

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)

平成29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・技術高度化開発のうち、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	地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発 －実証試験
	第2分冊	地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発
○	その1	－回収可能性の維持についての検討
	その2	可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理

目次

第1章	背景と目的	1-1
1.1	背景	1-1
1.1.1	回収可能性にかかわる国内の動向	1-1
1.1.2	回収可能性にかかわる国際的な動向	1-1
1.2	目的	1-2
1.2.1	回収可能性維持に関する検討	1-2
1.2.2	回収可能性維持に関する定量的評価に関する調査	1-3
第2章	回収可能性維持に関する検討	2-5
2.1	検討方針	2-5
2.2	検討方法	2-9
2.2.1	回収可能性維持の影響分析と技術要素マップの作成	2-9
2.2.2	定置概念についての技術課題の抽出	2-10
2.3	横置き PEM 方式における回収可能性維持の影響分析と技術要素マップの作成	2-10
2.3.1	回収可能性維持の影響検討に用いる前提と検討ケースの設定	2-10
(1)	検討の前提整理	2-10
(2)	PEM の特徴整理	2-23
(3)	検討ケースの設定	2-27
(4)	PEM の回収手順の検討	2-31
2.3.2	回収可能性維持の影響検討手法の整理	2-42
(1)	回収可能性維持による影響の種類および影響評価指標の検討	2-42
(2)	影響因子の抽出と分析	2-49
(3)	状態変遷表の作成	2-51
(4)	プロセス・インフルエンス・ダイアグラムの作成	2-56
(5)	閉鎖後の影響評価シナリオの作成	2-63
2.3.3	回収可能性維持の影響検討	2-66
(1)	基本ケースの影響分析	2-66
(2)	検討ケースの影響分析	2-72
(3)	検討ケース相互の影響比較	2-78
(4)	影響低減の方策検討	2-93
2.3.4	技術要素マップの作成	2-98
(1)	技術要素マップの枠組み	2-98
(2)	技術要素マップの作成	2-109
(3)	技術群の展望と技術課題の整理	2-132
(4)	重要度および緊急度の分析による技術群の課題整理	2-134
2.4	定置概念についての回収可能性維持に伴う影響比較および技術課題の抽出	2-136
2.4.1	縦置きブロック方式における回収可能性維持の影響と技術課題の整理	2-136

(1)	回収可能性維持の影響検討のまとめ.....	2-136
(2)	縦置きブロック方式の回収可能性維持における技術課題の整理.....	2-142
2.4.2	横置き PEM 方式における回収可能性維持の影響と技術課題の整理	2-144
(1)	回収可能性維持の影響検討のまとめ.....	2-144
(2)	横置き PEM 方式における回収可能性維持における技術課題の整理	2-148
2.4.3	定置方式の違いによる回収可能性維持の影響と技術課題の比較.....	2-150
(1)	回収可能性維持の閉鎖前と閉鎖後の影響比較.....	2-150
(2)	定置方式の違いによる技術課題の比較	2-157
2.4.4	回収可能性維持の期間設定と具体化に向けての方策に関する検討	2-161
(1)	回収可能性維持期間の設定の考え方と設定フローの検討	2-161
2.5	検討のまとめ	2-162
2.5.1	回収可能性維持の影響分析と技術要素マップの作成	2-162
2.5.2	定置概念についての技術課題の抽出.....	2-164
2.5.3	まとめ	2-164
第 3 章	回収可能性維持に関する定量的評価に関する調査	3-1
3.1	調査の概要	3-1
3.1.1	全体実施方針	3-1
(1)	基本方針	3-1
3.1.2	調査内容	3-3
(1)	影響低減技術の定量的評価に係わる手法の検討	3-3
(2)	坑道安定性に関する解析的評価	3-6
3.2	影響低減技術の定量的評価に係わる手法の検討.....	3-8
3.2.1	4 ヶ年の解析的検討のための具体的な手法、手順の提示.....	3-8
(1)	方針.....	3-8
(2)	4 ヶ年計画	3-11
3.2.2	力学的影響の評価方法の検討.....	3-12
(1)	坑道の力学的安定性影響評価.....	3-13
(2)	トンネルの変状要因を考慮した力学的安定性影響評価	3-13
(3)	岩盤の割れ目を考慮した力学的影響評価	3-13
3.2.3	水理学的影響の評価方法の検討	3-14
(1)	「閉鎖前の作業環境の安全性」に関する影響評価.....	3-15
(2)	「閉鎖後の長期安全性」に関する影響評価.....	3-15
(3)	「閉鎖前の作業環境の安全性」に関する影響評価.....	3-16
(4)	「閉鎖後の長期安全性」に関する影響評価.....	3-29
3.2.4	化学的・熱的影響の評価方法の検討.....	3-32
(1)	現状技術把握のための既往研究の調査	3-34
(2)	「閉鎖前の作業環境の安全性」に関する影響評価(現状での一例)	3-34
(3)	「閉鎖後の長期安全性」に関する影響評価(現状での一例)	3-38

3.2.5	課題の整理.....	3-39
3.3	坑道安定性に関する解析的評価.....	3-41
3.3.1	実施内容.....	3-41
3.3.2	解析の前提条件.....	3-44
(1)	処分坑道仕様の設定.....	3-44
(2)	想定される力学的影響現象の整理と解析シナリオの設定.....	3-44
3.3.3	各材料の構成モデル.....	3-48
(1)	岩盤.....	3-48
(2)	支保工.....	3-53
(3)	緩衝材と埋戻し材.....	3-55
(4)	オーバーパック.....	3-55
3.3.4	坑道安定性の評価.....	3-55
(1)	局所安全率.....	3-56
(2)	最大せん断ひずみ.....	3-56
(3)	支保工応力度.....	3-57
3.3.5	力学的影響現象解析.....	3-58
(1)	掘削解析.....	3-58
(2)	長期力学解析.....	3-73
3.3.6	坑道安定期間と影響低減技術の検討.....	3-143
(1)	坑道安定期間の評価.....	3-143
(2)	影響低減技術の検討.....	3-149
(3)	対策工の選定とその効果の検討.....	3-150
3.3.7	課題抽出と水理学的影響評価への展開.....	3-170
(1)	評価方法に関する課題.....	3-171
(2)	坑道安定性に対する技術的課題.....	3-172
(3)	水理学的影響評価への展開.....	3-174
3.4	調査のまとめと課題の整理.....	3-183
3.4.1	調査のまとめ.....	3-183
(1)	影響低減技術の定量的評価に係わる手法の検討.....	3-184
(2)	坑道安定性に関する解析的評価.....	3-185
3.4.2	課題の整理.....	3-185
(1)	影響低減技術の定量的評価に係わる手法の検討.....	3-186
(2)	坑道安定性に関する解析的評価.....	3-186
第4章	まとめ.....	4-1
4.1	回収可能性維持に関する検討.....	4-1
4.1.1	回収可能性維持の影響分析と技術要素マップの作成.....	4-1
4.1.2	定置概念についての技術課題の抽出.....	4-2
4.2	回収可能性維持に関する定量的評価に関する調査.....	4-2

図 表 目 次

図 1.1.2-1	処分の全事業段階における回収可能性の変化の概念	1-2
図 1.2.2-1	5ヶ年計画の概要[3]	1-3
図 1.2.2-1	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に与える影響の概念	2-5
図 1.2.2-2	閉鎖時期の違いと工学的対策によるバリアの状態変遷のイメージ	2-6
図 2.3.1-1	検討対象とする処分概念	2-11
図 2.3.1-2	回収可能性維持期間の考え方	2-12
図 2.3.1-3	回収可能性維持のケース	2-13
図 2.3.1-4	廃棄体容器回収を考慮した工程例（定置終了直後から回収を開始する場合）	2-13
図 2.3.1-5	回収シナリオ設定とその考え方	2-14
図 2.3.1-6	廃棄体の定置概念（NUMO TR-11-01 より抜粋）	2-15
図 2.3.1-7	安全確保策と安全機能と回収可能性維持の影響	2-15
図 2.3.1-8	閉鎖後の閉じ込め機能	2-16
図 2.3.1-9	安全機能に期待する期間	2-16
図 2.3.1-10	核種移行解析の前提	2-17
図 2.3.1-11	初期の PEM 概念	2-24
図 2.3.1-12	合理化された PEM の概念	2-24
図 2.3.1-13	2010 年安全確保レポートで示された PEM 概念（NUMO TR-11-01）	2-25
図 2.3.1-14	SKB が開発したスーパーコンテナの概念と定置の概念（SKB ホームページ）	2-25
図 2.3.1-15	HRL（地下研究所）でのスーパーコンテナの定置装置と試験概念	2-26
図 2.3.1-16	ベルギーのスーパーコンテナ概念（ONDRAF, SAFIER-2 より）	2-26
図 2.3.1-17	2015 年セーフティケースレポートにおける NUMO の PEM 概念と定置イメージ	2-27
図 2.3.1-18	回収シナリオと回収可能性維持期間の設定	2-28
図 2.3.1-19	回収可能性維持の処分場状態オプション	2-29
図 2.3.1-20	検討ケースの設定	2-29
図 2.3.1-21	基本ケースの対象とする処分場の状態	2-30
図 2.3.1-22	処分場を構成する各種坑道の仕様例	2-31
図 2.3.1-23	NUMO が提示した PEM 回収方法のイメージ（NUMO 配布資料 [6]より）	2-32
図 2.3.1-24	基本ケースにおける PEM の回収手順	2-33
図 2.3.1-25	PEM 回収手順と作業項目、必要技術の整理	2-39
図 2.3.2-1	本年度実施する影響検討業務全体	2-42
図 2.3.2-2	回収可能性の維持により発生する影響の種類	2-43

図 2.3.2-3 坑道を開放していることによる影響.....	2-44
図 2.3.2-4 廃棄体を回収することによる影響の種類	2-45
図 2.3.2-5 閉鎖後長期安全性への影響を評価する指標の使用例	2-48
図 2.3.2-6 閉鎖前の影響を評価する場合の指標.....	2-49
図 2.3.2-7 回収可能性維持に係わる影響因子（FEP）とその分類（赤字は回収可能性維持期間に廃棄体容器を回収する場合の因子を記述している。）	2-49
図 2.3.2-8 閉鎖前の安全性に影響を及ぼす因子.....	2-50
図 2.3.2-9 閉鎖後安全性に係る影響因子相互の関係（影響を与える因子における赤字は回収する場合の因子を示している。）	2-50
図 2.3.2-10 閉鎖前安全性に係る影響因子相互の関係	2-51
図 2.3.2-11 PID の例.....	2-56
図 2.3.2-12 回収しない場合の PID の枠組み.....	2-57
図 2.3.2-13 異なるスケールへの PID の展開.....	2-57
図 2.3.2-14 回収する場合の PID の枠組み	2-58
図 2.3.2-15 回収する場合の PID の異なるスケールへの展開	2-58
図 2.3.2-16 基本ケース：処分坑道スケールでの PID 作成例（回収する場合）	2-60
図 2.3.2-17 基本ケース：パネルスケールでの PID 作成例（回収する場合）	2-61
図 2.3.2-18 基本ケース：処分場スケールでの PID 作成例（回収する場合）	2-62
図 2.3.2-19 PID を用いた影響評価シナリオ作成の流れ.....	2-64
図 2.3.3-1 回収可能性維持による影響検討.....	2-66
図 2.3.3-2 基本ケースの影響分析の流れ	2-67
図 2.3.3-3 基本ケースと他の検討ケースの前提条件の整理	2-67
図 2.3.3-4 基本ケースの閉鎖前の影響分析の対象.....	2-68
図 2.3.3-5 回収する場合の閉鎖前の影響.....	2-69
図 2.3.3-6 回収可能性維持の処分場閉鎖後の長期安全性への影響	2-70
図 2.3.3-7 基本ケースと検討ケース	2-73
図 2.3.3-8 状態オプションの違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響の変化	2-81
図 2.3.3-9 状態オプション①における回収可能性維持期間と閉鎖前、閉鎖後の影響比較 .2-83	
図 2.3.3-10 状態オプション②における回収可能性維持期間と閉鎖前、閉鎖後の影響比較 .2-85	
図 2.3.3-11 状態オプション③における回収可能性維持期間と閉鎖前、閉鎖後の影響比較 ..2-86	
図 2.3.3-12 回収可能性維持の閉鎖前影響のまとめ.....	2-87
図 2.3.3-13 回収可能性維持の閉鎖後への影響のまとめ.....	2-88
図 2.3.3-14 異なるスケールでの母岩特性の擾乱と回復のイメージ	2-90
図 2.3.3-15 回収可能性維持の閉鎖前の影響の分析結果.....	2-91
図 2.3.3-16 回収可能性維持の閉鎖後への影響分析結果.....	2-92

図 2.3.3-17 CARE 概念.....	2-96
図 2.3.3-18 処分孔横置き方式.....	2-96
図 2.3.3-19 スーパーPEM 概念.....	2-97
図 2.3.4-1 技術要素マップの作成手順.....	2-98
図 2.3.4-2 対象とする状態の設定.....	2-99
図 2.3.4-3 技術要素マップの枠組みのイメージ.....	2-100
図 2.3.4-4 回収可能性維持に係わる技術体系.....	2-102
図 2.3.4-5 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」の整理と課題.....	2-119
図 2.3.4-6 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」の整理と課題.....	2-120
図 2.3.4-7 技術要素展開表 技術群 B. 回収技術「B-1. 廃棄体へのアクセス技術」の整理と課題.....	2-121
図 2.3.4-8 技術要素展開表 技術群 B「B-2. 廃棄体回収・搬出技術」の整理と課題.....	2-122
図 2.3.4-9 技術要素展開表 技術群 B. 回収技術「B-3. 回収後の維持管理技術」の整理と課題.....	2-123
図 2.3.4-10 技術要素展開表 技術群 C. 閉鎖後長期安全性への影響評価技術「C-1. バリア性能評価技術」の整理と課題.....	2-124
図 2.3.4-11 技術要素展開表 技術群 D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術「D-1. 坑道維持更新技術の高度化」の整理と課題.....	2-125
図 2.3.4-12 技術要素展開表 技術群 D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術「D-2. 回収技術の合理性向上」、「D-3. 計測・測定技術（モニタリング技術）の高度化」の整理と課題.....	2-126
図 2.3.4-13 技術要素展開表 技術群 E. 事業中安全性への影響評価技術「E-1. 作業評価技術」、「E-2. 環境影響評価技術」、「E-3. コスト評価技術」の整理と課題.....	2-127
図 2.3.4-14 技術要素展開表 技術群 F. 事業中安全性への影響低減対策技術「F-1. 坑道維持更新技術の高度化」の整理と課題.....	2-128
図 2.3.4-15 技術要素展開表 技術群 F. 事業中安全性への影響低減対策技術「F-2. 回収技術の合理性向上」、「F-3. 計測・測定技術（モニタリング技術）の高度化」の整理と課題.....	2-129
図 2.3.4-1 技術課題の整理等のための手順.....	2-136
図 2.4.1-1 状態オプション①における回収維持期間による閉鎖前と閉鎖後の影響の変化... 2-139	2-139
図 2.4.1-2 状態オプション②における回収維持期間による閉鎖前と閉鎖後の影響の変化... 2-139	2-139
図 2.4.1-3 状態オプション③における回収維持期間による閉鎖前と閉鎖後の影響の変化... 2-140	2-140
図 2.4.1-4 状態オプション④における回収維持期間による閉鎖前と閉鎖後の影響の変化... 2-	

図 2.4.1-5 状態オプションと回収維持期間をパラメータとした閉鎖前（左）と閉鎖後（右） 影響の比較.....	2-141
図 2.4.2-1 状態オプション①の回収維持期間の違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響.....	2-145
図 2.4.2-2 状態オプション②の回収維持期間の違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響.....	2-146
図 2.4.2-3 状態オプション③の回収維持期間の違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響.....	2-146
図 2.4.2-4 状態オプションと維持期間をパラメータとした閉鎖前と閉鎖後の影響比較.....	2-147
図 2.4.3-1 定置方式の違いによる回収可能性維持の影響と技術課題の比較における検討の 流れ.....	2-150
図 2.4.3-2 閉鎖前と閉鎖後の影響比較実施手順.....	2-150
図 2.4.3-3 回収可能性維持期間の違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響比較（基本ケース） ...	2-151
図 2.4.3-4 状態オプションの違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響比較.....	2-152
図 2.4.3-5 状態オプションと回収維持期間の違いによる閉鎖前の影響比較.....	2-152
図 2.4.3-6 状態オプションと回収可能性維持期間の違いによる閉鎖後の影響比較.....	2-153
図 2.4.3-7 定置方式の違いによる技術課題の比較検討の流れ.....	2-157
図 2.4.3-8 回収可能性維持に係わる技術体系の構成（H27 年度検討より）	2-157
図 2.4.4-1 回収維持期間の設定に向けての検討フロー例.....	2-161
図 2.4.4-2 検討の進め方の案.....	2-162
図 2.5.3-1 技術要素展開表 技術群 D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術「D-1. 坑 道維持更新技術の高度化」の二つの定置概念に関する整理と課題.....	2-167
図 2.5.3-2 技術要素展開表 技術群 D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術「D-2. 回 収技術の合理性向上」、「D-3. 計測・測定技術（モニタリング技術）の高度化」の二つの 定置概念に関する整理と課題.....	2-168
図 2.5.3-3 技術要素展開表 技術群 F. 事業中安全性への影響低減対策技術「F-1. 坑道維 持更新技術の高度化」の二つの定置概念に関する整理と課題.....	2-169
図 2.5.3-4 技術要素展開表 技術群 F. 事業中安全性への影響低減対策技術「F-2. 回収技 術の合理性向上」、「F-3. 計測・測定技術（モニタリング技術）の高度化」の二つの定置 概念に関する整理と課題.....	2-170
図 2.5.3-5 技術要素展開表 技術群 B「B-2. 廃棄体回収・搬出技術」の二つの定置概念に 関する整理と課題.....	2-171
図 3.1.1-1 「基本方針 1 回収可能性維持状態、維持期間の違いを考慮した検討」の概要	3-1
図 3.1.1-2 「基本方針 2 回収可能性維持状態、維持期間の違いを考慮した検討」の概要	3-2
図 3.1.2-1 影響低減技術の定量的評価に係わる手法の検討の概要.....	3-4
図 3.1.2-2 H27 年度原環センター策定の 5 ヶ年計画（RWMC、2016、一部省略） [3].	3-5
図 3.1.2-3 坑道安定性に関する解析的評価の概要.....	3-6

図 3.2.1-1	回収維持期間を考慮した定量的評価検討の流れ.....	3-9
図 3.2.1-2	4カ年計画の工程表.....	3-11
図 3.2.2-1	力学的影響の評価方法の検討フロー図.....	3-12
図 3.2.3-1	水理学的影響の評価方法の検討フロー図.....	3-14
図 3.2.3-2	回収可能性維持状態のオプション(H27年度RWC回収可能性維持に関する検討)	3-14
図 3.2.3-3	HLW処分施設の概念図.....	3-17
図 3.2.3-4	パネルスケールモデル.....	3-18
図 3.2.3-5	パネルスケールモデルのメッシュ分割のイメージ.....	3-19
図 3.2.3-6	候補母岩(NUMO配布資料[4])と検討対象母岩.....	3-20
図 3.2.3-7	解析モデル領域と境界条件.....	3-22
図 3.2.3-8	「パネルスケールモデル」から得られる湧水量の経時変化のイメージ.....	3-23
図 3.2.3-9	「処分坑道詳細モデル」による検討内容.....	3-25
図 3.2.3-10	「処分坑道詳細モデル」における解析モデル領域と境界条件.....	3-28
図 3.2.3-11	再冠水時間による評価のための解析モデル.....	3-30
図 3.2.4-1	化学的・熱的影響の評価方法の検討フロー図.....	3-32
図 3.2.4-2	化学的・熱的影響評価のための処分坑道周辺の不飽和領域評価のフロー図.....	3-34
図 3.2.4-3	化学的、熱的影響評価モデルと結果のイメージ(現状での一例).....	3-36
図 3.2.4-4	連続的な化学的・熱的影響評価モデルと結果のイメージ(現状での一例).....	3-37
図 3.2.4-5	化学的・熱的影響評価のための化学的再冠水に要する時間の評価.....	3-38
図 3.2.5-1	現状での課題例1の概要.....	3-40
図 3.2.5-2	現状での課題例2の概要.....	3-40
図 3.3.1-1	本検討の実施内容の概要.....	3-42
図 3.3.1-2	作業内容と作業フロー.....	3-43
図 3.3.2-1	対象とする処分坑道仕様.....	3-44
図 3.3.2-2	長期構造力学安定性検討の概要[6].....	3-45
図 3.3.2-3	ニアフィールドで想定される力学的影響現象.....	3-47
図 3.3.2-4	力学的影響現象の解析フロー.....	3-48
図 3.3.3-1	応力-ひずみ曲線[9].....	3-49
図 3.3.3-2	せん断破壊透水試験の概要[13].....	3-51
図 3.3.3-3	既往のせん断破壊透水試験の結果[12].....	3-52
図 3.3.3-4	正規化された軸ひずみと透水係数の増加率の関係[12].....	3-52
図 3.3.3-5	コンクリートからの水酸化カルシウムの溶脱の概念[14].....	3-53
図 3.3.3-6	セメントペーストの溶脱変質に伴うCa/Si比の変化と空隙形成状態の比較[15]	3-53
図 3.3.3-7	コンクリートの物性値の経時変化.....	3-54
図 3.3.3-8	緩衝材の物性値の経時変化.....	3-55
図 3.3.4-1	局所安全率の定義.....	3-56

図 3.3.4-2	評価基準の概念図	3-56
図 3.3.4-3	限界ひずみと弾性係数の関係[20]	3-57
図 3.3.5-1	坑道形状および寸法 (図 3.3.2-1 を再掲載)	3-58
図 3.3.5-2	深成岩・縦置き方式の解析モデル	3-62
図 3.3.5-3	深成岩・横置き方式の解析モデル	3-62
図 3.3.5-4	新第三紀堆積岩・縦置き方式の解析モデル	3-63
図 3.3.5-5	新第三紀堆積岩・横置き方式の解析モデル	3-63
図 3.3.5-6	縦置き方式の2次元解析メッシュの切り出し位置	3-65
図 3.3.5-7	解析モデルの領域	3-65
図 3.3.5-8	処分坑道内部のモデル化	3-66
図 3.3.5-9	処分孔内部のモデル化	3-66
図 3.3.5-10	局所安全率の分布 (深成岩・縦置き方式)	3-68
図 3.3.5-11	最大せん断ひずみの分布 (深成岩・縦置き方式)	3-68
図 3.3.5-12	局所安全率の分布 (深成岩・横置き方式)	3-69
図 3.3.5-13	最大せん断ひずみの分布 (深成岩・横置き方式)	3-69
図 3.3.5-14	局所安全率の分布 (新第三紀堆積岩・縦置き方式)	3-70
図 3.3.5-15	最大せん断ひずみの分布 (新第三紀堆積岩・縦置き方式)	3-70
図 3.3.5-16	局所安全率の分布 (新第三紀堆積岩・横置き方式)	3-71
図 3.3.5-17	最大せん断ひずみの分布 (新第三紀堆積岩・横置き方式)	3-71
図 3.3.5-18	吹付けコンクリートの応力分布 (新第三紀堆積岩・横置き方式)	3-72
図 3.3.5-19	鋼製支保工の応力分布 (新第三紀堆積岩・横置き方式)	3-72
図 3.3.5-20	処分坑道の長期構造力学安定性の検討における解析モデル	3-74
図 3.3.5-21	変位の経時変化の比較 (軟岩系岩盤)	3-75
図 3.3.5-22	事象と経年変化の概念	3-75
図 3.3.5-23	周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース1: A断面)	3-79
図 3.3.5-24	周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース1: A断面)	3-80
図 3.3.5-25	周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース1: A断面)	3-81
図 3.3.5-26	壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース1: A断面)	3-82
図 3.3.5-27	周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース1: B断面)	3-83
図 3.3.5-28	周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース1: B断面)	3-84
図 3.3.5-29	周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース1: B断面)	3-85
図 3.3.5-30	壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース1: B断面)	3-86
図 3.3.5-31	周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース2: A断面)	3-88
図 3.3.5-32	周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース2: A断面)	3-89
図 3.3.5-33	周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース2: A断面)	3-90
図 3.3.5-34	壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース2: A断面)	3-91
図 3.3.5-35	周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース2: B断面)	3-93
図 3.3.5-36	周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース2: B断面)	3-94

図 3.3.5-37	周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 2 : B 断面)	3-95
図 3.3.5-38	壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 2 : B 断面)	3-96
図 3.3.5-39	周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース 3)	3-98
図 3.3.5-40	周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 3)	3-99
図 3.3.5-41	周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 3)	3-100
図 3.3.5-42	壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 3)	3-101
図 3.3.5-43	周辺岩盤の局所安全率の変化 (ケース 4)	3-103
図 3.3.5-44	周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 4)	3-104
図 3.3.5-45	周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 4)	3-105
図 3.3.5-46	壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 4)	3-106
図 3.3.5-47	周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース 5 : A 断面)	3-108
図 3.3.5-48	周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 5 : A 断面)	3-109
図 3.3.5-49	周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 5 : A 断面)	3-110
図 3.3.5-50	周辺岩盤の透水係数の変化の分布 (ケース 5 : A 断面)	3-111
図 3.3.5-51	壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 5 : A 断面)	3-112
図 3.3.5-52	周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース 5 : B 断面)	3-114
図 3.3.5-53	周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 5 : B 断面)	3-115
図 3.3.5-54	周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 5 : B 断面)	3-116
図 3.3.5-55	周辺岩盤の透水係数の変化の分布 (ケース 5 : B 断面)	3-117
図 3.3.5-56	壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 5 : B 断面)	3-118
図 3.3.5-57	周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース 6 : A 断面)	3-120
図 3.3.5-58	周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 6 : A 断面)	3-121
図 3.3.5-59	周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 6 : A 断面)	3-122
図 3.3.5-60	周辺岩盤の透水係数の変化の分布 (ケース 6 : A 断面)	3-123
図 3.3.5-61	壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 6 : A 断面)	3-124
図 3.3.5-62	周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース 6 : B 断面)	3-126
図 3.3.5-63	周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 6 : B 断面)	3-127
図 3.3.5-64	周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 6 : B 断面)	3-128
図 3.3.5-65	周辺岩盤の透水係数の変化の分布 (ケース 6 : B 断面)	3-129
図 3.3.5-66	壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 6 : B 断面)	3-130
図 3.3.5-67	周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース 7)	3-132
図 3.3.5-68	周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 7)	3-133
図 3.3.5-69	周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 7)	3-134
図 3.3.5-70	周辺岩盤の透水係数の変化の分布 (ケース 7)	3-135
図 3.3.5-71	壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 7)	3-136
図 3.3.5-72	周辺岩盤の局所安全率の変化 (ケース 8)	3-138
図 3.3.5-73	周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 8)	3-139
図 3.3.5-74	周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 8)	3-140

図 3.3.5-75	周辺岩盤の透水係数の変化の分布 (ケース 8)	3-141
図 3.3.5-76	壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 8)	3-142
図 3.3.6-1	坑道安定期間の評価の概念	3-144
図 3.3.6-2	坑道掘削径 D の 20%の領域を超える位置にある要素	3-146
図 3.3.6-3	着目要素における最大せん断ひずみの経時変化	3-146
図 3.3.6-4	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	3-147
図 3.3.6-5	着目要素における最大せん断ひずみの経時変化	3-147
図 3.3.6-6	吹付けコンクリートにおける着目要素	3-148
図 3.3.6-7	着目要素における吹付けコンクリート応力の経時変化	3-148
図 3.3.6-8	事業中安全性への影響低減技術	3-149
図 3.3.6-9	カルシウム溶脱率 LC の経時変化[8]	3-151
図 3.3.6-10	無次元化した一軸圧縮強度と弾性係数の経時変化[8]に加筆・修正	3-152
図 3.3.6-11	吹付けコンクリートの無次元化弾性係数の経時変化	3-152
図 3.3.6-12	局所安全率の分布 (ケース 9)	3-153
図 3.3.6-13	最大せん断ひずみの分布 (ケース 9)	3-153
図 3.3.6-14	吹付けコンクリートの応力分布 (ケース 9)	3-154
図 3.3.6-15	鋼製支保工の応力分布 (ケース 9)	3-154
図 3.3.6-16	周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース 9)	3-156
図 3.3.6-17	周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 9)	3-157
図 3.3.6-18	周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 9)	3-158
図 3.3.6-19	周辺岩盤の透水係数の変化の分布 (ケース 9)	3-159
図 3.3.6-20	壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 9)	3-160
図 3.3.6-21	周辺岩盤の局所安全率の変化 (ケース 10)	3-162
図 3.3.6-22	周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 10)	3-163
図 3.3.6-23	周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 10)	3-164
図 3.3.6-24	周辺岩盤の透水係数の変化の分布 (ケース 10)	3-165
図 3.3.6-25	壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 10)	3-166
図 3.3.6-26	坑道掘削径 D の 20%領域外の要素における最大せん断ひずみの経時変化 (ケース 9)	3-167
図 3.3.6-27	肩部の要素における最大せん断ひずみの経時変化 (ケース 9)	3-167
図 3.3.6-28	着目要素における吹付けコンクリート応力の経時変化 (ケース 9)	3-168
図 3.3.6-29	坑道掘削径 D20%領域外の要素における最大せん断ひずみの経時変化 (ケース 10)	3-169
図 3.3.6-30	肩部の要素における最大せん断ひずみの経時変化 (ケース 10)	3-169
図 3.3.6-31	着目要素における吹付けコンクリート応力の経時変化 (ケース 10)	3-170
図 3.3.7-1	空圧式クリープ試験機の概略図[27]	3-171
図 3.3.7-2	空圧式クリープ試験機の写真[27]	3-172
図 3.3.7-3	覆工展開図[28]	3-173

図 3.3.7-4	対策工標準断面図（一部） [28]	3-174
図 3.3.7-5	処分坑道周辺の透水係数の設定例	3-175
図 3.3.7-6	地山劣化モデルの概要[29]	3-176
図 3.3.7-7	クラックテンソルモデルの概念	3-179
図 3.3.7-8	掘削損傷領域の形成の概念	3-180
図 3.3.7-9	割れ目を含む岩石の室内透水試験の概要図[35]	3-182
図 3.3.7-10	室内試験による割れ目の垂直応力－透水係数関係[35]	3-182
図 3.3.7-11	斜坑部・冠水坑道の割れ目状況（左）と岩盤等級区分（右） [30]	3-183
図 4.2-1	回収維持期間を考慮した定量的評価検討の流れ（再掲）	4-3

表 2.3.1-1	前提として整理する項目と出典	2-11
表 2.3.1-2	一般労働安全への要件 (NUMO TR-11-01)	2-17
表 2.3.1-3	放射線防護に関する基本的な安全対策 (NUMO TR-11-01)	2-18
表 2.3.1-4	環境保全対策の考え方 (NUMO TR-11-01)	2-19
表 2.3.1-5	作業中に想定される異常事象と安全対策 (NUMO TR-11-01)	2-20
表 2.3.1-6	技術要件の設定の考え方 (NUMO TR-11-01)	2-21
表 2.3.1-7	母岩の好ましい特性 (NUMO TR-11-01)	2-21
表 2.3.1-8	オーバーパックの技術要件 (基本的なバリア性能の確保) (NUMO TR-11-01)	2-22
表 2.3.1-9	オーバーパックの技術要件 (長期健全性の維持) (NUMO TR-11-01)	2-22
表 2.3.1-10	緩衝材の技術要件 (基本的なバリア性能の確保) (NUMO TR-11-01)	2-23
表 2.3.1-11	緩衝材の技術要件 (長期健全性の維持) (NUMO TR-11-01)	2-23
表 2.3.1-12	基本ケースの PEM 回収手順と状態変遷	2-41
表 2.3.2-1	母岩の好ましい特性 (NUMO TR-11-01)	2-46
表 2.3.2-2	緩衝材の技術要件 (基本的なバリア性能の確保) (NUMO TR-11-01)	2-47
表 2.3.2-3	オーバーパックの技術要件 (基本的なバリア性能の確保) (NUMO TR-11-01)	2-47
表 2.3.2-4	状態変遷表のブロックでの記述例	2-51
表 2.3.2-5	基本ケースの回収可能性維持の状態変遷 (回収しない場合)	2-53
表 2.3.2-6	基本ケースの回収可能性維持の状態変遷表 (回収する場合)	2-54
表 2.3.2-7	処分坑道での状態変遷 (回収しない場合)	2-55
表 2.3.2-8	処分坑道スケールでの状態変遷 (回収する場合)	2-56
表 2.3.3-1	回収可能性維持の閉鎖後の影響 (回収しない場合)	2-70
表 2.3.3-2	回収可能性維持の閉鎖後の影響 (回収する場合)	2-71
表 2.3.3-3	状態オプションの違いによる閉鎖前の影響	2-79
表 2.3.3-4	状態オプションの違いによる閉鎖後への影響	2-80
表 2.3.3-5	回収可能性維持期間の違いによる閉鎖前の影響の比較	2-82
表 2.3.3-6	回収可能性維持期間の違いによる閉鎖後の母岩特性への影響変化	2-82
表 2.3.4-1	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	2-103
表 2.3.4-2	技術要素マップにおける技術群の展開 (技術群 A および技術群 B : 維持更新と回収技術)	2-105
表 2.3.4-3	技術要素マップにおける技術群の展開 (技術群 C および技術群 D : 閉鎖後長期の安全性)	2-106
表 2.3.4-4	技術要素マップにおける技術群の展開 (技術群 E および技術群 F : 事業期間中の安全性)	2-106
表 2.3.4-5	想定される回収に必要なタスクと作業内容	2-107
表 2.3.4-6	基本ケースの回収シナリオの展開 (例)	2-108
表 2.3.4-7	技術要素マップ 検討ケース II (基本ケース、状態オプション②・回収シナリオ)	

②)	2-110
表 2.3.4-8 技術要素マップ 検討ケース I (状態オプション②・回収シナリオ①)	2-112
表 2.3.4-9 技術要素マップ 検討ケース III (状態オプション②・回収シナリオ③)	2-113
表 2.3.4-10 技術要素マップ 検討ケース IV (状態オプション②・回収シナリオ④)	2-114
表 2.3.4-11 技術要素マップ 検討ケース V (状態オプション①・回収シナリオ②)	2-115
表 2.3.4-12 技術要素マップ 検討ケース VI (状態オプション③・回収シナリオ②)	2-116
表 2.3.4-13 技術要素マップの状態オプションおよび回収シナリオの変化に関する整理	2-131
表 2.3.4-14 技術体系を構成する技術群の特徴と課題 (薄い色 (A, B, D, F) : ハード技術、 濃い色 (C,E) : ソフト技術)	2-133
表 2.3.4-15 技術群の課題に対する重要度および緊急度の分析 (薄い色 (D,F) : ハード技術、 濃い色 (C,E) : ソフト技術)	2-135
表 2.4.1-1 縦置きブロック方式の回収可能性維持の閉鎖前の影響整理	2-137
表 2.4.1-2 縦置きブロック方式の回収可能性維持の閉鎖後の影響整理	2-138
表 2.4.1-3 縦置きブロック方式の技術課題 (状態オプション共通)	2-142
表 2.4.2-1 回収可能性維持期間の違いによる閉鎖前の影響整理 (状態オプション②)	2-144
表 2.4.2-2 回収可能性維持期間の違いによる閉鎖後の影響整理 (状態オプション②)	2-145
表 2.4.2-3 横置き PEM 方式における課題整理 (状態オプション共通)	2-148
表 2.4.3-1 定置方式の違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響比較結果	2-154
表 2.4.3-2 処分概念・技術オプションの特徴比較の視点 (NUMO-TR-11-01) [3]	2-155
表 2.4.3-3 処分孔縦置き定置方式と処分坑道横置き定置方式の作業性と想定される地下環境 条件への適用性 (NUMO-TR-11-01) [3]	2-155
表 2.4.3-4 定置概念の違いによる回収可能性維持の影響の比較のまとめ	2-156
表 2.4.3-5 定置方式の違いによる技術課題 (ハード技術)	2-159
表 2.4.3-6 定置方式の違いによる技術課題のまとめ	2-160
表 2.5.3-1 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	2-165
表 2.5.3-2 技術体系を構成する技術群に対する課題	2-172
表 3.2.3-1 対象とする岩種と水理物性値	3-21
表 3.2.3-2 埋戻材、プラグ工の水理物性値	3-21
表 3.2.3-3 対象とする岩種と水理物性値 (表 3.2.3-1 の再掲)	3-27
表 3.2.3-4 人工バリア等の水理物性値	3-27
表 3.3.3-1 岩盤の時間依存性挙動評価のための主な力学モデル	3-49
表 3.3.4-1 深成岩および新第三紀堆積岩の限界せん断ひずみ	3-57
表 3.3.5-1 深成岩の解析用物性値	3-59

表 3.3.5-2	新第三紀堆積岩の解析用物性値	3-59
表 3.3.5-3	初期応力と地山強度比.....	3-59
表 3.3.5-4	深成岩の解析手順	3-60
表 3.3.5-5	新第三紀堆積岩の解析手順	3-60
表 3.3.5-6	吹付けコンクリートの物性値.....	3-64
表 3.3.5-7	鋼製支保工の物性値	3-64
表 3.3.5-8	解析に用いた岩盤物性[6]	3-73
表 3.3.5-9	解析に用いた緩衝材物性[6].....	3-73
表 3.3.5-10	変位の解析結果.....	3-74
表 3.3.5-11	回収可能性維持の状態オプション.....	3-76
表 3.3.5-12	検討ケース	3-77
表 3.3.5-13	クリープ解析用物性値.....	3-77
表 3.3.6-1	特性変化低減策を実現する為の要求特性[25]	3-150
表 3.3.6-2	坑道安定期間の評価結果.....	3-170
表 3.3.7-1	変状原因と対策工[28]	3-173

第1章 背景と目的

1.1 背景

1.1.1 回収可能性にかかわる国内の動向

高レベル放射性廃棄物処分における廃棄体の回収可能性に関して、平成27年5月22日に閣議決定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」[1]において、実施主体は、特定放射性廃棄物が最終処分施設に搬入された後においても、安全な管理が合理的に継続される範囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性(回収可能性)を確保するものとされており、国及び関係研究機関は、最終処分施設を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等について調査研究を進め、最終処分施設の閉鎖までの間の特定放射性廃棄物の管理の在り方を具体化することが求められている。さらに、最終処分に関する国民との相互理解を深め、最終処分事業を円滑に推進するための社会的側面に関する調査研究も進めていくことが重要であることが記されている。

1.1.2 回収可能性にかかわる国際的な動向

OECD/NEAのReversibility and Retrievability (R&R)プロジェクトでは、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に関し、その概念に関する問題の範囲と考え方についてNEA加盟国による調査・議論が行われた。2011年に発行された最終報告書[2]の中では、廃棄物貯蔵～処分場操業～閉鎖後長期における事業段階ごとに、回収可能性(回収の容易性)、安全確保の考え方等の関係を整理している(図1.1.2-1)。同報告書では、回収可能性に関係する地層処分場の構成要素や、回収可能性を検討していくために事業段階ごとに考慮すべき要因についても検討されている。回収可能性維持に関する検討では、大きく二つのアプローチが提唱されている。

- ・回収の容易性を考慮せず構築された処分場の概念を対象に、廃棄体を安全かつ合理的に回収するための技術を準備する
- ・回収の容易性を考慮した処分場の概念を構築し、廃棄体を安全かつ合理的に回収する技術を準備する

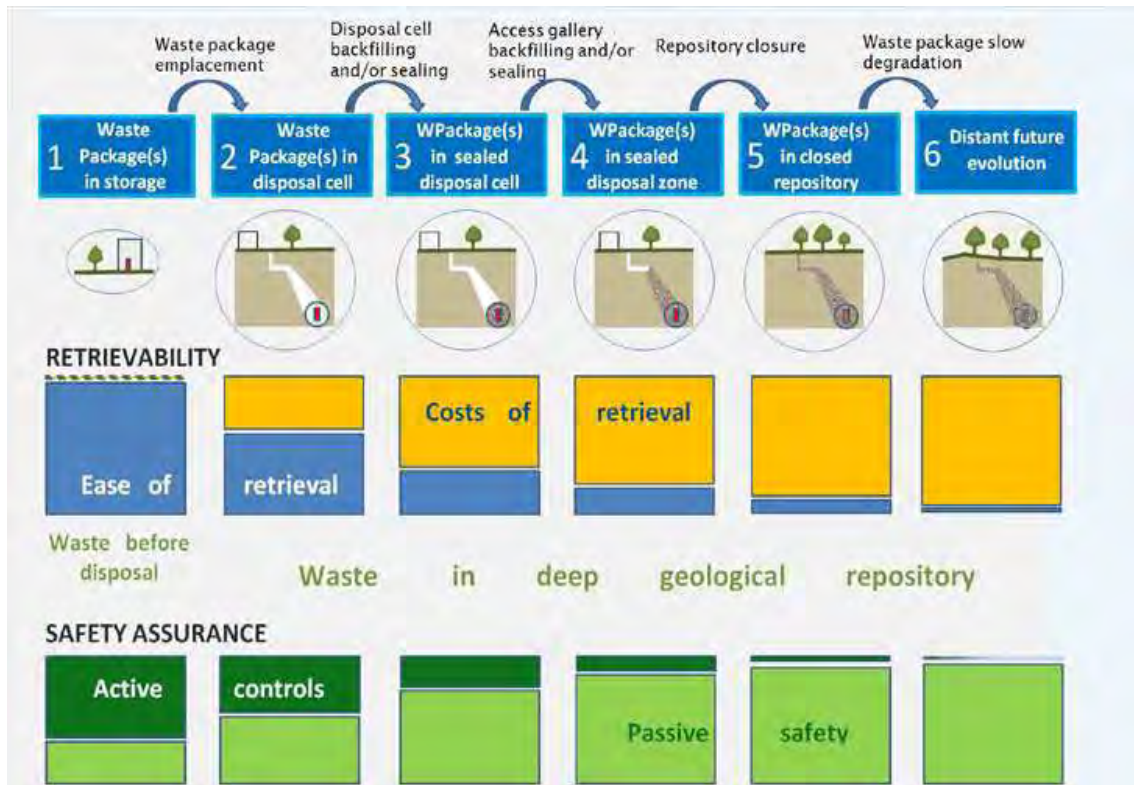


図 1.1.2-1 処分の全事業段階における回収可能性の変化の概念
〔OECD/NEA R（回収可能性）スケール（OECD/NEA、2011）〕 [2]

1.2 目的

1.2.1 回収可能性維持に関する検討

高レベル放射性廃棄物処分における廃棄体の回収可能性に関して、平成27年5月22日に閣議決定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」において、実施主体は、特定放射性廃棄物が最終処分施設に搬入された後においても、安全な管理が合理的に継続される範囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性（回収可能性）を確保するものとされており、国及び関係研究機関は、最終処分施設を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等について調査研究を進め、最終処分施設の閉鎖までの間の特定放射性廃棄物の管理の在り方を具体化することが求められている。

この方針を受けて、本業務は、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長期的な安全性に与える影響等について検討することを目的とする。

本年度は、昨年度に策定した5ヶ年計画に沿って、昨年度までに実施した回収技術や回収維持期間についての検討を踏まえた調査を行う。本年度は、昨年度と異なる廃棄体の定置方式等を対象に、処分施設の安全性に影響を及ぼす要因について、人工バリアの性能維持が可能な期間の観点から分析を行う。影響要因については網羅的に整理する。これらの結果に基づき、処分場の長期的な安全性を損なうことなく坑道を維持できる期間を設定するための具体的な方策とリスク、状態観察、回収後の対応等の要素をまとめ、回収可能性に係わる技術要素マップを作成する。さ

らに、昨年度に実施した検討結果との比較検討を行い、各定置方式における課題の整理を行う。

1.2.2 回収可能性維持に関する定量的評価に関する調査

閉鎖後長期の安全性に与える影響については、回収可能性維持の期間を検討するためにも、定量的に評価することが検討を進めていく上に必要となる。定量化する対象は、温度、水理、力学、化学のそれぞれが考えられるが、定量化が必要となる優先順位、及び論理的な組み立てのための手順を考慮して調査を進める。昨年度までの検討において、回収可能性維持状態、期間を考慮した処分場へのこれらの影響について熱的、水理的、力学的、化学的影響の観点から回収可能性維持に関する検討を実施した。これらの主たる影響要因について、その影響程度の評価および影響低減技術の検討が必要である。

本調査は、昨年度策定した5ヶ年の検討計画の概要（図 1.2.2-1）に沿って、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ための調査を行うことを目的とする。

また、本年度は、坑道安定性に関する解析について取り組み、昨年度までの検討結果を踏まえ、定量的に評価するための条件を検討し、必要となる解析的手法の例示を行う。また、それらの試行を通して、回収可能性の維持期間を考慮した、坑道への影響低減技術の必要性の有無や課題の抽出を行うことを目的とする。



図 1.2.2-1 5ヶ年計画の概要[3]

第1章 参考文献

- [1] 経済産業省、“特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（平成27年5月22日閣議決定）”、経済産業省ホームページ
<http://www.meti.go.jp/press/2015/05/20150522003/20150522003-1.pdf>
- [2] 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).
- [3] 原子力環境整備促進・資金管理センター：“平成25年度 地層処分技術調査等事業 地層処分回収技術高度化開発 報告書”、平成26年3月

第2章 回収可能性維持に関する検討

2.1 検討方針

本業務の目的は「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長期的な安全性に与える影響等について検討すること」である。この目的を達成するためには、まず「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に与える影響」の理解が重要と考える。そこで検討方針を示す前に、「回収可能性とバリアの長期的な安全性への影響」の概念、および「処分場の閉鎖時期の違いによるバリアの性能維持」に関する基本的な考え方を述べる。

■回収可能性とバリアの長期的な安全性への影響に対する基本的な考え方について

本業務での検討対象となる、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に与える影響の概念を図 1.2.2-1 に示す。建設・処分スケジュールにより、人工バリアとその周辺の岩盤および坑道は、熱的 (T)、水理的 (H)、力学的 (M)、化学的 (C) な特性が変化するとともに、相互に影響を及ぼし合う。例えば、岩盤および坑道は建設開始から時間の経過とともに掘削影響や風化などの劣化現象により熱的、力学的、水理的、化学的な特性が変化して坑道の維持に影響を及ぼし、坑道内の環境は人工バリアの定置後に緩衝材やオーバーパックに影響を及ぼす。人工バリア自体もガラス固化体の発熱等により、緩衝材やオーバーパックに影響を受ける。このことから、回収可能性維持および人工バリアの長期性能を維持するためには、人工バリアおよびそれらを取り巻く岩盤・坑道環境の状態を維持する必要がある。これらの状態維持のためには、安全性を損なう要因となる各因子の把握・評価や、その結果に基づいた工学的対策の検討が必要となる。

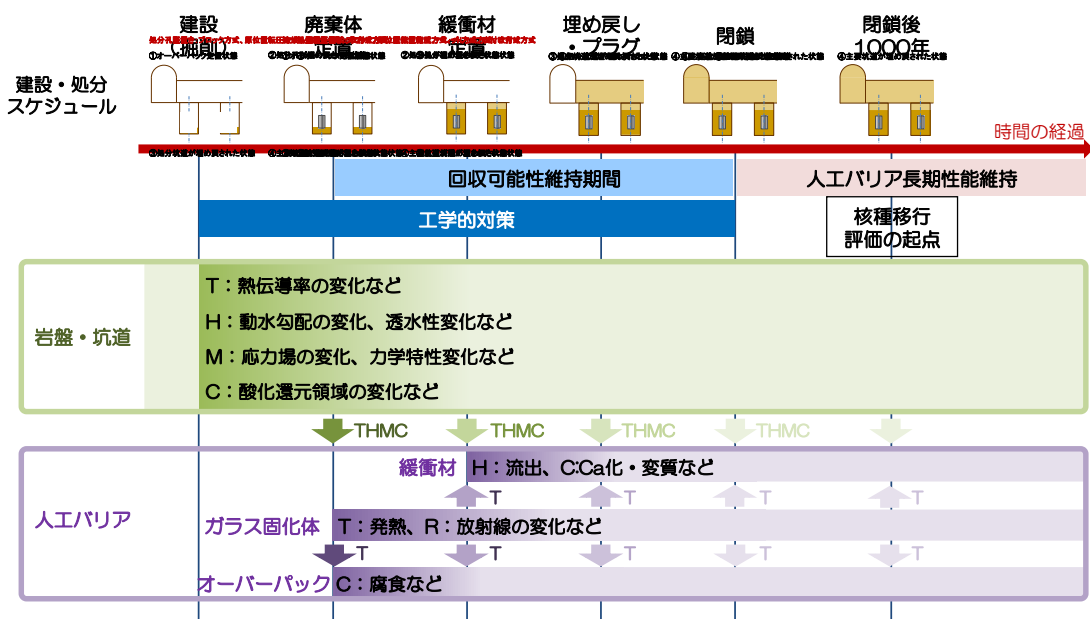


図 1.2.2-1 処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の長期的な安全性に与える影響の概念

■閉鎖時期の違いによるバリアの性能維持の基本的考え方について

バリアの状態が建設・処分スケジュールや時間の経過とともに変遷することは前述のとおりである。廃棄体の定置直後に処分場を閉鎖する場合と処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持する場合とを比較すると、坑道開放による岩盤・坑道の劣化などの影響により、バリアの状態変化は処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持する場合の方が大きくなると考えられる。したがって、処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持し、かつ安全評価で求められるバリアの要求性能を満足するためには、回収可能性維持期間に生じる状態変化に対応するための対策が必要となる。対策には、回収可能性を維持するための施工による方法と、回収可能性を維持するための工学的な対策を含んだ施工により状態変遷を緩和させる方法が考えられる。閉鎖時期の違いと工学的対策によるバリアの状態変遷のイメージを図 1.2.2-2 に示す。

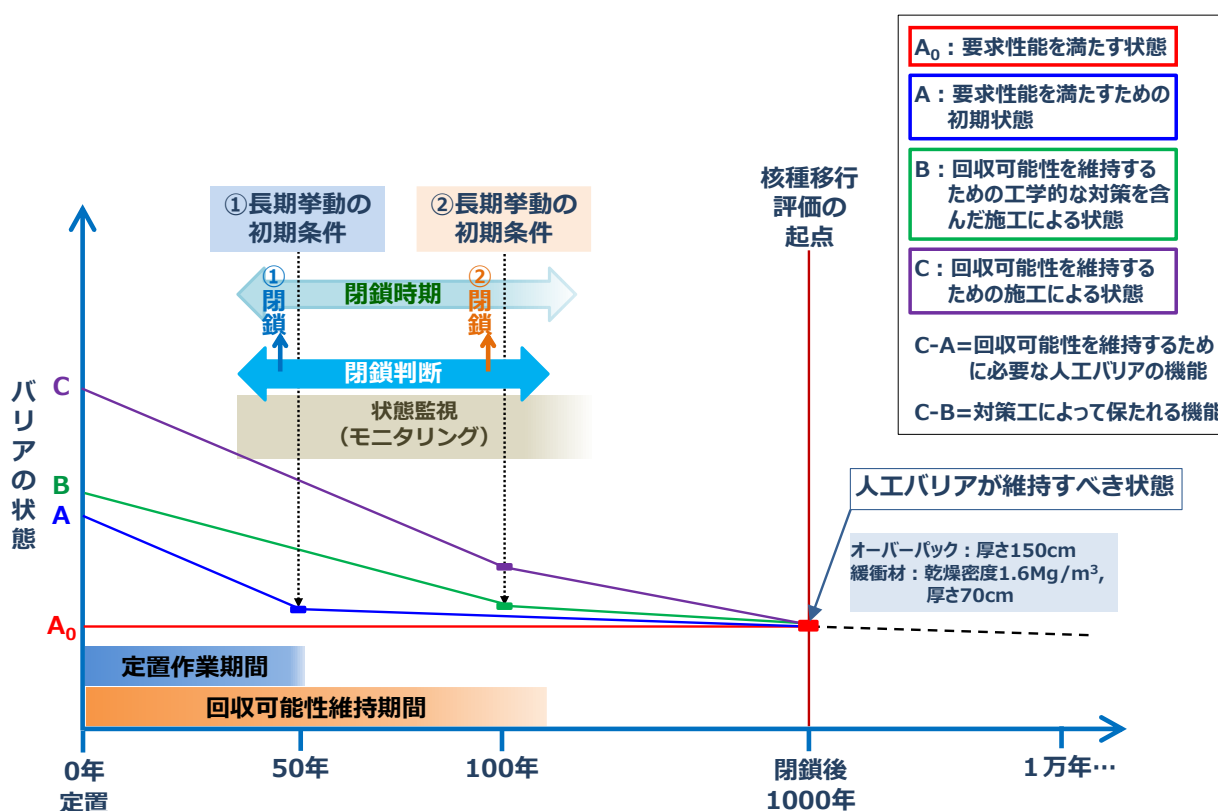


図 1.2.2-2 閉鎖時期の違いと工学的対策によるバリアの状態変遷のイメージ

これまで示してきた回収可能性維持と人工バリア長期性能維持に関する基本的な考え方、および前章で述べた回収可能性（容易性）に関する国内外の背景を踏まえ、回収可能性維持の影響分析と技術要素マップの作成、および定置概念についての技術課題の抽出について、以下に示す検討方針のもとで検討を行う。

【検討方針 1】「長期的な安全性に与える影響」の理解と整理に基づく検討

本業務の目的は「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長期的な安全性に与える影響等について検討すること」である。この目的を達成するためには、まず「長期的な安全性に与える影響」についての考え方を明らかにして示すことが重要である。

「長期的な安全性」とは、直接的には人工バリアの長期性能を意味する。ただし、人工バリアの長期性能としての要件を閉鎖後に達成するためには、坑道環境の作用により影響を受ける人工バリアの状態を回収可能性維持期間中にわたり保持する必要がある。すなわち、「回収可能性を維持した場合の長期的な安全性」は、長期性能としての要件を閉鎖後に達成できる人工バリアおよび坑道環境の状態を維持することと考えられる。ここで、回収を考慮すると、人工バリアおよび坑道環境の状態は回収作業により影響を受け、また、回収（の容易性）も坑道環境の作用の影響を受けることが考えられる。

これらをまとめると、本業務の目的に示されている「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に与える影響」とは、坑道環境の作用によるバリア性能への影響、坑道環境の作用による回収（の容易性）への影響、回収作業による人工バリアと坑道環境への影響に大別できると考える。この3つの影響についてさらに整理し、以下に述べる。

- ◆坑道環境の作用によるバリア性能への影響は「処分場の成立性への影響」であり、以下の二つに整理できる。
 - ・閉鎖後長期の安全確保
 - ・操業期間中の安全確保
- ◆坑道環境の作用による回収（の容易性）への影響は「回収可能性を視点とした時の国内外の処分場の整理（処分場の性能として回収の容易性を積極的に付加しているか）」により、OECD/NEA R&R Report（2011） [1]により以下のアプローチが提案されている。
 - ・回収の容易性を考慮せず構築された処分場の概念を対象に、廃棄体を安全かつ合理的に回収するための技術を準備する
 - ・回収の容易性を考慮した処分場の概念を構築し、廃棄体を安全かつ合理的に回収する技術を準備する
- ◆回収作業による人工バリアと坑道環境への影響は「回収の対象となる廃棄体の量による整理」ができる。
 - ・限定回収
 - ・全量回収
 - ・回収後の処分場に求められる性能

「長期的な安全性に与える影響」について、上記の3つの影響を考えることが必要と考え、検討を実施する。

【検討方針 2】 TPO（時間・場所・場合）を明確にした包括的な検討

本業務においては多様かつ複雑な影響を包括的に取りまとめる必要がある。そこで、TPO（時間・場所・場合）を基軸にした検討を進める。

T（時間）：処分場の閉鎖をしない時間の影響

人工バリアおよび坑道環境の状態は、熱的、水理学的、力学的、化学的な観点の影響を受けて時間とともに変遷していく。各観点の影響は、建設から定置、埋め戻し、回収、閉鎖などの各イベントにより変化するため、各イベントで変化する各観点での影響を連続する時間の経過を考慮して検討を進める。

P（場所）：回収可能性維持の状態（物理的な状態）の影響

人工バリアおよび坑道環境の状態は、熱的、水理学的、力学的、化学的な観点の影響を受けるが、これらの影響の大きさは回収可能性維持の物理的な状態により異なる。また、回収作業が人工バリアと坑道環境に与える影響は、回収時に存在する人工バリアおよび坑道の構成要素や、それに応じて選択される回収技術、回収対象となる廃棄体の量などにより異なることが考えられる。これらを考慮するために回収可能性維持の状態について物理的に異なる複数のオプションを設定した検討を行う。これにより、回収については放射線影響の観点も加えることが可能となり、回収時の放射線安全などのリスク評価も検討できる。

O（場合）：回収作業の影響（回収しない場合、回収した場合の影響）

回収は人工バリアおよび坑道環境の状態に影響を及ぼすため、回収可能性を維持しつつ回収しない場合と回収した場合に分けて影響を整理する。回収しない場合の人工バリアおよび坑道環境の状態は、回収可能性維持期間の影響を受けた変遷となり、閉鎖へと進む。一方、回収した場合の人工バリアおよび坑道環境の状態には、回収維持期間の影響に加えて回収の影響が加わる。回収の影響については、回収時の作業や、回収後の対応等を検討する必要がある。これらは回収の対象となる廃棄体の量や回収後に求められる処分場の性能などを考慮した検討となる。

【検討方針 3】 並行して進む検討会や研究開発と密接な連携をとった検討

本業務の背景である「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」において、安全な管理が合理的に継続される範囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性(回収可能性)を確保することが求められていること、さらに、最終処分に関する国民との相互理解を深め、最終処分事業を円滑に推進するための社会的側面に関する調査研究も進めていくことが重要であることを意識した検討を実施する。そのため、本業務と並行して実施されている「可逆性・回収

可能性の意義および確保のあり方の整理」の有識者検討委員会へ本業務の研究成果を報告し、かつ、検討委員会での議論を本業務に反映させた検討を実施する。

また、本業務により整理した技術課題は、回収可能性を維持するために必要な工学的対策や回収技術として今後の計画へと集約されていく。この計画が、処分事業の推進に資する社会的貢献度の高いものとなるよう、これまで個々に実施されてきた技術開発の成果を統合した検討を行う。具体的には、搬送定置・回収技術開発や処分システム工学確証技術開発と連携をとり、監視・予測技術等の整理も含めて、広く最新の知見や研究成果を取り込む。また、「長期的な安全性」の検討をより現実的なものとするために、事業期間を通して時間的・空間的に途切れの無い連続した検討を行う。

2.2 検討方法

本業務において実施する作業内容は、検討方針で示したように、評価や整理の際の基軸を明確にした検討（例えば、TPO や THMC を基軸とした検討）を展開するとともに、煩雑になりがちな作業については既往の検討で実績のある手法（例えば、FEP や PID 作成）を用いて行う。すなわち、「評価や整理の基軸の明確化」および「既往検討で実績（および経験・知見）のある手法の展開」のもとで作業することにより、効率的に目標達成に向けた作業を進めることとする。

2.2.1 回収可能性維持の影響分析と技術要素マップの作成

高レベル廃棄物処分の安全性評価の観点から、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に与える影響について、平成 27 年度の検討とは異なる廃棄体の定置方式を対象として、回収可能性維持に関連する要素の網羅的な抽出と共に、その関連性を可視化し、安全性確保の要素、回収シナリオの整理も含めて、技術要素マップを作成する。

具体的には、廃棄体の定置方式を横置き方式、緩衝材製作・施工方法を PEM 方式とした場合の検討を行う。実施にあたっては、以下のような方法を用いる。

- ① 回収可能性を維持した場合の処分施設の安全性への影響を及ぼすと推定される要因とその要素（影響因子）を抽出する。影響因子の抽出にあたり、本年度は、平成 27 年度の検討にて閉鎖前の影響と閉鎖後の影響に大別して検討した回収可能性維持の影響評価指標について、それぞれの影響の具体的な種類を考察し、体系的に整備する。
- ② 抽出した影響因子を特質に応じて分類し、回収する場合と回収しない場合を考慮して状態変遷表として示す。この分析にあたっては、まず、横置き PEM 方式の特徴を整理し、バリアの構成要素が全て含まれる状態を考慮した標準的な基本ケースを設定する。次に、閉鎖前の状態をオプションとして、複数の回収可能性維持期間を考慮した回収シナリオを作成し、シナリオごとの影響因子とその影響先を抽出し、抽出した影響因子を影響先ごとに分類する。さらに、基本ケースから、状態オプションおよび回収シナリオに関する展開を考慮した検討ケースを設定し、網羅的に影響因子を検討する。

- ③ 抽出した影響因子に対して、その妥当性を検討する。検討は、影響因子と影響先をリンクしたプロセス・インフルエンス・ダイアグラム（PID）の作成等による分析と整理により実施することとする。また、これらの妥当性検討から導かれる影響を閉鎖前と閉鎖後に分け、想定される影響の範囲や程度について整理する。
- ④ 平成 27 年度に作成した技術要素マップの枠組みに基づき、技術要素マップを作成する。技術要素マップは技術群を系統的に整理するものであり、回収可能性維持に係わる技術は、状態オプションにより変化する回収対象を考慮した技術要素群のマトリクスで表わす。

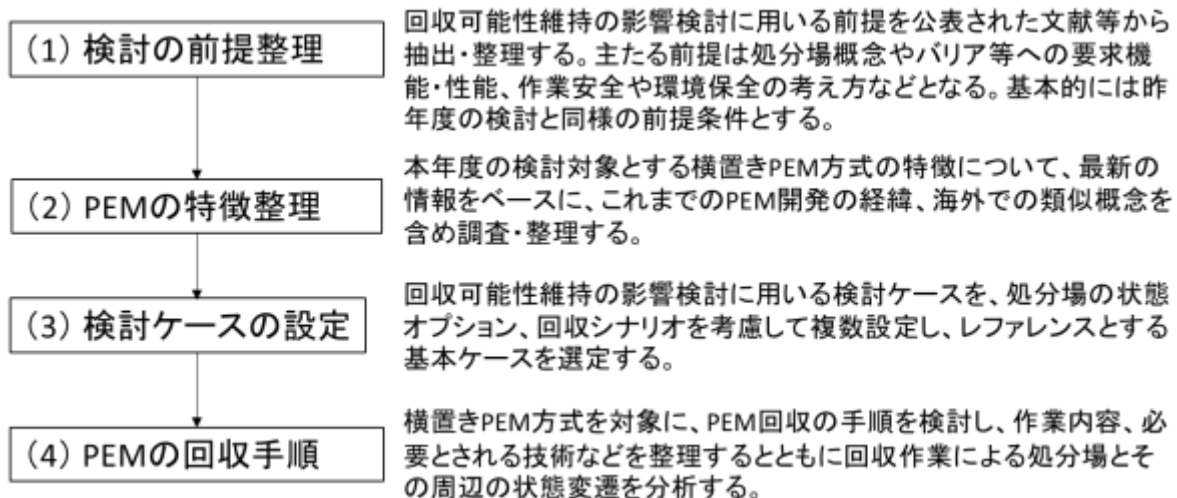
2.2.2 定置概念についての技術課題の抽出

2.2.1 の検討結果について、平成 27 年度に実施した縦置き・ブロック方式を対象とした検討結果との比較により、定置方式の違いによる回収可能性維持による影響の比較および技術要素の分析による技術課題の比較を行う。また、評価指標および結果の表示方法についても検討する。

2.3 横置き PEM 方式における回収可能性維持の影響分析と技術要素マップの作成

2.3.1 回収可能性維持の影響検討に用いる前提と検討ケースの設定

本項では、以下の手順で前提と検討ケース等の設定を行う。



(1) 検討の前提整理

検討の前提は、平成 27 年度の本事業報告書 [2]と NUMO の安全確保レポート [3]を参照して、表 2.3.1-1 に示す項目を設定する。

表 2.3.1-1 前提として整理する項目と出典

前提番号	項目	出展
1	処分場概念(基本概念)	NUMO-TR-11-01で設定されている概念
2	回収可能性維持期間の考え方	H27年度の検討成果を踏襲
3	回収可能性維持の影響評価検討ケース	H27年度の検討成果を踏襲
4	回収を考慮した処分事業工程例	H27年度の検討成果を踏襲
5	回収可能性維持期間と回収シナリオ	H27年度の検討成果を踏襲
6	廃棄体と人工バリアの定置概念オプション	NUMO-TR-11-01で設定されている概念
7	処分施設の閉鎖後安全確保と安全機能	NUMO-TR-11-01に記述
8	人工バリアと周辺岩盤の安全機能	NUMO-TR-11-01に記述
9	安全機能に期待する期間	NUMO-TR-11-01で設定されている期間
10	核種移行評価までの状態変遷	H27年度の検討成果を踏襲
11	一般労働安全に関する安全対策の考え方	NUMO-TR-11-01に記述
12	放射線防護に関する安全対策の考え方	NUMO-TR-11-01に記述
13	環境保全対策の考え方	NUMO-TR-11-01に記述
14	操業期間中に遭遇する異常事象と安全対策例	NUMO-TR-11-01に記述
15	技術要件設定の考え方	NUMO-TR-11-01に記述
16	母岩の好ましい特性	NUMO-TR-11-01に記述
17	オーバーバックの安全機能と技術要件	NUMO-TR-11-01に記述
18	緩衝材の安全機能と技術要件	NUMO-TR-11-01に記述

1) 処分場概念

対象とする処分概念と関連する条件は、図 2.3.1-1 に示す平成 27 年度の検討（縦置きブロック方式）と同様とする。

1. 処分場立地環境: 沿岸平野
2. 処分岩種: 堆積岩(第三紀泥岩)
3. 処分深度: 500m
4. 処分場レイアウト: 平面パネル配置
5. パネル数: 6面
6. アクセス: 斜坑と立坑
7. 坑道: 支保、覆工コンクリート、背面排水システム、強制換気システム
8. 建設・操業(定置・埋戻し)期間: 約50年
9. 廃棄体数: 4万本(5体/日で定置を基本)
10. 廃棄体定置形態: 処分坑道横置きPEM方式
11. 回収までの処分場状態: アクセス坑道、連絡坑道、主要坑道は開放され、処分坑道の埋戻しは完了していると設定(NUMO基本概念)
12. 回収PEMの管理: 処分サイト敷地内に建設

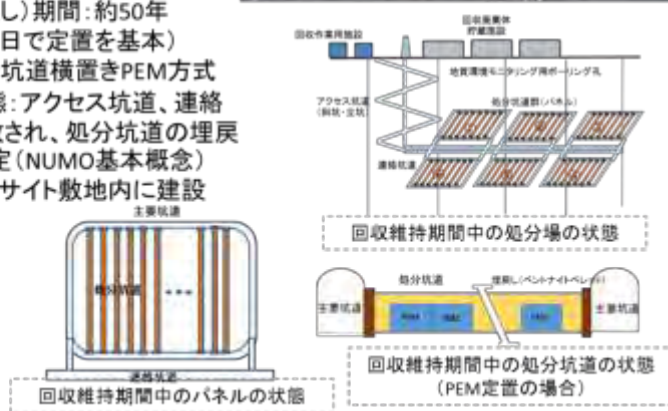
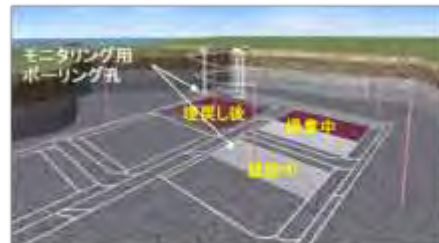
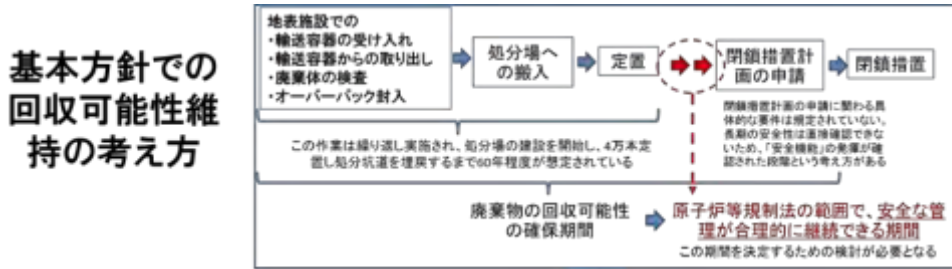


図 2.3.1-1 検討対象とする処分概念

2) 回収可能性維持期間の考え方

回収可能性維持期間の考え方は、平成 27 年度と同様、基本方針に提示された廃棄体が受入れられてから閉鎖の意思決定がなされるまでとする（図 2.3.1-2）。



基本方針で提示された廃棄体の回収可能性の維持期間の概念を具体化すると、

- 処分場のアクセス坑道、第1パネル建設期間（約10年間）
- 廃棄体定置・埋戻しの作業、他パネル建設期間（最大約50年間）
- 定置完了後、閉鎖判断の期間
- 回収した場合の回収作業の期間（最大約40年間）

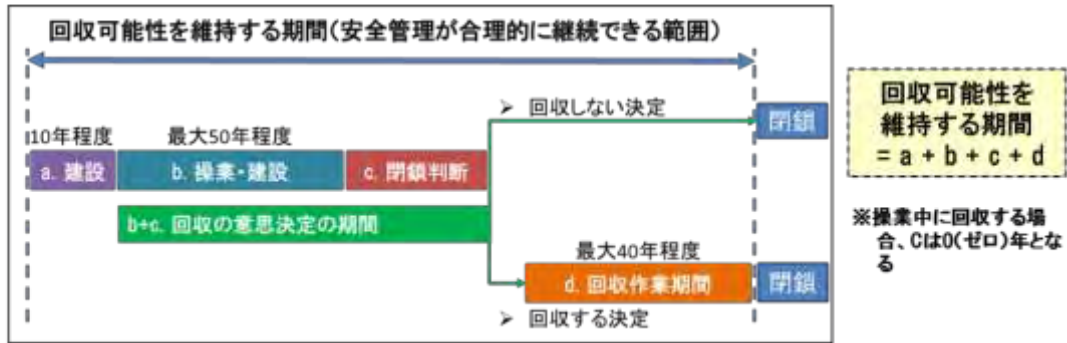


図 2.3.1-2 回収可能性維持期間の考え方

3) 回収可能性維持検討のケース

処分事業における閉鎖段階までの回収可能性維持がもたらす影響については、維持後に回収しない場合と回収をする場合の2ケースがある（図 2.3.1-3）。

回収しない場合：閉鎖段階まで回収可能性を維持するが結果的に廃棄体を回収することがなく処分場が閉鎖される場合。坑道が閉鎖されず開放しておくことの作業・環境リスクや費用の発生、また閉鎖後の長期安全性への影響などを検討しなければならない。

回収する場合：閉鎖せずに廃棄体が回収される場合は、一部を回収する場合と全数回収の場合があり得る。回収可能性維持に伴う上記の影響の他に、回収作業に伴う作業・環境リスクや費用の発生、閉鎖後の回収行為の影響を含めた長期安全性への影響などが付加される。全てを回収する場合は、長期の安全性への影響は考慮する必要はないが、回収した廃棄体容器の安全管理の義務が発生する。

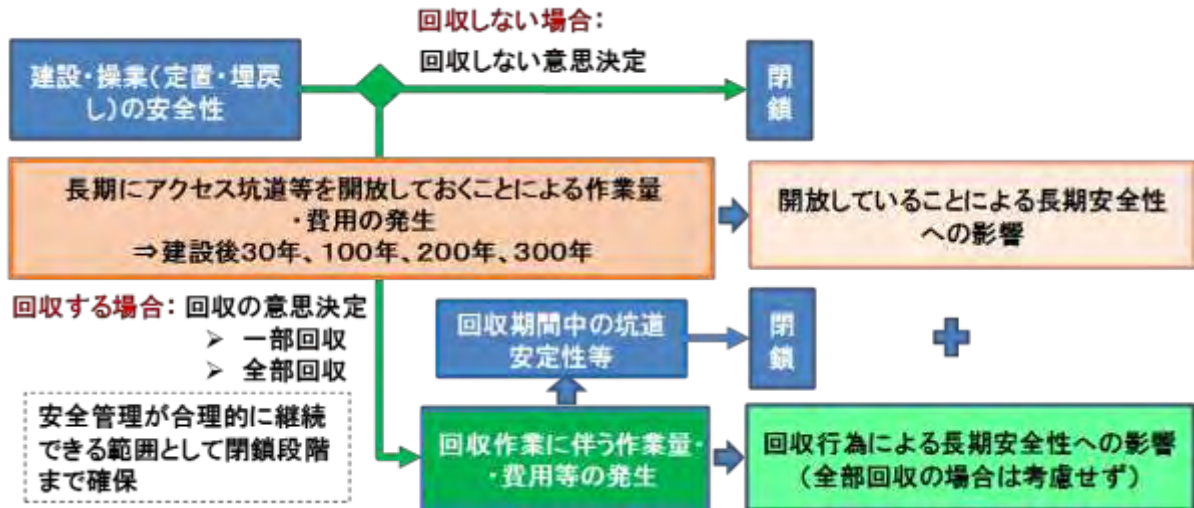


図 2.3.1-3 回収可能性維持のケース

4) 回収を考慮した場合の処分事業の工程例

回収可能性維持の処分場の状態例として、PEM を処分坑道に横置き定置し処分坑道を埋戻したのち、端部にプラグを設置し、閉鎖段階までアクセス坑道等を開放しておくことを想定する。回収可能性の維持とは、回収の意思決定がなされたときに速やかに作業に掛かれるように技術等を準備しておくことを意味する。この時、維持期間としては、図 2.3.1-4 にあるように定置・埋戻し終了後、全数回収する場合には、回収の期間を考慮して「回収可能性維持期間」を設定する必要がある。ここで前提とする回収終了までの工程は、平成 27 年度で検討した縦置きブロック方式と同様とする。

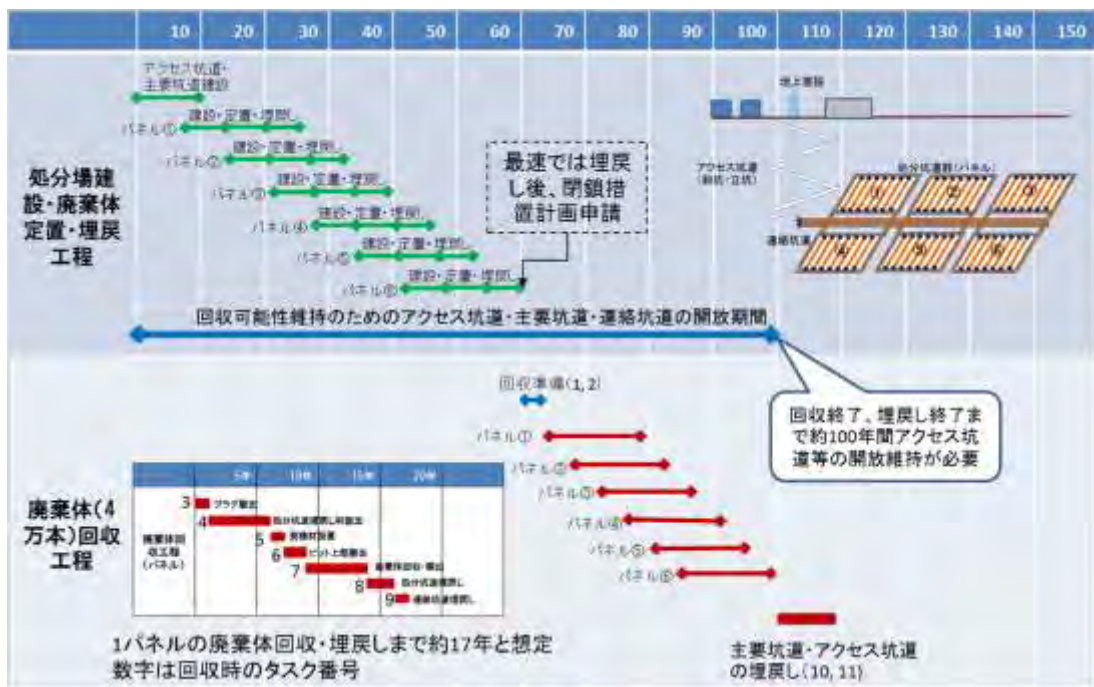


図 2.3.1-4 廃棄体容器回収を考慮した工程例（定置終了直後から回収を開始する場合）

5) 回収シナリオの設定

回収シナリオは、回収可能性維持期間の考え方と整合性を考慮して設定する（図 2.3.1-5）。回収する場合、回収可能性維持期間には、回収（廃棄体の取り出し）を実施している期間も含める。

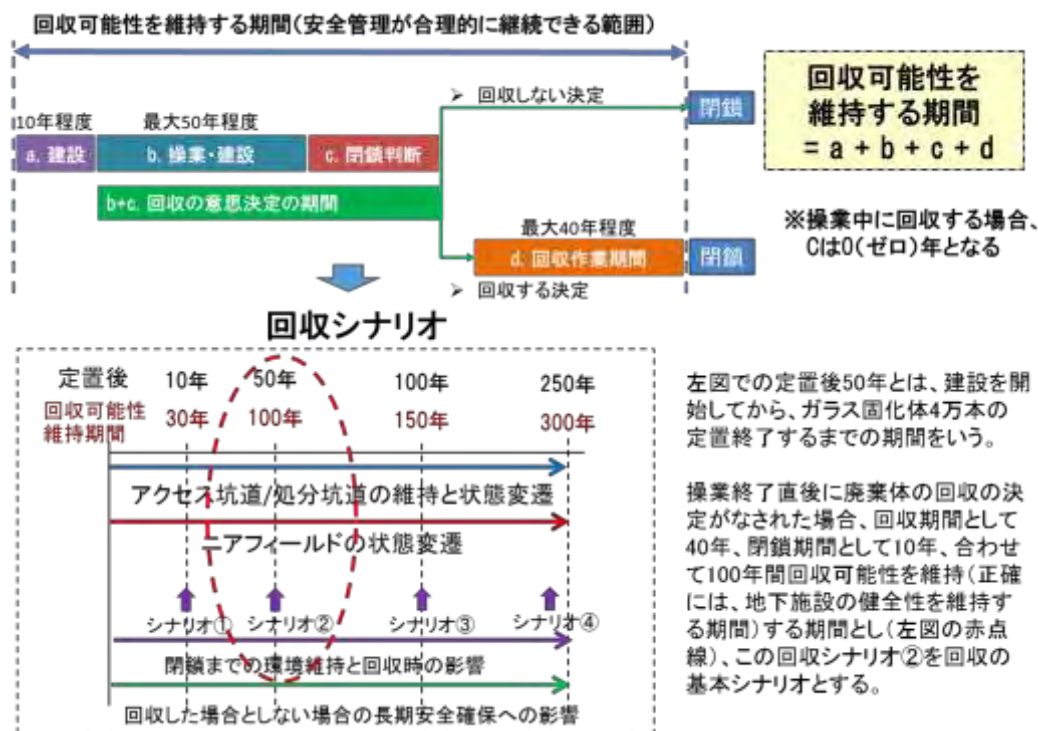


図 2.3.1-5 回収シナリオ設定とその考え方

6) 廃棄体の定置概念

平成 27 年度の検討（縦置きブロック方式）と平成 28 年度の検討（横置き PEM 方式）を対象に、回収可能性維持の影響を維持することによる閉鎖前と閉鎖後の影響を比較する（図 2.3.1-6）。PEM 方式を対象とする理由は以下の通りである。

- ✓ 安全評価の前提となるニアフィールド地質環境への回収可能性維持の影響は、人工バリアの製作方法に関係なく、定置形状に係るため、平成 27 年度の検討対象であった縦置き方式に加えて、本年度は横置き方式を検討対象とする。
- ✓ 回収可能性維持の人工バリアの安全機能への影響は、地上で緩衝材ブロックを製作し、地下で緩衝材ブロックとオーバーパックを人工バリアとして組立てる「ブロック方式」と、地上で緩衝材とオーバーパックを人工バリアとして組立て、一体型として地下へと搬送する PEM 方式では異なる。そのため、平成 27 年度の検討対象であったブロック方式に加えて、本年度は PEM 方式を検討対象とする。

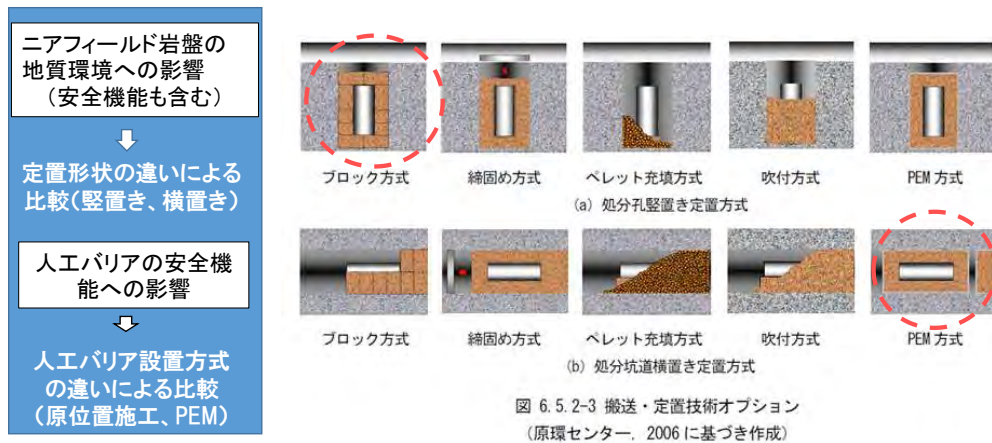


図 2.3.1-6 廃棄体の定置概念 (NUMO TR-11-01 より抜粋)

7) 処分施設の閉鎖後長期の安全確保の基本概念と安全機能

処分施設の安全機能への回収可能性維持による影響を網羅的に抽出するために、NUMO TR-11-01 にセーフティケースとして設定されている安全の基本概念と安全機能 (図 2.3.1-7) に着目する。右欄には回収可能性維持の隔離と核種閉じ込め機能への影響例を示す。

表 6.2.2-1 閉鎖後長期の安全確保の基本概念と安全機能

基本概念	安全機能	安全機能の説明	回収可能性維持の影響例
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、侵食のような地形の変化から防護すること	処分場を長期に開放しておくことでテロや自然災害を受けるリスクが上昇する。
	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することで、地下水への放出率を低下させること	長期に維持することでの影響 ✓ 人工バリアに期待されている閉じ込め性能 ✓ 処分場周辺の母岩の好ましい特性への影響
	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こと	

NUMO-TR-11-01より抜粋

図 2.3.1-7 安全確保策と安全機能と回収可能性維持の影響

8) 人工バリアと周辺岩盤の安全機能

回収可能性維持の影響を評価する対象として図 2.3.1-8 の人工バリアと周辺岩盤の閉鎖後閉じ込め機能を設定する。これらの安全機能への影響は状態オプションや回収シナリオ等に依存する。



図 2.3.1-8 閉鎖後の閉じ込め機能

9) 安全機能を期待する期間

多重バリアシステムの安全機能に期待する期間については、NUMO TR-11-01 では図 2.3.1-9 に示すように設定されている。

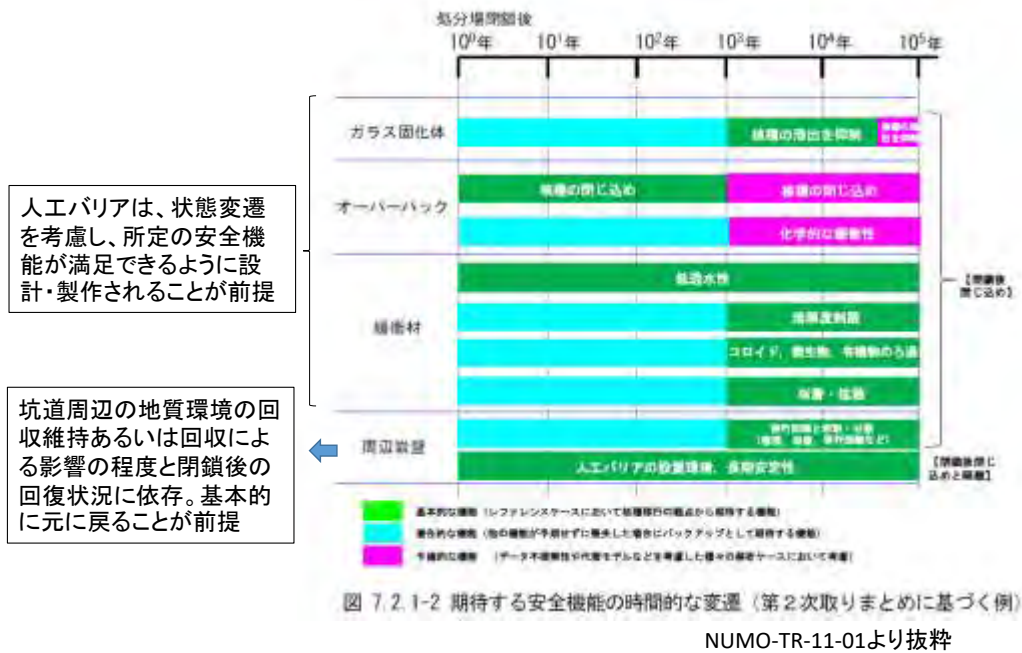


図 2.3.1-9 安全機能に期待する期間

10) 核種移行解析開始までの状態変遷

現状での安全評価における核種移行解析の前提は、オーバーパックによる閉じ込め機能を 1000 年としているため、1000 年後が起点となっている。人工バリアを含むニアフィールド（坑道周辺の母岩特性）の状態は、図 2.3.1-10 に示すように、定置作業時での影響や回収可能性維持の影響を考慮して設定されることになる。

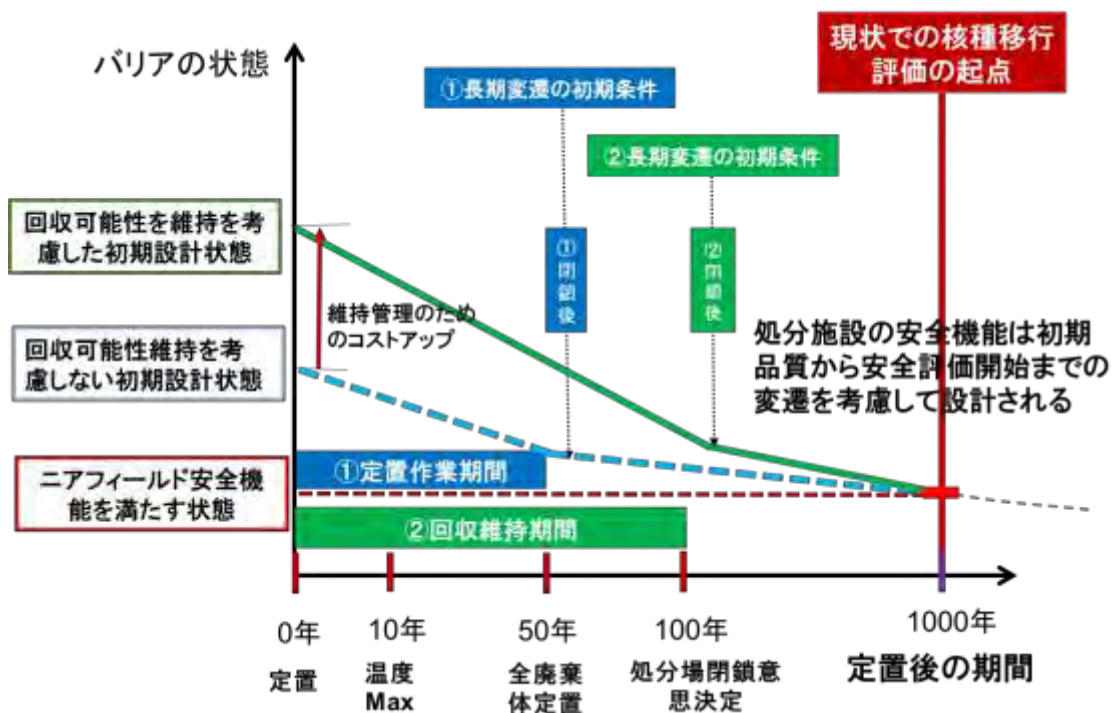


図 2.3.1-10 核種移行解析の前提

11) 一般労働安全に関する安全対策の考え方

NUMO の安全確保レポート (NUMO TR-11-01) には、一般労働安全に対する安全対策の考え方が提示されている (表 2.3.1-2)。これらの安全対策については、回収可能性を維持した場合も継続して有効であることを前提とする。

表 2.3.1-2 一般労働安全への要件 (NUMO TR-11-01)

安全対策		説明
労働災害対策	災害の発生・拡大の防止	労働災害の要因となる事象の発生防止と拡大の対策を有すること
	災害時の避難経路確保	災害時の避難経路が確保されていること
作業環境対策	作業環境の維持	労働に適する環境を維持すること

12) 放射線防護に関する基本的な安全対策の考え方

NUMOの安全確保レポート（NUMO TR-11-01）では、表 2.3.1-3 に示す作業時の放射線防護に対する基本的な安全対策が提示されており、処分場の状態オプションにも依存するが回収可能性維持期間も同様な対策が継続して必要と考える。

表 2.3.1-3 放射線防護に関する基本的な安全対策（NUMO TR-11-01）

基本概念	安全対策	説明
作業時 閉じ込め	廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止	作業期間中において廃棄体からの放射性物質の漏えいを防止すること
	施設外への放射性物質の過大な放出の防止	作業期間中において放射性物質取り扱い施設からの放射性物質の過大な放出を防止すること（廃棄体受入時）
放射線 遮へい	放射線の遮へい	廃棄体からの外部放射線による空間線量率を遮へいにより低減すること
放射線 被ばく管理	放射線管理区域の設定	放射線管理区域を設定すること
	モニタリング・被ばく管理	作業従事者の被ばく管理、管理区域および敷地周辺において放射線モニタリングを実施すること

13) 環境保全対策の考え方

NUMOは安全確保レポート（NUMO TR-11-01）で環境保全対策の考え方を提示している（表 2.3.1-4）。レポートには回収可能性維持期間については言及していないが、示された安全対策は回収可能性維持期間中、および回収時も考慮すべき事項と考える。

表 2.3.1-4 環境保全対策の考え方 (NUMO TR-11-01)

環境保全対策対象の環境要素		環境保全対策の説明	
環境の自然的構成要素の良好な状態の保持	大気環境	大気質	大気汚染物質の排出を低減する対策が施されていること
		騒音・振動	騒音・振動の対策が施されていること
		悪臭	悪臭物質の発生を低減する対策が施されていること
	水環境	水質	水質汚染物質の排出を低減する対策が施されていること
		地下水	周辺環境に著しい影響を与える地下水位低下や地下水水質変化を低減する対策が施されていること
	土壌環境・その他	地形・地質	保全対象の地形・地質に影響を与えない対策が施されていること 地盤沈下などの有意な発生を低減する対策が施されていること
土壌		土壌汚染の影響を低減する対策が施されていること	
生物の多様性の確保および自然環境の体系的保全	動物・植物・生態系	天然記念物や学術的価値の高い動物・植物への影響を低減する対策が施されていること 地域を特徴付ける生態系に対する影響を低減する対策が施されていること	
環境への負荷低減	廃棄物	事業に伴い発生する廃棄物量を低減する対策が施されていること	
	温室効果ガス	温室効果ガスの排出量を低減する対策が施されていること	

14) 操業期間中に想定される異常事象と安全対策

NUMO の安全確保レポート (NUMO TR-11-01) では、操業期間中に想定される異常事象とその安全対策の例が示されている (表 2.3.1-5)。回収可能性の維持期間にも依存するが、維持期間中および回収作業時に考慮すべき事項は基本的に継続して必要と考える。回収可能性維持期間の長期化に伴い、異常事象が発生する確率は高くなっていき、安全対策そのものの劣化・損傷を防ぐための作業が必要となる。

表 2.3.1-5 操業中に想定される異常事象と安全対策 (NUMO TR-11-01)

要因	異常事象	安全対策の例
装置・設備に起因する異常事象	搬送・定置設備の故障、損傷	<ul style="list-style-type: none"> ・重要機能へのインターロックの設置 (過走行防止、吊り上げ高さ制限) ・転倒防止機能、脱輪防止機能の設置 ・多重化措置 (吊りワイヤの二重化など) ・吊り荷の確実な保持機構の採用 ・搬送・定置設備の定期点検の実施
	運転操作のミス	<ul style="list-style-type: none"> ・運転範囲の制限 ・運転要領書の整備 ・ヒューマンエラー防止機能の設置 (フルブーフ機能設置)
	電源喪失	<ul style="list-style-type: none"> ・フェイルセーフ機能の設置 (安全側に保持)
自然現象などに起因する異常事象	地震	<ul style="list-style-type: none"> ・搬送・定置設備の揺れによる廃棄体の転倒、落下 ・建屋の倒壊 ・坑道、処分孔の崩落 <ul style="list-style-type: none"> ・搬送・定置設備の耐震設計 ・建屋、坑道、処分孔の耐震設計
	落盤	<ul style="list-style-type: none"> ・落石による廃棄体の転倒、落下 ・坑道、処分孔の崩落 <ul style="list-style-type: none"> ・支保工の品質管理と施工管理
	火災・爆発	<ul style="list-style-type: none"> ・搬送・定置設備の延焼 <ul style="list-style-type: none"> ・警報・消火設備の設置 ・不燃性・難燃性材料の使用 ・着火源の排除 ・必要に応じて可燃性ガス対策 ・異常な温度上昇の防止対策
	地震以外の自然現象 (津波、台風、浸水、豪雪など)	<ul style="list-style-type: none"> ・搬送・定置設備の機能停止による廃棄体の転倒、落下 ・建屋の倒壊 ・搬送・定置設備や坑道の浸水 <ul style="list-style-type: none"> ・転倒防止機能、脱輪防止機能の設置 ・風、積雪荷重などを考慮した建屋の設計 ・施設設置高さの設計、防潮堤、排水設備の設置

15) 技術要件の設定の考え方

NUMO は、安全確保レポート (NUMO TR-11-01) において、バリア等の設計における技術要件を表 2.3.1-6 に示す 3 項目に分類している。回収可能性を維持することによる処分施設の安全性への影響を検討する場合、これらの技術要件のもとに設計されている人工バリア等特性への影響因子を抽出し、その影響の程度を評価することになる。

表 2.3.1-6 技術要件の設定の考え方 (NUMO TR-11-01)

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-ベントナイト相互作用の考慮など。
工学的実現性の確保	実現性の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。

16) 母岩の好ましい特性

坑道を掘削し、操業期間中に一部を開放状態として回収可能性を維持する場合、掘削の影響と閉鎖までの安全と安定を確保するために施す支保工、排水、換気などが「好ましいとされる特性」にどの程度の影響を及ぼし、その影響が閉鎖後にどの程度まで回復するか、そしてその回復期間はどの程度かといった定量的な見通しを得ることが必要となる。

NUMO の安全確保レポート (NUMO-TR-11-01) では、「母岩の好ましい特性」(表 2.3.1-7) が設定されている。そこで、処分場の様々な状態オプションと回収可能性維持期間が坑道周辺の地質環境与える影響を評価する場合には、「熱影響」「力学場」「水理場」「化学影響」を評価の指標として、また「好ましい特性」を評価の基準として採用する。

表 2.3.1-7 母岩の好ましい特性 (NUMO TR-11-01)

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
力学場	坑道の力学的安定性が確保できるとともに、閉鎖後の処分場とその周辺の力学場が人工バリアの安定性に適していること
水理場	閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流束が小さく、緩慢であること
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と人工バリアの安定性に適していること

17) オーバーパックの安全機能と技術要件

NUMO は、オーバーパックに対する技術要件を下表のように設定している (表 2.3.1-8、表

2.3.1-9)。放射性核種の浸出抑制の観点からは、耐食、構造強度などを規定し、長期健全性の観点からは、ガラス固化体の発熱、放射線影響、残置物の影響などに対する技術要件を設定している。本検討では、回収可能性を維持することがこれらの技術要件に影響するかを評価することとする。

表 2.3.1-8 オーバーパックの技術要件（基本的なバリア性能の確保）(NUMO TR-11-01)

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	オーバーパックの設計（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	オーバーパックの設計（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	オーバーパックの溶接設計（材料設計、蓋構造設計、溶接法、溶接条件）

表 2.3.1-9 オーバーパックの技術要件（長期健全性の維持）(NUMO TR-11-01)

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）

18) 緩衝材の安全機能と技術要件

NUMO は、緩衝材（ベントナイト）に対する安全機能と対応する技術要件を表 2.3.1-10、表 2.3.1-11 のように設定している（NUMO TR-11-01）。それぞれの技術要件に対して、材料の特性を考慮して設計で対応し、施工により品質を確保することになる。これらの設計では、例えば、安全率などを取り入れ、施工時のバラツキ、発熱や再冠水等による状態変遷を考慮した要素も含まれている。

表 2.3.1-10 緩衝材の技術要件（基本的なバリア性能の確保）（NUMO TR-11-01）

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	移流による移行の抑制	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抑制すること	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抑制すること	緩衝材の設計 （材料設計、形状・厚さの設計）
	収着による放射性物質の移行遅延	収着性	ガラス固化体から溶出した放射性物質を収着することにより遅延すること	緩衝材の設計 （材料設計）

表 2.3.1-11 緩衝材の技術要件（長期健全性の維持）（NUMO TR-11-01）

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、プラグ、グラウト設計（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）
オーバーバックの保護（物理的緩衝性）	オーバーバックの腐食膨張、岩盤の変形を緩和し、オーバーバ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）
オーバーバックの沈下の防止	廃棄体オーバーバ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）

(2) PEM の特徴整理

1) PEM (Prefabricated Engineered Barrier System Module) 開発の経緯

現在 NUMO が提示している PEM については、以下に示す開発の経緯がある。

a サイクル機構：第2次取りまとめ（1999） [4]

サイクル機構は第2次取りまとめ作成時に図 2.3.1-11 に示す2つの概念を考案した。これらは、いずれも地下深部の異なる環境で高品質な人工バリアシステムを構築するために開発された。

IWP (Integrated Waste Package) : オーバーパックの中にベントナイトを挿入する概念で、オーバーパックの腐食によるガスや膨張がベントナイトに与える影響を最小限とすることでベントナイトの厚さを低減し、全体として EBS は小さくできる概念である。

MCM (Multi-Component Module) : 現在の PEM の概念のルーツとなるもので、オーバーパックの外側に砂層を設け、その外側に乾燥ベントナイトを巻いて鋼製の外壳で格納する。砂層はオーバーパックの腐食膨張の応力を緩和しまたガスをためる役割を果たす。

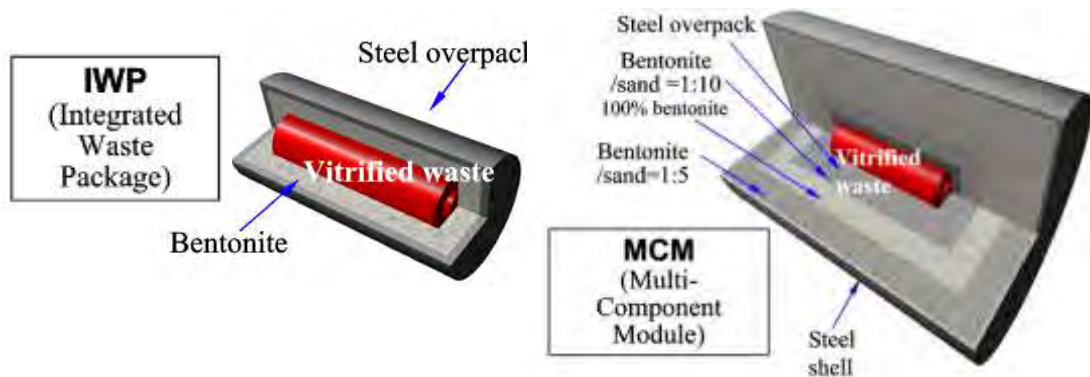


図 2.3.1-11 初期の PEM 概念

b NUMO：処分概念オプション検討（2002～2004） [5]

NUMO が処分概念オプション検討の一環として、前述の2つの概念（図 2.3.1-12）をベースにオーバーパックや緩衝材の仕様を見直し、PEM という名の概念を開発した。特徴は、オーバーパックとベントナイトの間にケイ砂の層を設計している点、仕様の見直しから軽量になっていることである。

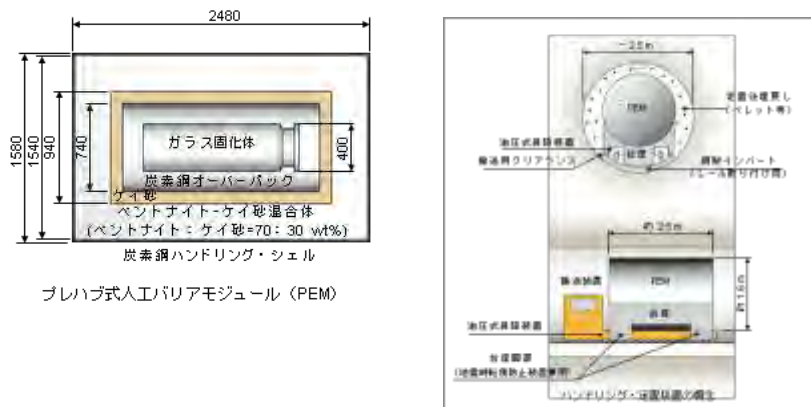


図 2.3.1-12 合理化された PEM の概念

c NUMO の PEM 設計検討

NUMO が 2008 年～2009 年に実施した PEM の設計検討では、第 2 次取りまとめの人工バリア仕様をそのまま鋼製の外殻に格納する概念となっている（図 2.3.1-13）。人工バリアの合理化検討は実施せず、定置時での PEM の安定性を検討し、外殻の仕様を設定した。2010 年安全確保レポートでは、この PEM の概念が踏襲されている。特徴としては、全て第 2 次取りまとめの人工バリアシステムの仕様を踏襲しているため、重量が約 35 トンとなっていること。表面線量が低減されていることから、遠隔での操作をしなくてもよいことなどがあげられる。

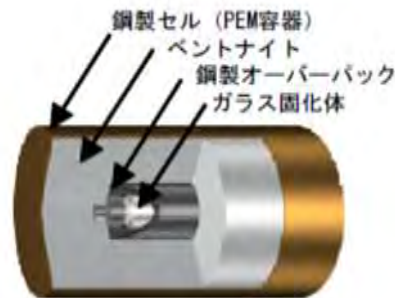


図 2.3.1-13 2010 年安全確保レポートで示された PEM 概念 (NUMO TR-11-01)

2) 海外における類似の概念開発の状況

PEM と類似の概念は、海外でも開発されてきている。ここでは、その代表的な概念としてスウェーデンとベルギーの事例を紹介する。

a スウェーデンのスーパーコンテナの概念

スウェーデン SKB は、使用済燃料を処分孔に縦置きする KBS-3 の代替概念として処分孔横置き (KBS-3H) 概念を開発した（図 2.3.1-14、図 2.3.1-15）。背景としては、横置きとすることで定置の難しさの解消、処分坑道の掘削量を大きく削減できる点が挙げられている。横置きとすることを考え出されたのがスーパーコンテナと呼ばれる概念である。

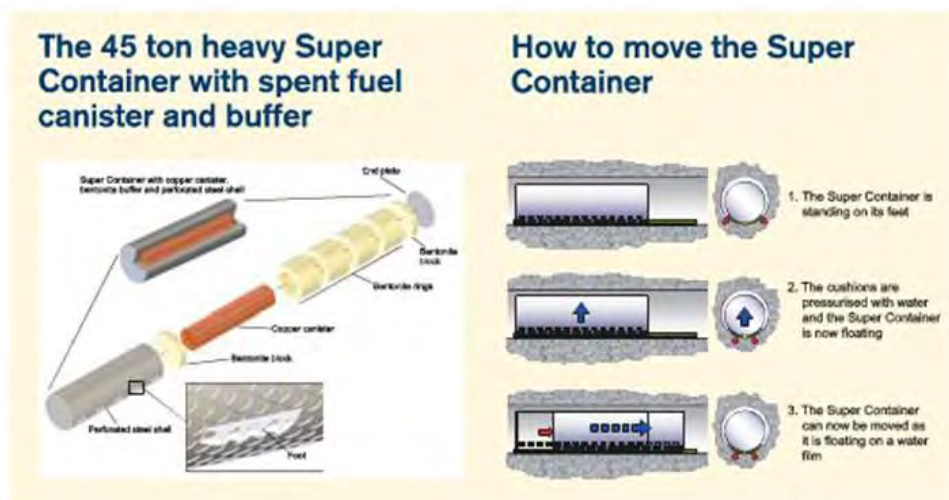


図 2.3.1-14 SKB が開発したスーパーコンテナの概念と定置の概念 (SKB ホームページ)

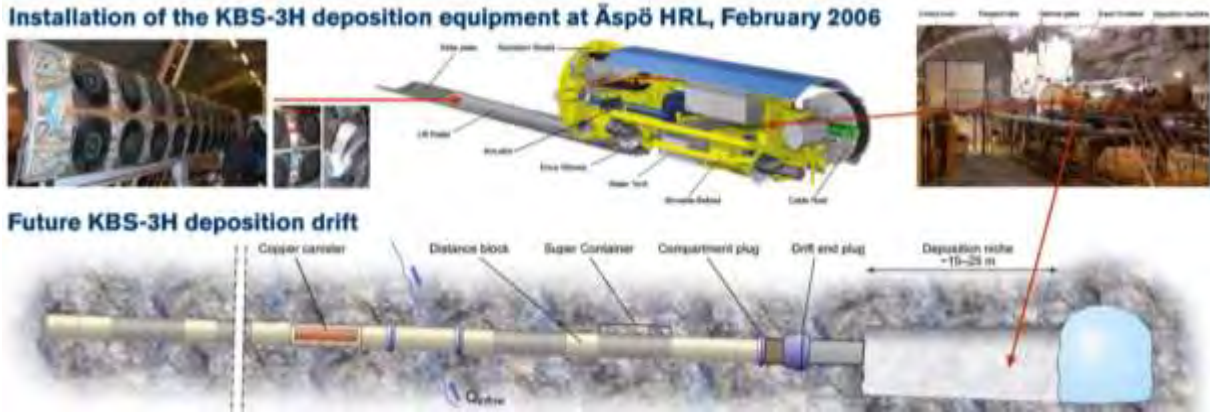
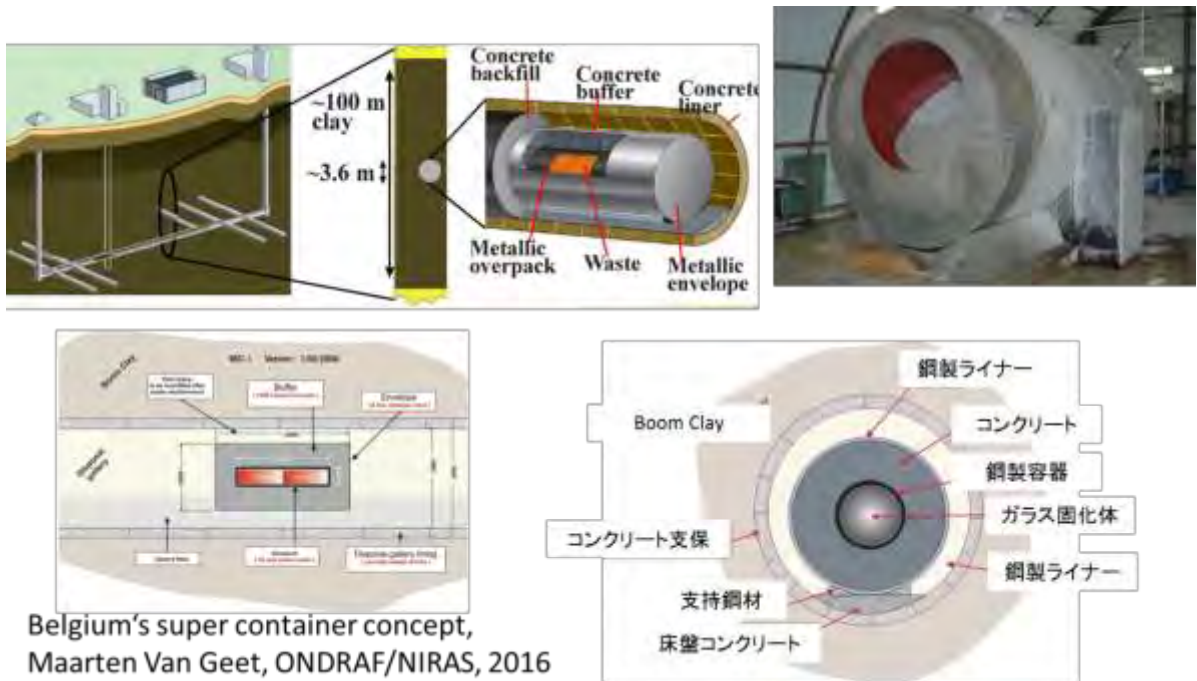


図 2.3.1-15 HRL（地下研究所）でのスーパーコンテナの定置装置と試験概念

b ベルギーのスーパーコンテナ概念

ONDRAF が構築した処分概念（図 2.3.1-16）では、Broom Clay と呼ばれる粘土層への処分を前提としているため、ガラス固化体周辺のベントナイトは不要としており、ガラス固化体をコンクリートで固めるのは、定置後初期段階での応力破壊を防ぐためとしている（SAFIER-2, 2003）。



Belgium's super container concept, Maarten Van Geet, ONDRAF/NIRAS, 2016

図 2.3.1-16 ベルギーのスーパーコンテナ概念（ONDRAF, SAFIER-2 より）

3) 本検討で対象とする PEM 概念とその特徴

NUMO は、「NUMO の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、人工バリアの定置概念として 2010 年安全確保レポ

ートで提示した PEM 概念をレファレンス概念として示した。本検討では、この PEM の仕様を対象に回収可能性維持の影響検討を進めることとする。

NUMO が提示した PEM の概念は、図 2.3.1-17 に示す仕様となっている（ NUMO 配布資料 [6]より）。

検討対象とする PEM は、第2次取りまとめの人工バリア仕様をそのまま鋼製外殻(厚さ 28mm)に格納した概念であり、重量は約 37.2 トンとなっている。外殻の厚さも含め、遮蔽効果が期待でき、搬送・定置時の管理区域の設定は必要なくなる。また全面腐食を仮定すれば、外殻は 100 年以上の耐久性を有する。このことは、回収可能性維持期間を検討する上で重要な特徴となる。

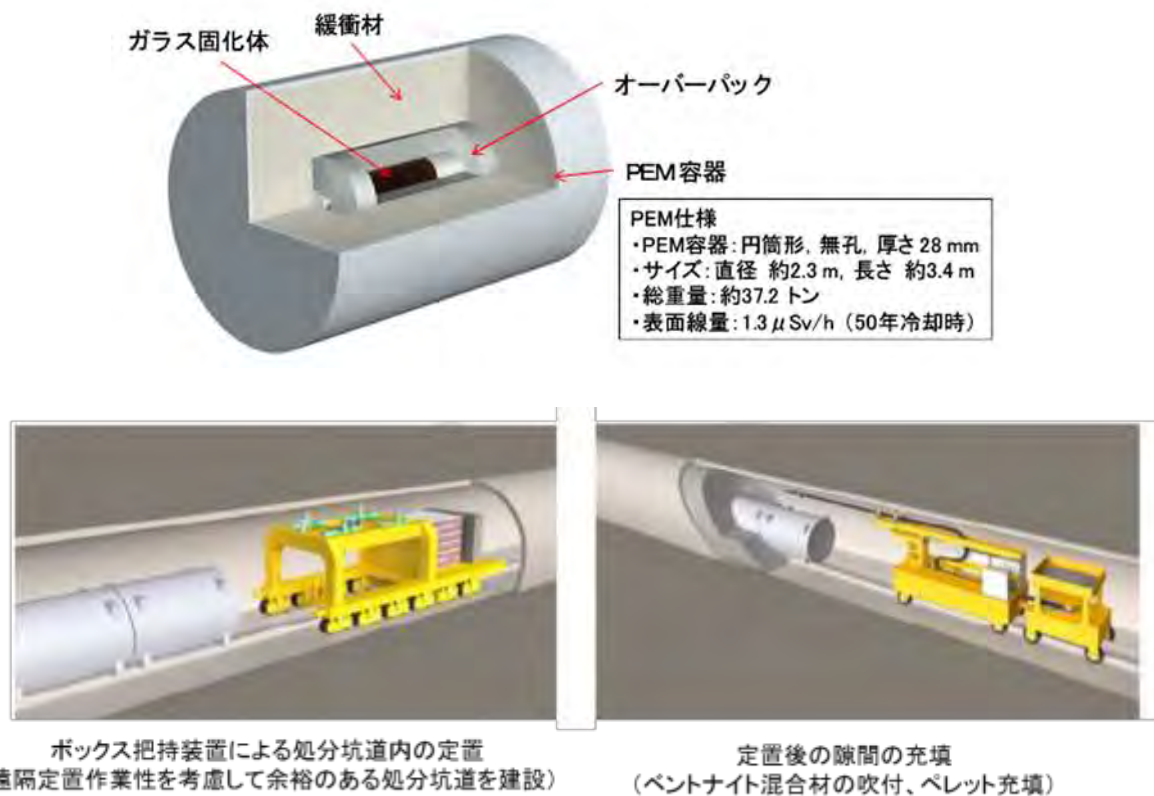


図 2.3.1-17 2015 年セーフティケースレポートにおける NUMO の PEM 概念と定置イメージ (NUMO 配布資料 [6]より)

(3) 検討ケースの設定

ここでは、回収可能性維持の影響を検討するケースを次の2つのパラメータを用いて設定する。

- ① 回収可能性維持期間中の回収シナリオ
- ② 回収可能性維持の状態オプション

1) 回収可能性維持期間と回収シナリオ

2.3.1(1)で設定した前提に従い、下記に示す4つの回収シナリオを設定する。

- ・回収シナリオ①：定置が開始された 10 年後に回収の意思決定がなされる
- ・回収シナリオ②：4 万本の定置が終了したのち、すぐに回収が決定される
- ・回収シナリオ③：4 万本の定置後、150 年経過した後、回収が決定される
- ・回収シナリオ④：4 万本の定置後、250 年経過した後、回収が決定される

回収可能性維持期間との関係を整理すると図 2.3.1-18 のようになる。ここで、建設には 10 年、定置期間＝回収期間と仮定している。

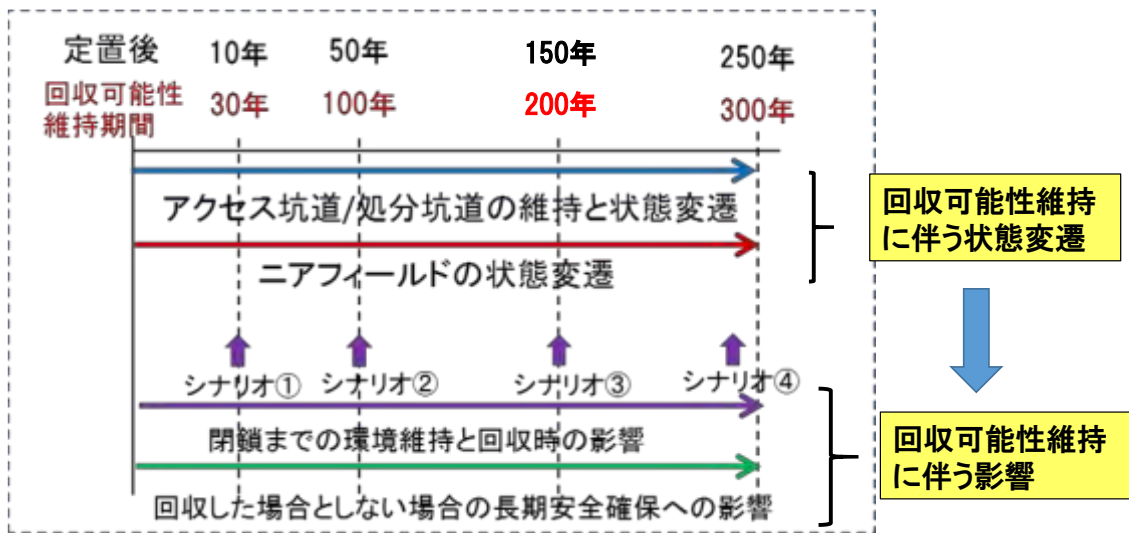


図 2.3.1-18 回収シナリオと回収可能性維持期間の設定

回収可能性を維持することによるアクセス坑道や処分坑道等の状態変遷を検討することで、閉鎖前と閉鎖後の安全確保への影響を推定する。

2) 回収可能性維持の状態オプション

回収可能性を維持する処分場の状態を検討することが影響を評価する上で重要となる。平成 27 年度の検討で設定した状態オプションとの整合性、前提条件として提示した NUMO の考え方を考慮して、図 2.3.1-19 に示す 3 つの状態オプションを設定した。

- ・ 状態オプション①：PEM を定置した処分坑道を含め、全ての坑道を開放した状態で回収可能性を維持する。
- ・ 状態オプション②：PEM を定置した処分坑道を埋戻した後、端部にプラグを設置し、処分坑道以外の坑道は開放した状態で回収可能性を維持する。
- ・ 状態オプション③：処分坑道、主要坑道、連絡坑道を埋戻し、アクセス坑道のみを開放した状態で回収可能性を維持する。

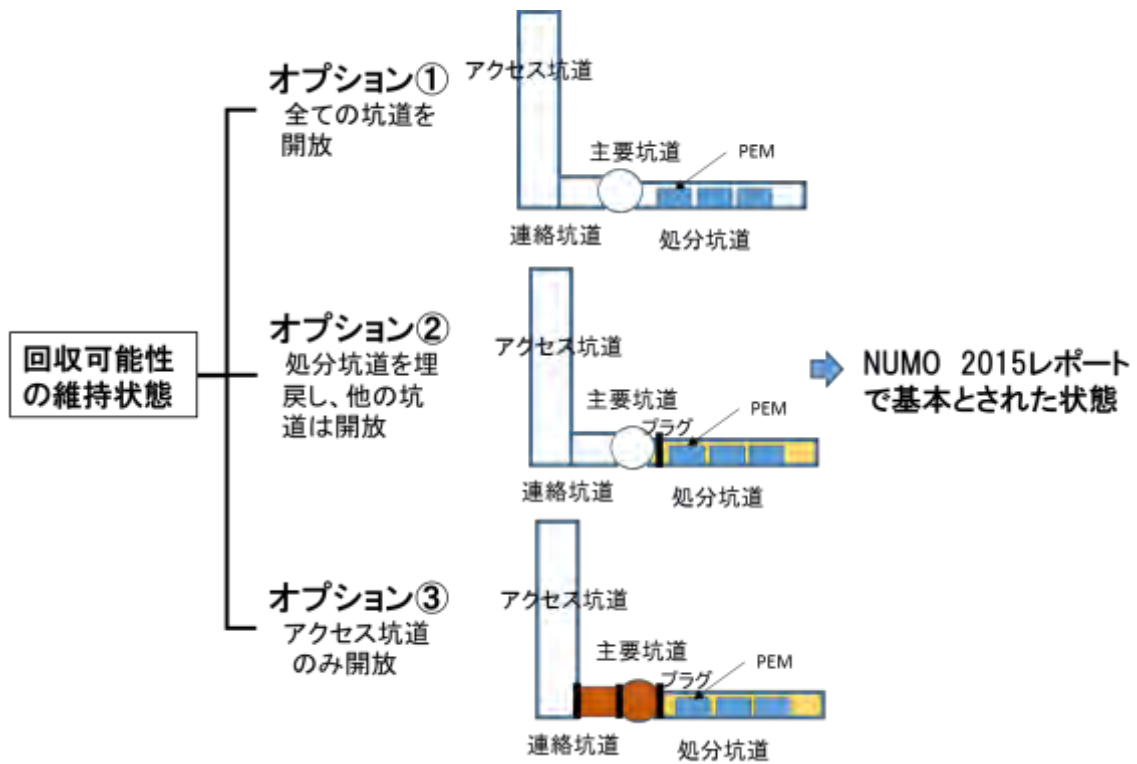
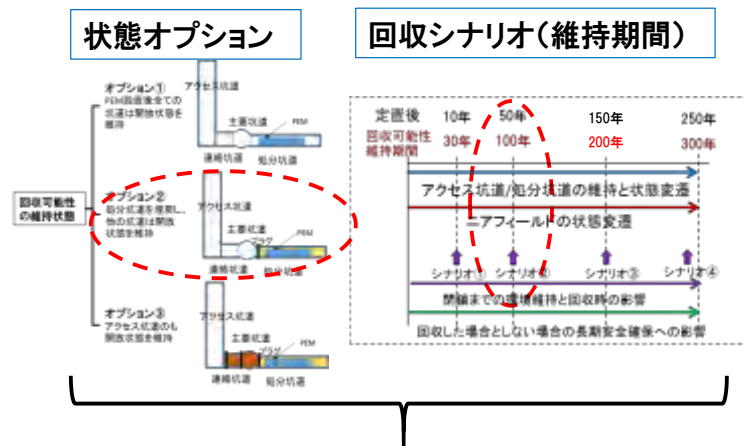


図 2.3.1-19 回収可能性維持の処分場状態オプション

3) 検討ケースの設定

回収可能性維持の影響を評価する検討ケースは、2.3.1(1)における処分場概念を対象に、1)、2)で設定した回収シナリオと処分場状態オプションを組合せ、図 2.3.1-20 のように設定する。



基本ケースと検討ケース(O)

	回収シナリオ①	回収シナリオ②	回収シナリオ③	回収シナリオ④
状態オプション①		○		
状態オプション②	○	← 基本ケース →	○	○
状態オプション③		○		

図 2.3.1-20 検討ケースの設定

検討ケースのうち、処分場状態オプション②と回収シナリオ②を組合わせたケースを、全てのケースのレファレンスとして扱い「基本ケース」とする。全体としての検討ケースは、この基本ケースをベースに3つの状態オプション、4つの回収シナリオに展開して設定した。

4) 基本ケースの状態設定

基本ケースは、処分坑道に PEM を定置し、空間を埋め戻した後、坑道端部にコンクリート製のプラグを設置して、パネル周辺の主要坑道や連絡坑道およびアクセス坑道を開放した状態で回収可能性を維持する状態である。このため、影響を評価する場合、図 2.3.1-21 に示す3つの異なるスケール（処分場スケール、パネルスケール、処分坑道スケール）を対象に検討することとする。このうち、プラグの概念については、NUMO が NUMO 配布資料 [6]で提示した概念を模式化して示している。

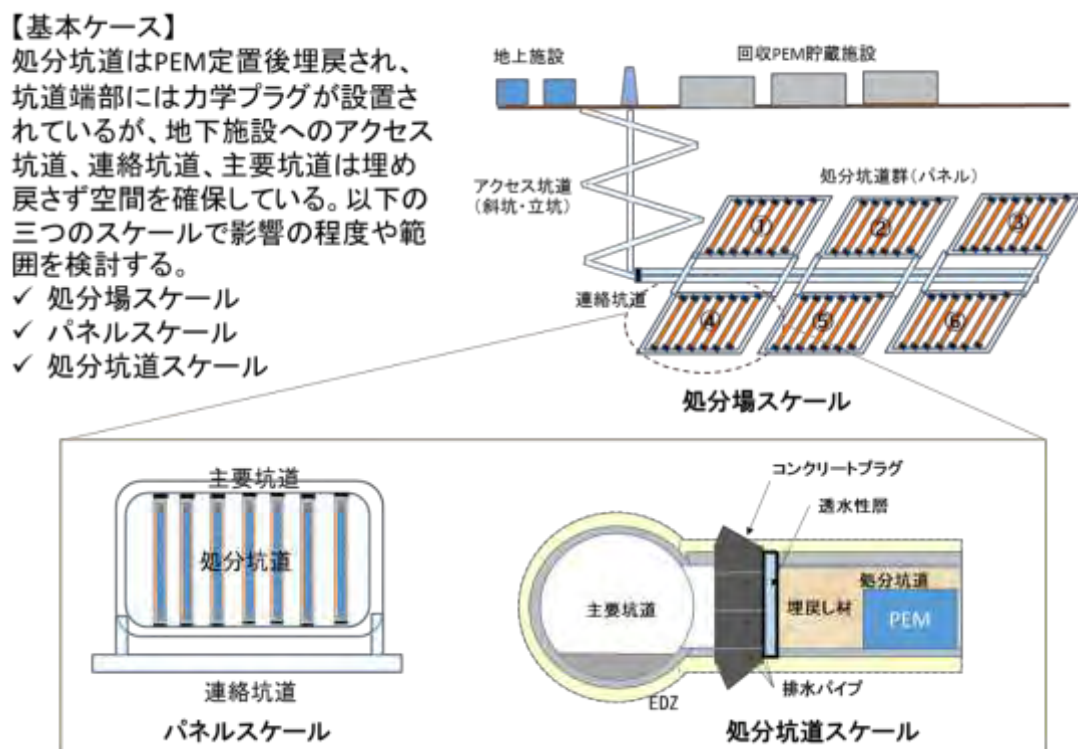
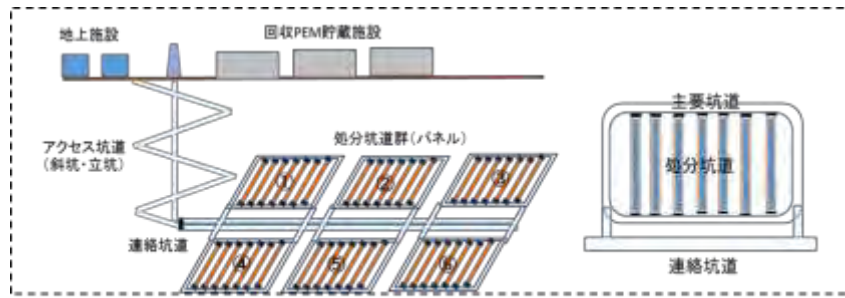


図 2.3.1-21 基本ケースの対象とする処分場の状態

5) 基本ケースにおける各種坑道の仕様例

基本ケースの3つの異なるスケールでの代表的な坑道とそれぞれの仕様例を図 2.3.1-22 に示す。いずれの坑道仕様も、NUMO 配布資料 [6]で公表した図をもとに模式化している。それぞれの坑道の仕様は、堆積岩（第三紀泥岩）における深度 500m を想定して設計されており、本検討で設定した処分場概念と同じである。また、この仕様は、縦置きブロック方式でも同様である。



基本ケースの処分場レイアウトイメージ

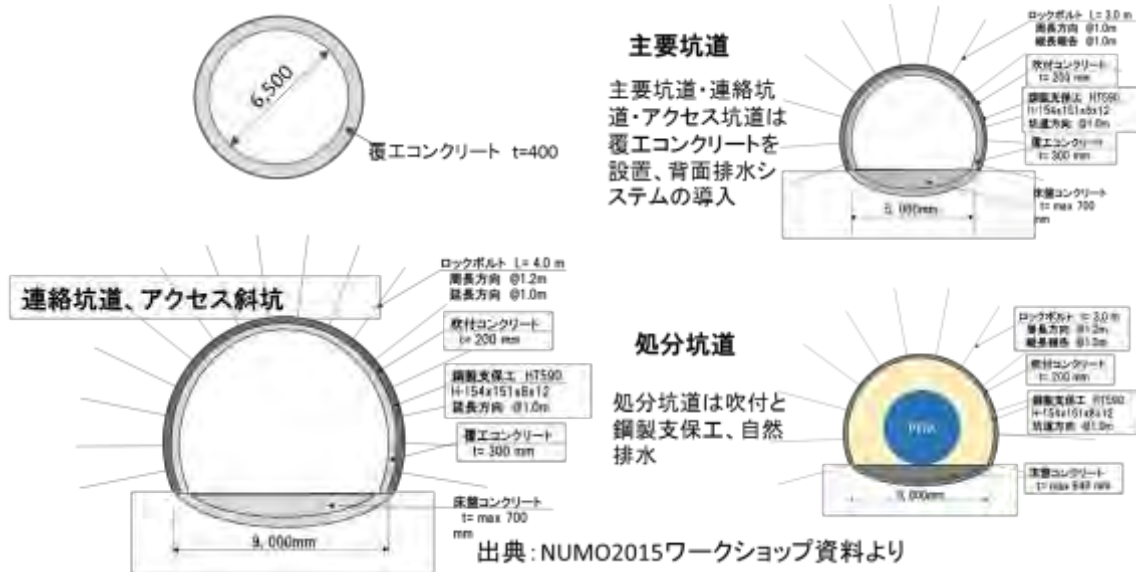


図 2.3.1-22 処分場を構成する各種坑道の仕様例

(4) PEM の回収手順の検討

回収可能性維持の影響検討の前提の一つとして、横置き PEM 方式の回収手順と作業内容および必要とされる技術を整理する。

1) NUMO が提示した回収のイメージ

NUMO は、NUMO 配布資料 [6]において図 2.3.1-23 に示す回収方法のイメージを提示した。このイメージでは、PEM の鋼製外殻が健全性を維持している前提で、定置時と同じ装置を用いて PEM を回収することとしている。

PEM回収概念では、PEMが回収時に健全性を維持していることを前提として、現状で準備可能な遠隔操作装置の適用を考慮したイメージ図を作成している。

①自由断面掘削機で坑道間隙の埋戻し材の撤去・搬出

②PEM外殻に付着した埋戻し材の塩水ジェットでの撤去、スラリーの回収

①PEM回収装置の処分坑道内へ搬入

②PEM回収装置の設置

③PEMの油圧での把持

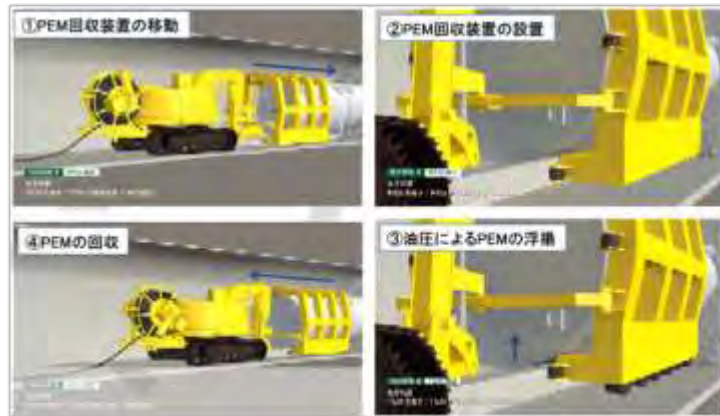
④PEMの搬出

これら一連の作業に必要な事項

- ✓ PEMの状態把握(外殻の腐食損傷状況など)
- ✓ PEM外殻、支保工の腐食による水素ガス発生への対応
- ✓ 処分坑道の支保の健全性、床盤コンクリートの耐久性、換気・排水装置の稼働性の確認。必要に応じて補修・補強



PEM周辺の埋戻し材の撤去のイメージ



PEMの回収方法のイメージ

図 2.3.1-23 NUMO が提示した PEM 回収方法のイメージ (NUMO 配布資料 [6] より)

資料には記載されていなかったが、回収の実現性を判断する上で重要なポイントは、以下の事項となると考えられる。

- ・ PEM の回収時に処分坑道の安定性が確保されていること
- ・ PEM の鋼製外殻の健全性が維持されていること
- ・ 狭隘部での PEM 回収のための各種遠隔装置が準備されていること

また、回収した PEM を地表まで運搬する装置、地表での保管施設の準備も必要である。特に上述の坑道の安定性と外殻の健全性については、回収する時期と大きく関係し、定置後長い期間経過後の回収作業では、事前の確認が不可欠となる。

PEM はベントナイトとオーバーパックを内蔵していることで、表面線量が低下し、遮蔽を必要としない環境での作業が可能になると推定されるが、遠隔ロボットによる作業が想定される。

2) 基本ケースにおける PEM の回収手順

ここでは、技術要素マップ作成のために回収可能性維持と回収およびその後の埋戻し等への要件と必要技術を整理する。また、回収可能性維持の影響低減(あるいは緩和)策についても考察する。

PEM を対象とした回収の手順は、平成 27 年度に検討した縦置きブロック方式での手順も参照し、図 2.3.1-24 のように考えた。

2.3.1 項の前提条件で提示したように、①回収可能性を維持しつつ最終的に回収しない場合と②

回収可能性の維持期間中に回収する場合が存在する。ここでの手順は②の回収する場合を対象に作成している。図中の「R」はRetrievabilityの意味で用いている。なお、回収する場合のPEMの数量については言及していない。また、回収後の処分坑道を再利用するかについても言及せず、回収後埋め戻す作業を手順のなかで取り入れている。

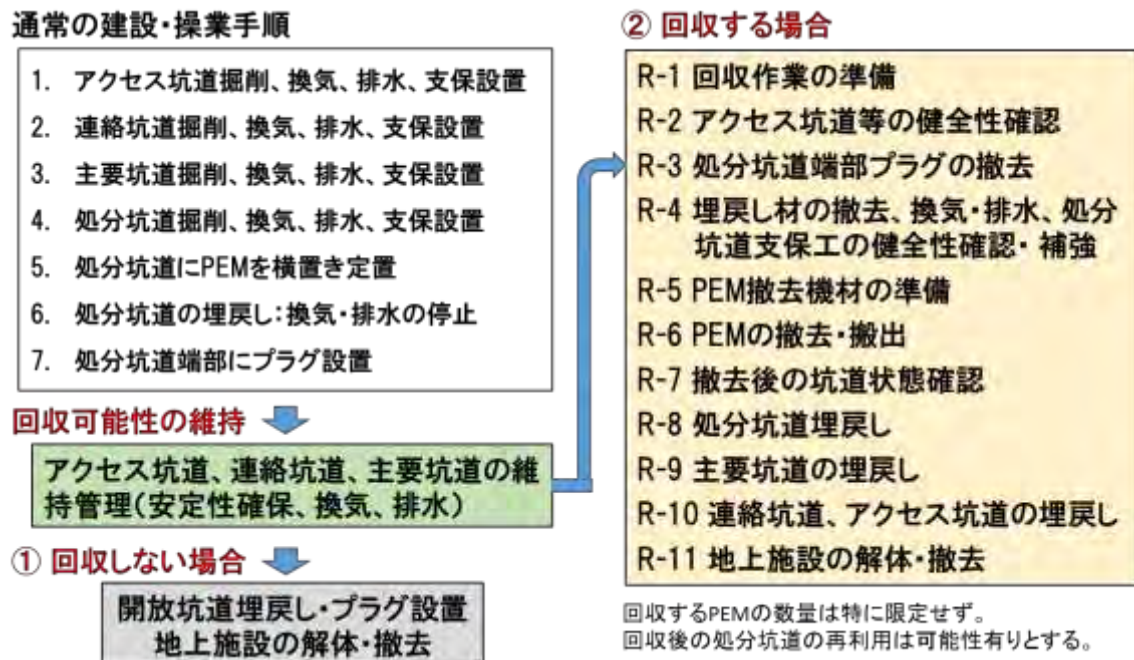


図 2.3.1-24 基本ケースにおける PEM の回収手順

以下、回収する場合の手順に従って、それぞれの作業の詳細手順、必要技術、留意事項を整理する。

【R-1：回収作業の準備】

- 1.1 回収の意思決定に従い、PEMの回収計画を策定し、回収に係る許認可申請書提出（回収作業に対する規制側の認可が必要とされる場合）
- 1.2 PEMの状態把握（方法については今後の検討事項）
- 1.3 地表に回収したPEMを検査・収容する施設の準備
- 1.4 処分場周辺の地質環境モニタリングの状態確認：建設前から継続して実施している地質環境モニタリング結果から処分場全体の水理環境を確認し、回収時の排水等の計画を立案
- 1.5 遠隔による回収に係る技術を準備（PEMの状態に依存）

【必要技術】

- ・回収廃棄体貯蔵施設設計・建設・運用技術
- ・モニタリング情報の分析・評価技術
- ・遠隔回収技術（遠隔での埋戻し材撤去、PEM撤去・搬出）
- ・PEM状態分析・評価技術
- ・回収計画立案技術
- ・回収認可申請のための安全評価等技術



定置してから50年程度経過したPEMがどのような状態になっているか、回収計画を立てるとき、回収技術を準備するときには不可欠な情報となる。
特に塩水環境で熱の影響があり、初期の酸化環境では、急激に腐食が進展する。
性能確認エリア等での事前の確認が必要。

【留意事項】

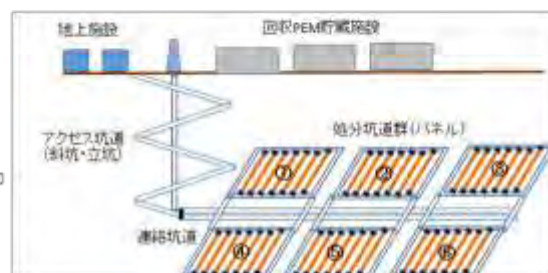
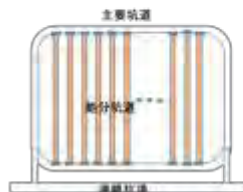
- ・PEMの状態把握をするための施設が必要
- ・腐食等によるガス発生への対応策検討が必要（回収時リスク評価の一部）
- ・回収時の処分坑道の安定性評価手法の準備

【R-2：アクセス坑道等の健全性確認・補強】

- 2.1 アクセス坑道の健全性確認・補強：アクセス坑道の支保材の劣化状況の確認、支保背面の岩盤状態の確認、必要に応じて補修・補強。立坑では、昇降設備、安全設備等の確認・補修
- 2.2 連絡坑道の健全性確認：連絡坑道の支保工の劣化状況の確認、支保背面の岩盤状況等の確認、必要に応じて補修・補強。坑道にそった排水、換気、電気系統の健全性確認・補修
- 2.3 主要坑道の健全性確認：主要坑道の支保工の劣化状況の確認、支保背面の岩盤状況等の確認、必要に応じて補修・補強。坑道にそった排水、換気、電気系統の健全性確認・補修
- 2.4 回収に伴う埋戻し材撤去に関わる機器・設備の準備：最初のパネルの処分坑道内埋戻し材等の撤去のための搬送設備、換気・排水等の設備の準備

【必要技術】

- ・支保工の劣化診断技術
- ・支保工背面の状態把握技術
- ・支保工の補修・補強技術
- ・排水・換気技術

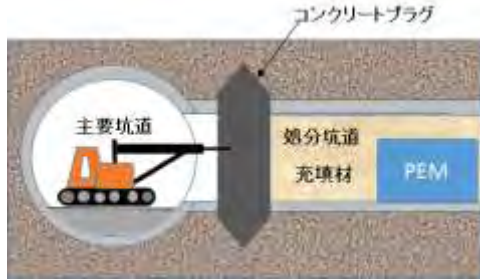


【留意事項】

- ・アクセス坑道等の基本ケースでは最終的に110年程度の健全性維持が要求される。

【R-3：処分坑道端部プラグ撤去】

- 3.1 プラグ撤去前調査：プラグを削孔し、反対側の埋戻し材の状況、腐食による水素ガスの存在などを確認
- 3.2 プラグ撤去用機材等の投入（遠隔ドリルジャンボなど）
- 3.3 プラグ撤去、撤去材の搬出
- 3.4 撤去部の岩盤の状態確認、ロックボルト、吹付などによる補強
- 3.5 埋戻し材端部安定性確保のためのコンクリート吹付（充填材の状況に依存）



ドリルジャンボ(削岩機)の例

【必要技術】

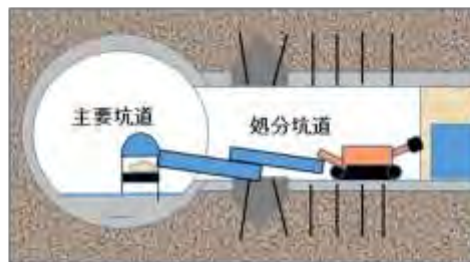
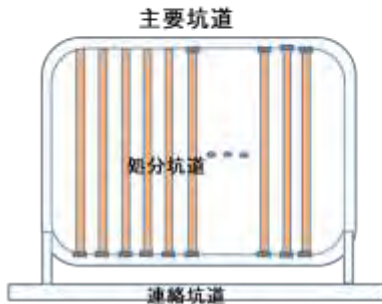
- ・プラグ状況確認技術
- ・プラグ背後の状態確認技術
- ・水素ガス等の回収技術
- ・遠隔によるコンクリートプラグ撤去技術
- ・プラグ撤去後の岩盤状況把握技術
- ・岩盤補強技術
- ・作業時の安全性確保技術

【留意事項】

- ・プラグの構造にも依存するが、プラグ撤去時の岩盤の緩み、出水への対応
- ・埋戻し材内部に存在する腐食による水素ガスへの対応

【R-4：処分坑道埋戻し材撤去、支保健全性確認・補強】

- 4.1 処分坑道内の埋戻し材の撤去・搬出：自由断面掘削機を使用
- 4.2 処分坑道支保の健全性確認、必要に応じて補修、補強：吹付、ロックボルトなど
- 4.3 処分坑道内の排水、換気システムの再構築（特に水素ガス排出システムの構築）



自由断面掘削機
(ロードヘッダー)

【必要技術】

- ・遠隔による埋戻し材撤去技術
- ・撤去埋戻し材の搬出技術
- ・支保・岩盤診断技術
- ・支保・岩盤の補修・補強技術
- ・排水・換気技術（水素ガス回収技術）
- ・作業時の安全性確保技術

【留意事項】

- ・埋戻し材はベントナイトを含むため、地下水に接触することをできるだけ避ける方法で搬出
- ・埋戻し材中の水素ガスの存在に留意
- ・坑道周辺の間隙水圧の回復、EDZの存在により、地下水の流入量が増加する可能性がある
- ・支保工の劣化が進展して可能性が高いため、対応策の準備が不可欠

【R-5 : PEM 回収用機材の準備】

処分坑道内のPEM回収は、埋戻し材の撤去、支保等の補強を順次進めていくことになる。ここでは5系統で廃棄体の回収作業を行い、基本的な工程として5本/日の回収とする。

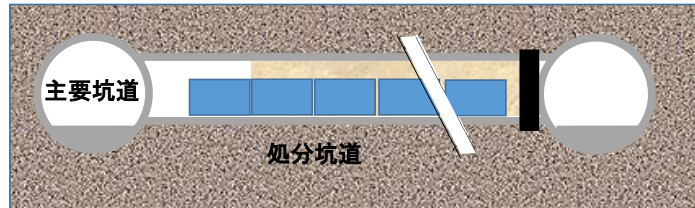
- 5.1 PEMの外殻の状態確認(腐食等による損傷など)
- 5.2 PEM回収用機材の設置、動線の確認
- 5.3 PEM搬送機材の設置
- 5.4 搬送ルートの確認



PEM回収装置例



PEM搬送車両例



【必要技術】

- ・PEMの外殻の状況に対応した遠隔回収技術
- ・PEMの遠隔搬出技術
- ・撤去・搬出時の安全確保技術
- ・処分坑道内の安定性維持技術

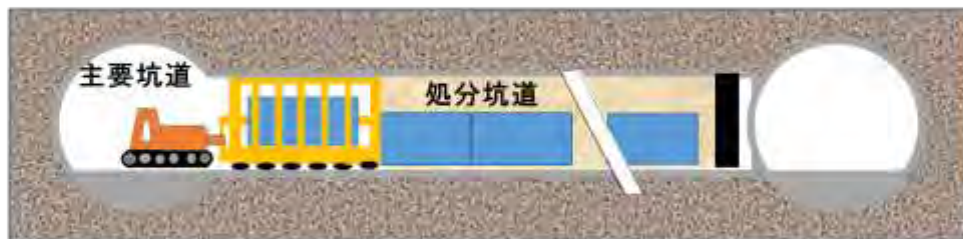
【留意事項】

- ・PEMの外殻の状況に応じた回収技術の準備が必要
- ・主要坑道内での様々な機材の待避エリア等、機材の動線と交代サイクルの事前検討が不可欠

【R-6 : PEM の回収・搬出】

PEMは、5本の処分坑道からそれぞれ1体/日で回収することを基本とする。定置後50年程度のガラス固化体の発熱量は低下、PEM外殻表面は腐食が進んでいる。

- 6.1 回収装置の設置
- 6.2 PEMの吊上げ、撤去
- 6.3 回収PEMの搬送装置への積替え
- 6.4 地表への搬出、地上施設での検査・貯蔵
- 6.4 PEM撤去エリアの岩盤安定性確認、必要に応じて補修・補強



【必要技術】

- ・PEM回収技術(遠隔装置)
- ・PEM搬出技術(遠隔装置)
- ・回収PEMの検査技術
- ・回収PEMの貯蔵技術
- ・回収エリアの検査、補修・補強技術
- ・作業時安全確保技術

【留意事項】

- ・PEM搬送ルートでの遮蔽の必要性の吟味
- ・回収部での岩盤安定性等作業環境の安全性への吟味

【R-7：撤去後の処分坑道内確認】

処分坑道からPEMを撤去したのち、埋戻し作業に備え、また、坑道の再利用も考慮し、坑道の状態を確認する。

7.1 PEM回収後の処分坑道内の調査、清掃、必要に応じて再補強

7.2 換気・排水設備の整備



【必要技術】

- ・坑道周辺を含めた調査技術
- ・坑道内安定性維持技術
- ・作業時安全確保技術

【留意事項】

- ・処分坑道の再利用についての吟味が必要

【R-8：処分坑道の埋戻し】

処分坑道の再利用がないことが決定されたのち、坑道の埋戻しを行う。埋戻しは原型復旧の観点から周辺岩盤と同程度の透水性を有する材料を用いることを前提とする。

8.1 処分坑道の埋戻し

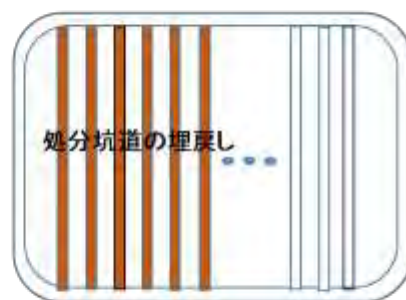
8.2 処分坑道端部のセメント吹付(安定性維持)

