平成３０年度
高レベル放射性廃棄物等の
地層処分に関する技術開発事業

可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発

報告書
（第３分冊）

回収可能性の維持についての検討

平成３１年３月

公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター

本報告書は、経済産業省からの委託研究として、公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した、平成３０年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発のうち、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３０年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発の報告書は、以下の分冊により構成されている。

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

目　次

第 1 章　はじめに 1-1
1.1　背景及び目的 1-1
1.2　回収可能性の維持についての今後の検討のベース 1-2
1.3　過年度及び本年度の検討概要 1-4
第 2 章　安全性への影響の定量的な評価技術の整備に向けた既存技術の整理と課題抽出 2-7
2.1　検討方針と検討項目の概要 2-7
2.2　既存技術の整理と課題抽出 2-11
2.2.1　定量化に必要な技術検討項目 i　開放坑道の健全性（空間安定性） 2-11
2.2.2　定量化に必要な技術検討項目 ii　開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響 2-24
2.2.3　技術検討項目 iii　埋め戻した坑道の再利用時の健全性 2-30
2.2.4　技術検討項目 iv　再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響 2-38
2.2.5　技術検討項目 v　回収時の廃棄体容器の健全性 2-42
2.2.6　技術検討項目 vi　開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響 2-48
2.2.7　技術検討項目 vii　廃棄体からの熱による影響 2-51
2.2.8　技術検討項目 viii　坑道開放中に継続する坑内湧水の影響 2-58
2.2.9　技術検討項目 ix　地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込みの影響） 2-68
2.2.10　技術検討項目 x　開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度 2-78
2.2.11　技術検討項目 xi　ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度 2-86
2.3　既存技術の整理と課題抽出のまとめ 2-94
第 3 章　回収可能性維持期間の影響に関する定量的評価 3-1
3.1　検討方針と検討項目の概要 3-1
3.1.1　定量評価の検討方針 3-1
3.1.2　検討項目の概要 3-2
3.2　技術検討項目に対する影響評価方法の整理 3-4
3.2.1　検討手順 3-4
3.2.2　検討対象とする現象の図示 3-4
3.2.3　評価対象と影響を与える現象の整理及び影響評価方法の流れの整理 3-12
3.3　回収可能性維持期間の影響評価方法の検討 3-26
3.3.1　水理学的影響評価 3-26
3.3.2　化学的影響評価 3-131
3.3.3　力学的影響評価 3-168

第 4 章　回収容易性に関する検討 4-1
4.1　検討方針と検討項目の概要 4-1
4.2　回収の容易性を高めることの考え方の整理 4-6
4.2.1　回収の容易性向上の視点の整理 4-6
4.2.2　我が国の処分環境条件として求められる事項の整理 4-8
4.3　既存処分概念等の整理 4-13
4.3.1　海外の処分概念の調査 4-13
4.3.2　国内の処分概念の調査 4-32
4.3.3　国内外の処分概念の調査のまとめ 4-41
4.4　回収の容易性を高めた工夫のポイントの抽出 4-43
4.5　処分坑道の状態設定に関する検討 4-50
4.5.1　処分坑道の状態設定 4-50
4.5.2　状態設定の展開と特徴 4-50
4.5.3　各状態設定で想定した作業に伴う負荷と安全性への影響 4-55
4.5.4　状態設定のまとめと技術課題 4-59
4.6　回収容易性に関する検討のまとめ 4-61
第 5 章　まとめ 5-1
5.1　安全性への影響の定量的な評価技術の整備に向けた既存技術の整理と課題抽出 5-1
5.2　回収可能性維持期間の影響に関する定量的評価 5-2
5.2.1　水理学的影響評価の検討結果 5-2
5.2.2　化学的影響評価の検討結果 5-3
5.2.3　力学的影響評価の検討結果 5-4
5.3　回収容易性に関する検討 5-4

図　目　次

図 2.2.1-1　定量的な評価技術の整備に向けた既存技術の整理と課題抽出のための検討の流れ 2-7
図 2.2.1-2　Effects of coupled in situ processes in rock mass behavior. Bold arrows suggest processes of potentially greater engineering significance [5] 2-9
図 2.2.1-1　解析検討対象とした現象の時系列[10] 2-15
図 2.2.1-2　岩盤クリープ解析モデル[10] 2-16
図 2.2.1-3　六十里越トンネルの主な変状状況[19] 2-17
図 2.2.1-4　内空変位計測結果[13] 2-17
図 2.2.1-5　地山劣化モデルによる対策工解析結果[19] 2-18
図 2.2.1-6　計測結果と解析結果の比較[19] 2-18
図 2.2.1-7　覆工コンクリートのモデルと境界条件[18] 2-19
図 2.2.1-8　覆工の最大主応力分布表（単位：MPa）[18] 2-19
図 2.2.1-9　覆工の主応力ベクトル表[18] 2-20
図 2.2.1-10　周辺岩盤の局所安全率の分布（ケース７）[8] 2-22
図 2.2.1-11　平成 28 年度検討ケース７における吹付けコンクリート壁面の変位速度[7] 2-23
図 2.2.2-1　ガラス固化体の中間貯蔵期間後の発熱量経時の例[10] 2-26
図 2.2.2-2　伝導伝熱（熱伝導）解析の例：処分坑道が埋め戻しされていない状態での温度分布及び評価点での温度経時変化　竪置きブロック方式[23] 2-27
図 2.2.2-3　伝導伝熱（熱伝導）解析の例：処分坑道が埋め戻しされていない状態での温度分布及び評価点での温度経時変化　横置き PEM 方式[23] 2-27
図 2.2.2-4　熱環境解析の結果[24] 2-28
図 2.2.2-5　部分冷却方式による冷房設備の検討例[24] 2-28
図 2.2.3-1　解析検討対象とした現象の時系列[10]（図 2.2.1-1 再掲） 2-34
図 2.2.3-2　周辺岩盤の局所安全率の分布（ケース８）[8] 2-37
図 2.2.4-1　ガラス固化体の中間貯蔵期間後の発熱量経時の例[10]（図 2.2.2-1 再掲） .. 2-40
図 2.2.5-1　腐食評価の観点から埋め戻し状態（模式図）[23] 2-46
図 2.2.7-1　緩衝材の温度経時変化解析結果[25] 2-55
図 2.2.7-2　ベントナイトのイライト化率解析結果[25] 2-56
図 2.2.8-1　三次元水理解析モデルの概要（倉敷基地）[35] 2-64
図 2.2.8-2　地球統計学的手法によるグラウト改良後の透水分布推定結果（倉敷基地）[35] 2-64
図 2.2.8-3　貯槽掘削時の湧水量変化と不均質解析結果との対比（倉敷基地）[35] 2-65
図 2.2.8-4　三次元水理解析モデルの概要（波方基地）[35] 2-65
図 2.2.8-5　地球統計学的手法による貯槽周辺の透水性分布及びグラウト改良前後の比較（波方基地）[35] 2-65
図 2.2.8-6　貯槽掘削時の湧水量変化と不均質解析結果との比較（波方基地）[35] 2-66

図 2.2.9-1　SiteK-1 及び SiteK-2 を通る 2 次元鉛直断面非定常解析結果に示される 塩分濃度分布の経時変化[39] 2-74
図 2.2.9-2　解析対象範囲表[40] 2-75
図 2.2.9-3　シミュレーションモデルの鳥瞰表[40] 2-75
図 2.2.9-4　タンク湧水量経時変化表[40] 2-76
図 2.2.10-1　ニアフィールドの間隙圧力の経時変化及び坑道からの 間隙水排水量の経時変化（1）[41] 2-82
図 2.2.10-2　ニアフィールドの間隙圧力の経時変化及び坑道からの 間隙水排水量の経時変化（2）[41] 2-82
図 2.2.10-3　ガス状核種の移行挙動の評価（1）[41] 2-83
図 2.2.10-4　ガス状核種の移行挙動の評価（2）[41] 2-84
図 2.2.11-1　再冠水に要する期間と挙動の評価（図左：地下水の飽和度、図右：間隙圧力）[41] 2-91
図 3.2.2-1　ニアフィールドにおいて起こりうる現象（力学的影響） 3-7
図 3.2.2-2　ニアフィールドにおいて起こりうる現象（水理学的影響） 3-8
図 3.2.2-3　ニアフィールドにおいて起こりうる現象（化学的影響） 3-9
図 3.2.2-4　ファーフィールドにおいて起こりうる現象のイメージ 3-11
図 3.2.3-1　技術検討項目の評価対象とする現象と影響を与えている現象の関連性（再利用時の健全性以外） 3-13
図 3.2.3-2　「再利用時の健全性」の評価対象とする現象と影響を与えている現象の関連性 3-14
図 3.2.3-3　「開放坑道の健全性（空間安定性）」の評価フロー 3-18
図 3.2.3-4　「埋め戻した坑道の再利用時の健全性」に関する評価フロー 3-19
図 3.2.3-5　「坑道開放期間中の坑内湧水の影響」に関する評価手法のフロー 3-21
図 3.2.3-6　「地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度」に関する評価フロー 3-22
図 3.2.3-7　「開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への 影響範囲と程度」に関する評価フロー 3-23
図 3.2.3-8　「ベースラインへの回復過程と回復の程度」に関する評価フロー 3-25
図 3.3.1-1　パネルスケールモデルの解析領域の設定 3-31
図 3.3.1-2　地下施設配置検討結果（「Trough-type」） 3-31
図 3.3.1-3　地下施設配置検討結果（「Dead-end-type」） 3-32
図 3.3.1-4　3D パネルスケールモデル（「Through-type」） 3-33
図 3.3.1-5　3D パネルスケールモデル（「Dead-end-type」） 3-34
図 3.3.1-6　湧水量への影響検討用 2D モデル（横置き PEM タイプ） 3-35
図 3.3.1-7　湧水量への影響検討用 3D モデル（竪置きタイプ：case6a） 3-35
図 3.3.1-8　パネルスケールモデルにおける境界条件の設定 3-37
図 3.3.1-9　連絡坑道掘削時の湧水量の経時変化（case1a,case1a-9） 3-40
図 3.3.1-10　処分坑道掘削時の湧水量の経時変化（case1a、case1a-9） 3-41

図 3.3.1-11 「処分坑道詳細モデル」拡大図（case9b、case9b-9）..... 3-42
図 3.3.1-12 「処分坑道詳細モデル」での底部境界における全水頭の経時変化 （case9b、case9b-9）..... 3-43
図 3.3.1-13 「処分坑道詳細モデル」解析結果の湧水量の経時変化（case9b、case9b-9）3-44
図 3.3.1-14 「3D 処分坑道詳細モデル」拡大図（case6a、case6a-9）..... 3-45
図 3.3.1-15 ベントナイト流出評価のための湧水量（case6a）..... 3-46
図 3.3.1-16 3D モデル解析での底部境界条件の経時変化（case6a）..... 3-46
図 3.3.1-17 ベントナイト流出評価のための湧水量（case6a-9）..... 3-47
図 3.3.1-18 3D モデル解析での底部境界条件の経時変化（case6a-9）..... 3-47
図 3.3.1-19 処分坑道埋め戻し時の連絡坑道からの湧水量の経時変化（case4a、case4a-9）..... 3-49
図 3.3.1-20 閉鎖時挙動を把握するための全水頭チェックポイント（3 点）..... 3-50
図 3.3.1-21 地下施設閉鎖後の全水頭の経時変化（case21a-9c、case21a-9d）..... 3-51
図 3.3.1-22 全水頭分布の表示断面位置図..... 3-52
図 3.3.1-23 地下施設閉鎖時の全水頭分布の経時変化（case21a-9c：処分坑道埋め戻し状態からの閉鎖）..... 3-53
図 3.3.1-24 地下施設閉鎖時の全水頭分布の経時変化（case21a-9d：処分坑道開放状態からの閉鎖）..... 3-54
図 3.3.1-25 東濃鉱山でのレーダー探査の事例[8]..... 3-57
図 3.3.1-26 坑道掘削の進展に伴う弾性波速度変化率の変化[10]..... 3-58
図 3.3.1-27 比抵抗トモグラフィ調査の概略図（a: 平面図、b: 側面図）[11]..... 3-59
図 3.3.1-28 比抵抗二次元解析断面（a: 掘削前, b: 掘削中, c～f: 掘削後）[11]..... 3-59
図 3.3.1-29 バロメトリックポンピングが坑道周辺に与えると考えられる影響[13]、[14]. 3-60
図 3.3.1-30 不飽和特性曲線の設定例（その１）[16]..... 3-61
図 3.3.1-31 不飽和特性曲線の設定例（その２）[17]..... 3-62
図 3.3.1-32 不飽和特性曲線の設定例（その３）[18]..... 3-63
図 3.3.1-33 不飽和特性曲線の設定例（その４）[19]..... 3-64
図 3.3.1-34 地下水流出量の経時変化のイメージ[19]..... 3-65
図 3.3.1-35 感度解析に用いた不飽和特性曲線の比較..... 3-66
図 3.3.1-36 「処分坑道詳細モデル」拡大図（case9b-91～case9b-94）..... 3-67
図 3.3.1-37 「処分坑道詳細モデル」での底部境界における全水頭の経時変化(case9a-91～94)..... 3-68
図 3.3.1-38 非定常解析 100 年後の圧力水頭分布の比較(case9a-91～94)..... 3-69
図 3.3.1-39 坑道湧水量の経時変化の比較(case9a-91～94)..... 3-70
図 3.3.1-40 感度解析に用いた不飽和特性曲線の比較（その２）..... 3-71
図 3.3.1-41 解析モデルの概要（二相流解析：掘削時）..... 3-74

図 3.3.1-42　坑道掘削後解析の水圧の初期条件 3-77
図 3.3.1-43　モデル下端の圧力境界..... 3-78
図 3.3.1-44　不飽和特性（岩盤、EDZ） 3-81
図 3.3.1-45　不飽和特性（支保工/インバート） 3-82
図 3.3.1-46　ケース②、ケース③の不飽和特性（岩盤、EDZ、支保工/インバート）..... 3-84
図 3.3.1-47　ケース④の不飽和特性（岩盤、EDZ、支保工/インバート） 3-85
図 3.3.1-48　ケース①の坑道周辺の水飽和度分布、毛管圧力分布および水圧分布　（case9b-91’：掘削から 1 年後～28 年後） 3-87
図 3.3.1-49　ケース②の坑道周辺の水飽和度分布、毛管圧力分布および水圧分布　（case9b-92’：掘削から 1 年後～100 年後） 3-88
図 3.3.1-50　ケース③の坑道周辺の水飽和度分布、毛管圧力分布および水圧分布　（case9b-93’：掘削から 1 年後～100 年後） 3-89
図 3.3.1-51　ケース④の坑道周辺の水飽和度分布、毛管圧力分布および水圧分布　（case9b-94’：掘削から 1 年後～100 年後） 3-90
図 3.3.1-52　ケース①～ケース④の坑道周辺の水飽和度分布、毛管圧力分布および水圧分布（case9b-91’～case9b-94’：掘削直後から 100 年後、ケース①のみ 28 年後） 3-91
図 3.3.1-53　ケース①～ケース④の坑道周辺の水圧分布の 二相流解析と飽和・不飽和流解析の比較　（case9b-91’～case9b-94’：掘削直後から 100 年後、ケース①のみ 28 年後） 3-92
図 3.3.1-54　二相流解析における「坑道への湧水量」と「坑道からの空気流量」の経時変化 3-93
図 3.3.1-55　飽和・不飽和流解析における「坑道への湧水量」の経時変化..... 3-94
図 3.3.1-56　ケース①の坑道周辺の不飽和領域（掘削直後から 100 年後） 3-95
図 3.3.1-57　モデル下端の圧力境界..... 3-96
図 3.3.1-58　解析モデル概要図（深度：GL-500m 周辺の拡大図） 3-97
図 3.3.1-59　不飽和特性（埋め戻し材） 3-101
図 3.3.1-60　坑道周辺の水飽和度分布、毛管圧力分布および水圧分布　（case19b-9’：再冠水時から 90 日～1 年後） 3-104
図 3.3.1-61　坑道周辺の水飽和度分布、毛管圧力分布および水圧分布　（case19b-9’：再冠水時：2 年後～10 年後） 3-105
図 3.3.1-62　 case19b-9’（再冠水解析）の水圧分布（再冠水時：2 年後） 3-106
図 3.3.1-63　1cm^3 の水に溶けうる最大の空気の体積 V_{sa}（30℃、標準大気圧）と圧力 p_a の関係..... 3-108
図 3.3.1-64　 case19b-9’の水に溶解している空気の水に対する水に溶解した 空気の重量と水の重量の比 3-109
図 3.3.1-65　「切り出しモデル」の処分坑道奥行方向のメッシュ分割の違い.....3-111
図 3.3.1-66　切り出しモデルの境界条件(case31a-9～case33a-9) 3-112
図 3.3.1-67　メッシュ分割の違いと坑道湧水量の経時変化の比較 3-113

図 3.3.1-68　メッシュ分割の違いと坑道湧水量の経時変化の比較（その２） 3-113
図 3.3.1-69　パネルスケールモデルにおける境界条件の設定（case22a-91～case22a-94）
..... 3-116
図 3.3.1-70　「パネルスケールモデル（Through-type）」の修正（case22a-91～case22a-94）
..... 3-117
図 3.3.1-71　降雨涵養量の違いによる地下水位低下の経時変化(case22a-91～case22a-94) 3-118
図 3.3.1-72　「パネルスケールモデル」からの「切り出しモデル」と物性値の設定 3-119
図 3.3.1-73　「切り出しモデル」における境界条件の設定（case1a-9k～case4a-9k） 3-120
図 3.3.1-74　「切り出しモデル」解析結果の坑道湧水量の経時変化..... 3-120
図 3.3.1-75　坑道湧水量の相対比率の経時変化 3-121
図 3.3.1-76　地下水低下の経時変化（case2a-9k：グラウト考慮） 3-122
図 3.3.1-77　地下水低下の経時変化（case3a-9k：キャップロック考慮..... 3-123
図 3.3.1-78　地下水低下の経時変化（case4a-9k：グラウト＋キャップロック考慮）.. 3-124
図 3.3.1-79　流跡線による地下水流動の可視化の例 3-125
図 3.3.1-80　流跡線を用いた地下水流動フロントの可視化フロー 3-126
図 3.3.1-81　粒子仮想粒子の配置点..... 3-126
図 3.3.1-82　50 年後の流跡線演算結果と粒子の最終位置 3-127
図 3.3.1-83　流動フロントデータの作成方法（50 年後場合の例） 3-128
図 3.3.1-84　各時間における流動フロント（境界面データ） 3-129
図 3.3.1-85　地下水流動フロントの経時変化に関する可視化の例（3D 表示） 3-129
図 3.3.1-86　地下水流動フロントの経時変化に関する可視化の例（2D 表示） 3-130
図 3.3.2-1　ファーフィールドモデルの概念図 3-138
図 3.3.2-2　一次元ファーフィールドモデルの坑道付近のメッシュ図..... 3-138
図 3.3.2-3　坑道開放時の検討解析における初期条件および境界条件の概念図 3-145
図 3.3.2-4　再冠水時の検討解析における初期条件および境界条件の概念図..... 3-148
図 3.3.2-5　岩盤中の黄鉄鉱と方解石の体積割合、地下水の pH と Eh 並びに Ca^{2+}および HCO_3^-の分布 （ケース pHC-021，透水係数：高透水，高 Cl^-濃度地下水）..... 3-151
図 3.3.2-6　岩盤中の黄鉄鉱と方解石の体積割合、地下水の pH と Eh 並びに Ca^{2+}および HCO_3^-の分布 （ケース pLC-021，透水係数：高透水，低 Cl^-濃度地下水） 3-152
図 3.3.2-7　坑道掘削時点からの吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の変化（高 Cl^-濃度地下水，速度論係数：標準） 3-154
図 3.3.2-8　坑道掘削からの各時点における吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の分布 （ケース HC-021；透水係数：高透水，高 Cl^-濃度地下水，速度論係数：標準） 3-155
図 3.3.2-9　坑道掘削からの各時点における吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の分布 （ケース HC-022；透水係数：標準，高 Cl^-濃度地下水，速度論係数：標準） ... 3-156

図 3.3.2-10　坑道掘削時点からの吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の変化 （高 Cl^-濃度地下水，速度論係数：小） 3-157
図 3.3.2-11　坑道掘削からの各時点における吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の分布 （ケース HC-031；透水係数：高透水，高 Cl^-濃度地下水，速度論係数：小） ... 3-158
図 3.3.2-12　吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水の pH 変化（ケース HC-032） （透水係数：標準，高 Cl^-濃度地下水，速度論係数：小） 3-159
図 3.3.2-13　坑道掘削時点からの吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の変化 （低 Cl^-濃度地下水，速度論係数：標準） 3-160
図 3.3.2-14　坑道掘削からの各時点における吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の分布 （ケース LC-021；透水係数：高透水，低 Cl^-濃度地下水，速度論係数：標準） 3-161
図 3.3.2-15　坑道掘削からの各時点における吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の分布 （ケース LC-022；透水係数：標準，低 Cl^-濃度地下水，速度論係数：標準） 3-162
図 3.3.2-16　坑道掘削時点からの吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の変化 （低 Cl^-濃度地下水，速度論係数：小） 3-163
図 3.3.2-17　坑道掘削からの各時点における吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の分布 （ケース LC-031；透水係数：高透水，低 Cl^-濃度地下水，速度論係数：小） 3-164
図 3.3.2-18　坑道掘削からの各時点における吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の分布（ケース LC-032） （透水係数：標準，低 Cl^-濃度地下水，速度論係数：小） 3-165
図 3.3.2-19　再冠水時の岩盤地下水の pH と Eh ならびに Ca^{2+}および HCO_3^-の分布 （ケース rHC-021，透水係数：高透水，高 Cl^-濃度地下水） 3-166
図 3.3.2-20　再冠水時の岩盤地下水の pH と Eh ならびに Ca^{2+}および HCO_3^-の分布 （ケース pLC-021，透水係数：高透水，低 Cl^-濃度地下水） 3-167
図 3.3.3-1　吹付けコンクリートのヤング率の経時変化 3-169
図 3.3.3-2　吹付けコンクリートの鉱物組成の評価点 3-171
図 3.3.3-3　鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率（ケース HC-021） ... 3-182
図 3.3.3-4　鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率（ケース HC-022） ... 3-182
図 3.3.3-5　鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率（ケース HC-031） ... 3-183
図 3.3.3-6　鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率（ケース HC-032） ... 3-183
図 3.3.3-7　鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率（ケース LC-021） 3-184
図 3.3.3-8　鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率（ケース LC-022） 3-184
図 3.3.3-9　鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率（ケース LC-031） 3-185
図 3.3.3-10　鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率（ケース LC-032） .. 3-185
図 3.3.3-11　高 Cl ケースの溶脱率とヤング率の低下に相当する溶脱率との比較 3-187

図 3.3.3-12　低 Cl ケースの溶脱率とヤング率の低下に相当する溶脱率の比較 3-187
図 3.3.3-13　高 Cl ケースのヤング率と力学的影響評価に用いたヤング率の比較 3-188
図 3.3.3-14　低 Cl ケースのヤング率と力学的影響評価に用いたヤング率の比較 3-188
図 3.3.3-15　掘削解放力の概念 3-191
図 3.3.3-16　再掘削時の力学的影響評価の解析手順 3-192
図 4.1-1　回収の容易性を坑道の埋め戻し状態を工夫することで考慮する方法の例 4-2
図 4.1-2　回収の容易性に係る検討の流れ 4-4
図 4.2.2-1　設計仕様設定までの流れ（[5]に一部加筆） 4-9
図 4.2.2-2　定置位置決定特性の例[5] 4-12
図 4.3.1-1　ANDRA が公表した処分場レイアウト（[7]に一部加筆） 4-13
図 4.3.1-2　小口径定置坑道への廃棄体定置と回収概念[8] 4-14
図 4.3.1-3　ユッカマウンテンでの処分場概念とレイアウト[10] 4-16
図 4.3.1-4　ユッカマウンテン処分場の換気システム[10] 4-17
図 4.3.1-5　ユッカマウンテンでの廃棄体定置概念（[10]に一部加筆） 4-18
図 4.3.1-6　通常時での廃棄体回収概念（定置装置の利用）[10] 4-18
図 4.3.1-7　ユッカマウンテンにおける定置坑道内の廃棄体定置手順（[10]に一部加筆） .. 4-19
図 4.3.1-8　SKB が計画している処分場レイアウト概念[12] 4-20
図 4.3.1-9　スーパーコンテナーと定置概念[14] 4-20
図 4.3.1-10　スウェーデン SKB が提唱した KBS-3H 定置概念と定置装置[14] 4-21
図 4.3.1-11　KBS-3V, KBS-3H の処分場概念と定置概念[18] 4-22
図 4.3.1-12　NAGRA が計画している併置処分概念と処分場レイアウト[19] 4-24
図 4.3.1-13　NAGRA が考案した処分坑道への廃棄体定置概念[59] 4-25
図 4.3.1-14　地層の傾斜に合わせた定置坑道の計画[58] 4-25
図 4.3.1-15　ベルギーでの処分場レイアウトとスーパーコンテナー概念[21] 4-26
図 4.3.1-16　ベルギーにおける定置概念の比較[22] 4-27
図 4.3.1-17　ゴアレーベンを対象とした処分場レイアウトと定置概念[23] 4-28
図 4.3.1-18　POLLUX を用いた大口径坑道横置き定置と廃棄物容器の竪置き定置概念（[24]に一部加筆） 4-28
図 4.3.1-19　カナダにおける処分概念と処分場のレイアウト（[25]に一部加筆） 4-30
図 4.3.1-20　バッファーボックスを用いた坑道横置き概念（[25]に一部加筆） 4-31
図 4.3.1-21　定置坑道内へのフォークリフトによるバッファーボックスの定置手順[25] 4-31
図 4.3.2-1　NUMO-TR-04-01 に記述された設計因子と処分概念（[6] に一部加筆） 4-32
図 4.3.2-2　NUMO-TR-04-03 に提示された複数の固化体を格納する オーバーパックの概念オプション[26] 4-34
図 4.3.2-3　NUMO-TR-04-03 に提示された様々な PEM の概念オプション[26] 4-35
図 4.3.2-4　NUMO-TR-04-03 に提示された様々な竪置き定置概念オプション[26] 4-36
図 4.3.2-5　NUMO-TR-04-03 に提示された様々な横置き定置概念オプション[26] 4-37

図 4.3.2-6　NUMO-TR-04-03 に提示された様々な処分場レイアウト概念オプション[26] . 4-38
図 4.3.2-7　廃棄体回収のイメージ[27] 4-39
図 4.3.2-8　作業性を考慮した定置概念[27] 4-41
図 4.4-1　工夫のポイントのイメージ例：大口径作業坑道から小口径坑道への定置 4-45
図 4.4-2　工夫のポイントのイメージ例：高耐久性のセグメント 4-46
図 4.4-3　工夫のポイントのイメージ例：高耐久性のケーシング 4-46
図 4.4-4　工夫のポイントのイメージ例：複数のガラス固化体格納容器 4-47
図 4.4-5　工夫のポイントのイメージ例：大規模空洞 4-48
図 4.4-6　工夫のポイントのイメージ例：集積定置 4-49
図 4.5.1-1　処分坑道の状態設定のイメージ（横置き PEM 方式の場合） 4-50
図 4.5.2-1　状態設定①：PEM 定置後処分坑道を埋め戻し状態とした場合の作業展開 .. 4-52
図 4.5.2-2　状態設定②：PEM 定置後処分坑道を開放状態とした場合の作業展開 4-53
図 4.5.2-3　状態設定③：PEM 定置後地下施設全体を水没状態とした場合の作業展開 .. 4-54

表　目　次

表 2.2.1-1　R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目[4] 1-3
表 2.2.1-2　定量化の時期と反映先 1-4
表 2.2.1-1　定量化に必要な各技術検討項目に対する個別番号表記の対応表 2-10
表 2.2.1-1　事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係[1] 2-12
表 2.2.1-2　地下施設の技術要件（NUMO，2004 に一部加筆）[1] 2-12
表 2.2.1-3　トンネルの時間依存性を考慮した解析手法の整理（土木学会、2003）[13] . 2-14
表 2.2.1-4　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）[14] 2-14
表 2.2.1-5　絶対変位量及びクリープによる変位量[10] 2-16
表 2.2.2-1　事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係[1]（表 2.2.1-1 再掲） 2-25
表 2.2.2-2　地下施設の技術要件（NUMO，2004 に一部加筆）[1]（表 2.2.1-2 再掲） . 2-25
表 2.2.3-1　事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係[1]（表 2.2.1-1 再掲） 2-31
表 2.2.3-2　地下施設の技術要件（NUMO，2004 に一部加筆）[1]（表 2.2.1-2 再掲） . 2-31
表 2.2.3-3　トンネルの時間依存性を考慮した解析手法の整理 （土木学会、2003）[13] （表 2.2.1-3 再掲） 2-33
表 2.2.3-4　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）[14]（表 2.2.1-4 再掲） 2-33
表 2.2.3-5　解析条件一覧[10] 2-35
表 2.2.4-1　事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係[1]（表 2.2.1-1 再掲） 2-39
表 2.2.4-2　地下施設の技術要件（NUMO，2004 に一部加筆）[1]（表 2.2.1-2 再掲） . 2-39
表 2.2.5-1　事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係[1]（表 2.2.1-1 再掲） 2-43
表 2.2.5-2　オーバーパックの設計要件[3] 2-44
表 2.2.5-3　オーバーパックの技術要件（基本的なバリア性能の確保）[1] 2-45
表 2.2.5-4　炭素鋼の代表的な腐食形態[23] 2-46
表 2.2.5-5　腐食深さの定置条件、及び時間依存性比較[23] 2-47
表 2.2.6-1　高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係[1] 2-49
表 2.2.6-2　オーバーパックの技術要件（基本的なバリア性能の確保）[1]（表 2.2.5-3 再掲） 2-49
表 2.2.7-1　高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係[1]（表 2.2.6-1 再掲） 2-52
表 2.2.7-2　オーバーパックの長期健全性の維持に関する技術要件[1] 2-52
表 2.2.7-3　緩衝材の技術要件（基本的なバリア性能の確保）[1] 2-53
表 2.2.7-4　緩衝材の技術要件（長期健全性の維持）[1] 2-54
表 2.2.8-1　高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係[1]（表 2.2.6-1 再掲） 2-59
表 2.2.8-2　オーバーパックの技術要件（基本的なバリア性能の確保）[1]（表 2.2.5-3 再掲） 2-59
表 2.2.8-3　緩衝材の技術要件（長期健全性の維持）[1]（表 2.2.7-4 再掲） 2-60

表 2.2.8-4　埋め戻し材・止水プラグの技術要件（基本的なバリア性能の確保）[1] 2-61
表 2.2.8-5　埋め戻し材・止水プラグの長期健全性の維持に関する技術要件[1]..... 2-61
表 2.2.9-1　高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係[1]（表 2.2.6-1 再掲） 2-69
表 2.2.9-2　閉鎖後長期の安全確保の基本概念と安全機能[1]..... 2-69
表 2.2.9-3　母岩の好ましい特性[1]..... 2-70
表 2.2.9-4　代表的な移流分散及び多相流解析コード[37]..... 2-72
表 2.2.10-1　高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係[1]（表 2.2.6-1 再掲） .. 2-79
表 2.2.10-2　閉鎖後長期の安全確保の基本概念と安全機能[1]（表 2.2.9-2 再掲） 2-79
表 2.2.10-3　母岩の好ましい特性[1]（表 2.2.9-3 再掲） 2-80
表 2.2.11-1　高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係[1]（表 2.2.6-1 再掲）... 2-87
表 2.2.11-2　閉鎖後長期の安全確保の基本概念と安全機能[1]（表 2.2.9-2 再掲） 2-87
表 2.2.11-3　母岩の好ましい特性[1]（表 2.2.9-3 再掲） 2-88
表 2.3-1　各技術検討項目に対する既存技術の整理と課題抽出の概要一覧表①..... 2-96
表 2.3-2　各技術検討項目に対する既存技術の整理と課題抽出の概要一覧表②..... 2-97
表 2.3-3　各技術検討項目に対する既存技術の整理と課題抽出の概要一覧表③..... 2-98
表 3.2.3-1　各影響評価項目で考慮する現象とそれらに影響を与えている現象 3-16
表 3.3.1-1　透水係数と間隙率の設定値 3-36
表 3.3.1-2　パネルスケールモデルによる解析ケース 3-39
表 3.3.1-3　「パネルスケールモデル」による解析ケース（case1a,case1a-9） 3-39
表 3.3.1-4　処分坑道掘削時の定常湧水量の算出結果（case1a、case1a-9） 3-41
表 3.3.1-5　処分坑道詳細モデル等による解析ケース 3-42
表 3.3.1-6　「処分坑道詳細モデル」による解析ケース（case9b、case9b-9） 3-42
表 3.3.1-7　「3D 処分坑道詳細モデル」による解析ケース（case6a、case6a-9） 3-45
表 3.3.1-8　「パネルスケールモデル」による解析ケース（case4a、case4a-9）..... 3-48
表 3.3.1-9　「パネルスケールモデル」による閉鎖後解析ケース（case21a-9c、case21a-9d）
..... 3-50
表 3.3.1-10　不飽和領域の主要な計測手法（Y:yes、N:no） 3-56
表 3.3.1-11　国内における不飽和領域の測定事例..... 3-57
表 3.3.1-12　「処分坑道詳細モデル」による解析ケース（case9b-91～case9b-94） 3-67
表 3.3.1-13　飽和透過係数の設定値..... 3-76
表 3.3.1-14　解析モデルの境界条件..... 3-78
表 3.3.1-15　不飽和特性の設定用パラメータの一覧 3-80
表 3.3.1-16　二相流解析による解析ケース（坑道掘削時の不飽和領域評価） 3-86
表 3.3.1-17　飽和透過係数の設定値..... 3-99
表 3.3.1-18　不飽和特性の設定用パラメータ一覧..... 3-100
表 3.3.1-19　解析モデルの境界条件..... 3-102

表 3.3.1-20　二相流解析による解析ケース（再冠水評価：case19b-9’） 3-102
表 3.3.1-21　変数の値..... 3-107
表 3.3.1-22　「切り出しモデル」による解析ケース(case31a-9～case33a-9) 3-112
表 3.3.1-23　地下水位が低下する場合の解析ケース(case22a-91～94) 3-116
表 3.3.1-24　「切り出しモデル」による解析ケース(case1a-k～case4a-k)..... 3-119
表 3.3.2-1　間隙流体の移動に係るパラメータ 3-136
表 3.3.2-2　溶質の移流分散に係るパラメータ 3-136
表 3.3.2-3　地球化学的反応に係るパラメータ 3-137
表 3.3.2-4　地下水の移動および物質輸送関連のパラメータ..... 3-139
表 3.3.2-5　岩盤、EDZ および支保工において地球化学的反応を考慮する鉱物と その式量・密度・モル体積（灰色除く） 3-140
表 3.3.2-6　地球化学的反応解析で考慮する鉱物の溶解反応の化学反応式と平衡定数 .. 3-143
表 3.3.2-7　地球化学的反応解析で考慮する鉱物の溶解反応の平衡定数と速度論係数並びに比表面積..... 3-144
表 3.3.2-8　吹付けコンクリートに含まれる鉱物の初期存在量..... 3-146
表 3.3.2-9　岩盤および地表面の地下水組成..... 3-147
表 3.3.2-10　坑道開放時の地下水の引き込みによる影響検討のための解析ケース..... 3-148
表 3.3.2-11　再冠水時の地下水組成の回復を検討するための解析ケース 3-149
表 3.3.3-1　吹付けコンクリートのカルシウム量の算定対象とする解析ケース 3-171
表 3.3.3-2　吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化（ケース HC-021）..... 3-172
表 3.3.3-3　吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化（ケース HC-022）..... 3-173
表 3.3.3-4　吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化（ケース HC-031）..... 3-174
表 3.3.3-5　吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化（ケース HC-032）..... 3-175
表 3.3.3-6　吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化（ケース LC-021）..... 3-176
表 3.3.3-7　吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化（ケース LC-022）..... 3-177
表 3.3.3-8　吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化（ケース LC-031）..... 3-178
表 3.3.3-9　吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化（ケース LC-032）..... 3-179
表 3.3.3-10　各鉱物の吹付けコンクリート単位体積当たりのモル数と 1 モル当たりのカルシウム数 3-181
表 4.1-1　回収の容易性を設計に考慮する際の多様な方法の例[2]..... 4-1

表 4.1-2　R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目[2]（表 2.2.1-1 再掲）.... 4-3
表 4.2.1-1　アクセス性向上の要素における考慮事項の例 4-7
表 4.2.1-2　ハンドリング性向上の要素における考慮事項の例 4-8
表 4.2.2-1　閉鎖前の安全性に関する安全機能と構成要素（放射線防護）[5] 4-10
表 4.2.2-2　閉鎖後長期の安全性に関する安全機能と構成要素（一般労働安全）[5] 4-10
表 4.2.2-3　閉鎖後長期の安全性に関する安全機能と構成要素[5] 4-10
表 4.3.2-1　定置方式に関する定性的な比較[27]..... 4-40
表 4.3.3-1　国内外の処分概念における回収の容易性向上の視点からのポイント..... 4-42
表 4.4-1　回収の容易性向上の視点からの工夫のポイント例 4-44
表 4.5.3-1　処分坑道の状態設定の違いによる各作業の負荷及び安全性への影響..... 4-58

第1章　はじめに

1.1　背景及び目的

放射性廃棄物の地層処分事業における可逆性・回収可能性については、我が国で特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（以下、「最終処分法」という。）が制定される以前から、一部の国や国際機関などで先行的な議論が進められてきた。

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

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

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

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

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

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

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

1.2 回収可能性の維持についての今後の検討のベース

1.1 節に示した目的のうち、1 つ目に対応する項目については、大学等に所属する外部有識者の協力のもとで「可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会」（以下、「R&R 検討会」という。）を平成 27 年度に設置し、平成 27～28 年度の 2 ヵ年にわたって、可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理に向けた多面的な検討を進め、平成 29 年度に報告書として成果を取りまとめた[4]。本成果より、回収可能性に関して今後必要となる技術的な対応として、以下の①～③の項目が抽出された。

①我が国における回収可能性に関する技術的アプローチの具体化
②基本方針で示された課題である施設閉鎖までの管理のあり方の具体化
（閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響の定量化）
③将来の可逆性・回収可能性の実施の可否を判断しなければならない場面での対応

廃棄物 WG で示されたように、処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持する期間は、地元の意向等を踏まえた上で決定・見直しすることから、上記の①～③の技術対応のうち、直近の対応が必要となる可能性のあるものは①及び②の課題と考えられた。さらに、②を具体化するには①を具体化する必要があり、また①で適切なアプローチを選択するには②の影響を定量化する必要があることから、①及び②の課題は並行して取り組む必要がある。

一方で、回収可能性を維持することに関して、

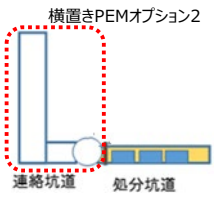
1. 安全性への影響
2. 回収の容易性（回収作業時間）
3. 最終閉鎖せずに回収可能性を維持できる期間
4. 回収可能性に係る費用

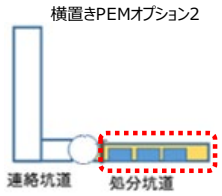
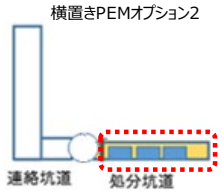
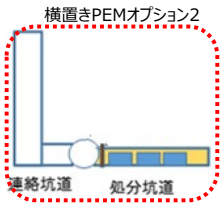
といった事項の間でトレードオフの関係が存在する。採用する技術的アプローチの種類や内容によってこれらのトレードオフの関係が異なることから、適切な技術的アプローチを選択するためには、これらトレードオフの関係をより定量的に示していく必要がある。R&R 検討会では、これらのトレードオフの関係の定量化に向けた技術的な検討を進める際の出発点として、今後の技術的アプローチの具体化に必要となる定量的な情報を想定し、それらの定量化に必要となる技術検討項目を具体化し、回収可能性の維持に関する技術的アプローチの具体化に係る技術検討の枠組み（技術検討のフレームワーク）として提示している。技術検討のフレームワークでは、トレードオフの関係にある上記 1～4 の 4 つの定量化すべき情報のうち、「安全性への影響」及び「回収の容易性（回収作業時間）」に着目して、定量化に必要な技術検討項目と技術検討の視点を表 2.2.1-1 のように整理している。

本事業における回収可能性の維持についての検討では、表 2.2.1-1 に示す定量化に必要な技術

検討項目を、回収可能性の維持に係る今後の更なる議論や技術検討を進める上での“検討のベース”と位置付けて、この観点から新たに取り組むべき技術課題の具体化を昨年度より実施している。

表 2.2.1-1　R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目[4]

<table>
<tr><th colspan="4">R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目」</th></tr>
<tr><th colspan="3">定量化すべき情報</th><th>定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点</th><th>検討対象(イメージ)</th></tr>
<tr><td rowspan="4">1.
安全性への影響</td><td rowspan="2">(1)
操業期間中の安全性への影響</td><td>①
回収可能性維持期間中の開放坑道の安全性への影響</td><td>1)開放坑道内の作業空間の安全性
保守管理のために開放坑道内に人が出入りするため、開放坑道内の作業空間の安全性確保の観点から、以下の評価・検討や技術の具体化を行う。
a.開放坑道の健全性（空間安定性）
b.開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響</td><td rowspan="2">  </td></tr>
<tr><td>②
回収作業時の安全性への影響（回収を実施する場合）</td><td>1)回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性
一度埋め戻した坑道の再掘削／再利用を前提とする場合に、回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性確保の観点から、以下の評価・検討や技術の具体化を行う。
a.埋め戻した坑道の再利用時の健全性
b.再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響

2)回収時の廃棄体容器の健全性
回収装置による把持・取り出しの際には、廃棄体容器に一定の機械強度が要求されることから、廃棄体容器の健全性に関する評価や検討を行う。</td><td>  </td></tr>
<tr><td colspan="2">(2)
閉鎖後長期の安全性への影響
：回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合の、人工バリアや天然バリア（母岩）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響</td><td>1)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う人工バリア等に期待する安全機能への影響
維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ、人工バリア（及び他の地下構造物）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響を下記観点から評価する。
a.開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響
b.廃棄体からの熱による影響
c.坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響</td><td>  </td></tr>
<tr><td colspan="2">(2)
閉鎖後長期の安全性への影響
：回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合の、人工バリアや天然バリア（母岩）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響</td><td>2)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う天然バリア(母岩)に期待する安全機能への影響
維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ、天然バリア（母岩）に期待される閉鎖後長期の安全機能に係わる次のような影響を評価する。
a.地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込みの影響
b.開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度
c.ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度</td><td>  </td></tr>
<tr><td rowspan="2">2.
回収の容易性（回収作業時間）</td><td colspan="2" rowspan="2">(1)単位ユニットあたりの回収時間(廃棄体１体又は処分坑道１本)
(2)全ての廃棄体回収に係る全体作業時間</td><td>1)より合理的な回収作業の実現に向けた技術検討／技術開発
a.回収時間の短縮に向けた回収方法（技術・装置）の高度化
b.回収作業手順の具体化</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">2)より回収の容易性を高めた処分場の設計開発：回収の容易性を設計に考慮する際の多様な方法の導入や組合せに関する検討を進め、前提とした２つの処分概念オプション以外の新たなものを含めて、より回収の容易性を高めた処分場の設計開発に係る検討を進める。</td></tr>
</table>

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

なお、意思決定を支援するために定量的な情報を提示しなければならない時期として、表 2.2.1-2 に示すような幾つかの場面が想定される（これ以外に操業段階以降に何らかの理由で回収実施の意思決定が必要な場面も想定される）。廃棄物 WG で示されているように、回収可能性の維持期間は地元の意向も踏まえて決定されることから、処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持し

た場合の影響等に対する評価方法は、サイト選定の段階から準備される必要がある。本事業における処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等に対する評価技術の整備は、まずはサイト選定段階で利用されることを念頭に置くが、表 2.2.1-2 に示すように、これらの技術は後の段階における設計照査や安全規制対応技術へと利用されていくこととなる。なお、特に、サイト選定の初期段階では、サイトの地質環境や処分概念等の入力情報に不確かさや十分性への制約がある。ここでの定量化技術の整備においては、入力情報に関する制約にも留意して、利用されるそれぞれの段階における利用目的や必要な情報レベルとともに、提示可能な情報項目やアウトプットの精度（入力の制約）を整理して行くことが必要となる。

表 2.2.1-2　定量化の時期と反映先

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

本第 3 分冊では、上述した目的及び検討のベースに対応した調査研究に係る取組に関して、本年度の検討成果を取りまとめている。以下に、本事業における検討概要を整理したうえで、次節以降に本年度の検討結果等を要約整理する。

1.3　過年度及び本年度の検討概要

1.1 節に示した目的のうち、2 つ目に対応する項目については、処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等に関する検討（以下、「回収可能性の維持についての検討」という）として、平成 27 年度より開始した。平成 27～28 年度には、回収可能性を維持したことによる影響を受ける因子の抽出と影響範囲等の分析、及び一定の期間回収可能性を維持するために必要となる技術の現状調査と課題を含めた整理を進めた。これらの当初の 2 ヵ年の取組では、“竪置きブロック定置方式” 及び “横置き PEM（Prefabricated Engineered Barrier System Module）定置方式” を対象として定性的な分析に基づき検討や整理を行うとともに、平成 28 年度からは回収可能性を維持することによる影響の定量的な評価を行うための技術の整備に向けて、坑道の安定性に関する定量的評価の条件や適用可能な解析手法の検討に着手した[5]、[6]。一方、1.2 節に示した回収可能性の維持についての今後の検討のベースを踏まえ、平成 29 年度からは、本事業における回収可能性の維持についての検討の成果目標は以下のように設定して、検討及び調査研究を進めることとした。

- 回収可能性を維持した場合の「安全性への影響」に係る評価技術について、既存の解析的

評価技術を整理し、安全性への影響の定量的評価方法を整備する。また、それに伴って必要となる評価指標やパラメータ等を具体化する。

- 回収可能性を維持した場合の既存の回収技術、回収維持技術を整理し、取り組むべき課題を抽出する。
- 「回収の容易性」を考慮した場合の代替設計オプションを具体化し、関連する技術開発課題を抽出する。

平成 29 年度は、表 2.2.1-1 に示す安全性への影響の定量化に必要な技術検討項目に留意して、坑道安定性に着目した力学的な影響評価方法の整備に向けた検討に加え、坑道湧水量の時間変化や空気の岩盤中への侵入による不飽和領域の発生の可能性といった水理学的な影響評価方法の調査・検討を行った[4]。また影響の定量化に必要な技術に加え、回収維持期間中の地下施設の維持技術及び回収技術の実現性にも留意が必要であるため、現時点で適用可能な回収維持技術※1 や回収技術※2 の整理を行った[4]。

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

本年度は、引き続き上記の成果目標を達成するために以下のような検討を行う。

（1）回収可能性維持期間の検討（第 2 章、第 4 章）

R&R 検討会で示されたで定量化に必要な技術検討項目に関して、安全性への影響の定量的な評価技術の整備に向けての既存技術の整理と課題抽出を行うとともに、回収の容易性を高めた設計オプションの具体化について、検討の視点を整理したうえで、回収容易性の視点及び既存処分概念等の整理や容易性を高めた代替設計オプションの検討を行う。なお本報告書では、安全性への影響の定量的な評価技術の整備に向けた既存技術の整理と課題抽出を第 2 章に示し、回収容易性に関する検討を第 4 章に示す。

（2）回収可能性維持期間の影響に関する定量的評価（第 3 章）

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

第１章　参考文献

[1]　総合資源エネルギー調査会　電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 放射性廃棄物ワーキンググループ：放射性廃棄物 WG 中間とりまとめ，経済産業省ホームページ，http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/genshiryoku/houshasei_haikibutsu_wg/report_001.pdf，2014.

[2]　経済産業省：特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（平成 27 年 5 月 22 日閣議決定），経済産業省ホームページ，http://www.meti.go.jp/press/2015/05/20150522003/20150522003-1.pdf.

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

[4]　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発　報告書（第３分冊），2018.

[5]　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 27 年度地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書　第２編，2016.

[6]　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 28 年度地層処分技術調査等事業　可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発　報告書（第２分冊：その１），2017.

第2章　安全性への影響の定量的な評価技術の整備に向けた既存技術の整理と課題抽出

2.1　検討方針と検討項目の概要

本章では、R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目に対して、安全性への影響の定量的な評価技術の整備に向けての既存技術の整理と課題抽出を行う。本検討では、各技術検討項に対する安全性への影響の意味や指標の整理を行う。その上で、指標を時間依存で解析できる既存の解析的評価技術の現状レベルの整理と課題を抽出する。検討の流れを図 2.2.1-1 に示す。

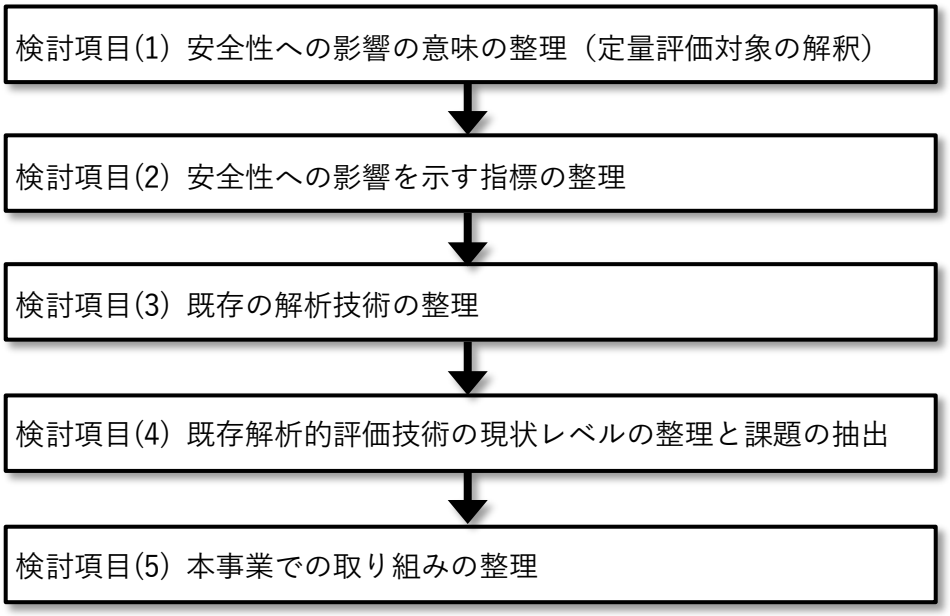


図 2.2.1-1　定量的な評価技術の整備に向けた既存技術の整理と課題抽出のための検討の流れ

各検討項目の概要を以下に示す。

検討項目（1）：安全性への影響の意味の整理（定量評価対象の解釈）

定量化に必要な各技術検討項目に対する安全性への影響の意味をまとめるために、まずは安全性の確保について整理する必要がある。安全性の確保については、地層処分事業の実施主体である、原子力発電環境整備機構（以下、「NUMO」という）が「処分場の安全機能と技術要件（NUMO-TR-10-11）」[1]で体系的にまとめている。NUMO は、放射性安全、労働安全の確保と環境保全を合わせた「事業期間中の安全確保」の考え方として基本的な安全対策を示し、安全確保の要件について述べている。また、地層処分の目標に基づいた安全確保の基本概念を示し、「閉鎖後長期の安全確保」を達成するために必要な処分場の設計、性能評価の基本的な考え方として安全機能を示し、技術要件を示している。そこで本検討においては、NUMO の「処分場の安全機能と技術要

件（NUMO-TR-10-11）」などに基づき、R&R 検討会で示された各技術検討項目に対する安全性への影響の意味を整理する。

検討項目（2）：安全性への影響を示す指標の整理

定量化に必要な各技術検討項目に対する安全性への影響を示す指標は、安全性の確保について体系的に整理された NUMO の「処分場の安全機能と技術要件（NUMO-TR-10-11）」[1]、「地層処分事業の安全確保（2010 年度版）（NUMO-TR-11-01）」[2]、「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）」[3]等のレポートや労働安全衛生規則[4]などの法令等を参照して整理する。

検討項目（3）：既存の解析技術の整理

定量化に必要な各技術検討項目に対する安全性への影響を示す指標を時間依存で解析できる既存技術について、学会等により整理された文献、地層処分に関する研究等を行っている各機関（NUMO、日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という）、原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、「RWMC」という））等のレポートに基づき整理する。

検討項目（4）：既存解析的評価技術の現状レベルの整理と課題の抽出

(3)で整理した既存の解析技術を用いて評価を行う解析的評価技術について、現状レベル（回収可能性の維持による影響の評価として適用例があるか、または、研究開発段階であるか等）の整理を行い、R&R 検討会の安全性への影響の技術検討項目の定量的評価実施に向けた課題を抽出する。

検討項目（5）：本事業での取り組みの整理

本事業での取り組みの有無や取り組み状況を整理する。

R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目で想定される現象は、物理現象の相互作用により生じることが考えられる。例えば図 2.2.1-2[5]は、熱(Thermal)、水理(Hydrologic)、力学(Mechanical)、化学(Chemical)などの物理現象の相互作用を示しており、これらの相互作用を考慮して解く問題の総称を連成問題という[6]。図で示されたように四つの代表的な物理現象を考慮する場合、それぞれの現象の頭文字から THMC などの略語で呼ばれることが多い[6]。太矢印で示された現象は、連成問題の相関関係の支配的な要因と考えられている[5]。このように物理現象は複雑な相互作用により生じることがわかる。特に、地層処分の分野では長期的な熱－水理（浸透）－力学－化学（THMC）の連成現象を取り扱う必要があるため、実験的な研究や解析的評価技術の研究が進められている[6]。

定量化に必要な各技術検討項目に示された安全性への影響の定量的評価を行う際には、全ての物理現象の相互作用を完全に連成させた解析的評価技術により解くことが理想であるが、これは前述したとおり研究段階にある。また、完全な連成ではなくとも、THMC のうちの複数の現象を連成させる解析的評価技術も研究されている[6]。

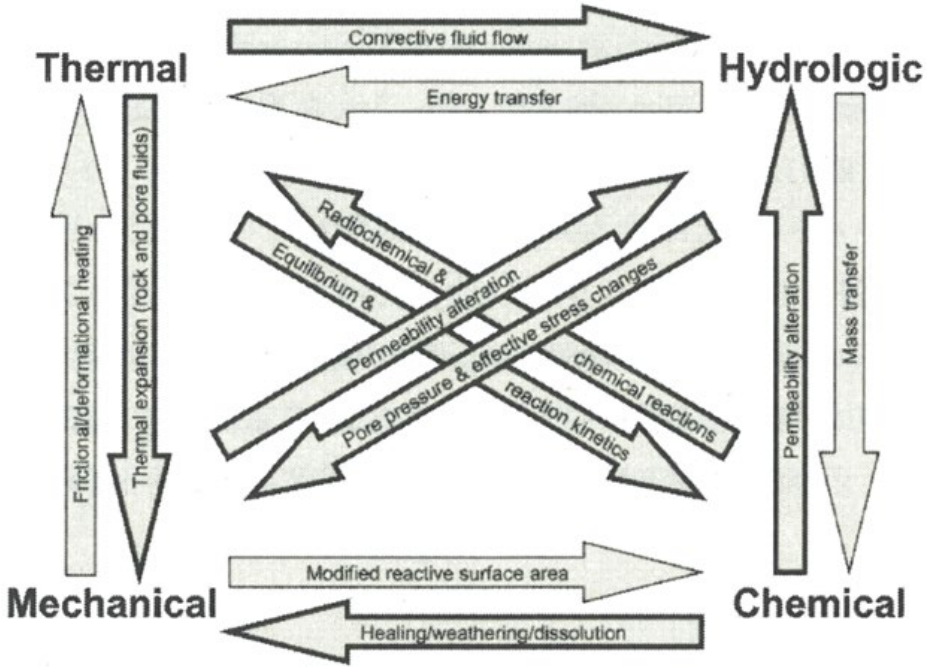


図 2.2.1-2　Effects of coupled in situ processes in rock mass behavior. Bold arrows suggest processes of potentially greater engineering significance [5]

これまで本事業では、現象間の相互作用を考慮しつつ、安全性への THMC の各影響の度合いを明らかにするために、時間依存性による物性や境界条件の変化の結果を引渡しながら複数の解析を段階的に実施する手法を検討してきた[7]、[8]。これは、各影響の度合いを把握するだけでなく、長期的な安全性に対する影響低減技術（対策技術）を定量的に評価、検討することも求められているためである。従って、本検討においても、まずは安全性への影響を示す指標を直接評価する解析的評価技術について整理し、現象の相互作用による影響は物性や境界条件などの変化をどのように反映させるかについて整理する。本章では、定量化に必要な各技術検討項目を対象に、取り組み方法と状況を整理する。技術検討項目の整理にあたっては、表 2.2.1-1 に示すように定量化に必要な各技術検討項目にⅰ～xiの個別番号を付けて表記する。

表 2.2.1-1　定量化に必要な各技術検討項目に対する個別番号表記の対応表

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

2.2　既存技術の整理と課題抽出

2.2.1　定量化に必要な技術検討項目 i　開放坑道の健全性（空間安定性）

(1)　安全性への影響の意味の整理（定量評価対象の解釈）

NUMO の「処分場の安全機能と技術要件（NUMO-TR-10-11）」[1]では、「事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係」のうち、一般労働安全の「作業環境の維持」に「空洞の力学的安定性の確保」として安全対策が示されており、その構成要素には地下施設が挙げられている（表 2.2.1-1）。また、地下施設の技術要件のうち、アクセス坑道、連絡坑道及び処分坑道（処分孔）の技術要件として「空洞の力学的安定性が確保されること」が示されている（表 2.2.1-2）。

R&R 検討会が提示した技術検討の視点では、「保守管理のために開放坑道内に人が出入りする」ことが前提であり、回収可能性の維持を考慮した場合においても、上記の NUMO の技術要件「空洞の力学的安定性が確保されること」を考慮する必要がある。

現時点での想定である、最長 300 年程度（RWMC 平成 27 年度～平成 28 年度検討[8]、[9]）の回収可能性維持期間中、開放坑道では周辺岩盤の変形の進行と支保工の変形の進行が生じ、空洞の力学的安定性に影響が生じることが予想される。周辺岩盤の変形の進行は、坑道構築時の応力再配分、周辺岩盤のクリープ変形、化学的・熱的影響による周辺岩盤の変形・強度特性の変化、支保工の変形の進行などによるものと考えられる[8]。一方で、支保工の変形の進行は、周辺岩盤の変形の進行や化学的・熱的な劣化による支保工の変形・強度特性の変化の進行によるものと考えられる。支保工にはコンクリートや鋼材等などが用いられる。コンクリートの劣化現象は、地下水との接触によるセメント水和物の成分の溶脱、鋼材の腐蝕膨張によるひび割れ、アルカリ骨材反応によるひび割れ、CO_2 の浸透による中性化などがある。鋼材の劣化現象は地下水との接触による腐食などがある。このような劣化が時間経過とともに進行し、支保工の強度や剛性が低下することにより、変形が進行する。周辺岩盤と支保工の変形は相互作用により進行し、空洞の力学的安定性に影響を及ぼす恐れがある。

回収可能性の維持を考慮する際には、技術要件である作業環境の維持のための「空洞の力学的安定性が確保されること」に対して、「開放坑道の健全性（空間安定性）」への影響を評価する必要があり、この影響は回収可能性維持期間が長くなるほど坑道の周辺岩盤や支保工の変形が進行することにより大きくなることが考えられる。したがって、数百年に及ぶ時間依存性を考慮可能な解析的評価技術による、力学的安定性の変化の定量的評価が重要であると考えられる。また、開放坑道の健全性への影響の把握には、回収可能性維持期間中の周辺岩盤や支保工の変形・強度特性の化学的・熱的な変化を併せて評価する必要があり、これらの変化は地下水流動場の変化などに依存すると考えられる。時間依存性を考慮した解析的評価技術により、開放坑道の支保工や覆工等の健全性を定量的に把握し、坑道の支保工の設計や維持管理・更新技術の検討に反映させることが重要と考えられる。

表 2.2.1-1　事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係[1]

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

（＊地下施設でのみ考慮する安全対策）

表 2.2.1-2　地下施設の技術要件（NUMO，2004 に一部加筆）[1]

坑道	技術要件
アクセス坑道 連絡坑道	・安全に建設・操業・閉鎖が実施できること ・空洞の力学的安定性が確保されること ・建設に必要な空間が確保できること ・建設関連の物流経路が確保できること ・地理，地形，地質等の設計上の前提となる条件を満たすこと ・操業に必要な空間が確保できること ・廃棄体を含む操業関連の物流経路が確保できること ・閉鎖に必要な空間が確保できること ・核種移行遅延性能に有意な影響を与えないように配慮がなされること
処分坑道 （処分孔）	・安全に建設・操業・閉鎖が実施できること ・空洞の力学的安定性が確保されること ・建設に必要な空間が確保できること ・建設関連の物流経路が確保できること ・地理，地形，地質等の設計上の前提となる条件を満たすこと ・操業に必要な空間が確保できること ・廃棄体を含む操業関連の物流経路が確保できること ・閉鎖後長期安全性を有すること ・核種移行遅延性能に有意な影響を与えないように配慮がなされること ・長期的に健全であること ・人工バリアが安定するように埋め戻されること

(2)　安全性への影響を示す指標

(1)で述べたように、回収可能性の維持を考慮した場合においても、技術要件として「空洞の力学的安定性が確保されること」が考えられることから、本技術検討項目に対する安全性への影響を示す指標は、この技術要件に基づいて抽出できると考えられる。設計時において空洞の力学的安定性評価に用いる指標は、周辺岩盤のひずみ及び応力、支保部材の応力であり[10]、これらの指標は回収可能性維持期間にも適用できると考えられる。なお、供用中の道路トンネルや鉄道トンネルでは、維持管理時にコンクリートのひび割れ幅や長さや、内空変位速度等の定量的な数値をトンネルの健全度の評価指標（判定の目安）として用いている[11]、[12]。コンクリートのひび割れに関しては、鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）[12]では運用上の留意点として、コンクリートによる覆工を対象として判定区分や目安を示している旨が述べられており、本事業の既往検討[7]でも維持管理の対象をコンクリートによる覆工としている。よって、処分坑道のように吹付けコンクリートを最終仕上げ面としたトンネルでは、判定の目安としてひび割れの値をそのまま適用できないと考えられる[7]。また、(3)で述べるようにコンクリートのひび割れは数値解析で予測することが非常に難しいことから、コンクリートのひび割れを計画・設計段階の解析的評価で坑道安定性への影響を示す指標とすることは極めて困難であると考えられる。一方、内空変位速度に関しては、周辺岩盤に起因したものであるため、坑道の最終仕上げ方法に係わらず坑道の変状の判定の目安として適用できる可能性があると考えられる。

従って、「開放坑道の健全性（空間安定性）」への影響を示す指標は、坑道設計時と同様に周辺岩盤のひずみ及び応力、支保部材の応力が適用できると考えられる。なお、内空変位速度に関しては指標としての適用性の検討が必要である。

(3)　既存の解析技術の整理

(2)では、「開放坑道の健全性（空間安定性）」への影響を示す指標として、周辺岩盤のひずみ及び応力、支保部材の応力を挙げた。これらの指標を時間依存で解析できる技術は、表 2.2.1-3[13]に示すように理論解析と数値解析に大別される。このうち、坑道等を任意形状で考慮可能な解析手法は数値解析であり、粘弾性解析及び粘弾塑性解析があり、表 2.2.1-4[14]に示すように構成モデル（力学モデル）として大久保モデルや地山劣化モデルを導入することが考えられている。坑道に設定する支保工について、NUMO の「地層処分事業の安全確保（2010 年度版）（NUMO-TR-11-01）」[2]では、吹付コンクリート、覆工コンクリート、コンクリートセグメント、ロックボルト、鋼製支保工などがあり、坑道の力学的安定性を確保するためにそれぞれを単独あるいは組み合わせて用いる、と示されており、本技術検討項目においても設計時に設定された支保工が評価の対象となる。なお、坑道設計時には主に数値解析による検討が行われ、岩盤とともに支保工のモデル化を行い、支保工の必要性の検討、また、必要となる場合には仕様（厚さ、強度）の検討が行われる。

表 2.2.1-3　トンネルの時間依存性を考慮した解析手法の整理（土木学会、2003）[13]

<table>
<tr><th rowspan="2">解析手法</th><th colspan="2" rowspan="2">構成モデル</th><th rowspan="2">トンネル形状</th><th rowspan="2">初期地圧</th><th colspan="4">クリープモデル</th></tr>
<tr><th>瞬時変形</th><th>1次</th><th>2次</th><th>3次</th></tr>
<tr><td rowspan="7">理論解析</td><td rowspan="4">粘弾性</td><td>Kelvin</td><td rowspan="4">円形,
だ円形が主</td><td rowspan="4">等方,二軸</td><td>-</td><td>○</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Maxwell</td><td rowspan="3">弾性</td><td></td><td>○</td><td></td></tr>
<tr><td>Zener(Voigt3要素)</td><td>○</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Burgers</td><td>○</td><td>○</td><td></td></tr>
<tr><td>粘弾塑性</td><td>べき乗則</td><td>円形</td><td>等方</td><td></td><td>○</td><td></td></tr>
<tr><td>地山劣化</td><td>Mohr-Coulomb</td><td>円形</td><td>等方,二軸</td><td>弾塑性</td><td colspan="3">モデル化による</td></tr>
<tr><td rowspan="6">数値解析</td><td>粘弾性</td><td>同上</td><td rowspan="6">任意形状</td><td rowspan="6">任意</td><td colspan="4">理論解析と同じ</td></tr>
<tr><td rowspan="4">粘弾塑性</td><td>Mohr-Coulomb</td><td rowspan="5">弾塑性</td><td>○</td><td>○</td><td></td></tr>
<tr><td>べき乗則</td><td>○</td><td>○</td><td></td></tr>
<tr><td>大久保</td><td>○</td><td>○</td><td>○</td></tr>
<tr><td>足立-岡</td><td>○</td><td>○</td><td>○</td></tr>
<tr><td>地山劣化</td><td>Mohr-Coulomb</td><td colspan="3">モデル化による</td></tr>
</table>

表 2.2.1-4　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）[14]

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積がある）
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積がある）
山冨モデル	スプリングとダッシュポット、スライダーの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、ダイレイタンシー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、ダイレイタンシー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）

なお、(2)において供用中のトンネルの維持管理に用いられる判定の目安としてコンクリートのひび割れの幅や長さを挙げたが、ひび割れの要因には溶脱、鋼材の腐蝕膨張、アルカリ骨材反応などがあり、ひび割れの発生や進展現象を数値解析で予測することは難しい。亀裂進展問題に対する数値解析手法の研究例[15]、[16]や、コンクリートのひび割れの発生・進展を解析的に予測する方法の研究例[17]もあるが、これらの解析技術はいずれも研究段階である。

(4)　既存解析的評価技術の現状レベルの整理と課題の抽出

1)　現状レベルの整理

本技術検討項目に適用性があると考えられる力学モデルは大久保モデルと地山劣化モデルである。大久保モデルは第２次取りまとめへ適用例[10]などがあり、地山劣化モデルは一般のトンネルへの適用例として JR 只見線六十里越トンネルの検討例[13]などがある。以下に２つの力学モデルについて述べる。

大久保モデルを用いた第２次取りまとめの検討[10]は埋め戻した坑道を対象として、岩盤のクリープを考慮した評価期間 10000 年の解析を実施している。対象とした岩盤は硬岩系岩盤と軟岩系岩盤であり、両者の変位量の比較を実施している（図 2.2.1-1、図 2.2.1-2、表 2.2.1-5）。この検討では、開放坑道を対象とした解析は行われておらず、また支保工はモデル化されていない。よって、支保工の劣化による剛性低下等は考慮されていない。評価は岩盤のクリープ変形量と応力状態の経時変化等の確認により行われている。このように岩盤の時間性挙動評価のための力学モデルである大久保モデルを用いた解析の適用例はあるが、「開放坑道の健全性（空間安定性）」を対象とした解析的評価の実施例は本事業以外に見当たらない。

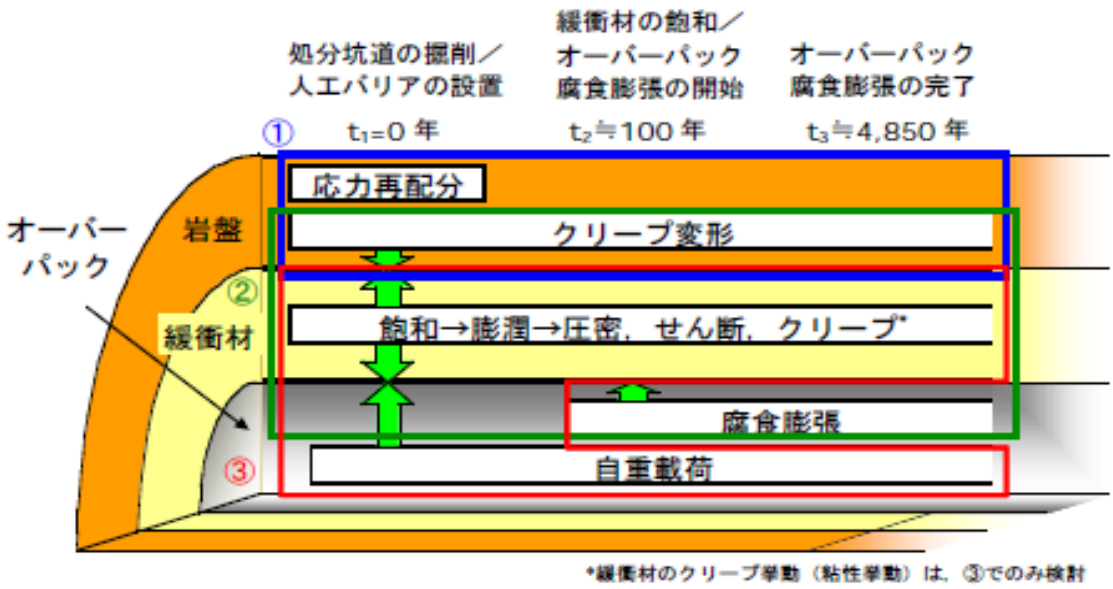


図 2.2.1-1　解析検討対象とした現象の時系列[10]

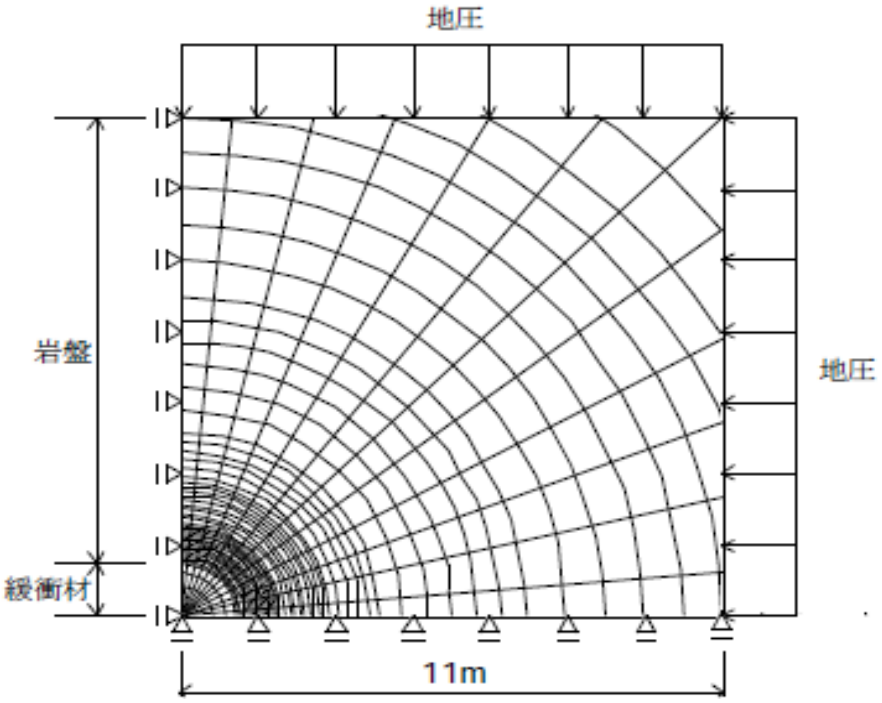


図 2.2.1-2　岩盤クリープ解析モデル[10]

表 2.2.1-5　絶対変位量及びクリープによる変位量[10]

時間 [年]	硬岩系岩盤		軟岩系岩盤	
	天端 [mm]	側壁 [mm]	天端 [mm]	側壁 [mm]
0	1.50 (0.00)	1.50 (0.00)	7.77 (0.00)	8.95 (0.00)
1	1.50 (0.00)	1.50 (0.00)	13.7 (5.89)	13.8 (4.87)
10	1.50 (0.00)	1.50 (0.00)	15.9 (8.10)	15.4 (6.49)
100	1.50 (0.00)	1.50 (0.00)	18.9 (11.1)	17.6 (8.65)
1,000	1.50 (0.00)	1.50 (0.00)	23.2 (15.4)	20.5 (11.6)
10,000	1.50 (0.00)	1.50 (0.00)	29.6 (21.8)	24.9 (15.9)

() 内の値はクリープによる変位量

地山劣化モデルを用いたトンネルでの検討例として JR 只見線六十里越トンネルの例[13]、[18]、[19]がある。この事例では解析結果が変状状況等と内空変位計測結果に整合するように、支保の有無や覆工に関するさまざまなパターンのモデル化を行い、解析ケースを設定、実施している（図 2.2.1-3、図 2.2.1-4）。図 2.2.1-4 のような内空変位速度の計測結果から地山の劣化の進行を仮定して解析し、さらに対策工を考慮した解析を行うことで内空変位速度の抑制効果の評価を行っている（図 2.2.1-5、図 2.2.1-6）。ただし、サイト選定段階での適用は入力値の設定方法が難しいと考えられる。

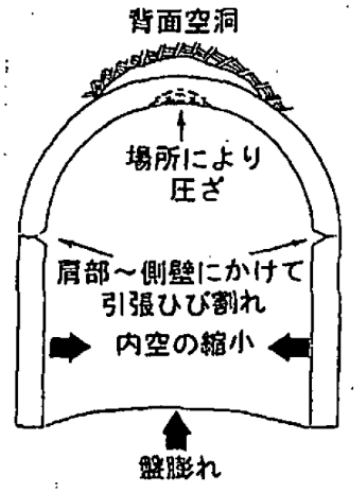


図 2.2.1-3　六十里越トンネルの主な変状状況[19]

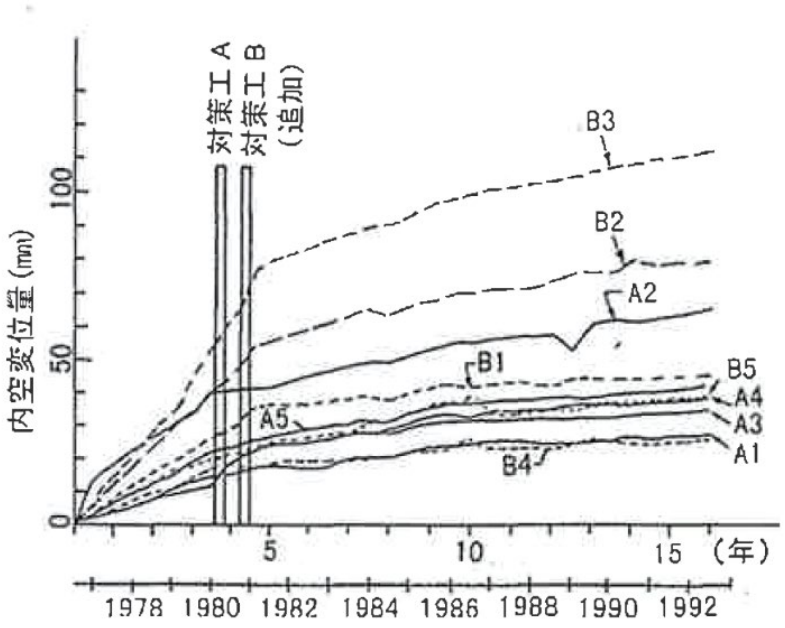


図 2.2.1-4　内空変位計測結果[13]

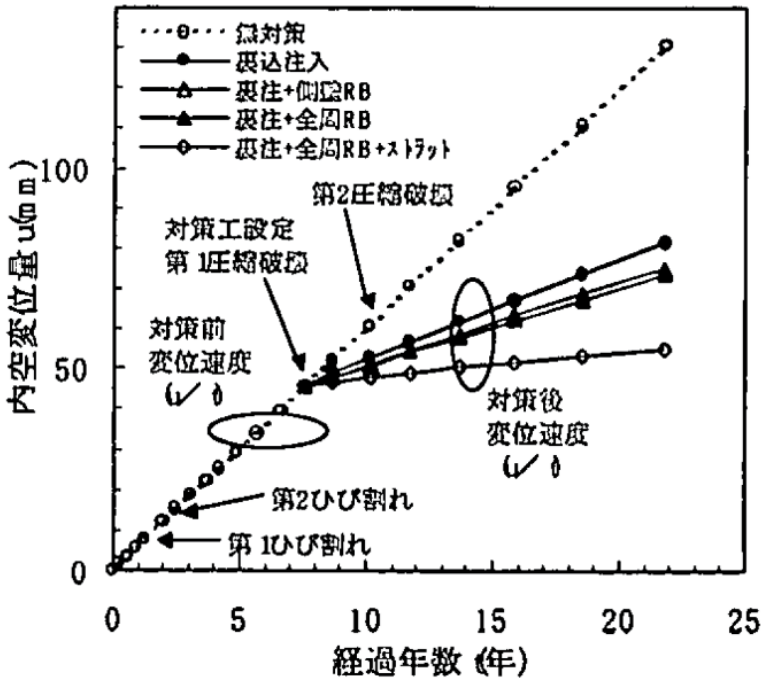


図 2.2.1-5　地山劣化モデルによる対策工解析結果[19]

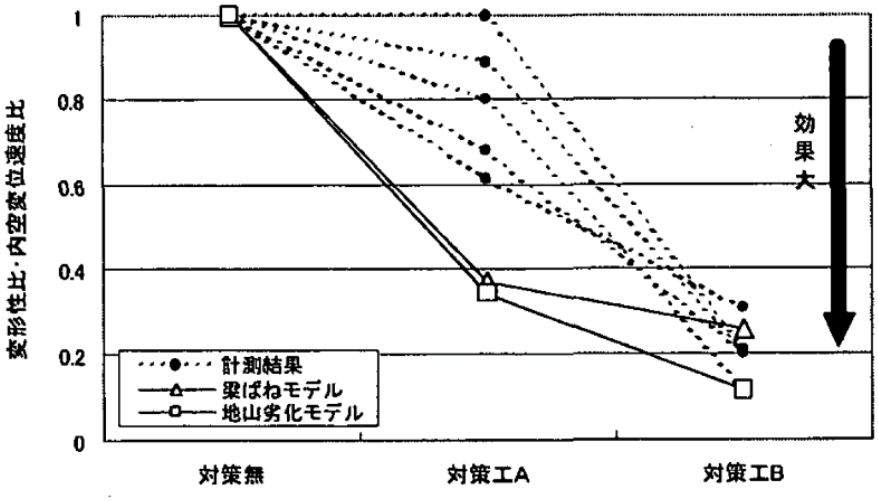


図 2.2.1-6　計測結果と解析結果の比較[19]

なお、JR 只見線六十里越トンネルの検討例[13]では、覆工コンクリートを図 2.2.1-7～図 2.2.1-9 のようにモデル化し、評価を行った結果も示されている。

このように岩盤の時間性挙動評価のための力学モデルである地山劣化モデルを用いた解析の適用例はあるが、「開放坑道の健全性（空間安定性）」を対象とした解析的評価の実施例は見当たらない。

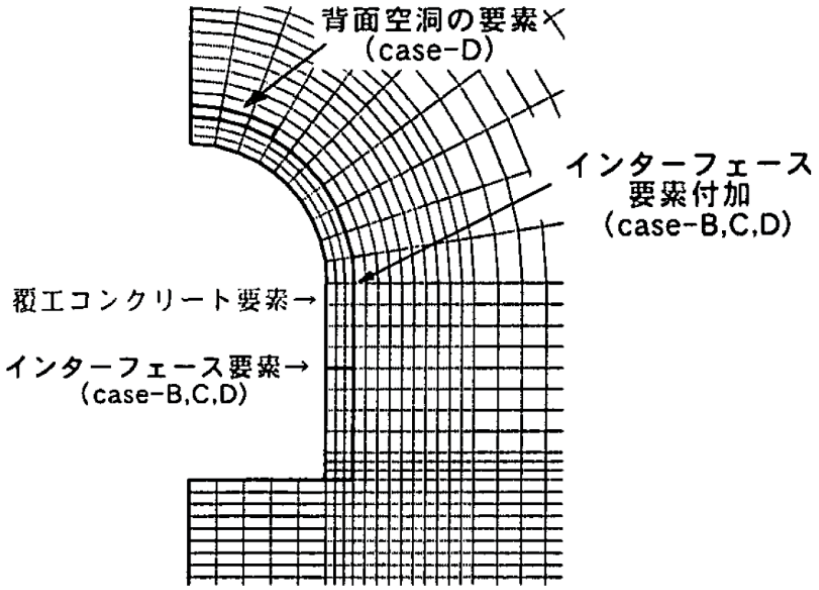


図 2.2.1-7　覆工コンクリートのモデルと境界条件[18]

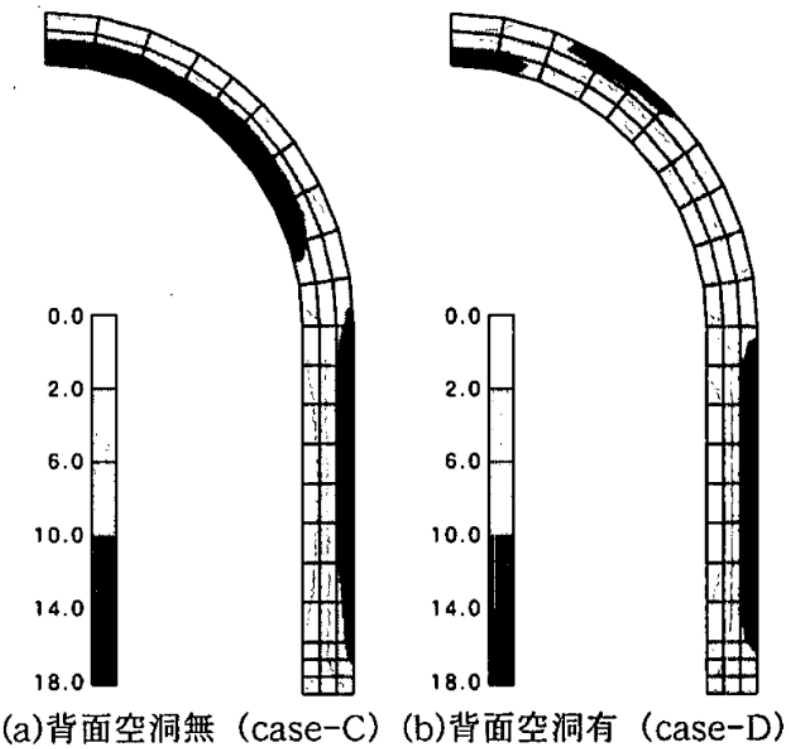
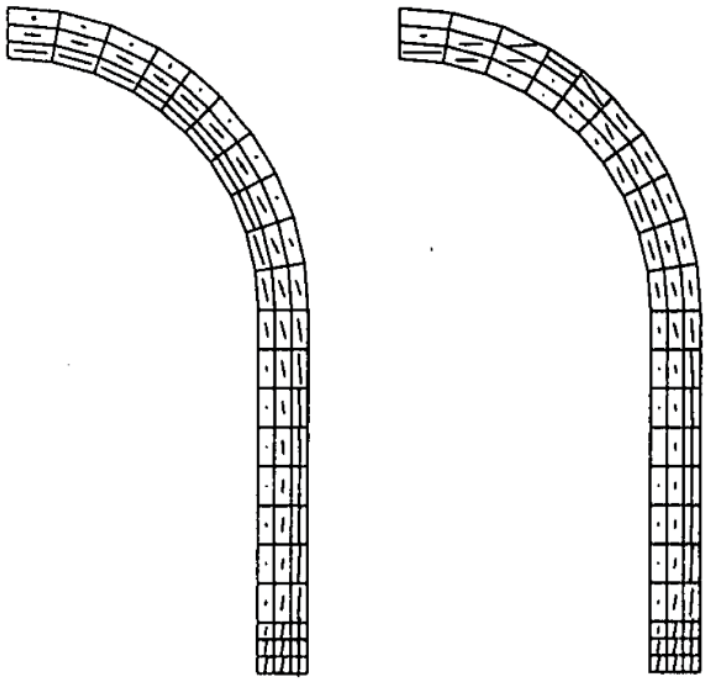


図 2.2.1-8　覆工の最大主応力分布表（単位：MPa）[18]



(a)背面空洞無（case-C）(b)背面空洞有（case-D）

図 2.2.1-9　覆工の主応力ベクトル表[18]

2)　課題

1)で整理したとおり、本技術検討項目に適用性があると考えられる力学モデルには大久保モデルと地山劣化モデルがある。大久保モデルを用いた既往検討[10]は、坑道を埋め戻した評価であり、数百年に及ぶ開放期間を想定しておらず、また、支保工の劣化現象等を考慮していないため、これらを考慮した「開放坑道の健全性（空間安定性）」を評価するための手法の体系化及び具体化が課題として挙げられる。また地山劣化モデルでは、地山の劣化の進行の仮定のため、内空変位速度の計測結果を用いるが、サイト選定段階で適用する際は、適切な入力値の設定方法を検討する必要があると考えられる。

いずれの力学モデルを用いた場合にも、本技術検討項目に適用する坑道の力学的安定性の評価基準の設定が課題となる。坑道設計時には主に数値解析による検討が行われ、岩盤とともに支保工のモデル化を行い、支保工の必要性の検討、また、必要となる場合には仕様（厚さ、強度）の検討が行われる。例えば、既往検討[10]では「NATM 設計施工指針」[20]に規定された評価基準を用いて坑道の力学的安定性評価が行われているが、これは設計実施時に適用される基準である。回収可能性維持期間は一般構造物の供用期間と比較して長い時間（最大 300 年程度）が想定されており、このような長期間の検討を対象として規定された坑道安定性の評価基準を調査し、適用性について検討する必要があることが課題として挙げられる。また、坑道の力学的安定性の評価に用いる指標として、設計時に用いる周辺岩盤のひずみ及び応力、支保部材の応力の他に、維持管理時に用いる内空変位速度について適用可能性があることから、検討が必要と考えられる。

支保工の劣化についてはコンクリートの溶脱等の化学的・熱的な現象を評価してモデルを設定する必要があり、熱環境及び地下水の水質や坑内への湧水状況に依存するため、これらを考慮し

て劣化による支保工の強度や剛性の低下を評価する必要がある。回収可能性維持期間を含めた長期間の支保工の劣化による力学的な特性の変化を考慮した解析的評価技術は確立されておらず、課題として挙げられる。

(5)　本事業での取り組みの整理

本事業での取り組みとして、(4)で挙げた課題に対して解析的評価技術の体系化及び具体化を実施中である。

平成 28 年度の取り組みとして、深成岩及び新第三紀堆積岩を対象とし、NUMO の処分坑道仕様を条件とし、開放した状態の坑道を対象として、吹付けコンクリートの溶脱による支保工の劣化を想定した坑道の力学的安定性に関する解析的評価手法を検討し、解析結果例（図 2.2.1-10）を提示した[8]。

平成 29 年度の取り組みとして、支保工の劣化及び坑道の力学的安定性の評価基準などに関して検討を進めた[7]。支保工の劣化に関する検討では、力学的安定性への寄与が高い吹付けコンクリートの溶脱速度の違いによる物性変化特性を変えた検討を実施した。支保工の劣化現象の評価手法の検討として、処分坑道の部材や周辺地質環境への化学的・熱的影響評価手法に関する調査を実施した。坑道の力学的安定性の評価基準について、一般の土木構造物で考えられているよりもより長期間に対応した評価基準の研究事例の調査を行い、回収可能性維持期間に対応した評価に適用するにはさらに検討や実験が必要であることがわかった。また、坑道安定性の評価に用いる指標として、図 2.2.1-11 に示すように解析結果から算出した内空変位速度の適用性について検討を実施し、適用可能性があることが考えられた。

本年度は、地球化学解析の結果から、平成 28 年度と平成 29 年度に仮定した吹付けコンクリートの変形特性の設定との比較検討を行う。

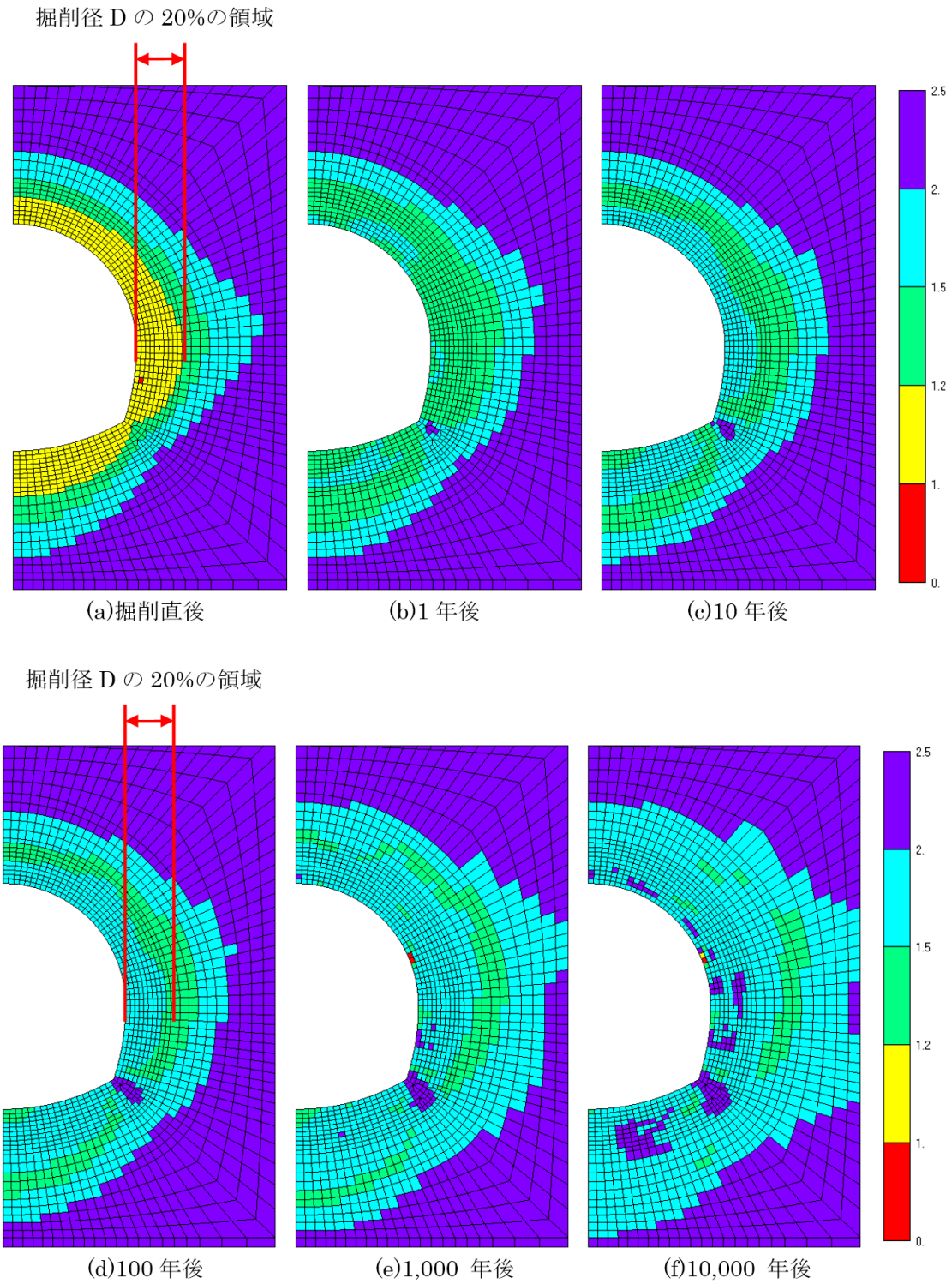


図 2.2.1-10　周辺岩盤の局所安全率の分布（ケース 7）[8]

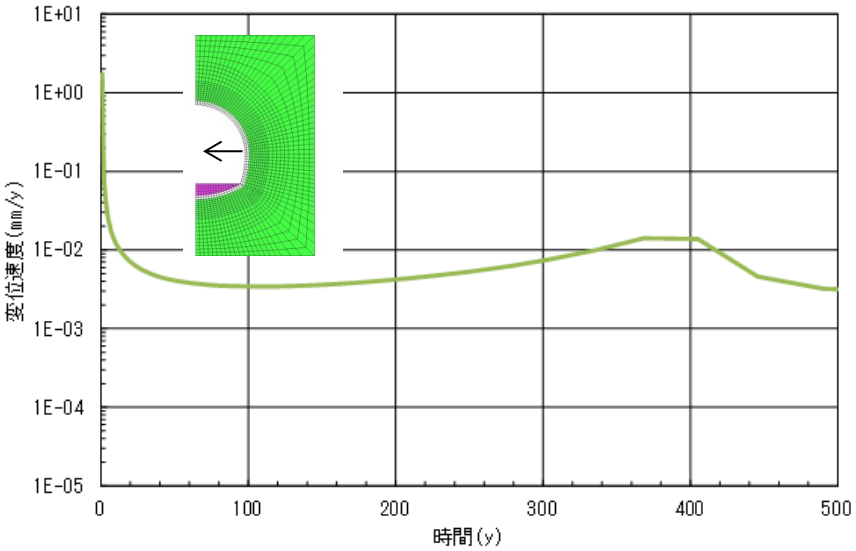


図 2.2.1-11　平成 28 年度検討ケース 7 における吹付けコンクリート壁面の変位速度[7]

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

(1)　安全性への影響の意味の整理（定量評価対象の解釈）

NUMO の「処分場の安全機能と技術要件（NUMO-TR-10-11）」[1]は、「事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係」のうち、一般労働安全の「作業環境の維持」に「換気経路の確保」として安全対策が示されており、その構成要素には地下施設が挙げられている（表 2.2.2-1）。また、地下施設の技術要件のうち、アクセス坑道、連絡坑道及び処分坑道（処分孔）の技術要件として「安全に建設・操業・閉鎖が実施できること」が示されている（表 2.2.2-2）。

R&R 検討会が提示した技術検討の視点では、「保守管理のために開放坑道内に人が出入りする」ことが前提であるため、回収可能性の維持を考慮した場合においても、上記の技術要件を考慮する必要がある。例えば、処分深度 1000m、地表温度 15℃、地温勾配 0.03℃/m とした場合、坑道周辺の岩盤温度は 45℃となることから、廃棄体の有無にかかわらず、一般労働安全を確保するためには換気などの対策は必要となる。廃棄体が定置されている処分坑道は他の坑道よりもさらに坑内気温が上昇することが想定されるため、熱影響はより大きくなると考えられる。また、開放状態の処分坑道では、熱伝導率が低く密度が小さい空気の対流により、坑内温度が変化することが予想される。ただし、廃棄体の発熱量は時間経過とともに減少していく。ガラス固化体の中間貯蔵期間後の発熱量経時変化の例[10]を示す（図 2.2.2-1）。

現時点での想定である、最長 300 年程度（RWMC 平成 27 年度～平成 28 年度検討[8]、[9]）の回収可能性維持期間中、作業環境を維持し、「安全に建設・操業・閉鎖が実施できること」を満たすためには、「開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響」について、廃棄体の発熱量の経時変化を踏まえた時間依存性を考慮可能な解析的評価技術を用いて、坑内気温を評価することが重要である。そして、その結果を、開放坑道内の作業空間の安全性を確保するための換気系統の検討等に反映させることが重要と考えられる。

なお、廃棄体の発熱は、周辺岩盤や支保工の変形・強度特性の化学的・熱的変化にも影響を与える可能性があり、力学的な坑道安定性評価に考慮する必要があると考えられる。

表 2.2.2-1　事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係[1]（表 2.2.1-1 再掲）

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

（＊地下施設でのみ考慮する安全対策）

表 2.2.2-2　地下施設の技術要件（NUMO，2004 に一部加筆）[1]（表 2.2.1-2 再掲）

坑道	技術要件
アクセス坑道 連絡坑道	・安全に建設・操業・閉鎖が実施できること ・空洞の力学的安定性が確保されること ・建設に必要な空間が確保できること ・建設関連の物流経路が確保できること ・地理，地形，地質等の設計上の前提となる条件を満たすこと ・操業に必要な空間が確保できること ・廃棄体を含む操業関連の物流経路が確保できること ・閉鎖に必要な空間が確保できること ・核種移行遅延性能に有意な影響を与えないように配慮がなされること
処分坑道 （処分孔）	・安全に建設・操業・閉鎖が実施できること ・空洞の力学的安定性が確保されること ・建設に必要な空間が確保できること ・建設関連の物流経路が確保できること ・地理，地形，地質等の設計上の前提となる条件を満たすこと ・操業に必要な空間が確保できること ・廃棄体を含む操業関連の物流経路が確保できること ・閉鎖後長期安全性を有すること ・核種移行遅延性能に有意な影響を与えないように配慮がなされること ・長期的に健全であること ・人工バリアが安定するように埋め戻されること

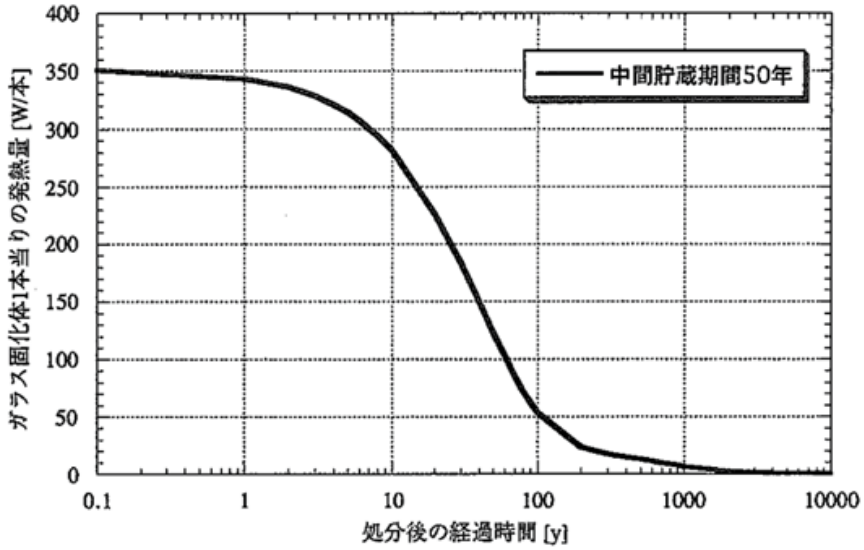


図 2.2.2-1　ガラス固化体の中間貯蔵期間後の発熱量経時の例[10]

(2)　安全性への影響を示す指標

(1)で述べたように、回収可能性の維持を考慮した場合においても、技術要件として「安全に建設・操業・閉鎖が実施できること」が考えられることから、本技術検討項目に対する安全性への影響を示す指標は、この技術要件に基づいて抽出できると考えられる。労働安全衛生規則[4] の第六百十一条には「事業者は、坑内における気温を三十七度以下としなければならない。ただし、高温による健康障害を防止するため必要な措置を講じて人命救助又は危害防止に関する作業をさせるときは、この限りでない。」とあることから、「開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響」を評価するための指標は坑内気温が相当すると考えられる。その他、労働安全衛生規則に準じて、廃棄体からのふく射熱等による熱影響がある場合（労働安全衛生規則における「事業者は、屋内作業場に多量の熱を放散する溶鉱炉等がある場合」）においても、これらが指標となる可能性がある。坑内気温等などの指標の適用は、建設・操業時も同様であり、回収維持段階でも法令を遵守するための対策をとる必要がある。

(3)　既存の解析技術の整理

本技術検討項目に対する安全性への影響を示す指標を時間依存で評価できる既存の解析技術は、伝熱の形態により整理される。伝熱工学（日本機械学会）[21]によると、伝熱の形態は伝導伝熱、対流熱伝達及びふく射伝熱の三つに整理され、伝導伝熱は物体内の温度勾配による熱移動、対流熱伝達は流体の移動による熱移動、ふく射伝熱は電磁波による熱移動と定義されている。これらの伝熱形態に対応する解析技術は、伝導伝熱（熱伝導）解析、対流熱伝達（熱流体）解析及びふく射伝熱解析と整理できる。

一般のトンネルでも温熱対策としての換気は必須であり、設備設計や施工計画は「ずい道等建設工事における換気技術指針」[22]に基づき行われている。

(4)　既存解析的評価技術の現状レベルの整理と課題の抽出

1)　現状レベルの整理

本技術検討項目への適用例として、伝導伝熱（熱伝導）解析がある。平成 26 年度の可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発報告書[23]では、深成岩（地温が高い地質環境条件）を対象とし、定置方式や状態オプションを考慮した、換気の無い状態での評価期間 1,000 年の伝導伝熱（熱伝導）解析による解析的評価手法と解析結果例が示されている（図 2.2.2-2、図 2.2.2-3）。ただし、この検討では対流熱伝達（熱流体）及びふく射伝熱は考慮されていない。

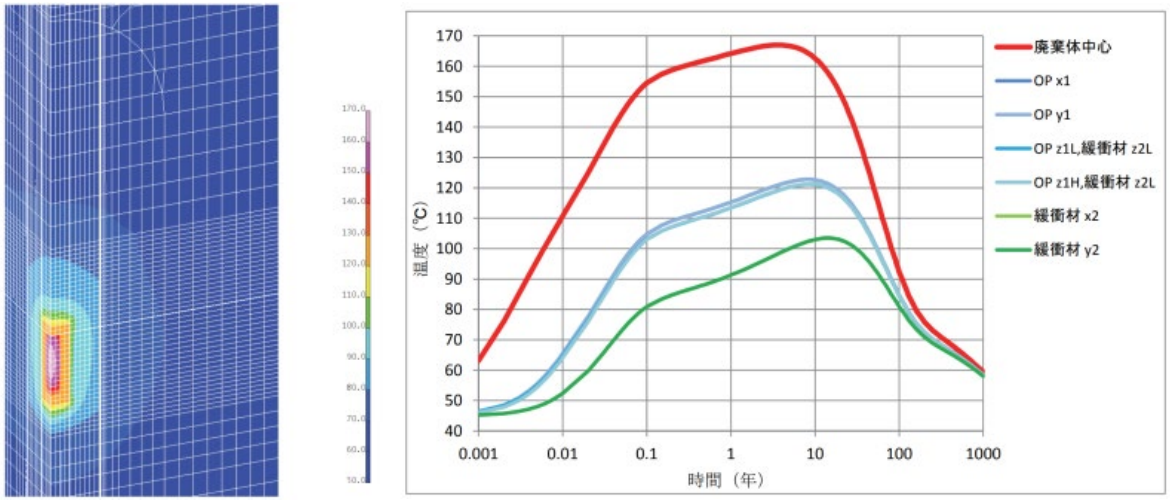


図 2.2.2-2　伝導伝熱（熱伝導）解析の例：処分坑道が埋め戻しされていない状態での温度分布及び評価点での温度経時変化　竪置きブロック方式[23]

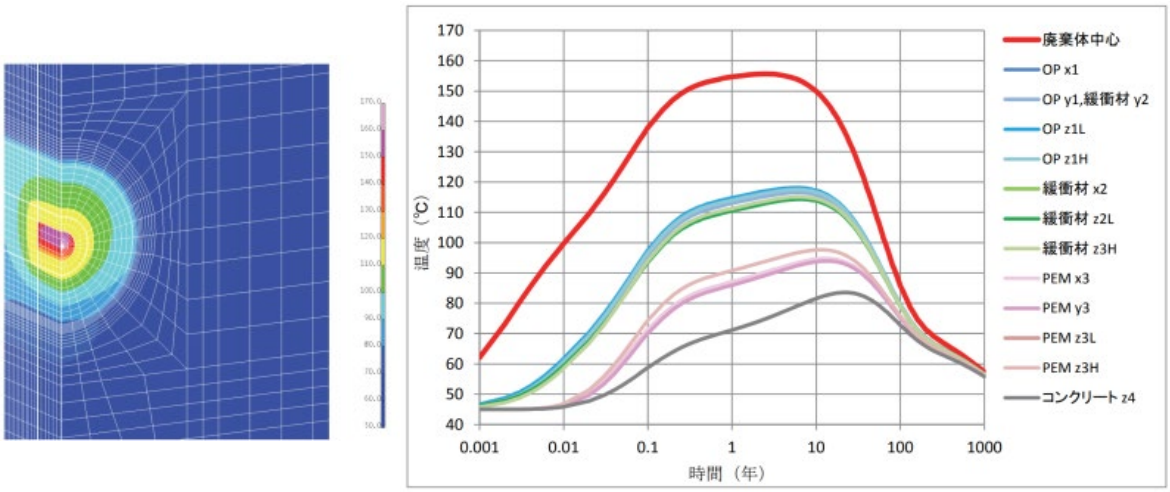


図 2.2.2-3　伝導伝熱（熱伝導）解析の例：処分坑道が埋め戻しされていない状態での温度分布及び評価点での温度経時変化　横置き PEM 方式[23]

また、(3)で述べたように坑道内における温熱を考慮した換気設計法は一般のトンネルの建設計画時にも用いられている。この設計法を応用して事業期間中の換気（冷房などの空調）を検討す

るため、処分場レイアウトを考慮した NUMO による設計検討例[24]（図 2.2.2-4、図 2.2.2-5）がある。

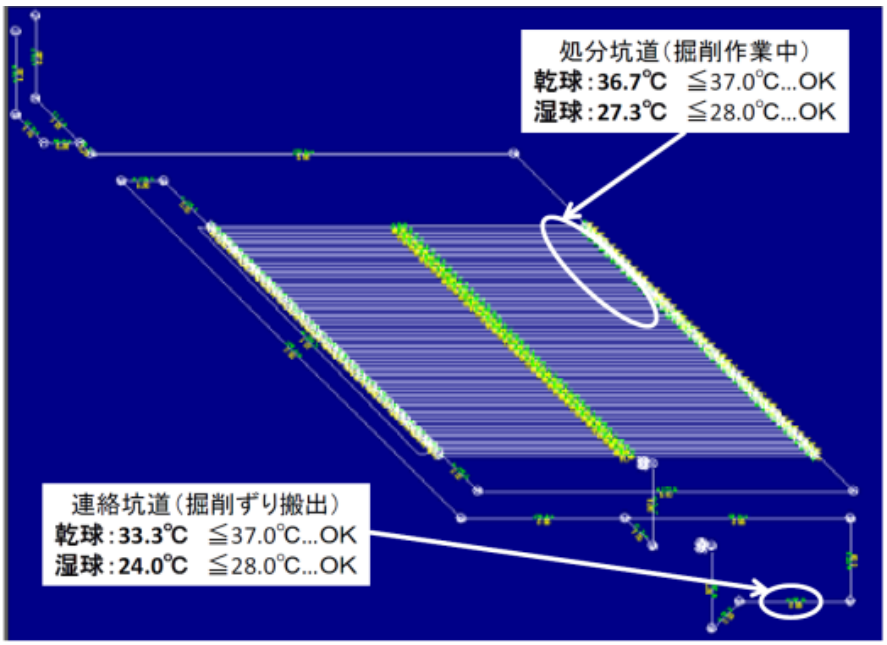


図 2.2.2-4　熱環境解析の結果[24]

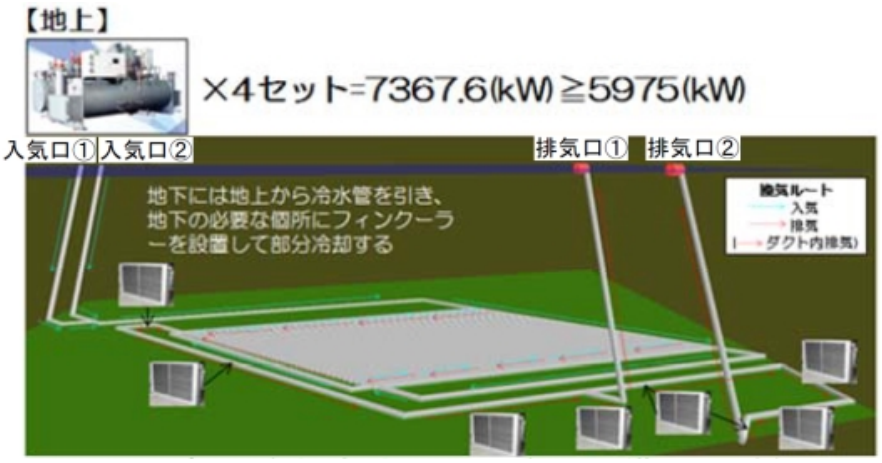


図 2.2.2-5　部分冷却方式による冷房設備の検討例[24]

2)　課題

1)で整理したとおり、本技術検討項目に適用性があると考えられる解析的評価技術には、伝導伝熱（熱伝導）解析、対流熱伝達（熱流体）解析及びふく射伝熱解析を用いた評価が挙げられる。しかし、対流熱伝達（熱流体）及びふく射伝熱は非線形性が強い解析を非定常で実施する必要があり、収束性や計算規模の面から実施は容易ではない。また、解析に必要な定数を実験等により求める必要がある。

労働安全衛生規則を遵守するために、安全対策としての換気は必須であるため、一般のトンネ

ルで用いられている設計法に基づく換気設備の計画や設計を今後も実施していく必要があると考えられる。処分場のレイアウトは複雑であるため、設計法を応用して熱環境を解析し、評価する必要があり、その取り組みは行われている[24]（図 2.2.2-4、図 2.2.2-5）。ただし、既往検討は建設時を対象としている。本技術検討項目は、廃棄体が定置された開放坑道の熱影響を対象としているため、換気検討の実施が課題として挙げられる。

(5) 本事業での取り組みの整理

既往の類似評価検討例があるため、本事業では本技術検討項目の取り組みは実施していない。

2.2.3　技術検討項目 iii　埋め戻した坑道の再利用時の健全性

(1)　安全性への影響の意味の整理（定量評価対象の解釈）

NUMO の「処分場の安全機能と技術要件（NUMO-TR-10-11）」[1]では、「事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係」のうち、一般労働安全の「作業環境の維持」に「空洞の力学的安定性の確保」として安全対策が示されており、その構成要素には地下施設が挙げられている（表 2.2.3-1）。また、地下施設の技術要件のうち、アクセス坑道、連絡坑道及び処分坑道（処分孔）の技術要件として「空洞の力学的安定性が確保されること」が示されている（表 2.2.3-2）。

R&R 検討会が提示した技術検討の視点では、「一度埋め戻した坑道の再掘削／再利用を前提とする」ことが示されている。上記の NUMO の技術要件では、埋め戻した坑道を再掘削／再利用することは想定されていないが、操業期間中である回収可能性維持期間においても建設時などと同様に「空洞の力学的安定性が確保されること」を考慮する必要がある。

現時点での想定である、最長 300 年程度（RWMC 平成 27 年度～平成 28 年度検討[8]、[9]）の回収可能性維持期間中、坑道では埋め戻し期間とその後の再掘削から回収作業完了までの期間において周辺岩盤の変形の進行と支保工の変形の進行が生じ、空洞の力学的安定性に影響が生じることが予想される。周辺岩盤の変形の進行は、坑道構築時の応力再配分、周辺岩盤のクリープ変形、化学的・熱的影響による周辺岩盤の変形・強度特性の変化、支保工の変形の進行、再掘削時の開放力、埋め戻しから再掘削までの飽和に伴う埋め戻し材の変形特性及び膨潤圧の変化などによるものと考えられる[10]。

一方で、支保工の変形の進行は、周辺岩盤の変形の進行や化学的・熱的な劣化による支保工の変形・強度特性の変化の進行によるものと考えられる。支保工にはコンクリートや鋼材等などが用いられる。コンクリートの劣化現象は、地下水との接触によるセメント水和物の成分の溶脱、鋼材の腐蝕膨張によるひび割れ、アルカリ骨材反応によるひび割れ、CO_2 の浸透による中性化などがある。鋼材の劣化現象は地下水との接触による腐食などがある。このような劣化が時間経過とともに進行し、支保工の強度や剛性が低下することにより、変形が進行する。周辺岩盤と支保工の変形は相互作用により進行し、空洞の力学的安定性に影響を及ぼす恐れがある。

回収可能性維持期間中の回収時には、技術要件である作業環境の維持のための「空洞の力学的安定性が確保されること」に対して、「埋め戻した坑道の再利用時の健全性」への影響を評価する必要があり、この影響は回収可能性維持期間である埋め戻した状態の期間や再掘削時から回収作業完了までの期間が長くなるほど坑道の周辺岩盤や支保工の変形が進行することにより大きくなることが考えられる。したがって、数百年に及ぶ時間依存性を考慮可能な解析的評価技術による、力学的安定性の変化の定量的評価が重要であると考えられる。また、埋め戻した坑道の再利用時の健全性への影響の把握には、回収可能性維持期間中の周辺岩盤や支保工の変形・強度特性の化学的・熱的な変化や埋め戻し材の膨潤圧の変化を併せて評価する必要があり、これらの変化は地下水流動場の変化などに依存すると考えられる。時間依存性を考慮した解析的評価技術により、埋め戻し期間及びその後の再利用時の坑道の支保工や覆工等の健全性を定量的に把握し、坑道の支保工の設計や維持管理技術、再利用時の補修・再構築技術の検討に反映させることが重要と考えられる。

表 2.2.3-1　事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係[1]（表 2.2.1-1 再掲）

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

（＊地下施設でのみ考慮する安全対策）

表 2.2.3-2　地下施設の技術要件（NUMO，2004 に一部加筆）[1]（表 2.2.1-2 再掲）

坑道	技術要件
アクセス坑道 連絡坑道	・安全に建設・操業・閉鎖が実施できること ・空洞の力学的安定性が確保されること ・建設に必要な空間が確保できること ・建設関連の物流経路が確保できること ・地理，地形，地質等の設計上の前提となる条件を満たすこと ・操業に必要な空間が確保できること ・廃棄体を含む操業関連の物流経路が確保できること ・閉鎖に必要な空間が確保できること ・核種移行遅延性能に有意な影響を与えないように配慮がなされること
処分坑道 （処分孔）	・安全に建設・操業・閉鎖が実施できること ・空洞の力学的安定性が確保されること ・建設に必要な空間が確保できること ・建設関連の物流経路が確保できること ・地理，地形，地質等の設計上の前提となる条件を満たすこと ・操業に必要な空間が確保できること ・廃棄体を含む操業関連の物流経路が確保できること ・閉鎖後長期安全性を有すること ・核種移行遅延性能に有意な影響を与えないように配慮がなされること ・長期的に健全であること ・人工バリアが安定するように埋め戻されること

(2)　安全性への影響を示す指標

(1)で述べたように、回収可能性の維持を考慮した場合においても、技術要件として「空洞の力学的安定性が確保されること」が考えられることから、本技術検討項目に対する安全性への影響を示す指標は、この技術要件に基づいて抽出できると考えられる。設計時において空洞の力学的安定性評価に用いる指標は、周辺岩盤のひずみ及び応力、支保部材の応力であり[10]、これらの指標は回収可能性維持期間にも適用できると考えられる。なお、供用中の道路トンネルや鉄道トンネルでは、維持管理時にコンクリートのひび割れ幅や長さ、内空変位速度等の定量的な数値をトンネルの健全度の評価指標（判定の目安）として用いている[11]、[12]。コンクリートのひび割れに関しては、鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）[12]では運用上の留意点として、コンクリートによる覆工を対象として判定区分や目安を示している旨が述べられており、既往の検討[7]でも維持管理の対象をコンクリートによる覆工としている。よって、処分坑道のように吹付けコンクリートを最終仕上げ面としたトンネルでは、判定の目安としてひび割れの値をそのまま適用できず[7]、また埋め戻した坑道での適用も難しいと考えられる。また、(3)で述べるようにコンクリートのひび割れは数値解析で予測することが非常に難しいことから、サイト選定段階の解析的評価で坑道安定性への影響を示す指標とすることは極めて困難であると考えられる。一方、内空変位速度に関しては、周辺岩盤に起因したものであるため、坑道の最終仕上げ方法に係わらず坑道の変状の判定の目安として適用できる可能性があると考えられる。ただし内空変位速度は、埋め戻した状態の坑道よりも再掘削後以降の再開放した坑道を念頭においた指標になると考えられる。

従って、「埋め戻した坑道の再利用時の健全性」への影響を示す指標は、坑道設計時と同様に周辺岩盤のひずみ及び応力、支保部材の応力が相当すると考えられる。なお、内空変位速度に関しては指標としての適用性の検討が必要である。

