 3.3.4-20）。

7) 定量化に必要な技術検討項目 vii 廃棄体からの熱による影響

回収維持段階における技術要件として廃棄体容器（オーバーパック）および緩衝材に対して「耐熱性」を示した。NUMO の技術要件[3]では、技術要件に対する設計項目として、オーバーパックの耐熱性については、耐食性や強度が著しく低下しないことを目的として、材料設計が示されている（表 3.3.4-8）。また、緩衝材の耐熱性については、緩衝材の機能が著しく低下しないことを目的として、地下施設の設計（坑道離間距離、廃棄体ピッチ）が示されている（表 3.3.4-10）。回収維持段階における技術要件に対する、廃棄体からの熱による影響に関する回収可能性維持を判断するための指標として、オーバーパックについては、オーバーパックとその溶接部の材料および形状・厚さが相当すると考えられる（表 3.3.4-20）。また、緩衝材については、材料そのものが相当すると考えられる（表 3.3.4-20）。

8) 定量化に必要な技術検討項目 viii 坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響

回収維持段階における技術要件として廃棄体容器（オーバーパック）に対して「耐食性」を示した。また、緩衝材に対して「緩衝材流出の抑制」、埋め戻し材および止水プラグに対して「ベントナイト成分流出の抑制」を示した。

NUMO の技術要件[3]では、オーバーパックの耐食性について、技術要件に対する設計項目として以下が示されている（表 3.3.4-7）。

- ・オーバーパックの設計：材料設計、形状・厚さ
- ・オーバーパック溶接設計：材料設計、蓋構造設計、溶接法、溶接条件

同様に、緩衝材流出の抑制について、技術要件に対する設計項目として「地下施設の設計」が示されており（表 3.3.4-10）、密度低下に関する解析や定置場所の選択およびグラウトによる岩盤の亀裂の充填などの対策検討が示されている。埋め戻し材および止水プラグについては、基本的なバリア性能の確保の技術要件および長期健全性の維持に関する技術要件に対する設計項目に「材料設計」が示されており（表 3.3.4-12）、ベントナイト含有率や乾燥密度の検討において対策を検討することが示されている。

オーバーパックの回収維持段階における技術要件に対する、坑道開放期間内に継続する坑内湧

水の影響に関する回収可能性維持を判断するための指標として、オーバーパックとその溶接部の材料および形状・厚さが相当すると考えられる（表 3.3.4-20）。また、緩衝材、埋め戻し材および止水プラグに対しては、機能を発揮するための成分として考慮されているベントナイトの含有率および乾燥密度（密度）が指標として相当すると考えられる（表 3.3.4-20）。

表 3.3.4-20 回収可能性維持を判断するための指標の例（定量化に必要な技術検討項目 vi～viii）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」		検討対象(イメージ)						技術要件		回収可能性維持期間を判断するための指標
定量化すべき情報	定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点	堅置き方式			構置き方式[PEM]			回収維持段階	回収段階	
		OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3			
1. 安全性への影響	(2) 閉鎖後長期の安全性への影響 ：回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合、人工バリアや天然バリア（母岩）に期待する閉鎖後長期の安全性への影響	1)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う人工バリア等に期待する安全機能への影響 維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ、人工バリア（及び他の地下構造物）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響を下記観点から評価する。 a.開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響 b.廃棄体からの熱による影響 c.坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響							a. ・オーバーバック：耐食性 ・緩衝材：－ ・埋め戻し材：－ ・止水プラグ：－ b. ・オーバーバック：耐熱性 ・緩衝材：耐熱性 ・埋め戻し材：－ ・止水プラグ：－ c. オーバーバック：耐食性 ・緩衝材：緩衝材流出の抑制 ・埋め戻し材：ベントナイト成分流出の抑制 ・止水プラグ：ベントナイト成分流出の抑制	a. ・オーバーバック：本体と溶接部の材料、形状・厚さ（設計項目の一部） ・緩衝材：－ ・埋め戻し材：－ ・止水プラグ：－ b. ・オーバーバック：材料（設計項目の一部） ・緩衝材：材料 ・埋め戻し材：－ ・止水プラグ：－ c. オーバーバック：本体と溶接部の材料、形状・厚さ（設計項目の一部） ・緩衝材：ベントナイト含有率、乾燥密度（密度） ・埋め戻し材：ベントナイト含有率、乾燥密度（密度） ・止水プラグ：ベントナイト含有率、乾燥密度（密度）

※黄色マーカーは建設・操業(定置まで)段階で記載がなかったもの

9) 定量化に必要な技術検討項目 ix 地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込みの影響）

回収維持段階における好ましい特性として、母岩の化学環境に関する「閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶性、収着遅延性とバリア材料の安定性に適していること」を示した。

回収維持段階における技術要件に対する、地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込みの影響）に関する回収可能性維持を判断するための指標として、酸化還元電位、地下水の pH、地下水組成、鉱物組成などが挙げられると考えられる（表 3.3.4-21）。

10) 定量化に必要な技術検討項目 x 開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度

回収維持段階における好ましい特性として、母岩の化学環境に関する「閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶性、収着遅延性とバリア材料の安定性に適していること」を示した。

回収維持段階における技術要件に対する、開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度に関する回収可能性維持を判断するための指標として、酸化還元電位、地下水の pH、地下水組成、鉱物組成などが挙げられると考えられる（表 3.3.4-21）。

11) 定量化に必要な技術検討項目 xi ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度

回収維持段階における好ましい特性として、母岩の地下水環境に関する「閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流速が遅いこと」を示した。

回収維持段階における技術要件に対する、ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度に関する回収可能性維持を判断するための指標として、流速（流量）などが挙げられると考えられる（表 3.3.4-21）。

表 3.3.4-21 回収可能性維持を判断するための指標の例（定量化に必要な技術検討項目 ix～xi）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」		検討対象(イメージ)						技術要件		回収可能性維持期間を判断するための指標
定量化すべき情報	定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点	堅置き方式			横置き方式[PEM]			回収維持段階	回収段階	
		OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3			
1. 安全性への影響	(2) 閉鎖後長期の安全性への影響 ：回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合、人工バリアや天然バリア(母岩)に期待する閉鎖後長期の安全性への影響	<p>2)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う天然バリア(母岩)に期待する安全機能への影響</p> <p>維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ、天然バリア(母岩)に期待される閉鎖後長期の安全機能に係わる次のような影響を評価する。</p> <p>a.地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度(化学組成の異なる地下水の引き込みの影響)</p> <p>b.開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度</p> <p>c.ベースライン(建設前の元の地下環境の状態)への回復過程と回復の程度</p>						<p>a. 閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶解性、収着遅延性とバリア材料の安定性に適していること(好ましい特性)</p> <p>b. 閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶解性、収着遅延性とバリア材料の安定性に適していること(好ましい特性)</p> <p>c. 閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流速が遅いこと(好ましい特性)</p>	<p>a. 酸化還元電位、地下水のpH、地下水組成、鉍物組成など</p> <p>b. 酸化還元電位、地下水のpH、地下水組成、鉍物組成など</p> <p>c. 流速(流量)など</p>	

3.3.5 基本方針の回収可能性確保の要求事項に基づく回収可能性維持技術要件の設定方法と具体例の検討

本項では、法規制からの要求事項を「必須の要件」とする考え方にに基づき、基本方針に規定された回収可能性維持に係わる上位の要求事項から階層構造を作成し、それぞれについて専門的な判断で技術要件を設定する考え方について検討する。

(1) 基本方針からの回収可能性確保への要求事項の整理

回収可能性維持に係る「基本方針」[19]では、回収可能性の確保に関して以下の技術的な要求事項が記述されている。これらから図 3.3.5-1 に示す大きく二つの要求事項が抽出できる。

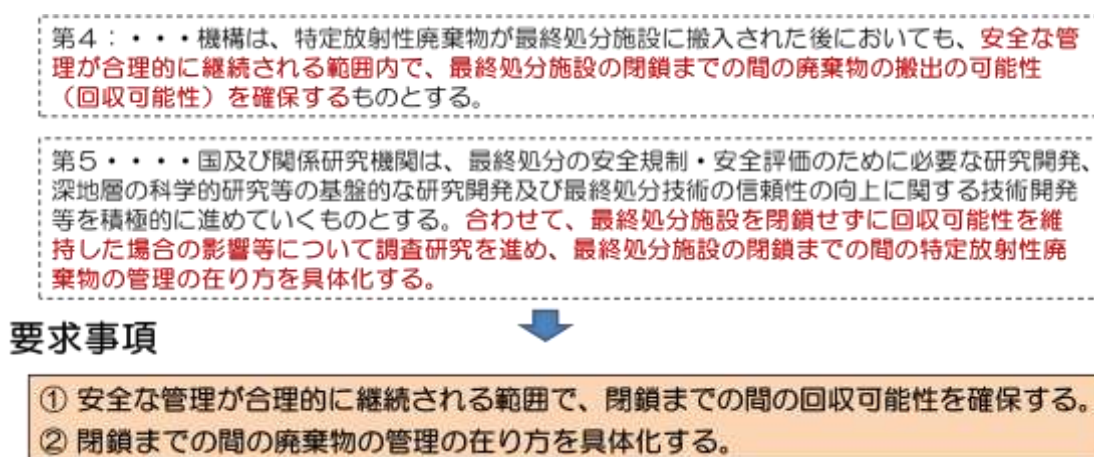


図 3.3.5-1 基本方針からの回収可能性確保に係る要求事項

基本方針からの要求事項の内、①の要求は、回収可能性の維持に係わる技術的な要件として以下に示す3つのキーワード（安全な管理、合理的な範囲、閉鎖まで）に分解することができる。

表 3.3.5-1 回収可能性を維持することに対する技術的な要件例

<p>「安全な管理」：処分事業期間中の安全（労働安全、放射線安全）管理と長期的な安全性確保に向けての処分システム安全機能を維持するための要件に分類される。</p> <p>「合理的な範囲」：処分事業の安全な管理が合理的に実現できるとする要件を意味し、「法規制の順守」、「技術的な実現性」及び「経済性と効率性」に分類される。</p> <p>「閉鎖まで」：回収可能性を維持しつつ「閉鎖措置計画が申請できること」が要求事項となり、環境回復の確認、安全レビューでの確認、性能確認などが要件となる。</p>

これらの要件には、NUMO が設定した回収可能性を考慮しない場合の安全確保からの3つの要件（基本的なバリア性能の確保、長期健全性の維持、工学的実現性の確保）に共通する事項もあり、回収可能性の維持の観点からは「合理的な範囲で実現性がある」ことがあげられる。

回収可能性維持の技術要件としての特徴的なことは、回収可能性の維持期間の延長に伴い、3つの要件を遵守することが困難になっていく点である。OECD/NEA の R&R レポートでは、この

ことを Retrieval-Scale (R-Scale) という図で説明されている。また、安全な管理に係る要件では、どこまでの範囲が安全性確保で許容されるのかについて特定されることが求められる。

(2) 基本方針の要求事項からの技術要件への展開例

基本方針での要求を最上位の要件として、階層構造的に展開した要件を図 3.3.5-2 に示す。下部になるほどに要件は具体化され、それらは、「回収可能性を維持作業への技術要件」と「回収作業への技術要件」に大別できる。

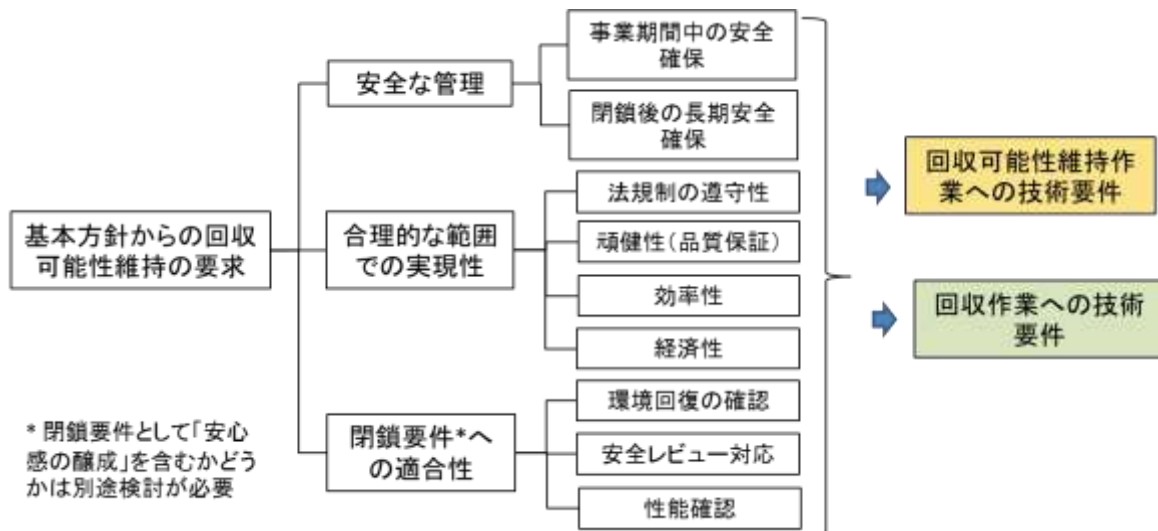


図 3.3.5-2 基本方針の要求項目からの技術要件への展開例

階層構造的に展開した二つの技術要件の例を表 3.3.5-2 に示す。

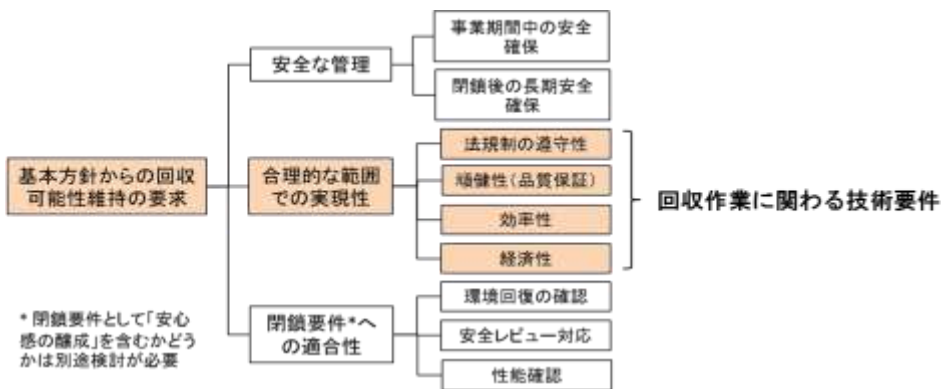
表 3.3.5-2 基本方針の要求事項からの技術要件設定例

上位の要求	要求事項	回収可能性維持への技術要件	回収への技術要件
安全な管理の実現性	事業期間中の安全確保	開放坑道の維持・更新に係る作業安全が確保されること(基準の遵守)	回収作業に係る作業安全と放射線安全(基準の遵守)が確保されること
	閉鎖後の安全確保	維持が長期の安全性に著しい影響を与えないこと	(全数回収の場合は関係なし) 一部回収の場合は回収行為が長期の安全性に影響を及ぼさないこと
合理的な範囲での実現性	法規制の遵守	法規制で要求される基準等を満足すること(トンネル標準示方書など)	法規制で要求される基準を満足すること(回収についての要件は未設定)
	頑健性(品質保証)	回収可能性維持により人工バリアや地下構造物の安全確保に係る品質に著しい影響を及ぼさないこと	回収技術・装置が想定されるリスクに対して頑健性を有すること
	効率性	想定する時間内での維持作業が実施できること	想定する時間内で廃棄体が回収できること(例えば定置時間と同じ)
	経済性	想定する費用内で維持作業が実施できること	想定する費用内で廃棄体が回収できること(例えば定置費用と同じ)
閉鎖要件への適合性	地質環境回復	回収維持期間中のバリアへの擾乱が閉鎖後回復あるいは予測可能な安定状態に移行することが確認できていること	関係しない
	安全レビュー	閉鎖後の安全評価の境界条件、初期性能データが確保できていること	関係しない
	性能確認	閉鎖後の多重バリア性能が確認できていること	関係しない

(3) 基本方針からの技術要件の具体的な設定例

1) 技術要件設定の対象

基本方針で回収可能性の確保への要求事項を3つに分解し、階層構造的に展開することで具体的な技術要件を設定した例を図3.3.5-3に示す。事例として扱う要求事項は、基本方針からの要求事項の内、「合理的な範囲での実現性」を選択し、回収作業に関わる要求事項として「法規制の遵守性」、「頑健性（品質保証）」、「効率性」および「経済性」に着目する。技術要件を設定する対象としては、横置きPEM方式におけるPEMの回数作業とする。PEM回収の手順は大きく4ステップとなるが、本検討では図3.3.5-3でのステップ③でのPEM回収・搬出を対象とする。



	技術要求	回収作業に関わる技術要件
合理的な範囲での実現性	法規制の遵守	法規制で要求される基準を満足すること(作業安全基準、回収についての技術基準など)
	頑健性(品質保証)	回収・搬送手順で想定されるリスクに対して技術・設備が頑健性を有すること
	効率性	想定する時間内で廃棄体が回収できること(例えば定置時間と同じ)
	経済性	想定する費用内で廃棄体が回収できること(例えば定置費用と同じ)

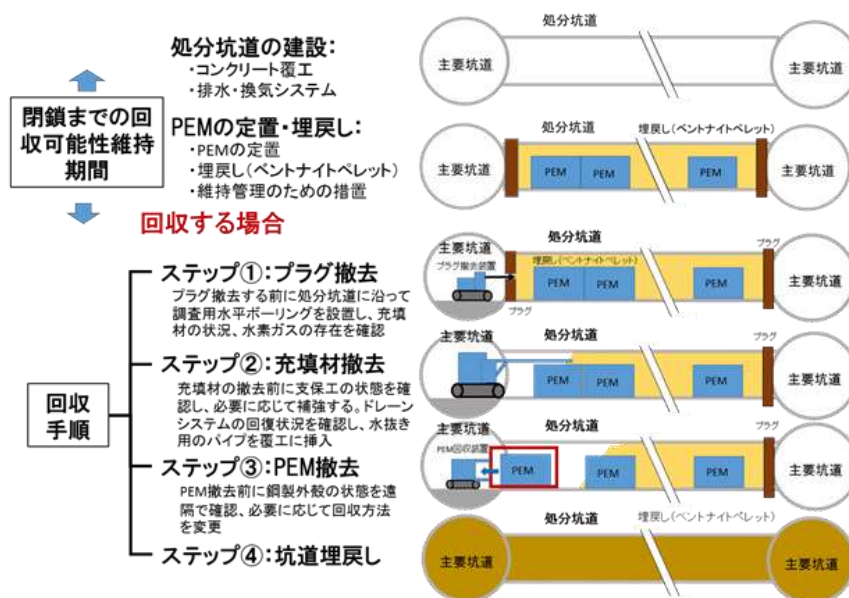


図 3.3.5-3 具体的な技術要件設定例の対象

2) 横置き PEM の回収・搬送作業に関わる技術要件の設定例

横置き PEM の回収手順を対象に、上位の要件からトップダウンに各技術要素への技術要件を設定していく。下記の例では PEM の外殻への設計要件が最下層の定性的な指標として示されるが、定量的に設定するには、回収可能性の維持期間を何年とするかにより異なってくる。

下図の例では、「PEM 回収・搬出技術」への技術要件は、法規制の遵守、頑健性、効率性、経済性への要求から具体的に設定できる。例えば、「PEM 外殻が回収時に健全性を有していること」が一つの技術要件となる。このような技術要件（ここでは設計要件の意味合いが濃い）に対して、PEM 外殻は想定される回収可能性維持の期間中、例えば、「腐食耐久性」、「力学耐久性」、「水密性」を有することが要件となり、対応する事項が設計基準として設定されることになる。水密性を要件としたのは水と接触することで発生するベントナイトの偏膨潤の影響を設計上考慮しないためである。一方で、IAEA の技術報告書にあるように、回収の容易性を向上させるために PEM 外殻の品質を向上させることで長期の安全確保への著しい影響が生じないことも確認しておく必要がある。

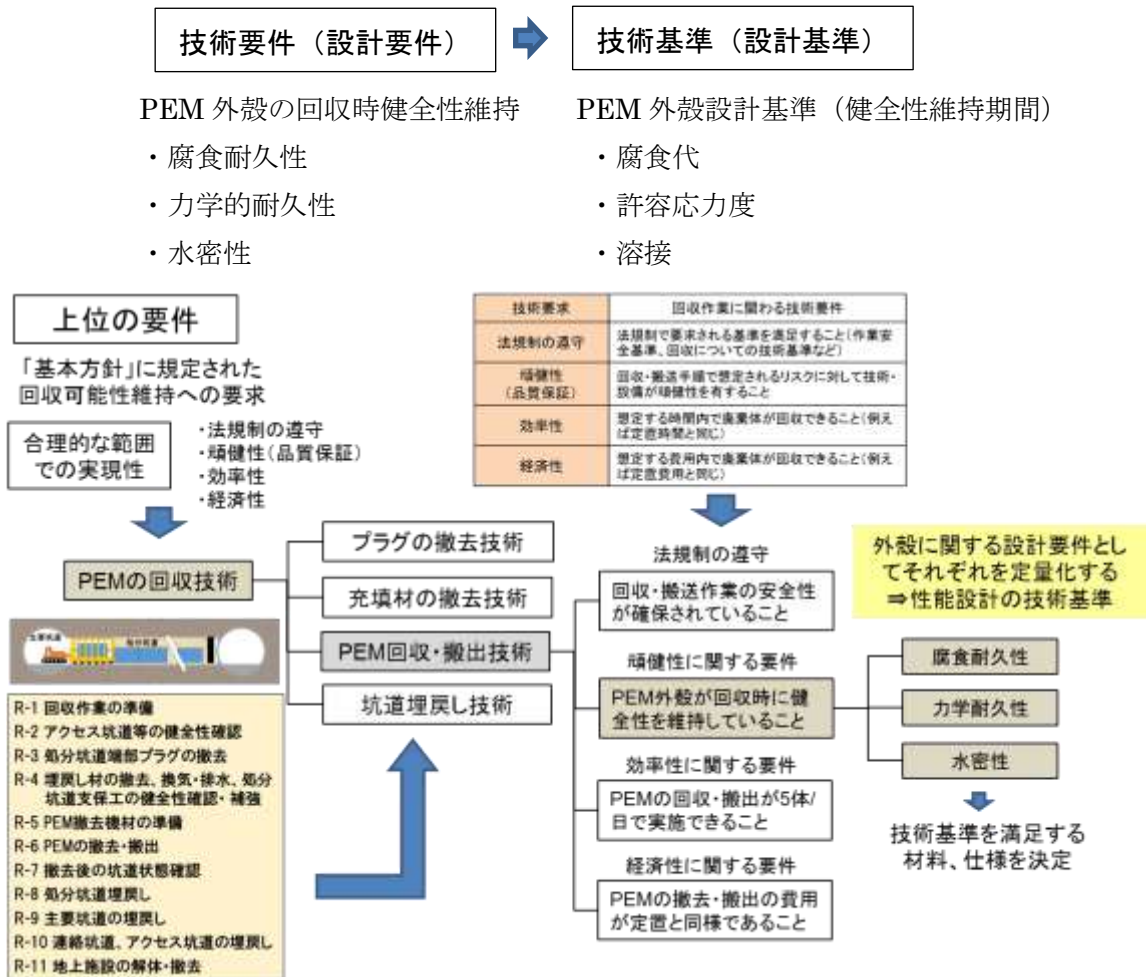


図 3.3.5-4 横置き PEM の外殻に求められる技術要件例

3) 基本方針からの回収可能性確保への要求事項と具体的な技術要件設定との関係のまとめ

基本方針からの回収可能性確保の要求を「必須の要件」としてトップダウンで関連する技術への技術要件を設定していく方法（アプローチ②）では、大きく回収可能性維持と回収技術に大別された。これまで記述してきたように、それらの技術に対する上位の要求事項は、基本方針から階層構造的に展開された要件と密接に関連する。図 3.3.5-5 に整理するように、例えば回収に係る技術は、回収手順に必要なとなる技術を設定し、それらの技術への要件を上位の要件に対応して策定することになる。回収作業に対する「合理的な範囲での実現性」では、法規制の遵守、作業時の頑健性、効率性及び経済性が要求事項となり、それらに対する技術的対策（設計・施工技術）が具体的な要件として設定することになる。また、上位の要求は、対応する技術の達成レベルを評価する指標としても活用される。

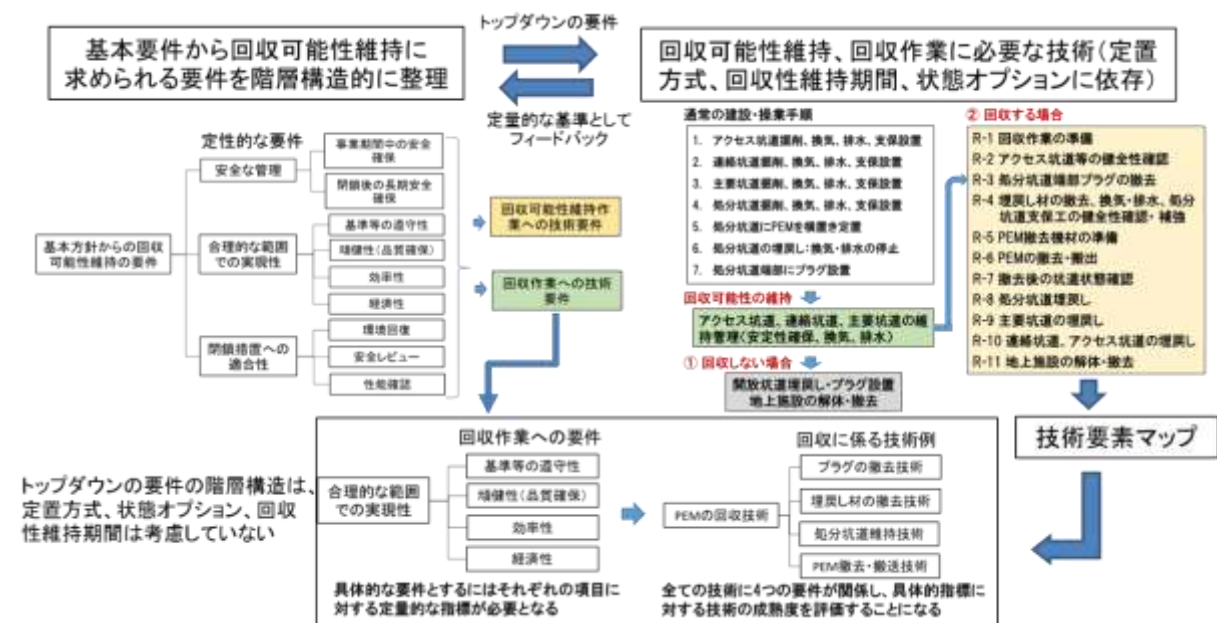


図 3.3.5-5 基本方針と技術要件設定との関係

3.3.6 回収可能性維持に係る技術要件展開方法の二つのアプローチの比較

(1) NUMOの安全確保の技術要件から技術要件に展開する方法（アプローチ①）

NUMOの回収可能性を考慮していない既往の技術要件の設定では、図 3.3.6-1 に示すように安全確保の基本概念から出発し、3種類の技術要件に分類している。分類までの流れの特徴的な事項として、設定された技術要件は、いずれも安全機能を維持するために人工バリアの設計・製作上の技術的な対策を検討し、要件が設定されている点である。

この技術要件を参考として、定量化に必要な技術検討項目を対象に、回収可能性を維持することで付加される技術要件を展開していくのがこの方法の特徴である。枠組みとしては、技術ワークフレームでの検討項目を用い、そこに技術要件として記述される事項は、安全確保の観点からの要件に回収可能性維持に係わる要件が付加される形で取りまとめられる。



図 3.3.6-1 アプローチ①：NUMOの安全確保の技術要件からの展開方法

(2) 基本方針からの回収可能性確保の要件から技術要件に展開する方法（アプローチ②）

基本方針に規定された回収可能性確保の要求事項からの技術要件への展開では、図 3.3.6-2 に示すように、回収可能性維持に係わる要求事項は、安全管理、技術的実現性、閉鎖要件への適合性の要求事項に分類され、さらにそれぞれについて要求を実現するための事項が要件として細分化されている。細分化された要件は「回収可能性維持に係わる技術要件」と「回収に関わる技術要件」として設定した。

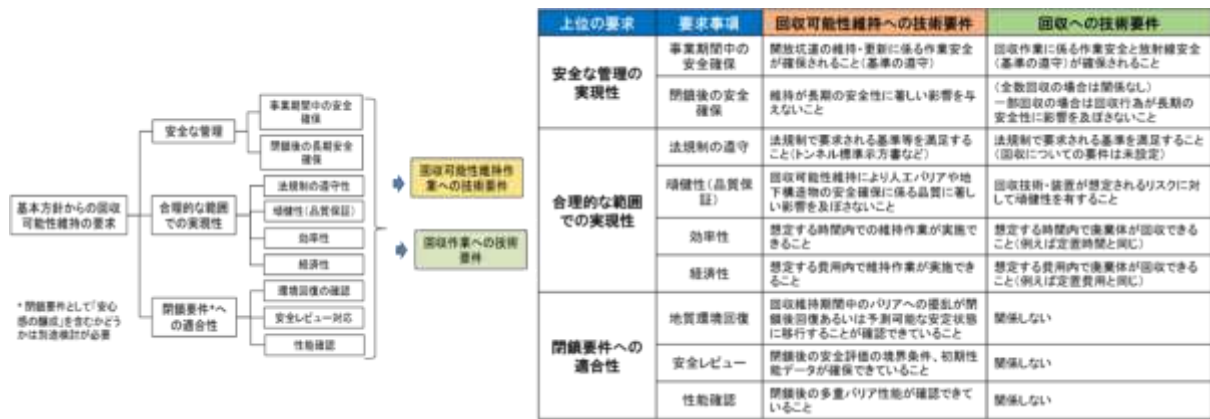


図 3.3.6-2 アプローチ②：基本方針の要求事項から技術要件への展開方法

(3) 二つのアプローチの比較

二つのアプローチの相違は以下に整理することができる。

- NUMO が設定した技術要件を参考として、定量化に必要な技術検討項目を対象に技術要件を設定する方法(アプローチ①)では、安全機能という工学技術の観点からの要件が上位とされ、人工バリアや地下施設の設計および施工に係る要件に集約されている。つまり、処分システムの安全機能という要件(これは目標に相当)に対し、長期の機能維持の観点からの技術要件、製作や施工に対する技術要件が設定されている。
- NUMO の要件管理における要件の対象として、容易性や経済性は「好ましい要件」とされている。この背景には、安全確保が一義的な目標であり、処分事業としての成立性に係る議論が十分なされてきていないことによると推定される。つまり、安全性に対して、どの程度の裕度とゆらぎ幅が許容されるのかは不明である。
- NUMO の技術要件の中には、基本方針からの要件の一つとなる閉鎖措置への対応を考慮した事項は設定されていない(「閉鎖技術」に対する要件は設定されている)。
- 回収可能性維持を考慮していない安全確保の技術要件の大部分は、回収可能性を維持する場合も同様に継続されていく。
- 本年度検討した回収可能性維持を考慮することで付加される技術要件は、定量化に必要な技術検討項目の範囲内では少なく、主要な追加事項は、回収作業に関わる技術要件となった。
- 一方、基本方針から技術要件を設定するアプローチ②の方法では、NUMO が提示した安全確保に係る技術要件に基づき設計・施工される処分システムが技術的に実現できることを前提に、回収可能性を確保することで発生すると想定される事項への対策を検討し、技術要件として設定している。
- そのため、回収可能性を維持することの要求事項として、回収可能性維持期間中の安全な管理、合理的な実現性、閉鎖要件への適合性という、時間の経過とともに実現が困難になっていく要求に対してどのように対応していくかを要件として具体的に設定する必要が発生している。

- その一つが回収可能性を維持するための技術要件となり、もう一つが廃棄体を回収する作業への技術要件となる。
- これらは、当然ながら NUMO 技術要件には含まれていない（例えば、構造耐力などの設計要件は閉鎖までの期間を想定し設定されている）。

以上から、アプローチ①は、個別の具体的な定量化に必要な技術検討項目に着目していることもあり、技術要件を網羅的に示す点で分かりやすい構成となっている。しかし、回収可能性維持の期間を設定するという観点からは、それぞれの項目相互の関係について、意思決定に反映させる観点からさらに論理的に組み合わせる必要がある。

一方、アプローチ②では、上位の要求事項を 3 つの要素に分解し、階層構造的に展開することで、評価すべき事項への技術要件に結び付けている。特徴的なことは、回収可能性維持に係わる意思決定（期間など）のため考慮すべき事項を網羅的に示している点で、技術要件では期間を判断する指標や尺度に係る事項も取り上げている点である。

3.4 回収維持技術、回収技術などの整理と研究課題の抽出

本節では、R&R 検討会においてまとめられた、定量化に必要な技術検討項目を対象として、回収維持技術および回収技術の整理と研究課題の抽出を行う。なお、3.2.2 項で述べたように、本検討では、原位置状態把握技術を回収維持技術および回収技術の一部として位置づけている。

3.4.1 項では、定量化に必要な技術検討項目に対して現状適用できる回収維持技術および回収技術を抽出し、整理する。現状適用できる技術は、平成 27 年度および平成 28 年度の本事業の検討 [1]、[2]を参考にして整理を行う。

3.4.2 項では、回収維持技術および回収技術に関連する最新技術の研究開発状況について調査を行う。回収技術の研究開発は、本事業の実証試験にて行われており、これが最新技術に該当する。そのため、ここでは特に回収維持技術に関連するインフラの維持管理分野での最新の研究開発状況および動向について調査を行う。

3.4.3 項では、前項の最新技術の調査結果を踏まえ、定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術および回収技術に関して、今後開発が必要な技術等の研究課題を抽出し、整理を行う。

3.4.1 定量化に必要な技術検討項目に対応する回収維持技術、回収技術の抽出、整理

(1) 平成 27 年度および平成 28 年度に整理した回収維持技術および回収技術

平成 27 年度および平成 28 年度の本事業の検討[1]、[2]では、回収可能性維持期間における定性的な影響評価およびその対応策の検討成果に基づき、回収可能性維持期間と回収時の状態オプションに対する必要技術を設定し、それらを区分して技術群として整理することにより技術要素マップの枠組みを構築した。本年度は、それらの技術要素マップの技術体系を構成する技術群を参考にした検討を行う。R&R 検討会においてまとめられた、定量化に必要な技術検討項目に対して、現状適用できる回収維持技術および回収技術の整理を行う。技術要素マップの技術体系を構成する技術群の大きな区分は平成 27 年度および平成 28 年度の検討で概ね同様である。表 3.4.1-1 に平成 28 年度の検討成果である、技術要素マップの技術体系を構成する技術群の内容と要件を示す。また、表 3.4.1-1 に示す技術群 A～F について展開したものを表 3.4.1-2～表 3.4.1-4 に示す。

表 3.4.1-1 技術要素マップの技術体系を構成する技術群の内容と要件[1]

	技術の分類	技術内容	必要技術例	技術に求められる要件
維持更新と回収技術	A. 坑道維持更新技術	アクセス坑道等を長期に開放した状態を維持するために、坑道の力学的安定性や環境を維持するための技術 ・坑道内環境の維持と更新	・支保工等の維持管理・更新技術 ・異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術 ・排水・換気設備の維持管理・更新技術	・現状技術の延長線上で対応できる技術であること(影響評価のため)
	B. 回収技術	廃棄体(PEM)回収時に用いる一連の技術 ・廃棄体(PEM)へのアクセス、回収、搬出、管理等	・廃棄体(PEM)へのアクセス技術(プラグ・埋め戻し材除去技術) ・廃棄体(PEM)回収・搬出技術 ・回収後の維持管理技術	・現状技術の延長線上で対応できる技術であること(影響評価のため)
閉鎖後長期の安全性	C. 閉鎖後長期安全性への影響評価技術	坑道開放と回収が長期安全性に与える影響を評価するための技術 ・坑道等開放による影響(程度、範囲)予測	・バリア性能評価技術(評価手法(シナリオ作成)、モデル化技術、データベース開発)	・多重バリアシステムの安全機能への影響が定量的に評価できること(処分サイトの条件、維持管理・補修対策、維持管理期間に依存)
	D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術	坑道開放と回収による長期安全性への影響を低減するための技術 ・周辺坑道の水理学的影響低減 ・地化学的影響低減 ・人工バリア初期性能への影響低減	・坑道維持更新技術の高度化(A.維持更新技術の高度化:初期品質向上、維持・更新高度化) ・回収技術の合理性向上(B.回収技術の高度化) ・計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化	・安全機能への影響を低減できる可能性のある技術であること ・長期への影響を考慮した合理性(高度化や容易性の向上)の追求
事業期間中の安全性	E. 事業期間中安全性への影響評価技術	坑道開放および回収作業時の作業リスク、周辺環境影響、コスト評価のための技術 ・放射線安全、一般労働安全性の評価 ・周辺環境影響の評価 ・コストの評価	・作業リスク評価技術 ・環境影響評価技術 ・コスト評価技術	・労働安全衛生法 ・電離放射線障害防止規則 ・環境影響防止法 ・コスト評価では根拠が必要
	F. 事業期間中安全性への影響低減対策技術	坑道開放および回収に伴う影響を低減するための対応技術	・坑道維持更新技術の高度化(A.維持更新技術の高度化:初期品質向上、維持・更新高度化) ・回収技術の合理性向上(B.回収技術の高度化) ・計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化	・安全機能(安全対策)への影響を低減できる可能性のある技術であること ・事業期間中の安全性への影響を考慮した合理性(高度化や容易性の向上)の追求

表 3.4.1-2 技術要素マップの技術体系を構成する技術群の展開（技術群 A および技術群 B：維持更新と回収技術） [1]

技術の分類	
維持更新と回収技術	A. 坑道維持更新技術
	B. 回収技術
閉鎖後長期の安全性	C. 閉鎖後長期安全性への影響評価技術
	D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術
事業期間中の安全性	E. 事業期間中安全性への影響評価技術
	F. 事業期間中安全性への影響低減対策技術

技術の分類 (技術群)	技術内容	技術に求められる要件	技術群の展開
維持更新と回収技術	A. 坑道維持更新技術 アクセス坑道等を長期に開放した状態を維持するために、坑道の力学的安定性や環境を維持するための技術・坑道内環境の維持と更新	・現状技術の延長線上で対応できる技術であること(影響評価のため)	A-1：支保工等の維持管理・更新技術 (異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術) A-2：排水・換気設備、その他(電源・防災・避難等)の維持管理・更新技術 (異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術)
	B. 回収技術 廃棄体(PEM)回収時に用いる一連の技術 ・廃棄体(PEM)へのアクセス、回収、搬出、管理等	・現状技術の延長線上で対応できる技術であること(影響評価のため)	B-1：廃棄体(PEM)へのアクセス技術 (プラグ撤去技術、埋め戻し材除去技術) B-2：廃棄体(PEM)回収・搬出技術 (回収用設備・機材設置技術、処分場上部埋戻し除去技術、PEM回収技術) B-3：回収後の維持管理技術 (埋め戻し技術、廃棄体管理技術)

表 3.4.1-3 技術要素マップの技術体系を構成する技術群の展開（技術群 C および技術群 D：閉鎖後長期の安全性） [1]

技術の分類	
維持更新と回収技術	A. 坑道維持管理技術
	B. 回収技術
閉鎖後長期の安全性	C. 閉鎖後長期安全性への影響評価技術
	D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術
事業期間中の安全性	E. 事業期間中安全性への影響評価技術
	F. 事業期間中安全性への影響低減対策技術

技術の分類 (技術群)	技術内容	技術に求められる要件	技術群の展開
閉鎖後長期の安全性	C. 閉鎖後長期安全性への影響評価技術 坑道開放と回収が長期安全性に与える影響を評価するための技術 ・坑道等開放による影響(程度、範囲)予測	・多重バリアシステムの安全機能への影響が定量的に評価できること (処分サイトの条件、維持管理・補修対策、維持管理期間に依存)	C-1：バリア性能評価技術 (評価手法[シナリオ設定]、モデル設定、データベース開発)
	D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術 坑道開放と回収による長期安全性への影響を低減するための技術 ・周辺坑道の水理学的影響低減 ・地化学的影響低減 ・人工バリア初期性能への影響低減	・安全機能への影響を低減できる可能性のある技術であること ・長期への影響を考慮した合理性(高度化や容易性の向上)の追求	D-1：坑道維持更新技術の高度化 (A.維持更新技術の高度化:初期品質向上、維持・更新高度化) D-2：回収技術の合理性向上 (B.回収技術の高度化) D-3：計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化 (坑道維持、周辺環境影響、回収に係る計測・測定技術)

表 3.4.1-4 技術要素マップの技術体系を構成する技術群の展開（技術群 E および技術群 F：事業期間中の安全性） [1]

技術の分類	
維持更新と回収技術	A. 坑道維持管理技術
	B. 回収技術
閉鎖後長期の安全性	C. 閉鎖後長期安全性への影響評価技術
	D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術
事業期間中の安全性	E. 事業期間中安全性への影響評価技術
	F. 事業期間中安全性への影響低減対策技術

技術の分類 (技術群)	技術内容	技術に求められる要件	技術群の展開
事業期間中の安全性	坑道開放および回収作業時の作業リスク、周辺環境影響、コスト評価のための技術 ・放射線安全、一般労働安全性の評価 ・環境影響の評価 ・コストの評価	<ul style="list-style-type: none"> ・労働安全衛生法 ・電離放射線障害防止規則 ・環境影響防止法 ・コスト評価では根拠が必要 	E-1：作業リスク評価技術 (放射性安全評価、一般労働安全評価)
			E-2：環境影響評価技術 E-3：コスト評価技術
事業期間中の安全性	坑道開放および回収に伴う影響を低減するための対応技術	<ul style="list-style-type: none"> ・安全機能(安全対策)への影響を低減できる可能性のある技術であること ・事業期間中の安全性への影響を考慮した合理性(高度化やの容易性の向上)の追求 	F-1：坑道維持更新技術の高度化 (A.維持更新技術の高度化:初期品質向上、維持・更新高度化)
			F-2：回収技術の合理性向上 (B.回収技術の高度化)
			F-3：計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化 (坑道維持、周辺環境影響、回収に係る計測・測定技術)

(2) 定量化に必要な技術検討項目に対して現状適用できる回収維持技術および回収技術

本項では、定量化に必要な技術検討項目を対象に、取り組み方法と状況を整理する。定量化に必要な技術検討項目の整理にあたっては、表 3.2-1 において示した定量化に必要な各技術検討項目に i ~xiの個別番号を付けて表記する。

1) 定量化に必要な技術検討項目 i 開放坑道の健全性（空間安定性）

回収可能性維持期間中における開放坑道の健全性を維持するための回収維持技術として、表 3.4.1-2 に示したとおり、「A-1 支保工等の維持管理・更新技術」がある。平成 28 年度の検討では、表中の「A-1 支保工等の維持管理・更新技術」について、さらに具体的な技術内容を示している。「A-1 支保工等の維持管理・更新技術」の具体的な内容は、表 3.4.1-5 に示すとおり、異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術などに分類される。異常発生監視・点検技術は、一般的なトンネルで実施されている段階的な点検の実施や非破壊調査、材料試験の技術既存のトンネル等で用いられている技術である。劣化診断技術は、点検により坑道の変状が確認された場合、その点検結果に基づいて変状の判定を行う。判定は健全度などの指標を用いる。変状が機能に与える影響の程度や危険度を判断する技術である。補強・修復技術は、変状の原因（外力、材料劣化等）を推定し、対策工を選定する。対策工には劣化・剥落対策工、湧水対策工、外力対策工などがある。これらの技術は既存であり、「トンネルの維持管理（土木学会）」や「トンネル補修・補強マニュアル（鉄道総合技術研究所）」などにまとめられている。

本技術検討項目に対する回収維持技術は、上記が適用できると考えられる(表 3.4.1-7)。

表 3.4.1-5 技術要素展開表 技術群 A. 坑道維持更新技術「A-1 支保工等の維持管理・更新技術」[1]

A. 坑道維持更新技術		技術の内容	技術内容の文献等参照先	課題
A-1 支保工等の 維持管理・ 更新技術	A-1-1: 異常発生監視・ 点検技術	一般的なトンネルで実施されている段階的な点検の実施や非破壊調査、材料試験の技術。	・「トンネルの維持管理」(土木学会) ・「トンネル補修・補強マニュアル」 (鉄道総合技術研究所)	— (既存のため)
	A-1-2: 劣化診断技術	点検により坑道の変状が確認された場合、その点検結果に基づいて変状の判定を行う。判定は健全度などの指標を用いる。変状が機能に与える影響の程度や危険度を判断する技術。	・「トンネルの維持管理」(土木学会) ・「トンネル補修・補強マニュアル」 (鉄道総合技術研究所)	— (既存のため)
	A-1-3: 補強・修復技術	変状の原因(外力、材料劣化等)を推定し、対策工を選定。対策工には劣化・剥落対策工、湧水対策工、外力対策工などがある。	・「トンネルの維持管理」(土木学会) ・「トンネル補修・補強マニュアル」 (鉄道総合技術研究所)	— (既存のため)

2) 定量化に必要な技術検討項目 ii 開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響

回収可能性維持期間中における開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響に対する、作業空間の安全性確保のための回収維持技術として、表 3.4.1-2 に示したとおり、「A-2 排水・換気設備、その他（電源・防災・避難等）の維持管理・更新技術」がある。本技術検討項目では、このうち換気設備の維持管理・更新技術が対象となる。平成 28 年度の検討では、表中の「A-2 排水・換気設備、その他（電源・防災・避難等）の維持管理・更新技術」について、さらに具体的な技術内容を検討しており、技術内容は表 3.4.1-6 に示すとおり、異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術などに分類される。異常発生監視・点検技術は、一般的なトンネル等既存の地下施設で実施されている設備点検実施の技術である。劣化診断技術は、点検による設備劣化の判定を行い、影響程度や危険度を判断する技術である。補強・修復技術は、判定結果により、設備の補修や更新（置き換え）を実施する技術である。これらの技術は既存であり、「トンネルの維持管理（土木学会）」などにまとめられている。

本技術検討項目に対する回収維持技術は、上記が適用できると考えられる(表 3.4.1-7)。

表 3.4.1-6 技術要素展開表 技術群 A. 坑道維持更新技術「A-2 排水・換気設備、その他（電源・防災・避難等）の維持管理・更新技術」 [1]

A. 坑道維持更新技術		技術の内容	技術内容の文献等参照先	課題
A-2 排水・換気設備、 その他（電源、 防災、避難等） の維持管理・更 新技術	A-2-1: 異常発生監視・点検技術	各種設備は建設中から設置される。一般的なトンネル等既存の地下施設で実施されている設備点検実施の技術。	・「トンネル標準示方書」(土木学会)	— (既存のため)
	A-2-2: 劣化診断技術	点検による設備劣化の判定を行い、影響程度や危険度を判断する技術。	・「トンネル標準示方書」(土木学会)	— (既存のため)
	A-2-3: 補強・修復技術	判定結果により、設備の補修や更新（置き換え）を実施。	・「トンネル標準示方書」(土木学会)	— (既存のため)

表 3.4.1-7 回収維持技術および回収技術の整理（定量化に必要な技術検討項目 i ~ ii）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」			R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」						回収維持技術、回収技術	
定量化すべき情報			検討対象(イメージ)							
			堅置き方式			横置き方式[PEM]				
定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点			OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3		
1.	(1)	①	<p>1)開放坑道内の作業空間の安全性</p> <p>保守管理のために開放坑道内に人が出入りするため、開放坑道内の作業空間の安全性確保の観点から、以下の評価・検討や技術の具体化を行う。</p> <p>a.開放坑道の健全性（空間安定性） b.開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響</p>							<p>【回収維持技術】</p> <p>a. 支保工等の維持管理・更新技術（異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術）</p> <p>b. 換気設備の維持管理・更新技術（異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術）</p> <p>※他に、作業空間の安全性確保のために、排水設備などの維持管理・更新技術、放射線防護に関する技術などがある。</p>

3) 定量化に必要な技術検討項目 iii 埋め戻した坑道の再利用時の健全性

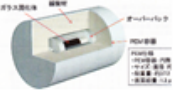
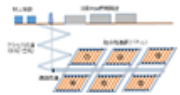
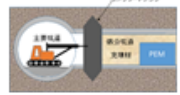
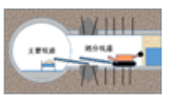







回収時における埋め戻した坑道の再利用時の健全性を確保するための回収技術として、表 3.4.1-2 に示したとおり、「B-1 廃棄体 (PEM) へのアクセス技術」がある。平成 28 年度の検討では、「B-1 廃棄体 (PEM) へのアクセス技術」について、さらに具体的な回収技術の例による技術内容を示している。具体的な内容は、表 3.4.1-8 に示すとおりであり、さらに回収時の作業を詳細に検討した例を表 3.4.1-9 に示す。「B-1 廃棄体 (PEM) へのアクセス技術」はプラグ撤去技術、埋め戻し材除去技術に加えて、支保工等の維持管理・更新技術などに分類される。プラグ撤去技術は、コンクリートプラグ (力学プラグ) をブレーカー等で破砕・撤去する技術である。埋め戻し材除去技術は一般的なトンネル等で用いられる機械的な掘削により埋め戻し材を除去する技術である。埋め戻し材を除去した坑道の健全性確保には、坑道掘削時に用いる坑道構築技術または坑道維持管理・更新時に用いる異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術など技術を適用できると考えられる。これらの技術は既存であり、「トンネル標準示方書 (土木学会)」、「トンネルの維持管理 (土木学会)」および「トンネル補修・補強マニュアル (鉄道総合技術研究所)」などにまとめられている。

本技術検討項目に対する回収維持技術は、上記が適用できると考えられる (表 3.4.1-10)。

表 3.4.1-8 技術要素展開表 技術群 A. 坑道維持更新技術「A-2 排水・換気設備、その他 (電源・防災・避難等) の維持管理・更新技術」 [1]

B. 回収技術		技術の内容	技術内容の文献等参照先	課題
B-1 廃棄体への アクセス技術	B-1-1: プラグ撤去 技術	主要坑道と処分坑道間のプラグ撤去、撤去箇所の補強技術。	・(本文3.2.4)回収技術 ・平成26年度 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 (RWMC) ・平成27年度 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 平成27年度報告書 (RWMC) など	— (既存のため) ※ただし、維持状態・期間を想定した工程・コスト評価が必要
	B-1-2: 埋戻し材撤去 技術	支保工の状態確認および補強しつつ埋戻し材を撤去する技術。排水・換気設備の再設置。	・(本文3.2.4)回収技術 ・平成26年度 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 (RWMC) ・平成27年度 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 平成27年度報告書 (RWMC) など	— (既存のため) ※ただし、維持状態・期間を想定した工程・コスト評価が必要

表 3.4.1-9 PEMを対象とした回収手順の例と作業項目、必要技術の整理[1] (赤枠加筆)

タスク	R-1	R-2	R-3	R-4	R-5	
作業名	回収作業準備	アクセス坑道の健全性確認・補強	処分坑道プラグ撤去	処分坑道の埋戻し材撤去・支保補強	回収用設備・機材の設置	
タスクイメージ						
作業内容	<ul style="list-style-type: none"> 回収技術の整備 回収廃棄体貯蔵施設の建設 回収計画の作成 回収事業認可申請 PEMの状況把握 	<ul style="list-style-type: none"> アクセス、連絡、主要坑道の安定性、設備の健全性確認 補修・補強 	<ul style="list-style-type: none"> プラグ撤去前の状態確認(背後のガス等の環境確認) 処分坑道プラグの撤去 撤去部の補強 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道埋戻し材撤去・搬出 支保確認・補修・補強 排水・換気 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道内安全性・安定性確保 回収用資器材の投入・設置 廃棄体回収物流・動線の確保 	
必要技術	<ul style="list-style-type: none"> PEM状態把握技術 PEM回収技術 許認可申請図書作成技術 回収PEM貯蔵施設建設技術 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道支保・設備の健全性確認技術 坑道・設備の維持補修・補強技術 	<ul style="list-style-type: none"> プラグの状態確認技術 コンクリートプラグの解体技術 ガス回収技術 撤去部補強技術 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道内埋戻し材撤去・搬出技術 支保の状態確認技術 補修・補強技術 排水・換気技術 	<ul style="list-style-type: none"> PEM回収用の装置・設備 PEM搬出動線の確保 処分坑道内安全性・安定性確保技術 	
	R-6	R-7	R-8	R-9	R-10	R-11
PEMの回収・搬出	PEM撤去後の処分坑道内確認	処分坑道埋戻し	主要坑道埋戻し	連絡坑道・アクセス坑道の埋戻し	回収用地上施設の解体撤去	
						
<ul style="list-style-type: none"> PEM回収装置設置 PEM回収・搬出 PEMの搬送 撤去空間確認と補強 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道内の状態調査・評価 必要に応じて補修・補強 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道埋戻し 端部処理 	<ul style="list-style-type: none"> 主要坑埋戻し 端部処理 	<ul style="list-style-type: none"> 坑底設備の解体撤去 連絡坑道埋戻し アクセス坑道埋戻し 	<ul style="list-style-type: none"> 回収事業の廃止措置計画申請 回収用地上施設の解体・撤去 現状復帰 	
<ul style="list-style-type: none"> PEM回収技術 PEM搬出技術 PEM検査技術 PEM貯蔵技術 回収空間の補修・補強技術 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道内調査・評価技術 補修・補強技術 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道埋戻し技術 端部処理技術(セメント吹付) 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道埋戻し技術 端部処理技術(セメント吹付) 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道埋戻し技術 端部処理技術(セメント吹付) 	<ul style="list-style-type: none"> 地表施設の解体・撤去技術 環境修復技術 	

4) 定量化に必要な技術検討項目 iv 再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響
回収時における坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響に対する、作業空間の安全性確保のための回収技術として、表 3.4.1-2 に示したとおり、「B-1 廃棄体（PEM）へのアクセス技術」がある。平成 28 年度の検討では、「B-1 廃棄体（PEM）へのアクセス技術」について、さらに具体的な回収技術の例による技術内容を示している。具体的な内容は、表 3.4.1-8 に示すとおりであり、さらに回収時の作業を詳細に検討した例を表 3.4.1-9 に示す。「B-1 廃棄体（PEM）へのアクセス技術」はプラグ撤去技術、埋め戻し材除去技術に加えて、支保工等の維持管理・更新技術などに分類されるが、その中に作業空間の安全性確保のための回収技術として、換気設備の再設置・維持管理・更新技術がある。換気設備の再設置・維持管理・更新技術の具体的な技術内容は、再設置技術、異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術などがある。換気設備の再設置技術は、坑道掘削時に換気設備を新たに設置する際に用いられる技術が適用できると考えられる。換気設備の異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術は、回収可能性維持期間に用いる技術と同様である。これらの技術は既存であり、「トンネルの維持管理（土木学会）」などにまとめられている。

本技術検討項目に対する回収維持技術は、上記が適用できると考えられる(表 3.4.1-10)。

なお、再利用する坑道内（作業空間）の安全性確保のためには、一般的なトンネル建設時に用いられる排水設備など各種設備の維持管理・更新技術、また、放射線防護に関する技術などが必要になると考えられる。

表 3.4.1-10 回収維持技術および回収技術の整理（定量化に必要な技術検討項目 iii ~ iv）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」			R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」						回収維持技術、回収技術
定量化すべき情報			検討対象(イメージ)						
			堅置き方式			横置き方式[PEM]			
			OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3	
1. 安全性への影響	(1) 操業期間中の安全性への影響	② 回収作業時の安全性への影響(回収を実施する場合)	1)回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性 一度埋め戻した坑道の再掘削/再利用を前提とする場合に、回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性確保の観点から、以下の評価・検討や技術の具体化を行う。 a.埋め戻した坑道の再利用時の健全性 b.再利用する坑道内(作業空間)への廃棄体からの熱影響						【回収技術】 a. 廃棄体へのアクセス技術(プラグ・埋め戻し材除去技術、支保工等の維持管理・更新技術、異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術) b. 換気設備の再設置・維持管理・更新技術(再設置技術、異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術) ※他に、作業空間の安全性確保のために、排水設備などの再設置・維持管理・更新技術、放射線防護に関する技術などがある。

5) 定量化に必要な技術検討項目 v 回収時の廃棄体容器の健全性

回収時における坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響に対する、作業空間の安全性確保のための回収技術として、表 3.4.1-2 に示したとおり、「B-2 廃棄体（PEM）回収・搬出技術」がある。平成 28 年度の検討では、「B-2 廃棄体（PEM）回収・搬出技術」について、さらに具体的な回収技術の例による技術内容を示している。具体的な内容は、表 3.4.1-11 に示すとおりであり、さらに回収時の作業を詳細に検討した例を表 3.4.1-12 に示す。ここで、横置き方式では、PEM 容器の構造健全性評価技術（表 3.4.1-12 中の PEM 検査技術が該当）、PEM 容器の構造健全性が保持されている場合は PEM 回収技術および PEM 搬出技術、PEM 容器の構造健全性が保持されていない場合は PEM から廃棄体を取り出す技術を考える必要がある。PEM から廃棄体を取り出した後は、廃棄体回収・搬出技術が適用できる。PEM 容器の構造健全性評価技術は、PEM 容器の構造健全性が確保され、PEM 容器ごと搬出できるかどうかを判定するための技術であり、PEM 容器の材料に対応した非破壊検査等を用いることが考えられる。

本技術検討項目に対する回収維持技術は、上記が適用できると考えられる(表 3.4.1-13)。

なお、廃棄体回収・搬出技術、また、構造健全性が確保された PEM 容器の回収・搬出技術は RWMC にて実証実験[27]が行われている

表 3.4.1-11 技術要素展開表 技術群 B. 回収技術「B-2 廃棄体（PEM）回収・搬出技術」[1]

B. 回収技術		技術の内容	技術内容の文献等参照先	課題
B-2 廃棄体回収・ 搬出技術	B-2-1: 回収用設備・ 機材設置技術	遠隔での回収・搬出用の器材を処分坑道に設置する技術。	・(本文3.2.4)回収技術 ・平成26年度 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(RWMC) ・平成27年度 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 平成27年度報告書 (RWMC) など	— (既存のため) ※ただし、維持状態・期間を想定した工程・コスト評価が必要
	B-2-2: PEM回収技術	PEM周囲のベントナイトを撤去後、PEMを回収、地表まで搬出する技術。	・(本文3.2.4)回収技術 ・平成26年度 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(RWMC) ・平成27年度 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 平成27年度報告書 (RWMC) など	— (既存のため) ※ただし、維持状態・期間を想定した工程・コスト評価が必要

表 3.4.1-12 PEM を対象とした回収手順の例と作業項目、必要技術の整理[1] (赤枠加筆)

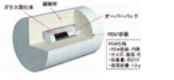
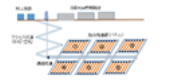
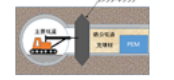
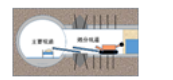





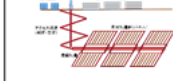

タスク	R-1	R-2	R-3	R-4	R-5
作業名	回収作業準備	アクセス坑道の健全性確認・補強	処分坑道プラグ撤去	処分坑道の埋戻し材撤去・支保補強	回収用設備・機材の設置
タスクイメージ					
作業内容	<ul style="list-style-type: none"> 回収技術の整備 回収廃棄体貯蔵施設の建設 回収計画の作成 回収事業認可申請 PEMの状況把握 	<ul style="list-style-type: none"> アクセス、連絡、主要坑道の安定性、設備の健全性確認 補修・補強 	<ul style="list-style-type: none"> プラグ撤去前の状態確認(背後のガス等の環境確認) 処分坑道プラグの撤去 撤去部の補強 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道埋戻し材撤去・搬出 支保確認・補修・補強 排水・換気 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道内安全性・安定性確保 回収用資器材の投入・設置 廃棄体回収物流・動線の確保
必要技術	<ul style="list-style-type: none"> PEM状態把握技術 PEM回収技術 許認可申請図書作成技術 回収PEM貯蔵施設建設技術 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道支保・設備の健全性確認技術 坑道・設備の維持補修・補強技術 	<ul style="list-style-type: none"> プラグの状態確認技術 コンクリートプラグの解体技術 ガス回収技術 撤去部補強技術 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道内埋戻し材撤去・搬出技術 支保の状態確認技術 補修・補強技術 排水・換気技術 	<ul style="list-style-type: none"> PEM回収用の装置・設備 PEM搬出動線の確保 処分坑道内安全性・安定性確保技術
R-6	R-7	R-8	R-9	R-10	R-11
PEMの回収・搬出	PEM撤去後の処分坑道内確認	処分坑道埋戻し	主要坑道埋戻し	連絡坑道・アクセス坑道の埋戻し	回収用地上施設の解体撤去
					
<ul style="list-style-type: none"> PEM回収装置設置 PEM回収・搬出 PEMの搬送 撤去空間確認と補強 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道内の状態調査・評価 必要に応じて補修・補強 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道埋戻し 端部処理 	<ul style="list-style-type: none"> 主要坑道埋戻し 端部処理 	<ul style="list-style-type: none"> 坑底設備の解体撤去 連絡坑道埋戻し アクセス坑道埋戻し 	<ul style="list-style-type: none"> 回収事業の廃止措置計画申請 回収用地上施設の解体・撤去 現状復帰
<ul style="list-style-type: none"> PEM回収技術 PEM搬出技術 PEM検査技術 PEM貯蔵技術 回収空間の補修・補強技術 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道内調査・評価技術 補修・補強技術 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道埋戻し技術 端部処理技術(セメント吹付) 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道埋戻し技術 端部処理技術(セメント吹付) 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道埋戻し技術 端部処理技術(セメント吹付) 	<ul style="list-style-type: none"> 地表施設の解体・撤去技術 環境修復技術

表 3.4.1-13 回収維持技術および回収技術の整理（定量化に必要な技術検討項目 v）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」			回収維持技術、回収技術							
			回収維持技術、回収技術							
定量化すべき情報			検討対象(イメージ)							
			定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点			横置き方式[PEM]				
			縦置き方式			横置き方式[PEM]				
			OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3		
1.	(1)	②	2)回収時の廃棄体容器の健全性 回収装置による把持・取り出しの際には、廃棄体容器に一定の機械強度が要求されることから、廃棄体容器の健全性に関する評価や検討を行う。							【回収技術】 ・廃棄体回収・搬出技術 ・横置き方式では、PEM 容器の構造健全性評価技術、PEM 容器の構造健全性が保持されている場合は PEM 搬出技術、PEM 容器の構造健全性が保持されていない場合は PEM から廃棄体を取り出す技術

- 6) 定量化に必要な技術検討項目 vi 開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響

3.3.4 項の検討において、回収維持期間中の安全機能に対する技術要件として廃棄体容器の耐食性を示した。本検討において人工バリアの設計は対象外であり、人工バリアの周辺環境に対して回収維持するための技術を適用することが検討の前提である。また、本検討では、堅置き方式および横置き方式の全ての状態オプションにおいて、廃棄体容器は緩衝材の中にあり、さらにその外側を埋め戻し材や PEM 容器が覆っており、直接空気にさらされる状態は考えにくい。

上記より、開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる廃棄体容器の機能劣化に対する回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）は特に挙げないこととする（表 3.4.1-15 表 3.4.1-15）。

- 7) 定量化に必要な技術検討項目 vii 廃棄体からの熱による影響

3.3.4 項の検討において、回収維持期間中の安全機能に対する技術要件として廃棄体容器（オーバーパック）および緩衝材に対して「耐熱性」を示した。回収維持期間中の開放坑道（空気）の存在により、廃棄体からの熱による影響を低減させるための回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）として、換気設備の維持管理・更新技術が挙げられる。これは表 3.4.1-2 に示した「A-2 排水・換気設備、その他（電源・防災・避難等）の維持管理・更新技術」に含まれるものである。平成 28 年度の検討では、表中の「A-2 排水・換気設備、その他（電源・防災・避難等）の維持管理・更新技術」について、さらに具体的な技術内容を検討しており、技術内容は表 3.4.1-6 に示すとおり、異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術などに分類される。異常発生監視・点検技術は、一般的なトンネル等既存の地下施設で実施されている設備点検実施の技術である。劣化診断技術は、点検による設備劣化の判定を行い、影響程度や危険度を判断する技術である。補強・修復技術は、判定結果により、設備の補修や更新（置き換え）を実施する技術である。これらの技術は既存であり、「トンネルの維持管理（土木学会）」などにまとめられている。

本技術検討項目に対する回収技術は、上記が適用できると考えられる(表 4.2.1-15)。

- 8) 定量化に必要な技術検討項目 viii 坑道開放期間内に継続する坑内湧水の影響

3.3.4 項の検討において、回収維持期間中の安全機能に対する技術要件として廃棄体容器（オーバーパック）に対して「耐食性」を示した。また、緩衝材に対して「緩衝材流出の抑制」、埋め戻し材および止水プラグに対して「ベントナイト成分流出の抑制」を示した。坑道開放期間内に継続する坑内湧水の影響に対する回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）としては、排水設備の維持管理・更新技術、湧水抑制対策技術などが挙げられる。

排水設備の維持管理・更新技術は表 3.4.1-2 に示した「A-2 排水・換気設備、その他（電源・防災・避難等）の維持管理・更新技術」に含まれるものである。平成 28 年度の検討では、表中の「A-2 排水・換気設備、その他（電源・防災・避難等）の維持管理・更新技術」について、さらに具体的な技術内容を検討しており、技術内容は表 3.4.1-6 に示すとおり、異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術などに分類され、建設時から設置される排水設備を維持す

るための技術である。異常発生監視・点検技術は、一般的なトンネル等既存の地下施設で実施されている設備点検実施の技術である。劣化診断技術は、点検による設備劣化の判定を行い、影響程度や危険度を判断する技術である。補強・修復技術は、判定結果により、設備の補修や更新（置き換え）を実施する技術である。これらの技術は既存であり、「トンネルの維持管理（土木学会）」などにまとめられている。

湧水抑制対策技術は、表 3.4.1-1 の閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術に分類され、さらに、表 3.4.1-3 に示した「D-1 坑道維持更新技術の高度化」に含まれるものである。平成 28 年度の検討では、表中の「D-1 坑道維持更新技術の高度化」について、さらに具体的な技術内容を検討しており、技術内容は表 3.4.1-14 に示すとおり、岩盤中の割れ目などにグラウト材を充填するグラウト技術が挙げられる。

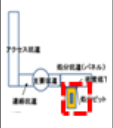
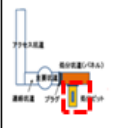
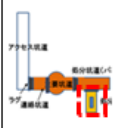
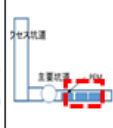

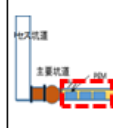
これらの技術は既存であり、排水設備の維持管理・更新技術は一般のトンネルで用いられている。また、湧水抑制対策技術は国家石油ガス備蓄基地建設[28]などで適用された実績があり、さらに技術の高度化のため、超深地層研究所における工学技術に関する研究[29]、[30]、[31]などで研究開発が行われている。

本技術検討項目に対する回収技術は、上記が適用できると考えられる（表 3.4.1-15）。

表 3.4.1-14 技術要素展開表 技術群 D. 回収技術「D-1 坑道維持更新技術の高度化」[1]

D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術		技術の内容	技術内容の文献等参照先	課題
D-1 坑道維持更新 技術の高度化	D-1-1: 初期性能向上	「A.維持更新技術」の高度化。 覆工の処分場への適用性検討、 湧水抑制(グラウト)技術、高耐久 性材料・設備による更新頻度低減 技術等	<ul style="list-style-type: none"> ・「トンネル標準示方書」(土木学会) ・「トンネルの維持管理」(土木学会) ・「トンネル補修・補強マニュアル」 (鉄道総合技術研究所) ・「鉄道総研報告」(鉄道総合技術研 究所) ・NEXCO総研各種書籍(NEXCO総研) など 	回収可能性維持状態・ 期間を想定した処分場 への水理学的・地化学 的影響と対策工効果の 定量的評価 (高耐久性材料・設備 は各事業者等で技術 開発・研究実施中)
	D-1-2: 維持・更新高 度化	「A.維持更新技術」の高度化。 坑道支保および設備の維持・更新 高度化(ユニット化など)	<ul style="list-style-type: none"> ・「鉄道総研報告」(鉄道総合技術研 究所) ・NEXCO総研各種書籍(NEXCO総研) など 	回収可能性維持状態を 考慮した狭い空間での 維持更新技術高度化 (PEMが設置されない 状態の技術は各事業 者等で技術開発・研究 実施中)

表 3.4.1-15 回収維持技術および回収技術の整理（定量化に必要な技術検討項目 vi～viii）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」		検討対象(イメージ)						回収維持技術、回収技術
定量化すべき情報	定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点	堅置き方式			横置き方式[PEM]			
		OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3	
<p>1. 安全性への影響</p> <p>(2) 閉鎖後長期の安全性への影響</p> <p>：回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合、人工バリアや天然バリア(母岩)に期待する閉鎖後長期の安全性への影響</p>	<p>1)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う人工バリア等に期待する安全機能への影響</p> <p>維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ、人工バリア(及び他の地下構造物)に期待する閉鎖後長期の安全性への影響を下記観点から評価する。</p> <p>a.開放坑道を介した空気(酸素)の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響</p> <p>b.廃棄体からの熱による影響</p> <p>c.坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響</p>							<p>【回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）】</p> <p>a. —</p> <p>b. 換気設備の維持管理・更新技術（異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術）</p> <p>c. 排水設備の維持管理・更新技術（異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術）、湧水抑制対策技術</p>

9) 定量化に必要な技術検討項目 ix 地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込みの影響）

地下水の引き込みによる擾乱影響に対する回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）としては、開放坑道の存在により発生する湧水を低減させることを目的とした、湧水抑制対策技術などが挙げられる。湧水抑制対策技術は、表 3.4.1-1 の閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術に分類され、さらに、表 3.4.1-3 に示した「D-1 坑道維持更新技術の高度化」に含まれるものである。平成 28 年度の検討では、表中の「D-1 坑道維持更新技術の高度化」について、さらに具体的な技術内容を検討しており、技術内容は表 3.4.1-14 に示すとおり、岩盤中の割れ目などにグラウト材を充填するグラウト技術が挙げられる。湧水抑制対策技術は既存であり、国家石油ガス備蓄基地建設[28]などで適用された実績がある。また、さらなる技術の高度化のため、超深地層研究所における工学技術に関する研究[29]、[30]、[31]などで研究開発が行われている。

本技術検討項目に対する回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）は、上記が適用できると考えられる（表 3.4.1-16）。

10) 定量化に必要な技術検討項目 x 開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度

回収維持期間中の開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響を低減させる回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）は現在の施設設計を踏まえると見当たらない（表 3.4.1-16）。酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度を解析などのシミュレーションを行うことにより定量化し、母岩の安全機能が損なわれると評価された場合は、何らかの対策を講じることが必要であると考えられる。

11) 定量化に必要な技術検討項目 xi ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度

ベースラインへの回復に対する回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）としては、開放坑道の存在により発生する湧水を低減させることを目的とした、湧水抑制対策技術などが挙げられる。湧水抑制対策技術は、表 3.4.1-1 の閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術に分類され、さらに、表 3.4.1-3 に示した「D-1 坑道維持更新技術の高度化」に含まれるものである。平成 28 年度の検討では、表中の「D-1 坑道維持更新技術の高度化」について、さらに具体的な技術内容を検討しており、技術内容は表 3.4.1-14 に示すとおり、岩盤中の割れ目などにグラウト材を充填するグラウト技術が挙げられる。湧水抑制対策技術は既存であり、国家石油ガス備蓄基地建設[28]などで適用された実績がある。また、さらなる技術の高度化のため、超深地層研究所における工学技術に関する研究[29]、[30]、[31]などで研究開発が行われている。

本技術検討項目に対する回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）は、上記が適用できると考えられる（表 3.4.1-16）。

表 3.4.1-16 回収維持技術および回収技術の整理（定量化に必要な技術検討項目 ix～xi）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」		検討対象(イメージ)						回収維持技術、回収技術
定量化すべき情報	定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点	堅置き方式			横置き方式[PEM]			
		OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3	
1. 安全性への影響	(2) 閉鎖後長期の安全性への影響 ：回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合の、人工バリア(母岩)に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響	<p>2)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う天然バリア(母岩)に期待する安全機能への影響</p> <p>維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ、天然バリア(母岩)に期待される閉鎖後長期の安全機能に係わる次のような影響を評価する。</p> <p>a.地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度(化学組成の異なる地下水の引き込みの影響)</p> <p>b.開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度</p> <p>c.ベースライン(建設前の元の地下環境の状態)への回復過程と回復の程度</p>						<p>【回収維持技術(閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術)】</p> <p>a. 湧水抑制対策技術</p> <p>b. —</p> <p>c. 湧水抑制対策技術</p>

3.4.2 回収維持技術、回収技術に関連する最新技術の調査

本項では、回収維持技術および回収技術に関連する最新技術の研究開発状況について調査を行い、次項の 3.4.3 項で述べる回収維持技術および回収技術に関する、今後開発が必要な技術等の研究課題の抽出に資する。なお、回収技術の研究開発は本事業において回収技術の高度化開発のための実証試験が実施されており [27]、これが最新技術に該当する。そのため、ここでは特に回収維持技術について、我が国のインフラの維持管理に関する最新の研究開発状況および動向について調査を行う。

(1) 回収維持技術に関連する最新技術の調査

わが国では、社会基盤となる公共施設などのインフラの高齢化が著しい。一方で、財政は厳しく、かつ、熟練技術者は減少の一途をたどるばかりである。そのような状況下において、インフラの高齢化による事故リスクの低減や、維持修繕費を抑制してライフサイクルコストを最小化するために、インフラの維持管理に関するさまざまな技術開発が行われている。国土交通省では、近年、目覚ましい発達を遂げている ICT（Information Communication Technology、情報通信技術）などの先進技術を活用した i-Construction が推進されている [32]。

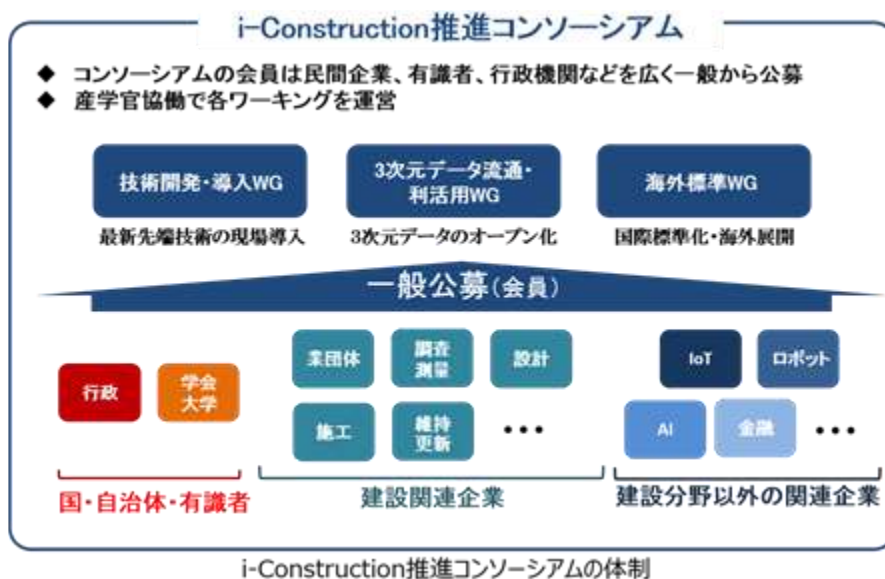


図 3.4.2-1 国土交通省が推進する i-Construction 推進コンソーシアムの体制[32]

このような取り組みの背景は冒頭述べたとおり、限られた財源と人材で既存のインフラの品質や安全を確保し続ける必要があるためであり、維持管理の効率化、省力化・省人化、コスト減に向けた技術開発が行われている。すなわち、インフラの維持管理の技術開発では、技術者の熟練度や人の違いによるばらつきによる低減による品質確保、作業時間などの工程短縮による効率化、危険な場所へ人間が立ち入る機会を減らすことによる安全性向上・確保、さらに、品質・工程・安全確保に要する費用低減によるトータルコストの抑制による経済性向上を目指していると言えよう。また、これらの技術開発は国が推進している生産性向上につながると考えられる。

以降に、着目されている最新技術として、CIM 導入による生産性向上、インフラ用ロボットに

よる点検作業と施工の省力化、AI を活用した構造物の調査・維持管理、AR・VR による品質向上・教育、に関する調査結果を述べる。

1) CIM 導入による生産性向上

国土交通省が CIM (Construction Information Modeling/Management) の導入と普及に取り組んでおり、「CIM 導入ガイドライン (案)」[33]を平成 29 年 3 月に策定・公表している。ガイドラインには、CIM (Construction Information Modeling/Management) を導入する目的、活用方法が示されており、「CIM は、計画、調査、設計段階から 3 次元モデルを導入することにより、その後の施工、維持管理の各段階においても 3 次元モデルを連携・発展させて事業全体にわたる関係者間の情報共有を容易にし、一連の建設生産システムの効率化・高度化を図ることを目的としている」と述べられている。CIM の導入による建設生産システムの生産性向上のイメージ図を図 3.4.2-3 に示す。

図 3.4.2-2 に示すように、CIM では対象とする構造物の形状を 3 次元的に表現した 3 次元モデルとそのモデルに付与する属性情報を組み合わせた CIM モデルを作成し、これを活用する。属性情報には、地質・土質に関するデータ、構成部材毎の材料に関する情報等の様々な 3 次元モデルに関連付けられる情報の他に、報告書、図面、工事記録や点検記録帳票等の情報も含まれる。調査、設計、施工段階を通じて蓄積された 3 次元モデルを用いることにより、高品質かつ効率的な維持管理の計画策定を図る。維持管理段階においても、点検・補修履歴のデータ蓄積や現地センサーとの連動により、日常的な情報の集約・統合を図り、さらに、3 次元モデルを活用した解析、劣化予測等に応用することで高度な活用が期待されている[33]。

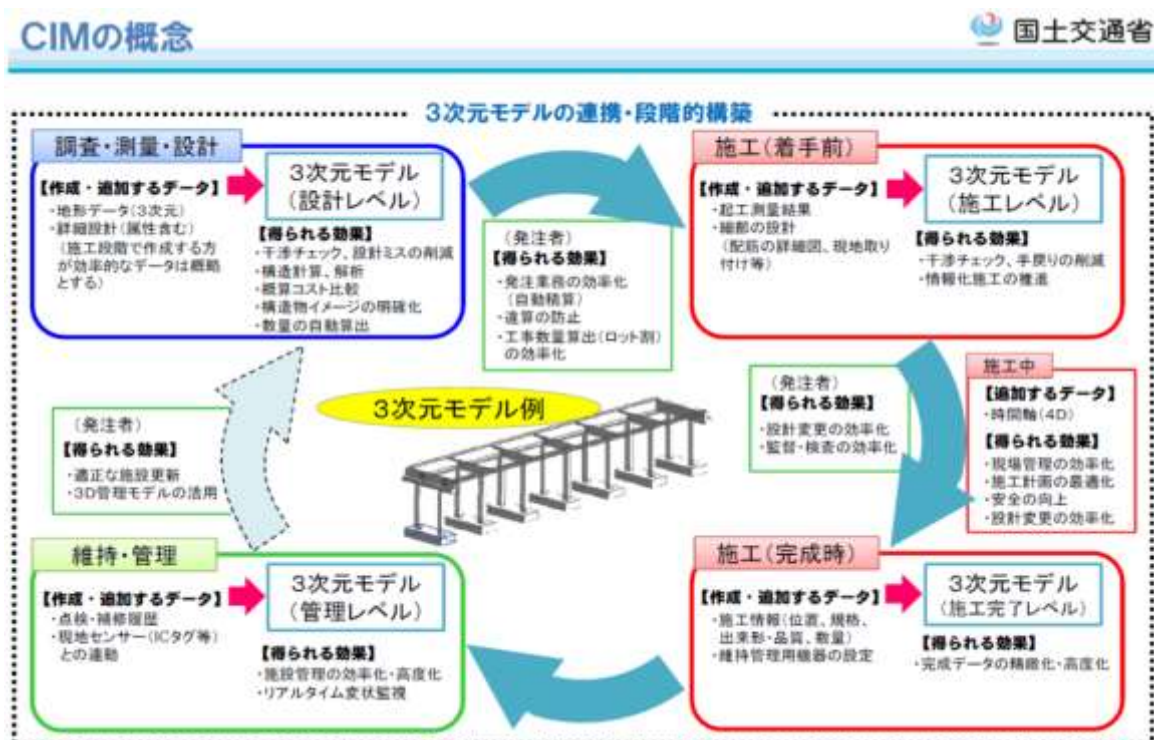


図 3.4.2-2 CIM の概念[33]



図 3.4.2-3 CIM 導入による建設生産システムの生産性向上のイメージ[33]

地層処分の分野では、平成 25 年度から平成 28 年度に JAEA が CIM の考え方を参考にした直接処分施設の設計支援システムを構築し、設計支援システムの設計、試作、課題の整理等を行っている[34]、[35]、[36]、[37]。

2) インフラ用ロボットによる点検作業と施工の省力化

国土交通省と経済産業省は 2013 年度から社会インフラ用ロボットの開発・導入事業を進めており、この事業では社会インフラの維持管理および災害対応に関するロボット開発・導入の推進に重点を置いている。このように、社会的な需要から、官民学それぞれまたは連携してインフラ用ロボットの開発が盛んに行なわれている。

例えば、人による近接目視や打音検査の代替技術として、橋梁の床版や桁の細部を撮影できるさまざまな点検ロボットが開発され、国土交通省により現場検証されている[38]。図 3.4.2-4 に現場検証のイメージを示す。一方で、操縦者が不要なオートパイロットを組み込んだドローンの制御システムも各社が開発しており、撮影から 3 次元モデル作成までが可能となれば、測量作業の全自動化が期待できる[39]。

また、施工の省力化を目的として開発されたロボットとして、クレーンを使えない地下構造物の工事において鉄筋の運搬を助ける「配筋アシストロボ」がある。に示すように、わずかな人力を加えるだけで、最大 250kg の鉄筋を運搬することが可能なロボットも開発されている[39]。

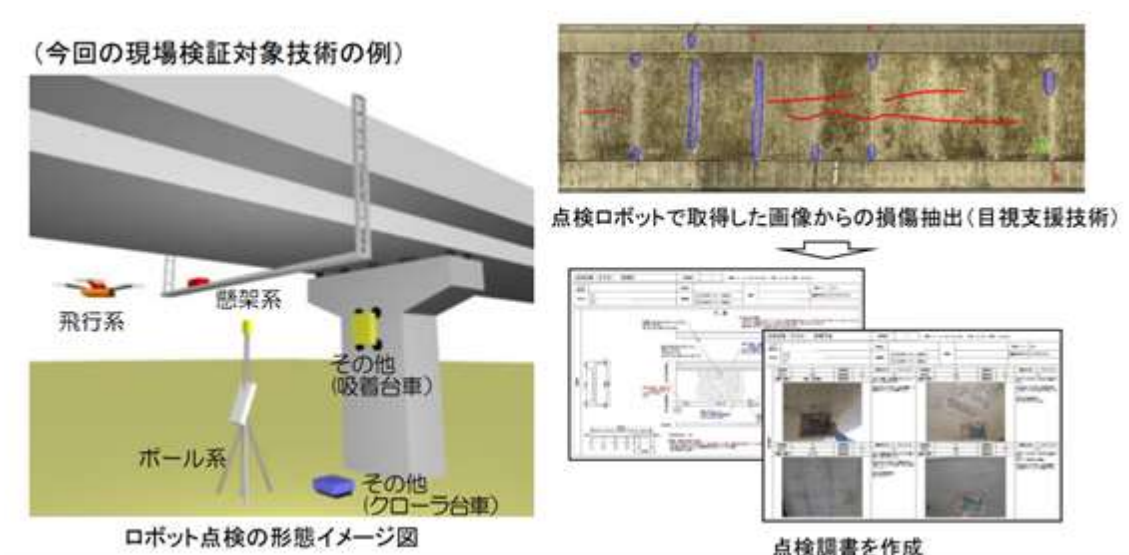


図 3.4.2-4 国土交通省による橋梁点検ロボットの現場検証のイメージ[38]



図 3.4.2-5 配筋アシストロボ[39]

3) AI を活用した構造物の調査・維持管理

インフラの維持管理の分野においてAI (Artificial Intelligence : 人工知能) を適用するための研究および技術開発が盛んに行なわれている。道路や鉄道などのインフラを管理する各事業者も積極的な取り組みを行っている。例えば、阪神高速道路会社は 2016 年に「阪神高速グループビジョン」においてAI による交通制御の高度化を掲げ、道路の維持管理の効率化にも取り組んでおり、JR 東日本も 2016 年の「技術革新中長期ビジョン」にて安全確保や維持管理にAI を活用する方針を示した[40]。

現在のAI 技術で特に注目されているのが機械学習の一種であるディープラーニング(深層学習) である。ディープラーニングによる画像認識は、土木の工事や維持管理の現場での性状評価や状況判断との親和性が高い。2)で述べた自動操縦のドローンによる撮影とディープラーニングによる画像認識とひび割れ損傷などの検出を組み合わせ、さらには余寿命の推定までを自動的に高速で算出する研究もなされている[40]。余寿命を推定する技術によって、補修の優先順位付けが可能となれば、効率的な維持管理が実施できると考えられる。

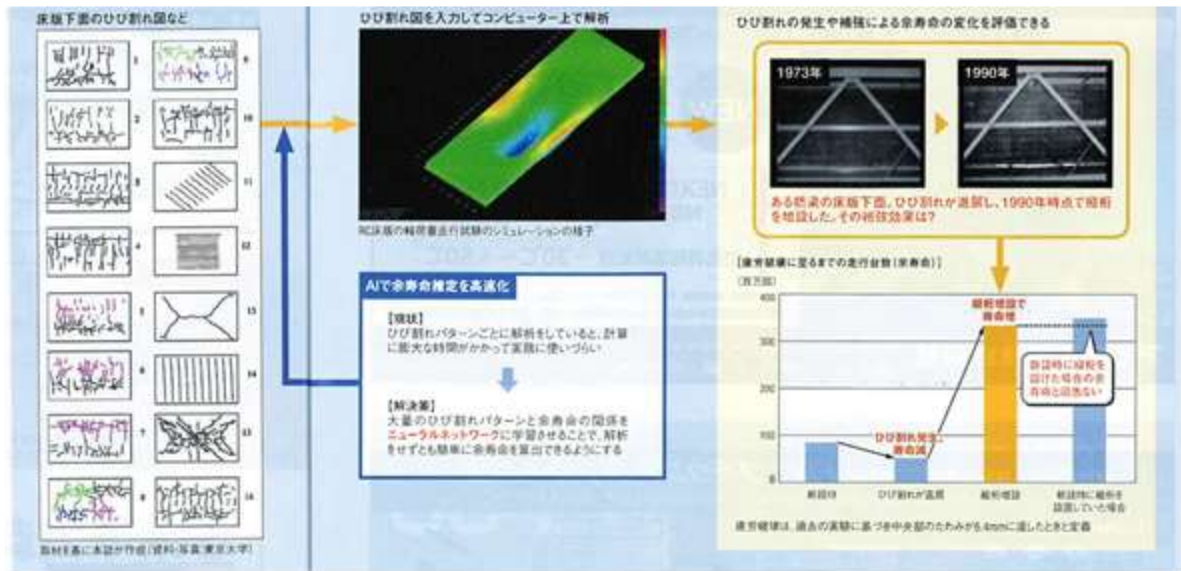


図 3.4.2-6 コンクリート床版の余寿命推定[40]

次ページ以降に、AI を活用した構造物の調査・維持管理に関する研究・技術開発事例を示す。

a 深層学習と画像解析を用いたコンクリート構造物のひび割れ検出[41]

コンクリート構造物のひび割れ検出に適用する技術として、深層学習を利用した新しい画像解析手法が開発された。この技術は、コンクリート構造物の変状展開図の自動作成プログラムの基盤技術として活用することが可能である。多階層型のニューラルネットワークを用いて、トンネル覆工面の画像からひび割れの有無を 90%以上の正解率で分類することが可能であり、図 3.4.2-7 に示すように、画像処理時にケーブルや目地など、ひび割れに類似したノイズの除去ができるという特長を有する。

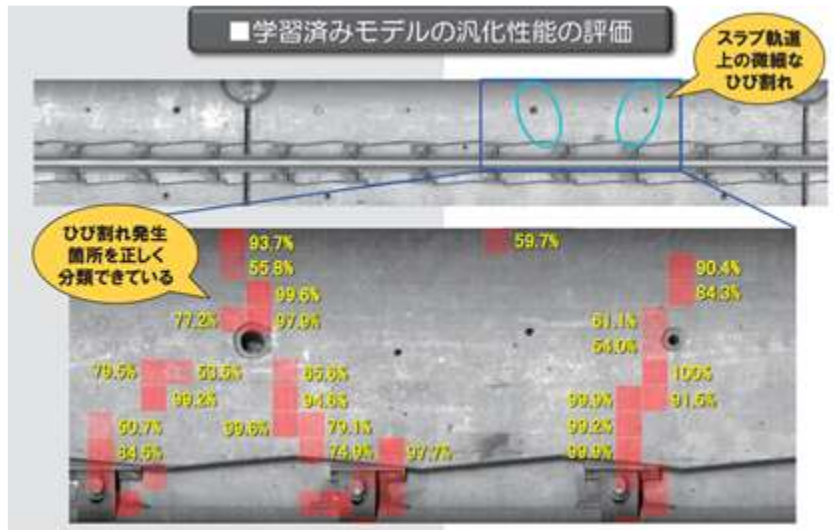


図 3.4.2-7 学習済みモデルの汎化性能の評価[41]

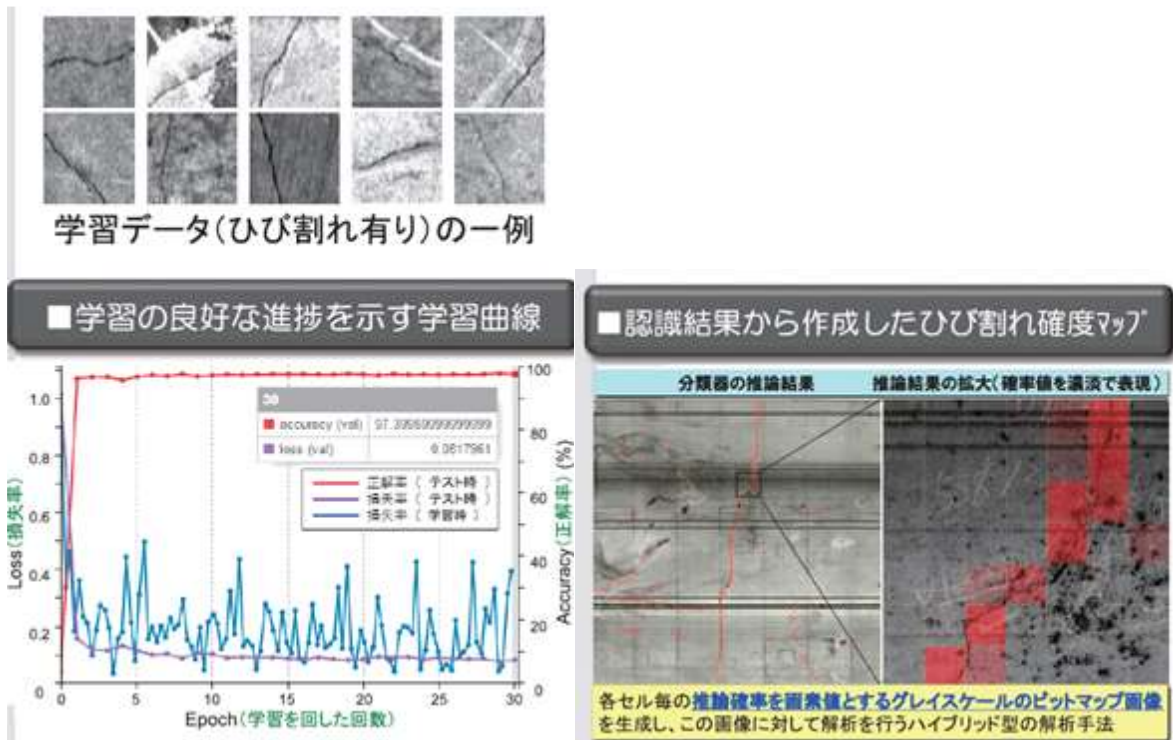


図 3.4.2-8 学習データと学習曲線、認識結果から作成したひび割れ確度マップ[41]

b AIによる舗装点検[40]

道路管理会社である阪神高速道路会社では、路面性状測定車「ドクターパト」に搭載したラインスキャンカメラで路面を撮影し、画像から自動的にひび割れの位置を検出するシステムを開発した[40]。機械学習の一種でデータ分類に用いる「FCM 識別機」と呼ばれる AI 技術が適用されている。ひび割れの検出にかかる時間を従来の 5 分の 1 に削減、判断のばらつきも抑制できる。



図 3.4.2-9 路面性状測定車「ドクターパト」[40]

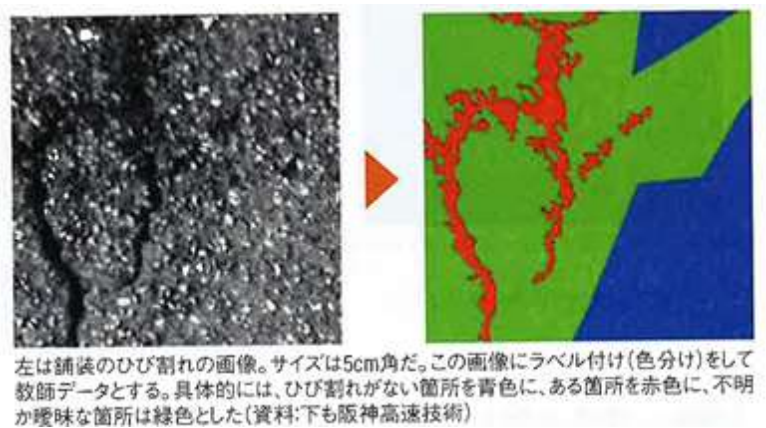


図 3.4.2-10 教師データ作成の流れ[40]



図 3.4.2-11 ひび割れの検出結果 (ひび割れがある確率が高い箇所は赤色) [40]

c ディープラーニングによる空洞探査診断[40]

道路の維持管理において、舗装の下にある地中の空洞の検出は重要であり、一般的には、地中レーダー探査が行われる。地中レーダー探査は、地中に向けて電磁波を放射し、反射波の乱れを基にして、路面より下の空洞の位置を推定する技術である。そこで、地中レーダー探査で得られた画像の判定に、AIを用いた診断技術が開発された[40]。収集した画像と判定結果を基にした膨大な教師データをディープラーニングで学習させ、従来の10分の1の時間で空洞を検出可能となった。牽引式のレーダー装置は地下5mまでのレーダー画像を収集でき、時速40~50kmで牽引した場合、幅約2mの範囲のレーダー画像を5cmおきに取得する。これらの膨大な画像の確認がAIを用いた技術で自動化できるため、維持管理の効率化、省人化、ひいてはコスト低減が見込まれると考えられる。2018年から道路管理会社や自治体を対象として、サービス提供が開始される予定であり、また、レーダー装置の小型化も今後開発される予定である。

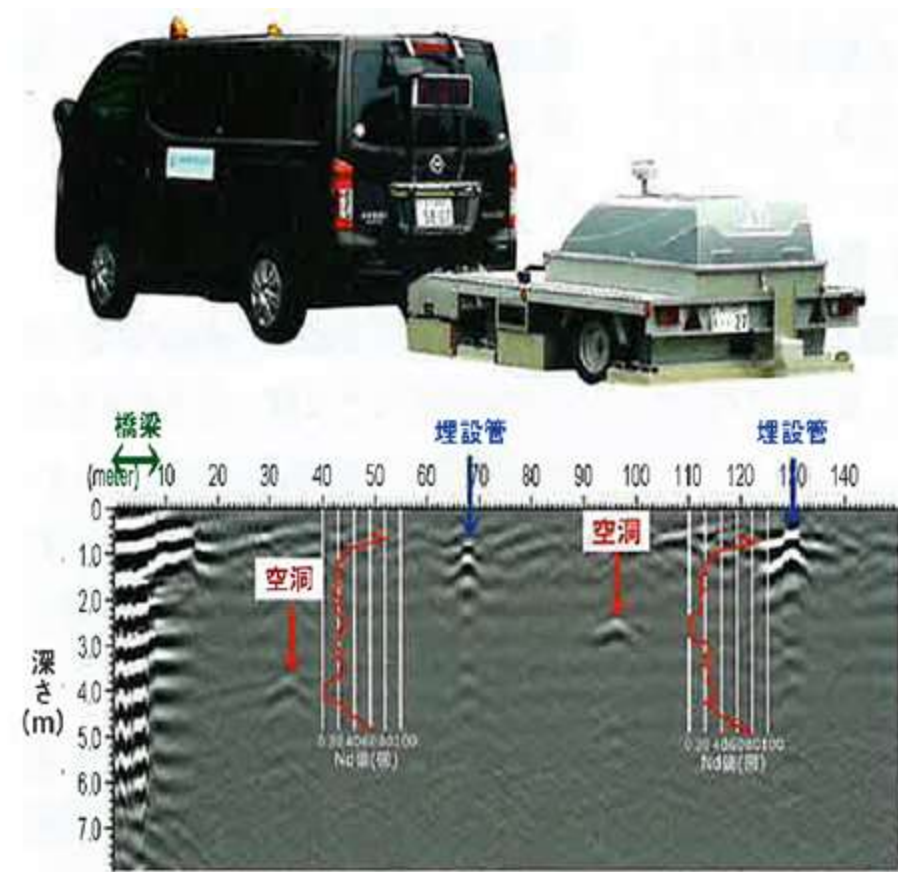


図 3.4.2-12 牽引式のレーダー探査と探査で得られた画像の例[40]

d 機械学習によるトンネル覆工コンクリートの打音検査およびひび割れ点検[40]

トンネルの覆工コンクリートはひび割れの点検や打音検査による維持意管理が実施されている。そこで、トンネルの覆工コンクリートに対するひび割れの点検と打音検査について、AIを用いた技術が開発されている[40]。この技術は、走行式の門形の架構にガイドフレームを載せ、打音検査装置とひび割れ検出装置をガイドフレームに沿って移動させる。ガイドフレームは、トンネルの断面形状に合わせて変形が可能であり、交通規制が不要となる。また、点検は遠隔操作により行う。

打音検査装置で収集した打音については、機械学習の一種である集団学習(アンサンブル学習)を適用したAIにより診断がされ、点検速度は150m²/時間を目標に開発中である。また、ひび割れ検出は覆工表面の画像と凹凸の情報を同時に取得することにより行い、幅0.2mmの検出を目標として開発されている。

この技術は、後述する内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の下で、「トンネル全断面点検診断システム」として開発されている。



図 3.4.2-13 トンネルの断面形状に合わせて変形可能なガイドフレーム[40]

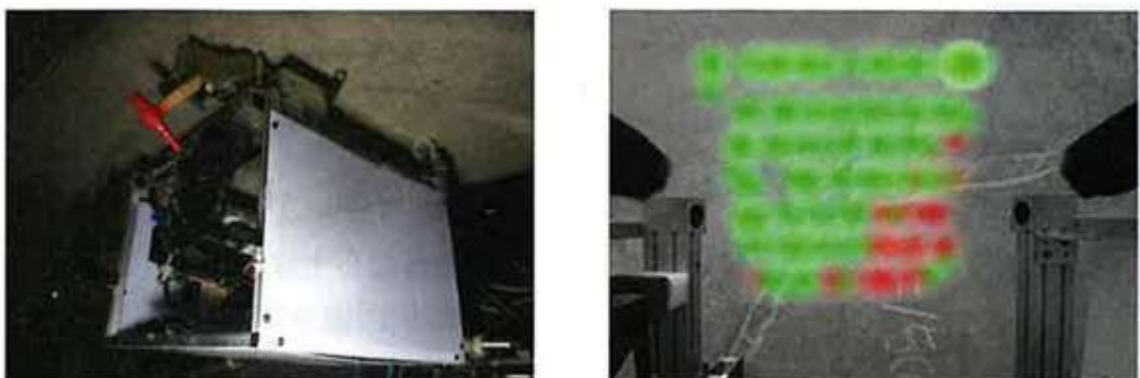


図 3.4.2-14 打音検査装置(左)と検査結果(右、浮きが疑われる箇所は赤色)[40]

4) AR・VRによる品質向上・教育

ICT技術の活用において、AR（Augmented Reality：拡張現実）とVR（Virtual Reality：仮想現実）を用いた品質の向上や教育に役立つ取り組みも盛んに行なわれている。東京メトロでは、AR（拡張現実）技術を活用した土木構造物の維持管理教育用アプリケーションを開発し、2017年5月から使用を開始している[42]。このアプリケーションの導入より、実際の検査の方法・手順を模擬体験できること、実際の変状を仮想的に確認することができることから理解度が高まること、時間の制約にとらわれず安全に教育が行える等の効果を得ることが可能となった。

また、経済産業省では、「VR、AR、MRを活用した休廃止鉱山の鉱害防止及び保安の高度化に関する調査研究」を平成30年度のテーマとして挙げており、その事業目的を、「現時点では入ることが難しい休廃止鉱山の坑道内の現場を管理者、作業者の各視点で疑似体験できるVR（バーチャルリアリティ）システムを構築し、実務教育を実施する環境を整備する。」としている[43]。このように、長期にわたり継続した人材育成が必要、かつ、現場を体験することが難しい技術について、ARやVR技術を活用した人材育成の推進が行われている。



図 3.4.2-15 AR（拡張現実）を用いたアプリケーション[42]

新入社員研修状況／総合研修訓練センター 模擬トンネル（左）、模擬高架橋（右）

(2) 内閣府による戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の取り組み

わが国における府省の枠や旧来の分野の枠を超えた科学技術イノベーションを実現するための取り組みとして、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）が創設された[44]。SIPの課題の一つが、インフラ維持管理・更新・マネジメント技術であり、研究開発計画が策定されている[45]。このプログラムにおいては、図 3.4.2-16 に示す維持管理フローを構築するため、以下に示す研究開発項目が設定されている。

- ・点検・モニタリング・診断技術の研究開発
- ・構造材料・劣化機構・補修・補強技術の研究開発
- ・情報・通信技術の研究開発
- ・ロボット技術の研究開発
- ・アセットマネジメント技術の研究開発

研究開発期間は2014年～2018年であるが、終了しているテーマも一部ある。これらのインフラ維持管理・更新・マネジメント技術の研究開発計画には、前項にて述べた調査結果の一部も含まれている。

また、SIPの実施体制は図 3.4.2-17 に示すとおりであり、省庁等を超えた取り組みが行われているのがわかる。

インフラ維持管理フローと基盤技術開発

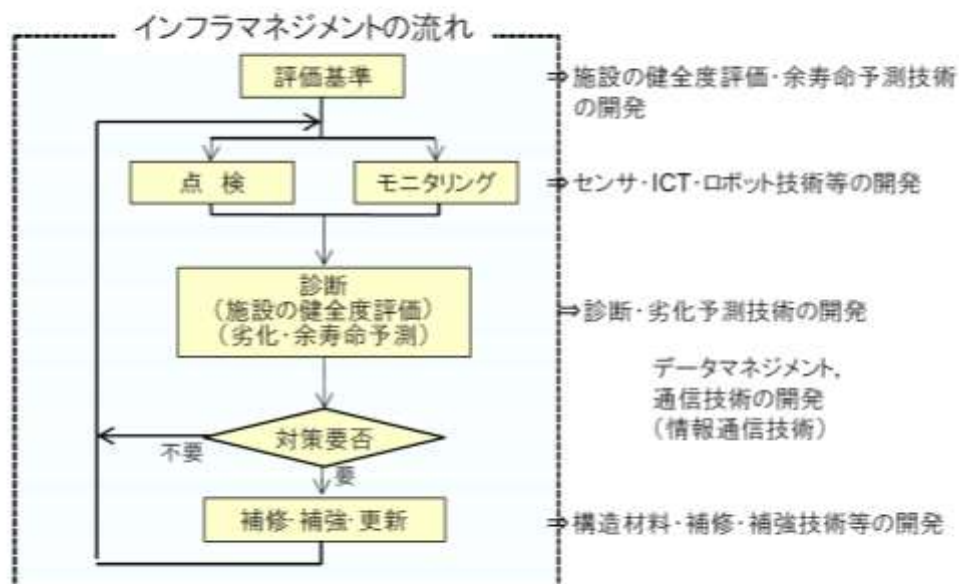


図 3.4.2-16 インフラの維持管理フローと基盤技術開発[45]



図 3.4.2-17 SIP（インフラ維持管理・更新・マネジメント技術）の実施体制[45]

回収維持技術は、既存のインフラに対する最新の維持管理技術を取り込み、展開できるものが多くあると考えられる。関連する最新技術の動向については、このような国の取り組みや、鉄道・道路等の各事業者の研究開発状況などを今後も注視していく必要があると考えられる。

3.4.3 今後開発が必要な技術等の研究課題の抽出

前項の最新技術の調査結果を踏まえ、定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術および回収技術に関して、今後開発が必要な技術等の研究課題を抽出する。

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

1) 定量化に必要な技術検討項目 i 開放坑道の健全性（空間安定性）

3.4.1 項では、回収維持期間中における開放坑道の健全性を維持するための回収維持技術として、支保工等の維持管理・更新技術（異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術）などを示した。これらの技術は既存であり、一般的なトンネルに適用されている。詳細な技術の内容や手順は「トンネルの維持管理（土木学会）」や「トンネル補修・補強マニュアル（鉄道総合技術研究所）」などにまとめられていることは前述したとおりである。一般的なトンネルと同様である堅置き方式および横置き方式の開放坑道に適用可能と考えられるこれらの技術は、品質・安全性・効率性・経済性などをより高めるため、各事業者等で技術開発・研究が進められている。

研究課題としては、処分場の地下坑道が大深度に建設されること、長大であること、特に処分坑道の断面寸法は高さ、幅ともに 5m 程度と大きくないうえに、廃棄体が定置されていることや他にも様々な設備が配置されることを考慮する必要があり、これらの条件下で対応可能な技術の高度化が挙げられる。操業時、廃棄体定置中のパネル内は放射線管理区域となるが、定置後に管理区域が継続されるかについては現状では定められていない。しかし、回収可能性維持期間中に管理区域となった場合には、被ばく管理が重要な課題となる。その対策として放射線管理区域内では遠隔操作可能な装置・ロボット等による回収維持作業および回収作業となる可能性が高い。したがって、具体的な研究課題としては、遠隔操作が可能なロボット等による支保工等の維持管理・更新技術の開発が挙げられる。また、維持管理の異常発生監視に必要な計測器は、一般的な寿命は長くても 10 年程度と考えられる。回収可能性維持期間中の埋戻し状態にも依るが、計測器および計測システムの更新（置き換え）は簡単ではないと予測できる。したがって、長期健全性維持可能な計測器および計測システムの開発等が研究課題として挙げられる。表 3.4.3-1 に研究課題を整理して示す。

特に、本検討で想定している横置き方式の オプション 1 では、処分坑道に PEM が定置された状態で埋戻しをせずに回収可能性を維持する設定となっているため、狭隘な空間において対応可能な支保工等の維持管理・更新技術が求められる。






2) 定量化に必要な技術検討項目 ii 開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響

3.4.1 項では、回収維持期間中における開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響に対する、作業空間の安全性確保のための回収維持技術として、換気設備の維持管理・更新技術（異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術）などを示した。これらの技術は既存であり、一般的なトンネルに適用されている。詳細な技術の内容や手順は「トンネルの維持管理（土木学会）」などにまとめられていることは前述したとおりである。一般的なトンネルと同様である縦置き方式および横置き方式の開放坑道に適用可能と考えられるこれらの技術は、品質・安全性・効率性・経済性などをより高めるため、各事業者等で技術開発・研究が進められている。

研究課題としては、処分場の地下坑道が大深度に建設されること、長大であること、特に処分坑道の断面寸法は高さ、幅ともに 5m 程度と大きくないうえにさまざまな設備が配置されることを考慮すると、これらの条件下で対応可能な技術の高度化が挙げられる。操業時、廃棄体定置中のパネル内は放射線管理区域となるが、定置後に管理区域が継続されるかについては現状では定められていない。しかし、回収可能性維持期間中に管理区域となった場合には、被ばく管理が重要な課題となる。その対策として放射線管理区域内では遠隔操作可能な装置・ロボット等による回収維持作業および回収作業となる可能性が高い。したがって、具体的な研究課題としては、遠隔操作による換気設備の維持管理・更新技術が挙げられる。また、維持管理の異常発生監視に必要な計測器は、一般的な寿命は長くても 10 年程度と考えられる。回収可能性維持期間中の埋戻し状態にも依るが、計測器および計測システムの更新（置き換え）は簡単ではないと予測できる。したがって、長期健全性維持可能な計測器および計測システムの開発等が研究課題として挙げられる。表 3.4.3-1 に研究課題を整理して示す。

特に、本検討で想定している横置き方式の オプション 1 では、処分坑道に PEM が定置された状態で埋戻しをせずに回収可能性を維持する設定となっているため、狭隘な空間において対応可能な換気設備の維持管理・更新技術が求められる。

表 3.4.3-1 定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術および回収技術とその研究課題（定量化に必要な技術検討項目 i ~ ii）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」			検討対象(イメージ)						回収維持技術、回収技術	研究課題
定量化すべき情報			定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点							
			堅置き方式			横置き方式[PEM]				
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	OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3		
										

3) 定量化に必要な技術検討項目 iii 埋め戻した坑道の再利用時の健全性

3.4.1 項では、回収時における埋め戻した坑道の再利用時の健全性を確保するための回収技術として、廃棄体へのアクセス技術（プラグ・埋め戻し材除去技術、支保工等の維持管理・更新技術としての異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術）などを示した。これらの技術は既存であり、一般的なトンネルに適用されている。詳細な技術の内容や手順は、「トンネル標準示方書（土木学会）」、「トンネルの維持管理（土木学会）」および「トンネル補修・補強マニュアル（鉄道総合技術研究所）」などにまとめられていることは前述したとおりである。一般的なトンネルと同様である豎置き方式および横置き方式の開放坑道に適用可能と考えられるこれらの技術は、品質・安全性・効率性・経済性などをより高めるため、各事業者等で技術開発・研究が進められている。

研究課題としては、処分場の地下坑道が大深度に建設されること、長大であること、特に処分坑道の断面寸法は高さ、幅ともに 5m 程度と大きくないうえに、廃棄体が定置されていることや他にも様々な設備を再配置しながら再掘削／再利用することを考慮すると、これらの条件下で対応可能な技術の高度化が挙げられる。操業時、廃棄体定置中のパネル内は放射線管理区域となるが、定置後に管理区域が継続されるかについては現状では定められていない。しかし、回収可能性維持期間中に管理区域となった場合には、被ばく管理が重要な課題となる。その対策として放射線管理区域内では遠隔操作可能な装置・ロボット等による回収維持作業および回収作業となる可能性が高い。したがって、具体的な研究課題としては、遠隔操作が可能なロボット等による廃棄体へのアクセス技術の開発が挙げられる。また、アクセス時の異常発生監視に必要な計測器は、一般的な寿命は長くても 10 年程度と考えられる。回収可能性維持期間中の埋戻し状態にも依るが、計測器および計測システムの更新（置き換え）は簡単ではないと予測できる。したがって、長期健全性維持可能な計測器および計測システムの開発等が研究課題として挙げられる。表 3.4.3-2 に研究課題を整理して示す。

特に、本検討で想定している横置き方式の オプション 2 およびオプション 3 では、PEM が定置された状態の処分坑道を再掘削／再利用する必要があるため、狭隘な空間において対応可能な廃棄体へのアクセス技術が求められる。





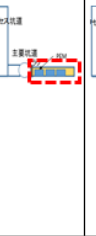

4) 定量化に必要な技術検討項目 iv 再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響

3.4.1 項では、回収時における坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響に対する、作業空間の安全性確保のための回収維持技術として、換気設備の再設置・維持管理・更新技術（再設置技術、異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術）などを示した。これらの技術は既存であり、一般的なトンネルに適用されている。詳細な技術の内容や手順は「トンネルの維持管理（土木学会）」などにまとめられていることは前述したとおりである。一般的なトンネルと同様である堅置き方式および横置き方式の開放坑道に適用可能と考えられるこれらの技術は、品質・安全性・効率性・経済性をより高めるため、各事業者等で技術開発・研究が進められている。

研究課題としては、処分場の地下坑道が大深度に建設されること、長大であること、特に処分坑道の断面寸法は高さ、幅ともに 5m 程度と大きくないうえに、坑道の再掘削／再利用にあたり換気設備以外のさまざまな設備も再配置することを考慮すると、これらの条件下で対応可能な技術の高度化が挙げられる。操業時、廃棄体定置中のパネル内は放射線管理区域となるが、定置後に管理区域が継続されるかについては現状では定められていない。しかし、回収可能性維持期間中に管理区域となった場合には、被ばく管理が重要な課題となる。その対策として放射線管理区域内では遠隔操作可能な装置・ロボット等による回収維持作業および回収作業となる可能性が高い。したがって、具体的な研究課題としては、遠隔操作による換気設備の維持管理・更新技術が挙げられる。また、維持管理の異常発生監視に必要な計測器は、一般的な寿命は長くても 10 年程度と考えられる。回収可能性維持期間中の埋戻し状態にも依るが、計測器および計測システムの更新（置き換え）は簡単ではないと予測できる。したがって、長期健全性維持可能な計測器および計測システムの開発等が研究課題として挙げられる。表 3.4.3-2 に研究課題を整理して示す。

特に、本検討で想定している横置き方式の オプション 2 およびオプション 3 では、PEM が定置された状態の処分坑道の再掘削／再利用時の換気設備となるため、狭隘な空間において対応可能な換気設備の再設置・維持管理・更新技術が求められる。

表 3.4.3-2 定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術および回収技術とその研究課題（定量化に必要な技術検討項目 iii ~ iv）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」			検討対象(イメージ)						回収維持技術、回収技術	研究課題			
定量化すべき情報			堅置き方式			横置き方式[PEM]							
			OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3					
1. 安全性への影響	(1) 操業期間中の安全性への影響	② 回収作業時の安全性への影響 (回収を実施する場合)	1)回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性 一度埋め戻した坑道の再掘削/再利用を前提とする場合に、回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性確保の観点から、以下の評価・検討や技術の具体化を行う。 a.埋め戻した坑道の再利用時の健全性 b.再利用する坑道内(作業空間)への廃棄体からの熱影響									【回収技術】 a. 廃棄体へのアクセス技術 (プラグ・埋め戻し材除去技術、支保工等の維持管理・更新技術、異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術) b. 換気設備の再設置・維持管理・更新技術 (再設置技術、異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術) ※他に、作業空間の安全性確保のために、排水設備などの再設置・維持管理・更新技術、放射線防護に関する技術などがある。	【回収技術】 a. 大深度・長大・狭隘な空間に対応可能な廃棄体へのアクセス技術の高度化 (特に、横置き方式 OP2,OP3 の場合の狭隘空間への対応) ・遠隔操作可能なロボット等による廃棄体へのアクセス技術 ・長期健全性維持可能な計測器および計測システム b. 大深度・長大・狭隘な空間に対応可能な換気設備の再設置・維持管理・更新技術の高度化 (特に、横置き方式 OP2,OP3 の場合の狭隘空間への対応) ・遠隔操作による換気設備の維持管理・更新技術 ・長期健全性維持可能な計測器および計測システム

5) 定量化に必要な技術検討項目 v 回収時の廃棄体容器の健全性

3.4.1 項では、回収時の廃棄体容器の健全性に関する技術として、廃棄体回収・搬出技術を示した。また、横置き方式では、PEM 容器の構造健全性評価技術、PEM 容器の構造健全性が保持されている場合は PEM 搬出技術、PEM 容器の構造健全性が保持されていない場合は PEM から廃棄体を取り出す技術についても示した。

研究課題として、横置き方式の PEM 容器の構造健全性評価技術については、PEM 容器の仕様に適用可能な非破壊検査等を用いる必要があると考えられ、放射線安全などの観点から遠隔操作等で実施できるロボット技術等の開発が望ましいため、研究課題として挙げられる。また、PEM 容器の構造健全性が保持されていない場合に PEM 容器から廃棄体を取り出す技術についても実証試験等が必要と考えられる。廃棄体回収・搬出技術、および構造健全性が確保された PEM 容器の回収・搬出技術は実証実験[27]が行われており、今後は実証実験の結果を踏まえたさらなる技術の高度化が研究課題となる。表 3.4.3-3 に研究課題を整理して示す。

表 3.4.3-3 定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術および回収技術とその研究課題（定量化に必要な技術検討項目 v）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」			検討対象(イメージ)						回収維持技術、回収技術	研究課題	
定量化すべき情報			堅置き方式			横置き方式[PEM]					
			OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3			
1. 安全性への影響	(1) 作業期間中の安全性への影響	(2) 回収作業時の安全性への影響 (回収を実施する場合)	2)回収時の廃棄体容器の健全性 回収装置による把持・取り出しの際には、廃棄体容器に一定の機械強度が要求されることから、廃棄体容器の健全性に関する評価や検討を行う。							【回収技術】 ・廃棄体回収・搬出技術 ・横置き方式では、PEM 容器の構造健全性評価技術、PEM 容器の構造健全性が保持されている場合は PEM 搬出技術、PEM 容器の構造健全性が保持されていない場合は PEM から廃棄体を取り出す技術	【回収技術】 ・横置き方式では、遠隔操作可能なロボット等による、PEM 容器の構造健全性評価技術・構造健全性が保持されていない PEM 容器からの廃棄体取り出し・回収・搬出技術の実証と高度化 ・堅置き方式、および横置き方式の健全な PEM 容器の回収技術についてはさらなる高度化（現在実証中）

6) 定量化に必要な技術検討項目 vi 開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響

3.4.1 項において、本検討では人工バリアの設計は対象外であること、また、対象となる廃棄体容器が直接空気にさらされる状態は考えにくいことなどの理由から、開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる廃棄体容器の機能劣化に対する回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）は特に示さなかった。よって、表 3.4.3-4 に示すように、研究課題についても特に挙げないものとする。

7) 定量化に必要な技術検討項目 vii 廃棄体からの熱による影響

3.4.1 項において述べたように、回収維持期間中の開放坑道（空気）の存在により、廃棄体からの熱による影響を低減させるための回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）として、換気設備の維持管理・更新技術（異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術）などがある。これらの技術は既存であり、一般的なトンネルに適用されている。詳細な技術の内容や手順は「トンネルの維持管理（土木学会）」などにまとめられていることは前述したとおりである。一般的なトンネルと同様である豎置き方式および横置き方式の開放坑道に適用可能と考えられるこれらの技術は、品質・安全性・効率性・経済性などをより高めるため、各事業者等で技術開発・研究が進められている。

研究課題としては、処分場の地下坑道が大深度に建設されること、長大であること、特に処分坑道の断面寸法は高さ、幅ともに 5m 程度と大きくないうえに、廃棄体が定置されていることや他にも様々な設備が配置されることを考慮する必要がある、これらの条件下で対応可能な技術の高度化が挙げられる。操業時、廃棄体定置中のパネル内は放射線管理区域となるが、定置後に管理区域が継続されるかについては現状では定められていない。しかし、回収可能性維持期間中に管理区域となった場合には、被ばく管理が重要な課題となる。その対策として放射線管理区域内では遠隔操作可能な装置・ロボット等による回収維持作業および回収作業となる可能性が高い。したがって、具体的な研究課題としては、遠隔操作が可能なロボット等による換気設備の維持管理・更新技術の開発が挙げられる。また、維持管理の異常発生監視に必要な計測器は、一般的な寿命は長くても 10 年程度と考えられる。回収可能性維持期間中の埋戻し状態にも依るが、計測器および計測システムの更新（置き換え）は簡単ではないと予測できる。したがって、長期健全性維持可能な計測器および計測システムの開発等が研究課題として挙げられる。表 3.4.3-4 に研究課題を整理して示す。

特に、本検討で想定している横置き方式の オプション 1 では、処分坑道に PEM が定置された状態で埋戻しをせずに回収可能性を維持する設定となっているため、狭隘な空間において対応可能な換気設備の維持管理・更新技術が求められる。

8) 定量化に必要な技術検討項目 viii 坑道開放期間内に継続する坑内湧水の影響

3.4.1 項では、坑道開放期間内に継続する坑内湧水の影響に対する回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）としては、排水設備の維持管理・更新技術（異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術）、湧水抑制対策技術などを示した。排水設備の維持管理・更新技術は既存であり、一般的なトンネルに適用されている。詳細な技術の内容や手順は「トンネルの維持管理（土木学会）」などにまとめられていることは前述したとおりである。一般的なトンネルと同様である豎置き方式および横置き方式の開放坑道に適用可能と考えられるこの技術は、品質・安全性・効率性・経済性などをより高めるため、各事業者等で技術開発・研究が進められている。また、湧水抑制対策技術（グラウト技術）も既存であり、一般的なトンネルや国家石油ガス備蓄基地建設[28]などで適用されている。また、超深地層研究所において、工学技術に関する研究[29]、[30]、[31]が進められている。

研究課題としては、処分場の地下坑道が大深度に建設されること、長大であること、特に処分坑道の断面寸法は高さ、幅ともに 5m 程度と大きくないうえに、廃棄体が定置されていることや他にも様々な設備が配置されることを考慮する必要がある、これらの条件下で対応可能な技術の高度化が挙げられる。操業時、廃棄体定置中のパネル内は放射線管理区域となるが、定置後に管理区域が継続されるかについては現状では定められていない。しかし、回収可能性維持期間中に管理区域となった場合には、被ばく管理が重要な課題となる。その対策として放射線管理区域内では遠隔操作可能な装置・ロボット等による回収維持作業および回収作業となる可能性が高い。したがって、具体的な研究課題としては、遠隔操作が可能なロボット等による排水設備の維持管理・更新技術の開発が挙げられる。また、維持管理の異常発生監視に必要な計測器は、一般的な寿命は長くても 10 年程度と考えられる。回収可能性維持期間中の埋戻し状態にも依るが、計測器および計測システムの更新（置き換え）は簡単ではないと予測できる。したがって、長期健全性維持可能な計測器および計測システムの開発等が研究課題として挙げられる。また、湧水抑制対策技術についても、使用するグラウト材や地下水の水質等により健全性を維持できる期間は異なると考えられるが[46]、放射線管理区域における追加施工は容易ではないため、長期健全性維持可能な湧水抑制対策技術の開発等が研究課題として挙げられる。表 3.4.3-4 に研究課題を整理して示す。

特に、本検討で想定している横置き方式の オプション 1 では、処分坑道に PEM が定置された状態で埋戻しをせずに回収可能性を維持する設定となっているため、狭隘な空間において対応可能な排水設備の維持管理・更新技術が求められる。

表 3.4.3-4 定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術および回収技術とその研究課題（定量化に必要な技術検討項目 vi ~ viii）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」		検討対象(イメージ)						回収維持技術、回収技術	研究課題	
定量化すべき情報	定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点	堅置き方式			横置き方式[PEM]					
		OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3			
1. 安全性への影響	(2) 閉鎖後長期の安全性への影響 ：回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合の、人工バリアや天然バリア(母岩)に期待する閉鎖後長期の安全性への影響	1)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う人工バリア等に期待する安全機能への影響 維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ、人工バリア(及び他の地下構造物)に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響を下記観点から評価する。 a.開放坑道を介した空気(酸素)の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響 b.廃棄体からの熱による影響 c.坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響							【回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）】 a. — b. 換気設備の維持管理・更新技術（異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術） c. 排水設備の維持管理・更新技術（異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術）、湧水抑制対策技術	【回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）】 a. — b. 大深度・長大・狭隘な空間に対応可能な換気設備の維持管理・更新技術の高度化 （特に、横置き方式 OP1 の場合の狭隘空間への対応） ・遠隔操作による換気設備の維持管理・更新技術 ・長期健全性維持可能な計測器および計測システム c. 大深度・長大・狭隘な空間に対応可能な技術の高度化 （特に、横置き方式 OP1 の場合の狭隘空間への対応） ・遠隔操作による排水設備の維持管理・更新技術 ・長期健全性維持可能な計測器および計測システム ・長期健全性維持可能な湧水抑制対策技術（グラウト技術）

9) 定量化に必要な技術検討項目 ix 地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込みの影響）

3.4.1 項では、地下水の引き込みによる擾乱影響に対する回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）としては、開放坑道の存在により発生する湧水を低減させることを目的とした、湧水抑制対策技術を示した。湧水抑制対策技術（グラウト技術）は既存であり、一般的なトンネルや国家石油ガス備蓄基地建設[28]などで適用されている。また、超深地層研究所において、工学技術に関する研究[29]、[30]、[31]が進められている。

研究課題としては、処分場の地下坑道が大深度に建設されること、長大であること、特に処分坑道の断面寸法は高さ、幅ともに 5m 程度と大きくないうえに、廃棄体が定置されていることや他にも様々な設備が配置されることを考慮する必要がある、これらの条件下で対応可能な技術の高度化が挙げられる。操業時、廃棄体定置中のパネル内は放射線管理区域となるが、定置後に管理区域が継続されるかについては現状では定められていない。しかし、回収可能性維持期間中に管理区域となった場合には、被ばく管理が重要な課題となる。その対策として放射線管理区域内では遠隔操作可能な装置・ロボット等による回収維持作業および回収作業となる可能性が高い。湧水抑制対策技術は、使用するグラウト材や地下水の水質等により健全性を維持できる期間は異なると考えられるが[46]、放射線管理区域における追加施工は容易ではない。したがって、具体的な研究課題は、長期健全性維持可能な湧水抑制対策技術の開発等が挙げられる。表 3.4.3-5 に研究課題を整理して示す。

10) 定量化に必要な技術検討項目 x 開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度


3.4.1 項では、回収維持期間中の開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響を低減させる回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）は、現在の施設設計を踏まえると見当たらないため示さなかった。酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度を解析などのシミュレーションにより定量化し、母岩の安全機能が損なわれると評価された場合は、何らかの対策を講じることが必要である。既存の技術が存在しない可能性があるため、回収維持期間中の影響を低減させ、閉鎖後の母岩の安全機能が保持できる状態（還元環境）へ回復を促進させる新たな技術の開発と実証が必要と考えられる。

11) 定量化に必要な技術検討項目 xi ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度

3.4.1 項では、ベースラインへの回復に対する回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）として、開放坑道の存在により発生する湧水を低減させることを目的とした、湧水抑制対策技術を示した。湧水抑制対策技術（グラウト技術）は既存であり、一般的なトンネルや国家石油ガス備蓄基地建設[28]などで適用されている。また、超深地層研究所において、工学技術に関する研究[29]、[30]、[31]が進められている。

研究課題としては、処分場の地下坑道が大深度に建設されること、長大であること、特に処分坑道の断面寸法は高さ、幅ともに 5m 程度と大きくないうえに、廃棄体が定置されていることや他にも様々な設備が配置されることを考慮する必要がある、これらの条件下で対応可能な技術の高度化が挙げられる。操業時、廃棄体定置中のパネル内は放射線管理区域となるが、定置後に管理区域が継続されるかについては現状では定められていない。しかし、回収可能性維持期間中に管理区域となった場合には、被ばく管理が重要な課題となる。その対策として放射線管理区域内では遠隔操作可能な装置・ロボット等による回収維持作業および回収作業となる可能性が高い。湧水抑制対策技術は、使用するグラウト材や地下水の水質等により健全性を維持できる期間は異なると考えられるが[46]、放射線管理区域における追加施工は容易ではない。したがって、具体的な研究課題は、長期健全性維持可能な湧水抑制対策技術の開発等が挙げられる。表 3.4.3-5 に研究課題を整理して示す。

表 3.4.3-5 定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術および回収技術とその研究課題（定量化に必要な技術検討項目 ix～xi）

R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目(例)」		検討対象(イメージ)						回収維持技術、回収技術	研究課題
定量化すべき情報	定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点	堅置き方式			横置き方式[PEM]				
		OP1	OP2	OP3	OP1	OP2	OP3		
1. 安全性への影響	(2) 閉鎖後長期の安全性への影響 ：回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合、人工バリアや天然バリア(母岩)に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響	<p>2)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う天然バリア(母岩)に期待する安全機能への影響</p> <p>維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ、天然バリア(母岩)に期待される閉鎖後長期の安全機能に係わる次のような影響を評価する。</p> <p>a.地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度(化学組成の異なる地下水の引き込みの影響)</p> <p>b.開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度</p> <p>c.ベースライン(建設前の元の地下環境の状態)への回復過程と回復の程度</p> 						<p>【回収維持技術(閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術)】</p> <p>a. 湧水抑制対策技術</p> <p>b. ー</p> <p>c. 湧水抑制対策技術</p>	<p>【回収維持技術(閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術)】</p> <p>a. 湧水抑制対策技術(グラウト技術)の高度化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・長期健全性維持可能な湧水抑制対策技術(グラウト技術) ・長期健全性維持可能な計測器および計測システム <p>b. 還元環境回復促進技術の開発</p> <p>c. 湧水抑制対策技術(グラウト技術)の高度化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・長期健全性維持可能な湧水抑制対策技術(グラウト技術) ・長期健全性維持可能な計測器および計測システム

(2) 今後開発が必要な技術等の研究課題の整理

本項では、最新技術の調査結果を踏まえ、定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術および回収技術に関して、今後開発が必要な技術等の研究課題を抽出した。

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

第3章 参考文献

- [1] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 報告書（第2分冊：その1），2017.
- [2] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 27 年度 地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書 第2編 地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発，2016.
- [3] 原子力発電環境整備機構：処分場の安全機能と技術要件(2010年度版)，NUMO-TR-10-11，2011.
- [4] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 26 年度 地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）報告書，2015.
- [5] 勝又尚貴，山品和久，窪田茂，黒崎ひろみ，沖原光信，戸栗智仁：地層処分 地下施設の換気システムの設計方法の検討（その1 平常時の検討），土木学会第 72 回年次講演会 VII-038，2018.
- [6] 建設業労働災害防止協会：新版 ずい道等建設工事における換気技術指針（設計及び粉じん等の測定），2002.
- [7] 日本原子力研究開発機構：平成 19 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 処分システム化学影響評価高度化開発報告，2008.
- [8] 日本原子力研究開発機構：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 処分システム化学影響評価高度化開発報告，2009.
- [9] 日本原子力研究開発機構：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 処分システム化学影響評価高度化開発報告，2010.
- [10] 日本原子力研究開発機構：平成 22 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発報告，2011.
- [11] 日本原子力研究開発機構：平成 23 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 処分システム化学影響評価高度化開発報告書，2012.
- [12] 日本原子力研究開発機構，平成 24 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 処分システム化学影響評価高度化開発報告書，2013.
- [13] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 25 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学科確証技術開発報告書－人工バリア品質／健全性表評価手法の構築－オーバーパック，2014.
- [14] 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 処分システム工学科確証技術開発報告書－人工バリア品質／健全性表評価手法の構築－オーバーパック，2015.
- [15] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学科確証技術開発報告書－人工バリア品質／健全性表評価手法の構築－オーバーパック，2016.
- [16] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 処分

- システム工学科確証技術開発報告書－人工バリア品質／健全性表評価手法の構築－オーバーパック，2017.
- [17] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度 地層処分技術調査等事業 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－遠隔操作技術高度化開発－，2013.
- [18] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－ 分冊 2 地層処分の工学技術，JNC TN1400 99-022，1999.
- [19] 経済産業省：特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（平成 27 年 5 月 22 日閣議決定），経済産業省ホームページ，<http://www.meti.go.jp/press/2015/05/20150522003/20150522003-1.pdf>，2015.
- [20] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY:Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel, NEA/RWM/R (2011)4, Paris, 2011 (full report).
- [21] 高レベル放射性廃棄物および使用済燃料の深地層処分のための可逆性と回収可能性（R&R）NEA R&R プロジェクト(2007 年～2011 年)最終報告書，<https://www.oecd-neo.org/rwm/rr/documents/rr-final-report-gd-j.pdf>，2011.
- [22] IAEA : Geological Disposal of Radioactive Waste Technological Implications for Retrievability IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.19, 2009.
- [23] 原子力発電環境整備機構：地層処分事業の安全確保（2010 年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－，NUMO-TR-11-01，2011.
- [24] 原子力発電環境整備機構：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性－「処分場の概要」の説明資料－，NUMO-TR-04-01，2004.
- [25] 原子力発電環境整備機構：地層処分の要件管理技術，NUMO-TR-10-12，2011.
- [26] 厚生労働省：労働安全衛生規則，平成 29 年 11 月改正.
- [27] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 報告書（第 1 分冊） 地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発－実証試験－，2017.
- [28] 土木学会 岩盤力学委員会：大規模地下空洞の建設・施工管理事例集（H25 年度集約版），2014.
- [29] 日本原子力研究開発機構：瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討（平成 25 年度），JAEA-Technology2014-040，2015.
- [30] 日本原子力研究開発機構：瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討（平成 26 年度），JAEA-Technology2015-039，2016.
- [31] 日本原子力研究開発機構：瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討（平成 27 年度），JAEA-Technology2017-005，2017.
- [32] 国土交通省：http://www.mlit.go.jp/tec/tec_mn_000008.html
- [33] 国土交通省 CIM 導入推進委員会：CIM 導入ガイドライン（案），2017. <http://www.mli>

t.go.jp/tec/it/pdf/guide01.pdf

- [34] 日本原子力研究開発機構：平成 25 年度 地層処分技術調査等事業 使用済燃料直接処分技術開発 報告書.
- [35] 日本原子力研究開発機構：平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 使用済燃料直接処分技術開発 報告書.
- [36] 日本原子力研究開発機構：平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 直接処分等代替処分技術開発報告書.
- [37] 日本原子力研究開発機構：平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 直接処分等代替処分技術開発報告書.
- [38] 国土交通省：プレスリリース，平成 27 年 11 月 6 日．<http://www.mlit.go.jp/common/001108749.pdf>
- [39] 日経コンストラクション：2017.1.23.
- [40] 日経コンストラクション：2017.8.28.
- [41] 鉄道総研：<https://www.rtri.or.jp/events/forum/is5f1i00000032z1-att/D09.pdf>
- [42] 東京メトロ：www.tokyometro.jp/news/images_h/metroNews20170703_68.pdf
- [43] 経済産業省：http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/min_e/portal/shincyaku/VR_Project.pdf
- [44] 内閣府：<http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/index.html>
- [45] 内閣府 政策統括官（科学技術・イノベーション担当）：戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）インフラ維持管理・更新・マネジメント技術 研究開発計画，2017．
http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/7_infura.pdf
- [46] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 25 年度 地層処分回収技術高度化開発 報告書，2014.