【必要技術】

- ・処分坑道埋戻し技術
- ・坑道端部セメント吹付技術

【留意事項】

- ・処分坑道の埋戻しの仕様は、回収後のサイトの利用形態により異なる



【R-9：主要坑道の埋戻し】

処分坑道の埋戻し終了後、パネル周辺の主要坑道を埋め戻す。埋戻し材の仕様は、サイトへの要件により異なる。

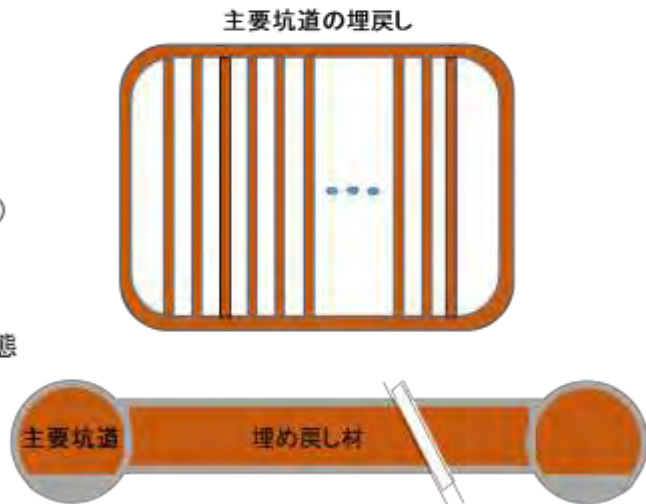
- 9.1 パネル周辺の主要坑道の埋戻し
- 9.2 主要坑道の端部のセメント吹付

【必要技術】

- ・坑道埋戻し技術(埋め戻し材は撤去材を転用)
- ・坑道端部セメント吹付技術

【留意事項】

- ・坑道埋戻し仕様は、回収後のサイトの利用形態により異なる、



【R-10：連絡坑道・アクセス坑道の埋戻し】

全ての廃棄体を回収したのち、連絡坑道、アクセス坑道を埋め戻す。アクセス坑道は、地表部にコンクリートキャップを設置する。

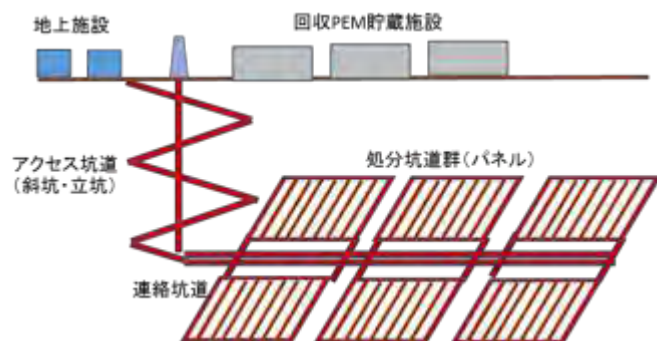
- 10.1 連絡坑道の埋戻し
- 10.2 斜坑の埋戻し
- 10.3 立坑の埋戻し
- 10.4 斜坑、立坑の地表接近部にコンクリートキャップの設置

【必要技術】

- ・坑道埋戻し技術
- ・坑道地表接近部コンクリートキャップ設置技術

【留意事項】

- ・坑道埋戻しの仕様は、回収後のサイト利用形態により異なる



【R-11：地上施設の解体・撤去】

地下坑道を埋め戻したのち、地表に設置した回収作業用の施設を解体・撤去する。この場合、回収事業を停止するための許認可が必要となる可能性がある。処分場周辺に設置した地質環境モニタリングも停止し、ボーリング孔も閉鎖する。

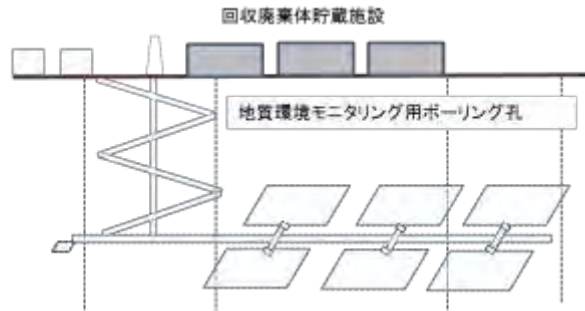
- 11.1 回収事業の廃止のための認可申請
- 11.2 地表回収用施設の解体・撤去
- 11.3 モニタリングの停止、モニタリング用ボーリング孔の閉鎖
- 11.4 回収廃棄体の貯蔵については、別途貯蔵のための許認可を取得

【必要技術】

- ・地表施設の解体・撤去技術
- ・モニタリング用ボーリング孔の閉鎖
- ・環境修復技術
- ・回収事業廃止に向けての申請書作成技術

【留意事項】

- ・地表の復旧のレベルについては未定



3) PEM 回収手順と必要技術のまとめ

上述した R-1～R-11 までの作業手順と作業イメージ、作業項目と必要技術を一覧として取りまとめた (図 2.3.1-25)。

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・補修	処分坑道プラグ撤去	処分坑道の埋戻し材撤去・支保補修	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"> ・回収設備の整備 ・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 ・撤去部の補修 	<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 ・撤去部補修技術 	<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 ・搬送空間確認と補修 	<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"> ・坑道設備の解体撤去 ・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 ・現状復旧
<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(セント吹付) 	<ul style="list-style-type: none"> ・坑道埋戻し技術 ・端部処理技術(セント吹付) 	<ul style="list-style-type: none"> ・坑道埋戻し技術 ・端部処理技術(セント吹付) 	<ul style="list-style-type: none"> ・地表施設の解体・撤去技術 ・環境修復技術

図 2.3.1-25 PEM 回収手順と作業項目、必要技術の整理

4) PEM 回収時の状態変遷表の作成

基本ケースにおいて、回収可能性を維持しつつ PEM を回収する場合、坑道周辺や処分場構成要素の変化について、各作業の特徴を考慮して状態変遷表として整理した（表 2.3.1-12）。

状態変遷表は、横軸に回収作業の展開を、縦軸は大きく、作業名、作業内容、作業結果、想定工程、必要技術、留意事項をまとめた欄と、異なるスケールでの処分場構成要素の欄を設けた。

表 2.3.1-12 基本ケースの PEM 回収手順と状態変遷

タスク	R-1	R-2	R-3	R-4	R-5	R-6	R-7	R-8	R-9	R-10	R-11
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	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・閉鎖
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 	<ul style="list-style-type: none"> PEM回収装置の設置 PEM回収・搬出 PEMの搬送 撤去空間の確認と補強 	<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
作業結果	<ul style="list-style-type: none"> PEMの状況把握 回収事業認可 回収作業計画 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道までの安全なアプローチ確保 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道へのアクセスが確保 	<ul style="list-style-type: none"> PEMまでのアクセス確保 	<ul style="list-style-type: none"> PEMの回収準備完了 	<ul style="list-style-type: none"> PEMの回収・搬出・搬送ルートの確保 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道内の健全性確認 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道埋戻し完了 	<ul style="list-style-type: none"> 主要坑道埋戻し完了 	<ul style="list-style-type: none"> 連絡坑道、アクセス坑道埋戻し完了 	<ul style="list-style-type: none"> 回収用地上施設の撤去完了
想定工程	3年	2年	1年/パネル	1年/パネル	5年/パネル	1年/パネル	1年/パネル	2年/パネル	1年/パネル	3年	1年
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 	<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 閉鎖技術 モニタリング用ボーリング孔の閉鎖 環境修復技術
留意事項	<ul style="list-style-type: none"> 性能確認エリアでの廃棄体状態確認、回収技術の適用性確認 回収・搬送作業の安全評価 	<ul style="list-style-type: none"> 150年程度の安定性確保を目標 維持管理基準の準備 	<ul style="list-style-type: none"> プラグ背面の岩盤状態の把握 撤去後の補強確認 	<ul style="list-style-type: none"> 支保の状態、周辺岩盤の応力状態の把握 補修・補強の効果の確認 	<ul style="list-style-type: none"> PEMの状態は事前に確認 撤去・補修、回収に係る機材の動線と待機場所の確保 	<ul style="list-style-type: none"> 搬出ルートの確保 回収時の坑道安定性の確保 PEM損傷時の対応 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道の埋戻し作業のため健全性を確保 	<ul style="list-style-type: none"> 埋戻し材の仕様はサイトの活用策に依存 	<ul style="list-style-type: none"> 埋戻し材の仕様はサイトの活用策に依存 	<ul style="list-style-type: none"> 埋戻し材の仕様はサイトの活用策に依存 	<ul style="list-style-type: none"> 地表の復旧レベルは未定
状態変遷	処分場周辺環境の状態	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒
	アクセス坑道周辺環境の状態	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒
	パネル周辺環境の状態	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒
	処分坑道周辺環境の状態	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒
	埋戻し材の状態	⇒	⇒	⇒	⇒	—	—	—	⇒	⇒	⇒
	PEMの状態	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	PEMの回収	—	—	—	—

2.3.2 回収可能性維持の影響検討手法の整理

平成 27 年度では、評価や整理の際の基軸を明確にした検討（例えば、TPO や THMC を基軸とした検討）を展開するとともに、煩雑になりがちな作業については既往の検討で実績のある手法（例えば、FEP や PID 作成）を用いて行った。すなわち、「評価や整理の基軸の明確化」および「既往検討で実績（および経験・知見）のある手法の展開」のもとで作業を展開し、回収可能性維持の影響検討に向けた一連の評価手法を示した。一方、回収可能性調査・技術高度化検討委員会では、回収可能性維持による影響の種類および影響評価を行う際の指標について、より体系立てた整理の必要性が指摘されている。そこで、本項では、回収可能性維持の影響検討を実施する前に、平成 27 年度に実施した検討例も参照し、影響検討手法について考察した上で整理する。具体的には、閉鎖前の影響と閉鎖後の影響に大別して検討した回収可能性維持の影響評価指標について、それぞれの影響の具体的な種類を考察し、体系的に整備する。

本項は、本年度実施する影響検討業務全体からすると図 2.3.2-1 に示す位置づけとなる。

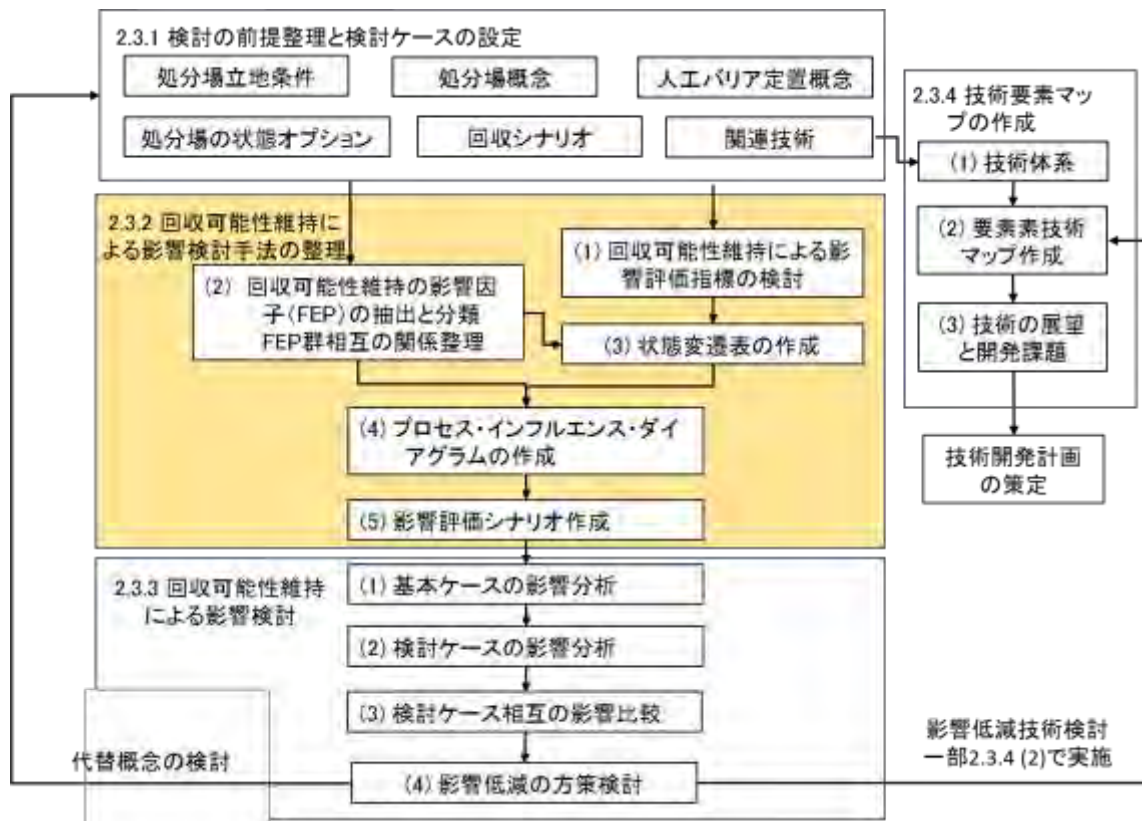


図 2.3.2-1 本年度実施する影響検討業務全体

(1) 回収可能性維持による影響の種類および影響評価指標の検討

1) 回収可能性維持が及ぼす影響の種類

回収可能性を閉鎖まで維持するということは、一度地下施設に定置した廃棄体を必要に応じて（様々な動機で）地表まで回収することができる技術を準備することを意味する。このためには、

維持や回収に伴う影響をできる限り最小限に抑えることが、回収可能性維持を目指す各国共通の規制要件（回収作業の安全性と長期安全性）となっている。

維持や回収に伴う影響にはどのようなものがあるか、それが具体的に事業期間中の安全や閉鎖後の安全にどのような影響を及ぼすのかを検討することが、本業務の目的である。また、それらの影響の程度（大きさと範囲）が許容できないレベルであれば、影響を低減するための方策（技術や制度）を整備していく必要がある。

前提条件の整理では、まず、回収可能性を維持するための方策として坑道を開放しておくことの影響について、これまでの経験を踏まえ考察したのち、回収する場合の影響について整理し、次項以降での影響検討につなげていく。

影響の種類を以下に示す二つの要因に大別して分析する（図 2.3.2-2）。

一つには、回収可能性を維持するために坑道等を開放しておくことによる影響がある。これは坑道を開放状態としておくことで、支保等の劣化により坑道の安定性が損なわれたり、作業環境維持のための換気・排水の処理により地表の環境に影響を与えたりするものと、坑道を開放しておくことで坑道周辺の母岩の水理特性や力学特性を変化させる影響に分類することができる。

もう一つには、回収可能性維持の中で、実際に廃棄体を回収することで発生する影響がある。例えば、廃棄体を回収する場合には一度埋め戻した坑道を再掘削する必要があり、坑道の安定性確保への影響と再利用に伴う換気・排水の環境への影響の他に、坑道を再開放することによる周辺母岩の特性への影響が発生する。

以下、大別した二つの要因を対象に、本検討の前提とする影響の種類を詳細に考察する。

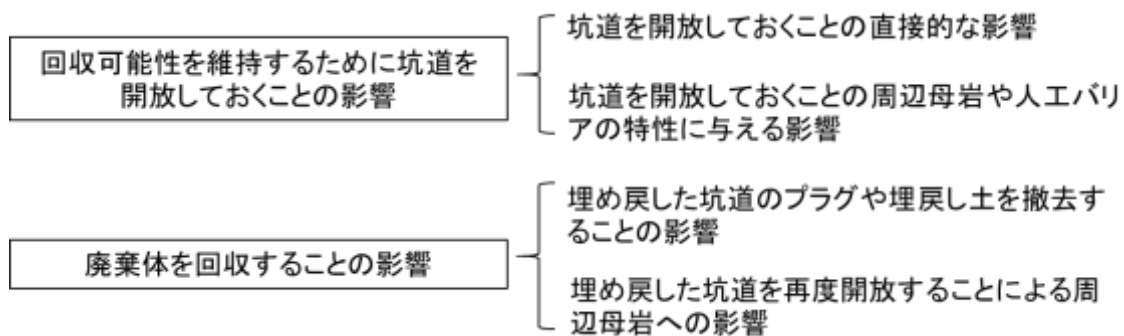


図 2.3.2-2 回収可能性の維持により発生する影響の種類

2) 坑道を開放しておくことの影響

坑道を開放しておくことは、通常の道路トンネルや鉄道トンネルを供用しているときに発生する現象が相当する。これらの現象は、坑道を供用している限り継続して発生するものと、時間の経過に伴い顕著となるものがある。前者は、供用中の換気・排水による廃棄物の処理であり、後者は開放坑道の安定性に係る現象である。

現在 NUMO が想定している地下坑道仕様は、図 2.3.2-3 にあるような標準的な断面と部材から構成される。坑道の構成部材であるロックボルトや鋼製支保工は、供用中の酸素供給により腐食が進み、その機能（強度、変形性能）を喪失していく。開放坑道のコンクリートは空気中の二酸化炭素と結合し表面に炭化カルシウムを生成することで劣化が抑制されることがあるが、微生物の増殖も見られ、変質・劣化が促進される可能性も否定できない。最終的には支保工の強度が失われ、破壊することで落盤や肌落ちが発生する可能性がある。

また、坑道の掘削、支保の設置、換気・排水の継続という要因（トリガー）の複合作用の結果として、坑道周辺母岩の温度、水理、力学、化学特性を変化させることになる。これらの影響は、建設・操業段階の擾乱として発生しているが、坑道の開放状態を継続することにより、変化領域や大きさが増加する可能性がある。このような影響の程度は周辺母岩の種類や水理等の環境条件、特性にも依存する。

掘削や換気・排水により発生する物質は、地表まで運搬され、環境基準等を順守するように処理がなされる。処理による廃棄物は適切に処分されることになるが、結果として環境への負荷という影響を生み出すことになる。

これらの影響の程度によって、緩和策や低減策が検討され、処分場の建設時や操業期間だけでなく、回収可能性維持期間に適用されることになる。そのような影響緩和や低減対策を施すことによる作業の発生に係るコストという影響もまた発生することになる。処分事業の観点からは、これらの作業に係る安全性確保や環境保全策を必要とする事項およびコストを、影響を押し量る指標として用いることとする。

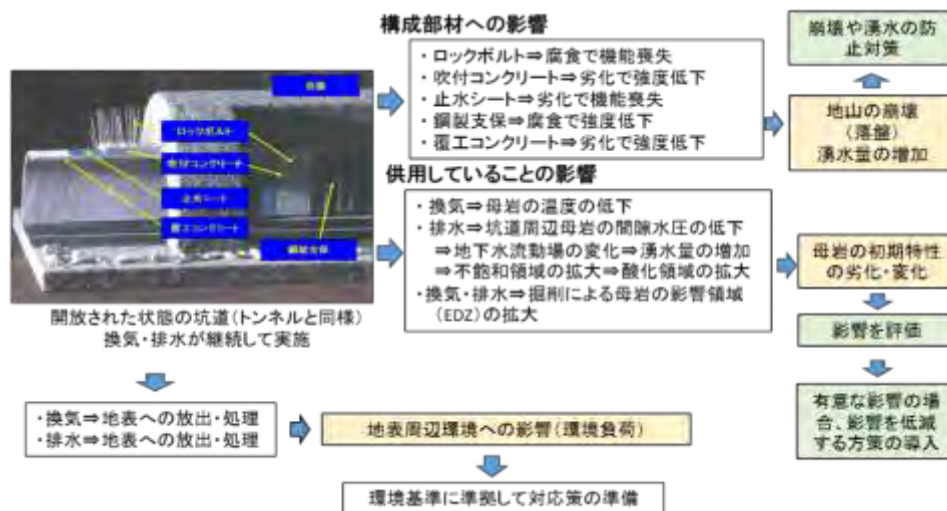


図 2.3.2-3 坑道を開放していることによる影響

3) 廃棄体を回収することによる影響

廃棄体を定置し埋戻された坑道を回収のために再掘削（埋戻し材を撤去）し、廃棄体を搬出することが要因（トリガー）となり、下記に示す三つの影響が発生する（図 2.3.2-4）。

- ① 坑道を再掘削し開放することの坑道周辺母岩の特性に与える影響
- ② 廃棄体回収のためにプラグや埋戻し材を撤去することによる坑道の安定性に与える影響
- ③ 一連の回収作業に伴う一般労働安全と放射線安全に与える影響

基本シナリオでは、廃棄体を定置した後、速やかに処分坑道を埋戻し、端部にプラグを設置することで、建設・操業時における坑道周辺岩盤への水理や力学的な擾乱の安定化を図ることとしている。安定化が元の環境に戻るかどうか、安定するまでどの程度の時間がかかるかについては、岩盤の特性や処分場の位置に依存する。

基本シナリオでは、処分坑道以外は開放された状態にあるので、周辺母岩の特性等に与える影響が処分場の閉鎖まで継続し、回収する場合は、処分坑道の掘削に伴い再度建設・操業時と同様な擾乱が発生し、周辺母岩の特性が変化する。

廃棄体の回収のための一連の作業により、一般労働安全や放射線安全に対する影響が発生する。この影響は作業の安全性確保の必要性の増大（廃棄体の落下、放射性物質の放出などの事象による人間への影響に係るもの）につながる。また、回収した廃棄体を地表に搬出し、保管することによる放射線影響が発生する。これらの影響は環境への負荷として評価することができる。撤去した埋戻し材、回収中の排水や換気からの廃棄物も同様に環境負荷としてカウントされる。さらにこれらの作業に伴うコストも発生する。

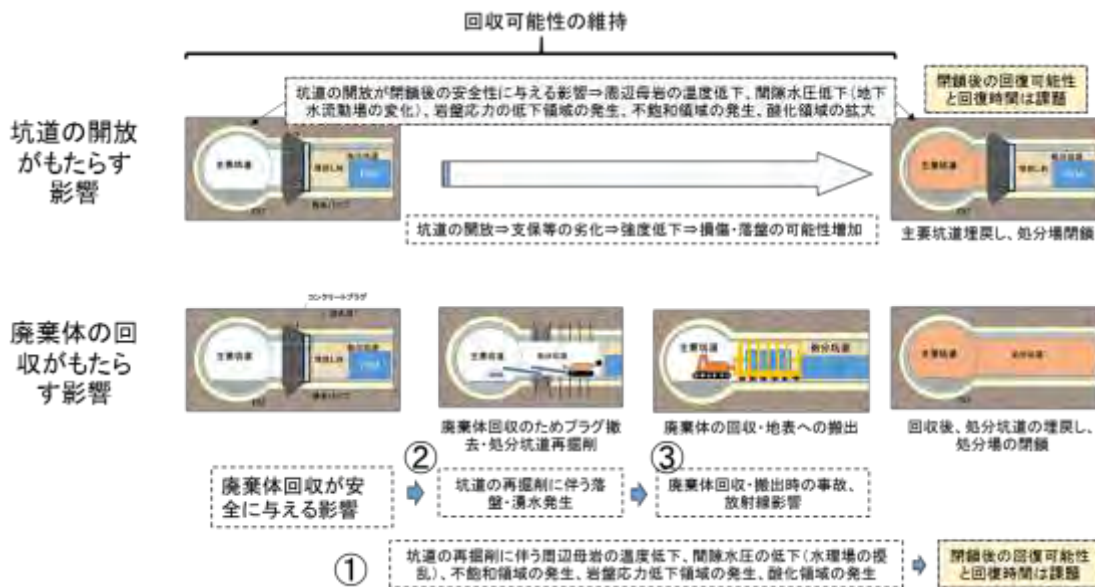


図 2.3.2-4 廃棄体を回収することによる影響の種類

4) 回収可能性維持による閉鎖後の影響評価指標

上記で整理したように回収可能性維持による影響は、大きく二つの要因から発生する。一つは

維持のために坑道を開放した状態におくことが起因となる影響、もう一つは、廃棄体を回収することで発生する影響である。

これらを起因として発生する影響の種類は、以下の3項目があげられた。

- ✓ 地層処分の長期安全評価で重要となる坑道周辺母岩の地質環境特性（温度、水理、力学、化学）を変化させる（「擾乱」ともいう）
- ✓ 坑道の安定性を損ね、落盤や剥落が発生する
- ✓ 回収可能性維持の作業や回収作業に伴う一般労働安全や放射線安全を損ねる

前者の母岩への影響は、処分場閉鎖後の安全性に係るもの、後者の二項目は、坑道周辺の岩盤の特性が劣化や変質により変化することによる処分場閉鎖前の処分事業に与える影響として分類できる。さらに、長期安全性への影響については、母岩の特性とともに、定置した人工バリアシステムへの影響に分類でき、閉鎖前の影響は、坑道の安定性と作業安全および放射線安全への影響に分類できる。

次に、回収可能性維持による閉鎖後の安全確保に係る影響の影響を評価する上での指標について考察する。ここでの指標は、影響を推し量るうえでの指標とするもので、定性的あるいは定量的な評価や比較をするために必要となるものである。

坑道周辺母岩については、NUMO が 2010 年安全確保レポートで表 2.3.2-1 表のように「母岩の好ましい特性」として整理している熱環境 (T)、力学場 (M)、水理場 (H)、化学環境 (C) を評価の指標として設定する。すなわち、これらの評価指標となる特性が回収可能性の維持によりどのように変化するかを推し量ることとなる。

表 2.3.2-1 母岩の好ましい特性 (NUMO TR-11-01)

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
力学場	坑道の力学的安定性が確保できるとともに、閉鎖後の処分場とその周辺の力学場が人工バリアの安定性に適していること
水理場	閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流束が小さく、緩慢であること
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と人工バリアの安定性に適していること

人工バリア性能に関して NUMO は、オーバーパックとベントナイト緩衝材に期待する安全機能とその技術要件を設定している。PEM 概念では、回収可能性維持期間中は鋼製外殻が健全性を維持すると仮定すると、状態変化が緩衝材とオーバーパックの性能に影響を与えることはないとは推定される。ここでは、外殻が何らかの形で損傷を受ける場合を想定し、緩衝材とオーバーパックの性能への影響を推し量る指標を設定する。

緩衝材については、表 2.3.2-2 に示すように大きく 3 つの安全機能を満足するための技術要件が設定されており、それらへの影響を推し量る指標としては、緩衝材の密度、形状、厚さが考え

られる。すなわち、回収可能性を維持することで、緩衝材の密度、形状、厚さにどの程度影響を及ぼすかで対応策の必要性を判断することになる。

表 2.3.2-2 緩衝材の技術要件（基本的なバリア性能の確保）（NUMO TR-11-01）

安全機能		技術要件	技術要件の説明	設計項目	性能維持の指標 密度 形状 厚さ
放射性物質の移行抑制	稜流による移行の抑制	低透水性	緩衝材中の地下水の動き（稜流）を抑制し、結果的に放射性物質の移行を抑制すること	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抑制すること	緩衝材の設計（材料設計、形状・厚さの設計）	
	収着による放射性物質の移行遅延	収着性	ガラス固化体から溶出した放射性物質を収着することにより遅延すること	緩衝材の設計（材料設計）	

NUMO TR-11-01より抜粋

オーバーパックに関しては、表 2.3.2-3 にある放射性物質の浸出抑制機能（放射性核種の物理的な閉じ込め）を確保するための技術要件として耐食性、構造健全性があり、それらを推し量る指標としては、オーバーパックの材質、形状、厚さがあげられている。すなわち、回収可能性を維持することで材質の変質や腐食の加速が発生し、所定の期間の閉じ込め性が発揮できなくなることを評価することになり、初期性能を損ねることが予測できれば対応策を講じることになる。

表 2.3.2-3 オーバーパックの技術要件（基本的なバリア性能の確保）（NUMO TR-11-01）

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	オーバーパックの設計（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	オーバーパックの設計（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	オーバーパックの溶接設計（材料設計、蓋構造設計、溶接法、溶接条件）

閉鎖後長期の安全性への影響を評価する指標の使用例を図 2.3.2-5 に示す。ここでは指標とする THMC の特性の変化と人工バリアシステムの緩衝材の密度、オーバーパックの腐食を指標として、それらの変化を文書で定性的に記述している。

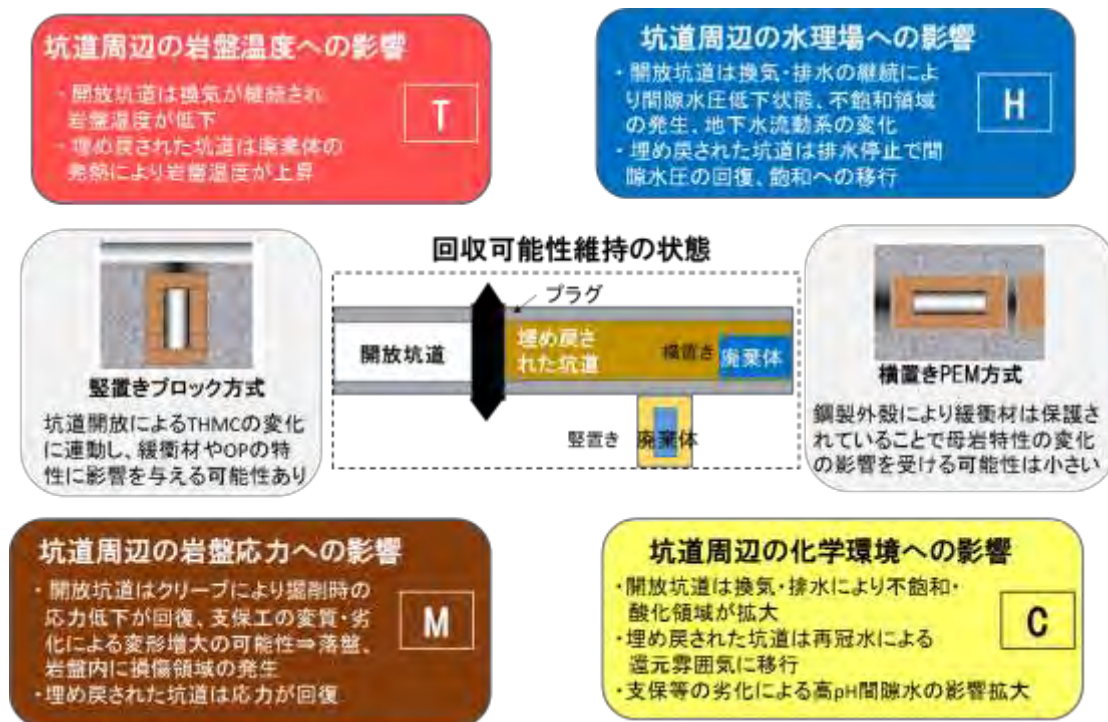


図 2.3.2-5 閉鎖後長期安全性への影響を評価する指標の使用例

5) 回収可能性維持による閉鎖前の影響評価指標

閉鎖前の影響の要因（トリガー）としては、回収可能性維持のための坑道を閉鎖まで開放しておくこと、そしてその間の廃棄体の回収という行為がある。これらの要因による影響は、以下に整理することができる。

- ✓ 坑道支保の劣化等により開放坑道の安定性が時間の経過とともに喪失し、落盤や剥落が発生する可能性が高まること
- ✓ 開放期間中の換気・排水の処理により廃棄物の発生が増加すること
- ✓ 廃棄体の回収・搬出時の事故等により労働安全と放射線安全が損なわれる可能性があること
- ✓ 放射性物質を地表に搬出・保管することで放射線安全が損なわれる可能性があること
- ✓ さらに、上記の影響を予防、防止、緩和あるいは低減するための作業が発生し、その作業時のリスク、環境負荷、コストが二次的に発生すること

回収可能性を閉鎖までの期間、安全かつ合理的な範囲で維持するには、これらの影響を評価し、具体的な対応（予防、防止、緩和、低減）を講じ、その効果を評価する必要がある。そのためには、影響評価と対策の効果を同じ指標で比較することが重要となる。

坑道開放による安定性に与える影響については、落盤や剥落の発生確率と落盤や剥落で被る被害（復旧のための作業の安全性確保、復旧からの発生物処理処分に係る環境負荷、復旧に係るコスト）で評価でき、その対応策も同様に、作業量と作業の安全性確保、環境負荷、コストで評価できる。換気・排水処理から発生する廃棄物が及ぼす環境負荷は廃棄物の種類に係る作業量及びコストで評価することができる。また、廃棄体回収・搬出に伴う労働安全や放射線安全について

も、同様に作業に係る安全性確保の必要性、環境負荷、コストで評価できる。これらの指標の展開を図 2.3.2-6 に示す。

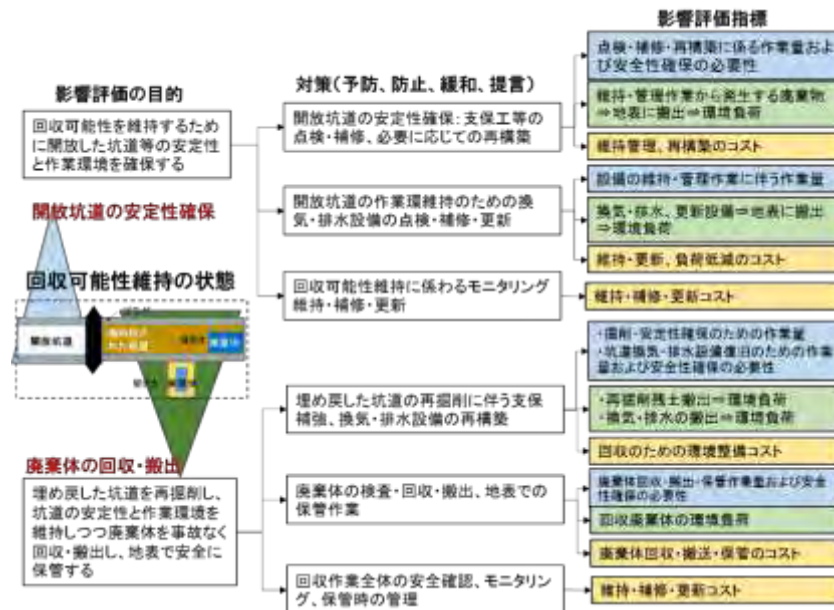


図 2.3.2-6 閉鎖前の影響を評価する場合の指標

(2) 影響因子の抽出と分析

1) 影響因子の抽出と分類

a 閉鎖後の安全性に係る因子 (FEP)

閉鎖後の長期安全性に係る因子は、大きく、A.初期特性に係る FEP 群、B.影響を与える FEP 群および C.影響結果の FEP 群に分類できる (図 2.3.2-7)。この分類は、閉鎖前の安全性に係る因子についても同様である (図 2.3.2-8)。

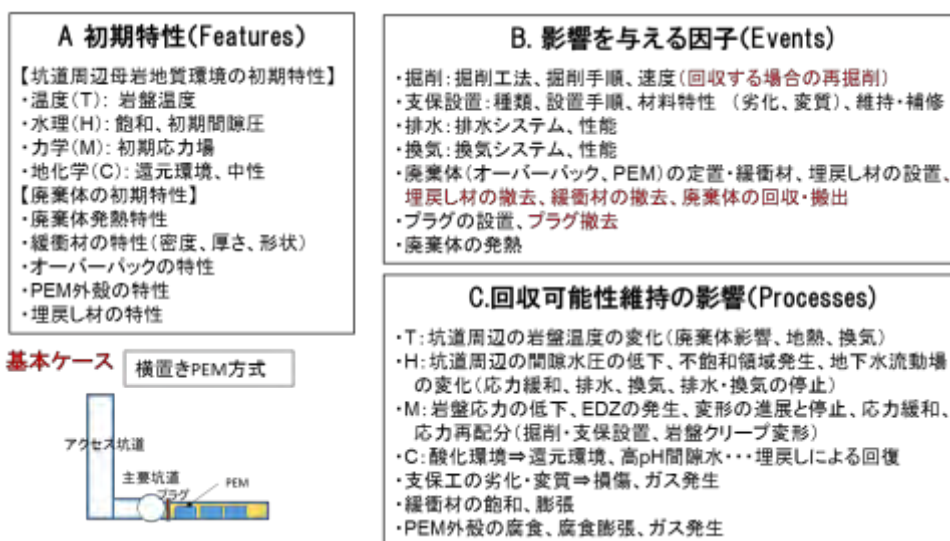


図 2.3.2-7 回収可能性維持に係わる影響因子 (FEP) とその分類 (赤字は回収可能性維持期間に廃棄体容器を回収する場合の因子を記述している。)

b 閉鎖前の安全性等に係る因子 (FEP)

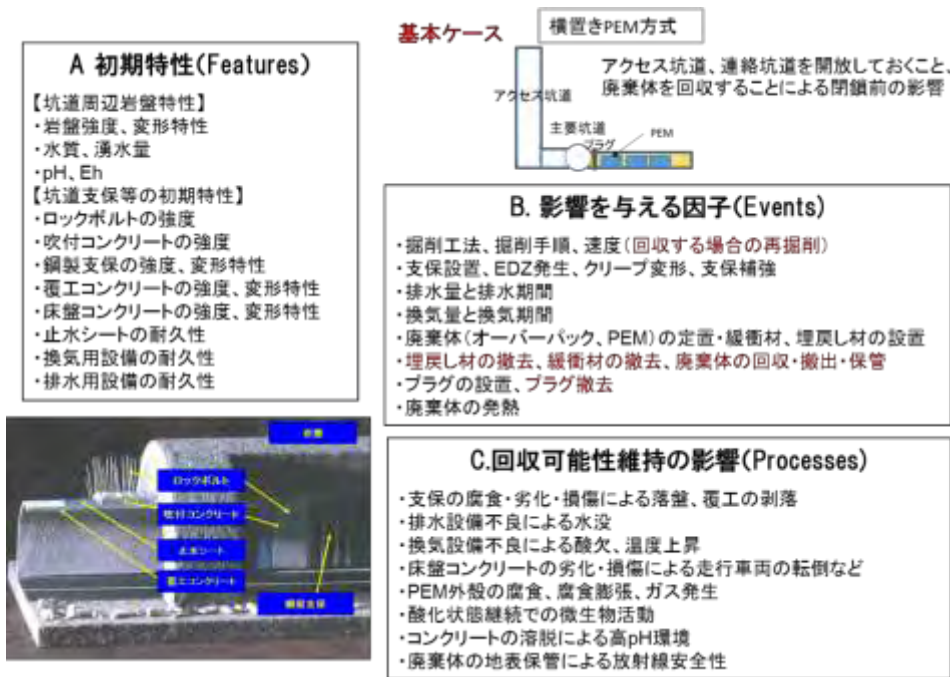


図 2.3.2-8 閉鎖前の安全性に影響を及ぼす因子

2) 影響因子相互の関係整理

a 閉鎖後の安全性に係る因子相互の関係

A,B,C の FEP 群を時間の経過を考慮して、初期状態 (A グループの FEP 群) が回収可能性維持に伴う影響因子 (B グループの FEP 群) により変化していく状態 (C グループの FEP 群) を影響伝搬の形で整理する (図 2.3.2-9)。これらの影響の大きさと範囲は着目するスケールで異なる。

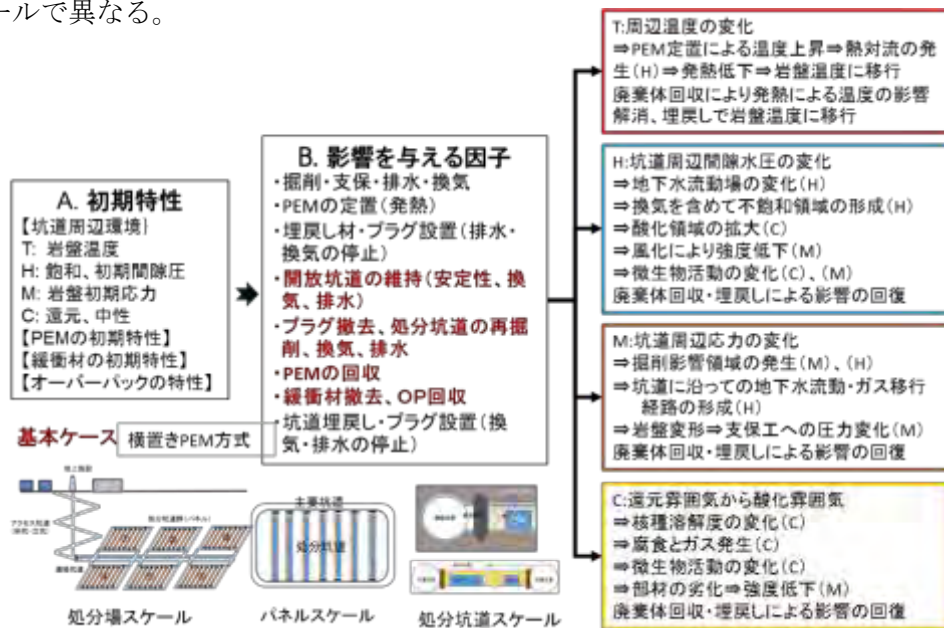


図 2.3.2-9 閉鎖後安全性に係る影響因子相互の関係 (影響を与える因子における赤字は回収する場合の因子を示している。)

b 閉鎖前の安全性に係る影響因子相互の関係

閉鎖前の安全性に係る影響因子相互の関係は、閉鎖後安全性と同様に、初期特性が影響を与える因子により影響が発生するという流れとして整理することができる（図 2.3.2-10）。

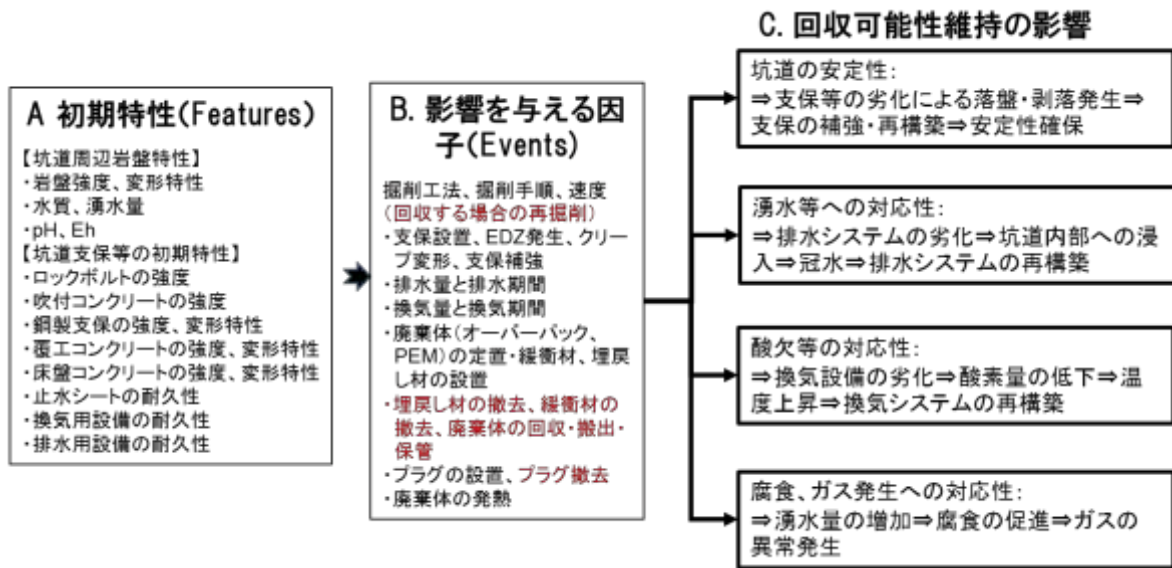


図 2.3.2-10 閉鎖前安全性に係る影響因子相互の関係

(3) 状態変遷表の作成

1) 異なるスケールでの状態変遷表

回収可能性を維持する場合の処分場の異なるスケールでの状態変遷表を作成する。状態変遷表を作成する目的は、影響評価のためのシナリオ作成に向けて、処分システム（処分場を構成する要素とその特性や機能）の変化を理解することにある。(2)で整理した因子（FEP群）がもれなく状態変遷表に記述されていることの確認も作業を通じて実施する。

状態変遷表の横軸には、建設開始前の初期状態（初期特性）、建設、定置、埋戻し、その後の回収可能性維持期間（基本ケースでは50年間）、閉鎖（約10年）、閉鎖後300年後という期間を対象とし、最後の欄には影響伝搬を記述している。縦軸には処分場スケール、処分パネルスケール、処分坑道スケール、PEMという異なるスケールを配置している。

状態変遷表の各ブロックには、表 2.3.2-4 に示すように影響を評価する指標となる温度（T）、水理（H）、力学（M）、化学（C）の変化を記述する。状態変遷表の作成は、専門家間での共同作業として作成する。

表 2.3.2-4 状態変遷表のブロックでの記述例

初期状態	建設期間
【PEM定置周辺岩盤の初期条件】 T: 岩盤温度 H: 飽和、初期間隙圧 M: 初期岩盤応力 C: 還元雰囲気、中性	T: 掘削・換気⇒周辺岩盤温度の低下 H: 掘削・排水⇒周辺の間隙水圧低下⇒不飽和領域発生 M: 掘削⇒応力低下⇒EDZ発生、支保設置⇒変形停止⇒背面応力回復 C: 排水・換気⇒酸化環境

状態変遷表は、基本ケースを対象に、表 2.3.2-5 と表 2.3.2-6 に、それぞれ回収可能性を維持しつつ最終的に回収しないケースと回収するケースに分けて示す。

回収しない場合は、100 年間回収可能性を維持したのち、開放坑道を埋戻し、処分場を閉鎖することになる。基本ケースではアクセス坑道と連絡坑道のみ開放されているが、その延長は全体の坑道長からすると短いことから、開放していることによる影響は局地的なものになると推定される。また、PEM は定置された後、速やかに埋戻しされることから、回収可能性維持による人工バリア性能が影響を受けることはなく、回収可能性を維持しない場合の変遷と変わらない。

回収する場合、全数回収する場合、回収後の処分場は放棄されることにつながるため閉鎖後の影響は環境復旧対策のみとなる。一部を回収する場合、残された PEM はいずれも埋め戻された坑道に存在するため、回収の影響を受けることはない。PEM を回収するために坑道を再掘削するが、回収後速やかに埋め戻せばその影響は局地的になると推定される。状態変遷では、このような影響の伝播をそれぞれのスケールで記述している。

表 2.3.2-5 基本ケースの回収可能性維持の状態変遷 (回収しない場合)

	オプション②の状態	初期状態	建設	定置	埋戻し	50年間維持	閉鎖(約10年)	閉鎖300年後	影響伝搬
			回収可能性維持期間(約100年)						
処分場スケール	<p>基本ケースの工程</p>  <p>・平野、堆積岩、深度500m、塩水環境 ・平面6パネルで順次建設⇒定置⇒回収可能性の維持⇒埋戻し・閉鎖</p>	<p>【処分場スケールでの状態変遷】</p> <p>T: 岩盤温度 H: 飽和、初期間隙水圧 M: 初期岩盤応力 C: 還元雰囲気</p>	<p>アクセス坑道⇒連絡坑道⇒主要坑道⇒処分坑道の掘削</p> <p>T: 掘削・換気⇒周辺岩盤の温度低下 H: 掘削・排水⇒坑道周辺の間隙水圧低下⇒応力と連成して不飽和領域の発生⇒処分場周辺の地下水流動系変化 M: 掘削⇒坑道周辺の応力解放⇒EDZの発生と坑道に沿っての連結⇒支保設置⇒変形停止⇒応力回復 C: 換気・排水⇒岩盤内の酸化領域の発生</p>	<p>処分坑道に PEM 定置・間隙の充填</p> <p>T: PEM 定置・充填⇒換気停止⇒発熱による温度の上昇、開放坑道の換気⇒温度低下 H: PEM 定置・充填⇒間隙水圧の回復⇒一部開放坑道の排水⇒間隙水圧低下⇒不飽和領域の拡大 M: EDZの残存、PEM 定置・充填⇒岩盤クリープ変形⇒応力再配分 C: 地下水流動場の変化⇒換気・排水エリアの酸化領域の拡大(地下水特性と連成)</p>	<p>処分坑道端部にプラグ設置</p> <p>T: PEM の発熱⇒温度の上昇、開放坑道の換気⇒周辺岩盤温度の低下 H: 処分坑道の閉鎖⇒排水停止⇒間隙水圧の回復⇒飽和プロセス、開放坑道の排水継続⇒不飽和領域の残存 M: EDZ の残存、処分坑道周辺⇒岩盤クリープ変形⇒応力の再配分 C: 坑道周辺の水理条件⇒酸化領域の残存⇒還元雰囲気に変化、支保工の劣化⇒高 pH 間隙水の発生</p>	<p>開放坑道の維持、モニタリング、維持補修</p> <p>T: PEM の温度低下⇒周辺岩盤温度⇒一部坑道の換気による岩盤温度の低下 H: 処分坑道の閉鎖⇒排水停止⇒間隙水圧回復⇒飽和プロセス、開放坑道の排水⇒不飽和領域の残存 M: EDZ の残存、処分坑道周辺は応力の回復 C: 処分坑道周辺の間隙水圧の回復(水理地質条件に依存)、高 pH 間隙水の坑道内への浸入、腐食による水素ガス発生</p>	<p>開放坑道の埋戻し・閉鎖</p> <p>T: 開放坑道の埋戻し・閉鎖⇒周辺岩盤温度に移行 H: 開放坑道の埋戻し・閉鎖⇒排水停止⇒間隙水圧の回復⇒。処分場規模で飽和プロセス M: 開放坑道の埋戻し・閉鎖により周辺の応力の回復 C: 水理場の回復⇒還元雰囲気への回復、補強材の劣化⇒高 pH 間隙水の存在、水素ガス発生</p>	<p>モニタリング停止 事業廃止</p> <p>T: 処分場規模での周辺岩盤温度への回復 H: 処分場規模で水理地質環境の回復(不飽和領域の残存の可能性) M: 坑道周辺の応力の回復(元に戻るかどうかは不明) C: 水理条件の回復に伴い還元雰囲気への回復(酸化領域が残存する可能性は否定できない)、高い pH 間隙水の存在、水素ガス発生</p>	<ol style="list-style-type: none"> ① 処分場の建設に伴う換気・排水⇒初期状態の THMC の変化 ② PEM・充填材の設置⇒換気・排水の停止⇒定置手順に従い THMC が初期状態に移行 ③ 維持期間中⇒初期状態に移行 ④ 閉鎖・閉鎖後⇒初期状態の THMC に移行、補強材、PEM バリア材の腐食・劣化⇒化学環境の変化
処分パネルスケール	 <p>処分坑道建設後、PEM の定置、充填材の設置が複数坑道で並行して実施、定置後端部にプラグの設置、主要坑道、連絡坑道は開放維持</p>	<p>【パネルスケールでの状態変遷】</p> <p>T: 岩盤温度 H: 飽和、初期間隙水圧 M: 初期岩盤応力 C: 還元雰囲気</p>	<p>T: 掘削・換気⇒岩盤温度の低下 H: 掘削・排水⇒間隙水圧低下⇒不飽和領域の発生 M: 掘削⇒応力解放(EDZ の発生)、支保設置⇒変形停止⇒背面応力の回復 C: 排水・換気⇒地下水場の変化⇒酸化領域の拡大</p>	<p>T: PEM 定置・充填⇒発熱⇒パネルエリアの温度上昇、開放坑道での換気⇒温度低下 H: 処分坑道の間隙水圧の回復⇒飽和過程、開放坑道の排水⇒周辺の不飽和領域の残存 M: EDZ の残存、処分坑道周辺岩盤の応力回復、開放坑道⇒クリープ変形による背面応力回復 C: 地下水流動場の変化に対応して酸化領域の縮小、ロックボルトの腐食劣化</p>	<p>T: PEM 定置・充填⇒発熱⇒温度低下⇒岩盤温度に移行 H: 処分坑道の間隙水圧の回復⇒飽和過程、開放坑道の排水⇒不飽和領域の残存 M: EDZ の残存、処分坑道周辺岩盤の応力回復、開放坑道⇒クリープ変形による背面応力回復 C: 地下水流動場の変化に対応して酸化領域の縮小、ロックボルトの腐食劣化</p>	<p>T: パネルエリア⇒周辺岩盤温度、開放坑道での換気⇒温度低下 H: 処分坑道での間隙水圧の回復⇒飽和過程、開放坑道の排水⇒不飽和領域の残存 M: EDZ の残存、処分坑道周辺岩盤の応力回復、開放坑道⇒クリープ変形による背面応力回復 C: 地下水流動場の変化に対応して酸化領域の縮小、支保の劣化⇒高 pH 間隙水の発生</p>	<p>T: パネル全体で周辺岩盤温度に移行 H: 全域での排水停止⇒パネル全体で間隙水圧回復、地下水流動系の回復傾向 M: EDZ の残存、応力場の回復 C: 地下水流動場の変化⇒還元領域の拡大、補強材の変質劣化⇒高 pH 間隙水、水素ガスの発生</p>	<p>T: パネル全体で周辺岩盤温度に回復 H: パネル全体で間隙水圧回復⇒飽和(不飽和領域の残存の可能) M: EDZ の残存、応力場への回復(初期状態とは異なる) C: 地下水流動場の変化⇒還元領域の拡大(酸化領域の残存の可能性)、補強材の変質劣化⇒高 pH 間隙水</p>	<ol style="list-style-type: none"> ① 処分場の建設に伴う換気・排水⇒初期状態の THMC の変化 ② PEM・充填材の設置⇒換気・排水の停止⇒定置手順に従い THMC が初期状態に移行 ③ 維持期間中⇒初期状態に移行 ④ 閉鎖・閉鎖後⇒初期状態の THMC に移行、補強材、PEM バリア材の腐食・劣化⇒化学環境の変化
廃棄体スケール	 <p>PEM の定置は、主要坑道からアプローチ、複数定置後に間隙を充填</p>	<p>【PEM 定置周辺岩盤の初期条件】</p> <p>T: 岩盤温度 H: 飽和、初期間隙水圧 M: 初期岩盤応力 C: 還元雰囲気</p> <p>【PEM の初期仕様】 ・鋼製外殻+EBS 【充填材の初期仕様】 ・ベントナイトペレット ・不飽和</p>	<p>T: 掘削・換気⇒周辺岩盤温度の低下 H: 掘削・排水⇒周辺の間隙水圧低下⇒不飽和領域発生 M: 掘削⇒応力低下⇒EDZ 発生、支保設置⇒変形停止⇒背面応力回復 C: 排水・換気⇒酸化領域</p>	<p>T: 発熱⇒周辺岩盤温度上昇 H: 排水停止、充填⇒間隙水圧回復⇒飽和過程 M: EDZ の存在、充填⇒支保背面応力回復 C: 排水・換気停止⇒還元地下水の浸入⇒還元雰囲気</p>	<p>T: 発熱低下⇒周辺岩盤温度に移行 H: 地下水浸透⇒飽和過程 M: EDZ の存在、岩盤応力の回復 C: 還元地下水の浸透⇒還元雰囲気に移行</p>	<p>T: 発熱低下⇒周辺岩盤温度に移行 H: 地下水浸透⇒飽和過程 M: EDZ の存在、岩盤応力の回復 C: 還元地下水の浸透⇒還元雰囲気に移行</p>	<p>同左</p>	<p>T: 周辺岩盤温度 H: 飽和 M: EDZ の残存、応力回復 C: 還元雰囲気、放射線分解ガスと PEM 外殻の腐食による水素ガスの存在</p>	<ol style="list-style-type: none"> ① 処分坑道建設⇒換気・排水・支保設置⇒初期状態 THMC の変化 ② PEM・充填材の設置⇒建設後の坑道周辺の THMC の変化 ③ PEM・充填材の回収に伴う換気・排水⇒坑道周辺の THMC の変化 ④ 閉鎖・閉鎖後⇒時間の経過に伴う THMC の変化、補強材、バリア材の劣化に伴う化学環境の変化

表 2.3.2-6 基本ケースの回収可能性維持の状態変遷表 (回収する場合)

オプション②の状態	構成要素	建設	定置	埋戻し	50年間維持+回収	閉鎖(約10年)	閉鎖300年後	影響伝搬
		回収可能性維持期間(約100年)						
基本ケースの工程		アクセス坑道⇒連絡坑道⇒主要坑道⇒処分坑道の掘削	処分坑道にPEM 定置・間隙の充填	処分坑道端部にプラグ設置	プラグ撤去、充填材撤去、一部PEM 回収、埋戻し	主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道の埋戻し、プラグ	モニタリング停止 事業廃止	
処分場スケール	 <p>【処分場スケールでの状態変遷】</p> <p>T: 岩盤温度 H: 飽和、初期間隙水圧 M: 初期岩盤応力 C: 還元雰囲気</p> <p>・平野、堆積岩、深度500m、塩水環境 ・平面6パネルで順次建設⇒定置⇒回収可能性の維持⇒埋戻し・閉鎖</p>	<p>T: 換気⇒処分場周辺岩盤の温度低下 H: 排水⇒処分場周辺の間隙水圧低下⇒不飽和領域の発生⇒処分場周辺の地下水流動系変化 M: 掘削⇒坑道周辺の応力解放⇒EDZの発生と坑道に沿っての連結⇒支保工設置⇒変形停止⇒応力回復 C: 換気・排水⇒岩盤内の酸化領域の発生</p>	<p>T: PEM 定置・充填⇒換気停止⇒発熱による温度の上昇、開放坑道の換気⇒温度低下 H: PEM 定置・充填⇒間隙水圧の回復+一部開放坑道の排水⇒間隙水圧低下⇒不飽和領域の拡大 M: EDZの残存、PEM 定置・充填⇒岩盤クリープ変形⇒応力再配分 C: 地下水流動場の変化⇒換気・排水エリアの酸化領域の拡大(地下水特性と運動)</p>	<p>T: PEM の発熱⇒温度の上昇、開放坑道の換気⇒周辺岩盤温度の低下 H: 処分坑道の閉鎖⇒排水停止⇒間隙水圧の回復⇒飽和プロセス、開放坑道の排水継続⇒不飽和領域の残存 M: EDZの残存、処分坑道周辺⇒岩盤クリープ変形⇒応力の再配分 C: 坑道周辺の水理条件⇒酸化領域の残存⇒還元雰囲気に変化、支保工の劣化⇒高pH 間隙水の発生</p>	<p>【PEM回収は処分坑道単位で実施されるため、処分場スケールでの状態変遷への影響程度は限定される】 T: 周辺岩盤温度 H: 飽和過程の継続 M: EDZの残存、応力の再配分 C: 還元雰囲気への移行過程、酸化領域の残存、支保工等のコンクリート材料劣化⇒ガス発生、高pH 間隙水の発生</p>	<p>T: 開放坑道の埋戻し・閉鎖⇒周辺岩盤温度に移行 H: 開放坑道の埋戻し・閉鎖⇒排水停止⇒間隙水圧の回復⇒処分場規模で飽和プロセス M: 開放坑道の埋戻し・閉鎖により周辺の応力の回復 C: 水理場の回復⇒還元雰囲気への回復、補強材の劣化⇒高pH 間隙水の存在、水素ガス発生</p>	<p>T: 処分場規模⇒周辺岩盤温度 H: 処分場規模で水理地質環境の回復(不飽和領域の残存の可能性) M: 坑道周辺の応力の回復(元に戻るかどうかは不明) C: 水理条件の回復に伴い還元雰囲気への回復(酸化領域が残存する可能性は否定できない)、高いpH 間隙水の存在、水素ガス発生</p>	<ol style="list-style-type: none"> ① 処分場の建設による換気・排水⇒初期状態のTHMCの変化 ② PEM・充填材の設置⇒THMCの変化(①の状態への移行) ③ PEM・充填材の回収⇒回収対象パネル周辺のTHMCの変化 ④ 埋戻し・閉鎖による換気・排水の停止⇒THMCの変化、補強材の劣化に伴う処分場スケールでの化学環境の変化
処分パネルスケール	 <p>【パネルを構成する要素】</p> <p>・母岩: 数100m四方 ・主要坑道 ・処分坑道 ・プラグ ・PEM、充填材</p> <p>処分坑道建設後、PEMの定置、充填材の設置が複数坑道で並行して実施。定置後端部にプラグの設置、主要坑道、連絡坑道は開放維持</p>	<p>T: 掘削・換気⇒岩盤温度の低下 H: 掘削・排水⇒間隙水圧低下⇒不飽和領域の発生 M: 掘削⇒応力開放(EDZの発生)、支保設置⇒変形停止⇒背面応力の回復 C: 排水・換気⇒地下水場の変化⇒酸化領域の拡大</p>	<p>T: PEM 定置・充填⇒発熱⇒パネルエリアの温度上昇、開放坑道での換気⇒温度低下 H: PEM 定置・充填⇒処分坑道の排水停止⇒地下水の浸透⇒飽和過程、開放坑道の排水⇒周辺の不飽和領域の残存 M: EDZの残存、PEM 定置・充填⇒パネル規模での応力回復、開放坑道⇒クリープ変形による背面応力回復 C: 地下水流動場の変化⇒酸化領域の縮小、ロックボルトの腐食劣化⇒ガス発生</p>	<p>T: PEM 定置・充填⇒発熱低下⇒岩盤温度に移行 H: 処分坑道の間隙水圧の回復⇒飽和過程、開放坑道の排水⇒周辺の不飽和領域の残存 M: EDZの残存、処分坑道周辺岩盤の応力回復、開放坑道⇒クリープ変形による背面応力回復 C: 地下水流動場の変化に対応して酸化領域の縮小、ロックボルトの腐食劣化⇒ガス発生</p>	<p>【パネル1枚分のPEMを撤去すると仮定】 T: 回収に伴う処分坑道の換気⇒パネル周辺温度の低下 H: 回収に伴う処分坑道の排水⇒回収パネル周辺の不飽和領域の発生 M: 回収に伴う支保の補強⇒EDZ内の応力低下⇒変形停止⇒応力回復 C: 回収に伴う換気・排水⇒酸化領域の拡大</p> <p>*発生する影響は回収する規模に依存</p>	<p>【回収パネル、開放坑道の埋戻し・閉鎖】 T: 埋戻しに伴う換気・排水の停止⇒回収パネルを含めて周辺岩盤温度に移行 H: 埋戻しに伴う排水の停止⇒地下水の浸透⇒飽和過程 M: EDZの残存、埋戻し⇒岩盤応力の回復 C: 還元地下水の浸透⇒還元環境への移行</p>	<p>T: 各パネル⇒周辺岩盤温度に移行 H: 処分場規模で水理地質環境の回復(不飽和領域の残存の可能性) M: 坑道周辺の応力の回復(元に戻るかどうかは不明) C: 水理条件の回復に伴い還元雰囲気への回復(酸化領域が残存する可能性は否定できない)、高いpH 間隙水の存在、水素ガス発生</p>	<ol style="list-style-type: none"> ① 処分坑道の掘削・排水・換気⇒初期状態のTHMCの変化 ② PEM・充填材の設置⇒パネル領域でのTHMCの変化 ③ 一部PEM・充填材の回収⇒回収パネルのTHMCの変化 ④ 回収後の埋戻し・閉鎖⇒換気・排水の停止⇒THMCの初期状態への移行、補強材の劣化、パネル領域での化学環境の変化
処分坑道スケール	 <p>【PEM 定置周辺岩盤の初期条件】</p> <p>T: 岩盤温度 H: 飽和、初期間隙水圧 M: 初期岩盤応力 C: 還元雰囲気</p> <p>【PEMの初期仕様】 ・鋼製外殻+EBS 【充填材の初期仕様】 ・ベントナイトペレット ・不飽和</p> <p>PEMの定置は、主要坑道からアプローチ、複数定置後に間隙を充填</p>	<p>T: 掘削・換気⇒周辺岩盤温度の低下 H: 掘削・排水⇒周辺の間隙水圧低下⇒不飽和領域発生 M: 掘削⇒応力低下⇒EDZ発生、支保設置⇒変形停止⇒背面応力回復 C: 排水・換気⇒酸化環境</p>	<p>T: PEM 定置⇒発熱⇒周辺岩盤温度の上昇 H: PEM 定置・充填⇒排水停止⇒周辺地下水の浸透⇒飽和過程 M: EDZの残存、充填⇒応力再配分 C: 還元地下水の浸透⇒還元環境に移行</p>	<p>T: PEM 定置⇒発熱低下⇒周辺岩盤温度に移行 H: 周辺地下水の浸透⇒飽和過程の進行 M: EDZの残存、充填、膨潤圧⇒応力再配分 C: 還元地下水の浸透⇒還元環境に移行</p>	<p>T: 回収に伴う換気⇒処分坑道の温度低下 H: 回収に伴う排水⇒坑道周辺に不飽和領域の発生 M: 充填材撤去⇒支保の補強⇒周辺岩盤応力の再配分 C: 排水・換気⇒坑道周辺に酸化領域の発生</p> <p>充填材の撤去 PEMの回収</p>	<p>T: 埋戻し・換気停止⇒岩盤温度に移行度 H: 埋戻し・排水停止⇒地下水の浸透⇒飽和過程 M: 埋戻し⇒坑道周辺の応力回復、EDZは残存 C: 還元地下水の浸透⇒酸化から還元環境への移行</p>	<p>T: 周辺岩盤温度 H: 地下水の浸透⇒飽和過程 M: 応力回復、残置されたベントナイトの飽和⇒膨潤圧の発生 C: 飽和、還元環境、支保工等の補強材の劣化⇒高pH 間隙水、ガス</p>	<ol style="list-style-type: none"> ① 処分坑道掘削・排水・換気⇒初期状態のTHMCの変化 ② PEM・充填材の設置による換気・排水の停止、空間の充填⇒THMCの変化 ③ 一部のPEMと充填材の回収⇒換気・排水・空洞維持⇒THMCの変化 ④ 埋戻し・閉鎖⇒換気・排水の停止⇒初期状態のTHMCに移行、補強材の劣化、PEM部材、バリア材の劣化⇒化学環境の変化

2) 坑道スケールでの状態変遷表

他の検討ケースへの展開を考慮して、坑道スケールの変遷に着目し、坑道周辺母岩の特性変化と PEM の性能変化に関する状態変遷表を作成する。

a 回収しない場合

基本ケースでは PEM 定置後埋戻しされていることから、回収可能性維持の影響は回収維持を想定しない場合の閉鎖までの変遷と同様になる（表 2.3.2-7）。建設・定置作業中に発生する擾乱が埋戻しとともに安定化していくプロセスを記述することになる。処分坑道周辺の主要坑道が開放されたとしてもその影響は局地的で処分坑道の PEM に影響を与えることはない。

表 2.3.2-7 処分坑道での状態変遷（回収しない場合）

1. 掘削前	2. 坑道掘削・支保設置	3. PEM定置・埋戻し	4. 状態維持	5. 閉鎖
				
新第三紀堆積岩の初期特性	坑道掘削による支保工設置・換気・排水	PEM定置・埋戻しで換気・排水の停止	主要坑道、連絡坑道の開放	全ての坑道の埋め戻し、閉鎖
(T): 熱 ・岩盤初期温度:30℃	・岩盤温度の低下	・PEMの発熱での岩盤周辺温度上昇	・発熱低下⇒周辺岩盤温度に回復	・周辺岩盤温度に回復
(H): 水理 ・飽和状態 ・沿岸平野での地下水流動系	・坑道周辺の間隙水圧低下⇒不飽和領域の発生⇒地下水流動系変化	・間隙水圧の上昇⇒地下水の坑道内への浸入⇒飽和に移行⇒地下水流動系の回復	・間隙水圧の回復⇒不飽和領域が飽和に移行	・間隙水圧の回復⇒不飽和領域が飽和領域に移行
(M): 力学 ・初期岩盤応力	・坑道周辺の応力低下(EDZ発生) ・支保設置で変形停止(応力の均衡)	・EDZ内応力の均衡(クリープ変形での応力回復/支保と埋戻し材内部応力)	・クリープ変形、埋戻し土への応力分散⇒初期応力に回復、EDZは残存	・クリープ変形、埋戻し土への応力分散⇒初期応力に回復、EDZは残存
(C): 地化学 ・還元雰囲気 ・中性 ・嫌気性微生物	・酸化領域の発生+微生物⇒支保工の腐食、変質⇒ガス、高pH間隙水の発生	・酸化⇒還元雰囲気に移行 ・支保の腐食・変質⇒ガス、高pH間隙水	・還元雰囲気に移行⇒支保工の腐食、変質⇒ガス、高pH間隙水の発生	・還元雰囲気に移行⇒支保工の腐食、変質⇒ガス、高pH間隙水の発生
PEMへの影響(回収維持期間中健全)		PEM外殻の腐食⇒ガス発生	PEM外殻の腐食⇒ガス発生	PEM外殻の腐食⇒ガス発生

b 回収する場合

回収可能性を維持している期間で PEM を回収する場合、埋め戻されていた処分坑道は再掘削されることになる（表 2.3.2-8）。この時の坑道周辺母岩の特性への擾乱は、建設段階でのそれと類似なものとなるが、その程度は、定置・埋戻し時の回復プロセスの途中での擾乱となることから複雑なプロセスとなる。PEM 回収後速やかに坑道が埋め戻されると、擾乱は短期間で局地的なものとなり、全体としては安定化に向けてのプロセスが支配すると推定される。

表 2.3.2-8 処分坑道スケールでの状態変遷（回収する場合）

1. 掘削前	2. 坑道掘削・支保設置	3. PEM設置・埋戻し	4. 坑道掘削・PEM回収	5. 坑道埋戻し
 <p>新第三紀堆積岩</p>				
新第三紀堆積岩の初期特性	坑道掘削による支保工設置・換気・排水	PEM設置・埋戻しして換気・排水停止	PEM回収に伴う埋戻し材撤去・換気・排水	換気・排水停止・処分坑道の埋戻し
(T): 温度 ・岩盤初期温度:30°C	・坑道開放⇒岩盤温度の低下	・PEMの発熱での岩盤温度上昇	・坑道開放⇒岩盤温度の低下	・埋戻し⇒初期岩盤温度に移行
(H): 水理 ・飽和状態 ・沿岸平野での地下水流動系	・坑道周辺の間隙水圧低下⇒不飽和領域の発生⇒地下水流動系変化	・間隙水圧の上昇⇒地下水の坑道内への浸入⇒飽和に移行⇒地下水流動系の回復	・坑道周辺の間隙水圧低下⇒不飽和領域の発生⇒地下水流動系変化	・排水停止⇒間隙水圧の上昇⇒地下水の坑道内への浸入⇒飽和に移行
(M): 力学 ・初期岩盤応力	・坑道周辺の応力低下(EDZ発生) ・支保設置で変形停止(応力の均衡)	・EDZ内応力の均衡(クリープ変形での応力回復/支保と埋戻し材内部応力)	・EDZ内での応力低下(支保の残留強度に依存)⇒応力均衡	・応力均衡は、支保の健全性喪失に伴い初期応力に移行
(C): 地化学 ・還元雰囲気 ・中性 ・嫌気性微生物	・酸化領域の発生+微生物⇒支保工の腐食、変質⇒ガス、高pH間隙水の発生	・酸化⇒還元雰囲気に移行 ・支保の腐食・変質⇒ガス、高pH間隙水	・酸化領域の発生⇒支保工の腐食、変質⇒ガス、高pH間隙水の発生	・地下水流入⇒酸化⇒還元雰囲気に移行 ・支保の腐食・変質⇒ガス、高pH間隙水
PEMへの影響(回収維持期間中の健全性確保)	—	PEM外殻の腐食⇒ガス発生	PEM外殻の腐食⇒ガス発生(期間によっては損傷の可能性)	—

(4) プロセス・インフルエンス・ダイアグラムの作成

1) プロセス・インフルエンス・ダイアグラム (PID) の役割

プロセス・インフルエンス・ダイアグラム (Process Influence Diagram: PID) は、回収可能性維持の影響検討の流れの中で、影響評価に用いるシナリオ作成のために、状態変遷表をベースに関連する FEP を時系列的に関連図として明示するものである。

PID を用いて、着目する変遷プロセスを記述した「シナリオ」を作成し、PID に示された FEP 相互の関連を用いて状態変遷の「プロセス・モデル：変遷の定量評価を行うためのモデル」を構築することができる。PID は、着目する状態変遷に係る専門家によって構築される。定量化に向けてのプロセス・モデルがない場合は、PID に示された FEP の時系列的な関連性を考慮したモデルを開発することになる (図 2.3.2-11)。

PIDの例

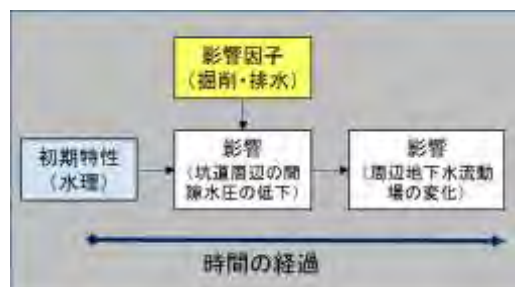


図 2.3.2-11 PID の例

2) 回収可能性を維持しつつ回収しない場合の PID

回収可能性を維持しつつ、最終的には回収せず処分場を閉鎖する場合の PID では、初期の坑道周辺岩盤特性が、建設・操業時に擾乱を受け、PEM 定置後の埋戻しにより安定化に向かう領域と一部の坑道を閉鎖まで開放しておくことでの閉鎖後の母岩特性への影響伝搬を示すように作成される。図 2.3.2-12 に PID の枠組みを示す。このような PID を処分場、パネル、坑道といった異なるスケールで作成する（図 2.3.2-13）。

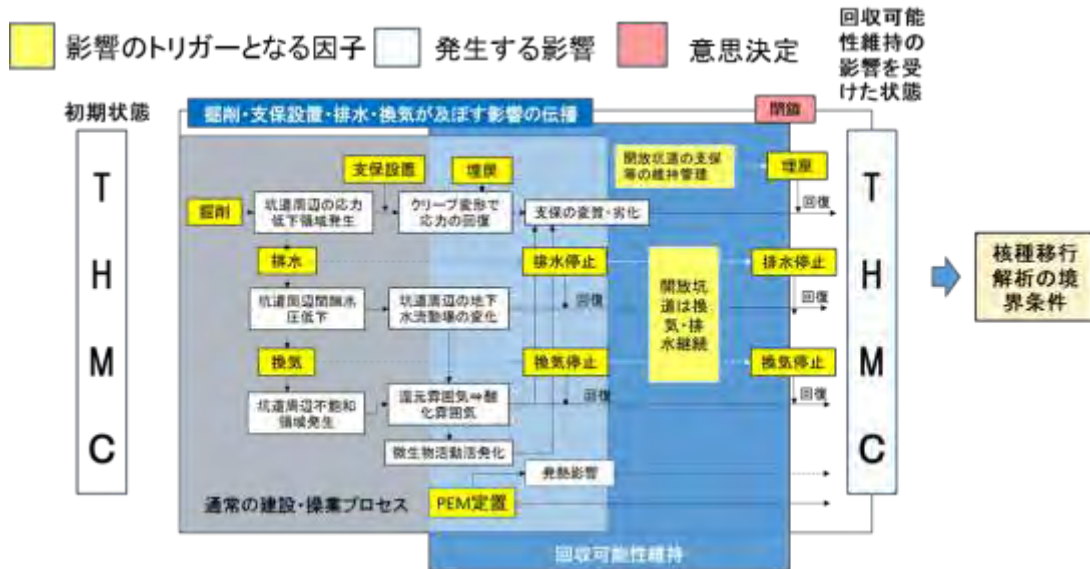


図 2.3.2-12 回収しない場合の PID の枠組み



図 2.3.2-13 異なるスケールへの PID の展開

3) 回収可能性を維持しつつ PEM を回収する場合の PID

回収可能性を維持しつつ PEM を回収する場合の閉鎖後の母岩特性への影響伝搬を示す PID は、通常建設・操業（廃棄体定置と処分坑道の埋戻し・プラグ設置）までの状態を、50 年程度維持

することによる処分坑道周辺の母岩の特性の変化と回収することによる坑道周辺母岩への影響を組合せた形で表わす。発生する全ての影響は時間の係数となり、スケールによって異なる。図 2.3.2-14、図 2.3.2-15 に PID の枠組みを示す。

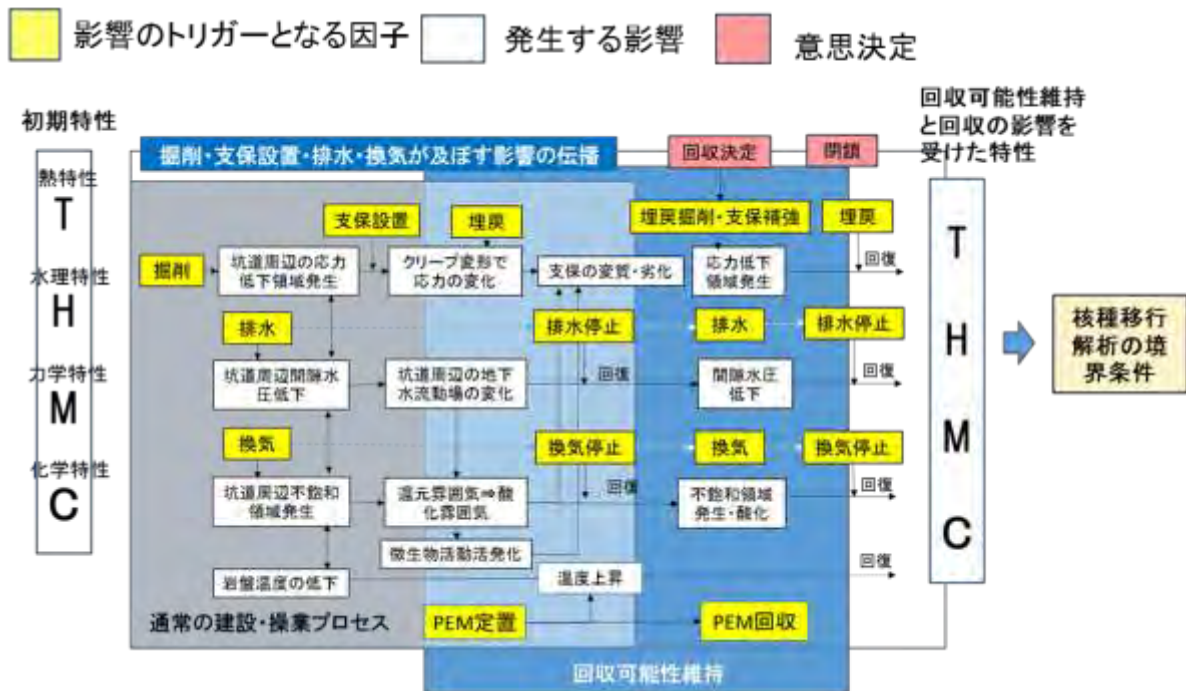


図 2.3.2-14 回収する場合の PID の枠組み

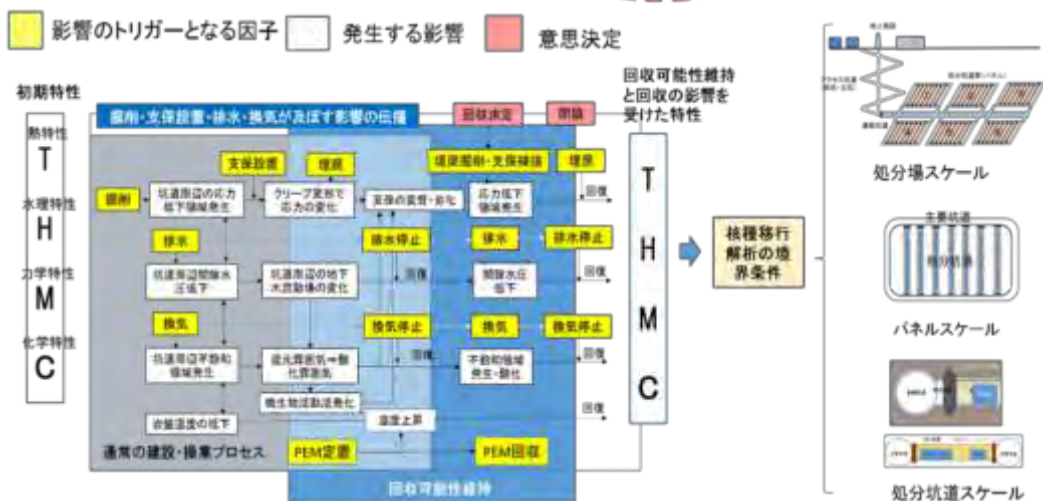


図 2.3.2-15 回収する場合の PID の異なるスケールへの展開

4) 基本ケースにおける処分坑道スケールでのPID作成例

1)～3)で提示したPIDの枠組みに従い、基本ケースにおける処分坑道スケールに展開したPIDの作成例を図 2.3.2-16 に示す。PIDでは処分坑道周辺母岩の初期特性（力学特性、水理特性、化学特性、温度特性）が、処分坑道の掘削、PEMの定置・埋戻し、回収維持期間中のPEM回収、処分場の閉鎖等の行為（影響因子）によってどのように変化していくのかを時系列を考慮して系統的に整理している。それぞれの特性は、相互に関係していることもあり、矢印でその関係を明示する。処分坑道に定置されたPEMの鋼製外殻は、埋戻し段階から腐食が開始し、回収する段階では水素ガスを発生している。

平成27年度に実施した縦置きブロック方式のPIDとの違いは、図中赤点線で示した範囲が異なるだけで、残りは同じとなる。

回収可能性を維持しつつ回収する場合の処分スケールおよびパネルスケールでのPIDをそれぞれ図 2.3.2-17、図 2.3.2-18 に示す。これらは、基本的に平成27年度に検討した縦置きブロック方式と同様になる。

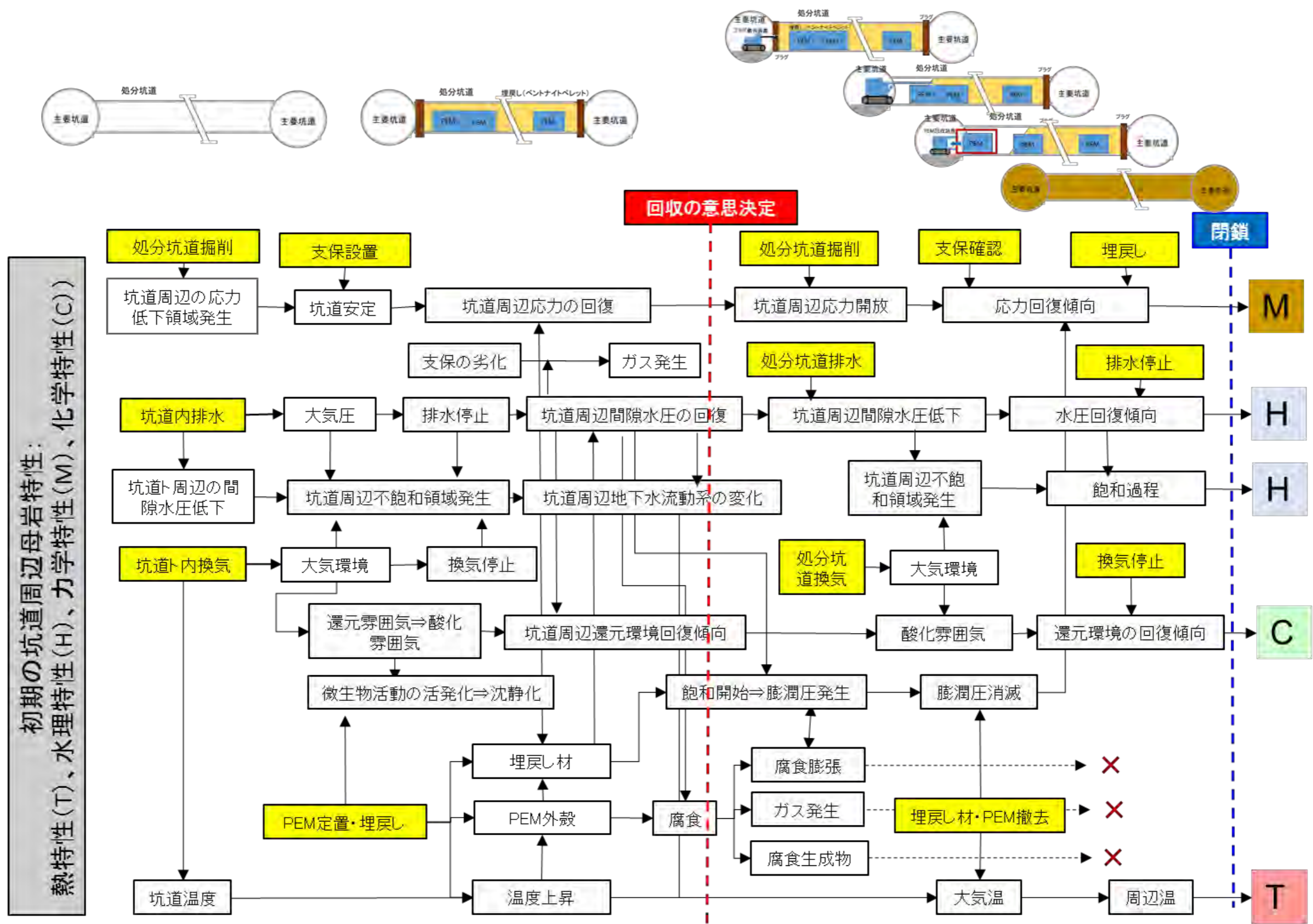


図 2.3.2-16 基本ケース：処分坑道スケールでの PID 作成例（回収する場合）

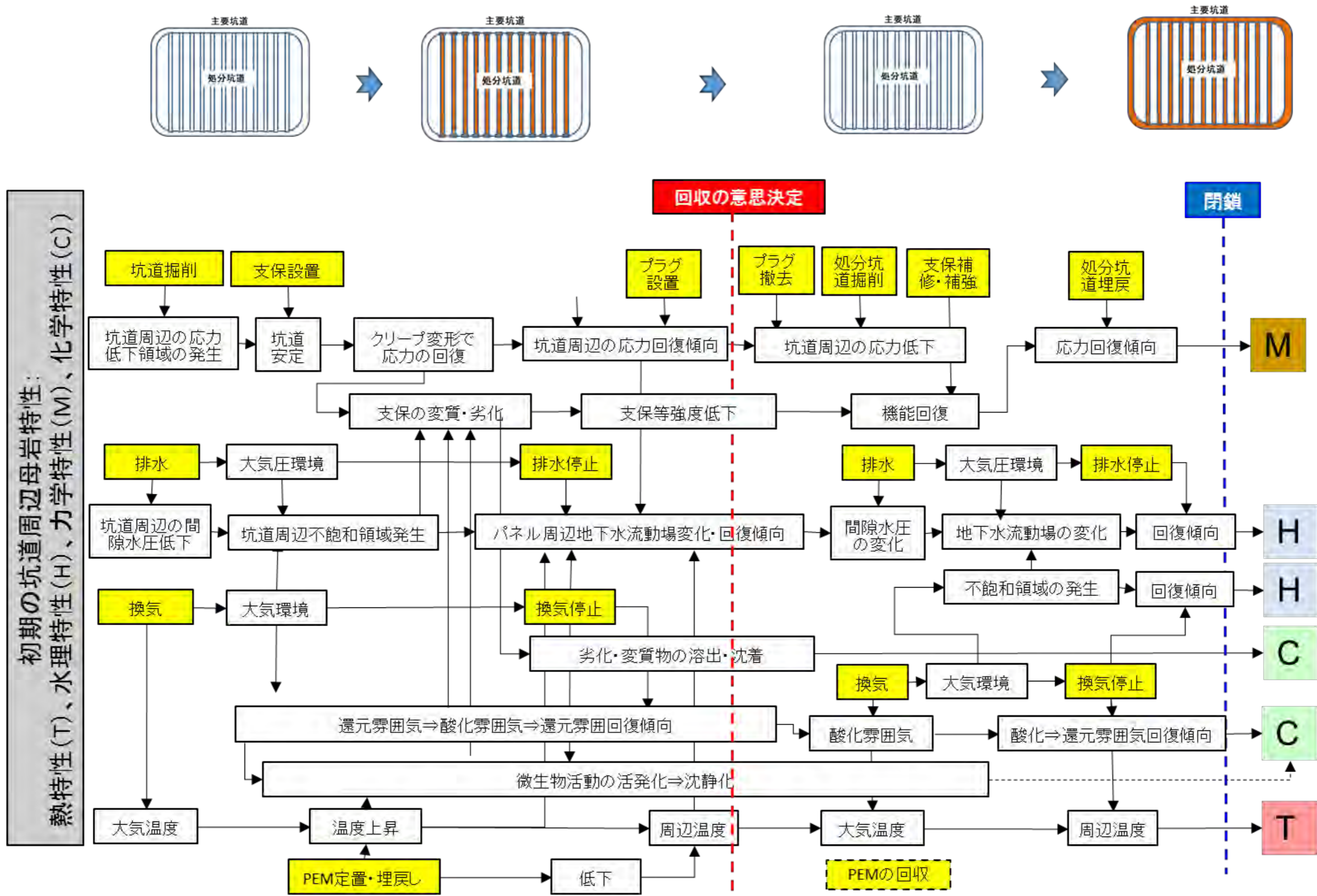


図 2.3.2-17 基本ケース：パネルスケールでのPID 作成例（回収する場合）

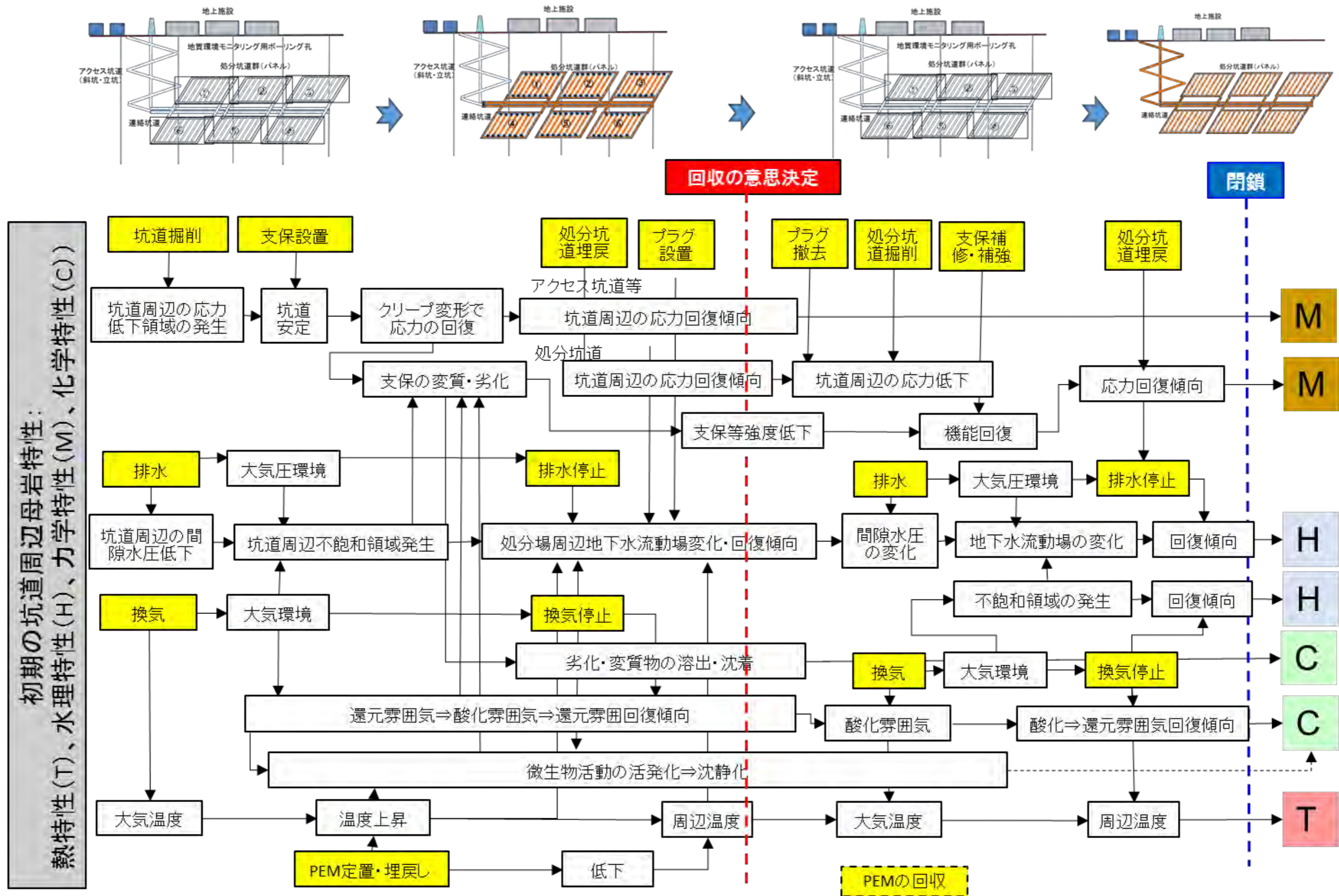


図 2.3.2-18 基本ケース：処分場スケールでのPID作成例（回収する場合）

(5) 閉鎖後の影響評価シナリオの作成

1) 評価シナリオ作成の考え方

影響評価のシナリオは、通常、状態変遷をベースに安全性に係る重要な FEP を文書で結びつけた形で表わす。つまり、(4)で作成した PID を文書で説明することになる。

通常の安全評価シナリオは、閉鎖後の母岩や人工バリアの状態をベースに安全機能と呼ばれる安全確保上の要素の変遷をベースに核種移行のプロセスを記述したものとなる。

本検討での影響評価シナリオは、安全評価の前提となる母岩の特性 (THMC) や人工バリアの初期品質が回収可能性を維持することで、どのような影響を受けて変化するかを評価するために、時間経過を考慮した PID を用いて作成する。これらの影響(定量的な評価と不確実性の存在明示)が核種移行に与える影響については、別途実施する核種移行解析で明らかとなる。

建設前の母岩や人工バリアに期待する性能として、例えば、図 2.3.2-19 の左に示す「母岩の好ましい特性」や「緩衝材の技術要件」がある。母岩の好ましい特性は、地層処分場を立地する母岩の熱、力学、水理、化学特性としてサイト調査結果をもとに処分場の建設前の初期特性値として設定される。このような初期特性や初期性能が、処分場の建設、廃棄体の定置、回収可能性の維持に係わる行為(擾乱を引き起こす影響因子)によってどのように変化するかを系統的に示したのが PID となる。

回収可能性維持は閉鎖の決定を持って終了し、処分場は埋め戻され閉鎖される。長期の安全評価では、初期の母岩の特性や人工バリア性能が擾乱を受けたのち、安定した状態に回復することを前提に進められる。現在の安全評価では、第 2 次取りまとめでの前提を踏襲し、定置後 1000 年経過した時点で、オーバーパックの放射性物質閉じ込め機能が喪失し、核種がバリア内に放出され、母岩の中を地下水とともに移行することを基本シナリオとしている。この場合、母岩の特性は初期特性の安定した状態を仮定している。

建設前の母岩や人工バリアの初期性能

建設・操業＋回収可能性維持による変化

安全評価の前提となる母岩やバリア初期性能

表 6.2.2-4 母岩の好ましい特性

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
力学場	坑道の力学的安定性が確保できるとともに、閉鎖後の処分場とその周辺の力学場が人工バリアの安定性に適していること
水理場	閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流動が小さく、緩慢であること
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と人工バリアの安定性に適していること

表 6.2.2-9 緩衝材の技術要件（基本的なバリア性能の確保）

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	移流による移行の抑制	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抑制すること	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抑制すること	緩衝材の設計（材料設計、形状・厚さの設計）
	収着による放射性物質の移行遅延	収着性	ガラス固化体から溶出した放射性物質を収着することにより遅延すること	緩衝材の設計（材料設計）



【PIDで特に着目する事項】
建設・操業段階での影響
＋坑道を開放状態で維持した場合の影響（維持・補修による影響も含む）

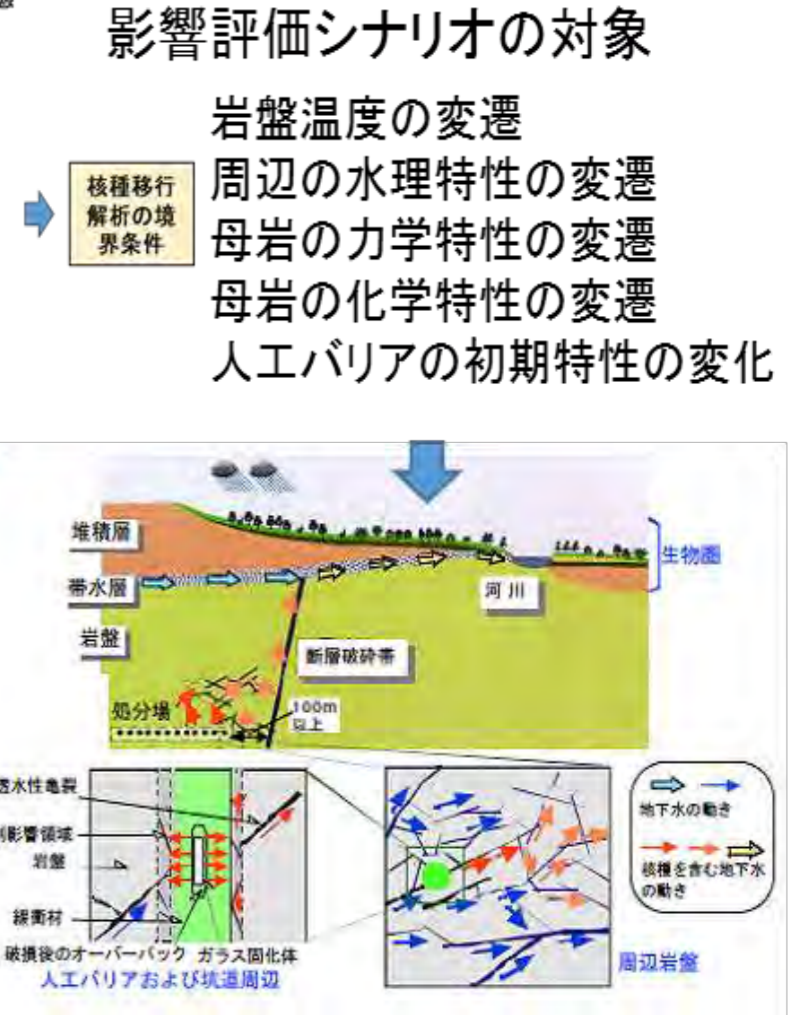


図 2.3.2-19 PID を用いた影響評価シナリオ作成の流れ

2) 影響評価シナリオの作成

基本ケースをベースに坑道周辺母岩の特性と人工バリアの性能の変化を評価するための影響評価シナリオを以下に作成した。いずれのシナリオも前提とする処分場の状態オプションと回収可能性維持期間により変化する。

a 坑道周辺母岩の特性への影響

【温度特性に係る影響シナリオ】

坑道周辺の母岩の初期温度は、坑道掘削による換気で坑内温度に低下する。埋め戻された処分坑道では、換気・排水が停止し、ガラス固化体の発生する熱により上昇するが、発熱の低下で岩盤温度に移行していく。この間、廃棄体の回収があれば、坑道周辺は開放されることで再度温度が下がるが、埋戻し後に周辺岩盤温度に移行していく。

【水理特性に係る影響シナリオ】

坑道周辺の母岩の水理特性は、掘削と排水により坑道周囲の間隙水圧が低下し、地下水流動方向（流線）が変化するとともに坑道周囲に発生する掘削影響領域の透水係数が大きくなり、坑道延長に沿って移動する地下水流動が新たに発生する可能性がある。また、換気の影響を受けて坑道周辺には不飽和領域も発生する。これらの変化は、坑道の埋戻しとともに回復すると推定されるが、変化の大きさと範囲によっては回復に時間がかかる可能性がある。

【力学特性に係る影響シナリオ】

坑道周辺の母岩には、坑道掘削による応力開放により「掘削影響領域：EDZ」が発生する。このような影響には、応力緩和と損傷のモードがある。損傷の場合は、坑道周辺の岩盤力学特性（強度や変形特性など）が低下する。この低下は、坑道内が埋め戻されても回復する可能性は低い。応力緩和は、母岩の初期応力が掘削により低下する減少であり、岩盤の種類にも依存するがクリープによる応力再配分が発生し、長い時間をかけて初期応力に回復する可能性がある。

【化学特性に係る影響シナリオ】

坑道周辺の化学特性（pHとEh）は、坑道の掘削に伴う換気・排水および支保等の坑道安定性確保対策の影響を受ける。特に排水と換気により、本来還元領域であったものが酸化領域に変化する。また、コンクリート製の支保の劣化に伴い周辺間隙水（中性）が高pHの特性に変化する。このような影響の内、酸化環境は坑道の埋戻しに伴う周辺還元地下水の浸入により還元環境に回復していくことが推定される。高pHの影響は支保が残存することから長期にわたり継続する。また、この間、微生物の活動もプロセスに考慮する必要がある。

b 人工バリア性能への影響

【PEMのバリアの性能への影響シナリオ】

緩衝材とオーバーパックが鋼製の外殻に格納されたPEMの場合、外殻の腐食により損傷に至る可能性があるが、PEMの存在そのものが回収可能性維持期間に周辺母岩の特性に影響を与えることはなく、また、殻が健全である期間であれば、PEM内部の人工バリア特性が坑道の開放や再掘削の影響を受けない。

2.3.3 回収可能性維持の影響検討

回収可能性維持の影響分析は、2.3.2 項で整理した手法と影響評価シナリオを用い、基本ケースとその他のケースの定性的な評価を実施し、検討ケース相互の影響比較を行うとともに、影響低減の方策について検討する（図 2.3.3-1）。影響低減の方策（予防、防止、緩和、低減）の内、技術的な方策は、2.3.4 項の要素技術マップ作成に反映させる。

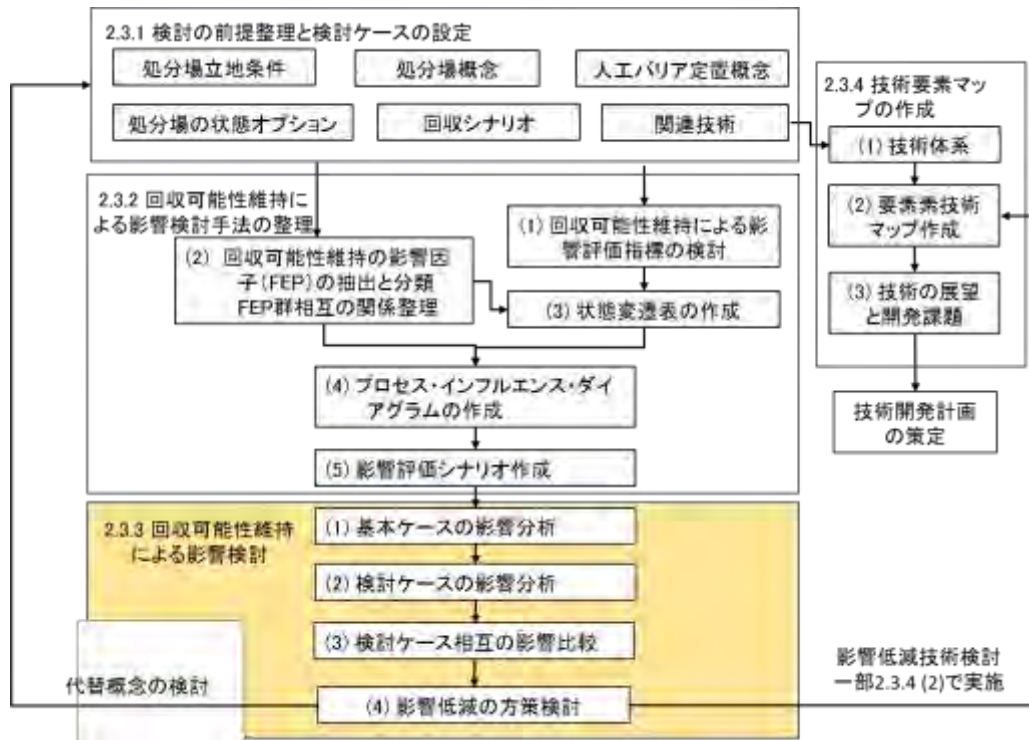


図 2.3.3-1 回収可能性維持による影響検討

(1) 基本ケースの影響分析

基本ケースの影響分析は、図 2.3.3-2 の流れに沿って、閉鎖前の影響と閉鎖後への影響に分けて実施する。閉鎖前の影響は、回収可能性維持によるものと回収する場合の影響があり、閉鎖後の影響は、前項で検討した PID に沿った母岩特性への影響を定性的に検討することになる。

基本ケースの影響検討は、閉鎖前の影響と閉鎖後の影響に分けて実施する。閉鎖前の影響は、回収可能性維持によるものと回収する場合の影響があり、閉鎖後の影響は、前節で検討したPIDに沿った影響を定性的に検討することになる。

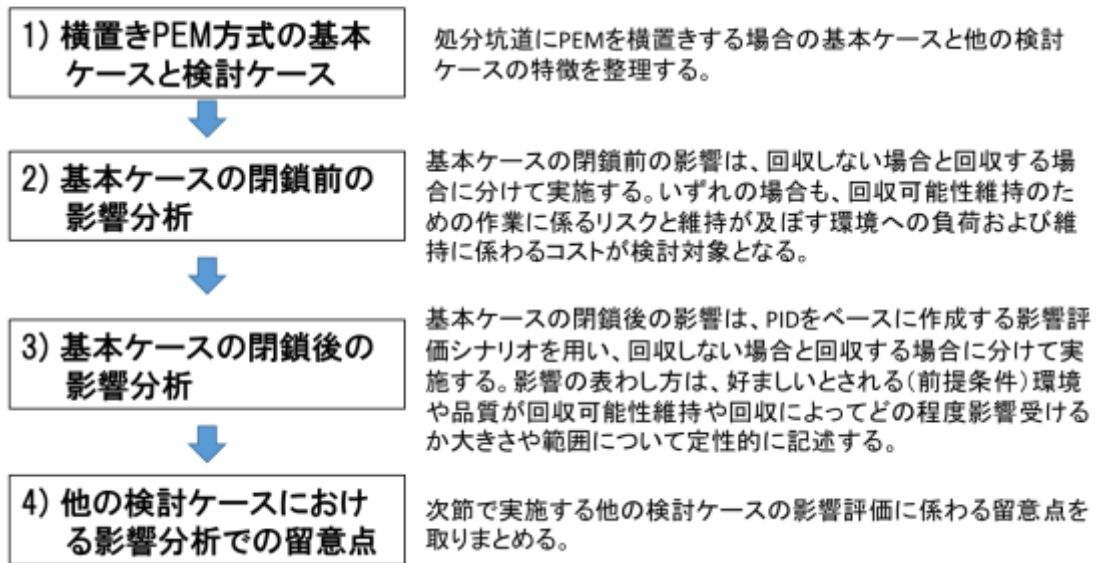


図 2.3.3-2 基本ケースの影響分析の流れ

1) 横置き PEM 方式の基本ケースと検討ケースの前提再整理

基本ケースと他のケースの回収可能性維持の影響分析を実施する前、これまで前提として提示してきた条件を再整理して図 2.3.3-3 に示す。

- ✓ 横置きPEM方式を対象に回収可能性維持の影響検討では、3.3節で設定した手法に基づき、定性的な影響を求める。ここでの定性的とは、異なる種類の影響の程度(大きさや範囲)と不確実性について言及する。
- ✓ これらの影響の大きさや範囲は、処分場の立地条件、処分場概念、着目するスケール、処分場の状態、回収維持期間により異なる。

沿岸平野、堆積層500m
 斜坑と立坑アクセス、平面パネル配置

状態オプション

回収シナリオ(維持期間)

基本ケースと検討ケース(O)

	回収シナリオ①	回収シナリオ②	回収シナリオ③	回収シナリオ④
状態オプション①		○		
状態オプション②	○	基本ケース	○	○
状態オプション③		○		

PEM(Prefabricate EBS Module)概念

図 2.3.3-3 基本ケースと他の検討ケースの前提条件の整理

2) 基本ケースの閉鎖前の影響分析

基本ケースの回収可能性維持に伴う閉鎖までの影響は、図 2.3.3-4 に示すように回収維持作業に伴う影響と回収作業に伴う影響に分けて検討する。これらの影響の程度（大きさや範囲）は、処分場の立地環境や処分場概念および回収可能性維持期間（本検討では回収シナリオ）によって異なる。

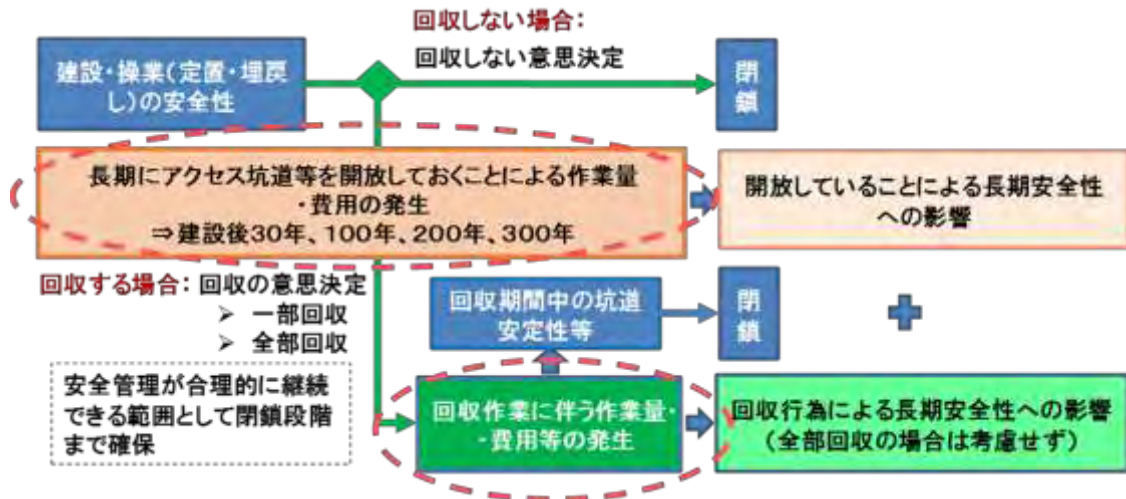


図 2.3.3-4 基本ケースの閉鎖前の影響分析の対象

a 回収可能性維持による影響：回収しない場合

基本ケースの回収可能性維持による閉鎖前影響とは、PEM が定置され、処分坑道が埋め戻された後、パネル周辺の主要坑道、パネルへの連絡坑道およびアクセス坑道が閉鎖まで 50 年間開放された状態におかれた場合の影響をいう。影響を分析・評価する指標としては、「作業量と作業の安全性確保」（これ以降、「作業」という）「環境負荷」「コスト」を用いる。

・作業：開放された坑道では、支保工や排水設備などの劣化が進み、力学的な安定性や湧水による水没の可能性が増加し、一般労働への作業の安全性確保の必要性が発生する。このような作業環境への対策として、支保工や設備の補修や更新が必要となる。

・環境負荷：坑道を開放しているため、換気・排水が継続され、地表で処理されることで廃棄物が発生する。さらに支保の補修等による残材発生による地表での環境への負荷が増加する。

・コスト：開放坑道の安定性維持や損傷部の補修など、作業環境維持のためのコストが発生する。これらのコストの中には、別途実施する影響低減のための対策（例えば、耐久性向上や換気・排水の処処理）に係る費用も含まれる。

【留意点】 上記の影響は、いずれも維持期間、開放坑道の延長に伴い増加していく。

b 回収可能性維持による影響：回収しない場合

基本ケースでは、廃棄体を定置したのち、処分坑道の間隙は埋め戻され、端部にはプラグ

が設置される。アクセス坑道、連絡坑道、主要坑道は開放された状態で維持される。このような状態で「廃棄体を回収する」場合の影響を分析する。回収時の影響は、図 2.3.3-5 に示すように回収維持の影響に付加されることになり、回収維持と同様に 3 種類の指標を使って記述する。

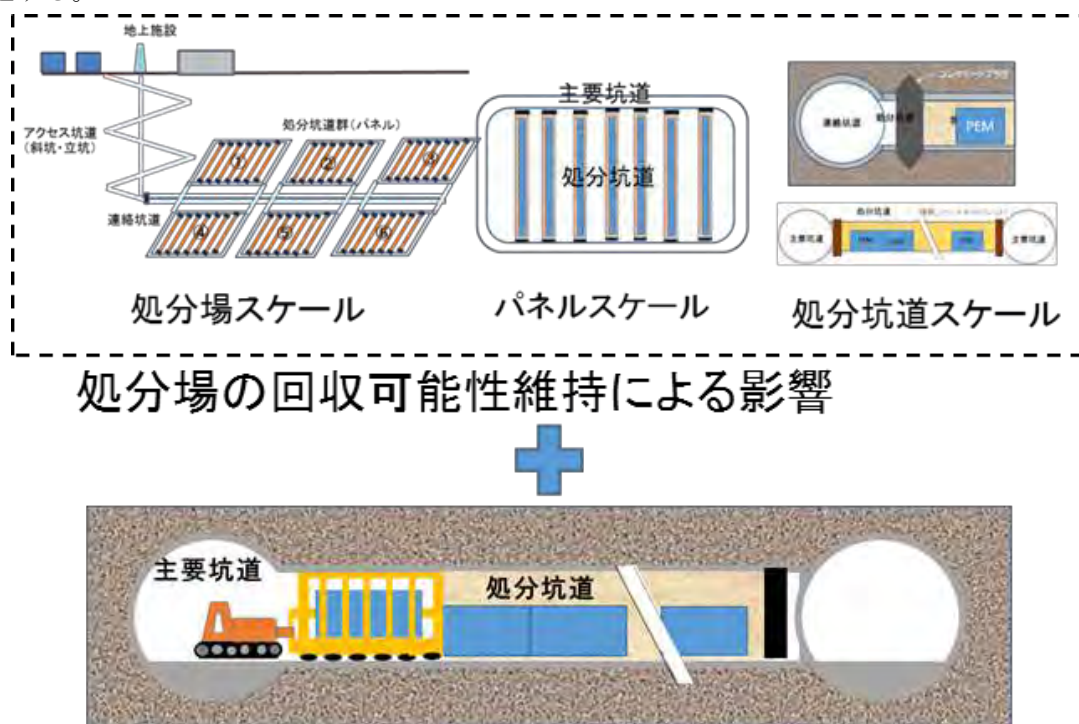


図 2.3.3-5 回収する場合の閉鎖前の影響

・作業：開放坑道の維持のための作業に加え、廃棄体の回収のために処分坑道を再掘削し、作業空間の安定性維持のための作業、および廃棄体を回収・搬出する作業が影響として追加して発生する。

・環境負荷：坑道を開放していることによる環境負荷に加え、廃棄体を回収することによる掘削土の発生、換気・排水量の増加、PEMに格納された放射性物質を地表に搬送し、貯蔵することによる環境負荷が大幅に増加する。

・コスト：開放坑道の安定性維持、環境維持のためのコストに加え、廃棄体を回収するためのコスト、地表での貯蔵等に関わるコストが大幅に増加する。

【留意点】

✓ 上記の影響の内、開放した坑道の維持に係るコストは維持期間に比例して増加し、さらに、回収に係る影響は、維持期間が長くなるほど、PEM 外殻の劣化や飽和進展に伴う支保の劣化、埋戻し材の膨張などで作業の困難さが増すことで増加する。

状態オプションの違いにより、開放坑道の延長が増加するほど作業量が増加し、リスク、環境負荷、コストが増加していくが、廃棄体の回収に伴う影響は開放坑道の延長が増加するほど作業量が削減され作業、環境負荷、コストが減少していくことになる。

3) 基本ケースの閉鎖後の影響分析

基本ケースの回収可能性維持に伴う閉鎖後の長期安全性への影響は、図 2.3.3-6 に示すように維持に伴う影響と回収作業に伴う影響に分けて分析する。これらの影響の程度（大きさや範囲）は、処分場の立地環境や処分場概念によって異なる。

PEM への影響は、処分坑道に定置後速やかに埋戻しされることから、回収可能性を維持していても閉鎖後の性能には影響を与えることはないと考えられることから分析の対象としない。

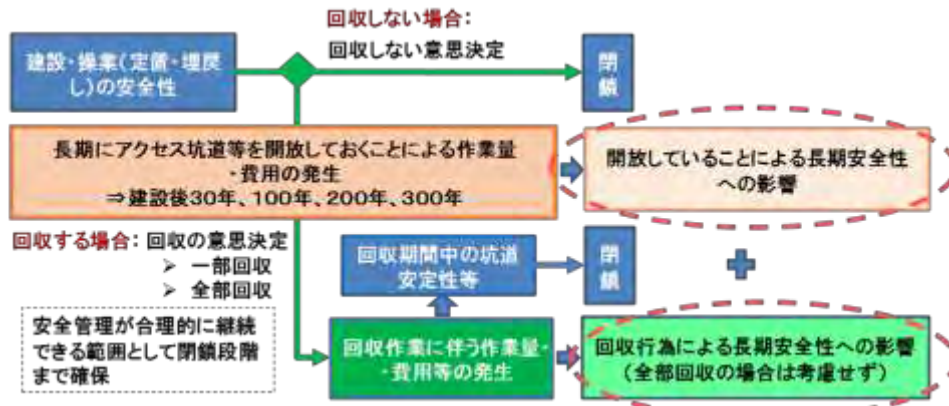


図 2.3.3-6 回収可能性維持の処分場閉鎖後の長期安全性への影響

a 閉鎖後の影響：回収しない場合

基本ケースの PID から設定した影響評価シナリオに基づき、回収可能性を維持した場合の閉鎖後の坑道周辺母岩への影響について、異なるスケールで定性的に分析した結果を表 2.3.3-1 に取りまとめた。人工バリアへの影響は PEM のため発生しない。

表 2.3.3-1 回収可能性維持の閉鎖後の影響（回収しない場合）

状態オプション②	温度(T)	水理(H)	力学(M)	地化学(C)
<p>処分場スケール</p>	<ul style="list-style-type: none"> 開放坑道の換気により岩盤は坑道温度に低下、埋戻しで一時温度上昇し、その後周辺岩盤温度に移行 	<ul style="list-style-type: none"> 開放坑道の換気・排水により坑道周辺に不飽和領域の発生 処分場スケールでは間隙水圧が回復し地下水流動系が回復 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道周辺に掘削影響領域が残存、処分場スケールでは応力の回復 	<ul style="list-style-type: none"> 処分場スケールでは地下水流動系の回復で還元雰囲気に移行
<p>パネルスケール</p>	<ul style="list-style-type: none"> パネル範囲は処分坑道埋戻しにより、廃棄体発熱と岩盤温度で温度上昇 時間の経過で岩盤温度に移行 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道埋戻しによりパネル全体で不飽和領域⇔飽和に移行 主要坑道周辺のみ不飽和、局地的水理場の擾乱が継続 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道周辺の応力場は埋戻しにより徐々に回復 EDZは存続 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道周辺は飽和によりパネルスケールで還元雰囲気に移行
<p>処分坑道スケール</p>	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道周辺は埋戻し後廃棄体からの発熱で上昇 時間の経過とともに岩盤温度に移行 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道埋戻しにより坑道周辺の間隙水圧は回復、地下水の浸入による埋め戻し度の飽和 局地的な地下水流動系は回復 	<ul style="list-style-type: none"> 埋戻しとクリーブにより坑道周辺応力回復、EDZは残存 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道周辺の水理場の回復により還元雰囲気は回復

b 閉鎖後の影響：回収する場合

基本ケースのPIDから設定した影響評価シナリオに基づき、回収可能性を維持しつつPEMを回収した場合の閉鎖後の坑道周辺母岩への影響について、異なるスケールで定性的に分析した結果を表2.3.3-2に取りまとめた。人工バリアへの影響はPEMのため発生しない。

表 2.3.3-2 回収可能性維持の閉鎖後の影響（回収する場合）

状態オプション②	温度(T)	水理(H)	力学(M)	地化学(C)
	 <p>処分場スケール</p>	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道の再掘削・埋戻しにより局部的に岩盤温度の低下 処分場全体では周辺岩盤温度に移行 	<ul style="list-style-type: none"> 再掘削に伴う換気・排水および埋戻しで局地的な水理場の変化、不飽和領域の発生 処分場スケールでは地下水流動系が回復 	<ul style="list-style-type: none"> 再掘削による坑道周辺の応力場の変化 埋戻しによる応力場の回復
 <p>パネルスケール</p>	<ul style="list-style-type: none"> パネル範囲は再掘削の換気により温度低下 埋戻しによる岩盤温度に移行 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道の再掘削でパネル全体が不飽和領域 坑道の埋戻しによる飽和状態に移行、局地的な水理場の擾乱も回復 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道の再掘削によるパネル領域全体の応力場の変化・埋戻しによる回復 EDZは存続 	<ul style="list-style-type: none"> 再掘削によるパネルスケールで酸化雰囲気 埋戻しにより還元雰囲気に移行
 <p>処分坑道スケール</p>	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道の再掘削による換気により温度低下 回収後の埋戻しにより岩盤温度に移行 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道の再掘削に伴う排水で建設時と同様間隙水圧の低下、不飽和領域発生 埋戻しにより回復 局地的な水理場の擾乱も徐々に回復 	<ul style="list-style-type: none"> 再掘削で応力低下、埋戻しとクリーブにより坑道周辺応力回復 EDZは残存 	<ul style="list-style-type: none"> 再掘削で酸化領域 廃棄体回収後の埋戻しで水理場の回復に伴い還元雰囲気に移行

4) 他の検討ケースにおける影響分析の留意点の整理

基本ケースを対象に閉鎖前と閉鎖後の定性的な影響を分析した。基本ケース以外の状態オプションと維持期間（回収シナリオ）をパラメータとして、他の検討ケースの影響を分析するに当たり、留意する事項を以下に整理する。

	回収シナリオ①	回収シナリオ②	回収シナリオ③	回収シナリオ④
状態オプション①		○		
状態オプション②	○	← 基本ケース →	○	○
状態オプション③		○		

【回収可能性維持期間が閉鎖前の影響に及ぼす要素】

状態オプション②を基軸として、回収可能性維持期間の違いによる閉鎖前の影響分析では、開放坑道の延長は変化しないが、開放期間が長くなることにより、坑道支保の劣化等が進行し、維

持・補修のための作業量が増加する。この状態で PEM を回収する場合、埋め戻し後維持をしていなかった処分坑道の再掘削での安定性確保の困難さが顕在化する。さらに期間が長くなると PEM の外殻が損傷する可能性が大きくなり、回収方法や作業手順を変更する必要性が発生する。

【状態オプションの違いが閉鎖前の影響に及ぼす要素】

回収維持期間を固定して、状態オプションの違いを考慮すると、開放坑道の延長が長くなることで坑道維持のための作業量が増加するとともに、落盤や剥落の危険性も増していく。一方、PEM を回収する場合は、開放坑道が増えるほど再掘削の作業量が減少することで回収の作業量が削減される。回収維持期間が同じであれば、PEM の回収・搬出に伴う作業はほぼ同じとなる。(開放環境の PEM と埋め戻された PEM の特性への影響の差は小さい)

【回収可能性維持期間が閉鎖後の影響に及ぼす要素】

状態オプション②を基軸として、回収可能性維持期間の違いによる閉鎖後の坑道周辺母岩の特性変化は、開放坑道が限定される(坑道延長が最も長いことで支配的となる処分坑道が埋戻しされているため)ことから、特性への影響は回収しない場合もする場合も局地的なものとなる。PEM は埋め戻されている環境にあるため、回収維持期間が変化しても閉鎖後への母岩特性に与える影響は想定する必要はない。

【状態オプションの違いが閉鎖後の影響に及ぼす要素】

回収維持期間を決めて、状態オプションが変化した場合の閉鎖後の影響は、開放坑道の範囲の大きさに伴い、坑道周辺母岩の特性の変化は局地的なものから処分場スケールに拡大する。特に水理場や化学場の変動に留意すべき。

(2) 検討ケースの影響分析

ここでは、状態オプションと回収可能性維持期間をパラメータとして、図 2.3.3-7 に示す基本ケース以外(検討ケース I ~ VI)の影響について分析する。いずれの検討ケースも「回収しない場合」と「回収する場合」に分け、閉鎖前と閉鎖後の定性的な影響を記述する。

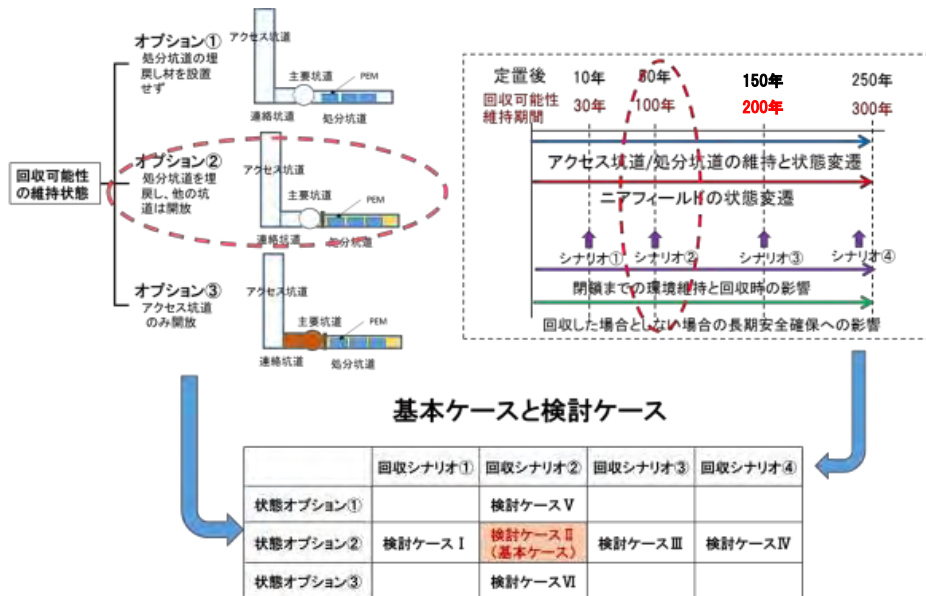


図 2.3.3-7 基本ケースと検討ケース

1) 検討ケースⅠの影響分析

	回収シナリオ①	回収シナリオ②	回収シナリオ③	回収シナリオ④
状態オプション①		検討ケースⅤ		
状態オプション②	検討ケースⅠ	検討ケースⅡ (基本ケース)	検討ケースⅢ	検討ケースⅣ
状態オプション③		検討ケースⅥ		

検討ケースⅠは、PEMの定置が行われている段階（建設・操業中）で回収が決定された場合となる。このとき、定置しているパネルの処分坑道は定置後順次埋め戻されているが、他の坑道は開放された状態となっていると仮定する。これらの状態は特に回収可能性を維持している訳ではないことから、影響の分析では、PEMを回収した場合のみを対象とする。

① 回収しない場合の閉鎖前の影響・・・通常の建設・操業のため該当しない

② 回収する場合の閉鎖前の影響

回収は操業段階の途中で実施することになるため、坑道維持のための作業は通常の建設・操業時のものとなり、新たに発生する影響は、回収に伴う作業、廃棄体が地表で保管されることによる環境負荷、回収に伴うコストが発生する。これらの程度は、回収する廃棄体の数量に比例する。

③ 回収しない場合の閉鎖後への影響・・・該当しない

④ 回収する場合の閉鎖後の影響

操業途中で回収する場合、回収の閉鎖後への影響は、回収する廃棄体の数量と回収後の復旧状況に依存する。これらの影響を定量的に分析するには、具体的な状態設定が必要となるが、回収する方法にも関係する。例えば、以下の手順で回収されるならば、その影響は局所的で限定

されると想定される。

- ・ 廃棄体回収後、そのパネルは埋め戻され放棄される場合の影響、処分坑道ごとに埋戻し材を撤去、廃棄体の回収、回収後の坑道埋め戻しの手順で実施されれば影響は局所的になり、他のパネルへの影響は無視できる。
- ・ 廃棄体が回収され、再度定置される場合も同様に影響は局所的で無視できる。

2) 検討ケースⅡ（基本ケース）の影響分析

	回収シナリオ①	回収シナリオ②	回収シナリオ③	回収シナリオ④
状態オプション①		検討ケースⅤ		
状態オプション②	検討ケースⅠ	検討ケースⅡ (基本ケース)	検討ケースⅢ	検討ケースⅣ
状態オプション③		検討ケースⅥ		

検討ケースⅡの場合の回収可能性維持の影響は、基本ケースとして前項で分析した。ここでは、その結果の概要を整理して示す。

① 回収しない場合の閉鎖前の影響

回収維持期間を定置終了後 50 年程度維持するために、開放された坑道の安定性確保、作業環境の確保に係る維持・補修作業が発生する。それぞれの作業に係るリスク、環境負荷、コストが閉鎖前の影響として発生する。その程度は、開放坑道の延長に比例する。

② 回収する場合の閉鎖前の影響

回収可能性維持期間中での PEM 回収作業に伴い、回収維持のための影響に加えて、回収作業に伴うリスク、環境負荷、コストが発生する。特に、一度埋め戻した処分坑道の埋戻し土を撤去し、坑道の安定性を確保した上で、順次 PEM を回収し、再度埋め戻す作業でのリスクとコストは増加する。

③ 回収しない場合の閉鎖後の影響

定置後処分坑道を埋め戻して回収可能性を 50 年間程度維持したのち、処分場を閉鎖する場合の影響は、パネルの周辺坑道（主要坑道）、連絡坑道、アクセス坑道を開放しておくことでの局地的な影響が発生する。処分坑道は定置後埋め戻されることから長期への影響は建設・操業段階の影響にとどまる。

④ 回収する場合の閉鎖後の影響

回収可能性を維持しつつ PEM を回収する場合、処分坑道の再掘削と廃棄体の回収により、建設・操業と同様な周辺地質環境への影響が処分坑道周辺やパネルスケールで発生する。しかし、回収後の処分坑道は順次埋め戻されることから、その影響は局地的なものに限定されることになる。処分場スケールから見ると局地的な影響が全体に分布し、それらの影響の回復は、サイト条件に依存する。

3) 検討ケースⅢの影響分析

	回収シナリオ①	回収シナリオ②	回収シナリオ③	回収シナリオ④
状態オプション①		検討ケースⅤ		
状態オプション②	検討ケースⅠ	検討ケースⅡ (基本ケース)	検討ケースⅢ	検討ケースⅣ
状態オプション③		検討ケースⅥ		

検討ケースⅢは、基本ケースと同じ状態で、回収可能性維持期間が定置後 150 年となる場合で、影響の種類は基本ケースと同様であるが、その程度（大きさと範囲）が異なってくる。

① 回収しない場合の閉鎖前の影響

回収維持期間を定置終了後 150 年程度維持するために、開放された坑道の安定性確保、作業環境の確保に係る維持・補修作業が発生する。特に坑道の安定性を維持するための作業に係るリスク、不測の事態の発生による事故対応などのリスクが増加し、関連する環境負荷、コストが基本ケースより大きくなる。

② 回収する場合の閉鎖前の影響

回収可能性維持期間中での回収作業に伴い、回収維持のための影響に加えて、回収作業に伴うリスク、環境負荷、コストが発生する。処分坑道は埋戻し後時間が経過していることによる支保等の劣化が進展し、回収時の安定性の確保に係るリスク、回収コストが基本ケースより大きくなる。

③ 回収しない場合の閉鎖後の影響

定置後処分坑道を埋め戻して回収可能性を 150 年間程度維持したのち、処分場を閉鎖する場合の影響は、パネルの周辺坑道（主要坑道）、連絡坑道、アクセス坑道を開放しておくことでの局地的な影響が発生し、その大きさや範囲は基本ケースより大きくなる。処分坑道は定置後埋め戻されることから長期への影響は建設・操業段階と同様な影響にとどまり、時間の経過とともに回復していくと推定される。

④ 回収する場合の閉鎖後の影響

回収可能性を維持しつつ回収する場合、維持したときの影響に加え、処分坑道の再掘削と廃棄体の回収により、建設・操業と同様な周辺地質環境への影響が処分坑道周辺やパネルスケールで発生する。回収後の処分坑道は順次埋め戻されることから、その影響は局地的なものに限定されるが、処分場スケールから見ると局地的な影響が全体に分布し、それらの影響の回復はサイト条件に依存する。

4) 検討ケースⅣの影響分析

	回収シナリオ①	回収シナリオ②	回収シナリオ③	回収シナリオ④
状態オプション①		検討ケースⅤ		
状態オプション②	検討ケースⅠ	検討ケースⅡ (基本ケース)	検討ケースⅢ	検討ケースⅣ
状態オプション③		検討ケースⅥ		

検討ケースⅣは、基本ケースと同じ状態で、回収可能性維持期間が定置後 250 年となる。影響の種類は基本ケースと同様であるが、その程度（大きさと範囲）が異なってくる。

① 回収しない場合の閉鎖前の影響

回収維持期間を定置終了後 250 年程度維持するために、開放された坑道の安定性確保、作業環境の確保に係る維持・補修作業が発生する。長期に坑道を開放しておくことによる不測の事態へのリスクの増加、坑道の安定性と作業環境維持に伴う作業、それに伴い環境負荷、コストも期間とともに増加していく。それらの影響は、検討ケースⅢより大きくなる。

② 回収する場合の閉鎖前の影響

回収可能性維持期間中での回収作業に伴い、回収維持のための影響に加え、回収作業に伴うリスク、環境負荷、コストが発生する。処分坑道は埋戻した後時間が経過していることによる支保等の劣化が進展し、回収時の安定性の確保に係る作業、環境負荷、回収コストが検討ケースⅢより大きくなる。PEM の鋼製外殻の腐食の程度に依存するが、損傷を受けている場合、別途回収の方法を準備する必要がある。この場合の回収作業、環境負荷、コストは増加する。

③ 回収しない場合の閉鎖後への影響

定置後処分坑道を埋め戻して回収可能性を 250 年間程度維持したのち、処分場を閉鎖する場合の影響は、パネルの周辺坑道（主要坑道）、連絡坑道、アクセス坑道を開放しておくことでの局地的な影響が発生し、その大きさや範囲は増加していく。処分坑道は定置後埋め戻されることから長期への影響は建設・操業段階と同様な影響にとどまり、時間の経過とともに回復していくと推定される。いずれの影響も、ケースⅢよりも大きくなるが、PEM は埋め戻されていることから影響を受けない。

④ 回収する場合の閉鎖後への影響

回収可能性を維持しつつ回収する場合、維持したときの影響に加え、処分坑道の再掘削と廃棄体の回収により、建設・操業と同様な周辺地質環境への影響が処分坑道周辺やパネルスケールで発生する。回収後の処分坑道は順次埋め戻されることから、その影響は局地的なものに限定されるが、処分場スケールから見ると局地的な影響が全体に分布し、それらの影響の回復は、サイト条件に依存する。いずれの影響も検討ケースⅢより大きくなる。

5) 検討ケースVの影響分析

	回収シナリオ①	回収シナリオ②	回収シナリオ③	回収シナリオ④
状態オプション①		検討ケースV		
状態オプション②	検討ケースI	検討ケースII (基本ケース)	検討ケースIII	検討ケースIV
状態オプション③		検討ケースVI		

検討ケースVは、基本ケースと同様に定置後 50 年間回収可能性を全ての坑道を開放した状態で維持する場合である。影響の種類は基本ケースと同様であるが、その程度（大きさと範囲）が異なってくる。

① 回収しない場合の閉鎖前の影響

回収維持期間を定置終了後 50 年程度維持するために、開放された全坑道の安定性確保、作業環境の確保に係る維持・補修作業が発生する。特に、PEM を定置した処分坑道の安定性維持では、狭隘空間となることから、作業の負荷が大きくなり、それに伴うリスク、環境負荷、コストが基本ケースに比較して大幅に増大する。

② 回収する場合の閉鎖前の影響

回収可能性維持期間中での回収作業に伴い、回収維持のための影響に加えて、回収作業に伴うリスク、環境負荷、コストが発生するが、処分坑道は開放されていることから、回収に伴う作業、環境負荷、コストは基本ケースより大幅に削減される。

③ 回収しない場合の閉鎖後への影響

定置後、全ての坑道を開放状態として 50 年間程度維持したのち、処分場を閉鎖する場合の影響は、局地的な影響から処分場スケールまでの影響に拡大していく。特に水理環境への影響は大きくなり、処分場周辺の地下水流動系が変化するが、人工バリアは PEM 外殻で隔離されていることから性能が影響を受ける可能性は小さい。しかし、このケースで回収可能性維持期間が延長されると PEM の鋼製外殻の腐食が進み、損傷する可能性が出てくる。この場合の内部緩衝材の状況把握が不可欠となる。

④ 回収する場合の閉鎖後への影響

全坑道を開放した状態で、回収可能性を維持しつつ回収する場合、回収することによる周辺環境に付加される影響はない。

6) 検討ケースⅥの影響分析

	回収シナリオ①	回収シナリオ②	回収シナリオ③	回収シナリオ④
状態オプション①		検討ケースⅤ		
状態オプション②	検討ケースⅠ	検討ケースⅡ (基本ケース)	検討ケースⅢ	検討ケースⅣ
状態オプション③		(検討ケースⅥ)		

検討ケースⅥは、基本ケースと同様に定置後 50 年間回収可能性をアクセス坑道のみを開放した状態で維持する場合である。影響の種類は基本ケースと同様であるが、その程度（大きさと範囲）が異なってくる。

① 回収しない場合の閉鎖前の影響

回収維持期間を定置終了後 50 年程度維持するために、アクセス坑道のみを開放し、その安定性確保に係る作業、環境負荷、コストが発生する。維持する坑道延長が最短となるため、これらの影響は基本ケースに比較して小さくなる。

② 回収する場合の閉鎖前の影響

回収可能性維持期間中での回収作業に伴い、回収維持のための影響にプラスして、回収作業に伴う埋め戻した坑道の再掘削、回収中の安定性確保に係る作業、環境負荷、コストが発生する。埋め戻された坑道延長が最大となることから、影響は基本ケースに比較して増大する。

③ 回収しない場合の閉鎖後への影響

定置後、アクセス坑道を除いてすべての坑道を埋め戻すことから、回収可能性維持の坑道周辺への影響、人工バリアへの影響は通常建設・操業段階と同様となる。アクセス坑道周辺の局地的な地質環境の影響が発生するが、処分場全体からするとその程度は小さい。

④ 回収する場合の閉鎖後への影響

回収の意思決定に伴う坑道の再掘削、PEM の回収に伴う影響は、建設・操業段階のそれと同様となる。同じようなプロセスが二回繰り返されることによる坑道周辺環境への影響は単純な足し算とはならず、一度埋戻しで回復傾向にあったこともあり、複雑なプロセスとなると推定される。

(3) 検討ケース相互の影響比較

ここでは、各検討ケースの閉鎖前の影響と閉鎖後への影響について、検討対象外の組合せも考慮し、相対的な比較を行う。特に全坑道を開放した状態（状態オプション①）で長期に回収可能性を維持した場合の影響に着目する。

1) 影響比較の指標

影響比較の指標としては、各検討ケースの影響分析に用いた以下に示す指標と同じものを用い

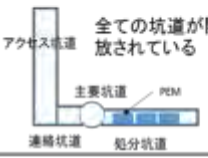
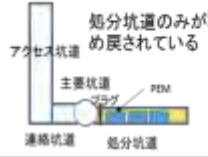
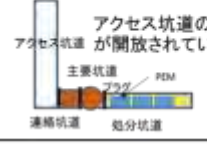
る。それぞれの指標に対して、基本ケースをレファレンスとして影響程度（大きさ、範囲）の大小の変化を視覚的に記述していく。相対比較では、影響分析のパラメータとした「状態オプションの違い」「回収可能性維持期間の違い」に着目して整理する。

2) 状態オプションの違いによる影響比較

a 閉鎖前の影響

状態オプションの違いによる閉鎖前の定性的な影響を表 2.3.3-3 にまとめた。オプション①の状態が、回収可能性維持に関しては影響が最大となるが、回収時には坑道が開放されていることで最も作業量が削減され、回収に伴うリスク等は最小となる。全ての図対応オプションで閉鎖前の影響の大きさは、回収しない場合とする場合で相反することになる。

表 2.3.3-3 状態オプションの違いによる閉鎖前の影響

状態オプション		作業	環境負荷	コスト
状態オプション①  全ての坑道が開放されている	回収なし	・開放されている坑道長が最大となり、維持管理のための作業が最大となる	・全域にわたっての換気・排水のため地表への環境負荷が最大となる可能性あり	・全域の開放坑道の維持管理のために費用が最大となる
	回収あり	・回収時は最も容易となり、作業は最小となる	・廃棄体回収による地表への環境負荷は再掘削がないため最小となる	・回収の容易性が増加することでコストは最小となる
状態オプション②  処分坑道のみが埋め戻されている	回収なし	・坑道の維持管理はオプション①よりかなり少なくなり、作業は削減する	・処分坑道埋戻しにより換気・排水が停止、地表への影響は減少	・開放坑道の維持管理コストはオプション①よりはるかに小さくなる
	回収あり	・回収時には処分坑道の再掘削と支保補強があり、作業は①より増加する	・廃棄体回収による地表での環境負荷は全てのオプションで同じ	・回収のための処分坑道掘削が増加しコストも増加する
状態オプション③  アクセス坑道のみが開放されている	回収なし	・開放坑道維持に係わる作業量は最小となる	・アクセス坑道以外は埋め戻されているため地表への環境負荷は最小となる	・開放坑道の維持管理コストは最小となる
	回収あり	・回収時の再掘削や支保補強等の作業が増加し、作業量は最大となる	・廃棄体回収による地表での環境負荷は全てのオプションで同じ	・回収のため坑道掘削が最長となりコストが最大となる

b 閉鎖後の影響

閉鎖後の坑道周辺母岩の特性への影響は、回収可能性維持によるものが支配的であり、回収する場合としない場合の差は小さい（回収する場合は再掘削が伴うが回収後速やかに埋め戻されることで影響は限定される）。母岩特性への影響としては、水理場への影響が顕著であり、それに従い地化学場が変化する。これらの影響の大きさは開放坑道の範囲に比例する（表 2.3.3-4 では色の濃淡で影響の程度を表している（色が濃いほど影響が大きいことを示す）。状態オプション①の母岩特性に与える影響が最も大きくなる）。人工バリアは、PEMの外殻の健全性により全てのオプションで影響を受けない。

表 2.3.3-4 状態オプションの違いによる閉鎖後への影響

	温度(T)	水理(H)	力学(M)	地化学(C)
状態オプション①  <p>全ての坑道が開放されている</p>	<ul style="list-style-type: none"> 処分場全域での換気・排水により坑道周辺の岩盤温度は低下 	<ul style="list-style-type: none"> 処分場全域での換気・排水により坑道周辺の空隙水圧が低下、不飽和領域の拡大 処分場スケールでの地下水流動場の変化(坑道への勾配) 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道開放による全域にわたっての岩盤応力低下 クリープと支保効果により応力の回復 	<ul style="list-style-type: none"> 処分場全域での換気・排水⇒坑道周辺の地下水流動場の変化⇒坑道周辺に酸化領域の拡大
状態オプション②  <p>処分坑道のみが埋め戻されている</p>	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道周辺は廃棄体発熱により上昇 時間の経過とともに岩盤温度に移行 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道埋戻しにより空隙水圧の回復⇒飽和に移行 地下水流動場への影響は局地的でオプション①よりかなり小さい 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道周辺の応力場は埋戻しにより初期応力に回復 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道周辺は埋戻し飽和により還元雰囲気に移行 その他の坑道周辺はオプション①と同様
状態オプション③  <p>アクセス坑道のみが開放されている</p>	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道周辺は廃棄体発熱により上昇 時間の経過とともに岩盤温度に移行 	<ul style="list-style-type: none"> アクセス坑道以外を埋め戻すことで建設・作業時の影響(不飽和領域、地下水流動場の変化)は徐々に回復 地下水流動場への影響は最小 	<ul style="list-style-type: none"> アクセス坑道以外は埋戻しにより徐々に応力回復 	<ul style="list-style-type: none"> 処分場全体は埋戻しにより建設・作業時の水理場の回復により、酸化領域が還元雰囲気に移行

c 影響比較のまとめ

状態オプションの違いによる回収可能性維持の閉鎖前と閉鎖後の影響の増大や減少などの傾向を図 2.3.3-8 にイメージとして表わす。このような傾向は、回収維持期間が長くなると状態オプション間の差が大きくなることが考察される。

閉鎖前の影響をみると、開放坑道の延長が長くなることで、坑道安定性が損なわれる可能性が増し、そのための維持・補修作業が増加することで、関連する作業、環境負荷、コストが増大していく。回収可能性維持期間が長くなると支保等の劣化・変質も進み、関連する影響は増加していく。一方で、処分坑道が開放され、安定性が確保されていると PEM の回収作業は削減し、回収時の作業やコストは低下していく。回収時の埋戻し材撤去が必要ないことから環境への負荷も低減していく。

閉鎖後の周辺母岩の特性に与える影響(擾乱)は、全ての特性について開放坑道の延長に比例して増加していく。この傾向は回収しない場合もする場合も同様となる。

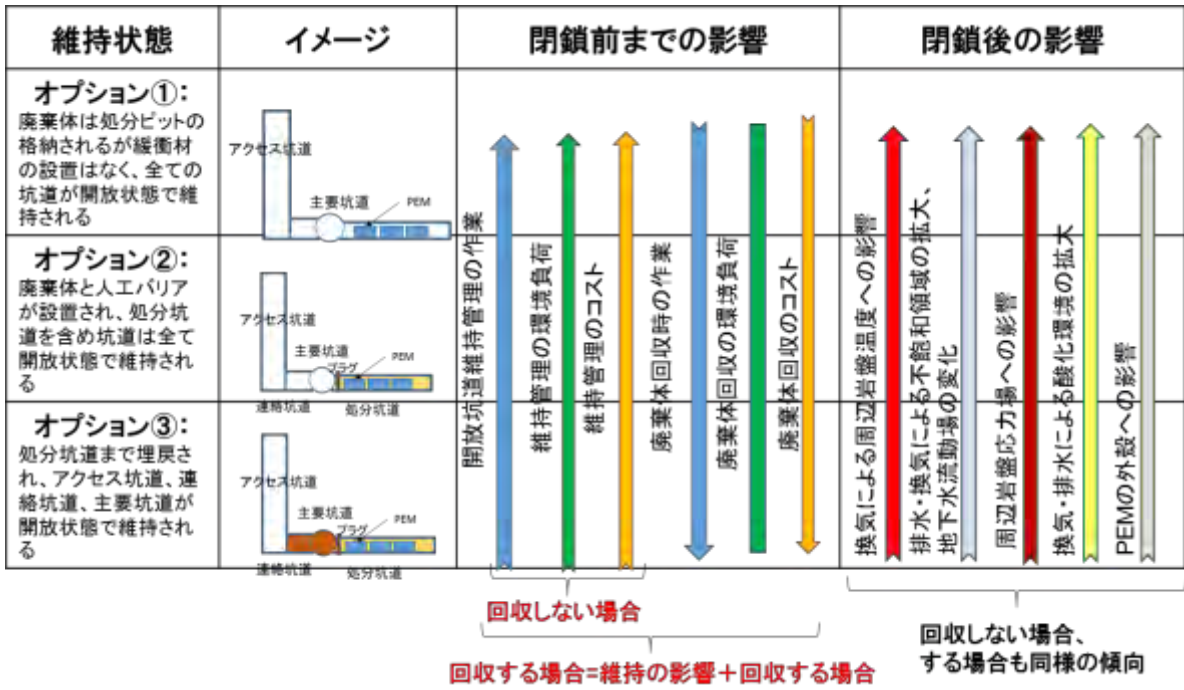


図 2.3.3-8 状態オプションの違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響の変化

3) 回収可能性維持期間の違いによる影響比較

a 閉鎖前の影響

基本ケース（状態オプション②）の状態における閉鎖前の影響（作業、環境負荷、コスト）は、表 2.3.3-5 に示すように回収可能性維持の期間とともに増加していく。また、廃棄体回収に伴うコストも、再掘削した坑道の安定性確保の困難さが増すことから増加していく。