(3)　既存の解析技術の整理

(2)では、「埋め戻した坑道の再利用時の健全性」への影響を示す指標として、周辺岩盤のひずみ及び応力、支保部材の応力を挙げた。これらの指標を時間依存で解析できる技術は、表 2.2.3-3[13]に示すように理論解析と数値解析に大別される。このうち、坑道等を任意形状で考慮可能な解析手法は数値解析であり、粘弾性解析及び粘弾塑性解析があり、表 2.2.3-4 [14]に示すように構成モデル（力学モデル）として大久保モデルや地山劣化モデルを導入することが考えられている。坑道に設定する支保工について、NUMO の「地層処分事業の安全確保（2010 年度版）（NUMO-TR-11-01）」[2]では、吹付コンクリート、覆工コンクリート、コンクリートセグメント、ロックボルト、鋼製支保工などがあり、坑道の力学的安定性を確保するためにそれぞれを単独あるいは組み合わせて用いる、と示されており、本技術検討項目においても設計時に設定された支保工が評価の対象となる。なお、坑道設計時には主に数値解析による検討が行われ、岩盤とともに支保工のモデル化を行い、支保工の必要性の検討、また、必要となる場合には仕様（厚さ、強度）の検討が行われる。

表 2.2.3-3　トンネルの時間依存性を考慮した解析手法の整理
（土木学会、2003）[13]（表 2.2.1-3 再掲）

解析手法	構成モデル		トンネル形状	初期地圧	クリープモデル			
					瞬時変形	1次	2次	3次
理論解析	粘弾性	Kelvin	円形，だ円形が主	等方,二軸	-	○		
		Maxwell			弾性		○	
		Zener(Voigt3要素)				○		
		Burgers				○	○	
	粘弾塑性	べき乗則	円形	等方			○	
	地山劣化	Mohr-Coulomb	円形	等方,二軸	弾塑性	モデル化による		
数値解析	粘弾性	同上	任意形状	任意	理論解析と同じ			
	粘弾塑性	Mohr-Coulomb			弾塑性	○	○	
		べき乗則				○	○	
		大久保				○	○	○
		足立-岡				○	○	○
	地山劣化	Mohr-Coulomb				モデル化による		

表 2.2.3-4　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）[14]（表 2.2.1-4 再掲）

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積がある）
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積がある）
山冨モデル	スプリングとダッシュポット、スライダーの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、ダイレイタンシー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、ダイレイタンシー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）

なお、(2)において供用中のトンネルの維持管理に用いられる判定の目安としてコンクリートのひび割れの幅や長さを挙げたが、ひび割れの要因には溶脱、鋼材の腐蝕膨張、アルカリ骨材反応などがあり、ひび割れの発生や進展現象を数値解析で予測することは難しい。亀裂進展問題に対する数値解析手法の研究例[15]、[16]や、コンクリートのひび割れの発生・進展を解析的に予測する方法の研究例[17]もあるが、これらの解析技術はいずれも研究段階である。

(4)　既存解析的評価技術の現状レベルの整理と課題の抽出

1)　現状レベルの整理

本技術検討項目に適用性があると考えられる力学モデルは大久保モデルと地山劣化モデルである。大久保モデルは第２次取りまとめへ適用例[10]などがある。一方で、地山劣化モデルは一般の供用中のトンネルへの適用例[13] はあるが、埋め戻された坑道への適用例は見当たらない。以下、ここでは大久保モデルを用いた検討例を整理する。

大久保モデルを用いた第２次取りまとめの検討[10]では埋め戻した坑道を対象として、岩盤のクリープを考慮した評価期間 10,000 年の解析を実施している。表 2.2.3-5 の①岩盤クリープ解析が相当する。この検討では、岩盤、緩衝材及びオーバーパックがモデル化されており、埋め戻し材や支保工はモデル化されていない。よって、埋め戻し材の膨潤圧による影響や支保工の劣化による剛性低下等は考慮されていない。評価は岩盤のクリープ変形量と応力状態の経時変化等の確認により行われている。

第２次取りまとめの検討では、別途、緩衝材の長期力学安定性の検討を目的として、岩盤のクリープ変形挙動やオーバーパックの腐食膨張変形及び緩衝材の膨潤圧を考慮した解析が実施されている。表 2.2.3-5 の②オーバーパック腐食膨張解析が相当する。この検討では、岩盤の長期挙動として大久保モデルを用いたクリープ変形の解析結果を条件として与えており、岩盤自体はモデル化されていない。

このように大久保モデル及び地山劣化モデルなどの岩盤の時間性挙動評価のための力学モデルを用いた解析の適用例はあるが、「埋め戻した坑道の再利用時の健全性」を対象とした解析的評価の実施例は本事業以外に見当たらない。

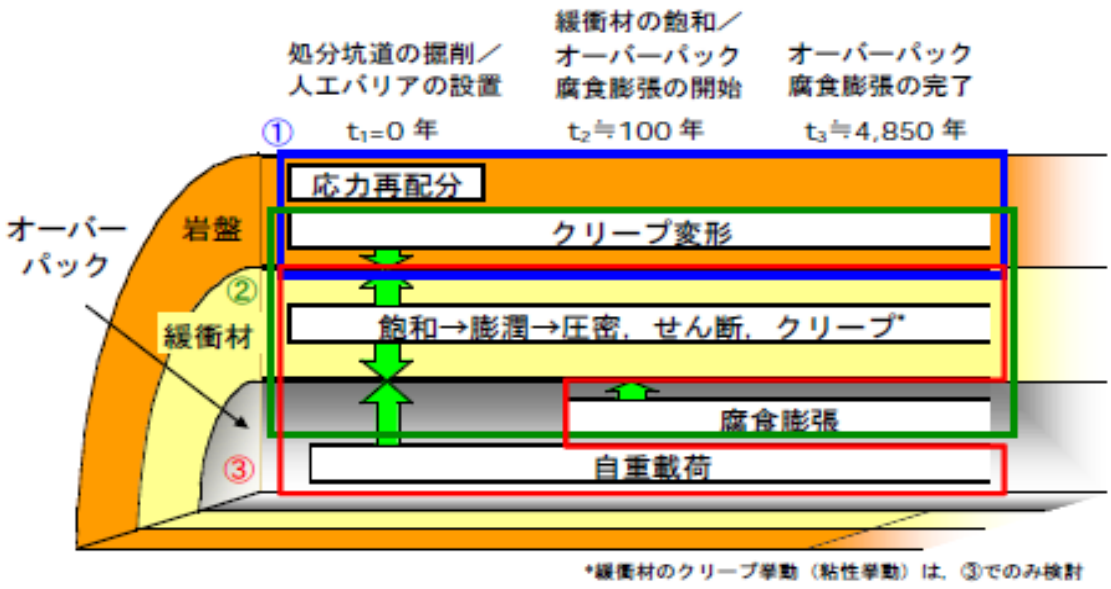


図 2.2.3-1　解析検討対象とした現象の時系列[10]（図 2.2.1-1 再掲）

表 2.2.3-5　解析条件一覧[10]

解析現象		①岩盤クリープ解析	②オーバーパック腐食膨張解析		③オーバーパック沈下解析
評価指標		岩盤のクリープ変形量，応力状態の経時変化等	緩衝材の応力状態，過剰間隙水圧の経時変化等		オーバーパック沈下量，緩衝材の応力状態，過剰間隙水圧の経時変化等
対象岩種		硬岩系岩盤 軟岩系岩盤	硬岩系岩盤想定	軟岩系岩盤想定	—
モデル化および構成モデル	岩盤	○：コンプライアンス可変型モデル	—		—
	緩衝材	○：弾性体	○：弾塑性体 (修正 Cam-Clay モデル)		○：弾粘塑性体 (関口-太田モデル)
	オーバーパック	×	○：弾性体 (温度ひずみ考慮)		○：弾性体（自重考慮）
解析コード		上記モデルを組み込んだ専用 FEM コード	ABAQUS		DACSAR
解析次元		2 次元平面ひずみ	軸対称	2 次元平面ひずみ	横置き方式：2 次元 竪置き方式：軸対称
評価期間		10,000 年			
備考			岩盤クリープ変形を①の解析結果より設定 自重は考慮しない		岩盤クリープ変形，オーバーパック腐食膨張変形を考慮しない

2)　課題

1)で整理したとおり、本技術検討項目に適用性があると考えられる力学モデルには大久保モデルと地山劣化モデルがある。大久保モデルを用いた既往検討[10]は、坑道を埋め戻した評価であるが、埋め戻し材の膨潤圧や支保工の劣化現象等を考慮しておらず、また、埋め戻し期間後の再掘削や回収作業期間などの再利用時を想定していないため、これらを考慮した「埋め戻した坑道の再利用時の健全性」を評価するための手法の体系化及び具体化が課題として挙げられる。また地山劣化モデルでは、地山の劣化の進行の仮定のため、内空変位速度の計測結果を用いるが、調査・計画段階で適用する際は、適切な入力値の設定方法を検討する必要があると考えられる。

いずれの力学モデルを用いた場合にも、本技術検討項目に適用する坑道の力学的安定性の評価基準の設定が課題となる。坑道設計時には主に数値解析による検討が行われ、岩盤とともに支保工のモデル化を行い、支保工の必要性の検討、また、必要となる場合には仕様（厚さ、強度）の検討が行われる。例えば、既往検討[10]では「NATM 設計施工指針」[20]に規定された評価基準を用いて坑道の力学的安定性評価が行われているが、これは設計実施時に適用される基準である。回収可能性維持期間は一般構造物の供用期間と比較して長い時間（最大 300 年程度）が想定されており、このような長期間の検討を対象として規定された坑道安定性の評価基準を調査し、適用性について検討することが課題として挙げられる。また、坑道の力学的安定性の評価に用いる指標として、設計時に用いる周辺岩盤のひずみ及び応力、支保部材の応力の他に、維持管理時に用いる内空変位速度について適用可能性があることから、検討が必要と考えられる。

埋め戻し材の膨潤による影響については、飽和の進行に伴う膨潤圧の発生や剛性の低下などの力学的な特性の変化を考慮した解析的評価技術の確立が課題として挙げられる。

また、支保工の劣化についてはコンクリートの溶脱等の化学的・熱的な現象を評価してモデルを設定する必要があり、熱環境及び地下水の水質や坑内への湧水状況に依存するため、これらを

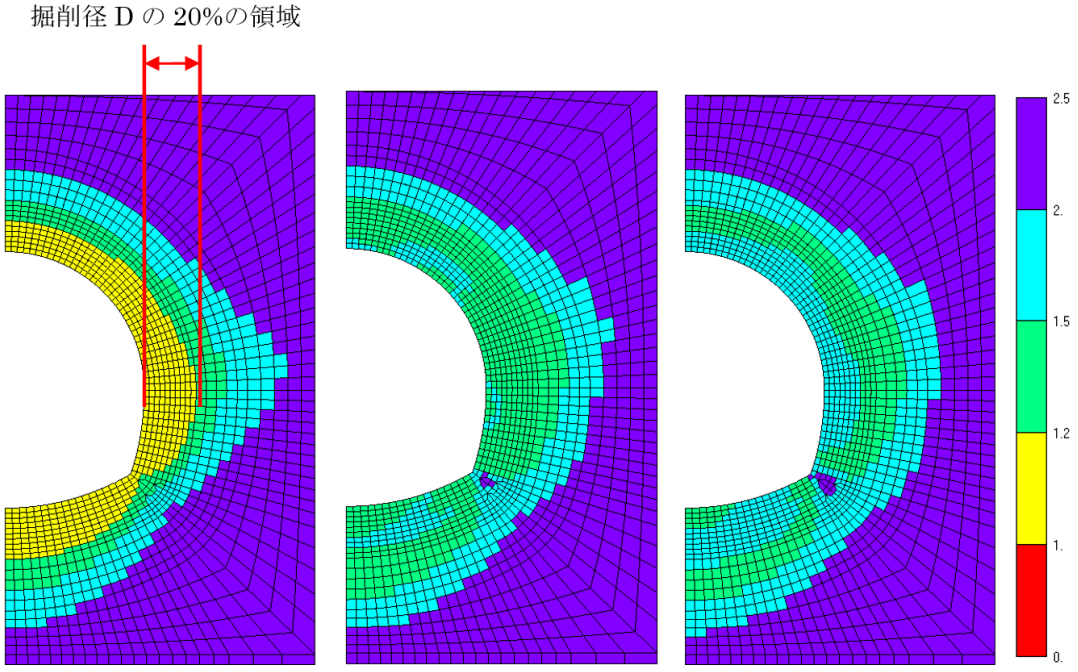
考慮して劣化による支保工の強度や剛性の低下を評価する必要がある。回収可能性維持期間を含めた長期間の支保工の劣化による力学的な特性の変化を考慮した解析的評価技術は確立されておらず、課題として挙げられる。

(5)　本事業での取り組みの整理

本事業での取り組みとして、(4)で挙げた課題に対して解析的評価技術の体系化及び具体化を実施中である。

平成 28 年度の取り組みとして、深成岩及び新第三紀堆積岩を対象に、NUMO の処分坑道仕様を条件として、埋め戻した状態の坑道を対象とし、吹付けコンクリートの溶脱による支保工の劣化を想定した坑道の力学的安定性に関する解析的評価手法を検討し、解析結果例（図 2.2.3-2）を提示した[8]。また、坑道安定性への影響低減技術適用時の効果の評価例として、支保工の剛性を高めた検討や吹付コンクリートの溶脱を抑制した場合の検討例を提示した。

平成 29 年度の取り組みとして、埋め戻し材の膨潤や支保工の劣化による影響、及び坑道の力学的安定性の評価基準などに関して検討を進めた[7]。埋め戻し材の膨潤に関する検討では、飽和の進行に伴う膨潤圧の発生及び剛性の低下を考慮した検討を実施した。また、埋め戻し材が存在することによる支持効果に関する検討も併せて実施した。支保工の劣化に関する検討では、力学的安定性への寄与が高い吹付けコンクリートの溶脱速度の違いによる物性変化特性を変えた検討を実施した。支保工の劣化現象の評価手法の検討として、処分坑道の部材や周辺地質環境への化学的・熱的影響評価手法に関する調査を実施した。坑道の力学的安定性の評価基準について、一般の土木構造物で考えられているよりもより長期間に対応した評価基準の研究事例の調査を行い、回収可能性維持期間に対応した評価に適用するにはさらに検討や実験が必要であることを整理した。



(a)掘削直後　(b)1 年後　(c)10 年後

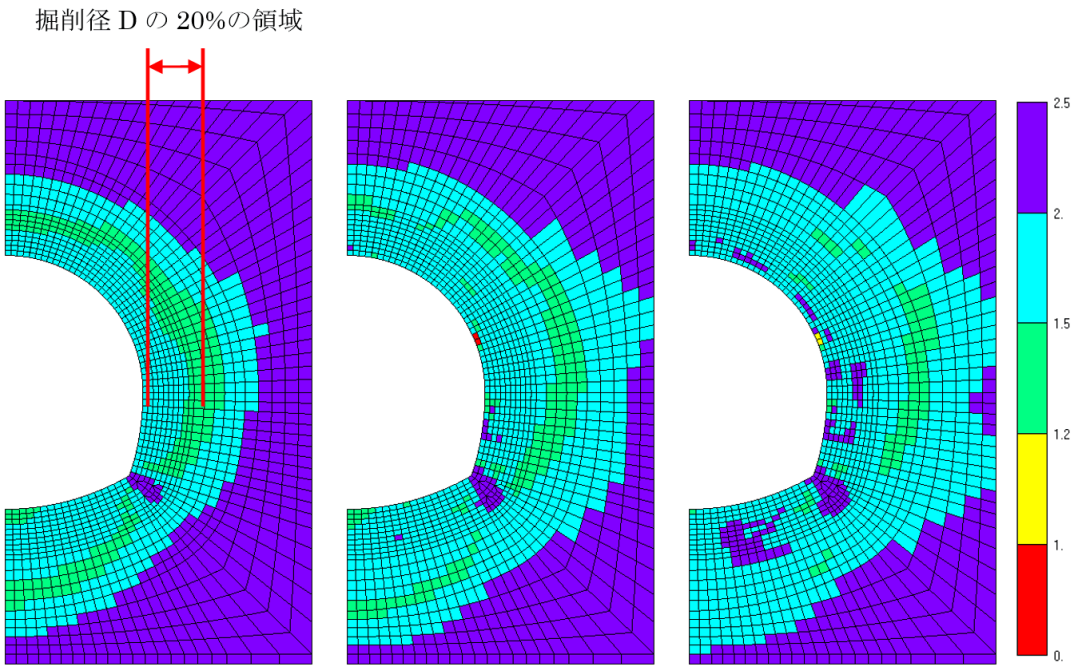


図 2.2.3-2　周辺岩盤の局所安全率の分布（ケース８）[8]

2.2.4　技術検討項目 iv　再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響

(1)　安全性への影響の意味の整理（定量評価対象の解釈）

NUMO の「処分場の安全機能と技術要件（NUMO-TR-10-11）」[1]では、「事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係」のうち、一般労働安全の「作業環境の維持」に「換気経路の確保」として安全対策が示されており、その構成要素には地下施設が挙げられている（表 2.2.4-1）。また、地下施設の技術要件のうち、アクセス坑道、連絡坑道及び処分坑道（処分孔）の技術要件として「安全に建設・操業・閉鎖が実施できること」が示されている（表 2.2.4-2）。

R&R 検討会が提示した技術検討の視点では、「一度埋め戻した坑道の再掘削／再利用を前提とする」ことが示されている。NUMO の技術要件では、埋め戻した坑道を再掘削／再利用することは想定されていないが、回収可能性の維持を考慮した場合においても、建設時などと同様に上述の技術要件を考慮する必要がある。例として、処分深度 1000m、地表温度 15℃、地温勾配 0.03℃/mとした場合、坑道周辺の岩盤温度は 45℃となることから、廃棄体の有無にかかわらず、一般労働安全を確保するためには換気などの対策は必要となる。廃棄体が定置されている処分坑道及びその周辺の岩盤は他の坑道よりもさらに坑内気温が上昇することが想定されるため、熱影響はより大きくなると考えられる。ただし、廃棄体の発熱量は時間経過とともに減少していく。ガラス固化体の中間貯蔵期間後の発熱量経時変化の例[10]を示す（図 2.2.4-1）。

現時点での想定である、最長 300 年程度（RWMC 平成 27 年度～平成 28 年度検討[8]、[9]）の回収可能性維持期間中、回収を実施する場合の作業環境を維持し、「安全に建設・操業・閉鎖が実施できること」を満たすためには、「再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響」について、廃棄体の発熱量の経時変化を踏まえた時間依存性を考慮可能な解析的評価技術を用いて坑内気温を評価することが重要である。そして、その結果を、再掘削／再利用時の作業空間の安全性を確保するための換気系統の検討等に反映させることが重要と考えられる。

なお、廃棄体の発熱は、周辺岩盤や支保工の変形・強度特性の化学的・熱的変化にも影響を与える可能性があり、力学的な坑道安定性評価に考慮する必要があると考えられる。

表 2.2.4-1　事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係[1]（表 2.2.1-1 再掲）

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

（＊地下施設でのみ考慮する安全対策）

表 2.2.4-2　地下施設の技術要件（NUMO，2004 に一部加筆）[1]（表 2.2.1-2 再掲）

坑道	技術要件
アクセス坑道 連絡坑道	・安全に建設・操業・閉鎖が実施できること ・空洞の力学的安定性が確保されること ・建設に必要な空間が確保できること ・建設関連の物流経路が確保できること ・地理，地形，地質等の設計上の前提となる条件を満たすこと ・操業に必要な空間が確保できること ・廃棄体を含む操業関連の物流経路が確保できること ・閉鎖に必要な空間が確保できること ・核種移行遅延性能に有意な影響を与えないように配慮がなされること
処分坑道 （処分孔）	・安全に建設・操業・閉鎖が実施できること ・空洞の力学的安定性が確保されること ・建設に必要な空間が確保できること ・建設関連の物流経路が確保できること ・地理，地形，地質等の設計上の前提となる条件を満たすこと ・操業に必要な空間が確保できること ・廃棄体を含む操業関連の物流経路が確保できること ・閉鎖後長期安全性を有すること ・核種移行遅延性能に有意な影響を与えないように配慮がなされること ・長期的に健全であること ・人工バリアが安定するように埋め戻されること

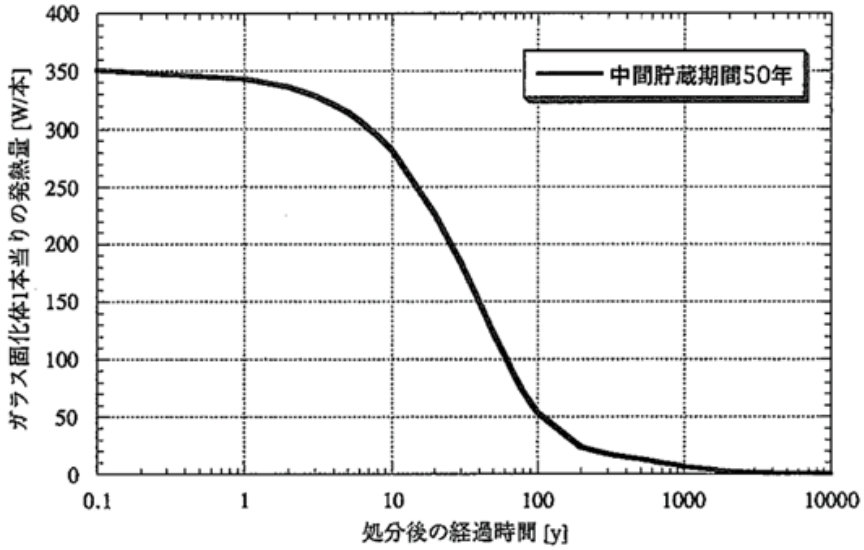


図 2.2.4-1　ガラス固化体の中間貯蔵期間後の発熱量経時の例[10]（図 2.2.2-1 再掲）

(2)　安全性への影響を示す指標

(1)で述べたように、回収可能性の維持を考慮した場合においても、技術要件として「安全に建設・操業・閉鎖が実施できること」が考えられることから、本技術検討項目に対する安全性への影響を示す指標は、この技術要件に基づいて抽出できると考えられる。労働安全衛生規則[4]の第六百十一条には、「事業者は、坑内における気温を三十七度以下としなければならない。ただし、高温による健康障害を防止するため必要な措置を講じて人命救助又は危害防止に関する作業をさせるときは、この限りでない。」とあり、「再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響」を評価する指標は坑内気温が相当すると考えられる。その他、労働安全衛生規則に準じて、廃棄体からのふく射熱等による熱影響がある場合（労働安全衛生規則における「事業者は、屋内作業場に多量の熱を放散する溶鉱炉等がある場合」）においても、これらが指標となる可能性がある。坑内気温等などの指標の適用は、建設・操業時も同様であり、回収段階でも法令を遵守するための対策をとる必要がある。

(3)　既存の解析技術の整理

本技術検討項目に対する安全性への影響を示す指標を時間依存で評価できる既存の解析技術は、伝熱の形態により整理される。文献[21]によると、伝熱の形態は伝導伝熱、対流熱伝達及びふく射伝熱の三つに整理され、伝導伝熱は物体内の温度勾配による熱移動、対流熱伝達は流体の移動による熱移動、ふく射伝熱は電磁波による熱移動と定義されている。これらの伝熱形態に対応する解析技術は、伝導伝熱（熱伝導）解析、対流熱伝達（熱流体）解析及びふく射伝熱解析と整理できる。

一般のトンネルでも温熱対策としての換気は必須であり、設備設計や施工計画は「ずい道等建設工事における換気技術指針」[22]に基づき行われている。

(4)　既存解析的評価技術の現状レベルの整理と課題の抽出

1)　現状レベルの整理

伝導伝熱（熱伝導）解析の適用例として、平成 26 年度の可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発報告書[23]では、深成岩（地温が高い地質環境条件）を対象とし、定置方式や状態オプションを考慮した、換気の無い状態での評価期間 1,000 年の伝導伝熱（熱伝導）解析による解析的評価手法と解析結果例が示されている（図 2.2.2-2、図 2.2.2-3）。ただし、この検討では対流熱伝達（熱流体）及びふく射伝熱は考慮されていない。

また、(3)で述べたように坑道内における温熱を考慮した換気設計法は一般のトンネルの建設計画時にも用いられている。この設計法を応用して事業期間中の換気（冷房などの空調）を検討するため、処分場レイアウトを考慮した NUMO による設計検討例[24]がある（図 2.2.2-4、図 2.2.2-5）。

2)　課題

1)で整理したとおり、本技術検討項目に適用性があると考えられる解析的評価技術には、伝導伝熱（熱伝導）解析、対流熱伝達（熱流体）解析及びふく射伝熱解析を用いた評価が挙げられる。しかし、対流熱伝達（熱流体）及びふく射伝熱は非線形性が強い解析を非定常で実施する必要があり、収束性や計算規模の面から実施は容易ではない。また、解析に必要な定数を実験等により求める必要がある。

建設時と同様に坑道の再利用時においても労働安全衛生規則を遵守するために、安全対策としての換気は必須であるため、一般のトンネルで用いられている設計法に基づく換気設備の計画や設計を実施していく必要があると考えられる。処分場のレイアウトは複雑であるため、設計法を応用して熱環境を解析し、評価する必要があり、その取り組みは行われている[24]。既往検討は建設時を対象としており、そこで用いられた解析的評価技術は埋め戻した坑道を再掘削する時にも適用可能と考えられる。本技術検討項目の評価のためには、廃棄体が定置された状態の坑道に対する再利用時の熱影響と換気検討の実施が課題として挙げられる。

(5)　本事業での取り組みの整理

既往の類似評価検討例があるため、本事業では本技術検討項目の取り組みは実施していない。

2.2.5　技術検討項目ｖ　回収時の廃棄体容器の健全性

(1)　安全性への影響の意味の整理（定量評価対象の解釈）

NUMO の「処分場の安全機能と技術要件（NUMO-TR-10-11）」[1]「事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係」のうち、放射線安全の「操業時閉じ込め／廃棄体から放射性物質の漏洩の防止」に「搬送時の落下・転倒・衝突時の廃棄体への衝撃の緩和」として安全対策が示されており（表 2.2.5-1）、その構成要素にはオーバーパックなどが挙げられている。ここでは安全対策としての記載のみであり、技術要件については示されていないが、NUMO の「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）」[3]には設計要件として、「耐食性を有すること（廃棄体埋設後、所定の期間、腐食によって閉じ込め性が損なわれないこと）」や「耐圧性を有すること（埋設後作用する機械的荷重に対して構造健全性を維持し、閉じ込め性を損なわないこと）」がある）。また、閉鎖後長期の「多重バリアシステムの構成要素の技術要件」にオーバーパックの技術要件（基本的なバリア性能の確保）として構造健全性（埋設後作用する機械的荷重に対して構造健全性を維持すること）が示されている[3]（表 2.2.5-2）。

R&R 検討会が提示した技術検討の視点では、「回収装置による把持・取り出しの際には、廃棄体容器に一定の機械強度が要求されること」が示されている。NUMO の技術要件は回収を想定したものではないが、回収可能性の維持期間が長くなるほど、処分坑道内の空気（酸素）、地下水、熱の影響による廃棄体容器の腐食が進行し、回収時の廃棄体容器の健全性への影響が大きくなることから、回収可能性の維持を考慮した場合においても、廃棄体容器の「機械的荷重に対して構造健全性を維持し、閉じ込め性を損なわないこと」を考慮する必要がある。

現時点での想定である、最長 300 年程度（RWMC 平成 27 年度～平成 28 年度検討[8]、[9]）の回収可能性維持期間中に、回収を実施する場合の「回収時の廃棄体容器の健全性」を満たすためには、数百年に及ぶ時間依存性を考慮可能な解析的評価技術により、坑道の埋め戻し状態を考慮した廃棄体容器の腐食量などを定量的に把握し、劣化状態を評価することが必要であると考えられる。廃棄体容器の材料には炭素鋼を用いることが検討されている。炭素鋼の腐食は水や大気が存在する環境により生じ、pH、溶存酸素（DO）、酸化還元電位（Eh）、温度、共存イオン種、生物活性などさまざまな因子が作用する[23]。これらの因子を考慮し、腐食の定量化を行うことにより、回収技術の一つである廃棄体回収・搬出技術[8]、[9]の検討に反映させていくことが重要であると考えられる。

なお、PEM 容器は廃棄体及び緩衝材を一体化させることによる、品質管理・品質確保の容易性向上や物流の効率性向上を目的とした構成要素であり、操業時の PEM に技術要件は設定されていない。廃棄体容器回収時に PEM 容器（鋼殻）の構造健全性が確保されている場合には、PEM 容器ごと搬出することが可能であるため、定置時と同様に回収作業の効率化が期待できる。PEM 容器に使用する材料は廃棄体容器と同様に炭素鋼が検討されている。

表 2.2.5-1　事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係[1]（表 2.2.1-1 再掲）

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

（＊地下施設でのみ考慮する安全対策）

表 2.2.5-2　オーバーパックの設計要件[3]

（核燃料サイクル開発機構，1999a を一部修正）

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

(2)　安全性への影響を示す指標

(1)で述べたように、回収可能性の維持を考慮した場合においても、技術要件として廃棄体容器の「機械的荷重に対して構造健全性を維持すること」が考えられることから、本技術検討項目に対する安全性への影響を示す指標は、この技術要件に基づいて抽出できると考えられる。従って、「回収時の廃棄体容器の健全性」への影響を評価する指標は、廃棄体容器設計時と同様に廃棄体容器（オーバーパック）の腐食深さが相当すると考えられる（表 2.2.5-3）。

表 2.2.5-3　オーバーパックの技術要件（基本的なバリア性能の確保）[1]

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）

(3)　既存の解析技術の整理

(2)では、「回収時の廃棄体容器の健全性」への影響を示す指標として、廃棄体容器（オーバーパック）とその溶接部の材料、形状・厚さを挙げた。既往検討では、回収可能性維持期間を考慮した場合のオーバーパックや PEM 容器の変状の影響として、腐食の定量化に関する程度の検討が行われ、解析技術として腐食解析が用いられている[23]。

(4)　既存解析的評価技術の現状レベルの整理と課題の抽出

1)　現状レベルの整理

本技術検討項目の安全性への影響を示す指標である廃棄体容器（オーバーパック）とその溶接部の材料、形状・厚さを評価する腐食解析の適用例として、回収可能性維持期間中を対象としてオーバーパック及び PEM 容器の変状の影響としての腐食の定量化を実施した解析例[23]がある。この例では、まず炭素鋼の代表的な腐食形態を表 2.2.5-4 に示すように整理し、腐食の因子を踏まえた条件を選定し、評価を実施している。回収維持期間中の埋め戻し状態については、腐食評価の観点から図 2.2.5-1 に示すようにオーバーパック（OP）は空気（大気）、水（地下水）、ベントナイトと接触することを想定し、それぞれに対する腐食見積の算定と、表 2.2.5-5 に示すように腐食深さの定置条件や時間依存性の比較による評価が行われた。

表 2.2.5-4　炭素鋼の代表的な腐食形態[23]

腐食形態			備　考
湿食	全面腐食	均一腐食	炭素鋼の代表的な腐食、0.1mm/年オーダー 局在化により凹凸を生じる
	局部腐食	孔食	自由表面に生じる穴あき腐食
		すきま腐食	構造上、付着物下で起きる
		通気差腐食	酸素濃淡によるアノードとカソードの分離
		脱成分腐食	合金中の特定組成の抜け落ち
		粒界腐食	粒界のみ優先的に腐食が進展
		SCC	特定の材料･環境･応力下で発生
	異種金属接触腐食		電位の貴卑、面積比に依存
	エロージョン･コロージョン		腐食作用と流れによる力学作用の競合
	微生物腐食		高い生物活性下での腐食の加速
	水素脆化		金属中に吸収された水素による割れ
	酸露点腐食		高温気相からの塩酸、硫酸などの結露
乾食	高温腐食		酸化、硫化、溶融塩腐食など

図 2.2.5-1　腐食評価の観点から埋め戻し状態（模式図）[23]

表 2.2.5-5　腐食深さの定置条件、及び時間依存性比較[23]

10年間

温度(℃)	大気／湿度(R.H.)				地下水／溶存酸素(DO)					ベントナイト	
	40%	60%	80%	100%	8ppm	3ppm	1ppm	0.3ppm	0.1ppm	海洋性	非海洋性
15			0.13	0.99	0.54	0.20	0.07	0.02	0.01	0.95	0.40
30		0.05	0.23	1.28	0.68	0.26	0.09	0.03	0.01	0.95	0.40
45		0.14	0.32	1.57	0.83	0.31	0.10	0.03	0.01	0.47	0.19
60	0.06	0.23	0.41	1.86	0.97	0.37	0.12	0.04	0.01	0.47	0.19
75	0.15	0.32	0.50	2.15	1.12	0.42	0.14	0.04	0.02	0.95	0.40
90	0.24	0.42	0.59	2.44	1.26	0.48	0.16	0.05	0.02	0.95	0.40
105	0.33	0.51	0.69	2.73	1.41	0.53	0.18	0.06	0.02	0.95	0.40
120										0.47	0.19
135										0.47	0.19
150										0.00	0.00

100年間

温度(℃)	大気／湿度(R.H.)				地下水／溶存酸素(DO)					ベントナイト	
	40%	60%	80%	100%	8ppm	3ppm	1ppm	0.3ppm	0.1ppm	海洋性	非海洋性
15			0.43	0.99	1.69	0.64	0.21	0.07	0.02	3.00	1.25
30		0.16	0.72	1.28	2.15	0.81	0.27	0.08	0.03	3.00	1.25
45		0.45	1.01	1.57	2.62	0.98	0.33	0.10	0.04	1.50	0.60
60	0.18	0.74	1.30	1.86	3.08	1.16	0.39	0.12	0.04	1.50	0.60
75	0.47	1.03	1.59	2.15	3.54	1.33	0.45	0.14	0.05	3.00	1.25
90	0.76	1.32	1.88	2.44	4.00	1.50	0.51	0.16	0.06	3.00	1.25
105	1.05	1.61	2.17	2.73	4.46	1.68	0.56	0.17	0.06	3.00	1.25
120										1.50	0.60
135										1.50	0.60
150										0.00	0.00
備考	時間のべき乗(1/2)				時間のべき乗(1/2)					時間に線形	
	＜0.1mm	0.1～1mm	＞1mm								

2)　課題

1)で示した解析的評価の既往検討[23]では、環境条件の設定や影響の定量化の検討にあたって、第２次取りまとめ[10]などの文献調査に基づき処分場の環境条件を試行的に設定している。人工バリアの環境条件は温度や地下水条件が過渡的な状態となり、それらの挙動は相互に関連して複雑に変化する状態となることが予想される。そのため既往検討では、人工バリアの環境条件が保守的な設定となったことが述べられており、より現実的な設定が課題であると整理されている。加えて、操業期間中の作業環境を維持するための排水や換気による乾燥、酸化環境が継続することの腐食や好気性の微生物の影響など、操業を進めることにより埋め戻しを実施すれば影響が小さい、または無視していたような事項についても、人工バリアや処分場に対する影響として考慮が必要であることを課題として整理している。

また、既往検討[23]では、評価における考え方として、回収可能性の維持や長期安全性確保の観点から、腐食の定量評価が困難な場合には腐食しないように対策をたてることが述べられている。オーバーパックの回収を考えると回収方法にもよるが、評価上は把持部の溶接部が厳しくなる可能性があるため、長期安全性とは異なるが評価指標に入れることの可否を検討することについて整理されている。なお、構造検討の範囲は課題であることがまとめられている。

(5)　本事業での取り組みの整理

既往の類似評価検討例があるため、本事業では本技術検討項目の取り組みは実施していない。

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

(1)　安全性への影響の意味の整理（定量評価対象の解釈）

人工バリアは、廃棄体であるガラス固化体、廃棄体容器（オーバーパック）、緩衝材から構成される。このうち、ガラス固化体については NUMO が実施する地層処分事業の設計項目に含まれないため[1]、本検討でも対象としない。また緩衝材に対しては、開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる安全機能への影響はないと考えられる。従って、開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる安全機能への影響が考えられるのはオーバーパックである。

NUMO の「処分場の安全機能と技術要件（NUMO-TR-10-11）」[1]において、「高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係」のうち、オーバーパックに関する安全機能は、閉鎖後閉じ込めの「放射性物質の浸出抑制」に「発熱が著しい期間の地下水接触防止」、及び「放射性物質の移行抑制」に「放射性物質の溶解度制限」が示されている（表 2.2.6-1）。これを踏まえ、オーバーパックの技術要件（基本的なバリア性能の確保）として、「耐食性」、「構造健全性」及び「溶接部耐食性・構造健全性」が示されている。このうち、空気（酸素）の持ち込みによる機能劣化の評価対象は「所定の期間、腐食により安全機能が損なわれないこと」とする技術要件である「耐食性」と考えられ、これには溶接部も含まれる（表 2.2.6-2）。

R&R 検討会が提示した技術検討の視点では「維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ」ることが示されている。NUMO の技術要件では、廃棄体定置後に処分坑道を開放し続けることは想定されていないが、回収可能性の維持を考慮した場合の閉鎖後長期においても、オーバーパックの「耐食性」を考慮する必要がある。但し、横置き PEM では、オーバーパックは PEM 容器に格納され、周辺にはベントナイト緩衝材が設置された状態にあり、また、竪置きブロック方式もオーバーパック周辺には圧縮ベントナイト緩衝材が存在しており、直接的に開放された坑道環境とは接していない状態にあることに留意しておく必要がある。

現時点での想定である、最長 300 年程度（RWMC 平成 27 年度～平成 28 年度検討[8]、[9]）の回収可能性維持期間を経た後でも廃棄体容器の「耐食性」を満たすためには、数百年に及ぶ時間依存性を考慮可能な解析的評価技術により、坑道の埋め戻し状態を考慮した廃棄体容器の腐食量などを定量的に把握し、劣化状態を評価することが必要であると考えられる。廃棄体容器の材料には炭素鋼を用いることが検討されている。炭素鋼の腐食は水や大気が存在する環境により生じ、pH、溶存酸素（DO）、酸化還元電位（Eh）、温度、共存イオン種、生物活性などさまざまな因子が作用する[23]。これらの因子を考慮した廃棄体容器の劣化状態の検討により、安全機能への影響を定量的に把握することが重要であると考えられる。

表 2.2.6-1　高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係[1]

<table>
<tr><th>基本概念</th><th colspan="2">安 全 機 能</th><th>構 成 要 素</th></tr>
<tr><td rowspan="2">隔離</td><td colspan="2">地質の長期的な変動からの防護*1</td><td rowspan="2">天然バリア</td></tr>
<tr><td colspan="2">人の接近の抑制*1</td></tr>
<tr><td rowspan="9">閉鎖後閉じ込め</td><td rowspan="2">放射性物質の浸出抑制</td><td>ガラスマトリクスによる浸出抑制</td><td>廃棄体</td></tr>
<tr><td>発熱が著しい期間の地下水接触の防止</td><td>オーバーパック</td></tr>
<tr><td rowspan="7">放射性物質の移行抑制</td><td>放射性物質の溶解度制限*2</td><td>天然バリア，人工バリア</td></tr>
<tr><td>移流による移行の抑制</td><td rowspan="3">緩衝材</td></tr>
<tr><td>コロイド移行の防止・抑制</td></tr>
<tr><td rowspan="2">収着による放射性物質の移行遅延</td></tr>
<tr><td>遅い地下水流動</td><td rowspan="3">天然バリア</td></tr>
<tr><td>分散による移行率の低減</td></tr>
<tr><td>アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制</td><td>閉鎖用埋め戻し等</td></tr>
</table>

*1　適切なサイトを選定することにより確保する機能

*2　還元環境を保つことなどにより確保する機能

表 2.2.6-2　オーバーパックの技術要件（基本的なバリア性能の確保）[1]（表 2.2.5-3 再掲）

<table>
<tr><th colspan="2">安全機能</th><th>技術要件</th><th>技術要件の説明</th><th>設計項目</th></tr>
<tr><td rowspan="3">放射性物質の浸出抑制</td><td rowspan="3">発熱が著しい期間の地下水接触の防止</td><td>耐食性</td><td>所定の期間，腐食により安全機能が損なわれないこと</td><td>オーバーパックの設計（材料設計，形状・厚さの設計）</td></tr>
<tr><td>構造健全性</td><td>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</td><td>オーバーパックの設計（材料設計，形状・厚さの設計）</td></tr>
<tr><td>溶接部耐食性・構造健全性</td><td>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</td><td>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）</td></tr>
</table>

(2)　安全性への影響を示す指標

(1)で述べたように、回収可能性の維持を考慮した場合においても、技術要件としてオーバーパックの「耐食性」が考えられることから、本技術検討項目に対する安全性への影響を示す指標は、この技術要件に基づいて抽出できると考えられる。従って、「開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響」を評価する指標は、廃棄体容器設計時と同様に廃棄体容器（オーバーパック）の腐食深さが相当すると考えられる。

(3)　既存の解析技術の整理

(2)では、「開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等」への影響を示す指標として、廃棄体容器（オーバーパック）とその溶接部の材料、形状・厚さを挙げた。既往検討では、回収可能性維持期間を考慮した場合のオーバーパックや PEM 容器の変状の影響として、腐食の定量化に関する程度の検討が行われ、解析技術として腐食解析が用いられている[23]。

(4)　既存解析的評価技術の現状レベルの整理と課題の抽出

1)　現状レベルの整理

本技術検討項目の安全性への影響を示す指標である廃棄体容器（オーバーパック）とその溶接部の材料、形状・厚さを評価する腐食解析の適用例として、回収可能性維持期間中を対象としてオーバーパック及び PEM 容器の変状の影響としての腐食の定量化に関する程度の検討を実施した解析例[23]がある。この例では、まず炭素鋼の代表的な腐食形態を整理し（表 2.2.5-4）、腐食の因子を踏まえた条件を選定し、評価を実施している。回収維持期間中の埋め戻し状態については、腐食評価の観点から、オーバーパック（OP）は空気（大気）、水（地下水）、ベントナイトと接触することを想定し（図 2.2.5-1）、それぞれに対する腐食見積の算定と、腐食深さの定置条件や時間依存性の比較による評価（表 2.2.5-5）が行われた。この評価事例は本技術検討項目を対象とした検討例と言える。

2)　課題

1)で示した解析的評価の既往検討[23]では、環境条件の設定や影響の定量化の検討にあたって、第２次取りまとめ[10]などの文献調査に基づき処分場の環境条件を試行的に設定している。人工バリアの環境条件は温度や地下水条件が過渡的な状態となり、それらの挙動は相互に関連して複雑に変化する状態となることが予想される。そのため既往検討では、人工バリアの環境条件が保守的な設定となった（定置後、オーバーパック周辺のベントナイトが即時に飽和し、地下水がオーバーパックと接することを前提）ことが述べられており、より現実的な設定が課題であると整理されている。加えて、操業期間中の作業環境を維持するための排水や換気による乾燥、酸化環境が継続することの腐食や好気性の微生物の影響など、操業を進めることにより埋め戻しを実施すれば影響が小さい、あるいは、考慮は不要としていたような事項についても、人工バリアや処分場に対する影響として考慮が必要であることを課題として整理している。

また、既往検討[23]では、評価における考え方として、回収可能性の維持や長期安全性確保の観点から、腐食の定量評価が困難な場合には腐食しないように対策をたてることが述べられている。

(5)　本事業での取り組みの整理

既往の類似評価検討例があるため、本事業では本技術検討項目の取り組みは実施していない。

2.2.7　技術検討項目vii　廃棄体からの熱による影響

(1)　安全性への影響の意味の整理（定量評価対象の解釈）

人工バリアは、廃棄体であるガラス固化体、廃棄体容器（オーバーパック）、緩衝材から構成される。このうち、ガラス固化体については NUMO が実施する地層処分事業の設計項目に含まれないため[1]、本検討でも対象としない。ここで、廃棄体からの熱による安全機能への影響が考えられるのはオーバーパック、及びベントナイトを主成分とする緩衝材である。

オーバーパックの安全機能については、NUMO の「処分場の安全機能と技術要件（NUMO-TR-10-11）」[1]において、「高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係」のうち、閉鎖後閉じ込めの「放射性物質の浸出抑制」に「発熱が著しい期間の地下水接触防止」及び「放射性物質の移行抑制」に「放射性物質の溶解度制限」が示されている（表 2.2.7-1）。これを踏まえ、オーバーパックの長期健全性の維持に関する技術要件として挙げられているもののうち、「廃棄体からの発熱により耐食性や強度が著しく低下しないこと」とする技術要件として「耐熱性」が示されている。回収可能性の維持を考慮した場合の閉鎖後長期においても、オーバーパックの「耐熱性」が確保されることを考慮する必要がある。ここで、「耐熱性」とは廃棄体からの発熱によりオーバーパック材料の熱による変形がないことや、熱応力によりオーバーパックが破損しないことを意味する。この懸念事項に対しては、現在は炭素鋼オーバーパックが基本とされていることから、良好な耐熱性を有していると判断できる（表 2.2.7-2）。従って、オーバーパックの熱影響に対する定量評価は必要ないと考えられる。

なお、R&R 検討会が提示した技術検討の視点では「維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ」ることが示されている。坑道が埋め戻されていない場合、熱伝導率の低い空気の存在により、定置後すぐに埋め戻されるよりも人工バリアの温度が上昇することが予想されるが、一方で、操業期間中「開放坑道内に人が出入りする」ことが前提として示されており、坑内気温は換気や冷房によって 37℃以下に保たれる対策がとられることを考慮する必要がある。

表 2.2.7-1　高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係[1]（表 2.2.6-1 再掲）

<table>
<tr><th>基本概念</th><th colspan="2">安 全 機 能</th><th>構 成 要 素</th></tr>
<tr><td rowspan="2">隔離</td><td colspan="2">地質の長期的な変動からの防護*1</td><td rowspan="2">天然バリア</td></tr>
<tr><td colspan="2">人の接近の抑制*1</td></tr>
<tr><td rowspan="9">閉鎖後閉じ込め</td><td rowspan="2">放射性物質の浸出抑制</td><td>ガラスマトリクスによる浸出抑制</td><td>廃棄体</td></tr>
<tr><td>発熱が著しい期間の地下水接触の防止</td><td>オーバーパック</td></tr>
<tr><td rowspan="7">放射性物質の移行抑制</td><td>放射性物質の溶解度制限*2</td><td>天然バリア，人工バリア</td></tr>
<tr><td>移流による移行の抑制</td><td rowspan="3">緩衝材</td></tr>
<tr><td>コロイド移行の防止・抑制</td></tr>
<tr><td rowspan="2">収着による放射性物質の移行遅延</td></tr>
<tr><td>遅い地下水流動</td><td rowspan="3">天然バリア</td></tr>
<tr><td>分散による移行率の低減</td></tr>
<tr><td>アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制</td><td>閉鎖用埋め戻し等</td></tr>
</table>

*1　適切なサイトを選定することにより確保する機能

*2　還元環境を保つことなどにより確保する機能

表 2.2.7-2　オーバーパックの長期健全性の維持に関する技術要件[1]

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）

緩衝材の安全機能については、NUMO の「処分場の安全機能と技術要件（NUMO-TR-10-11）」[1]において、閉鎖後閉じ込めの「放射性物質の移行抑制」に「放射性物質の溶解度制限」、「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止・抑制」及び「収着による放射性物質の移行遅延」が示されている（表 2.2.7-3）。これらの安全機能は、緩衝材のベントナイト含有量を考慮した密度や厚さで担保することが仕様設定の基本とされている。これにより、緩衝材の長期健全性の維持の技術要件として挙げられているもののうち、「廃棄体からの発熱により緩衝材の機能が著しく低下しないこと」とする技術要件として、「耐熱性」が示されている（表 2.2.7-4）。

しかし、処分場の設計では、緩衝材の熱による変質を回避する観点から廃棄体の埋設密度などの設定が行われることとなる[10]。緩衝材は熱（温度）と水分などの影響により、ベントナイト成分のモンモリロナイトのイライト化などの鉱物変質が生じる。モンモリロナイトのイライト化により、緩衝材の技術要件（基本的なバリア性能の確保）でもある「低透水性」、「コロイドろ過能」、「収着性」（表 2.2.7-3）等といった性能が低下することから、設計時には廃棄体からの時系列的な発熱を考慮した熱解析により、坑道離間距離や廃棄体ピッチの設計がなされている。

しかし、坑道が埋め戻されていない場合、熱伝導率の低い空気の存在により、定置後すぐに埋め戻されるよりも人工バリアの温度が上昇することが予想されるが、一方で、操業期間中「開放坑道内に人が出入りする」ことが前提として示されており、坑内気温は換気や冷房によって 37℃以下に保たれる対策がとられることとなる。そのため、基本的には緩衝材の熱影響に対する定量評価は必要ないと考えられるが、回収維持期間中の維持状態によっては、廃棄体からの熱による影響により、緩衝材がどの程度変化するかの定量的な評価が必要となる場合がある。

現時点での想定である、最長 300 年程度（RWMC 平成 27 年度～平成 28 年度検討[8]、[9]）の回収可能性維持期間における時間依存性を考慮可能な解析的評価技術により、緩衝材への熱影響を維持状態に応じて定量的に評価することが必要で、緩衝材の劣化状態の検討により、安全機能への影響を定量的に把握することが重要であると考えられる。この場合、考慮しておく事項として、竪置きブロック方式ではベントナイトが定置されてから処分坑道が埋め戻しされるまでの時間的な遅れがあること、ガラス固化体の発熱特性は時間の経過とともに低下していく点がある。

表 2.2.7-3　緩衝材の技術要件（基本的なバリア性能の確保）[1]

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

表 2.2.7-4　緩衝材の技術要件（長期健全性の維持）[1]

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

(2)　安全性への影響を示す指標

(1)で述べたように、回収可能性の維持を考慮した場合においても、技術要件としてオーバーパックや緩衝材の「耐熱性」が考えられることから、本技術検討項目に対する安全性への影響を示す指標は、この技術要件に基づいて抽出できると考えられる。従って、「廃棄体からの熱による人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響」を評価する指標は、緩衝材の材料中の粘土成分（モンモリロナイト）の量が相当すると考えられる。しかし、処分場の設計では、緩衝材の熱による変質を回避する観点から廃棄体の埋設密度などの設定が行われている[10]。また、廃棄体容器の材料は鋼製である点から、鋼製材料に変化が生じる温度は非常に高いため、ここでは廃棄体容器への影響についての指標は除外する。

(3)　既存の解析技術の整理

(2)では、「廃棄体からの熱による影響」を示す指標として、緩衝材の材料中の粘土成分（モンモリロナイト）を挙げた。温度による緩衝材の粘土成分のモンモリロナイトは、埋設続成作用や

熱水変質作用によるイライト化が生じることが知られている。解析技術としては、スメクタイトのイライト化に関する反応速度式を用いたイライト化率解析が挙げられる[10]、[25]。これらの解析は、1990 年代に Push らが実施した自由境界（処分環境を模擬していない）を有するベントナイトサンプルを用いた試験データを用いており、実際の環境を考慮したベントナイトにおける熱変質への耐久性は異なると報告されている[26]。

(4)　既存解析的評価技術の現状レベルの整理と課題の抽出

1)　現状レベルの整理

本技術検討項目の安全性への影響を示す指標である緩衝材の粘土成分のスメクタイトを対象としたイライト化率解析の適用例[25]がある。この例では、処分場の温度変化を考慮して、速度反応式を用いた評価期間 100 万年のイライト化率の変化を解析している。ここで、緩衝材の温度の経時変化は廃棄体が埋め戻された状態を対象とし、埋設密度を変化させた伝導伝熱（熱伝導）解析を行うことにより把握している（図 2.2.7-1）。温度解析結果に基づき、ベントナイトのイライト化率が解析された結果を図 2.2.7-2 に示す。解析に用いた三種の速度反応式は、室内試験や天然のイライト化事例の研究から導出されたものを用いている。各速度反応式に対して、埋設密度を変化させた 3 ケースの解析を行い、従来の温度一定の解析（100℃と 150℃のケース）と比較を行っている。この解析結果では、100℃を超える期間が数十年で最高温度が 130℃程度になる場合であっても、著しいイライト化は生じないことが報告されている。なお、ナチュラルアナログ研究においては、100℃を超える条件で 100 万年以上スメクタイトが安定に存在していた例[27]、[28]があり、解析結果はこれらの事例とも調和的である。また、このように種々の速度反応式を合わせて評価することで、概略的なイライト化の変質の評価は可能であるとまとめている。

温度の環境設定評価例として、回収可能性維持期間に処分坑道が開放された状態を考慮した検討例がある[23]。ただし、この事例では熱の伝達に関して伝導伝熱（熱伝導）のみを考慮し、空気の対流熱伝達（熱流体）やふく射伝熱などによる熱移動を考慮しない検討例である。

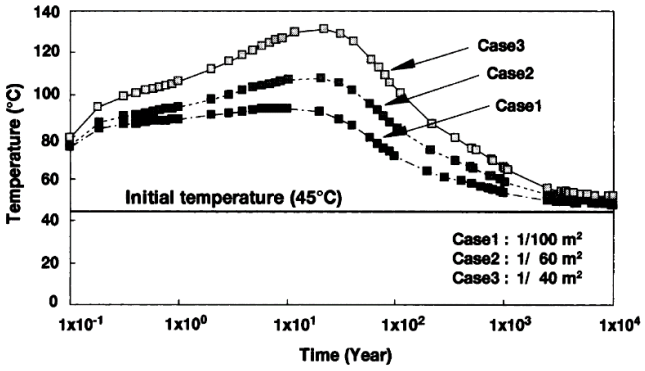


Fig. 4 Time dependency of buffer material temperature (at inner boundary of buffer material).

図 2.2.7-1　緩衝材の温度経時変化解析結果[25]

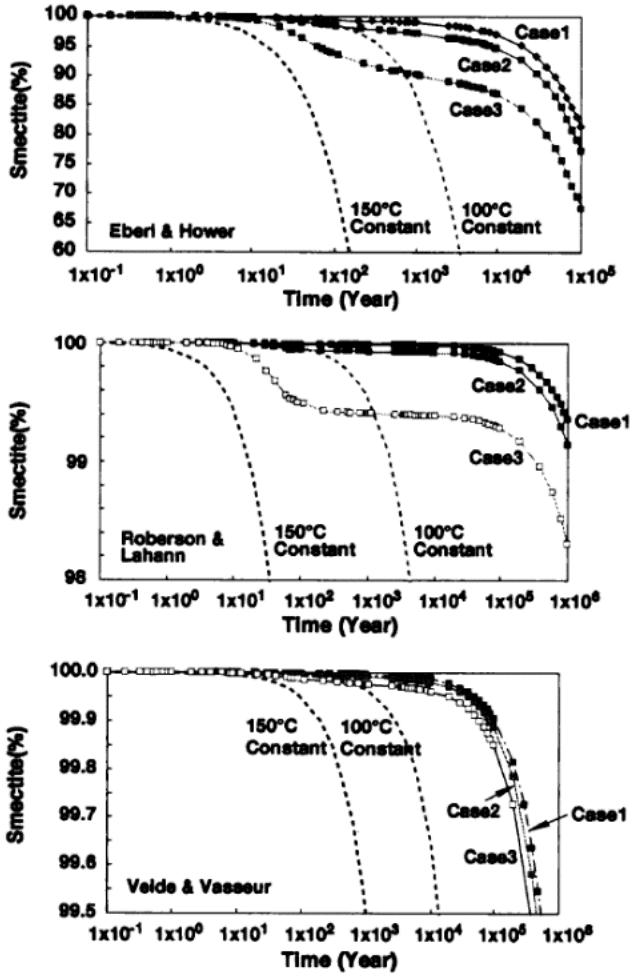


Fig. 5 Time/smectite [%] relationships calculated from the kinetic models of smectite to conversion. The calculation based on the time dependency of buffer material temperature (case 1 ~case 3) and constant temperature (100℃ and 150℃).

図 2.2.7-2　ベントナイトのイライト化率解析結果[25]

2)　課題

1)で示した解析的評価の既往検討[25]では、竪置きブロック方式に代表される廃棄体定置後すぐに埋め戻され、ベントナイトが飽和した条件下での熱解析を実施している。スメクタイトのイライト化へプロセスも実際の処分環境を考慮した実験的研究が進められていることから、最新の知見をもって評価することが求められる。特に PEM など周辺環境からある期間隔離できる環境における熱影響についての検討が必要とされる。

また、既往検討[23]による温度の環境設定例はあるが、坑道開放を想定した熱伝達に関して、より実現象を詳細に把握するために伝導伝熱（熱伝導）だけでなく、空気の対流熱伝達（熱流体）やふく射伝熱などによる熱移動の効果を考慮した評価の実施が課題として挙げられる。回収可能性維持期間中、開放坑道には熱伝導率の低い空気が存在し、定置後すぐに埋め戻されるよりも人

工バリアの温度が上昇することが予想されるが、一方で、R&R 検討会の操業期間中の技術検討項目では「開放坑道内に人が出入りする」ことが前提として示されており、坑内気温は換気や冷房によって 37℃以下に保たれる対策がとられることを考慮した評価が必要である。ただし、対流熱伝達（熱流体）及びふく射伝熱は非線形性が強い解析を非定常で実施する必要があり、収束性や計算規模の面から実施は容易ではない。また、解析に必要な定数を実験等により求める必要がある。

(5) 本事業での取り組みの整理

既往の類似評価検討例があるため、本事業では本技術検討項目の取り組みは実施していない。

2.2.8　技術検討項目viii　坑道開放中に継続する坑内湧水の影響

(1)　安全性への影響の意味の整理（定量評価対象の解釈）

人工バリアは、廃棄体であるガラス固化体、廃棄体容器（オーバーパック）、緩衝材から構成される。このうち、ガラス固化体については NUMO が実施する地層処分事業の設計項目に含まれないため[1]、本検討でも対象としない。ここで、坑道開放期間中に継続する坑内湧水による安全機能への影響が考えられるのはオーバーパック及び緩衝材である。

NUMO の「処分場の安全機能と技術要件（NUMO-TR-10-11）」[1]において、「高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係」のうち、オーバーパックに関する安全機能は、閉鎖後閉じ込めの「放射性物質の浸出抑制」に「発熱が著しい期間の地下水接触防止」及び「放射性物質の移行抑制」に「放射性物質の溶解度制限」が示されている（表 2.2.8-1）。これを踏まえ、オーバーパックの技術要件（基本的なバリア性能の確保）として、「耐食性」、「構造健全性」及び「溶接部耐食性・構造健全性」が示されている。このうち、坑道開放期間中に継続する坑内湧水による機能劣化の評価対象は「所定の期間、腐食により安全機能が損なわれないこと」とする技術要件である「耐食性」と考えられ、これには溶接部も含まれる（表 2.2.8-2）。

R&R 検討会が提示した技術検討の視点では「維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ」ることが示されている。NUMO の技術要件では、廃棄体定置後に処分坑道を開放し続けることは想定されていないが、回収可能性維持を考慮した場合の閉鎖後長期においてもオーバーパックの「耐食性」を考慮する必要がある。

現時点での想定である、最長 300 年程度（RWMC 平成 27 年度～平成 28 年度検討[8]、[9]）の回収可能性維持期間を経た後でも廃棄体容器の「耐食性」を満たすためには、数百年に及ぶ時間依存性を考慮可能な解析的評価技術により、坑道の埋め戻し状態を考慮した廃棄体容器の腐食量などを定量的に把握し、劣化状態を評価することが必要であると考えられる。廃棄体容器の材料には炭素鋼を用いることが検討されている。炭素鋼の腐食は水や大気が存在する環境により生じ、pH、溶存酸素（DO）、酸化還元電位（Eh）、温度、共存イオン種、生物活性などさまざまな因子が作用する[23]。これらの因子を考慮した廃棄体容器の劣化状態の検討により、安全機能への影響を定量的に把握することが重要であると考えられる。

表 2.2.8-1　高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係[1]（表 2.2.6-1 再掲）

<table>
<tr><th>基本概念</th><th colspan="2">安 全 機 能</th><th>構 成 要 素</th></tr>
<tr><td rowspan="2">隔離</td><td colspan="2">地質の長期的な変動からの防護*1</td><td rowspan="2">天然バリア</td></tr>
<tr><td colspan="2">人の接近の抑制*1</td></tr>
<tr><td rowspan="9">閉鎖後閉じ込め</td><td rowspan="2">放射性物質の浸出抑制</td><td>ガラスマトリクスによる浸出抑制</td><td>廃棄体</td></tr>
<tr><td>発熱が著しい期間の地下水接触の防止</td><td>オーバーパック</td></tr>
<tr><td rowspan="7">放射性物質の移行抑制</td><td>放射性物質の溶解度制限*2</td><td>天然バリア，人工バリア</td></tr>
<tr><td>移流による移行の抑制</td><td rowspan="3">緩衝材</td></tr>
<tr><td>コロイド移行の防止・抑制</td></tr>
<tr><td rowspan="2">収着による放射性物質の移行遅延</td></tr>
<tr><td>遅い地下水流動</td><td rowspan="3">天然バリア</td></tr>
<tr><td>分散による移行率の低減</td></tr>
<tr><td>アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制</td><td>閉鎖用埋め戻し等</td></tr>
</table>

*1　適切なサイトを選定することにより確保する機能
*2　還元環境を保つことなどにより確保する機能

表 2.2.8-2　オーバーパックの技術要件（基本的なバリア性能の確保）[1]（表 2.2.5-3 再掲）

<table>
<tr><th colspan="2">安全機能</th><th>技術要件</th><th>技術要件の説明</th><th>設計項目</th></tr>
<tr><td rowspan="3">放射性物質の浸出抑制</td><td rowspan="3">発熱が著しい期間の地下水接触の防止</td><td>耐食性</td><td>所定の期間，腐食により安全機能が損なわれないこと</td><td>オーバーパックの設計（材料設計，形状・厚さの設計）</td></tr>
<tr><td>構造健全性</td><td>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</td><td>オーバーパックの設計（材料設計，形状・厚さの設計）</td></tr>
<tr><td>溶接部耐食性・構造健全性</td><td>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</td><td>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）</td></tr>
</table>

緩衝材の安全機能については、NUMO の「処分場の安全機能と技術要件（NUMO-TR-10-11）」[1]において、閉鎖後閉じ込めの「放射性物質の移行抑制」に「放射性物質の溶解度制限」、「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止・抑制」及び「収着による放射性物質の移行遅延」が示されている。これにより、緩衝材の長期健全性の維持の技術要件として挙げられているもののうち、「地下水流による緩衝材流出が著しくないこと」とする技術要件として、「緩衝材流出の抑制」が示されている（表 2.2.8-3）。回収可能性維持を考慮した場合の閉鎖後長期においても、「緩

衝材流出の抑制」が確保されることを考慮する必要がある。

なお、R&R 検討会が提示した技術検討の視点では「維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ」ることが示されている。坑道が埋め戻されていない場合、坑内に向かう動水勾配が大きくなるため、定置後すぐに埋め戻されるよりも坑内湧水量（地下水流）が多くなることが予想される。

表 2.2.8-3　緩衝材の技術要件（長期健全性の維持）[1]（表 2.2.7-4 再掲）

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

また、本技術検討項目では処分坑道等に設置する埋め戻し材や、止水プラグも検討の対象とする。NUMO の技術要件での閉鎖後閉じ込めの基本概念において、「放射性物質の移行抑制」の安全機能が示されている閉鎖用埋め戻し等として埋め戻し材及び止水プラグが示されている。

埋め戻し材及び止水プラグの安全機能は「閉鎖後長期の安全確保の安全機能と構成要素の関係」に、閉鎖後閉じ込めの「放射性物質の移行抑制」に「アクセス坑道及びその周辺が卓越した移行経路となることの抑制」が示されている（表 2.2.8-4）。埋め戻し材及び止水プラグの技術要件（基本的なバリア性能の確保）には「地下水の流れを抑制すること」として「低透水性」が挙げられており、また、長期健全性の維持に関する技術要件には「施工時の隙間を充填するよう、膨潤性

を有すること」として「施工時の隙間の充てん（自己シール性）」などが挙げられている（表 2.2.8-5）。回収可能性維持を考慮した場合の閉鎖後長期においては、上記の要件を満たすために緩衝材と同様の考え方で、「ベントナイト流出の抑制」を考慮する必要がある。

表 2.2.8-4　埋め戻し材・止水プラグの技術要件（基本的なバリア性能の確保）[1]

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

表 2.2.8-5　埋め戻し材・止水プラグの長期健全性の維持に関する技術要件[1]

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

現時点での想定である、最長 300 年程度（RWMC 平成 27 年度～平成 28 年度検討[8]、[9]）の回収可能性維持期間を経た後で、緩衝材、埋め戻し材及び止水プラグの「緩衝材（ベントナイト）流出の抑制」を確保するため、ベントナイト含有量の定量的な評価が必要であると考えられる。ベントナイトの流出はベントナイト周辺での動水勾配の大きさに関連することが報告されており[29]、結果的に坑内湧水量に依存すると考えられるため、時間依存性を考慮した解析的評価技術により坑内湧水量を定量的に把握することが重要であると考えられる。緩衝材に対するこのような現象は、竪置きブロック方式のみが対象となり、横置き PEM 方式では鋼製外殻が健全性を維持する限り内部ベントナイトは構内湧水の影響を受けない。

NUMO の包括的技術報告書（レビュー版）では、人工バリアへの擾乱（パイピングによる流出）を防ぐ工学的対策の一つとして、竪置きブロック方式の場合、処分孔の安定性やベントナイトブロックの流出を避けるために、我が国での地下環境を考慮すると確実に存在する構造弱部や湧水量が多い断層・割れ目を避ける定置位置決定特性（EDF: Emplacement Determining Features）を設定している。横置き PEM では、ベントナイト緩衝材は外殻に保護されているためこの特性

は考慮する必要はないとされている[30]。

(2)　安全性への影響を示す指標

(1)で述べたように、回収可能性の維持を考慮した場合においても、技術要件として、オーバーパックの「耐食性」や緩衝材、埋め戻し材及び止水プラグの「緩衝材（ベントナイト）流出の抑制」が考えられることから、本技術検討項目に対する安全性への影響を示す指標は、この技術要件に基づいて抽出できると考えられる。従って、「坑道開放期間中に継続する坑内湧水による影響」を評価する指標は、廃棄体容器設計時と同様に廃棄体容器（オーバーパック）とその溶接部の材料、形状・厚さが相当すると考えられる。ただし PEM 容器については、人工バリアの構成要素ではなく、設計要件が明確でないため、検討の対象から外す。また、緩衝材、埋め戻し材及び止水プラグに対する、「坑道開放期間中に継続する坑内湧水による影響」を評価する指標は、ベントナイト含有量及び乾燥密度（密度）が相当すると考えられる。

(3)　既存の解析技術の整理

(2)では、「坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響」を示す指標として、廃棄体容器（オーバーパック）とその溶接部については材料、形状・厚さを挙げた。既往検討では、回収可能性維持期間を考慮した場合のオーバーパックや PEM 容器の変状の影響として、腐食の定量化に関する程度の検討が行われ、解析技術として腐食解析が用いられている[23]。

緩衝材、埋め戻し材及び止水プラグに関する指標として、ベントナイト含有量及び乾燥密度（密度）を挙げた。緩衝材流出に関する解析技術については、剥離モデルと膨潤モデルを連成させた解析技術[31]があるが研究段階である。一方、再冠水中に発生する流出現象に関して、RWMC や SKB で実験的な研究[32]、[33]がなされているが、解析技術は具体的に示されていない。その理由として、再冠水中の破過、水みちの発生、緩衝材流出の各現象を連続体力学の枠組みの中で取り扱うには、非常に高度な解析技術が要求されることから、緩衝材の流出に関しては、当面流出量を予測することにより、全体の緩衝材量、あるいは表面付近の密度低下の度合を予測し、許容される範囲に抑えるための対策を講じることが有効であると考える、と述べられている[32]。なお緩衝材の流出については、現在も別事業であるニアフィールドシステム評価確証技術開発にて検討が進められている。

また、緩衝材（ベントナイト）の岩盤亀裂内への侵入現象のシミュレーション解析については既往検討で整理されている[32]。それによると、侵入現象モデルの入力データの整備を進め、評価手法の妥当性・適用性について検討を行った研究結果[34]により、実際の侵入現象では、既存のモデル化で用いられている粘度といった物性パラメータ以外に評価上影響する要因が含まれていることが推測され、現状の物性パラメータによる侵入現象のモデル化には限界があることが示されたことが整理されている。そのため、既往検討の緩衝材流出現象は実験的研究の結果を用いた検討がされている[32]。

ただし、(1)で述べたように、ベントナイトの流出に影響を及ぼす坑内湧水量の算定（緩衝材流出の与条件）には、地下水流動の評価が必要となる。地下水流動に関する解析技術を整理すると、飽和・不飽和浸透流解析と多相流解析に大別される。両者の大きな違いは不飽和領域の気体（空

気）の取り扱いにある。飽和・不飽和浸透流解析は空気を疑似的に表現するため、それ自体の流れを考慮することはできないが、多相流解析は空気を気相として扱うため、その流れを考慮することが可能である。

以上より、緩衝材、埋め戻し材及び止水プラグに関する指標そのものを時間依存で解析できる既存技術は見当たらないと考えられるが、坑内湧水量を算定する既存技術として地下水流動解析が挙げられる。

次節では、腐食解析及び地下水流動解析を対象とした整理を行う。

(4) 既存解析的評価技術の現状レベルの整理と課題の抽出

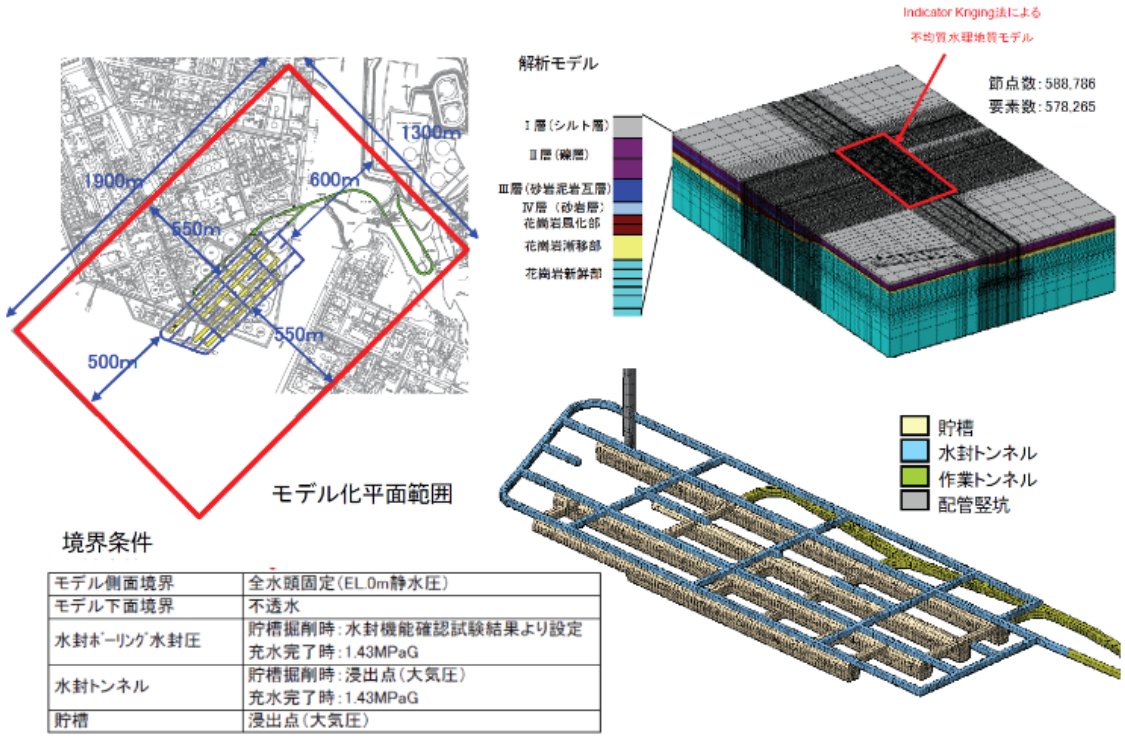
1) 現状レベルの整理

a 腐食解析

本技術検討項目の安全性への影響を示す指標である廃棄体容器（オーバーパック）とその溶接部の材料、形状・厚さを評価する腐食解析の適用例として、回収可能性維持期間中を対象としてオーバーパック及び PEM 容器の変状の影響としての腐食の定量化に関する程度の検討を実施した解析例[23]がある。この例では、まず炭素鋼の代表的な腐食形態を整理し（表 2.2.5-4）、腐食の因子を踏まえた条件を選定し、評価を実施している。回収維持期間中の埋め戻し状態については、腐食評価の観点から、オーバーパック（OP）は空気（大気）、水（地下水）、ベントナイトと接触することを想定し（図 2.2.5-1）、それぞれに対する腐食見積の算定と、腐食深さの定置条件や時間依存性の比較による評価（表 2.2.5-5）が行われた。

b 地下水流動解析

地下水流動の解析技術の適用例として、飽和・不飽和浸透流解析の例[35]を図 2.2.8-1～図 2.2.8-6 に示す。事例は、平成 25 年に竣工した倉敷国家石油ガス備蓄基地と波方国家石油ガス備蓄基地の地下水流動解析である。両基地とも水封式地下岩盤貯槽方式が採用されており、貯槽建設時には掘削により明らかとなる水理地質データや地下水挙動データから 3 次元水理地質モデルを構築した（図 2.2.8-1、図 2.2.8-4）。また、貯槽の湧水量を設計湧水量以下に収めるため、グラウトにより貯槽周囲に低透水な改良帯を構築した施工実績も解析モデルに反映された（図 2.2.8-2、図 2.2.8-5）。解析では各施工段階における貯槽湧水量を求め、実測湧水量及び設計湧水量との比較が行われた（図 2.2.8-3、図 2.2.8-6）。



境界条件

モデル側面境界	全水頭固定（EL.0m静水圧）
モデル下面境界	不透水
水封ボーリング水封圧	貯槽掘削時：水封機能確認試験結果より設定 充水完了時：1.43MPaG
水封トンネル	貯槽掘削時：浸出点（大気圧） 充水完了時：1.43MPaG
貯槽	浸出点（大気圧）

図 2.2.8-1　三次元水理解析モデルの概要（倉敷基地）[35]

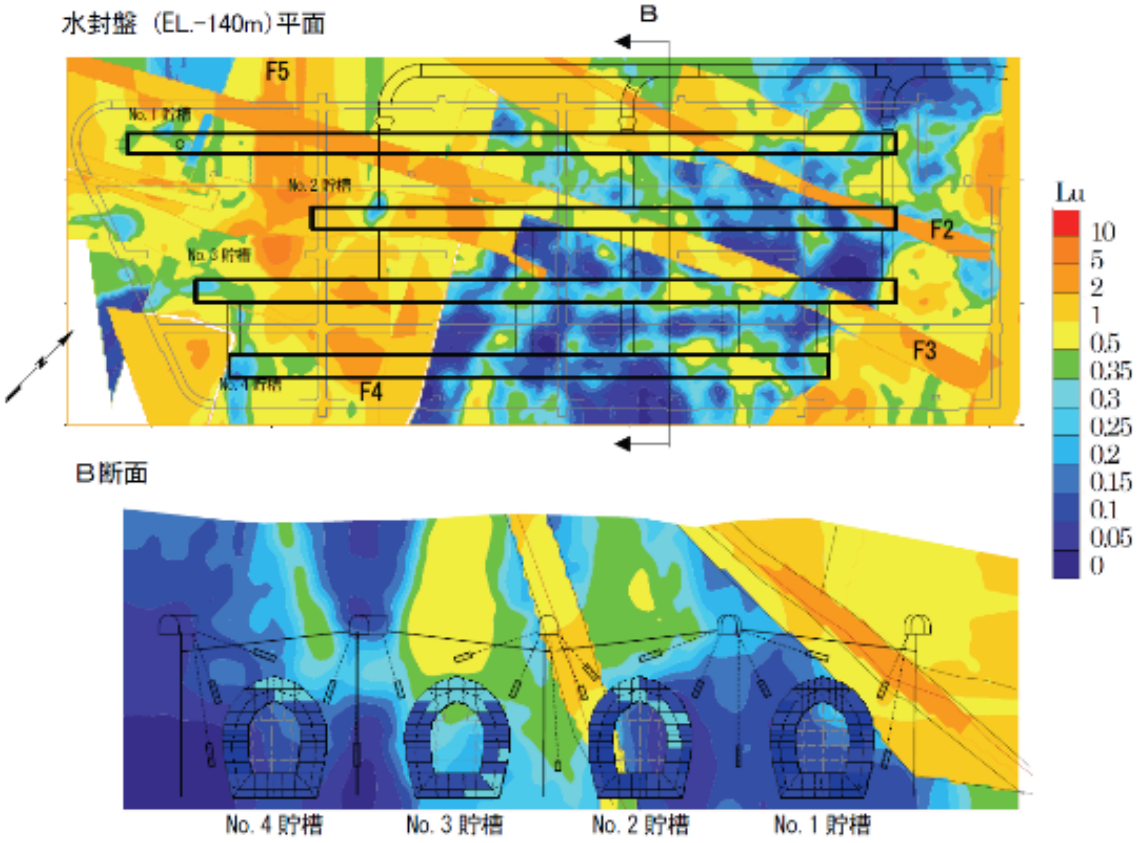


図 9. 2. 36　インディケータクリギングによるグラウト改良後透水分布推定結果

図 2.2.8-2　地球統計学的手法によるグラウト改良後の透水分布推定結果（倉敷基地）[35]

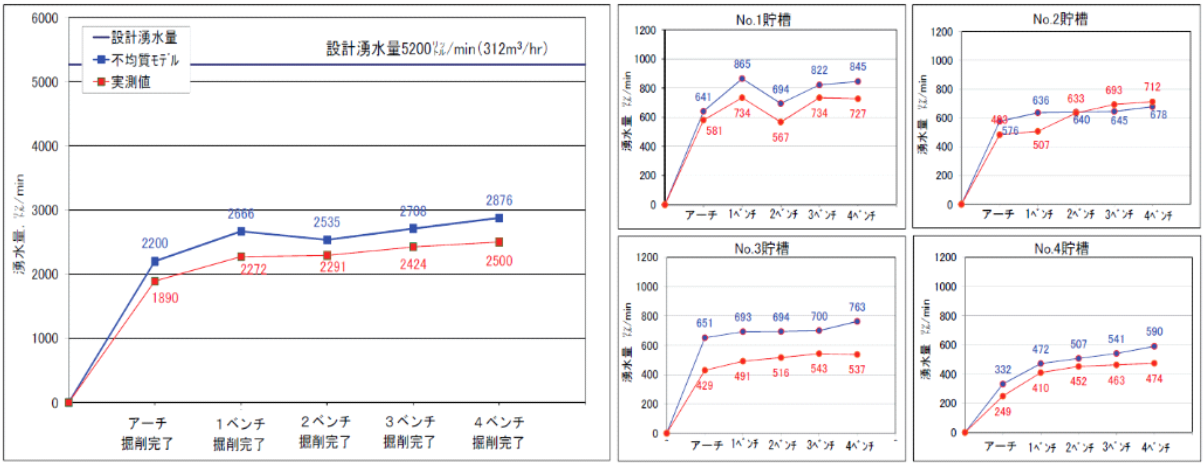


図 2.2.8-3　貯槽掘削時の湧水量変化と不均質解析結果との対比（倉敷基地）[35]

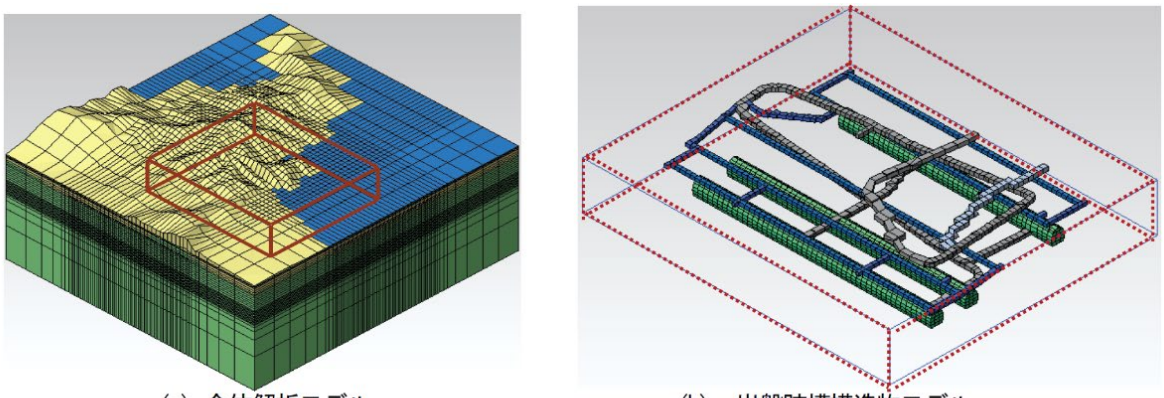


図 2.2.8-4　三次元水理解析モデルの概要（波方基地）[35]

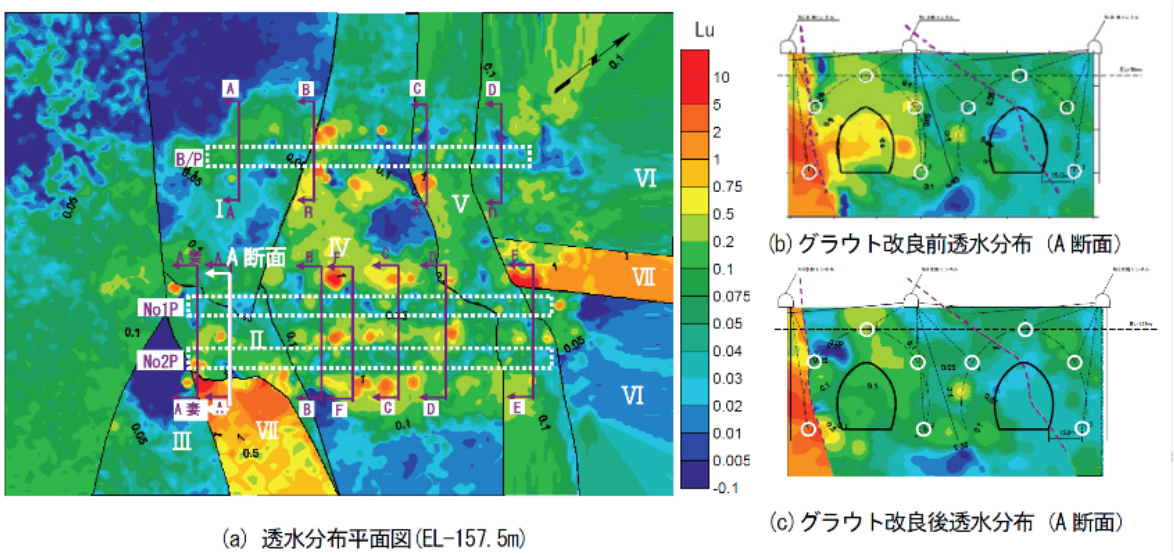
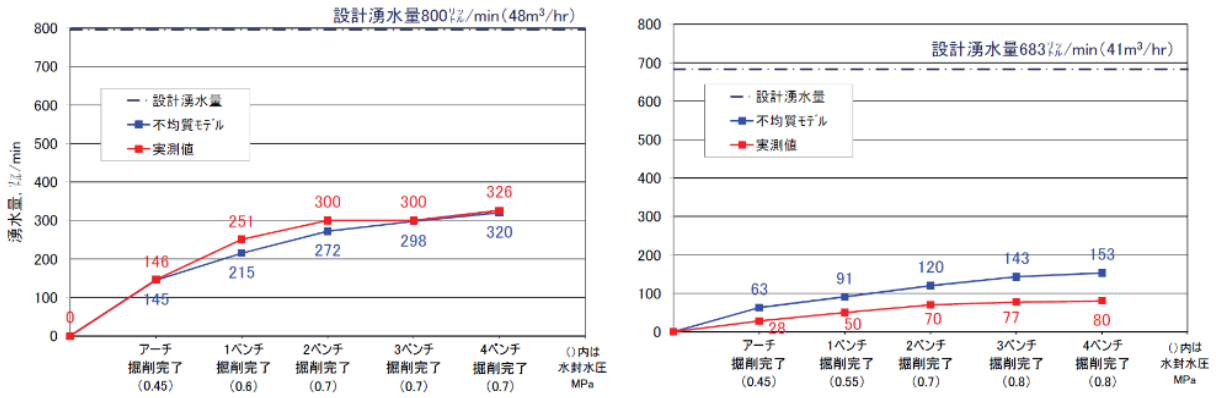


図 2.2.8-5　地球統計学的手法による貯槽周辺の透水性分布及びグラウト改良前後の比較（波方基地）[35]



(a) プロパン貯槽　　(b) ブタン/プロパン兼用貯槽

図 2.2.8-6　貯槽掘削時の湧水量変化と不均質解析結果との比較（波方基地）[35]

このように、坑内湧水量を解析するための地下水流動解析に関しては、飽和・不飽和浸透流解析の他にも後述するような多相流解析の適用例などもあるが、数百年に及ぶ「坑道開放中に継続する坑内湧水の影響」を対象とした解析的評価の実施例は見当たらない。

2)　課題

a　腐食解析

1)で示した解析的評価の既往検討[23]では、環境条件の設定や影響の定量化の検討にあたって、第２次取りまとめ[10]などの文献調査に基づき処分場の環境条件を試行的に設定している。人工バリアの環境条件は温度や地下水条件が過渡的な状態となり、それらの挙動は相互に関連して複雑に変化する状態となることが予想される。そのため既往検討では、人工バリアの環境条件が保守的な設定となったことが述べられており、より現実的な設定が課題であると整理されている。加えて、操業期間中の作業環境を維持するための排水や換気による乾燥、酸化環境が継続することの腐食や好気性の微生物の影響など、操業を進めることにより埋め戻しを実施すれば影響が小さい、あるいは、考慮は不要としていたような事項についても、人工バリアや処分場に対する影響として考慮が必要であることを課題として整理している。

また、既往検討[23]では、評価における考え方として、回収可能性の維持や長期安全性確保の観点から、腐食の定量評価が困難な場合には腐食しないように対策をたてることが述べられている。

b　地下水流動解析

地下水流動を対象とした解析的評価技術の課題は平成 28 年度及び平成 29 年度に実施した本事業の検討[7]、[8]において整理されている。回収可能性維持期間中の開放坑道周辺のひずみの経時変化などに伴う透水係数などの水理特性の変化を考慮した解析が必要であること、また、飽和・不飽和浸透流解析と多相流解析それぞれの特性を踏まえた手法の選択とその体系化が必要であることなどが挙げられている。

(5)　本事業での取り組みの整理

a　腐食解析

既往の類似評価検討例があるため、本事業では本技術検討項目の取り組みは実施していない。

b　地下水流動解析

地下水流動に係る解析的評価技術に関しては、平成 28 年度から取り組みが行われている[8]。平成 29 年度の取り組みでは、平成 28 年度に実施された坑道安定性評価の解析結果に基づき、坑道周辺の透水係数などの水理特性の経時変化を考慮した飽和・不飽和浸透流解析が実施され、力学的評価を反映した地下水流動解析を行う方法が具体化された[7]。この検討では、回収可能性維持期間を想定し、処分坑道の埋め戻し状態の違い（開放状態及び埋め戻した状態）を考慮した解析により坑道湧水量を算出した。さらに、グラウトにより坑内湧水対策が施された場合についても検討が行われた。

本年度は引き続き、坑内湧水量が定常状態になるまでの時間に対する母岩の透水係数の影響についての検討を行う。

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

(1)　安全性への影響の意味の整理（定量評価対象の解釈）

NUMO の「処分場の安全機能と技術要件（NUMO-TR-10-11）」[1]では、「高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係」のうち、天然バリアに関する安全機能は、隔離と閉鎖後閉じ込めの二つの基本概念に基づき示されている（表 2.2.9-1、表 2.2.9-2）。隔離については、「地質の長期的変動からの防護」及び「人の接近の抑制」が安全機能として示されており、どちらも適切なサイトを選定することにより確保する機能であるとされている。閉鎖後閉じ込めについては、「放射性物質の移行抑制」が安全機能として示されており、その詳細として「放射性物質の溶解度制限」、「収着による放射性物質の移行遅延」、「遅い地下水挙動」及び「分散による移行率の低減」が示されている。上述の安全機能に基づき、多重バリアシステムの構成要素である天然バリアに必要となる好ましい特性が示されている。ここで、天然バリアは「放射性物質の移行を抑制する機能を有し、かつ、安定で地層処分に好ましい条件を有する地下深部の岩盤とする」と NUMO-TR-04-01（2004）[3]において定義されている。この定義を踏まえ、NUMO-TR-10-11 では「放射性廃棄物を埋設しようとする岩盤を特に母岩と呼ぶ」と示され、また、母岩の好ましい特性の分類として、「熱環境」、「水理場」、「力学場」、及び「化学環境」が示されている（表 2.2.9-3）。このうち、地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込みの影響）に関係する特性の分類は「化学環境」であり、好ましい特性は「閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶性、収着遅延性とバリア材料の安定性に適していること」であると考えられる。

表 2.2.9-1　高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係[1]（表 2.2.6-1 再掲）

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

*1　適切なサイトを選定することにより確保する機能

*2　還元環境を保つことなどにより確保する機能

表 2.2.9-2　閉鎖後長期の安全確保の基本概念と安全機能[1]

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

表 2.2.9-3　母岩の好ましい特性[1]

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

回収可能性維持を考慮した場合の閉鎖後長期においても、同様に母岩の好ましい特性の化学環境「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性、収着遅延性とバリア材料の安定性に適していること」を有することが必要であると考えられる。

現時点での想定である、最長 300 年程度（RWMC 平成 27 年度～平成 28 年度検討[8]、[9]）の回収可能性維持期間中、開放坑道では発生する湧水を排水し続けることにより、化学組成の異なる地下水を処分坑道やその周辺へ引き込むことが予想される。地下水の地球化学特性は、岩盤中での核種・鉱物・地下水の相互反応を支配する重要な要素であり、地下水と岩石との主な反応としては鉱物の溶解・沈殿やイオン交換などが挙げられる[10]。これらの相互反応は、母岩の好ましい特性の化学環境である放射性物質の難溶解性や収着遅延性、バリア材料の安定性に影響を及ぼす恐れがある。例えば、放射性物質の難溶解性や収着遅延性は地下水が還元性である環境を維持することにより確保される機能である。回収可能性維持を考慮する際には、母岩の好ましい特性である化学環境への影響として「地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込みの影響)」を評価する必要があり、この影響は回収可能性維持期間が長くなるほど母岩の好ましい特性に変化を及ぼすことが考えられる。したがって、数百年に及ぶ時間依存性を考慮可能な解析的評価技術による、化学環境の変遷などの定量的評価が重要であると考えられる。また、地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度の把握には、回収可能性維持期間中の地下水流動の変遷を併せて評価する必要ある。地下水流動の変遷は坑道開放期間や母岩の透水性などに依存する。

(2)　安全性への影響を示す指標

(1)で述べたように、回収可能性の維持を考慮した場合においても、好ましい特性として、母岩の化学環境に関する「閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶性、収着遅延性とバリア材料の安定性に適していること」が必要であると考えられることから、本技術検討項目に対する安全性への影響を示す指標は、この特性に基づいて抽出できると考えられる。地下水の地球化学特性は岩盤中での核種・鉱物・地下水の相互反応を支配する。相互反応としては、pH の上昇や還元反応、イオン交換反応が考えられる[10]。放射性物質の難溶解性や収着遅延性は地下水が還元性である環境を維持することにより確保される機能である。特に、地下水の酸化還元状態は核種の溶解速度を大きく左右する[10]。また、例えば、高アルカリ環境では岩盤を構成す

る鉱物の溶解度が上昇し、長期挙動に影響を及ぼす可能性がある一方で、二次鉱物の生成・沈殿による間隙の閉塞により、核種移行が遅延される可能性も考えられる[14]。これらのことから、母岩の好ましい化学環境に対する「地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込みの影響)」を示す指標は、地下水の pH、酸化還元電位が挙げられる[14]。

この二つの指標に関して、地層処分を行う上で好ましい地質環境特性が整理された文献（地層処分技術 WG とりまとめ，2017）[36]によると、「化学場」の「天然バリアとして好ましい主な地質環境特性」は「地下水の水素イオン指数（pH）が高 pH あるいは低 pH ではないこと」及び「地下水が酸化性雰囲気ではないこと」が示されている。また、「化学場」の「人工バリア設置環境として好ましい主な地質環境特性」には、前述した二つの指標に加えて「地下水の炭酸化学種濃度が高くないこと」が特性として示されている。

(3)　既存の解析技術の整理

(2)では、母岩の好ましい化学環境に対する「地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込みの影響)」を示す指標として地下水の pH、酸化還元電位を挙げた。これらの指標を解析できる技術については本事業において平成 29 年度に調査が行われており、指標を対象とした解析技術は地球化学解析であると整理されている[7]。

また、本技術検討項目に対する安全性への影響を示す指標を対象とした解析には、地下水流動の評価が必要となる。地下水流動に関する解析技術を整理すると、飽和・不飽和浸透流解析と多相流解析に大別される（地盤工学会，2002）[37]。両者の大きな違いは不飽和領域の気体（空気）の取り扱いにある。飽和・不飽和浸透流解析は空気を疑似的に表現するため、それ自体の流れを考慮することはできないが、多相流解析は空気を気相として扱うため、その流れを考慮することが可能である。

表 2.2.9-4　代表的な移流分散及び多相流解析コード[37]

プログラム名	機能																							入力パラメータ																		開発元／配布元
																								浸透流					多相流					移流・分散								
	次元	離散化	定常	非定常	飽和	不飽和	透水異方性	地質構造	浸出面	揚水・注水	圧力経時変化	流量境界	濃度経時変化	マスフラックス境界	移流	分散	密度流	熱連成	多相流	遅延	減衰	化学反応	飽和透水係数	不飽和特性	間隙率／有効間隙率	比貯留係数	密度／単位体積重量	固有透過度	粘性係数	比熱	圧縮係数	膨張係数	分散長／分散係数	分子拡散係数	屈曲率	濃度拡散係数	遅延係数	吸着係数	減衰定数	
GETFLOWS-V 3	3	D	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○		○	○	○							○		○	○	登坂ほか（1996）
Dtransu 2 D·EL，3 D·EL	3	E	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○		○	○	○	○	○						○	○	○		○		○	岡山大学，ダイヤコンサルタント，三菱マテリアル
TRANSFLOW（MATRAN）	2	E	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○		○	○	○	○	○						○	○	○		○		○	CRC 総合研究所
FERM（FEGM）	3	E	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○		○	○	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	電力中央研究所
SUTRA	2	E	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○			○	○	○	○	○	○				○	○	○		○		○	USGS
TOUGH	3	I	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○		○	○	○	○	○	○				○				LBL
UTCHEM	3	D	○	○	○	○	○	○		○	○		○		○	○	○	○	○	○		○	○	○	○		○		○	○	○		○	○				○		Center for Petroleum and Geosystem Engineering, UT at Ausitin
MOCDENSE（MODFLOW）	2	D	○	○	○		○	○		○	○	○	○	○	○	○	○			○	○		○		○	○	○						○	○				○	○	IGWMC
MODPATH（MODFLOW）	2	D	○	○	○		○	○		○	○	○	○	○	○					○	○		○		○	○												○	○	USGS
MT 3 D（MODFLOW）	3	D	○	○	○		○	○		○	○	○	○	○	○	○				○	○		○		○	○	○						○	○				○	○	IGWMC
FEMFAT	3	E	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○		○	○	○	○	○						○	○	○		○		○	SSG
BIOPLUME Ⅱ	2	D	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				○	○	○	○		○									○			○			Rice University/IGWMC
SWICHA	3	E	○	○	○			○			○	○	○	○	○	○	○			○	○		○		○									○			○		○	Geo Trans/IGWMC
SWIFT Ⅱ	2	D	○	○	○		○	○		○	○	○	○	○	○	○				○	○	○	○		○	○							○	○	○		○		○	SNL
TARGET	3	D	○	○	○		○	○		○	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○																		Dames & Moore Inc.
RAND 3 D	3	R		○						○			○	○	○	○				○	○												○					○	○	Engineering Technologies Associates
HST 3 D	3	D	○	○	○		○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○				○		○	○	○	○									○	IGWMC

（注）D：差分法，E：有限要素法，I：積分差分法，R：ランダムウォーク法

(4)　既存解析的評価技術の現状レベルの整理と課題の抽出

1)　現状レベルの整理

a　地球化学解析

本技術検討項目の安全性への影響を示す指標である地下水の pH、酸化還元電位を評価する地球化学解析の適用例として、高 pH 地下水による天然バリアの変質に関する平衡論に基づいた、塚本らによる解析例[38]がある。この例では CSH（ケイ酸カルシウム水和物）が天然バリア内に生成され、その沈殿フロントが進行していく様子が示されている。平成 29 年度に実施した本事業の調査[7]では、この解析においては CSH の Ca/Si 比は 1 種類だけであるが、実験の再現性の良い溶解モデルがいくつか提案されており、そのような溶解モデルを用いれば、より現実に近いシミュレーションが可能になると考えられる、と整理されている。

このように地球化学解析の適用例はあるが、「地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込みの影響）を対象とした解析的評価の実施例は見当たらない。

b　地下水流動解析

地下水流動の解析技術の適用例として、髙本らによる飽和・不飽和浸透流解析の例[39]を図 2.2.9-1 に示す。事例は、霞ケ浦を対象として海水準変動の低下に伴う淡水による地下水の塩濃度変化や堆積物の堆積過程といった長期的な変遷を考慮した評価を行うため、大規模な 3 次元の定常解析及び非定常予備解析を実施後、2 次元鉛直断面非定常解析を実施している。解析結果から、既往調査で得られたコア間隙水の塩分濃度のプロファイルを概ね再現し、陸域からの淡水地下水の寄与の違いを定量的に示すことを可能としている。

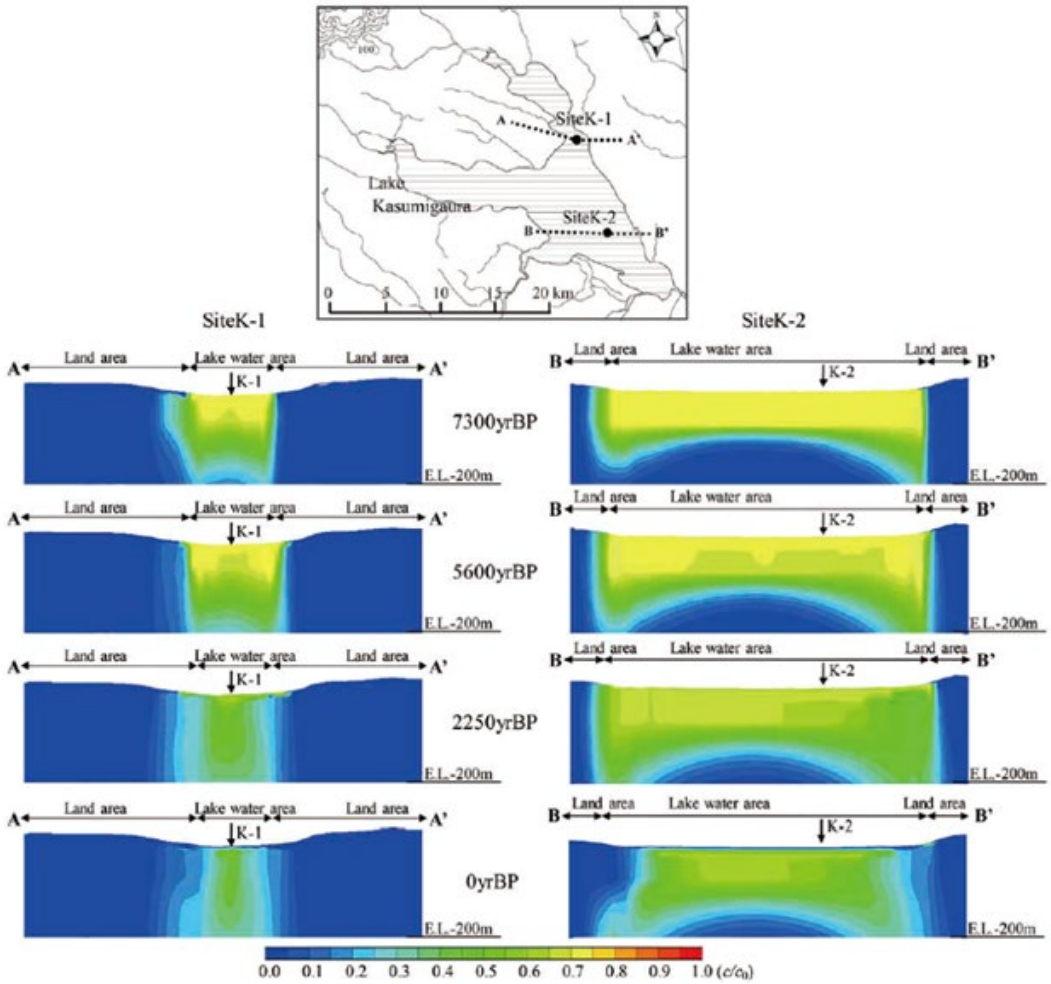


図 2.2.9-1　SiteK-1 及び SiteK-2 を通る 2 次元鉛直断面非定常解析結果に示される塩分濃度分布の経時変化[39]

山石らによる多相流解析の例[40]を図 2.2.9-2～図 2.2.9-4 に示す。例では二相流解析により、地下石油備蓄基地(久慈基地)周辺の地表水及び地下水の流動の数値シミュレーションを水封式岩盤石油地下タンクの建設から操業(オイルイン)にわたる期間について実施した結果が示されており、タンクへの湧水量や観測孔水位などの実測値との比較が行われている。解析には、地質、水文及び水理に関する情報が反映されている。

このように地下水流動の評価を対象とした飽和・不飽和浸透流解析や多相流解析の適用例はあるが、本技術検討項目を対象とした解析的評価の実施例は見当たらない。

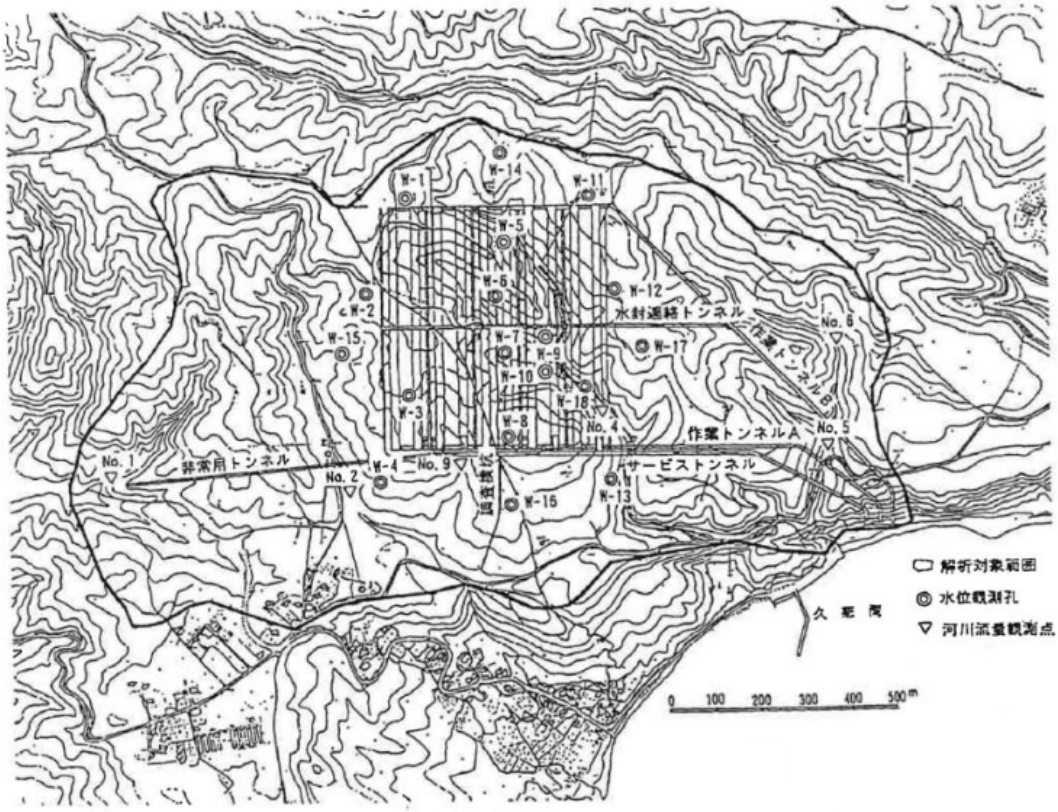


図 2.2.9-2　解析対象範囲表[40]

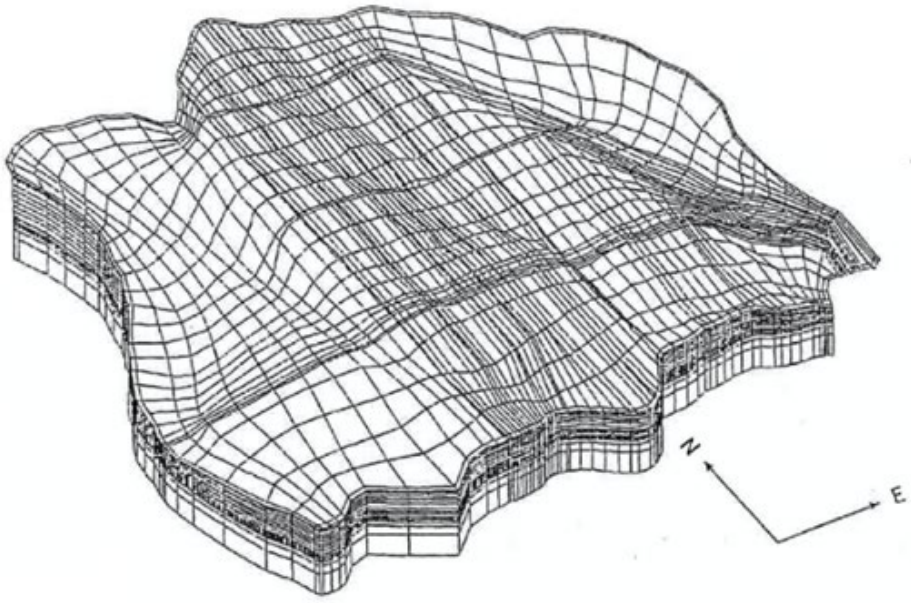


図 2.2.9-3　シミュレーションモデルの鳥瞰表[40]

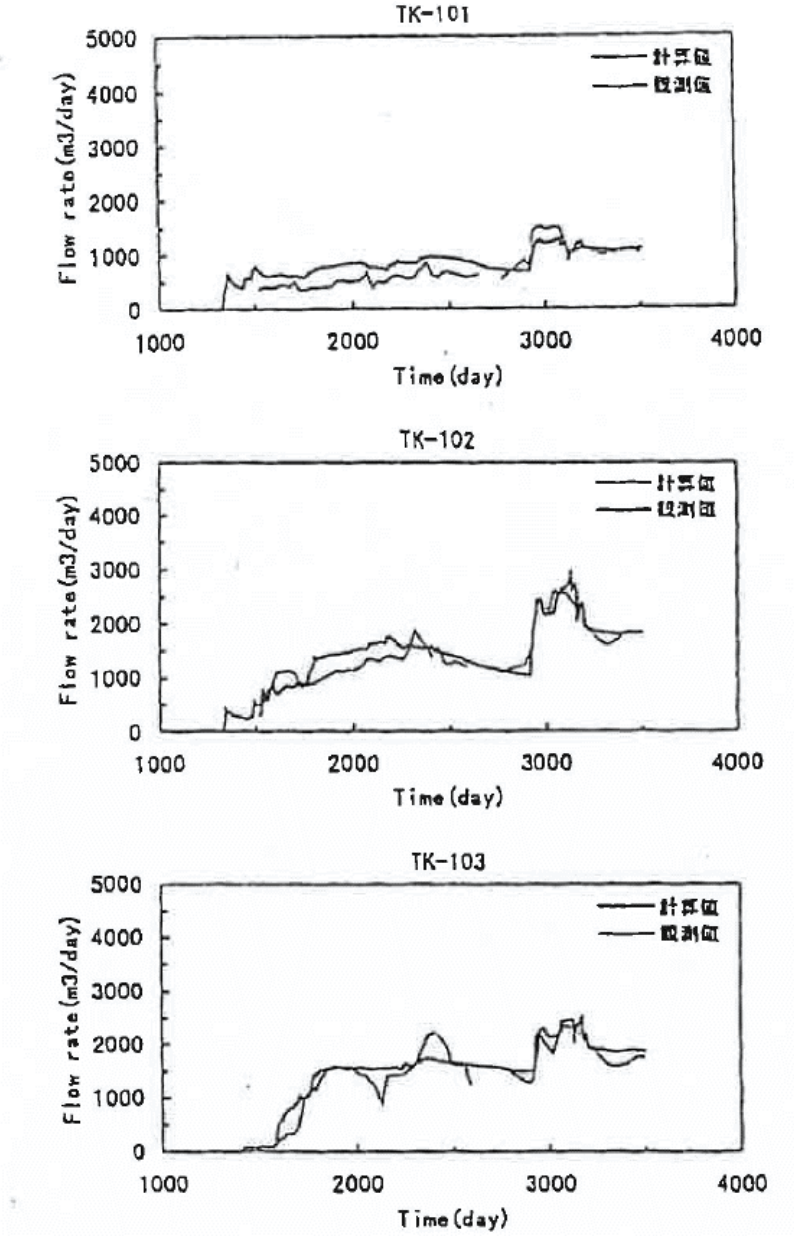


図 2.2.9-4　タンク湧水量経時変化表[40]

2)　課題

課題は、1)で整理したとおり、本技術検討項目を対象とした評価の実施例は見当たらないことから、「地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込みの影響）」を評価するための手法の体系化及び具体化が挙げられる。処分場を対象とした地下水の引き込みによる擾乱影響を評価するためには、ファーフィールドの地下水流動場の変化に基づくニアフィールドの水理学的・化学的影響の定量的評価が必要であるため、地下水流動解析から地球化学解析への情報の引き渡し方法の確立などが求められる。

また、地球化学特性及び地下水流動を対象とした解析的評価技術それぞれの課題も以下に整理する。

a　地球化学解析

地球化学特性を対象とした解析的評価技術の課題については平成 29 年度に実施した本事業の調査[7]において整理されており、熱力学データには不確実性が多いため、特に反応速度のデータなどの継続的な整備が求められることが課題として挙げられている。また、目的に応じた鉱物及び溶解モデルの取捨選択が必要であるが、この過程は経験的知識や試行錯誤によるところが大きいのが現状であるため手法の体系化が求められること、などが整理されている。

b　地下水流動解析

地下水流動を対象とした解析的評価技術の課題はこれまでに実施した本事業の検討[7]、[8]において整理されている。回収可能性維持期間中の開放坑道周辺のひずみの経時変化などに伴う、透水係数などの水理特性の変化を考慮した解析が必要であること、また、飽和・不飽和浸透流解析と多相流解析それぞれの特性を踏まえた手法の選択が必要であるが挙げられている。

(5)　本事業での取り組みの整理

本事業での取り組みとして、(4)で挙げた課題に対して解析的評価技術の体系化及び具体化を実施中である。処分場を対象とした地下水の引き込みによる擾乱影響を評価するためには、地下水流動場の変化に基づく水理学的・化学的影響の定量的評価が必要であるため、地下水流動解析から地球化学解析への情報の引き渡し方法の手法の具体化を行っている。

a　地球化学解析

地球化学特性の変化に係る解析的評価技術に関しては、平成 28 年度から取り組みが行われている[8]。平成 28 年度には回収可能性維持期間を考慮する場合の着目点として「不飽和領域（酸化領域）」、「化学物質の透過性」及び「核種の吸着性」が整理された。このうち、本技術検討項目に関する着目点としては「化学物質の透過性」及び「核種の吸着性」が挙げられる。これらの着目点を踏まえた化学的・熱的な環境の変化に要する時間の評価のための手法や手順の提示が行われた。平成 29 年度の取り組みでは、化学的・熱的影響の評価に関する現状技術について既往研究の調査が行われ、適用可能な評価方法や効果的な検討手順について検討が行われた[7]。

これらの成果に基づき、地球化学解析を実施する具体的な取り組みとして、本年度に、高 Cl^-濃度及び低 Cl^-濃度の還元性地下水中に淡水の酸化性地下水を引き込む際の鉱物反応を考慮した解析的評価方法の検討を実施する。

b　地下水流動解析

地下水流動の変化に係る解析的評価技術に関しても、平成 28 年度から取り組みが行われている[8]。平成 29 年度の取り組みでは、平成 28 年度に実施された坑道安定性評価の解析結果に基づき、坑道周辺の透水係数などの水理特性の経時変化を設定した飽和・不飽和浸透流解析が実施され、力学的評価を反映した地下水流動解析を行う方法が具体化された[7]。

本年度は、開放坑道の存在に伴う地下水の引き込みの程度を把握するため、流跡線分布を用いた可視化手法の具体化と地下水流動解析結果を地球化学解析へ引き渡す方法の具体化を行う。

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

(1)　安全性への影響の意味の整理（定量評価対象の解釈）

NUMO の「処分場の安全機能と技術要件（NUMO-TR-10-11）」[1]では、「高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係」のうち、天然バリアに関する安全機能は、隔離と閉鎖後閉じ込めの二つの基本概念に基づき示されている（表 2.2.10-1、表 2.2.10-2）。隔離については、「地質の長期的変動からの防護」及び「人の接近の抑制」が安全機能として示されており、どちらも適切なサイトを選定することにより確保する機能であるとされている。閉鎖後閉じ込めについては、「放射性物質の移行抑制」が安全機能として示されており、その詳細として「放射性物質の溶解度制限」、「収着による放射性物質の移行遅延」、「遅い地下水挙動」及び「分散による移行率の低減」が示されている。上述の安全機能に基づき、多重バリアシステムの構成要素である天然バリアに必要となる好ましい特性が示されている。ここで、天然バリアは「放射性物質の移行を抑制する機能を有し、かつ、安定で地層処分に好ましい条件を有する地下深部の岩盤とする」と NUMO-TR-04-01（2004）[3]において定義されている。この定義を踏まえ、NUMO-TR-10-11 では「放射性廃棄物を埋設しようとする岩盤を特に母岩と呼ぶ」と示され、また、母岩の好ましい特性の分類として、「熱環境」、「水理場」、「力学場」及び「化学環境」が示されている（表 2.2.10-3）。このうち、開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度に関係する特性の分類は「化学環境」であり、好ましい特性は「閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶性、収着遅延性とバリア材料の安定性に適していること」であると考えられる。

表 2.2.10-1　高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係[1]（表 2.2.6-1 再掲）

<table>
<tr><th>基本概念</th><th colspan="2">安 全 機 能</th><th>構 成 要 素</th></tr>
<tr><td rowspan="2">隔離</td><td colspan="2">地質の長期的な変動からの防護*1</td><td rowspan="2">天然バリア</td></tr>
<tr><td colspan="2">人の接近の抑制*1</td></tr>
<tr><td rowspan="9">閉鎖後閉じ込め</td><td rowspan="2">放射性物質の浸出抑制</td><td>ガラスマトリクスによる浸出抑制</td><td>廃棄体</td></tr>
<tr><td>発熱が著しい期間の地下水接触の防止</td><td>オーバーパック</td></tr>
<tr><td rowspan="7">放射性物質の移行抑制</td><td>放射性物質の溶解度制限*2</td><td>天然バリア，人工バリア</td></tr>
<tr><td>移流による移行の抑制</td><td rowspan="3">緩衝材</td></tr>
<tr><td>コロイド移行の防止・抑制</td></tr>
<tr><td rowspan="2">収着による放射性物質の移行遅延</td></tr>
<tr><td>遅い地下水流動</td><td rowspan="3">天然バリア</td></tr>
<tr><td>分散による移行率の低減</td></tr>
<tr><td>アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制</td><td>閉鎖用埋め戻し等</td></tr>
</table>

*1　適切なサイトを選定することにより確保する機能

*2　還元環境を保つことなどにより確保する機能

表 2.2.10-2　閉鎖後長期の安全確保の基本概念と安全機能[1]（表 2.2.9-2 再掲）

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

表 2.2.10-3　母岩の好ましい特性[1]（表 2.2.9-3 再掲）

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

回収可能性維持を考慮した場合の閉鎖後長期においても、同様に母岩の好ましい特性の化学環境「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性、収着遅延性とバリア材料の安定性に適していること」を有することが必要であると考えられる。

現時点での想定である、最長 300 年程度（RWMC 平成 27 年度～平成 28 年度検討[8]、[9]）の回収可能性維持期間中、坑道が開放され、換気が実施されることにより、坑道内の空気が岩盤に侵入し、水理学的な不飽和領域が形成され、坑道掘削前は還元環境であった化学条件が酸化環境となることが予想される。すなわち、地下水及び鉱物の酸化が生じる可能性がある。地下水の地球化学特性は、岩盤中での核種・鉱物・地下水の相互反応を支配する重要な要素であり、地下水と岩石との主な反応としては鉱物の溶解・沈殿やイオン交換などが挙げられる[10]。これらの相互反応は、母岩の好ましい特性の化学環境である放射性物質の難溶解性や収着遅延性、バリア材料の安定性に影響を及ぼす恐れがある。例えば、放射性物質の難溶解性や収着遅延性は地下水が還元性である環境を維持することにより確保される機能である。したがって、回収可能性維持を考慮する際には、母岩の好ましい特性である化学環境への影響として「開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度」を評価する必要があり、この影響は回収可能性維持期間が長くなるほど母岩の好ましい特性に変化を及ぼすことが考えられる。従って、数百年に及ぶ時間依存性を考慮可能な解析的評価技術による、化学環境の変遷などの定量的評価が重要であると考えられる。なお、回収可能性維持期間中の開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響は、坑道周辺の地下水の飽和状態が関係するため、地下水流動の変化を併せて評価する必要ある。