第4章 回収可能性維持期間の影響に関する定量的評価

4.1 検討方針と検討項目の概要

本章では、処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持したことによる坑道および周辺地質環境への影響の評価方法を示すために、評価方法の具体化を行う。評価を行う際の検討方針と本年度の定量評価に関する検討項目の概要を以下に述べる。

4.1.1 定量評価の検討方針

評価を行う際の方針として、下記の2つの方針を昨年度に設定している[1]。

➤ 方針1：回収可能性維持状態、回収可能性維持期間の違いを考慮した検討を行う

平成27年度の回収可能性の維持についての検討[2]で示されたように、処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の長期的な安全性（閉鎖後の長期安全性および閉鎖前の作業環境の安全性）に与える影響は、回収可能性を維持する状態および期間を考慮する必要がある。すなわち、長期的な安全性（閉鎖後の長期安全性および閉鎖前の作業環境の安全性）に与える影響の評価は、以下の事項を考慮するものとする。また本方針の概要を図4.1.1-1に示す。

- ・回収可能性維持状態：埋戻し状態の違い（安全性を評価する際の材料・部材）
- ・回収可能性維持期間：時間依存性による物性の変化（劣化）や境界条件（膨潤圧など外力・内力作用）の変化

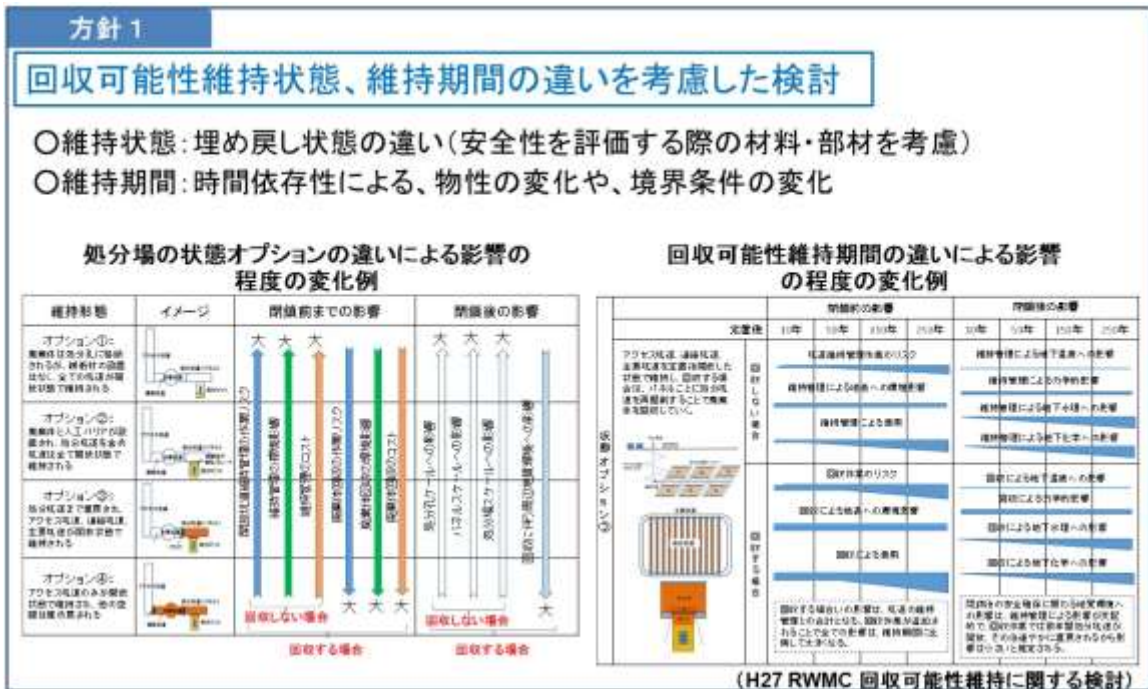


図 4.1.1-1 基本方針1の概要[1]

▶ 方針 2：影響の定量的評価手法と安全性に対する影響低減技術の効果を明確にした検討を行う
 方針 1 で示した検討のポイントを踏まえた上で、THMC（熱的（T）、水理学的（H）、力学的（M）、化学的（C））の影響の観点から、回収可能性を維持したことによる影響を定量的に評価する。THMC を対象とする場合には、THMC の複数の影響評価を同時に実施する連成解析手法を用いる場合と、THMC の各影響について、時間依存性による物性や境界条件の変化の結果を引渡ししながら複数の解析を段階的に実施する手法がある。本検討では、長期的な安全性に対する影響低減技術の効果についても検討するために、それぞれの THMC の影響についての解析を個々に行い、影響要素を抽出することとした。これにより、各影響の度合いが明らかになることから、それぞれの影響に対する低減技術の効果が明確になると考えられる。

また、回収可能性維持状態、期間を考慮した処分場への影響の定量的評価に基づく影響を低減するために用いられる技術は、平成 27 年度の回収可能性の維持についての検討[2]において、閉鎖後の長期安全性、および閉鎖前の作業環境の安全性のための両方に対して、次の二つのアプローチがあると考えられた。

- 回収維持による安全性に対する影響低減技術
- 初期品質向上すること
 - 維持管理、修繕によって品質を保つこと

本方針の概要を図 4.1.1-2 に示す。

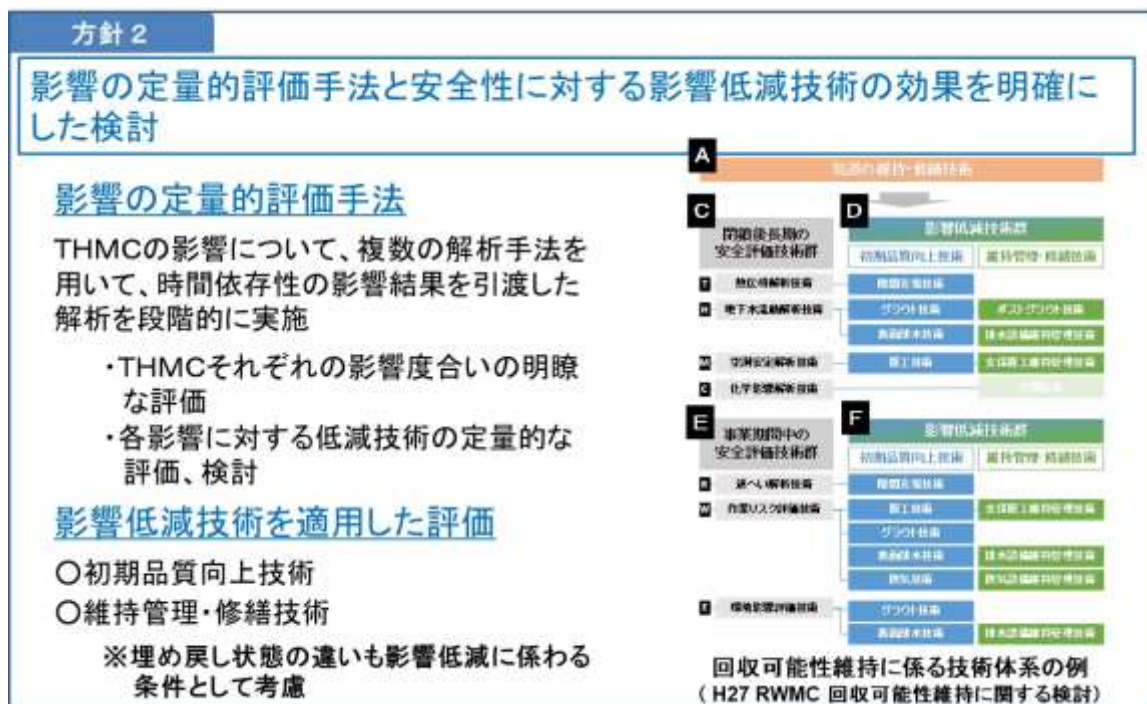


図 4.1.1-2 方針 2 の概要[1]

これらの方針を基に、解析的検討のための具体的な手法や手順の 4 ヶ年計画を策定し、昨年度は、力学的影響の評価方法の検討として、坑道安定性に関する解析手法の検討に着手した[1]。定量的に評価するための条件を検討し、既往の検討の設計例等に基づき[3][4]、前提条件、岩盤や支保工など各材料の構成則を設定し、時間依存性を考慮できる解析手法により坑道安定性の評価方

法の検討を行った。

一方で前章でも述べたように、本年度からは、定量化に必要な技術検討項目を、回収可能性維持に係る今後の更なる議論や技術検討を進める上での“検討のベース”と位置付けたことから、定量化に必要な技術検討項目に対する定量評価の検討も加えることとした。

▶ 方針 3：定量化に必要な技術検討項目に対応した検討

定量化に必要な技術検討項目については、表 3.2.2-6 に示されたように、過去に類似の検討がされているもの、または現在、別の事業で検討しているものがある。従って本事業では、既往の類似検討例が現段階ではなく、今後、定量的評価のための解析技術等の整備が必要となる以下の 6 項目に対して、影響の評価方法を示すために、評価方法の具体化を行う必要がある。また以下の項目に関しては、表 3.3.4-17～表 3.3.4-21 に示す指標案を考慮すると、熱・水理学・力学・化学の複数の影響評価に関わってくることが分かる。

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

なお、「開放坑道の健全性（空間安定性）」、「埋め戻した坑道の再利用時の健全性」については、上述したように、既に昨年度より対応した検討を力学的影響評価方法の検討で始めている[1]。

昨年度示された定量的評価に係る手法の検討の概要[1]を図 4.1.1-3 に示す。方針 1 にて示した通り、回収可能性の維持による閉鎖前の作業環境の安全性、閉鎖後の長期安全性に対する影響に対しては、回収可能性を維持する状態および期間を考慮する必要がある。また、方針 2 にて示した通り、回収可能性を維持した場合の影響を定量的に評価する際には、熱・水理学・力学・化学の各影響について、時間依存性による変化を考慮しながら各々の解析を行い、時間経過に伴う結果を相互に反映させるという方法を用いる。これによって、それぞれの影響の度合いを明らかにし、評価する手法が効率的・効果的であると考ええる。

昨年度の検討では硬岩系と軟岩系の両岩盤を検討対象としていたが、今年度の検討からは硬岩系岩盤は外部機関で検討されることになったため、軟岩系（堆積岩系）についての検討を行うこととなった。そのため、本年度の力学的影響評価では、軟岩系岩盤を対象としたトンネルの変状要因を考慮した評価と、埋戻し材の膨潤圧した場合等の検討や坑道安定性の評価基準の考え方の再整理を行うことにした。また、水理学的影響評価や化学的影響評価でも軟岩系岩盤のみを検討対象とすることとした。定量評価方法の検討に関する 4 ヶ年計画の工程表を図 4.1.1-4 に示す。

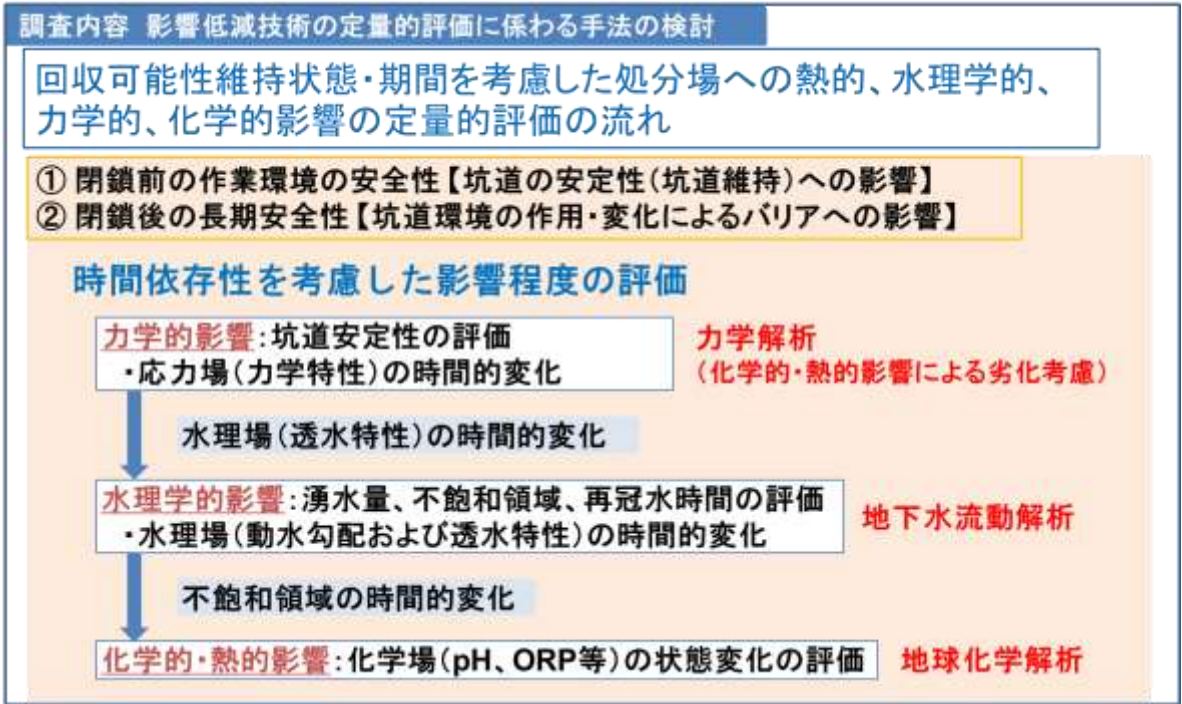


図 4.1.1-3 定量的評価に係る手法の検討の概要[1]

4ヶ年の解析的検討のための具体的な手法、手順

検討項目	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度
力学的影響 : 空洞安定性の評価 応力場(力学特性)の時間的変化	[硬岩系・軟岩系] 坑道の力学的安定性影響評価 (大久保モデルによる力学解析)	埋戻し材の膨潤圧を考慮した場合等の検討、坑道安定性の評価基準の再整理		回収可能性維持期間における具体的な方策の提示
化学的・熱的影響 : コンクリート支保の劣化 : 鋼製支保の腐食	透水特性データ			
水理学的影響 : 湧水量、不飽和領域の評価 水理場(動水勾配および透水特性)の時間的変化		力学解析により得られた透水特性データの評価 湧水量・不飽和評価 (地下水流動解析)	EBS性能維持・坑道環境維持のための対策工評価 (地下水流動解析)	
化学的・熱的影響 : 化学場(pH, ORP等)の状態変化の評価		水理特性データ ニアフィールド状態変化評価 (地球化学解析)	水理特性データ	

図 4.1.1-4 変更した4ヶ年計画の工程表

4.1.2 検討項目の概要

前項の検討方針のもとに実施した本年度の各検討項目の概要を以下に示す。前述した方針で示したように力学的影響、水理学的影響、化学的・熱的影響はそれぞれ独立した解析を行い、関連する要素についての結果を相互に反映する。昨年度はその取り掛かりとして、力学的影響評価を行い、坑道安定性についての評価手法を検討した。力学的評価として影響が大きい要素として抽出されたセメント系部材の劣化等には、地下水の影響（湧水量）の影響を大きい考えられるため、本年度は水理学的影響についての評価手法を検討する。また、水理学的影響により左右されるのが化学的・熱的影響であるため、この検討も必要となる。しかし、化学的な影響は考えられる要素が多いため、考慮すべき要素を絞り込むために、本年度は、調査を行った。

(1) 回収可能性維持期間の影響評価方法の検討（4.2 節）

1) 力学的影響評価方法の検討（4.2.1 項）

昨年度の検討により課題となった事項について検討を進める。検討内容は、埋戻し材の膨潤圧を設定した場合や埋戻し材の坑道変形に対する支持効果に関する検討、各材料の物性変化特性の条件を変えた検討等である。検討にあたっては、昨年度の坑道安定性の解析手法の妥当性について文献調査による確認を行う。また、昨年度設定した坑道安定性の評価基準について考え方を再整理する。

2) 水理学的影響評価方法の検討（4.2.2 項）

回収可能性維持期間を考慮した地下水流動解析により、セメント系部材の劣化等の影響に関連する坑道の湧水量の時間変化や、化学的な評価に影響が大きいと考えられる不飽和領域の発生、および閉鎖後の再冠水に要する時間に着目した評価を実施する。また、回収可能性の維持による閉鎖前の作業環境の安全性、閉鎖後の長期安全性の観点から影響低減技術の効果について検討する。

3) 化学的・熱的影響評価方法の検討（4.2.3 項）

化学的・熱的影響の評価に関する現状技術について把握し、さらに検討要素を絞り込むための、既往研究の調査を行い、本検討において適用可能な評価方法、検討手順について検討する。

(2) 回収可能性維持期間に係る情報の整理（4.3 節）

4.2 節の検討結果を踏まえて、回収可能性維持期間の決定のために必要となる情報を整理する。

(3) 課題の抽出（4.4 節）

4.2 節および 4.3 節の検討結果を踏まえて、回収可能性維持期間の安全性に対する影響に関しての評価を行うことによる課題を抽出する。

4.2 回収可能性維持期間の影響評価方法の検討

4.2.1 力学的影響評価方法の検討

昨年度の力学的影響評価の検討では、第2次取りまとめ[3]やNUMOによる処分場の設計例[4]等に基づき、前提条件を設定し、岩盤や支保工など各材料の構成則を設定し、坑道安定性を解析的に評価している。力学解析は、回収可能性維持期間・状態を考慮して、時間依存性を考慮できる解析手法を用いた試行的な解析を行った。その結果、処分坑道の埋戻しの有無が坑道安定性に与える影響には、ほとんど差が見られないことが分かった。そして、処分坑道の埋戻し材の有無が坑道の安定性に与える影響に関して、埋戻し材の膨潤圧や坑道変形に対する支持効果について今後検討が必要であることが示されている[1]。

本年度は、上記に示された課題を考慮して、埋戻し材の膨潤圧を設定した場合や埋戻し材の坑道変形に対する支持効果に関する検討、各材料の物性変化特性の条件を変えた検討等を行う。昨年度の力学的影響評価の検討では、岩盤の構成則に大久保ら[5]のコンプライアンス可変型モデルを用いている。これに対して、解析の妥当性の確認を必要があったことから、本年度は、コンプライアンス可変型モデルを用いた掘削解析と現地計測を比較して妥当性確認を行った例について、文献調査を行う。

さらに、昨年度の検討では、坑道安定性の保持期間については、岩盤の最大せん断ひずみや吹付けコンクリートの応力によって評価していた。この評価基準は、従来から空洞安定設計時に使っていたものを踏襲している。一方、回収可能性維持期間は、従来の土木構造物の設計で考えていた期間よりも長いことも想定されることから、より長期間に対応した評価基準を用いる必要もあると考えられる。本年度は、長期間に対応した坑道安定性の評価基準について、既往の研究やトンネルの維持管理に用いている指標等について整理することで、解析や地下施設への適用性について検討する。

(1) 埋戻し材の膨潤圧を設定した検討

1) 目的

昨年度の検討では、岩盤条件、処分坑道の断面形状、および回収可能性維持の状態オプションを組合せてケースを設定している。その状態オプションの一つとして、処分坑道を埋戻し材で埋戻す場合を考慮している。埋戻し材には緩衝材と同様にベントナイトが含まれていることから、不飽和状態から地下水によって飽和が進行すると、水分量に応じて剛性が低下することで埋戻し材による周辺岩盤への拘束が減り、周辺岩盤の長期的な変形挙動に影響を与えられと考えられた[1]。

一方、埋戻し材のベントナイトは、地下水に触れると膨潤圧が発生し、この膨潤圧によって周辺岩盤への拘束が増えることも考えられる。昨年度の検討では、この埋戻し材から生じる膨潤圧を考慮していなかった。

ここでは、埋戻し材の膨潤圧を考慮した場合、坑道の周辺岩盤の長期的な変形挙動にどのような影響を与えるのかを確認することを目的とする。そして、昨年度の検討における新第三紀堆積岩、横置き、状態オプション②（PEM 設置後、処分坑道まで埋戻し）のケース 8（以下、「昨年度ケース 8」と称する）に対して、埋戻し材の膨潤圧も考慮した場合の解析を行うことにした。

2) 解析フローと解析対象期間

ニアフィールドの力学的影響現象にシナリオに基づいた解析のフローを図 4.2.1-1 に示す[1]。

昨年度の検討と同様に、岩盤を含めた力学的影響評価を行う場合、 $t=0y$ において掘削により再配分された応力状態を、初期状態とする必要がある。したがって、長期力学解析に先立って、人工バリア定置前の坑道の掘削解析を行い、得られた応力状態を長期力学解析における初期状態とする。

処分坑道の掘削後から周辺岩盤のクリープ変形は始まり、それが続くものとする。支保工は坑道掘削直後に設置し、設置直後から劣化は始まるものとする。そして、設置後 400 年まで劣化は進行し、その後は剛性が一定となるものとする。緩衝材、オーバーパック、埋戻し材は掘削後 10 年後に設置するものとして、その直後から再冠水が始まり、設置後 100 年間 ($t=110y$ 時) で飽和が完了して、剛性が一定になるものとする。

埋戻し材の膨潤圧は、埋戻し材の設置直後 ($t=10y$ 時) から作用するものとして、経時変化はしないものとする。

解析対象期間は、昨年度の検討と同様に、掘削開始から 10,000 年間とする。

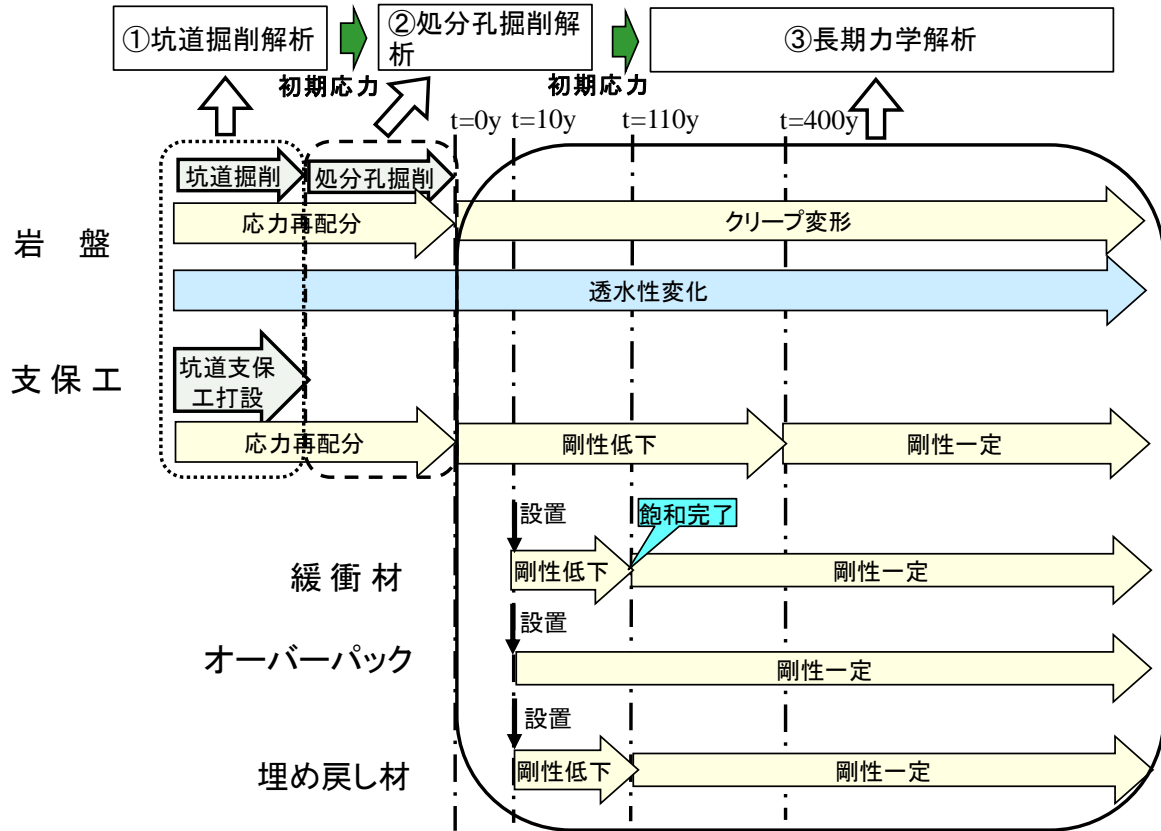


図 4.2.1-1 力学的影響現象の解析フロー

3) 構成則と物性値

a 岩盤

岩盤の長期力学解析に用いる構成則には、大久保ら[5]により考案されたコンプライアンス可変型モデルを用いる。

大久保らによると、コンプライアンスの増加速度は、そのときの軸差応力 $\Delta\sigma(=\sigma_1-\sigma_3)$ の n 乗に比例する。また、コンプライアンスの増加速度は、 λ の m 乗に比例して加速度的に大きくなると考え、基礎方程式を次のように仮定している。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a \cdot (\Delta\sigma^*)^n (\lambda^*)^m \quad \text{式 4.2.1-1}$$

$$a = \frac{1}{t_0} \left(\frac{m}{n_0 + 1} \right)^{\frac{m}{(n_0 - m + 1)}} \quad \text{式 4.2.1-2}$$

$$\Delta\varepsilon^* = \lambda^* \Delta\sigma^* \quad \text{式 4.2.1-3}$$

ここに、 $\lambda^*(=\lambda/\lambda_0)$ は基準化されたコンプライアンス、 $\Delta\sigma^*(=\Delta\sigma/\sigma_0)$ は基準化された軸差応力、

$\Delta\varepsilon^*$ ($=\Delta\varepsilon/\Delta\varepsilon_0$) は基準化された軸差ひずみ、 λ_0 は初期コンプライアンス、 $\Delta\sigma_0$ は破壊時の軸差応力、また、 $\Delta\varepsilon_0 = \lambda_0 \Delta\sigma_0$ であり、 t_0 はひずみ制御による圧縮試験においてひずみが $\Delta\varepsilon_0$ となるまでの所要時間を表している、大久保らは $t_0 = 120(\text{s})$ を標準としている。さらに、 m と n_0 とは岩盤のクリープ挙動を支配する物性値である。

n は、拘束圧の増加に伴い破壊強度 $\Delta\sigma_0$ が増加すると、次式にしたがって増加する。

$$n = \frac{\Delta\sigma_0}{\sigma_c} n_0 \quad \text{式 4.2.1-4}$$

ここに、 n_0 は一軸圧縮応力下での n の値である。

岩盤を対象とした破壊基準には、いくつか提案されている。本検討では、Mohr-Coulomb の破壊基準を用いた。Mohr-Coulomb の破壊基準は次式で表される。

$$\Delta\sigma_0 = \frac{2C \cos\phi}{1 - \sin\phi} + \frac{2\sigma_3 \sin\phi}{1 - \sin\phi} \quad \text{式 4.2.1-5}$$

ここに、 C は粘着力、 ϕ は内部摩擦角である。

また、破壊の進行に伴うポアソン比 ν の増加を次式のように仮定している。

$$\nu = 0.5 - \frac{0.5 - \nu_0}{\lambda^*} \quad \text{式 4.2.1-6}$$

新第三紀堆積岩の解析用の物性値を表 4.2.1-1 に示す。また、クリープ挙動を支配する物性値を表 4.2.1-2 に示す[1]。

表 4.2.1-1 新第三紀堆積岩の解析用物性値

項目	単位	
単位体積重量	kN/m ³	21.6
初期ヤング率	MPa	3,500
初期ポアソン比	—	0.3
粘着力	MPa	3
内部摩擦角	deg	28
限界せん断ひずみ (平均)	%	0.57
限界せん断ひずみ (上限)	%	1.34
一軸圧縮強度	MPa	15

表 4.2.1-2 クリープ挙動を支配する物性値

物性区分 (略称)	新第三紀堆積岩
n_0	20
m	5

b 支保工

昨年度の検討と同様に、支保工として吹付けコンクリートと鋼製支保工を取り扱う。吹付けコンクリートの力学特性の経時変化としてカルシウム成分の溶脱を考慮する。吹付けコンクリートの溶脱は支保工設置直後から進むものとして、400年で溶脱が完了するものとする。

吹付けコンクリートの初期ヤング率を 29,600MPa とし、溶脱完了後のヤング率は初期ヤング率の 1/10 になるものとした。また、ポアソン比については、初期値は 0.2 とし、溶脱完了後には 0.45 になるものとした。さらに、溶脱進行中の物性値については線形補間することにし、溶脱完了以降は、一定値をとるものとした。吹付けコンクリートの物性値の経時変化を図 4.2.1-2 に示す。

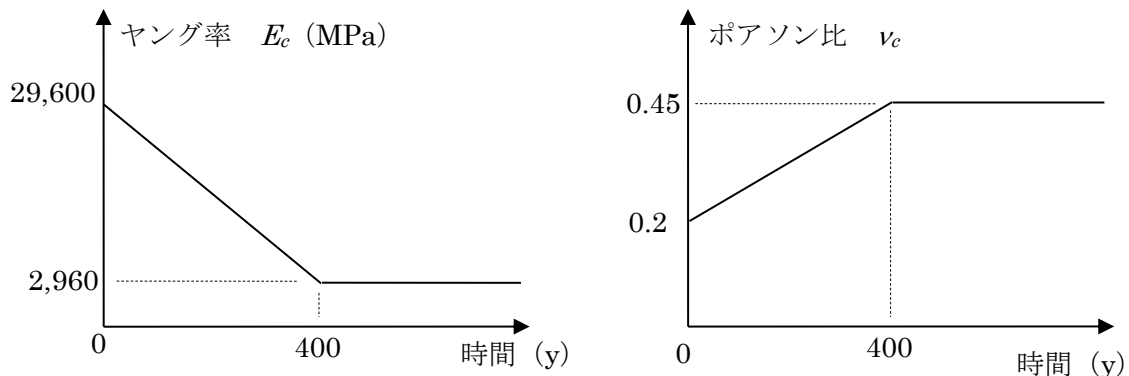


図 4.2.1-2 吹付けコンクリートの物性値の経時変化

c 緩衝材と埋戻し材

昨年度の検討と同様に、緩衝材の力学特性の経時変化として緩衝材の飽和の進行を考慮する。緩衝材の飽和は緩衝材設置直後から進むものとして、再冠水期間を 100 年と仮定することで、100 年後には飽和が完了するものとする。

緩衝材の初期ヤング率を 39MPa とし、飽和完了後のヤング率は 3MPa とした。また、ポアソン比については、含水状態にかかわらず 0.4 とした[1]。さらに、飽和が進行中の物性値については線形補間して、飽和完了後は一定値をとるものと想定した。

埋戻し材も緩衝材と同じ力学特性を持つ線形弾性体としてモデル化した。緩衝材と埋戻し材の物性値の経時変化を図 4.2.1-3 に示す。なお、埋戻し材の膨潤圧の設定については、後述に示す。

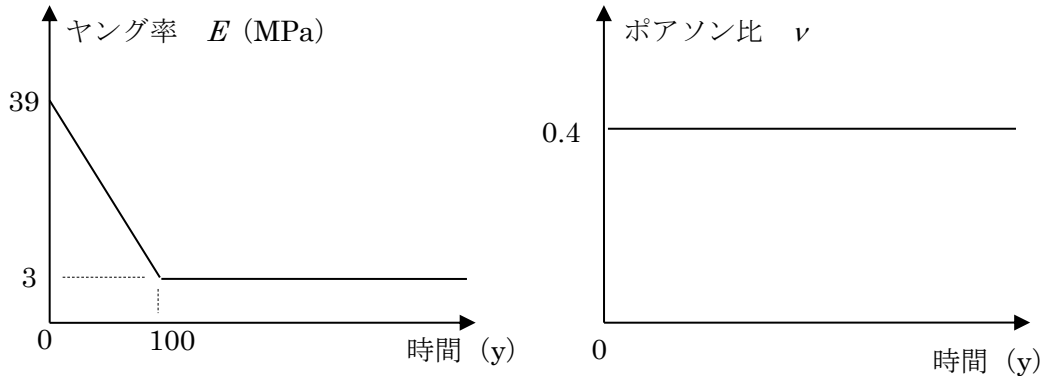


図 4.2.1-3 緩衝材と埋戻し材の物性値の経時変化

d オーバーパック

オーバーパックは直径 820mm の円形の線形弾性体としてモデル化した。昨年度と同様に、物性値は、

- ヤング率 : $E_s = 2.1 \times 10^5$ (MPa)
- ポアソン比 : $\nu_s = 0.3$

とし、腐食の影響については考慮しない。また、物性値は一定値をとるものとした[1]。

4) 埋戻し材の膨潤圧の設定

埋戻し材の膨潤圧を設定するためには、ベントナイトの有効粘土密度等を定める必要がある。ここでは、NUMO の公開資料に示された埋戻し材の仕様[6]を参考にすることにした。公開資料に示された埋戻し材の仕様例を図 4.2.1-4 に示す。この図によると、高レベル放射性廃棄物の処分坑道で横置き方式の場合、埋戻し材の有効粘土密度は、 1.15Mg/m^3 であることが示されている。

菊地・棚井[7]は、「第2次取りまとめ」[3]にて例示された埋戻し材の仕様に対して、浸潤させる水の水質をパラメータとして膨潤圧の経時変化の測定を行っている。この試験では、浸潤させる水に、蒸留水、人工海水、NaCl 溶液、および幌延地下水を用いている。有効粘土密度 1.165Mg/m^3 の場合の膨潤圧の経時変化を図 4.2.1-5 に示す。この図によると、水が浸潤を始めると、その直後から膨潤圧が発生し始めている。そして、蒸留水の場合、経過時間 10 時間程度で膨潤圧が平衡状態に達していることが分かる。一方、幌延地下水の場合、平衡に達する時間は遅くなるが、それでも 200 時間程度で平衡に達している。本検討において対象としている時間の範囲からは、埋戻し材の膨潤圧は瞬間的に平衡状態に達するものとみなすことができる。したがって、膨潤圧の経時変化は考慮しないものとする。

さらに、菊池・棚井[7]は、有効粘土密度と平衡膨潤圧の関係を降水系地下水条件（蒸留水）と海水系地下水条件に分けて整理している（図 4.2.1-6 参照）。ここでは、地下水の水質条件を降水系とすると、有効粘土密度 $[\text{Mg/m}^3]$ と平衡膨潤圧 $[\text{MPa}]$ の関係は、次式のように示されている。

$$\sigma = \exp(3.94\rho_b^3 - 13.71\rho_b^2 + 18.06\rho_b - 9.60) \quad [0.50 \leq \rho_b \leq 2.00] \quad \text{式 4.2.1-7}$$

式 4.2.1-7 より、有効粘土密度を 1.15Mg/m^3 とすると、平衡膨潤圧は 0.38MPa となる。これ以降、膨潤圧の経時変化は考慮しないので、この平衡膨潤圧を単に膨潤圧と称することにする。

解析上、埋戻し材の膨潤圧は、埋戻し材設置と同時に支保工とインバートの内側に一定の分布荷重、かつ、面に垂直な方向に作用させる（図 4.2.1-7 参照）。

埋め戻し材・プラグの設計(埋め戻し材の仕様の設定例)

No.	仕様	対象坑道	施工方法
1	配合:ベントナイト/掘削土 = 15%/85% 乾燥密度: 1.8 Mg/m^3 有効粘土密度: 0.64 Mg/m^3	処分坑道(HLW竖置き方式)、処分坑道(TRU)、連絡坑道、取付坑道、主要坑道、アクセス斜坑、アクセス立坑	撒き出し・締固め工法
2	配合:ベントナイト/掘削土 = 50%/50% 乾燥密度: 1.6 Mg/m^3 有効粘土密度: 1.15 Mg/m^3	処分坑道(HLW横置き方式)	吹付け工法

■仕様 No.1

- 対象とする坑道で作業空間の放射線遮蔽が確保されていることから、施工機械の運転など埋め戻し作業を直接人間が行うことが可能であり、幅広い実績と効率性から「撒き出し・締固め工法」を採用。
- 「膨出抑制」の観点から最も低圧縮になる(乾燥密度が高くなる)配合条件を設定。

■仕様 No.2

- 緩衝材による放射線遮蔽効果が期待できるが、安全性の高い放射線防護の観点から、埋め戻し作業は遠隔操作による無人化施工で行うことを想定。PEM容器と坑道間の隙間が比較的大きいこと、砂分を多く含む場合の配合や密度に対して適用範囲の広い「吹付け工法」を採用。
- 遠隔操作による施工を想定することから、施工時の隙間充填性に対する品質の余裕を見込んで、直接施工による仕様No.1の場合よりも「膨潤性」と「低透水性」の高い仕様を設定。



撒き出し・締固め工法による坑道の埋め戻し作業のイメージ(竖置き方式)



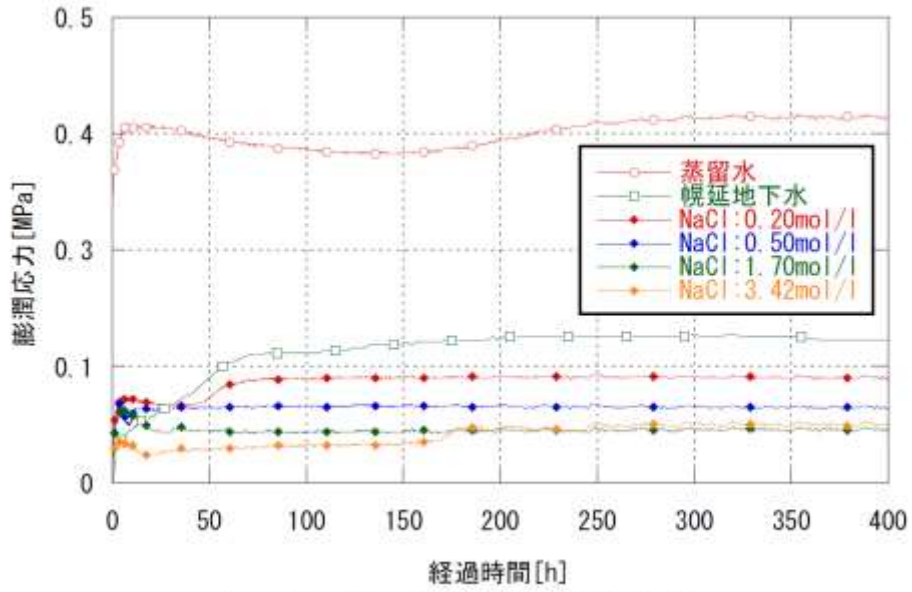
吹付け工法による坑道の埋め戻し作業のイメージ(横置き方式)

NUMO

本スライドの内容は、最終的に作成する包括的技術報告書において変更される可能性があります

P.4-32

図 4.2.1-4 NUMO による埋戻し材の配合[6]



(a) 有効粘土密度 1.165[Mg/m³]

図 4.2.1-5 膨潤圧の経時変化[7]

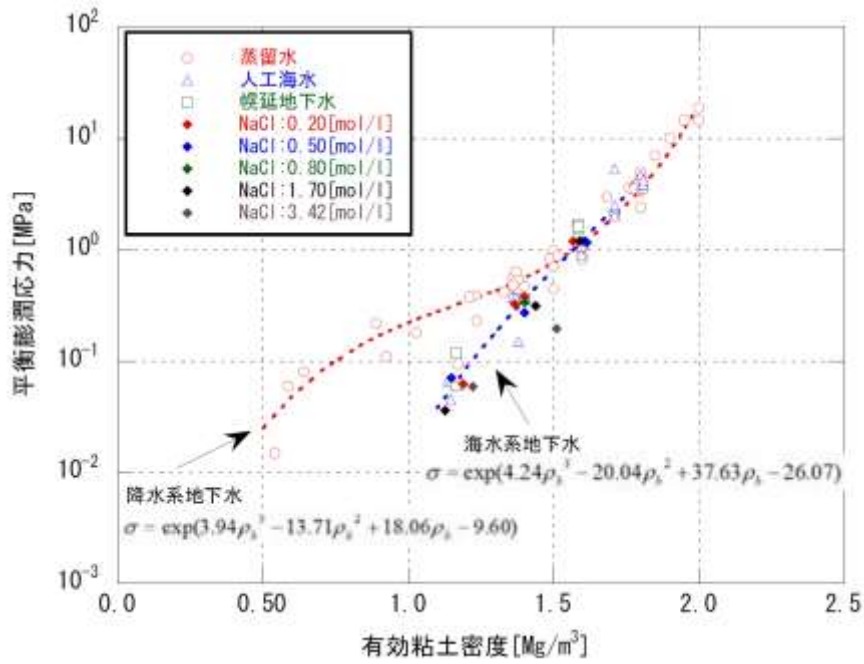


図 4.2.1-6 有効粘土密度と平衡膨潤圧の関係[7]

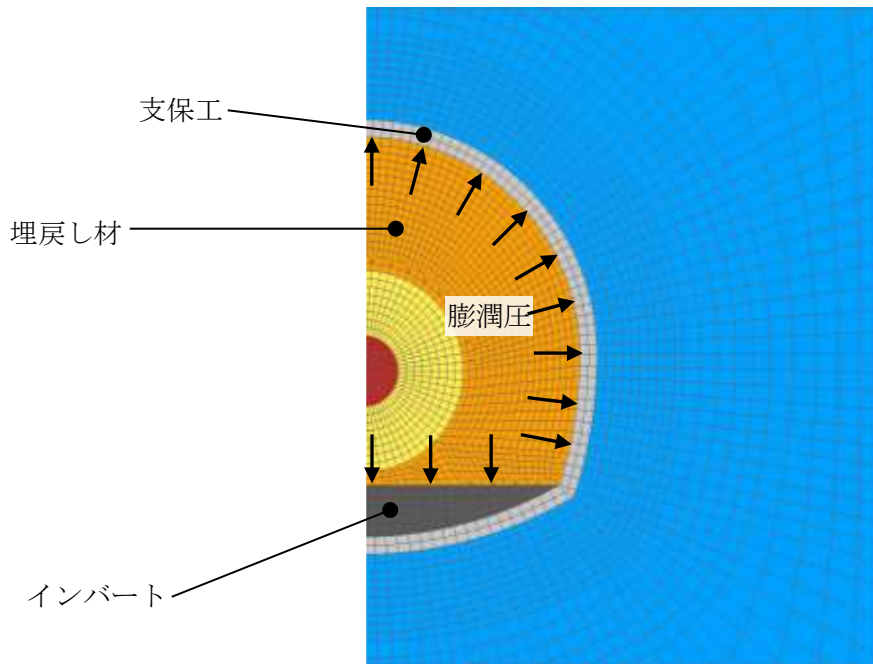


図 4.2.1-7 膨潤圧の作用位置と方向

5) 解析モデル

新第三紀堆積岩一横置き方式の処分坑道内部の各材料の形状、寸法を図 4.2.1-8 に示す。支保工は、吹付けコンクリートと鋼製支保工で構成される。

解析モデルを図 4.2.1-9に示す。要素は2次元の平面ひずみ要素を用いている。要素数は3,724、節点数は 3,847 である。支保工については吹付けコンクリートも平面ひずみ要素としている。境界条件は側面および上下面は、それぞれの面の法線方向の変位を固定とした。

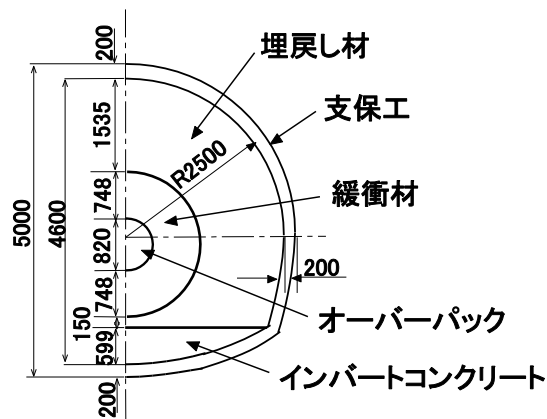


図 4.2.1-8 新第三紀堆積岩一横置き方式の処分坑道内部の各材料の形状と寸法

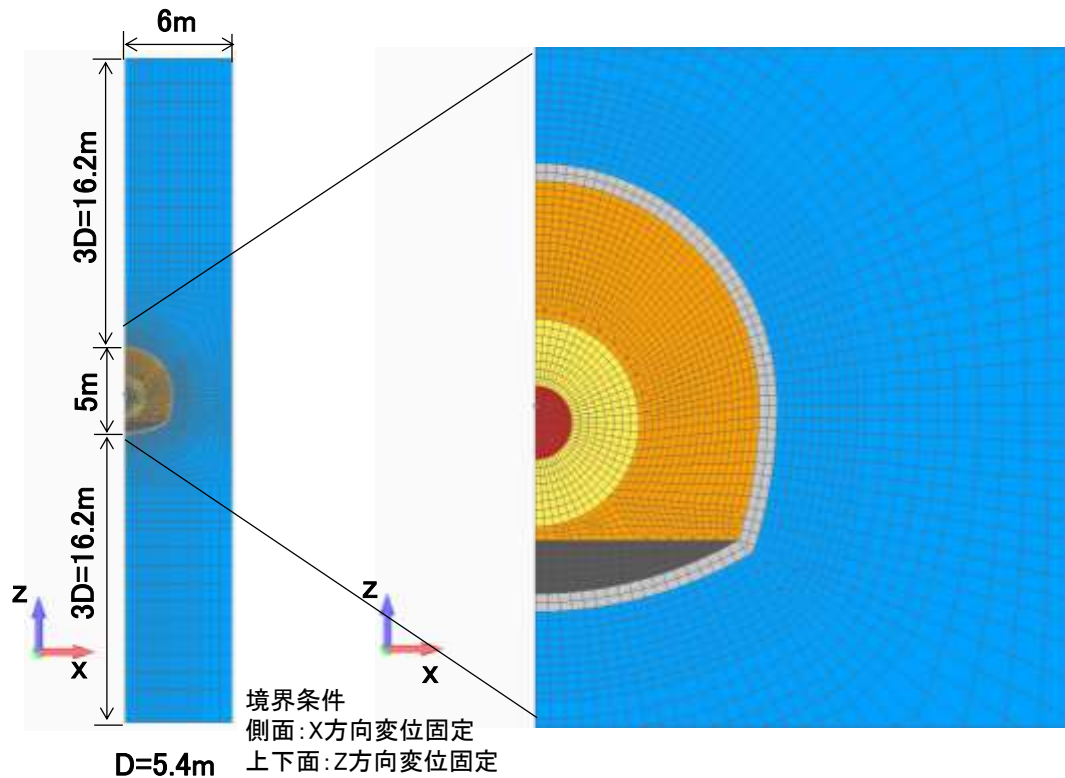


図 4.2.1-9 新第三紀堆積岩—横置き方式の解析モデル

6) 解析結果

解析結果として、10年後、100年後、1000年後、1万年後の処分坑道周辺岩盤における局所安全率の分布を図 4.2.1-10～図 4.2.1-13 に示す。また、周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布を図 4.2.1-14～図 4.2.1-17 に示す。さらに、周辺岩盤の弾性係数の変化の分布を図 4.2.1-18～図 4.2.1-21 に示す。弾性係数の変化の値は、弾性係数 E を初期弾性係数 E_0 で除した値とした。なお、経過時間 0～10 年は埋戻し材は存在しないことから、表示を省略している。

壁面近傍の天端、肩部、側部、脚部、底部の各要素の弾性係数の経時変化を図 4.2.1-22 と図 4.2.1-23 に示す。

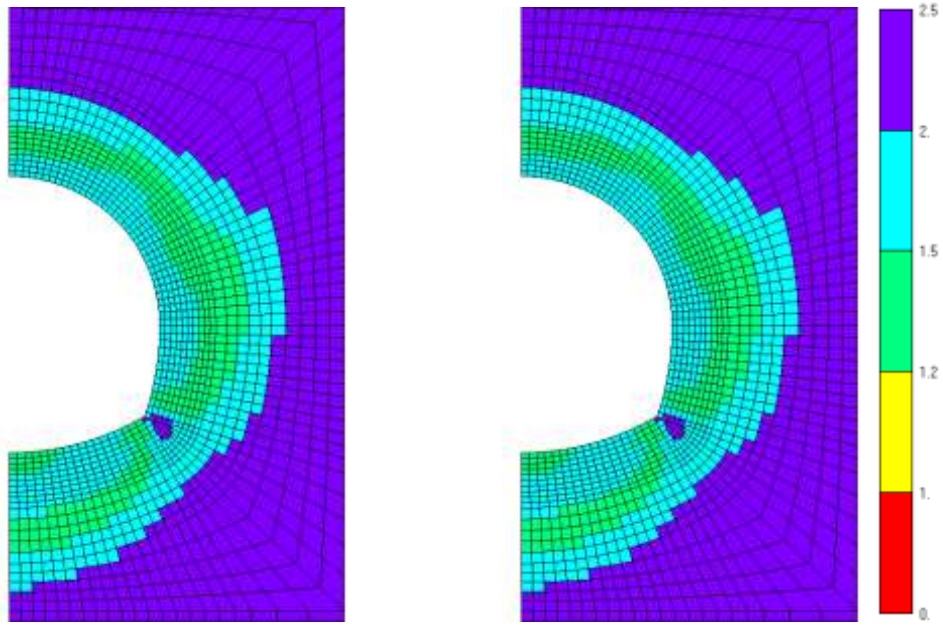
100 年後以降の局所安全率の分布、最大せん断ひずみの分布、弾性係数の変化の分布において、昨年度ケース 8 と膨潤圧を考慮した本解析結果を比較すると顕著な違いは見られないが、膨潤圧を考慮した本解析結果の局所安全率の低い領域、最大せん断ひずみの高い領域、無次元化弾性係数の低い領域はいずれも昨年度ケース 8 に比べてその広がり若干小さくなり、膨潤圧の作用によりクリープ変形が抑制されたことによる影響が僅かではあるが現れている。

坑道安定性の保持期間について、昨年度の検討と同様、吹付けコンクリート応力と岩盤の最大せん断ひずみの経時変化を図化した。

吹付けコンクリートについては、昨年度と同様、天端、肩部、側部、脚部、底部の 5 箇所の要素に着目した。吹付けコンクリートにおける着目要素を図 4.2.1-24 に示す。この着目要素における昨年度ケース 8 の吹付けコンクリートの応力の経時変化を図 4.2.1-25 に、膨潤圧を考慮した本解析結果を図 4.2.1-26 に示す。ここで吹付けコンクリートの応力度の評価基準は、昨年度と同様、

初期の設計基準強度 36MPa から時間経過に伴う強度低下を考慮した値を判定指標とした。着目要素における吹付けコンクリート応力と経時変化を考慮した設計基準強度を比較すると、昨年度ケース 8 では、掘削後 142 年後に肩部で最初に設計基準強度を超えているのに対して、膨潤圧を考慮した本解析結果では、掘削後 189 年後に肩部で最初に設計基準強度を超えている。この結果より、支保工の応力度で評価した場合の坑道安定性の保持期間は膨潤圧の作用により 50 年程度延長されると考えられる。

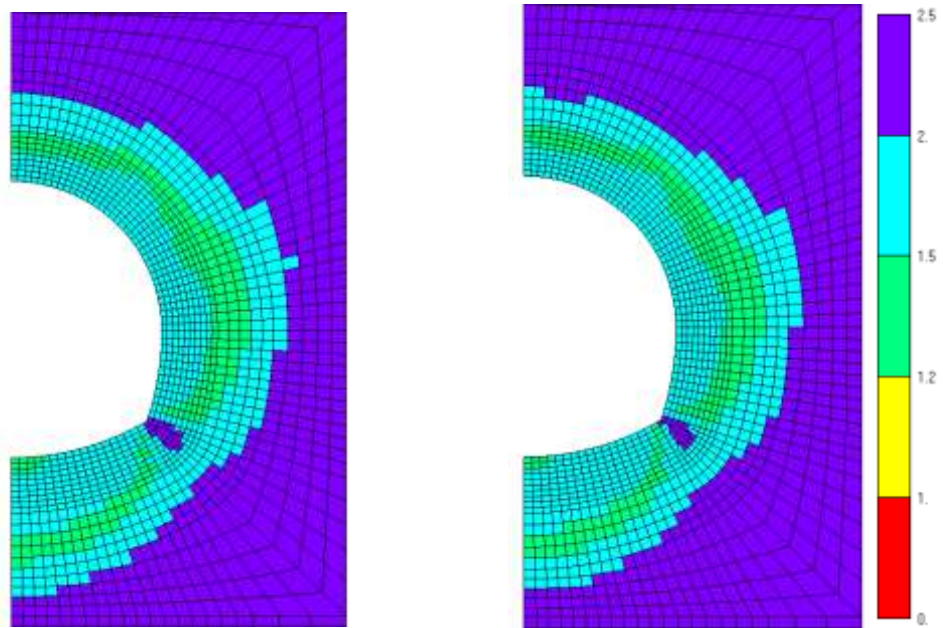
壁面近傍で最大せん断ひずみが限界せん断ひずみ（上限）の $\gamma_{\max}=1.340\%$ を超える肩部の着目要素を図 4.2.1-27 に示す。この着目要素における最大せん断ひずみの経時変化を図 4.2.1-28 に示す。ここで、限界せん断ひずみ（上限）は、昨年度と同様、1.340%を用いた。このひずみ値と解析結果から得られる最大せん断ひずみを比較した。昨年度ケース 8 の膨潤圧無しでは、肩部の最大せん断ひずみが掘削後 252 年後に $\gamma_{\max}=1.340\%$ を超えているのに対して、膨潤圧を考慮した本解析結果では、掘削後 304 年後に肩部の最大せん断ひずみが $\gamma_{\max}=1.340\%$ を超えている。この結果より、岩盤の最大せん断ひずみで評価した場合においても、坑道安定性の保持期間は膨潤圧の作用により 20%程度（50 年程度）延長されると考えられる。



(a) 膨潤圧なし

(b) 膨潤圧あり

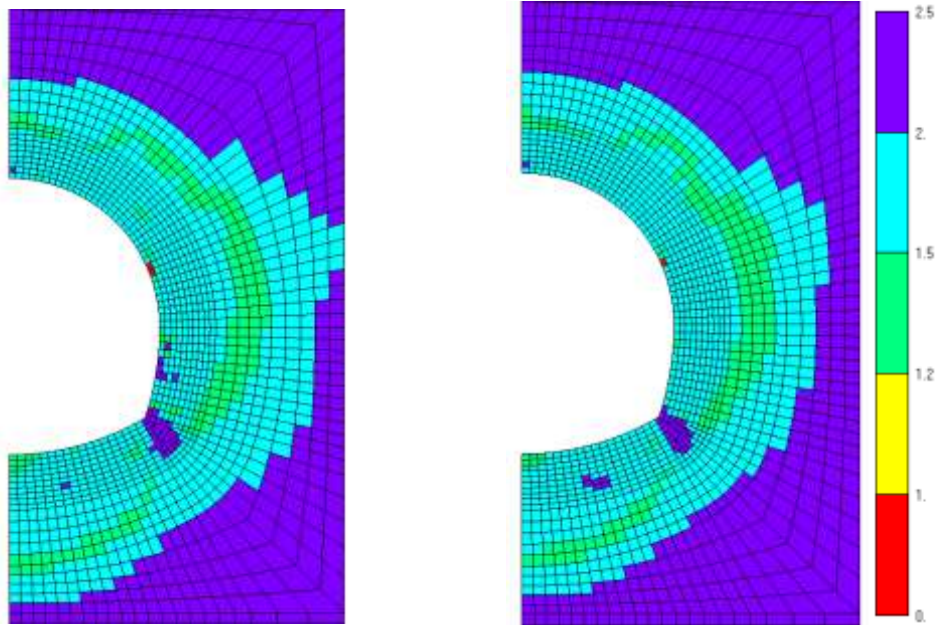
図 4.2.1-10 経過時間 10 年後の局所安全率の分布



(a) 膨潤圧なし

(b) 膨潤圧あり

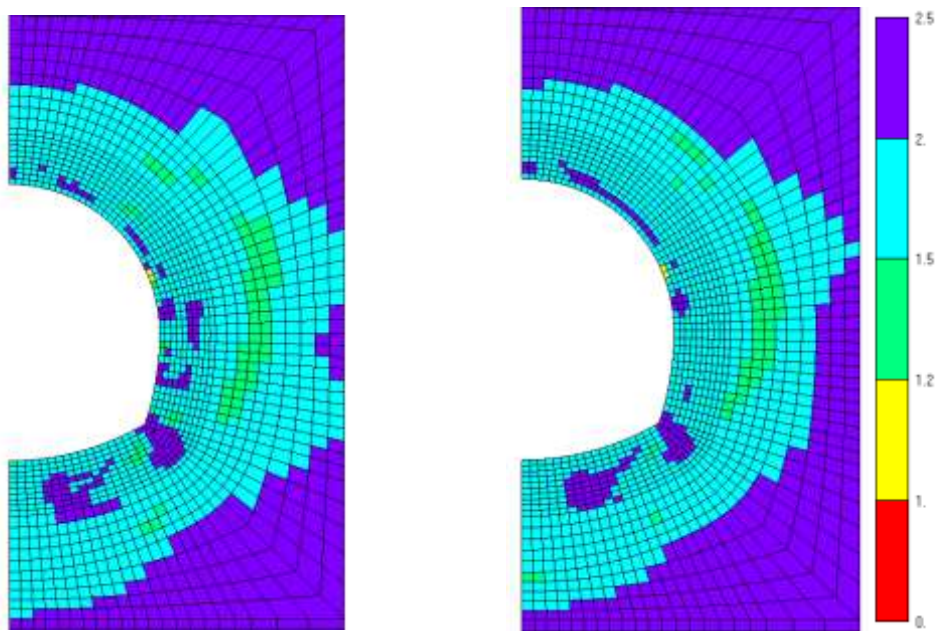
図 4.2.1-11 経過時間 100 年後の局所安全率の分布



(a) 膨潤圧なし

(b) 膨潤圧あり

図 4.2.1-12 経過時間 1,000 年後の局所安全率の分布



(a) 膨潤圧なし

(b) 膨潤圧あり

図 4.2.1-13 経過時間 10,000 年後の局所安全率の分布

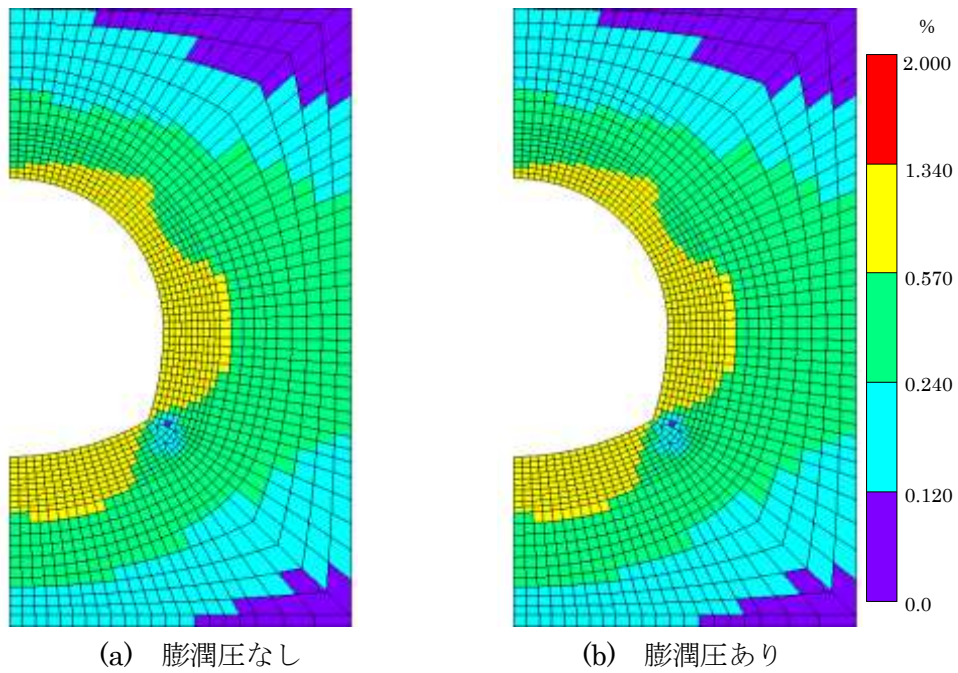


図 4.2.1-14 経過時間 10 年後の最大せん断ひずみの分布

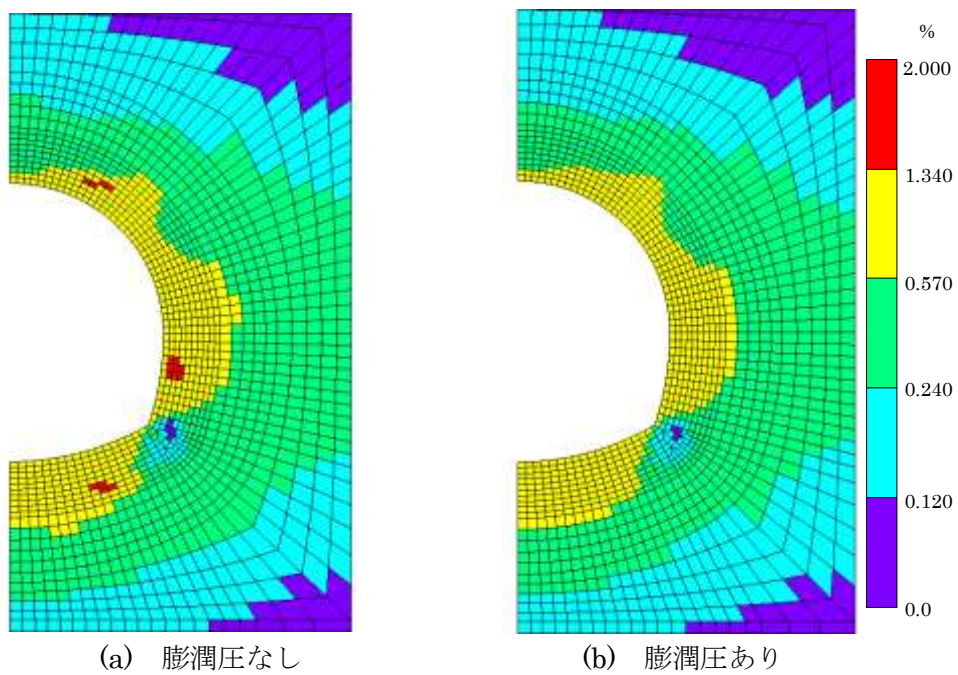


図 4.2.1-15 経過時間 100 年後の最大せん断ひずみの分布

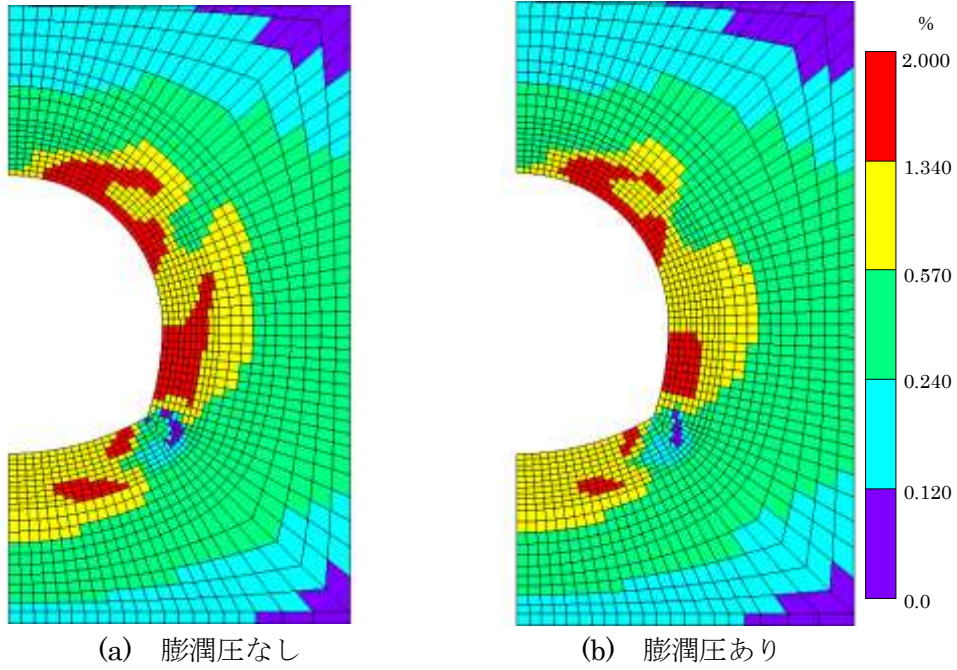


図 4.2.1-16 経過時間 1,000 年後の最大せん断ひずみの分布

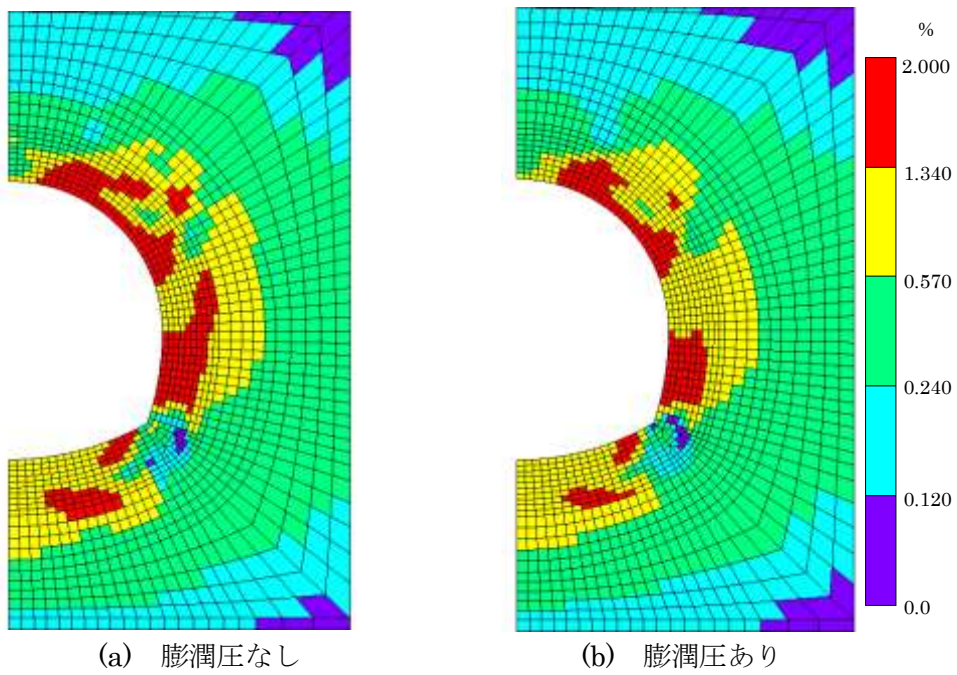


図 4.2.1-17 経過時間 10,000 年後の最大せん断ひずみの分布

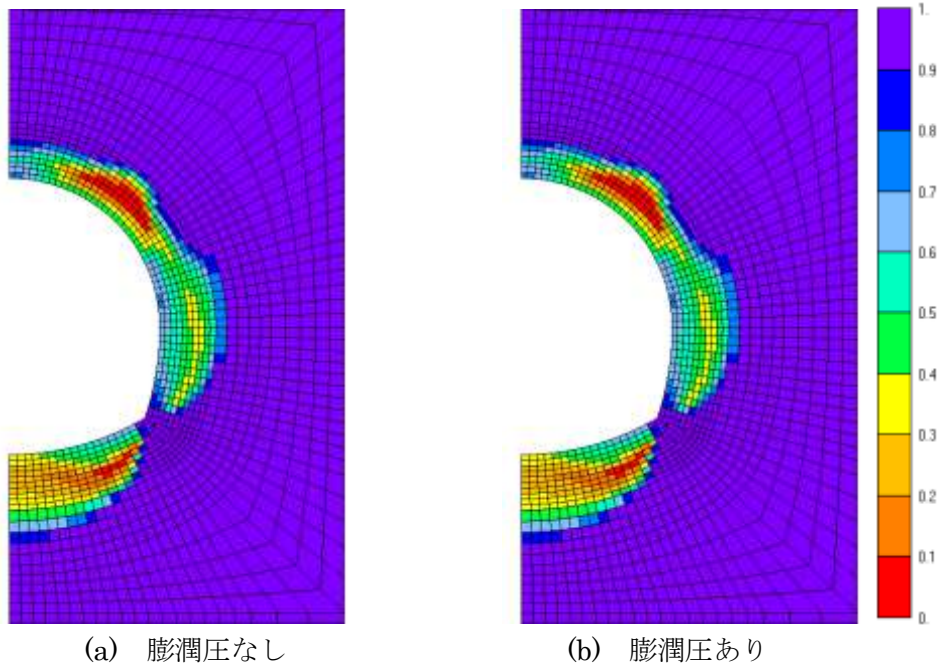


図 4.2.1-18 経過時間 10 年後の周辺岩盤の弾性係数の変化の分布

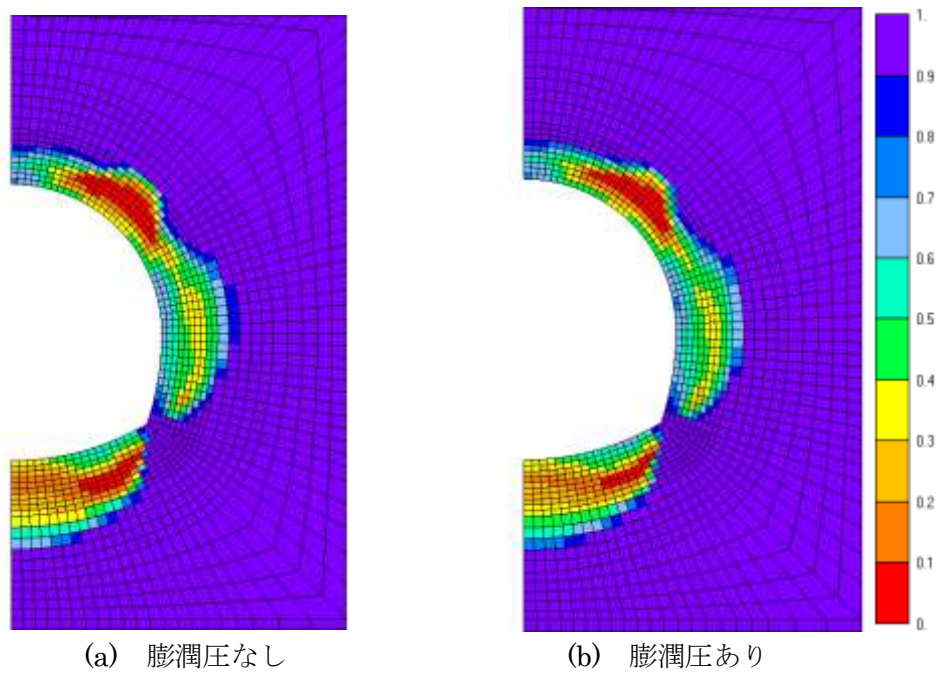


図 4.2.1-19 経過時間 100 年後の周辺岩盤の弾性係数の変化の分布

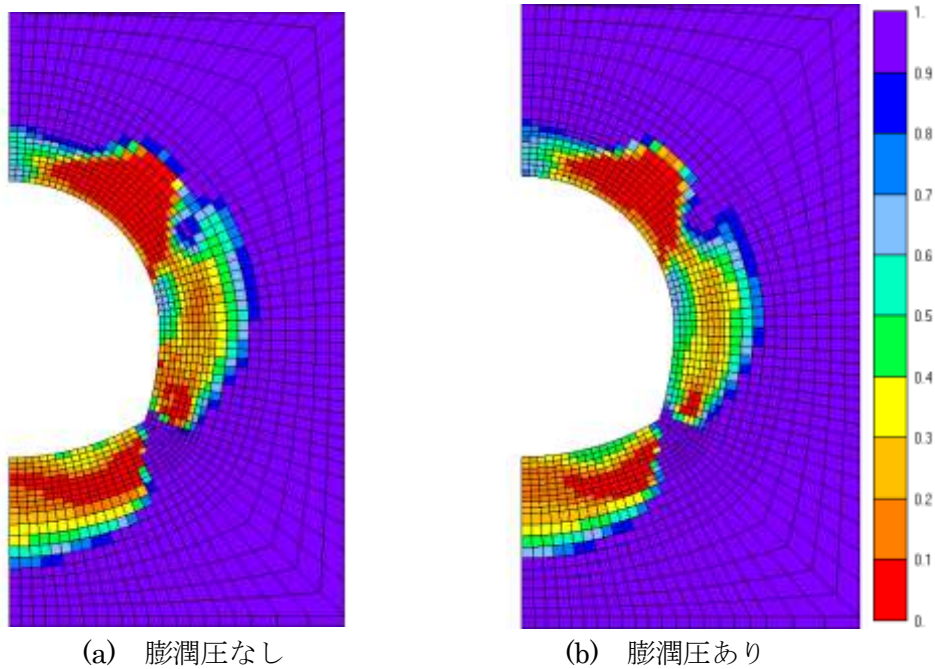


図 4.2.1-20 経過時間 1,000 年後の周辺岩盤の弾性係数の変化の分布

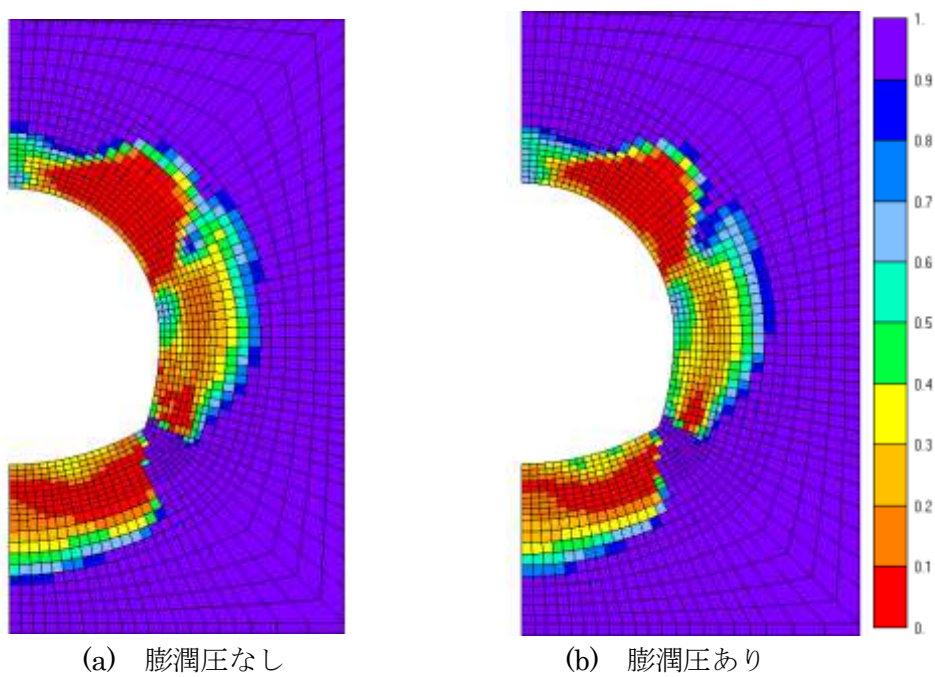
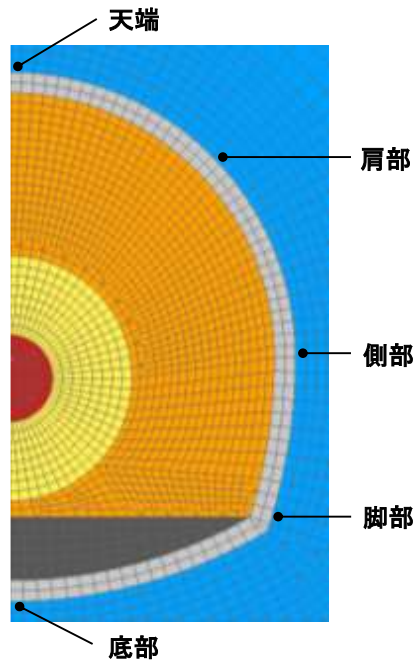


図 4.2.1-21 経過時間 10,000 年後の周辺岩盤の弾性係数の変化の分布



着目した壁面近傍の要素

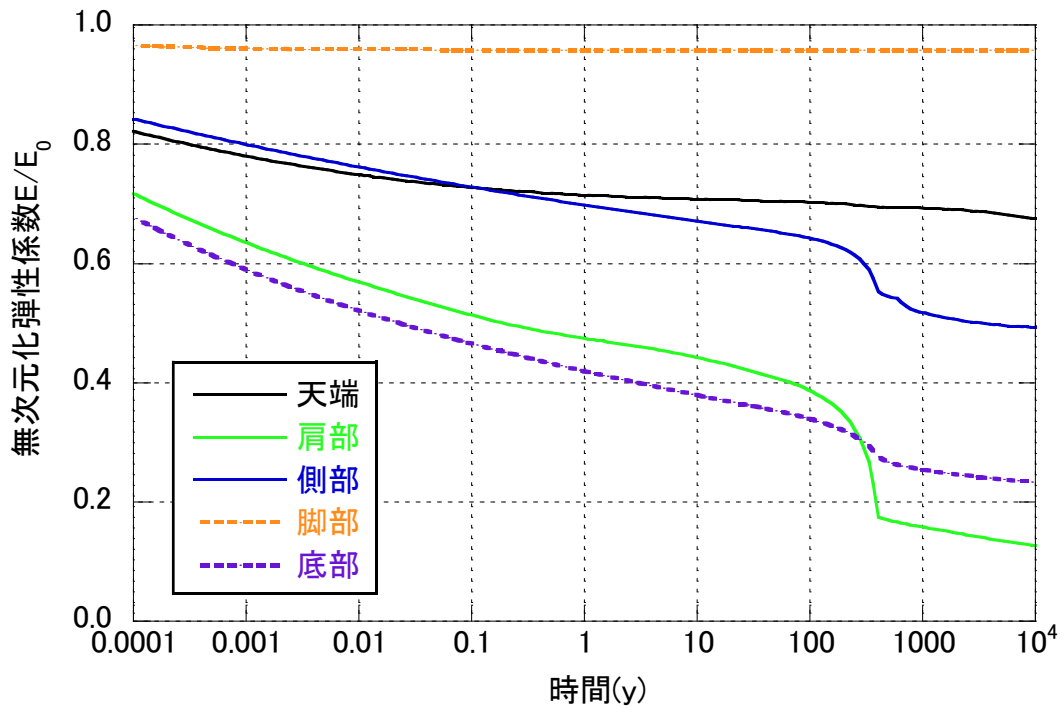


図 4.2.1-22 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (昨年度ケース 8、膨潤圧なし) [1]

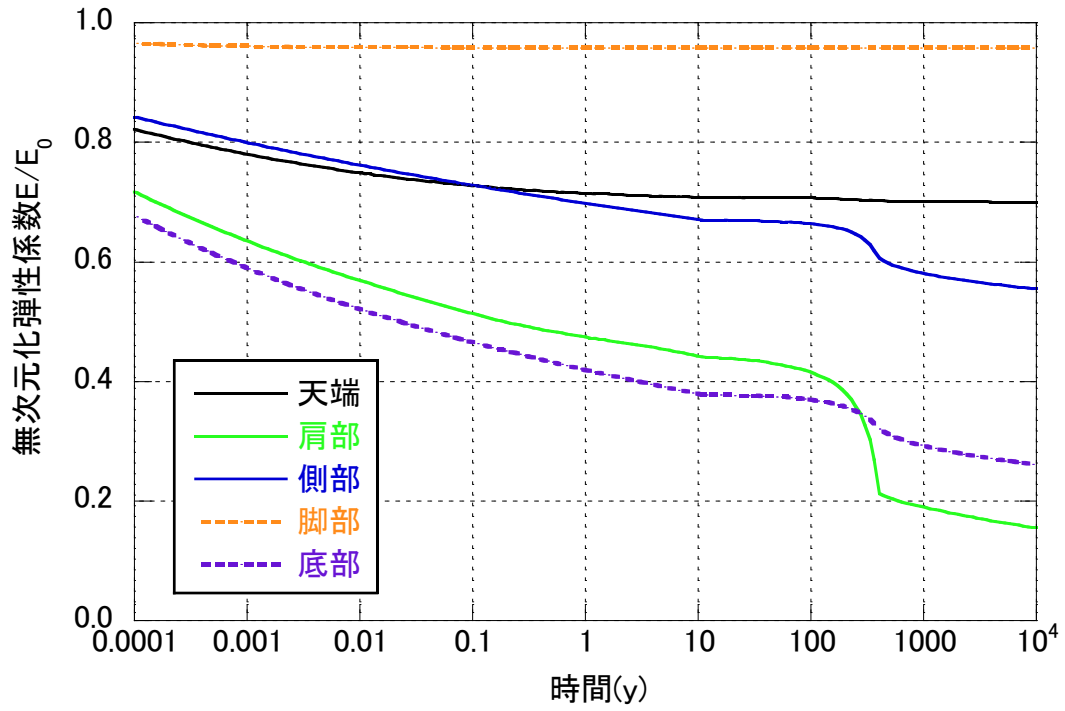


図 4.2.1-23 壁面近傍の弾性係数の経時変化（膨潤圧あり）

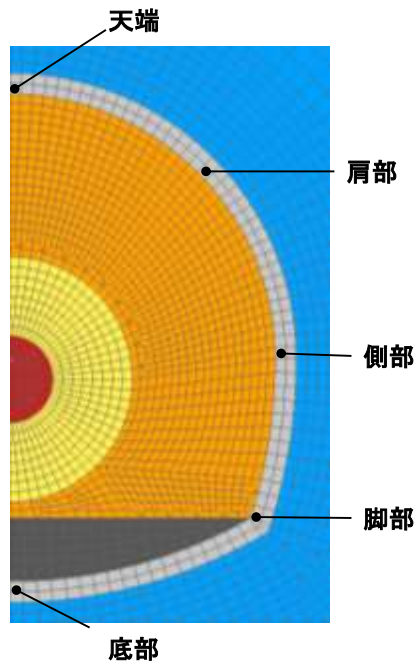


図 4.2.1-24 吹付けコンクリートにおける着目要素

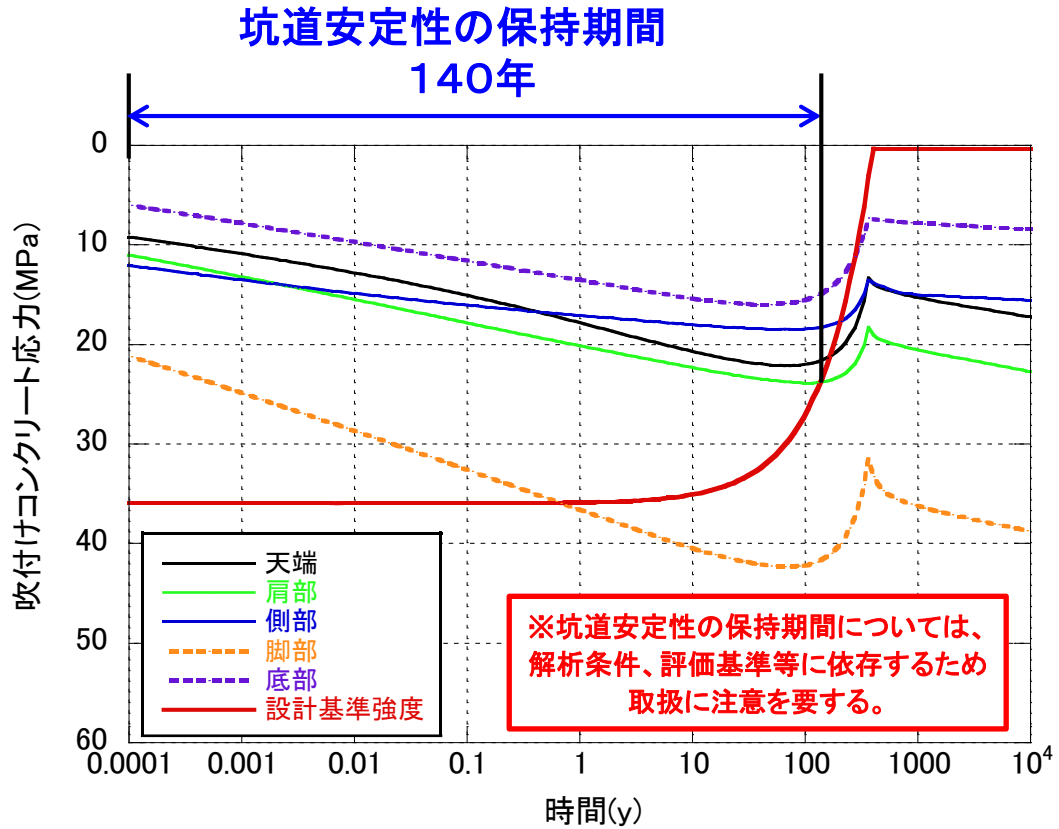


図 4.2.1-25 着目要素における吹付けコンクリート応力の経時変化
(昨年度ケース8、膨潤圧なし) [1]

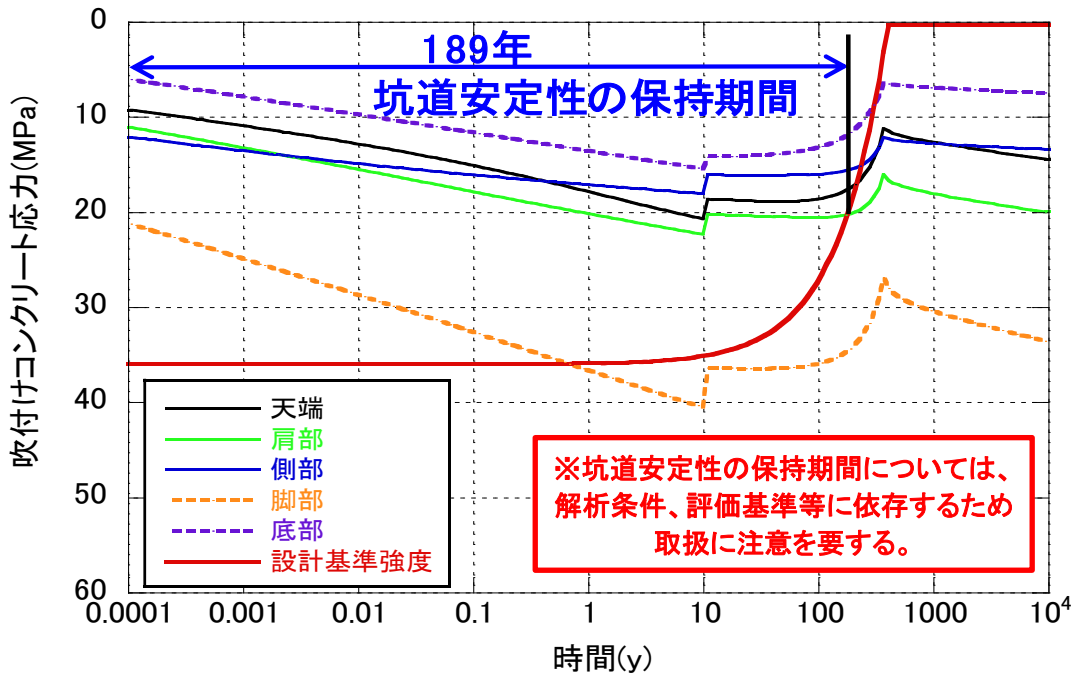


図 4.2.1-26 着目要素における吹付けコンクリート応力の経時変化 (膨潤圧あり)

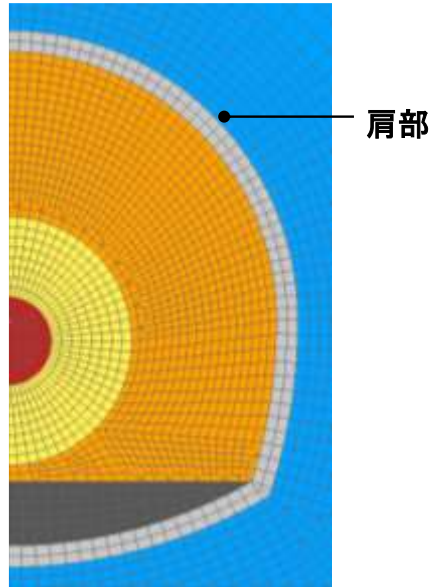


図 4.2.1-27 壁面近傍で最大せん断ひずみが上限 $\gamma_{\max}=1.340\%$ を超える肩部の要素

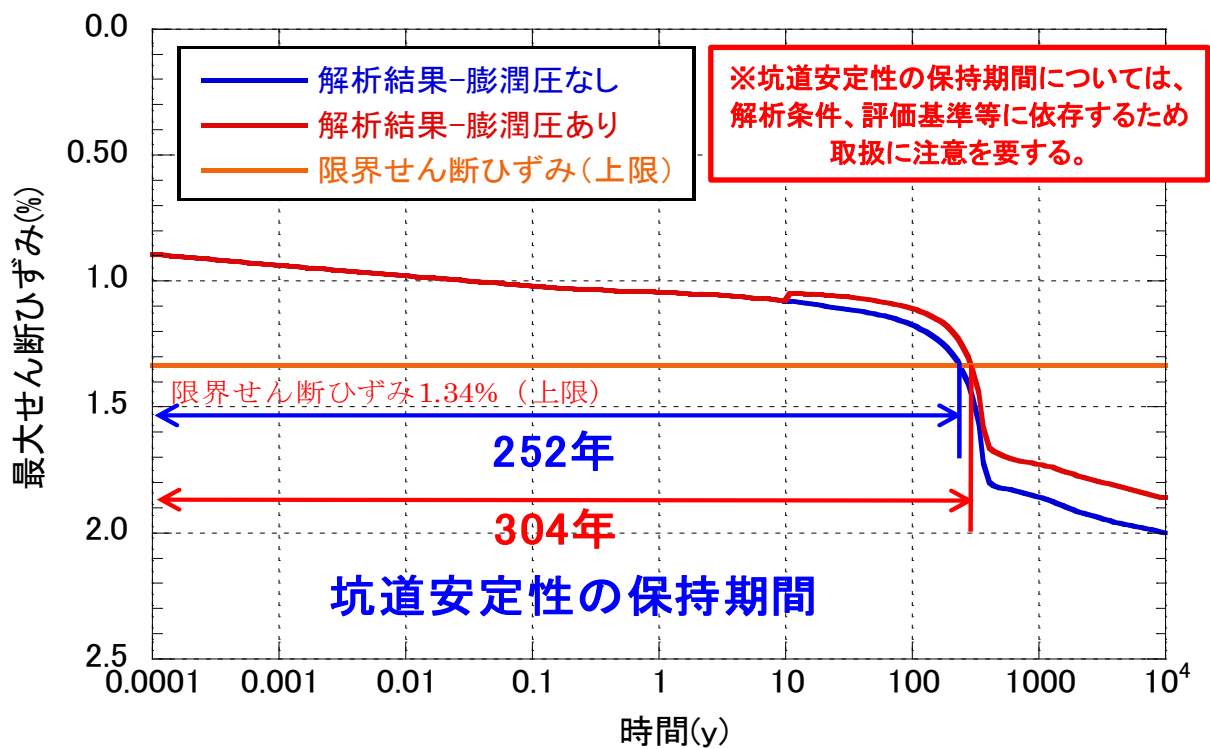


図 4.2.1-28 着目要素における最大せん断ひずみの経時変化

(2) 埋戻し材の坑道変形に対する支持効果に関する検討

1) 目的

昨年度の検討では、新第三紀堆積岩—横置き方式—状態オプション①（処分坑道に PEM を設置後、埋戻し材の設置なし）のケース7（以下、「昨年度ケース7」と称する）と、昨年度ケース8の結果において、坑道の安定性、弾性係数および透水係数の変化は、ほぼ一致する結果となった。また、クリープ変形によって生じた変位量を比較しても、100年後でも 10^{-3}mm オーダー程度の違いしかなく、処分坑道の埋戻しの有無が坑道安定性に影響を与えないことが分かった[1]。

ここでは、埋戻し材がある場合とない場合との解析結果に差がほとんどなかったことに対して、その理由の説明性を向上させることを目的とする。

昨年度ケース8を対象として、坑道の変形に対して埋戻し材の支持効果を見るために、埋戻し材の剛性を変えた場合と、埋戻し後の支保工とインバートの存在の有無を組合せて解析ケースを設定し、解析を行うことにした。これらの解析ケースの結果から、坑道の変形に対して支保工と埋戻し材のいずれが有意な影響を与えているのか、また、埋戻し材の剛性の違いが影響を与えるのかについて考察を行う。

2) 解析ケース

坑道の変形に対して埋戻し材の支持効果を見るために、埋戻し材の初期剛性を昨年度の検討と同じ場合【1】[1]と、10倍固くした場合【10】の2つのパターンを想定した。

また、支保工とインバートについては、埋戻し材設置後もある場合【a】と、埋戻し材設置するまでは存在しているが、設置後に埋戻し材に置き換わる場合【n】の2つのパターンを想定した。埋戻し材に置き換わるとは、埋戻し材設置後に支保工やインバートがなくなり、埋戻し材だけで坑道の変形を抑えることを想定したものである。支保工とインバートが埋戻し材に置き換わることは現実にはあり得ないが、支保工と埋戻し材の物性の違いによる周辺岩盤の挙動の差を見るために設定した。解析上は、埋戻し材を設置する時に、支保工とインバートの要素の物性値を埋戻し材の物性値に入れ替える操作を行う。

埋戻し材の初期剛性と、埋戻し後の支保工とインバートの存在を組合せて解析ケースを設定した。解析ケースを表 4.2.1-3 に示す。また、解析上の物性値の置き換えのイメージを図 4.2.1-29 に示す。

表 4.2.1-3 埋戻し材の坑道変形に対する支持効果に関する解析ケース

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

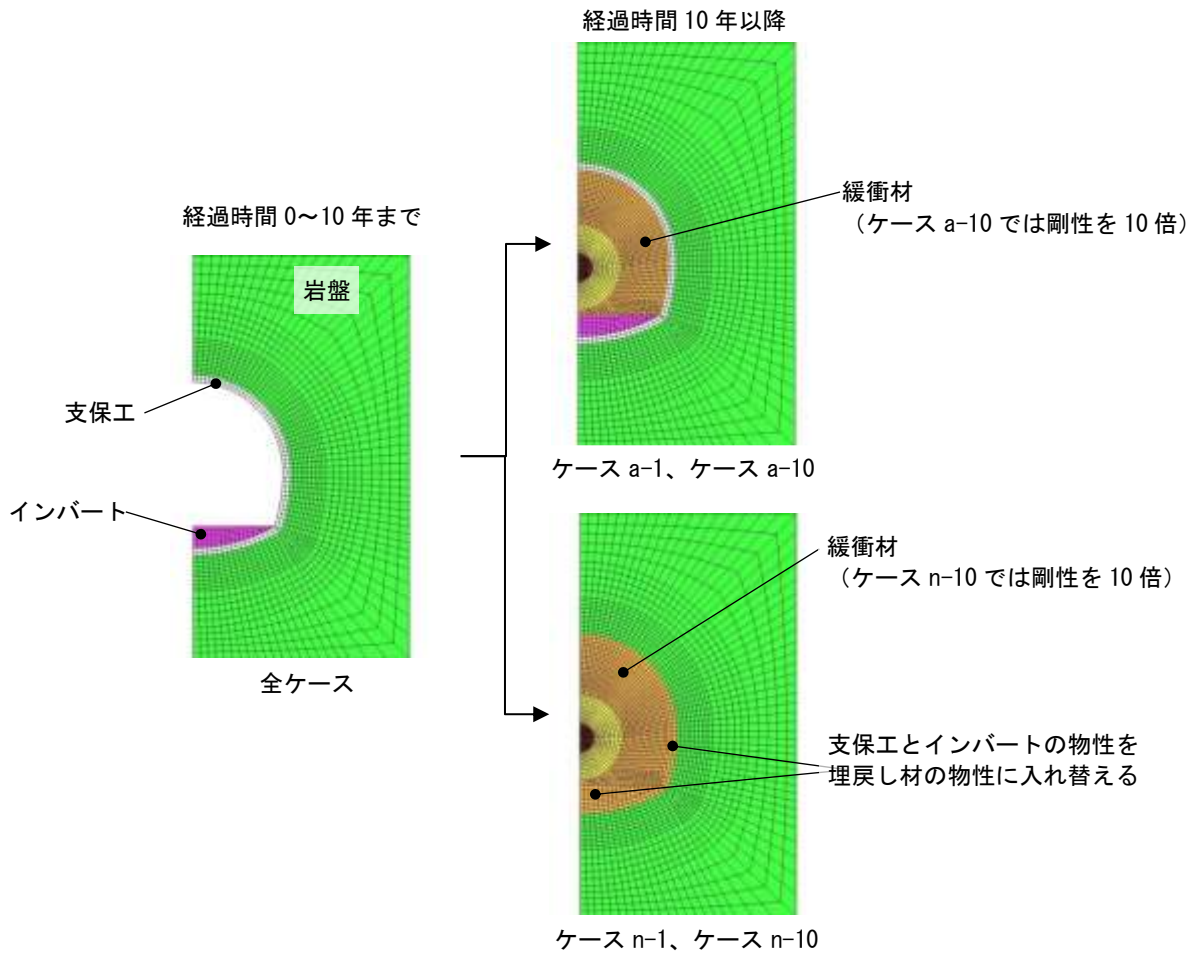


図 4.2.1-29 物性値の置き換えのイメージ

3) 埋戻し材の物性値の経時変化

この検討では、埋戻し材の物性値について、昨年度と同じ場合（ケース a-1、ケース n-1）と 10 倍固くした場合（ケース a-10、ケース n-1）を想定している。昨年度と同じ場合の物性値については、図 4.2.1-3 にて示している。10 倍固くした場合については、ヤング率のみを 10 倍固くした。物性値の経時変化を図 4.2.1-30 に示す。

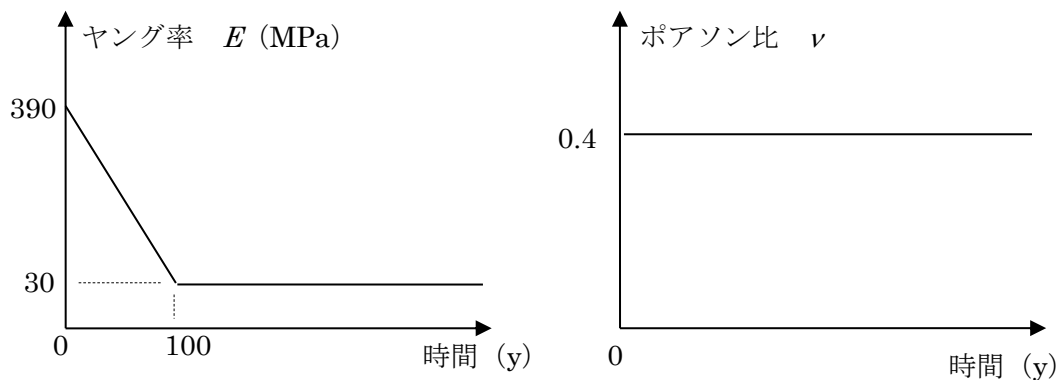


図 4.2.1-30 10 倍固くした場合の埋戻し材の物性値の経時変化

4) その他の解析条件

その他の解析条件、すなわち、解析フロー、解析対象期間、岩盤や支保工等の構成則・物性値、および解析モデルは、昨年度ケース8（新第三紀堆積岩－横置き方式－状態オプション②）、および「4.2.1(1) 埋戻し材の膨潤圧を設定した検討」と同じとする。埋戻し材の膨潤圧は考慮していない。

5) 解析結果

解析結果として、10年後、100年後、1,000年後、1万年後の処分坑道の周辺岩盤における局所安全率の分布を図4.2.1-31～図4.2.1-34に、周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布を図4.2.1-35～図4.2.1-38に、周辺岩盤の弾性係数の変化の分布を図4.2.1-39～図4.2.1-42に示す。弾性係数の変化の値は、その時点での弾性係数を初期弾性係数で除した値である。これら図において、経過時間0～10年は全ケースとも同じであるため、表示を省略している。

また、図4.2.1-22に示された天端、肩部、側部、脚部、底部の各要素の弾性係数の経時変化を図4.2.1-43～図4.2.1-46に示す。

ケースa-1（昨年度ケース8）とケースa-10を比較してみると、緩衝材の剛性は異なっているが、局所安全率、最大せん断ひずみ、弾性係数の変化の分布や経時変化に明確な違いは見られなかった。また、ケースn-1とケースn-10を比較しても、局所安全率、最大せん断ひずみ、弾性係数の変化の経時変化の分布に違いは見られなかった。

昨年度の検討では、図4.2.1-27に示した壁面近傍の肩部において特定の要素に着目して、最大せん断ひずみの経時変化から坑道安定性の保持期間を考察している。ここでも、同じ要素に着目して最大せん断ひずみの経時変化を比較した。着目要素の最大せん断ひずみの経時変化を図4.2.1-47に示す。また、図4.2.1-47において経過時間0～500年の範囲に注目した場合の最大せん断ひずみの経時変化を図4.2.1-48に示す。

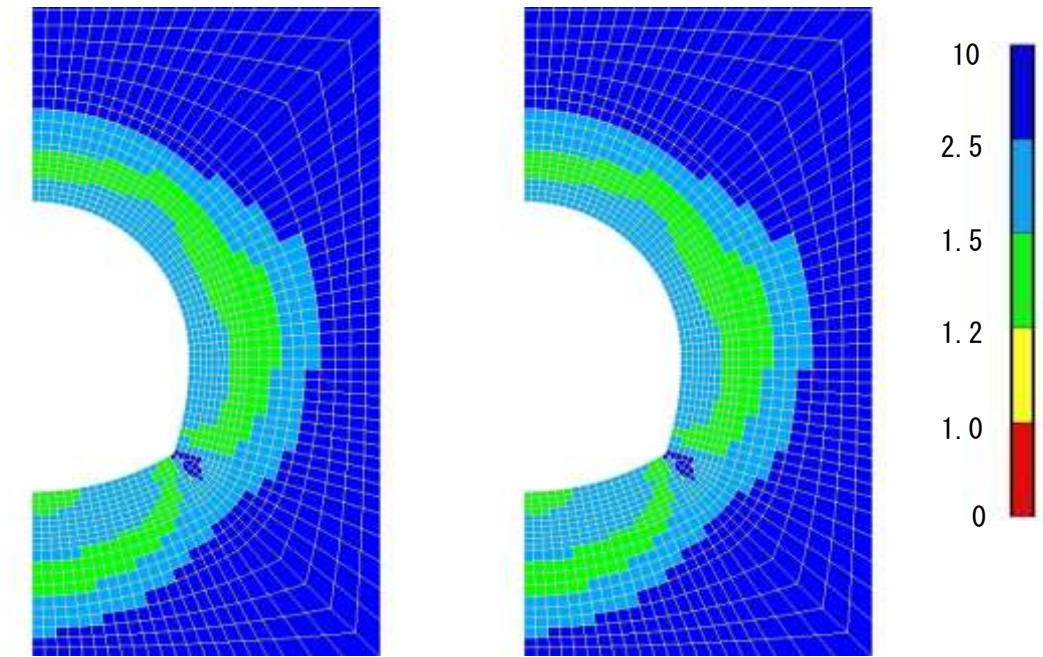
ケースa-1とケースa-10を見てみると、最大せん断ひずみの経時変化には、ほとんど差は見られなかった。両ケースとも、掘削後252年後に限界せん断ひずみ（上限） $\gamma_{max}=1.340\%$ を超えた。一方、ケースn-1とケースn-10では、肩部の最大せん断ひずみは、掘削後97年または110年後に限界せん断ひずみ（上限）を超えた。ケースn-10の方が、わずかに保持期間が長くなっているが、これは、緩衝材の剛性がケースn-1よりも高かったことによるものと考えられる。しかしながら、両者の最大せん断ひずみには、10~2%オーダー程度の違いしかなかった。この結果から、埋戻し材の剛性を10倍固くしても、周辺岩盤の変形抑制や坑道安定性の保持期間延長に対しては、ほとんど効果がないことが分かった。

限界せん断ひずみ（上限）に達するまでの期間において、支保工がある場合（ケースa-1とケース10）と、埋戻し後に支保工がなくなる場合（ケースn-1とケースn-10）を比較すると、支保工がある場合の方が周辺岩盤の変形は抑えられていて、保持期間が長くなっていることが分かった。

昨年度の検討では、吹付けコンクリートに生じた応力度の経時変化からも坑道安定性の保持期間を考察している。ここでは、図4.2.1-24に示した天端、肩部、側部、脚部、底部の5箇所の要素に着目して、吹付けコンクリートの応力度の経時変化を評価している。ここでも、同じ要素に

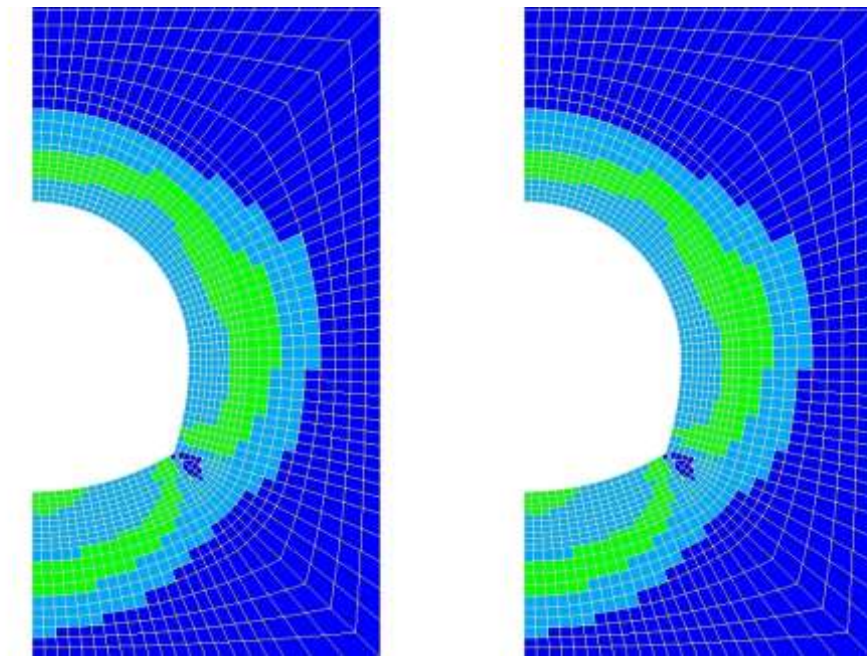
着目することにした。ケース a-1 とケース 1-10 における吹付けコンクリートの経時変化を図 4.2.1-49 と図 4.2.1-50 に示す。経過時間として 0～500 年の範囲に注目した場合の肩部における吹付けコンクリートの応力の経時変化の比較を図 4.2.1-51 に示す。

ケース a-1 とケース a-10 のいずれの場合でも、吹付けコンクリートの応力度の経時変化に、ほとんど差が見られず、掘削後 140 年後に肩部の吹付けコンクリートの応力が設計基準強度を超える結果となった。ここでも埋戻し材の剛性による違いは現れなかった。



(a) ケース a-1

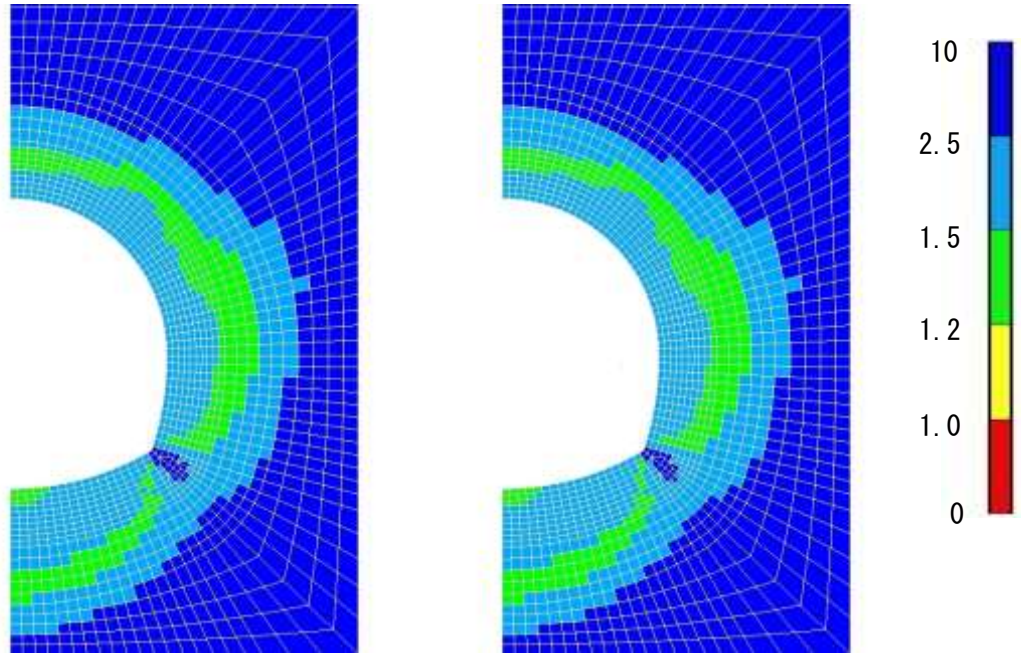
(b) ケース a-10



(c) ケース n-1

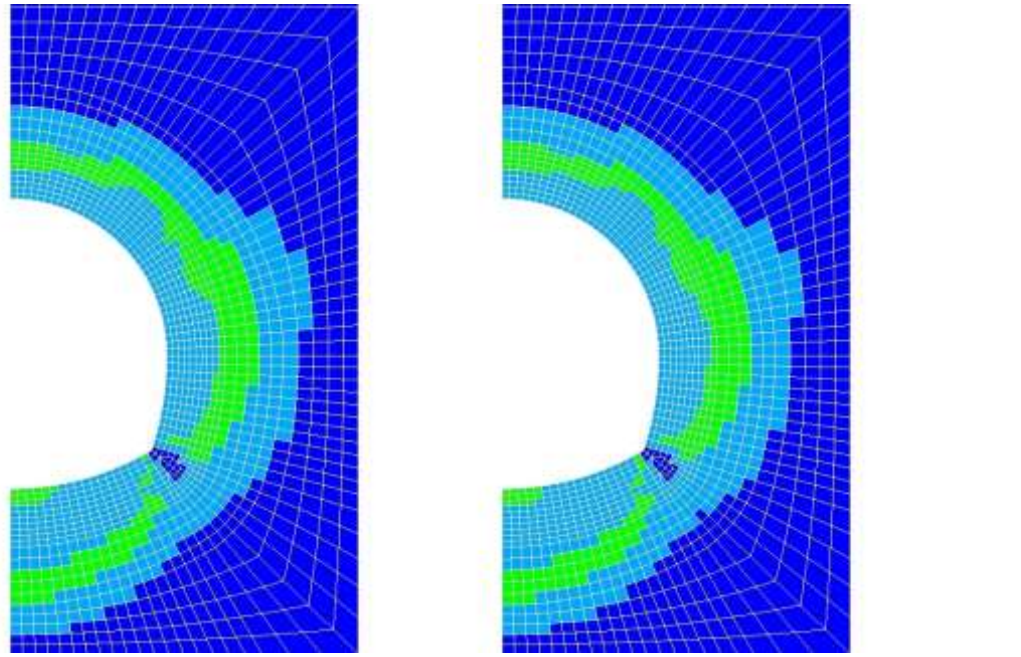
(d) ケース n-10

図 4.2.1-31 経過時間 10 年時の局所安全率の分布



(a) ケース a-1

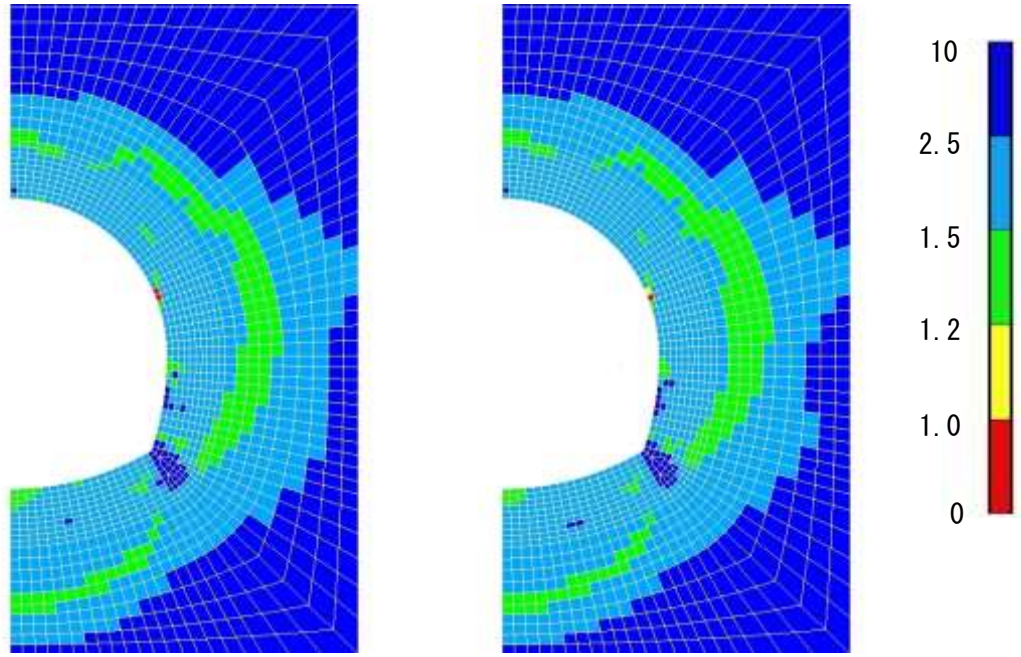
(b) ケース a-10



(c) ケース n-1

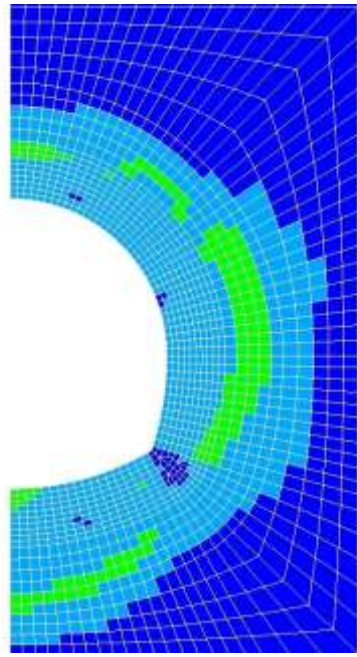
(d) ケース n-10

図 4.2.1-32 経過時間 100 年時の局所安全率の分布

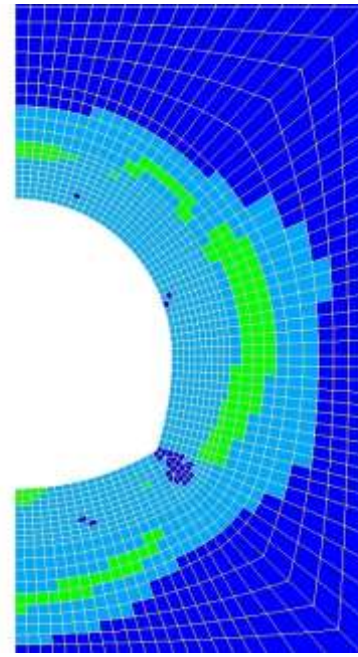


(a) ケース a-1

(b) ケース a-10

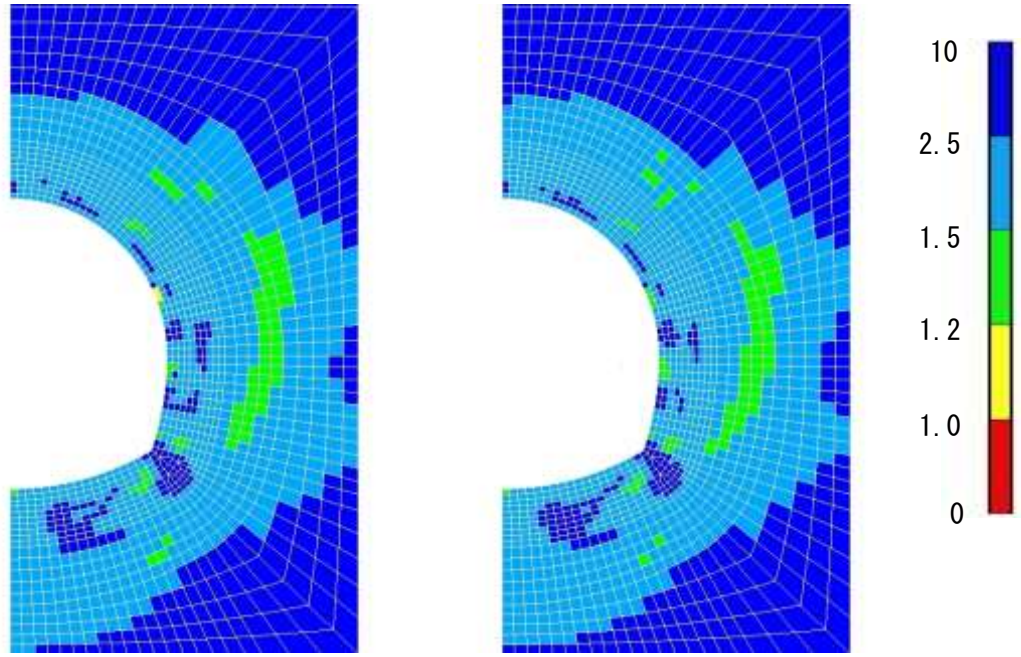


(c) ケース n-1



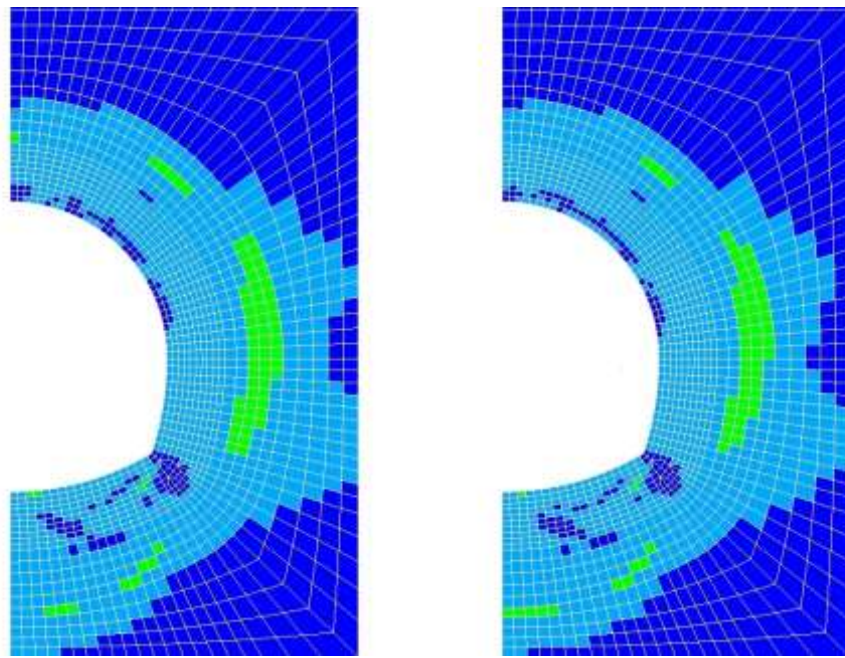
(d) ケース n-10

図 4.2.1-33 経過時間 1,000 年時の局所安全率の分布



(a) ケース a-1

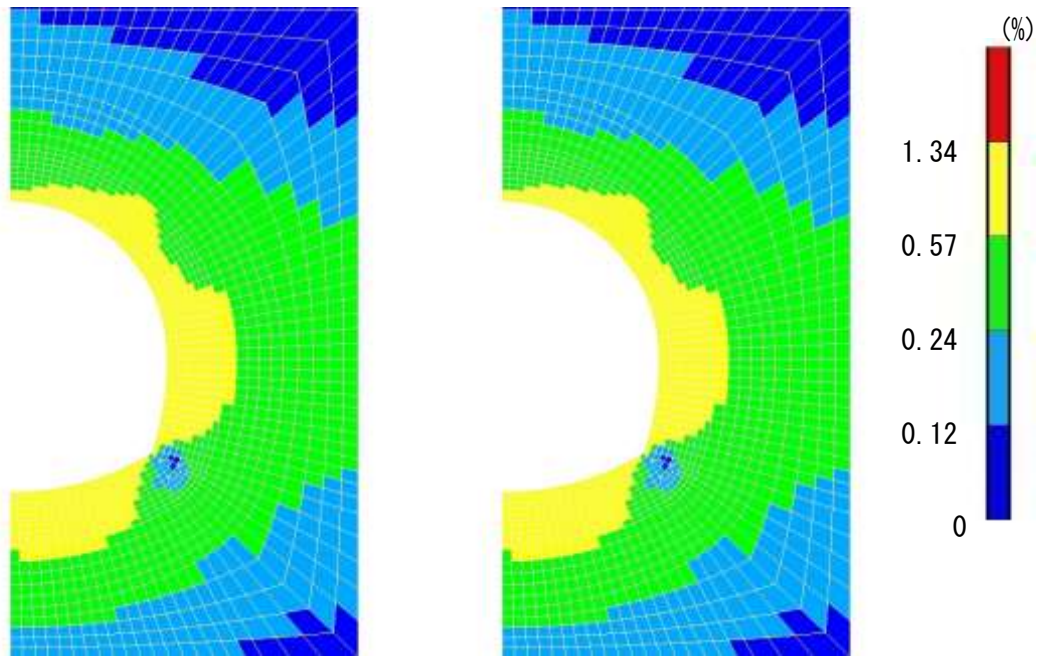
(b) ケース a-10



(c) ケース n-1

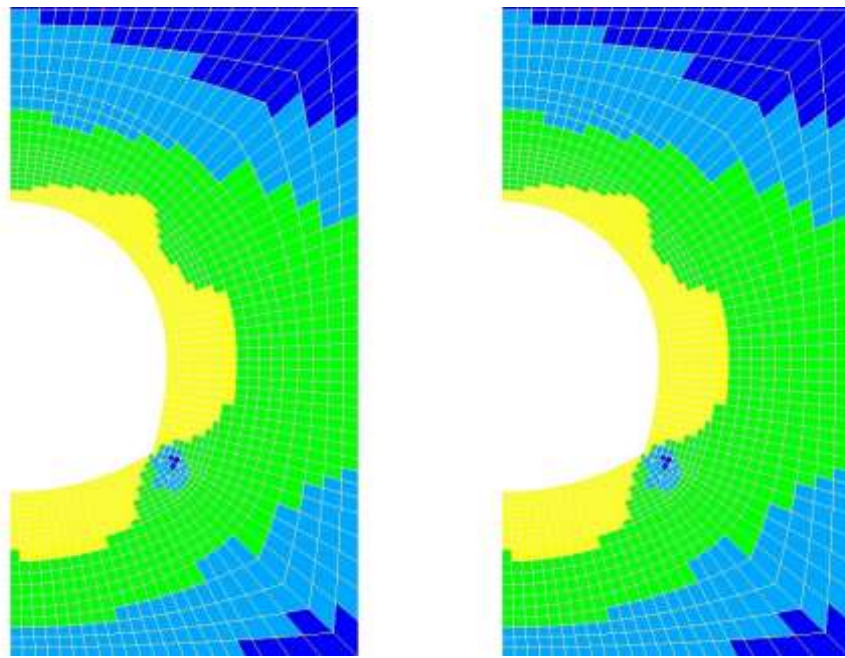
(d) ケース n-10

図 4.2.1-34 経過時間 10,000 年時の局所安全率の分布



(a) ケース a-1

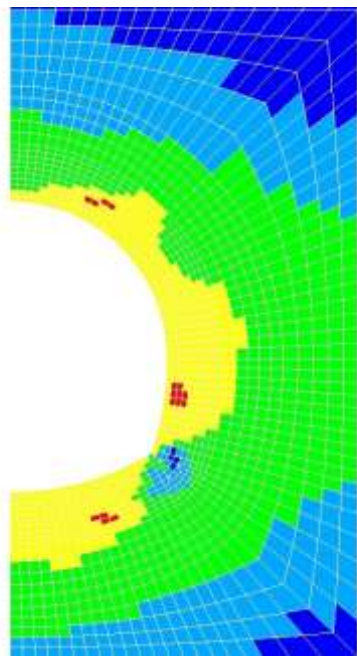
(b) ケース a-10



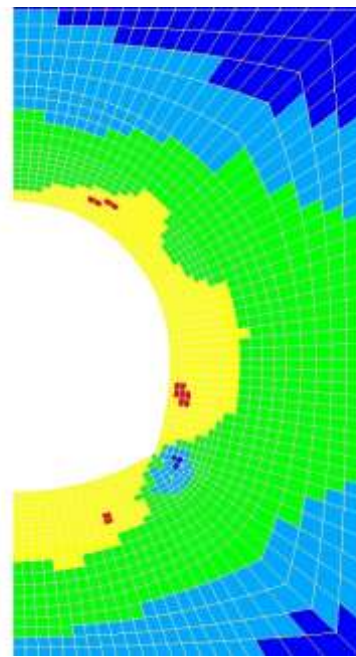
(c) ケース n-1

(d) ケース n-10

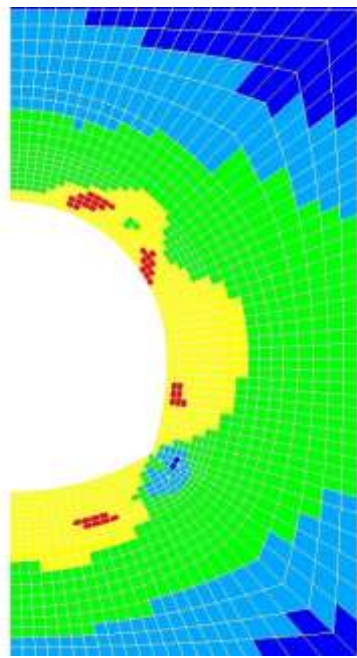
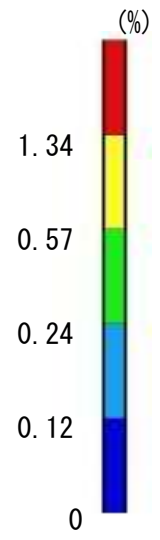
図 4.2.1-35 経過時間 10 年時の最大せん断ひずみの分布



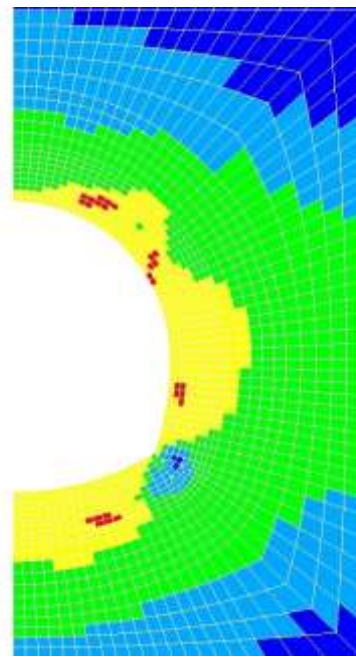
(a) ケース a-1



(b) ケース a-10

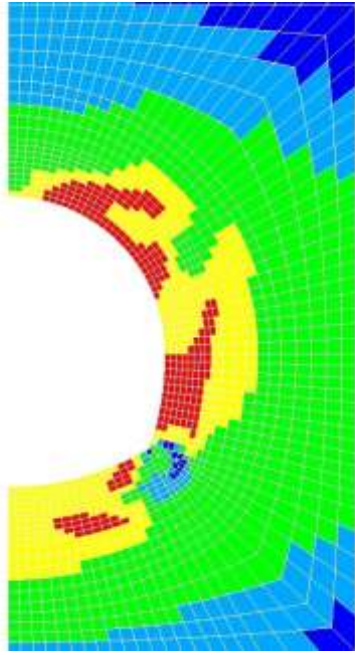


(c) ケース n-1

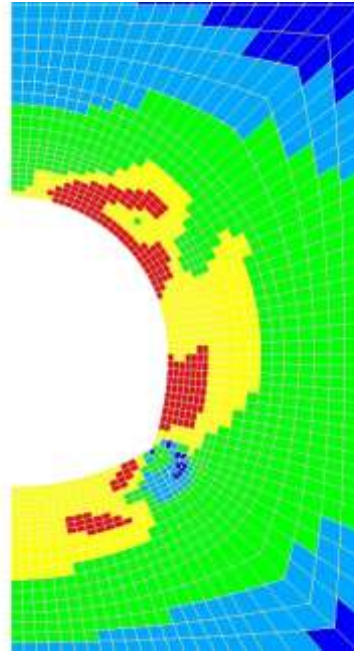


(d) ケース n-10

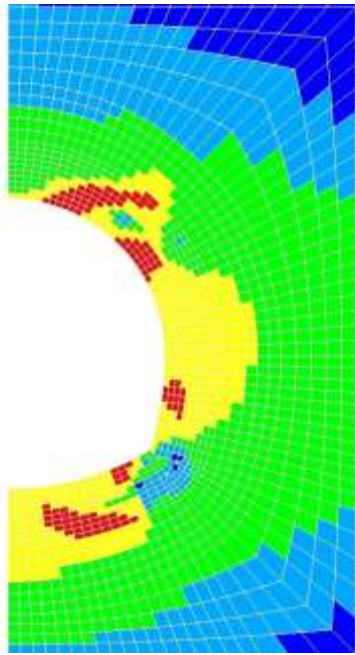
図 4.2.1-36 経過時間 100 年時の最大せん断ひずみの分布



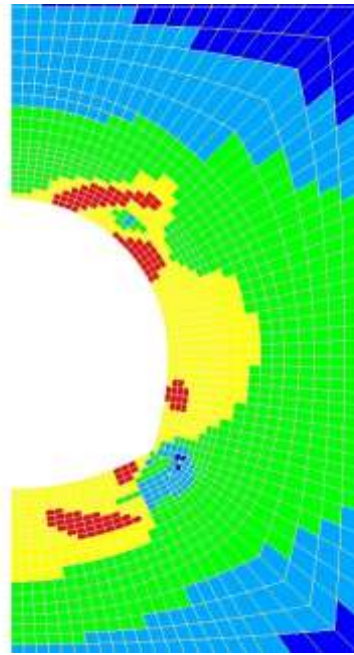
(a) ケース a-1



(b) ケース a-10

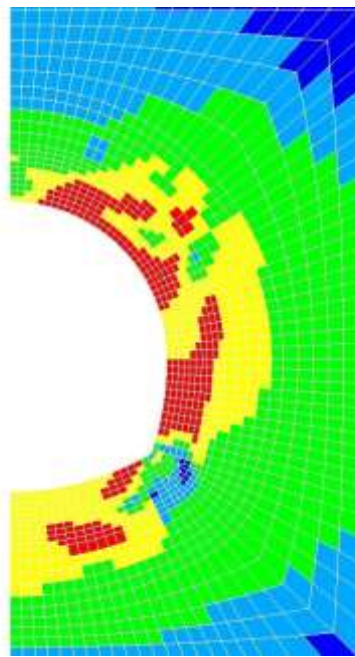


(c) ケース n-1

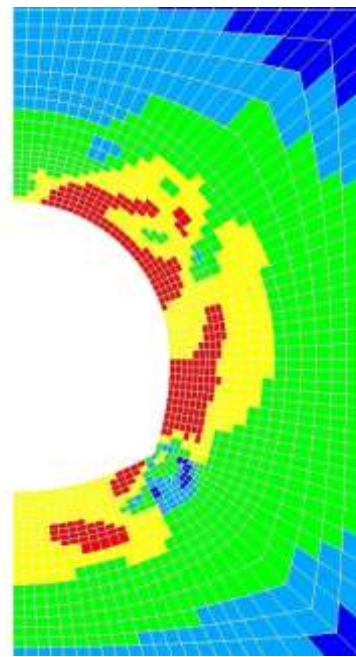


(d) ケース n-10

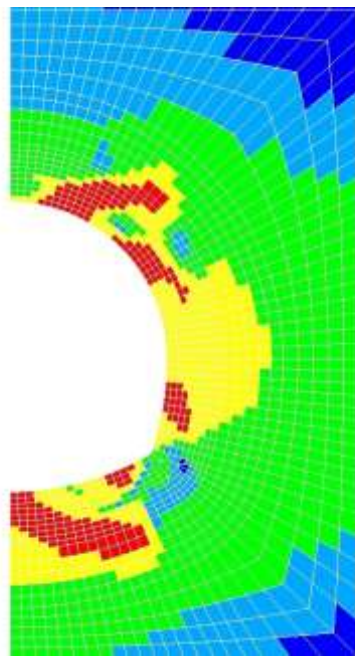
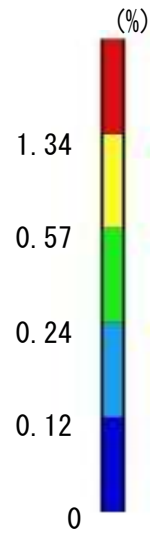
図 4.2.1-37 経過時間 1,000 年時の最大せん断ひずみの分布