表 2.3.3-5 回収可能性維持期間の違いによる閉鎖前の影響の比較

指標	10年	50年(基本ケース)	150年	250年
作業	通常の操業時の定置・埋戻し作業でのリスク この段階での回収は定置時の作業リスク	開放された坑道支保等の耐用年数となり、維持・補修作業が増加 回収時には埋戻し坑道の掘削に伴い、狭径部での支保等の健全性確保のための補強・補修作業が発生	支保工や換気・排水設備の更新が必要となり、それに伴う作業が発生 回収時の坑道再掘削に伴い、劣化した支保の補強・補修作業のリスクが増加	更新作業が繰り返し必要となり、その都度の作業リスクが加算されていく。 回収時の坑道再掘削に伴いさらに劣化した支保補強等を狭径部で実施する必要がある。
環境負荷	通常の操業に発生する換気・排水、維持からの廃材発生 回収時の掘削残土、回収廃棄体の地上での保管による負荷	開放坑道から発生する換気・排水と維持・補修からの廃材発生 回収時の残土と支保補強等からの廃材が発生、回収廃棄体は健全性を維持	開放坑道の維持から発生する換気・排水処理、支保・設備の更新からの廃材が増加 回収時の残土は50年と同様、支保の劣化進展による廃材の増加、廃棄体の負荷は50年と同様	開放坑道の維持から発生する換気・排水の処理、支保・設備の更新からの廃材が増加 回収時の残土は50年と同様、支保の劣化進展による廃材の増加、廃棄体の劣化の可能性から負荷は増加
コスト	通常の操業時の維持管理に係る費用 廃棄体の回収・搬出に伴うコストが発生	開放坑道の維持・補修に伴う費用 廃棄体回収に伴う再掘削・支保補強等、回収・搬出・保管コストの発生	開放坑道の支保・設備の更新に伴う費用の増加 廃棄体回収に伴う再掘削・支保補強、回収・搬出・保管コスト(50年と同程度)	開放坑道の支保・設備の繰り返し更新の費用増加 回収の再掘削の困難さ、支保補強コスト増加、廃棄体の状態により回収・搬出コスト増加

b 閉鎖後の影響

基本ケース(状態オプション②)における閉鎖後母岩への特性(温度、水理、力学、化学特性)変化と人工バリアの初期特性(緩衝材の密度、オーバーパックの腐食等)への影響は、回収維持期間とともに変化していく(表 2.3.3-6)。このような変化の中で廃棄体を回収する場合も、建設・定置段階における擾乱の発生は局所的であり、大きくは回収可能性維持の影響に支配される。

表 2.3.3-6 回収可能性維持期間の違いによる閉鎖後の母岩特性への影響変化

指標	10年	50年(基本ケース)	150年	250年
温度(T)	開放坑道は換気・排水により岩盤温度が低下 処分坑道は定置された廃棄体の発熱により埋戻し材の温度上昇	開放坑道は換気・排水により岩盤温度が低下 処分坑道は廃棄体からの発熱が下がり、埋戻し材は岩盤温度に移行	開放坑道は換気・排水により岩盤温度が低下 処分坑道内は周辺岩盤温度	開放坑道は換気・排水により岩盤温度が低下 処分坑道内は周辺岩盤温度
水理(H)	開放坑道周辺は排水により間隙水圧低下、不飽和領域の発生 処分坑道内は埋戻しにより間隙水圧の回復、飽和過程	開放坑道周辺は排水により間隙水圧低下、不飽和領域の発生 処分坑道内は間隙水圧が回復し飽和過程	開放坑道周辺は排水により間隙水圧低下、不飽和領域の発生 処分坑道内は飽和状態	開放坑道周辺は排水により間隙水圧低下、不飽和領域の発生 処分坑道内は飽和状態
力学(M)	開放坑道周辺にはEDZが形成、岩盤クリープで応力場の回復 処分坑道内は埋戻し材の膨潤圧発生	開放坑道周辺にはEDZが形成、岩盤クリープで応力場の回復 処分坑道内は埋戻し材の膨潤圧発生	開放坑道周辺にはEDZが形成、岩盤クリープで応力場の回復 処分坑道内膨潤圧+PEMの腐食膨張圧発生	開放坑道周辺にはEDZが形成、岩盤クリープで応力場の回復 処分坑道内膨潤圧+PEMの腐食膨張圧発生
化学(C)	開放坑道周辺は換気・排水により酸化領域の発生 処分坑道の埋戻し材は酸化状態	開放坑道周辺は換気・排水により酸化領域の発生 処分坑道内の地下水浸入に伴い還元雰囲気	開放坑道周辺は換気・排水により酸化領域の発生 処分坑道内はPEMの腐食物と還元雰囲気	開放坑道周辺は換気・排水により酸化領域の発生 処分坑道内はPEMの腐食物と還元雰囲気

4) 状態オプション回収可能性維持期間の違いによる影響比較

a 状態オプション①

状態オプション①を対象に、回収可能性維持期間の違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響を設定した指標の変化を図 2.3.3-9 に整理して示す。

- ✓ 状態オプション①では、全ての坑道が開放されていることから、坑道支保等の劣化・変質による安定性の悪化とそれに伴う維持・補修作業や更新時のリスクの増加、換気・排水の長期継続による処理・処分量の増加がもたらす環境負荷の増加、それらに伴うコストの増加が顕著に発生する。
- ✓ このような状態での PEM の回収・搬出では、処分坑道が開放されていることから、坑道の安定性が維持されている環境下では、回収時期に係らず回収作業のリスクに大きな変化はない。但し、回収に関係する装置や設備の劣化による事故リスクは高くなっていき、これらを低減するためのコストが増加する。
- ✓ 閉鎖後の坑道周辺母岩の好ましい特性への影響は、全ての坑道が開放され、換気と排水が継続的に実施されるため、処分場スケールでの変化が発生する。これらの変化は、回収維持期間が長くなるとより顕著になるとともに、範囲も拡大していく可能性がある。
- ✓ このような状態での PEM の回収による坑道周辺母岩への影響は回収可能性維持の影響と同様となる。
- ✓ PEM の鋼製外殻が健全性を維持している限り、回収維持期間の影響は受けない。外殻が腐食等で損傷を受けた場合、内部の緩衝材が部分的に欠落し、密度低下を起こす可能性は存在する。

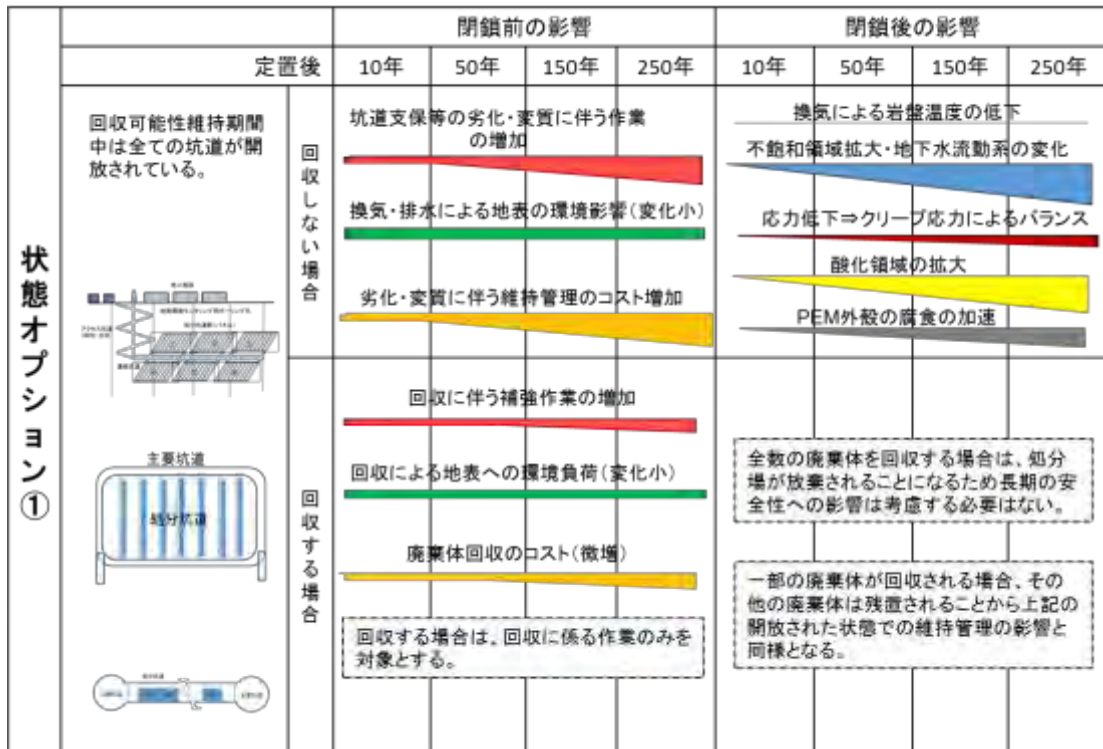


図 2.3.3-9 状態オプション①における回収可能性維持期間と閉鎖前、閉鎖後の影響比較

b 状態オプション②

状態オプション②における回収可能性維持期間の違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響を設定した指標の変化を図 2.3.3-10 に整理して示す。

- ✓ 状態オプション②では PEM を定置した処分坑道は埋め戻され、パネル周辺の主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道が開放されている。開放された坑道では、坑道支保等の劣化・変質による安定性の悪化とそれに伴う維持補修作業時のリスクの増加、換気・排水の長期継続による処理・処分量の増加がもたらす環境負荷の増加、それらに伴うコストが維持期間に比例して増加する。
- ✓ このような状態での PEM の回収・搬出では、処分坑道端部のプラグの撤去から開始され、坑道内部の埋戻し材撤去後、坑道安定性を確認してから PEM が回収・搬出される。このような作業は回収可能性維持期間の違いでも同じであるが、埋め戻された坑道の支保材の劣化等により、再掘削時の安定性確保で差が発生する。期間が長くなるに従い、作業のリスク、環境負荷、コストが徐々に増加する。PEM の外殻が健全性を維持している限り、回収のために特別なリスクは発生しない。腐食等で損傷を受けている場合は、別途作業が発生する。
- ✓ 閉鎖後の坑道周辺母岩の好ましい特性への影響は、処分坑道が埋め戻されていることから建設・操業時の擾乱が残るもののその影響の程度は局地的になり、期間の長期化に伴い変化した状態で安定していく。
- ✓ このような状態での PEM の回収による坑道周辺母岩への影響は、一度、安定化に向かった環境を再度掘削と回収で擾乱することになるが、回収後速やかに埋め戻される場合は、その影響は局地的であり、時間の経過とともに安定化していく。
- ✓ 埋め戻された PEM の鋼製外殻が健全性を維持している限り、回収維持期間の影響は受けない。外殻が腐食等で損傷を受けた場合においても回収後に周辺母岩に与える影響はない。

状態オプション②	定置後	閉鎖前の影響				閉鎖後の影響			
		10年	50年	150年	250年	10年	50年	150年	250年
<p>アクセス坑道、連絡坑道、主要坑道をPEM定置後開放した状態で維持し、回収する場合は、パネルごとに処分坑道を再掘削することで廃棄体を回収していく。</p> <p>主要坑道 処分坑道 連絡坑道</p>	回収しない場合	坑道支保等の劣化・変質に伴う作業の増加	[Red bar increasing from 10 to 250 years]			換気による岩盤温度の低下	[Blue bar increasing from 10 to 250 years]		
		換気・排水による地表の環境影響(変化小)	[Green bar increasing from 10 to 250 years]			応力低下⇒クリープ応力によるバランス	[Red bar increasing from 10 to 250 years]		
	回収する場合	劣化・変質に伴う維持管理のコスト増加	[Yellow bar increasing from 10 to 250 years]			酸化領域の拡大	[Yellow bar increasing from 10 to 250 years]		
		回収に伴う再掘削・補強の作業増加	[Red bar increasing from 10 to 250 years]			PEMへの影響(小)	[Blue bar increasing from 10 to 250 years]		
		掘削ずり・回収廃棄体による地表への環境負荷の増加	[Green bar increasing from 10 to 250 years]			全数の廃棄体を回収する場合は、処分場が放棄されることになるため長期の安全性への影響は考慮する必要はない。			
		再掘削・補強・回収作業に伴うコスト増加	[Yellow bar increasing from 10 to 250 years]			一部の廃棄体が回収される場合、必要分だけの坑道再掘削・廃棄体回収・埋戻しとなり、その影響は限定される。その他の廃棄体は残置されることから上記の開放された状態での維持管理の影響と同様となる。			
		回収する場合は、回収に係る作業のみを対象とする。							

図 2.3.3-10 状態オプション②における回収可能性維持期間と閉鎖前、閉鎖後の影響比較

c 状態オプション③

状態オプション②における回収可能性維持期間の違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響を設定した指標の変化を図 2.3.3-11 に整理して示す。

- ✓ 状態オプション③では、アクセス坑道以外は全て埋め戻した状態での回収可能性維持となる。回収しない場合の閉鎖前の影響はオプション間で最小となり、期間の延長に従い漸増する。閉鎖後の影響は、アクセス坑道周辺岩盤の特性変化だけとなり、閉鎖後長期安全性への影響の観点からは限定される。このような状態で回収する場合、処分坑道に至るまで坑道を再掘削する必要があり、建設段階と同様な作業が新たに発生する。維持のための影響は最小となるが、回収時の影響は最大となる。この傾向は回収維持期間の長さに比例して増加する。
- ✓ 回収作業の閉鎖後安全性の影響は、坑道を再掘削し安定性を維持することによる周辺母岩の特性変化に影響を及ぼすが、回収がパネルごとに順次進み、回収後速やかに埋め戻される場合、特性変化は局地的で埋戻し後安定化に向かう。

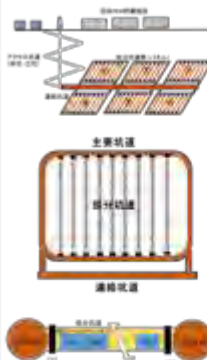
状態オプション ③	定置後	閉鎖前の影響				閉鎖後の影響			
		10年	50年	150年	250年	10年	50年	150年	250年
<p>PEMを定置したのち、処分坑道、主要坑道、連絡坑道は埋め戻され、アクセス坑道のみを開放した状態で回収可能性を維持する。</p> 	回収しない場合	坑道支保等の劣化・変質に伴う作業の増加				換気による岩盤温度の低下			
	回収する場合	回収に伴う再掘削・補強作業増加				不飽和領域拡大・地下水流動系の変化			
		換気・排水による地表の環境負荷(変化小)				応力低下⇒クリープ応力によるバランス			
		劣化・変質に伴う維持管理のコスト増加				酸化領域の拡大			
						PEMへの影響(小)			
		再掘削・廃棄体による地表への環境負荷の増加影響							全数の廃棄体を回収する場合は、処分場が放棄されることになるため長期の安全性への影響は考慮する必要はない。
		再掘削・補強・回収作業に伴うコスト増加							一部の廃棄体が回収される場合、必要分だけの坑道再掘削・廃棄体回収・埋戻しとなり、その影響は限定される。その他の廃棄体は残置されることから上記の開放された状態での維持管理の影響と同様となる。
		回収する場合は、回収に係る作業のみを対象とする。							

図 2.3.3-11 状態オプション③における回収可能性維持期間と閉鎖前、閉鎖後の影響比較

5) 回収可能性維持の影響比較のまとめ

a 閉鎖前の影響

回収可能性維持による閉鎖前の影響を、作業、環境負荷およびコストの3つの指標を用い、状態オプションの違いと回収維持期間の違いの2つの軸で整理した結果を図 2.3.3-12 に示す。

この整理図では、矢印の方向が影響指標の増加する方向を示し、矢印の太さ（この図では3段階）が影響指標の大きさを表す。状態オプション①では、全ての坑道が開放されているため、その維持・補修に係る作業や環境負荷及びコストが最大となり、その傾向は回収期間が長くなるに従い増加していくことを示している。一方この状態で回収する場合、坑道が全て開放されていることもあり回収作業は最もリスクが小さくなる。

一方、状態オプション③では、アクセス坑道以外は埋め戻されているため、回収維持の閉鎖前の影響指標は最も小さくなる。この状態で PEM を回収する場合、坑道の再掘削延長が最も長くなり、作業、環境負荷、コストいずれも最大となり、この傾向は維持期間が長くなるに従い増加する。

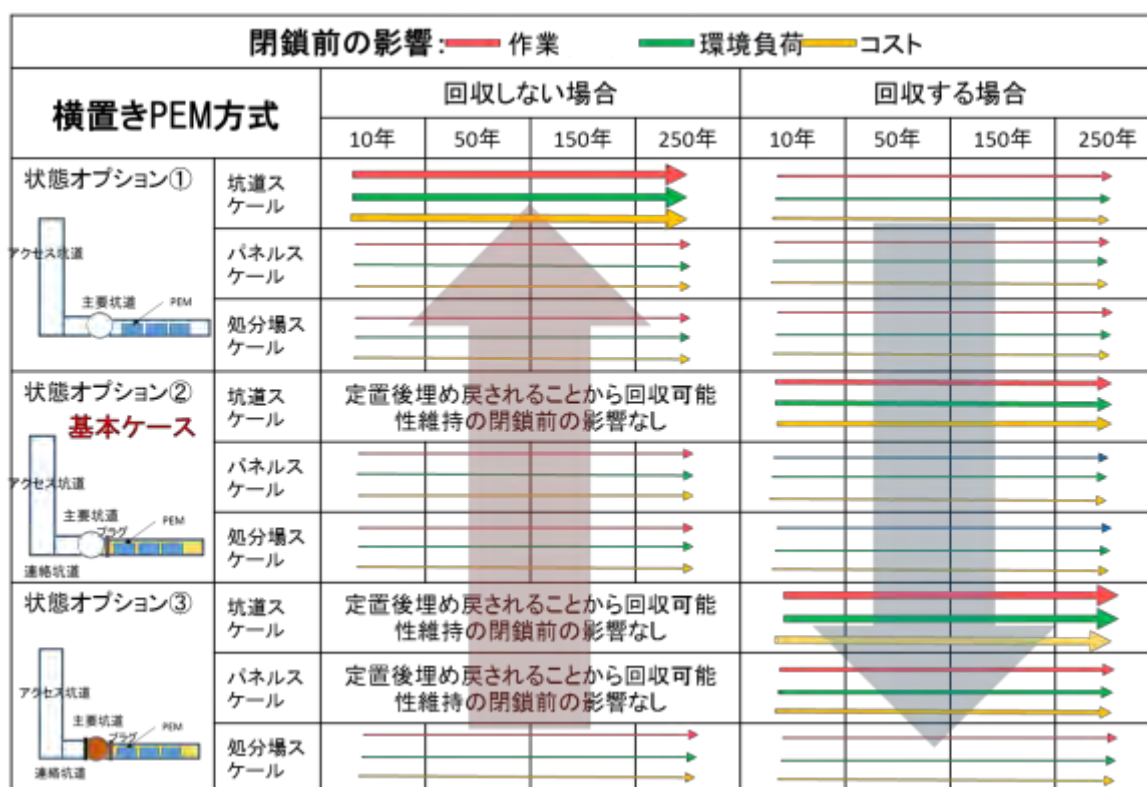


図 2.3.3-12 回収可能性維持の閉鎖前影響のまとめ

b 閉鎖後への影響

閉鎖前の影響整理と同様に、状態オプションと回収維持期間を軸として閉鎖後への影響を坑道周辺母岩の特性を指標として整理した結果を図 2.3.3-13 に示す。状態オプション①では、全ての坑道が開放されていることから、異なるスケールでの母岩特性への変化が最大となり、回収維持期間の延長に従いその影響程度は増加していく。

状態オプション②からオプション③にかけて、開放坑道の延長は短くなることから、回収維持の閉鎖後への影響は徐々に小さくなる。

回収する場合の閉鎖後への影響については、回収維持期間に係らず、回収時にはその影響が局地的に発生するが、大きくは回収可能性維持での影響に支配される。図 2.3.3-13 では、それぞれの回収シナリオでの回収の影響発生が全ての状態オプションにおいても短期間のものであり、時間の経過とともに減少していくことを示している。

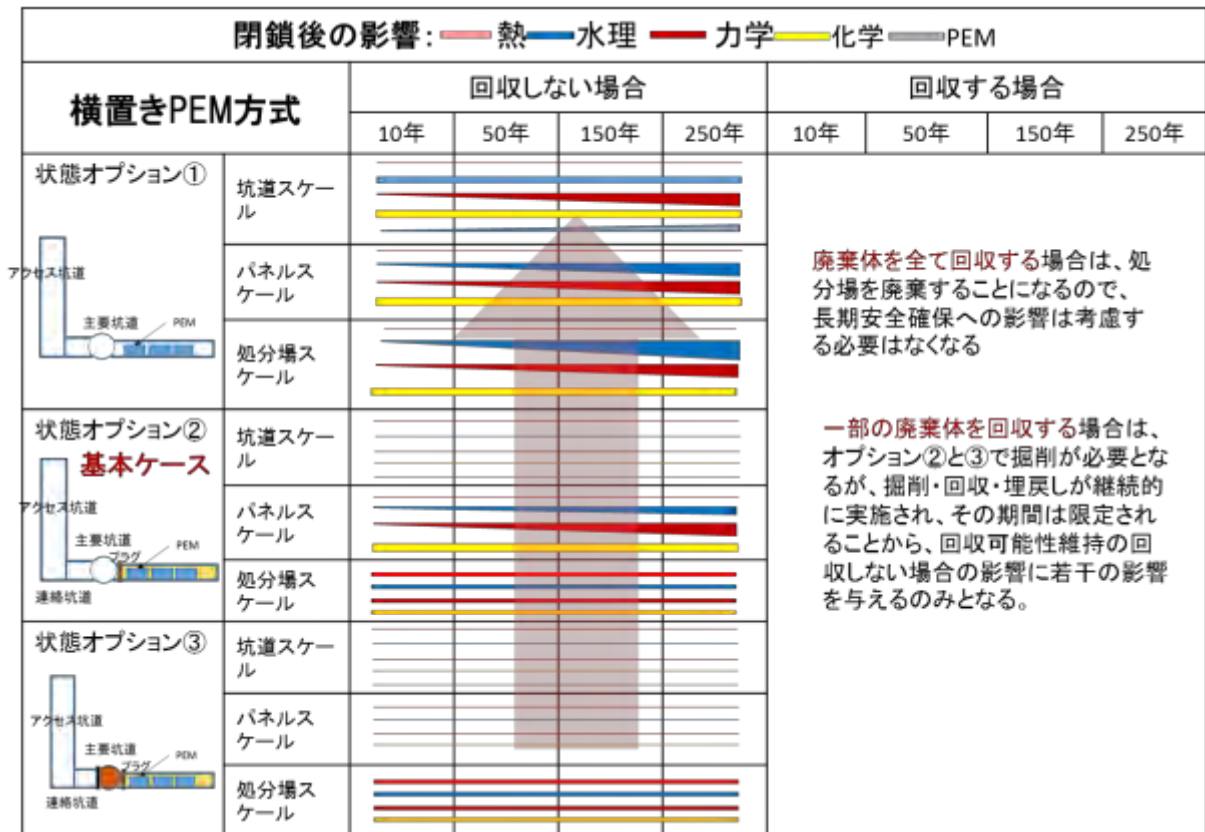


図 2.3.3-13 回収可能性維持の閉鎖後への影響のまとめ

c 閉鎖後への影響の回復に係る考察

回収可能性維持による閉鎖後への影響（母岩特性の変化）は、前項の取りまとめで整理したように状態オプションと維持期間により、大きさと範囲が異なってくる。異なるスケールでのこれらの影響を模式的に分析した結果、全ての坑道が開放状態で維持される状態オプション①の場合、処分場スケールでの水理場への擾乱が顕著となり、閉鎖後の回復（安定化）までは相当の時間がかかる可能性がある。この擾乱の安定化までの期間は、開放坑道の延長と回収維持期間にも関係する。

ここでは、全ての坑道が開放されている状態オプション①の場合を想定し、処分場スケールでの水理場の擾乱とその回復（安定化）までの期間について考察する。

図 2.3.3-14 は、閉鎖後への影響が最も大きいと推定される処分オプション①の処分坑道と

処分場のスケールでの母岩特性の擾乱とその回復の状況を模式的に示している。処分坑道周辺は開放されていることで建設時の母岩の特性への擾乱がそのまま継続し、閉鎖の決定で埋め戻される。この場合の坑道周辺の擾乱は、時間をかけて安定化する特性と安定化するがもとには回復しない特性も存在する。例えば、坑道開放での間隙水圧の低下は、埋戻しにより比較的早く回復していく。しかし、排水と換気で発生した不飽和領域は、間隙水圧が回復しても長く残存する可能性は否定できない。また、坑道掘削で発生した応力低下領域（緩み領域ともいう）は、埋戻した後も元の状態に戻るかどうかは不明である。クリープ現象で応力再配分が継続して発生し、初期の岩盤応力に回復する可能性は示唆されているがその証拠は得られていない。

処分場スケールでは、広い範囲にわたり排水されるため、図にあるように処分場規模で地下水流動場が変化する可能性がある。このような変動は、坑道を埋め戻したとしても元の地下水流動場に戻るには相当時間がかかると推定される。このような水理場の擾乱は、換気と合わせて地化学場の擾乱も引き起こし、広い範囲で不飽和領域が発生し酸化雰囲気となる。これらの変化は埋め戻すことでの還元地下水の浸透で徐々に飽和し、還元雰囲気に移行していくと推定されるが、それ以外に微生物の活動も含めて時間が相当かかると推定される。

このように、擾乱を受けた母岩の初期特性の変化は、回収可能性維持の状態と維持期間との明確な因果関係をもって安定化あるいは元の特性へ回復すると考えられるが、それには相当の時間がかかるとも推定される。これらの安定化や回復の時間は、地層処分における閉鎖後の安全評価にとって極めて重要な前提となる。重要とした背景には、現状の安全評価では、建設・操業時の擾乱の影響が、核種がオーバーパックから放出される 1000 年後には安定化し、もとの特性や環境に戻っていることを前提としているためである。そのため、回復や安定化にかかる時間とそのプロセスが評価できなければ、安全評価の不確実性を増加させることにつながる。

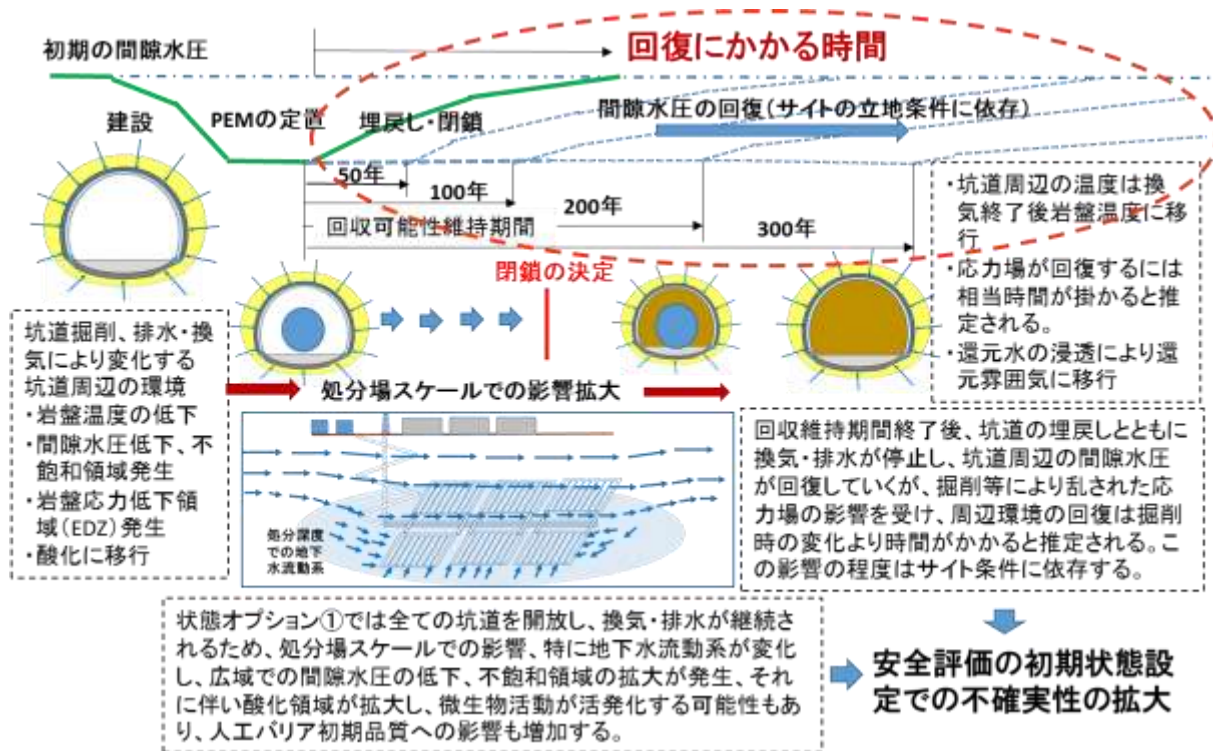


図 2.3.3-14 異なるスケールでの母岩特性の擾乱と回復のイメージ

6) 回収可能性維持の影響分析結果の考察

a 閉鎖前の影響

処分場の状態オプションと維持期間をパラメータとして回収可能性維持の定性的な影響を比較検討した結果の考察を以下にまとめる。

- ▶ 全ての坑道を開放した状態(状態オプション①)で回収可能性を維持する影響は、最も大きくなる(図 2.3.3-15 中赤線丸)。この傾向は維持期間が長くなる、あるいは対象スケールが大きくなると増加していく。しかし、維持期間中に回収する場合、坑道が開放されていることで、回収作業が削減され、作業、コストは最小となる。この傾向は維持期間が長くなっても変化しない(図 2.3.3-15 中、青点線丸)。このことは、長い期間坑道を開放状態で維持する影響と回収の容易さがトレードオフの関係にあることを示唆している。
- ▶ 処分坑道が廃棄体定置後埋め戻されている場合(状態オプション②または③)、開放されている坑道延長は大きな差がなく、開放していると補修や更新で増加していくが、状態オプション①に比較してその増加は小さい(図 2.3.3-15 中、赤点線丸)。
- ▶ 廃棄体を回収する場合、埋め戻した坑道長が長くなると処分坑道の埋戻し材を撤去しつつ支保の補強が必要となり、作業、環境負荷、コストとも増加していく。この作業は、時間の経過とともに劣化等が進むため確実に増加していく。

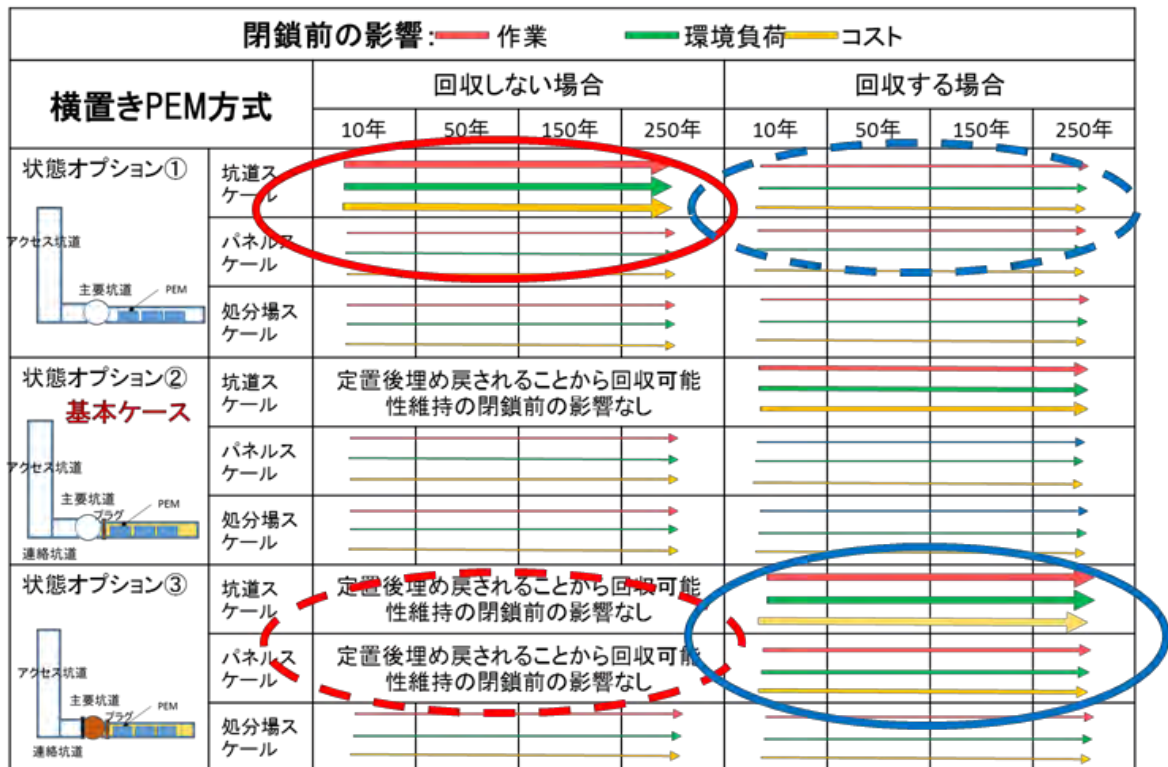


図 2.3.3-15 回収可能性維持の閉鎖前の影響の分析結果

b 閉鎖後の影響

処分場の状態オプションと維持期間をパラメータとして、回収可能性維持の閉鎖後長期の影響を比較検討した結果の考察を以下に示す (図 2.3.3-16)。

- 閉鎖後長期への影響には、周辺母岩の特性 (温度、水理、力学、地化学) と人工バリアの初期性能へのものがある。処分坑道が開放されている場合 (状態オプション①)、これらの影響は他のケースに比較して最大 (図中の緑線丸) となり、この傾向は維持期間の長さに比例して増加していく。
- 処分坑道が開放されている場合の閉鎖後の母岩特性への影響は、スケールによって異なり、特に処分場スケールでの水理環境に対する影響が最大となる。この傾向は時間の経過とともに増加し、閉鎖したのちも回復する期間が長くなると推定される。
- 回収可能性を維持しつつ回収する場合、回収後、処分坑道は順次埋め戻されることから、その影響は、回収までの坑道の状態、スケールでは違いがなく、回収する時期により、影響の回復期間が異なってくる。
- 人工バリアへの初期性能への影響は、処分坑道が開放されている場合に発生する。PEMの場合は、鋼製の外殻が健全であれば、影響を受けることはない。

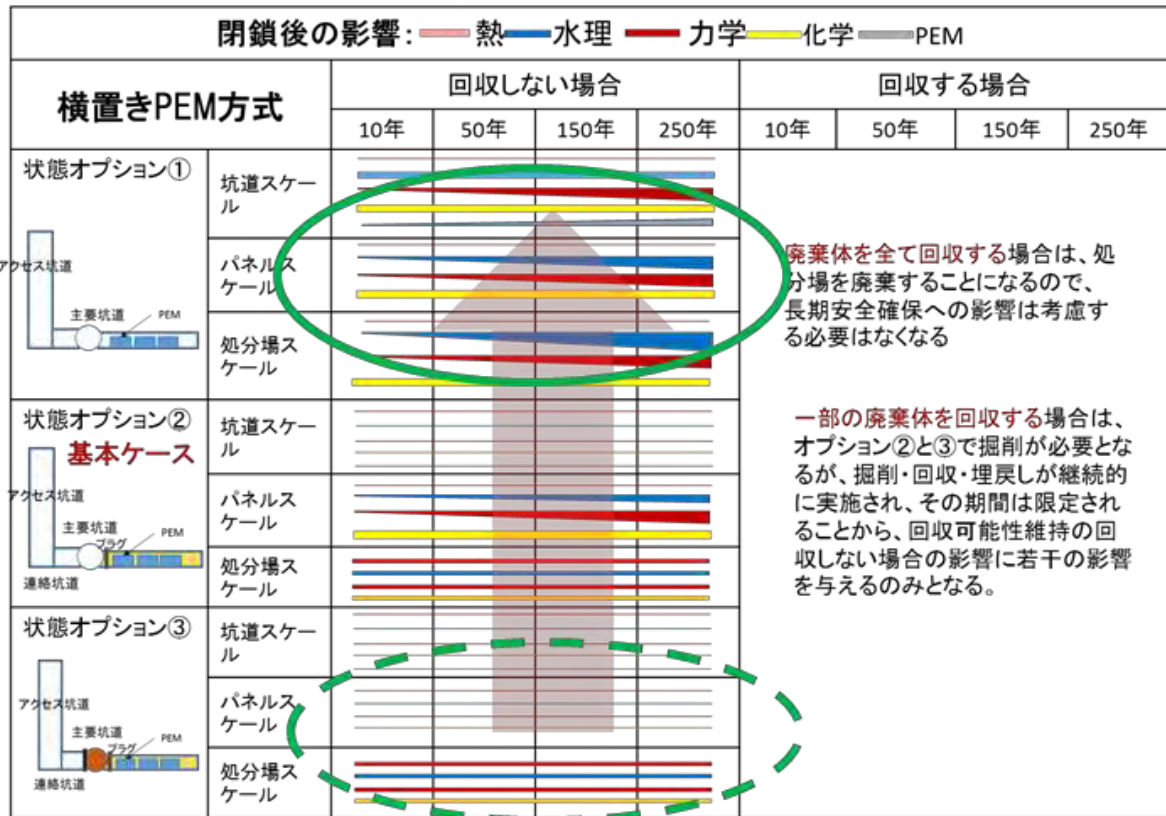


図 2.3.3-16 回収可能性維持の閉鎖後への影響分析結果

(4) 影響低減の方策検討

ここでは、(1)～(3)までの検討成果を受け、閉鎖前と閉鎖後の想定される影響を低減するための方策や技術を今後検討していくにあたり、その方向性や考え方を整理し、具体策を例示することで進む方向を具現化することを目的として考察する。

これまでの検討結果は、以下にまとめることができる。

- ▶ 回収可能性維持の影響は、状態オプションおよび回収維持期間の違いにより、閉鎖前、閉鎖後とも変化する。特に閉鎖前の影響（回収維持と回収作業に伴う作業、環境負荷およびコスト）は、処分場の維持環境の状態（本検討では状態オプション①）が最も差が大きくなり、この傾向は維持期間が長くなるほど顕著となっていく。
- ▶ 一方、閉鎖後の母岩特性や人工バリア性能への影響は、回収の有無にも関わらず維持期間に比例して大きくなる傾向があり、特に状態オプション①ではその範囲も処分場スケールへと拡大していくことが分かった。

これらの影響が処分事業や長期の安全性確保に優位な影響となるかどうかについては、今後、定量的な評価を実施することで、安全管理が合理的な範囲で実施できる閉鎖までの期間を総合的に判断していくことになる。

1) 低減策の考え方と方向性

回収可能性の維持に係わる影響を低減する考え方とその方向性については、OECD/NEA R&R Report (2011) で二つの例を提唱している。ここでの低減とは、閉鎖前に関しては、リスク、環境負荷、コストの量的な低減であり、閉鎖後に関しては岩盤特性の変化を小さくし、人工バリア性能劣化を防ぐ方策として取り扱うこととする。

方策Ⅰ：現状考えられている定置・回収概念を対象に影響を低減する方策を開発していく。

方策Ⅱ：新たに定置・回収の容易性向上の概念を開発し、関連技術も同じように整備することで影響を低減する。

方策Ⅰは、現状の坑道維持技術や回収技術を対象とする「影響低減技術の整備」として、また方策Ⅱは、低減のための新たな概念や技術を対象とした「代替処分概念の開発」として検討を進めていくことになる。本検討では、開発された概念や技術を用い、想定される処分場状態オプションと回収維持の期間をパラメータに、閉鎖前と閉鎖後の影響を検討・比較することで閉鎖までの安全管理が合理的に実施できる方策を準備していく。

2) 影響低減方策検討例

a 方策Ⅰ：現状考えられている定置・回収概念を対象に影響を低減する方策の開発例

影響の低減策は、影響の種類や特徴により異なってくる。ここでは、下記の影響指標を対象に具体的な低減策や緩和策の例を検討する。

影響低減⇒閉鎖前：維持管理や回収作業リスクの低減、環境負荷の削減、コストの低減
⇒閉鎖後：望ましい母岩の特性変化の緩和、人工バリア性能劣化の緩和

① 初期品質の高度化：長期安定性維持のために支保工等の初期品質を向上

- ・ 支保の高耐久、高強度化（メンテ・フリーの吹付材料、高強度コンクリート）
- ・ 背面排水システムの高耐久性のある材質の投入
- ・ 換気システムの安定化技術

開放坑道や回収のために掘削する坑道の支保劣化による落盤や剥落のリスクを低減するために、劣化しない高品質、あるいは高強度の支保材を開発し適用する。結果として維持管理の頻度を下げることができ落盤や剥落のリスクが低減するとともに維持等から発生する廃材の発生を抑制することができる。作業環境維持のための換気や排水設備の劣化による停止リスクを低減するために、高耐久性のドレーンシステムの開発、換気方法を開発する。例えば、覆工コンクリート背面にセラミック・ビーズを配置することで高耐久性を確保する。換気については、坑道途中にバッファとなる圧縮空気空洞を設置し、供給量を安定化させる。それぞれ初期投資は大きくなるが、維持管理に修復コストが低減できるため、維持期間を考慮したライフ・サイクル・コストで判断する。

② 坑道維持技術の高度化：開放坑道の安定性確保の作業効率向上

- ・ 更新を容易とする軽量セグメントの導入
- ・ 異常検知と補修・補強判断の AI システム
- ・ 狭隘部での補修・補強等専用ロボット

軽量セグメントの材料としては、軽量コンクリートあるいはセラミック・セグメントが想定できる。軽量コンクリートは商品化されており、セラミック・セグメントは作成する技術は存在する。維持管理のために支保等の健全性をモニターし、診断・処置を速やかに決定する AI システムを開発する。それぞれの要素技術は存在することから、AI のデータベースを整備する。PEM 定置後の処分坑道を開放しておく場合、空間が狭隘のため、支保等の維持管理や補修が困難となる。PEM を作業架台とする遠隔操作での補修ロボットを開発する。

③ 廃棄体の定置・回収方法の高度化：回収作業量の低減

- ・ 廃棄体の軽量化（オーバーパック、ベントナイト厚さの削減）
- ・ 動線・物流の単純化と低減：複数ガラ固化体を封入した PEM 開発
- ・ 埋戻し材撤去の高度化、撤去後の支保等の機能回復自動化

現在想定されている PEM の重量は約 37 トン。内蔵されるオーバーパックや緩衝材を軽量化する（厚さを薄くする）ことは安全上可能であるがその試みはなされていない。軽量化することで作業性が向上し効率化できる。現在のオーバーパック 1 体にガラス固化体 1 本格納することから、ガラス固化体 3 本～6 本を格納できるようにすることで、定置や回収の作業量や物流を大幅に削減することができる。複数のガラス固化体をオーバーパックに格納することは現状技術で対応できる。埋戻し材は撤去後、地に搬出せずに隣接する PEM 撤去後の処分坑道の埋

戻しに用いることで地表への環境負荷の低減と物流の効率化を図ることができる。

④ 回収技術の高度化：回収の効率化とコストダウン

- ・ PEM 周辺の充填材の撤去技術（塩水を用いない方法）
- ・ 損傷 PEM の回収・搬出技術

狭隘部での PEM 回収時に高濃度塩水を使用しての PEM に付着したベントナイト撤去方法に対し、周辺岩盤等への影響を考慮してドライアイスなどの無水物での撤去、金属ブラシなどの機械的な撤去技術を開発する。PEM の鋼製外殻が腐食等で損傷している PEM の回収における装置を開発する。現在の回収装置は吊り上げ方式であることから、外殻の健全性が前提となっている。

⑤ 開放坑道の母岩への影響低減技術：開放状態による母岩の水理・化学特性への影響を低減

- ・ 坑道周辺岩盤内の間隙を利用した遮水膜構築技術
- ・ 周辺岩盤と一体化した遮水支保工の開発

坑道周辺岩盤内の間隙に即効性の膜を構築する材料を注入し、周辺地下水の間隙水圧低減を防止しつつ、坑道掘削を進める。高強度セグメントと岩盤との接合性を高め、水圧に対して、岩盤とセグメントを一体化させた構造でもたせる。排水量も削減するとともに母岩の水理特性への擾乱を最小限とする。

b 方策Ⅱ：回収可能性維持の容易性向上をはかる概念の開発例

方策Ⅱでは、安全概念は踏襲し、定置や回収の容易性を向上させる目的で現状の定置概念の変更、あるいは新たな概念を開発することを目指す。

① 閉鎖までは貯蔵形態、閉鎖後は処分形態とした最適な方策を準備

大規模開放空洞にオーバーパックの状態での長期貯蔵し、閉鎖決定後、所定の緩衝材と一緒に埋設する方策を整備する（図 2.3.3-17）。貯蔵期間中の回収は容易であり、閉鎖前の影響は大幅に低減できる。また、長期間の貯蔵によりガラス固化体からの発熱の影響が小さくなり、オーバーパックを高密度で定置可能となり、処分場の投影面積を大幅に縮小でき、閉鎖後の母岩への影響を低減できる。

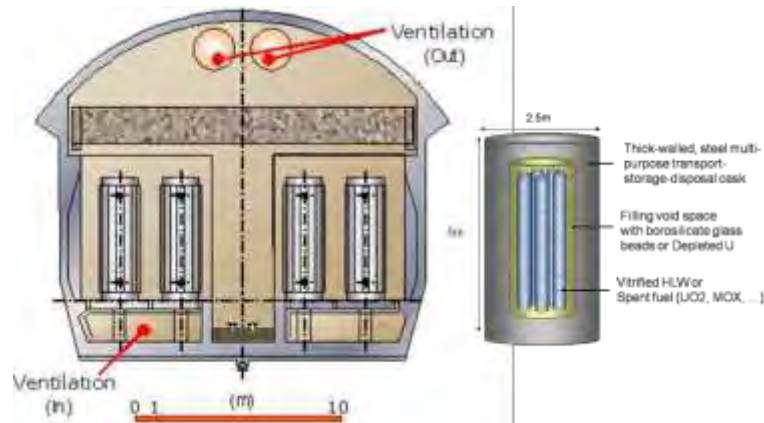


図 2.3.3-17 CARE 概念

(Kawamura et.al., TAILORING OF THE CARE CONCEPT FOR PRACTICALITY, SAFETY AND ROBUSTNESS , Proceedings of the 15th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICM2013 September 8-12, 2013, Brussels, Belgium)

② 処分孔横置き定置方式の改良

処分坑道から 1 日分のオーバーパックを定置する処分孔を水平に構築し、リング状ベントナイトの中にセラミック・ケーシングを設置して軽量化したオーバーパックをプッシングマシンで挿入する方式を開発する (図 2.3.3-18)。1 日に軽量オーバーパック 5 体を連続して投入することで物流、動線を簡略化でき、ケーシングの存在で定置・回収は容易となる。また、ベントナイトは回収しないことで作業の簡易化、環境負荷を低減できる。

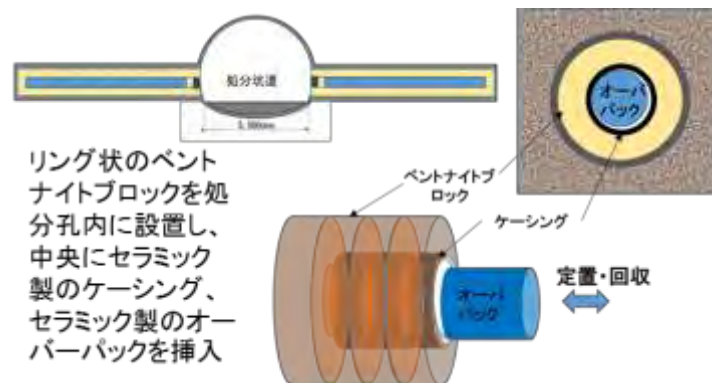


図 2.3.3-18 処分孔横置き方式

③ スーパーPEM の開発

ガラス固化体を 6 本格納する軽量化した PEM を開発することで、物流の簡素化、定置・回収の効率化を図り、作業、環境負荷、コストを低減する (図 2.3.3-19)。下図に示すスーパーPEM は軽量化したオーバーパックの中にガラス固化体 6 本を格納し、その外側にケイ砂の層、ピュアーベントナイトを装填する概念で、総重量は約 34 トンと現在の PEM 概念より軽くなる。1 日に一体地下に搬送して定置することで物流を大幅に削減できる。

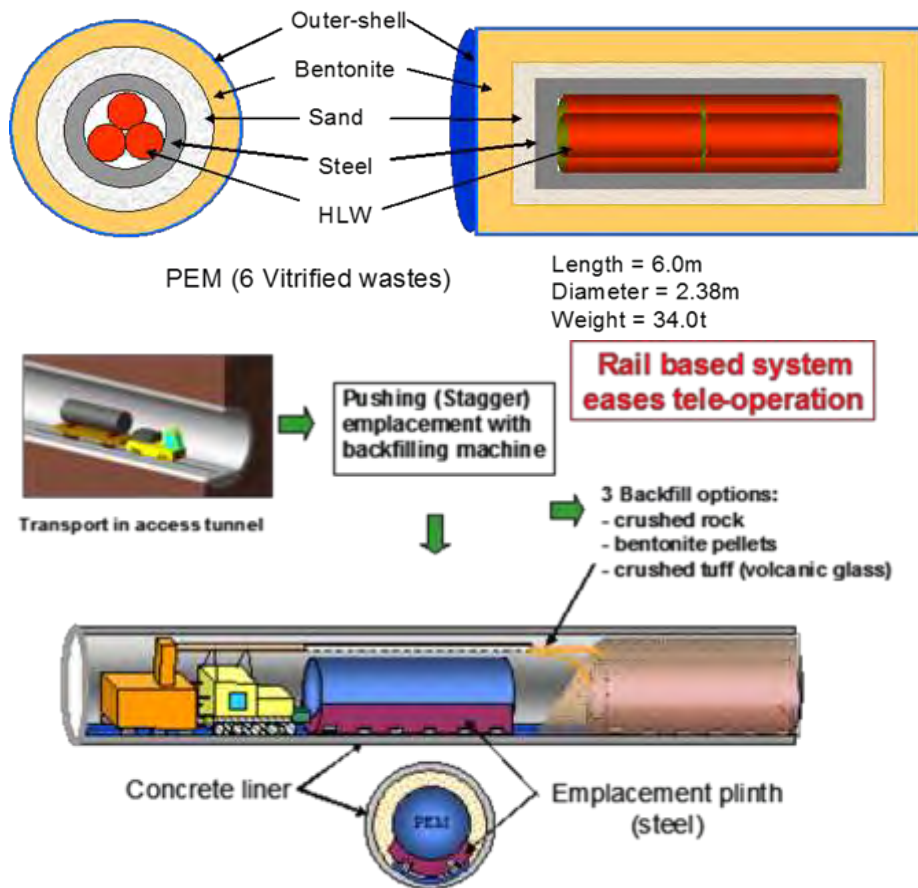


図 2.3.3-19 スーパーPEM 概念

(Kawamura et.al. , Practical and safe implementation of disposal with prefabricated EBS modules, International Conference Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository ,16-18 June 2008, Prague)

2.3.4 技術要素マップの作成

(1) 技術要素マップの枠組み

昨年度検討した技術要素マップ作成の考え方および枠組みに従って、技術要素マップを作成する。作成手順は図 2.3.4-1 に示す通りである。

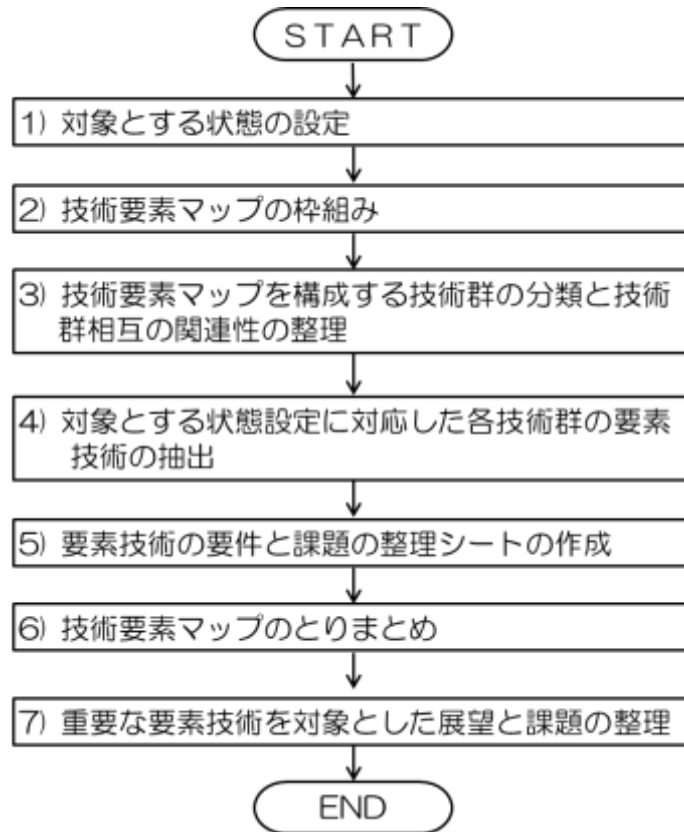


図 2.3.4-1 技術要素マップの作成手順

1) 対象とする状態の設定

技術要素マップの作成にあたり、まずは対象範囲を設定した。技術要素マップの作成は図 2.3.4-2 に示すように、PID による分析を行った検討ケース I～VIの全てのケースを対象とする。図中の赤枠で示した全ての検討ケースを対象とすることにより、回収可能性を維持する状態および期間の違いによる技術要素の変化の傾向が明らかとなる。また、技術要素マップで取り扱う技術要素は、回収の容易性を考慮しない概念から始めるが、将来的な展開も考慮して回収可能性維持に係る合理性（高度化や容易性）を考慮する対策についても検討範囲に含める。

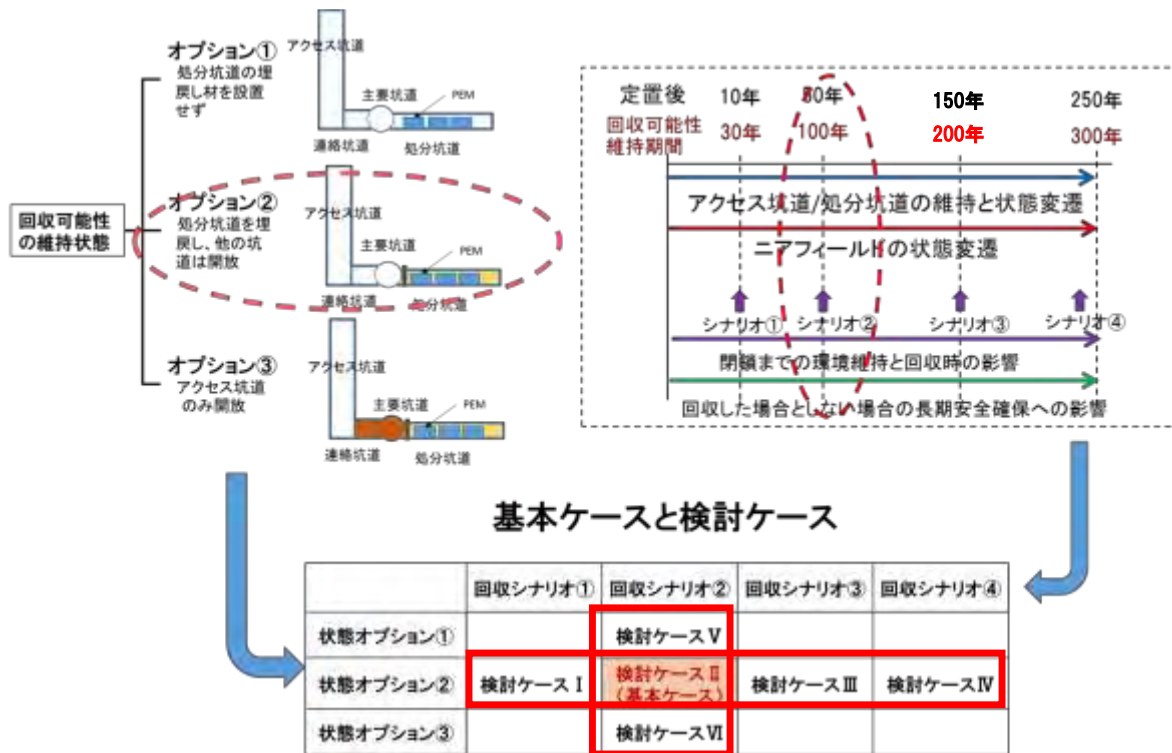


図 2.3.4-2 対象とする状態の設定

2) 技術要素マップの枠組み

技術要素マップは、技術群を系統的に整理したものとす。回収可能性維持に係わる技術は、状態オプションにより変化する回収対象を考慮した技術要素群のマトリクスにより整理する。技術要素マップの枠組みの例を図 2.3.4-3 に示す。技術要素マップの縦軸は各スケールでの対象とする坑道（アクセス坑道および連絡坑道、主要坑道、処分坑道）、処分孔、人工バリアとそれぞれの構成要素（構成部材等）とし、横軸は回収可能性維持に係る技術グループとし、各技術グループは技術要素を含むこととする。ここで、技術要素マップに示される技術要素の網羅性・確実性をさらに高めるために、各坑道等の使用部材とそれらの経時変化を整理して技術要素マップの構成要素として考慮した。すなわち、ある役割を有する構成要素が時間の経過による劣化等により、本来期待された役割が果たせなくなったときには何らかの対策工が必要となり、対応する工学的対策が技術要素マップに示されることとなる。本検討では第 2 次取りまとめを基本としているため、第 2 次取りまとめで示された部材を構成要素として技術要素マップの縦軸に考慮した。また、各構成要素の変化（劣化）は平成 25 年度に実施された地層処分回収技術高度化開発報告書[2]を参照して整理した。

検討ケース毎に作成された技術要素マップを比較することにより、状態オプションや回収シナリオの違いによる技術要素の違いが明らかとなる。

各スケールでの対象とする坑道・PEM・人工バリア

			技術要素					
対象範囲	構成要素	構成要素の変化	技術要素					
			坑道維持更新技術	回収技術	閉鎖後長期安全性への影響評価技術	閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術	事業期間中安全性への影響評価技術	事業期間中安全性への影響低減対策技術
 各スケールでの対象とする坑道・PEM・人工バリア	坑道維持更新スケール 	重コンクリート ひび割れ、崩壊、中性化等による坑道形状および坑内環境の保持機能の低下 吹付コンクリート ひび割れ、崩壊、中性化等による坑道および周辺地盤の力学的安定性確保機能の低下 ロックボルト 腐食等による坑道および周辺地盤の力学的安定性確保機能の低下 鋼製支保工 腐食による坑道および周辺地盤の力学的安定性確保機能の低下 排水システム 目詰まり、腐食等による漏水・排水機能の低下 換気システム 経年劣化による換気機能の低下 グラウト 湧水抑制機能の低下 埋め戻し材 構成要素なし インバートコンクリート ひび割れ、崩壊、中性化等による坑道形状および坑内環境の保持機能の低下 EDZ 熱伝導率、強度、透水性・透気性等の変化 周辺地盤 熱伝導率、強度、透水性・透気性等の変化	坑道維持更新技術	回収技術	閉鎖後長期安全性への影響評価技術	閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術	事業期間中安全性への影響評価技術	事業期間中安全性への影響低減対策技術
	中間スケール 	吹付コンクリート ひび割れ、崩壊、中性化等による坑道および周辺地盤の力学的安定性確保機能の低下 ロックボルト 腐食等による坑道および周辺地盤の力学的安定性確保機能の低下 鋼製支保工 腐食による坑道および周辺地盤の力学的安定性確保機能の低下 排水システム 目詰まり、腐食等による漏水・排水機能の低下 換気システム 経年劣化による換気機能の低下 グラウト 湧水抑制機能の低下 埋め戻し材 構成要素なし インバートコンクリート ひび割れ、崩壊、中性化等による坑道形状および坑内環境の保持機能の低下 EDZ 熱伝導率、強度、透水性・透気性等の変化 周辺地盤 熱伝導率、強度、透水性・透気性等の変化	坑道維持更新技術	回収技術	閉鎖後長期安全性への影響評価技術	閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術	事業期間中安全性への影響評価技術	事業期間中安全性への影響低減対策技術
	主要坑道 	吹付コンクリート ひび割れ、崩壊、中性化等による坑道および周辺地盤の力学的安定性確保機能の低下 ロックボルト 腐食等による坑道および周辺地盤の力学的安定性確保機能の低下 鋼製支保工 腐食による坑道および周辺地盤の力学的安定性確保機能の低下 排水システム 目詰まり、腐食等による漏水・排水機能の低下 換気システム 経年劣化による換気機能の低下 グラウト 湧水抑制機能の低下 埋め戻し材 構成要素なし インバートコンクリート ひび割れ、崩壊、中性化等による坑道形状および坑内環境の保持機能の低下 EDZ 熱伝導率、強度、透水性・透気性等の変化 周辺地盤 熱伝導率、強度、透水性・透気性等の変化	坑道維持更新技術	回収技術	閉鎖後長期安全性への影響評価技術	閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術	事業期間中安全性への影響評価技術	事業期間中安全性への影響低減対策技術
	部分坑道スケール 	吹付コンクリート ひび割れ、崩壊、中性化等による坑道および周辺地盤の力学的安定性確保機能の低下 ロックボルト 腐食等による坑道および周辺地盤の力学的安定性確保機能の低下 鋼製支保工 腐食による坑道および周辺地盤の力学的安定性確保機能の低下 排水システム 目詰まり、腐食等による漏水・排水機能の低下 換気システム 経年劣化による換気機能の低下 グラウト 湧水抑制機能の低下 埋め戻し材 構成要素なし インバートコンクリート ひび割れ、崩壊、中性化等による坑道形状および坑内環境の保持機能の低下 EDZ 熱伝導率、強度、透水性・透気性等の変化 周辺地盤 熱伝導率、強度、透水性・透気性等の変化	坑道維持更新技術	回収技術	閉鎖後長期安全性への影響評価技術	閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術	事業期間中安全性への影響評価技術	事業期間中安全性への影響低減対策技術
		PEM 保護層への影響評価機能および人工バリア一体化機能の低下 保護層材 流食、変質による密封性能の劣化・物理的劣化等の低下 オーバーレイク 腐食による放射線遮蔽の物理的劣化等の低下 ガラス固化体	PEM 保護層への影響評価機能および人工バリア一体化機能の低下 保護層材 流食、変質による密封性能の劣化・物理的劣化等の低下 オーバーレイク 腐食による放射線遮蔽の物理的劣化等の低下 ガラス固化体					

図 2.3.4-3 技術要素マップの枠組みのイメージ

3) 技術要素マップを構成する技術グループの分類と技術グループの相互の関連性の整理

技術要素マップを構成する技術グループについて分類および整理を行った。技術グループの分類は、これまで検討した PID による影響伝搬の分析結果や、回収可能性維持の状態・期間の違いによる、閉鎖後長期および事業期間中の安全性への影響の種類と程度のまとめを踏まえたものである。回収可能性維持に係わる技術体系は、維持状態と回収対象によって、選択される技術要素が異なるものの、図 2.3.4-4 に示す A~F の 6 つの技術群から構成されるものとした。技術群は、ハード技術とソフト技術からなる。

回収可能性維持に伴う技術要素は、回収可能性を維持しつつ回収しない場合と回収する場合に大別でき、それらは、坑道の維持管理・更新技術群と回収技術群からなる。維持管理・更新技術群には、初期品質向上技術や維持管理・更新技術がある。坑道の維持管理・更新と回収の影響として閉鎖後長期の安全性への影響と事業期間中の安全性への影響があると考えられる。さらにそれぞれの安全性への影響について、影響評価技術（ソフト）および影響低減対策技術（ハード）が存在すると考えられる。回収可能性維持による閉鎖後長期の安全性への影響（多重バリアシステムの安全機能への影響）評価技術は、評価対象スケールの違いはあるものの回収しないケースも回収したケースも同様となる。影響低減対策技術は、維持管理・更新技術や回収技術の高度化もしくは合理性向上技術となる。

従って、技術要素のグループは坑道維持更新と回収技術に関する技術、閉鎖後長期の安全性への影響に関する技術、事業期間中の安全性に関する技術に大別され、坑道維持更新と回収技術に関する技術は「坑道維持更新技術（ハード）」、「回収技術（ソフト）」、閉鎖後長期の安全性への影響に関する技術は「閉鎖後長期の安全性への影響評価技術（ソフト）」、「閉鎖後長期の安全性への影響低減対策技術（ハード）」、さらに事業期間中の安全性に関する技術は「事業期間中の安全性への影響評価技術（ソフト）」、「事業期間中の安全性への影響低減対策（ハード）」の技術群に分類するものと設定する。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まとめ、表 2.3.4-1 に示す。ここで示す技術群の技術内容や必要技術例は、状態変遷表、概念成立のための対策工および対策工を考慮した際の PID による影響伝搬の分析に基づき整理した内容となっている。



図 2.3.4-4 回収可能性維持に係わる技術体系

表 2.3.4-1 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

	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	・ハリア性能評価技術(評価手法(シナリオ作成)、モデル化技術、データベース開発)	・多重ハ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 ・人工ハ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、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(高度化やの容易性の向上)の追求

表 2.3.4-1 の技術群の技術内容や必要技術例は、状態変遷表、概念成立のための対策工および対策工を考慮した際の PID による影響伝搬の分析を踏まえた内容となっている。これらの技術群について、技術要素マップ上に示すために技術内容や必要技術例、技術に求められる要件に基づき展開を行い、技術の要素として整理したものを表 2.3.4-2～表 2.3.4-4 に示す。表 2.3.4-2 は「維持更新と回収技術」の「A. 坑道維持更新技術」、「B. 回収技術」についての展開を示している。この二つの技術群は現状技術の延長線上で対応できる技術であることが要件である。「A. 坑道維持更新技術」はハード技術であり、一般的なトンネルで適用されている「A-1：支保工等の維持管理・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」へと展開した。技術要素の具体的な内容は、「A-1：支保工等の維持管理・更新技術」、「A-2：排水・換気設備、その他の維持管理・更新技術」共に異常発生監視・点検技術、劣化診断技術、補強・修復技術となる。「B. 回収技術」は廃棄体回収時に用いる一連のハード技術であり、「B-1：廃棄体へのアクセス技術」、「B-2：廃棄体回収・搬出技術」、「B-3：回収後の維持管理技術」に展開した。技術要素の具体的な内容は、「B-1：廃棄体へのアクセス技術」については、プラグ撤去技術、埋め戻し材除去技術となり、「B-2：廃棄体回収・搬出技術」については、回収用設備・機材設置技術、廃棄体（PEM）回収技術となる。「B-3：回収後の維持管理技術」については、埋め戻し技術、廃棄体管理技術となる。この「B.回収技術」については必要な一連のタスクの詳細について 2.3.1(4)で述べた。

表 2.3.4-3 は「閉鎖後長期の安全性」の「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」についての展開を示している。「C.閉鎖後長期安全性への影響評価技術」はソフト技術であり、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が要件である。技術の展開としては「C-1：バリア性能 評価技術」にまとめられる。技術要素の具体的な内容は、評価手法〔シナリオ設定〕、モデル設定、データベース開発となる。「D.閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術」は、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ハード技術である。これは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や、長期への影響を考慮した合理性（高度化や容易性の向上）に関する技術であり、「D-1：坑道維持更新技術の高度化」、「D-2：回収技術の合理性向上」、「D-3：計測・測定技術（モニタリング技術）の高度化」に展開した。技術要素の具体的な内容は、「D-1：坑道維持更新技術の高度化」については、技術群「A. 坑道維持更新技術」の高度化であり、初期品質向上と維持・更新高度化となる。「D-2：回収技術の合理性向上」については、「B. 回収技術」の高度化となる。「D-3：計測・測定技術（モニタリング技術）の高度化」は坑道維持、周辺環境影響、回収に係る計測・測定技術となる。

表 2.3.4-4 は「事業期間中の安全性」の「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」についての展開を示している。「E.事業期間中安全性への影響評価技術」は、坑道開放および回収作業時の作業量及び作業の安全性確保、周辺環境影響、コスト評価のためのソフト技術であり、「E-1：作業評価技術」、「E-2：環境影響評価技術」、「E-3：コスト評価技術」に展開した。技術要素の具体的な内容は、「E-1：作業評価技術」については、放射性安全評価、一般労働安全評価であり、「E-2：環境影響評価技術」は環境影響評価、「E-3：コスト評価技術」はコスト評価となる。「F.事業期間中安全性への影響低減対策技術」は、坑道開放および回収に伴う影響を低減するためのハード技術である。すなわち、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や、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）に関する技術であり、「F-1：坑道維持更新技術の高度化」、「F-2：回

収技術の合理性向上」、「F-3：計測・測定技術（モニタリング技術）の高度化」へと展開した。技術要素の具体的な内容は、「F-1：坑道維持更新技術の高度化」については、技術群「A. 坑道維持更新技術」の高度化であり、初期品質向上と維持・更新高度化となる。「D-2：回収技術の合理性向上」については、「B. 回収技術」の高度化となり、「D-3：計測・測定技術（モニタリング技術）の高度化」は坑道維持、周辺環境影響、回収に係る計測・測定技術となる。

表 2.3.4-2 技術要素マップにおける技術群の展開（技術群 A および技術群 B：維持更新と回収技術）

		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、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 2.3.4-3 技術要素マップにおける技術群の展開（技術群 C および技術群 D：閉鎖後長期の安全性）

技術の分類		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 2.3.4-4 技術要素マップにおける技術群の展開（技術群 E および技術群 F：事業期間中の安全性）

技術の分類		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、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	・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	・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	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)

前述した技術群のうち「B.回収技術」について、回収時に想定される必要なタスクと作業内容をまとめて表 2.3.4-5 に再掲する。なお、回収は「一部を回収する場合」と「全量回収する場合」に分けられるが、両者は回収の対象となる廃棄体の量は異なるが、必要となる回収技術群は同じと考えられる。

タスク R-1 および R-2 は回収の前段階として必要なタスクを示している。タスク R-3～R-10 は回収技術であり、これらは「廃棄体へのアクセス技術（撤去・補強技術）」、「廃棄体回収・搬出技術」、「回収後の維持管理技術（埋め戻し技術等）」に大別される。基本ケースにおける回収シナリオの展開例を表 2.3.4-6 に示す。

表 2.3.4-5 想定される回収に必要なタスクと作業内容

タスク No.	タスク	作業内容
R-1	回収作業の準備	<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
R-2	アクセス坑道の健全性確認・補強	<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
R-3	処分坑道プラグ撤去	<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
R-4	処分坑道埋戻し材撤去	<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
R-5	回収用設備・機材の設置	<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
R-6	PEM の回収・搬出	<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
R-7	PEM 撤去後の処分坑道内確認	<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
R-8	処分坑道の埋戻し	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道埋戻し 端部処理
R-9	主要坑道の埋戻し	<ul style="list-style-type: none"> 主要坑埋戻し 端部処理
R-10	連絡坑道・アクセス坑道の埋戻し	<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
R-11	回収用地上施設の解体撤去	<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

表 2.3.4-6 基本ケースの回収シナリオの展開 (例)

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

(2) 技術要素マップの作成

1) 対象とする状態設定に対応した各技術群の要素技術の抽出

(1)で示した技術要素マップの枠組みに基づき、検討ケースⅠ～Ⅵの技術要素マップを次ページ以降の表 2.3.4-7～表 2.3.4-12 に示す。

次ページに示す表 2.3.4-7 は検討ケースⅡ（基本ケース）の技術要素マップである。検討ケースⅢは状態オプション②、回収シナリオ②であり、アクセス坑道、連絡坑道、主要坑道が開放され、処分坑道にプラグが設置されて処分坑道および処分孔が埋め戻された状態、回収可能性維持期間を 100 年と想定した検討ケースである。

検討ケースⅡの技術要素マップにおける各技術群の技術要素は以下のとおりと考えられる。

技術群「A. 坑道維持更新技術」は開放されているアクセス坑道、連絡坑道、主要坑道および処分坑道に設置されたプラグに対して必要となる。その中で、「A-1：支保工等の維持管理・更新技術」は支保工等を対象としており、「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」は開放された坑道内に設置された排水システムや換気システムに必要な技術である。

技術群「B.回収技術」のうち、「B-1：廃棄体へのアクセス技術」は埋め戻し状態にある処分坑道に対して必要な技術であり、「B-2：廃棄体回収・搬出技術」は PEM および人工バリアに対して必要な技術である。「B-3：回収後の維持管理技術」は回収後の埋め戻し技術等であるため、全ての坑道に必要な技術となる。

技術群「C.閉鎖後長期安全性への影響評価技術」は「C-1：バリア性能評価技術」であり、回収可能性維持状態で存在する構成要素のうち、閉鎖後にも残る全ての構成要素に対して必要となる。

技術群「D.閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術」のうち、「D-1：坑道維持更新技術の高度化」は回収可能性維持状態で存在する構成要素のうち、閉鎖後にも残る人工バリア以外の全ての構成要素に対して必要となる技術である。「D-2：回収技術の合理性向上」は埋め戻し状態にある処分坑道、PEM および人工バリアに対して必要となる。「D-3：計測・測定技術（モニタリング技術）の高度化」は対象となる構成要素の埋め戻し状態に関わらず、回収可能性維持状態で存在する全ての構成要素に必要な技術となる。

技術群「E.事業期間中安全性への影響評価技術」は「E-1：作業評価技術」、「E-2：環境影響評価技術」、「E-3：コスト評価技術」であり、回収可能性維持状態で存在する全ての構成要素に対して必要となる。

技術群「F.事業期間中安全性への影響低減対策技術」のうち、「F-1：坑道維持更新技術の高度化」は開放されているアクセス坑道、連絡坑道、主要坑道および処分坑道に設置されたプラグに対して必要となる。「F-2：回収技術の合理性向上」は回収時に作業対象となる埋め戻し状態にある処分坑道、PEM および人工バリアに対して必要となる。「F-3：計測・測定技術（モニタリング技術）の高度化」は対象となる構成要素の埋め戻し状態に関わらず、回収可能性維持状態で存在する全ての構成要素に必要な技術となる。

検討ケースⅠ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵの技術要素マップ（表 2.3.4-8～表 2.3.4-12）について次ページ以降に示すとともに、それぞれの検討ケースと検討ケースⅡとの比較について記載する。

検討ケースⅠは状態オプション②、回収シナリオ①であり、アクセス坑道、連絡坑道、主要坑道が開放され、処分坑道にプラグが設置されて処分坑道および処分孔が埋め戻された状態、回収可能性維持期間を 30 年と想定した検討ケースである。検討ケースⅠの技術要素マップは基本ケースである検討ケースⅡと同じ結果となった。これは、回収維持期間が変化した場合には必要となる技術を適用する頻度は変化するが、必要となる技術自体は変わらないと考えられるためである。

検討ケースⅢは状態オプション②、回収シナリオ③であり、アクセス坑道、連絡坑道、主要坑道が開放され、処分坑道にプラグが設置されて処分坑道および処分孔が埋め戻された状態、回収可能性維持期間を 200 年と想定した検討ケースである。検討ケースⅢの技術要素マップは基本ケースである検討ケースⅡと同じ結果となった。これは、回収維持期間が変化した場合には必要となる技術を適用する頻度は変化するが、必要となる技術自体は変わらないと考えられるためである。ただし、国内のトンネルにおける供用実績は 100 年程度であり、200 年という期間での維持管理の経験は無いことに留意する必要がある。

検討ケースⅣは状態オプション②、回収シナリオ④であり、アクセス坑道、連絡坑道、主要坑道が開放され、処分坑道にプラグが設置されて処分坑道および処分孔が埋め戻された状態、回収可能性維持期間を 300 年と想定した検討ケースである。検討ケースⅣの技術要素マップは基本ケースである検討ケースⅡと同じ結果となった。これは、回収維持期間が変化した場合には必要となる技術を適用する頻度は変化するが、必要となる技術自体は変わらないと考えられるためである。ただし、国内のトンネルにおける供用実績は 100 年程度であり、300 年という期間での維持管理の経験は無いことに留意する必要がある。

検討ケースⅤは状態オプション①、回収シナリオ②であり、アクセス坑道、連絡坑道、主要坑道、処分坑道が開放され、処分孔に廃棄体（PEM）が定置された維持状態で、回収可能性維持期間を 100 年と想定した検討ケースである。検討ケースⅤの技術要素マップは基本ケースである検討ケースⅡと比較して、坑道の維持更新に係る技術要素が大幅に増加し、回収に係る技術要素が減少した。これは、状態オプション（埋め戻し状態）が変化したことにより、維持更新および回収それぞれの技術要素を必要とする構成要素が変化したためである。

検討ケースⅥは状態オプション③、回収シナリオ②であり、アクセス坑道が開放され、連絡坑道、主要坑道、処分坑道が埋め戻された維持状態で、回収可能性維持期間を 100 年と想定した検討ケースである。検討ケースⅥの技術要素マップは基本ケースである検討ケースⅡと比較して、坑道の維持更新に係る技術要素が減少し、回収に係る技術要素が増加した。これは、状態オプション（埋め戻し状態）が変化したことにより、維持更新および回収それぞれの技術要素を必要とする構成要素が変化したためである。

2) 要素技術の要件と課題の整理シートの作成

技術要素マップに示した各技術群の技術要素について、展開と技術内容の整理を行うことにより、技術課題の抽出を行った。いくつかの技術要素についてはこれまで各事業者、学会、研究機関等がそれぞれの分野で体系的に整理した技術体系や研究成果が文献としてあるため、技術要素の展開と技術内容の整理のためにそれらの文献を参照した。技術課題の抽出は回収可能性を維持するための技術の課題という観点で行うが、文献に技術の適用実績や研究成果が十分に示され、回収可能性を維持するための技術としても適用可能と考えられる技術要素については、本検討での技術課題はなしとした。

図 2.3.4-5～図 2.3.4-15 に技術要素展開表として技術要素ごとの詳細な分類と課題を示す。図中の技術内容の文献等参照先は簡略化した表記としているため、以下にまとめて列挙して、末尾の参考文献に詳細を記す。

A. 坑道維持更新技術

A-1：支保工等の維持管理・更新技術

- ・トンネルの維持管理（土木学会） [7]
- ・トンネル補修・補強マニュアル（鉄道総合技術研究所） [8]

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

- ・トンネル標準示方書（土木学会） [9]

B.回収技術

B-1：廃棄体へのアクセス技術、B-2：廃棄体回収・搬出技術、B-3：回収後の維持管理技術

- ・本報告書 2.3.1(4)
- ・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（RWMC） [10]
- ・平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発平成 27 年度報告書（RWMC） [2]

C.閉鎖後長期安全性への影響評価技術

C-1：バリア性能評価技術

- ・第 2 次取りまとめ分冊 3（JNC） [4]
- ・地層処分事業の技術開発計画（NUMO） [11]

D.閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術

D-1：坑道維持更新技術の高度化

- ・トンネル標準示方書（土木学会） [9]
- ・トンネルの維持管理（土木学会） [7]
- ・トンネル補修・補強マニュアル（鉄道総合技術研究所） [8]
- ・「鉄道総研報告」（鉄道総合技術研究所） [12]

D-2：回収技術の合理性向上

- ・「Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-level

Radioactive Waste and Spent Fuel」(OECD/NEA) [1]

D-3 : 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化

- ・処分場の安全機能と技術要件(NUMO) [13]
- ・地層処分事業の技術開発計画(NUMO) [11]
- ・処分システム工学確証技術開発 モニタリング関連技術の整備(RWMC) [14]

E. 事業期間中安全性への影響評価技術

E-1 : 作業評価技術

- ・処分場の安全機能と技術要件(NUMO) [13]
- ・「廃棄物管理施設の保安規定」(日本原燃株式会社) [15]
- ・トンネル標準示方書(土木学会) [9]

E-2 : 環境影響評価技術

- ・処分場の安全機能と技術要件(NUMO) [13]
- ・地層処分事業の技術開発計画(NUMO) [11]
- ・改訂・発電所に係る環境影響評価の手引(経済産業省) [16]

E-3 : コスト評価技術

- ・「岩盤構造物の建設と維持管理におけるマネジメント」(土木学会) [17]

F. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術

F-1 : 坑道維持更新技術の高度化

- ・トンネル標準示方書(土木学会) [9]
- ・トンネルの維持管理(土木学会) [7]
- ・トンネル補修・補強マニュアル(鉄道総合技術研究所) [8]
- ・「鉄道総研報告」(鉄道総合技術研究所) [12]

F-2 : 回収技術の合理性向上

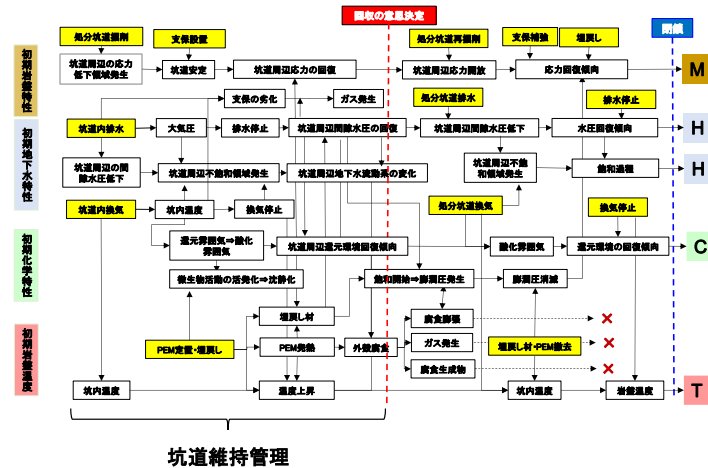
- ・「Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel」(OECD/NEA) [1]

F-3 : 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化

- ・処分場の安全機能と技術要件(NUMO) [13]
- ・地層処分事業の技術開発計画(NUMO) [11]
- ・処分システム工学確証技術開発 モニタリング関連技術の整備(RWMC) [14]

A. 坑道維持更新技術
A-1. 支保工等の維持管理・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

<内容>
 回収可能性維持のために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
 <求められる要件>
 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)

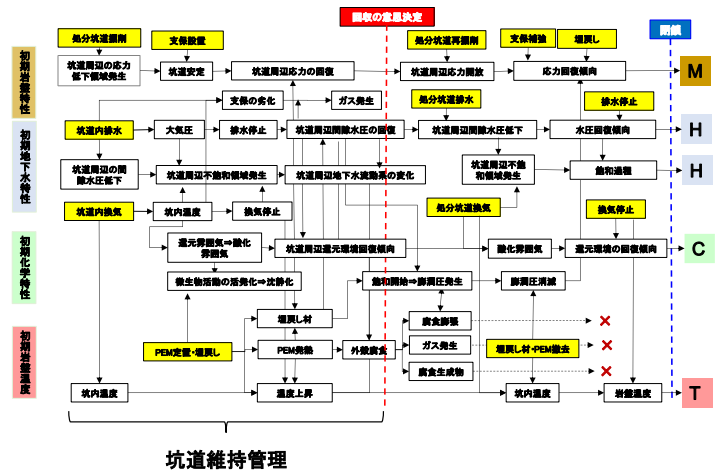


A. 坑道維持更新技術		技術の内容	技術内容の文献等参照先	課題
A-1 支保工等の維持管理・更新技術	A-1-1: 異常発生監視・点検技術	一般的なトンネルで実施されている段階的な点検の実施や非破壊調査、材料試験の技術。	・「トンネルの維持管理」(土木学会) ・「トンネル補修・補強マニュアル」(鉄道総合技術研究所)	— (既存のため)
	A-1-2: 劣化診断技術	点検により坑道の変状が確認された場合、その点検結果に基づいて変状の判定を行う。判定は健全度などの指標を用いる。変状が機能に与える影響の程度や危険度を判断する技術。	・「トンネルの維持管理」(土木学会) ・「トンネル補修・補強マニ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

図 2.3.4-5 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」の整理と課題

A. 坑道維持更新技術
A-1. 支保工等の維持管理・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

＜内容＞
 回収可能性維持のために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
 ＜求められる要件＞
 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. 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)

図 2.3.4-6 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」の整理と課題

B. 回収技術

B-1. 廃棄体へのアクセス技術

B-2. 廃棄体回収・搬出技術

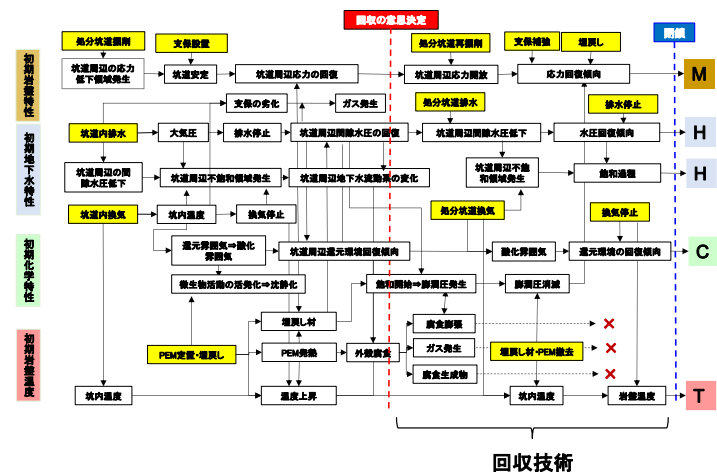
B-3. 回収後の維持管理技術

<内容>

廃棄体回収時に用いる一連の技術。廃棄体へのアクセス、回収、搬出、管理等の技術。

<求められる要件>

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		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。	<ul style="list-style-type: none"> ・(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 	<p>—</p> <p>(既存のため)</p> <p>※ただし、維持状態・期間を想定した工程・コスト評価が必要</p>
	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。	<ul style="list-style-type: none"> ・(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 	<p>—</p> <p>(既存のため)</p> <p>※ただし、維持状態・期間を想定した工程・コスト評価が必要</p>

図 2.3.4-7 技術要素展開表 技術群 B. 回収技術「B-1. 廃棄体へのアクセス技術」の整理と課題

B. 回収技術

B-1. 廃棄体へのアクセス技術

B-2. 廃棄体回収・搬出技術

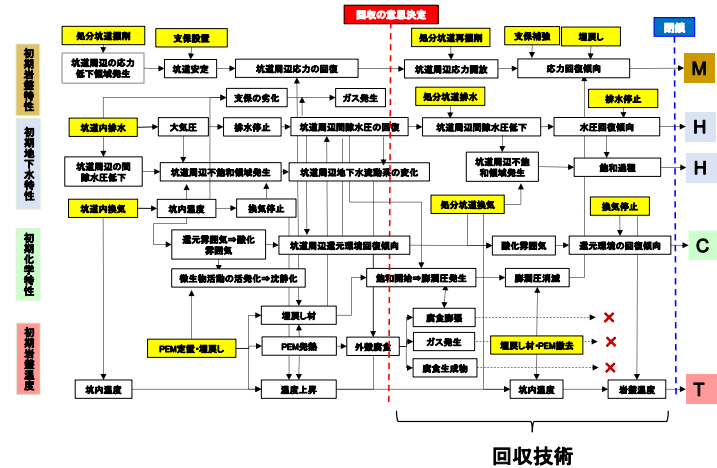
B-3. 回収後の維持管理技術

<内容>

廃棄体回収時に用いる一連の技術。廃棄体へのアクセス、回収、搬出、管理等の技術。

<求められる要件>

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		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。	<ul style="list-style-type: none"> ・(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 	<p>—</p> <p>(既存のため)</p> <p>※ただし、維持状態・期間を想定した工程・コスト評価が必要</p>
	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。	<ul style="list-style-type: none"> ・(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 	<p>—</p> <p>(既存のため)</p> <p>※ただし、維持状態・期間を想定した工程・コスト評価が必要</p>

図 2.3.4-8 技術要素展開表 技術群 B「B-2. 廃棄体回収・搬出技術」の整理と課題

B. 回収技術

B-1. 廃棄体へのアクセス技術

B-2. 廃棄体回収・搬出技術

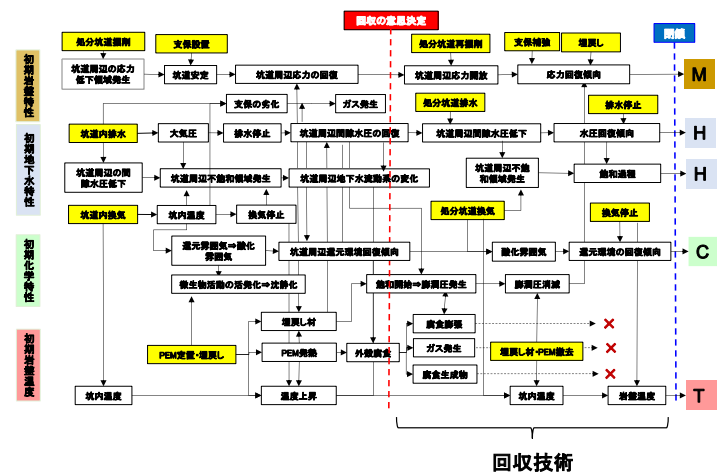
B-3. 回収後の維持管理技術

<内容>

廃棄体回収時に用いる一連の技術。廃棄体へのアクセス、回収、搬出、管理等の技術。

<求められる要件>

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		技術の内容	技術内容の文献等参照先	課題
B-3 回収後の維持管理技術	B-3-1: 処分坑道・主要坑道埋戻し技術	埋め戻し技術。作業中の埋め戻しと同様。	<ul style="list-style-type: none"> ・(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-3-2: 連絡坑道・アクセス坑道埋戻し技術	埋め戻し技術。閉鎖行為と同じ。	<ul style="list-style-type: none"> ・(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-3-3: 回収後維持管理技術	回収後の維持管理技術。	<ul style="list-style-type: none"> ・(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

図 2.3.4-9 技術要素展開表 技術群 B. 回収技術「B-3. 回収後の維持管理技術」の整理と課題

C. 閉鎖後長期安全性への影響評価技術

C-1. バリア性能評価技術

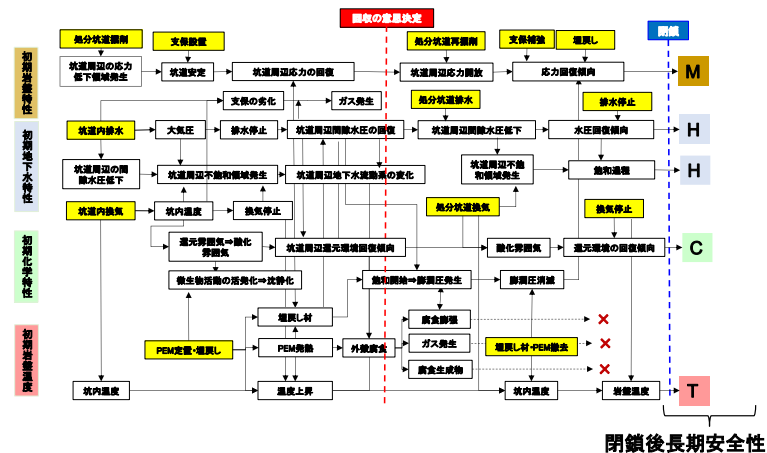
<内容>

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

<求められる要件>

- 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)

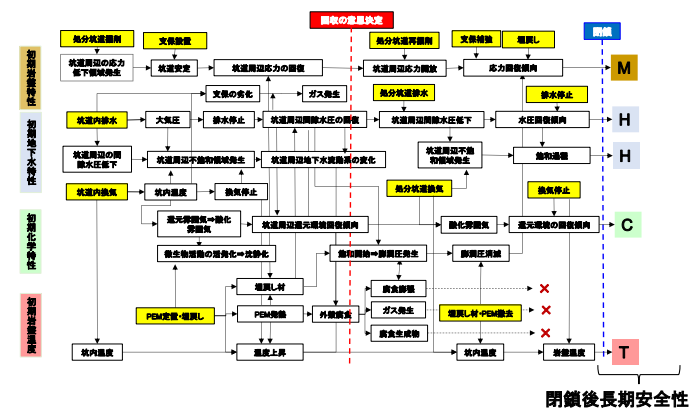


C. 閉鎖後長期安全性への影響評価技術		技術の内容	技術内容の文献等参照先	課題
C-1 バリア性能評価技術	C-1-1: 評価手法	得られる情報に基づく評価をするためのシナリオ設定	<ul style="list-style-type: none"> 第2次取りまとめ分冊3(JNC) 地層処分事業の技術開発計画(NUMO) 	— (既存のため)
	C-2-1: モデル設定	シナリオを評価するためのモデル設定、解析コードの準備	<ul style="list-style-type: none"> 第2次取りまとめ分冊3(JNC) 地層処分事業の技術開発計画(NUMO) 	— (既存のため)
	C-3-1: データベース開発	モデルに基づき定量的な評価をするためのデータベース開発	<ul style="list-style-type: none"> 第2次取りまとめ分冊3(JNC) 地層処分事業の技術開発計画(NUMO) 	回収可能性維持状態・期間による、安全機能への影響を評価するためのデータ整備状況調査、データ整備

図 2.3.4-10 技術要素展開表 技術群 C. 閉鎖後長期安全性への影響評価技術「C-1. バリア性能評価技術」の整理と課題

D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術
D-1. 坑道維持更新技術の高度化
D-2. 回収技術の合理性向上
D-3. 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化

<内容>
 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
 <求められる要件>
 ・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

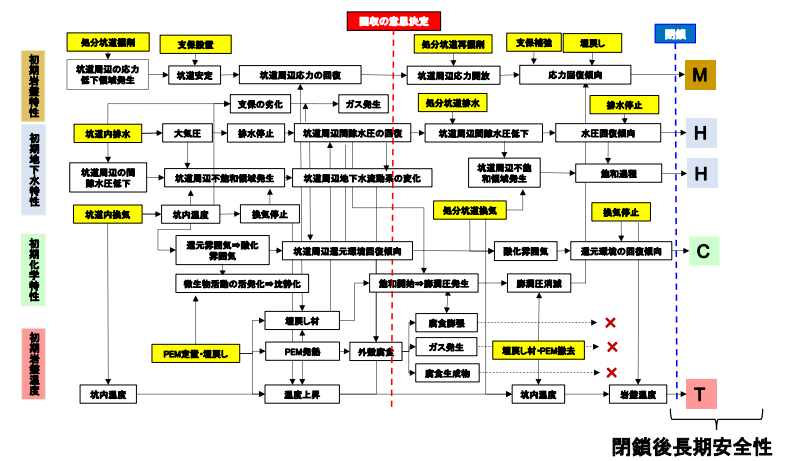


D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術		技術の内容	技術内容の文献等参照先	課題
D-1 坑道維持更新技術の高度化	D-1-1: 初期性能向上	「A.維持更新技術」の高度化。 覆工の処分場への適用性検討、埋め戻し材流出防止のための湧水抑制(グラウト)技術、高耐久性材料・設備による更新頻度低減技術等	・「トンネル標準示方書」(土木学会) ・「トンネルの維持管理」(土木学会) ・「トンネル補修・補強マニュアル」(鉄道総合技術研究所) ・「鉄道総研報告」(鉄道総合技術研究所) ・NEXCO総研各種書籍(NEXCO総研)など	回収可能性維持状態・期間を想定した処分場への水理学的・地化学的影響と対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)	・「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・期間を考慮した狭い空間での維持更新技術高度化(PEMが定置されない状態の坑道での技術は各事業者等で技術開発・研究実施中)

図 2.3.4-11 技術要素展開表 技術群 D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術「D-1. 坑道維持更新技術の高度化」の整理と課題

D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術
D-1. 坑道維持更新技術の高度化
D-2. 回収技術の合理性向上
D-3. 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化

<内容>
 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
 <求められる要件>
 ・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



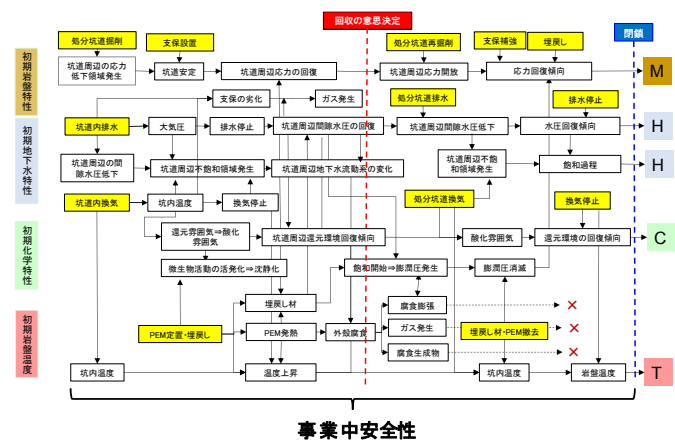
2-126

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-2 回収技術の合理性向上	D-2-1: 回収技術の合理性向上	「B.回収技術」の高度化。回収による長期安全性への影響低減対策	・「Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel」(OECD/NEA) など	回収技術のさらなる高度化、合理化技術の検討
D-3 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化	D-3-1: 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化	坑道維持による影響、周辺環境影響、回収による影響に係る計測・測定技術	・処分場の安全機能と技術要件(NUMO) ・地層処分事業の技術開発計画(NUMO) ・処分システム工学確証技術開発モニタリング関連技術の整備(RWMC)	回収可能性維持状態・期間を想定した項目や手法に応じた計測・測定技術(モニタリング技術)の整備

図 2.3.4-12 技術要素展開表 技術群 D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術「D-2. 回収技術の合理性向上」、「D-3. 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化」の整理と課題

E. 事業中安全性への影響評価技術
E-1. 作業評価技術
E-2. 環境影響評価技術
E-3. コスト評価技術

<内容>
 坑道開放および回収作業時の作業、周辺環境影響、コスト評価のための技術
 <求められる要件>
 ・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

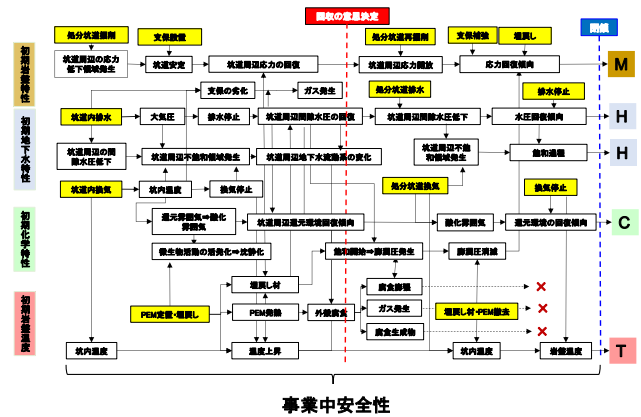


E. 事業中安全性への影響評価技術		技術の内容	技術内容の文献等参照先	課題
E-1 作業評価 技術	E-1-1: 放射線安全評価 技術	放射線防護(作業時閉じ込め、放射線遮へい)等による放射線被ばく管理技術	・処分場の安全機能と技術要件(NUMO) ・「廃棄物管理施設の保安規定」(日本原燃株式会社) など	— (既存のため)
	E-1-2: 一般労働安全評価 技術	災害発生・拡大防止、災害時避難経路確保等による作業環境保持管理技術	・「トンネル標準示方書」(土木学会) など	— (既存のため)
E-2 環境影響 評価技術	E-2-1: 予測・評価技術	環境影響の把握および対策のための予測、評価技術	・処分場の安全機能と技術要件(NUMO) ・地層処分事業の安全確保(NUMO) ・改訂・発電所に係る環境影響評価の手引(経済産業省) など	— (既存のため)
E-3 コスト評価 技術	E-3-1: コスト評価技術	回収可能性維持に要するコストの評価LCC算定・指標とするアセットマネジメント等の維持管理マネジメント技術	・「岩盤構造物の建設と維持管理におけるマネジメント」(土木学会) など	コスト評価のための根拠データ整備

図 2.3.4-13 技術要素展開表 技術群 E. 事業中安全性への影響評価技術「E-1. 作業評価技術」、「E-2. 環境影響評価技術」、「E-3. コスト評価技術」の整理と課題

F. 事業中安全性への影響低減対策技術
F-1. 坑道維持更新技術の高度化
F-2. 回収技術の合理性向上
F-3. 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化

<内容>
 坑道開放と回収に伴う影響を低減するための技術
 <求められる要件>
 ・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
 ・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

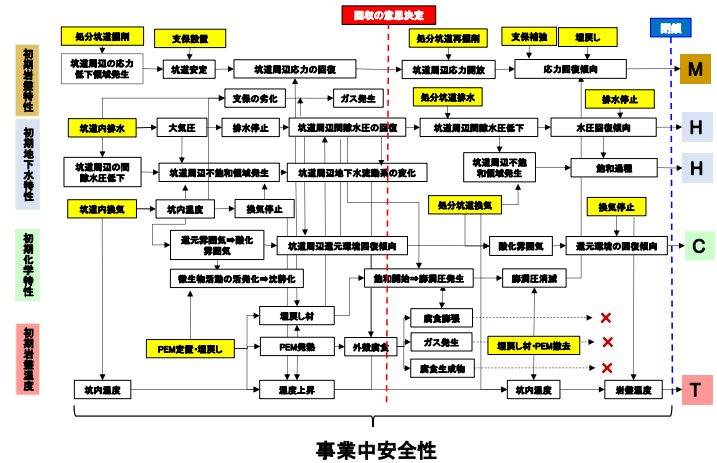


F. 事業中安全性への影響低減対策技術		技術の内容	技術内容の文献等参照先	課題
F-1 坑道維持更新技術の高度化	F-1-1: 初期性能向上	「A.維持更新技術」の高度化。覆工の処分場への適用性検討、湧水抑制(グラウト)技術、高耐久性材料・設備による更新頻度低減技術、等	・「トンネル標準示方書」(土木学会) ・「トンネルの維持管理」(土木学会) ・「トンネル補修・補強マニュアル」(鉄道総合技術研究所) ・「鉄道総研報告」(鉄道総合技術研究所) ・NEXCO総研各種書籍(NEXCO総研) など	回収可能性維持状態・期間を想定した処分場への水理的・地化学的影響と対策工効果の定量的評価(力学的安定性確保技術は既存、高耐久性材料・設備は各事業者等で技術開発・研究実施中)
	F-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)、環境保全対策技術等	・「トンネル標準示方書」(土木学会) ・「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・期間を想定した対策工効果の定量的評価と狭い空間での維持更新技術高度化(PEMが定置されない状態の坑道での維持・更新高度化は各事業者等で技術開発・研究実施中)

図 2.3.4-14 技術要素展開表 技術群 F. 事業中安全性への影響低減対策技術「F-1. 坑道維持更新技術の高度化」の整理と課題

F. 事業中安全性への影響低減対策技術
F-1. 坑道維持更新技術の高度化
F-2. 回収技術の合理性向上
F-3. 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化

<内容>
 坑道開放と回収に伴う影響を低減するための技術
 <求められる要件>
 ・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
 ・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. 事業中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
F-2 回収技術の合理性向上	F-2-1: 回収技術の合理性向上	「B.回収技術」の高度化。回収による事業期間中の安全性への影響低減対策	・「Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel」(OECD/NEA) など	回収技術のさらなる高度化、合理化技術の検討
F-3 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化	F-3-1: 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化	坑道維持による影響、周辺環境影響、回収による影響に係る計測・測定技術	・処分場の安全機能と技術要件(NUMO) ・地層処分事業の技術開発計画(NUMO) ・処分システム工学確証技術開発モニタリング関連技術の整備(RWMC)	回収可能性維持状態・期間を想定した項目や手法に応じた計測・測定技術(モニタリング技術)の整備

図 2.3.4-15 技術要素展開表 技術群 F. 事業中安全性への影響低減対策技術「F-2. 回収技術の合理性向上」、「F-3. 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化」の整理と課題

3) 技術要素マップのとりまとめ


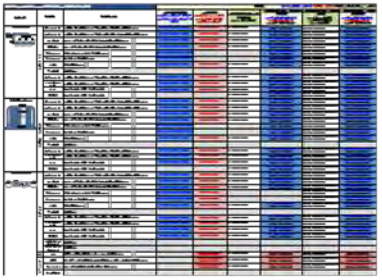
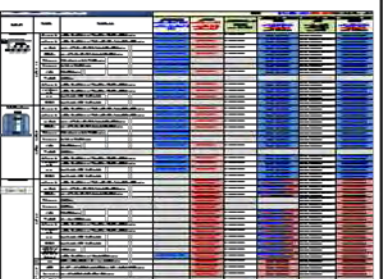

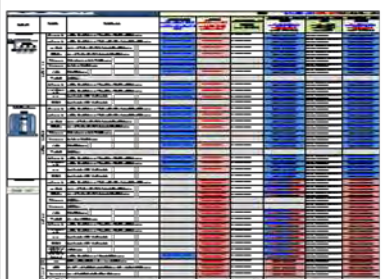

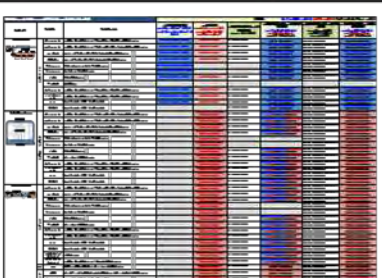
2)で示した各検討ケースの技術要素マップについて、回収可能性を維持する状態（状態オプション）と維持期間（回収シナリオ）で整理して表 2.3.4-13 に示す。技術要素マップの維持更新に係る技術要素については青塗り、回収に係る技術要素については赤塗りで区別して表示した。ここで、状態オプションおよび回収シナリオの違いによる技術要素マップの変化をみる。状態オプションの違いに着目すると、定置後の初期の事業段階の状態（埋め戻しがされない状態）で回収可能性を維持すると、坑道を開放しておくことによる処分施設の安全性への影響が大きくなるため、維持更新の技術要素は多く、施設の維持管理・更新にコストがかかることが考えられる。しかし、回収に係る技術要素は少なく、これは廃棄体を回収するために除去しなくてはならない部材が少ないためであり、回収は定置作業とほぼ逆動線となるため必要な工程も短く、コストは低くなることが予想される。一方、定置後の事業段階が進んだ状態（埋め戻しが進んだ状態）で回収可能性を維持すると、開放される坑道範囲が狭くなることから処分施設の安全性への影響が小さくなるため維持更新に係る技術要素群は減少し、それに伴い施設の維持管理・更新のコストは低くなると考えられる。しかし、回収作業の観点からは、廃棄体を回収するために除去しなくてはならない部材が多くなるため回収に係る技術要素は多くなり、回収作業に時間を要し、コストも高くなることが予想される。一方、回収維持期間の違いに着目した技術要素マップの違いは認められなかった。これは、回収維持期間が変化した場合には必要となる技術を適用する頻度は増大するが、必要となる技術自体は変わらないためと考えられる。

この結果は、本検討書の冒頭で示した OECD/NEA の Reversibility and Retrievability (R&R) プロジェクトの最終報告書 [1]における事業段階ごとの回収可能性（回収の容易性）、安全確保の考え方等の関係を整理した図 1.1.2-1 が示している内容と同義であると考えられる。回収可能性維持における事業段階（埋め戻し段階）の進捗において、施設の維持管理・更新の容易性（コスト）と回収の容易性（コスト）は相反する関係にある。また、施設の維持管理・更新の容易性（コスト）と回収の容易性（コスト）は回収可能性維持期間によって、それぞれの増減の傾きが変化することも考えられる。今後は、回収可能性維持期間に応じて「維持性」および「回収性」を考慮した QCDSE（品質、コスト、工期、安全、環境）が最適となる回収可能性維持の状態や定置方式について具体的な方策を示していくことが課題として考えられる。

今後は「回収の容易性を考慮した処分場の概念を構築し、廃棄体を安全かつ合理的に回収する技術を準備する」ことを視野に入れた回収可能性維持の検討が必要と考える。

表 2.3.4-13 技術要素マップの状態オプションおよび回収シナリオの変化に関する整理

■ :維持更新に係る技術要素群 ■ :回収に係る技術要素群

	回収シナリオ①	回収シナリオ②	回収シナリオ③	回収シナリオ④
				
状態オプション①				
状態オプション②				
状態オプション③				

維持更新の技術要素群は減少、回収の技術要素群は増加

(3) 技術群の展望と技術課題の整理

(2)の技術群の展開と整理によって抽出した技術的課題について、今後開発すべき事項を明らかにするため、技術群ごとに再整理して表 2.3.4-14 に示す。

表中の技術群 A. 坑道維持更新技術は、現状技術の延長線上で対応できる技術であることが要件であり、技術は既存であるため課題は特に挙げていない。ただし、後述する技術群 D, F の影響低減効果を評価するためのベースとなる比較対象となるため、現在想定されている概念で回収可能性維持状態および期間を想定した処分場への影響の定量的評価が必要となることが考えられる。

技術群 B.回収技術についても、現状技術の延長線上で対応できる技術であることを要件としているため、課題は特に挙げていない。ただし、後述する技術群 D, F の影響低減効果を評価するためのベースとなる比較対象となるため、既存技術の実証実験の結果等を踏まえ、回収可能性維持状態および期間を想定した工程・コストの評価が必要となると考えられる。

技術群 C. 閉鎖後長期安全性への影響評価技術は、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が要件であるが、評価手法やモデル化技術については既存であることから課題は挙げていない。しかし、回収可能性維持を想定したときの評価手法やモデル化技術で用いるためのデータベースの整備は課題と考えられる。まずはデータ整備の状況を確認し、必要に応じてデータを整備していく必要がある。

技術群 D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術は、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や長期への影響を考慮した合理性（高度化や容易性の向上）が要件の技術であり、(2)の技術群の展開と整理で挙げた工学的対策に関する維持状態・期間を想定した水理学的・地化学的影響への効果の定量的評価や、回収技術のさらなる高度化、合理化技術の検討が必要と考えられるため課題として挙げた。また、回収可能性維持状態や期間を想定した閉鎖後長期安全性への影響、その影響に対する低減対策効果を確認するための計測・測定技術についての整備も併せて行う必要があるため、これも課題とした。

技術群 E. 事業期間中安全性への影響評価技術は、労働安全衛生法や電離放射線障害防止規則等に対応するための評価が要件であり、各評価手法は既存であるが、回収可能性維持を考慮したコスト評価については根拠となるデータの整備が必要と考えられることから課題として挙げた。

技術群 F. 事業期間中安全性への影響低減対策技術は、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、および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）が要件の技術であり、技術群 D.と同様に、前項の技術群の展開と整理で挙げた工学的対策に関する維持状態・期間を想定した水理学的・地化学的影響への効果の定量的評価や、回収技術のさらなる高度化、合理化技術の検討が必要と考えられるため課題として挙げた。また、回収可能性維持状態や期間を想定した閉鎖後長期安全性への影響、その影響に対する低減対策効果を確認するための計測・測定技術についての整備も併せて行う必要があるため、これも課題とした。

表 2.3.4-14 技術体系を構成する技術群の特徴と課題（薄い色（A, B, D, F）：ハード技術、濃い色（C, E）：ソフト技術）

	技術の分類	技術内容	必要技術例	技術に求められる要件	課題
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 ・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）	－（既存） ※ただし、維持状態・期間を想定した処分場への影響の定量的評価が必要
	B. 回収技術	廃棄体回収時に用いる一連の技術 ・廃棄体へのアクセス、回収、搬出、管理等	・廃棄体へのアクセス技術・廃棄体回収・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）	－（既存） ※ただし、維持状態・期間を想定した工程・コストの評価が必要
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	・評価手法（シナリオ作成技術） ・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）	・評価のためのデータ整備状況調査、データ整備 【評価手法・モデル化は既存】
	D. 閉鎖後長期安全性への影響緩和・削減対策技術	坑道開放と回収による長期安全性への影響を緩和・削減するための技術 ・周辺坑道の水理学的影響緩和・削減 ・地化学的影響緩和・削減 ・人工バリア初期性能への影響緩和・削減	・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・測定技術の高度化	・安全機能への影響を緩和・削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	・維持状態・期間を想定した水理学的・地化学的影響への対策工効果の定量的評価 ・維持状態・期間を考慮した維持管理技術の高度化 ・回収技術のさらなる高度化、合理化技術の検討 ・維持状態・期間を想定した計測・測定技術整備
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、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	・コスト評価のための根拠データ整備 【各評価手法は既存】
	F. 事業期間中安全性への影響緩和・削減対策技術	坑道開放および回収に伴う影響を緩和・削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・測定技術の高度化	・安全機能（安全対策）への影響を緩和・削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	・維持状態・期間を想定した水理学的・地化学的影響への対策工効果の定量的評価 ・維持状態・期間を考慮した維持管理技術の高度化 ・回収技術のさらなる高度化、合理化技術の検討 ・維持状態・期間を想定した計測・測定技術整備

(4) 重要度および緊急度の分析による技術群の課題整理

前項で整理した技術的課題について重要度および緊急度等の指標を用いた分析により選定を行った。ここで、重要度および緊急度は以下のとおり設定した。なお、Ⅲが最も重要度、緊急度が高い点数となる。

- ・重要度（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ）：本業務において取り扱うのに相応しい内容かどうか
- ・緊急度（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ）：検討を実施していくプロセスにおける順番

上記の重要度、緊急度を用いた技術的課題の分析結果を整理して表 2.3.4-15 に示す。ここで、技術群 A および B の技術は既往技術を適応可能であるため、検討対象外とした。ただし、後述する技術群 D、F の影響低減効果を評価するベースとするため、技術群 A については第 2 次取りまとめの概念での定量的評価は必要となり、また、技術群 B については既存の技術を用いた実証実験の結果等を反映した工程・コストの評価が必要となる。

表中の技術群 C および E は影響評価技術であり、評価のためのデータ整備が課題であるが、他の研究機関や研究開発で既に研究が進められていることから重要度はⅡと評価した。緊急度については、まずは他の研究機関等での状況を調査・整理することが必要となり、未実施だった場合に本検討業務で取り扱うかを今後検討することとなることから緊急度はⅡと評価した。

一方、技術群 D および F は影響低減対策技術であり、回収可能性維持期間を対象とした高度化、合理性向上の検討は他研究において未実施であることから、本検討業務において取り扱うに相応しいと考え、重要度はⅢと評価した。緊急度については、それぞれの課題①～④のうち、まずは課題①として挙げた、回収可能性維持状態および期間を想定した処分場への水理的・地化学的影響の定量的評価と対策工の効果について定量的評価を行うこと、課題②の回収可能性維持状態・期間を考慮した狭い空間での維持更新技術高度化（PEM）が定置されない状態の坑道での維持・更新高度化は各事業者等で技術開発・研究実施中）を行うこと、課題③の回収技術のさらなる高度化、合理性向上技術の検討を行うことについて緊急度が高いと評価し、課題①、課題②および課題③の緊急度をⅢとした。また、課題④で挙げた回収可能性維持状態および期間を想定した計測・測定技術（モニタリング技術）の整備については、計測・測定項目とそれに対応した手法について整備する必要がある、課題①の成果やこれまでの既往の研究を踏まえて検討していく必要がある、緊急度はⅡと評価した。

以上の重要度および緊急度の分析により、技術群 D の課題①、②および③、また技術群 F の課題①、②および③が本業務の技術的課題と整理できる。

表 2.3.4-15 技術群の課題に対する重要度および緊急度の分析（薄い色（D,F）：ハード技術、濃い色（C,E）：ソフト技術）

	技術の分類	技術内容	課題	重要度	緊急度
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	① 評価のためのデータ整備状況調査、データ整備	Ⅱ 他の研究機関、技術開発等で既に研究が進められている。	課題①: Ⅱ 他の機関等での研究実施状況の調査・整理が必要。未実施なら整備。
	D. 閉鎖後長期安全性への影響緩和・削減対策技術	坑道開放と回収による長期安全性への影響を緩和・削減するための技術 ・周辺坑道の水理学的影響緩和・削減 ・地化学的影響緩和・削減 ・人工バリア初期性能への影響緩和・削減	① 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 ② 維持状態・期間を考慮した維持管理技術の高度化 ③ 回収技術のさらなる高度化、合理化技術の検討 ④ 維持状態・期間を想定した計測・測定技術(モニタリング技術)整備	Ⅲ 回収可能性維持期間を対象とした高度化、合理性向上の検討は他研究において未実施。	課題①: Ⅲ 課題②: Ⅲ 課題③: Ⅲ 課題④: Ⅱ 影響と対策工効果を定量的に把握した後、具体的方策を示す。
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、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	① コスト評価のための根拠データ整備	Ⅱ 他の研究機関、技術開発等で既に研究が進められている。	課題①: Ⅱ 他の機関等での研究実施状況の調査・整理が必要。未実施なら整備。
	F. 事業期間中安全性への影響緩和・削減対策技術	坑道開放および回収に伴う影響を緩和・削減するための対応技術	① 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 ② 維持状態・期間を考慮した維持管理技術の高度化 ③ 回収技術のさらなる高度化、合理化技術の検討 ④ 維持状態・期間を想定した計測・測定技術(モニタリング技術)整備	Ⅲ 回収可能性維持期間を対象とした高度化、合理性向上の検討は他研究において未実施。	課題①: Ⅲ 課題②: Ⅲ 課題③: Ⅲ 課題④: Ⅱ 影響と対策工効果を定量的に把握した後、具体的方策を示す。

※技術群 A,B は既往技術を適応可能であるため対象外とした。ただし、技術群 D,F の影響低減効果の比較対象としての定量的評価は必要。

2.4 定置概念についての回収可能性維持に伴う影響比較および技術課題の抽出

本節では、H27年度に実施した縦置きブロック方式とH28年度に実施した横置きPEM方式を対象とした回収可能性維持の影響および技術課題を整理し、それぞれを比較するとともに、今後回収可能性維持期間を具体的に設定するための考え方や必要となる情報等について以下の手順(図2.3.4-1)で検討する。

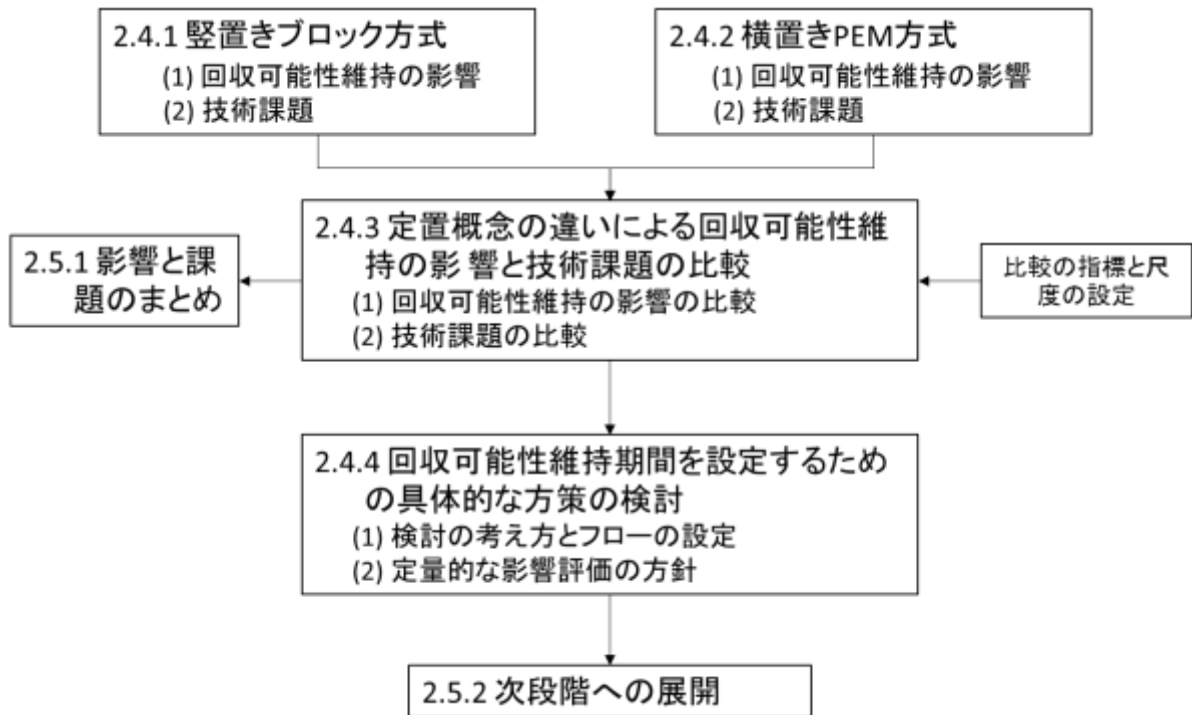


図 2.3.4-1 技術課題の整理等のための手順

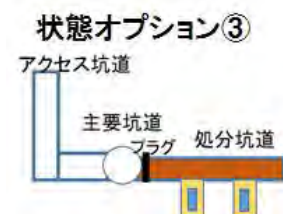
2.4.1 縦置きブロック方式における回収可能性維持の影響と技術課題の整理

下図に示す概念と検討ケースを対象にH27年度に実施した縦置きブロック方式の回収可能性維持による閉鎖前と閉鎖後への定性的な影響について、今年度実施した横置きPEM方式と同様な表示に修正するとともに技術体系整理の中で取りまとめた技術課題について記述する。

(1) 回収可能性維持の影響検討のまとめ

1) 閉鎖前の影響

縦置きブロック方式の基本ケース(状態オプション③)の状態における閉鎖前の影響(作業、環境負荷、コスト)は、表2.4.1-1にまとめることができる。表中の上段には回収可能性を維持しつつ最終的に回収しない場合、下段には回収する場合の影響を示している。



- ✓ 坑道の維持に係わる作業では、時間の経過とともに支保工等の劣化や変質により落盤等のリスクが増加していく。回収する場合は、処分坑道の埋戻し材の撤去が必要となり、回収中の安定性を確保するために坑道を掘削する時と同様な作業が発生すること、廃棄体容器の回収と搬出作業に伴う作業が追加されるため、回収しない場合に比較してさらに作業が増加する。

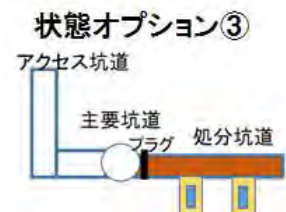
- ✓ 環境負荷も同様に期間の延長とともに増加していく。負荷の主たる要因は、維持のための排水や換気とともに維持や更新から発生する廃材、回収する場合には坑道の埋戻し材の発生と廃棄体容器周辺の緩衝材の撤去となる。これらは地表に搬出すると環境負荷が増加する。また、廃棄体を回収し地表に搬出・貯蔵することにより環境への負荷が発生する。
- ✓ コストは、作業リスクを低減すること、環境負荷を低減する対応策に係って発生するため、それぞれの影響が増加するのに比例して増加していく。

表 2.4.1-1 縦置きブロック方式の回収可能性維持の閉鎖前の影響整理

指標	10年	50年(基本ケース)	150年	250年
作業	通常の作業時の定置・埋戻し作業 この段階での回収は通常での定置と同じ作業	開放された坑道支保等の耐用年数となり、維持・補修作業が発生 回収時には処分坑道の掘削・支保補強作業が発生し、掘削に関する作業が増加	支保工や換気・排水設備の更新が必要となり、それに伴う作業が発生 回収時の坑道再掘削に伴い、劣化した支保の補強・補修作業が増加	更新作業が繰り返し必要となり、その都度の作業が加算され増加 回収時の坑道再掘削に伴いさらに劣化した支保補強等による作業が増加
環境負荷	通常の作業に発生する換気・排水、維持からの廃材発生 回収時の掘削残土、回収廃棄体の地上での保管による負荷	開放坑道から発生する換気・排水と維持・補修からの廃材発生 回収時の残土と支保補強等からの廃材が発生、回収廃棄体の地上での保管	開放坑道の維持から発生する換気・排水処理、支保・設備の更新からの廃材が増加 回収時の残土は50年と同様、支保の劣化進展による廃材の増加、廃棄体の負荷50年と同様	開放坑道の維持から発生する換気・排水の処理、支保・設備の更新からの廃材が増加 回収時の残土は50年と同様、支保の劣化進展による廃材の増加、廃棄体の劣化の可能性から負荷は増加
コスト	通常の作業時の維持管理に係る費用 廃棄体の回収・搬出に伴うコストが発生	開放坑道の維持・補修に伴う費用発生 廃棄体回収に伴う再掘削、支保補強等、回収・搬出・保管コストの発生	開放坑道の支保・設備の更新に伴う費用の増加 廃棄体回収に伴う再掘削・支保補強、回収・搬出・保管コスト(50年と同程度)	開放坑道の支保・設備の繰り返し更新の費用増加 回収の再掘削の困難さ、支保補強、廃棄体の状態により回収・搬出コストの増加

2) 閉鎖後の影響

縦置きブロック方式の基本ケース（状態オプション③）における閉鎖後の影響（周辺母岩の特性や人工バリアの初期品質）は、表 2.4.1-2 にまとめることができる。表中の上段には処分場の坑道周辺岩盤への影響、下段は廃棄体容器が定置される緩衝材への影響を示している。基本ケースでは処分坑道が埋め戻されていることから緩衝材への影響はないと判断している。



- ✓ 周辺岩盤への温度の影響は、開放している坑道周辺に限定され、埋め戻された処分坑道では、廃棄体からの熱により一時的に温度は上昇するが、発熱の低下に伴い岩盤温度に戻っていく。回収する場合は、埋戻し材の撤去に伴い換気と排水が実施されるため、岩盤温度は換気温度に低下するが、回収後速やかに埋戻しされた場合、時間の経過とともに初期の岩盤温度に回復していく。
- ✓ 水理特性への影響は、廃棄体容器定置後処分坑道が埋め戻されることから、影響は回収可能性維持を考慮しない場合と同じレベルになる。開放坑道では排水が継続して実施されるため、坑道周辺の間隙水圧が低下し、地下水流動場への影響が発生する可能性があるが、開放坑道の延長が短いため、その影響は局所的になると考えられる。
- ✓ 力学的な影響のうち、掘削影響については、処分場設計において建設中の隣接坑道相互の力学影響を避けるようにレイアウトされているために、岩盤の強度や変形特性への影響は、坑道周辺の損傷を受けた岩盤に限定される。このような現象の程度は、掘削方法と支保の仕様

および坑道の開放期間に依存する。また、コンクリート製の支保工の変質・劣化による高 pH 間隙水の岩盤特性への影響は、回収維持期間の延長に伴い増加する。

- ✓ 坑道を開放しておくことによる坑道周辺の岩盤の還元環境から酸化環境への化学特性の変化は、坑道解放時の換気と排水により発生する。影響の大きさと範囲は、特に地下水流動系の変動幅に依存することから、坑道の開放範囲と開放時間が大きくなるに従い増加していく。基本ケース（オプション③）では、処分孔と処分坑道は廃棄体容器の定置後埋め戻されることから、回収可能性維持期間の延長による影響が建設時のそれに加わることはない。開放されているアクセス坑道周辺の酸化領域が期間の延長に伴い増加するがその範囲は局所的となる。

表 2.4.1-2 縦置きブロック方式の回収可能性維持の閉鎖後の影響整理

指標	10年	50年(基本ケース)	150年	250年
温度(T)	開放坑道は換気・排水により岩盤温度が低下 処分孔内は廃棄体の発熱により上昇	開放坑道は換気・排水により岩盤温度が低下 廃棄体からの発熱が下がり、処分孔内は周辺岩盤温度に移行	開放坑道は換気・排水により岩盤温度が低下 処分孔内は周辺岩盤温度	開放坑道は換気・排水により岩盤温度が低下 処分孔内は周辺岩盤温度
水理(H)	開放坑道周辺は排水により間隙水圧低下、不飽和領域の発生 処分孔周辺は不飽和状態、間隙水圧の回復	開放坑道周辺は排水により間隙水圧低下、不飽和領域の発生 処分孔内は間隙水圧が回復し内部は飽和過程	開放坑道周辺は排水により間隙水圧低下、不飽和領域の発生 処分孔周辺は間隙水圧が回復し、飽和	開放坑道周辺は排水により間隙水圧低下、不飽和領域の発生 処分孔内は飽和
力学(M)	開放坑道周辺にはEDZが形成、岩盤クリープで応力場の回復 処分孔内は充填圧のみ	開放坑道周辺にはEDZが形成、岩盤クリープで応力場の回復 処分孔内はペントナイト膨潤圧が発生	開放坑道周辺のEDZは残存、岩盤クリープで応力場の回復 処分孔内は膨潤圧と水圧とのバランス	開放坑道周辺のEDZは残存、岩盤クリープで応力場の回復 処分孔内は膨潤圧と水圧とのバランス
化学(C)	開放坑道周辺は換気・排水により酸化領域の発生 処分孔内は酸化雰囲気	開放坑道周辺は換気・排水により酸化領域の発生 処分孔内は酸化から還元雰囲気への移行	開放坑道周辺は換気・排水により酸化領域の発生 処分孔内は還元雰囲気を回復	開放坑道周辺は換気・排水により酸化領域の発生 処分孔内は還元雰囲気、オーバーパックの腐食生成物

3) 回収可能性維持期間の違いによる影響比較

回収可能性維持期間の違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響について、状態オプション①から④について整理した結果を図 2.4.1-1 から図 2.4.1-4 にそれぞれ示す。いずれの状態オプションにおいても、回収する場合の閉鎖後の影響は、全数回収ならば考慮する必要がないこと、一部回収であれば、その影響は局所的であることが共通している。

a 状態オプション①

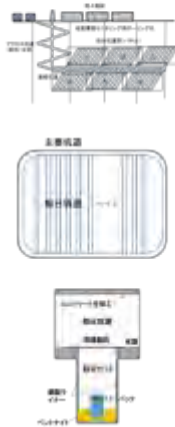
状態オプション①	堅置きブロック方式		閉鎖前の影響				閉鎖後の影響				
	定置後		10年	50年	150年	250年	10年	50年	150年	250年	
	回収可能性維持期間中は全ての坑道が開放されている。	回収しない場合	坑道支保等の劣化・変質に伴う管理作業の増加	[Red bar increasing from 10 to 250 years]				換気による岩盤温度の低下	[Blue bar increasing from 10 to 250 years]		
	回収する場合	換気・排水による地表の環境負荷(変化小)	[Green bar constant]				不飽和領域拡大・地下水流動系の変化	[Blue bar increasing]			
		劣化・変質に伴う維持管理のコスト増加	[Yellow bar increasing]				岩盤応力の低下・クリープ応力の増加	[Orange bar increasing]			
		回収時の処分孔の補強作業の増加	[Red bar increasing]				酸化領域の拡大	[Yellow bar increasing]			
		回収廃棄体による環境負荷(変化小)	[Green bar constant]				オーバーバックの腐食の加速	[Grey bar increasing]			
		回収作業のコストの増加	[Yellow bar increasing]				<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> 全数の廃棄体を回収する場合は、処分場が放棄されることになるため長期の安全性への影響は考慮する必要はない。 </div>				
		回収する場合は、回収に係る作業のみを対象とする。	[Yellow bar increasing]				<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> 一部の廃棄体が回収される場合、その他の廃棄体は残置されることから上記の開放された状態での維持管理の影響と同様となる。 </div>				

図 2.4.1-1 状態オプション①における回収維持期間による閉鎖前と閉鎖後の影響の変化

b 状態オプション②


状態オプション②	堅置きブロック方式		閉鎖前の影響				閉鎖後の影響				
	定置後		10年	50年	150年	250年	10年	50年	150年	250年	
	回収可能性維持期間中は全ての坑道が開放されている。	回収しない場合	坑道支保等の劣化・変質に伴う維持作業の増加	[Red bar increasing from 10 to 250 years]				換気による岩盤温度の低下	[Blue bar increasing from 10 to 250 years]		
	回収する場合	換気・排水による地表の環境負荷(変化小)	[Green bar constant]				不飽和領域拡大・地下水流動系の変化	[Blue bar increasing]			
		劣化・変質に伴う維持管理のコスト増加	[Yellow bar increasing]				岩盤応力の低下・クリープ応力の増加	[Orange bar increasing]			
		回収に伴う補強作業の増加	[Red bar increasing]				酸化領域の拡大	[Yellow bar increasing]			
		回収廃棄体による環境負荷(変化小)	[Green bar constant]				オーバーバックの腐食の加速	[Grey bar increasing]			
		回収作業のコストの増加	[Yellow bar increasing]				<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> 全数の廃棄体を回収する場合は、処分場が放棄されることになるため長期の安全性への影響は考慮する必要はない。 </div>				
		回収する場合は、回収に係る作業のみを対象とする。	[Yellow bar increasing]				<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> 一部の廃棄体が回収される場合、その他の廃棄体は残置されることから上記の開放された状態での維持管理の影響と同様となる。 </div>				

図 2.4.1-2 状態オプション②における回収維持期間による閉鎖前と閉鎖後の影響の変化

c 状態オプション③

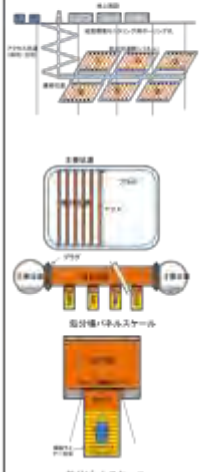
堅置きブロック方式		閉鎖前の影響				閉鎖後の影響			
定置後		10年	50年	150年	250年	10年	50年	150年	250年
状態オプション③ 	回収しない場合	坑道支保等の劣化・変質に伴う作業の増加 換気・排水による地表の環境負荷(変化小) 劣化・変質に伴う維持管理のコスト増加				換気による岩盤温度の低下 不飽和領域拡大・地下水流動系の変化 岩盤応力の低下・クリープ応力の増加 酸化領域の拡大 人工バリア初期品質への影響小			
	回収する場合	回収に伴う再掘削・補強作業増加 掘削、廃棄体回収による地表への環境負荷増加 再掘削・補強・回収作業によるコスト増加 回収する場合は、回収に係る作業のみを対象とする。				全数の廃棄体を回収する場合は、処分場が放棄されることになるため長期の安全性への影響は考慮する必要はない。 一部の廃棄体が回収される場合、その他の廃棄体は残置されることから上記の開放された状態での維持管理の影響と同様となる。			

図 2.4.1-3 状態オプション③における回収維持期間による閉鎖前と閉鎖後の影響の変化

d 状態オプション④

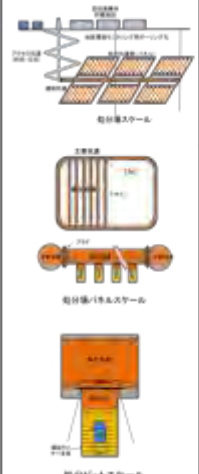
堅置きブロック方式		閉鎖前の影響				閉鎖後の影響			
定置後		10年	50年	150年	250年	10年	50年	150年	250年
状態オプション④ 	回収しない場合	坑道支保等の劣化・変質に伴う作業の増加 換気・排水による地表の環境負荷(変化小) 劣化・変質に伴う維持管理のコスト増加				換気による岩盤温度の低下 不飽和領域拡大・地下水流動系の変化 応力低下⇒クリープ応力によるバランス 酸化領域の拡大 人工バリアの初期品質への影響(小)			
	回収する場合	回収に伴う再掘削・補強作業増加 掘削・回収廃棄体による地表への環境負荷増加 再掘削・補強・回収作業のコスト増加 回収する場合は、回収に係る作業のみを対象とする。				全数の廃棄体を回収する場合は、処分場が放棄されることになるため長期の安全性への影響は考慮する必要はない。 一部の廃棄体が回収される場合、その他の廃棄体は残置されることから上記の開放された状態での維持管理の影響と同様となる。			

図 2.4.1-4 状態オプション④における回収維持期間による閉鎖前と閉鎖後の影響の変化

4) 回収可能性維持の閉鎖前と閉鎖後の影響比較のまとめ

縦置きブロック方式を対象に、処分場の状態オプションと回収維持期間をパラメータとし、回収しない場合と回収する場合の閉鎖前と閉鎖後の定性的な影響結果を図 2.4.1-5 にまとめた。

a 閉鎖前の影響

回収しない場合：状態オプション①では、坑道の開放延長が長くなるため、作業、環境負荷、コストいずれも最も大きくなる。この傾向は維持期間が長くなると支保や設備の劣化・変質が加速され増加していく（赤線丸）。一方、処分オプション④では、開放された坑道延長が短いため維持の影響を示す指標は最小となる（赤点線丸）。維持期間の延長により増加するがオプション①に比較してその増加傾向は小さい。

回収する場合：状態オプション①が最も容易で、作業、コストは最小となる。維持期間が長くなるとオーバーパックの腐食が進むと推定されるため回収の難しさは増加する（青点線丸）。一方、オプション④では処分坑道の再掘削・補強の量が多くなるため、影響は最も大きく、回収維持期間の延長に伴い補強の必要性が増加し、それに伴い各指標も大きくなっていく（青線丸）。

b 閉鎖後の影響

閉鎖後の影響は、坑道の開放延長が長いオプション①が処分場スケールでの母岩特性への影響が最も大きくなる（緑線丸）。反対にアクセス坑道のみが確保されているオプション④の影響は局所的となり比較的小さい（緑点線丸）。全数回収する場合は、処分場が放棄されたものとして影響は考慮しない。一部の廃棄体容器を回収する場合、処分坑道の埋戻し材を撤去し、対象の廃棄体容器を撤去した後、速やかに埋め戻すことでその影響は局所的にとどまると推定される。

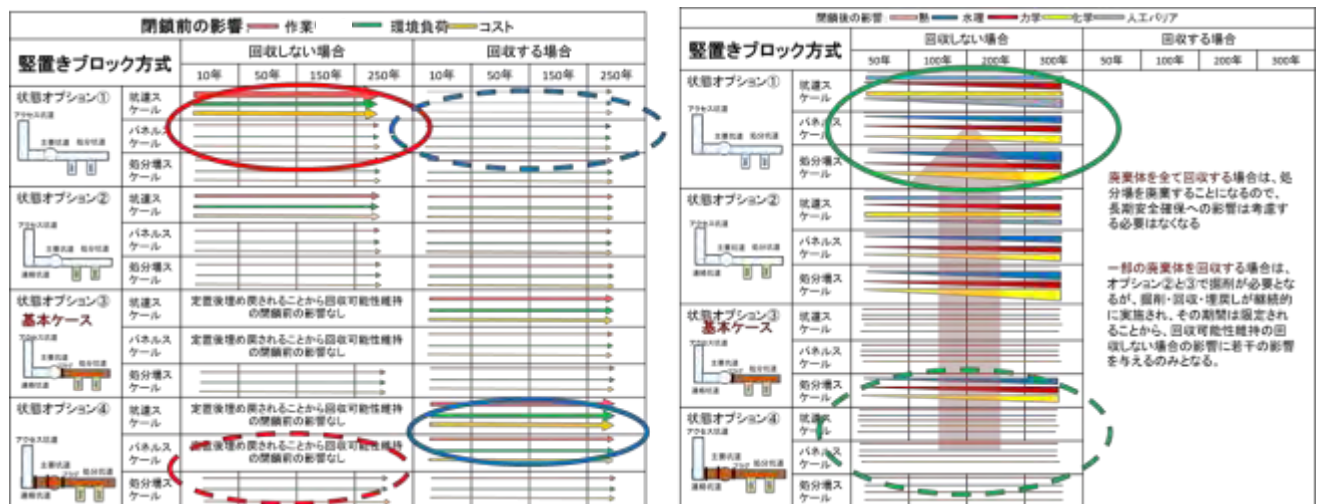


図 2.4.1-5 状態オプションと回収維持期間をパラメータとした閉鎖前（左）と閉鎖後（右）影響の比較

(2) 堅置きブロック方式の回収可能性維持における技術課題の整理

1) 状態オプション共通の課題

回収可能性維持に必要な技術要素とそれらに求められる要件から抽出した各状態オプション共通な技術的課題を表 2.4.1-3 に示す。表中の色付けした欄は評価などのソフト技術を、他はハード技術を示し、技術の分類は、技術体系で整理した 6 項目を対象としている。表中の必要技術と技術に求められる要件は、2.4.4 項で記述する「閉鎖までの回収可能性維持期間設定」への要件から、「安全な管理が合理的に実施できる」ことを目標として、安全性、効率性、経済性をキーワードに設定した。

整理した技術課題は、技術に求められる要件に対応して、現在適用する技術がなく、今後開発すべき事項を記述している（詳細は H27 年度報告書を参照）。

表 2.4.1-3 堅置きブロック方式の技術課題（状態オプション共通）

技術の分類	技術内容	必要技術	技術に求められる要件	課題	
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	・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	・処分場の特徴を考慮した現状技術の安全性、経済性の向上、特にロボット化が不可欠	・遠隔ロボットでの診断、維持・補修をする技術 ・建設時から保守を考慮したパッケージ支援システムの開発
	B. 回収技術	定置された廃棄体を異なる環境（状態オプション）で回収するために必要とされる技術	・廃棄体へのアクセス技術 ・プラグ・埋め戻し材除去技術 ・支保補強、排水・換気回復技術 ・遠隔での廃棄体回収・搬出技術 ・回収後の廃棄体管理技術	・技術的実現性とともにも安全性・効率性・経済性を有する技術であること	・遠隔による廃棄体回収・搬出技術 ・効率性、経済性を考慮した回収技術の開発
閉鎖後長期の安全性	C. 閉鎖後の影響評価技術	坑道開放と回収作業が処分システムの長期安全性に与える影響を評価するための技術	・評価手法（シナリオ作成技術） ・モデル化技術 ・関連データベース開発	・多量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	・状態変遷を考慮できるモデルの開発 ・THMC連成モデルの開発 ・関連データの整備
	D. 閉鎖後の影響低減技術	坑道開放と回収作業による処分システムの影響を低減するための技術	・坑道維持更新の高度化技術（A.維持更新技術の高度化） ・初期品質向上、維持・更新高度化 ・回収合理性向上技術（B.回収技術の高度化）	・処分場の建設・操業における影響低減技術開発との連携した技術開発であること ・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	・想定される立地条件での定量評価に基づく低減策の実現性評価
閉鎖前の安全性	E. 閉鎖前の影響評価技術	坑道開放の管理・保守および回収作業時の作業リスク、環境負荷、コスト、定置バリアへの影響評価のための技術	・作業リスク評価技術 ・環境影響評価技術 ・コスト評価技術 ・定置バリアへの影響評価技術	・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	・関連データの整備 ・人工バリアへの影響を評価するための実験データ
	F. 閉鎖前の影響低減技術	坑道開放の管理・保守および回収作業に伴う作業リスク、環境負荷、コストを低減するための技術	・坑道管理・保守高度化技術 ・耐久性向上（材料、設計、施工） ・遠隔操作による補修・補強技術 ・回収合理性向上技術 ・回収技術の効率化、経済性向上 ・ロボットによる回収技術	・作業リスクを低減しつつ効率化、経済性を向上させる技術であること ・影響の伝播を制御できる技術であること	・影響低減の新技术と工程・コストとのトレードオフの評価

2) 状態オプション固有の課題

処分坑道に設置した処分孔にベントナイトブロックとオーバーパックを定置する概念に対する回収可能性維持に係わる固有の技術課題は以下に要約することができる。

a 状態オプション①固有の課題

処分孔に定置したオーバーパックを安定化させるための対策が必要。また、オーバーパック腐食速度の増加を防止する対応策、また、処分孔の長期安定性のための対策も必要となる。

b 状態オプション①と②固有の課題

処分坑道を含めたすべての坑道が開放されることによる支保工や換気・排水設備の維持・補修、更新技術を効率的に実施する技術の整備、メンテナンス・フリーとする技術などが必要となる。広範に開放されることでの周辺母岩の水理、地化学特性の擾乱の状況と埋め戻し後の安定環境への移行に係る不確実性を把握することと、問題がある場合の対応策が必要となる。

c 状態オプション③と④固有の課題

回収時に処分坑道のプラグ、埋戻し材の撤去とともに支保の補強や排水設備設置を効率的・経済的に実施する技術が必要。

処分孔内の緩衝材を効率的・経済的に撤去する技術が必要となる。(例えば、塩水によるスラリー化工法の効率性向上など)。オーバーパックを回収するには全ての緩衝材を撤去する必要はなく、周辺のみを撤去する技術が効果的と推定される。

d 各状態オプション共通の課題

開放している坑道の長期維持管理・保守、更新の安全かつ効率的・経済的な技術の整備
遠隔操作で効率的・経済的にオーバーパックを回収・搬出する技術（定置のための装置が適用できるかの実証試験も含めて）

2.4.2 横置き PEM 方式における回収可能性維持の影響と技術課題の整理

(1) 回収可能性維持の影響検討のまとめ

ここでは、本年度（H28年度）に実施した横置き PEM 方式を対象に、回収可能性の維持による閉鎖前と閉鎖後の定性的な影響および技術課題を縦置きブロック方式と同様な書式と図表で整理する。

1) 閉鎖前の影響

基本ケース（状態オプション②）の状態における閉鎖前の影響（作業、環境負荷、コスト）は、回収可能性維持の期間延長とともに増加していく（表 2.4.2-1 参照）。また、廃棄体回収に伴う費用も、再掘削した坑道の安定性確保の困難さが増すことから影響が大きくなっていく（表の上段は維持に係わる影響、下段は回収に伴う影響）。