(2)　安全性への影響を示す指標

(1)で述べたように、回収可能性の維持を考慮した場合においても、好ましい特性として、母岩の化学環境に関する「閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶性、収着遅延性とバリア材料の安定性に適していること」が必要であると考えられることから、本技術検討項目に対する安全性への影響を示す指標は、この特性に基づいて抽出できると考えられる。地下水の地球化学特性は岩盤中での核種・鉱物・地下水の相互反応を支配する。相互反応としては、pH の上昇や還元反応、イオン交換反応が考えられる[10]。放射性物質の難溶解性や収着遅延性は地下水が還元性である環境を維持することにより確保される機能である。特に、地下水の酸化還

元状態は核種の溶解速度を大きく左右する[10]。また、例えば、高アルカリ環境では岩盤を構成する鉱物の溶解度が上昇し、長期挙動に影響を及ぼす可能性がある一方で、二次鉱物の生成・沈殿による間隙の閉塞により、核種移行が遅延される可能性も考えられる[14]。これらのことから、母岩の好ましい化学環境に対する「開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度」を示す指標は、地下水の pH、酸化還元電位が挙げられる[14]。

この二つの指標に関して、地層処分を行う上で好ましい地質環境特性が整理された文献（地層処分技術 WG とりまとめ，2017）[36]によると、「化学場」の「天然バリアとして好ましい主な地質環境特性」は「地下水の水素イオン指数（pH）が高 pH あるいは低 pH ではないこと」及び「地下水が酸化性雰囲気ではないこと」が示されている。また、「化学場」の「人工バリア設置環境として好ましい主な地質環境特性」には、前述した二つの指標に加えて「地下水の炭酸化学種濃度が高くないこと」が特性として示されている。

(3)　既存の解析技術の整理

(2)では、母岩の好ましい化学環境に対する「開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度」を示す指標として地下水の pH、酸化還元電位を挙げた。これらの指標を解析できる技術については本事業において平成 29 年度に調査が行われており、指標を対象とした解析技術は地球化学解析であると整理されている[7]。

また、本技術検討項目に対する安全性への影響を示す指標を対象とした解析には、地下水流動の評価が必要となる。地下水流動に関する解析技術を整理すると、飽和・不飽和浸透流解析と多相流解析に大別される（地盤工学会，2002）[37]。両者の大きな違いは不飽和領域の気体（空気）の取り扱いにある。飽和・不飽和浸透流解析は空気を疑似的に表現するため、それ自体の流れを考慮することはできないが、多相流解析は空気を気相として扱うため、その流れを考慮することが可能である。

(4)　既存解析的評価技術の現状レベルの整理と課題の抽出

1)　現状レベルの整理

a　地球化学解析

本技術検討項目の安全性への影響を示す指標である地下水の pH、酸化還元電位を評価する地球化学解析の適用例として、技術検討項目 ix でも挙げた高 pH 地下水による天然バリアの変質に関する平衡論に基づいた、塚本らによる解析例[38]がある。この解析例に対して、平成 29 年度に実施した本事業の調査[7]では、実験の再現性の良い溶解モデルがいくつか提案されているため、そのような溶解モデルを用いれば、より現実に近いシミュレーションが可能になると考えられる、と整理されている。

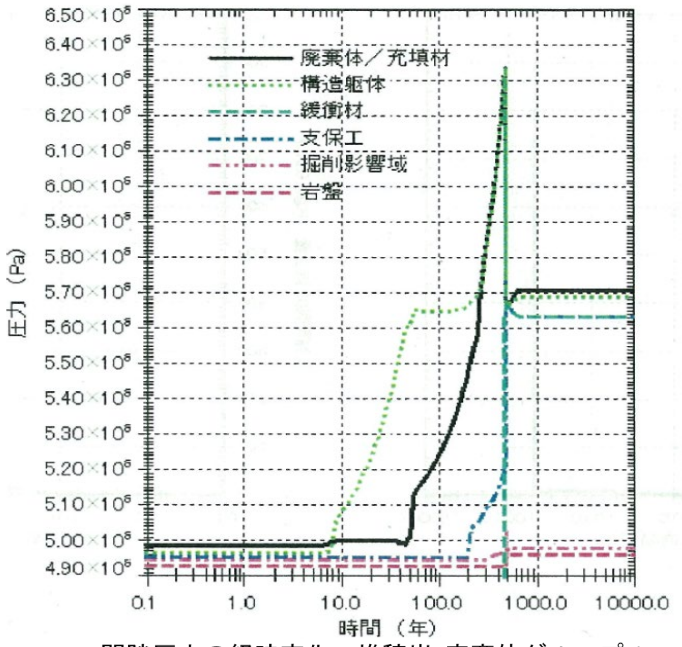
このように地球化学解析の適用例はあるが、「開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度」を対象とした解析的評価の実施例は見当たらない。

b　地下水流動解析

地下水流動の解析技術の適用例として、核燃料サイクル開発機構による多相流解析の例[41]を

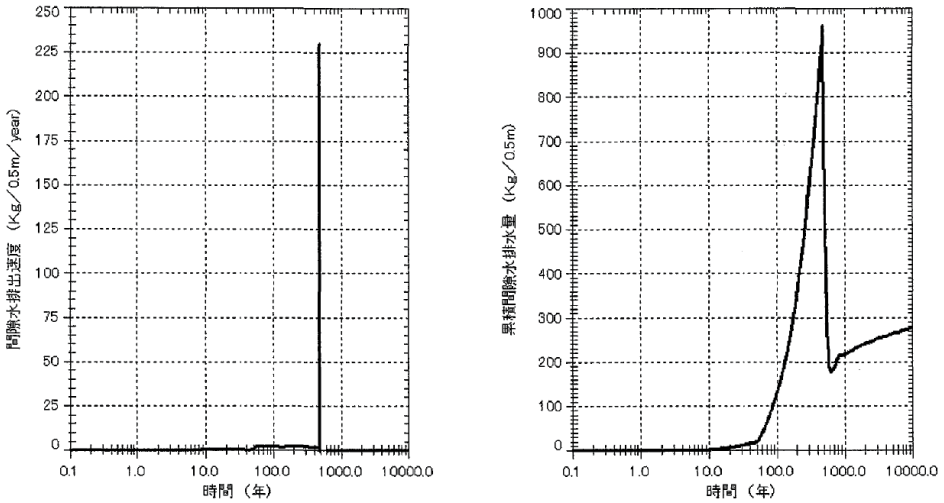
図 2.2.10-1～図 2.2.10-4 に示す。例は TRU 廃棄物処分性能評価におけるガス発生による影響の評価に資することを目的として、処分システム内でのガスの発生量を算定し、ガスの移行挙動に関する解析を実施したものである。気液二相流解析により、ニアフィールドの間隙圧力の経時変化及び坑道からの間隙水排水量の経時変化を算定し、ガス状核種の移行挙動の評価を実施している。

このように地下水流動の評価を対象とした飽和・不飽和浸透流解析や多相流解析の適用例はあるが、本技術検討項目を対象とした解析的評価の実施例は見当たらない。



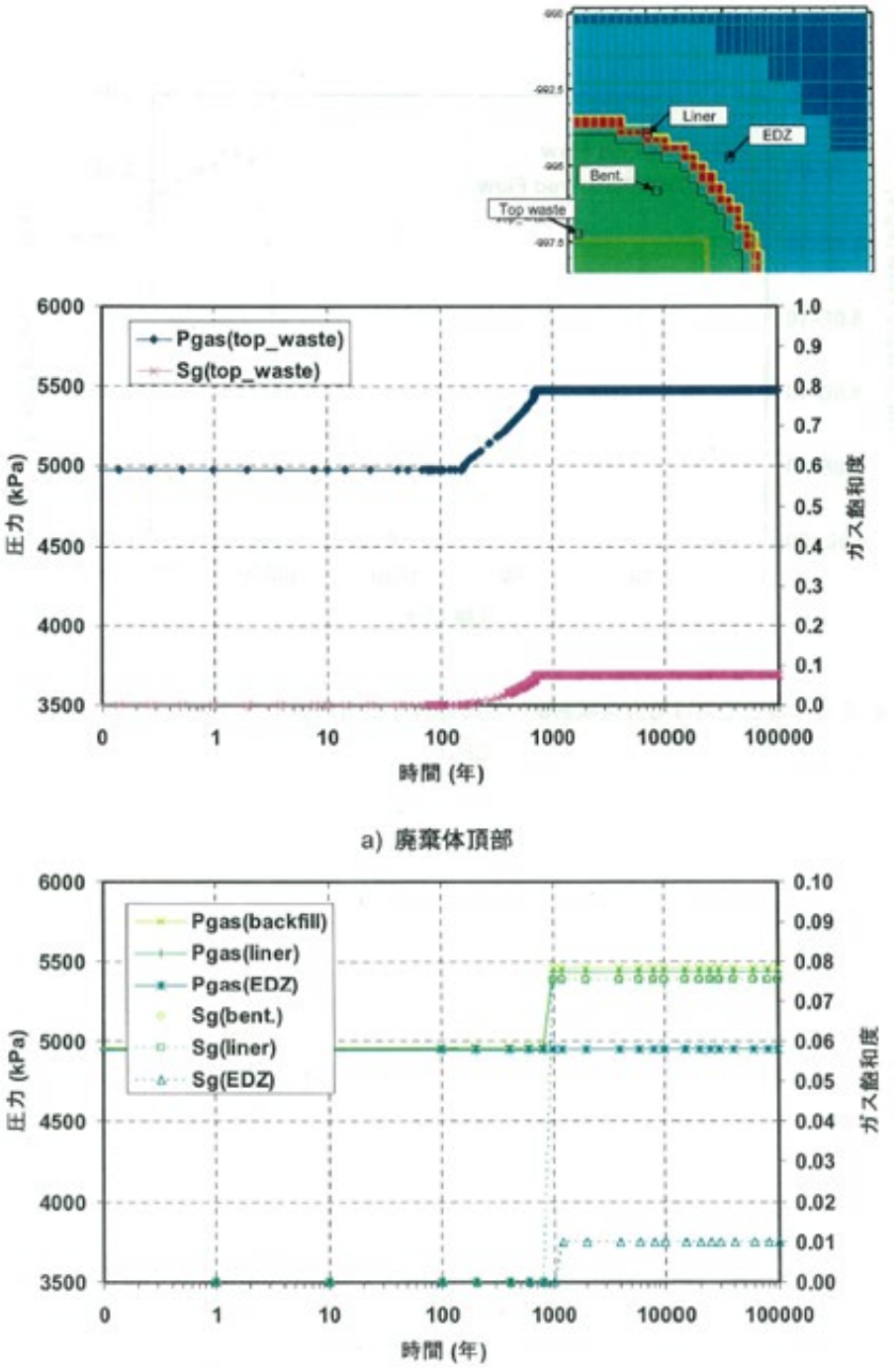
間隙圧力の経時変化－堆積岩 廃棄体グループ１

図 2.2.10-1　ニアフィールドの間隙圧力の経時変化及び坑道からの間隙水排水量の経時変化（1）[41]



間隙水排出速度（左図）と累積排出量（右図）の経時変化－堆積岩 廃棄体グループ１

図 2.2.10-2　ニアフィールドの間隙圧力の経時変化及び坑道からの間隙水排水量の経時変化（2）[41]



圧力と飽和度の時刻歴による変化（グループ３, 堆積岩, CH_4）

図 2.2.10-3　ガス状核種の移行挙動の評価（1）[41]

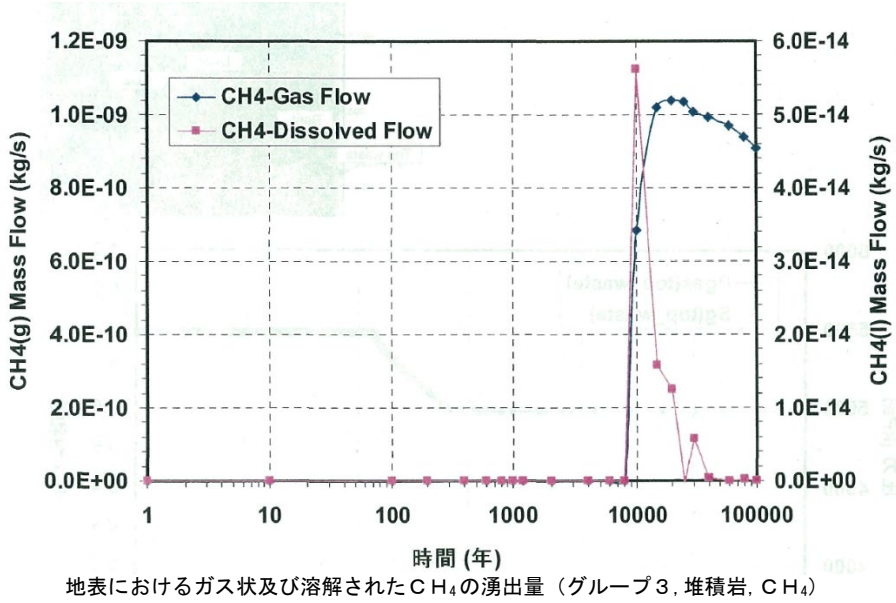


図 2.2.10-4　ガス状核種の移行挙動の評価（2）[41]

2)　課題

課題は、前述のように、本技術検討項目を対象とした評価の実施例は見当たらないことから、「開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度」を評価するための手法の体系化及び具体化が挙げられる。酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響を評価するためには、ニアフィールドの地下水流動の変化に基づく地球化学特性への影響の定量的評価が必要であるため、地下水流動解析から地球化学解析への情報の引き渡し方法の確立などが求められる。

地球化学特性及び地下水流動を対象とした解析的評価技術それぞれの課題も以下に整理する。

a　地球化学解析

地球化学特性を対象とした解析的評価技術の課題については平成 29 年度に実施した本事業の調査[7]において整理されており、熱力学データには不確実性が多いため、特に反応速度のデータなどの継続的な整備が求められることが課題として挙げられている。また、目的に応じた鉱物及び溶解モデルの取捨選択が必要であるが、この過程は経験的知識や試行錯誤によるところが大きいのが現状であるため手法の体系化が求められること、などが整理されている。

b　地下水流動解析

地下水流動を対象とした解析的評価技術の課題は平成 28 年度及び平成 29 年度に実施した本事業の検討[7]、[8]において整理されている。開放坑道周辺の不飽和領域に着目した解析的評価の実施例が非常に少ないため、解析の実施に必要な飽和・不飽和特性の適切な設定方法や、飽和・不飽和浸透流解析と多相流解析それぞれの特性を踏まえた解析手法の選択とその体系化が必要であることが挙げられている。また、回収可能性維持期間中の開放坑道周辺のひずみの経時変化などに伴う、透水係数などの水理特性の変化を考慮した解析が必要であることなどが挙げられている。

(5)　本事業での取り組みの整理

本事業での取り組みとして、(4)で挙げた課題に対して解析的評価技術の体系化及び具体化を実施中である。処分場を対象とした開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲とその程度を評価するためには、地下水流動場の変化に基づく水理学的・化学的影響の定量的評価が必要であるため、地下水流動解析から地球化学解析への情報の引き渡し方法の手法の体系化及び具体化を行っている。

a　地球化学解析

地球化学特性の変化に係る解析的評価技術に関しては、平成 28 年度から取り組みが行われている[7]、[8]。平成 28 年度には回収可能性維持期間を考慮する場合の着目点として「不飽和領域（酸化領域）」、「化学物質の透過性」及び「核種の吸着性」が整理され、全て本技術検討項目に係るものであると考えられる。これらの着目点を踏まえた化学的・熱的な環境の変化に要する時間の評価のための手法や手順の提示が行われた。平成 29 年度の取り組みでは、化学的・熱的影響の評価に関する現状技術について既往研究の調査が行われ、適用可能な評価方法や効果的な検討手順について検討が行われた。

これらの成果に基づき、本年度は地球化学解析を実施する具体的な取り組みとして、開放坑道の壁面を介して酸素が供給された際の鉱物反応を考慮したニアフィールドへの影響に対する解析的評価方法の検討を実施する。

b　地下水流動解析

地下水流動の変化に係る解析的評価技術に関しても、平成 28 年度から取り組みが行われている[7]、[8]。平成 28 年度には開放坑道周辺の酸化性雰囲気の発生予測方法として、坑道を詳細に表現した処分坑道詳細モデルを用いた坑道周辺の不飽和領域の評価による検討方法が示されている。地下水流動を評価する際に広く一般的に用いられる飽和・不飽和浸透流解析だけでなく、空気と水の二相流解析手法の導入の必要性についても示されている。平成 29 年度の取り組みでは、平成 28 年度に実施された坑道安定性評価の解析結果に基づき、坑道周辺の透水係数などの水理特性の経時変化を設定した飽和・不飽和浸透流解析及び二相流解析を実施し、不飽和領域の発生に着目した評価が実施され、解析的評価を行う方法が具体化された。

これらの成果に基づき、本年度は地下水流動解析結果を地球化学解析へ引き渡す方法の具体化を行う。

2.2.11　技術検討項目xi　ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度

(1)　安全性への影響の意味の整理（定量評価対象の解釈）

NUMO の「処分場の安全機能と技術要件（NUMO-TR-10-11）」[1]では、「高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係」のうち、天然バリアに関する安全機能は、隔離と閉鎖後閉じ込めの二つの基本概念に基づき示されている（表 2.2.11-1、表 2.2.11-2）。隔離については、「地質の長期的変動からの防護」及び「人の接近の抑制」が安全機能として示されており、どちらも適切なサイトを選定することにより確保する機能であるとされている。閉鎖後閉じ込めについては、「放射性物質の移行抑制」が安全機能として示されており、その詳細として「放射性物質の溶解度制限」、「収着による放射性物質の移行遅延」、「遅い地下水挙動」及び「分散による移行率の低減」が示されている。上述の安全機能に基づき、多重バリアシステムの構成要素である天然バリアに必要となる好ましい特性が示されている。ここで、天然バリアは「放射性物質の移行を抑制する機能を有し、かつ、安定で地層処分に好ましい条件を有する地下深部の岩盤とする」と NUMO-TR-04-01（2004）[3]において定義されている。この定義を踏まえ、NUMO-TR-10-11 では「放射性廃棄物を埋設しようとする岩盤を特に母岩と呼ぶ」と示され、また、母岩の好ましい特性の分類として、「熱環境」、「水理場」、「力学場」及び「化学環境」が示されている（表 2.2.11-3）。このうち、ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度に関係する特性の分類は「化学環境」及び「水理場」であり、化学環境の好ましい特性は「閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶性、収着遅延性とバリア材料の安定性に適していること」であり、水理場の好ましい特性は「閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流速が遅いこと」であると考えられる。

表 2.2.11-1　高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係[1]（表 2.2.6-1 再掲）

<table>
<tr><th>基本概念</th><th colspan="2">安 全 機 能</th><th>構 成 要 素</th></tr>
<tr><td rowspan="2">隔
離</td><td colspan="2">地質の長期的な変動からの防護*1</td><td rowspan="2">天然バリア</td></tr>
<tr><td colspan="2">人の接近の抑制*1</td></tr>
<tr><td rowspan="10">閉鎖後閉じ込め</td><td rowspan="2">放射性物質の浸出抑制</td><td>ガラスマトリクスによる浸出抑制</td><td>廃棄体</td></tr>
<tr><td>発熱が著しい期間の地下水接触の防止</td><td>オーバーパック</td></tr>
<tr><td rowspan="8">放射性物質の移行抑制</td><td>放射性物質の溶解度制限*2</td><td>天然バリア，人工バリア</td></tr>
<tr><td>移流による移行の抑制</td><td rowspan="3">緩衝材</td></tr>
<tr><td>コロイド移行の防止・抑制</td></tr>
<tr><td rowspan="2">収着による放射性物質の移行遅延</td></tr>
<tr><td rowspan="3">天然バリア</td></tr>
<tr><td>遅い地下水流動</td></tr>
<tr><td>分散による移行率の低減</td></tr>
<tr><td>アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制</td><td>閉鎖用埋め戻し等</td></tr>
</table>

*1　適切なサイトを選定することにより確保する機能

*2　還元環境を保つことなどにより確保する機能

表 2.2.11-2　閉鎖後長期の安全確保の基本概念と安全機能[1]（表 2.2.9-2 再掲）

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

表 2.2.11-3　母岩の好ましい特性[1]（表 2.2.9-3 再掲）

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

回収可能性維持を考慮した場合の閉鎖後長期においても、同様に母岩の好ましい特性の化学環境及び水理場を有することが必要であり、化学環境の「閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶性、収着遅延性とバリア材料の安定性に適していること」及び「閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流速が遅いこと」を考慮する必要がある。

現時点での想定である、最長 300 年程度（RWMC 平成 27 年度～平成 28 年度検討[8]、[9]）の回収可能性維持期間中、開放坑道では発生する湧水を排水し続けることにより、化学組成の異なる地下水を処分坑道やその周辺へ引き込むことによる化学環境の変化が予想される。回収維持期間終了後は、坑道の埋め戻しと処分場の閉鎖に伴う再冠水により、回収可能性維持期間中に形成された坑道及び処分場周辺の化学環境が回復する可能性が考えられる。地下水の地球化学特性は、岩盤中での核種・鉱物・地下水の相互反応を支配する重要な要素であり、地下水と岩石との主な反応としては鉱物の溶解・沈殿やイオン交換などが挙げられる[10]。これらの相互反応は、母岩の好ましい特性の化学環境である放射性物質の難溶解性や収着遅延性、バリア材料の安定性に影響を及ぼす恐れがある。例えば、放射性物質の難溶解性や収着遅延性は地下水が還元性である環境を維持することにより確保される機能である。したがって、回収可能性維持を考慮する際には、母岩の好ましい特性である化学環境への影響として、「ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度」を評価する必要があり、この影響は回収可能性維持期間が長くなるほど母岩の好ましい特性に変化を及ぼすことが考えられる。したがって、数百年に及ぶ時間依存性を考慮可能な解析的評価技術による、化学環境の変遷などの定量的評価が重要であると考えられる。

また、放射性物質の移行抑制のためには地下水挙動が遅いことが求められる。さらに、好ましい化学環境への影響評価のためにも、回収可能性維持期間を考慮した閉鎖後の地下水流動の変遷を評価する必要がある。地下水流動の変遷は坑道開放期間や母岩の透水性などに依存する。したがって、母岩の好ましい特性である水理場についても、数百年に及ぶ時間依存性を考慮可能な解析的評価技術による定量的評価が重要であると考えられる。

(2)　安全性への影響を示す指標

(1)で述べたように、回収可能性の維持を考慮した場合においても、好ましい特性として、母岩の化学環境に関する「閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶性、収着遅

延性とバリア材料の安定性に適していること」が必要であると考えられることから、本技術検討項目に対する安全性への影響を示す指標は、この特性に基づいて抽出できると考えられる。地下水の地球化学特性は岩盤中での核種・鉱物・地下水の相互反応を支配する。相互反応としては、pH の上昇や還元反応、イオン交換反応が考えられる[10]。放射性物質の難溶解性や収着遅延性は地下水が還元性である環境を維持することにより確保される機能である。特に、地下水の酸化還元状態は核種の溶解速度を大きく左右する[10]。また、例えば、高アルカリ環境では岩盤を構成する鉱物の溶解度が上昇し、長期挙動に影響を及ぼす可能性がある一方で、二次鉱物の生成・沈殿による間隙の閉塞により、核種移行が遅延される可能性も考えられる[14]。これらのことから、母岩の好ましい化学環境に対する「ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度」を評価する指標として、地下水の pH、酸化還元電位が挙げられる[14]。

この二つの指標に関して、地層処分を行う上で好ましい地質環境特性が整理された文献（地層処分技術 WG とりまとめ，2017）[36]によると、「化学場」の「天然バリアとして好ましい主な地質環境特性」は「地下水の水素イオン指数（pH）が高 pH あるいは低 pH ではないこと」及び「地下水が酸化性雰囲気ではないこと」が示されている。また、「化学場」の「人工バリア設置環境として好ましい主な地質環境特性」には、前述した二つの指標に加えて「地下水の炭酸化学種濃度が高くないこと」が特性として示されている。

また(1)では、回収可能性維持を考慮した場合の回収維持段階における好ましい特性として、母岩の水理場に関する「閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流速が遅いこと」を示した。地下水流速は動水勾配と透水係数に依存し、動水勾配は水頭により定まる。回収可能性維持期間中の開放坑道の存在による全水頭及び透水係数の変化と、その後の埋め戻しと閉鎖による全水頭及び透水係数の変化、すなわち水理場の変遷が地下水流速に影響を及ぼすと考えられる。これらのことから、母岩の好ましい水理場に対する「ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度」を評価する指標として、地下水流速が挙げられる[14]。この指標に関して、地層処分を行う上で好ましい地質環境特性が整理された文献（地層処分技術 WG とりまとめ，2017）[36]によると、「水理場」の「天然バリアとして好ましい主な地質環境特性」は「地下水流動が緩慢であること」が示されている。

(3)　既存の解析技術の整理

(2)では、母岩の好ましい化学環境に対する「ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度」を示す指標として地下水の pH、酸化還元電位を挙げた。これらの指標を解析できる技術については本事業において平成 29 年度に調査が行われており、指標を対象とした解析技術は地球化学解析であると整理されている[7]。

また、母岩の好ましい水理場に対する本技術検討項目の安全性への影響を示す指標として、地下水流速を上げた。この指標を解析できる技術を整理すると、飽和・不飽和浸透流解析と多相流解析に大別される。両者の大きな違いは不飽和領域の気体（空気）の取り扱いにある。飽和・不飽和浸透流解析は空気を疑似的に表現するため、それ自体の流れを考慮することはできないが、多相流解析は空気を気相として扱うため、その流れを考慮することが可能である。

(4)　既存解析的評価技術の現状レベルの整理と課題の抽出

1)　現状レベルの整理

a　地球化学解析

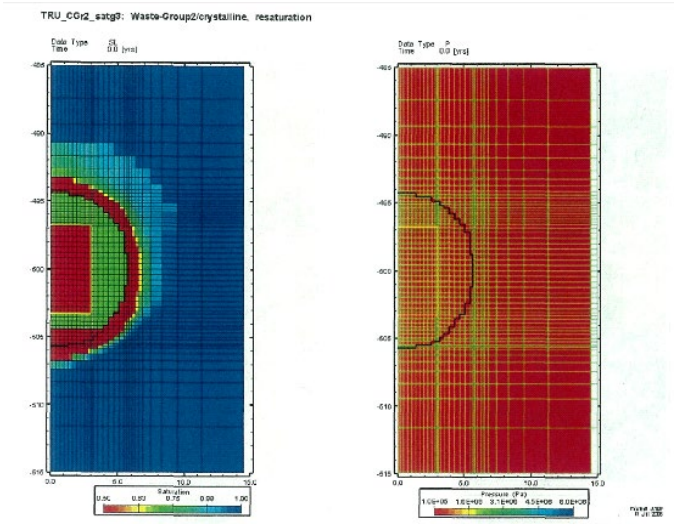
本技術検討項目の安全性への影響を示す指標である地下水の pH、酸化還元電位を評価する地球化学解析の適用例として、技術検討項目 a.でも挙げた高 pH 地下水による天然バリアの変質に関する平衡論に基づいた、塚本らによる解析例[38]がある。この解析例に対して、平成 29 年度に実施した本事業の調査[7]では、実験の再現性の良い溶解モデルがいくつか提案されているため、そのような溶解モデルを用いれば、より現実に近いシミュレーションが可能になると考えられる、と整理されている。

このように地球化学解析の適用例はあるが、「ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度」を対象とした解析的評価の実施例は見当たらない。

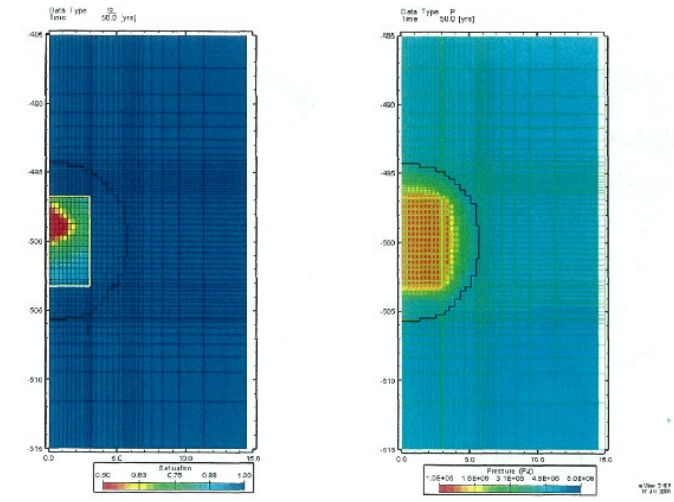
b　地下水流動解析

地下水流動の解析技術の適用例として、核燃料サイクル開発機構による多相流解析の例[41]を図 2.2.11-1 に示す。例は TRU 廃棄物処分性能評価におけるガス発生による影響の評価に資することを目的として、処分システム内でのガスの発生量を算定し、ガスの移行挙動に関する解析を実施したものである。気液二相流解析により、安全評価の前提条件である処分場の飽和状態になるまでの建設・操業・閉鎖の過程での遷移的な挙動の検討を実施している。解析は操業期間を 50 年として期間中にトンネルへの湧水が発生し、トンネル上部に不飽和領域が進展可能な状態とし、初期状態は操業終了時と設定され、再冠水に要する期間と挙動が検討された例である。また、再冠水までにガスが発生し、移行する場合を考慮した解析的評価も実施されている。この検討では、対象期間中に生じる力学的な影響による水理特性の変化は考慮されておらず、また、気液の移行特性の把握等が課題であるとまとめられている。解析モデルは処分システムを模擬した形状であり、単一廃棄体定置抗道の二次元鉛直断面を対象としたモデルを用いており、広域かつ三次元的な評価は実施されていない。

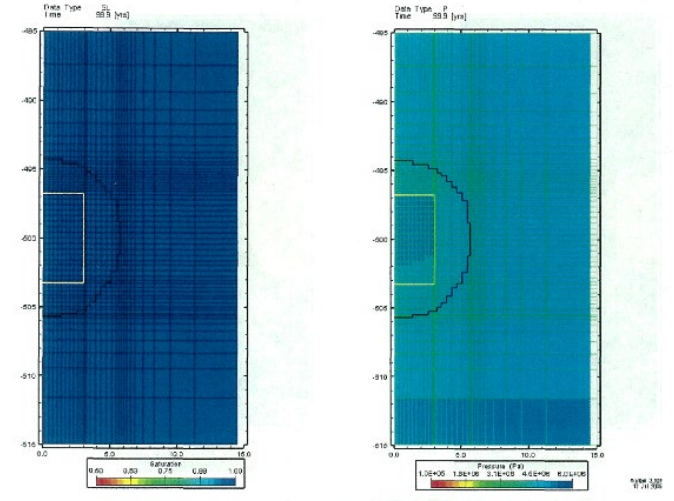
このように地下水流動の評価を対象とした飽和・不飽和浸透流解析や多相流解析の適用例はあるが、「ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度」を対象とした解析的評価の実施例は見当たらない。



a. 閉鎖直後（初期状態）



b. 50年間の再冠水後のシミュレーション結果



c. 100年間の再冠水後のシミュレーション結果

図 2.2.11-1　再冠水に要する期間と挙動の評価（図左：地下水の飽和度、図右：間隙圧力）[41]

2)　課題

課題は、1)で整理したとおり、本技術検討項目を対象とした評価の実施例は見当たらないことから、「ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度」を評価するための手法の体系化及び具体化が挙げられる。処分場を対象としたベースラインへの回復過程と回復の程度を評価するためには、ファーフィールドとニアフィールドの地下水流動及び地化学特性の変化とその影響の定量的評価が必要であるため、地下水流動解析から地球化学解析への情報の引き渡し方法の確立などが求められる。

また、地球化学特性及び地下水流動を対象とした解析的評価技術それぞれの課題も以下に整理する。

a　地球化学解析

地球化学特性を対象とした解析的評価技術の課題については平成 29 年度に実施した本事業の調査[7]において整理されており、熱力学データには不確実性が多いため、特に反応速度のデータなどの継続的な整備が求められることが課題として挙げられている。また、目的に応じた鉱物及び溶解モデルの取捨選択が必要であるが、この過程は経験的知識や試行錯誤によるところが大きいのが現状であるため手法の体系化が求められること、などが整理されている。

b　地下水流動解析

地下水流動を対象とした解析的評価技術の課題はこれまでの本事業の検討[7]、[8]において整理されている。回収可能性維持期間中の開放坑道周辺のひずみの経時変化などに伴う、透水係数などの水理特性の変化を考慮した解析が必要であることが挙げられている。また、開放坑道周辺の不飽和領域に着目した解析的評価の実施例が非常に少ないため、解析の実施に必要な飽和・不飽和特性の適切な設定方法や、飽和・不飽和浸透流解析と多相流解析それぞれの特性を踏まえた手法の選択とその体系化が必要であることなどが挙げられている。

(5)　本事業での取り組みの整理

本事業での取り組みとして、(4)で挙げた課題に対して解析的評価技術の具体化を実施中である。処分場を対象としたベースラインへの回復過程と回復の程度への影響を評価するためには、地下水流動場の変化に基づく水理学的・化学的影響の定量的評価が必要であるため、地下水流動解析から地球化学解析への情報の引き渡し方法の手法の体系化及び具体化について取り組みが行われている。

a　地球化学解析

地球化学特性の変化に係る解析的評価技術に関しては、平成 28 年度から取り組みが行われている[7]、[8]。平成 28 年度には回収可能性維持期間を考慮する場合の着目点として「不飽和領域（酸化領域）」、「化学物質の透過性」及び「核種の吸着性」が整理され、全て本技術検討項目に係るものであると考えられる。これらの着目点を踏まえた化学的・熱的な環境の変化に要する時間の評価のための手法や手順の提示が行われた。平成 29 年度の取り組みでは、化学的・熱的影響の

評価に関する現状技術について既往研究の調査が行われ、適用可能な評価方法や効果的な検討手順について検討が行われた。

これらの成果に基づき、本年度は地球化学解析を実施する具体的な取り組みとして、まずは地表面の地下水位が低下しないとした条件で、回収可能性維持期間を経た後の埋め戻し等による再冠水時の鉱物反応を考慮した解析的評価方法の検討を実施する。

b　地下水流動解析

地下水流動の変化に係る解析的評価技術に関しても、平成 28 年度から取り組みが行われている[7]、[8]。平成 28 年度には回収可能性維持期間を経て、閉鎖後 1000 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の評価方法として、飽和・不飽和浸透流解析及び二相流解析の導入の必要性が示された。平成 29 年度の取り組みでは、平成 28 年度に実施された力学的影響評価から得られた解析結果に基づき、坑道周辺の透水係数などの水理特性の経時変化を考慮した飽和・不飽和浸透流解析及び二相流解析を実施し、閉鎖後の再冠水に要する時間に着目した評価が実施され、解析的評価方法が具体化された。

これらの成果に基づき、本年度は処分場の 1 パネルを包含する解析領域を有するモデルを構築して、降雨による涵養を考慮した飽和・不飽和浸透流解析による再冠水時の地下水流動の変遷を把握するための解析的評価方法の検討が行われている。また、再冠水後の不飽和領域の変化の評価のため、飽和・不飽和浸透流解析と二相流解析の結果を比較し、不飽和特性の設定方法や解析的評価技術の具体化を行う。

2.3　既存技術の整理と課題抽出のまとめ

本章では、R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目に対して、安全性への影響の定量的な評価技術の整備に向けての既存技術の整理と課題抽出を行った。まずは、R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目に対して、安全性への影響の意味や指標の整理を行った。その上で、指標を時間依存で評価できる既存の解析技術を整理し、既存の解析技術を用いて評価を行う解析的評価技術について現状レベルの整理を行い、技術検討項目の定量的評価実施に向けた課題を抽出した。また、課題に対する本事業での取り組み状況の有無を整理し、本事業で取り組んでいる技術検討項目については取り組み状況も整理した。前節の各技術検討項目に対する既存技術の整理と課題抽出について一覧表としてまとめたものを表 2.3-1～表 2.3-3 に示す。ここでは複数の技術検討項目に関係する課題や解析技術を用いて定量的な評価を行う際の共通した課題について述べる。

課題１．解析に用いる物性値とその変化（劣化など）に関する不確実性の取り扱い

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

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

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

課題３．安全性への影響低減のための対策とその効果の定量的評価技術の検討

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

課題４．予測解析の信頼性確保への取り組み

解析的評価技術全般に関係する課題として、予測解析の信頼性確保への取り組みが必要なこと

が挙げられる。回収可能性を維持したことにより生じる現象及びその影響については、評価期間が長く、原位置の再現が難しい等の理由から、実験や実現象との比較による妥当性確認が困難である。そのため、予測解析の信頼性如何に確保するかが重要となる。解析結果の信頼性提示については、V&V（Verification and Validation, 検証と妥当性確認。以下、「V&V」という）の考え方や方法論が米国航空宇宙局（NASA）の技術標準[42]、米国機械学会（ASME）のガイドライン[43]などで示されており、理論についても体系的に整理されている文献（Roache, 1998）がある[44]。我が国でも V&V に関して学会などによる取り組みが盛んに行われている。このように近年ますます重要視されている V&V の観点を踏まえ、課題 1 ともあわせて解析的評価技術の整備を行っていくことが望まれる。

表 2.3-1　各技術検討項目に対する既存技術の整理と課題抽出の概要一覧表①

定量化すべき情報		技術検討項目		安全性への影響の意味の整理 （定量評価対象の解釈）	安全性への影響を示す指標	既存の解析技術 （指標を時間依存で解析できる技術）	既存解析的評価技術の現状レベル（○）と課題（●）	本事業での取り組み
(1) 操業期間中の安全性への影響	①回収可能性維持期間中の開放坑道の安全性への影響	1)開放坑道内の作業空間の安全性	a. 開放坑道の健全性（空間安定性）	回収可能性の維持期間が長くなるほど、開放坑道の周辺岩盤の変形（坑道構築時の応力再配分、クリープ変形、化学的・熱的影響による変形・強度特性の変化、支保工の変形）や支保工の劣化・変形（鋼材の腐食、コンクリートのセメント溶脱・ひび割れ・中性化）が進行する。 そのため、事業期間（維持期間）中の安全対策の一つである「空洞の力学的安定性の確保」への影響が大きくなることから、数百年に及ぶ力学的安定性の変化を定量的に評価する必要がある。	○岩盤のひずみ、応力（坑道設計時に用いる指標） ○支保部材の応力（坑道設計時に用いる指標） ○内空変位速度（坑道維持管理に用いる指標） ※コンクリートのひび割れ幅や長さ（坑道維持管理に用いる指標）	○粘弾性解析、粘弾塑性解析構成モデル（力学モデル）として大久保モデルや地山劣化モデルを導入 ※亀裂進展問題に対する数値解析手法やコンクリートのひび割れの発生・進展の予測解析手法の研究例はあるが、研究段階で、解析的な予測は困難	○数百年に及ぶ開放期間を想定した解析的評価例はない ○埋め戻された坑道に対してクリープを考慮した大久保モデルを導入した解析例はあり ○計測された内空変位速度から地山の劣化の進行を仮定する地山劣化モデルを導入した解析例はあり ●支保工の劣化による剛性低下等、物性値の時間変化の設定 ●一般土木構造物よりも、より長期間に対応した坑道の力学的安定性評価基準の設定 ●内空変位速度の坑道の力学的安定性評価指標への適用性検討（サイト選定段階での適用は入力値の設定方法が困難）	○周辺岩盤や支保工を連続体として、クリープを考慮した大久保モデルを導入し、吹付けコンクリートの溶脱による支保工の剛性の低下を想定した開放坑道の解析的評価方法を検討 ○支保工の劣化現象に関する地球化学解析からの情報の反映方法を検討 ○坑道の力学的安定性評価基準の研究事例調査と検討 ○解析結果を用いた、内空変位速度の坑道の力学的安定性評価指標への適用性検討
			b. 開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響	回収可能性の維持期間中に、開放坑道内の温度、特に廃棄体が定置された処分坑道の坑内温度が、廃棄体の発熱量の経時変化と空気の対流によって変化することが考えられる。 そのため、事業期間（維持期間）中の安全対策の一つである「作業環境の維持」のための「換気経路の確保」が必須となることから、維持期間中の開放坑道に対して、廃棄体からの熱影響を定量的に評価した上で、「換気経路の確保」を検討する必要がある。 なお、廃棄体の発熱は、周辺岩盤や支保工の変形・強度特性変化にも影響する可能性あり。	○坑内温度 （労働安全衛生規則の第六百十一条に定められた気温三十七度以下）	○伝導伝熱（熱伝導）解析 ○対流熱伝達（熱流体）解析 ○ふく射伝熱解析 ※換気は建設段階においても必須であり、一般のトンネルの建設計画時に用いられている換気設計技術指針がある	○廃棄体を定置した状態の開放坑道を対象として、換気が無い状態での評価期間1,000年の伝導伝熱（熱伝導）解析的評価例あり ○換気設計指針に基づく、処分場レイアウトを考慮した換気（冷房）設備の検討例あり ●対流熱伝達（熱流体）解析、及びふく射伝熱解析は、非線形性が強い解析を非定常で実施する必要があり、収束性や計算規模の面から実施は容易ではなく、必要な定数を実験等により求める必要がある ●廃棄体が定置された開放坑道の熱影響を考慮した換気検討	※既往の類似評価検討例があるため、本事業では本技術検討項目の取り組みは実施していない
	②回収作業時の安全性への影響（回収を実施する場合）	1)回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性	a. 埋め戻した坑道の再利用時の健全性	埋め戻した後の回収可能性の維持期間が長くなるほど、埋め戻した坑道の周辺岩盤の変形や支保工の劣化・変形が進行し、加えて、再掘削時の開放力や再掘削までの埋め戻し材の浸潤に伴う変形特性・膨潤圧の変化による岩盤や支保工の変形も考えられる。 そのため、事業期間（維持期間）中の安全対策の一つである「空洞の力学的安定性の確保」への影響が大きくなることから、埋め戻した坑道の再利用時の力学的安定性（数百年に及ぶ変化）を定量的に評価する必要がある。	○岩盤のひずみ、応力（坑道設計時に用いる指標） ○支保部材の応力（坑道設計時に用いる指標） ○内空変位速度（坑道維持管理に用いる指標、再掘削後以降の坑道を念頭においた指標） ※コンクリートのひび割れ幅や長さ（坑道維持管理に用いる指標）	(1)①1)a. 開放坑道の健全性に同じ	○埋め戻した坑道の再利用を想定した解析的評価例はない ○埋め戻し材及び支保工を考慮していないが、埋め戻された坑道に対してクリープを考慮した大久保モデルを導入した解析例はあり ○計測された内空変位速度から地山の劣化の進行を仮定する地山劣化モデルを導入した解析例はあり ●支保工の劣化による剛性低下等、物性値の時間変化の設定 ●一般土木構造物よりも、より長期間に対応した坑道の力学的安定性評価基準の設定 ●再利用時における内空変位速度の坑道の力学的安定性評価指標への適用性検討（サイト選定段階での適用は入力値の設定方法が困難）	○周辺岩盤や支保工を連続体として、クリープを考慮した大久保モデルを導入し、吹付けコンクリートの溶脱による支保工の剛性の低下を想定した埋め戻した坑道の解析的評価方法を検討 ○埋め戻し材の膨潤圧及び剛性低下を考慮した解析的評価方法を検討 ○支保工の劣化現象に関する地球化学解析からの情報の反映方法を検討 ○坑道の力学的安定性評価基準の研究事例調査と検討
			b. 再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響	回収可能性の維持期間中に、埋め戻した坑道の坑内温度が廃棄体の発熱量の経時変化し、再掘削時の時期等に応じて坑内温度が変化することが考えられる。 そのため、事業期間（維持期間）中の安全対策の一つである「作業環境の維持」のための「換気経路の確保」が必須となることから、再利用する坑道に対して、廃棄体からの熱影響を定量的に評価した上で、「換気経路の確保」を検討する必要がある。 なお、廃棄体の発熱は、周辺岩盤や支保工の変形・強度特性変化にも影響する可能性あり。	(1)①1)b. 開放坑道内への廃棄体からの熱影響に同じ	(1)①1)b. 開放坑道内への廃棄体からの熱影響に同じ	○廃棄体を定置した状態の埋め戻した坑道を対象として、換気が無い状態での評価期間1,000年の伝導伝熱（熱伝導）解析的評価例あり ○換気設計指針に基づく、処分場レイアウトを考慮した換気（冷房）設備の検討例あり ●対流熱伝達（熱流体）解析、及びふく射伝熱解析は、非線形性が強い解析を非定常で実施する必要があり、収束性や計算規模の面から実施は容易ではなく、必要な定数を実験等により求める必要がある ●廃棄体定置後一定期間埋め戻された坑道を再利用するときの換気検討	※既往の類似評価検討例があるため、本事業では本技術検討項目の取り組みは実施していない
		2）回収時の廃棄体容器の健全性		回収可能性の維持期間が長くなるほど、処分坑道内の空気（酸素）、地下水、熱の影響による廃棄体容器の腐食が進行する。 そのため、オーバーパックの設計要件である「耐食性」や「耐圧性」等への影響が大きくなることが考えられ、回収段階においても「構造健全性を維持し、閉じ込め性を損なわないこと」が求められると考えられることから、坑道の埋め戻し状態や人工バリアの環境条件を考慮した廃棄体容器の健全性の変化を定量的に評価する必要がある。	○廃棄体容器（オーバーパック）の腐食深さ	○腐食解析	○回収可能性維持期間を対象として、坑道の埋め戻し状態の違いを考慮した評価期間100年の腐食解析例あり ●温度、地下水、空気（酸素）などの人工バリアの環境条件をより現実的な設定とした解析 ●回収時には評価上は把持部の溶接部が厳しくなる可能性があるため、把持部に対する評価指標や構造検討の範囲の検討が必要 ●腐食の定量評価が困難な場合には、腐食しないような対策の検討	※既往の類似評価検討例があるため、本事業では本技術検討項目の取り組みは実施していない

表 2.3-2　各技術検討項目に対する既存技術の整理と課題抽出の概要一覧表②

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

表 2.3-3　各技術検討項目に対する既存技術の整理と課題抽出の概要一覧表③

定量化すべき情報	技術検討項目		安全性への影響の意味の整理（定量評価対象の解釈）	安全性への影響を示す指標	既存の解析技術（指標を時間依存で解析できる技術）	既存解析的評価技術の現状レベル（○）と課題（●）	本事業での取り組み
(2) 閉鎖後長期の安全性への影響	2)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う天然バリア（母岩）に期待する安全機能への影響	a. 地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込みの影響）	回収可能性の維持期間中の開放坑道への湧水が継続することにより、処分場周辺の化学組成の異なる地下水が引き込まれ、岩石－水反応が進行し、「母岩の好ましい特性」に変化を及ぼすようになると考えられる。特に母岩の化学環境の変化は、安全確保の基本概念となる「閉鎖後閉じ込め」の安全機能の一つである「放射性物質の移行抑制」に影響する。 そのため、回収可能性の維持期間中の開放坑道により、母岩の化学環境がどの程度変化し、またその変化がどの範囲まで及ぶかを定量的に評価する必要がある。また、そのためには地下水流動の変遷も定量的に把握する必要がある。	○地下水のpH、酸化還元電位（岩盤中の地下水のpHや酸化還元電位の変化が、放射性物質の難溶性、収着遅延性とバリア材料の安定性の変化を支配するため）	○地球化学解析 ⇒○地下水流動の変遷を定量化するための地下水流動解析として以下がある ・飽和・不飽和浸透流解析 ・多相流解析	地球化学解析 ○高pH地下水による天然バリアの変質に関する解析例はあるが、化学組成の異なる地下水の引き込みを対象とした解析評価的例はない ●反応速度を含む熱力学データの整備 ●鉱物や溶解モデルの設定（一般化した解析はできない） 地下水流動解析 ○海水準変動の低下に伴う淡水による地下水塩濃度変化の長期的変遷を考慮した解析例や大規模地下空洞の建設・操業に伴う地下水流動状況を再現した解析例があるが、地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度を対象とした解析的評価例はない ●地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度を対象とした解析手法の具体化 ●地下水流動解析から地球化学解析への情報の引き渡しなどの手法の体系化及び具体化 ●飽和・不飽和浸透流解析と多相流解析それぞれの特性を踏まえた手法の選択とその体系化	地球化学解析 ○高Cl-濃度の還元性地下水中に淡水の酸化性地下水を引き込む際の鉱物反応を考慮した解析的評価方法の検討 地下水流動解析 ○流跡線分布に基づく地下水の引き込み範囲と程度の解析的評価方法の検討 ○地下水流動解析から地球化学解析への情報の引き渡しなどの手法の体系化及び具体化
		b. 開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度	回収可能性の維持期間中に坑道が開放され、換気が実施・継続されることにより、壁面から支保工や岩盤へ酸素が供給され、坑道周辺における水理学的な不飽和領域の形成や化学的な酸化領域の形成が進展し、「母岩の好ましい特性」に変化を及ぼすようになると考えられる。特に母岩の化学環境の変化は、安全確保の基本概念となる「閉鎖後閉じ込め」の安全機能の一つである「放射性物質の移行抑制」に影響する。 そのため、回収可能性の維持期間中の開放坑道により、母岩の化学環境がどの程度変化し、またその変化がどの範囲まで及ぶかを定量的に評価する必要がある。また、そのためには坑道近傍の地下水流動の変化も定量的に把握する必要がある。	○地下水のpH、酸化還元電位（岩盤中の地下水のpHや酸化還元電位の変化が、放射性物質の難溶性、収着遅延性とバリア材料の安定性の変化を支配するため）	○地球化学解析 ⇒○不飽和領域を定量化するための地下水流動解析として以下がある ・飽和・不飽和浸透流解析 ・多相流解析	地球化学解析 ○高pH地下水による天然バリアの変質に関する解析例はあるが、酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度を対象とした解析評価的例はない ●反応速度を含む熱力学データの整備 ●鉱物や溶解モデルの設定（一般化した解析はできない） 地下水流動解析 ○TRU廃棄物処分のガス移行を考慮した間隙圧力等の経時変化の解析例はあるが、酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度を対象とした解析評価的例はない ●解析に必要な不飽和特性の設定 ●飽和・不飽和浸透流解析と多相流解析それぞれの特性を踏まえた手法の選択とその体系化 ●地下水流動解析から地球化学解析への情報の引き渡しなどの手法の体系化及び具体化が必要である。	地球化学解析 ○開放坑道の壁面を介して酸素が供給された際の鉱物反応を考慮したニアフィールドへの影響に対する解析的評価方法の検討 地下水流動解析 ○酸化性雰囲気（不飽和領域）の発生状況の解析的評価と不飽和領域の設定方法の検討 ○飽和・不飽和浸透流解析と二相流解析の結果比較による手法の具体化 ○地下水流動解析から地球化学解析への情報の引き渡しなどの手法の体系化及び具体化
		c. ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度	回収可能性の維持期間中における湧水や酸素の供給等によって生じた化学環境及び水理場の変化の程度が、閉鎖後のベースラインへの回復過程と回復程度に影響することが考えられる。これらの母岩の化学環境及び水理場の変化は、安全確保の基本概念となる「閉鎖後閉じ込め」の安全機能の一つである「放射性物質の移行抑制」に影響する。 そのため、回収可能性の維持期間中の開放坑道により変化した母岩の化学環境及び水理場が、ベースラインへと回復する際のどの範囲まで、どの程度回復するかを定量的に評価する必要がある。	○地下水のpH、酸化還元電位（岩盤中の地下水のpHや酸化還元電位の変化が、放射性物質の難溶性、収着遅延性とバリア材料の安定性の変化を支配するため） ○地下水流速（地下水流速が遅いことが、放射性物質の移行抑制に寄与するため） ○上記三つの指標が好ましい状態へ移行するまでの時間	○地球化学解析 ○地下水流動解析 ・飽和・不飽和浸透流解析 ・多相流解析	地球化学解析 ○高pH地下水による天然バリアの変質に関する解析例はあるが、化学的なベースラインへの回復過程と回復の程度を対象とした解析評価的例はない ●反応速度を含む熱力学データの整備 ●鉱物や溶解モデルの設定（一般化した解析はできない） 地下水流動解析 ○TRU廃棄物処分を対象とした単一廃棄体定置坑道の二次元鉛直断面モデルによる、ガス移行を考慮した建設・操業・閉鎖の過程での気液の挙動解析例あり ●広域かつ三次元的な解析的評価方法の検討 ●飽和・不飽和浸透流解析と多相流解析それぞれの特性を踏まえた手法の選択とその体系化 ●地下水流動解析から地球化学解析への情報の引き渡しなどの手法の体系化及び具体化が必要である。	地球化学解析 ○回収可能性維持期間を経た後の再冠水時の鉱物反応を考慮した解析的評価方法の検討 地下水流動解析 ○処分場の 1 パネルを包含する解析モデルによる、降雨による涵養を考慮した飽和・不飽和浸透流解析による再冠水時の地下水流動の変遷を把握するための解析的評価方法の検討 ○飽和・不飽和浸透流解析と二相流解析の結果比較による手法の具体化 ○地下水流動解析から地球化学解析への情報の引き渡しなどの手法の体系化及び具体化

第２章　参考文献

[1] 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.

[2] 原子力発電環境整備機構：地層処分事業の安全確保（2010 年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－，NUMO-TR-11-01，2011.

[3] 原子力発電環境整備機構：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性－「処分場の概要」の説明資料－，NUMO-TR-04-01，2004.

[4] 厚生労働省：労働安全衛生規則，平成 29 年 11 月改正.

[5] J.L. You. and J.R. Hunt.: Review Article, Coupled process in rock mass performance with emphasis on nuclear waste isolation, int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.39(2), pp.143-150, 2002.

[6] 土木学会：熱環境下の地下岩盤敷設の開発をめざして－熱物性と解析－，2006.

[7] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発　報告書（第３分冊），2018.

[8] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 28 年度地層処分技術調査等事業　可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発　報告書（第２分冊：その１），2017.

[9] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 27 年度地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書　第２編，2016.

[10] 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.

[11] 公益財団法人日本道路協会: 道路トンネル維持管理便覧【本体工編】，丸善出版，2017.

[12] 国土交通省鉄道局，鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル，丸善出版，2007.

[13] 土木学会：トンネルの変状メカニズム，2003.

[14] 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－，2004.

[15] Belytschko, T. and Black, T.: “lastic crack growth in finite elements with minimal remeshing”, International Journal For Numerical Methods in Engineering., Vol.45, pp.601-620, 1999.

[16] Sukumar, N., Moes, N., Moran, B. and Belytschko, T.: “Extended finite element method for three-dimensional crack modelling”, International Journal For Numerical Methods in Engineering, Vol.48, pp.1549-1570, 2000.

[17] 車谷麻緒，相馬悠人：有限ひずみ材料モデルを用いた鉄筋コンクリートの 3 次元破壊シミュレーションに関する基礎的検討，日本計算工学論文集，No.20182006，2018.

[18] 熊坂博夫，朝倉俊弘，小島芳之，松長 剛：地山の時間依存性を考慮したトンネル変状解析手法の適用性に関する検討，第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム，2003.
[19] 松尾他：地山の時間依存性を考慮した変状対策孔の解析手法に関する検討，第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム，2003.
[20] 日本鉄道建設公団：NATM 設計施工指針，1996.
[21] 日本機械学会：伝熱工学，2012.
[22] 建設業労働災害防止協会：新版　ずい道等建設工事における換気技術指針（設計及び粉じん等の測定），2002.
[23] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 26 年度 地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）報告書，2015.
[24] 勝又尚貴，山品和久，窪田 茂，黒崎ひろみ，沖原光信，戸栗智仁：地層処分　地下施設の換気システムの設計方法の検討（その 1　平常時の検討）土木学会第 72 回年次講演会　VII-038，2018.
[25] 石川博久，柴田雅博，藤田朝雄：放射性廃棄物地層処分における緩衝材のイライト化変質シミュレーション，粘土科学，34，pp.149-156, 1994.
[26] P. wersin, L. H. Johnson, I. G. McKinley: Performace of the bentonite barrier at yemperature beyond 100℃: Critical review, Physics and Chemistry of the earth 32, pp 780-788, 2007.
[27] Pusch, R.: Evolution of Models for Conversion of Smectite to Non-Expandable Minerals. SKB TR 93-33., 1993.
[28] Kamei, G., Yusa, Y., Sasaki, N.: Natural Analogue Study on the Long-Term Durability of Bentonite. – Time – Temperature Condition and Water Chemistry on Illitization at the Murakami Deposit, Japan-, Material Research Society Symposium Proceeding, 257, pp.505-512., 1992.
[29] Nagra: Montmorillonite stability under near-field conditions, Technocal Report 14-12, 2014.
[30] 原子力発電環境整備機構：「包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－（レビュー版）」，2018.
[31] POSIVA: Current Status of Mechanical Erosion Studies of Bentonite Buffer, POSIVA 2012-45, 2013.
[32] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業　処分システム工学確証技術開発報告書（第 2 分冊）　処分システム工学確証技術開発　人工バリア品質／健全性評価手法術の構築－緩衝材，2018.
[33] Torbjorn Sanden, Lennart Borgesson: Deep repository-engineered barrier system. Piping and erosion in tunnel backfill Laboratory tests to understand processes during early water uptake, SKB, Report R-06-72, 2008.
[34] 松本一浩，棚井憲治：緩衝材の侵入現象モデルに関する適用性の確認，JAEA Research,

2009-070，2010.
[35] 土木学会 岩盤力学委員会：大規模地下空洞の建設・維持管理事例（H25 年度集約版），CD-ROM，2014.
[36] 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　地層処分技術 WG：地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果（地層処分技術 WG とりまとめ），2017.
[37] 地盤工学会：土壌・地下水汚染の調査・予測・対策，2002.
[38] 塚本政樹，藤田智成：セメント系材料との相互作用による岩石及び緩衝材の変質反応シミュレーション，電力中央研究所報告，U99046，2000.
[39] 髙本尚彦，嶋田 純，白石知成：非定常地下水流動解析による霞ケ浦の完新世における古水文環境の復元，Vol.59，No.4，pp.325-343，地下水学会誌，2017.
[40] 山石 毅，小林 仁，谷 藤吉郎，岡本明夫，登坂博行，小島圭二：地下石油備蓄基地建設に伴う水文・水理挙動の数値シミュレーション，地下水学会誌、Vol.40，No.2，pp.167-183，1998.
[41] 核燃料サイクル開発機構　東海事業所：TRU 廃棄物におけるガス発生・移行解析（研究報告），JNC TN8400 2005-026，2005.
[42] National Aeronautics and Space Administration: NASA TECHNICAL STANDARD NASA-STD-7009A, STANDARD FOR MODELS AND SIMULATIONS, 2016.
[43] The American Society for Mechanical Engineers: Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechan-ics, ASME V&V 10-2006, pp. 1-21, 2006.
[44] Roache, J. P.: Verification and Validation in Computational Science and Engineering, Hermosa Publishers, pp. 107-141, 1998.

第3章　回収可能性維持期間の影響に関する定量的評価

3.1　検討方針と検討項目の概要

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

3.1.1　定量評価の検討方針

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

- 方針１：R&R 検討会で示された技術検討項目に沿った検討を行う

定量化に必要な技術検討項目については、R&R 検討会においてまとめられており、2.3 節の表 2.3-1～表 2.3-3 に示されたように、本事業では、現段階では既往の類似検討例がない、あるいは少なく、今後、定量的評価のための解析技術等の整備が必要となると考えられる以下の 6 項目に対して、優先して安全性への影響の評価方法の具体化を行うこととした。

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

なお、開放坑道の健全性（空間安定性）、坑道開放期間中の継続する坑内湧水の影響、ベースラインへの回復過程と回復の程度については、平成 28 年度より、具体的な力学的影響評価および水理学的影響評価の検討を行っている[1]、[2]。

- 方針２：影響の定量的評価手法と安全性に対する影響を明確にした検討を行う

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

➢ 方針 3：時間変化を示すことのできる手法を用いる。

解析的評価方法として、回収可能性維持の影響を明らかにするために、回収維持のために地下施設が開放されている期間による影響を定量化することが必要である。そのため、解析は非定常解析を行うことを主とし、経時変化を示すことができるものとする。経時変化を明確とするために、モデル、前提条件等はできるだけ、シンプルなものとし、モデルの複雑さによって、現象の経時変化が明確にならないことを避けるものとする。また、多くの解析の前提条件、モデルはサイトの特性が反映されるべきものであるため、今後、サイトが具体的になった場合に、その情報を取り込んだ解析ができる手法を検討対象とする。

3.1.2 検討項目の概要

前項の検討方針、及び昨年度までに実施した検討結果を基にした本年度の実施内容を以下に示す。

(1) 技術検討項目に対する影響評価方法の整理

本業務では、平成 28 年度より回収可能性維持期間における「閉鎖前の作業環境の安全性」と「閉鎖後の長期安全性」を評価するため方法として、力学的・水理学的・化学的の各影響評価方法について検討を実施してきた[1]、[2]。一方、前項 3.1.1 の方針で示したように、R&R 検討会で示された技術検討項目に沿った検討を行うこととなった。

昨年度まで実施してきた回収可能性維持期間の影響評価方法の検討では、各影響評価方法が技術検討項目に対してどの様に位置付けられているのかが明確でない部分があった。そのため、本年度の検討では、各技術検討項目において着目する現象や影響を与える現象を抽出し、取り組みの現状と課題も含めた整理を行っている（第 2 章）。その整理によって示された、各技術検討項目に対する影響評価方法の概要を示す。さらに、この技術検討項目に対する影響評価方法の整理から、回収可能性維持期間に対する各影響評価方法がどのように位置付けられているのかを示す。

(2) 回収可能性維持期間の影響評価方法の検討

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

1) 水理学的影響評価

昨年度の検討により課題となった水理解析手法の適切な解析条件の設定や解析結果の妥当性に係る課題についての検討を進めると共に、技術検討項目に関する定量評価方法を例示する。実施内容としては、水理解析の課題の検討として、不飽和領域に関する既往の知見の整理と不飽和領域の形成や再冠水時間についての、設定パラメータの違いに関する感度解析、及び解析手法の違いによる影響の把握（飽和・不飽和浸透流解析、二相流解析等）を行い、

解析手法の高度化のための検討も実施する。また、技術検討項目に関する定量評価方法の例示として、坑道開放状態の維持による地下水の引き込み影響の評価のために、流跡線解析（地下水流動の可視化）を実施する。また、これらの結果については、必要に応じて種々の水理学的データを抽出し、「2)　化学的影響評価」に引き渡す。

2)　化学的影響評価

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

3)　力学的影響評価

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

3.2　技術検討項目に対する影響評価方法の整理

3.2.1　検討手順

本章における検討手順を以下に示す。

① 技術検討項目として挙げられている内容に関わる現象や影響について抽出する前段階として、安全性への影響として検討の対象となる現象について図示する。(3.2.2)。

② 技術検討項目の評価対象とする現象や影響を与えている現象を、時間軸を考慮して関係性を図示する。(3.2.3(1))。

ここで、対象とする技術検討項目は、3.1 節にて示した以下の 6 項目とする。

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

③ ②で挙げられた評価対象の現象や影響を与えている現象の関連を示したものを基に、力学的影響評価、水理学的影響評価、化学的影響評価それぞれに分類して、各影響評価項目で考慮する現象とそれらに影響を与えている現象に整理する（3.2.3(2)）。

④ 各技術検討項目において考慮すべき現象や要因を整理し、これらを基にそれぞれの技術検討項目において影響評価の流れを考える（3.2.3(3)）。

3.2.2　検討対象とする現象の図示

ここでは、技術検討項目として挙げられている内容に関わる現象や影響について抽出する前段階として、安全性への影響として検討の対象となる現象について横置き PEM 定置方式について図示する。検討対象は、今年度は横置き PEM 方式を主としたが、適宜、竪置き定置方式についても対象としている。R&R 検討会の報告書では、定量化に必要となる技術検討項目について記されているが、どの様な現象を対象として安全性への影響を懸念しているかについては明確ではなかった [2]。そのため、技術検討項目に対する影響評価方法の整理を行うにあたり、現象の範囲とイメージを共有し、理解を助けるために、対象とされている現象について図に示す必要があると考えた。この図示にあたっては、ニアフィールドにおける現象とファーフィールドで考えるべき現象を分けることとした。また、坑道の構築直後からの時系列で現象を考慮することと、現象が力学的・水理学・化学的影響のいずれによるものかを明確にすることを方針とした。実際には、様々な現象は同時に発生しているが、ここでは対象としている現象について、スケールや各影響に分けて図化し、理解しやすくなることを優先した。

(1)　ニアフィールドにおける現象

ニアフィールドを対象としている技術検討項目は、以下の 5 項目である。

- 開放坑道の健全性（空間安定性）
- 埋め戻した坑道の再利用時の健全性
- 坑道開放期間中の継続する坑内湧水の影響
- 開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度」
- ベースラインへの回復過程と回復の程度

ニアフィールドでは、お互いが関連しつつ様々な現象が起こると想定されることから、ここでは、力学的影響、水理学的影響、化学的影響に分けて図示した。

力学的影響に関して、坑道構築から再掘削までの期間に発生する現象のイメージを図 3.2.2-1に示す。坑道構築後から周辺岩盤や支保工の変形が進行すると、いずれ、空間が不安定化すると考えらえる。また、坑道を掘削すれば周辺岩盤には透水性が増加する領域が発生し、さらに、周辺岩盤の変形が進行すれば、透水性が変化する領域は拡大していくものと想定される。埋め戻しの完了後は、坑道内部の埋め戻し材の湿潤に伴う変形特性の変化や膨潤圧の影響を受けつつ、坑道が開放された状態よりは小さながらも周辺岩盤の変形は継続するものと想定される。ただし、埋め戻し後に変形が進行しても、坑道内部は埋め戻し材で支えられているので、不安定化に対する懸念は不要と考えられる。その後、廃棄体回収のために再掘削をした場合は、坑道構築後と同様に、周辺岩盤や支保工の変形の進行に伴い坑道が不安定化することが懸念される。

水理学的影響に関して、坑道構築から再掘削までの期間に発生する現象のイメージを図 3.2.2-2に示す。坑道を構築すると周辺岩盤の水圧分布等の地下水流動場が変化して湧水が発生し、場合によっては坑道壁面から大気が浸入すると考えられ、不飽和領域が発生することが想定される。また、湧水が発生すれば、周辺の化学組成の異なる地下水が引き込まれることも考えなければならない。さらに、竪置き定置方式で岩盤と緩衝材の間に隙間が存在する場合には、湧水によって緩衝材中のベントナイトが流出する可能性が指摘されている[3]、[4]。流出によって、緩衝材が損失すれば、緩衝材の機能として求められる低透水性が損なわれる可能性がある。

坑道の埋め戻し後には、湧水が抑えられて周辺岩盤の地下水流動が変化し、処分場周辺からの地下水の引き込みが大きく減少すると考えられる。また、埋め戻し後には埋め戻し材への浸潤が始まり、横置き PEM 方式の場合では、岩盤と埋め戻し材の間に隙間が存在し、湧水量が継続してある程度ある場合には、埋め戻し材中のベントナイトが流出し、埋め戻し材の低透水性が損なわれる可能性がある。また、周辺の地下水流動場の回復にどの程度の時間がかかるのかも検討対象となる。さらに、再掘削が行われた場合は、坑道構築後と同様に、湧水が発生し、不飽和領域が発生する可能生、周辺の地下水の再引き込みも起こることも考えられる。

化学的影響に関して、坑道構築から再掘削までの期間に発生する現象のイメージを図 3.2.2-3に示す。坑道を構築した時に、溶存ガスの脱ガスや大気浸入により、不飽和領域が生じると、その壁面から大気中の酸素が周辺岩盤に拡散していくと考えられる。その脱ガスや酸素供給により地下水の pH が変化する。また、吹付けコンクリートのセメント成分が地下水と接触することで溶脱や高 pH 水が生じるようになる。そして、脱ガスや酸素の供給・拡散による地下水の pH の変化や、セメント成分による高 pH 水の発生によって周辺岩盤を構成する鉱物が溶解し、二次鉱物が生成されて、周辺岩盤における地下水の pH や酸化還元電位、透水性が変化することも考え

られる。埋め戻し後は、壁面から大気中の酸素の供給は止まるものの、埋め戻し材や緩衝材中に存在している酸素が、影響を与えるものと考えられる。さらに、埋め戻しから再冠水の期間はベースラインへの回復過程となるが、その過程において、周辺岩盤における地下水の pH や酸化還元電位がどの程度の範囲まで影響を受けるのか、あるいはどの程度の時間で回復するのかが検討対象となる。再掘削した場合は、坑道構築後と同様の現象が再び起こるものと考えられる。

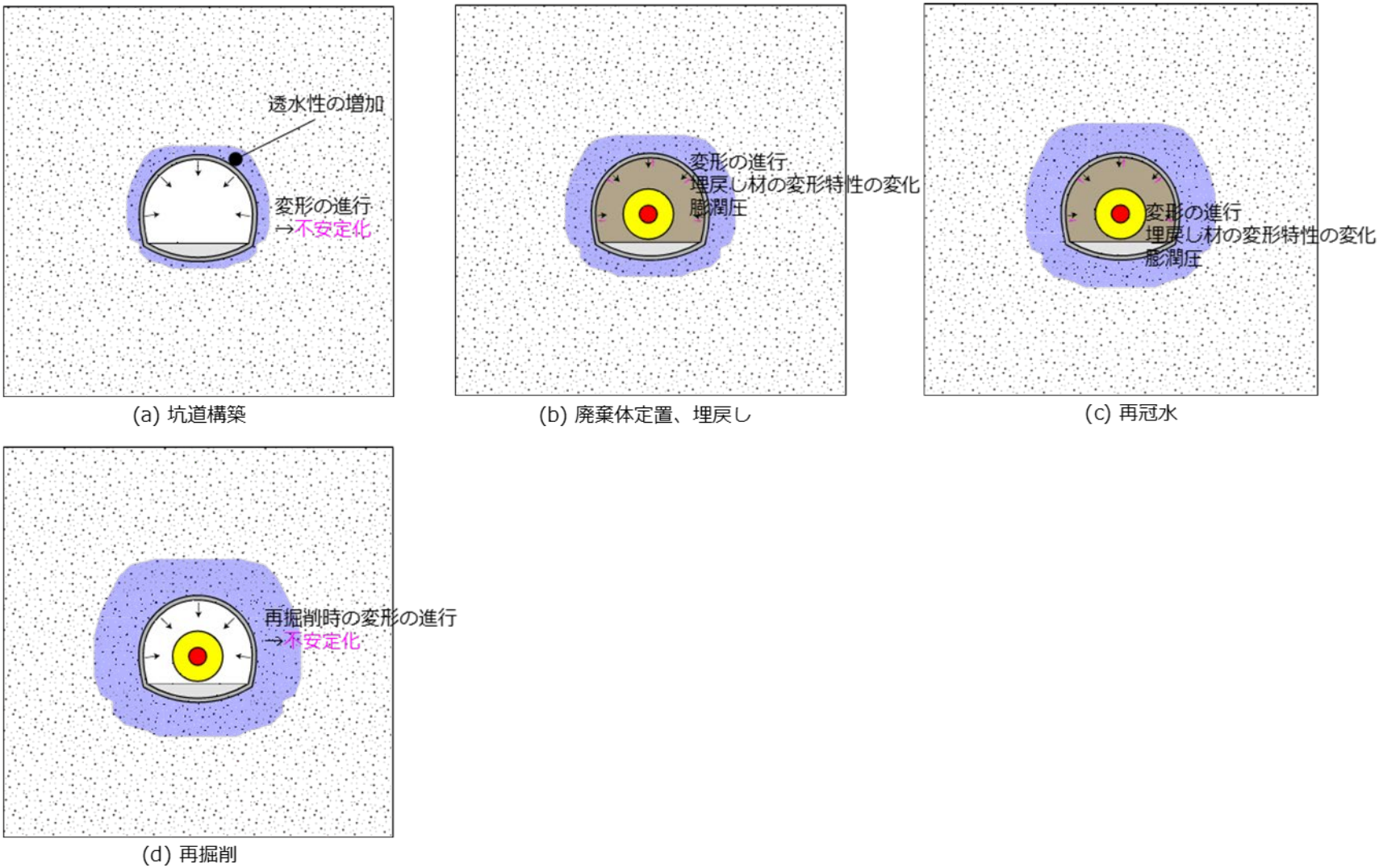


図 3.2.2-1　ニアフィールドにおいて起こりうる現象（力学的影響）

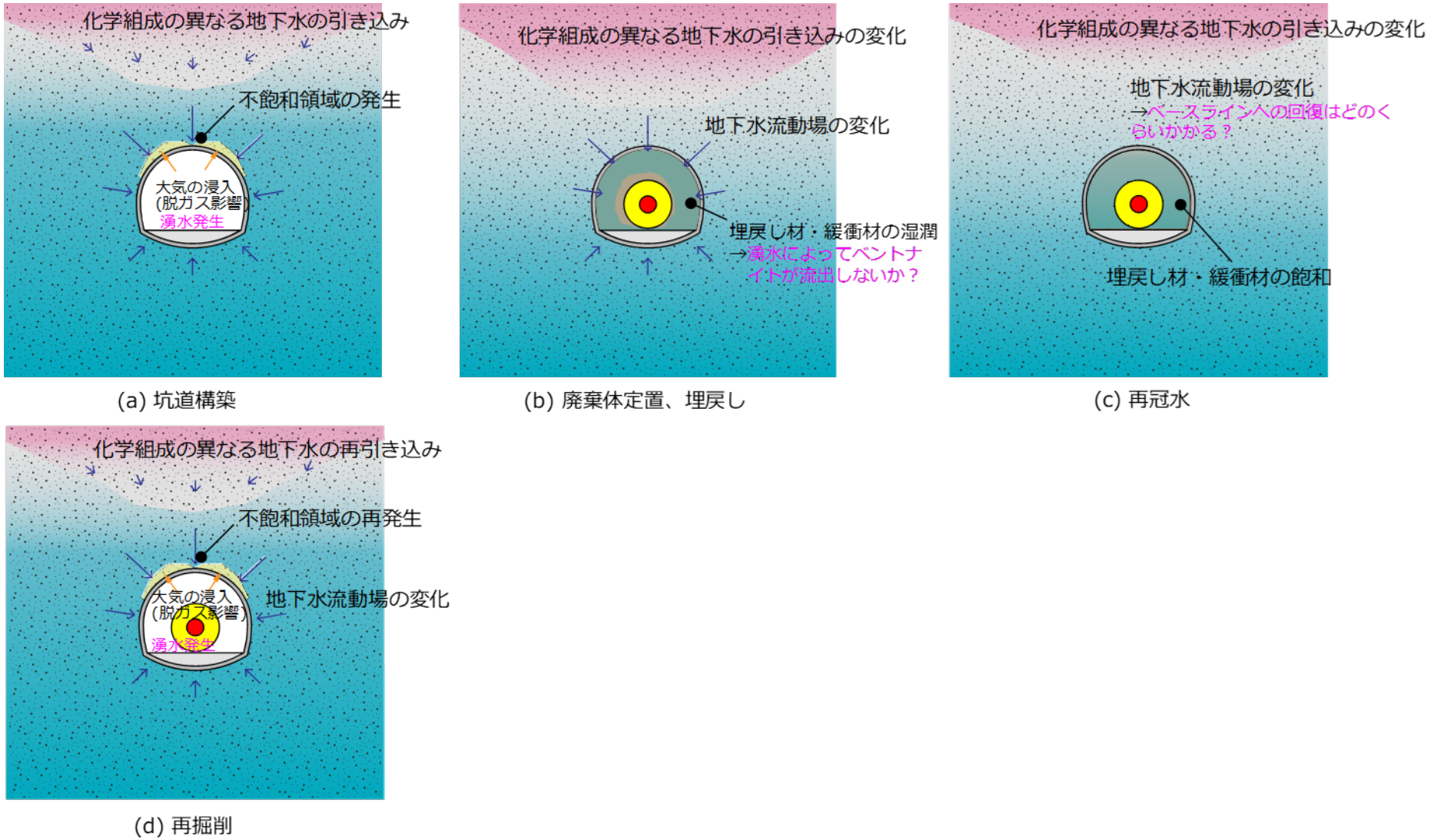


図 3.2.2-2　ニアフィールドにおいて起こりうる現象（水理学的影響）

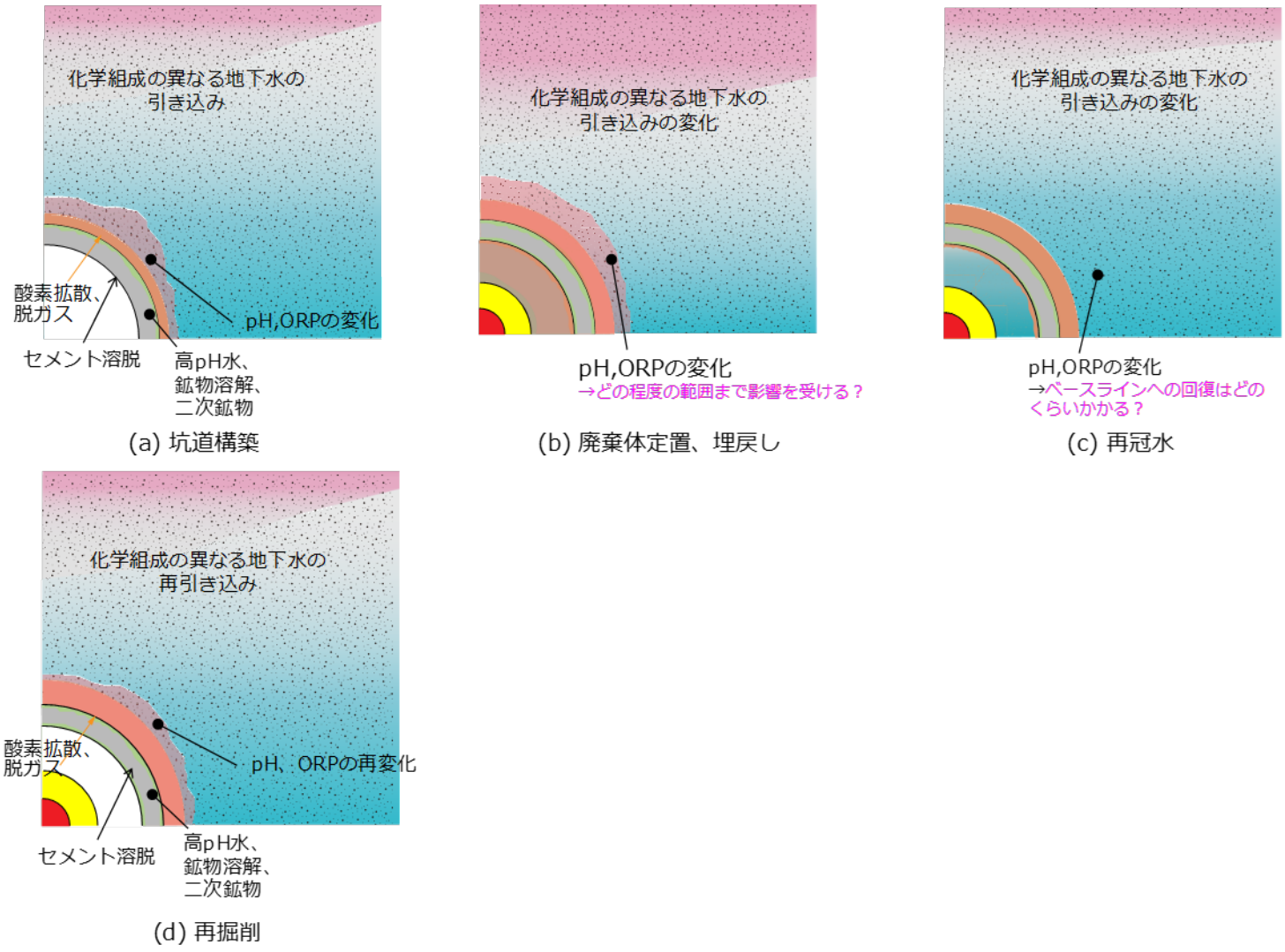


図 3.2.2-3　ニアフィールドにおいて起こりうる現象（化学的影響）

(2)　ファーフィールドにおける現象

ファーフィールドを対象としている技術検討項目として、以下の２つの項目があげられる。

- 地下水の引き込みによる擾乱影響の程度と範囲
- ベースラインへの回復過程と回復の程度

「地下水の引き込みによる擾乱影響の程度と範囲」と「ベースラインへの回復過程と回復の程度」において、起こりうる現象のイメージを図 3.2.2-4 に示す。図中の赤色と青色の違いは、化学組成の異なる地下水を表現している。この図は、地表面から地下深部までの広範囲のフィールドを対象として図化したものであり、処分坑道近傍の変化は示していない。

処分場の地下施設が構築された直後には、坑道が存在している地下深部の地質環境は還元状態である。地表面直下の地下水面近傍は酸化状態であり、地下の深度が深まるにつれ、地質環境の影響も受け、地下水組成、pH、ORP が変化していくことが知られている。この変化は、与えられる場によって決まるものであるが、ここでは、地下深部環境にある地下水とは異なる地表面直下の地下水が、地下施設が構築された後、坑道が開放されていることにより坑道内に湧水が発生し、湧水が継続することにより、地下水面近くの地下水が徐々に地下深部に引き込まれることを対象とした地下水流動解析を行う。そのまま湧水が続き、地下施設から排水されることにより、やがては化学組成の異なる地下水は坑道周辺まで届く可能性がある。この引き込みの程度と進行は地質環境にも依存するが、本検討においては、一連の手法の提示を目的として、地質は地上から深部まで等価な透水性を持つものとして扱った場合の解析方法を示した。

また、坑道が埋め戻された後は、還元状態の地下水の供給や地下水と岩石の化学反応等により、地下施設周辺の地質環境が当初の状態に回復していくことが予想される。

この引き込みと回復を時間の要素を加えて、定量化することが、回収を維持することによる影響の定量化することになる。

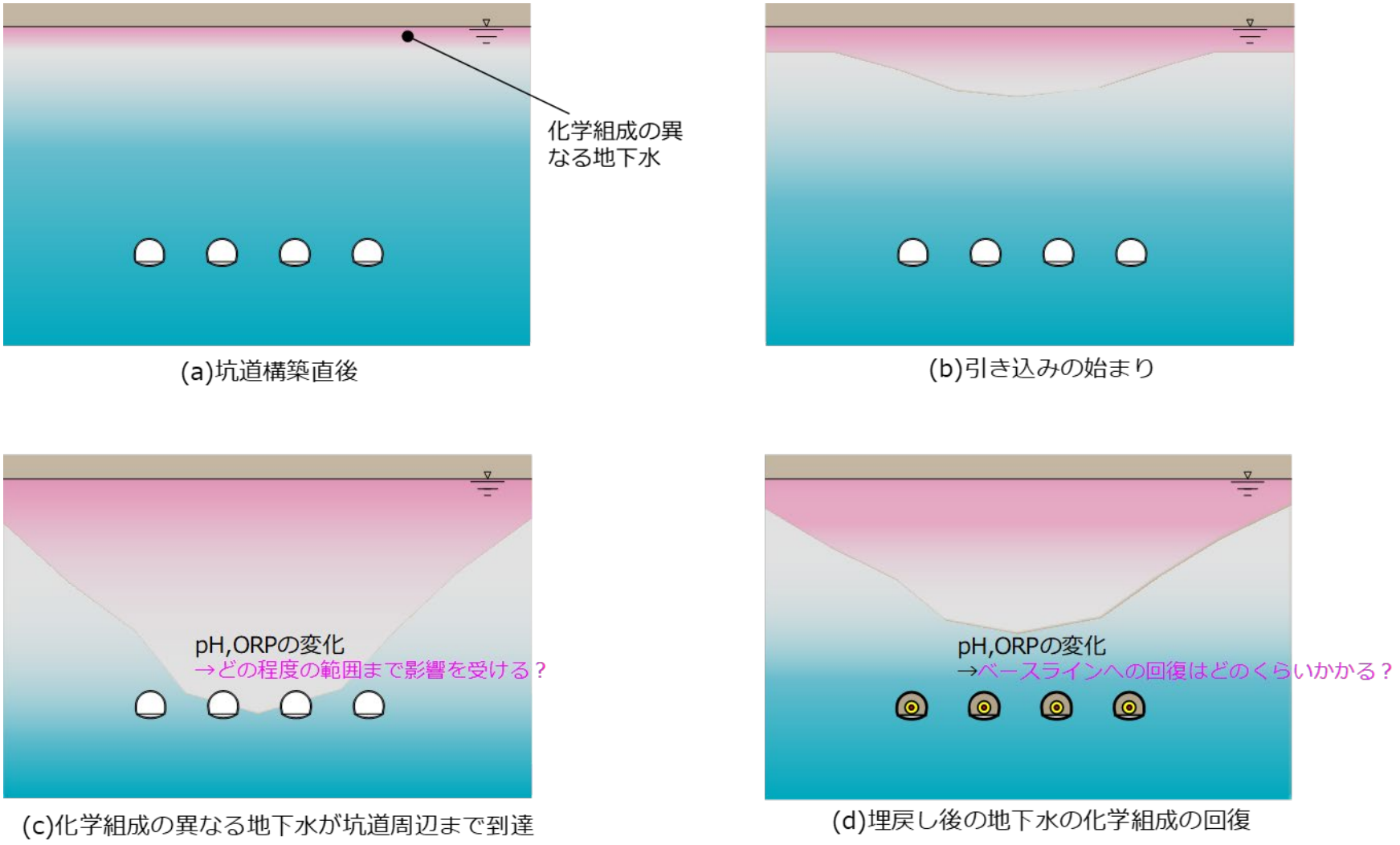


図 3.2.2-4　ファーフィールドにおいて起こりうる現象のイメージ

3.2.3　評価対象と影響を与える現象の整理及び影響評価方法の流れの整理

(1)　評価対象とする現象と影響を与えている現象等の関連

技術検討項目の評価対象とする現象や影響を与えている現象を、時間軸を考慮して関係性を図示する。各技術検討項目を統合して図 3.2.3-1 に示したが、「埋め戻した坑道の再利用時の健全性」では、回収可能性維持期間中に再掘削と回収があることを考慮する必要があることから、他の 5 項目と区別して、図 3.2.3-2 に別図として示す。

これらの図から、回収可能性維持期間中の安全性への影響を評価するためには、様々な現象が相互および直接的・間接的に影響を与えていることが分かる。図は左から右に時間の経過を示しており、回収可能性維持による影響を与える状態、あるいは施工の工程を黒枠、黄色のハッチングで示し、その状態をきっかけとして力学的、水理顎堤、化学的起こり得る現象のつながりを示している。起こり得る現象は他の事象に影響を与え、相互に影響を及ぼすものもある。定量的評価方法を検討することとした 6 つの項目が対象とする事象と期間を、図中、点線で囲まれ、ハッチングして示した。

評価は、関連する現象を考慮して、必要となる力学的、水理学的、化学的によってそれぞれ解析を行い、必要な情報を反映して行う。

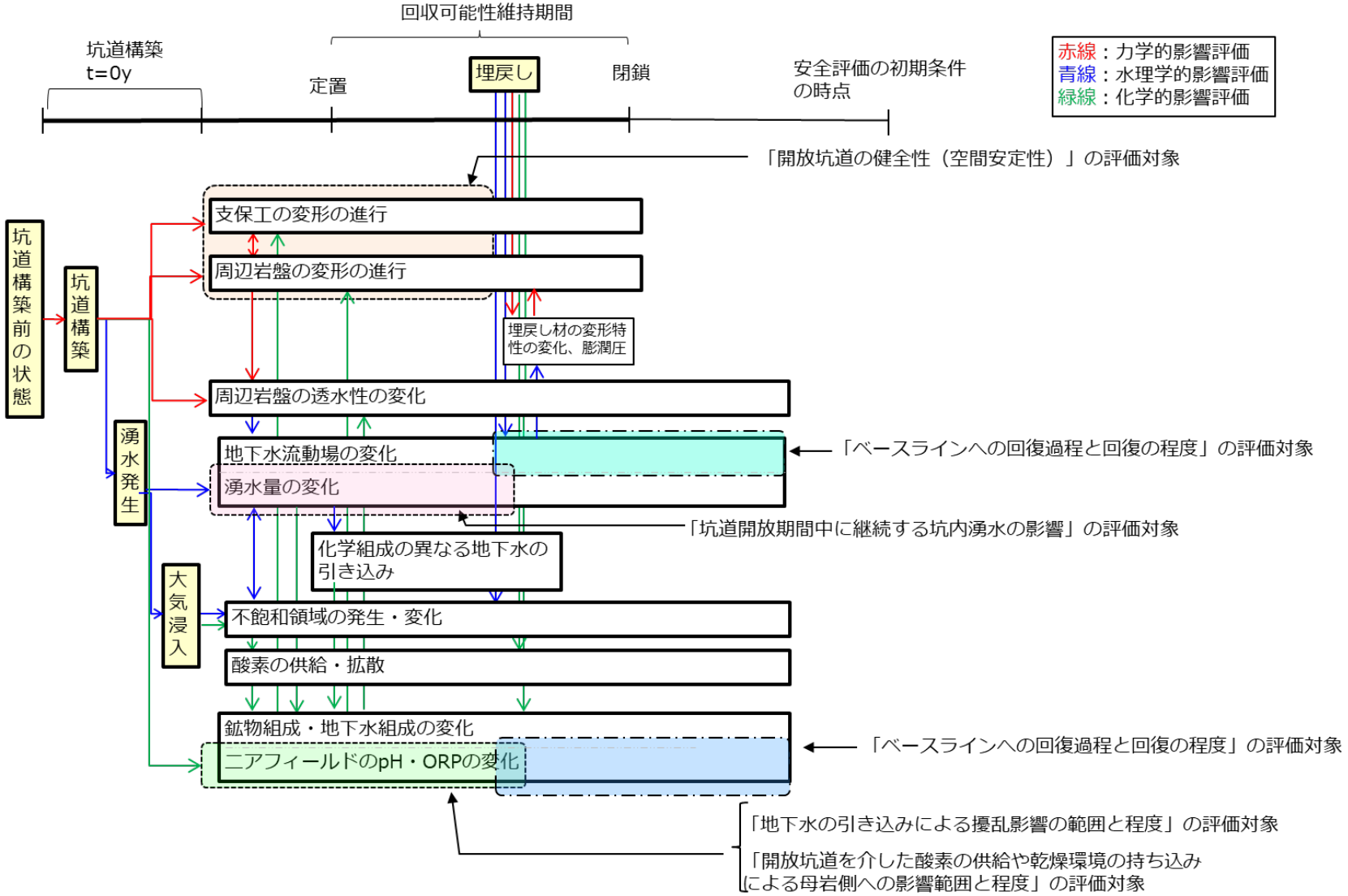


図 3.2.3-1　技術検討項目の評価対象とする現象と影響を与えている現象の関連性（再利用時の健全性以外）

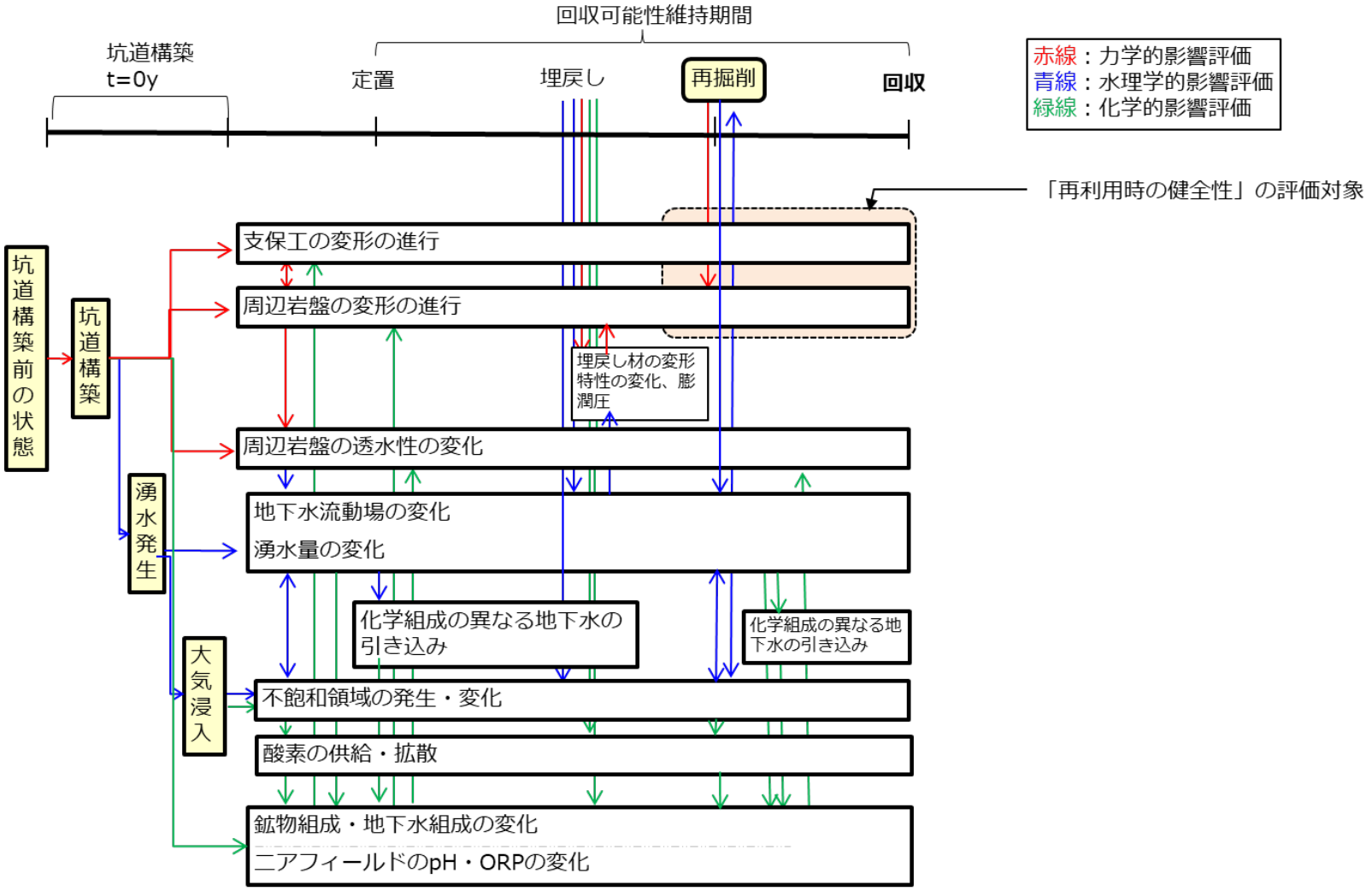


図 3.2.3-2　「再利用時の健全性」の評価対象とする現象と影響を与えている現象の関連性

(2)　影響評価項目ごとの分類

前項において、技術検討項目ごとに評価対象の現象や影響を与えている現象の関連を示したものを基に、力学的影響評価、水理学的影響評価、化学的影響評価それぞれに分類して、各影響評価項目で考慮する現象とそれらに影響を与えている現象に整理を行う。

整理の結果を表 3.2.3-1 に示す。なお、この表において、太字で示したものが各影響評価項目において考慮する現象であり、●印に続いて示された項目が、それに影響を与えている現象を示している。また、この表で示した項目や現象は、6 つの技術検討項目を包含されたものである。

表 3.2.3-1 により、考慮する現象と影響を与えている現象が、相互に影響を及ぼしあっていることが分かる。ただし、ここでは、様々な現象に対して定性的な考察に留めている。

表 3.2.3-1　各影響評価項目で考慮する現象とそれらに影響を与えている現象

影響評価項目	力学的影響	水理学的影響	化学的影響
考慮する現象と影響を与えている現象	**周辺岩盤の変形の進行** ● 坑道掘削時の応力再配分 ● 周辺岩盤のクリープ変形 ● 化学的影響による変形・強度特性の変化 ● 飽和に伴う埋戻し材の膨潤圧の発生 ● 飽和に伴う埋戻し材の変形特性の変化 ● 支保工の変形の進行 ● 再掘削時の解放力 **支保工の変形の進行** ● 周辺岩盤の変形の進行 ● 化学的影響による変形・強度特性の変化 **周辺岩盤の透水性の変化** ● 坑道掘削時の応力再配分 ● 周辺岩盤の変形の進行	**地下水流動場の変化、湧水量の変化** ● 坑道壁面からの湧水の発生 ● 不飽和領域の発生・変化 ● 周辺岩盤の透水性の変化 ● 坑道の埋戻し ● 再掘削時の湧水の発生 **不飽和領域の発生・変化** ● 坑道壁面からの大気の浸入 ● 地下水流動場の変化 ● 坑道の埋戻し ● 再掘削時の大気の浸入 **FFの化学組成の異なる地下水の引き込み** ● 地下水流動場の変化	**酸化還元反応による鉱物組成・地下水組成・pH及びORPの変化** ● 地下水流動場の変化、湧水量の変化 ● 酸素の供給・拡散 ● FFの化学組成の異なる地下水の引き込み ● 支保工からの高pH水・セメント溶脱 ● 埋戻し材の鉱物組成・間隙水組成 **酸素の供給、拡散** ● 不飽和領域の発生、変化 ● 埋戻し材内の酸素 **支保工からの高pH水・セメント溶脱** ● 酸化還元反応による鉱物組成・地下水組成・pH及びORPの変化 **周辺岩盤の透水性の変化** ● 酸化還元反応による間隙構造の変化

凡例
太字：影響評価項目において考慮する現象
●　：影響を与えている現象

(3)　各技術検討項目において評価対象とする現象と影響評価の流れ

3.2.3(1)項で現象の関連性を示した図 3.2.3-1 及び図 3.2.3-2 から、各技術検討項目において考慮すべき現象や要因を整理し、これらを基に、それぞれの技術検討項目において影響評価の流れを考えた。以下にそれぞれの技術検討項目について示す。

1)　開放坑道の健全性（空間安定性）

開放坑道の健全性（空間安定性）において、評価対象とする現象や量は、坑道構築直後から埋め戻しまでの期間における、「周辺岩盤の変形の進行」と「支保工の変形の進行」が考えられる。

周辺岩盤の変形の進行に対して影響を与える現象や要因を挙げると、以下のようなものがあると考えられる。

- 坑道構築時の応力再配分
- 周辺岩盤のクリープ変形
- 化学的影響による周辺岩盤の変形・強度特性の変化
- 支保工の変形の進行

また、支保工の変形の進行に対して影響を与える現象や要因には、以下のようなものあると考えられる。

- 周辺岩盤の変形の進行
- 化学的影響による支保工の変形・強度特性の変化

本技術検討項目における評価手法として、図 3.2.3-3 に示す流れ（フロー、以下評価フローと呼ぶ）を考えた。力学的影響評価において、相互に影響を及ぼし合う「周辺岩盤の変形の進行」と「支保工の変形の進行」の時間変化を算出し、ひずみの進行により、坑道の安定性についての評価を行う。一方、岩盤の変形は岩盤の持つ物理特性が設定条件（与条件）となるが、支保工の変形に対しては、化学的影響であるコンクリートの溶脱によるコンクリートの強度変化を解析的に評価できると考える。コンクリートの溶脱は、コンクリートに接触する水の量と接触する時間によってその量が決まると考えられるため、支保工周辺の湧水量がコンクリートの溶脱の化学的影響評価の与条件となる。そこで、力学的影響評価からは周辺岩盤の透水性の時間変化を水理学的影響評価に引き渡し、水理学的影響評価では、得られた流動経路、坑道湧水量（動水勾配）を条件の設定として化学的影響評価に引き渡す。化学的影響評価では、地化学状態の時間変化を算出し、コンクリートの溶脱についての評価を行い、カルシウム溶脱率から支保工の劣化の進行を算出し、力学解析で設定する条件として使用できる。

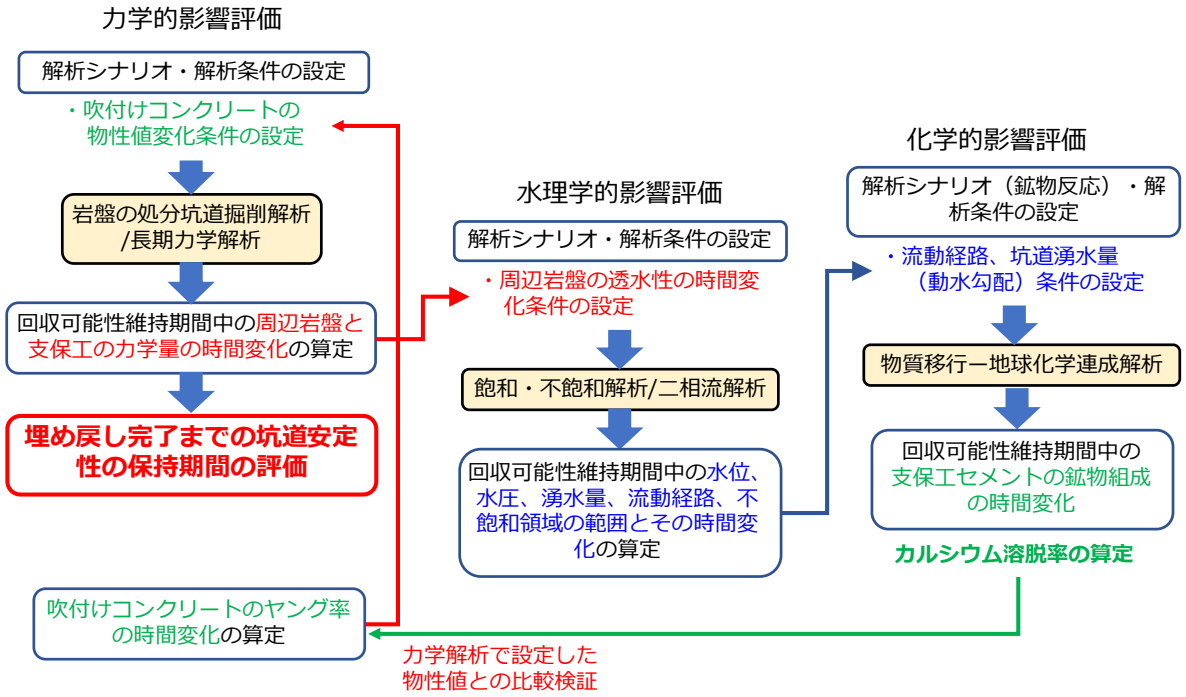


図 3.2.3-3　「開放坑道の健全性（空間安定性）」の評価フロー

2)　埋め戻した坑道の再利用時の健全性

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

周辺岩盤の変形の進行に対して影響を与える現象や要因を挙げると、以下のようにものがあると考えらえる。

- 坑道構築時の応力再配分
- 周辺岩盤のクリープ変形
- 化学的影響による周辺岩盤の変形・強度特性の変化
- 支保工の変形の進行
- 再掘削時の解放力
- 飽和に伴う埋め戻し材の変形特性の変化
- 飽和に伴う埋め戻し材の膨潤圧の発生

坑道の再利用時には埋め戻し材は存在していないので、再掘削開始から回収完了までの期間の周辺岩盤の変形の進行には直接的な影響を与えてはいない。しかし、埋め戻し材の変形特性や膨潤圧は、再掘削開始するまでの期間の岩盤の変形の履歴に影響を与えるので、間接的には影響を与えていると考えらえる。

支保工の変形の進行に対しては、以下のような現象や要因が影響を与えていると考えられる。

- 周辺岩盤の変形の進行
- 化学的影響による支保工の変形・強度特性の変化

評価手法として、図 3.2.3-4 に示す評価フローを考えた。再利用時の坑道の健全性を評価するためには、1)の開放坑道の健全性と同様の手法を用いることができるが、評価の対象となる期間と事象を付加することになる。すなわち、評価対象として、回収維持期間を経た、埋め戻し期間とその後の再掘削と回収までの坑道開放の影響を考慮することが必要である。従って、評価手法の流れとしては、図 3.2.3-3 に示したものと大きく変わらず、影響評価の対象が増えることになる。力学的影響評価において、埋め戻し期間におけるベースラインのへの回復過程における周辺岩盤と支保工の変形の進行の時間変化を算出する。その際の埋め戻し材の変形特性や膨潤圧は、再掘削開始するまでの期間の岩盤や支保の変形履歴に影響を与えるので、間接的には影響を与えていると考えらえる。そして、埋め戻し期間を経た後の再掘削直前の条件を基に、再掘削と回収までの変形の進行の時間変化を算出して、坑道の安定性についての評価を行う。

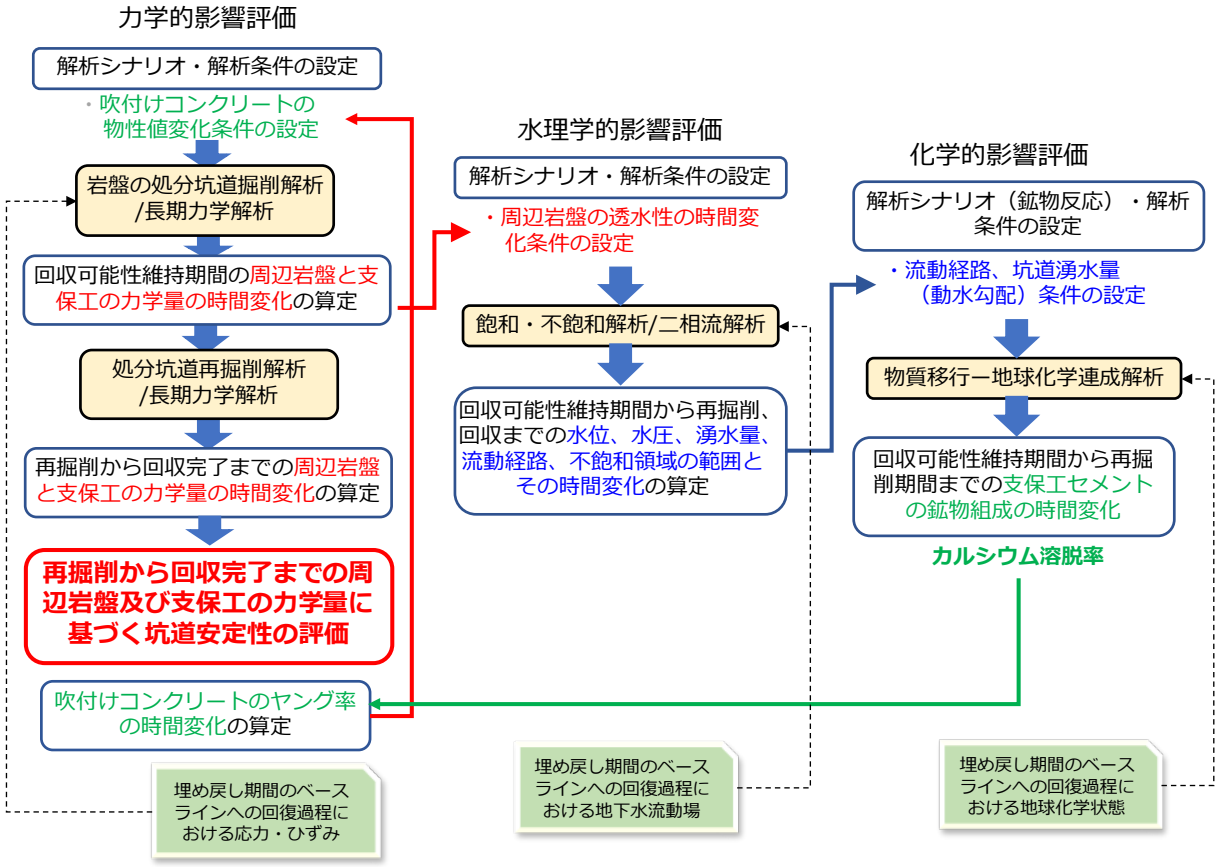


図 3.2.3-4　「埋め戻した坑道の再利用時の健全性」に関する評価フロー

3)　坑道開放期間中の坑内湧水の影響

坑道開放期間中の坑内湧水の影響において、評価対象とする現象や量は、坑道構築直後から閉鎖までの期間における湧水量の変化である。

湧水量の変化に影響を与える現象や要因を挙げると、以下のようにものがあると考えらえる。

- 坑道壁面からの湧水の発生
- 不飽和領域の発生・変化
- 周辺岩盤の透水性の変化

上記に挙げられた不飽和領域の発生・変化に影響を与える現象としては、以下のようなものが挙げられる。

- 坑道壁面からの大気の浸入
- 地下水流動場の変化

また、周辺岩盤の透水性の変化に対して影響を与える現象としては、以下のようなものが考えられる。

- 坑道構築時の周辺岩盤の応力再配分
- 周辺岩盤の変形の進行
- 酸化還元を含む岩石―水反応による岩盤の間隙構造の変化

評価手法として、図 3.2.3-5 に示す評価フローを考えた。湧水は人工バリアや、周辺部材に影響を及ぼすと考えられる。最も影響が懸念されるのは、緩衝材に対する影響であり、竪置きブロック方式による定置では、処分孔への湧水により緩衝材が流出することが懸念されている。湧水量によって、緩衝材の流出量が見積もれることが既往の研究[3]で示されており、湧水量を評価することにより、緩衝材の流出も評価することができると考えられる。本項目は、水理学的影響評価が主であるが、力学評価による透水性の変化が水理学的影響評価の条件に反映される。また、周辺岩盤の透水性の変化に対して影響を与える現象としては、酸化還元を含む岩石―水反応による岩盤の間隙構造の変化も含まれるため、化学的影響評価によって得られる透水性の変化も水理学的影響評価の条件設定として使用できる。

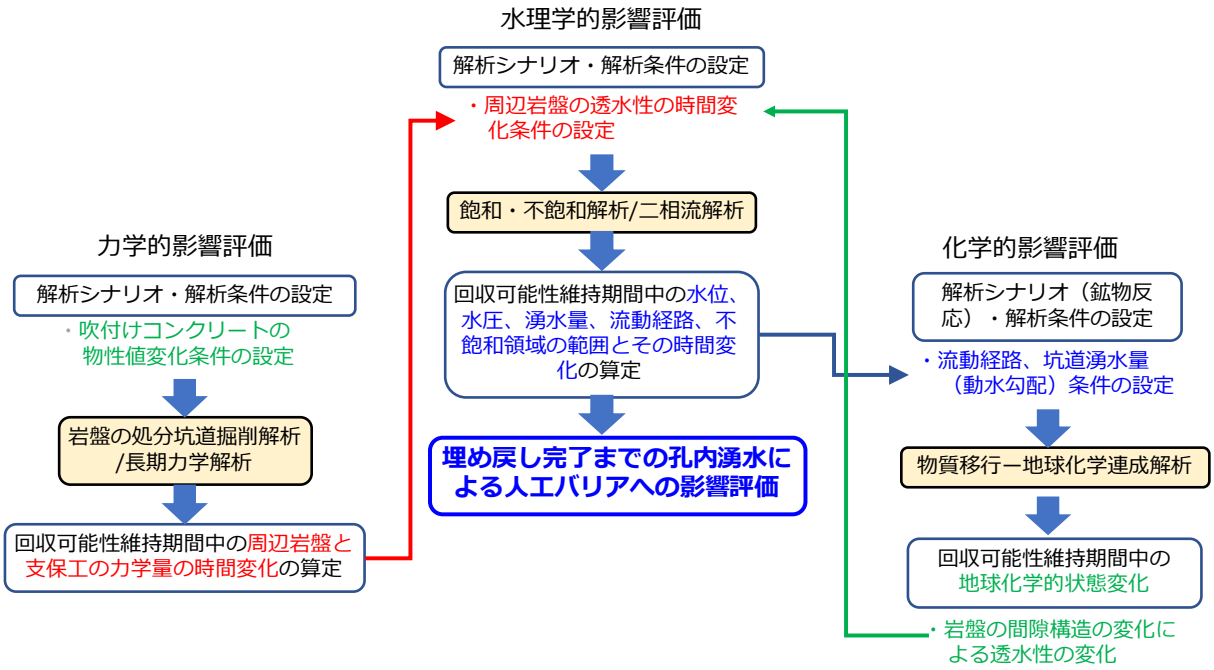


図 3.2.3-5　「坑道開放期間中の坑内湧水の影響」に関する評価手法のフロー

4)　地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度

地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度において、評価対象とする現象は、坑道構築直後から埋め戻しまでの期間における「ファーフィールドの化学組成の異なる地下水の引き込み」と「酸化還元及び岩石―水反応による鉱物組成・地下水組成・pH 及び酸化還元電位の変化」の内、pH 及び酸化還元電位の変化とした。ただし、pH 及び酸化還元電位の変化は、鉱物組成や地下水組成の変化とも相互に影響を及ぼしあっていることから、1 つの項目として扱っている。また、ファーフィールドとニアフィールドの両方が評価対象の領域となるが、特に、擾乱影響がニアフィールドまで至るのかが、着目するポイントとなる。

化学組成の異なる地下水の引き込みに対して影響を与える現象としては、地下水流動場の変化が挙げられる。

また、鉱物組成・地下水組成・pH 及び酸化還元電位の変化に対して影響を与える現象や要因を挙げると、以下のようなものが考えられる。

- 地下水流動場の変化、湧水量の変化
- 壁面からの酸素の供給・拡散
- ファーフィールドの化学組成の異なる地下水の引き込み
- 支保工からの高 pH 水・セメント溶脱

上記において、壁面からの酸素の供給・拡散に対しては、不飽和領域の発生・変化が影響を与える。また、支保工からの高 pH 水・セメント溶脱については、ニアフィールドの鉱物組成・地下水組成・pH 及び酸化還元電位の変化が影響を及ぼすと考えられる。

評価手法として、図 3.2.3-6 に示す評価フローを考えた。地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度の評価の対象とする現象は、坑道構築直後から埋め戻しまでの期間におけるファーフィールドの化学組成の異なる地下水の引き込みである。地下水の引き込みによる、酸化還元環境、岩石ー水反応による鉱物組成・地下水組成・pH 及び酸化還元電位の変化が起こる。この変化の内、本検討において評価の指標となる値として着目したのは、pH 及び酸化還元電位の変化である。そのため、評価手法としては化学的影響評価が主となるが、透水性や湧水量が影響を変化の進行に影響を与えるため、水理学的評価も必要となる。

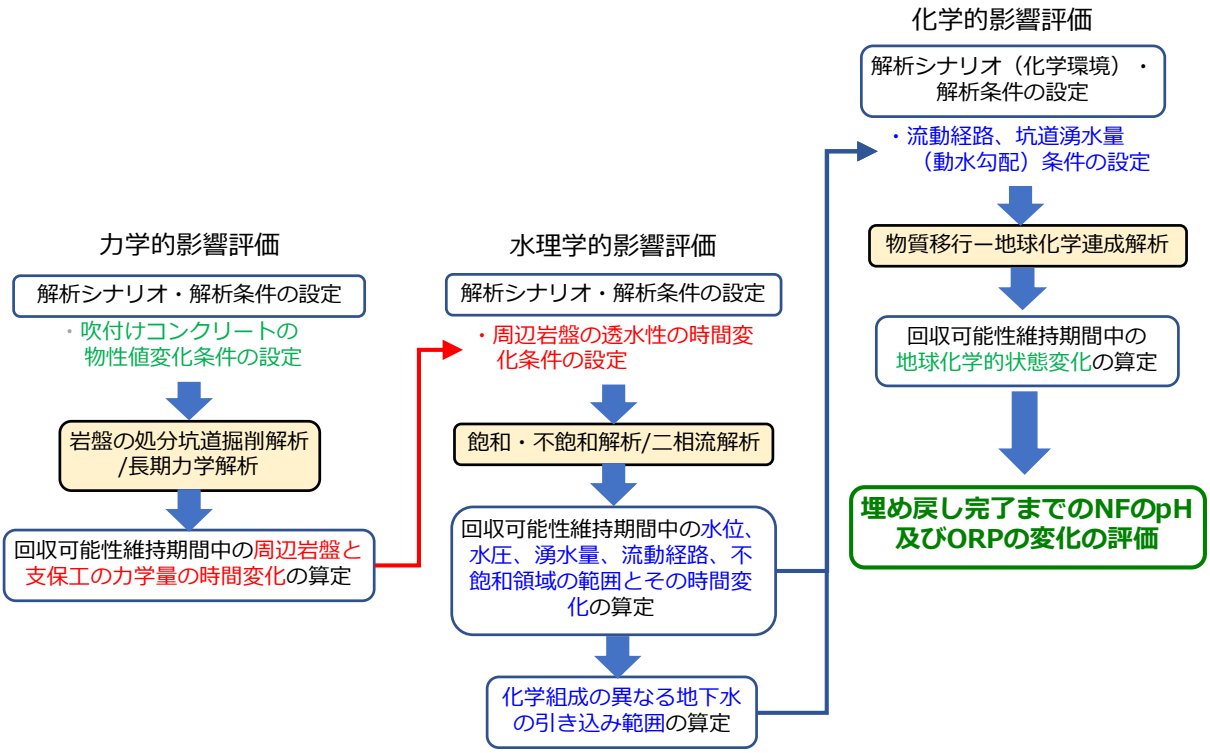


図 3.2.3-6　「地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度」に関する評価フロー

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

開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩への影響範囲と程度において、評価対象とする現象は、処分坑道を対象とした場合、坑道構築直後から埋め戻しまでの期間における「鉱物組成・地下水組成・pH 及び酸化還元電位の変化」である。これらの現象の内、pH 及び酸化還元電位の変化が処分機能の要件を満たすための指標となる。その変化と同時に、鉱物変化も起こり得るため、鉱物の変化（溶解、二次鉱物の生成）に伴う間隙率の変化や透水性の変化に影響が及ぶ。この時、回収可能性維持期間における鉱物変化は、瞬時反応、または比較的反応速度の速い鉱物反応によるものに限定される。また、評価対象とする領域は坑道周辺のニアフィールドとなる。