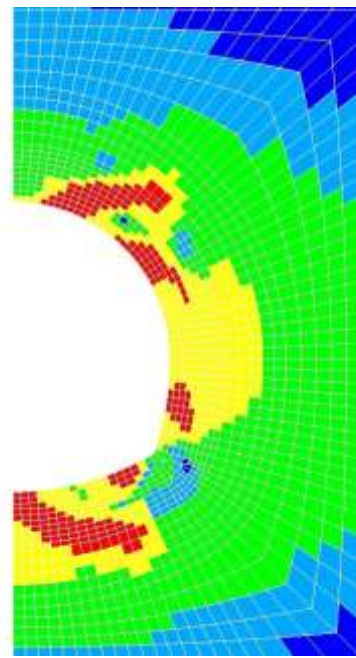
(a) ケース a-1



(b) ケース a-10



(c) ケース n-1



(d) ケース n-10

図 4.2.1-38 経過時間 10,000 年時の最大せん断ひずみの分布

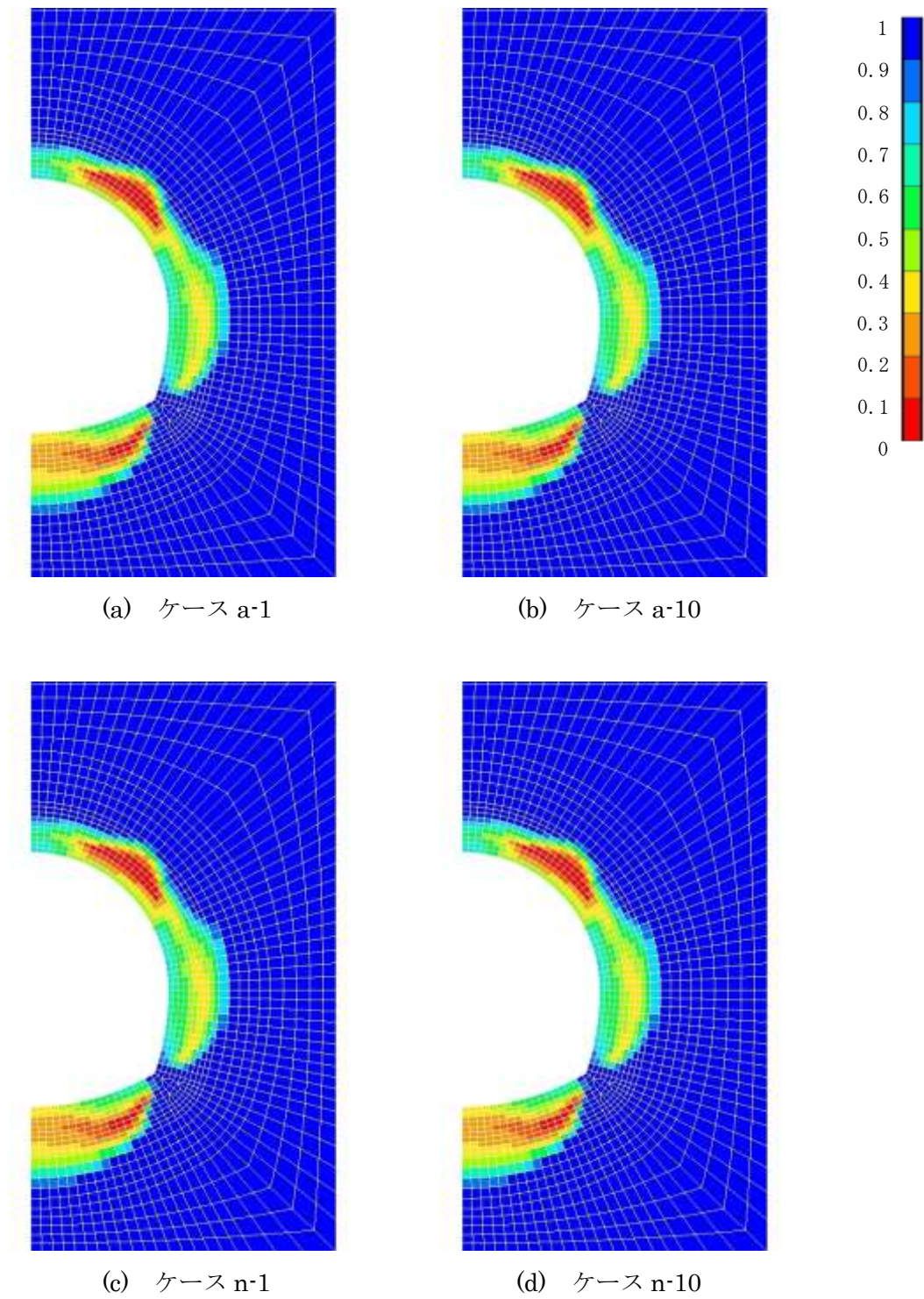


図 4.2.1-39 経過時間 10 年時における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布

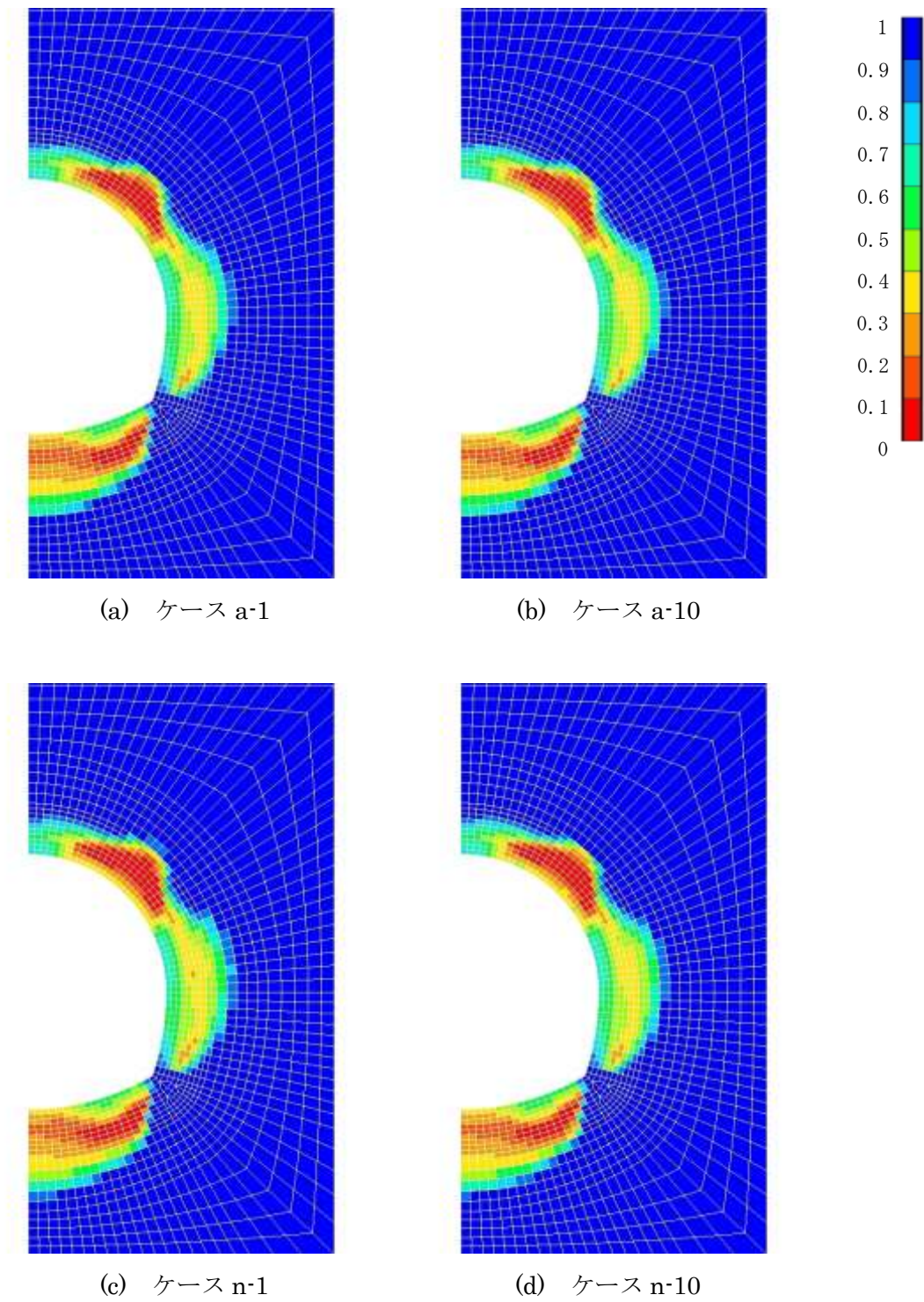


図 4.2.1-40 経過時間 100 年時における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布

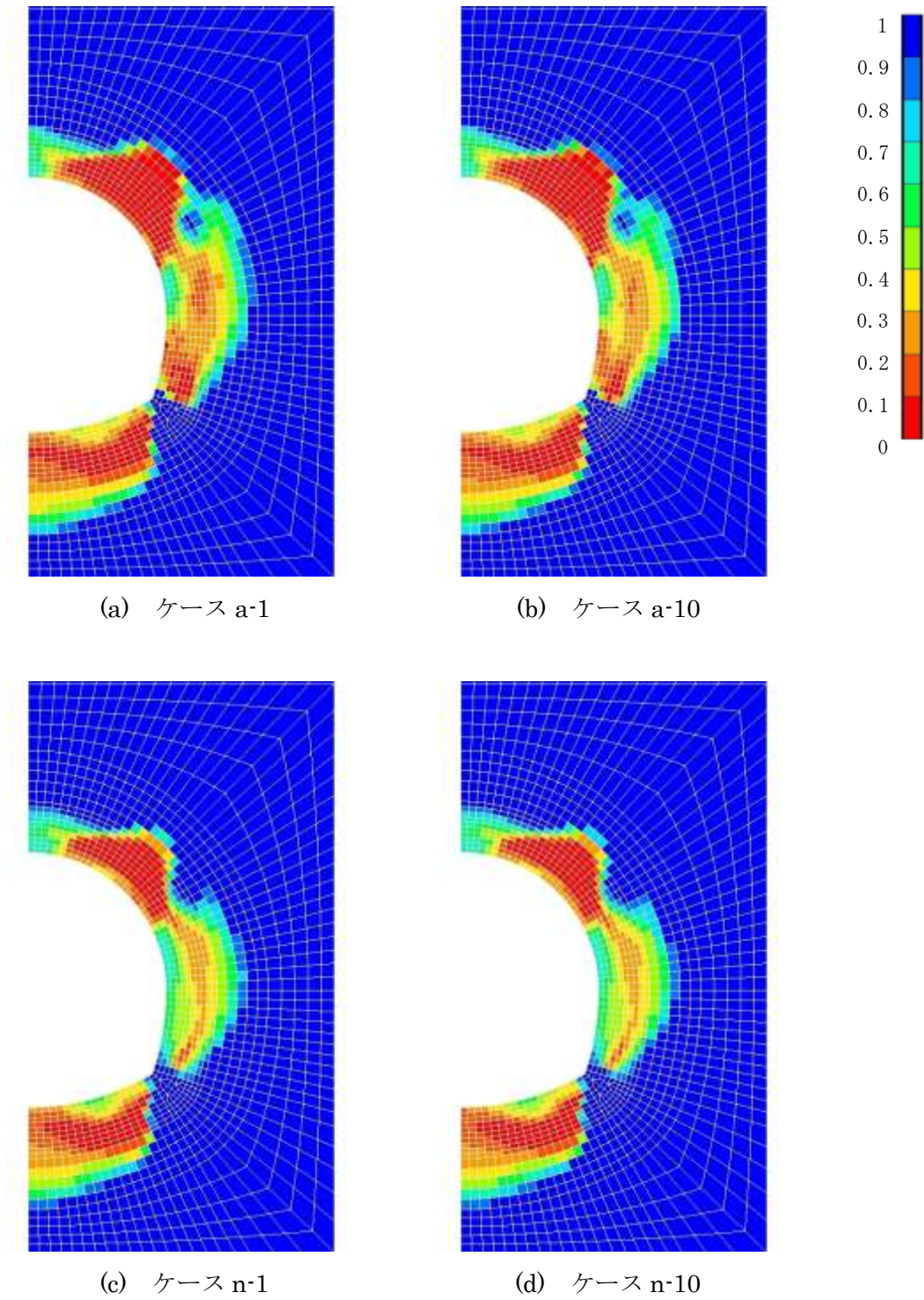
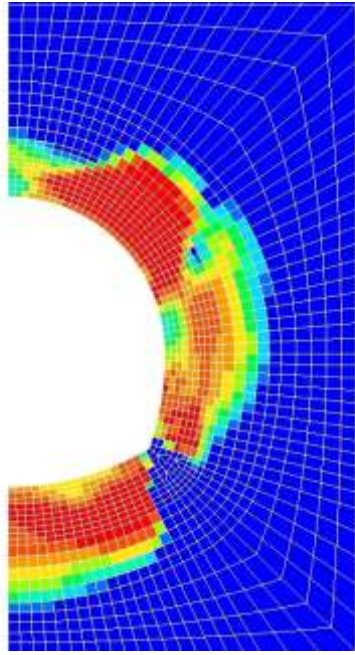
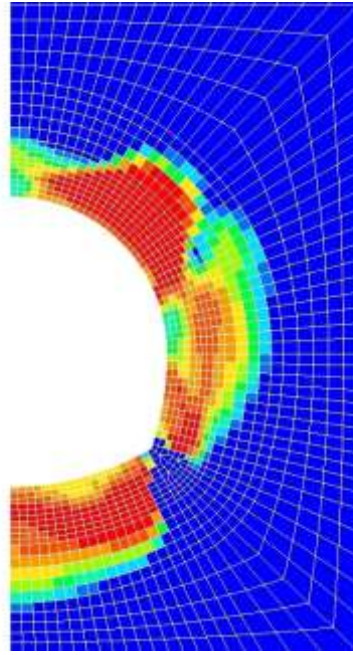


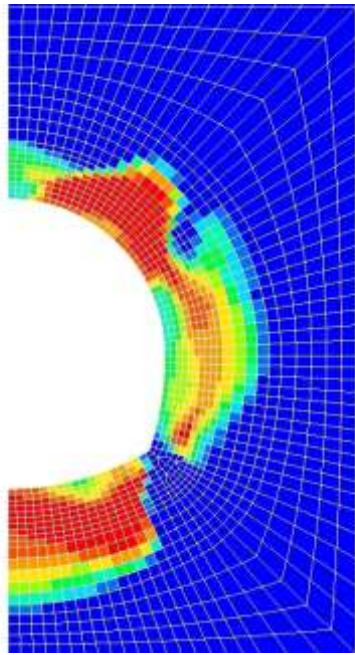
図 4.2.1-41 経過時間 1,000 年時における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布



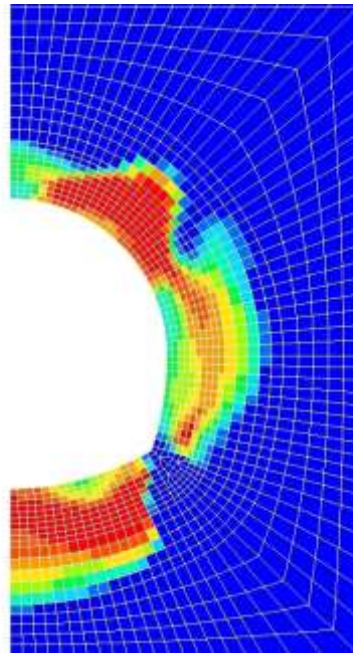
(a) ケース a-1



(b) ケース a-10



(c) ケース n-1



(d) ケース n-10

図 4.2.1-42 経過時間 10,000 年時における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布

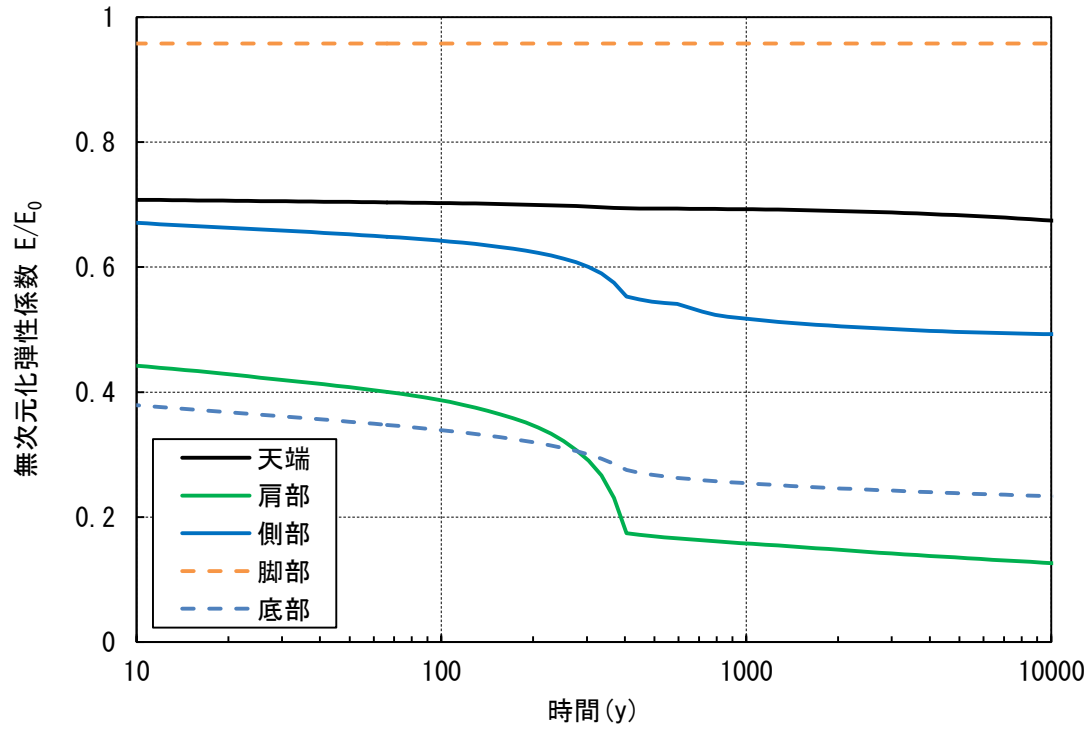


図 4.2.1-43 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース a-1)

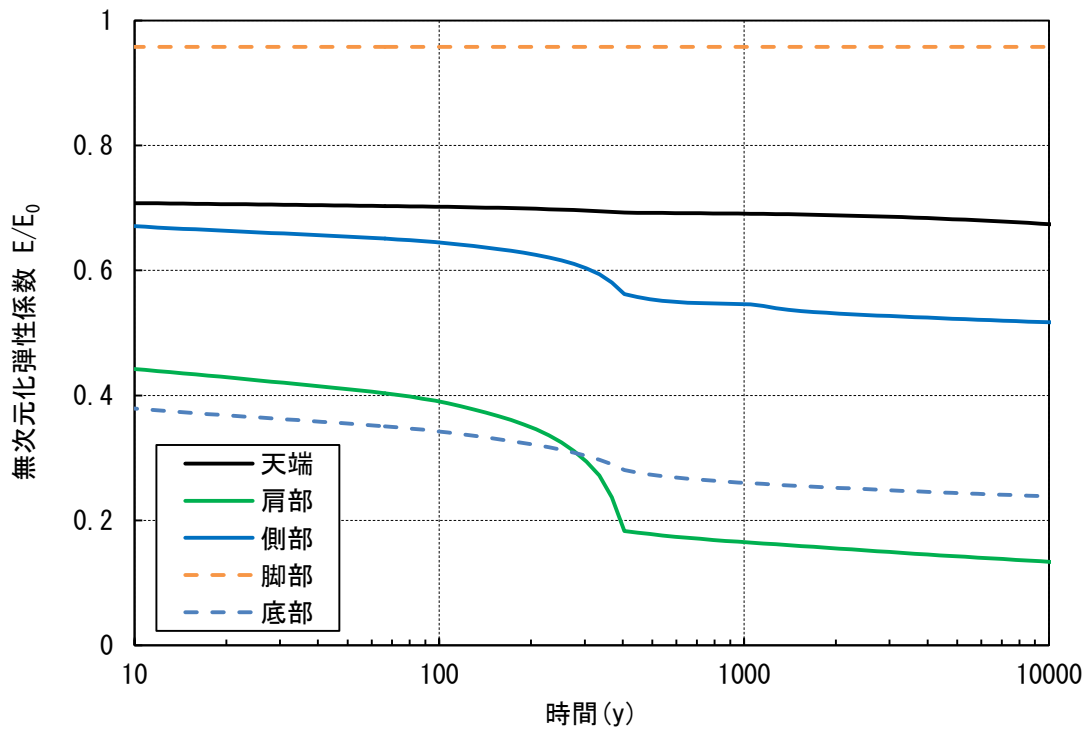


図 4.2.1-44 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース a-10)

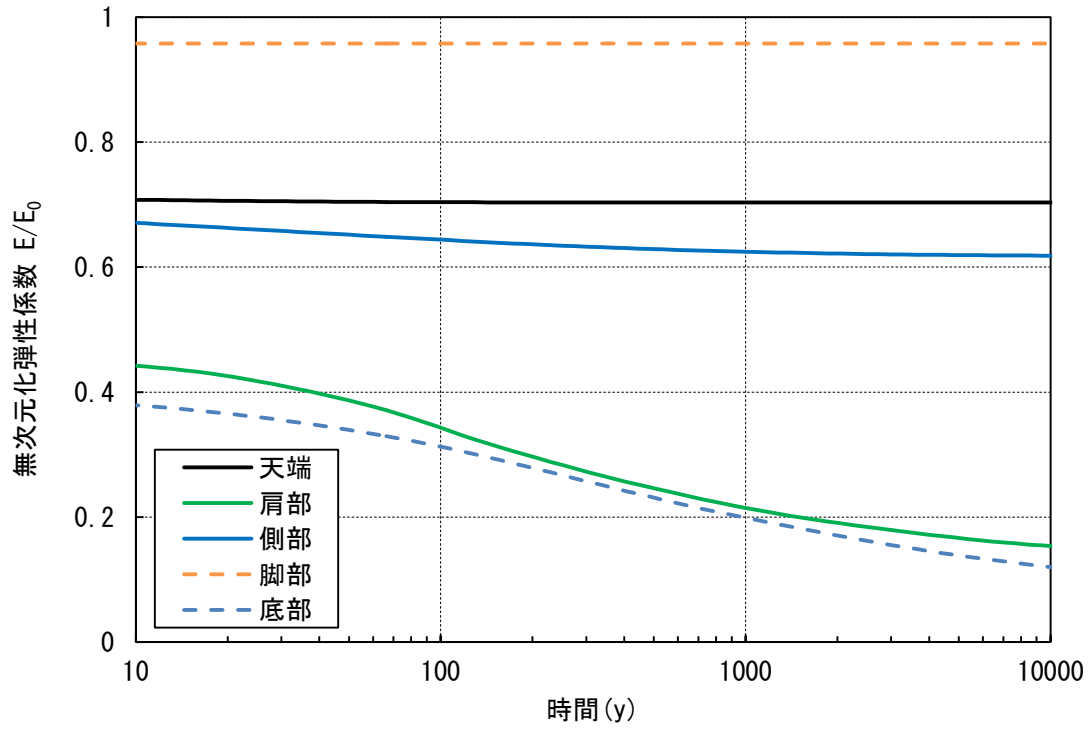


図 4.2.1-45 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース n-1)

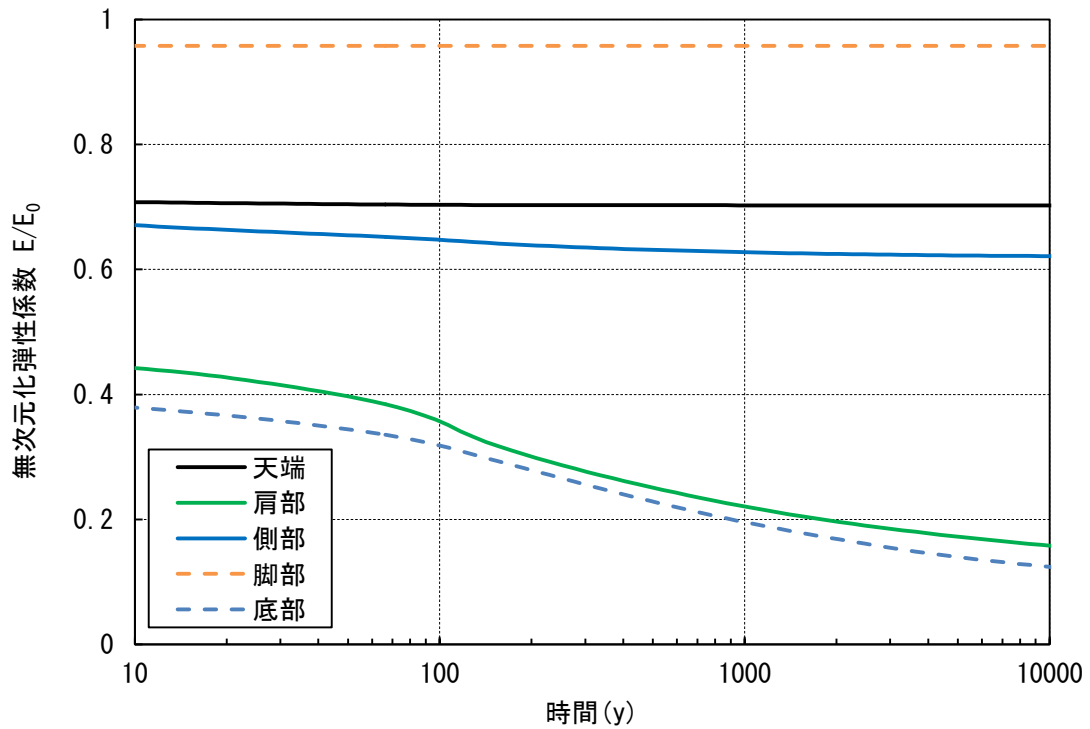


図 4.2.1-46 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース n-10)

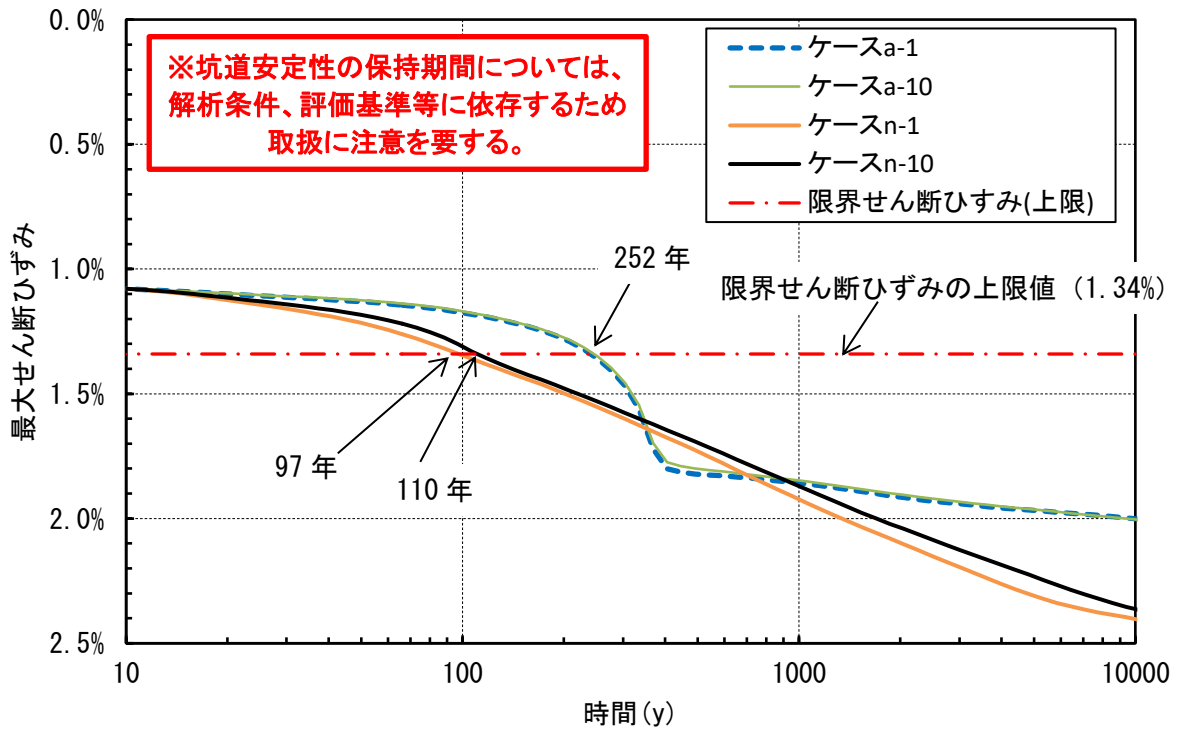


図 4.2.1-47 着目要素における最大せん断ひずみの経時変化

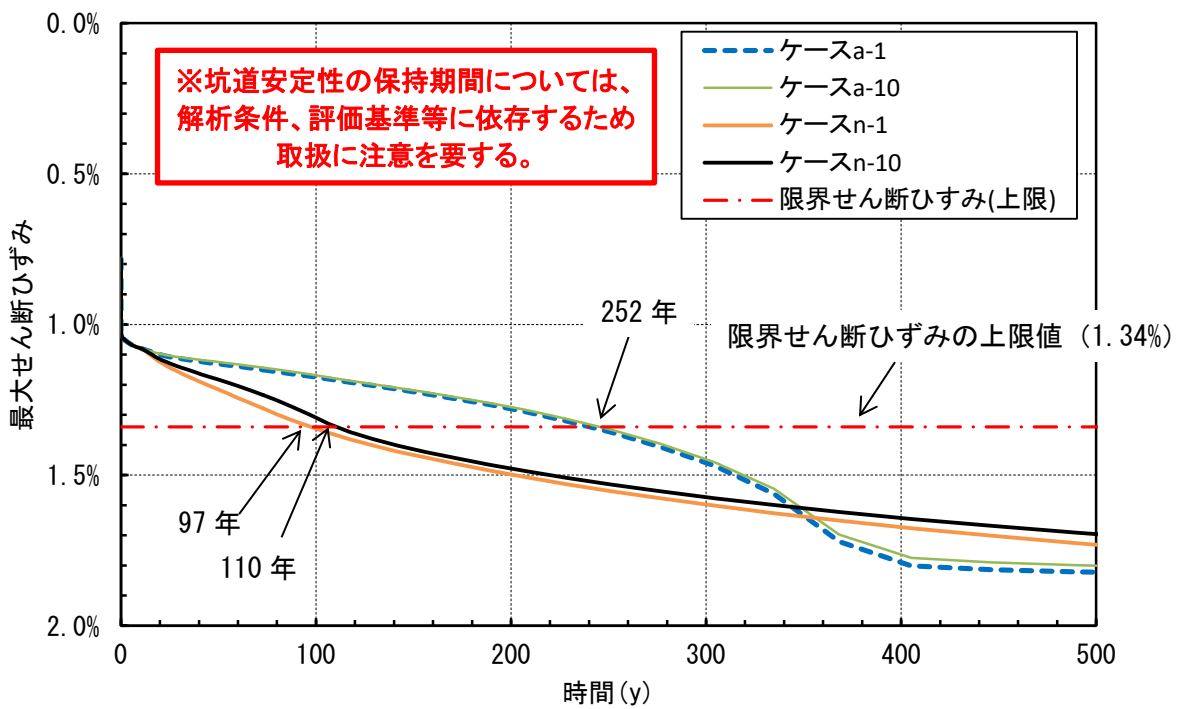


図 4.2.1-48 経過時間 0~500 年の最大せん断ひずみの経時変化

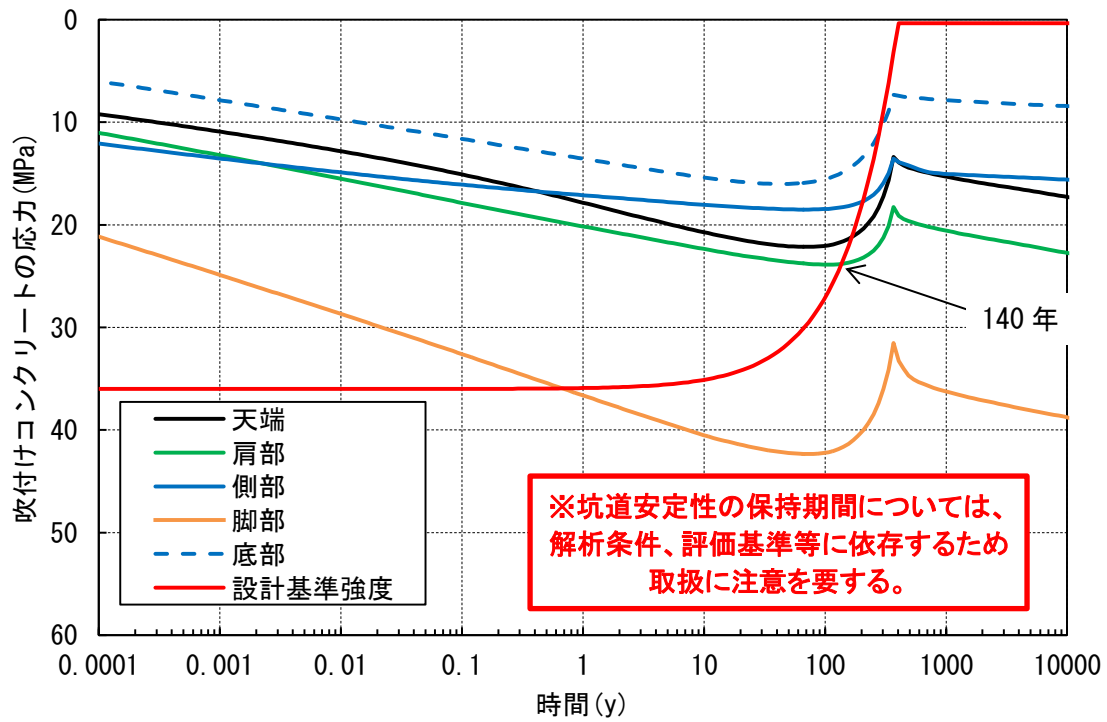


図 4.2.1-49 ケース a-1 における吹付けコンクリートの応力の経時変化

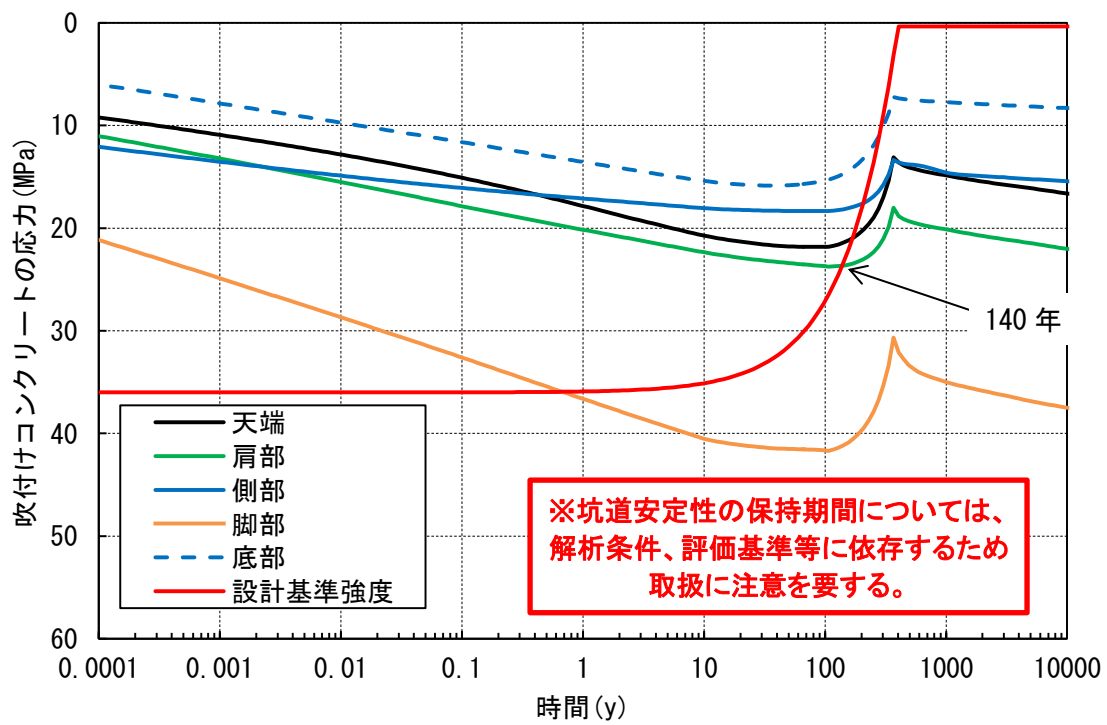


図 4.2.1-50 ケース a-10 における吹付けコンクリートの応力の経時変化

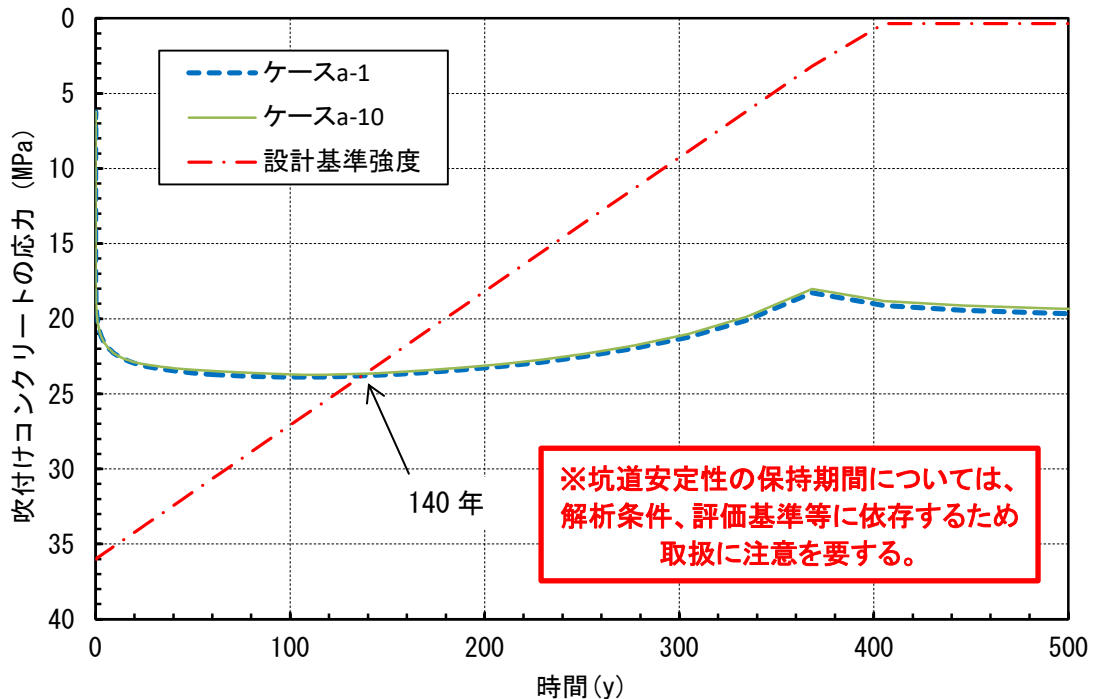


図 4.2.1-51 経過時間 0～500 年における肩部の吹付けコンクリートの応力の経時変化の比較

6) 坑道安定性の保持期間に関する考察

前述の解析結果からは、埋戻し材の剛性の違いが、坑道安定性の保持期間に影響を与えないことが分かった。支保工、埋戻し材、緩衝材、およびオーバーパックから構成される全体系（以下、「支保工等」と称する）の剛性が高いほど坑道周辺岩盤の変形を抑えることから、各ケースにおいて、支保工等の剛性にどの程度の差があったのかを調べることにした。

a 支保工等の剛性の定義と算定方法

支保工等の外側から一様な圧力を作用させると、半径方向に変位が生じる。ここでは、圧力 P に対する支保工最外縁の半径方向変位 U_r を線形弾性体の 2 次元平面ひずみ問題として求める。そして、この圧力 P と支保工最外縁における半径方向変位 U_r の比を支保工等の剛性 K と定義する。

$$K = \frac{P}{U_r} \quad \text{式 4.2.1-8}$$

新第三紀堆積岩—横置き方式の処分坑道の断面を図 4.2.1-52 に示す。この図より、アーチ部の半径は 2,500mm、支保工の厚さは 200mm となっていることから、支保工等を直径 5,400mm の円形に単純化した。また、オーバーパックと緩衝材の寸法は、図 4.2.1-8 から設定した。支保工等の剛性を求めるための解析モデルを図 4.2.1-53 に示す。

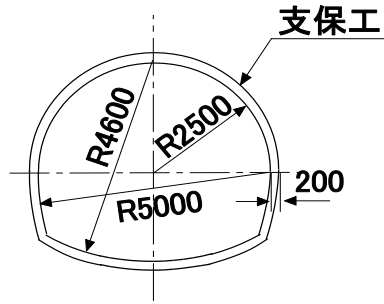


図 4.2.1-52 新第三紀堆積岩—横置き方式の処分坑道の断面形状

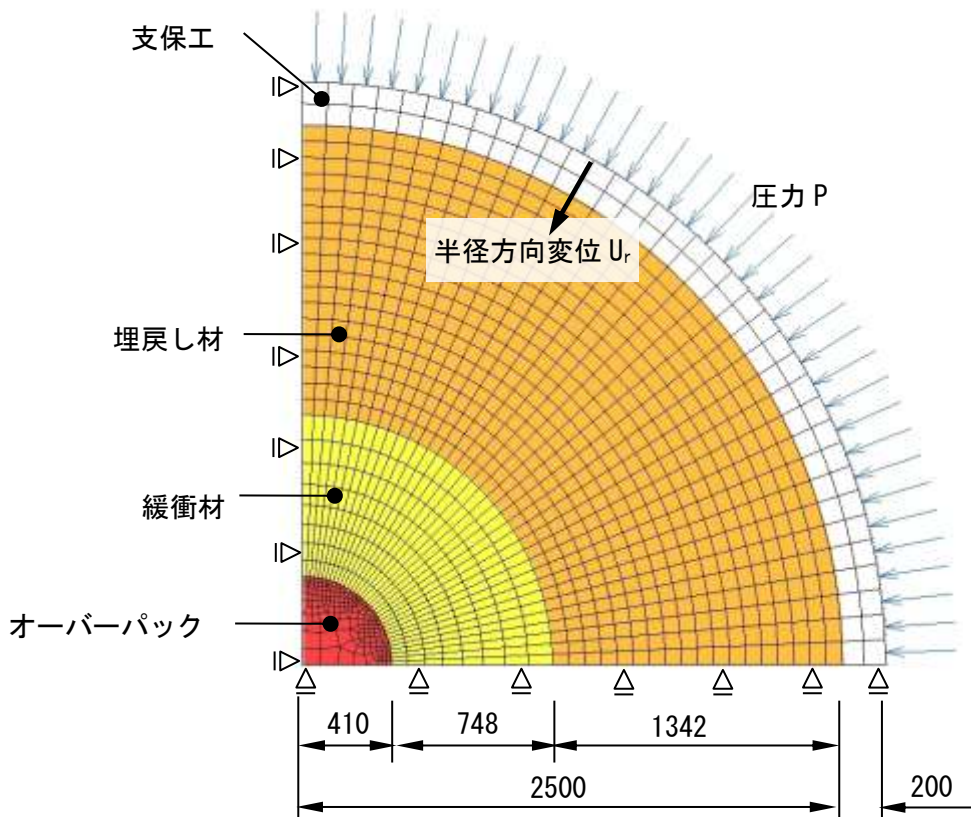


図 4.2.1-53 新支保工等の剛性を求めるための解析モデル

b 解析条件

支保工、緩衝材、および埋戻し材については、これまでと同様に、劣化や飽和の進行に伴う物性値の変化を考慮する。

支保工については、吹付けコンクリートからのカルシウム成分の溶脱を考慮する。溶脱は支保工設置直後から始まり、400年で溶脱が終了するものとする。物性値の経時変化は、図 4.2.1-2 に示した通りである。

緩衝材については、飽和の進行を考慮する。飽和は設置直後から始まり、100年で飽和が完了

するものとする。物性値の経時変化は、図 4.2.1-3 に示した通りである。

埋戻し材も緩衝材と同様に、飽和の進行を考慮する。飽和は設置直後から始まり、100 年で飽和が完了するものとする。埋戻し材の初期剛性を昨年度の検討と同じにした場合（ケース a-1、ケース n-1）の物性値の経時変化は、図 4.2.1-3 に示した通りである。また、初期剛性を 10 倍固くした場合（ケース a-10、ケース n-10）の物性値の経時変化は、図 4.2.1-30 に示した通りである。

c 支保工等の剛性の経時変化と考察

解析結果として、各ケースの支保工等の剛性の経時変化を図 4.2.1-54 に示す。

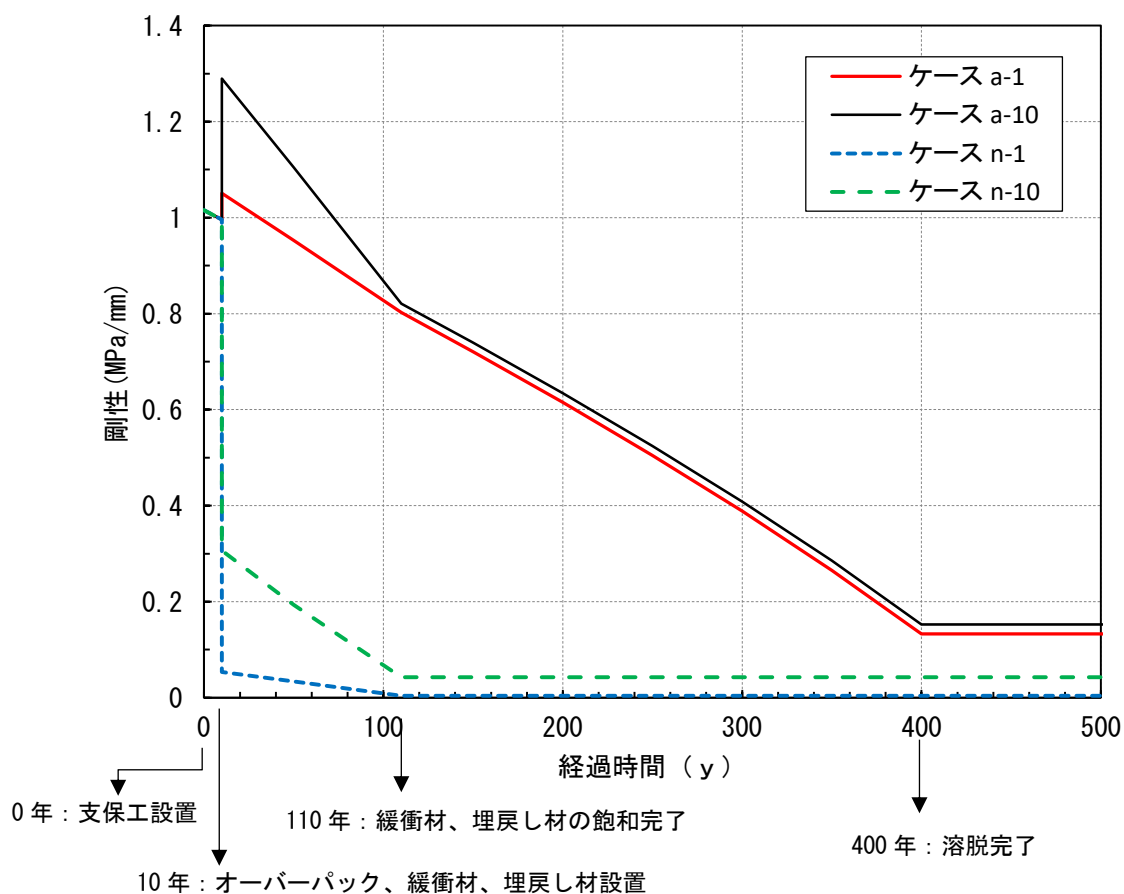


図 4.2.1-54 支保工等の剛性の経時変化

図 4.2.1-54 において、経過時間 0～10 年までは全ケースとも支保工しかなく、かつ同じ物性値であることから、剛性は同じ値である。

経過時間 10 年の時に、ケース a-1 とケース a-10 では、支保工の内側にオーバーパック、緩衝材、埋戻し材が設置されることから、それらの効果によって 1.05MPa/mm または 1.3MPa/mm と剛性は上がった。一方、ケース n-1 とケース n-10 では、支保工の物性値を埋戻し材の物性値に入れ替えたために、0.05MPa/mm または 0.31MPa/mm と低下した。

その後、飽和や劣化の進行に伴って、支保工等の剛性は 0.004～0.15MPa/mm まで低下した。

経過時間 400 年以降は、全ケースとも飽和や劣化は終了しているため、一定値となった。

ケース a-10 とケース a-1 を比較してみると、埋戻し材の剛性は 10 倍違っているが、経過時間 10～110 年の埋戻し材の飽和前の期間において、支保工等の剛性の差は 1.23～1.02 倍であった。また、飽和完了後の 110 年以降でも、支保工等の剛性の差は 1.03～1.15 倍であった。この結果から、埋戻し材が固くなったとしても、支保工等の剛性向上にあまり寄与しないことが分かった。局所安全率の分布、最大せん断ひずみの分布および経時変化にも示されているように、埋戻し材の剛性を 10 倍固くしてもケース a-1 とケース a-10 で周辺岩盤の挙動に差が見られなかったのは、周辺岩盤の内側にある支保工等の剛性に差がなかったことによると考えられる。

ケース a-1 とケース n-1 を比較してみると、支保工の物性値が埋戻し材の物性値と入れ替わる経過時間 10 年以降は、ケース n-1 の剛性はケース a-1 の 0.05～0.01 倍で推移した。ケース n-1 では、支保工等の剛性がかなり小さくなったことから、図 4.2.1-48 に示されているように、ケース n-1 では周辺岩盤のクリープ変形が抑制されずに、ケース a-1 よりも最大せん断ひずみが大きくなったと考えられる。

埋戻し材が固くなったとしても支保工等の剛性向上にあまり寄与しないこと、支保工の代わりに埋戻し材に置き換えると、支保工等の剛性は著しく低下することから、周辺岩盤の内側にある支保工等の剛性は、支保工そのものの剛性が支配的になっていると言える。

したがって、昨年度ケース 7 と昨年度ケース 8 において、埋戻しの有無によって周辺岩盤の挙動に差が見られなかった理由として、支保工そのものの剛性が支配的だったためと考えられる。

(3) 各材料の物性変化特性の条件を変えた検討

1) 目的

昨年度の検討では、岩盤条件、処分形態に応じた坑道断面、回収可能性維持の状態オプションを組合せて解析ケースを設定して、坑道安定性に関する評価を行った[1]。その一方、各材料の物性値の違いによる坑道安定性の保持期間への影響については実施していなかった。そのため、物性値の違いによって解析結果がどのように変わるのかについての知見は得られていなかった。

ここでは、物性値変化の条件を変えた場合、解析結果がどのように変わるのかを知ることを目的とする。

昨年度の検討結果を踏まえると、吹付けコンクリートの剛性が坑道安定性の保持期間に大きな影響を与えるパラメータであると考えられる。吹付けコンクリートの剛性の変化は劣化によって起こるが、その劣化はカルシウム成分の溶脱によって起こる。このカルシウムの溶脱速度は吹付けコンクリートに接触している周辺の地下水の性質に大きく依存していると考えられる。そこで、昨年度ケース8を対象として、物性変化特性の条件を変えた影響を見るために、吹付けコンクリートの剛性変化の速度を変えた場合の解析ケースを設定し、解析を行うことにした。

2) 解析ケース

昨年度ケース8では、吹付けコンクリートの剛性は、400年後に1/10になるものとしていた。ここでは、それに加えて200年後に1/10になる場合と、800年後に1/10になる場合を想定した。解析ケースを表4.2.1-4に示す。

表 4.2.1-4 埋戻し材の坑道変形に対する支持効果に関する解析ケース

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

3) コンクリートの物性値の経時変化

吹付けコンクリートの初期ヤング率を 29,600MPa とし、溶脱完了後のヤング率は初期ヤング率の1/10になるものとした。また、ポアソン比については、初期値は0.2とし、溶脱完了後には0.45になるものとした。さらに、溶脱進行中の物性値については線形補間することにし、溶脱完了以降は、一定値をとるものとした。各ケースにおける吹付けコンクリートの物性値の経時変化を図4.2.1-55に示す。

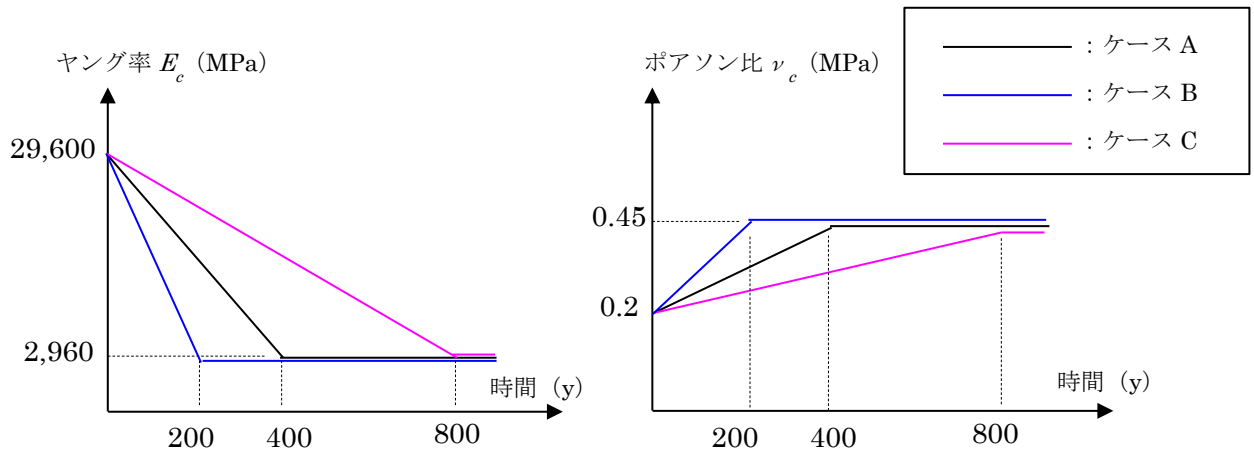


図 4.2.1-55 溶脱期間を変えた場合の吹付けコンクリートの経時変化

4) その他の解析条件

その他の解析条件、すなわち、解析フロー、解析対象期間、岩盤や埋戻し材の構成則・物性値、および解析モデルについては、昨年度ケース 8 や「4.2.1(1) 埋戻し材の膨潤圧を設定した検討」と同じとする。また、埋戻し材の膨潤圧は考慮しない。

5) 解析結果

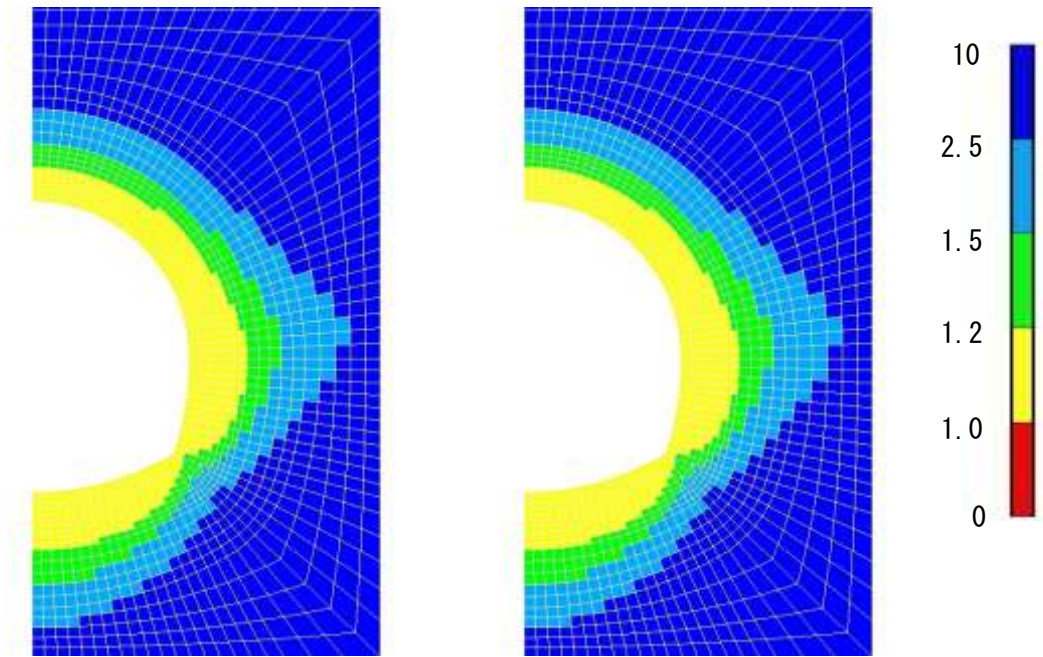
解析結果として、掘削直後、1 年後、10 年後、100 年後、300 年後、1,000 年後、1 万年後の処分坑道の周辺岩盤における局所安全率の分布を図 4.2.1-57～図 4.2.1-62 に、周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布を図 4.2.1-63～図 4.2.1-69 に、周辺岩盤の弾性係数の変化の分布を図 4.2.1-70～図 4.2.1-76 に示す。弾性係数の変化とは、その時点での弾性係数を初期弾性係数で除した値である。また、図 4.2.1-22 に示された天端、肩部、側部、脚部、底部の各要素の弾性係数の経時変化を図 4.2.1-77～図 4.2.1-79 に示す。

これらの図を見てみると、図 4.2.1-67 の経過時間 300 年後の最大せん断ひずみ分布や、図 4.2.1-74 の 300 年後の弾性係数の変化の分布に溶脱期間による違いがよく分かる。これらの図を見てみると、溶脱期間が短い順（ケース B、ケース A、ケース C）に、最大せん断ひずみの大きい領域や弾性係数の低下している領域が、肩部や側部に広がっていることが分かる。

「4.2.1(1) 埋戻し材の膨潤圧を設定した検討」と同様に、図 4.2.1-27 に示した壁面近傍の肩部の特定の要素に着目して、最大せん断ひずみの経時変化を比較した。着目要素の最大せん断ひずみの経時変化を図 4.2.1-80 に示す。また、経過時間 0～500 年の範囲に注目した場合の最大せん断ひずみの経時変化を図 4.2.1-81 に示す。これらの図によると、ケース A（溶脱期間 400 年、昨年度ケース 8）の場合、掘削後 252 年後に限界せん断ひずみ（上限） $\gamma_{\max}=1.340\%$ を超えた。また、ケース B（溶脱期間 200 年）の場合は 129 年、ケース C（溶脱期間 800 年）の場合は 460 年のときに限界せん断ひずみ（上限）を超え、溶脱速度が遅くなると、岩盤の最大せん断ひずみで評価した場合の坑道安定性の保持期間が長くなることが分かった。

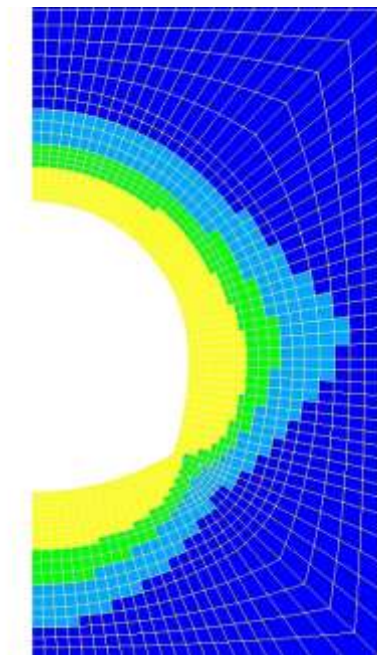
図 4.2.1-24 に示した天端、肩部、側部、脚部、底部の 5 箇所の要素に着目したときの吹付けコンクリートの応力度の経時変化を図 4.2.1-82～図 4.2.1-84 に示す。経過時間として 0～500 年の範囲に注目した場合の肩部における吹付けコンクリートの応力の経時変化の比較を図 4.2.1-85 に示す。これらの図によると、ケース A の場合、掘削後 140 年後に肩部の吹付けコンクリートの応力が設計基準強度を超えた。また、ケース B の場合は 73 年、ケース C の場合は 260 年のときに肩部の吹付けコンクリートの応力が設計基準強度を超えた。最大せん断ひずみのときと同様に、溶脱速度が遅くなると、吹付けコンクリートの応力で評価した場合の坑道安定性の保持期間も長くなることが分かった。

これらの結果と「4.2.1(1) 埋戻し材の膨潤圧を設定した検討」の結果と比較してみると、埋戻し材よりも吹付けコンクリートの物性が坑道安定性の保持期間に大きく影響することが分かった。



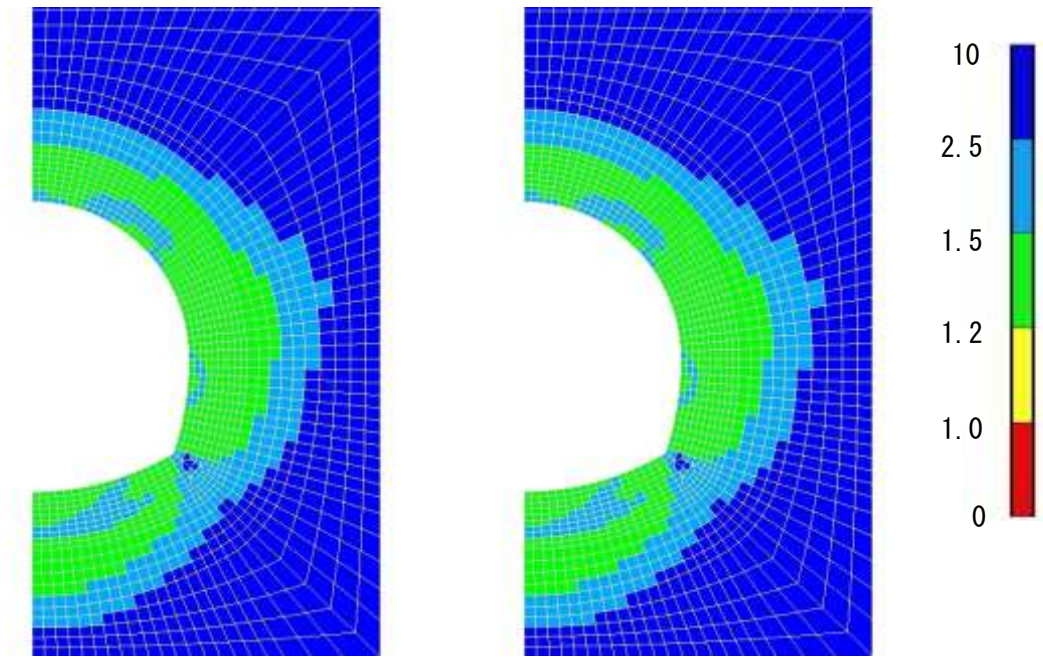
(a) ケース A

(b) ケース B



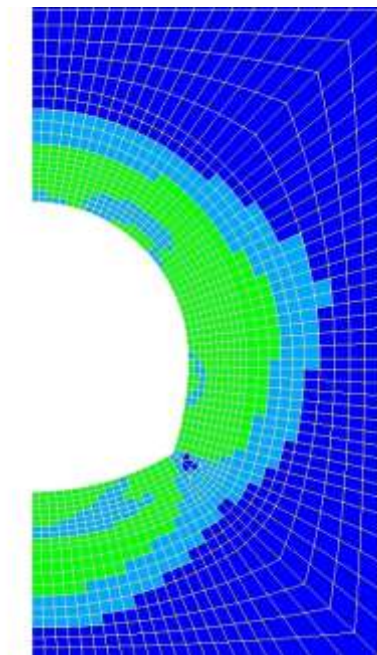
(c) ケース C

図 4.2.1-56 掘削直後の局所安全率の分布



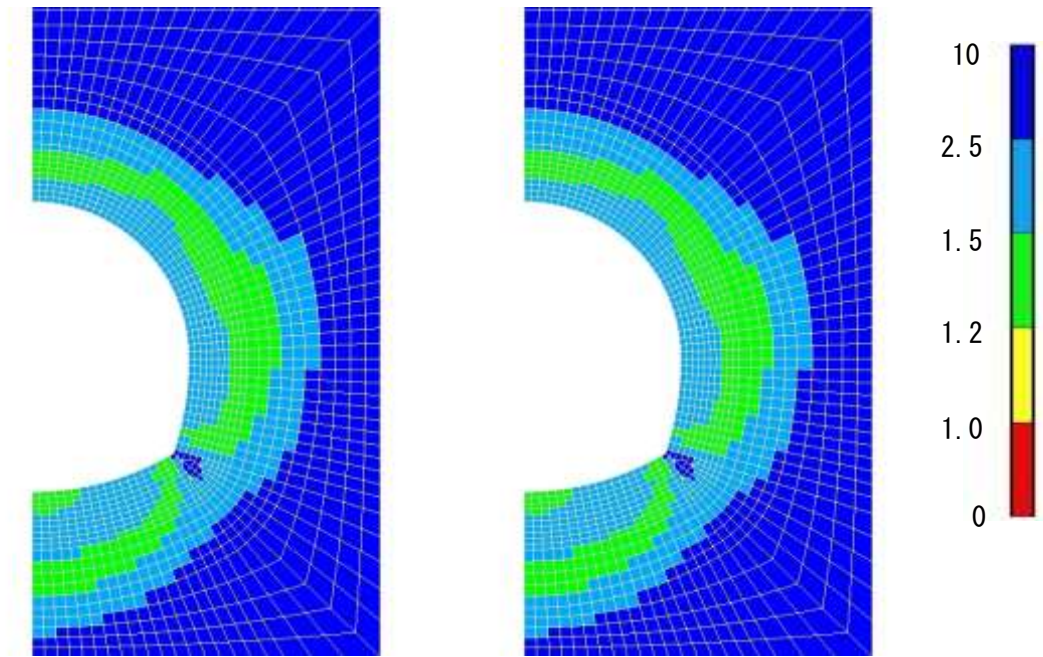
(a) ケース A

(b) ケース B



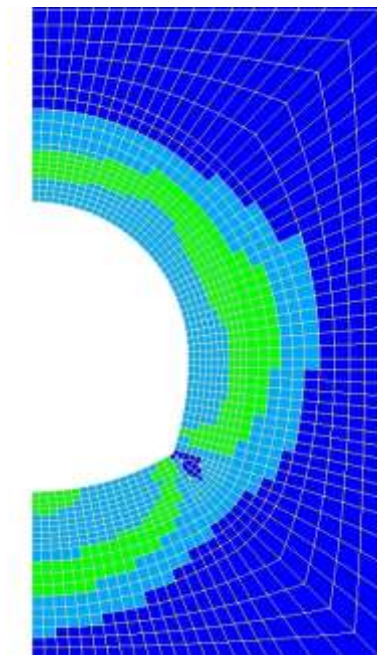
(c) ケース C

図 4.2.1-57 経過時間 1 年時の局所安全率の分布



(a) ケース A

(b) ケース B



(c) ケース C

図 4.2.1-58 経過時間 10 年時の局所安全率の分布

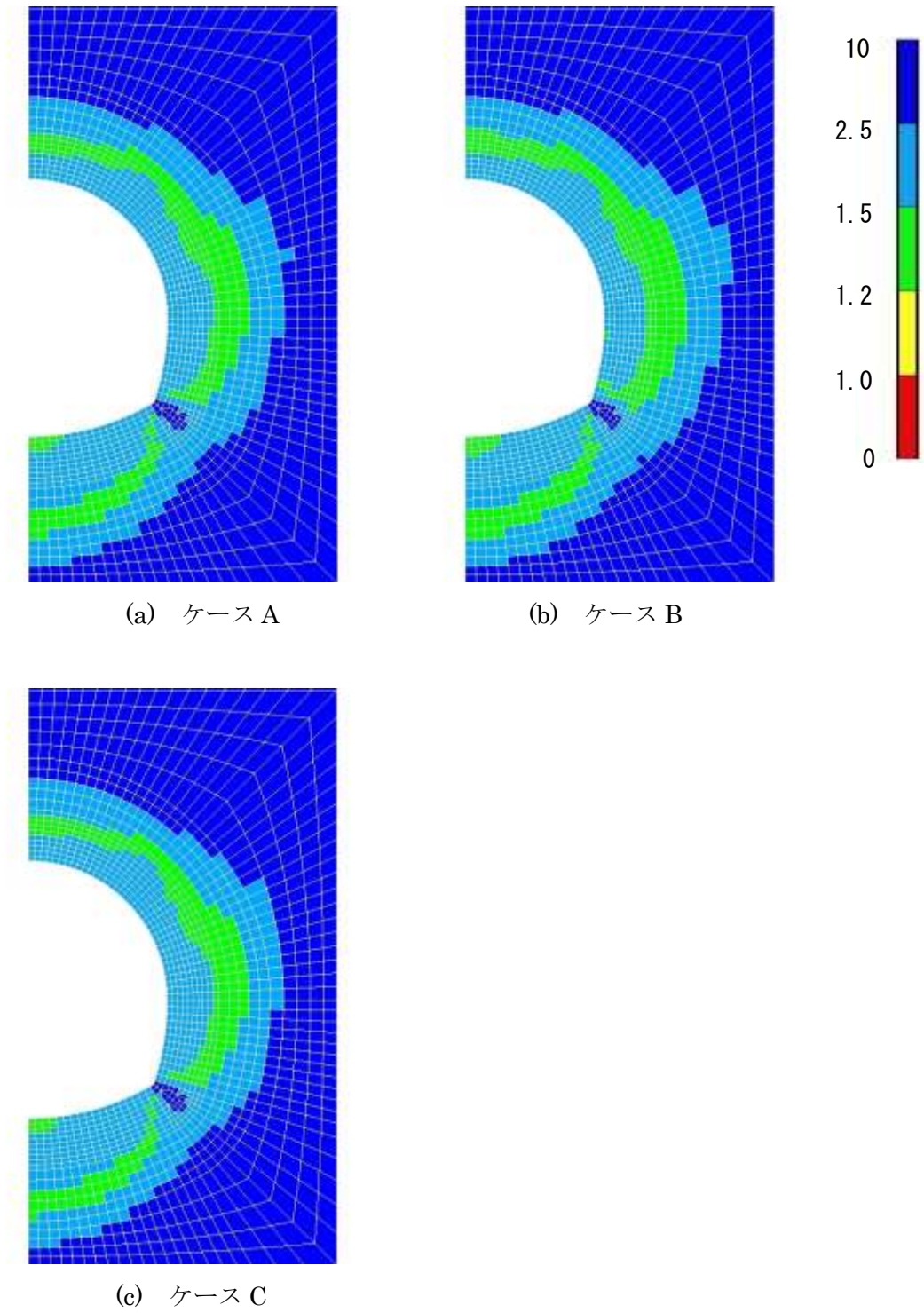
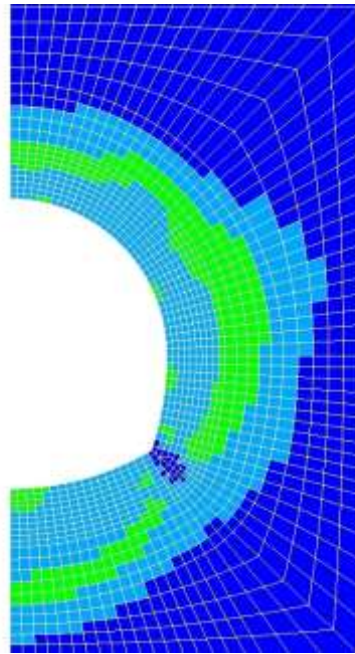
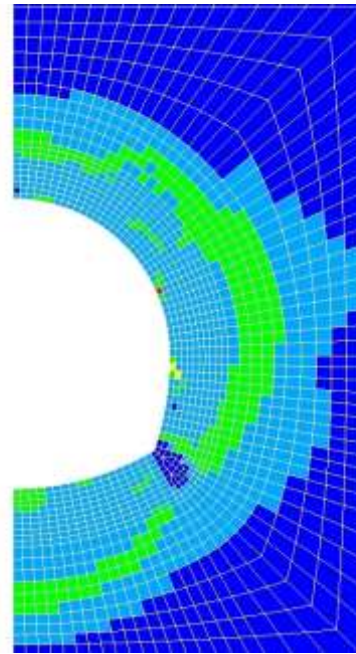


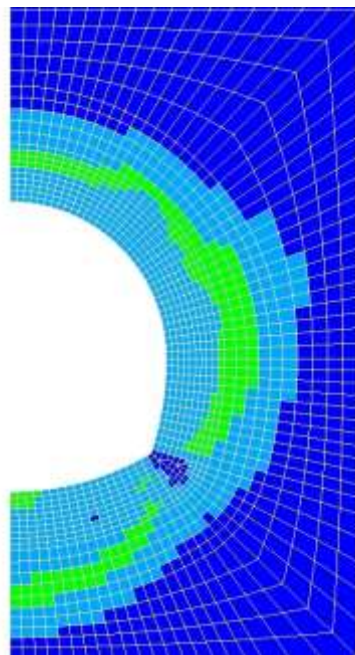
図 4.2.1-59 経過時間 100 年時の局所安全率の分布



(a) ケース A

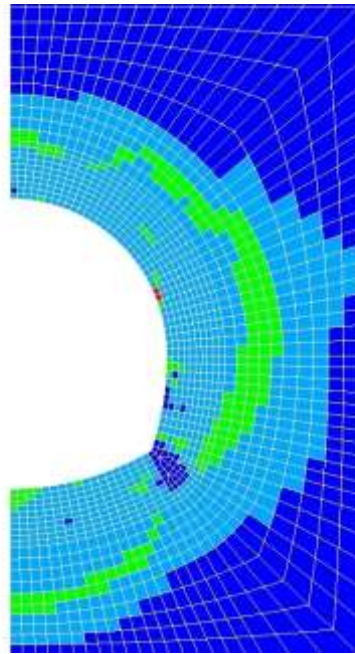


(b) ケース B

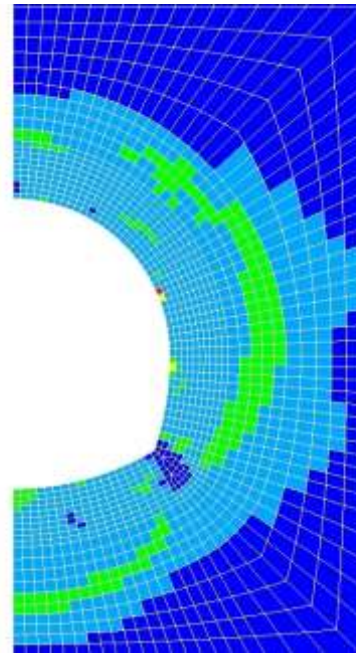


(c) ケース C

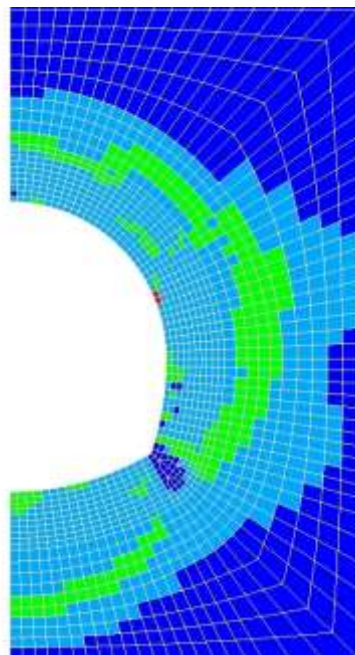
図 4.2.1-60 経過時間 300 年時の局所安全率の分布



(a) ケース A

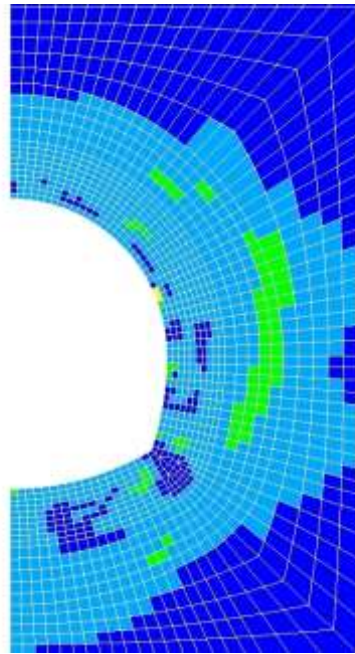


(b) ケース B

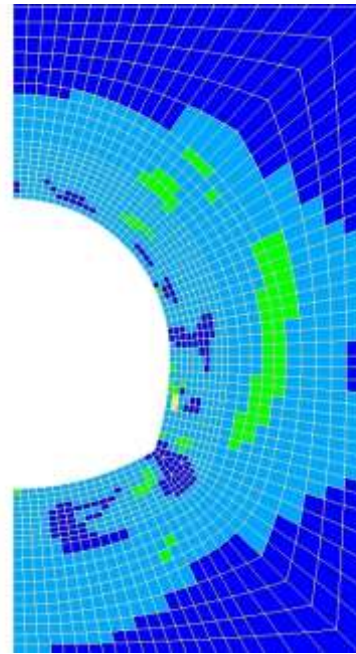


(c) ケース C

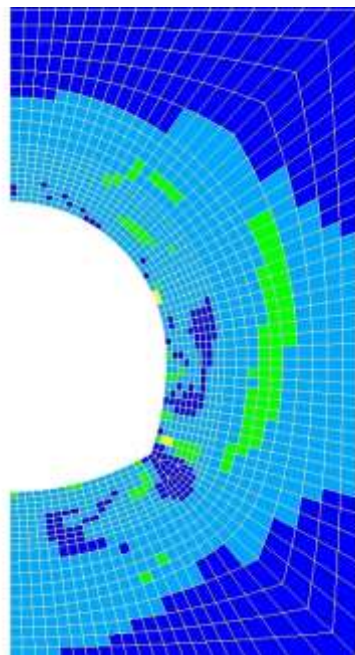
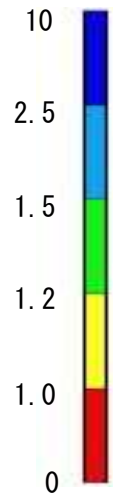
図 4.2.1-61 経過時間 1,000 年時の局所安全率の分布



(a) ケース A

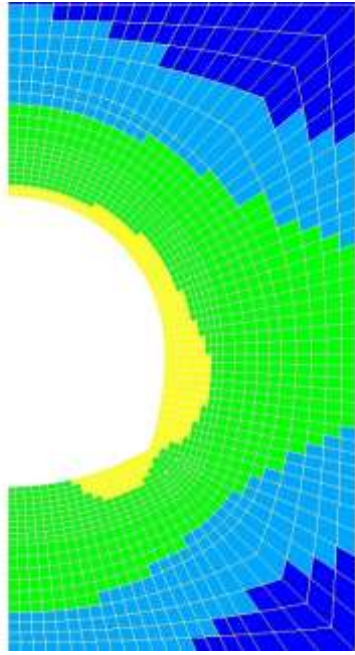


(b) ケース B

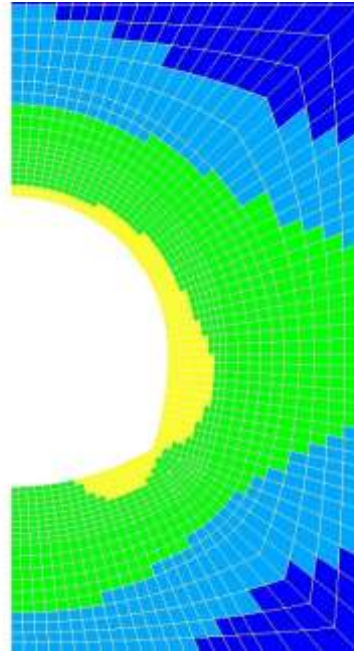


(c) ケース C

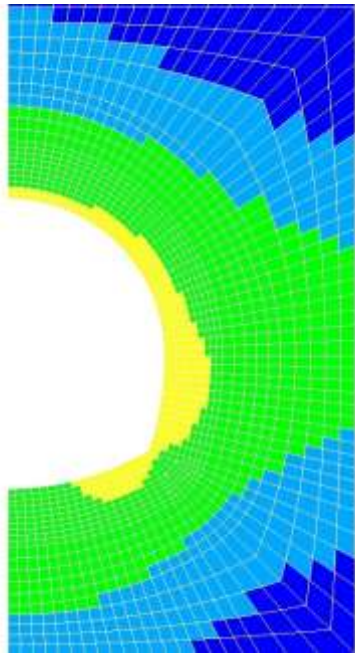
図 4.2.1-62 経過時間 10,000 年時の局所安全率の分布



(a) ケース A

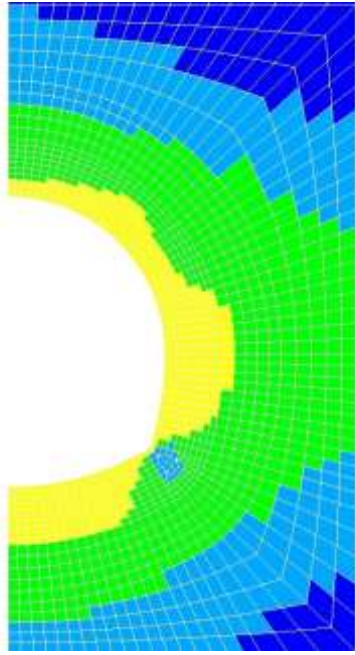


(b) ケース B

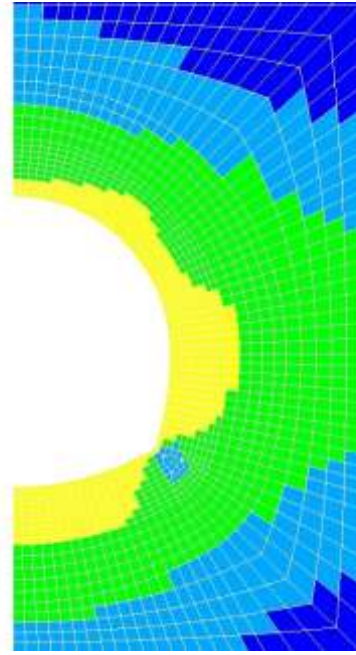


(c) ケース C

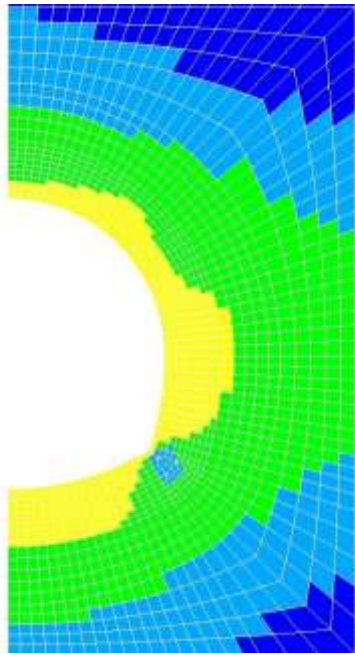
図 4.2.1-63 掘削直後の最大せん断ひずみの分布



(a) ケース A

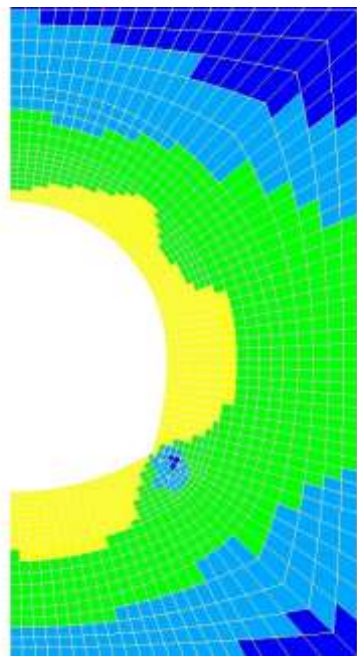


(b) ケース B

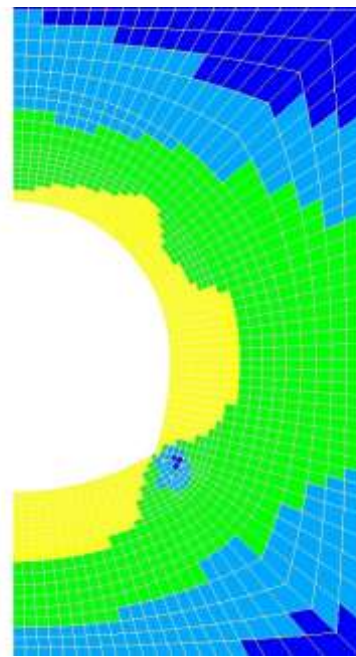


(c) ケース C

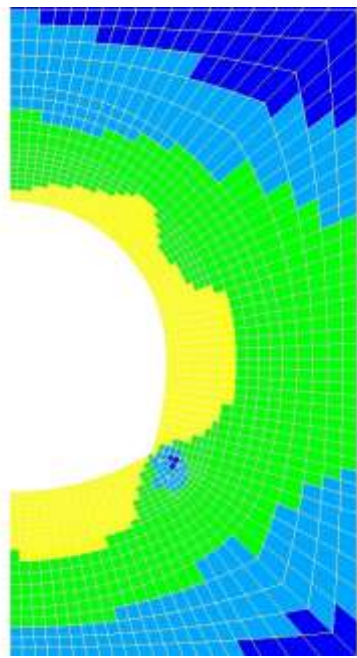
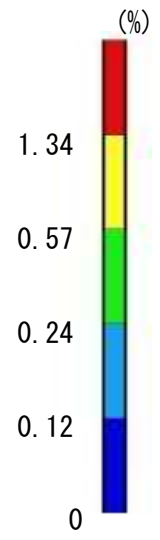
図 4.2.1-64 経過時間 1 年時の最大せん断ひずみの分布



(a) ケース A

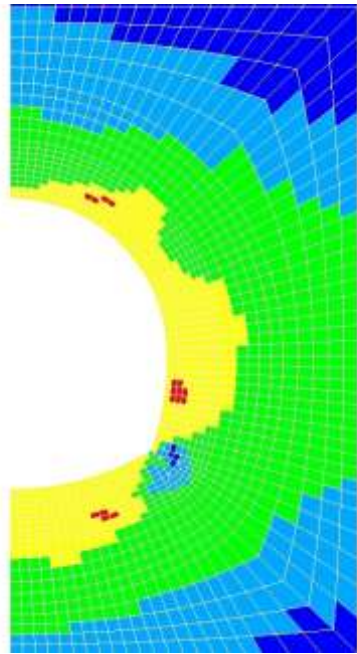


(b) ケース B

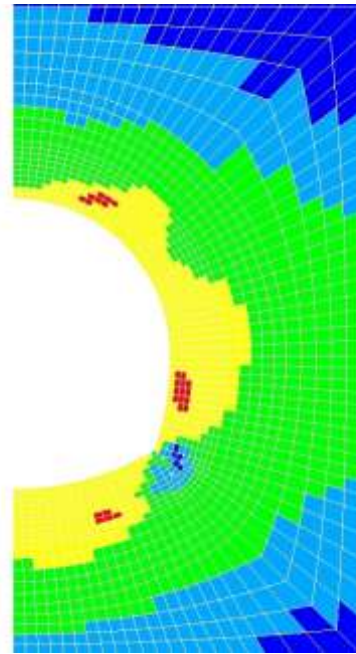


(c) ケース C

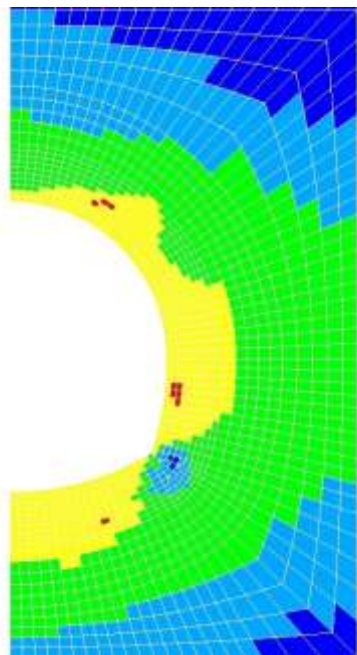
図 4.2.1-65 経過時間 10 年時の最大せん断ひずみの分布



(a) ケース A

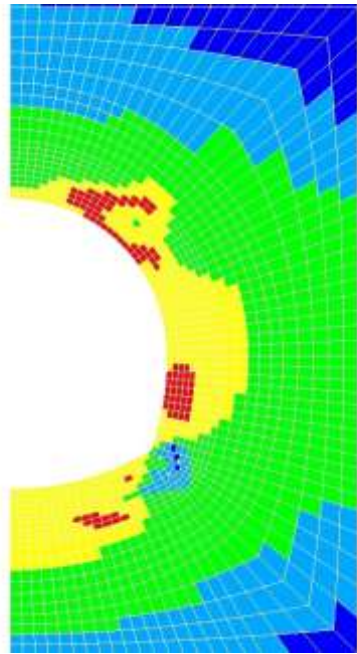


(b) ケース B

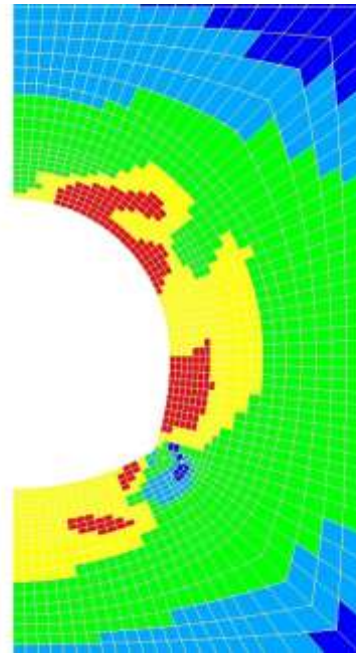


(c) ケース C

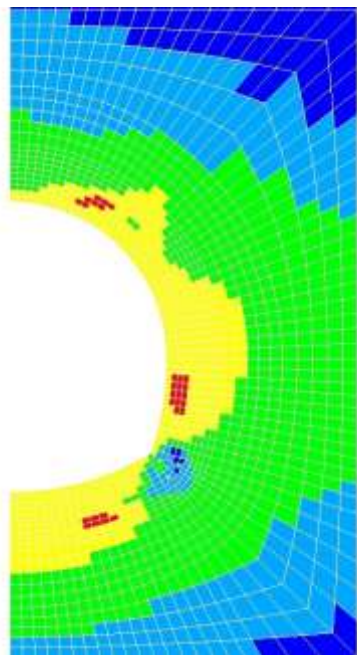
図 4.2.1-66 経過時間 100 年時の最大せん断ひずみの分布



(a) ケース A

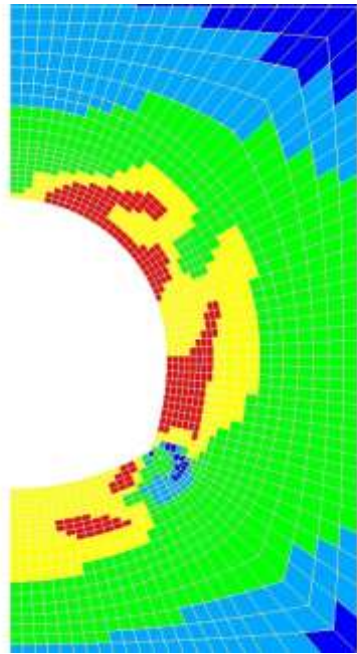


(b) ケース B

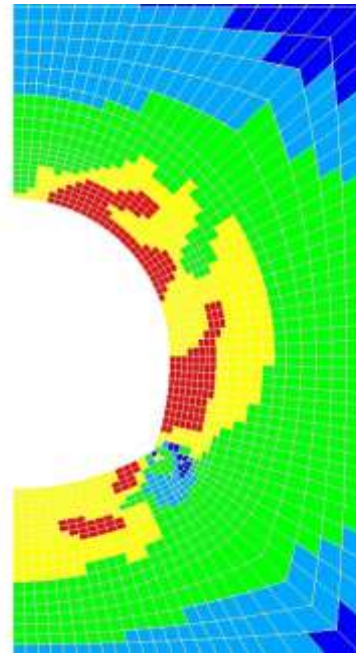


(c) ケース C

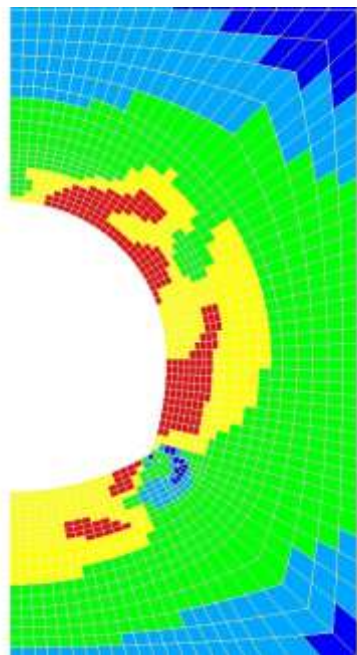
図 4.2.1-67 経過時間 300 年時の最大せん断ひずみの分布



(a) ケース A

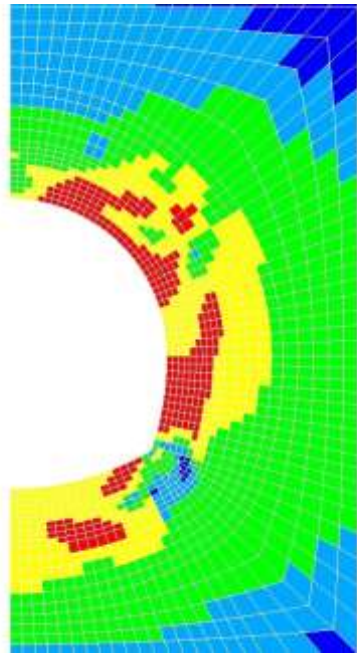


(b) ケース B

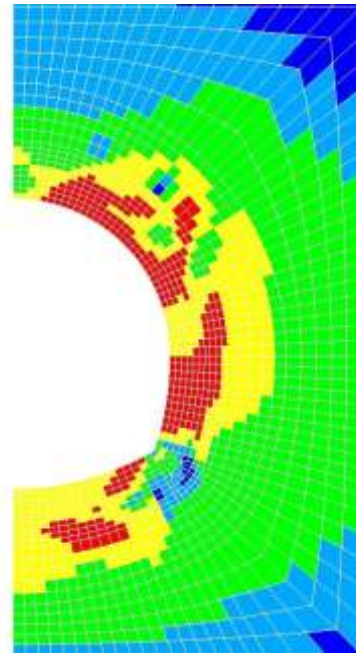


(c) ケース C

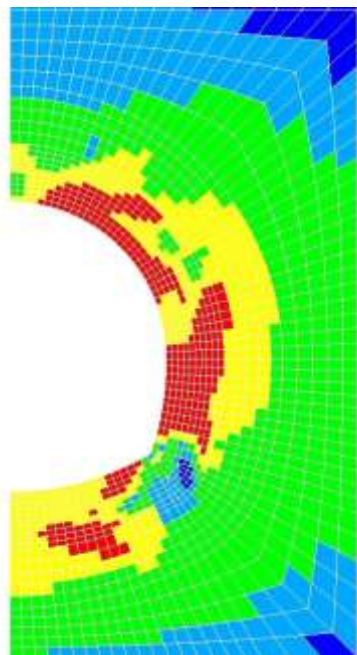
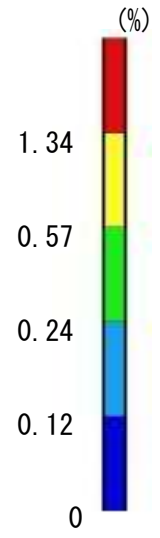
図 4.2.1-68 経過時間 1,000 年時の最大せん断ひずみの分布



(a) ケース A



(b) ケース B



(c) ケース C

図 4.2.1-69 経過時間 10,000 年時の最大せん断ひずみの分布

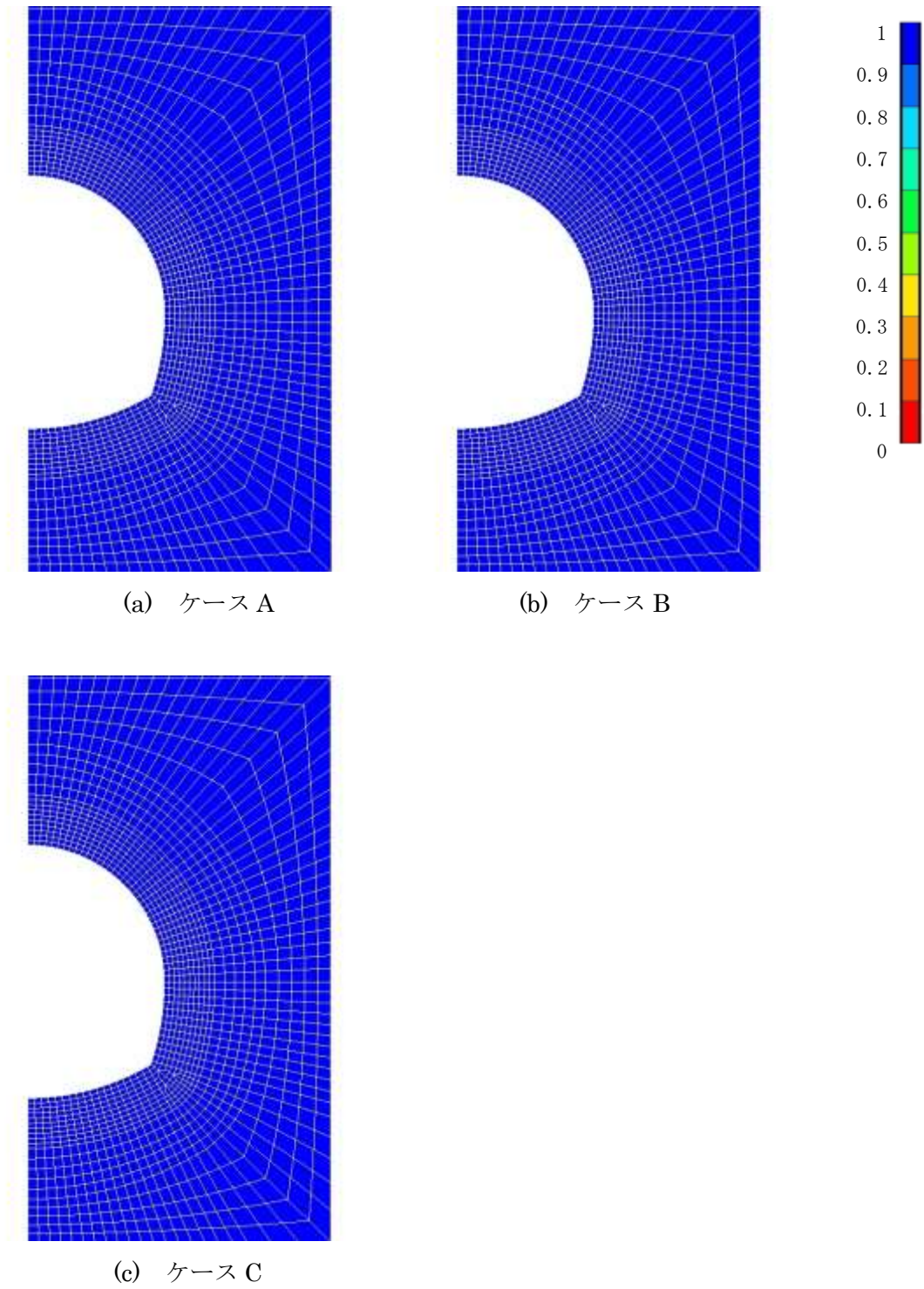


図 4.2.1-70 掘削直後における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布

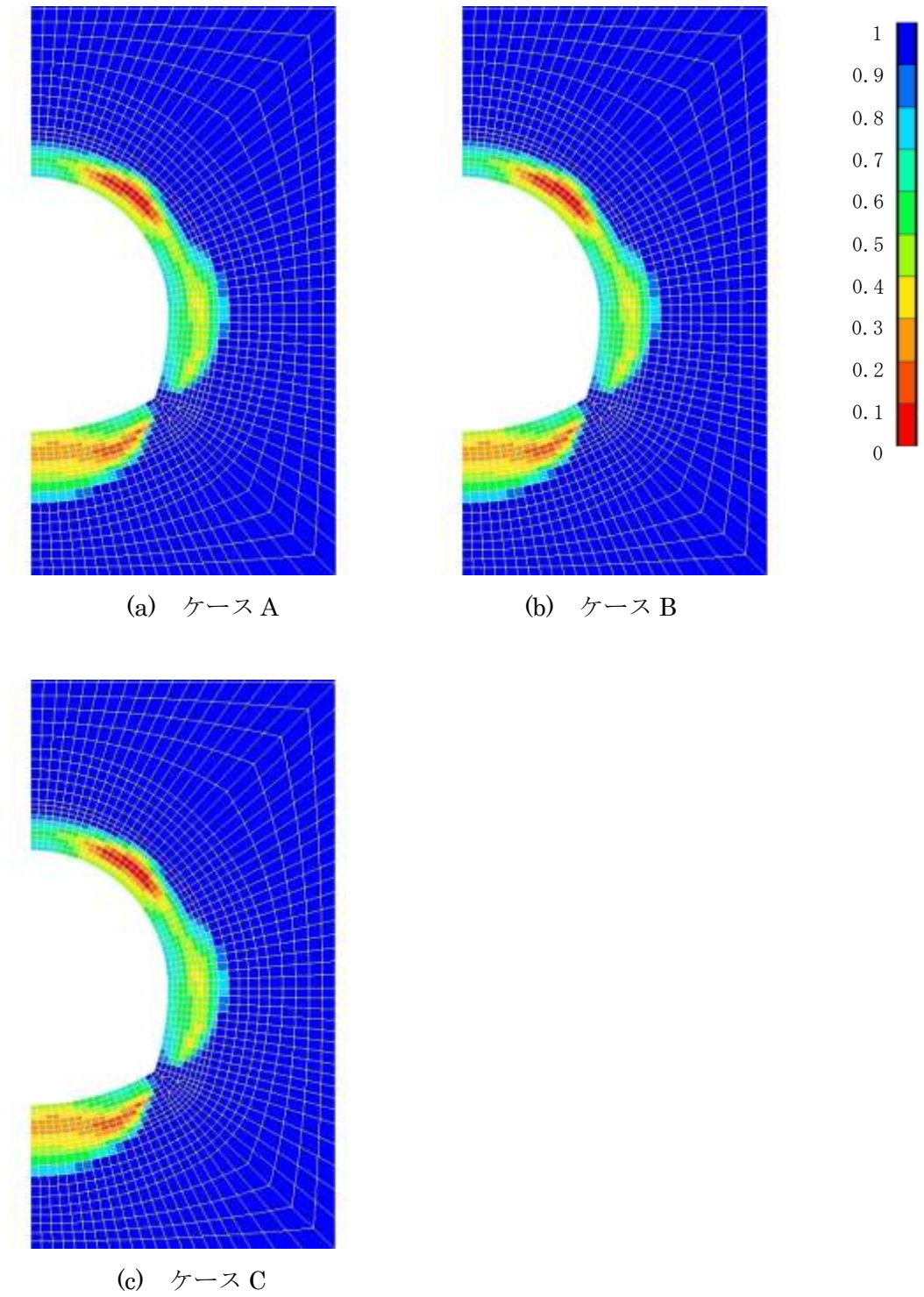


図 4.2.1-71 経過時間 1 年後における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布

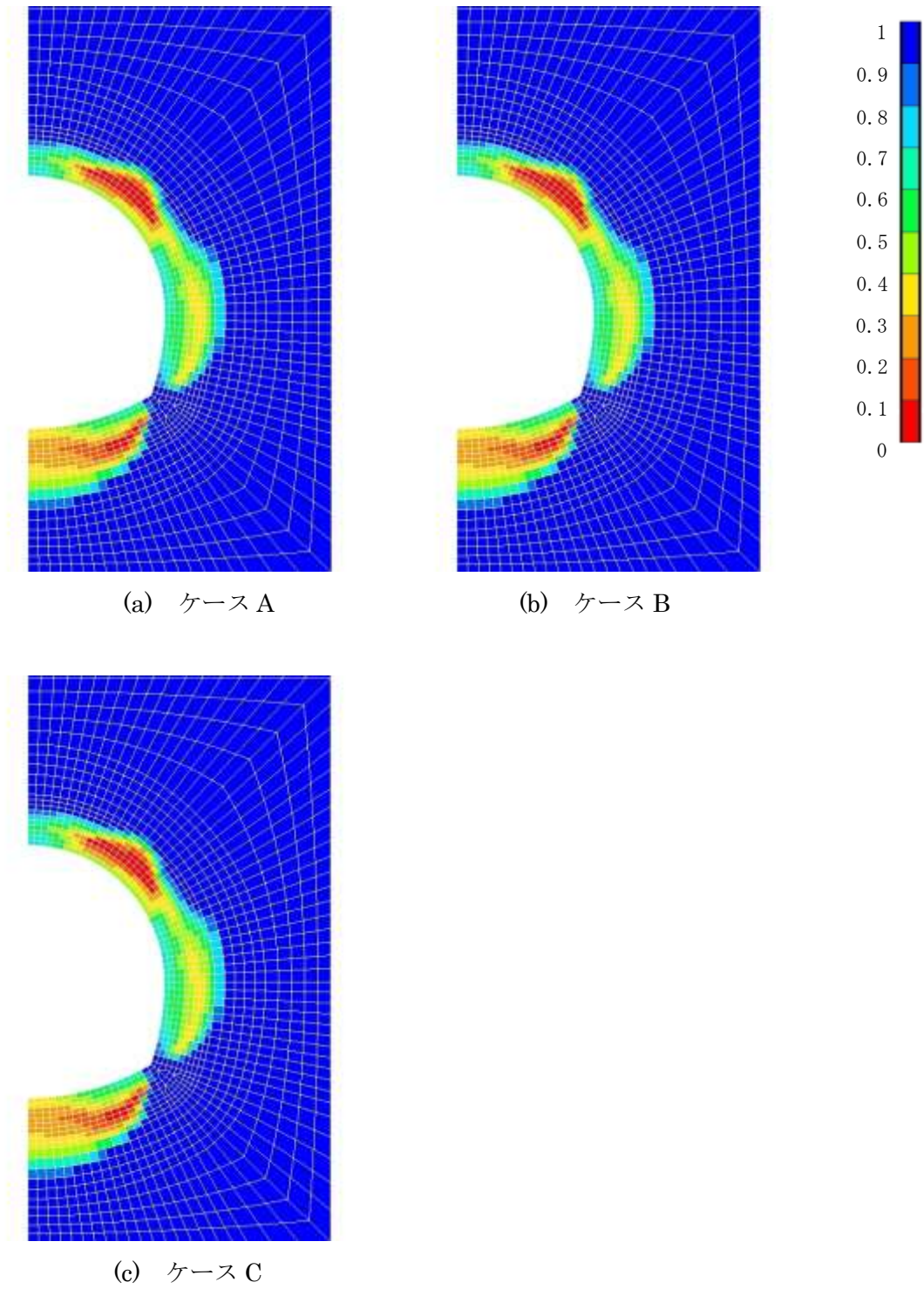


図 4.2.1-72 経過時間 10 年後における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布

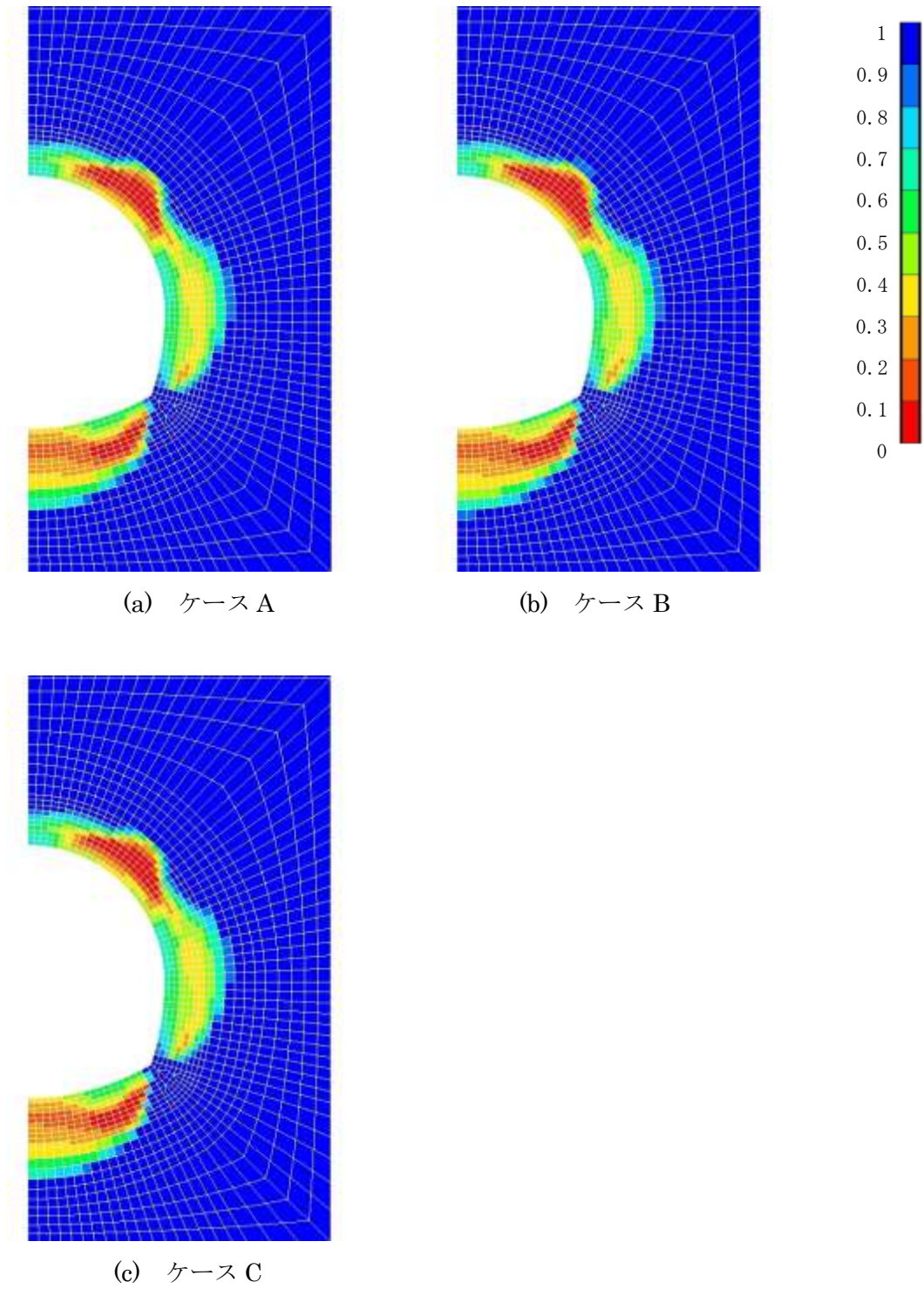


図 4.2.1-73 経過時間 100 年後における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布

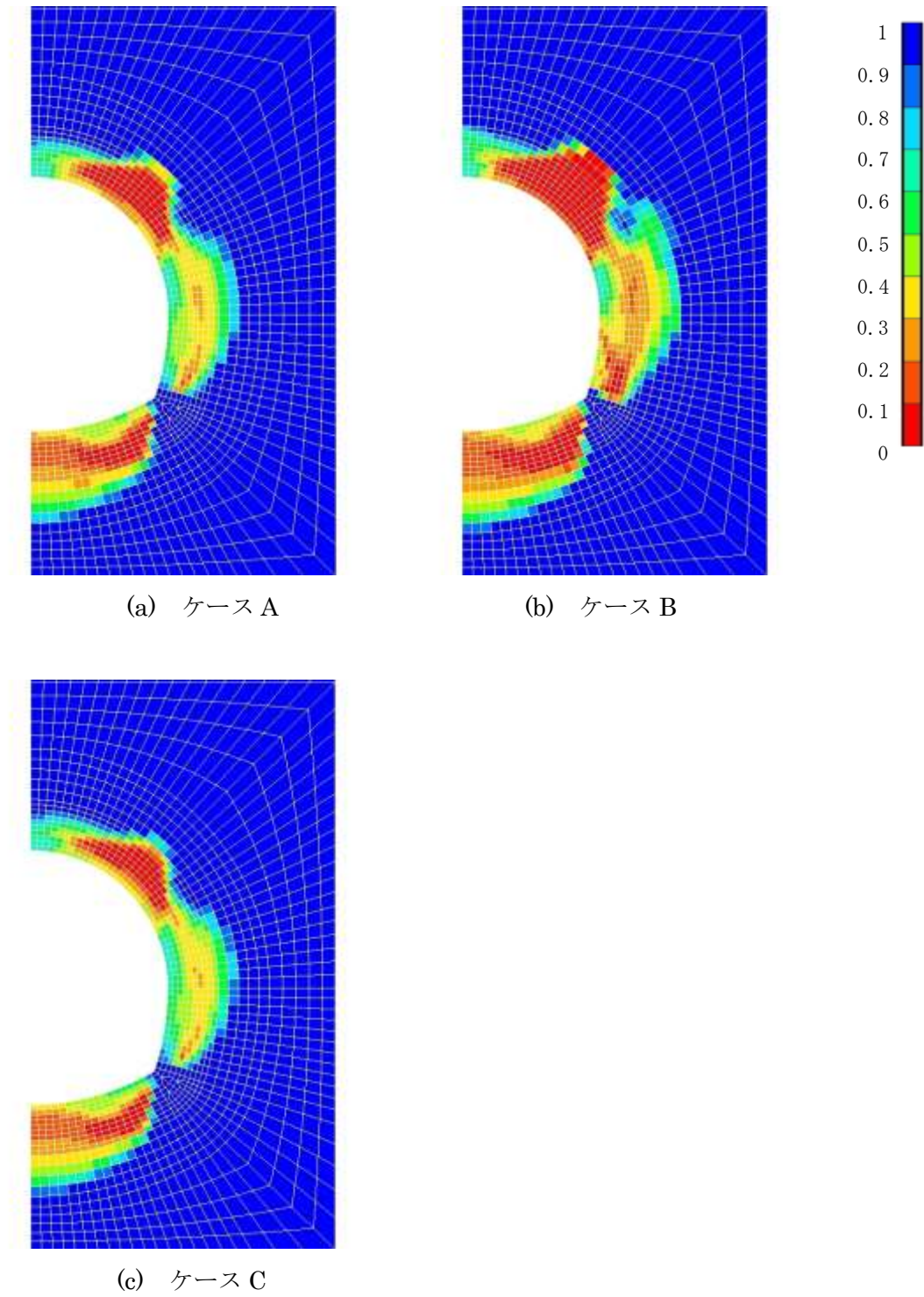


図 4.2.1-74 経過時間 300 年後における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布

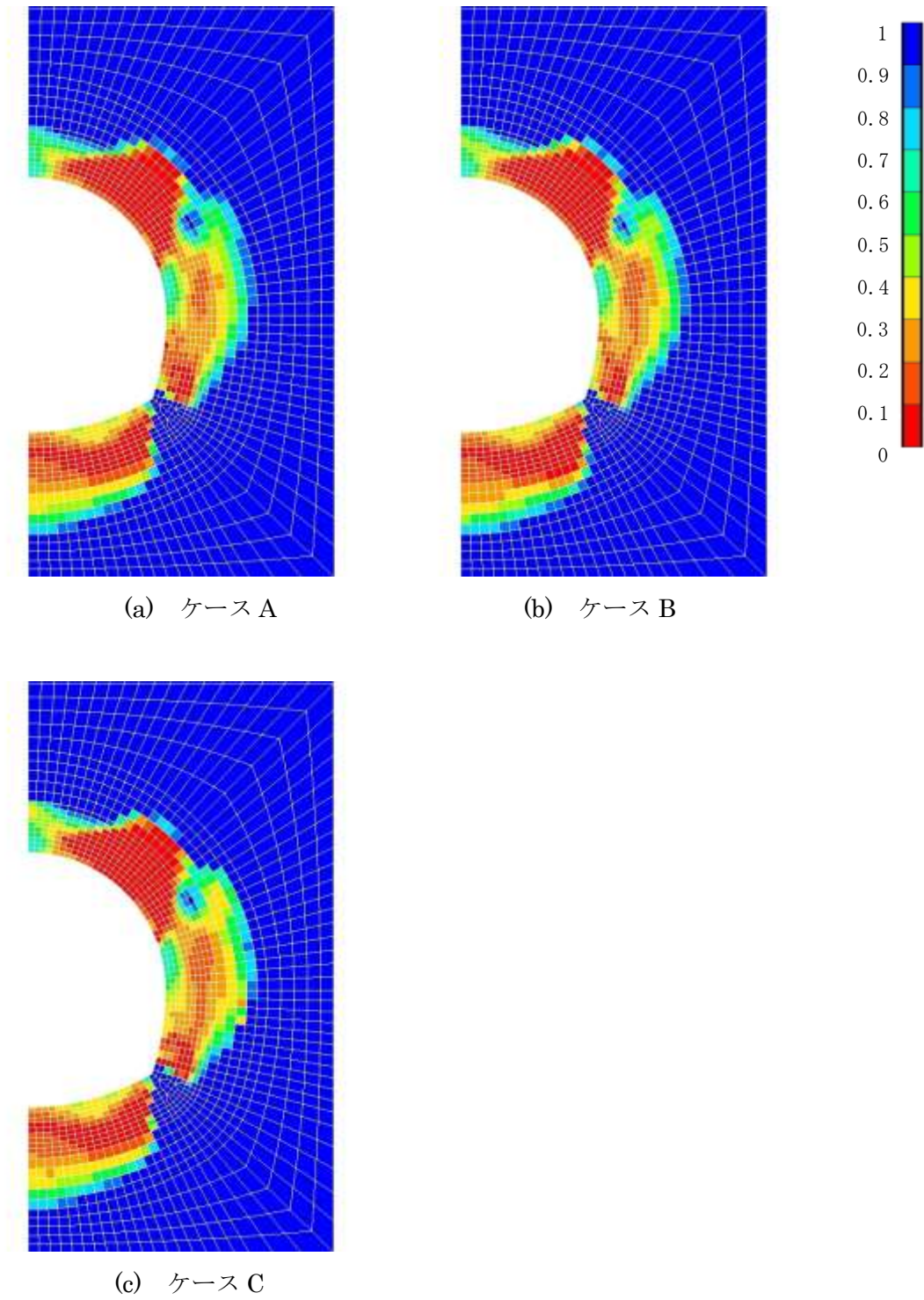


図 4.2.1-75 経過時間 1,000 年後における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布

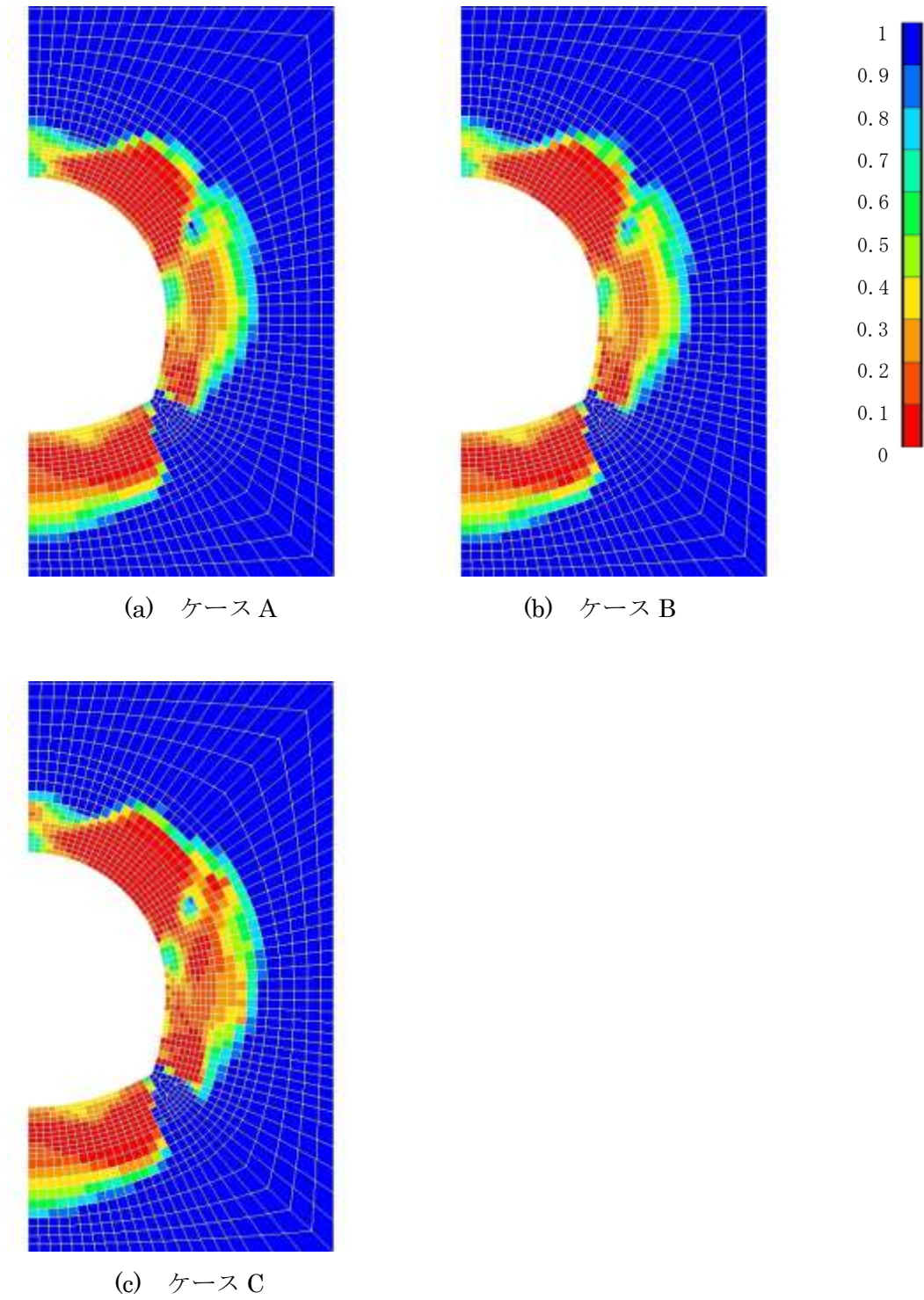


図 4.2.1-76 経過時間 10,000 年後における周辺岩盤の弾性係数の変化の分布

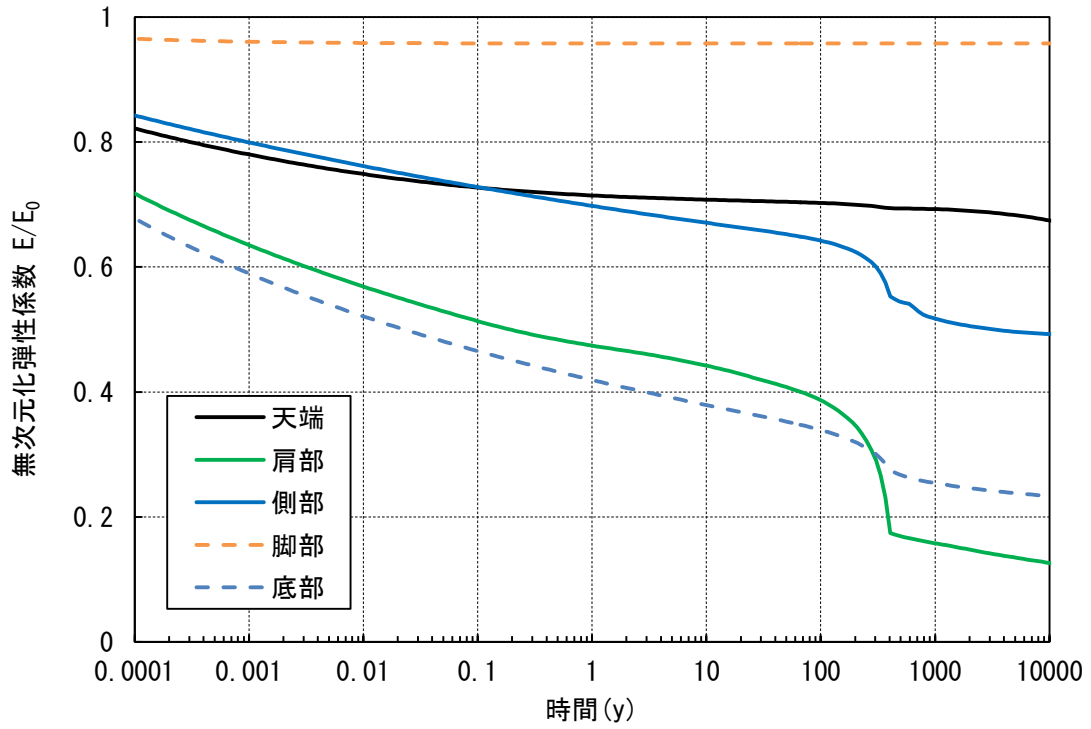


図 4.2.1-77 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース A、図 4.2.1-22 再掲)

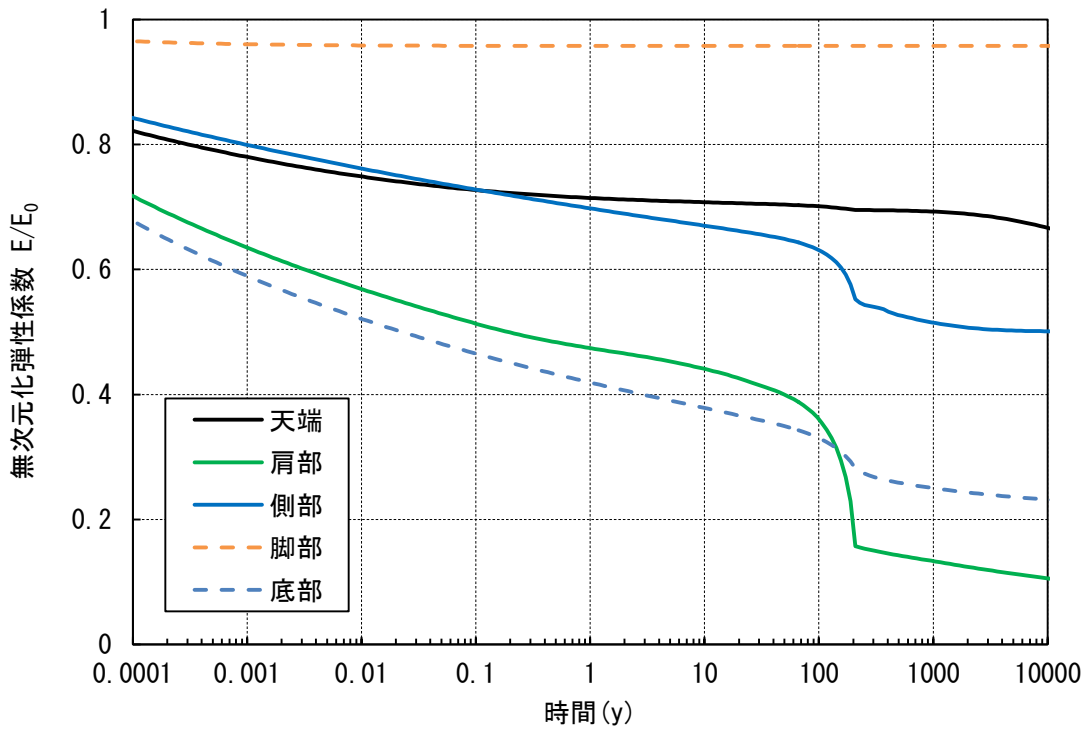


図 4.2.1-78 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース B)

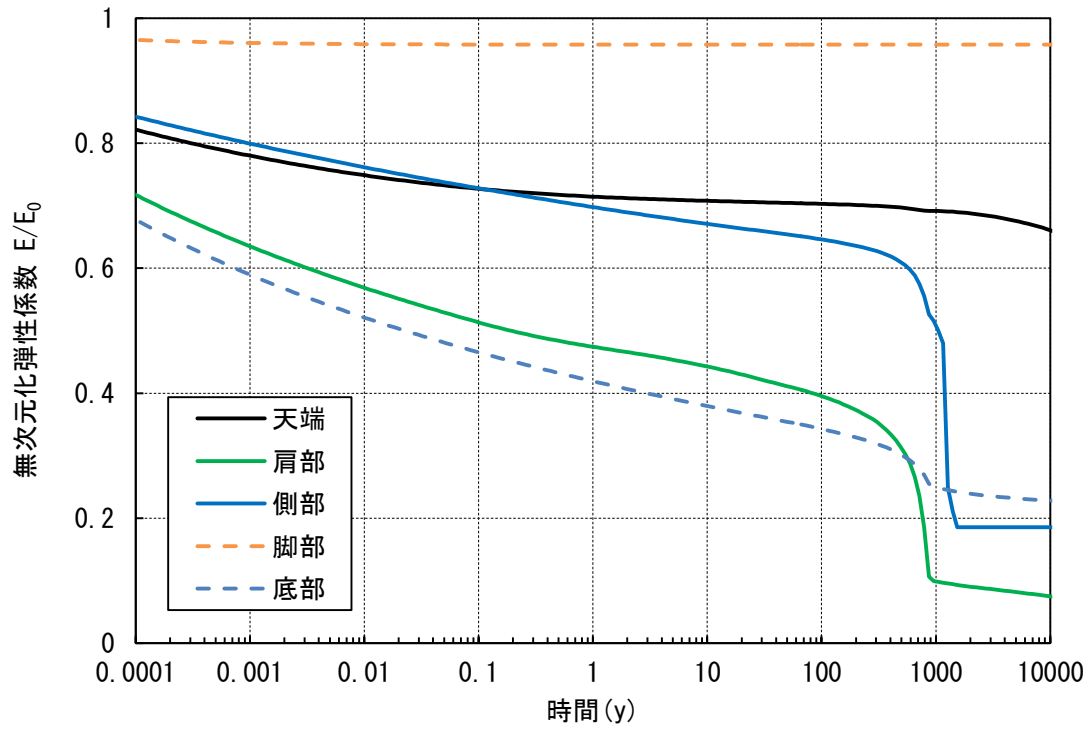


図 4.2.1-79 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース C)