状態オプション②

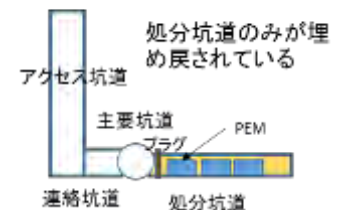


表 2.4.2-1 回収可能性維持期間の違いによる閉鎖前の影響整理（状態オプション②）

指標	10年	50年(基本ケース)	150年	250年
作業	通常の作業時の定置・埋戻し作業 この段階での回収は定置時の作業	開放された坑道支保等の耐用年数となり、維持・補修作業が増加 回収時には埋戻し坑道の掘削に伴い、狭径部での支保等の健全性確保のための補強・補修作業が発生	支保工や換気・排水設備の更新が必要となり、それに伴う作業が発生 回収時の坑道再掘削に伴い、劣化した支保の補強・補修作業が増加	更新作業が繰り返し必要となり、その都度の作業が加算されていく 回収時の坑道再掘削に伴いさらに劣化した支保補強等を狭径部で実施する必要が発生する
環境負荷	通常の作業に発生する換気・排水、維持からの廃材発生 回収時の掘削残土、回収廃棄体の地上での保管による負荷	開放坑道から発生する換気・排水と維持・補修からの廃材発生 回収時の残土と支保補強等からの廃材が発生、回収廃棄体は健全性を維持	開放坑道の維持から発生する換気・排水処理、支保・設備の更新からの廃材が増加 回収時の残土は50年と同様、支保の劣化進展による廃材の増加、廃棄体の負荷は50年と同様	開放坑道の維持から発生する換気・排水の処理、支保・設備の更新からの廃材が増加 回収時の残土は50年と同様、支保の劣化進展による廃材の増加、廃棄体の劣化の可能性から負荷は増加
コスト	通常の作業時の維持管理に係る費用 廃棄体の回収・搬出に伴うコストが発生	開放坑道の維持・補修に伴う費用 廃棄体回収に伴う再掘削・支保補強等、回収・搬出・保管コストの発生	開放坑道の支保・設備の更新に伴う費用の増加 廃棄体回収に伴う再掘削・支保補強、回収・搬出・保管コスト(50年と同程度)	開放坑道の支保・設備の繰り返し更新の費用増加 回収の再掘削の困難さ、支保補強コスト増加、廃棄体の状態により回収・搬出コスト増加

2) 閉鎖後の影響

基本ケース（状態オプション②）における閉鎖後母岩への影響（温度、水理、力学、化学特性）と人工バリアの初期品質（緩衝材の密度、オーバーパックの腐食等）への影響は、回収維持期間とともに変化していく（表 2.4.2-2 参照）。廃棄体を回収する場合、全数回数するならば、その後に影響は考慮する必要はない。表の上段に母岩特性の変化、下段には処分坑道内の変化を記述している。

母岩特性の回収維持期間の違いによる変化で着目すべき事項は、閉鎖措置後にどれぐらいの時間で回復するあるいは新たな定常状態になるかを確実に予測することである。定性的な検討では、このような期間を予測することが困難であるため、特性変化の程度（大きさと範囲）を記述している。

状態オプション②

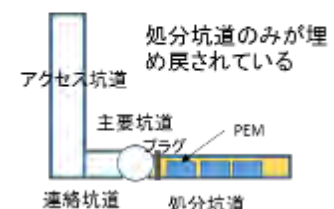


表 2.4.2-2 回収可能性維持期間の違いによる閉鎖後の影響整理 (状態オプション②)

指標	10年	50年(基本ケース)	150年	250年
温度(T)	開放坑道は換気・排水により岩盤温度が低下 処分坑道は定置された廃棄体の発熱により埋戻し材の温度上昇	開放坑道は換気・排水により岩盤温度が低下 処分坑道は廃棄体からの発熱が下がり、埋戻し材は岩盤温度に移行	開放坑道は換気・排水により岩盤温度が低下 処分坑道内は周辺岩盤温度	開放坑道は換気・排水により岩盤温度が低下 処分坑道内は周辺岩盤温度
水理(H)	開放坑道周辺は排水により間隙水圧低下、不飽和領域の発生 処分坑道内は埋戻しにより間隙水圧の回復、飽和過程	開放坑道周辺は排水により間隙水圧低下、不飽和領域の発生 処分坑道内は間隙水圧が回復し飽和過程	開放坑道周辺は排水により間隙水圧低下、不飽和領域の発生 処分坑道内は飽和状態	開放坑道周辺は排水により間隙水圧低下、不飽和領域の発生 処分坑道内は飽和状態
力学(M)	開放坑道周辺にはEDZが形成、岩盤クリープで応力場の回復 処分坑道内は埋戻し材の膨潤圧発生	開放坑道周辺にはEDZが形成、岩盤クリープで応力場の回復 処分坑道内は埋戻し材の膨潤圧発生	開放坑道周辺にはEDZが形成、岩盤クリープで応力場の回復 処分坑道内膨潤圧+PEMの腐食膨張圧発生	開放坑道周辺にはEDZが形成、岩盤クリープで応力場の回復 処分坑道内膨潤圧+PEMの腐食膨張圧発生
化学(C)	開放坑道周辺は換気・排水により酸化領域の発生 処分坑道の埋戻し材は酸化状態	開放坑道周辺は換気・排水により酸化領域の発生 処分坑道内の地下水浸入に伴い還元雰囲気	開放坑道周辺は換気・排水により酸化領域の発生 処分坑道内はPEMの腐食物と還元雰囲気	開放坑道周辺は換気・排水により酸化領域の発生 処分坑道内はPEMの腐食物と還元雰囲気

3) 回収可能性維持期間の違いによる影響比較

回収可能性維持期間の違いによる閉鎖前と閉鎖後の回収しない場合とする場合の影響について、状態オプション①～③を対象に整理した結果を図 2.4.2-1～図 2.4.2-3 にそれぞれ示す。いずれの状態オプションにおいても、回収する場合の閉鎖後の影響は、全数回収ならば考慮する必要がないこと、一部回収であれば、その影響は局所的であることが共通している。

a 状態オプション①

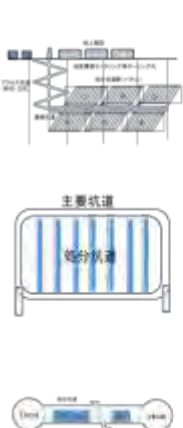
状態オプション①	横置きPEM方式 定置後	閉鎖前の影響				閉鎖後の影響			
		10年	50年	150年	250年	10年	50年	150年	250年
 回収可能性維持期間中は全ての坑道が開放されている。 回収しない場合 回収する場合	坑道支保等の劣化・変質に伴う作業の増加 換気・排水による地表の環境影響(変化小) 劣化・変質に伴う維持管理のコスト増加	換気による岩盤温度の低下 不飽和領域拡大・地下水流動系の変化 応力低下⇒クリープ応力によるバランス 酸化領域の拡大 PEM外殻の腐食の加速	回収に伴う補強作業の増加 回収による地表への環境負荷(変化小) 廃棄体回収のコスト(微増)	全数の廃棄体を回収する場合は、処分場が放棄されることになるため長期の安全性への影響は考慮する必要はない。 一部の廃棄体が回収される場合、その他の廃棄体は残置されることから上記の開放された状態での維持管理の影響と同様となる。	回収する場合は、回収に係る作業のみを対象とする。				

図 2.4.2-1 状態オプション①の回収維持期間の違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響

b 状態オプション②

横置きPEM方式		閉鎖前の影響				閉鎖後の影響			
		10年	50年	150年	250年	10年	50年	150年	250年
状態オプション②	定置後								
	回収しない場合	<p>坑道支保等の劣化・変質に伴う作業の増加</p> <p>換気・排水による地表の環境影響(変化小)</p> <p>劣化・変質に伴う維持管理のコスト増加</p>				<p>換気による岩盤温度の低下</p> <p>不飽和領域拡大・地下水流動系の変化</p> <p>応力低下⇒クリープ応力によるバランス</p> <p>酸化領域の拡大</p> <p>PEMへの影響(小)</p>			
	回収する場合	<p>回収に伴う再掘削・補強の作業が増加</p> <p>掘削ずり・回収廃棄体による地表への環境負荷の増加</p> <p>再掘削・補強・回収作業に伴うコスト増加</p> <p>回収する場合は、回収に係る作業のみを対象とする。</p>				<p>全数の廃棄体を回収する場合は、処分場が放棄されることになるため長期の安全性への影響は考慮する必要はない。</p> <p>一部の廃棄体が回収される場合、必要分だけの坑道再掘削・廃棄体回収・埋戻しとなり、その影響は限定される。その他の廃棄体は残置されることから上記の開放された状態での維持管理の影響と同様となる。</p>			

図 2.4.2-2 状態オプション②の回収維持期間の違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響

c 状態オプション③

横置きPEM方式		閉鎖前の影響				閉鎖後の影響			
		10年	50年	150年	250年	10年	50年	150年	250年
状態オプション③	定置後								
	回収しない場合	<p>坑道支保等の劣化・変質に伴う作業の増加</p> <p>換気・排水による地表の環境負荷(変化小)</p> <p>劣化・変質に伴う維持管理のコスト増加</p>				<p>換気による岩盤温度の低下</p> <p>不飽和領域拡大・地下水流動系の変化</p> <p>応力低下⇒クリープ応力によるバランス</p> <p>酸化領域の拡大</p> <p>PEMへの影響(小)</p>			
	回収する場合	<p>回収に伴う再掘削・補強作業が増加</p> <p>再掘削・廃棄体による地表への環境負荷の増加影響</p> <p>再掘削・補強・回収作業に伴うコスト増加</p> <p>回収する場合は、回収に係る作業のみを対象とする。</p>				<p>全数の廃棄体を回収する場合は、処分場が放棄されることになるため長期の安全性への影響は考慮する必要はない。</p> <p>一部の廃棄体が回収される場合、必要分だけの坑道再掘削・廃棄体回収・埋戻しとなり、その影響は限定される。その他の廃棄体は残置されることから上記の開放された状態での維持管理の影響と同様となる。</p>			

図 2.4.2-3 状態オプション③の回収維持期間の違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響

4) 回収可能性維持の閉鎖前と閉鎖後の影響比較のまとめ

横置き PEM 方式を対象に、処分場の状態オプションと回収維持期間をパラメータとし、回収しない場合と回収する場合における閉鎖前と閉鎖後の定性的な影響を以下にまとめる（図 2.4.2-4）。

a 閉鎖前の影響

回収しない場合：状態オプション①では、開放坑道の延長が最長となることから、作業、環境負荷、コストいずれも最大となり、維持期間の延長に伴い支保等の劣化・変質への対応から指標は増加していく（赤線丸）。一方、オプション③では開放延長が最短のため、維持による影響指標は最小となる（赤点線丸）。

回収する場合：状態オプション①が最も回収が容易となり、作業、環境負荷、コストいずれも最少となる（赤点線丸）。一方、オプション③ではアクセス坑道以外は埋戻し・プラグ設置されているため、それらの撤去、撤去後の坑道安定性確保などの作業が発生し、作業、環境負荷、コストが最も大きくなる（青線丸）。この傾向は維持期間の延長に伴い増加する。

b 閉鎖後の影響

閉鎖後の影響は回収しない場合のみを対象とすると、オプション①の開放坑道延長が長い場合、全てのスケールでの周辺母岩への影響が大きくなり、維持期間の延長に伴いその影響は増加していく（緑線丸）。一方、坑道の埋戻し延長が長くなるオプション④では周辺母岩への影響は局所的となる（緑点線丸）。

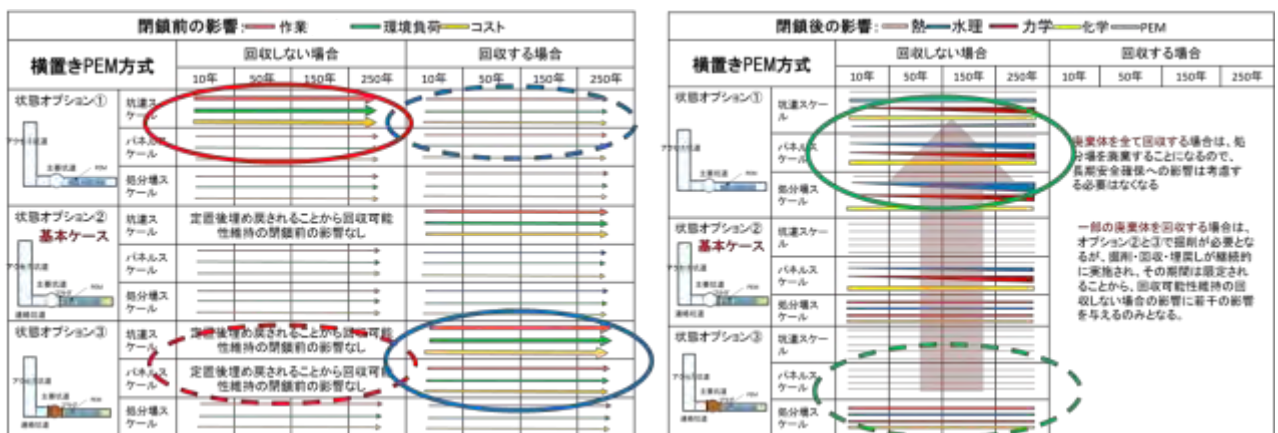


図 2.4.2-4 状態オプションと維持期間をパラメータとした閉鎖前と閉鎖後の影響比較

(2) 横置き PEM 方式における回収可能性維持における技術解題の整理

1) 状態オプション共通の課題

回収可能性維持に必要な技術要素とそれらに求められる要件から抽出した各処分場オプション共通な技術的課題を表 2.4.2-3 に示す。表中の色付けした欄は評価などのソフト技術を、他はハード技術を表し、技術の分類は、技術体系で設定した 6 項目で整理している。表中の必要技術と技術に求められる要件は、2.4.4 項で記述する「閉鎖までの回収可能性維持期間設定」への要件から、「安全な管理が合理的に実施できる」ことを目標として、安全性、効率性、経済性をキーワードに設定した。

整理した技術課題は、技術に求められる要件に対応して、現在適用する技術がなく、今後開発や実証すべき事項を記述している。

表 2.4.2-3 横置き PEM 方式における課題整理 (状態オプション共通)

技術の分類	技術内容	必要技術	技術に求められる要件	課題	
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	・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、補修・修復技術 ・排水・換気設備の維持管理・更新技術	・処分場の特徴を考慮した現状技術の安全性、経済性の向上、特にロボット化が不可欠	・遠隔ロボットでの診断、維持・補修をする技術 ・建設時からの保守を考慮したパッケージ支援システムの開発
	B.回収技術	・定置された廃棄体を異なる環境(状態オプション)で回収するために必要とされる技術	・廃棄体へのアクセス技術 ・プラグ・埋め戻し材除去技術 ・支保補強、排水・換気回復技術 ・遠隔での廃棄体回収・搬出技術 ・回収後の廃棄体管理技術	・技術的実現性とともな安全性・効率性・経済性を有する技術であること	・遠隔による廃棄体回収・搬出技術 ・効率性、経済性を考慮した回収技術の開発
閉鎖後長期の安全性	C.閉鎖後の影響評価技術	・坑道開放と回収作業が処分システムの長期安全性に与える影響を評価するための技術	・評価手法(シナリオ作成技術) ・モデル化技術 ・関連データベース開発	・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	・状態変遷を考慮できるモデルの開発 ・THMC連成モデルの開発 ・関連データの整備
	D.閉鎖後の影響低減技術	・坑道開放と回収作業による処分システムの影響を低減するための技術	・坑道維持更新の高度化技術(A.維持更新技術の高度化) ・初期品質向上、維持・更新高度化 ・回収合理性向上技術(B.回収技術の高度化)	・処分場の建設・操業における影響低減技術開発との連携した技術開発であること ・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	・想定される立地条件での定量評価に基づく低減策の実現性評価
閉鎖前の安全性	E.閉鎖前の影響評価技術	・坑道開放の管理・保守および回収作業時の作業リスク、環境負荷、コスト、定置バリアへの影響評価のための技術	・作業リスク評価技術 ・環境影響評価技術 ・コスト評価技術 ・定置バリアへの影響評価技術	・労働安全衛生法 ・電磁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	・関連データの整備 ・人工バリアへの影響を評価するための実験データ
	F.閉鎖前の影響低減技術	・坑道開放の管理・保守および回収作業に伴う作業リスク、環境負荷、コストを低減するための技術	・坑道管理・保守高度化技術(耐久性向上(材料、設計、施工)) ・遠隔操作による補修・補強技術 ・回収合理性向上技術 ・回収技術の効率化、経済性向上 ・ロボットによる回収技術	・作業リスクを低減しつつ効率化、経済性を向上させる技術であること ・影響の伝播を制御できる技術であること	・影響低減の新技术と工程・コストとのトレードオフの評価

2) 状態オプション固有の課題

処分坑道に PEM を横置きに定置する方式に対する「回収可能性維持に係わる技術課題」の内、状態オプション固有と共通の技術課題を以下に整理する。

a 状態オプション①固有の課題

PEM を定置した坑道を埋め戻さないことから、坑道の安定性確保と作業環境維持のために、狭隘な作業空間における支保や排水・換気設備等の維持管理・保守・更新を安全かつ効率的・経済的に行う必要がある。

開放していることで PEM 外殻の腐食が促進され、人工バリア初期性に影響を与える可能性がある場合は、対策が必要となる。坑道が長期に開放されることによる処分場スケールでの地下水流動系と地化学特性への擾乱程度の予測の確実性と処分場閉鎖後に、どれぐらいの時間で回復するあるいは安定状態に移行するかの予測が、安全評価上の重要な課題となる。そのため、類似環境での実証試験が不可欠であるとともに信頼性のある予測手法の確立も課題となる。

b 状態オプション②と③の固有の課題

回収時の処分坑道のプラグ、埋戻し材の撤去とともに撤去坑道の安定性確保の支保の補強や換気・排水設備の安全かつ効率的・経済的な技術の整備が必要

c 各状態オプション共通の課題

開放している坑道の長期維持管理・保守、更新の安全かつ効率的・経済的な技術の整備
想定しうるあらゆる場合を想定した PEM を遠隔で回収・搬出する技術が必要

2.4.3 定置方式の違いによる回収可能性維持の影響と技術課題の比較

本項では、2.4.1 と 2.4.2 の影響検討と技術課題の整理に基づき、以下に示す手順（図 2.4.3-1）で縦置きブロック方式と横置き PEM 方式の影響と技術課題の比較を定性的に実施する。



図 2.4.3-1 定置方式の違いによる回収可能性維持の影響と技術課題の比較における検討の流れ

(1) 回収可能性維持の閉鎖前と閉鎖後の影響比較

回収可能性維持の閉鎖前と閉鎖後の影響比較は以下の手順（図 2.4.3-2）で実施する。

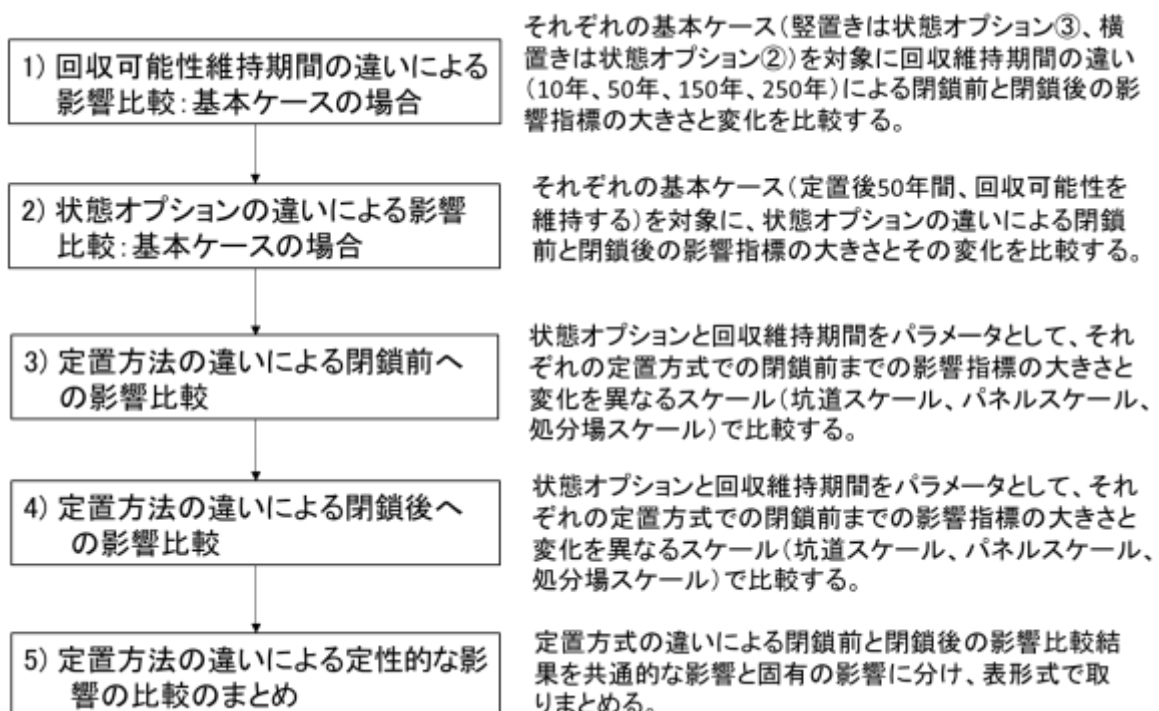


図 2.4.3-2 閉鎖前と閉鎖後の影響比較実施手順

1) 回収可能性維持期間の違いによる影響比較：基本ケースの場合

縦置きブロックの基本ケース（状態オプション③）と横置き PEM 方式の基本ケース（状態オプション②）を対象に、回収可能性の維持期間をパラメータとし、回収しない場合と回収する場合の閉鎖前と閉鎖後の定性的な影響を比較した結果を図 2.4.3-3 に示す。

- ✓ **回収しない場合**の閉鎖前の影響の内、作業とコストは、開放された坑道の支保や設備の劣化・変質に伴い維持期間の増加とともに大きくなっていく。環境負荷は、換気と排水が支配的であり継続して同じ程度の影響でその変化は小さい。この傾向は両定置方式も同じである。
- ✓ **回収する場合**、両定置方式とも、埋め戻した処分坑道の掘削、支保の補強や作業環境の整備が伴うため、維持期間が長くなるほどそのための作業が困難となり指標は増加する。一部回収する場合、ブロック方式では処分坑道の再掘削、横置き PEM 方式では再掘削とともに関係のない PEM も回収する必要性が発生するため、その影響度は大きく異なる。周辺母岩特性への影響は、回収後すぐに埋め戻すことで、特性の擾乱は局所的となる。
- ✓ 閉鎖後の周辺地質環境（温度、水理、力学、地化学）への影響は、処分坑道が埋め戻されていることもあり、その影響は開放坑道周辺の局所的なものとなる。坑道周辺での水理特性の変化（間隙水圧の低下から回復）と力学的な掘削影響による損傷範囲が残存する可能性がある。

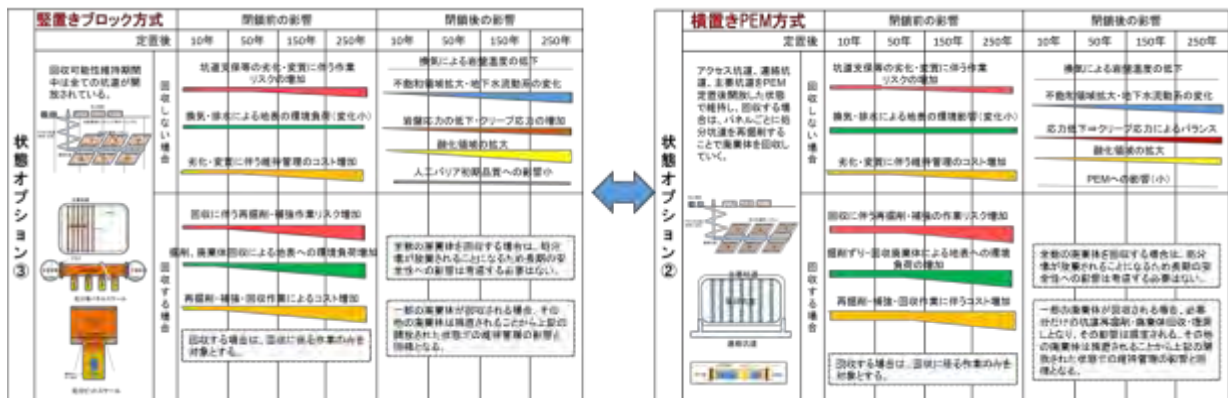


図 2.4.3-3 回収可能性維持期間の違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響比較（基本ケース）

2) 状態オプションの違いによる影響比較：基本ケースの場合

縦置きブロック方式と横置き PEM 方式を対象に、定置後 50 年間回収維持を確保する基本ケースを対象に、閉鎖前と閉鎖後の定性的な影響について、状態オプションの違いをパラメータとして比較した結果を図 2.4.3-4 にまとめた。

- ✓ 閉鎖前の影響は、回収しない場合と回収する場合とでは、どちらの定置方式とも増加の方向が逆転する。開放坑道延長が長い場合は、維持・保守による影響が大きくなるが回収による影響は小さくなるトレードオフの関係がみられる。
- ✓ 閉鎖後の影響は、坑道の開放延長が長くなるほど周辺母岩特性への影響が大きくなる。この傾向は両定置方式も同様である。このような影響の程度は両方式における処分場レイアウトや投影面積に比例する。
- ✓ 一方、処分坑道が開放されている場合、人工バリア初期性能への影響は、ブロック方式の方が横置き PEM 方式より大きい可能性がある。その影響の程度は維持期間にも依存する。PEM は鋼製の外殻が健全である限り、外部の影響を受けないことがないため、状態オプション

ンごとの性能への影響の違いは小さい。

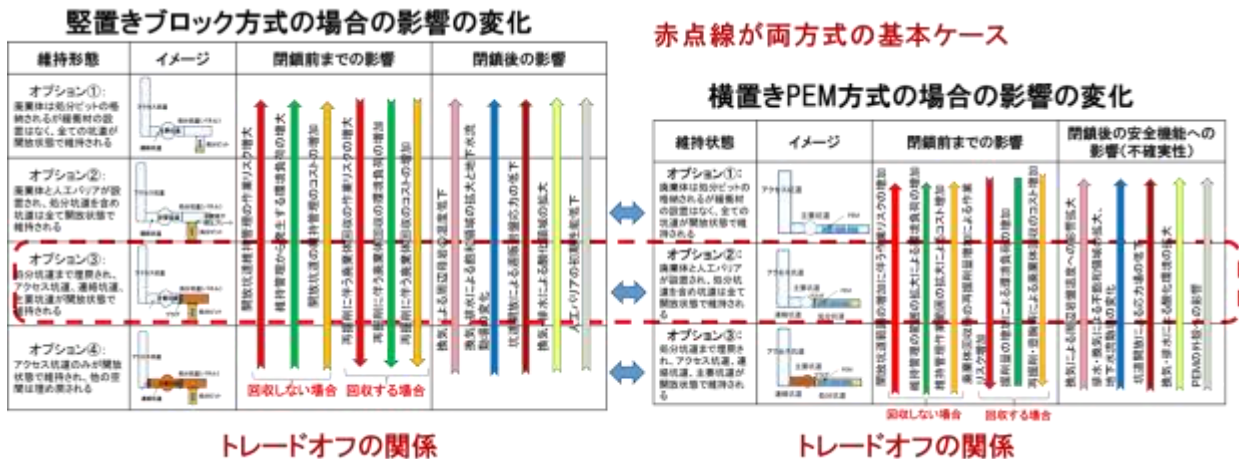


図 2.4.3-4 状態オプションの違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響比較

3) 定置方法の違いによる閉鎖前の影響比較

定置方式の違いによる閉鎖前の影響は、状態オプションの違い、回収維持期間の違い、着目するスケールの違い、回収なし・ありの違いに着目し、作業、環境負荷、コストを指標として影響を定性的に比較した結果を図 2.4.3-5 にまとめる。

- ✓ 影響指標の全体傾向は縦置きブロック、横置き PEM でも同様である。
- ✓ 「回収しない場合」は開放坑道延長が最長となる状態オプションが回収維持のための指標が最大となり、時間の経過とともに増加していく。
- ✓ アクセス坑道のみを開放する状態オプションでは、開放坑道の延長が最短となることから、回収維持に係わる影響指標も最少となる。
- ✓ 「回収する場合」は、維持状態とは異なり、処分坑道が開放されている状態オプションが最も容易となることから影響指標は最少となる。
- ✓ 一方、アクセス坑道以外が埋め戻されている状態オプションでは、坑道の再掘削や補強を伴うため、その影響の指標は全て最大となる。
- ✓ 一部を回収する場合、横置き PEM 方式では対象以外の PEM も撤去するため影響が縦置きブロック方式よりも大きくなる。

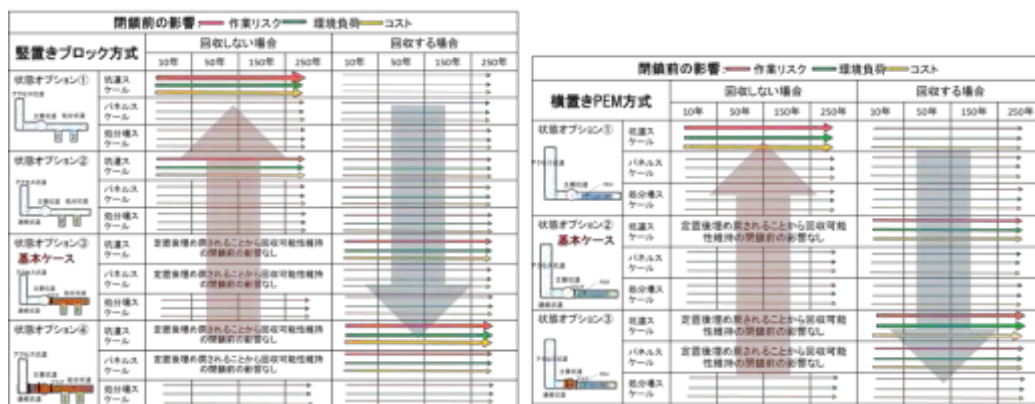


図 2.4.3-5 状態オプションと回収維持期間の違いによる閉鎖前の影響比較

4) 定置方法の違いによる閉鎖後の影響比較

定置方法の違いによる閉鎖後の影響比較は、状態オプションの違い、回収維持期間の違い、着目するスケールの違い、回収なし・ありをパラメータとして、周辺母岩の特性と人工バリアの初期品質の影響について定性的に評価した結果を図 2.4.3-6 に取りまとめた。

- ✓ どちらの定置方式も回収維持のために開放された坑道延長が長い状態オプション①の影響が大きくなり、回収維持期間の長さに伴い増加していく傾向は同じである。
- ✓ 特に処分場スケールにおける水理、化学特性への影響がともに顕著となる。
- ✓ 力学的な影響は坑道周辺に限定される。
- ✓ 坑道が埋め戻されていないことによる人工バリア初期品質への影響は、縦置きオーバーパックやベントナイトブロックに発生する。
- ✓ 横置き PEM 方式の場合は鋼製外殻の健全性に依存するが開放程度の影響を受ける可能性は小さい。
- ✓ 回収による母岩への影響は、回収する廃棄体の数量にも依存するが、一部を回収する場合は、坑道の再掘削・回収・埋戻しを順次進めることで影響は局所的となる。この影響程度は、両方式で同様となる。

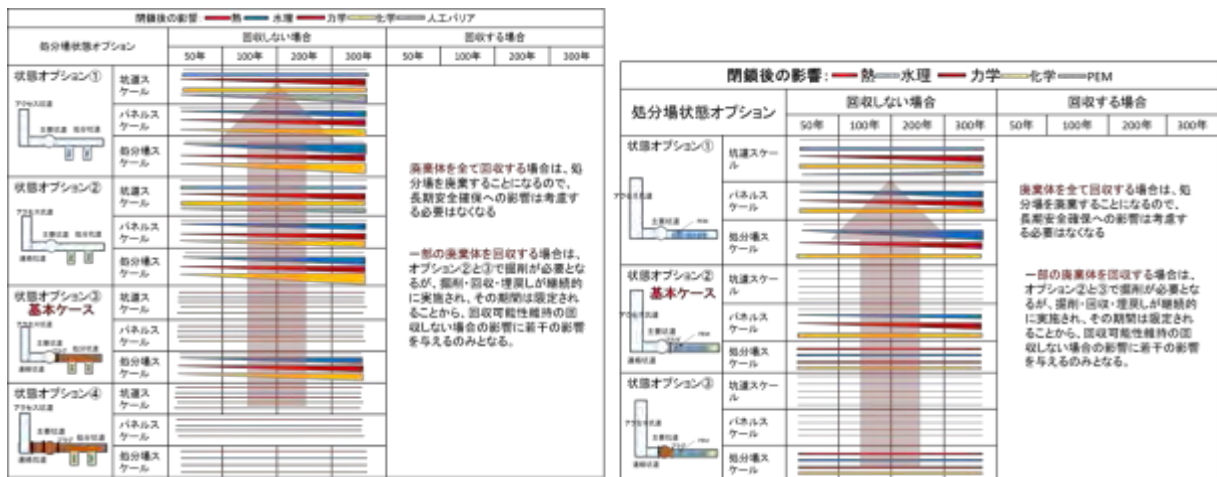
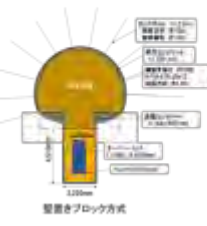
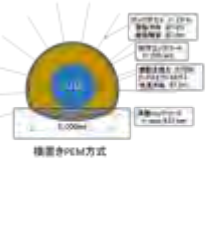


図 2.4.3-6 状態オプションと回収可能性維持期間の違いによる閉鎖後の影響比較

5) 定置方式の違いによる定性的な影響の比較のまとめ

縦置きブロック方式と横置き PEM 方式の回収可能性維持による閉鎖前と閉鎖後の定性的な影響の違いは、共通的な事項と影響の差ができる事項があり、それらの要因を表 2.4.3-1 にまとめた。それぞれの状態オプションや回収維持期間により大きさや増加傾向が異なる。

表 2.4.3-1 定置方式の違いによる閉鎖前と閉鎖後の影響比較結果

定置方式	閉鎖前への影響		閉鎖後への影響	
	共通	影響の差の要因	共通	影響の差の要因
 <p>縦置きブロック方式</p>	<ul style="list-style-type: none"> 坑道開放延長が最大となる状態オプションでは、支保工等の維持管理・更新に係る作業リスク、環境負荷、コストは最大となり、維持期間に伴い増加する。一方で、廃棄体回収時には坑道が開放されていることで最も容易となりリスク、環境影響、コストとも最小となる。 坑道が埋め戻された状態オプションでは、閉鎖前の影響に関するこの傾向がともに逆転する。 	<ul style="list-style-type: none"> オーバーパック回収・搬出時の放射線対策が必要となる。 オーバーパック周辺の緩衝材撤去に係るコストがかかる。 坑道埋戻し材の撤去量が多くなる。 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道開放延長が最大となった状態オプションでの周辺母岩への影響が顕著となる。特に水理と地化学特性は、維持期間の増加とともに変化が増大する。 坑道の埋戻し延長が増えたと周辺母岩への影響は各スケールとも減少していく。 廃棄体回収時は、処分坑道ごとに実施されるため影響は局所的で維持管理時の影響に支配される。 	<ul style="list-style-type: none"> 状態オプション①では、オーバーパックが長期間にわたり酸素と水滴の影響を受け腐食が促進される。 状態オプション②での緩衝材の流出の可能性がある。
 <p>横置きPEM方式</p>	<ul style="list-style-type: none"> 坑道が埋め戻された状態オプションでは、閉鎖前の影響に関するこの傾向がともに逆転する。 	<ul style="list-style-type: none"> PEM定置後の空間が狭隘となるため坑道の維持管理が複雑となる。 一部のPEMを回収する場合の対象外のPEMも撤去する必要がある。 PEMではベントナイトも一緒に回収することになり、重量物の回収・搬出、搬出後の対応が多くなる。 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道の埋戻し延長が増えたと周辺母岩への影響は各スケールとも減少していく。 廃棄体回収時は、処分坑道ごとに実施されるため影響は局所的で維持管理時の影響に支配される。 	<ul style="list-style-type: none"> PEMの鋼製外殻のために坑道の状態による初期性能への影響は小さい。

また、影響の比較のまとめとして、既往の検討で用いられている指標を用いた検討も行った。ここでは、NUMO-TR-11-01 [3]で示されている表 2.4.3-2 の処分概念・技術オプションの特徴比較の視点や、表 2.4.3-3 の定置方式の作業性と想定される地下環境条件への適用性の評価で用いられている指標を適用して整理を行った。影響の比較をまとめた結果を表 2.4.3-4 に示す。

本検討では、比較の指標は閉鎖後長期の安全性と閉鎖前の安全性に大別し、閉鎖前の安全性は回収作業性と地下環境への適用性（坑道維持作業）に分類し、さらにそれぞれについて NUMO-TR-11-01 [3]で用いられている指標を参考にして比較の指標を設定した。また、各比較の指標に対して、縦置きブロック方式と横置き PEM 方式の特徴による違いを示し、定置概念の違いによる影響の比較をとりまとめた。ただし、ここでは横置き PEM 方式では PEM が健全な場合を想定しており、不健全な場合は PEM 容器があること、及びオーバーパックと緩衝材が一体となっていること（一体化）の特徴がなくなり、ブロック方式と違いが生じなくなる考えられることに注意する必要がある。

表 2.4.3-2 処分概念・技術オプションの特徴比較の視点 (NUMO-TR-11-01) [3]

設計因子		特徴比較の視点
閉鎖後長期の安全性	放射性物質の移行	・ 定置方式の形状に対する移行フラックスの大小 ・ 処分孔および処分坑道の側面影響領域の連続性
	人工バリアの長期安定性	・ ニアフィールドにおける積層物と人工バリアとの相互作用
作業安全性	放射線安全	・ 避へいの有無 ・ 事故時・復旧時の人のアクセスの可能性
	一般労働安全	・ 避難経路の数・延長 ・ 換気・排水経路の数・延長 ・ 落盤の危険性
工学的成立性・品質保証	工程	・ 処分坑道・処分孔の掘削速度
	定置作業性	・ 定置装置(積層部)の空間的余裕 ・ 掘削材搬送・定置・構築体搬送・定置技術レベル
	技術開発の進展	・ 実証試験による技術の成立性の確認
	効率性(物流)	・ 物流量 ・ 搬送・定置の作業量
	地下環境への適応性	・ 想定される地下環境条件への適応性
工学的信頼性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 建設・構築作業の地質環境条件の不確実性に対する信頼性 ・ 構築条件(1日あたりの定置構築体数など)の変化に対する柔軟性 ・ 繰り返し動作の信頼性、メンテナンスの簡便性、容易さ 	
サイト調査とモニタリング	<ul style="list-style-type: none"> ・ サイト調査のしやすさ ・ モニタリングのしやすさ 	
回収可能性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 回収のしやすさ ・ 実証試験による回収技術の成立性の確認 	
環境影響	<ul style="list-style-type: none"> ・ 揚土数量(掘削土、排水) 	
社会経済的側面	<ul style="list-style-type: none"> ・ ステークホルダーの受容性 ・ 揚土数量 	

表 2.4.3-3 処分孔縦置き定置方式と処分坑道横置き定置方式の作業性と想定される地下環境条件への適用性 (NUMO-TR-11-01) [3]

分類	処分孔縦置き定置方式 	処分坑道横置き定置方式		
		原位置施工方式 	FEM方式 	
作業性	【定置作業性】	処分坑道に空間的余裕があり、定置装置の空間的制約は少ない。 掘削材ブロック製作・定置に関する構築技術は実証試験が行われている。	掘削材搬送ブロック・側部・上部掘削材吹付に関する構築技術は開発済みである。 吹付材料の圧送可能距離に応じて処分坑道長を設計する必要がある。	狭小空間での重量物搬送・定置に関する構築技術は開発済みである。
	【作業安全性】	処分坑道に空間的余裕があり定置装置の稼働は容易である。 坑道換気が可能である。 処分孔上部避へい坑入坑が可能である。 2方向の入坑・避難経路が確保できる。	処分坑道内の換気は容易ではない。 構築体定置後は入坑することはできない。	処分坑道内の換気は容易ではない。 構築体定置後は入坑することはできない。
	【効率性(物流)】	搬送性は良好と考えられる。往復作業がないため作業効率を上げることができると見られる。	狭小空間での往復作業になるため、搬送距離が長いと効率性が低下する。	狭小空間での重量物搬送を含む往復作業になるため、搬送距離が長いと効率が低下する。
地下環境への適応性	【空間安定性】	処分孔列に必要に応じて補強が必要である。	坑道断面が小さいので堅固な方式に比べて有利である。	坑道断面が小さいので堅固な方式に比べて有利である。
	【高湿度対策】	ブロックの初期含水比調整、処分坑道内換気により対応可能である。	高湿度対策として十分な換気を行うのは難しい。	掘削材が圧入容器内に収納されているので、換気は不要である。
	【湧水対策】	処分孔列に湧水遮断壁、排水室、地下水と掘削材の接触防止策を対応する。	処分坑道全線で排水工を施す。	鋼製セルに水密性を持たせる場合、水床については湧水対策は不要である。鋼製セルに関しては、湧水対策を施す必要がある。

表 2.4.3-4 定置概念の違いによる回収可能性維持の影響の比較のまとめ

比較の指標		特徴による違い	縦置きブロック方式	横置きPEM方式
閉鎖後長期の安全性		・PEM容器 ・一体化	<ul style="list-style-type: none"> 人工バリアは外部の影響を受けやすい。緩衝材の流出、再冠水・膨潤挙動のばらつき、変質等の考慮が必要。 鋼殻の残置による影響はない 	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材が鋼殻に格納されていることから、人工バリアが外部の影響を受けにくい。 鋼殻の残置による影響(腐食、緩衝材の再冠水・膨潤挙動、緩衝材の変質等)の考慮が必要であるが、オーバーパックによる影響と同様である。
閉鎖前の安全性	回収作業性	回収作業性(容易性, 技術的実現性)	<ul style="list-style-type: none"> 空間余裕 一体化 <ul style="list-style-type: none"> 処分坑道が開放状態であれば、空間的余裕があるため、回収作業への制約は少ない(実証試験により実現性は確認済み)。 緩衝材除去作業を行う必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 狭隘な空間のため、回収作業への制約がある(実証試験により実現性確認中)。 一体化モジュールであるため、緩衝材除去作業の必要はない。
		回収作業安全性(作業リスク)	<ul style="list-style-type: none"> 一体化 <ul style="list-style-type: none"> 廃棄体を取り出す必要があるため、放射性安全に対する作業リスクは比較的大きい。 	<ul style="list-style-type: none"> 一体化モジュールなので放射線安全に対する作業リスクは比較的小さい。
		効率性(費用)	<ul style="list-style-type: none"> 延長 アクセス <ul style="list-style-type: none"> 処分孔の延長分の容積(埋戻材の量)が多くなることが見込まれる。 処分孔へのアクセスが必要。処分坑道が開放状態なら同時に複数の廃棄体を回収可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 処分孔の延長分容積(埋戻材)はなし。 処分孔へのアクセスは不要。廃棄体の回収は1方向からにつき1体ずつとなる。
	地下環境への適用性(坑道維持作業)	坑道安定性	<ul style="list-style-type: none"> 空間余裕 <ul style="list-style-type: none"> 処分坑道が開放状態の場合でも、空間的余裕があるため、安定性維持作業への制約は少ない 処分孔の埋め戻しを行わない場合、狭隘な空間での処分孔の安定性維持作業は困難である 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道が開放状態の場合、狭隘な空間での安定性維持作業は困難である
		高温度・高湿度対策	<ul style="list-style-type: none"> PEM容器 <ul style="list-style-type: none"> 処分孔の埋め戻ししない場合、緩衝材の含水比管理のための処分坑道内換気の維持が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 特になし
		湧水対策	<ul style="list-style-type: none"> 空間余裕 <ul style="list-style-type: none"> 処分孔の埋め戻しを行わない場合、孔毎に狭隘な空間での湧水対策が必要であるが、維持作業は困難である。 	<ul style="list-style-type: none"> 処分坑道が開放状態の場合、狭隘な空間での湧水対策の維持作業が必要であるが、維持作業は困難である。

※横置きPEM方式ではPEMが健全な場合を想定。不健全な場合はPEM容器および一体化の特徴に関してブロック方式と同じになる。

(2) 定置方式の違いによる技術課題の比較

定置方式の違いによる技術課題は、回収可能性維持に必要な技術を技術体系として 6 項目に分類し、それぞれの技術への要件を考慮して抽出してきた。ここでは、下記に示す流れ(図 2.4.3-7)に沿って、抽出した技術課題を共通課題と固有の課題に分類し、それぞれの課題の内容を比較する。

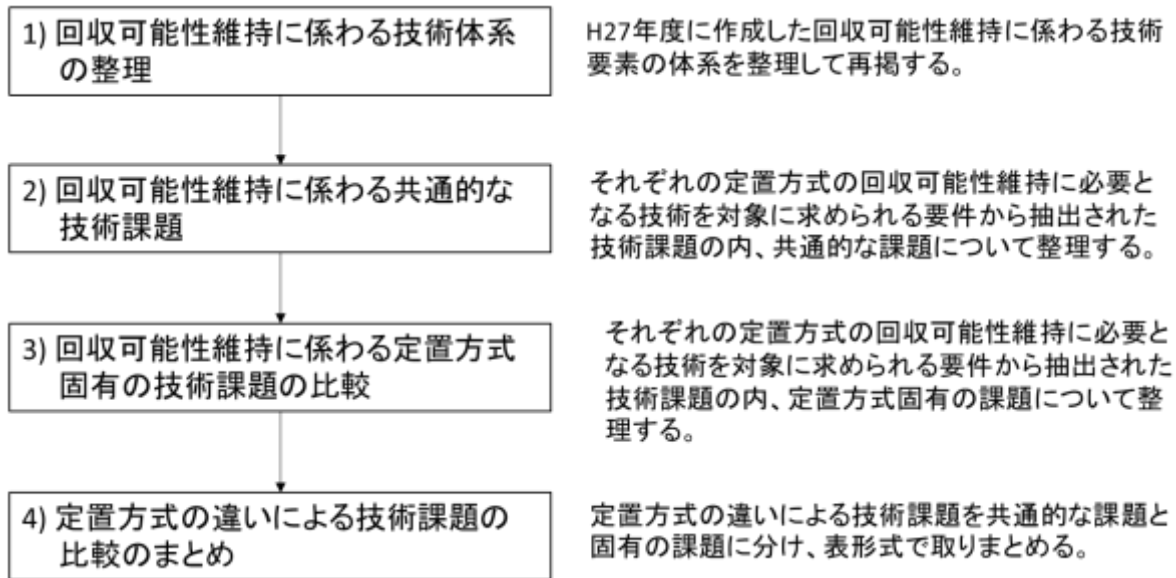


図 2.4.3-7 定置方式の違いによる技術課題の比較検討の流れ

1) 回収可能性維持に係わる技術体系の整理

回収可能性維持に係わる技術要素は、図 2.4.3-8 に示す大きく A~F の 6 項目に分類できる。それぞれは、回収技術を除いて状態オプションや回収可能性維持期間に係らず同じものとなる。

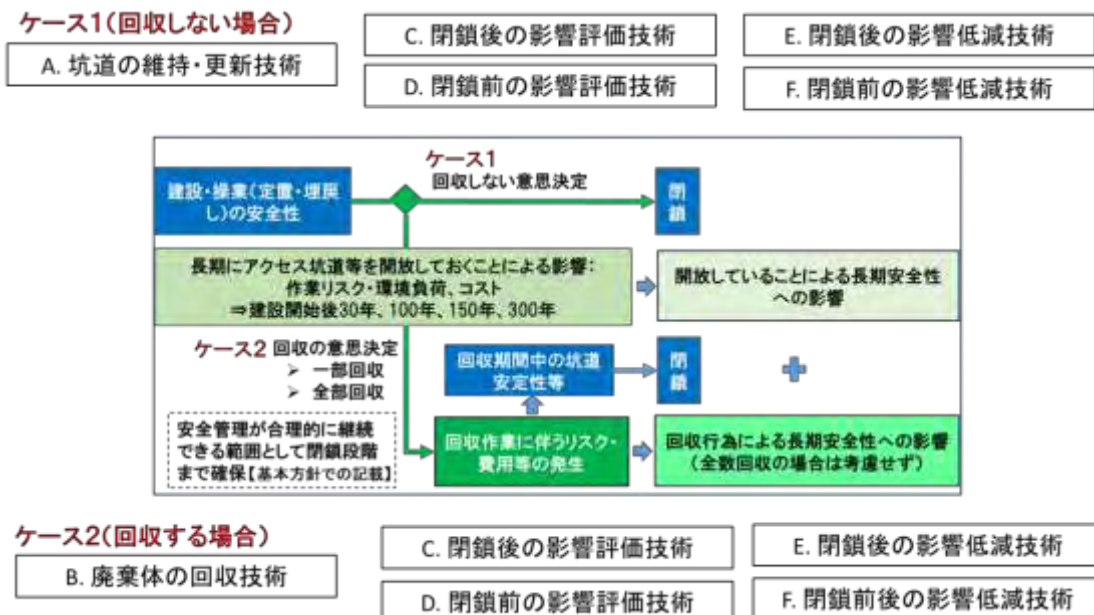


図 2.4.3-8 回収可能性維持に係わる技術体系の構成 (H27 年度検討より)

2) 定置方式の共通的な課題

縦置きブロック方式と横置き PEM 方式を対象とした技術課題の検討結果を分析すると定置方式と状態オプションに共通した課題が存在することが分かった。技術体系に沿った項目で整理すると以下のようにまとめることができる。

- A. 坑道維持・更新技術：回収可能性維持のために長期に亘り坑道が開放されている場合、モニタリング機器の設置とともに遠隔操作での点検・診断ができ、損傷部の補修・補強技ができる技術が必要となる。現状では作業員が点検機器を操作しつつ保守を行っているが、放坑道の延長が200km以上に及ぶことも想定されるため、ロボット等を用いた効率的な作業が必要となる。支保の更新が必要な場合を想定した脱着が容易となる支保構造を開発することも重要課題。
- B. 回収技術：定置方式に依存する。共通的な作業は、処分坑道が埋戻されている場合の力学プラグの撤去、処分坑道の埋戻し材撤去、埋戻し撤去後の処分坑道の安定確保および作業環境整備（換気・排水）となる。力学プラグの撤去では、無騒音・無振動の撤去技術と撤去材の回収・搬送技術開発が共通の課題となる。埋戻し材の撤去後の対応についての工夫も課題であり、特に支保の補強や排水システムの復旧方法の開発も必要となる。
- C. 閉鎖後の影響評価技術：本検討でも実施した状態変遷の理解から始まり、PIDの構築、評価シナリオの作成、評価ケースの設定など評価の流れは定置方式に係らず共通する手法である。課題となるは、状態変遷の知識情報が不十分であること、特に広範囲に発生する地下水流動場の変動と連動する化学場の変化が閉鎖後にどの程度の時間で回復あるいは安定状態に移行するかの知見が十分でない。評価に用いるモデルや解析コードについては、状態オプションを考慮して THMC 相互の関係を考慮した解析ができるように開発整備が必要となり、関連した知識情報データの拡充も求められる。
- D. 閉鎖後の影響低減技術：影響低減技術は具体的な目標を設定し、定性・定量的影響検討の結果から抽出する。これまでの検討から影響の程度（大きさや範囲）とその回復プロセスに係る期間は、定置方式よりも、処分場の母岩を含む立地条件、状態オプションおよび回収可能性維持期間に依存することが分かっている。閉鎖後の影響の内、最も着目すべき現象は地下水流動場の変化とそれに伴う化学環境の変化となる。これらの影響を低減するためには、坑道周辺の間隙水圧低下を防止する工法などの導入が考えられるが、極めてコスト増大の要因ともなることから、新たな方策の開発が必要となる。
- E. 閉鎖前の影響評価技術：本検討での定性的な検討で用いた指標（作業、環境負荷、コスト）を精度よく定量化することが課題となる。影響低減技術として新たな工法等の開発が進めば、実証試験を通じて評価するための知識情報ベースを拡充していくことも課題となる。定量化に向けては、後述する 2.4.4 項に考え方を記述する。
- F. 閉鎖前の影響低減技術：本検討において 2.3.3(4)で低減技術開発の二つのアプローチを提示した。例えば、メンテナンス・フリーの支保材の開発、撤去した埋戻し材の再利用を考慮した物流・動線の開発、回収技術の高度化（回収の容易さを考慮した定置概念の開発など）を実施する。回収の容易性を確保するために坑道を長期に開放することでの定性的な影響評価では、全ての指標が大きくなっていくため、坑道をできるだけ埋戻しておい状態で安全かつ効率的に回する技術が全体の影響低減につながると考えられる。

3) 定置方式固有の技術課題の比較

以下にそれぞれの定置方式で整理した技術課題を示す。ハード技術におけるいずれの技術課題についても、安全性、効率性、経済性がキーワードとなる。

表 2.4.3-5 定置方式の違いによる技術課題（ハード技術）

【縦置きブロック方式】

【横置き PEM 方式】


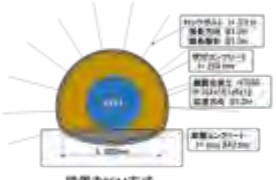
<p>処分坑道に設置した処分孔にベントナイトブロックとオーバーバックを定置する方式に対する「回収可能性維持に係わる技術課題」の内、状態オプション固有と共通の技術課題を以下に整理する。</p> <p>【状態オプション①固有の課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 処分孔に定置したオーバーバックを長期に安定状態とする仕組みの構築、また、腐食速度の増加を防止する対応策、処分孔の長期安定性のための対策も必要となる。 <p>【状態オプション①と②固有の課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 処分坑道を含めたすべての坑道が開放されることによる支保工や換気・排水設備の維持・補修、更新技術を効率的に実施する技術の整備、メンテフリーとする技術などが必要となる。 ✓ 広範に開放されることでの周辺母岩の水理、地化学特性の擾乱の状況と埋め戻し後の安定環境への移行に係る不確実性を把握すること、問題がある場合の対応策が必要となる。 <p>【状態オプション③と④固有の課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 回収時に処分坑道のプラグ、埋戻し材の撤去とともに支保の補強や排水設備を効率的・経済的に実施する技術が必要。 ✓ 処分孔内の緩衝材を効率的・経済的に撤去する技術が必要となる。(例えば、塩水によるスラリー化工法の効率性向上など)。 <p>【各状態オプション共通の課題】に関して</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 開放している坑道の長期維持管理・保守、更新の安全から効率的・経済的な技術の整備 ✓ 遠隔操作により、効率的・経済的にオーバーバックを回収・搬出する技術 	<p>処分坑道にPEMを横置きに定置する方式に対する「回収可能性維持に係わる技術課題」の内、状態オプション固有と共通の技術課題を以下に整理する。</p> <p>【状態オプション①固有の課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ PEMを定置した坑道を埋め戻さない状態で維持するために、坑道安定性と作業環境維持のために、狭隘な作業空間での支保や排水・換気設備等の維持管理・保守、更新を安全かつ効率的・経済的に行う必要がある。 ✓ 開放していることでPEM外殻の腐食が促進され、人工バリア初期性に影響を与える可能性がある場合は、対策が必要となる。 ✓ 坑道が長期に開放されることによる処分場スケールでの地下水流動系と地化学特性への擾乱が埋め戻し後に回復するあるいは安定状態に移行するかが評価の不確実性となることから状態推定と問題がある場合の対策が必要。 <p>【状態オプション②と③の固有の課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 回収時の処分坑道のプラグ、埋戻し材の撤去とともに撤去坑道の安定性確保の支保の補強や換気・排水設備の安全かつ効率的・経済的な技術の整備が必要 <p>【各状態オプション共通の課題】に関して</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 開放している坑道の長期維持管理・保守、更新の安全から効率的・経済的な技術の整備 ✓ 想定しうるあらゆる場合を想定したPEMを遠隔で回収・搬出する技術が必要
--	---

それぞれの影響評価技術に係る課題は、手法としては固有な技術ではなく共通する。一方で、評価の対象とする定置方式固有の知識情報データベースの拡充は不可欠で、そこにはこれまでの検討での情報についても一元化して管理ができるようなシステムの整備も共通的な課題となる。

4) 定置方式の違いによる技術課題のまとめ

定置方式の違いによる共通的な技術課題と固有の技術課題を表 2.4.3-6 に要約する。固有の技術課題は状態オプションに依存する。

表 2.4.3-6 定置方式の違いによる技術課題のまとめ

定置方式	共通技術課題	固有技術課題
 <p>固定きブロック方式</p>	<p>【A. 坑道維持・更新技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> AIとロボットでの診断、維持補修する技術 現状での維持・更新技術の高度化 <p>【B. 回収技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> 遠隔による緩衝材、廃棄体回収・搬出技術 回収容易性(効率化、経済性)向上技術 <p>【C. 閉鎖後の影響評価技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> 定量化に向けて異なるスケールでの特性変化を追跡できる解析技術 THMC連成解析技術 関連するデータベースの拡充 	<ul style="list-style-type: none"> 状態オプション①における処分孔の長期安定性確保策とオーバーバックの腐食促進防止策 状態オプション②における緩衝材流出防止策 状態オプション②、③における緩衝材撤去技術の高度化(効率性、経済性) 異なる状態でのオーバーバック回収技術の高度化
 <p>固定きPEM方式</p>	<p>【D. 閉鎖後の影響低減技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> 母岩への影響を低減する支保・排水技術 オーバーバック、PEMの腐食防止技術 影響低減を考慮した定置概念開発 <p>【E. 閉鎖前の影響評価技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> 影響指標の定量化技術 データベースの拡充 <p>【F. 閉鎖前の影響低減技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> メンテフリーの支保・設備技術 廃棄体回収高度化技術(回収の容易さ、効率性、経済性を向上させる技術と概念の開発) 物流の低減概念の開発 	<ul style="list-style-type: none"> 状態オプション①における狭隘部の処分坑道維持・補修技術の高度化(AI, 遠隔ロボットなど) オプション①におけるPEM腐食防止策 埋め戻し後の一部のPEM回収高度化技術(物流の最適化を含む) PEM周辺の埋戻し材撤去高度化技術(付着した埋戻し材撤去も含む) 重量PEMの回収・搬出技術

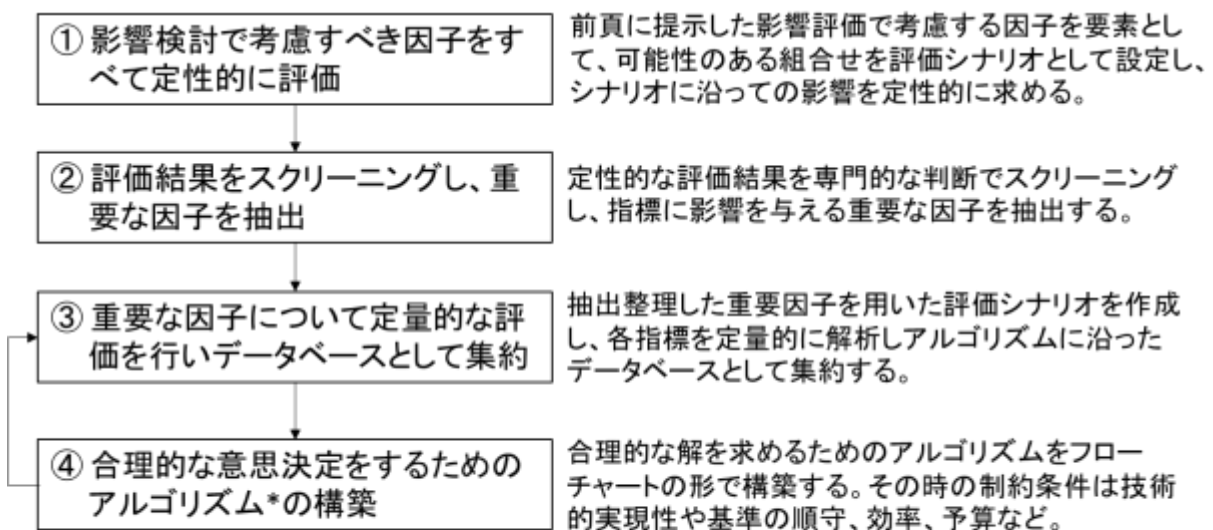
2.4.4 回収可能性維持の期間設定と具体化に向けての方策に関する検討

(1) 回収可能性維持期間の設定の考え方と設定フローの検討

1) 回収可能性維持期間設定に向けての検討フロー（案）

回収可能性維持期間の設定に係る要件は、「安全な管理が合理的に継続される範囲」となる。具体的な検討は次年度以降に実施するとして、ここでは、現時点で想定される設定に向けての検討フローについて言及する。

図 2.4.4-1 に設定の検討フロー例とその作業概要を示す。期間設定においては、様々な因子の組合せから閉鎖前と閉鎖後の影響を設定した指標（例えば、閉鎖前のコストや閉鎖後の母岩の変化など）で定性・定量的に評価し、総合的に判断する必要がある。これらの指標は特性が異なることから簡単な線形式にはならないため、数量や定性的な判定を共通の点数に置き換える多変数（あるいは多属性）意思決定手法を用いる必要がある。



*【アルゴリズム】問題を解決するための方法や手順のこと。問題解決の手続きを一般化するもので、プログラミングを作成する基礎となる。デジタル用語辞典

図 2.4.4-1 回収維持期間の設定に向けての検討フロー例

2) 検討の進め方

回収時に発生する影響については、縦置きブロック方式と横置き PEM 方式を比較した結果、廃棄体の設置方式に依存することも明らかとなった。また、性質の異なるどの指標が支配的となるかについては、定量的に把握することが困難であることも推測できた。

現状での影響の定量化の目的としては、定量化の結果を吟味することで今後明らかにすべき事項や必要な技術要件を設定し開発方策を立案することである。

技術開発や知識情報データベースの拡充を進めることで、回収可能性維持期間設定に向けての手法と指標（属性）に係る情報を蓄積していくことになる。これらの情報には、定量化の結果だけでなく、地下研究施設での調査研究から取得される知見やナチュラルアナログ的な情報も加えていくことで、設定の意思決定の妥当性を提示することにつながる。統合化に用いられる定性的な評価には専門家の判断も含まれることから、異なる専門家の意見を集約していく方策も整備していくことが不可欠となる。図 2.4.4-2 に上記の事項をまとめて示す。

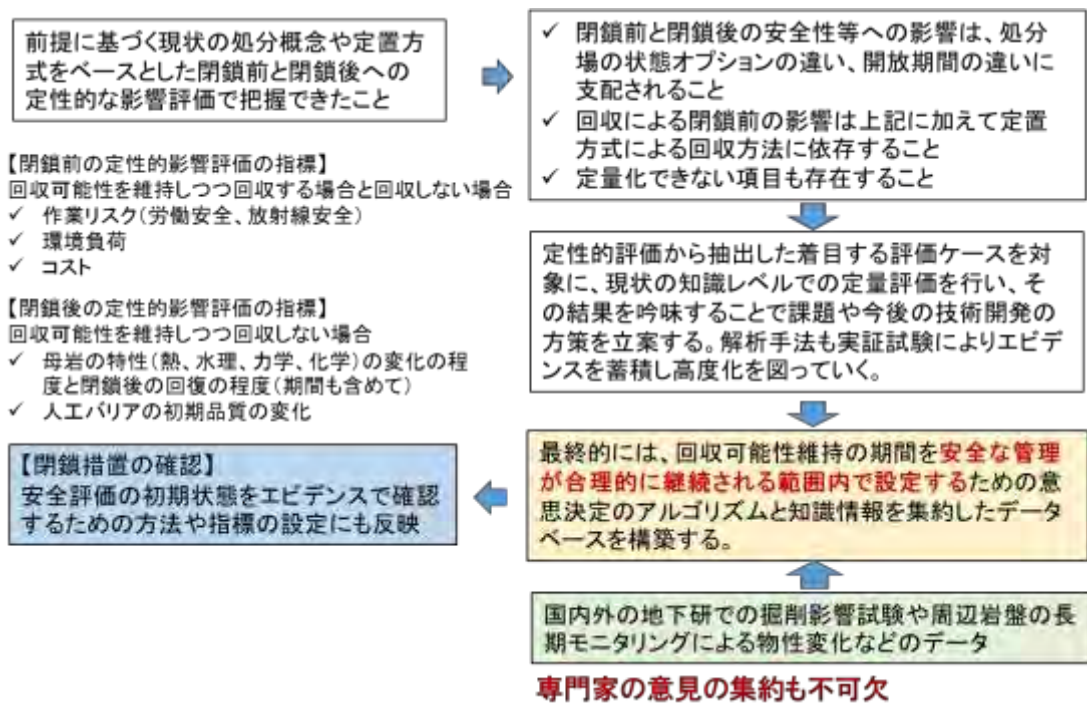


図 2.4.4-2 検討の進め方の案

2.5 検討のまとめ

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長期的な安全性に与える影響等について検討することを目的として、本年度は、昨年度に策定した5ヶ年計画に沿って、昨年度までに実施した回収技術や回収維持期間についての検討を踏まえた調査を行った。

本年度は、(1) 昨年度と異なる廃棄体の定置方式等を対象に、回収可能性維持の影響分析の実施と技術要素マップを作成し、(2) 定置概念についての技術課題の抽出を行った。本節では、(1)および(2)の実施結果を概説した後、技術課題を整理して2年間の検討のとりまとめを行うとともに、回収可能性維持期間を検討する上での検討課題を整理して述べる。

2.5.1 回収可能性維持の影響分析と技術要素マップの作成

高レベル放射性廃棄物処分の安全性評価の観点から、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に与える影響について、平成27年度の検討とは異なる廃棄体の定置方式を対象として、回収可能性維持に関連する要素の網羅的な抽出と共に、その関連性を可視化し、安全性確保の要素、回収シナリオの整理も含めて、技術要素マップを作成した。

具体的には、廃棄体の定置方式を横置き方式、緩衝材製作・施工方法をPEM方式とした場合の検討を実施した。検討項目は以下のとおりである。

- ① 回収可能性を維持した場合の処分施設の安全性への影響を及ぼすと推定される要因とその要素(影響因子)の抽出
- ② 抽出した影響因子の分類と状態変遷表の提示、基本ケースおよび検討ケースの設定と網羅的な影響因子の検討
- ③ プロセス・インフルエンス・ダイアグラム(PID)の作成等による分析と整理による影響因

子の整理

④ 技術要素マップの作成

各検討項目で得られた結果をまとめて述べる。

① 回収可能性を維持した場合の処分施設の安全性への影響を及ぼすと推定される要因とその要素（影響因子）の抽出

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に与える影響に及ぼす要因とその要素（影響因子）の抽出を行った。検討は、平成 27 年度に実施した検討内容も参照した上で整理した。回収可能性維持による影響は、大きく二つの要因から発生し、一つは維持のために坑道を開放した状態におくことが起因となる影響、もう一つは、廃棄体を回収することで発生する影響であり、これらを起因として発生する影響の種類を整理した。

② 抽出した影響因子の分類と状態変遷表の提示、基本ケースおよび検討ケースの設定と網羅的な影響因子の検討

抽出した影響因子を特質に応じて分類し、回収する場合と回収しない場合を考慮して状態変遷表として示した。処分施設の状態変遷の検討では THMC による整理を行い、FEP による分類と体系化を図った。これらの検討により、長期的な安全性に与える影響は、回収の有無にかかわらず、回収可能性維持状態および回収可能性維持期間に依存することが分かった。また、回収する場合の影響要因とその要素は、回収しない場合のそれに加えて回収作業によるものが加わるため、回収可能性を維持した場合の長期的な安全性に与える影響の検討では回収作業の影響を考慮する必要があることを明らかにした。これらの分析にあたっては、横置き PEM 方式の特徴を整理し、バリアの構成要素が全て含まれる状態を考慮した標準的な基本ケースを設定した。

次に、閉鎖前の回収可能性維持状態を状態オプションとして複数パターン設定し、また、複数の回収可能性維持期間を考慮した回収シナリオを作成し、状態オプションと回収シナリオを組み合わせた検討ケースを設定した。基本ケースおよび検討ケースのシナリオごとの影響因子とその影響先を抽出し、抽出した影響因子を影響先ごとに分類した。この検討により、網羅的に影響因子を検討した。

③ プロセス・インフルエンス・ダイアグラム（PID）の作成等による分析と整理による影響因子の整理

抽出された影響因子と影響先について、プロセス・インフルエンス・ダイアグラム（PID）の作成等による分析と整理を実施した。また、これらの妥当性検討から導かれる影響を閉鎖前と閉鎖後に分け、想定される影響の範囲や程度について整理を行った。基本的に PID は時間の経過を表すことが出来ないが、本検討では時間領域の異なる複数の PID を組み合わせることにより、経過時間を考慮した PID を作成することを可能とした。PID は着目するスケールごとに作成し、影響要素（トリガー）による影響伝搬の様子を時系列的に整理した。

この検討により、処分場への影響を低減させる工学的対策はトリガーに対して施す必要

があることが分かった。また、PID では影響の伝搬を示すことができるが、影響の規模や範囲を示すことができないことから、影響低減のために必要となる工学的対策の程度は解析的手法等による定量的な評価が必要であることを明らかにした。

④ 技術要素マップの作成

平成 27 年度に作成した技術要素マップの枠組みに基づき、全ての検討ケースを対象にして技術要素マップを作成した。技術要素マップは技術群を系統的に整理するものであり、回収可能性維持に係わる技術を、状態オプションにより変化する回収対象を考慮した技術要素群のマトリクスで表した。技術要素マップの縦軸は各スケールでの対象とする坑道（アクセス坑道および連絡坑道、主要坑道、処分坑道）、PEM、人工バリアとそれぞれの構成要素（構成部材等）とした。横軸は回収可能性維持に係る技術グループ（技術群）とし、各技術群は技術要素を含むものとした。

各技術群は坑道維持更新と回収技術に関する技術、閉鎖後長期の安全性への影響に関する技術、事業期間中の安全性に関する技術に大別され、坑道維持更新と回収技術に関する技術は「坑道維持更新技術（ハード）」、「回収技術（ハード）」、閉鎖後長期の安全性への影響に関する技術は「閉鎖後長期の安全性への影響評価技術（ソフト）」、「閉鎖後長期の安全性への影響低減対策技術（ハード）」、さらに事業期間中の安全性に関する技術は「事業期間中の安全性への影響評価技術（ソフト）」、「事業期間中の安全性への影響低減対策（ハード）」の技術群に分類し、これらの枠組みにより、技術要素マップを作成した。

さらに、各技術要素について展開して技術要素展開表にまとめ、技術課題を抽出した。

2.5.2 定置概念についての技術課題の抽出

2.5.1 の検討結果について、平成 27 年度に実施した縦置き・ブロック方式を対象とした検討結果との比較により、定置方式の違いによる回収可能性維持による影響の比較および技術要素の分析による技術課題の比較を行った。また、評価指標および結果の表示方法についても検討した。

定置方式の違いによる影響比較では、閉鎖前の影響と閉鎖後の影響の観点から整理を行った。それぞれの影響は定置方式に共通の事項と、定置方式により差が生じる事項があるため、差が生じる事項の要因も整理した。定置方式の違いによる技術課題の比較では、定置方式に共通的な技術課題と、定置方式に固有の技術課題を要約して示した。固有の技術課題は状態オプションに依存することを明らかにした。

2.5.3 まとめ

2年間の検討のとりまとめとして、平成 27 年度に検討した縦置き・ブロック方式と今年度検討の横置き PEM 方式についての定置概念について技術課題を整理して以下に示す。また、回収可能性維持期間を検討する上での検討課題を整理して述べる

2年間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の特徴を表 2.5.3-1 に再掲する。2.3.4(3)で述べたように、ここで示す技術群のうち、技術群 D の「閉鎖後長期の安全性への影響低減対策技術（ハード）」、および技術群 F の「事業期間中の安全性への影響低減対策（ハード）」は昨年度および今年度の検討で共通して重要度および緊急度が高いと評価された技術群となる。

表 2.5.3-1 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

	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 ・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	廃棄体回収時に用いる一連の技術 ・廃棄体へのアクセス、回収、搬出、管理等	・廃棄体へのアクセス技術・廃棄体回収・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	・評価手法(シナリオ作成技術) ・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緩和・削減対策技術	坑道開放と回収による長期安全性への影響を緩和・削減するための技術 ・周辺坑道の水理学的影響緩和・削減 ・地化学的影響緩和・削減 ・人工バリア初期性能への影響緩和・削減	・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・測定技術の高度化	・安全機能への影響を緩和・削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、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緩和・削減対策技術	坑道開放および回収に伴う影響を緩和・削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・測定技術の高度化	・安全機能(安全対策)への影響を緩和・削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

ここで、技術群 D および技術群 F について、昨年度と今年度の検討結果から得られた技術の内容と課題を整理して図 2.5.3-1～図 2.5.3-4 に示す。また、昨年度と今年度の検討では、回収する対象が廃棄体（オーバーパック）と PEM で異なることから、技術群 D の「D-2」および技術群 F の「F-2」で高度化を図る「B.回収技術」は異なる。そこで、参考までに技術群 B の「回収技術」の B-2「廃棄体回収・搬出技術」を整理した結果を図 2.5.3-5 に示す。図中、朱太字で示した内容は、定置概念で異なる事項である。

これらを整理して、定置概念の違いによる技術課題をまとめると、ニアフィールドに関するものと、回収に関する課題に大別できる。整理した結果を以下に述べる。

①ニアフィールドに関する技術課題

- ・ PEM 容器の機能や要件（横置き PEM 方式）

PEM に求められる要件および仕様が定まっていないため、検討が必要。

- ・ 埋め戻し材の品質要件（全ての定置概念共通）

埋め戻し材の流出限界、長期力学特性など、仕様や特性に関する検討が必要。

- ・ 坑道の維持管理技術の高度化（全ての定置概念共通）

水理学・力学・化学的影響の定量的評価を踏まえた、坑道（+EDZ）の維持管理技術の高度化（モニタリング、坑道補修・更新、部材開発）を図る。

②回収に関する技術課題

- ・ 回収技術の合理性（全ての定置概念共通）

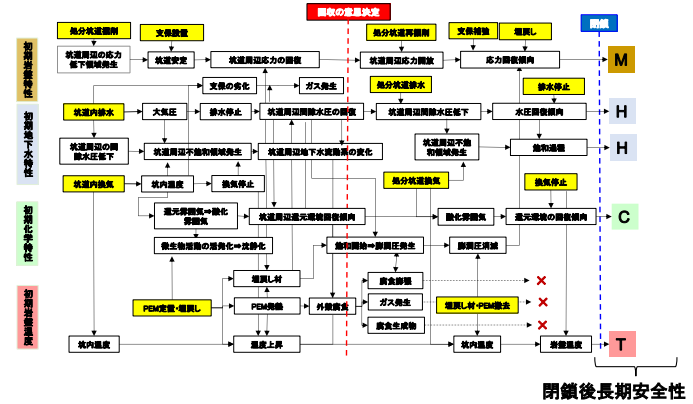
回収技術の高度化や回収の容易性の向上の追求。

回収による閉鎖後長期安全性および閉鎖前（事業期間中）安全性への影響低減対策の策定。

回収可能性維持期間を検討する上での検討課題を整理して表 2.5.3-2 に示す。表中、太青字は定置概念により異なる課題となる。

D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術
D-1. 坑道維持更新技術の高度化
D-2. 回収技術の合理性向上
D-3. 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化

- <内容>
 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
 <求められる要件>
 ・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



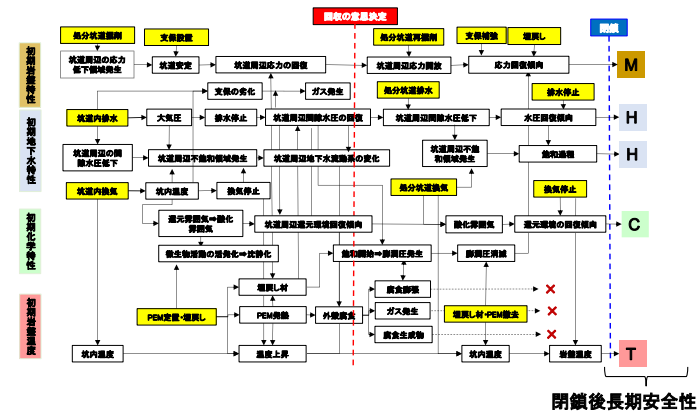
D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術		技術の内容		課題
		縦置きブロック方式	横置きPEM方式	
D-1 坑道維持更新技術の高度化	D-1-1: 初期性能向上	「A.維持更新技術」の高度化。覆工の処分場への適用性検討、埋め戻し材流出防止のための湧水抑制(グラウト)技術、 緩衝材流出防止技術(遮水ライナー等)※1 、 オーバーパック腐食防止のための坑道環境維持技術(状態オプション①)※1 等	「A.維持更新技術」の高度化。覆工の処分場への適用性検討、埋め戻し材流出防止のための湧水抑制(グラウト)技術、高耐久性材料・設備による更新頻度低減技術、等 (※1:鋼殻があるため不要)	回収可能性維持状態・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)	「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)	PEMは狭い空間での維持更新技術高度化 (PEMが無い坑道での技術は各事業者等で技術開発・研究実施中)

・**朱太字**は定置概念で異なる内容。

図 2.5.3-1 技術要素展開表 技術群 D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術「D-1. 坑道維持更新技術の高度化」の二つの定置概念に関する整理と課題

D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術
D-1. 坑道維持更新技術の高度化
D-2. 回収技術の合理性向上
D-3. 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化

- <内容>
 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
- <求められる要件>
- ・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



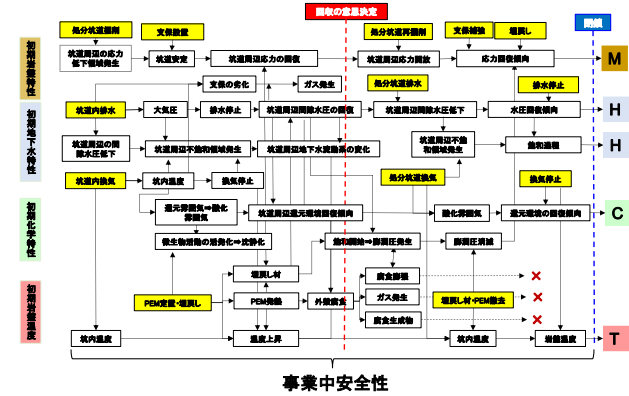
D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術		技術の内容		課題
		縦置きブロック方式	横置きPEM方式	
D-2 回収技術の合理性向上	D-2-1: 回収技術の合理性向上	「 B.回収技術 」の高度化。回収による長期安全性への影響低減対策	「 B.回収技術 」の高度化。回収による長期安全性への影響低減対策	回収技術のさらなる高度化、合理化技術の検討
D-3 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化	D-3-1: 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化	坑道維持による影響、周辺環境影響、回収による影響に係る計測・測定技術	坑道維持による影響、周辺環境影響、回収による影響に係る計測・測定技術	回収可能性維持状態・期間を想定した項目や手法に応じた計測・測定技術(モニタリング技術)の整備

・**朱太字**は定置概念で異なる内容。

図 2.5.3-2 技術要素展開表 技術群 D. 閉鎖後長期安全性への影響低減対策技術「D-2. 回収技術の合理性向上」、「D-3. 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化」の二つの定置概念に関する整理と課題

F. 事業中安全性への影響低減対策技術
F-1. 坑道維持更新技術の高度化
F-2. 回収技術の合理性向上
F-3. 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化

<内容>
 坑道開放と回収に伴う影響を低減するための技術
 <求められる要件>
 ・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
 ・事業期間中の安全性への影響を考慮した合理性(高度化や回収の容易性の向上)の追求



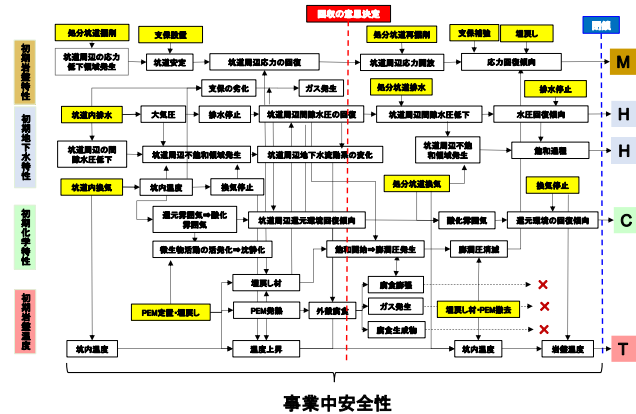
F. 事業中安全性への影響低減対策技術		技術の内容		課題
		縦置きブロック方式	横置きPEM方式	
F-1 坑道維持更新技術の高度化	F-1-1: 初期性能向上	「A.維持更新技術」の高度化。覆工の処分場への適用性検討、湧水抑制(グラウト)技術、 処分孔の力学的安定確保技術(支保工等) 、 処分孔地下水流入対策技術(遮水ライナー等)*1 、高耐久性材料・設備による更新頻度低減技術、 オーバーパック転倒防止対策技術(状態オプション①)*2 等	「A.維持更新技術」の高度化。覆工の処分場への適用性検討、湧水抑制(グラウト)技術、高耐久性材料・設備による更新頻度低減技術、等 (※1: 鋼殻があるため不要, ※2: 台座の形状で確保)	回収可能性維持状態・期間を想定した処分場への水理的・地化学的影響と対策工効果の定量的評価 (力学的安定性確保技術は既存、高耐久性材料・設備は各事業者等で技術開発・研究実施中)
	F-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)、環境保全対策技術等	「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)、環境保全対策技術等	回収可能性維持状態・期間を想定した対策工効果の定量的評価、 PEMは狭い空間での維持更新技術高度化 (PEMが無い坑道での技術は各事業者等で技術開発・研究実施中)

・**朱太字**は定置概念で異なる内容。

図 2.5.3-3 技術要素展開表 技術群 F. 事業中安全性への影響低減対策技術「F-1. 坑道維持更新技術の高度化」の二つの定置概念に関する整理と課題

F. 事業中安全性への影響低減対策技術
F-1. 坑道維持更新技術の高度化
F-2. 回収技術の合理性向上
F-3. 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化

<内容>
 坑道開放と回収に伴う影響を低減するための技術
 <求められる要件>
 ・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
 ・事業期間中の安全性への影響を考慮した合理性(高度化や回収の容易性の向上)の追求



F. 事業中安全性への影響低減対策技術		技術の内容		課題
		縦置きブロック方式	横置きPEM方式	
F-2 回収技術の合理性向上	F-2-1: 回収技術の合理性向上	「 B.回収技術 」の高度化。回収による事業期間中安全性への影響低減対策	「 B.回収技術 」の高度化。回収による事業期間中安全性への影響低減対策	回収技術のさらなる高度化、合理化技術の検討
F-3 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化	F-3-1: 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化	坑道維持による影響、周辺環境影響、回収による影響に係る計測・測定技術	坑道維持による影響、周辺環境影響、回収による影響に係る計測・測定技術	回収可能性維持状態・期間を想定した項目や手法に応じた計測・測定技術(モニタリング技術)の整備

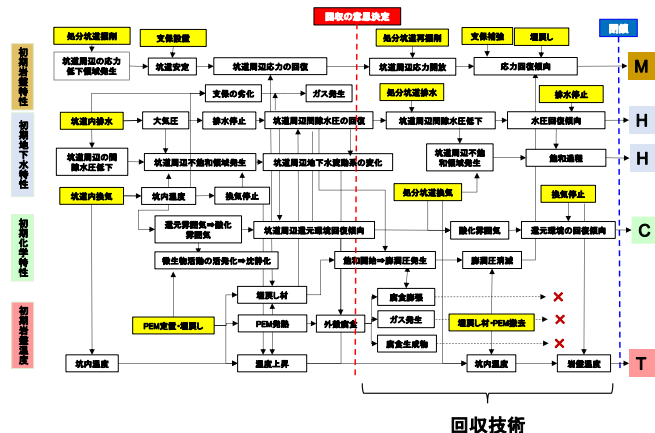
・**朱太字**は定置概念で異なる内容。

図 2.5.3-4 技術要素展開表 技術群 F. 事業中安全性への影響低減対策技術「F-2. 回収技術の合理性向上」、「F-3. 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化」の二つの定置概念に関する整理と課題

<参考:B. 回収技術>

B. 回収技術
 B-1. 廃棄体へのアクセス技術
B-2. 廃棄体回収・搬出技術
 B-3. 回収後の維持管理技術

<内容>
 廃棄体回収時に用いる一連の技術。廃棄体へのアクセス、回収、搬出、管理等の技術。
 <求められる要件>
 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		技術の内容		課題
		縦置きブロック方式	横置きPEM方式	
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。	遠隔での回収・搬出用の器材を処分坑道に設置する技術。	— (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: 廃棄体回収技術	廃棄体 周囲のベントナイトを撤去後、 廃棄体 を回収、地表まで搬出する技術。	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。	— (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

・**朱赤字**は定置概念で異なる内容。

図 2.5.3-5 技術要素展開表 技術群 B「B-2. 廃棄体回収・搬出技術」の二つの定置概念に関する整理と課題

表 2.5.3-2 技術体系を構成する技術群に対する課題

太青字: 定置概念による違い
 ・薄い色(A,B,D,F): ハード技術、濃い色(C,E): ソフト技術

	技術の分類	技術内容	必要技術例	技術に求められる要件	課題
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 ・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)	－ (既存) ※ただし、維持状態・期間を想定した処分場への影響の定量的評価が必要
	B. 回収技術	廃棄体回収時に用いる一連の技術 ・廃棄体へのアクセス、回収、搬出、管理等	・廃棄体へのアクセス技術・廃棄体回収・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)	－ (既存) ※ただし、維持状態・期間を想定した工程・コストの評価が必要
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	・評価手法(シナリオ作成技術) ・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)	・評価のためのデータ整備状況調査、データ整備 【評価手法・モデル化は既存】
	D. 閉鎖後長期安全性への影響緩和・削減対策技術	坑道開放と回収による長期安全性への影響を緩和・削減するための技術 ・周辺坑道の水理学的影響緩和・削減 ・地化学的影響緩和・削減 ・人工バリア初期性能への影響緩和・削減	・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・測定技術の高度化	・安全機能への影響を緩和・削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	・維持状態・期間を想定した水理学的・地化学的影響への対策工効果の定量的評価 ・維持状態・期間を考慮した維持管理技術の高度化 ・回収技術のさらなる高度化、合理化技術の検討 ・維持状態・期間を想定した計測・測定技術整備
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	・コスト評価のための根拠データ整備 【各評価手法は既存】
	F. 事業期間中安全性への影響緩和・削減対策技術	坑道開放および回収に伴う影響を緩和・削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・測定技術の高度化	・安全機能(安全対策)への影響を緩和・削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	・維持状態・期間を想定した水理学的・地化学的影響への対策工効果の定量的評価 ・維持状態・期間を考慮した維持管理技術の高度化 ・回収技術のさらなる高度化、合理化技術の検討 ・維持状態・期間を想定した計測・測定技術整備

第2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] “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、回収可能性維持の影響に関する検討 “、平成27年3月”。
- [3] “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.”。
- [4] “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3 地層処分システムの安全評価”、JNC TN1400 99-023、平成11年3月”。
- [5] “NUMO(原子力発電環境整備機構)(2004a): 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.”。
- [6] “原子力発電環境整備機構、“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”、2016.”。
- [7] “土木学会、“トンネルの維持管理（トンネルライブラリー第14号）”、平成17年7月”。
- [8] “鉄道総合技術研究所、“トンネル補修・補強マニュアル”、平成19年1月”。
- [9] “土木学会、“トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説”、平成13年5月”。
- [10] “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”、平成27年3月”。
- [11] “原子力発電環境整備機構、“地層処分事業の技術開発計画—概査調査段階および精密調査段階に向けた技術開発—”、NUMO-TR-13-02、2013年6月”。
- [12] “鉄道総合技術研究所、“鉄道総研報告””。
- [13] “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年3月”。
- [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 処分システム工学確証技術開発 報告書（第3分冊） モニタリング関連技術の整備”、平成27年3月”。
- [15] “日本原燃株式会社、“廃棄物管理施設の保安規定”、2011年”。
- [16] “経済産業省、“改訂・発電所に係る環境影響評価の手引き”、平成27年7月”。
- [17] “土木学会、“岩盤構造物の建設と維持管理におけるマネジメント—ジオリスクマネジメントへの取り組み—”、平成21年9月”。

第3章 回収可能性維持に関する定量的評価に関する調査

3.1 調査の概要

3.1.1 全体実施方針

前章で述べたとおり、本業務の目的は、原環センターが策定した5ヶ年の検討計画に沿って、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ための調査を行うことである。また、本年度は、坑道安定性に関する解析について取り組み、昨年度までの検討結果を踏まえ、定量的に評価するための条件を検討し、必要となる解析的手法の例示を行う。また、それらの試行を通して、回収可能性の維持期間を考慮した、坑道への影響低減技術の必要性の有無や課題の抽出を行うことを目的とする。これらの目的を達成するために、本業務では回収可能性維持状態・期間を考慮した熱的、水理学的、力学的、化学的影響の定量的な評価の考え方を基本とする。本業務の基本方針の概要を整理して以下に述べる。

(1) 基本方針

本業務の二つの基本方針の概要を図 3.1.1-1、図 3.1.1-2 に示す。基本方針は、基本方針 1 として「回収可能性維持状態、維持期間の違いを考慮した検討」および、基本方針 2 として「影響の定量的評価手法と影響低減技術の考え方を明確にした検討」の二つとなる。

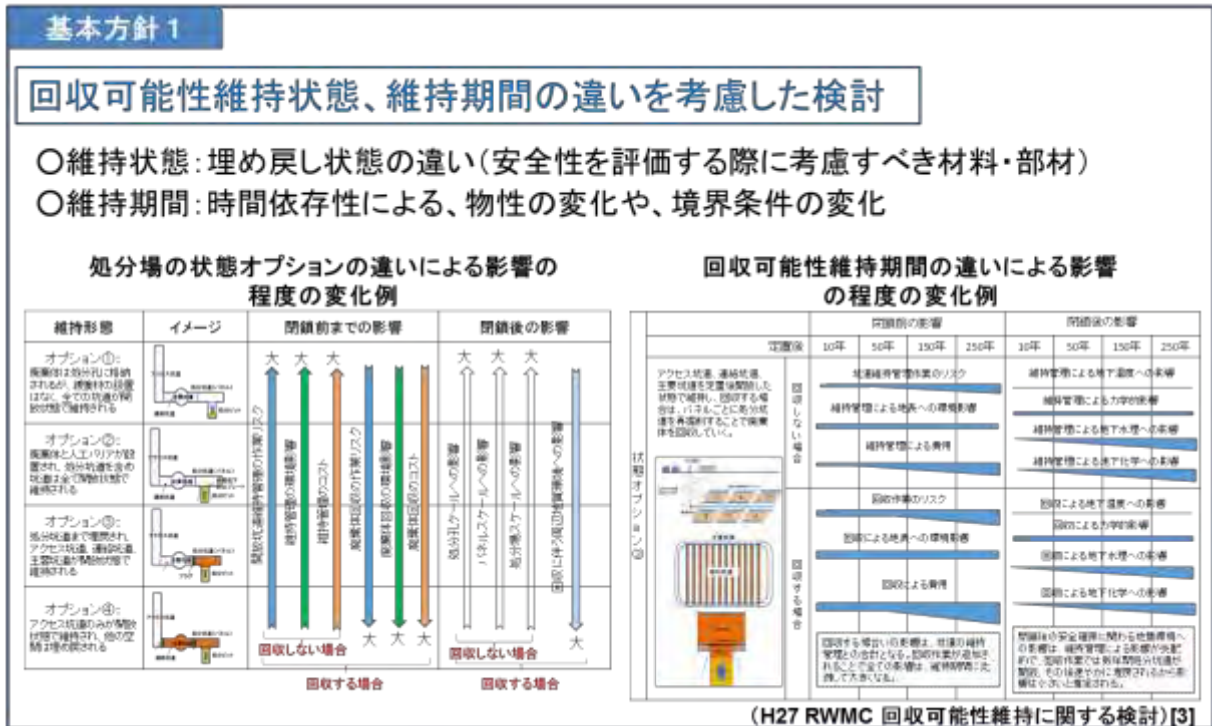


図 3.1.1-1 「基本方針 1 回収可能性維持状態、維持期間の違いを考慮した検討」の概要

基本方針 2

影響の定量的評価手法と影響低減技術の考え方を明確にした検討

影響の定量的評価手法

THMCの影響について、複数の解析手法を用いて、時間依存性の影響結果を引渡した解析を段階的に実施

- ・THMCそれぞれの影響度合いの明瞭な評価
- ・各影響に対する低減技術の定量的な評価、検討

影響低減技術の考え方

- 初期品質向上技術
- 維持管理・修繕技術

※埋め戻し状態の違いも影響低減に係わる条件として考慮

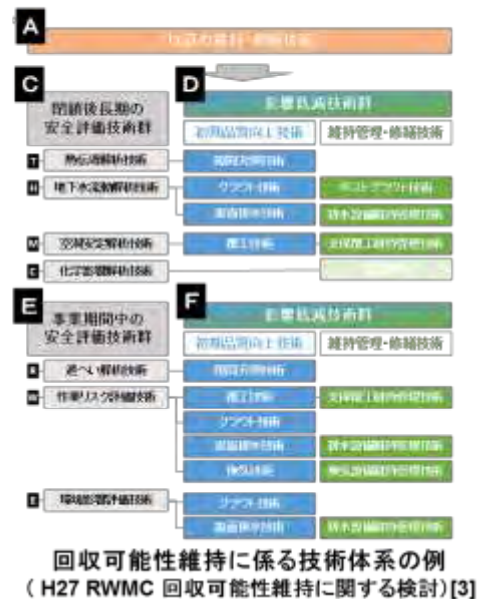


図 3.1.1-2 「基本方針 2 回収可能性維持状態、維持期間の違いを考慮した検討」の概要

二つの基本方針について以下に述べる。

1) 基本方針 1 回収可能性維持状態、維持期間の違いを考慮した検討

H27 年度のセンターの検討業務で示されたように、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。

- ・回収可能性維持状態：埋め戻し状態の違い（考慮すべき材料・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

2) 基本方針 2 影響の定量的評価手法と影響低減技術の考え方を明確にした検討

基本方針 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」際に、評価手法の考え方は二つに大別できる。一つは、THMCの複数の影響評価を同時に実施する連成解析手法である。もう一つはTHMCの各影響について、時間依存性による物性や境界条件の変化の結果を引渡しながらか複数の解析を段階的に実施する手法である。ここでは、影響を定量的に評価するだけでなく、長期的な安全性に対する影響低減技術を定量的に評価、検討することも求められるため、各影響について複数の解析手法を用いて、解析を段階的に実施する評価手法を用いる。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評価が可能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低減技術は、H27年度の原環センターの検討において、閉鎖後の長期安全性および閉鎖前の作業環境の安全性ともに次の二つに大別されている。

影響低減技術 { 初期品質向上技術
維持管理・修繕技術

本業務では、上記の影響低減技術を基本とし、さらに回収可能性維持状態（埋め戻し状態）も影響低減に係わる条件として考慮する。これらにより、原環センター策定の5ヶ年計画(図 1.2.2-1)に示されている次年度以降実施予定の「(回収可能性維持) 期間を設定するための具体的な方策の検討」に資する成果が得られる。

3.1.2 調査内容

前述した基本方針のもと、以下の二つの実施内容について調査を行う。

(1) 影響低減技術の定量的評価に係わる手法の検討

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低減技術を定量的に評価するためには、温度・力学・水理・化学（THMC）それぞれの変化を考慮する複数の解析手法を用いた検討が必要だと考えられる。本年度から、4ヶ年をかけて効率的に定量的な評価をするために、本年度は坑道安定性に係わる評価に着手するとともに、次年度以降に必要な定量的な評価方法を検討することとする。この検討を通じて、今後4ヶ年で解析的検討を行うための、具体的な手法、手順等を提示する。

影響低減技術の定量的評価に係わる手法の検討の概要を整理して図 3.1.2-1 に示す。

回収可能性維持状態・期間を考慮した処分場への熱的、水理学的、力学的、化学的影響の定量的評価の流れ

- ① 閉鎖前の作業環境の安全性【坑道の安定性(坑道維持)への影響】
- ② 閉鎖後の長期安全性【坑道環境の作用・変化によるバリアへの影響】

時間依存性を考慮した影響程度の評価

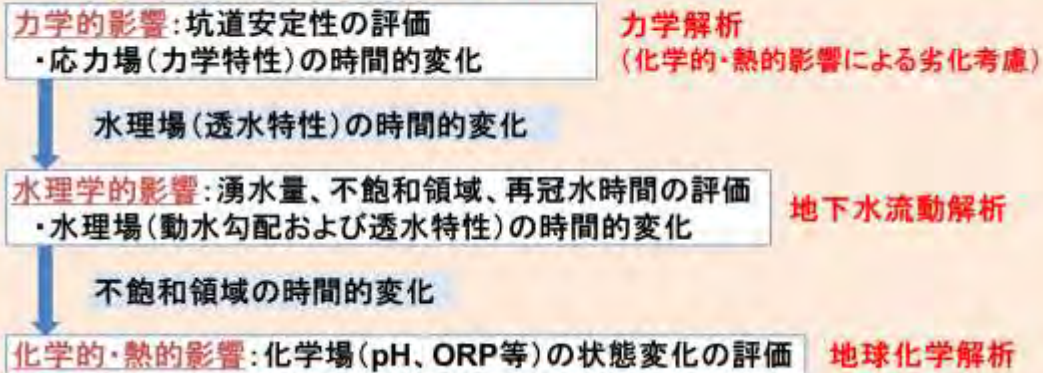


図 3.1.2-1 影響低減技術の定量的評価に係わる手法の検討の概要

3.1.1(1)の基本方針1で述べたように、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は、昨年度原環センターが実施した業務の検討結果から、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と考える。また、基本方針2で述べたように、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、THMC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、複数の解析を段階的に実施する評価手法を用いて、各影響の度合いを明らかにし、影響低減技術の評価を行うことが効率的・効果的であると考え。また、本年度から、4ヶ年をかけて効率的に定量的な評価をするために、その方針として、本年度は坑道安定性に係る評価に着手するとともに、次年度以降に必要な定量的な評価方法を検討する。以降に調査内容について述べる。

・4ヶ年の解析的検討のための具体的な手法、手順の提示

本年度は、今後4ヶ年で解析的検討を行うための、具体的な手法、手順等を提示するための検討を行う。これまで述べてきた影響低減技術の定量的評価に係わる手法の検討についての調査内容を整理すると、回収可能性維持状態および期間を考慮した処分場へのTHMCの各影響の定量的評価の流れとして考えることができる。これは、閉鎖前の作業環境の安全性および閉鎖後の長期安全性への各影響に対して、時間依存性を考慮した影響程度の評価を実施する手法を検討することである。

・坑道安定性（力学的影響）に係わる定量的評価方法の検討

本年度着手する坑道安定性に係る評価とは、坑道の力学的影響に対する安定性を評価するこ

とであり、解析手法として力学解析を用いた評価を実施する。前述したように、本業務では時間依存性を考慮した影響程度の評価を実施する必要があるため、化学的・熱的影響による劣化現象などの変化を考慮した力学解析とする。坑道安定性に係わる評価の具体的な調査内容は(2)で述べる。

・水理学的影響および化学的・熱的影響に係わる定量的評価方法の検討

また、本年度は、次年度以降に実施予定の水理学的影響を評価するための地下水流動解析、および化学的影響を評価するための地球化学解析について検討を行う。具体的には、閉鎖前の作業環境の安全性および閉鎖後の長期安全性への THMC の各影響と影響低減技術の定量的評価に係わる検討を行い、具体的な手法および手順を提示する。昨年度の原環センターの検討では、坑道周辺の力学場の変化と地下水の流動場の変化、および地球化学的状态変化が影響因子として挙げられており、この結果に基づき 5 ヶ年計画 (図 3.1.2-2) が策定されている。この 5 ヶ年計画で示された力学解析による力学的影響評価、地下水流動解析による水理学的影響評価、および地球化学解析による化学的影響評価では、THMC の各影響について、時間依存性による物性や境界条件の変化の結果を引渡ししながら段階的に実施する手法を検討する計画となっている。力学解析により得られる応力場の時間的変化は、水理場 (透水特性) の時間的変化として表現することにより地下水流動解析に情報を受け渡して水理学的影響の評価を行う手法を検討する。また、地下水流動解析により得られた不飽和域の時間的変化などの情報を地球化学解析に受け渡して化学的影響の評価を行う手法を検討する。



図 3.1.2-2 H27 年度原環センター策定の 5 ヶ年計画 (RWMC、2016、一部省略) [3]

上記の検討を通じて、今後 4 ヶ年で解析的検討を行うための、具体的な手法、手順等を提示する。この定量的評価に係わる手法の検討によって、閉鎖前の作業環境の安全性および閉鎖後の長

期安全性に与える THMC の各影響の度合いを明らかにすることにより、各影響に対する低減技術の評価が可能となり、5 ヶ年計画概要（図 1.2.2-1）に示された次年度以降実施予定の「(回収可能性維持) 期間を設定するための具体的な方策の検討」に資する成果が得られると考える。

(2) 坑道安定性に関する解析的評価

「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(1999)」や NUMO による「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—」などで示されている処分場の設計を基に、検討ケースを設定し、坑道安定性を解析的に評価する。解析は回収可能性の維持による坑道の安全性への影響を定量的に評価できる条件で行い、その結果を受けて回収可能性の維持による影響を低減する技術について検討する。また、回収可能性の維持期間を検討する上で定量的評価を行うことによる課題を抽出する。

坑道安定性に関する解析的評価の概要を整理して図 3.1.2-3 に示す。

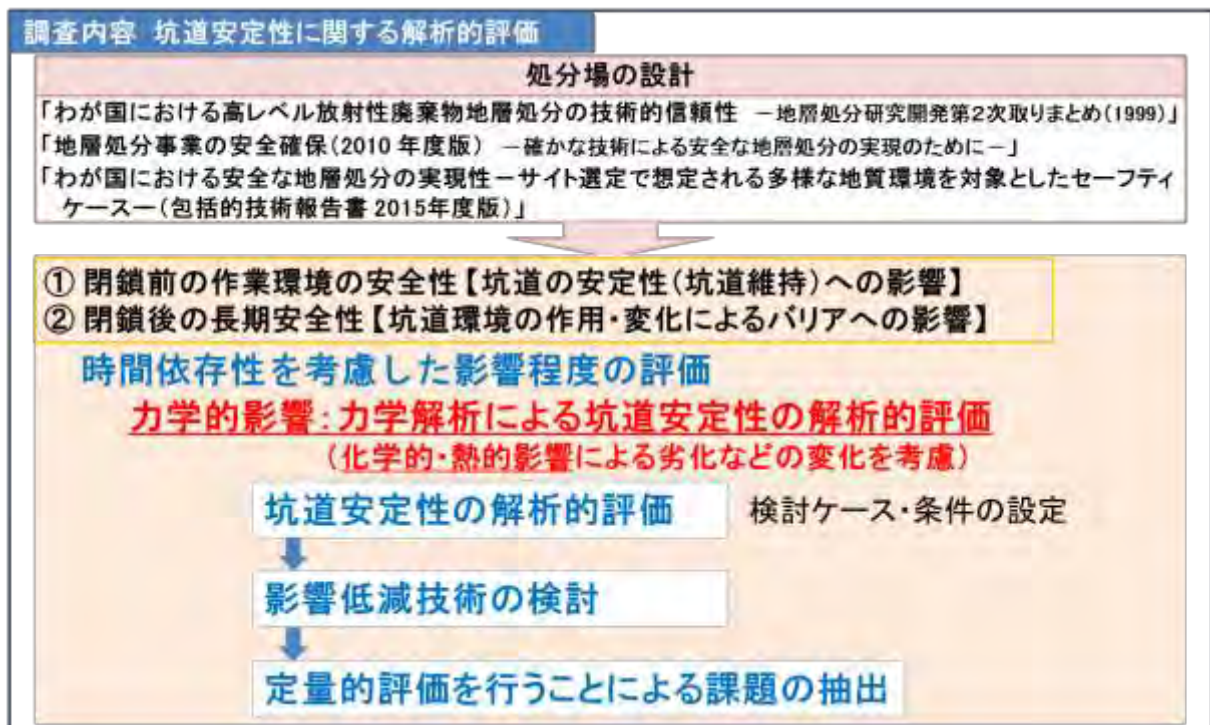


図 3.1.2-3 坑道安定性に関する解析的評価の概要

坑道安定性とは坑道が力学的に安定していることであり、坑道の力学的安定性は周辺の岩盤および支保工が一体となって機能することにより確保される。また、3.1.1(1)の基本方針1で述べたように、回収可能性維持状態を考慮して定置や埋め戻した状態を想定する際には、人工バリア、埋め戻し材、PEMなどの材料の存在も含めて坑道安定性を評価する必要がある。すなわち、回収可能性の維持による影響の坑道安定性の解析的評価とは、岩盤や支保工およびその他の材料を考慮した力学解析により、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を定

量的に評価することである。さらに、基本方針 1 で述べたように、回収可能性維持期間を考えると、回収可能性の維持による影響の評価においては時間依存性を考慮する必要がある。そこで、坑道掘削時に初期応力状態から岩盤の力学的特性に応じて坑道周辺の応力分布の変化や、掘削損傷領域（EDZ）の発生による力学的特性の劣化など、坑道の周辺岩盤の力学的な時間的変化を考慮する。緩衝材や埋め戻し材などベントナイトを含む材料については、飽和による力学特性の時間的変化も考慮する。加えて、吹付けコンクリートや鋼製支保工などの支保工について、化学的・熱的影響による劣化などの時間的変化を、劣化速度を加味した力学特性の低下として反映させた評価を行う。

・坑道安定性の解析的評価

坑道安定性に関する力学解析で用いる手法は、実績が多く、手法として確立されており、信頼性が高い有限要素法（FEM）を用いることとする。また、時間依存性を考慮した解析の岩盤の構成則としては第 2 次取りまとめ（1999）でも用いられているコンプライアンス可変型モデル（大久保モデル）を用いる。

既往の処分場の設計を基に、前述した坑道の安定性評価を解析的に行うため、検討ケースおよび解析の条件を設定する。解析ケースは既往の処分場の設計で設定されている岩盤条件や坑道断面に加えて、回収可能性維持状態および維持期間を考慮して設定する。また、解析の条件としては、物性値や解析モデルの境界条件について、回収可能性維持期間を考慮した時間依存性を考慮して変化させる。

坑道の安定性の解析的評価では、坑道の周辺岩盤挙動や支保工発生応力を算定し、安定性の指標に基づく評価を行う。岩盤については局所安全率（Mohr-Coulomb の破壊規準に対する応力円接近度）や限界せん断ひずみなどを用いた評価基準の考え方を適用し、支保工については設計基準強度を与えた際の応力度により、吹付けコンクリートや鋼製支保工などの部材ごとに安定性を評価する。すなわち、坑道の安定性に関する解析的評価は、坑道掘削直後を初期状態とし時間依存性を考慮した影響程度を定量的に把握し、岩盤や支保工などの部材ごとに、一般的に用いられている安定性の評価指標に対する判定により行うものとする。

・影響低減技術の検討

坑道安定性の解析的評価により、岩盤や支保工などの力学的機能が安定性の評価指標を下回ったときには、対策として影響低減技術が必要となる。前述のとおり、安定性評価指標に対する判定は岩盤や部材ごとに時間依存性を考慮して行うことから、評価結果に基づき回収可能性の維持による影響を低減する技術を検討する。3.1.1(1)の基本方針 2 で述べたように、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低減技術は、H27 年度の原環センターの検討において、閉鎖後の長期安全性および閉鎖前の作業環境の安全性ともに初期品質向上技術と維持管理・修繕技術に大別されており、この観点からの検討を行う。初期品質向上技術とは、例えば高耐久性材料・設備による更新頻度低減技術などであり、維持管理・修繕技術とは、岩盤や支保工の劣化に対して補強や修復、あるいは更新を行う技術である。また、影響低減技術の検討では、これらの初期品質向上技術と維持管理・修繕技術に加えて、回収可能性維持状態（埋

め戻し状態)も影響低減に係わる条件として考慮する。これにより、原環センター策定の5ヶ年計画の概要(図1.2.2-1)に示されている次年度以降実施予定の「期間を設定するための具体的な方策の検討」に資する成果が得られると考える。

- ・ 定量的評価を行うことによる課題の抽出

回収可能性の維持期間を検討する上で定量的評価を行うことによる課題を抽出する。解析手法や安定性の評価方法に関する課題、設定している物性値およびその時間依存性に関する課題などが想定される。また、回収可能性の維持による影響を低減する技術に対する技術的課題も想定される。

最後に、3.1.1(1)で述べたように、坑道安定性に関する解析的評価に引き続き次年度以降に実施予定の地下水流動解析による水理学的影響に対する評価への展開も行う。力学解析により得られた応力場の時間変化などの力学特性の時間変化を、透水特性などの水理学的特性の時間変化として表現し、地下水流動解析に受け渡す情報の整理を行う。

3.2 影響低減技術の定量的評価に係わる手法の検討

3.2.1 4ヶ年の解析的検討のための具体的な手法、手順の提示

本年度から、4ヶ年をかけて回収可能性の維持による影響について、効率的に定量的な評価を行うための方針および計画について以下に示す。

(1) 方針

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低減技術を定量的に評価するために、THMCそれぞれの変化を考慮するために、複数の解析手法を用いた検討が必要だと考えられる。本検討では、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と考える。また、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、THMC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、複数の解析を段階的に実施する評価手法を用いて、各影響の度合いを明らかにし、影響低減技術の評価を行うことが効率的・効果的であると考え。したがって、THMCそれぞれの変化を考慮する方法として、連成解析手法が想定されるが、本検討では連成解析を行わず、各影響を把握するための個々の解析を実施するとともに、影響毎に物性の変化などを引き渡す評価方法を用いるものとする。

図3.2.1-1に示すように、本年度から4ヶ年をかけて効率的に定量的な評価をするために、まず坑道安定性に係わる評価として力学解析による力学的影響の定量的な評価に着手するとともに、次年度以降に水理学的影響の評価および化学的・熱的影響の定量的な評価方法を検討する。

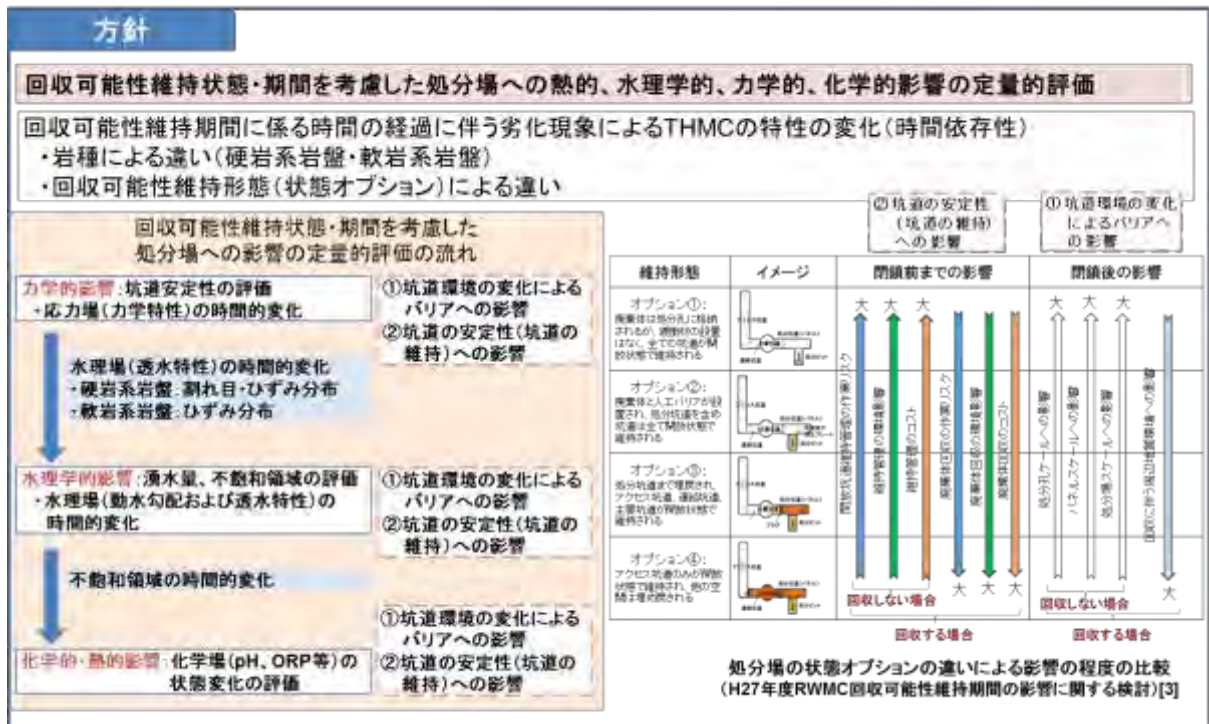


図 3.2.1-1 回収維持期間を考慮した定量的評価検討の流れ

1) 力学的影響の評価方法の検討

本年度着手する坑道安定性に係る評価とは、坑道の力学的影響に対する安定性を評価することであるため、最初のステップとして力学的影響評価の定量的な評価手法、手順を提示する。全体計画で述べたように、本業務では時間依存性を考慮した影響程度の評価を実施する必要があると考えるため、評価方法は化学的・熱的影響による劣化現象などの変化を考慮した力学解析を行うこととする。

力学的影響の評価は、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」に与える影響を力学解析により定量化し、坑道安定性の評価指標に対する判定により行うものとする。坑道安定性の解析的評価により、坑道安定性の評価指標を下回ったときには、対策として影響低減技術を検討する。

具体的な検討内容について、3.2.2に示すとともに、本年度実施する内容については、(2)1)に詳細を示す。

2) 水理学的影響の評価方法の検討

水理学的影響評価にあたっては、地下水流動解析手法を用いて、回収可能性維持期間中の坑道周辺の不飽和領域の発生状況、湧水量の時間的変化を把握することが有効と考えられる。

回収可能性の維持による「閉鎖前の作業環境の安全性」に対する水理学的影響としては、過度な湧水量の低減技術(グラウト)や、湧水による処分施設の水没リスク低減のための対策技術などが影響低減技術として考えられ、これらの影響低減技術に対する定量的な評価の手法、手順を

提示する。

回収可能性の維持による「閉鎖後の長期安全性」に対する水理学的影響としては、坑道周辺の環境変化による人工バリア、天然バリアへの影響や、再冠水に要する時間の観点から、閉鎖後 1,000 年の時点での水理環境条件への影響などが想定され、これらの影響を低減するための技術の提示ならびに定量的な評価の手法、手順を提示する。

具体的な検討内容について、3.2.3 に示す。

3) 化学的・熱的影響の評価方法の検討

化学的・熱的影響の評価にあたっては、現状で定量的な評価が実施可能な手法について調査を行うとともに、本業務において評価を実施するための具体的な手法、手順を提示する。なお、調査にあたっては、微生物影響の評価手法についても対象とする。

回収可能性の維持による「閉鎖前の作業環境の安全性」に対する化学的・熱的影響としては、力学的坑道安定性に影響を及ぼす支保や岩盤の劣化が想定され、これらの影響低減技術に対する評価手法、手順を提示する。化学的・熱的影響の評価の結果から、力学的評価に用いた物性値の経時変化（劣化影響）の妥当性について考察することができる。

回収可能性の維持による「閉鎖後の長期安全性」に対する化学的・熱的影響としては、水理学的影響と同様に、坑道周辺の環境変化による人工バリア、天然バリアへの影響や、再冠水に要する時間の観点から、閉鎖後 1,000 年の時点での化学環境条件への影響が想定され、これらの影響を低減するための技術の提示および定量的な評価手法、手順を提示する。

具体的な検討内容について、3.2.4 に示す。

4) 課題の整理

本年度の検討を通じて、今後 4 ヶ年で解析的検討を行うための、具体的な手法、手順等を提示するとともに、現状の課題について整理する。

現状想定される課題について、3.2.5 に示す。

(2) 4ヶ年計画

今後4ヶ年で解析的検討を行うための、具体的な手法、手順等を提示することを目的とした検討計画について図3.2.1-2に示す。

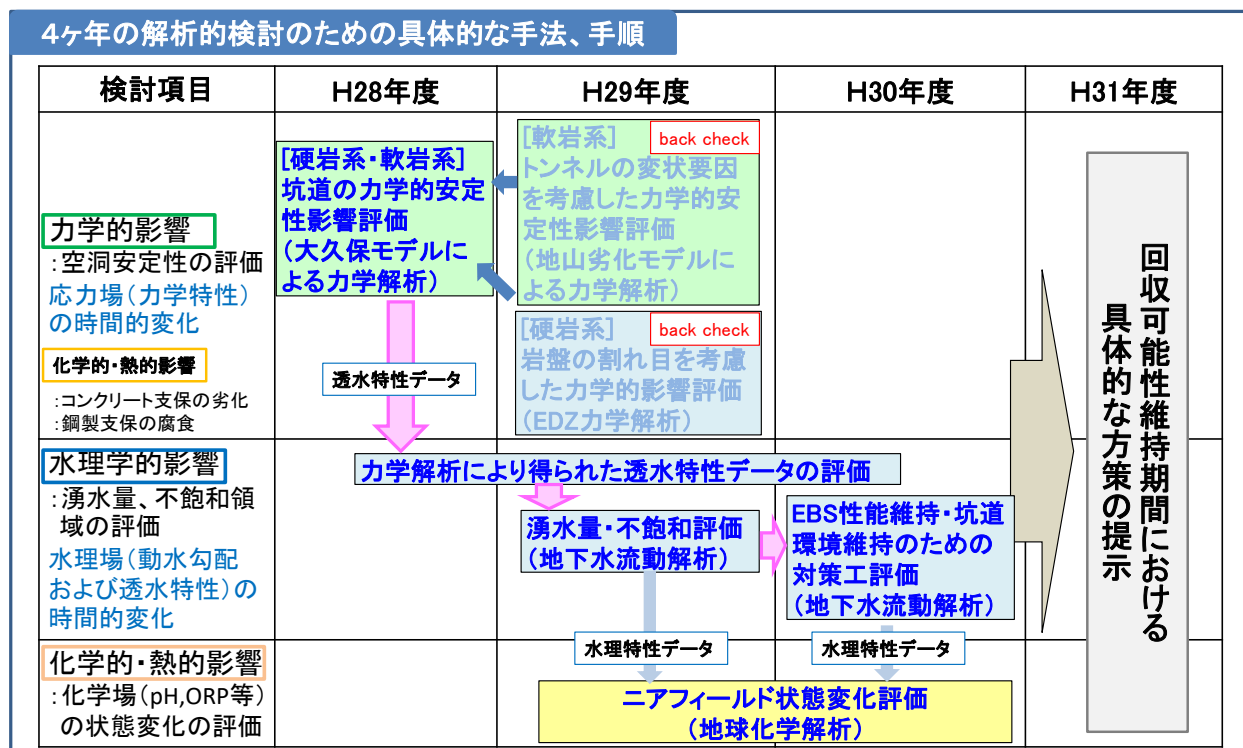


図 3.2.1-2 4カ年計画の工程表

方針に示した「力学的影響」、「水理学的影響」、「化学的・熱的影響」の各評価方法の検討に関する今後4ヶ年の解析的検討について、具体的な手法、手順等を提示するための検討計画および工程を示す。

1) 本年度の実施項目

- ・力学的影響の評価方法の検討として、坑道安定性に係わる評価に着手する。力学解析で得られた坑道周辺の水理特性への影響（透水特性データ）を評価し、次年度以降に実施する水理学的影響の評価のための条件として引き渡す。（詳細については、3.3に示す。）
- ・次年度以降に必要な定量的な評価方法として、水理学的影響および化学的・熱的影響の評価手法および手順について検討する。（具体的な検討内容、結果について、3.2.2、3.2.3、3.2.4に示す。）
- ・本年度の検討から得られる種々の課題について整理し、次年度以降の検討にフィードバックする。具体的な検討内容、結果について、3.2.5に示す。

2) 次年度以降の実施項目

- ・力学的影響については、軟岩系の岩盤条件に対して、トンネルの変状要因を考慮した力学的

安定性影響評価（地山劣化モデルによる力学解析）をバックチェックとして実施し、本年度の検討結果との比較から、坑道安定性に対する影響を考察する。

- ・ 力学的影響については、硬岩系の岩盤条件に対して、岩盤の割れ目を考慮した力学的安定性影響評価（クラックテンソルモデルによる応力・変形解析）をバックチェックとして実施し、割れ目系岩盤に対する坑道安定性への影響を考察する。
- ・ 水理学的影響については、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、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とともに、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。
- ・ 化学的・熱的影響については、水理学的影響評価から得られた坑道周辺の不飽和領域（酸化領域）や、再冠水に要する時間とその間の化学的・熱的環境の変化に着目した評価を実施するとともに、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。
- ・ 最終年度には、回収可能性の維持期間におけ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の影響低減のための具体的な方策を提示する。

3.2.2 力学的影響の評価方法の検討

力学的影響評価に対する定量的な評価手法、手順のフロー図を図 3.2.2-1 に示す。

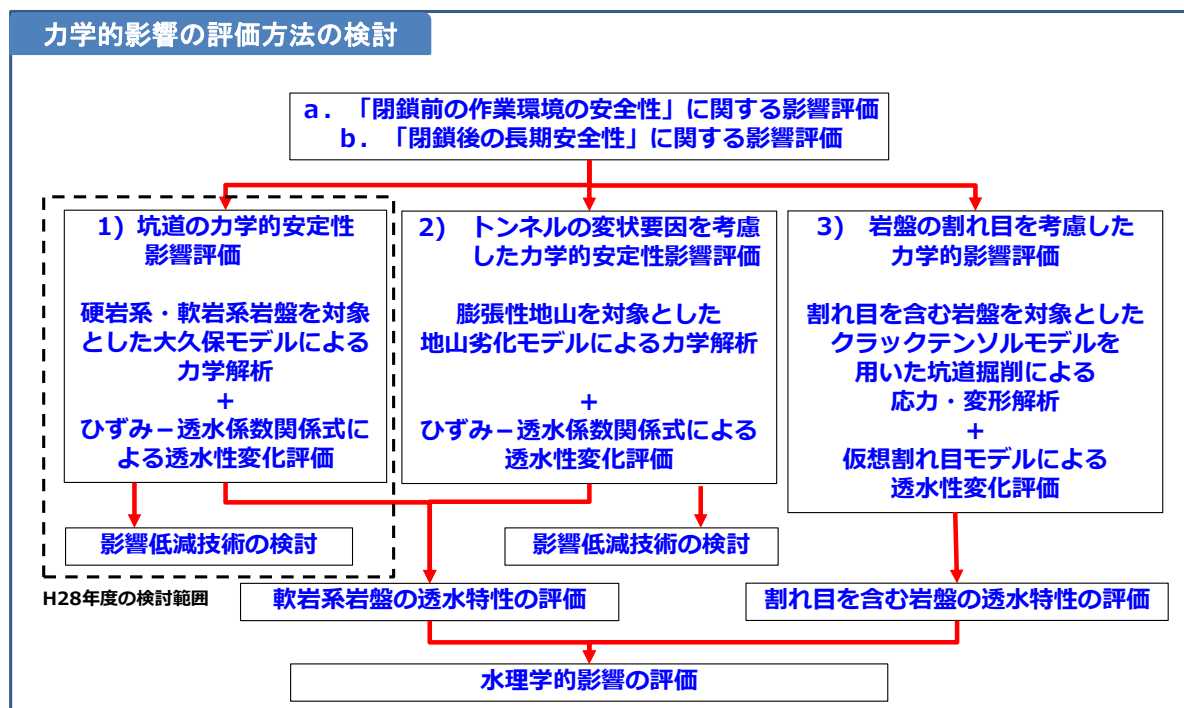


図 3.2.2-1 力学的影響の評価方法の検討フロー図

力学的影響の評価方法の検討にあたっては、力学解析を用いて回収可能性維持期間中および閉

鎖後の坑道安定性を評価する必要がある。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としては、以下の3項目の検討が重要になると考えられる。

(1) 坑道の力学的安定性影響評価

坑道の力学的安定性影響評価（H28年度実施項目）では、回収可能性の維持の観点からの力学的影響の定量的な評価手法、手順について検討する。

本検討では、回収可能性維持期間中の力学的坑道安定性を評価するため、クリープ挙動に代表される時間依存性挙動を評価する手法として、大久保モデルを用いることとする。回収可能性維持期間中の物性値（弾性係数）の時間変化を考慮することにより、坑道安定性の時間変化を予測することができるとともに、坑道安定期間（坑道が力学的に安定している期間）の評価から、坑道安定性に対する影響低減技術について検討を行うことができる。

一方、力学解析結果から得られる周辺岩盤のひずみと、室内試験等で計測された岩盤のひずみ-透水係数の関係式から、岩盤の透水性の変化について推定し、水理学的影響評価へデータを引き継ぐ。

(2) トンネルの変状要因を考慮した力学的安定性影響評価

トンネルの変状要因を考慮した力学的安定性影響評価（次年度以降の実施項目）では、現在供用されているトンネルの中には、大きな変状が認められる場合もあるため、本提案では、大久保モデルによる検討に対するバックチェックとして、膨張性地山で認められるトンネルの変状要因を考慮した力学的安定性影響評価を実施する。

軟岩（堆積岩）を対象とする検討においても物性値の設定により、膨張性を有する場合が想定される。このような地山の膨張性を考慮した地山劣化モデルによる力学解析を実施するとともに、ひずみ-透水係数関係式による透水性変化評価を実施し、大久保モデルによる評価結果との比較から、回収可能性維持期間における影響の違いや、影響低減技術の検討を実施する。

上記の検討を踏まえ、大きな変状が想定される膨張性地山を対象とした場合の力学的影響の定量的な評価手法、手順について整理する。

(3) 岩盤の割れ目を考慮した力学的影響評価

岩盤の割れ目を考慮した力学的影響評価（次年度以降の実施項目）では、割れ目を考慮した力学的影響評価を実施する。

硬岩（結晶質岩）に代表される岩盤は、亀裂性であり力学的、水理学的、化学的・熱的にも亀裂の分布、連続性等の影響評価が重要となる。力学的な坑道安定性の観点では、掘削に伴う割れ目の力学的な挙動を予測する必要がある。

そこで、大久保モデルによる検討が割れ目の影響を直接考慮した検討ではないことからそれを補う検討として、割れ目を考慮した力学的影響評価を実施する。

割れ目を含む岩盤を対象としたクラックテンソルモデルを用いた坑道掘削による応力・変形解析を実施するとともに、仮想割れ目モデルによる透水性変化解析を行い、水理学的影響評価に用

いる岩盤の透水係数の変化の評価を実施し、回収可能性維持期間における影響の違いや、影響低減技術の検討を実施する。

上記の検討を踏まえ、割れ目を含む岩盤を対象とした場合の力学的影響の定量的な評価手法、手順について整理する。

なお、坑道の力学的安定性影響の評価手法の検討に関する詳細については、3.3に記載する。

3.2.3 水理学的影響の評価方法の検討

水理学的影響評価に対する定量的な評価手法、手順のフロー図を図 3.2.3-1 に、検討対象とする回収可能性維持状態のオプションを図 3.2.3-2 に示す。

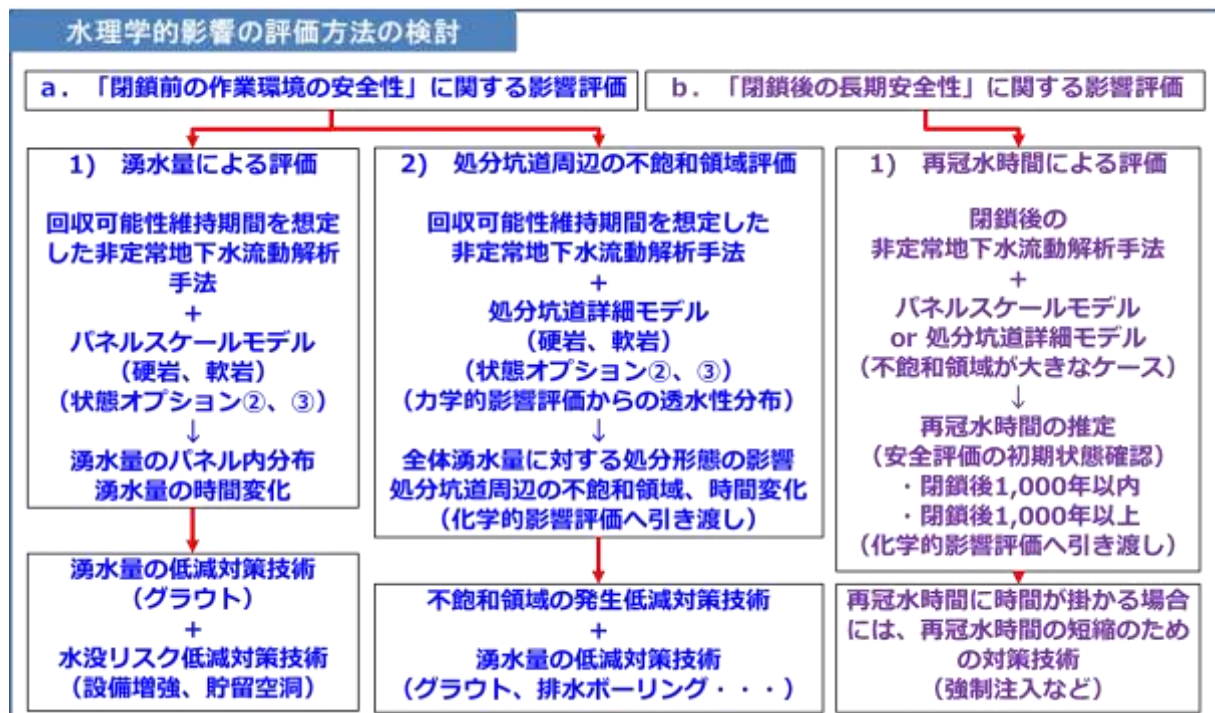


図 3.2.3-1 水理学的影響の評価方法の検討フロー図

回収可能性維持状態	オプション① オーバーバック定置	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 3.2.3-2 回収可能性維持状態のオプション (H27 年度 RWMC 回収可能性維持に関する検討)

水理学的影響の評価方法の検討にあたっては、地下水流動解析手法を用いて、回収可能性維持期間中の坑道周辺の不飽和領域の発生状況、湧水量の時間的変化を把握することが有効と考えられる。

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としては、以下が重要になると考えられる。

(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。

1) 湧水量による評価

湧水量による評価（次年度以降の実施項目）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」と組み合わせて、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、手順を検討する。

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。

2) 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（次年度以降の実施項目）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・熱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。

(2) 「閉鎖後の長期安全性」に関する影響評価

ここでは「再冠水時間による評価」を行う。

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。

再冠水の解析に関しては、一般的な飽和・不飽和解析手法では評価が適切でない可能性が想定されるため、二相流解析手法による評価についても比較検討を行い、具体的な定量化手法、手順について検討する。

また、地下水の再冠水時間については、「再冠水に要する時間とその間の化学的・熱的環境の変化」について化学的・熱的な影響評価のための情報として引き渡す。

再冠水時間の検討の結果、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るものの、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、手順を検討する。

(3) 「閉鎖前の作業環境の安全性」に関する影響評価

1) 湧水量による評価

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、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、また、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 3.2.3-3 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。

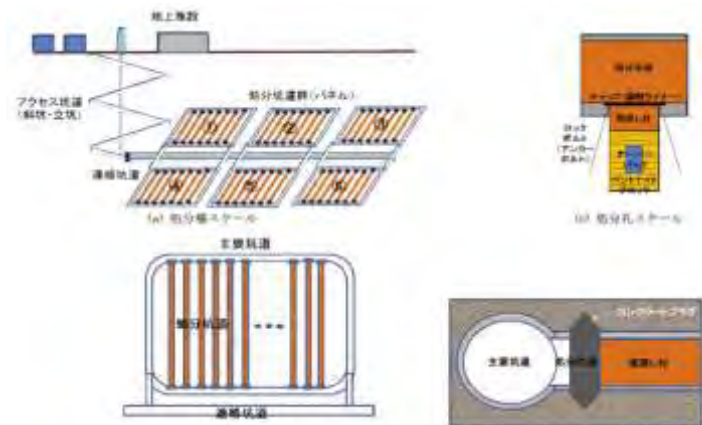
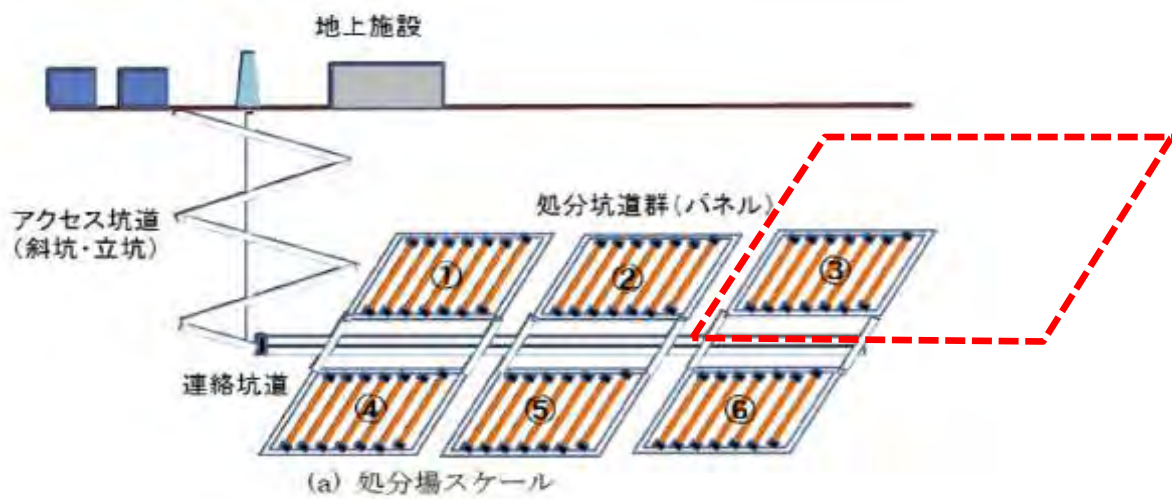
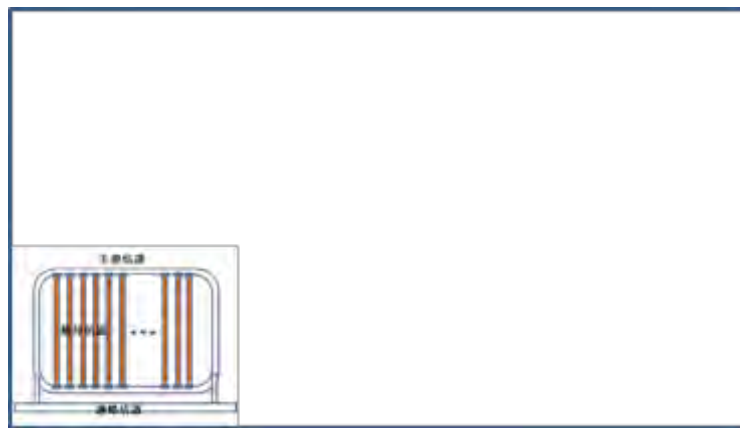


図 3.2.3-3 HLW 処分施設の概念図

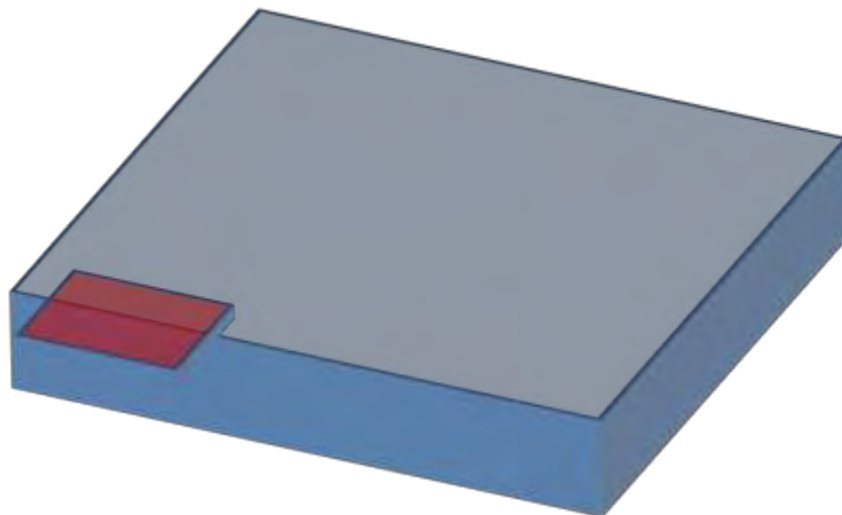
そこで、本検討では図 3.2.3-4 に示すような 1 ヶ所の処分パネルを対象とした 3 次元解析モデル（以降、「パネルスケールモデル」とする）を用いることとする。



(a) 平面的な解析領域



(b) 解析領域の平面図



(c) 3次元解析モデルの鳥瞰図

図 3.2.3-4 パネルスケールモデル

「パネルスケールモデル」においても、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と考えられ、図 3.2.3-5 に示すように各地下坑道はそれぞれ矩形形状のモデル化とならざるを得ないことが予想される。

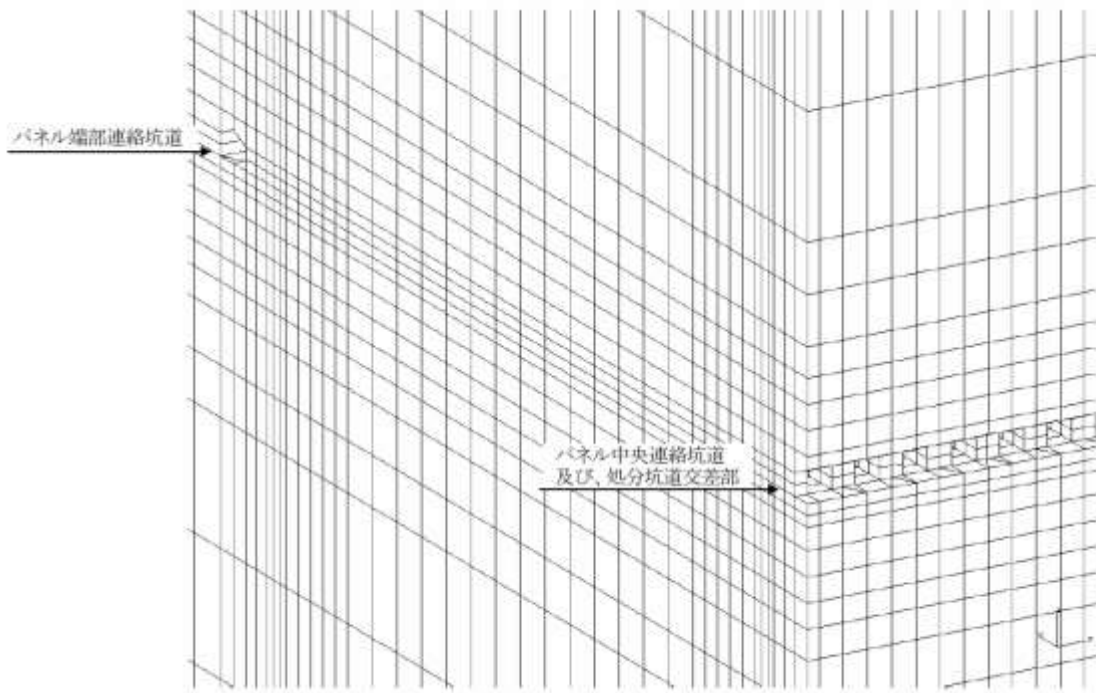


図 3.2.3-5 パネルスケールモデルのメッシュ分割のイメージ

解析モデルの作成にあたっては、非定常解析手法を用いた定量的な解析に耐えることができる解析規模のモデル化となるようメッシュ分割の工夫を行う。地下坑道の形状、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。

「パネルスケールモデル」を用いた非定常地下水流動解析により、湧水量のパネル内の分布、時間変化等について定量化を行うことができる。

また、本検討では岩盤を多孔質媒体とした地下水流動解析手法を適用することとする。現時点ではサイトが決定していないため、岩盤条件については一般的な条件設定とならざるを得ない。特に水理地質構造（透水性の異なる地層の分布や亀裂分布）は湧水量や不飽和領域の発生に対する影響が大きいと推測されるものの、本検討では水理地質構造の不確実性は検討対象と考えず、均質な多孔質媒体としてモデル化することとする。回収可能性維持期間の違いに対する水理学的な影響を評価することを目的とし、均質な水理条件での影響を把握することにより、基本的な水理学的影響およびその影響低減対策について検討を行う。水理地質構造の不均質性については、今後の課題と考える。

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。

検討対象の岩種は、硬岩と軟岩の 2 ケースを対象とし、等価均質媒体としての物性値を与えるものとする。

回収可能性維持期間の状態オプションとしては、図 3.2.3-2 に示すオプション②および③を対象とする。なお、解析モデル規模の観点から、坑道周辺の詳細なメッシュ分割が困難であることにより、支保工のモデル化は行わない。また、堅置き処分形態の場合については、処分孔、緩衝材（ベントナイト混合土）、廃棄体（ガラス固化体、オーバーパック）についてのモデル化は行わないこととする。「パネルスケールモデル」では地下坑道の掘削状態あるいは埋戻材による埋戻し状態のみをモデル化することとする。

前述のように、湧水量の算出精度に及ぼす処分坑道のモデル化の影響については、後述する「坑道周辺詳細モデル」での検討で実施するものとする。

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。

① 岩盤等の初期物性条件

国内の標準的な岩種として硬岩、軟岩の 2 種類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[4]（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 3.2.3-6 に示す硬岩（深成岩類、処分深度：1,000m）と軟岩（新第三紀堆積岩類、処分深度：500m）を検討対象とする。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が、本検討ではそれぞれ等価連続体（均質な多孔質媒体）としてモデル化するものとし、各水理物性値については NUMO 配布資料を踏まえて、表 3.2.3-1 に示す値を設定する。現状でデータのない項目については、文献調査等を行うこととする。

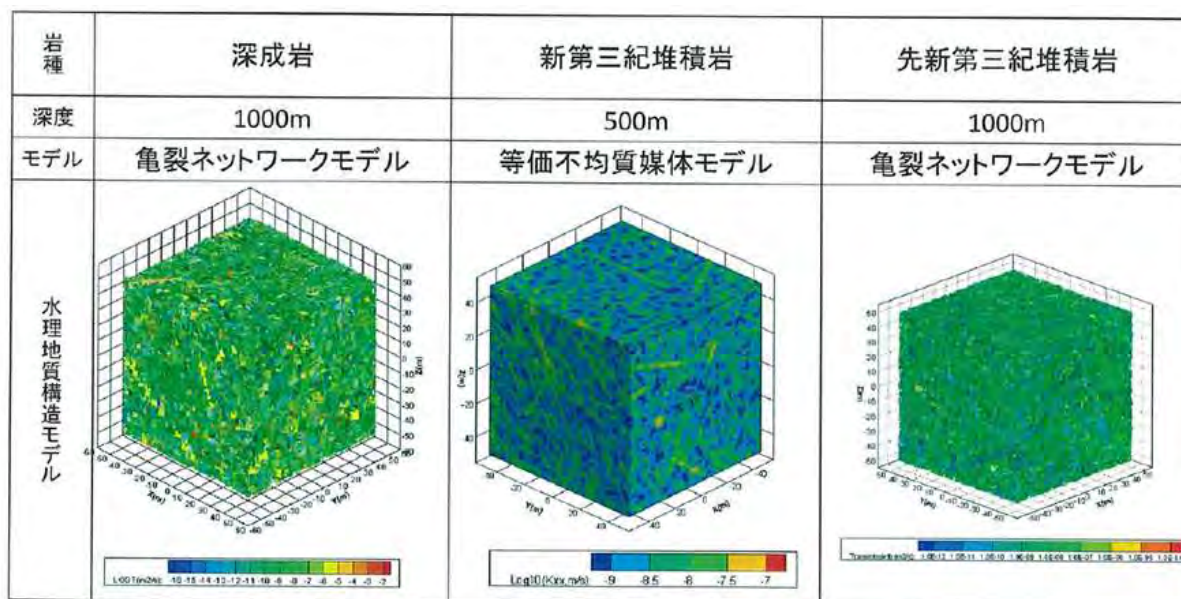


図 3.2.3-6 候補母岩（NUMO 配布資料[4]）と検討対象母岩

表 3.2.3-1 対象とする岩種と水理物性値

項目	深成岩類	新第三紀堆積岩類	備考
透水係数(m/s)	5E-8	3E-7	NUMO 配布資料[4]より
有効間隙率(%)	1(0.8~2)	25(25~26)	()内 NUMO 配布資料[4]より
不飽和特性曲線	—	—	現状では未定
比貯留係数(1/m)	—	—	現状では未定

なお、岩盤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予測されるものの、「パネルスケールモデル」の検討においては、岩盤の透水係数の経時変化は考慮しないものとする。

図 3.2.3-2 に示した回収可能性維持状態のオプション③に対しては、埋戻材やプラグによる処分坑道の閉塞についてモデル化を行う。埋戻材等の物性条件を表 3.2.3-2 に示す。現状でデータのない項目については、文献調査等を行うこととする。

表 3.2.3-2 埋戻材、プラグ工の水理物性値

項目	埋戻材	プラグ	備考
透水係数(m/s)	1E-7	1E-7 (1E-10)	NUMO-TR-15-01[5]
有効間隙率(%)	—	—	現状では未定
不飽和特性曲線	—	—	現状では未定
比貯留係数(1/m)	—	—	現状では未定

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、後述する境界条件を考慮し、静水圧分布条件を与えるものとする。

② モデル領域および境界条件

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が、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から簡略化された境界条件として解析モデル領域の側面は、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と底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。境界条件設定を踏まえ、解析モデル領域としては NUMO 配布資料における「処分場スケール (5km×5km)」参考に、本検討における「パネルスケールモデル」については、2km×2km×800m (処分深度から上下 400m のモデル高さ) とする。ただし、処分坑道のモ