酸化還元及び岩石―水反応による鉱物組成･地下水組成･pH 及び酸化還元電位の変化に対して、影響を与える現象や要因を挙げると、以下のようなものが考えられる。

- 地下水流動場の変化、湧水量の変化

- 壁面からの酸素の供給・拡散
- ファーフィールドの化学組成の異なる地下水の引き込み
- 支保工からの高 pH 水・セメント溶脱

評価手法として、図 3.2.3-7 に示す評価フローを考えた。評価手法としては化学的影響評価が主となる。また、坑道の開放による酸素の供給や乾燥環境の持ち込みは、不飽和領域の範囲によってその影響範囲が評価されると考えられるため、その範囲を示すためには水理学的影響評価による不飽和領域の拡大に関する評価も必要となる。さらに、この不飽和領域の拡大が pH 及び酸化還元電位の変化に影響を与えるため、水理学的評価を化学的評価に反映して評価しなければならない。pH 及び酸化還元電位の変化は、鉱物変化ももたらし、鉱物の変化（溶解、二次鉱物の生成）に伴う間隙率の変化や透水性の変化に影響が及ぶ。すなわち、水理学的影響評価と化学的影響評価は複数現象が相互に影響し合うことになり、評価は複雑なものになると。

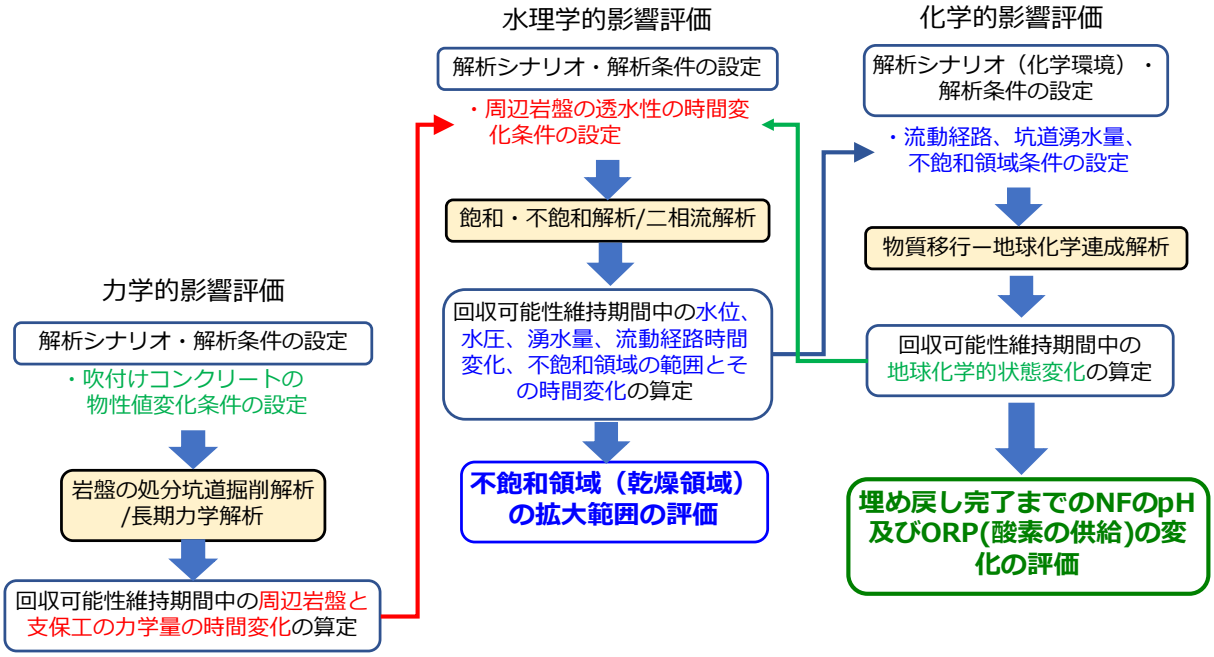


図 3.2.3-7 「開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度」に関する評価フロー

6) ベースラインへの回復過程と回復の程度

ベースラインへの回復過程と回復の程度において、評価対象とする現象や量は、埋め戻し後から安全評価の初期条件とする時点までの期間における「地下水流動場の変化、湧水量の変化」の内、地下水流動場の変化と、「鉱物組成・地下水組成・pH 及び酸化還元電位の変化」の内、pH 及び酸化還元電位の変化である。この時、鉱物組成・地下水組成の変化は可逆的なものと非可逆なものがあり、回復には含まれないと考えられる。ただし、開放時（回収維持期間）における鉱物組成・地化学組成の変化によって、pH 及び酸化還元電位の回復に要する時間に影響を与える。評価対象とする領域は、ニアフィールドとファーフィールドの両方になると考えられる。

地下水流動場の変化に対して、影響を与える現象や要因を挙げると、以下のようなものが考えらえる。

- 坑道の埋め戻し
- 不飽和領域の変化
- 周辺岩盤の透水性の変化

また、鉱物組成・地下水組成・pH 及び酸化還元電位の変化に対して、影響を与える現象や要因を挙げると、以下のようなものが考えられる。

- 地下水流動場の変化、湧水量の変化
- 埋め戻し材からの酸素の供給・拡散
- ファーフィールドの化学組成の異なる地下水の引き込み
- 支保工からの高 pH 水・セメント溶脱
- 埋め戻し材の鉱物組成・間隙水組成

評価手法として、図 3.2.3-8 に示す評価フローを考えた。ベースラインへの回復過程と回復の程度における評価対象とする現象や量は、上記の 4)及び 5)の影響を引き継ぎ、埋戻し後から安全評価の初期条件とする時点までの期間における水理学的影響評価である地下水流動場の変化と、化学的影響評価のである鉱物組成・地下水組成・pH 及び酸化還元電位の変化の２つとなる。

水理学的影響評価では、坑道掘削後の地下水水位の低下と再冠水による水位の回復を評価しなければならない。また、湧水が続くことによる不飽和領域の発生と進展、及び再冠水による不飽和領域の飽和過程の評価も必要となる。そのため、解析手法として、二相流解析の必要性についても検討を行う。化学的影響評価は 4)、5)と同様に pH 及び酸化還元電位の変化を対象とする。回復過程と回復の程度を評価するためには、その前提条件として、地下水の引き込みの影響、及び開放坑道を介した酸素の供給、乾燥の影響を取り込んだ設定が必要である。手法としては、回復の初期条件を与条件として与えての感度解析での評価も考えられる。

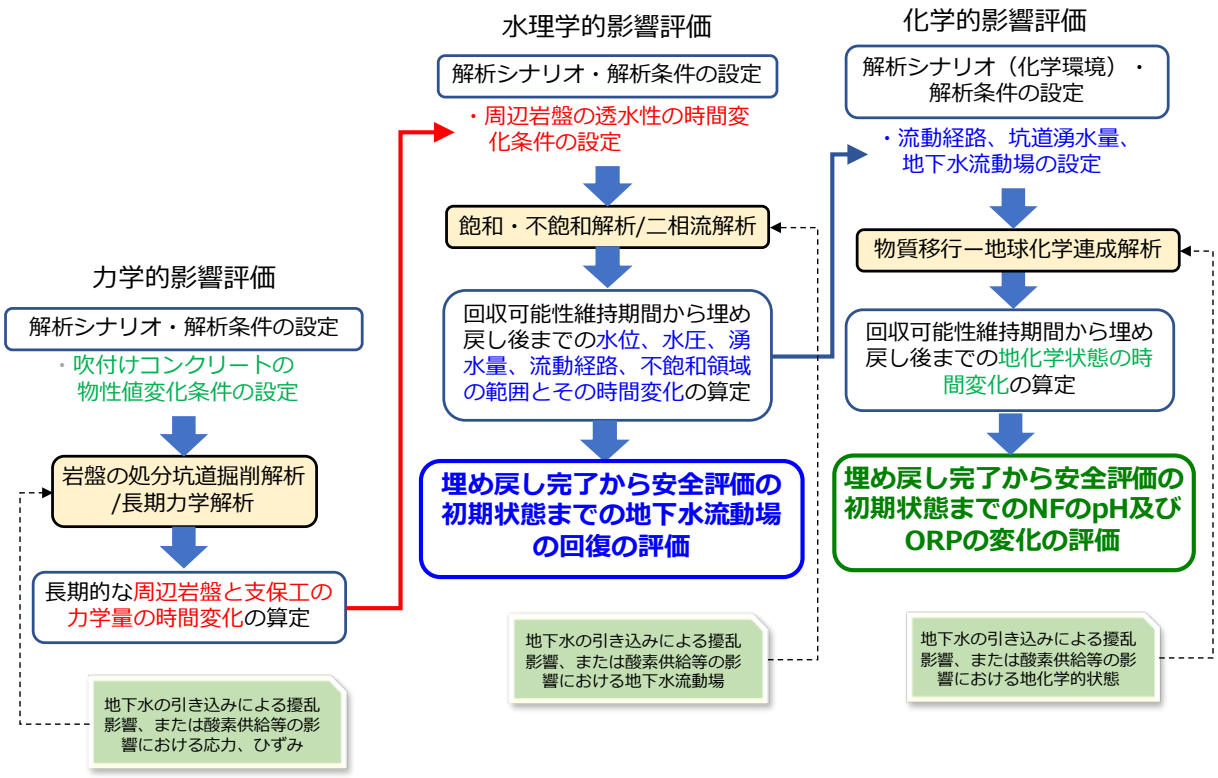


図 3.2.3-8　「ベースラインへの回復過程と回復の程度」に関する評価フロー

3.3　回収可能性維持期間の影響評価方法の検討

R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目に対する、回収可能性を維持した場合の安全性への影響の定量的評価方法を示す。今年度の検討においては、力学的な評価から受け渡される情報を基に、水理学的な影響の評価方法についての検討を進め、さらに水理学的な影響評価から得られた化学的な影響に反映できる情報を抽出して、化学的な影響の評価方法について検討した。

水理学的な影響については、回収可能性維持期間の影響を抽出するために、非定常解析により経時変化を評価するための手法が必要である。そのため、技術検討項目を評価すると共に、水理解析手法としての妥当性を検討した。

化学的な影響に関する定量的な評価方法には、物質移行と化学反応の連成解析を用いた。この解析は計算の負荷が高いため、一次元モデルでの解析を行った。ここに、水理解析によって得られた湧水量と齟齬のない条件を設定した。今年度は、地下水の引き込みによる影響の評価方法として、ファーフィールドを対象とした解析を行った。同じモデルを用いて、支保工のコンクリートの溶脱について解析も実施した。

物質移行と化学の連成解析によって得られたコンクリートの溶脱の時間変化を基に、力学解析のパラメータとして重要な支保工の劣化速度を算出した。これまでの研究[1]、[2]においては、前提条件として既往の研究[5]を参照してヤング率の低下を設定していたが、この設定と比較することにより、化学解析から支保工の劣化速度を評価する方法の適用性を検討した。

以下にそれぞれの定量評価についての検討を述べる。

3.3.1　水理学的影響評価

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

必要となる水理学的な影響評価手法について、本検討における前提条件を踏まえて整理を行い、具体的な解析手法の選定から解析手順や感度解析項目や条件設定と、具体的な解析事例を示す。これにより、水理学的な影響評価における現状技術の把握と評価における課題について抽出した結果を示す。

そのための検討が、以下の 4 項目である。この項目は直接技術検討項目について評価方法とはならないが、回収可能性維持期間の影響を評価する手法としての水理解析方法として必要な検討となる。

- 岩盤の透水係数の違いに関する検討
- 岩盤の不飽和特性の違いに関する検討
- 水理学的影響評価手法の適用性評価検討
- 処分孔同奥行き方向のメッシュ分割影響の検討

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

(1)　解析手法

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

①　飽和・不飽和解析手法　　：Dtransu-3D･EL（FEM 系）
※空気の流れを考慮しない解析手法

②　二相流（多相流）解析手法：TOUGH2（IFDM 系）
※空気の流れを考慮する解析手法

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

以下に 2 種類の解析手法の基礎方程式を示す。

1)　飽和・不飽和解析手法（コード名：Dtransu-3D･EL）

Dtransu-3D・EL の基礎方程式は、Darcy 則からなる運動方程式（式 3.3.1-1）と質量保存則からなる連続の式（式 3.3.1-2）を基にしている。

$$v = k\frac{\partial h}{\partial x} \qquad \text{式 3.3.1-1}$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = f \qquad \text{式 3.3.1-2}$$

ここに、v は Darcy 流速（浸透流の平均流速）、h は全水頭、x は浸透長、z は位置水頭、k は飽和透水係数、f は領域内の間隙にある水の体積の変化量である。

式 3.3.1-1 を式 3.3.1-2 に代入することにより、浸透問題の基礎方程式が得られる。飽和した地盤の場合、右辺は間隙の変化と等しくなるので、次式のようになる。

$$f = \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial n}{\partial h}\frac{\partial h}{\partial t} = S_s\frac{\partial h}{\partial t} \qquad \text{式 3.3.1-3}$$

ここに、n は間隙率、S_s は比貯留係数であり、水頭変化による帯水層の間隙の変化率を表す係数である。

また、全水頭h とサクションφ と位置水頭z には、次式の関係がある。

$$h = \varphi + z \qquad \text{式 3.3.1-4}$$

式 3.3.1-4 を用いて未知数φ に直して整理すると、飽和領域内の浸透流の支配方程式は次式のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial \varphi}{\partial z}+k\right)=S_s\frac{\partial \varphi}{\partial t} \qquad \text{式 3.3.1-5}$$

一方、不飽和地盤の場合、負の圧力水頭の変動によって間隙率の変化は生じないものと仮定すると、f は次式のようになる。

$$f=\frac{\partial \theta}{\partial t}=\frac{\partial \theta}{\partial \varphi}\frac{\partial \varphi}{\partial t}=C\frac{\partial \varphi}{\partial t} \qquad \text{式 3.3.1-6}$$

ここに、θ は体積含水率、C は比水分容量であり、この式を用いることにより不飽和領域内の浸透流の支配方程式は次式のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k(\theta)\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k(\theta)\frac{\partial \varphi}{\partial z}+k(\theta)\right)=C\frac{\partial \varphi}{\partial t} \qquad \text{式 3.3.1-7}$$

ここで、透水係数は含水率によって変化するため、$k(\theta)$ としている。

圧力水頭が 0 となる面を自由水面と仮定し、それを境界として飽和領域と不飽和領域に分かれるとする。この考え方を基に上記の飽和領域の式 3.3.1-5 と不飽和領域の式 3.3.1-7 を 1 つの式にまとめると、次式となる。

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k(\theta)\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k(\theta)\frac{\partial \varphi}{\partial z}+k(\theta)\right)=(C(\varphi)+\alpha S_s)\frac{\partial \varphi}{\partial t} \qquad \text{式 3.3.1-8}$$

ここに、不飽和領域では$\alpha=0$、飽和領域では$\alpha=1$ となる。

2)　二相流（多相流）解析手法（コード名：TOUGH2）

TOUGH2 の基礎方程式は、エネルギー保存則と質量保存則を基にしていて、次式のようになる。

$$\frac{d}{dt}\int_{V_n} M^{\kappa}\,dV_n=\int_{\Gamma_n}\boldsymbol{F}^{\kappa}\cdot\boldsymbol{n}\,d\Gamma_n+\int_{V_n} q^{\kappa}\,dV_n \qquad \text{式 3.3.1-9}$$

ここに、V_n は対象となる流れ場の任意の領域、Γ_n は境界の閉曲面、M は単位体積質量（kg/m³）あるいはエネルギー（J/m³）、F は質量流量（kg/s）または熱流量（J/s）、q は流体の流入または流出（kg/m³/s）、$\boldsymbol{n}$ はV_n の部分面$d\Gamma_n$ の内向き法線ベクトルである。また、$\Gamma=1$ は水の質量、$\Gamma=2$ は空気の質量、$\Gamma=3$ は熱エネルギーを示す。

質量M^{Γ} は次式のように表せる。

$$M^{\Gamma} = \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}^{\Gamma}$$ 式 3.3.1-10

ここに、β は流体の相、ϕ は間隙率、S_{β} はβ 相の飽和率、ρ_{β} はβ 相の密度（kg/m³）、X_{β}^{Γ} はβ 相のκ 成分に対する質量割合である。

また、熱エネルギーは以下のように表される。

$$M^{h} = (1-\phi)\rho_{R} C_{R} T + \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} U_{\beta}$$ 式 3.3.1-11

ここに、ρ_{R} は岩盤の密度（kg/m³）、C_{R} は岩盤の比熱（J/kg/K）、T は流体の温度（K）、U_{R} はβ 相の比内部エネルギー（J/kg）である。

質量流量は各成分の和として次式のようになる。

$$F_{\kappa}|_{adv} = \sum_{\beta} X_{\beta}^{\kappa} F_{\beta}$$ 式 3.3.1-12

また、個別の成分の質量流量F_{β} は、多相流に拡張した Darcy 則として次式のように表される。

$$F_{\beta} = \rho_{\beta} u_{\beta} = -K \frac{k_{r\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} \left(\nabla P_{\beta} - \rho_{\beta} g \right)$$ 式 3.3.1-13

ここに、u_{β} はβ相の体積流量としての Darcy 流速、K は絶対浸透率（m²）、$k_{r\beta}$ は相対浸透率、μ_{β} はβ相の粘性係数（Pa・s）、P_{β} はβ相の流体圧力、g は重力加速度（m/s²）である。

β相の流体圧力P_{β} は、圧力と毛管圧力$P_{c\beta}$（Pa）の和として次式のように表される。

$$P_{\beta} = P + P_{c\beta}$$ 式 3.3.1-14

(2) 解析条件の設定

水理学的な影響評価のための解析条件にあたっては、対象とするサイトスペシフィックな条件を踏まえて、できるだけ詳細な水理地質構造、境界条件を考慮した解析領域、解析の目的に応じた不確実性や不均質性の考慮方法、などを設定する必要がある。本検討においては、以下に示す「基本的な考え方」に基づき、解析条件を設定した。

① 本検討では、「回収可能性維持期間の影響」に対する基礎的な検討の位置づけとし、サイトスペシフィックな条件となる流動場の不均質性、不確実性、境界条件の影響を考慮しない。

② 従来の検討では実施されていない「回収可能性維持期間を想定」した場合の時間依存性を考慮した非定常解析評価を実施するため、できるだけ解析的な負荷が軽減されるジェネリックな

条件設定を行う。

③ 「設計に対応する条件（処分形態、回収可能性維持期間の状態オプション、など）が評価結果に及ぼす影響を定量化することを目的とするため、母岩の不均質性、不確実性の影響については今後の課題と考える。

以下、基本的な解析条件を整理する。

1) 水理地質構造

ジェネリックな条件として、新第三紀堆積岩を対象とするが、多孔質媒体、均質場を想定する。ただし、後述するように処分の対象となる母岩の透水性については感度解析を行う。

また、均質媒体では不飽和領域が発生しにくいことが明らかなため、キャップロックを考慮するケースも想定した。

2) 解析領域、モデル化

処分形態（坑道レイアウト）の違いの影響を評価するためには、パネルスケールの解析領域を設定し、周辺への影響の観点から比較検討する必要があるため、パネルスケールモデルが必要となる。本検討ではサイトスペシフィックな条件を考慮しないこと、後述する簡易な境界条件の設定を考慮し、解析負荷を低減する目的で図 3.3.1-1 に示すように 1/4 パネルを対象とした解析領域を設定し、解析モデルを作成した。

平成 29 年度の検討[2]で作成したパネルスケールモデルの諸元を図 3.3.1-2～図 3.3.1-5 に示す。処分形態の違いよる比較のため、Through-type（竪置きタイプ）、Dead-end-type（横置き PEM タイプ）の 2 ケースを設定した。

また、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に対する詳細なモデル化が難しくなるため、EDZ（掘削影響領域）や坑道の詳細形状を考慮することができる処分坑道詳細モデルを設定し、処分坑道周辺の EDZ 等の影響検討に対応した。

平成 29 年度の検討で作成した処分坑道詳細モデルの諸元を図 3.3.1-6 と図 3.3.1-7 に示す。

処分坑道詳細モデルについては、処分パネルの中央部において、ほぼ鉛直流れが卓越することを前提に想定しており、側面の境界条件を不透水境界としていることから、地下水の流入が上下の境界からのみになる。平成 29 年度の検討[2]の結果、パネルスケールモデルの解析結果をみると処分パネル中央部であっても、坑道掘削時の鉛直方向の地下水流速は坑道に近づくにつれ速度が速くなる結果が得られており、これは側面からの地下水流入による影響が表れている。このため、処分坑道詳細モデルについては厳密な意味での解析条件（境界条件）は適切ではないと言えるが、EDZ 影響等の相対的な比較検討に対する影響は小さいと考えられることから、処分坑道周辺の物性の違いによる影響比較のための解析モデルとして採用することとした。

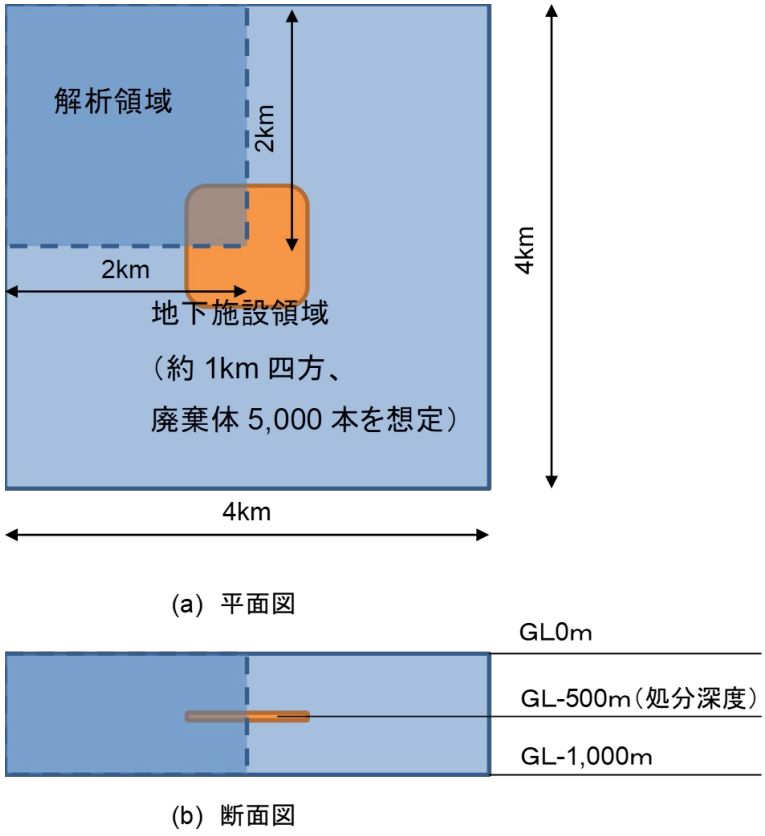


図 3.3.1-1　パネルスケールモデルの解析領域の設定

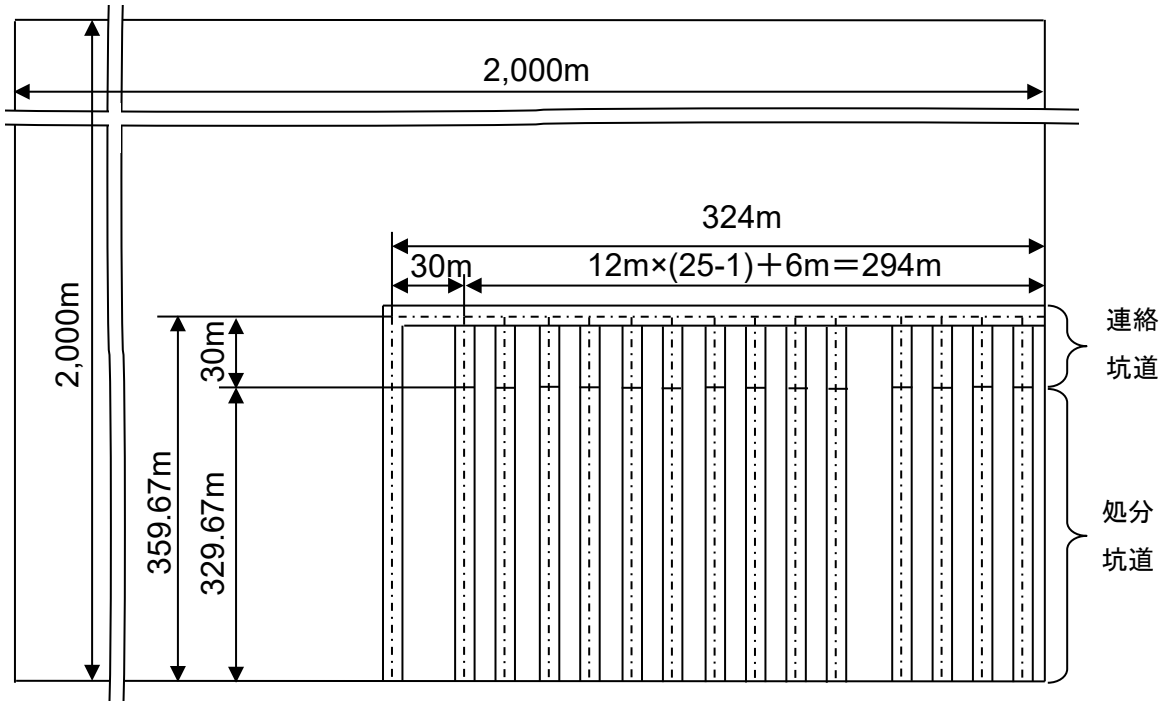


図 3.3.1-2　地下施設配置検討結果（「Trough-type」）

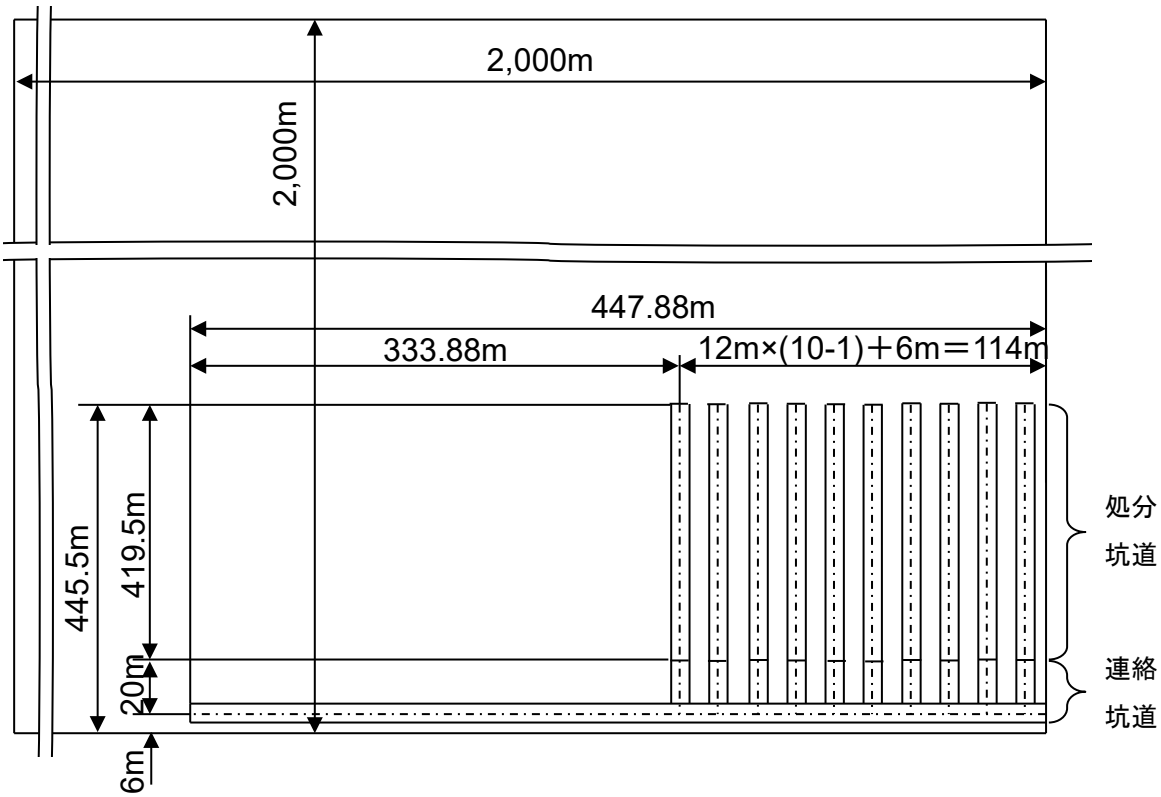
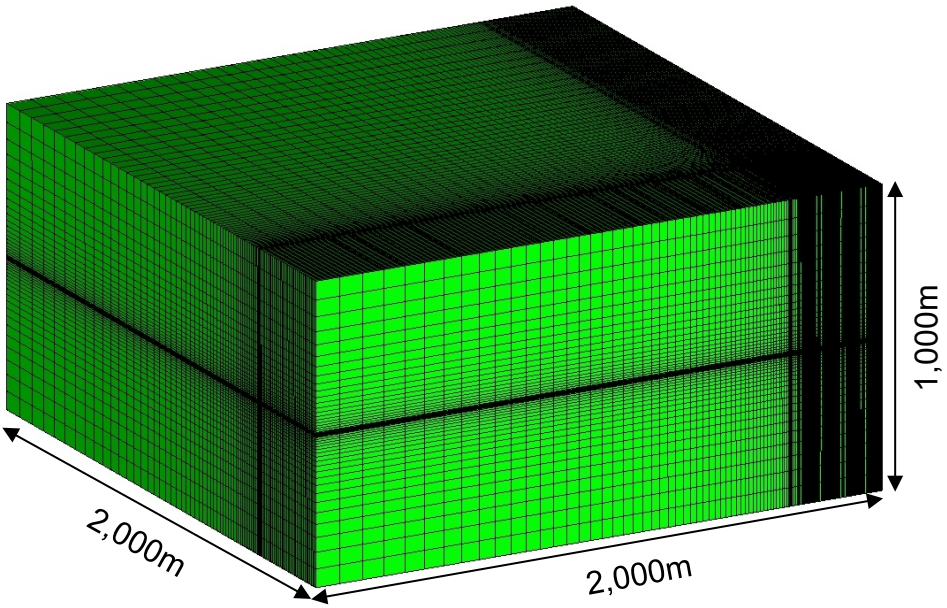
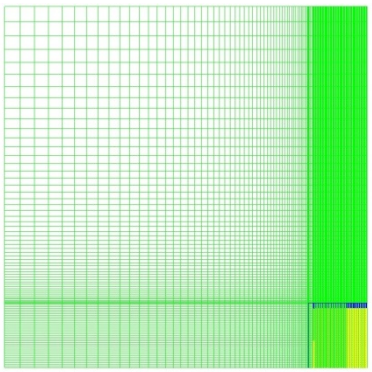


図 3.3.1-3　地下施設配置検討結果（「Dead-end-type」）

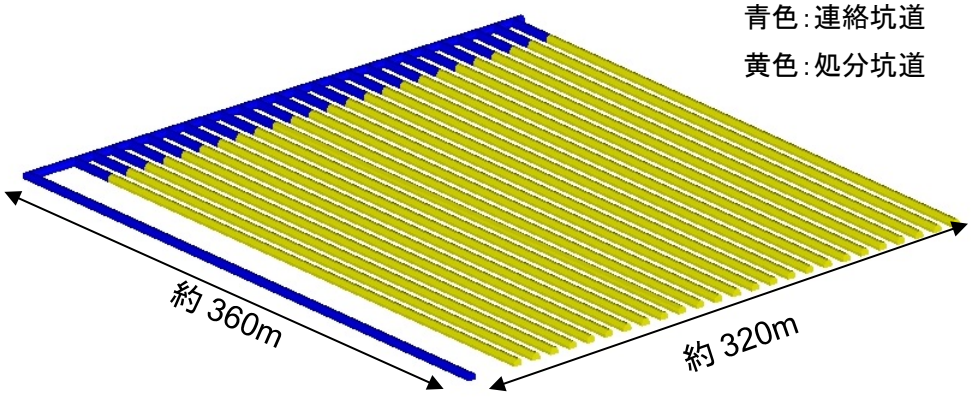


(a) 解析モデル鳥瞰図



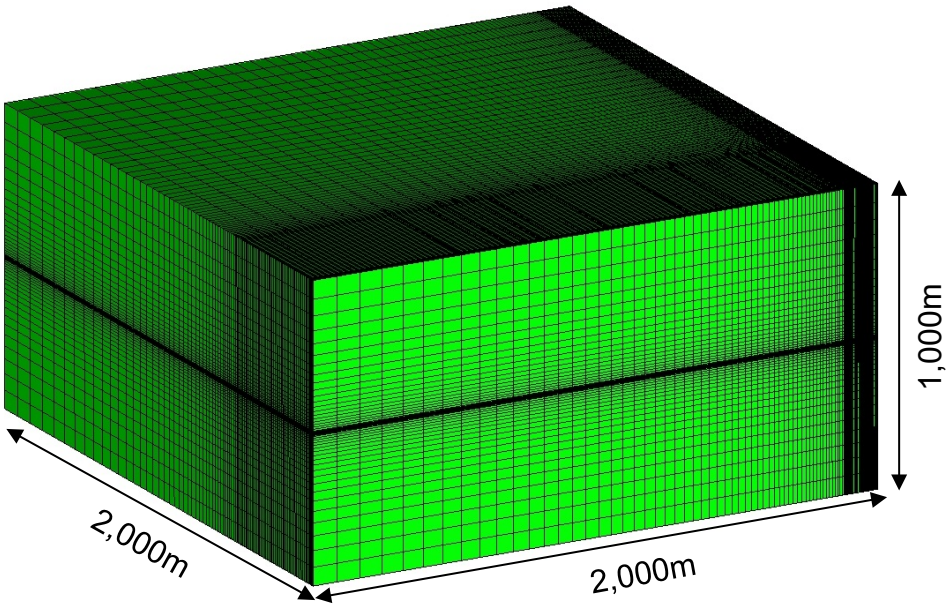
解析モデル規模
節点総数:670,293
要素総数:646,000

(b) 解析モデル平面メッシュ図

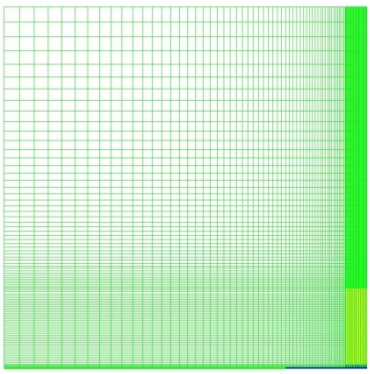


(c) 地下施設鳥瞰図

図 3.3.1-4　3D パネルスケールモデル（「Through-type」）

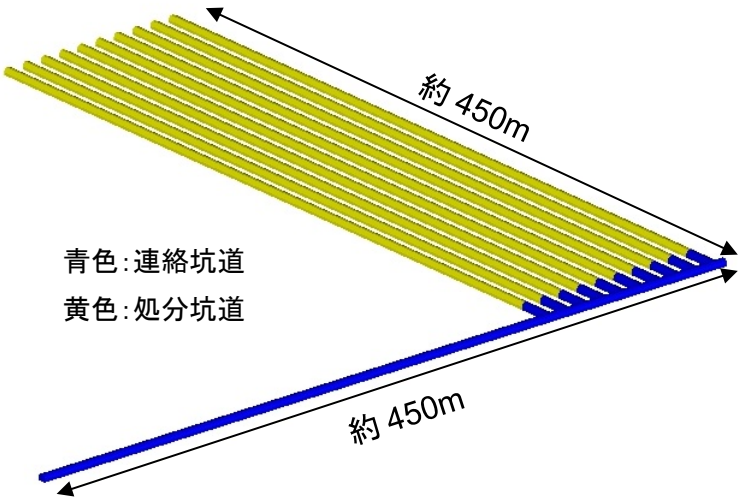


(a) 解析モデル鳥瞰図



(b) 解析モデル平面メッシュ図

解析モデル規模
節点総数:456,858
要素総数:438,750



(c) 地下施設鳥瞰図

図 3.3.1-5　3D パネルスケールモデル（「Dead-end-type」）

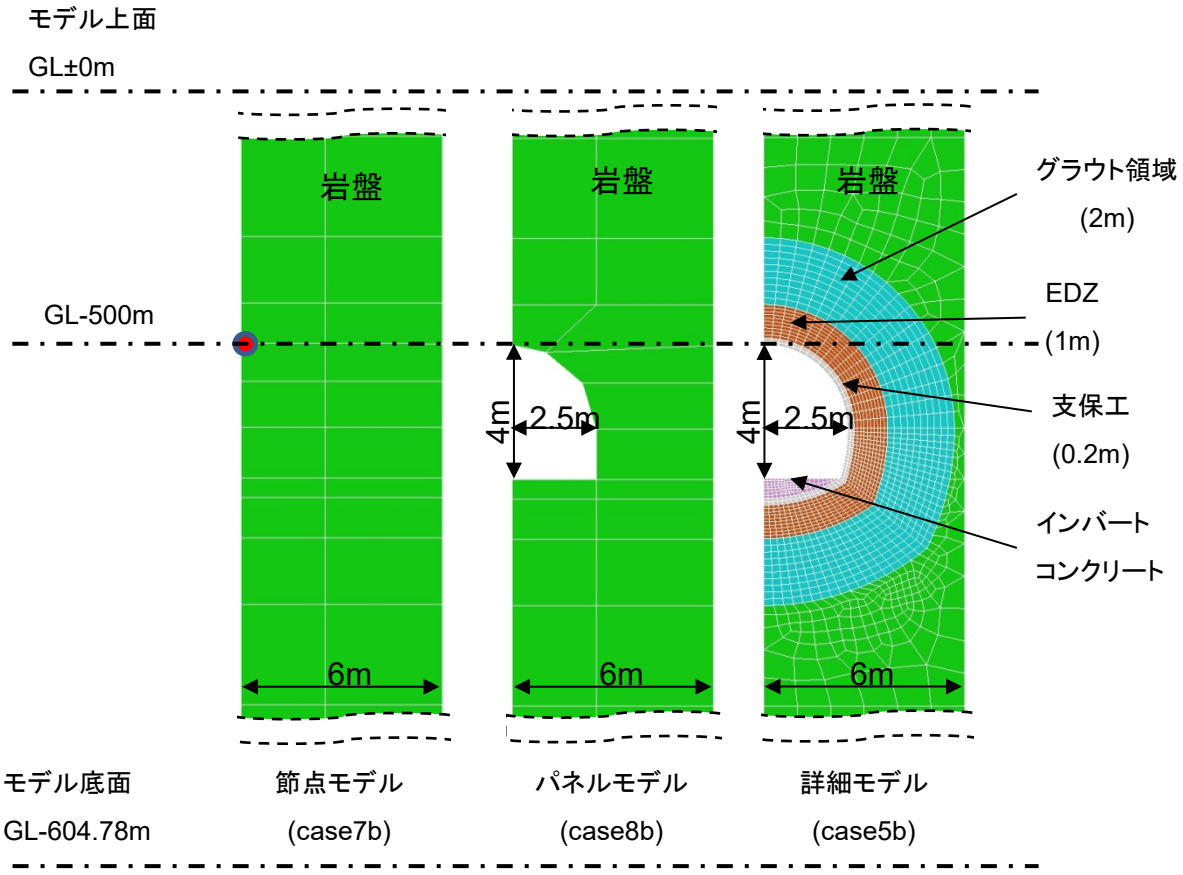


図 3.3.1-6　湧水量への影響検討用 2D モデル（横置き PEM タイプ）

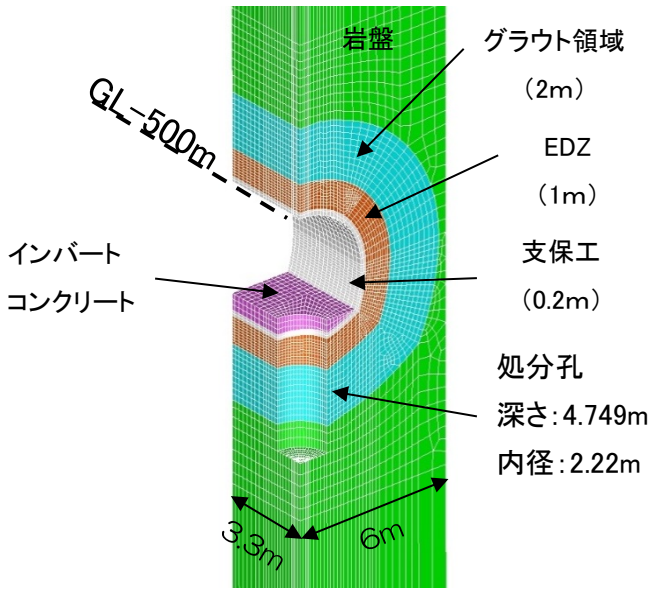


図 3.3.1-7　湧水量への影響検討用 3D モデル（竪置きタイプ：case6a）

3)　物性値（透水係数、間隙率、不飽和特性）

設定した透水係数と間隙率の一覧を表 3.3.1-1 に示す。

表 3.3.1-1　透水係数と間隙率の設定値

材質名	透水係数 (m/s)	間隙率 (%)	備考
岩盤（新第三紀堆積岩類）	3.000E-7 （3.000E-9）	25	NUMO[4]より （ ）は感度解析に用いた値
キャップロック	（岩盤より 1 オーダー小さい）	25	不飽和領域発生への影響評価用
支保コンクリート等	3.000E-7	25	健全時および劣化時共通
EDZ	（健岩よりも 2 オーダー大きい）	25	平成 28 年度の力学検討結果では、約 5 倍（100 年後）、7 倍(10,000 年後）程度
グラウト領域	（岩盤より 1 オーダー小さい）	25	岩盤よりも 1 オーダー小さく設定
緩衝材	1.005E-12	40	JNC TN8400 2005-026[6]より、竪置きのみ使用（PEM は無視）
埋め戻し材	7.353E-12	33	JNC TN1400 99-022[7]より

なお、EDZ の透水係数については、平成 28 年度に実施した力学影響解析結果による岩盤の透水性の時間変化を考慮する計画であったが、岩盤の透水性に与える力学影響が小さい結果であったため[1]、不飽和領域の発生に対して影響が大きくなる条件として、EDZ を坑道壁面から 1m 範囲の透水性が岩盤よりも 2 オーダー大きくなる条件を設定した。また、EDZ の透水性の時間変化は考慮しないものとした。

また、不飽和特性については平成 29 年度の検討の結果[2]、不飽和特性の設定の違いにより不飽和領域の評価結果が異なる可能性があることが分かったため、適切な不飽和特性の設定、データ取得の必要性を評価するため、後述する感度解析を実施することとした。

4)　境界条件

設定した「パネルスケールモデル」、「処分坑道詳細モデル」に対しては、解析結果に対する境界条件の影響を低減するため、比較的簡易でジェネリックな境界条件を設定した。

「パネルスケールモデル」に対しては、1/4 切り出しモデルの対称性を考慮し、図 3.3.1-8 に示すように解析領域の外周側面および上面については地表面標高（H=0m）の水頭固定境界、対称面となる側面および底面については不透水境界とした。本設定は、海底下のような処分場の上部から無限の地下水供給がある場合に相当するものであり、湧水量の算出条件としては保守的（湧水量が多くなる）な条件設定と言える。

内陸部の処分場では、処分場上部の地下水位の低下の可能性があるため、降雨涵養量を考慮した

境界条件については、後述する感度解析項目として検討を実施した。

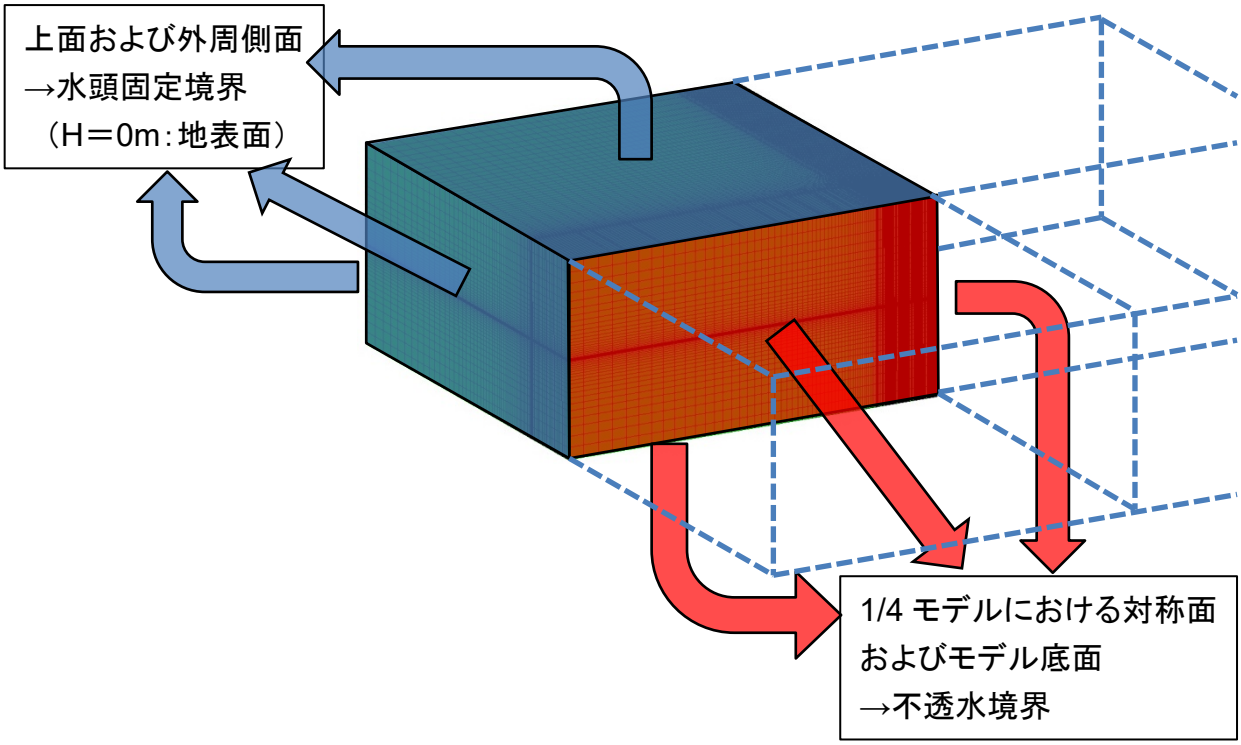


図 3.3.1-8　パネルスケールモデルにおける境界条件の設定

処分坑道詳細モデルの境界条件については、連接する処分坑道の影響を考慮し対称となる 1/2 モデルに対して、「パネルスケールモデル」と同様の考え方に基づき、上面（GL0m）は水頭固定境界、側面は対象性から不透水境界、底面（GL-604.78m）は水頭固定境界とし、「パネルスケールモデル」から得られる全水頭の経時変化を考慮した境界条件を与えることとした。なお、「パネルスケールモデル」による解析では、「Through-type」と「Dead-end-type」の違いや、岩盤の透水係数の違いにより、境界深度での水頭値の時間変化が異なるため、本検討では各対応条件での水頭値の時間変化を境界条件として与えた。

(3)　回収可能性維持期間の影響を評価する手法の検討

本検討では以下の項目について検討を実施した。

①　岩盤の透水係数の違いに関する検討

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

- 坑道開放期間中の継続する坑内湧水の影響
- 地下水の引き込みによる擾乱影響の程度と範囲
- 開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度
- ベースラインへの回復過程と回復の程度

② 岩盤の不飽和特性の違いに関する検討

昨年度の検討により、岩盤の不飽和特性の設定により、不飽和領域の評価結果に対しての影響が大きいことが分かった。そのため、不飽和領域評価にあたり、岩盤の不飽和特性の違いによる感度解析を実施し、評価結果への影響について把握するとともに、本検討で用いる不飽和特性の設定を行う。本検討は以下の技術検討項目に関連する。

- 坑道開放期間中の継続する坑内湧水の影響
- 地下水の引き込みによる擾乱影響の程度と範囲
- 開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度
- ベースラインへの回復過程と回復の程度

③ 水理学的影響評価手法の適用性評価検討

坑道掘削時の不飽和領域評価、および処分坑道閉鎖時の再冠水評価に対する水理学的影響評価手法（飽和・不飽和解析手法と二相流解析手法）の適用性について、不飽和領域評価や再冠水評価の観点から比較検討を行い、評価手法としての適用性について考察する。本検討は以下の技術検討項目に関連する。

- 坑道開放期間中の継続する坑内湧水の影響
- 地下水の引き込みによる擾乱影響の程度と範囲
- 開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度
- ベースラインへの回復過程と回復の程度

④ 処分坑道奥行方向のメッシュ分割影響の検討

パネルスケールモデルのメッシュ分割に対する妥当性を確認するため、処分坑道の奥行方向のメッシュ分割に関する感度解析を実施する。

1) 岩盤の透水係数の違いに関する検討

本検討では国内の標準的な岩種として、軟岩（新第三紀堆積岩類、処分深度：500m）を対象とする。検討するにあたっては、回収可能性維持期間の影響として、非定常解析により時間的な変化を明確とするために、等価均質媒体モデル（均質な多孔質媒体）としてモデル化するものとした。設定すべき透水係数と間隙率については、地表面から均一の透水性とするため、平均値として既存文献[4]を踏まえて、岩盤の飽和透水係数として 3E-7(m/s)を設定し、非定常解析を行った。この値は、HLW 処分における天然バリア母岩の透水性の設定値としては大きく、均質モデルによる湧水量の評価では湧水量が多くなる結果であった。湧水量については、理論的に岩盤の透水係数の設定値に比例し、非定常評価における経過時間は透水性に反比例するはずである。ここでは岩盤の飽和

透水係数を 2 オーダー小さくした場合（3E-9(m/s)）の解析を実施し、昨年度の結果と比較することにより、回収維持期間を考慮した地下水流動の時間依存性に対する岩盤の透水性の影響把握を行った。

平成 29 年度に行った、パネルスケールモデルによる地下水流動解析ケース（全 8 ケース）について表 3.3.1-2 に示す。処分形態については 2 種類（「Through-type」と「Dead-end-type」）、処分坑道の状態についても 2 種類（開放と埋め戻し）を想定した。また、坑道周辺に不飽和領域が発生しやすくなる条件として、処分坑道上部にキャップロック（低透水性層）が分布する場合を想定した。

表 3.3.1-2　パネルスケールモデルによる解析ケース

ケース名	処分形態	状態	グラウト	キャップロック	手法	備考
case1a case1b	a:Through type b:Dead-end-type	坑道開放	なし	なし	飽和・不飽和 FEM	基本ケース
case2a case2b		坑道開放	あり	なし	飽和・不飽和 FEM	グラウトの効果
case3a case3b		坑道開放	なし	あり	飽和・不飽和 FEM	キャップロックの影響（不飽和） 透水係数：岩盤より1オーダー小
case4a case4b		坑道埋戻	なし	なし	飽和・不飽和 FEM	処分坑道のみ埋め戻した場合

a　坑道掘削時の影響

坑道掘削時、回収可能性維持期間中の影響について、岩盤の透水係数の違いに関して比較検討した。なお、解析手法としては、パネルスケールモデルを対象とすることができる飽和・不飽和解析手法を用いた。

解析条件については平成 29 年度検討[2]における「パネルスケールモデル」による解析ケース case1a を用いた。2 種類の解析ケースを表 3.3.1-3 に示す。

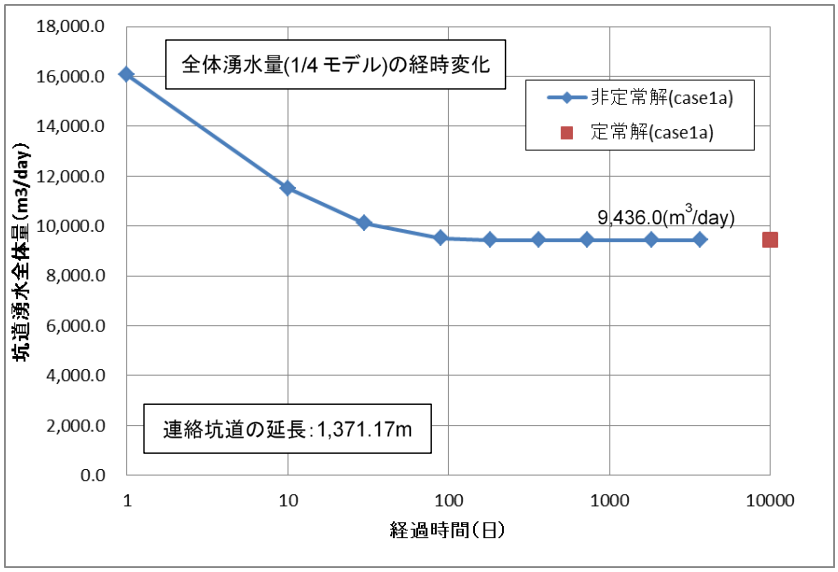
表 3.3.1-3　「パネルスケールモデル」による解析ケース（case1a,case1a-9）

ケース名	処分形態	状態	グラウト	キャップロック	手法	岩盤の透水係数
case1a	Through-type	坑道開放	なし	なし	飽和・不飽和 FEM	3E-7(m/s)
case1a-9						3E-9(m/s)

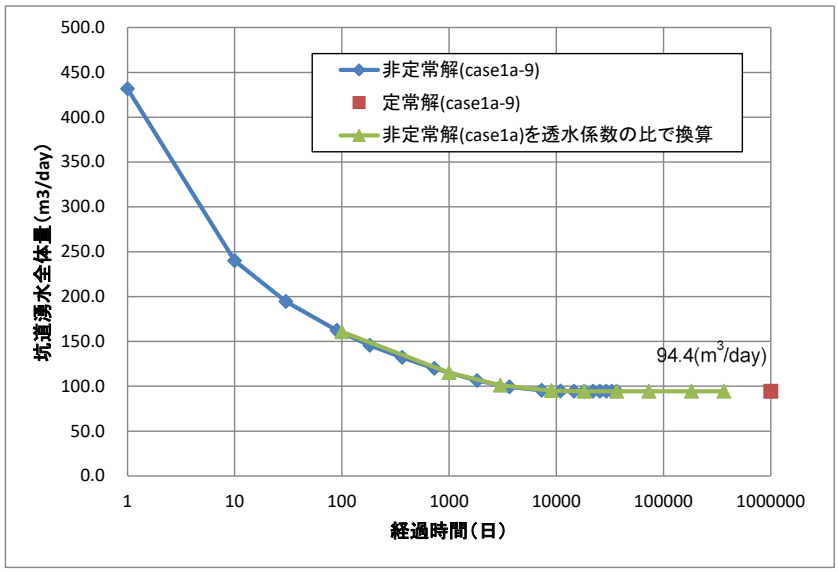
2 ケースの解析結果として、連絡坑道掘削時の湧水量の経時変化の比較を図 3.3.1-9 に、処分坑道掘削時の湧水量の経時変化の比較を図 3.3.1-10 に示す。なお、図 3.3.1-9 (b)には case1a の解析結果に対して透水係数の比で換算した結果（湧水量を 1/100、経過時間を 100 倍）を case1a-9 グラフに重ねた。これより、岩盤の透水係数の違いによる湧水量に経時変化は理論通りであることがわかる。また、処分坑道掘削時の定常湧水量の算出結果を示した表 3.3.1-4 により、透水係数に関わらず、連絡坑道と処分坑道の全体湧水量に対する割合が変わらないことがわかる。

湧水量の経時変化に着目すると、岩盤の透水性が大きい方が定常状態に落ち着く時間が早く、透水性が小さいほど時間が掛かるが、岩盤の透水性が-9 乗オーダーの場合、掘削影響が落ち着く時間としては、約 30 年程度と考えられ、短期間に定常に至ることがわかった。

ただし、本解析条件は「地下水位が低下しない」条件によるものであり、海底下などの処分条件に相当する。地下水位が低下する場合については、別途影響を確認すべきと思われる。



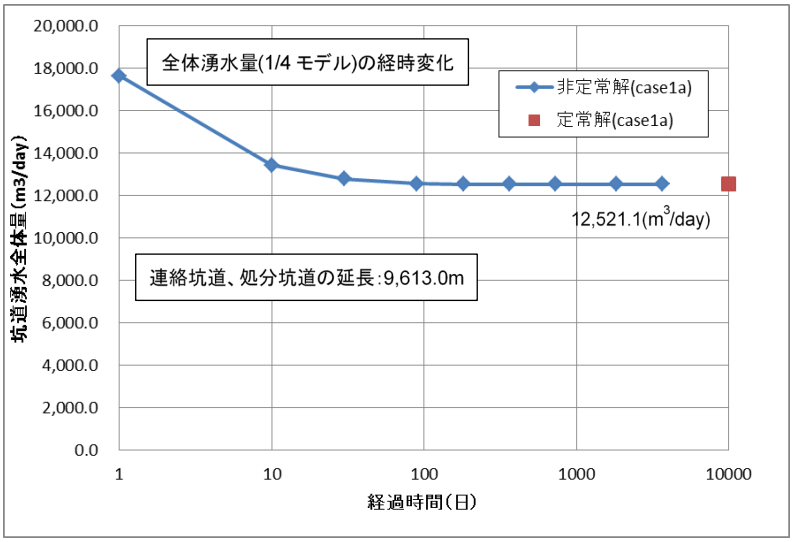
(a)　case1a(岩盤の透水係数:3E-7(m/s))



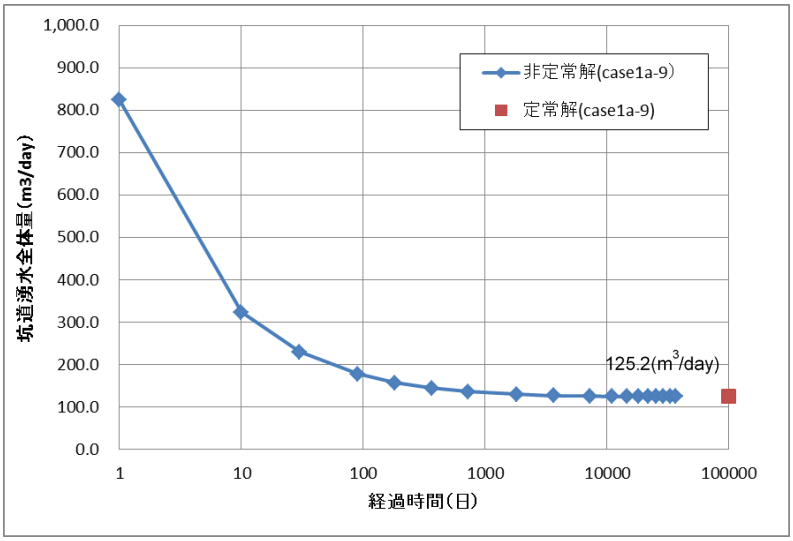
(b)　case1a-9(岩盤の透水係数:3E-9(m/s))

※湧水量の絶対値については、解析条件等に依存するため取扱に注意を要する。

図 3.3.1-9　連絡坑道掘削時の湧水量の経時変化（case1a,case1a-9）



(a)　case1a(岩盤の透水係数:3E-7(m/s))



(b)　case1a-9(岩盤の透水係数:3E-9(m/s))

※湧水量の絶対値については、解析条件等に依存するため取扱に注意を要する。

図　3.3.1-10　処分坑道掘削時の湧水量の経時変化（case1a、case1a-9）

表　3.3.1-4　処分坑道掘削時の定常湧水量の算出結果（case1a、case1a-9）

地下施設	case1a：3E-7(m/s)		case1a-9：3E-9(m/s)	
	延長(m)	湧水量(m³/day)	延長(m)	湧水量(m³/day)
連絡坑道	1,496.0 (15.6%)	5,011.2 (40.0%)	1,496.0 (15.6%)	50.1 (40.0%)
処分坑道	8,116.9 (84.4%)	7,509.9(60.0%)	8,116.9 (84.4%)	75.1(60.0%)
全体	9,612.9 (100.0%)	12,521.1(100.0%)	9,612.9 (100.0%)	125.2(100.0%)

※湧水量の絶対値については、解析条件等に依存するため取扱に注意を要する。

「パネルスケールモデル」では、坑道周辺の EDZ 等の影響を考慮できないため、「処分坑道詳細モデル」を用いた坑道掘削時の比較検討を実施した。解析条件については平成 29 年度検討における「処分坑道詳細モデル」による解析ケース case9b を用いた。

平成 29 年度に設定した、処分坑道詳細モデル等による地下水流動解析ケース（全 7 ケース）について表 3.3.1-5 に示す。

表 3.3.1-5　処分坑道詳細モデル等による解析ケース

ケース名	処分形態	メッシュ	EDZ	グラウト	キャップロック	手法	備考
case5b	a:Through type b:Dead-end-type	2D詳細	なし	なし	なし	FEM	基本ケース
case6a		3D詳細	なし	なし	なし	FEM	処分形態の比較
case7b		2D節点	なし	なし	なし	FEM	メッシュ分割影響1
case8b		2Dパネル	なし	なし	なし	FEM	メッシュ分割影響2
case9b		2D詳細	あり	なし	なし	FEM	EDZ影響
case10b		2D詳細	あり	あり	なし	FEM	グラウト影響
case11b		2D詳細	なし	なし	あり	FEM	キャップロック影響

今年度設定した 2 種類の解析ケースを表 3.3.1-6 に、解析モデルを図 3.3.1-11 に示す。

表 3.3.1-6　「処分坑道詳細モデル」による解析ケース（case9b、case9b-9）

ケース名	処分形態	メッシュ	EDZ	グラウト	キャップロック	手法	岩盤の透水係数
case9b	b:Dead-end-type	2D詳細	あり	なし	なし	飽和・不飽和 FEM	3E-7(m/s)
case9b-9							3E-9(m/s)

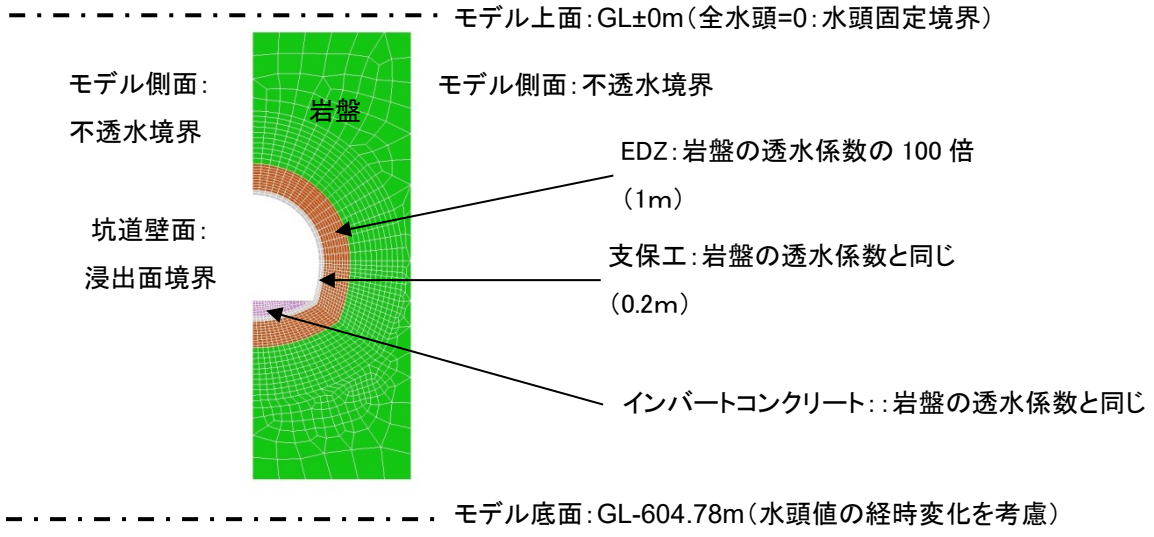
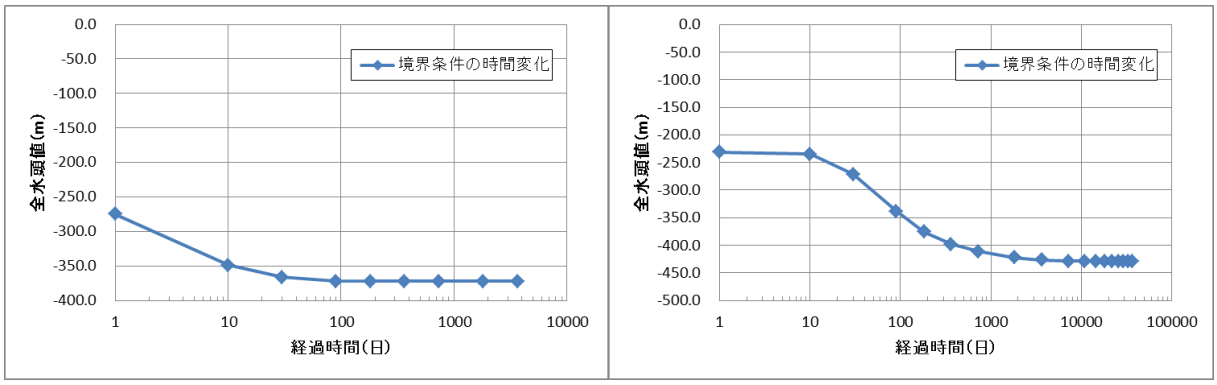


図 3.3.1-11　「処分坑道詳細モデル」拡大図（case9b、case9b-9）

底部境界条件に関しては、図 3.3.1-12 に示すようにそれぞれ対応する「パネルスケールモデル」解析結果（case1b、case1a-9）から全水頭分布の経時変化を与えた。また、case9b-9 については、case9b と異なる不飽和特性が異なる条件（後述する「3.3.1(3)2)b ケース④」）で解析を実

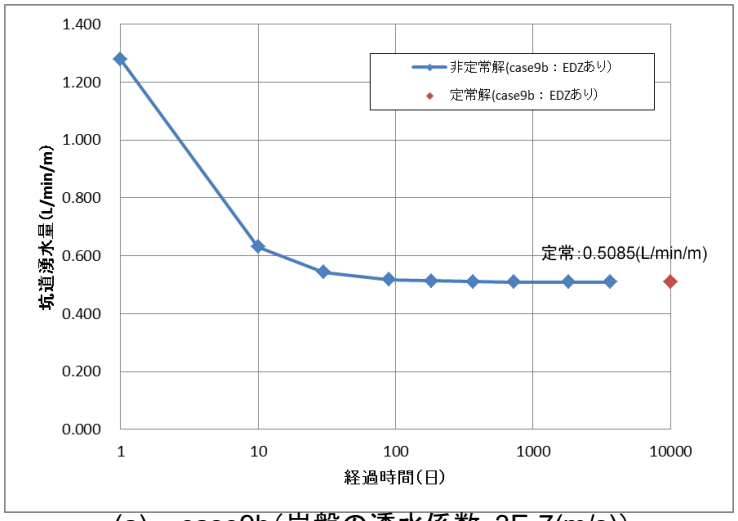
施した。



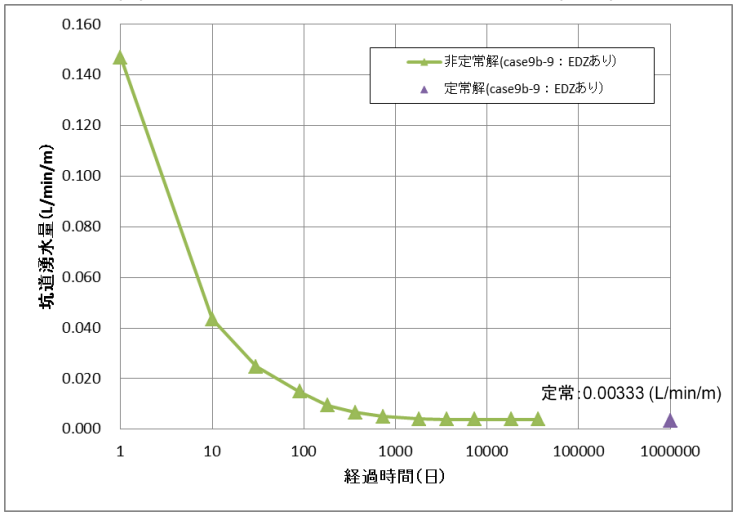
(a) case9b（岩盤の透水係数：3E-7(m/s)）　(b) case9b-9（岩盤の透水係数：3E-9(m/s)）

図 3.3.1-12 「処分坑道詳細モデル」での底部境界における全水頭の経時変化
（case9b、case9b-9）

湧水量の経時変化について図 3.3.1-13 に示す。ここでは処分坑道の単位長さあたりの湧水量の経時変化を示した。透水係数の影響により、case9b-9 の方が湧水量は小さいが、定常状態の湧水量が透水係数の比率と比例関係にないことがわかる。これは、図 3.3.1-12 に示したように底部境界での境界条件が異なっているためであり、定常状態の底部境界深度の水頭値の違いによるものである。平成 29 年度の case9b では「Dead-end-type」の「パネルスケールモデル」解析結果（case1b）から底部境界条件を設定したが、case9b-9 では前項で解析結果を示した「Through-type」の「パネルスケールモデル」解析結果（case1a-9）から底部境界を設定したためである。「処分坑道詳細モデル」による解析結果は、透水係数の変化による影響に加えて、底部境界条件の影響を受けるため、境界条件の設定には注意する必要がある。なお、「処分坑道詳細モデル」検討による処分坑道周辺の不飽和領域の評価結果については、後述する。



(a)　case9b（岩盤の透水係数：3E-7(m/s)）



(b)　case9b-9（岩盤の透水係数：3E-9(m/s)）

※湧水量の絶対値については、解析条件等に依存するため取扱に注意を要する。

図 3.3.1-13　「処分坑道詳細モデル」解析結果の湧水量の経時変化（case9b、case9b-9）

緩衝材の流出評価の指標として、竪置きタイプの処分孔の湧水量への岩盤の透水係数の影響について確認した。解析条件については平成 29 年度検討における「3D 処分坑道詳細モデル」による解析ケース case6a（表 3.3.1-5 参照）を用いた。2 種類の解析ケースを表 3.3.1-7 に、解析モデルを図 3.3.1-14 に示す。

表 3.3.1-7　「3D 処分坑道詳細モデル」による解析ケース（case6a、case6a-9）

ケース名	処分形態	メッシュ	EDZ	グラウト	キャップロック	手法	岩盤の透水係数
case6a	Through-type	3D詳細	なし	なし	なし	飽和・不飽和 FEM	3E-7(m/s)
case6a-9							3E-9(m/s)

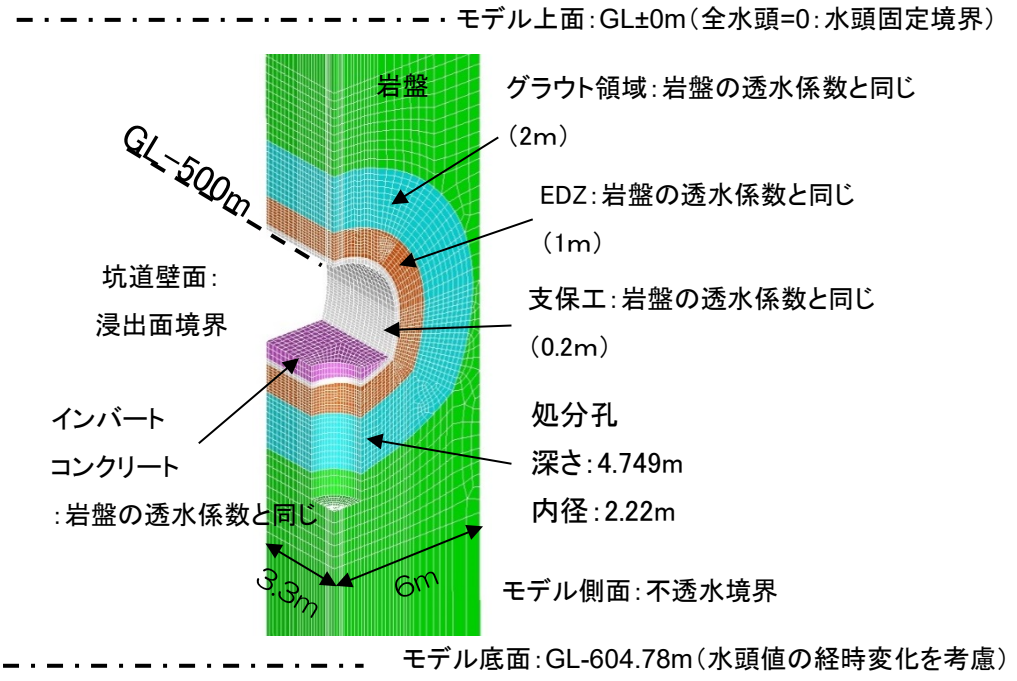


図 3.3.1-14　「3D 処分坑道詳細モデル」拡大図（case6a、case6a-9）

平成 29 年度に検討した case6a の解析結果を図 3.3.1-15 に、底部境界での境界条件の経時変化を図 3.3.1-16 に、case6a-9 の解析結果を図 3.3.1-17 に、底部境界での境界条件の経時変化を図 3.3.1-18 に示す。

定常状態での湧水量に関しては、岩盤の透水係数と比例関係であることを確認できた。

本検討では、岩盤を均質多孔質媒体としたジェネリックな条件での解析結果を用いたものである。緩衝材や埋め戻し材のベントナイト流出評価に関しては、今後別事業の成果を踏まえて検討を行うことが望ましい。

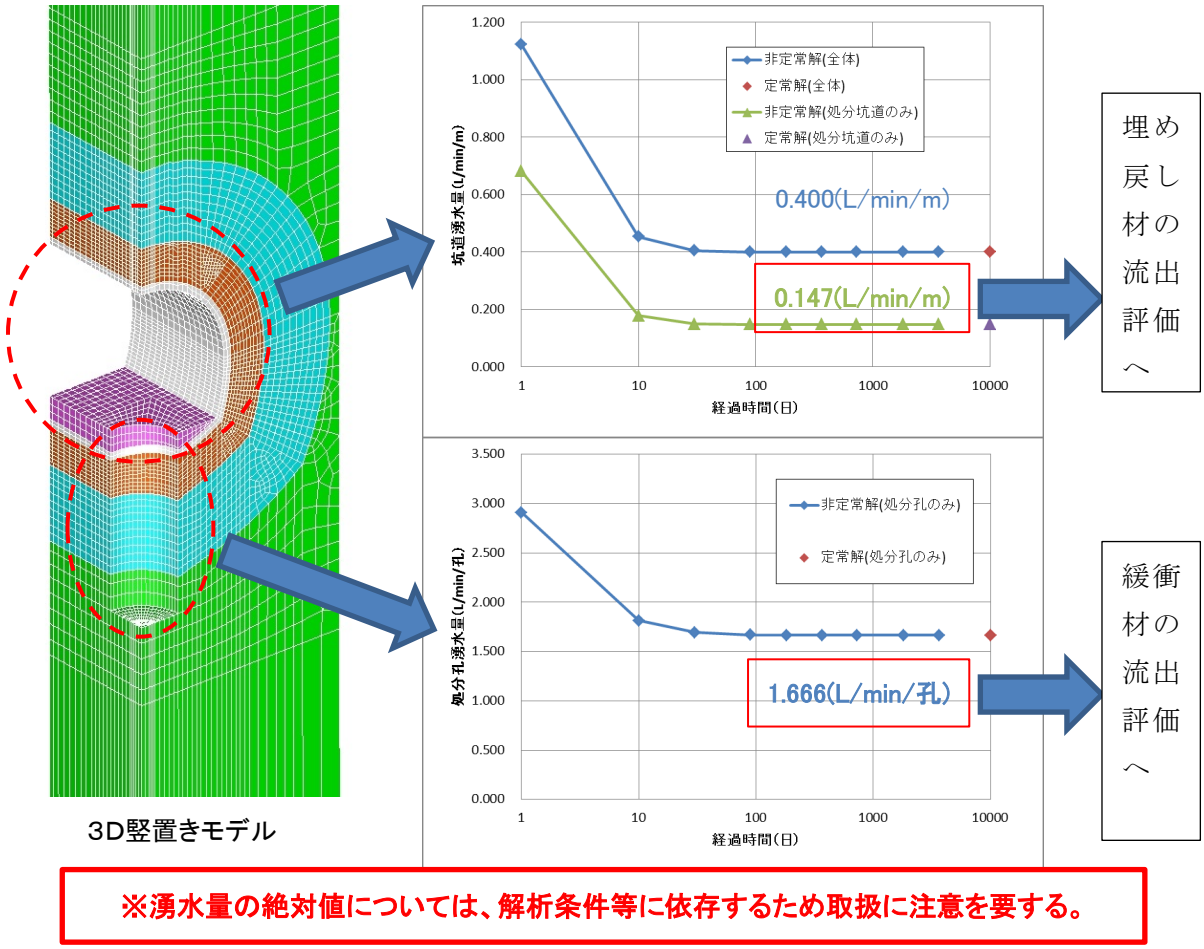


図 3.3.1-15　ベントナイト流出評価のための湧水量（case6a）

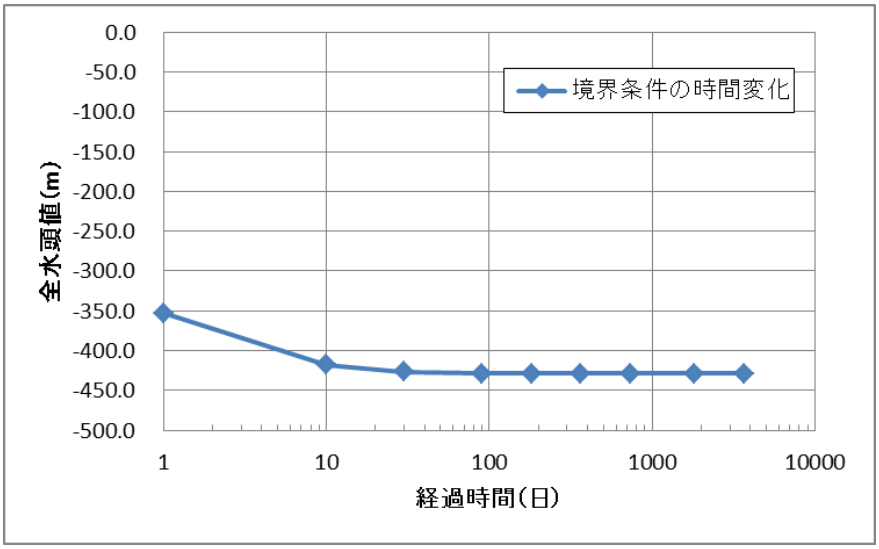


図 3.3.1-16　3D モデル解析での底部境界条件の経時変化（case6a）

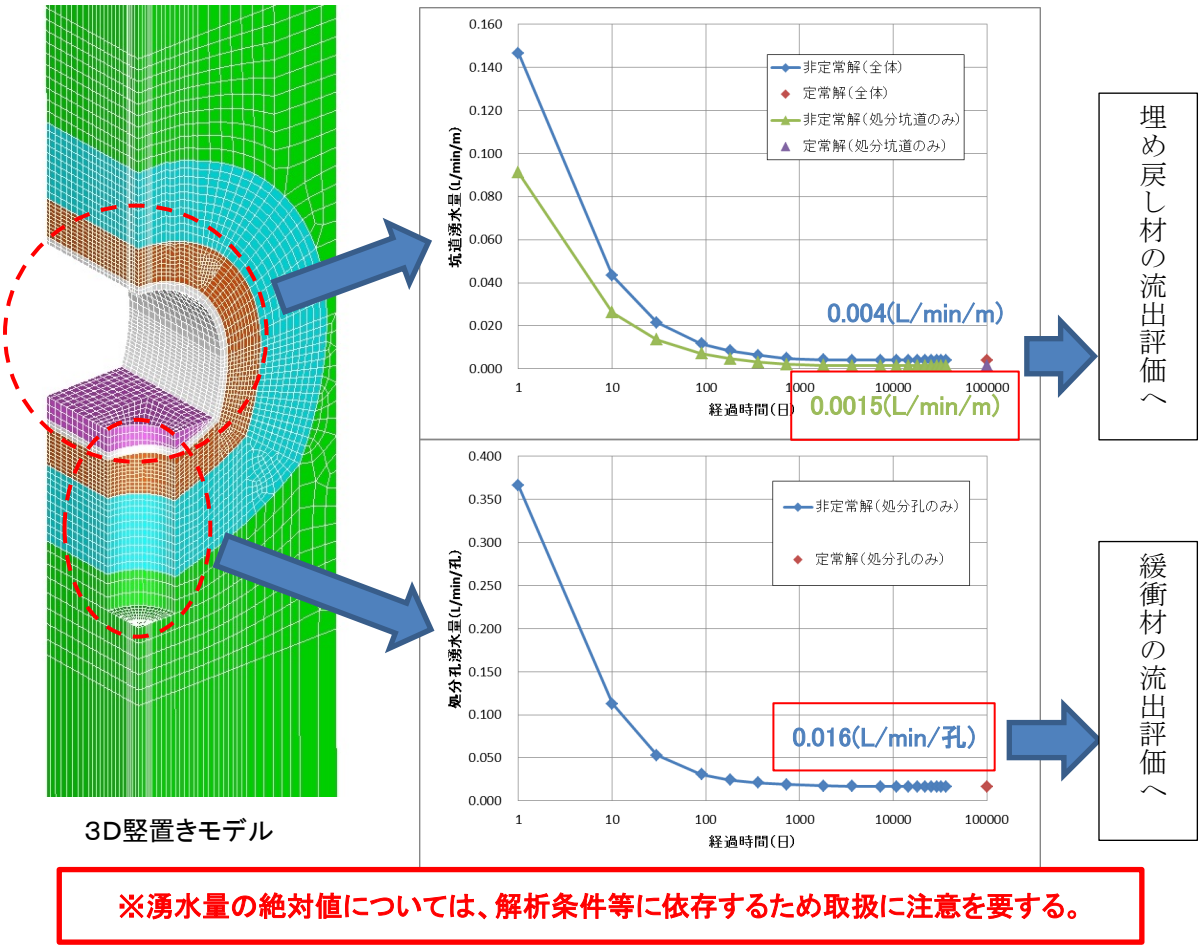


図 3.3.1-17　ベントナイト流出評価のための湧水量（case6a-9）

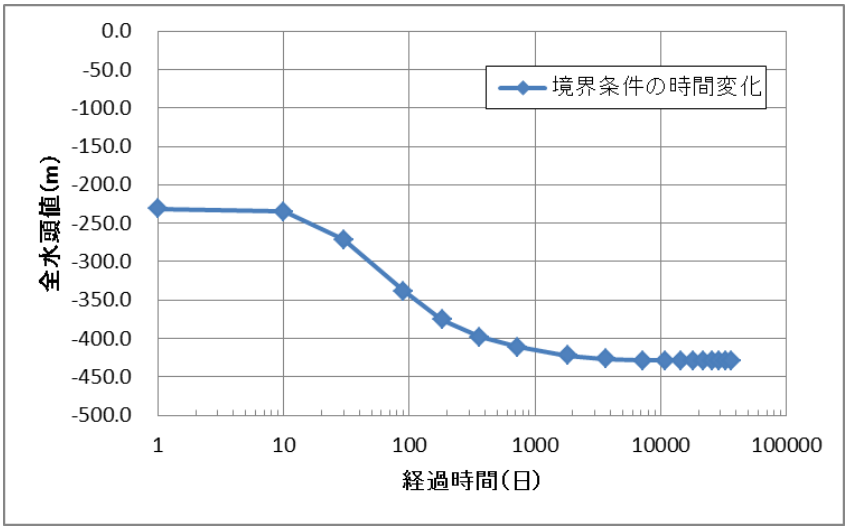


図 3.3.1-18　3D モデル解析での底部境界条件の経時変化（case6a-9）

b 再冠水時の影響

回収可能性維持期間中の処分坑道の状態オプションにおける処分坑道の埋め戻し時や、地下施設閉鎖時の再冠水現象に対する岩盤の透水係数の違いの影響について比較検討を実施した。なお、解析手法としては、パネルスケールモデルを対象とすることができる飽和・不飽和解析手法を用いた。

解析条件については平成 29 年度検討における「パネルスケールモデル」による解析ケース case4a（処分坑道埋め戻し状態）（表 3.3.1-2 参照）を用いた。2 種類の解析ケースを表 3.3.1-8 に示す。

表 3.3.1-8 「パネルスケールモデル」による解析ケース（case4a、case4a-9）

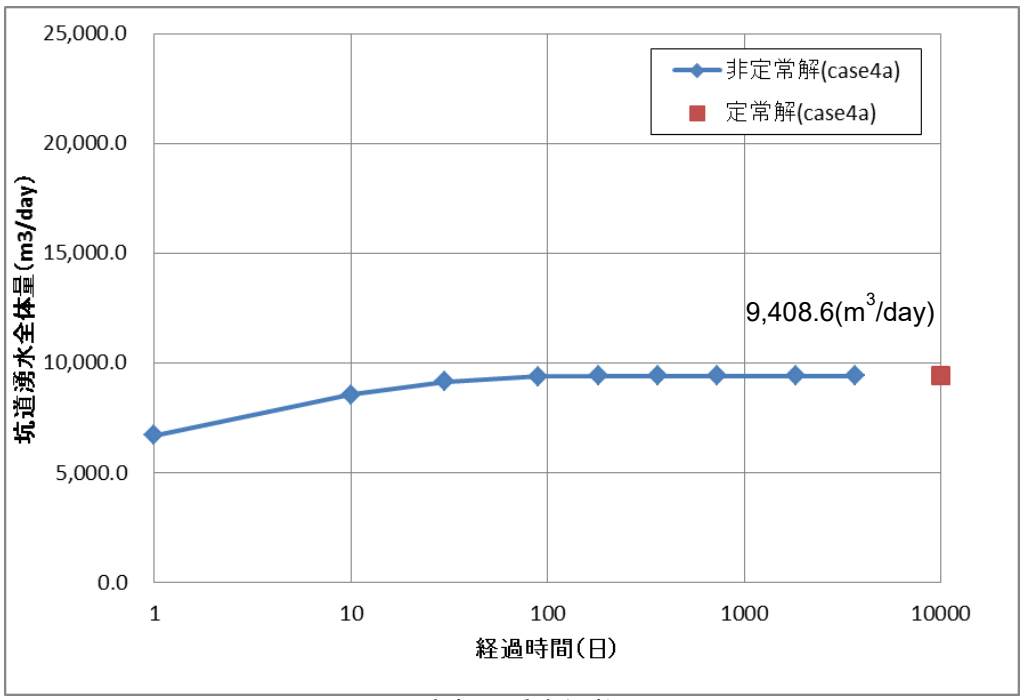
ケース名	処分形態	状態	グラウト	キャップロック	手法	岩盤の透水係数
case4a	Through-type	坑道埋戻	なし	なし	飽和・不飽和 FEM	3E-7(m/s)
case4a-9						3E-9(m/s)

本解析条件では、連絡坑道のみを開放した条件であるため、処分坑道埋め戻し後の連絡坑道からの湧水量の経時変化を図 3.3.1-19 に示す。

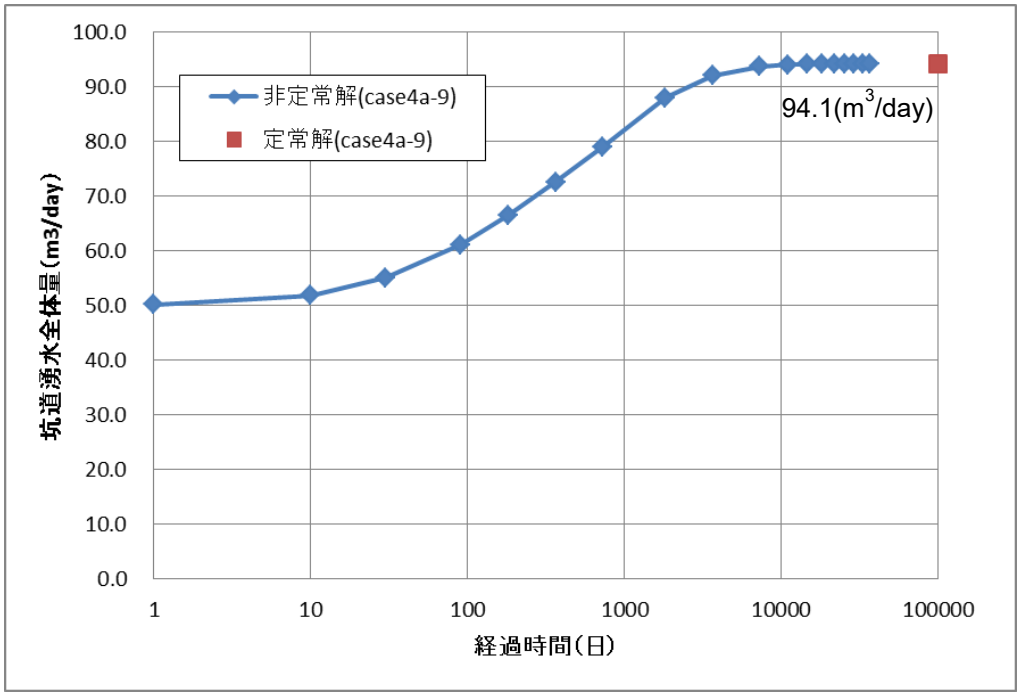
図 3.3.1-19 より、連絡坑道からの定常湧水量は岩盤の透水係数の設定値に比例していたが、case4a-9 の場合、湧水量が定常状態に近くなるのは埋め戻し後約 30 年程度であり、処分坑道の埋め戻し後約 30 年程度で水理学的には安定すると考えられる結果が得られた。ただし、掘削解析と同様に、本解析条件は「地下水位が低下しない」条件によるものであり、海底下などの処分条件に相当する。地下水位が低下する場合については、別途影響を確認すべきと思われる。

次に、初期条件としての処分坑道の状態オプション（開放または埋め戻し）の違いによって、閉鎖後の再冠水に差が表れるのかを確認するために、再冠水挙動の予測解析を実施した。

解析条件については「パネルスケールモデル」を用いた解析とし、岩盤の透水係数については 3E-9(m/s)の場合のみについて検討を実施した。処分坑道の閉鎖前の状態オプションの違い 2 種類の解析ケースを表 3.3.1-9 に示す。



(a)　case4a（岩盤の透水係数：3E-7(m/s)）



(b)　case4a-9（岩盤の透水係数 3E-9(m/s)）

※湧水量の絶対値については、解析条件等に依存するため取扱に注意を要する。

図 3.3.1-19　処分坑道埋め戻し時の連絡坑道からの湧水量の経時変化（case4a、case4a-9）

表 3.3.1-9　「パネルスケールモデル」による閉鎖後解析ケース（case21a-9c、case21a-9d）

ケース名	処分形態	状態	グラウト	キャップロック	手法	岩盤の透水係数
case21a-9c	Through-type	坑道埋戻	なし	なし	飽和・不飽和FEM	3E-9(m/s)
case21a-9d		坑道開放				

閉鎖後の水理学的な再冠水挙動について把握するため、解析モデルにおける 3 か所の全水頭値の経時変化を確認することとした。図 3.3.1-20 に選定した 3 か所について解析モデル上の位置を示す。

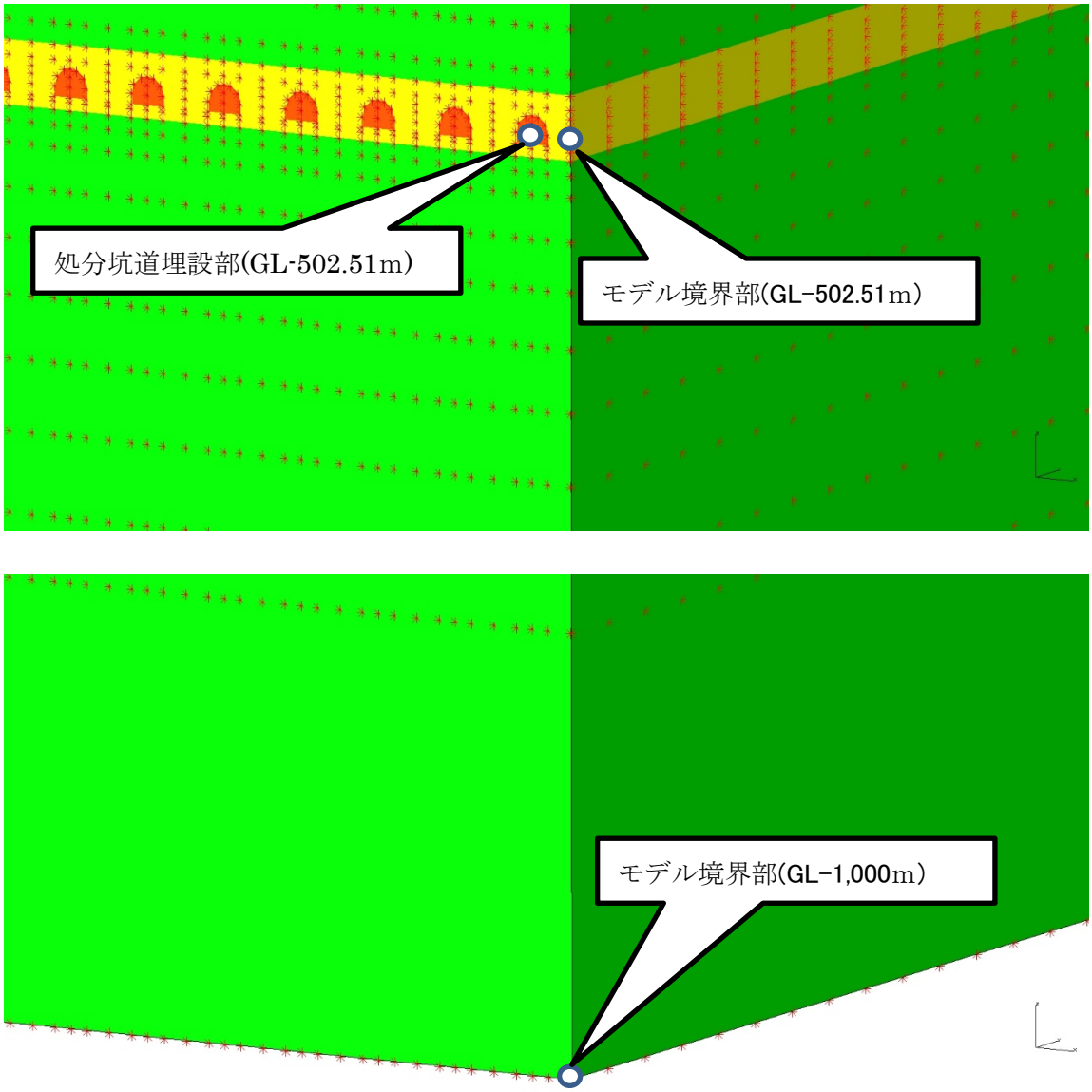
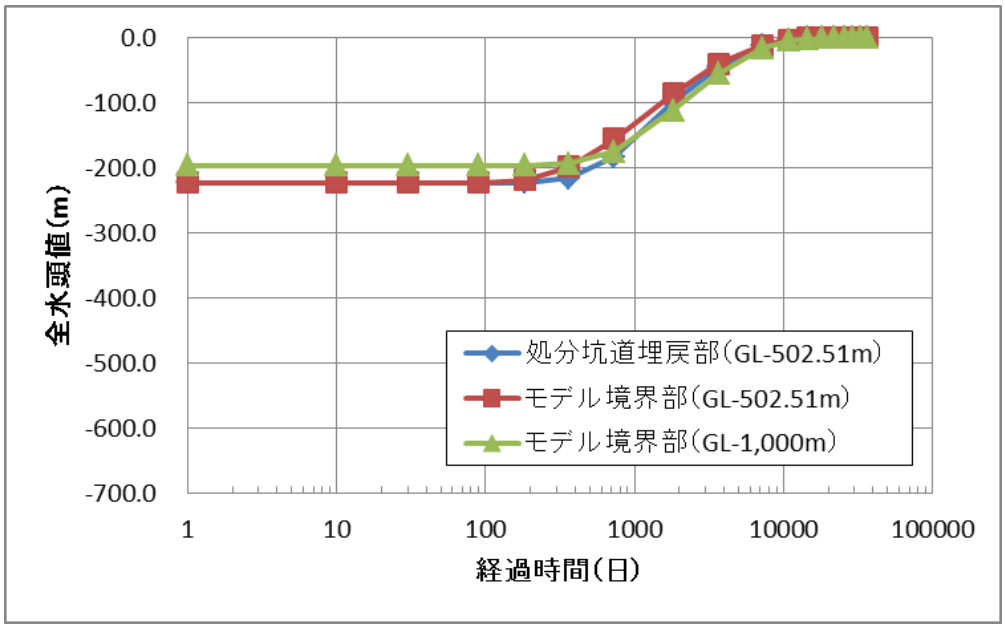


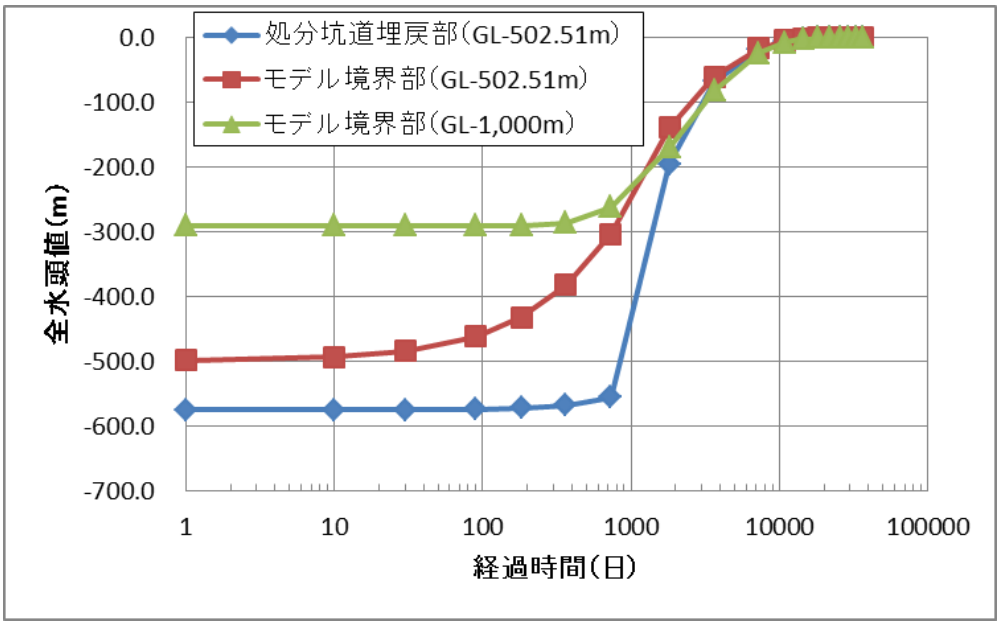
図 3.3.1-20　閉鎖時挙動を把握するための全水頭チェックポイント（3 点）

全水頭チェックポイントでの地下施設閉鎖後の全水頭値の経時変化を図 3.3.1-21 に示す。初期条件として処分坑道埋め戻し、開放の両ケースともに、閉鎖後の水理学的に安定するまで

には約 30 年～100 年程度かかる結果となった。処分坑道の状態の違いにより、初期の全水頭分布が異なるものの、最終的に定常状態になる時間には大きな違いがないと言える。処分坑道開放時からの挙動から、処分坑道周辺が最も早く水圧変化が始まり、周辺地下水や埋め戻し土内の水圧変動は遅れて発生する傾向がわかる。処分坑道周辺の全水頭分布の断面図位置を図 3.3.1-22 に、図 3.3.1-23 と図 3.3.1-24 に全水頭分布の経時変化について示す。



(a)　case21a-9c(処分坑道埋め戻し状態からの閉鎖)



(b)　case21a-9d(処分坑道開放状態からの閉鎖)

図 3.3.1-21　地下施設閉鎖後の全水頭の経時変化（case21a-9c、case21a-9d）

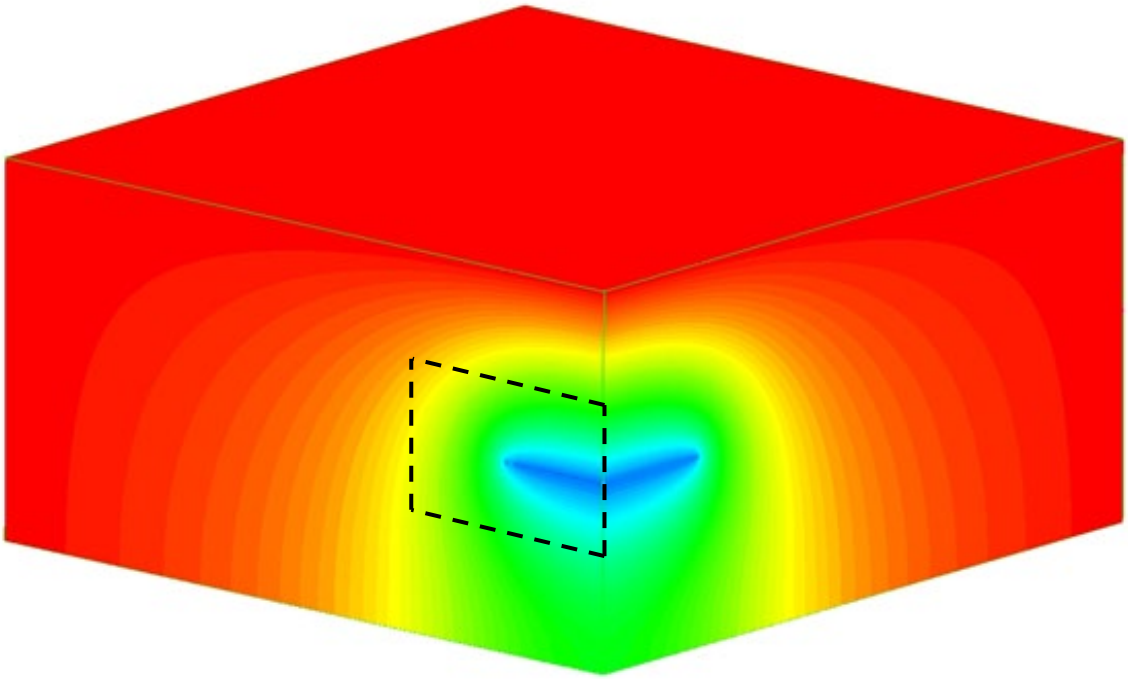


図 3.3.1-22　全水頭分布の表示断面位置図

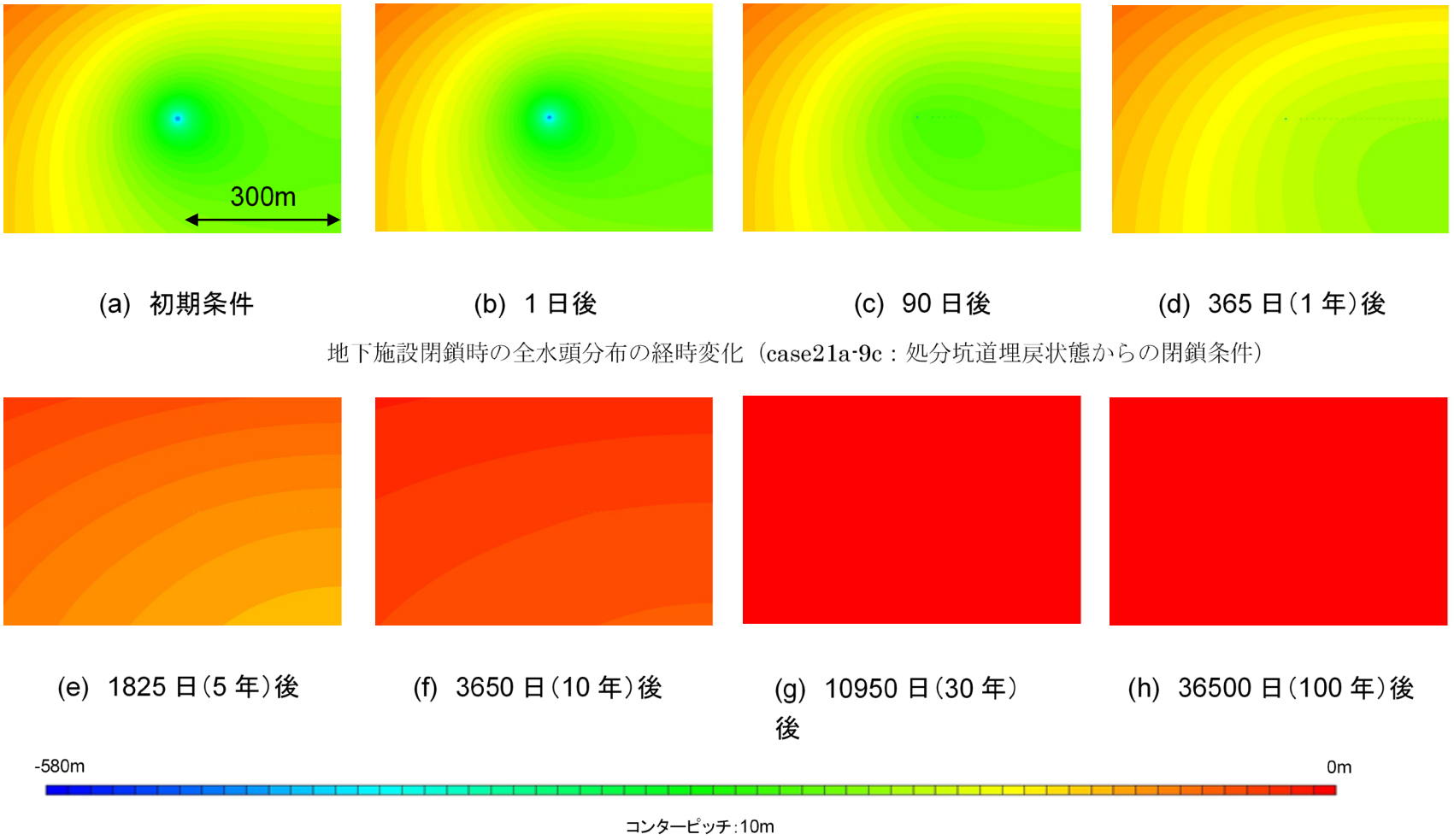


図 3.3.1-23　地下施設閉鎖時の全水頭分布の経時変化（case21a-9c：処分坑道埋め戻し状態からの閉鎖）

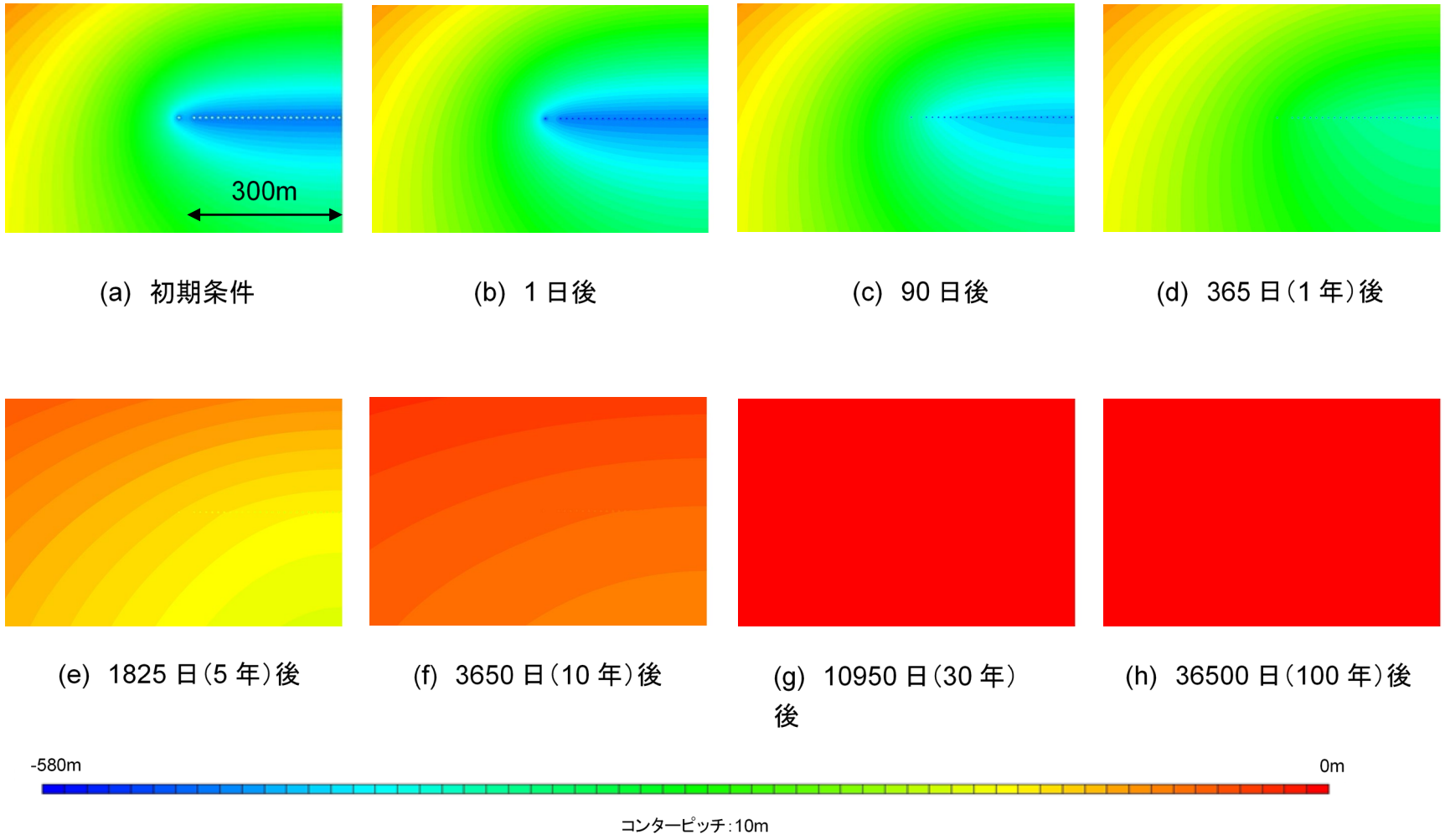


図 3.3.1-24　地下施設閉鎖時の全水頭分布の経時変化（case21a-9d：処分坑道開放状態からの閉鎖）

c　検討結果のまとめ

岩盤の透水係数の違いが及ぼす各技術検討項目に対しての影響を以下にまとめる。

(a)　坑道開放期間中の継続する坑内湧水の影響について

本検討での岩盤条件は、均質・多孔質媒体であるが、岩盤の透水係数と湧水量は比例関係にあると考えてよい。湧水量は岩盤の透水性の影響が大きいため、岩盤の透水係数の不均質性や不確実性の影響が大きいと言える。本検討では対象としていないサイトスペシフィックな岩盤の不均質性、不確実性の影響による検討が今後の課題であろう。

(b)　地下水の引き込みによる擾乱影響の程度と範囲について

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

本検討では処分パネルの中心部から 2km を解析領域の境界としてモデル化を実施したが、広範囲の地下流動場に対する影響を確認した。特に処分坑道位置深部については、坑道掘削の影響により地下水圧が大きく低下する。

(c)　ベースラインへの回復過程と回復の程度について

岩盤の透水係数が小さいほど、地下水流動場の変動スピードは小さくなり、岩盤の透水係数に反比例してベースラインへの回復時間が長くなると考えてよい。本検討で用いた岩盤の透水係数（3E-9(m/s)）の場合では、約 30 年～100 年程度で地下水流動場はベースラインへ回復する結果が得られた。安全評価の前提となる閉鎖後 1,000 年以内の回復であることから、特に工学的な対策の必要性はないと言える。よって、地化学的なベースラインへの回復期間の評価が重要になる。

2)　岩盤の不飽和特性の違いに関する検討

平成 29 年度の検討では、飽和・不飽和解析手法（FEM）を用いた「処分坑道詳細モデル」による不飽和領域評価において、不飽和特性の設定によっては不自然な不飽和領域の発生が認められた。そのため、ここでは、不飽和特性に関する既存検討の調査に基づく岩盤の不飽和特性等を含めて、不飽和特性の違いに関する感度解析を実施し、不飽和特性の違いによる不飽和領域評価に対する影響を把握するとともに、本検討で用いる岩盤の不飽和特性について設定した。また、不飽和特性の重要性、課題について考察を行った。

a　坑道周辺の不飽和領域に関する文献調査

国内の坑道掘削に伴う不飽和領域の発生、その調査の状況について把握するため、不飽和領域の測定方法、観測データの有無、評価結果の有無の観点から文献調査を行った。

(a)　不飽和領域の主要な計測方法

表 3.3.1-10 に不飽和領域の主要な計測手法について示す。近年では誘電率法を用いた計測が行われているようであるが、局所的な計測となるため、物理探査手法により広範囲の把握を行う方法も用いられている。

表 3.3.1-10　不飽和領域の主要な計測手法（Y:yes、N:no）

手法		概要	要 ボーリング	要センサ 設置加工	破壊的	面的
直接法	重量法	試料を採取し、湿潤状態と乾燥状態の 質量差を計測	Y	N	Y	N
間接法	テンシオメータ法	不飽和状態にある水の負圧を圧力 センサーで計測	Y	Y	N	N
	水ポテンシャル法	不飽和状態にある水の相対湿度を センサーで計測	Y	Y	N	N
	中性子法	高速中性子が水の水素原子により 減速する割合を計測	Y	Y	N	N
	静電容量法	岩石の含水状態の違いによる静電容量の 差異を計測	Y	Y	N	N
	誘電率法	岩石の含水状態の違いによる誘電率の 差異を計測、TDR, FDRなど	Y	Y	N	N
	探査	弾性波、電気（比抵抗）、レーダー（電磁波） 測線上で伝搬や電位差を計測	N	N	N	Y
	孔間トモグラフィ	弾性波、比抵抗、レーダー（電磁波） 孔間で伝搬や電位差を計測し、逆解析	Y	N	N	Y
その他	透気試験 透水試験	透過度の大きい箇所を開口亀裂と判断 （亀裂に水がなければ不飽和と考える）	Y	N	N	N

(b)　国内における不飽和領域の測定事例

表 3.3.1-11 に国内における不飽和領域の測定事例を示す。放射性廃棄物処分研究に関連しては、JAEA:瑞浪（東濃）[8]、幌延[9],[10],[11]および釧路炭鉱[12]等の測定例がある。

表 3.3.1-11　国内における不飽和領域の測定事例

ジャンル	サイト	地質年代・岩種	手法	空洞断面の大きさ	不飽和領域の広がり	コメント
RW処分関係	東濃鉱山	新第三紀・泥質凝灰岩	TDR（パッカー式）	W 3m×H 3m	ほぼ飽和	
		〃	レーダー探査	W 3m×H 3m	孔壁から4m程度	
	瑞浪URL	白亜紀後期・花崗岩	レーダー探査	W 4m×H 3m	判断なし	一部不飽和 300m坑道
	幌延URL	新第三紀・珪藻質泥岩	FDR-V	W 4m×H 3.2m	判断なし	飽和度低下 140m坑道
		〃	弾性波TG、比抵抗TG	〃	判断なし	飽和度低下 140m坑道
		〃	重量法	W 4m×H 3.2m	ほぼ飽和	壁面 250m坑道
		〃	比抵抗TG	〃	ほぼ飽和	250m坑道
	釧路炭鉱	古第三紀・細粒砂岩	透気試験	W 6～7m×H 4m	孔壁から2m程度	高浸透率領域
備蓄関係	久慈基地	白亜紀前期・花崗岩	（弾性波TG、比抵抗TG）	…	…	
	菊間基地	白亜紀後期・花崗岩	弾性波TG、比抵抗TG	W 21m×H 30m	亀裂周辺	
	串木野基地	新第三紀・自破砕状安山岩	（〃）	…	…	
その他	導水路トンネル	古第三紀・流紋岩	電気探査			

図 3.3.1-25 は、戸井田らによる東濃鉱山[8]でのレーダー（電磁波）探査の事例であ。この探査では、孔壁から 4m 程度までの探査が行われ、不飽和帯が区間速度 0.05m/nsec 以上の領域として検出されたとしている。