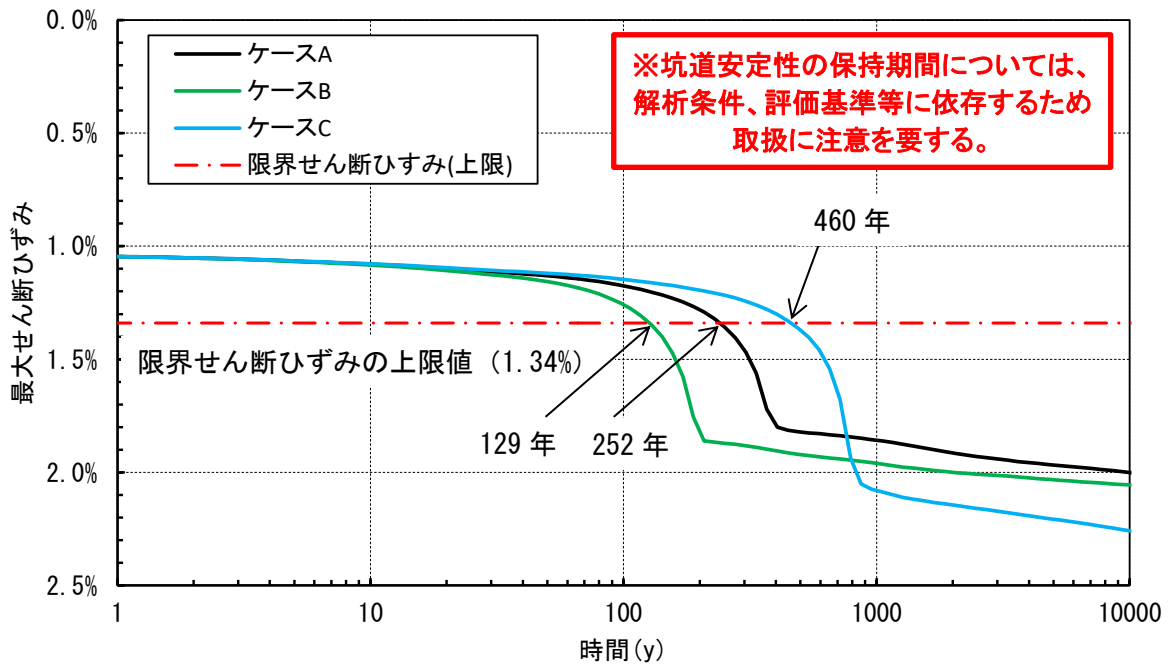


図 4.2.1-80 着目要素における最大せん断ひずみの経時変化

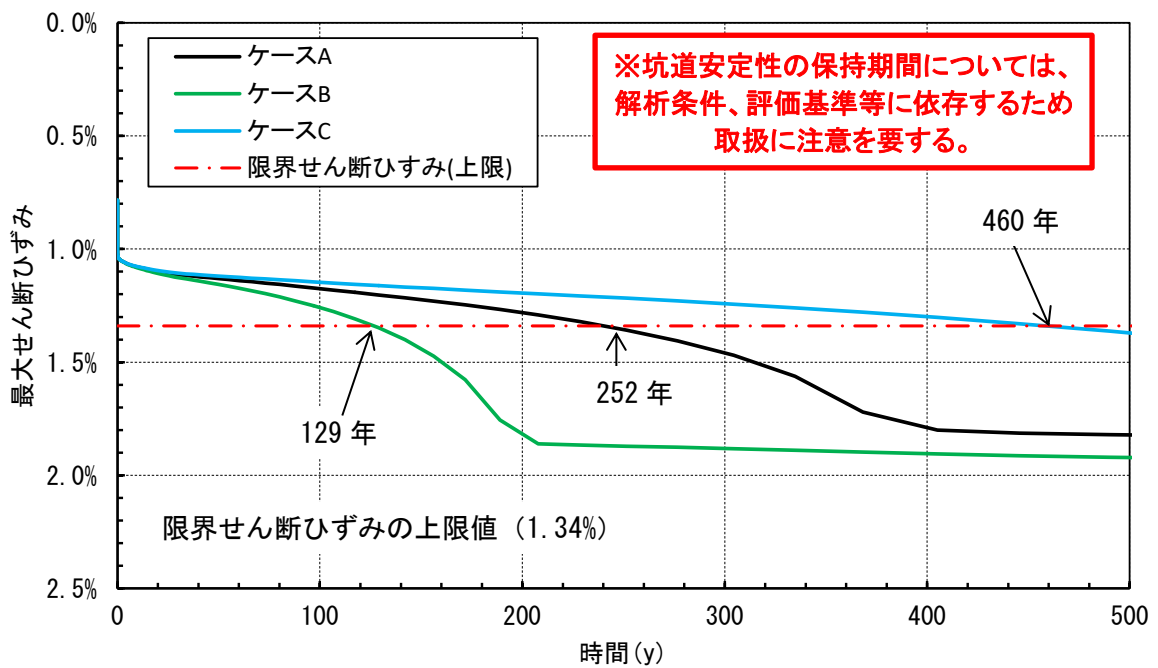


図 4.2.1-81 経過時間 0~500 年の最大せん断ひずみの経時変化

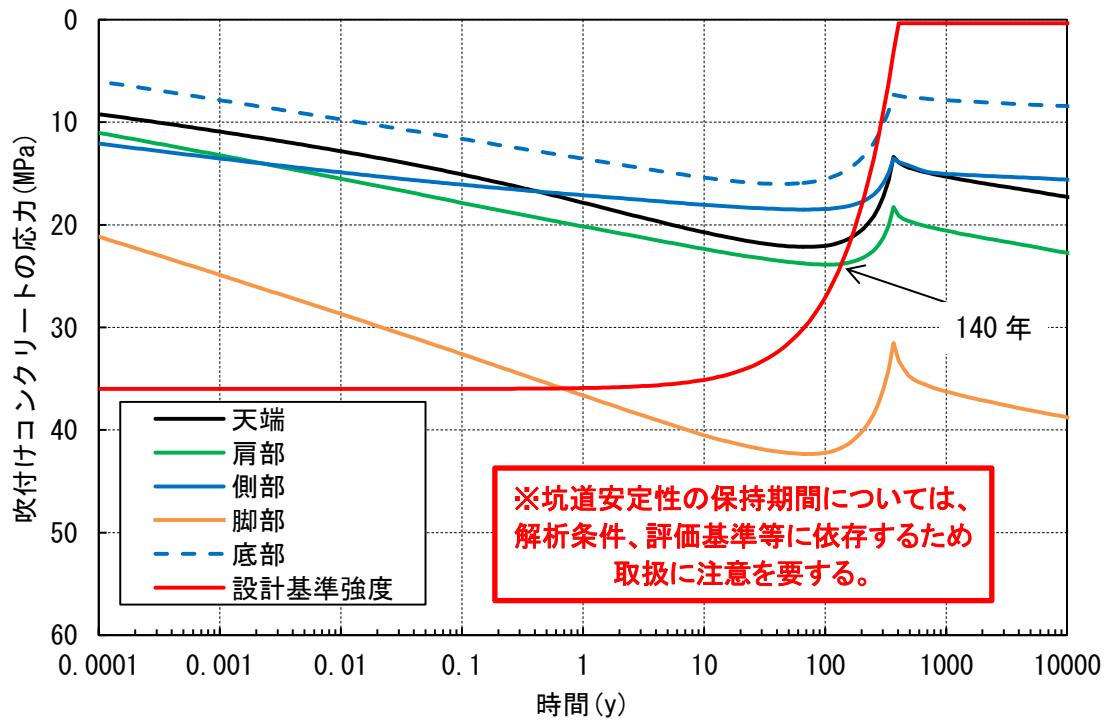


図 4.2.1-82 ケース A における吹付けコンクリートの応力の経時変化

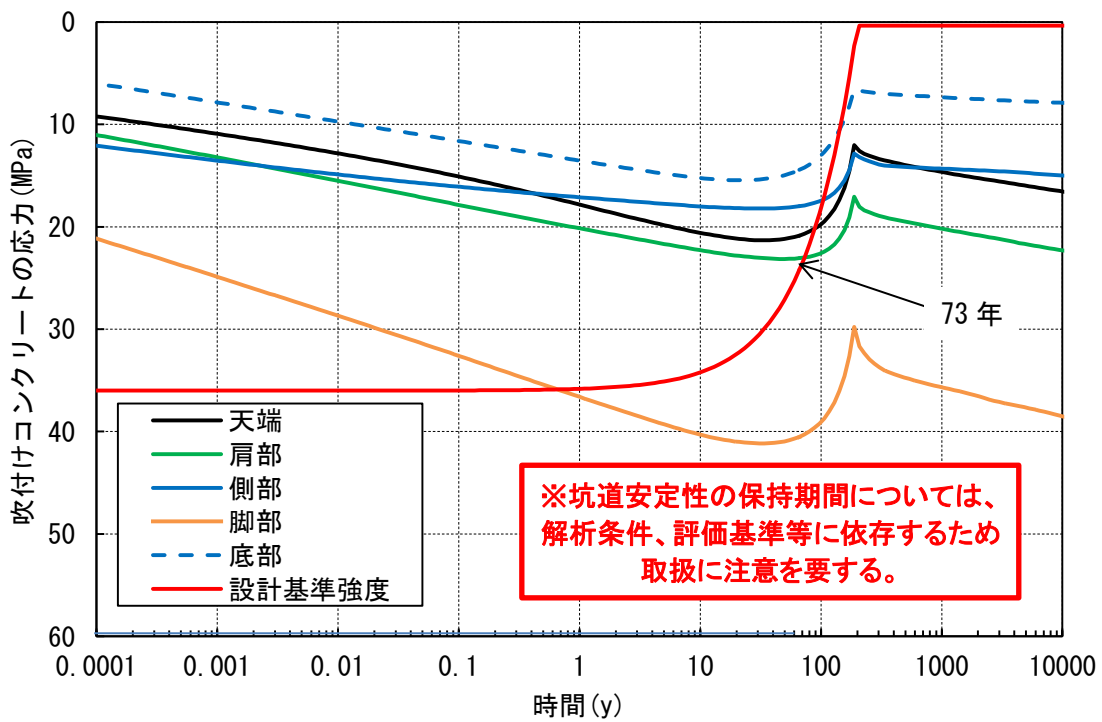


図 4.2.1-83 ケース B における吹付けコンクリートの応力の経時変化

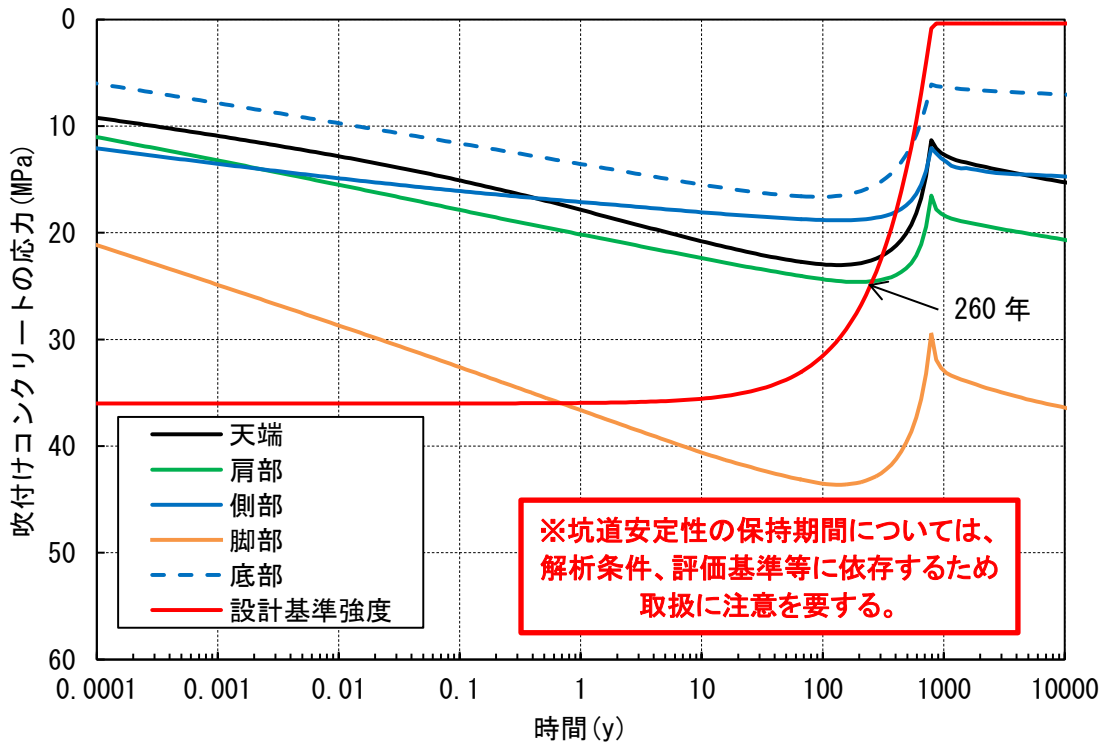


図 4.2.1-84 ケース C における吹付けコンクリートの応力の経時変化

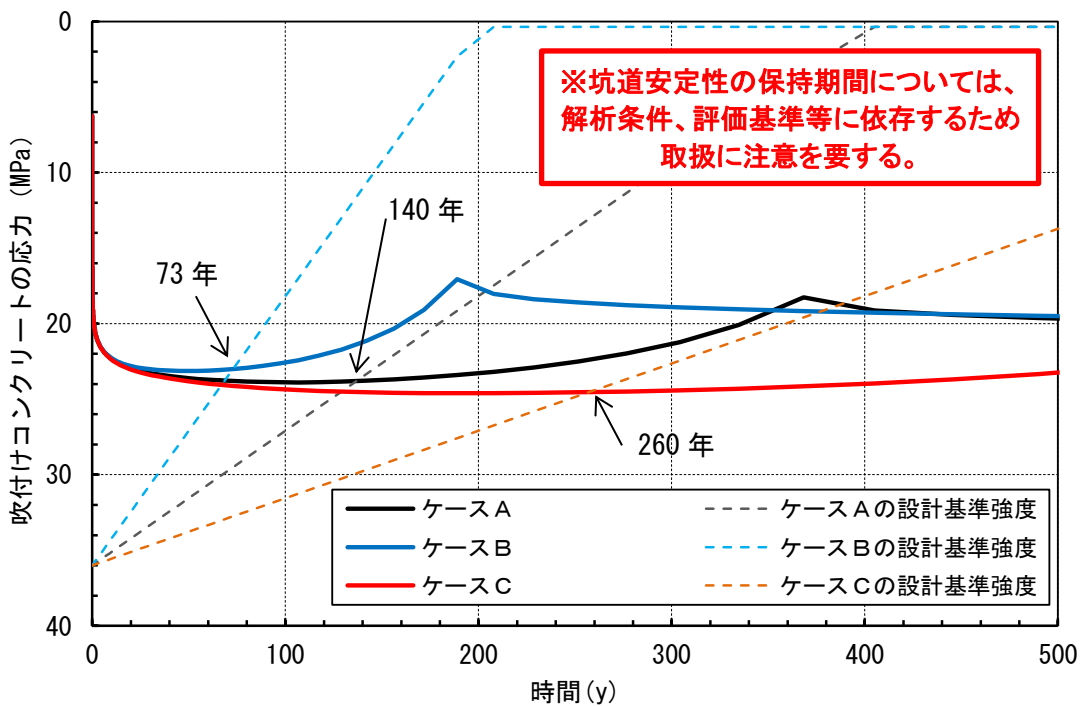


図 4.2.1-85 経過時間 0~500 年における肩部の吹付けコンクリートの応力の経時変化の比較

6) 坑道安定性の保持期間に関する考察

前述の解析結果から、溶脱期間の違いが坑道安定性の保持期間に影響を与えることが分かった。そこで、坑道周辺岩盤の内部にある支保工等の剛性にどのような違いがあったのかを調べることにした。

支保工等の剛性の経時変化を算定する方法、解析条件、解析モデルは、「4.2.1(2)6)a 支保工等の剛性の定義と算定方法」に示した方法と同じである。ただし、吹付けコンクリートの物性値の経時変化は、図 4.2.1-55 に示した通りである。

解析の結果として、各ケースの支保工等の剛性の経時変化を図 4.2.1-86 に示す。この図では、経過時間 500 年までの剛性を示している。

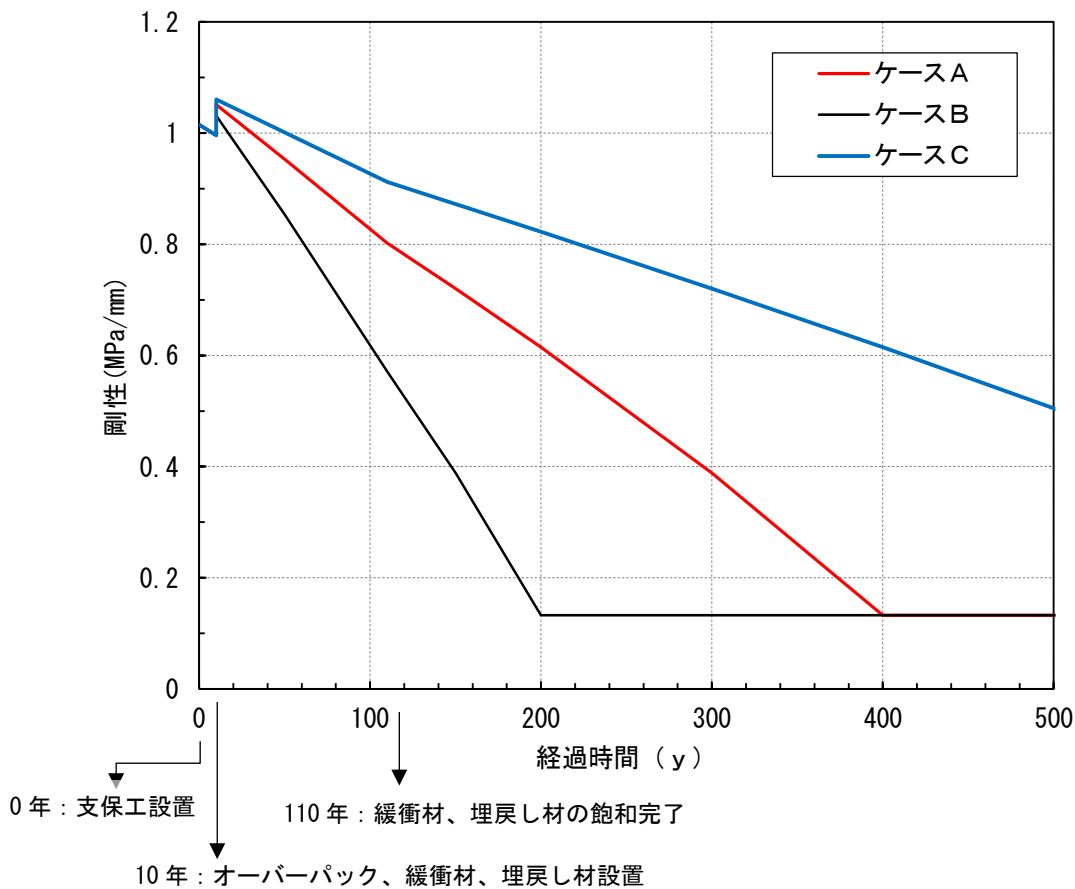


図 4.2.1-86 支保工等の剛性の経時変化

溶脱期間 400 年のケース A と 200 年に短縮したケース B を比較してみると、ケース B の支保工等の剛性は 0.2~1 倍となっている。また、溶脱期間 800 年のケース C とケース A を比較してみると、ケース C の支保工等の剛性は 1~4.6 倍となっている。

溶脱期間が異なることによって、支保工等に大きな剛性の差が生じたことになり、坑道安定性の保持期間に大きな差が表れたと考えられる。

(4) コンプライアンス可変型モデルの妥当性確認

1) 目的

これまでの処分坑道の力学的影響評価における岩盤の構成則には大久保らのコンプライアンス可変型モデルを用いている。ここでは、コンプライアンス可変型モデルの構成則の妥当性確認を示すことを目的として、解析と計測を比較して妥当性確認を行った例について文献調査を行った。これに対して、解析の妥当性の確認を必要があったことから、コンプライアンス可変型モデル[5]を用いた解析と現地計測を比較した妥当性確認を行った例について文献調査を行い、構成則の妥当性確認を示すことを目的とする。

岩盤のコンプライアンス可変型モデルについては、大久保教授・福井教授らグループが長年にわたって、その妥当性も含めて研究を行っている。最近でも、19年間継続した田下石凝灰岩の室内クリープ試験から構成則の妥当性について報告している[8]。一方、コンクリートの溶脱による劣化を考慮した構成則や、緩衝材および埋戻し材の飽和の進行を考慮した構成則については、本検討においては仮定したものであるため、課題として残っている。

ここでは、岩盤のコンプライアンス可変型モデルを対象として、現場の計測値との比較によって妥当性の確認を行った例[9], [10]を示すことにする。

2) 報告例1

緒方ら[9]は、秋田県の松峰鉱山の試験坑道において、現地計測[11]、[12]と掘削解析を行ってコンプライアンス可変型モデルの妥当性の確認を行っている。ここでは、その概要を示す。

なお論文では、岩盤の構成則に「非線形粘弾性モデル」という言葉が用いられているが、これは、コンプライアンス可変型モデルを示しているため、混乱を避ける意味で「コンプライアンス可変型モデル」と置き換えることにする。

計測、解析対象となったのは、松峰鉱山の L240- roadway と名付けられた試験坑道である。この坑道の周辺岩盤は、主として石膏、凝灰角礫岩ならびに凝灰岩から構成されていて、計測領域は石膏が大部分を占めていた。地質状況を図 4.2.1-87 に示す。

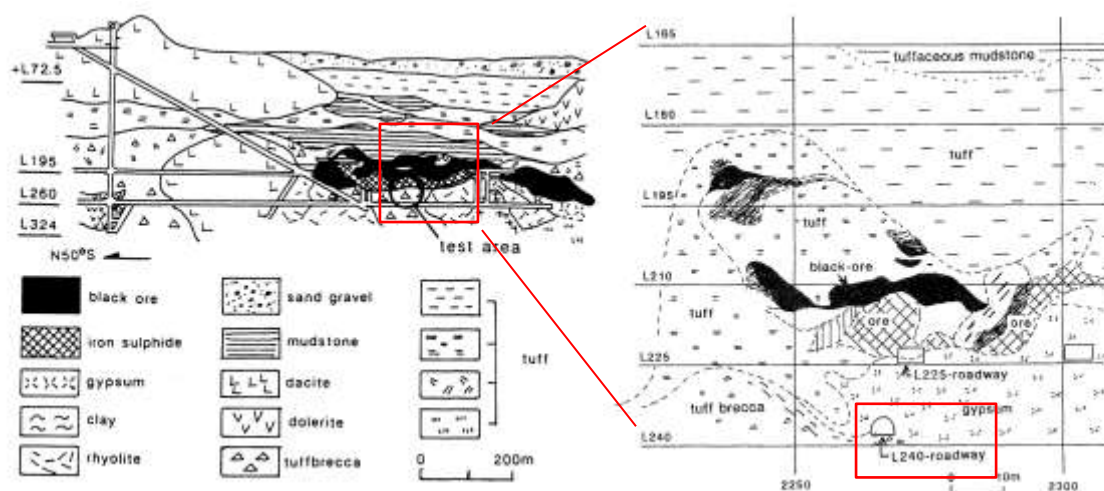


図 4.2.1-87 試験坑道周辺の地質状況[9]

計測データとしては、試験坑道の天盤から約 10m 上にある既存坑道 (L225-roadway) の底盤を基点とした岩盤内鉛直変位と、試験坑道の壁面を基点とした岩盤内変位並びに試験坑道のコンバージェンスである。計測機器の配置を図 4.2.1-88 と図 4.2.1-89 に示す。

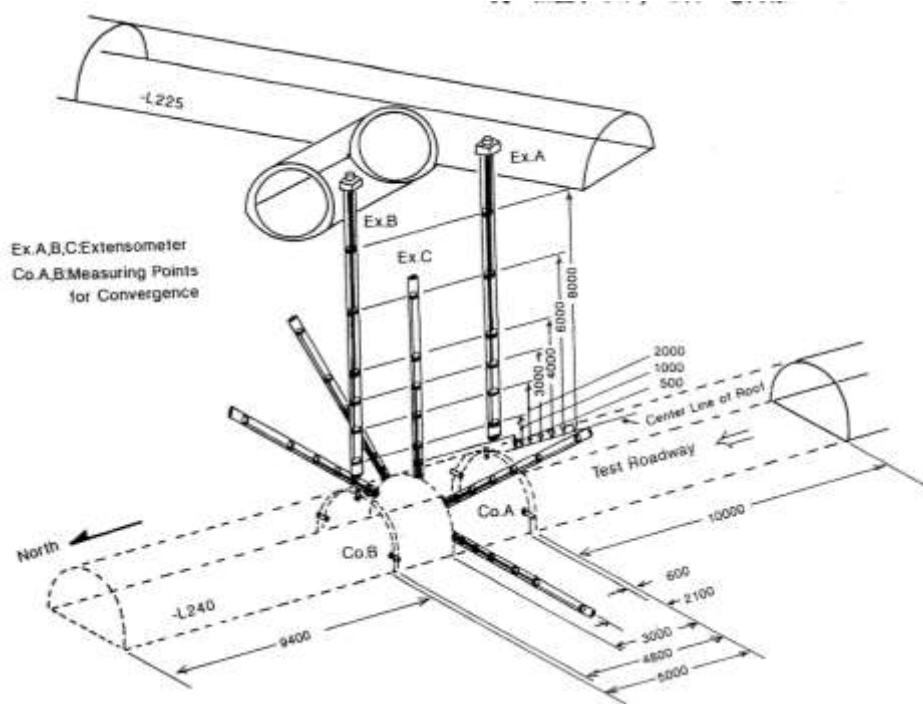


図 4.2.1-88 計測機器の配置[9]

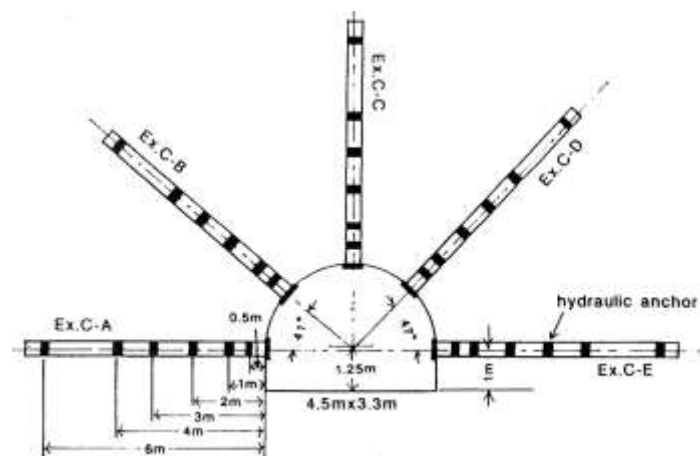


図 4.2.1-89 Ex.C 計測断面における岩盤変位計の配置パターン[9]

この試験坑道に対して、2次元有限要素法による変形解析を行ったときの解析モデルを図 4.2.1-90 に示す。また、解析に用いた岩盤の物性値については、松峰鉦山の坑内で採取した岩石試料で求めた値を参考して決めたと記されている。解析に用いられたパラメータを表 3.1.4 1 に示す。この表では、岩盤の初期コンプライアンスは 0.25GPa^{-1} と示されているが、この後、解析

結果を計測結果にあてはめるために初期コンプライアンスを 0.26GPa^{-1} に修正したことが示されている。

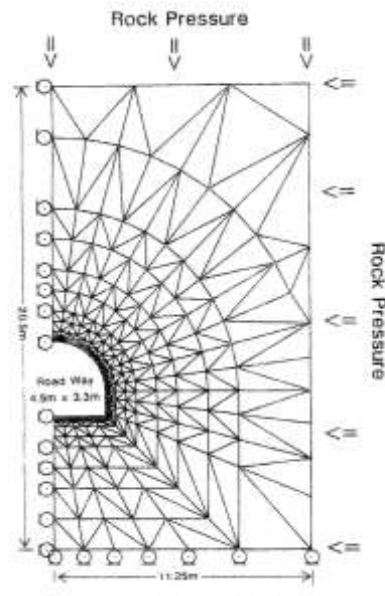


図 4.2.1-90 解析モデル[9]

表 4.2.1-5 解析に用いられたパラメータ[9]

uniaxial compressive strength, MPa	6.0
uniaxial tensile strength, MPa	0.9
initial compliance, GPa^{-1}	0.25 ←後に、0.26 に修正している
specific gravity, g/cm^3	2.5
n_0	10
m	2
rock pressure (MPa)	7.5
initial time step calculation (hour)	2
increment of time step for calculation	1.02

初期コンプライアンスを 0.26GPa^{-1} としたときの解析で得られた天盤内 1m、2m および 3m の鉛直方向変位の経時変化と計測値の比較を図 4.2.1-91 に示す。

緒方らによると、天盤内 1 m の変位は、約 50 日目までは解析値が計測値よりも多少上回る傾向を示すが、両者はよく合っているとしている。しかし、約 50 日目以降は両者が必ずしも合わず、約 200 日目以降は計測値の方が大きくなる傾向を示したとある。これに対しては、変形が大きくなったある時点においては、天盤内に大きな開口き裂等が発生し、そのため実際の岩盤は不連続体として挙動したのではと考察している。また、天盤内 2m と 3m の変位は、解析値の方が計測値よりも大きくなっている。これに対しては、天盤内 1m の変位の計測結果にあてはめるために、初期コンプライアンスを 0.25GPa^{-1} から 0.26GPa^{-1} と大きくしたことによると、説明している。

また、緒方らは、坑道底盤から 1.2m 高さにおける水平方向のコンバージェンスの経時変化についても比較を行っている。計測値と解析値の比較を図 4.2.1-92 に示す。この図において、○印は計測値を、点線は解析値を示している。緒方らによると、計測値と解析値は、定量的にもよく合っているが、コンバージェンスが緩やかな増加に変化した約 25 日目以降は、解析値の方が大きくなる傾向を示したとしている。しかし、コンバージェンスの増加の割合は解析値と計測値の両方とも時間の経過に伴って減少し、コンバージェンスの経時変化は両者とも同じ傾向を示したとしている。

さらに、坑道肩部の斜め方向のコンバージェンスについても比較が行われている。計測値と解析値の比較を図 4.2.1-93 に示す。計測値は坑道の左肩部と右肩部とで差異があったために、ここでは左右の肩部のコンバージェンスの平均値を代表値としたとある。この図によると、肩部のコンバージェンスの経時変化は、解析値および計測値とも、水平コンバージェンスとほぼ同様の傾向を示したとしている。

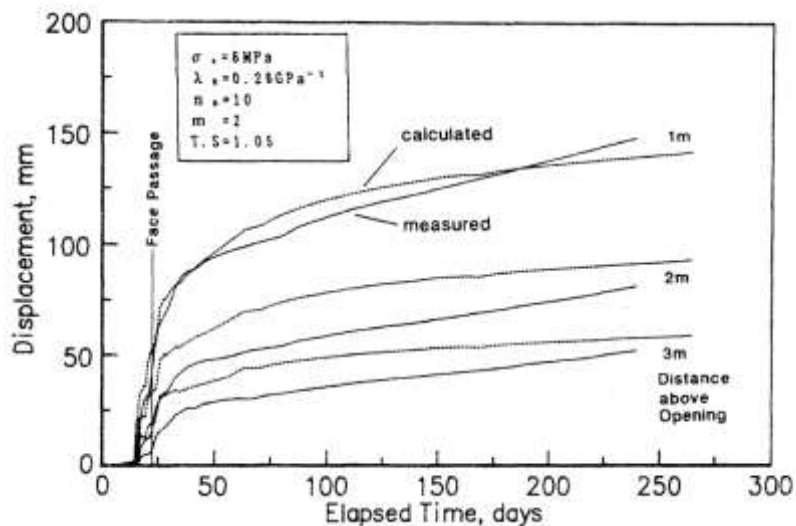


図 4.2.1-91 天盤内 1m、2m および 3m の鉛直方向変位の解析値と計測値の比較[9]

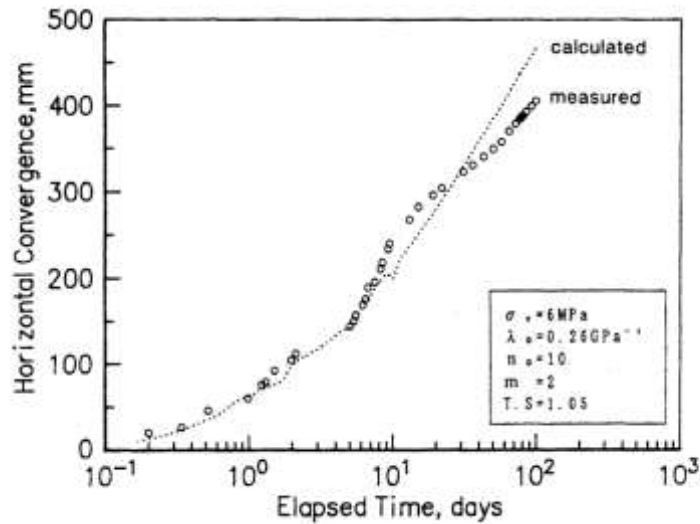


図 4.2.1-92 坑道底盤 1.2m 高さにおける水平方向のコンバージェンスの経時変化の比較[9]

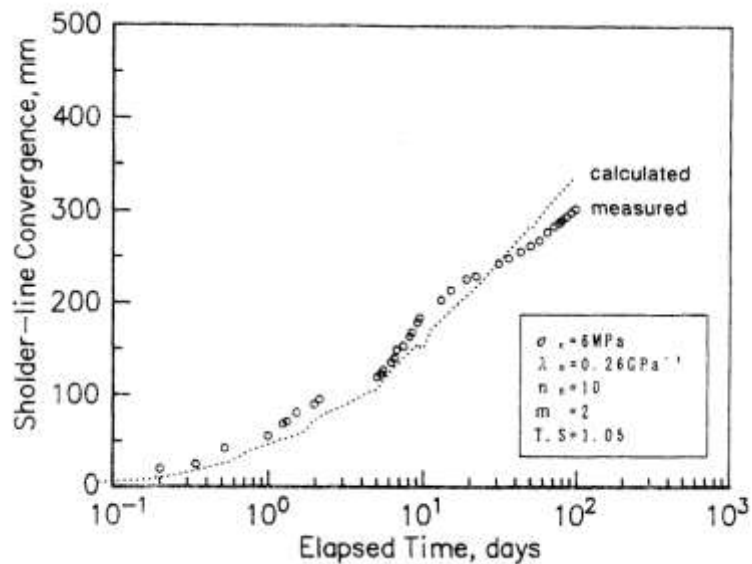


図 4.2.1-93 左右肩部のコンバージェンスの計測値の平均と解析値の比較[9]

この論文の結論として、以下のことが示されている。

- コンプライアンス可変型モデルを用いた 2 次元有限要素法による解析は、入力する力学パラメータ、特に初期コンプライアンスを適正に選ぶことにより、坑道周辺岩盤の時間依存性の変形を比較的容易に、しかも定量的に表わすことができる。
- 本コンプライアンス可変型モデルによる解析は、岩盤が連続体として挙動している変形に対しては適用できるが、岩盤が不連続体として挙動し始める時刻以降の大きな変形に対しては、新たな解析手法が必要である。

3) 報告例 2

佐藤ら[10] は、日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所の主立坑を対象にして、コンプライアンス可変型モデルを用いた 3次元の掘削解析を実施して、計測値との比較を行っている。ここでは、その概要を示す。

計測、解析対象としているのは、主立坑の深度 GL-250m である。瑞浪超深地層研究所の主立坑は、地表から深度 500m 付近まで、主立坑断面内あるいはその周辺に、断層および付随する変質領域が出現していて、岩盤のクリープ変形が生じやすい環境にあったと示されている。

解析に用いたコンプライアンス可変型モデルのパラメータについては、主立坑深度 GL-180m 時点に切羽底面から GL-520m まで先行掘削したパイロットボーリングによって取得された岩石コアを用いた一軸圧縮試験と再現解析によって同定している。同定された結果を表 4.2.1-6 に示す。また、解析に用いられた岩盤の物性値を表 4.2.1-7 に示す。

解析に用いられたモデルを図 4.2.1-94 に示す。

表 4.2.1-6 同定されたコンプライアンス可変型モデルのパラメータ[10]

岩盤等級	n	m	a
D	10.3	0.7	4.67E-03
C _L	5.0	1.0	5.00E-03
C _M	10.0	1.0	3.00E-03
C _H	10.0	1.0	2.00E-03

表 4.2.1-7 解析に用いられた岩盤の物性値[10]

a) 健全部						b) 変質部					
岩盤等級	弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	単位体積重量 (kN/m ³)	粘着力 C (MPa)	内部摩擦角 ϕ (°)	深度	岩盤等級	変形係数 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	粘着力 (MPa)	ポアソン比
B	35640	0.35	26	18.934	53.9	220~229	D	425	5.629	0.976	0.255
C _H	30080	0.35	26	14.603	53.9	230~239					
C _M	24530	0.35	26	10.271	53.9	240~249	C _L	557	6.996	1.19	0.305
						250~259					
						260~269	C _M	841	9.822	1.626	0.231
						270~279					
						280~289	C _H	1967	19.29	3.009	0.237
						290~299					
						300~309	C _M	1871	18.538	2.902	0.231
						310~319					
						320~329					
						330~339					
						340~349	C _L	977	11.096	1.82	0.297
						350~359					



図 4.2.1-94 解析モデル[10]

壁面 50cm 付近の岩盤内変位の実測値と解析値の経時変化の比較を図 4.2.1-95 に示す。この図において、E1 と E3 は断層方向の実測値であり、E2 と E4 は断層直交方向の実測値となっている。

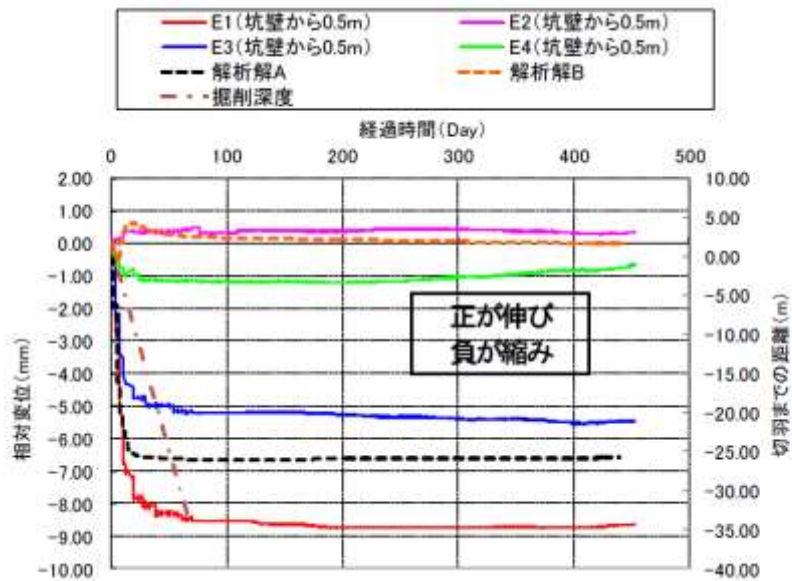


図 4.2.1-95 壁面 50cm 付近の岩盤内変位の経時変化の比較[10]

この図を見ると、解析値は計測値を概ね再現できていることが分かるが、大きな地中変位の発生は経時変化よりも掘削時の応力変化によるものが支配的であったと示している。また、計測値の経時変化は、対象断面深度から 30m 程度掘削が進行した状況、すなわち掘削に伴う直接的な応力解放の顕著な影響がなくなったと考えられる深度を超えた状態でも時間と共に若干の変形が進行を示している。このような時間変化に伴う変形の進行も解析では表現できていることから、短期・長期的な地下構造物の安定性評価に対して有効なツールの一つになることが示唆されている。

4) 妥当性確認に関する課題

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

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

(5) 坑道安定性の評価基準の考え方の再整理

1) 目的

昨年度の検討では、坑道安定性に関しては、岩盤の応力や最大せん断ひずみ、吹付けコンクリートの応力によって評価していた。そして、Mohr-Coulomb の破壊基準や限界せん断ひずみ等の限界値は、従来から空洞安定設計に使っていたものを踏襲しており、経過時間によらず一定値として扱っていた。これに対して、回収維持可能性期間は従来の土木構造物の設計で考えていた期間よりも長いことも想定されることから、より長期間に対応した評価基準を用いる必要も考えられる。そこで、研究事例を調査した結果、軟岩サイトに建設されたトンネルにおいて、時間と共に内空変位やロックボルトの軸力が増加する現象を、時間と共に岩盤の強度が低下していく過程と解釈している事例[13]、[14]があることが分かった。一方、建設時には軟弱だった地山が時間の経過とともに圧縮による締固めなどによって、強度の増加が起きた事例[15]もあることが分かった。これらの研究事例から、地質環境にも依存すると考えられるが、坑道周辺岩盤の強度やひずみの限界値は時間と共に低下することも増加することも、いずれも起こり得ると考えられる。経過時間によって限界値が大きく変化すれば、安定性の保持期間の評価結果が大きく変わってくる可能性がある（図 4.2.1-96 参照）。

ここでは、長期間に対応した坑道安定性の評価基準に資することを目的として、既往の研究事例およびトンネルの維持管理に用いている指標等について整理を行う。その結果から、解析や地下施設への適用性について検討する。

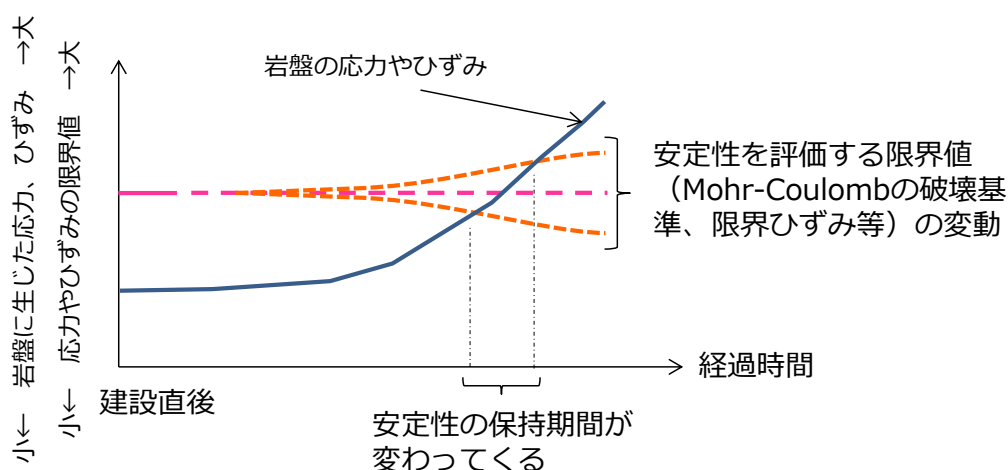


図 4.2.1-96 安定性評価の限界値の時間変動と保持期間の変化のイメージ

2) 大久保らによる長期の破壊基準の研究事例（その1）

大久保ら[16]は、放射性廃棄物の地層処分や大規模地下空間においては、これまでの地下構造物よりもはるかに長期間にわたる高い安全性を確保する必要があり、長期強度について研究する必要があることを指摘している。それに関連して、岩石の強度の載荷速度依存性と長期強度は、互いに結びついていると主張している。三城目安山岩の載荷速度依存性の試験結果を整理した結

果、以下のような結果を示した。

- 一軸圧縮強度および一軸引張強度は、載荷速度が 10 倍になると、6.5%増加する。
- 一軸圧縮状態を含めて、拘束圧下では載荷速度が 10 倍になると、6MPa ずつ強度が増加する。

そして、上記の性質を考察することによって、三軸圧縮状態下における載荷時間依存性を考慮した破壊基準を示した。

$$\begin{aligned}\sigma_1(\sigma_3, t_F) &= \sigma_C(t_F) + f(\sigma_3) \\ &= 1.065^{\log(500/t_F)} \sigma_C(500) + f(\sigma_3)\end{aligned}\quad \text{式 4.2.1-9}$$

ここに、 $\sigma_C(t_F)$ は試験開始からピーク強度までの所要時間を t_F (sec) としたときの一軸圧縮強度、右辺の第 2 項は拘束圧 σ_3 によって増加した強度を表し、拘束圧のみの関数となっている。

式 4.2.1-9 において t_F を大きくすると、第 1 項は 0 に漸近するために、長期強度は以下のようになるとしている。

$$\begin{aligned}\sigma_1(\sigma_3, \infty) &= f(\sigma_3) \\ &= \sigma_1(\sigma_3, t_F) - \sigma_C(t_F)\end{aligned}\quad \text{式 4.2.1-10}$$

そして、 $\sigma_3 \leq \sigma_1 < f(\sigma_3)$ の領域が、安定領域なるとしている。

主応力線図上で破壊基準は直線になると仮定した場合、最終的には Mohr-Coulomb の破壊基準を仮定したことになるとして、式 4.2.1-9 は以下の様書き改められる。

$$\sigma_1(\sigma_3, t_F) = \sigma_C(t_F) + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3 \quad \text{式 4.2.1-11}$$

そして、式 4.2.1-10、式 4.2.1-11 より、次式が得られるとしている。

$$\sigma_1(\sigma_3, \infty) = f(\sigma_3) = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3 \quad \text{式 4.2.1-12}$$

解析に用いられている内部摩擦角の範囲が $10 \sim 45^\circ$ 程度の範囲であることから、実際の岩盤における $f(\sigma_3)$ は $1.7\sigma_3 \sim 5.8\sigma_3$ となり、最小主応力の 2~6 倍程度となるとしている。試験結果を外挿した結果からは、以下の領域は長期的に安定な領域であるとしている。

$$\sigma_3 \leq \sigma_1 < 2 \sim 6\sigma_3 \quad \text{式 4.2.1-13}$$

さらに、大久保らは、この結果を検証するためには、長期の自然現象を利用すべきと考えて、比較的長期間大きな変動がなかったと考えられる地点での地圧の測定結果を利用することを提案している。すなわち、地圧は相当の時間を経過して安定な状態にあるのではないかと考えている。地圧測定結果をプロットしたものを図 4.2.1-97 に示す。この図より、大部分が以下のような範囲に入っていることを示し、長い間この応力状態で保たれたために、この範囲が安定領域になっていると主張している。

$$\sigma_3 \leq \sigma_1 < 4\sigma_3 \quad \text{式 4.2.1-14}$$

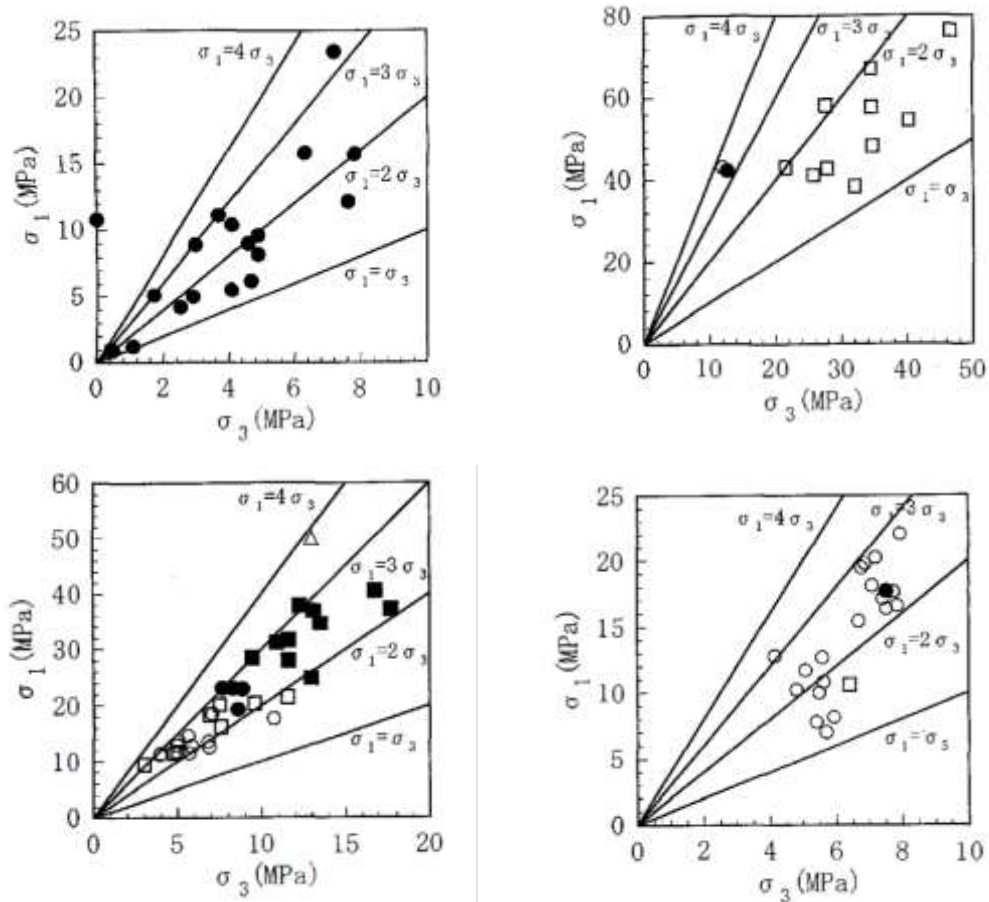


図 4.2.1-97 主応力線図上にプロットした地圧測定結果[16]

なお、 $\sigma_1 = 4\sigma_3$ を書き直せば、長期の破壊基準は以下ようになる。

$$\tau = 0.75\sigma \quad \text{式 4.2.1-15}$$

ただし、式 4.2.1-14 や式 4.2.1-15 を見てみると、この式には時間項がなくなっているために、応力状態が長期の破壊基準に達したとしても、将来、周辺岩盤がどの時点で不安定になるのかは分からない。つまり、回収可能性維持期間を坑道安定性の観点から考えていくためには、式 4.2.1-14 を適用することは都合が悪いことになる。

そこで、長期間に対応した破壊基準として、式 4.2.1-9 と式 4.2.1-12 を適用することが考えられる。この 2 式を合せて示すと、以下ようになる。

$$\sigma_1(\sigma_3, t_F) = 1.065^{\log(500/t_F)} \sigma_c(500) + \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \sigma_3 \quad \text{式 4.2.1-16}$$

上式を見てみると、時間依存性を考慮した Mohr-Coulomb の破壊基準になっていることが分かる。図 4.2.1-98 のように、時間経過と共に強度は減少していくことを表している。

ただし、式 4.2.1-16 は三城目安山岩の試験結果から導いていることから、他の岩種でも成り立

つかは明らかになっていない。また、 t_F は圧縮試験の荷重時間であり、これが坑道安定性の保持期間と一対一で対応するのか検討が必要と考えられる。

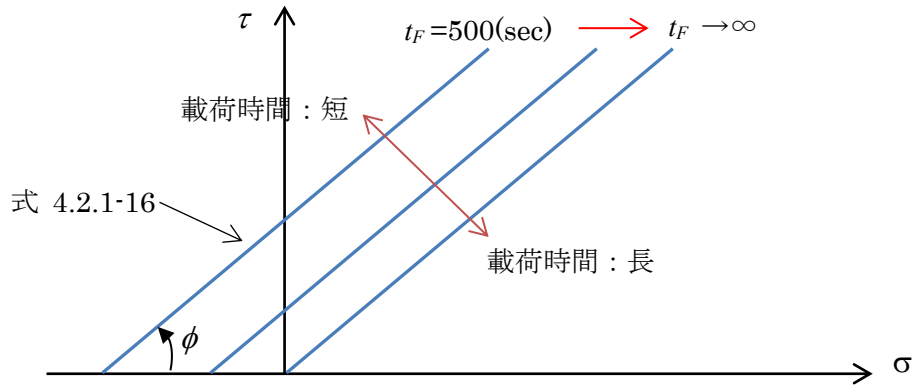


図 4.2.1-98 時間依存性を考慮した破壊基準のイメージ

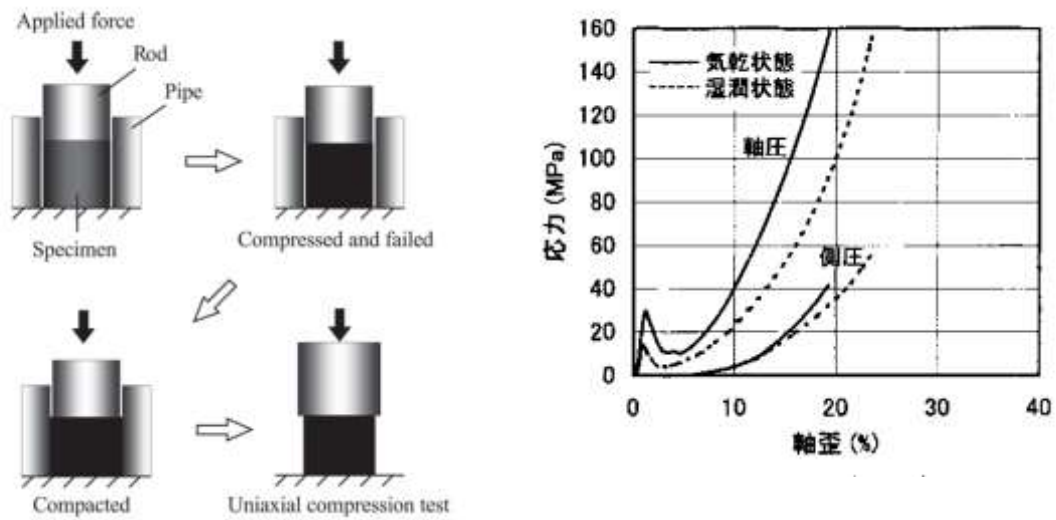
3) 大久保らによる長期の破壊基準の研究事例（その2）

前述した通り、大久保ら[16]は、岩石の圧縮強度の荷重速度依存性と長期強度は互いに結びついていると主張している。それに加えて、岩石の押し込み試験を行ったとき、ある条件下では破壊した岩石がある程度の強度を回復することを示している[17]、この強度回復時に岩石が経験する応力経路が、長期強度を表す破壊基準と何らかの関係を持つのではないかと主張している[18]。

岩石の押し込み試験とは、円柱形の岩石供試体を鋼製厚肉円筒に入れて、押し棒によって一定の変位速度で押し込むものである。この試験開始時には供試体側面と厚肉円筒内壁の間に十分な隙間があるので、一軸圧縮応力下で供試体は荷重される。荷重を続けると供試体は一軸圧縮強度に達する。一軸圧縮強度を過ぎてからも、さらに押し棒を押し込むと、供試体は横に膨らんで、やがて供試体側面が厚肉円筒内壁と接触し、荷重が増加し始める。その後も、所定の押し込み最大荷重に達するまで押し棒を押し込み続ける。押し込み最大荷重に達したらすみやかに除荷し、供試体を取り出す。最後に、取り出した供試体の一軸圧縮試験と圧裂引張試験を行うものとしている[17]。

押し込み試験中に供試体に作用する最大主応力は、押し棒に加わる荷重から計算し、半径方向に作用する最小主応力（拘束圧）は鋼製厚肉円筒の外周に貼り付けたひずみゲージから計算するものとしている。

押し込み試験の概念と押し込み試験時の応力-ひずみ関係の例を図 4.2.1-99 に示す[17]、[18]。



(a) 試験の概念 (b) 応力-ひずみ関係

図 4.2.1-99 押し込み試験の概念と応力-ひずみ関係[17]、[18]

供試体側面が厚肉円筒内壁と接触した後の押し込み試験中のモール応力円を $\tau - \sigma$ 線図上に描くと図 4.2.1-100 のようになると示している[18]。押し込み試験が進むにつれて、モールの応力円は次第に最小主応力が増加していき、円の中心が左から右へと移動していき、包絡線が描かれる。そして、様々な岩石に対して、応力円の包絡線を求めた結果、次式で応力円の包絡線は近似できるとしている[18]。

$$\tau = A\sigma^{0.7} \quad \text{式 4.2.1-17}$$

ここに、 A は定数である。

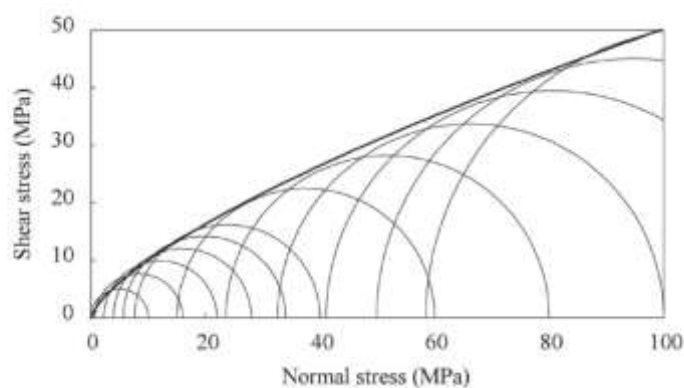


図 4.2.1-100 田下凝灰岩（気乾状態）に対する押し込み試験時のモールの応力円と包絡線[18]

そして、大久保ら[18]は、地圧は多くの場合、相当に時間をかけて安定した結果と得られた状態であると考えて、238 個の地圧データと包絡線を比較した。地圧データと包絡線の比較を図

4.2.1-101 に示す。これによると、 $A=2$ のとき、ほとんどの地圧データは式 4.2.1-17 の包絡線の下に位置することから、 $A=2$ が長期強度を表す破壊基準の候補となるとしている[18]。

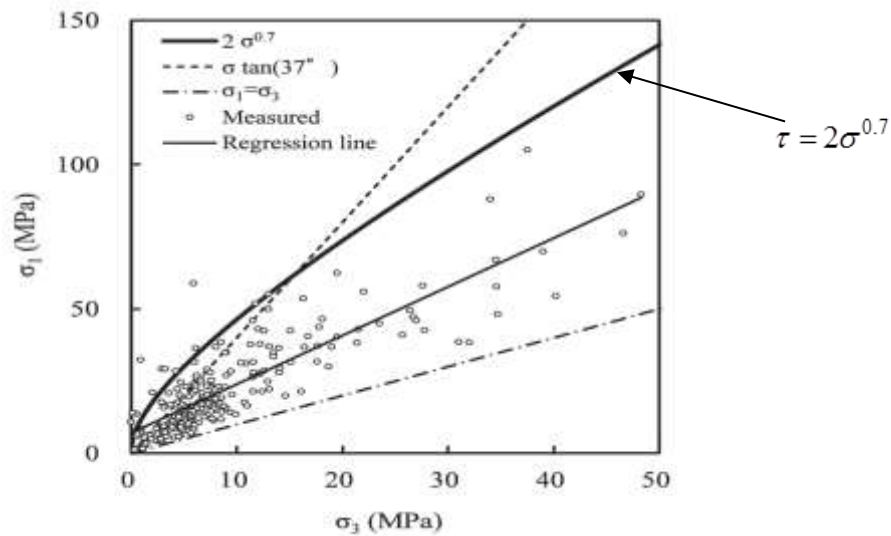


図 4.2.1-101 地圧データと包絡線の比較[18]

ただし、式 4.2.1-17 から分かるように、この式には時間項がないことから、応力状態が破壊基準に達した際、長期的には不安定と言えても、どの時点で不安定になるかは分からない。

4) 雷らによる破壊した岩石の強度回復のシミュレーションの研究事例

前述した大久保らの研究事例[16]によると、トンネルや坑道においては、時間の経過に伴って次第に強度が低下する場合もあるが、十分な強度・剛性を持つ支保工が施された場合には、緩み領域は時間の経過に伴って回復し、緩み領域が減少する可能性があることも主張している。図 4.2.1-102 に示したように、一旦緩んだ坑道周辺の岩盤に、内からは支保反力が作用し、外からは地圧が作用することによって緩み領域の強度回復が進むとしている[17]。

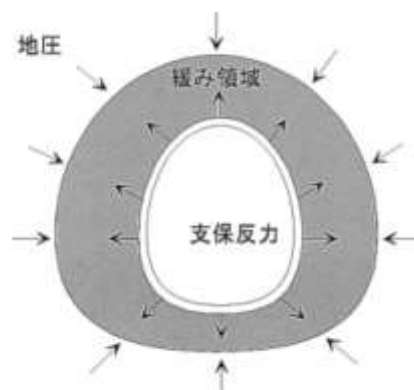


図 4.2.1-102 緩み領域の強度回復の概念[17]

岩石の押し込み試験の概念と応力-ひずみ関係については、既に、図 4.2.1-99 に示した通りで

ある。雷ら[19]は、図 4.2.1-99(b)の応力-ひずみ関係に示したような強度回復の表現できる構成式の基礎的な検討を行って、強度回復過程を表現するためにコンプライアンス可変型モデルを採用している。

$$\frac{d\lambda}{dt} = a \cdot \lambda^m H_p^n \quad \text{式 4.2.1-18}$$

$$H_p = -S_v \quad \text{式 4.2.1-19}$$

$$S_v = \frac{\sigma_1}{\sigma'_1} = \frac{\sigma_2}{\sigma'_2} = \frac{\sigma_3}{\sigma'_3} \quad \text{式 4.2.1-20}$$

ここに、 a 、 m 、 n は定数である。 S_v は西松ら[20]によって提案された一般化された破壊接近度である。この S_v は、主応力空間において応力状態を示す点 $A(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ と原点 $(0, 0, 0)$ とを結ぶ直線が、破壊基準を示す曲面と点 $B(\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3)$ で交わるとき、線分 OB と線分 OA の長さの比を示している (図 4.2.1-103 参照)。

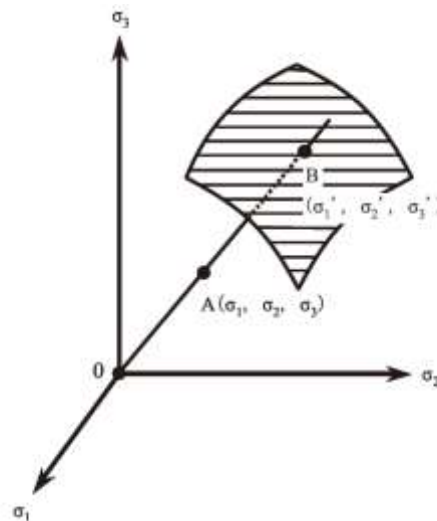


図 4.2.1-103 一般化された破壊接近度のイメージ[19]

そして、雷ら[19]は、田下凝灰岩や来待砂岩の押し込み試験の強度回復過程のシミュレーションを行い、室内試験結果との比較を行っている。比較結果を図 4.2.1-104 に示す。このシミュレーションでは、室内試験で押し込み応力が最低値をとったときを起点としている。この結果から試験結果をある程度再現できているとしている。ただし、強度回復過程の計算開始するときのひずみや最大主応力の選択や、破壊後の強度がどのくらい増加するかなどに課題が残っているとしている。

これらの研究状況からは、強度回復の現象を回収可能性維持期間の影響の評価に組み込むためには、現在の研究状況は十分でないと考えられる。今後、現象の理解を含めて、破壊が進行して

いる状態から圧縮により強度が増加する状態へ変わるための条件、および強度回復過程の岩盤に対する構成則の構築・検証の研究が必要と考えられる。

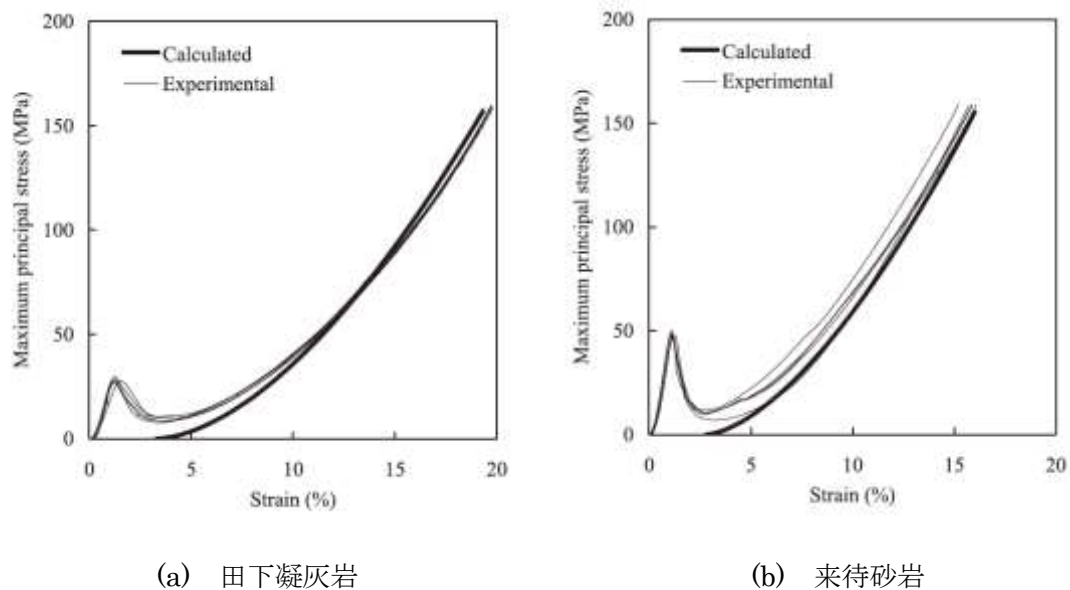


図 4.2.1-104 押し込み試験の室内試験結果とシミュレーションの比較[19]

5) トンネルの維持管理に用いられている指標

a 道路トンネルの維持管理

現在、我が国の道路トンネルの維持管理に用いられている点検要領類としては、以下のようなものがある。

- 国土交通省道路局国土・防災課：道路トンネル定期点検要領（以下、直轄版要領）[21]
- 国土交通省道路局：道路トンネル定期点検要領（以下、全国版要領）[22]
- 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧【本体工編】（以下、維持管理便覧）[23]

道路トンネルの点検要領類の位置付けおよび適用範囲を表 4.2.1-8 に示す。

高レベル放射性廃棄物の地層処分場の処分坑道は、道路トンネルの山岳トンネルと同様の工法で構築されることから、点検要領類に示された考え方や判定方法が処分坑道の安定性の判断に使用できる可能性がある。なお、上記の 3 つの点検要領類に記載されている指標や判定方法は、ほぼ同じものとなっていることが分かった。そこで、文献調査は維持管理便覧[23]に絞ることにした。

維持管理便覧によると、本体工とは、覆工、坑門、内装板、天井板、路面、路肩、排水設備および補修・補強材を示している。そして、この本体工の維持管理のために点検を行うことが示されている。維持管理便覧に示された点検の種類と定義を表 4.2.1-9 に示す。

表 4.2.1-8 道路トンネルの点検要領類の位置付けおよび適用範囲

点検要領類	位置付け、適用範囲
直轄版要領	国土交通省および内閣府沖縄総合事務局が管理する道路トンネルの定期点検に適用される。 山岳トンネル工法や矢板工法を含めた山岳工法によって建設されたトンネルの維持管理に適用する。
全国版要領	道路トンネルの定期点検に適用される。 道路法施行規則第4条の5の2の規定に基づいて行う点検について、最小限の方法、記録項目を具体的に記したものの。 各道路管理者が必要に応じて、より詳細な点検、記録を行う場合は、直轄版要領等を参考にする。
維持管理便覧	道路トンネルの主として本体工の維持管理の参考として適用できるもの。 「直轄版要領」の内容を補完することを基本とし、より具体的な知見について記載されている。 山岳トンネル工法や矢板工法等を含めた山岳工法によって建設されたトンネルの維持管理の参考として適用できるものである。

表 4.2.1-9 維持管理便覧に示された点検の定義[23]

点検の種類	点検の定義
日常点検	通常巡回を行う際に併せて実施する車上目視による点検
定期点検	トンネルの最新の情報を把握するとともに、次回の定期点検までに必要な措置等の判断を行う上で必要な情報を得るために行うもので、一定の期間ごとに定められた方法で点検し、必要に応じて調査を行うこと、その結果を基にトンネルごとで健全性を診断し、記録を残す。通常は1回/5年で近接目視を基本とする。
異常時点検	日常点検等により変状等が発見された場合に実施する点検
臨時点検	集中豪雨、地震およびトンネル内の事故等が発生した場合に実施する点検

異常時点検あるいは臨時点検の結果により、近接目視による点検が必要と判断された場合には、定期点検の方法に準拠した点検を実施し、対策区分の判定と健全性の判断を行うことが示されている。つまり、判定や判断を行うのは定期点検のときになっているので、この定期点検の詳細な方法について整理してみた。

定期点検を対象とした維持管理サイクルの基本的なフローを図 4.2.1-105 に示す[23]。

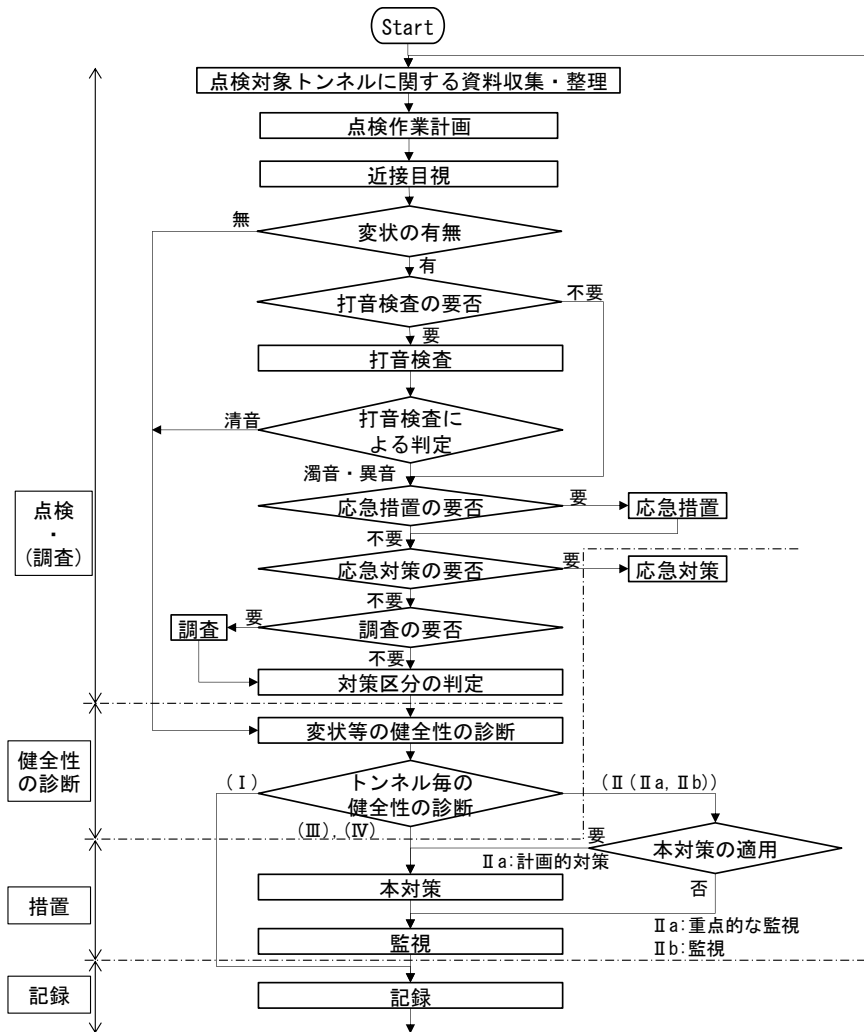


図 4.2.1-105 道路トンネルにおける定期点検を対象とした維持管理の基本的なフロー[23]

図 4.2.1-105 に示されている対策区分とは、利用者への影響の可能性と措置の必要性の観点から変状の状態を表す指標である。判定区分は、本体工に対しては表 4.2.1-10 に示された I、IIb、IIa、III、IV の 5 段階で行うことになっている。そして、対策区分の判定は、本体工の変状の状況に基づいて行うことになっていて、表 4.2.1-11 に示した「①圧ざ、ひび割れ」～「⑦漏水等による変状」の変状種類ごとに I～IV の区分の判定を行うことが示されている。

表 4.2.1-10 本体工における対策区分[23]

判定区分	定義	
I	利用者に対して影響が及び可能性がないため、措置を必要としない状態	
II	II b	将来的に、利用者に対して影響が及び可能性があるため、監視を必要とする状態
	II a	将来的に、利用者に対して影響が及び可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
III	早晚、利用者に対して影響が及び可能性が高いため、早期に対策を講じる必要がある状態	
IV	利用者に対して影響が及び可能性が高いため、緊急に対策を講じる必要がある状態	

表 4.2.1-11 変状の種類[23]

変状区分 変状の種類	外力		材料劣化	漏水
	通常の外力	突発性の崩壊		
①圧ぎ、ひび割れ	○			
②うき、はく離	○		○	
③変形、移動、沈下	○			
④巻厚不足、背面空洞		○		
⑤鋼材腐食（鉄筋腐食含む）			○	
⑥有効巻厚の減少			○	
⑦漏水等による変状				○

ここで、変状ごとに行う判定が注目すべきポイントとなるが、判定の目安として定量的な値で判定できるのは、「①圧ぎ、ひび割れ」、「③変形、移動、沈下」、「④巻厚不足・背面空洞」、「⑥有効巻厚の減少」の4つとなっている。

ただし、判定を行う際の運用上の留意点として、維持管理便覧の p.227～228 には、以下のような主旨の記述が見られる。

この便覧では、無筋コンクリートによる覆工を主たる対象として判定区分や判定の目安を示している。吹付けコンクリートを最終仕上げ面としたトンネルでは、トンネルの構造や利用条件に応じて個別に検討する。判定の目安については、これらのトンネルに対して直接適用できないことに留意する必要がある。

つまり、処分坑道は、吹付けコンクリートを最終仕上げ面とした構造となっていることから、判定の目安に示されている覆工コンクリートのひび割れ幅や長さ等の定量的な数値を、そのまま適用することはできないと考えられる。

また、定量的な値で判定できる指標のうち、「①圧ぎ、ひび割れ」、「④巻厚不足・背面空洞」、「④有効巻厚の減少」に関して、コンクリートのひび割れの発生・進展を解析的に予測する方法の研究例[24]もあるが、これらの現象はいずれも、数値解析で予測することが難しい現象でもある。よって、維持管理で用いられている指標のほとんどは、解析に適用することはできないと考えられる。ただし、変形速度は周辺岩盤に起因したものと考えられることから、最終仕上げ方法に関係なく処分坑道の変状の判定の目安として、適用できる可能性があると考えられる。変形速度に関する判定の目安を表 4.2.1-12 に示す。参考例として、昨年度ケース7における吹付けコンクリートの壁面の変位速度を図 4.2.1-106 に示す。この図ではスプリングラインにある節点の変位速度となっている。変位速度は、1年目は1.7mm/yであったが、2年目以降は0.1mm/y以下となっていて、2年目以降は緩慢と評価されることになると考えられる。

表 4.2.1-12 変形速度に対する判定の目安[23]

対象箇所	部位区分	変形速度				判定区分
		10mm/年以上 (著しい)	3mm/年以上 10mm/年未満 (進行が みられる)	1mm/年以上 3mm/年未満 (進行が みられる ～緩慢)	1mm/年 未満 (緩慢)	
覆工 路面 路肩	断面内				○	Ⅱ b, Ⅱ a
				○		Ⅱ a
			○	○		Ⅲ
		○				Ⅳ

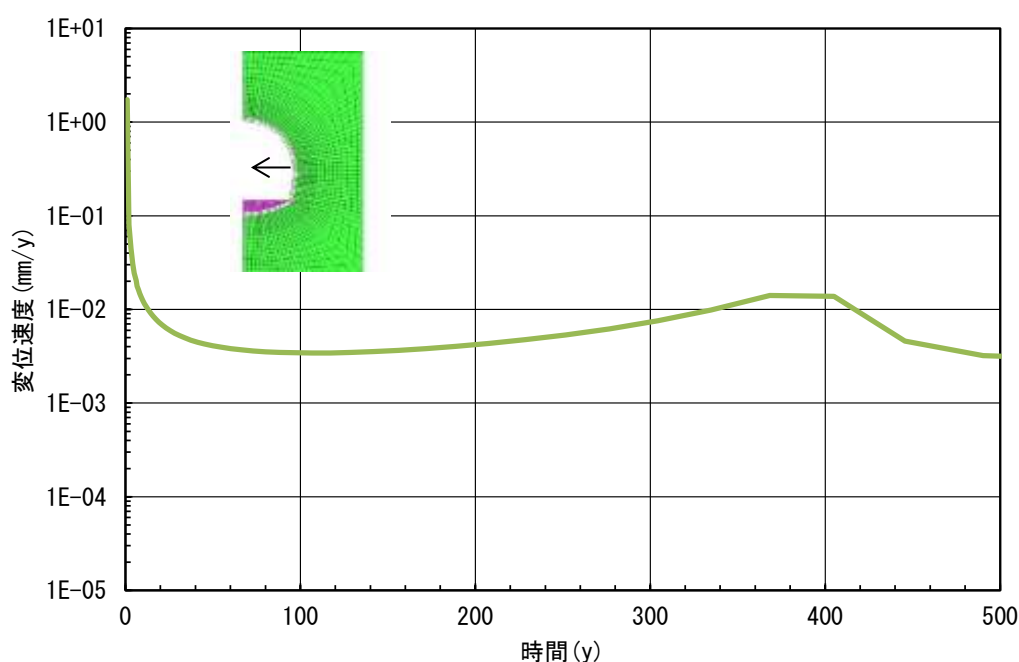


図 4.2.1-106 昨年度ケース7における吹付けコンクリート壁面の変位速度

維持管理便覧に示された指標のうち、変位速度以外の指標を解析に適用することは難しいが、図 4.2.1-105 の点検フローや表 4.2.1-11 に示された変状の種類に関しては、今後、地層処分場の坑道の維持管理を考えていく上では、参考になると思われる。

b 鉄道トンネルの維持管理

現在、我が国の鉄道トンネルの維持管理に用いられている点検要領としては、以下のものがある。

- 国土交通省鉄道局, 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編) トンネル(以下、鉄道トンネル維持管理) [25]

この鉄道トンネル維持管理の適用範囲は、鉄道トンネルと記載されていて、内容を見てみると、

山岳トンネル以外にも、シールドトンネルや開削トンネルも対象としていることが読み取れる。

鉄道トンネル維持管理[25]における標準的な維持管理の手順を図 4.2.1-107 に示す。また、図 4.2.1-107 に示された各検査の定義を表 4.2.1-13 に示す。なお、全般検査は通常全般検査と特別全般検査の 2 つに分けられている。

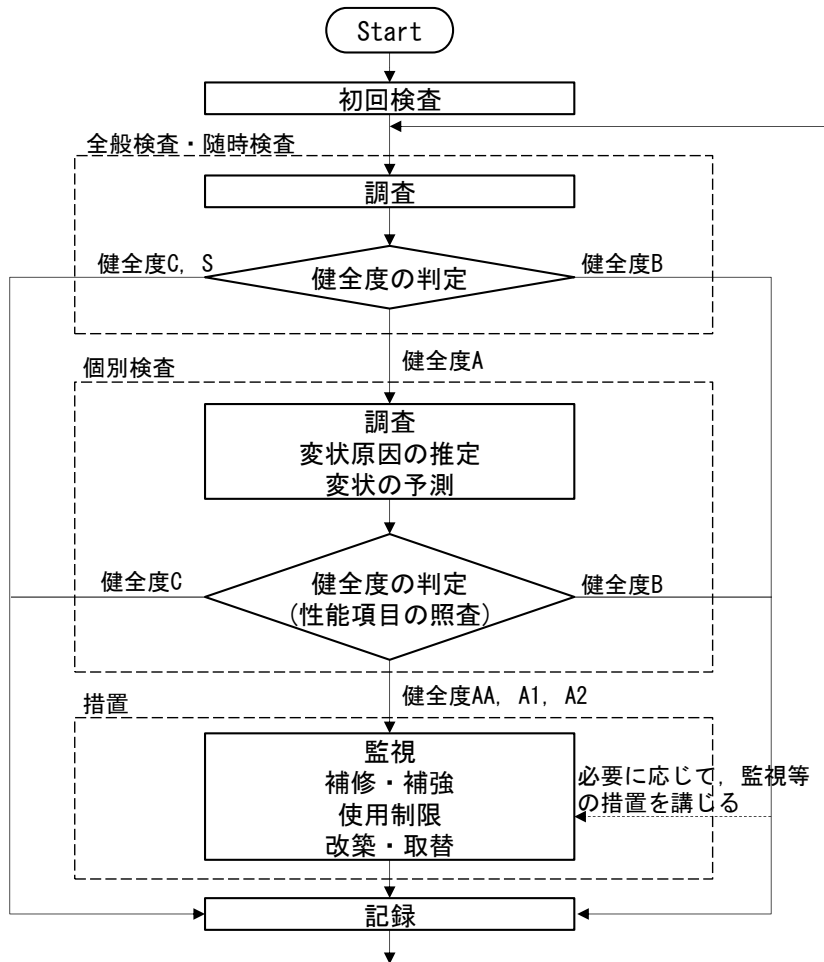


図 4.2.1-107 鉄道トンネルにおける標準的な維持管理の手順[25]

表 4.2.1-13 鉄道トンネル維持管理に示された検査の定義[25]

検査の種類		検査の定義
初回検査		初期状態の把握のために、新設工事、改築・取替を行った構造物の供用開始前に行う検査
全般検査	通常全般検査	構造物の変状等を抽出することを目的とし、定期的実施する全般検査。1回/2年で行うことが基本である。
	特別全般検査	構造種別や線区の実態に合わせて、必要に応じて健全度の精度を高めるために行う検査。新幹線のトンネルで10年を超えない期間ごと、新幹線以外で20年を超えない期間ごとに行う。
個別検査		全般検査や随時検査において、健全度Aと判定された構造物および必要と判断された構造物に対して、詳細調査により変状原因の推定、変状の予測、性能項目の照査を行って精度の高い健全度を判定するための検査。
臨時点検		災害による変状が発生した場合、同様の変状の発生する可能性がある場合に行う検査。

図 4.2.1-107 に示されている健全度とは、運転保守、旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の観点から変状の状態を示す指標となっている。そして、表 4.2.1-14 に示されているように、健全度はA（さらに、AはAA、A1、A2に細分化される）、B、C、Sの段階で判定することが示されている。

表 4.2.1-14 標準的な健全度と変状の程度等の関係[25]

健全度		運転保安、旅客および公衆などの安全に対する影響	変状の程度	措置等
A	AA	脅かす	重大	緊急に措置
	A1	早晚脅かす 異常時外力の作用時に脅かす	進行中の変状等があり、性能低下も進行している	早急に措置
	A2	将来脅かす	性能低下のおそれがある変状等がある	必要な時期に措置
B		進行すれば健全度Aになる	進行すれば健全度Aになる	必要に応じて監視等の措置
C		現状では影響なし	軽微	次回検査時に必要に応じて重点的に調査
S		影響なし	なし	なし

全般検査における調査方法は、目視を基本としていて、必要と判断された場合には打音調査もすることになっている。健全度の判断基準は定性的な表現に留まっている。各事業者は、独自に判断基準値を定めていると考えられるが、この点検要領には定量的な数値はほとんど示されていない。

図 4.2.1-107 に示した通り、個別検査は調査、変状原因の推定、変状の予測、健全度の判定の流れとなっている。そして、健全度の判定は、変状原因の推定および変状予測の結果、並びに、

「トンネル構造の安定性」、「建築限界と覆工との離隔」、「路盤部の安定性」、「漏水・凍結に対する安全性」の4つの性能項目の照査に基づき総合的に行うものと示されている。

この性能項目のうち、「トンネル構造の安定性」に対する性能項目の照査例を表 4.2.1-15 に示す。その中に示された「変状の程度や進行性」については、判断の目安となる定量的な値が示されている。すなわち、変状の程度において大きな圧ざとは、延長 3m 以上を目安とすることや、ひび割れについては、幅と延長によって評価する目安が図 4.2.1-108 のように示されている[25]。ただし、この鉄道トンネル維持管理が対象としている山岳トンネルでは、無筋コンクリート覆工、鉄筋コンクリート覆工、ブロック積み覆工が点検の対象となっているが、処分坑道のような吹付けコンクリートを最終仕上げ面とした構造は視野に入っていないようである。また、コンクリートのひび割れの発生・進展は、数値解析で予測することが難しい現象でもあることから、図 4.2.1-108 の値をそのまま解析に適用することはできないと考えられる。

表 4.2.1-15 個別検査におけるトンネル構造の安定性の照査例[25]

(a) 性能項目：トンネル構造の安定性

全般検査段階		個別検査段階			
①	変状	変状の程度	進行性	変状の予測と 性能評価項目の照査の結果	健全度
1. 覆工に圧ざ、せん断ひび割れ、放射状ひび割れ、顕著な開口ひび割れが発生している	特に大きなひび割れがある、あるいはせん断ひび割れ、大きな圧ざが生じている	大きなひび割れがある、あるいは圧ざが生じている	あり	現時点でトンネル構造の安定性に問題が生じている	AA
			なし	次回検査までトンネル構造の安定性を確保できない	A1
	2. 覆工に前回検査時に見られなかったひび割れが多く発生している	中程度のひび割れ	非常に大きい	現時点でトンネル構造の安定性に問題が生じている	AA
			大きい～なし	次回検査までトンネル構造の安定性を確保できない	A1
	3. 目視により確認できる程度の覆工の変形・沈下・移動が発生している	顕著なひび割れはない	非常に大きい	現時点でトンネル構造の安定性に問題が生じている	AA
			大きい	次回検査までトンネル構造の安定性を確保できない	A1
			小さい	次回検査までにトンネル構造の安定性が低下する可能性が高い	A2
			なし	現時点においてはトンネル構造の安定性には問題はない	B～C
	4. 広い範囲で覆工が劣化し強度の低下が生じていると考えられる	広い範囲で深部まで強度が低下し変状部分がブロック化している	(不問)	現時点でトンネル構造の安定性に問題が生じている	AA
			あり	次回検査までにトンネル構造の安定性を確保できない	A1
		広い範囲で強度が低下しているが深部までには至っていない	なし	次回検査までにトンネル構造の安定性が低下する可能性が高い	A2
			あり	現時点においてはトンネル構造の安定性には問題はない	B～C
強度の低下している範囲は部分的である	あり	次回検査までにトンネル構造の安定性が低下する可能性が高い	A2		
	なし	現時点においてはトンネル構造の安定性には問題はない	B～C		

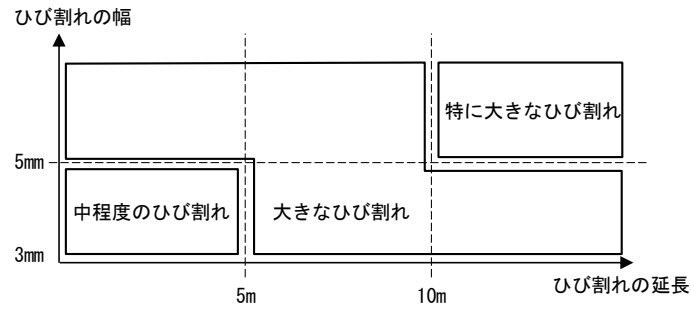


図 4.2.1-108 幅と延長によるひび割れの評価の目安[25]

変状の進行性は、周辺岩盤に起因したものと考えられることから、最終仕上げ方法に関係なく処分坑道の変状の目安として、適用できる可能性があると考えられる。変状の進行性は、内空変位速度 (u/t) により評価することになっていて、その目安が以下のように示されている[25]。

- 進行性が非常に大きい： $10\text{mm}/\text{年} \leq u/t$ 、または $2\text{mm} \leq u/t$ を目安とする
- 進行性が大きい： $3\text{mm}/\text{年} \leq u/t < 10\text{mm}/\text{年}$ を目安とする
- 進行性が小さい： $1\text{mm}/\text{年} \leq u/t < 10\text{mm}/\text{年}$ を目安とする

図 4.2.1-106 には、昨年度ケース7の壁面の変位速度を示しているが、この変位速度を倍にすれば、ほぼ内空変位速度に相当する。よって、処分坑道の内空変位速度は、1年目は $3.4\text{mm}/\text{y}$ 、2年目以降は $0.2\text{mm}/\text{y}$ 以下と評価されることから、処分坑道の変状の進行性は、1年目は進行性が大きい、2年目以降については、進行性はないと評価されることになると考えられる。

鉄道トンネル維持管理に示された指標のうち、内空変位速度以外の指標を解析に適用することは難しいが、図 4.2.1-107 の維持管理フローや表 4.2.1-15 に示された着目すべき変状に関しては、今後、地層処分場の坑道の維持管理を考えていく上では、参考になると思われる。

特に、図 4.2.1-107 の維持管理のフローの個別検査において、変状の予測という項目が示されているが、この変状の予測に、本検討での評価手法、および西村[26]が地下鉄銀座線に適用したマルコフ確率過程に基づく劣化予測の手法が適用できると考えられる。本検討における評価手法は、材料の力学的特性に基づいて挙動を予測するもので、演繹的と言える。一方、西村[26]が適用した劣化予測の手法は、判定区分低下の推移を統計的に予測するもので、帰納的なものという特徴がある。マルコフ確率過程を使った予測は、橋梁および舗装などを対象に多く用いられているが、トンネルの覆工の劣化予測のために適用した事例[27]もある。

6) 適用性に関する考察と課題

長期間に対応した坑道安定性の評価基準に関連して既往の研究事例、およびトンネルの維持管理に用いている指標等を調査した結果、以下のようなことが分かった。

- 坑道周辺岩盤に関して、時間と共に岩盤の強度が低下していると解釈している事例[13]、[14]や、逆に、軟弱な地山の強度の増加が見られる事例[15]があった。これらから、坑道周辺岩盤の強度やひずみの限界値は、初期値からの低下も増加もいずれも起こり得ると考えらえる。
- 大久保ら[16]、[18]は、岩盤の長期的な破壊基準を提案している(式 4.2.1-15、式 4.2.1-17 参照)。適用する際の問題点としては、応力状態が破壊基準に達した場合、長期的には不安定と言えても、どの時点で不安定になるのかは分からないことが挙げられる。
- 大久保ら[16]は、時間依存性を考慮した Mohr-Coulomb の破壊基準の式も示している(式 4.2.1-16 参照)。課題としては、一種類の岩種の試験結果から導いていることから、他の岩種でも成り立つのかは明らかではないことが挙げられる。また、圧縮試験の載荷時間と坑道安定性の保持期間の関係についても検討が必要である。
- 雷ら[19]は、破壊した岩石の強度回復過程のシミュレーション方法を提案していて、室内試験結果をある程度、再現することができたとしている。ただし、回収可能性維持期間の影響の検討に適用するために、現象の理解も含めて、破壊から圧縮・強度増加への変わる条件、および強度回復後の岩盤の構成則の構築・検証などの課題がある。
- 道路トンネルの維持管理便覧[23]、および鉄道トンネル維持管理[25]を調査した結果、処分坑道との構造の違いや、維持管理において着目している変状などを考慮すると、維持管理の点検要領に示されている指標のうち、変形速度以外の指標を解析に適用することはできないと考えらえる。

岩盤の応力に対する長期間の破壊基準に関しては、大久保ら[16]、[18]によって研究がなされていた。一方、昨年度の検討でも評価基準に用いた限界せん断ひずみ[28]については、その時間依存性について検討している事例については、調査した限りでは見つけることができなかった。そこで、限界せん断ひずみの時間依存性について考察してみることにした。

限界せん断ひずみ γ_0 は限界ひずみ ε_0 から求められ、限界ひずみは岩石の一軸圧縮試験の応力-ひずみ曲線から求めることができる(図 4.2.1-109 参照) [29]、[30]。

$$\gamma_0 = \varepsilon_0(1 + \nu) \quad \text{式 4.2.1-21}$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_c}{E} \quad \text{式 4.2.1-22}$$

ここに、 σ_c は一軸圧縮強度、 E は弾性係数である。

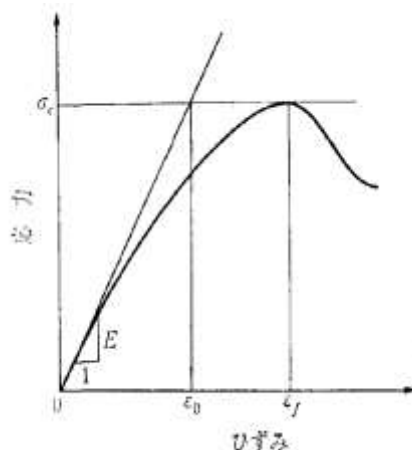


図 4.2.1-109 応力-ひずみ曲線と限界ひずみの関係[30]

一方、岩石の一軸圧縮試験において荷速度を変えた場合の応力-ひずみ曲線は、図 4.2.1-110 のようになり、荷速度を遅くする（荷時間が長い）と、一軸圧縮試験における破壊ひずみ ϵ_f は減少する傾向にある[31]。また、弾性係数は、あまり変化がないことから、荷時間を長くなると限界ひずみは小さくなり、限界せん断ひずみも小さくなると考えられる。これは、感覚的には、図 4.2.1-98 に示した時間依存性を考慮した破壊基準のイメージとも合うと思われる。

ただし、荷時間と限界せん断ひずみの低下度の定量的な関係については、整理されていないことから、今後の課題として、時間依存性を定量的に示すためにはデータの詳細な分析と検討が必要と考えられる。

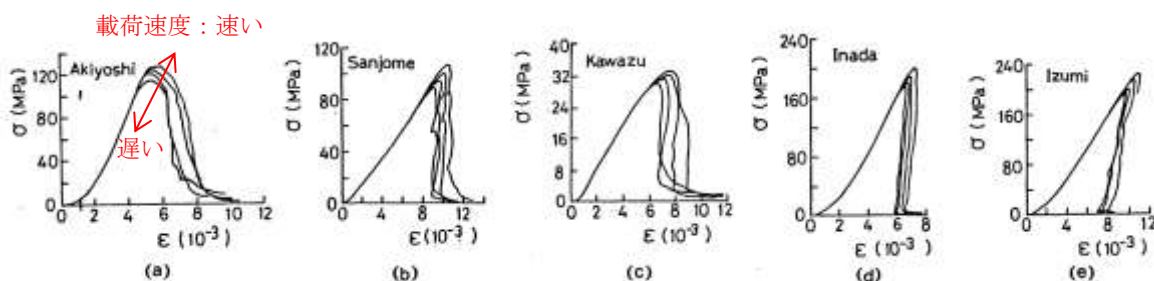


図 4.2.1-110 荷速度を変えた場合の一軸圧縮試験の応力-ひずみ曲線[31]

長期間に対応した坑道安定性の評価基準の解析や地下施設への適用に関してまとめてみると、岩盤の応力に対する破壊基準については、幾つか提案されているものがあつた。長期間の場合、強度は減少する方向になることが分かつたが、回収可能性維持期間の影響の評価に適用するには、十分ではないと考えられる。特に、時間依存性を考慮できる応力の破壊基準を検討するためには、荷時間を変えた場合の一軸圧縮試験、および三軸圧縮試験のデータの拡充が必要であり、それらの拡充が望まれる。また、荷時間と坑道安定性の保持期間の対応関係についても検討する必要がある。

また、長期間に対応した岩盤のひずみに対する基準については、研究事例は見当たらなかつた。

したがって、時間依存性を考慮できる応力の破壊基準と同様に、载荷時間を変えた場合の一軸圧縮試験のデータを拡充したうえで、検討することが望まれる。

本検討では回収可能性維持期間における坑道周辺岩盤への影響として、図 4.2.1-1 に示したようにクリープ変形だけを考慮していて、破壊した岩盤の強度が回復する現象については考慮していなかった。今後、強度回復も考慮するのであれば、図 4.2.1-1 の枠組みに新たな現象を加えることを意味している。ただし、強度回復の現象を回収可能性維持期間の影響の評価に組み込むためには、現在の研究状況は、まだ十分ではないと考えられる。組み込んでいくためには、現象理解も含めて、破壊から回復へ向かう条件、および強度回復過程の岩盤に対する構成則の構築・検証の研究は、非常に難しい課題ではあるが、必要だと考えられる。

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

4.2.2 水理学的影響評価方法の検討

ここでは、力学的影響評価から得られた坑道周辺の水理特性データを考慮し、回収可能性維持期間を考慮した地下水流動解析により、坑道の湧水量の時間変化や不飽和領域の発生、また閉鎖後の再冠水に要する時間に着目した評価を実施することにより、回収可能性の維持による閉鎖前の作業環境の安全性、閉鎖後の長期安全性の観点から影響低減技術の効果について検討する。

(1) 水理学的影響の評価方法の検討

昨年度検討した水理学的影響評価に対する定量的な評価手法および手順のフロー[1]に関して、4.1.1項に述べた検討方針のもと、本年度は若干の見直しを行った。そのフロー図を図 4.2.2-1 に示す。水理学的影響評価は、処分定置方式・埋戻し状態・坑道開放期間の違いを考慮した地下水流動解析により、セメント系部材の劣化等の影響に関連する坑道の湧水量の時間変化や、化学的な評価に影響が大きいと考えられる不飽和領域の発生、また閉鎖後の再冠水に要する時間や湧水量のベントナイト流出への影響に着目した評価を実施する。なお、検討対象とする回収可能性維持状態のオプションも図 4.2.2-2 に示す[2]。ここでの状態オプションについては、処分坑道の埋戻しの有無の観点から以下のように定義する。

坑道開放：処分坑道を開放した状態（図 4.2.2-2 の状態オプション②）

坑道埋戻し：処分坑道を埋め戻した状態（図 4.2.2-2 の状態オプション③）

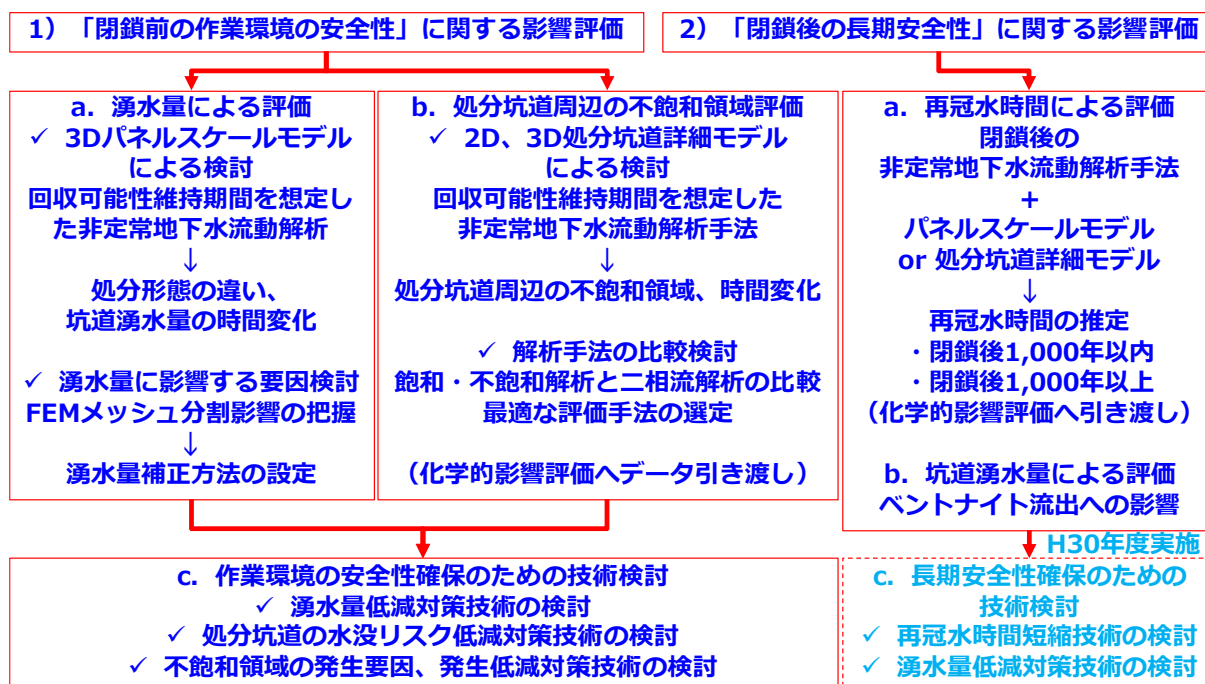


図 4.2.2-1 水理学的影響の評価方法の検討フロー

回収可能性維持状態	オプション① オーバーバック設置	オプション② 処分孔に緩衝材を設置	オプション③ 処分坑道まで埋め戻し	オプション④ 主要坑道まで埋め戻し
状態のイメージ				
状態の説明	<ul style="list-style-type: none"> 処分孔に緩衝材が定置され、オーバーバックが緩衝材上に定置されている。 オーバーバック表面が部分的に露出している。 	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材が全て定置され、処分孔が埋め戻されている。 処分孔上部に抑え蓋などが設置されている。 	<ul style="list-style-type: none"> 処分孔および処分坑道が埋め戻されている。 処分坑道端部にはプラグが設置されている。 	<ul style="list-style-type: none"> 処分孔、処分坑道および主要坑道が埋め戻されている。
バリアへの影響	人工バリア：坑道・岩盤、処分孔ともに大きい	人工バリアやや大きく、坑道・岩盤：大きい	人工バリア：小さい 坑道・岩盤：やや大きい	影響はほとんどない
回収時対象構成要素	オーバーバック	オーバーバック、緩衝材、抑え蓋	オーバーバック、緩衝材、抑え蓋、埋戻し材、プラグ	オーバーバック、緩衝材、抑え蓋、埋戻し材、プラグ

図 4.2.2-2 回収可能性維持状態のオプション[2]

また、水理学的影響の評価方法の検討項目と関連する定量化に必要な技術検討項目との対応を図 4.2.2-3 に示す。定量化に必要な技術検討項目は、いずれも水理学的影響評価だけでなく、化学的影響評価も関連していることとなる。従って、水理学的影響の評価方法の検討より得られたデータについては、次の化学的影響評価の条件等へと引き渡すこととなる。さらに化学的影響評価で得られたデータについては、力学的影響評価の条件へと活用できると考えられる。

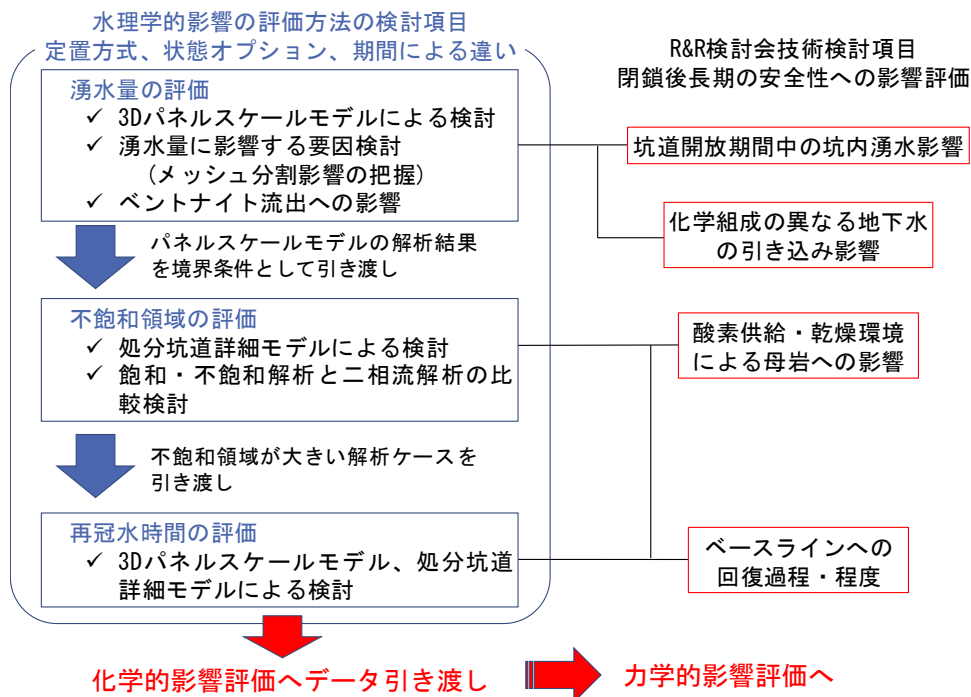


図 4.2.2-3 水理学的影響の評価方法の検討項目と定量化に必要な技術検討項目との対応

図 4.2.2-1 に示す回収可能性の維持による「閉鎖前の作業環境の安全性」および「閉鎖後の長期安全性」に対する影響低減技術を定量的に評価するためのアプローチについて以下に示す。

1) 閉鎖前の作業環境の安全性に関する影響評価

ここでは湧水量による評価、および処分坑道周辺の不飽和領域評価を行う。湧水量は地下深部の坑道掘削において、作業環境の安全性を検討する上で最も重要な要因と考えられ、湧水量の予測により、排水設備設計や坑道の水没リスク等を回避する必要があること、また、処分坑道周辺の不飽和領域の発生については、還元性であった地下環境に対して、坑道掘削に伴い酸化性の雰囲気に変化するため、岩盤および支保に対する水理学的、地化学的影響を及ぼす可能性があり、その結果坑道開放時の安定性に影響を及ぼすことが想定されるためである。

a 湧水量による評価

湧水量による評価では、回収可能性維持期間中の湧水量を定量的に評価する検討を行う。当該期間中の湧水量を把握することにより、湧水のくみ上げや処理のための設備容量を設計することができ、そのランニングコストを評価する上でも重要である。

湧水量を把握するためには、地下水流動解析手法を用いた予測解析による定量化が有効である。処分場の全体湧水量を推定する上では、処分場全体をモデル化した処分場スケール（数十 km 領域）規模が望ましいが、解析の規模が大きくなり効率的ではない。そこで、本検討では処分場全体の地下水流動場の対称性を考慮し、1ヶ所の処分パネルを対象としたパネルスケールモデルでの地下水流動解析を実施する。なお、解析の規模を考慮すると、パネルスケールモデルにおいても処分坑道を詳細にモデル化することは困難と考えられるため、「処分坑道詳細モデル」と組み合わせ、処分形態（処分坑道の形状、大きさ）の影響を考慮した湧水量の算出を試みる手法、手順を示す。

得られた解析結果から、グラウトに代表される湧水量の低減対策技術の効果や、回収可能性維持期間における作業環境の安全性を確保するためのオペレーション上の対策技術（例えば、処分坑道の水没リスクの低減技術など）について考察する。

湧水量の算出のための定量的な評価手法、手順について以下に示す。

(a) 検討目的

閉鎖前の作業環境の安全性の観点から湧水量を定量的に把握することにより、本検討では処分パネル方式、処分坑道の状態（開放、埋戻）、坑道開放期間の違いなどに対する感度解析を実施し、これらの違いの影響について把握することを目的とする。また、湧水対策設備設計、地下坑道の水没リスク評価に資すること、湧水低減対策の効果を定量的に把握することを目的とする。

(b) 検討モデル、検討方針

地下坑道の掘削に伴い坑道壁面が大気圧解放されるため、周辺岩盤から地下水が湧水として坑道内に流出する。湧水量に影響する要因は以下が考えられる。

- ① 坑道深度（地下水圧の違いにより、湧水の動水勾配に影響する）

- ② 周辺岩盤、支保、グラウトの透水性（透水性と湧水量は比例関係にある）
- ③ 坑道長さ（坑道長さと湧水量は比例関係にある）
- ④ 坑道の大きさ、形状（湧水量への影響は明確でない）
- ⑤ EDZ の有無、不飽和領域の有無（湧水量への影響は明確でない）
- ⑥ 掘削後の経過時間（一般的に時間経過とともに湧水量は低減する）
- ⑦ 隣接坑道の有無（隣接坑道があると単位坑道長さあたりの湧水量は少なくなる）

HLW の地層処分坑道は図 4.2.2-4 に示すように処分坑道群（パネル）と周辺の主要坑道、連絡坑道等から構成されている。上記の湧水量に対する影響を考慮した処分場全体の湧水量を定量的に把握するためには、処分場全体を対象とした地下水流動解析モデルによる検討が望ましい。しかしながら、数 km 四方のサイトを対象とし、処分坑道を詳細に 3 次元的にモデルすることは解析モデルの規模が大きくなるため、現状では非定常解析の計算負荷が大きく、現実的ではない。

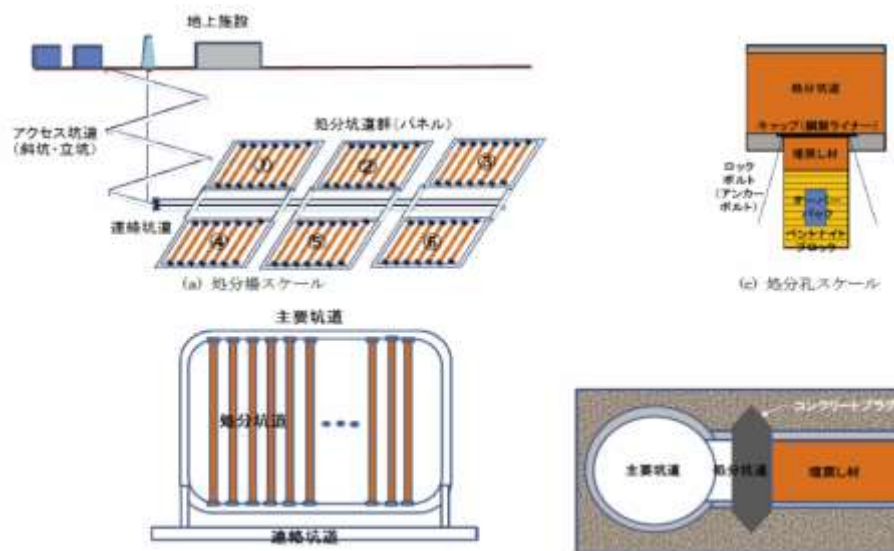


図 4.2.2-4 HLW 処分施設の概念図[2]

そこで、本検討では図 4.2.2-5[4]に示すような 1ヶ所の処分パネルを対象とした 3次元解析モデル（以降、パネルスケールモデルとする）を用いることとする。

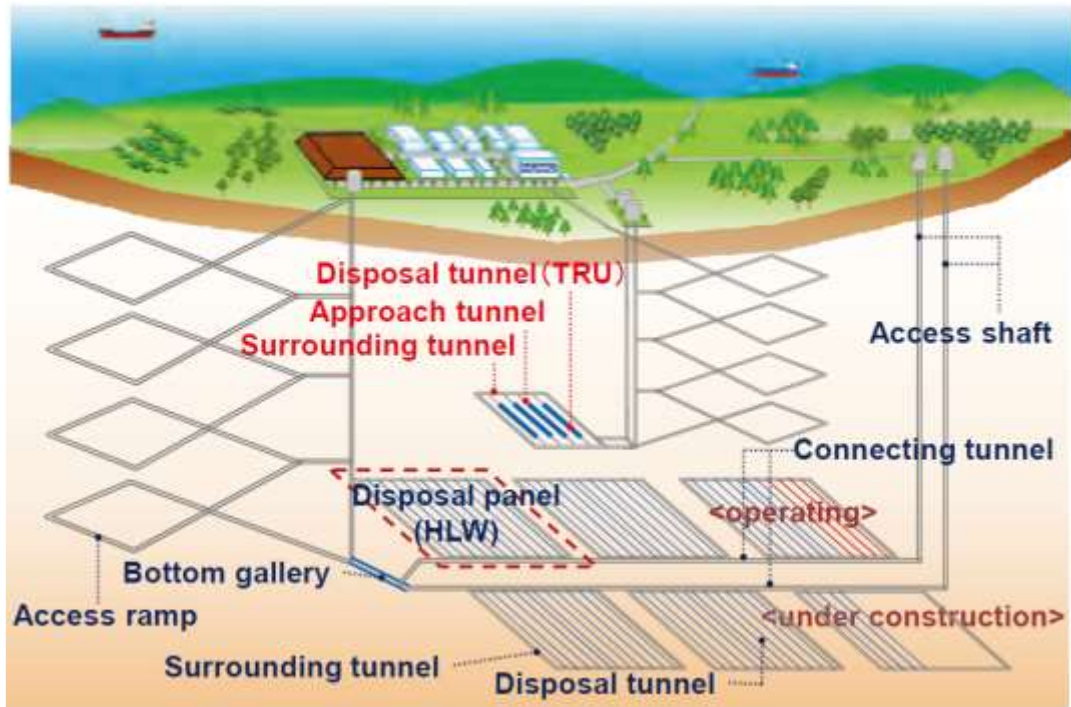


図 4.2.2-5 パネルスケールモデルの解析領域イメージ[4]

NUMO[4]によると、図 4.2.2-6 および図 4.2.2-7 に示すような 2 種類の処分パネル概念が検討されており、それぞれ Through-type と Dead-end-type と称されている。本検討ではこれらを踏襲し、レイアウトの違いによる影響を評価するため、2 種類の処分パネルを対象とした検討を実施する。なお、堆積岩を対象とした場合、Through-type は縦置き方式、Dead-end-type は横置き PEM 方式に対応するものとする。

また、図 4.2.2-5 に示されるように、地下施設にはアクセス立坑、アクセス斜坑等が存在するが、本検討では処分坑道+連絡坑道からなる 1 パネル分のみを対象とし、アクセス坑道や複数の処分パネルの影響は無視して、モデル化の対象とはしない。本検討の目的は、主に処分坑道からの湧水量評価の手法の提示と確認であり、複雑な地下施設レイアウトの影響については今後の課題とする。

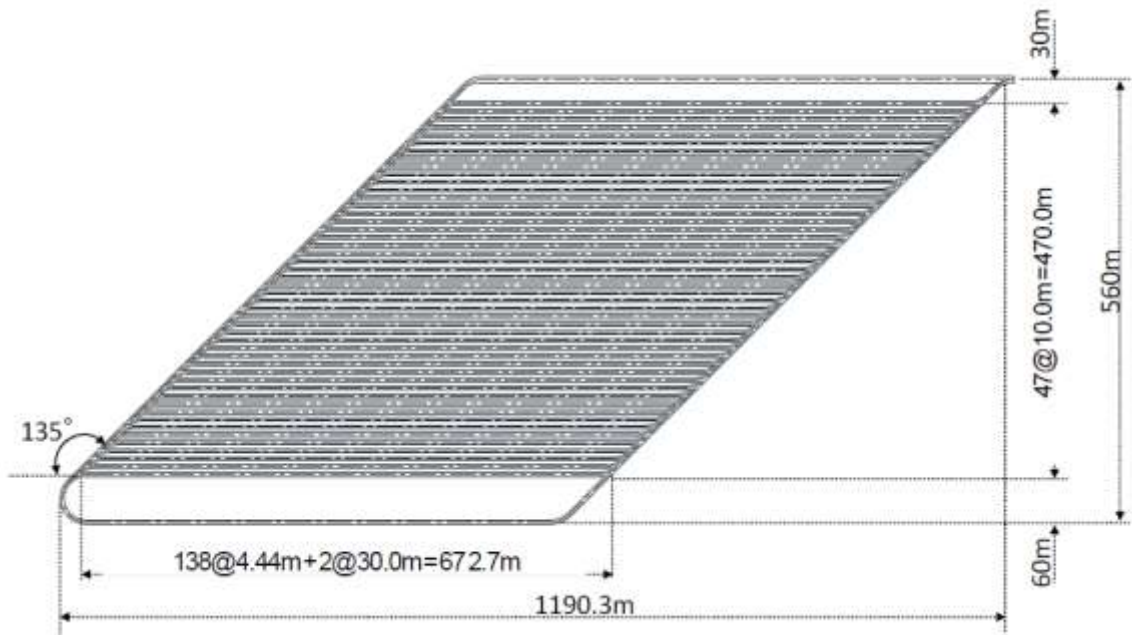


図 4.2.2-6 処分パネルの例 (Through-type) [4]

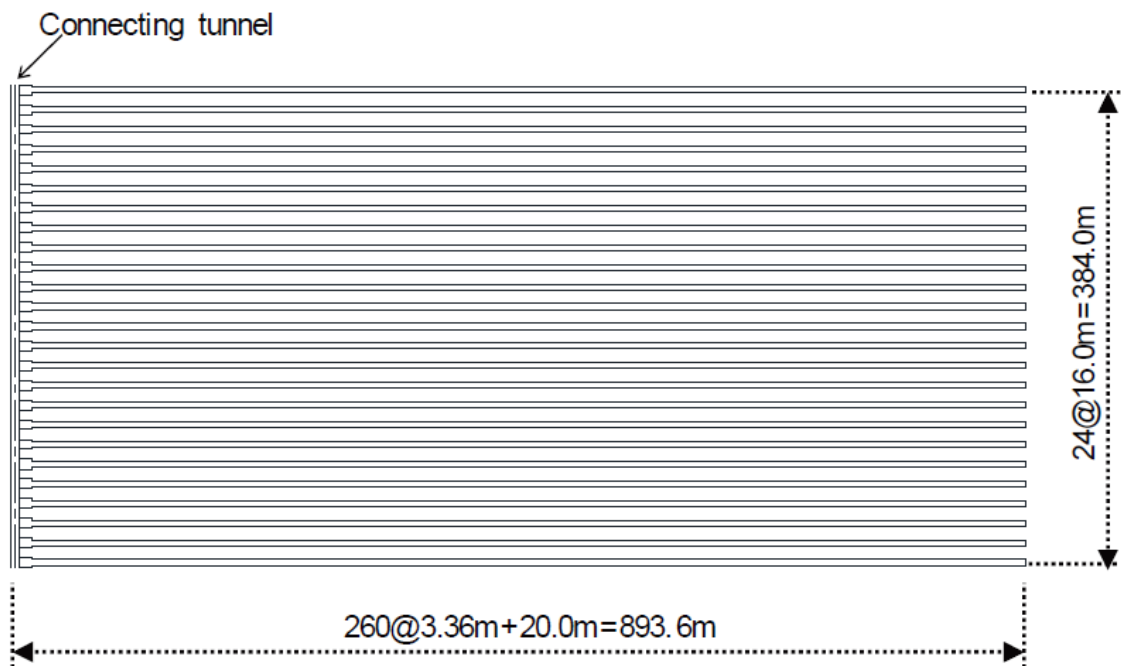


図 4.2.2-7 処分パネルの例 (Dead-end-type) [4]

パネルスケールモデルの構築にあたっては、施設規模の設定において以下の考え方を前提とした。

- ① 1 パネルあたり廃棄体 5,000 本定置を想定する。

処分パネル方式の違いによる影響比較にあたって、同数の廃棄体を対象とすることにより単位廃棄体あたりの比較が可能となる。

② 解析領域の設定にあたり、対称性を考慮し 1/4 切り出しモデルとする。

非定常解析を実施することを考慮し、解析負荷のできるだけ小さいモデル化を試みる。図 4.2.2-8 に示すように Through-type では、1 パネル領域が約 1km 四方であると想定し、地下施設の影響領域として平面的に 4km 四方を対象とする。深度方向については、地表面から処分深度 GL-500m（堆積岩の場合）を考慮し、底部境界深度を GL-1,000m まで考慮することとする。これより、解析領域としては対象領域から 1/4 と切り出した領域を設定する。対称性を考慮することにより解析モデル規模の縮小が可能である。ただし、対称性を維持するには、境界条件の対称性も必要となる。

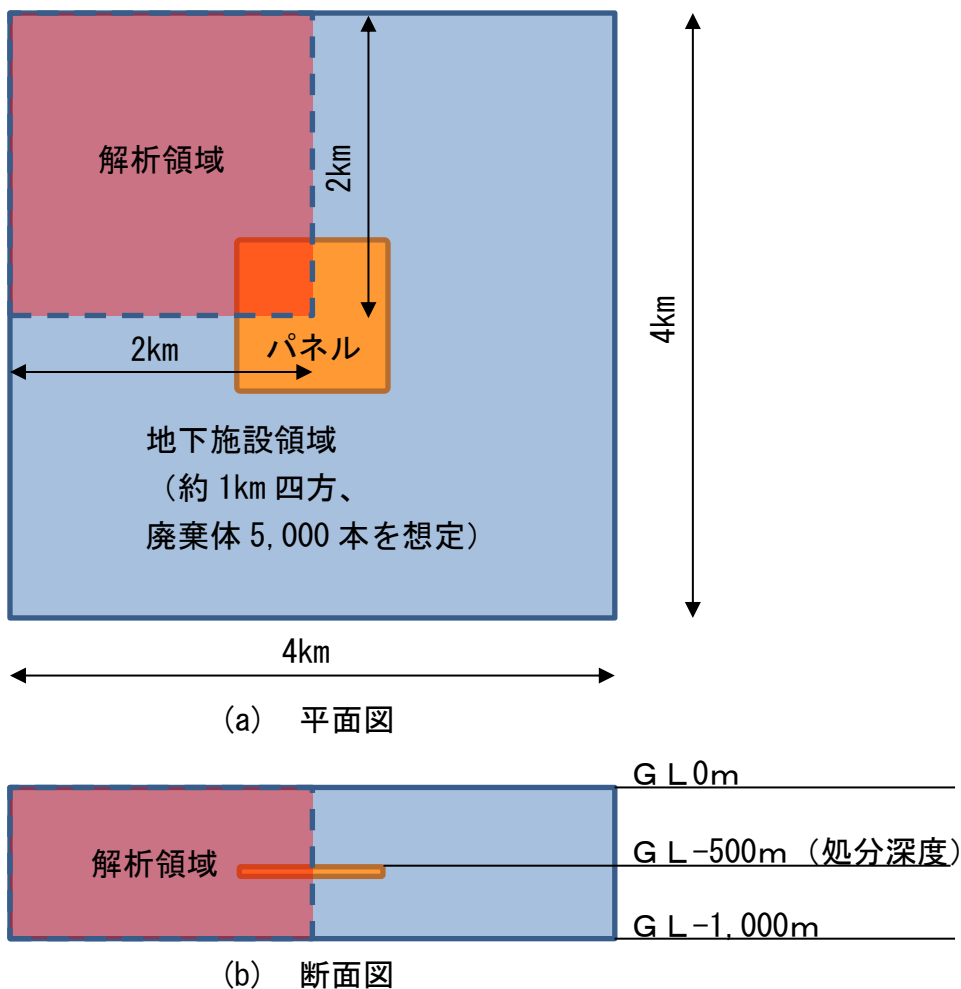


図 4.2.2-8 パネルスケールモデルの解析領域の設定

前述のように、アクセス坑道等はモデル化を行わないが、1 処分パネルが単独で存在する条件であり、坑道からの湧水量の算出条件としては保守的（湧水量が多くなる）な条件設定と言える。

③ 対象岩盤は新第三紀堆積岩であり、透水特性は均質条件とする。

本検討の目的は、処分形態の違いや、処分坑道の状態（開放、埋戻）、坑道開放期間の違いなどに対する影響の把握であり、岩盤の不均質性を考慮するとそれぞれの影響を把握することが難し

くなる。このため、本検討では岩盤条件は均質とし、不均質性は取り扱わない。岩盤の透水性に関しては、サイトスペシフィックな条件の1つであり、不均質性、不確実性を有するため湧水量への影響が大きいと考えられるものの、本検討では不均質性、不確実性については検討対象としない。サイトスペシフィックな条件については、サイト条件を踏まえた検討において実施すべきと考える。

④ 解析モデルの側面および上面については静水圧固定境界とする。

1/4 切り出しモデルの対称性を考慮し、図 4.2.2-9 に示すように解析領域の外周側面および上面については地表面標高 ($H=0\text{m}$) の水頭固定境界、対称面となる側面および底面については不透水境界とする。本設定は、海底下のような処分場の上部から無限の地下水供給がある場合に相当するものであり、湧水量の算出条件としては保守的(湧水量が多くなる)な条件設定と言える。内陸部の処分場では、処分場上部の地下水位の低下の可能性が想定されるため、降雨涵養量を考慮した境界条件の設定も想定されるものの、今後の課題としたい。

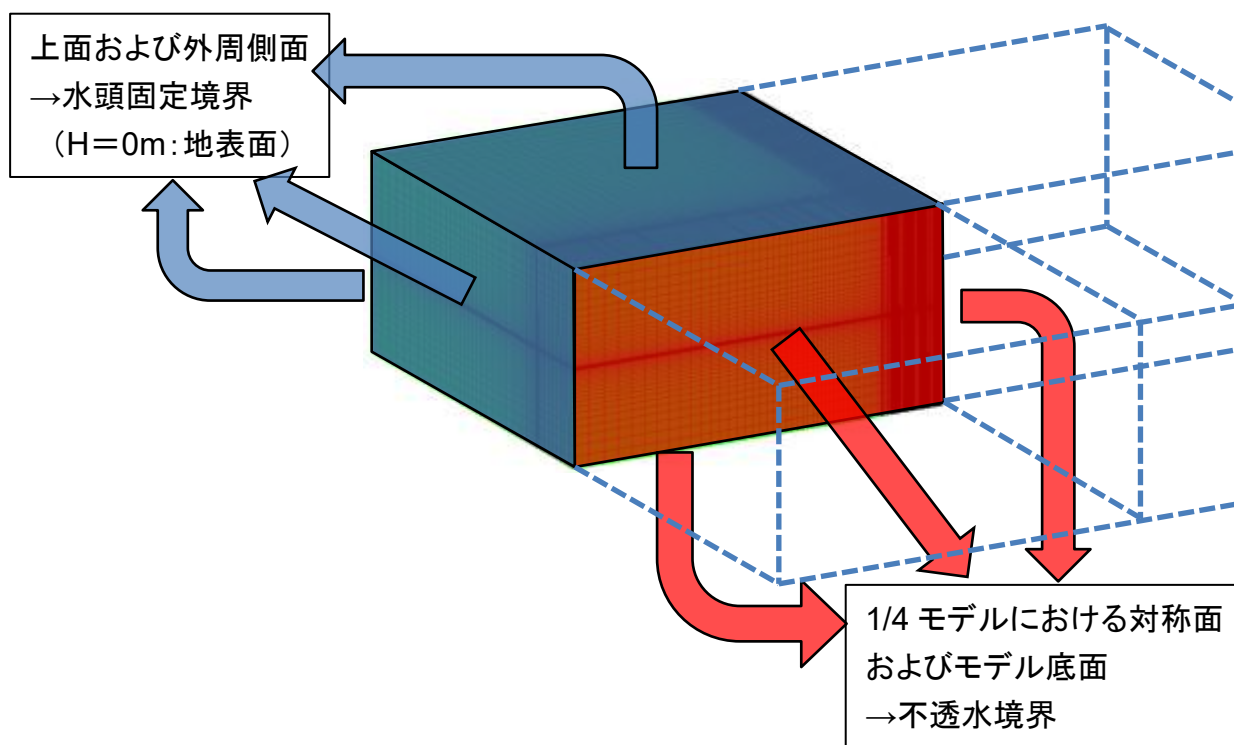


図 4.2.2-9 パネルスケールモデルにおける境界条件の設定

⑤ 地下施設の坑道寸法は、力学検討結果を反映する。

本検討では昨年度実施した力学解析に用いた坑道寸法、離間距離等を用いて水理検討のモデル化実施する。なお、本設定は NUMO の最新の検討結果と異なる可能性がある。

また、処分坑道と連絡坑道については、坑道の大きさ、形状が異なるが、パネルスケールモデルの構築にあたっては、モデル化の煩雑さを解消するため坑道寸法は処分坑道の大きさに統一す

ることとする。湧水量の評価に対して、坑道寸法、形状の影響は比較的小さいと考えられることから、定量評価に対する影響は小さいと想定される。

⑥ モデル規模の制約から、支保工、EDZ等はモデル化しない。

パネルスケールモデルは解析領域が広域であり、処分坑道等の地下坑道を詳細な形状でモデル化することは難しい。また、支保工やEDZ等の領域についてもモデル化が困難であると考え、本検討では坑道周辺のグラウト領域のみ考慮可能なモデル化とした。なお、処分坑道の形状、大きさや、EDZの有無、不飽和領域の有無などが湧水量の算出結果に与える影響については、後述する2次元あるいは3次元の坑道周辺詳細モデルから得られる湧水量との比較により、パネルスケールモデルの解析結果から得られる湧水量の精度を評価するとともに、必要に応じて補正を行うことにより、湧水量の定量化の精度向上を図ることとする。

(c) 検討条件の設定

処分場における湧水量の定量化を目的としたパネルスケールモデルの検討条件を以下に設定する。なお、本検討では回収可能性の維持期間として100～300年を想定した。

① 解析コードの選定

本検討では3次元飽和・不飽和、非定常地下水流動解析の実施にあたり、公開コードとなっているDtransu3D・ELを用いて検討することとする。本解析コードは適用実績も多く、解析コード自体の妥当性検証も行われており、FEM解析手法として適用性が高いと判断される。以下にDtransu-3D・ELの基礎方程式を示す。

Dtransu-3D・ELの基礎方程式は、Darcy則からなる運動方程式(式4.2.2-1)と質量保存則からなる連続の式(式4.2.2-2)を基にしている。

$$v = k \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{式 4.2.2-1}$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = f \quad \text{式 4.2.2-2}$$

ここに、 v はDarcy流速(浸透流の平均流速)、 h は全水頭、 x は浸透長、 z は位置水頭、 k は飽和透水係数、 f は領域内の間隙にある水の体積の変化量である。

式4.2.2-1を式4.2.2-2に代入することにより、浸透問題の基礎方程式が得られる。飽和した地盤の場合、右辺は間隙の変化と等しくなるので、次式のようになる。

$$f = \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial n}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = S_s \frac{\partial n}{\partial t} \quad \text{式 4.2.2-3}$$

ここに、 n は間隙率、 S_s は比貯留係数であり、水頭変化による帯水層の間隙の変化率を表す係数である。

また、全水頭 h とサクション φ と位置水頭 z には、次式の関係がある。

$$h = \varphi + z \quad \text{式 4.2.2-4}$$

式 4.2.2-4 を用いて未知数 φ に直して整理すると、飽和領域内の浸透流の支配方程式は次式のようにになる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \varphi}{\partial z} + k \right) = S_s \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad \text{式 4.2.2-5}$$

一方、不飽和地盤の場合、負の圧力水頭の変動によって間隙率の変化は生じないものと仮定すると、 f は次式のようにになる。

$$f = \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = C \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad \text{式 4.2.2-6}$$

ここに、 θ は体積含水率、 C は比水分容量であり、この式を用いることにより不飽和領域内の浸透流の支配方程式は次式のようにになる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial z} + k(\theta) \right) = C \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad \text{式 4.2.2-7}$$

ここで、透水係数は含水率によって変化するため、 $k(\theta)$ としている。

圧力水頭が 0 となる面を自由水面と仮定し、それを境界として飽和領域と不飽和領域に分かれるとする。この考え方を基に上記の飽和領域の式 (式 4.2.2-5) と不飽和領域の式 (式 4.2.2-7) を 1 つの式にまとめると、次式となる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial z} + k(\theta) \right) = (C(\varphi) + \alpha S_s) \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad \text{式 4.2.2-8}$$

ここに、不飽和領域では $\alpha = 0$ 、飽和領域では $\alpha = 1$ となる。

② 岩盤等の初期物性条件

本検討では国内の標準的な岩種として軟岩を検討対象とするが、物性等の設定にあたっては、NUMO セーフティケースに関する外部専門家ワークショップでの配布資料[6] (以下、「NUMO 配布資料」と称す) において候補母岩となっている 3 岩種のうち、図 4.2.2-10 に示す軟岩 (新第三紀堆積岩類、処分深度: 500m) を対象とする。本来、岩盤の種類により地下水流動に影響する水みちの構造が異なることから、NUMO は亀裂ネットワークモデルや等価不均質媒体モデルを想定しているが、本検討では前述したように、等価均質媒体モデル (均質な多孔質媒体) としてモデル化するものとし、設定すべき透水係数と間隙率については NUMO 配布資料、既存文献を踏まえて、表 4.2.2-1 に示す値を設定する。不均質性を考慮した検討については今後の課題であるが、等価不均質媒体モデルを対象とする場合、本検討と同様の解析手法を用いて検討することができる。

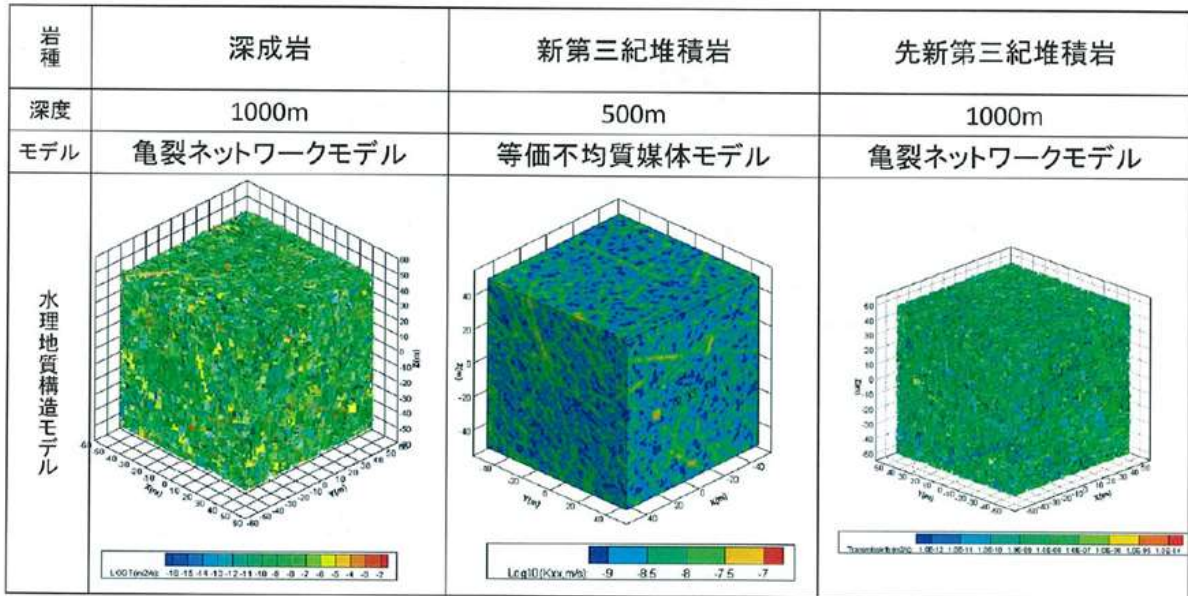


図 4.2.2-10 候補母岩と検討対象母岩[6]