デル化にあたって、解析モデル規模が大きくなる場合（数 100 万自由度）については、解析モデル規模の縮小を検討する。

解析モデル領域、処分深度、境界条件について図 3.2.3-7 に示す。前述のように解析領域の側面はパネルの対称性等を考慮した面を不透水境界とするが、その他の側面、上面および底面については、地表面での圧力水頭 0 を想定した静水圧分布での水頭固定境界とする。

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、境界条件の非線形問題として取り扱う。

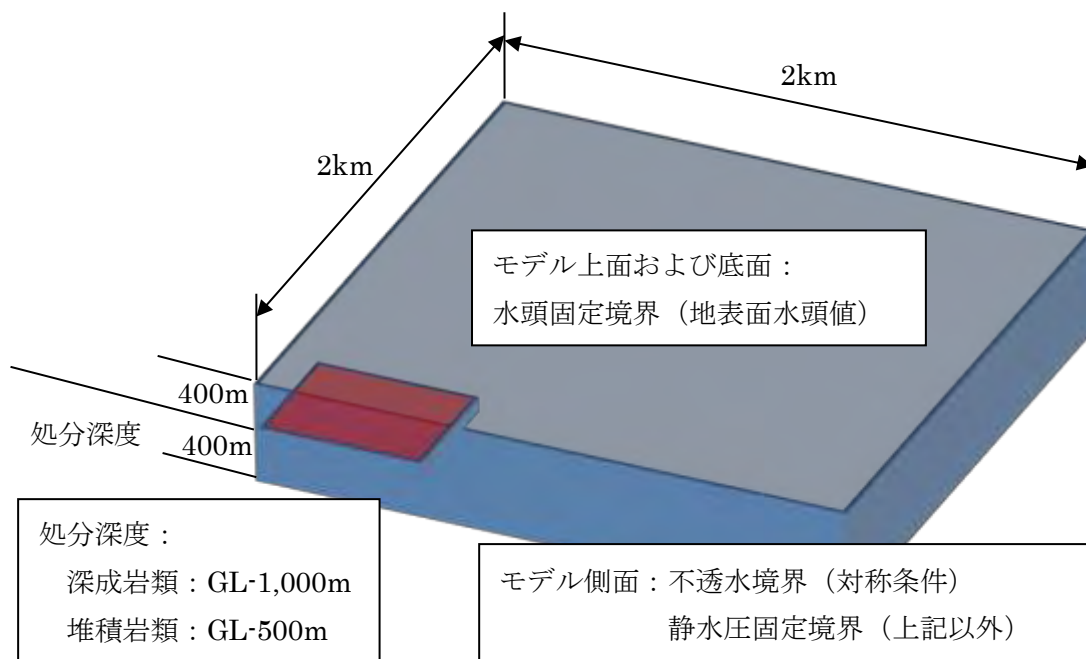


図 3.2.3-7 解析モデル領域と境界条件

④ 非定常解析条件

地下坑道掘削に対する非定常の地下水流動解析を行う場合、坑道の掘削工程を反映した検討を実施することが望ましい。本検討においても掘削工程（NUMO 配布資料）を参照し、坑道の掘削の時間変化を考慮した条件を設定するものとする。

また、回収可能性維持期間の状態オプションを考慮し、状態オプション③の場合は処分坑道の埋戻状態をモデル化し、湧水量の変化を考慮した解析を実施する。

d 解析結果

解析結果として以下を提示する。

① 処分場における全体湧水量の経時変化

非定常解析結果から得られた 1 パネル分の湧水量の時間変化に基づき、処分場全体（パネル数倍する）の湧水量の経時変化曲線を作成する。

図 3.2.3-8 に湧水量の経時変化曲線のイメージ図を示す。図に示すように、岩種、状態オ

プッシュ、湧水低減対策の有無などの影響により異なる湧水量の経時変化曲線を作成し、条件の違いによる湧水量への影響を把握する。

② 処分場 1 パネル内における湧水量の平面分布

湧水量の算出結果に基づき、処分坑道パネル内の湧水量の平面的な分布を把握し、湧水量の低減対策の効果的な設計に反映する。一般的に定常的な湧水量は、パネル内の中心部が少なく、パネル端部や主要坑道では多くなることが予測される。主要坑道部については、グラウトによる湧水低減対策を行った方が、長期的な湧水量の低減に寄与できる可能性がある。

③ 処分坑道周辺の不飽和領域の把握

「パネルスケールモデル」では、解析モデル規模の観点から処分坑道を詳細にモデル化することは困難であるが、接続する処分坑道では坑道と坑道の間部分に不飽和領域が発生する可能性もあるため、不飽和領域の発生の有無についても、解析結果から考察する。

④ 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ことができる。しかしながら、本検討では「パネルスケールモデル」解析結果から、「処分坑道詳細モデル」の境界条件として基本的に水理学的に対称条件と想定される条件（水頭固定条件ではなく不透水境界条件）として設定することができるパネル内の範囲を把握し、「処分坑道詳細モデル」での解析条件の妥当性、適用範囲等について確認する。

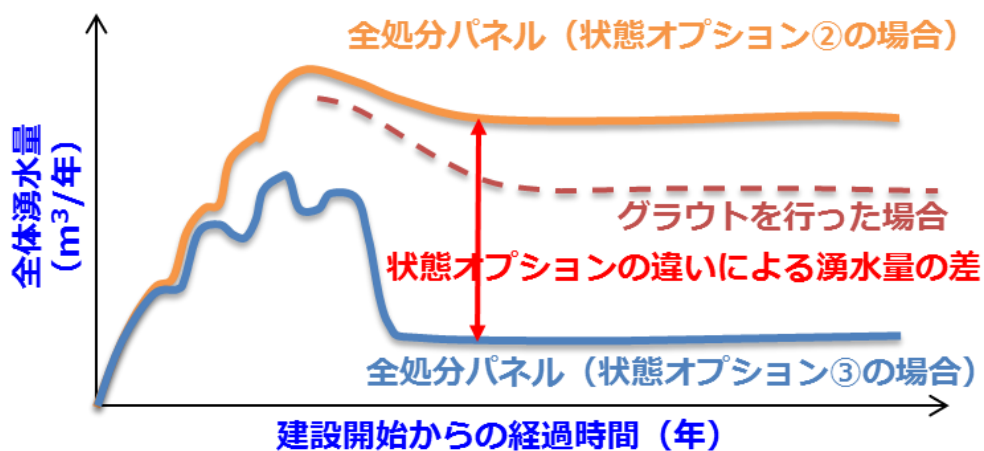


図 3.2.3-8 「パネルスケールモデル」から得られる湧水量の経時変化のイメージ

e 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。

➤ 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)
- ③ その他

- ▶ 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
 - ③ その他

なお、解析業務の遂行にあたっては、種々のガイドラインを考慮して品質の確保を図る。

2) 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

①湧水量に影響する要因の把握

1)の「パネルスケールモデル」による湧水量評価では、解析モデル規模の観点から処分坑道を詳細にモデル化することが難しい。そこで、詳細解析モデル(以下、「処分坑道詳細モデル」と称す)による湧水量の算出結果から、処分坑道の大きさ、形状の違い等による影響を把握し、全体湧水量の評価に及ぼすモデル化の影響を把握するための手法、手順について検討する。

②不飽和領域評価、時間変化

回収可能性維持期間を想定した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手法、手順を検討する。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。

「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、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、また、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、図 3.2.3-9 に示すような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、処分坑道単位長さあたりの湧水量の経時変化や、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（例えば TOUGH2 など）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。

検討対象の岩種は、硬岩と軟岩の 2 ケースを対象とし、等価均質媒体としての物性値を与えるものとする。

処分形式については、堅置き、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状態オプション②を対象とする。

また、処分坑道周辺の支保工、EDZ 等を考慮できるものとし、力学的検討結果から得られた透水係数の時間変化を引き継いだ検討を実施する。

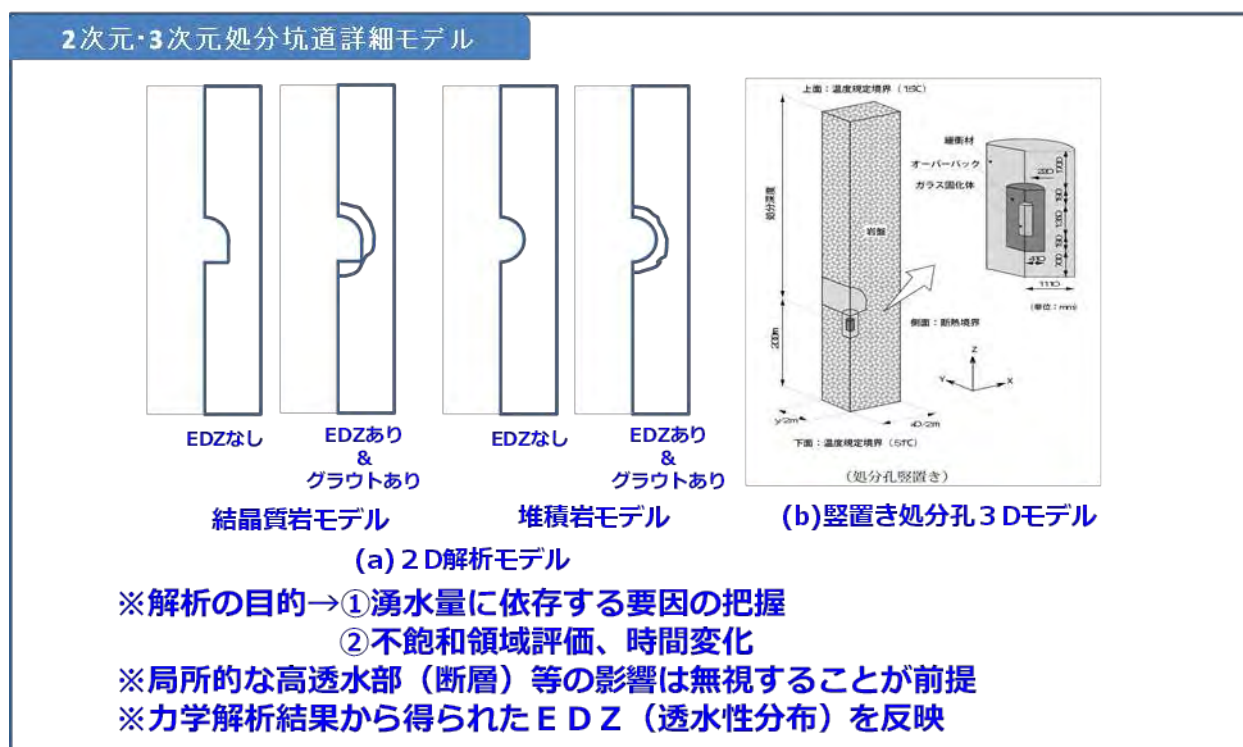


図 3.2.3-9 「処分坑道詳細モデル」による検討内容

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。

➤ 岩盤等の初期物性条件

国内の標準的な岩種として硬岩、軟岩の 2 種類を検討対象とするが、物性等の設定にあたっては、NUMO 配布資料において候補母岩となっている 3 岩種のうち、図 3.2.3-6 に示した硬岩（深成岩類、処分深度：1,000m）と軟岩（新第三紀堆積岩類、処分深度：500m）を検討対象と

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が、本検討ではそれぞれ等価連続体（不均質あるいは均質な多孔質媒体）としてモデル化するものとし、各水理物性値については NUMO 配布資料を踏まえて、表 3.2.3-3 に示す値を設定する。現状でデータの無い項目については、文献調査等を行う。

なお、力学的影響検討に合わせて、硬岩については亀裂を考慮した場合の検討結果（クラック・テンソルモデル）に対しては、亀裂分布による透水性への影響を考慮した等価連続体（均質な多孔質媒体）モデルとして検討を実施する。

表 3.2.3-3 対象とする岩種と水理物性値 (表 3.2.3-1 の再掲)

項目	新第三紀堆積岩類	深成岩類	備考
透水係数(m/s)	3E-7	5E-8	NUMO 配布資料[4]より
有効間隙率(%)	25(25~26)	1(0.8~2)	()内 NUMO 配布資料[4]より
不飽和特性曲線	—	—	現状では未定
比貯留係数(1/m)	—	—	現状では未定

なお、岩盤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 EDZ 領域における透水係数の経時変化データ考慮する。

支保材料や堅置き形式での緩衝材等についてはモデル化を行う。人工バリア等の物性条件を表 3.2.3-4 に示す。現状でデータのない項目については、文献調査等を行うこととする。

表 3.2.3-4 人工バリア等の水理物性値

項目	支保材料	緩衝材	グラウト領域	備考
透水係数(m/s)	—	—	—	現状では未定
有効間隙率(%)	—	—	—	現状では未定
不飽和特性曲線	—	—	—	現状では未定
比貯留係数(1/m)	—	—	—	現状では未定

① 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、後述する境界条件を考慮し、静水圧分布条件を与えるものとする。

② モデル領域および境界条件

解析領域に関しては図 3.2.3-10 に示すように、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次元あるいは3次元領域を設定する。また、処分深度を考慮し上下それぞれ400mの鉛直方向の解析領域をモデル化する。

③ 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。基本的に状態オプション②のみを対象とした検討を実施する。

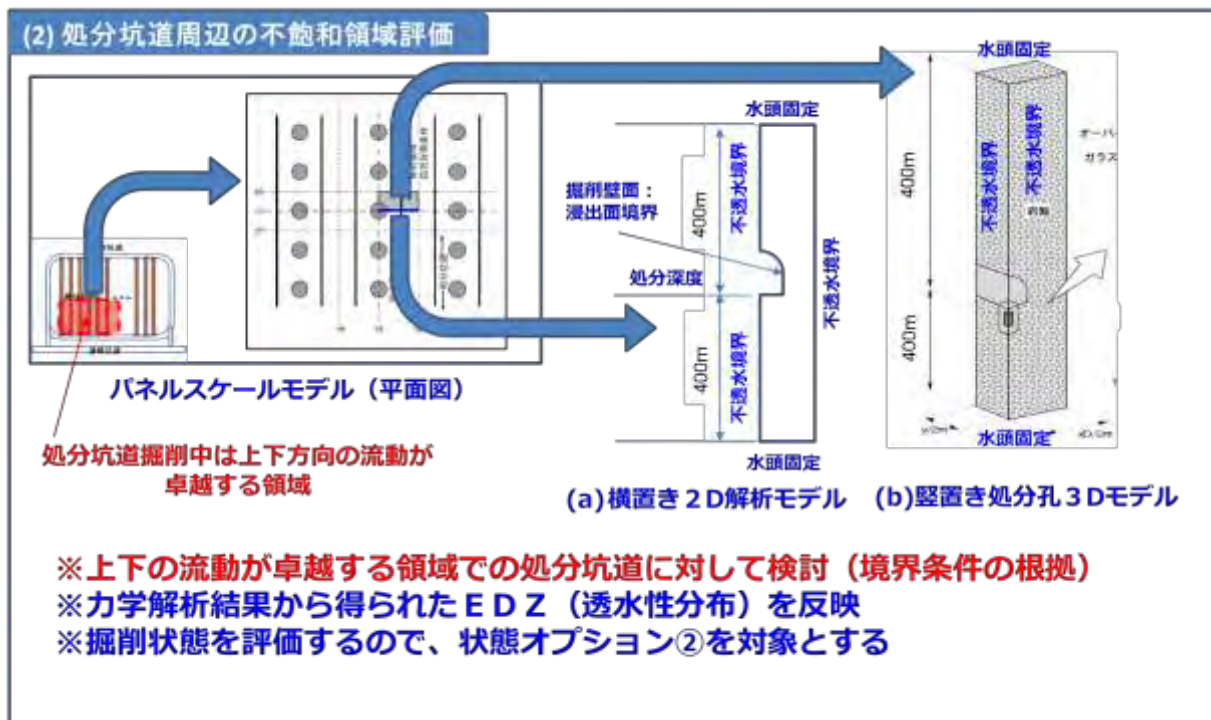


図 3.2.3-10 「処分坑道詳細モデル」における解析モデル領域と境界条件

d 解析結果

解析結果として以下を提示する。

① 処分坑道単位長さあたりの湧水量 (湧水量に影響する要因 (坑道形状、大きさ) の把握)

「パネルスケールモデル」による湧水量と「処分坑道詳細モデル」による湧水量を比較することにより、湧水量に影響する要因とその影響を把握し、必要に応じて湧水量の補正を行い、解析精度の向上を図る。

また、湧水対策としてのグラウトの効果について把握し、全体湧水量に対する影響を定量的に示す。

② 処分坑道周辺の不飽和領域の分布、時間変化 (化学的・熱的影響評価の条件設定)

不飽和領域の分布やその時間変化については、グラウトの有無等による影響を相対的に示すとともに、化学的・熱的影響評価の前提条件として引き渡す。

e 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。

・不飽和領域 (酸化領域) の発生による支保、岩盤への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

なお、解析業務の遂行にあたっては、種々のガイドラインを考慮して品質の確保を図る。

(4) 「閉鎖後の長期安全性」に関する影響評価

1) 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の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 など）

一般的な飽和・不飽和流動解析手法（例えば、公開コードとなっている 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（例えば、米国ローレンスバークレイ国立研究所の IFDM 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（図 3.2.3-11）。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。

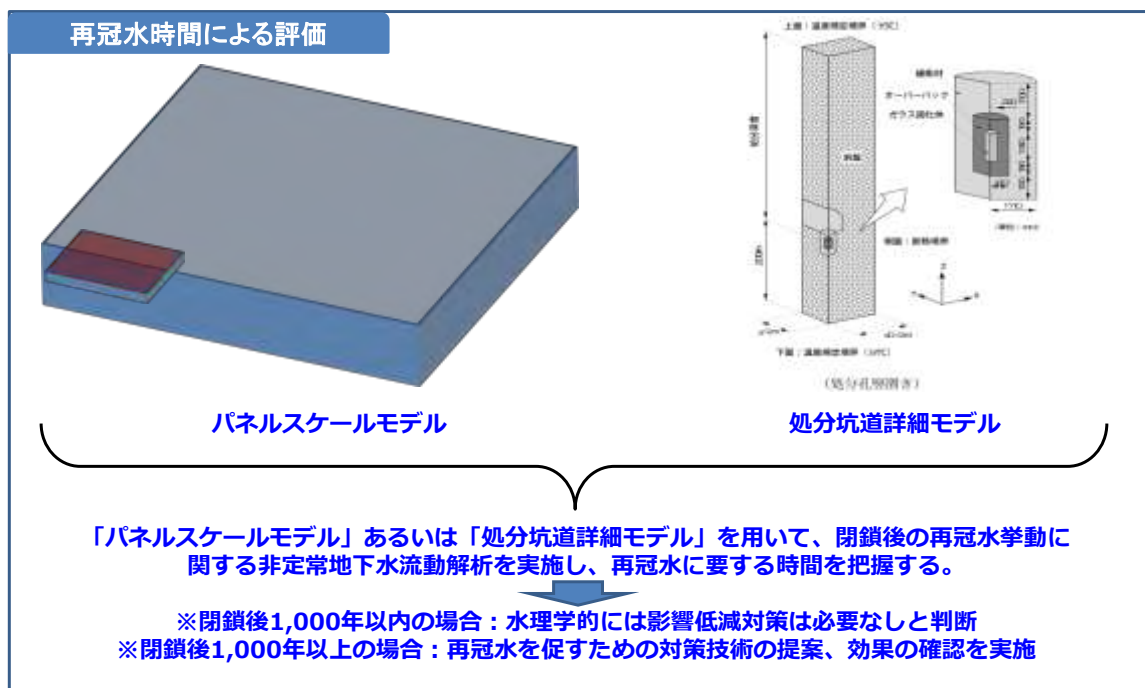


図 3.2.3-11 再冠水時間による評価のための解析モデル

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（飽和度分布の時間変化）

処分坑道周辺の再冠水状況を把握するため、着目点での飽和度の揭示変化等を整理する。

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（飽和度 100%）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、処分坑道周辺の飽和度分布から判断することとする。また、再冠水に関する飽和度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。

e 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。

・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保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保するための流動解析を実施する。

なお、解析業務の遂行にあたっては、種々のガイドラインを考慮して品質の確保を図る。

3.2.4 化学的・熱的影響の評価方法の検討

化学的・熱的影響を評価するための定量的な評価手法、手順のフロー図を図 3.2.4-1 に示す。

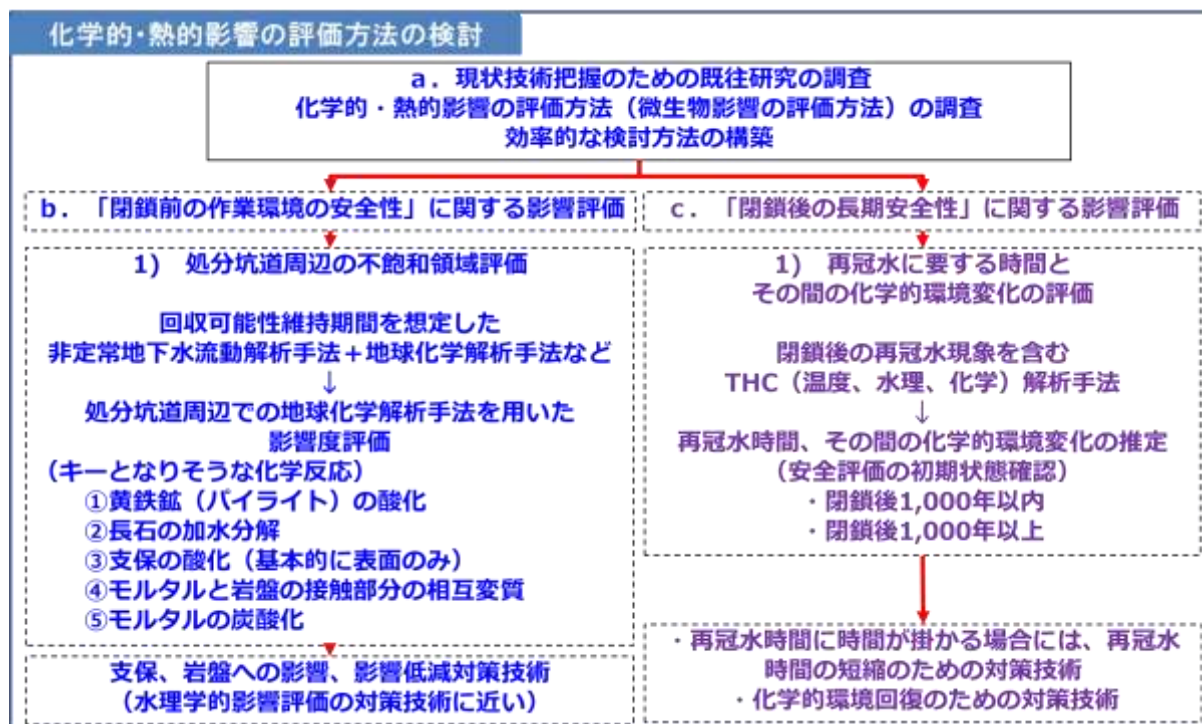


図 3.2.4-1 化学的・熱的影響の評価方法の検討フロー図

回収可能性の維持による化学的・熱的影響については、まず現状技術を把握するための調査が重要であると考えられるが、化学的に着目すべき点は以下の3点と考えられる。

① 不飽和領域（酸化領域）の広がり→「閉鎖前の作業環境の安全性」に影響

不飽和領域の発生による処分坑道周辺の水理場の変化が発生するとともに、不飽和領域では岩盤の気相率が増大し酸化領域となるため、化学的環境は異なる。

② 化学物質の透過性→「閉鎖前の作業環境の安全性」および「閉鎖後の長期安全性」に影響

処分坑道周辺の環境が還元性雰囲気から酸化性雰囲気に変わることにより、岩盤内鉱物の沈殿、溶解現象が発生するため、岩盤の空隙率や気相率、飽和度が変化し、岩盤の透水性とともに化学物質の透過性が変化する。

③ 核種の吸着性→「閉鎖後の長期安全性」に影響

処分坑道周辺の環境が還元性雰囲気から酸化性雰囲気に変わることにより、岩盤内における地下水の化学的特性（pH、ORP など）が変化すると、岩盤の核種の吸着性が変化する。

これらの化学的・熱的影響評価のための定量的な評価手法、手順を提示する。

a. 現状技術把握のための既往研究の調査

ここでは、化学的・熱的影響評価のための現状技術について把握するため、既往の研究につい

て調査し、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を行う。

また、合わせて微生物影響評価技術についても調査を行い、本検討での取り扱いを設定する。

b. 「閉鎖前の作業環境の安全性」に関する影響評価

ここでは「処分坑道周辺の不飽和領域評価」について検討を行う。

回収可能性維持期間中の不飽和領域の予測解析（水理学的影響の評価結果）に基づき、力学的安定性に影響を及ぼすと考えられる支保や岩盤の化学的・熱的劣化に相当する影響について、地球化学解析手法を用いた影響の定量的な評価手法、手順について提示する。

化学的・熱的影響評価においてキーとなりそうな化学反応は、以下が想定される。

- ① 黄鉄鉱（パイライト）の酸化
- ② 長石の加水分解
- ③ 支保の酸化（基本的に表面のみと考えられる）
- ④ モルタル（支保、吹付コンクリート）と岩盤との接触部分の相互変質
- ⑤ モルタル（支保、吹付コンクリート）の炭酸化

これらの化学反応を踏まえて、処分坑道周辺の不飽和領域（水理学的影響の評価結果より）、岩盤、支保、緩衝材などの化学反応に対する解析的な検討により、それぞれの化学的・熱的な劣化、化学的・熱的な環境変化について評価を行う。

化学的・熱的な劣化については、力学的影響の評価で想定した物性値（弾性係数）の経時変化の妥当性について評価することにより、力学的評価へフィードバックすることができる。

化学的・熱的な環境変化影響の低減技術（不飽和領域の低減のためのグラウト注入など）についても検討を行い、これらの効果を定量的に評価する手法、手順について提示する。

なお、化学的・熱的影響評価の解析手法については、現状での技術の調査結果に基づき、適切な手法を選定する。

c. 「閉鎖後の長期安全性」に関する影響評価

ここでは「再冠水に要する時間とその間の化学的・熱的環境変化の評価」について検討を行う。

化学的・熱的に「閉鎖後の長期安全性」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（特に岩盤の核種の吸着性）が維持されていない場合であると考えられ、水理的な再冠水に要する時間の評価と同様に、化学的・熱的な環境の変化（酸化領域→還元領域）に要する時間の評価を行うための手法、手順の提示を行う。

化学的・熱的な環境の変化に関しては、核種の吸着性に影響を及ぼす指標として、主に pH、ORP が想定され、これらの時間変化を評価する必要があると考えられる。

化学的・熱的な環境の変化が遅い場合の影響低減技術としては、還元材としてパイライトを埋め戻し材に添加する方法などが考えられ、これらの効果を定量的に評価する手法、手順について提示する。

なお、閉鎖後の化学的・熱的な環境の変化の評価手法については、現状での技術の調査結果に基づき、適切な手法を選定する。

(1) 現状技術把握のための既往研究の調査

1) 化学的・熱的影響評価技術に対する調査

回収維持期間を想定した処分坑道周辺で想定される化学的・熱的影響について定量的な評価を行うにあたり、現状技術を把握するため既往研究の調査を行い、本検討で対象とする評価技術の選定を行う。

調査にあたっては、主に HLW や TRU 処分研究を対象とし、評価技術の現状を把握する。

2) 微生物影響評価技術に対する調査

回収維持期間を想定した処分坑道周辺で想定される微生物影響について定性的あるいは定量的な評価を目標として、現状技術を把握するため既往研究の調査を行い、本検討で対象とする評価技術の選定を行う。

(2) 「閉鎖前の作業環境の安全性」に関する影響評価(現状での一例)

1) 処分坑道周辺の不飽和領域評価

現段階における処分坑道周辺の不飽和領域を評価するための定量的な評価手法、手順のフロー図を図 3.2.4-2 に示す。なお、評価技術の調査結果に基づき、適宜検討方法については見直すものとする。

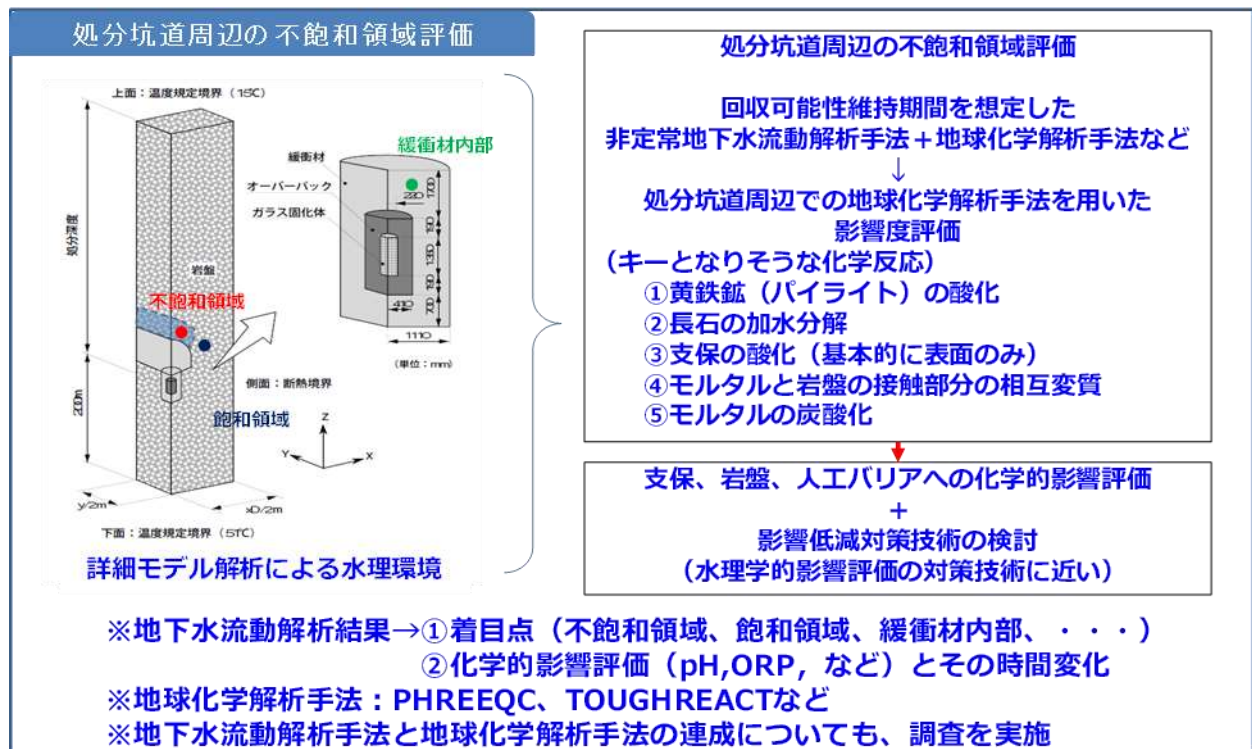


図 3.2.4-2 化学的・熱的影響評価のための処分坑道周辺の不飽和領域評価のフロー図

a 検討目的

回収可能性の維持における「閉鎖前の作業環境の安全性」に対する化学的・熱的影響について

ての定量的に把握することを目的とする。

現状では、不飽和領域と飽和領域における化学的・熱的影響の違いや、緩衝材の内部における化学的・熱的影響について、水理学的影響の評価結果や、地球化学解析手法を用いて、支保や岩盤、人工バリア（緩衝材）に対する化学的・熱的な劣化の影響の有無、定量的な評価方法について検討する方法が考えられる。

化学的・熱的影響の評価においてキーとなりそうな化学反応は、以下が想定される。

- ① 黄鉄鉱（パイライト）の酸化
- ② 長石の加水分解
- ③ 支保の酸化（基本的に表面のみと考えられる）
- ④ モルタル（支保、吹付コンクリート）と岩盤との接触部分の相互変質
- ⑤ モルタル（支保、吹付コンクリート）の炭酸化

b 検討モデル、検討方法

現状では、地球化学解析手法（解析コード：PHREEQC、TOUGHREACT など）を適用することが考えられる。

化学的・熱的な定量評価に対して、現状で実施可能な地球化学解析手法の調査を行い、実施可能な定量化手法、手順について明らかにする。現状では化学平衡計算に用いられるフリーソフトウェアの地球化学解析コード PHREEQC や、前述の TOUGH2（多相流解析コード）に化学反応解析機能（水溶性錯体、酸・塩基反応、酸化還元反応、鉱物の溶解・沈殿反応、ガスの溶解・脱ガス反応、陽イオン交換反応など）が追加された TOUGHREACT などが想定される。

なお、詳細については調査結果に基づき設定する。

c 検討条件の設定

化学的・熱的影響の検討の第 1 ステップとしては、水理学的検討の結果から得られている岩盤中の不飽和領域、飽和領域、緩衝材内部、支保部材内部、支保と岩盤の境界部などを対象として、地下水の流入、流出、空気の流入、流出条件を与えた条件での反応計算が考えられる。検討のイメージを図 3.2.4-3 に示す。

このような反応モデルに対して必要の検討条件としては以下が考えられる。

- ① 鉱物組成 : 岩種や緩衝材、支保等の組成に基づき想定
- ② 地下水の水質組成 : 淡水、塩水等を踏まえ想定
- ③ 温度環境 : 廃棄体の熱影響等を踏まえ想定
- ④ 地下水の流入、流出 : 水理学的影響評価結果より設定
- ⑤ 空気の流入、流出 : 水理学的影響評価結果より設定（あるいは拡散条件）
- ⑥ 主要な化学反応 : 鉱物、地下水の組成から設定

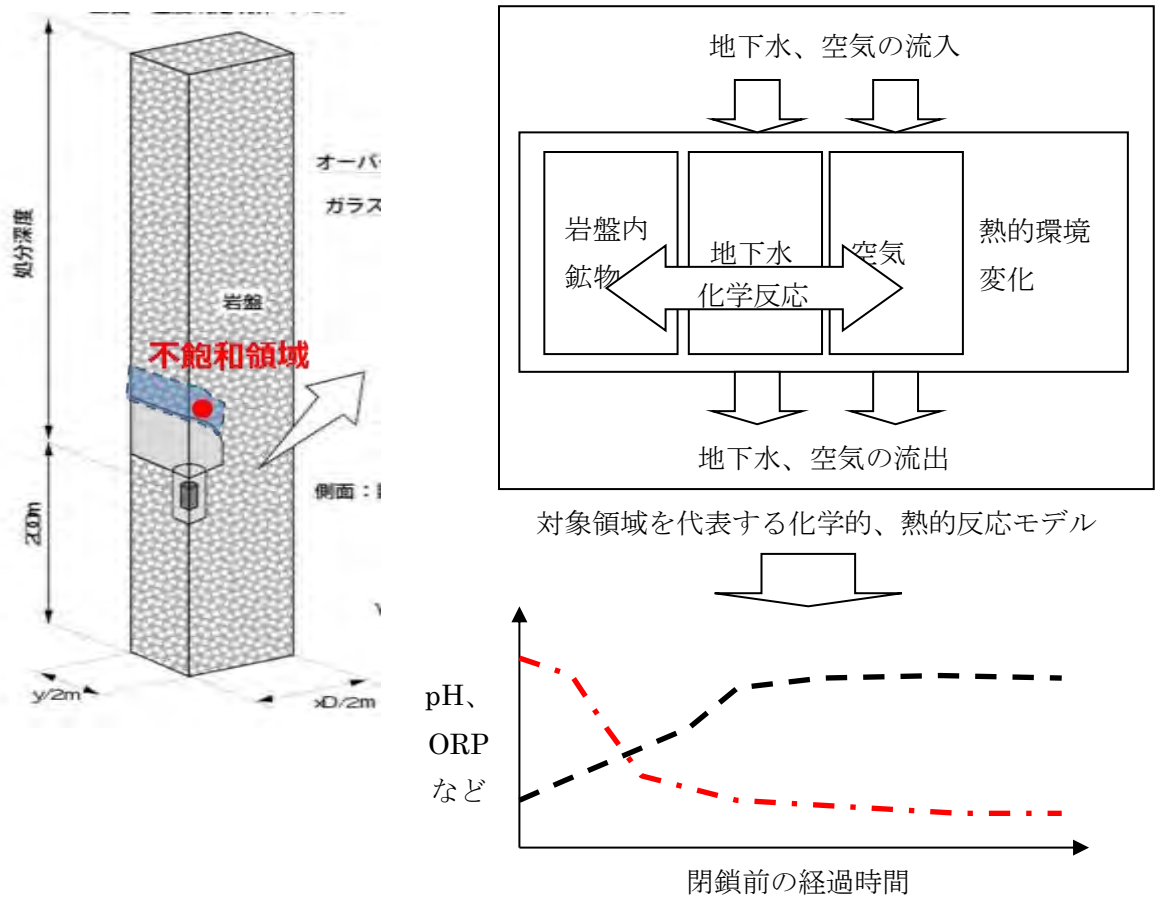
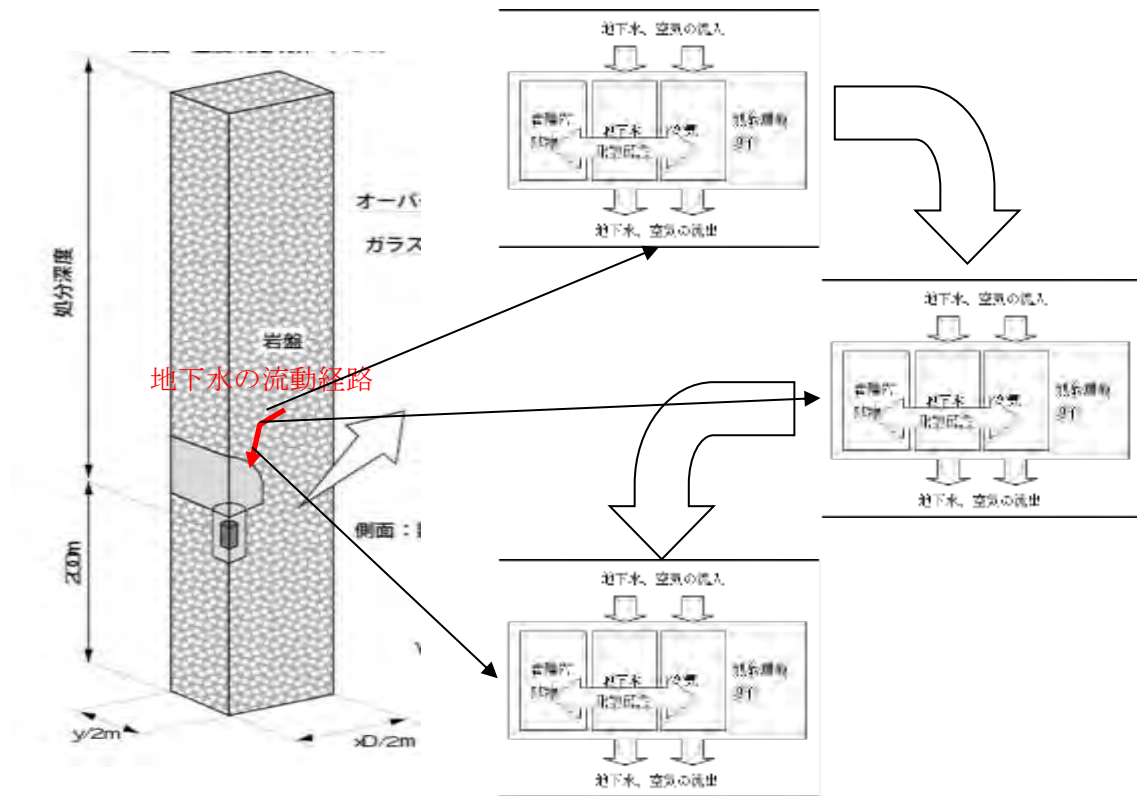


図 3.2.4-3 化学的、熱的影響評価モデルと結果のイメージ(現状での一例)

また、第 2 ステップとしては、2 次元のあるいは 3 次元のモデル化が想定されるが、地下水流動経路に沿った 1 次元の反応評価も考えられる。検討のイメージを図 3.2.4-4 に示す。



流動経路に沿った化学的、熱的反応モデル

図 3.2.4-4 連続的な化学的・熱的影響評価モデルと結果のイメージ(現状での一例)

d 解析結果

解析結果として以下を提示する。

- ① 着目点における化学的・熱的な環境の経時変化
- ② 処分坑道周辺の化学的・熱的变化による支保、岩盤、人工バリアへの影響

e 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。

- ・化学的・熱的な影響による支保、岩盤、人工バリアへの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 その他

なお、詳細な解析モデル条件、解析条件については種々のガイドラインを考慮して品質の確保を図る。

(3) 「閉鎖後の長期安全性」に関する影響評価(現状での一例)

1) 再冠水に要する時間とその間の化学的・熱的環境変化の評価

現段階における再冠水に要する時間とその間の化学的・熱的環境変化を評価するための定量的な評価手法、手順の一例を図 3.2.4-5 に示す。なお、評価技術の調査結果に基づき、適宜検討方法については見直すものとする。

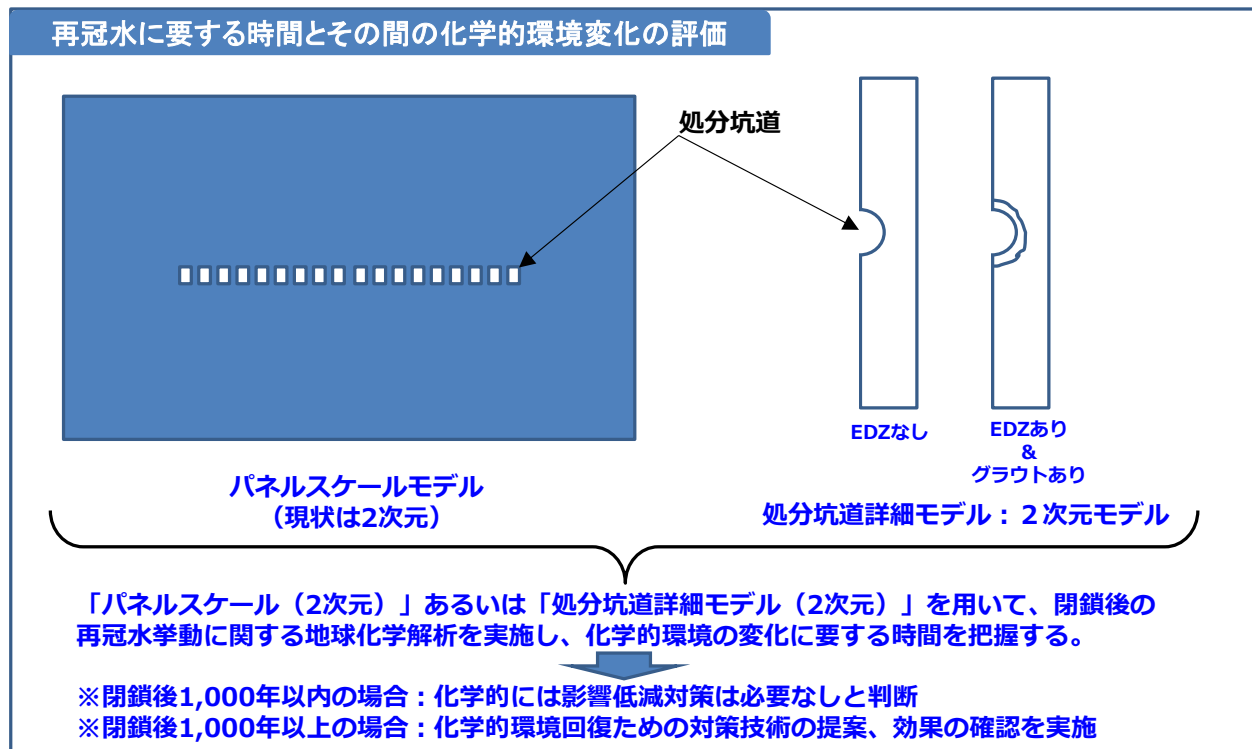


図 3.2.4-5 化学的・熱的影響評価のための化学的再冠水に要する時間の評価

a 検討目的

化学的・熱的に「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が維持されていない（還元雰囲気に戻っていない）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地球化学解析により、処分場の化学的・熱的環境回復に要する時間の把握を行う。その結果、化学的・熱的環境回復に要する時間が閉鎖後 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、化学的・熱的環境回復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、手順を検討する。

b 検討モデル、検討方法

現状では、地球化学解析手法（解析コード： TOUGHREACT など）の適用が想定される。

化学的・熱的な定量評価に対して、現状で実施可能な地球化学解析手法の調査結果に基づき、実施可能な定量化手法、手順を明らかにする。現状では前述の TOUGHREACT などが想定される。

なお、詳細については調査結果に基づき設定する。

c 検討条件の設定

パネルスケールモデル解析結果および処分坑道詳細モデル解析を踏まえ、検討条件を設定する。水理学的評価結果から、比較的不飽和領域が発生した解析条件に対して検討を行うことにより、保守的な評価が可能であると考えられる。

d 解析結果

解析結果として以下を提示する。

① 閉鎖後の化学的・熱的環境の変化状況、還元状態に回復するまでの時間

e 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。

・化学的・熱的環境回復のための対策技術についての整理

① 還元状態への回復を促す対策技術の提示と効果の確認、課題の抽出

(例えば、埋め戻し材などにパイライトを添加する方法など。硫化物の発生影響等の評価により、パイライトの添加量に関する知見などが得られる可能性がある。)

② その他

なお、詳細な解析モデル条件、解析条件については種々のガイドラインを考慮して品質の確保を図る。

3.2.5 課題の整理

本検討の結果から得られる現状での課題例の概要を図 3.2.5-1、図 3.2.5-2 に示す。

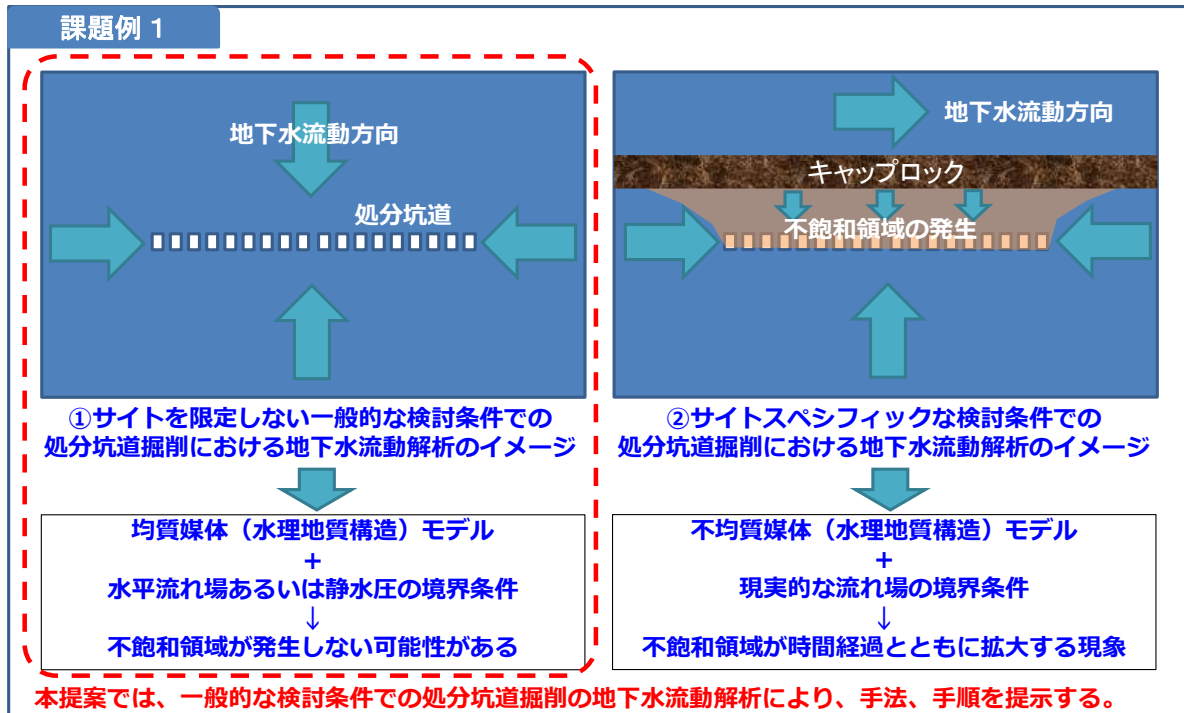


図 3.2.5-1 現状での課題例 1 の概要

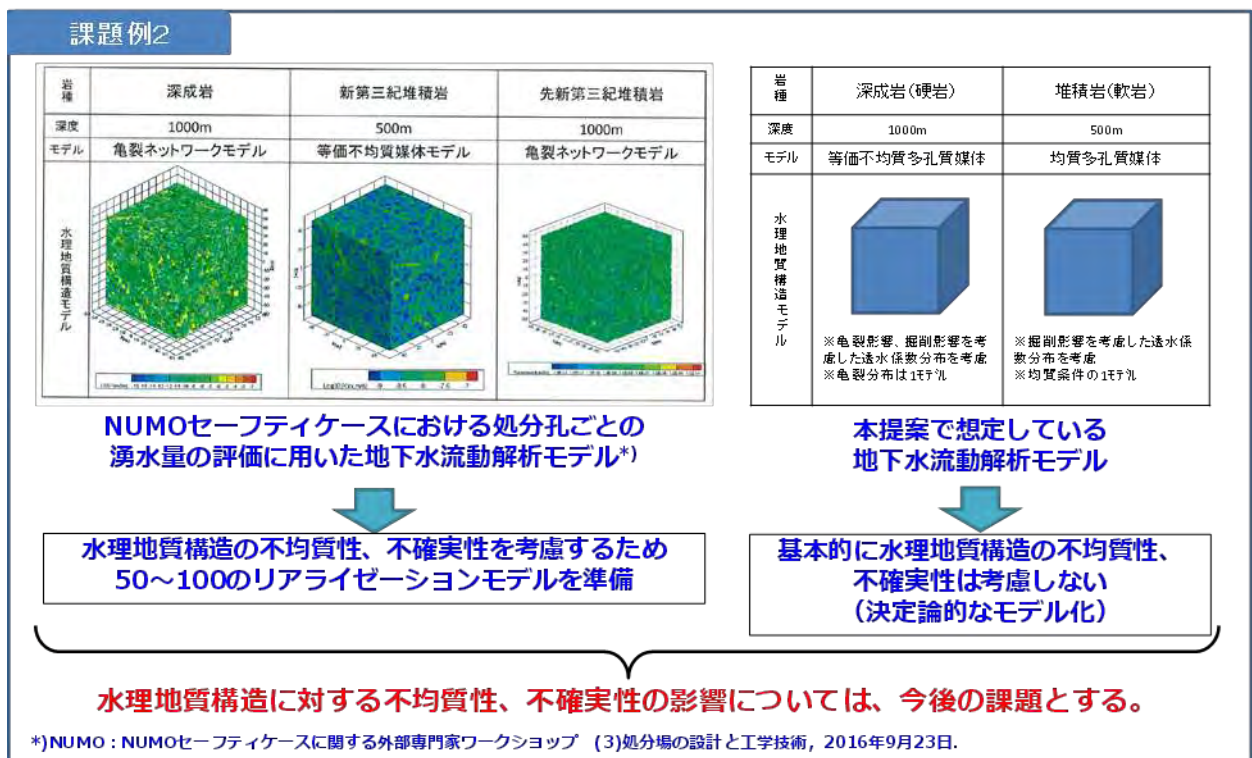


図 3.2.5-2 現状での課題例 2 の概要

① 課題例 1 について

- ・水理学的影響については、非常にサイトスペシフィックな条件（水理地質構造、地下水流動

状況～動水勾配条件など)により、処分坑道の掘削影響が異なることが懸念される。具体的なサイトが決定していない現段階では具体的な条件設定が困難であり、簡易な流動場の設定とならざるを得ない。処分坑道掘削により発生する可能性がある不飽和領域についても、水理地質構造の影響が大きいことが予測されるため、境界条件の設定によっては明確な不飽和領域が発生しない可能性がある。これに関しては、サイト条件が決定した際に適切に評価ができる手法とその手順を整理することにより対応できるよう準備することが重要と考え、本提案では一般的な条件での検討を実施するものとした。

② 課題例 2 について

- ・NUMO 配布資料では、地質環境の設定において亀裂の空間的な分布をリアライゼーションによって、50～100 以上モデル化し（亀裂分布モデル）それらに対して数値解析を実施しており、亀裂分布の不確実性を考慮した検討が実施されているが、本提案では多孔質媒体モデルおよび決定論的なモデル化（水理地質構造モデルは岩種ごとに各 1 つ設定）での検討を前提としている。そのため、水理地質構造の不均質・不確実性の影響については今後の課題と考える。

③ その他について

- ・THMC の影響検討については、既存検討として JAEA において 3 次元解析モデルを用いた THMC 連成解析が実施されている*ものの、本提案ではそれぞれの影響を評価することを目的として、別々の解析手法による評価を行うものとした。化学的・熱的影響の検討においては、M（力学）以外の THC(温度、水理、化学)を対象とした解析コードが開発されており、これらの現状を調査しつつ、手法の選定を行う必要がある。今後の化学的・熱的影響検討の実施内容については適切な手法の設定を行う。

上記のみでなく、本業務の結果を踏まえ、回収可能性の維持に対する種々の検討課題について整理、提示する。

3.3 坑道安定性に関する解析的評価

3.3.1 実施内容

本検討の実施内容の概要を図 3.3.1-1 に示す。坑道安定性に関する解析的評価では、「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（1999）」（以降、第 2 次取りまとめ[6]）や NUMO による「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－」（以降、NUMO2010 年レポート）などで示されている既往の検討の処分場の設計を基に、検討ケースを設定し、坑道安定性を解析的に評価する。坑道安定性とは坑道が力学的に安定していることであり、坑道の力学的安定性は周辺の岩盤および支保工が一体となって機能することにより確保される。よって、坑道の安定性に関する解析的評価は、既往の検討の処分場の設計に基づき、前提条件を設定し、岩盤や支保工など各材料を構成モデルとして設定した力学解析により行う。

力学解析は回収可能性の維持による安全性への影響を定量的に評価できる条件で行う。すなわち、回収可能性維持期間・状態を考慮したときの、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与える影響について、時間依存性を考慮することができる解析手法により評価する。坑道の安定性に関する解析的評価は、岩盤や支保工などの材料ごとに、一般的に用いられている安定性の評価指標を用いて行う。指標に基づく判定により、坑道安定期間（坑道が力学的に安定している期間）を検討し、安定期間を超えた場合には回収可能性の維持による影響を低減する技術について検討を行う。

また、回収可能性の維持期間を検討する上で定量的評価を行うことによる課題を抽出するとともに、次年度以降に実施予定の地下水流動解析による水理学的影響に対する評価への展開も行う。

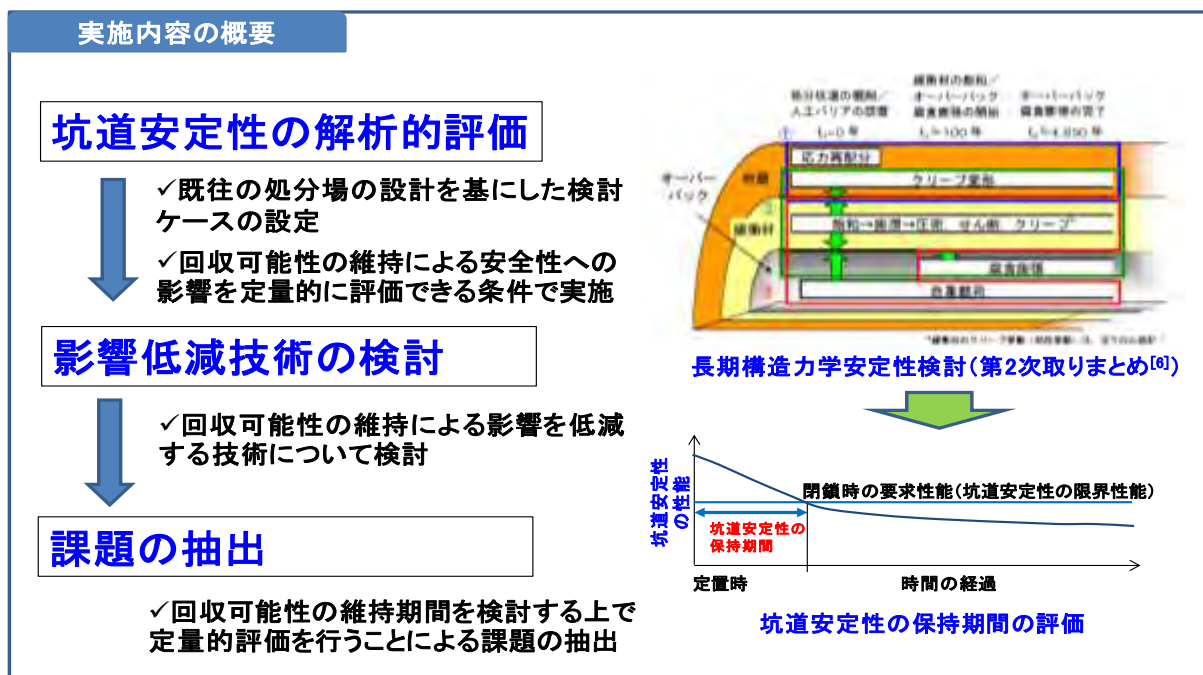


図 3.3.1-1 本検討の実施内容の概要

前述の実施内容を踏まえ、実施内容を検討するための詳細な作業内容、作業フローを図 3.3.1-2 に示す。

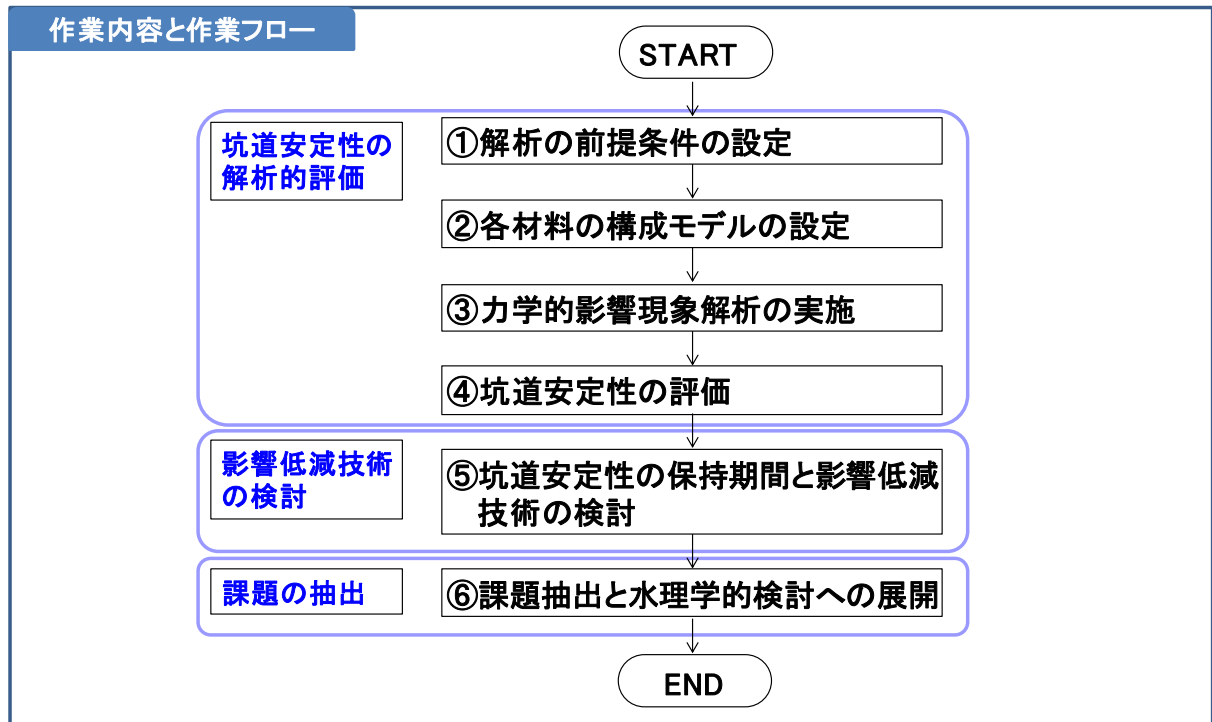


図 3.3.1-2 作業内容と作業フロー

3.3.2 解析の前提条件

処分場地下施設の建設時には、坑道の掘削にともなって岩盤に応力再分配が起こる。また、オーバーパックおよび緩衝材の定置後から、緩衝材の膨潤、オーバーパックの自重沈下、腐食膨張変形、岩盤のクリープ変形等が発生し、それらの現象が相互に作用することにより、緩衝材や坑道周辺岩盤の応力状態が経時的に変化することが考えられる。

そこで、回収可能性維持期間が坑道の力学的安定性に与える影響の評価として、周辺岩盤の力学的影響現象を考慮した解析を実施する。主に考慮する現象は以下の3項目である。

- ・岩盤の時間依存性挙動
- ・支保工の劣化
- ・緩衝材、埋め戻し材の力学特性の変化

ここで、周辺岩盤の力学的影響現象を考慮した解析を実施するために、前提条件を整理する。前提条件は、対象とする処分坑道仕様、想定される力学的影響現象の整理、および力学的影響現象解析のシナリオとする。

(1) 処分坑道仕様の設定

本検討では、NUMO から処分坑道仕様に関する参考値を提供して頂き、その参考値（以降、NUMO の参考値）に基づき、検討対象とする処分坑道仕様を設定した。図 3.3.2-1 に対象とする処分坑道仕様を示す。

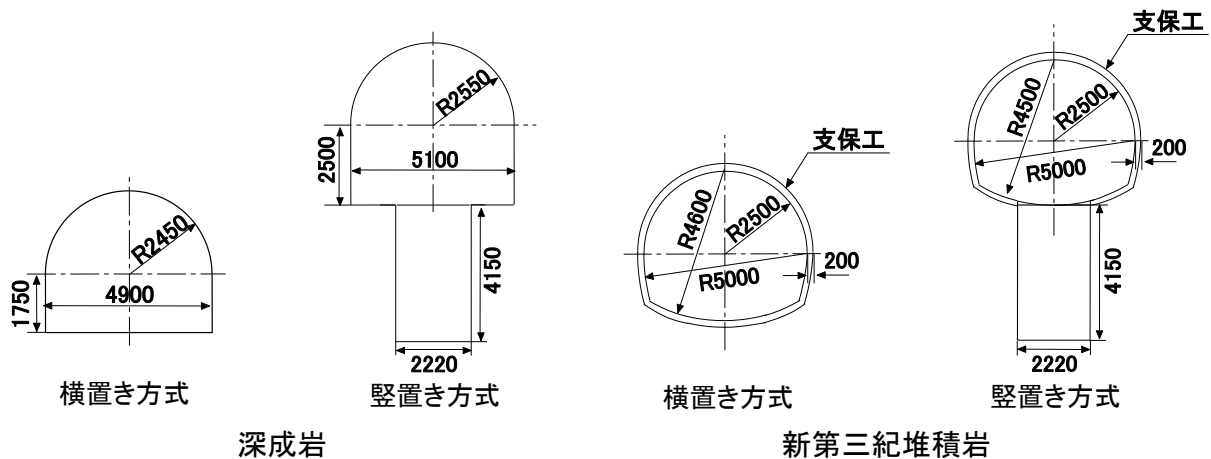


図 3.3.2-1 対象とする処分坑道仕様

(2) 想定される力学的影響現象の整理と解析シナリオの設定

第2次取りまとめでは、緩衝材、岩盤の安定性に影響を与える可能性のある種々の現象に対して、経時変化や相互作用の程度を把握するために解析を行い、長期構造力学安定性の検討、評価を実施している。長期構造力学安定性検討の概要を図 3.3.2-2 に示す。

大久保ら[7]により提案されたコンプライアンス可変型モデルを用いて、硬岩系および軟岩系岩盤における処分坑道の長期変形量の評価が実施されている。この結果、閉鎖後1万年後において、

硬岩系岩盤（内径 2.2m）では 10^{-4} オーダー、軟岩系岩盤（内径 2.8m）では数 10 mm 程度のクリープ変形量となることが示されている。

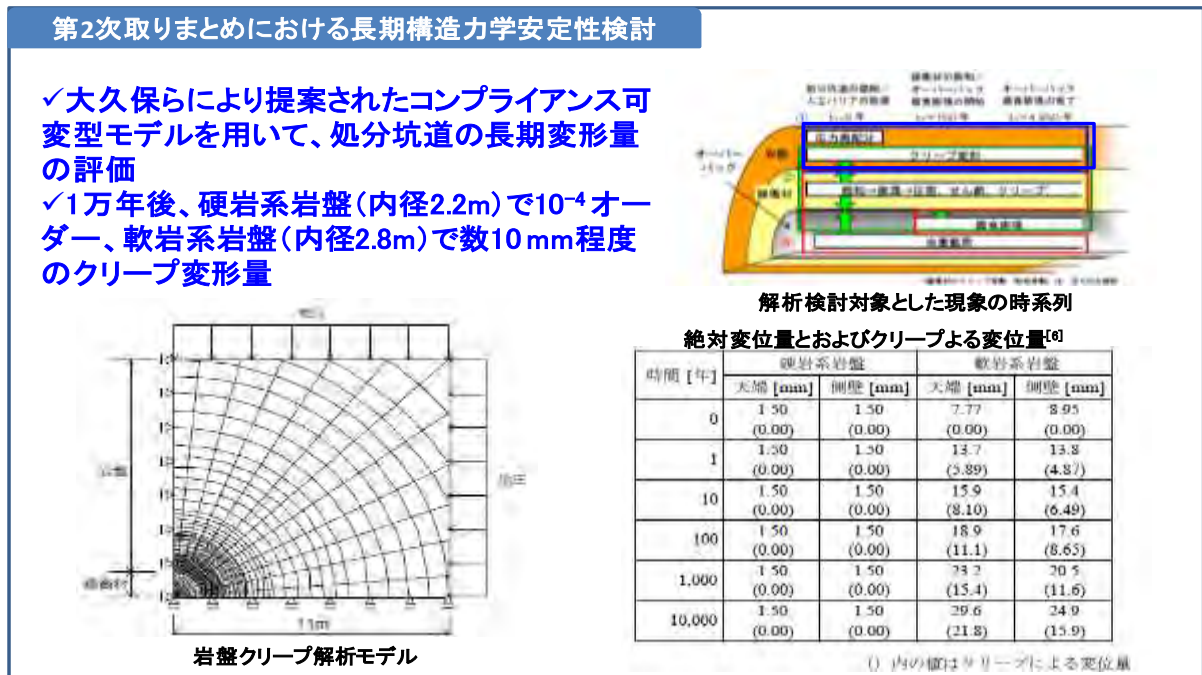


図 3.3.2-2 長期構造力学安定性検討の概要[6]

本検討で取り扱うニアフィールドの力学的影響現象のシナリオを設定するため、第2次取りまとめの検討結果を踏まえ、さらに西村ら[8]の既往研究を参考にして、岩盤、支保工、緩衝材、オーバーパック、埋め戻し材の各要素で想定される現象を以下のように設定した。

・岩盤

岩盤中に坑道を掘削すると、その周辺岩盤では応力再配分によって応力やひずみの状態の変化が起こる。また、割れ目の発生・進展や間隙水圧の変化も起こる。このような現象によって、周辺岩盤の強度や変形などの力学特性、透水係数などの水理学的特性、あるいは地下水の酸化還元電位などの地球化学特性が変化するとされている。また、掘削後、周辺岩盤では、時間の経過とともにクリープによる変形の進行や劣化現象も観察されるようになる。

天然バリアとしての周辺岩盤の透水性の変化には、直接的あるいは間接的に様々な要因が考えられるが、ここでは、力学的影響から水理学的影響評価への透水係数データの受け渡しを考慮して、周辺岩盤の変形に伴って透水性が変化するものと考え、長期的なクリープによる変形を考慮するものとする。

・支保工

処分坑道や処分孔の掘削後に、坑道安定性上、必要と判断される場合にはコンクリートと鋼材等からなる支保工が設置される。支保工が時間経過とともに劣化すると、強度および剛性が低下するため、支保工の内圧効果が減少して坑道周辺岩盤の長期的な変形挙動に影響を与えると考え

られる。その結果、岩盤のバリア性能に影響を与えることが想定される。

支保工の構成材料であるコンクリートには、地下水との接触によるセメント水和物の成分の溶脱、鋼材の腐食膨張によるひび割れ、アルカリ骨材反応によるひび割れ、CO₂の浸透による中性化などの劣化現象が起きる。ここでは、セメント系材料の劣化現象に関して、地下水との接触によるセメント水和物の成分の溶脱を支保工の剛性の低下として考慮するものとする。

また、支保工の構成材料は、第2次取りまとめではコンクリート材料が明記されているが、それ以降の関係機関の検討では鋼製支保工を使用する坑道仕様も検討されているので、その力学特性を考慮するものとする。

・緩衝材

緩衝材は、人工バリアとして低透水性、自己シール性、核種吸着遅延性、熱伝導性、化学的緩衝性、オーバーパック支持性、応力緩衝性等の機能が期待されて設置され、ベントナイト単体、または、ベントナイトと砂の混合物を締め固めることによって作られる。

緩衝材は、設置直後は不飽和状態であるが、地下水によって飽和状態に移行する。緩衝材が飽和すると、膨潤するとともに、外力の作用に対して、体積変形やせん断変形を起こし、その剛性は低下することが知られている。したがって、緩衝材の飽和が進むと、緩衝材による周辺岩盤への拘束が減ることになり、周辺岩盤の長期的な変形挙動に影響を与えることが考えられる。その結果、岩盤のバリア性能に影響を与えることが想定される。そのため、緩衝材の飽和の進行に伴う物性変化を剛性の低下として考慮するものとする。

・埋め戻し材

定置後に設置される埋め戻し材は、緩衝材と同様、再冠水により膨潤するとともに、外力により変形が生じる。

緩衝材と同様、埋め戻し材が飽和すると、その剛性は低下すると考えられる。したがって、埋め戻し材の飽和状態に応じて、物性変化を考慮するものとする。

・オーバーパック

オーバーパックは定置後、自重により沈下するとともに、再冠水により腐食して腐食生成物により体積膨張が起こる。ここでは、オーバーパックは緩衝材によって周囲を覆われており、体積膨張が直接的に支保工や岩盤に及ぼす影響は小さいものと考え、オーバーパックを剛性一定の材料として考慮するものとする。

第2次取りまとめの岩盤クリープ解析において、オーバーパックは考慮されていない。

以上のような現象を時系列的に整理すると図 3.3.2-3 のようになる。

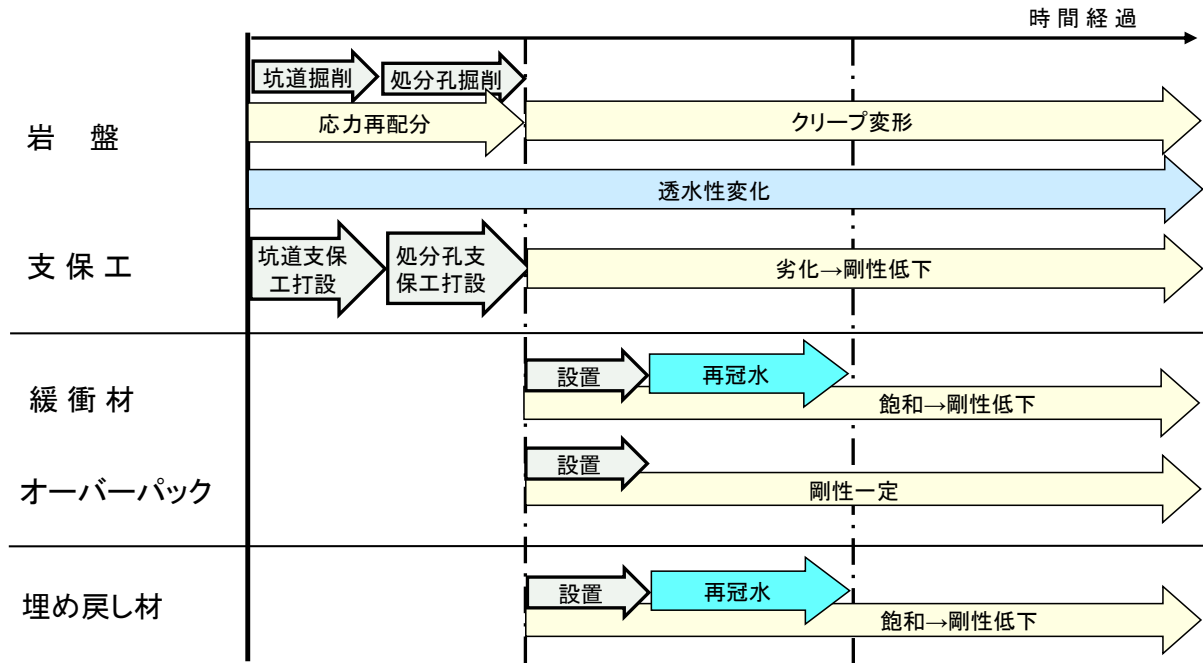


図 3.3.2-3 ニアフィールドで想定される力学的影響現象
(西村ら[8]の既往研究に加筆・修正)

本検討で想定するニアフィールドの力学的影響現象のシナリオに基づいた解析フローを図 3.3.2-4 に示す。岩盤を含めた力学的影響評価を行う場合、 $t=0y$ (0年) において掘削により再配分された応力状態を、初期応力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および処分孔の掘削解析を実施し、得られた応力状態を長期力学解析における初期応力状態とする。

処分坑道および処分孔の掘削後から周辺岩盤のクリープ変形は始まるものとし、それが続くものとする。支保工は、坑道掘削直後に設置するものとして、設置直後から劣化は始まるものとする。3.3.3 で後述するように、掘削後 400 年まで劣化は進行し、その後の剛性は一定となるものとする。緩衝材、オーバーパック、埋め戻し材は掘削後 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るものとして、設置後 100 年間で飽和が完了するものとする。

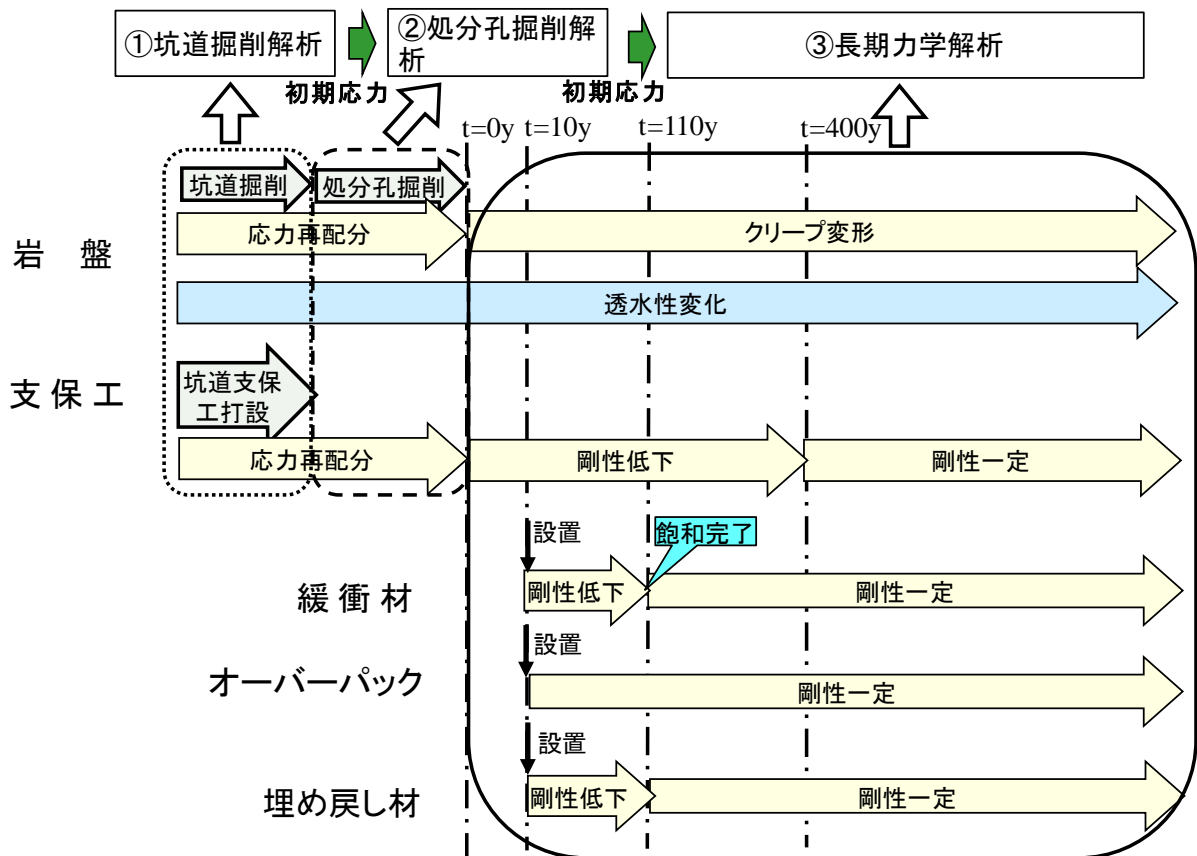


図 3.3.2-4 力学的影響現象の解析フロー
(西村ら[8]の既往研究に加筆・修正)

3.3.3 各材料の構成モデル

本検討で対象とする各材料の構成モデルの概要を以下に述べる。

(1) 岩盤

1) クリープ変形

岩盤の長期の変形挙動を解析するためには、時間依存性の挙動や粘弾性的な挙動を考慮することが必要となる。表 3.3.3-1 に現時点までに提案されている主な時間依存性力学モデル[10]を示す。これらのモデルのうち、大久保モデルは地層処分分野での適用実績が多く、第2次取りまとめの岩盤クリープ解析においても、大久保モデルが使用されている。そこで、本検討においても、大久保モデルを用いてニアフィールドの長期力学解析を行うものとする。

岩石は非線形な粘弾性挙動を示す材料であるが、岩盤のクリープ挙動に関して提案されている多くの構成則は線形粘弾性モデルであり、非線形粘弾性挙動を解析的に扱うことはできない。また、岩種によってはクリープによる坑道周辺岩盤のひずみは数10%に達し、破壊点を超える状態になることも予想されるが、破壊点以降の範囲まで適用できるモデルも少ない。

そのような挙動を表現するための構成則が、大久保ら[7]が考案したモデルである。このモデルはコンプライアンス可変型と呼ばれる構成則であり、非線形粘弾性挙動および破壊点以降の挙動を数値解析的に表現可能なものになっている。また、このモデルは、非線形 Maxwell モデルに相

当し、応力を受ける岩盤のコンプライアンス（ヤング率の逆数）が、時間の経過とともに次第に増加していくものとしている。図 3.3.3-1 に示す応力-ひずみ曲線の勾配の逆数がコンプライアンスである。

表 3.3.3-1 岩盤の時間依存性挙動評価のための主な力学モデル
(土木学会、2004 より一部改変) [10]

モデル名称	概要	対象地盤	本検討への適用性
大久保モデル	非線形Maxwellモデルの一種であり、応力を受ける岩盤の各要素のコンプライアンス（ヤング率の逆数）が時間の経過とともに次第に増加していくと仮定した長期にわたる岩盤の粘性的挙動を評価できるコンプライアンス可変型モデルである。	硬岩・軟岩	○ (地層処分研究での実績がある)
地山劣化モデル	泥岩や頁岩などの膨張性地山に見られる時間依存性を持った地山挙動が岩盤強度の時間依存性に由来すると仮定して、粘着力に時間依存性を持たせた弾塑性構成モデルである。	膨張性地山	○ (トンネルの維持管理に関する適用実績がある)
山富モデル	スプリングとダッシュポット、スライダの3要素からなるレオロジーモデルを考え、ひずみ硬化性、非硬化性、ひずみ軟化特性を表わす3種類のスライダー特性を持たせることにより、岩石のひずみ硬化・軟化特性、1次、2次、3次と変化するクリープ曲線やクリープ破壊、さらには、強度破壊点以降も含めた変形特性やひずみ速度の増加に伴う強度増加を表現できる弾粘塑性構成モデルである。	軟岩	△ (空洞の長期挙動予測をする上での課題がある)
関口・太田モデル	粘性土の圧密特性、せん断特性、ダイレイタンス特性を表現できるカムクレイ型の弾塑性構成モデルに、レオロジー特性および主応力の回転に伴う異方性を考慮できるようにした弾粘塑性構成モデルである。泥岩などを過圧密粘性土として扱うことにより軟岩へ適用することが可能である。	軟岩・粘性土	△ (粘性土を対象としたモデル)
足立・岡モデル	粘性土の圧密特性、せん断特性、ダイレイタンス特性を表現できるカムクレイ型の弾塑性構成モデルを拡張し、動的な流れ則の導入により時間依存性をも説明できるようにした弾粘塑性構成モデルである。	軟岩・粘性土	△ (入力パラメータが多く、複数の試験を行う必要がある)

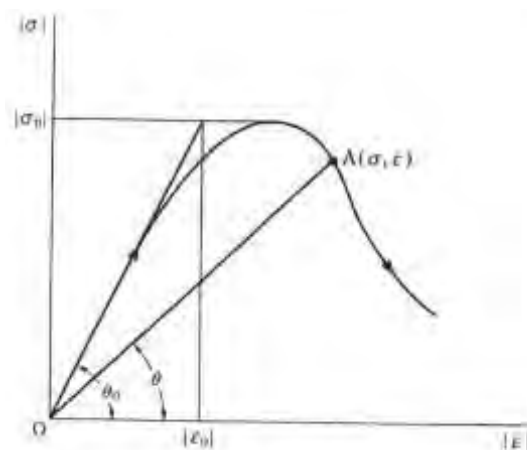


図 3.3.3-1 応力-ひずみ曲線[9]

大久保ら[7]によると、コンプライアンス λ 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。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a \cdot (\Delta\sigma^*)^n (\lambda^*)^m \quad \text{式 3-1}$$

$$a = \frac{1}{t_0} \left(\frac{m}{n_0 + 1} \right)^{\frac{m}{(n_0 - m + 1)}} \quad \text{式 3-2}$$

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

ここに、 λ^* ($=\lambda/\lambda_0$) 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わしている、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 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。

$$n = \frac{\Delta\sigma_0}{\sigma_c} n_0 \quad \text{式 3-4}$$

ここに、 n_0 は一軸圧縮応力下での n の値である。

破壊規準は岩盤を対象としていくつか提案されているが、Janach および Mohr-Coulomb の破壊規準が用いられている。Janach の破壊規準を以下に示す。

$$\Delta\sigma_0 = \sigma_c \left(1 + \frac{\sigma_3}{\sigma_t} \right)^{0.5} - \sigma_3 \quad \text{式 3-5}$$

ここに、 σ_c は一軸圧縮強度、 σ_t は一軸引張強度、 σ_3 は最小主応力である。

Mohr-Coulomb の破壊規準は次式で表わされる。

$$\Delta\sigma_0 = \sigma_c + \frac{2\sigma_3 \sin\phi}{1 - \sin\phi} \quad \text{式 3-6}$$

$$\sigma_c = \frac{2C \cos\phi}{1 - \sin\phi} \quad \text{式 3-7}$$

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。

$$\nu = 0.5 - \frac{0.5 - \nu_0}{\lambda^*} \quad \text{式 3-8}$$

一方、表 3.3.3-1 には本検討への適用性として地山劣化モデルも挙げられている。このモデルは膨張性地山で認められるトンネルへの変状要因を考慮したモデルで、トンネルの維持管理に関

する適用実績を有する。本年度、大久保モデルで深成岩、新第三紀堆積岩を比較したうえで、次年度以降、新第三紀堆積岩を対象に地山劣化モデルによる解析を実施し、新第三紀堆積岩の評価や考察に用いる計画である。

2) 透水性変化

3.2 で提示した「影響低減技術の定量的評価に係る手法の検討」を基に、次年度以降に計画している地下水流動解析を踏まえ、周辺岩盤の透水係数の変化を扱う。そのためには、解析で得られた岩盤のひずみや応力から透水係数に変換する必要があるが、ここでは、既存の実験結果からひずみ-透水係数の関係を整理して、その関係式を用いることにする。

堆積軟岩を対象として、三軸圧縮試験中に行なわれた透水試験（以下、せん断破壊透水試験）の結果から、透水係数の変化を算定する透水係数の変化モデルが提案されている[11],[12],[13]。本検討では、この透水係数の変化モデルを使用する。せん断破壊透水試験の試験方法の概要を図 3.3.3-2 に示す。

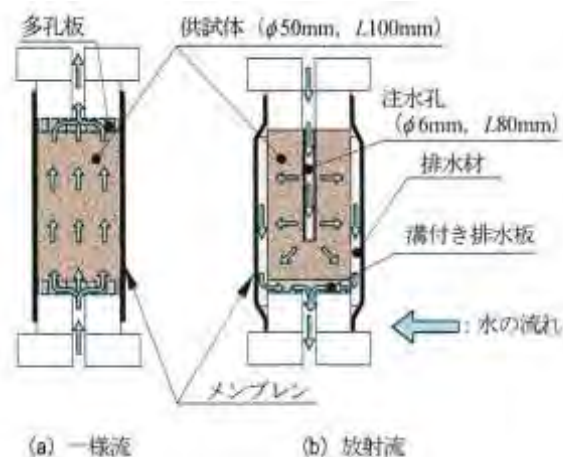


図 3.3.3-2 せん断破壊透水試験の概要[13]

堆積軟岩を対象として、三軸圧縮試験中に行なわれた透水試験の結果から、透水係数の変化として以下のようなことがわかっている。

- ・ピーク強度に達するまでは、透水係数はほとんど増加しない。
- ・ピーク強度以降のひずみ軟化過程以降に、透水係数の増加がみられる。

これらのことから、ピーク強度以前のひずみ状態では透水係数は増加しないものとした。岩盤のひずみ-透水係数関係を求めるために参考にしたせん断破壊透水試験の結果を図 3.3.3-3 に示す[12]。

そして、図 3.3.3-3 の有効拘束圧 1.0MPa の結果に対して、軸ひずみ ε をピーク強度時の軸ひずみ ε_c で正規化し、さらにピーク強度以前や除荷時のデータを除いて、回帰式を求めた結果を図 3.3.3-4 に示す。

そして、ひずみの履歴によって岩盤の透水係数は不可逆的に増加するものと仮定したことと、

解析によって求められた岩盤の最大主ひずみ ε_1 が試験の軸ひずみに相当すると仮定したことにより、岩盤のひずみと透水係数の関係を以下のように設定する。

$$\frac{k}{k_0} = \begin{cases} 1 & (\varepsilon_{1_max} \leq \varepsilon_c) \\ 2.8798 + 11.8921 \times \log_{10} \left(\frac{\varepsilon_{1_max}}{\varepsilon_c} \right) & (\varepsilon_{1_max} > \varepsilon_c) \end{cases} \quad \text{式 3-9}$$

ここで、 k は透水係数、 k_0 は透水係数の初期値、 ε_c は軟岩系岩盤の SR-C の一軸圧縮試験時におけるピーク強度時の軸ひずみ、 ε_{1_max} は最大主ひずみ ε_1 の履歴最大値である。

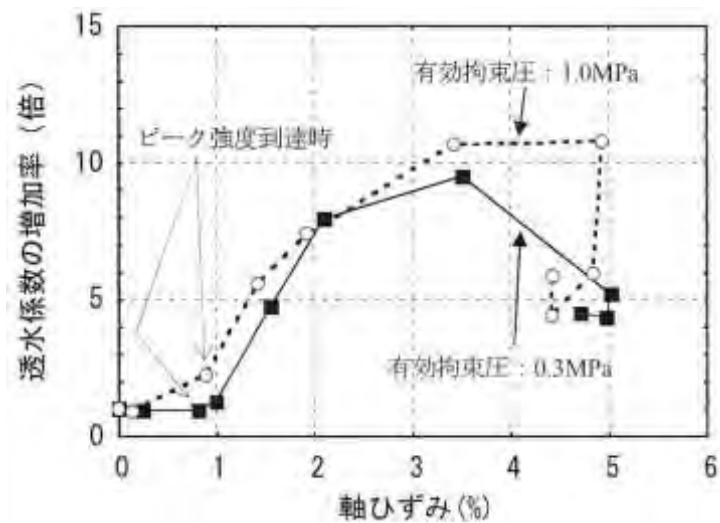


図 3.3.3-3 既往のせん断破壊透水試験の結果[12]

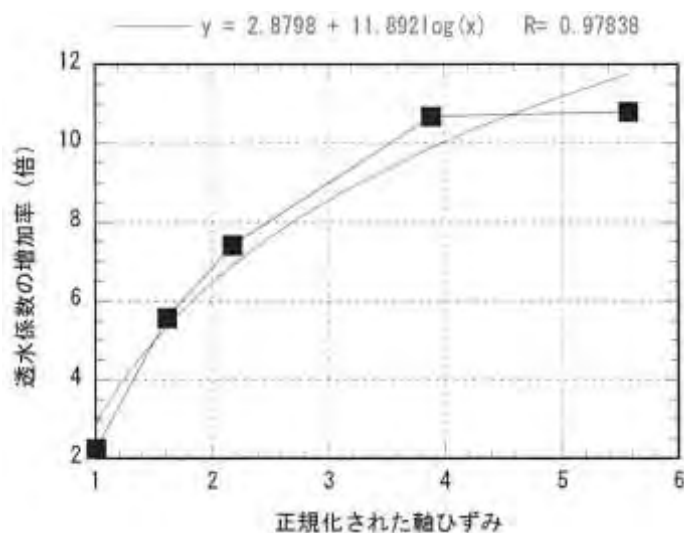


図 3.3.3-4 正規化された軸ひずみと透水係数の増加率の関係[12]

(2) 支保工

本検討では、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以下に示すコンクリートの溶脱特性を考慮する。辻本ら[14]は、覆工コンクリートの変状に関する観察結果を基に、水酸化カルシウムの溶脱をモデル化している(図 3.3.3-5)。コンクリートに発生したひび割れが溶脱を促進し、その結果さらにひび割れが進行することが示されている。また、山本・廣永[15]は、セメントペーストの接水面極近傍では、水酸化カルシウムの消失と併せて C-S-H 相の溶脱変質が生じるため、孔径 $10\mu\text{m}$ 程度の空隙が多く形成される状態を分析している(図 3.3.3-6)。このようなセメントの溶脱によりセメント硬化体の空隙が増加することから、材料の力学的性能が低下することが知られている。

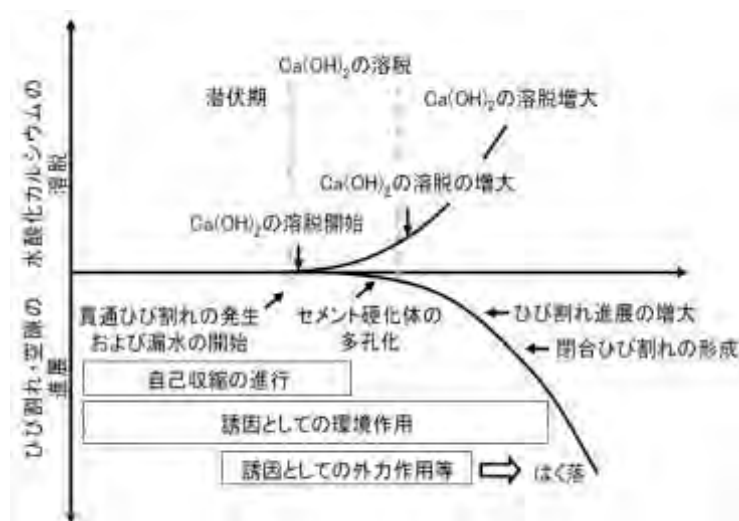


図 3.3.3-5 コンクリートからの水酸化カルシウムの溶脱の概念[14]

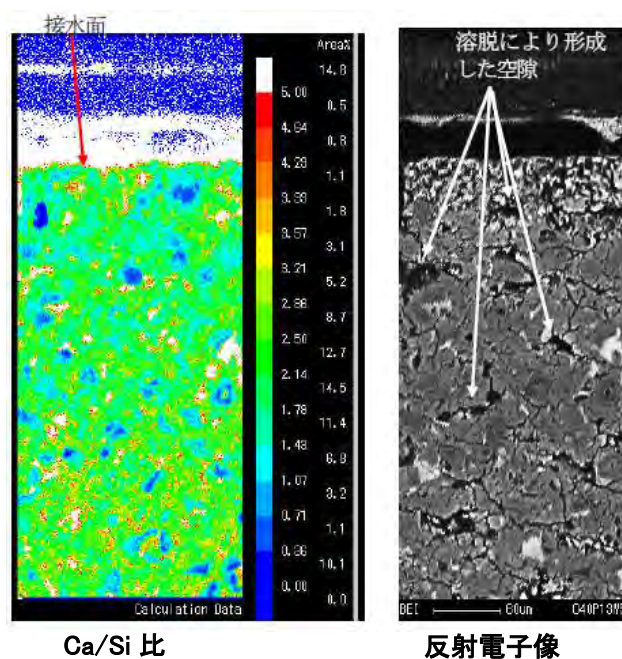


図 3.3.3-6 セメントペーストの溶脱変質に伴う Ca/Si 比の変化と空隙形成状態の比較[15]

本検討では、コンクリートの溶脱特性として、既往の研究[16]を参考にする。既往の研究[16]では、トンネル型処分施設における人工バリアの長期力学挙動解析を実施し、人工バリアのコンクリート系材料の溶脱速度を $t=0.5\text{mm/y}$ と設定している。本検討においても、人工バリアのコンクリート系材料の溶脱速度を吹付けコンクリートの溶脱速度に適用する。ここでは、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仮定し、その速度を $t=0.5\text{mm/y}$ と設定する。この結果、厚さ 200mm の吹付けコンクリートの場合、 $200/0.5=400$ 年で溶脱完了することになる。本検討で用いる溶脱によるコンクリートの弾性係数とポアソン比の経時変化を図 3.3.3-7 に示す。

溶脱完了後のコンクリートの弾性係数については、既往の研究[16]と同様に、初期弾性係数の $1/10$ になるものとした。溶脱完了後のポアソン比については、 0.45 になるものと仮定する（図 3.3.3-7）。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、完了後以降は一定値をとるものと仮定する。なお、吹付けコンクリートの場合、初期弾性係数を $29,600\text{MPa}$ とする。この値の設定については、後述の(1)で説明する。

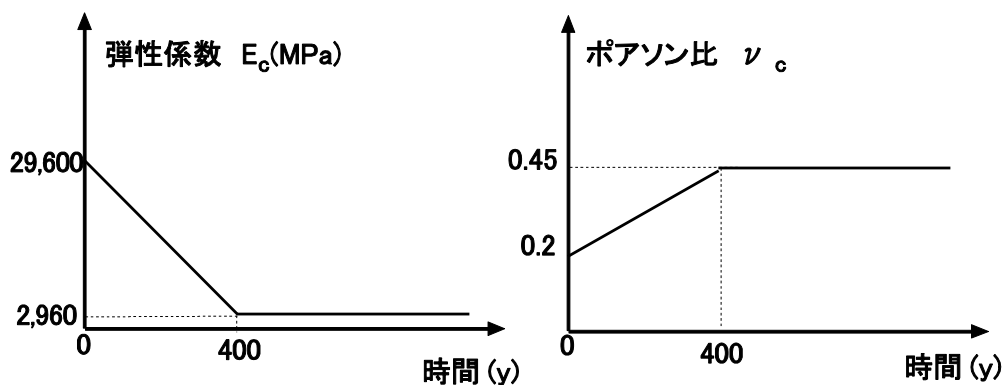


図 3.3.3-7 コンクリートの物性値の経時変化

また、支保工の構成材料は、第 2 次取りまとめではコンクリート材料が明記されているが、NUMO の参考値によれば鋼製支保工を使用する坑道仕様が検討されている。本検討では鋼製支保工は、コンクリートとの合成要素としてモデル化する。その際には、次のように合成要素の等価弾性係数を用いる。

$$E = \frac{A_s}{A} E_s + \left(1 - \frac{A_s}{A}\right) E_c \quad \text{式 3-10}$$

$$A = A_s + A_c \quad \text{式 3-11}$$

ここに、 E は合成要素の等価弾性係数、 A は合成要素の面積、 E_c はコンクリートの弾性係数、 A_c はコンクリートの面積、 E_s は鋼製支保工の弾性係数、 A_s は鋼製支保工の面積である。また、鋼製支保工の物性値についてもコンクリートと同様に劣化による経時変化を反映する。

(3) 緩衝材と埋戻し材

本検討では、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。図 3.3.3-8 に緩衝材の物性値の経時変化を示す。第 2 次取りまとめより、緩衝材の配合は、クニゲル V1 : ケイ砂=7 : 3 でケイ砂 3 号 : 5 号=1 : 1 であることが示されていて、緩衝材ブロック製作実験より、不飽和時の緩衝材の平均含水比 w が 11.99%であったことが示されている。そして、含水比-弾性係数の実験式[17]から不飽和時の緩衝材の弾性係数を 39MPa と設定する。飽和後の弾性係数については、既往の実験結果[17]から 3MPa と設定する。不飽和時のポアソン比については、適切な実験例が見当たらないこと等から、現時点では飽和時と同じポアソン比を設定する。飽和時のポアソン比については、第 2 次取りまとめから 0.4 とする。

第 2 次取りまとめの結果では再冠水する期間が 5~1,000 年以上となっていることから、ここでは、再冠水期間を 100 年と仮定する。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する。

また、埋め戻し材については、現時点では明確な仕様が定まっていないことから、緩衝材と同様の弾性体としてモデル化する。

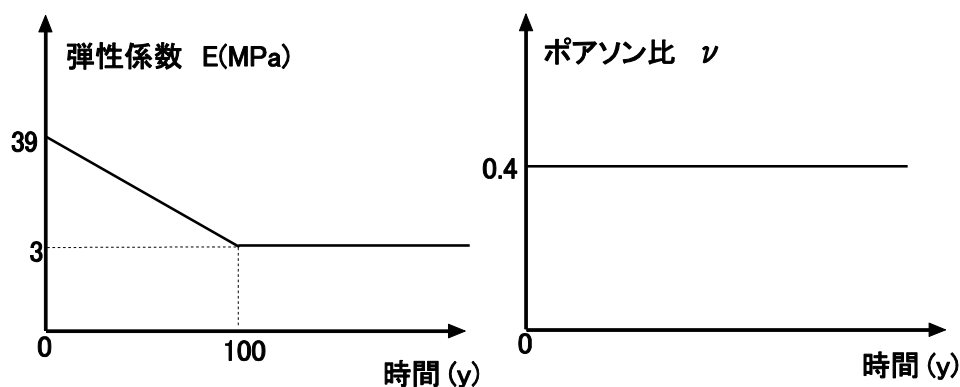


図 3.3.3-8 緩衝材の物性値の経時変化

(4) オーバーパック

オーバーパックは直径 820mm の円形で弾性体としてモデル化する。第 2 次取りまとめより物性値は、

- ・弾性係数 : $E_s=2.1 \times 10^5$ (MPa)
- ・ポアソン比 : $\nu_s=0.3$

とし、腐食の影響について考慮せず、物性値は一定値をとるものと仮定する。

3.3.4 坑道安定性の評価

本検討では、解析結果から坑道の力学的安定性への影響評価を行う。この安定性の評価としては、坑道の構造体である周辺岩盤と支保工の安定性が確保できているかどうかで判断する。周辺岩盤および支保工の安定性を評価するため、第 2 次取りまとめと同様、局所安全率、最大せん断ひずみ、支保工の応力度を評価指標として用いることを基本とした。

(1) 局所安全率

局所安全率 F_s は、図 3.3.4-1 に示す Mohr-Coulomb の破壊規準に対する Mohr の応力円の余裕度で定義する。「山岳トンネル設計施工標準・同解析」[18]では、図 3.3.4-2 に示すように坑道周辺岩盤の局所安全率 $F_s=1.2$ 以下となる領域が坑道掘削径 D の 20%以下であることを空洞安定性の一つの目安としている。本検討においても、これらの評価基準を用いることとした。ここで、坑道掘削径 D は坑道断面の掘削幅を示すものとした。

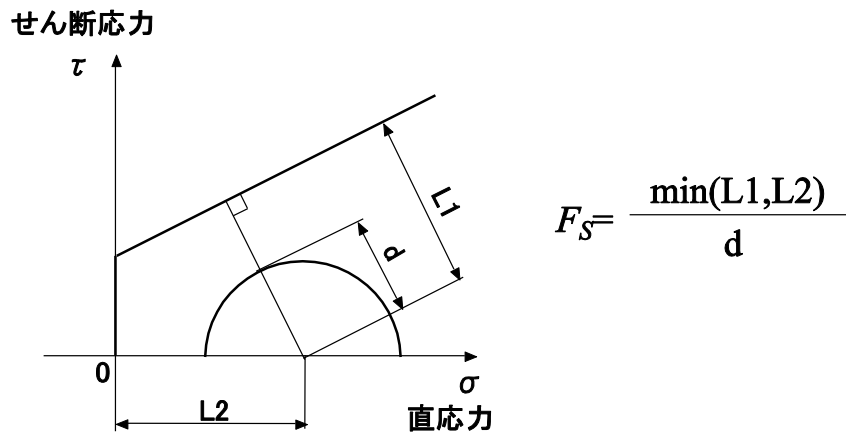


図 3.3.4-1 局所安全率の定義

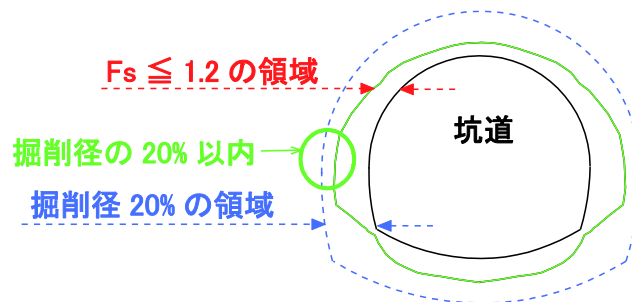


図 3.3.4-2 評価基準の概念図

(2) 最大せん断ひずみ

最大せん断ひずみについては、櫻井ら[19]が提案する以下に示す限界せん断ひずみを用いて評価する。

$$\gamma_0 = (1 + \nu)\epsilon_0 \tag{式 3-12}$$

ここに、 γ_0 ：限界せん断ひずみ、 ν ：ポアソン比、 ε_0 ：一軸状態での限界ひずみ

限界ひずみは、櫻井・足立[20]によって提案されている弾性係数と限界ひずみの関係(図 3.3.4-3)から得られる。以下に示す式 4-13 は限界ひずみの上限値を、式 4-15 は下限値を、式 4-14 は式 4-13 と式 4-15 の対数平均値を示している。

$$\log \varepsilon_0 = -0.25 \log E - 0.85 \quad \text{式 3-13}$$

$$\log \varepsilon_0 = -0.25 \log E - 1.22 \quad \text{式 3-14}$$

$$\log \varepsilon_0 = -0.25 \log E - 1.59 \quad \text{式 3-15}$$

第 2 次取りまとめでは、対数平均値が用いられており、本検討においても対数平均値を利用した。岩盤の弾性係数から算出した限界ひずみと限界せん断ひずみ(平均値)を表 3.3.4-1 に示す。なお、新第三紀堆積岩での限界せん断ひずみ ε_0 の上限値は $\varepsilon_0=1.34\%$ 、下限値は $\varepsilon_0=0.24\%$ である。

本検討では、「山岳トンネル設計施工標準・同解析」[18]を参考にして、最大せん断ひずみが限界ひずみを超過する領域が坑道壁面から坑道掘削径 D の 20%以下であれば周辺岩盤の安定性は確保される条件とした。

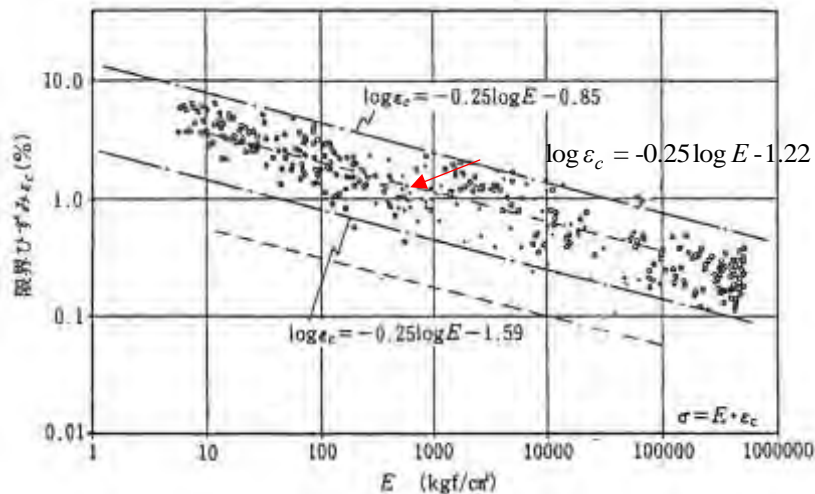


図 3.3.4-3 限界ひずみと弾性係数の関係[20]

表 3.3.4-1 深成岩および新第三紀堆積岩の限界せん断ひずみ

	深成岩	新第三紀堆積岩
限界ひずみ (ε_0)	0.243%	0.438%
限界せん断ひずみ (γ_0)	0.304%	0.570%

(3) 支保工応力度

支保工については、掘削解析の場合、NUMO の参考値に基づいて、吹付けコンクリートの応力評価基準 19.4MPa および鋼製支保工の降伏応力 440MPa 以下であれば支保工の安定性は確保さ

れる条件とした。長期力学解析に対しては、吹付けコンクリートの設計基準強度 36MPa を初期強度として、その値からの経時変化を考慮した強度以下であれば支保工の安定性は確保される条件とした。ここでは、吹付けコンクリートの設計基準強度は 400 年後、初期値の 1/100 になると仮定し、線形補間による強度低下を考慮した値を応力評価基準とした。

3.3.5 力学的影響現象解析

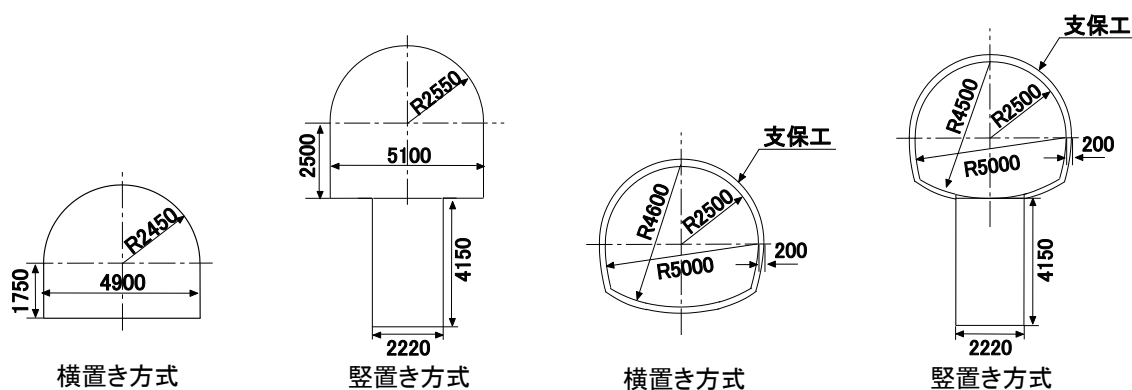
(1) 掘削解析

長期力学解析に先立ち、長期力学解析における初期応力状態を設定するために、人工バリア定置前の処分坑道および処分孔の掘削解析を実施した。掘削解析は、第 2 次取りまとめで実施された方法に従い、Mohr-Coulomb の破壊規準に従う完全弾塑性モデルを採用し、横置き方式の処分坑道においては 2 次元解析にて、縦置き方式の処分坑道においては 3 次元解析にて検討を行った。掘削解析には有限差分法による解析コードである FLAC3D (Itasca 社) を用いた。

1) 坑道形状および支保工仕様

坑道形状および寸法は、図 3.3.5-1 のように設定した。深成岩は、基本的に、肌落ち防止などの作業安全性の観点から吹付けコンクリートの施工が必要となるが、構造部材としては考えないこととし、解析においては考慮しない（解析は無支保とする）こととした。

新第三紀堆積岩は、吹付けコンクリートの厚さを 20cm、鋼製支保工を H-154×151×8×12 とし、材質は HT590 とした。また、鋼製支保工の設置間隔は L=1.0m とした。



(a)深成岩

(b)新第三紀堆積岩

図 3.3.5-1 坑道形状および寸法 (図 3.3.2-1 を再掲載)

2) 岩盤物性値

岩盤物性は、表 3.3.5-1、表 3.3.5-2 に示す値を用い、検討深度は深成岩が 1,000m、新第三紀堆積岩が 500m とした。また、初期応力と地山強度比は表 3.3.5-3 のようになる。初期応力は坑道の天端での値となるように設定した。

表 3.3.5-1 深成岩の解析用物性値

深成岩	単位	
単位体積重量 ρ	kN/m ³	26.2
弾性係数E	MPa	37,000
ポアソン比 ν	-	0.25
粘着力c	MPa	15
内部摩擦角 ϕ	°	45
限界せん断ひずみ	%	0.304
処分深度	m	1000
側圧係数	-	1

表 3.3.5-2 新第三紀堆積岩の解析用物性値

新第三紀堆積岩	単位	
単位体積重量 ρ	kN/m ³	21.6
弾性係数E	MPa	3,500
ポアソン比 ν	-	0.3
粘着力c	MPa	3
内部摩擦角 ϕ	°	28
限界せん断ひずみ	%	0.570
処分深度	m	500
側圧係数	-	1.07

表 3.3.5-3 初期応力と地山強度比

物性区分(略称)	深成岩	新第三紀堆積岩
処分深度(m)	1,000	500
側圧係数 K_0	1	1.07
単位体積重量 ρ (kN/m ³)	26.2	21.6
初期鉛直応力 σ_v (MPa)	26.2	10.8
初期水平応力 σ_h (MPa)	26.2	11.56
一軸圧縮強度 σ_c (MPa)	115	15
地山強度比 σ_c / σ_{max}	4.4	1.3
弾性波速度 V_p (km/sec)	5	2.5

3) 解析手順

解析手順を深成岩のケースについては表 3.3.5-4 に、新第三紀堆積岩のケースについては表 3.3.5-5 に示す。ここで、表 3.3.5-5 に示す堅置き方式の STEP4 の吹付けコンクリートの弾性係数は処分坑道の吹付けコンクリートの弾性係数を示すものであり、処分孔掘削時点での処分坑道の吹付けコンクリートの材齢を考慮して 28 日強度における吹付けコンクリートの弾性係数を設定した。なお、初期応力は側圧係数を考慮した初期応力値を解析モデルの格子点に与える方法によって設定した。

表 3.3.5-4 深成岩の解析手順

	横置き方式	縦置き方式
STEP 1	坑道掘削 (掘削解放率100%)	坑道掘削 (掘削解放率100%)
STEP 2	—	処分孔掘削 (掘削解放率100%)

表 3.3.5-5 新第三紀堆積岩の解析手順

	横置き方式	縦置き方式
STEP 1	坑道掘削 (掘削解放率65%)	坑道掘削 (掘削解放率65%)
STEP 2	支保工の設置	支保工の設置 ※吹付けコンクリートの 弾性係数は4,800MPa
STEP 3	坑道掘削 (掘削解放率35%)	坑道掘削 (掘削解放率35%)
STEP 4	—	処分孔掘削 (掘削解放率100%) ※吹付けコンクリートの 弾性係数は29,600MPa

4) 解析モデル

処分坑道横置き方式は、2次元弾塑性解析にて、処分坑道縦置き方式は、3次元弾塑性解析にて検討を行う。

深成岩の縦置き方式の解析モデルを図 3.3.5-2 に示す。要素は3次元モデルではソリッド要素、2次元モデルでは平面ひずみ要素を用いた。3次元モデルの要素数は 62,844、節点数は 70,276 である。解析領域の水平方向は 5m、鉛直方向は 39.8m、坑道延長方向は 2.22m とした。

深成岩の横置き方式の解析モデルを図 3.3.5-3 に示す。要素は平面ひずみ要素を用いた。要素数は 4,229、節点数は 4,359 である。解析領域の水平方向は 7m、鉛直方向は 33.6m とした。

新第三紀堆積岩の縦置き方式の解析モデルを図 3.3.5-4 に示す。要素は3次元モデルではソリッド要素、2次元モデルでは平面ひずみ要素を用いた。3次元モデルの要素数は 88,429、節点数は 97,037 である。解析領域の水平方向は 6m、鉛直方向は 41.3m、坑道延長方向は 3.33m とした。

新第三紀堆積岩の横置き方式の解析モデルを図 3.3.5-5 に示す。要素は平面ひずみ要素を用いた。要素数は 3,724、節点数は 3,847 である。解析領域の水平方向は 6m、鉛直方向は 37.4m とした。

各モデルとも、モデル境界は 3D とし、境界条件はモデル側面および上下面はそれぞれの面に対し垂直方向の変位を固定とした。

支保工については、吹付けコンクリートを 2次元解析では平面ひずみ要素、3次元解析ではソ

リッド要素、鋼製支保工をビーム要素でそれぞれモデル化した。吹付けコンクリートは厚さ 20cm を 2 層でモデル化した。

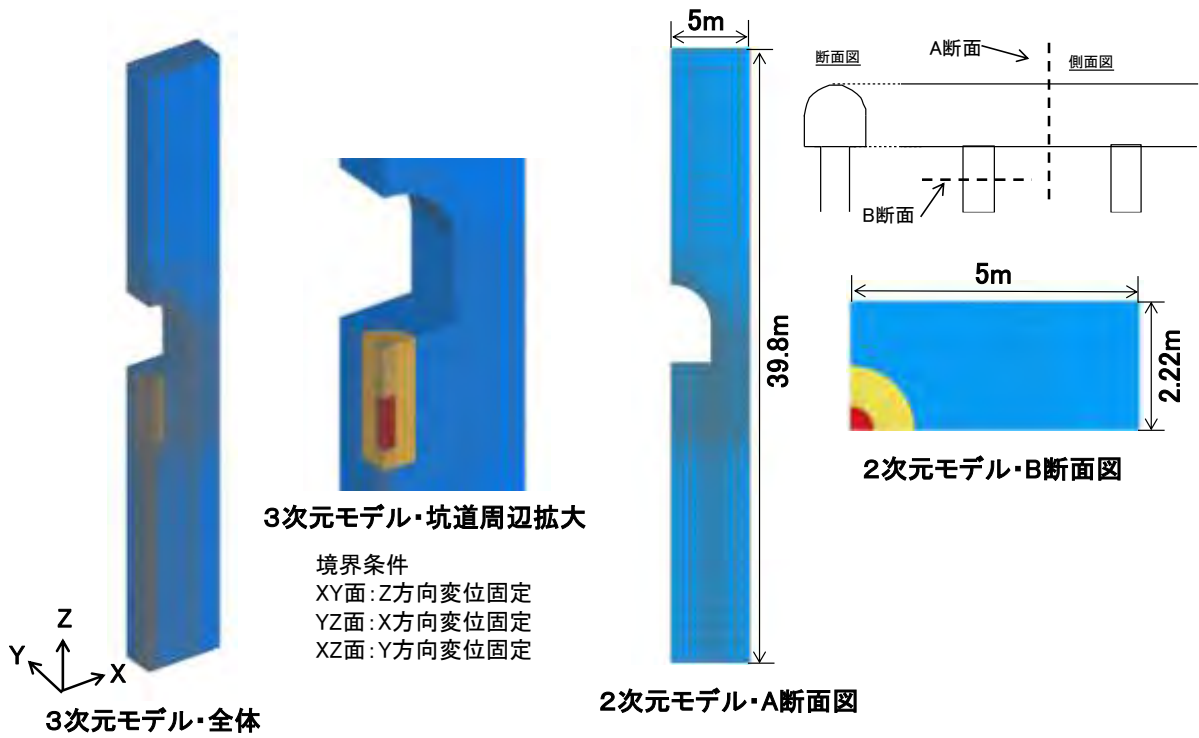


図 3.3.5-2 深成岩・縦置き方式の解析モデル

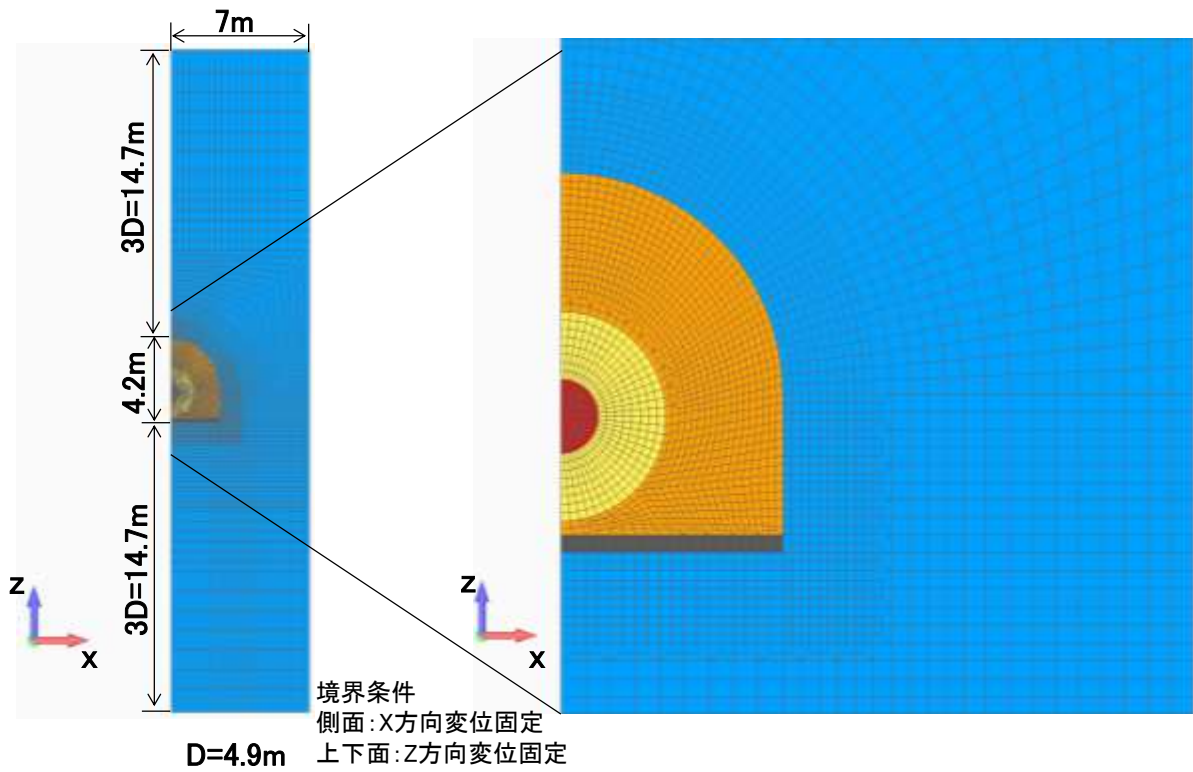


図 3.3.5-3 深成岩・横置き方式の解析モデル

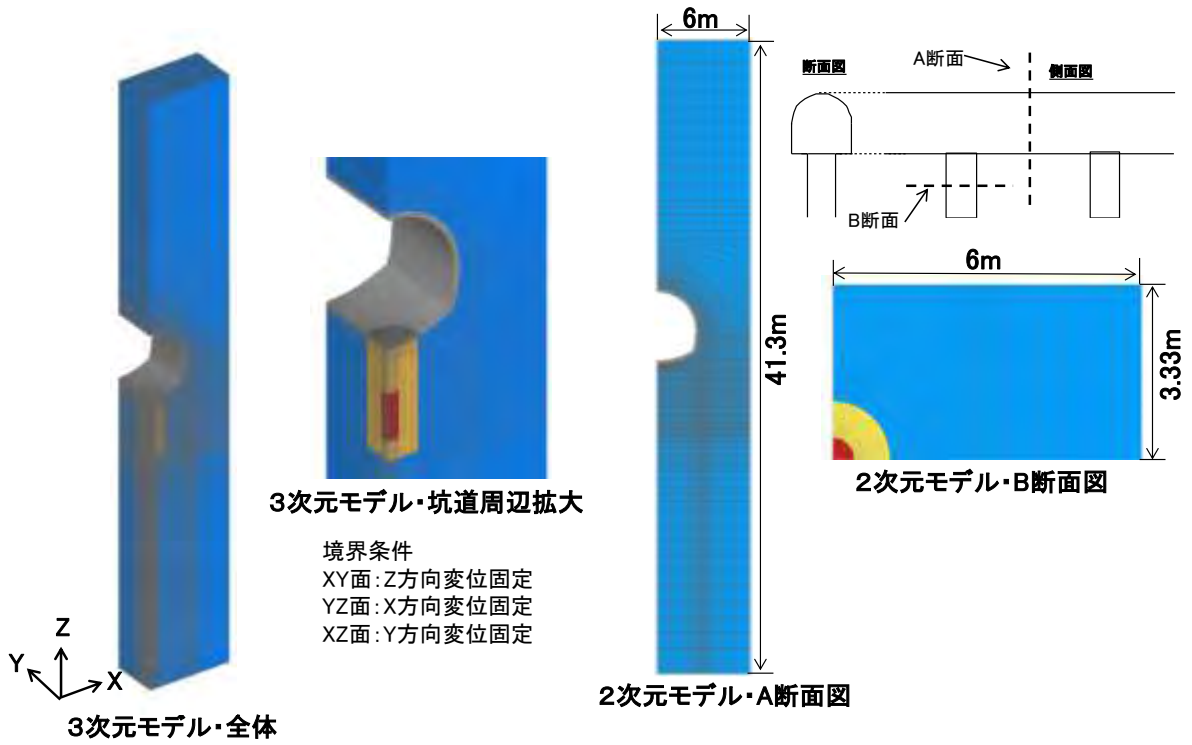


図 3.3.5-4 新第三紀堆積岩・豎置き方式の解析モデル

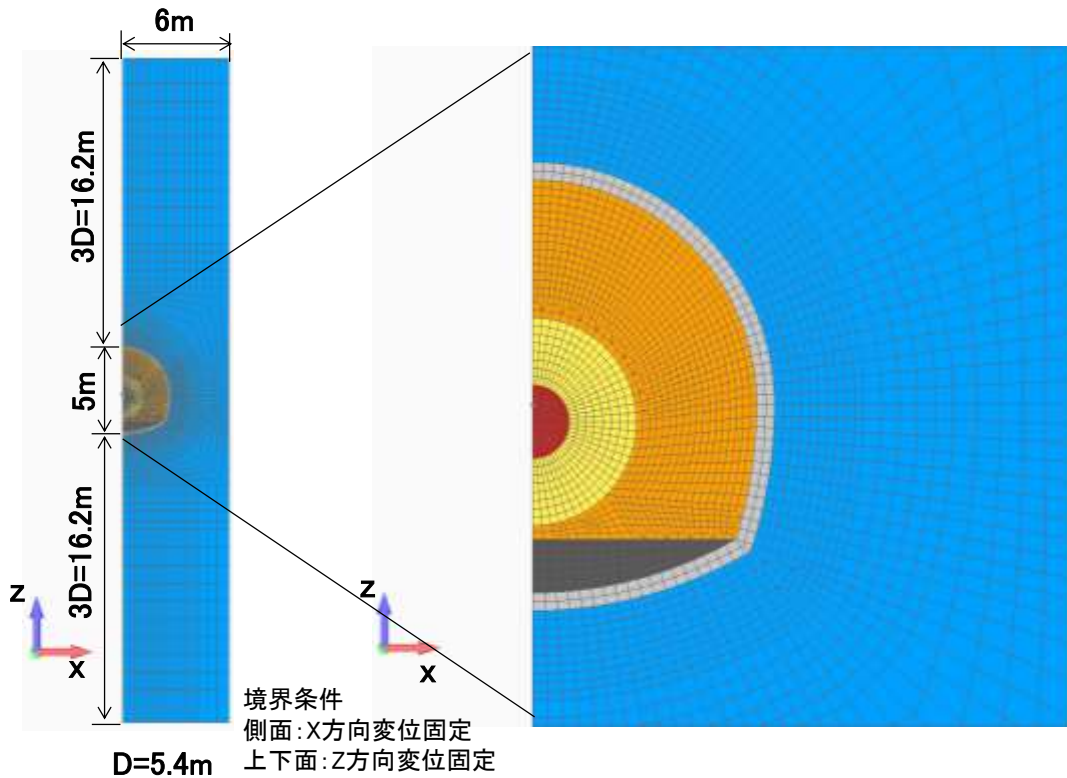


図 3.3.5-5 新第三紀堆積岩・横置き方式の解析モデル

吹付けコンクリートの物性値を表 3.3.5-6、鋼製支保工の物性値を表 3.3.5-7 に示す。支保工の

物性については、NUMO の参考値に基づき、吹付コンクリートについては、吹付厚低減のため、高強度コンクリートを、鋼製支保工は H 形鋼の一般的な材質である HT590 を適用した。

吹付コンクリートの設計基準強度は吹付コンクリート指針（案）〔トンネル編〕〔21〕に、単位体積重量とポアソン比はコンクリート標準示方書〔設計編〕〔22〕に各々示されている高強度コンクリートの物性値を設定した。弾性係数（若材齢）は山岳トンネル設計施工標準・同解説〔18〕に示されている設計基準強度 18 MPa の時の弾性係数（若材齢）の 3400 MPa に対して、鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説〔23〕に示されている設計基準強度の比率の 0.5 乗に比例するように弾性係数を補正する方法を適用して設定した。弾性係数（28 日強度）はコンクリート標準示方書〔設計編〕〔22〕に示されている設計基準強度と弾性係数の関係から、回帰式により設計基準強度 36 MPa に相当する弾性係数を算出して設定した。

鋼製支保工の呼称寸法、断面積、断面二次モーメント、断面係数はトンネル標準示方書「山岳工法編」・同解説〔24〕に示されている HT590 の物性値を設定した。また、単位体積重量、ポアソン比、弾性係数はコンクリート標準示方書〔設計編〕〔22〕に示されている HT590 の物性値を設定した。

表 3.3.5-6 吹付けコンクリートの物性値

項目	物性値
設計基準強度	36MPa
単位体積重量	23.0kN/m ³
弾性係数(若材齢)	4,800MPa
弾性係数(28日強度)	29,600MPa
ポアソン比	0.20

表 3.3.5-7 鋼製支保工の物性値

項目	物性値
規格	HT590
呼称寸法	H-154×151×8×12
断面積	47.19cm ²
断面二次モーメントIx	2000cm ⁴
断面計数Zx	260cm ³
単位体積重量	77kN/m ³
ポアソン比	0.3
弾性係数	2×10 ⁵ MPa
奥行きピッチ	1.0m

長期力学挙動解析用の 2 次元解析メッシュの切り出し位置を図 3.3.5-6 に示す。A 断面は処分孔間の中間位置、B 断面は処分孔の高さの 1/2 の位置とした。

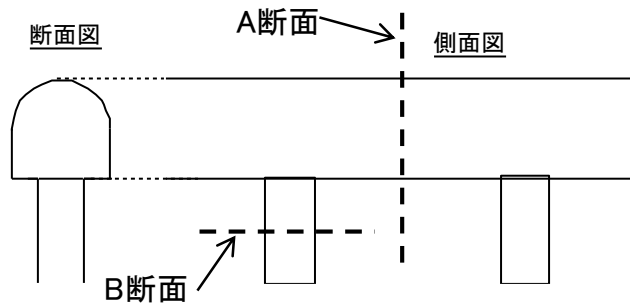
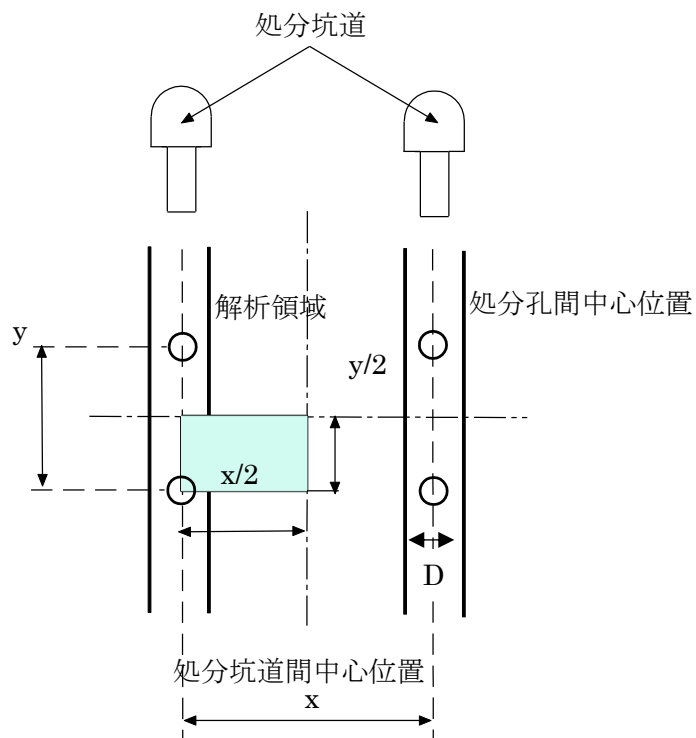


図 3.3.5-6 縦置き方式の2次元解析メッシュの切り出し位置

解析モデルの領域を図 3.3.5-7 に示す。解析領域の寸法は、NUMO 殿の今後の検討と整合をとるために提供いただいた参考値（以下、「参考値」と呼ぶ）に基づいて設定した。



- ① 深成岩・縦置き : $x=2D(10m), y=2d(4.44m)$
- ② 新第三紀堆積岩・縦置き : $x=2.4D(12m), y=3d(6.66m)$
- ③ 深成岩・横置き : $x=2.85D(14m)$
- ④ 新第三紀堆積岩・横置き : $x=2.4D(12m)$

図 3.3.5-7 解析モデルの領域

横置き方式の処分坑道内部の各材料の形状、寸法を図 3.3.5-8 に、豎置き方式の処分孔内部の各材料の形状、寸法を図 3.3.5-9 にそれぞれ示す。ここで、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。

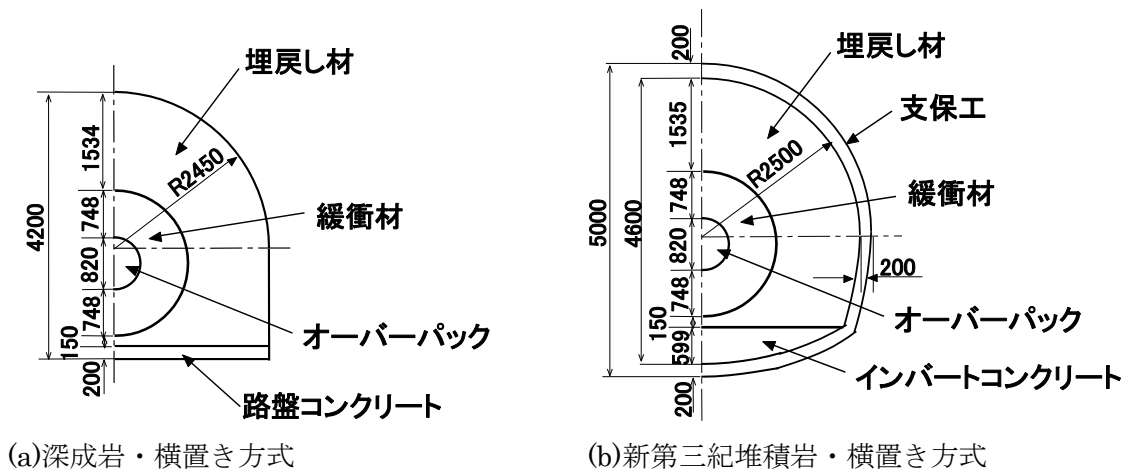


図 3.3.5-8 処分坑道内部のモデル化

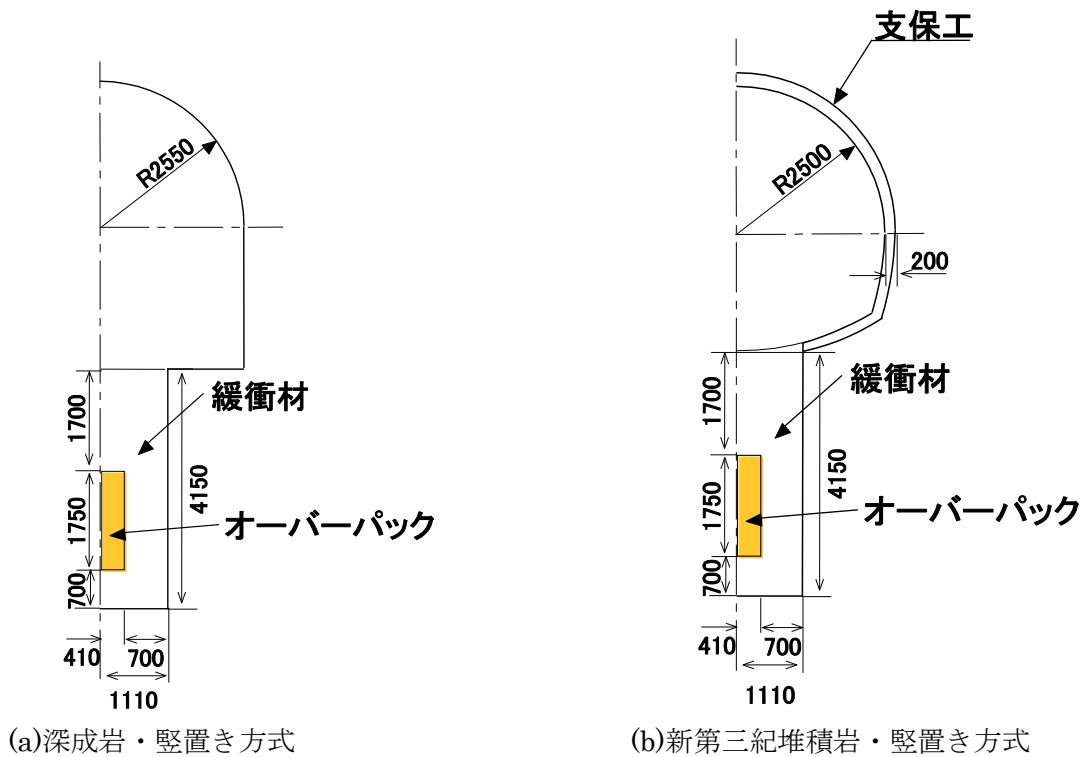


図 3.3.5-9 処分孔内部のモデル化

5) 解析結果

掘削解析で得られた解析結果として、深成岩の場合は処分坑道周辺岩盤の局所安全率の分布、周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布を、新第三紀堆積岩の場合はそれらの図に吹付けコンクリートの応力分布と鋼製支保工の応力分布を加えて整理した。各ケースの解析結果を図 3.3.5-10～図 3.3.5-19 に示す。

各ケースともに、周辺岩盤では、局所安全率 $F_s=1.2$ の領域は坑道径の 20%以下を満足する結果となった。また、最大せん断ひずみが限界せん断ひずみ（深成岩の場合は 0.304%、新第三紀堆積岩の場合は 0.570%）を超過する領域は、坑道掘削径 D の 20%以下であった。吹付けコンクリートの応力は応力評価基準である 19.4 MPa 以下を満足した。鋼製支保工の応力についても、評価基準である降伏点強度 440MPa 以下を満足した。

以上の解析結果から、坑道掘削時の安定性は確保されていると考えられる。

掘削径 D の 20% の領域

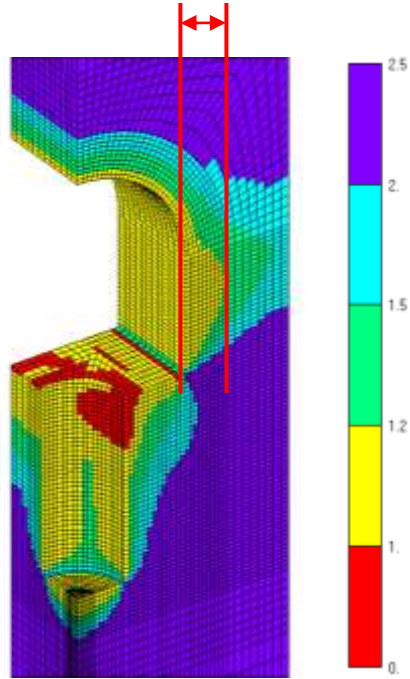


図 3.3.5-10 局所安全率の分布 (深成岩・縦置き方式)

掘削径 D の 20% の領域

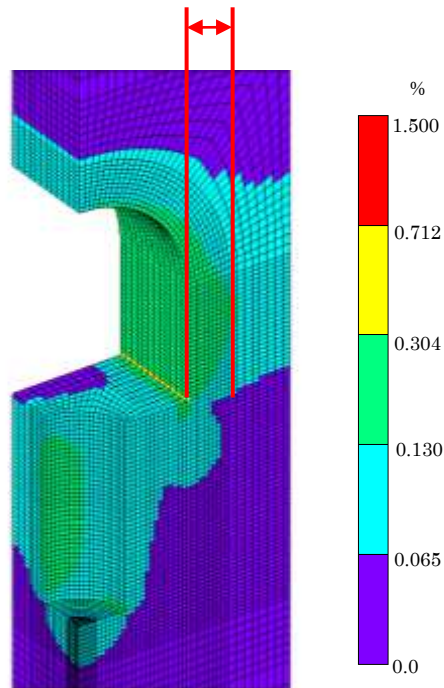


図 3.3.5-11 最大せん断ひずみの分布 (深成岩・縦置き方式)

掘削径 D の 20%の領域

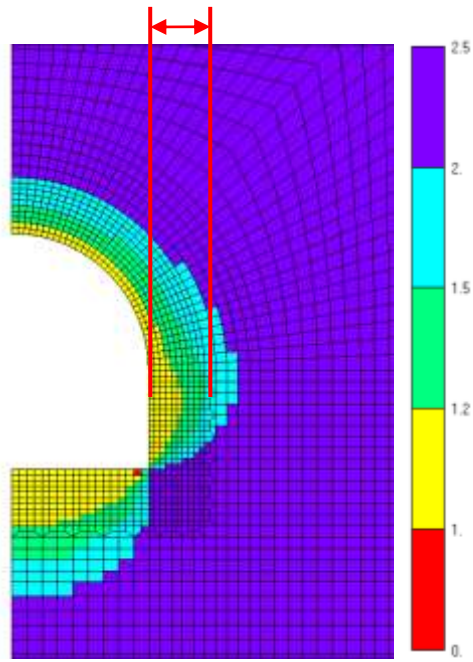


図 3.3.5-12 局所安全率の分布 (深成岩・横置き方式)

掘削径 D の 20%の領域

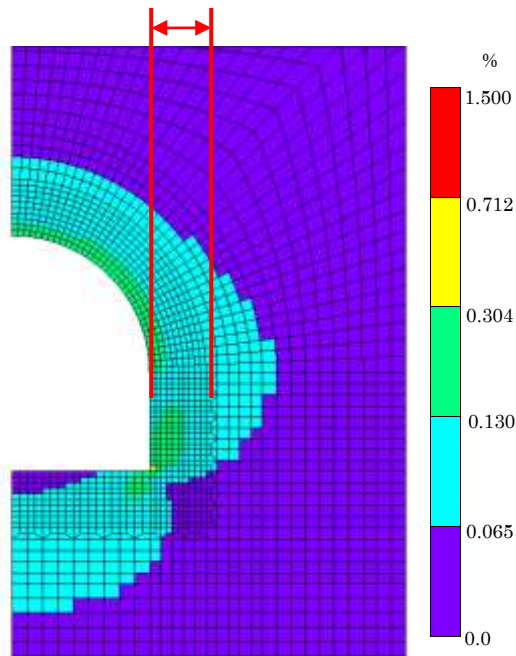


図 3.3.5-13 最大せん断ひずみの分布 (深成岩・横置き方式)

掘削径 D の 20% の領域

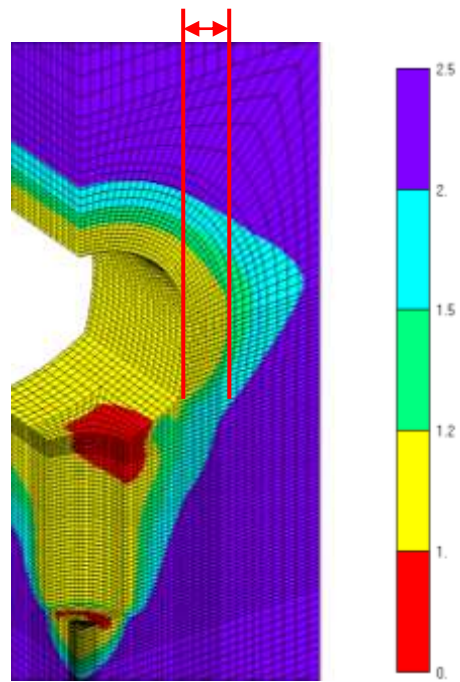


図 3.3.5-14 局所安全率の分布 (新第三紀堆積岩・豎置き方式)

掘削径 D の 20% の領域

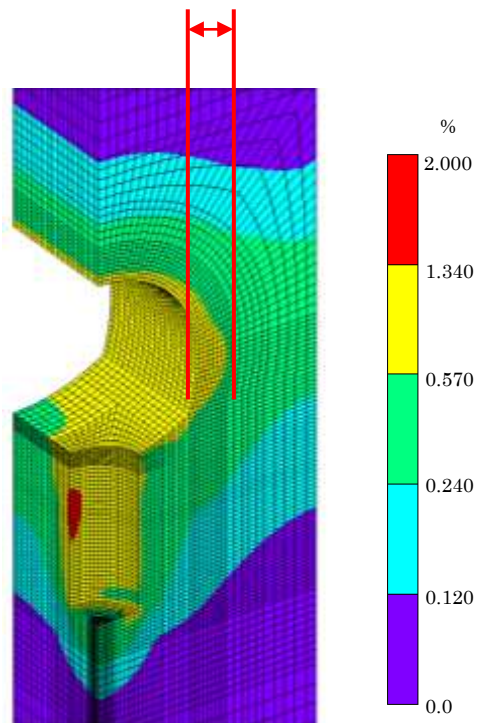


図 3.3.5-15 最大せん断ひずみの分布 (新第三紀堆積岩・豎置き方式)

掘削径 D の 20% の領域

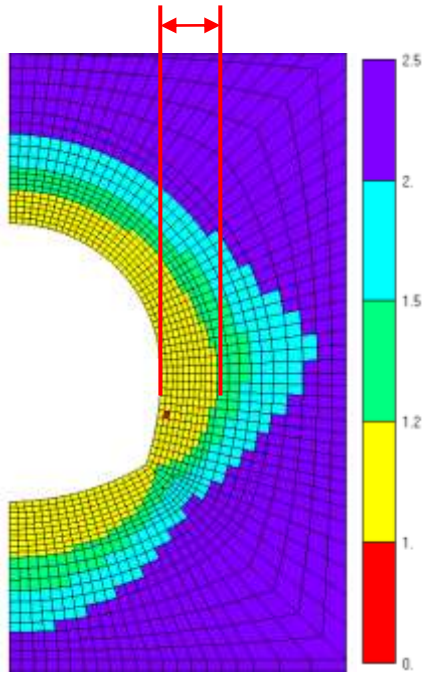


図 3.3.5-16 局所安全率の分布 (新第三紀堆積岩・横置き方式)

掘削径 D の 20% の領域

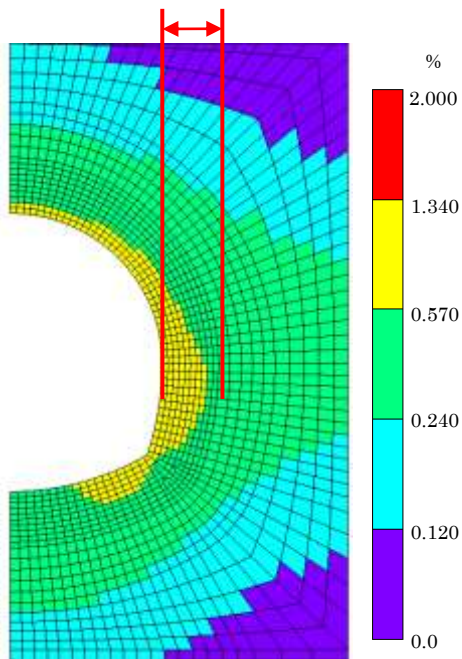


図 3.3.5-17 最大せん断ひずみの分布 (新第三紀堆積岩・横置き方式)

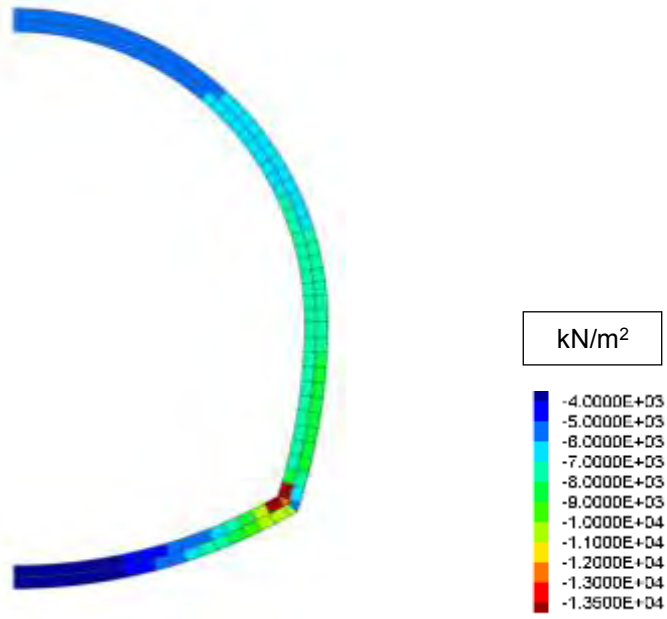


図 3.3.5-18 吹付けコンクリートの応力分布（新第三紀堆積岩・横置き方式）

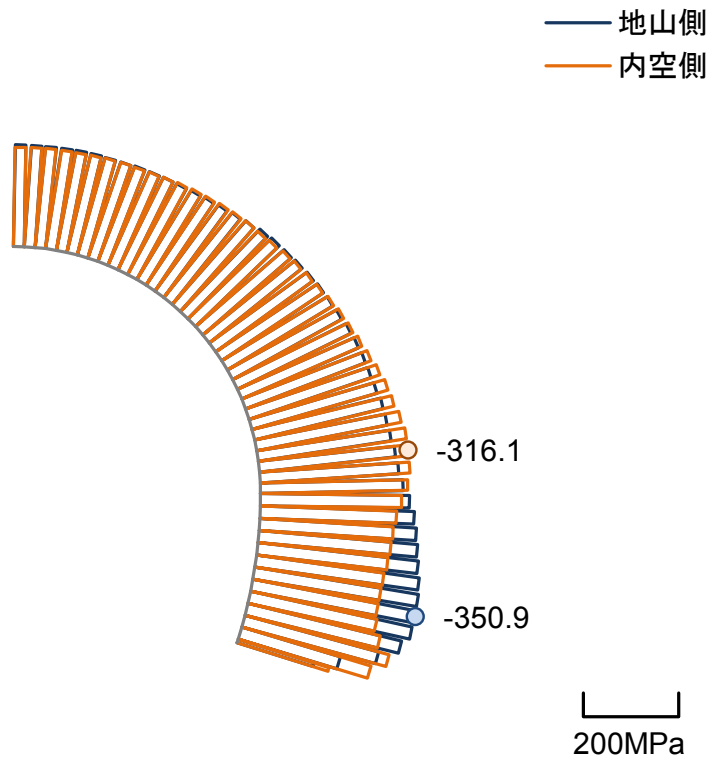


図 3.3.5-19 鋼製支保工の応力分布（新第三紀堆積岩・横置き方式）

(2) 長期力学解析

前述の掘削解析から得られた初期応力状態を用いて、処分坑道および処分孔の長期力学解析を実施した。3.3.3 で述べたように、岩盤をコンプライアンス可変型モデル、支保工、緩衝材、オーバパック、裏込め材を弾性体とし、物性の経時変化を考慮にいたした有限要素法による解析コードにより、2次元平面ひずみモデルの解析を実施した。