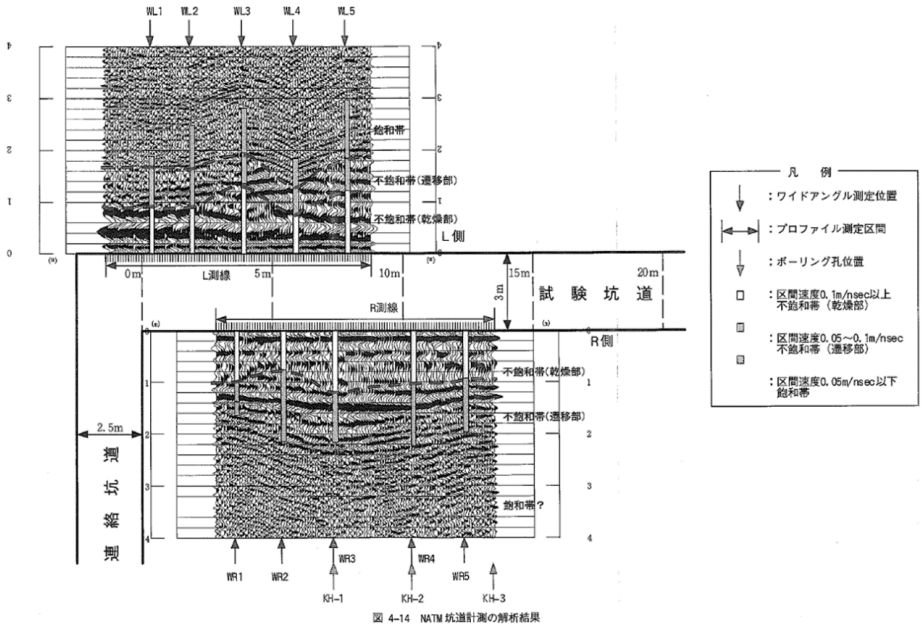
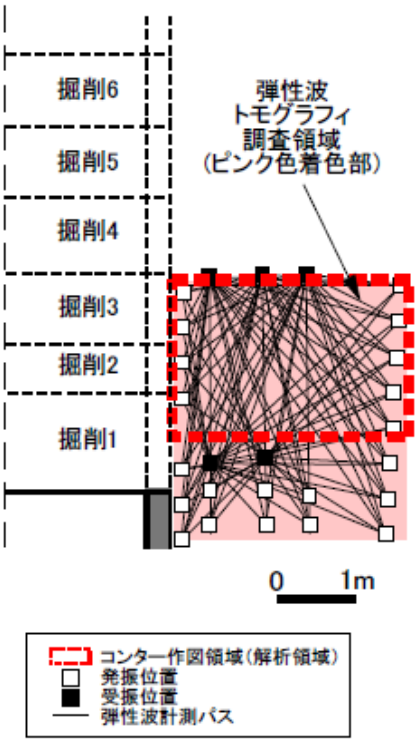


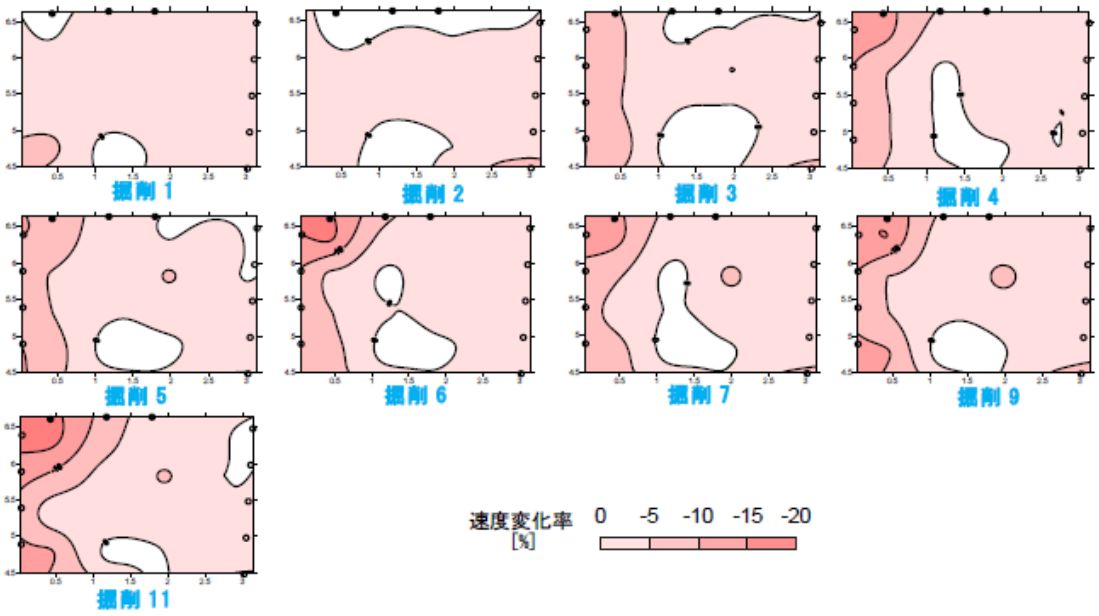
図 4-14　NATM 坑道計測の解析結果

図 3.3.1-25　東濃鉱山でのレーダー探査の事例[8]

図 3.3.1-26 は、JAEA・電中研[10]による幌延地下坑道での弾性波探査の事例である。掘削の進展に伴い、坑道壁面近傍で弾性波速度の低下率が大きくなり、その範囲が広がっていく傾向が認められた。これは、掘削影響領域の拡大によるものと判断されている。



(a) 調査坑道と弾性波トモグラフィ調査領域との関係



(b) 調査坑道掘削中の速度変化率のコンター図

図 3.3.1-26　坑道掘削の進展に伴う弾性波速度変化率の変化[10]

また、図 3.3.1-27 および図 3.3.1-28 は、青柳ら[11]による幌延地下坑道での比抵抗探査の事例である。比抵抗の場合は、掘削の進展や掘削後の時間経過に関わらず、一定の変化の傾向は認められなかった。確認された比抵抗変化の要因としては、季節による岩盤温度の変化が挙

げられている。なお、重量法による坑道壁面岩石の飽和度計測の結果から、原位置の岩石は概ね飽和状態にあったと判断されている。

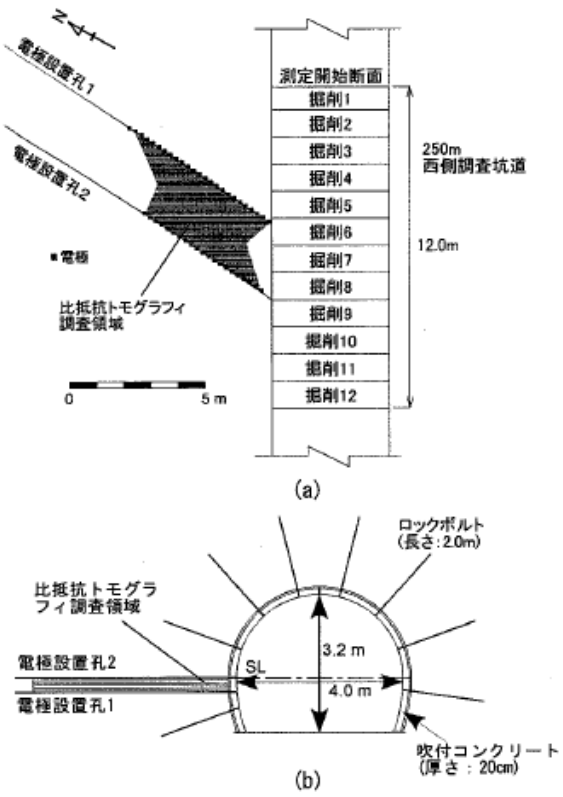


図 3.3.1-27　比抵抗トモグラフィ調査の概略図（a: 平面図、b: 側面図）[11]

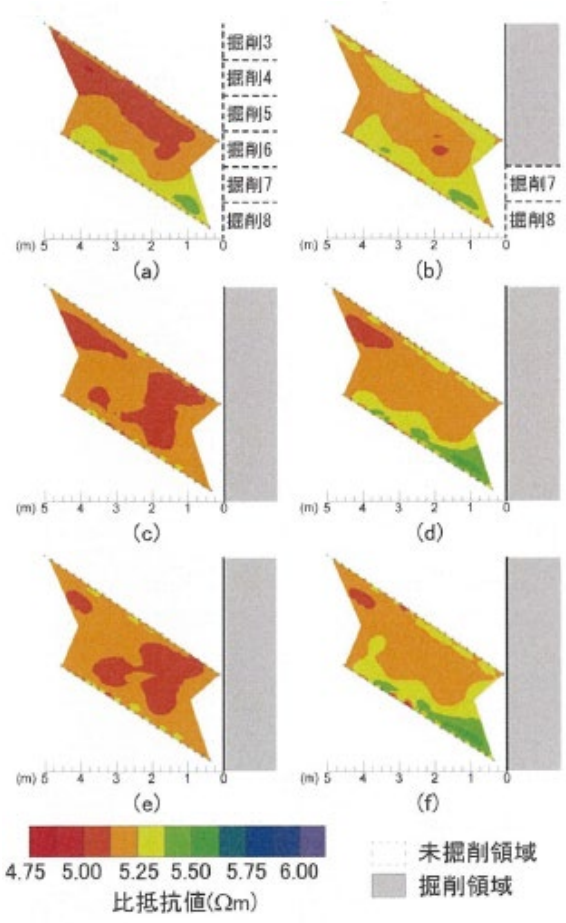


図 3.3.1-28　比抵抗二次元解析断面（a: 掘削前，b: 掘削中, c～f: 掘削後）[11]

小松ら[13]、[14]は、図 3.3.1-29 に示すような地下坑道における「バロメトリックポンピング（大気圧変動による揚水）」やベンチレーションによる揚水現象が不飽和領域発生に与える動的な影響の評価や、発生した不飽和領域が再冠水後に飽和状態への移行する過程の評価を実施している。その結果、大気圧変動の影響については、変動圧力幅が大きく、変動周期が短くなるにつれて水分減少量・促進効果ともに上昇することを確認している。

また、榊・小松[15]は、均質な砂を対象とした再冠水後の飽和移行過程評価を行い、水圧変化に伴う飽和度の増加は 0.5MPa（水深 50m 相当）の範囲でそのほとんどが起こること、水圧上昇による気泡の圧縮が飽和度の上昇に支配的に寄与していること、を確認している。

その他、岩石試料に対する飽和度計測技術の高度化検討として、誘電率の測定において、誘電率と飽和度の関係はほぼ線型であり、飽和度の全領域に渡って一定の測定精度を有していること、が確認されている。

地中レーダー探査については、堆積岩ではなく結晶質岩において有効な観測ができるもの

の、結晶質岩では間隙率が小さく、誘電率を示す値の範囲が狭いため、岩盤内の水分量分布を把握するためには、高い測定精度（分解能）が必要としている。

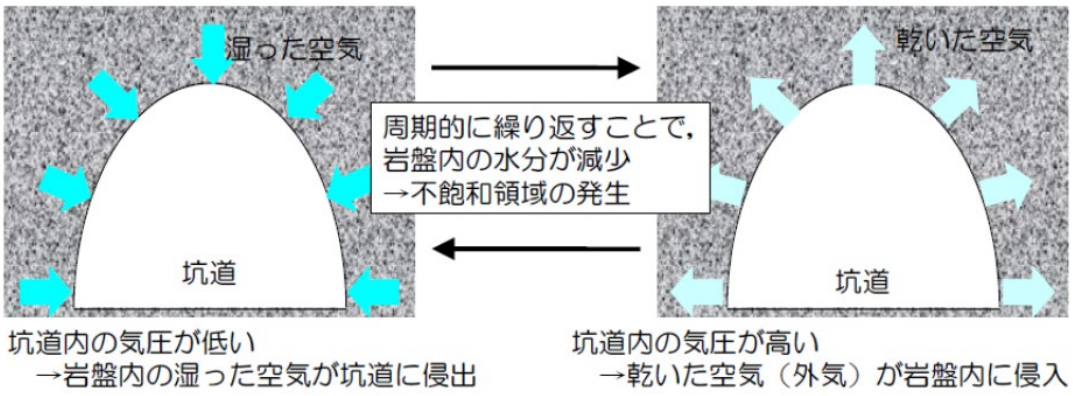


図 3.3.1-29　バロメトリックポンピングが坑道周辺に与えると考えられる影響[13]、[14]

(c)　岩盤の不飽和特性の設定

岩盤を対象とした飽和･不飽和解析や二相流（多相流）解析について文献調査を実施したが、国内の研究では、岩盤内石油備蓄関連の解析研究[16],[17]や 3 次元陸水シミュレーション手法の開発[18]などであり、あまり研究例がないことがわかった。ここでは、主に岩盤内石油備蓄関連の地下水流動解析に用いられている不飽和特性について整理した。

駒田ら[16]の研究において用いられている不飽和特性について図 3.3.1-30 に示す。水封式燃料地下貯蔵用の空洞周辺岩盤の浸透流に関する検討であり、地下水位の低下に関する予測解析が行われている。不飽和特性の特徴としては、地盤の自然飽和度（残留飽和度）を 50%、毛管上昇高さを 1m および 5m の 2 種類を想定している。飽和に近い領域での限界毛管圧は考慮していない。

※残留飽和度（不流動水飽和度）：特殊な乾燥条件を除いた場合の岩盤の飽和度の最小値

※限界毛管圧　：地下水面より上の不飽和領域であるが、ほぼ飽和の状態となっている毛管圧。空気が透気するのに必要な圧力に相当する。

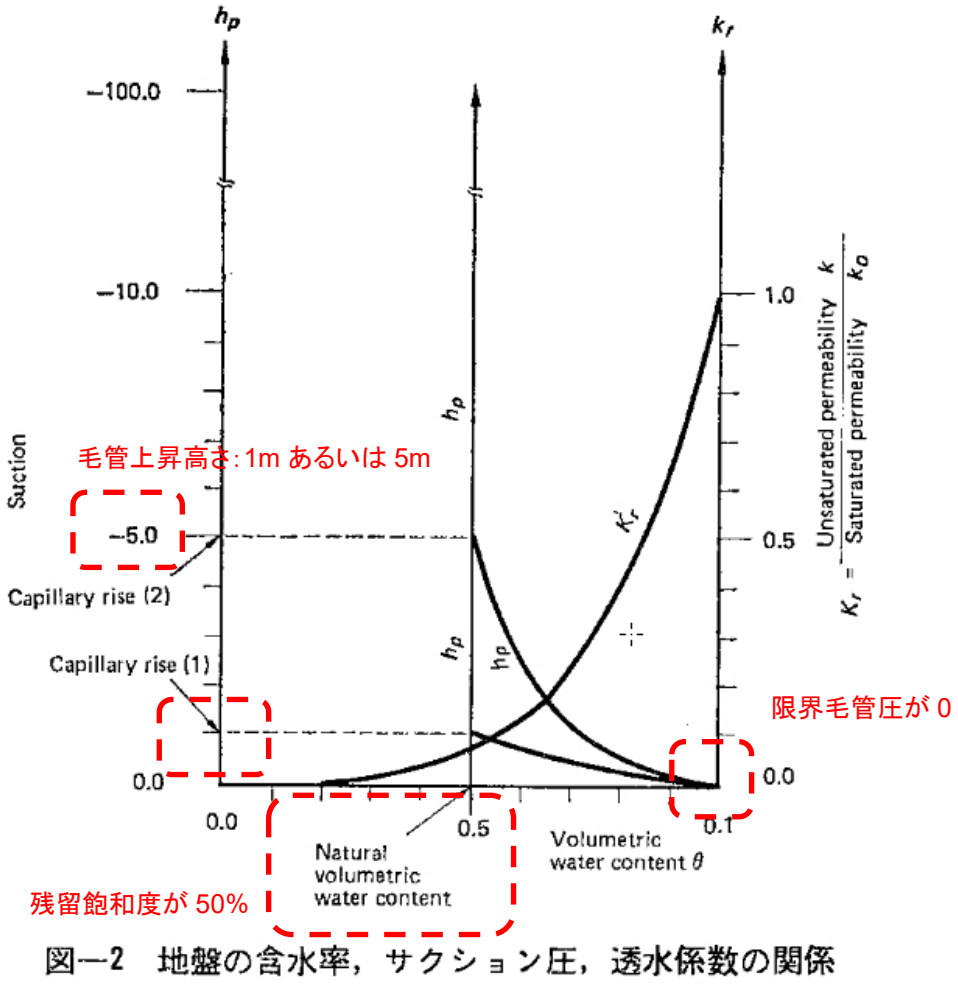


図 3.3.1-30 不飽和特性曲線の設定例（その１）[16]

山石ら[17]の研究において用いられている不飽和特性について図 3.3.1-31 に示す。地下石油備蓄基地建設に伴う水文・水理挙動に対する数値シミュレーションであり、二相流を対象としているため、空気の透気性についてもパラメータも設定されている。不飽和特性の特徴としては、地盤の自然飽和度（残留飽和度）が 20%（風化帯）、40%（新鮮岩体）であり、毛管上昇高さはそれぞれ 8m および 10m の 2 種類を想定している。飽和に近い領域での限界毛管圧は考慮していない。

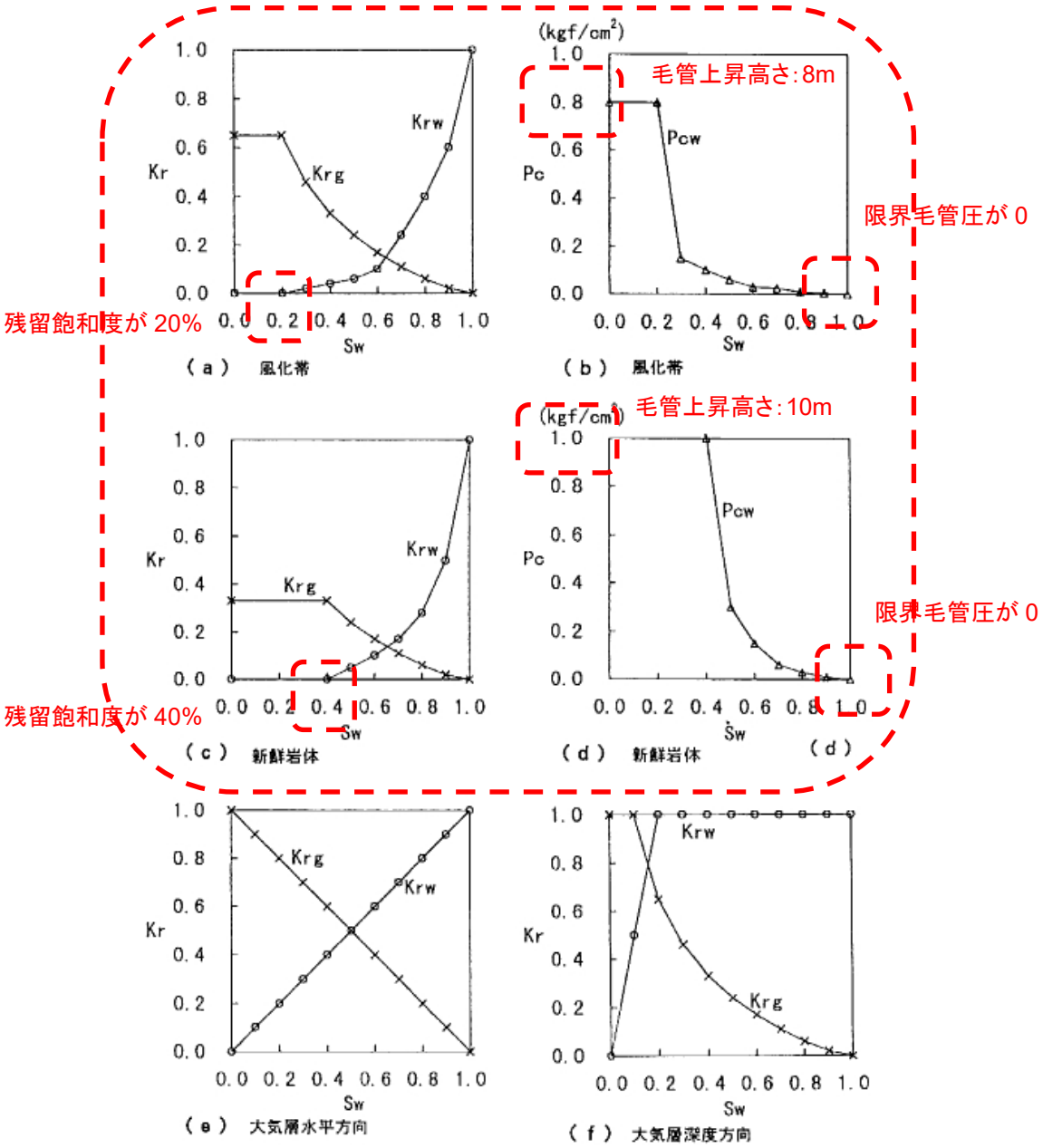
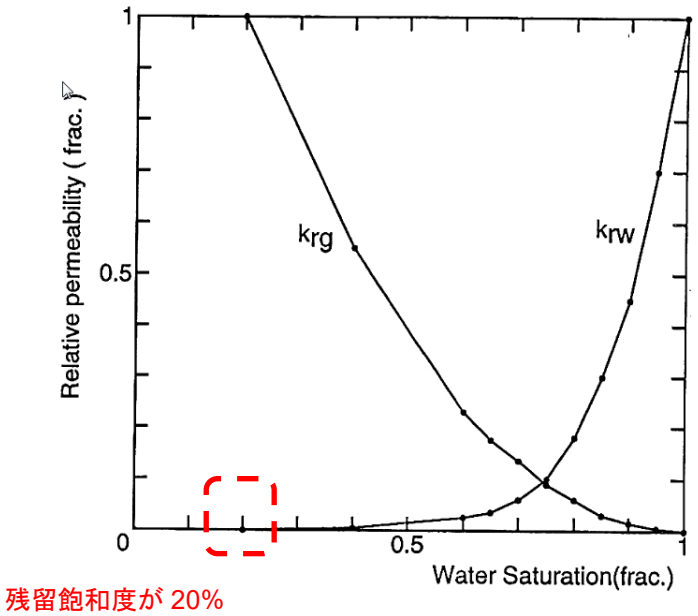


図 9　不飽和特性

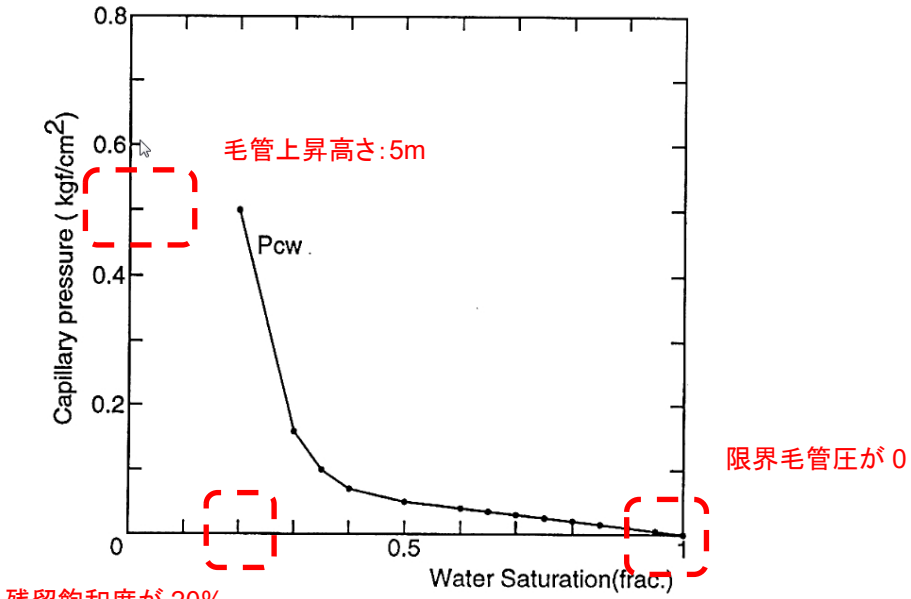
Fig. 9　Properties for unsaturated condition

図 3.3.1-31　不飽和特性曲線の設定例（その２）[17]

前述の山石ら[17]の研究の元になったツール開発の研究が登坂ら[18]であり、用いられている不飽和特性について図 3.3.1-32 に示す。不飽和特性に関しては、石油関連の流動評価に用いられているものであり、二相流を対象としているため空気の透気性についてもパラメータが設定されている。不飽和特性の特徴としては、地盤の自然飽和度が 20%であり、毛管上昇高さは約 5m を想定している。飽和に近い領域での限界毛管圧は考慮していない。



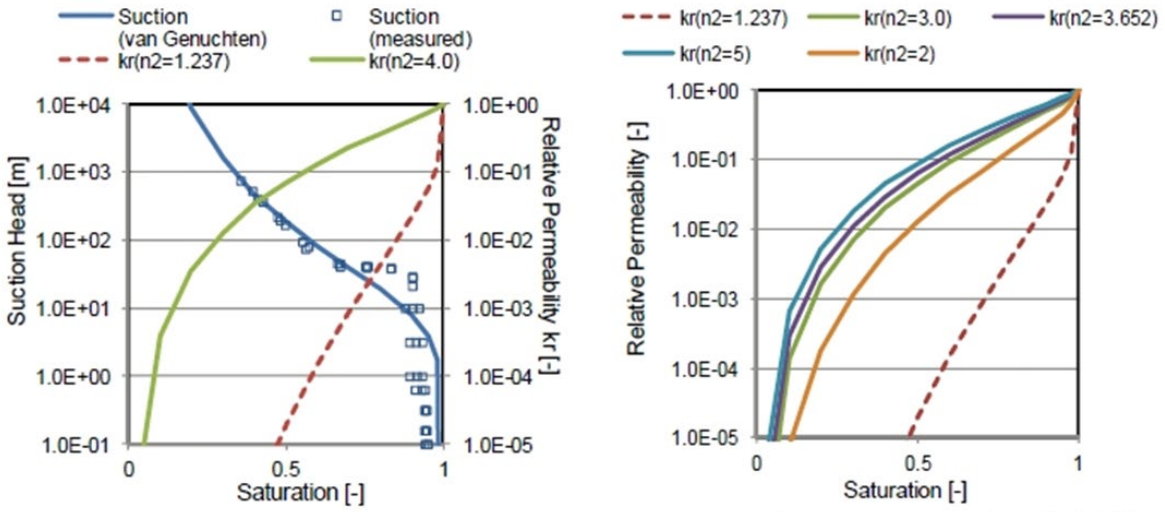
(a) 相対浸透率関数



(b) 毛管水圧関数

図 3.3.1-32　不飽和特性曲線の設定例（その３）[18]

その他の研究としては、岩盤を対象とした不飽和特性に関しては、今井ら[19]において、岩盤の不飽和浸透パラメータの設定と空洞壁面に対する適切な境界条件の設定に関する検討が行われており、不飽和特性の設定にあたり図 3.3.1-33 に示すように VG（van Genuchten）モデルによりフィッティングした水分特性曲線（毛管圧力関数）のパラメータn_1 と、相対浸透率関数のパラメータn_2 が、試験を行った「白浜砂岩」で異なることが報告されており、岩盤の種類によっては VG モデルのパラメータn を用いて一意的に不飽和特性を設定することができないとしている。



(a) 測定・同定された結果　(b) VG式のパラメータ n_2 と比透水係数

図-12　測定されたサクションと解析結果

(a)　相対浸透率関数

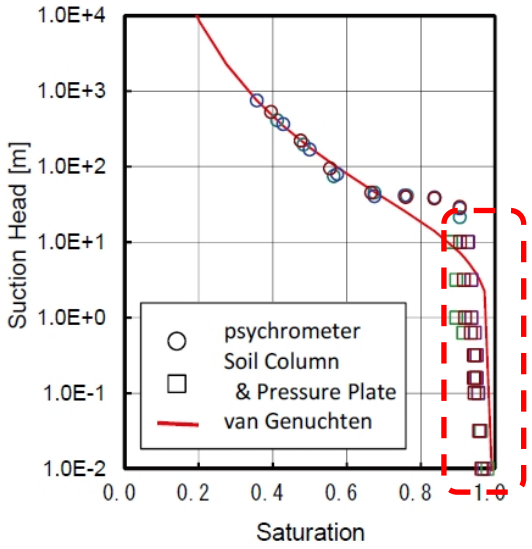


図-6　砂岩の水分特性曲線

(b)　毛管水圧関数

図 3.3.1-33　不飽和特性曲線の設定例（その４）[19]

また、今井ら[19]は、不飽和領域の発生に対する坑道壁面からの蒸発散影響についても指摘しており、坑道周辺の不飽和領域の解析的評価にあたって、図 3.3.1-34 に示すような坑道からの流出量の経時変化を想定し、坑道壁面からの蒸発散量との関係から、ハイブリッド境界条件の設定を提案している。これは、湧水量が小さい場合に、蒸発散量の影響により坑道壁面近傍に不飽和領域が発生、進展するメカニズムとして示されているものである。新しい解析手法として、坑道壁面での境界条件の設定方法が提案された。検討にあたっては、坑道壁面からの蒸発散量の実測や適切な境界条件（蒸発散量の変化など）の設定の必要性が示されている。

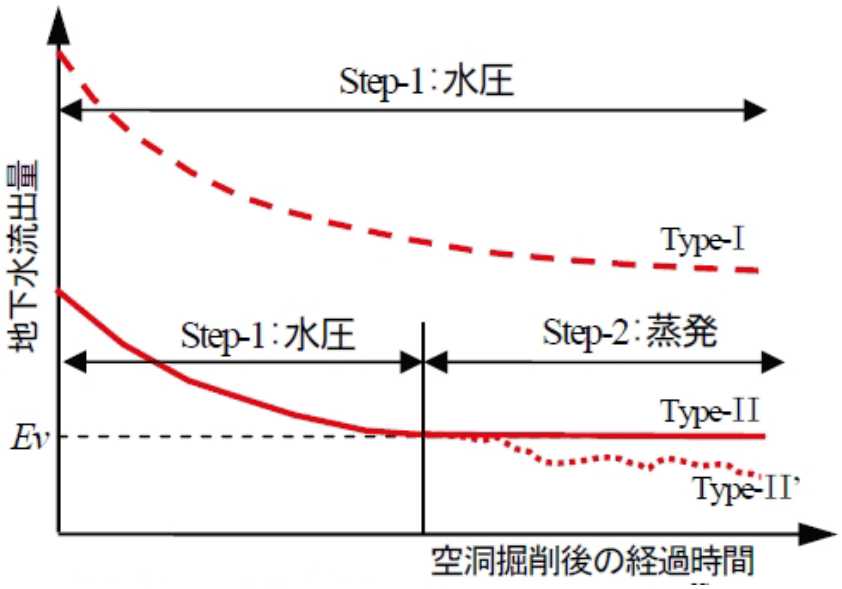


図 3.3.1-34　地下水流出量の経時変化のイメージ[19]

上述の調査結果を踏まえ、本検討では不飽和特性曲線の違いによる評価結果への影響を把握するため、感度解析を行うこととした。特に、既存研究での不飽和特性の設定例としては、図 3.3.1-32 に示した登坂ら[18]の条件を選定した。これは、飽和・不飽和解析だけでなく、空気の流動を考慮する二相流解析にもパラメータを適用できるためである。

b　不飽和特性の違いによる感度解析

ここでは、前項の文献調査結果を踏まえ、岩盤の不飽和特性の違いについて以下に示す 4 ケースを設定し、飽和・不飽和解析手法（FEM）を用いた「処分坑道詳細モデル」による不飽和領域評価に対する感度解析の結果について示す。

・ケース①　：平成 29 年度の設定条件[2]
・ケース②　：簡易な直線関数関数（サクション水頭の最小値：-50m）
・ケース③　：簡易な直線関数関数（サクション水頭の最小値：-5m）
・ケース④　：陸水シミュレーション条件（登坂ら[18]　参照）

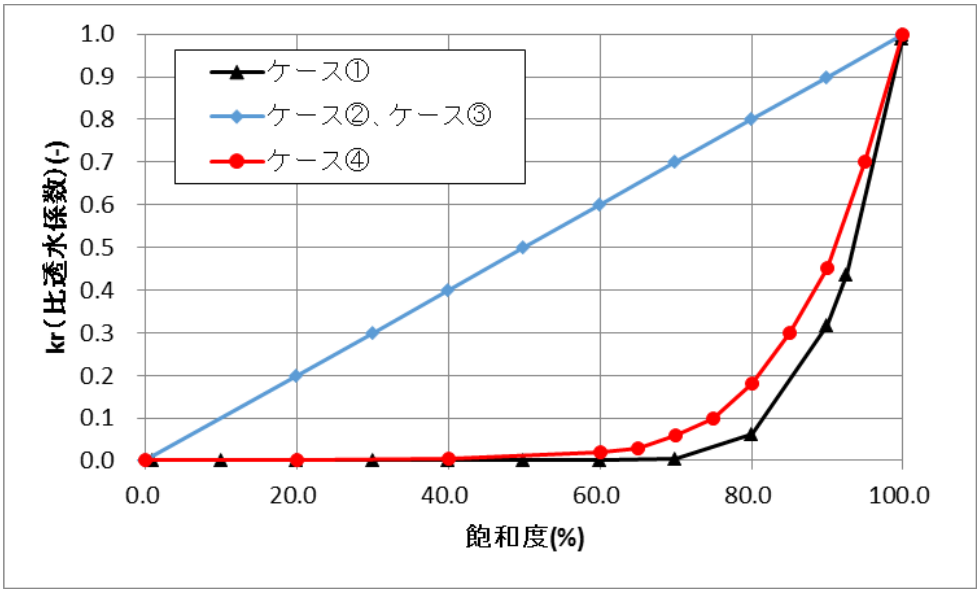
各ケースの不飽和特性として相対浸透率関数と毛管圧力関数のグラフを図 3.3.1-35 に示す。各ケースの不飽和特性の特徴を比較すると、以下のようになる。

・ケース①　：残留飽和度（不流動水飽和度）を 60%としている。（飽和度が 60%未満の場合、不飽和透水係数は非常に小さくなる。飽和度 60%での毛管水頭は約-29m となっている。）限界毛管圧（水頭）として約-3.5m が設定されている。（毛管水頭が-3.5m まではほぼ飽和と同じ透水係数となる。）
・ケース②　：毛管圧力が-50m までは線型に相対浸透率が変化する。（毛管圧力（水頭）が-

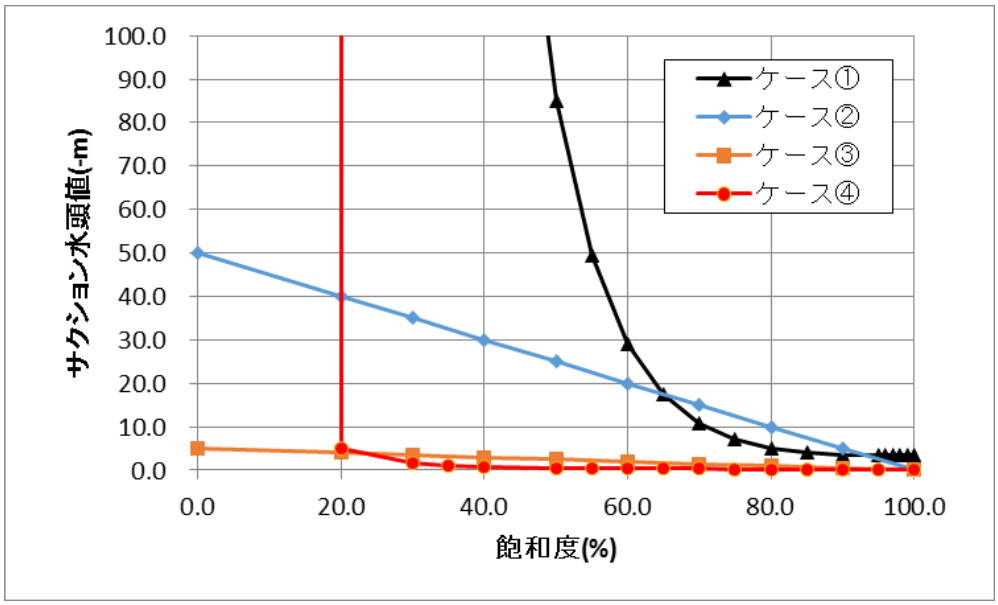
50m を超えると、不飽和透水係数は非常に小さくなる。）限界毛管圧はない。

・ケース③　：毛管圧力が-5m までは線型に相対浸透率が変化する。（毛管圧力（水頭）が-5m を超えると、不飽和透水係数は非常に小さくなる。）ケース②よりも毛管圧力のレンジが狭いため、不飽和透水係数が小さくなる領域が広くなる可能性が高い。）限界毛管圧はない。

・ケース④　：残留飽和度（不流動水飽和度）を 20%としている。（飽和度が 20%未満の場合、不飽和透水係数は非常に小さくなる。）限界毛管圧はない。



(a)　相対浸透率関数



(b)　毛管圧力関数

図 3.3.1-35　感度解析に用いた不飽和特性曲線の比較

坑道周辺に不飽和領域が発生する条件としては、EDZ のような高透水部が存在することが挙げられることから、ここでは平成 29 年度検討における「処分坑道詳細モデル」による解析ケース case9b（EDZ あり）を用いた。4 種類の解析ケースを表 3.3.1-12 に、解析モデルを図 3.3.1-36 に示す。岩盤の透水係数については、3E-9(m/s)を設定して検討を実施した。なお、岩盤以外の EDZ、支保工、インバートコンクリートともに同じ不飽和特性を与えて解析を実施した。

表 3.3.1-12 「処分坑道詳細モデル」による解析ケース（case9b-91～case9b-94）

ケース名	岩盤の透水係数	メッシュ	EDZ	グラウト	キャップロック	手法	不飽和特性
case9b	3E-7(m/s)	2D詳細	あり	なし	なし	飽和・不飽和 FEM	H29年度検討
case9b-91	3E-9(m/s)						ケース①
case9b-92							ケース②
case9b-93							ケース③
case9b-94							ケース④

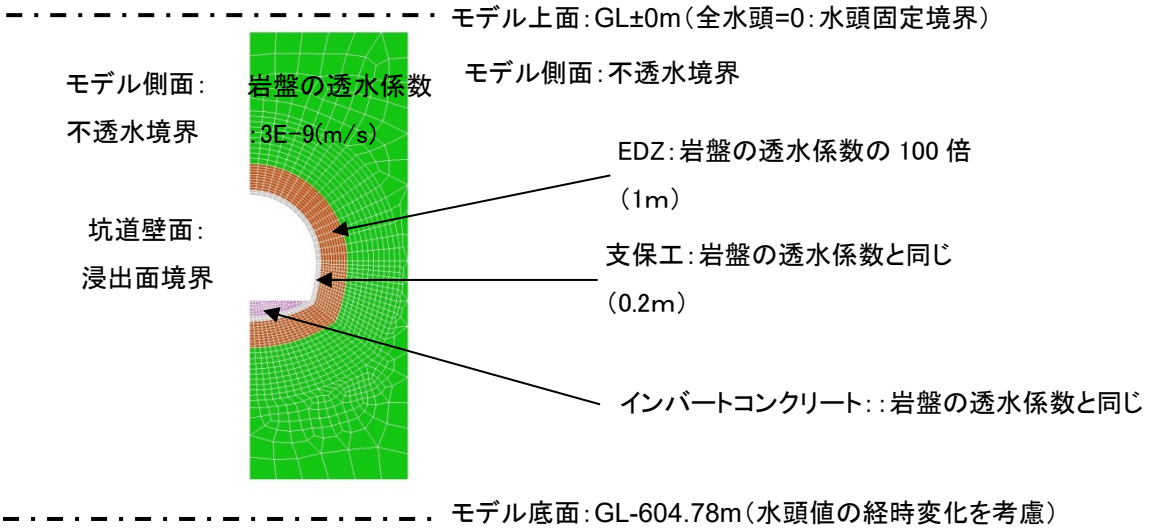


図 3.3.1-36 「処分坑道詳細モデル」拡大図（case9b-91～case9b-94）

底部境界条件に関しては、図 3.3.1-37 に示すように「パネルスケールモデル」解析結果（case1a-9）から全水頭分布の経時変化を与えた。

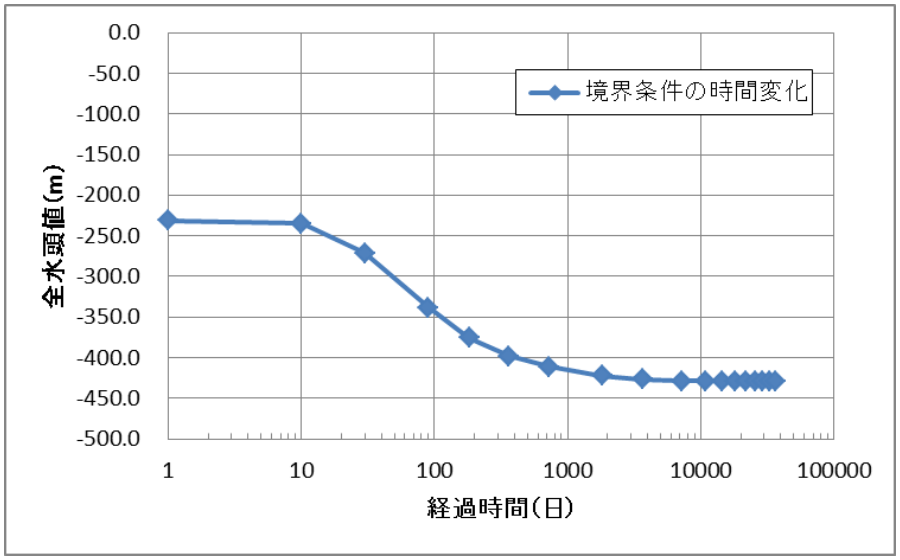
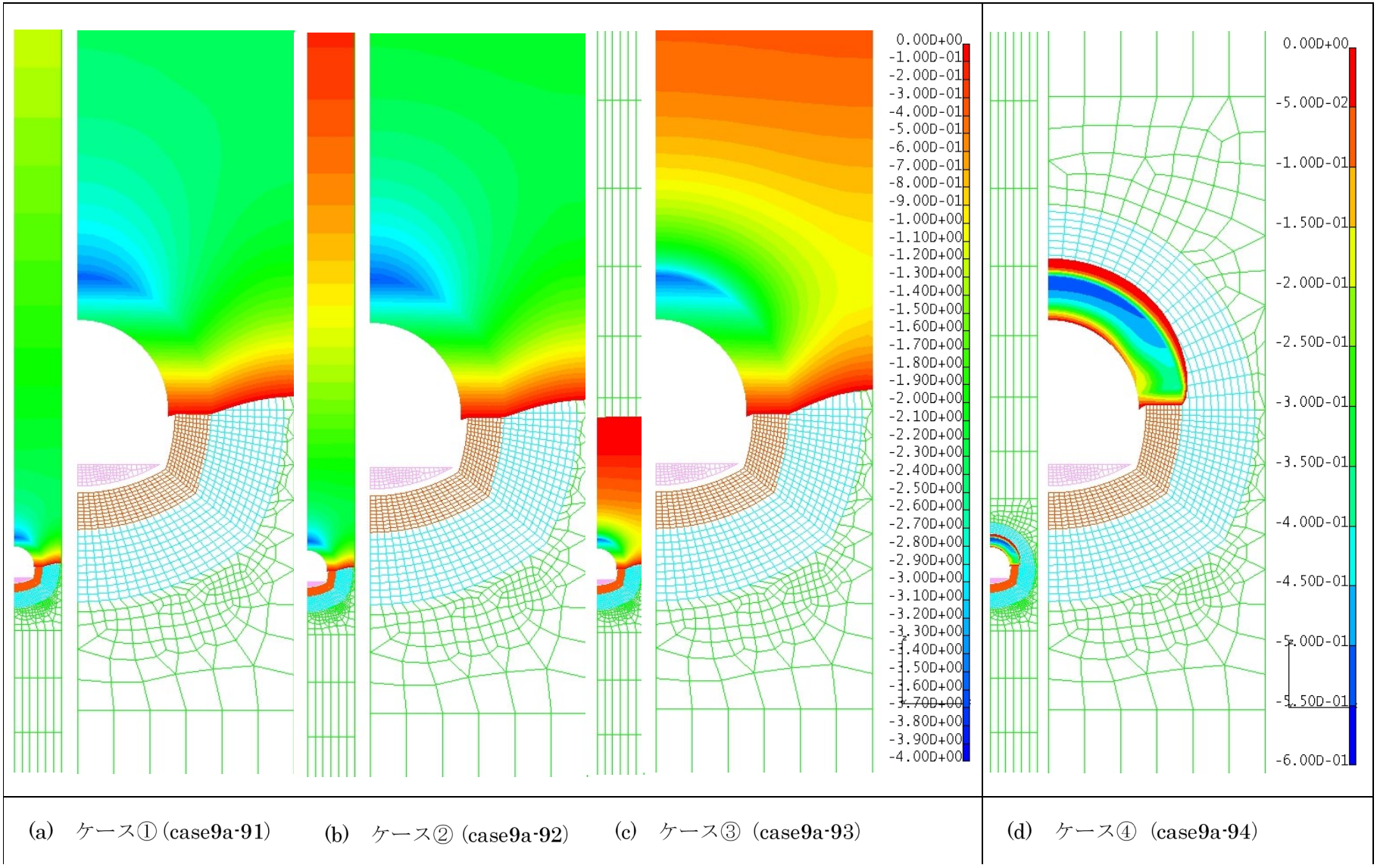


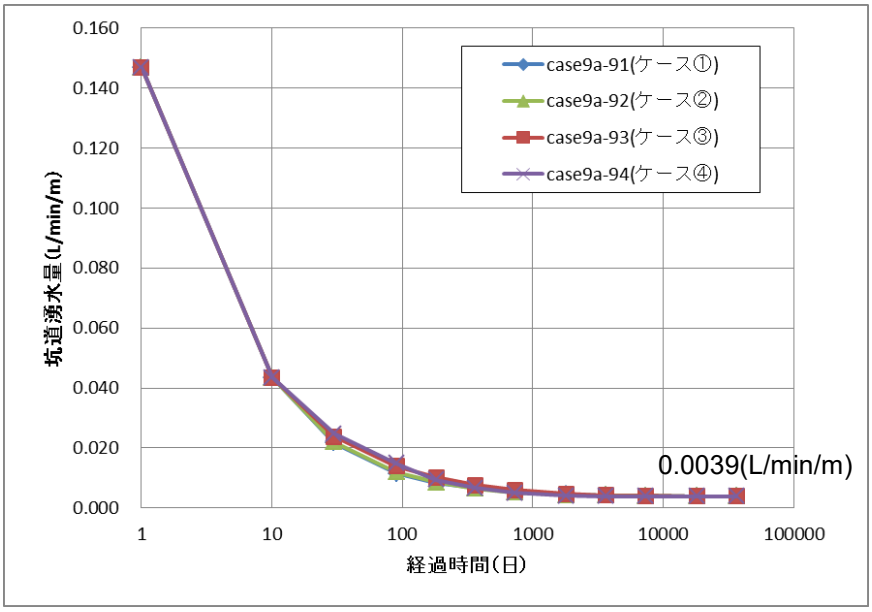
図 3.3.1-37 「処分坑道詳細モデル」での底部境界における全水頭の経時変化(case9a-91～94)

4 ケースの解析結果として、非定常解析 100 年後の圧力水頭分布（不の圧力水頭分布）の比較を図 3.3.1-38 に示す。これより、ケース①～③については、処分坑道の上部に不飽和領域が発生する結果となっているが、ケース④については、EDZ にのみ不飽和領域が発生しており、解析結果としては現実的ではないかと考えられる。坑道湧水量の算出結果を図 3.3.1-39 に示す。100 日前後において若干の違いがあるものの、100 年後の湧水量はほとんど変わらない。これは、処分坑道周辺の透水性に違いがないためである。不飽和領域は飽和透水係数よりも小さくなるため、ケース①～③のように不飽和領域が発生すると、処分坑道上部からの湧水量は少なくなるはずである。これは、飽和・不飽和解析においては圧力水頭が負になる領域を不飽和領域として表現しているが、解析上は飽和領域とほぼ同じ透水係数が設定されているため、湧水量が変わらない結果が得られていることによると考えられる。



(a) ケース①（case9a-91）　(b) ケース②（case9a-92）　(c) ケース③（case9a-93）　(d) ケース④（case9a-94）

図 3.3.1-38　非定常解析 100 年後の圧力水頭分布の比較(case9a-91～94)



※湧水量の絶対値については、解析条件等に依存するため取扱に注意を要する。

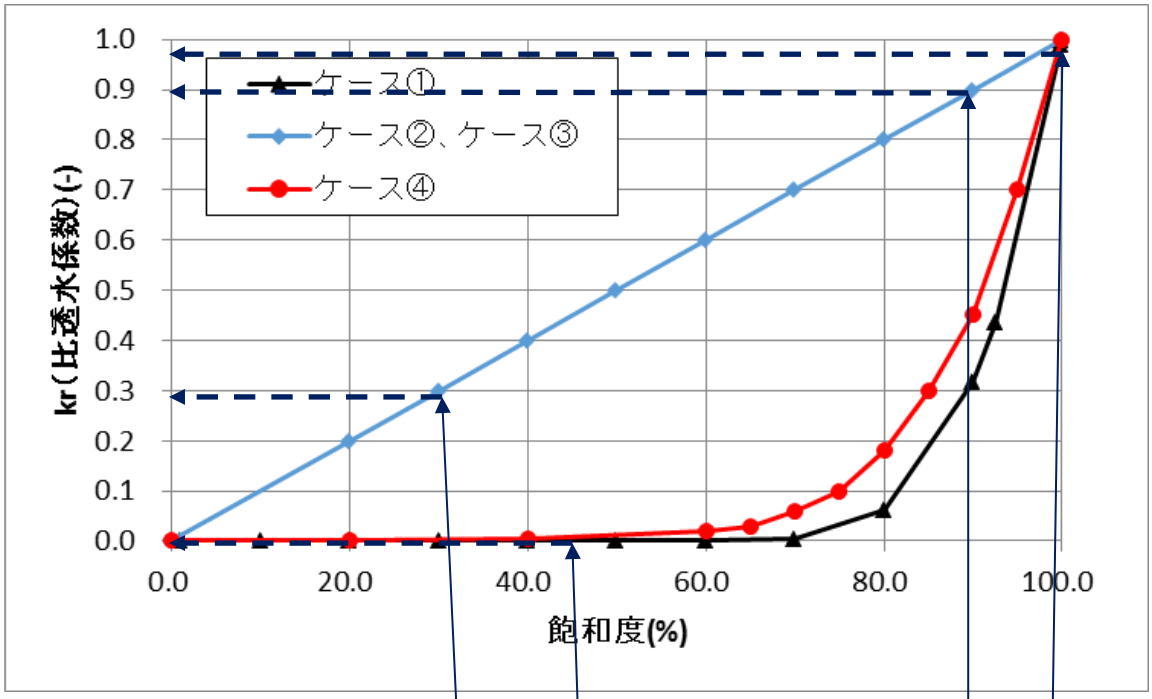
図 3.3.1-39　坑道湧水量の経時変化の比較(case9a-91～94)

図 3.3.1-38 を見ると、ケース①～③では、処分坑道の上部の EDZ 中に最も圧力水頭が小さい箇所が分布しているが、圧力水頭値は-3.5m 程度である。図 3.3.1-35 の毛管圧力関数の Y 軸を対数表示したグラフを図 3.3.1-40 に示すが、ケース①、②では、圧力水頭が-3.5m の場合でも飽和度は 90%以上であるため、不飽和領域内の岩盤の透水係数はほぼ飽和透水係数に等しいことがわかる。ケース③については、飽和度が 30%、相対浸透率は 0.3 程度となるため、ケース①、②とは異なって狭い不飽和領域が得られたと思われる。一方、ケース④の場合、EDZ 内の圧力水頭は-0.6m 程度であるが、不飽和領域の飽和度は約 45%、相対浸透率は 1/100 未満まで小さくなっており、不飽和領域での低透水性を表現できていると言える。これらを考察すると、ケース④の条件が不飽和領域の評価として妥当な不飽和特性であると考えられる。

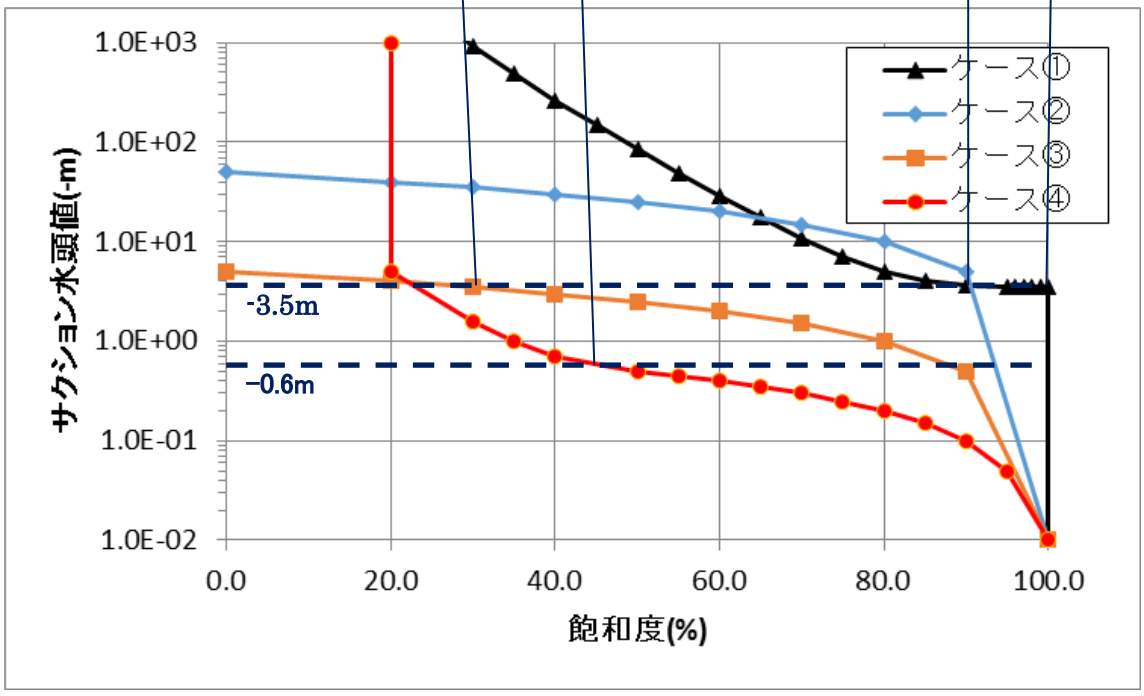
上記を踏まえ、本検討における岩盤の不飽和特性に関しては、ケース④の条件が望ましいと考えられることから、ケース④を用いることとした。

飽和・不飽和解析手法による不飽和特性に関する感度解析の結果から、岩盤の不飽和領域の評価にあたり、不飽和特性の違いにより評価結果が異なること、設定条件によっては不適切な不飽和領域の評価結果が得られること、が明らかとなった。岩盤の不飽和特性については、実測データが少ないことを考慮すると、今後、適切なデータ取得が必要であると言える。

また、飽和・不飽和解析手法を用いた場合、不飽和領域の評価にあたっては、圧力水頭が負の領域と定義しているが、二相流解析結果の評価方法を踏まえて、不飽和領域の定義について再検討する必要があると考えられる。



(a)　相対浸透率関数



(b)　毛管圧力関数

図 3.3.1-40　感度解析に用いた不飽和特性曲線の比較（その２）

c　検討結果のまとめ

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

(a)　坑道開放期間中の継続する坑内湧水の影響について

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

(b)　地下水の引き込みによる擾乱影響の程度と範囲について

坑内湧水量や周辺地下水の擾乱影響に対しては、不飽和領域の有無や、不飽和特性の違いの影響は小さい。よって、坑道周辺の不飽和領域の発生よりも、岩盤の不均質性、不確実性による影響に注意する必要があると思われる。

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

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

今井ら[19]の研究によると、岩石の水分特性は、土柱法・加圧版法・サイクロメータ法を用いて測定できることが示されている。また、水分特性曲線（毛管水圧関数）から一義的に比透水係数曲線（相対浸透率関数）が得られる VG 式については、岩盤の種類によっては適用できないケースがあるため、注意する必要がある。

また、飽和・不飽和解析における不飽和特性の設定によっては、不自然な不飽和領域が発生する可能性があり、不飽和特性の設定は評価結果に及ぼす影響が大きいため、適切な不飽和特性の設定が必要である。特に、岩盤の毛管圧力関数において「限界毛管圧」を考慮した場合、不飽和領域の透水係数が飽和透水係数と変わらなくなると、不自然な不飽和領域の評価結果となる場合が認められる。一般的に、堆積岩など間隙構造が複雑な場合には「限界毛管圧」を有し、亀裂性岩盤では「限界毛管圧」が小さい、と考えられている。従来の研究では、圧縮空気の取り扱いに関する研究が多く、CCS 研究など高圧のガスの移行挙動に基づく不飽和特性であることから、空気が動き出す「限界毛管圧」を有する特性が用いられている場合が多い。そのため、坑道周辺の不飽和領域の発生挙動の評価に適切か否かに関する研究が必要ではないかと思われる。

さらに、今井ら[19]の研究では、坑道壁面での境界条件に取扱いに対する提案も行われており、坑壁からの湧水量が少なくなると、坑壁からの蒸発散の影響により、不飽和領域が岩盤内に進展する可能性があることが示されている。坑道開放時の不飽和領域評価においては、従来の飽和・不飽和解析手法、二相流解析手法に対しても、坑壁境界条件として蒸発散を考慮した検討、そのためのデータ取得の必要性について課題が残る。

(d)　ベースラインへの回復過程と回復の程度について

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

榊・小松[15]の検討によると、堆積岩とベントナイト混合土を対象とした再冠水後の飽和過程移行評価では、水圧変化に伴う飽和度の増加は 0.5MPa（水深 50m 相当）の範囲でそのほとんどが起こること、水圧上昇による気泡の圧縮が飽和度の上昇に支配的に寄与していること、を確認している。このため、処分深度-500m の場合、約 5MPa（水深 500m 相当）の水圧が回復する可能性があり、水理学的には比較的短期間で飽和する可能性があると考えられる。本検討では 3.3.1(4)1)において再冠水検討を実施したが、約 30 年～100 年くらいまでにはベースラインに戻る可能性がある結果が得られているものの、解析条件としては地下水位が低下しない場合の予測結果であり、ベースラインへの回復期間としては、地下水位が低下する場合の方が長くなる可能性があるため、今後は地下水位低下時の再冠水検討を行う必要がある。

3)　水理学的影響評価手法の適用性評価検討

水理学的影響評価手法として選定した 2 種類の解析手法（飽和・不飽和解析手法と二相流解析手法）の適用性について、不飽和領域評価や再冠水評価の観点から比較検討を行い、評価手法としての適用性について考察した。

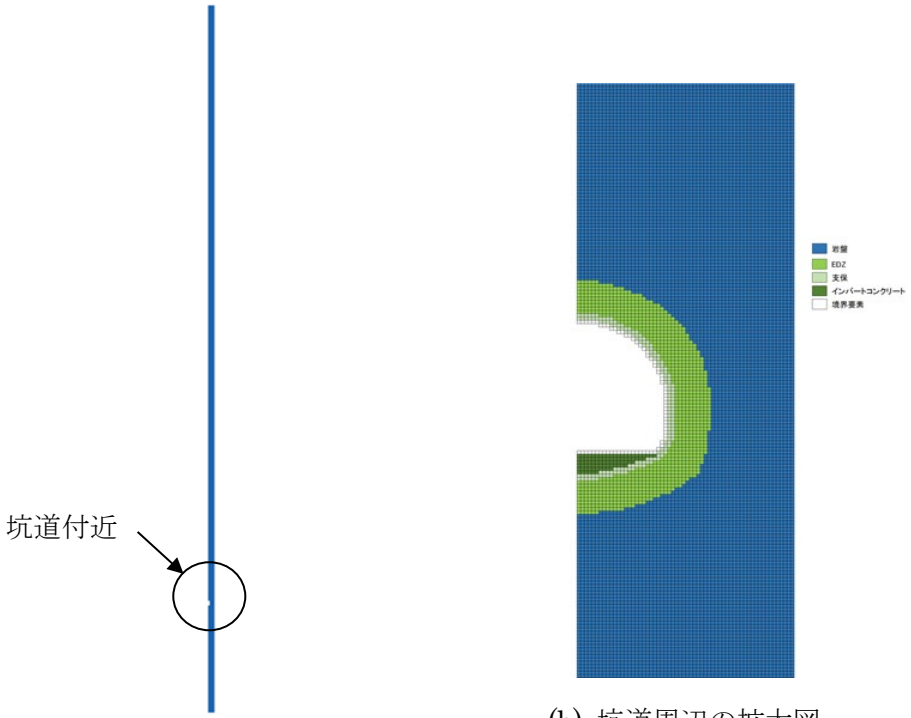
ここでは主に二相流解析の条件、結果を示すとともに、飽和・不飽和解析結果との比較を行った。

a　処分坑道掘削時の影響

処分坑道掘削時の不飽和領域評価、湧水量評価への影響について検討した。

(a)　二相流解析における解析モデル

本検討で用いた処分坑道を含む解析モデルの概要を図 3.3.1-41 に示す。モデルは二次元で鉛直方向の長さは 600m、水平方向の長さは 6m である。当該モデルでは、上端を地表面と想定しており、G.L.−500m に処分坑道を模擬している。また、水平方向の範囲は、坑道間隔と対称性を考慮して設定した。



(a)モデル全体図（H600m×W6m）
P：初期水圧分布(Pa)

(b) 坑道周辺の拡大図

図 3.3.1-41　解析モデルの概要（二相流解析：掘削時）

(b)　二相流解析における物性値の設定

本検討では二相流解析を行うことから、透水係数のみでなく透気係数の設定も行う必要がある。

二相流解析では、流体の粘性および密度の影響を除いた媒体の透過度として、絶対浸透率（絶対透過係数）を用いる。絶対浸透率は、以下の式で表現される。

$$K = \frac{\mu}{\rho g} k \qquad \text{式 3.3.1-1}$$

ここに、K：絶対浸透率（絶対透過係数）(m^2)

k：k_l またはk_g：間隙流体の飽和透過係数(m/s)

（k_l ：飽和透水係数(m/s)、 k_g ：飽和透気係数(m/s)）

μ：間隙流体の粘性係数(kg/m･s)

ρ：間隙流体の密度、 g：重力加速度(m/s^2)

飽和透水係数、透気係数、間隙率の設定値を表 3.3.1-13 に示す。

また、不飽和特性については、前節の検討結果を踏まえ、解析ケースにより異なる設定を行った。詳細については、後述する。

表 3.3.1-13　飽和透過係数の設定値

名　称	飽和透過係数（m/s） （赤字：回収可能性での設定値）				間隙率 （赤字：回収可能性での設定値）			沿岸業務での設定 （赤字：回収可能性と異なる設定）	備　考
		99-022※1	2005-026※1	設定値	99-022	2005-026	設定値		
支保工/インバート	水		5.025E-11	3.000E-09		0.190	0.250	2005-026と同様の設定 （飽和透水係数：5.025E-11m/s、 間隙率：0.190）	
	ｶﾞｽ		4.052E-08	1.497E-10					
軟岩系岩盤	水	1.226E-09	1.005E-09	3.000E-09	0.220	0.300	0.250	透過不均質の設定	
	ｶﾞｽ	1.283E-08	1.054E-08	1.497E-10					
EDZ （軟岩系岩盤）	水		1.005E-07	3.000E-07		0.300	0.250	透過係数：岩盤×100 間隙率：岩盤と同じ	間隙率は岩盤と同じ
	ｶﾞｽ		1.054E-06	1.497E-08					

※1：間隙流体の温度を30°に設定（下記、(1)(2)の文献を参考に設定）
Slr：水の残留飽和度、 Sls：水の最大飽和度、 Ssr：ガスの残留飽和度、λ、ε、α、m、n：関数のパラメータ
P_0：定数（Pa）、P_e：毛管排除圧（Pa）

（1）地層処分研究開発第2次とりまとめ（JNC TN1400 99-022）より
（2）TRU廃棄物処分におけるガス発生・移行解析（JNC TN8400 2005-026）より

$$k_g = \left(\frac{\rho_g}{\rho_w} \cdot \frac{\mu_w}{\mu_g}\right) k_w$$

用いて、飽和透水係数から飽和透気係数を算定

k_g、k_w：飽和透気係数、飽和透水係数　　ρ_g、ρ_w：ガス（空気）および水の密度
μ_g、μ_w：ガス（空気）および水の粘性係数

(c)　二相流解析における初期条件の設定

初期条件は、以下の通りとした。

・不飽和領域は存在しない。

・水に空気は溶解していない（溶解した条件では収束解が得られなかったため）。

・上端境界の圧力は大気圧である。

・下端境界の圧力は 3.5×10^{6}Pa である。

・上端と下端の間の圧力分布は、図 3.3.1-42 に示すように、鉛直方向に線形である。

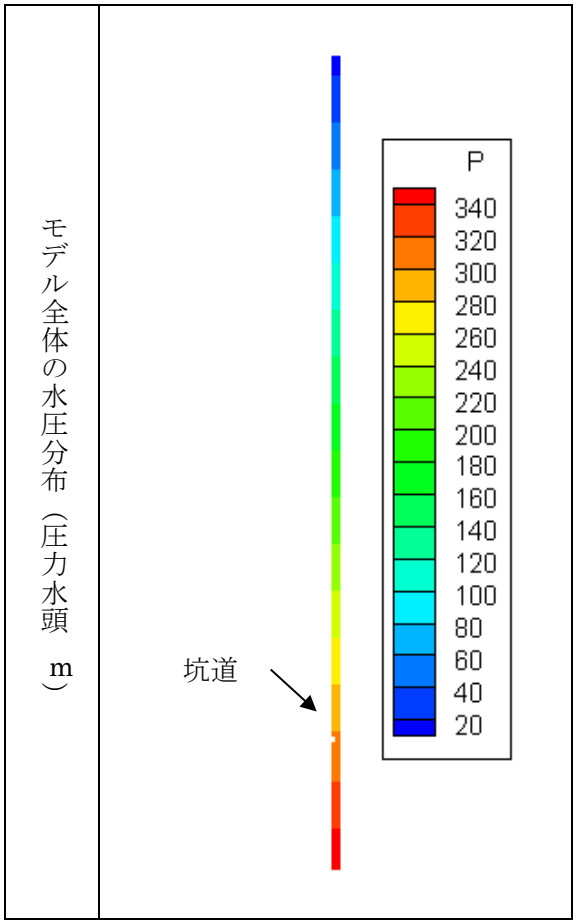


図 3.3.1-42　坑道掘削後解析の水圧の初期条件

(d)　二相流解析における解析条件の設定

モデルの境界条件は、表 3.3.1-14 に示すとおりである。

坑道掘削により、下端境界の圧力は変化していくが、本検討では解析コードの機能上の制約から、一定値（3.9×10^{6} Pa）とした。これは、飽和・不飽和流解析の 2D モデルの下端境界圧（掘削後および再冠水時）の圧力の平均的な圧力に相当する（図 3.3.1-43 の黒線を参照）。

今年度の検討では、平成 29 年度の二相流解析の設定と異なり、空洞壁面の毛管圧力を 0 とした。平成 29 年度の設定では、空洞壁面の毛管圧力関数を岩盤、EDZ、グラウトと同様にし

ていたが、その結果、坑道壁面に過剰な毛管圧（負圧）が掛かり、空洞周辺に不飽和帯が形成されていた。このため、今年度は壁面の境界条件を適切な条件に見直して解析を実施した。

表 3.3.1-14　解析モデルの境界条件

境界条件	
両側境界	不透水
上端境界	水飽和度：100%
	圧力：大気圧
下端境界	水飽和度：100%
	圧力：3.9×10⁶Pa（掘削後および再冠水時の平均的な圧力）
空洞壁面	水飽和度：0%
	圧力：大気圧
	毛管圧力：0

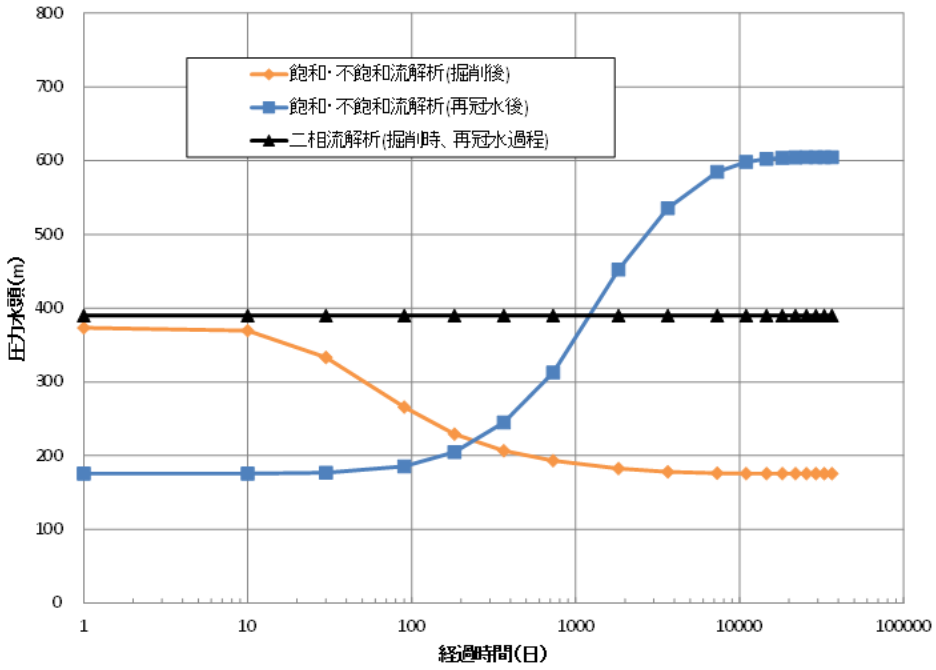


図 3.3.1-43　モデル下端の圧力境界

(e)　二相流解析における解析ケースの設定

不飽和特性の違いによる解析結果の違いを確認するため、ケース①～ケース④の 4 通りの不飽和特性で解析を実施した。ケース①～ケース③に関しては、飽和・不飽和流解析で使用した不飽和特性と同じ曲線を、ケース④に関しては、飽和・不飽和流解析で使用した不飽和特性に近似した曲線をそれぞれ使用した。

・ケース①の不飽和特性

相対浸透率評価関数（不飽和領域における比透過係数関数：対象物の飽和度に応じた透水性と透気性を表す 0～1 の関数）に関しては、次式で表される Corey モデルを用いた。

【Corey モデル】

$$k_{rl} = (S^*)^m$$
$$k_{rg} = (1 - S^*)^n(1 - (S^*)^n) \qquad \text{式 3.3.1-2}$$
$$S^* = (S_l - S_{lr})/(1 - S_{lr} - S_{sr})$$

ここに、k_{rl}：水の相対浸透率、k_{rg}：ガスの相対浸透率、
S^*：水の有効飽和度、S_l：間隙水の飽和度、S_{lr}：水の残留飽和度、
S_{sr}：ガスの残留飽和度、n, m：関数パラメータ

毛管圧力関数（対象物の飽和度に応じた毛管圧力の関数）に関しては、次式で表される Narasimhan モデルを用いた。

【Narasimhan モデル】

$$P_{cap,l} = \begin{cases} -P_e - P_0\left(\dfrac{1 - S_l}{S_l - S_{lr}}\right)^{1/\lambda} & \text{for } S_l < 1 \\ 0 & \text{for } S_l = 1 \end{cases} \qquad \text{式 3.3.1-3}$$

ここに、$P_{cap,l}$：毛管圧力（Pa）、P_e：毛管排除圧（Pa）、
P_0：定数（Pa）、λ：関数パラメータ

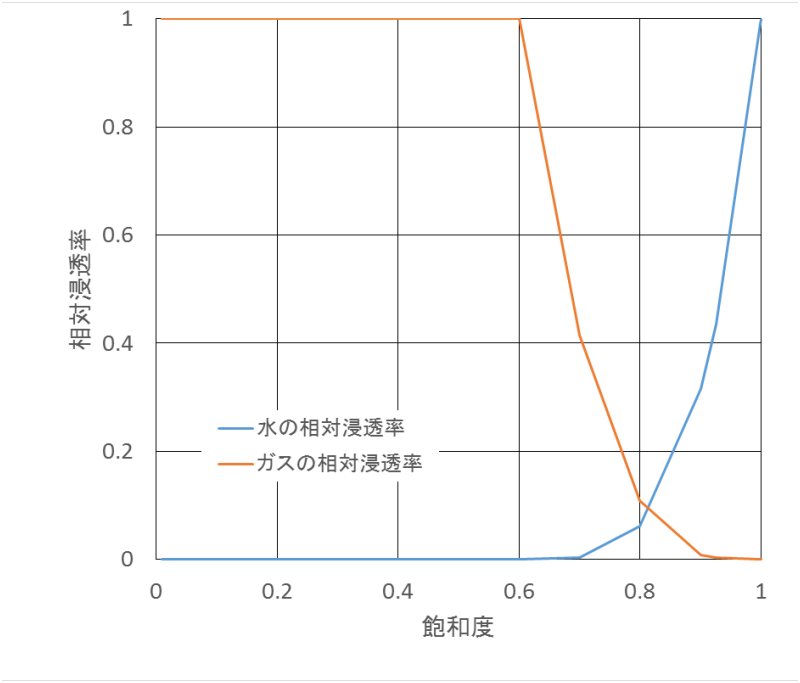
不飽和特性の設定に用いたパラメータの一覧表を表 3.3.1-15 に示す。各材料に対する不飽和特性について、図 3.3.1-44、図 3.3.1-45 にグラフ形状を示す。

表 3.3.1-15　不飽和特性の設定用パラメータの一覧

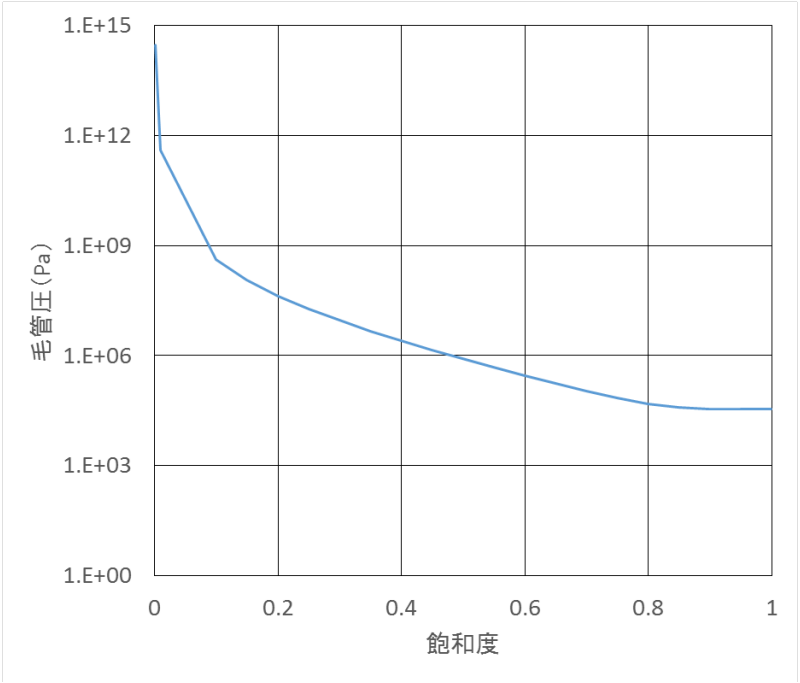
名称	対象	相対浸透率関数								毛管圧力関数							出典
		計算式	S_{lr}	S_{ls}	S_{sr}	λ	ε	m	n	計算式	S_{lr}	S_{ls}	λ	α (1/m)	P0 (Pa)	Pe (Pa)	
支保工/インバート	水	Corey	0.150	–	0.075	–	–	2.500	2.300	Narasimhan	0.150	–	1.050	–	5.000E+06	6.900E+04	2005-026
	ｶﾞｽ	Corey	0.150	–	0.075	–	–	2.500	2.300								
軟岩系岩盤	水	Corey	0.600	–	0.000	–	–	4.000	3.000	Narasimhan	0.000	–	0.350	–	8.000E+05	3.400E+04	2005-026
	ｶﾞｽ	Corey	0.600	–	0.000	–	–	4.000	3.000								
EDZ 軟岩系岩盤	水	Corey	0.600	–	0.000	–	–	4.000	3.000	Narasimhan	0.000	–	0.350	–	8.000E+05	3.400E+04	2005-026
	ｶﾞｽ	Corey	0.600	–	0.000	–	–	4.000	3.000								

Slr：水の残留飽和度、 Sls：水の最大飽和度、 Ssr：ガスの残留飽和度、λ、ε、α、m、n：関数のパラメータ
P_0：定数（Pa）、P_e：毛管排除圧（Pa）

（1）地層処分研究開発第2次とりまとめ（JNC TN1400 99-022）より（赤字は、資料を基に数値を修正）
（2）TRU廃棄物処分におけるガス発生・移行解析（JNC TN8400 2005-026）より（赤字は、資料を基に数値を修正）

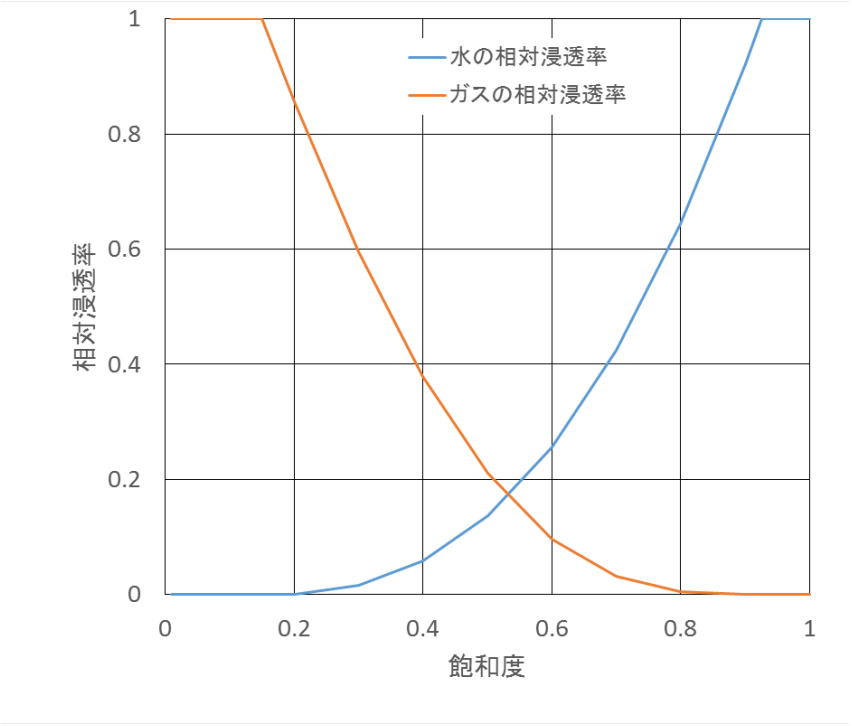


(a)　相対浸透率関数

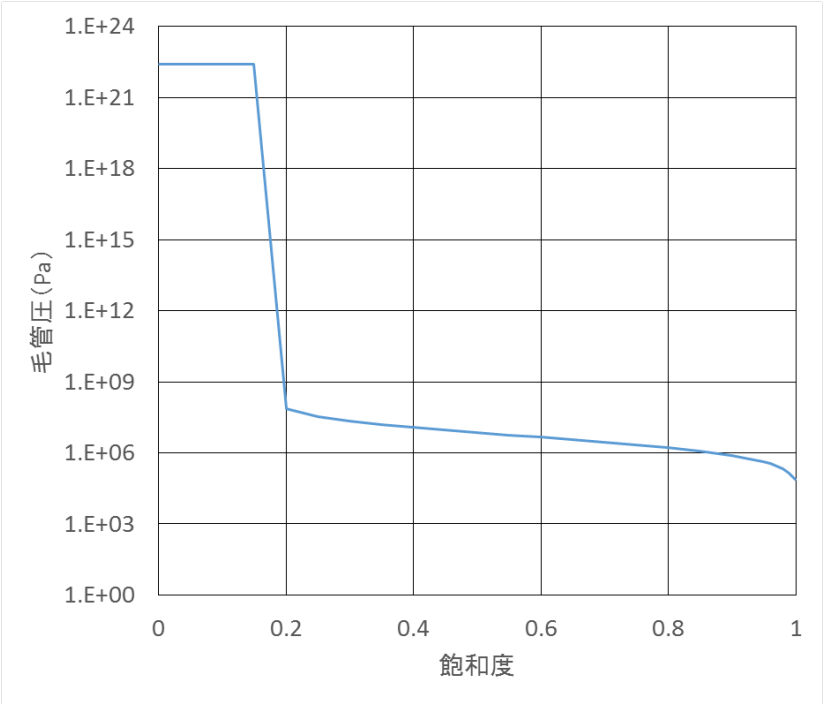


(b)　毛管圧力関数

図 3.3.1-44　不飽和特性（岩盤、EDZ）



(a)　相対浸透率関数



(b)　毛管圧力関数

図 3.3.1-45　不飽和特性（支保工/インバート）

・ケース②の不飽和特性

相対浸透率評価関数（不飽和領域における比透水係数関数：対象物の飽和度に応じた透水性と透気性を表す 0～1 の関数）に関しては、岩盤、EDZ および支保工/インバートについて、次式に示す直線モデルを使用した。

【直線モデル】

$$k_{rl} = S_l k_{rg} = 1 - k_{rl}$$ 式 3.3.1-4

ここに、k_{rl}：水の相対浸透率、k_{rg}：ガスの相対浸透率、

S_l：間隙水の飽和度

毛管圧力関数（対象物の飽和度に応じた毛管圧力の関数）に関しては、岩盤、EDZ、支保工/インバートおよび埋め戻し材の全てについて、水飽和度 0%における毛管圧力を $-50mH_2O$ とした直線モデル a を使用した。

【直線モデル a】

$$P_{cap,l} = -50(1 - S_l)$$ 式 3.3.1-5

ここに、$P_{cap,l}$：毛管圧力（mH_2O）、S_l：間隙水の飽和度

・ケース③の不飽和特性

相対浸透率評価関数に関しては、ケース②と同様に、岩盤、EDZ、支保工/インバートで直線モデルを使用した。

【直線モデル】

$$k_{rl} = S_l k_{rg} = 1 - k_{rl}$$ 式 3.3.1-6

ここに、k_{rl}：水の相対浸透率、k_{rg}：ガスの相対浸透率、

S_l：間隙水の飽和度

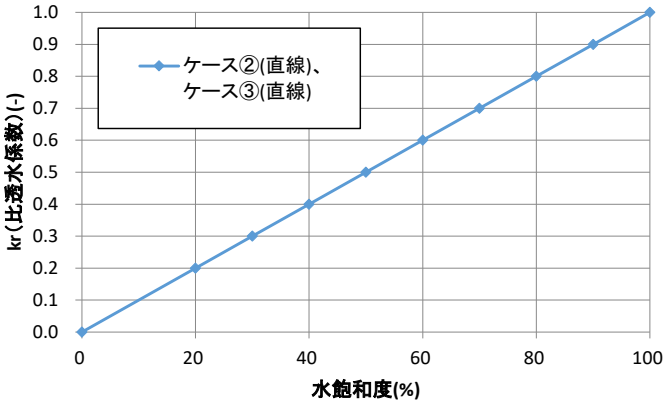
毛管圧力関数（対象物の飽和度に応じた毛管圧力の関数）に関しては、岩盤、EDZ、支保工/インバートの全てについて、水飽和度 0%における毛管圧力を−5m とした直線モデル b を使用した。

【直線モデル b】

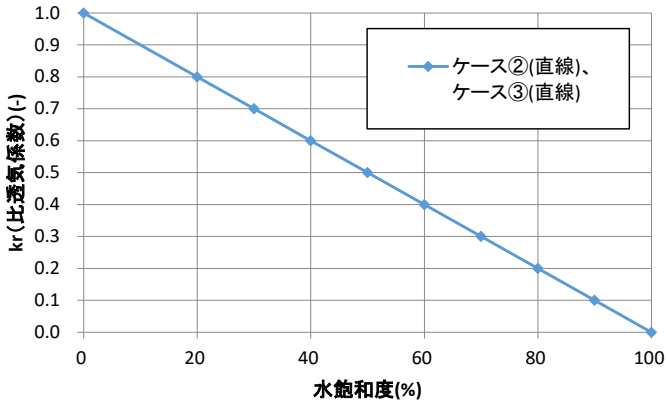
$$P_{cap,l} = -5(1 - S_l)$$ 式 3.3.1-7

ここに、$P_{cap,l}$：毛管圧力（mH_2O）、S_l：間隙水の飽和度

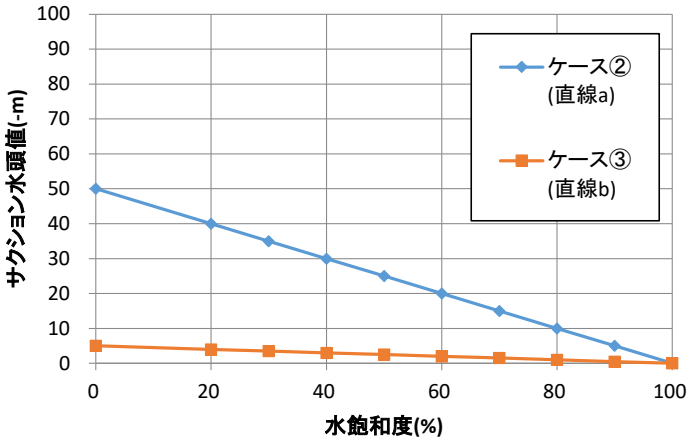
ケース②および③の不飽和特性について、図 3.3.1-46 にグラフ形状を示す。



(a)　ケース②、ケース③の相対浸透率関数(水)



(b)　ケース②、ケース③の相対浸透率関数(空気)

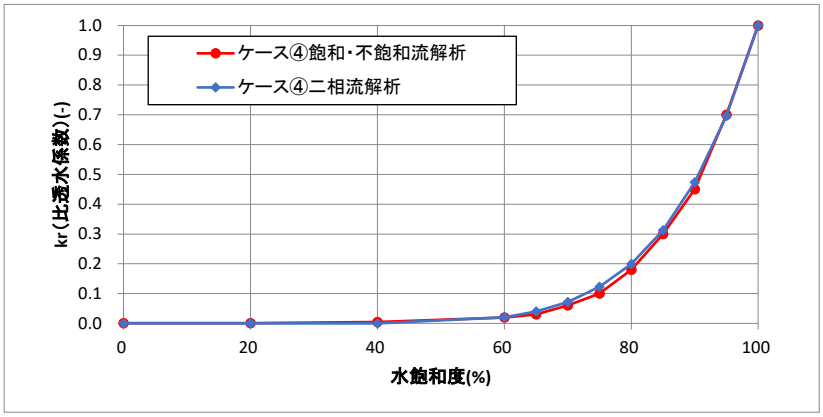


(c) ケース②、ケース③の毛管圧力関数

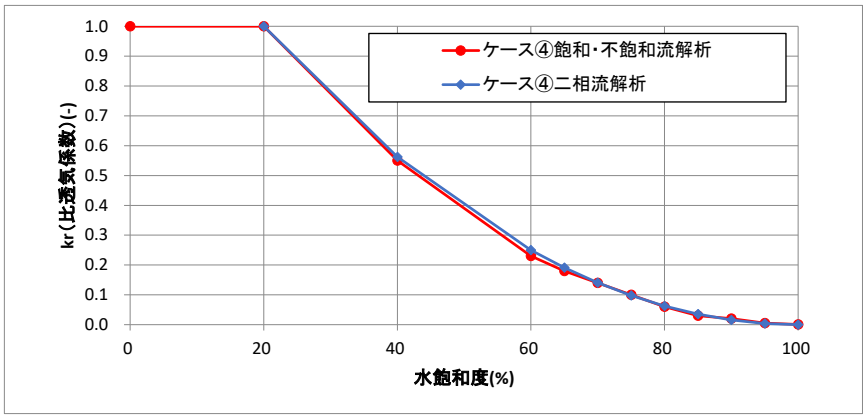
図 3.3.1-46　ケース②、ケース③の不飽和特性（岩盤、EDZ、支保工/インバート）

・ケース④の不飽和特性

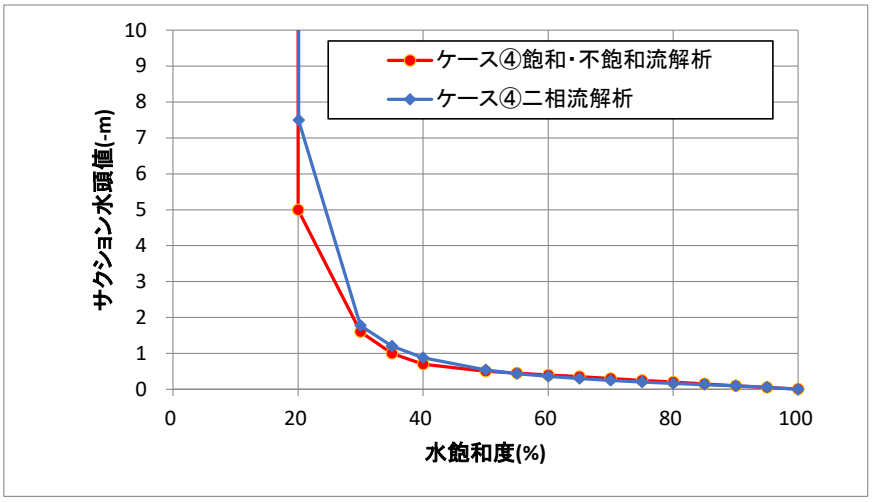
ケース④の不飽和特性は、登坂ら[18]]を参照し、相対浸透率関数と毛管圧力関数を飽和・不飽和流解析で使用した不飽和特性に近似した曲線とした。不飽和特性について、図 3.3.1-47 にグラフ形状を示す。



(a)　相対浸透率関数（水）



(b)　相対浸透率関数（空気）



(c)　毛管圧力関数

図 3.3.1-47　ケース④の不飽和特性（岩盤、EDZ、支保工/インバート）

二相流解析の掘削後検討の解析ケースを表 3.3.1-16 に示す。ケース名については、3.3.1(3)2)b で実施した飽和・不飽和解析に対応している。

表 3.3.1-16　二相流解析による解析ケース（坑道掘削時の不飽和領域評価）

<table>
<tr><th rowspan="2">ケース名</th><th rowspan="2">EDZ</th><th rowspan="2">解析手法</th><th rowspan="2">材料(領域)</th><th colspan="2">不飽和特性</th><th rowspan="2">初期条件</th></tr>
<tr><th>相対浸透率関数</th><th>毛管圧力関数</th></tr>
<tr><td rowspan="9">case9b-91′

case9b-92′

case9b-93′

case9b-94′</td><td rowspan="9">あり</td><td rowspan="9">二相流</td><td rowspan="9">岩盤
EDZ
支保等</td><td>Coreyの式</td><td>Narasimhanの式</td><td rowspan="9">・不飽和領域は存在しない。
・水に空気は溶解していない。
・上端境界の圧力は大気圧である。
・下端境界の圧力は3.9×10⁶Paである。
・上端と下端の間の圧力分布は、鉛直方向に線形である。</td></tr>
<tr><td colspan="2">ケース①</td></tr>
<tr><td>直線</td><td>直線a</td></tr>
<tr><td colspan="2">ケース②</td></tr>
<tr><td>直線</td><td>直線b</td></tr>
<tr><td colspan="2">ケース③</td></tr>
<tr><td>登坂ら(1996)</td><td>登坂ら(1996)</td></tr>
<tr><td colspan="2">ケース④</td></tr>
</table>

(f)　二相流解析における解析結果と得られた知見

不飽和特性の違いによる解析結果の違いを確認するため、ケース①～ケース④の 4 通りの不飽和特性で解析を実施した。ケース①～ケース③に関しては、飽和・不飽和流解析で使用した不飽和特性と同じ曲線を用いた。

解析結果として、ケース①～ケース④の水飽和度分布図、毛管圧力分布図、水圧分布図を図 3.3.1-48～図 3.3.1-51 に示す。なお、TOUGH2 での水飽和度が 100%未満の時の水圧は、水圧 = 空気圧 + 毛管圧力　としている。

また、掘削直後から 100 年後のケース①～ケース④の水飽和度分布、毛管圧力分布および水圧分布の比較を図 3.3.1-52 に示す。さらに、掘削直後から 100 年後の水圧分布の二相流解析と飽和・不飽和流解析の比較を図 3.3.1-53 に示す。これらにおいて、ケース①については 28 年後までに圧力変化がほぼ 0 になったことから、28 年後の結果を示している。

これらの結果から得られた知見は次の通りである。

- ケース①は、掘削直後から 1 年後以降も EDZ に空気が流入しない。
- ケース②～ケース④は、掘削直後から 1 年後以降は EDZ に不飽和領域が存在する。
- 掘削直後から 100 年後の水圧分布に関して（ケース①は 28 年後の水圧分布）、ケース①の水圧分布は毛管圧力分布と異なる様相であるが、ケース②～ケース④の水圧分布は毛管圧力分布と同様である。
- 掘削直後から 100 年後の水圧分布に関して（ケース①は 28 年後の水圧分布）、ケース①～ケース④のすべてのケースで、二相流解析と飽和・不飽和流解析の水圧分布が同様となる。

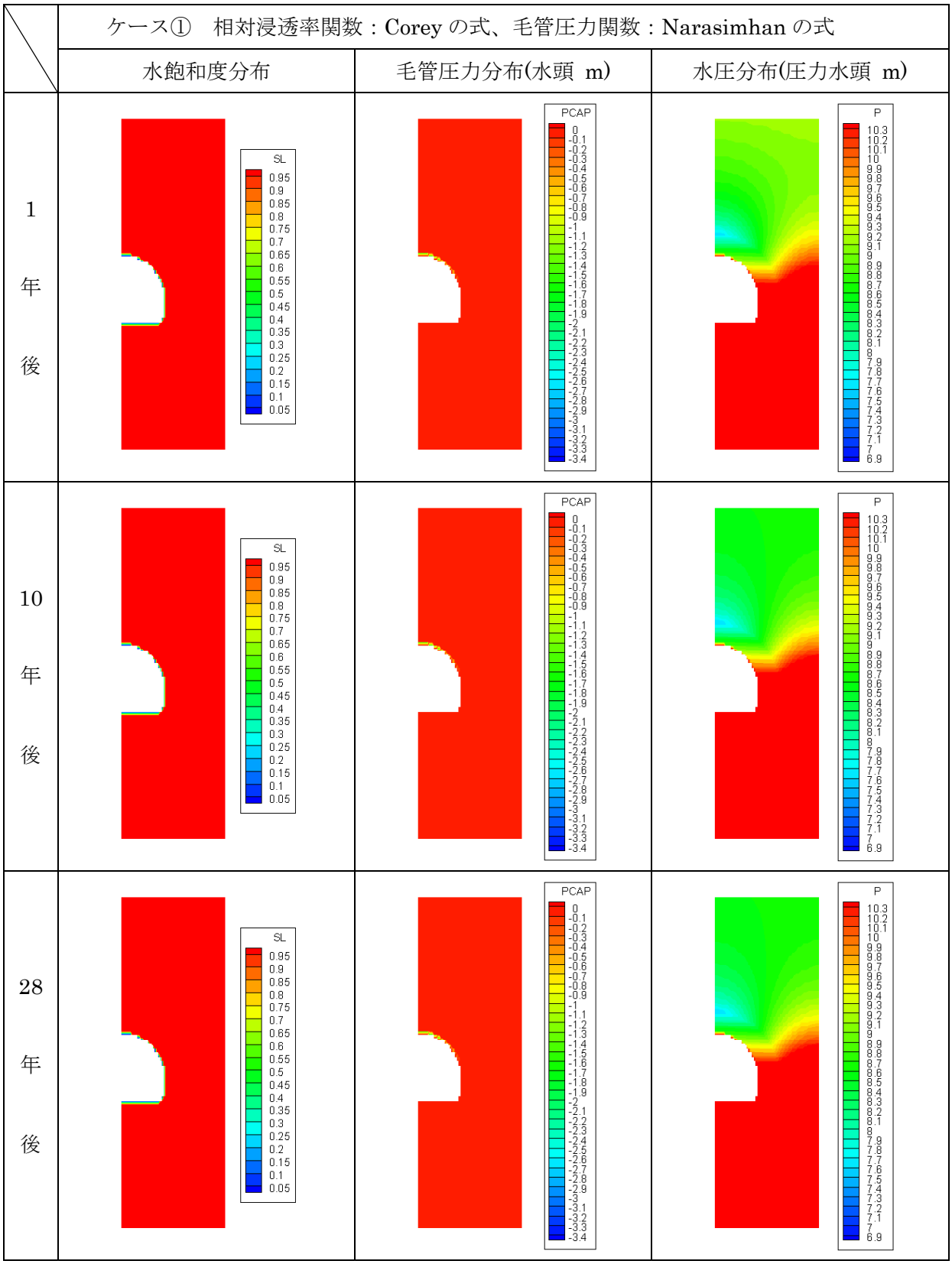


図 3.3.1-48　ケース①の坑道周辺の水飽和度分布、毛管圧力分布および水圧分布
（case9b-91’：掘削から 1 年後～28 年後）

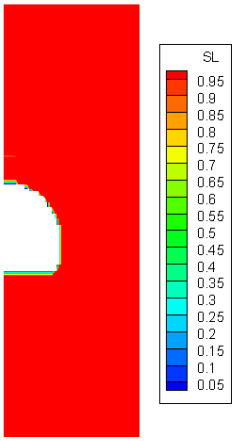
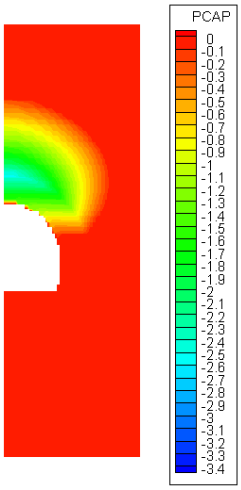
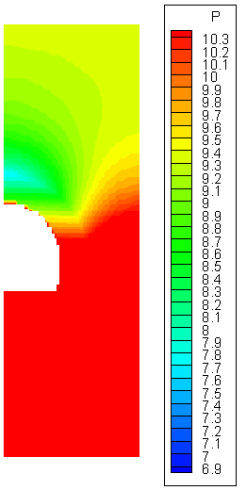
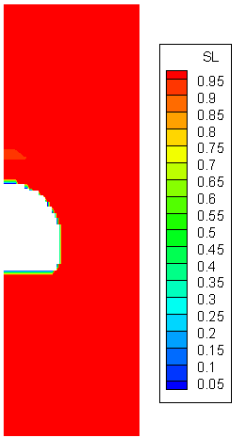
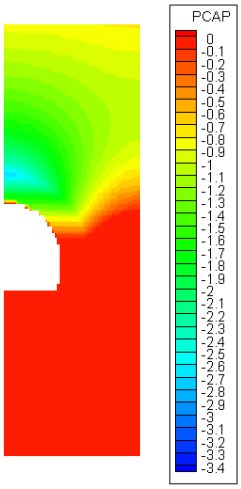
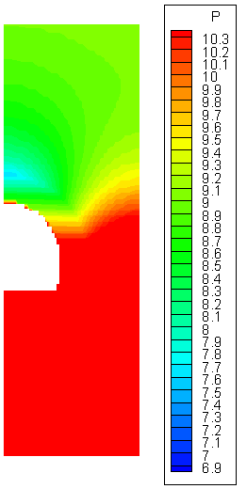
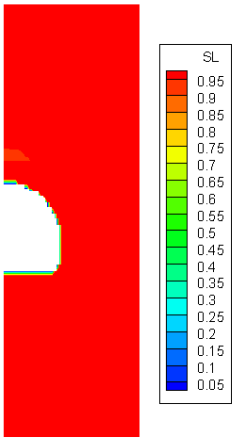
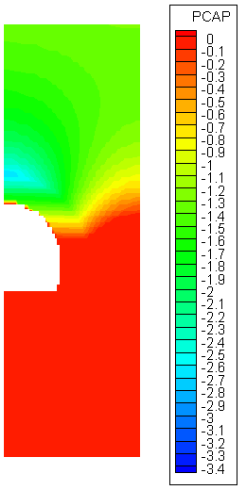
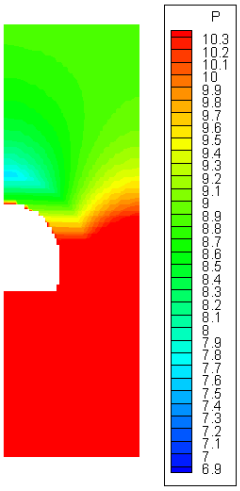
	ケース②　相対浸透率関数：直線、毛管圧力関数：直線（水飽和度 0%の時、毛管圧水頭-50m）		
	水飽和度分布	毛管圧力分布(水頭 m)	水圧分布(圧力水頭 m)
1年後			
10年後			
100年後			

図 3.3.1-49　ケース②の坑道周辺の水飽和度分布、毛管圧力分布および水圧分布
（case9b-92’：掘削から 1 年後～100 年後）

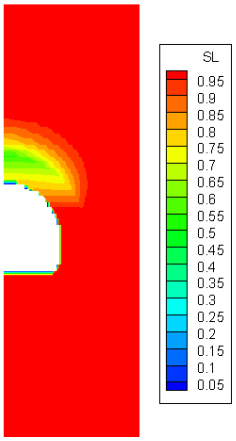
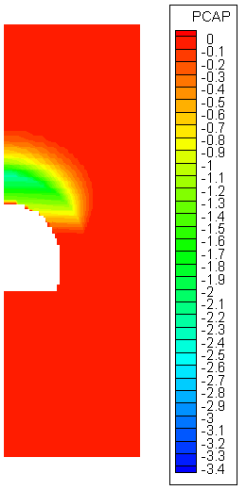
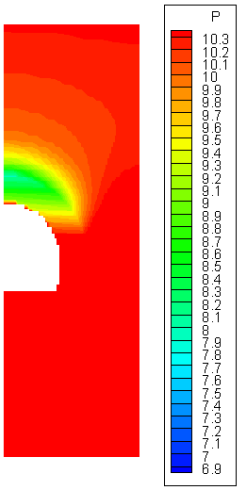
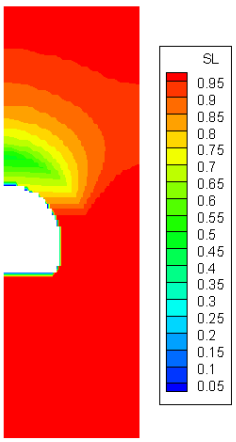
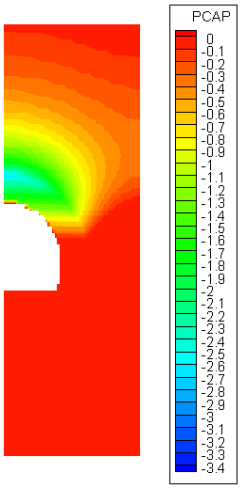
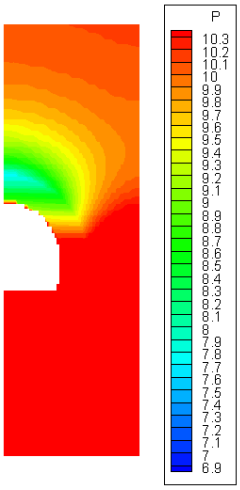
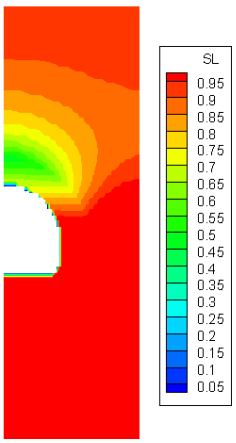
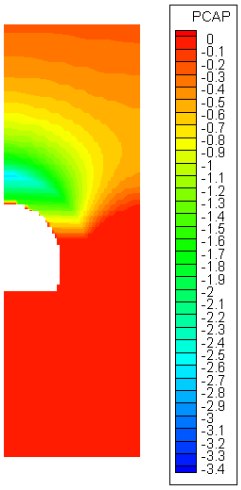
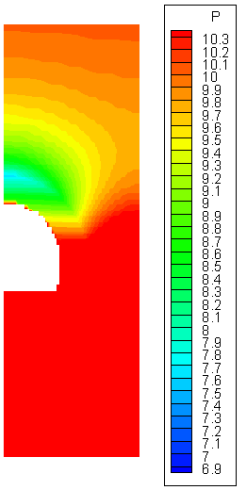
	ケース③　相対浸透率関数：直線、毛管圧力関数：直線（水飽和度 0%の時、毛管圧水頭-5m）		
	水飽和度分布	毛管圧力分布(水頭 m)	水圧分布(圧力水頭 m)
1年後			
10年後			
100年後			

図 3.3.1-50　ケース③の坑道周辺の水飽和度分布、毛管圧力分布および水圧分布
（case9b-93’：掘削から 1 年後～100 年後）

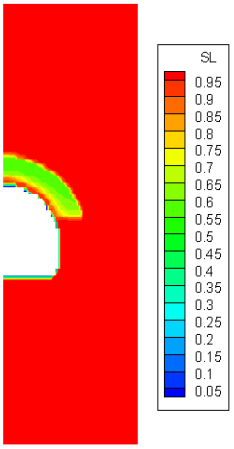
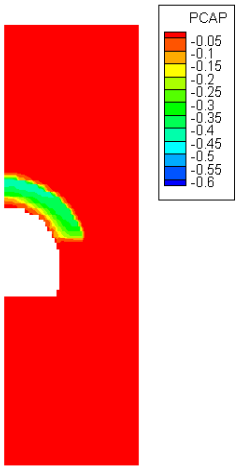
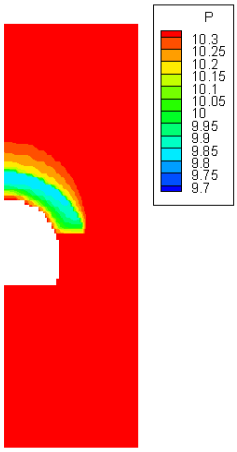
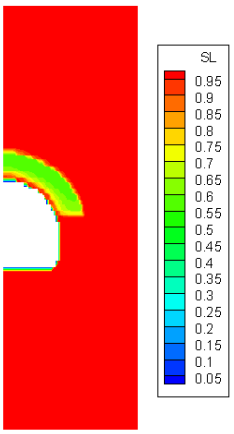
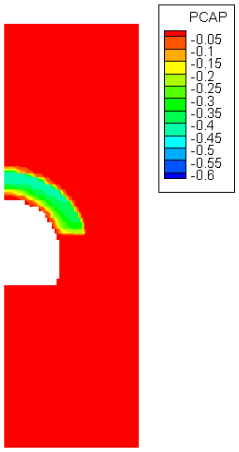
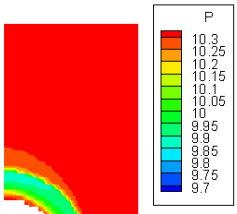
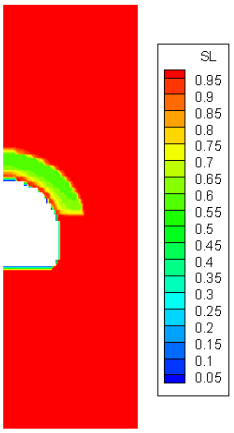
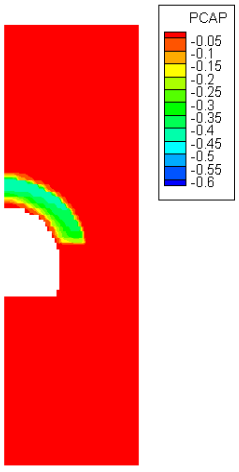
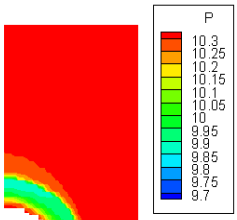
	ケース④　相対浸透率関数：登坂(1996)参照、毛管圧力関数：登坂(1996)参照)		
	水飽和度分布	毛管圧力分布(水頭 m)	水圧分布(圧力水頭 m)
1年後			
10年後			
100年後			

図 3.3.1-51　ケース④の坑道周辺の水飽和度分布、毛管圧力分布および水圧分布
（case9b-94’：掘削から 1 年後～100 年後）

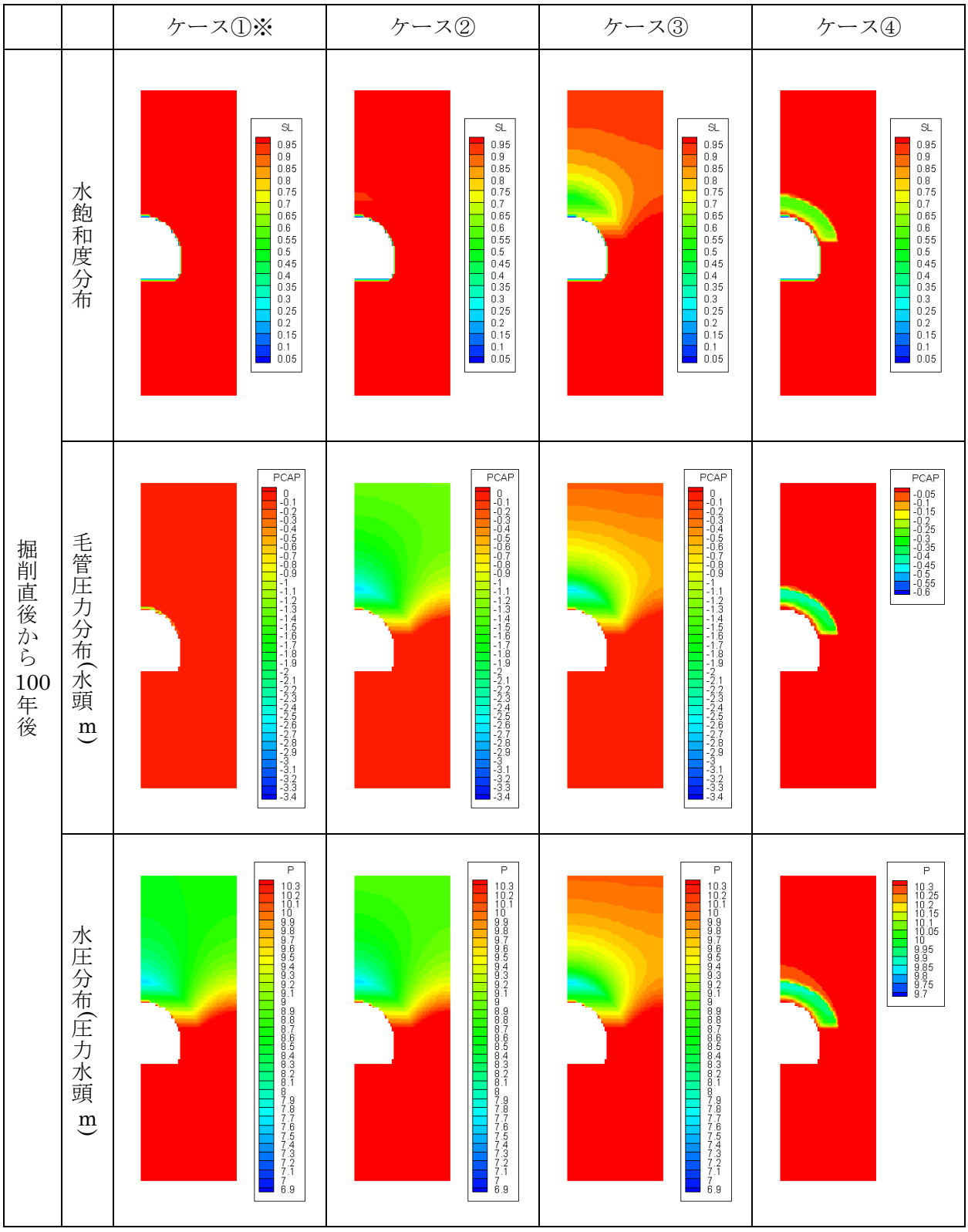


図 3.3.1-52　ケース①～ケース④の坑道周辺の水飽和度分布、毛管圧力分布および水圧分布
（case9b-91’～case9b-94’：掘削直後から 100 年後、ケース①のみ 28 年後）

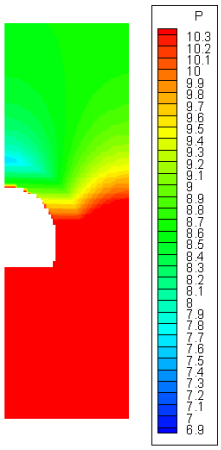
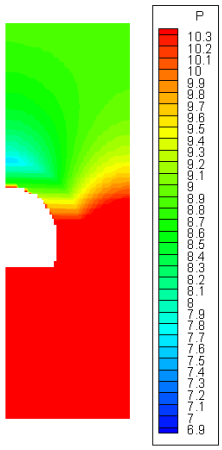
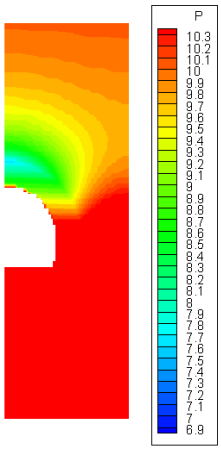
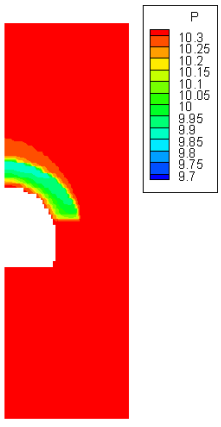
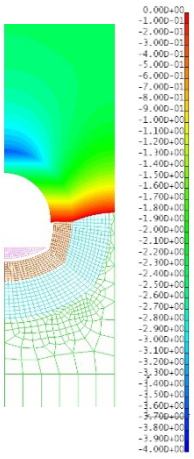
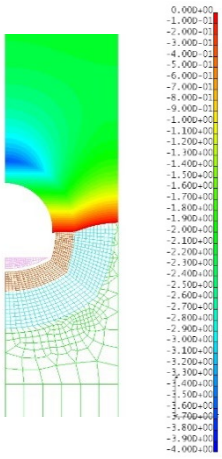
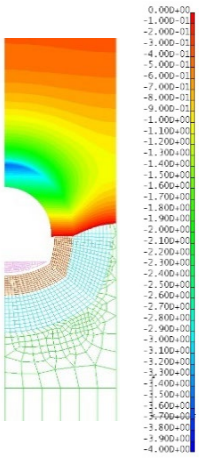
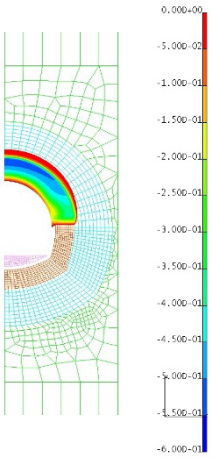
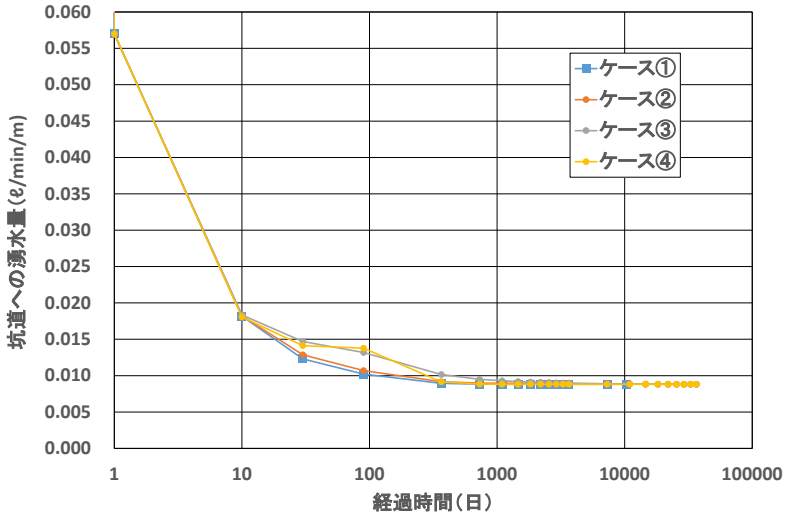
		ケース①※	ケース②	ケース③	ケース④
掘削直後から100年後　水圧分布（水頭 m）	二相流解析				
	飽和・不飽和流解析				

図 3.3.1-53　ケース①～ケース④の坑道周辺の水圧分布の
二相流解析と飽和・不飽和流解析の比較
（case9b-91’～case9b-94’：掘削直後から 100 年後、ケース①のみ 28 年後）

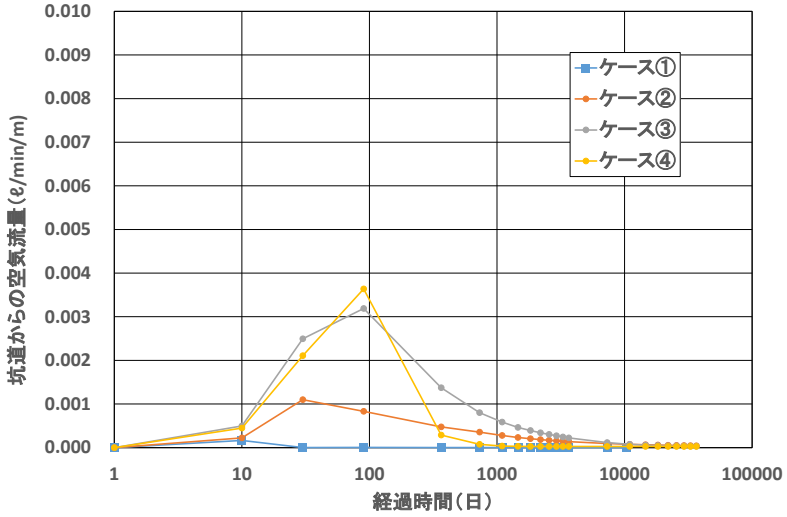
坑道への湧水量と坑道からの空気流入量のケース①～ケース④の比較を図 3.3.1-54 に示す。また、飽和・不飽和流解析でのケース①～ケース④の坑道への湧水量を図 3.3.1-55 に示す。