表 4.2.2-1 透水係数と間隙率の設定値

材質名	透水係数 (m/s)	間隙率 (%)	備考
岩盤（新第三紀堆積岩類）	3.000E-7	25 (25~26)	NUMO 配布資料[6]より
支保コンクリート等	3.000E-7	25	健全時および劣化時共通
EDZ	3.000E-5 (健岩よりも2 オーダー大きい)	25	昨年度の力学検討結果では、約 5 倍 (100 年後)、7 倍(10,000 年後)程度[1]
グラウト領域	3.000E-8	25	岩盤よりも 1 オーダー小さく設定
緩衝材	1.005E-12	40	JNC TN8400 2005-026[32]より、 縦置きのみ使用（PEM は無視）
埋戻し材	7.353E-12	33	JNC TN1400 99-022[3]より

なお、EDZ の透水係数については、力学的影響検討の結果から得られる透水係数の経時変化データを反映する方法があるが、パネルスケールモデルの検討においては、メッシュ分割の制約から岩盤の透水係数の経時変化は考慮しないものとする。

本検討では、非定常解析を実施すること、不飽和領域の発生を考慮する必要があるため、比貯留係数および不飽和特性についての設定を行う必要がある。比貯留係数については、表 4.2.2-2 に示すように各部材の力学物性（弾性係数、ポアソン比など）から算出した。

表 4.2.2-2 比貯留係数の設定値

名 称	弾性係数 E (Pa)	ポアソン比 ν	有効間隙率 ϕ	せん断弾性係数 G (Pa)	体積弾性係数 K (Pa)	体積弾性係数 (多孔質体相当) K_v (Pa)	比貯留係数 S_s (1/m)	備 考
緩衝材	3.900E+07	0.400	0.40	1.393E+07	6.500E+07	8.357E+07	1.186E-04	
埋戻し材	3.900E+07	0.400	0.33	1.393E+07	6.500E+07	8.357E+07	1.183E-04	緩衝材と同様の弾性係数とポアソン比
支保工	2.960E+10	0.200	0.25	1.233E+10	1.644E+10	3.289E+10	1.382E-06	コンクリートの初期剛性相当 間隙率は岩盤相当
軟岩系岩盤	3.500E+09	0.300	0.25	1.346E+09	2.917E+09	4.712E+09	3.158E-06	NUMO,2016bより (温度設定は30°)
EDZ (軟岩系岩盤)	3.500E+08	0.450	0.25	1.207E+08	1.167E+09	1.328E+09	8.442E-06	弾性係数は岩盤の1/10 ポアソン比は0.45 (破壊接近度法の破壊時の設定) 間隙率は岩盤相当
グラウト	3.500E+09	0.300	0.25	1.346E+09	2.917E+09	4.712E+09	3.158E-06	岩盤相当

S_s : 比貯留係数 (1/m) 、 ρ_f : 水の密度 (30°相当を設定、 $9.957 \times 10^2 \text{kg/m}^3$)、 g : 重力加速度 (m/s^2)

ϕ : 有効間隙率、 K_v : 多孔質岩盤の体積弾性係数 (Pa) 、 K_f : 水の体積弾性係数 (30°相当を設定 : $2.250 \times 10^9 \text{Pa}$)

$$S_s = \rho_f g \left(\frac{1}{K_v} + \frac{\phi}{K_f} \right) : \text{比貯留係数の算出式} \quad K_v = K + \frac{4}{3}G, \quad K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

不飽和特性に関しては、既存の検討結果を踏まえ、設定を行った。本検討では飽和・不飽和解析手法のみでなく、二相流解析手法を用いた検討を行うことから、透水係数のみでなく透気係数の設定を行う必要がある。

媒体の絶対浸透率（絶対透過係数）は、以下の式で表現される。

$$K = \frac{\mu}{\rho g} k \quad \text{式 4.2.2-9}$$

ここに、 K ：絶対浸透率（絶対透過係数）(m²)

k ： k_l または k_g ：間隙流体の飽和透過係数(m/s)

(k_l ：飽和透水係数(m/s)、 k_g ：飽和透気係数(m/s))

μ ：間隙流体の粘性係数(kg/m・s)

ρ ：間隙流体の密度、 g ：重力加速度(m/s²)

また、相対浸透率評価関数（不飽和領域における比透水係数関数：対象物の飽和度に応じた透水性と透気性を表す0～1の関数）に関しては、以下の2つのモデルを用いた。

【Corey モデル】

$$k_{rl} = (S^*)^n, k_{rg} = (1 - S^*)^n (1 - (S^*)^n) \quad \text{式 4.2.2-10}$$

$$S^* = (S_l - S_{lr}) / (1 - S_{lr} - S_{sr})$$

【van Genuchten モデル】

$$k_{rl} = (S^*)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \left(1 - (S^*)^{\frac{1}{\lambda}} \right)^{\lambda} \right)^2, k_{rg} = 1 - k_{rl} \quad \text{式 4.2.2-11}$$

$$S^* = (S_l - S_{lr}) / (S_{ls} - S_{lr}), S_{ls} = 1 - S_{sr}$$

ここに、 k_{rl} ：水の相対浸透率、 k_{rg} ：ガスの相対浸透率、

S^* ：水の有効飽和度、 S_{lr} ：水の残留飽和度、 S_{ls} ：水の最大飽和度、

S_{sr} ：ガスの残留飽和度、 n , m , λ ：関数パラメータ

毛管圧力関数（対象物の飽和度に応じた毛管圧力の関数）に関しては、以下の2つのモデルを用いた。

【Narasimhan モデル】

$$P_{cap,l} = \begin{cases} -P_e - P_0 \left(\frac{1 - S_l}{S_l - S_{lr}} \right)^{1/\lambda} & \text{for } S_l < 1 \\ 0 & \text{for } S_l = 1 \end{cases} \quad \text{式 4.2.2-12}$$

【van Genuchten モデル】

$$P_{cap,l} = p_0 \left((S^*)^{-\lambda} - 1 \right)^{1-1/\lambda} \quad \text{式}$$
$$S^* = \frac{S_l - S_{lr}}{S_{ls} - S_{lr}} \quad \text{4.2.2-13}$$

ここに、 $P_{cap,l}$: 毛管圧力 (Pa)

S^* : 水の有効穂岩度、 S_l : 間隙水飽和度、 S_{lr} : 水の残留飽和度、

S_{ls} : 水の最大飽和度、 S_{sr} : ガスの残留飽和度、 λ : 関数パラメータ

上記を用いて設定した飽和透水係数、透気係数、間隙率の設定値を表 4.2.2-3 に示す。また、不飽和特性の設定に用いたパラメータの一覧表を表 4.2.2-4 に示す。各材料に対する不飽和特性曲線について、図 4.2.2-11～図 4.2.2-14 にグラフ形状を示す。

表 4.2.2-3 飽和透過係数の設定値

名称	飽和透過係数 (m/s) (赤字: 回収可能性での設定値)			間隙率 (赤字: 回収可能性での設定値)			沿岸業務での設定 (赤字: 回収可能性と異なる設定)	備考	
	99-022 ^{※1}	2005-026 ^{※1}	設定案 (11/07)	99-022	2005-026	設定案 (11/07)			
緩衝材	水	4.902E-13	1.005E-12	1.005E-12	0.400	0.400	0.400	左記設定案と同様	ベントナイト (70wt%) + ケイ砂 (30wt%) の混合材料を想定
	ガス	6.753E-12	1.405E-12	5.014E-14					
埋戻し材	水	7.353E-12		7.353E-12	0.333		0.333	左記設定案と同様	ベントナイト (15wt%) + 骨材 (85wt%) の混合材料を想定 NUMO (TR-15-10)、プラグは無機
	ガス	1.283E-08		3.669E-13					
支保工/インポート	水		5.025E-11	3.000E-07		0.190	0.250	2005-026と同様の設定 (飽和透水係数: 5.025E-11m/s, 間隙率: 0.190)	
	ガス		4.052E-08	1.497E-08					
軟岩系岩盤	水	1.226E-09	1.005E-09	3.000E-07	0.220	0.300	0.250	透過不均質の設定	
	ガス	1.283E-08	1.054E-08	1.497E-08					
EDZ (軟岩系岩盤)	水		1.005E-07	3.000E-05		0.300	0.250	透過係数: 岩盤×100 間隙率: 岩盤と同じ	間隙率は岩盤と同じ
	ガス		1.054E-06	1.497E-06					
グラウト	水			3.000E-08			0.250	透過係数: 岩盤×0.1 間隙率: 岩盤と同じ	1Lu (1.333×10 ⁻⁷ m/s)以下の設定 間隙率は岩盤と同じ
	ガス			1.497E-09					

4-122

※1: 間隙流体の温度を30° に設定 (下記、(1)(2)の文献を参考に設定)

Slr: 水の残留飽和度、Sl_s: 水の最大飽和度、Ssr: ガスの残留飽和度、λ、ε、α、m、n: 関数のパラメータ

P₀: 定数 (Pa)、P_e: 毛管排除圧 (Pa)

(1) 地層処分研究開発第2次とりまとめ (JNC TN1400 99-022) より

(2) TRU廃棄物処分におけるガス発生・移行解析 (JNC TN8400 2005-026) より

$$k_g = \left(\frac{\rho_g}{\rho_w} \cdot \frac{\mu_w}{\mu_g} \right) k_w$$

用いて、飽和透水係数から飽和透気係数を算定

k_g、k_w: 飽和透気係数、飽和透水係数 ρ_g、ρ_w: ガス (空気) および水の密度

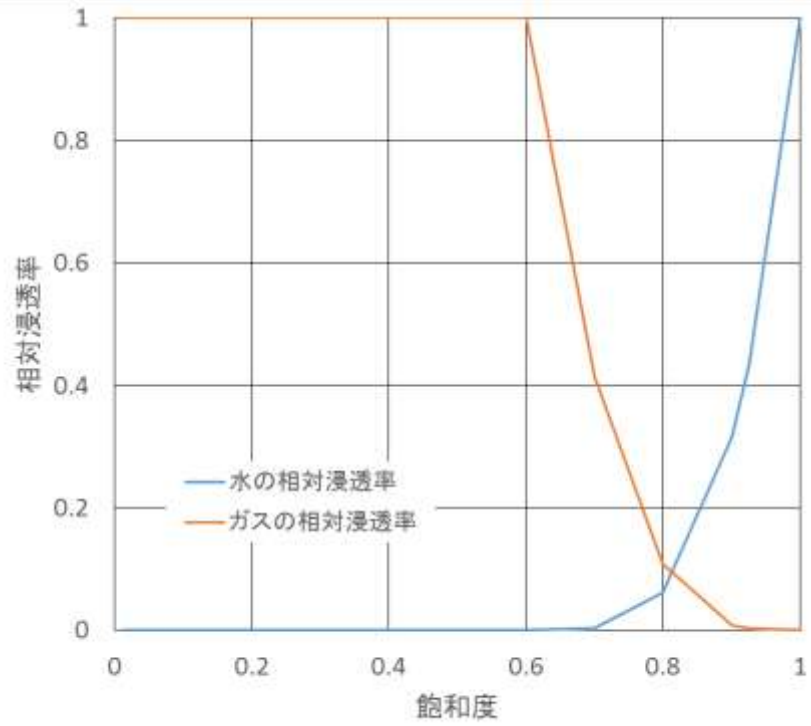
μ_g、μ_w: ガス (空気) および水の粘性係数

表 4.2.2-4 不飽和特性の設定用パラメータ一覧表

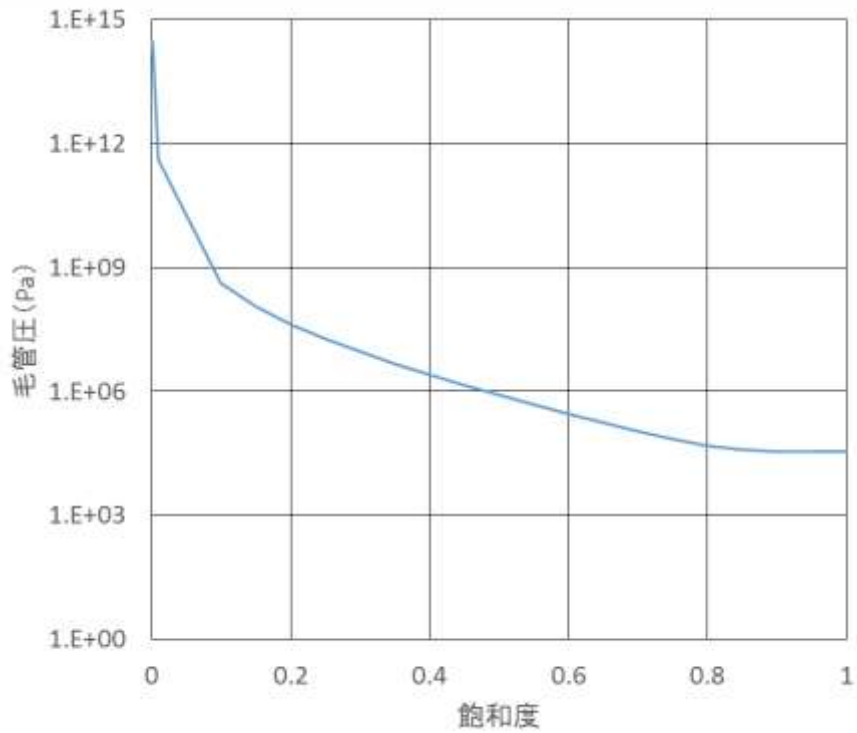
名称	対象	相対浸透率関数								毛管圧力関数						出典	
		計算式	S_{lr}	S_{ls}	S_{sr}	λ	ϵ	m	n	計算式	S_{lr}	S_{ls}	λ	α (1/m)	P_0 (Pa)		P_e (Pa)
緩衝材	水	Corey	0.94	-	0	-	-	1.5	9.5	Narasimhan	0	-	0.45	-	2.50E+06	1.20E+06	(2)
	ガス	Corey	0.94	-	0	-	-	1.5	9.5		0	-	0.45	-	2.50E+06	1.20E+06	
埋戻し材	水	van Genuchten	0	1	-	0.667	0.5	-	-	van Genuchten	0	1	0.667	1.50E-02	-	-	(1)
	ガス	Corey	0.997	-	0	-	-	4	2		0	1	0.667	1.50E-02	-	-	
支保工/インバート	水	Corey	0.15	-	0.075	-	-	2.5	2.3	Narasimhan	0.15	-	1.05	-	5.00E+06	6.90E+04	(2)
	ガス	Corey	0.15	-	0.075	-	-	2.5	2.3		0.15	-	1.05	-	5.00E+06	6.90E+04	
軟岩系岩盤	水	Corey	0.6	-	0	-	-	4	3	Narasimhan	0	-	0.35	-	8.00E+05	3.40E+04	(2)
	ガス	Corey	0.6	-	0	-	-	4	3		0	-	0.35	-	8.00E+05	3.40E+04	
EDZ 軟岩系岩盤	水	Corey	0.6	-	0	-	-	4	3	Narasimhan	0	-	0.35	-	8.00E+05	3.40E+04	(2)
	ガス	Corey	0.6	-	0	-	-	4	3		0	-	0.35	-	8.00E+05	3.40E+04	
グラウト	水	Corey	0.6	-	0	-	-	4	3	Narasimhan	0	-	0.35	-	8.00E+05	3.40E+04	(2)
	ガス	Corey	0.6	-	0	-	-	4	3		0	-	0.35	-	8.00E+05	3.40E+04	

S_{lr} : 水の残留飽和度、 S_{ls} : 水の最大飽和度、 S_{sr} : ガスの残留飽和度、 λ 、 ϵ 、 α 、 m 、 n : 関数のパラメータ
 P_0 : 定数 (Pa)、 P_e : 毛管排除圧 (Pa)

- (1) 地層処分研究開発第2次とりまとめ (JNC TN1400 99-022) より (赤字は、資料を基に数値を修正)
 (2) TRU廃棄物処分におけるガス発生・移行解析 (JNC TN8400 2005-026) より (赤字は、資料を基に数値を修正)

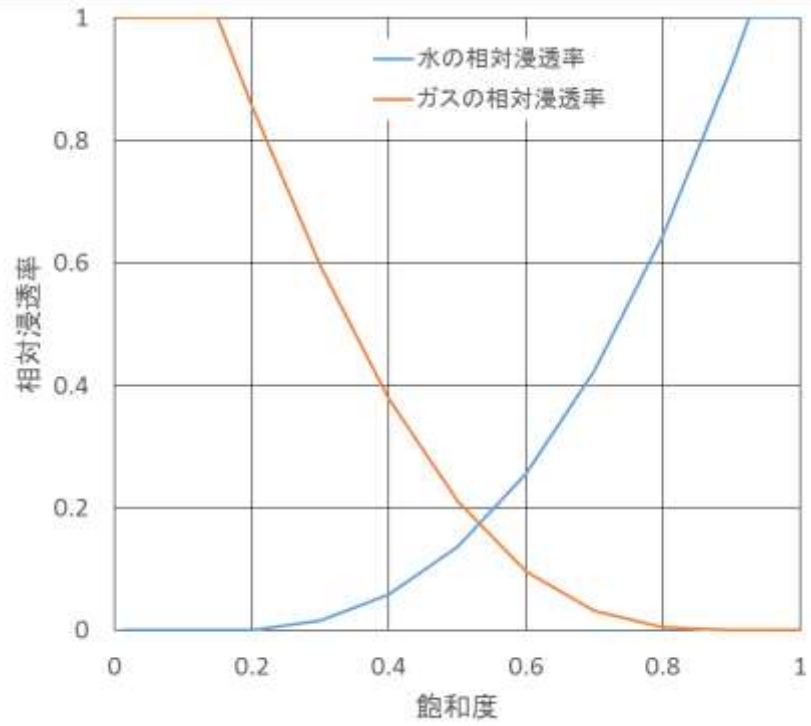


(a) 相対浸透率関数

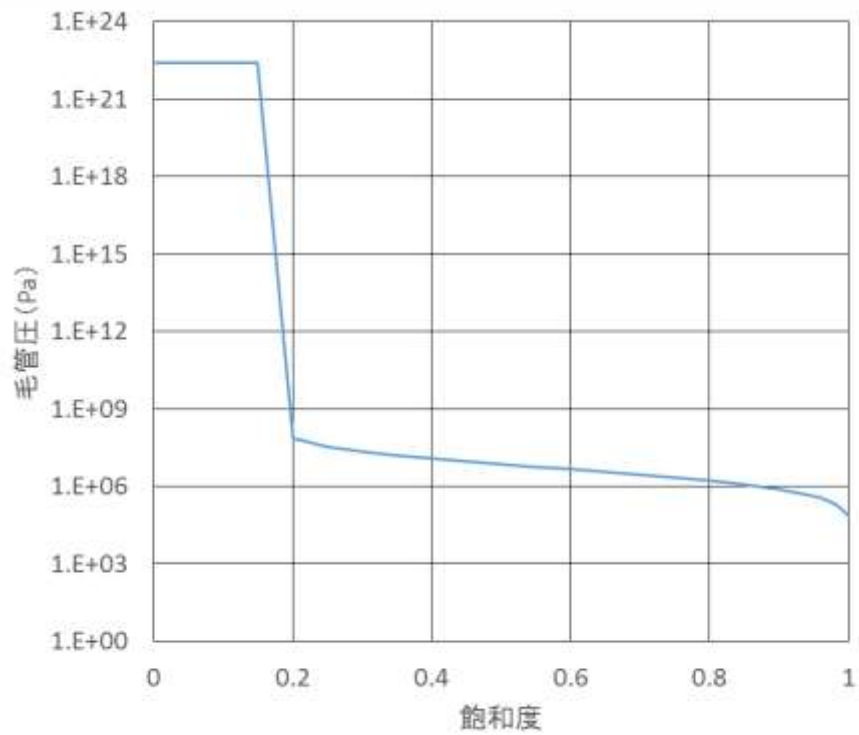


(b) 毛管圧力関数

図 4.2.2-11 不飽和特性曲線 (岩盤、EDZ、グラウト)

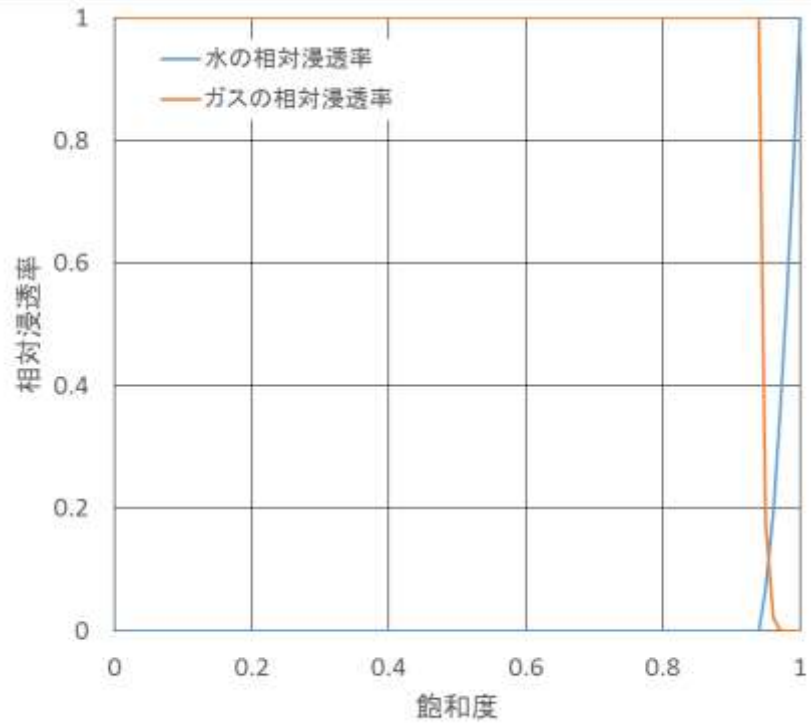


(a) 相対浸透率関数

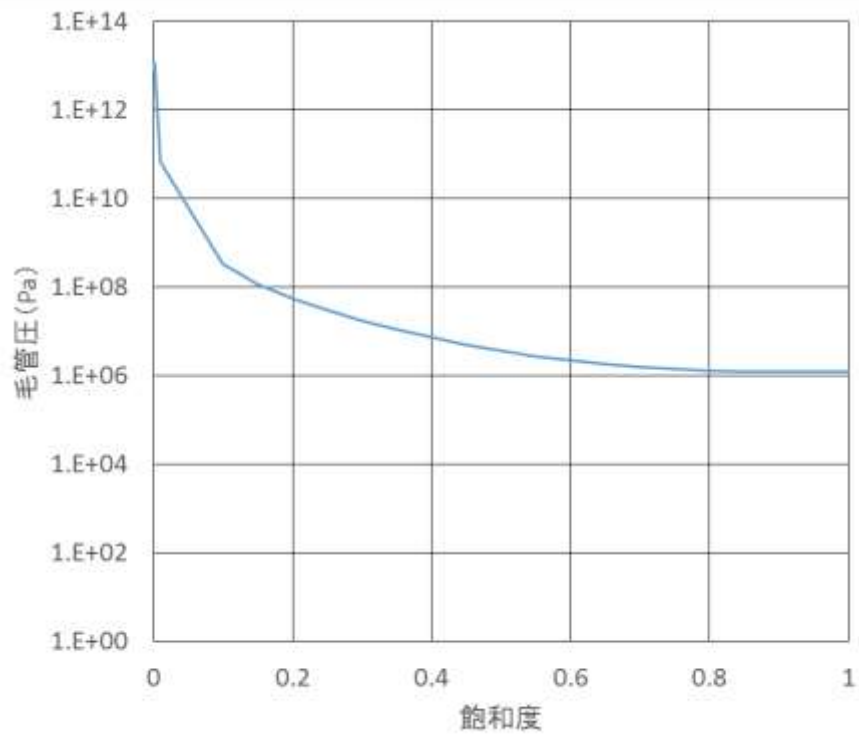


(b) 毛管圧力関数

図 4.2.2-12 不飽和特性曲線 (支保工、インバート)

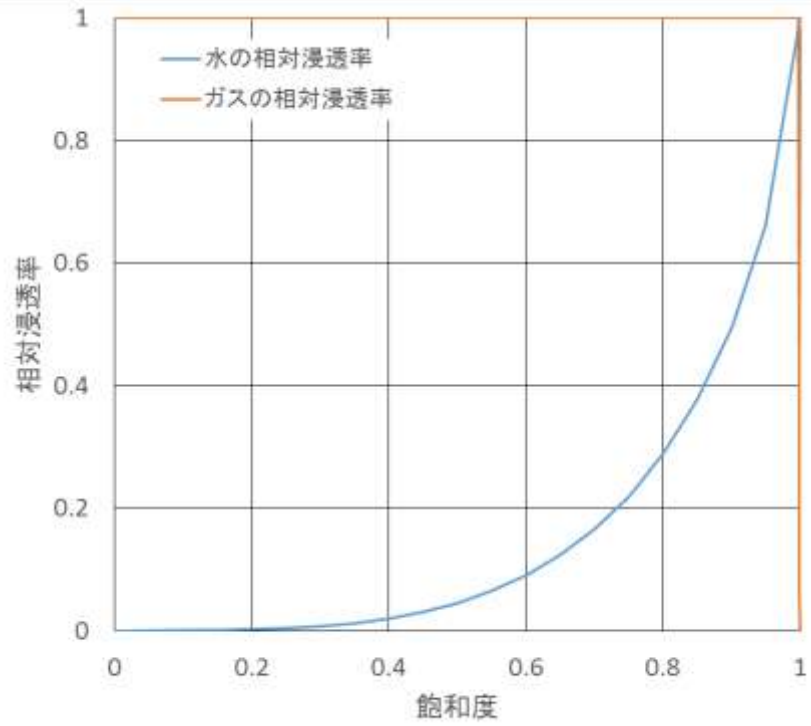


(a) 相対浸透率関数

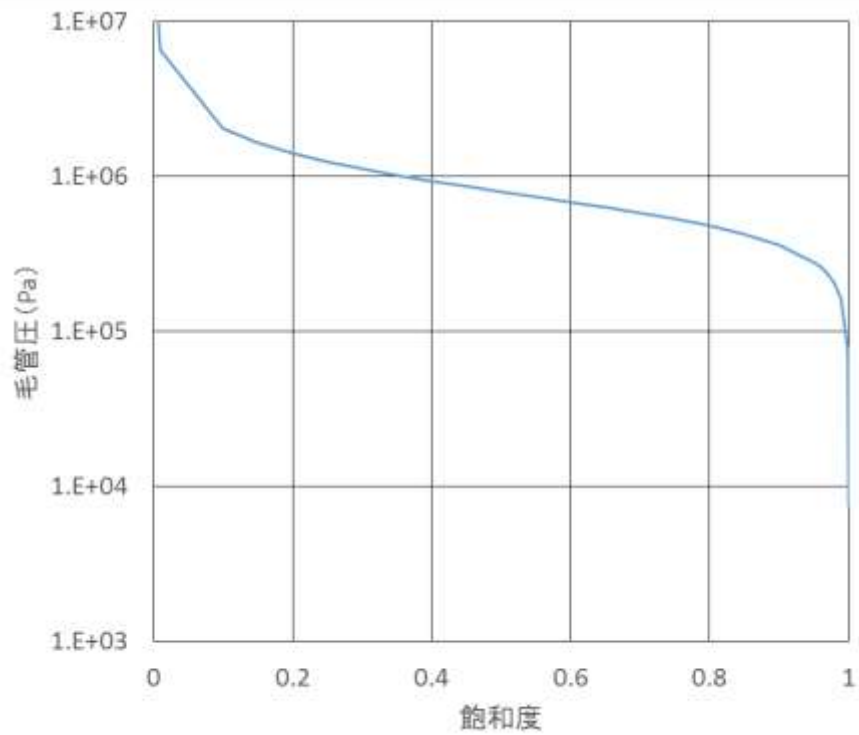


(b) 毛管圧力関数

図 4.2.2-13 不飽和特性曲線 (緩衝材)



(a) 相対浸透率関数



(b) 毛管圧力関数

図 4.2.2-14 不飽和特性曲線 (埋戻し材)

③ 初期条件

非定常地下水流動解析における初期条件としては、岩盤内の初期水頭値が必要となる。初期水頭値については境界条件を考慮し、静水圧分布条件 ($H=0\text{m}$) を与えるものとする。

④ モデル領域および境界条件

パネルスケールモデルの作成にあたって、処分坑道のレイアウトについての検討も行う。

2種類のパネル方式 (Through-type および Dead-end-type) について、1/4 モデル領域内での配置検討結果を図 4.2.2-15 および図 4.2.2-16 に示す。それぞれの配置に対する根拠は以下の通りである。

【Through-type】

- ・ 1 パネルあたりの廃棄体を 5,000 本と想定 (縦置き方式)
- ・ 坑道 1 本あたりの廃棄体定置本数を 100 本とすると、坑道本数は 50 本必要
- ・ 坑道 1 本あたりの長さは、 $(100-1) \times 6.66\text{m}$ (処分孔離間距離) = 659.34m
- ・ 1/4 対称モデルの場合、処分坑道長さは $659.34\text{m} \times 1/2 = 329.67\text{m}$
- ・ 連絡坑道長さ (処分坑道端部) は 30m を想定
- ・ 処分坑道の離間距離は、12m (2.4D : 坑道径 5m ~ 力学検討と同じ)

【Dead-end-type】

- ・ 1 パネルあたりの廃棄体を 5,000 本と想定 (横置き PEM 方式)
- ・ PEM(3.356m)5,000 本分の処分坑道延長は $3.356\text{m} \times 5,000 \text{本} = 16,780\text{m}$
- ・ 1/4 対称モデルの場合の処分坑道長さは、 $16,780\text{m} \times 1/4 = 4,195\text{m}$
- ・ 坑道 1 本あたりの長さを 419.5m とすると、1/4 対称モデルの処分坑道本数は 10 本
- ・ 連絡坑道長さ (処分坑道端部) は 20m を想定
- ・ 処分坑道の離間距離は、12m (2.4D : 坑道径 5m ~ 力学検討と同じ)

なお、連絡坑道については処分坑道と異なる形状、寸法であるが、本検討ではモデル化を簡略化するため処分坑道と同じ大きさとしている。また、NUMO の最新の検討結果と異なる可能性があるものの、平成 28 年度に実施した力学検討条件[1]を踏襲していることに注意する必要がある。

作成した 3D パネルスケールモデルを図 4.2.2-17 および図 4.2.2-18 に示す。

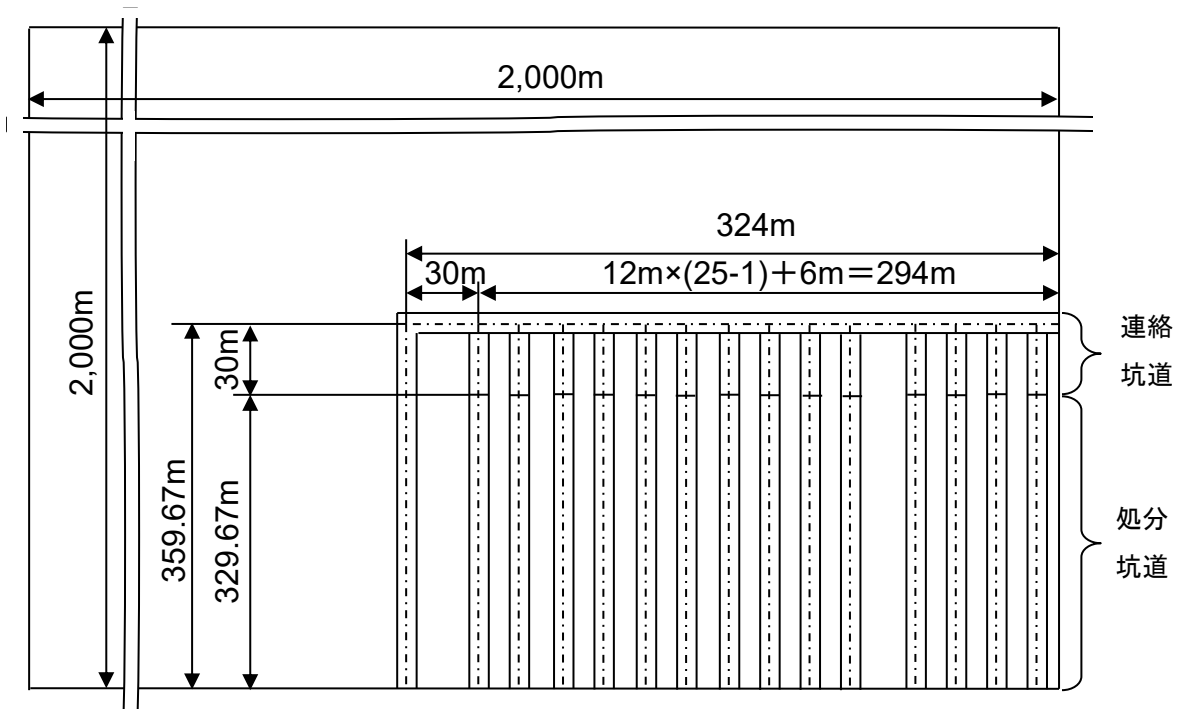


図 4.2.2-15 地下施設配置検討結果 (Trough-type)

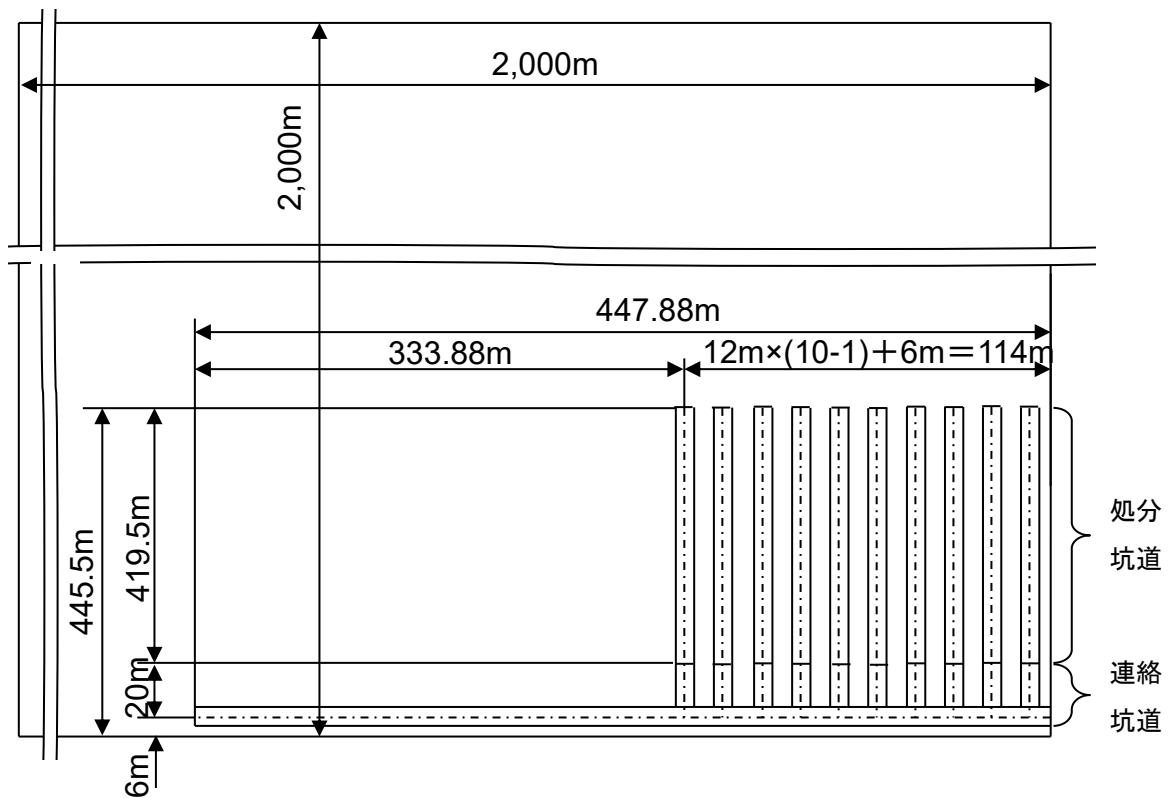
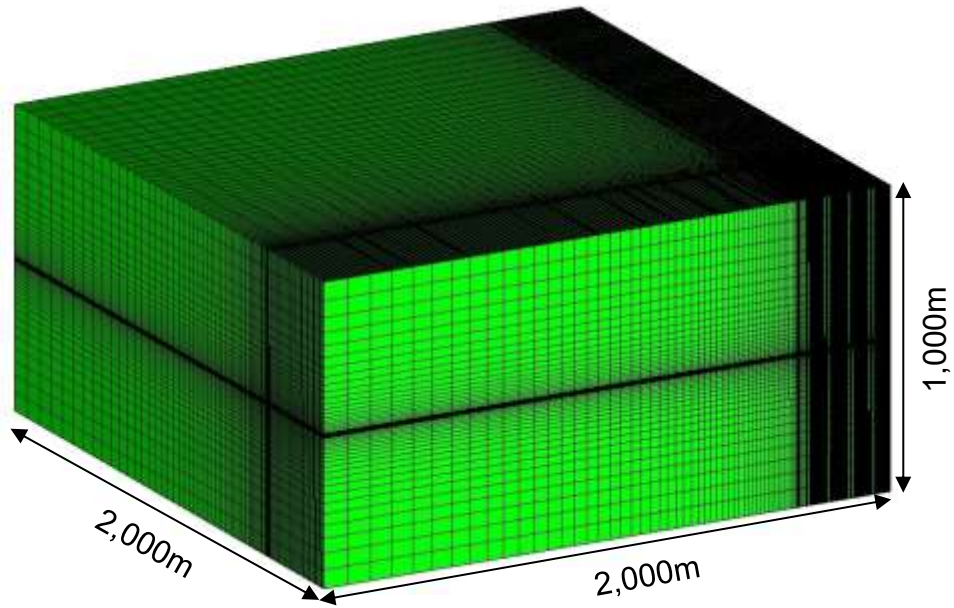
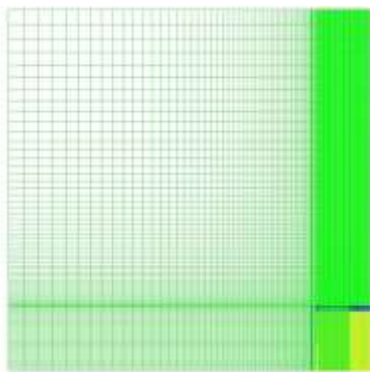


図 4.2.2-16 地下施設配置検討結果 (Dead-end-type)

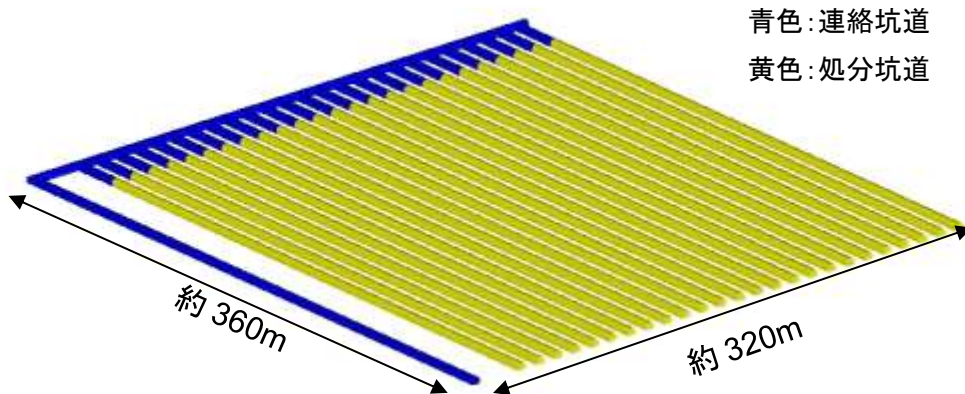


(a) 解析モデル鳥瞰図



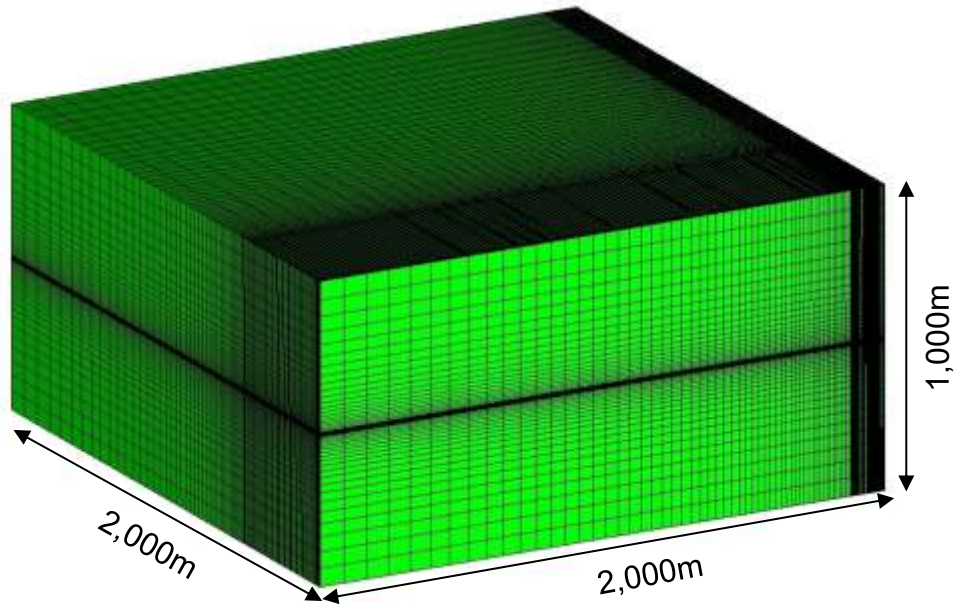
(b) 解析モデル平面メッシュ図

解析モデル規模 節点総数: 670,293 要素総数: 646,000

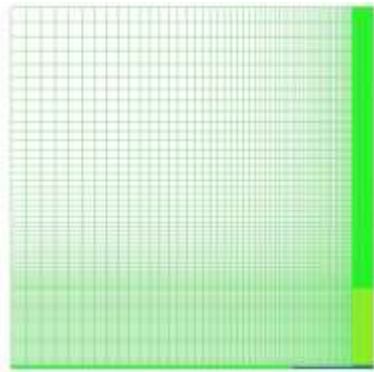


(c) 地下施設鳥瞰図

図 4.2.2-17 3D パネルスケールモデル (Through-type)

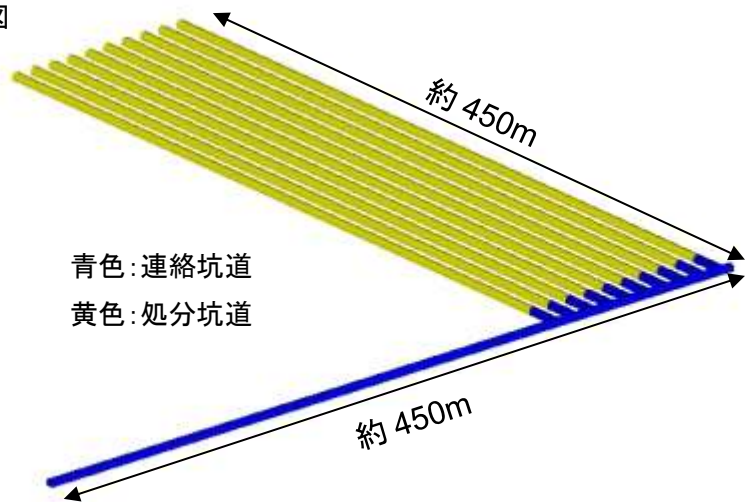


(a) 解析モデル鳥瞰図



(b) 解析モデル平面メッシュ図

解析モデル規模
節点総数: 456,858
要素総数: 438,750



(c) 地下施設鳥瞰図

図 4.2.2-18 3D パネルスケールモデル (Dead-end-type)

非定常地下水流動解析における境界条件については、実サイトにおいては周辺の地形条件等を反映した水理境界を設定する方法や、パネルスケールモデル領域を含む広域地下水流動解析モデルの解析結果から設定する方法が想定される。しかし、本検討では回収可能性維持期間を対象とした地下水流動解析であり、地下坑道への湧水現象を再現すること、また、境界条件の違いによる影響を排除するために簡略化された境界条件として、図 4.2.2-9 に示したように解析モデル領域の底面および側面の対称条件に対しては不透水境界条件、その他の側面と上面からは地下水が流入するものとして水頭固定境界条件を設定する。すなわち、地下空洞掘削前の地下水流動は非常に小さく、自然状態の地下水の動水勾配は 0 と仮定し無視する。また、実際には長期間の地下坑道掘削状態を維持すると、周辺地下水位の低下現象が発生する可能性があるものの、本検討では広域的な地下水位の低下現象は発生しないものと想定する。

これらのサイトスペシフィックな条件については、適切に解析モデルに反映することにより、本検討で用いる評価手法による検討が可能である。ただし、解析モデルの増大に伴う解析負荷が大きくなることに注意する必要がある。

また、地下坑道の掘削面については、浸出面境界（湧水発生時は大気圧境界、不飽和領域発生時は不透水境界）として、境界条件非線形問題として取り扱う。

⑤ 非定常解析条件

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

1. 連絡坑道掘削時（逐次掘削ではなく全連絡坑道を瞬時に掘削（連絡坑道開放条件））
2. 処分坑道掘削時（逐次掘削ではなく全処分坑道を瞬時に掘削（処分坑道開放条件））

本条件に基づき、連絡坑道掘削時の水圧条件を処分坑道掘削時の初期条件として解析的に引き継ぐこととする。これにより連絡坑道影響を反映した処分坑道掘削後の水理学的な時間変化を考慮した解析を実施することができる。

また、回収可能性維持期間の状態オプションを考慮し、処分坑道埋戻し状態の場合は処分坑道の埋戻し状態をモデル化（埋戻し材を考慮）し、処分坑道掘削時の水圧条件を初期条件とした非定常解析（逐次埋戻しではなく全処分坑道を瞬時に埋戻し）を実施することにより、処分坑道埋戻し状態での水理学的な時間変化を考慮した解析を実施することができる。

⑥ 処分坑道詳細モデルに対する境界条件

パネルスケールモデル解析結果については、後述する「処分坑道詳細モデル」における境界条件設定のためのデータとして適用する。

(d) 湧水量に影響する要因検討

パネルスケールモデルによる検討は、解析領域が広く解析負荷の低減の観点から地下施設を詳細にモデルすることができない。また、湧水量評価に用いた解析手法である FEM については、空間の離散化誤差を有することが知られており、湧水量の定量化結果については、メッシュ分割

の影響による誤差が含まれている。そのため、パネルスケールモデル解析から得られた湧水量の精度について検証すること目的として、処分坑道の形状、大きさに対するメッシュ分割影響を把握するため、2Dあるいは3Dの処分坑道詳細モデルおよび異なるメッシュ分割（パネルスケールモデルと同じ分割）や節点のみで坑道を再現したメッシュ（節点モデル）による湧水量算出を行い、湧水量に対するメッシュ分割の違いによる影響の定量化を行う。

加えて、パネルスケールモデルで考慮することができなかつた処分坑道周辺のEDZ等の影響について定量化を行い、湧水量に影響を及ぼす要因について感度解析を実施する。

解析条件等は前述のパネルスケールモデルでの設定を踏襲する。

b 処分坑道周辺の不飽和領域評価

処分坑道周辺の不飽和領域評価では、処分坑道周辺の不飽和領域の推定手法を検討する。還元雰囲気であった地下に処分坑道を掘削することにより、坑道周辺に不飽和領域（酸化領域）が発生する可能性がある。処分坑道周辺の地下水流動については、サイトスペシフィックな水理地質構造の影響により大きく挙動が異なる可能性があるものの、現段階では具体的なサイトが決定していないことから、本検討では水理地質構造を均質とした条件のもとでの飽和・不飽和地下水流動解析により、処分坑道周辺の不飽和領域の推定手法を用いる。

不飽和領域については、次のステップで実施する化学的影響評価のための条件として引き渡すものとし、不飽和領域の低減技術や、湧水量の低減技術の定量的評価のための具体的な手法、手順を検討する。

処分坑道周辺の不飽和領域評価のための定量的な評価手法、手順について以下に示す。

(a) 検討目的

非定常地下水流動解析手法を用いて、処分坑道詳細モデルにより坑道周辺に発生する可能性がある不飽和領域の分布、時間変化等について定量化を行うことを目的とする。

(b) 検討モデル、検討方法

湧水量や不飽和領域の評価結果に与える要因について把握するためには、処分坑道周辺を細かくモデル化した処分坑道詳細モデルによる検討が必要であり、効率的な検討の上では解析領域の絞り込み、適切な境界条件設定が必要となる。本検討では、処分坑道の近傍に対して、水理学的な対象条件を考慮した解析領域を設定するとともに、湧水量や不飽和領域への影響要因による感度を把握することにより、パネルスケールモデルの評価結果に対する湧水量算出精度の評価や、不飽和領域の発生に対する影響を把握する。

解析モデルとしては、処分坑道近傍を詳細にモデル化可能な領域を設定し、豎置き処分孔を有する場合は 3D モデル、横置き処分の場合は 2D モデルによりモデル化し、主に処分坑道掘削時の非定常解析結果から、坑道周辺の不飽和領域発生の時間変化を把握する。

本検討では 3 次元飽和・不飽和、非定常地下水流動解析の実施にあたり、公開コードとなっている Dtransu3D・EL を用いて検討することとする。本解析コードは適用実績も多く、解析コード自体の妥当性検証も行われており、FEM 解析手法として適用性が高いと判断される。ただし、不飽和領域の発生に関しては、二相流解析手法による評価手法の適用についても検討を行い、より適切な解析手法の比較検討を行う。本検討では二相流解析コードとして米国ローレンスバークレイ国立研究所の FDM 多相流解析 3次元コードである TOUGH2 を用いて検討することとする。本解析コードは適用実績も多く、解析コード自体の妥当性検証も行われており、FDM 解析手法、多相流解析手法として適用性が高いと判断される。TOUGH2 の基礎方程式を以下に示す。

TOUGH2 の基礎方程式は、エネルギー保存則と質量保存則を基にしていて、次式のようになる。

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^k dV_n = \int_{\Gamma_n} F^k \cdot nd\Gamma_n + \int_{V_n} q^k dV_n \quad \text{式 4.2.2-14}$$

ここに、 V_n は対象となる流れ場の任意の領域、 Γ_n は境界の閉曲面、 M は単位体積質量 (kg/m^3) あるいはエネルギー (J/m^3)、 F は質量流量 (kg/s) または熱流量 (J/s)、 q は流体の流入または流出 ($\text{kg/m}^3/\text{s}$)、 \mathbf{n} は V_n の部分面 $d\Gamma_n$ の内向き法線ベクトルである。また、 $\Gamma=1$ は水の質量、 $\Gamma=2$ は空気の質量、 $\Gamma=3$ は熱エネルギーを示す。

質量 M^κ は次式のように表せる。

$$M^\kappa = \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}^{\kappa} \quad \text{式 4.2.2-15}$$

ここに、 β は流体の相、 ϕ は間隙率、 S_{β} は β 相の飽和率、 ρ_{β} は β 相の密度 (kg/m^3)、 X_{β}^{κ} は β 相の κ 成分に対する質量割合

また、熱エネルギーは以下のように表される。

$$M^{N\kappa+1} = (1-\phi)\rho_R C_R T + \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} U_{\beta} \quad \text{式 4.2.2-16}$$

ここに、 ρ_R は岩盤の密度 (kg/m^3)、 C_R は岩盤の比熱 (J/kg/K)、 T は流体の温度 (K)、 U_{β} は β 相の比内部エネルギー (J/kg) である。

質量流量は各成分の和として次式のようになる。

$$F_{\kappa} |_{adv} = \sum_{\beta} X_{\beta}^{\kappa} F_{\beta} \quad \text{式 4.2.2-17}$$

また、個別の成分の質量流量 F_{β} は、多相流に拡張した Darcy 則として次式のように表される。

$$F_{\beta} = \rho_{\beta} u_{\beta} = -K \frac{k_{r\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} (\nabla P_{\beta} - \rho_{\beta} g) \quad \text{式 4.2.2-18}$$

ここに、 u_{β} は β 相の体積流量としての Darcy 流速、 K は絶対浸透率 (m^2)、 $k_{r\beta}$ は相対浸透率、 μ_{β} は β 相の粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)、 P_{β} は β 相の流体圧力、 g は重力加速度 (m/s^2) である。

β 相の流体圧力 P_{β} は、圧力と毛管圧力 $P_{c\beta}$ (Pa) の和として次式のように表される。

$$P_{\beta} = P + P_{c\beta} \quad \text{式 4.2.2-19}$$

検討対象の岩種は、軟岩（新第三紀堆積岩）を対象とし、等価均質媒体としての物性値を与えるものとする。処分形態については、縦置き、横置きの 2 ケースを対象とする。回収可能性維持期間の状態オプションとしては、処分坑道における湧水量、不飽和領域の発生の対象となる「処分坑道開放状態」を対象とする。

(c) 検討条件の設定

処分場における湧水量の定量化および不飽和領域評価を目的とした処分坑道詳細モデルの検討条件を以下に設定する。

① 岩盤等の初期物性条件

基本的にパネルスケールモデル解析と同様である。表 4.2.2-5 に透水係数と間隙率の設定値を示す。なお、その他の不飽和特性等も同様である。

表 4.2.2-5 透水係数と間隙率の設定値 (表 4.2.2-1 の再掲)

材質名	透水係数 (m/s)	間隙率 (%)	備考
岩盤 (新第三紀堆積岩類)	3.000E-7	25 (25~26)	NUMO 配布資料[6]より
支保コンクリート等	3.000E-7	25	健全時および劣化時共通
EDZ	3.000E-5 (健岩よりも2 オーダー大きい)	25	昨年度の力学検討結果では、約5倍 (100年後)、7倍(10,000年後)程度[1]
グラウト領域	3.000E-8	25	岩盤よりも1オーダー小さく設定
緩衝材	1.005E-12	40	JNC TN8400 2005-026[32]より、 縦置きのみ使用 (PEMは無視)
埋戻し材	7.353E-12	33	JNC TN1400 99-022[3]より

なお、EDZの透水係数については、昨年度実施した力学影響解析結果による岩盤の透水性の時間変化を考慮する計画であったが、岩盤の透水性に与える力学影響が小さい結果であったため、不飽和領域の発生に対して影響が大きくなる条件として、EDZを坑道壁面から1m範囲の透水性が岩盤よりも2オーダー大きくなる条件を設定する。また、EDZの透水性の時間変化は考慮しないものとする。

② 初期条件

非定常地下水流動解析における初期条件としては、岩盤内の初期水頭値が必要となる。初期水頭値については境界条件を考慮し、静水圧分布条件 (H=0m) を与えるものとする。

③ モデル領域および境界条件

解析領域に関しては、処分坑道への鉛直方向の地下水流動が卓越する領域を対象として、2次元 (横置き PEM 方式) あるいは3次元 (縦置き方式) 領域を設定する。なお、処分坑道詳細モデルの境界条件については、パネルスケール解析結果を考慮して設定する。

④ 非定常解析条件

処分坑道詳細モデルにおいては、掘削前の静水圧分布から掘削された状態を想定して非定常解析を実施する。基本的に処分坑道開放時を対象とした検討を実施するが、処分坑道埋戻時を想定した解析についても実施する。

c 閉鎖前の作業環境の安全性に関する影響評価と影響低減技術の検討

解析結果より、閉鎖前の作業環境の安全性への影響を評価し、影響評価に基づき影響低減技術の検討を行う。

・閉鎖前の作業環境の安全性への影響整理

- ① 湧水量に着目した処分パネル方式、坑道状態（開放、埋戻）、坑道開放期間の違いに対する影響評価

・湧水量の低減対策技術についての整理

- ① グラウトによる坑道周辺岩盤の遮水性の向上による作業環境の改善
- ② 排水坑道等による処分坑道からの湧水量低減（全体としての湧水量の低減効果は小さい）

・湧水量の排水設備トラブルなどによる処分坑道水没リスクの低減対策技術についての整理

- ① 排水設備の容量の増大、複数の設備設置
- ② 地下における湧水貯留坑道の設計

・不飽和領域（酸化領域）の発生による支保、岩盤への影響評価と影響低減技術についての整理

- ① グラウトによる不飽和領域発生の違いによる影響の評価と低減対策
- ② 湧水量の低減対策工による不飽和領域発生の違いによる影響の評価と低減対策

2) 閉鎖後の長期安定性に関する影響評価

ここでは再冠水時間による評価、および坑道湧水量による評価を行う。坑道閉鎖後の再冠水時間を把握することにより、安全評価の前提条件の妥当性について評価することができる。また、緩衝材や埋戻し材中のベントナイト成分の流出影響を把握することを目的として、湧水量による評価方法の一例を示す。

a 再冠水時間による評価

閉鎖後の再冠水時間を評価するための定量的な評価手法、手順について以下に示す。

(a) 検討目的

水理的に閉鎖後長期の安全性に影響がある場合とは、安全評価の前提となる閉鎖後 1,000 年の段階で人工バリア、天然バリアの初期状態（飽和状態）が維持されていない場合であると考えられる。そこで、回収可能性維持期間を想定した地下水流動解析結果を初期値とし、閉鎖後の再

冠水挙動に関する非定常地下水流動解析により、処分場の再冠水時間の把握を行う。その結果、再冠水時間が閉鎖後 1,000 年以内であれば、影響低減技術は必要ないと判断され、閉鎖後 1,000 年以上掛かる場合には、再冠水を促すための対策技術を提案するとともに、影響低減技術の効果を定量的に把握する手法、手順を提示する。

(b) 検討モデル、検討方法

- ・二相流を取扱うことのできる多相流解析手法の適用（解析コード：TOUGH2）

一般的な飽和・不飽和流動解析手法（本検討で用いている FEM 地下水流動解析コード：Dtransu3D・EL）では、処分坑道の閉鎖に伴う再冠水現象を適切に評価することができない可能性がある。このため、二相流（水と空気）を取扱うことのできる手法（本検討では米国ローレンスバークレイ国立研究所の FDM 多相流解析 3 次元コード：TOUGH2）による検討を実施する。

- ・パネルスケールモデルおよび処分坑道詳細モデル解析結果を踏まえた検討条件の設定

パネルスケールモデルの解析結果と処分坑道詳細モデルの解析結果を比較し、検討条件を設定する。不飽和領域が大きく発生した解析結果に対して検討を行うことにより、解析ケースの絞り込みを行うことができ、効率の良い検討が可能であると考えられる。

(c) 検討条件の設定

再冠水の時間評価を目的とした検討条件を以下に設定する。

① 岩盤等の初期物性条件

基本的に処分坑道の掘削解析と同様であるが、EDZ 影響等については、埋戻前の条件を初期物性条件として設定する。

② 初期条件

処分坑道の埋戻前の条件を初期条件とする。

③ モデル領域および境界条件

パネルスケールモデル、処分坑道詳細モデルともに、処分坑道掘削解析と同様の解析モデル、境界条件とする。

④ 非定常解析条件

処分坑道の埋戻前を初期条件とした非定常解析を実施し、原則として埋戻後 1,000 年までの非定常解析を実施する。

(d) 解析結果

解析結果として以下を提示する。

① 処分坑道周辺の再冠水状況（圧力水頭分布の時間変化）

処分坑道周辺の再冠水状況を把握するため、着目点での圧力水頭の経時変化等を整理する。

② 処分坑道周辺が冠水（飽和）するまでの経過時間

再冠水評価において、完全飽和となるには非常に長期間となる可能性が考えられる。本

検討での処分坑道周辺の冠水時間については、非定常解析 1,000 年後の解析結果を踏まえて、処分坑道周辺の圧力水頭分布から判断することとする。また、再冠水に関する圧力水頭の経時変化については、化学的・熱的影響評価の前提条件として引き渡す。

b 坑道湧水量による評価

緩衝材や埋戻し材中のベントナイト成分の流出影響を評価するための定量的な評価手法、手順について以下に示す。

(a) 検討目的

緩衝材や埋戻し材の長期的な性能はベントナイト成分の量に起因する。地下水流動に伴うベントナイト成分の流出影響について評価するための地下水流動に関するデータの提供を目的とする。

(b) 検討モデル、検討方法

本検討では処分坑道詳細モデルとして作成する豎置きタイプの地下水流動解析モデルを用いて、処分孔（緩衝材）、処分坑道（埋戻し材）掘削時における坑道湧水量を算出することにより、ベントナイト流出評価のための坑道湧水量データとして提示する。

横置き PEM 方式の場合は評価対象が処分坑道内の埋戻し材のみであるが、坑道湧水量の算出結果を評価データとして提供することができる。

緩衝材や埋戻し材設置後は、掘削状態とは異なり周辺地下水流動が大きく異なることが想定されるものの、局所的なパイピング現象の発生によりベントナイト成分が流出しやすくなる可能性が想定されるため、ここでは掘削状態での湧水量について提示することとする。

(c) 検討条件の設定

基本的に坑道掘削解析による湧水量算出条件と同じである。

(d) 解析結果

解析結果として以下を提示する。

- ① 豎置き処分孔からの湧水量（緩衝材のベントナイト流出評価データ）
処分孔からの湧水量について算出結果を提示する。
- ② 処分坑道からの湧水量（埋戻し土のベントナイト流出評価データ）
処分坑道壁面からの湧水量について算出結果を提示する。

c 閉鎖後の長期安全性に関する影響評価と影響低減技術の検討

解析結果より、閉鎖後の長期安全性への影響を評価し、影響評価に基づき影響低減技術の検討を行う。なお、本検討は次年度（平成 30 年度）に実施する。

・処分場の再冠水に要する時間の把握と、影響低減技術についての整理

① 再冠水を促す対策技術の提示と効果の確認、課題の抽出

例えば、注入ボーリングからの強制冠水などが想定され、必要に応じて対策工の効果を

確認するための流動解析を実施する。

② その他

例えば、強制的な脱気設備による強制冠水などが想定され、必要に応じて対策工の効果を確認するための流動解析を実施する。

(2) 閉鎖前の作業環境の安全性に関する影響評価

ここでは、前項にて示した検討方法に基づき回収可能性維持期間を考慮した地下水流動解析により、閉鎖前の作業環境の安全性に関して、坑道の湧水量の時間変化や不飽和領域の発生に着目した評価を実施する。

1) 湧水量による評価

回収可能性維持期間を考慮した湧水量の定量化を目的とし、処分場の全体湧水量の評価に対してパネルスケールモデルによる地下水流動解析を実施する。また、パネルスケールモデルのメッシュ分割影響による湧水量算出の妥当性や、処分坑道周辺の透水性の違いによる湧水量への影響を把握することを目的とした処分坑道詳細モデルによる地下水流動解析を実施する。

a 3D パネルスケールモデルによる検討

処分場の全体湧水量の把握と処分形態の違い（「Through-type」と「Dead-end-type」）の比較に着目した「パネルスケールモデル」による地下水流動解析結果について以下に示す。

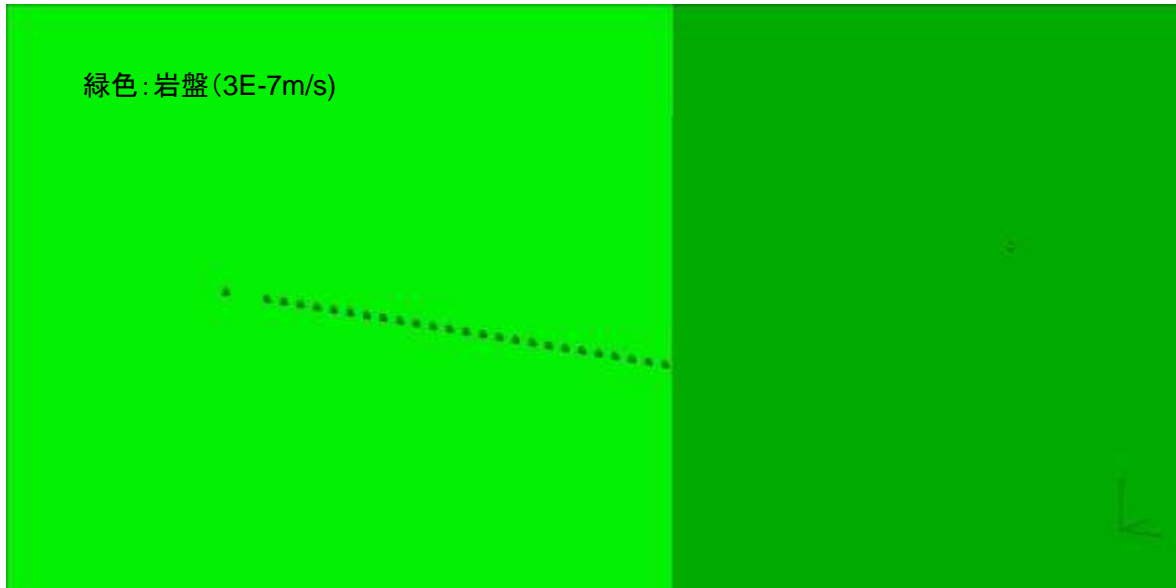
(a) 解析ケースの設定

パネルスケールモデルによる地下水流動解析ケース（全 8 ケース）について表 4.2.2-6 に示す。処分形態については 2 種類（「Through-type」と「Dead-end-type」）、処分坑道の状態についても 2 種類（開放と埋戻し）を想定するとともに、感度解析項目として処分坑道および連絡坑道周辺のグラウト影響を取り上げた。また、坑道周辺に不飽和領域が発生しやすくなる条件として、処分坑道上部にキャップロック（低透水性層）が分布する場合を想定した。

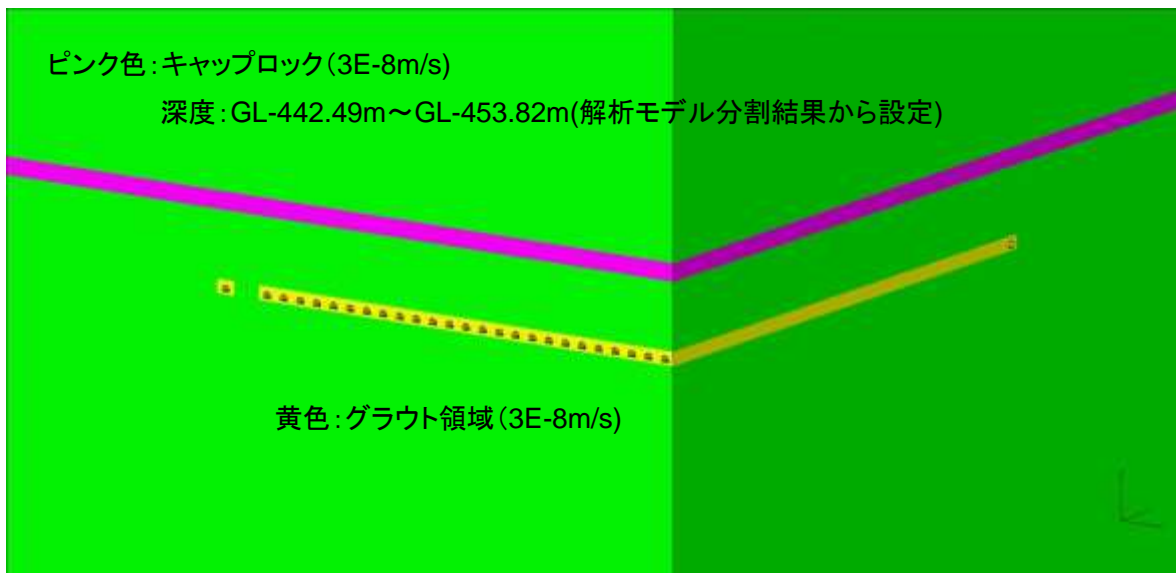
表 4.2.2-6 パネルスケールモデルによる解析ケース

ケース名	処分形態	状態	グラウト	キャップロック	手法	備考
case1a case1b	a:Through type	坑道開放	なし	なし	飽和・不飽和 FEM	基本ケース
case2a case2b		坑道開放	あり	なし	飽和・不飽和 FEM	グラウトの効果
case3a case3b	b:Dead- end-type	坑道開放	なし	あり	飽和・不飽和 FEM	キャップロックの影響（不飽和） 透水係数：岩盤より1オーダー小
case4a case4b		坑道埋戻し	なし	なし	飽和・不飽和 FEM	処分坑道のみ埋め戻した場合

図 4.2.2-19 および図 4.2.2-20 に、解析モデルに考慮したグラウト領域（約 3m 程度）、キャップロック深度（厚さ約 10m 程度）について示す。坑道周辺のグラウトに関しては、処分坑道周辺の要素を選択しており、パネルスケールモデルでは連続した分布となっている。



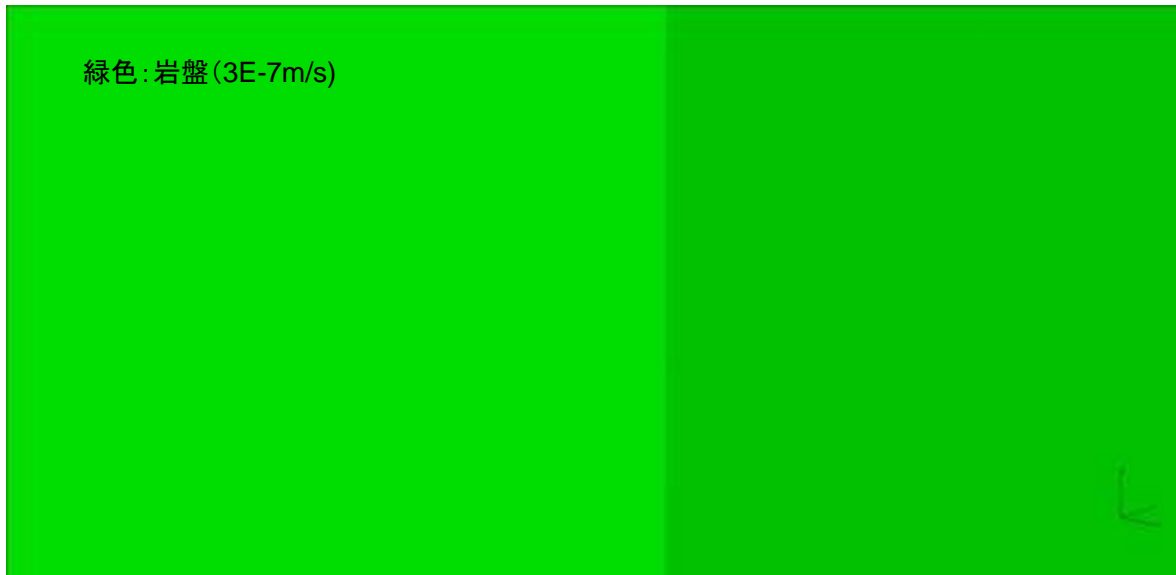
(a) 基本ケース(case1a)



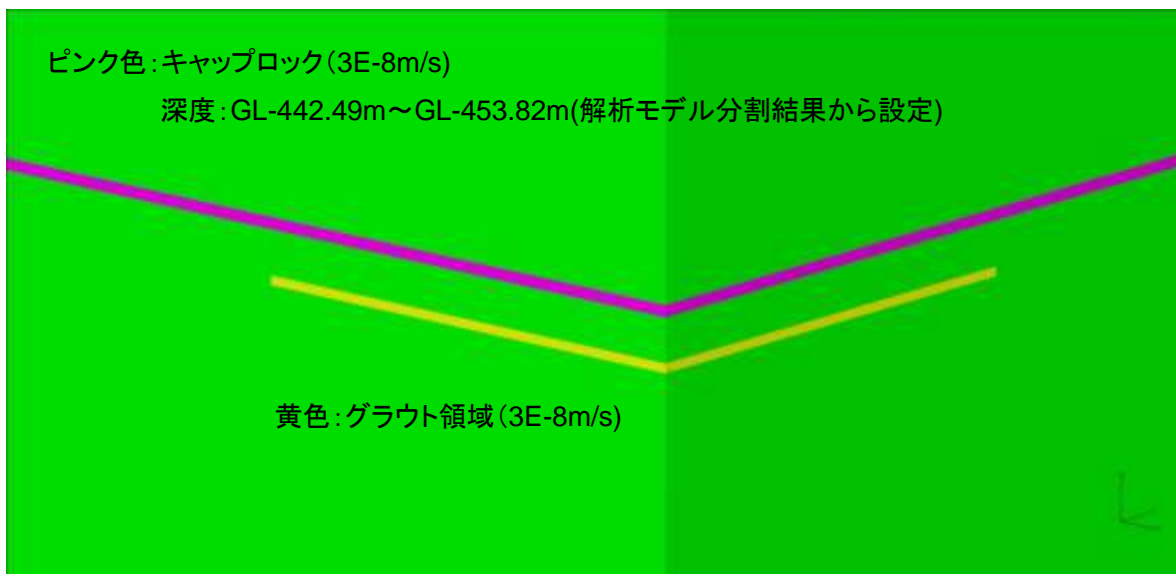
(b) グラウトあり(case2a)

(c) キャップロックあり(case3a)

図 4.2.2-19 グラウト、キャップロックのモデル化 (Through-type)



(a) 基本ケース(case1b)



(b) グラウトあり(case2b)

(c) キャップロックあり(case3b)

図 4.2.2-20 グラウト、キャップロックのモデル化 (Dead-end-type)

(b) 連絡坑道掘削時の非定常解析（基本ケース：case1a、case1b）

処分坑道が掘削される前段階として、連絡坑道の掘削が終了していることを前提として、ここでは連絡坑道のみが掘削された状態に対する非定常解析を実施し、連絡坑道の掘削影響の時間変化、湧水量の経時変化について把握を行った。なお、連絡坑道の掘削過程については掘削ステップを考慮せず瞬時掘削条件とした。なお、本検討で用いている解析手法の場合、坑道の掘削ステップを考慮した非定常解析も実施可能である。掘削工程を考慮した流動解析については、今後の課題と考える。

非定常解析のための時間ステップについて表 4.2.2-7 に示す。ここでは 3,650 日（10 年）までの非定常解析を実施した。

表 4.2.2-7 非定常解析のための解析時間ステップ、時間間隔

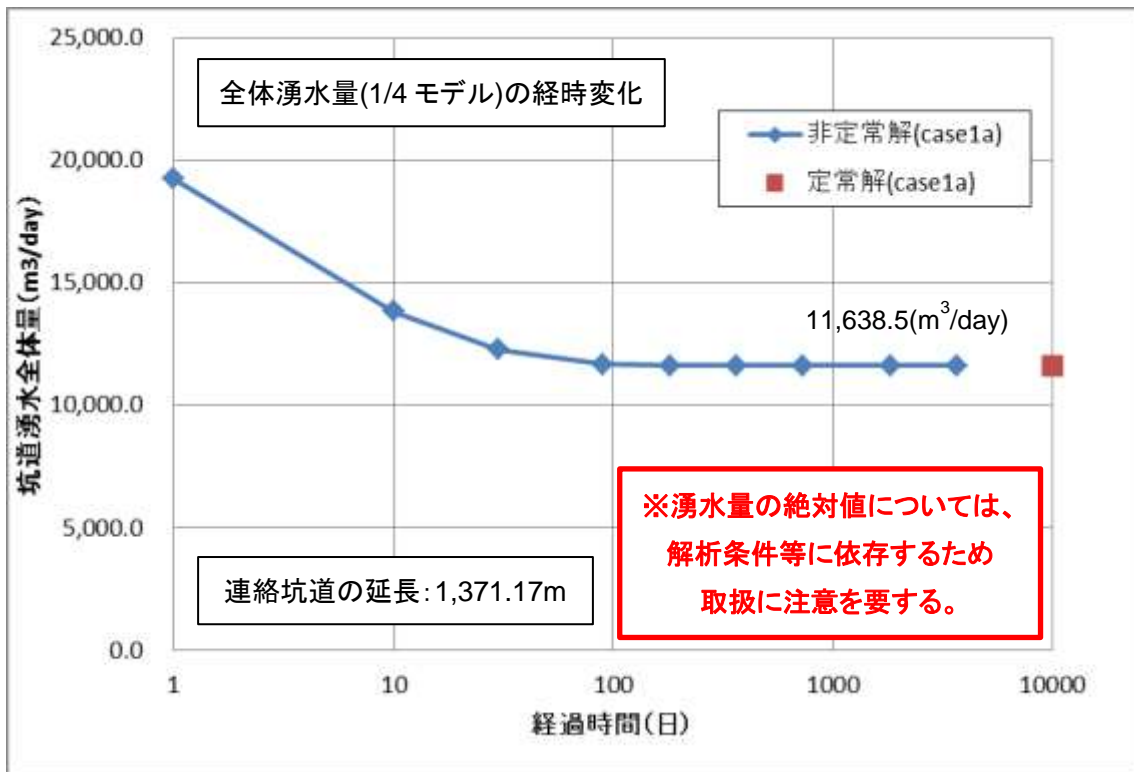
出力ステップ No.	出力時間(day)	解析時の分割数	$\Delta t(\text{day})$
1	1	10	0.1
2	10	10	0.9
3	30	10	2
4	90	10	6
5	182.5	10	9.25
6	365	10	18.25
7	730	10	36.5
8	1,825	10	109.5
9	3,650	10	182.5

図 4.2.2-21 および図 4.2.2-22 に 2 種類の処分形態の連絡坑道掘削時の非定常解析結果の比較として、およびに連絡坑道からの湧水量の経時変化を示す。なお、「坑道湧水全体量(m^3/day)」は、解析モデル（1/4 モデル）の湧水量であり、廃棄体 1,250 本相当である。

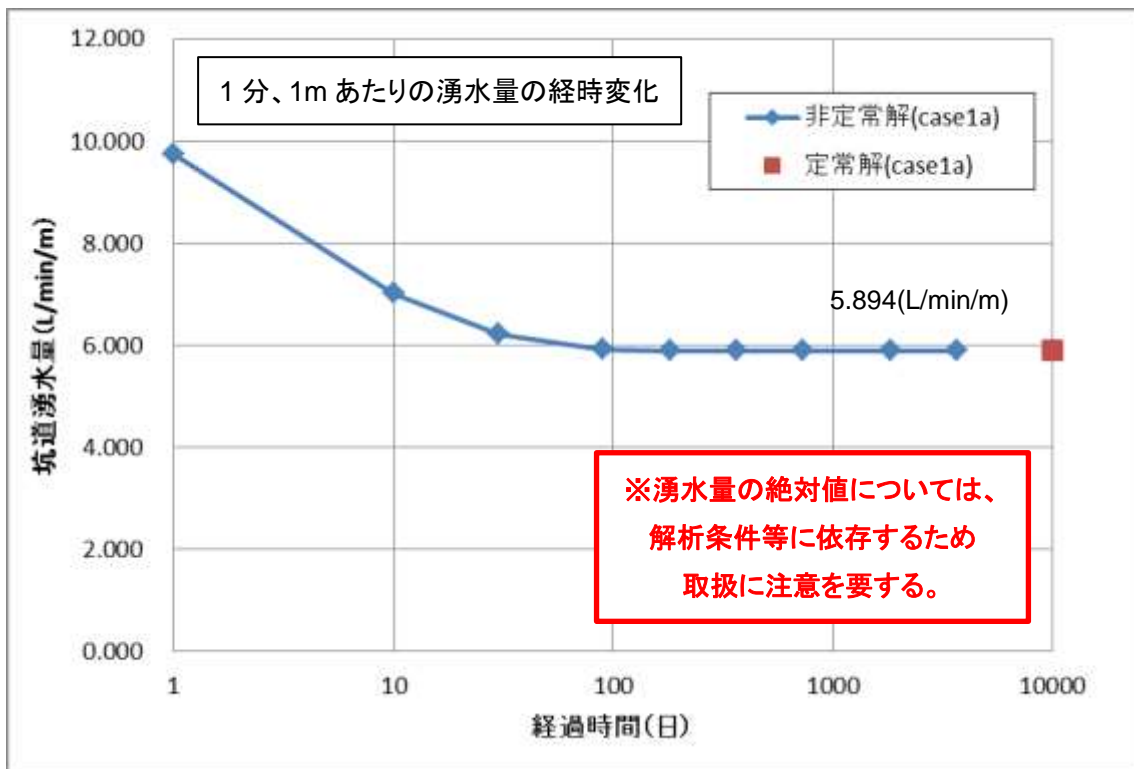
湧水量はほぼ 1 年程度で定常状態となっており、本検討における解析条件では、連絡坑道掘削の影響は比較的短時間で定常状態となることがわかった。本検討での条件設定において、均質岩盤であることや、水頭固定境界による境界条件の影響により、短時間で定常状態になったと考えられる。地下水位の低下を伴うような解析条件の場合、定常状態に達するには時間が掛かる可能性があるが、解析条件の設定については今後の課題と考える。

処分形態の違いについては、**Through-type** の方が連絡坑道が長いと、全体湧水量は多くなり、ほぼ連絡坑道の長さに比例する結果である。

図 4.2.2-23 および図 4.2.2-24 に連絡坑道掘削時の定常状態での全水頭分布を示す。湧水量の大小と同様に **Through-type** の方が掘削影響は遠方まで及んでいることがわかる。水平方向に対してはほぼ同心円状の水頭低下が認められる。特に深部の全水頭が **Dead-end-type** よりも低下しており、坑道掘削による影響は処分坑道の下部の地下水圧の低下を発生させる。このため、坑道掘削による周辺地下水流動のモニタリングにあたっては、水平的な観測に加えて、坑道の上部および深部の水圧計測を実施することが重要であると考えられる。

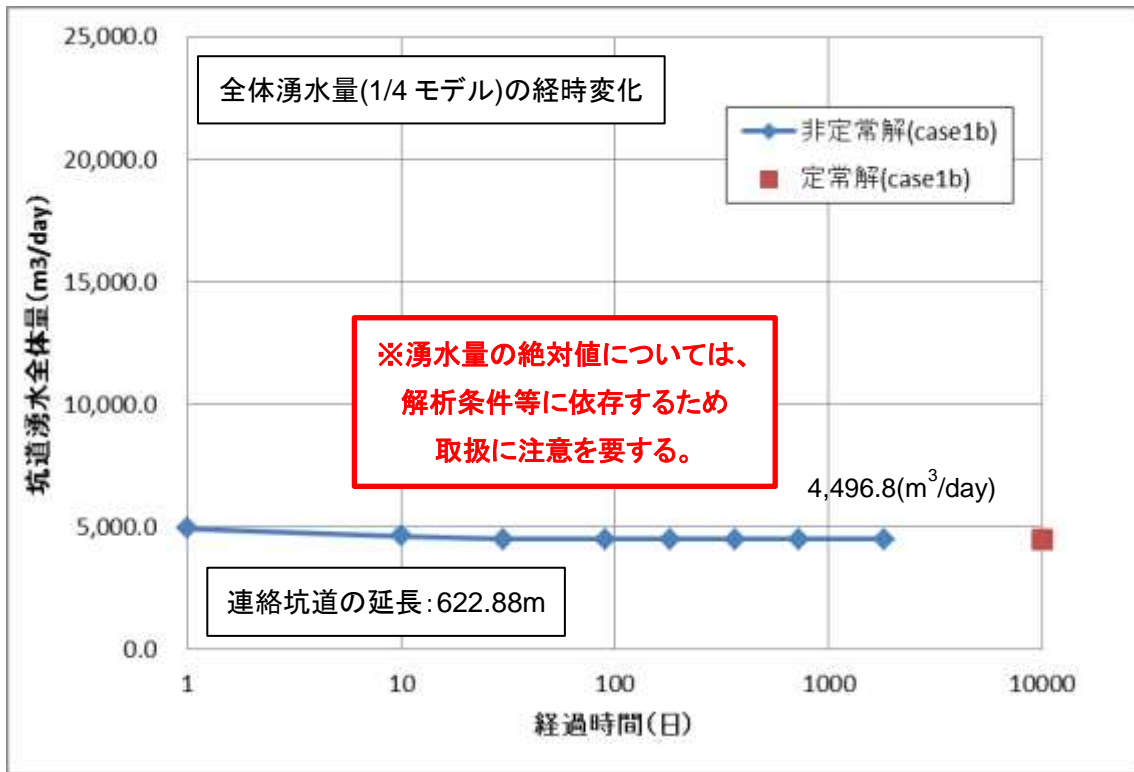


(a) 連絡坑道からの全体湧水量の経時変化(case1a)

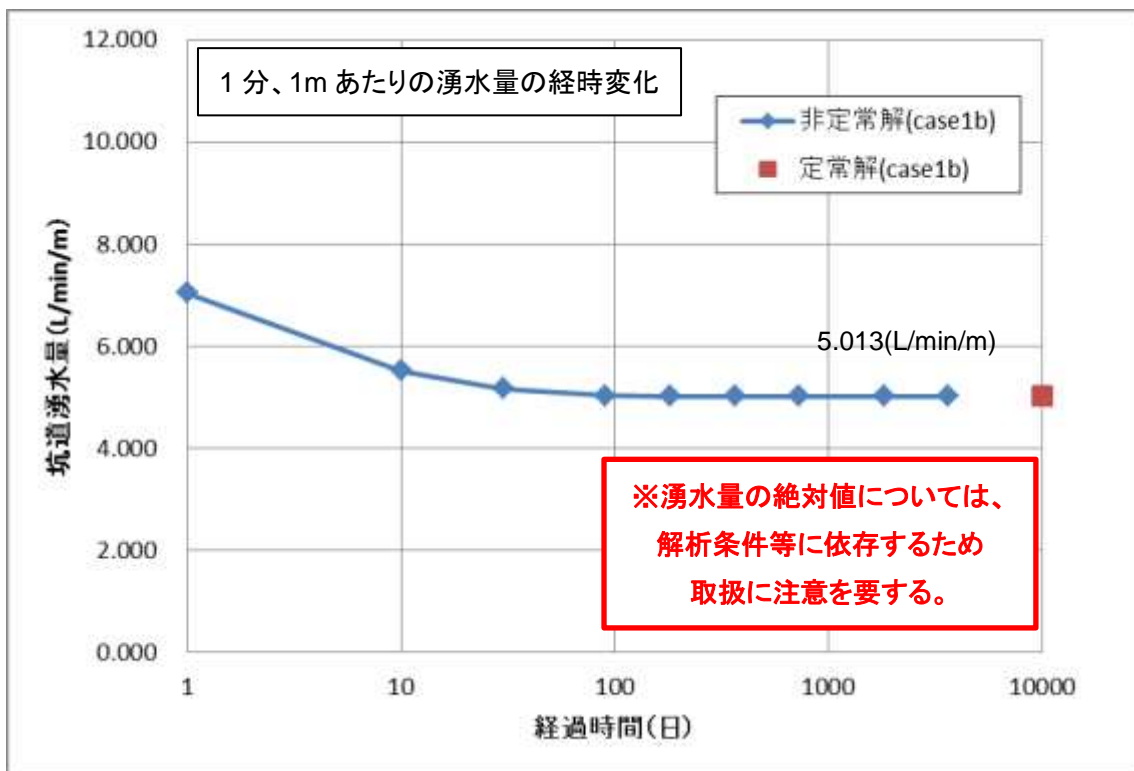


(b) 連絡坑道からの単位長さ、単位時間当たりの湧水量の経時変化(case1a)

図 4.2.2-21 連絡坑道掘削時の湧水量の経時変化 (case1a : Through-type)

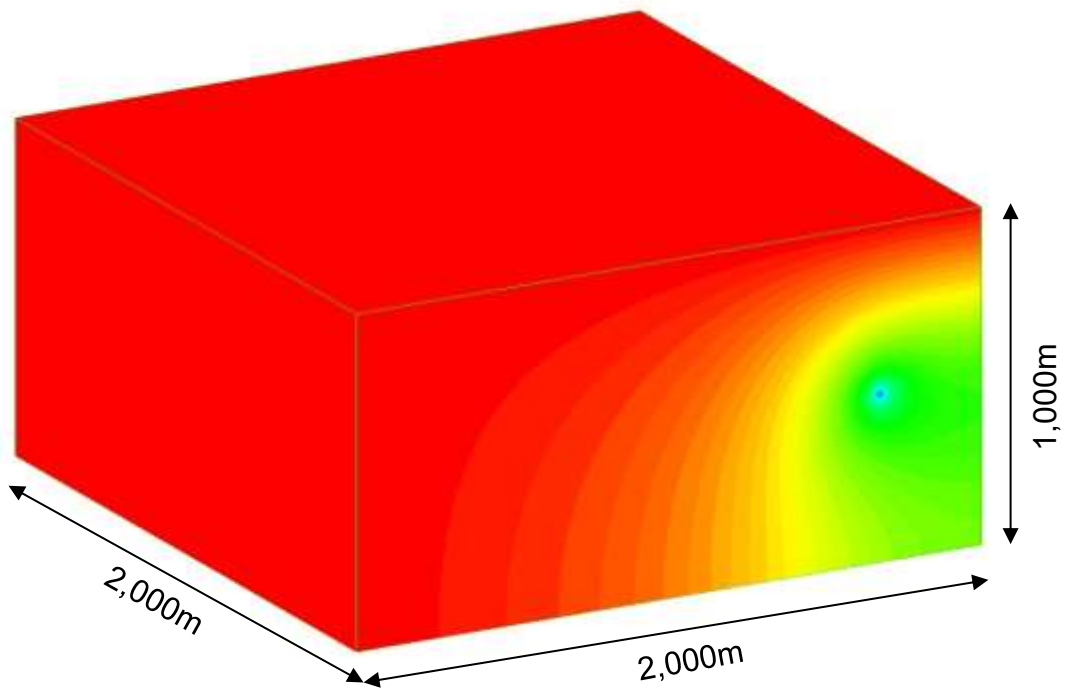


(a) 連絡坑道からの全体湧水量の経時変化(case1b)

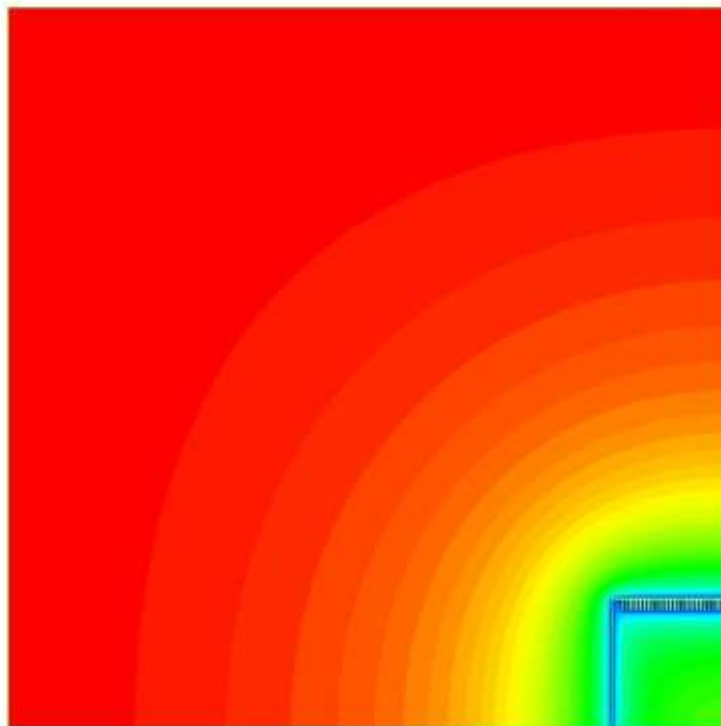


(b) 連絡坑道からの単位長さ、単位時間当たりの湧水量の経時変化(case1b)

図 4.2.2-22 連絡坑道掘削時の湧水量の経時変化 (case1b : Dead-end-type)



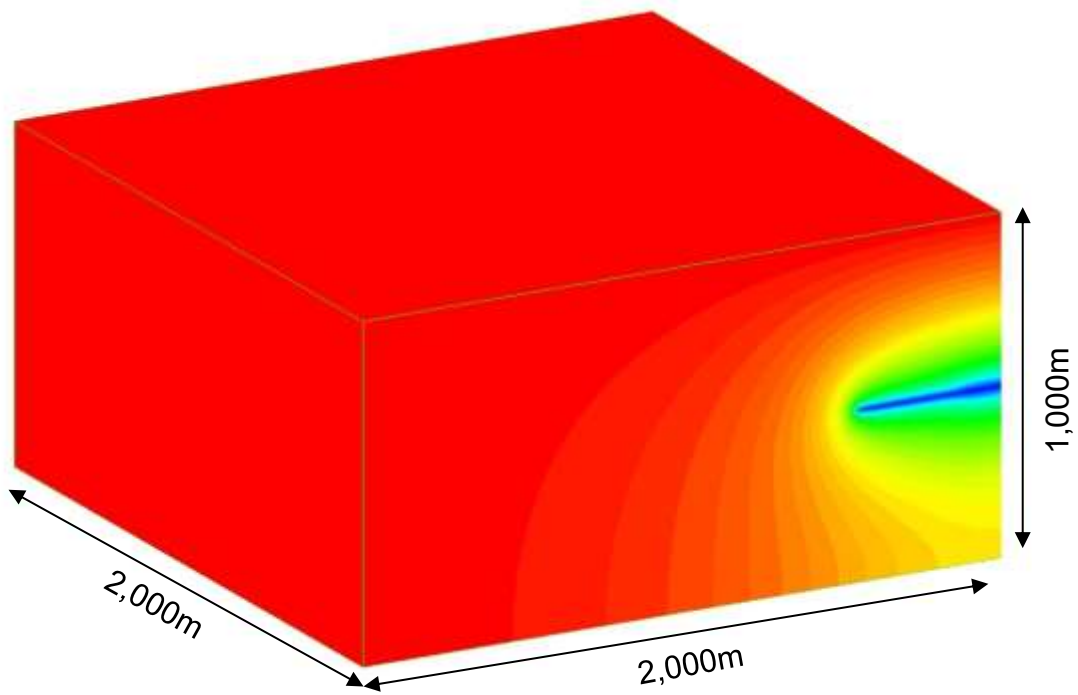
(a) 定常状態の全水頭分布(case1a)



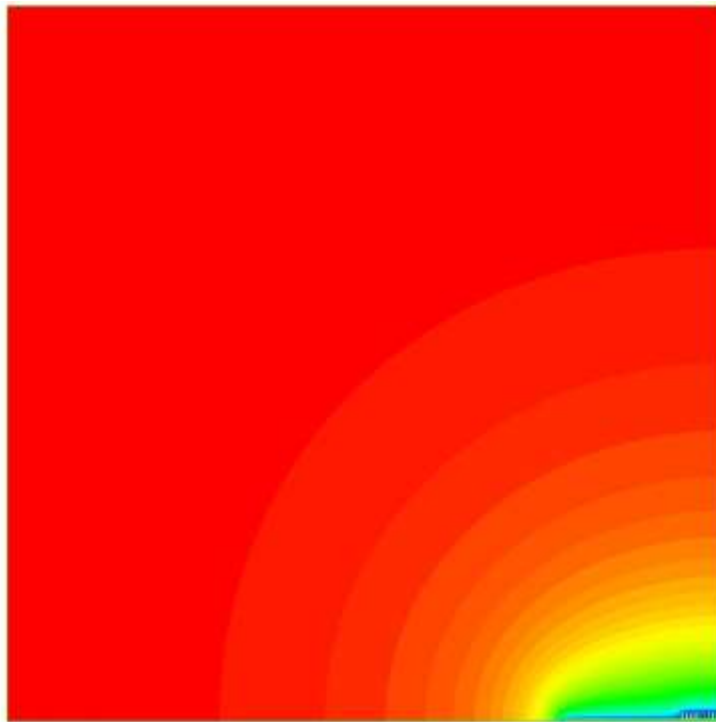
(b) GL-502m レベルにおける定常状態の全水頭分布(case1a)



図 4.2.2-23 連絡坑道掘削時の定常状態全水頭分布 (case1a : Through-type)



(a) 定常状態の全水頭分布(case1b)



(b) GL-502m レベルにおける定常状態の全水頭分布(case1b)



図 4.2.2-24 連絡坑道掘削時の定常状態全水頭分布 (case1b : Dead-end-type)

本検討結果を踏まえ、処分坑道掘削解析に際しては連絡坑道掘削後の経時変化の影響は小さい（短時間で定常状態となる）ことから、連絡坑道掘削時の定常解析結果を初期条件として実施することとした。なお、グラウト影響（case2a、case2b）、キャップロック影響（case3a、case3b）ともに同様の連絡坑道掘削解析を実施し、ほぼ1年程度で定常状態となることを確認した。

(c) 処分坑道掘削時の非定常解析（基本ケース：case1a、case1b）

連絡坑道の掘削影響は、本検討条件ではほぼ1年程度で定常状態となることが確認できたことから、処分坑道の掘削解析は連絡坑道掘削の定常解析結果を初期条件として、瞬時掘削条件での非定常解析を実施した。回収可能性維持期間としては100年～300年を想定しているものの、連絡坑道の掘削解析と同様に、本解析条件では比較的短時間で定常状態となることが予測されるため、非定常解析条件としては表4.2.2-7に示した時間ステップを用いて10年間の解析期間を設定した。

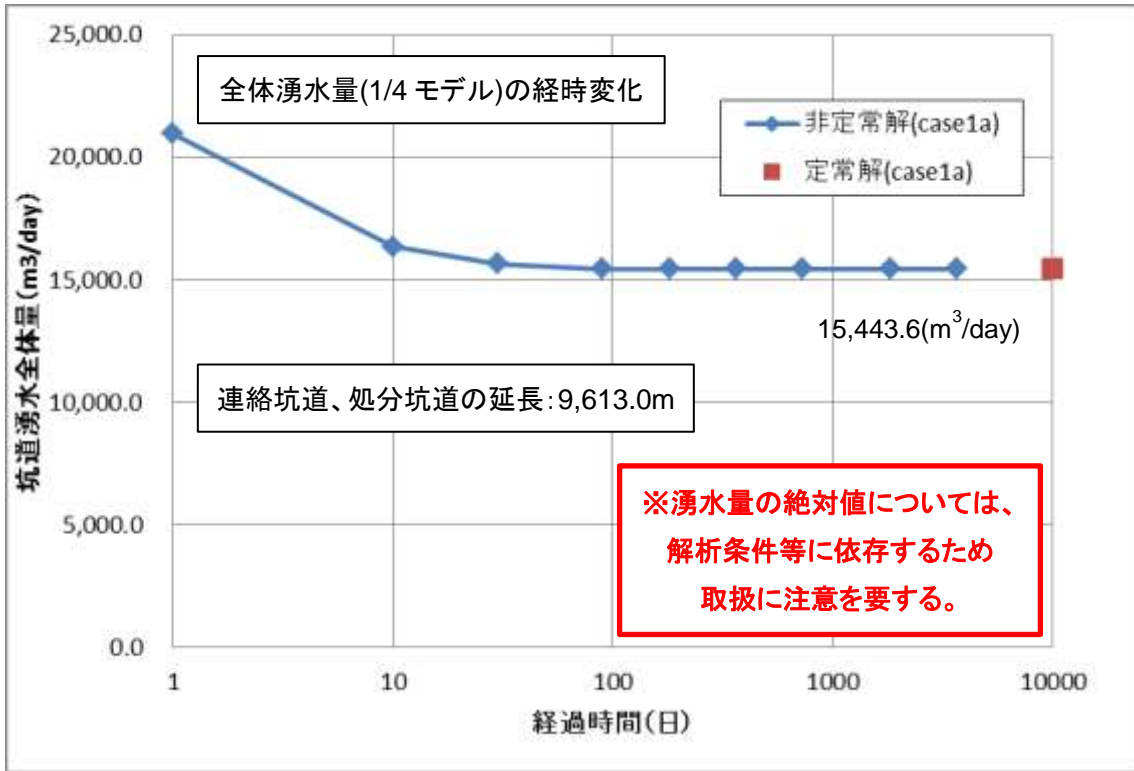
基本ケースとなるcase1a（Through-type）、case1b（Dead-end-type）の解析結果から得られた湧水量（連絡坑道＋処分坑道）の経時変化を図4.2.2-25および図4.2.2-26に示す。連絡坑道掘削時と同様に約1年程度で定常状態となっており、長期間にわたる地下水流動への影響は発生しない結果となった。このため、定常状態での湧水量について整理するが、表4.2.2-8に示すように、全体湧水量のうち連絡坑道からの湧水量の割合が多いのはThrough-typeであり、処分パネルの周辺に配置されていることによる影響が大きい。また、処分坑道からの湧水量の割合が多いのはDead-end-typeであり、処分坑道に妻部が存在しており、連絡坑道による水圧低下の影響が小さいことによる影響である。坑道延長に占める連絡坑道と処分坑道の割合は、処分形態によらずほぼ同程度であることを考慮すると、単位廃棄体あたりの坑道延長が短くなり、湧水量も少なくなる処分形態であるDead-end-typeの方が、有利であると考えられる。

表 4.2.2-8 処分坑道掘削時の湧水量の算出結果（基本ケース：case1a、case1b）

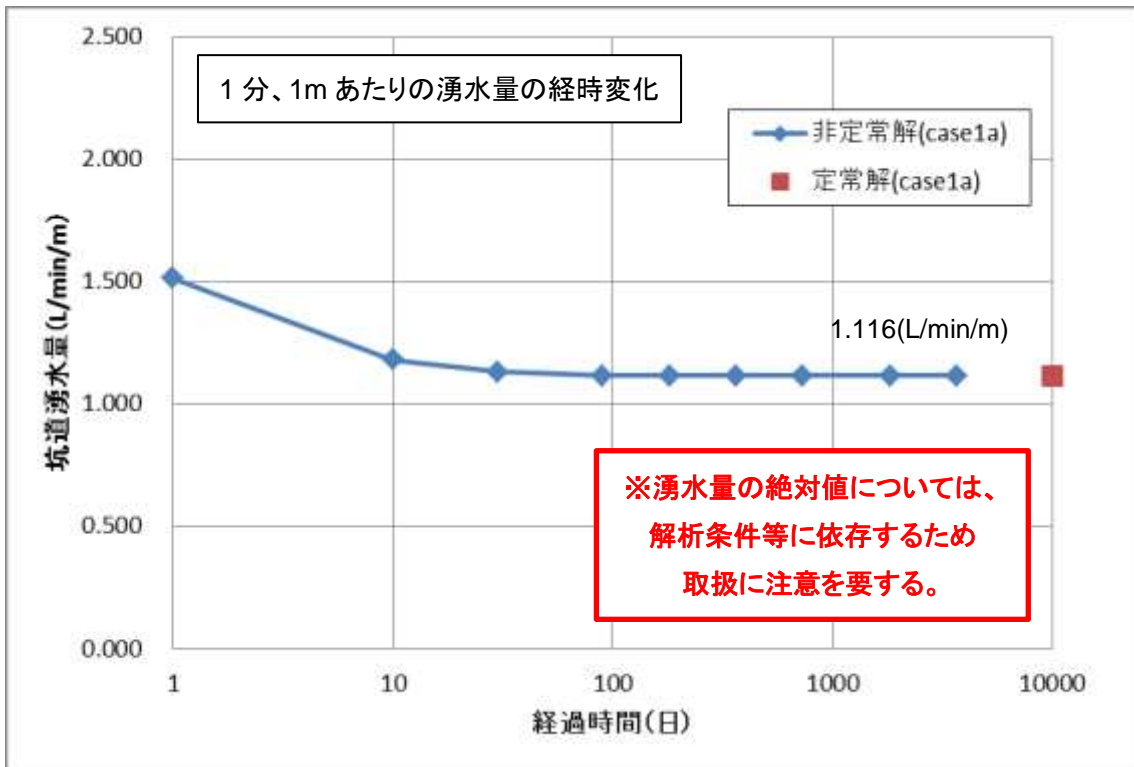
地下施設	case1a : Through-type		case1b : Dead-end-type	
	延長(m)	湧水量(m ³ /day)	延長(m)	湧水量(m ³ /day)
連絡坑道	1,496.0 (15.6%)	6,180.9 (40.0%)	672.8 (14.0%)	2,455.6 (24.7%)
処分坑道	8,116.9 (84.4%)	9,262.8 (60.0%)	4,145.1 (86.0%)	7,479.1 (75.3%)
全体	9,612.9 (100.0%)	15,443.6 (100.0%)	4,817.9 (100.0%)	9,934.7 (100.0%)

※湧水量の絶対値については、解析条件等に依存するため取扱に注意を要する。

図4.2.2-29および図4.2.2-30に、非定常解析結果の全水頭分布の変化について示す。連絡坑道掘削状態を初期条件としていること、ほぼ1年程度で定常状態となっていることが確認できる。

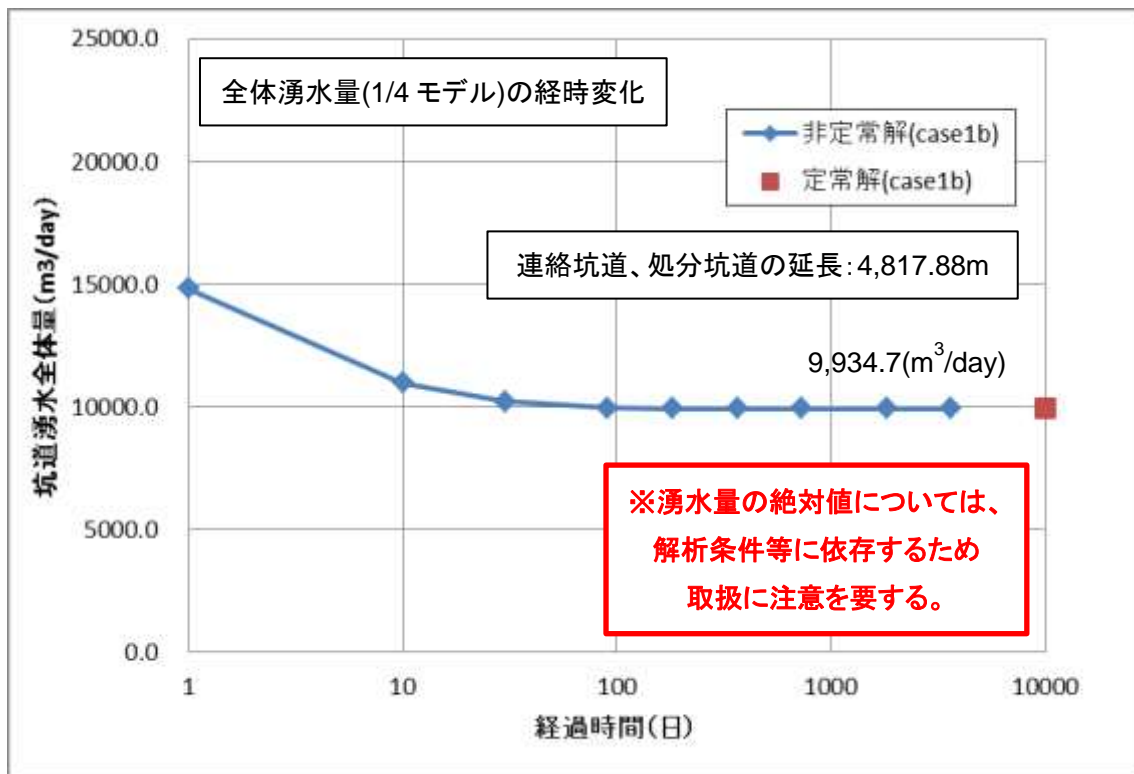


(a) 連絡坑道+処分坑道からの全体湧水量の経時変化(case1a)

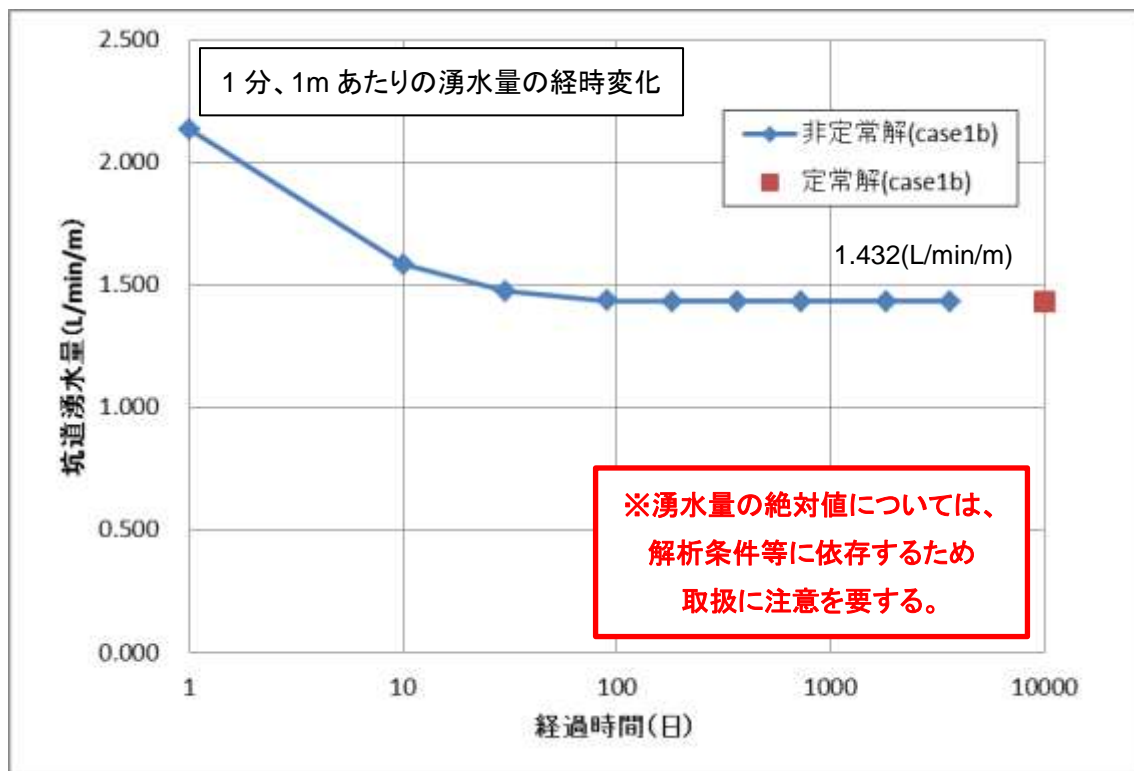


(b) 連絡坑道+処分坑道からの単位長さ、単位時間当たりの湧水量の経時変化(case1a)

図 4.2.2-25 処分坑道掘削時の湧水量の経時変化 (case1a : Through-type)

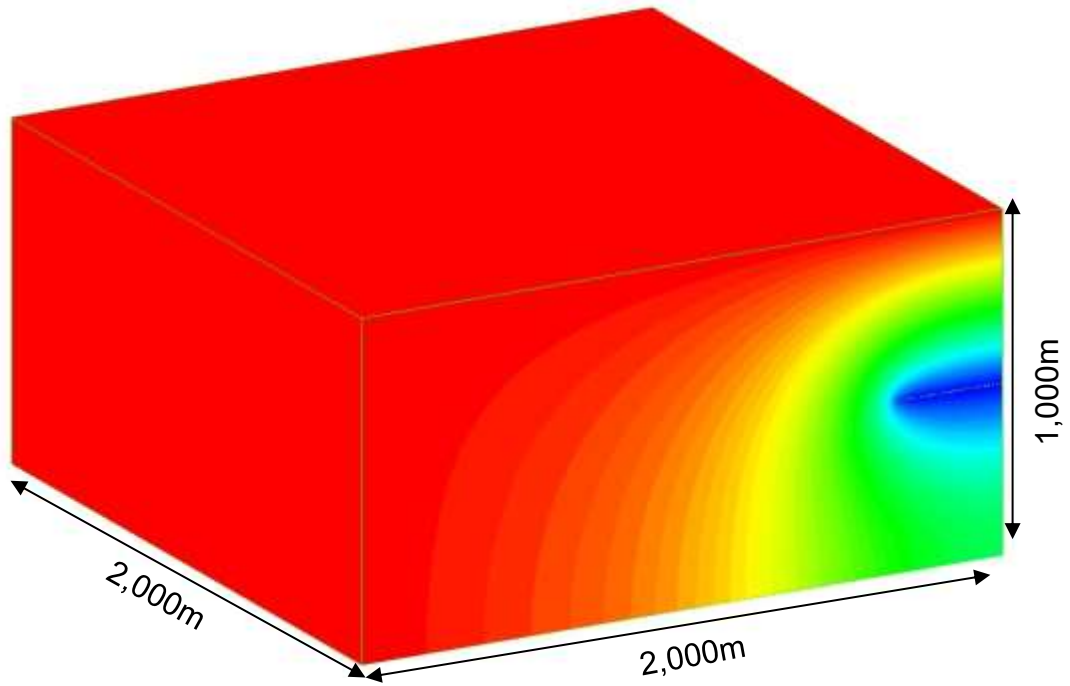


(a) 連絡坑道、処分坑道からの全体湧水量の経時変化(case1b)

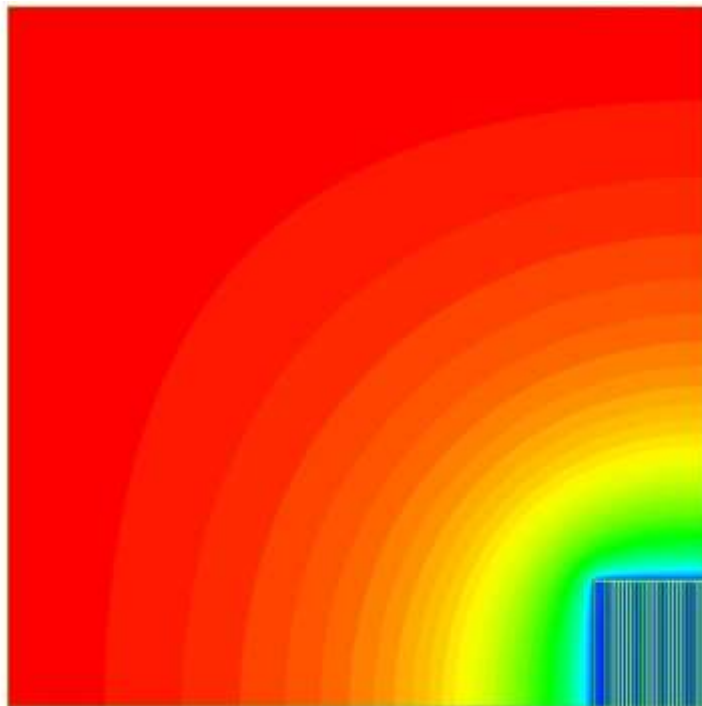


(b) 連絡坑道、処分坑道からの単位長さ、単位時間当たりの湧水量の経時変化(case1b)

図 4.2.2-26 処分坑道掘削時の湧水量の経時変化 (case1b : Dead-end-type)



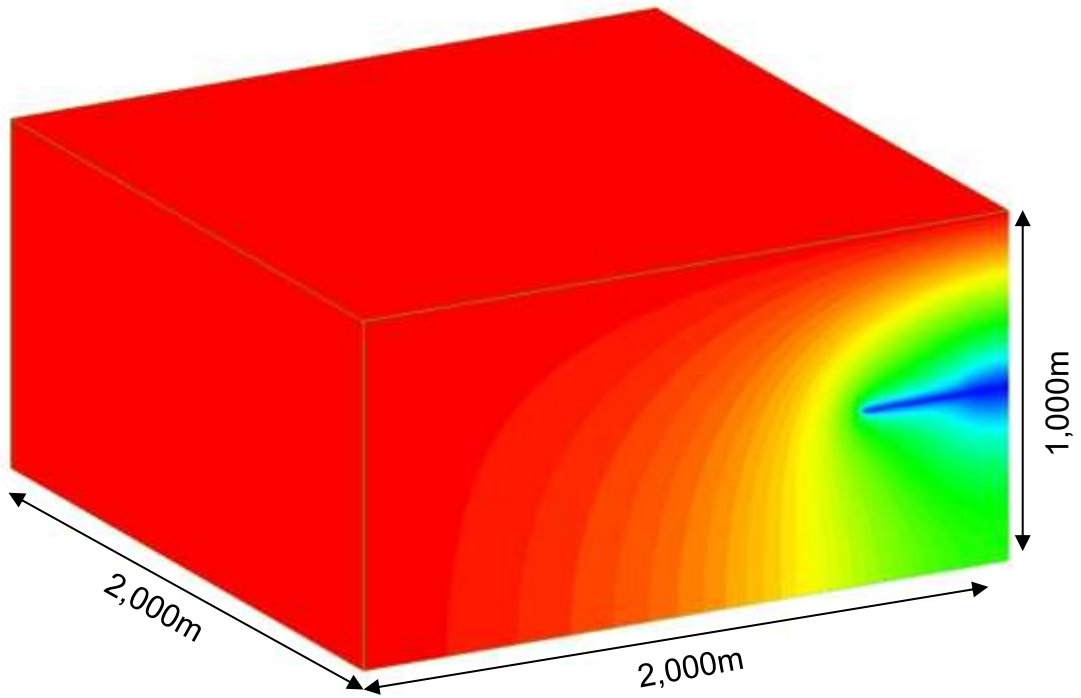
(a) 定常状態の全水頭分布(case1a)



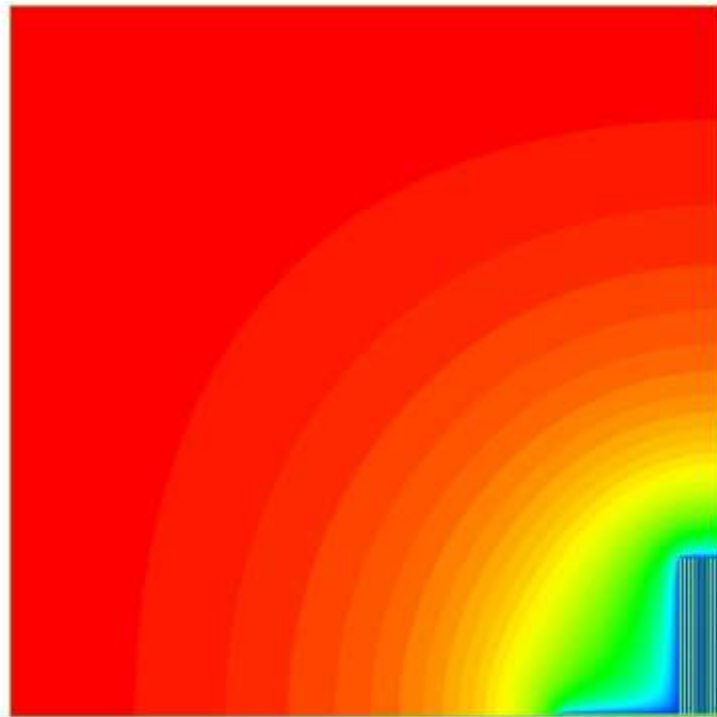
(b) GL-502m レベルにおける定常状態の全水頭分布(case1a)



図 4.2.2-27 処分坑道掘削時の定常状態全水頭分布 (case1a : Through-type)



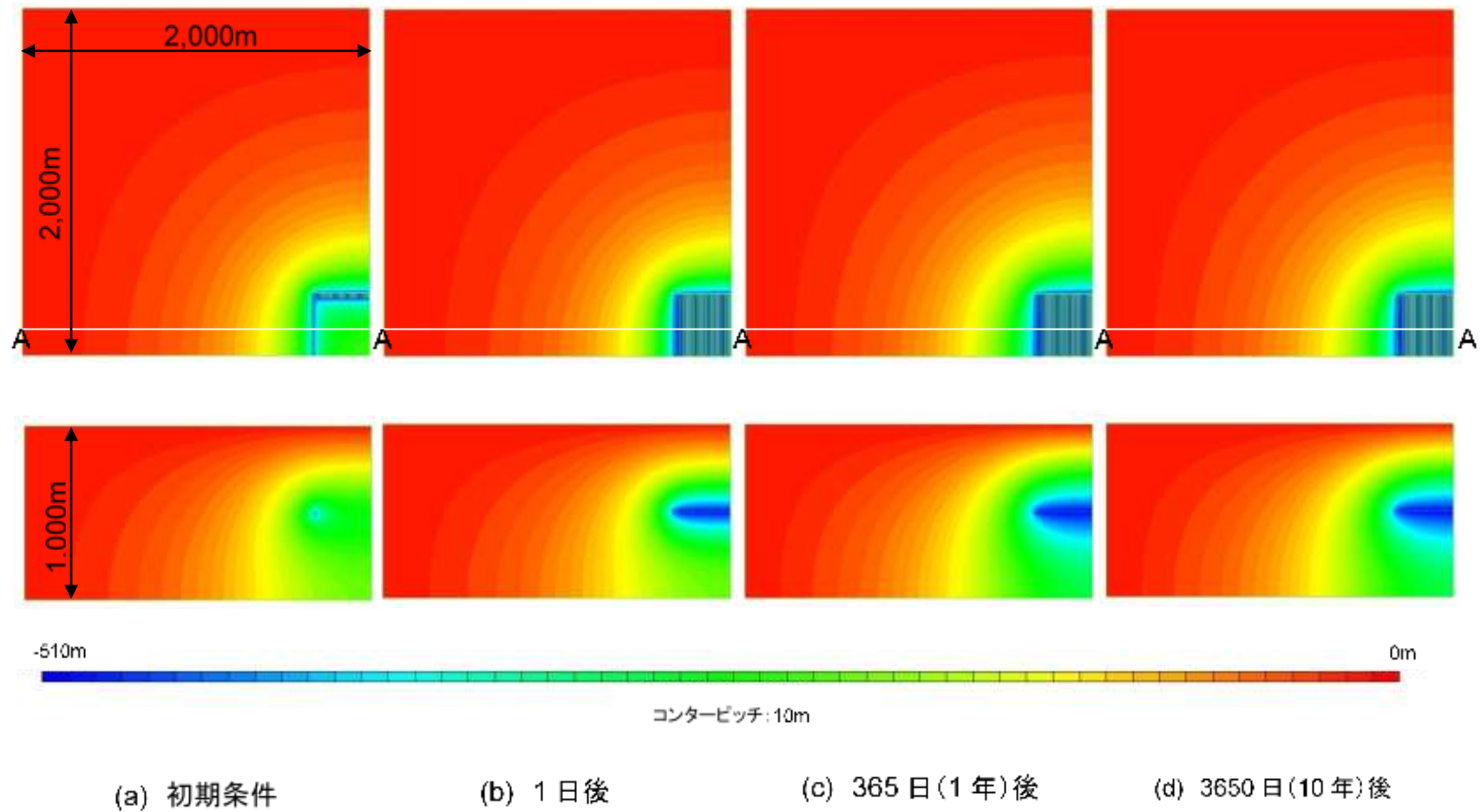
(a) 定常状態の全水頭分布(case1b)



(b) GL-502m レベルにおける定常状態の全水頭分布(case1b)

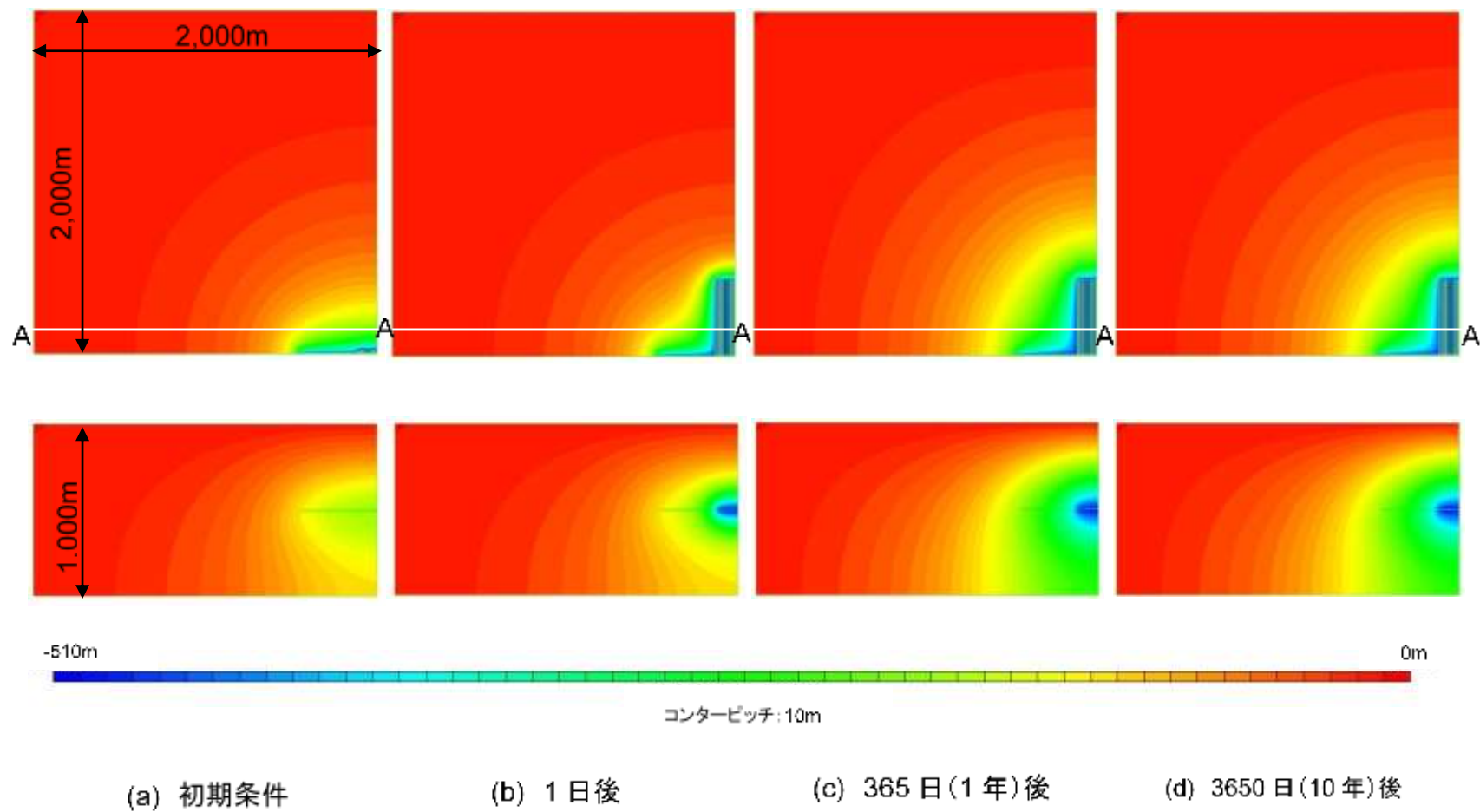


図 4.2.2-28 処分坑道掘削時の定常状態全水頭分布 (case1b : Dead-end-type)



※上段：GL-502mレベルの水平断面
 下段：A-A鉛直断面

図 4.2.2-29 処分坑道掘削時の全水頭分布の経時変化 (case1a : Through-type)



※上段：GL-502mレベルの水平断面

下段：A-A鉛直断面

図 4.2.2-30 処分坑道掘削時の全水頭分布の経時変化 (case1b: Dead-end-type)

(d) 処分坑道掘削時の非定常解析（グラウト、キャップロック影響）

パネルスケールモデルによる感度解析として、グラウトを考慮した場合（case2a、case2b）とキャップロックを考慮した場合（case3a、case3b）について解析を実施した。なお、止水用のグラウトによる透水係数は、表 4.2.2-1 に示したように岩盤よりも 1 オーダー小さい値（ $3.0E-8(m/s)$ ）とし、キャップロック（低透水性層）についても、グラウトと同様に岩盤よりも 1 オーダー小さい値（ $3.0E-8(m/s)$ ）を設定した。

基本ケース（case1a、case1b）との湧水量の比較図を図 4.2.2-31 および図 4.2.2-32 に、定常状態での湧水量の比較表を表 4.2.2-9 および表 4.2.2-10 に示す。グラウトによる湧水量の低減効果が高いのは Through-type の方であり、約 2/3 に低減していることがわかる。特にパネルの周辺に配置され、湧水量が多い連絡坑道の湧水量が半減しており、グラウトの効果が顕著となっている。

一方、キャップロックが分布する場合についても、湧水量が減少している。これより、地下空洞への湧水の供給源は上方からの影響が大きいことが考えられる。なお、キャップロックを考慮した解析結果からも不飽和領域の発生は認められなかった。不飽和領域の評価にあたっては、EDZ の影響が想定されるため、処分坑道詳細モデルにおいて評価を行う。

表 4.2.2-9 処分坑道掘削時の定常湧水量の算出結果（Through-type）

地下施設	延長(m)	case1a (基本ケース)	case2a (グラウトあり)	case3a (キャップロックあり)
		湧水量(m ³ /day)	湧水量(m ³ /day)	湧水量(m ³ /day)
連絡坑道	1,496.0 (15.6%)	6,180.9 (40.0%)	3,052.6(28.7%)	4,575.9 (41.5%)
処分坑道	8,116.9 (84.4%)	9,262.8 (60.0%)	7,571.3 (71.3%)	6,440.6 (58.5%)
全体	9,612.9 (100.0%)	15,443.6 (100.0%) 比率：1.00	10,623.9 (100.0%) 比率：0.68	11,016.5 (100.0%) 比率：0.73

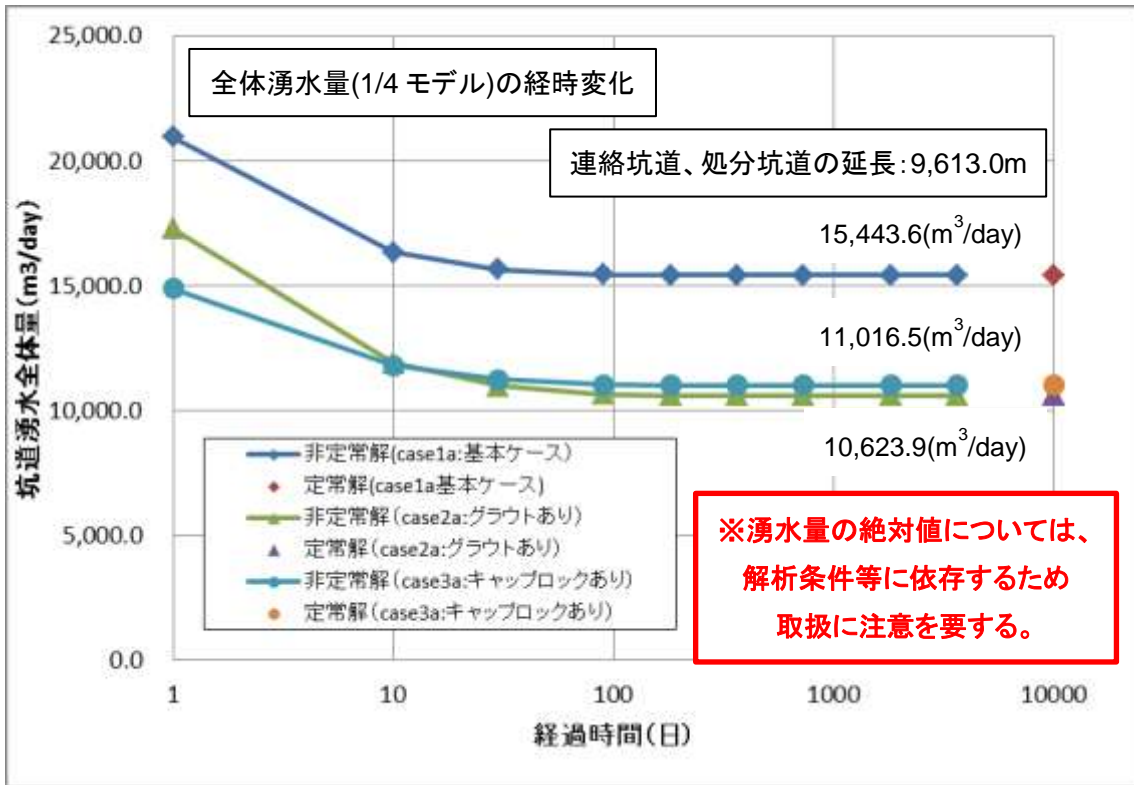
※湧水量の絶対値については、解析条件等に依存するため取扱に注意を要する。

表 4.2.2-10 処分坑道掘削時の定常湧水量の算出結果（Dead-end-type）

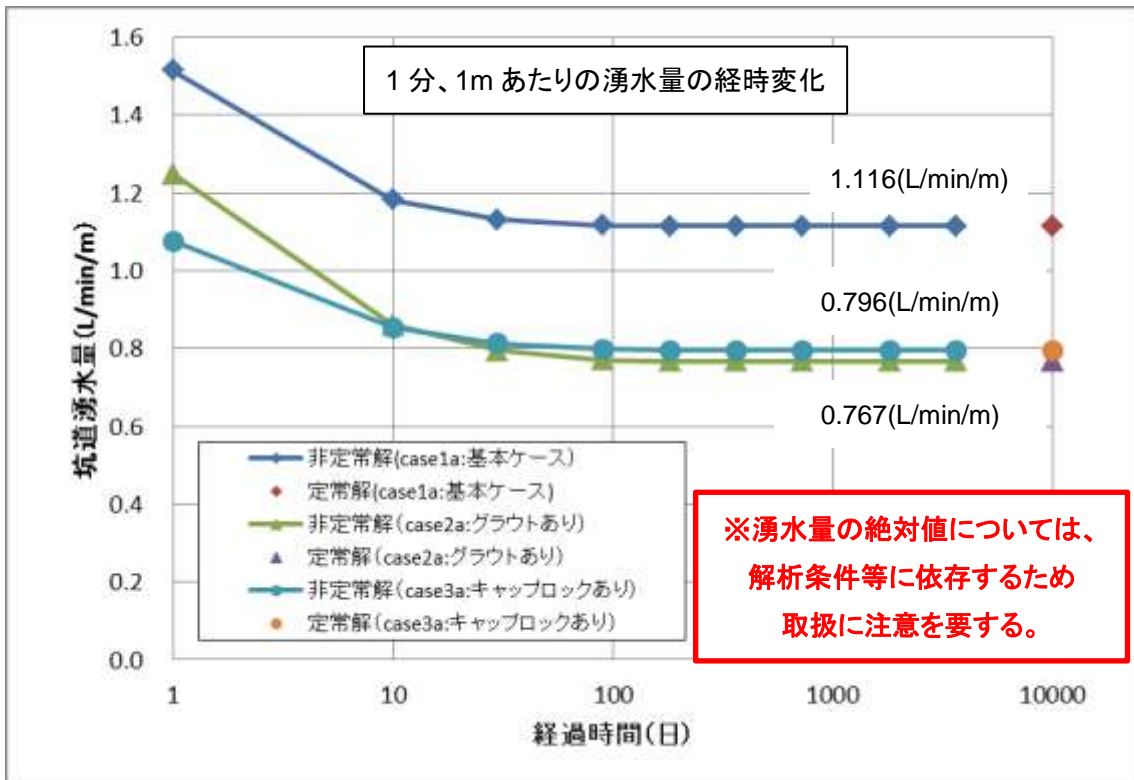
地下施設	延長(m)	case1b (基本ケース)	case2b (グラウトあり)	case3b (キャップロックあり)
		湧水量(m ³ /day)	湧水量(m ³ /day)	湧水量(m ³ /day)
連絡坑道	672.8 (14.0%)	2,455.6 (24.7%)	1,533.4(28.7%)	2,238.6 (25.4%)
処分坑道	4,145.1 (86.0%)	7,479.1 (75.3%)	6,295.0 (71.3%)	6,575.3 (74.6%)
全体	4,817.9 (100.0%)	9,934.7 (100.0%) 比率：1.00	7,828.3 (100.0%) 比率：0.79	8,813.8 (100.0%) 比率：0.89