1) 有限要素法解析コードの検証

岩盤のコンプライアンス可変型モデルを組み込んだ有限要素法解析コードが妥当であることを検証するため、第2次取りまとめで行われた長期構造力学安定性検討と同様の解析条件による解析を行った。表 3.3.5-8 に示す第2次取りまとめにおける岩盤物性値を用い、硬岩系岩盤と軟岩系岩盤の2つのデータについて、本解析コードを用いて解析を行った。なお、破壊規準は、第2次取りまとめと同様、Janach の破壊規準を用いた。解析対象は、横置き方式における処分坑道で、解析上は支保を考慮せず、支保のための余掘りを考慮して内径 2.8m としている。処分坑道に定置される緩衝材は弾性体とし、物性は表 3.3.5-9 に示す値を用いた。解析モデルを図 3.3.5-20 に示す。

表 3.3.5-8 解析に用いた岩盤物性[6]

物性区分 (略称)	硬岩系岩盤	軟岩系岩盤
	HR	SR-C
処分深度 [m]	1000	500
側圧係数 K_0 [-]	1.0	1.07
初期鉛直応力 σ_v [MPa]	26.7	11
初期水平応力 σ_h [MPa]	26.7	11.8
n_0^* [-]	30	20
m^* [-]	20	5

表 3.3.5-9 解析に用いた緩衝材物性[6]

	ケナール V1:ケイ砂=7:3 ケイ砂 3号:5号=1:1
乾燥密度 ρ_d [Mg m ⁻³]	1.60
弾性係数 E_{50} [MPa]	3($\omega=22\%$)
ポアソン比 ν [-]	0.4

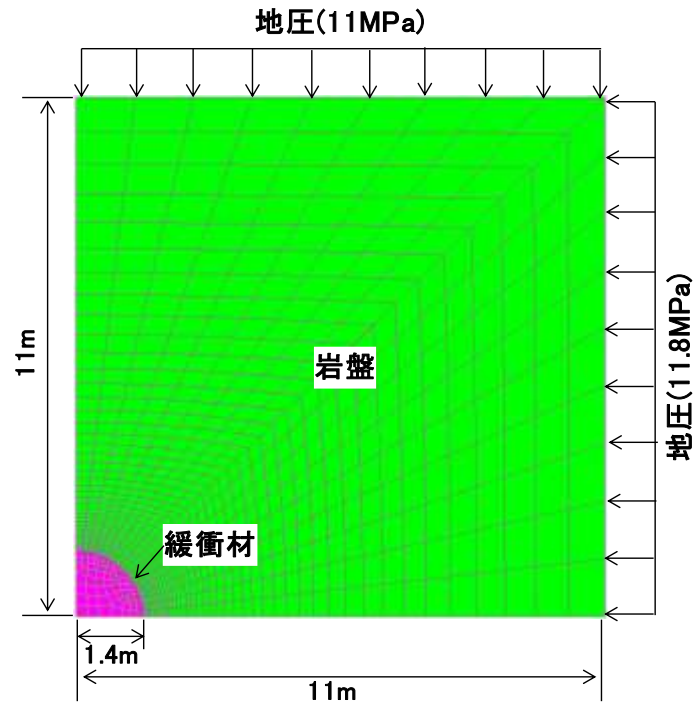


図 3.3.5-20 処分坑道の長期構造力学安定性の検討における解析モデル

軟岩系岩盤の処分坑道の変位の解析結果を表 3.3.5-10 に、変形量の経時変化の比較を図 3.3.5-21 に示す。軟岩系岩盤の場合は時間とともにクリープ変形が進行しており、1 万年後の変形量は第 2 次取りまとめの結果と本解析コードによる計算結果はほぼ一致しており、同様のクリープ挙動を表現できている。硬岩系岩盤については、クリープによる変形がほとんどなく、ほぼ掘削時の弾性変形のみであり両者の結果に差はないことを確認している。

以上より、本検討で用いる有限要素法解析コードは妥当であることを検証した。

表 3.3.5-10 変位の解析結果

時間 (年)	岩種	測点	解析結果 (mm)	
			第 2 次取りまとめ	本解析コード
0	硬岩系	天端	1.5	1.5
		側壁	1.5	1.5
	軟岩系	天端	7.8	7.8
		側壁	9.0	9.0
10,000	硬岩系	天端	1.5	1.5
		側壁	1.5	1.5
	軟岩系	天端	29.6	31.1
		側壁	24.9	24.8

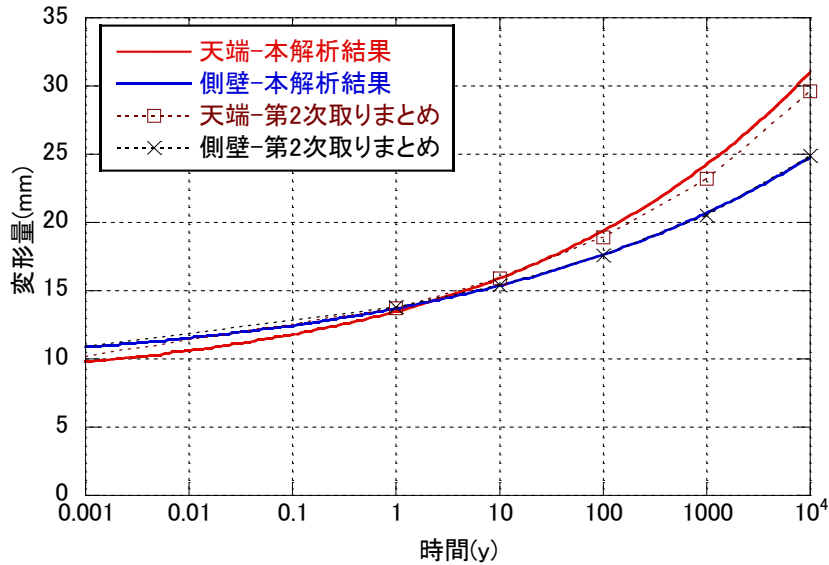


図 3.3.5-21 変位の経時変化の比較 (軟岩系岩盤)

2) 解析対象期間

解析対象期間は、坑道掘削後 10,000 年間とする。処分坑道の掘削直後から周辺岩盤のクリープ変形は始まるものとし、それが続くものとした。支保工は、坑道掘削直後に設置するものとして、設置直後から劣化は始まるものとした。掘削後 400 年まで劣化は進行し、その後の剛性は一定となるものとした。ここで、支保工は、吹付けコンクリートと鋼製支保工で構成され、両者とも同様な剛性低下を示すものと仮定した。

緩衝材、オーバーパック、裏込め材は掘削後 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るものとして、設置後 100 年間で飽和が完了するものとした。事象と経年変化の概念を図 3.3.5-22 に示す。

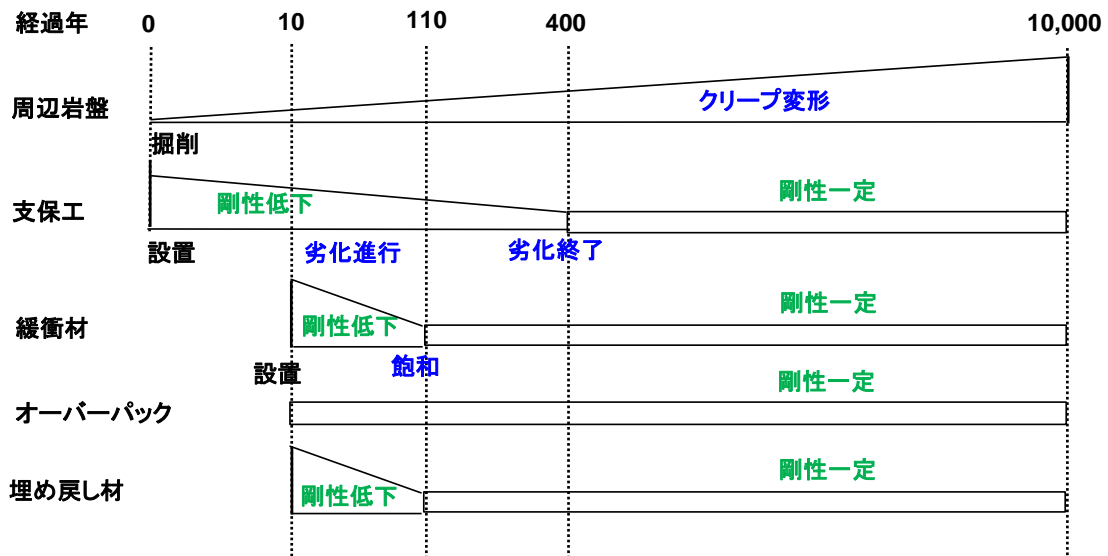


図 3.3.5-22 事象と経年変化の概念

3) 検討ケース

検討ケースは岩盤条件、坑道断面および表 3.3.5-11 に示す回収可能性維持の状態オプションを組み合わせ、表 3.3.5-12 に示す 8 ケースを設定した。なお、豎置き方式は、処分坑道のみを対象とした解析（図 3.3.5-6 の A 断面）と処分孔を対象とした解析（図 3.3.5-6 の B 断面）の 2 種類の 2 次元解析（平面ひずみ状態）の組合せで 3 次元挙動を評価する。

表 3.3.5-11 回収可能性維持の状態オプション

	回収可能性維持の状態オプション	説明	概念図
豎置き方式	①	<ul style="list-style-type: none"> ・処分孔に緩衝材が定置され、オーバーパックが緩衝材上に定置されている ・オーバーパック表面が部分的に露出している 	
	②	<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 ・処分孔上部に膨出抑え蓋などが設置されている 	
	③	<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 ・処分坑道端部にプラグが設置されている 	
横置き方式	①	・処分坑道の埋め戻し材を設置せず	
	②	・処分坑道を埋め戻し、他の坑道は開放	
	③	・アクセス坑道のみ開放	

表 3.3.5-12 検討ケース

ケース	岩盤条件	坑道断面	回収可能性維持の状態オプション
1	深成岩	縦置き方式	②処分孔に緩衝材設置
2	深成岩	縦置き方式	③処分坑道まで埋め戻し
3	深成岩	横置き方式	①処分坑道に PEM 設置
4	深成岩	横置き方式	②処分坑道まで埋め戻し
5	新第三紀堆積岩	縦置き方式	②処分孔に緩衝材設置
6	新第三紀堆積岩	縦置き方式	③処分坑道まで埋め戻し
7	新第三紀堆積岩	横置き方式	①処分坑道に PEM 設置
8	新第三紀堆積岩	横置き方式	②処分坑道まで埋め戻し

4) 解析用物性値

本検討では、表 3.3.5-1、表 3.3.5-2 で示した岩盤の解析用物性値に加え、クリープ挙動を表現するために、表 3.3.5-13 に示すクリープ解析用物性値を用いた。 n_0 は、ひずみ速度と一軸圧縮強度との関係を表す値、 m は、強度破壊後の応力-ひずみ関係を表す値であり、岩種ごとの粘性挙動および破壊後の挙動を決定する重要な定数である。 n_0 、 m は、クリープ試験、定ひずみ速度試験等から求められるものであるが、ここでは、第 2 次取りまとめの検討結果に基づき、深成岩、新第三紀堆積岩それぞれの n_0 、 m を設定した。なお、破壊規準は掘削解析と同様の Mohr-Coulomb の破壊規準を用いた。

表 3.3.5-13 クリープ解析用物性値

物性区分 (略称)	深成岩	新第三紀堆積岩
n_0	30	20
m	20	5

5) 解析結果

長期力学解析で得られた解析結果をケースごとに以下に示す。ケース 1~ケース 4 は深成岩、ケース 5~ケース 8 は新第三紀堆積岩の結果である。解析結果として、掘削直後、1 年後、10 年後、100 年後、1000 年後、そして 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、最大せん断ひずみの分布、弾性係数の変化の分布、透水係数の変化の分布を図化した。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、透水係数の変化の値は、透水係数 k を

初期透水係数 k_0 で除した値とした。なお、透水係数の変化の分布は新第三紀堆積岩のケースを対象に図化した。

a ケース 1

ケース 1 は、深成岩、豎置き方式、回収可能性維持の状態オプション②のケースである。

➤ A 断面

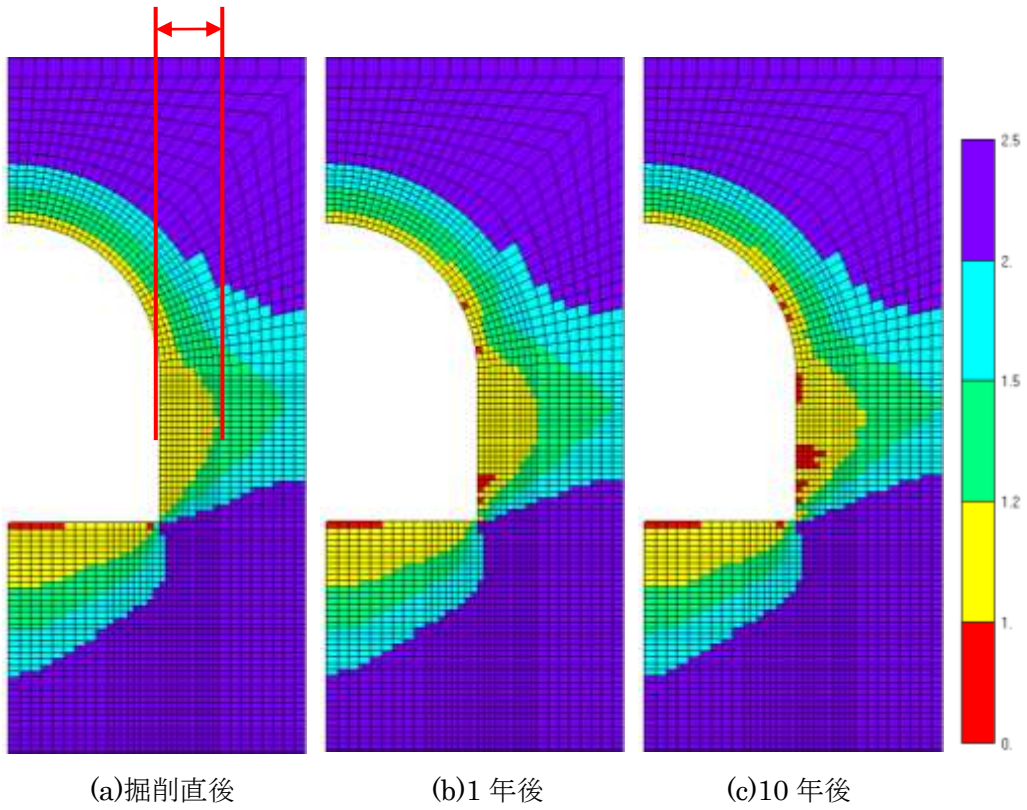
処分坑道周辺岩盤における局所安全率の分布を図 3.3.5-23 に、最大せん断ひずみの分布を図 3.3.5-24 に、弾性係数の変化を図 3.3.5-25 に示す。また、壁面近傍の天端、肩部、側部、脚部、底部の各要素の弾性係数の経時変化を図 3.3.5-26 に示す。

処分坑道周辺岩盤では、局所安全率 $F_s=1.2$ の領域は、掘削直後、坑道掘削径 D の 20%以下を満足する結果となった。

一方、最大せん断ひずみが限界せん断ひずみ (0.304%) を超過する領域 (以下、 $\gamma_{\max}=0.304\%$ 超過領域) は、掘削直後、坑道掘削径 D の 20%以下であり、その後、時間とともに $\gamma_{\max}=0.304\%$ 超過領域は若干広がるが 1 万年後まで坑道掘削径 D の 20%以下の範囲にとどまっている。

図 3.3.5-25 および図 3.3.5-26 より、周辺岩盤は壁面近傍で掘削直後から弾性係数は低下し続け、1 万年後の坑道周辺岩盤の弾性係数は壁面近傍の側部と肩部で初期値の 1~8%程度まで低下したことがわかった。特に、側部で弾性係数の低下領域が岩盤深部まで拡大したが、坑道掘削径 D の 20%以下の領域は超えなかった。また、弾性係数は掘削直後から一貫して低下している。これは、クリープによる変形が、徐々に減少していくが止まることなく継続していることを示している。

掘削径 D の 20%の領域



掘削径 D の 20%の領域

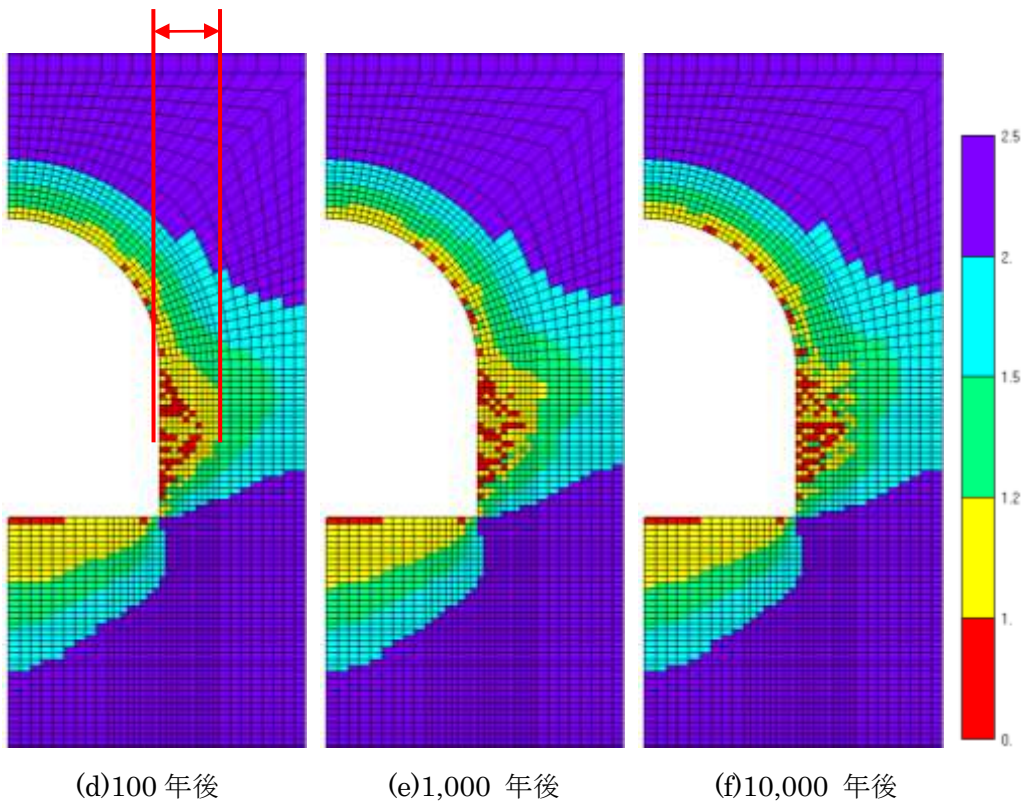
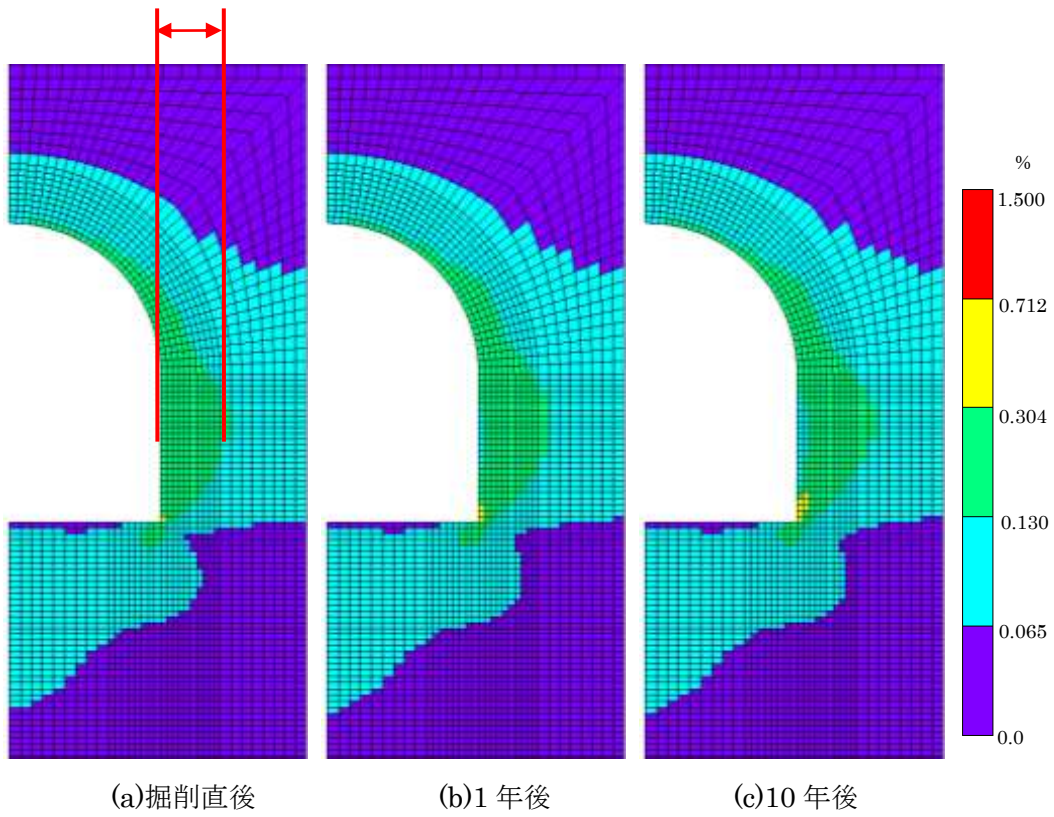


図 3.3.5-23 周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース 1 : A 断面)

掘削径 D の 20% の領域



掘削径 D の 20% の領域

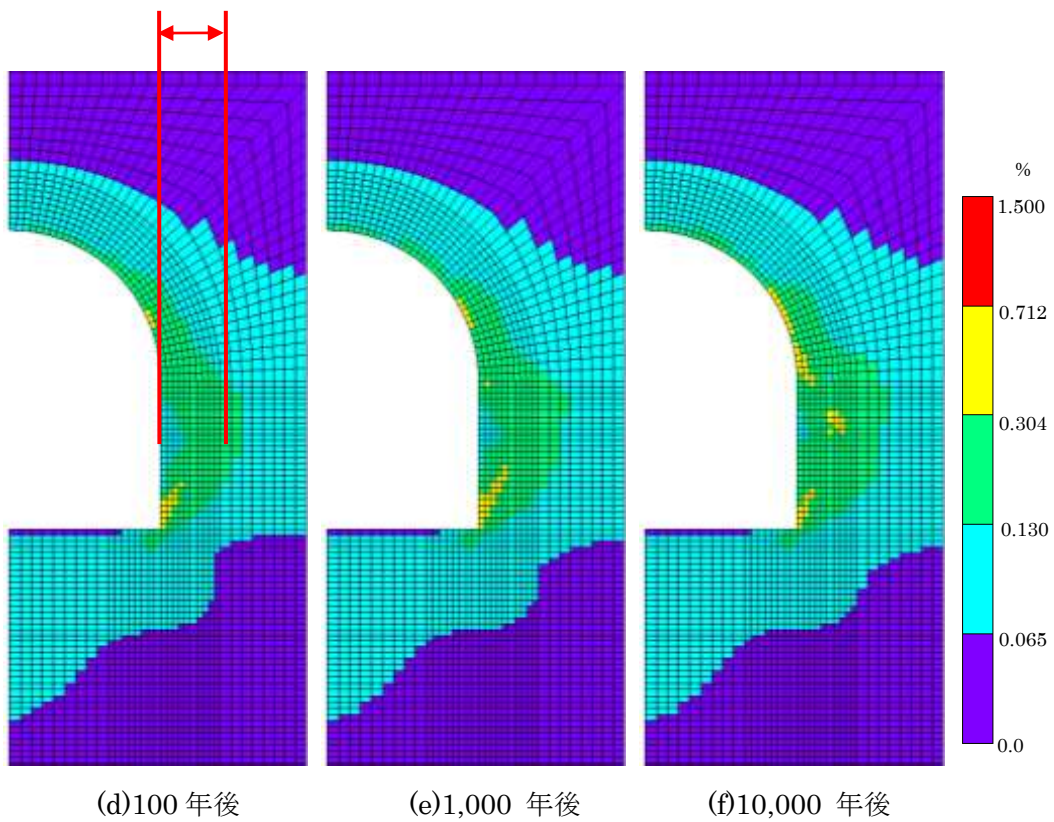
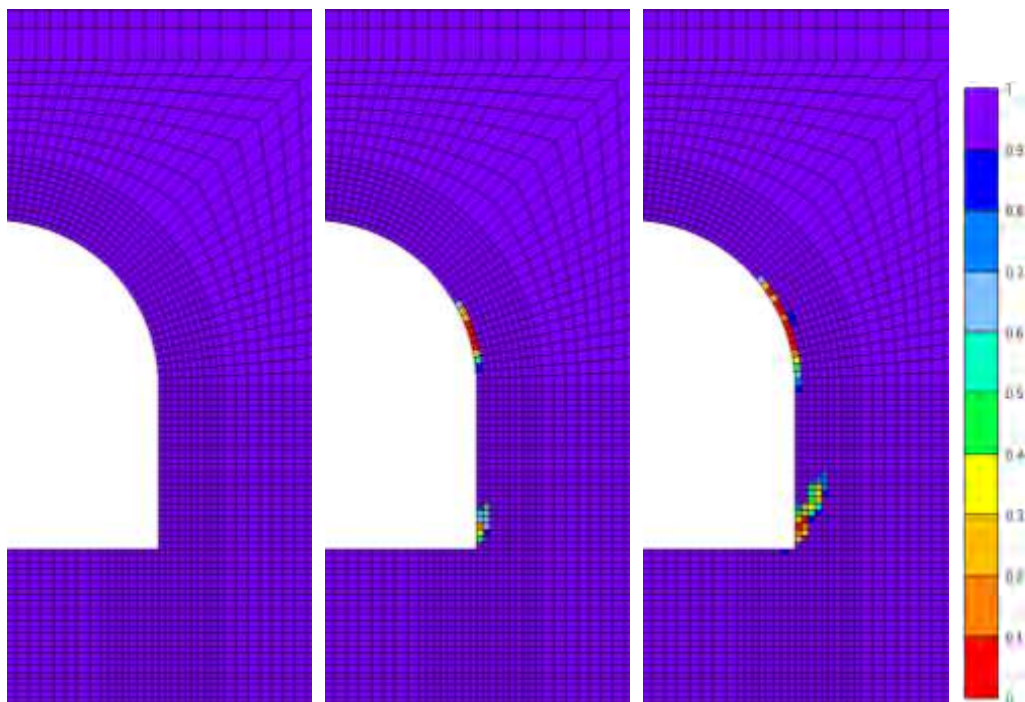


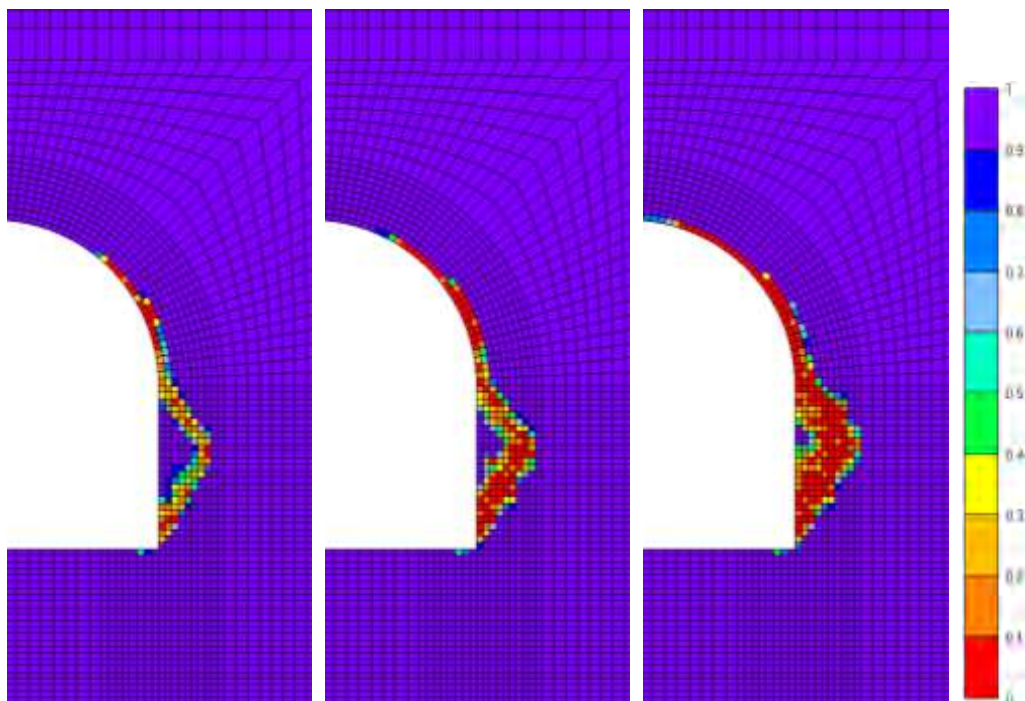
図 3.3.5-24 周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 1 : A 断面)



(a)掘削直後

(b)1年後

(c)10年後

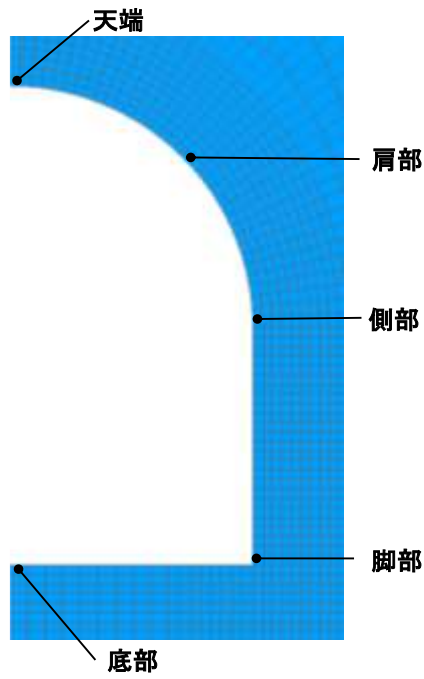


(d)100年後

(e)1,000年後

(f)10,000年後

図 3.3.5-25 周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 1 : A 断面)



着目した壁面近傍の要素

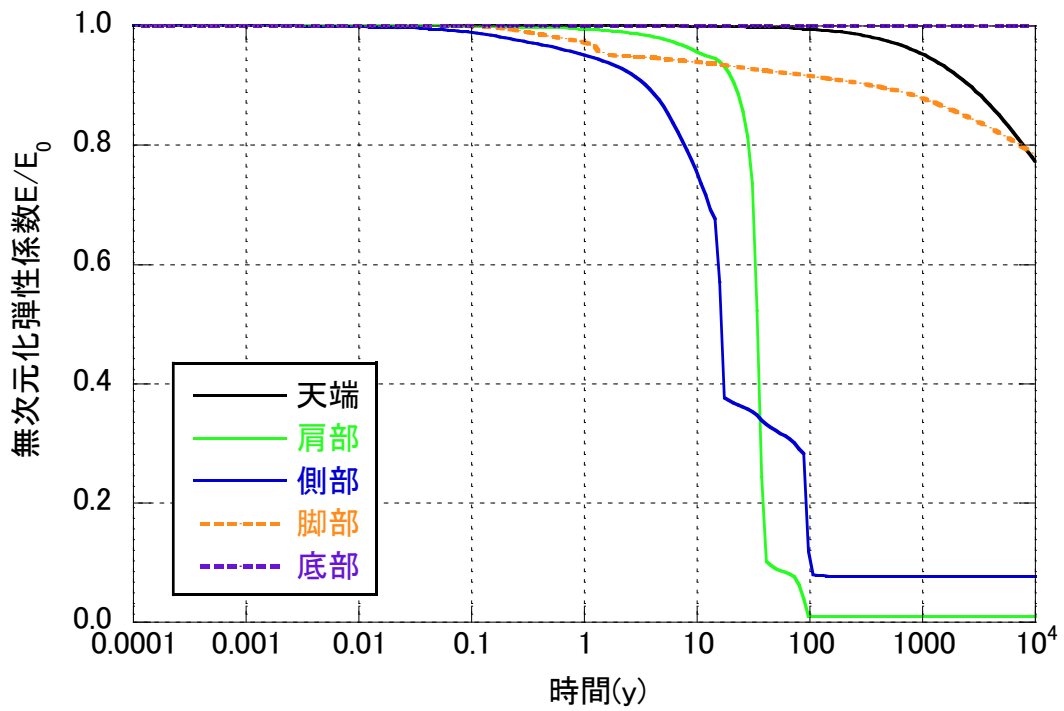


図 3.3.5-26 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 1 : A 断面)

➤ B断面

処分孔周辺岩盤における局所安全率の分布を図 3.3.5-27 に、最大せん断ひずみの分布を図 3.3.5-28 に、弾性係数の変化を図 3.3.5-29 に示す。また、壁面近傍の坑道中央側、45° 方向、坑道側壁側の各要素の弾性係数の経時変化を図 3.3.5-30 に示す。

処分孔周辺岩盤では、局所安全率 $F_s=1.2$ の領域は、掘削直後に処分孔の壁面近傍に生じたが、拡大する傾向は示さなかった。

一方、最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}=0.304\%$ 超過領域は、掘削直後から 1 万年後まで処分孔周辺には発生しなかった。

図 3.3.5-29 および図 3.3.5-30 より、処分孔周辺岩盤は坑道中央側の壁面近傍で掘削直後から弾性係数は低下するが、それ以外の領域では低下しなかった。コンター図では、100 年後に処分孔の坑道中央側に弾性係数の低下領域が発生し、1 万年後に初期値の 6% 程度まで低下したが非常に局所的な領域に限定された。

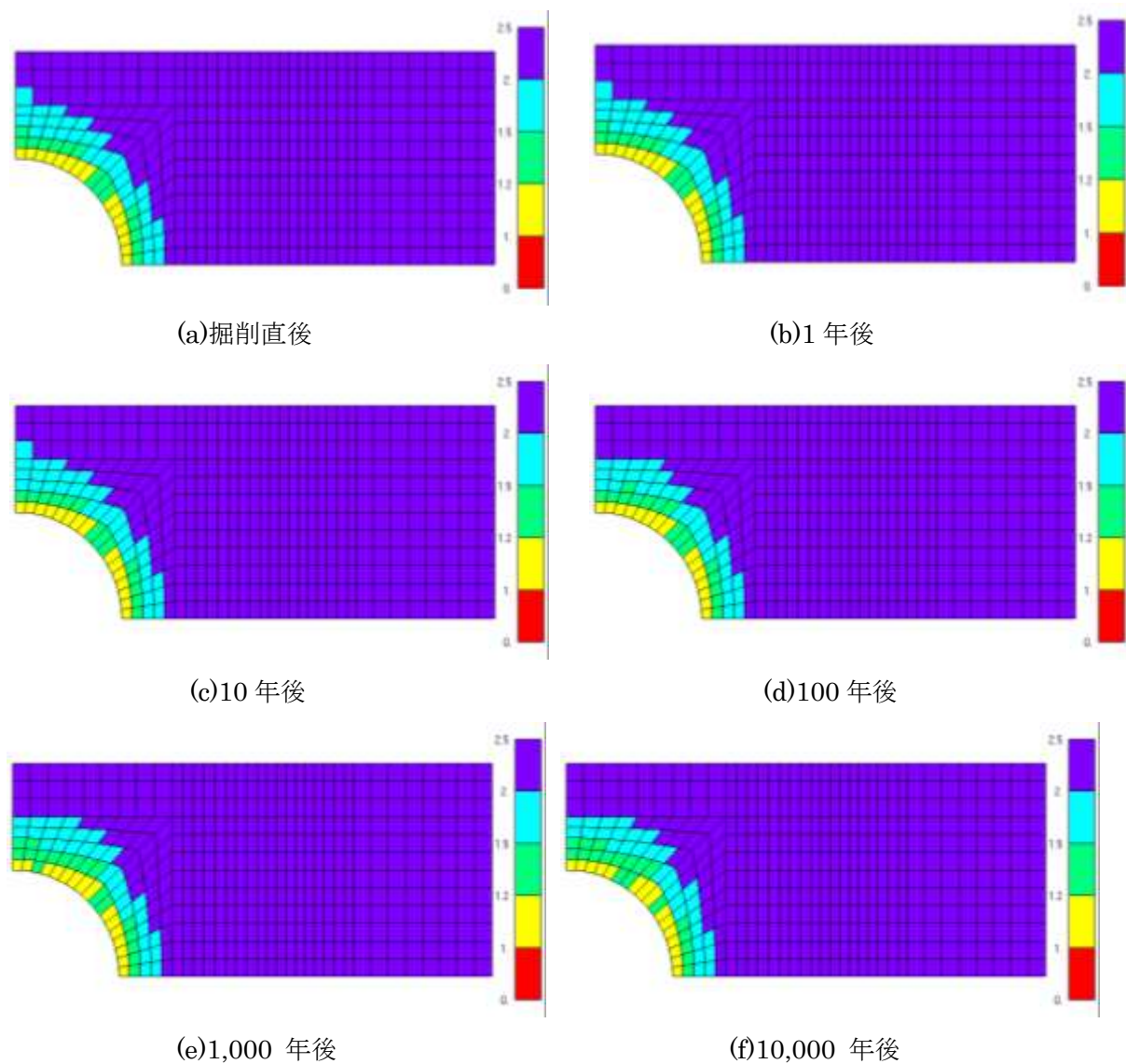


図 3.3.5-27 周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース 1 : B 断面)

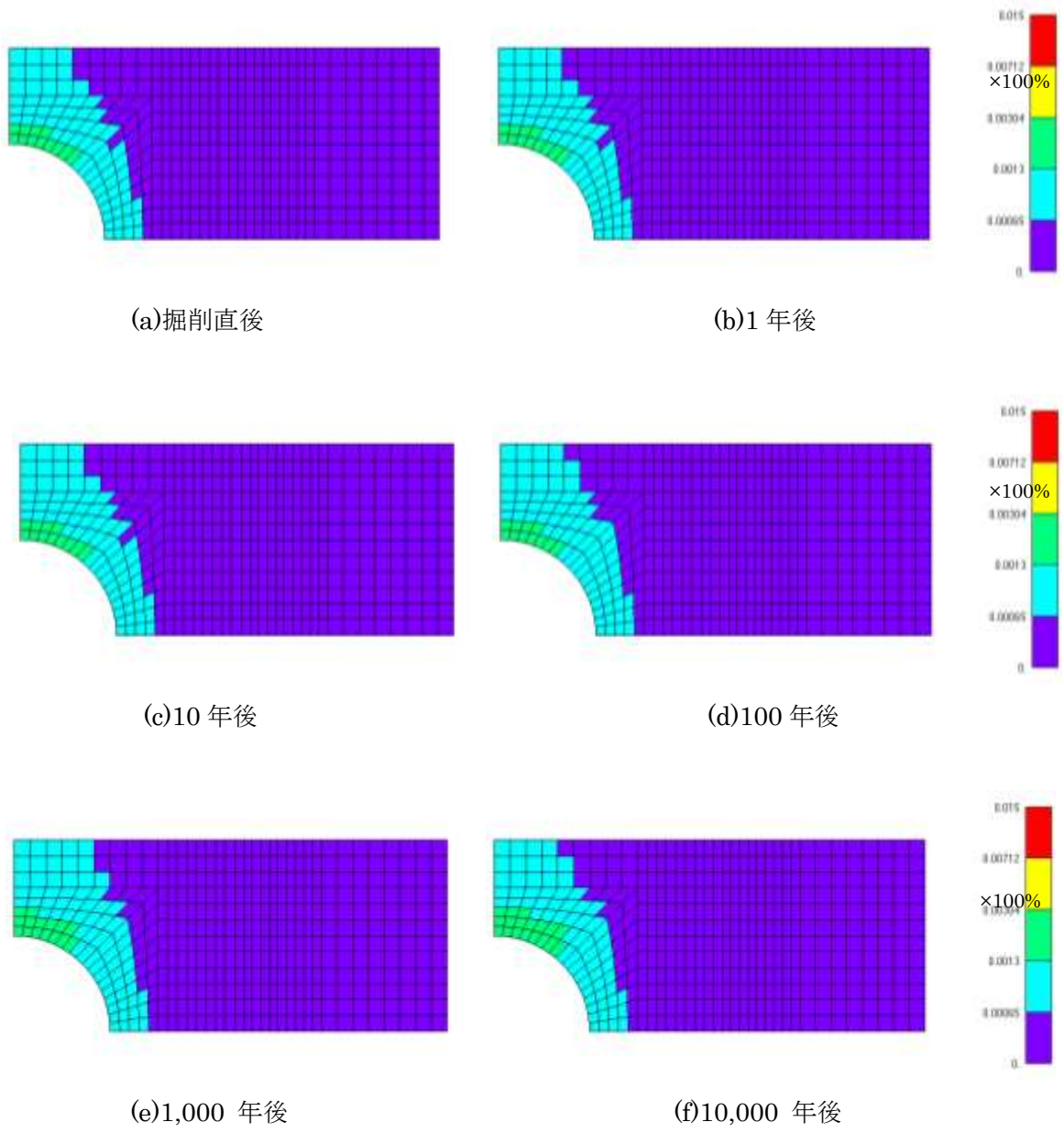


図 3.3.5-28 周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 1 : B 断面)

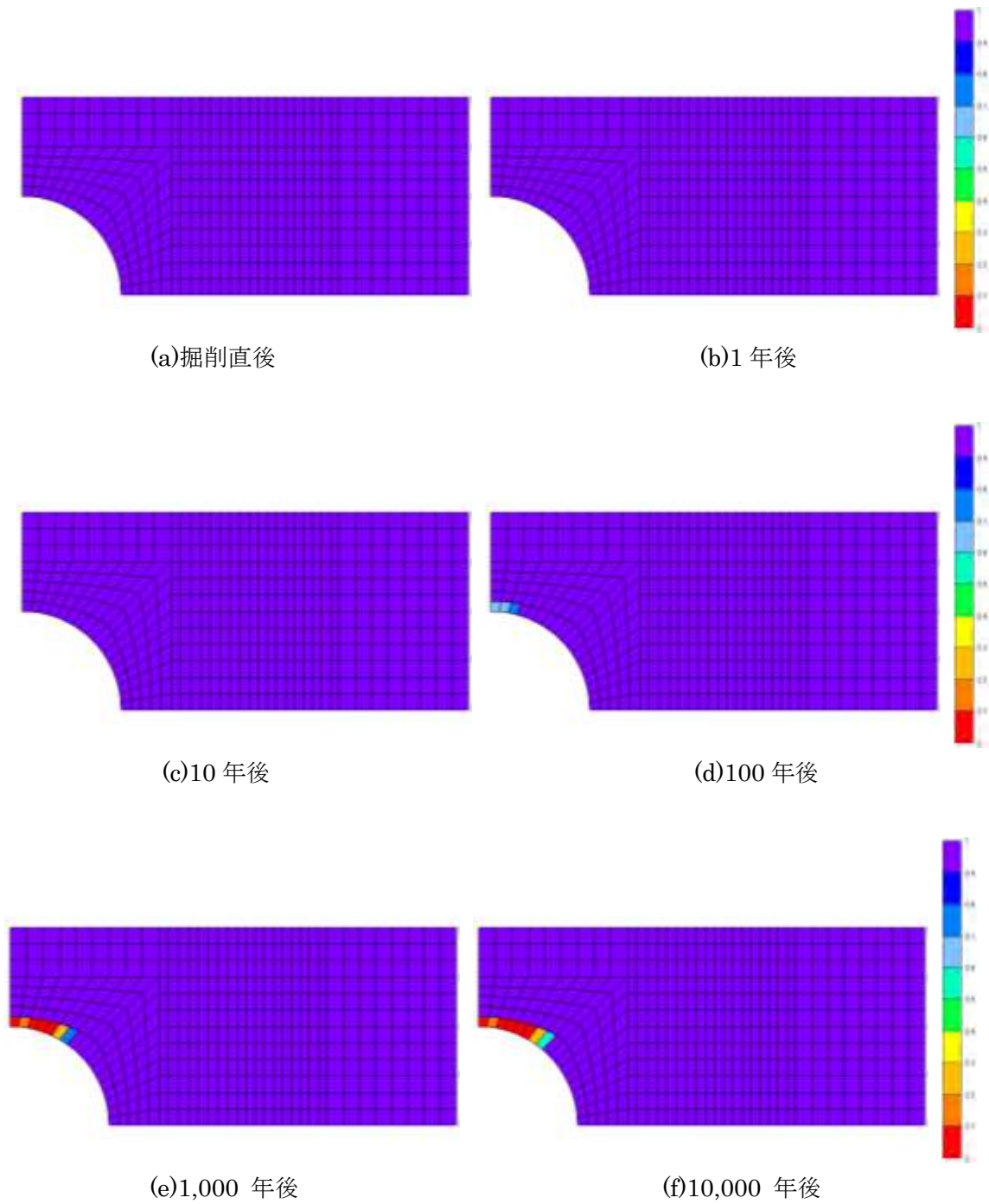
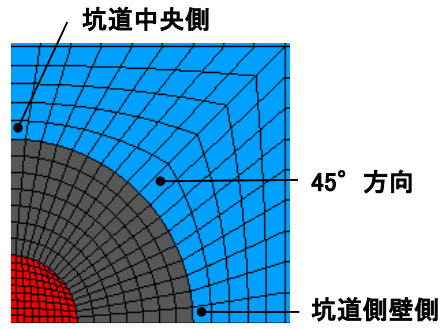


図 3.3.5-29 周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 1 : B 断面)



着目した壁面近傍の要素

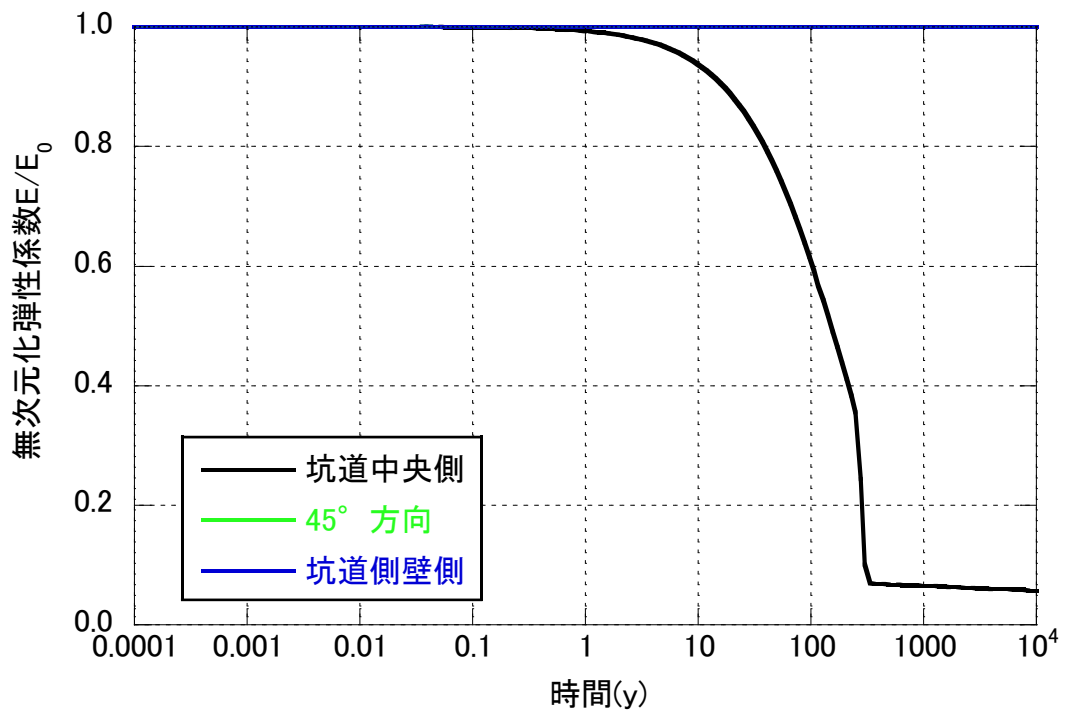


図 3.3.5-30 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 1 : B 断面)

b ケース 2

ケース 2 は、深成岩、豎置き方式、回収可能性維持の状態オプション③のケースである。

➤ A 断面

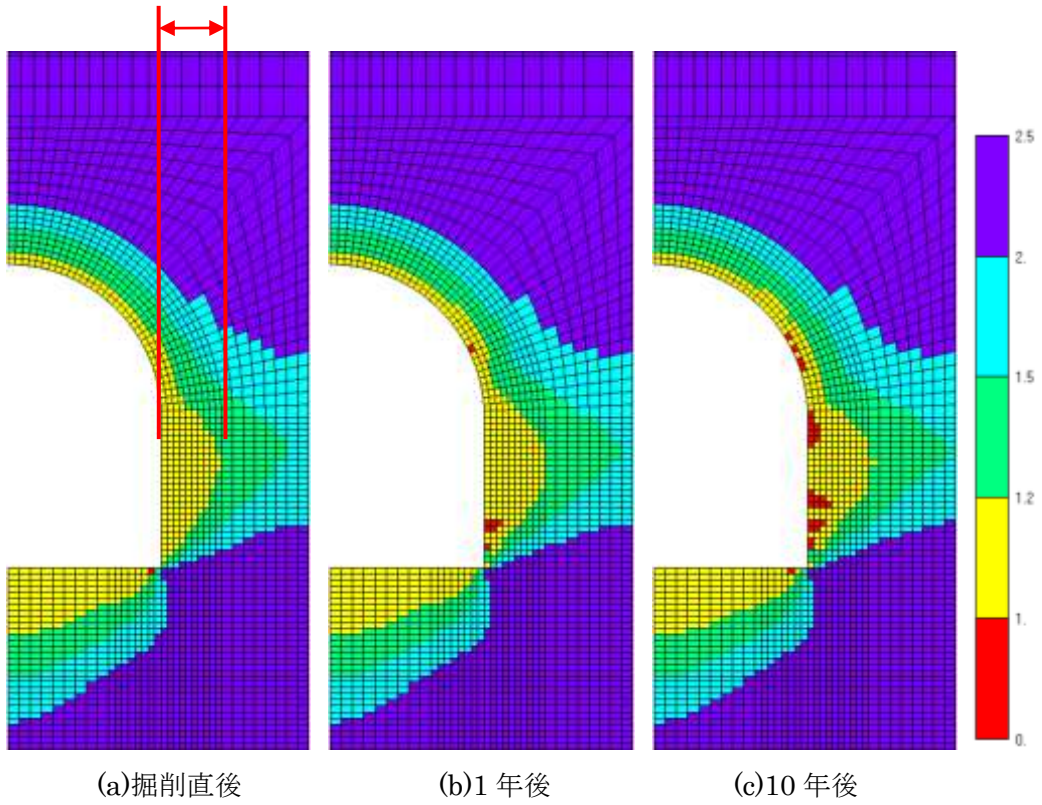
処分坑道周辺岩盤における局所安全率の分布を図 3.3.5-31 に、最大せん断ひずみの分布を図 3.3.5-32 に、弾性係数の変化を図 3.3.5-33 に示す。また、壁面近傍の天端、肩部、側部、脚部、底部の各要素の弾性係数の経時変化を図 3.3.5-34 に示す。

処分坑道周辺岩盤では、局所安全率 $F_s=1.2$ の領域は、掘削直後、坑道掘削径 D の 20%以下を満足する結果となった。

一方、最大せん断ひずみが限界せん断ひずみ (0.304%) を超過する領域 (以下、 $\gamma_{\max}=0.304\%$ 超過領域) は、掘削直後、坑道掘削径 D の 20%以下であり、その後、時間とともに $\gamma_{\max}=0.304\%$ 超過領域は若干広がるが 1 万年後まで坑道掘削径 D の 20%以下の範囲にとどまっている。

図 3.3.5-33 および図 3.3.5-34 より、周辺岩盤は壁面近傍で掘削直後から弾性係数は低下し続け、1 万年後の坑道周辺岩盤の弾性係数は壁面近傍の側部と肩部で初期値の 1~8%程度まで低下したことがわかった。特に、側部で弾性係数の低下領域が岩盤深部まで拡大したが、坑道掘削径 D の 20%以下の領域は超えなかった。

掘削径 D の 20% の領域



掘削径 D の 20% の領域

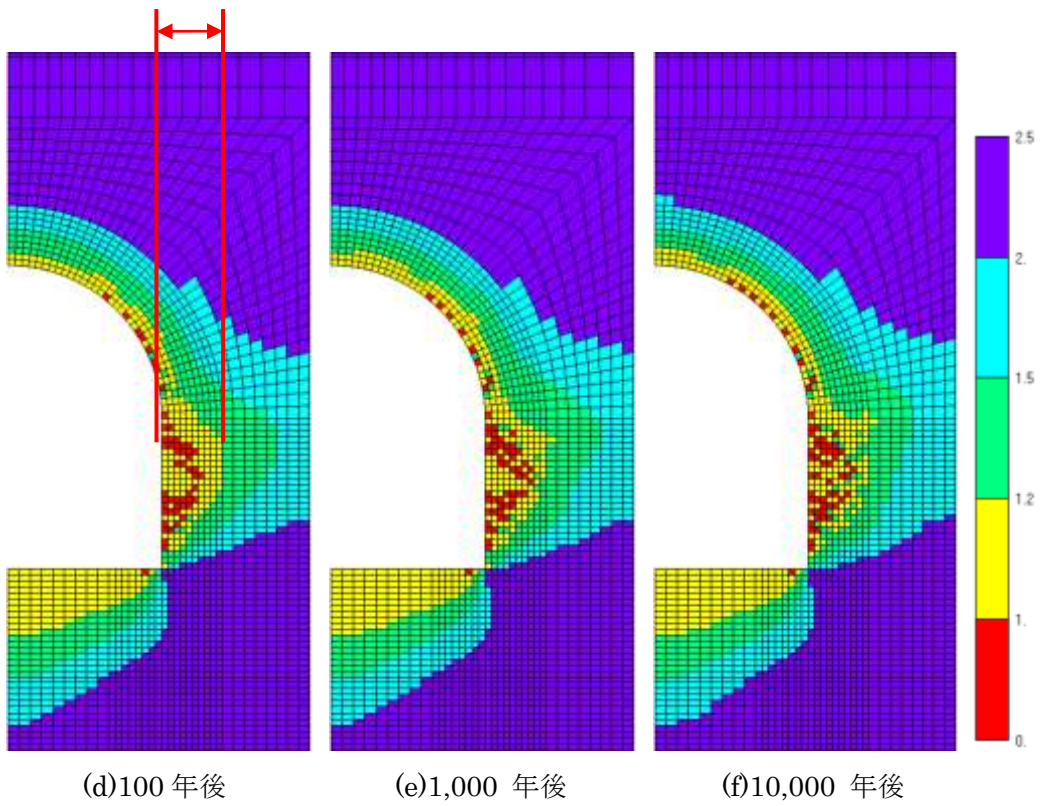
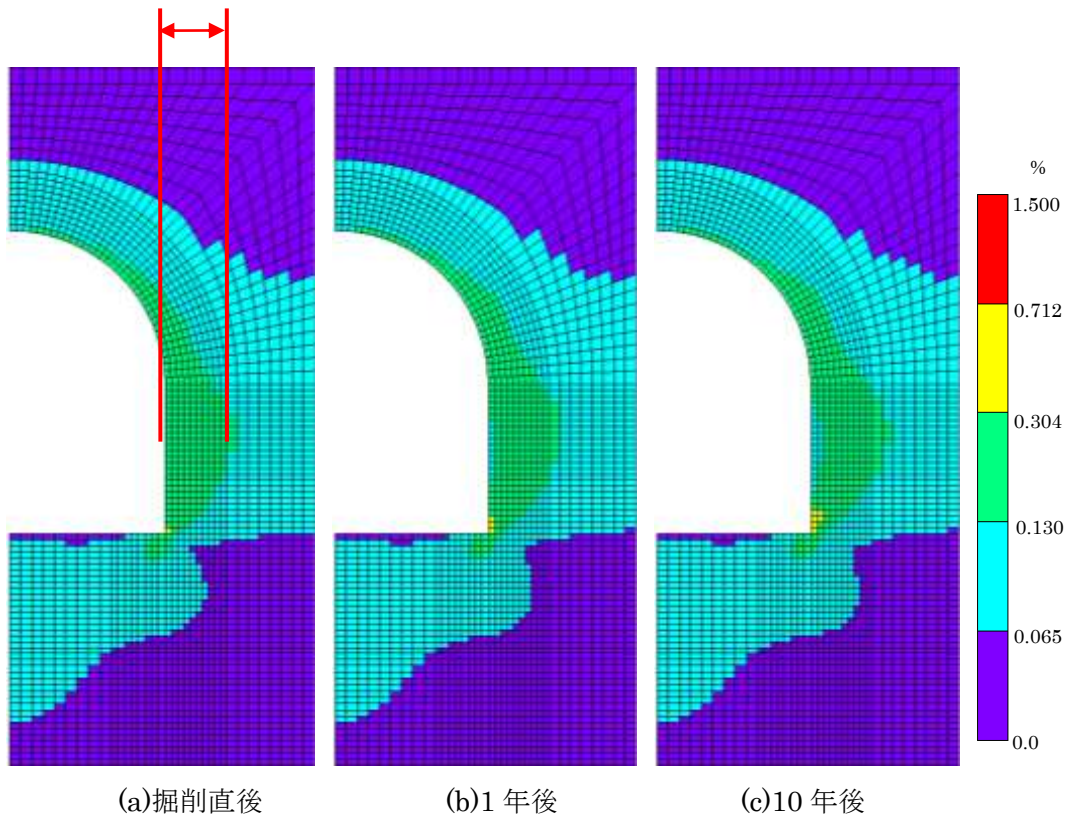


図 3.3.5-31 周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース 2 : A 断面)

掘削径 D の 20% の領域



掘削径 D の 20% の領域

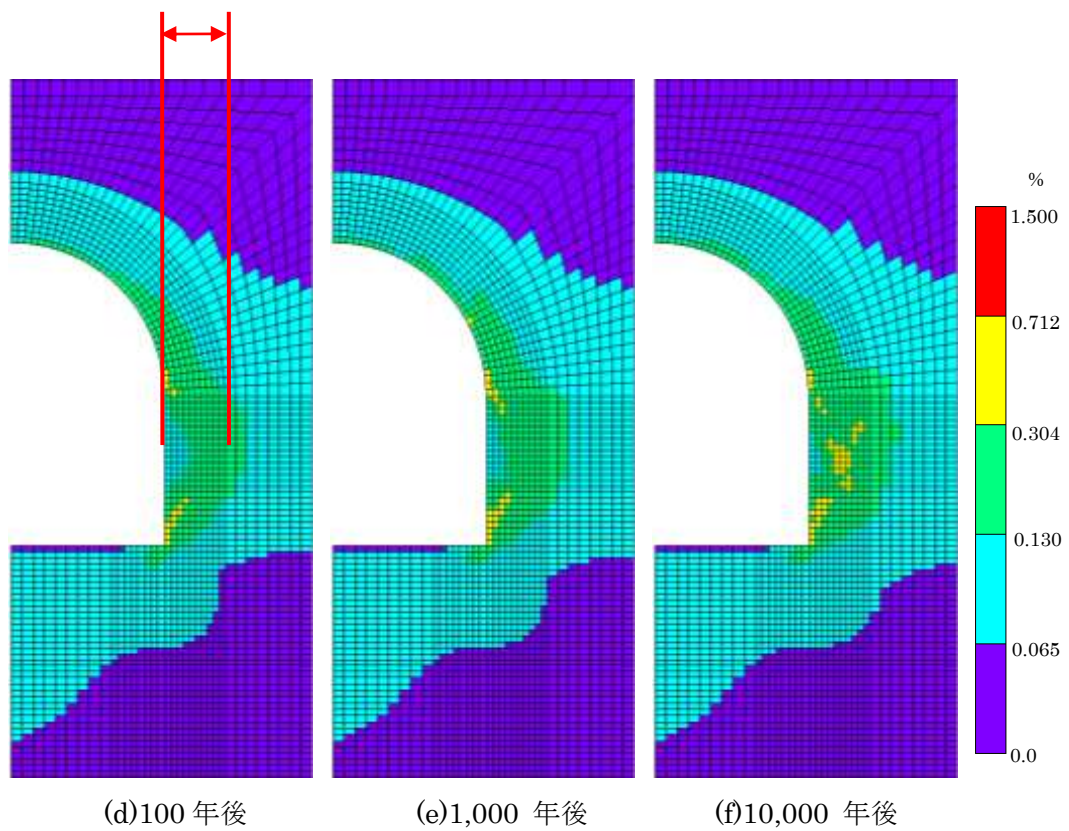
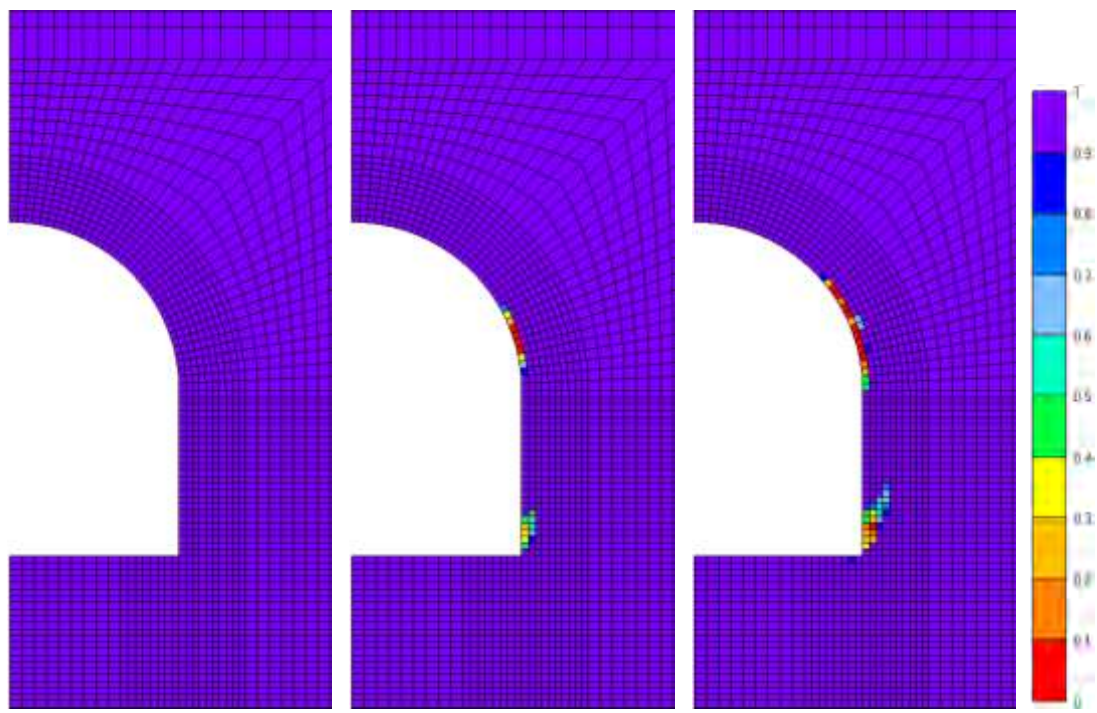


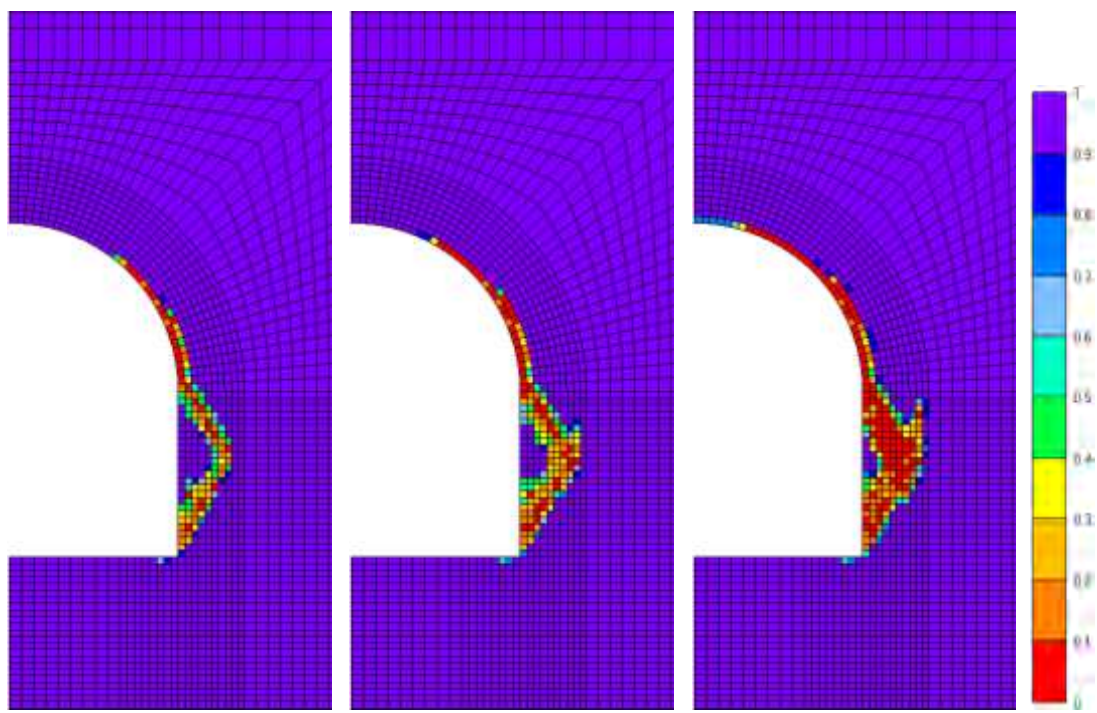
図 3.3.5-32 周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 2 : A 断面)



(a)掘削直後

(b)1 年後

(c)10 年後

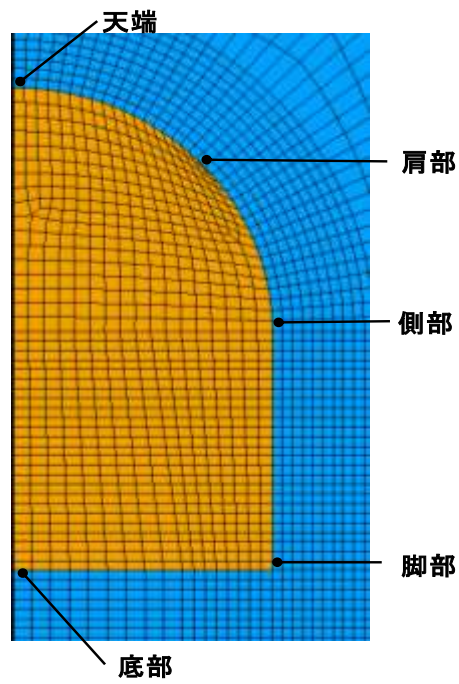


(d)100 年後

(e)1,000 年後

(f)10,000 年後

図 3.3.5-33 周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 2 : A 断面)



着目した壁面近傍の要素

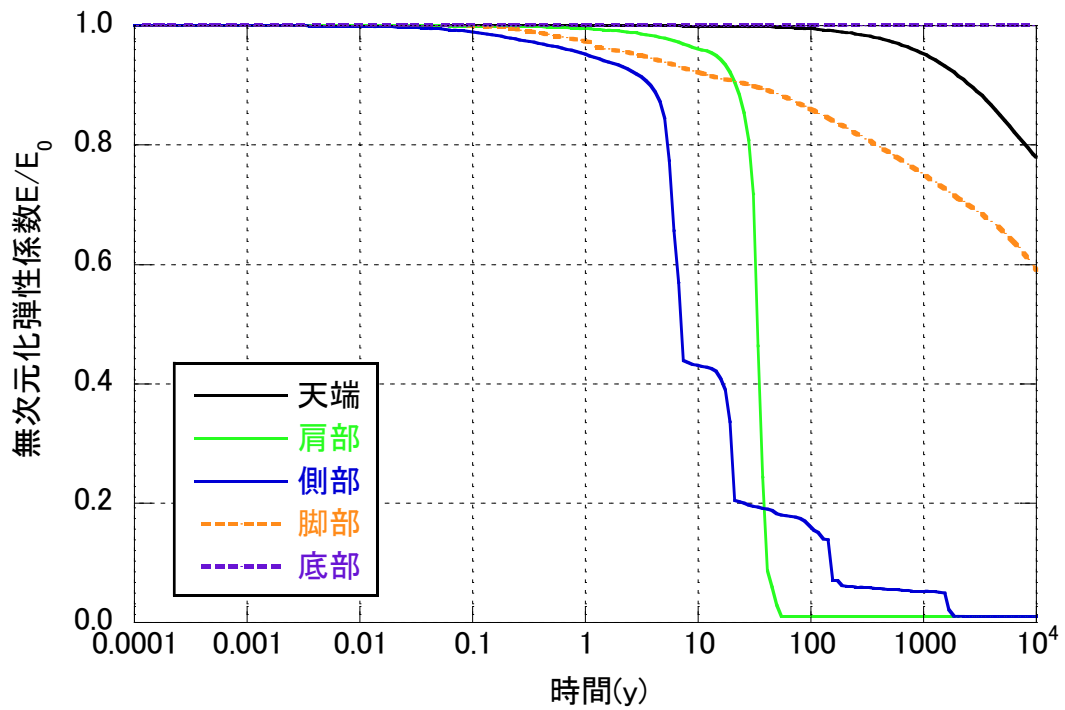


図 3.3.5-34 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 2 : A 断面)

➤ B断面

処分孔周辺岩盤における局所安全率の分布を図 3.3.5-35 に、最大せん断ひずみの分布を図 3.3.5-36 に、弾性係数の変化を図 3.3.5-37 に示す。また、壁面近傍の坑道中央側、45° 方向、坑道側壁側の各要素の弾性係数の経時変化を図 3.3.5-38 に示す。

処分孔周辺岩盤では、局所安全率 $F_s=1.2$ の領域は、掘削直後に処分孔の壁面近傍に生じたが、拡大する傾向は示さなかった。

一方、最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}=0.304\%$ 超過領域は、掘削直後から 1 万年後まで処分孔周辺には発生しなかった。

図 3.3.5-37 および図 3.3.5-38 より、処分孔周辺岩盤は坑道中央側の壁面近傍で掘削直後から弾性係数は低下するが、それ以外の領域では低下しなかった。コンター図では、100 年後に処分孔の坑道中央側に弾性係数の低下領域が発生し、1 万年後に初期値の 7% 割程度まで低下したが非常に局所的な領域に限定された。

本ケースの結果をケース 1 の B 断面の結果と比較すると、各コンター図からは両者の結果にほとんど差は見られなかったが、1 万年後の無次元化弾性係数は坑道中央側でケース 1 が 0.057 となるのに対してケース 2 は 0.068 と若干低下が小さかった。

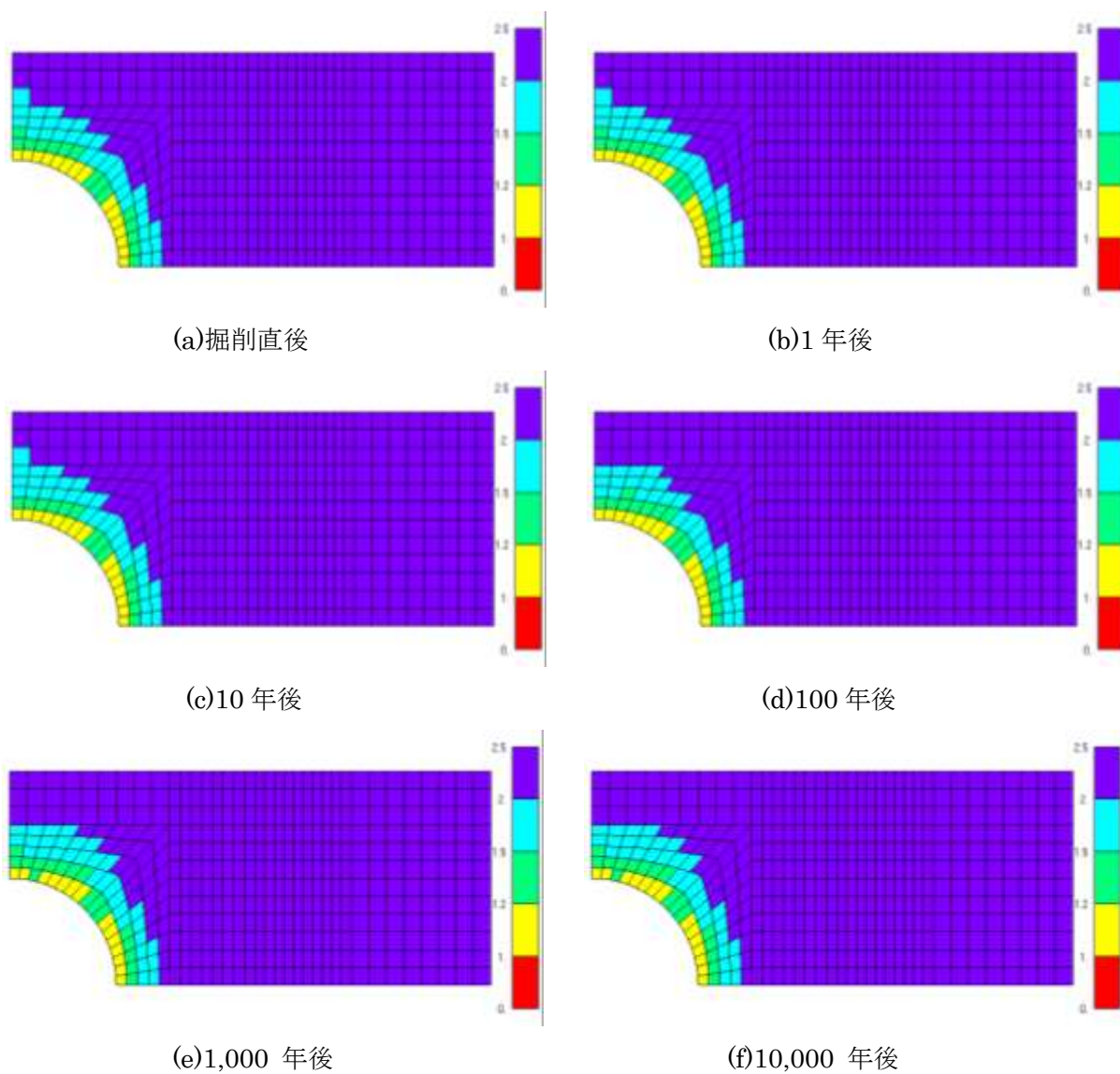


図 3.3.5-35 周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース 2 : B 断面)

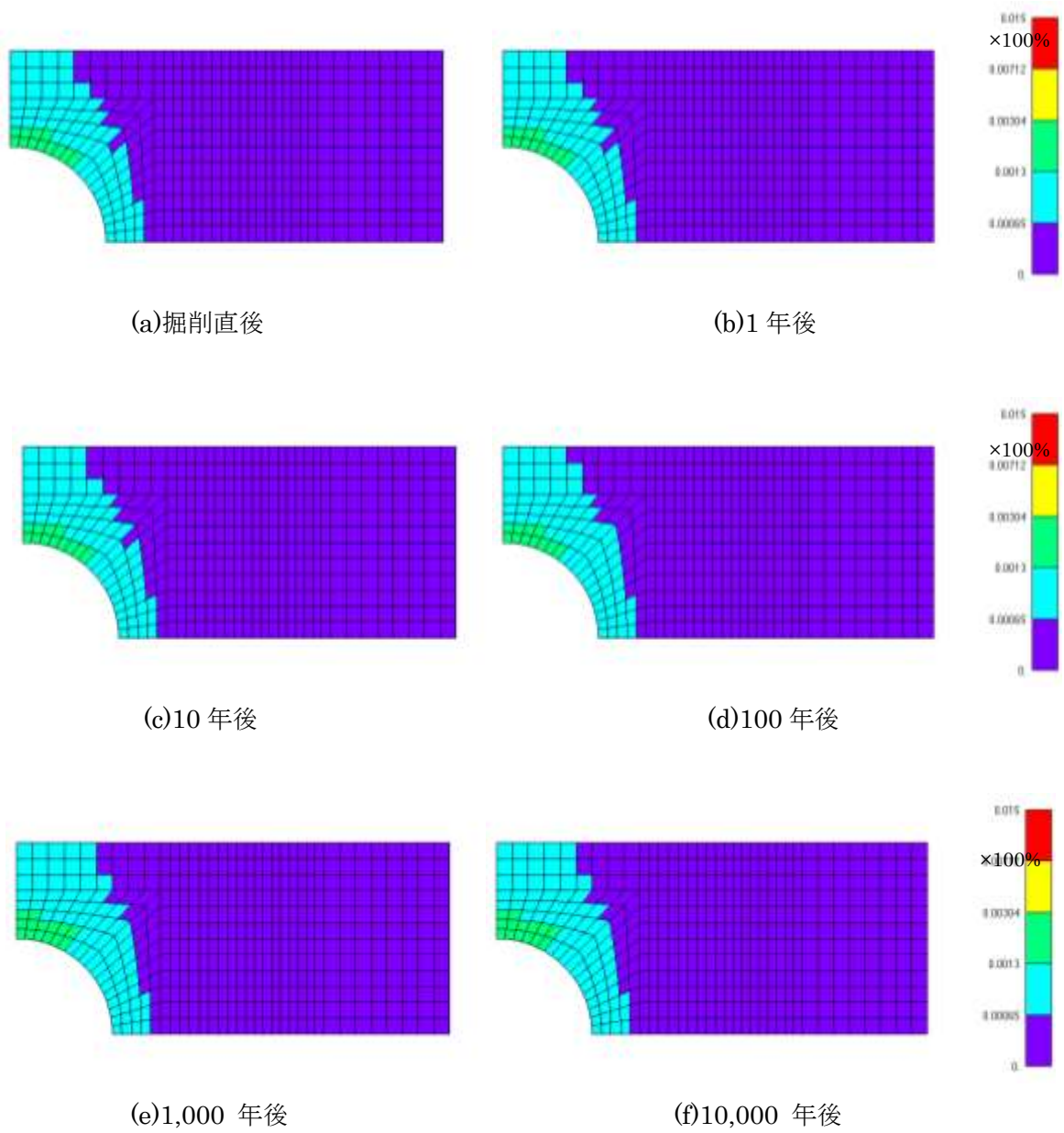


図 3.3.5-36 周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 2 : B 断面)

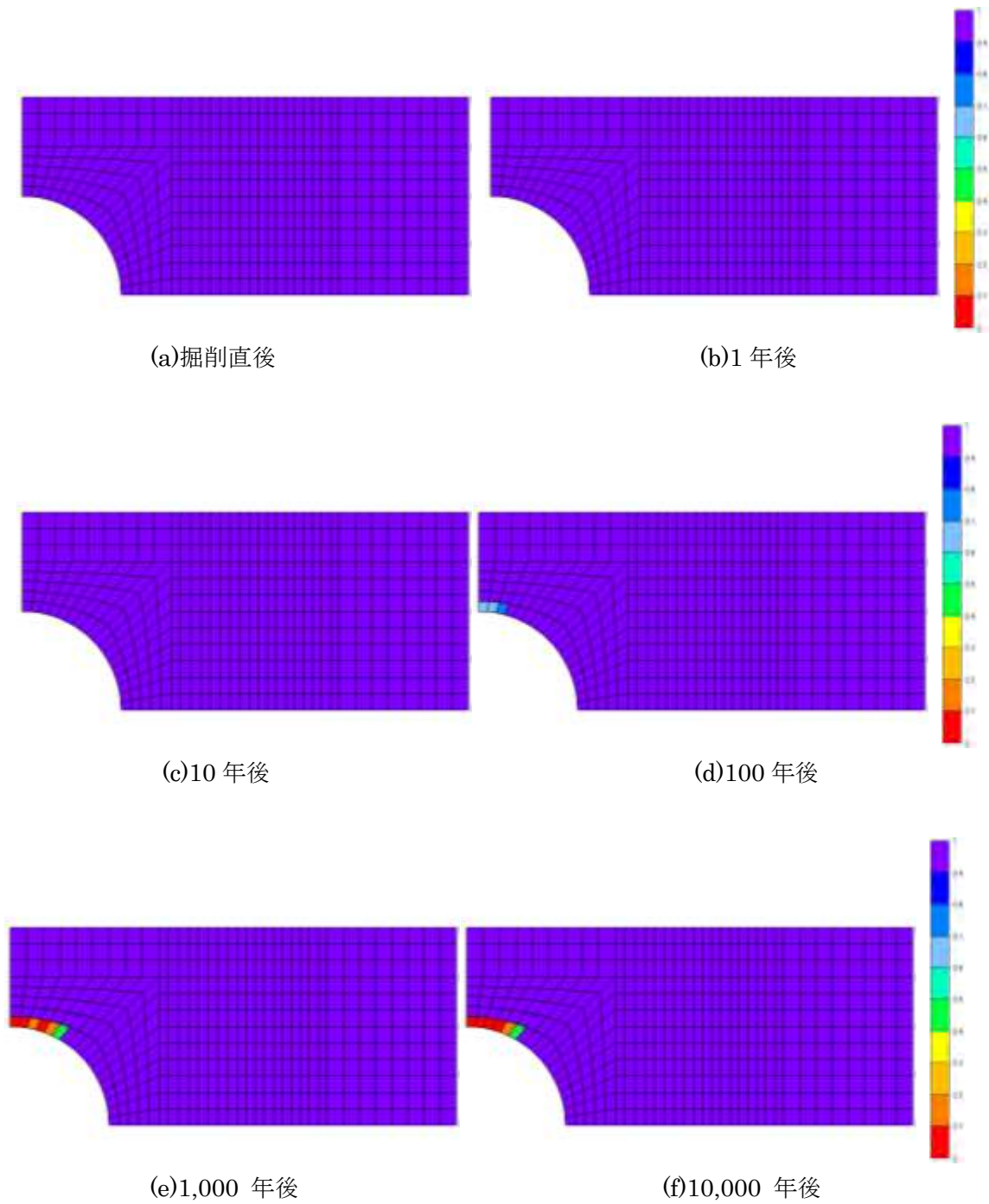
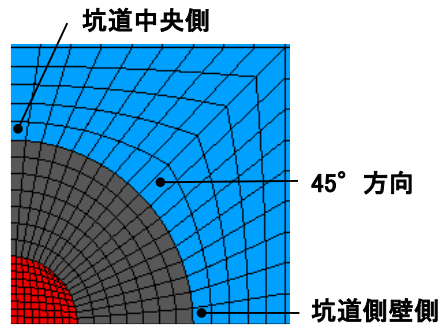


図 3.3.5-37 周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 2 : B 断面)



着目した壁面近傍の要素

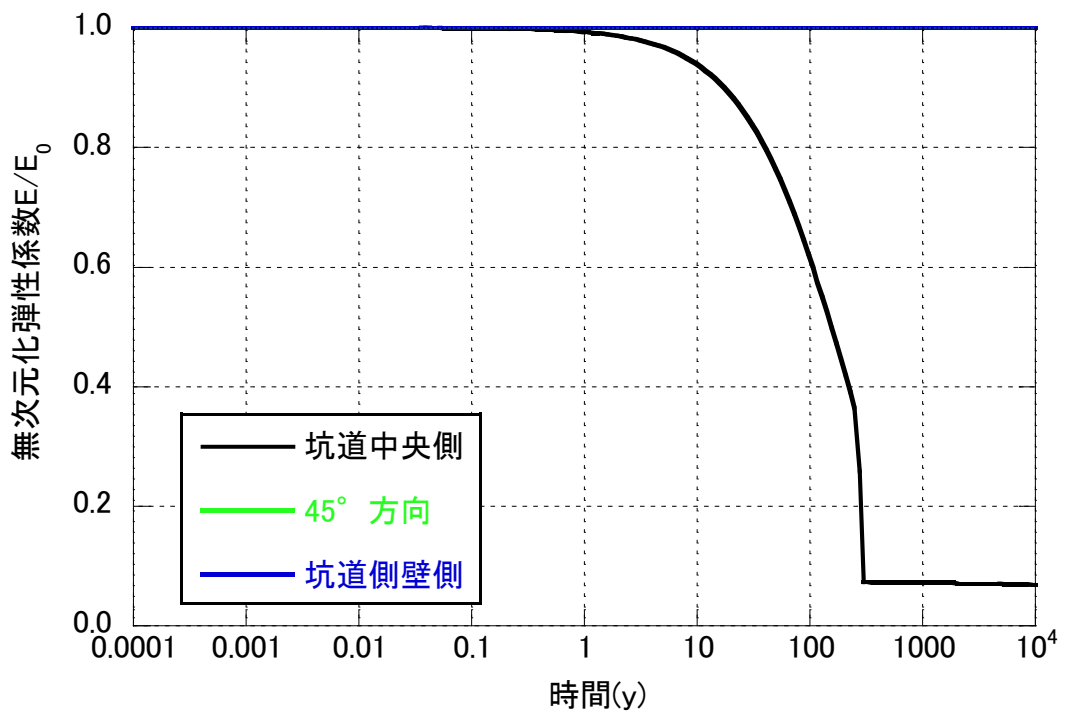


図 3.3.5-38 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 2 : B 断面)

c ケース 3

ケース 3 は、深成岩、横置き方式、回収可能性維持の状態オプション①のケースである。

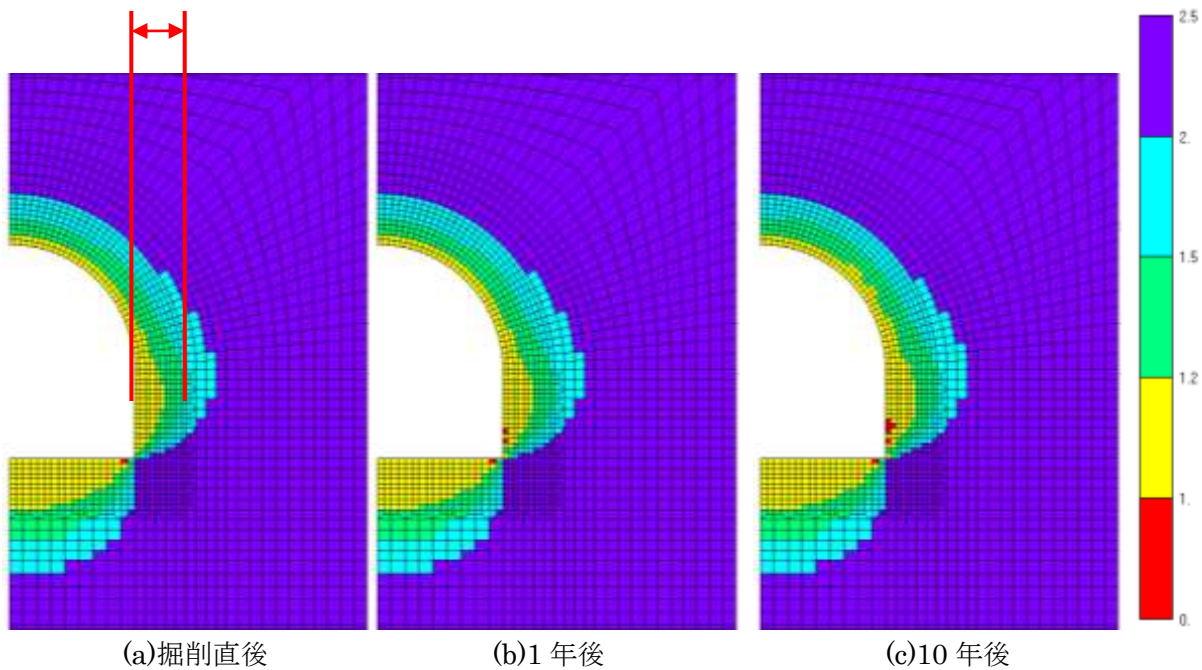
処分坑道周辺岩盤における局所安全率の分布を図 3.3.5-39 に、最大せん断ひずみの分布を図 3.3.5-40 に、弾性係数の変化を図 3.3.5-41 に示す。また、壁面近傍の各要素の弾性係数の経時変化を図 3.3.5-42 に示す。

処分坑道周辺岩盤では、局所安全率 $F_s=1.2$ の領域は、掘削直後、坑道掘削径 D の 20%以下を満足する結果となった。

一方、最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}=0.304\%$ 超過領域は、掘削直後、脚部の 1 要素に発生するのみで、その後も、脚部近傍で僅かに広がる程度で、1 万年後においても壁面から 30cm の範囲に留まり、坑道掘削径 D の 20%以下の範囲にとどまっている。

図 3.3.5-41 および図 3.3.5-42 より、周辺岩盤は脚部の壁面近傍で掘削直後から弾性係数は低下するが、その他の領域では 10 年後に肩部で、千年後に天端で低下域が生じた。特に、脚部に弾性係数の低下領域が集中し、1 万年後においては壁面から 60cm 程度まで広がった。

掘削径 D の 20% の領



掘削径 D の 20% の領

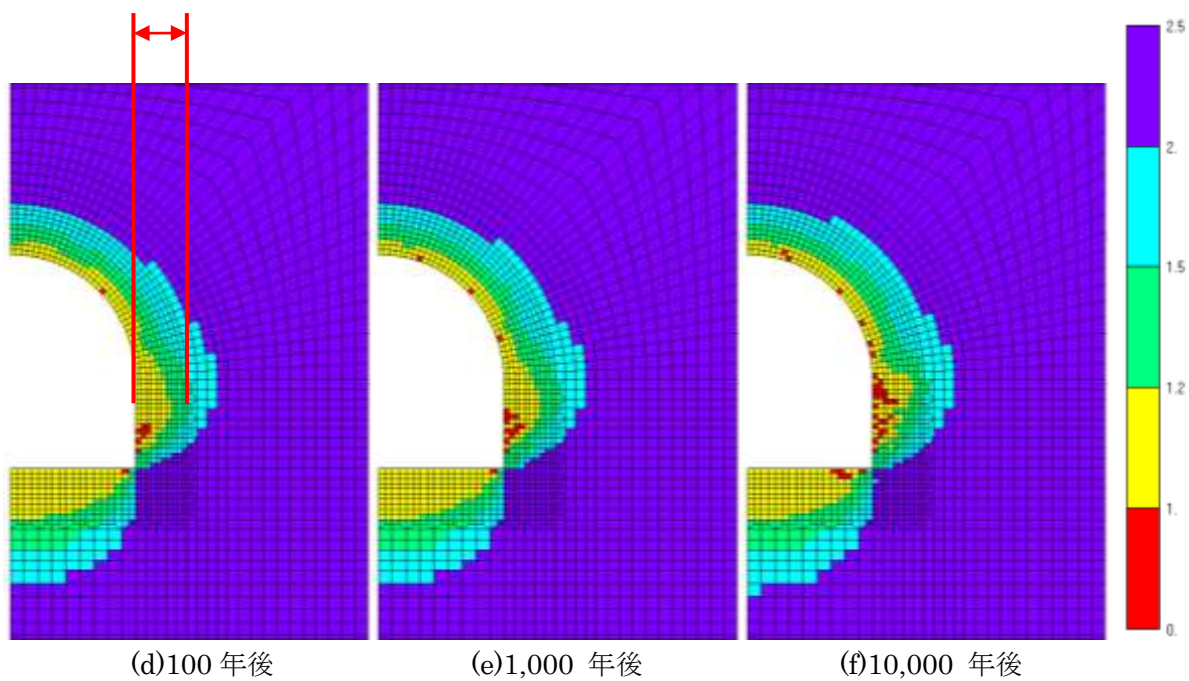
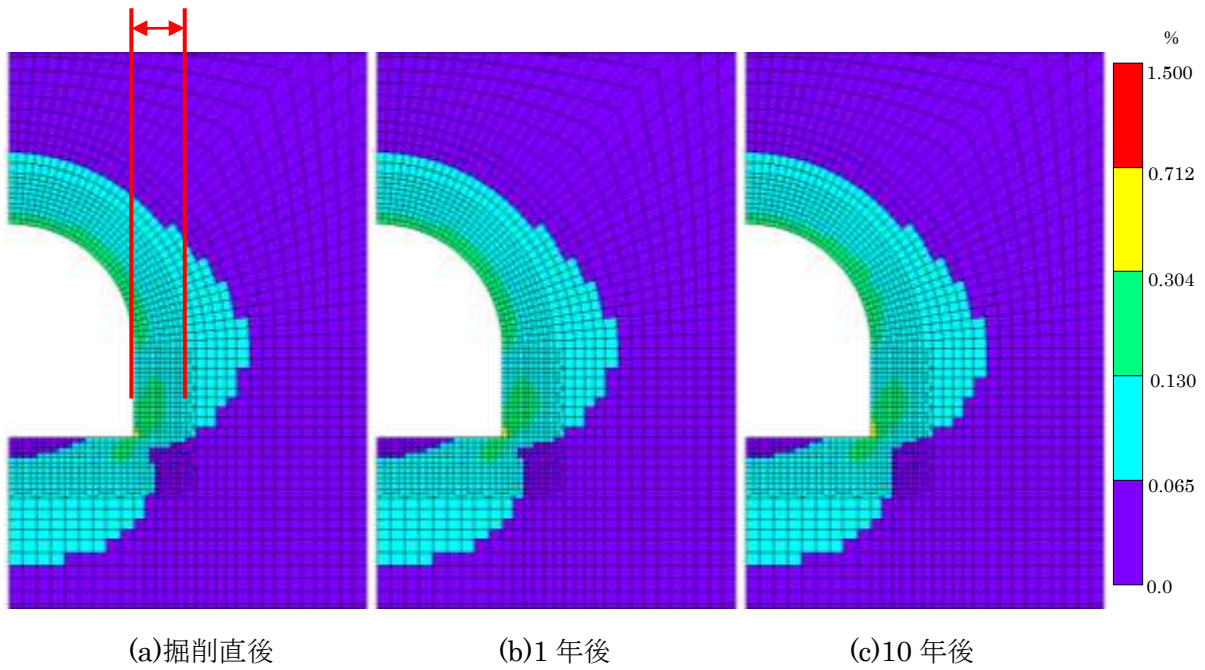


図 3.3.5-39 周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース 3)

掘削径 D の 20% の領域



掘削径 D の 20% の領域

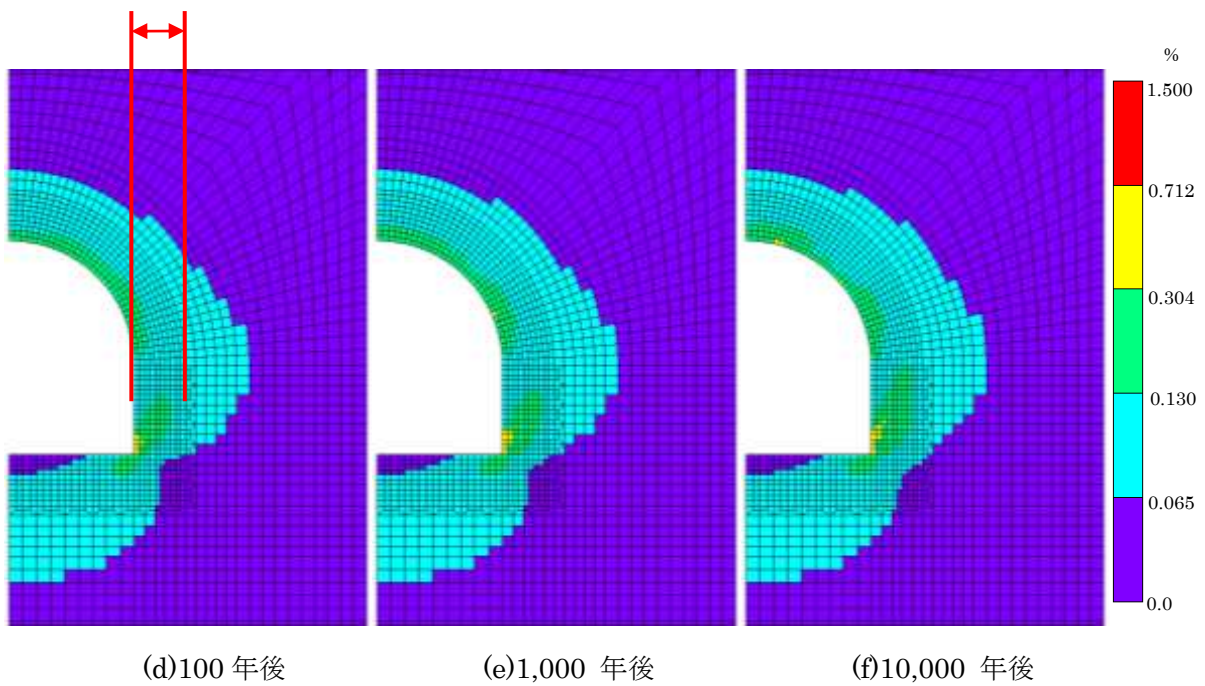


図 3.3.5-40 周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 3)

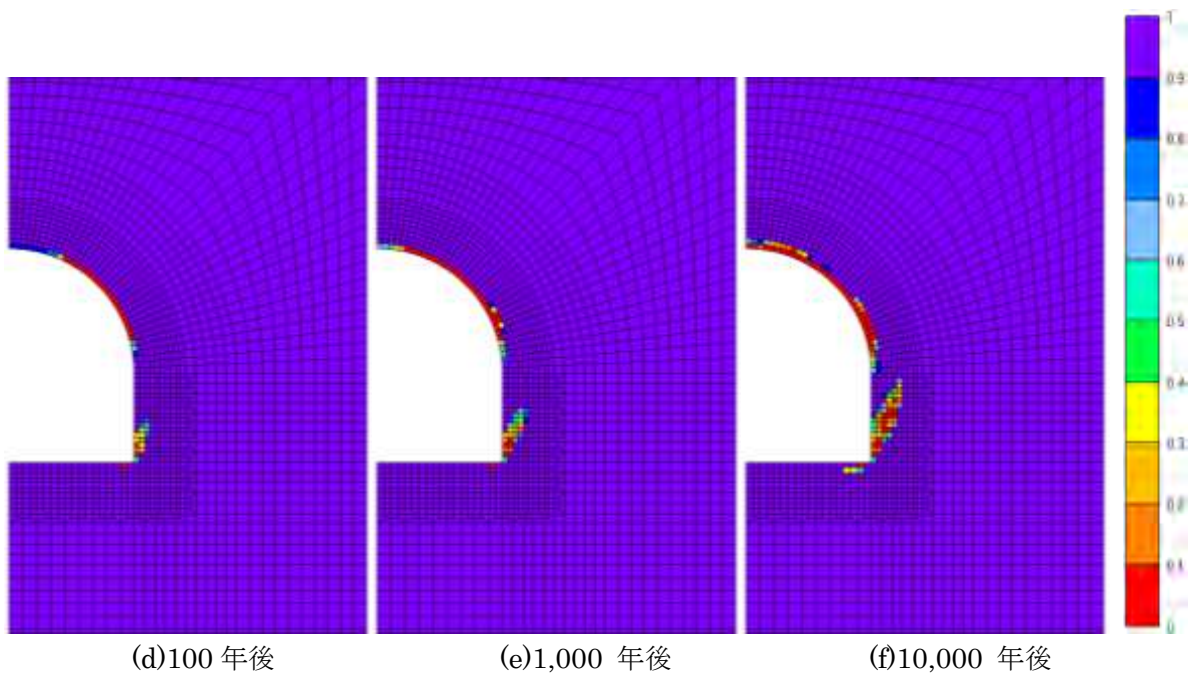
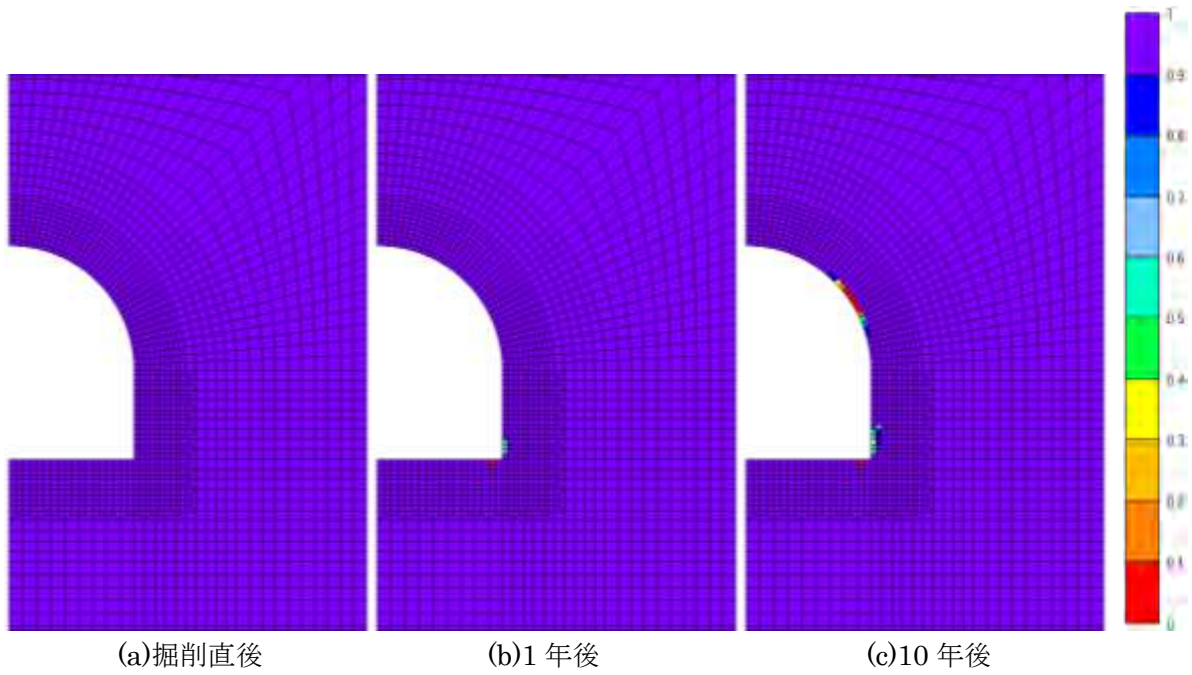
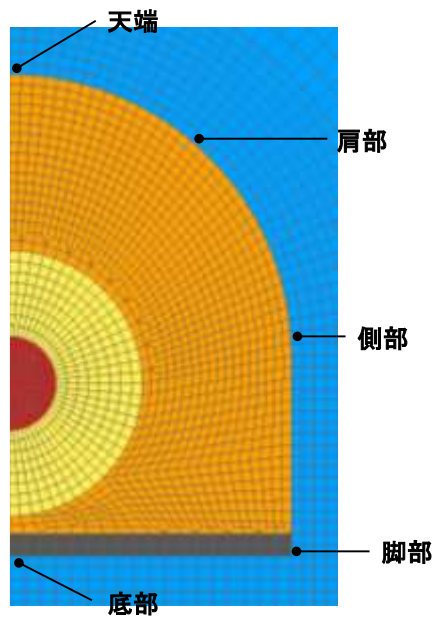


図 3.3.5-41 周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 3)



着目した壁面近傍の要素

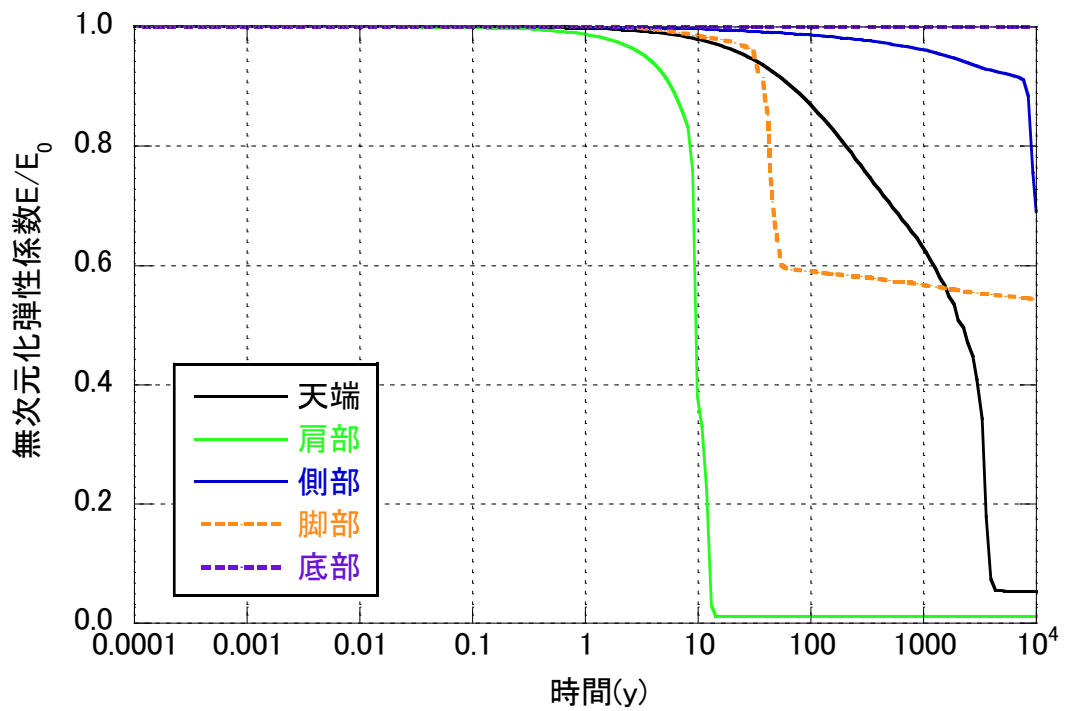


図 3.3.5-42 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 3)

d ケース 4

ケース 4 は、深成岩、横置き方式、回収可能性維持の状態オプション②のケースである。

処分坑道周辺岩盤における局所安全率の分布を図 3.3.5-43 に、最大せん断ひずみの分布を図 3.3.5-44 に、弾性係数の変化を図 3.3.5-45 に示す。また、壁面近傍の要素の弾性係数の経時変化を図 3.3.5-46 に示す。

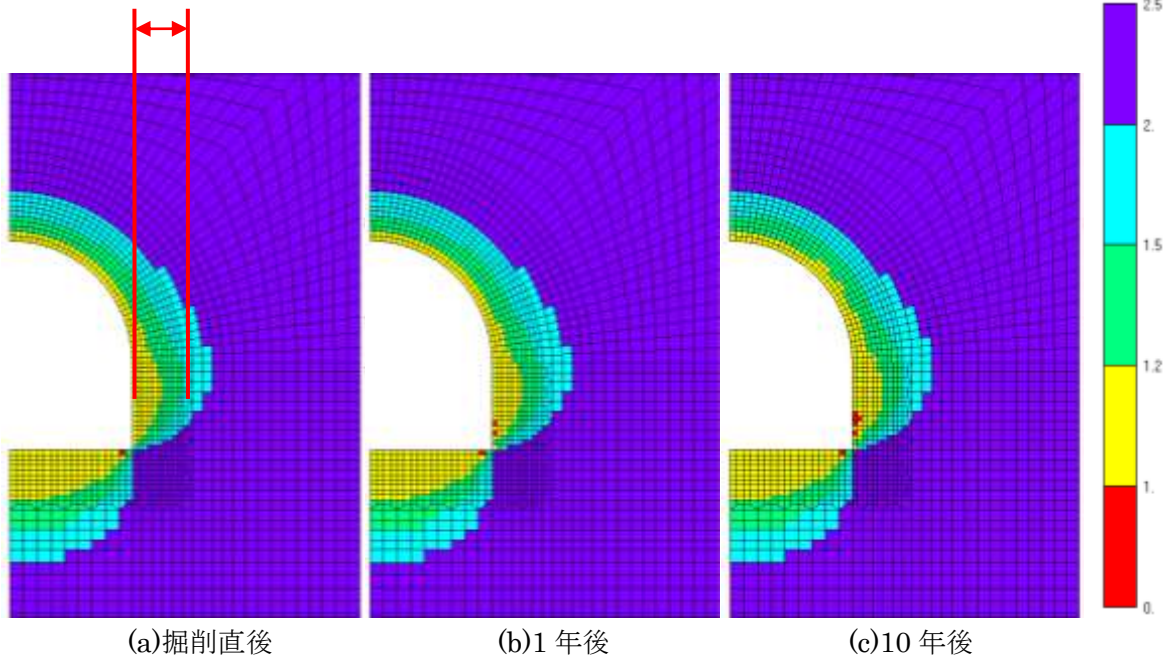
処分坑道周辺岩盤では、局所安全率 $F_s=1.2$ の領域は、掘削直後、坑道掘削径 D の 20%以下を満足する結果となった。

一方、最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}=0.304\%$ 超過領域は、本ケースにおいても掘削直後、脚部の 1 要素に発生するのみで、その後も、脚部近傍で僅かに広がる程度で、1 万年後においても壁面から 30cm の範囲に留まり、坑道掘削径 D の 20%以下の範囲にとどまっている。

図 3.3.5-45 および図 3.3.5-46 より、周辺岩盤は脚部の壁面近傍で掘削直後から弾性係数は低下するが、その他の領域では 10 年後に肩部で、千年後に天端で低下域が生じた。特に、脚部に弾性係数の低下領域が集中し、1 万年後においては壁面から 60cm 程度まで広がった。

本ケースの結果をケース 3 の結果と比較すると、各コンター図からは両者の結果にほとんど差は見られなかったが、1 万年後の無次元化弾性係数は天端と側部でケース 4 の方が若干小さく、脚部ではケース 3 の方が若干小さくなった。

掘削径 D の 20% の領



掘削径 D の 20% の領

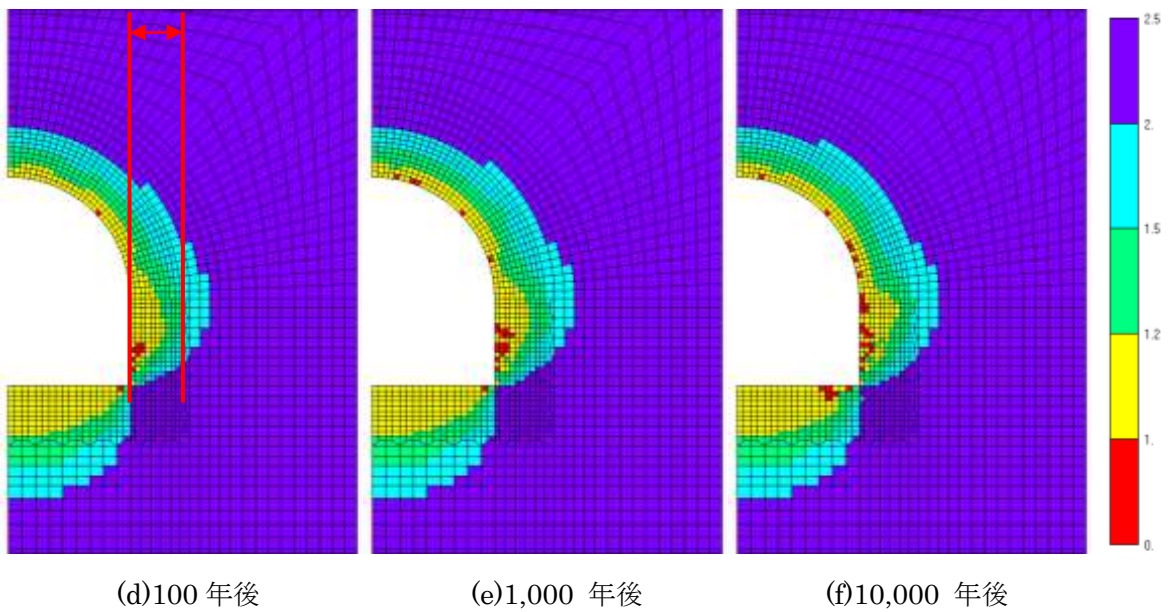
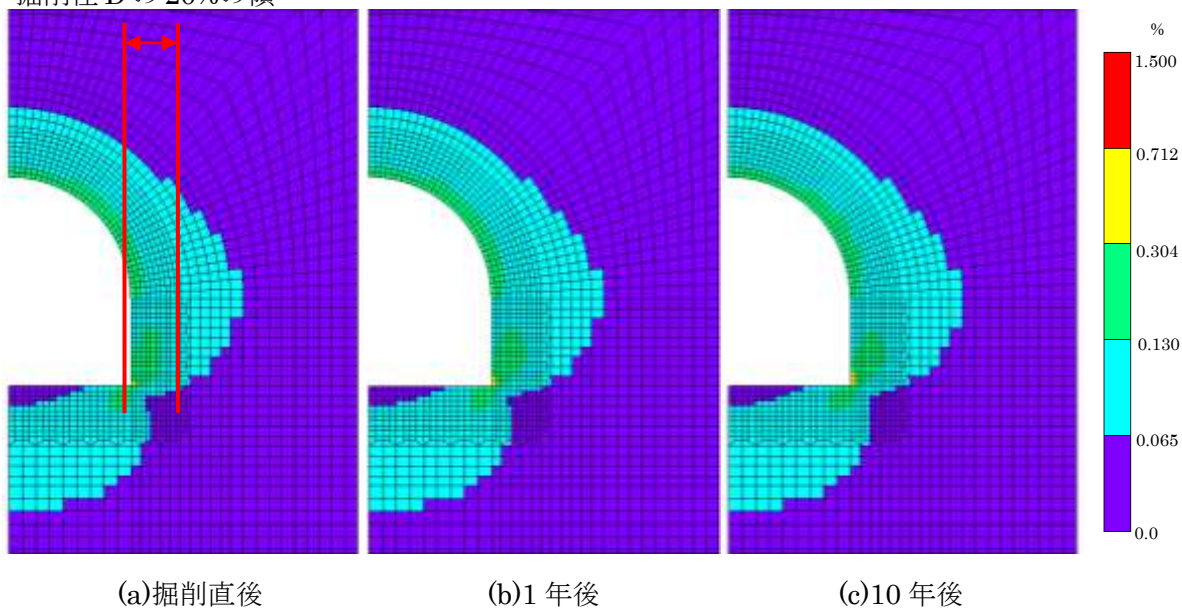


図 3.3.5-43 周辺岩盤の局所安全率の変化 (ケース 4)

掘削径 D の 20% の領



掘削径 D の 20% の領

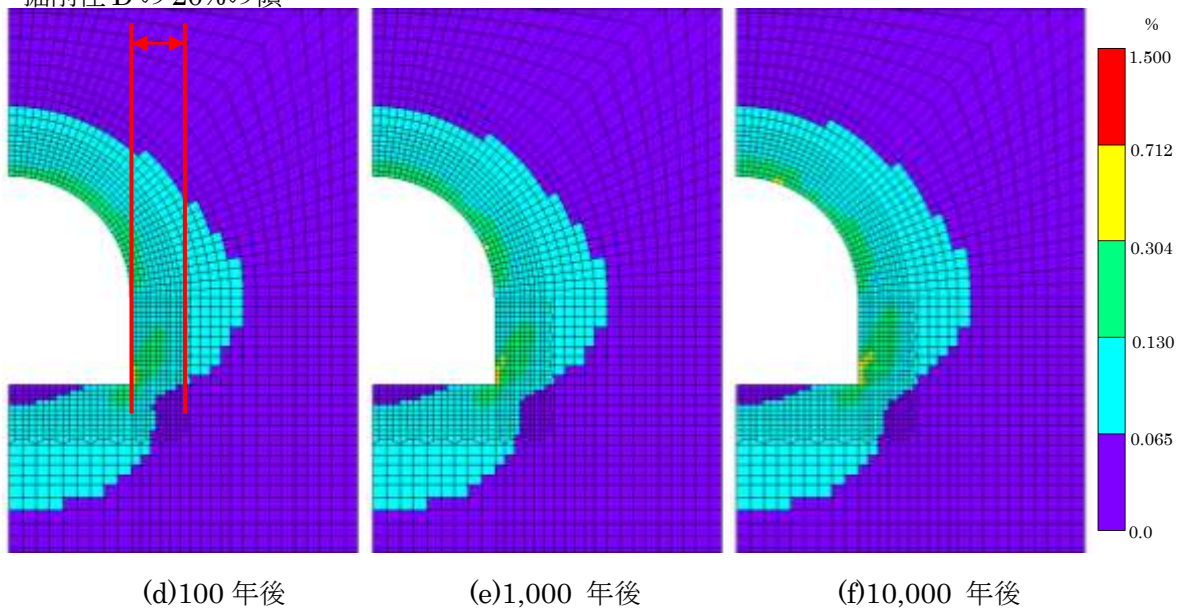


図 3.3.5-44 周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 4)

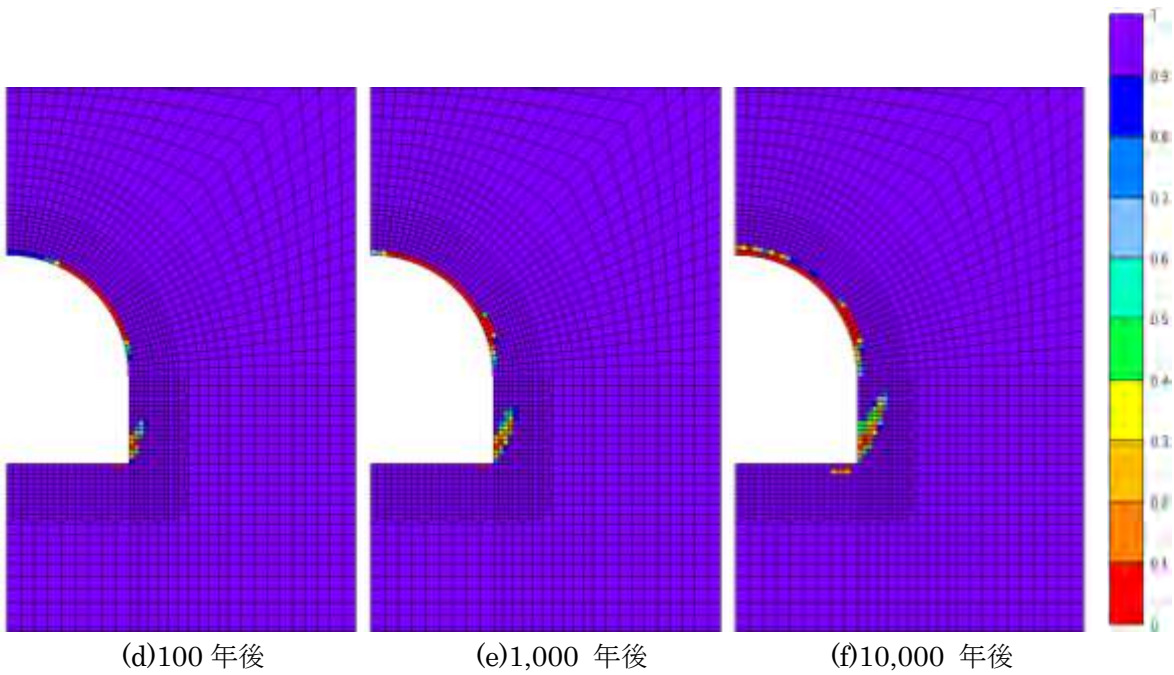
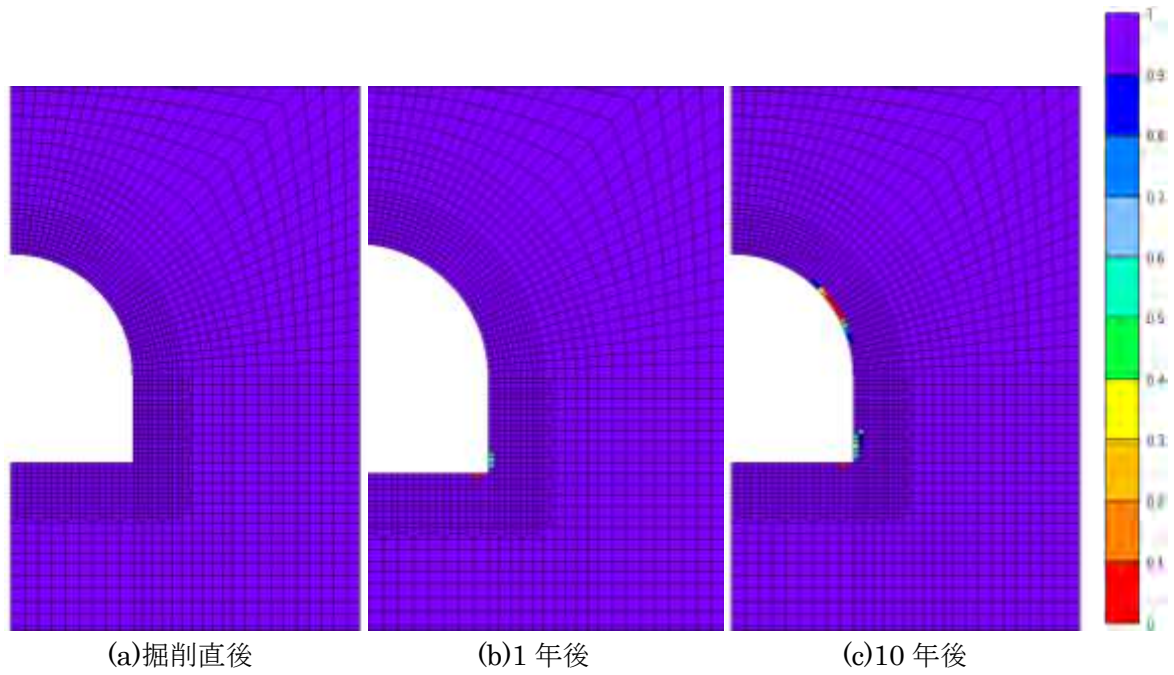
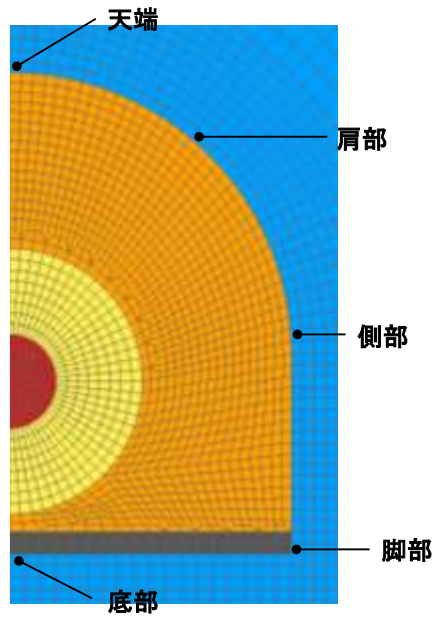


図 3.3.5-45 周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 4)



着目した壁面近傍の要素

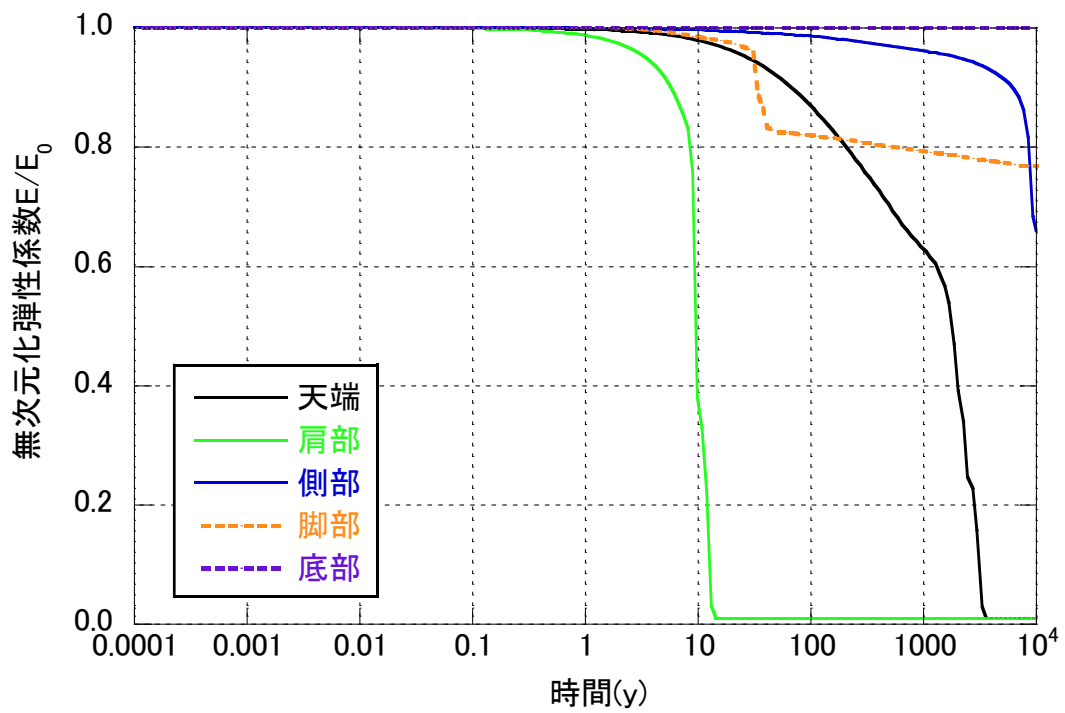


図 3.3.5-46 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 4)

e ケース 5

ケース 5 は、新第三紀堆積岩、豎置き方式、回収可能性維持の状態オプション②のケースである。

➤ A 断面

処分坑道周辺岩盤における局所安全率の分布を図 3.3.5-47 に、最大せん断ひずみの分布を図 3.3.5-48 に、弾性係数の変化を図 3.3.5-49 に、透水係数の変化を図 3.3.5-50 に示す。また、壁面近傍の要素の弾性係数の経時変化を図 3.3.5-51 に示す。

処分坑道周辺岩盤では、局所安全率 $F_s=1.2$ の領域は、掘削直後、坑道掘削径 D の 20%以下を満足する結果となり、その後、時間が経過すると $F_s=1.2$ の領域は発生しなくなる。これは、岩盤の弾性係数が時間の経過とともに低下し、応力レベルが低下することによるものである。

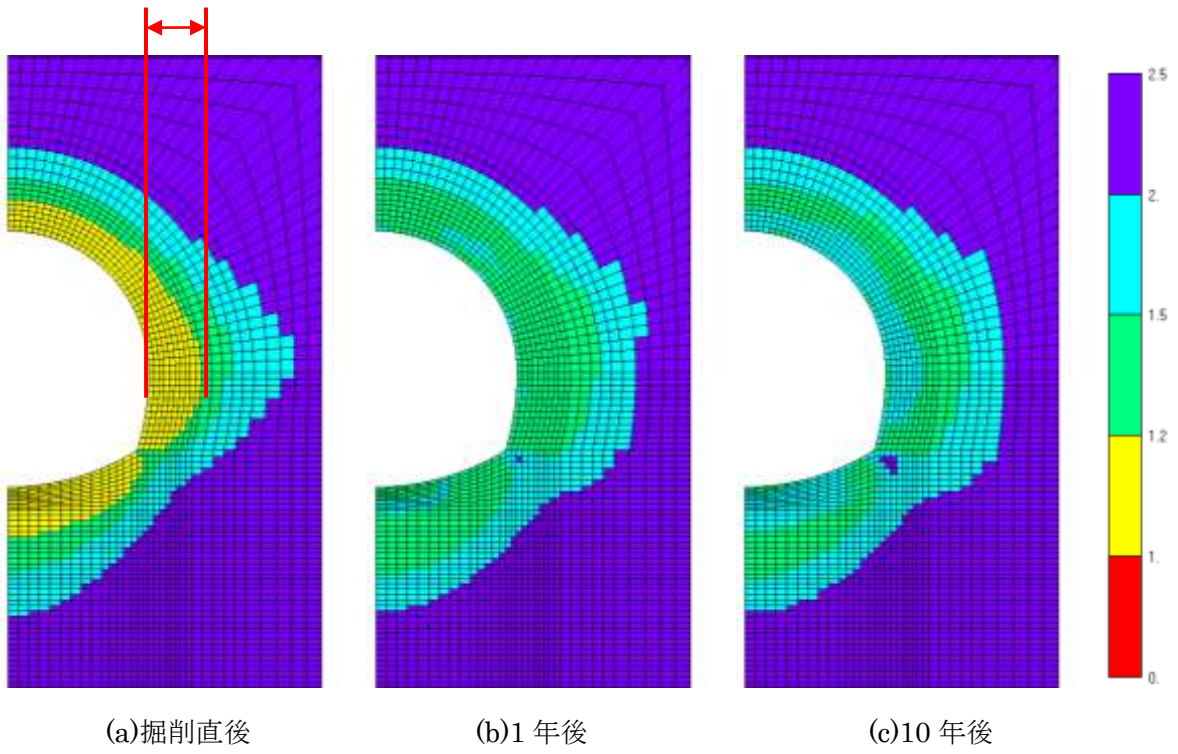
一方、最大せん断ひずみが限界せん断ひずみ (0.570%) を超過する領域 (以下、 $\gamma_{\max}=0.570\%$ 超過領域) は、掘削直後、坑道掘削径 D の 20%以下であるが、その後、時間とともに $\gamma_{\max}=0.570\%$ 超過領域は岩盤の深部に広がり、1 年後に側部で坑道掘削径 D の 20%以下を超え、1 万年後には坑道掘削径 D の 30%の領域まで拡大する。

図 3.3.5-49 および図 3.3.5-51 より、周辺岩盤は掘削直後から弾性係数は低下し続け、1 万年後の坑道周辺岩盤の弾性係数は壁面近傍で初期値の 20~80%程度まで低下したことがわかった。特に、肩部に弾性係数の低下領域が集中し、1 万年後の弾性係数は初期値の 20%まで低下した。

また、図 3.3.5-51 において 100 年以降に弾性係数が急激に低下し、400 年頃にその低下が収まり、その後の弾性係数の変化が小さくなっている。これは、支保工の劣化が 400 年で完了することに対応していると考えられる。

図 3.3.5-50 より、1 万年後の坑道周辺岩盤の透水係数は最大約 7 倍まで増加することがわかった。透水係数が増加する領域は肩部と下半側部の局所的な領域に発生し、坑道全周にわたって広がる分布とはならなかった。

掘削径 D の 20% の領域



掘削径 D の 20% の領域

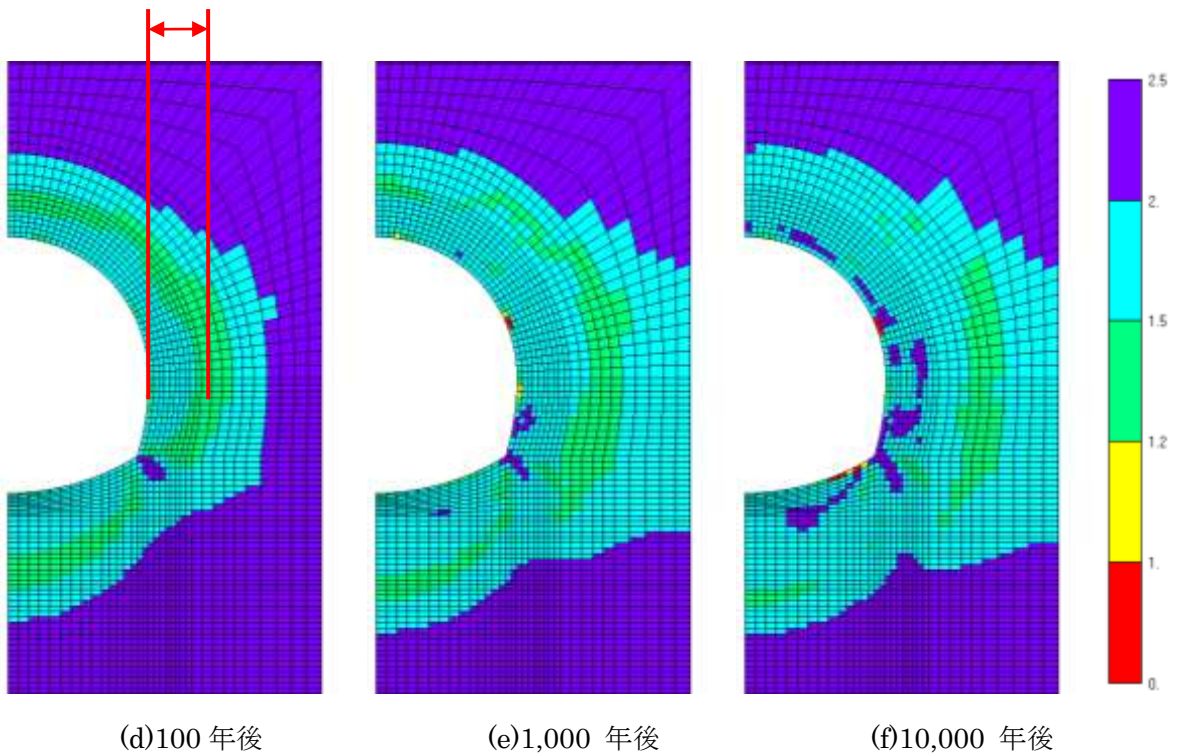
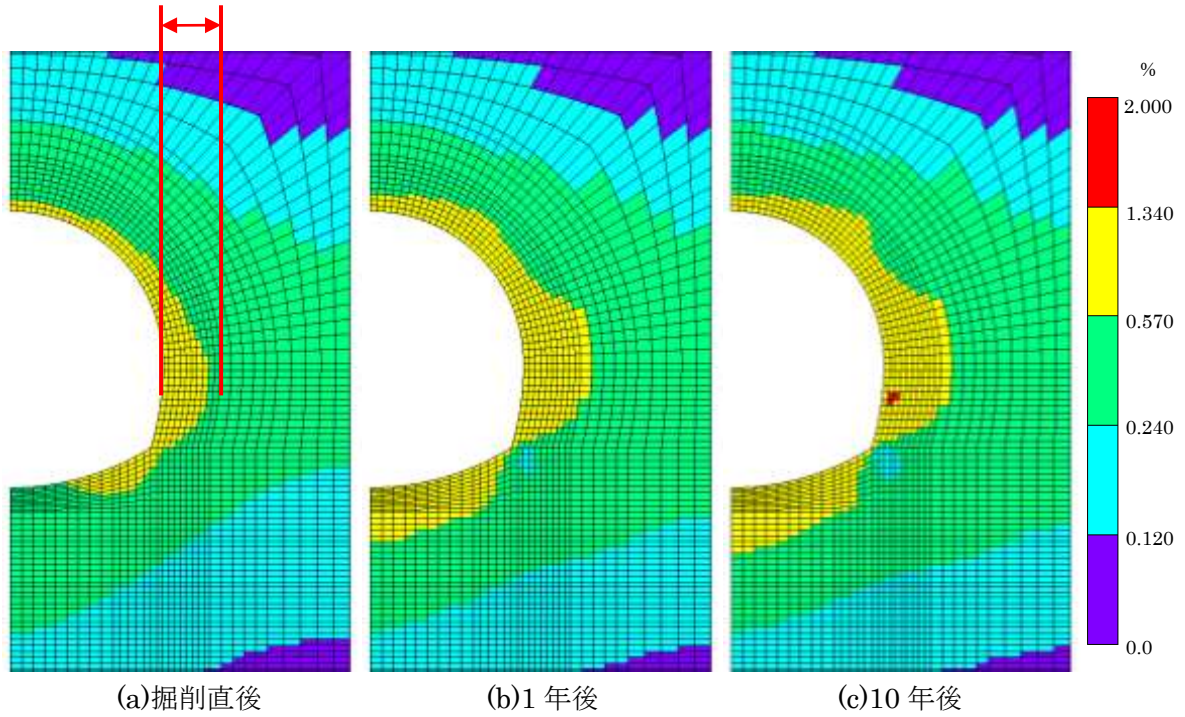


図 3.3.5-47 周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース 5 : A 断面)

掘削径 D の 20% の領域



掘削径 D の 20% の領域

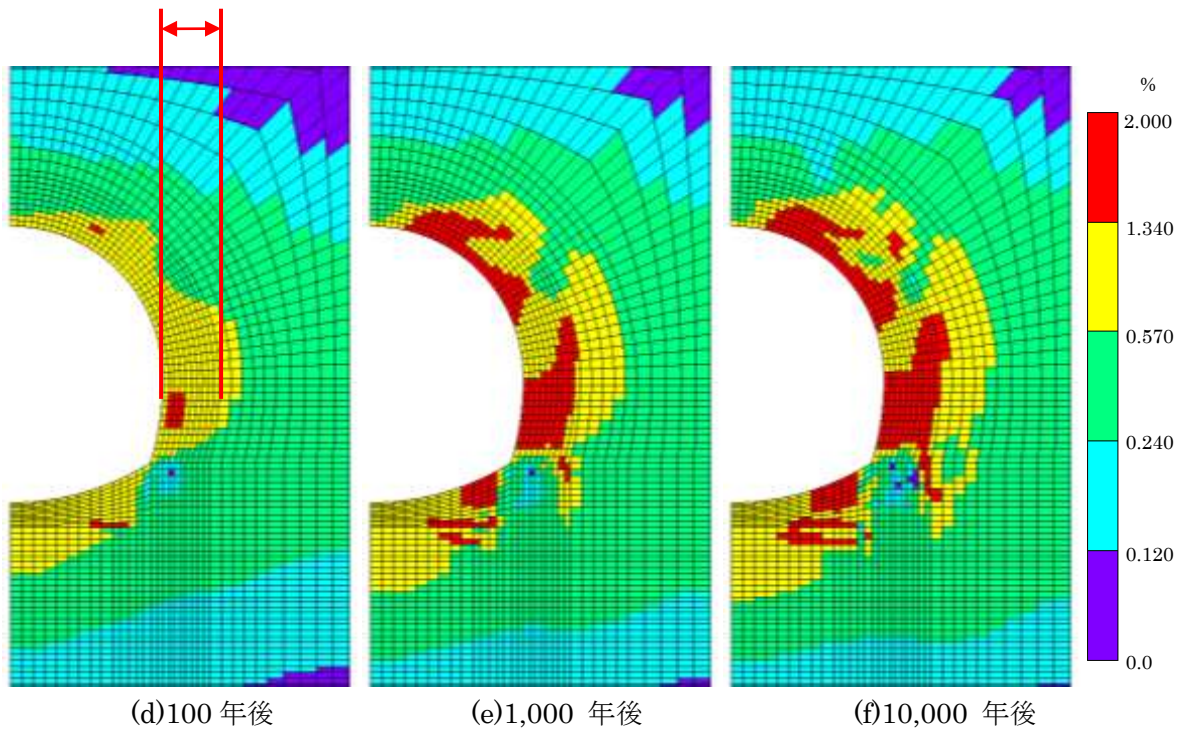


図 3.3.5-48 周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 5 : A 断面)

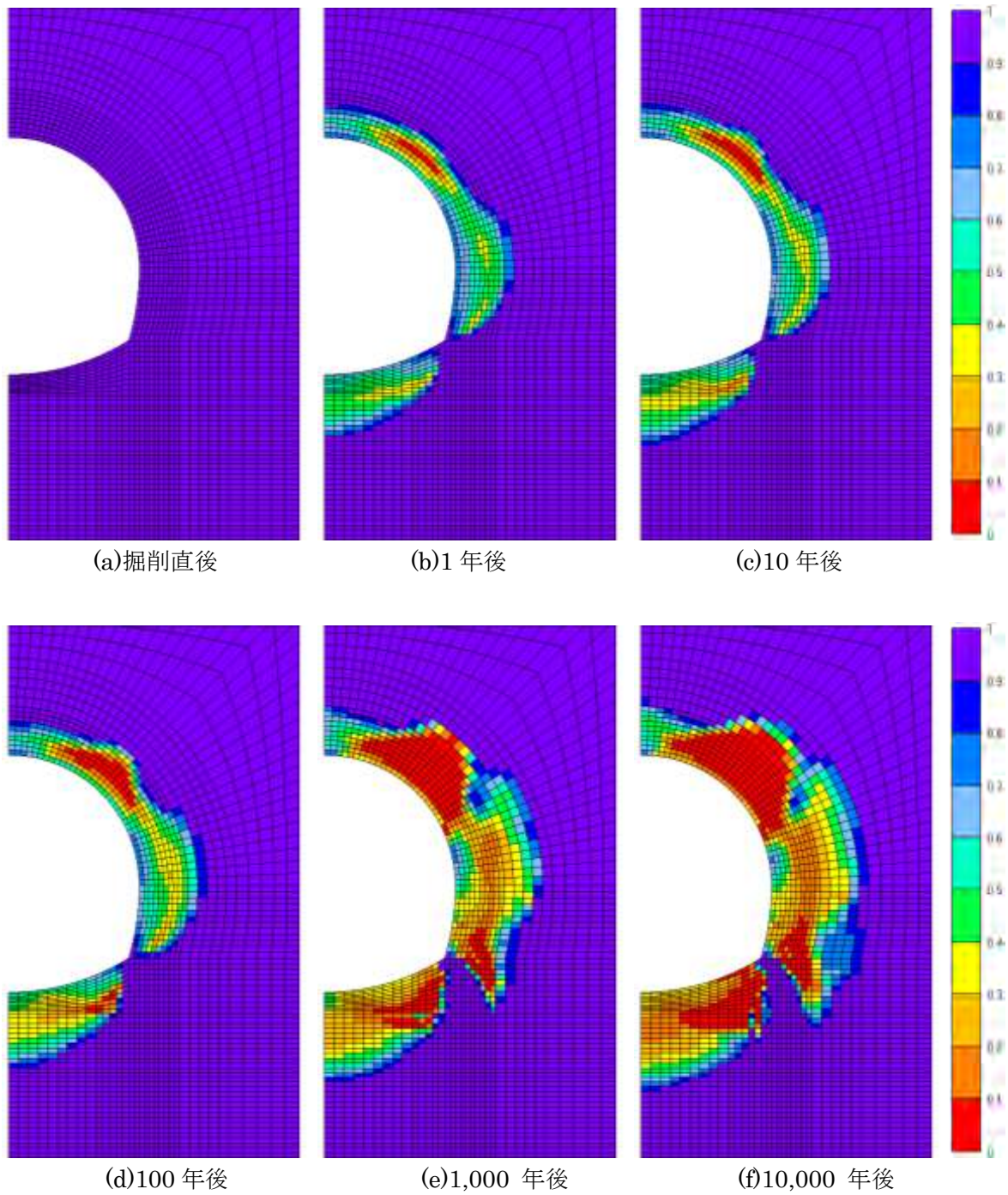


図 3.3.5-49 周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 5 : A 断面)

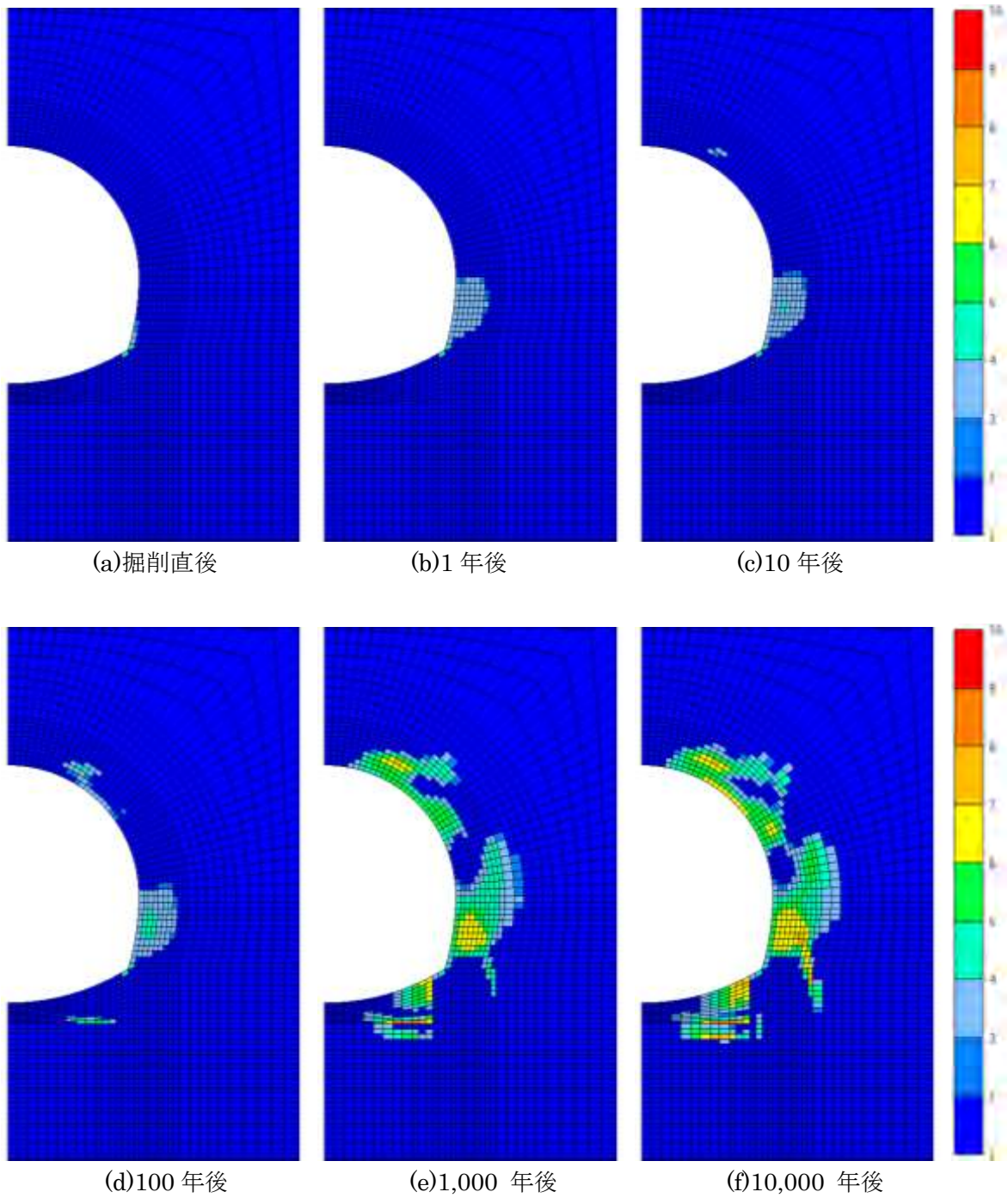
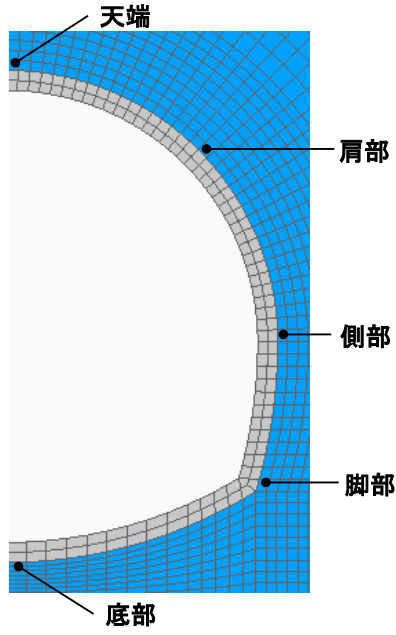