この結果から得られた知見は次のとおりである。

- 掘削直後から 2 年後（730 日後）以降は、ケース①～ケース④の坑道への湧水量がほぼ同じとなる。
- 二相流解析の坑道への湧水量は約 0.009L/min/m で、飽和・不飽和流解析の坑道への湧水量は 0.0039 L/min/m（図 3.3.1-55　参照）であったことから、二相流解析の方が飽和・不飽和流解析よりも坑道への湧水量が多かった。



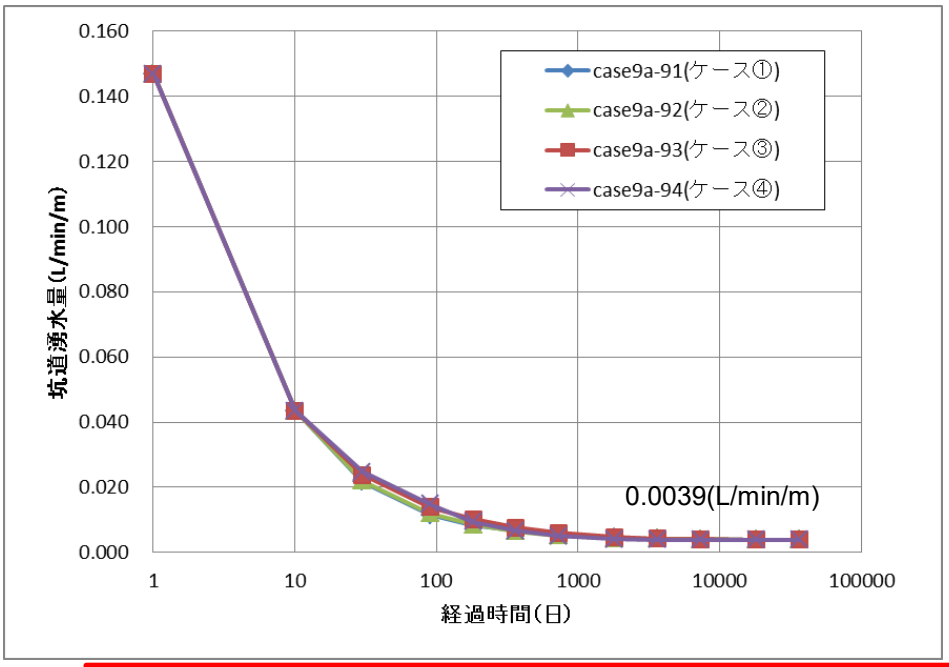
(a)　坑道への湧水量



(b)　坑道からの空気流量

※湧水量の絶対値については、解析条件等に依存するため取扱に注意を要する。

図 3.3.1-54　二相流解析における「坑道への湧水量」と「坑道からの空気流量」の経時変化



※湧水量の絶対値については、解析条件等に依存するため取扱に注意を要する。

図 3.3.1-55　飽和・不飽和流解析における「坑道への湧水量」の経時変化

(g)　　解析手法の違いについての考察

二相流解析のケース①は、掘削直後から 1 年後以降も EDZ に空気が流入しなかった。この理由は、以下のとおりである。

ケース①の水飽和度 100%での毛管圧力水頭（限界毛管圧）が、約-3.5m である。水飽和度 100%の岩盤領域に少しでも坑道から空気が入ると限界毛管圧が働き、空気が流入してない周辺よりも水圧が大幅に低くなるために、水が流入する。その結果、流入した空気をまた坑道に押し戻してしまうので、限界毛管圧が働くと空気が流入しにくいといえる。

掘削直後から 100 年後の水圧分布に関して（ケース①は 28 年後の水圧分布）、ケース①～ケース④の全てのケースで、二相流解析と飽和・不飽和流解析の水圧分布がほぼ同様となった。これらのケースでは、水圧を求めるという点に関しては、二相流解析と飽和・不飽和流解析のどちらを使用しても問題ないと考えられる。

ケース①の場合のみ飽和・不飽和流解析で求まる不飽和領域(圧力水頭が 0m 以下の領域)と二相流解析で求めた不飽和領域が異なった（図 3.3.1-56　参照)。飽和・不飽和流解析と二相流解析を比較すると、空気を考慮した解析ができる二相流解析の方がより適切である可能性が高いように思われるが、飽和・不飽和流解析結果の方が二相流解析結果よりも不飽和領域が広く現れるため、飽和・不飽和流解析の方がより保守的に不飽和領域を判断することができるとも言える。

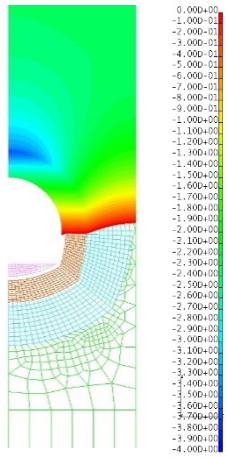
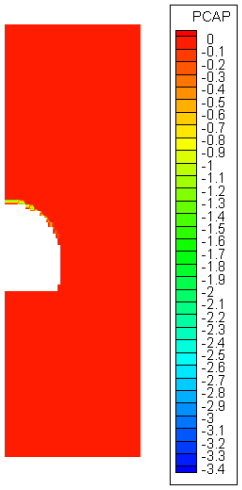
	飽和・不飽和流解析 水圧分布 (圧力水頭 m)	二相流解析※ 毛管圧力分布 (圧力水頭 m)
掘削直後から100年後　不飽和領域		
	圧力水頭が 0m 以下の領域が不飽和領域とみなされる。	毛管圧力水頭が 0m 未満の領域が不飽和領域である。

図 3.3.1-56　ケース①の坑道周辺の不飽和領域（掘削直後から 100 年後）

※二相流解析は 28 年後の結果

また、二相流解析の方が飽和・不飽和流解析よりも坑道への湧水量が多かった。この原因は、以下のとおりである。

Dtransu-3D・EL（飽和・不飽和流解析）は時間とともに変化する圧力を境界条件として設定でき、掘削後解析の 100 年後の下端の圧力水頭は 176m である（図 3.3.1-57、図 3.3.1-43 の再掲）。一方、TOUGH2（二相流解析）は、時間とともに変化する圧力を境界条件として設定できないため、本検討では飽和・不飽和流解析の再冠水解析と掘削解析の下端圧力設定の平均を設定し、下端の圧力水頭を 390m とした。このため、二相流解析の方が飽和・不飽和解析よりも下端から坑道までの動水勾配が大きくなり坑道への湧水量が多くなったと考えられる。

このことから、湧水量の評価に関しては、時間とともに変化する圧力を境界条件として設定できる飽和・不飽和流解析の方が、より実際に近い設定をすることができると言える。

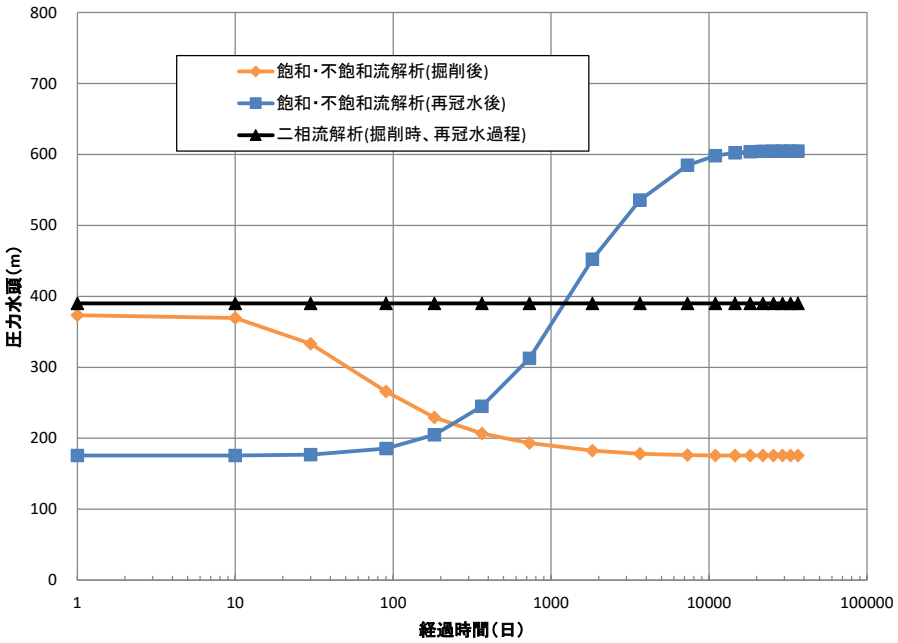


図 3.3.1-57　モデル下端の圧力境界

b　二相流解析による再冠水過程の検討

ここでは、TOUGH2 を使用して、地下水に加えて間隙空気の流れも考慮した二相流再冠水解析を実施した。また、その結果を Dtransu-3D・EL（飽和・不飽和解析手法）の結果と比較検討した。

(a)　二相流解析における解析モデル

解析モデルの概要を図 3.3.1-58 に示す。坑道掘削後解析のモデル（前掲　図 3.3.1-41）の坑道に埋め戻し材を充填した状態を模擬している。埋め戻し材の内側には PEM があると仮定している。

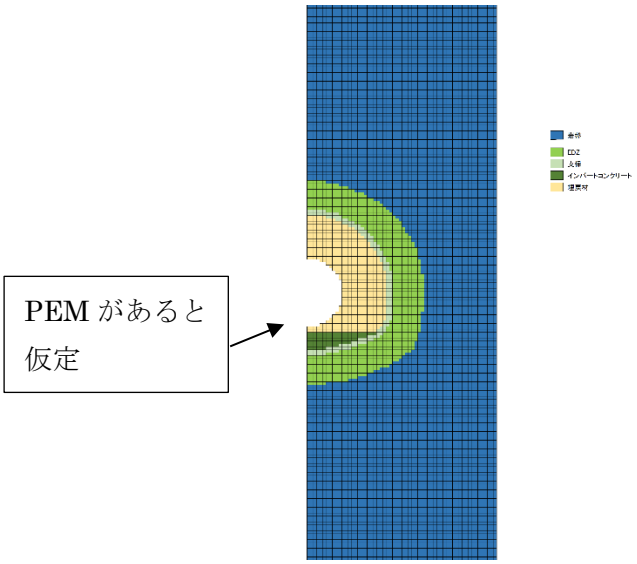


図 3.3.1-58　解析モデル概要図（深度：GL-500m 周辺の拡大図）

(b)　二相流解析における物性値の設定

岩盤、EDZ、支保工/インバート、埋め戻し材の飽和透水係数、透気係数、間隙率の設定値を表 3.3.1-17 に示す。岩盤、EDZ、支保工/インバートは、掘削後解析に使用した設定と同じである。

岩盤、EDZ、支保工/インバートの不飽和特性は坑道掘削後解析のケース④と同じ曲線を使用した（図 3.3.1-44 参照）。

埋め戻し材の相対浸透率評価関数（不飽和領域における比透水係数関数：対象物の飽和度に応じた透水性と透気性を表す 0～1 の関数）に関しては、以下のモデルを用いた。

【van Genuchten モデル】

$$k_{rl} = (S^*)^{\frac{1}{2}}\left(1-\left(1-(S^*)^{\frac{1}{\lambda}}\right)^{\lambda}\right)^2$$

$$k_{rg} = 1 - k_{rl}$$

$$S^* = (S_l - S_{lr})/(S_{ls} - S_{lr})$$

$$S_{ls} = 1 - S_{sr}$$

式 3.3.1-8

ここに、k_{rl}：水の相対浸透率、k_{rg}：ガスの相対浸透率、
S^*：水の有効飽和度、S_l：間隙水の飽和度、S_{lr}：水の残留飽和度、
S_{ls}：水の最大飽和度、S_{sr}：ガスの残留飽和度、λ：関数パラメータ

埋め戻し材の毛管圧力関数（対象物の飽和度に応じた毛管圧力の関数）に関しては、以下のモデルを用いた。

【van Genuchten モデル】

$$P_{cap,l} = P_0\left((S^*)^{-\frac{1}{\lambda}} - 1\right)^{1-\lambda}$$
$$S^* = (S_l - S_{lr})/(S_{ls} - S_{lr})$$

式 3.3.1-9

ここに、$P_{cap,l}$：毛管圧力（Pa）
S^*：水の有効飽和度、S_l：間隙水の飽和度、S_{lr}：水の残留飽和度、
S_{ls}：水の最大飽和度、λ：関数パラメータ

不飽和特性の設定に用いたパラメータの一覧表を表 3.3.1-18 に示す。
各材料に対する不飽和特性について、図 3.3.1-59 にグラフ形状を示す。

表 3.3.1-17　飽和透過係数の設定値

名　称		飽和透過係数（m/s）（赤字：回収可能性での設定値）			間隙率（赤字：回収可能性での設定値）			沿岸業務での設定（赤字：回収可能性と異なる設定）	備　考
		99-022※1	2005-026※1	設定値	99-022	2005-026	設定値		
埋戻し材	水	7.353E-12		**7.353E-12**	0.333		**0.333**	左記設定案と同様	ベントナイト（15wt%）+骨材（85wt%）の混合材料を想定 NUMO（TR-15-10）、プラグは無視
	ｶﾞｽ	1.283E-08		**3.669E-13**					
支保工/インバート	水		5.025E-11	**3.000E-09**		0.190	**0.250**	**2005-026と同様の設定（飽和透水係数：5.025E-11m/s、間隙率：0.190）**	
	ｶﾞｽ		4.052E-08	**1.497E-10**					
軟岩系岩盤	水	1.226E-09	1.005E-09	**3.000E-09**	0.220	0.300	**0.250**	**透過不均質の設定**	
	ｶﾞｽ	1.283E-08	1.054E-08	**1.497E-10**					
EDZ（軟岩系岩盤）	水		1.005E-07	**3.000E-07**		0.300	**0.250**	**透過係数：岩盤×100 間隙率：岩盤と同じ**	間隙率は岩盤と同じ
	ｶﾞｽ		1.054E-06	**1.497E-08**					

※1：間隙流体の温度を30°に設定（下記、(1)(2)の文献を参考に設定）
Slr：水の残留飽和度、 Sls：水の最大飽和度、 Ssr：ガスの残留飽和度、λ、ε、α、m、n：関数のパラメータ
P_0：定数（Pa）、P_e：毛管排除圧（Pa）

（1）地層処分研究開発第2次とりまとめ（JNC TN1400 99-022）より
（2）TRU廃棄物処分におけるガス発生・移行解析（JNC TN8400 2005-026）より

$$k_g = \left(\frac{\rho_g}{\rho_w} \cdot \frac{\mu_w}{\mu_g}\right) k_w$$

用いて、飽和透水係数から飽和透気係数を算定

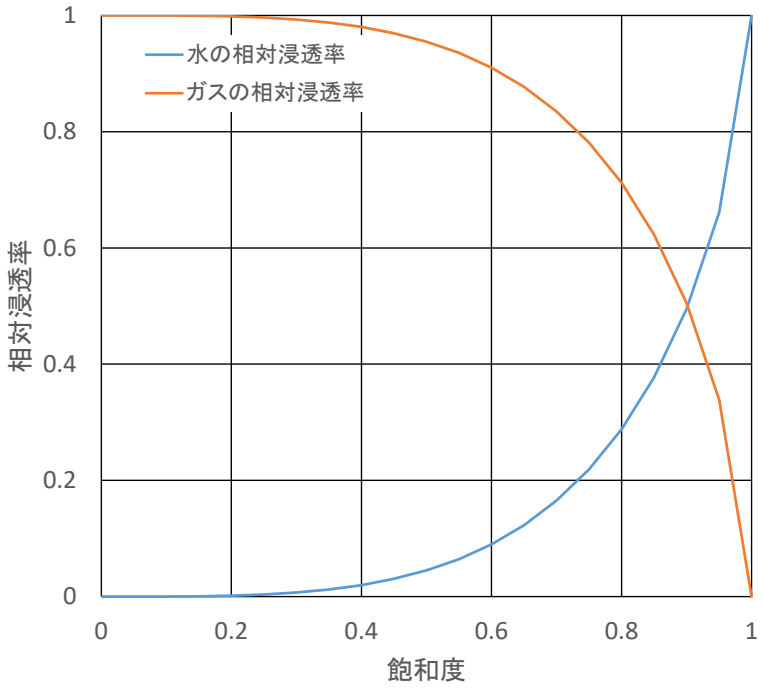
k_g、k_w：飽和透気係数、飽和透水係数　　ρ_g、ρ_w：ガス（空気）および水の密度
μ_g、μ_w：ガス（空気）および水の粘性係数

表 3.3.1-18　不飽和特性の設定用パラメーター一覧

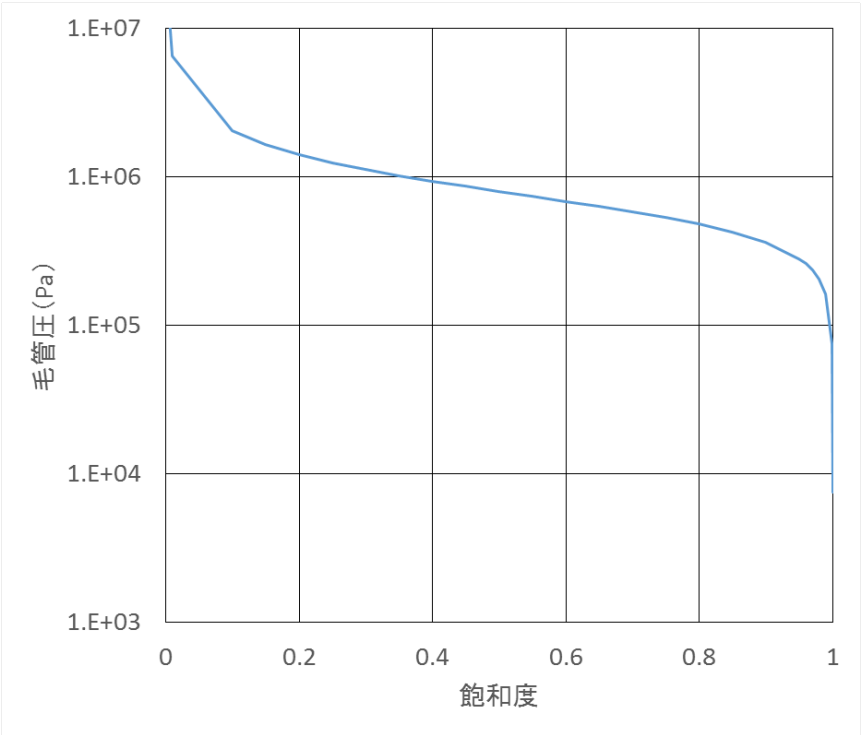
名称	対象	相対浸透率関数								毛管圧力関数							出典
		計算式	S_{lr}	S_{ls}	S_{sr}	λ	ε	m	n	計算式	S_{lr}	S_{ls}	λ	α (1/m)	P0 (Pa)	Pe (Pa)	
埋戻し材	水	van Genuchten	0.000	1.000	–	0.667	0.5	–	–	van Genuchten	0.000	1	0.667	1.50E-02	–	–	99-022
	ｶﾞｽ	van Genuchten	0.000	1.000	–	0.667	0.5	–	–								

Slr：水の残留飽和度、 Sls：水の最大飽和度、 Ssr：ガスの残留飽和度、λ、ε、α、m、n：関数のパラメータ
P_0：定数（Pa）、P_e：毛管排除圧（Pa）

（1）地層処分研究開発第2次とりまとめ（JNC TN1400 99-022）より（赤字は、資料を基に数値を修正）
（2）TRU廃棄物処分におけるガス発生・移行解析（JNC TN8400 2005-026）より（赤字は、資料を基に数値を修正）



(a)　相対浸透率関数



(b)　毛管圧力関数

図 3.3.1-59　不飽和特性（埋め戻し材）

(c)　初期条件

岩盤、EDZ、支保工/インバートの圧力、水飽和度等の初期条件は、掘削後解析ケース④における 100 年後の状態とした。

埋め戻し材の初期条件は、水飽和度は 0.567（＝56.7%）、圧力を大気圧とした。

(d)　解析条件

モデルの境界条件は、表 3.3.1-19 に示すとおりである。

下端境界の圧力は、3.9×10^{6}Pa であるのは、飽和・不飽和流解析の 2D モデルの下端境界圧（掘削後、および再冠水時）の圧力を参考に、両者の平均的な圧力を一定期間与えた（前掲図 3.3.1-43 の黒線を参照）。埋め戻し材の内側（PEM の外縁）に相当する箇所は不透水とすることにより PEM 内部への浸透は無い状況を模擬した。

表 3.3.1-19　解析モデルの境界条件

境界条件	
両側境界	不透水
上端境界	水飽和度：100%
	圧力：大気圧
下端境界	水飽和度：100%
	圧力：3.9×10^{6}Pa
埋め戻し材の内側境界	不透水

(e)　解析ケース

解析ケースを表 3.3.1-20 に示す。

表 3.3.1-20　二相流解析による解析ケース（再冠水評価：case19b-9’）

ケース名	EDZ	解析手法	不飽和特性				初期状態	
			相対浸透率関数		毛管圧力関数			
case19b-9’	あり	FDM	埋戻材以外	登坂ら(1996)ケース④	埋戻材以外	登坂ら(1996)ケース④	埋戻材以外	圧力等は閉鎖前解析ケース④の100年後の結果を使用
			埋戻材	van-Genuchtenの式	埋戻材	van-Genuchtenの式	埋戻材	圧力は大気圧 初期水飽和度は0.567

(f)　解析結果の整理

解析結果として、水飽和度分布等の経時変化の比較を図 3.3.1-60 と図 3.3.1-61 に示す。

また、飽和・不飽和流解析と二相流解析の再冠水から 2 年後の水圧分布を図 3.3.1-62 に示す。

これらの結果から得られた知見を以下に示す。

- EDZ の領域に形成された不飽和領域は、再冠水開始から 1 年以内に水飽和状態に戻る結果となった。
- 埋め戻し材は、再冠水開始から 2 年後にほぼ飽和状態となった。これは、再冠水によって埋め戻し土に水が湿潤すること、水圧が高くなるにつれて空気が水に溶解したためである。
- 再冠水 2 年後の水圧分布は、飽和・不飽和流解析と二相流解析で同様の結果となった。

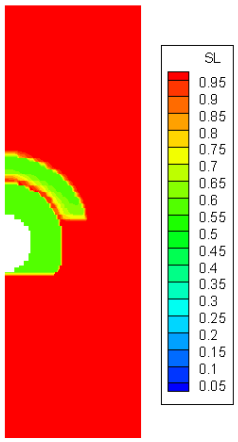
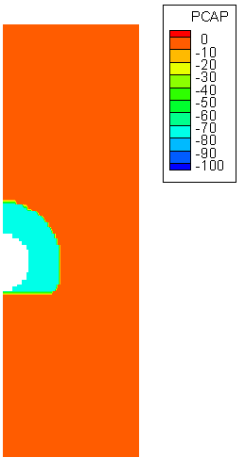
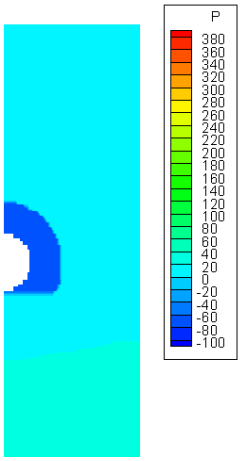
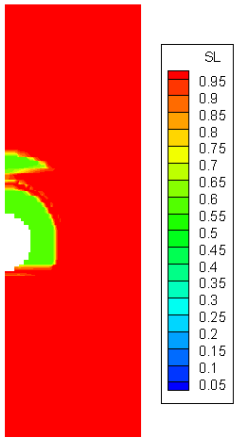
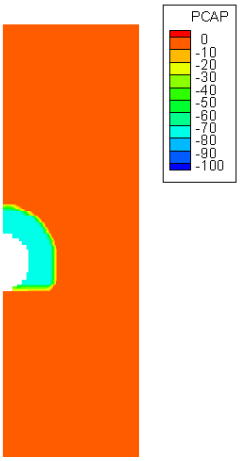
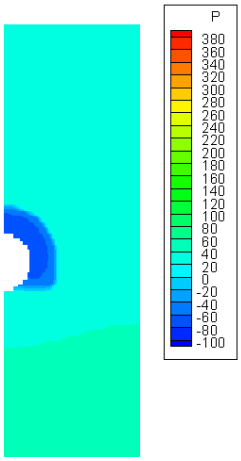
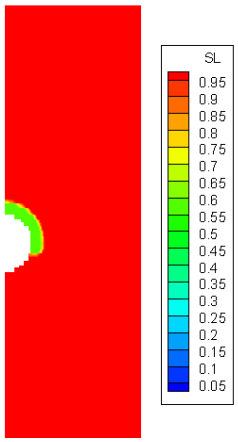
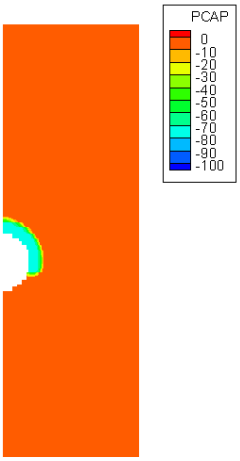
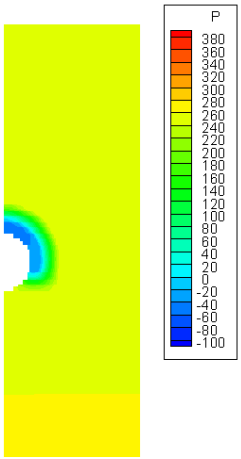
	case19b-9’（再冠水解析）		
	水飽和度分布	毛管圧分布(水頭 m)	水圧分布(水頭 m)
初期			
90日後			
1年後			

図 3.3.1-60　坑道周辺の水飽和度分布、毛管圧力分布および水圧分布
（case19b-9’：再冠水時から 90 日～1 年後）

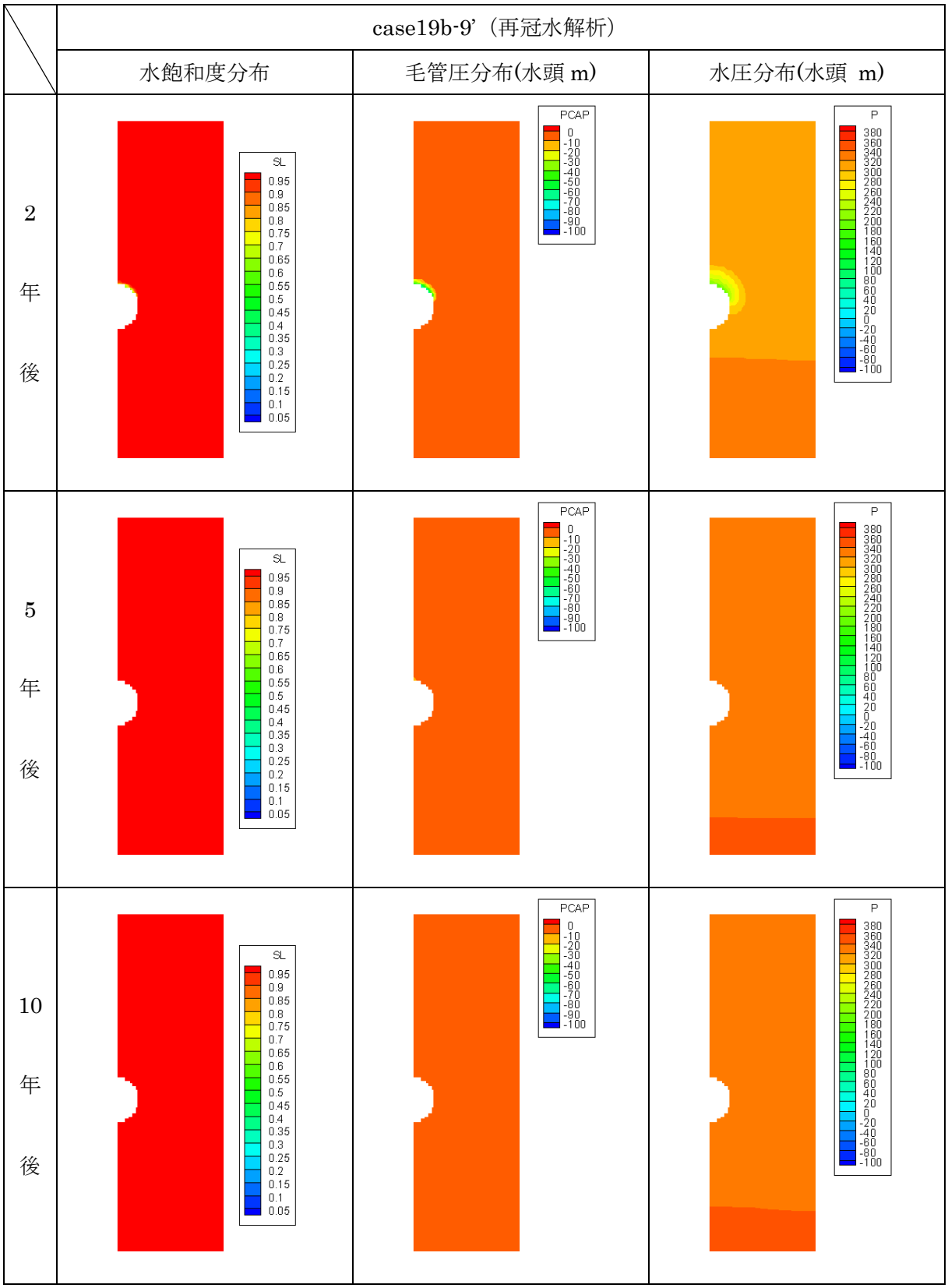


図 3.3.1-61　坑道周辺の水飽和度分布、毛管圧力分布および水圧分布
（case19b-9’：再冠水時：2 年後～10 年後）

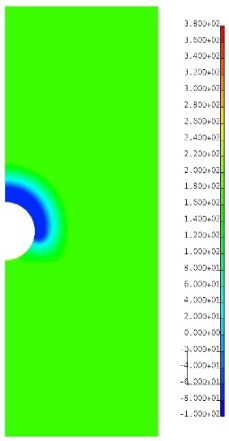
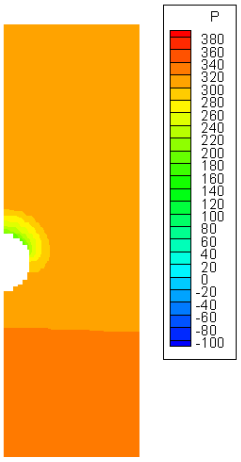
	飽和・不飽和流解析 水圧分布 (圧力水頭 m)	二相流解析 水圧分布 (圧力水頭 m)
再冠水から2年後		

図 3.3.1-62　case19b-9’（再冠水解析）の水圧分布（再冠水時：2 年後）

(g)　考察

case19b-9’ において、埋め戻し材に含まれた空気がほぼすべて水に溶解した 2 年後は、坑道周辺の圧力が 300m（=2.9×10⁶Pa）となる。この圧力の時、埋め戻し材の不飽和領域の空気が水にすべて溶けうるかについて、気体分圧と水に溶けうる最大の気体量の関係式（ヘンリーの式）を使用して確認する。

空気分圧と水に溶けうる最大の空気量に関するヘンリーの式は、以下の式で表現される。

$$p_a = K_{Ha} \times \frac{n_{sa}}{n_w}$$　　式 3.3.1-10

ここに、p_a：空気分圧（Pa）、K_{Ha}：水に溶解する空気のヘンリー定数（Pa）、
n_{sa}：1cm³ の水に溶けうる最大の空気の物質量（mol）、
n_w：1cm³ の水の物質量（mol/ cm³）

上記の式を使用して、1cm³ の水に溶けうる最大の空気の体積（30℃、標準大気圧）と圧力の関係式を求める。これを求めると、埋め戻し材の間隙 1cm³ に水が湿潤した場合、どの圧力で間隙 1cm³ に存在していた空気がすべて水に溶解するかの指標を作成できる。ただし、この指標は、埋め戻し材の間隙に湿潤する前の水は空気が一切溶解していないこと、また、水に空気が溶解しても体積変化はしないことを前提としている。

1cm³ の水の物質量n_w は、以下の式で表現される。

$$n_w = \frac{\rho_w}{M_w}$$　　式 3.3.1-11

ここに、ρ_w：水の密度（g/cm³）、M_w：水のモル質量（g/mol）

1cm³の水に溶けうる最大の空気の体積V_{sa}は、以下の式で表現される。

$$V_{sa} = n_{sa} \times \frac{M_a}{\rho_a} \qquad \text{式 3.3.1-12}$$

ここに、V_{sa}：1cm³の水に溶けうる最大の空気の体積（cm³）
ρ_a：空気の密度（g/cm³）
M_a：空気のモル質量（g/mol）

式 3.3.1-10～式 3.3.1-12 より、1cm³の水に溶けうる最大の空気の体積V_{sa}（30℃、標準大気圧）と圧力p_aの関係式を以下の式で表現できる。

$$V_{sa} = \frac{M_a \times \rho_w}{K_{Ha} \times M_w \times \rho_a} \times p_a \qquad \text{式 3.3.1-13}$$

表 3.3.1-21 に示す$K_{Ha}, M_a, M_w, \rho_a, \rho_w$の値を式 3.3.1-13 に代入すると、1cm³の水に溶けうる最大の空気の体積V_{sa}（30℃、標準大気圧）と圧力p_aの関係式を以下の式で表現できる。

$$V_{sa} = 1.4 \times 10^{-7} \times p_a \qquad \text{式 3.3.1-14}$$

表 3.3.1-21　変数の値

変数	変数の値	変数の説明
K_{Ha}	1.0×10¹⁰ Pa[20]	水に溶解する空気のヘンリー定数(60℃)
M_a	28.8 g/mol	空気のモル質量
M_w	18.0 g/mol	水のモル質量
ρ_a	1.17×10⁻³g/cm³	空気の密度(30℃、標準大気圧)
ρ_w	0.996g/cm³	水の密度(30℃、標準大気圧)

1cm³の水に溶けうる最大の空気の体積V_{sa}（30℃、標準大気圧）と圧力p_aの関係を図 3.3.1-63 に示す。

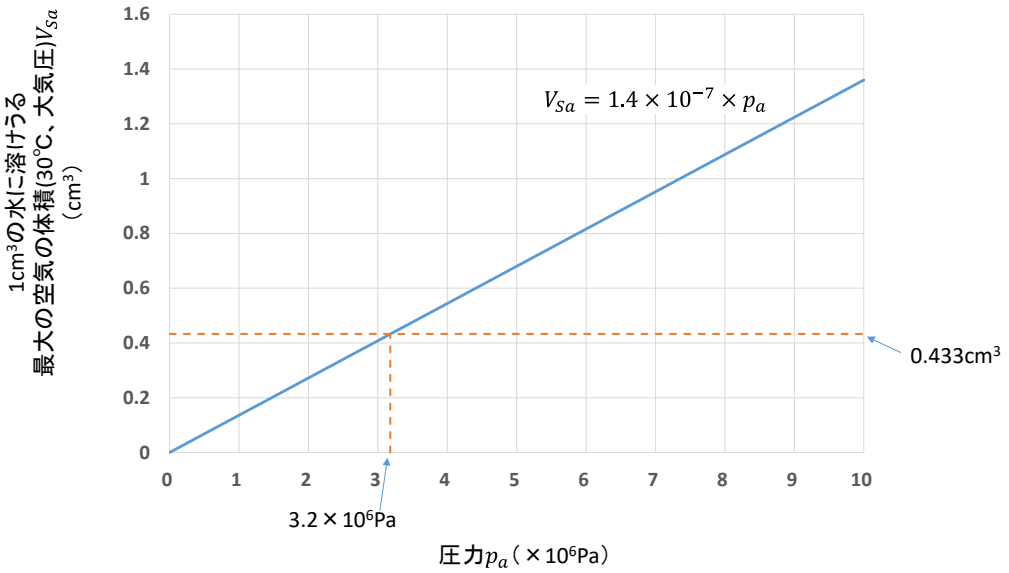


図 3.3.1-63　1cm³ の水に溶けうる最大の空気の体積 V_{sa}（30℃、標準大気圧）と圧力 p_a の関係

case19b-9’（再冠水解析）の埋め戻し材の初期水飽和度が 56.7%（=初期空気飽和度が 43.3%）なので、間隙 1cm³ に 0.433cm³ の空気が存在する。間隙 1cm³ に水が湿潤した後、0.433cm³ の空気が間隙 1cm³ に湿潤した水にすべて溶解する時の圧力は、3.2×10⁶Pa 以上となる。しかし、埋め戻し材に含まれた空気がほぼすべて水に溶解した 2 年後の坑道周辺の圧力水頭は 300mH_2O（=2.9×10⁶Pa）で、3.2×10⁶Pa 未満となっており、圧力上昇による空気の溶解量上昇で不飽和領域が消えたわけでないことがわかる。

2 年後までに埋め戻し材の不飽和領域が消えた別の要因として、再冠水前に埋め戻し材の間隙にあった空気が水に溶解し、移流によって岩盤に移動したことが考えられる。これを確認するため、水に溶解した空気量（水に溶解した空気の重量/水の重量）の分布を取ると図 3.3.1-64 に示す通りとなり、再冠水解析で空気の溶解した水が移流によって岩盤に移動していることが確認できる。

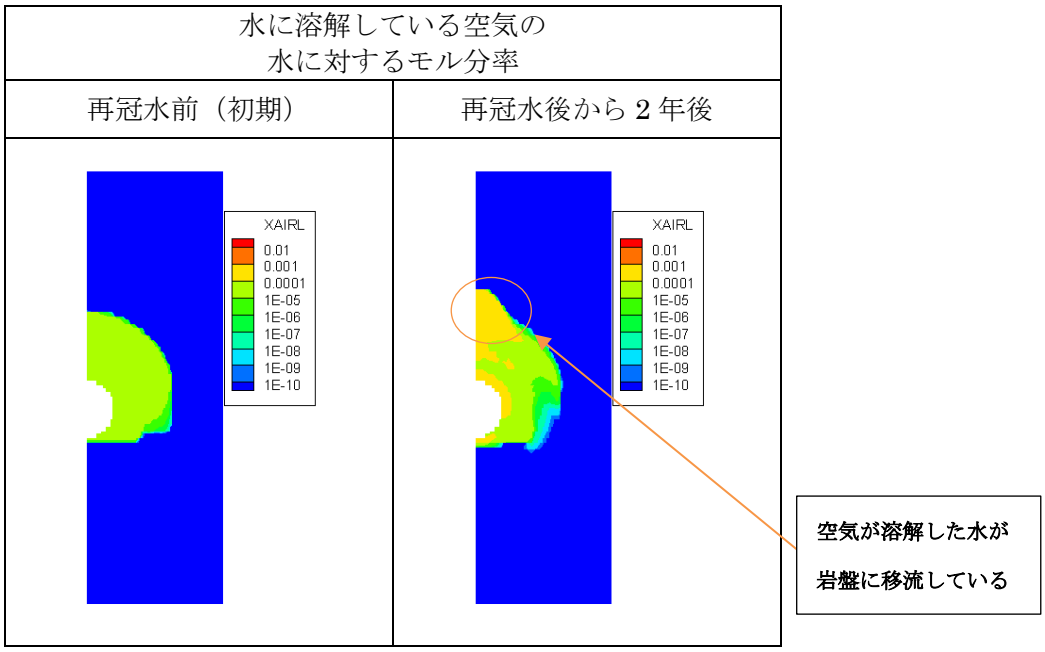


図 3.3.1-64　case19b-9’の水に溶解している空気の水に対する水に溶解した空気の重量と水の重量の比

また、二相流解析では境界条件の経時変化を考慮できないため、最終的な処分坑道深度の水圧が 500mH_2O に回復していないものの、約 5.0×10^6Pa の水圧が回復すると、埋め戻し材中の空気は地下水に全量溶解すると考えられることから、処分深度 GL-500m 程度であれば、再冠水に伴う埋め戻し土中の空気は全て地下水に溶解するため、比較的短期間（数 10 年程度）で不飽和領域はなくなると考えられる。HLW 処分においては 300m 以深の深度を対象としており、再冠水評価における不飽和領域内の空気は、水圧の回復とともに圧縮化（体積の減少）や地下水への溶解が発生するため、比較的短期間で消失する可能性が高く、この観点からは、空気の移動を考慮しない飽和・不飽和解析手法を用いても、空気の影響が少ないため、適切な評価ができると考えられる。ただし、図 3.3.1-64 に示したように、二相流解析手法では地下水に溶解した空気の移流についても評価することができる点は、飽和・不飽和解析手法よりも優れていると言える。

c　評価手法の適用性に関するまとめ

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

限界毛管圧が働く場合には、二相流解析（TOUGH2）では不飽和領域が生じないが、飽和・不飽和流解析（Dtransu-3D・EL）では不飽和領域と見なされる領域が生じる場合があることがわかった。この場合、空気の動きを考慮できる二相流解析（TOUGH2）の方がより現実的な評価を行っていると考えられるが、不飽和領域の形成に着目すると、飽和・不飽和流解析

（Dtransu-3D・EL）の方が二相流解析（TOUGH2）よりも不飽和領域を広く評価することになるため、より保守的な影響評価をしていると考えることもできる。

本検討で実施した解析では、掘削後の坑道湧水量に関して、二相流解析（TOUGH2）と飽和・不飽和流解析（Dtransu-3D・EL）で異なる値となった。これは、飽和・不飽和流解析（Dtransu-3D・EL）が境界圧力の経時変化を考慮できる一方、TOUGH2 は考慮できないという機能的な制約を有するためである。現状では掘削過程の湧水量を詳細に評価したい場合には、TOUGH2 よりも Dtransu-3D・EL を選択した方がよいと考えられる。ただし、最新版の TOUGH3 では、境界圧力の経時変化を考慮できるとされており、この場合の解析手法としての差異は生じないものと予想される。

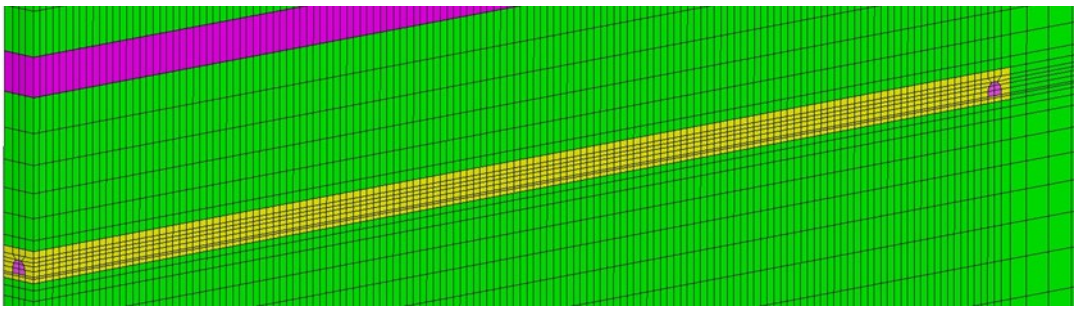
再冠水解析においては、二相流解析では不飽和領域（EDZ、埋め戻し土）内の空気が水圧回復に伴い溶解することを考慮できるものの、二相流解析手法、飽和・不飽和解析手法による評価結果の違いは顕著ではない結果が得られた。ただし、二相流解析の方が地下水に溶解した空気の移流現象を評価できる点で飽和・不飽和解析手法よりも優れていると言える。

一方、再冠水現象で考慮された地下水圧の上昇に伴う空気の溶解現象から、坑道掘削時に地下水に溶存している気体の脱ガスが発生し、脱ガス現象による不飽和領域の発生、拡散の可能性が想定される。本検討では、初期条件として地下水中の溶存ガスを考慮すると、二相流解析での収束解が得られない現象が発生したため、地下水中には溶存ガスがない条件で検討を実施した。脱ガスによる現象は幌延 URL でのメタンなど、実際に観測されている現象であることから適切な評価を実施する必要があると考えられ、二相流解析条件の見直しを含めて検討を継続する必要がある。

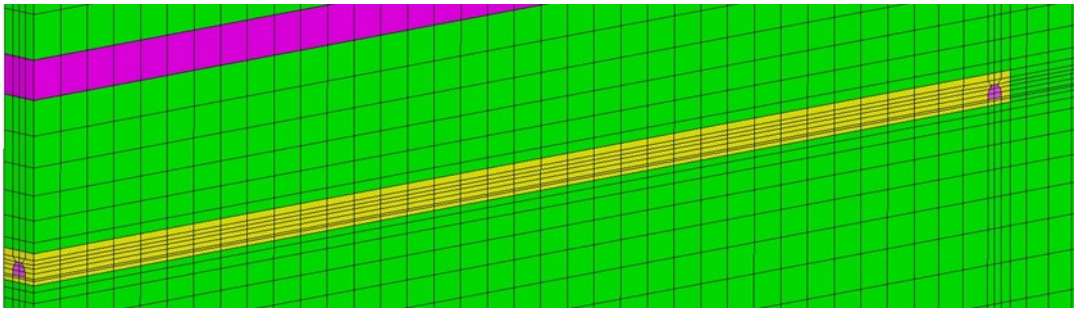
4)　処分坑道奥行方向のメッシュ分割影響の検討

平成 29 年度の検討では、処分坑道のメッシュ分割影響について、坑道奥行方向に直交する断面図でのメッシュ分割の違いと湧水量の算出精度に関して感度解析を実施し、湧水量の算出にあたって「パネルスケールモデル」のメッシュ分割は妥当であることを確認した。ここでは「パネルスケールモデル」のメッシュ分割に対する妥当性を確認するため、処分坑道の奥行方向のメッシュ分割に関する感度解析を実施した。

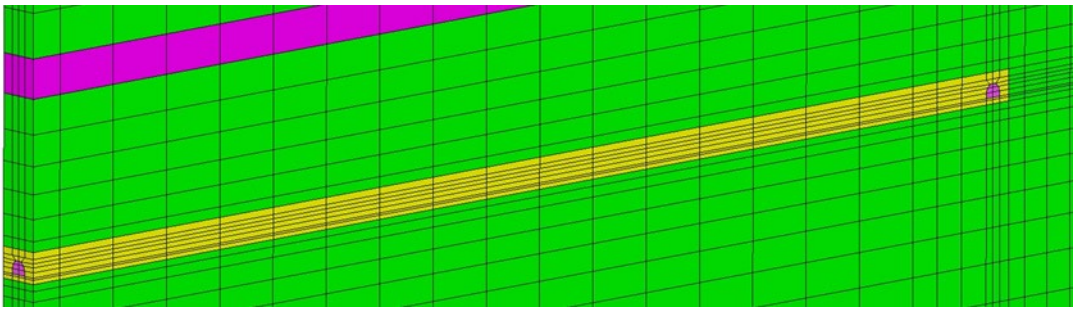
検討にあたっては図 3.3.1-65 に示すように、「Through-type」の処分坑道 1 本分を「パネルスケールモデル」から切り出した解析領域を設定し、3 ケースのメッシュ分割の異なる解析モデルを作成した。



(a) L=2.5m の細かい場合



(b) L=10m の「パネルスケールモデル」と同じ場合



(c) L=20m の粗い場合

図 3.3.1-65　「切り出しモデル」の処分坑道奥行方向のメッシュ分割の違い

3 種類の解析ケースを表 3.3.1-22 に示す。岩盤の透水係数については、3E-9(m/s)を設定して検討を実施した。境界条件を図 3.3.1-66 に示す。本検討では「地下水位が低下する条件」とな

るよう、モデル上面の境界条件に対して、降雨涵養量=0 の条件を与えている。

表 3.3.1-22　「切り出しモデル」による解析ケース(case31a-9～case33a-9)

ケース名	処分形態	状態	岩盤の透水係数	グラウト	キャップロック	手法	処分坑道メッシュサイズ
case31a-9	Through type	坑道開放	3E-9 (m/s)	なし	なし	飽和・不飽和FEM	L=2.5m（細かい）
case32a-9							L=10m（「ﾊﾟﾈﾙｽｹｰﾙﾓﾃﾞﾙ」と同じ）
case33a-9							L=20m（粗い）

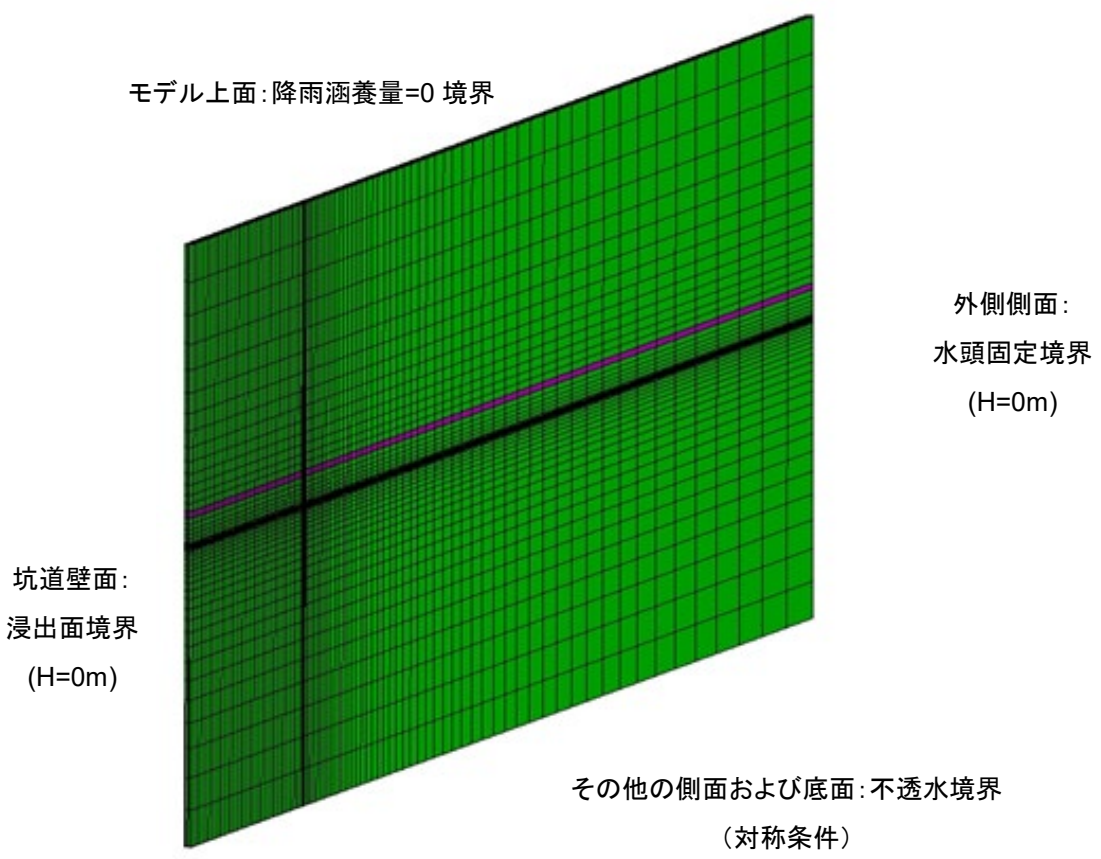
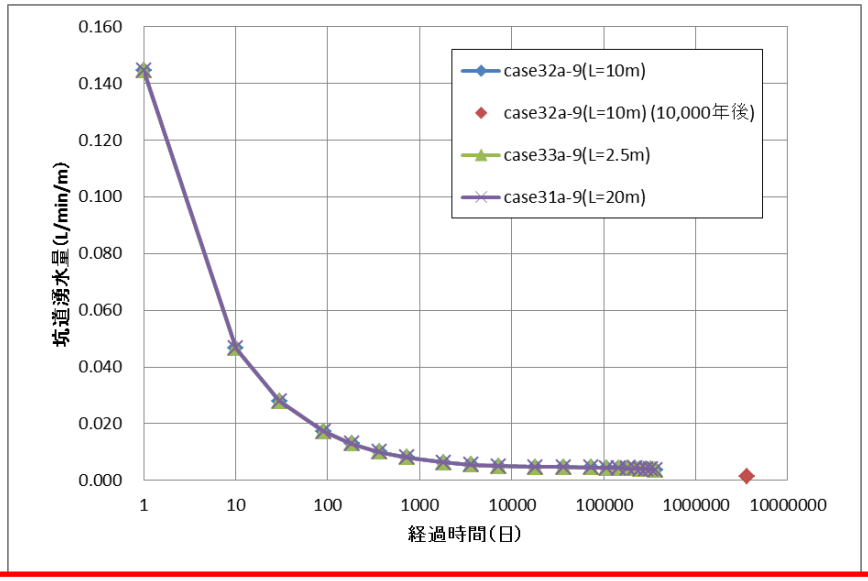


図 3.3.1-66　切り出しモデルの境界条件(case31a-9～case33a-9)

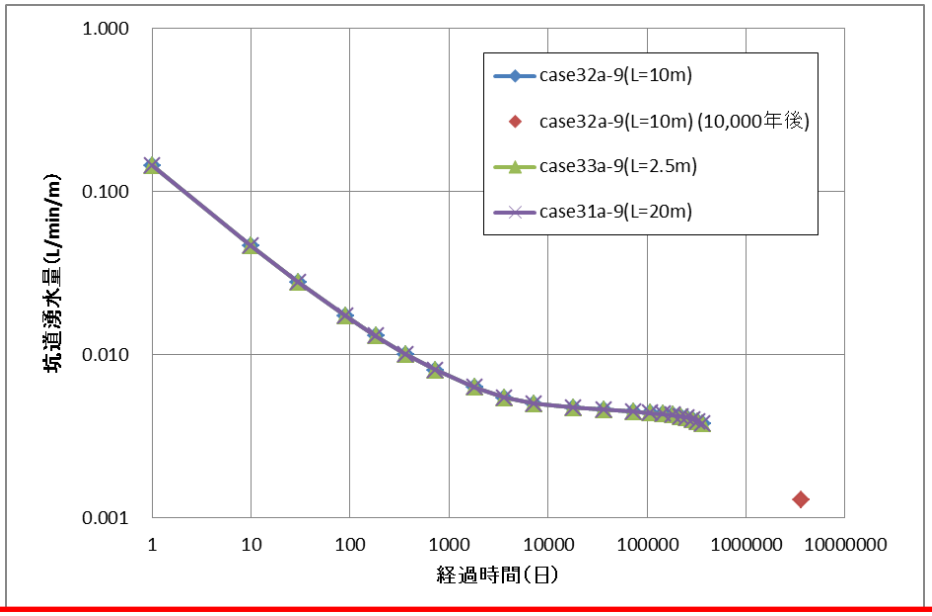
3 ケースの解析結果として、湧水量の経時変化を図 3.3.1-67 に示す。



※湧水量の絶対値については、解析条件等に依存するため取扱に注意を要する。

図 3.3.1-67　メッシュ分割の違いと坑道湧水量の経時変化の比較

3 ケースの解析結果にほとんど差がないという結果であった。湧水量を対数表示した場合についても図 3.3.1-68 に示すが、湧水量の経時変化は同じであった。



※湧水量の絶対値については、解析条件等に依存するため取扱に注意を要する。

図 3.3.1-68　メッシュ分割の違いと坑道湧水量の経時変化の比較（その２）

処分坑道の奥行方向のメッシュサイズについて感度解析を実施したが、湧水量の算出精度は

変わらなかった。これは掘削解析において、処分坑道周辺の地下水流動は処分坑道に対して 2 次元的な流動が卓越するため、処分坑道の奥行方向のメッシュサイズについては湧水量の算出精度に対する影響が小さいことによると考えられる。よって、「パネルスケールモデル」における処分坑道のメッシュサイズについては、湧水量の算出精度の観点から妥当であると判断することができる。

図 3.3.1-68 を見ると、湧水量が徐々に低下しており、定常状態に近い 10,000 年後の湧水量が非常に小さくなっているが、これは地下水位の低下に伴い、処分坑道深度まで地下水位が低下すると湧水量がさらに小さくなるためである。地下水位の低下がない場合と比較すると、地下水位が低下する場合の掘削の影響は長期に渡る可能性が高いと言える

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

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

a　地下水位が低下する場合の水理学的影響評価方法

地下水位が低下する場合の水理学的影響評価方法について以下に示す。

評価方法については地下水位が低下しない場合（飽和状態）と変わるものではなく、地表面での境界条件を変更することにより対応することができる。

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

国内の降雨涵養量の平均値は約 1mm/day（約 350～400mm/.y）と言われているが、これは地表面から表土に浸透する涵養量の平均値であり、地表の植生、勾配、標高などにより降雨涵養量の分布は異なる傾向にある。また、表層から岩盤への涵養量については、降雨涵養量と比較するとさらに小さいことが予測される。

地下水位が低下する場合、解析モデル上面からの涵養のための動水勾配は、圧力勾配が作用しない重力場での最大 1 の下向き動水勾配となる。よって、岩盤の飽和透水係数と動水勾配の関係から、岩盤の透水係数が 3E-9(m/s)の場合、可能な涵養量は最大で約 95mm/y となる。これより、地表付近から最大約 95mm/y の涵養条件に対して、坑道からの湧水量が多い場合は地下水位の低下が発生し、湧水量が少なければ地下水位は低下しない。

サイトスペシフィックな条件を考慮する場合の検討では、水理地質構造、透水性を反映した検討となるため、地下水面を形成する要因となる降雨涵養量の設定は難しく、実測された地下水位を再現できる降雨涵養量を感度解析的に設定する方法が用いられるが、本検討では「パネルスケールモデル」の上面に涵養量を考慮することにより、地下水位が低下する現象を再現する。処分形態の選定にあたっては、地下水位低下の影響がより大きくなると考えられる「Through-type」を選定した。

岩盤の透水係数が 3×10^{-9} m/s の場合、考慮可能な涵養量が約 95 mm/y であることから、4 ケースの降雨涵養量を用いて感度解析を行い、地下水位低下の違いについて比較を行った。

解析ケースを表 3.3.1-23 に示す。また、解析モデルの境界条件を図 3.3.1-69 に示す。

表 3.3.1-23　地下水位が低下する場合の解析ケース(case22a-91～94)

ケース名	処分形態	岩盤の透水係数	グラウト	キャップロック	手法	上面からの降雨涵養量
case22a-91	Through-type	3E-9(m/s)	なし	なし	飽和・不飽和FEM	0mm/y
case22a-92						10mm/y
case22a-93						30mm/y
case22a-94						50mm/y

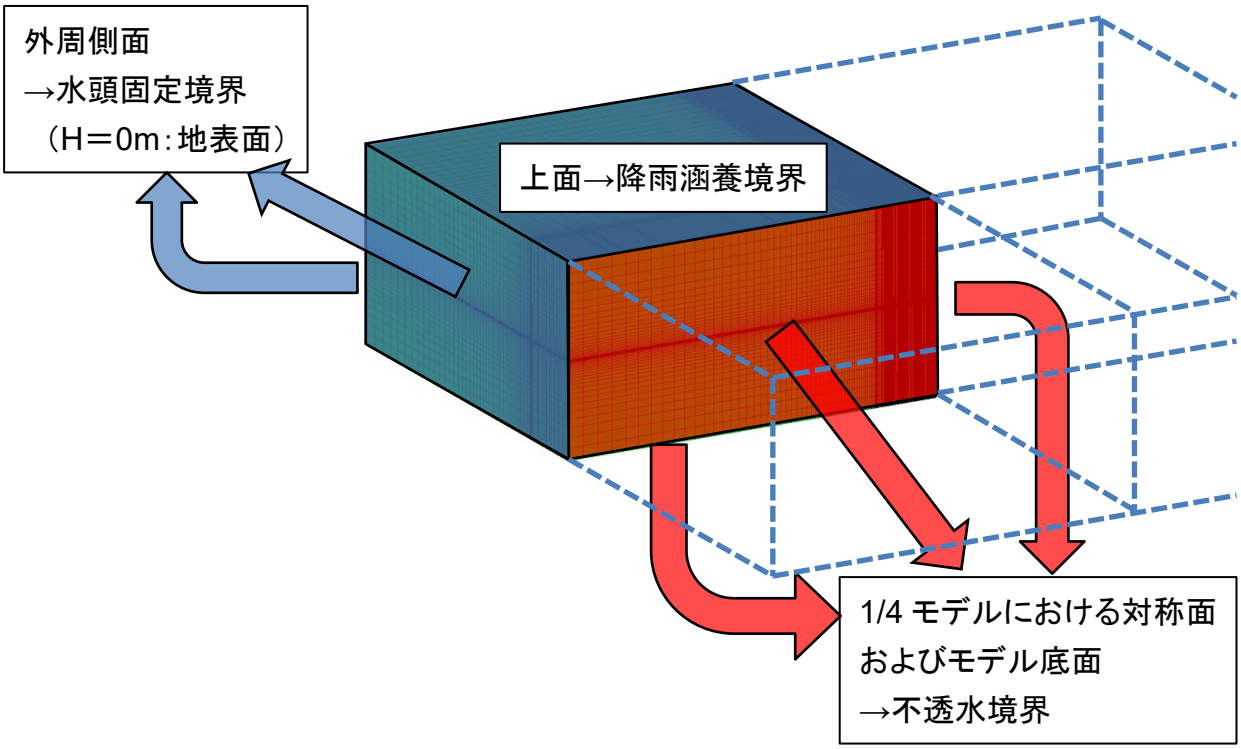
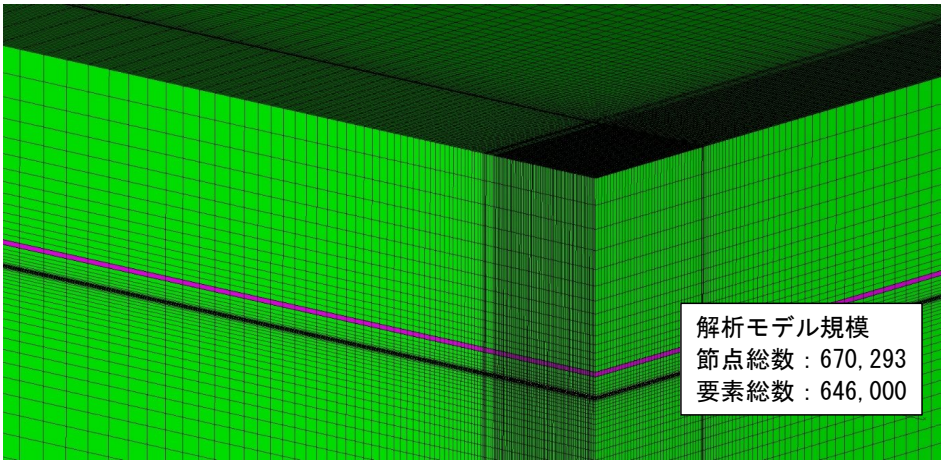
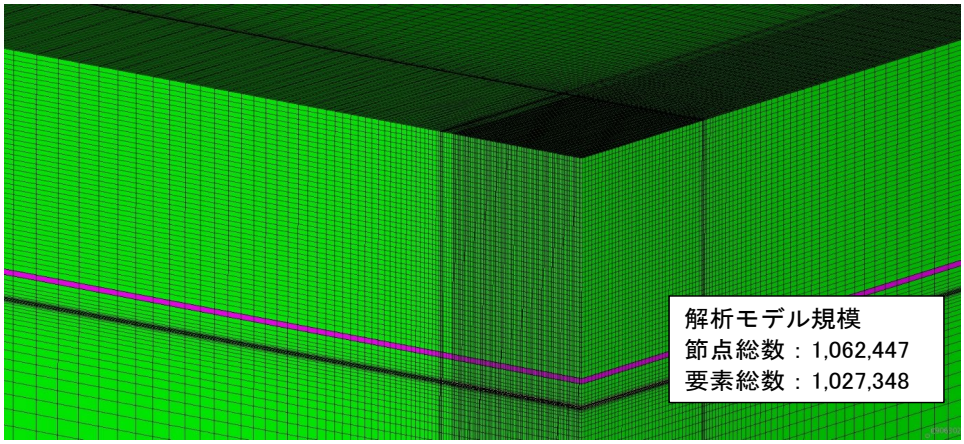


図 3.3.1-69　パネルスケールモデルにおける境界条件の設定（case22a-91～case22a-94）

検討にあたって、地下水位が低下しない条件での検討を実施した「パネルスケールモデル」による地下水位低下の解析を試みたところ、収束解が得られなかった。これは、地下水位が低下する解析モデル上部の鉛直方向のメッシュ分割が粗いことが原因と考えられたことから、解析モデルの修正を行い、地下水位が位置する可能性のある領域の鉛直方向のメッシュサイズを 10m（等分割）とした。解析モデルの比較を図 3.3.1-70 に示す。



a)　「パネルスケールモデル」鳥瞰図



b)　修正した「パネルスケールモデル」鳥瞰図

図 3.3.1-70　「パネルスケールモデル（Through-type)」の修正（case22a-91～case22a-94）

解析モデル規模が大きくなったこと、不飽和領域内を涵養する非線形問題となることから、非定常解析を行う際に時間ステップを粗くして解析した。なお、降雨涵養量の違いにより、解析時の収束性が異なることもわかった。

非定常解析による 1,000 年後までの 100 年毎の地下水位の低下状況を図 3.3.1-71 に示す。降雨涵養量に依存して、水位低下の範囲が狭くなり、地下水位の低下量も、少なくなることが示された。地下水位が低下した領域については、空気の混入により酸化雰囲気に変化し、継続する可能性があるため、閉鎖後の再冠水挙動評価によるベースラインへの回復に対する影響を及ぼすと考えられる。今後、地下水位低下時の再冠水挙動評価を実施することが必要である。

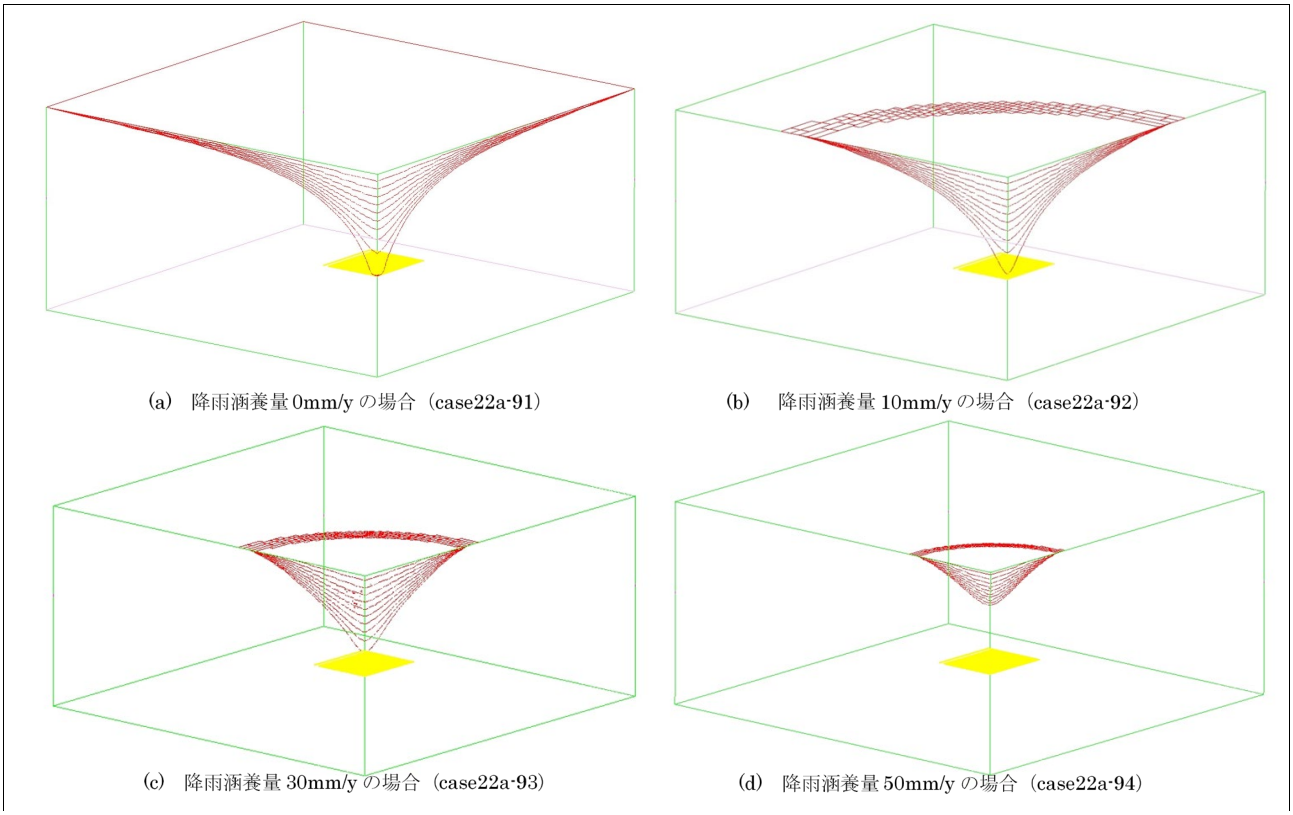


図 3.3.1-71　降雨涵養量の違いによる地下水位低下の経時変化(case22a-91～case22a-94)

解析モデル規模が大きくなった「パネルスケールモデル」による検討は感度解析の実施のための解析負荷が大きく効率が悪いことから、より簡易なモデルにより地下水位低下時の挙動を把握することを目的として、「パネルスケールモデル」からの切り出しモデルを作成した。図 3.3.1-72 にモデルを示す。解析モデルの対称性を考慮すると、大きく連続したパネルの一部に相当し、地下施設の影響が大きい場合であると考えることができる。

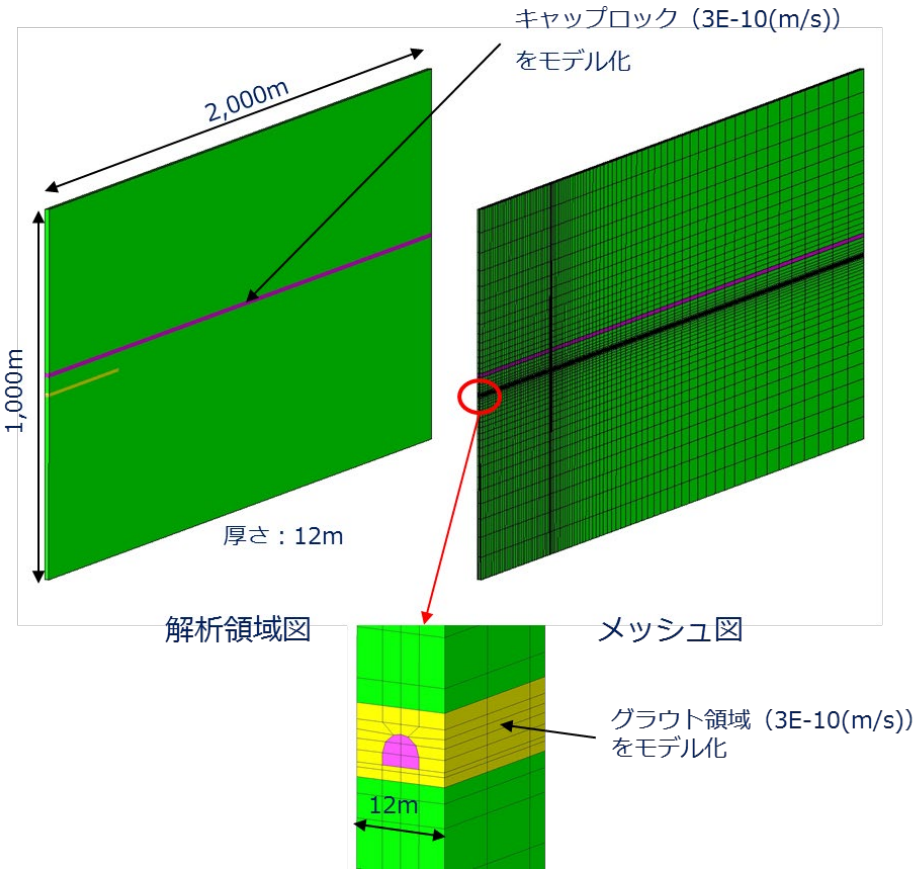


図 3.3.1-72　「パネルスケールモデル」からの「切り出しモデル」と物性値の設定

「切り出しモデル」を用いた解析ケースを表 3.3.1-24 に示す。ここでは、グラウトの効果、キャップロックの影響について把握することを目的としたため、引き込みが大きい、降雨涵養量＝0 とする解析を行った。実際には、降雨涵養量が 0 という環境はあり得ないが、降雨涵養量を考慮すると、計算負荷が大きくなることもあり、検討のためのケースとして設定した。「切り出しモデル」の境界条件を図 3.3.1-73 に示す。

表 3.3.1-24　「切り出しモデル」による解析ケース(case1a-k～case4a-k)

ケース名	処分形態	状態	グラウト	キャップロック	手法	涵養量	備考
case1a-9k	a:Through type	坑道開放	なし	なし	飽和・不飽和FEM	0mm/y（なし）	基本ケース
case2a-9k			あり	なし			グラウトの効果
case3a-9k			なし	あり			キャップロックの影響
case4a-9k			あり	あり			グラウト+キャップロックの影響

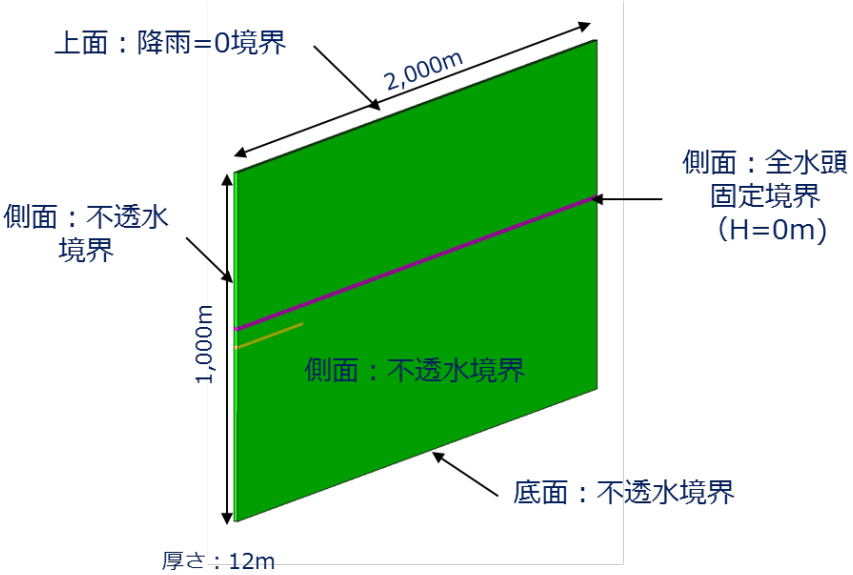


図 3.3.1-73　「切り出しモデル」における境界条件の設定（case1a-9k～case4a-9k）

解析結果として坑道湧水量の経時変化を図 3.3.1-74 に、基本ケース（case1a-9）の流量に対する各ケースの相対比率を図 3.3.1-75 に示す。グラウトの効果は掘削後の初期段階で顕著であり、長期的にも 10%程度の湧水量の低減効果があると言える。キャップロックが存在すると、湧水量が少なくなることが認められる。

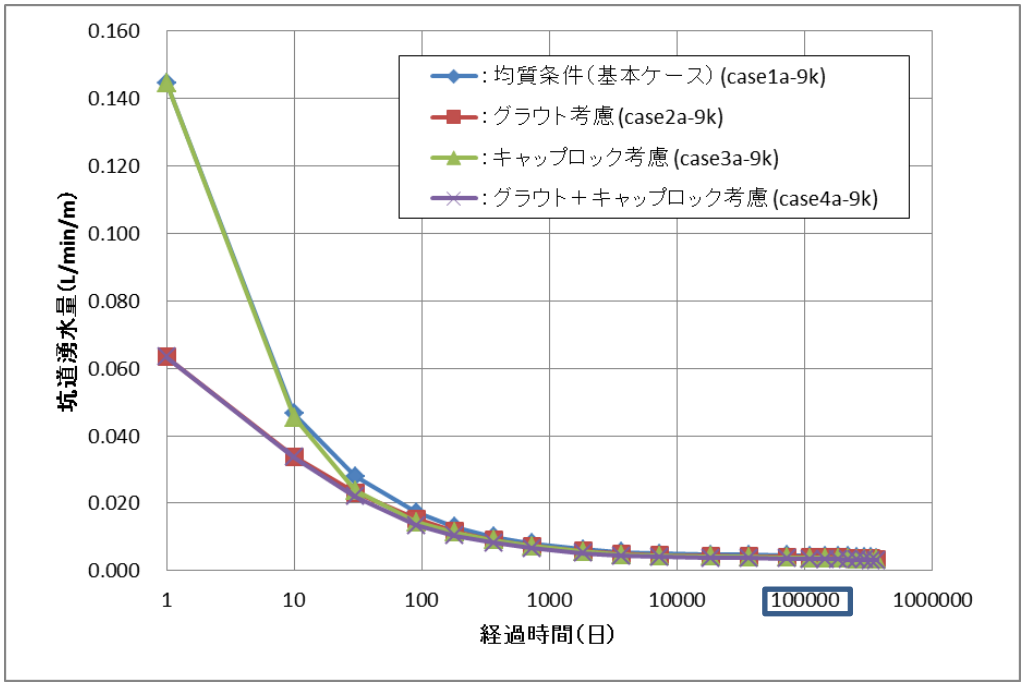


図 3.3.1-74　「切り出しモデル」解析結果の坑道湧水量の経時変化
（case1a-9k～case4a-9k）；100000 日≒274 年

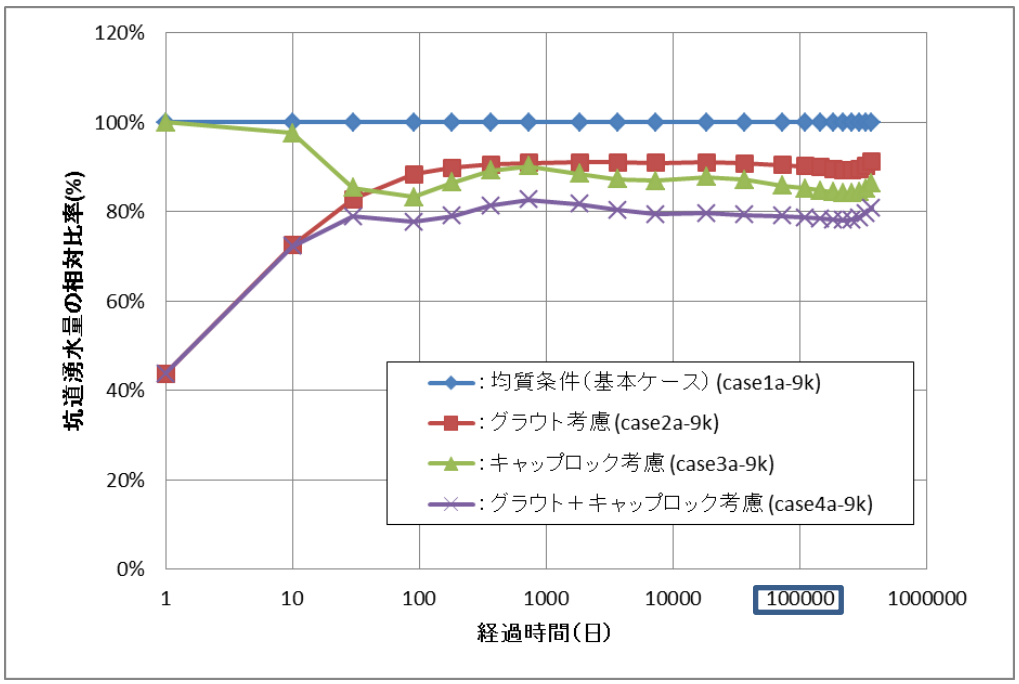
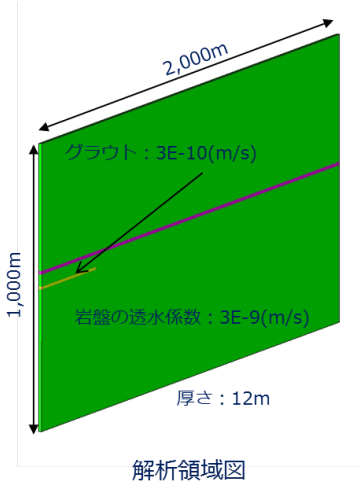


図 3.3.1-75　坑道湧水量の相対比率の経時変化
（case1a-9k～case4a-9k）；100000 日≒274 年

case2a-9k、case3a-9k、case4a-9k の地下水位低下の状況を図 3.3.1-76～図 3.3.1-78 に示す。図 3.3.1-76 より、グラウトの低透水性により湧水量が少なくなるとともに、地下水位の低下速度も基本ケース（case1a-9k）よりも遅くなった。これより、グラウトによる遮水対策は、坑道湧水量の低減だけでなく、周辺地下水の低下抑制の効果があると言える。

また、図 3.3.1-77 よりキャップロックが存在する場合（case3a-9k）には坑道からの湧水量の影響によりキャップロックと処分坑道の間に不飽和領域が発生する可能性がある。しかしながら地下水位の低下は少なかった。地下水位の低下速度には、水理地質構造の影響が大きいと考えられる。本検討においては地表面から処分場までを均一なモデルとして扱っているが、実際の地下環境での評価では、地質環境により地下水位の低下は大きく変わってくることが推測されるため、場の設定が重要であると考えられる。

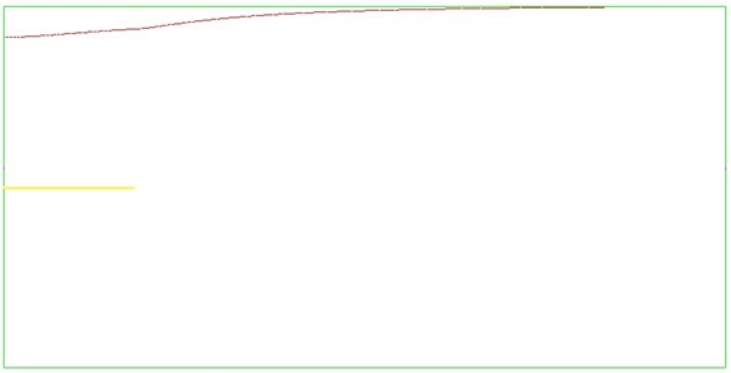
図 3.3.1-78 より、グラウトとキャップロックを考慮した場合（case4a-9k）には、グラウトの低透水性により湧水量が少なくなるため、キャップロックの下部に不飽和領域が発生しないという結果が得られた。グラウトによる坑道湧水量の低減により、水理地質構造の影響による不飽和領域の発生の可能性を低減されると考えられる。



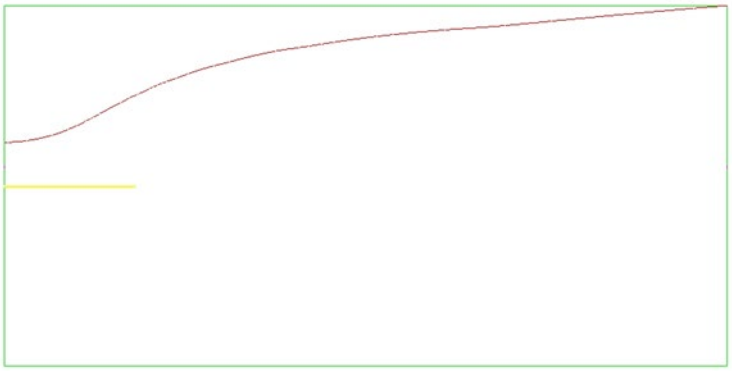
解析領域図

※降雨涵養量＝0

(a)　20 年後

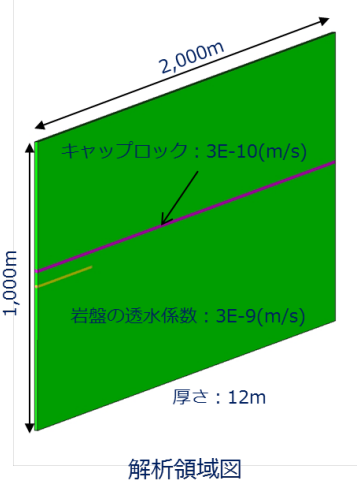


(b)　100 年後



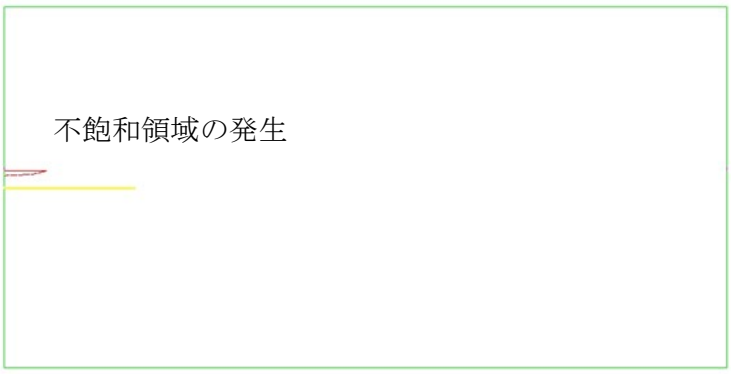
(c)　1,000 年後

図 3.3.1-76　地下水低下の経時変化（case2a-9k：グラウト考慮）

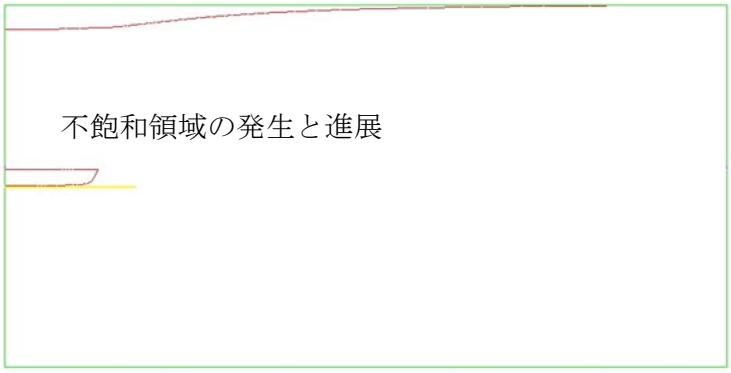


解析領域図

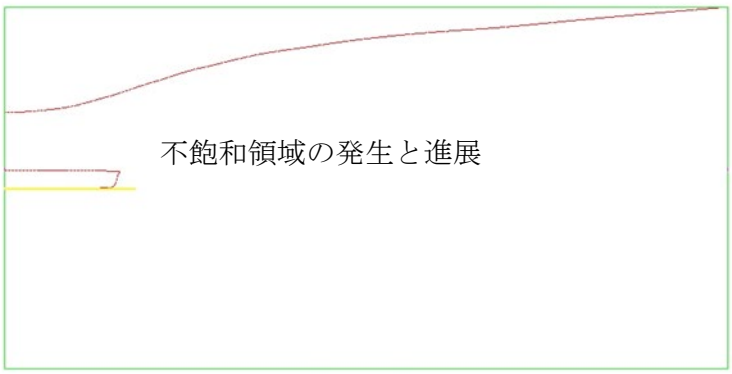
※降雨涵養量＝0



(a)　10 年後

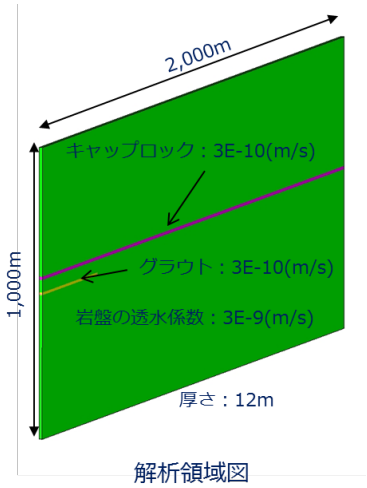


(b)　100 年後

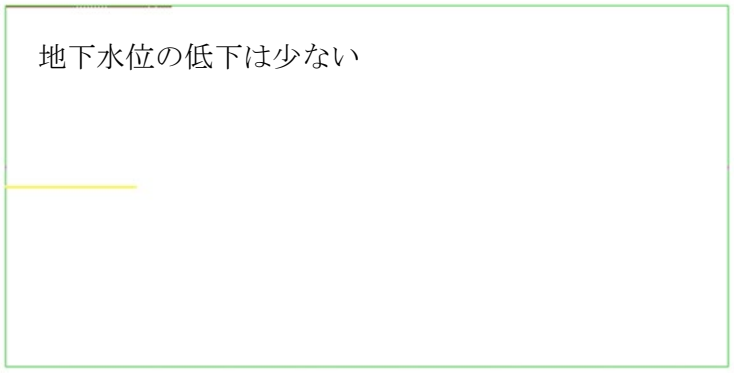


(c)　1,000 年後

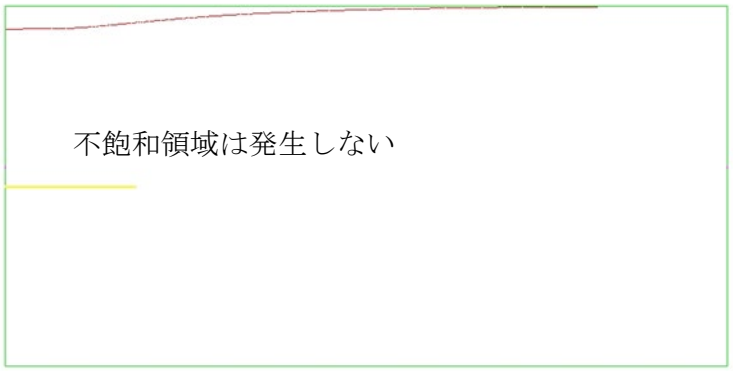
図 3.3.1-77　地下水低下の経時変化（case3a-9k：キャップロック考慮



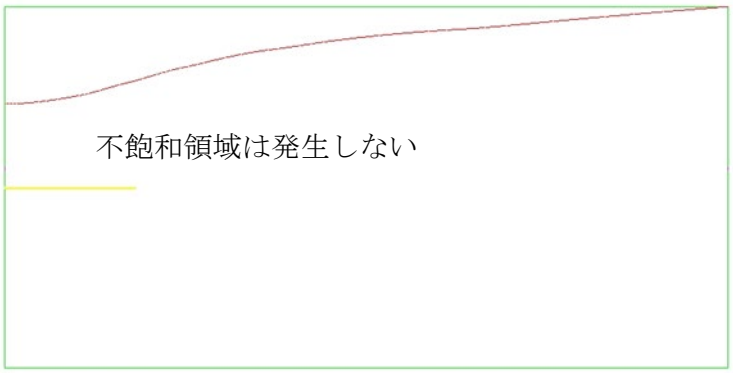
※降雨涵養量＝0



(a)　20 年後



(b)　100 年後



(c)　1,000 年後

図 3.3.1-78　地下水低下の経時変化（case4a-9k：グラウト＋キャップロック考慮）

ここでは地下水位が低下する条件に対しても、飽和・不飽和解析手法による水理学的な影響評価が可能であることを確認した。ただし、降雨涵養量を考慮した飽和・不飽和非定常解析を行う場合、不飽和領域での非線形問題の影響により解析時間が長くなる場合が多くなるため、注意が必要である。本検討では切り出しモデルを用いて検討時間の短縮を図ったが、大規模モデルを用いる場合には並列化処理など演算速度の高速化を図る必要があると考えられる。

本年度は地下水位が低下した状態からの再冠水検討していないが、再冠水に伴う非線形性の影響を含めて今後再冠水時の検討を実施する必要がある。

b　地下水流動の可視化方法の検討

坑道掘削に伴い「地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込み影響など）」を評価するためには、地下水流動についてのわかりやすい可視化が必要である。ここでは、地下水流動を可視化する方法について検討を行う。

地下水流動可視化の例としては、流線（あるいは流跡線）による方法がある。一般的には仮想の粒子の軌跡をトレースした流跡線が用いられる。流跡線による可視化の例を図 3.3.1-79 に示す。

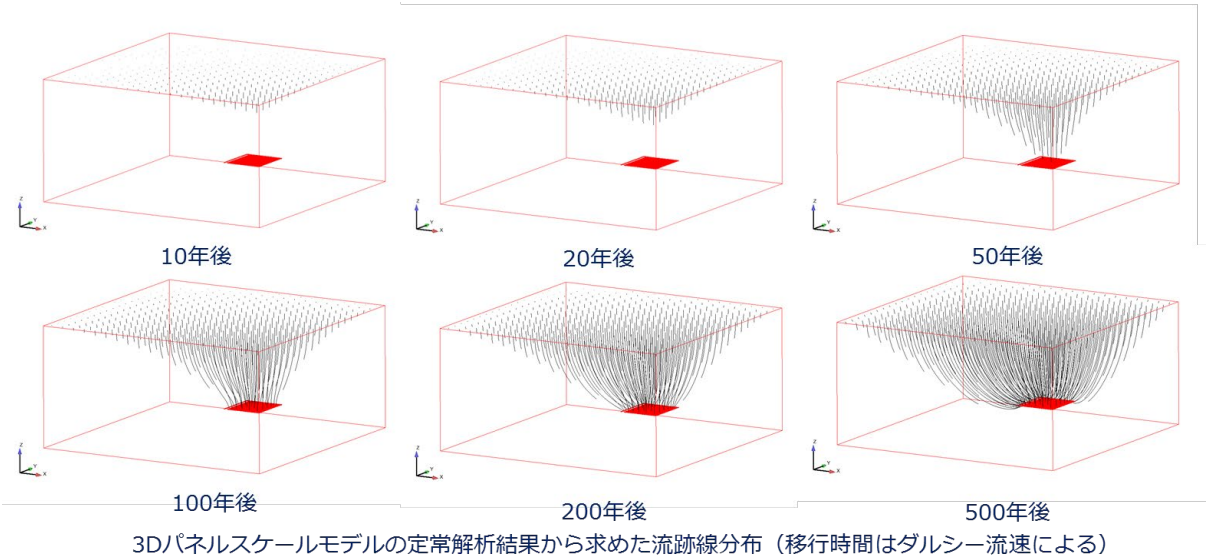


図 3.3.1-79　流跡線による地下水流動の可視化の例

図 3.3.1-79 は、解析モデル上面（地表付近）から等間隔に配置された粒子の流動場での軌跡を示したものであり、経過時間とともに掘削された処分坑道へ流動している様子が示されている。処分坑道の上部からの地下水流動が早く、処分坑道から水平方向に離れるほど地下水流動が遅いことがわかる。

ここでは、モデル上面から涵養される地下水は化学組成が異なるもの（酸化性の地下水）と想定し、異なる地下水の境界（流動フロント）の動きを可視化する方法として、流跡線を

利用した方法について検討した。可視化方法のフローを図 3.3.1-80 に示す。

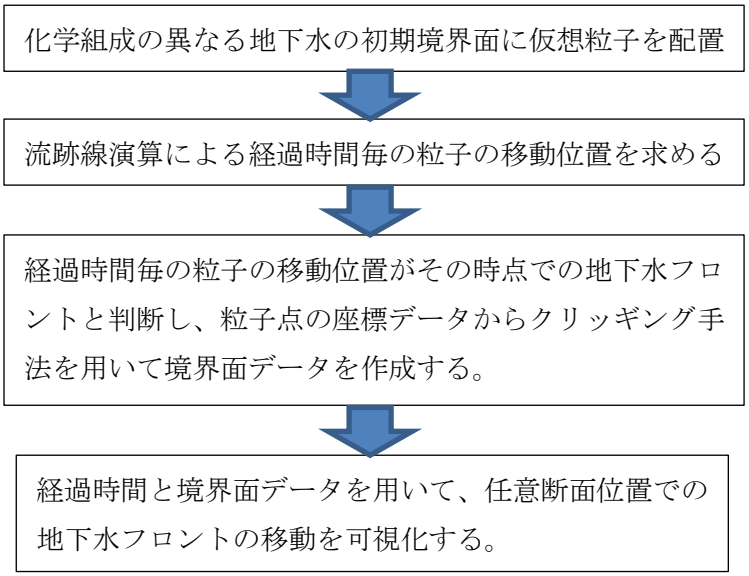


図 3.3.1-80　流跡線を用いた地下水流動フロントの可視化フロー

以下、本検討で実施した作業内容と結果について示す。

(a)　化学組成の異なる地下水の初期境界面に仮想粒子を配置

本検討では地表から涵養される酸化性の地下水の流動を可視化することを前提として、図 3.3.1-81 に示すように「パネルスケールモデル」の上面境界上にほぼ等間隔（100m）の粒子配置点を設定した。なお、解析モデルの境界付近に関しては、粒子を追加して境界付近の流動を把握できるよう工夫した。粒子点の総数は 484 点（22×22）である。

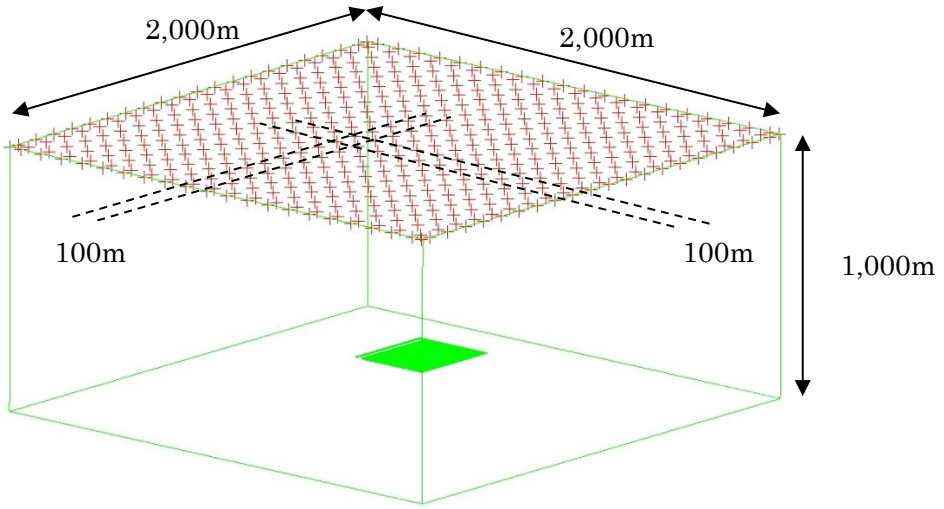
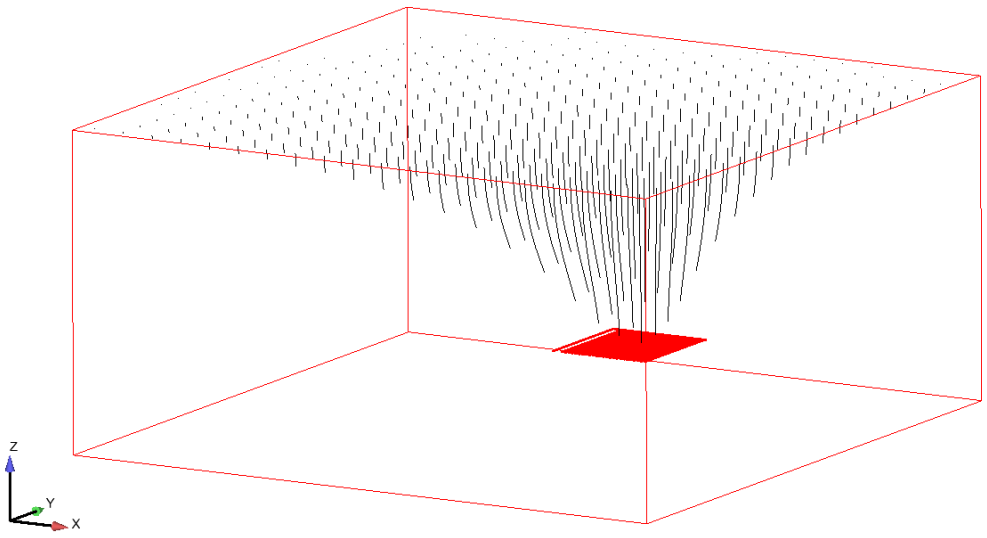


図 3.3.1-81　粒子仮想粒子の配置点

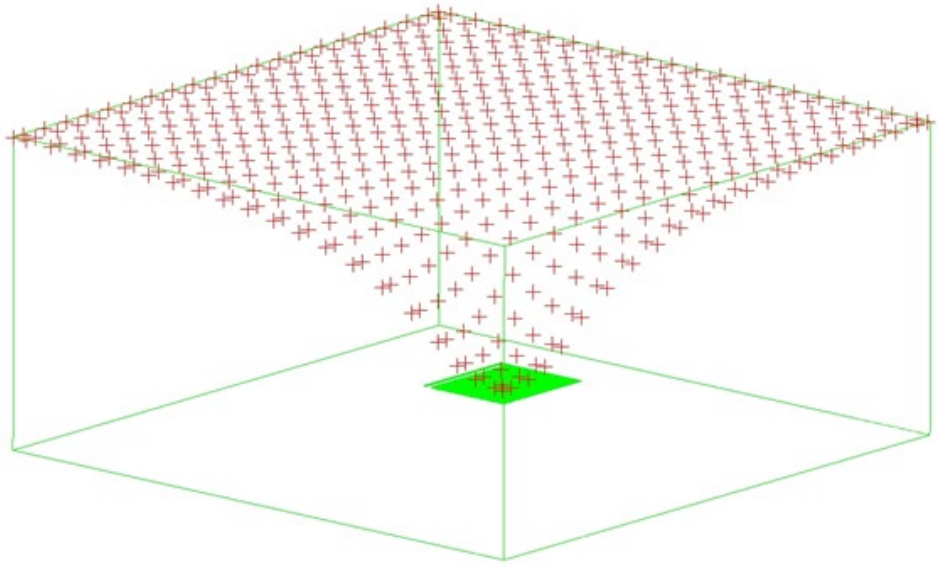
(b)　流跡線演算による経過時間毎の粒子の最終位置の把握

近年では流跡線の演算に関して、市販の図化処理ソフト等を用いて実施することが可能となっており、本検討では汎用ソフトである「EnSight」を用いて流跡線演算を実施した。

流跡線演算の最終時間を 10, 20, 50, 100, 200, 500 年（6 ステップ）と設定し、流跡線演算を実施した結果を図 3.3.1-79 に示したが、例として 50 年後までの流跡線演算結果と粒子の最終位置を抽出してプロットしたものを図 3.3.1-82 に示す。



(a)　流跡線演算結果の鳥瞰図

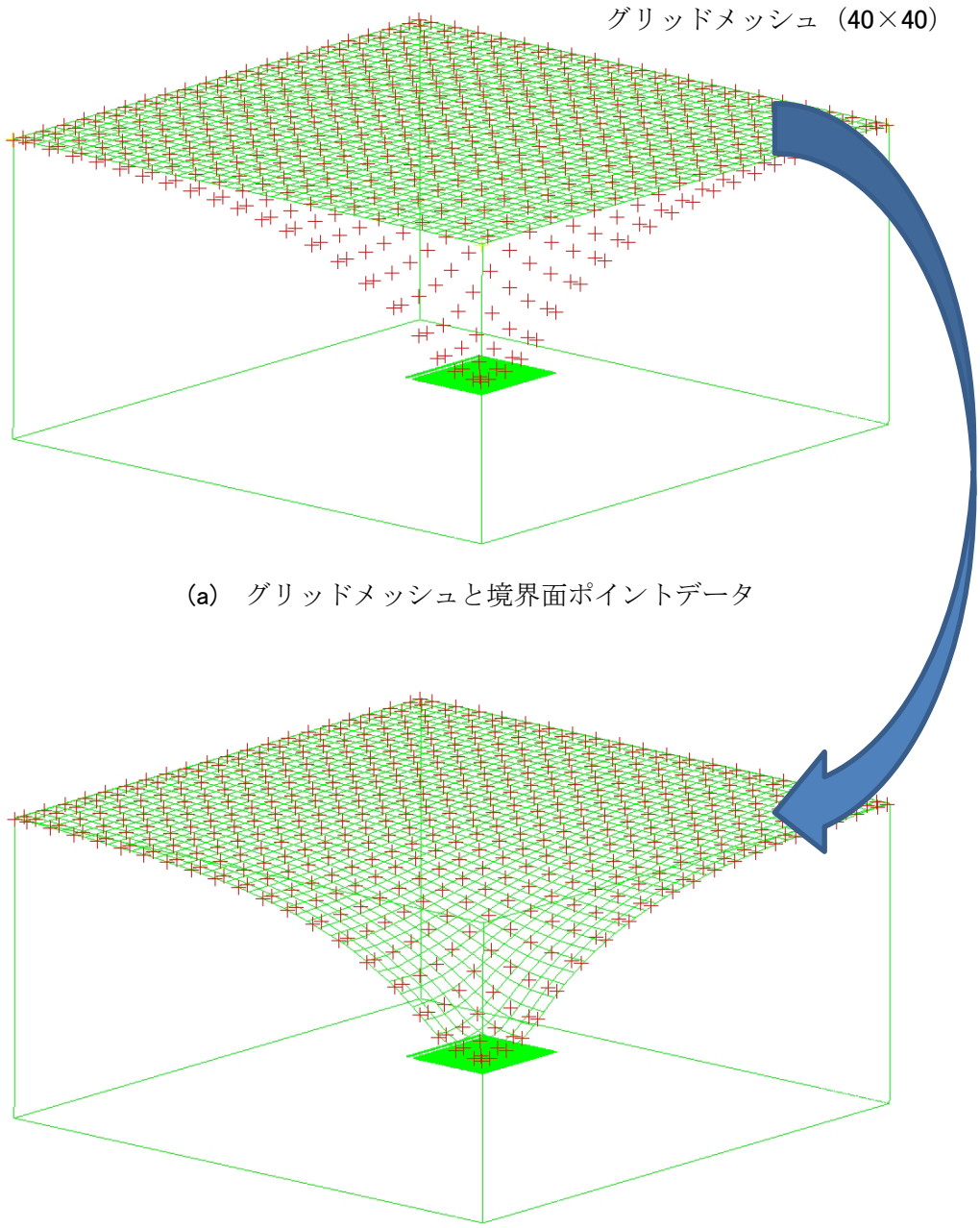


(b)　粒子の最終位置

図 3.3.1-82　50 年後の流跡線演算結果と粒子の最終位置

(c)　クリッギング手法を用いた境界面データの作成

各時間ステップでの流動フロントに相当する境界面データを作成するため、図 3.3.1-82 に示した流跡線の最終位置データ（境界面ポイントデータ）を用いて、クリッギング手法による境界面データを作成する。データの作成にあたっては、境界面データの基本として図 3.3.1-83(a)に示すようなグリッドメッシュを準備し、グリッドの格子点位置での座標をクリッギング手法により求め境界面データを作成する。作業のイメージを図 3.3.1-83 に示す。



(a)　グリッドメッシュと境界面ポイントデータ

(b)　作成した境界面データ

図 3.3.1-83　流動フロントデータの作成方法（50 年後場合の例）

(d)　　流動フロントの可視化

各時間ステップに対して作成した流動フロントの境界面を図 4.2.3 54 に示す。このようなデータを用いて流動の可視化が可能となる。

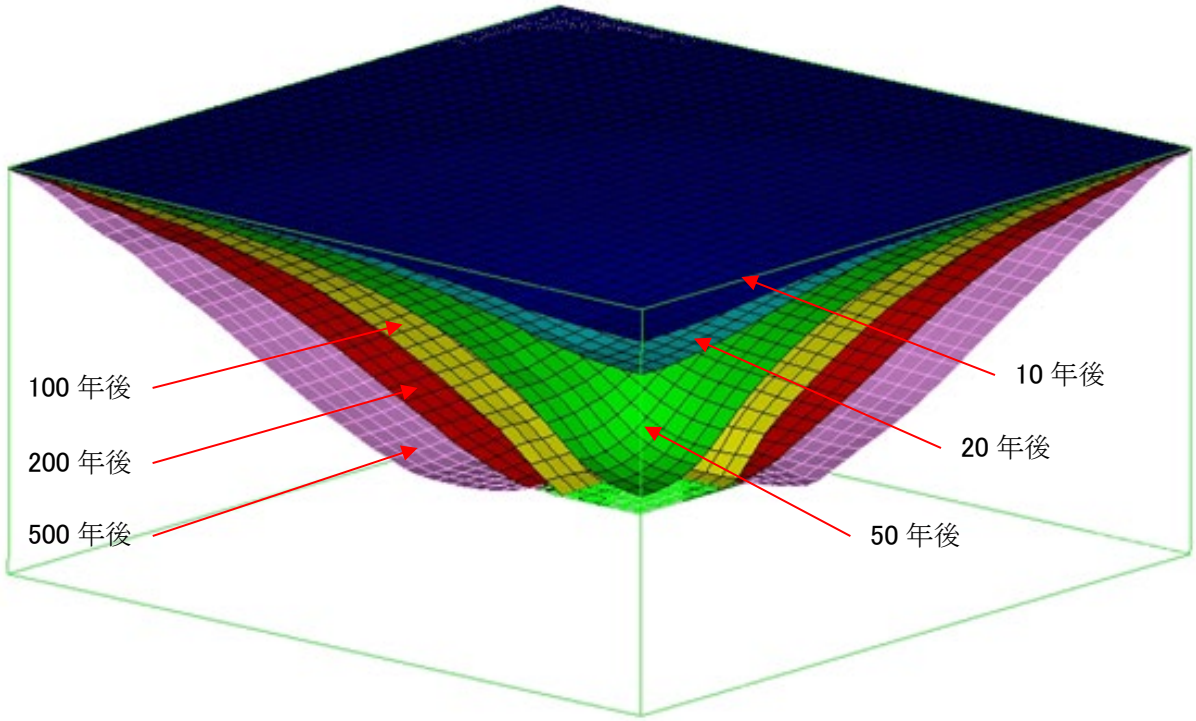


図 3.3.1-84　各時間における流動フロント（境界面データ）

本方法を用いての流跡線演算結果を用いた地表水の流動フロントの経時変化を図 3.3.1-85 および図 3.3.1-86 に示す。

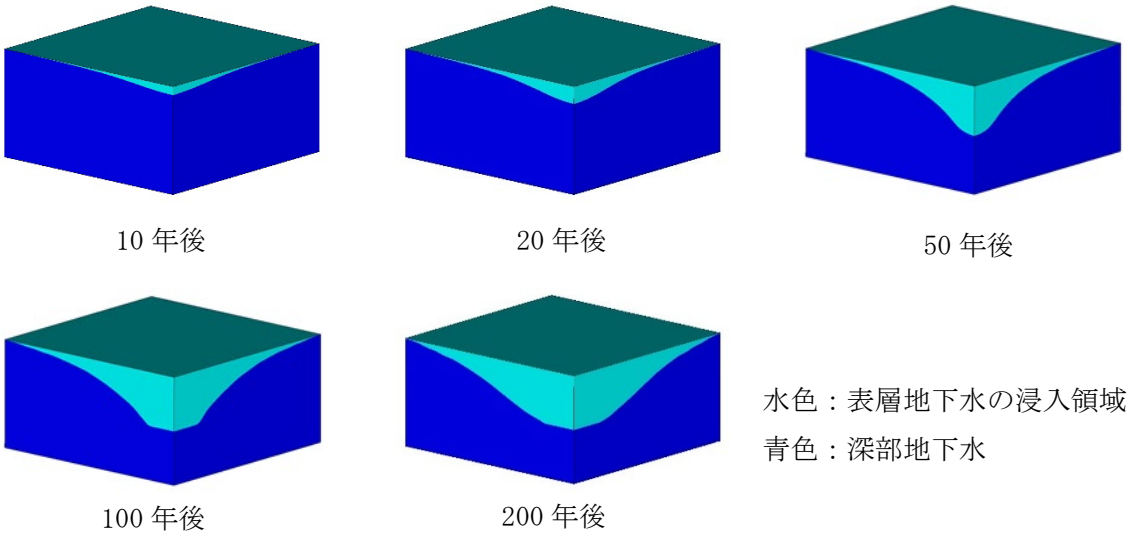


図 3.3.1-85　地下水流動フロントの経時変化に関する可視化の例（3D 表示）

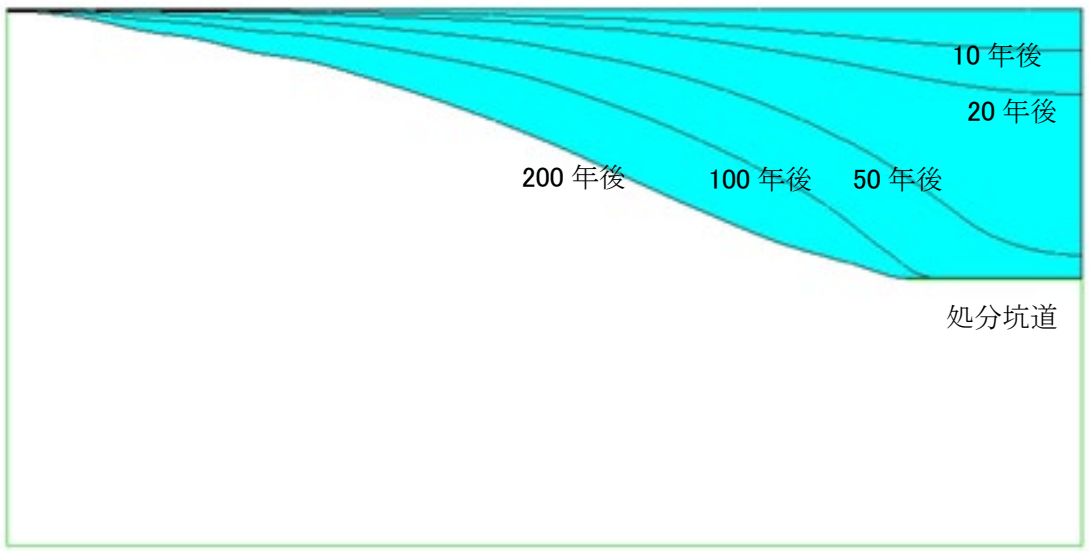


図 3.3.1-86　地下水流動フロントの経時変化に関する可視化の例（2D 表示）

地下水に溶け込んだ物質（塩分など）を対象とした物質移行解析の場合には、物質の流動状況を濃度分布で表現することができるが、移流のみを対象とした場合には分散現象による流動フロント周辺の物質濃度分布を表現することが難しい。すなわち、図 3.3.1-85 に示されるように流動フロントが明確になっているため現実的でないこと、流動フロントの平均的な位置として評価する必要があること、注意する必要がある。

解析手法としては、地下水流動のみを対象とする解析手法ではなく、水質の異なる地下水の流動状況の可視化に関しては、仮想の物質を想定し供給源から濃度 1 で物質が供給される条件での物質移行解析を行う方法が適切ではないかと考えられるが、大規模問題を対象とした物質移行問題の非定常解析は解析的な負担が大きいため、今後の課題と考えられる。

c　化学的影響評価へ引き渡すデータの検討

ここでは次のステップとして実施する化学的影響評価のために必要な水理学的なデータについて整理する。

本検討では、化学的影響評価の実施にあたり、水理学的な影響を個別に取り込むよりも評価手法に水理学的影響を考慮した手法を検討することとしている。すなわち、化学的な評価にあたっては、化学だけでなく、熱的影響、水理学的影響（物質の移流・拡散・分散）を考慮できる手法の適用である。

しかしながら、化学的影響評価では自由度が多いため、水理学的影響評価と同様の検討が難しく、簡素化されたモデル（例えば、1 次元流れ場）よる検討が基本となる。

そこで、現状では化学的な影響評価にあたって引き渡す水理学的なデータとしては、以下

のように行うこととし、必要に応じて化学的影響評価のための具体的なデータを提供するものと考える。

① 坑道掘削に伴うニアフィールドおよびファーフィールドの流動状況

→ 坑道掘削に伴う化学的影響評価のためのモデル化の参考とする。

→ 化学的な回復過程評価のための初期条件および境界条件とする。

② 再冠水時（回復過程）のニアフィールドおよびファーフィールドの流動状況

→ 化学的な回復過程評価のためのモデル化の参考とする。

d 地下水位低下の有無に関する検討のまとめ

平成 29 年度の検討で実施した「地下水位が低下しない場合」と比較するため、本検討では「地下水位が低下する場合」を想定した検討を実施した。地表面に降雨涵養量を考慮することにより、地下水位が低下する条件に対しても、飽和・不飽和解析手法による水理学的な影響評価が可能であることを確認した。ただし、降雨涵養量を考慮した飽和・不飽和非定常解析を行う場合、不飽和領域での非線形問題の影響により解析時間が掛かることになる。本検討では切り出しモデルを用いて検討時間の短縮を図った。

今後は、再冠水に伴う非線形性の影響を含めて今後再冠水時の検討を実施する必要がある。

3.3.2 化学的影響評価

本項では、前項「3.3.1 水理学的影響評価」の結果も踏まえて、回収可能性維持による化学的影響評価のため、ファーフィールド（地表～坑道）あるいはニアフィールド（坑道近傍）を対象とした解析モデルを構築する。そして物質輸送・化学反応連成解析により、回収可能性の維持による地下水の pH および ORP（酸化還元電位）の変化、ならびに支保工などの地下構成要素（セメント系材料）の劣化挙動を把握することにより、安全性への影響評価方法の検討を行う。