※湧水量の絶対値については、解析条件等に依存するため取扱に注意を要する。

なお、各ケースの定常状態での全水頭分布の比較結果を図 4.2.2-33 および図 4.2.2-34 に示す。これらの全水頭分布からグラウト領域やキャップロックの低透水性条件が考慮されていることを確認することができる。

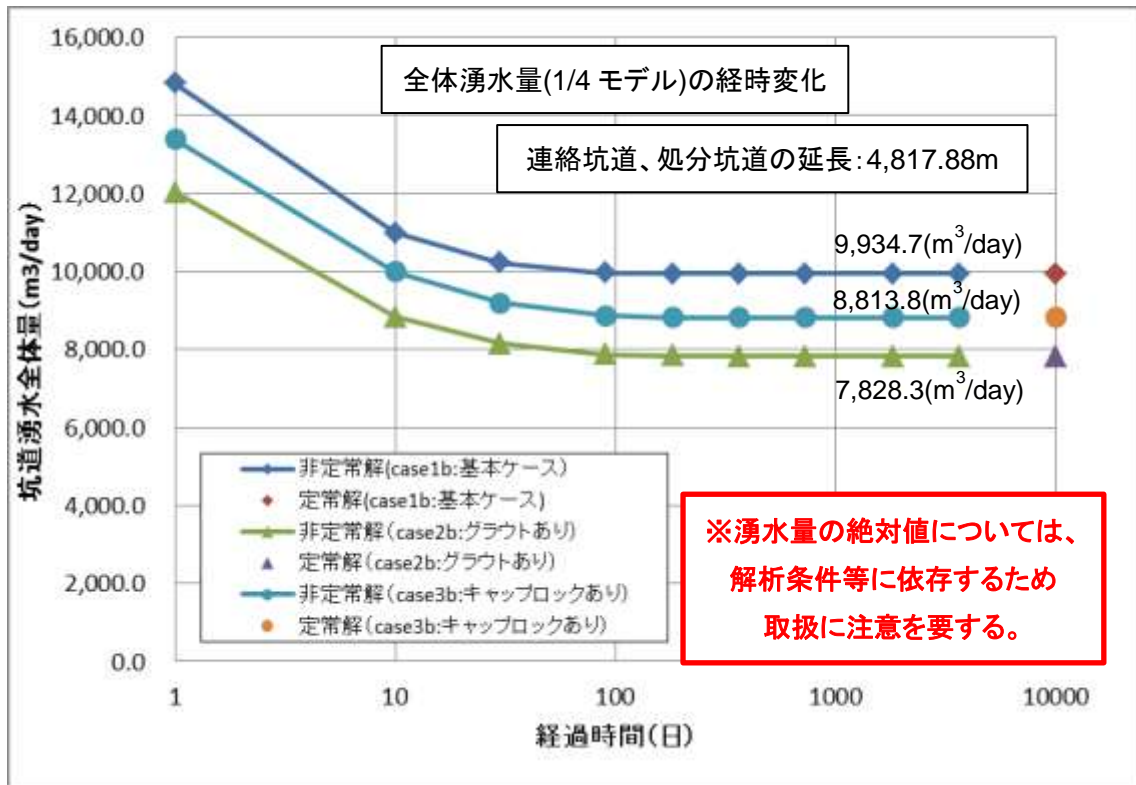


(a) 連絡坑道+処分坑道からの全体湧水量の経時変化

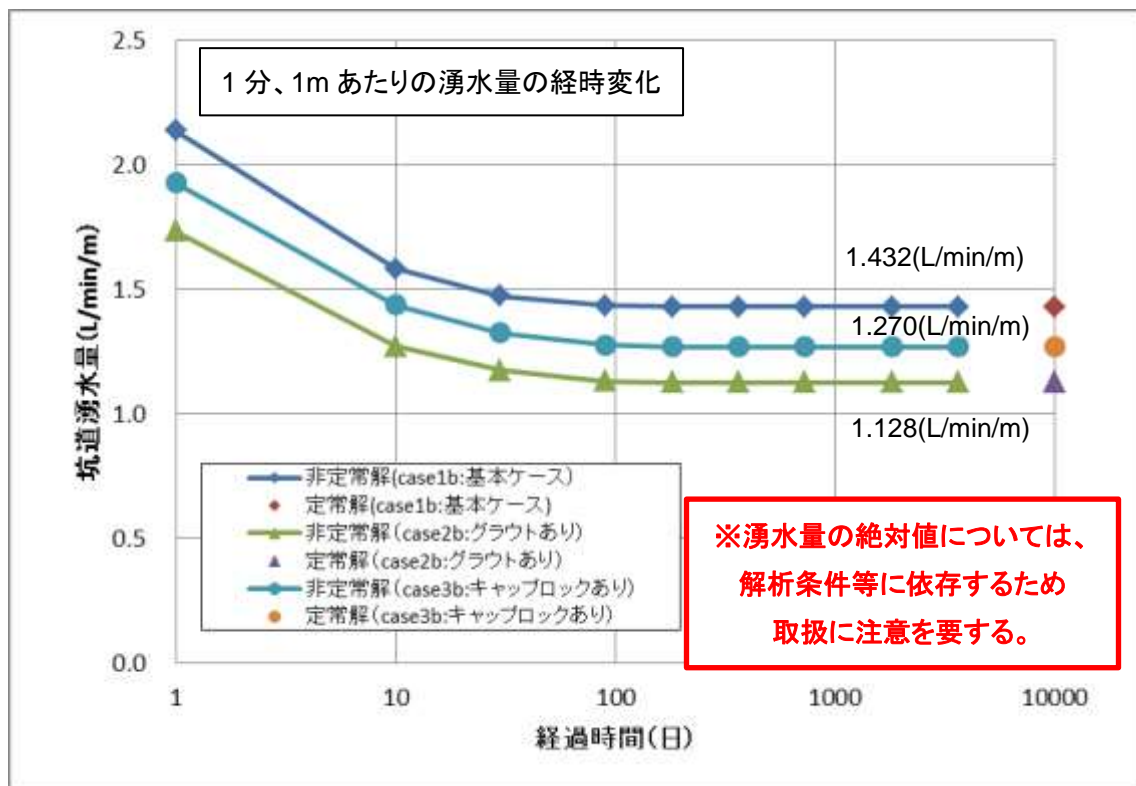


(b) 連絡坑道+処分坑道からの単位長さ、単位時間当たりの湧水量の経時変化

図 4.2.2-31 処分坑道掘削時の湧水量の経時変化の比較 (Through-type)

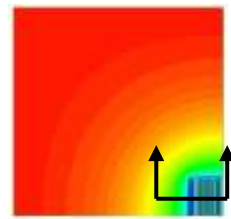
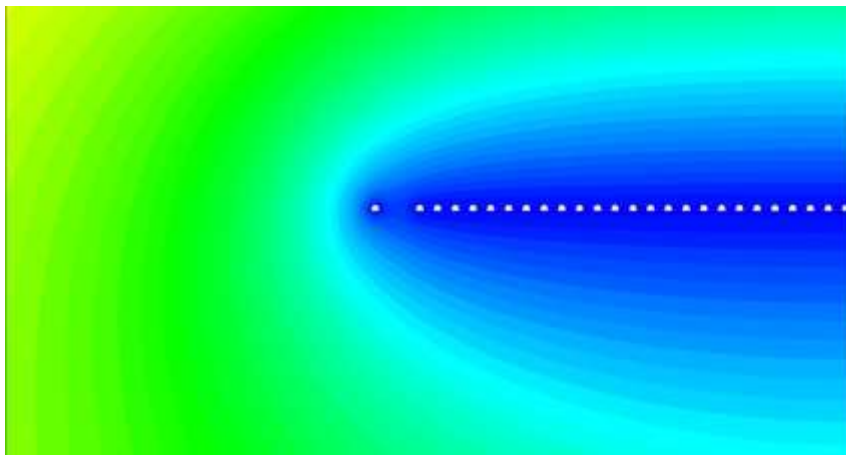


(a) 連絡坑道、処分坑道からの全体湧水量の経時変化



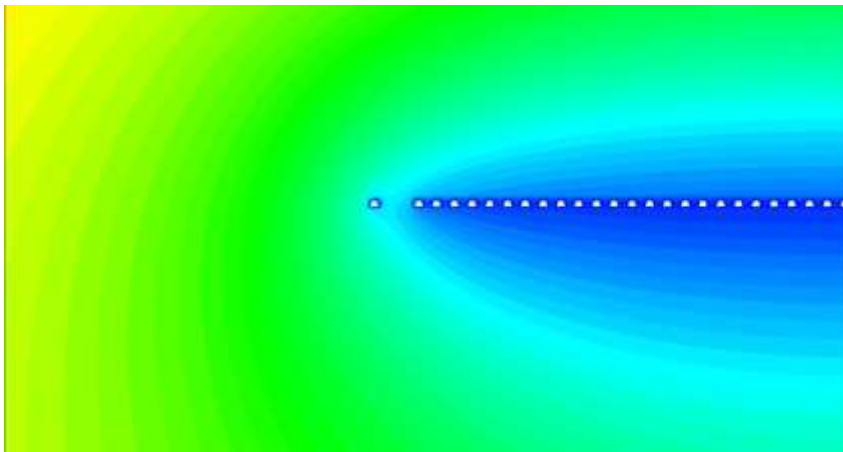
(b) 連絡坑道、処分坑道からの単位長さ、単位時間当たりの湧水量の経時変化

図 4.2.2-32 処分坑道掘削時の湧水量の経時変化の比較 (Dead-end-type)



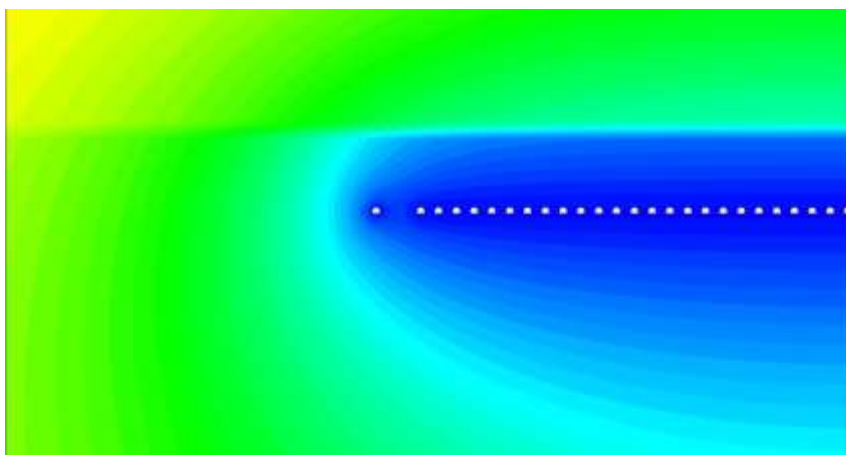
※A-A 断面位置

(a) 基本ケース(case1a)



グラウト領域の動水勾配が大きくなり、周辺岩盤の動水勾配が小さくなっている。

(b) グラウトあり(case2a)

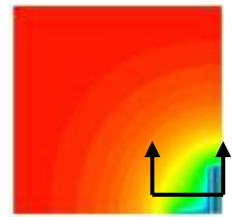
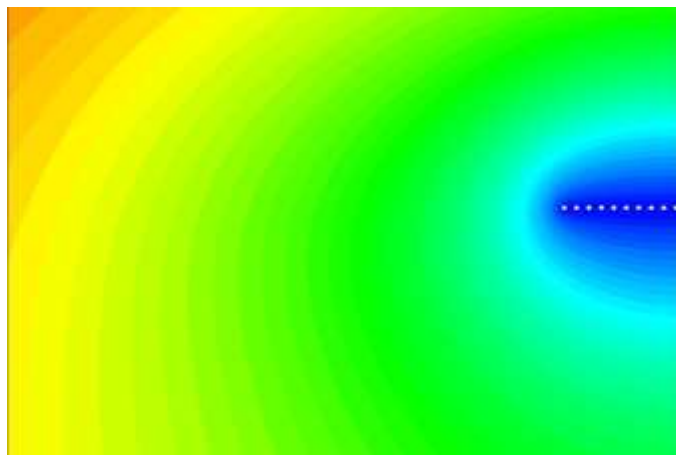


キャップロックの動水勾配が大きくなり、処分坑道上部の全水頭分布が大きく異なる。

(c) キャップロックあり(case3a)

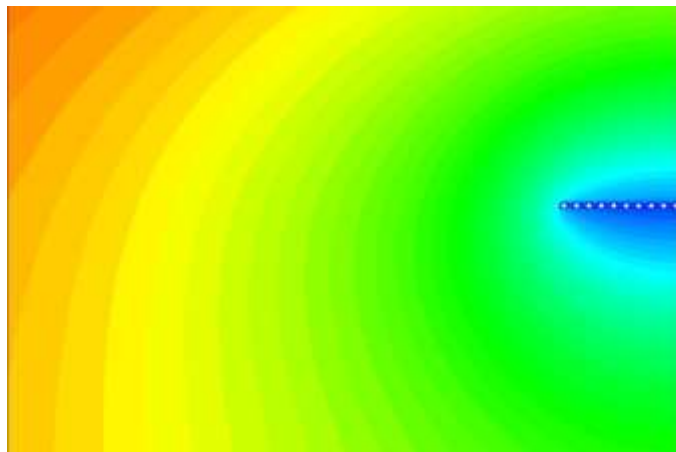


図 4.2.2-33 処分坑道掘削時の定常全水頭分布の比較 (Through-type)



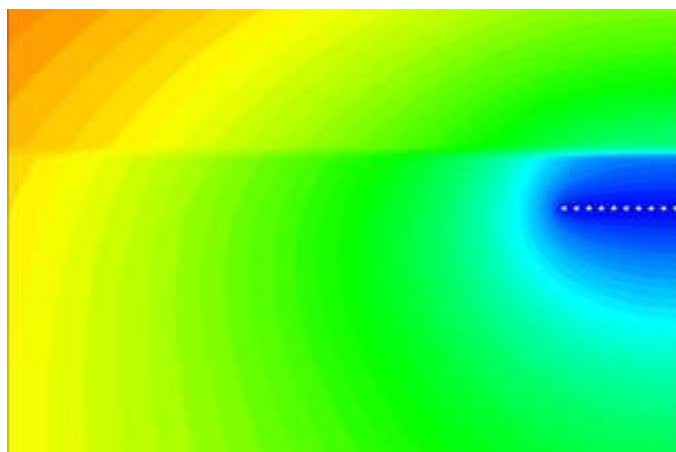
※A-A 断面位置

(a) 基本ケース(case1b)



グラウト領域の動水勾配が大きくなり、周辺岩盤の動水勾配が小さくなっている。

(b) グラウトあり(case2b)



キャップロックの動水勾配が大きくなり、処分坑道上部の全水頭分布が大きく異なる。

(c) キャップロックあり(case3b)



図 4.2.2-34 処分坑道掘削時の定常全水頭分布の比較 (Dead-end-type)

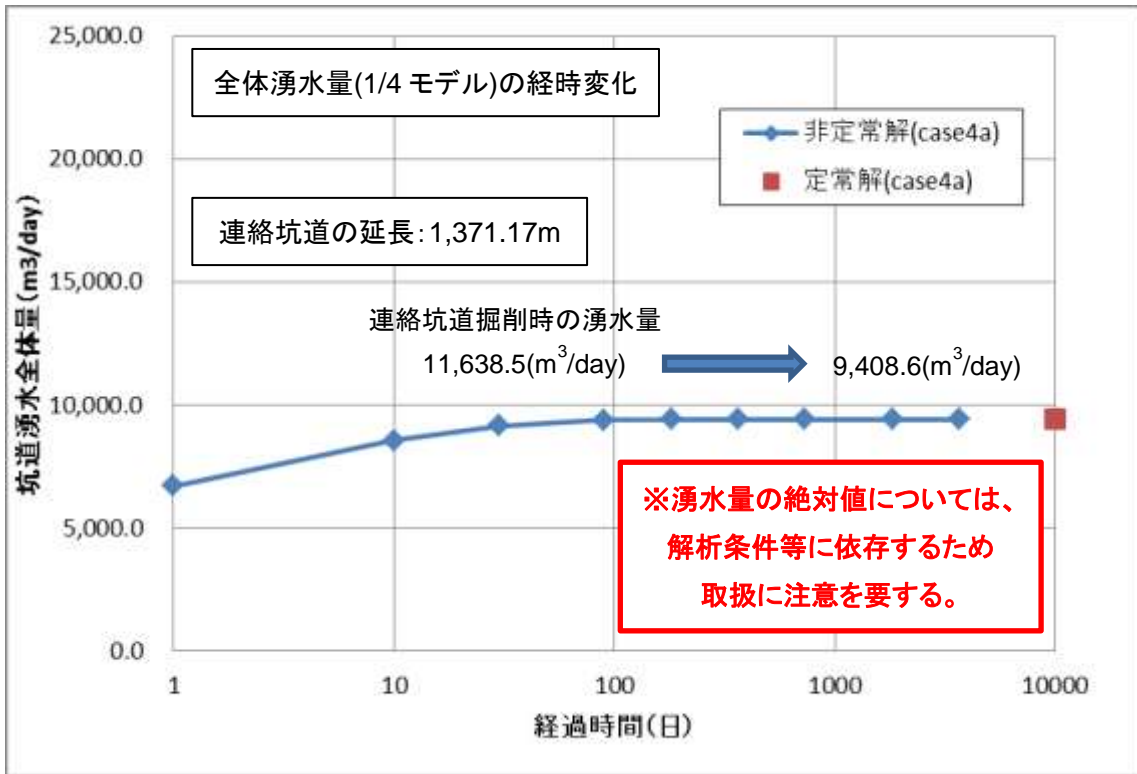
(e) 処分坑道埋戻時の非定常解析（坑道埋戻時：case4a、case4b）

回収可能性維持期間に関する状態オプションとして、処分坑道埋戻の場合（case4a、case4b）について解析を実施した。なお、埋戻し材の透水係数は、表 4.2.2-1 に示したようにベントナイト混合土として小さい値（ $7.353\text{E-}12$ (m/s)）を設定した。

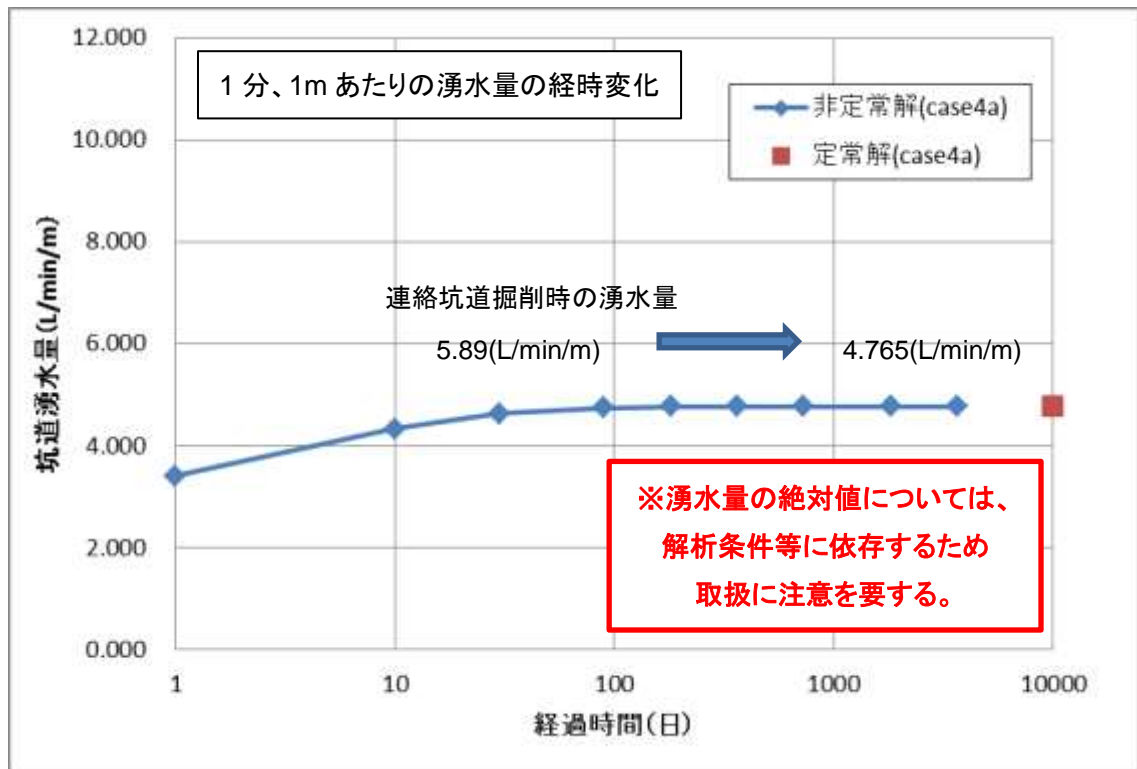
処分坑道の埋戻解析にあたっては、処分坑道を瞬時に埋戻すものと想定した。また、解析の初期条件については、処分坑道掘削時の定常解析結果の水頭分布とし、埋戻し材の部分に関しては施工時の初期飽和度（0.567 と設定）から、図 4.2.2-14 に示した不飽和特性曲線を用いて算出した初期圧力水頭（-73.625m）を与えた。

非定常解析結果として、処分坑道埋戻後の連絡坑道からの湧水量の経時変化を図 4.2.2-35 および図 4.2.2-36 に示す。埋戻状態の場合も数年で湧水量が定常状態となることがわかる。また、処分坑道埋戻時は連絡坑道の湧水量が徐々に増加するが、これは処分坑道の埋戻に伴い地下水圧が回復（上昇）するため、連絡坑道周辺の地下水圧の上昇、動水勾配の上昇に伴い湧水量が増加する現象を表している。ただし、定常状態の湧水量は、連絡坑道掘削時よりも若干少なくなっている。これは、処分坑道位置の透水性が岩盤よりも小さい埋戻し材に置き換わっているためである。

図 4.2.2-37 および図 4.2.2-38 に処分坑道埋戻時の全水頭分布の経時変化を示す。処分坑道掘削時を初期状態として、処分坑道埋戻後の地下水圧の回復（上昇）現象を解析できていることがわかる。また、埋戻し材低透水性の影響により、1 年後でも処分坑道位置での水圧分布は定常状態ではないことから、埋戻時については定常状態になるまでに数年を要すると考えられる。

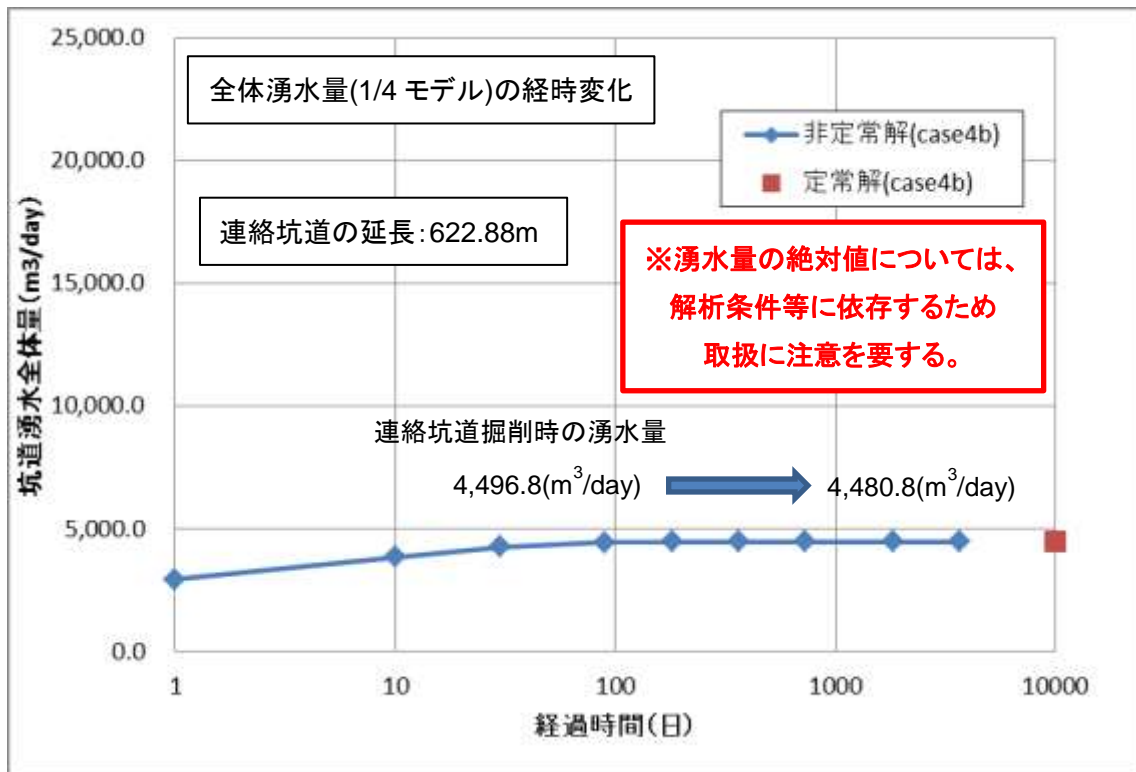


(a) 連絡坑道からの全体湧水量の経時変化

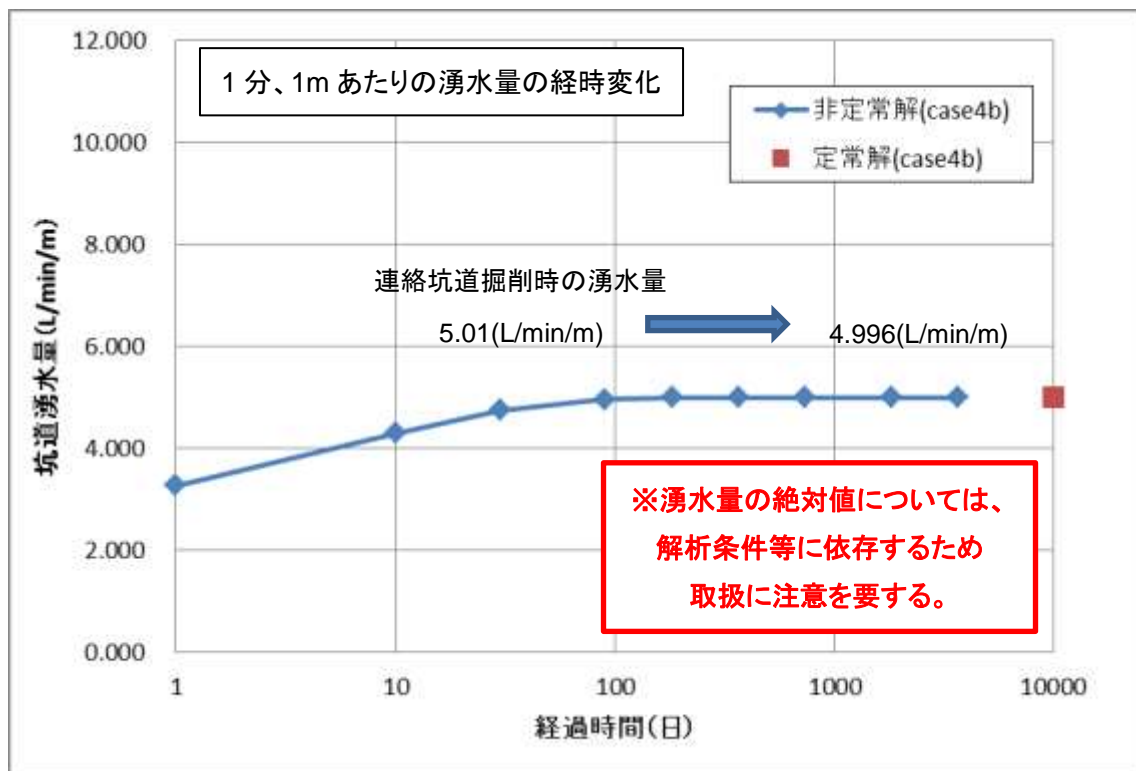


(b) 連絡坑道からの単位長さ、単位時間当たりの湧水量の経時変化

図 4.2.2-35 処分坑道埋戻時の湧水量の経時変化の比較 (case4a : Through-type)

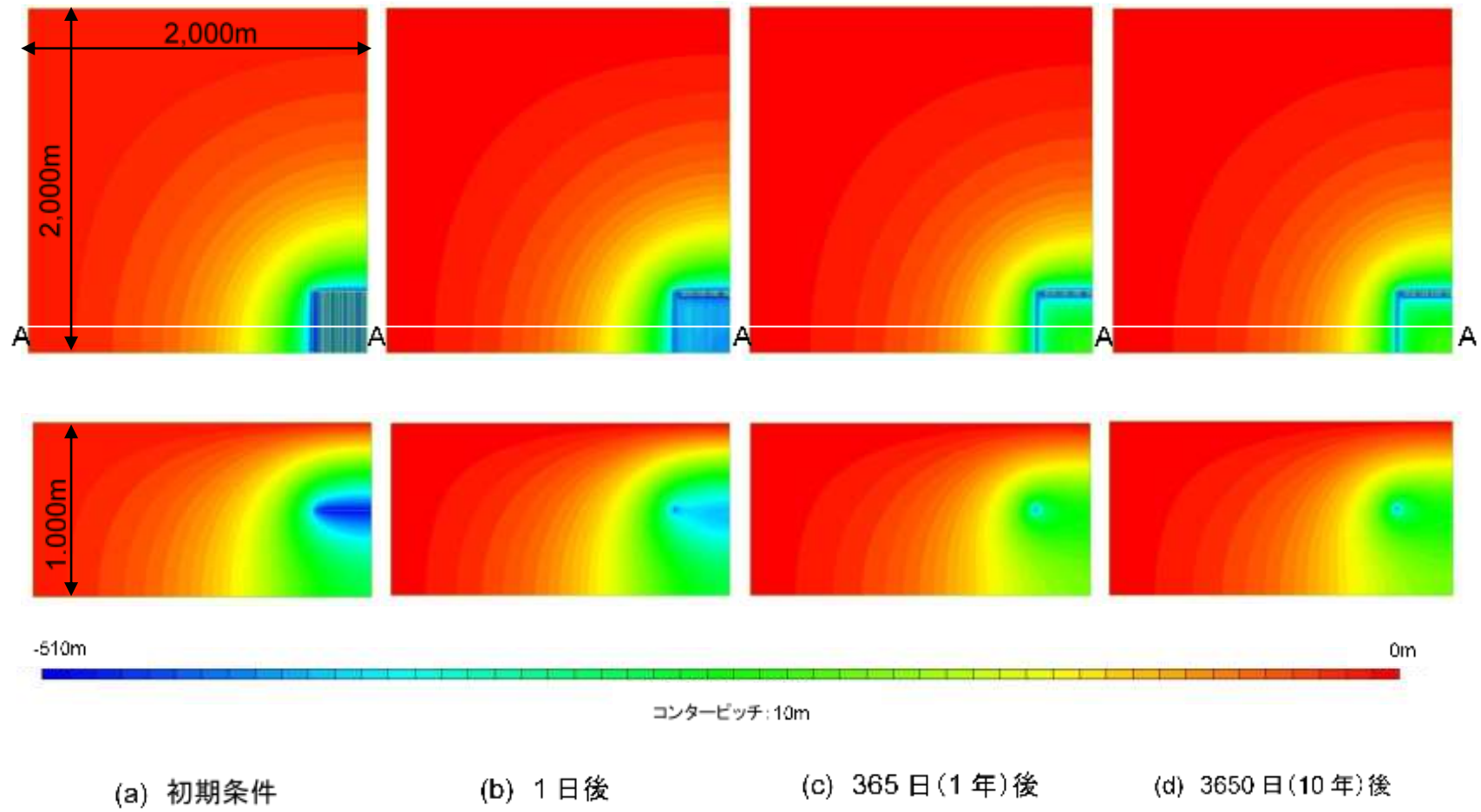


(a) 連絡坑道からの全体湧水量の経時変化



(b) 連絡坑道からの単位長さ、単位時間当たりの湧水量の経時変化

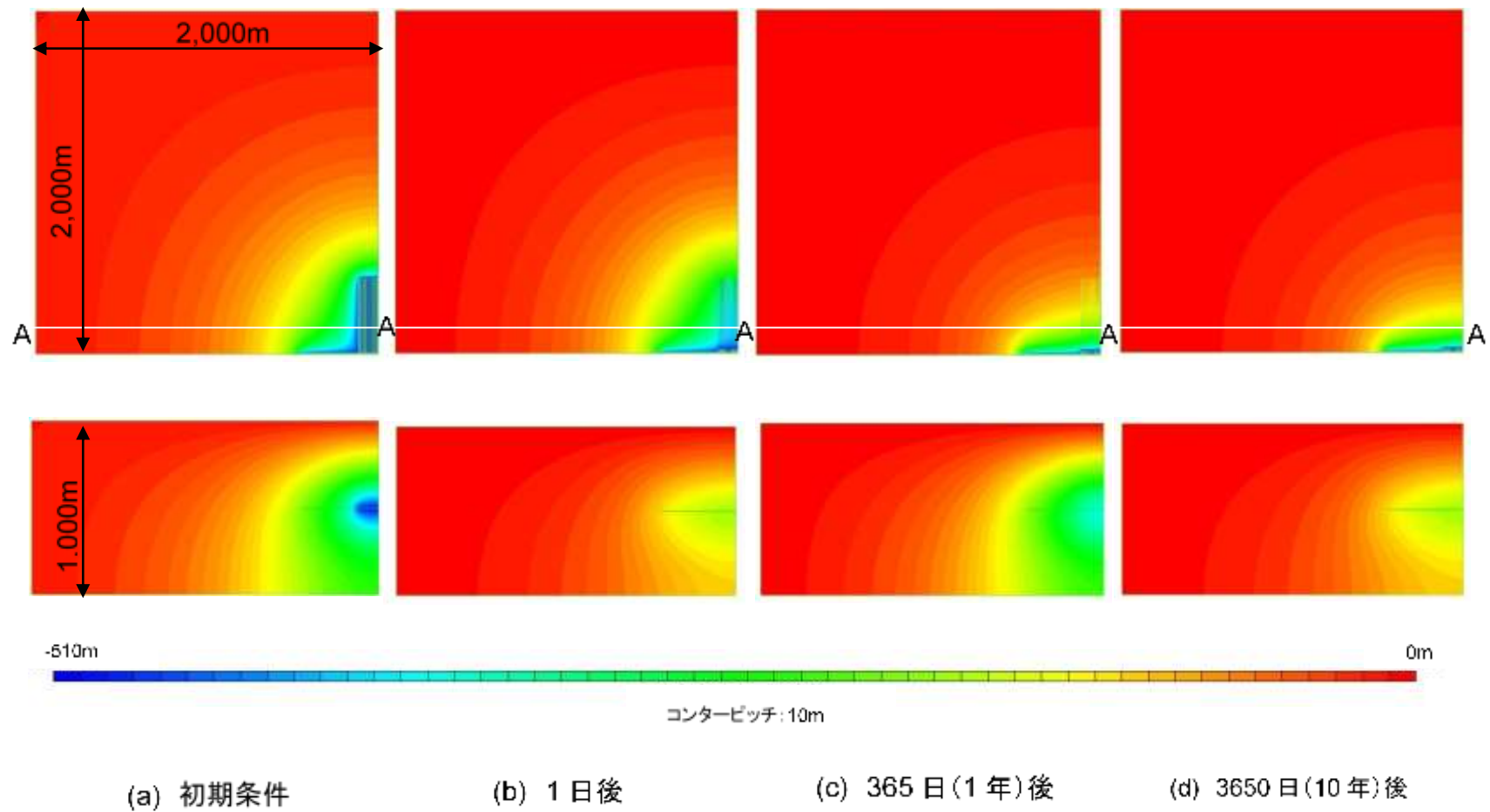
図 4.2.2-36 処分坑道埋戻時の湧水量の経時変化の比較 (case4b : Dead-end-type)



※上段：GL-502mレベルの水平断面

下段：A-A鉛直断面

図 4.2.2-37 処分坑道埋戻時の全水頭分布の経時変化 (case4a : Through-type)



※上段：GL-502mレベルの水平断面

下段：A-A鉛直断面

図 4.2.2-38 処分坑道埋戻時の全水頭分布の経時変化 (case4b : Dead-end-type)

基本ケース（処分坑道開放状態：case1a、case1b）と処分坑道埋戻状態（case4a、case4b）の解析結果から、それぞれの定常湧水量の比較表を表 4.2.2-11 および表 4.2.2-12 に、湧水量の比較グラフを図 4.2.2-39 および図 4.2.2-40 に示す。

回収可能性維持期間の状態オプションとして、処分坑道開放時については処分坑道からの湧水量が継続する。一方、坑道埋戻時には処分坑道からの湧水がなくなるため、湧水量は開放している連絡坑道からのみとなり、湧水処理の観点からは、坑道埋戻しの方が有利であると考えられる。処分形態の違いによる特徴としては、Through-type の場合には連絡坑道からの湧水量が多いため、処分坑道掘削時の湧水量の増分は約 30%程度しかない。Dead-end-type の場合には処分坑道開放時の処分坑道からの湧水量が全体の約 60%であり、開放状態よりも埋戻状態の方が湧水量低減の効果が Through-type よりも大きいと言える。

処分坑道埋戻時の連絡坑道からの湧水量に着目すると、Through-type の方が連絡坑道掘削時より約 20%少ない。これは処分坑道の埋戻し材が岩盤の透水性よりも小さいこと、パネル内の処分坑道の本数が Dead-end-type よりも多く（2.5 倍）、埋戻し材の低透水性による連絡坑道への湧水量の低減効果が高いためである。

表 4.2.2-11 状態オプションの違いによる定常湧水量の算出結果（Through-type）

地下施設	延長(m)	case1a (連絡坑道掘削時)	case1a (処分坑道開放時)	case4a (処分坑道埋戻時)
		湧水量(m ³ /day)	湧水量(m ³ /day)	湧水量(m ³ /day)
連絡坑道	1,496.0 (15.6%)	11,638.5 (100.0%)	6,180.9 (40.0%)	9,408.6(100.0%)
処分坑道	8,116.9 (84.4%)	—	9,262.8 (60.0%)	—
全体	9,612.9 (100.0%)	11,638.5 (100.0%) 比率：1.00	15,443.6 (100.0%) 比率：1.33	9,408.6 (100.0%) 比率：0.81

※湧水量の絶対値については、解析条件等に依存するため取扱に注意を要する。

表 4.2.2-12 状態オプションの違いによる定常湧水量の算出結果（Dead-end-type）

地下施設	延長(m)	case1b (連絡坑道掘削時)	case1b (処分坑道開放時)	case4b (処分坑道埋戻時)
		湧水量(m ³ /day)	湧水量(m ³ /day)	湧水量(m ³ /day)
連絡坑道	672.8 (14.0%)	4,496.8(100.0%)	2,455.6 (24.7%)	4,480.8 (100.0%)
処分坑道	4,145.1 (86.0%)	—	7,479.1 (75.3%)	—
全体	4,817.9 (100.0%)	4,496.8 (100.0%) 比率：1.00	9,934.7 (100.0%) 比率：2.21	4,480.8 (100.0%) 比率：1.00

※湧水量の絶対値については、解析条件等に依存するため取扱に注意を要する。

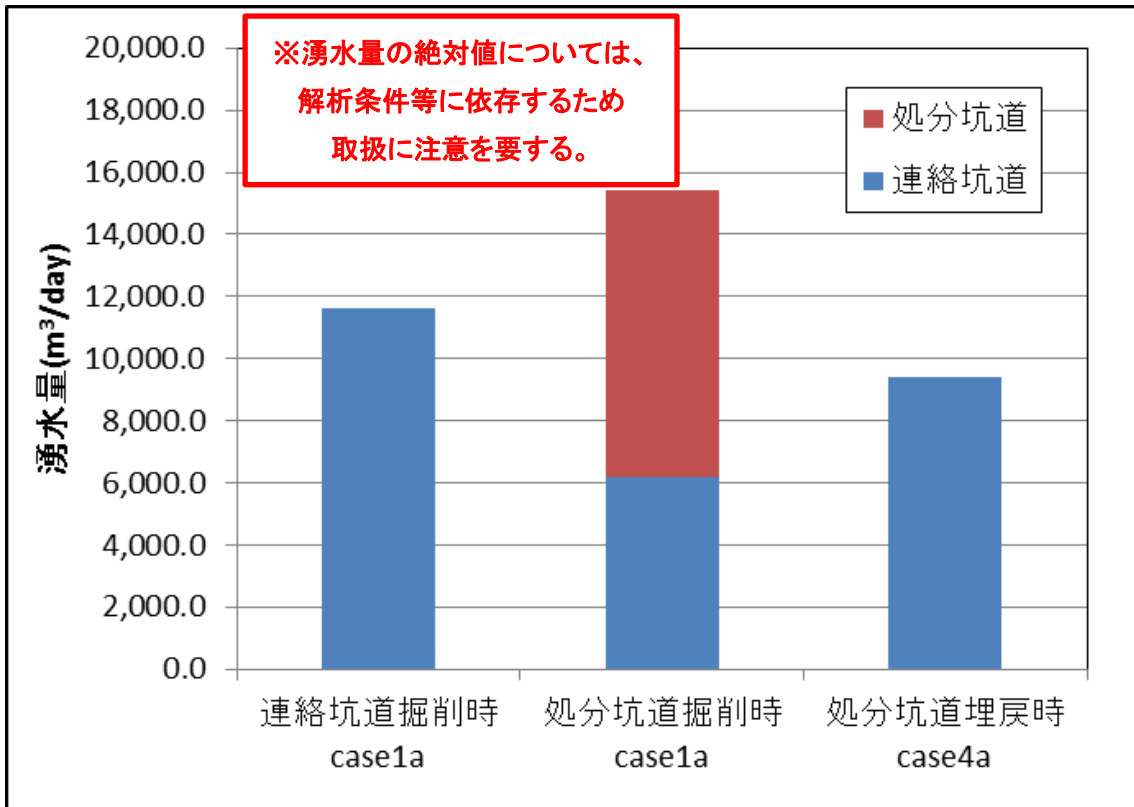


図 4.2.2-39 状態オプションの違いによる定常湧水量の比較 (Through-type)

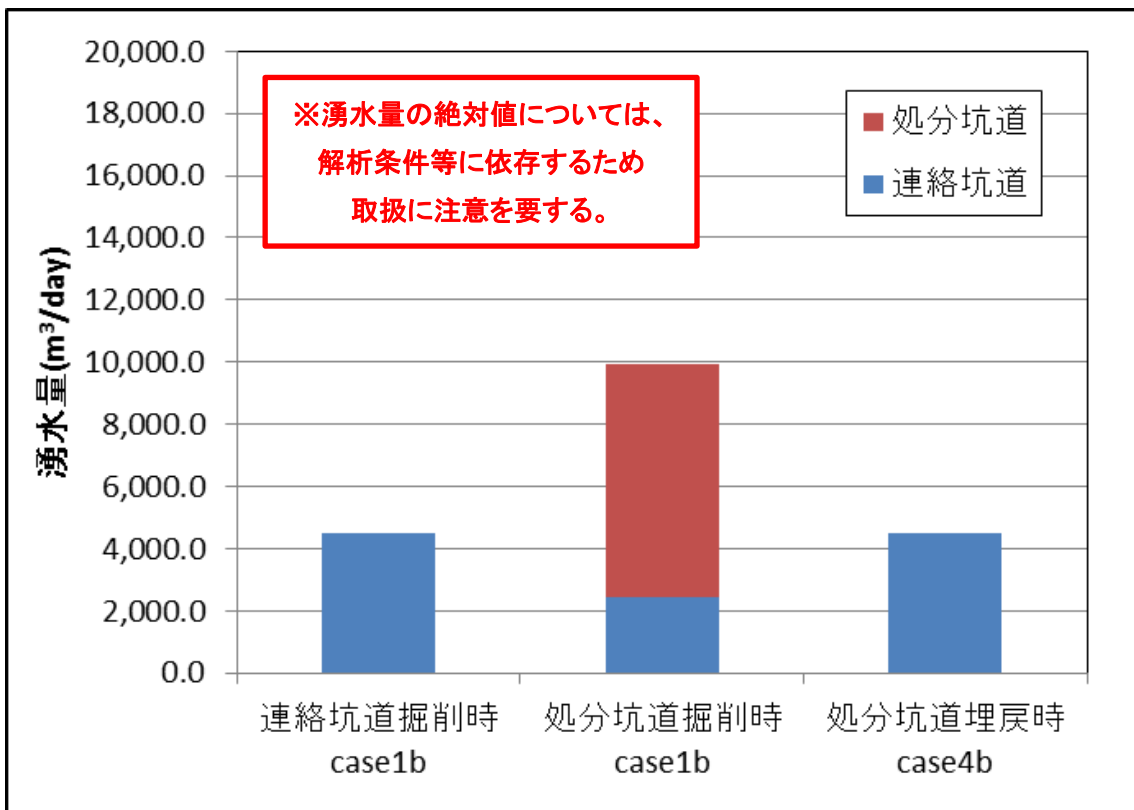


図 4.2.2-40 状態オプションの違いによる定常湧水量の比較 (Dead-end-type)

(f) パネルスケールモデルによる検討結果のまとめ

湧水量に着目した処分形態、状態オプション、グラウトの有無、キャップロックの有無に関する感度解析に関して、評価手法を踏まえて以下にまとめる。

【評価手法について】

- ・ 本検討において採用した地下水流動解析手法により、湧水量等の定量化が可能であることが確認できた。
- ・ 本検討での解析条件の場合、理論的に岩盤の透水性と湧水量は比例関係にある。よって、均質媒体として湧水量を予測する場合、本検討結果と岩盤の透水性の設定値から、湧水量を推定することができる。
- ・ 非定常解析の実行を考慮し、解析負荷を低減するために解析モデル規模を小さくし（1/4モデルの採用）、簡易な境界条件で検討を実施したが、基本的には大規模問題に対しても適用可能である。
- ・ サイトスペシフィックな条件を考慮した複雑な解析モデル（不均質媒体、広い解析領域、複雑な境界条件など）で実施する場合、解析負荷が大きくなることに注意する必要がある。

【地下水流動の経時変化の傾向について】

- ・ 本検討において設定した解析条件の場合、連絡坑道のみを掘削した場合も、処分坑道まで掘削した場合においても、周辺の地下水流動や湧水量が定常状態になる時間は約1年程度であり、回収可能性維持期間として100年～300年を想定していたが、長期間の非定常解析を実施する必要のない結果となった。同様に、処分坑道を埋め戻した場合についても、数年から10年程度で定常状態となる結果が得られた。
- ・ 本検討条件では、処分場周辺の地下水位の低下が発生しない条件であり、今後、地下水位が低下する条件や、サイトスペシフィックな条件（地形、水理地質構造、流動境界など）を考慮した検討を行うことにより、長期間の非定常解析が必要となるケースが想定される。
- ・ 地下施設（連絡坑道、処分坑道）の掘削については、瞬時掘削条件での解析を実施した。地下施設の建設工程を考慮した逐次掘削解析による非定常解析を実施する必要がある。

【処分形態の違いについて】

- ・ 単位廃棄物あたりの坑道延長（連絡坑道＋処分坑道）が長くなる Through-type の方が、Dead-end-type よりも湧水量が多くなる。
- ・ Through-type は処分坑道の周辺に連絡坑道が掘削されるため、処分坑道掘削時に周辺の地下水圧が低下する効果があるため、処分坑道単位長さ、単位時間あたりの湧水量は、Dead-end-type よりも少なくなる。
- ・ Through-type は連絡坑道開放による周辺地下水への影響が Dead-end-type よりも

広範囲となることから、周辺地下水影響低減の観点からは **Dead-end-type** の方が有利であると考えられる。処分坑道を埋戻すことにより、**Dead-end-type** はさらに影響を低減できる。

- ・ 処分坑道埋戻状態については、処分坑道からの湧水量が全体に占める割合の多い **Dead-end-type** の方が湧水量低減の効果が大きいと言える。回収維持期間として処分坑道開放状態よりも埋戻状態の方が全体湧水量の抑制効果があるため、湧水処理の観点からは有利であることは明らかである。

【グラウト影響について】

- ・ 本評価手法の適用により、グラウトによる湧水量の低減効果を確認することができた。
- ・ 坑道周辺にグラウトがある場合、グラウト領域での動水勾配が大きくなる。結果的にグラウト周辺の岩盤中の動水勾配が小さくなることから、グラウトがない場合と比較して湧水量は少なくなる。
- ・ **Through-type** の方がグラウトによる湧水量の低減効果が高く、全体湧水量は約 2/3 に減少した。特にパネルの周辺に配置され、湧水量が多い連絡坑道の湧水量が半減しており、グラウトの効果が顕著となっている。動水勾配が大きく、湧水量の多い連絡坑道の方がグラウトによる効果が大きくなると考えられる。
- ・ 本検討では均質岩盤を対象としており、グラウトによる湧水量の低減効果に関しては、不均質場での検討を行うことが望ましい。

【キャップロック影響について】

- ・ 地下施設の上方（約 50m）に約 11m 厚さのキャップロック（透水性は岩盤より 1 オーダー小さい）が存在する場合、上部からの地下水の流動が抑えられるため、湧水量が減少する。処分坑道とキャップロックの間に不飽和領域が発生し、時間経過とともに不飽和領域が進展する現象を期待したが、本検討条件では不飽和領域は発生しなかった。岩盤やキャップロックの透水性の設定により、不飽和領域が発生する可能性があるため、不飽和領域の発生を考慮した条件設定やメッシュ分割の工夫（不飽和領域ではメッシュを細かくすべき）が必要になると考えられる。
- ・ 基本的に水理地質構造は、サイトスペシフィックな問題であり、サイト特性を考慮した検討が望ましい。

b 湧水量に影響する要因検討

パネルスケールモデルによる検討は、解析領域が広く解析負荷の低減の観点から地下施設を詳細にモデルすることができていない。湧水量評価に用いた解析手法である FEM については、空間の離散化誤差を有することが知られており、湧水量の定量化結果については、メッシュ分割の影響による誤差が含まれている。

ここでは、パネルスケールモデル解析から得られた湧水量の精度について検証すること目的として、処分坑道の形状、大きさに対するメッシュ分割影響を把握するため、2D あるいは 3D の処分坑道詳細モデル、および異なるメッシュ分割（パネルスケールモデルと同じ分割）や節点のみで坑道を再現したメッシュ（節点モデル）による湧水量算出を行い、湧水量に対するメッシュ分割の違いによる影響の定量化を行う。

加えて、パネルスケールモデルで考慮することができなかつた処分坑道周辺の EDZ 等の影響について定量化を行い、湧水量に影響を及ぼす要因について感度解析を実施する。

処分坑道詳細モデルによる非定常解析手法を用いた解析結果について以下に示す。

(a) 解析ケースの設定

処分坑道詳細モデル等による地下水流動解析ケース(全7ケース)について表 4.2.2-13 に示す。処分形態については2種類（「Through-type：縦置き」と「Dead-end-type：横置き」、処分坑道の状態については、湧水量算出のため開放状態を想定するとともに、感度解析項目としてメッシュ分割の違い、EDZ 影響、グラウト影響を取り上げた。また、坑道周辺に不飽和領域が発生しやすくなる条件として、処分坑道上部にキャップロック（低透水性層）が分布する場合を想定した。

表 4.2.2-13 処分坑道詳細モデル等による解析ケース

ケース名	処分形態	メッシュ	EDZ	グラウト	キャップロック	手法	備考
case 5 b	a:Through type	2D詳細	なし	なし	なし	FEM	基本ケース
case 6 a		3D詳細	なし	なし	なし	FEM	処分形態の比較
case 7 b		2D節点	なし	なし	なし	FEM	メッシュ分割影響 1
case 8 b		2Dパネル	なし	なし	なし	FEM	メッシュ分割影響 2
case9b	b:Dead-end-type	2D詳細	あり	なし	なし	FEM	EDZ影響
case10b		2D詳細	あり	あり	なし	FEM	グラウト影響
case11b		2D詳細	なし	なし	あり	FEM	キャップロック影響

(b) 解析モデル

感度解析に用いた解析モデルを図 4.2.2-41 および図 4.2.2-42 に示す。横置き PEM タイプは 2D モデル、縦置きタイプは処分孔を有するため 3D モデルとした。解析領域については、坑道の離間距離を考慮し 2D モデルでは 1/2 領域を、3D モデルでは 1/4 領域を対象としている。

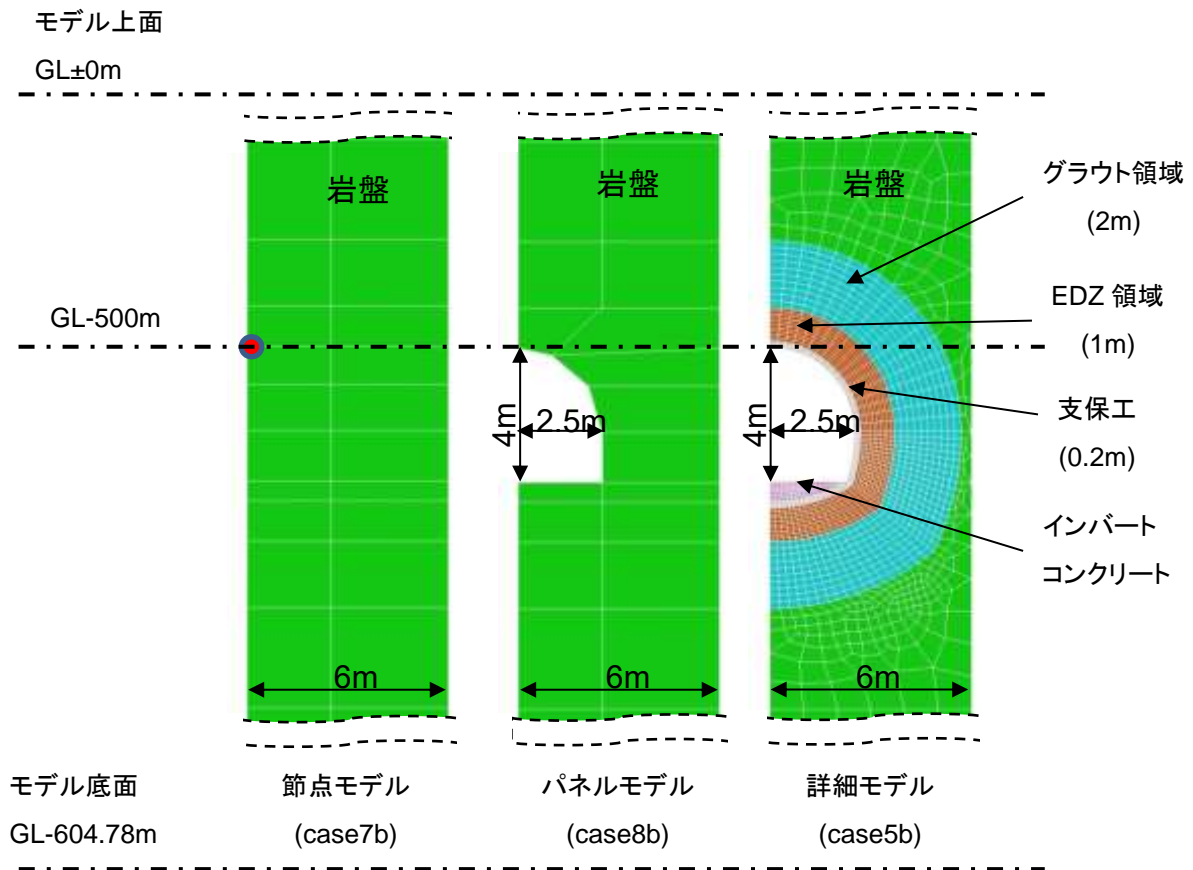


図 4.2.2-41 湧水量への影響検討用 2D モデル (横置き PEM タイプ)

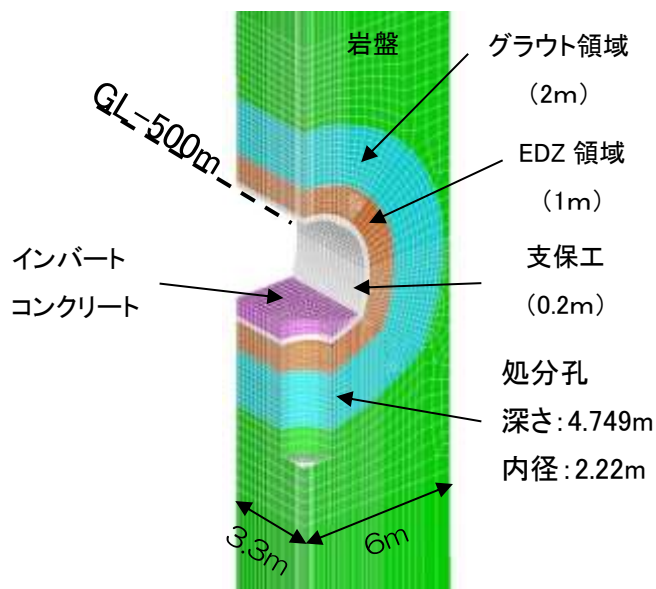


図 4.2.2-42 湧水量への影響検討用 3D モデル (縦置きタイプ : case6a)

(c) 境界条件、初期条件

境界条件については、接続する処分坑道の影響を考慮し対称となる 1/2 モデルに対して、パネルスケールモデルと同様の考え方に基づき、上面 (GL0m) は水頭固定境界、側面および底面 (GL-1,000m) は不透水境界として設定したが、予備解析の結果、上面からは地下水が供給されるものの、底部からの地下水の供給がなくなるため、妥当な設定ではないことが判明した。そこで、解析モデル領域の底面を処分深度から約 100m 深部となる GL-604.78m (解析メッシュの分割結果から想定した) 深度において水頭固定境界とし、パネルスケールモデルから得られる全水頭の経時変化を考慮した境界条件を与えることとした。なお、パネルスケールモデルによる解析では、Through-type と Dead-end-type の違いにより、境界深度での水頭値の時間変化が異なる。ここでは Dead-end-type の解析結果 (case1b) の解析結果を用いて境界条件を設定した。図 4.2.2-43 に境界条件として与えた底部境界深度における全水頭の経時変化を示す。

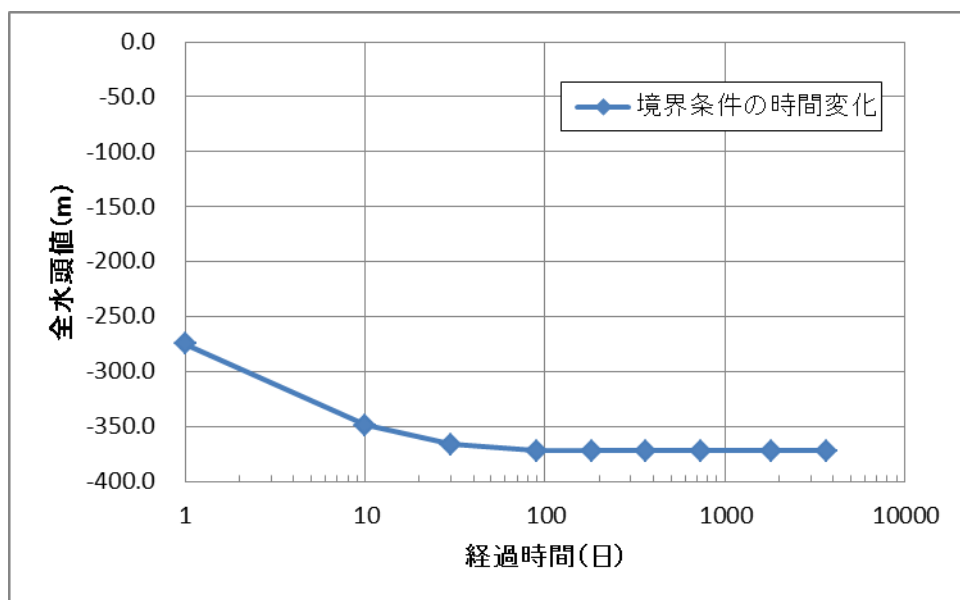


図 4.2.2-43 2D、3D モデル解析での底部境界における全水頭の経時変化

なお、対称面となる側面を不透水境界としたが、鉛直方向の流動が卓越している領域を想定したものであり、図 4.2.2-44 に示すように接続する処分坑道の中央部であれば、パネルスケールモデル解析結果からもほぼ鉛直方向が卓越していると言える領域での湧水量算出を想定している。

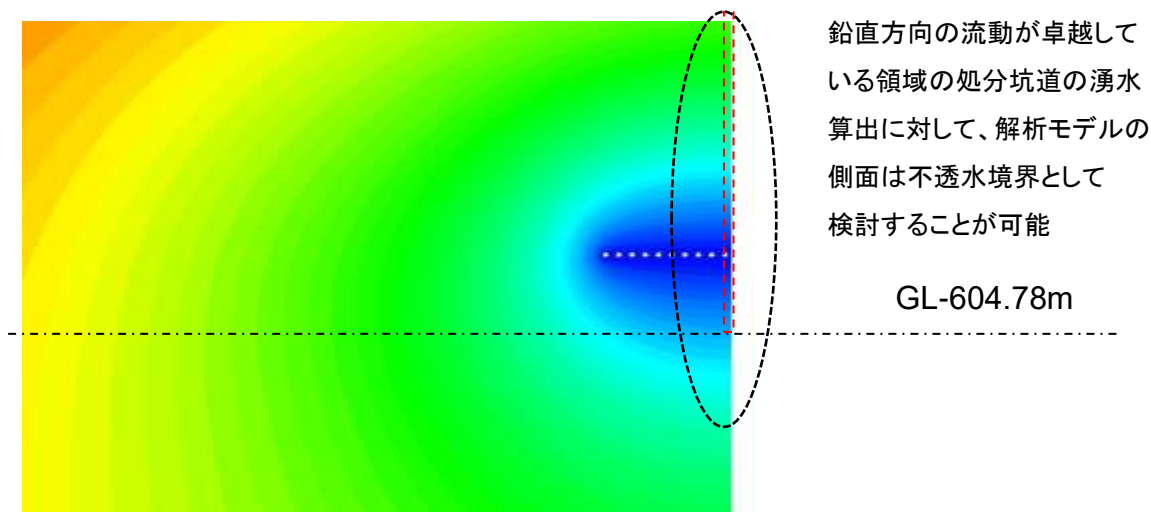


図 4.2.2-44 2D、3D モデル解析で対象とする処分坑道の位置

なお、初期条件に関しては、解析領域内は全水頭=0とした。処分坑道の場合により、事前に掘削される連絡坑道の影響は異なること、連絡坑道の影響を無視した方が、初期の湧水量を多目に評価する条件であることから、メッシュ分割の影響評価のための比較検討条件としては問題ないと判断した。

(d) メッシュ分割影響に関する検討

異なるメッシュ分割形状での処分坑道からの湧水量の算出結果についての湧水量の経時変化を図 4.2.2-45 に示す。湧水量については、単位長さ、単位時間あたりに換算した。2D モデルの場合、解析モデルとしては処分坑道の 1/2 モデルであること（2 倍）、3D モデルの場合、解析結果を 2 倍するとともに、奥行長さ（3.33m）を考慮した。

図 4.2.2-45 より、定常状態での湧水量を比較すると、メッシュ分割の影響はほぼ 10%以内の範囲であり、最も異なるのは処分坑道を節点でモデル化した節点モデルの場合である。本検討条件では、処分坑道を節点でモデル化した場合、湧水量は約 10%少なめに算出されることを示している。

力学解析と同程度のメッシュ分割である詳細モデルと 3D 縦置きモデルについては、処分孔の有無によらず、単位長さあたりの湧水量は約 4%の増加程度であり、小さいと言える。すなわち、縦置き方式の処分孔の湧水量に対する影響は小さく、無視できると考えてよい。ただし、全体湧水量に対する約 4%は大きいと考える場合、パネルスケールモデルにおける処分坑道の湧水量について 4%の割り増しを行うことで評価することができる。

パネルスケールモデルでの処分坑道のモデル化と同じパネルモデルの湧水量についても、詳細モデルとほぼ同じ結果となった。これより、パネルスケールモデルによる湧水量の算出結果に関しては、処分坑道を詳細にモデル化した場合と同程度の精度を有していると考えられる。よって、本検討ではパネルスケールモデルにより算出した湧水量に対して、特に補正を行わなくてもよいと判断できる。なお、本結論はメッシュ分割による FEM 解析モデルの空間的な離散化影響に対

するものであることに注意する必要がある。不均質媒体に関しては、メッシュ分割の違いにより物性値の分布が異なる可能性があることに注意しなければならない。

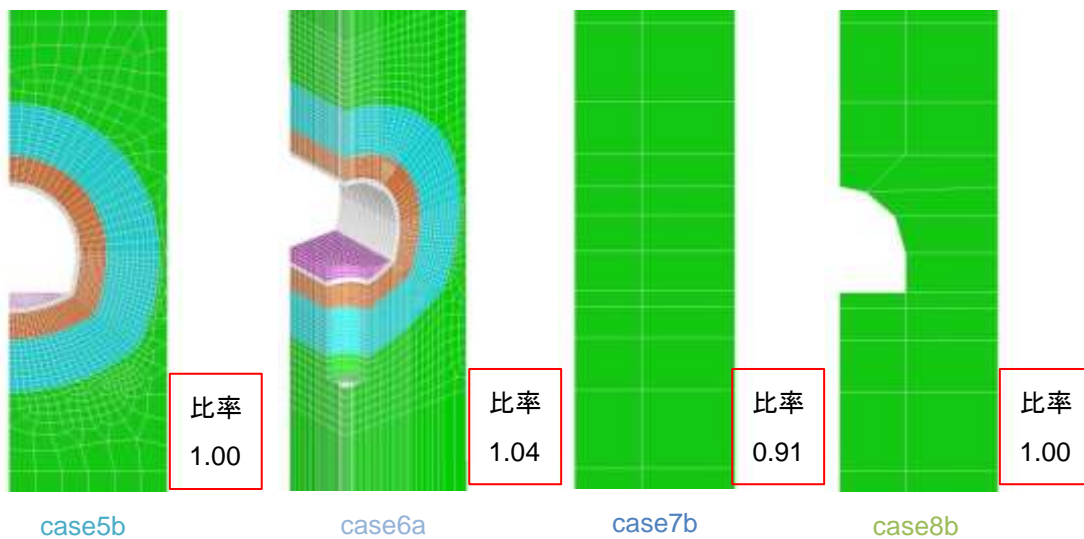
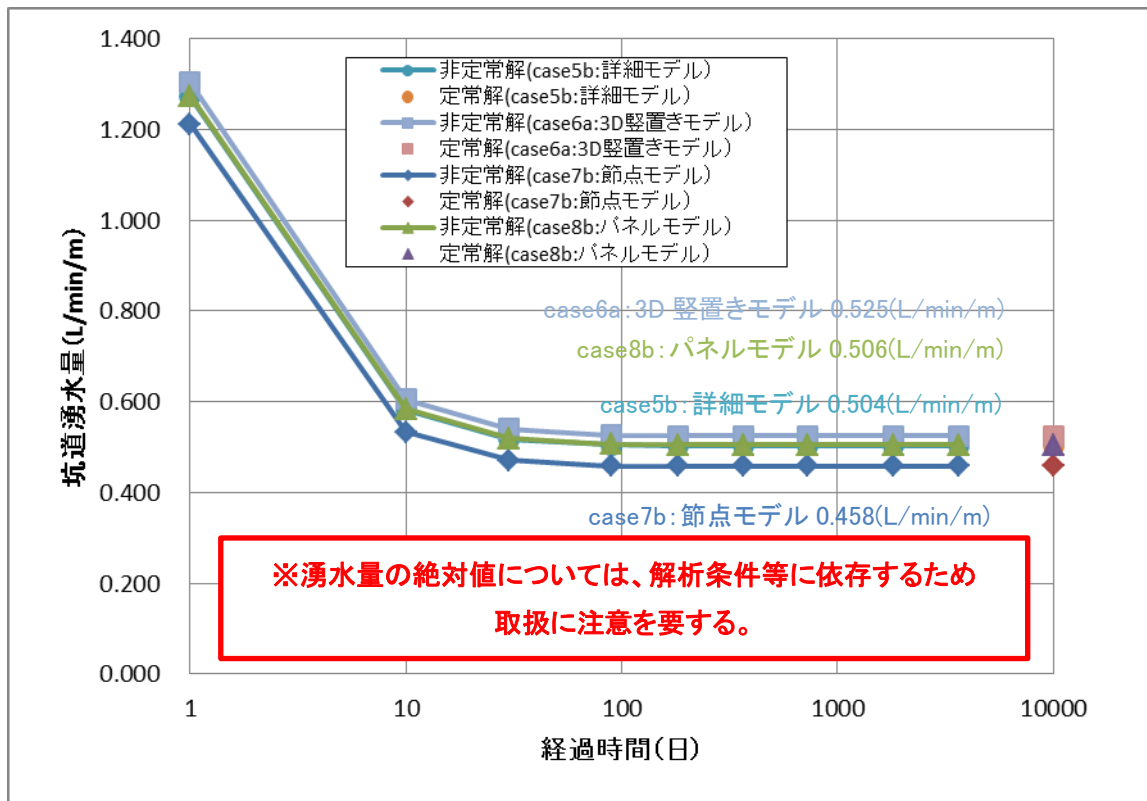


図 4.2.2-45 メッシュ分割の違いと湧水量の経時変化の比較

(e) EDZ 等の影響に関する検討

ここでは処分坑道詳細モデルを用いて、パネルスケールモデルで検討することができなかった EDZ 影響の検討を行うとともに、グラウト影響、キャップロック影響に関する検討を実施した。

感度解析ケースにおける処分坑道からの湧水量の算出結果について、湧水量の経時変化を図 4.2.2-46 に示す。EDZ の有無に関しては、case5b と case9b の比較から湧水量に対する影響は小さいことがわかる。グラウト (case10b) に関しても、湧水量低減効果が表れているが約 10%程度である。これは、処分坑道として上下方向の流動場であり、連節する処分坑道の影響を受けて処分坑道周辺の動水勾配が最も小さい場所を想定した解析条件であることによると考えられる。

キャップロックの有無による湧水量の算出結果について、湧水量の経時変化を図 4.2.2-47 に示す。キャップロックがある場合は処分坑道上方からの湧水量が少なくなるため、湧水量は低減していると考えられるが、影響は小さい。また、出力時刻において湧水量にばらつきが認められ、定常状態に安定する結果となっていない。これは、キャップロックがある場合には不飽和領域は処分坑道上部に発生しており、非定常状態での湧水量の算出にあたって、不飽和領域の影響が表れているためと考察される。不飽和領域の発生については、後述する。

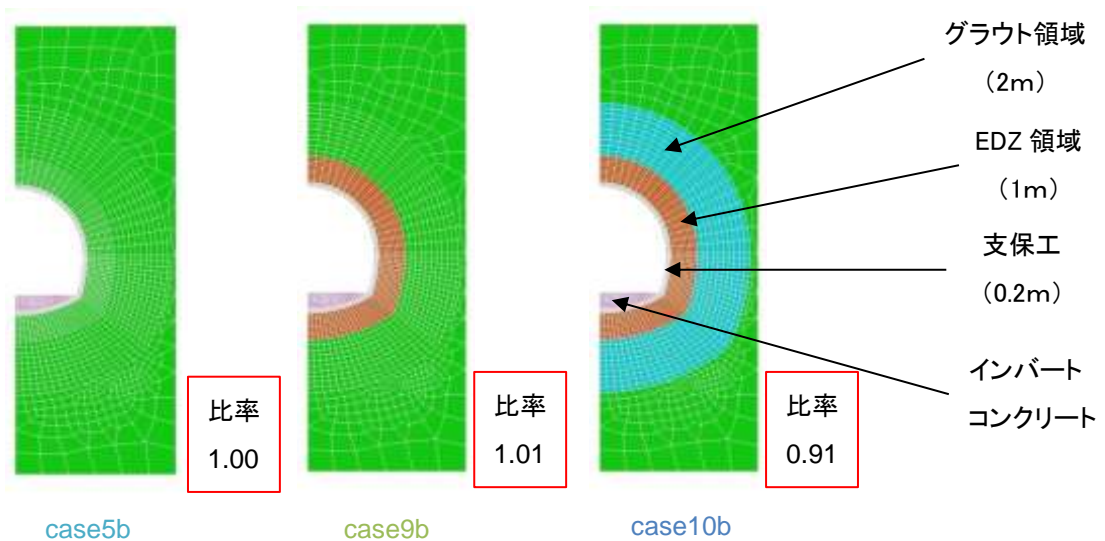
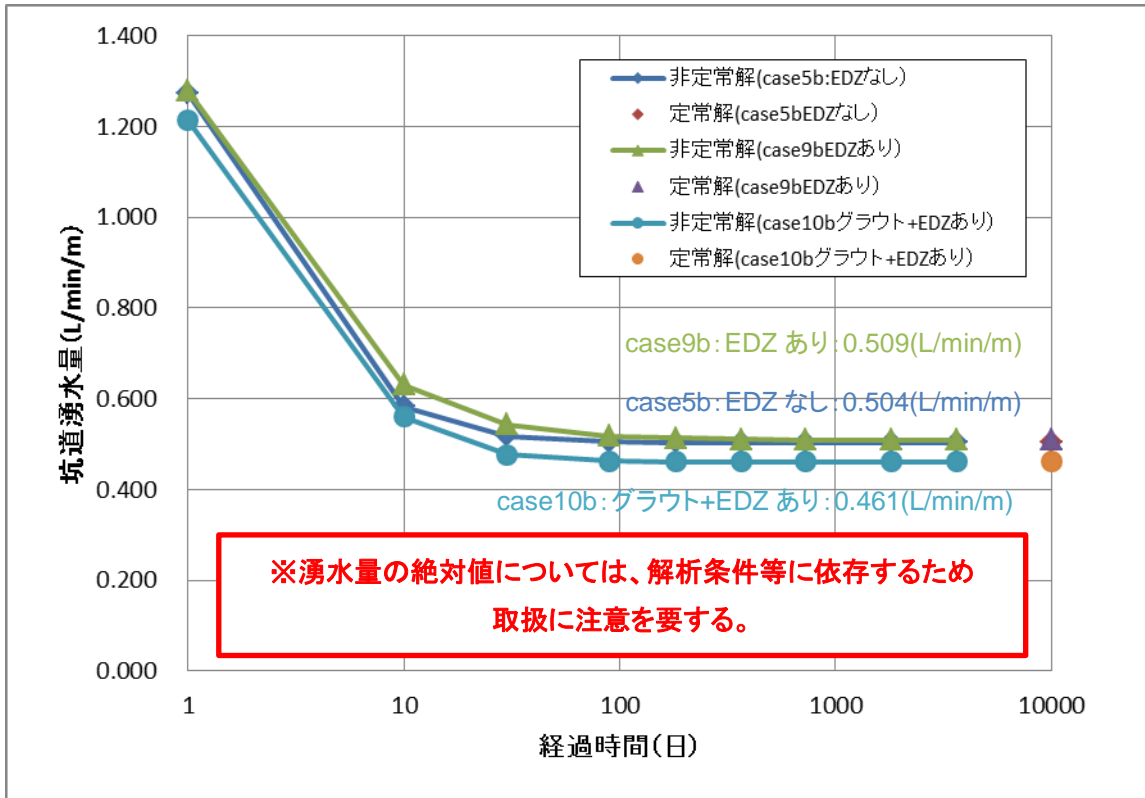


図 4.2.2-46 感度解析条件と湧水量の経時変化の比較

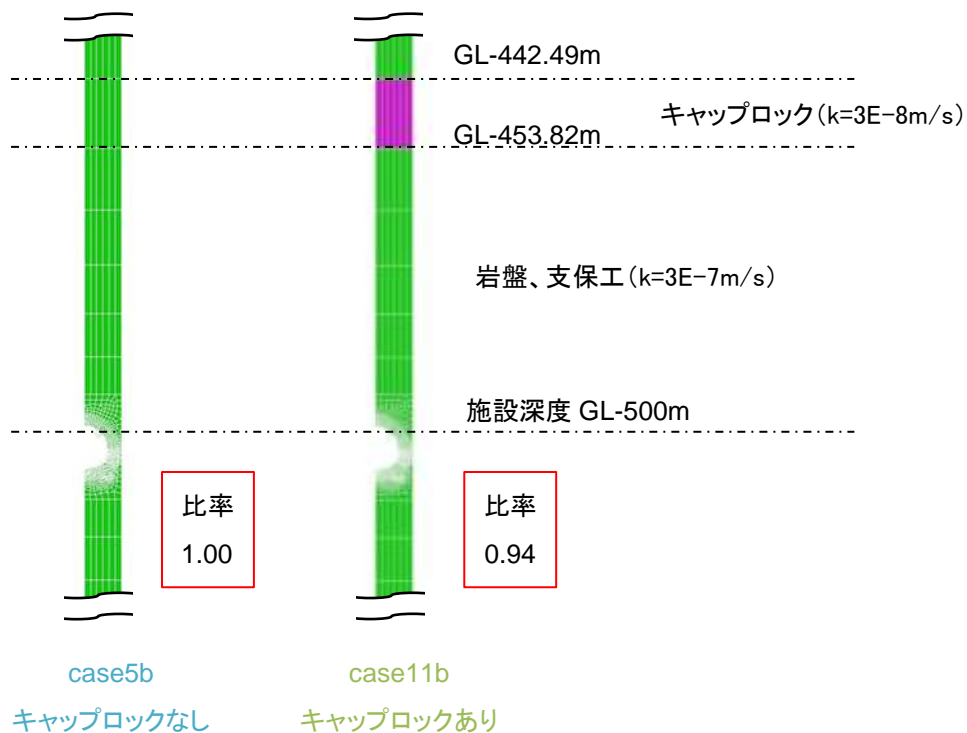
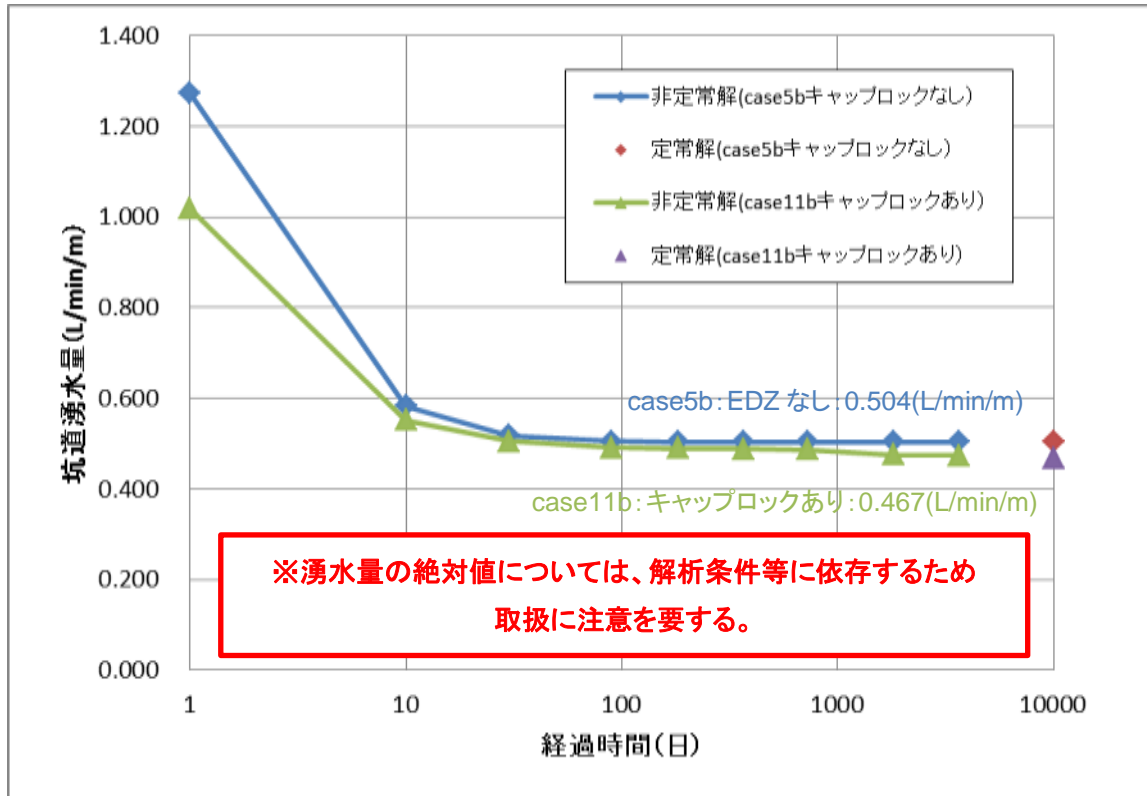


図 4.2.2-47 キャップロックの有無と湧水量の経時変化の比較

2) 処分坑道周辺の不飽和領域評価

処分坑道開放に伴い坑道周辺に発生する可能性がある不飽和領域の分布、時間変化等について定量化を行うことを目的とし、処分坑道周辺の状態（EDZの有無、グラウトの有無など）の違いによる不飽和領域発生への影響評価に対して処分坑道詳細モデルによる非定常地下水流動解析を実施する。

なお、湧水量算出を実施したパネルスケールモデルによる解析では、解析領域内に不飽和領域は発生しなかった。

a 2D、3D 処分坑道詳細モデルによる検討

処分坑道周辺の部材をモデル化した処分坑道詳細モデルによる地下水流動解析結果について以下に示す。なお、堅置きタイプについては3Dモデル、横置き PEM タイプについては2Dモデルを用いている。

(a) 解析ケースの設定

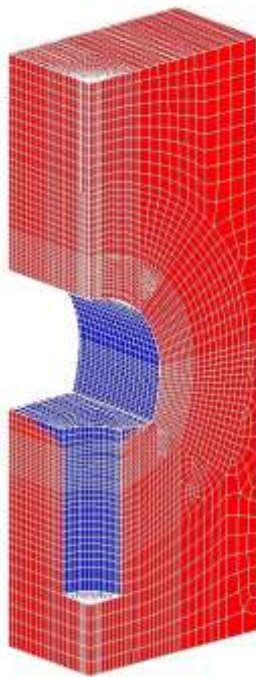
処分坑道詳細モデルを用いて湧水量の算出を実施した地下水流動解析ケース（全8ケース）について表 4.2.2-14 に再掲する。処分形態については2種類（「Through-type：堅置き」と「Dead-end-type：横置き」）、感度解析項目として処分坑道周辺のメッシュ分割の違い、EDZ影響、グラウト影響を取り上げた。また、坑道周辺に不飽和領域が発生しやすくなる条件として、処分坑道上部にキャップロック（低透水性層）が分布する場合を想定した。

表 4.2.2-14 「処分坑道詳細モデル」等による解析ケース（表 4.2.2-13 再掲）

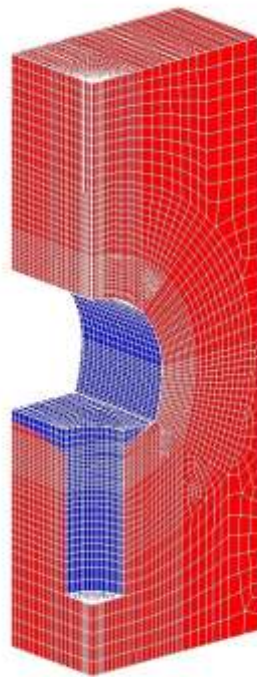
ケース名	処分形態	メッシュ	EDZ	グラウト	キャップロック	手法	備考
case 5 b	a:Through-type b:Dead-end-type	2D詳細	なし	なし	なし	FEM	基本ケース
case 6 a		3D詳細	なし	なし	なし	FEM	処分形態の比較
case 7 b		2D節点	なし	なし	なし	FEM	メッシュ分割影響1
case 8 b		2Dパネル	なし	なし	なし	FEM	メッシュ分割影響2
case 9 b		2D詳細	あり	なし	なし	FEM	EDZ影響
case 10 b		2D詳細	あり	あり	なし	FEM	グラウト影響
case 11 b		2D詳細	なし	なし	あり	FEM	キャップロック影響

(b) 不飽和領域に関する検討

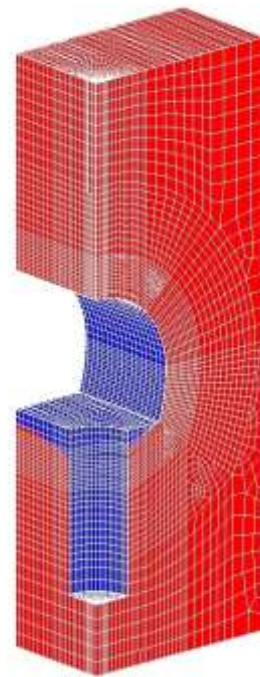
掘削時の非定常解析の結果、case 5b（基本ケース）、case 7b（節点モデル）、case 8b（パネルモデル）については、不飽和領域は発生しなかった。均質媒体モデルであり、岩盤の透水性の不均質性がない場合、500m 深度での坑道掘削条件では不飽和領域は発生しないと考えられる。一方、他のケースでは不飽和領域が発生した。堅置きタイプをモデル化した case 6a の解析結果として、処分坑道周辺の不飽和領域の経時変化を図 4.2.2-48 に示す。堅置きタイプの場合、処分坑道の上方には不飽和領域は発生せず、処分孔の影響により、インバート部付近に不飽和領域が発生するものの、領域が時間経過とともに大きく進展する可能性は小さく、約3か月程度でほぼ不飽和領域の進展は終了している。



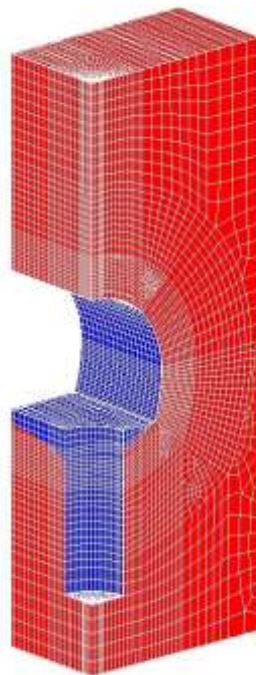
(a) 1日後



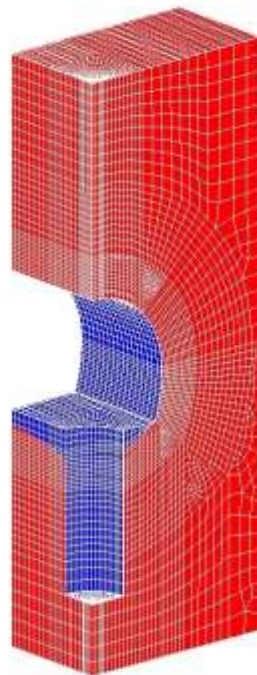
(b) 10日後



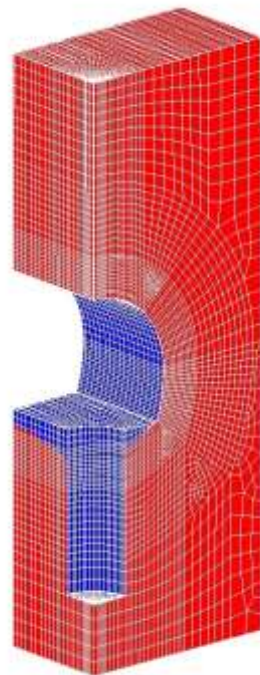
(c) 30日後



(d) 90日後



(e) 365日後



(f) 3650日後

※ 赤色:飽和領域(圧力水頭が正)、青色:不飽和領域(圧力水頭が0及び負)

図 4.2.2-48 縦置きタイプ (case6a) における不飽和領域の経時変化

なお、堅置きタイプの処分孔を廃棄体および緩衝材で充填し、埋め戻した状態については、2Dモデル解析を実施した case5b（基本ケース）と同様にインバート部の不飽和領域は消失することが予測できる。

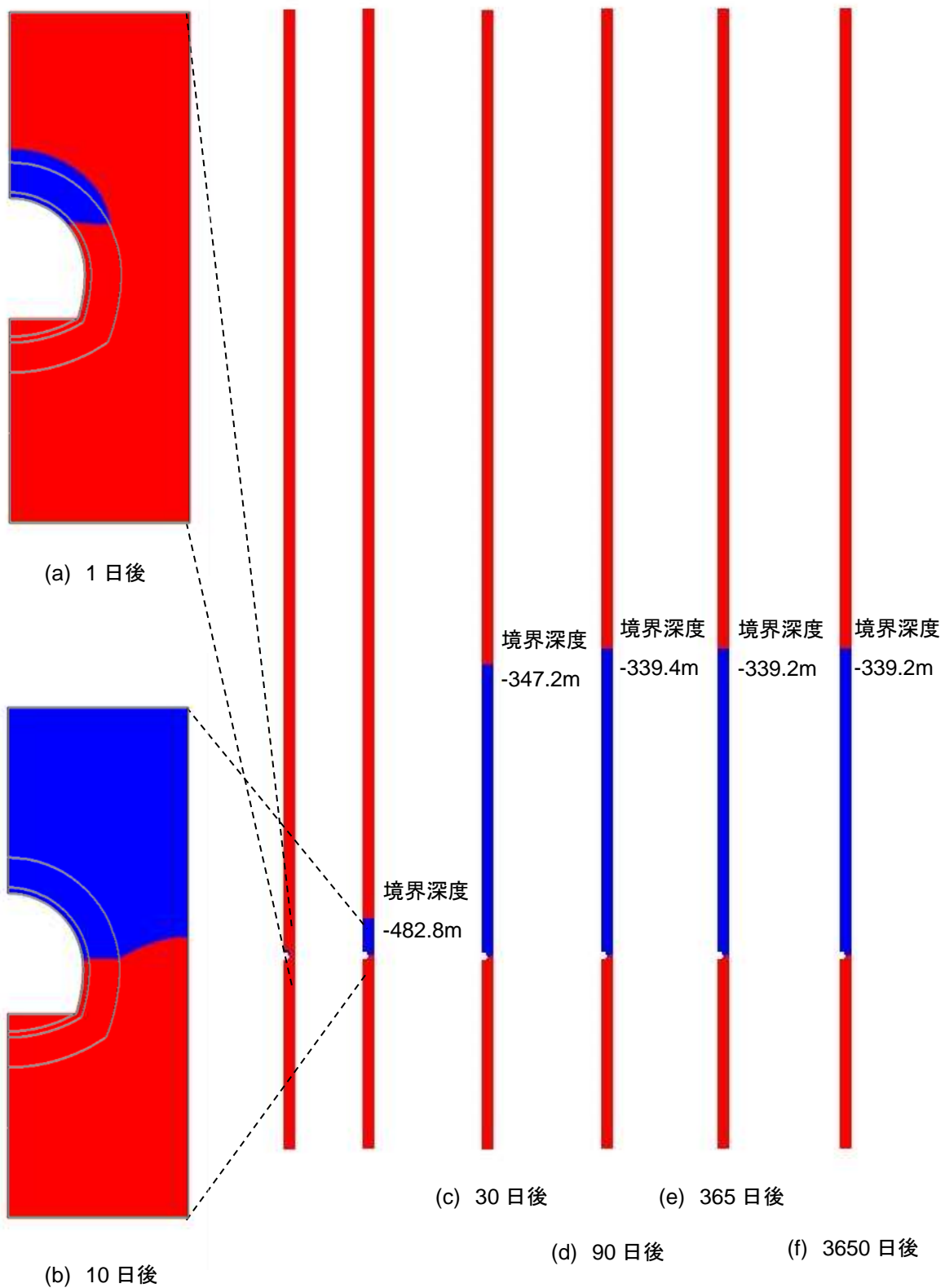
次に、EDZ を考慮した case9b と EDZ とグラウトを考慮した case10b について、不飽和領域の経時変化図を図 4.2.2-49 および図 4.2.2-50 に示す。

EDZ を考慮した case9b では、掘削直後の 1 日後は処分坑道上部の EDZ 領域において不飽和領域が発生し、10 日後の解析結果では不飽和領域が上方に進展している。その後も不飽和領域が上方に進展し、ほぼ 3 カ月程度で進展が遅くなり 1 年後の不飽和領域は 10 年後と同じ結果となった。

本解析結果については、飽和・不飽和流動解析結果としては予想していなかったものであり、原因としては不飽和特性（不飽和透水係数）の設定により、不飽和領域の透水性が小さくない（飽和透水係数とほぼ同じ）ことによる影響ではないかと考えられる。湧水量に対する EDZ の影響が小さかったことを考慮すると、不飽和領域が発生している訳ではなく、特殊な条件となっている可能性があるため、要因検討は今後の課題としたい。

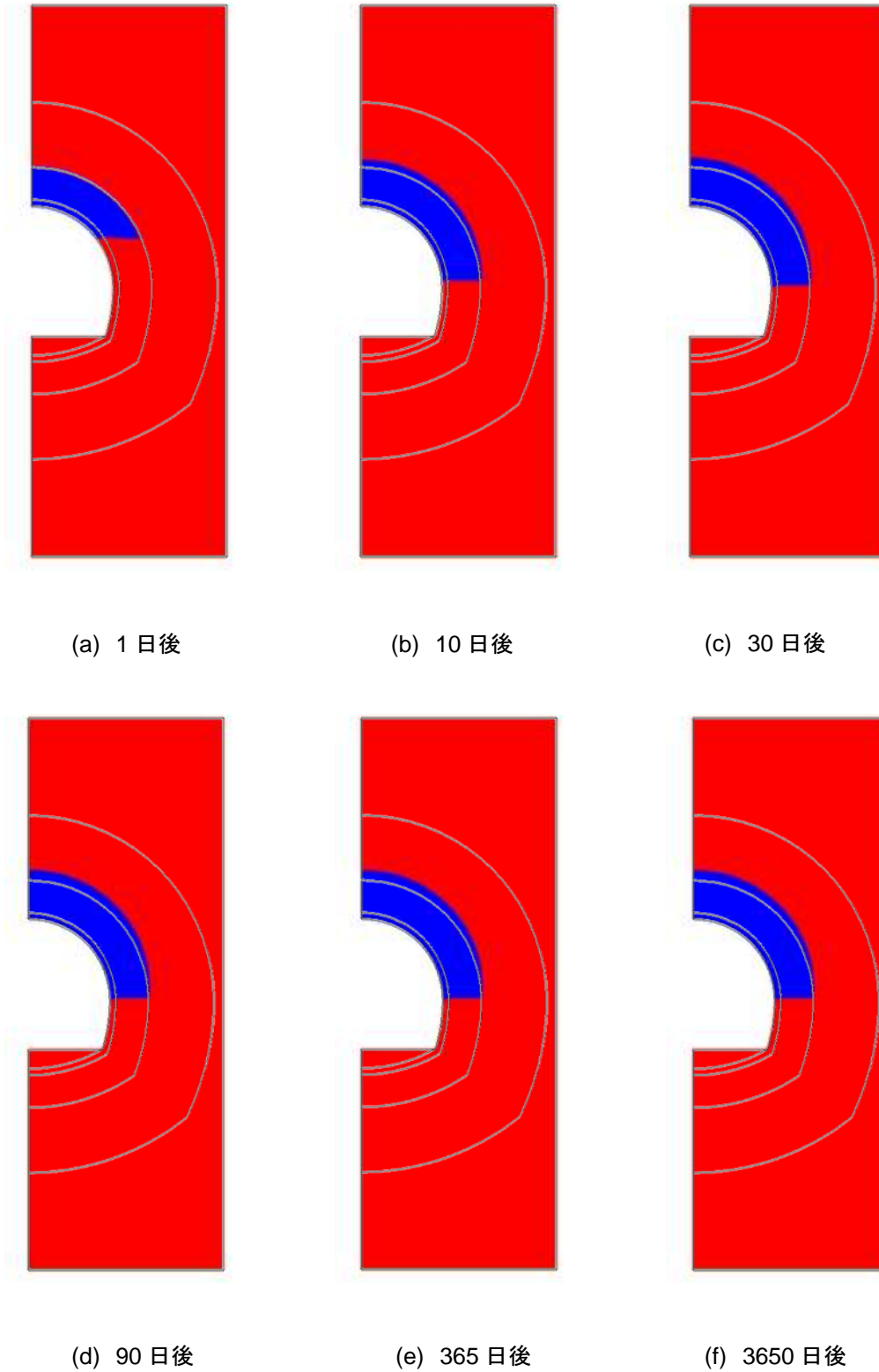
一方、グラウトおよび EDZ を考慮した case10b では、EDZ 領域において不飽和領域が発生し、時間が経過しても不飽和領域の進展は小さい。これより、グラウトによる低透水性層が処分坑道周辺に形成されると、EDZ 部に不飽和領域が発生しても周辺に進展しなくなる効果があると考えられる。よって、グラウトについては湧水量低減効果だけでなく不飽和領域の発生抑制効果を有すると考えられる。グラウト領域の透水性が小さい場合、外側の岩盤内の水頭値は高くなるため、不飽和領域が発生しにくくなると考察できる。

次に、キャップロックを考慮した case11b（EDZ なし、グラウトなし）について、不飽和領域の経時変化図を図 4.2.2-51 に示す。キャップロックが存在しても、掘削直後（1 日後）の処分坑道周辺は飽和状態であるが、10 日後ではキャップロックの下方に不飽和領域が発生している。キャップロックの透水性が小さいため、下向き流動場では上方からの地下水の流動が制限されるため、坑道湧水の影響により、キャップロックの下部に不飽和領域が発生する現象は理解できる。時間の経過とともに不飽和領域は処分坑道と連続するものの、湧水量が安定しなかった要因として、飽和領域と不飽和領域の境界で安定しない結果が得られた。また、パネルスケールモデルではキャップロックを考慮しても不飽和領域は発生しなかった。これらについては、2D 鉛直断面モデルとして対称条件でモデル化を行った影響が想定される。すなわち、2D モデルでは側方からの地下水流動を無視しているが、「パネルスケールモデル」は全体系で解析しているため、2D モデルでは無視しているモデル側方からの流動の影響により、地下水が供給されたため、不飽和領域が発生しなかった可能性がある。すなわち、わずかな地下水のモデル内への流入の有無により、処分坑道周辺の不飽和領域の発生の有無が発生する可能性がある。よって、不飽和領域評価にあたっては、本検討に用いた 2D 鉛直断面での切り出しモデルよりも、できるだけ全体系の流動を考慮できる解析領域、解析モデルの設定が望ましいと考えられる。



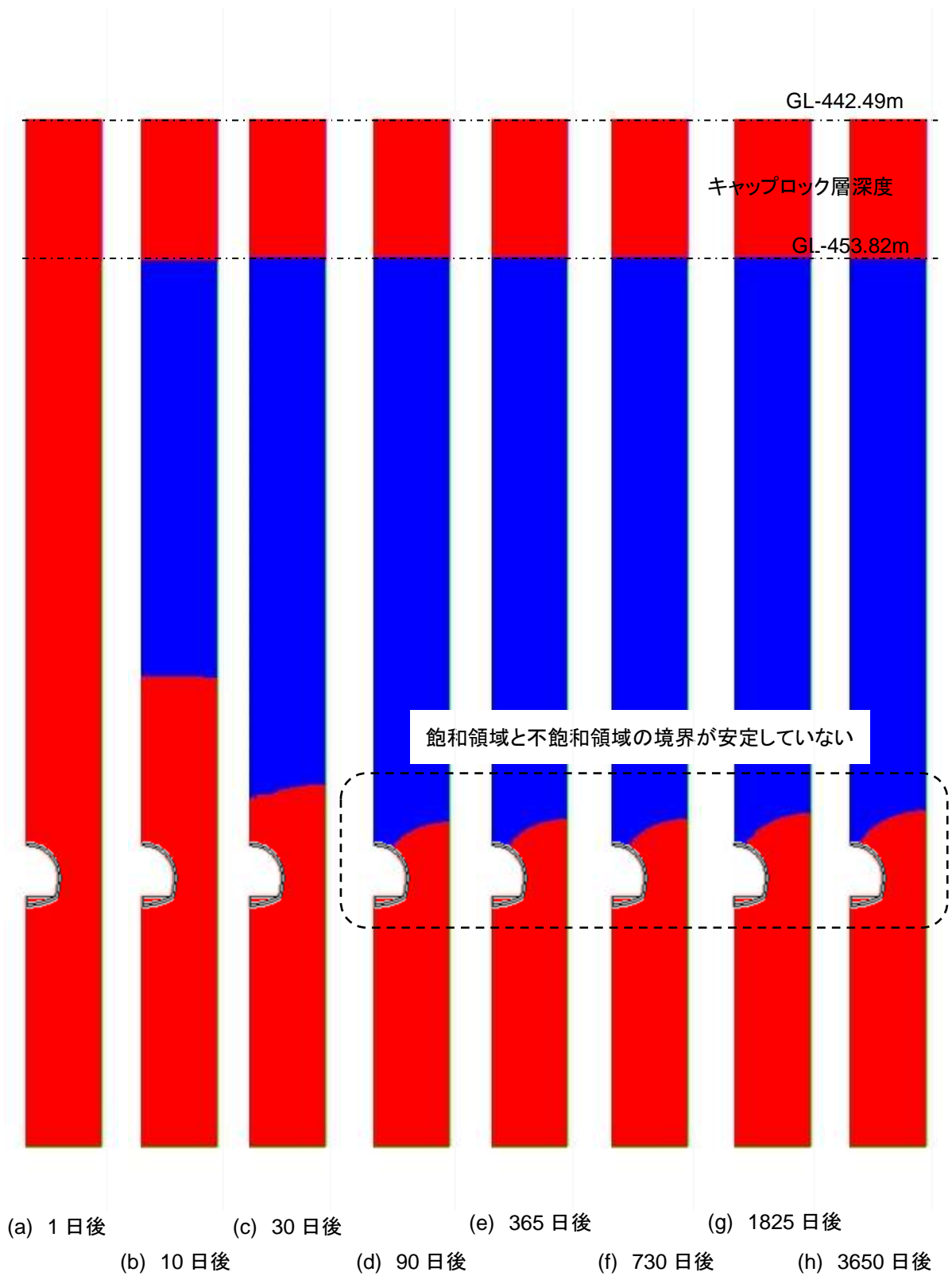
※ 赤色:飽和領域(圧力水頭が正)、青色:不飽和領域(圧力水頭が0及び負)

図 4.2.2-49 EDZ 考慮 (case9b) における不飽和領域の経時変化



※ 赤色: 飽和領域(圧力水頭が正)、青色: 不飽和領域(圧力水頭が0及び負)

図 4.2.2-50 グラウト、EDZ 考慮 (case10b) における不飽和領域の経時変化



※ 赤色: 飽和領域(圧力水頭が正)、青色: 不飽和領域(圧力水頭が0及び負)

図 4.2.2-51 キャップロック考慮 (case11b) における不飽和領域の経時変化

b 飽和・不飽和解析と二相流解析の比較検討

解析手法の比較検討として FDM モデル (TOUGH2) による、地下水に加えて間隙空気の流れも考慮した二相流の 2D 解析を実施した。解析モデルの概要を図 4.2.2-52 に示す。

深度 600m×幅 6m のモデル (図中(a))において GL-500m に処分坑道 (Dead-end-type) を模擬している (図中(b))。モデルの境界条件は、次の通り。

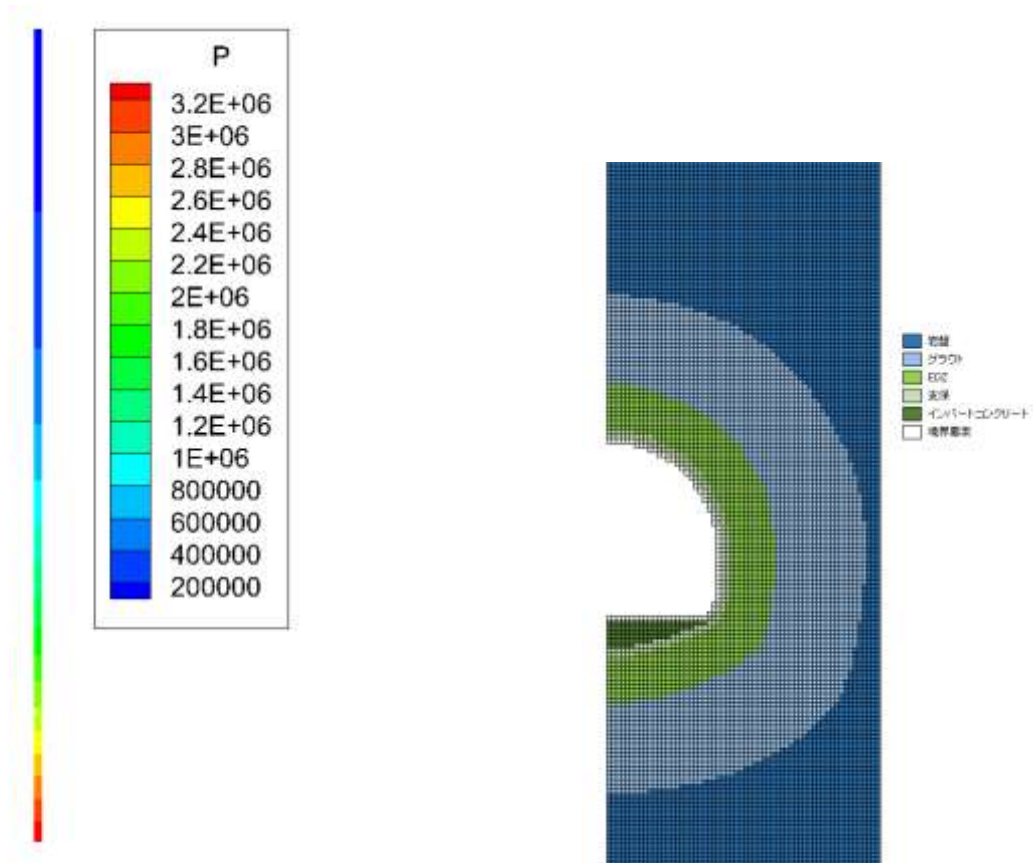
両側境界：不透水境界

上端境界：飽和度 100%の大気圧境界

下端境界：飽和度 100%の圧力境界

空洞壁面：飽和度 0%の大気圧境界

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



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

図 4.2.2-52 解析モデルの概要

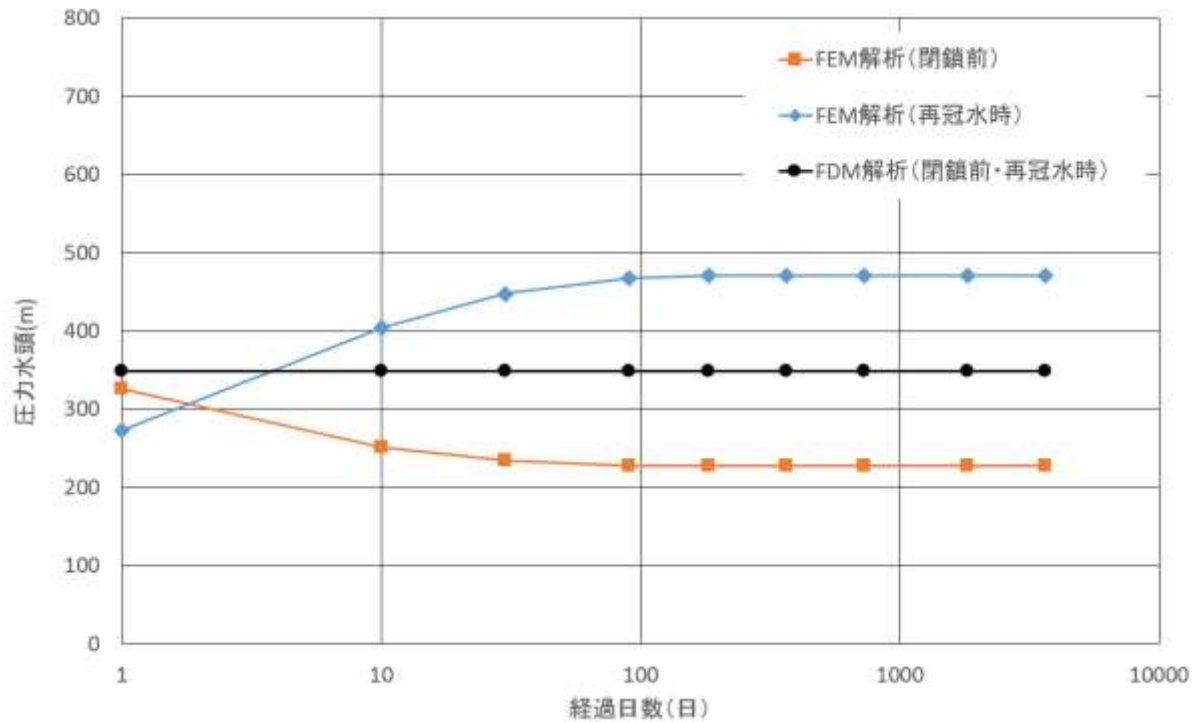


図 4.2.2-53 モデル下端の圧力境界

解析に用いた物性値は、FEM の 2D モデルの設定と同様とした (表 4.2.2-3～

表 4.2.2-4 および図 4.2.2-11～図 4.2.2-14 参照)。FDM による解析ケースを表 4.2.2-15 に示す。このケースは、FEM による解析ケース (表 4.2.2-14 参照) における case5b、case9b、case10b に該当するモデルであり、それぞれのケース名を case5b'、case9b'、case10b' とした。

表 4.2.2-15 FDM による解析ケース

ケース名	処分形態	メッシュ	EDZ	グラウト	キャップロック	手法	備考
case5b'	b: Dead-end-type	2D詳細	なし	なし	なし	FDM	基本ケース
case9b'		2D詳細	あり	なし	なし	FDM	EDZ影響
case10b'		2D詳細	あり	あり	なし	FDM	EDZ影響、グラウト影響

解析結果として、飽和度分布の経時変化の比較を図 4.2.2-55～図 4.2.2-59 に示し、case9b' における単位長さあたりの坑内湧水量を図 4.2.2-60 に示す。

これらの結果から得られた知見は次の通り。

- EDZが存在する場合には、EDZの範囲に不飽和領域が形成される(case9b'、case10b')。
- EDZの外側に低透水のプレグラウトがある場合は、EDZよりも外側へは不飽和領域は広がらない(case10b')。
- 坑道内への湧水量から判断すると、約2年後(730日後)に定常状態となり、単位長さあたりの坑道内湧水量は0.413 (ℓ/min/m) に落ち着く(図 4.2.2-60 参照)。この状態をFEM解析結果(図 4.2.2-54 参照)と比較すると、FEM解析結果では約100日後に定常状態となり、単位長さあたりの坑道内湧水量は0.509 (ℓ/min/m) に落ち着いている。この違いは、間隙空気の流れの影響と考えられる。

以上のように、FEM解析結果とは定性的には同様な結果が得られるが、FDMでは、間隙空気の流れを考慮しているため、FEM解析による評価結果よりも定常状態に落ち着く期間が長くなり、坑道内湧水量は若干小さくなるものと考えられる。

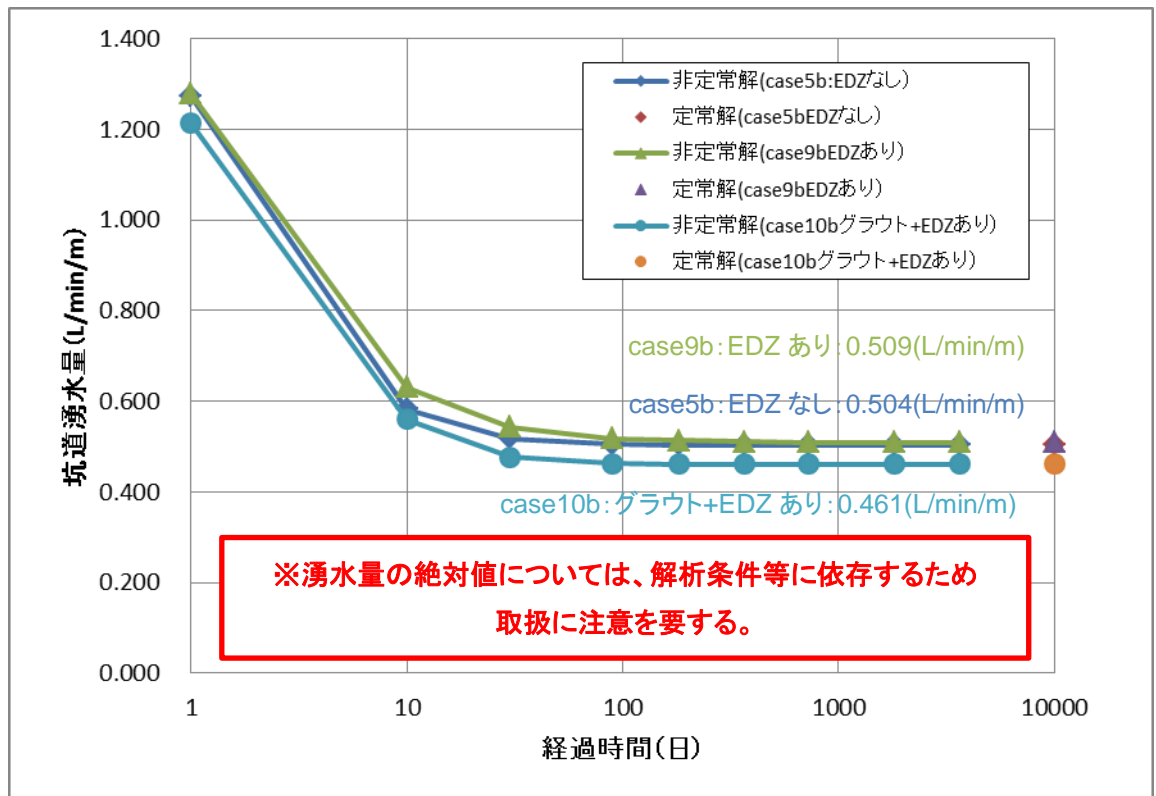


図 4.2.2-54 FEM 解析結果における坑道内湧水量 (図 4.2.2-46 再掲)

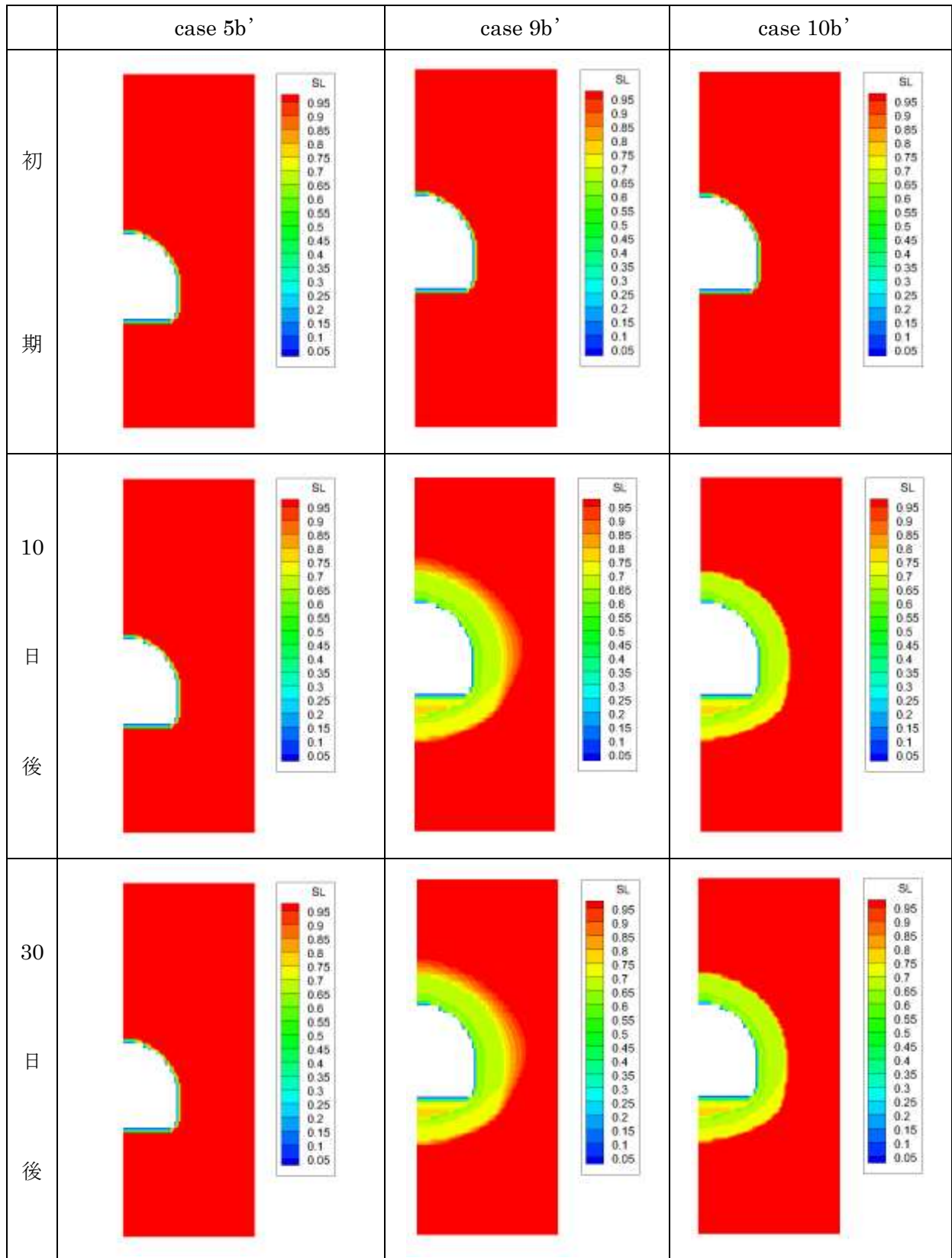


図 4.2.2-55 飽和度分布の比較（閉鎖前：初期～30日後）

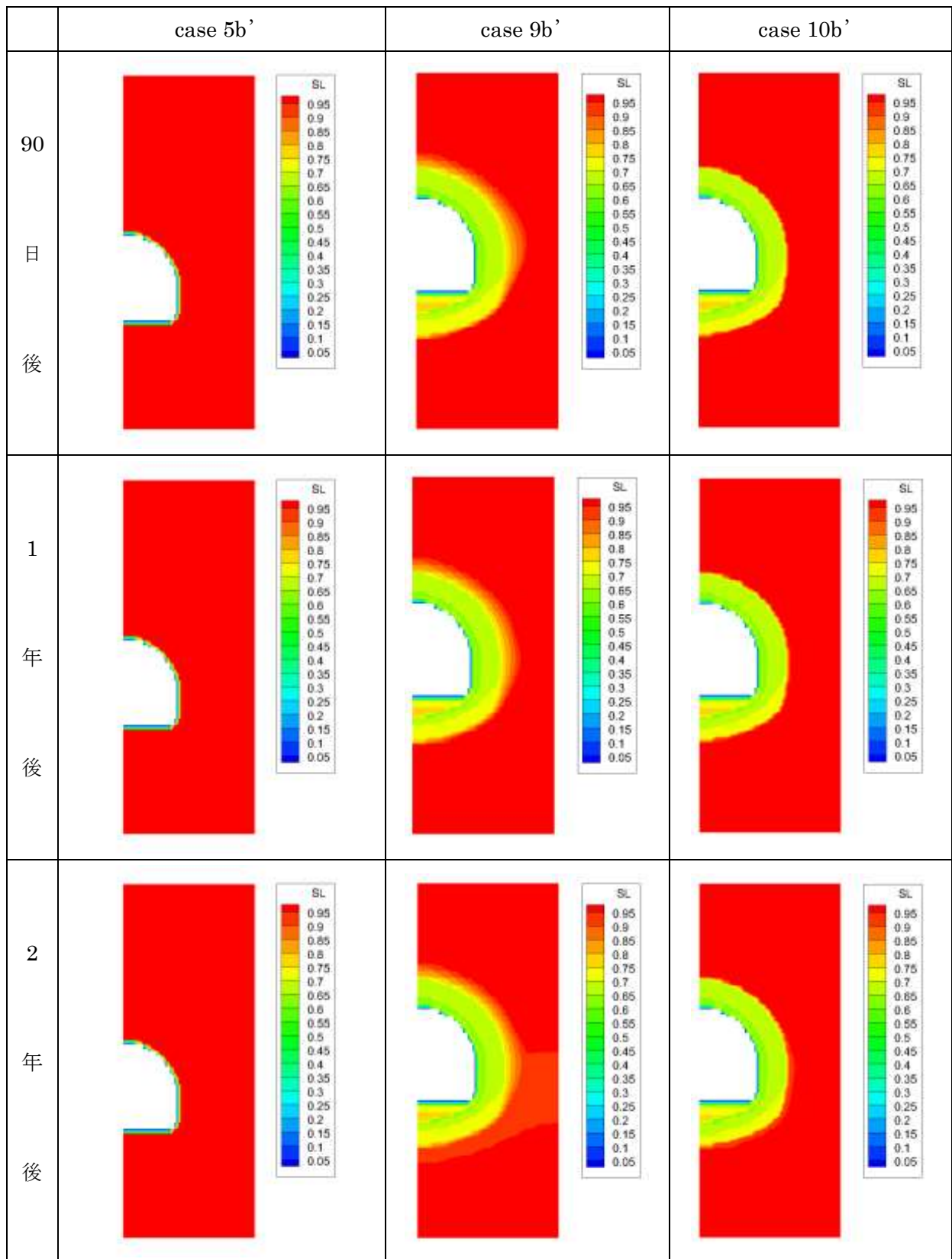


図 4.2.2-56 飽和度分布の比較（閉鎖前：90 日後～2 年後）

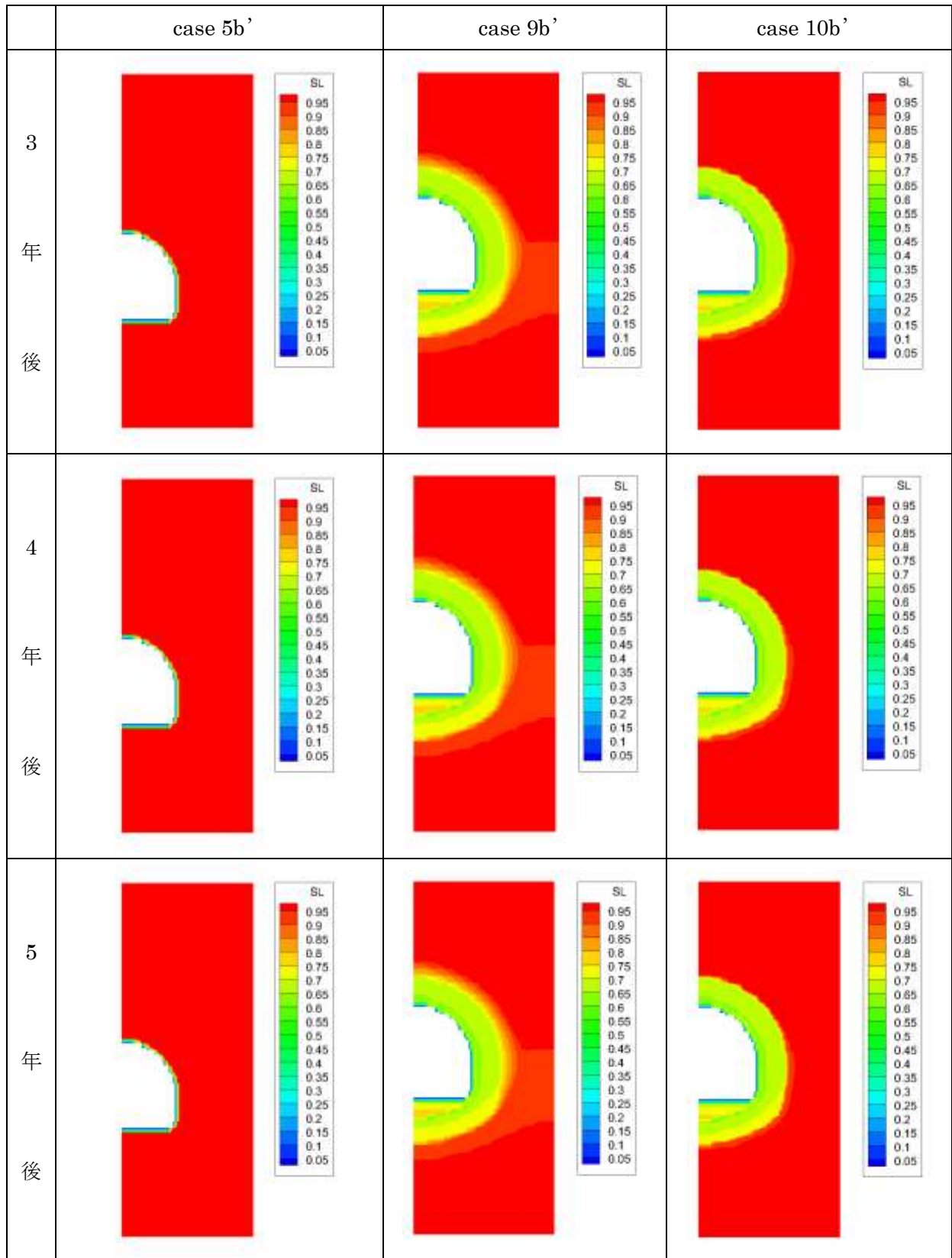


図 4.2.2-57 飽和度分布の比較（閉鎖前：3年後～5年後）

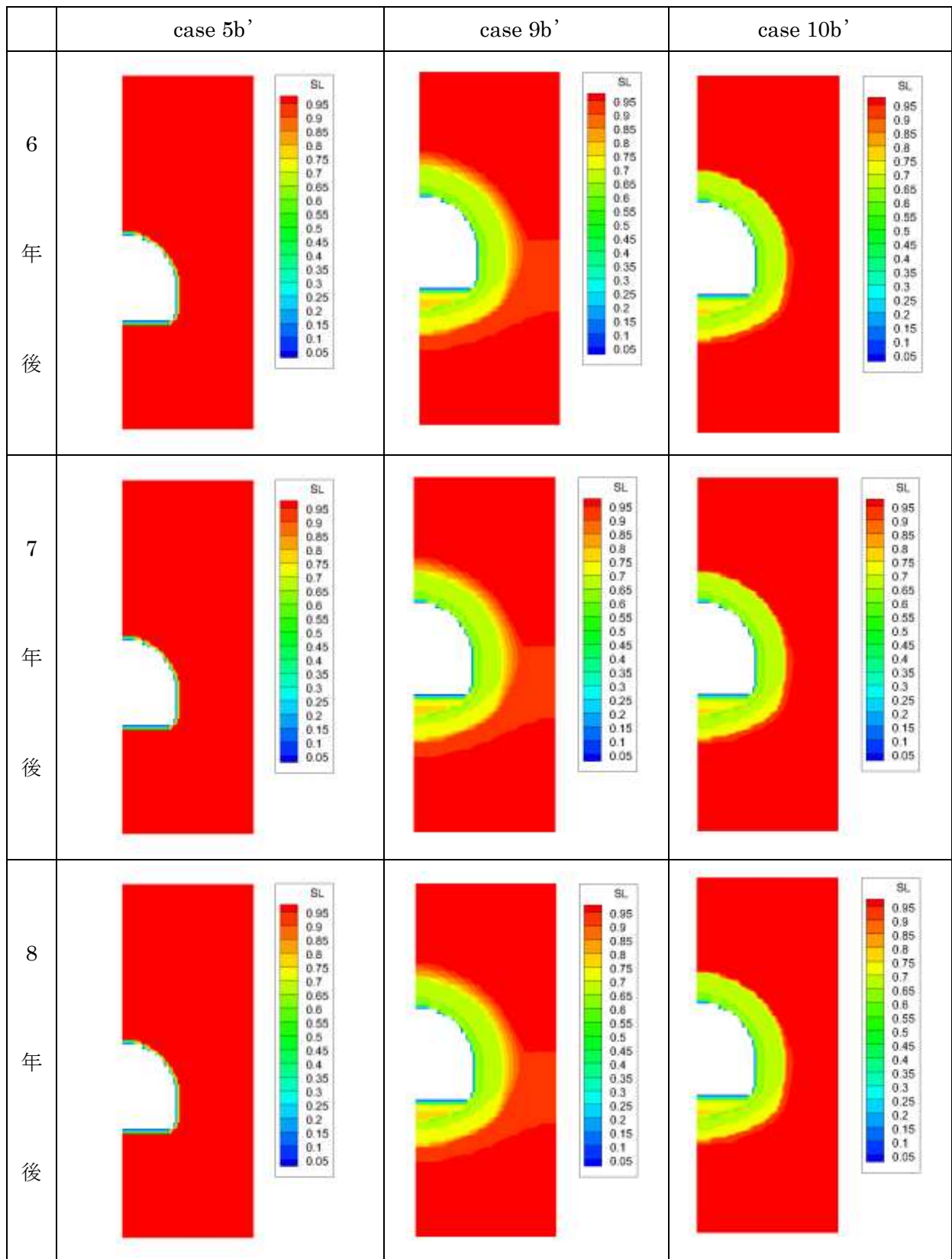


図 4.2.2-58 飽和度分布の比較（閉鎖前：6年後～8年後）

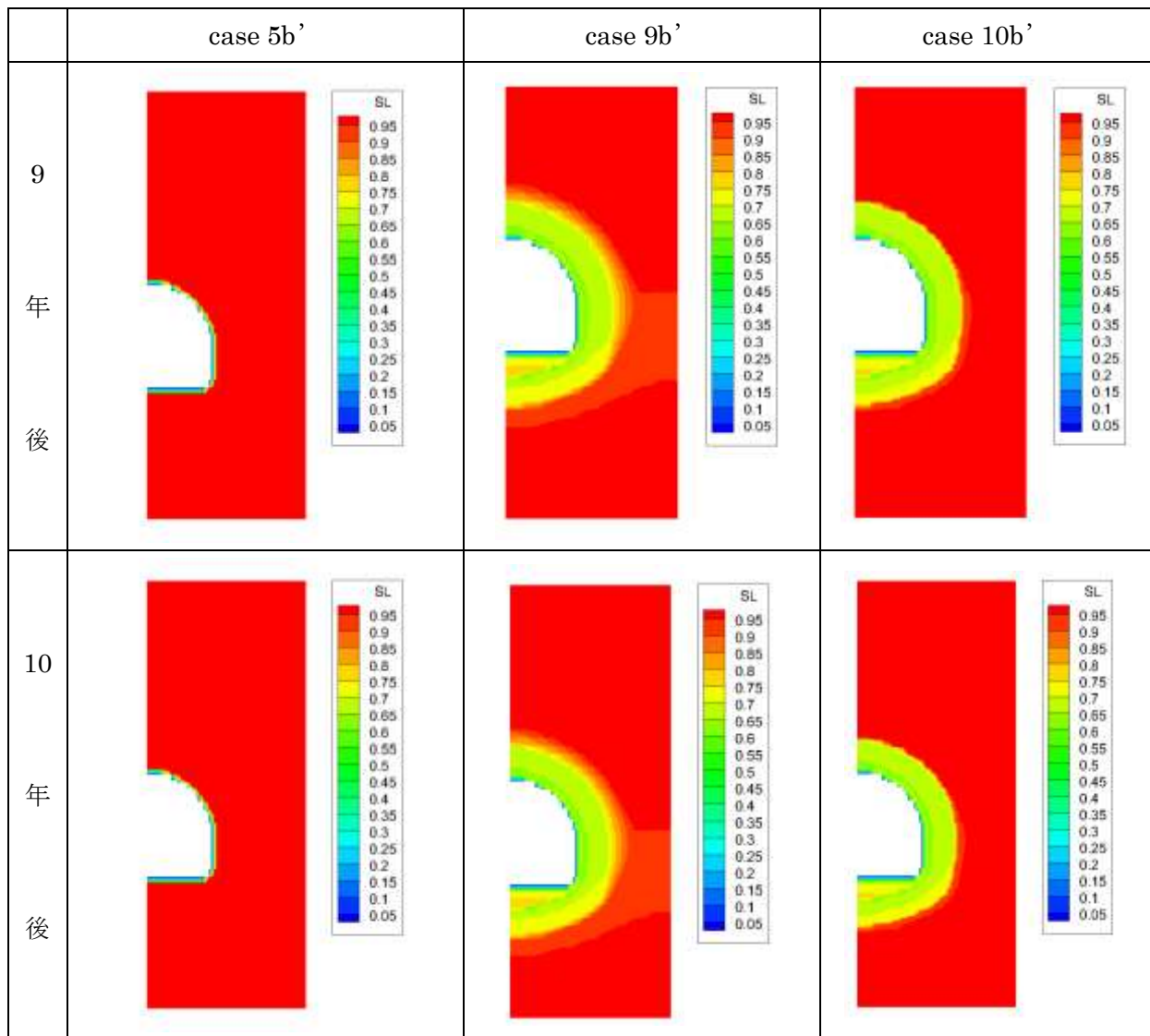


図 4.2.2-59 飽和度分布の比較（閉鎖前：9年後～10年後）

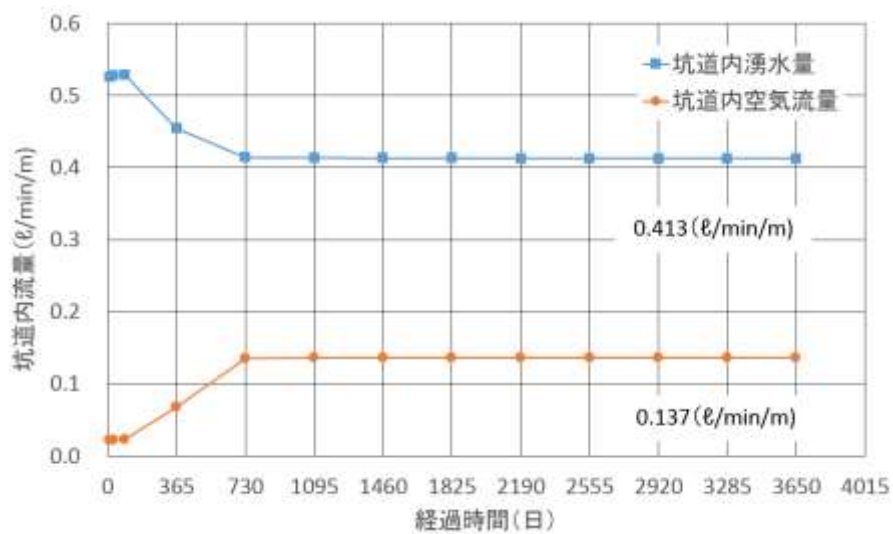


図 4.2.2-60 坑道内湧水量 (case9b')

c 不飽和領域評価に関するまとめ

地下環境での坑道掘削に伴い、湧水現象とともに想定される坑道周辺での不飽和領域の評価にあたって、飽和・不飽和解析手法（FEM系）と二相流解析手法（FDM系）による評価を実施した。本検討結果について以下にまとめる。