図 3.3.5-50 周辺岩盤の透水係数の変化の分布 (ケース 5 : A 断面)



着目した壁面近傍の要素

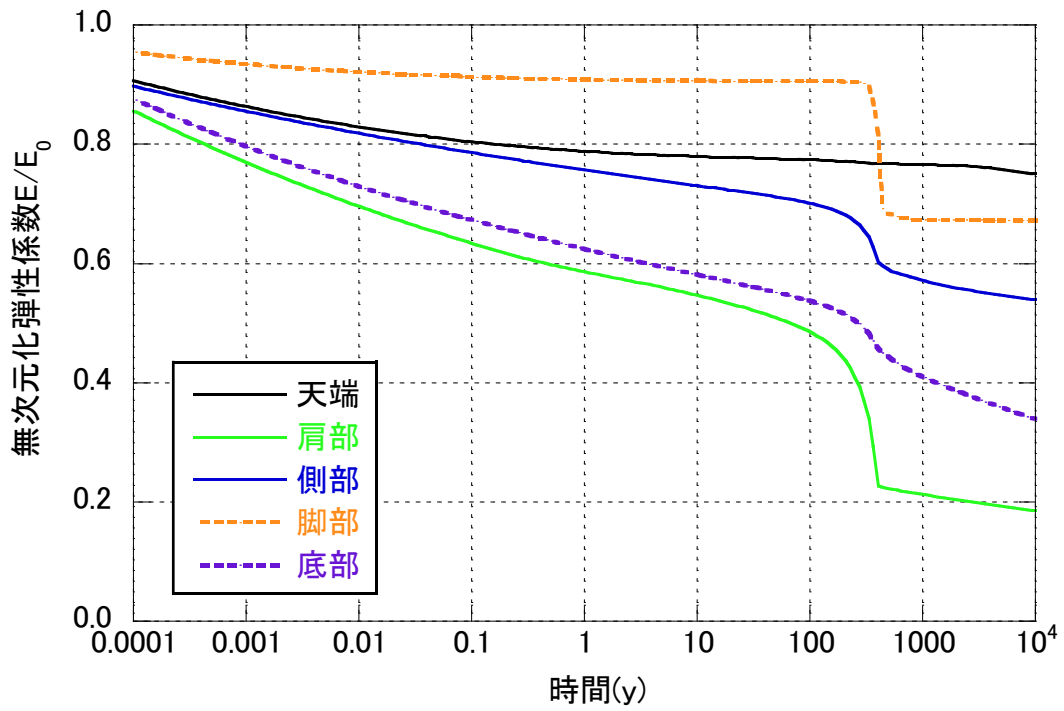


図 3.3.5-51 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 5 : A 断面)

➤ B 断面

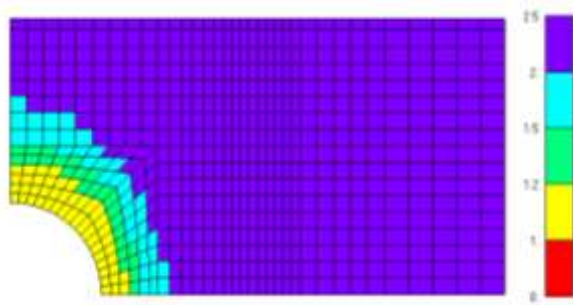
処分孔周辺岩盤における局所安全率の分布を図 3.3.5-52 に、最大せん断ひずみの分布を図 3.3.5-53 に、弾性係数の変化を図 3.3.5-54 に、透水係数の変化を図 3.3.5-55 に示す。また、壁面近傍の要素の弾性係数の経時変化を図 3.3.5-56 に示す。

処分孔周辺岩盤では、局所安全率 $F_s=1.2$ の領域は、掘削直後に処分孔の壁面近傍に生じ、その後、時間の経過に伴い、 $F_s=1.2$ の領域は小さくなる傾向を示した。

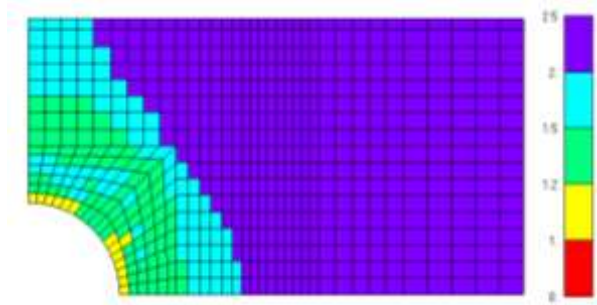
一方、最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}=0.570\%$ 超過領域は、掘削直後から処分孔周辺に生じ、時間の経過に伴い、坑道中央側に拡大し、1 万年後には解析領域の境界にまで達した。

処分孔周辺岩盤は壁面近傍で掘削直後から弾性係数は低下し続け、1 万年後の周辺岩盤の弾性係数は壁面近傍で初期値の 4~65%程度まで低下した。特に、 45° 方向に弾性係数の低下領域が集中し、1 万年後の弾性係数は初期値の 4%まで低下した。

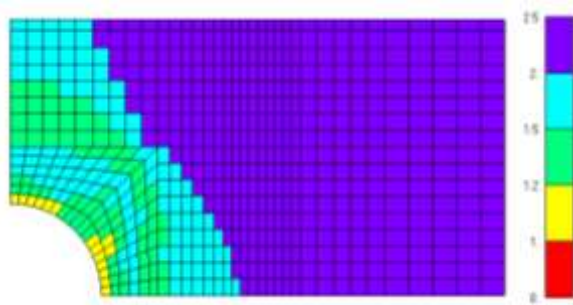
1 万年後の処分孔周辺岩盤の透水係数は 10 倍まで増加し、 45° 方向から坑道中央側に透水係数の増加する領域が広がる分布となっている。



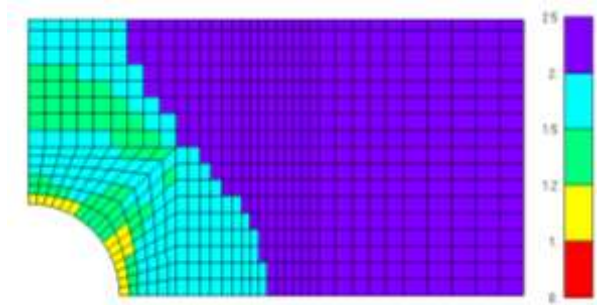
(a)掘削直後



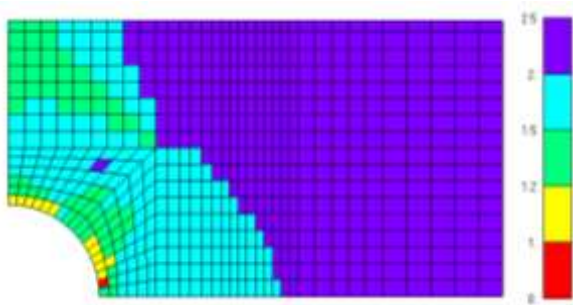
(b)1年後



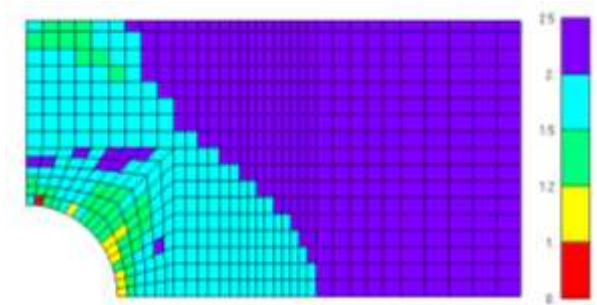
(c)10年後



(d)100年後



(e)1,000年後



(f)10,000年後

図 3.3.5-52 周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース 5 : B 断面)

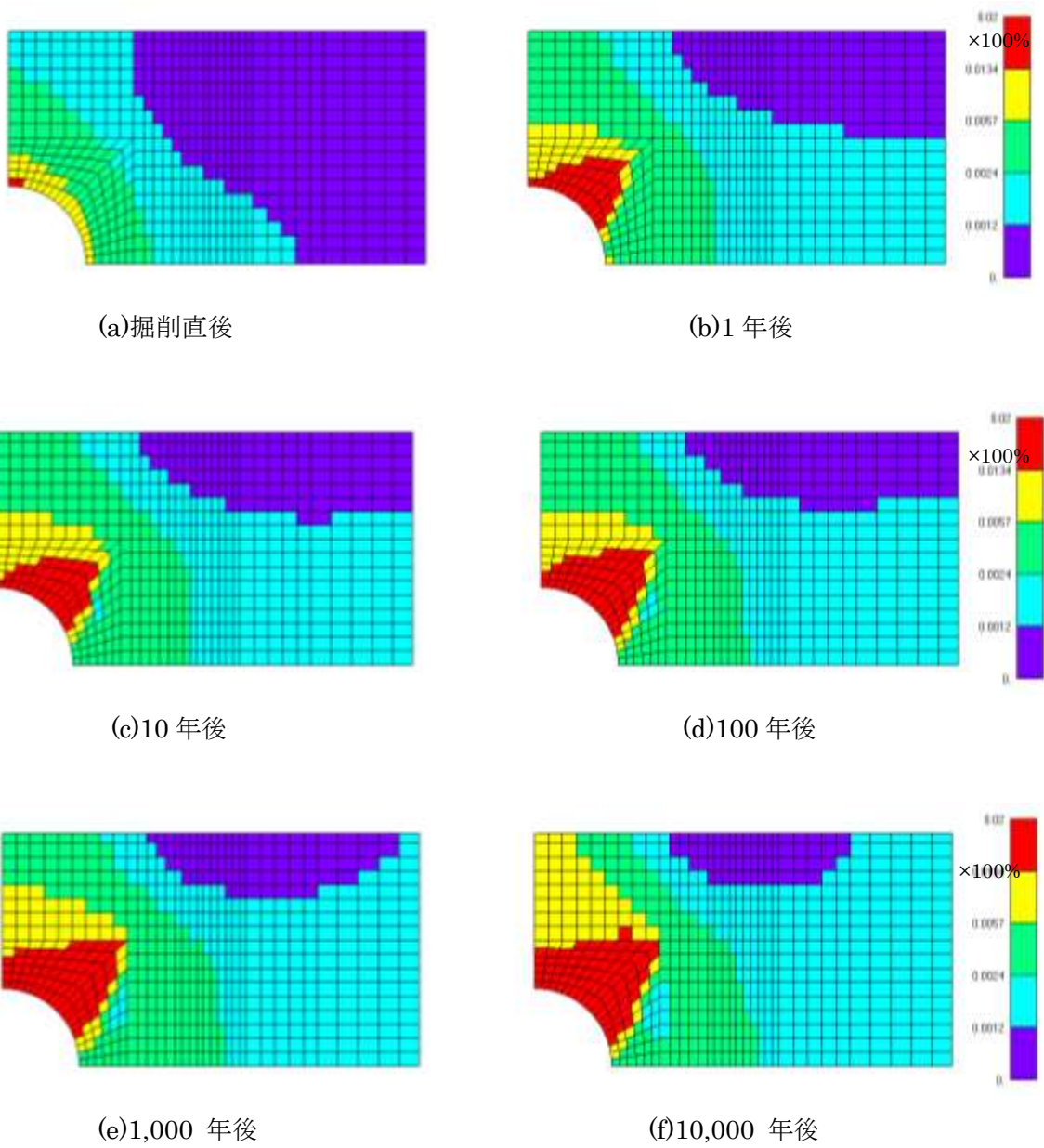


図 3.3.5-53 周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 5 : B 断面)

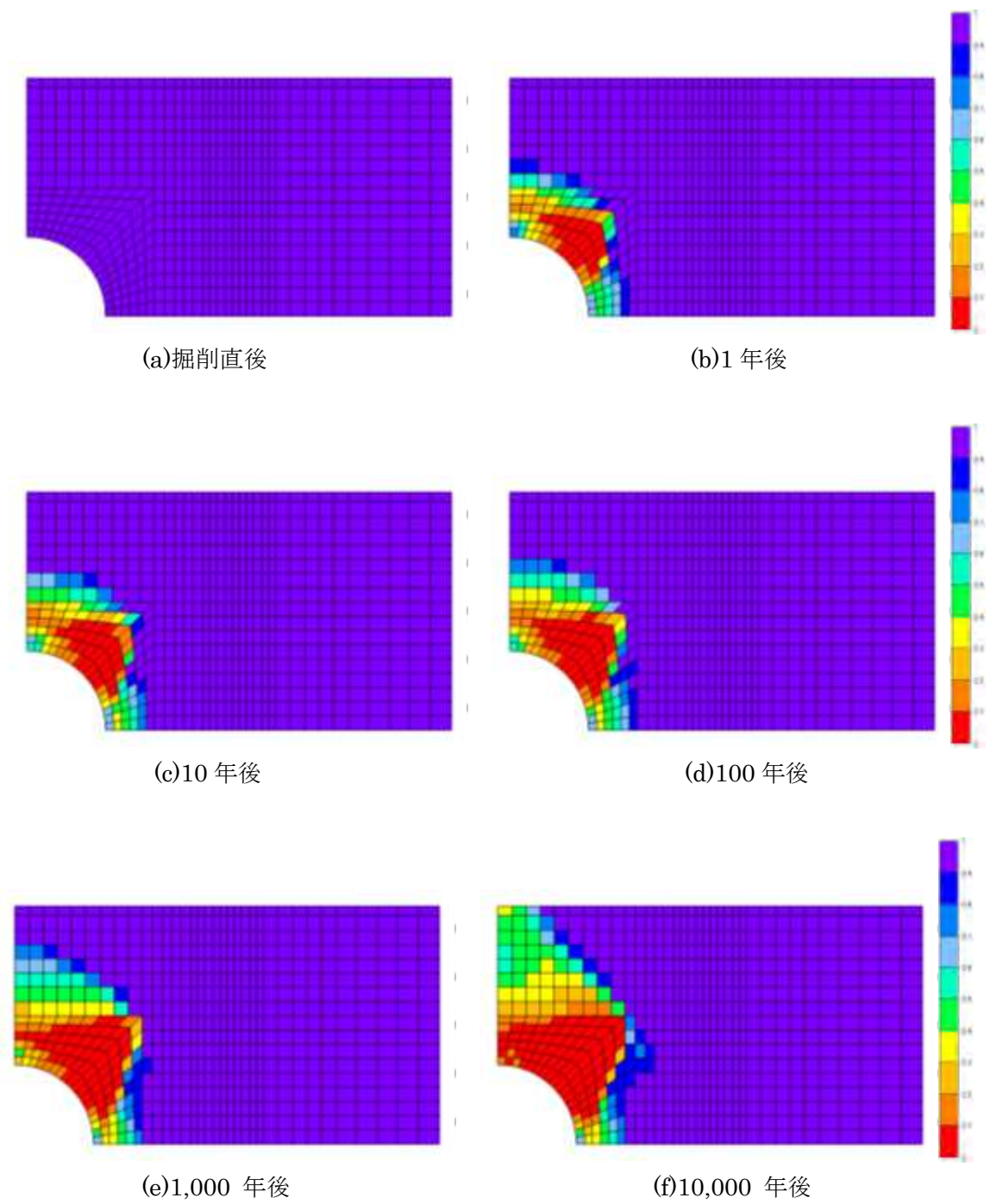


図 3.3.5-54 周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 5 : B 断面)

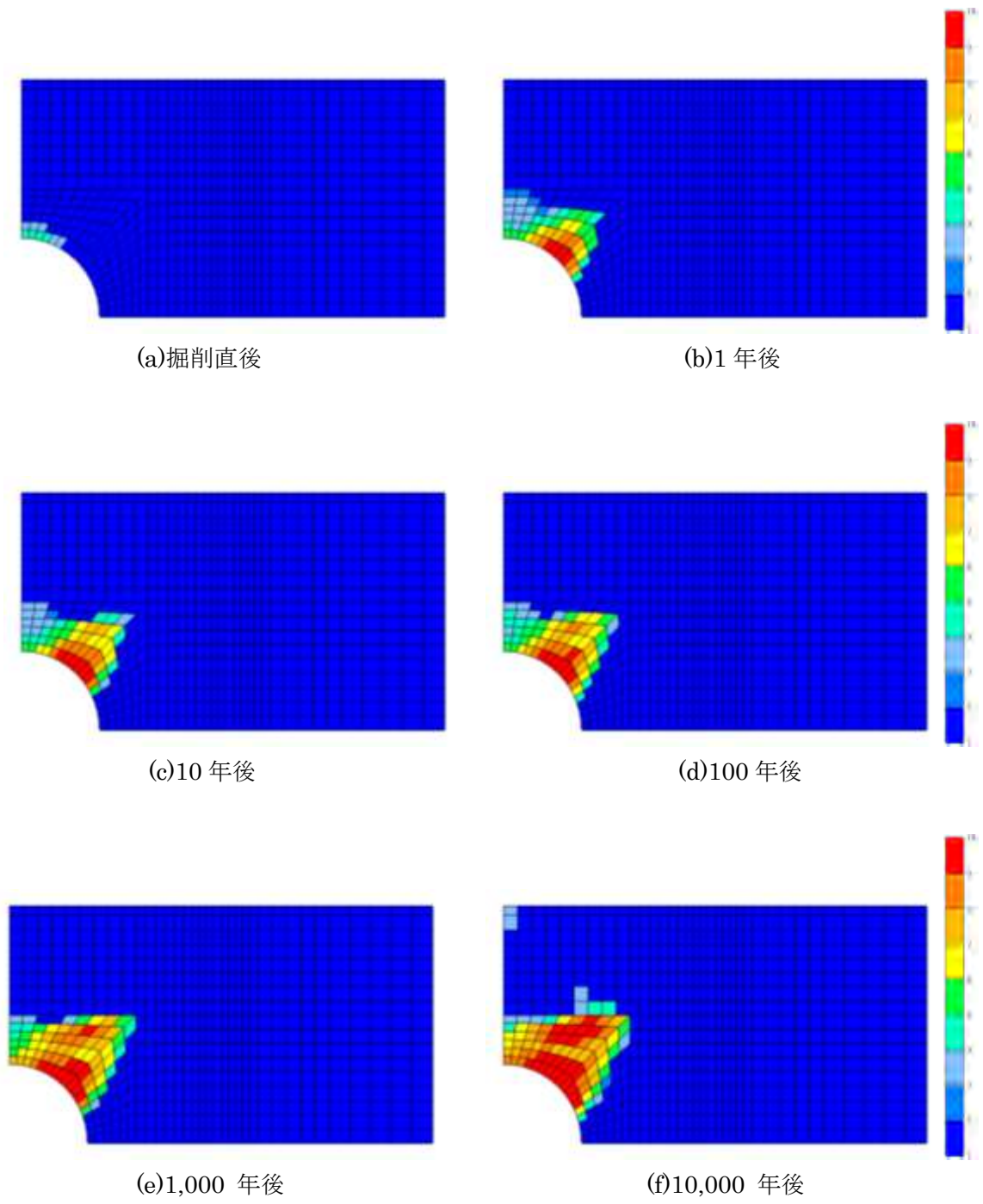
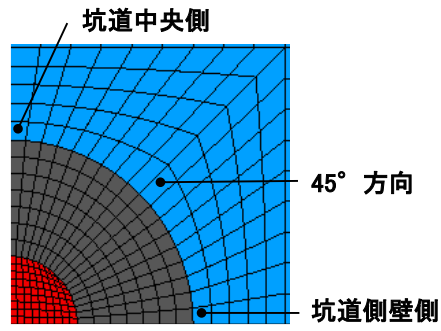


図 3.3.5-55 周辺岩盤の透水係数の変化の分布 (ケース 5 : B 断面)



着目した壁面近傍の要素

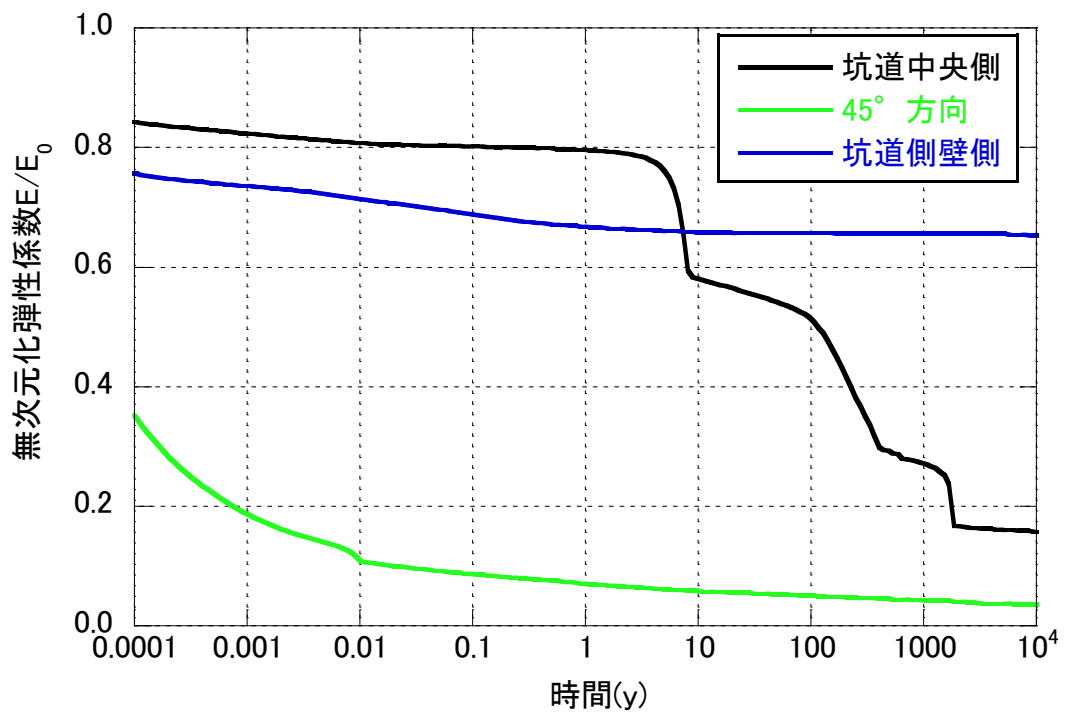


図 3.3.5-56 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 5 : B 断面)

f ケース 6

ケース 6 は、新第三紀堆積岩、豎置き方式、回収可能性維持の状態オプション③のケースである。

➤ A 断面

処分坑道周辺岩盤における局所安全率の分布を図 3.3.5-57 に、最大せん断ひずみの分布を図 3.3.5-58 に、弾性係数の変化を図 3.3.5-59 に、透水係数の変化を図 3.3.5-60 に示す。また、壁面近傍の要素の弾性係数の経時変化を図 3.3.5-61 に示す。

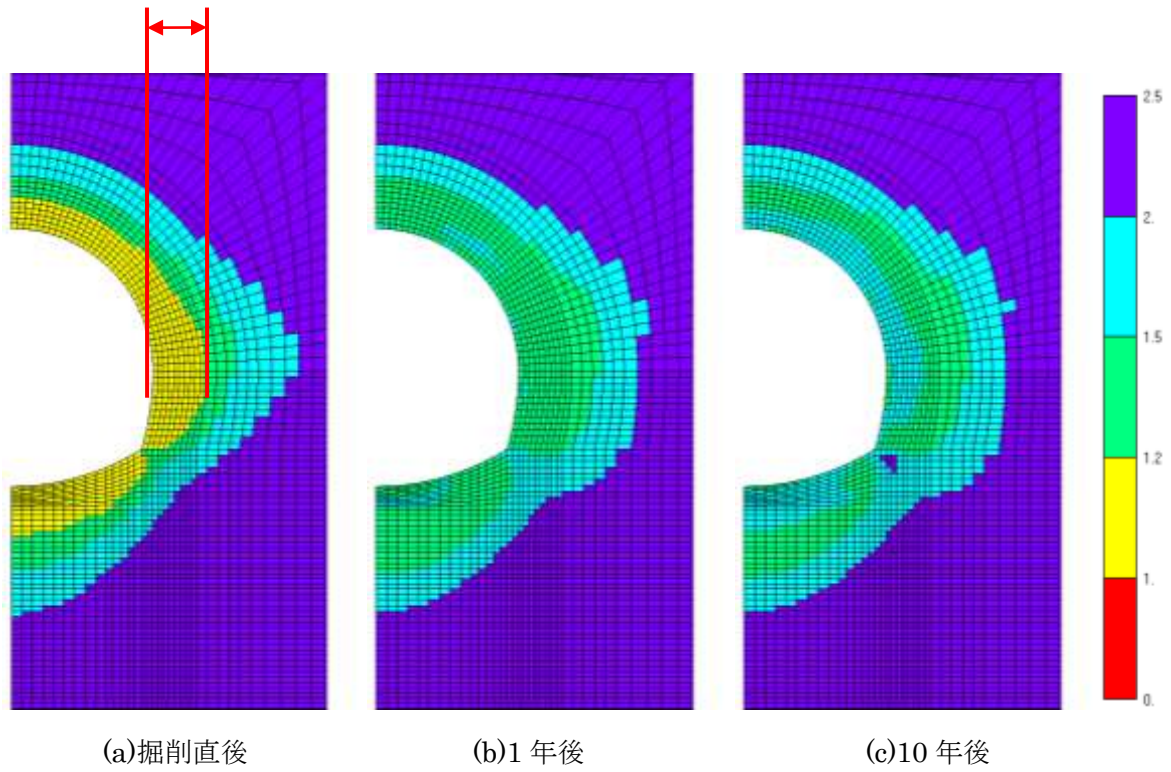
処分坑道周辺岩盤では、局所安全率 $F_s=1.2$ の領域は、掘削直後、坑道掘削径 D の 20%以下を満足する結果となり、その後、時間が経過すると $F_s=1.2$ の領域は発生しなくなる。

一方、最大せん断ひずみが限界せん断ひずみ (0.570%) を超過する領域 (以下、 $\gamma_{\max}=0.570\%$ 超過領域) は、掘削直後、坑道掘削径 D の 20%以下であるが、その後、時間とともに $\gamma_{\max}=0.570\%$ 超過領域は岩盤の深部に広がり、1 年後に側部で坑道掘削径 D の 20%以下を超え、1 万年後には坑道掘削径 D の 30%の領域まで拡大する。

図 3.3.5-59 および図 3.3.5-61 より、周辺岩盤は掘削直後から弾性係数は低下し続け、1 万年後の坑道周辺岩盤の弾性係数は壁面近傍で初期値の 20~80%程度まで低下したことがわかった。特に、肩部に弾性係数の低下領域が集中し、1 万年後の弾性係数は初期値の 20%まで低下した。

図 3.3.5-60 より、1 万年後の坑道周辺岩盤の透水係数は最大約 7 倍まで増加することがわかった。透水係数が増加する領域は肩部と下半側部の局所的な領域に発生し、坑道全周にわたって広がる分布とはならなかった。

掘削径 D の 20% の領域



掘削径 D の 20% の領域

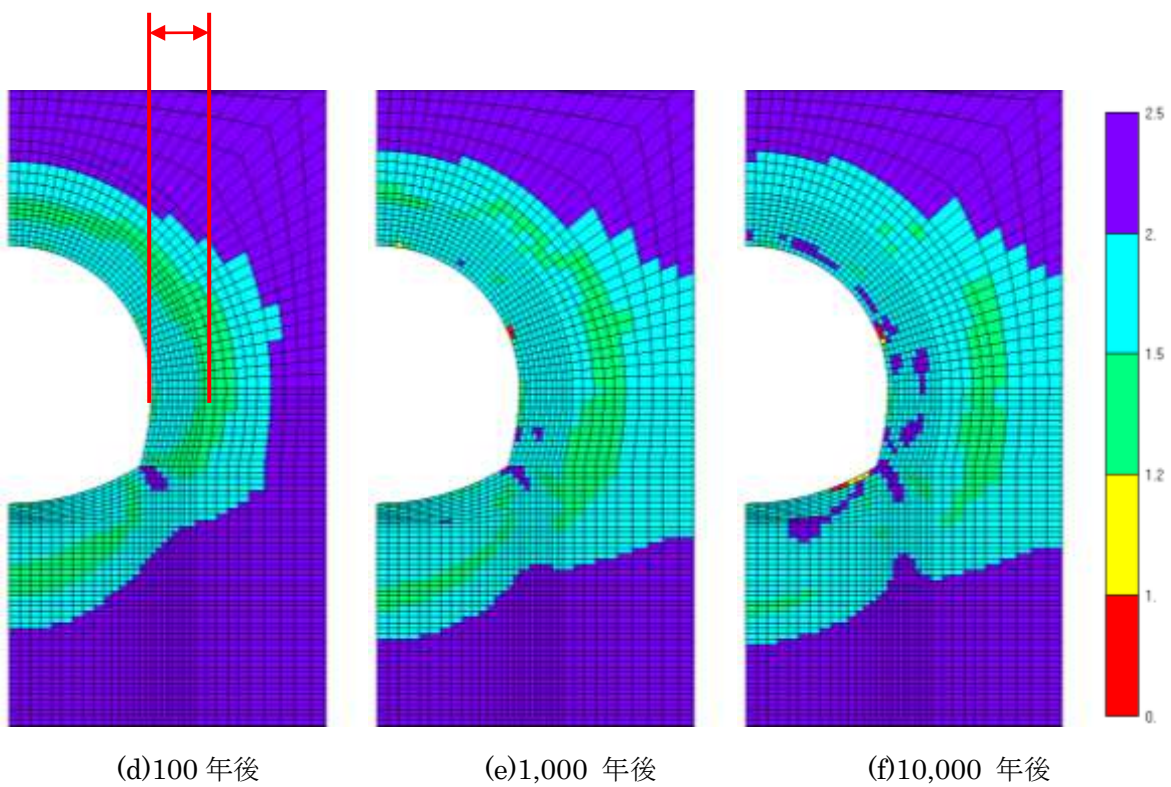
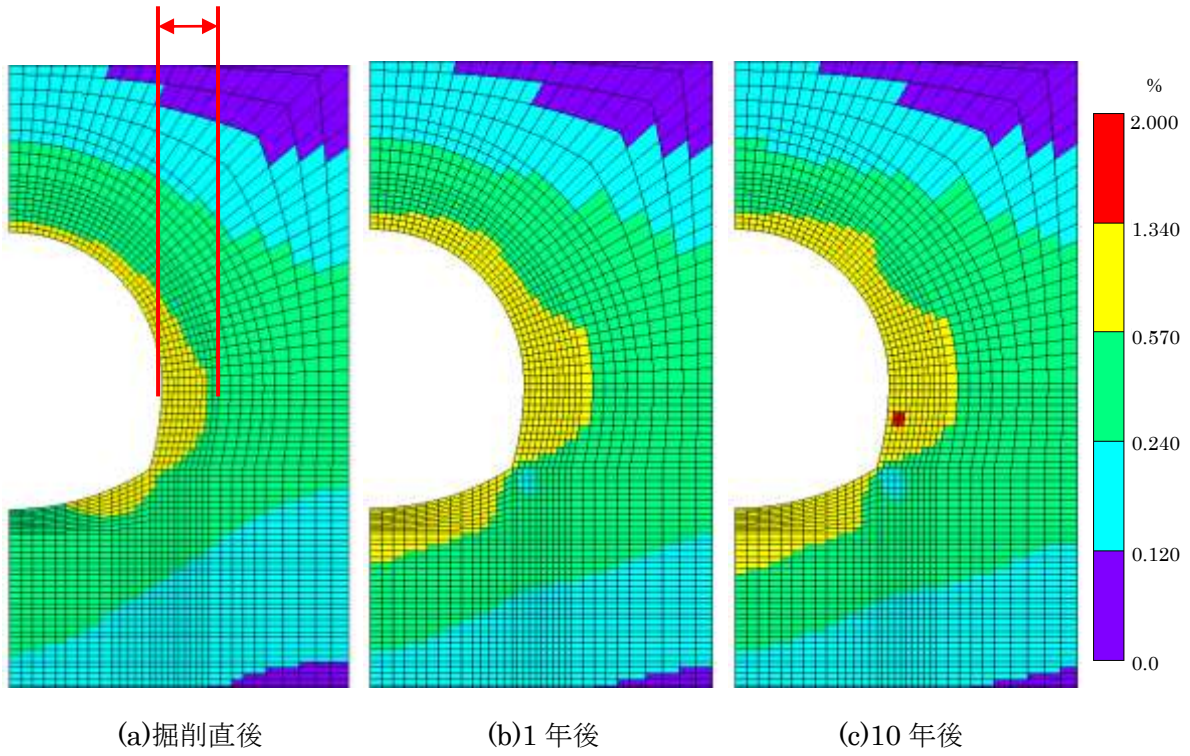


図 3.3.5-57 周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース 6 : A 断面)

掘削径 D の 20% の領域



掘削径 D の 20% の領域

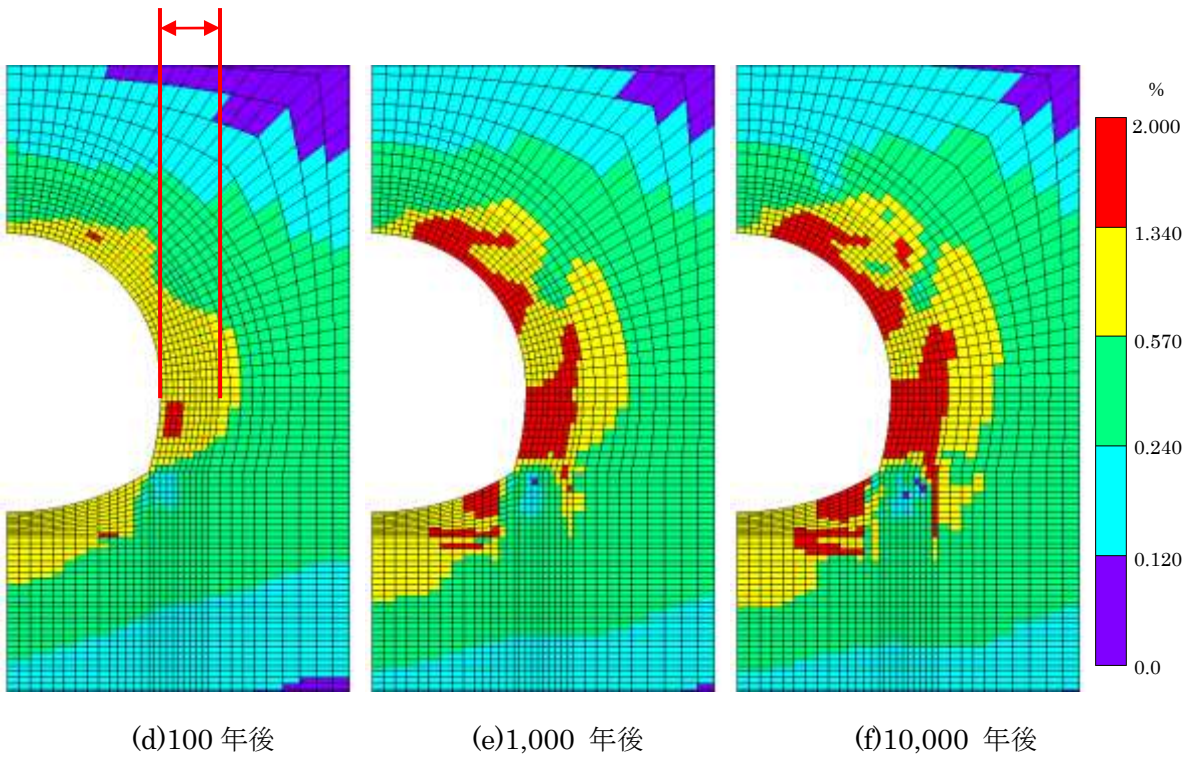
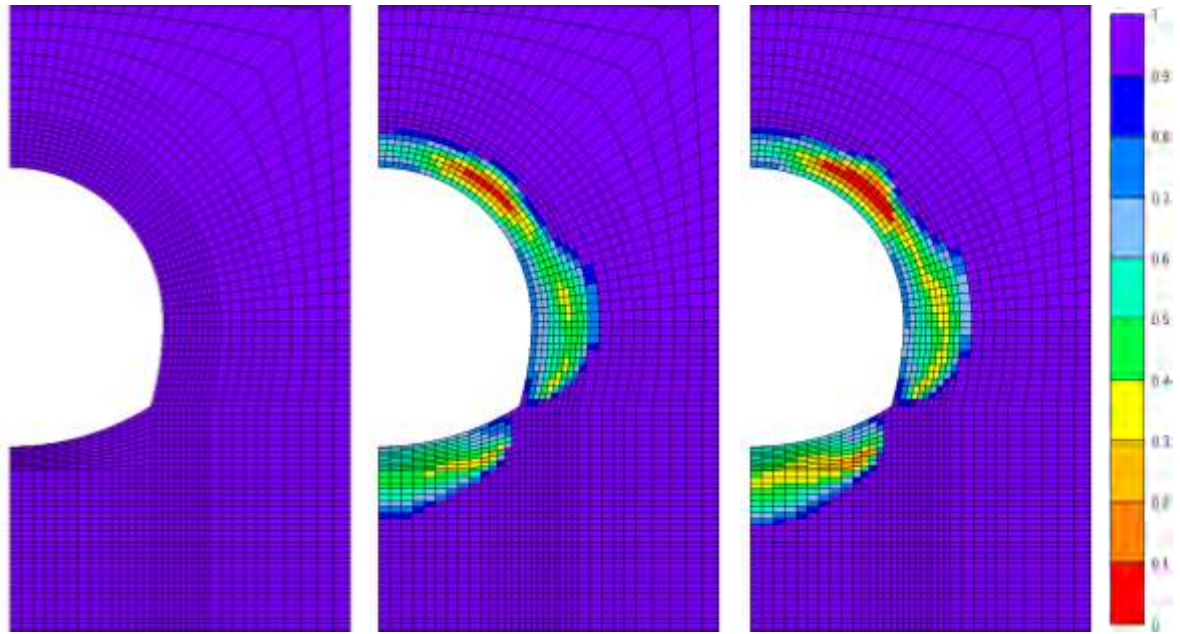


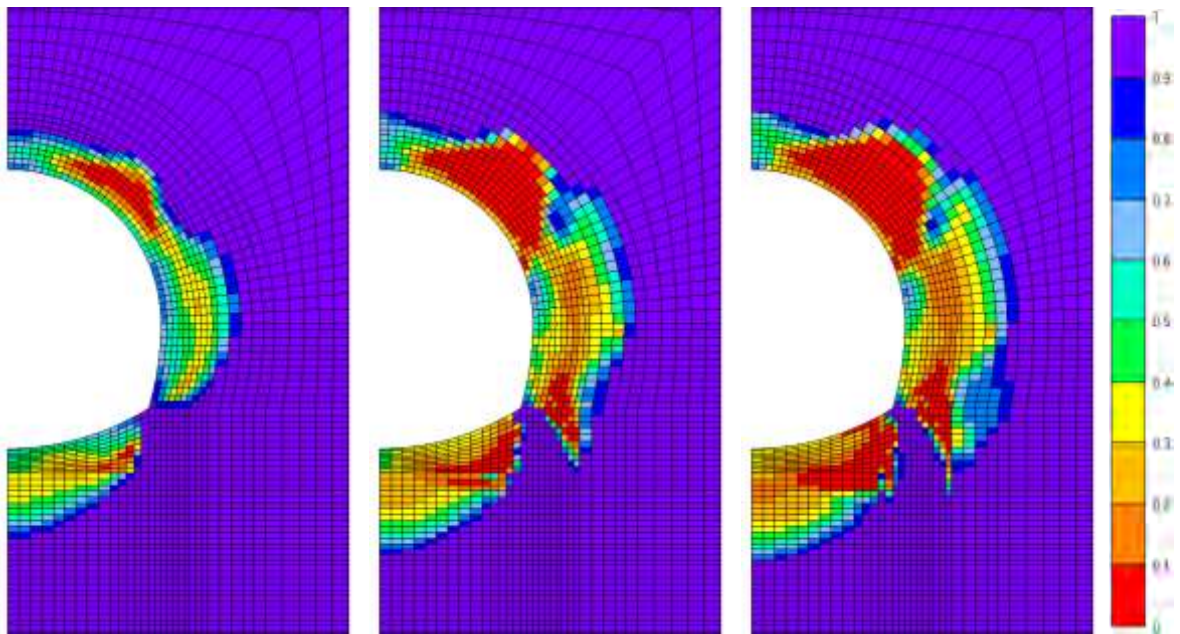
図 3.3.5-58 周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 6 : A 断面)



(a)掘削直後

(b)1年後

(c)10年後

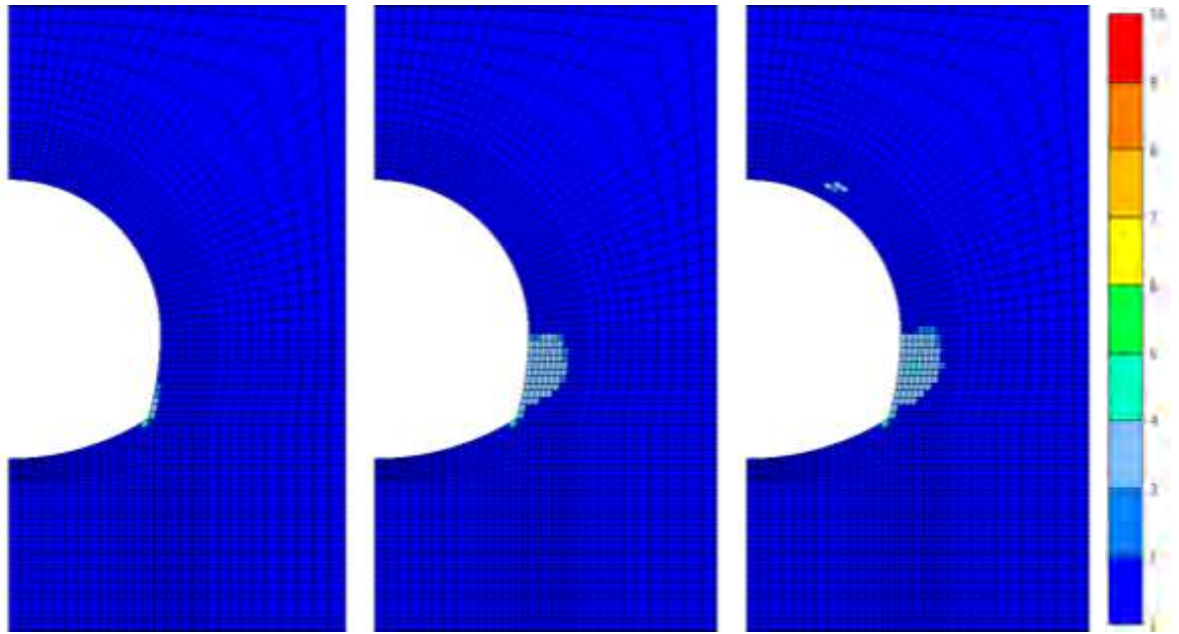


(d)100年後

(e)1,000年後

(f)10,000年後

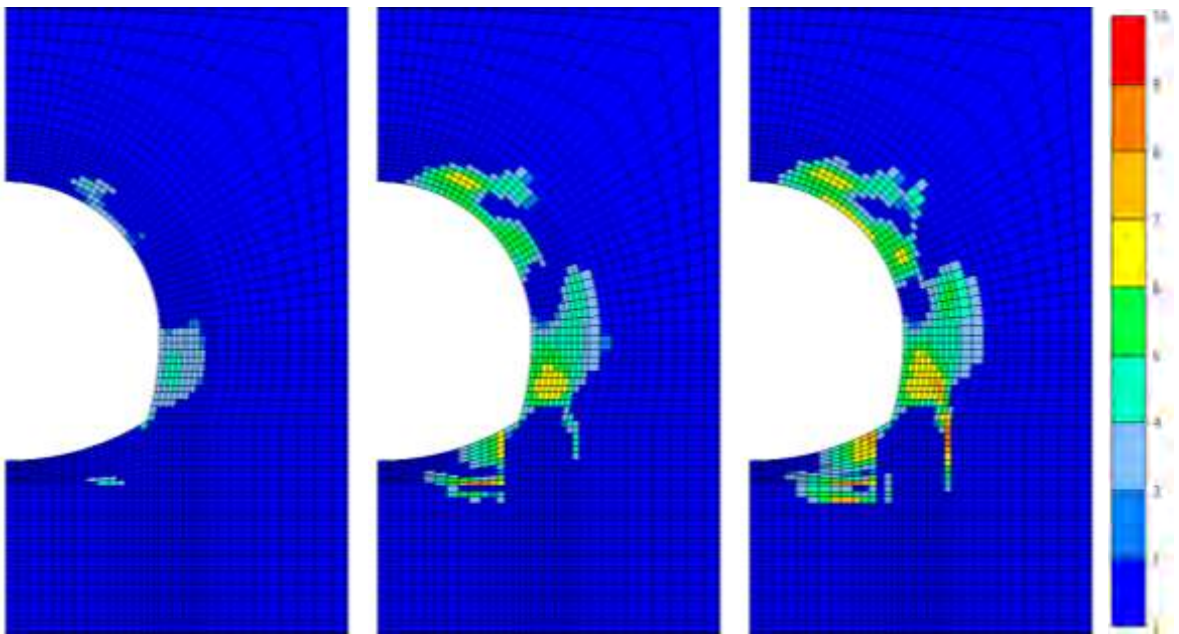
図 3.3.5-59 周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 6 : A 断面)



(a)掘削直後

(b)1年後

(c)10年後

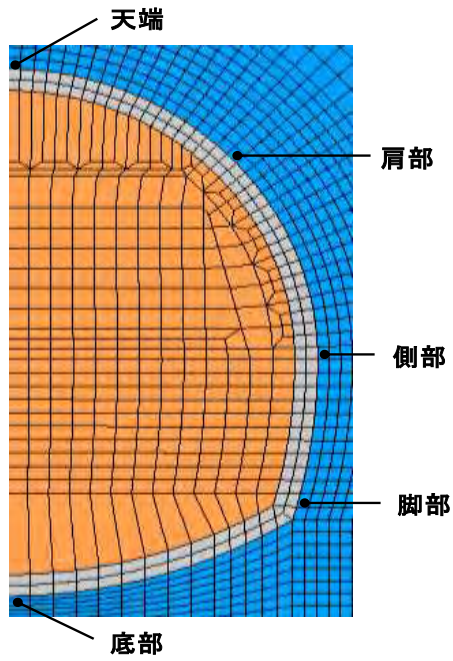


(d)100年後

(e)1,000年後

(f)10,000年後

図 3.3.5-60 周辺岩盤の透水係数の変化の分布 (ケース 6 : A 断面)



着目した壁面近傍の要素

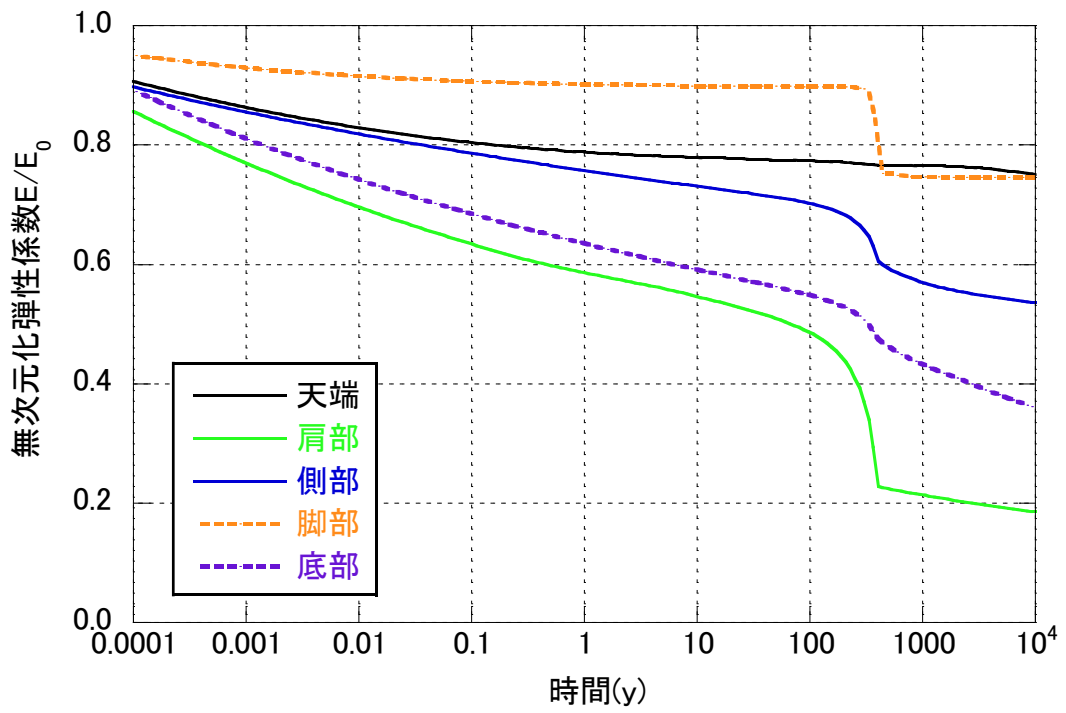


図 3.3.5-61 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 6 : A 断面)

➤ B 断面

処分孔周辺岩盤における局所安全率の分布を図 3.3.5-62 に、最大せん断ひずみの分布を図 3.3.5-63 に、弾性係数の変化図 3.3.5-64 に、透水係数の変化を図 3.3.5-65 に示す。また、壁面近傍の要素の弾性係数の経時変化を図 3.3.5-66 に示す。

処分孔周辺岩盤では、局所安全率 $F_s=1.2$ の領域は、掘削直後に処分孔の壁面近傍に生じ、その後、時間の経過に伴い、 $F_s=1.2$ の領域は小さくなる傾向を示した。一方、最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}=0.570\%$ 超過領域は、掘削直後から処分孔周辺に生じ、時間の経過に伴い、坑道中央側に拡大し、1 万年後には解析領域の境界にまで達した。

処分孔周辺岩盤は壁面近傍で掘削直後から弾性係数は低下し続け、1 万年後の周辺岩盤の弾性係数は壁面近傍で初期値の 4～65%程度まで低下した。特に、 45° 方向に弾性係数の低下領域が集中し、1 万年後の弾性係数は初期値の 4%まで低下した。

1 万年後の処分孔周辺岩盤の透水係数は 10 倍まで増加し、 45° 方向から坑道中央側に透水係数の増加する領域が広がる分布となっている。

本ケースの結果をケース 5 の B 断面の結果と比較すると、各コンター図からは両者の結果にほとんど差は見られなかったが、1 万年後の無次元化弾性係数は坑道中央側でケース 5 が 0.157 となるのに対してケース 6 は 0.079 となり、ケース 6 の方が小さくなった。

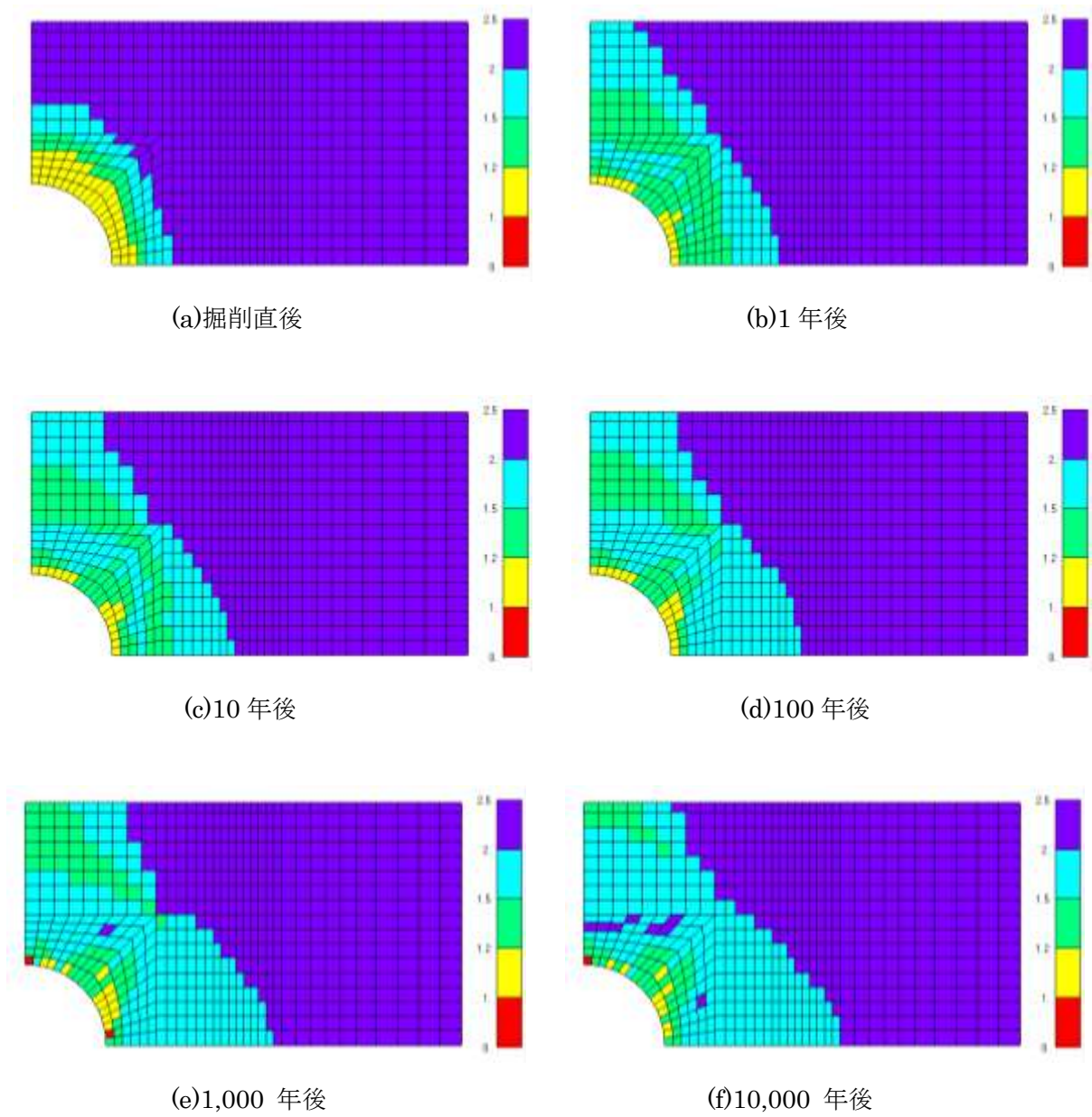


図 3.3.5-62 周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース 6 : B 断面)

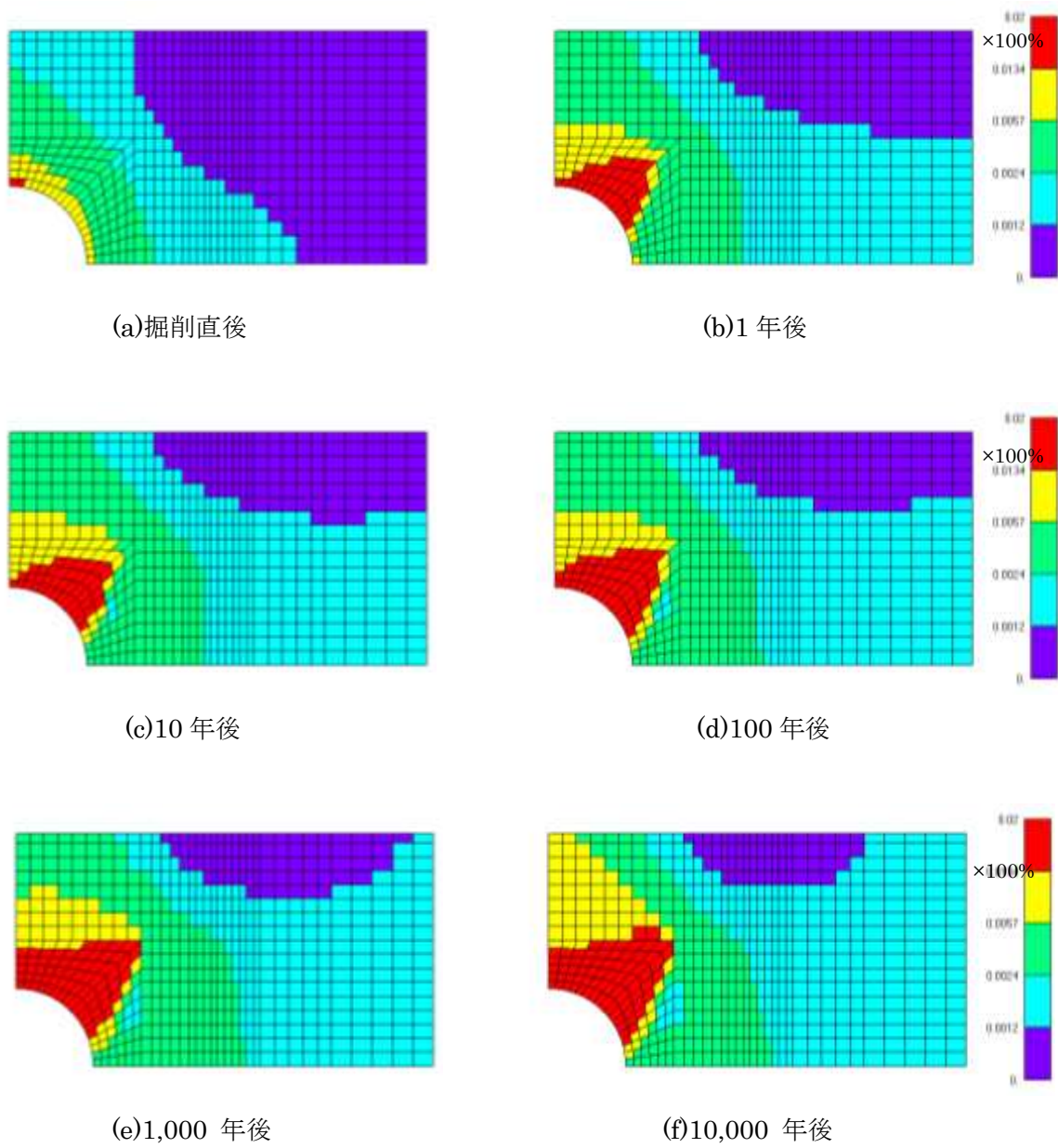


図 3.3.5-63 周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 6 : B 断面)

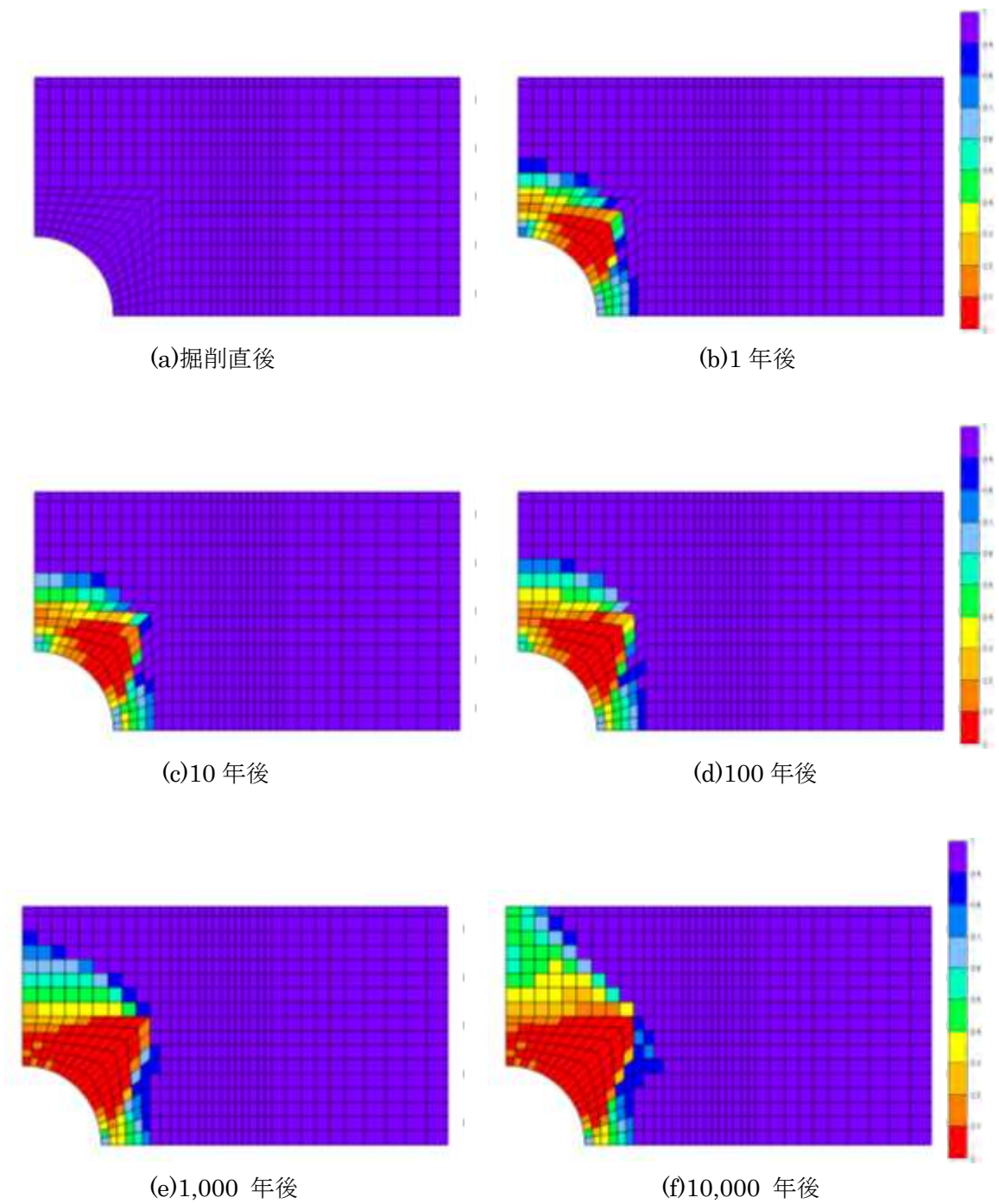


図 3.3.5-64 周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 6 : B 断面)

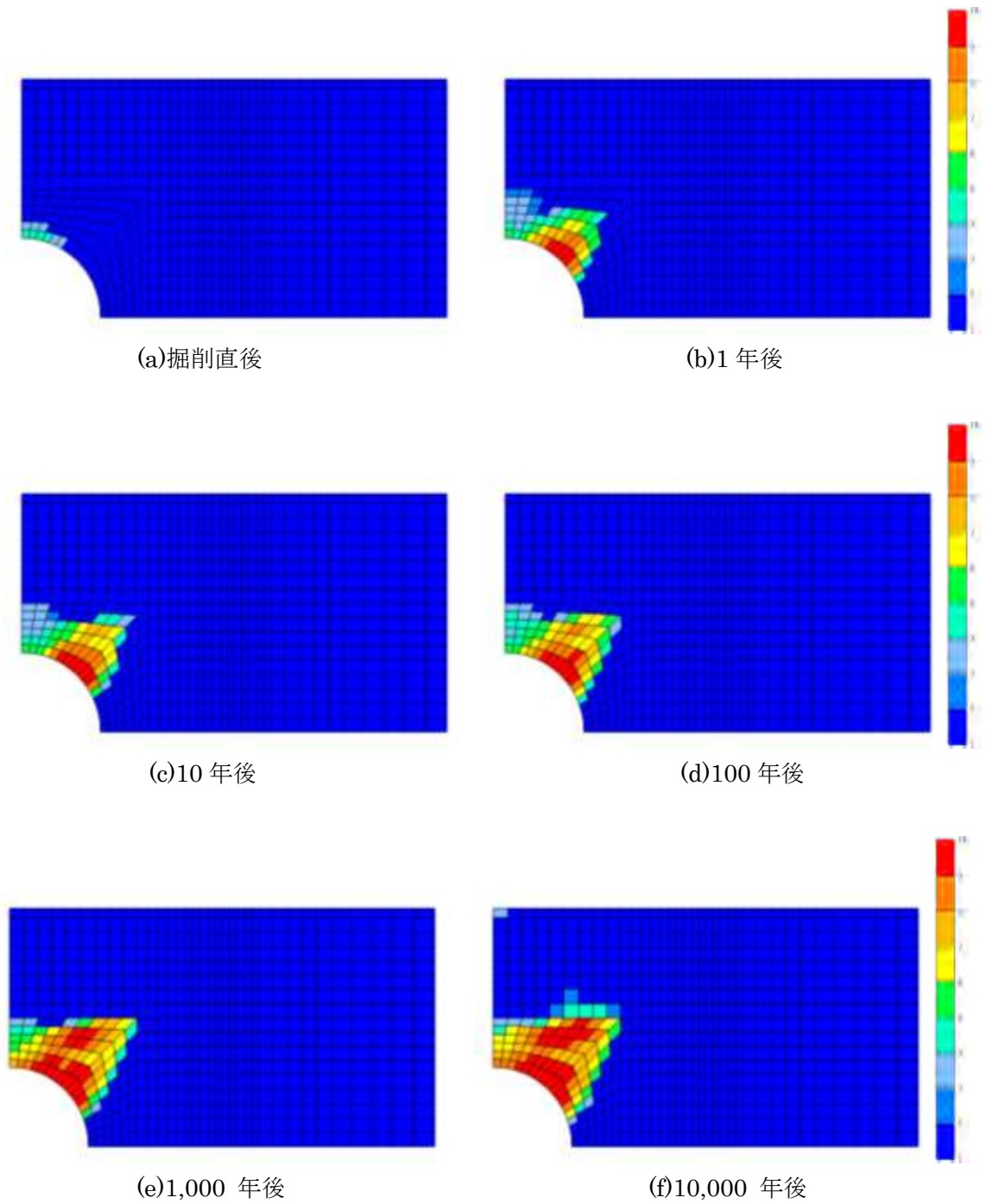
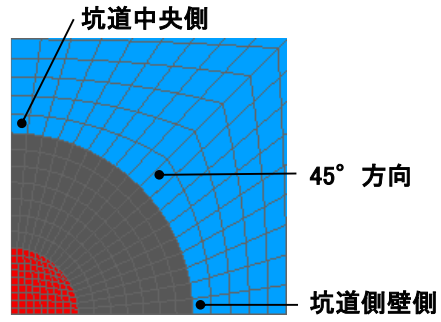


図 3.3.5-65 周辺岩盤の透水係数の変化の分布 (ケース 6 : B 断面)



着目した壁面近傍の要素

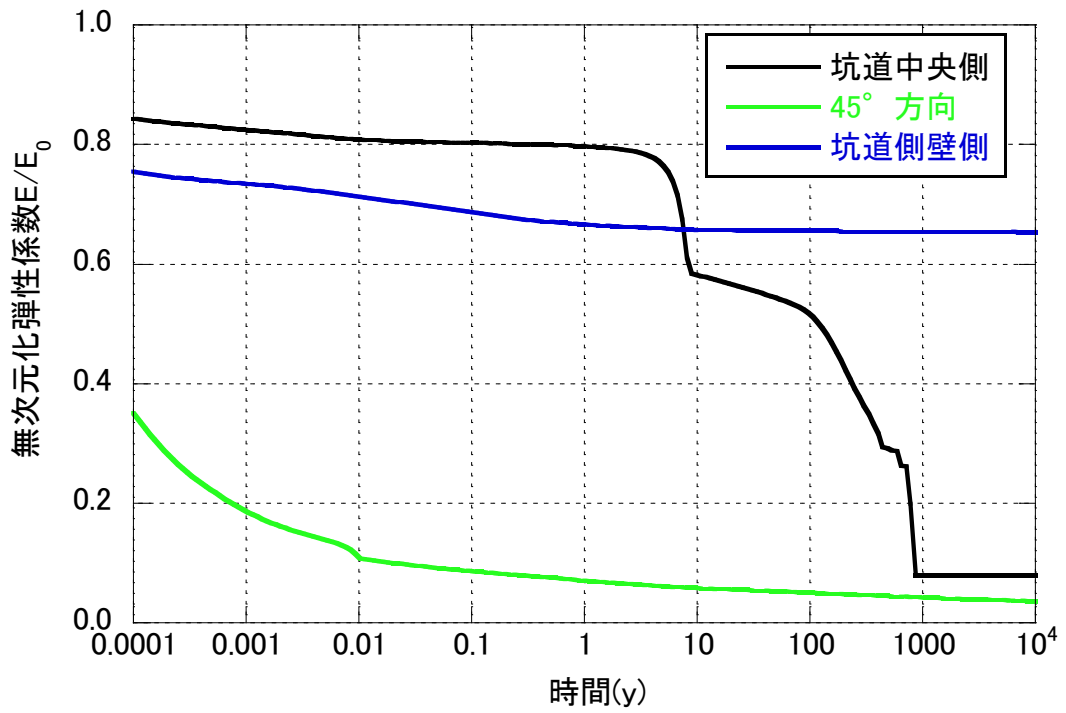


図 3.3.5-66 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 6 : B 断面)

g ケース 7

ケース 7 は、新第三紀堆積岩、横置き方式、回収可能性維持の状態オプション①のケースである。

処分坑道周辺岩盤における局所安全率の分布を図 3.3.5-67 に、最大せん断ひずみの分布を図 3.3.5-68 に、弾性係数の変化を図 3.3.5-69 に、透水係数の変化を図 3.3.5-70 に示す。また、壁面近傍の要素の弾性係数の経時変化を図 3.3.5-71 に示す。

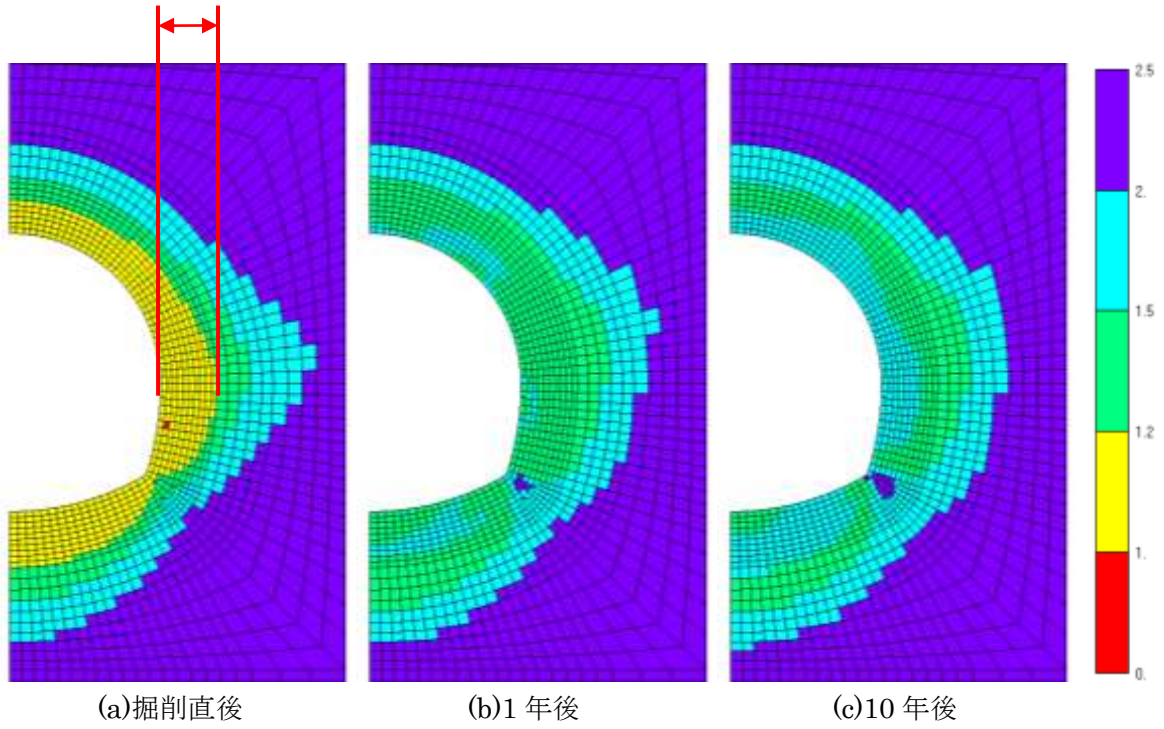
処分坑道周辺岩盤では、局所安全率 $F_s=1.2$ の領域は、掘削直後、坑道掘削径 D の 20%以下を満足する結果となり、その後、時間が経過すると $F_s=1.2$ の領域は発生しなくなる。

一方、最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}=0.570\%$ 超過領域は、掘削直後、坑道掘削径 D の 20%以下であるが、その後、時間とともに $\gamma_{\max}=0.570\%$ 超過領域は岩盤の深部に広がり、1 年後に側部で坑道掘削径 D の 20%以下を超え、1 万年後には坑道掘削径 D の 30%の領域まで拡大する。

図 3.3.5-69 および図 3.3.5-71 より、周辺岩盤は掘削直後から弾性係数は低下し続け、1 万年後の坑道周辺岩盤の弾性係数は壁面近傍で初期値の 10~20%程度まで低下したことがわかった。特に、肩部に弾性係数の低下領域が集中し、肩部の岩盤深部では弾性係数は初期値の 10%まで低下した。

図 3.3.5-70 より、1 万年後の坑道周辺岩盤の透水係数は最大約 7 倍まで増加することがわかった。透水係数が増加する領域は肩部と下半側部の局所的な領域に発生し、坑道全周にわたって広がる分布とはならなかった。

掘削径 D の 20% の領域



掘削径 D の 20% の領域

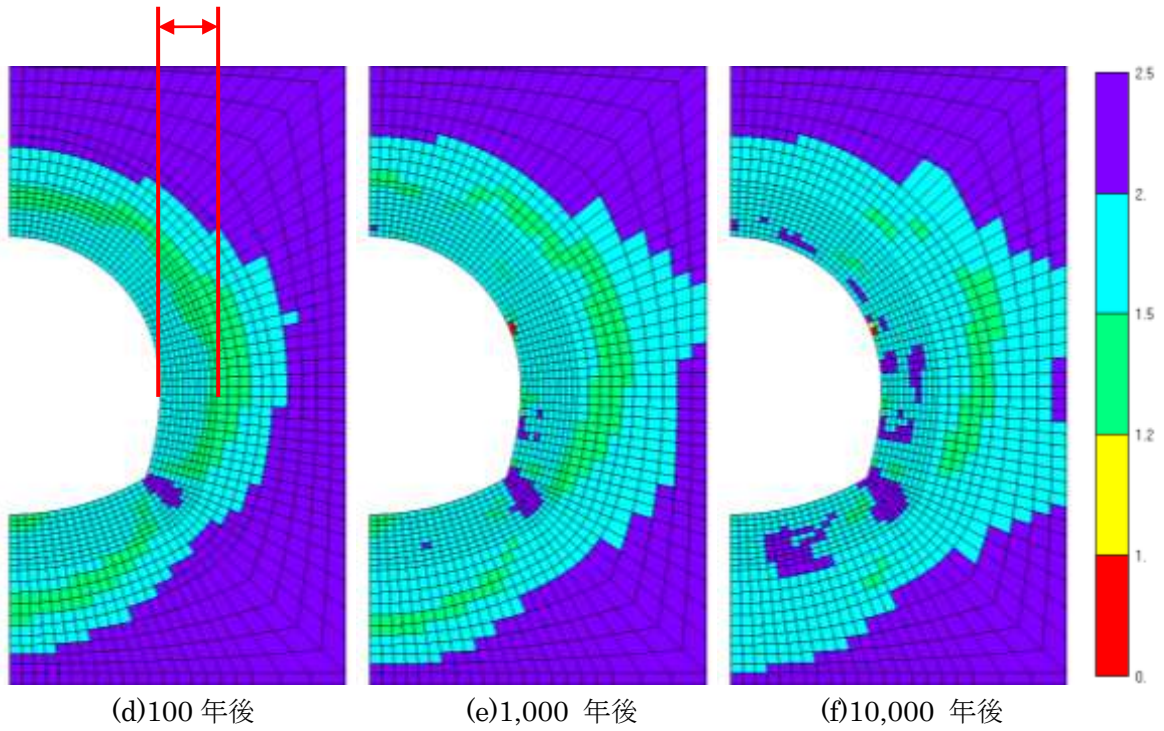
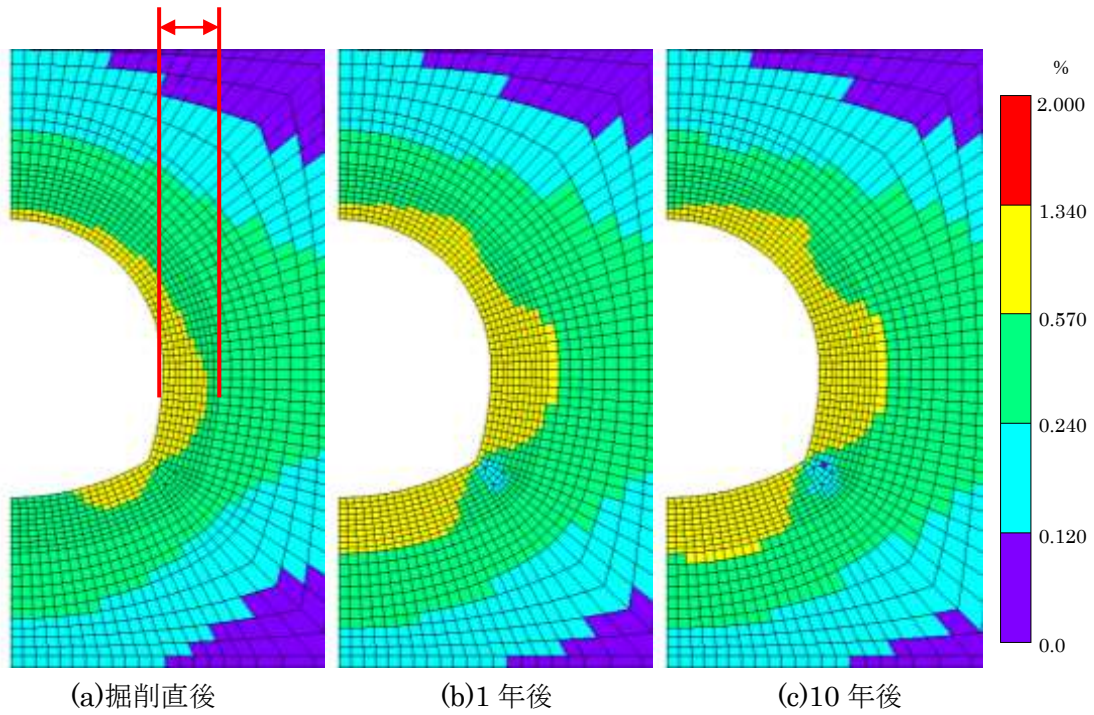


図 3.3.5-67 周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース 7)

掘削径 D の 20%の領域



掘削径 D の 20%の領域

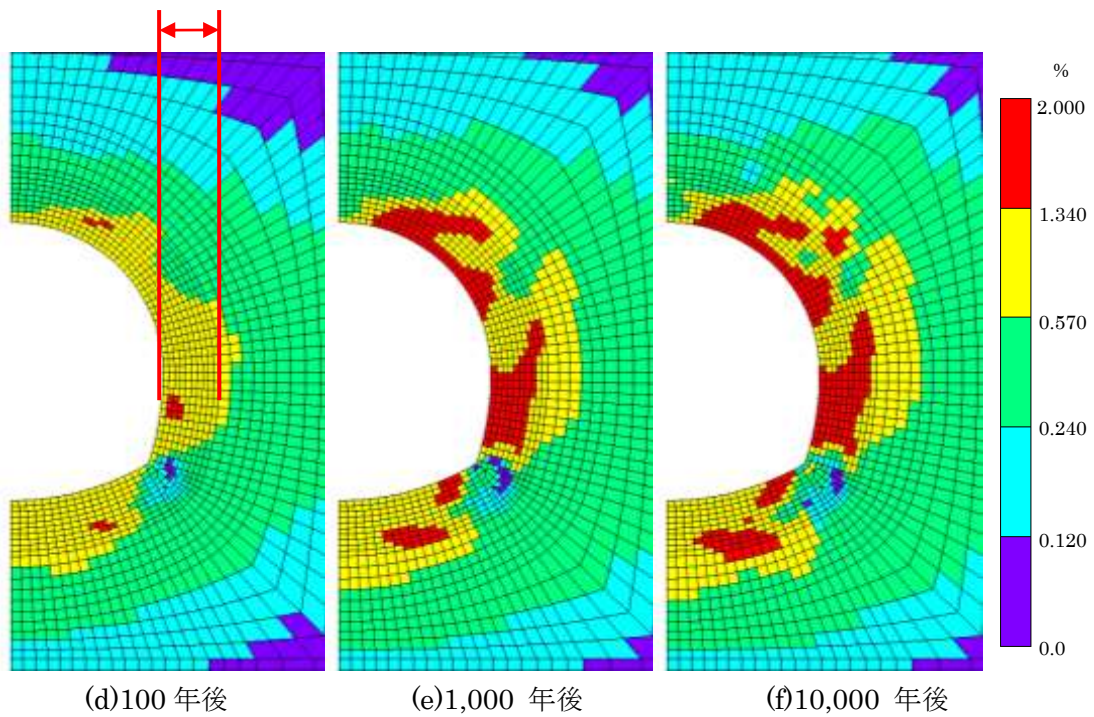


図 3.3.5-68 周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 7)

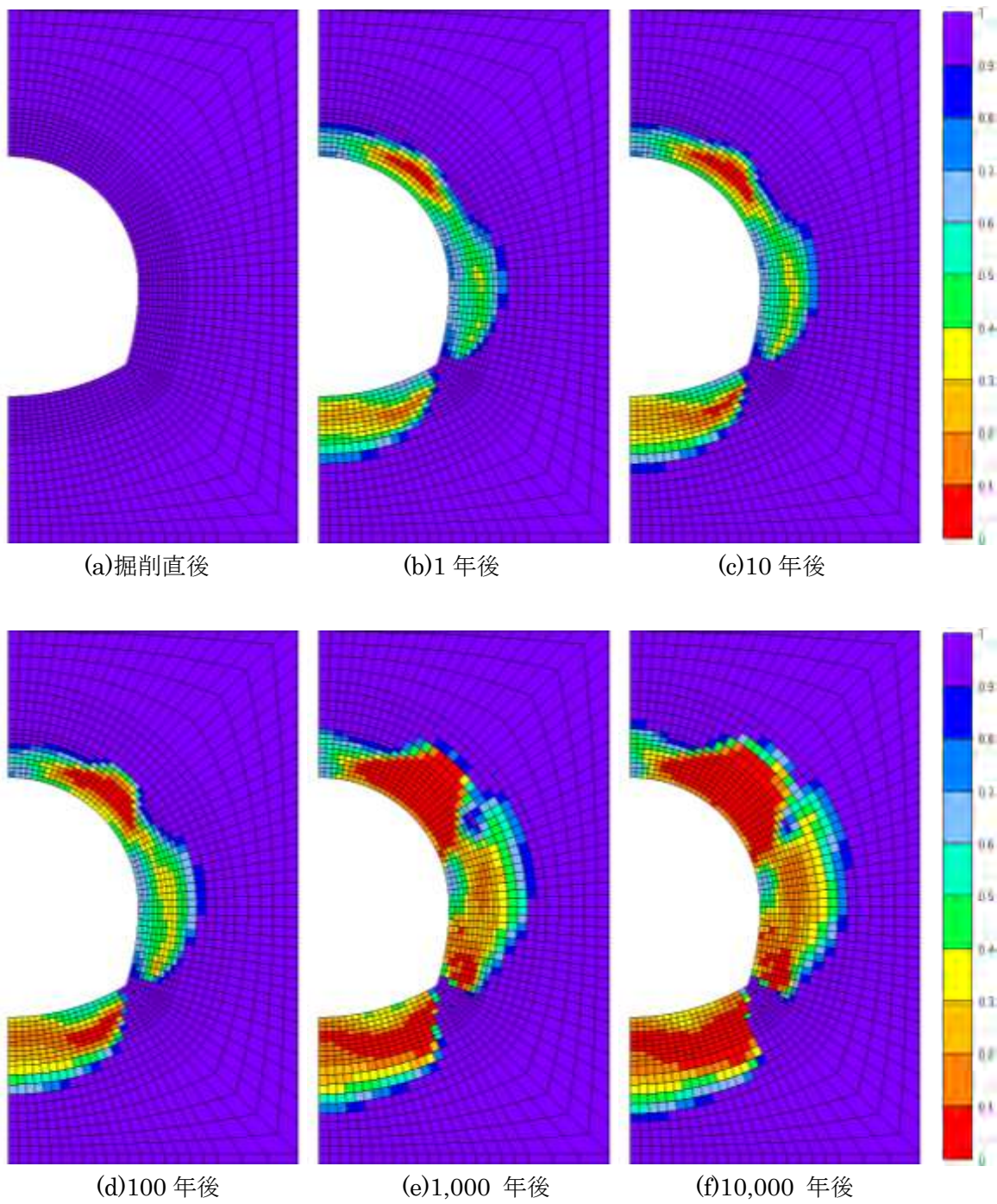


図 3.3.5-69 周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 7)

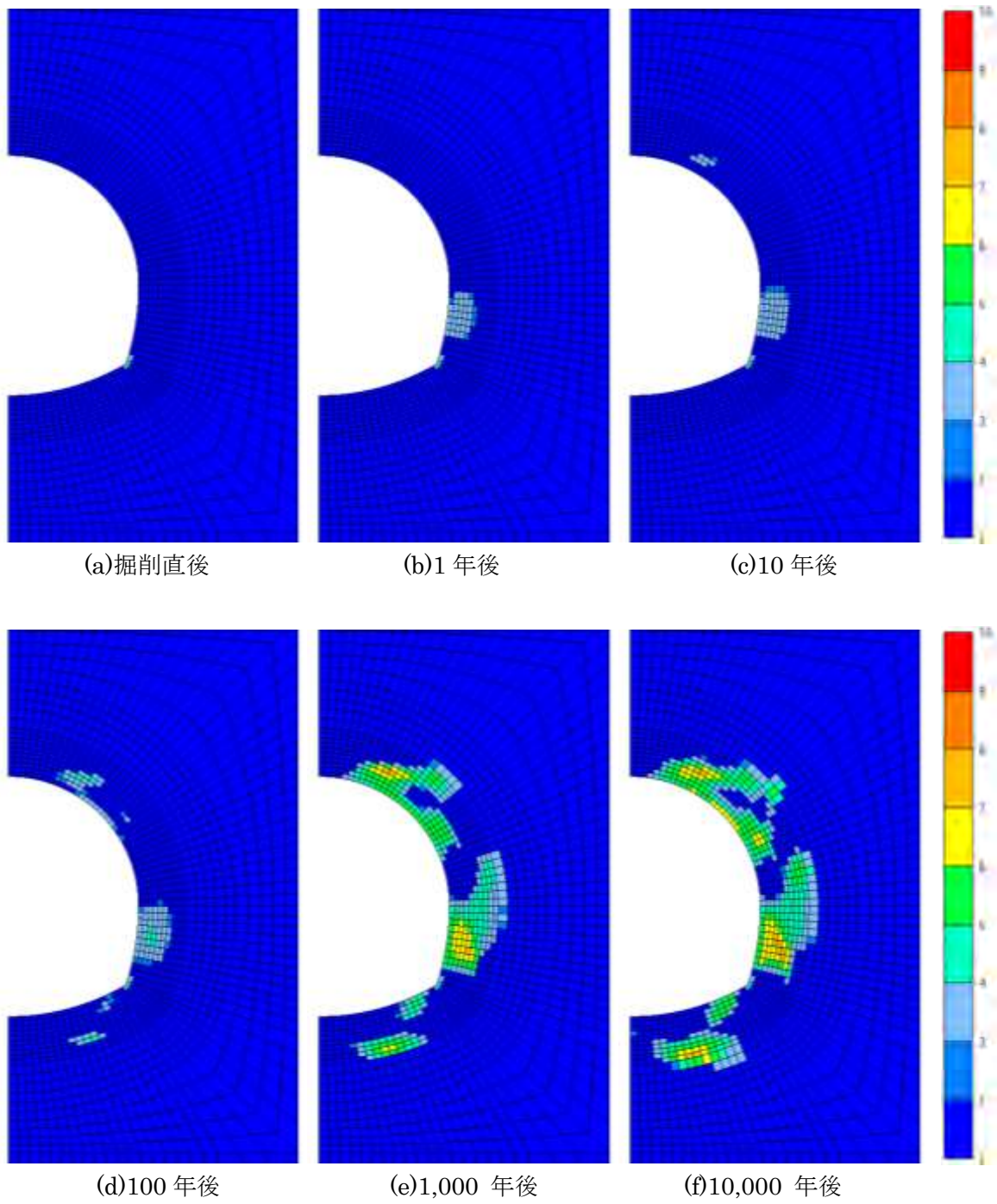
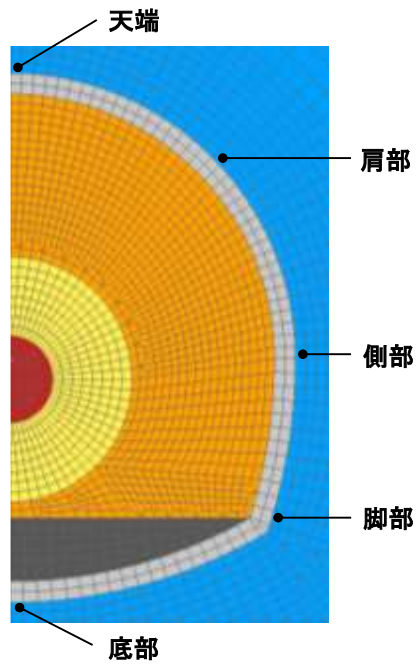


図 3.3.5-70 周辺岩盤の透水係数の変化の分布 (ケース 7)



着目した壁面近傍の要素

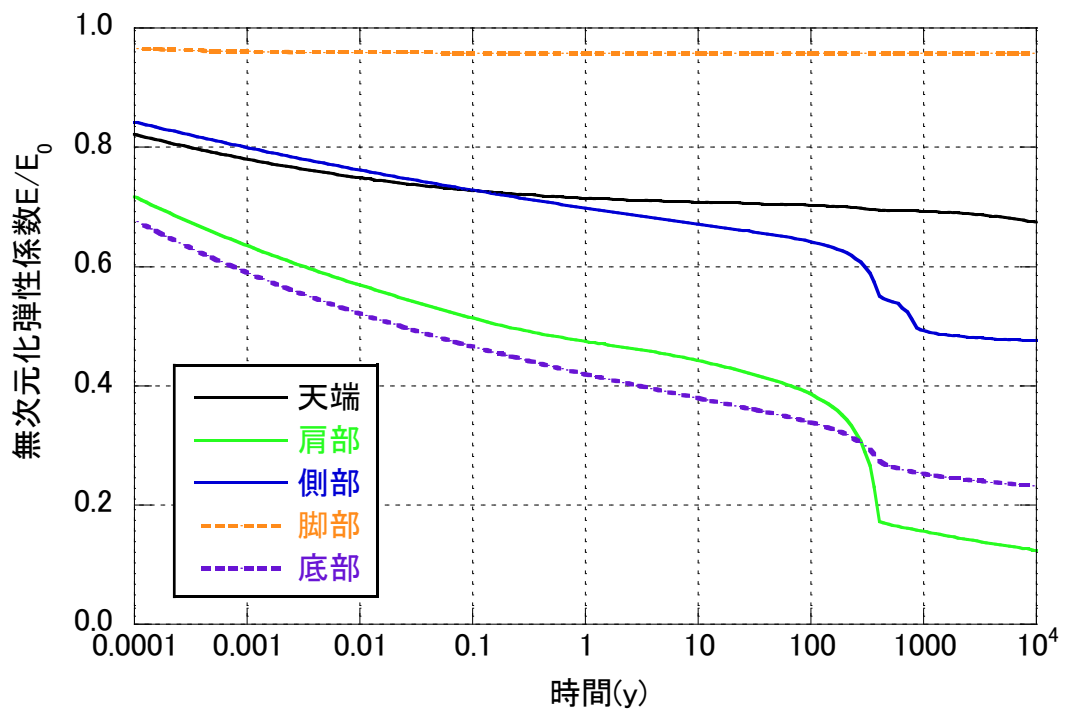


図 3.3.5-71 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 7)

h ケース 8

ケース 8 は、新第三紀堆積岩、横置き方式、回収可能性維持の状態オプション②のケースである。

処分坑道周辺岩盤における局所安全率の分布を図 3.3.5-72 に、最大せん断ひずみの分布を図 3.3.5-73 に、弾性係数の変化を図 3.3.5-74 に、透水係数の変化を図 3.3.5-75 に示す。また、壁面近傍の要素の弾性係数の経時変化を図 3.3.5-76 に示す。

処分坑道周辺岩盤では、局所安全率 $F_s=1.2$ の領域は、掘削直後、坑道掘削径 D の 20%以下を満足する結果となり、その後、時間が経過すると $F_s=1.2$ の領域は発生しなくなる。

一方、最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}=0.570\%$ 超過領域は、掘削直後、坑道掘削径 D の 20%以下であるが、その後、時間とともに $\gamma_{\max}=0.57\%$ 超過領域は岩盤の深部に広がり、1 年後に側部で坑道掘削径 D の 20%以下を超え、1 万年後には坑道掘削径 D の 30%の領域まで拡大する。坑道安定性の評価基準に関しては、ケース 7 とほぼ一致する結果となった。

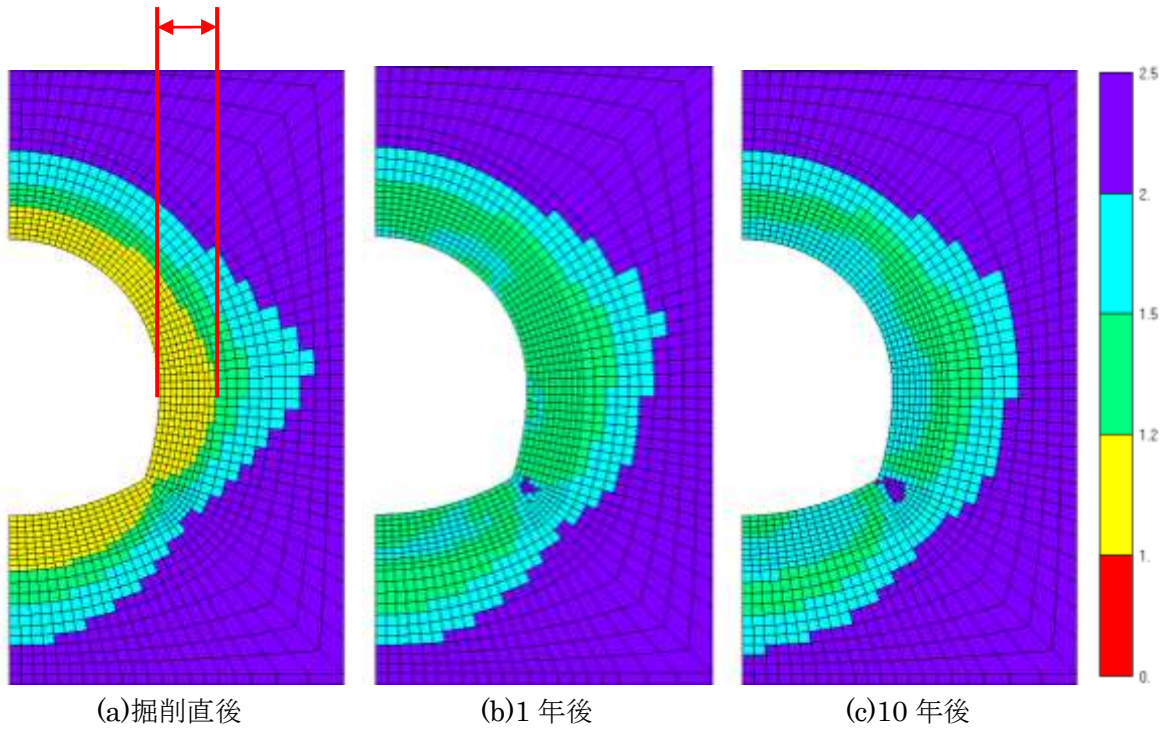
図 3.3.5-74 および図 3.3.5-76 より、周辺岩盤は掘削直後から弾性係数は低下し続け、1 万年後の坑道周辺岩盤の弾性係数は壁面近傍で初期値の 10~20%程度まで低下したことがわかった。特に、肩部に弾性係数の低下領域が集中し、肩部の岩盤深部では弾性係数は初期値の 10%まで低下した。

図 3.3.5-75 より、1 万年後の坑道周辺岩盤の透水係数は最大約 7 倍まで増加することがわかった。透水係数が増加する領域は肩部と下半側部の局所的な領域に発生し、坑道全周にわたって広がる分布とはならなかった。弾性係数および透水係数の変化についてもケース 7 とほぼ一致する結果となっている。

ケース 7 とケース 8 の結果から、坑道の安定性の評価基準および弾性係数・透水係数の変化について、両者はほぼ一致する結果となった。このことから、オプション①とオプション②で坑道の安定性に与える影響にほとんど差が見られないことがわかった。

具体的にクリープ変形によって生じた変位量で比較すると、100 年後の天端沈下はケース 7 が 0.503mm、ケース 8 が 0.500mm となり、ケース 8 の方が小さく、その差は 0.003mm となる。一方、100 年後の側部の内空変位はケース 7 が 2.363mm、ケース 8 が 2.355mm となり、ケース 8 の方が小さく、その差は 0.008mm となる。

掘削径 D の 20% の領域



掘削径 D の 20% の領域

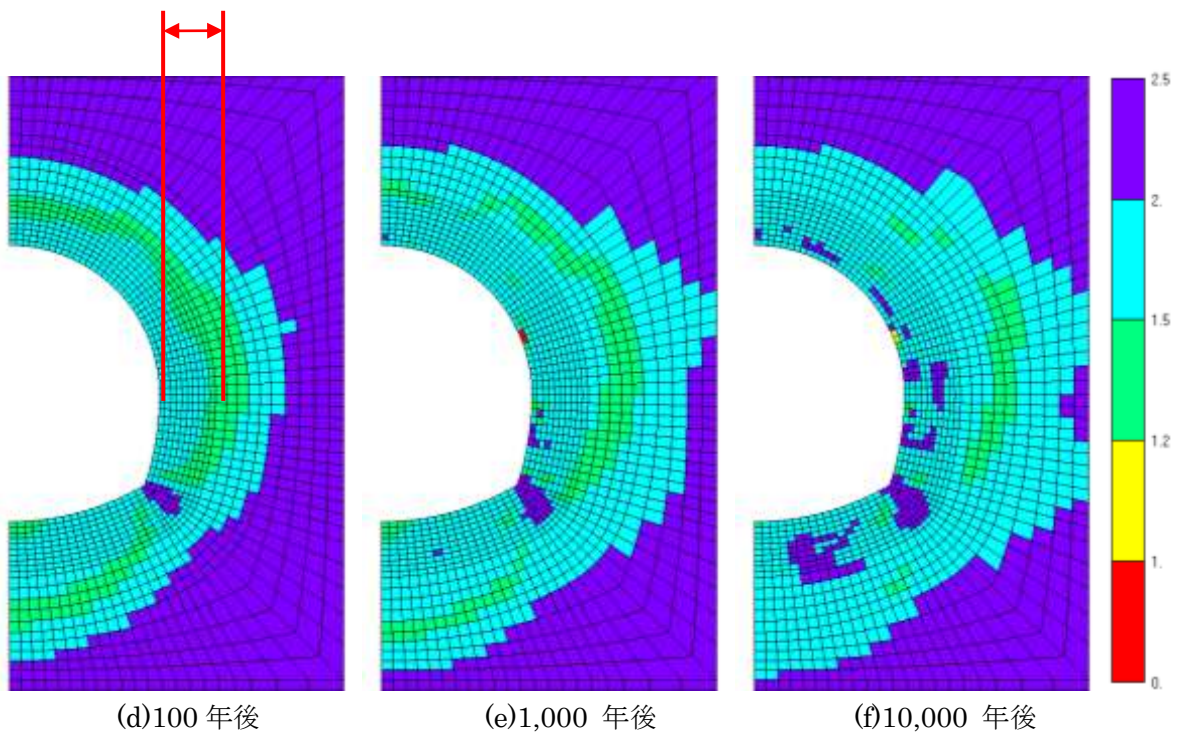


図 3.3.5-72 周辺岩盤の局所安全率の変化 (ケース 8)

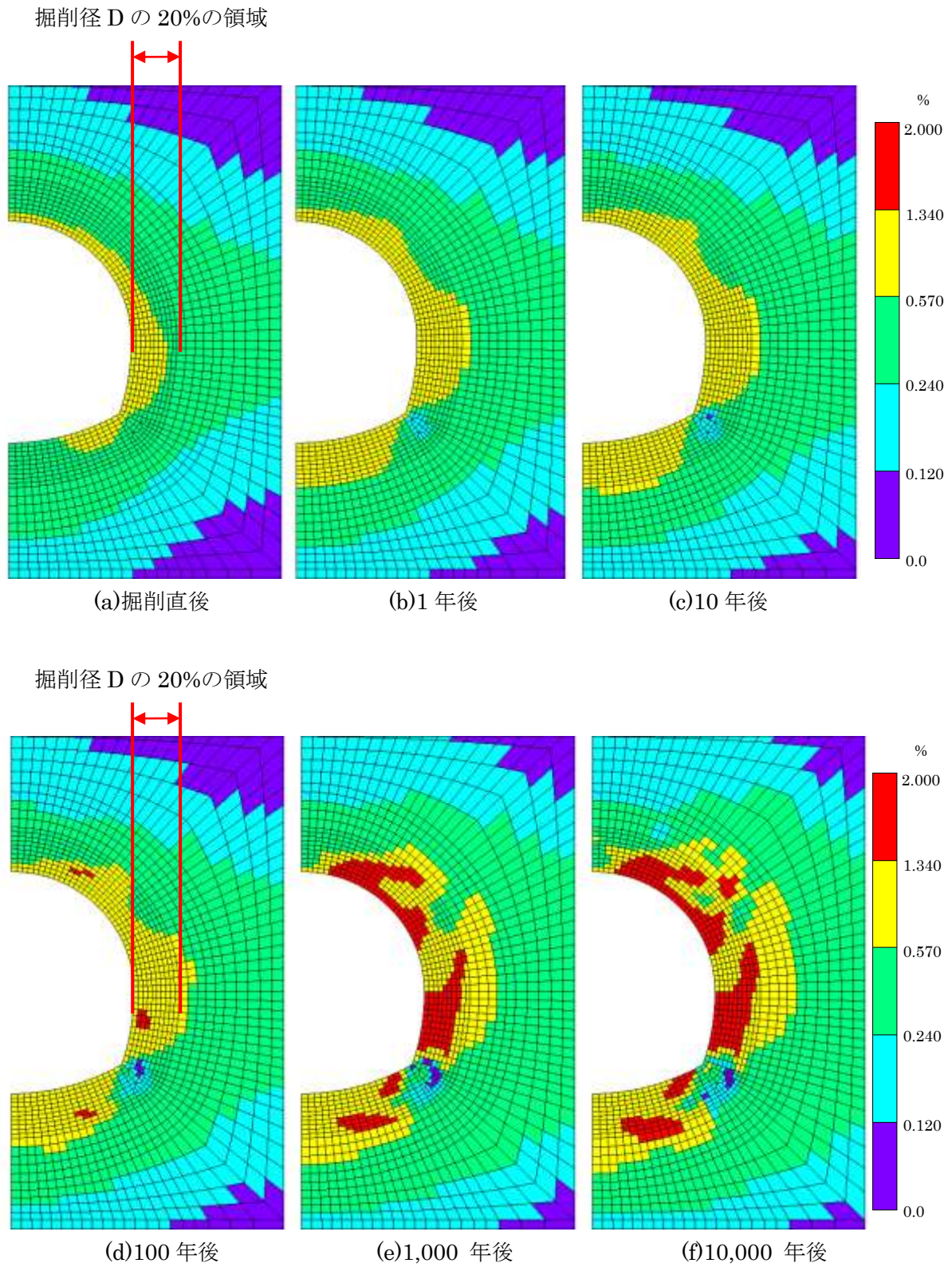


図 3.3.5-73 周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 8)

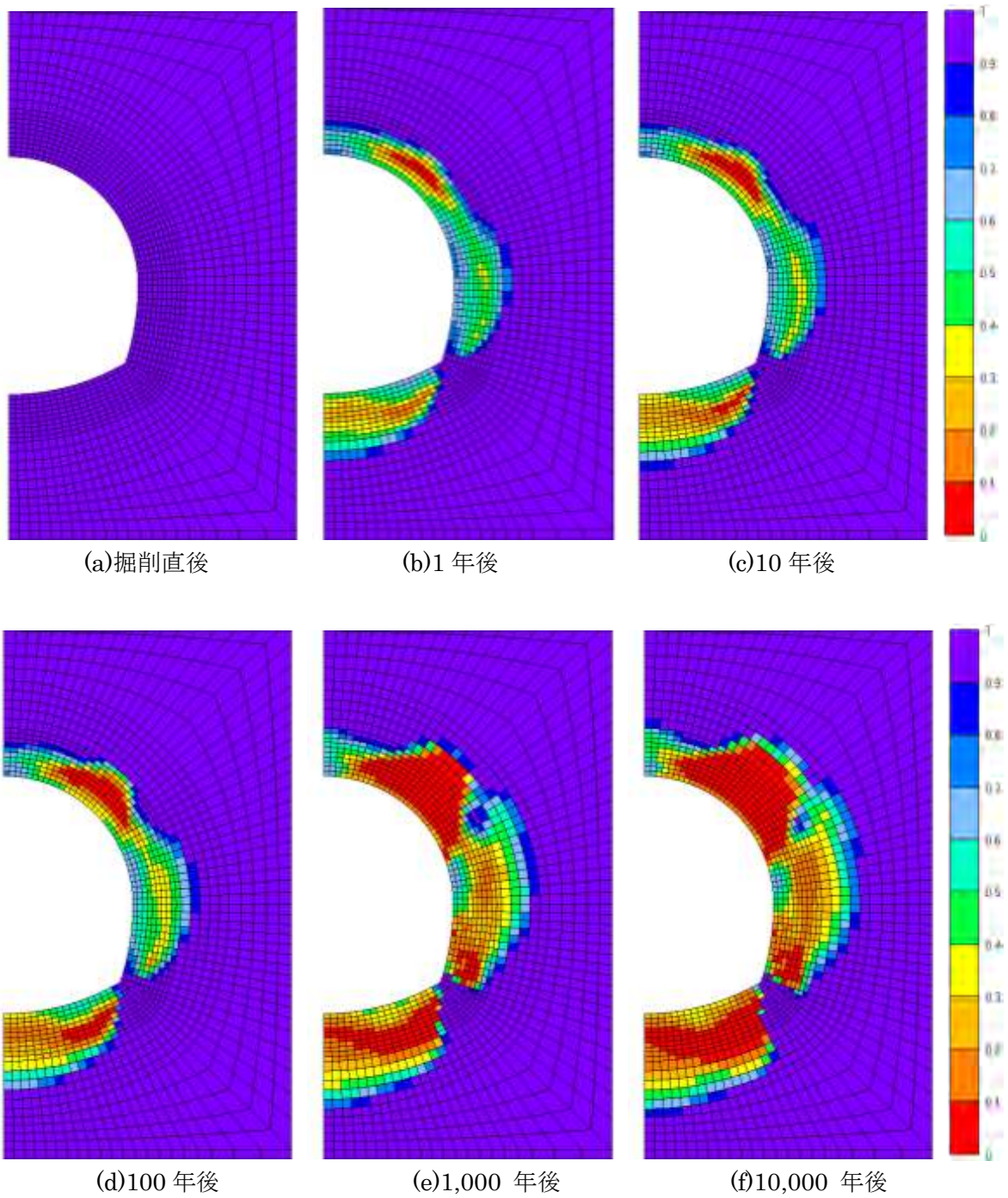


図 3.3.5-74 周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 8)

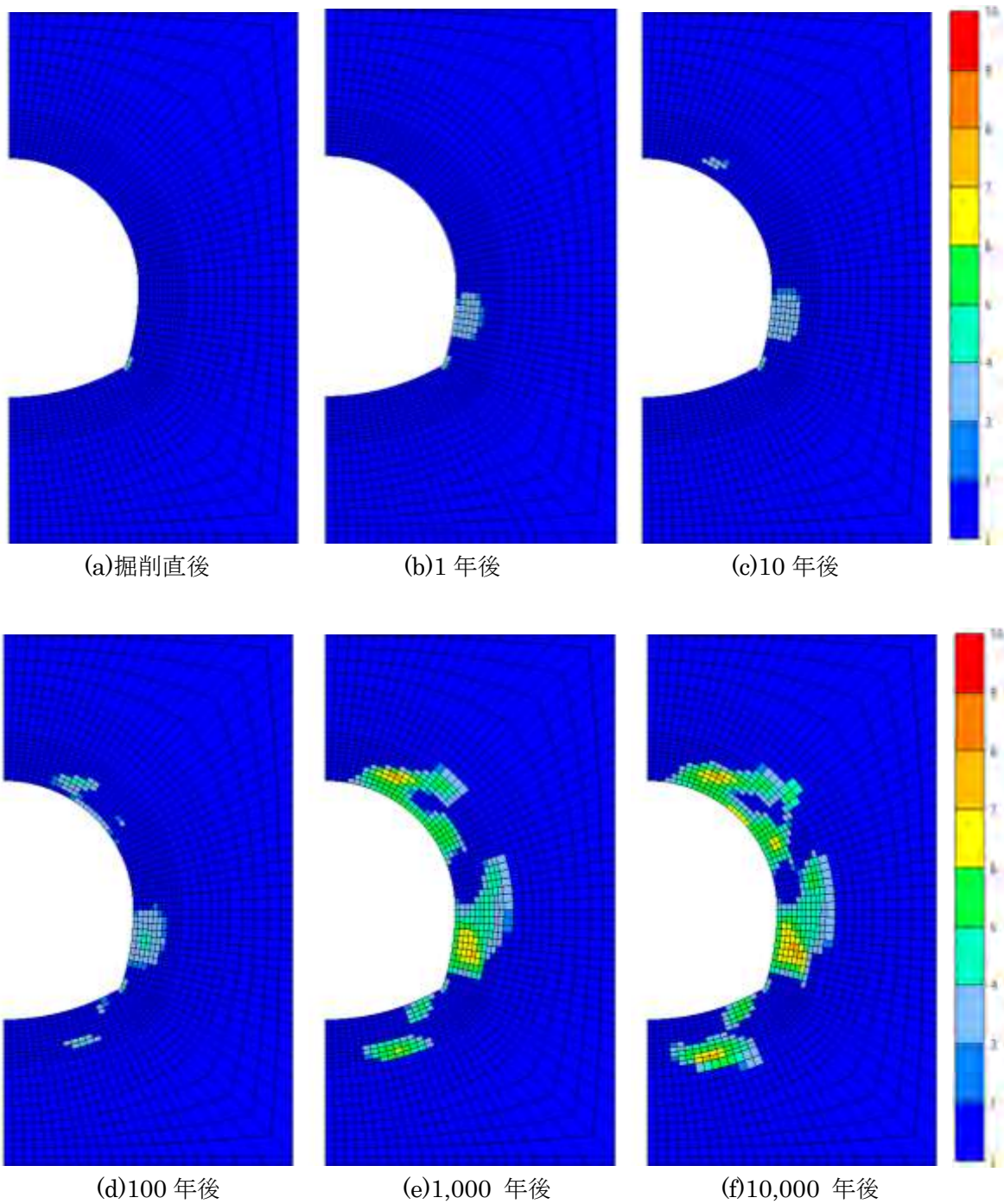
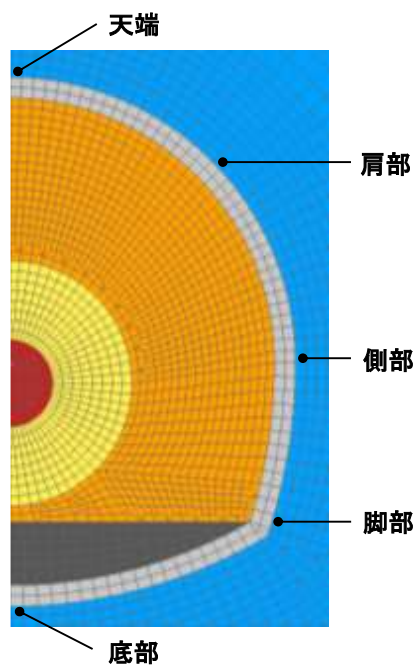


図 3.3.5-75 周辺岩盤の透水係数の変化の分布 (ケース 8)



着目した壁面近傍の要素

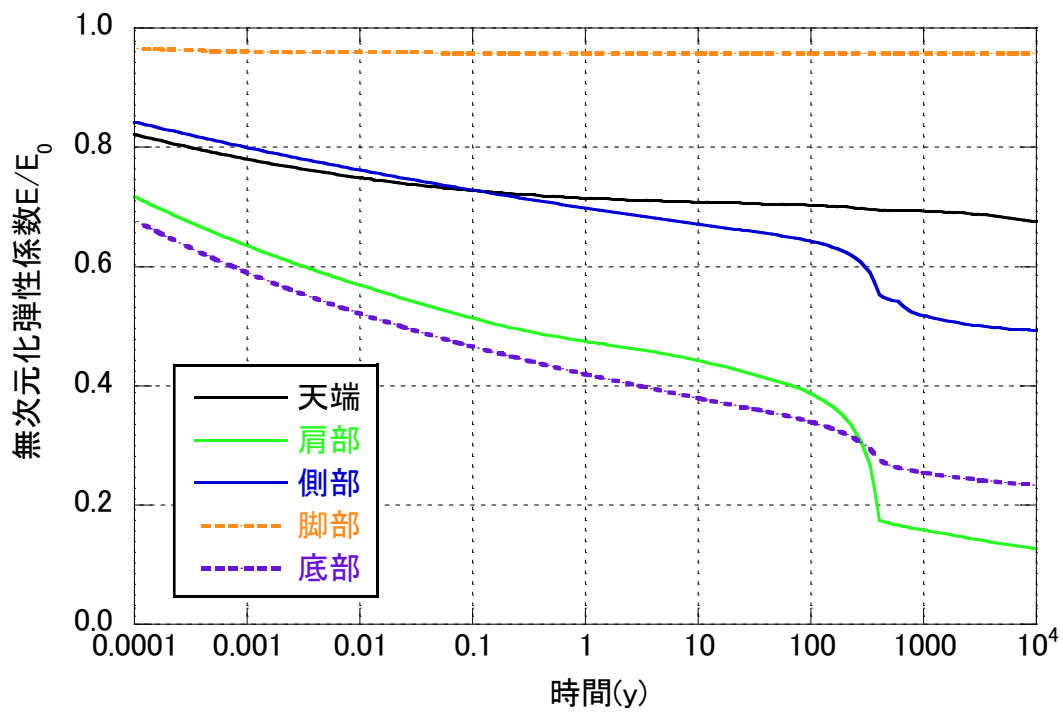


図 3.3.5-76 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 8)

以上より、深成岩では掘削時に生じた局所安全率 $F_s=1.2$ の領域および最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}=0.304\%$ 超過領域は、掘削直後から1万年後までの間、坑道掘削径 D の20%以下を満足する結果となり、1万年後においても坑道の力学的安定性は確保される。

一方、新第三紀堆積岩では、掘削時に生じた局所安全率 $F_s=1.2$ の領域は、掘削直後、坑道掘削径の20%以下を満足する結果となり、時間とともに発生しなくなり、局所安全率の評価基準に従えば、坑道の安定性は長期にわたり確保されることになる。

最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}=0.570\%$ 超過領域は、掘削直後、坑道掘削径の20%の領域以下であるが、その後、時間とともに $\gamma_{\max}=0.570\%$ 超過領域は岩盤の深部に広がり、1年後に側部で坑道掘削径の20%の領域を超え、1万年後には坑道掘削径の30%の領域まで拡大した。この結果から、掘削時の坑道安定性評価基準に従えば、1年以内に坑道の安定性に影響が生じると考えられるが、掘削時の評価基準は安全裕度を見込んだ判定指標であり、この結果を基に、掘削後の長期における坑道の力学的安定性を評価することは適切ではないことに留意する必要がある。

支保工の応力度の評価基準に対する評価結果については、後述の3.3.6の坑道安定期間の評価において詳述する。

3.3.6 坑道安定期間と影響低減技術の検討

(1) 坑道安定期間の評価

坑道安定期間の評価方法の概念を図3.3.6-1に示す。評価指標には支保工と周辺岩盤があり、支保工を対象にした性能低下曲線と周辺岩盤を対象にした性能低下曲線が考えられる。埋め戻し時の要求性能の考え方に基づいて、支保工の健全性と周辺岩盤の健全性のいずれかを優先し、坑道安定性の評価には優先した評価指標の性能低下曲線を利用し、坑道安定期間を求めるものである。

評価の手順として、例えば、支保工応力と経過年数との関係および最大せん断ひずみの分布領域と経過年数との関係を作成する。その際、支保工応力は施工時の初期状態からの応力の増加を性能低下曲線として表示する(図3.3.6-1の(a))。同様に、最大せん断ひずみの分布領域では施工時の初期状態からの限界せん断ひずみを超過するせん断ひずみの分布領域を性能低下曲線として表示する(図3.3.6-1の(b))。この両者の関係において、性能低下曲線が限界状態を下回る時期が坑道安定期間となる。限界状態は支保工応力では降伏強度となり、せん断ひずみの分布領域では坑道掘削径 D の20%となる。

このような手順により、坑道安定性の観点からの坑道安定期間を定量的に示すことが可能となる。また、この安定期間を基にして回収可能性の維持による影響を低減する技術を検討することも可能となる。具体的な影響低減技術として、図3.3.6-1(c)に示すような坑道安定性の初期性能を向上させる「対策1」が考えられる。性能低下曲線を当初設計よりも上方へ移動させることにより、埋め戻し時期を延長することが期待できる。一方図3.3.6-1(d)に示すように、当初設計での性能低下曲線において、埋め戻し時の要求性能に低下した時点で坑道安定性の性能を向上させる「対策2」も考えられる。この場合、低下した性能を初期性能に回復させることにより、埋め戻し時期

を延長することが期待できる。なお、対策 2 では廃棄体等の定置が完了した後の対策実施も想定されるため、対策を実施する空間的余裕も必要となる。

この方法を用いて、長期力学解析の解析結果から坑道安定期間を求め、回収可能性維持期間に与える影響の比較・検討を行う。

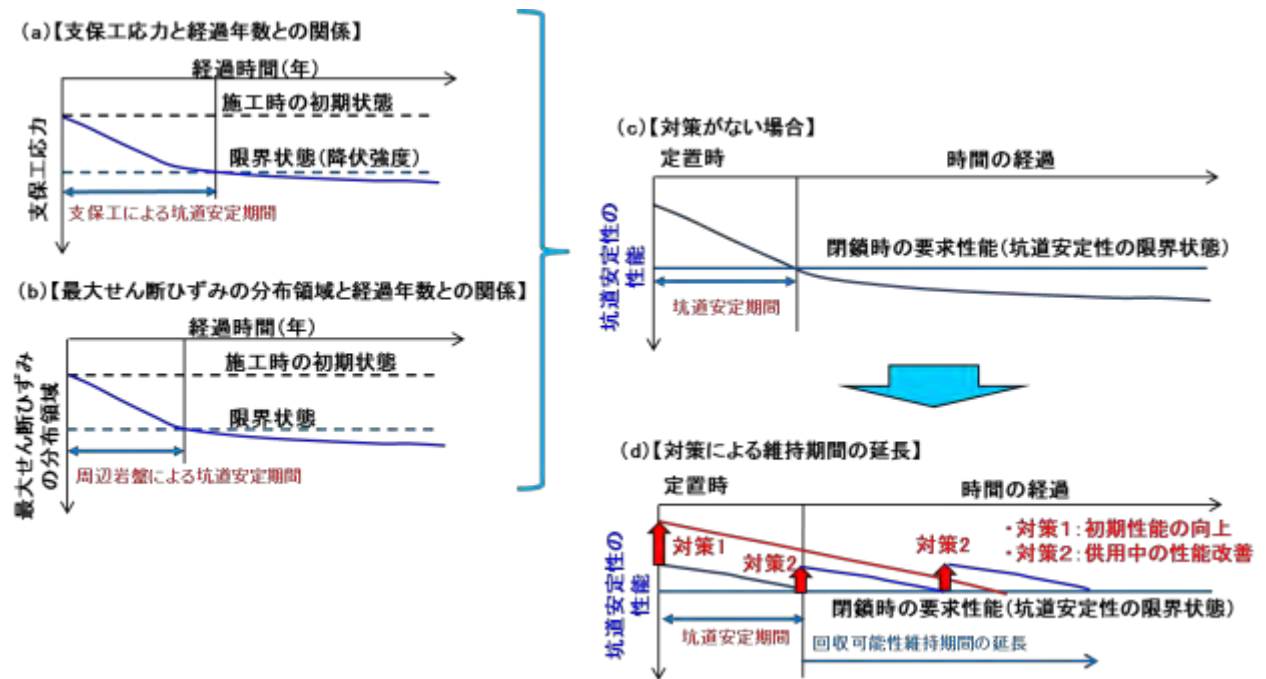


図 3.3.6-1 坑道安定期間の評価の概念

ケース 8 の結果に対して、坑道安定期間について検討する。

「最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}=0.570\%$ 超過領域が坑道掘削径 D の 20% 以下」の坑道の力学的安定性の評価基準を対象に考えると、図 3.3.5-73 より、 $\gamma_{\max}=0.570\%$ 超過領域が坑道掘削径 D の 20% の領域を超えるのは、1 年後の側部で超えていることがわかる。そこで、この点に着目して、性能低下曲線を検討した。

図 3.3.6-2 に示す側部の深部で坑道掘削径 D の 20% の領域を超える位置にある要素に着目して、図 3.3.6-3 に示す着目要素における最大せん断ひずみの経時変化をプロットした。ここで、限界せん断ひずみ (平均) は、着目要素における岩盤の弾性係数とポアソン比を式 4-14 に代入して算定したひずみ値であり、経時変化を考慮した限界せん断ひずみである。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。なお、性能低下を表現するために、ここでは、グラフの縦軸を下方に大きくなる方向として図化した。

図 3.3.6-3 より、評価基準とした限界せん断ひずみ 0.570% を超えるのは 0.149 年 (53 日) となる。これより、坑道安定期間を 1 年未満 (約 2 ヶ月) と設定することが可能となる。しかしながら、この時の評価基準の 0.570% は掘削時の安定性の目安として、限界せん断ひずみの平均を設定したものであり、掘削時の坑道安定性の評価基準で評価した場合である。前述したように、掘削時の評価基準は安全裕度を見込んだ判定指標であり、この数値を基に、掘削後の長期における

坑道の力学的安定性を評価することは過剰な評価となり、不適切である。そこで、安定性の限界値として、限界せん断ひずみの上限値の 1.340%を設定することが妥当であると考えた。

図 3.3.5-73 より、 $\gamma_{\max}=1.340\%$ 超過領域が坑道掘削径 D の 20%の領域を超えるのは、1000 年後から 1 万年後の間となることがわかる。しかしながら、1000 年後の時点において、 $\gamma_{\max}=1.340\%$ 超過領域は坑道の肩部と側部に発生し、坑道掘削径 D の 20%の境界まで達しており、坑道全体の安定性に影響を及ぼすことが懸念される。特に肩部については、図 3.3.5-74 より弾性係数の低下が著しいことから、坑道周辺では最初に不安定化が進行する箇所であると言える。そこで、掘削後の長期の坑道安定性に関しては、壁面近傍の肩部の要素に着目して、性能低下曲線を検討した。

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 3.3.6-4 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 3.3.6-5 に示す。ここで、限界せん断ひずみ（上限）は、初期の岩盤の弾性係数とポアソン比を式 4-13 に代入して算定したひずみ値である 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。その結果、坑道安定期間は延長され、252 年となった。

なお、ここでも、経時変化を考慮した限界せん断ひずみ（上限）を算定したが、1 万年後においても、解析結果の最大せん断ひずみは経時変化を考慮した限界せん断ひずみ（上限）を超えなかった。そのため、掘削後の長期の坑道安定性に関しては、初期の岩盤の弾性係数とポアソン比に基づいた限界せん断ひずみ（上限）の $\gamma_{\max}=1.340\%$ を用いた。

つぎに、支保工応力度の評価基準について検討する。吹付けコンクリートについては、坑道断面が三心円馬蹄形であることから、その形状の変化点を考慮して、天端、肩部、側部、脚部、底部の五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 3.3.6-6 に示す。この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 3.3.6-7 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、前述したように、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（時間経過後の降伏強度）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降伏強度を比較すると、脚部以外では、掘削後 140 年後に肩部で最初に降伏強度を超えている。この結果より、支保工応力度で評価した場合の坑道安定期間は 140 年とした。

なお、脚部については、坑道の形状上、応力集中しやすい箇所であることから、掘削後の長期の坑道安定性評価に関しては、検討の対象外とした。

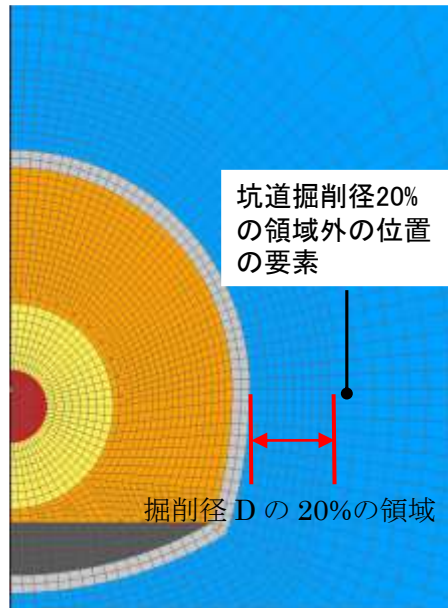


図 3.3.6-2 坑道掘削径 D の 20%の領域を超える位置にある要素

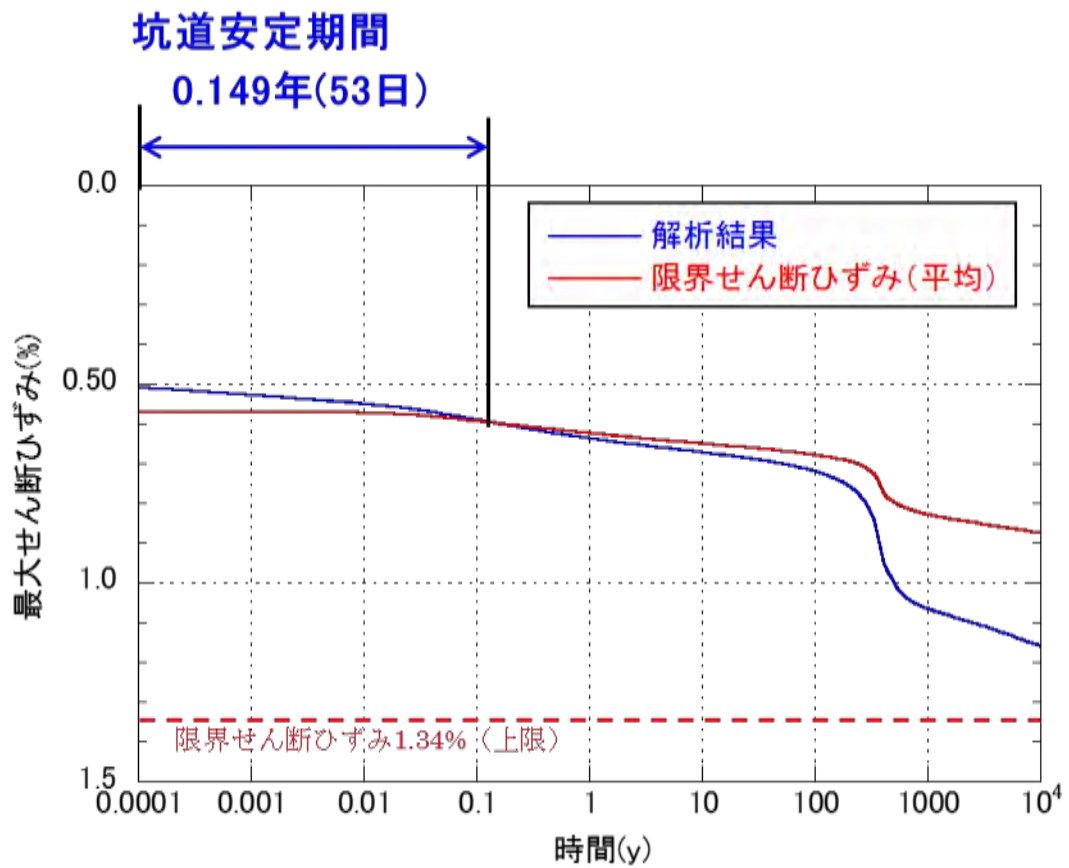


図 3.3.6-3 着目要素における最大せん断ひずみの経時変化

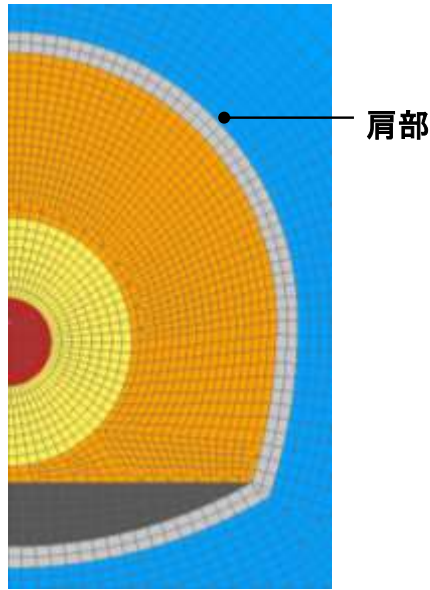


図 3.3.6-4 壁面近傍で最大せん断ひずみが上限 $\gamma_{max}=1.340\%$ を超える肩部の要素

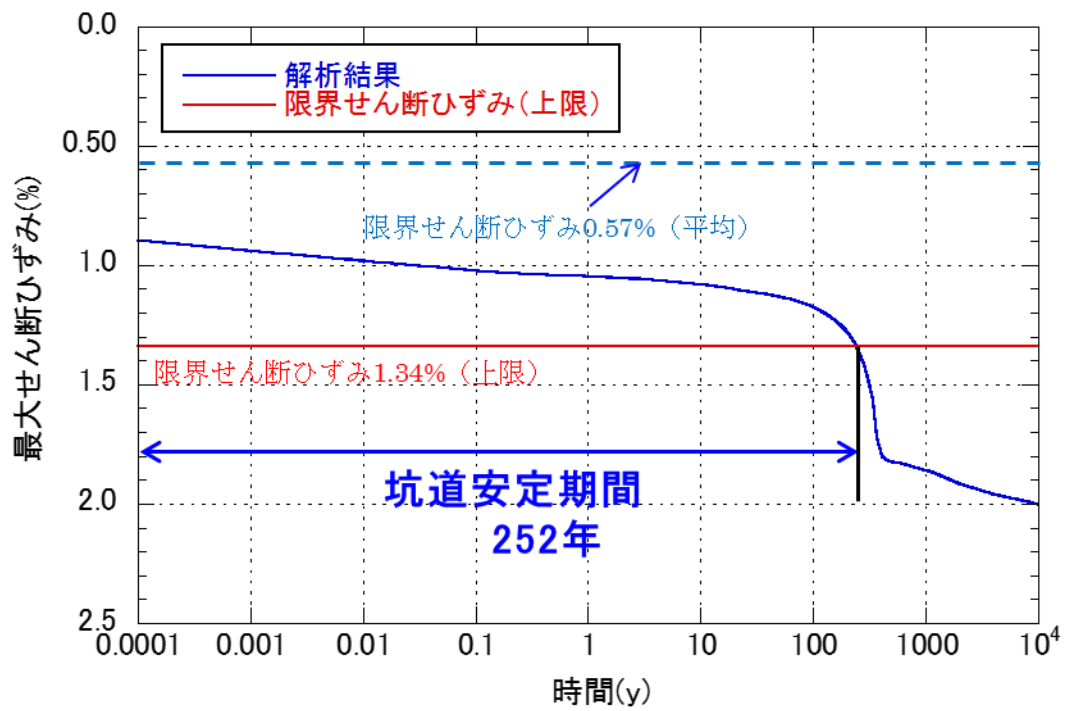


図 3.3.6-5 着目要素における最大せん断ひずみの経時変化

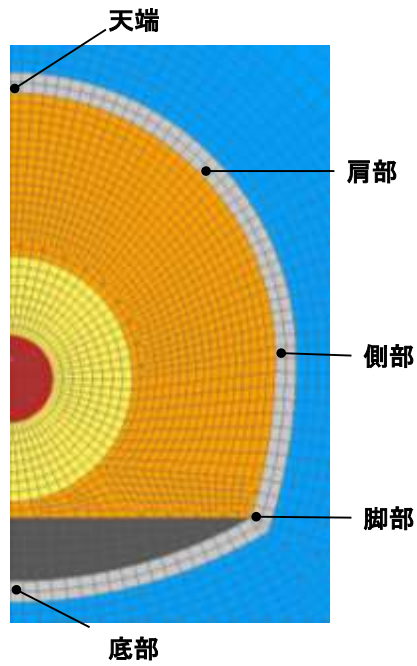


図 3.3.6-6 吹付けコンクリートにおける着目要素

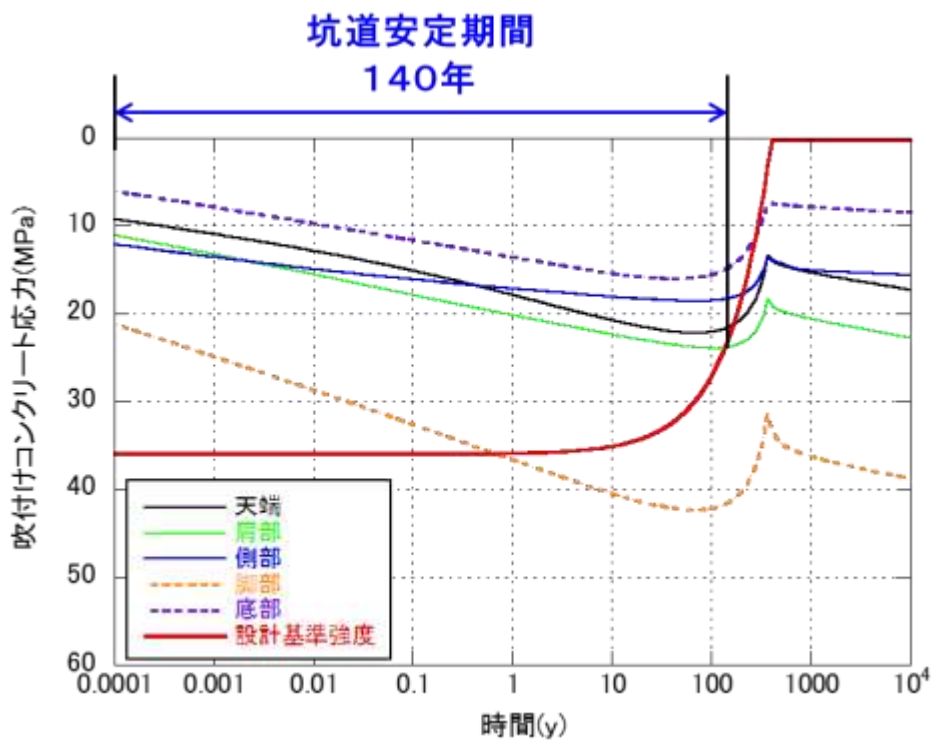


図 3.3.6-7 着目要素における吹付けコンクリート応力の経時変化

(2) 影響低減技術の検討

平成 27 年度の原環センターの「回収可能性維持期間の影響に関する検討」では、処分場を閉鎖せず回収可能性を維持した場合の長期的な安全性に与える影響についての技術要素マップを作成し、その中において、図 3.3.6-8 に示すような事業中安全性への影響低減技術が整理されている。これによると、坑道維持更新技術の高度化として、高耐久性材料・設備による更新頻度低減技術が挙げられている。これを参考にすると、坑道安定性の影響低減技術として、支保工の材料であるコンクリートの初期性能の向上が考えられる。これは、図 3.3.6-1 に示す「対策 1」に対応する影響低減技術である。

これに関して、NUMO-TR-13-07 レポート[25]では、セメント系材料に対して施すべき、特性変化の程度を低減する方策（以下、特性変化低減策）を検討し、特性変化低減策を導出してそれぞれの低減策を実現させるために必要なセメント適用部位の要求特性を表 3.3.6-1 のように整理している。これによると、特性変化低減策のうち、剛性の裕度確保と溶脱の抑制はその効果を力学特性値の変化として捉えることが比較的容易であると考えられる。したがって、コンクリートの初期性能の向上としては、剛性の裕度確保と溶脱の抑制に着目した検討を行うことが、影響低減技術の検討を行う上で、有効である。

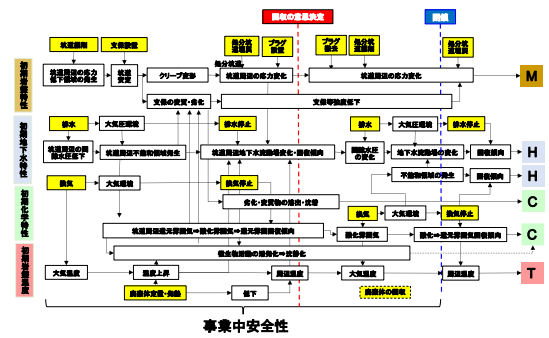
F. 事業中安全性への影響低減対策技術

F-1. 坑道維持更新技術の高度化

F-2. 回収技術の合理性向上

F-3. 計測・測定技術(モニタリング技術)の高度化

<内容>
 坑道開放と回収に伴う影響を低減するための技術
 <求められる要件>
 ・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
 ・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. 事業中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
F-1 坑道維持更新技術の高度化	F-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、処分孔の力学的安定確保技術(支保工等)、処分孔地下水流入対策技術(遮水ライナー等)、高耐久性材料・設備による更新頻度低減技術、オーバーパック転倒防止対策技術等	・「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 (力学的安定性確保技術は既存、高耐久性材料・設備は各事業者等で技術開発・研究実施中)
	F-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)、環境保全対策技術等	・「トンネル標準示方書」(土木学会) ・「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・期間を想定した対策工効果の定量的評価 (維持・更新高度化は各事業者等で技術開発・研究実施中)

図 3.3.6-8 事業中安全性への影響低減技術
(平成 27 年度原環センター回収可能性維持に関する検討)

表 3.3.6-1 特性変化低減策を実現する為の要求特性[25]

特性変化低減策	低減策実現の為の要求特性
ひび割れ発生の抑制	<ul style="list-style-type: none"> ・ 低収縮性 ・ 低発熱性（構造物の形状・寸法および環境条件を考慮し、可否を判断） ・ 耐アルカリ骨材反応性 ・ 化学抵抗性
剛性の裕度確保	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高強度
溶脱の抑制	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高緻密性 ・ 低溶解度の水和物相
空隙を低下させる材料設計	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高緻密性
部材厚の低減	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高強度
アルカリ分量の低減	<ul style="list-style-type: none"> ・ 低アルカリ含有量

(3) 対策工の選定とその効果の検討

前述(2)を踏まえ、図 3.3.6-1 に示した「対策 1」に対応する影響低減技術の例として、剛性の裕度確保と溶脱の抑制を選定する。この対策工の効果を調べるために、前述の力学的影響現象解析と同様の方法により解析的評価を行う。剛性の裕度確保に対応する支保工の高強度化と溶脱の抑制に対応する支保工の剛性低下の遅延を想定する。剛性の裕度確保に対応する検討ケースをケース 9、溶脱の抑制に対応する検討ケースをケース 10 とする。解析では、ケース 9 は支保工の弾性係数を大きくした条件、ケース 10 は溶脱完了時期を 400 年からさらに延長した条件をそれぞれ設定して解析を行う。以下に各解析の解析条件、解析結果および対策工の効果を述べる。

1) 剛性の裕度確保の解析条件

ケース 9 の解析条件を以下に示す。

- ・ 岩盤条件・坑道断面：新第三紀堆積岩の横置き方式
- ・ 処分場の状態：状態オプション②（処分坑道まで埋め戻し）
- ・ 支保工モデル：鋼製支保工の建込間隔を 1m から 0.5m に変更とし、吹付けコンクリートの物性変化は 3.3.3 と同様、溶脱完了時期を 400 年とする。

2) 溶脱の抑制の解析条件

ケース 10 の解析条件を以下に示す。

- ・ 岩盤条件・坑道断面：新第三紀堆積岩の横置き方式
- ・ 処分場の状態：状態オプション②（処分坑道まで埋め戻し）
- ・ 支保工モデル：鋼製支保工は(1)の設定と同様、建込間隔を 1m とし、吹付けコンクリートの溶

脱完了時期を 400 年から 1 万年に延長する。

溶脱の抑制における支保の劣化について、ここでは、既往の研究[8]を参考にして、吹付けコンクリートの指数関数による溶脱モデルを導入した。既往の研究 [8]では、「第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ」[26]の成果を導入して、カルシウム溶脱によるコンクリートの強度と弾性係数の変化を以下の式で評価している。

「第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ」[26]において、カルシウムの溶脱によるコンクリートの一軸圧縮強度の低下は次式で提案されている。

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{c0}}{\exp\left(\ln\left(\sigma_{c0} / \sigma_{c(\min)}\right) \times (LC / 100)\right)} \quad \text{式 3-16}$$

ここに σ_c は一軸圧縮強度、 σ_{c0} は初期一軸圧縮強度、 $\sigma_{c(\min)}$ は最小一軸圧縮強度、 LC はカルシウム溶脱率 (%) である。

カルシウム溶脱は、時間に対して指数関数に従って変化すると考え、次式で仮定している。

$$LC = 100 - 100 \times \exp(-kt) \quad \text{式 3-17}$$

k は、溶脱の速さを決める係数で、既往の研究[8]では、1 万年後にカルシウム溶脱率 LC がほぼ 0 となるよう、 $k=0.001y^{-1}$ と設定している。このとき、カルシウム溶脱率 LC の経時変化は図 3.3.6-9 のようになる。

コンクリートの弾性係数は、一軸圧縮強度との関係で次式のように示されている。

$$E = E_0 \times (\sigma_c / \sigma_{c0})^{0.5} \quad \text{式 3-18}$$

ここに E は任意時点の弾性係数、 E_0 は初期弾性係数である。

先に仮定したカルシウム溶脱速さにおける無次元化した一軸圧縮強度と弾性係数の経時変化は図 3.3.6-10 のようになる。ただし、1 万年後の一軸圧縮強度は、初期値の 1/100 になると仮定している。

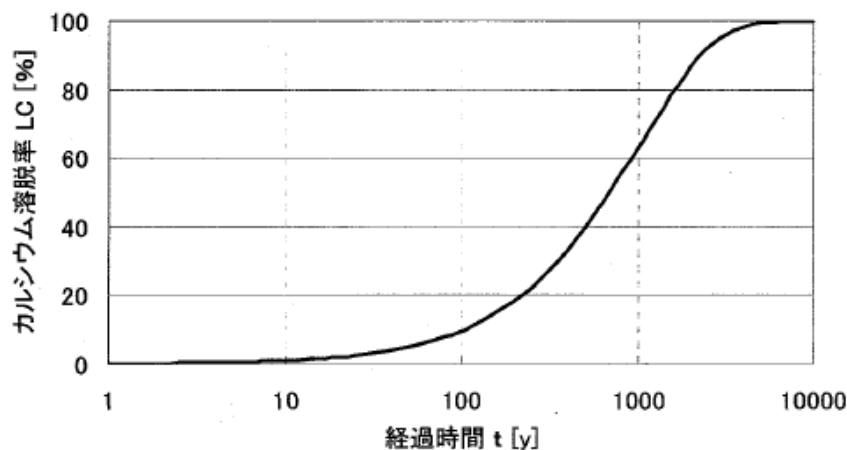


図 3.3.6-9 カルシウム溶脱率 LC の経時変化[8]