(1) 化学的影響評価の方針

1) はじめに

処分施設の建設により地下に坑道が掘削されると、ニアフィールドおよびファーフィールドでは、岩盤の間隙流体 [1)]の圧力に不均衡が生じ、それを解消する形で、坑道へ向かう間隙流体の流れが生じる。間隙流体の圧力は、生じた不均衡が解消するまで変化し続け、それに伴って間隙流体の流れも変化していく。回収可能性維持のため、坑道が長期間にわたって開放状態に維持されれば、最終的に流れ一定の定常状態になると予想される。

上記のプロセスにおいては、間隙流体の流れに加えて、間隙流体を媒体とした物質輸送、および地球化学的反応による状態変化が同時に進行する。ここでは、化学的状態変化が坑道の安定性やバリア性能にもたらす正負の効果を化学的影響と呼ぶことにする。

---

1) 間隙流体は専ら水（地下水）であるが、不飽和領域には同時に気体も存在する。また、地下水に気体成分が溶解している場合もある。

本項では、回収可能性維持による化学的影響として懸念される事項を列挙し、これらを定量的に評価するために考慮すべきメカニズムと、本年度の検討方針について述べる。

2)　化学的影響として懸念される事項

回収可能性維持による化学的影響として、次の 3 つの事項が懸念される。

a　坑道への地下水の引き込みによる岩盤や支保工への影響

坑道が長期間に渡って開放状態に維持されることにより、支保工においては、坑道へ流入する地下水によって吹付けコンクリートの溶脱が進行し、坑道の安定性が損なわれる恐れがある。

また、坑道に向かって元々の組成とは異なる地下水が移動してくることにより、坑道周辺の母岩の間隙水に pH および ORP の変化が起こり、これらが核種の母岩あるいはコロイドへの収着性に影響を及ぼす可能性がある。加えて、これら pH および ORP の変化の影響が、坑道を埋め戻した後も長期間残留する可能性も考えられる。

b　開放坑道を介した空気成分の供給による支保工や母岩への影響

開放坑道に空気が持ち込まれることにより、その成分である酸素や二酸化炭素が支保工へ供給され、鋼材の腐食が進行し、坑道の安定性が損なわれる恐れがある。

また、酸素や二酸化炭素が支保工を介して岩盤へと供給されることにより、間隙水に pH および ORP の変化が起こり、これらが核種の母岩あるいはコロイドへの収着性に影響を及ぼす可能性がある。加えて、これら pH および ORP の変化の影響が、坑道を埋め戻した後も長期間残留する可能性も考えられる。

c　開放坑道への乾燥環境の持ち込みによる支保工や岩盤への影響

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

3)　解析モデルにおいて考慮されるべきメカニズム

先に挙げた懸念事項について数値解析により定量的評価を行う場合、物質輸送と化学反応とを同時に考慮できるように、水理―熱―化学を連成させた解析モデルが必要になる。ここでは、連成を考慮した解析モデルにおいて考慮されるべきメカニズムについて述べる。

a　間隙流体の移動

地下深部の岩盤中では、水（地下水）が主要な間隙流体であると考えられるため、この移

動のメカニズムを考慮する必要がある。ただし、地下水には気体が溶存しており、地下深部ではその量が相当なものになる場合もある。その場合、坑道掘削によって空洞周辺の圧力が低下すると、溶存気体が気泡となり、それが連結して気体の流れが生じる可能性があることに留意する必要がある。

岩盤の間隙流体の移動は、流体の圧力差、重力ポテンシャルおよび流体の密度差に起因する浮力によって生じると見なしてよい。岩盤が多孔質体で変形がない場合、間隙流体の流れは次のダルシー則で表される。

$$\boldsymbol{q_\alpha} = -\frac{k k_\alpha}{\mu_\alpha}\nabla(p_\alpha - \rho_\alpha g z) \qquad \text{式 3.3.2-1}$$

ここで、$\boldsymbol{q_\alpha}$は相αのフラックス（ダルシー流速）、kは多孔質体の絶対浸透率、k_α，μ_α，p_α，ρ_αは、それぞれ相αの相対浸透率、粘性係数、圧力および密度であり、gは重力加速度である。

流体の密度差は、気相・液相の違い、流体の温度差、流体に溶解する物質量の差、あるいは流体を構成する化学成分の差などによって生じる。

b　流体を媒体とした物質輸送

岩盤中の間隙流体の移動に伴って、流体を媒体とした（流体に溶解した）物質の輸送が生じる。この物質輸送に係るメカニズムは、移流、拡散および分散であり、それにより生じるフラックスは次式で表される。

$$\boldsymbol{\Omega}_j^\alpha = (\boldsymbol{q}_\alpha - \varphi s_\alpha \boldsymbol{D}_\alpha \cdot \nabla)\Psi_j^\alpha \qquad \text{式 3.3.2-2}$$

ここで、$\boldsymbol{\Omega}_j^\alpha$は相$\alpha$に溶解した物質$j$のフラックス（単位断面積あたりの流量）、$\boldsymbol{q_\alpha}$は相$\alpha$のフラックス（ダルシー流速）、$\varphi$は多孔質体の空隙率、$s_\alpha$は相$\alpha$の飽和度，$\boldsymbol{D}_\alpha$は移流分散テンソル、そして$\Psi_j^\alpha$は相$\alpha$に溶解した物質$j$（正確には、化学反応における親種$j$の濃度）である。

なお、移流分散テンソル$\boldsymbol{D}_\alpha$は、次式で表される。

$$\boldsymbol{D}_\alpha = \tau D_m \boldsymbol{E} + \alpha_T v \boldsymbol{E} + (\alpha_L - \alpha_T)\frac{\boldsymbol{v}\boldsymbol{v}}{v} \qquad \text{式 3.3.2-3}$$

ここで、τは屈曲度、D_mは分子拡散係数、$\boldsymbol{E}$は単位行列、α_Lは縦分散長、α_Tは横分散長、$\boldsymbol{v}$およびvは間隙流速ベクトルとその大きさである。

なお、拡散は固体内でも生じる現象であるが、ここでは流体を介した物質移動の一メカニズムとして記載した。

c　化学物質の収脱着

流体に溶解した化学物質は、岩盤や支保工と収脱着し、物質移行においてはこれが遅延効果として現れる。収脱着のメカニズムには様々なものがあるが、代表的なものとしてイオン吸着、吸着平衡などが挙げられる。

d　種々の化学反応

種々の化学反応は、化学量論係数と化学物質量を用いて、下記のように表すことができる。

$$A_r \leftrightarrow \sum_{i=1}^{n_s} \nu_{ir} A_i \qquad \text{式 3.3.2-4}$$

ここで、A_rは反応生成物、n_s は反応物質の数、ν_{ir}は化学量論係数、A_iは反応物質である。

4)　検討方針

a　検討対象とする事項

本年度は、先に挙げた化学的影響として懸念される事項のうち、坑道への地下水の引き込みによる岩盤や支保工への影響について、数値解析による検討を行うこととした。具体的には、地下水の流れと地球化学的反応を単純化した一次元モデルによる検討を行うこととした。

なお、開放坑道を介した空気成分の供給による支保工や母岩への影響と、開放坑道への乾燥環境の持ち込みによる支保工や岩盤への影響については、モデルを単純化することが困難であり、ひいては数値解析の負荷が非常に高くなると予想されることから、今年度は今後の検討に備えた具体的な解析手順の検討を行うこととした。

b　考慮するメカニズム

本年度の検討では、先に挙げた考慮されるべきメカニズムを全て考慮することとした。ただし今年度は、化学物質の吸脱着についてはパラメータの設定が複雑であることから考慮していない。また、熱については一定温度下での検討を行い、熱の影響については検討の対象とはしなかった。

c　解析モデルの次元

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

(2)　解析モデルの構築と解析条件の設定

1)　解析コード

地盤中の流体流れによる物質輸送と地球化学的反応を連成させた解析コードとして様々なものが存在している。地球化学的反応の解析コードとしては、豊富な機能を有する PHREEQC[21]が主流となっており、これを利用した物質輸送との連成解析コードもいくつか存在する。代表的なものとして PHAST[22]があり、地層処分分野では第 2 次 TRU レポート[23]の検討で使用された PHREEQC-Trans[24]が挙げられる。

しかし、これらは水の飽和流が扱えるのみであり、飽和・不飽和流を扱うことはできない。PHREEQC と飽和・不飽和流との連成解析コードで入手可能なものは、HYDRUS 1D/2D/3D とその拡張モジュールである HP 1/2[25]に限られている。これらはソースコードが非公開であったり、公開版は扱えるモデルの次元が一次元のみであったりする。

地球化学的反応の部分に PHREEQC を使用していない同種の連成解析コードとしては、HYDROGEOCHEM [26]、TOUGHREACT [27]、PerCrunchFlow[28]、PFLOTRAN[29][2)]などが挙げられる。これらのうち、地層処分分野での利用事例が多いのは TOUGHREACT であるが、同ソフトはプロプライエタリ・ソフトウェアであり、ソースコードは公開されていない。また、流体流れの解析部分は TOUGH2 をベースとしており、同プログラムの作りが古いために、データセットの作成が容易でないという欠点がある。

上記のうち、PFLOTRAN は、三次元多孔質媒体中の多相流、化学反応、吸脱着、熱輸送等を考慮可能な比較的新しい連成解析コードである。PFLOTRAN の特徴として、次のようなものが挙げられる。

- 超並列計算が可能であり、計算資源を用意できれば、連成解析としては大規模なモデルの計算を実用的な速度で行うことができる。
- 数値解析の基盤（フレームワーク）として、オープンソースの PETSc[3)]を採用しており、数値解法の信頼性と高速性を両立させている。
- オープンソースであり、利用者が自由に改変することができる。
- コードは Fotran 2003 / 2008 で書かれており、全面的にオブジェクト指向プログラミング（OOP）を採用している。これは、境界領域の科学者にとって使いやすいものにし、コードの保守性を高めるためであるとしている。
- 数値解法は有限体積法（FVM）で、構造格子、非構造格子の両方に対応している。
- 多孔質体中の間隙流体の流れとして、単一相（水）の飽和・不飽和流、二相流（気体と液体）、並びに水と CO_2 を対象とした多相流を取り扱うことができる。機能的には TOUGH2 とほぼ同等[4)]である。

[2)] 英語で f の前の p が無音となるのは、ドイツ語起源の単語に限られるので、これは”pea-flotran”のように発音するのが妥当と思われる。

[3)] Portable Extensible Toolkit for Scientific Computation の略であり、発音は”pet-see”である。Argonne National Laboratory により開発が続けられている数値計算ライブラリであり、MPI (Message Passing Interface) による並列計算が可能である。

[4)] PFLOTRAN の二相流および多相流解析機能は、TOUGH2 を強く意識して作成されており、ほぼ同等である。

- 間隙流体の流れ、熱（エネルギー）輸送を併せて考慮することができる。
- 地球化学的反応としては、平衡計算に基づく液相種のスペシエーション、鉱物の溶解・沈殿反応（速度論）、イオン交換反応、等温吸脱着反応、微生物反応、核種崩壊などを取り扱うことができる。機能的にはPHREEQCに近い[5]ものを有する。
- 地球化学的反応は、飽和流あるいは二相流との連成解析が可能であり、その場合、多成分流れの解析が可能である。また、適切な熱力学データベースを用意すれば、熱を考慮した地球化学的反応解析も可能である。

本検討では、今後モデル規模を拡大したり、様々なメカニズムを考慮した検討を行ったりする可能性があることから、大規模並列計算に対応しており、解析できる事象が多く、かつ今後の発展性が望めるPFLOTRANを採用することとした。

2)　解析に必要なパラメータ

a　間隙流体の移動関連

PFLOTRANは、多孔質媒体中の飽和・不飽和浸透流、二相流（気体および液体）並びに多相流解析の機能を有する。飽和・不飽和浸透流および二相流に係る主要なパラメータは、表3.3.2-1の通りである。

表 3.3.2-1　間隙流体の移動に係るパラメータ

絶対透過度（飽和時）	流体の密度
飽和度―相対透過度の関係	流体の粘性係数
飽和度―流体圧力の関係	間隙率

b　物質輸送関連

PFLOTRAN は、多孔質媒体中の流体流れに伴う移流分散解析の機能を有する。移流分散に係るパラメータは、表 3.3.2-2 の通りである。

表 3.3.2-2　溶質の移流分散に係るパラメータ

溶質拡散係数	縦分散長
間隙率	横分散長（二次元以上）
屈曲度	

c　地球化学的反応関連

PFLOTRAN は、物質輸送が生じる条件下での地球化学的反応解析の機能を有する。地球化学的反応の解析には、化学物質に関する基本的な情報のほか、化学反応に係る熱力学デー

[5] PHREEQCにあってPFLOTRANにない機能として、固溶体の溶解・沈殿、Pitzerモデル、SITモデルなどがある。

タが必要になる。地球化学的反応解析に必要なパラメータのうち、主要なものは表 3.3.2-3 の通りである。なお、同表で背景色の付いた項目は、PFLOTRAN では熱力学データベースとして入力する。

表 3.3.2-3　地球化学的反応に係るパラメータ

化学組成	化学反応の量論係数
分子量	化学反応の平衡定数
式量（モル質量）	速度論係数
モル体積	鉱物の比表面積

3)　ファーフィールドモデル

ここでは、坑道への地下水の引き込みによる岩盤や支保工への影響と、再冠水後の地下水組成の回復を検討するための、地表から坑道までを含む一次元ファーフィールドモデル（以後、1D-FF モデルと略記する。）について解説する。

a　モデルの構造

図 3.3.2-1 に、1D-FF モデルの構造の概念図を示す。

1D-FF モデルは、地表から 500m 下の処分坑道壁面までを鉛直一次元でモデル化したものである。下端の処分坑道の近傍には、支保、EDZ、グラウト領域がモデル化されており、これらの幅（一次元モデル上の長さ）は水理解析での設定と同一である。なお、本年度はグラウトの影響に関する検討を実施しないため、この領域の物性は岩盤と同一とした。

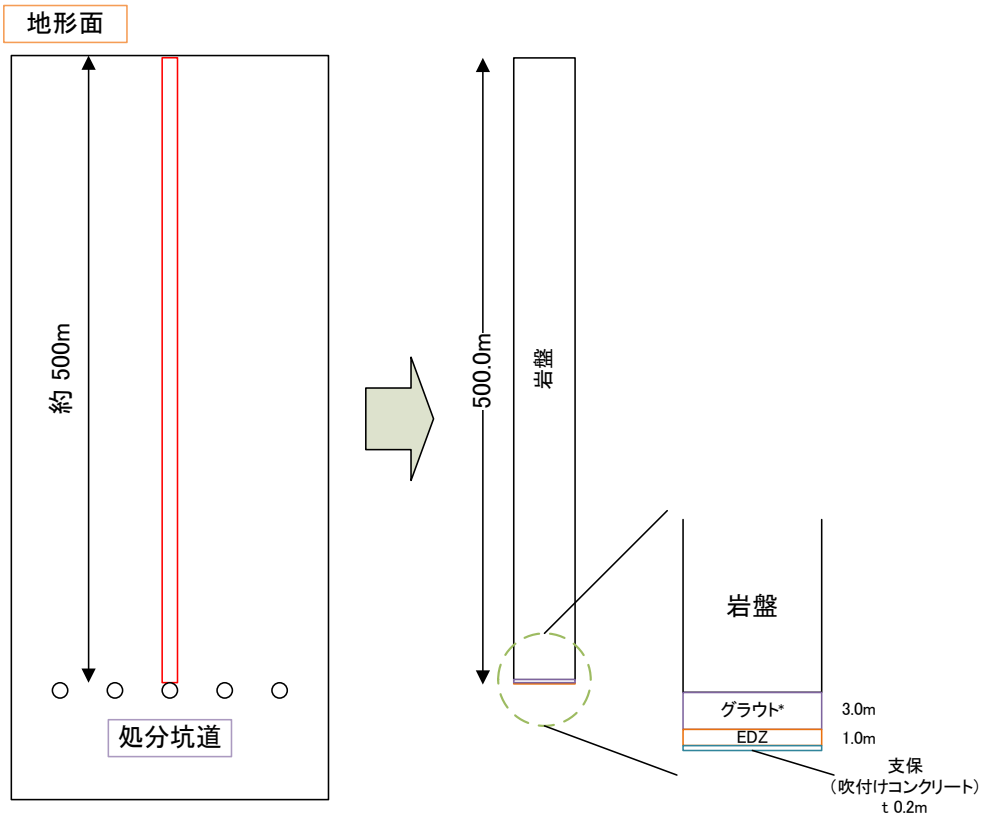


図 3.3.2-1　ファーフィールドモデルの概念図

1D-FF モデルの坑道付近のメッシュ図を図 3.3.2-2 に示す。

支保工のメッシュ幅は 0.05m、EDZ のそれは 0.07m～0.26m とし、後者のメッシュ幅は地表面側ほど大きくなるようにした。

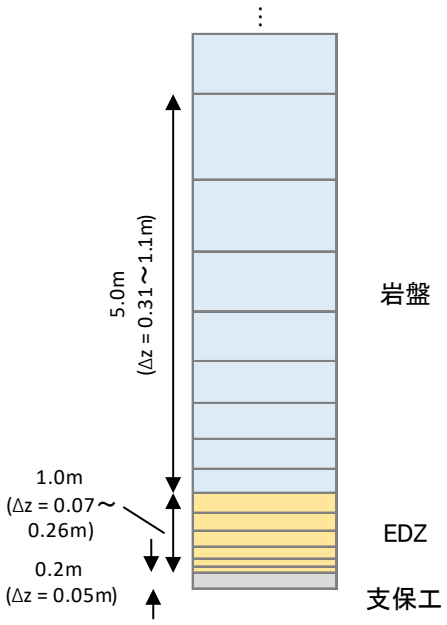


図 3.3.2-2　一次元ファーフィールドモデルの坑道付近のメッシュ図

b　解析モデルのパラメータ

(a)　間隙流体の移動関連

間隙流体の移動のメカニズムには、PFLOTRAN に実装されており、水理解析でも使用した飽和・不飽和浸透流を用いることとした。ただし、本年度は不飽和領域が発生する場合の検討を行わないため、パラメータは絶対透過度（透水係数）のみであり、飽和度―相対透過度の関係（不飽和透水係数）と飽和度―毛管圧力の関係（水分特性曲線）の設定は不要である。

岩盤の絶対透過度は、透水係数換算で 3.0×10^{-9} m/s を標準とし、高透水ケースとして 3.0×10^{-8} m/s を設定することとした。また、水理解析での設定と同様に、EDZ の絶対透過度は岩盤の 100 倍とし、吹付けコンクリートのそれは岩盤と同一とした。

(b)　物質輸送関連

物質輸送のメカニズムは、浸透流に伴う移流・分散とした。物質輸送関連のパラメータを、透水係数と併せて表 3.3.2-4 に示す。

岩盤および EDZ の間隙率は、水理解析での設定と同一とした。支保工の吹付けコンクリートの間隙率は、後述するセメントの配合および鉱物組成から計算により求めた。分散長は、各領域の幅に応じて、1.0m から 0.01m の値を設定した。なお、溶質拡散係数は、自由水中の陰イオンの分子拡散係数のオーダーを参考に、1.0×10^{-9} m²/s とし、屈曲度はランダムな空隙構造を持つ多孔質体の理論値である 0.5 とした。

表 3.3.2-4　地下水の移動および物質輸送関連のパラメータ

材料	層厚 (m)	透水係数(m/s)		間隙率 (-)	分散長 (m)	溶質拡散係数(m^2/s)	屈曲度 (-)	備考
		標準	高透水					
岩盤	498.8	3.0×10^{-9}	3.0×10^{-8}	0.245	1.0	1.0×10^{-9}	0.5	透水係数の標準は、水理解析と同じ 高透水の設定値は、標準の10倍 間隙率の設定値は、水理解析と同じ
EDZ	1.0	3.0×10^{-7}	3.0×10^{-6}	0.245	0.1	1.0×10^{-9}	0.5	透水係数の設定値は、岩盤の100倍 間隙率の設定値は、水理解析と同じ
支保工	0.2	3.0×10^{-9}	3.0×10^{-8}	0.202	0.01	1.0×10^{-9}	0.5	透水係数の設定値は、岩盤と同じ 間隙率は、セメント配合および鉱物組成から計算

(c)　地球化学的反応関連

岩盤、EDZ および支保工の各領域に含まれ、かつ地球化学的反応に寄与する鉱物として、表 3.3.2-5 に挙げるものを考慮することとした。同表には、各鉱物の式量、密度およびモル体積（稠密な鉱物 1 mol あたりの体積）も併せて示した。

表 3.3.2-5　岩盤、EDZ および支保工において地球化学的反応を考慮する鉱物と
その式量・密度・モル体積（灰色除く）

材料	鉱物		式量 (g/mol)	密度 (g/cm^3)	モル体積 (cm^3/mol)	反応
岩盤 EDZ	初期鉱物	黄鉄鉱（パイライト; Pyrite; FeS_2）	119.98	5.01	23.94	○
		方解石（カルサイト; Calcite; $CaCO_3$）	100.09	2.71	36.93	○
支保工（吹付けコンクリート）	初期鉱物	ポルトランダイト（Portlandite; $Ca(OH)_2$; CH）	74.09	2.24	33.06	○
		カルシウムシリケート水和物（C-S-H (Ca/Si = 1.8)）	108.35	2.43	44.59	○
		エトリンガイト（Ettringite; AFt; $C_3As_3^{-}H_{32}$）	1255.11	1.73	725.5	○
		ハイドロガーネット（Hydrogarnet; Katoite相当; C_3AH_6）	378.29	2.52	150.12	○
		ブルーサイト（Brucite; $Mg(OH)_2$）	58.32	2.39	24.4	○
		C_3FH_6（ハイドロガーネットの一種; Fe-Katoite相当）	-	-	-	×
	二次鉱物	カルシウムシリケート水和物（C-S-H (Ca/Si = 1.5～0.4)）	～115.18	～2.51	～59.44	○
		C_3ASH_4（ハイドロガーネットの一種; Katoite-Si相当）	402.34	2.52	159.66	○
		ゲーレナイト水和物（Gehlenite hydrate; C_2ASH_8）	418.32	1.94	215.63	○
		灰ばん柘榴石（グロシュラー; Grossular; C_3AS_3）	450.45	3.5	128.7	○
		葉ろう石（パイロフィライト; Pyrophyllite; AS_4H）	360.31	2.61	138.05	○
		フリーデル氏塩（Friedel's salt; $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$）	561.33	2.3	244.06	○
		方解石（カルサイト; Calcite; $CaCO_3$）	100.09	2.71	36.93	○

※青字は組成式の略号で、それぞれC: CaO, A: Al_2O_3, F: Fe_2O_3, S: SiO_2, s^{-}: $CaSO_4$, H: H_2O を意味する。

岩盤内の鉱物としては、黄鉄鉱（パイライト; Pyrite）と方解石（カルサイト; Calcite）の 2 つのみを考慮した。前者は、堆積岩で普遍的に見られる鉱物であること、また酸化的環境下で溶解し、地下水の pH を大きく変化させる可能性があることから考慮に入れた。また、後者は必ずしも黄鉄鉱と共存する鉱物ではないが、やはり堆積岩に比較的よく見られ、地下水の pH の安定化に寄与することから、考慮の対象とした。

なお、堆積岩にはこれら以外にも普遍的に見られる鉱物がいくつかあるが、それらは地下水の pH への寄与が黄鉄鉱や方解石に比べて小さいと予想されることから、今回の検討では考慮の対象としなかった。

支保工の吹付けコンクリートに含まれる鉱物については、セメント材料として普通ポルトランドセメント（OPC）を考え、硬化後のセメントモルタルに含まれる代表的な鉱物（初期鉱物）と、それが地球化学的反応を経て生成される鉱物（二次鉱物）を検討対象とした。

まず、初期鉱物として、ポルトランダイト（Portlandite）、Ca/Si 比が 1.8 のカルシウムシリケート水和物（以下、C-S-H(1.8)と記す。また、同様に Ca/Si 比がm のカルシウムシリケート水和物を、C-S-H(m)と記す。）、エトリンガイト（Ettringite）、ハイドロガーネット（C3AH6）[6]およびブルーサイト（Brucite）を考慮した。なお、C_3FH_6（ハイドロガーネットの一種 ; Fe-Katoite 相当）については、Ca を含む初期鉱物としては考慮したが、化学反応に関するデータに乏しいことから、反応には寄与しないものと考えた。

6) セメント鉱物の略記号による表記であり、C は CaO を、A は Al_2O_3 を、H は H_2O を意味する。同様に、F は Fe_2O_3 を、S は SiO_2 を、s^{-}は $CaSO_4$ を意味する。この表記によると、C_3AH_6 は $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$ を意味する。ただし、これは結晶構造を示す示性式ではなく、組成式の意味合いに近いものである。

上記のセメント初期鉱物の設定は、第 2 次 TRU レポート[24]における地球化学的解析での設定と同様である。

また、二次鉱物としては、Ca/Si 比が 1.5 から 0.4 のカルシウムシリケート水和物、C_3ASH_4（ハイドロガーネットの一種）、ゲーレナイト水和物（C_2ASH_8）、グロシュラー（Grossular；C_3AS_3）、パイロフィライト（Pyrophyllite；AS_4H）、フリーデル氏塩（Friedel's salt）および方解石（カルサイト；Calcite）を考慮した。

なお、上記の二次鉱物の設定は、第 2 次 TRU レポート[24]における地球化学的解析での設定と次の点で異なる。

① ハイドロタルサイト（$4MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O$）、セピオライト（$3MgO \cdot Mg(OH)_2 \cdot 6SiO_2 \cdot 6H_2O$）などの Mg を含む鉱物が含まれていない。
② カオリナイトが含まれていない。
③ モノサルフェート（AFm；主にエトリンガイトが変質して生成される鉱物）が含まれていない。

上記①は、今回の検討が支保工の吹付けコンクリートからの Ca の溶脱を主眼に置いていること、Mg については吹付けコンクリートに初期鉱物（ブルーサイト）として含まれる量が少ないことから、モデルを単純化し、計算負荷の低減を図るために省略したものである。ただし、吹付けコンクリートへ流入する地下水に Mg が多く含まれる場合には、これら二次鉱物の沈殿が固相割合に影響を及ぼす可能性があるため、今後の検討では考慮の対象とする可能性がある。

上記②については、類似の鉱物であるパイロフィライトの生成で代表でき、省略しても問題ないと考えた。

上記③は、モデルを単純化し、計算負荷の低減を図るための設定である。モノサルフェートの沈殿を考慮しないことにより、吹付けコンクリートからの Ca の溶脱を大きめに評価することになり、基本的には保守的な検討になることから、問題ないと考えた。

次に、前掲表 3.3.2-5 に示した鉱物について、溶解反応の化学反応式とその平衡定数を表 3.3.2-6 に示す。これらは、黄鉄鉱と方解石については PFLOTRAN 付属の熱力学データベース（hanfort.dat; Hanford 300 Area の解析[30]に使用したもの）に、セメント鉱物については、第 2 次 TRU レポート[24]における地球化学的反応解析で使用した熱力学データベース JNC-TDB.TRU[31]にそれぞれ基づくものである。

また、前掲表 3.3.2-5 に示した鉱物について、溶解反応の平衡定数と速度論定数（溶解速度定数）ならびに比表面積を表 3.3.2-7 に示す。

各鉱物の比表面積のうち、黄鉄鉱については、堆積岩に典型的なフランボイダルパイライト[32]の形状を想定して、直径を 10μm と仮定し、これとモル体積から計算により求めた。その他の鉱物については、典型的な粒子径に関する情報がなかったことから、直径を 100μm と仮定してモル体積から計算により求めた。

黄鉄鉱と方解石の溶解反応の速度論定数（以下、k_p と記す。）は、文献から中性域付近

における平衡から離れた条件下での値を抽出して設定した。一方、セメント鉱物のk_p は文献値が限られていたことから、まず C-S-H について、代表的な値を Ca/Si 比によらず一律に設定した。そして、ポルトランダイドの、k_p は C-S-H の 10 倍に、エトリンガイトとフリーデル氏塩の、k_p は C-S-H の 0.1 倍に、その他のセメント鉱物の、k_p は C-S-H と同一に設定した。

表 3.3.2-6　地球化学的反応解析で考慮する鉱物の溶解反応の化学反応式と平衡定数

鉱物	溶解反応の化学反応式	−log K	出典
黄鉄鉱（パイライト; Pyrite）	$FeS_2 + H_2O \rightarrow Fe^2 + 0.25H^+ + 0.25SO_4^{2-} + 1.75HS^-$	−24.65	(a)
方解石（カルサイト; Calcite）	$CaCO_3 + H^+ \rightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$	1.849	
ポルトランダイト（Portlandite）	$Ca(OH)_2 + 2H^+ \rightarrow Ca^{2+} + 2H_2O$	22.71	(b)
カルシウムシリケート水和物 (C-S-H (Ca/Si = 1.8))	$CaO \cdot 0.556SiO_2 \cdot 1.047H_2O + 2H^+ \rightarrow Ca^2 + 0.556H_4SiO_4 + 0.935H_2O$	17.89	
同　(Ca/Si = 1.5)	$CaO \cdot 0.667SiO_2 \cdot 1.056H_2O + 2H^+ \rightarrow Ca^2 + 0.667H_4SiO_4 + 0.722H_2O$	16.64	
同　(Ca/Si = 1.3)	$CaO \cdot 0.769SiO_2 \cdot 1.064H_2O + 2H^+ \rightarrow Ca^2 + 0.769H_4SiO_4 + 0.526H_2O$	15.87	
同　(Ca/Si = 1.1)	$CaO \cdot 0.909SiO_2 \cdot 1.076H_2O + 2H^+ \rightarrow Ca^2 + 0.909H_4SiO_4 + 0.258H_2O$	14.98	
同　(Ca/Si = 1.0)	$CaO \cdot SiO_2 \cdot 1.0833H_2O + 2H^+ \rightarrow Ca^2 + H_4SiO_4 + 0.0833H_2O$	14.51	
同　(Ca/Si = 0.9)	$CaO \cdot 1.111SiO_2 \cdot 1.092H_2O + 2H^+ + 0.13H_2O \rightarrow Ca^2 + 1.111H_4SiO_4$	14.06	
同　(Ca/Si = 0.833)	$CaO \cdot 1.2SiO_2 \cdot 1.1H_2O + 2H^+ + 0.3H_2O \rightarrow Ca^2 + 1.2H_4SiO_4$	13.83	
同　(Ca/Si = 0.6)	$0.6CaO \cdot SiO_2 \cdot 0.6H_2O + 1.2H^+ + 0.8H_2O \rightarrow 0.6Ca^2 + H_4SiO_4$	7.312	
同　(Ca/Si = 0.4)	$0.4CaO \cdot SiO_2 \cdot 0.44H_2O + 0.8H^+ + 1.16H_2O \rightarrow 0.4Ca^2 + H_4SiO_4$	3.907	
ハイドロガーネット (Hydrogarnet; C_3AH_6)	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + 12H^+ \rightarrow 3Ca^{2+} + 2Al^{3+} + 12H_2O$	77.37	
C_3ASH_6 (Hydrogarnet; Katoite-Si)	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 4H_2O + 12H^+ \rightarrow 3Ca^{2+} + 2Al^{3+} + H_4SiO_4 + 8H_2O$	71.41	
ゲーレナイト水和物 (Gehlenite hydrate; C_2ASH_8)	$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 8H_2O + 10H^+ \rightarrow 2Ca^{2+} + 2Al^{3+} + H_4SiO_4 + 11H_2O$	50.32	
グロシュラー（Grossular; C_3AS_3）	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2 + 12H^+ \rightarrow 3Ca^{2+} + 2Al^{3+} + 3H_4SiO_4$	58.7	
パイロフィライト（Pyrophyllite; AS_4H）	$Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O + 6H^+ + 4H_2O \rightarrow 2Al^{3+} + 4H_4SiO_4$	0.440	
フリーデル氏塩（Friedel's salt）	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O + 12H^+ \rightarrow 4Ca^{2+} + 2Al^{3+} + 2Cl^- + 16H_2O$	70.13	
エトリンガイト（Ettringite; $C_3As_3H_{32}$）	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O + 12H^+ \rightarrow 6Ca^{2+} + 2Al^{3+} + 3SO_4^{2-} + 38H_2O$	58.25	

出典：(a) PFLOTRAN 付属の hanfort.dat[30]，(b) 第 2 次 TRU レポートで使用した JNC-TDB.TRU [31]

※上記の化学反応式では、右辺と左辺を判別しやすくするため、間の矢印に色を付けている。

表 3.3.2-7　地球化学的反応解析で考慮する鉱物の溶解反応の平衡定数と速度論係数並びに比表面積

鉱物名	平衡定数 pK	速度論係数 k_p (mol/m^2/s)	比表面積 (cm^2/g)	備考
黄鉄鉱（パイライト; Pyrite; FeS_2）	-24.65	1.00E-08	1197.2	pK, kpは文献値。粒子径10μmを仮定。
方解石（カルサイト; Calcite; $CaCO_3$）	1.849	4.37E-09	221.4	pK, kpは文献値。粒子径100μmを仮定。
ポルトランダイト（Portlandite; $Ca(OH)_2$; CH）	22.71	3.16E-10	267.7	pKはJNC-TDB.TRUの値による。 粒子径は100μmと仮定。 C-S-Hのkpは文献値から代表的な値をCa/Si比によらず一律に設定。 ポルトランダイドのkpはC-S-Hの10倍 エトリンガイト、フリーデル氏塩のkpはC-S-Hの0.1倍 その他の鉱物のkpは、C-S-Hと同一
カルシウムシリケート水和物（CSH (Ca/Si = 1.8)）	17.60	3.16E-11	246.5	
エトリンガイト　(Ettringite; $C_3As_3^{-}H_{32}$)	58.25	3.16E-12	346.8	
ハイドロガーネット（Hydrogarnet; Katoite; C_3AH_6）	77.37	3.16E-11	238.1	
ブルーサイト (Brucite; $Mg(OH)_2$)	16.30	5.75E-09	253.4	
カルシウムシリケート水和物（CSH (Ca/Si = 1.5～0.4)）	3.907～16.64	3.16E-11	244.8	
C_3ASH_4 (Hyrdogarnet; Katoite-Si)	71.41	3.16E-11	238.1	
ゲーレナイト水和物（Gehlenite hydrate; C_2ASH_8）	50.32	3.16E-11	309.3	
グロシュラー（Grossular; C_3AS_3）	58.70	3.16E-11	171.4	
パイロフィライト (Pyrophylite; AS_4H)	0.440	3.16E-11	229.9	
フリーデル氏塩（Friedel's salt; $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$）	70.13	3.16E-12	260.9	

※青字は組成式の略号で、それぞれC: CaO, A: Al_2O_3, F: Fe_2O_3, S: SiO_2, s^{-}: $CaSO_4$, H: H_2O を意味する。

c　坑道開放時の検討解析における初期条件・境界条件

坑道開放時の検討解析における初期条件と境界条件の概念を図 3.3.2-3 に示す。

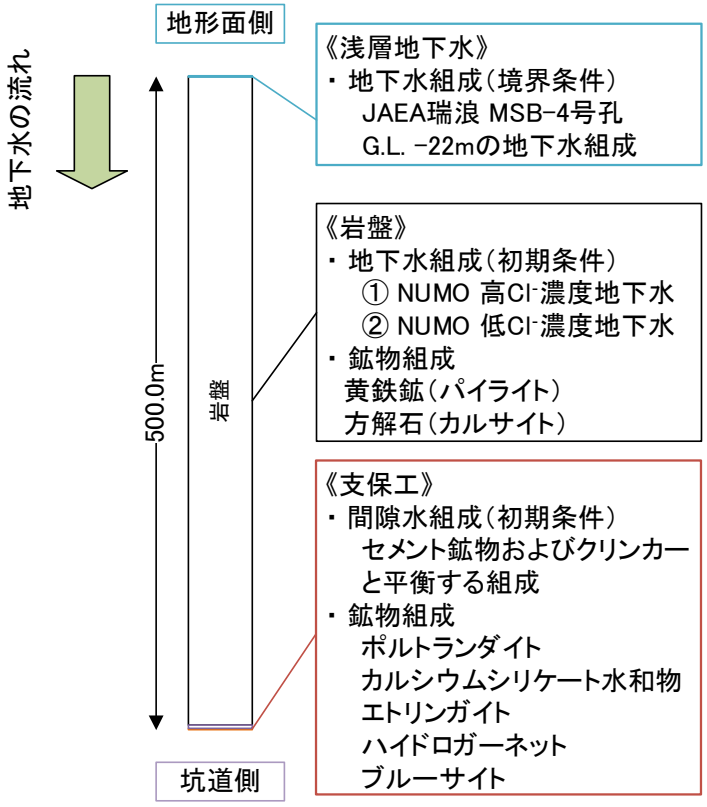


図 3.3.2-3　坑道開放時の検討解析における初期条件および境界条件の概念図

(a)　地下水位と地下水の流れ

地下水位はモデル表面に維持されるものとした。また、モデル中の地下水の流れは重力勾配による飽和定常流とし、流速はモデルを構成する岩盤、EDZ および支保の透水係数を考慮して設定した。

(b)　物質輸送および地球化学的反応関連

初期の岩盤に含まれる黄鉄鉱および方解石の量は、いずれも岩盤全体の固相に対する質量比で 3%と仮定して設定した。

支保工の吹付けコンクリートの単位セメント量は、昨年度までの力学的影響評価[1]、[2]で想定した設計基準強度と、その強度に基づく標準的な配合[33]から設定した。その鉱物組成は、第 2 次 TRU レポートでの OPC 鉱物組成の構成を参考にして決定した。支保工の吹付けコンクリートの初期鉱物組成を表 3.3.2-8 に示す。

表 3.3.2-8　吹付けコンクリートに含まれる鉱物の初期存在量

鉱物			初期存在量	備考
分類	名称	組成式	(mol/m^3)	
セメント鉱物	ポルトランダイト	$Ca(OH)_2$	1191.241	
	C-S-H (1.8)		2898.394	
	ハイドロガーネット	C_3AH_6	192.033	
	ブルーサイト	$Mg(OH)_2$	167.473	
	エトリンガイト	$C_3As_3H_{32}$	37.469	
		C_3FH_6	81.719	モデルから除外
セメントクリンカー（アルカリ分）		Na_2O	21.781	溶解しているものとした
		K_2O	22.453	

岩盤の初期地下水組成とモデル上端の浅層地下水の組成の設定を表 3.3.2-9 に示す。

岩盤の初期地下水組成には、NUMO 包括的技術報告書レビュー版の付属書[34]に記載の「新第三紀堆積岩類―高 Cl^-濃度」および「新第三紀堆積岩類―低 Cl^-濃度」と同一のものを用いることとした。ただし、鉱物の沈殿・溶解に関与しないイオンは基本的に省略し、これによる電荷の過不足は Na^+により調節することとした。高 Cl^-濃度地下水は、pH が中性よりわずかに酸性側で、炭酸濃度が高い（CO_2 分圧で 0.4 bar 相当）という特徴を有する。また、低 Cl^-濃度地下水は弱アルカリ性で、高 Cl^-濃度地下水よりも炭酸濃度が低く、SO_4^{2-}濃度が高い。

また、境界条件となる地表面の地下水組成には、堆積岩表層の地下水組成の一例として、瑞浪 URL の MSB-4 号孔、深度 21m（同孔の最も浅い測定区間）における測定データ[35]、[36]を用いることとした。この地下水は Na-Ca-HCO_3 型で、pH はほぼ中性である。ただし、本検討では上部からの酸素の供給を考慮するために、表 3.3.2-9 の地下水を O_2：18%、CO_2：2%を含む大気と平衡させたものを用いることとした。このとき、ORP は 809 mV となり、酸化的な地下水となる。

表 3.3.2-9　岩盤および地表面の地下水組成

（背景が灰色のイオンはモデルに含めず、電荷の過不足は Na+により調節）

		浅層地下水		低Cl^-濃度	高Cl^-濃度
		（JAEA瑞浪）†	設定値‡	(NUMO)	(NUMO)
温度	(℃)	—	25	30	30
pH		7.29	7.03	8.38	6.54
Eh	(mV)	—	809	-282	-168
陽イオン	Na (mol/L)	8.58E-04	8.58E-04	2.47E-03	2.18E-01
	K	5.39E-05	5.39E-05	3.01E-05	3.18E-03
	Mg	3.16E-04	3.16E-04	1.47E-05	4.95E-03
	Ca	1.19E-03	1.19E-03	2.26E-04	3.45E-03
	Fe	[注2] < 8.95E-07	8.95E-07	8.45E-07	3.25E-05
	Al	[注1] < 7.41E-06	7.41E-06	2.20E-08	1.31E-09
陰イオン	F	8.86E-06	—	1.90E-04	6.49E-06
	Cl	3.80E-05	3.80E-05	1.11E-03	2.08E-01
	Br	[注2] < 1.63E-06	—	4.44E-06	7.98E-04
	I	—	—	3.94E-06	1.83E-04
	S	1.66E-04	1.66E-04	1.24E-04	4.09E-06
	P	[注2] < 8.86E-07	—	5.62E-06	5.92E-06
	N	[注2] < 4.32E-06	—	2.54E-06	1.01E-02
	TIC	3.91E-03	4.09E-03	1.66E-03	4.00E-02
	Si	1.16E-03	1.16E-03	7.47E-04	6.64E-04
	B	[注1] < 1.85E-05	1.85E-05	4.62E-06	1.02E-02
備考			岩盤地表部の境界条件用	岩盤の間隙水の初期条件用	

† 2003年12月～2004年11月の測定値の平均値　　‡ O_2 18%vol, CO_2 2%volを含む 1atmの大気と平衡させた

[注1] 報告下限値の濃度をmol/Lで示したもの

[注2] 報告下限値とこれを上回る測定値との平均濃度をmol/Lで示したもの

(c)　解析ケース

解析ケースとして、表 3.3.2-10 に示すものを設定した。

予備的検討として、モデルに支保工を含めず、坑道への地下水の引き込みによる母岩への影響を確認するためのケース pHC-021 および pLC-021 を実施した。地下水の引き込みの影響を見るために透水係数を高く設定（3×10^{-8} m/s）し、地下水流動の影響が明確になるようにした。

次に、支保工への影響を検討するケースとして、モデルに支保工を含め、岩盤の透水係数、地下水組成およびセメント鉱物の反応速度係数をパラメータとした HC-021 から HC-032 ならびに LC-021 から LC-032 の計 8 ケースを実施した。透水係数は、水理解析で標準として用いた 3×10^{-9} m/s を標準としたが、比較のために透水係数が高いケースを設定した。

表 3.3.2-10　坑道開放時の地下水の引き込みによる影響検討のための解析ケース

ケース名	モデル体系			透水係数（m/s）	岩盤の地下水組成	速度論係数		確認事項
	岩盤	EDZ	支保工	岩盤・支保工		セメント鉱物	その他	
pHC-021	○	○	－	3×10^{-8}（高透水）	高Cl（高炭酸）	－	標準	高Cl地下水の引き込み状況
pLC-021	○	○	－	3×10^{-8}（高透水）	低Cl（低炭酸）	－	標準	低Cl地下水の引き込み状況
HC-021	○	○	○	3×10^{-8}（高透水）	高Cl（高炭酸）	標準	標準	高Cl地下水による支保工変質
HC-022	○	○	○	3×10^{-9}（標準）	高Cl（高炭酸）	標準	標準	同　低透水の場合
HC-031	○	○	○	3×10^{-8}（高透水）	高Cl（高炭酸）	標準×0.1	標準	同　速度論係数小の場合
HC-032	○	○	○	3×10^{-9}（標準）	高Cl（高炭酸）	標準×0.1	標準	低透水かつ速度論係数小の場合
LC-021	○	○	○	3×10^{-8}（高透水）	低Cl（低炭酸）	標準	標準	低Cl地下水による支保工変質
LC-022	○	○	○	3×10^{-9}（標準）	低Cl（低炭酸）	標準	標準	同　低透水の場合
LC-031	○	○	○	3×10^{-8}（高透水）	低Cl（低炭酸）	標準×0.1	標準	同　速度論係数小の場合
LC-032	○	○	○	3×10^{-9}（標準）	低Cl（低炭酸）	標準×0.1	標準	低透水かつ速度論係数小の場合

d　再冠水時の検討解析における初期条件・境界条件

再冠水時の検討解析における初期条件と境界条件の概念を図 3.3.2-4 に示す。

再冠水時の検討では、検討対象を岩盤のみとし、支保工および EDZ を省略したモデルを用いた。

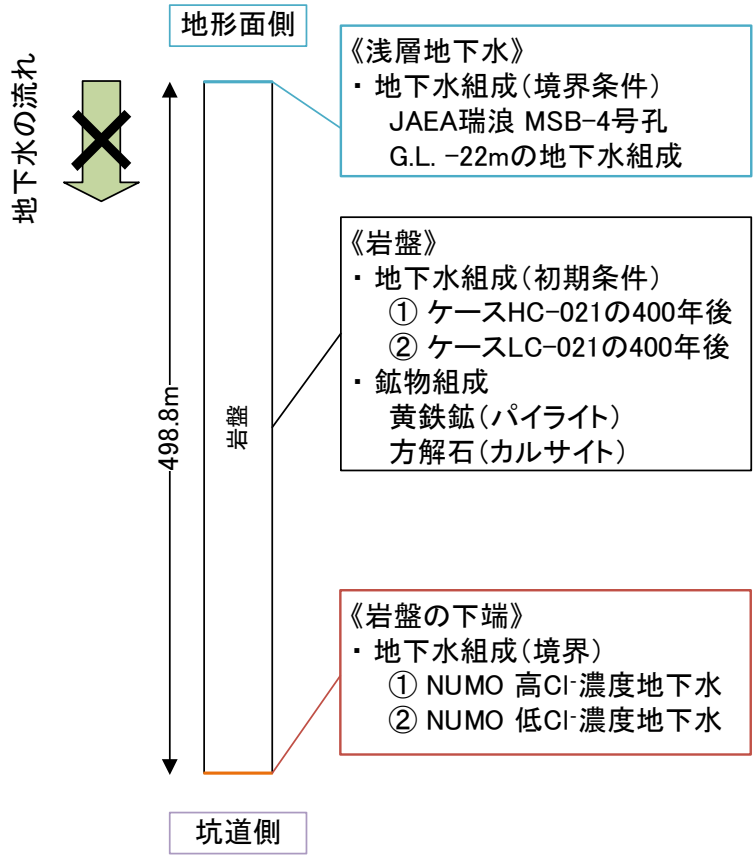


図 3.3.2-4　再冠水時の検討解析における初期条件および境界条件の概念図

(a)　地下水位と地下水の流れ

坑道開放時と同様に、地下水位はモデル表面に維持されるものとした。また、モデル中の地下水の流れは、坑道内が低透水材料で埋め戻される結果、0 になるものと考えた。

(b)　物質輸送および地球化学的反応関連

岩盤中の地下水組成は、坑道開放時の解析ケースにおいて、岩盤の下端（EDZ の直上）における地下水濃度がほぼ一定となった時点（ケース HC-021 とケース LC-021 では、400 年後）のものとした。

また、岩盤に含まれる黄鉄鉱および方解石の量は、上記の時点で岩盤に存在する量とした。なお、ケース HC-021 とケース LC-021 の 400 年後の時点における岩盤中の黄鉄鉱および方解石の量は、モデルのごく表層を除き、各ケースの初期状態（固相の質量比で 3%）と同一である。

モデル上端の地下水組成は、坑道開放時と同様の設定で一定とした。また、モデル下端（岩盤の下端）の地下水組成は、その下の EDZ の間隙内に元の地下水組成の水が速やかに浸入してくると考えて、元の地下水組成（高 Cl^-濃度地下水または低 Cl^-濃度地下水）で一定とした。

(c)　解析ケース

解析ケースとして、表 3.3.2-11 に示すものを設定した。

坑道開放時の解析ケース HC-021 および LC-021 の 400 年後を初期状態として、EDZ および支保工をモデルから取り除き、岩盤の下端に各ケースの元の地下水組成を与えて、岩盤中の pH、ORP およびイオン濃度の変化を検討した。透水係数は、他のパラメータの影響が見やすいように 3×10^{-8} とした。

表 3.3.2-11　再冠水時の地下水組成の回復を検討するための解析ケース

ケース名	モデル体系			透水係数（m/s）	元の岩盤の地下水組成	速度論係数		確認事項
	岩盤	EDZ	支保工	岩盤		セメント鉱物	その他	
rHC-021	○	－	－	3×10^{-8}（高透水）	高Cl（高炭酸）	－	標準	高Cl濃度地下水の場合の影響
rLC-021	○	－	－	3×10^{-8}（高透水）	低Cl（低炭酸）	－	標準	低Cl濃度地下水の場合の影響

(3)　解析結果

1)　坑道への地下水の引き込みによる母岩や支保工への影響の検討

a　坑道開放時

(a)　母岩への影響検討

坑道開放時における地表からの地下水の引き込み状況を検討した解析ケースのうち、ケース pHC-021（元の地下水が高 Cl^-濃度である場合）について、坑道掘削からの各時点に

おける岩盤中の黄鉄鉱と方解石の体積割合、地下水の pH と ORP（Eh 値）の分布ならびに Ca^{2+}および HCO_3^-（炭酸水素イオン）の分布を図 3.3.2-5 に示す。

なお、同図において、地下水の pH と Eh の分布図ならびに Ca^{2+}および HCO_3^-の分布図はモデル全体を表示しているが、黄鉄鉱と方解石の体積割合の分布図は地表面から 10m の範囲であることに留意されたい。

黄鉄鉱の体積割合の分布に着目すると、黄鉄鉱が溶解する範囲は、100 年後で地表から 0.3m 未満、1000 年後でも 0.6m 未満であり、ごく表層に限られていた。これは、本解析ケースの設定では地下水位が地表に維持されていることにより、黄鉄鉱を溶解させる酸素の供給が表層地下水中に溶解したものに限られるためである。

同様に、方解石が溶解・消失する範囲も、100 年後で 1.0m 未満、1000 年後でも 1.9m 未満であった。これは、表層地下水の pH が 7 程度であること、黄鉄鉱の溶解により供給される水素イオンがわずかであることから、方解石の溶解速度が遅いことによるものと判断される。

以上のことから、本ケースでは地表から供給された地下水中の酸素がごく表層で消費されるため、岩盤中の ORP はほぼ元の値に維持されると予想される。

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

なお、Ca^{2+}および HCO_3^-の分布に着目すると、前者は pH の変化域にピークを持つような分布であり、後者は pH と同様の分布となっている。HCO_3^-の分布は、pH と同様に、移流分散による表層地下水の移動現象を反映したものと考えられる。一方、Ca^{2+}の分布がピークを持つのは、元々 HCO_3^-の濃度が高いところに低い濃度の HCO_3^-が入り込むことにより、pH の変化領域において Ca^{2+}および HCO_3^-のスペシエーションが変わるためと考えられる。

次に、ケース pLC-021（元の地下水が低 Cl^-濃度である場合）について、同様の分布図を図 3.3.2-6 に示す。

黄鉄鉱と方解石の溶解の状況は、ケース pHC-021 とほぼ同様であった。これは、地表から浸入する地下水の組成がケース pHC-021 と同一であるためである。

地下水の pH と Eh の分布に着目すると、pH および Eh の前線は時間の経過とともにモデル深部へ進行し、100 年後には先端が坑道付近に達している。これは、移流分散による表層地下水の移動現象を反映したものと考えられる。また、このケースでは元の地下水の Eh と表層地下水のそれとに差があるため、変化の幅がケース pHC-021 よりは大きくなっているが、全体的に還元状態のままであることには変わりがない。

なお、Ca^{2+}および HCO_3^-の分布に着目すると、いずれも pH と同様の分布となっており、移流分散による表層地下水の移動現象を反映したものと考えられる。

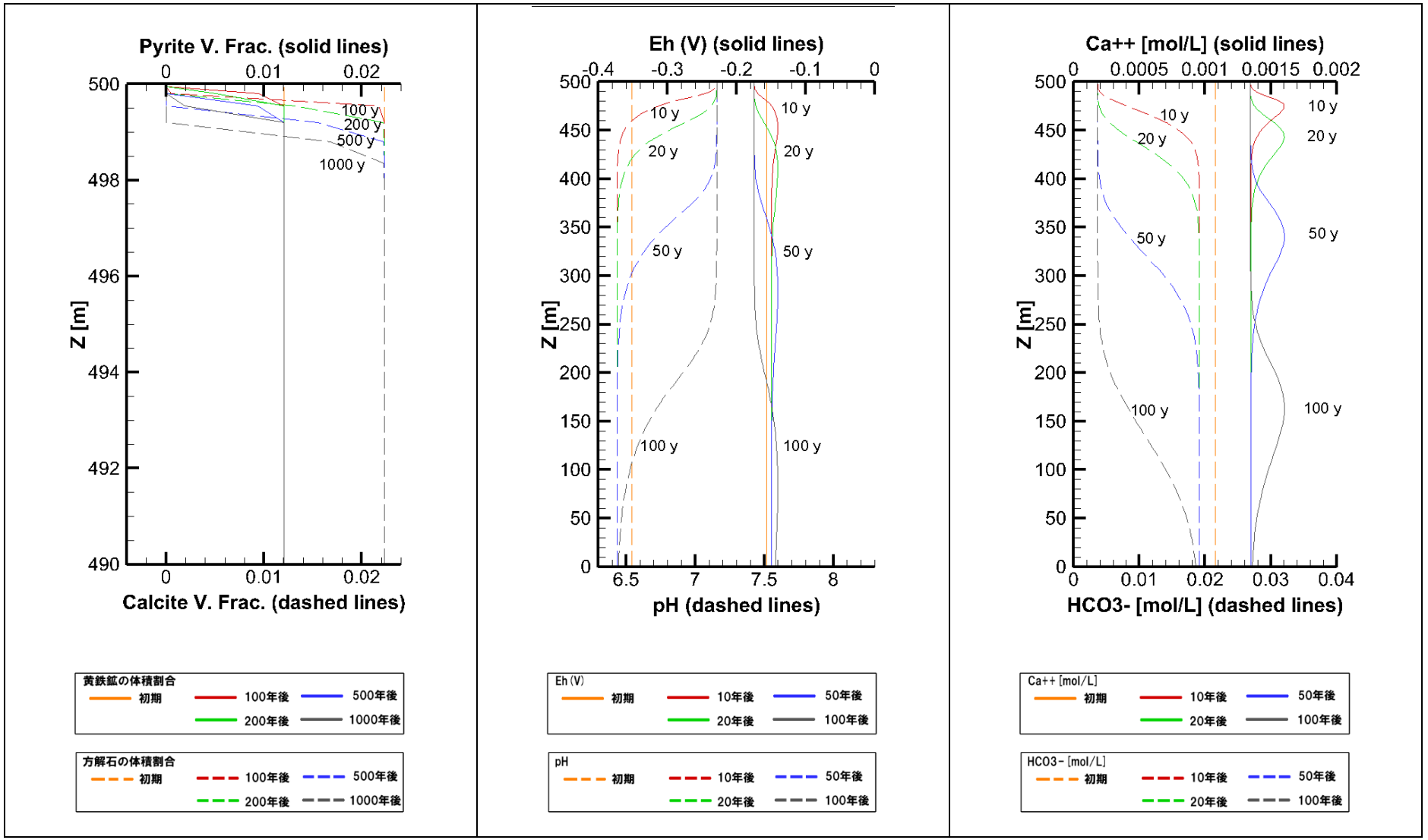


図 3.3.2-5　岩盤中の黄鉄鉱と方解石の体積割合、地下水の pH と Eh 並びに Ca^{2+}および HCO_3^-の分布

（ケース pHC-021，透水係数：高透水，高 Cl^-濃度地下水）

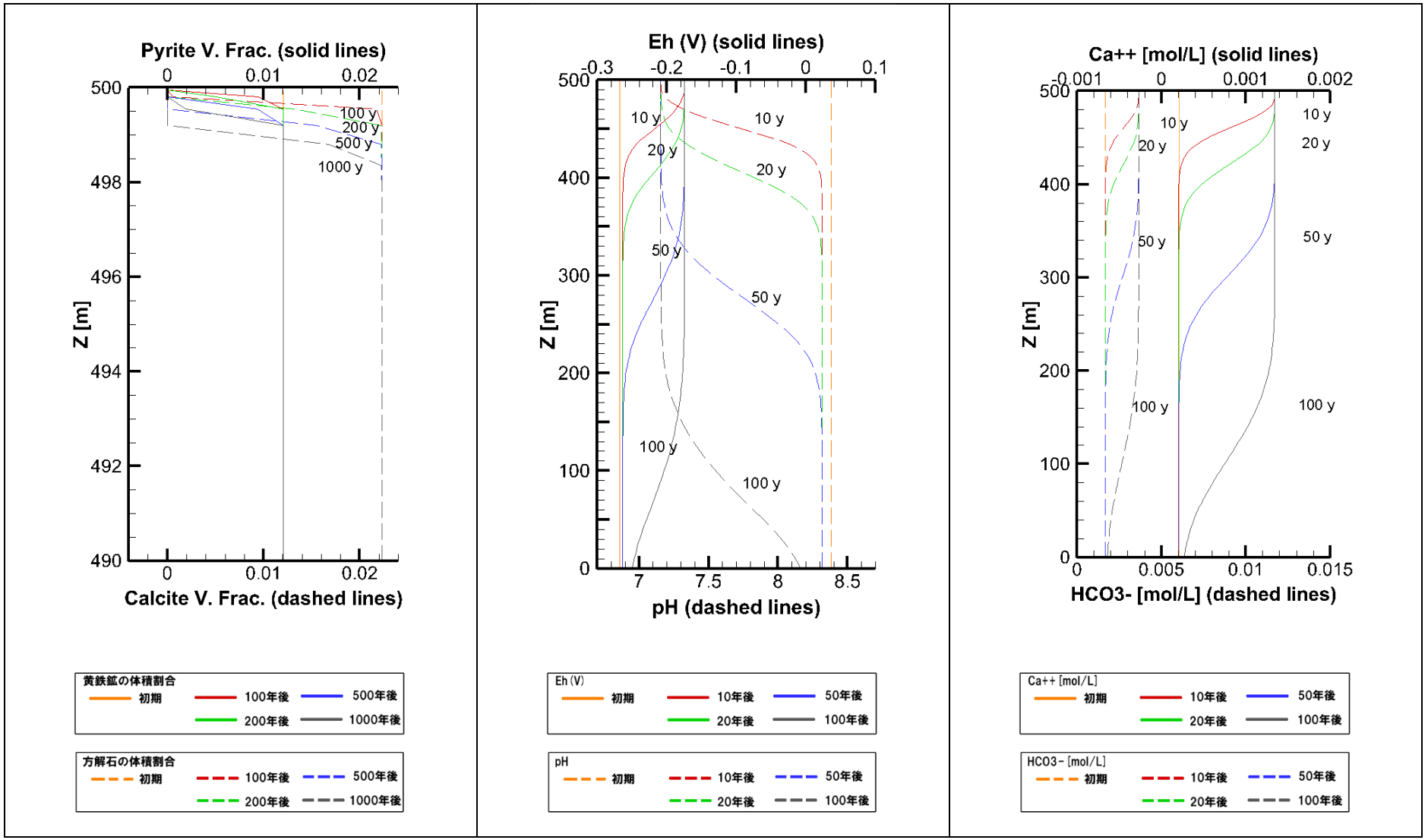


図 3.3.2-6　岩盤中の黄鉄鉱と方解石の体積割合、地下水の pH と Eh 並びに Ca^{2+}および HCO_3^-の分布
（ケース pLC-021，透水係数：高透水，低 Cl^-濃度地下水）

(b)　支保工への影響検討

坑道への地下水の引き込みによる支保工の吹付けコンクリートの変質を検討した結果として、ケース HC-021 から HC-032 並びに LC-021 から LC-032 について、掘削後 200 年間の pH と鉱物割合の変化を図 3.3.2-7 から図 3.3.2-18 に示す。

ケース HC-021（高 Cl^-濃度地下水、速度論係数：標準、透水係数：高透水）の場合、支保工の吹付けコンクリート内の pH は地下水相当の値まで急激に低下し､100 年以降に徐々に上昇していく傾向を示した。また、ポルトランダイトは 60 年後までに消失し、以後 C-S-H やガーネット類、エトリンガイトが溶解して、パイロフィライトが沈殿していく傾向を示した（図 3.3.2-7）。

pH が坑道掘削直後に急激に低下するのは、支保工の透水係数が大きいために地下水が支保工へ流入し、かつその地下水の炭酸濃度が高く、緩衝能が大きいためと考えられる。なお、pH が 100 年以降に上昇するのは、表層地下水と混合した地下水が到達するためである。

一方、同様の設定で透水係数が小さいケース HC-022 の場合は、ケース HC-021 に比べて pH の低下は段階的でゆるやかであり、かつ方解石（カルサイト）の沈殿が多く生じるという傾向を示した（図 3.3.2-7）。これは、透水係数が低い場合、岩盤中の pH の低い地下水の浸入が抑えられるために間隙水の pH の低下が起こりににくいことと、方解石の沈殿が起こりうる pH が維持されたためと考えられる。

なお、速度論係数を小さくしたケース HC-031 とケース HC-032 では、いずれも pH が急激に低下する一方、セメント鉱物の溶解はわずかで直線的であった（図 3.3.2-10）。

ケース LC-021（低 Cl^-濃度地下水、速度論係数：標準、透水係数：高透水）の場合、支保工の吹付けコンクリート内の pH は各セメント鉱物の溶解に対応して段階的に低下する結果となった。また、セメント鉱物のうち、ポルトランダイトは 60 年後までに消失し、以後 C-S-H やガーネット類が溶解して、パイロフィライト、方解石が沈殿していく傾向を示した（図 3.3.2-13）。

高 Cl^-濃度地下水のケースと異なり、pH が急速に低下しないのは、地下水の pH が比較的高いことと、地下水の炭酸濃度が小さく、緩衝能が低いために、セメント鉱物の溶解によって pH が維持されるためと考えられる。

同様の設定で透水係数が小さいケース LC-022 の場合は、セメント鉱物の溶解と pH の低下がさらにゆるやかであった（図 3.3.2-13）。これは、透水係数が低く、岩盤中の地下水の浸入が抑えられるためと考えられる。

なお、速度論係数を小さくしたケース LC-031 では pH が急激に低下した後に徐々に低下する傾向を示し、このときセメント鉱物の溶解は小さかった。また、速度論係数と透水係数の両方を小さくしたケース LC-032 では、pH はほとんど変化せず、セメント鉱物の溶解は、ケース LC-031 よりもさらに小さかった（図 3.3.2-16）。

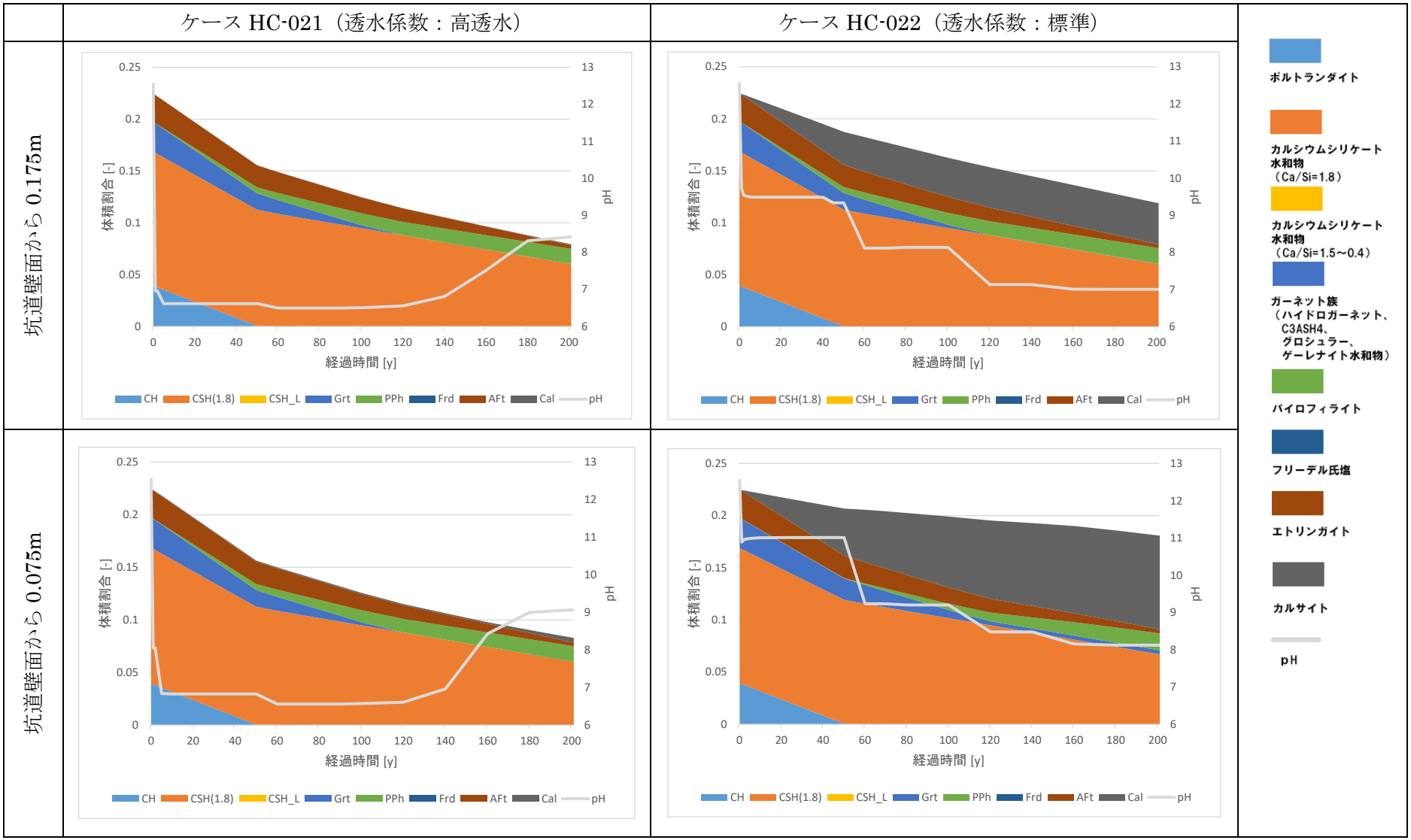


図 3.3.2-7　坑道掘削時点からの吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の変化（高 Cl⁻濃度地下水，速度論係数：標準）

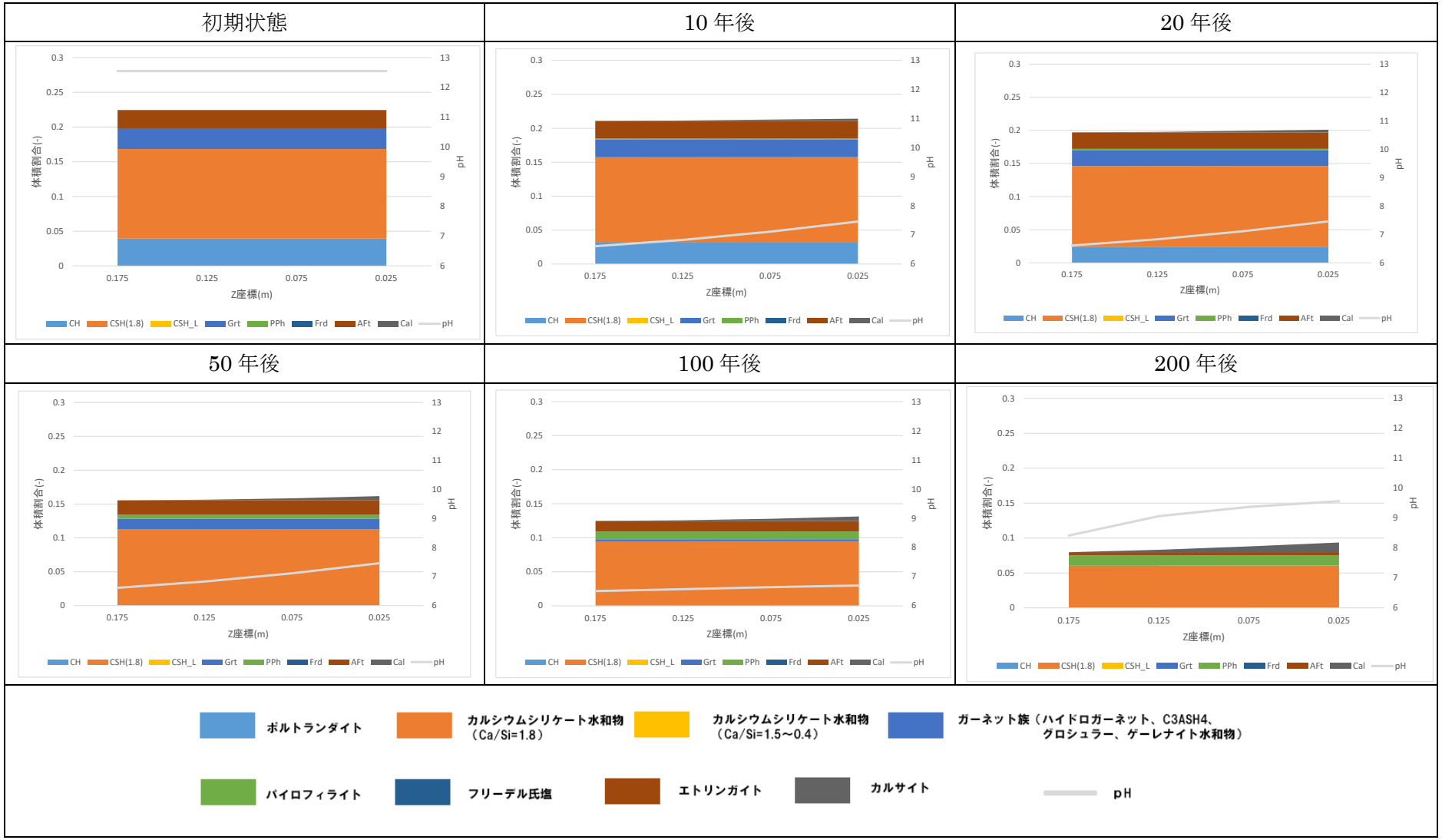


図 3.3.2-8　坑道掘削からの各時点における吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の分布

（ケース HC-021；透水係数：高透水，高 Cl^-濃度地下水，速度論係数：標準）

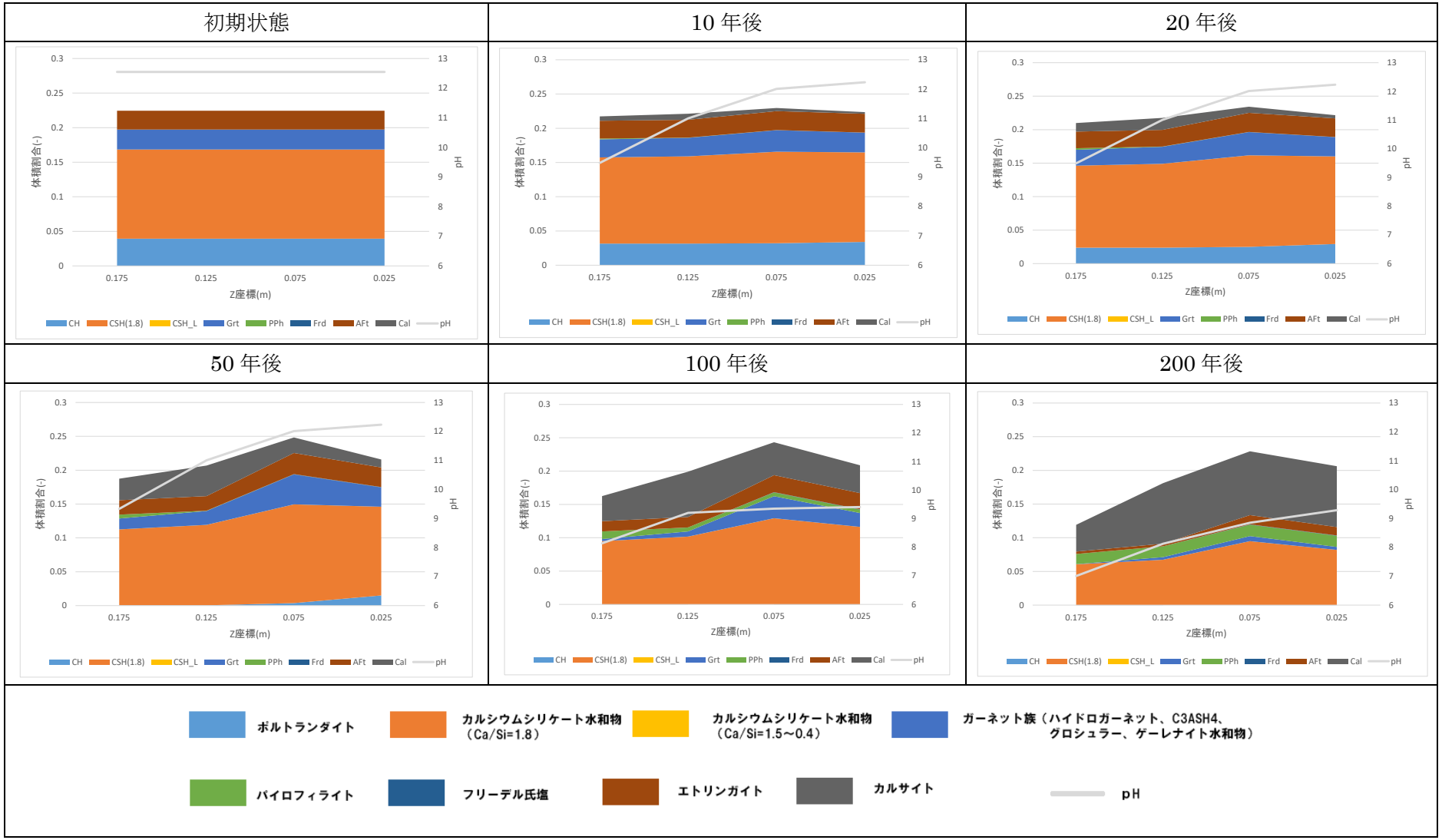


図 3.3.2-9　坑道掘削からの各時点における吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の分布

（ケース HC-022；透水係数：標準，高 Cl⁻濃度地下水，速度論係数：標準）

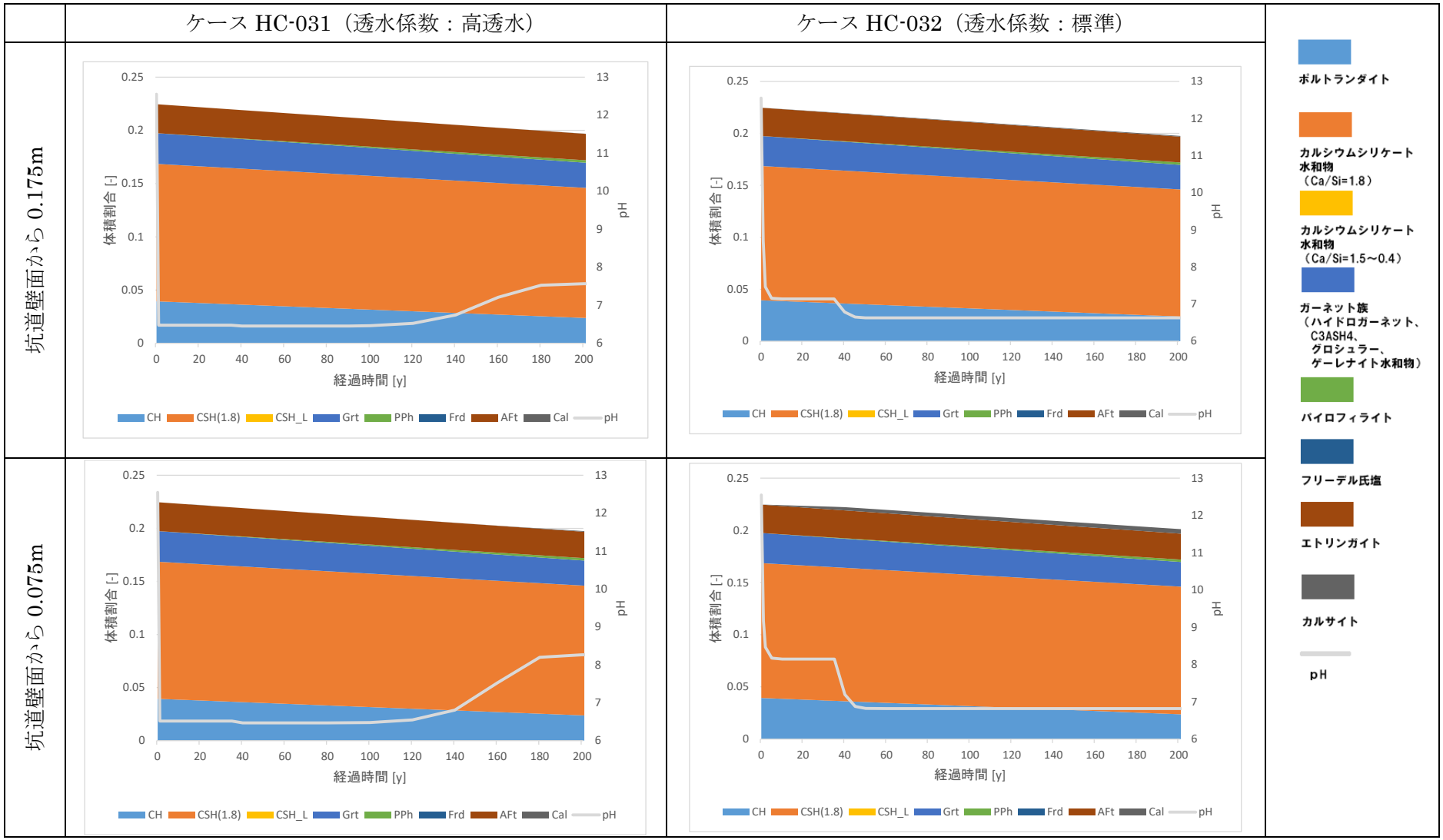


図 3.3.2-10　坑道掘削時点からの吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の変化

（高 Cl^-濃度地下水，速度論係数：小）

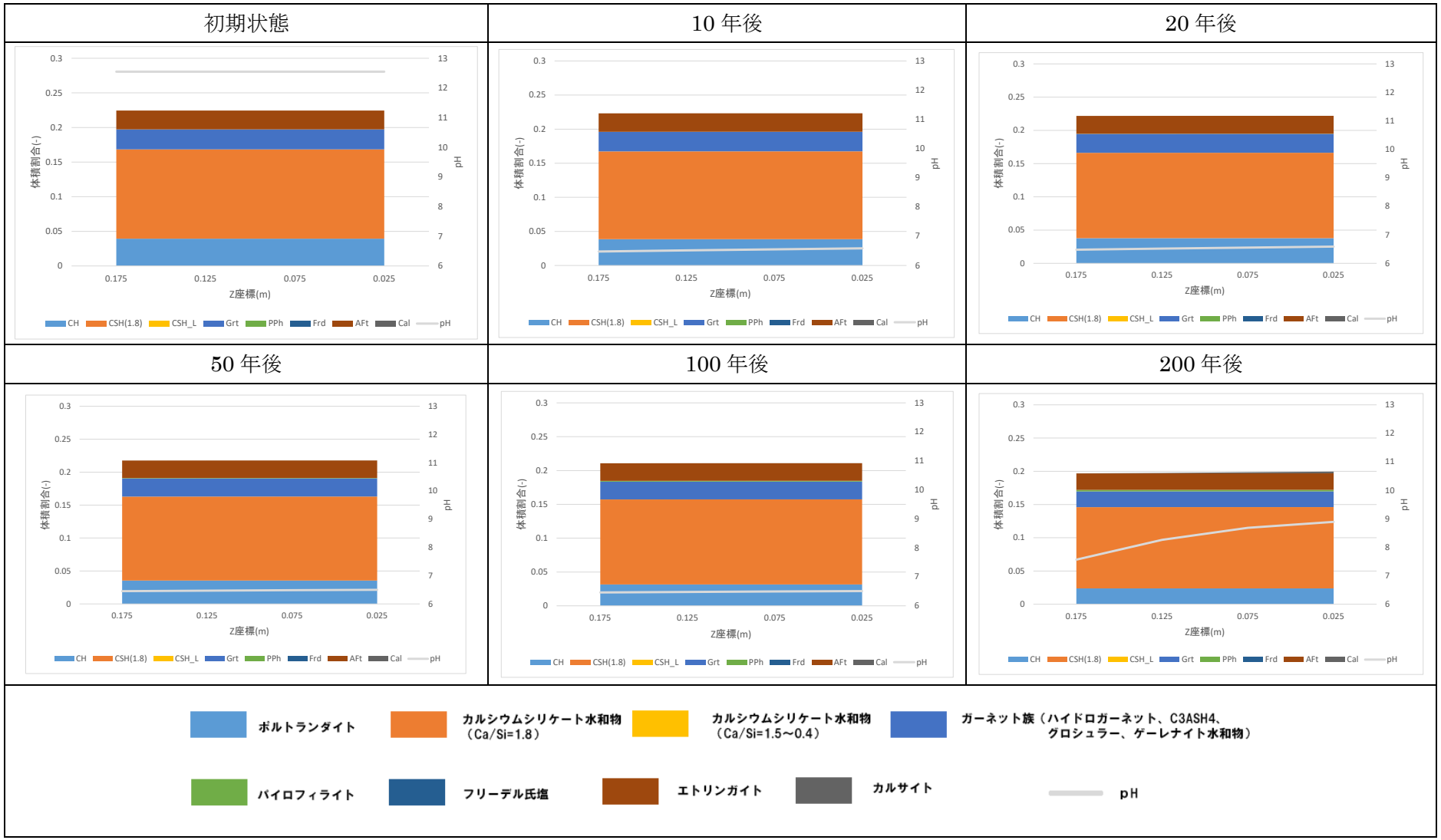


図 3.3.2-11　坑道掘削からの各時点における吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の分布

（ケース HC-031；透水係数：高透水，高 Cl^-濃度地下水，速度論係数：小）

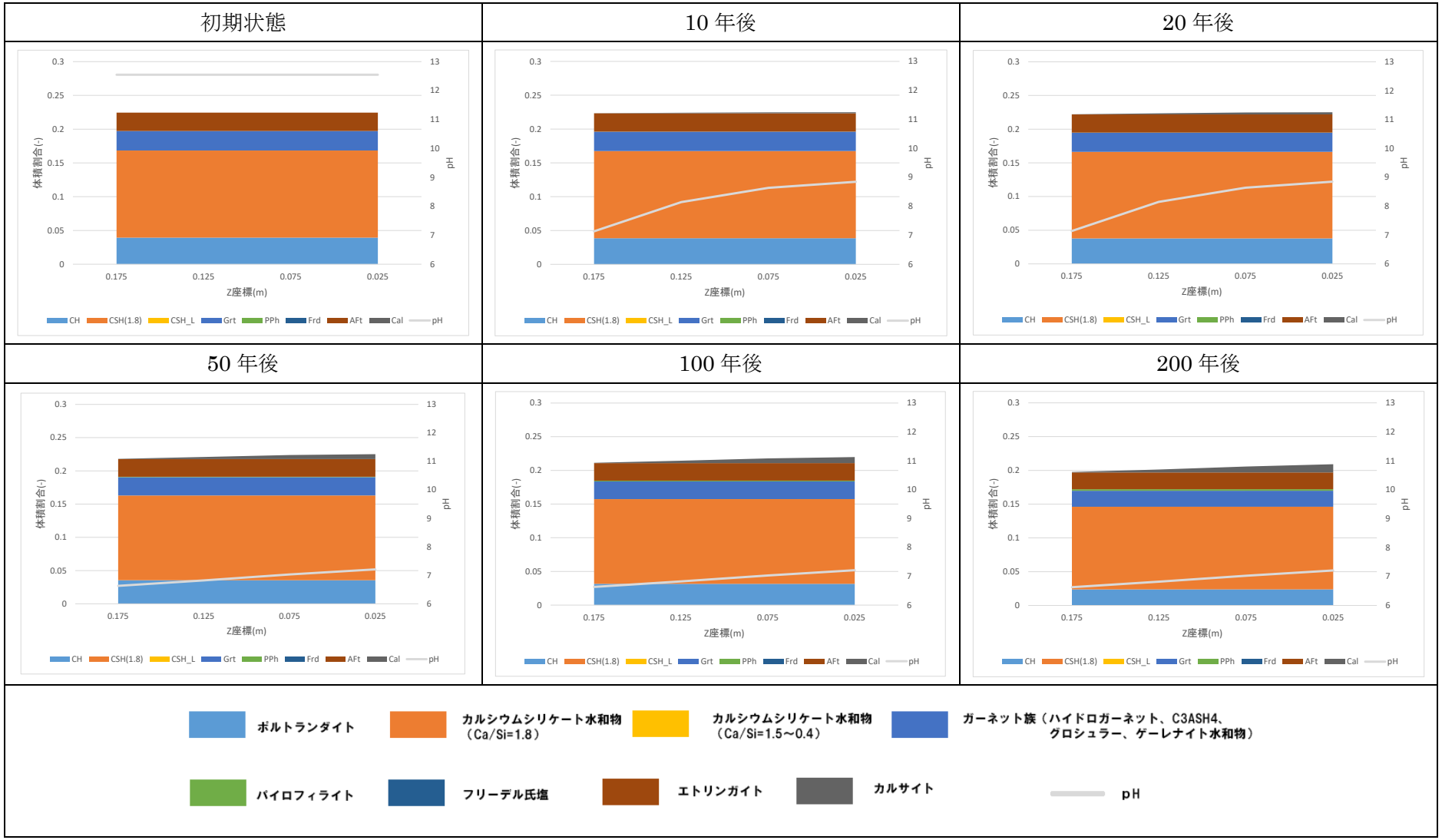


図 3.3.2-12　吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水の pH 変化（ケース HC-032）

（透水係数：標準，高 Cl⁻濃度地下水，速度論係数：小）

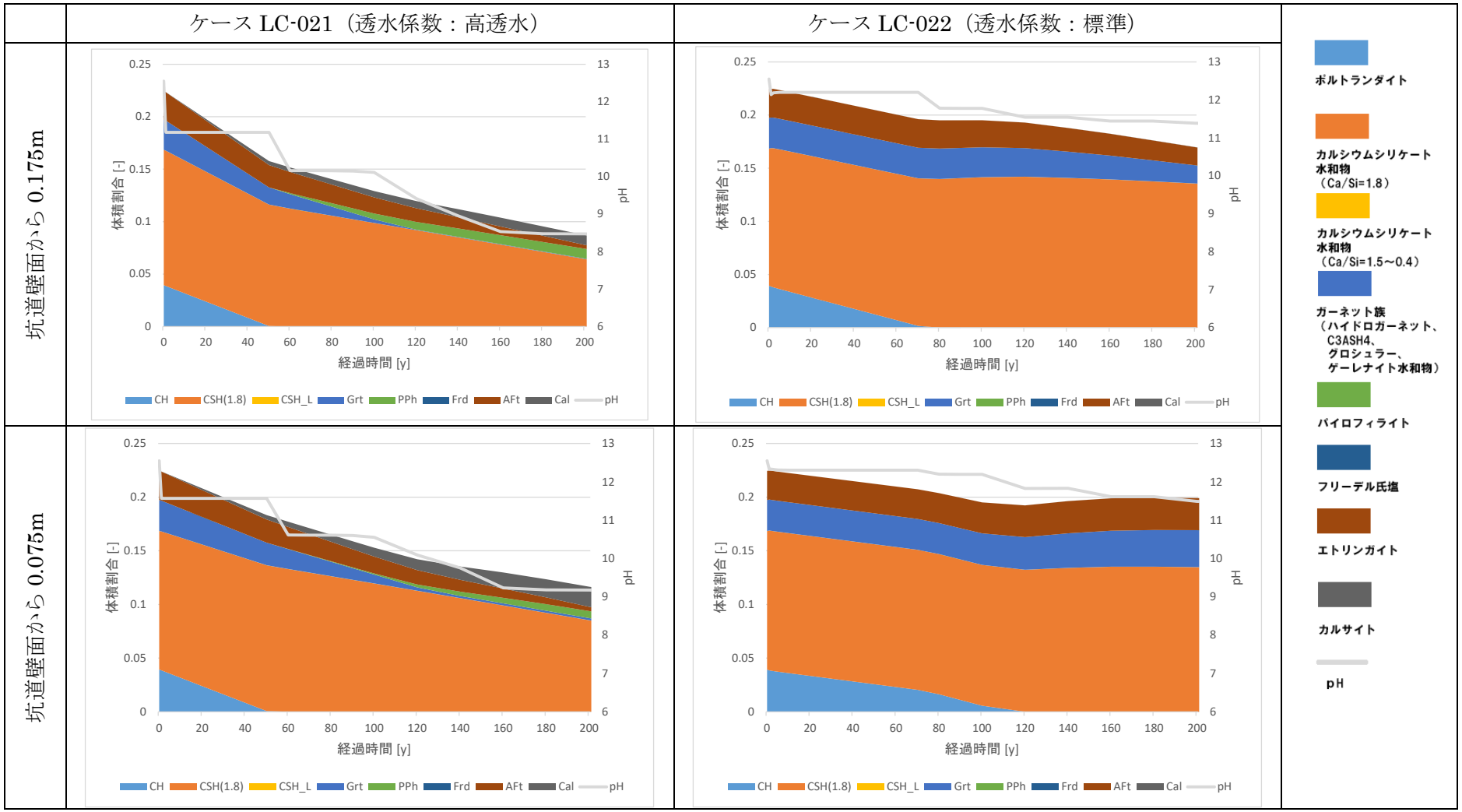


図 3.3.2-13　坑道掘削時点からの吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の変化

（低 Cl^-濃度地下水，速度論係数：標準）

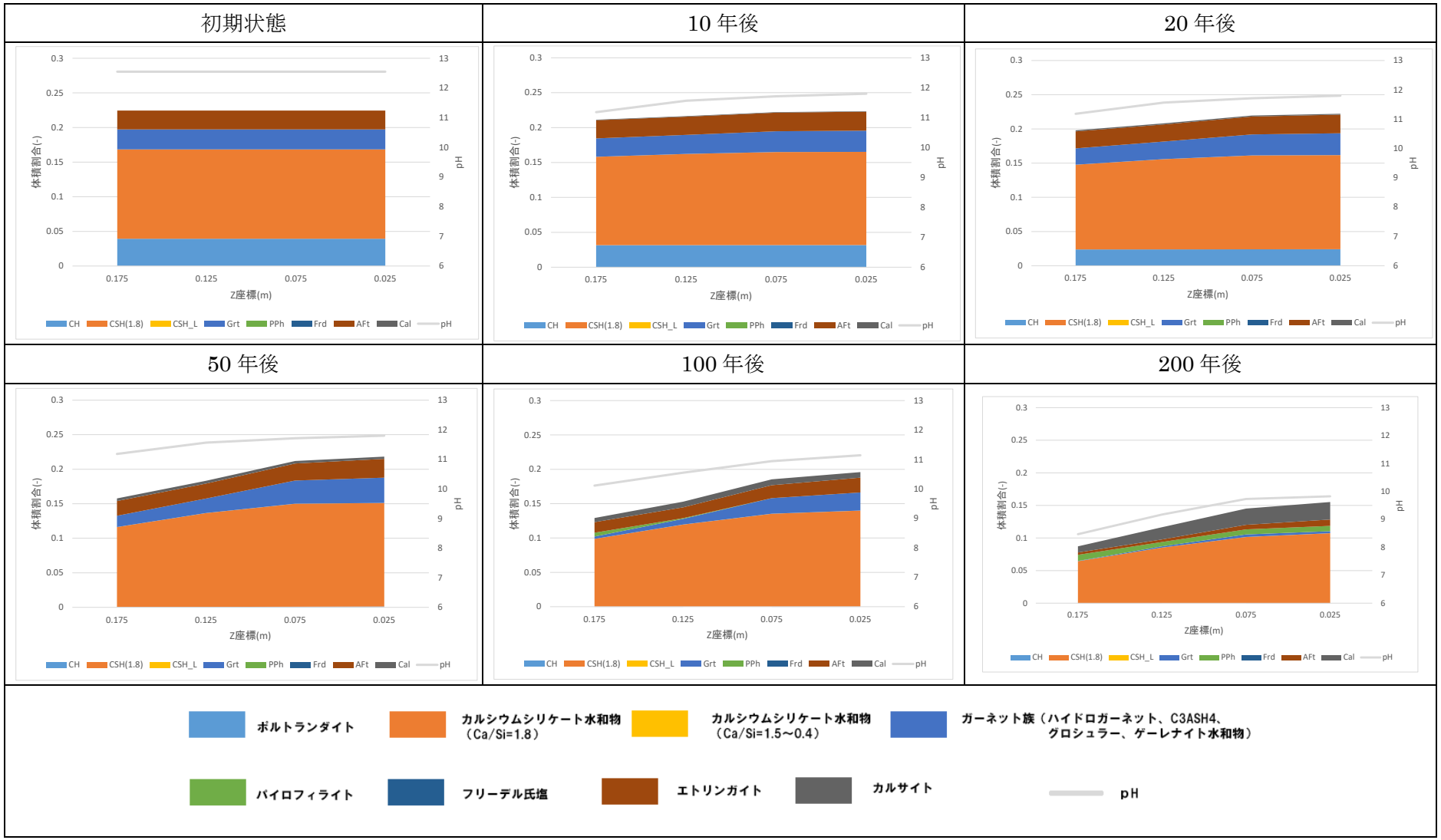


図 3.3.2-14　坑道掘削からの各時点における吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の分布

（ケース LC-021；透水係数：高透水，低 Cl⁻濃度地下水，速度論係数：標準）

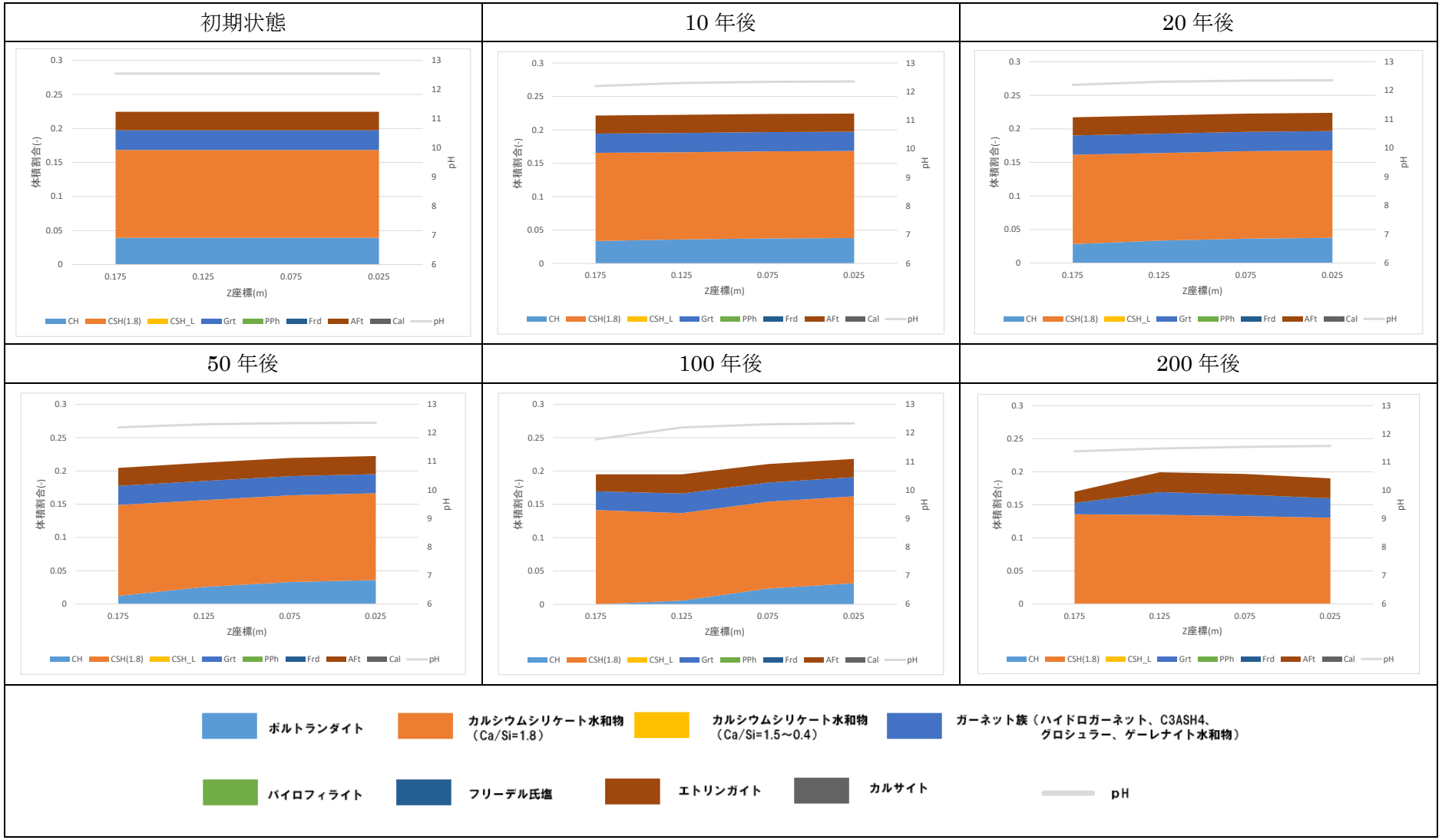


図 3.3.2-15　坑道掘削からの各時点における吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の分布

（ケース LC-022；透水係数：標準，低 Cl⁻濃度地下水，速度論係数：標準）

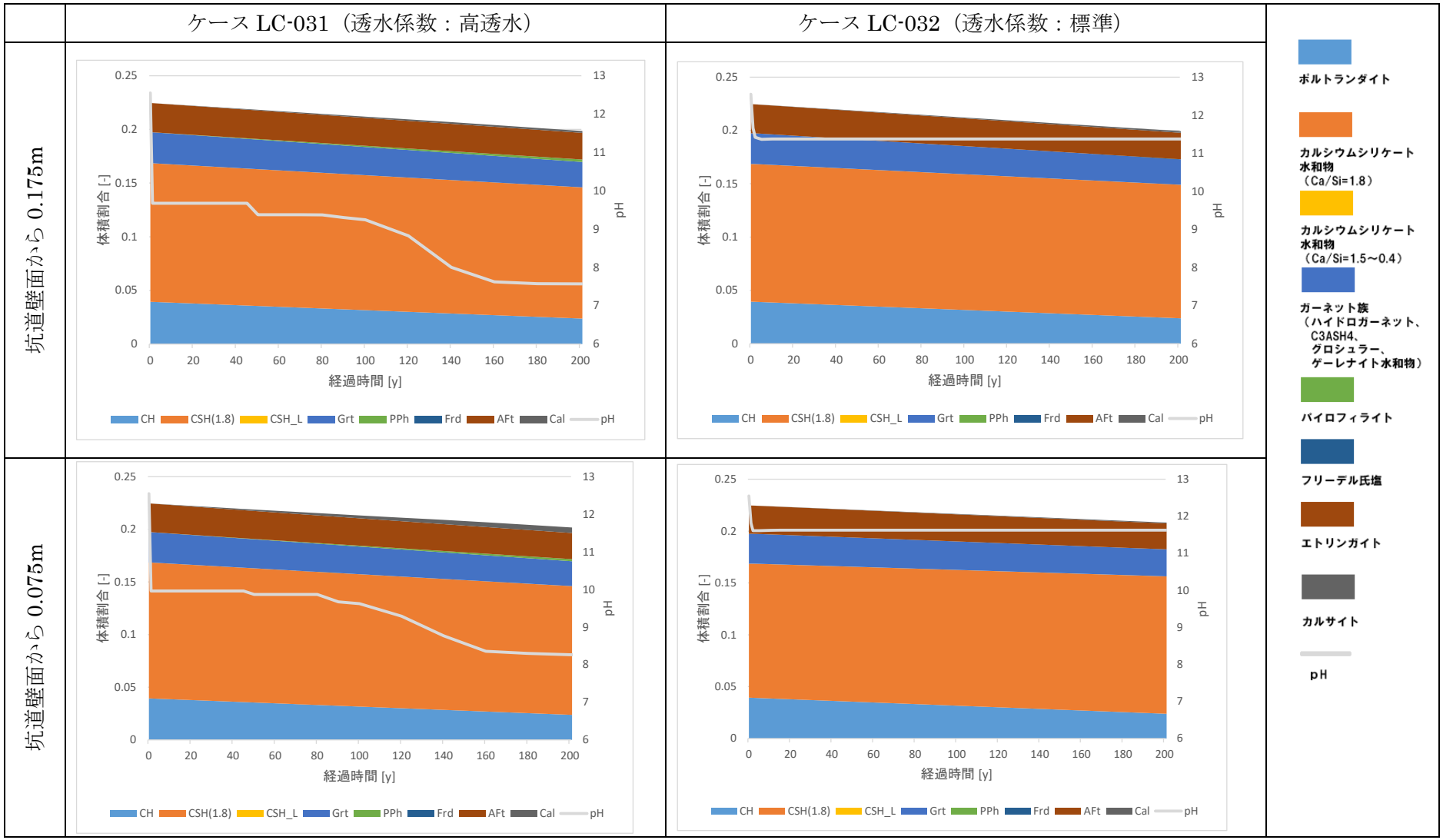


図 3.3.2-16　坑道掘削時点からの吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の変化

（低 Cl^-濃度地下水，速度論係数：小）

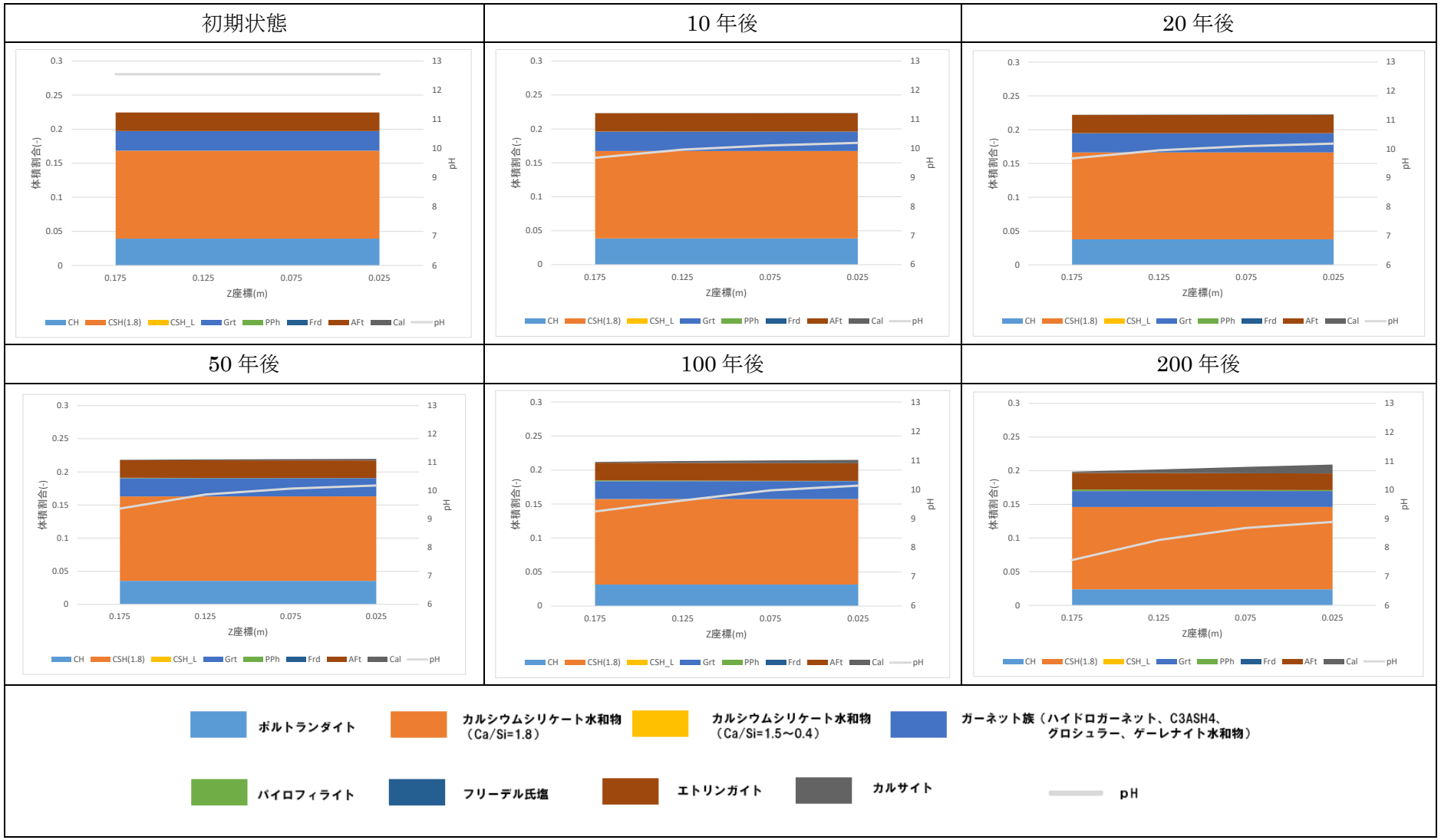


図 3.3.2-17　坑道掘削からの各時点における吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の分布

（ケース LC-031；透水係数：高透水，低 Cl^-濃度地下水，速度論係数：小）

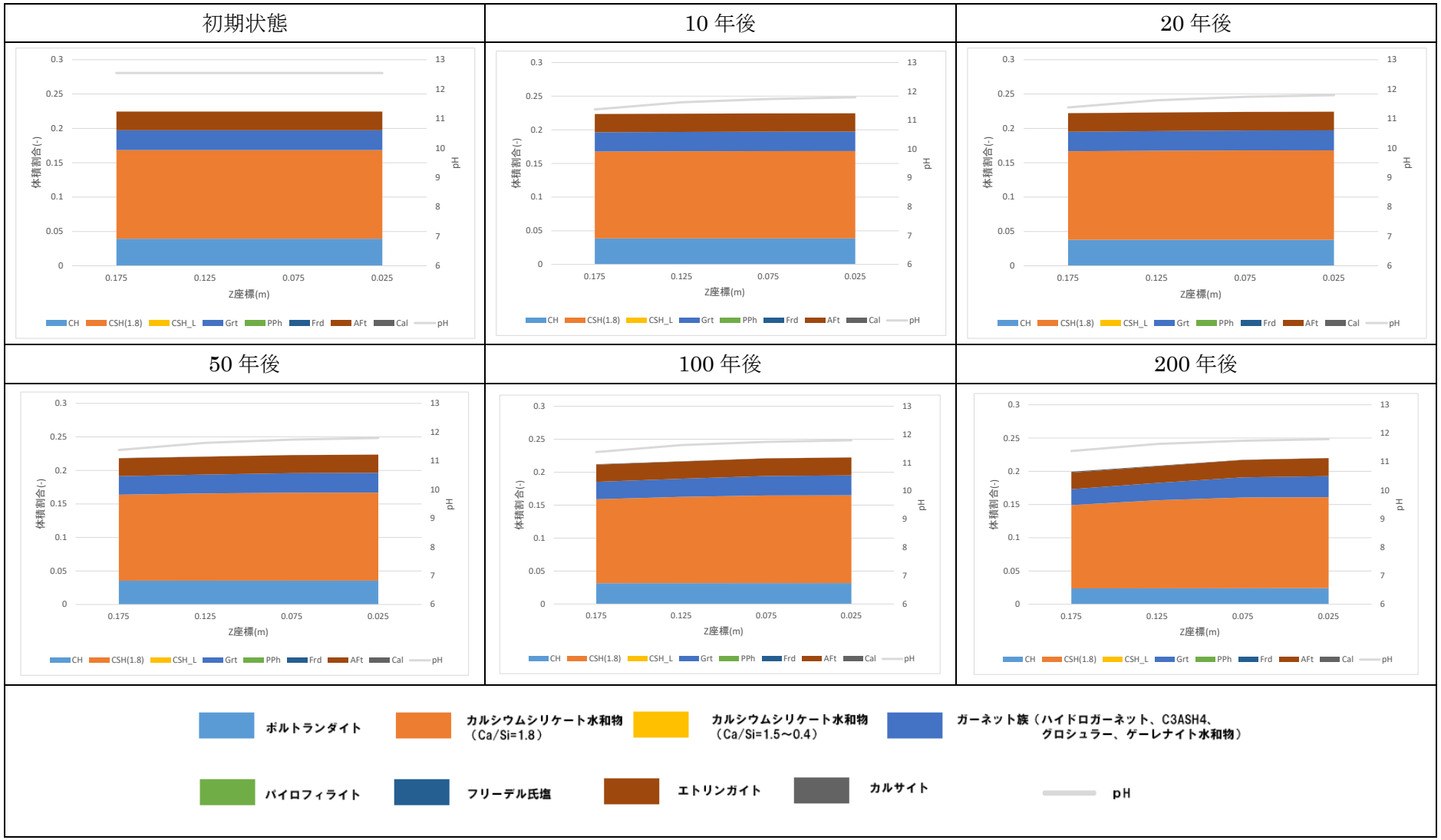


図 3.3.2-18　坑道掘削からの各時点における吹付けコンクリートの鉱物割合と間隙水 pH の分布（ケース LC-032）

（透水係数：標準，低 Cl^-濃度地下水，速度論係数：小）

b　再冠水時

(a)　母岩への影響検討

再冠水後のケース rHC-021（元の地下水が高 Cl^-濃度）およびケース rLC-021（元の地下水が低 Cl^-濃度）について、坑道掘削からの各時点における地下水の pH と ORP（Eh 値）の分布ならびに Ca^{2+}および HCO_3^-（炭酸水素イオン）の分布を図 3.3.2-19 と図 3.3.2-20 に示す。透水係数は 3×10^{-8}m/s である。

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

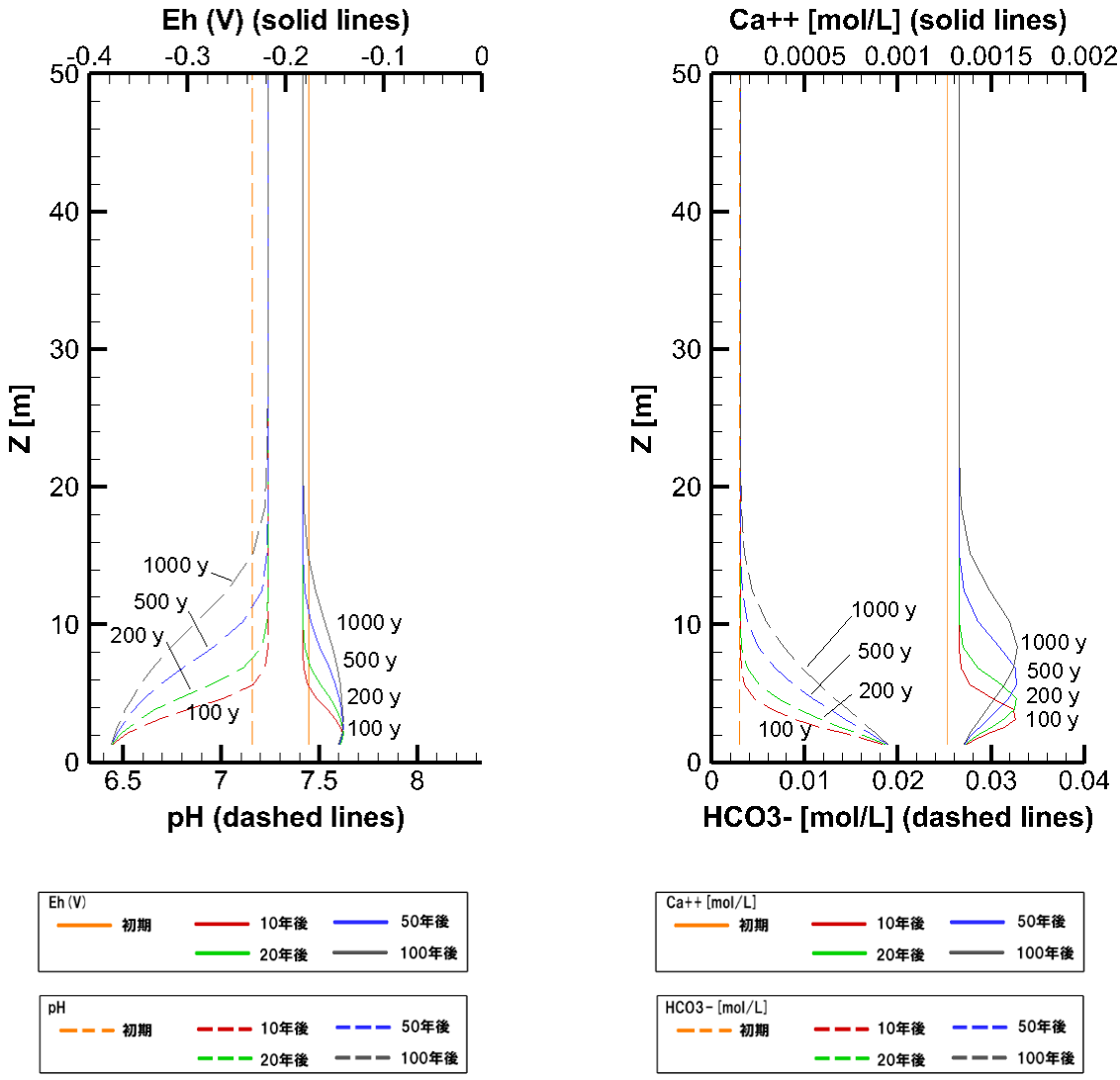


図 3.3.2-19　再冠水時の岩盤地下水の pH と Eh ならびに Ca^{2+}および HCO_3^-の分布
（ケース rHC-021，透水係数：高透水，高 Cl^-濃度地下水）

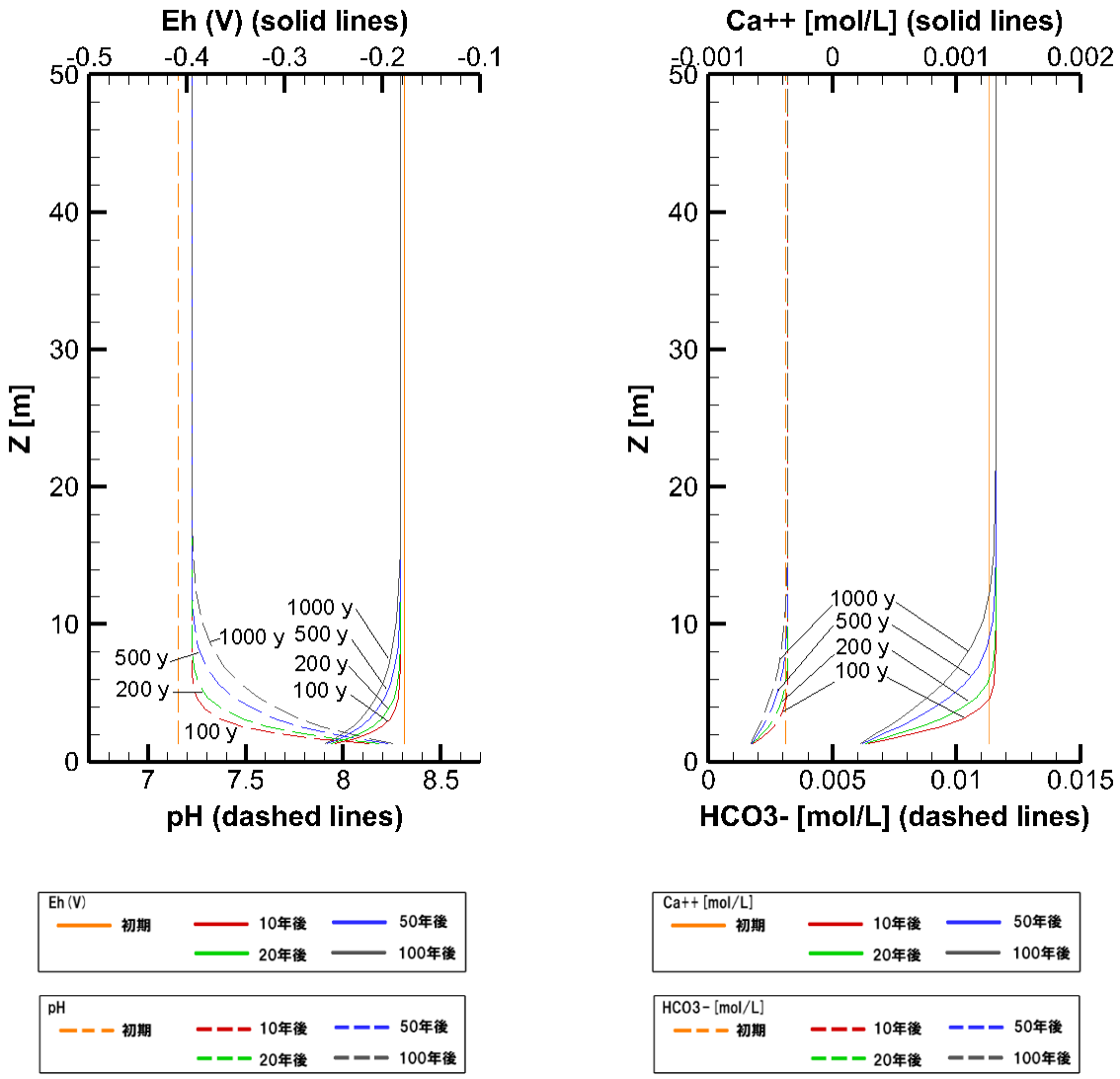


図 3.3.2-20　再冠水時の岩盤地下水の pH と Eh ならびに Ca^{2+}および HCO_3^-の分布
（ケース pLC-021，透水係数：高透水，低 Cl^-濃度地下水）