【飽和・不飽和解析手法について】

- 飽和・不飽和解析手法を用いて処分坑道詳細モデルによる検討を実施したが、EDZがない場合には、不飽和領域は発生しない結果が得られた。本検討条件は均質岩盤を想定していることから、坑道周辺の透水性が大きくなるEDZを考慮しない場合には不飽和領域が発生しないと考えられる。
- 堅置きタイプの処分形態の場合、EDZがない場合でも処分孔の周辺に不飽和領域が発生する可能性があるものの、処分孔の埋戻に伴い飽和状態へ移行すると予測できる。
- EDZ（岩盤より2オーダー大きい想定）が存在すると、坑道上部に不飽和領域が発生し、その影響が坑道上方へ広がる結果が得られた。ただし、EDZの外側にグラウト領域が存在すると、不飽和領域はEDZ領域内に収まり、周辺へは拡大しない結果が得られた。飽和・不飽和解析では不飽和領域の透水性を飽和領域よりも小さい値で評価することにより、簡易に不飽和領域内の流動を制限する方法であり、厳密な気相の流動やその連続性を考慮していない。今回の不飽和特性を確認すると、負の圧力水頭値（最大約-3.5m程度）の場合、不飽和領域の要素の透水性はほぼ飽和透水性と同じであることがわかったため、本検討で得られた不飽和領域は厳密には不飽和領域とは断定できない。岩盤内の流速を確認しても、地下水の流速が不飽和領域であっても、飽和の場合と変わらないことが分かった。よって、解析の結果として圧力水頭が負になっている見かけの不飽和領域と考えられる。
- 坑道周辺に発生する可能性がある不飽和領域の評価にあたっては、EDZの厚さ、透水性、岩盤の透水性に加えて、不飽和特性曲線の設定により、不飽和領域の評価結果が大きく異なる可能性があるため、感度解析等により影響を確認することが望ましい。
- 飽和・不飽和解析手法を用いた坑道周辺の不飽和領域評価にあたっては、不飽和特性曲線の影響が大きいことが想定されるため、適切な不飽和特性曲線の取得が課題と考えられる。なお、不飽和特性曲線に関しては、二相流解析手法においても重要な入力データとなることから、適切な設定が望ましいことと、特性の違いによる予測結果への影響について把握することが重要と考えられる。

【二相流解析手法について】

- FEM解析モデルとは異なる処分坑道詳細モデルによる検討を実施した。解析手法が異なるため、解析モデル作成、境界条件設定などに制約があり、同一条件での比較が難しいことが明らかとなった。ただし、本検討においては二相流解析手法の場合のメッシュ分割が細かく設定されており、空間の離散化誤差の影響は小さいと言える。また、液相と気相のマスバランスを考慮した解析手法であることから、坑道周辺の不飽和領

域評価手法として適していると考えられる。

- FEM 解析結果と同様に、EDZ がない場合では不飽和領域は発生しない結果が得られた。一方、EDZ を考慮すると EDZ 領域に不飽和領域が発生するものの、坑道下部の EDZ 領域までも不飽和領域となった。坑道湧水は主にインバート部から発生すると考えられ、インバート部は飽和状態である可能性が高いため、実現象と比較すると二相流解析結果は矛盾している可能性が考えられる。
- EDZ の外側にグラウトが存在する場合、EDZ 領域が不飽和領域となる傾向は FEM と同じであるが、上述のように坑道底部が不飽和領域となる結果が得られた。
- 二相流解析においても、不飽和特性曲線を用いているため、解析に用いた物性の影響が大きいことが予測される。FEM 解析と同様に不飽和領域の発生に影響する要因について感度解析を実施すること重要と考えられる。
- 本検討では、処分坑道内の温度は一定条件で検討を実施しているが、廃棄体からの熱影響なども不飽和領域評価に対して影響することが推定される。

【今後の課題について】

- 本検討により、今後実施する化学的影響評価への水理学的な条件を提示するための評価手法を選定する予定であったが、現状では解析手法の絞り込みを行うことは難しいと考えられる。
- 不飽和領域の評価手法として、パラメータ設定の影響等の感度解析を実施するとともに、より適切な解析手法、解析条件の設定について検討を継続する必要がある。
- 解析手法の検証するためには、実測データや実験データについても取得する必要がある。入力パラメータとなるデータのみでなく、解析手法やモデル化の妥当性を確認するための検証データの取得についても検討する必要がある。

3) 作業環境の安全性確保のための技術検討

建設、操業および回収可能性維持期間中の作業環境の安全性確保の観点から、坑道湧水量の定量化結果を踏まえて必要な技術について検討を実施する。

検討対象としては、湧水量低減対策技術、処分坑道の水没リスク低減対策技術、不飽和領域の発生要因、発生低減技術を取り上げた。本検討では各対策方法として想定される技術のピックアップを行うこととし、具体的な対策の選定については、今後の総合的な評価に任せることとする。

a 湧水量低減対策技術の検討

地下施設掘削に伴う湧水量は、建設、操業、回収維持期間を通じて発生するため、適切な湧水処理を行う必要がある。基本的に湧水を汲み上げ、地上で処理した後に環境基準を満足する状態で放流される。このため、揚水設備や処理設備の容量は湧水量の予測に基づき設計される。できるだけ湧水量が小さい方が、揚水設備や処理設備の容量を小さくすることができるため有利となる。また、地下水の湧水量が少ない方が周辺地下水流動への影響を低減することができるため、地下水環境維持の観点からも有利と言える。

一方、一般的なトンネル構造では力学的な安定性の観点から支保工に地下水圧が作用しない条件、すなわち湧水を排水する条件で設計されており、施工時の湧水対策等においてグラウト注入等が実施されるものの、基本的には支保部材への水圧を低減する方法が採用される場合が多い。近年では環境維持のために水密トンネルなども設計されているが、一般的ではない。

ここでは、HLW 処分事業における現状の地下施設の設計を考慮し、現実的な湧水量の低減対策について以下に提案する。

(a) グラウト注入工

本検討では地下施設掘削時の湧水量を定量化するため、地下水流動解析手法を用いた検討を行い、湧水量の定量化が可能であることを示した。検討条件として周辺岩盤は均質条件として検討を行い、止水用のグラウトの透水性も岩盤よりも 1 オーダー小さい透水性を設定したため、湧水量の低減効果については約 10%減少する程度であったが、グラウト注入による処分坑道周辺の透水性の改善（低透水性への改良）は湧水量の低減対策工として有力である。グラウトによる湧水量の低減効果に関しては、岩盤の不均質性を考慮した検討などを行うことが望ましく、別途実施している事業の検討成果を考慮することが望ましい。

(b) 湧水の再注入工

湧水の処理水量を低減するための対策としては、処分坑道等からの湧水量を再度地下に注入する方法が想定される。処分坑道上部に注水坑道や注水ボーリングを掘削し、湧水を岩盤中に注水する方法である。水封式岩盤内石油備蓄タンク等において水封トンネル、水封ボーリングとして施工されている例がある方法であり、地下施設からの地下水の全体くみ上げ量を低減することができれば、周辺地下水環境への影響を低減する効果も期待できる。ただし、注水ボーリングから注水することにより、処分坑道周辺の地下水圧が上昇するため、処分坑道からの湧水量は増える可能性が高い。注水量と差し引くことによって全体の湧水量が低減できるか否かの検討が必要で

ある。

一方、回収維持期間が長くなると、注水坑道、注水ボーリングでの目詰まりによる注水効率の低下が発生する可能性もあり、処分坑道等のみでなく別途注水坑道、注水ボーリングの維持管理が必要となることに留意する必要がある。

具体的には、サイトスペシフィックな影響を受けると考えられるため、サイト条件を考慮した検討により採否を検討する必要があると思われる。

b 処分坑道の水没リスク低減対策技術の検討

地下施設からの湧水を適切にくみ上げなければ、地下施設は水没する可能性がある。水没リスクは湧水量、揚水設備容量、バッファ設備容量、処理設備容量等の維持管理に依存すると考えられる。地下施設の水没リスクに関しては別事業において検討されているが、ここでは、HLW 処分事業における現状の地下施設の設計を考慮し、水没リスク低減のための技術や設計上の注意事項について整理する。

(a) 湧水量の低減技術およびモニタリング技術

前述の湧水量の低減技術により地下施設からの全体湧水量を低減することは重要である。また、操業中あるいは回収維持期間中の突発湧水に対応するため、地山の変状、湧水量の変動等をモニタリングすることが重要と考えられる。よって、建設期間中のみでなく、操業および回収維持期間中のモニタリング項目、方法についての検討が必要となる。

(b) 揚水設備の適切な設計

湧水量の予測結果に基づき揚水設備の設計が行われるが、設備の維持管理方法を含めた設計検討が必要と考えられる。

本検討の結果得られた湧水量の定量化結果（パネルスケールモデル、Dead-end-type、case1b：廃棄体 1,250 本あたり約 10,000t/day、）を考慮すると、HLW 廃棄体 4 万本に対する地下施設からの定常湧水量の概略値は、約 32 倍の 320,000t/day（約 222t/min）であり、大量の揚水が可能な設備を設計しなければならないことがわかる。通常は上記の湧水量の予測値に対して、安全率（3 倍程度）を掛けて設計することに注意する必要がある。

これらを踏まえ、揚水設備設計時の注意事項について以下に列挙する。

- ・ 揚水設備の複数個所の設置（リスクの分散）

広大な地下施設からの湧水量を、1 か所から揚水することは非現実的である。揚水箇所を複数設定することは、アクセス坑道を複数建設することになるため、アクセス坑道との関係を含めた設計が必要となる。

- ・ 1 か所あたり最低 2 系統の設備設計（事故時対応リスクの低減）

設備の故障などトラブル発生時の対応を考慮すると、最低限でも 2 系統の揚水設備を設計することが望ましい。安全率が 3 倍の場合、3 系統とする考え方もある。定期的な維持管理計画と合わせた設備設計を行う必要がある。

- ・ 地下におけるバッファ設備の設計（事故時対応リスクの低減）

長期間の電源喪失リスクに関しては、非常用電源の準備などによりリスクの回避が可能と考えられるものの、設備の故障などトラブル発生時の対応を考慮すると、地下に湧水の貯留トンネルなどのバッファ設備を準備しておくことが望ましいと考えられる。

(c) 処理設備、バッファ設備の適切な設計

建設時に発生する湧水は濁水となる場合が多く、湧水処理設備として濁水処理設備が必要となる。また、サイトスペシフィックな特性であるが、地下水中にはそのまま放流できない排水基準を上回る成分（ホウ素やフッ素など）が存在する場合は想定され、必要に応じて除去処理設備を必要とする場合があることに注意しなければならない。

なお、これらの設備に関しては、定常（恒常）湧水量に伴い容量を変更することが可能であるため、建設、操業、回収維持期間中の湧水量のモニタリング結果に基づき適宜修正することが望ましい。

また、地下のバッファ設備と同様に地上にも揚水した地下水のバッファ設備を準備することが望ましいと考えられる。

c 不飽和領域の発生要因、発生低減技術の検討

本検討の結果、不飽和領域の発生に関しては、評価手法の違いによらず EDZ 等の高透水性部の存在が要因となることがわかった。

本検討では、岩盤は均質条件としており、処分坑道周辺の透水性の違いは EDZ やグラウトによるものであるが、岩盤の透水性の不均質性によっても、不飽和領域発生の要因となることが推定される。岩盤の不均質性、EDZ の範囲、透水性により不飽和領域の評価結果が異なる可能性がある。一方、湧水量の低減対策に想定されるグラウトは、不飽和領域の範囲を低減させる効果があると考えられ、グラウト注入工により岩盤の不均質性の影響による不飽和領域の発生についても低減効果が期待できる。

土被りが 500m 以上の坑道掘削においては EDZ が発生する可能性が高いため、処分坑道掘削による EDZ の影響による不飽和領域が発生することが推定される。化学的な影響を低減させるためには、不飽和領域を限定することが望ましく、そのためにはグラウトによる岩盤の低透水性化が有効と考えられる。

(a) グラウト注入工による低透水性ゾーンの構築

地下施設建設にあたり、掘削時の EDZ の発生は、掘削工法や力学的な応力分布の変化の観点から避けることは難しい。本検討の結果によると、グラウトによる透水性の改善を行うことにより、処分坑道周辺の不飽和領域の発生を EDZ 領域のみに限定することができる可能性が示された。グラウト注入に関しては、湧水量の低減効果のみでなく、不飽和領域の進展を低減する効果が期待できると考えられる。

不飽和領域の発生に伴う地化学的な影響を今後実施する必要があるが、不飽和領域の発生を低減することにより、岩盤の地化学的劣化を低減することができれば、力学的な安定性のみでなく、

長期的な天然バリア性能の維持に期待することができるため、グラウト注入工は有効であると考えられる。

(b) 処分坑道の埋戻しによる回収維持期間の管理

本検討の結果からは、処分坑道の埋戻しにより比較的短期間に再冠水され、不飽和領域を低減できる可能性が示された。本検討条件は岩盤条件が均質であり、不均質条件での検討や、水理学的な湧水による岩盤内の鉱物成分、支保工成分の流出についての地化学的な検討などが必要であるが、処分坑道を埋め戻した状態で管理することにより、長期的な不飽和領域の発生による影響を低減できることは明らかであると考えられる。

(c) 地下水注入工による不飽和領域の低減

不飽和領域の発生を低減する対策としては、水封ボーリングのような地下水注入工による方法が想定されるものの、設計手法や効果の確認方法などについて今後検討する必要がある。

(3) 閉鎖後の長期安定性に関する影響評価

ここでは、「4.2.2(1) 水理学的影響の評価方法の検討」に示した検討方法に基づき処分坑道閉鎖後の地下水流動解析により、閉鎖後の長期安定性に関して、処分坑道の飽和過程に着目した評価と、ベントナイト流出評価に資するための坑道湧水量に関する検討を実施する。

1) 再冠水時間による評価

水理学的に閉鎖後長期の安全性に影響がある場合とは、安全評価の前提となる閉鎖後 1,000 年の段階で人工バリア、天然バリアの初期状態（飽和状態）が維持されていない場合であると考えられる。そこで、回収可能性維持期間を想定した地下水流動解析結果を初期値とし、閉鎖後の再冠水挙動に関する非定常地下水流動解析により、処分場の再冠水時間の把握を行う。

ここでは、再冠水時間に対する評価として、パネルスケールモデルおよび処分坑道詳細モデルによる検討を実施する。また、解析手法についても飽和・不飽和解析手法（FEM）および二相流解析手法（FDM）を用いることとした。

a 3D パネルスケールモデルによる検討

まず、処分場全体に対する再冠水時間の把握と処分形態の違い（Through-type と Dead-end-type）の比較に着目したパネルスケールモデルによる地下水流動解析結果について以下に示す。

(a) 検討ケースの設定

パネルスケールモデルによる地下水流動解析ケース（全3ケース）について表 4.2.2-16 に示す。掘削解析では岩盤中の不飽和領域は発生しなかったため、本検討は埋戻し材の再冠水に対する解析となるものの、処分形態の違いやグラウト影響による再冠水過程の違いを把握するためパネルスケールモデルによる検討を実施した。キャップロックを考慮した掘削解析の場合も岩盤中の不飽和領域は発生しなかったため、ここでは再冠水検討の対象から除外した。なお、解析手法については飽和・不飽和解析手法を用いた。

埋戻し土内の初期条件（水頭値の設定）については、初期飽和度（0.567）から不飽和特性曲線に基づき算出される圧力水頭（-73.625m）を埋戻し土内部の節点の初期水頭値として与えることとした。この場合、掘削解析の場合と比較して細かい時間ステップでの非定常解析が必要であることがわかった。非定常解析の時間ステップを確認した結果、掘削解析では初期の計算時間ステップは $\Delta t=0.1$ 日程度で収束解が得られたが、再冠水解析の場合は $\Delta t=0.05$ 日にしなければ収束解が得られず、約 2 倍の計算負荷を予測したが、実際には定常状態に近づいても時間ステップを大きくすることができず、大幅な計算時間が必要となった。

再冠水解析の場合、埋戻し土の初期圧力水頭が小さいため解析時間ステップを細かくしなければ収束解が得にくいことがわかった。

表 4.2.2-16 再冠水評価のためのパネルスケールモデルによる解析ケース

ケース名	処分形態	解析モデル	グラウト	キャップロック	手法	備考
case16b	a:Through type b:Dead-end-type	3Dパネル	なし	なし	飽和・不飽和 FEM	基本ケース
case16a		3Dパネル	なし	なし	飽和・不飽和 FEM	処分形態の比較
case17b		3Dパネル	あり	なし	飽和・不飽和 FEM	グラウトの効果

(b) 再冠水評価のための非定常解析結果

解析条件としては、処分坑道のみ閉鎖（埋戻）された状態を想定し、連絡坑道の閉鎖は考慮していない。実際の閉鎖はアクセス坑道等の埋戻を想定するが、本検討では処分坑道の埋戻後を想定した再冠水解析を実施した。連絡坑道を閉鎖すると、さらに地下水圧が回復するため、再冠水時間は短くなることが予測される。

当初は圧力水頭によって不飽和領域の経時変化を表現する予定であったが、圧力水頭は閉鎖後短時間（数日程度）で飽和（圧力水頭が正）となる結果が得られたことから、再冠水の再現については飽和後の動水勾配（全水頭分布）の経時変化により判断することとした。パネルスケールモデルではメッシュが粗く、図 4.2.2-61 に示すように埋戻土内部の節点が坑道 1 本あたり 2 点しかないため、飽和・不飽和解析手法では坑道埋戻部の要素の飽和度が短時間に不飽和に達するためであると考えられる。この影響に関しては、別途、処分坑道詳細モデルによる解析によりメッシュ分割影響について確認する。

3 ケース解析結果として、鉛直断面での処分坑道周辺の全水頭分布の経時変化を図 4.2.2-62～図 4.2.2-64 に示す。

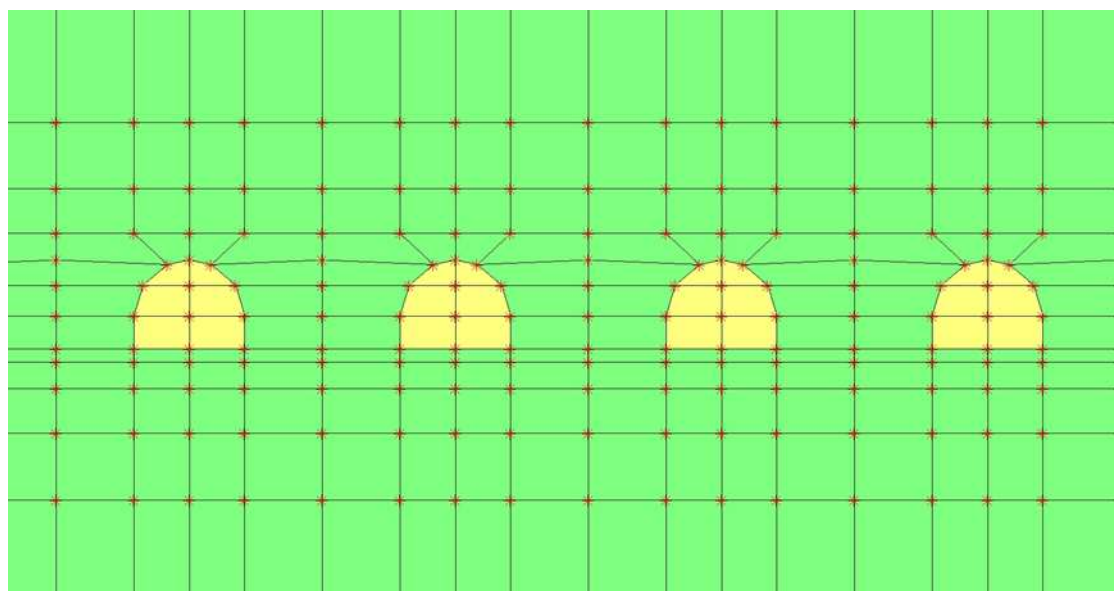


図 4.2.2-61 パネルスケールモデルでの坑道周辺のメッシュ分割

case16b (Dead-end-type)、case16a (Through-type) とともに処分坑道周辺の全水頭分布については約半年から 1 年程度で定常状態となり、埋戻土内部に関しては、周辺の全水頭分布と一致するには約 2 年以上 10 年未満程度の期間となった。この結果から、連絡坑道を閉鎖してもほぼ同程度の期間で再冠水が行われ、周辺岩盤と同じ水圧分布に回復すると考えられる。よって、本検討条件では処分坑道の水理学的な再冠水時間については、1,000 年よりも十分短時間で回復する結果が得られたものの、サイトスペシフィックな条件を考慮した解析の場合、地下水位の回復などの影響が想定され、本検討結果よりも再冠水時間が長くなる可能性を否定できないことに注意する必要がある。また、本検討条件では再冠水時間の観点からは処分形態の違いによる明確な優劣は得られなかった。ただし、処分形態の違いについては、Dead-end-type (case16b) の方が処分孔周辺の全水頭は高くなっており、周辺の連絡坑道が残っている Through-type (case16a) は処分坑道周辺の全水頭が低いことがわかる。これより、周辺地下水に対して閉鎖後の再冠水を考慮すると、Dead-end-type の方が周辺地下水に対する影響が小さく、地下水環境に対しては有効と考えることができる。

グラウトを考慮した case17b については、処分坑道の周辺の透水性が小さいことによる影響により埋戻土の再冠水に時間が掛かることが予想されたが、グラウトの有無と再冠水時間については大きな違いは認められなかった。

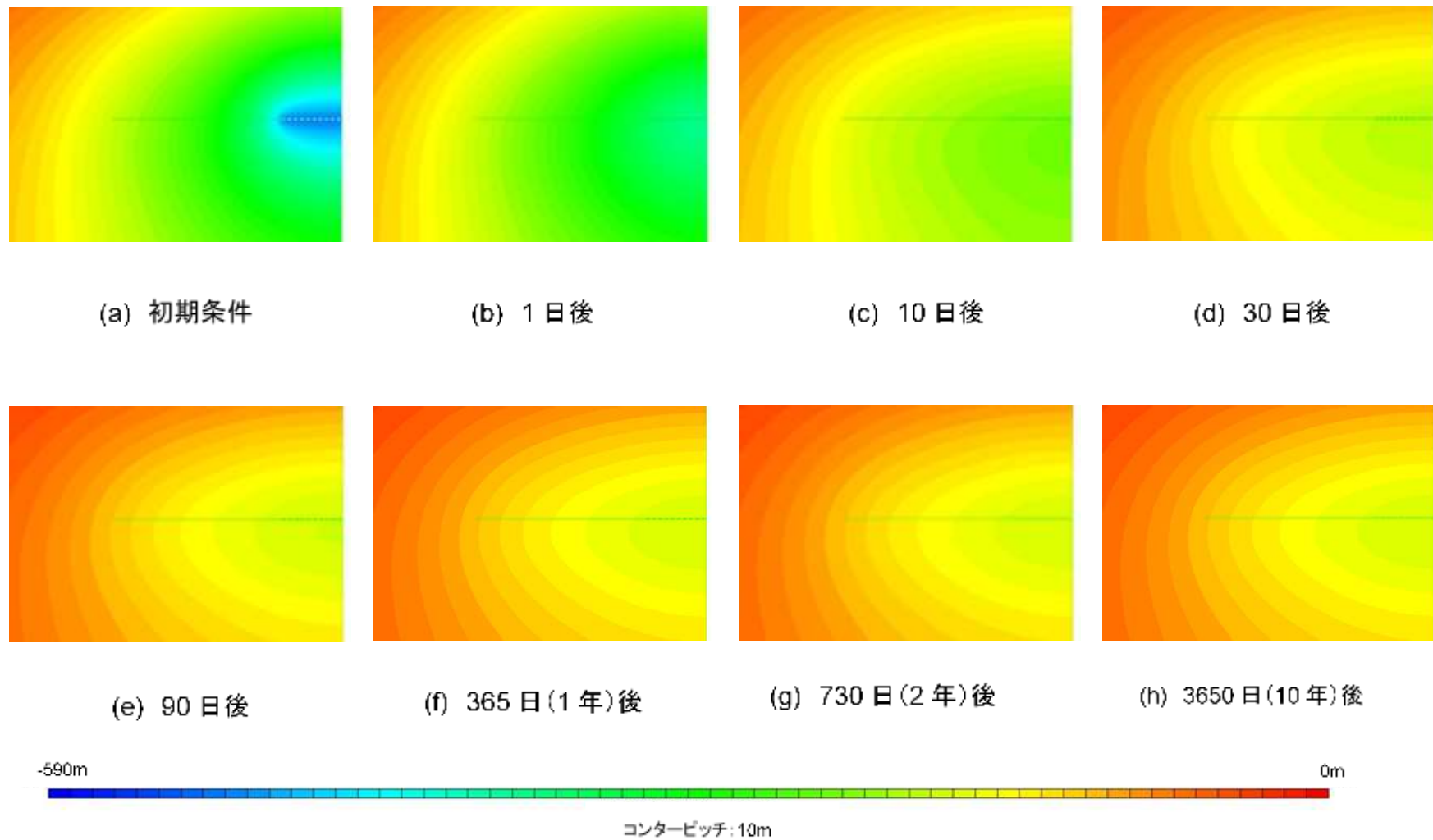


図 4.2.2-62 処分坑道再冠水時の全水頭分布の経時変化 (case16b : Dead-end-type)

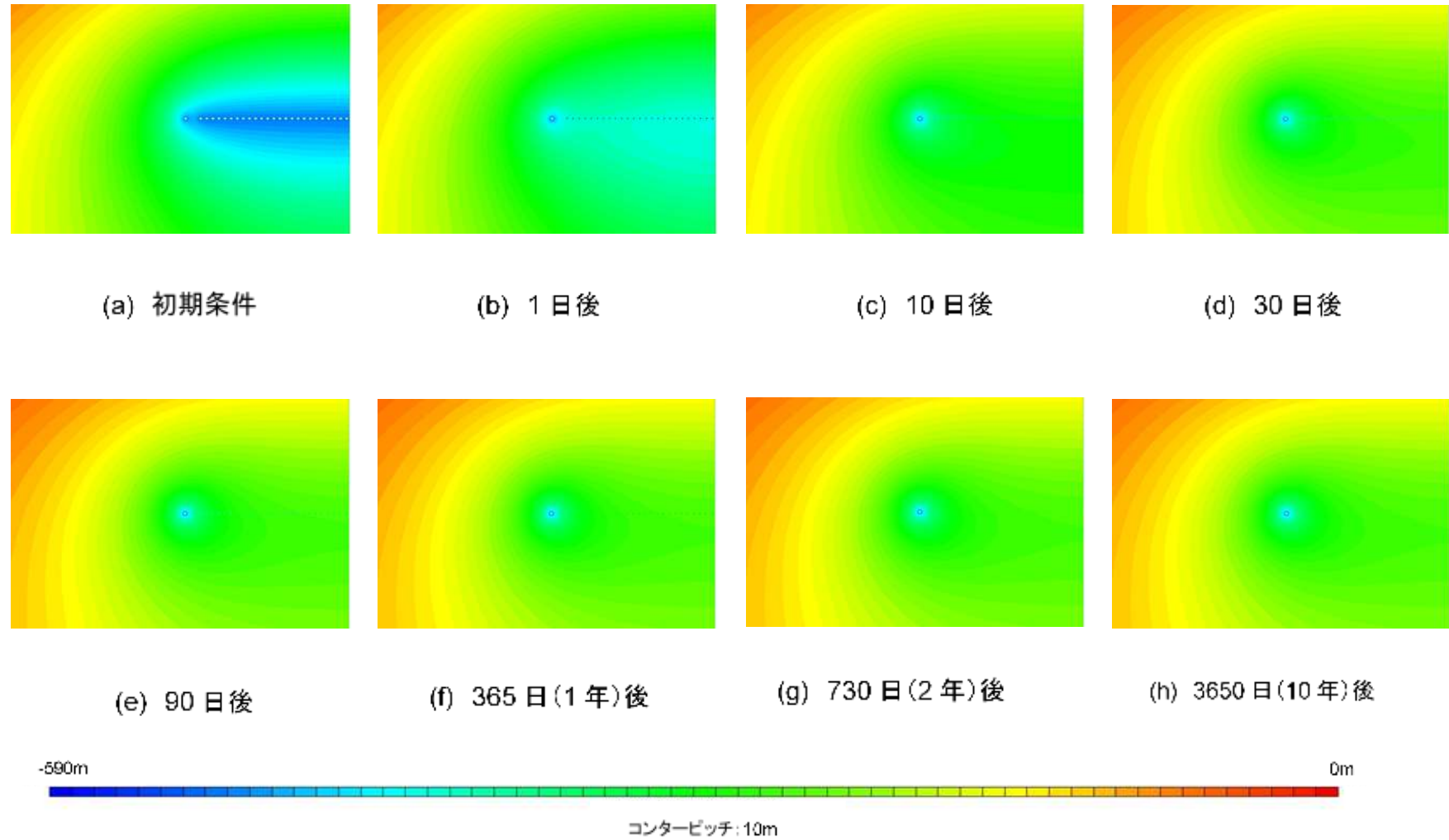


図 4.2.2-63 処分坑道再冠水時の全水頭分布の経時変化 (case16a : Through-type)

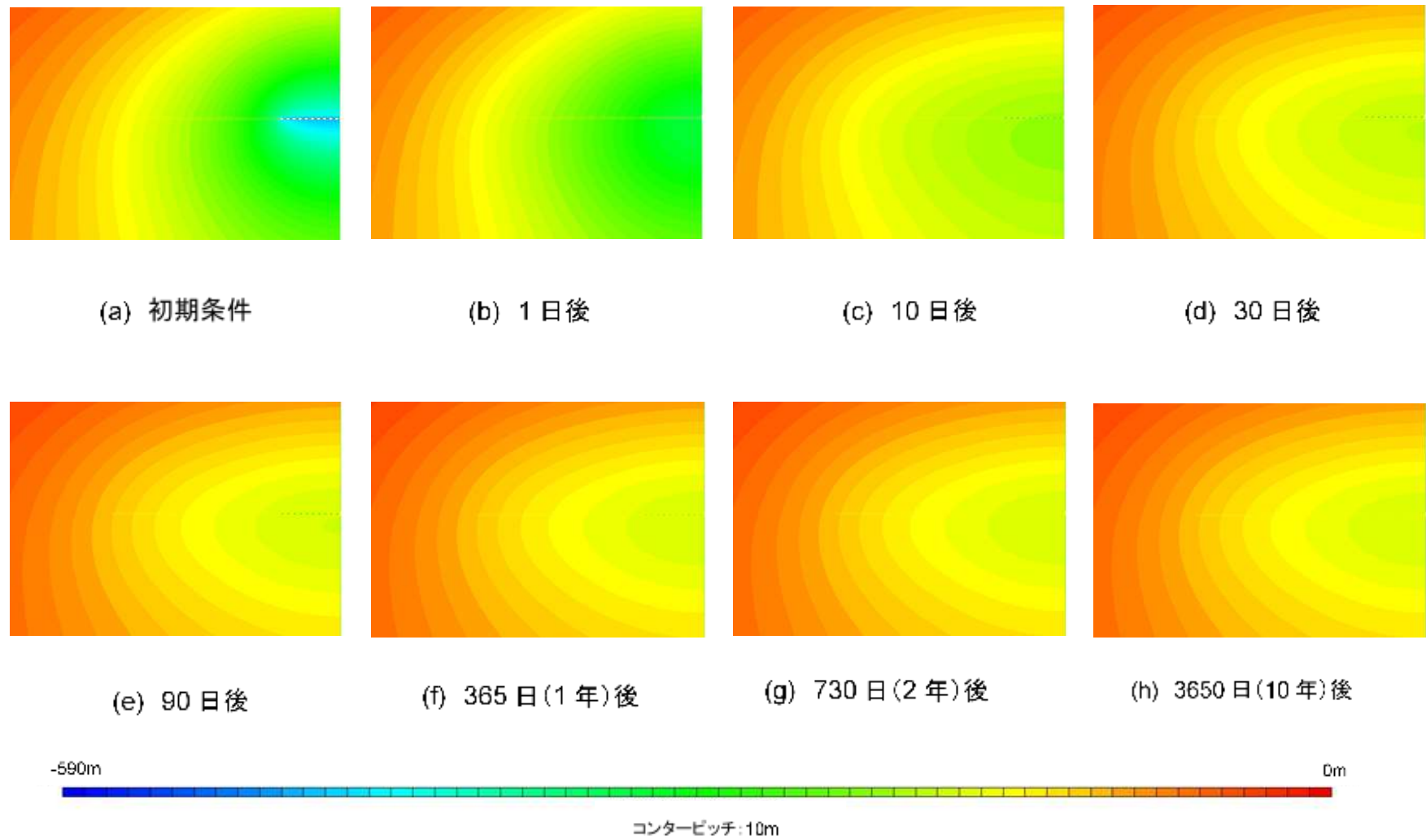


図 4.2.2-64 処分坑道再冠水時の全水頭分布の経時変化 (case17b : Dead-end-type)

(c) パネルスケールモデルによる検討結果のまとめ

再冠水現象を評価するために実施したパネルスケールモデルによる検討結果について以下にまとめる。

【評価手法について】

- ・ 本検討条件では処分坑道周辺において掘削時の不飽和領域が発生していなかったため、結果的には周辺岩盤内の不飽和領域に対する再冠水現象については評価できなかった。
- ・ 本検討の再冠水の対象は、処分坑道内部の埋戻土に対する評価のみであることに注意する必要がある。
- ・ 再冠水の評価にあたって、当初は飽和度の変化に対する経時変化を想定したが、不飽和から飽和（圧力水頭が負から正）への変化は非常に短時間（数日オーダー）であったため、飽和後の全水頭分布の経時変化から再冠水現象を評価することとした。これは飽和・不飽和解析手法を用いていることが要因とも想定されることから、別途実施する二相流解析手法による検討と合わせて検討する必要がある。

【再冠水時間について】

- ・ 本検討条件では評価対象が埋戻土のみであるが、再冠水については掘削時と同様にほぼ10年程度で飽和（ここでは埋戻土中の全水頭分布が周辺岩盤と同じになる時間として評価）する結果であり、安全評価の前提となる1,000年に対しては十分短い結果が得られた。
- ・ 本検討条件での再冠水時間は比較的短時間となる結果が得られたが、掘削時の地下水位の低下や、埋戻後の地下水位の回復などを伴う条件では再冠水時間は長くなる可能性があるため、本検討結果は一例として考慮する必要がある。
- ・ 本検討条件での解析結果については、処分坑道の埋戻後の再冠水に対する促進対策は必要ない結果と言えるものの、二相流解析手法による予測結果と合わせて検討する必要がある。

b 2D 処分坑道詳細モデルによる検討

処分形態としては横置き PEM 方式、Dead-end-type を想定した 2D 処分坑道詳細モデルを用いて再冠水時間の把握と処分坑道周辺の透水係数の違い（EDZ、グラウトなど）の影響に着目した地下水流動解析結果について以下に示す。

(a) 検討ケースの設定

2D 処分坑道詳細モデルによる地下水流動解析ケース（全 4 ケース）について表 4.2.2-17 に示す。横置き PEM 方式に対する解析モデルを用いて、再冠水現象に対する EDZ、グラウト、キャップロックの影響について検討を実施した。なお、ここでの解析手法については飽和・不飽和解析手法を用いた。図 4.2.2-65 に処分坑道周辺の解析モデル図を示す。PEM についてはモデル化を行っていない。

表 4.2.2-17 再冠水評価のための 2D 処分坑道詳細モデルによる解析ケース

ケース名	処分形態	解析モデル	EDZ	グラウト	キャップロック	手法	備考
case18b	b:Dead-end-type	2D詳細	なし	なし	なし	飽和・不飽和 FEM	基本ケース
case19b		2D詳細	あり	なし	なし	飽和・不飽和 FEM	EDZの影響
case20b		2D詳細	あり	あり	なし	飽和・不飽和 FEM	EDZとグラウトの影響
case21b		2D詳細	なし	なし	あり	飽和・不飽和 FEM	キャップロックの影響

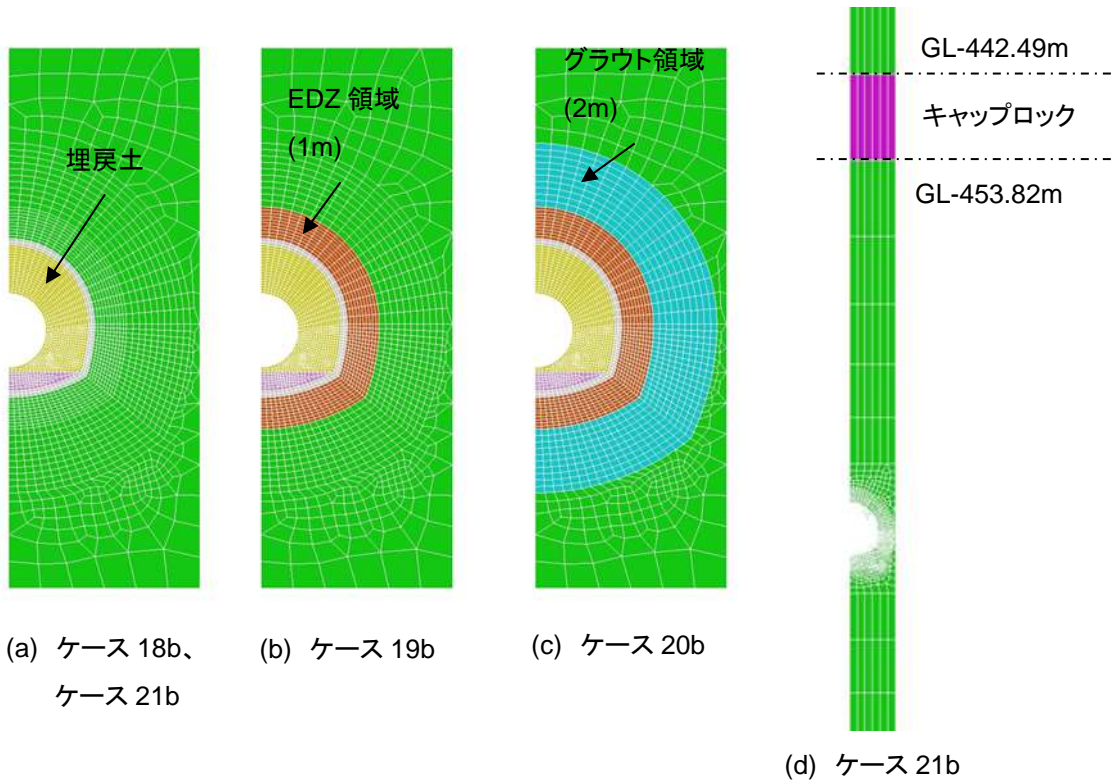


図 4.2.2-65 再冠水解析における 2D 処分坑道詳細モデルの比較

埋戻土内の初期条件（水頭値の設定）については、初期飽和度（0.567）から不飽和特性曲線に基づき算出される圧力水頭（-73.625m）を埋戻土内部の節点の初期水頭値として与えることとした。解析モデルの底部境界については、再冠水時の水圧回復を考慮し、図 4.2.2-66 に示す全水頭の経時変化を与えている。2次元解析モデルの上部境界が全水頭 0 の固定境界であることから、処分坑道閉鎖後の定常状態の流動は、モデル上部から底部境界への下向き流動となる。

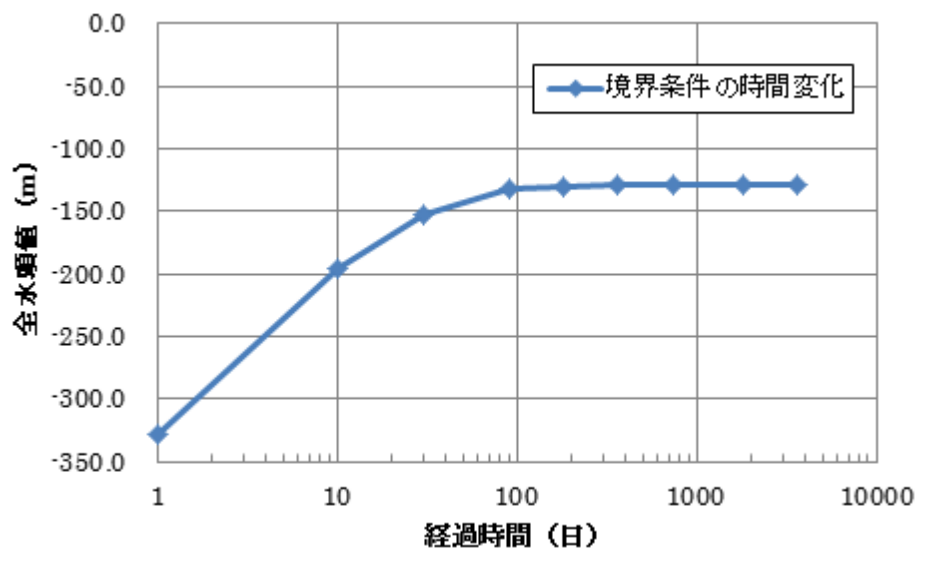


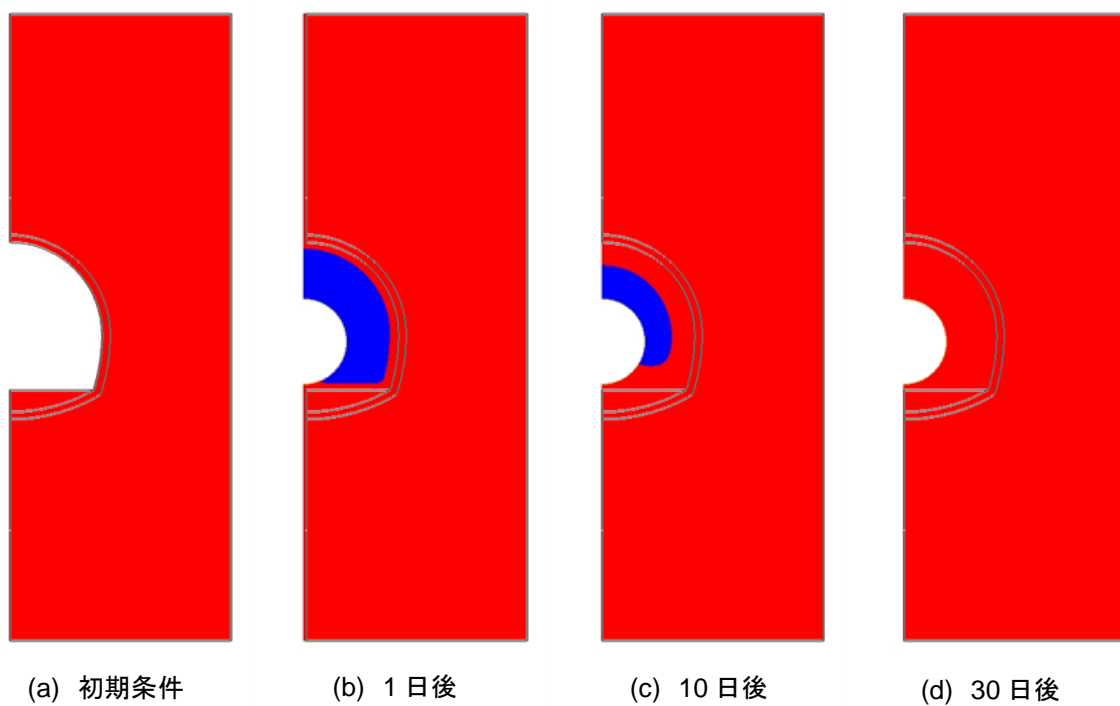
図 4.2.2-66 再冠水解析における 2D 処分坑道詳細モデルの底部境界水頭の経時変化

(b) 再冠水評価のための非定常解析結果

4 ケースの解析結果として処分坑道周辺の不飽和領域の経時変化を図 4.2.2-67～図 4.2.2-70 に示す。閉鎖後の処分坑道の不飽和領域については、EDZ の有無、グラウトの有無によらず埋戻後短時間（1 日程度）で周辺岩盤は飽和し、埋戻土のみが不飽和状態であるが、約 30 日（約 1 か月）で飽和状態となる結果が得られた。case18b、19b、20b とともに不飽和領域の経時変化は変わらない結果となっている。一方、キャップロックを考慮したケースでは、閉鎖後約 1 日ではキャップロックの下部に不飽和領域が分布するものの、10 日後には飽和状態となり、埋戻土中の不飽和領域も約 30 日後には飽和状態となる結果となった。

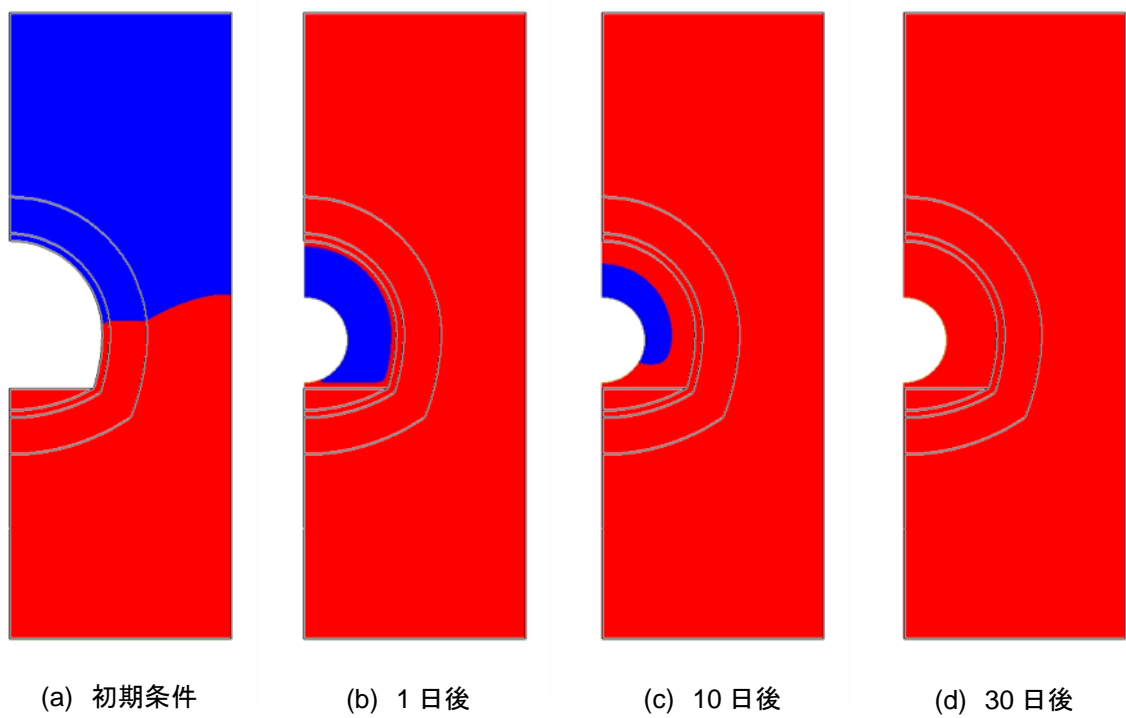
圧力水頭の正負による評価は難しいと判断し、ここでは全水頭分布の経時変化について確認を行った。各ケースの処分坑道周辺の全水頭分布の経時変化を図 4.2.2-71～図 4.2.2-74 に示す。各ケースによる違いが若干認められるものの、埋戻土内部の水圧が周辺岩盤中と同じ状態になるのは約 2 年程度であり、本検討結果としては再冠水時間としては約 2 年程度であると考えられる。

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



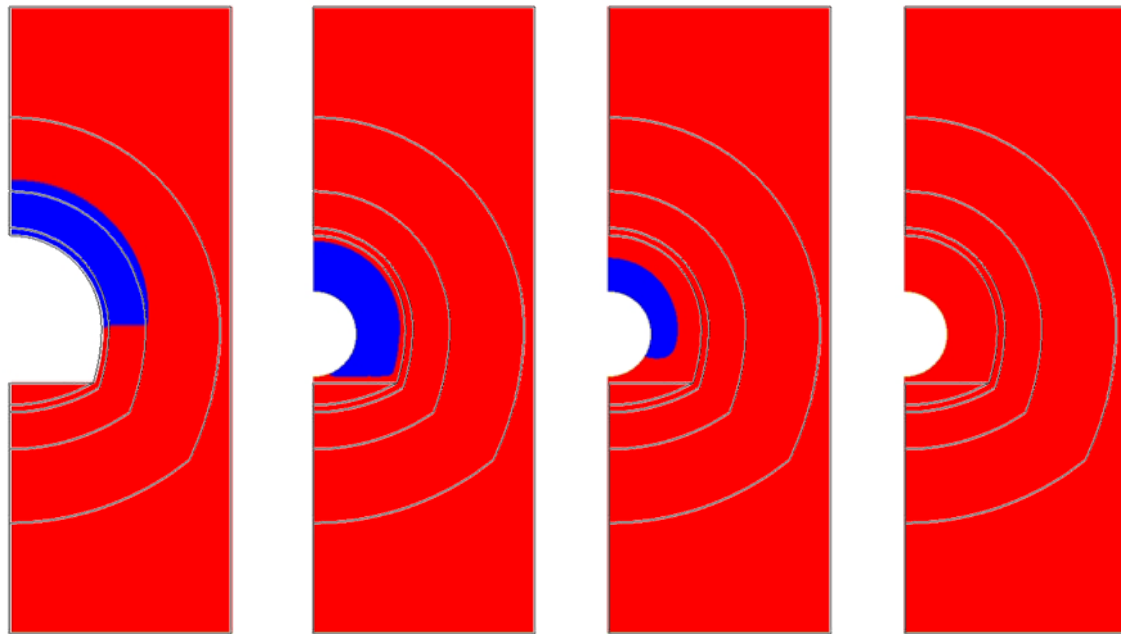
※ 赤色:飽和領域(圧力水頭が正)、青色:不飽和領域(圧力水頭が0及び負)

図 4.2.2-67 再冠水解析 (case18b : 基本ケース) における不飽和領域の経時変化



※ 赤色:飽和領域(圧力水頭が正)、青色:不飽和領域(圧力水頭が0及び負)

図 4.2.2-68 再冠水解析 (case19b : EDZ あり) における不飽和領域の経時変化



(a) 初期条件

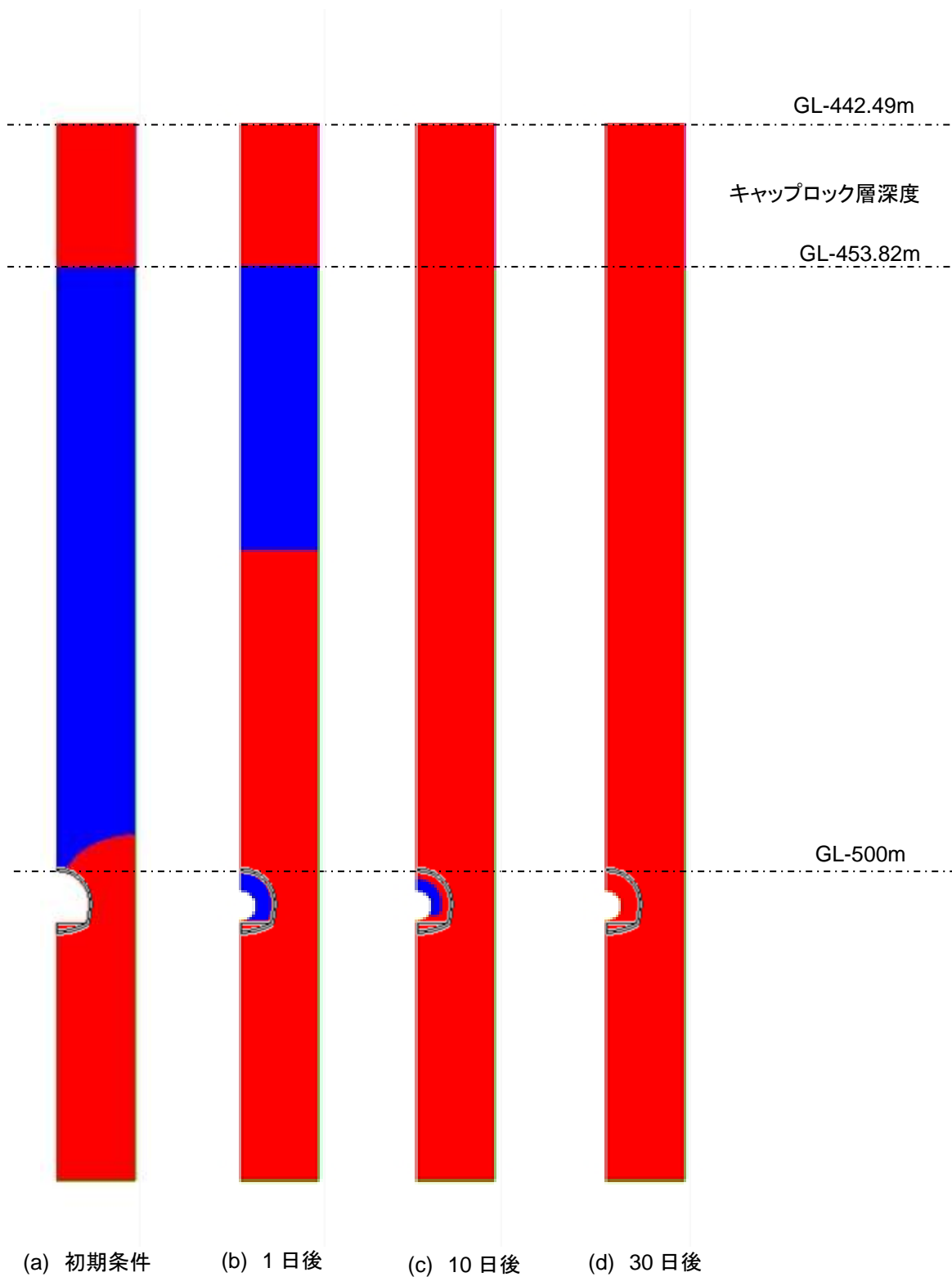
(b) 1 日後

(c) 10 日後

(d) 30 日後

※ 赤色:飽和領域(圧力水頭が正)、青色:不飽和領域(圧力水頭が0及び負)

図 4.2.2-69 再冠水解析 (case20b : EDZ+グラウトあり) における不飽和領域の経時変化



※ 赤色:飽和領域(圧力水頭が正)、青色:不飽和領域(圧力水頭が0及び負)

図 4.2.2-70 再冠水解析 (case21b: キャップロック考慮) における不飽和領域の経時変化

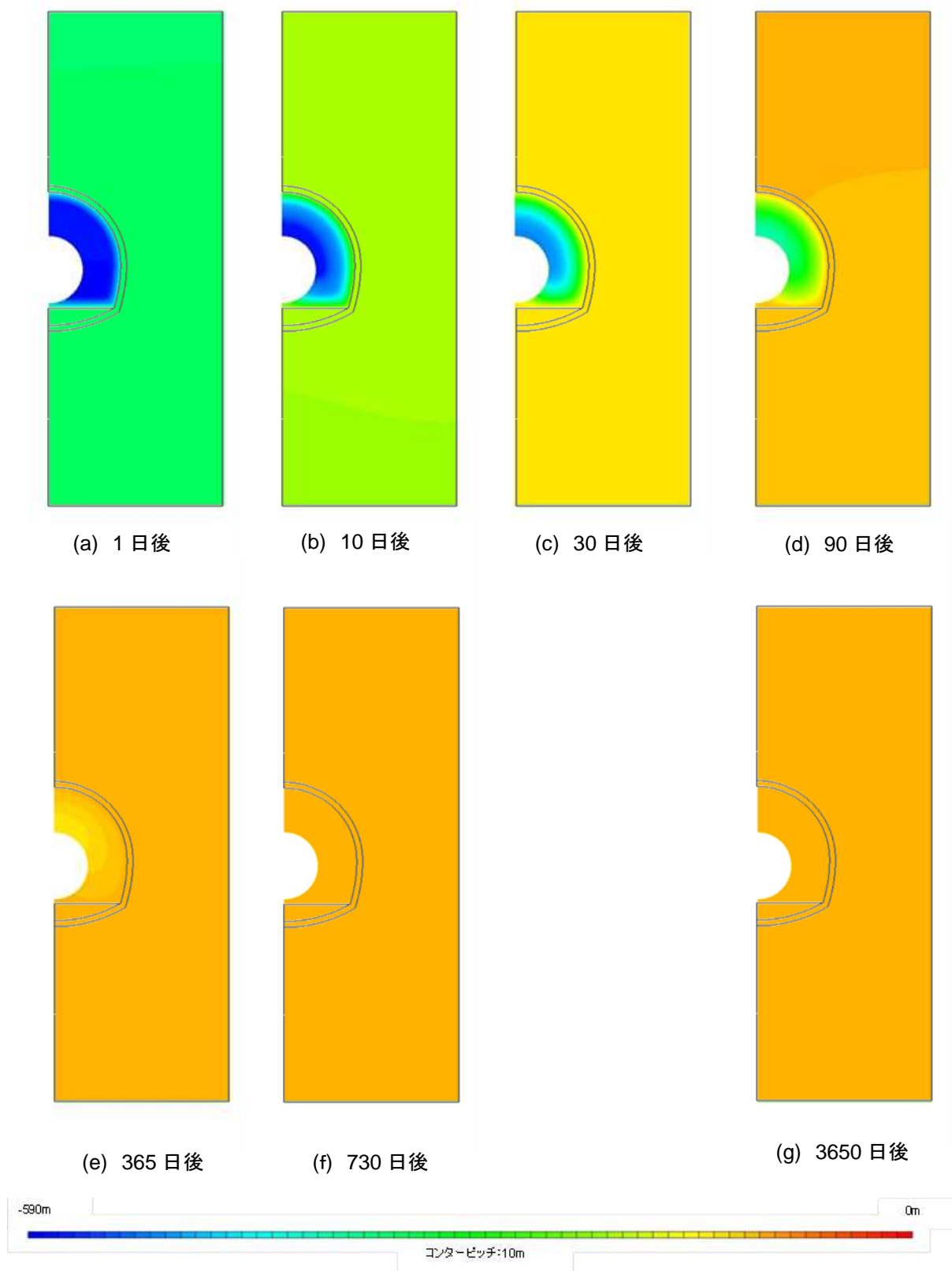


図 4.2.2-71 再冠水解析 (case18b : 基本ケース) における全水頭分布の経時変化

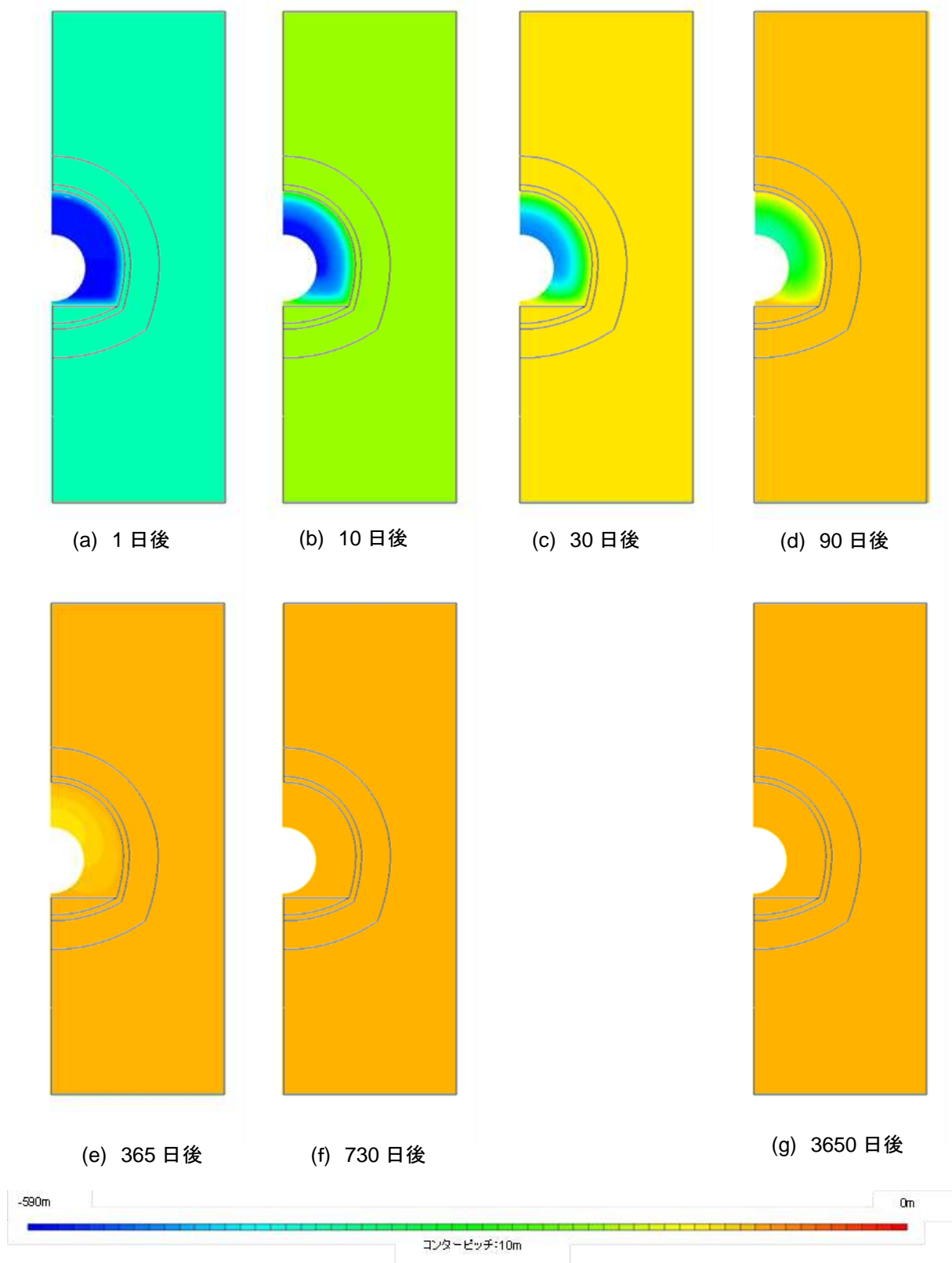


図 4.2.2-72 再冠水解析 (case19b : EDZ あり) における全水頭分布の経時変化

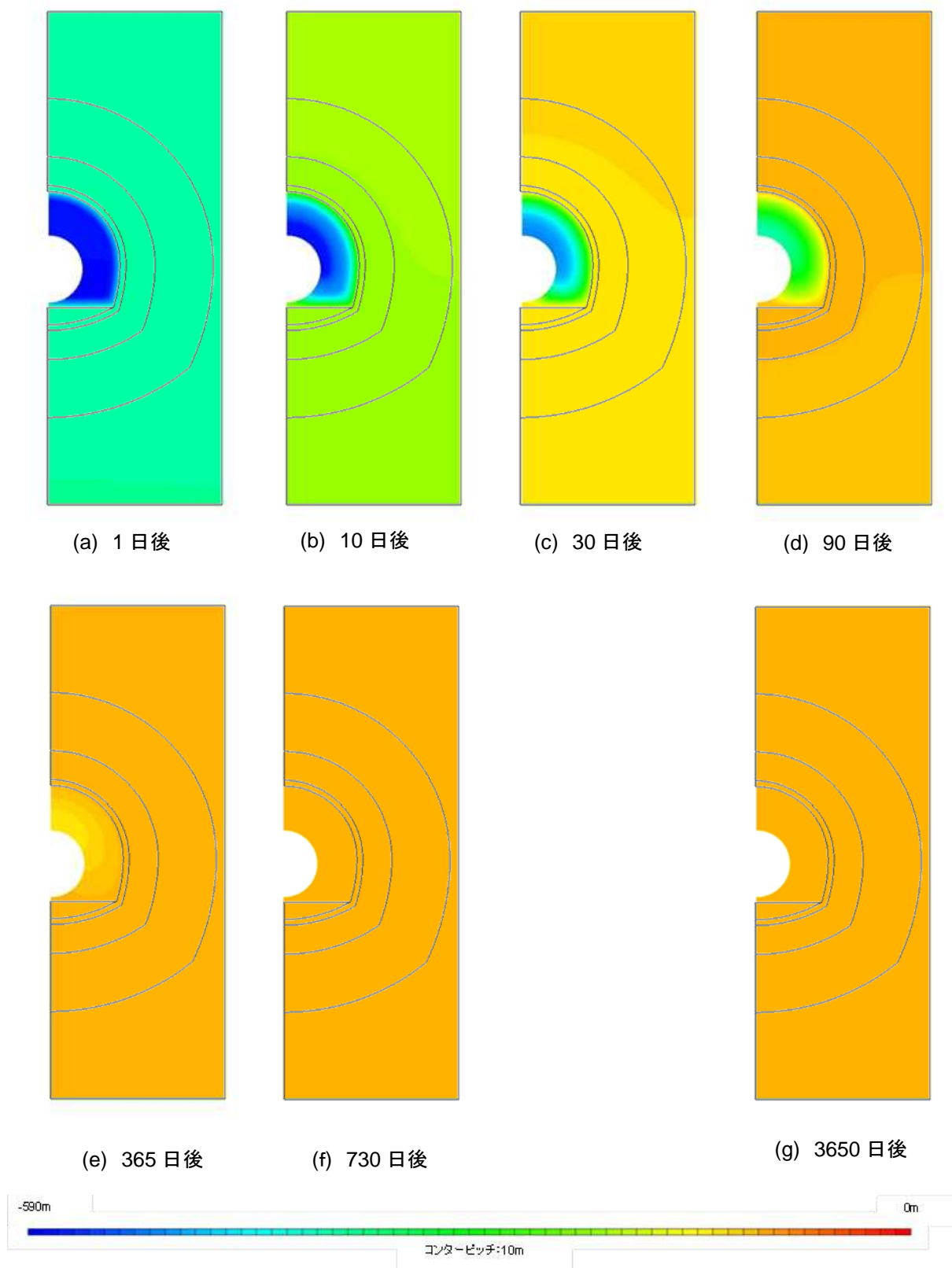


図 4.2.2-73 再冠水解析 (case20b : EDZ+グラウトあり) における全水頭分布の経時変化

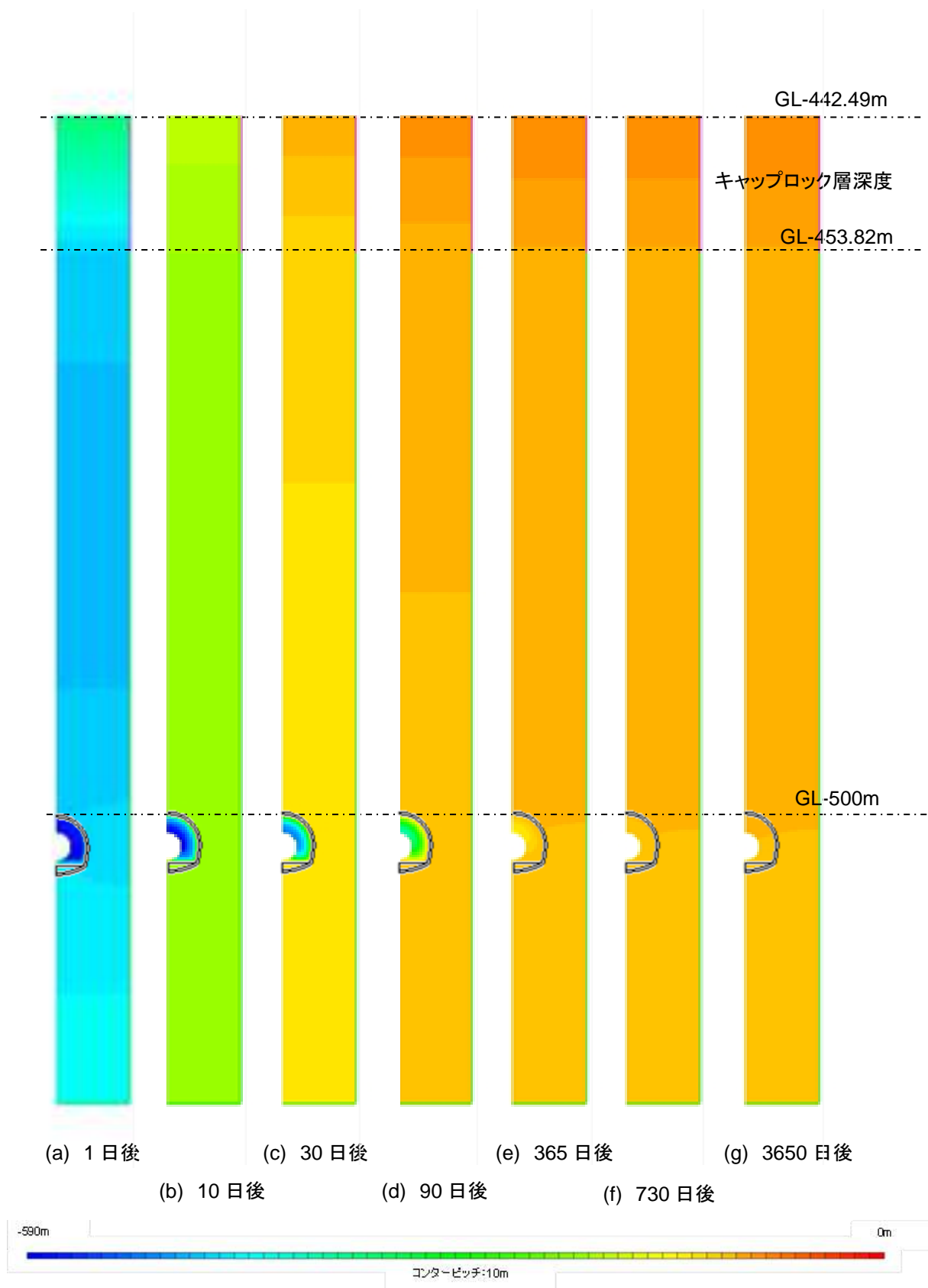


図 4.2.2-74 再冠水解析 (case21b : キャップロック考慮) における全水頭分布の経時変化

(c) 処分坑道詳細モデルによる検討結果のまとめ

再冠水現象を評価するために実施した「処分坑道詳細モデル」による検討結果について以下にまとめる。

【評価手法について】

- ・ 本検討では飽和・不飽和解析手法による検討を実施したが、再冠水現象について予測解析が可能であることが確認できた。
- ・ 再冠水の評価にあたって、当初は飽和度の変化に対する経時変化を想定したが、不飽和から飽和（圧力水頭が負から正）への変化は非常に短時間（数日オーダー）であったため、飽和後の全水頭分布の経時変化から再冠水現象を評価することとした。これは飽和・不飽和解析手法を用いていることが要因とも想定されることから、別途実施する二相流解析手法による検討と合わせて検討する必要がある。

【再冠水時間について】

- ・ 処分坑道周辺の透水性分布の違い（EDZ、グラウトなど）による比較検討を実施したが、処分坑道周辺の再冠水挙動については、大きな違いは認められなかった。
- ・ 処分坑道の再冠水については掘削時と同様にほぼ 10 年程度で飽和（ここでは埋戻土中の全水頭分布が周辺岩盤と同じになる時間として評価）する結果であり、安全評価の前提となる 1,000 年に対しては十分短い結果が得られた。これは「パネルスケールモデル」による全体系の解析結果と同じである。
- ・ 本検討条件での再冠水時間は比較的短時間となる結果が得られたが、掘削時の地下水位の低下や、埋戻後の地下水位の回復などを伴う条件では再冠水時間は長くなる可能性があるため、本検討結果は一例として考慮する必要がある。
- ・ 現状の解析結果を考慮すると、再冠水に対する対策は必要ないと考えられるが、二相流解析手法による予測結果と合わせて検討する必要がある。

c 解析手法の違いによる検討

再冠水時間による評価として、FDM 解析による評価を実施した。解析モデルを図 4.2.2-75 に示し、解析ケースを表 4.2.2-18 に示す。

これらのケースは前述の FDM による閉鎖前の解析ケース（表 4.2.2-15 参照）における 10 年後の状態を初期状態として、初期飽和度 0.567（=56.7%）の埋戻し材を坑道内に充填した場合を想定した解析を実施した。なお、埋戻し材の内側（PEM の外縁）に相当する箇所は不透水とすることにより PEM 内部への浸透は無い状況を模擬した。

左右の境界条件や上下端の境界条件設定およびモデルの物性値は、前述の閉鎖前のケースと同様の設定とした。

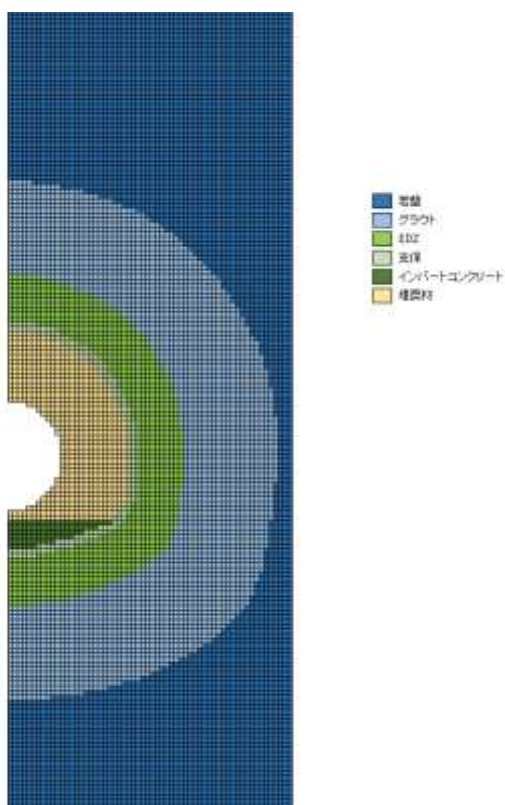


図 4.2.2-75 解析モデル概要図（深度：GL-500m 周辺の拡大図）

表 4.2.2-18 FDM による解析ケース

ケース名	処分形態	解析モデル	EDZ	グラウト	キャップロック	手法	備考
case18b'	b:Dead-end-type	2D詳細	なし	なし	なし	二相流 FDM	基本ケース
case19b'		2D詳細	あり	なし	なし	二相流 FDM	EDZの影響
case20b'		2D詳細	あり	あり	なし	二相流 FDM	EDZとグラウトの影響

解析結果として、飽和度分布の経時変化の比較を図 4.2.2-76 と図 4.2.2-77 に示す。

EDZの領域に形成された不飽和領域は再冠水開始から10日後には飽和状態に戻り、その後は、EDZの有無による違いは殆ど認められず、再冠水開始から約2年後には埋戻し材が飽和状態に戻ると考えられる。なお、再冠水開始から10日後までに不飽和領域が飽和される過程は、図 4.2.2-78 に示すように、EDZの底部から次第に上方に向かって飽和される。

これらの時間スケールは岩盤やEDZの透水係数の設定に左右されるものではあるが、EDZ内に形成された不飽和領域が再冠水の妨げになる（再冠水に要する時間を長くする）可能性は低いものと考えられる。したがって、化学的な評価に繋げるためには、各材料（岩盤、EDZ、グラウト、支保、インバート）の透水性の設定によりこの時間スケールがどの程度左右される可能性があるかという観点での不確実性評価を行う必要があるものと考えられる。

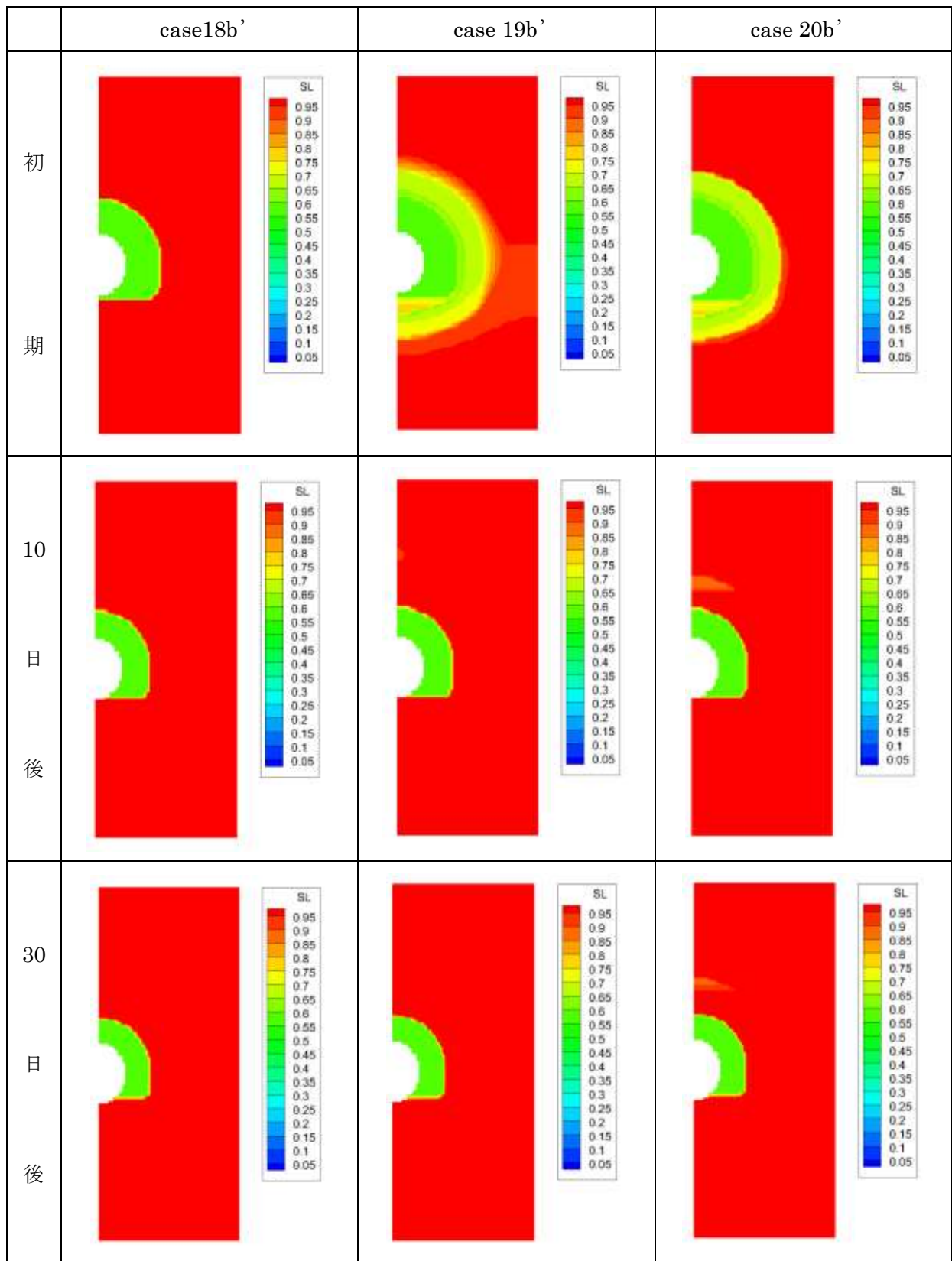


図 4.2.2-76 飽和度分布の比較（再冠水時：初期～30日後）

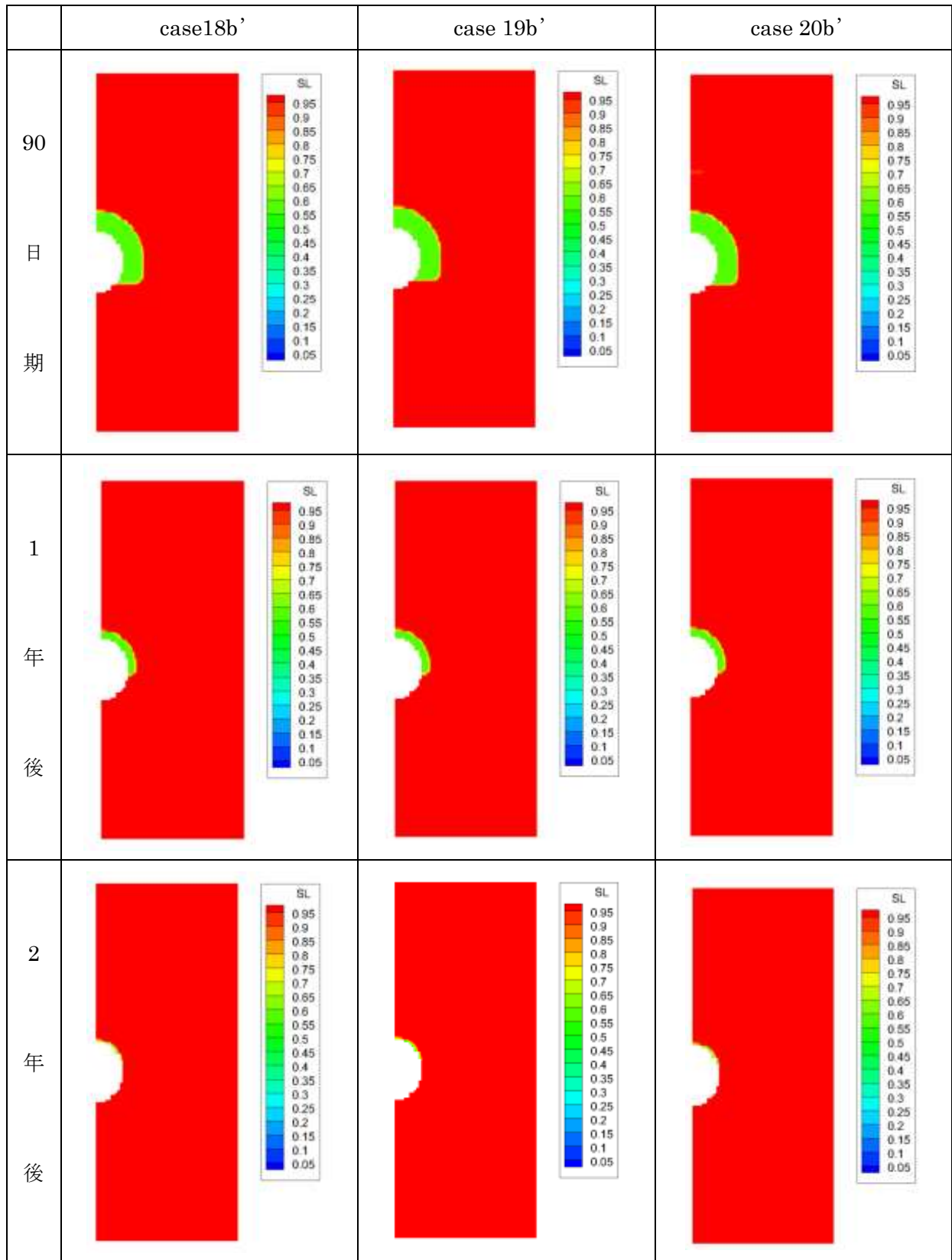
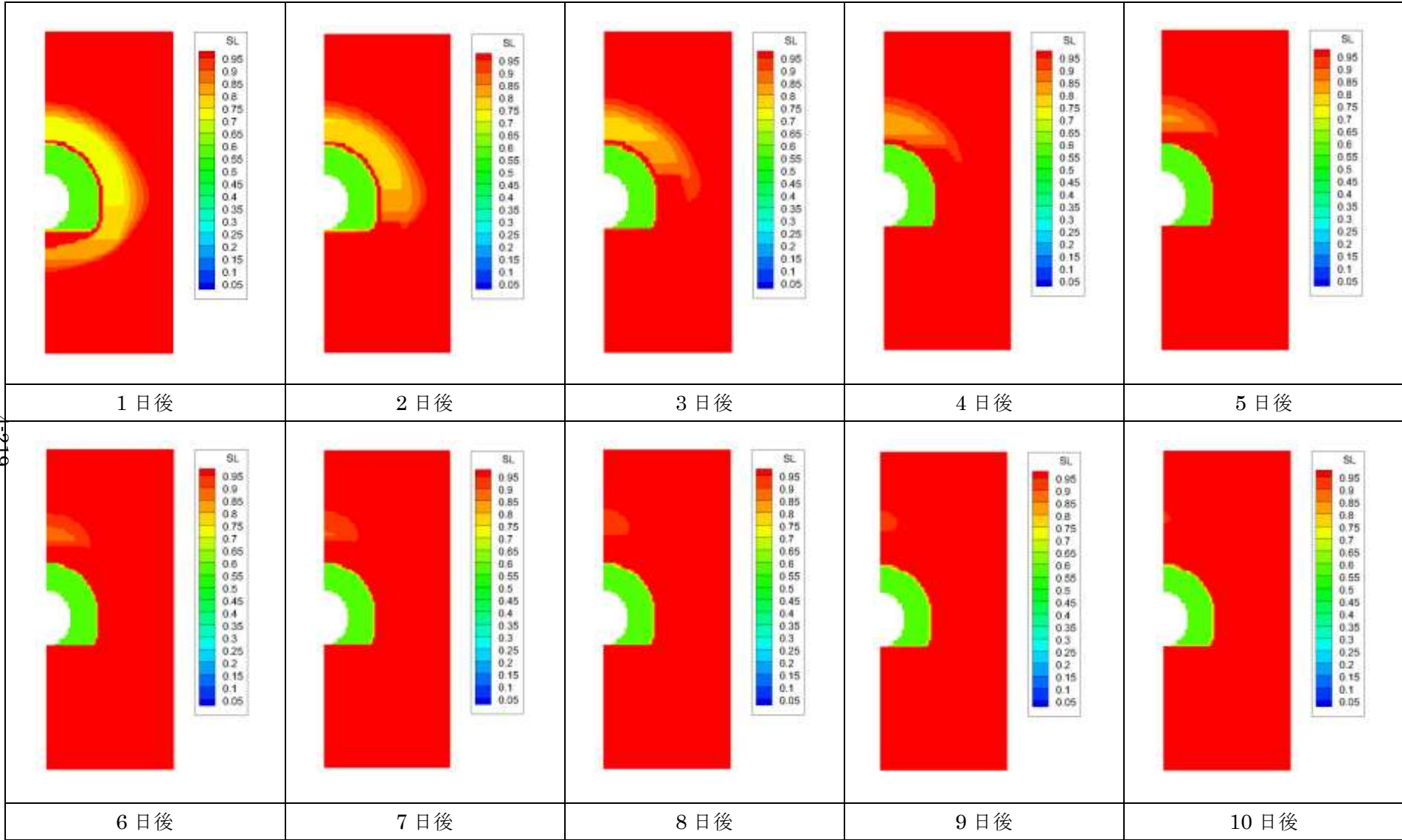


図 4.2.2-77 飽和度分布の比較（再冠水時：90 日後～2 年後）



4-219

図 4.2.2-78 EDZ 領域に形成された不飽和領域の再冠水過程 (case19b')

d 再冠水評価に関するまとめ

再冠水評価に関する検討結果について、解析手法の違いによる観点から以下にまとめる。

【飽和・不飽和解析手法について】

- 飽和・不飽和解析手法を用いて「パネルスケールモデル」および「処分坑道詳細モデル」による検討を実施したが、本検討条件では処分坑道の再冠水時間は主に処分坑道内部の埋戻土の再冠水時間であり、10年未満で周辺地下水と同じ水頭分布に回復する結果が得られた。EDZを考慮した解析では、掘削影響によりEDZ部が不飽和領域となったものの、再冠水評価ではEDZ層の不飽和領域は数日程度で飽和状態となる結果が得られた。
- 圧力水頭の正負による評価では、どの検討でも比較的短時間（数日～1か月未満）で埋戻土内の圧力水頭は正（飽和）となる結果であり、本検討では全水頭分布の経時変化について確認し、周辺岩盤と同じ水頭分布になる時間について再冠水時間として評価を実施した。飽和・不飽和解析では、気相の流動については厳密に考慮されていないため、気相がトラップされるような再冠水評価に対しては、評価手法としては適切ではない可能性があることから、二相流解析手法との比較により妥当な解析手法の選定が望ましい。
- 掘削解析における不飽和領域評価と同様に、種々のパラメータの影響により再冠水時間の評価結果が異なる可能性がある。再冠水時間に対するパラメータの感度解析を実施し、影響を把握することが望ましい。

【二相流解析手法について】

- FEM解析モデルとは異なる「処分坑道詳細モデル」による検討を実施した。EDZの有無により掘削状態における不飽和領域の発生が異なる結果が得られていたが、再冠水時については、最終的な処分坑道の埋戻し材の再冠水時間は約2年程度の結果となっており、再冠水時間に対するEDZの不飽和領域の有無の影響は小さい結果となった。
- EDZによる不飽和領域については、約10日程度で飽和状態になる結果であり、EDZの不飽和領域が飽和に至る時間が短いため、全体の再冠水時間に対する影響が小さくなっていると考えられる。
- FEM解析結果と比較すると、「再冠水」評価の定義が異なるものの、EDZ中は比較的短時間で飽和し、埋戻し材の飽和には2年程度かかると点ではほぼ同じ評価結果と思われるが、埋戻後の気相の状態変化について考慮している二相流解析手法の方が再冠水評価には適していると考えられる。

【今後の課題について】

- 本検討により、処分場の再冠水評価に対しては二相流解析手法が適していると考えられるものの、サイトスケールの再冠水現象の評価に手法として適用可能かどうかについては今後の課題と思われる。

2) 坑道湧水量による評価

坑道開放期間中の坑内湧水量の影響として、緩衝材や埋戻し材の流出の可能性が想定される。ベントナイト成分の流出評価については、別事業において詳細な検討を実施しており、ここでは作成した 3D 処分坑道詳細モデル（堅置きタイプ）を用いて、緩衝材（堅置きタイプの処分孔）、埋戻し材（処分坑道）の流出影響評価の一例として、坑道開放期間中の湧水量を算出し、ベントナイト流出評価の基礎データとしての流量算出方法について示す。

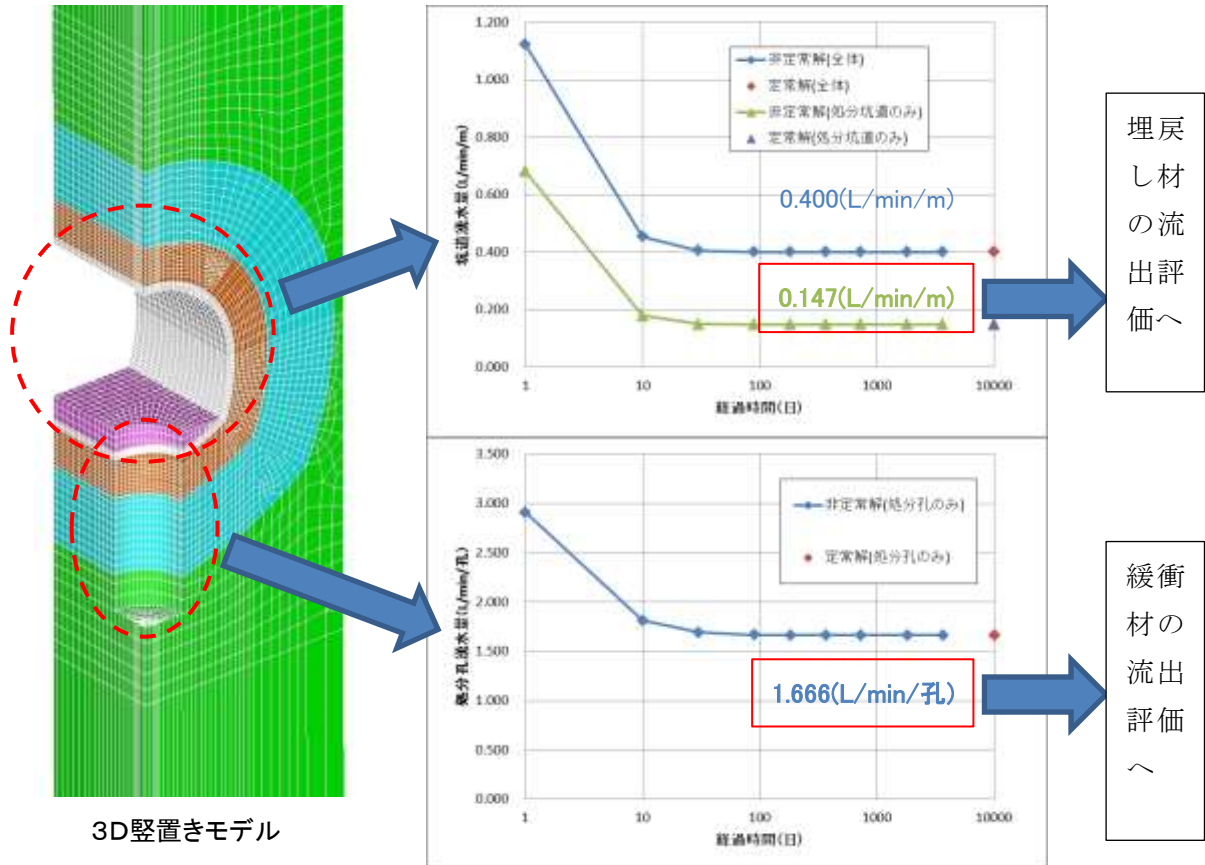
堅置きタイプの緩衝材に関しては、処分孔掘削時の処分孔の湧水量について、処分坑道の埋戻し材に関しては、処分坑道掘削時の処分坑道からの湧水量について算出した結果を示すこととした。なお、横置き PEM 方式に関する埋戻し材の流出評価に関しては、図 4.2.2-46 に示した湧水量の解析結果を適用することができる。実際には緩衝材や埋戻し材を施工すると、処分坑道周辺の地下水圧の回復（上昇）に伴い、動水勾配が小さくなるため、ベントナイト流出に関わる地下水の流速は小さくなると考えられるが、ここでは評価データの算出方法として掘削時の湧水量について示すこととする。局所的なパイピング現象の発生を考慮すると、緩衝材や埋戻し材施工後についても、大きな動水勾配条件が形成される可能性があることから、緩衝材や埋戻し材施工後の流速は、必ずしも保守的な条件とは言えないことが考えられる。

図 4.2.2-79 に処分坑道（処分孔からの湧水を除いた値）の単位長さ、単位時間あたりの湧水量の経時変化と、処分孔 1 孔あたりの湧水量の経時変化データを示す。なお、解析にあたっては堅置き方式のため、Through-type のパネルスケールモデル解析結果から得られた図 4.2.2-80 に示す底部境界での全水頭値の経時変化を境界条件として与えている。このように本解析手法では処分坑道内の湧水量を分割して算出することが可能である。

本検討での解析条件は均質媒体であり、境界条件が一定の場合には、湧水量は周辺岩盤の透水係数と比例する。岩盤の透水係数の違いによる湧水量については、本検討結果を用いて透水係数に比例する湧水量を算出すればよい。すなわち、岩盤の透水係数が 1 オーダー小さい場合は、湧水量も 1/10 になる。

なお、解析における境界条件の設定から、図 4.2.2-79 に示した処分坑道の流量は、処分パネル中央部付近の解析結果であり、処分パネルのすべての場所を代表している湧水量ではない。処分パネル中央部付近における処分坑道周辺の動水勾配は最も小さい状態であり、処分坑道内では最も湧水量の少なくなる条件であることに留意する必要がある。特に、処分パネルの端部側は、中央部と比較して動水勾配が大きくなることから図 4.2.2-79 に示した流量よりも増加することも想定される。したがって、処分パネル内での湧水量の違いについては、パネルスケールモデル解析結果等を踏まえて、総合的に評価することが必要である。

本検討では解析結果を用いた一例として示したものである。ベントナイト成分の流出評価に関しては、今後別事業での検討成果を踏まえて検討を行うことが望ましい。



※湧水量の絶対値については、解析条件等に依存するため取扱に注意を要する。

図 4.2.2-79 ベントナイト流出評価のための湧水量の提示の例

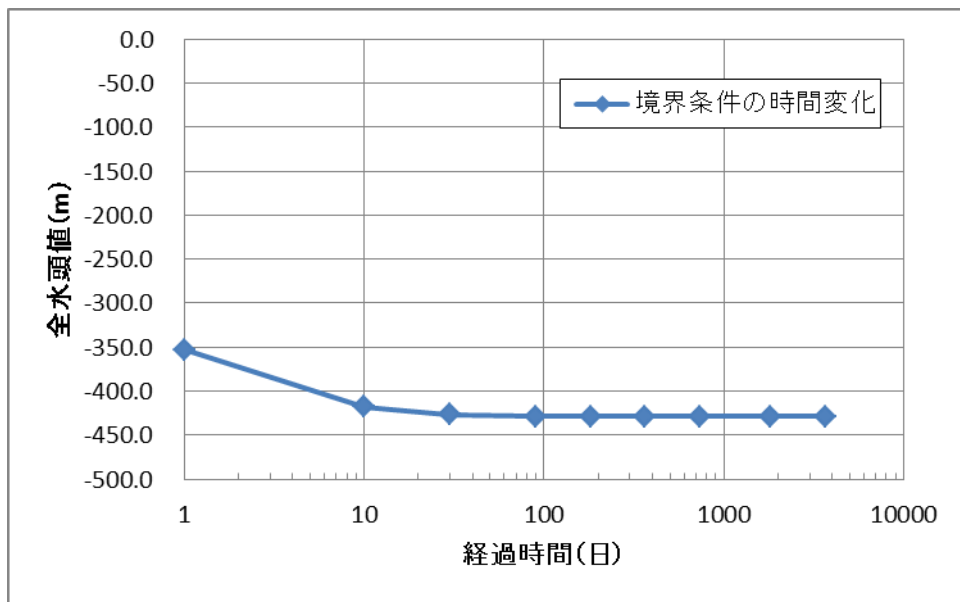


図 4.2.2-80 3D モデル解析での底部境界における全水頭の経時変化

4.2.3 化学的・熱的影響評価方法の検討

本年度は、平成 30 年度に実施予定の解析モデルを用いた評価に備えて、現状技術把握のための既往検討の調査を行い、それを踏まえて検討方法の構築を行う。具体的な実施項目は、文献調査に基づく化学的・熱的影響評価方法の調査と、それに基づく効率的かつ効果的な検討方法の構築である。なお、ここでは化学的影響の評価の中に生物的影響の評価も含めることとした。

(1) 化学的・熱的影響評価方法の調査

1) 調査の方針

平成 28 年度までの回収可能性維持に起因する影響の検討[1]、[2]においては、影響因子を網羅的に抽出し、それらを THMC の観点で整理した上で、影響の伝播をプロセス・インフルエンス・ダイアグラム (PID) の形で示した。このような PID の枠組みの例を図 4.2.3-1 に示す[1]。

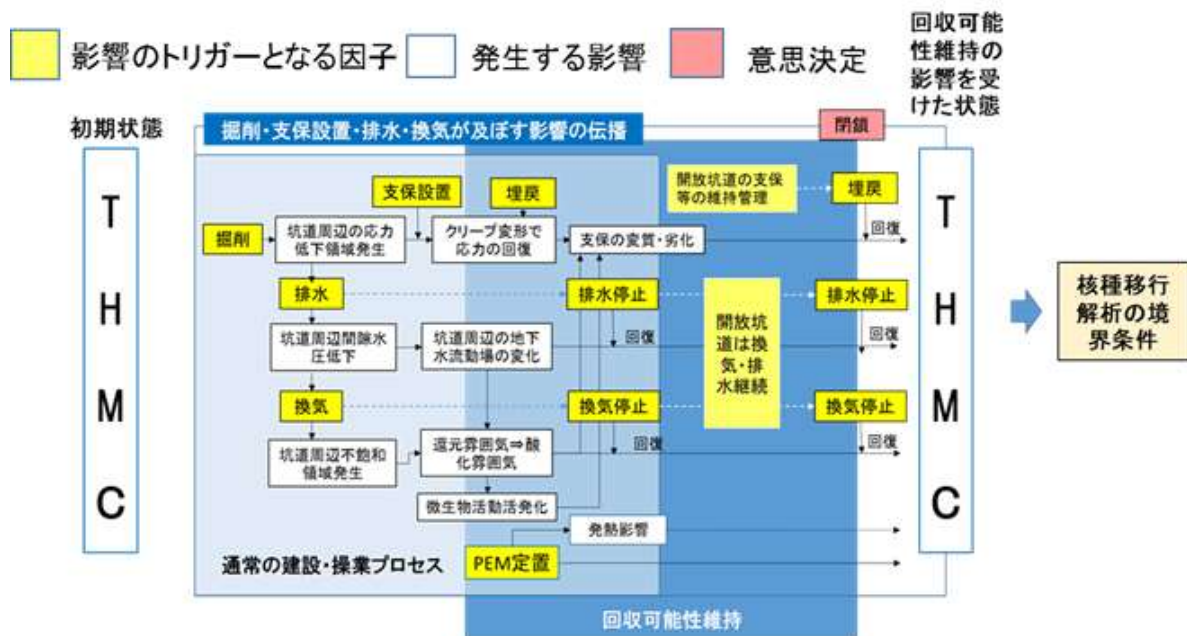


図 4.2.3-1 PID の枠組みの例 (横置き・PEM 方式、廃棄体を回収しない場合) [1]

PID は、影響の伝播を示すものの、その規模や範囲については言及していないため、具体的な影響の規模や範囲は、PID をベースに作成する影響評価モデルにより定量的に求めることとなる。

化学的・熱的影響をモデルにより評価する場合、それぞれの評価の中核となる解析手法は、前者が地球化学解析であり、後者が伝熱あるいは熱流体解析である。

地球化学解析では、示強変数として温度と圧力が、示量変数として化学種の量 (濃度) があり、比較的単純な反応にも複数の化学種が関わることになる。加えて、坑道周辺のような地下水流動が生じる場では、化学反応に関与する物質の出入りがあるため、物質移行との連成解析が必要になる。このため、領域に対する地球化学解析を行う場合には、一般的に熱、水理、力学のいずれの単独解析よりも変数や方程式の数が増える傾向にある。また、解析モデルに取り入れる化学

種や反応（化学量論式）が増えるほど、変数や方程式の数も増え、計算により多くの労力が必要になる。このため、地球化学解析に当たっては、モデルパラメータの検討に加えて、現実的な時間で解析を実施するために、モデルの次元を減らしたり、モデルに取り入れる化学種および反応を絞り込んだりする工夫が必要になる。

以上のことから、化学的影響と熱的影響とを比較した場合、前者の方が効率的かつ効果的な検討方法を構築する必要性がより高いと考えられる。そこで、ここでは主に化学的影響評価方法についての調査を実施することとした。

2) 調査内容と手順

調査内容と手順を図 4.2.3-2 に示す。前述の通り、化学的影響評価を効率的かつ効果的に実施するには、モデルに取り入れる化学種および反応を絞り込む必要がある。そこで、まず平成 28 年度までに作成された PID において化学的・熱的影響として分類されているものを抽出し、それぞれについて、予想される相対的な影響の大きさを検討することとした。

次に、相対的に影響が大きいと考えられる項目について、最新の知見に基づき、影響評価の現状を把握することとした。具体的には、既往検討に関する文献調査を行い、評価方法、解析用パラメータの設定方法、得られた成果、現状の課題などについて整理した。

最後に、化学的・熱的影響評価の現状を踏まえて、効率的かつ効果的なモデル解析による検討方法を構築し、平成 30 年度およびそれ以降の検討につなげることとした。

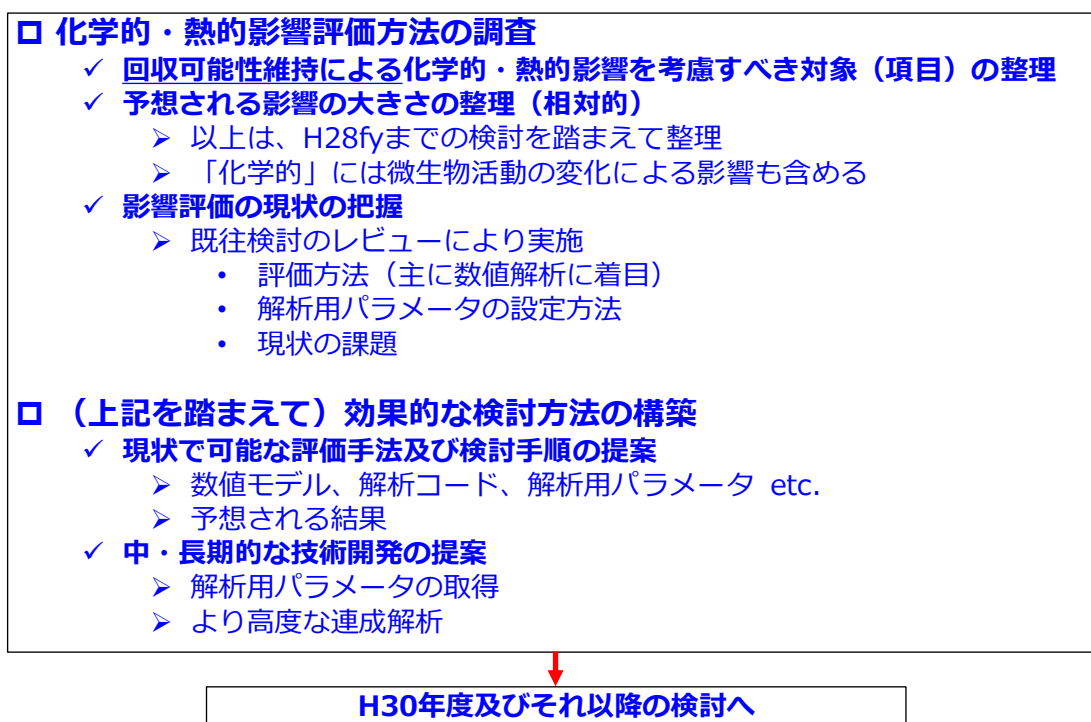


図 4.2.3-2 調査内容と手順

3) 検討対象となり得る項目の抽出

平成 28 年度までに作成した PID においては、図 4.2.3-1 に示したように、回収可能性の維持による化学的影響として次のような項目が挙げられている。

- ・ 酸化的雰囲気形成とその回復
- ・ 微生物活動の変化
- ・ 支保の変質・劣化

上記のほか、平成 28 年度までの検討でまとめられた状態変遷図においては、化学的影響の一つとして次の項目も挙げられている。

- ・ 腐食による水素ガスの発生

以上を踏まえて、化学的影響の検討対象となりうる項目を、PID 等で挙げられた項目に対応させる形で、表 4.2.3-1 に示すように抽出して整理した。なお、熱的影響は、表 4.2.3-1 に示す項目の背景として位置付けることとした。

表 4.2.3-1 化学的影響の検討対象となり得る項目

PID 等で挙げられた項目	今回の整理結果
・ 支保の変質・劣化	① 坑道を構成する人工部材の変質 <ul style="list-style-type: none"> ・ セメント系材料 (グラウト、ロックボルト定着材、支保コンクリート、インバートコンクリートなど) ・ 鋼材 (ロックボルト、支保工)
(該当なし)	② (セメント系材料に由来する) 高 pH 地下水による天然バリアの変質
・ 腐食による水素ガスの発生	③ 鋼材、PEM 容器の腐食による水素ガス発生
・ 酸化的雰囲気形成とその回復	④ 坑道近傍の岩盤の風化 ⑤ 操業段階(掘削、埋め戻し)における化学的環境の変化
・ 微生物活動の変化	⑥ 微生物活動の変化

4) 予想される影響の大きさの整理

閉鎖前の作業環境の安全性に関する影響評価において、化学的影響により引き起こされうるものとしては、力学強度の低下、透水性の増大、高 pH 地下水の生成、および腐食による水素ガスの発生が考えられる。また閉鎖後の長期安全性に関する影響評価においては、透水性や吸着特性の変化が考えられる。これらの着目すべき点について、表 4.2.3-1 に示した検討項目との関連性を示すと、表 4.2.3-2 および表 4.2.3-3 のようになる。

表 4.2.3-2 閉鎖前の作業環境の安全性に関する影響評価における着目点との関連性

化学的影響の検討対象となり得る項目 (影響要因となりうる項目)	閉鎖前の作業環境の安全性に関する 影響評価における着目点 (重複あり)
① 人工部材 (セメント系材料、鋼材) の変質	<ul style="list-style-type: none"> ・力学強度の低下 ・透水性の増大 ・高 pH 地下水の生成 ・腐食による水素ガス発生
② 高 pH 地下水による天然バリアの変質	<ul style="list-style-type: none"> ・力学強度の低下 ・透水性の増大
③ 鋼材、PEM 容器の腐食による水素ガス発生	<ul style="list-style-type: none"> ・腐食による水素ガス発生
④ 坑道近傍の岩盤の風化	<ul style="list-style-type: none"> ・力学強度の低下 ・透水性の増大

表 4.2.3-3 閉鎖後の長期安全性に関する影響評価における着目点との関連性

化学的影響の検討対象となり得る項目 (影響要因となりうる項目)	閉鎖後の長期安全性に関する 影響評価における着目点
② 高 pH 地下水による天然バリアの変質	<ul style="list-style-type: none"> ・透水性の変化 ・吸着特性の変化
④ 坑道近傍の岩盤の風化	<ul style="list-style-type: none"> ・透水性の変化 ・吸着特性の変化
⑤ 操業段階 (掘削、埋め戻し) における化学的環境 の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・吸着特性の変化
⑥ 微生物活動の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・透水性の変化 ・吸着特性の変化

上記を踏まえて、閉鎖前の作業環境の安全性に関する影響評価、閉鎖後の長期安全性に関する影響評価のそれぞれにおいて、表 4.2.3-1 に整理した化学的影響の検討対象となり得る項目が着目すべき点に及ぼしうる影響の大きさを、文献調査により検討した。

a 閉鎖前の作業環境の安全性に関する影響評価

(a) 人工部材 (セメント系材料、鋼材) の変質

人工部材 (セメント系材料および鋼材) の変質が閉鎖前の作業環境の安全性に及ぼす影響の大きさについて、文献調査により検討した結果を表 4.2.3-4 に示す。

坑道が長期間アクセス可能な状態に置かれた場合、坑道内への湧水が継続することによってセメント系材料の溶脱が進み、材料の空隙率が增大すると考えられる。また、これに伴う pH の低下により、鋼材の変質が進行する可能性がある。

これらによって、支保工の力学強度の低下、透水性の増大および高 pH 地下水の生成が起これらと考えられる。しかし、これらはいずれも検知可能であり、坑道の補修や補強並びに水処理による対応が可能であることから、作業環境の安全性への影響は小さいと予想される。但し、坑道の補修・補強の頻度並びに水処理の負荷がどの程度になるかを検討する必要があると考えられる。

一方、腐食による水素ガス発生は、発生したガスが坑道内に滞留した場合、廃棄体の回収の際に問題となる可能性があることから、検討の必要があると考えられる。

表 4.2.3-4 人工部材（セメント系材料および鋼材）の変質が閉鎖前の作業環境の安全性に及ぼす影響の大きさ

着目点	影響の大きさ
支保工の力学強度の低下	<ul style="list-style-type: none"> セメント系材料が溶脱を受け、空隙率が増大し、強度が低下する可能性がある。 セメント系材料の溶脱により pH が低下し、鋼材の変質が進んで、強度が低下する可能性がある。 坑道の補修や補強による対応が可能であり、作業環境の安全性への影響は小さいと予想される。
支保工の透水性の増大	<ul style="list-style-type: none"> セメント系材料が溶脱を受け、空隙率が増大し、透水性が増大する可能性がある。 坑道の補修や補強による対応が可能であり、作業環境の安全性への影響は小さいと予想される。
高 pH 地下水の生成	<ul style="list-style-type: none"> セメント系材料の溶脱によって生成される。 坑道内への湧水は処理可能であるため、作業環境の安全性への影響は小さいと予想される。
腐食による水素ガス発生 (基本的に還元的環境下)	<ul style="list-style-type: none"> 還元性環境下での RC 構造物中の鉄筋の腐食速度は、従来の腐食速度範囲に入ることが示されている[33] 発生したガスが坑道内に滞留した場合、廃棄体の回収を行う場合に問題となる可能性がある。

(b) 高 pH 地下水による天然バリアの変質

セメント材料由来の高 pH 地下水による天然バリアの変質が閉鎖前の作業環境の安全性に及ぼす影響として、力学強度の低下と透水性の増大が考えられる。これらの大きさについて、文献調査により検討した結果を表 4.2.3-5 に示す。

室内試験により高 pH 地下水によって岩石表面が変質することについては、多くの報告がある(例えば、[34])ものの、力学強度の低下について調べた例は確認できなかった。なお、原位置では、コンクリート界面近傍の岩盤にわずかな強度低下の傾向が認められた例があるが、pH の影響かどうかは不明とされている[35]。

閉鎖前の環境において、坑道が埋め戻される前までは、地下水は空洞方向へ向かうため、坑道周辺岩盤への高 pH 地下水の広がりには小さいと予想される。一方、処分坑道の一部が埋め戻され

た場合には、それらを通過した高 pH 地下水が主要坑道やアクセス坑道へ流れると考えられることから、そこで岩盤の力学強度の低下をもたらす可能性はある。しかし、力学強度の低下は空洞変位として検知可能であり、坑道の補修や補強による対応が可能であることから、作業環境の安全性への影響は小さいと予想される。

なお、セメント系材料由来の高 pH 地下水によって、岩盤の亀裂や間隙中に CSH が生成し、それが透水性の低下をもたらす可能性が指摘されている[36]。また、CSH 生成による岩盤の透水性低下を実験的に確かめた事例もある[37]。以上のことから、岩盤の透水性に着目すると、閉鎖前の作業環境の安全性には、正の影響があると予想される。

表 4.2.3-5 高 pH 地下水による天然バリアの変質が閉鎖前の作業環境の安全性に及ぼす影響の大きさ

着目点	影響の大きさ
力学強度の低下	<ul style="list-style-type: none"> ・ 室内試験により高 pH 水による岩石表面の変質は示されている（例えば、[34]）が、力学強度の低下を調べた例は確認できなかった。 ・ 原位置では、コンクリート界面近傍の岩盤に強度低下の傾向が認められた例があるが、pH の影響かどうかは不明である[35]。 ・ 補修や補強による対応が可能であり、作業環境の安全性への影響は小さいと予想される。
透水性の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高 pH 地下水によって、岩盤の亀裂や間隙中には CSH が生成し、透水性の低下をもたらす可能性が指摘され[36]、実験的にも確かめられている[37]。 ・ 閉鎖前の作業環境の安全性には、正の影響があると予想される。

(c) 鋼材や PEM 容器の腐食による水素ガス発生

鋼材や PEM 容器の腐食による水素ガス発生が閉鎖前の作業環境の安全性に及ぼす影響の大きさについて検討した結果を表 4.2.3-6 に示す。

腐食による水素ガス発生は、廃棄体の回収を行う場合に問題となる可能性がある。

表 4.2.3-6 鋼材や PEM 容器の腐食による水素ガス発生が閉鎖前の作業環境の安全性に及ぼす影響の大きさ

着目点	影響の大きさ
腐食による水素ガス発生 (基本的に還元的環境下)	<ul style="list-style-type: none"> 還元性環境下での RC 構造物中の鉄筋の腐食速度は、従来の腐食速度範囲に入ることが示されている[33] 発生したガスが坑道内に滞留した場合、廃棄体の回収を行う場合に問題となる可能性がある。 鉄製 PEM 容器の腐食に関しては、湛水条件下で 200 年ほどの地球化学解析が行われているが、腐食量についての評価はない[38]

(d) 坑道近傍の岩盤の風化

坑道近傍の岩盤の風化が閉鎖前の作業環境の安全性に及ぼす影響として、力学強度の低下や透水性の増大が考えられる。これらの大きさについて、文献調査により検討した結果を表 4.2.3-7 に示す。

地下深部は元々還元的環境にあるが、掘削によって大気と接触すると坑道周辺岩盤は酸化的環境となり、岩石に含まれる硫化鉱物が酸化することによって間隙水の pH が低下し、岩盤の風化が起こると考えられる[39]。また、坑道周辺岩盤が堅固で透水性が低い場合や、坑道壁面近傍に透水性が高い領域が形成される場合には、壁面近傍に不飽和領域が発生し、そこで風化が促進される可能性が考えられる。

堆積岩においては、風化による力学強度の低下や透水性の増大がいくつか報告されており、これらの変化は、岩盤中への酸素の拡散距離との関連性が示唆されている[40]。但し、力学強度の低下は空洞変位として、透水性の増大は湧水の増加としていずれも検知可能であり、坑道の補修や補強による対応が可能であることから、作業環境の安全性に及ぼす影響は小さいと予想される。

表 4.2.3-7 坑道近傍の岩盤の乾燥風化が閉鎖前の作業環境の安全性に及ぼす影響の大きさ

着目点	影響の大きさ
力学強度の低下	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥風化による力学強度の低下がいくつか報告されており、岩盤中への酸素の拡散距離との関連性が示唆されている[40]。 補修や補強による対応が可能であり、作業環境の安全性への影響は小さいと予想される。
透水性の増大	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥風化による透水性の増大がいくつか報告されており、岩盤中への酸素の拡散距離との関連性が示唆されている[40]。 補修や補強による対応が可能であり、作業環境の安全性に及ぼす影響は小さいと予想される。

b 閉鎖後の長期安全性に関する影響評価

(a) 高 pH 地下水による天然バリアの変質

高 pH 地下水による天然バリアの変質が長期安全性に及ぼす影響としては、収着特性や透水性の変化が挙げられる。これらの影響の大きさについて、既往研究に基づき検討した結果を表 4.2.3-8 に示す。

セメント系材料由来の高 pH 地下水によって、岩盤の亀裂や間隙中には CSH が生成し、それが透水性の低下や核種の吸着に寄与する可能性が考えられる[36]。また、CSH の存在域は、処分場近傍に比較的長期にわたって維持されるという報告がある[37]。一方で、生成した CSH は長期的には pH 低下により溶解するため、岩盤が初期より疎になる可能性も指摘されている[35]。これは、透水性を増大させる可能性がある。

回収可能性を維持した場合、それを行わない場合に比べて、坑道空洞がより長く維持されるため、結果的に施設外の天然バリアへの高 pH 地下水の移行は抑制されると予想される。一方、主要坑道や連絡坑道への地下水の流入はより長く継続するため、これらと処分坑道との間に位置する岩盤は、高 pH 地下水により長く接触する可能性がある。

以上のことから、回収可能性を維持した場合、高 pH 地下水による天然バリアの変質は、処分坑道と主要坑道および連絡坑道との間に位置する岩盤においてより促進される可能性がある。但し、その領域は限られると考えられることから、閉鎖後の長期安全性には大きく影響しないと予想される。

表 4.2.3-8 高 pH 地下水による天然バリアの変質が閉鎖後の長期安全性に及ぼす影響の大きさ

着目点	影響の大きさ
透水性の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高 pH 地下水によって CSH が生成し、透水性が低下する可能性がある[36]。 ・ CSH の存在域は、処分場近傍に比較的長期にわたって維持される可能性がある[37]。 ・ 生成した CSH は、長期的には pH 低下により溶解すると考えられるため、岩盤が初期より疎になる可能性も指摘されている[35]。これは透水性を増大させる可能性がある。 ・ 高 pH 地下水による天然バリアの変質領域は限られると考えられることから、閉鎖後の長期安全性には大きく影響しないと予想される。
収着特性の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高 pH 地下水によって CSH が生成し、核種が吸着することにより、移行が抑制される可能性がある[36]。 ・ CSH の存在域は、処分場近傍に比較的長期にわたって維持される可能性がある[37]。 ・ 高 pH 地下水による天然バリアの変質領域は限られると考えられることから、閉鎖後の長期安全性には大きく影響しないと予想される。

(b) 坑道近傍の岩盤の風化

地下深部は元々還元的環境にあるが、掘削によって大気と接触すると坑道周辺岩盤は酸化的環境となり、岩石に含まれる硫化鉱物が酸化することによって間隙水の pH が低下し、岩盤の風化が起こると考えられる[39]。また、坑道周辺岩盤が堅固で透水性が低い場合や、坑道壁面近傍に透水性が高い領域が形成される場合には、壁面近傍に不飽和領域が発生し、そこで風化が促進される可能性が考えられる。これにより、岩盤の透水性や収着特性が変化する可能性がある。

回収可能性を維持した場合、それを行わない場合に比べて、坑道において酸化的環境がより長く継続することから、岩盤の風化はより進むと予想される。これが岩盤の透水性や収着特性を変化させることにより、閉鎖後の長期安全性にどの程度影響するかを評価するためには、回収可能性維持期間における酸化的な領域の広がりを検討する必要がある。

表 4.2.3-9 坑道近傍の岩盤の風化が閉鎖後の長期安全性に及ぼす影響の大きさ

着目点	影響の大きさ
透水性の変化	<ul style="list-style-type: none">岩盤中の硫化鉱物が酸化することによって間隙水の pH が低下し[39]、岩石マトリクスの溶解が起こる可能性がある。乾燥風化による透水性の増大がいくつか報告されており、岩盤中への酸素の拡散距離との関連性が示唆されている[40]。閉鎖後の長期安全性にどの程度影響するかを評価するためには、回収可能性維持期間における酸化的な領域の広がりを検討する必要がある。
収着特性の変化	<ul style="list-style-type: none">岩盤中の硫化鉱物が酸化することによって間隙水の pH が低下し[39]、岩石マトリクスの溶解が起こる可能性がある。低 pH 側では、核種の分配係数 Kd が低下するという報告がある。閉鎖後の長期安全性にどの程度影響するかを評価するためには、回収可能性維持期間における酸化的な領域の広がりを検討する必要がある。

(c) 操業段階（掘削、埋め戻し）における化学的環境の変化

処分場の操業段階における坑道およびその周辺岩盤における化学的環境の変化は、閉鎖前の作業環境の安全性に対しては特に影響を及ぼさないと考えられるものの、処分場閉鎖後の化学的環境の変遷を予測する上で初期条件を与える情報として重要である。化学的環境を示す指標のうち、長期安全性を評価する上で重要な項目は、間隙水の水素イオン濃度 (pH) と酸化還元電位 (Eh) である。

(d) 微生物活動の変化

微生物は地球上のあらゆるところに存在し、処分場が建設される地下深部も例外ではない。地下環境で活動する微生物が処分場閉鎖後の Eh, pH などの化学条件の変化に影響を及ぼすことが指摘されている[41]ことから、長期安全性を評価する上で重要な項目であると判断される。

c 予想される影響の大きさについてのまとめ

閉鎖前の作業環境の安全性に関する影響評価、閉鎖後の長期安全性に関する影響評価のそれぞれにおいて、前掲表 4.2.3-1 に整理した化学的影響の検討対象となり得る項目が及ぼしうる影響の大きさを検討した。その結果を表 4.2.3-10 にまとめて示す。

表 4.2.3-10 予想される影響の大きさのまとめ

化学的影響の検討対象となり得る項目	回収可能性維持による安全性への影響の大きさ	
	閉鎖前の作業環境の安全性に関する影響評価	閉鎖後の長期安全性に関する影響評価
① 人工部材（セメント系材料、鋼材）の変質	△ (補修頻度の観点で◎)	△
② 高 pH 地下水による天然バリアの変質	△	△
③ 鋼材、PEM 容器の腐食による水素ガス発生	○ (回収する場合)	△
④ 坑道近傍の岩盤の風化	△	○
⑤ 操業段階（掘削、埋め戻し）における化学的環境の変化	△	○
⑥ 微生物活動の変化	△	○

5) 影響評価の現状の把握

4.2.3(1)4)に示した化学的影響の検討対象となりうる項目について、最新の知見に基づき、影響評価の現状を把握することを試みた。具体的には、既往検討に関する文献調査を行い、評価方法、解析用パラメータの設定方法、得られた成果、現状の課題などについて整理した。

a 人工部材（セメント系材料、鋼材）の変質

人工部材のうち、セメント系材料の変質の評価方法に関しては、近年では「放射性廃棄物の地層処分におけるセメント影響によるニアフィールド長期挙動評価ワークショップ」[42]に取りまとめられている。

同ワークショップでは、セメント系材料の変質のモデル化の現状や、短期・長期の評価における課題について幅広く議論がなされた。その結果、現状ではソースターム、移動現象、変質のいずれにも課題を有することが指摘された。加えて、スコープに応じたモデル化の必要性が認識されたが、結論を得るには至っていない。

さらに、2014年には、処分場を構成する各部位に適用するセメント種類の選定に向けた検討がなされている[43]。この中では、長期的評価の観点からセメント系材料の現状と課題を整理するとともに、処分システムで生じるセメント系材料の変遷過程を状態図として示している。解析的手法に関しては、第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ[44]（以下、「第2次 TRU レポート」と称する）を引用し、結論として、グラウト、床版、支保、インバートの劣化の影響は限定的であり、強度プラグのセメント影響に着目することが重要であると述べている。

セメント系材料の変質の長期的評価については、先に述べた第2次 TRU レポートに詳細な手法の解説があり、これを参考にすることで実施可能と考えられる。なお、セメント系材料の溶解について、速度論的なパラメータの集積は十分でないが、実験の再現性の良い溶解モデルがいくつか提案されている（例えば[45]）ことから、これを用いることができると考

b 高 pH 地下水による天然バリアの変質

高 pH 地下水による天然バリアの変質に関しては、平衡論に基づいた解析例[36]があり、CSH が天然バリア内に生成され、その沈殿フロントが進行していく様子が示されている。この解析においては、CSH の Ca/Si 比は1種類だけであるが、セメント材料の変質の解析で解説したような溶解モデルを用いれば、より現実に近いシミュレーションが可能になると考えられる。

c 鋼材、PEM 容器の腐食による水素ガス発生

鋼材や PEM 容器の腐食による水素ガス発生に関しては、還元環境下における鉄の腐食および水素ガス発生に関する研究報告が数多くある（例えば[46]）。これら既往の研究によると、腐食速度は様々な要因により変化し、これを演繹的にモデル化する試みは成功していない。このことから、鋼材や PEM 容器の腐食による水素ガス発生のモデル化においては、既往の腐食速度の測定データから平均的なガス発生速度を仮定し、これに基づいて水素ガス発生量を計算することが現実的であると判断される。

d 坑道近傍の岩盤の風化

坑道近傍の岩盤の風化は、坑道壁面からの酸素の供給により、岩盤中へ酸化フロントが進展し、黄鉄鉱のような硫化鉱物が酸化されることによって引き起こされる[39]。このメカニズムは、岩盤への酸素の拡散、硫化鉱物の酸化反応によって正確に予測可能であることが示されており、地球化学および物質移行解析でのモデル化は比較的容易であると判断される。

e 微生物活動の変化

岩盤内で起こりうる微生物活動は、基本的にサイト特有であるため、あるサイトについて構築されたモデルが他のサイトに適用できる可能性は低いと考えられる。しかしながら、JAEA が幌延 URL での計測に基づいて構築した微生物量の定量に基づく微生物活動のモデル化手法[47]は、ある程度の演繹性を持っており、また地球化学解析コードに PHREEQC を用いていることから、他のサイトでも同様の調査・検討を行うことにより、微生物活動のパラメータを取得し、解析を実施することが可能と考えられる。

6) 影響評価の現状のまとめ

以上の影響評価の現状についてまとめを踏まえ、4.2.3(1)4)に示した化学的影響の検討対象となりうる項目の影響の大きさを考慮して、次年度の化学的影響評価において取り組むべき課題を選定した。その結果を表 4.2.3-11 に示す。また、水理学的影響評価結果から化学的影響評価へのデータの引き渡す情報との関係を図 4.2.3-3 に示す。

表 4.2.3-11 検討対象となる項目のまとめと次年度以降の取り組み

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

◎：重点的、○：補足的、△：予定なし

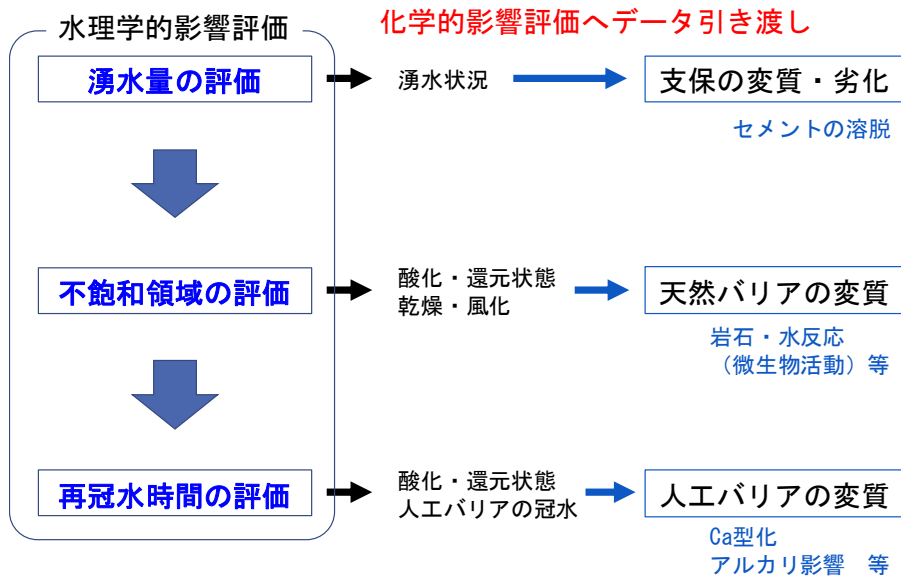


図 4.2.3-3 水理学的影響評価結果から化学的影響評価へのデータの引き渡す情報との関係

(2) 効果的な検討方法の構築

回収可能性維持による化学的影響の評価について、主に処分システムの長期性能評価を目的として検討・開発されてきた評価手法の現状を踏まえ、現状で可能であり、効率的かつ効果的なモデル解析による検討方法を構築し、検討手順の提案を行うこととした。また、今後の中・長期的な技術開発の提案も併せて行い、平成 30 年度以降の検討につなげることとした。