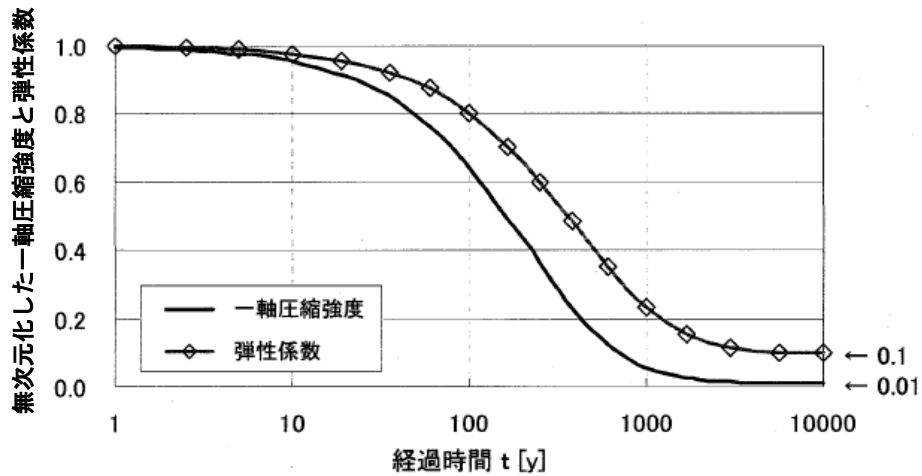


図 3.3.6-10 無次元化した一軸圧縮強度と弾性係数の経時変化[8]に加筆・修正

また、3.3.3 で設定した吹付けコンクリートの溶脱完了時期を 400 年とした線形補間モデルと上記のカルシウム溶脱の指数関数モデルとの無次元化弾性係数の経時変化の比較を図 3.3.6-11 に示す。

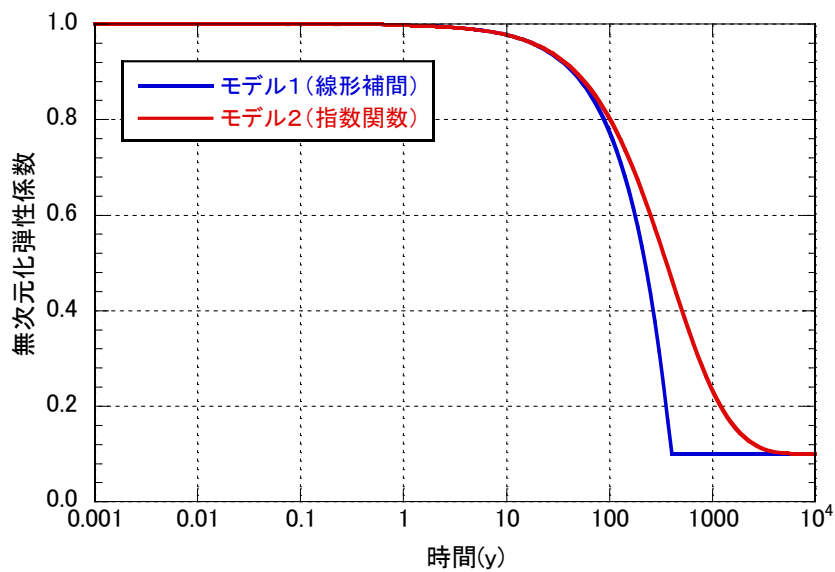


図 3.3.6-11 吹付けコンクリートの無次元化弾性係数の経時変化

3) 解析結果および対策工の効果

上記の条件で解析を行い、解析結果から対策工の効果の検討を行う。

まず、ケース 9 の掘削解析で得られた解析結果として、処分坑道周辺岩盤の局所安全率の分布を図 3.3.6-12 に、周辺岩盤の最大せん断応力の分布を図 3.3.6-13 に、吹付けコンクリートの応力分布を図 3.3.6-14 に、鋼製支保工の応力分布を図 3.3.6-15 にそれぞれ示す。

坑道の力学的安定性の評価基準より、周辺岩盤では、局所安全率 $F_s=1.2$ の領域は坑道掘削径 D の 20%以下を満足する結果となった。また、最大せん断ひずみ $\gamma_{max}=0.570\%$ 超過領域は、坑道掘削径 D の 20%以下であった。吹付コンクリートの応力は応力評価基準である 19.4 MPa 以下を満足した。鋼製支保工の応力についても、評価基準である降伏点強度 440MPa 以下を満足した。吹付コンクリートおよび鋼製支保工の応力は建込間隔 1.0m のケースよりも低減された結果となっている。

掘削径 D の 20%の領域

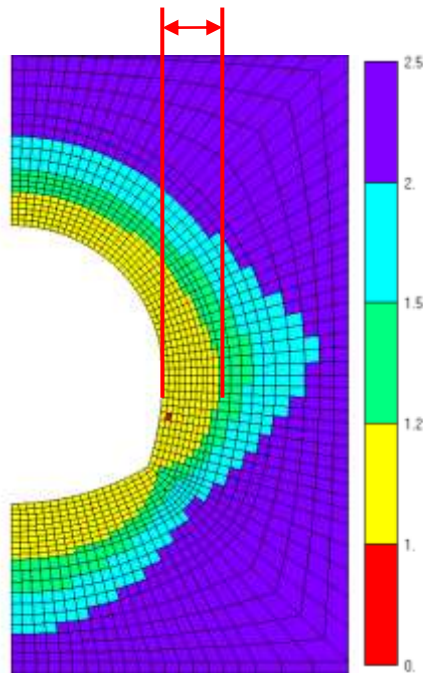


図 3.3.6-12 局所安全率の分布 (ケース 9)

掘削径 D の 20%の領域

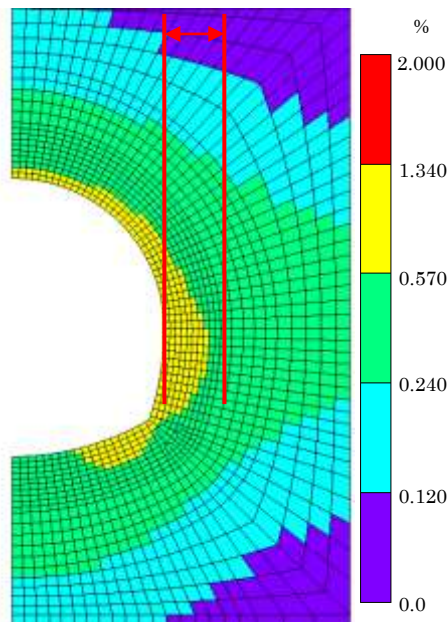


図 3.3.6-13 最大せん断ひずみの分布 (ケース 9)

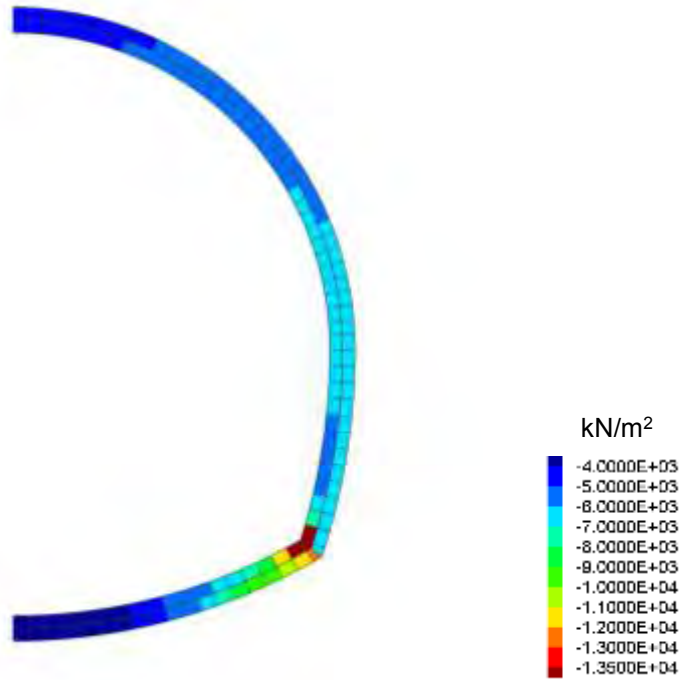


図 3.3.6-14 吹付けコンクリートの応力分布 (ケース 9)

— 地山側
— 内空側

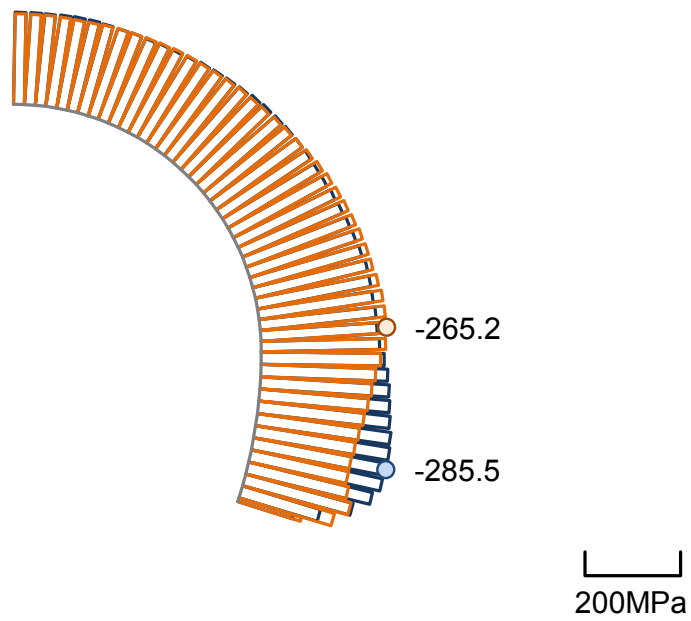


図 3.3.6-15 鋼製支保工の応力分布 (ケース 9)

以降に、ケース 9 とケース 10 の長期力学解析の解析結果を示す。

ケース 9 とケース 10 は、ケース 8 と同様、新第三紀堆積岩、横置き方式、回収可能性維持の状態オプション②のケースである。

まず、ケース 9 の解析結果として、(2)と同様、処分坑道周辺岩盤における局所安全率の分布を図 3.3.6-16 に、最大せん断ひずみの分布を図 3.3.6-17 に、弾性係数の変化を図 3.3.6-18 に、透水係数の変化を図 3.3.6-19 に示す。また、壁面近傍の要素の弾性係数の経時変化を図 3.3.6-20 に示す。

処分坑道周辺岩盤では、局所安全率 $F_s=1.2$ の領域は、掘削直後、坑道掘削径 D の 20%以下を満足する結果となり、その後、時間が経過すると $F_s=1.2$ の領域は発生しなくなる。

一方、最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}=0.570\%$ 超過領域は、掘削直後、坑道掘削径 D の 20%以下であるが、その後、時間とともに $\gamma_{\max}=0.570\%$ 超過領域は岩盤の深部に広がり、1 年後に側部で坑道掘削径 D の 20%以下を超え、1 万年後には坑道掘削径 D の 30%の領域まで拡大する。ケース 8 に比べて、 $\gamma_{\max}=0.570\%$ 超過領域は掘削時で 10cm 程度広がりが小さくなっている。

周辺岩盤は掘削直後から弾性係数は低下し続け、1 万年後の坑道周辺岩盤の弾性係数は壁面近傍で初期値の 10~20%程度まで低下した。特に、肩部に弾性係数の低下領域が集中し、肩部の岩盤深部では弾性係数は初期値の 10%まで低下した。

1 万年後の坑道周辺岩盤の透水係数は最大約 7 倍まで増加している。透水係数が増加する領域は肩部と下半側部の局所的な領域に発生し、坑道全周にわたって広がる分布とはならなかった。

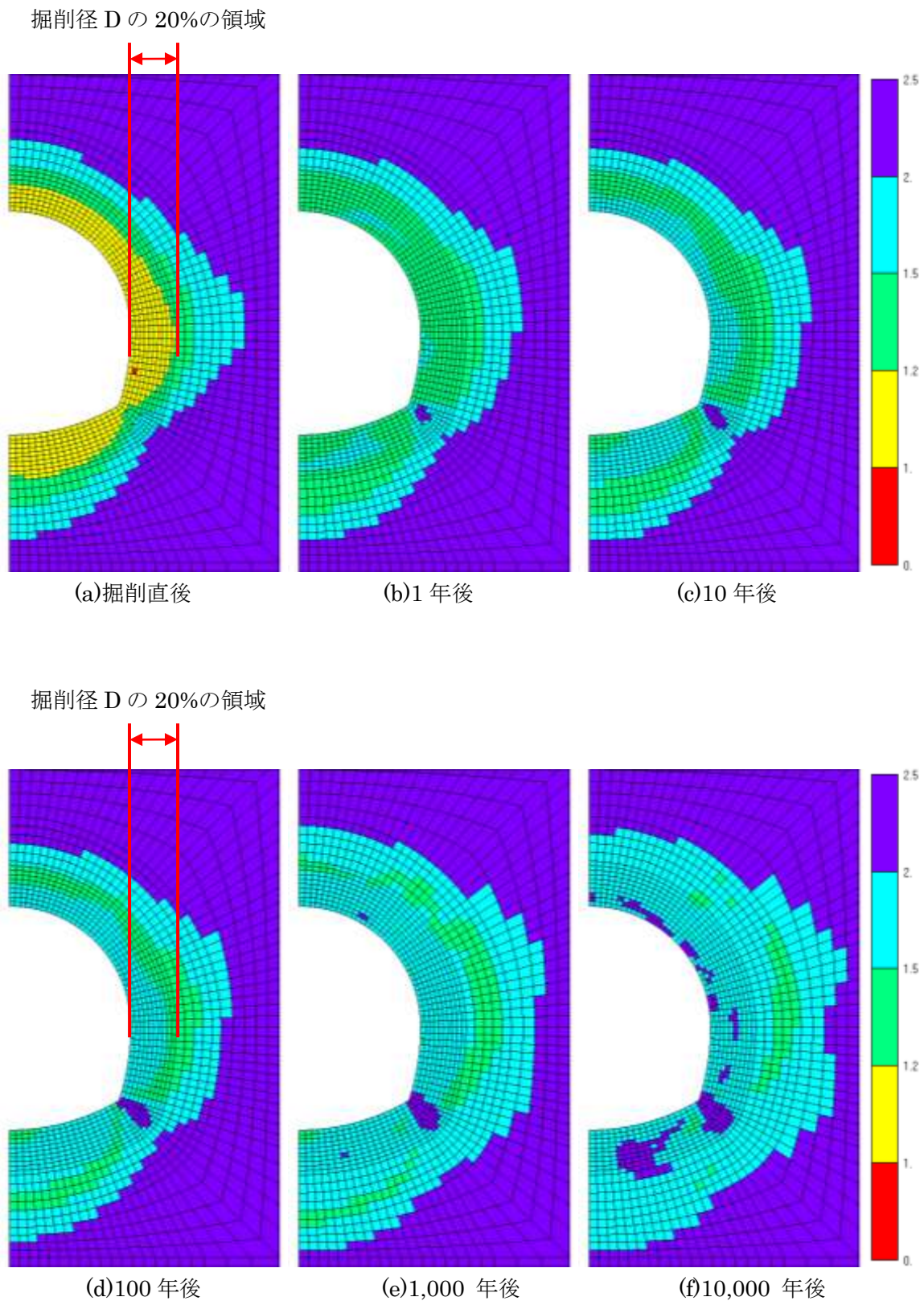
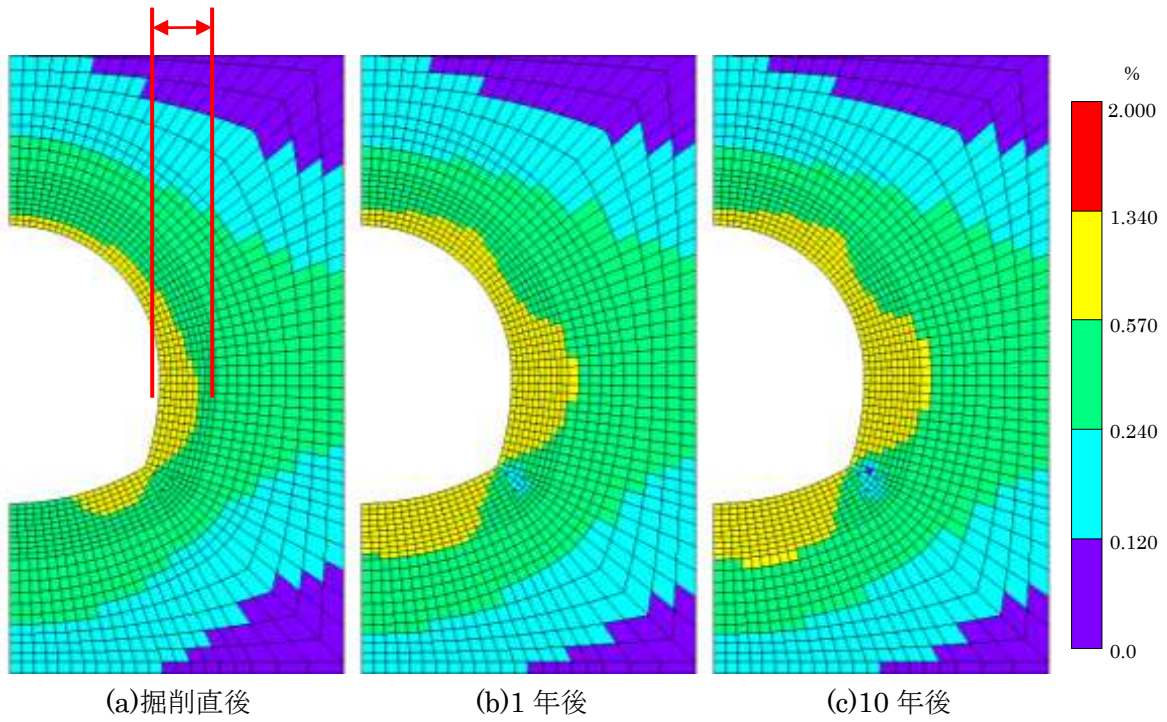


図 3.3.6-16 周辺岩盤の局所安全率の分布 (ケース 9)

掘削径 D の 20% の領域



掘削径 D の 20% の領域

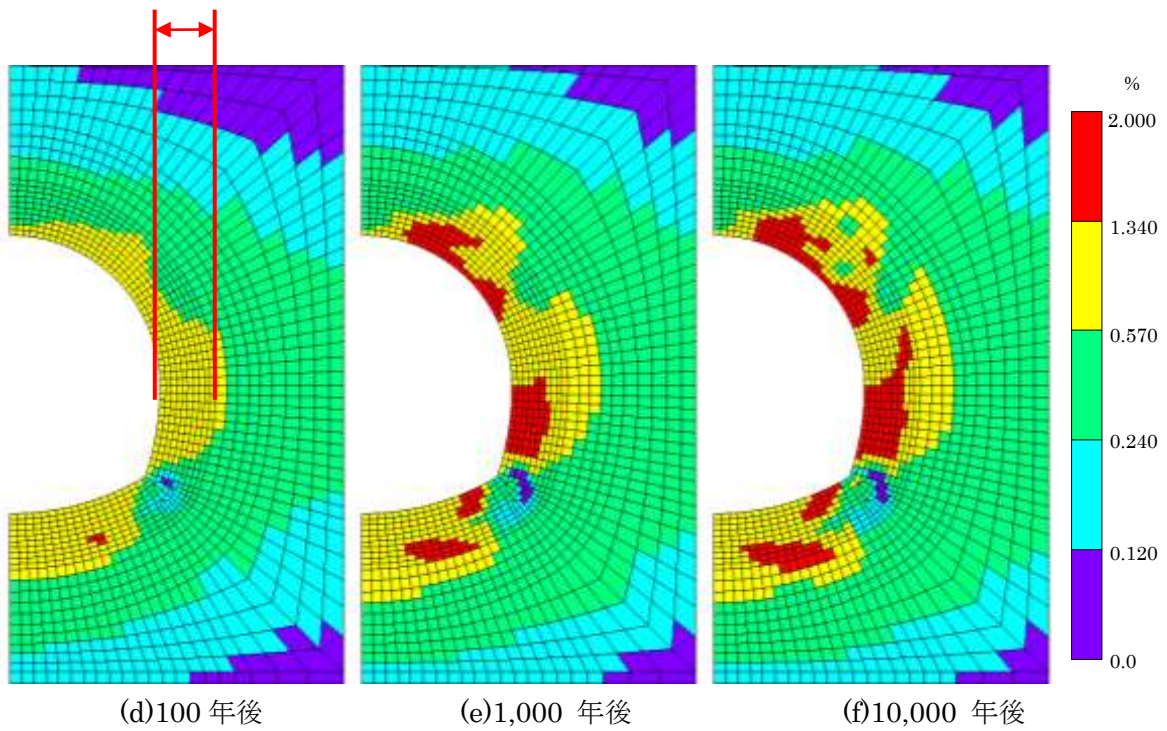


図 3.3.6-17 周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 9)

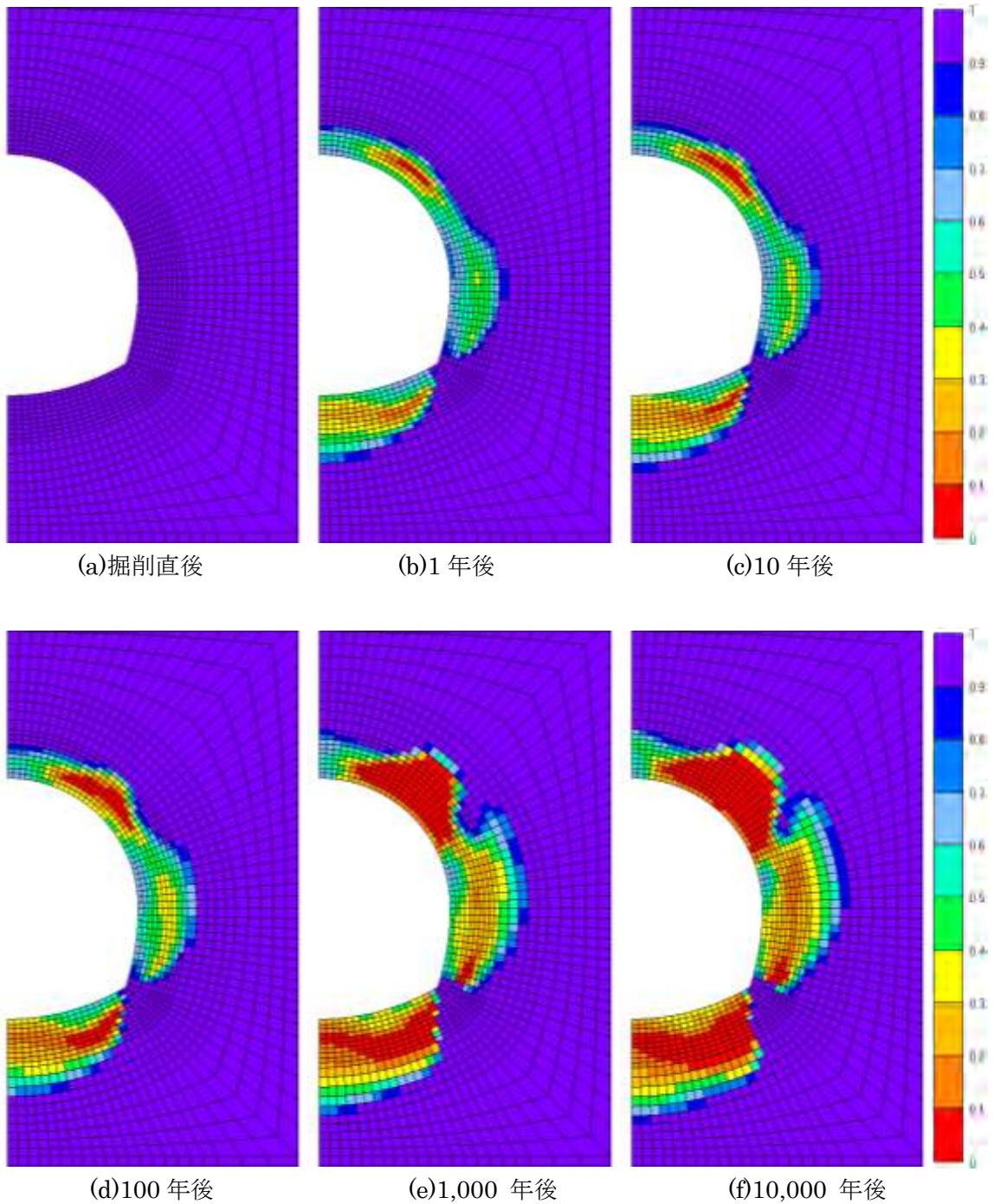
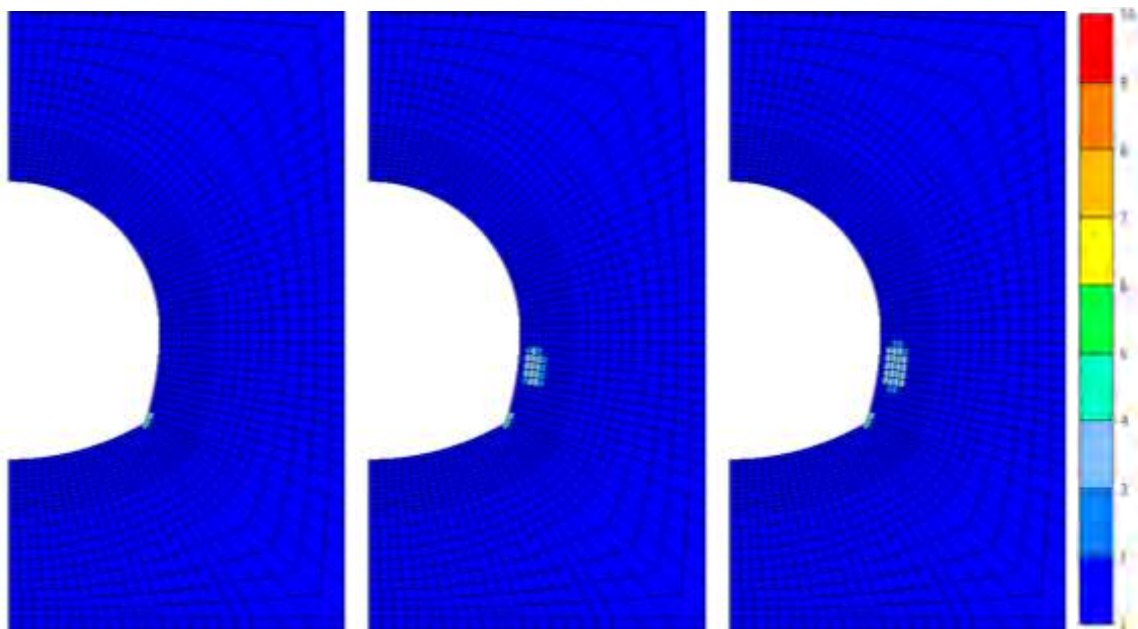


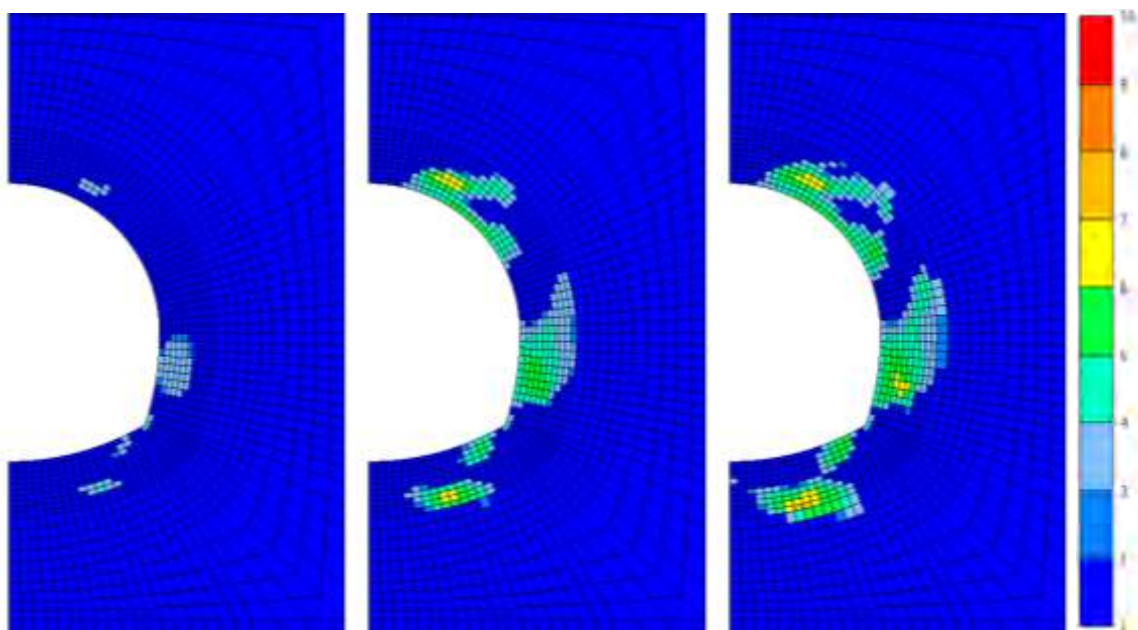
図 3.3.6-18 周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 9)



(a)掘削直後

(b)1年後

(c)10年後

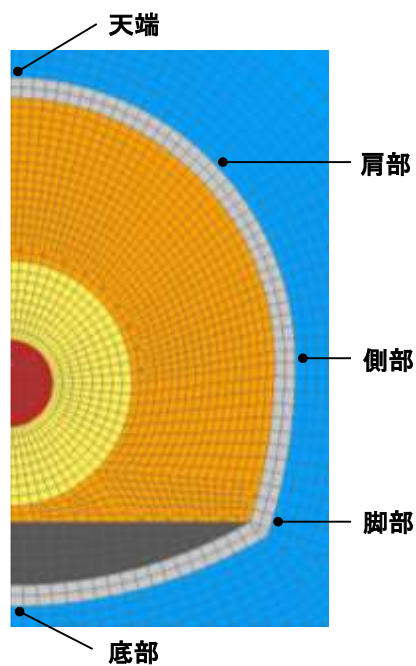


(d)100年後

(e)1,000年後

(f)10,000年後

図 3.3.6-19 周辺岩盤の透水係数の変化の分布 (ケース 9)



着目した壁面近傍の要素

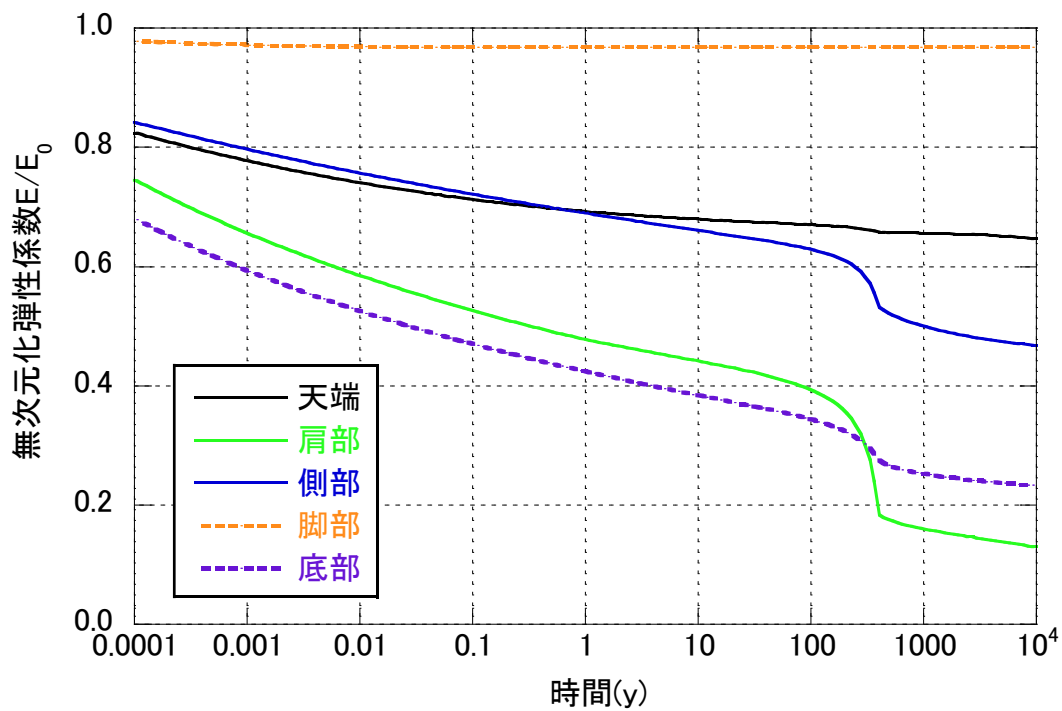


図 3.3.6-20 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 9)

つぎに、ケース 10 の解析結果として、処分坑道周辺岩盤における局所安全率の分布を図 3.3.6-21 に、最大せん断ひずみの分布を図 3.3.6-22 に、弾性係数の変化を図 3.3.6-23 に、透水係数の変化を図 3.3.6-24 に示す。また、壁面近傍の要素の弾性係数の経時変化を図 3.3.6-25 に示す。

処分坑道周辺岩盤では、局所安全率 $F_s=1.2$ の領域は、掘削直後、坑道掘削径 D の 20%以下を満足する結果となり、その後、時間が経過すると $F_s=1.2$ の領域は発生しなくなる。

一方、最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}=0.570\%$ 超過領域は、掘削直後、坑道掘削径 D の 20%以下であるが、その後、時間とともに $\gamma_{\max}=0.570\%$ 超過領域は岩盤の深部に広がり、1 年後に側部で坑道掘削径 D の 20%以下を超え、1 万年後には坑道掘削径 D の 30%の領域まで拡大する。

周辺岩盤は掘削直後から弾性係数は低下し続け、1 万年後の坑道周辺岩盤の弾性係数は壁面近傍で初期値の 10~20%程度まで低下した。特に、肩部に弾性係数の低下領域が集中し、肩部の岩盤深部では弾性係数は初期値の 10%まで低下した。

1 万年後の坑道周辺岩盤の透水係数は最大約 7 倍まで増加している。透水係数が増加する領域は肩部と下半側部の局所的な領域に発生し、坑道全周にわたって広がる分布とはならなかった。

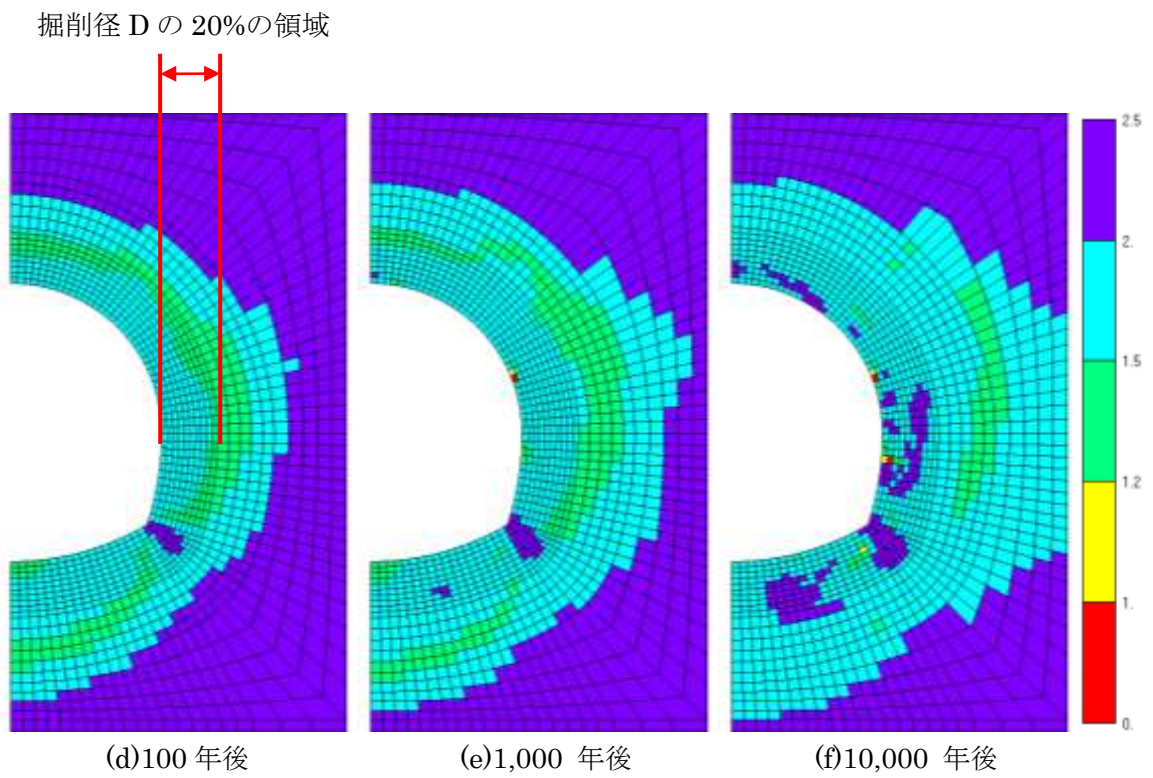
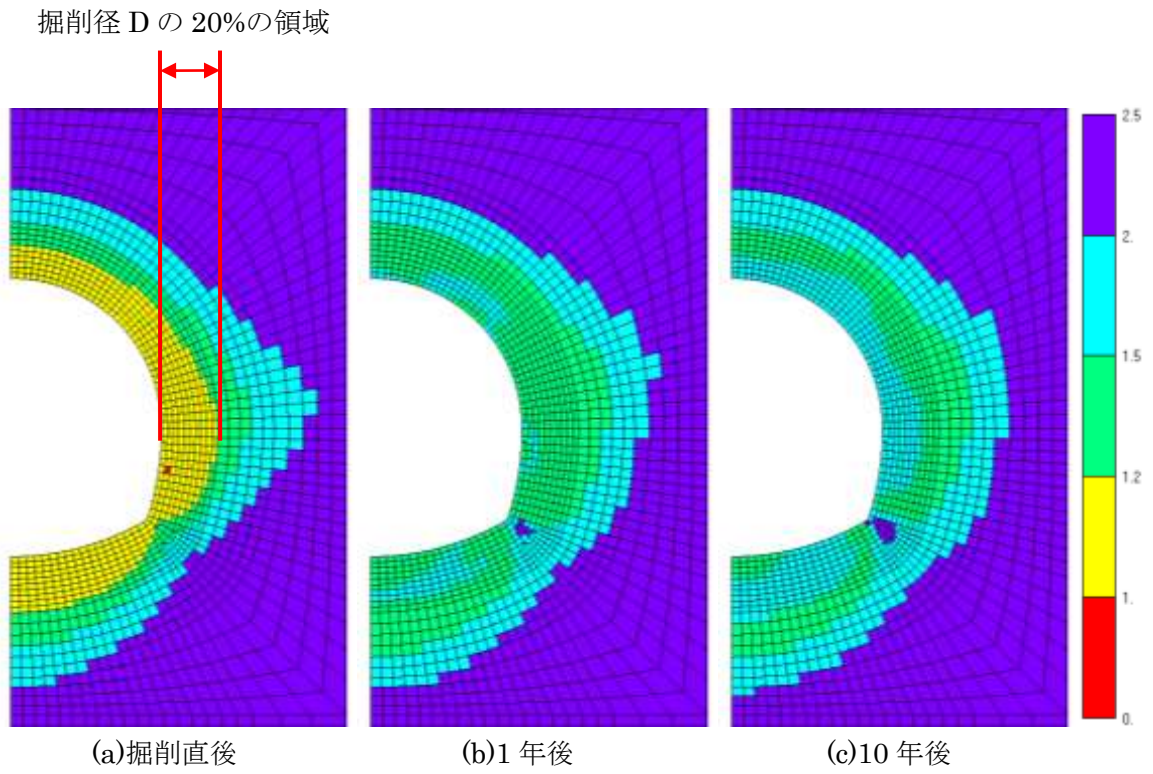
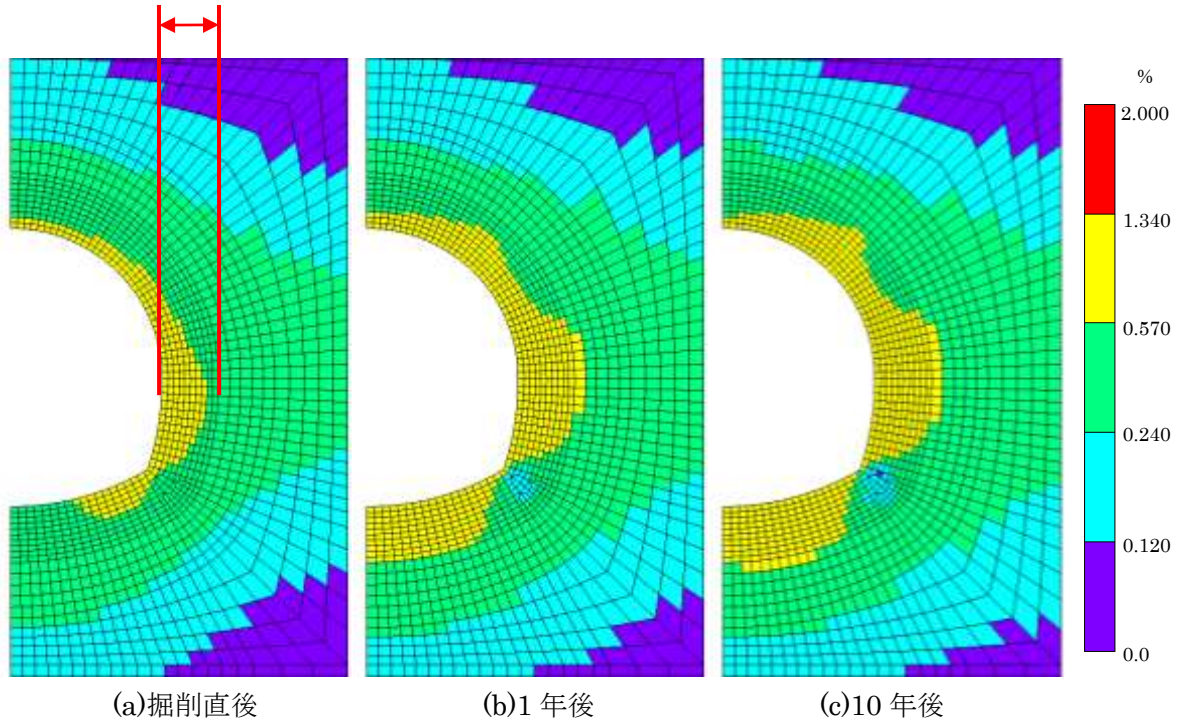


図 3.3.6-21 周辺岩盤の局所安全率の変化 (ケース 10)

掘削径 D の 20% の領域



掘削径 D の 20% の領域

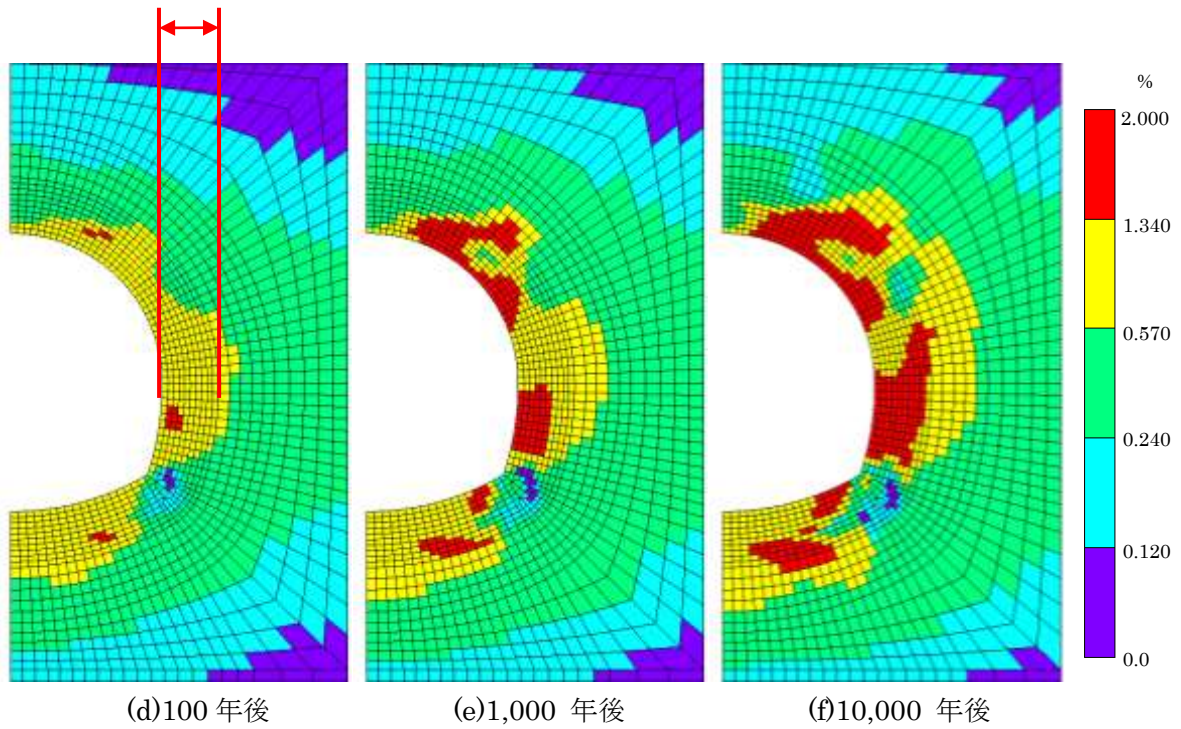
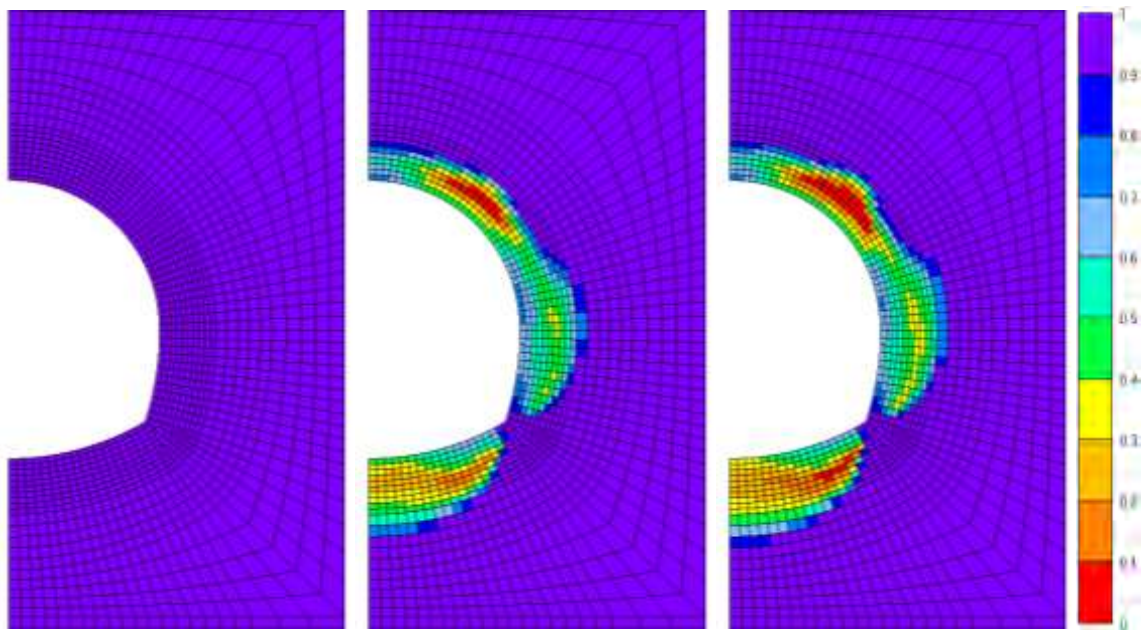


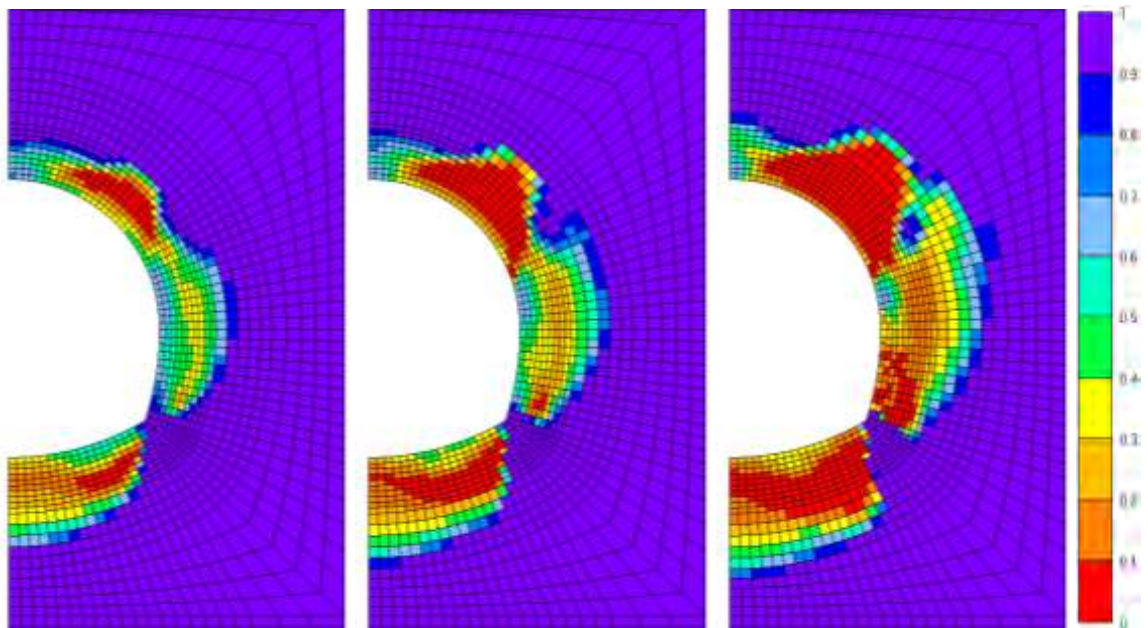
図 3.3.6-22 周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布 (ケース 10)



(a)掘削直後

(b)1年後

(c)10年後



(d)100年後

(e)1,000年後

(f)10,000年後

図 3.3.6-23 周辺岩盤の弾性係数の変化の分布 (ケース 10)

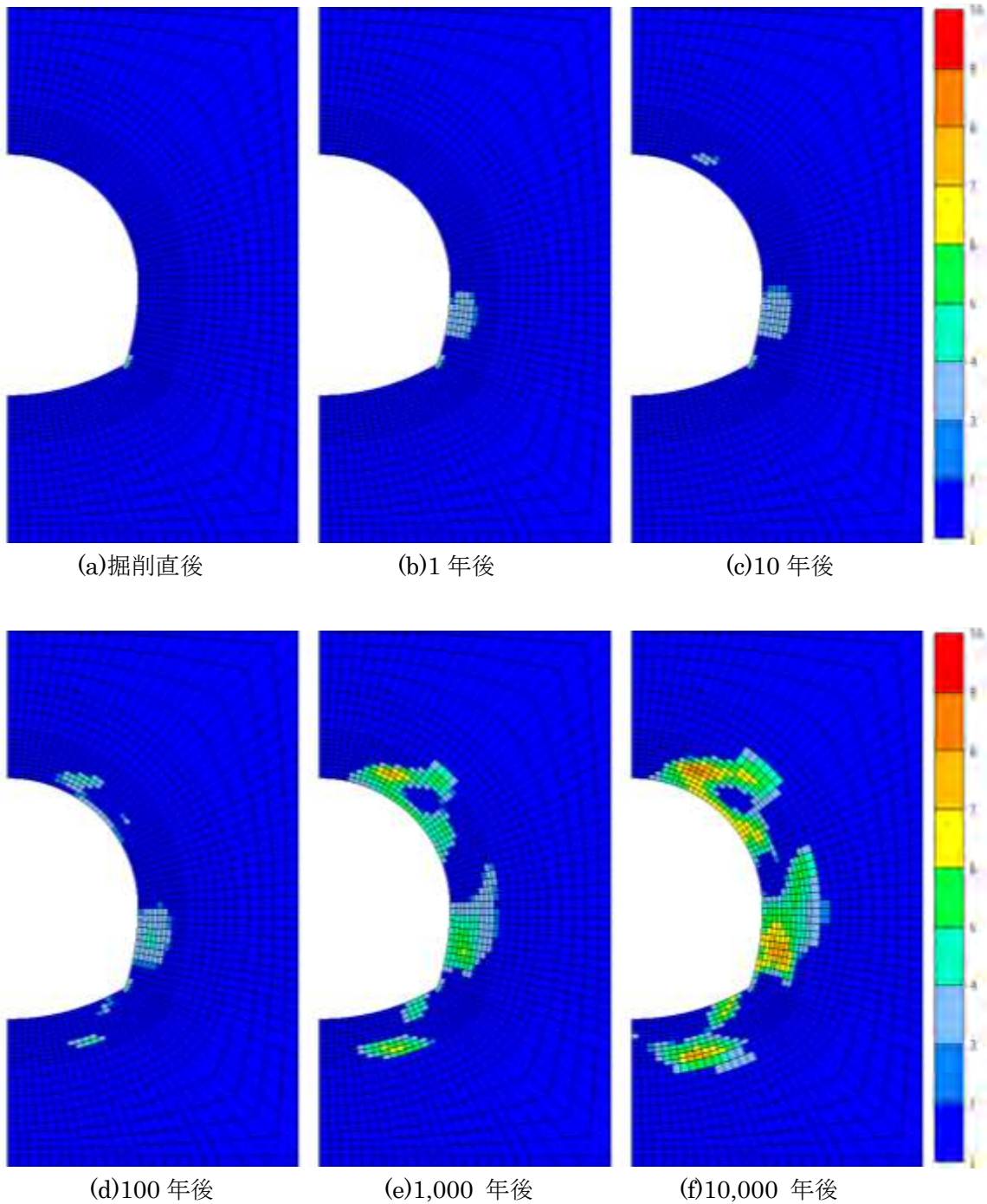
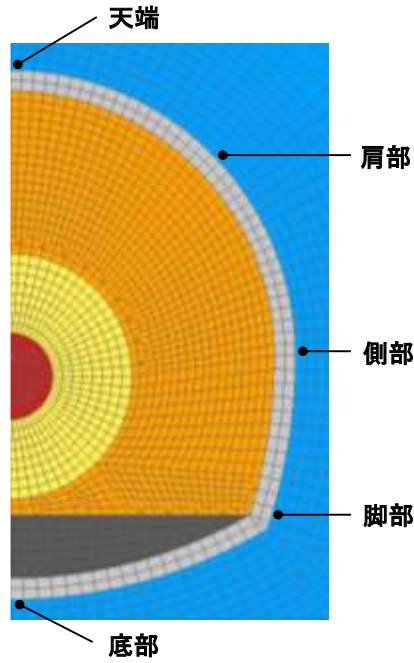


図 3.3.6-24 周辺岩盤の透水係数の変化の分布 (ケース 10)



着目した壁面近傍の要素

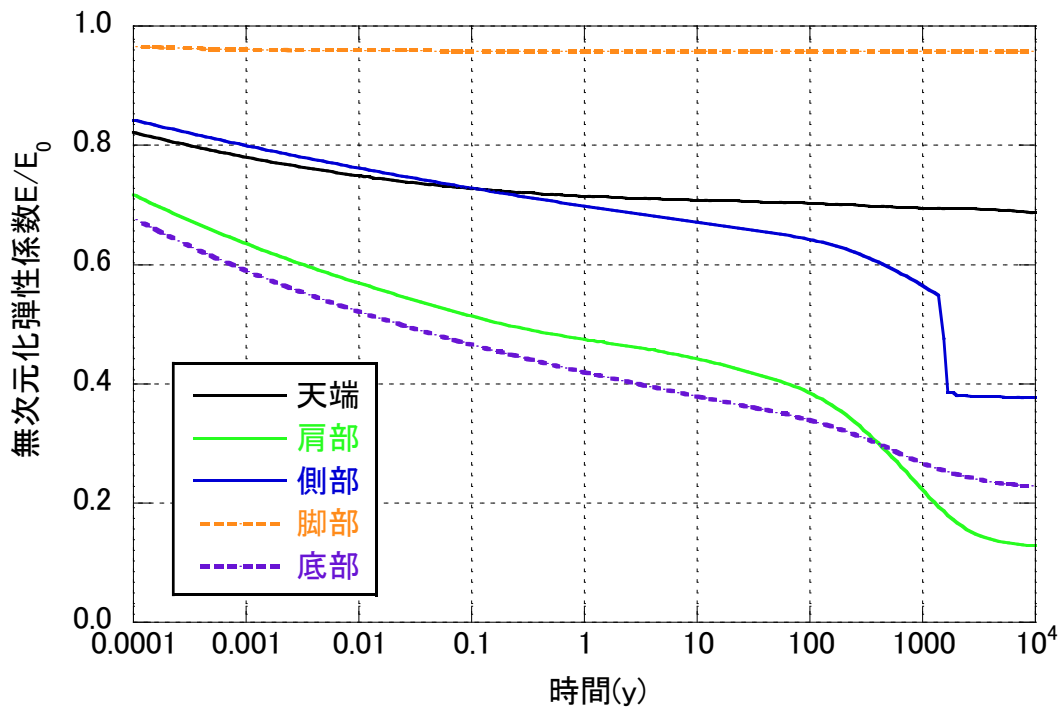


図 3.3.6-25 壁面近傍の弾性係数の経時変化 (ケース 10)

つぎに、ケース 9 の結果に対して、坑道安定期間について検討する。ケース 8 と同様、坑道掘削径 D の 20% の領域を超える位置にある要素に着目して、その要素における最大せん断ひずみの経時変化を図 3.3.6-26 に示す。評価基準とした限界せん断ひずみ 0.570% を超えるのは 12 年となる。つぎに、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における最大せん断ひずみの経時変化を図 3.3.6-27 に示す。この場合、坑道安定期間はケース 8 に比べてさらに延長され、335 年となる。

吹付けコンクリートの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 3.3.6-28 に示す。この結果より、支保工応力度で評価した場合の坑道安定期間は 208 年となる。

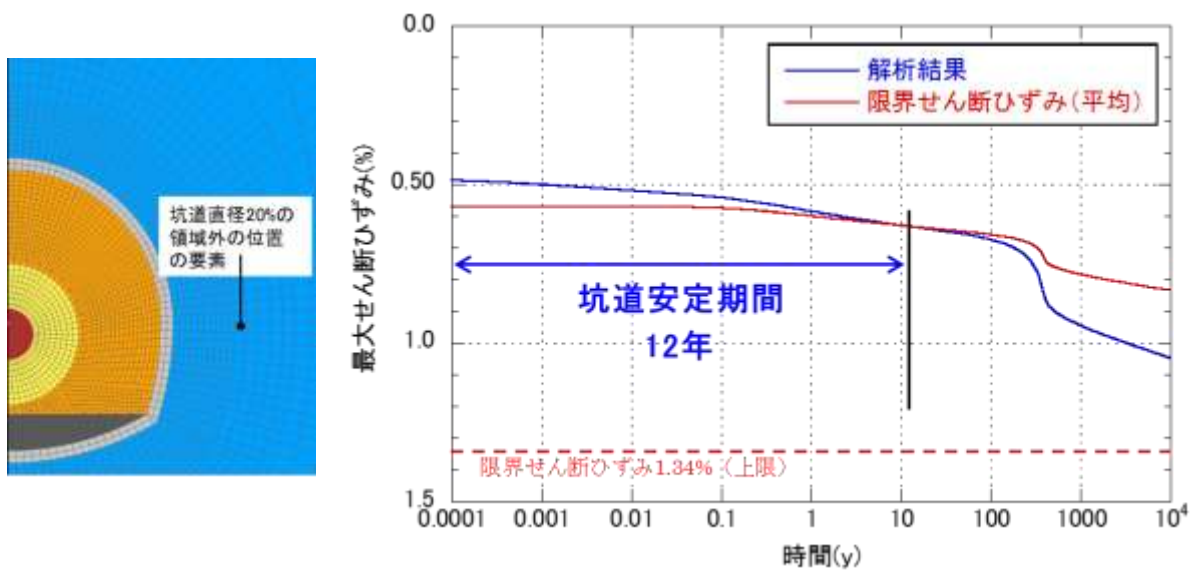


図 3.3.6-26 坑道掘削径 D の 20% 領域外の要素における最大せん断ひずみの経時変化 (ケース 9)

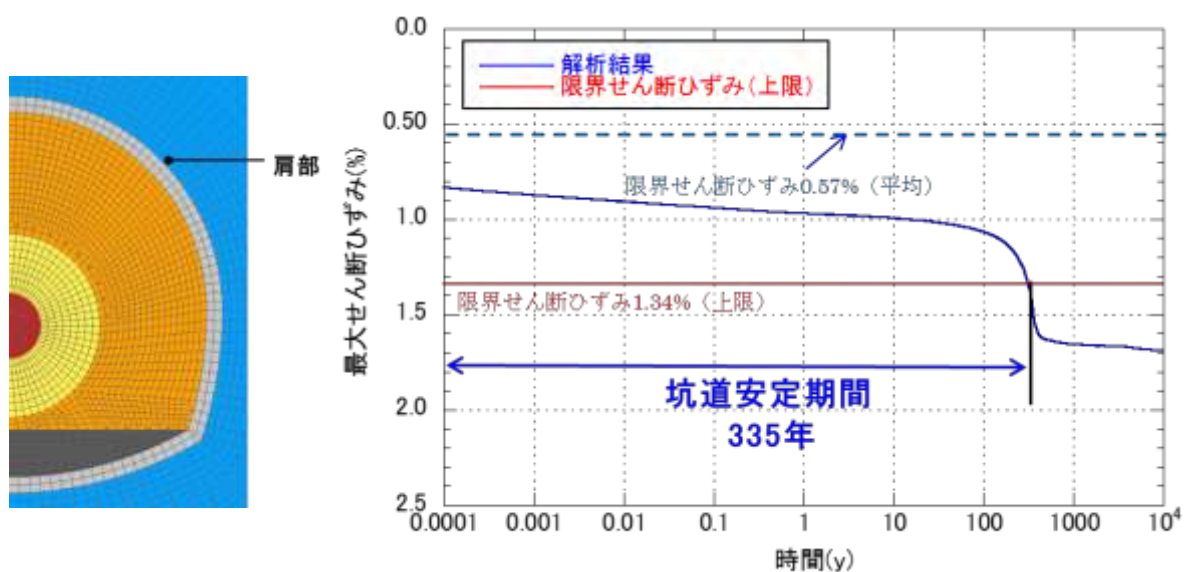


図 3.3.6-27 肩部の要素における最大せん断ひずみの経時変化 (ケース 9)

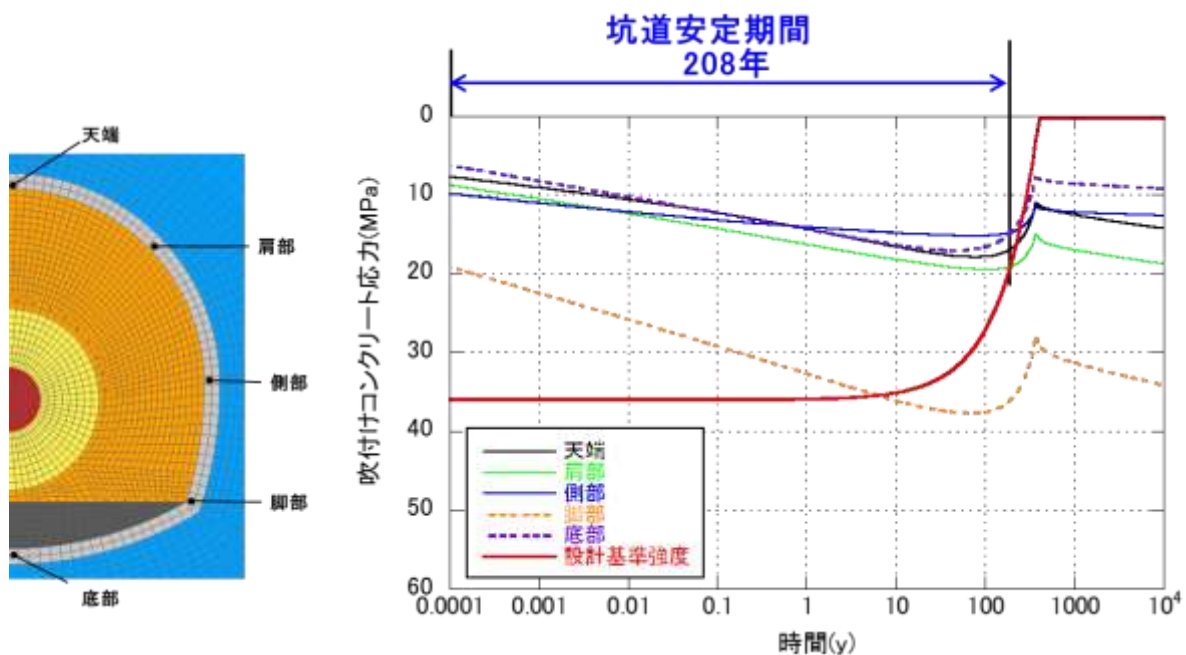


図 3.3.6-28 着目要素における吹付けコンクリート応力の経時変化（ケース 9）

つぎに、ケース 10 の結果に対して、坑道安定期間について検討する。ケース 8 と同様、坑道掘削径 D の 20% の領域を超える位置にある要素に着目して、その要素における最大せん断ひずみの経時変化を図 3.3.6-29 に示す。評価基準とした限界せん断ひずみ 0.570% を超えるのはケース 8 と同様、0.149 年（53 日）となる。つぎに、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における最大せん断ひずみの経時変化を図 3.3.6-30 に示す。この場合、坑道安定期間はケース 8 に比べて延長され、304 年となる。

吹付けコンクリートの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 3.3.6-31 に示す。この結果より、支保工応力度で評価した場合の坑道安定期間は 97 年となる。これは、ケース 8 の結果よりも 40 年程度短くなる結果となったが、これはコンクリートの劣化モデルの違いによる影響であると考えられる。

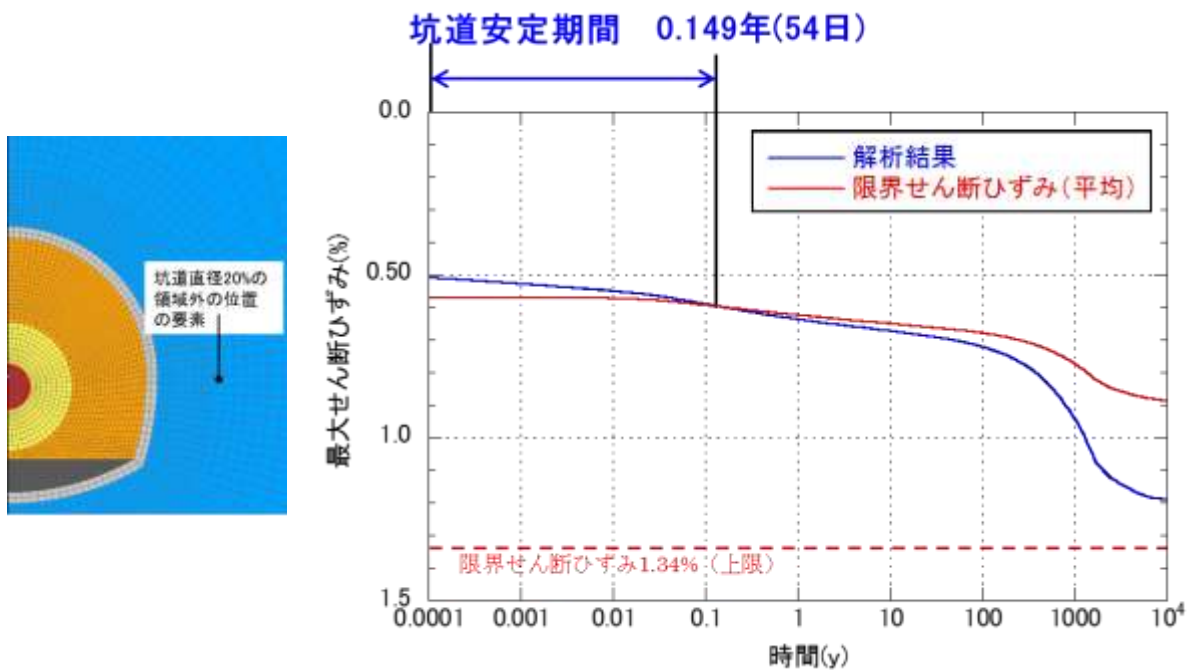


図 3.3.6-29 坑道掘削径 D20%領域外の要素における最大せん断ひずみの経時変化 (ケース 10)

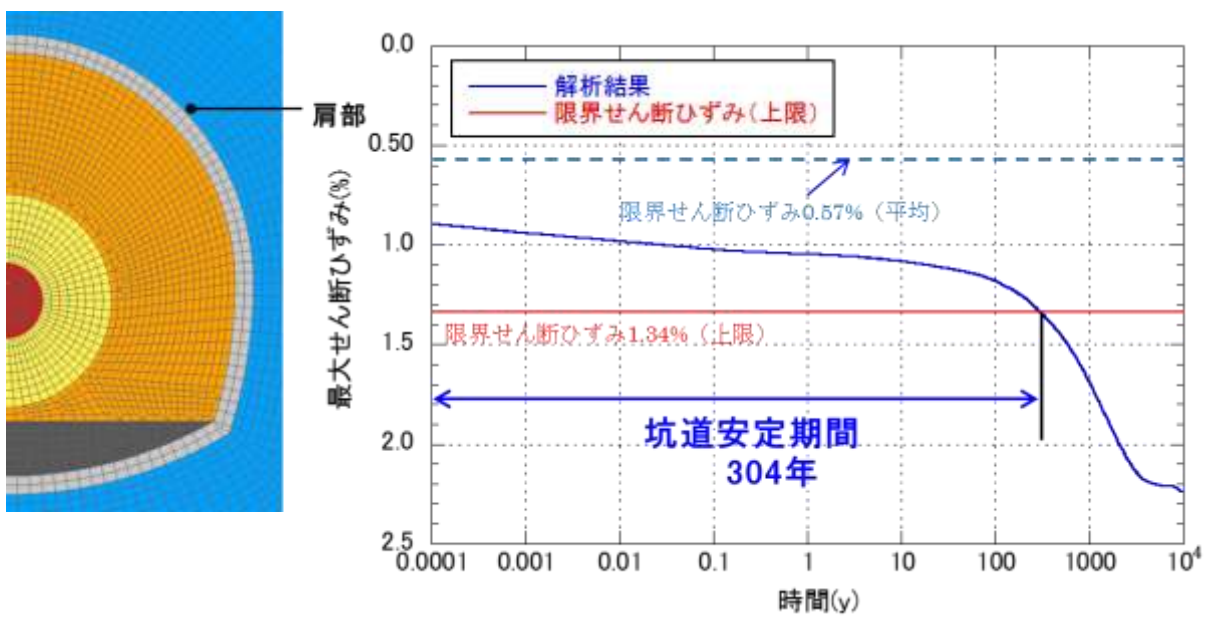


図 3.3.6-30 肩部の要素における最大せん断ひずみの経時変化 (ケース 10)

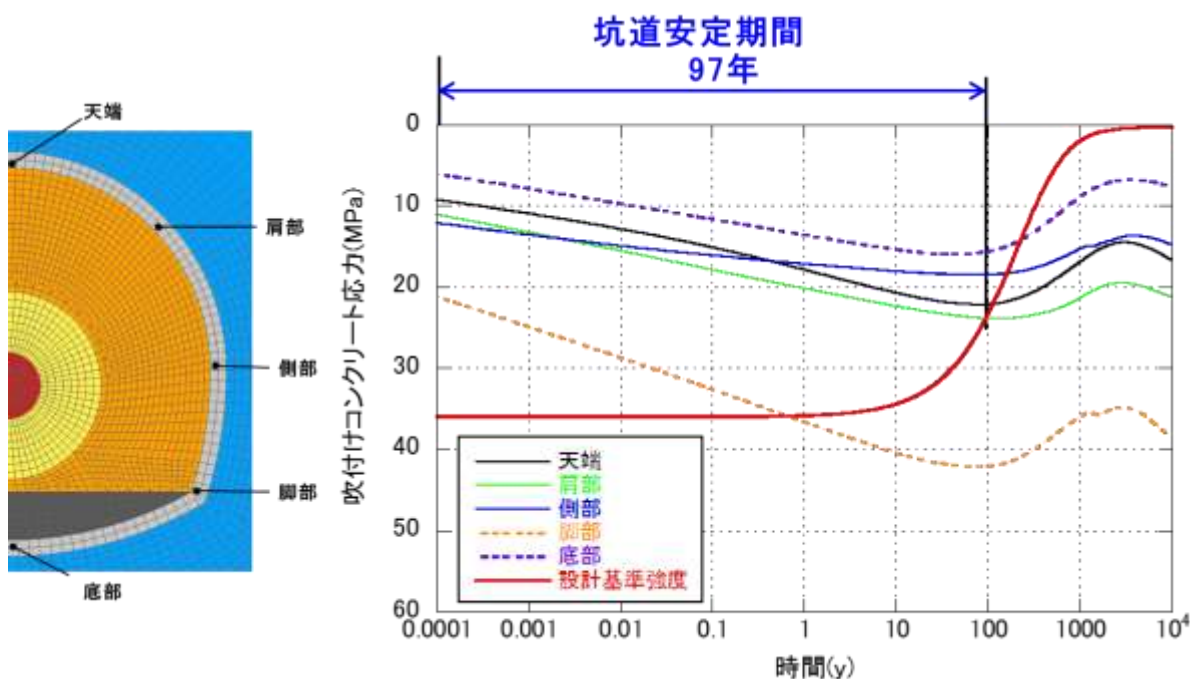


図 3.3.6-31 着目要素における吹付けコンクリート応力の経時変化（ケース 10）

以上の検討結果を整理すると、坑道安定期間は表 3.3.6-2 に示すようにまとめられる。この表より、新第三紀堆積岩については、100 年～350 年程度の坑道安定期間となることがわかった。

以上の検討結果より、坑道安定性の評価基準に基づき、坑道安定期間の評価方法を例示した。また、回収可能性の維持による影響を低減する技術について検討し、その影響低減効果を定量的に示した。

表 3.3.6-2 坑道安定期間の評価結果

検討ケース 新第三紀堆積岩横置き方式	岩盤の最大せん断ひずみ (限界せん断ひずみ上限)	吹付けコンクリート応力 (設計基準強度)
基本設定(ケース8)	250年	140年
剛性の裕度確保(ケース9)	340年	210年
溶脱の抑制(ケース10)	300年	100年

3.3.7 課題抽出と水理学的影響評価への展開

本年度の検討を通じて、回収可能性の維持期間を検討する上で定量的評価を行うことによる課題を抽出する。課題は評価方法に関する課題と坑道安定性保持に対する技術的課題に分けて抽出・整理する。また、水理学的影響評価への展開として、力学解析結果から次年度以降に計画している水理学的影響評価へのデータの引き継ぎ方法および次年度に実施する力学的影響の評価方法による検討の計画案を提示する。

(1) 評価方法に関する課題

評価方法に関する課題としては、力学的影響の解析手法に関する課題と支保工や緩衝材および埋め戻し材などの構成モデルおよび物性値の設定に関する課題が挙げられる。

岩盤の時間依存性力学モデルに関しては、日本原子力研究開発機構において、時間依存性挙動の主現象であるクリープと応力緩和現象の現象論的な解明をテーマとして、原位置における時間依存性挙動の予測評価手法の開発と、その手法を用いた研究坑道での原位置試験による検証を目標とする研究が進められている。その研究の一環として、岩盤構造物の長期挙動予測評価手法に対して新しい知見を加えるため、長期間のクリープ試験に耐えうる試験装置と、長期間にわたって精度の良い計測が行える計測システムを開発して、1994年から試験が開始されている[27]。長期クリープ試験の試験装置の概略図を図 3.3.7-1 に、写真を図 3.3.7-2 に示す。これまで続けてきた田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行い試験期間は 16 年を越えている。このような長期にわたる試験は過去にもほとんど例がなく、岩石の長期時間依存性挙動を評価するための貴重なデータを取得しつつある。また、岩石を対象とした構成方程式の妥当性や適用性については、従来、圧縮応力下で検討されることがほとんどであり、試験結果の少ない引張応力下での検討例はほとんどないことから、花崗岩の一軸引張試験結果を用いて構成方程式の適用性に関する検討が行われている。一軸引張応力下での検討例は少なく、試験結果を蓄積することにより、圧縮応力下と引張応力下での変形や破壊機構の相違点の検討や構成方程式の妥当性の検証が今後の課題であるとしている。

一方、支保工や緩衝材および埋め戻し材などの構成モデルに関しては、支保工の劣化モデルおよび物性値の設定方法が挙げられる。本検討においては、吹付けコンクリートにおけるセメント成分の溶脱を考慮した弾性係数の変化モデルとして、線形補間モデルと指数関数モデルを用いて比較を行った。その結果、モデルの違いが坑道安定期間に影響を与えることがわかった。したがって、物性値の設定も含めて、坑道周辺の水理環境の変遷を考慮したより適切なセメントの溶脱現象の評価やそれに伴う力学特性変化のモデル化に関する検討が必要である。また、緩衝材および埋め戻し材の物性変化についても飽和状態の変化に伴う物性データの取得や評価モデルの構築に関する検討が必要であると考えられる。

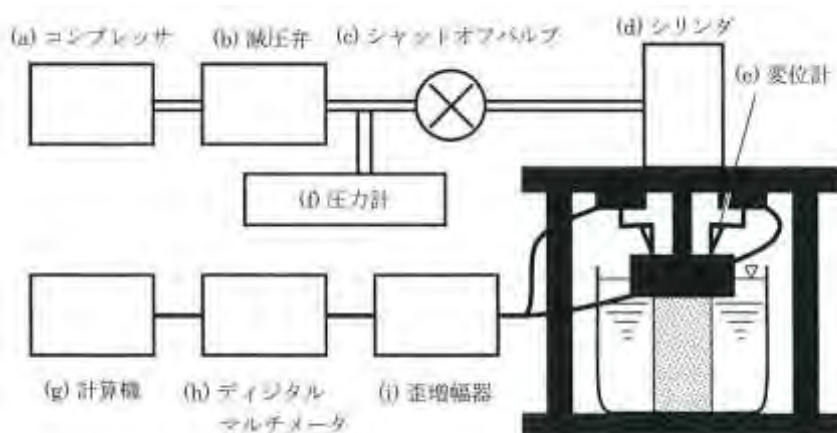


図 3.3.7-1 空圧式クリープ試験機の概略図[27]



図 3.3.7-2 空圧式クリープ試験機の写真[27]

(2) 坑道安定性に対する技術的課題

今回提案した坑道安定期間の評価方法における課題として、「対策 2」に相当する供用中のトンネルで行われている補修や補強などの対策工の効果について検討が挙げられる。「対策 2」については、既往の検討[28]によると変状原因と対策工の関係が表 3.3.7-1 のように整理されている。このうち、鋼板接着工の事例として、昭和 33 年に竣工したトンネルの補修・補強工の事例が挙げられている。この事例では、図 3.3.7-3 に示すような劣化状況に対して図 3.3.7-4 に示すような対策が行われている。この対策工の効果を解析へ導入するにあたっては、裏込め注入工による覆工の耐荷力の向上や鋼板設置による覆工の力学特性の向上ならびにロックボルトの打設による地山の補強効果などを適切モデル化して解析に取り入れる必要がある。さらに、その時点での覆工の劣化の程度や保持している支保性能を事前に評価しておくことも必要である。

また、対策工によっては、一時的に支保工を撤去することも必要となることから、そのことが坑道の安定性に与える影響を事前に正確に予測することも必要になると考えられる。

表 3.3.7-1 変状原因と対策工[28]

	外力による変状							材質劣化	漏水
	緩み土圧	突発性の崩壊	水圧・凍上圧 (膨張性土圧)	側性土圧	偏土圧/地すべり	近接施工	支持力不足		
断面修復工	○		△	△	○		○	○	
ひび割れ注入工	○		△	△	○		○	△	
ポインティング(目地詰め)工	○		△	△	○		○	△	○
金網・ネット工	○		△	△	○		○	○	
当て板工	○		△	△	○		○	△	
補強セントル工	○	○	○	○	○		○	△	
シート接着工	○	○	○	○	○		○	○	
鋼板接着工	○	○	○	○	○		○	○	
裏込め注入工	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎		△
ロックボルト工	○		◎						
アンカー工	△		◎	○	○	△	○		
吹付けコンクリート工	△	△	○	○	○		○	○	
場所打ち内巻工	△	△	○	○	○		○	○	
プレキャスト内巻工	△	△	○	○	○		○	○	
インパート工			◎	◎		◎			
路盤下補強工			△			○			
全面改築工	○	○	○	○	○	○	○	○	
漏水・つらら防止工									◎

凡例 ◎：変状に対して最適と考えられる対策
 ○：変状に対して適合すると考えられる対策
 △：変状に対して場合によっては有効な対策

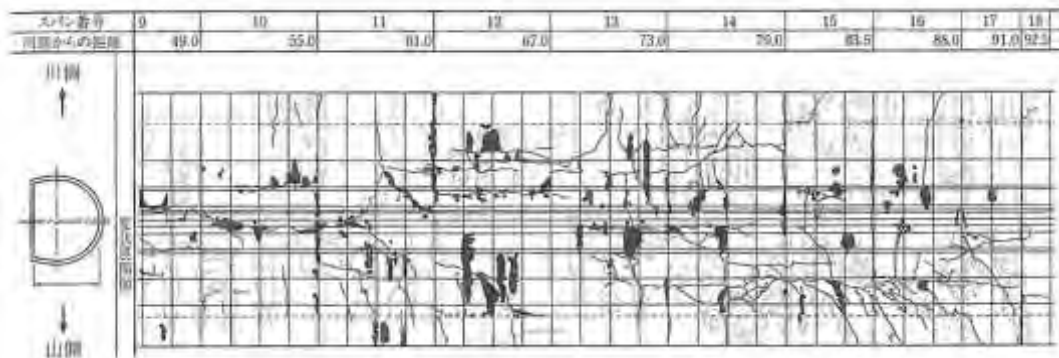


図 3.3.7-3 覆工展開図[28]

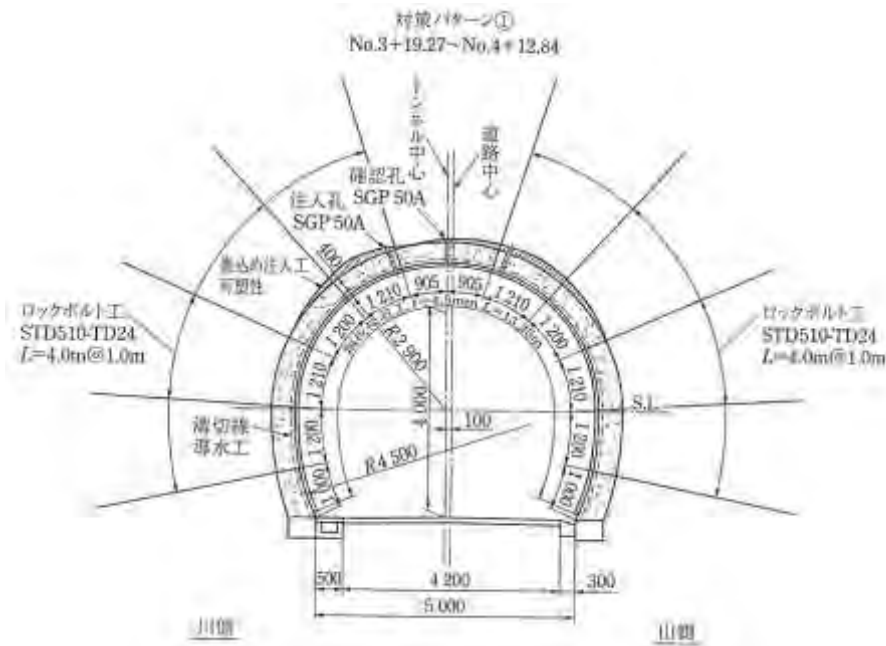


図 3.3.7-4 対策工標準断面図（一部）[28]

(3) 水理学的影響評価への展開

水理学的影響評価への展開として、本年度実施する力学的影響現象解析については、3.3.3 で述べたように力学解析によって求められた岩盤の最大主ひずみを基に既存の実験結果から得られたひずみ-透水係数の関係式を用いて透水係数を算定した。その結果を次年度以降に計画している水理学的影響評価へ透水係数分布のデータとして引き渡す。その他、次年度以降に実施する力学的影響評価の概要を以下に示す。

(1) 水理学的影響評価への展開

力学的影響現象解析の結果から、今年度検討した条件では、数値解析上、岩盤を連続体としてとらえているため、埋め戻しの効果がほとんど現れなかったが、実際では、掘削面からの崩落の防止、支保工の風化防止、壁面を三軸応力状態にするなどの効果が期待できる。

一方、水理学的には、坑道内が開放された状態と埋め戻された状態とでは坑道周辺の地下流動現象が異なると想定されることから、次年度計画している水理学的影響評価がより重要となると考えらえる。

水理学的影響評価では、力学解析によって求められた岩盤の透水係数分布を利用する。例えば、新第三紀堆積岩の横置き方式を対する場合には、ケース 8 の解析結果より、図 3.3.7-5 に示すように 100 年後と 1 万年後の透水係数分布を設定する。100 年後は坑道周辺で透水係数が 5 倍、1 万年後は 7 倍に増加すると想定する。

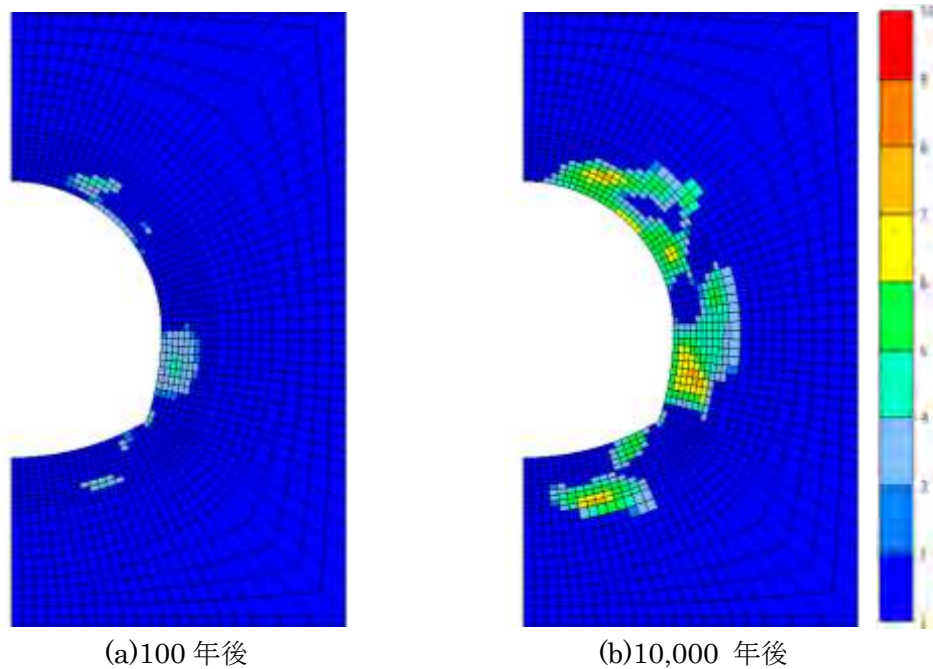


図 3.3.7-5 処分坑道周辺の透水係数の設定例

(2) トンネルの変状要因を考慮した力学的影響評価

トンネルの変状事例から想定した坑道の力学的安定性への影響を解析によって定量的に示すことを目的として、周辺岩盤の塑性化などによる変状の発生を想定した地山劣化モデルによる解析検討を行う。地山劣化モデルは、松長ら[29]が提案している手法で、周辺地山の強度劣化を考慮した解析手法である。地山劣化モデルの概要を図 3.3.7-6 に示す。地山の力学モデルには Mohr-Coulomb の降伏条件を使用し、地山の各要素の強度定数(C_{peak} , ϕ_{peak})から(C_{res} , ϕ_{res})に低減させることで、降伏しているあるいは低減により降伏した要素の応力をピーク強度 $\sigma_{1,peak}$ から残留強度 $\sigma_{1,res}$ まで低下させる。これによって、周辺地山には応力再配分が生じ、周辺地山が内空側へ変形することでトンネルの経時的な変形挙動を表現する手法である。

この解析から得られた結果から、本年度実施する力学的影響現象解析と同様、既存の実験結果のひずみ-透水係数の関係式を用いて透水係数を算定し、本年度実施する大久保モデルによって算定される透水係数との相違について考察、評価を加えて、水理学的影響評価へ透水係数分布のデータとして引き渡す。

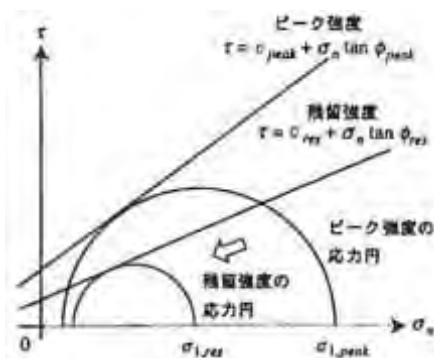
この解析を実施するあたっては、岩盤の物性値として、Mohr-Coulomb の降伏条件におけるピーク強度と残留強度が必要になる。これについては、今年度設定した新第三紀堆積岩の物性値と既往の研究例を参考にすることで設定可能である。また、解析には坑道周辺岩盤の変位-時間関係が必要になるが、これについては、今年度実施した大久保モデルによる長期力学解析の解析結果に基づいて設定することが可能であると考えている。



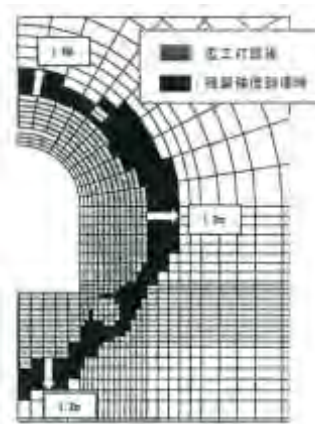
(a) トンネル断面形状



(b) 主な変状状況



(c) 地山劣化モデルの説明



(d) 塑性領域の進展状況

図 3.3.7-6 地山劣化モデルの概要[29]

(3) 岩盤の割れ目を考慮した力学的影響評価

割れ目を含む岩盤を対象としたクラックテンソルモデルを用いた坑道掘削による応力・変形解析を実施するとともに、仮想割れ目モデルによる透水性変化解析を行い、掘削による岩盤の透水性変化を予測する[30]。クラックテンソルモデルによる解析は、多数の割れ目を含む岩盤をそれと等価な連続体に置き換えて、応力・変形を解析する手法である。この解析から得られた応力分布を基に、仮想割れ目モデルを用いて、掘削後の透水係数を算定し、本年度実施する大久保モデルによって算定される透水係数との相違について考察、評価を加えて、水理学的影響評価へ透水係数分布のデータとして引き渡す。

クラックテンソルモデルを用いた応力・変形解析の概要を以降に示す。

はじめに、従来のクラックテンソルモデルの概要を示し、次に、掘削損傷領域を考慮した場合のクラックテンソルモデルを示す。本検討では、掘削影響領域を掘削損傷領域（坑道掘削時の発破の衝撃によって新規の割れ目が発生して、岩盤の剛性が低下した領域）として考慮する。

①従来のクラックテンソルモデル

Oda[31], [32]によって提案されているクラックテンソルとは、統計的に均質な岩盤領域におけ

る割れ目の密度、大きさ、方向などの幾何学的特性を表現するテンソル量である。

対象としている三次元空間に割れ目が任意に分布していて、面積 S を持つ割れ目を等価な円で置き換えたときの直径を D とすると、2 階、4 階のクラックテンソル F_{ij} 、 F_{ijkl} は、以下のように定義される。

$$F_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{D_m} \int_{\Omega} D^3 n_i n_j E(\mathbf{n}, D) d\Omega dD \quad \text{式 3-19}$$

$$F_{ijkl} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{D_m} \int_{\Omega} D^3 n_i n_j n_k n_l E(\mathbf{n}, D) d\Omega dD \quad \text{式 3-20}$$

ここに、 ρ は割れ目の密度、 D_m は D の最大値、 n_i は割れ目の単位法線ベクトル \mathbf{n} の基準軸 x_i への成分、 $E(\mathbf{n}, D)$ は単位法線ベクトル \mathbf{n} と代表長さ D の統計的分布を与える確率密度関数、 Ω は全立体角を示している。また、式 4-19 と式 4-20 を総和形式にて表すと、以下ようになる。

$$F_{ij} = \frac{\pi}{4V} \sum_{L=1}^M (D^{(L)})^3 n_i^{(L)} n_j^{(L)} \quad \text{式 3-21}$$

$$F_{ijkl} = \frac{\pi}{4V} \sum_{L=1}^M (D^{(L)})^3 n_i^{(L)} n_j^{(L)} n_k^{(L)} n_l^{(L)} \quad \text{式 3-22}$$

ここに、 V は統計的に均一と見なせる領域の体積で、 M は割れ目の総数である。

割れ目の代表長さ D と方向 \mathbf{n} が統計的な意味で独立しているとすると、 $E(\mathbf{n}, D) = E(\mathbf{n})f(D)$ とすることができ、式 4-19 と式 4-20 は、以下のようになる。

$$\begin{aligned} F_{ij} &= \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{D_m} D^3 f(D) dD \int_{\Omega} n_i n_j E(\mathbf{n}) d\Omega \\ &= F_0 N_{ij} \end{aligned} \quad \text{式 3-23}$$

$$\begin{aligned} F_{ijkl} &= \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{D_m} D^3 f(D) dD \int_{\Omega} n_i n_j n_k n_l E(\mathbf{n}) d\Omega \\ &= F_0 N_{ijkl} \end{aligned} \quad \text{式 3-24}$$

ただし、

$$F_0 = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{D_m} D^3 f(D) dD \quad \text{式 3-25}$$

$$N_{ij} = \int_{\Omega} n_i n_j E(\mathbf{n}) d\Omega \quad \text{式 3-26}$$

$$N_{ijkl} = \int_{\Omega} n_i n_j n_k n_l E(\mathbf{n}) d\Omega \quad \text{式 3-27}$$

ここに、 $f(D)$ は割れ目の代表長さ D の確率密度関数、 $E(\mathbf{n})$ は単位法線ベクトル \mathbf{n} の確率密度関数、 F_0 は割れ目の密度を示す量、 N_{ij} および N_{ijkl} は割れ目の方向分布によって定まる 2 階および 4 階の割れ目の構造テンソルである。そして、式 4-26 と式 4-27 を総和形式にすると、次式のようになる。

$$N_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{L=1}^M n_i^{(L)} n_j^{(L)} \quad \text{式 3-28}$$

$$N_{ijkl} = \frac{1}{M} \sum_{L=1}^M n_i^{(L)} n_j^{(L)} n_k^{(L)} n_l^{(L)} \quad \text{式 3-29}$$

また、Oda[28]によると、三次元空間中にスキャンラインを設定して、それに平行な単位ベクトルを \mathbf{q} 、この単位ベクトル \mathbf{q} に交わる割れ目の個数を N^q 、ある観測平面に現れる割れ目のトレースの長さを t とすると、式 4-22 は、以下のように表わされる。

$$F_0 = \frac{3\pi}{8} \frac{\langle t^2 \rangle}{\langle t \rangle} \frac{N^q}{\langle \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} \rangle} \quad \text{式 3-30}$$

ここに、 $\langle t^n \rangle$ はトレース長 t の n 次のモーメントである。

割れ目を有する岩盤の挙動を予測するためには、何らかの方法によって割れ目の挙動を考慮したモデル化が必要になる。その方法には、岩盤を割れ目で区切られた不連続体として取り扱う方法と、割れ目を含む岩盤を等価な連続体として取り扱う方法がある。そして、Oda[31], [32]は、割れ目の幾何学特性をクラックテンソルで表し、クラックテンソルを導入することによって、割れ目を含む岩盤を等価な連続体に置き換えて、応力・変形を解析する手法を提案している。

多くの割れ目を含む岩盤が巨視的な応力 σ を受けて変形をするとき、発生する巨視的なひずみ ε は、基質部に生じるひずみと割れ目に生じるひずみの和で与えられる。割れ目に生じるひずみは、割れ目の垂直およびせん断方向に発生する相対変位の総和から得られる。そして、割れ目によるひずみと巨視的な応力 σ の関係は、図 3.3.7-7 に示されたように割れ目をスプリングで連結された平行平板でモデル化することと、割れ目群の幾何学的特性を表すクラックテンソルを導入することによって求められる。

巨視的なひずみ ε が基質部の弾性ひずみと割れ目の存在による付加的な弾性ひずみの二つの成分の和であるとする、 ε と σ の関係は、次式のように示されている。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij} &= (M_{ijkl} + C_{ijkl}) \sigma_{kl} \\ &= \left[\frac{1}{E} \{ (1+\nu) \delta_{ik} \delta_{jl} - \nu \delta_{ij} \delta_{kl} \} + \left(\frac{1}{h} - \frac{1}{g} \right) F_{ijkl} + \frac{1}{4g} (\delta_{ik} F_{jl} + \delta_{jk} F_{il} + \delta_{il} F_{jk} + \delta_{jl} F_{ik}) \right] \sigma_{kl} \end{aligned}$$

式 3-31

ここに、 M_{ijkl} は基質部のコンプライアンステンソル、 C_{ijkl} は割れ目によるコンプライアンステンソル、 E と ν は基質部のヤング係数とポアソン比、 h と g は割れ目の垂直剛性とせん断剛性に関するパラメータ、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタを示す。

個々の割れ目が、図 3.3.7-7 のように二つのスプリングで連結された平行平板でモデル化され、スプリングによって垂直応力 σ_n とせん断応力 τ が伝達されるものとすれば、割れ目の垂直剛性 H 、せん断剛性 G はそれぞれのスプリングの剛性で表され、最終的に次式で近似される。

$$H = \frac{1}{r} (h_0 + C \sigma_{ij} N_{ij}) = \frac{1}{r} h \quad \text{式 3-32}$$

$$G = \frac{1}{r} (g_0 + g_1 \sigma_{ij} N_{ij}) = \frac{1}{r} g \quad \text{式 3-33}$$

ここに、 h_0 、 g_0 および g_1 は実験で求めるパラメータ、 C は割れ目のアスペクト比、 r は図 3.3.7-7

に示される割れ目の大きさである。

式 4-32、式 4-33 の垂直剛性 H とせん断剛性 G は、全割れ目について平均化した剛性であり、割れ目の大きさ r に反比例し垂直応力 σ_n に依存するパラメータである。ただし、割れ目の剛性に関して、その応力依存性を考慮しない場合、式 4-32 と式 4-33 中の h 、 g は応力の次元を持つ定数となる。

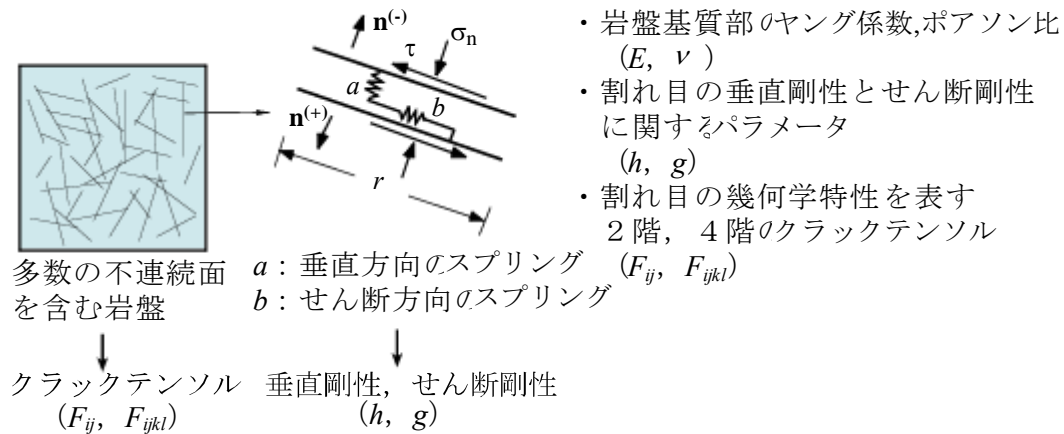


図 3.3.7-7 クラックテンソルモデルの概念

②掘削損傷を考慮したクラックテンソルモデル

岩盤中には既に割れ目が存在しているが、発破などによって既存の割れ目が伸展していない、あるいは新規の割れ目が発生していない場合、すなわち、掘削損傷領域以外では、岩盤の応力-ひずみ関係は式 4-31 より以下のように表される。

$$\varepsilon_{ij} = (M_{ijkl} + C_{ijkl}^P) \sigma_{kl}$$

$$= \left[\frac{1}{E} \{ (1+\nu) \delta_{ik} \delta_{jl} - \nu \delta_{ij} \delta_{kl} \} + \left(\frac{1}{h^P} - \frac{1}{g^P} \right) F_{ijkl}^P + \frac{1}{4g^P} (\delta_{ik} F_{jl}^P + \delta_{jk} F_{il}^P + \delta_{il} F_{jk}^P + \delta_{jl} F_{ik}^P) \right] \sigma_{kl}$$

式 3-34

ここに、右肩の添字 P は既存の割れ目に対応することを意味している。

発破などによって岩盤の剛性が低下する要因として、岩盤基質部の剛性低下と割れ目の状態が変化することが考えられるが、図 3.3.7-8 のように新規の割れ目が発生することによって岩盤の剛性が低下するものとしてクラックテンソルモデルによる定式化を行う。

クラックテンソルモデルによる巨視的な応力とひずみの関係は、基質部に生じるひずみと割れ目に生じるひずみの和から定式化されている。そして、割れ目に生じるひずみは割れ目の垂直およびせん断方向に発生する相対変位の総和から得られることから、新規の割れ目が発生して岩盤の剛性が低下（または、コンプライアンスが増加）する場合、掘削損傷領域の応力-ひずみ関係は、以下のように表される。

$$\varepsilon_{ij} = (M_{ijkl} + C_{ijkl}^P + C_{ijkl}^B) \sigma_{kl} \quad \text{式 3-35}$$

$$C_{ijkl}^B = \left(\frac{1}{h^B} - \frac{1}{g^B} \right) F_{ijkl}^B + \frac{1}{4g^B} (\delta_{ik} F_{jl}^B + \delta_{jk} F_{il}^B + \delta_{il} F_{jk}^B + \delta_{jl} F_{ik}^B) \quad \text{式 3-36}$$

ここに、右肩の添字 B は新規に発生した割れ目に対応することを意味している。

式 3-36 より、入力パラメータとしては、既存の割れ目の情報に加えて、新規の割れ目のクラックテンソル F_{ij}^B と F_{ijkl}^B 、新規の割れ目の垂直剛性とせん断剛性に関するパラメータ h^B と g^B が必要となる。

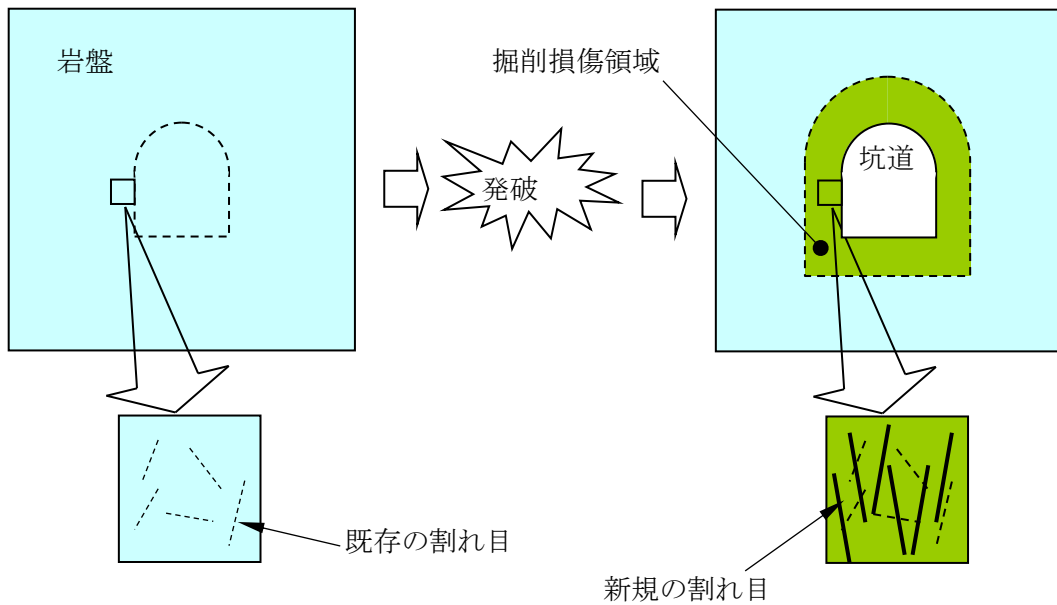


図 3.3.7-8 掘削損傷領域の形成の概念

本業務では、坑道掘削後の周辺岩盤の透水性変化を予測するために、仮想割れ目モデルを用いる。

仮想割れ目モデルとは、坑道掘削時の応力再配分により割れ目に作用する垂直応力の変化に伴って割れ目の透水性が変化し、それによって岩盤の透水性が変わることに着目したモデルである。また、三次元的な割れ目の方向分布を考慮することによって、三次元の透水テンソルを算定することができるモデルである。掘削前後の応力状態は、別途、応力解析にて求めておく必要があるが、掘削前後の応力状態に基づいて掘削前後の透水テンソルを算定し、それらを比較することによって透水性変化を評価することができる[29]。

仮想割れ目モデルでは、原位置の初期透水テンソルから仮想割れ目群の方向分布を推定するものとしていて、推定された割れ目の方向分布は目視観察から得られた方向分布と一致しないことも考えられることから、「仮想」という言葉を用いている。ただし、原位置の初期透水テンソルが得られていない場合には、観測された割れ目の方向分布を仮想割れ目群の方向分布として取り扱

うこともできる。また、仮想割れ目の大きさに関するパラメータも仮想的なものとして取り扱っているが、大きさを推定することができれば、その推定値を解析に用いることとする。

仮想割れ目モデルの特徴をまとめると、以下のようにとおりである。

- ①仮想割れ目群の幾何学特性として、密度・大きさ・方向が考慮され、三次元の透水テンソルを算定することができる。
- ②個々の仮想割れ目は平行平板でモデル化され、その透水性は作用する垂直応力によって変化する。
- ③入力パラメータは、仮想割れ目の垂直応力-透水係数関係、方向分布、密度、および大きさである。
- ④仮想割れ目の方向分布については、原位置の初期透水テンソルから推定することが望ましいが、観測された方向分布を用いることも可能である。

仮想割れ目を平行平板でモデル化すると、面内方向の透水係数は k_j 、面外方向は 0 となる。これを全体座標系に座標変換すると、一個の仮想割れ目の透水テンソル k_{ij}^f は、以下のようになる。

$$k_{ij}^f = k_f (\delta_{ij} - n_i n_j) \quad \text{式 3-37}$$

ここに、 n_i は割れ目の法線ベクトルの成分、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。式 4-37 の透水テンソルを仮想割れ目の体積で重み付けして平均化すれば、岩盤の透水テンソルは、以下のようになる。

$$k_{ij} = \frac{\pi \rho}{4} \sum_{k=1}^m r^2 e^{(k)} k_f^{(k)} (\delta_{ij} - n_i^{(k)} n_j^{(k)}) D(\mathbf{n}^{(k)}) \quad \text{式 3-38}$$

ここに、 ρ は仮想割れ目群の密度、 r は仮想割れ目の形状を円盤と仮定したときの直径、 e は水理学的開口幅、 $D(\mathbf{n})$ は法線ベクトルの相対頻度を表す関数である。なお、水理学的開口幅は次式にて算定できる[34]。

$$e = \sqrt{\frac{12 \mu k_f}{\rho_w g'}} \quad \text{式 3-39}$$

ここに、 ρ_w は水の密度、 g' は重力加速度、 μ は水の粘性係数である。

仮想割れ目の透水係数 k_j は、作用する垂直応力によって変化するが、その関係は、割れ目を含む岩石の室内透水試験から求めることができる。割れ目を含む岩石の室内透水試験の概要図[35]を図 3.3.7-9 に示す。この試験から得られた割れ目の垂直応力-透水係数の関係の例として、既存の試験結果[35]を図 3.3.7-10 に示す。ここで、垂直応力は割れ目の直交方向に作用する応力で、このような三軸圧縮型透水試験の場合、側圧が垂直応力となる。

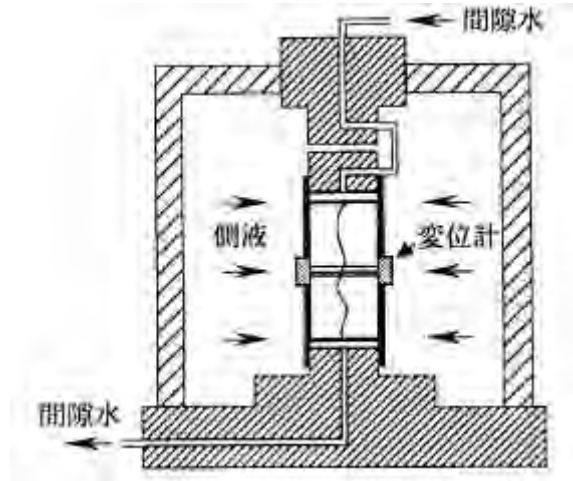
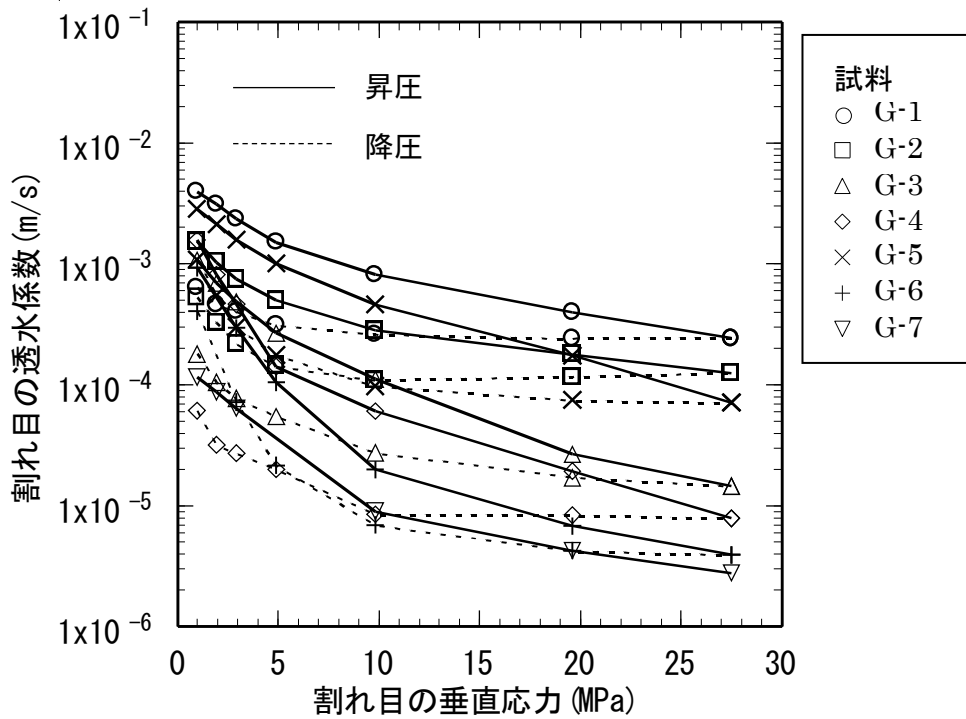


図 3.3.7-9 割れ目を含む岩石の室内透水試験の概要図[35]

図 3.3.7-10 室内試験による割れ目の垂直応力-透水係数関係[35]

③掘削損傷領域に対する仮想割れ目モデル

掘削損傷領域以外では、坑道掘削時に新規の割れ目は発生しないとしているので、岩盤の透水テンソルは、既存の割れ目の情報のみで求められ、以下のように表わすことができる。



$$k_{ij}^P = \frac{\pi \rho^P}{4} \sum_{k=1}^m (r^P)^2 e^{P(k)} k_f^{P(k)} (\delta_{ij} - n_i^{P(k)} n_j^{P(k)}) D(n^{P(k)}) \quad \text{式 3-40}$$

ここに、右肩の添字 P は、既存の割れ目に対応することを意味している。

仮想割れ目モデルによる岩盤の透水テンソルは個々の割れ目の透水テンソルを体積で重み付けして平均化していることから、新規の割れ目が発生した場合の掘削損傷領域の透水テンソルは、既存の割れ目による成分と新規の割れ目による成分の足し合わせとなり、以下のように表わされる[36]。

$$\begin{aligned}
 k_{ij} &= k_{ij}^P + k_{ij}^B \\
 &= \frac{\pi \rho^P}{4} \sum_{k=1}^m (r^P)^2 e^{P(k)} k_f^{P(k)} (\delta_{ij} - n_i^{P(k)} n_j^{P(k)}) D(\mathbf{n}^{P(k)}) \\
 &\quad + \frac{\pi \rho^B}{4} \sum_{k=1}^{m'} (r^B)^2 e^{B(k)} k_f^{B(k)} (\delta_{ij} - n_i^{B(k)} n_j^{B(k)}) D(\mathbf{n}^{B(k)})
 \end{aligned}
 \tag{式 3-41}$$

ここに、右肩の添字 B は、新規の割れ目に対応することを意味している。

式 4-41 より、入力パラメータとして、新規の割れ目に対応する仮想割れ目の密度、新規の割れ目の垂直応力-透水係数関係、および新規の割れ目の法線ベクトルの方向分布が新たに必要となる。

次年度の解析ではクラックテンソルを決定する場合、瑞浪地下研で得られたクラックテンソルを参考することは可能である。割れ目のスケッチ図の例として、瑞浪地下研の斜坑・冠水坑道の地質スケッチ図を図 3.3.7-11 示す。岩盤および割れ目のパラメータについても既往の研究[30]から設定可能であると考えている。

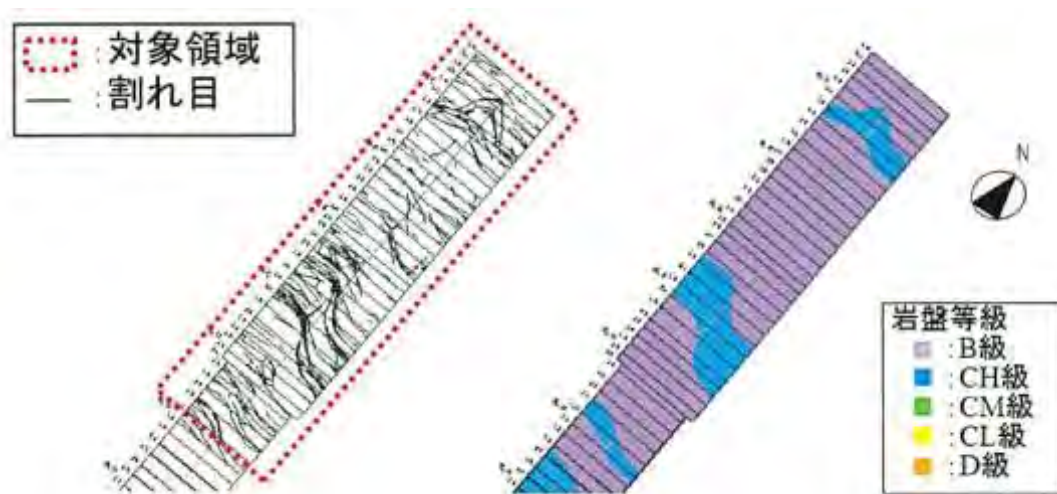


図 3.3.7-11 斜坑部・冠水坑道の割れ目状況（左）と岩盤等級区分（右）[30]

3.4 調査のまとめと課題の整理

3.4.1 調査のまとめ

本業務の目的は、原環センターが策定した 5 年検討計画に沿って、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ための調査を行うことであり、本年度は坑道安定性に関する解析について取り組み、昨年度までの検討結果を踏まえ、定量的に評価するための条件を検討し、必要となる解析的手法の例示を行った。また、それらの試行を通して、坑道安定期間を考慮した、

坑道への影響低減技術の必要性の有無や課題の抽出を行った。

一方、本業務では回収可能性維持状態・期間を考慮した、熱的、水理学的、力学的、化学的影響の定量的な評価の考え方が基本となることから、本業務の基本方針として「回収可能性維持状態、維持期間の違いを考慮した検討」と、「影響の定量的評価手法と影響低減技術の考え方を明確にした検討」を設定し、これら二つの基本方針について整理するとともに、以下の二つの実施内容について検討を行った。

① 影響低減技術の定量的評価に係わる手法の検討

② 坑道安定性に関する解析的評価

以下、二つの実施内容のまとめについて整理する。

(1) 影響低減技術の定量的評価に係わる手法の検討

回収可能性維持状態・期間を考慮した処分場への熱的、水理学的、力学的、化学的影響の定量的評価に対して、4カ年の解析的検討のための具体的な手法、手順を提示するため、まず方針を設定した。検討方針としては、THMC（熱的、水理学的、力学的、化学的）に対して連成解析手法の適用が想定されるものの、本検討では連成解析を行わず、各影響を把握するための個々の解析を実施するとともに、影響毎に物性の変化などを引き渡す評価手法を用いるものとした。また、各影響を把握するための解析的な検討方法の検討を実施し、主に本年度実施する坑道安定性に関する力学的影響検討方法を明らかにするとともに、水理学的影響の評価方法、化学的・熱的影響の評価方法について検討し、解析的検討に対する今後の4カ年計画を示した。

1) 力学的影響の評価方法の検討

坑道安定性に関する解析的評価については、(2)にまとめを示す。

2) 水理学的影響の評価方法の検討

水理学的影響の評価方法の検討においては、地下水流動解析手法を用いて回収可能性維持期間中の坑道周辺の不飽和領域の発生状況、湧水量の時間的変化を把握することが有効であることから、「閉鎖前の作業環境の安全性」に対しては湧水量の予測方法として、「パネルスケールモデル」による検討方法を示した。また、過度な湧水量に対しては、グラウトによる湧水量の低減対策や、処分施設の水没リスク低減のための対策技術（ポンプアップ設備の増強や、湧水貯留空洞の増設など）が想定され、グラウトによる湧水低減対策の効果について、「処分坑道詳細モデル」による検討により定量的に評価できることを示した。

同様に「閉鎖前の作業環境の安全性」に対しては、処分坑道周辺の不飽和領域評価により、坑道周辺の酸化性雰囲気発生予測を「処分坑道詳細モデル」により検討する方法を示した。なお、「処分坑道詳細モデル」検討においては、力学的影響評価の結果から得られる処分坑道周辺のEDZの透水係数の時間変化を反映し、湧水量や不飽和領域の発生に及ぼす影響を評価する。

一方、「閉鎖後の長期安全性」に対する水理学的影響としては、回収可能性の維持に伴い、坑道周辺の環境変化による人工バリア、天然バリアへの影響や、再冠水に要する時間の観点から、閉鎖後1,000年の時点での水理環境条件への影響に着目した再冠水時間による評価方法について示

した。なお、再冠水評価のためには、一般的な飽和・不飽和解析手法では適切な検討ができない可能性があるため、二相流（空気と水）解析手法の導入の必要性について言及した。

3) 化学的・熱的影響の評価方法の検討

化学的・熱的影響の評価方法の検討においては、着目点として「不飽和領域（酸化領域）の広がり」、「化学物質の透過性」、「核種の吸着性」が想定されることを示すとともに、回収可能性の維持期間中の坑道内での微生物影響についても検討対象とすることとし、まず化学的・熱的影響評価技術および微生物影響評価技術の現状を把握するため、既往研究の調査を行うこととした。また、「閉鎖前の作業環境の安全性」の観点から現状で想定される化学的・熱的影響の評価方法の一例を取り上げ、検討方法について示した。なお、化学的・熱的影響評価にあたっては、水理学的影響評価から得られる不飽和領域の情報を引き渡し、化学的・熱的反応の違いを考慮するものとした。「閉鎖後の長期安全性」に対する化学的・熱的影響評価については、「核種の吸着性」に影響する酸化還元に着目し、閉鎖後 1,000 年時点での処分場周辺の化学的雰囲気は還元雰囲気となるか、に着目した検討から、対策工（短時間で還元雰囲気を回復する方法）の必要性を検討する手法について示した。

なお、これらの検討方法、手順については最新の知見を反映しながら効率的な検討を実施することとする。

(2) 坑道安定性に関する解析的評価

坑道安定性に関する解析的評価では、既往の検討の処分場の設計を基に、検討ケースを設定し、坑道安定性を解析的に評価した。既往の検討の処分場の設計に基づき、前提条件を設定し、岩盤や支保工など各材料の構成モデルを設定して力学解析を行った。力学解析は、回収可能性維持期間・状態を考慮したときの時間依存性を考慮することができる解析手法により行った。

坑道の安定性に関する解析的評価は、岩盤や支保工などの材料ごとに、一般的に用いられている安定性の評価指標を用いて行った。坑道安定性の評価基準に基づき、坑道安定期間の評価方法を検討し、その評価方法の例示を行った。その結果、深成岩は、1 万年後も坑道の安定性は保持されること、新第三紀堆積岩は、100 年～350 年程度の坑道安定期間が算出された。また、処分坑道の開放期間の有無が坑道の安定性に与える影響にほとんど差が見られないことがわかった。新第三紀堆積岩の横置き方式について、100 年後の内空変位で示すとその差は 0.008mm 程度となった。さらに、回収可能性の維持による影響を低減する技術について検討し、その影響低減効果を力学解析により明らかにした。なお、処分坑道の埋戻しの有無が坑道の安定性に与える影響に関して、本検討では、埋め戻し材の膨潤圧や坑道変形に対する支持効果については考慮していないので今後検討が必要であると考えられた。

3.4.2 課題の整理

本検討の結果得られた課題について、以下に整理する。

(1) 影響低減技術の定量的評価に係わる手法の検討

本業務では、水理学的影響評価における課題として以下の2点を取り上げた。

① 簡易な境界条件での流動場と、実際のサイトスペシフィックな条件での流動場の違い

本業務での検討方法の設定においては、水理学的検討の水理地質構造、境界条件の設定は、単一構造と非常に簡単な流動場での境界条件設定であり、処分坑道周辺において不飽和領域が発生しにくいと予測される。

本業務では、評価方法と手順を明らかにすることを目的としており、アプローチ方法を示しているため、実際のサイト条件が明らかになれば、サイト特性を反映して検討すればよいと考えられるものの、不飽和領域の発生については、化学的影響における大きな要因の1つと考えられるため、検討条件によっては影響を過小評価する可能性も考えられる。

手法のみでなく、検討条件についても適切な設定を行う必要があるため、解析条件の設定の際に感度解析などを考慮する必要があると思われる。

② 亀裂影響による不確実性の取り扱い

本業務での検討方法の設定においては、硬岩（深成岩）、軟岩（新第三紀堆積岩）ともに、均質な多孔質媒体モデルを設定した。岩盤の不確実性はサイトスペシフィックなものなので、一般的な検討条件として不確実性を取り扱う必要はないと判断したものであるが、NUMO技術報告書では亀裂の空間的な分布をリアライゼーションにより作成しており、岩盤の不確実性を考慮した検討が進められている。処分場周辺の水理地質構造の不均質性、不確実性の影響評価については、今後の課題と考えられる。

なお、本業務を含めた4ヶ年の検討の結果を踏まえて、最終年には回収可能性の維持に対する検討課題を抽出し、可能であれば課題可決のための手法について示す予定である。

(2) 坑道安定性に関する解析的評価

回収可能性の維持期間を検討する上で定量的評価を行うことによる課題を抽出するとともに、次年度以降に実施予定の地下水流動解析による水理学的影響に対する評価への展開方法を示した。

評価方法に関する課題としては、力学的影響の解析手法そのものに関する課題と各材料の構成モデルおよび物性値の設定に関する課題を抽出した。岩盤の時間依存性力学モデルに関しては、JAEAにおける大久保モデルに関する研究成果を中心に整理した。

坑道安定期間の評価方法における課題として、供用中のトンネルで行われている補修や補強などの対策工の効果の解析へ導入方法に関する課題を抽出した。

また、水理学的影響評価への展開として、本年度実施した力学的影響現象解析から得られた結果を次年度以降に計画している水理学的影響評価へ反映する方法および次年度以降に実施する力学的影響評価の評価方法の概要を示した。

第3章 参考文献

- [1] 経済産業省、“特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（平成27年5月22日閣議決定）”、経済産業省ホームページ
<http://www.meti.go.jp/press/2015/05/20150522003/20150522003-1.pdf>
- [2] 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)
- [3] 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、平成28年3月
- [4] 原子力発電環境整備機構、NUMO セーフティケースに関する外部専門家ワークショップ」配布資料、2016年9月23日（東京会場）.
- [5] 原子力発電環境整備機構、技術年報2014年度、NUMO-TR-15-01、2015年3月.
- [6] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ— 分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999.
- [7] 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挙動のシミュレーション, 資源と素材, Vol.109, No.3, pp.209-214, 1993.
- [8] 西村繭果, 棚井憲治, 高治一彦, 重野善政, 下河内隆文：ニアフィールドの長期力学的解析手法の構築, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-004, 2007.
- [9] 土木学会：トンネルの変状メカニズム, 土木学会, 2003.
- [10] 土木学会原子力土木委員会地下環境部会：高レベル放射性廃棄物地層処分技術の現状とさらなる信頼性向上にむけて—土木工学に係わる技術を中心として—, pp.138, 土木学会, 2004.
- [11] 郷家光男, 石井卓, 木下直人, 船山潤一：せん断変形下における軟岩基質部の透水特性の変化, 第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.167-172, 2003.
- [12] 郷家光男・岸野佑次：軟岩の掘削影響領域における透水性変化モデルの提案, 土木学会トンネル工学論文集, 第19巻, pp.59-68, 2009.
- [13] 郷家光男, 石井卓, 佐ノ木哲, 松井裕哉, 杉田裕：せん断変形の進行に伴う堆積軟岩の透水特性の変化, 第40回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 土木学会, pp.282-287, 2011.
- [14] 辻本剛士, 木村定雄：トンネル覆工コンクリート中の水酸化カルシウム の溶脱に関する一考察, 土木学会第66回年次学術講演会概要集, V-165, 2011.
- [15] 山本武志, 廣永道彦：フライアッシュ混合使用による溶脱変質フロント進行抑制メカニズムの実験的考察, 土木学会論文集 E, Vol.64 No.1, pp.206-223, 2008.
- [16] 山本修一, 佐藤伸, 武内邦文, 佐々木規行：トンネル型処分施設における人工バリアの長期力学挙動解析, 土木学会第63回年次学術講演会, CS05-47, pp261-262, 2008.
- [17] 高治一彦, 鈴木英明：緩衝材の静的力学特性, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-041, 1999.

- [18] 鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，鉄道建設・運輸施設整備支援機構，2008.
- [19] 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／III-27，pp.185-188，1994.
- [20] 櫻井春輔，足立紀尚：都市トンネルにおける NATM，鹿島出版会，1988.
- [21] 土木学会：吹付コンクリート指針（案）[トンネル編]，土木学会，2005.
- [22] 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，土木学会，2007.
- [23] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説，日本建築学会，1992.
- [24] 土木学会：トンネル標準示方書「山岳工法編」・同解説，土木学会，2006.
- [25] 藤崎淳，窪田茂，植田浩義，山本武志，杉山大輔，千田太詩：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-TR-13-07，2014.
- [26] 電気事業連合会，核燃料サイクル開発機構：TRU 廃棄物処分技術検討書—第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—，JNC TY1400 2005-013， FEPC TRU-TR-2005-02，2005.
- [27] 福井勝則，羽柴公博，佐藤稔紀，真田祐幸，桑原和道：結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価手法に関する研究（2013 年度）（委託研究），JAEA-Research 2014-020，2005.
- [28] 猪熊明：現場技術者のためのトンネル維持管理の実際，山海堂，2004.
- [29] 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.
- [30] 尾崎裕介，松井裕哉，桑原和道，多田浩幸，櫻井英行，熊坂博夫，郷家光男，小林伸司：クラックテンソルモデルを用いた瑞浪超深地層研究所の冠水抗道における坑道冠水過程に伴う三次元応力解析，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2016-007，2016.
- [31] M. Oda: “An experimental study of the elasticity of mylonite rock with random cracks,” International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Vol.25, No.2, pp.59-69, 1988.
- [32] M. Oda: “A method for evaluating the representative elementary volume based on joint survey of rock masses”, Canadian Geotechnical Journal, Vol.25, pp.440-447, 1988.
- [33] 石井卓，郷家光男，櫻井英行，里優，木下直人，菅原健太郎：仮想割れ目モデルによる空洞周辺岩盤の透水性変化予測手法，土木学会論文集，No.715/III-60，pp.237~250，2002.
- [34] 例えば，ドミニコ，P.A.，シュワルツ，F.W.：地下水の科学 I —地下水の物理と科学—，地下水の科学研究会誌，土木工学社，pp.68，1995.
- [35] 多田浩幸，木下直人，若林成樹：岩石割れ目の透水係数と応力の関係を用いた空洞周辺岩盤の透水特性変化の予測手法，第 9 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.139~144，1994.
- [36] 郷家光男，多田浩幸，瀬野康弘，中間茂雄，佐藤稔紀：瑞浪超深地層研究所の研究坑道

における掘削損傷領域を考慮した掘削影響解析, トンネル工学論文集, 土木学会, 第 16 卷, pp.35-45, 2006.

第4章 まとめ

4.1 回収可能性維持に関する検討

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長期的な安全性に与える影響等について検討することを目的として、昨年度に策定した5ヶ年計画に沿って、本年度は、(1) 昨年度と異なる廃棄体の定置方式等を対象に、回収可能性維持の影響分析の実施と技術要素マップを作成し、(2) 定置概念についての技術課題の抽出を行った。

4.1.1 回収可能性維持の影響分析と技術要素マップの作成

高レベル廃棄物処分の安全性評価の観点から、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に与える影響について、平成 27 年度の検討とは異なる廃棄体の定置方式を対象として、回収可能性維持に関連する要素の網羅的な抽出と共に、その関連性を可視化し、安全性確保の要素、回収シナリオの整理も含めて、技術要素マップを作成した。具体的には、廃棄体の定置方式を横置き方式、緩衝材製作・施工方法を横置き PEM 方式とした場合の検討を実施した。検討項目およびその結果は以下のとおりである。

- ① 回収可能性を維持した場合の処分施設の安全性への影響を及ぼすと推定される要因とその要素（影響因子）の抽出
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に与える影響に及ぼす要因とその要素（影響因子）の抽出を行った。回収可能性維持による影響は、1)維持のために坑道を開放した状態におくことが起因となる影響、2)廃棄体を回収することで発生する影響の二つの要因から発生すると考えられた。その上で、これらを起因として発生する影響の種類を整理して示した。
- ② 抽出した影響因子の分類と状態変遷表の提示、基本ケースおよび検討ケースの設定と網羅的な影響因子の検討
抽出した影響因子を特質に応じて分類し、回収する場合と回収しない場合を考慮して状態変遷表として示した。処分施設の状態変遷の検討では THMC による整理を行い、FEP による分類と体系化を図った。この検討により、長期的な安全性に与える影響は、回収の有無にかかわらず、回収可能性維持状態および回収可能性維持期間に依存することが分かった。また、回収する場合の影響要因とその要素は、回収しない場合のそれらに加えて回収作業によるものが加わるため、回収可能性を維持した場合の長期的な安全性に与える影響の検討では回収作業の影響を考慮する必要があることを示した。
- ③ プロセス・インフルエンス・ダイアグラム (PID) の作成等による分析と整理による影響因子の整理

抽出された影響因子と影響先について、プロセス・インフルエンス・ダイアグラム (PID) の作成等による分析と整理を実施した。この検討により、処分場への影響を低減させる工学的対策はトリガーに対して施す必要があることが分かった。PID では影響の伝搬を示すことができるが、影響の規模や範囲を示すことができないことから、影響低減のために必要となる工学的対策の程度は解析的手法等による定量的な評価が必要である。

④ 技術要素マップの作成

平成 27 年度に作成した技術要素マップの枠組みに基づき、全ての検討ケースを対象にして技術要素マップを作成した。回収可能性維持に係わる技術について、状態オプションにより変化する回収対象を考慮した技術要素群のマトリクスで表し、各技術要素について技術要素展開表にまとめ技術課題を抽出した。

4.1.2 定置概念についての技術課題の抽出

2年間の検討のとりまとめとして、平成 27 年度に検討した縦置き・ブロック方式と今年度検討の横置き PEM 方式についての定置概念について技術課題を整理した。定置概念の違いによる技術課題をまとめると、ニアフィールドに関するものと、回収に関する課題に大別できる。整理した結果を以下に述べる。

①ニアフィールドに関する技術課題

- ・ PEM 容器の機能や要件 (横置き PEM 方式)

PEM に求められる要件および仕様が定まっていないため、検討が必要である。

- ・ 埋め戻し材の品質要件 (全ての定置概念共通)

埋め戻し材の流出限界、長期力学特性など、仕様や特性に関する検討が必要である。

- ・ 坑道の維持管理技術の高度化 (全ての定置概念共通)

水理学・力学・化学的影響の定量的評価を踏まえた、坑道 (+EDZ) の維持管理技術の高度化 (モニタリング、坑道補修・更新、部材開発) を図る必要がある。

②回収に関する技術課題

- ・ 回収技術の合理性 (全ての定置概念共通)

回収技術の高度化や回収の容易性の向上を追求する必要がある。

回収による閉鎖後長期安全性および閉鎖前 (事業期間中) 安全性への影響低減対策の策定が必要である。

4.2 回収可能性維持に関する定量的評価に関する調査

本検討は原環センターが策定した 5 年検討計画に沿って、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ための調査を行うことを目的として実施した。本年度は坑道安定性に関する解析について取り組み、昨年度までの検討結果を踏まえ、定量的に評価するための条件を検討し、必要となる解析的手法の例示を行った。また、それらの試行を通して、回収可能性の維持期間を考慮した、坑道への影響低減技術の必要性の有無や課題の抽出を行った。

検討方針としては、THMC（熱的、水理学的、力学的、化学的）に対して連成解析手法の適用が想定されるものの、本検討では連成解析を行わず、各影響を把握するための個々の解析を実施するとともに、影響毎に物性の変化などを引き渡す評価手法を用いるものとした。また、各影響を把握するための解析的な検討方法の検討を実施し今後の4カ年計画を示した。

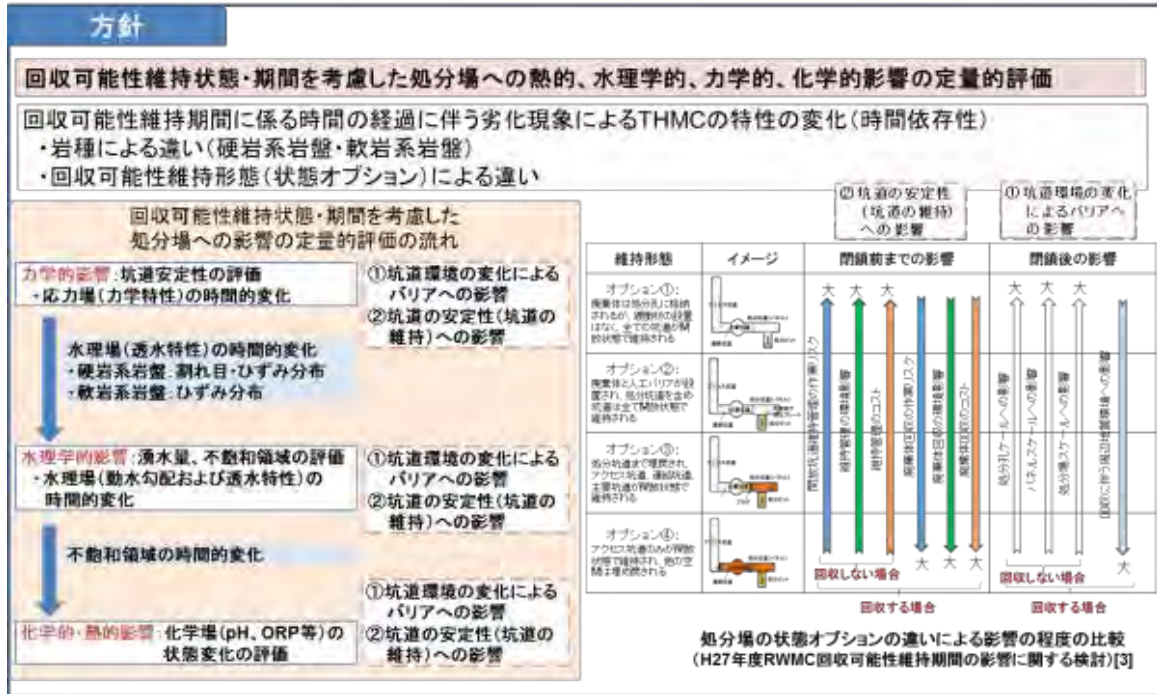


図 4.2-1 回収維持期間を考慮した定量的評価検討の流れ（再掲）

この4カ年計画に基づき本年度実施した力学解析は、回収可能性維持期間・状態を考慮したときの時間依存性を考慮することができる解析手法により行った。坑道の安定性に関する解析的評価は、岩盤や支保工などの材料ごとに、一般的に用いられている安定性の評価指標を用いた。この評価指標に基づき、坑道安定期間（坑道が力学的に安定している期間）の評価方法を提案し、例示的に評価結果を示した。

但し、ここで得られた坑道安定期間は、材料や岩盤の経時変化を本検討の中で設定し、安定性の指標を下回るまでの期間を算出したものであり、回収可能性を維持できる期間として直接評価したものではない。支保工、埋め戻し材等の材料特性や、周辺岩盤の特性によって大きく変化するものである。今後、解析パラメータとしての特性値、劣化挙動等が整備されることにより、より現実的な評価につながると考えられる。

また、坑道安定性の維持による影響を低減する技術を考慮し、その影響低減効果を力学解析により明らかにし、供用中のトンネルで行われる補修や補強などの対策工の効果の解析へ導入方法に関する課題を抽出した。さらに、水理学的影響評価への展開として、本年度実施した力学的影響現象解析から得られた結果を反映する方法を示した。こうした検討は、手法の整備のために行うものであり、平行して力学的影響評価の方法についても検討していく。

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2)

平成29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の開発成果を取りまとめたものです。

報告書の構成

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	地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発 －実証試験
	第2分冊	地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発
	その1	－回収可能性の維持についての検討
○	その2	可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理

目 次

第 1 章	可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理.....	1-1
1.1	はじめに.....	1-1
1.2	平成 27 年度の実施概要.....	1-2
1.3	平成 28 年度の検討会の活動内容.....	1-4

図 表 目 次

表 1.2-1	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委員構成.....	1-2
表 1.2-2	議論の対象とした 13 の検討項目	1-3
表 1.3-1	平成 28 年度に実施した検討会の議題と検討項目	1-4

第1章 可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理

1.1 はじめに

原子力や放射線の利用に伴い様々な形態の放射性廃棄物が発生している。現世代の責任として、それらの安全な処理・処分の具体化に向けた検討を行い着実に実施していく必要がある。放射性廃棄物を地下深くに処分する地層処分は、多様な管理方策の比較検討を経て¹、現在では国際的な合意事項として選択されるとともに、隔離、閉じ込め、多重安全機能ならびに受動的手法といった地層処分の基本的な概念や倫理的課題²への対処としての段階的な進め方等が、国際的な議論を経て構築されている。

我が国では、商業用原子炉が運転を開始する 1966 年以前より、その処分方法についての検討がなされ、1976 年に原子力委員会において、「当面地層処分に重点をおき研究開発を進める」ことが決定された[1]。その後、我が国における地層処分の実現可能性について、核燃料サイクル開発機構（現日本原子力研究開発機構（JAEA））を中心に、我が国における地質データ等を基に 20 年以上の研究を行い、この研究成果を受けて、2000 年に原子力委員会³において「我が国でも地層処分が実現可能である」と評価された[2]。また、こうした技術的な検討と並行して、立地選定プロセスや処分実施主体等の在り方等の制度的な検討が行われ、1998 年に原子力委員会⁴において、制度的な枠組みに関する基本的考え方が示されている[3]。これを踏まえ総合エネルギー調査会⁵において制度の具体化が検討され[4]、2000 年に「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。）が制定された。

最終処分法では、1)処分実施主体たる原子力発電環境整備機構の設立、2)3 段階の処分地選定調査（文献調査、概要調査、精密調査）を経て最終処分施設建設地を決定する処分地選定プロセス、3)「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」（以下、「基本方針」という。）および「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」の策定、4)電気事業者等が毎年の原子力発電電力量等に応じ原子力発電環境整備機構に処分費用を拠出すること、5)その他安全確保のための仕組み（掘削制限を行う保護区域の設定や機構が業務困難な場合の措置等）など、処分のための仕組みが整備された。こうした体制の整備を踏まえ、処分事業の実施主体として設立された原子力発電環境整備機構（NUMO）が、2002 年より全国の市町村を対象に最終処分場の立地に向けた文献調査の公募を開始した。

一方で、処分制度の創設以降 10 年以上を経た現段階においても、最終処分法が定める 3 段階の調査ステップの最初の段階である文献調査の実施に至っていない。更に、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

¹ 地層処分（坑道掘削型）、地層処分（超深孔処分）、地層処分（島内地層処分）、宇宙処分、核種分離・変換（消滅処理）、中間貯蔵（段階的地層処分）、長期貯蔵（永久貯蔵）といったオプションが検討された

² 次世代へ繰り越すリスクや負担などの世代間の公平性や、処分施設の影響を受ける地域とそうでない地域に関する問題といった世代内の公平性などが、倫理的課題として挙げられている

³ 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会

⁴ 原子力委員会高レベル放射性廃棄物処分懇談会

⁵ 総合エネルギー調査会原子力部会

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の変化も見られる。

このような中、放射性廃棄物ワーキンググループ⁶（以下、「廃棄物WG」という。）では、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。このような議論を経て、現世代として地層処分に向けた取組を進めることが再確認されるとともに、2015年5月に改定された基本方針では、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⁷、「基本的に最終処分に関する政策や最終処分事業の可逆性を担保する」こと、及び「機構は、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・回収可能性（R&Rと称される場合がある⁸）に関する我が国における今後の具体的な運用や技術開発に資する多面的な検討を行うことを目的として、平成27年度に経済産業省資源エネルギー庁による本委託事業（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））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。）が設置された。本節では昨年度の検討会の活動概要と本年度の検討会の活動について以下に示す。

1.2 平成27年度の実施概要

前述したように、平成27年度に、技術及び社会科学の双方に配慮した有識者で構成する「可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会」（以下、「検討会」）を設置し（表1.2-1）、わが国におけるR&Rの今後の具体的な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）についての整理に向けた検討を進めた。

表 1.2-1 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委員構成

（50音順、敬称略）

委員氏名	所属先 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

検討会での議論に先立ち、可逆性・回収可能性に関するわが国のこれまでの議論及び制度を整理・共有するとともに、海外において先行的に行われた検討や取組の動向等を概観し、そこで論点や課題とされた事項等を包括的に整理したうえで、議論を順次進めることとした。具体的には、検

⁶ 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

⁷ 本検討会では、基本方針によって導入された可逆性・回収可能性を、前ページの脚注1に示す代替管理方策のみならず、現時点で想定されていない新たな管理方策や将来世代の多様な選択を許容するものと整理している。

⁸ R&Rは「Reversibility（可逆性） and Retrieability（回収可能性）」を略した表現である。

討会での確認を経て、表 1.2-2 に示す 13 の検討項目を本検討会で議論の対象とすべきものとして抽出した。

表 1.2-2 議論の対象とした 13 の検討項目

<ul style="list-style-type: none">○考慮すべき動機○考慮すべき動機の事業段階に応じた変化○可逆性・回収可能性の実行に係る判断基準・判断指標○回収の技術的な実現性○回収の容易性○回収後の廃棄体管理○処分場設計への技術的要求○回収可能性に係る戦略・計画の策定○研究開発・実証○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○モニタリング等の役割○費用○意思決定のホールドポイントに係る留意事項
--

平成 27 年度の検討会では、上記 13 の検討項目の内の以下の 6 項目について、検討項目間の関連性や類似性を踏まえて、いくつかの検討項目を含む議題毎に議論を行った。議論の詳細は 27 年度の報告書[5]を参照されたい。

- ・ 考慮すべき動機
- ・ 考慮すべき動機の事業段階に応じた変化
- ・ 判断基準・判断指標
- ・ 技術的な実現性
- ・ 回収の容易性
- ・ 回収後の廃棄体の管理

1.3 平成 28 年度の検討会の活動内容

平成 28 年度は、前年度に引き続き、27 年度と同じ委員構成による検討会を設置し、また、検討会を 4 回開催実施することで、前年度から引き続き議論を継続する検討項目、及び本年度に残された検討項目について順次議論を行った。

表 1.3-1 に 28 年度に開催した検討会の議題と検討項目について示す。

表 1.3-1 平成 28 年度に実施した検討会の議題と検討項目

	議題	検討項目
H28 第 1 回	可逆性・回収可能性を必要とする動機の再整理について	<ul style="list-style-type: none"> ・考慮すべき動機 ・考慮すべき動機の事業段階に応じた変化 ・判断基準・判断指標
	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	<ul style="list-style-type: none"> ・処分場設計への技術的要求（設計への影響を含む） ・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
H28 第 2 回	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	<ul style="list-style-type: none"> ・回収可能性に係る戦略・計画の策定 ・研究開発・実証－①
	可逆性・回収可能性とモニタリングの関係について	<ul style="list-style-type: none"> ・モニタリング等の役割
H28 第 3 回	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）	<ul style="list-style-type: none"> ・研究開発・実証－②
	その他の留意すべき事項について	<ul style="list-style-type: none"> ・費用 ・意思決定のホールドポイントに係る留意事項
H28 第 4 回	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）	<ul style="list-style-type: none"> ・研究開発・実証－③

上述のように、平成 27 年度と 28 年度の検討会において 13 の検討項目に関する議論を実施した。2 年間の議論を踏まえて、平成 29 年度における本委託事業において、本検討会の取りまとめ報告書が作成される予定となっている。

第1章 参考文献

- [1] 原子力委員会（1976）：原子力委員会決定“放射性廃棄物対策について”
- [2] 原子力委員会（2000）：“我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価”、原子力委員会バックエンド対策専門部会
- [3] 原子力委員会（1998）：“高レベル放射性廃棄物処分に向けての基本的考え方について”、原子力委員会高レベル放射性廃棄物処分懇談会
- [4] 総合エネルギー調査会（1999）：総合エネルギー調査会原子力部会中間報告“高レベル放射性廃棄物処分事業の制度化のあり方”、総合エネルギー調査会原子力部会
- [5] 原子力環境整備促進・資金管理センター（原環センター）（2016）：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