1) 検討方法の構築方針

先に述べたとおり、化学的影響評価のための地球化学的反応解析は、変数や方程式の数が多いため、計算の負荷が大きい。加えて、坑道周辺のような地下水流動が生じる場では、地球化学的反応解析と物質移行との連成解析が必要になる。このため、現実的な時間で解析を実施するためには、モデルの次元を減らしたり、モデルに取り入れる化学種および反応をなるべく絞り込んだりする工夫が必要になる。

そこで、ここではまず別途実施しているパネルスケール、および処分坑道詳細モデルを用いた水理学的影響評価の結果に基づいて、坑道近傍の地球化学—物質移行連成解析用 1 次元モデルを構築することとした。モデルの概念図を図 4.2.3-4 に示す。

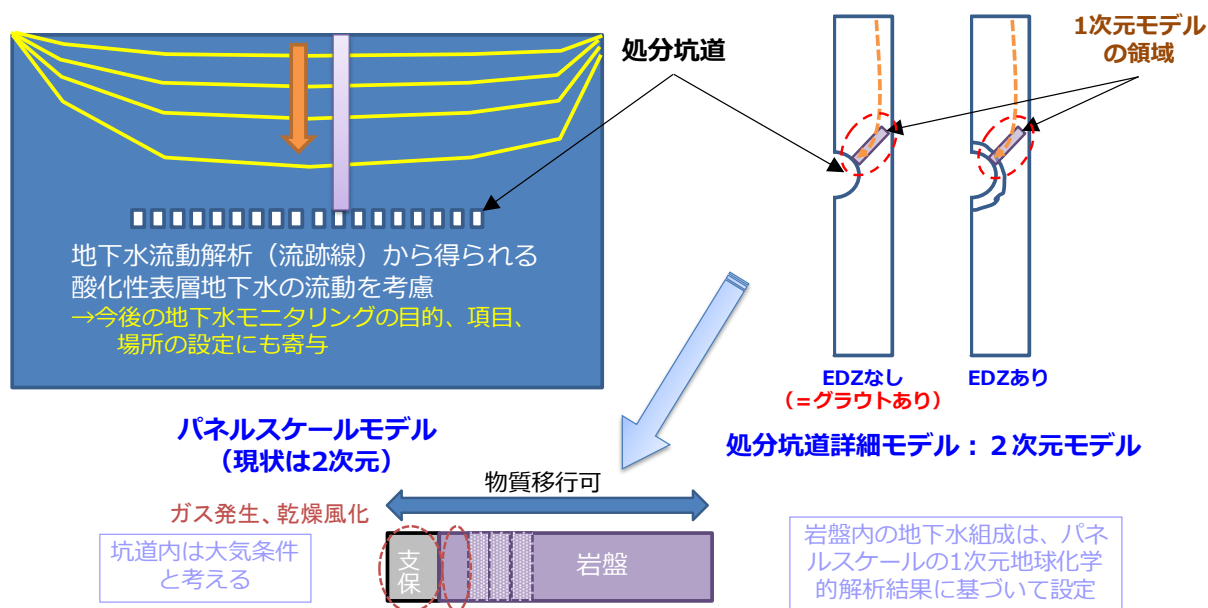


図 4.2.3-4 坑道近傍の地球化学的解析用 1 次元モデルの概念

2) 解析コード

解析コードには、地球化学解析に最も広く用いられている PHREEQC を採用した物質移行連成解析コードを用いることとする。地球化学解析に PHREEQC を用いることにより、熱力学データベースに研究機関が整備した一貫性のあるものを用いることができ、加えて第 2 次 TRU レポートにおけるセメント材料の解析手法や、幌延サイトで検討された微生物活動の解析手法[47]を流用することができ、有利であると判断される。

このような連成解析コードの例として、第 2 次 TRU レポートにおける解析で用いられた

PHREEQC-TRANS や、パブリックドメインの HP1[48]が挙げられる。

3) モデルパラメータの設定方針

地球化学解析に用いる熱力学データベースには、JAEA が整備している TDB にセメント関連の熱力学データを加えたものを用いる。なお、CSH の溶解モデルには、杉山ら[45]が提案している固溶体モデルを用いることとする。

岩盤を構成する鉱物としては、幌延サイトにおける検討を参考にしながら、シリカ、炭酸塩鉱物、黄鉄鉱を主体とした構成を設定する。また、岩盤の移動物性にも、幌延サイトの知見をなるべく採用することとする。

セメント系材料の組成には、第 2 次 TRU レポートで用いられた OPC に基づく値を設定することとし、その移動物性にも同レポートの設定を採用することとする。

鋼材や PEM 容器の腐食による水素ガス発生モデル化については、既往の腐食速度の測定データから還元環境における平均的なガス発生速度を仮定し、これに基づいて水素ガス発生量を計算することとする。

微生物活動のモデルおよびパラメータは、幌延サイトでの検討で用いられた値[47]を採用し、解析例を示すこととする。

4) 解析ケース

解析ケースの水理場としては、平成 29 年度の水理検討で用いられた EDZ なしと EDZ およびグラウトありの 2 ケースを設定することとする。その他、地球化学に関するパラメータに関しては、いくつかの場合分けを設定し、合計で 10 ケース程度を実施する。

4.3 回収可能性維持期間に係る情報の整理

本章では、前節の定量的な評価で得られた検討結果、および次年度以降に計画している検討も踏まえて、回収可能性維持期間の決定に係る情報を、定量化に必要な技術検討項目を対象に整理を行う。

4.3.1 開放坑道の健全性（空間安定性）

定量化に必要な技術検討項目には、開放坑道の健全性（空間安定性）と示されていることから、これは、基本的には坑道の空間安定性そのものを示していると解釈できる。しかし、開放坑道の健全性（空間安定性）の上位の項目として、作業坑道内の作業空間の安全性記されている。湧水を適切に処理しないと坑道が水没して作業空間の安全性を確保できないことから、ここでは、湧水量も作業空間の安全性に係る事項と解釈した。

(1) 空間安定性

昨年度の検討[1]の「3.3 坑道安定性に関する解析的評価」の解析結果から、空間安定性に基づく回収可能性維持期間に関する情報を得ることができる。例えば、昨年度ケース7（新第三紀堆積岩、横置き方式、状態オプション①（処分坑道に PEM））は、処分坑道に埋戻し材を設置しない場合であることから、この解析結果から得られる坑道安定性の保持期間が、回収可能性維持期間を検討するうえでの情報の一つとなる。

本検討では、図 4.2.1-27 に示した肩部の要素の最大せん断ひずみが限界せん断ひずみ（上限）を超えた期間や、図 4.2.1-24 に示した脚部以外の吹付けコンクリート応力が経時変化を考慮した設計基準強度を超えた期間で坑道安定性の保持期間を評価している。同様にして、昨年度ケース7の肩部の着目要素における最大せん断ひずみの経時変化を図 4.3.1-1 に示す。この例によると、肩部の岩盤の最大せん断ひずみから評価した場合の坑道安定性の保持期間は 252 年と評価される。また、着目要素における吹付けコンクリート応力の経時変化を図 4.3.1-2 に示す。脚部以外の吹付けコンクリートから評価した場合の坑道安定性の保持期間は、140 年と評価される。

ここで示した坑道安定性の保持期間は、坑道の補修・補強、および、支保工の更新を行わない場合のものであり、その条件における回収可能性維持期間を検討するための情報となる。

実際の地下施設の建設・操業期間中には、処分坑道の挙動を確認するために内空変位、地中内変位および吹付けコンクリート応力のモニタリングおよび日常点検・定期点検の維持管理が行われると想定される。この定期点検では、従来の維持管理と同様に、モニタリングで得られた計測データや点検記録に基づく健全性の評価や、今後の処分坑道の挙動の再予測が行われると考えられる。そして、将来、回収維持期間中に処分坑道の機能を維持できないと予測される場合には、予め補修・補強等の対策工を検討し、対策を行うと考えられる。このような処分坑道の維持管理のための費用や補修・補強等を行うための費用は、回収可能性維持に要する費用の一部となり、これも回収可能性維持期間を検討するための情報となる。

回収可能性維持による影響を低減させる技術には、補修・補強以外に坑道安定性の初期性能を向上させる対策も考えられる。昨年度は、ケース8【新第三紀堆積岩、横置き方式、状態オプシ

ョン②（処分坑道まで埋戻し）】に対して、支保工の剛性裕度確保した場合（ケース9）、および吹付けコンクリートの溶脱を抑制した場合（ケース10）の影響低減技術の定量的な評価を行っている[1]。昨年度のケース7とケース8の比較結果から、埋戻しをしてもしなくても、坑道安定性の結果に差はなかった。よって、昨年度のケース7に対して支保工の剛性裕度確保した場合、または、吹付けコンクリートの溶脱を抑制した場合を評価すると、ケース9とケース10と同様の保持期間になると予想される。

このように、工学的な対策による坑道安定性の保持期間への効果を定量的に評価できれば、そこで得られた保持期間は、回収可能性維持期間を検討するための情報となる。また、初期性能を向上させるための費用は回収可能性維持に要する費用の一部となり、これも回収可能性維持期間を検討するための情報となる。

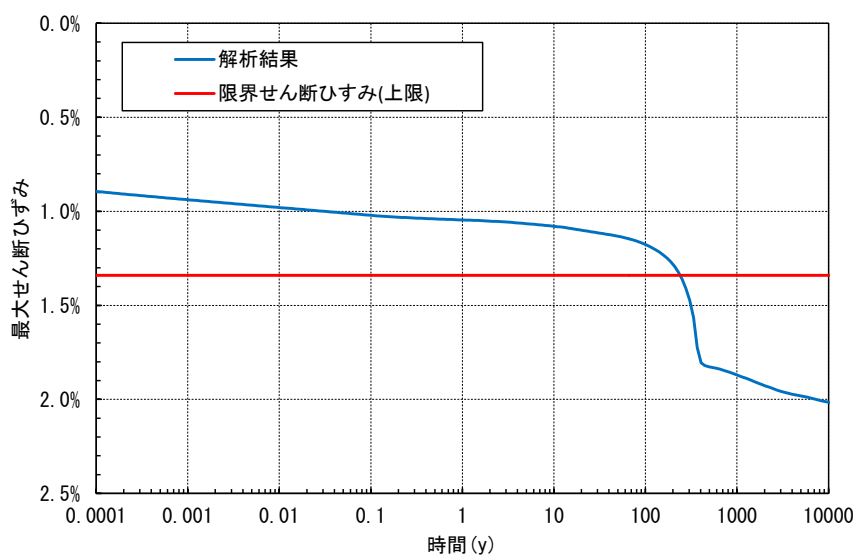


図 4.3.1-1 昨年度ケース7における肩部の要素の最大せん断ひずみの経時変化[1]

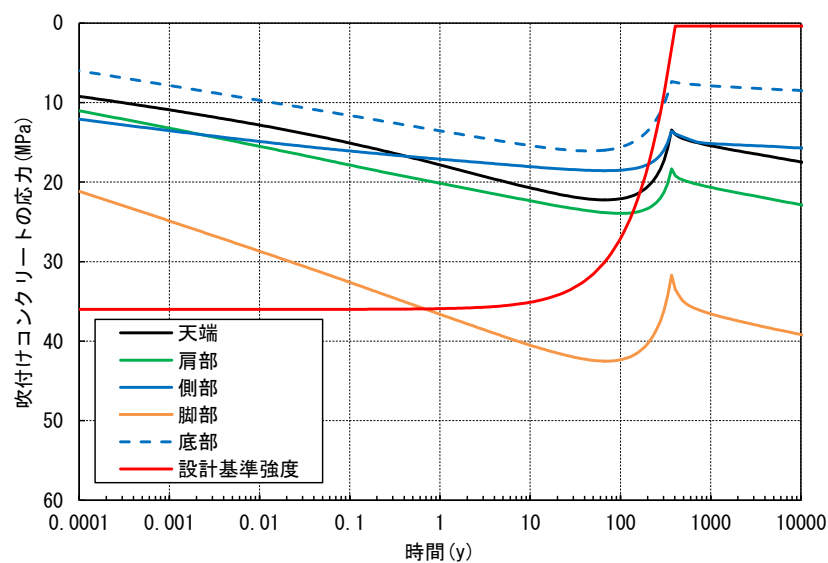


図 4.3.1-2 昨年度ケース7における着目要素の吹付けコンクリート応力の経時変化[1]

(2) 湧水量

本検討の「4.2.2 水理学的影響評価方法の検討」では、処分坑道と連絡坑道の両方を掘削したときの湧水量が示されている。例えば、ケース 1a (Through-type) とケース 1b (Dead-end-type) の湧水量の経時変化を図 4.3.1-3 と図 4.3.1-4 に示す。これらの結果から、排水設備の仕様が設定され、回収可能性維持期間と排水費用の関係が得られる。この排水費用には、排水設備の維持費用、排水処理費も含めて考える必要がある。通常、この排水費用は回収可能性維持期間に比例して増加することから、排水費用はコストの観点から回収可能性維持期間を検討するための情報となる。

湧水に関する影響低減技術には、グラウトによる周辺岩盤の改良工が考えられる。グラウトによる湧水量低減効果は、図 4.2.2-31 および図 4.2.2-32 に示されている。この場合、湧水量から排水費用が求められると同時に、グラウト改良工の費用も分かることから、これらの費用はコストの観点で回収可能性維持期間を検討するための情報となる。

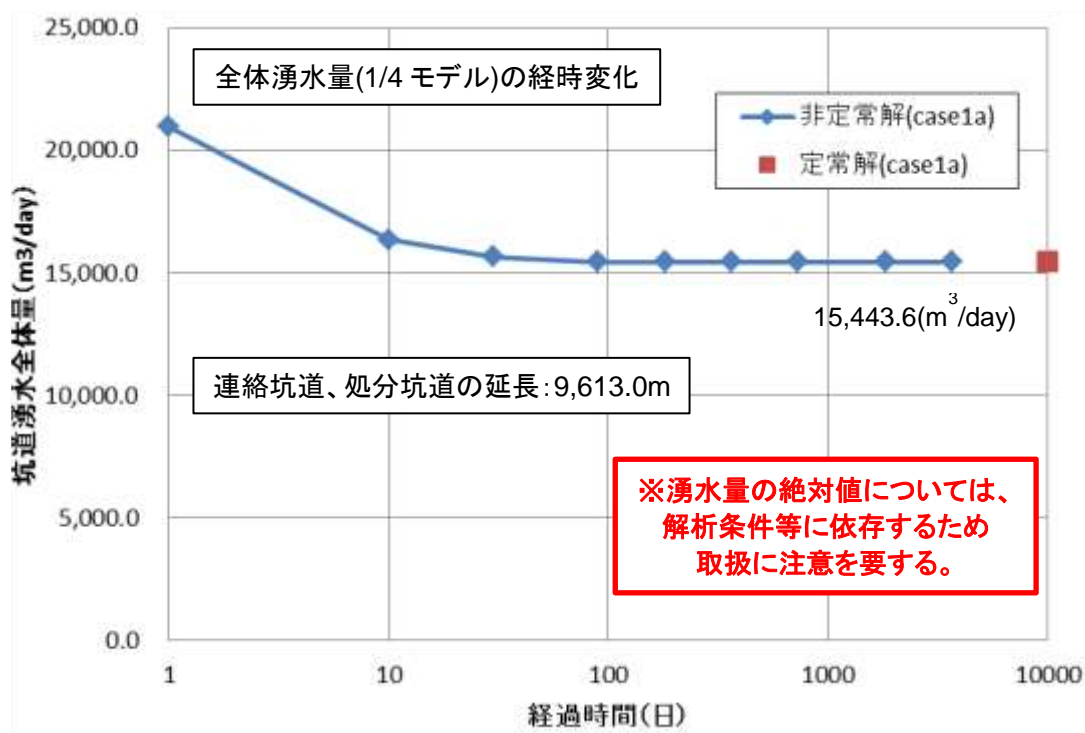


図 4.3.1-3 Through-type における連絡坑道と処分坑道からの湧水量 (図 4.2.2-25(a)再掲)

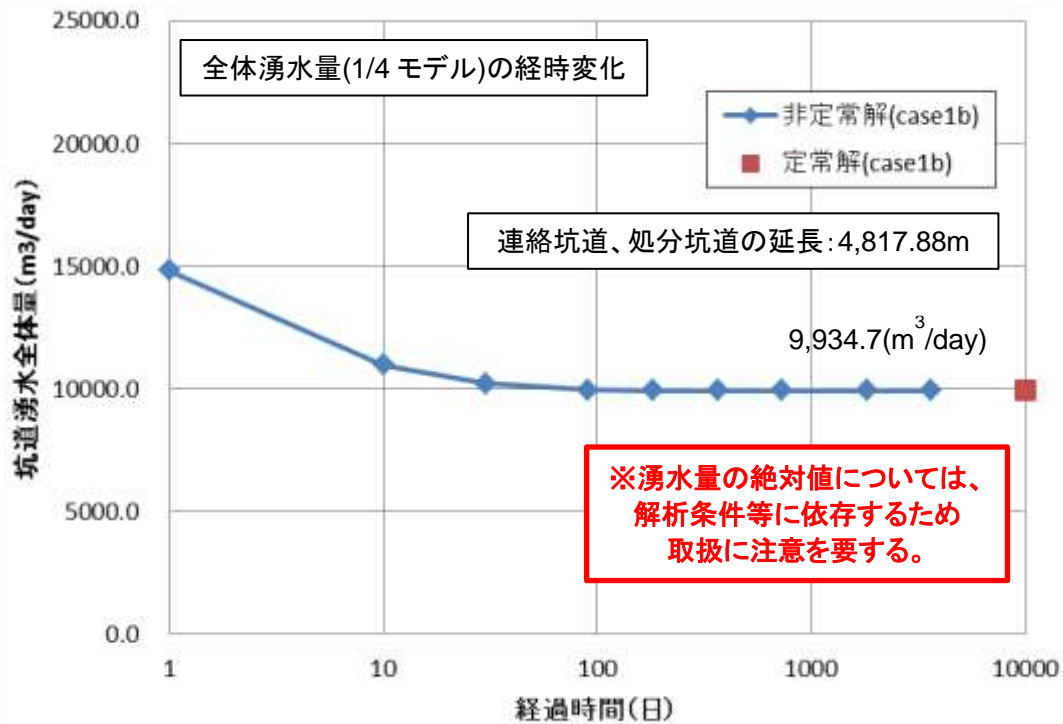


図 4.3.1-4 Dead-end-type における連絡坑道と処分坑道からの湧水量 (図 4.2.2-26(a)再掲)

4.3.2 埋戻した坑道の再利用時の健全性

前項と同様に、埋戻した坑道の再利用時の健全性に対しても、空間安定性と湧水量について整理を行った。

(1) 空間安定性

ここでの空間安定性とは、一旦埋戻した坑道を回収作業時に再利用するときの安定性のことを示している。本事業の昨年度の検討[1]において、埋め戻した処分坑道を対象とした解析は行っているものの、処分坑道掘削→埋戻し→埋戻し材の撤去の工程を想定した解析を行っていない。そこで、これまでに力学的影響評価で得られた結果から、埋戻し材を撤去した場合の坑道の安定性について検討した。

埋戻し材の設置後の応力状態について、昨年度ケース 8 [1]【新第三紀堆積岩、横置き方式、状態オプション② (処分坑道まで埋戻し)】における経過時間 200 年後の周辺岩盤、吹付けコンクリート、埋戻し材の主応力を図 4.3.2-1 に示す。周辺岩盤や吹付けコンクリートの最大主応力は $10^0 \sim 10^1$ MPa オーダーであったが、埋戻し材の最大主応力は $10^{-3} \sim 10^{-2}$ MPa オーダーであることが分かった。ここでは、経過時間 200 年後だけを図示しているが、どの経過時間においても、埋戻し材に生じた応力が十分に小さい状態であった。埋戻し材の応力が十分に小さいということは、埋戻し材は支保工や周辺岩盤から圧縮されているわけではなく、解析上、埋戻し材の撤去時の解放力は無視できることを示している。つまり、埋戻し材をどの時点で撤去しても、昨年度ケース 8 のように埋戻し材を撤去しない場合と比較して、周辺岩盤の挙動は変わらないと考えられる。したがって、埋戻した坑道の再利用時の安定性の保持期間は、埋戻した場合の坑道安定性の保持期

間と変わらないと考えられる。

昨年度ケース8の肩部の着目要素における最大せん断ひずみの経時変化を図 4.3.2-2 に示す[1]。これによると、肩部の岩盤の最大せん断ひずみから評価した場合の坑道安定性の保持期間は 252 年と評価される。また、着目要素における吹付けコンクリートの応力の経時変化を図 4.3.2-3 に示す。脚部以外の吹付けコンクリートから評価した場合の坑道安定性の保持期間は 140 年と評価される[1]。

ここで示した坑道安定性の保持期間は、坑道の補修・補強、および、支保工の更新を行わない場合のものであり、その条件における回収可能性維持期間を検討するための情報となる。

実際の処分坑道では、埋戻した後の回収可能性維持期間中、処分坑道を再利用する場合に備えて、周辺岩盤や吹付けコンクリートの挙動のモニタリングを行い、その計測データに基づいて再利用時の安定性を再評価することが想定される。このようなモニタリングや再評価のための費用は、回収可能性維持に要する費用の一部となり、これも回収可能性維持期間を検討するための情報となる。

坑道安定性に関する影響低減技術には、坑道安定性の初期性能を向上させる対策が考えられる。昨年度の検討では、ケース8に対して、支保工の剛性裕度確保した場合、および吹付けコンクリートの溶脱を抑制した場合の定量的評価を行っていて、坑道安定性の保持期間が延長されることを示している[1]。このように、工学的な対策による坑道安定性の保持期間への効果を定量的に評価できれば、そこで得られた保持期間は、回収可能性維持期間を検討するための情報となる。また、初期性能を向上させるための費用は回収可能性維持に要する費用の一部となり、これも回収可能性維持期間を検討するための情報となる。

本検討の解析例では、埋戻し材には応力がほとんど生じていなかったが、仮に、埋戻し材に生じた応力が無視できない場合、埋戻し材撤去後の坑道の挙動は、撤去しない場合とは異なるので、別途解析を行う必要がある。ただし、技術的な課題は小さく、通常の坑道掘削解析と同様に埋戻し材の応力から解放力を計算して、埋戻し材の要素を取り除くと同時にその解放力を坑道壁面に与えればよい。

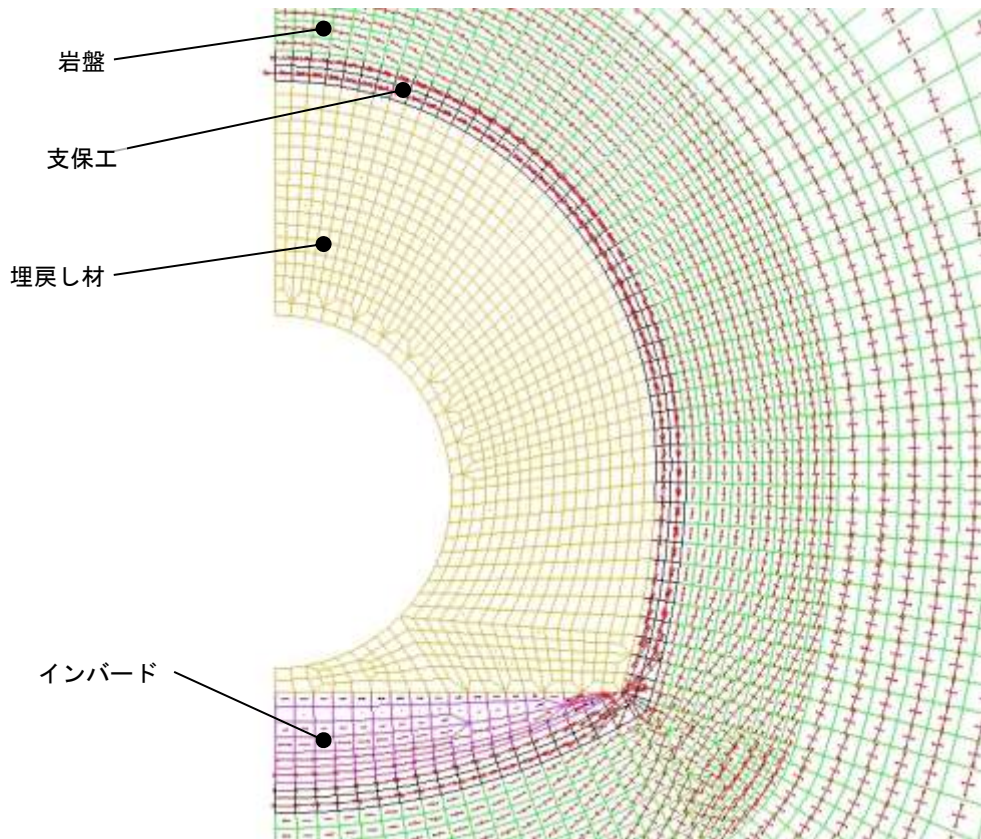


図 4.3.2-1 昨年度ケース 8 における経過時間 200 年後の主応力

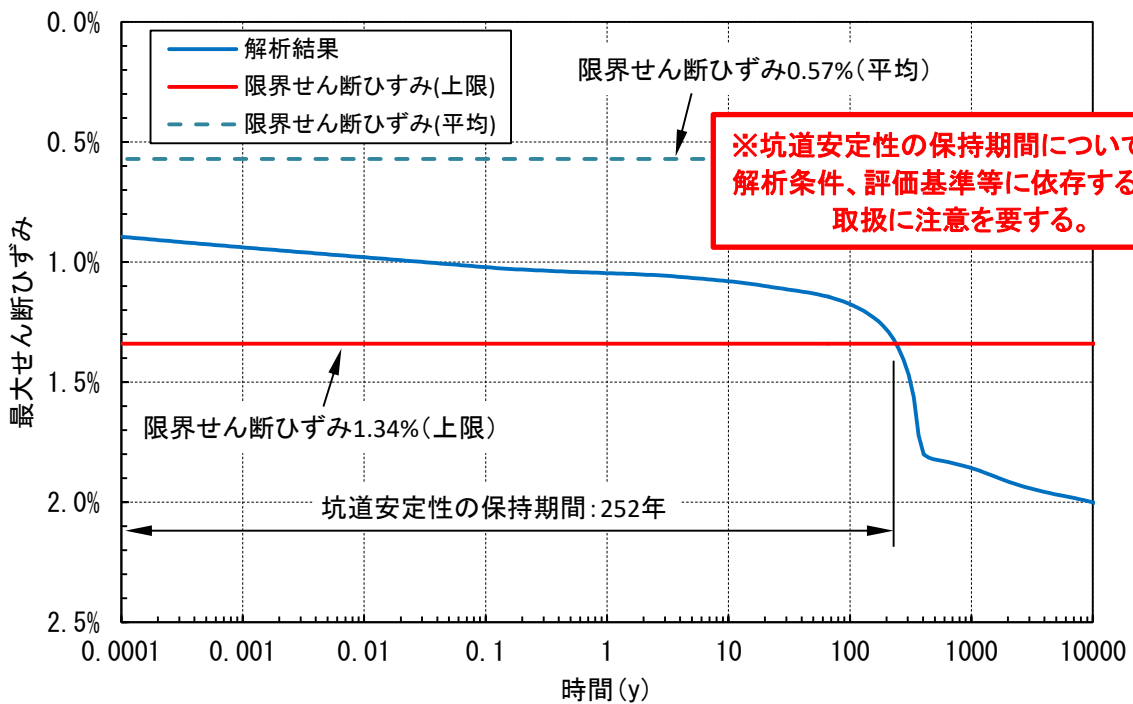


図 4.3.2-2 肩部の要素における最大せん断ひずみの経時変化（昨年度ケース 8） [1]

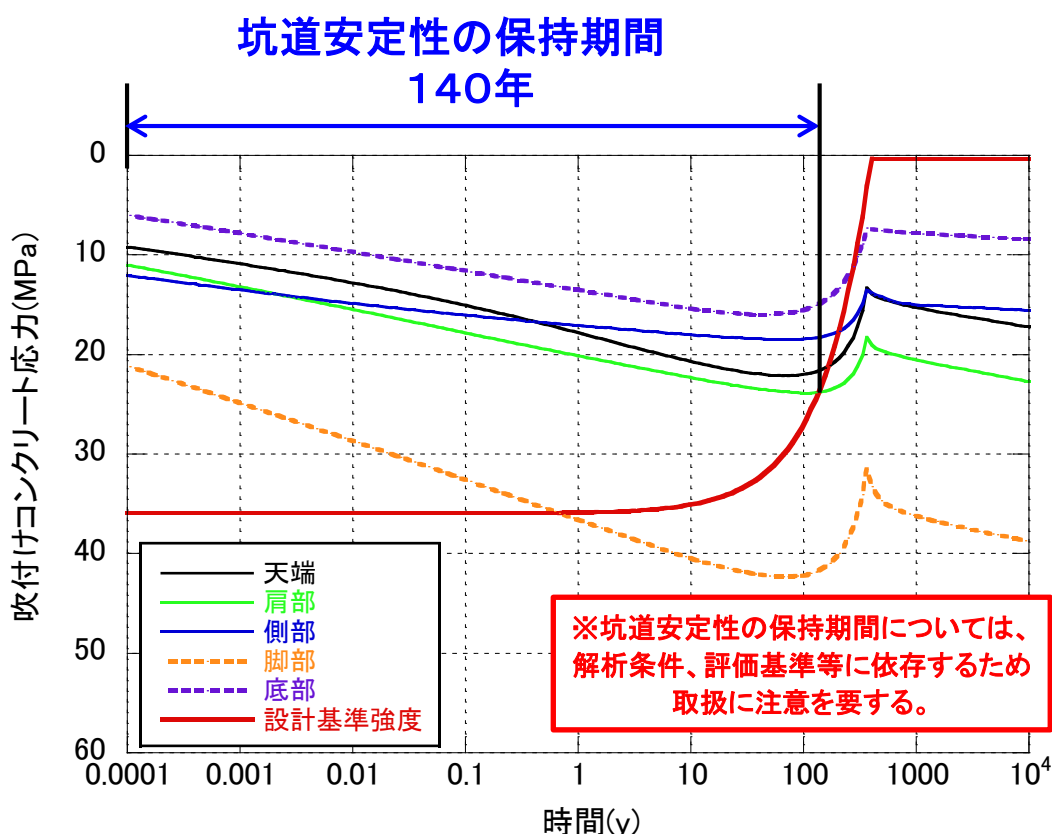


図 4.3.2-3 着目要素における吹付けコンクリート応力の経時変化
(昨年度ケース8 図 4.2.1-25 再掲) [1]

(2) 湧水量

ここでの湧水量とは、一旦埋戻した坑道を回収作業時に再利用するとき生じる湧水量を示している。本検討では、処分坑道掘削→埋戻し→埋戻し材の撤去の工程を想定した解析を行っていない。そこで、これまでの水理学的影響評価で得られた結果から、埋戻し材を撤去した場合の湧水量を推定した。

本年度と同じ解析条件で、かつ、全処分坑道の埋戻し材を撤去する場合、最終的な定常状態の湧水量は、表 4.3.2-1 と

表 4.3.2-2 に示された処分坑道掘削時の定常湧水量の結果と変わらないことが予想される。また、定常状態に至るまでの湧水量については、図 4.2.2-31 および図 4.2.2-32 と同様に、埋戻し材の撤去直後の湧水量は多いが、徐々に減少して定常状態に収束すると予想される。埋戻し材の撤去直後の湧水量は、埋戻し後の水圧の回復の程度にも依存すると考えられ、仮に、水圧が坑道掘削前の状態まで回復している場合は、埋戻し材撤去時の湧水量は、図 4.2.2-31 および図 4.2.2-32 に示された最大値と同じになると考えられる。水圧が回復していない場合は、最大値よりも少なくなると考えられる。

これらの湧水量の算出結果から、回収可能性維持期間と排水費用の関係が想定できると考えられる。通常、排水費用は回収可能性維持期間に比例して増加することから、この排水費用はコス

トの観点から回収可能性維持期間を検討するための情報となる。

湧水によって安全性に影響があると判断された場合には、影響低減技術が必要となる。この影響低減技術には、グラウトによる周辺岩盤の改良工が考えられる。グラウトを行った坑道を一旦埋戻し、その後再利用した場合の最終的な定常状態の湧水量は、表 4.3.2-1 と

表 4.3.2-2 に示された定常湧水量の結果と変わらないことが予想される。そして、湧水量から排水費用およびグラウト改良工の費用が分かることから、回収可能性維持期間を検討するための情報となる。

再利用時に一部の処分坑道から埋戻し材を撤去する場合や、再利用時の湧水量の経時変化を詳細に知る必要がある場合には、そのような条件を考慮して解析を改めて行う必要がある。

表 4.3.2-1 処分坑道掘削時の定常湧水量の算出結果 (Through-type、表 4.2.2-9 再掲)

地下施設	延長(m)	case1a (基本ケース)	case2a (グラウトあり)	case3a (キャップ・ロックあり)
		湧水量(m ³ /day)	湧水量(m ³ /day)	湧水量(m ³ /day)
連絡坑道	1,496.0 (15.6%)	6,180.9 (40.0%)	3,052.6(28.7%)	4,575.9 (41.5%)
処分坑道	8,116.9 (84.4%)	9,262.8 (60.0%)	7,571.3 (71.3%)	6,440.6 (58.5%)
全体	9,612.9 (100.0%)	15,443.6 (100.0%) 比率：1.00	10,623.9 (100.0%) 比率：0.68	11,016.5 (100.0%) 比率：0.73

※湧水量の絶対値については、解析条件等に依存するため取扱に注意を要する。

表 4.3.2-2 処分坑道掘削時の定常湧水量の算出結果 (Dead-end-type、表 4.2.2-10 再掲)

地下施設	延長(m)	case1b (基本ケース)	case2b (グラウトあり)	case3b (キャップ・ロックあり)
		湧水量(m ³ /day)	湧水量(m ³ /day)	湧水量(m ³ /day)
連絡坑道	672.8 (14.0%)	2,455.6 (24.7%)	1,533.4(28.7%)	2,238.6 (25.4%)
処分坑道	4,145.1 (86.0%)	7,479.1 (75.3%)	6,295.0 (71.3%)	6,575.3 (74.6%)
全体	4,817.9 (100.0%)	9,934.7 (100.0%) 比率：1.00	7,828.3 (100.0%) 比率：0.79	8,813.8 (100.0%) 比率：0.89

※湧水量の絶対値については、解析条件等に依存するため取扱に注意を要する。

4.3.3 坑道開放期間中の継続する坑内湧水の影響

ここで着目している坑内湧水への影響とは、回収可能性維持期間中の開放坑道の存在によって継続される坑内湧水に伴って起こり得る緩衝材の流出現象、人工バリアの状態変遷、緩衝材の再冠水過程への影響等、人工バリアに対する影響のことを指している。

緩衝材の流出現象や人工バリアの状態変遷に関する研究については、原環センター殿や国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」と称する）等によって行われていることから、流出や状態変遷の評価については、それらの成果を活用することができると考えられる。

本検討の水理学的影響評価の結果からは、ベントナイトの流出を評価するための基礎データとして、湧水量を提示することができる。流出評価のための基礎データの例は、「4.2.2(3)2 坑道湧水量による評価」にて示されていて、ベントナイトの流出評価のための湧水量の例を図 4.3.3-1 に示す。この図にも示されているように、処分坑道内を処分孔と坑道部に分けて示すことも可能となっている。また、湧水によってベントナイトの流出など安全性に影響が判断された場合には、影響低減技術が必要となる。この影響低減技術には、グラウトによる改良工が考えられる。本検討では、図 4.2.2-46 においてグラウトを行った場合の湧水量低減効果も示している。

本検討での解析条件は均質媒体であり、境界条件が一定の場合には、湧水量は周辺岩盤の透水係数と比例する。岩盤の透水係数の違いによる湧水量については、本検討結果を用いて透水係数に比例する湧水量を算出すればよい。すなわち、岩盤の透水係数が 1 オーダー小さい場合は、湧水量も 1/10 になる。

なお、解析における境界条件の設定は、処分坑道周辺の動水勾配が最も小さい条件での解析結果であり、処分坑道のすべての場所を代表している湧水量ではなく、処分坑道内では最も湧水量の少なくなる条件であることに留意する必要がある。すなわち、処分パネル内での湧水量の違いについては、パネルスケールモデル解析結果等を踏まえて、総合的に評価することが必要である。

なお、解析における境界条件の設定から、ここで示された処分坑道の流量は、処分パネル中央部付近の解析結果であり、処分パネルのすべての場所を代表している湧水量ではない。処分パネル中央部付近における処分坑道周辺の動水勾配は最も小さい状態であり、処分坑道内では最も湧水量の少なくなる条件となっているに留意する必要がある。特に、処分パネルの端部側は、中央部と比較して動水勾配が大きくなることから、流量が増加することも想定される。したがって、処分パネル内での湧水量の違いについては、パネルスケールモデル解析結果等を踏まえて、総合的に評価することが必要である。

本検討では解析結果を用いた一例として示したものである。ベントナイト成分の流出評価に関しては、今後、別事業での検討成果を踏まえて検討を行うことが望ましい。

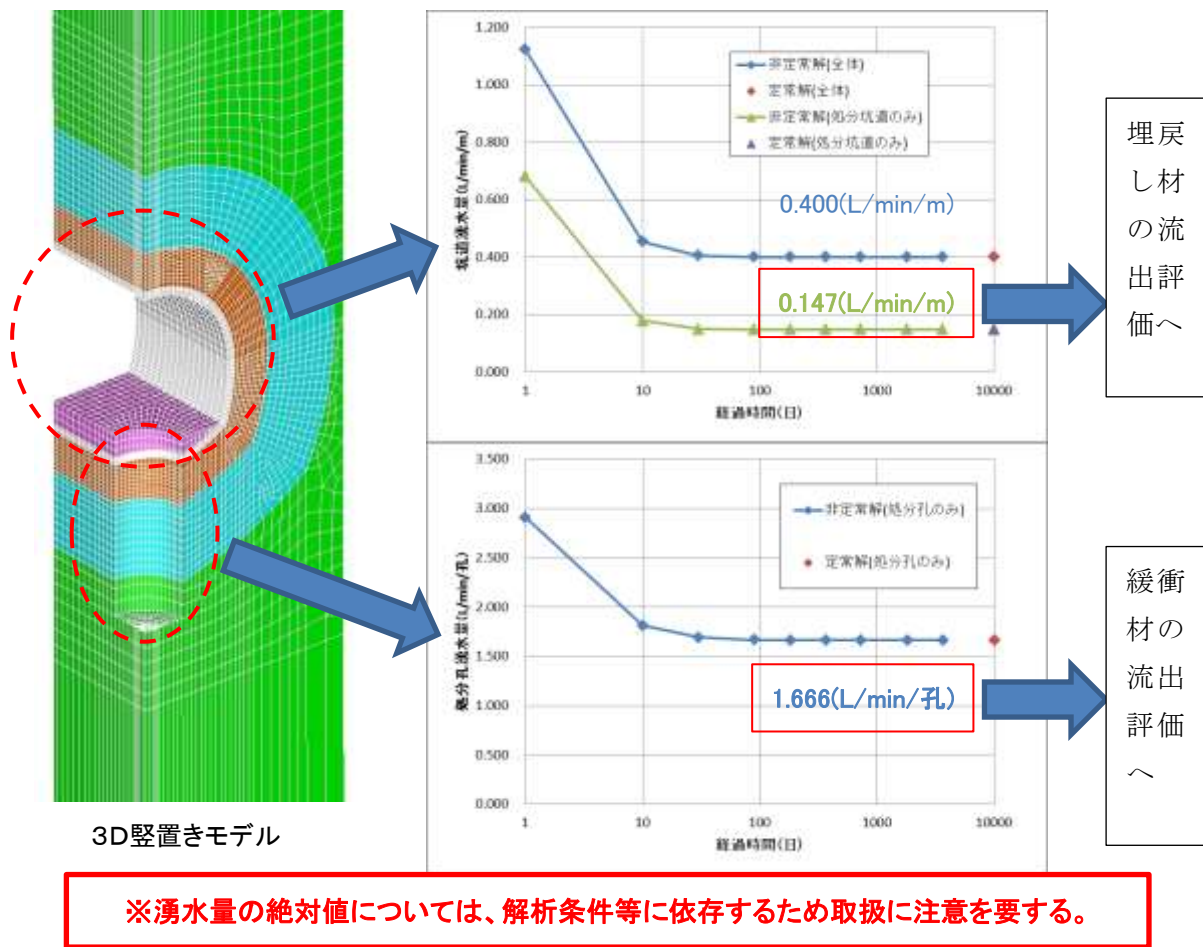


図 4.3.3-1 ベントナイト流出評価のための湧水量の提示例 (図 4.2.2-79 再掲)

4.3.4 地下水の引き込みによる擾乱影響の程度と範囲

ここで着目している地下水の引き込みとは、坑道掘削に伴って坑内に湧水が生じることによって、地下深部とは化学組成が異なる地表面近傍の酸化性表層地下水が、処分坑道に引き込まれていくことを指している。また、擾乱影響とは天然バリアに対する影響を示している。

サイトの条件にもよると考えられるが、坑道を埋め戻さずに開放していれば、いずれは酸化性表面地下水が処分坑道に到達するものと考えられる。どの程度の時間で到達するのかは、地下水流動解析における流跡線解析から評価することが可能である。また、処分坑道の周辺岩盤の地質環境への化学的影響評価手法については、「4.2.3 化学的・熱的影響評価方法の検討」にて示した通り、現在、検討中である。想定している坑道近傍の地球化学的解析用 1 次元モデルの概念を図 4.3.4-1 に示す。具体的な解析方法や結果の例については、次年度およびそれ以降の検討にて示す予定である。

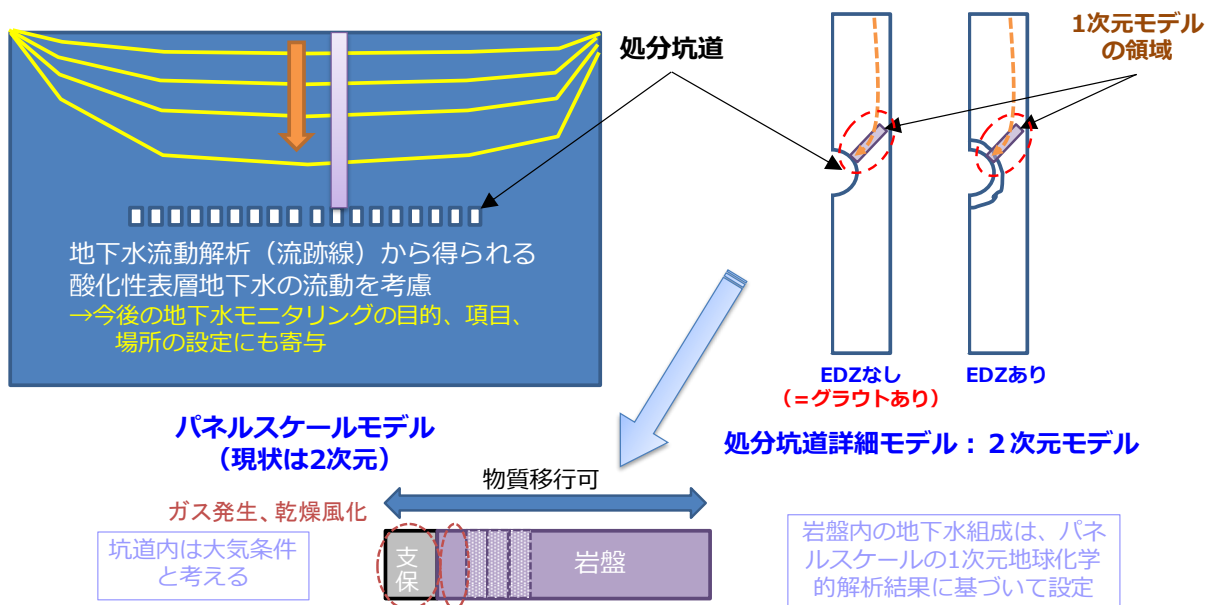


図 4.3.4-1 坑道近傍の地球化学的解析用 1次元モデルの概念 (図 4.2.3-4 再掲)

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

酸素の供給や乾燥環境による母岩への影響範囲と程度を評価する手法についても、「4.2.3 化学的・熱的影響評価方法の検討」にて示した通り、現在、検討中である。想定している解析モデルの概念を図 4.3.4-1 に示す。具体的な解析方法や結果の例については、次年度およびそれ以降の検討にて示す予定である。

4.3.6 ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度

処分坑道を埋戻しした後の再冠水過程について評価した例については、「4.2.2(3)1 再冠水時間による評価」に示されている。

本検討では、回収可能性維持期間を想定した地下水流動解析結果を初期値とし、閉鎖後の再冠水挙動に関する非定常地下水流動解析により、処分場の再冠水時間の把握を行っている。再冠水時間に対する評価には、パネルスケールモデルと処分坑道詳細モデルを用いている。また、解析手法についても飽和・不飽和解析手法 (FEM) および二相流解析手法 (FDM) を用いている。

再冠水過程の例として、Dead-end-type のパネルスケールモデルに対する飽和・不飽和解析手法による結果を図 4.3.6-1 に示す。この例では処分坑道のみを埋戻した状態を想定していて、連絡坑道は開放されたままである。今回の解析条件の場合、処分坑道の水理学的な再冠水時間については、1,000 年よりも十分短期間で回復すると考えられる。本検討条件では処分坑道の水理学的な再冠水時間については、1,000 年よりも十分短期間で回復する結果が得られたものの、サイトスペシフィックな条件を考慮した解析の場合、地下水位の回復などの影響が想定され、本検討結果よりも再冠水時間が長くなる可能性を否定できないことに注意する必要がある。

処分坑道を埋戻しした後の化学的環境の回復過程については、前項と同様に、現在検討中である。具体的な解析方法や結果の例については、次年度およびそれ以降の検討にて示す予定である。

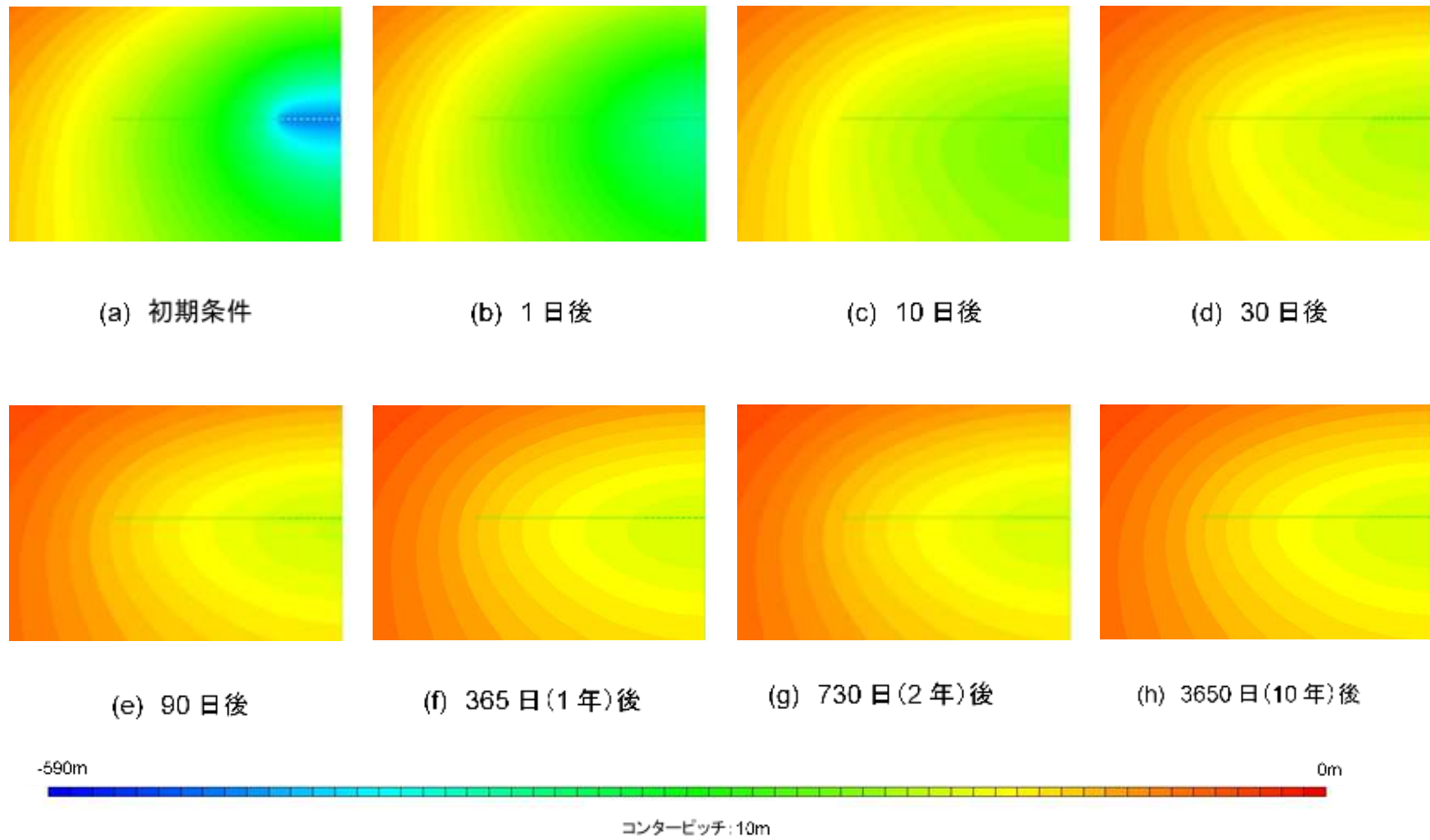


図 4.3.6-1 処分坑道再冠水時の全水頭分布の経時変化 (図 4.2.2-62 再掲)

4.4 課題の抽出

ここでは、前述した 4.2 節および 4.3 節の検討結果を踏まえて、回収可能性維持期間の影響に関して定量的評価を行うことによる課題を抽出する。

4.4.1 力学的影響評価に関する課題

(1) 構成則の妥当性確認

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

本検討において使用したコンクリートの溶脱による劣化を考慮した構成則や、緩衝材および埋戻し材の飽和の進行を考慮した構成則は仮定したものであるため、課題として残っている。特に、吹付けコンクリートの特性は、坑道安定性の保持期間に大きく影響を及ぼすことが明らかになったことから、その特性を把握することは予測精度向上のためには重要と考えられる。

(2) 長期間に対応した坑道安定性の評価基準

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

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

4.4.2 水理学的影響評価に関する課題

(1) 水理学的影響の評価方法について

本検討では堆積岩を対象とした検討であることから、多孔質媒体モデルを想定した解析手法を用いた検討を実施した。回収可能性維持期間の評価にあたり、回収維持期間として 100 年から 300 年を想定した非定常解析を行う必要があることから、解析モデル規模、解析負荷の低減を考慮した解析モデル、解析条件を設定し非定常解析を実施した。

その結果、採用した評価方法により、水理学的な定量化（湧水量の経時変化の把握、各種の感度解析、不飽和領域評価）が可能であることが確認できた。

一方、水理学的な定量化に際して、サイトスペシフィックな条件（地形、水理地質構造など）や地下施設の施工工程等を無視した簡易な条件（瞬時掘削条件など）で検討した結果、連絡坑道や処分坑道の掘削影響は約 1 年程度、処分坑道の埋戻し影響についても数年程度で定常状態となる結果となった。

より現実的な条件での検討が今後の課題と考えられるが、ここでは想定される課題について以

下に列挙する。

1) 解析モデル規模と解析負荷の増大への対応

実際にサイトを対象とした水理学的検討にあたっては、地形形状に起因する適切な解析領域の設定が必要であり、水理地質構造の反映、不均質性の考慮、地下施設のモデル化、適切な境界条件の設定等、評価が複雑になる。従来の定常解析手法ではなく、回収維持期間を想定した非定常解析の実施にあたっては、解析モデルの規模が大きくなると解析負荷が増すため、評価目的（湧水量評価、不飽和領域評価、再冠水評価）に応じた評価方法による検討が必要になる。

2) 解析モデルの妥当性確認のための水理モニタリング

多孔質媒体を対象とした評価手法はほぼ確立されており、解析コード自体の検証 (Verification) は実施されているため、評価対象に対する解析モデルの妥当性の確認 (Validation) が重要になる。水理評価モデルの妥当性の確認方法については、まだ明確な指針が示されているわけではないが、観測データと解析結果の比較によるアプローチが一般的である。また、事業の進展とともに解析モデルの改良が行われることになるが、水理モニタリング（観測データ取得）が必要となる。解析モデルの妥当性確認のためには、実測データの把握が不可欠となるが、水理データ取得はボーリング孔を用いた手法が一般的であり、得られる水圧、水質等は観測区間の平均的な値になることを考慮し、解析結果と比較する場合には得られたデータの解釈を含めた検討を実施する必要がある。

3) 不確実性の定量化のための検討

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

(2) 閉鎖前の作業環境の安全性評価について

本検討では坑道掘削により発生する「湧水量」と坑道周辺に発生する可能性がある「不飽和領域」に着目した検討、定量化を試みた。本検討での条件設定を踏まえ、今後の課題を列挙する。

1) 坑道の施工工程を考慮した検討

湧水量に関しては、解析条件の簡略化のため瞬時掘削を想定したが、実際には坑道掘削は瞬時ではなく、施工工程を有するため現実的な評価のためには、施工工程を反映した検討が必要と考えられる。また、処分坑道掘削時には施工が終了しているアクセス坑道（立坑、斜坑）についても評価上は無視している。処分坑道からの湧水量に対しては多めの評価条件となるため、保守的な条件であり、回収可能性維持期間として 100 年から 300 年を想定すると、建設期間の影響を無視できると考えられることによるが、今後は具体的な施工工程を考慮した評価による影響を把握

することが必要と思われる。

2) 岩盤の不均質性を考慮した検討

本検討では岩盤の透水性の条件を均質媒体としてモデル化しているため、評価結果としては決定論的な結論しか得られないものの、平均的な岩盤の透水性に対する湧水量の目安を把握することができた。本検討結果は設定した透水性に対する結果であるが、同じ境界条件の場合には岩盤の透水係数と湧水量は比例関係にあるため、異なる岩盤の透水係数の場合には、透水係数の比率から湧水量を推定することができる。また、感度解析により処分形態の違いやEDZおよびグラウトの有無に関する影響について検討したが、岩盤の条件を均質としていることにより、それぞれ設定した条件（厚さ、透水係数）での影響を個別に把握することができた。ただし、解析結果は設定した条件での一例であることに注意する必要がある。本検討で実施した均質条件での検討結果を踏まえ、今後は岩盤だけでなく人工バリア等に対する不均質性、不確実性を考慮した検討が必要と考えられる。

3) 不飽和領域評価手法の見極め

本検討により、今後実施する化学的影響評価への水理学的な条件を提示するための評価手法を選定する予定であったが、現状では解析手法の絞り込みを行うことは難しいと考えられる。不飽和領域の評価手法として、パラメータ設定の影響等の感度解析を実施するとともに、より妥当な解析手法、解析条件の設定について検討を継続する必要がある。

また、解析手法の検証するためには、実測データや実験データについても取得する必要がある。入力パラメータとなるデータのみでなく、解析手法やモデル化の妥当性を確認するための検証データの取得についても検討する必要がある。

(3) 閉鎖後の長期安全性評価について

本検討では坑道埋戻後の再冠水時間と、緩衝材や埋戻し材中のベントナイトの流出要因となる坑道湧水量に着目した検討、定量化を試みた。本検討での条件設定を踏まえ、今後の課題を列挙する。

1) サイトスケールでの再冠水評価手法の適用性検討

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

2) ベントナイト流出評価条件の見直し

本検討で提示した湧水量は坑道を開放した状態で算出されたものである。埋戻し後は動水勾配が小さくなるため、提示した流量は保守的ではあるが、ベントナイト流出評価の条件としては過大すぎるものが懸念される。ただし、水理学的な評価手法では、坑道開放時の湧水量だけでなく、

埋戻状態での流速分布の定量化が可能であることから、より現実的な評価条件に見直すことも考えられる。一方、本検討では考慮されていない不均質性、不確実性がベントナイト流出に及ぼす影響を把握する必要がある。長期的な安全性を評価するための条件設定について検討を行うことが重要である。

4.4.3 化学的・熱的影響評価に関する課題

(1) 地球化学解析および物質移行との連成解析における課題

1) 熱力学データの整備

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

2) 鉱物種および溶解モデルの選択

地球化学解析は、化学種を増やすと計算に長時間を要するため、検討対象とする鉱物を絞り込む必要がある。また、鉱物の溶解は緩慢なものが多いため、地球化学と物質移行との連成解析を行う場合に、時間増分幅に対して平衡論的な扱いが難しくなる場合がある。鉱物によっては、実測に合うような速度論的溶解モデルのパラメータが示されているが、パラメータが取得されている鉱物には限りがあり、モデルに取り入れたい鉱物について、望むようなデータが得られない可能性がある。

以上のことから、地球化学解析においては、目的に応じた鉱物および溶解モデルの取捨選択が必要になる。この過程は経験的知識や試行錯誤によるところが大きいのが現状であり、手法の体系化が求められる。

3) 物質移行パラメータと固相率の関係

鉱物の溶解・沈殿に伴い、固相の割合が変化し、間隙率が変化して物質移行パラメータが変化すると考えられるが、この設定にはいくつかの方法が考えられることから、次年度の検討において整理しておくことが必要と考えられる。

4) 地球化学解析および物質移動連成解析コードの検討

現在は、地球化学解析コードとして PHREEQC を用いる方法が主流であるが、今後のより複雑なモデル化や計算の高速化を見据えて、別の解析コードについても検討を行っていくことも必要であろう。

第4章 参考文献

- [1] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 28 年度地層処分技術調査等事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 報告書（第 2 分冊：その 1），2017.
- [2] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 27 年度地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書 第 2 編，2016.
- [3] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ 分冊 2－ 地層処分の工学技術，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 99-022，1999.
- [4] Yamamoto, Y et al.: Repository Design in Safety Case Development. Proceedings of the 16th International High-Level Radioactive Waste Management Conference, IHLRWM2017, Charlotte, NC, USA, April 9-13, 2017.
- [5] 大久保誠介，金豊年：非線形粘弾性モデルによる円形坑道周辺岩盤のシミュレーション，資源と素材 109，209-214，1993.
- [6] 原子力発電環境整備機構：セーフティケースに関する外部専門家ワークショップ，原子力環境整備機構ホームページ，<http://www.numo.or.jp/topics/201616092916.html>，2016.
- [7] 菊池広人，棚井憲治：幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験（試験報告），JNC TN8430 2004-005，核燃料サイクル開発機構 東海事業所，2005.
- [8] 羽柴公博，福井勝則，畠山正樹：開始から 19 年が経過した田下凝灰岩のクリープ試験，第 14 回岩の力学国内シンポジウム講演集，神戸，1 月 10～12 日，講演番号 003，2017.
- [9] 緒方義弘，山口勉，厨川道雄，大久保誠介，西松裕一：粘弾性的挙動を示す岩盤の坑道掘進に伴う時間依存性変形のシミュレーション，資源と素材 110，1082-1088，1994.
- [10] 佐藤伸，納多勝，丹生屋純夫，畑浩二，松井裕哉，見掛信一郎：長期岩盤挙動評価技術への適用性検討（その 2） コンプライアンス可変型モデルのパラメータ設定方法と岩盤挙動評価への適用性検討，第 41 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，東京，1 月 12～13 日，p.208-213，2012.
- [11] 緒方義弘，富島康夫，大久保誠介，西松裕一：軟弱岩盤内の坑道天盤の掘削に伴う変形の計測－粘弾性的挙動を示す岩盤の坑道掘進に伴う変形挙動に関する研究(第 1 報)－，資源と素材 109，171-178，1993.
- [12] 緒方義弘，富島康夫，大久保誠介，西松裕一：軟弱岩盤内の坑道天盤の掘削に伴う変形の計測－粘弾性的挙動を示す岩盤の坑道掘進に伴う変形挙動に関する研究(第 2 報)－，資源と素材 109，853-860，1993.
- [13] 里優，竹田直樹，亀村勝美：強度の時間依存性に着目した岩盤の解析，第 18 回土質工学研究発表会講演集，郡山，817-820，1983.
- [14] 松長剛，熊坂博夫，小島芳之，朝倉俊弘：地山強度の経時劣化を考慮したトンネル変状の予測と対策に関する研究，土木学会論文集 No.799/III-72，75-88，2005.
- [15] 北田正彦，櫻井春輔，芥川真一，岡部幸彦，進士正人：在来工法で建設されたトンネルの

- 拡幅時変形挙動とグラウンドリングに関する考察, 土木学会論文集 F Vol.65, No.2, 119-127, 2009.
- [16] 大久保誠介, 福井勝則, 新孝一: 岩盤の破壊基準と長期強度に関する一考察, 資源と素材 115, 213-218, 1999.
- [17] 大久保誠介, 福井勝則, 杉田隆博: 緩み領域の強度回復に関する基礎研究, 資源と素材 117, 631-638, 2001.
- [18] 大久保誠介, 羽柴公博, 福井勝則: 岩石の長期強度に関する一考察, Journal of MMIJ 129, 635-641, 2013.
- [19] 雷鳴, 大久保誠介, 福井勝則, 羽柴公博: 破碎した岩石の押し込み試験のシミュレーション, Journal of MMIJ 126, 64-71, 2010.
- [20] 西松裕一, 大久保誠介, 福井勝則: 破壊接近度と局所安全率に関する考察と拡張, 資源と素材 110, 343-346, 1994.
- [21] 国土交通省道路局国土・防災課: 道路トンネル定期点検要領, 2014.
- [22] 国土交通省道路局: 道路トンネル定期点検要領, 2014.
- [23] 公益財団法人日本道路協会: 道路トンネル維持管理便覧【本体工編】, 丸善出版, 東京, 2017.
- [24] 車谷麻緒, 相馬悠人: 有限ひずみ材料モデルを用いた鉄筋コンクリートの3次元破壊シミュレーションに関する基礎的検討, 日本計算工学論文集, No.20182006, 2018.
- [25] 国土交通省鉄道局, 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編) トンネル, 丸善出版, 2007.
- [26] 西村高明: 地下鉄トンネルの検査データに基づく安全性評価と維持管理に関する研究. 早稲田大学大学院学位論文, 45-82, 2017.
- [27] 須藤敦史, 佐藤京, 西弘明: 性能規定に基づく寒冷地トンネル覆工の劣化予測のためのマルコフ遷移確率行列の同定. 土木学会論文集 F1(トンネル工学) Vol.68, No.3, I_91-I_98, 2012.
- [28] 櫻井春輔, 川嶋幾夫, 大谷達彦, 松村真一郎: トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ. 土木学会論文集 No.493/III-27, 185-188, 1994.
- [29] 櫻井春輔: トンネル工事における変位計測結果の評価法, 土木学会論文報告集 317, 93-100, 1982.
- [30] 櫻井春輔: NATMにおける現場計測と管理基準値, 土と基礎 34-2(337), 5-10, 1986.
- [31] 大久保誠介, 何昌栄, 西松裕一: 一軸圧縮応力下における時間依存性挙動—岩石の Post-failure Region での挙動(第1報)—, 日本鉱業会誌 103 巻 1189 号, 177-181, 1987.
- [32] 安藤賢一, 納多勝, 山本幹彦, 三原守弘: TRU 廃棄物処分におけるガス発生・移行解析(研究報告), 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2005-026, 2005.
- [33] 朝瀬康平, 金子聡志, 関博: 酸化性環境および還元性環境でのコンクリート中鉄筋の腐食速度に関する実験的研究. 土木学会論文集 E2, 69, 1, 16-32, 2013.
- [34] 大和田 仁, 三原守弘, 黒木泰貴, 有本邦重: アルカリ溶液中での花崗岩の変質挙動, JNC TN8400 2000-027, 2000.

- [35] 山本武志, 大山隆弘, 猪原芳樹: 地下岩盤の地化学環境調査・評価技術の開発 (その 4) —坑壁岩盤の風化とコンクリート影響—, 電力中央研究所報告, N14010, 2015.
- [36] 塚本政樹, 藤田智成: セメント系材料との相互作用による岩石および緩衝材の変質反応シミュレーション, 電力中央研究所報告, U99046, 2000.
- [37] 新堀雄一, 千田太詩, 桐島 陽: 地下冠水環境におけるカルシウムシリケート水和物によるバリア機能の評価手法, 日本原子力学会 2016 年秋の大会 講演要旨, 2D20, 2016.
- [38] 後藤考裕, 鈴木覚, 黒澤 進, 窪田 茂, 出口 朗, 石黒勝彦: PEM 定置方式における人工バリア長期挙動に関する検討, 原子力バックエンド研究, 21(1), 23-24, 2014.
- [39] 大山隆弘, 千木良雅弘, 志田原巧, 渡辺良朋, 大村直也, 佐々木和裕, 下垣 久, 五十嵐敏文: 堆積性軟岩の化学的風化特性の検討—化学的風化のメカニズムと風化速度, 風化への微生物の影響—, 電力中央研究所報告, U38, 2000.
- [40] 大山隆弘, 千木良雅弘, 大村直也, 佐々木和裕, 長岡 亨: 不飽和領域での堆積岩の化学的風化作用—泥岩トンネル坑壁の風化速度と微生物の影響—, 応用地質, 39 (6), 511-523, 1999.
- [41] 大貫敏彦: 地層処分における微生物の影響—研究の現状と今後の課題—, 原子力バックエンド研究, 9 (1), 35-42, 2002.
- [42] 資源エネルギー庁: 放射性廃棄物の地層処分におけるセメント影響によるニアフィールド長期挙動評価ワークショップ開催報告, 経済産業省資源エネルギー庁 HP, http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2012/24-1-2.pdf, 2012.
- [43] 原子力発電環境整備機構: 処分場を構成する各部位に適用するセメント種類の選定に向けた検討 —各部位の要求特性の抽出と状態変遷の推定に基づく重要度の検討— (NUMO—電中研共同研究), NUMO-TR-13-07, 2012.
- [44] 電気事業連合会 核燃料サイクル開発機構: TRU 廃棄物処分技術検討書, —第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—, JNC TY1400 2005-002, FEPC TRU-TR2-2005-01, 2005.
- [45] 杉山大輔, 藤田智成, 中西 潔: TRU 廃棄物処分環境におけるセメント系材料の化学的変質評価 (その 1) —カルシウムシリケート水和物の熱力学的溶解沈殿モデルの提案—, 電力中央研究所報告, T01007, 2001.
- [46] 西村 務, 和田隆太郎, 藤原和雄: 地層処分場における金属腐食に伴う水素ガス発生量評価, 神戸製鋼技報, 53 (3), 78-83, 2003.
- [47] 日本原子力研究開発機構: 平成 24 年度 地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発—6 ヶ年研究成果の取りまとめ—, 2013.
- [48] Jacques, D., J. Šimůnek, D. Mallants, and M. Th. van Genuchten: The HPx software for multicomponent reactive transport during variably-saturated flow: Recent developments and applications, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66 (2), 211-226, doi: 10.1515/johh-2017-0049, 2018.

第5章 回収可能性維持期間に関する国際機関、諸外国の事例調査

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

5.1 国際機関の事例調査

調査の対象としたのは以下の報告書とする。OECD/NEA のレポートでは、「R&R レポート」と「R&R に関する意思決定レポート」の二つを対象とする。

- OECD/NEA(2011), Reversibility and Retrievalability (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel” (「R&R レポート」) [1]
- OECD/NEA (2011), Reversibility of Decisions and Retrievalability of Radioactive Waste (「R&R に関する意思決定レポート」) [2]
- IAEA (2009) Nuclear Energy Series, Geological Disposal of Radioactive Waste Technological Implication for Retrievalability[3]

5.1.1 OECD/NEA における事例

OECD/NEA が R&R レポートで提示した“Retrieval-Scale (R-Scale)”のイメージ(図 5.1.1-1)では、処分後の時間の経過とともに回収のための費用が増加し、回収作業が技術的に困難になっていく(逆の言い方をすれば、回収の容易性が低減していく)ことを示している。また、安全確保の観点からは、処分場の状態変遷に伴い、能動的な安全対策から受動的な安全確保(パッシブセーフティ)に移行していくことも表わしているが、いつまで回収可能性を維持するかについては言及していない。また、R&R レポートには「回収可能性は程度の問題であり、廃棄物を回収することが可能かどうかという問題ではない。」と記述されている。このことは根底に地層処分では時間と費用を掛ければ技術的には廃棄物の回収は可能であることを示唆している。すなわち、維持期間の設定では、「回収することの動機」、「パッシブセーフティによる長期の安全確保という基本概念の受入れ」に対する将来世代の意思決定に依存することが大きい。

R&R レポートでは、以下の事項も記述されている。

- ✓ 回収可能性維持を容易にする方策が、バリアが有する安全機能を脆弱化してはならない。
- ✓ 安全機能を維持しつつ回収の容易性を向上させる技術開発も必要である。

これらの事項は、回収可能性維持の延長に伴いにコストがかかり、安全性が低下する、あるいは長期の安全機能に影響を与える可能性があることの認識にたち、回収の容易性を向上することの重要性を言及している。すなわち、回収可能性の維持期間の設定では、「バリアの安全機能を脆弱化させない」範囲内で、容易性を向上させる(コスト低減や効率向上など技術的な合理性追求)

ことを求めている。

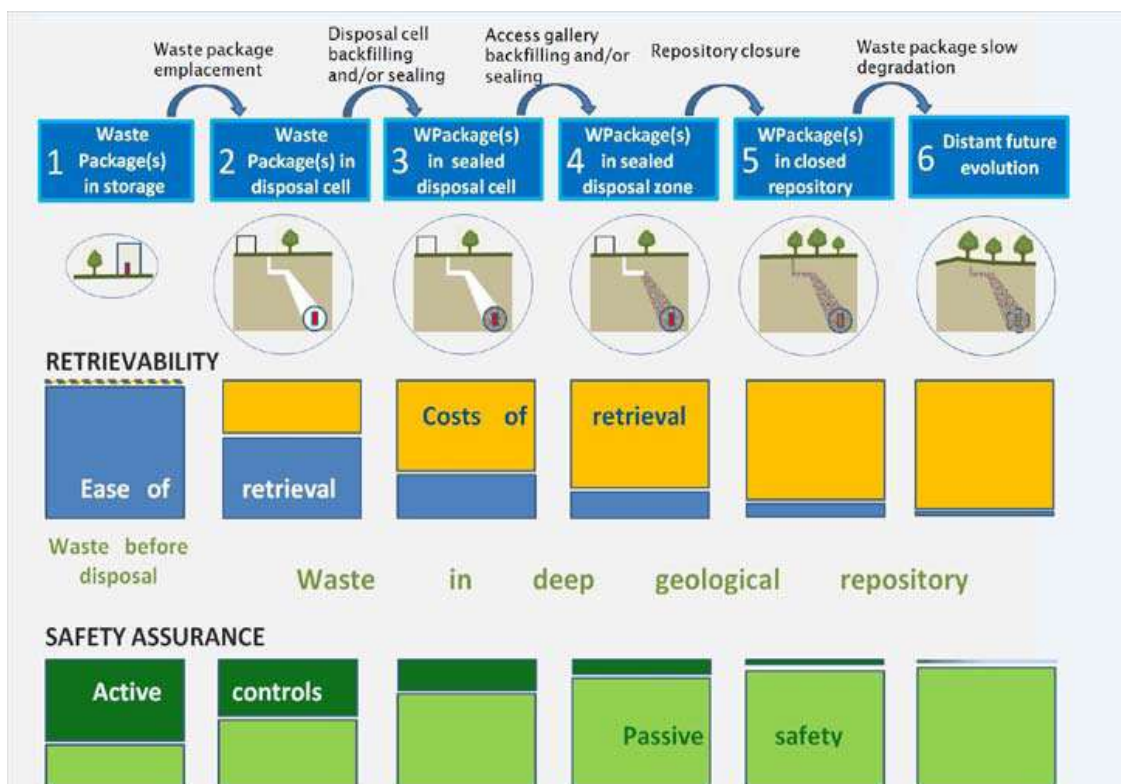


図 5.1.1-1 OECD/NEA レポートで示された R-Scale[1]

R&R に関する意思決定レポート[2]では、回収可能性維持の期間に関連する以下の記述がある(括弧内はレポートからの抜粋)。

“Actions today may be taken to facilitate to some extent the ability to retrieve (retrievability), and research and development may in future provide ways to improve retrievability and to reduce the degree of difficulty of retrieval.”

「現状の活動（ここでは回収可能性を向上させる技術開発を指す）は、回収可能性の期間をある程度延長をすることができるかもしれないし、今後の関連する研究開発は、回収可能性を向上させ回収の困難さを低減できる可能性がある。」

“At the same time, any choices that could facilitate retrieval must also be such that they would not jeopardise the integrity of the facility. Examples of provisions increasing retrievability include: more durable waste forms and waste containers, longer periods granted before closing galleries and the final repository, and buffer and backfill materials that are easier to remove.”

「回収可能性を高めるどのような方策が選択されようと、施設の健全性が弱体化されることは

あってはならない。例えば、より耐久性のある廃棄体や容器を用いる、最終処分場や処分空洞を閉鎖するまで長期間開放しておく、緩衝材や埋戻し材を容易に撤去できる材料とするなど。」

前者では、回収可能性維持の容易さを向上させる技術開発について、後者では、その結果として得られた方策は、施設の健全性を弱体化させてはならないという「境界条件、あるいは制約」について言及している。この記述で留意することは、施設の機能（特に安全機能）の健全性に対する弱体化がどこまで許容されるかが論点の一つとなる。

すなわち、R&R レポートに記述されたように、回収可能性維持期間に係わる事項は技術的な課題ではなく、「程度の問題、言い換えればどの程度の影響であれば許容されるか、あるいは受け入れられるか」を考慮する必要がある。

5.1.2 IAEA のレポートでの事例

IAEA の調査した報告書[3]には、回収可能性の維持期間に係わる直接的な記述は見当たらなかった。しかし、回収可能性を維持することに対する留意事項として以下の事項が提示されている（括弧内はレポートからの抜粋）。

“Potentially negative conditions may be introduced by measures adopted to extend the operational period of a repository or any associated monitoring and maintenance (e.g. degradation of repository materials (e.g. container corrosion) or near-field rock conditions (e.g. aeration of the surrounding host rock)). Any such effects would need to be assessed and assurance reached that any detrimental influences will not significantly degrade long term safety.”

「可能性として、回収可能性を維持するために操業期間を延長する、あるいは関連するモニタリングやメンテナンスを行うことにより、ネガティブな状況を招く（例えば、容器の腐食など施設の内の材料の劣化、あるいは母岩周辺を空気にさらすことでのニアフィールド岩盤の劣化など）ことがある。そのような影響が長期安全性を有意に低下させるような有害な作用を及ぼすことがないことを評価し保証する必要がある。」

本レポートでのキーワードは、回収可能性を維持することが「長期の安全性を有意なレベルまで低下させてしまう恐れがないことを保証しなければならない」という点である。このことは、OECD/NEA の R&R レポートと同様、「回収可能性維持期間を検討することは、技術的な可能性を検討するというより及ぼす影響の程度の問題」と置き換えることができる。

5.2 諸外国の事例調査

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

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

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

5.2.1 米国の事例

米国は、ユッカマウンテンを対象とした処分計画が進められていたが、2009年に処分計画が休止状態にあったが、2018年に安全評価書のレビューのための予算請求が準備されている（一般社団法人 日本原子力産業協会ニュースより）。本調査では、ユッカマウンテンを対象として計画が進められていたプロジェクトにおける回収可能性維持期間に関する記述を取りまとめる。

米国原子力規制委員会（NRC）は、規制基準 10 CFR Part 63「ネバダ州ユッカマウンテンで提案されている地層処分場における高レベル放射性廃棄物の処分」§ 63.111(e)（廃棄物の回収可能性）[4]において、以下の事項を要求している。

「地層処分場操業エリアの設計は、廃棄物の定置期間中及びその後の期間を通じて、性能確認プログラムや性能確認プログラムで得られた情報に関する原子力規制委員会（NRC）の審査が完了するまでの期間にわたり、廃棄物の回収可能性が保たれるものでなければならない。この目標を達成するため、地層処分場操業エリアは、定置された廃棄物のすべてまたはいずれかの回収が、廃棄物定置作業が開始されてから 50 年間経過するまでのいずれかの時点で始まる合理的なスケジュールによって可能になるように設計されなければならないが、NRC が当該期間について別の承認または指定を行った場合には、この限りではない。この別途定められる期間は、それぞれのケースごとに、定置スケジュール及び予定されている性能確認プログラムとの一貫性を保った形で設定することができる。」

すなわち、実施主体であるエネルギー省（DOE）は、要求される性能確認プログラムの結果を NRC に提出し、その承認を得るまでの期間、あるいは定置作業が開始されてから 50 年間経過するまでの期間、いずれかの期間内で廃棄体の回収可能性を維持することが求められている。

DOE は回収可能性維持に係わる技術開発として、“Yucca Mountain Science and Engineering Report (2002)”[5]で、定置後の回収が始まってから終わるまでの期間を含め 100 年以上は処分場の回収可能性を確保するとし、空洞の安定性、定置後の廃棄物の状態、回収装置などの設計要件に取り組んでいる。容器の設計等は 300 年を見込むとしている。図 5.2.1-1 にユッカマウンテンの廃棄体定置概念、定置後の回収可能性維持の状況を示す。ユッカマウンテンの処分場は、不飽和領域に建設されることもあり、廃棄体定置後は処分坑道を開放した状態となる。閉鎖措置につ

いては処分坑道の廃棄体の上部にドリップシールドと呼ばれるチタン製の覆いを設置し、空隙は埋め戻さない。アクセス坑道（斜坑）はプラグを設置した後、埋め戻されることが計画されている。

図 5.2.1-2 には、DOE が技術検討で考慮している回収可能性維持の期間の考え方を示している [5]。回収の意思決定があった場合、最後に定置した廃棄体を定置と同じ速度で回収すると仮定して、約 100 年程度、処分坑道の安定性を維持するという観点からの坑道の支保等の補強設計を実施している。また、廃棄体に関しては回収後のことも考慮して 300 年程度の物理的な閉じ込め性を有するように設計されている。これらは、いずれも回収可能性維持期間を要求事項としての設計要件となっている。

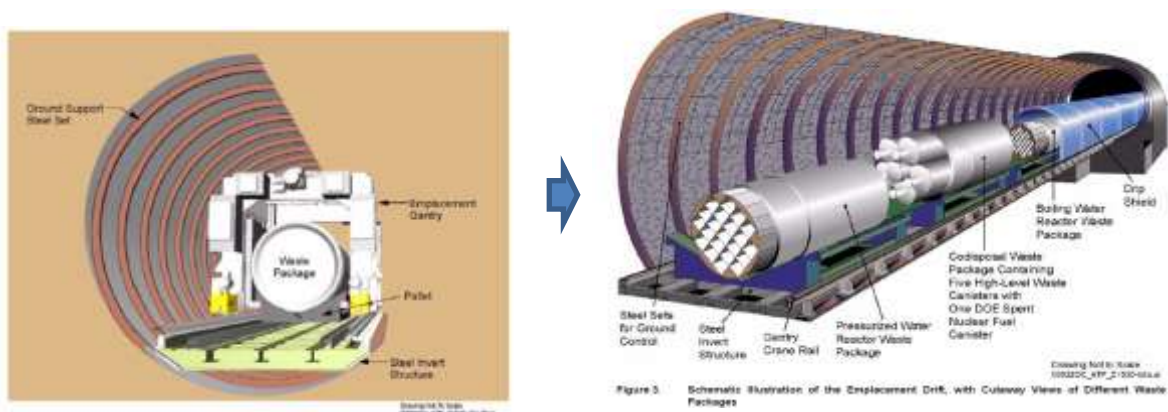


図 5.2.1-1 ユッカマウンテンでの廃棄体定置概念と回収可能性維持期間の状態[5]

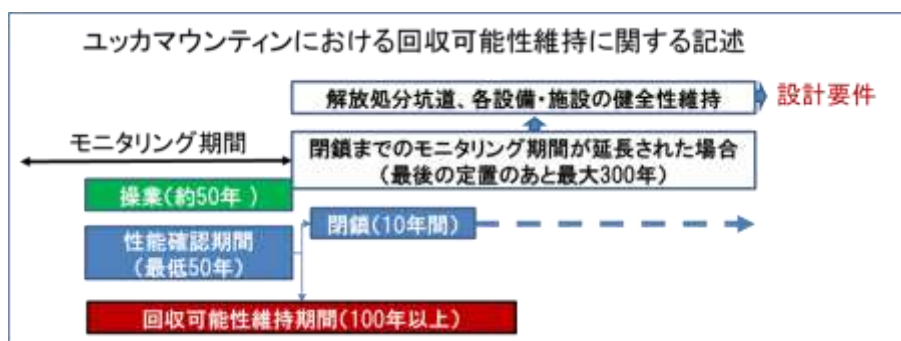


図 5.2.1-2 DOE が検討している回収可能性維持期間とその対応[5]

5.2.2 フランスの事例

フランスでは、法令「2006年放射性廃棄物等管理計画法 第12条（環境法典第L542-10-1条）」[6]により、「設置許可申請の審査に際しては、当該施設の安全性をその最終的な閉鎖も含め、その管理の諸段階を踏まえて評価する。法律のみが最終的な閉鎖を許可することができる。許可には、予防のため処分の可逆性を確保しなければならない最低期間を定める。この期間を100年未満とすることはできない。」と定められている。すなわち、処分施設の閉鎖は、法律により許可されることから、閉鎖が許可されるまで可逆性を確保する期間として、100年以上とすると規定されているが、100年という数字設定の背景については記述されていない。この100年という法令

での要求をベースに処分場の設計や回収装置の耐久性等の技術開発が進められている。

実施主体である ANDRA が開発したガラス固化体の定置概念と回収設備（定置装置を使用）の実験状況を図 5.2.2-1 に示す（Dossier 2005[7]）。ガラス固化体は鋼製の容器に格納され、容器には処分孔への挿入時のスペーサーと円滑さを確保するためのセラミック製のランナーが設置される。横置き処分孔内に鋼製ケーシングが設置され、定置・回収時の容易性を向上させている。処分孔と容器の間隙は充填されない状態で維持され、処分孔口は脱着可能なプラグで遮蔽される。

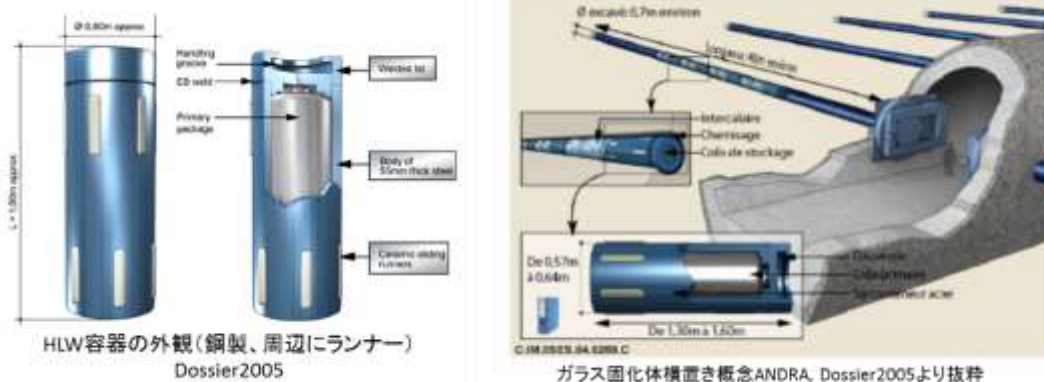


図 5.2.2-1 フランス ANDRA が開発した回収性を考慮した廃棄体定置概念[7]

ANDRA は、(Position Paper on Reversibility 2016[8])において、閉鎖の認可を得るため、本格的な廃棄体定置を開始する前に、図 5.2.2-2 に示す”Industrial Pilot Phase”を設け、定置した廃棄物の状態を 50 年間モニタリングで確認することを計画している。

【パイロット段階】
可逆性を有する地層処分事業を進める上で、ANDRA は初期段階に HLW の実廃棄体の 5%をパイロット施設に処分し 50 年間モニタリングされる、あるいは 50 年待たずに残り 95%の HLW を処分する。

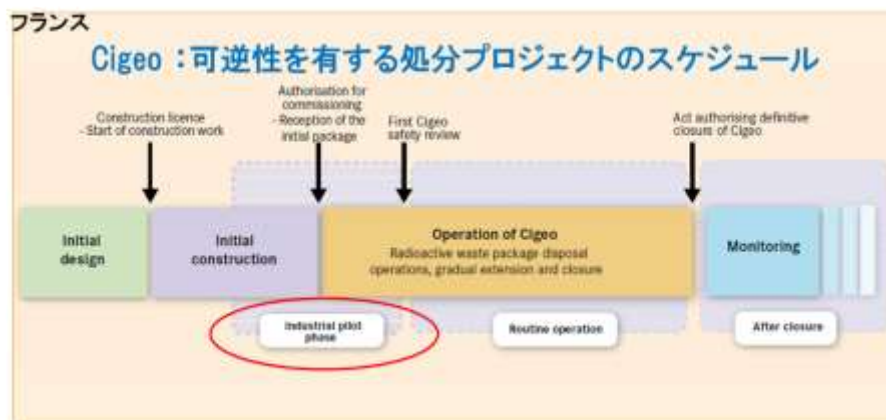


図 5.2.2-2 処分事業段階における Industrial pilot phase[8]

5.2.3 スイスの事例

スイスにおける可逆性と回収可能性の議論は、低中レベル処分場のサイト選定段階において候補地となった地域住民からの段階的な意思決定に対応する方策として取り入れられた（NEA R&R レポート[1]の各国の状況より）。

「原子力法」（2005 年発効）では、「モニタリング段階：地層処分場が閉鎖前にモニタリングされ、放射性廃棄物が多額の費用をかけずに回収可能な比較的長い期間」と記述されている。また、

規制主体である ENSI は、「地層処分場の設計原則とセーフティケースに関する要件」(ENSI-G03) として、「5.1.4 多額の費用を発生させない廃棄物の回収：将来的な処分場の閉鎖まで、多額の費用を発生させないで放射性廃棄物の回収が可能でなければならない。したがって、処分容器は、機械的強度に関して、少なくともモニタリング期間の終わりまでは、多額の費用を伴わずに回収できるような方法で定置しなければならない。また、回収可能性を確保するために講じられる措置は、受動的な安全バリア及び長期安全性を損なうものであってはならない。」と規定している。

規制主体を含めて、回収可能性維持期間は、処分場が閉鎖されるまで、多額の費用を発生させないで維持することとされている。すなわち、閉鎖の維持決定までの期間が主であり、モニタリングの期間が終わるまで維持することとし、その上限は「回収可能性維持に係わる費用」とされている。

このような法律や規制からの要件の背景には、2000 年に公表された地層処分の専門家委員会 (EKRA) の報告書 (Expert Group on Disposal Concepts for Radioactive Waste: Disposal Concepts for. Radioactive Waste Final Report, 2000[9]) で、段階的な処分事業の進め方が提示され、その中で「長期監視付処分概念」(「EKRA 概念」) が公表された。

【長期監視付処分概念】

処分場エリア内にパイロット施設を設置し、そこで定置した廃棄物の状態等を長期にモニタリングし、処分場閉鎖に必要な情報を得るとともに天然バリアのモニタリング結果を含めて性能を確認するという概念。この間、アクセス坑道は開放されたままで維持され、回収可能性が確保される。

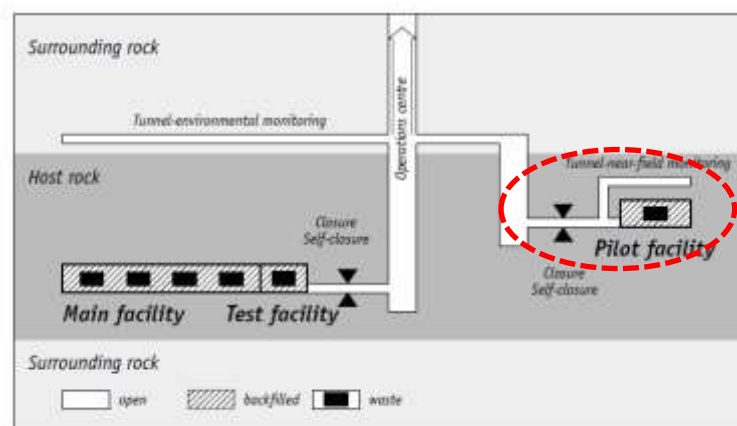


図 5.2.3-1 長期監視付処分概念 (EKRA 概念[9])

この監視の期間については、EKRA の報告書には記述されていない。アクセス坑道を含めて回収作業等の安全性を確保できる期間としてスイス国内のトンネル実績から 100 年程度 という目安が EKRA 報告書公表時に示された。

上述した法律や規制要件からの「多大な費用を発生させない」という縛りを受けた場合、例えばアクセス坑道の開放期間、回収時の坑道の安定性確保の観点からは、追加の補強や支保等の再構築など多くの費用が発生しない範囲での回収可能性維持期間と考えることができる。

ガラス固化体と使用済燃料の直接処分を対象としている実施主体 Nagra では、いずれの廃棄物も耐久性のある鋼製オーバーパックの導入を図っていることから、どのような時期にでも回収することは技術的に可能であるとしている。

5.2.4 カナダの事例

カナダの地層処分方策では、法律により回収可能性の確保は規定されていないが、実施主体である NWMO は、地層処分事業の進め方として (NWMO (2005), A Way Forward[10])、段階的に適合性を考慮した管理 (“Phased Adaptive Management”) を基本としている。

“A Way Forward 2005” によれば、回収可能性は、廃棄体が定置される期間 (約 30 年間) と処分場が閉鎖されるまで モニタリング期間 (約 210 年間)、合計で 240 年維持されることになる。モニタリングによりバリア性能等を確認後、処分場の閉鎖行為に移行することを基本工程としている。3 段階での管理の考え方を図 5.2.4-1 に示す。第 2 段階までは常に回収が可能で、第 3 段階ではモニタリング期間が終了し、閉鎖のためのアクセス坑道等の埋戻しが開始されるまで回収可能性を維持するとしている。同時にこの工程に関しては、今後変更する可能性も示唆されている。



図 5.2.4-1 Phased Adaptive Management での処分事業工程と回収可能性維持期間[10]

カナダでは現状、法的にも規制からも回収可能性は要求されておらず、NWMO の最近の技術報告書 (“Description of a Deep Geological Repository and Centre of Experties for Canada’s Used Nuclear Fuel”, 2015) [11]) では、廃棄体を定置後、処分坑道を埋戻したのち約 70 年間、性能確認のためのモニタリングを行い、この間、回収可能性を維持する計画である。この期間については、現段階での技術開発目標であり、将来的に変化する可能性があるとしている。

これらのことから、二つのレポートはそれぞれの段階 (2005 年の処分事業の進め方と 2015 年の概念構築) でのモニタリング等による性能確認と回収可能性維持との考え方を記述しており、期間についても言及しているがいずれも決定事項ではない。回収可能性維持期間をどの程度とするかについては技術開発の状況を鑑み、今後、国や規制主体と協議していくこととしている。



図 5.2.4-2 NWMO が計画する廃棄体定置の概念と実証施設[11]

5.3 国際機関および諸外国の回収可能性維持期間に関する調査のまとめ

5.3.1 国際機関の報告書の記述

IAEA の技術報告書には回収可能性維持の期間に係る直接的な記述は見当たらなかったが、OECD/NEA の R&R レポート[1]には以下の記載がある（NUMO の和訳版より抜粋）。

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

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

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

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

5.3.2 諸外国における回収可能性維持期間

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

- ▶ 規制主体が性能確認を要求しているのは米国のみである。ユッカマウンテンの定置概念は定置後埋め戻すことがないことから、定置したのち 50 年内での性能確認（特に使用済燃料の直接処分では廃棄体からの熱影響が周辺母岩に与える影響が性能確認上重要な事項となる）を求め、それを超える場合は DOE からの申請を受け、NRC が判断するとしている。実施主体である DOE は 50 年で影響を確認するのは困難であることから 300 年程度も期間も視野に入れたモニタリング計画を立案している。
- ▶ フランス、スイス、カナダでは、性能確認というタームは使わず、実証試験（パイロット）施設で実施するバリア機能のモニタリング結果で処分施設の閉鎖を申請することとしている。いずれの国も、廃棄体定置後処分坑道は埋め戻し、閉鎖までアクセス坑道のみを開放状態とすることを基本としている。
- ▶ その期間としてフランスでは、規制要件として 100 年以上を要求されている。スイスでは期間の要求はないが、実績から 100 年程度を目安としており、カナダでは技術開発目標として 30 年の操業後 70 年程度を実施主体が設定している。きせずして 3 か国では、定置を含めて 100 年という期間が取り上げられている。
- ▶ スイスでは、回収可能性を維持するために多大な費用をかけないことが法律と規制当局から要求されている。多大な費用とする判断は、R&R レポート[1]にあったいわゆる程度の問題に置き換えられる。

第5章 参考文献

- [1] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY : Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel, NEA/RWM/R(2011)4, Paris, 2011 (full report).
- [2] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY : Reversibility of Descisions and Retreivability of Radioactive Waste, 2011.
- [3] IAEA : Nuclear Energy Series, Geological Disposal of Radioactive Waste Technological Implication for Retrievability, 2009.
- [4] 米国原子力規制委員会 (NRC) : 規制基準 10 CFR Part 63 「ネバダ州ユッカマウンテンで提案されている地層処分場における高レベル放射性廃棄物の処分」, 2009.
- [5] 米国エネルギー省 (DOE) : Yucca Mountain Science and Enginnering Report, 2002.
- [6] フランス法令 : 放射性廃棄物等管理計画法, 2006.
- [7] ANDRA : Dossier, 2005.
- [8] ANDRA : Position Paper on Reversibility, 2016.
- [9] EKRA : Expert Group on Disposal Concepts for Radioactive Waste Disposal Concepts for. Radioactive Waste Final Report, 2000.
- [10] NWMO : A Way Forward, 2005.
- [11] NWMO : Description of a Deep Geological Repository and Centre of Experties for Canada' s Used Nuclear Fuel, 2015.

第6章 まとめ

6.1 研究計画の更新

6.1.1 研究計画の進捗状況と更新

(1) 5カ年計画の進捗状況

平成 27 年度に策定した 5 カ年計画を図 6.1.1-1 に示し、平成 27 年度から平成 29 年度までの検討の実施状況を 5 カ年計画の検討内容ごとに整理する。

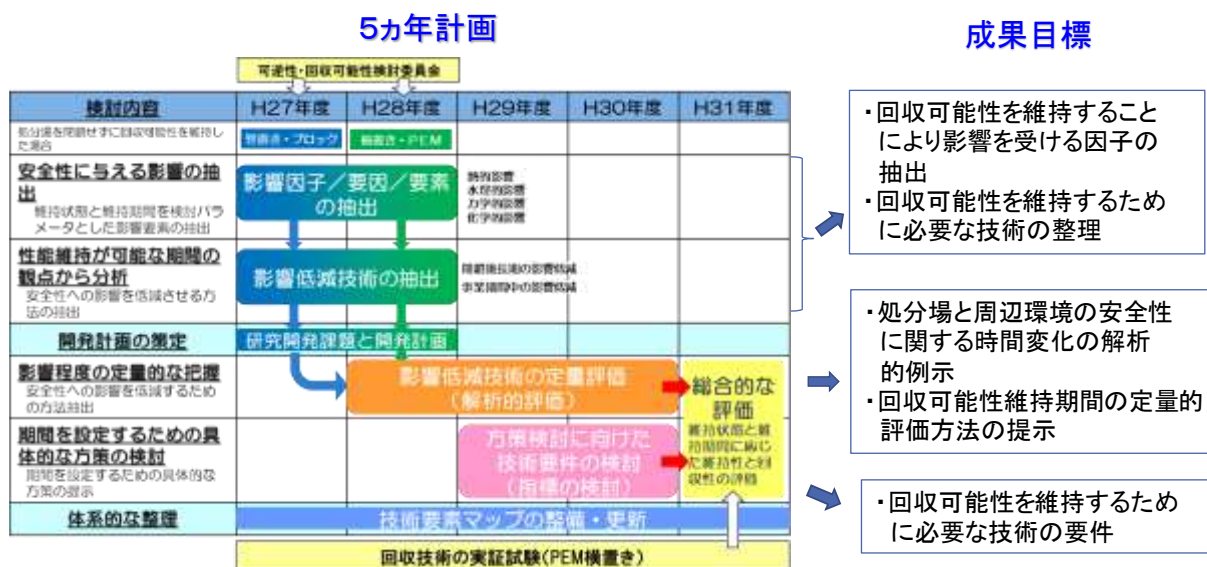


図 6.1.1-1 回収可能性の維持についての検討に関する成果目標および 5 カ年計画[1] (再掲)

1) 安全性に与える影響の抽出と、性能維持が可能な期間の観点からの分析

平成 27 年度は定置方式については縦置き方式、また緩衝材製作・施工方法はブロック方式とした人工バリア定置方式を対象とした検討を行った。内容は、回収可能性維持状態と維持期間を考慮した安全性に与える影響因子の検討と、人工バリア品質保持および坑道環境維持のための影響低減技術として、工学的対策について検討を実施し、回収可能性維持状態と期間を考慮した技術要素マップを作成した。また、そこから課題を抽出して 5 カ年計画案を策定した。

平成 28 年度は定置方式を横置き方式、また緩衝材製作・施工方法はブロック方式よりも定置・回収について容易性が高いと考えられる PEM 方式を対象として検討を行った。検討内容は、平成 27 年度と同様に、回収可能性維持状態と維持期間を考慮した安全性に与える影響因子の検討と、人工バリア品質保持および坑道環境維持のための影響低減技術として、工学的対策について検討を実施し、回収可能性維持状態と期間を考慮した技術要素マップを作成した。また、H27 年年度に実施した検討結果との比較を行い、これにより、定置方式および緩衝材製作・施工方法の組み合わせを網羅し、開発計画の策定として研究開発課題を整理した。

2) 影響程度の定量的な把握

平成 28 年度からは、回収可能性維持期間の定量的評価方法の例示と課題抽出のために、力学的な影響の定量的評価手法の検討として、坑道安定性に関する解析に取り組み、手法の例示を行った。さらに、平成 27 年度に課題として挙げた水理学的・化学的な影響および対策工効果についての定量的評価方法の調査および検討を開始し、平成 29 年度は水理学的な影響の定量的評価手法の例示を実施し、化学的影響評価手法に関する調査結果をまとめた。

3) 回収維持期間を設定するための具体的な方策の検討

平成 29 年度、本報告書において、定量化に必要な技術検討項目を対象とした検討を行った。まずは、定量化に必要な技術検討項目に対して、解析技術等の整備に関する取り組み方法や優先度等の整理を行い、優先度の高い項目は本事業で実施中であることを確認した。次に、回収可能性維持のための技術要件についての考え方の検討として二つのアプローチ方法を示し、比較を行った。一つ目のアプローチは既往検討である回収可能性維持を考慮していない技術要件を参考にして、定量化に必要な技術検討項目に対して技術要件の設定の考え方を整理する方法である。二つ目のアプローチは基本方針の回収可能性確保の要求事項を階層構造として整理し、技術要件として展開する方法であり、設定例を示した。また、定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術、回収技術などの整理と研究課題の抽出を行った。回収維持技術、回収技術などの整理は、平成 27 年度および平成 28 年度に作成した技術要素マップに基づくものとした。さらに、回収可能性維持期間の決定方法を検討していくために、回収可能性維持期間に係わる国際機関や諸外国での事例調査を行い、維持期間設定に対する考え方や背景および期間決定の因子等について取りまとめた。

(2) 5 ヶ年計画の更新

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

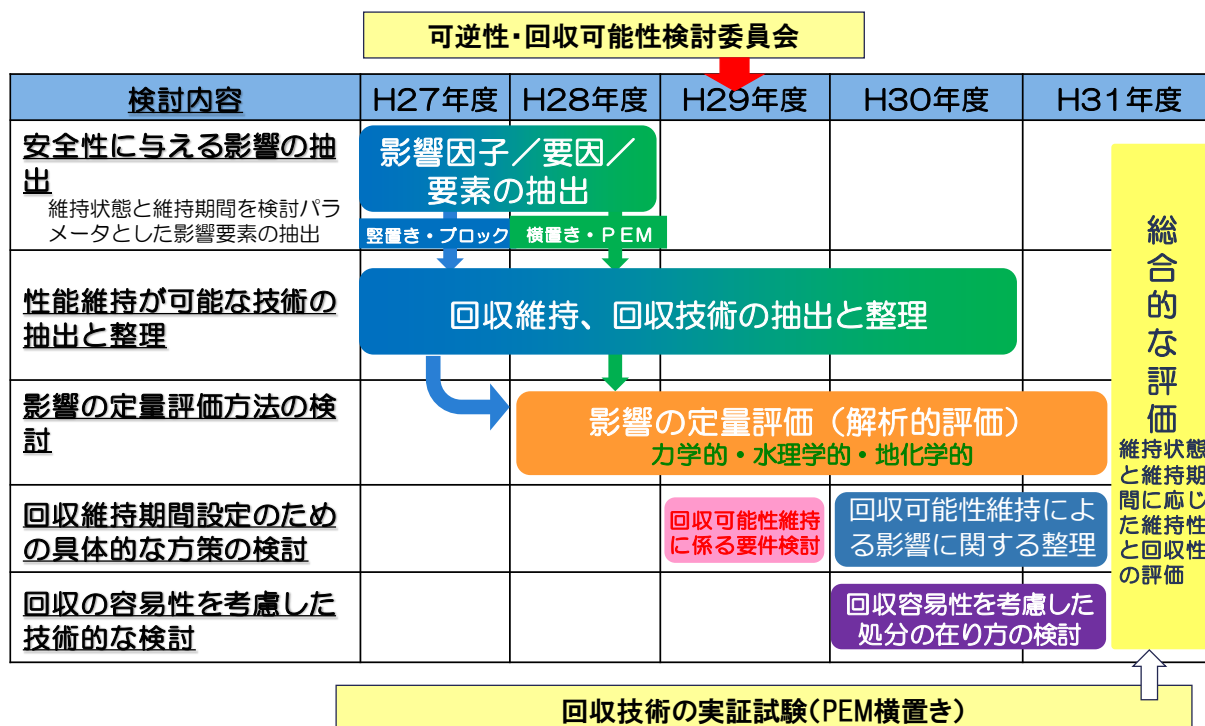


図 6.1.1-2 回収可能性の維持についての検討に関する5ヵ年計画の見直し

6.2 検討のまとめ

本年度の検討結果を以下にまとめる。

6.2.1 可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理

平成27～28年度の本事業のもとでR&R検討会を設置して議論を進め、本年度に、2ヵ年に渡る検討会における議論で得られた成果の取りまとめを行った。今後の技術的アプローチの具体化や将来の判断等の場面で必要となる定量的な情報を想定し、これらの定量化に必要な技術検討項目を抽出して、“技術検討のフレームワーク”（回収可能性の維持に関する技術的アプローチの具体化に係る技術検討の枠組み）として整理した。当面の進め方としては、同フレームワークの中で例示した“定量化に必要な技術検討項目”から展開される研究開発を着実に進めていく必要があると結論付けた。

6.2.2 回収可能性維持期間の検討

(1) 定量化に必要な技術の現状整理

様々な処分概念や処分場の埋め戻し状態に対して、回収可能性を維持したときの地質環境や人工バリアへの影響について定量化に必要な技術検討項目が、R&R検討会において整理された。3.2節では、定量化に必要な技術検討項目のうち、安全性への影響に関する定量化に必要な技術検討項目を対象として、現状での知見や着眼点の整理を行い、必要となる技術の抽出を行った。定量化に向けた技術検討に必要な技術としては、影響評価技術や原位置の状態把握のための計測技術

が挙げられた。また、処分場が決まっていない段階で汎用的な検討を行うという観点から、閉鎖後長期の予測まで一貫して適用可能な影響評価技術である実験や解析技術を用いた取り組み状況や優先度等について整理を行った。定量化に必要な技術検討項目に適用される影響評価技術には計測技術等を用いる取り組みがあるが、これらは事業段階のうち、回収可能性維持段階で用いられる回収維持技術および回収技術の一部として本検討では位置づけ、3.4 節の回収維持技術および回収技術の整理で取り扱った。また、定量化に必要な技術検討項目に対応する指標は、3.3 節において回収可能性維持のための技術要件についての考え方の検討に基づき整理したものをを用いた。優先度の整理にあたっては、設計・評価方法等が確立されていない項目や、本事業の検討以外で類似の検討例が無い項目を優先度が高いものとして整理した。結果として、定量化に必要な技術検討項目に対する取り組み状況において、本事業以外で既往の検討例が見当たらないため、定量的な予測技術の整備が必要である項目を整理し、該当項目については優先度が高いと考えられることを示した。ただし、これらの項目に対する解析技術などの検討については、平成 27 年度の調査において既往検討がされていないことが分かったため、本事業の 5 ヶ年計画で実施中であることが確認できた。一方で、設計手法が確立されている、また類似の検討例がある定量化に必要な技術検討項目については、優先度が低いものとして整理した。

(2) 回収可能性維持のための技術要件についての考え方の検討

3.3 節では、回収可能性を維持するために必要となる技術を対象に、「回収可能性を維持するために安全な管理が合理的な範囲で達成」するための技術要件についての考え方について整理を行った。整理にあたっては、国内外の機関等による調査を行い、回収可能性維持のための技術要件についての考え方を検討した。技術要件の考え方の検討では、二つのアプローチで検討を実施した。一つ目のアプローチは、基本方針が示されるより前に検討された回収可能性を考慮しない場合の安全確保に係る技術要件を参考にして、定量化に必要な技術検討項目に関して回収可能性を維持することにより追加される技術要件設定の考え方を検討するものである。二つ目のアプローチは、回収可能性維持に係わる基本方針の要求事項について、段階的に詳細化して検討する方法である。なお、処分場が置かれる環境は技術要件ではなく、技術選定時の条件となることに留意して検討を行った。

まずは、国際機関等で検討されてきた回収可能性維持に係わる技術要件について整理を行った。具体的には、OECD/NEA と IAEA の回収可能性に係わる報告書を調査し、技術要件あるいは設計要件に関連する記述を抽出し、整理して示した。その結果、OECD/NEA のレポートでは、回収可能性維持に係わる「技術要件」については直接的には言及されておらず、「回収可能性維持の戦略」の中の「技術的要素と課題」について「考慮すべき因子」として回収可能性維持へのアプローチとしては二つの戦略があり、その考え方によっては「技術要件」が異なってくることを示唆していると考えられることを整理した。また、IAEA のレポートでは、「設計対策」として回収可能性を設計で考慮すべき事項が言及されていることが分かった。

次に、基本方針が示される以前に国内で検討されてきた回収可能性を考慮していない技術要件について、設定の経緯等について調査と整理を行った。調査の対象は、核燃料サイクル開発機構や原子力発電環境整備機構が示してきた報告書とした。その結果、これまでの報告書では、高レ

ベル放射性廃棄物の地層処分の安全性と技術的な成立性に係る技術要件や設計要件は記述されているが、回収可能性の維持に係わる要件は提示されていないことが分かった。

技術要件の考え方の検討における一つ目のアプローチでは、NUMOの既往検討「処分場の安全機能と技術要件（2010年度）」を参考にして検討を行った。この既往検討は、基本方針が示されるより前に検討されたものであるため、回収可能性を考慮しない場合の安全確保に係る技術要件が示されている。定量化に必要な技術検討項目のうち、安全性への影響に関する定量化に必要な技術検討項目を対象に、既往の回収可能性を考慮しない技術要件を参考にした回収可能性維持のための技術要件の考え方について、設定方法と具体例を提示した。この検討により、回収可能性を維持することにより追加される技術要件設定の考え方を示すことができた。また、提示した技術要件の具体例に関して、回収可能性維持を判断するための指標について、各種技術報告書や各種法令等に基づき整理して示した。

技術要件の考え方の検討における二つ目のアプローチでは、技術要件に関する考え方（定義）の中で、法規制からの要求事項を「必須の要件」とする考え方に基づき、基本方針に規定された回収可能性維持に係わる上位の要求事項から階層構造を作成し、それぞれについて専門的な判断で技術要件を設定する考え方について検討を行った。検討では、基本方針が示す回収可能性の確保に関する技術的な要求事項について整理を行うことにより、3つのキーワード「安全な管理」、「合理的な範囲」、「閉鎖まで」を抽出し、基本方針での要求を最上位の要件として、階層構造的に展開を行った。階層が下部になるほど要件は具体化され、それらは、「回収可能性維持作業への技術要件」と「回収作業への技術要件」の二つに大別できることを示し、基本方針の要求事項に対応する技術要件についてそれぞれ設定例を示した。また、基本方針の回収可能性確保への要求事項と具体的な技術要件設定との関係のまとめを整理して示した。

最後に、前述した技術要件の考え方の検討における二つのアプローチの比較を行った。一つ目のアプローチは、個別の具体的な定量化に必要な技術検討項目に着目していることもあり、技術要件を示す点で分かりやすい構成となっているが、回収可能性維持の期間を設定するという観点からは、それぞれの項目相互の関係について、意思決定に反映させる観点からさらに論理的に組み合わせる必要があることを示した。一方、二つ目のアプローチでは、上位の要求事項を3つの要素に分解し、階層構造的に展開することで、評価すべき事項への技術要件に結び付けていることを述べた。また、二つの特徴として、回収可能性維持に係わる期間などの意思決定のため考慮すべき事項を網羅的に示していることと、技術要件では期間を判断する指標や尺度に係る事項も取り上げていることを示した。

(3) 回収維持技術、回収技術などの整理と研究課題の抽出

3.4節では、定量化に必要な技術検討項目に関連する、現状適用できる回収維持技術、回収技術及び影響低減技術を整理し、今後開発が必要な技術等の研究課題の抽出を行った。なお、研究課題の抽出にあたっては、最新技術の調査を行い、その結果を反映させた。

まずは、平成27年度および平成28年度の本事業の検討で整理した技術要素マップの技術体系を構成する技術群を参考にして、定量化に必要な技術検討項目に対して現状適用できる回収維持技術および回収技術を抽出し、整理した。その結果、閉鎖後長期の安全性への影響に関する定量

化に必要な技術検討項目のうち、開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度に関しては、現在の施設設計を踏まえると現状適用できる回収維持技術（閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術）が見当たらないことが分かった。酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度を解析などのシミュレーションにより定量化し、母岩の安全機能が損なわれると評価された場合は、何らかの対策を講じる必要があると考えられることを整理した。

次に、回収維持技術および回収技術に関連する最新技術の研究開発状況について調査を行った。ここで、回収技術の研究開発は本事業において回収技術の高度化開発のための実証試験が実施されており、これが最新技術に該当することを示した。そのため、ここでの検討では回収維持技術に関するインフラの維持管理について最新の研究開発状況および動向について調査を行った。国土交通省等のインフラ維持管理への研究開発の取り組みの背景は、限られた財源と人材で既存のインフラの品質や安全を確保し続ける必要があるためであり、維持管理の効率化、省力化・省人化、コスト減に向けた技術開発が行われていることを示した。また、インフラの維持管理で着目されている最新技術として、CIM 導入による生産性向上、インフラ用ロボットによる点検作業と施工の省力化、AI を活用した構造物の調査・維持管理、AR・VR による品質向上・教育、を挙げ、それぞれの研究開発状況に関する調査結果をまとめた。さらに、内閣府による戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の課題の一つが、インフラ維持管理・更新・マネジメント技術であり、研究開発計画が策定されていることを整理し、府省や分野の枠を超えた取り組みが行われていることが分かった。これらの調査結果から、回収維持技術は、既存のインフラに対する最新の維持管理技術を取り込み、展開できるものが多くあると考えられるため、関連する最新技術の動向については、国の取り組みや、鉄道・道路等の各事業者の研究開発状況などを今後も注視していく必要があることを示した。

さらに、最新技術の調査結果を踏まえ、定量化に必要な技術検討項目に関連する回収維持技術および回収技術に関して、今後開発が必要な技術等の研究課題を抽出した。処分場の特性を考慮すると、回収維持技術および回収技術の共通した研究課題として、遠隔操作により対応する技術や各種の機器やシステムおよび対策技術等の長期健全性の維持が挙げられた。また、特有の研究課題として、回収維持期間中の開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響低減技術は存在しない可能性があり、今後調査と検討が必要と考えられることを示した。この研究課題については、回収維持期間中の影響を把握し、必要に応じて影響を低減させ、閉鎖後の母岩の安全機能が保持できる状態（還元環境）へ回復を促進させる一連の技術の整備と開発、および実証が必要と考えられることを述べた。

6.2.3 回収可能性維持期間の影響に関する定量的評価

(1) 回収可能性維持期間の影響評価方法の検討

1) 力学的影響評価方法の検討

a 埋戻し材の膨潤圧を設定した検討

昨年度の検討では、埋戻し材にはベントナイトが含まれていることを考慮して、飽和の進行に伴う剛性の低下については考慮していたが、膨潤については考慮していなかった。本年度は、埋

戻し材の膨潤圧を考慮した場合、坑道の周辺岩盤の長期的な変形挙動にどのような影響を与えるのかを確認することを目的とした。

検討対象は昨年度ケース 8（新第三紀堆積岩、横置き、処分坑道まで埋戻し）とした。処分坑道の周辺岩盤の長期的挙動として、クリープ変形を考慮した。支保工は劣化に伴って剛性が低下するものとした。また、緩衝材は飽和の進行に伴い剛性が低下するものとした。

埋戻し材の膨潤圧については、NUMO の仕様と JAEA の室内試験結果から設定し、埋戻し材設置と同時に支保工とインバートの内側に一定の圧力が作用するものとした。

解析の結果、昨年度ケース 8 と比較すると顕著な違いは見られないが、膨潤圧を考慮した場合、局所安全率の低い領域、最大せん断ひずみの高い領域、無次元化弾性係数の低い領域はいずれも昨年度ケース 8 に比べてその広がり若干小さくなり、膨潤圧の作用によりクリープ変形が抑制されたことによる影響が僅かではあるが現れた。

昨年度ケース 8 と比較して、膨潤圧を考慮した場合、支保工の応力度で評価しても、岩盤の最大せん断ひずみで評価しても、坑道安定性の保持期間は延長される結果となった。

b 埋戻し材の坑道変形に対する支持効果に関する検討

昨年度の検討では、処分坑道の埋戻しが有無によって坑道安定性に影響を与えない結果となったことから、その理由の説明性を向上させることを目的とした。

昨年度ケース 8 を対象として、坑道の変形に対して埋戻し材の支持効果を見るために、埋戻し材の剛性（昨年度と同じ場合と 10 倍固くした場合）と、埋戻し後の支保工とインバートの存在の有無を組合せた解析ケースを設定した。これらの解析ケースの結果から、坑道の変形に対して支保工と埋戻し材のいずれが有意な影響を与えているのか、また、埋戻し材の剛性の違いが影響を与えるのかについて考察を行った。

解析の結果、埋戻し材の剛性を 10 倍固くしても、周辺岩盤の変形抑制や坑道安定性の保持期間延長に対しては、ほとんど効果がないことが分かった。支保工がある場合は、埋戻し後に支保工がなくなる場合と比べると、周辺岩盤の変形は抑えられて、保持期間も長くなることが分かった。また、周辺岩盤の内側の支保工、埋戻し材、緩衝材、およびオーバーパックから構成されている支保工等の剛性を調べてみると、埋戻し材が固くなったとしても支保工等の剛性向上には寄与していないこと、支保工等の剛性は支保工そのものの剛性が支配的であったことが考察された。

これらの結果から、埋戻しの有無によって周辺岩盤の挙動に差が見られなかった理由として、支保工そのものの剛性が支配的だったためと考えられる。

c 各材料の物性変化特性の条件を変えた検討

昨年度の検討では、物性値の違いによって解析結果がどのように変わるのかについての知見は得られていなかったことから、物性値変化の条件を変えた場合、解析結果がどのように変わるのかを知ることを目的とした。

昨年度の検討結果から、吹付けコンクリートの剛性が坑道安定性の保持期間に大きな影響を与えるパラメータであると考えられた。昨年度ケース 8 では、吹付けコンクリートの初期ヤング率に対して 400 年後に 1/10 になるものとしていた。それに加えて 200 年後に 1/10 になる場合と、

800年後に1/10になる場合の解析を行った。

解析の結果、溶脱速度が遅くなると、坑道安定性の保持期間は延びる結果となった。この結果から、吹付けコンクリートの物性が坑道安定性の保持期間に大きく影響することが明らかになった。

d コンプライアンス可変型モデルの妥当性確認

昨年度の委員会報告において解析の妥当性確認に関する指摘があったことから、文献調査によりコンプライアンス可変型モデルに対する妥当性確認を行った事例を示すことを目的とした。

岩盤のコンプライアンス可変型モデルについては、大久保教授・福井教授らグループが長年にわたって研究を行っていて、19年間継続した室内クリープ試験から構成則の妥当性について報告していることが分かった。また、実際の坑道の変位とコンプライアンス可変型モデルによる解析値を比較した例を見てみると、変形の経時変化を概ね再現できていることが分かった。

ただし、妥当性確認の事例は多くはなかったこと、妥当性確認の事例における現地計測は1年程度の計測であった。したがって、今後、現地計測との比較事例を積み上げる必要があるとともに、長期間にわたる計測例とも比較する必要がある。

本検討において使用したコンクリートの溶脱による劣化を考慮した構成則や、緩衝材および埋戻し材の飽和の進行を考慮した構成則は仮定したものであるため、これらの構成則も課題として残っている。特に、吹付けコンクリートの特性は坑道安定性の保持期間に大きく影響を及ぼすことが明らかになっていることから、その特性を把握することは予測精度向上のためには重要と考えられる。

e 坑道安定性の評価基準の考え方の再整理

昨年度の検討では、坑道安定性の評価基準には、従来から空洞安定設計に使われてきたものを踏襲していた。しかし、回収可能性維持期間は従来の土木構造物で考えられている期間よりも長いことが想定されることから、より長期間に対応した評価基準を用いるべきとの意見があった。そこで、研究事例の調査を行った結果、時間と共に岩盤の強度が低下していくと解釈している事例や、逆に地山の強度が増加した事例があることが分かった。

長期間に対応した坑道安定性の評価基準に資することを目的として、既往の研究事例およびトンネルの維持管理に用いている指標等について整理して、解析や地下施設への適用性について検討した。

長期間に対応した岩盤の応力の破壊基準については、幾つか提案されているものがあったが、回収可能性維持期間の評価に適用するには不十分であった。また、長期間に対応した岩盤のひずみの基準に関する研究事例は見当たらなかった。今後、載荷時間を変えた圧縮試験のデータの拡充を図ったうえで、検討を行う必要であると考えられる。

強度回復現象に関しては、これを回収可能性維持期間の影響の評価に組み込むためには、現在の研究状況は、まだ十分ではないと考えられる。今後、現象理解も含めて、強度回復の条件、および強度回復過程の構成則の研究が必要と考えられるが、ハードルは高いと考えられる。

現在、トンネルの維持管理の点検要領に示されている指標については、変形速度以外の指標を回

収可能性維持期間の坑道安定性の指標に適用することは難しいと考えられる。ただし、維持管理のプロセスの今後の変状予測等に対して、本検討における演繹的な評価手法やマルコフ確率過程などの統計的な手法が適用できると考えられる。

2) 水理学的影響評価方法の検討

本年度の水理学的影響評価は、昨年度の検討結果を基にして、評価方法を具体化した。本年度の水理学的影響に関する評価、検討結果について以下に整理する。

a 水理学的影響の評価方法の検討

本検討では、新第三紀堆積岩、処分深度・500m、処分形態 2 種類 (Through-type、Dead-end-type) に対して、閉鎖前の作業環境の安全性、および閉鎖後の長期安全性に対する水理学的影響の評価方法について具体的な手法、手順の提示を行った。以下に結果を整理する。

(a) 閉鎖前の作業環境の安全性に関する影響評価方法

閉鎖前の作業環境の安全性に関する影響評価のため、湧水量による評価、処分坑道周辺の不飽和領域評価に着目し、評価手法として、飽和・不飽和地下水流動解析手法 (D-transu3D-EL : FEM 系)、二相流解析手法 (Tough2 : FDM 系) を選定した。

湧水量による評価については、主に FEM を用いた非定常解析検討を実施することとし、パネルスケールモデルの作成、各種の水理パラメータの設定、解析ケースの設定を行った。なお、水理学的影響評価にあたって、昨年度実施した力学影響解析結果による岩盤の透水性の時間変化を考慮する計画であったが、岩盤の透水性に与える力学影響が小さい結果であったため、不飽和領域の発生に対して影響が大きくなる条件として、EDZ を坑道壁面から 1m 範囲の透水性が岩盤よりも 2 オーダー大きくなる条件を設定した。なお、EDZ の透水性の時間変化は考慮しないものとした。

また、湧水量の定量化に対する影響因子として、メッシュ分割影響、EDZ、グラウト等に着目し、処分坑道周辺に対してメッシュ分割の異なるモデル化を行うとともに、処分坑道詳細モデルを用いた感度解析により、EDZ やグラウトの影響、効果を把握する方法を提示した。

処分坑道周辺の不飽和領域評価については、FEM に加えて、FDM による検討を実施することとした。

(b) 閉鎖後の長期安全性に関する影響評価方法

閉鎖後の長期安全性に関する影響評価のため、再冠水時間による評価、坑道湧水量による評価に着目した。

再冠水時間による評価については、処分場の掘削影響状態からの閉鎖を考慮した解析ケースを設定した。

坑道湧水量による評価については、緩衝材、埋戻し材中のベントナイト流出評価のための湧水量を提示することとした。

b 閉鎖前の作業環境の安全性に関する影響評価

(a) 湧水量による評価

設定した解析手法、手順の結果、湧水量の定量化が可能であることを確認できた。

回収可能性維持期間を考慮するため、非定常解析手法を用いた処分坑道からの湧水量の経時変化について算出を行った。回収可能性維持期間として 100 年から 300 年を想定したが、本検討の結果では約 1 年程度で定常状態になったため、長期間の解析を実施する必要性がなくなった。また、坑道開放時の湧水量に関しては、定常解析結果の湧水量により、感度解析結果の比較評価を実施した。

パネルスケールモデルによる検討の結果、処分形態の違いについては、Through-type よりも Dead-end-type の方が、単位廃棄物あたりの坑道延長が短く、湧水量が小さいことが明らかとなった。処分坑道開放時および埋戻時の解析結果からも、周辺地下水流動への影響の大きさが小さい Dead-end-type の方が処分形態として有利となる結果が得られた。

グラウトによる湧水量低減の効果について感度解析を実施し、パネルスケールモデルにおいて考慮したグラウトによる湧水量低減の効果を確認した。坑道周辺の動水勾配が大きくなる Through-type のパネル周辺の連絡坑道部において、グラウトによる湧水量の低減効果が大きいことがわかった。

湧水量の定量化にあたって、FEM における空間の離散化影響について、2D モデル解析を実施したところ、パネルスケールモデル解析から得られる湧水量の精度が高いことが確認できた。また、堅置き処分孔についても 3D モデルによる解析を実施し、2D モデル解析と比較して処分坑道の単位長さあたりの湧水量は約 4% の増加であり、処分孔掘削の影響は小さいことがわかった。よって、Through-type を堅置きタイプと想定すると、処分孔をモデル化していないパネルスケールモデルの処分孔からの湧水量を 1.04 倍することにより、湧水量の補正が可能となる。ただし、本結論はメッシュ分割による FEM 解析モデルの空間的な離散化影響に対するもので、不均質媒体に関しては、メッシュ分割の違いにより物性値の分布が異なる可能性があることに注意しなければならない。

処分坑道詳細モデルによる、EDZ やグラウト影響について感度解析を実施し、EDZ の有無による湧水量への影響は小さいこと、グラウトによる湧水量の低減効果を確認することができた。

(b) 処分坑道周辺の不飽和領域評価

パネルスケールモデル解析では、不飽和領域が発生しなかったため、感度解析として処分坑道の上部にキャップロック（低透水性層）を考慮した解析を実施したが、キャップロックの透水性が岩盤よりも 1 オーダー小さい場合には不飽和領域が発生しない結果となった。

処分坑道詳細モデルによる FEM 解析では、EDZ が存在すると EDZ 領域に対して不飽和領域が発生する可能性があることがわかった。また、キャップロックが存在する場合、パネルスケールモデル解析では発生しなかった不飽和領域がキャップロックと処分坑道の間位に発生する結果が得られた。処分坑道詳細モデルは 2 次元鉛直断面モデルであり、側方からの地下水の流入を考慮していないために不飽和領域が発生した可能性がある。このため、簡易な対称条件を用いた解析モデルによる検討では境界条件等が不適切である可能性が考えられ、できるだけ広域を対象と

した検討が望ましいと思われる。

また、グラウトを考慮すると不飽和領域は EDZ 内部のみに発生し、周辺岩盤へは進展しない結果が得られた。グラウトは処分坑道周辺に発生する可能性のある不飽和領域の範囲を EDZ 領域のみに限定する効果がある可能性がある。

FEM 解析モデルとは異なる処分坑道詳細モデルによる FDM（二相流）解析では、解析手法が異なるため、解析モデル作成、境界条件設定などに制約があり、同一条件での比較が難しいことが明らかとなった。FEM と同様に EDZ が存在すると EDZ 領域に対して不飽和領域が発生する可能性があることがわかった。EDZ 領域に不飽和領域が発生するものの、坑道下部の EDZ 領域までも不飽和領域となった。坑道湧水は主にインバート部から発生すると考えられ、インバート部は飽和状態である可能性が高いため、実現象と比較すると二相流解析結果は矛盾している可能性が考えられる。

飽和・不飽和解析(FEM)、二相流解析(FDM)のどちらにおいても、不飽和特性曲線を用いているため、解析に用いた物性の影響が大きいことが予測される。不飽和領域の発生に影響する要因について感度解析を実施すること重要と考えられる。

(c) 作業環境の安全性確保のための技術検討

建設、操業および回収可能性維持期間中の作業環境の安全性確保の観点から、坑道湧水量の定量化結果を踏まえて必要な技術について検討を実施した。

検討対象としては、湧水量低減対策技術、処分坑道の水没リスク低減対策技術、不飽和領域の発生要因、発生低減技術を取り上げ、各対策方法として想定される技術のピックアップを行った。

c 閉鎖後の長期安全性に関する影響評価

(a) 再冠水時間による評価

飽和・不飽和解析手法を用いたパネルスケールモデル解析では、掘削時の岩盤内での不飽和領域が発生しなかったため、埋戻土に対する再冠水解析となったが、処分パネル形態の違いによらず再冠水時間は約 10 年未満となる結果が得られた。再冠水解析の条件として処分坑道のみ閉鎖であり、連絡坑道を閉鎖した場合も同程度の再冠水時間であると考えられる。ただし、本検討で用いた解析条件に依存すると考えられることから、解析結果については注意する必要がある。

FEM による処分坑道詳細モデル解析では、掘削解析結果を初期条件とし岩盤中の不飽和領域を考慮した解析を実施したが、岩盤中の不飽和領域はほぼ 10 日程度で飽和領域になり、埋戻土についても 1 か月程度で飽和状態となる結果が得られた。全水頭分布の経時変化を確認したところ、周辺岩盤と同じ水頭条件となるには 2 年以上 10 年未満程度であることが分かった。掘削解析における不飽和領域評価と同様に、種々のパラメータの影響により再冠水時間の評価結果が異なる可能性がある。再冠水時間に対するパラメータの感度解析を実施し、影響を把握することが望ましい。

FDM による二相流解析では、岩盤中の不飽和領域（EDZ など）はほぼ 10 日程度で飽和領域になり、埋戻土についても 2 年程度で飽和状態となることがわかった。FEM 解析結果とあまり変わらない結果であるものの、埋戻後の気相の状態変化について考慮している二相流解析手法の方が

再冠水評価には適していると考えられる。ただし、広域を対象としたスケールでの再冠水現象の解析に適するか否かについては今後の課題と思われる。

(b) 坑道湧水量による評価

緩衝材および埋戻し材に含まれるベントナイト成分の流出影響評価に資するため、処分坑道単位長さ、単位時間当たりの湧水量や、堅置き処分孔 1 孔あたりの湧水量の算出、提示を実施した。ただし、本検討は特定の解析条件による検討結果の一例であり、他の事業で実施している検討を踏まえ今後検討することが望ましい。

3) 化学的・熱的影響評価方法の検討

平成 30 年度に実施予定の解析モデルを用いた影響評価に備えて、現状の評価技術の把握を目的とした既往検討の調査を行った。そして、評価手法の現状を踏まえ、現状で可能であり、効率的かつ効果的なモデル解析による検討方法を構築し、検討手順の提案を行った。また、平成 30 年度以降の検討にも資するよう、今後の中・長期的な技術開発の提案も併せて行った。

(2) 回収可能性維持期間の決定に係る情報の整理

回収可能性維持期間の決定に係る情報を、定量化に必要な技術検討項目を対象に整理を行った。

本年度までの力学的定量評価と水理学的影響評価の結果から、「開放坑道の健全性（空間安定性）」、「埋戻した坑道の再利用時の健全性」、「坑道解放期間中に継続する坑内湧水の影響」、および「ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度のうち、水圧の回復過程」の項目に対して、坑道安定性の保持期間、湧水量の経時変化、水圧の回復過程の情報を提示した。

一方、「地下水の引き込みによる擾乱影響の程度と範囲」、「開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度」および「ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度のうち、化学的環境の回復過程」の項目は、化学的影響評価に関するものであり、現在、検討中である。具体的な解析結果の例は、次年度およびそれ以降の検討にて示す予定である。

(3) 定量的評価に関する課題

1) 力学的影響評価に関する課題

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

本検討において使用したコンクリートの溶脱による劣化を考慮した構成則や、緩衝材および埋戻し材の飽和の進行を考慮した構成則は仮定したものであるため、課題として残っている。特に、吹付けコンクリートの特性は、坑道安定性の保持期間に大きく影響を及ぼすことが明らかになったことから、その特性を把握することは予測精度向上のためには重要と考えられる。

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

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

2) 水理学的影響評価に関する課題

a 水理学的影響の評価方法について

(a) 解析モデル規模と解析負荷の増大への対応

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

(b) 解析モデルの妥当性の確認のための水理モニタリング

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

(c) 不確実性の定量化のための検討

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

b 閉鎖前の作業環境の安全性に評価について

(a) 坑道の施工工程を考慮した検討

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

(b) 岩盤の不均質性を考慮した検討

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

(c) 不飽和領域評価手法の見極め

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

討する必要がある。

c 閉鎖後の長期安全性に評価について

(a) サイトスケールでの再冠水評価手法の適用性検討

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

(b) ベントナイト流出評価の条件の見直し

今回提示した湧水量は坑道を開放した状態で算出されたものである。埋戻し後は動水勾配が小さくなるため、提示した流量は保守的ではあるが、ベントナイト流出評価の条件としては過大すぎる懸念される。長期的な安全性を評価するための条件設定について検討を行うことが重要である。

3) 化学的影響評価に関する課題

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

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

6.2.4 回収可能性維持期間に関する国際機関、諸外国の事例調査

回収可能性維持期間に係る国際機関および諸外国の事例調査を実施した。国際機関は OECD/NEA および IAEA を対象とし、諸外国は米国、フランス、スイスおよびカナダを対象として調査を行った。国際機関を対象とした調査により、OECD/NEA の R&R レポートに回収可能性維持のために閉鎖時期を遅らせる場合の理由として、二つの観点からの項目に大別されることが分かった。一つ目は科学・技術的な観点であり、具体的には規制の順守、熱管理、性能確認計画の項目である。二つ目は社会的な観点からであり、社会的信頼構築が挙げられている。これらの項目から、回収可能性維持期間の決定は、先ず、規制から求められる閉鎖要件への対応の期間があり、その後の期間を決定する因子は受容性という定性的なものとなると考えられることを整理した。諸外国を対象とした調査では、回収可能性維持期間に関する記述の中で維持期間を決める因子について、各国に共通した事項と個別の事項に分けて整理を行った。

第6章 参考文献

- [1] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 27 年度地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書 第2編，2016.