(4)　考察

1)　坑道への地下水の引き込みによる母岩や支保工への影響

a　坑道開放時

(a)　母岩への影響

本年度の検討では、岩盤中の地下水の ORP はほぼ元の値に近い還元状態に維持される結果となった。この原因は、地下水位が地表に維持されているため、酸素の供給が表層地下水中に溶解したものに限られることと、その溶存酸素が表層の黄鉄鉱と反応し、消費されてしまうことにある。

地下水の引き込みによる母岩への影響が大きくなるシナリオとして、坑道開放によって地

下水位が低下し、岩盤内に不飽和領域が形成されて、酸素が気体の状態で岩盤中へ浸入する場合が考えられる。PFLOTRAN を用いてこのような検討を行うには、間隙流体の流れを二相流として取り扱う必要がある。

(b)　支保工への影響

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

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

b　再冠水時

(a)　母岩の地下水組成の回復過程

本年度の検討では、再冠水の前後で地下水位が変化せず、坑道周辺に地下水の流れが生じないため、岩盤中の地下水が周辺の元の地下水と混合するのには長い時間を要する結果となった。また、地球化学的反応の考慮対象とするの母岩の鉱物が限られていたため、pH の変化は緩慢であった。

母岩の地下水の pH がより早く変化するシナリオとして、坑道開放時に地下水位が低下し、再冠水時に周辺から地下水が集まってくる状況が考えられる。また、考慮対象とする岩盤中の鉱物の種類を増やすことにより、pH の変化がより現実的になるものと予想される。

3.3.3　力学的影響評価

本節では、「3.3.2 化学的影響評価」の結果を基に、昨年度までの力学的解析の条件としていた支保工等のパラメータの妥当性を検討する。また、回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性に関連して、再掘削時の力学的影響評価方法についても検討を行う。さらに、力学的影響評価の課題についても整理を行う。

(1)　支保工等のパラメータの妥当性の検討

1)　検討の背景と目的

処分坑道の掘削後に、坑道安定性上、必要と判断された場合にはコンクリートや鋼材等からなる支保工が設置される。この支保工が時間経過とともに劣化すると、強度や剛性が低下することから、支保工の内圧効果が減少して坑道周辺岩盤の長期的な変形挙動に影響を与えると考えられる。よって、支保工の劣化は、坑道安定性の保持期間に影響を与えることが想定されている。

支保工の構成材料であるコンクリートには、地下水との接触によるセメント水和物の成分の溶

脱、鋼材の腐蝕膨張によるひび割れ、アルカリ骨材反応によるひび割れ、CO_2の浸透による中性化などの劣化現象が起きる。このようなセメント系材料の劣化現象に関して、昨年度までの検討[1]、[2]では地下水との接触によるセメント水和物からのカルシウムの溶脱の影響を支保工の剛性の低下として考慮した。そして、コンクリートの溶脱特性については、既往の研究[5]を参考に設定していた。また、昨年度の検討では、このコンクリートの溶脱特性が坑道安定性の保持期間に対して大きな影響を与えることが明らかになったことから、その特性を把握することは予測精度向上のためには重要であることが示されている[1]、[2]。

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

2)　昨年度までの設定

既往の研究[5]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ており、人工バリアのコンクリート系材料の溶脱速度を t=0.5mm/年と設定している。昨年度までの検討でも、この人工バリアのコンクリート系材料の溶脱速度を吹付けコンクリートの溶脱速度に適用している。そして、吹付けコンクリートの溶脱は支保工設置直後から進むと仮定したことにより、厚さ 200mm の吹付けコンクリートの場合、200/0.5=400 年で溶脱完了するものとしている。

溶脱完了後の吹付けコンクリートのヤング率については、既往の研究[5]と同様に、初期値の 1/10 になるものとしている。また、溶脱進行中の物性値については、線形補間することにして、溶脱完了後は一定をとるものと仮定していた。

吹付けコンクリートのヤング率の経時変化を図 3.3.3-1 に示す。

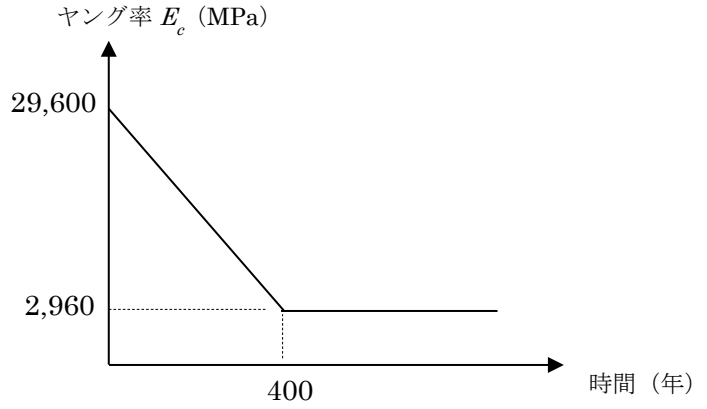


図 3.3.3-1　吹付けコンクリートのヤング率の経時変化

3)　既存の室内試験による溶脱率とコンクリートの力学特性の関係

カルシウムの溶脱率と一軸圧縮強度の関係に関して、JAEA による既往の研究[37]では、戸井田ら[38]の室内試験結果に基づく「第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ」[23]の成果を導入して、カルシウム溶脱によるコンクリートの一軸圧縮強度の低下を以下の式で評価している。

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

ここに、σ_cは一軸圧縮強度、σ_{c0}は初期一軸圧縮強度、$\sigma_{c(\min)}$は最小一軸圧縮強度、LCはカルシウムの溶脱率[%]である。なお、最小一軸圧縮強度については、JAEA の研究[37]と同様に、初期値の 1/100 になると仮定した。

戸井田ら[38]は、直径 30mm、厚さ 5mm の供試体をイオン交換水に浸漬し、作用水を定期的に交換する溶出劣化試験を行っているが、そこでは、供試体から溶け出したカルシウム量から、溶脱率を以下の様に定義している。

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

ここに、溶脱量=液相中のカルシウム濃度×作用水量、初期試料中に含まれるカルシウム量=供試体体積×初期試料中の単位セメント量×セメント中に含まれるカルシウムの質量割合である。

また、コンクリートのヤング率は、一軸圧縮強度との関係から以下のように示される[39]。

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

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

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

4)　化学的影響評価の結果に基づくパラメータの妥当性の検討

a　化学的影響評価に基づくカルシウム量の推移

3.3.2(2)3)では、地下水の引き込みによる岩盤や支保工への影響を検討するためにファーフィールドモデルによる解析を行っている。ここでは、その解析結果から、吹付けコンクリートに含まれるカルシウム量の推移を求める。

化学的影響評価のファーフィールドモデルの解析のうち、ここでは、支保工の存在を考慮している 8 ケースを対象とする。解析ケースを表 3.3.3-1 に示す。また、化学的影響評価における吹付けコンクリートの鉱物組成の評価点は、図 3.3.3-2 に示す通り、4 箇所あるが、ここでは、吹付けコンクリート中の鉱物の存在割合を 4 点の平均値で示すことにする。

化学的影響評価の結果から得られた吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化を表 3.3.3-2～表 3.3.3-9 に示す。

表 3.3.3-1　吹付けコンクリートのカルシウム量の算定対象とする解析ケース

ケース名	モデル体系			透水係数（m/s）	岩盤の地下水組成	速度論係数		確認事項
	岩盤	EDZ	支保工	岩盤・支保工		方解石	セメント鉱物	
HC-021	○	○	○	3×10^{-8}（高透水）	高Cl（高炭酸）	標準(b)	標準(b)	高Cl地下水による支保工変質
HC-022	○	○	○	3×10^{-9}（標準）	高Cl（高炭酸）	標準(b)	標準(b)	同　低透水の場合
HC-031	○	○	○	3×10^{-8}（高透水）	高Cl（高炭酸）	標準(b)	標準(b)×0.1	同　速度論係数小の場合
HC-032	○	○	○	3×10^{-9}（標準）	高Cl（高炭酸）	標準(b)	標準(b)×0.1	低透水かつ速度論係数小の場合
LC-021	○	○	○	3×10^{-8}（高透水）	低Cl（低炭酸）	標準(b)	標準(b)	低Cl地下水による支保工変質
LC-022	○	○	○	3×10^{-9}（標準）	低Cl（低炭酸）	標準(b)	標準(b)	同　低透水の場合
LC-031	○	○	○	3×10^{-8}（高透水）	低Cl（低炭酸）	標準(b)	標準(b)×0.1	同　速度論係数小の場合
LC-032	○	○	○	3×10^{-9}（標準）	低Cl（低炭酸）	標準(b)	標準(b)×0.1	低透水かつ速度論係数小の場合

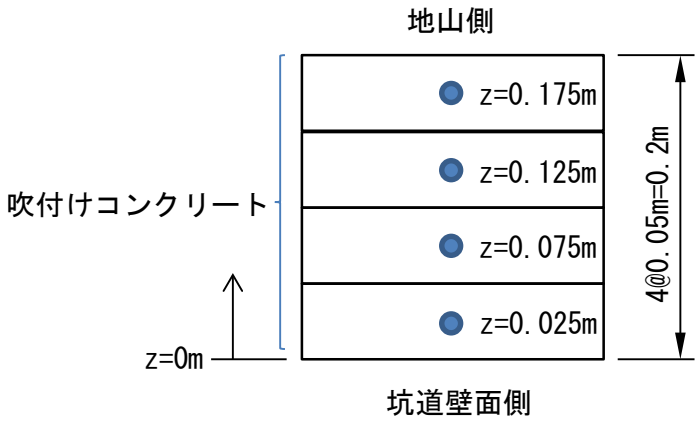


図 3.3.3-2　吹付けコンクリートの鉱物組成の評価点

表 3.3.3-2　吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化（ケース HC-021）

	ポルトランダイト	カルシウムシリケート水和物[( )内は、Ca/Si比]									ハイドロガーネット		ゲーレナイト水和物	グロシュラー	葉ろう石	フリーデルソルト	エトリンガイト	方解石	灰鉄ガーネット
	初期鉱物	初期鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	初期鉱物
時刻 [y]	Ca(OH)2	CSH(1.8)	CSH(1.5)	CSH(1.3)	CSH(1.1)	CSH(1.0)	CSH(0.9)	CSH(0.833)	CSH(0.6)	CSH(0.4)	C3AH6	C3ASH4	C2ASH8	C3AS3	AS4H	3CaO・Al2O3・CaCl2・10H2O	C6As3H32	CaCO3	C3FH6
0	3.938E-02	1.290E-01	4.699E-06	4.931E-06	5.258E-06	5.471E-06	5.732E-06	5.944E-06	6.969E-06	9.008E-06	2.883E-02	5.322E-06	1.078E-05	4.290E-06	1.381E-05	6.101E-06	2.718E-02	3.693E-06	8.172E-05
1	3.860E-02	1.289E-01	4.700E-06	4.946E-06	5.314E-06	5.567E-06	5.873E-06	6.087E-06	6.987E-06	9.007E-06	2.857E-02	5.274E-06	1.066E-05	6.466E-06	1.257E-04	6.093E-06	2.707E-02	3.081E-04	8.172E-05
2	3.782E-02	1.285E-01	4.687E-06	4.931E-06	5.297E-06	5.549E-06	5.854E-06	6.066E-06	6.970E-06	8.988E-06	2.831E-02	5.223E-06	1.052E-05	6.434E-06	2.396E-04	6.084E-06	2.695E-02	6.106E-04	8.172E-05
5	3.548E-02	1.275E-01	4.647E-06	4.887E-06	5.248E-06	5.496E-06	5.795E-06	6.002E-06	6.918E-06	8.933E-06	2.753E-02	5.071E-06	1.011E-05	6.336E-06	5.813E-04	6.057E-06	2.659E-02	1.350E-03	8.172E-05
10	3.159E-02	1.258E-01	4.581E-06	4.815E-06	5.165E-06	5.406E-06	5.697E-06	5.897E-06	6.831E-06	8.836E-06	2.624E-02	4.817E-06	9.410E-06	6.171E-06	1.151E-03	6.012E-06	2.600E-02	1.489E-03	8.172E-05
15	2.770E-02	1.241E-01	4.515E-06	4.742E-06	5.082E-06	5.317E-06	5.598E-06	5.791E-06	6.744E-06	8.740E-06	2.494E-02	4.563E-06	8.714E-06	6.006E-06	1.721E-03	5.968E-06	2.541E-02	1.628E-03	8.172E-05
20	2.380E-02	1.223E-01	4.449E-06	4.669E-06	5.000E-06	5.227E-06	5.500E-06	5.685E-06	6.657E-06	8.643E-06	2.365E-02	4.308E-06	8.019E-06	5.841E-06	2.290E-03	5.923E-06	2.482E-02	1.767E-03	8.172E-05
25	1.991E-02	1.206E-01	4.383E-06	4.596E-06	4.917E-06	5.138E-06	5.402E-06	5.580E-06	6.570E-06	8.547E-06	2.235E-02	4.054E-06	7.323E-06	5.675E-06	2.860E-03	5.879E-06	2.423E-02	1.906E-03	8.172E-05
30	1.601E-02	1.189E-01	4.317E-06	4.524E-06	4.834E-06	5.048E-06	5.303E-06	5.474E-06	6.483E-06	8.450E-06	2.106E-02	3.800E-06	6.628E-06	5.510E-06	3.429E-03	5.834E-06	2.364E-02	2.045E-03	8.172E-05
35	1.212E-02	1.172E-01	4.251E-06	4.451E-06	4.752E-06	4.958E-06	5.205E-06	5.368E-06	6.395E-06	8.354E-06	1.976E-02	3.546E-06	5.932E-06	5.345E-06	3.999E-03	5.790E-06	2.305E-02	2.184E-03	8.172E-05
40	8.224E-03	1.155E-01	4.185E-06	4.378E-06	4.669E-06	4.869E-06	5.107E-06	5.263E-06	6.308E-06	8.257E-06	1.847E-02	3.291E-06	5.236E-06	5.180E-06	4.569E-03	5.745E-06	2.246E-02	2.322E-03	8.172E-05
45	4.329E-03	1.138E-01	4.119E-06	4.305E-06	4.586E-06	4.779E-06	5.008E-06	5.157E-06	6.221E-06	8.160E-06	1.718E-02	3.037E-06	4.541E-06	5.015E-06	5.138E-03	5.700E-06	2.187E-02	2.461E-03	8.172E-05
50	4.350E-04	1.120E-01	4.053E-06	4.233E-06	4.503E-06	4.690E-06	4.910E-06	5.051E-06	6.134E-06	8.064E-06	1.588E-02	2.783E-06	3.845E-06	4.849E-06	5.708E-03	5.656E-06	2.128E-02	2.600E-03	8.172E-05
60	0	1.086E-01	3.921E-06	4.087E-06	4.338E-06	4.511E-06	4.714E-06	4.840E-06	5.960E-06	7.870E-06	1.329E-02	2.275E-06	2.454E-06	4.519E-06	6.847E-03	5.567E-06	2.010E-02	2.651E-03	8.172E-05
70	0	1.052E-01	3.788E-06	3.942E-06	4.173E-06	4.332E-06	4.517E-06	4.629E-06	5.785E-06	7.676E-06	1.070E-02	1.766E-06	1.063E-06	4.189E-06	7.986E-03	5.478E-06	1.892E-02	2.676E-03	8.172E-05
80	0	1.017E-01	3.656E-06	3.796E-06	4.007E-06	4.153E-06	4.320E-06	4.417E-06	5.611E-06	7.482E-06	8.113E-03	1.258E-06	0	3.858E-06	9.125E-03	5.389E-06	1.774E-02	2.702E-03	8.172E-05
90	0	9.829E-02	3.524E-06	3.651E-06	3.842E-06	3.974E-06	4.124E-06	4.206E-06	5.437E-06	7.288E-06	5.524E-03	7.494E-07	0	3.528E-06	1.026E-02	5.300E-06	1.656E-02	2.727E-03	8.172E-05
100	0	9.486E-02	3.392E-06	3.505E-06	3.676E-06	3.794E-06	3.927E-06	3.994E-06	5.262E-06	7.095E-06	2.935E-03	2.410E-07	0	3.198E-06	1.140E-02	5.210E-06	1.538E-02	2.753E-03	8.172E-05
200	0	6.050E-02	2.071E-06	2.053E-06	2.031E-06	2.019E-06	1.985E-06	1.905E-06	3.630E-06	5.388E-06	0	0	0	4.897E-07	1.469E-02	4.319E-06	3.584E-03	7.202E-03	8.172E-05
300	0	2.615E-02	7.525E-07	6.057E-07	4.039E-07	2.757E-07	1.237E-07	3.287E-08	2.193E-06	4.040E-06	0	0	0	0	1.538E-02	3.428E-06	0	1.630E-02	8.172E-05
500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.225E-07	0	0	0	0	1.539E-02	1.646E-06	0	2.304E-02	8.172E-05
1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.540E-02	0	0	2.304E-02	8.172E-05

表 3.3.3-3　吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化（ケース HC-022）

	ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾀﾞｲﾄ	カルシウムシリケート水和物[（ ）内は、Ca/Si比]									ハイドロガーネット		ｹﾞｰﾚﾅｲﾄ水和物	ｸﾞﾛｼｭﾗｰ	葉ろう石	ﾌﾘｰﾃﾞﾙｿﾙﾄ	ｴﾄﾘﾝｶﾞｲﾄ	方解石	灰鉄ｶﾞｰﾈｯﾄ
	初期鉱物	初期鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	初期鉱物
時刻 [y]	Ca(OH)2	CSH(1.8)	CSH(1.5)	CSH(1.3)	CSH(1.1)	CSH(1.0)	CSH(0.9)	CSH(0.833)	CSH(0.6)	CSH(0.4)	C3AH6	C3ASH4	C2ASH8	C3AS3	AS4H	3CaO･Al2O3･CaCl2･10H2O	C6As3H32	CaCO3	C3FH6
0	3.938E-02	1.290E-01	4.699E-06	4.931E-06	5.258E-06	5.471E-06	5.732E-06	5.944E-06	6.969E-06	9.008E-06	2.883E-02	5.322E-06	1.078E-05	4.290E-06	1.381E-05	6.101E-06	2.718E-02	3.693E-06	8.172E-05
1	3.860E-02	1.297E-01	4.823E-06	5.322E-06	6.488E-06	7.489E-06	8.544E-06	8.679E-06	7.359E-06	9.144E-06	2.860E-02	6.704E-06	5.850E-05	3.729E-05	9.068E-05	6.229E-06	2.707E-02	4.279E-04	8.172E-05
2	3.783E-02	1.299E-01	4.865E-06	5.433E-06	6.743E-06	7.827E-06	8.908E-06	8.965E-06	7.401E-06	9.151E-06	2.851E-02	7.508E-06	7.443E-05	6.665E-05	1.386E-04	9.161E-06	2.698E-02	9.785E-04	8.172E-05
5	3.568E-02	1.298E-01	4.895E-06	5.505E-06	6.869E-06	7.967E-06	9.024E-06	9.027E-06	7.381E-06	9.108E-06	2.838E-02	7.687E-06	8.832E-05	9.817E-05	2.242E-04	2.453E-05	2.689E-02	2.544E-03	8.172E-05
10	3.223E-02	1.296E-01	4.920E-06	5.571E-06	6.983E-06	8.086E-06	9.106E-06	9.043E-06	7.324E-06	9.025E-06	2.817E-02	8.000E-06	1.033E-04	1.404E-04	3.662E-04	5.579E-05	2.675E-02	5.059E-03	8.172E-05
15	2.880E-02	1.293E-01	4.943E-06	5.633E-06	7.089E-06	8.195E-06	9.177E-06	9.052E-06	7.265E-06	8.940E-06	2.797E-02	8.298E-06	1.166E-04	1.823E-04	5.082E-04	8.819E-05	2.662E-02	7.561E-03	8.172E-05
20	2.537E-02	1.290E-01	4.966E-06	5.694E-06	7.193E-06	8.302E-06	9.247E-06	9.060E-06	7.205E-06	8.855E-06	2.776E-02	8.592E-06	1.295E-04	2.242E-04	6.502E-04	1.208E-04	2.649E-02	1.006E-02	8.172E-05
25	2.194E-02	1.287E-01	4.989E-06	5.755E-06	7.298E-06	8.409E-06	9.316E-06	9.066E-06	7.146E-06	8.770E-06	2.755E-02	8.885E-06	1.423E-04	2.660E-04	7.921E-04	1.536E-04	2.636E-02	1.256E-02	8.172E-05
30	1.851E-02	1.284E-01	5.011E-06	5.816E-06	7.402E-06	8.516E-06	9.385E-06	9.073E-06	7.086E-06	8.685E-06	2.735E-02	9.177E-06	1.549E-04	3.079E-04	9.341E-04	1.864E-04	2.622E-02	1.505E-02	8.172E-05
35	1.508E-02	1.282E-01	5.034E-06	5.877E-06	7.506E-06	8.622E-06	9.453E-06	9.079E-06	7.026E-06	8.600E-06	2.714E-02	9.469E-06	1.676E-04	3.498E-04	1.076E-03	2.193E-04	2.609E-02	1.755E-02	8.172E-05
40	1.165E-02	1.279E-01	5.056E-06	5.938E-06	7.610E-06	8.728E-06	9.521E-06	9.086E-06	6.966E-06	8.515E-06	2.694E-02	9.760E-06	1.802E-04	3.916E-04	1.218E-03	2.522E-04	2.596E-02	2.004E-02	8.172E-05
45	8.216E-03	1.276E-01	5.079E-06	5.999E-06	7.714E-06	8.835E-06	9.590E-06	9.092E-06	6.906E-06	8.430E-06	2.673E-02	1.005E-05	1.928E-04	4.335E-04	1.360E-03	2.850E-04	2.583E-02	2.254E-02	8.172E-05
50	4.787E-03	1.273E-01	5.101E-06	6.060E-06	7.818E-06	8.941E-06	9.658E-06	9.098E-06	6.846E-06	8.345E-06	2.652E-02	1.034E-05	2.053E-04	4.754E-04	1.502E-03	3.179E-04	2.569E-02	2.503E-02	8.172E-05
60	1.529E-03	1.248E-01	5.051E-06	6.070E-06	7.922E-06	9.073E-06	9.751E-06	9.096E-06	6.760E-06	8.219E-06	2.485E-02	1.109E-05	3.009E-04	6.306E-04	2.390E-03	3.367E-04	2.493E-02	3.000E-02	8.172E-05
70	0	1.214E-01	4.922E-06	5.934E-06	7.787E-06	8.943E-06	9.624E-06	8.952E-06	6.667E-06	8.118E-06	2.226E-02	1.061E-05	4.365E-04	8.004E-04	3.529E-03	3.366E-04	2.375E-02	3.455E-02	8.172E-05
80	0	1.180E-01	4.790E-06	5.789E-06	7.624E-06	8.769E-06	9.435E-06	8.748E-06	6.527E-06	7.991E-06	1.967E-02	1.010E-05	4.427E-04	9.395E-04	4.669E-03	3.365E-04	2.257E-02	3.803E-02	8.172E-05
90	0	1.145E-01	4.658E-06	5.645E-06	7.461E-06	8.595E-06	9.246E-06	8.545E-06	6.387E-06	7.865E-06	1.708E-02	9.591E-06	4.489E-04	1.078E-03	5.808E-03	3.365E-04	2.139E-02	4.152E-02	8.172E-05
100	0	1.111E-01	4.526E-06	5.500E-06	7.299E-06	8.421E-06	9.057E-06	8.341E-06	6.247E-06	7.738E-06	1.449E-02	9.083E-06	4.551E-04	1.217E-03	6.947E-03	3.364E-04	2.021E-02	4.500E-02	8.172E-05
200	0	7.675E-02	3.206E-06	4.051E-06	5.667E-06	6.672E-06	7.157E-06	6.300E-06	4.848E-06	6.554E-06	3.374E-04	5.209E-06	4.610E-04	1.654E-03	1.690E-02	3.355E-04	8.414E-03	7.401E-02	8.172E-05
300	0	4.239E-02	1.886E-06	2.599E-06	4.024E-06	4.904E-06	5.234E-06	4.236E-06	3.425E-06	5.557E-06	0	2.848E-06	4.506E-04	1.651E-03	1.878E-02	3.346E-04	4.746E-04	9.211E-02	8.172E-05
500	0	0	0	3.440E-07	1.410E-06	2.088E-06	2.161E-06	9.865E-07	3.824E-07	2.262E-06	0	3.057E-07	4.297E-04	1.644E-03	1.890E-02	3.328E-04	0	1.061E-01	8.172E-05
1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.775E-04	1.628E-03	1.895E-02	3.290E-04	0	1.062E-01	8.172E-05

表 3.3.3-4　吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化（ケース HC-031）

	ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾀﾞｲﾄ	カルシウムシリケート水和物[( )内は、Ca/Si比]									ハイドロガーネット		ｹﾞｰﾚﾅｲﾄ水和物	ｸﾞﾛｼｭﾗｰ	葉ろう石	ﾌﾘｰﾃﾞﾙｿﾙﾄ	ｴﾄﾘﾝｶﾞｲﾄ	方解石	灰鉄ｶﾞｰﾈｯﾄ
	初期鉱物	初期鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	初期鉱物
時刻 [y]	Ca(OH)2	CSH(1.8)	CSH(1.5)	CSH(1.3)	CSH(1.1)	CSH(1.0)	CSH(0.9)	CSH(0.833)	CSH(0.6)	CSH(0.4)	C3AH6	C3ASH4	C2ASH8	C3AS3	AS4H	3CaO･Al2O3･CaCl2･10H2O	C6As3H32	CaCO3	C3FH6
0	3.938E−02	1.290E−01	4.699E−06	4.931E−06	5.258E−06	5.471E−06	5.732E−06	5.944E−06	6.969E−06	9.008E−06	2.883E−02	5.322E−06	1.078E−05	4.290E−06	1.381E−05	6.101E−06	2.718E−02	3.693E−06	8.172E−05
1	3.930E−02	1.291E−01	4.706E−06	4.942E−06	5.278E−06	5.496E−06	5.762E−06	5.976E−06	6.978E−06	9.008E−06	2.880E−02	5.319E−06	1.077E−05	4.373E−06	2.494E−05	6.101E−06	2.717E−02	1.344E−05	8.172E−05
2	3.922E−02	1.291E−01	4.705E−06	4.941E−06	5.276E−06	5.494E−06	5.761E−06	5.973E−06	6.976E−06	9.006E−06	2.878E−02	5.314E−06	1.075E−05	4.370E−06	3.633E−05	6.100E−06	2.716E−02	1.421E−05	8.172E−05
5	3.899E−02	1.290E−01	4.701E−06	4.937E−06	5.271E−06	5.489E−06	5.755E−06	5.967E−06	6.971E−06	9.001E−06	2.870E−02	5.299E−06	1.071E−05	4.360E−06	7.051E−05	6.097E−06	2.713E−02	1.652E−05	8.172E−05
10	3.860E−02	1.288E−01	4.694E−06	4.929E−06	5.263E−06	5.480E−06	5.745E−06	5.956E−06	6.962E−06	8.991E−06	2.857E−02	5.274E−06	1.064E−05	4.344E−06	1.275E−04	6.093E−06	2.707E−02	2.037E−05	8.172E−05
15	3.821E−02	1.286E−01	4.688E−06	4.922E−06	5.254E−06	5.471E−06	5.735E−06	5.946E−06	6.953E−06	8.981E−06	2.844E−02	5.248E−06	1.057E−05	4.327E−06	1.844E−04	6.088E−06	2.701E−02	2.422E−05	8.172E−05
20	3.782E−02	1.285E−01	4.681E−06	4.915E−06	5.246E−06	5.462E−06	5.725E−06	5.935E−06	6.945E−06	8.971E−06	2.831E−02	5.223E−06	1.050E−05	4.311E−06	2.414E−04	6.084E−06	2.695E−02	2.807E−05	8.172E−05
25	3.743E−02	1.283E−01	4.674E−06	4.908E−06	5.238E−06	5.453E−06	5.715E−06	5.925E−06	6.936E−06	8.962E−06	2.818E−02	5.197E−06	1.043E−05	4.294E−06	2.984E−04	6.079E−06	2.689E−02	3.191E−05	8.172E−05
30	3.704E−02	1.281E−01	4.668E−06	4.900E−06	5.230E−06	5.444E−06	5.705E−06	5.914E−06	6.927E−06	8.952E−06	2.805E−02	5.172E−06	1.036E−05	4.278E−06	3.553E−04	6.075E−06	2.683E−02	3.576E−05	8.172E−05
35	3.665E−02	1.280E−01	4.661E−06	4.893E−06	5.221E−06	5.435E−06	5.696E−06	5.904E−06	6.918E−06	8.942E−06	2.792E−02	5.146E−06	1.029E−05	4.261E−06	4.123E−04	6.070E−06	2.677E−02	3.961E−05	8.172E−05
40	3.626E−02	1.278E−01	4.655E−06	4.886E−06	5.213E−06	5.426E−06	5.686E−06	5.893E−06	6.910E−06	8.933E−06	2.779E−02	5.121E−06	1.023E−05	4.244E−06	4.692E−04	6.066E−06	2.671E−02	4.291E−05	8.172E−05
45	3.587E−02	1.276E−01	4.648E−06	4.878E−06	5.205E−06	5.417E−06	5.676E−06	5.882E−06	6.901E−06	8.923E−06	2.766E−02	5.096E−06	1.016E−05	4.228E−06	5.262E−04	6.061E−06	2.665E−02	4.537E−05	8.172E−05
50	3.548E−02	1.274E−01	4.641E−06	4.871E−06	5.196E−06	5.408E−06	5.666E−06	5.872E−06	6.892E−06	8.913E−06	2.753E−02	5.070E−06	1.009E−05	4.211E−06	5.832E−04	6.057E−06	2.659E−02	4.783E−05	8.172E−05
60	3.471E−02	1.271E−01	4.628E−06	4.857E−06	5.180E−06	5.390E−06	5.646E−06	5.851E−06	6.875E−06	8.894E−06	2.727E−02	5.019E−06	9.947E−06	4.178E−06	6.971E−04	6.048E−06	2.648E−02	5.276E−05	8.172E−05
70	3.393E−02	1.268E−01	4.615E−06	4.842E−06	5.163E−06	5.372E−06	5.627E−06	5.830E−06	6.857E−06	8.874E−06	2.701E−02	4.968E−06	9.808E−06	4.145E−06	8.110E−04	6.039E−06	2.636E−02	5.768E−05	8.172E−05
80	3.315E−02	1.264E−01	4.602E−06	4.827E−06	5.147E−06	5.354E−06	5.607E−06	5.809E−06	6.840E−06	8.855E−06	2.676E−02	4.918E−06	9.669E−06	4.112E−06	9.249E−04	6.030E−06	2.624E−02	6.260E−05	8.172E−05
90	3.237E−02	1.261E−01	4.589E−06	4.813E−06	5.130E−06	5.337E−06	5.587E−06	5.787E−06	6.823E−06	8.836E−06	2.650E−02	4.867E−06	9.530E−06	4.079E−06	1.039E−03	6.021E−06	2.612E−02	6.753E−05	8.172E−05
100	3.159E−02	1.257E−01	4.575E−06	4.798E−06	5.114E−06	5.319E−06	5.568E−06	5.766E−06	6.805E−06	8.816E−06	2.624E−02	4.816E−06	9.391E−06	4.046E−06	1.153E−03	6.012E−06	2.600E−02	7.249E−05	8.172E−05
200	2.380E−02	1.223E−01	4.443E−06	4.653E−06	4.948E−06	5.140E−06	5.371E−06	5.555E−06	6.632E−06	8.627E−06	2.365E−02	4.308E−06	7.999E−06	3.716E−06	2.292E−03	5.923E−06	2.482E−02	1.194E−03	8.172E−05
300	1.601E−02	1.189E−01	4.311E−06	4.507E−06	4.783E−06	4.961E−06	5.175E−06	5.344E−06	6.461E−06	8.446E−06	2.106E−02	3.799E−06	6.608E−06	3.386E−06	3.431E−03	5.834E−06	2.364E−02	4.136E−03	8.172E−05
500	4.349E−04	1.120E−01	4.047E−06	4.217E−06	4.452E−06	4.603E−06	4.782E−06	4.922E−06	6.120E−06	8.084E−06	1.588E−02	2.782E−06	3.826E−06	2.725E−06	5.710E−03	5.656E−06	2.128E−02	1.002E−02	8.172E−05
1000	0	9.480E−02	3.386E−06	3.489E−06	3.625E−06	3.707E−06	3.799E−06	3.865E−06	5.250E−06	7.125E−06	2.935E−03	2.401E−07	0	1.073E−06	1.141E−02	5.210E−06	1.538E−02	1.126E−02	8.172E−05

表 3.3.3-5　吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化（ケース HC-032）

	ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾀﾞｲﾄ	カルシウムシリケート水和物[( )内は、Ca/Si比]									ハイドロガーネット		ｹﾞｰﾚﾅｲﾄ水和物	ｸﾞﾛｼｭﾗｰ	葉ろう石	ﾌﾘｰﾃﾞﾙｿﾙﾄ	ｴﾄﾘﾝｶﾞｲﾄ	方解石	灰鉄ｶﾞｰﾈｯﾄ
	初期鉱物	初期鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	初期鉱物
時刻 [y]	Ca(OH)2	CSH(1.8)	CSH(1.5)	CSH(1.3)	CSH(1.1)	CSH(1.0)	CSH(0.9)	CSH(0.833)	CSH(0.6)	CSH(0.4)	C3AH6	C3ASH4	C2ASH8	C3AS3	AS4H	3CaO･Al2O3･CaCl2･10H2O	C6As3H32	CaCO3	C3FH6
0	3.938E-02	1.290E-01	4.699E-06	4.931E-06	5.258E-06	5.471E-06	5.732E-06	5.944E-06	6.969E-06	9.008E-06	2.883E-02	5.322E-06	1.078E-05	4.290E-06	1.381E-05	6.101E-06	2.718E-02	3.693E-06	8.172E-05
1	3.930E-02	1.292E-01	4.710E-06	4.951E-06	5.304E-06	5.542E-06	5.830E-06	6.044E-06	6.994E-06	9.020E-06	2.880E-02	5.320E-06	1.077E-05	5.744E-06	2.351E-05	6.101E-06	2.717E-02	9.399E-05	8.172E-05
2	3.922E-02	1.291E-01	4.708E-06	4.950E-06	5.303E-06	5.540E-06	5.828E-06	6.042E-06	6.992E-06	9.019E-06	2.878E-02	5.315E-06	1.076E-05	5.751E-06	3.490E-05	6.100E-06	2.716E-02	1.918E-04	8.172E-05
5	3.899E-02	1.290E-01	4.704E-06	4.945E-06	5.298E-06	5.535E-06	5.823E-06	6.035E-06	6.987E-06	9.015E-06	2.870E-02	5.299E-06	1.071E-05	5.742E-06	6.908E-05	6.097E-06	2.713E-02	4.695E-04	8.172E-05
10	3.860E-02	1.289E-01	4.698E-06	4.938E-06	5.290E-06	5.526E-06	5.813E-06	6.025E-06	6.979E-06	9.005E-06	2.857E-02	5.274E-06	1.064E-05	5.725E-06	1.260E-04	6.093E-06	2.707E-02	9.248E-04	8.172E-05
15	3.821E-02	1.287E-01	4.691E-06	4.931E-06	5.281E-06	5.517E-06	5.803E-06	6.014E-06	6.970E-06	8.996E-06	2.844E-02	5.249E-06	1.058E-05	5.709E-06	1.830E-04	6.088E-06	2.701E-02	1.380E-03	8.172E-05
20	3.782E-02	1.285E-01	4.684E-06	4.924E-06	5.273E-06	5.508E-06	5.793E-06	6.004E-06	6.962E-06	8.987E-06	2.831E-02	5.223E-06	1.051E-05	5.692E-06	2.400E-04	6.084E-06	2.695E-02	1.834E-03	8.172E-05
25	3.743E-02	1.283E-01	4.678E-06	4.916E-06	5.265E-06	5.499E-06	5.783E-06	5.993E-06	6.953E-06	8.977E-06	2.818E-02	5.198E-06	1.044E-05	5.676E-06	2.969E-04	6.079E-06	2.689E-02	2.289E-03	8.172E-05
30	3.704E-02	1.282E-01	4.671E-06	4.909E-06	5.257E-06	5.490E-06	5.773E-06	5.983E-06	6.944E-06	8.968E-06	2.805E-02	5.172E-06	1.037E-05	5.659E-06	3.539E-04	6.075E-06	2.683E-02	2.744E-03	8.172E-05
35	3.665E-02	1.280E-01	4.665E-06	4.902E-06	5.248E-06	5.481E-06	5.764E-06	5.972E-06	6.936E-06	8.959E-06	2.792E-02	5.147E-06	1.030E-05	5.643E-06	4.108E-04	6.070E-06	2.677E-02	3.198E-03	8.172E-05
40	3.626E-02	1.278E-01	4.658E-06	4.894E-06	5.240E-06	5.472E-06	5.754E-06	5.961E-06	6.927E-06	8.949E-06	2.779E-02	5.122E-06	1.023E-05	5.626E-06	4.678E-04	6.066E-06	2.671E-02	3.650E-03	8.172E-05
45	3.587E-02	1.277E-01	4.651E-06	4.887E-06	5.232E-06	5.463E-06	5.744E-06	5.951E-06	6.918E-06	8.940E-06	2.766E-02	5.096E-06	1.016E-05	5.610E-06	5.248E-04	6.061E-06	2.665E-02	3.882E-03	8.172E-05
50	3.548E-02	1.275E-01	4.645E-06	4.880E-06	5.223E-06	5.454E-06	5.734E-06	5.940E-06	6.910E-06	8.930E-06	2.753E-02	5.071E-06	1.009E-05	5.593E-06	5.817E-04	6.057E-06	2.659E-02	3.959E-03	8.172E-05
60	3.471E-02	1.271E-01	4.632E-06	4.865E-06	5.207E-06	5.436E-06	5.714E-06	5.919E-06	6.892E-06	8.911E-06	2.727E-02	5.020E-06	9.949E-06	5.560E-06	6.956E-04	6.048E-06	2.648E-02	4.074E-03	8.172E-05
70	3.393E-02	1.268E-01	4.618E-06	4.851E-06	5.190E-06	5.419E-06	5.695E-06	5.898E-06	6.875E-06	8.891E-06	2.701E-02	4.969E-06	9.810E-06	5.527E-06	8.096E-04	6.039E-06	2.636E-02	4.188E-03	8.172E-05
80	3.315E-02	1.265E-01	4.605E-06	4.836E-06	5.174E-06	5.401E-06	5.675E-06	5.877E-06	6.857E-06	8.872E-06	2.676E-02	4.918E-06	9.671E-06	5.494E-06	9.235E-04	6.030E-06	2.624E-02	4.303E-03	8.172E-05
90	3.237E-02	1.261E-01	4.592E-06	4.822E-06	5.157E-06	5.383E-06	5.656E-06	5.856E-06	6.840E-06	8.853E-06	2.650E-02	4.867E-06	9.532E-06	5.461E-06	1.037E-03	6.021E-06	2.612E-02	4.417E-03	8.172E-05
100	3.159E-02	1.258E-01	4.579E-06	4.807E-06	5.141E-06	5.365E-06	5.636E-06	5.835E-06	6.823E-06	8.833E-06	2.624E-02	4.816E-06	9.393E-06	5.428E-06	1.151E-03	6.012E-06	2.600E-02	4.531E-03	8.172E-05
200	2.380E-02	1.223E-01	4.447E-06	4.662E-06	4.975E-06	5.186E-06	5.439E-06	5.623E-06	6.648E-06	8.640E-06	2.365E-02	4.308E-06	8.002E-06	5.097E-06	2.291E-03	5.923E-06	2.482E-02	5.674E-03	8.172E-05
300	1.601E-02	1.189E-01	4.314E-06	4.516E-06	4.810E-06	5.007E-06	5.243E-06	5.412E-06	6.474E-06	8.446E-06	2.106E-02	3.800E-06	6.611E-06	4.767E-06	3.430E-03	5.834E-06	2.364E-02	6.817E-03	8.172E-05
500	4.350E-04	1.120E-01	4.050E-06	4.225E-06	4.479E-06	4.648E-06	4.849E-06	4.989E-06	6.125E-06	8.059E-06	1.588E-02	2.783E-06	3.828E-06	4.106E-06	5.708E-03	5.656E-06	2.128E-02	9.102E-03	8.172E-05
1000	0	9.484E-02	3.390E-06	3.498E-06	3.652E-06	3.753E-06	3.866E-06	3.932E-06	5.253E-06	7.090E-06	2.935E-03	2.407E-07	0	2.455E-06	1.140E-02	5.210E-06	1.538E-02	1.002E-02	8.172E-05

表 3.3.3-6　吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化（ケース LC-021）

	ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾀﾞｲﾄ	カルシウムシリケート水和物[( ) 内は、Ca/Si比]									ハイドロガーネット		ｹﾞｰﾚﾅｲﾄ水和物	ｸﾞﾛｼｭﾗｰ	葉ろう石	ﾌﾘｰﾃﾞﾙｿﾙﾄ	ｴﾄﾘﾝｶﾞｲﾄ	方解石	灰鉄ｶﾞｰﾈｯﾄ
	初期鉱物	初期鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	初期鉱物
時刻 [y]	Ca(OH)2	CSH(1.8)	CSH(1.5)	CSH(1.3)	CSH(1.1)	CSH(1.0)	CSH(0.9)	CSH(0.833)	CSH(0.6)	CSH(0.4)	C3AH6	C3ASH4	C2ASH8	C3AS3	AS4H	3CaO･Al2O3･CaCl2･10H2O	C6As3H32	CaCO3	C3FH6
0	3.938E-02	1.290E-01	4.699E-06	4.931E-06	5.258E-06	5.471E-06	5.732E-06	5.944E-06	6.969E-06	9.008E-06	2.883E-02	5.322E-06	1.078E-05	4.290E-06	1.381E-05	6.101E-06	2.718E-02	3.693E-06	8.172E-05
1	3.861E-02	1.295E-01	4.765E-06	5.092E-06	5.625E-06	5.971E-06	6.300E-06	6.421E-06	7.023E-06	9.006E-06	2.873E-02	5.575E-06	1.352E-05	2.900E-05	1.373E-05	6.093E-06	2.710E-02	6.777E-05	8.172E-05
2	3.783E-02	1.297E-01	4.799E-06	5.169E-06	5.762E-06	6.121E-06	6.424E-06	6.495E-06	7.022E-06	8.991E-06	2.867E-02	5.716E-06	1.469E-05	4.896E-05	1.361E-05	6.084E-06	2.703E-02	1.319E-04	8.172E-05
5	3.552E-02	1.302E-01	4.900E-06	5.398E-06	6.171E-06	6.570E-06	6.796E-06	6.715E-06	7.019E-06	8.945E-06	2.849E-02	6.136E-06	1.819E-05	1.088E-04	1.327E-05	6.059E-06	2.682E-02	3.241E-04	8.172E-05
10	3.166E-02	1.310E-01	5.068E-06	5.781E-06	6.853E-06	7.320E-06	7.414E-06	7.081E-06	7.015E-06	8.869E-06	2.818E-02	6.835E-06	2.403E-05	2.085E-04	1.270E-05	6.016E-06	2.648E-02	6.445E-04	8.172E-05
15	2.781E-02	1.318E-01	5.237E-06	6.164E-06	7.535E-06	8.069E-06	8.033E-06	7.448E-06	7.010E-06	8.792E-06	2.788E-02	7.535E-06	2.986E-05	3.082E-04	1.214E-05	5.973E-06	2.613E-02	9.649E-04	8.172E-05
20	2.395E-02	1.327E-01	5.405E-06	6.546E-06	8.217E-06	8.819E-06	8.652E-06	7.814E-06	7.006E-06	8.716E-06	2.758E-02	8.235E-06	3.570E-05	4.079E-04	1.157E-05	5.930E-06	2.578E-02	1.285E-03	8.172E-05
25	2.009E-02	1.335E-01	5.573E-06	6.929E-06	8.900E-06	9.568E-06	9.270E-06	8.181E-06	7.001E-06	8.639E-06	2.727E-02	8.935E-06	4.154E-05	5.077E-04	1.100E-05	5.888E-06	2.543E-02	1.606E-03	8.172E-05
30	1.624E-02	1.343E-01	5.741E-06	7.312E-06	9.582E-06	1.032E-05	9.889E-06	8.547E-06	6.997E-06	8.563E-06	2.697E-02	9.634E-06	4.737E-05	6.074E-04	1.043E-05	5.845E-06	2.509E-02	1.926E-03	8.172E-05
35	1.238E-02	1.352E-01	5.910E-06	7.694E-06	1.026E-05	1.107E-05	1.051E-05	8.914E-06	6.992E-06	8.486E-06	2.667E-02	1.033E-05	5.321E-05	7.071E-04	9.863E-06	5.802E-06	2.474E-02	2.246E-03	8.172E-05
40	8.525E-03	1.360E-01	6.078E-06	8.077E-06	1.095E-05	1.182E-05	1.113E-05	9.280E-06	6.988E-06	8.410E-06	2.637E-02	1.103E-05	5.904E-05	8.068E-04	9.295E-06	5.759E-06	2.439E-02	2.567E-03	8.172E-05
45	4.669E-03	1.368E-01	6.246E-06	8.460E-06	1.163E-05	1.257E-05	1.174E-05	9.647E-06	6.983E-06	8.333E-06	2.606E-02	1.173E-05	6.488E-05	9.065E-04	8.727E-06	5.717E-06	2.404E-02	2.887E-03	8.172E-05
50	8.124E-04	1.377E-01	6.414E-06	8.842E-06	1.231E-05	1.332E-05	1.236E-05	1.001E-05	6.979E-06	8.257E-06	2.576E-02	1.243E-05	7.071E-05	1.006E-03	8.159E-06	5.674E-06	2.369E-02	3.208E-03	8.172E-05
60	0	1.354E-01	6.400E-06	8.956E-06	1.267E-05	1.378E-05	1.282E-05	1.029E-05	6.964E-06	8.135E-06	2.346E-02	1.243E-05	8.371E-05	1.182E-03	2.988E-04	5.585E-06	2.258E-02	3.964E-03	8.172E-05
70	0	1.324E-01	6.323E-06	8.947E-06	1.282E-05	1.404E-05	1.310E-05	1.046E-05	6.948E-06	8.019E-06	2.088E-02	1.201E-05	9.519E-05	1.353E-03	6.272E-04	5.496E-06	2.140E-02	4.728E-03	8.172E-05
80	0	1.294E-01	6.245E-06	8.938E-06	1.298E-05	1.430E-05	1.338E-05	1.064E-05	6.931E-06	7.903E-06	1.830E-02	1.160E-05	1.066E-04	1.525E-03	9.559E-04	5.407E-06	2.023E-02	5.491E-03	8.172E-05
90	0	1.264E-01	6.167E-06	8.928E-06	1.313E-05	1.455E-05	1.366E-05	1.081E-05	6.914E-06	7.787E-06	1.572E-02	1.118E-05	1.180E-04	1.696E-03	1.287E-03	5.318E-06	1.905E-02	6.258E-03	8.172E-05
100	0	1.234E-01	6.086E-06	8.912E-06	1.327E-05	1.479E-05	1.392E-05	1.097E-05	6.895E-06	7.671E-06	1.313E-02	1.075E-05	1.287E-04	1.866E-03	1.636E-03	5.229E-06	1.787E-02	7.039E-03	8.172E-05
200	0	8.964E-02	4.845E-06	7.669E-06	1.216E-05	1.379E-05	1.290E-05	9.665E-06	5.916E-06	6.504E-06	0	6.925E-06	1.300E-04	2.202E-03	8.055E-03	4.338E-06	6.066E-03	1.905E-02	8.172E-05
300	0	5.530E-02	3.528E-06	6.229E-06	1.056E-05	1.208E-05	1.106E-05	7.679E-06	4.563E-06	5.223E-06	0	3.164E-06	1.196E-04	2.198E-03	9.198E-03	3.447E-06	0	2.906E-02	8.172E-05
500	0	9.946E-04	1.240E-06	3.619E-06	7.392E-06	8.591E-06	7.366E-06	4.021E-06	1.591E-06	2.144E-06	0	0	9.870E-05	2.192E-03	9.225E-03	1.665E-06	0	4.184E-02	8.172E-05
1000	0	0	0	0	1.406E-06	1.893E-06	5.645E-07	0	0	0	0	0	4.653E-05	2.175E-03	9.289E-03	0	0	4.191E-02	8.172E-05

表 3.3.3-7　吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化（ケース LC-022）

	ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾀﾞｲﾄ	カルシウムシリケート水和物[（ ）内は、Ca/Si比]									ハイドロガーネット		ｹﾞｰﾚﾅｲﾄ水和物	ｸﾞﾛｼｭﾗｰ	葉ろう石	ﾌﾘｰﾃﾞﾙｿﾙﾄ	ｴﾄﾘﾝｶﾞｲﾄ	方解石	灰鉄ｶﾞｰﾈｯﾄ
	初期鉱物	初期鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	初期鉱物
時刻 [y]	Ca(OH)2	CSH(1.8)	CSH(1.5)	CSH(1.3)	CSH(1.1)	CSH(1.0)	CSH(0.9)	CSH(0.833)	CSH(0.6)	CSH(0.4)	C3AH6	C3ASH4	C2ASH8	C3AS3	AS4H	3CaO･Al2O3･CaCl2･10H2	C6As3H32	CaCO3	C3FH6
0	3.938E-02	1.290E-01	4.699E-06	4.931E-06	5.258E-06	5.471E-06	5.732E-06	5.944E-06	6.969E-06	9.008E-06	2.883E-02	5.322E-06	1.078E-05	4.290E-06	1.381E-05	6.101E-06	2.718E-02	3.693E-06	8.172E-05
1	3.860E-02	1.303E-01	4.885E-06	5.435E-06	6.581E-06	7.411E-06	8.099E-06	8.018E-06	7.195E-06	9.049E-06	2.869E-02	6.822E-06	3.078E-05	3.729E-05	1.452E-05	6.093E-06	2.707E-02	1.377E-05	8.172E-05
2	3.816E-02	1.306E-01	4.915E-06	5.488E-06	6.659E-06	7.490E-06	8.157E-06	8.047E-06	7.183E-06	9.030E-06	2.870E-02	6.847E-06	3.095E-05	4.138E-05	1.441E-05	6.084E-06	2.709E-02	2.238E-05	8.172E-05
5	3.737E-02	1.308E-01	4.922E-06	5.487E-06	6.635E-06	7.450E-06	8.103E-06	7.985E-06	7.131E-06	8.972E-06	2.870E-02	6.695E-06	3.053E-05	4.129E-05	1.407E-05	6.062E-06	2.710E-02	2.244E-05	8.172E-05
10	3.617E-02	1.310E-01	4.926E-06	5.473E-06	6.584E-06	7.378E-06	8.011E-06	7.881E-06	7.044E-06	8.875E-06	2.870E-02	6.442E-06	2.983E-05	4.112E-05	1.350E-05	6.025E-06	2.712E-02	2.250E-05	8.172E-05
15	3.499E-02	1.311E-01	4.929E-06	5.459E-06	6.533E-06	7.305E-06	7.918E-06	7.778E-06	6.957E-06	8.778E-06	2.870E-02	6.188E-06	2.914E-05	4.095E-05	1.293E-05	5.988E-06	2.713E-02	2.256E-05	8.172E-05
20	3.380E-02	1.313E-01	4.932E-06	5.445E-06	6.482E-06	7.232E-06	7.826E-06	7.674E-06	6.870E-06	8.681E-06	2.870E-02	5.934E-06	2.844E-05	4.079E-05	1.236E-05	5.952E-06	2.714E-02	2.262E-05	8.172E-05
25	3.262E-02	1.314E-01	4.935E-06	5.430E-06	6.430E-06	7.159E-06	7.733E-06	7.570E-06	6.783E-06	8.584E-06	2.870E-02	5.681E-06	2.775E-05	4.062E-05	1.179E-05	5.915E-06	2.716E-02	2.268E-05	8.172E-05
30	3.144E-02	1.316E-01	4.938E-06	5.416E-06	6.379E-06	7.086E-06	7.641E-06	7.466E-06	6.696E-06	8.487E-06	2.870E-02	5.427E-06	2.705E-05	4.046E-05	1.122E-05	5.879E-06	2.717E-02	2.274E-05	8.172E-05
35	3.026E-02	1.317E-01	4.941E-06	5.402E-06	6.328E-06	7.013E-06	7.548E-06	7.362E-06	6.609E-06	8.390E-06	2.869E-02	5.173E-06	2.636E-05	4.029E-05	1.065E-05	5.842E-06	2.718E-02	2.280E-05	8.172E-05
40	2.908E-02	1.319E-01	4.944E-06	5.387E-06	6.276E-06	6.940E-06	7.456E-06	7.258E-06	6.522E-06	8.292E-06	2.869E-02	4.920E-06	2.566E-05	4.013E-05	1.008E-05	5.806E-06	2.720E-02	2.286E-05	8.172E-05
45	2.789E-02	1.320E-01	4.947E-06	5.373E-06	6.225E-06	6.866E-06	7.363E-06	7.154E-06	6.435E-06	8.195E-06	2.869E-02	4.666E-06	2.497E-05	3.996E-05	9.506E-06	5.769E-06	2.721E-02	2.291E-05	8.172E-05
50	2.671E-02	1.321E-01	4.949E-06	5.358E-06	6.174E-06	6.793E-06	7.270E-06	7.051E-06	6.348E-06	8.098E-06	2.869E-02	4.412E-06	2.427E-05	3.980E-05	8.936E-06	5.733E-06	2.722E-02	2.297E-05	8.172E-05
60	2.435E-02	1.324E-01	4.955E-06	5.329E-06	6.071E-06	6.647E-06	7.085E-06	6.843E-06	6.175E-06	7.904E-06	2.869E-02	3.905E-06	2.288E-05	3.947E-05	7.796E-06	5.659E-06	2.725E-02	2.309E-05	8.172E-05
70	2.199E-02	1.327E-01	4.961E-06	5.300E-06	5.968E-06	6.501E-06	6.900E-06	6.635E-06	6.001E-06	7.710E-06	2.868E-02	3.398E-06	2.149E-05	3.914E-05	6.655E-06	5.586E-06	2.727E-02	2.321E-05	8.172E-05
80	1.973E-02	1.330E-01	4.969E-06	5.275E-06	5.870E-06	6.358E-06	6.717E-06	6.428E-06	5.827E-06	7.516E-06	2.868E-02	2.891E-06	2.010E-05	3.881E-05	5.515E-06	5.513E-06	2.730E-02	2.334E-05	8.172E-05
90	1.747E-02	1.333E-01	5.001E-06	5.302E-06	5.838E-06	6.271E-06	6.566E-06	6.237E-06	5.656E-06	7.322E-06	2.868E-02	2.403E-06	1.873E-05	3.848E-05	4.375E-06	5.437E-06	2.732E-02	2.368E-05	8.172E-05
100	1.520E-02	1.336E-01	5.035E-06	5.330E-06	5.808E-06	6.186E-06	6.417E-06	6.047E-06	5.485E-06	7.128E-06	2.868E-02	1.916E-06	1.736E-05	3.815E-05	3.234E-06	5.361E-06	2.734E-02	2.404E-05	8.172E-05
200	0	1.345E-01	5.992E-06	7.432E-06	9.113E-06	9.438E-06	8.491E-06	6.494E-06	4.243E-06	5.305E-06	2.720E-02	8.949E-06	1.824E-04	9.291E-04	0.000E+00	4.553E-06	2.699E-02	3.555E-05	8.172E-05
300	0	1.295E-01	7.565E-06	1.194E-05	1.823E-05	1.996E-05	1.753E-05	1.187E-05	4.039E-06	3.757E-06	2.114E-02	4.539E-05	9.860E-04	4.229E-03	0.000E+00	3.687E-06	2.493E-02	5.151E-05	8.172E-05
500	0	1.195E-01	1.085E-05	2.156E-05	3.836E-05	4.386E-05	3.897E-05	2.535E-05	4.283E-06	8.833E-07	9.639E-03	9.440E-05	1.986E-03	1.079E-02	0.000E+00	1.941E-06	2.056E-02	1.231E-04	8.172E-05
1000	0	9.110E-02	2.101E-05	5.484E-05	1.218E-04	1.564E-04	1.595E-04	1.174E-04	1.772E-05	4.260E-11	0	1.052E-04	2.599E-03	1.842E-02	0.000E+00	0	6.087E-04	3.370E-04	8.172E-05

表 3.3.3-8　吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化（ケース LC-031）

	ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾀﾞｲﾄ	カルシウムシリケート水和物[（）内は、Ca/Si比]									ハイドロガーネット		ｹﾞｰﾚﾅｲﾄ水和物	ｸﾞﾛｼｭﾗｰ	葉ろう石	ﾌﾘｰﾃﾞﾙｿﾙﾄ	ｴﾄﾘﾝｶﾞｲﾄ	方解石	灰鉄ｶﾞｰﾈｯﾄ
	初期鉱物	初期鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	初期鉱物
時刻 [y]	Ca(OH)2	CSH(1.8)	CSH(1.5)	CSH(1.3)	CSH(1.1)	CSH(1.0)	CSH(0.9)	CSH(0.833)	CSH(0.6)	CSH(0.4)	C3AH6	C3ASH4	C2ASH8	C3AS3	AS4H	3CaO･Al2O3･CaCl2･10H2O	C6As3H32	CaCO3	C3FH6
0	3.938E-02	1.290E-01	4.699E-06	4.931E-06	5.258E-06	5.471E-06	5.732E-06	5.944E-06	6.969E-06	9.008E-06	2.883E-02	5.322E-06	1.078E-05	4.290E-06	1.381E-05	6.101E-06	2.718E-02	3.693E-06	8.172E-05
1	3.930E-02	1.291E-01	4.707E-06	4.944E-06	5.281E-06	5.502E-06	5.770E-06	5.981E-06	6.979E-06	9.009E-06	2.880E-02	5.320E-06	1.077E-05	4.534E-06	1.950E-05	6.101E-06	2.717E-02	3.167E-05	8.172E-05
2	3.922E-02	1.291E-01	4.706E-06	4.943E-06	5.279E-06	5.500E-06	5.768E-06	5.979E-06	6.978E-06	9.007E-06	2.878E-02	5.314E-06	1.075E-05	4.531E-06	2.565E-05	6.100E-06	2.716E-02	6.127E-05	8.172E-05
5	3.899E-02	1.290E-01	4.702E-06	4.938E-06	5.275E-06	5.495E-06	5.762E-06	5.973E-06	6.973E-06	9.002E-06	2.870E-02	5.299E-06	1.071E-05	4.521E-06	4.405E-05	6.097E-06	2.713E-02	1.501E-04	8.172E-05
10	3.860E-02	1.288E-01	4.695E-06	4.931E-06	5.266E-06	5.486E-06	5.753E-06	5.963E-06	6.966E-06	8.994E-06	2.857E-02	5.274E-06	1.064E-05	4.505E-06	7.472E-05	6.093E-06	2.707E-02	2.983E-04	8.172E-05
15	3.821E-02	1.287E-01	4.689E-06	4.924E-06	5.258E-06	5.478E-06	5.744E-06	5.953E-06	6.958E-06	8.986E-06	2.844E-02	5.248E-06	1.057E-05	4.488E-06	1.054E-04	6.088E-06	2.701E-02	4.464E-04	8.172E-05
20	3.782E-02	1.285E-01	4.682E-06	4.917E-06	5.250E-06	5.469E-06	5.734E-06	5.942E-06	6.950E-06	8.978E-06	2.831E-02	5.223E-06	1.050E-05	4.472E-06	1.361E-04	6.084E-06	2.695E-02	5.946E-04	8.172E-05
25	3.743E-02	1.283E-01	4.676E-06	4.909E-06	5.242E-06	5.460E-06	5.725E-06	5.932E-06	6.943E-06	8.969E-06	2.818E-02	5.198E-06	1.043E-05	4.455E-06	1.667E-04	6.079E-06	2.689E-02	7.427E-04	8.172E-05
30	3.704E-02	1.282E-01	4.669E-06	4.902E-06	5.234E-06	5.452E-06	5.715E-06	5.922E-06	6.935E-06	8.961E-06	2.805E-02	5.172E-06	1.036E-05	4.439E-06	1.974E-04	6.075E-06	2.683E-02	8.909E-04	8.172E-05
35	3.665E-02	1.280E-01	4.662E-06	4.895E-06	5.226E-06	5.443E-06	5.706E-06	5.912E-06	6.927E-06	8.953E-06	2.792E-02	5.147E-06	1.030E-05	4.423E-06	2.281E-04	6.070E-06	2.677E-02	1.039E-03	8.172E-05
40	3.626E-02	1.278E-01	4.656E-06	4.888E-06	5.218E-06	5.434E-06	5.696E-06	5.902E-06	6.920E-06	8.945E-06	2.779E-02	5.121E-06	1.023E-05	4.406E-06	2.588E-04	6.066E-06	2.671E-02	1.187E-03	8.172E-05
45	3.587E-02	1.276E-01	4.649E-06	4.881E-06	5.210E-06	5.426E-06	5.687E-06	5.891E-06	6.912E-06	8.937E-06	2.766E-02	5.096E-06	1.016E-05	4.390E-06	2.894E-04	6.061E-06	2.665E-02	1.335E-03	8.172E-05
50	3.548E-02	1.275E-01	4.643E-06	4.873E-06	5.202E-06	5.417E-06	5.678E-06	5.881E-06	6.905E-06	8.929E-06	2.753E-02	5.070E-06	1.009E-05	4.373E-06	3.232E-04	6.057E-06	2.659E-02	1.489E-03	8.172E-05
60	3.471E-02	1.271E-01	4.630E-06	4.859E-06	5.186E-06	5.400E-06	5.659E-06	5.861E-06	6.889E-06	8.912E-06	2.727E-02	5.020E-06	9.947E-06	4.341E-06	3.948E-04	6.048E-06	2.648E-02	1.806E-03	8.172E-05
70	3.393E-02	1.268E-01	4.616E-06	4.845E-06	5.170E-06	5.382E-06	5.640E-06	5.840E-06	6.874E-06	8.896E-06	2.701E-02	4.969E-06	9.808E-06	4.308E-06	4.665E-04	6.039E-06	2.636E-02	2.123E-03	8.172E-05
80	3.315E-02	1.264E-01	4.603E-06	4.830E-06	5.153E-06	5.365E-06	5.621E-06	5.820E-06	6.859E-06	8.880E-06	2.676E-02	4.918E-06	9.669E-06	4.275E-06	5.383E-04	6.030E-06	2.624E-02	2.441E-03	8.172E-05
90	3.237E-02	1.261E-01	4.590E-06	4.816E-06	5.137E-06	5.348E-06	5.602E-06	5.799E-06	6.843E-06	8.863E-06	2.650E-02	4.867E-06	9.530E-06	4.242E-06	6.134E-04	6.021E-06	2.612E-02	2.758E-03	8.172E-05
100	3.159E-02	1.257E-01	4.577E-06	4.801E-06	5.121E-06	5.330E-06	5.583E-06	5.779E-06	6.828E-06	8.847E-06	2.624E-02	4.816E-06	9.391E-06	4.209E-06	6.982E-04	6.012E-06	2.600E-02	3.080E-03	8.172E-05
200	2.380E-02	1.223E-01	4.445E-06	4.656E-06	4.957E-06	5.153E-06	5.389E-06	5.570E-06	6.664E-06	8.675E-06	2.365E-02	4.308E-06	8.000E-06	3.880E-06	1.822E-03	5.923E-06	2.482E-02	7.211E-03	8.172E-05
300	1.601E-02	1.189E-01	4.313E-06	4.511E-06	4.791E-06	4.974E-06	5.192E-06	5.359E-06	6.494E-06	8.494E-06	2.106E-02	3.799E-06	6.609E-06	3.549E-06	2.961E-03	5.834E-06	2.364E-02	1.015E-02	8.172E-05
500	4.350E-04	1.120E-01	4.048E-06	4.220E-06	4.461E-06	4.616E-06	4.800E-06	4.936E-06	6.152E-06	8.132E-06	1.588E-02	2.783E-06	3.826E-06	2.889E-06	5.240E-03	5.656E-06	2.128E-02	1.604E-02	8.172E-05
1000	0	9.482E-02	3.388E-06	3.492E-06	3.634E-06	3.721E-06	3.817E-06	3.880E-06	5.282E-06	7.173E-06	2.935E-03	2.404E-07	0	1.237E-06	1.094E-02	5.210E-06	1.538E-02	1.728E-02	8.172E-05

表 3.3.3-9　吹付けコンクリートの単位体積当たりの各鉱物の存在割合の経時変化（ケース LC-032）

	ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾀﾞｲﾄ	カルシウムシリケート水和物[( )内は、Ca/Si比]									ハイドロガーネット		ｹﾞｰﾚﾅｲﾄ水和物	ｸﾞﾛｼｭﾗｰ	葉ろう石	ﾌﾘｰﾃﾞﾙｿﾙﾄ	ｴﾄﾘﾝｶﾞｲﾄ	方解石	灰鉄ｶﾞｰﾈｯﾄ
	初期鉱物	初期鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	初期鉱物
時刻 [y]	Ca(OH)2	CSH(1.8)	CSH(1.5)	CSH(1.3)	CSH(1.1)	CSH(1.0)	CSH(0.9)	CSH(0.833)	CSH(0.6)	CSH(0.4)	C3AH6	C3ASH4	C2ASH8	C3AS3	AS4H	3CaO･Al2O3･CaCl2･10H2O	C6As3H32	CaCO3	C3FH6
0	3.938E-02	1.290E-01	4.699E-06	4.931E-06	5.258E-06	5.471E-06	5.732E-06	5.944E-06	6.969E-06	9.008E-06	2.883E-02	5.322E-06	1.078E-05	4.290E-06	1.381E-05	6.101E-06	2.718E-02	3.693E-06	8.172E-05
1	3.930E-02	1.293E-01	4.725E-06	4.996E-06	5.433E-06	5.739E-06	6.080E-06	6.267E-06	7.013E-06	9.017E-06	2.880E-02	5.330E-06	1.100E-05	7.590E-06	1.382E-05	6.101E-06	2.717E-02	1.608E-05	8.172E-05
2	3.922E-02	1.294E-01	4.738E-06	5.031E-06	5.525E-06	5.873E-06	6.239E-06	6.401E-06	7.029E-06	9.020E-06	2.878E-02	5.391E-06	1.210E-05	1.089E-05	1.382E-05	6.100E-06	2.716E-02	3.170E-05	8.172E-05
5	3.899E-02	1.295E-01	4.758E-06	5.083E-06	5.639E-06	6.017E-06	6.384E-06	6.509E-06	7.040E-06	9.018E-06	2.874E-02	5.552E-06	1.386E-05	2.079E-05	1.379E-05	6.097E-06	2.713E-02	4.230E-05	8.172E-05
10	3.861E-02	1.296E-01	4.777E-06	5.125E-06	5.713E-06	6.098E-06	6.451E-06	6.548E-06	7.039E-06	9.010E-06	2.870E-02	5.618E-06	1.435E-05	3.239E-05	1.373E-05	6.093E-06	2.709E-02	4.413E-05	8.172E-05
15	3.822E-02	1.297E-01	4.794E-06	5.163E-06	5.777E-06	6.167E-06	6.505E-06	6.578E-06	7.037E-06	9.002E-06	2.867E-02	5.668E-06	1.472E-05	4.092E-05	1.367E-05	6.088E-06	2.706E-02	4.556E-05	8.172E-05
20	3.783E-02	1.298E-01	4.811E-06	5.200E-06	5.840E-06	6.234E-06	6.557E-06	6.607E-06	7.035E-06	8.994E-06	2.864E-02	5.716E-06	1.507E-05	4.912E-05	1.362E-05	6.084E-06	2.702E-02	4.694E-05	8.172E-05
25	3.745E-02	1.299E-01	4.828E-06	5.237E-06	5.903E-06	6.300E-06	6.609E-06	6.636E-06	7.033E-06	8.985E-06	2.861E-02	5.763E-06	1.543E-05	5.718E-05	1.356E-05	6.080E-06	2.698E-02	4.831E-05	8.172E-05
30	3.706E-02	1.299E-01	4.845E-06	5.274E-06	5.966E-06	6.366E-06	6.661E-06	6.664E-06	7.031E-06	8.977E-06	2.858E-02	5.811E-06	1.578E-05	6.516E-05	1.350E-05	6.076E-06	2.695E-02	4.967E-05	8.172E-05
35	3.668E-02	1.300E-01	4.861E-06	5.310E-06	6.028E-06	6.432E-06	6.712E-06	6.693E-06	7.029E-06	8.969E-06	2.855E-02	5.858E-06	1.612E-05	7.310E-05	1.345E-05	6.071E-06	2.691E-02	5.102E-05	8.172E-05
40	3.629E-02	1.301E-01	4.878E-06	5.347E-06	6.090E-06	6.498E-06	6.764E-06	6.721E-06	7.026E-06	8.961E-06	2.852E-02	5.905E-06	1.647E-05	8.103E-05	1.339E-05	6.067E-06	2.688E-02	5.238E-05	8.172E-05
45	3.591E-02	1.302E-01	4.895E-06	5.384E-06	6.153E-06	6.564E-06	6.816E-06	6.750E-06	7.024E-06	8.952E-06	2.850E-02	5.952E-06	1.682E-05	8.894E-05	1.333E-05	6.063E-06	2.684E-02	5.373E-05	8.172E-05
50	3.552E-02	1.303E-01	4.911E-06	5.421E-06	6.215E-06	6.631E-06	6.867E-06	6.778E-06	7.022E-06	8.944E-06	2.847E-02	5.999E-06	1.717E-05	9.684E-05	1.327E-05	6.058E-06	2.681E-02	5.509E-05	8.172E-05
60	3.475E-02	1.305E-01	4.945E-06	5.494E-06	6.340E-06	6.763E-06	6.970E-06	6.835E-06	7.017E-06	8.927E-06	2.841E-02	6.093E-06	1.787E-05	1.126E-04	1.316E-05	6.050E-06	2.673E-02	5.779E-05	8.172E-05
70	3.398E-02	1.307E-01	4.978E-06	5.567E-06	6.464E-06	6.895E-06	7.073E-06	6.892E-06	7.013E-06	8.911E-06	2.835E-02	6.188E-06	1.856E-05	1.284E-04	1.305E-05	6.041E-06	2.666E-02	6.050E-05	8.172E-05
80	3.321E-02	1.308E-01	5.012E-06	5.641E-06	6.589E-06	7.027E-06	7.176E-06	6.948E-06	7.008E-06	8.894E-06	2.829E-02	6.282E-06	1.926E-05	1.442E-04	1.293E-05	6.033E-06	2.659E-02	6.321E-05	8.172E-05
90	3.244E-02	1.310E-01	5.045E-06	5.714E-06	6.714E-06	7.159E-06	7.279E-06	7.005E-06	7.004E-06	8.878E-06	2.823E-02	6.376E-06	1.995E-05	1.600E-04	1.282E-05	6.024E-06	2.652E-02	6.591E-05	8.172E-05
100	3.167E-02	1.312E-01	5.078E-06	5.787E-06	6.838E-06	7.290E-06	7.382E-06	7.062E-06	7.000E-06	8.861E-06	2.817E-02	6.470E-06	2.065E-05	1.758E-04	1.270E-05	6.016E-06	2.645E-02	6.862E-05	8.172E-05
200	2.397E-02	1.330E-01	5.412E-06	6.521E-06	8.084E-06	8.610E-06	8.413E-06	7.629E-06	6.955E-06	8.695E-06	2.759E-02	7.411E-06	2.761E-05	3.336E-04	1.156E-05	5.930E-06	2.574E-02	9.568E-05	8.172E-05
300	1.627E-02	1.348E-01	5.746E-06	7.255E-06	9.330E-06	9.930E-06	9.443E-06	8.197E-06	6.910E-06	8.530E-06	2.701E-02	8.353E-06	3.456E-05	4.915E-04	1.042E-05	5.845E-06	2.502E-02	1.227E-04	8.172E-05
500	8.618E-04	1.383E-01	6.414E-06	8.723E-06	1.182E-05	1.257E-05	1.150E-05	9.332E-06	6.821E-06	8.198E-06	2.584E-02	1.024E-05	4.848E-05	8.072E-04	8.143E-06	5.674E-06	2.360E-02	1.768E-04	8.172E-05
1000	0	1.239E-01	6.068E-06	8.755E-06	1.272E-05	1.397E-05	1.300E-05	1.024E-05	6.759E-06	7.615E-06	1.314E-02	8.264E-06	9.724E-05	1.753E-03	1.428E-03	5.229E-06	1.775E-02	6.684E-03	8.172E-05

表 3.3.3-2～表 3.3.3-9 に示した鉱物の存在割合に対して、表 3.3.3-10 に示した各鉱物の吹付けコンクリート単位体積中のモル数と 1 モルあたりのカルシウム数を掛けると、鉱物ごとの単位体積当たりのカルシウム量が得られる。そして、このカルシウム量を初期鉱物と二次鉱物に分類して集計すると、初期鉱物または二次鉱物に含まれる吹付けコンクリート単位体積当たりのカルシウム量が得られる。さらに、それらを初期のカルシウム量で除することで、初期鉱物および二次鉱物に含まれるカルシウムの初期量に対する比率が得られる。

初期鉱物および二次鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率を図 3.3.3-3～図 3.3.3-10 に示す。なお、これらの図において、初期鉱物と二次鉱物に含まれるカルシウム量の比率の合計が、1 とならないのは、地下水に溶けて流出してしまったカルシウムがあるためである。つまり、初期鉱物と二次鉱物に含まれるカルシウム量の比率の合計と初期量の差が、化学的影響評価によって得られるカルシウムの溶脱率となる（図 3.3.3-3　参照）。

図 3.3.3-3～図 3.3.3-10 によると、岩盤と支保工の透水係数が大きい場合は、溶脱率は大きくなる傾向があること、また、セメント鉱物の速度論係数が大きい場合も、溶脱率は大きくなる傾向があること、さらに、地下水組成が高 Cl 濃度の場合も溶脱率は大きくなる傾向があることが分かった。

図 3.3.3-3 のケース HC-021、図 3.3.3-4 のケース HC-022、および図 3.3.3-7 のケース LC-021 によると、経過時間 500 年以降、初期鉱物に含まれるカルシウム量は 0 にならず、その変化が止まっている。これは、初期鉱物中の反応に寄与する鉱物、ポルトランダイト、カルシウムシリケート水和物（CSH（Ca/Si=1.8））、エトリンガイト、ハイドロガーネット（C3AH6）が全てなくなり、反応に寄与していない灰鉄ガーネット（C3FH6）だけが残ったためである。

また、図 3.3.3-4 に示したケース HC-022 では、他のケースとは異なって二次鉱物に含まれるカルシウムの量が多く、溶脱率が比較的小さくなる結果になった。これは、初期鉱物から溶出したカルシウムイオンが地下水の炭酸イオンと反応し、二次鉱物の方解石（カルサイト ; $CaCO_3$）が生成されて支保工の中に析出したことが、他の高 Cl 濃度のケース（HC-021、HC-031、HC-032）よりも、顕著であったためと考えられる（表 3.3.3-3　参照）。地下水に多く炭酸イオンを含んでいたとしても、地下水の流速が速い場合や方解石が生成される反応が遅い場合や、pH によっては、初期鉱物からのカルシウムイオンが炭酸イオンと反応する前に地下水とともに流出してしまう。よって、ケース HC-022 は、他の高 Cl 濃度のケース（HC-021、HC-031、HC-032）よりも、地下水の流速、反応速度、pH のバランスが取れていたと考えられる。

表 3.3.3-10　各鉱物の吹付けコンクリート単位体積当たりのモル数と１モル当たりのカルシウム数

		ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾀﾞｲﾄ	カルシウムシリケート水和物[( ) 内は、Ca/Si比]								ハイドロガーネット		ｹﾞｰﾚﾅｲﾄ水和物	ｸﾞﾛｼｭﾗｰ	葉ろう石	ﾌﾘｰﾃﾞﾙｿﾙﾄ	ｴﾄﾘﾝｶﾞｲﾄ	方解石	灰鉄ｶﾞｰﾈｯﾄ
		初期鉱物	初期鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	二次鉱物	初期鉱物	二次鉱物	初期鉱物
名称		Ca(OH)2	CSH(1.8)	CSH(1.5)	CSH(1.3)	CSH(1.1)	CSH(1.0)	CSH(0.9)	CSH(0.833)	CSH(0.6)	CSH(0.4)	C3AH6	C3ASH4	C2ASH8	C3AS3	AS4H	3CaO･Al2O3･CaCl2･10H2O	C6As3H32	CaCO3	C3FH6
モル体積	cm^3/mol	3.306E+01	4.451E+01	4.699E+01	4.931E+01	5.258E+01	5.471E+01	5.732E+01	5.944E+01	4.182E+01	3.603E+01	1.501E+02	1.597E+02	2.156E+02	1.287E+02	1.381E+02	2.441E+02	7.255E+02	3.693E+01	-
cm^3あたりモル数		3.025E-02	2.247E-02	2.128E-02	2.028E-02	1.902E-02	1.828E-02	1.745E-02	1.682E-02	2.391E-02	2.775E-02	6.662E-03	6.263E-03	4.638E-03	7.770E-03	7.244E-03	4.097E-03	1.378E-03	2.708E-02	1.000E+00
1モルあたりのCa		1	1	1	1	1	1	1	1	0.6	0.4	3	3	2	3	0	4	6	1	3

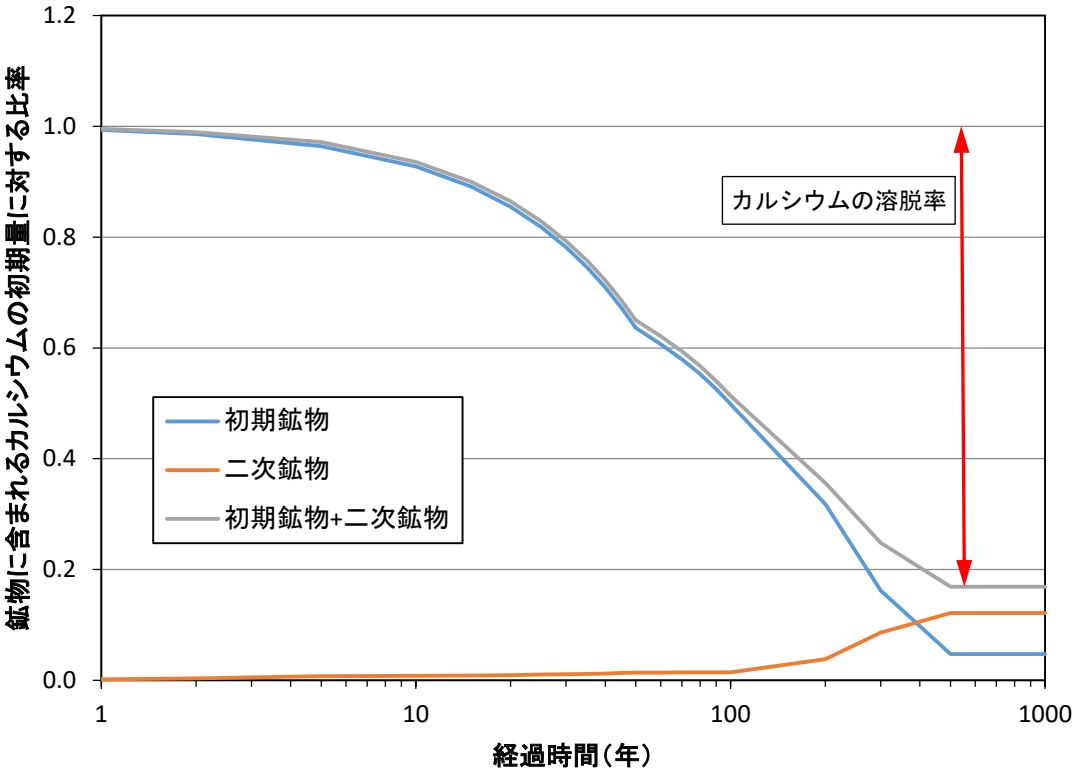


図 3.3.3-3　鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率（ケース HC-021）

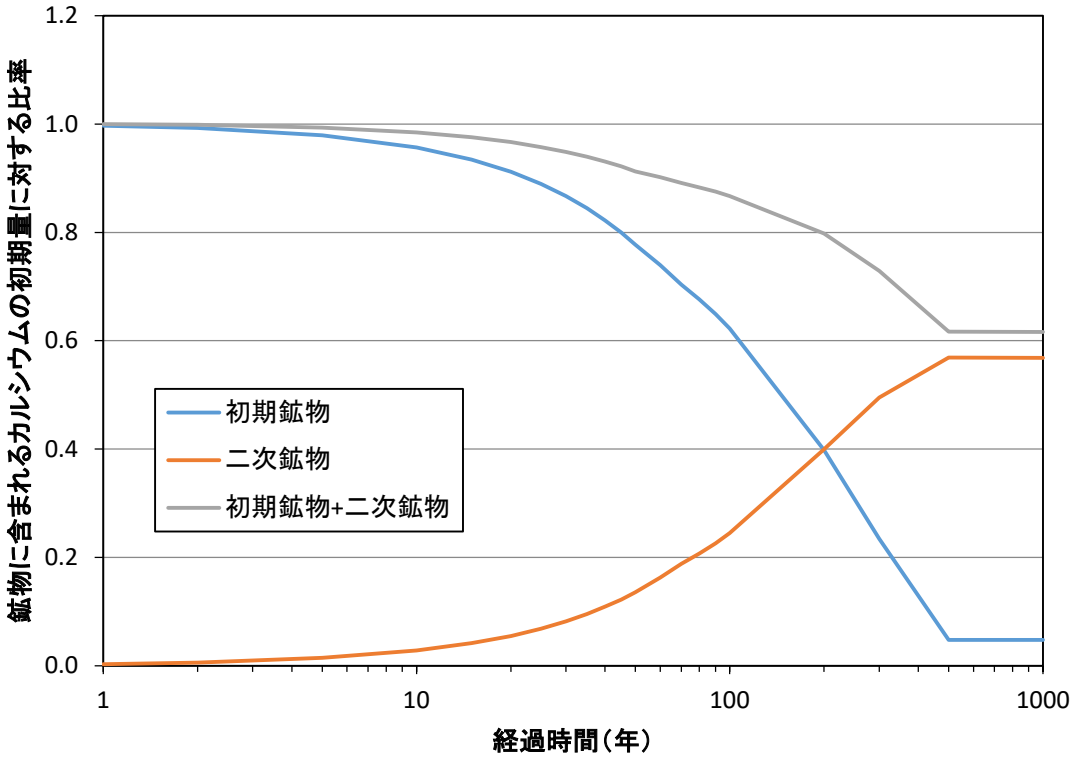


図 3.3.3-4　鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率（ケース HC-022）

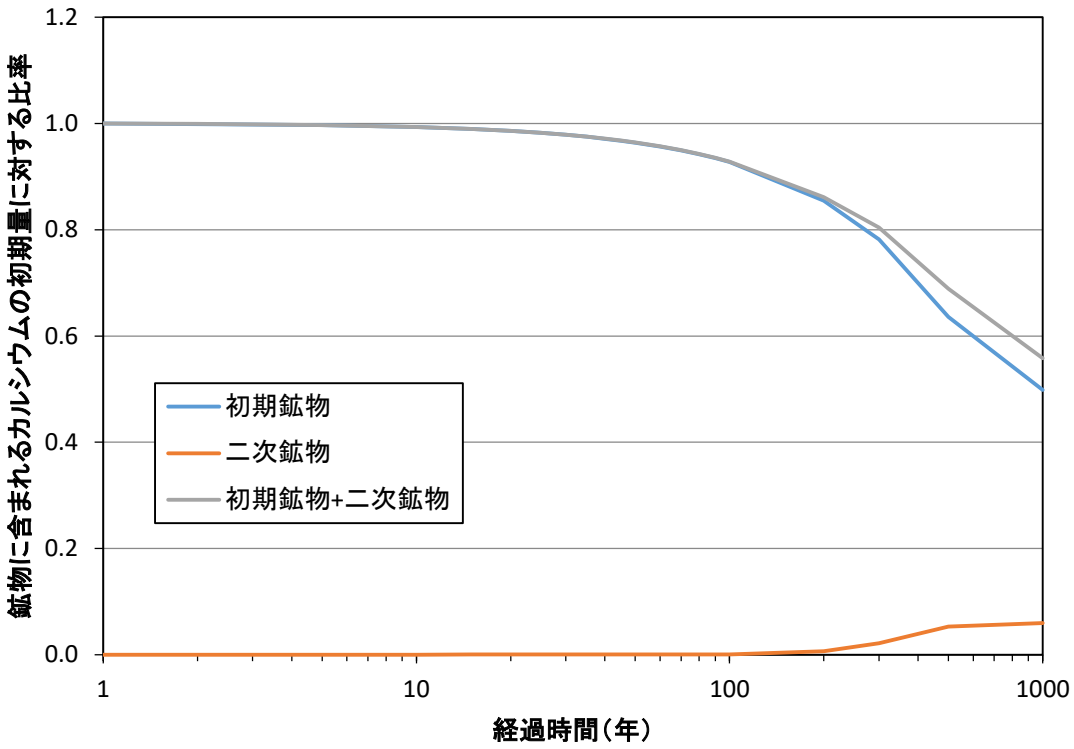


図 3.3.3-5　鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率（ケース HC-031）

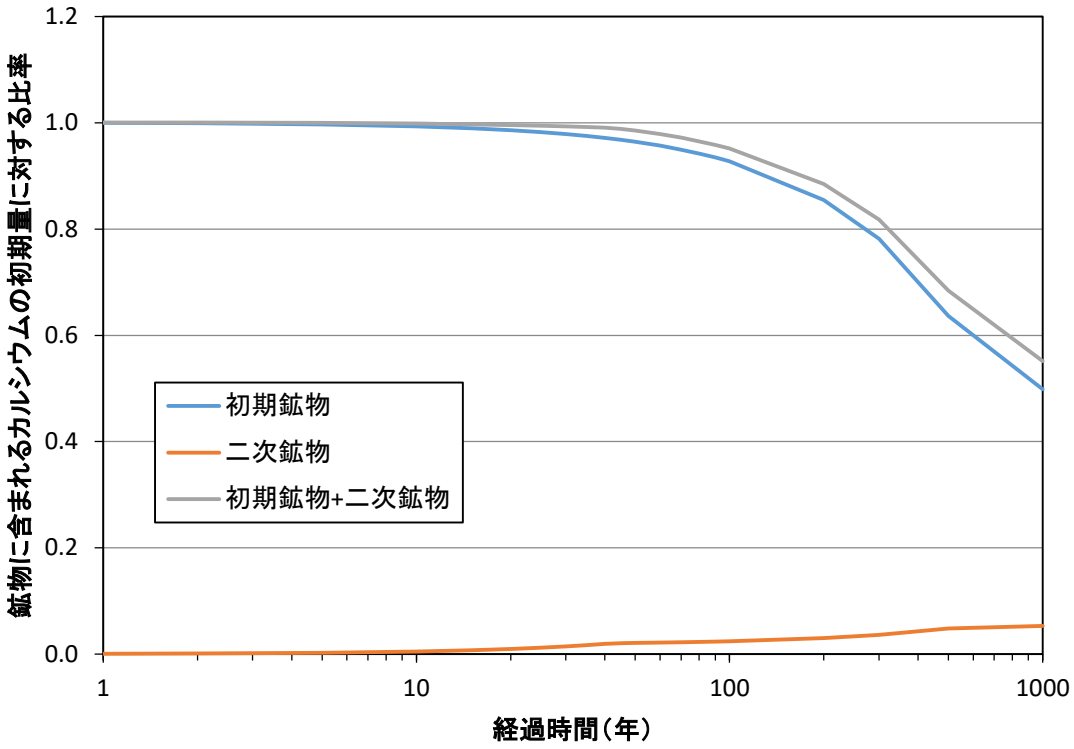


図 3.3.3-6　鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率（ケース HC-032）

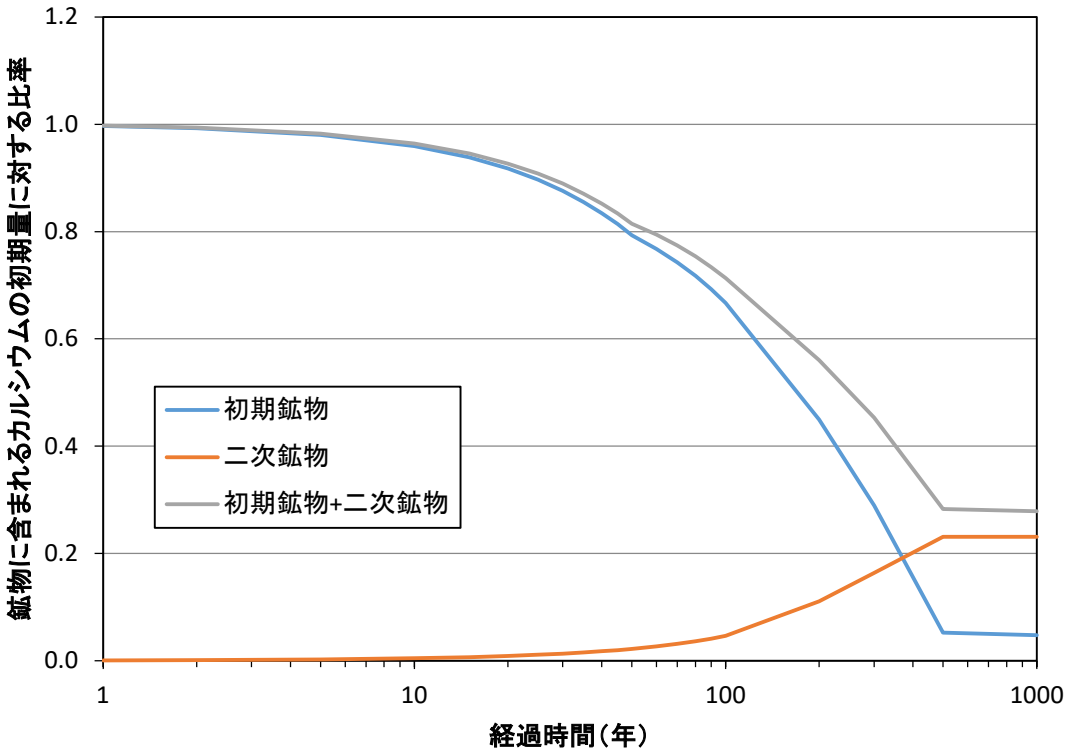


図 3.3.3-7　鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率（ケース LC-021）

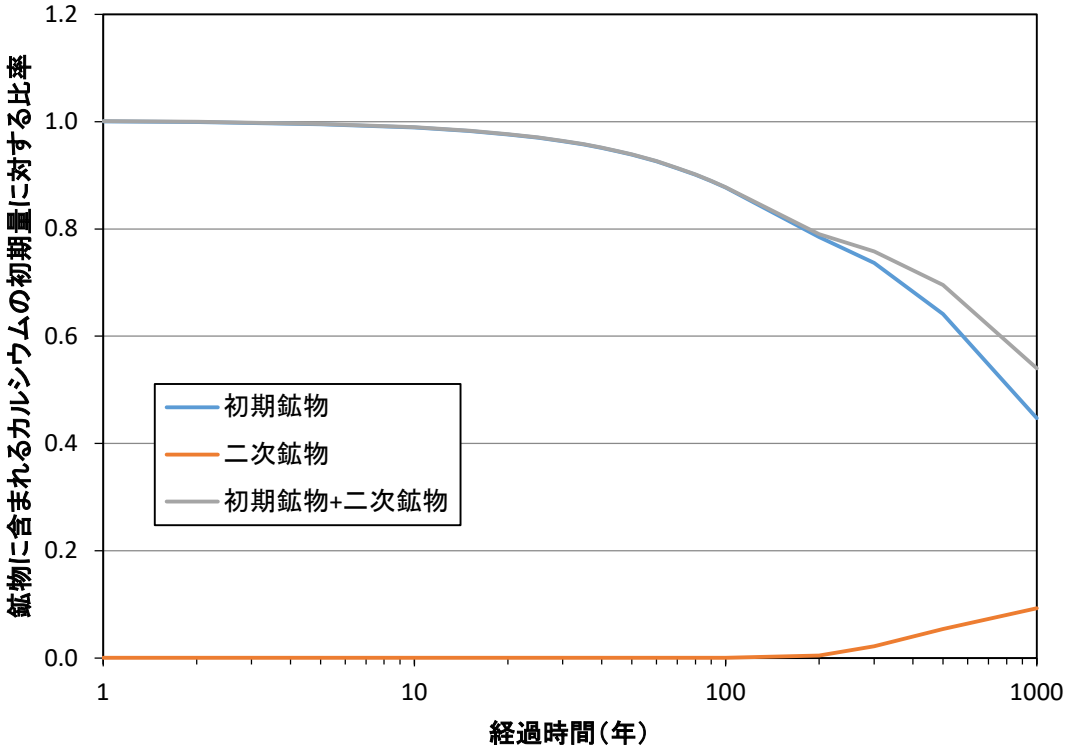


図 3.3.3-8　鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率（ケース LC-022）

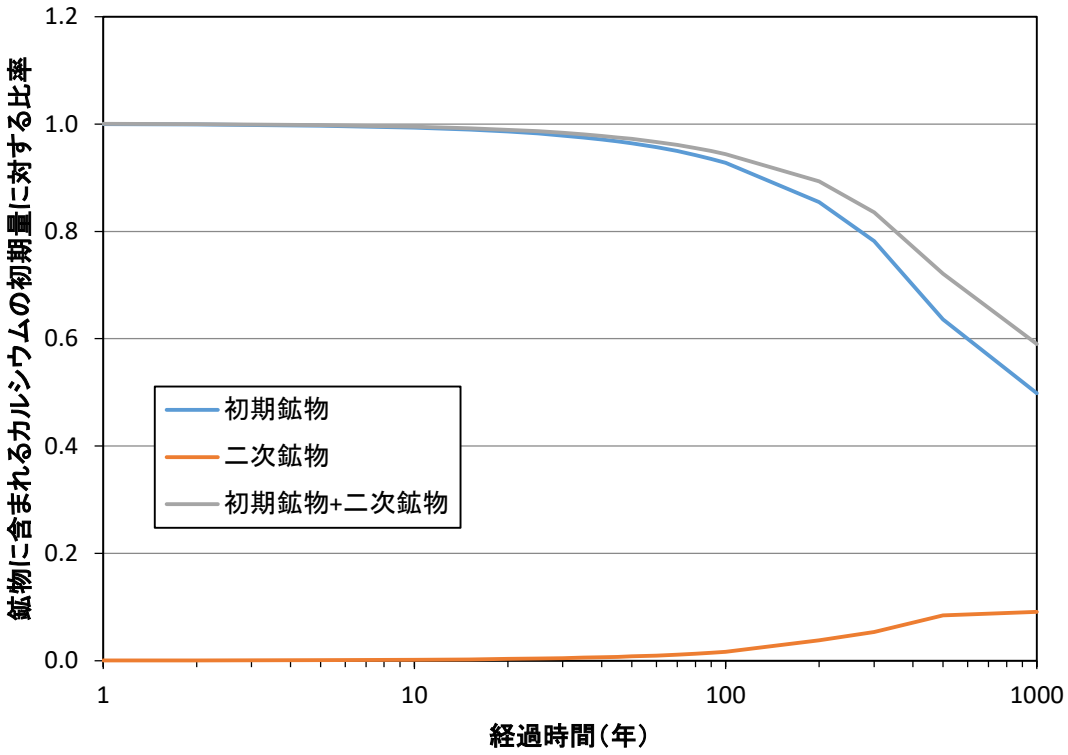


図 3.3.3-9　鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率（ケース LC-031）

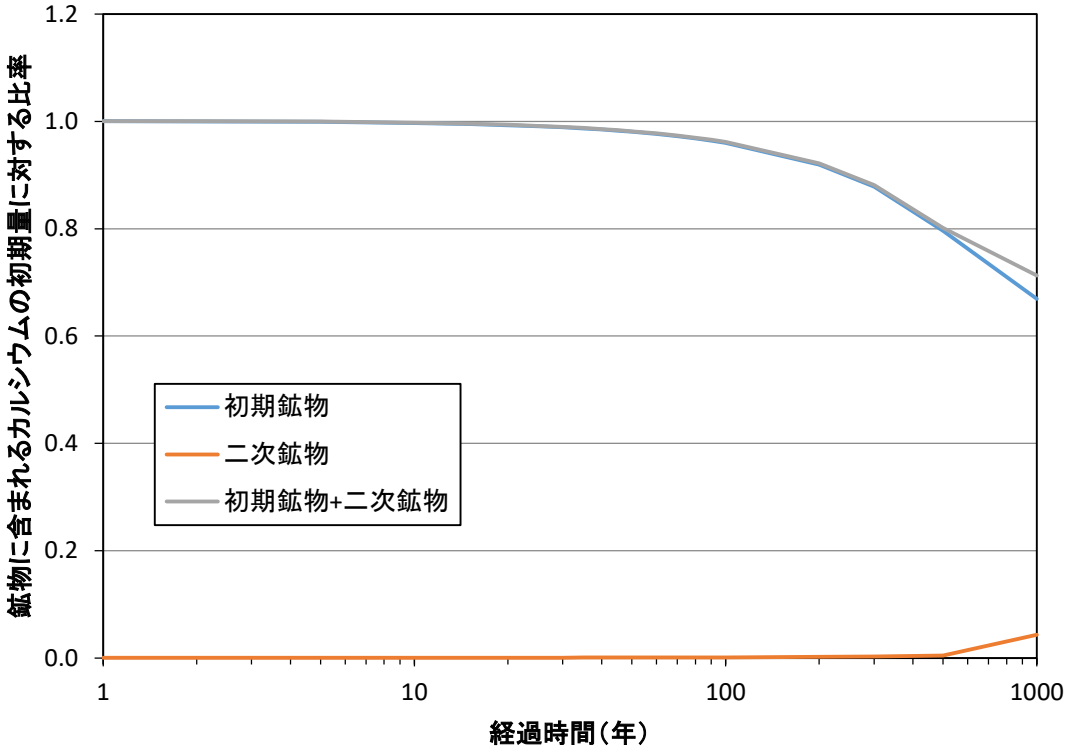


図 3.3.3-10　鉱物に含まれるカルシウム量の初期量に対する比率（ケース LC-032）

b　化学的影響評価から得られたパラメータとの比較

化学的影響評価から得られる溶脱率は、(1―図 3.3.3-3～図 3.3.3-10 における初期鉱物+二次鉱物に含まれるカルシウムの比率）×100%で求めることができる。力学的影響評価[1], [2]で想定した吹付けコンクリートのヤング率の低下に相当する溶脱率は、図 3.3.3-1、式 3.3.3-1、式 3.3.3-3 から求めることができる。化学的影響評価の結果から得られたカルシウムの溶脱率と力学的影響評価で想定したヤング率の低下に相当する溶脱率の比較を図 3.3.3-11 と図 3.3.3-12 に示す。なお、力学的影響評価では坑道構築後 400 年で溶脱が完了するとしたことから、これらの図において、経過時間は 500 年までとしている。

図 3.3.3-11 と図 3.3.3-12 によると、化学的影響評価から得られた溶脱率のカーブに関して、セメント鉱物の速度論係数が標準の場合は、時間とともに傾きが減少するタイプであり、速度論係数が小さい場合は、ほぼ直線で近似できるタイプになることが分かった。また、地質環境条件によって、溶脱率の増加速度は異なることも分かった。一方、力学的影響評価で想定したヤング率の低下に相当する溶脱率のカーブは、指数関数的な増加を示していて、化学的影響評価の結果とは異なる形となった。

式 3.3.3-1 と式 3.3.3-3 を用いると、化学的影響評価による溶脱率から吹付けコンクリートのヤング率を推定することができる。化学的影響評価の結果から得られたヤング率と力学的影響評価で想定したヤング率の比較を図 3.3.3-13 と図 3.3.3-14 に示す。

図 3.3.3-13 と図 3.3.3-14 によると、化学的影響評価の結果から推定した吹付けコンクリートのヤング率の経時変化は、地質環境条件によって大きく変わることが分かった。また、力学的影響評価で設定したヤング率は、ケース LC-022（図 3.3.3-14 中の緑色実線）の 200 年程度までの結果に近かったことも分かった。一方、標準的なケースである HC-021、LC-021 と比較すると、力学的影響評価で設定したヤング率低下の程度は、過少評価であったこと、速度論係数を小さくしたケースである HC-031、HC-032、LC-031、LC-032 と比較すると、逆に、低下の度合いは過大評価であったことが分かった。

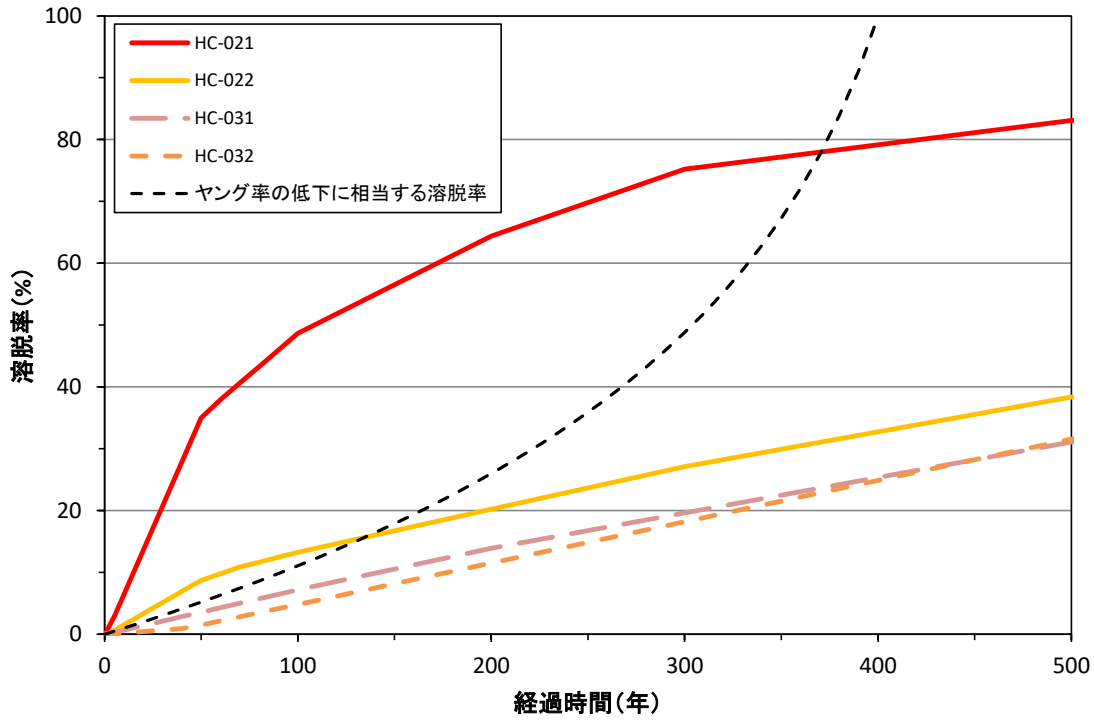


図 3.3.3-11　高 Cl ケースの溶脱率とヤング率の低下に相当する溶脱率との比較

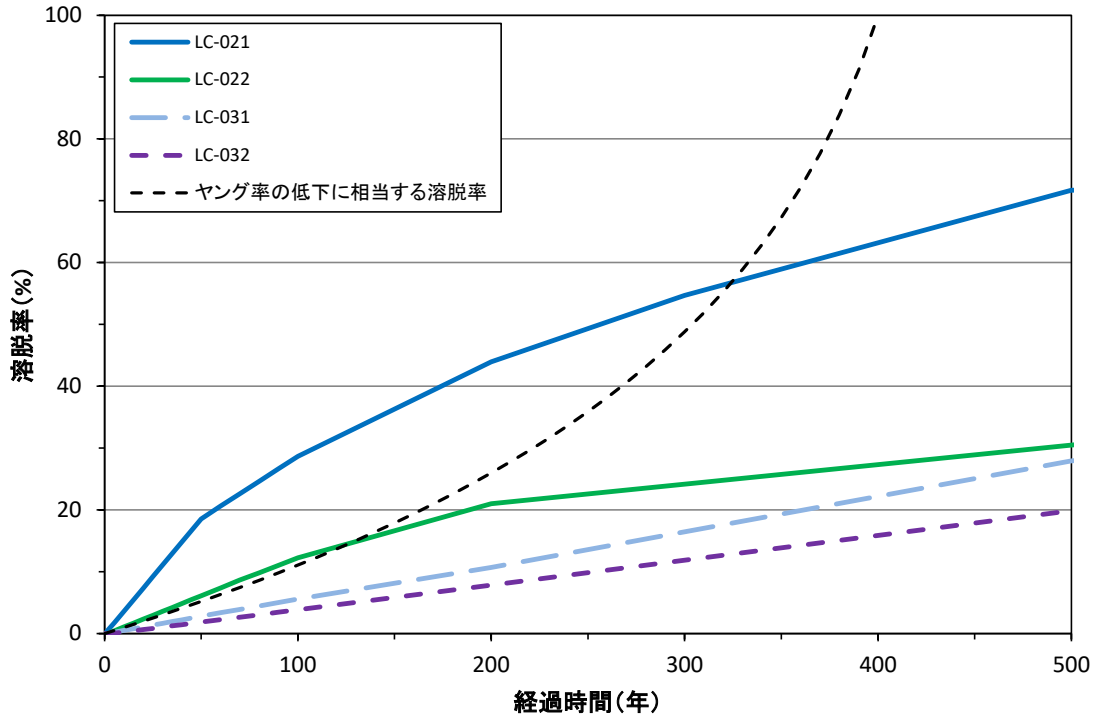


図 3.3.3-12　低 Cl ケースの溶脱率とヤング率の低下に相当する溶脱率の比較

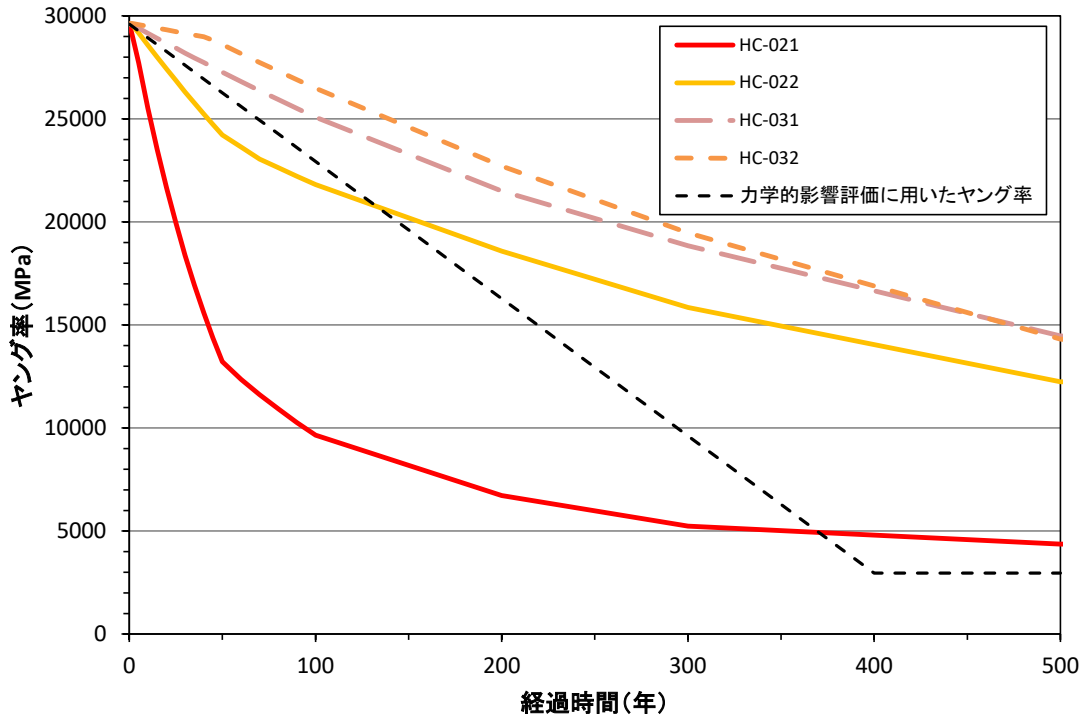


図 3.3.3-13　高 Cl ケースのヤング率と力学的影響評価に用いたヤング率の比較

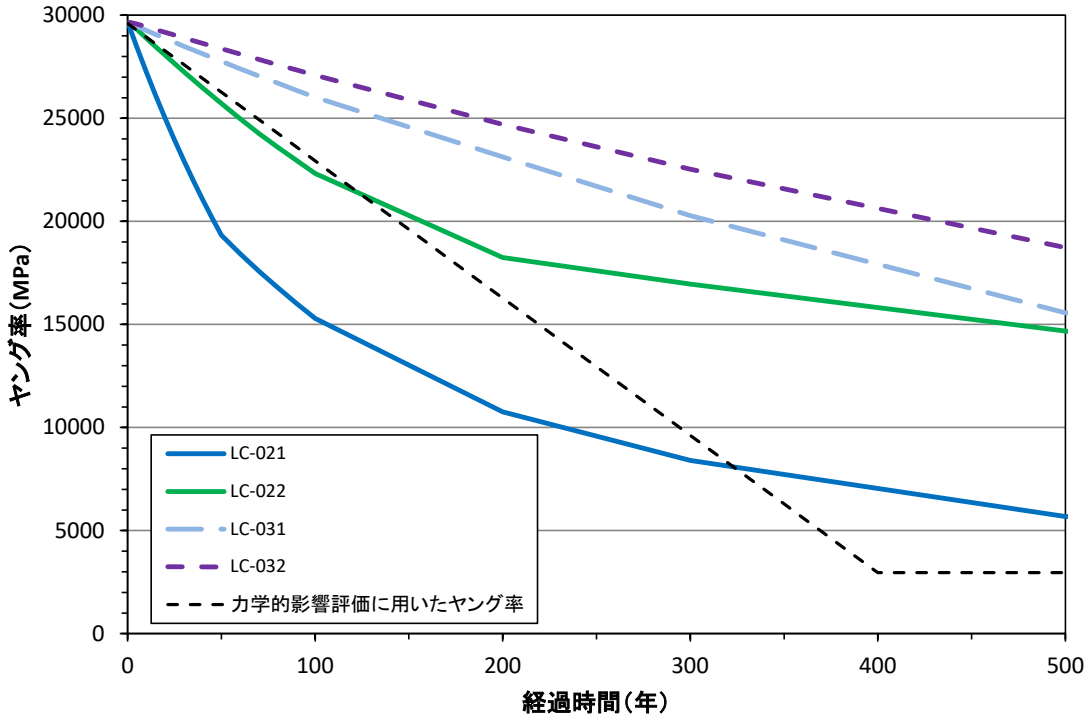


図 3.3.3-14　低 Cl ケースのヤング率と力学的影響評価に用いたヤング率の比較

(2)　再掘削時の力学的影響評価方法の検討

1)　検討の背景と目的

R&R 検討会が提示した技術検討項目の一つに、「埋め戻した坑道の再利用時の健全性」が挙げられている。これは、処分坑道に廃棄体を定置して埋め戻した後、何らかの理由により廃棄体を回収することを決定し、一度埋め戻した坑道の再掘削／再利用を行う場合、回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性確保から、坑道の安定性について評価や検討を行うことを示している。昨年度までは、開放した状態や埋め戻した状態での坑道の健全性、埋め戻し材の膨潤圧の影響や支保効果については検討を行ってきた。一方、再利用時については、その影響評価方法の検討も含めて特段の検討を実施していなかった[1]、[2]。

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

2)　再掘削時の力学的影響評価方法

a　評価の方針

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

b　評価対象および考慮する現象

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

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

c　再掘削の考慮方法

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

ントとなる。

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

再掘削に伴う掘削解放力の算定には、従来からの二次元の掘削解析の方法[40]を準用することができる。二次元の掘削解析における掘削解放力の概念を図 3.3.3-15 に示す。

再掘削前の領域全体Vに対してV_Eの部分を再掘削して解放面S_Eが生じるものと考える。再掘削前の状態において、再掘削領域V_E側の解放面S_E^+に生じている応力ベクトルを$\boldsymbol{t_0}$とすると、再掘削される地山側から見た解放面S_E^-に作用している応力ベクトルは$-\boldsymbol{t_0}$となる。再掘削領域V_Eの応力を$\boldsymbol{\sigma_0}$とし、その自重を無視すると、仮想仕事の原理より応力ベクトル$\boldsymbol{t_0}$は、以下のようになる。

$$\int_{S_E^+} \boldsymbol{\delta u}^T \boldsymbol{t_0} dS = \int_{V_E} \boldsymbol{\delta \varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma_0} dV \qquad \text{式 3.3.3-4}$$

ここで、$\boldsymbol{\delta u}$は仮想変位、$\boldsymbol{\delta \varepsilon}$は仮想ひずみである。

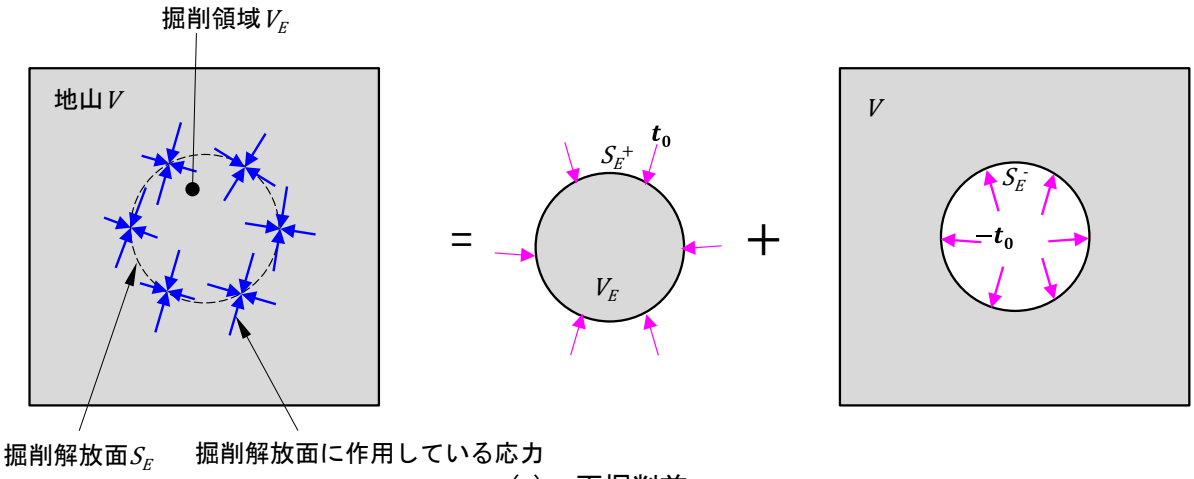
再掘削される地山側から見ると、再掘削前の解放面S_E^-には応力ベクトル$-\boldsymbol{t_0}$が作用していたが、掘削後の解放面S_E^-は自由表面であることから、この面に作用している応力ベクトルの合計はゼロになるはずである。つまり、再掘削後の状態に関しては、解放面S_E^-に掘削解放力$\boldsymbol{f}$として応力ベクトル$\boldsymbol{t_0}$を加えればよいことになる。

式 3.3.3-4 に有限要素近似を導入すると、再掘削時の掘削解放力$\boldsymbol{f}$に等価な節点荷重ベクトル$\boldsymbol{F_E}$は、以下のようになる[40]。

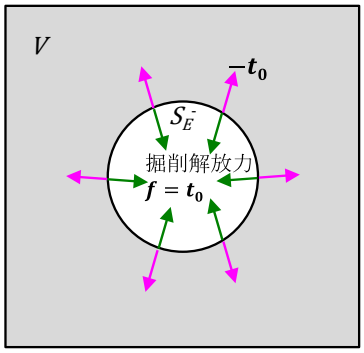
$$\boldsymbol{F_E} = \int_{V_E} \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{\sigma_0} dV \qquad \text{式 3.3.3-5}$$

ここで、$\boldsymbol{B}$はＢマトリックスである。

よって、再掘削時における再掘削領域V_Eの応力$\boldsymbol{\sigma_0}$が分かれば、式 3.3.3-5 より再掘削時の掘削解放力に等価な節点荷重ベクトル$\boldsymbol{F_E}$を求めることができる。



(a)　再掘削前



(b)　再掘削後

図 3.3.3-15　掘削解放力の概念

d　再掘削時の力学的影響評価方法の手順

坑道構築後、坑道が埋め戻されて再掘削が行われる直前までの解析が既に行われたものとすると、再掘削時の力学的影響評価方法の手順は、以下のようになる（図 3.3.3-16　参照）。

- 再掘削直前の状態から、再掘削領域の応力$\boldsymbol{\sigma_0}$の抽出
- 式 3.3.3-5 より、掘削解放力に等価な節点荷重ベクトル$\boldsymbol{F_E}$の算定
- 再掘削領域の要素の削除と掘削解放力の作用
- 開放状態の継続時の解析
- 坑道安定性の保持期間の評価

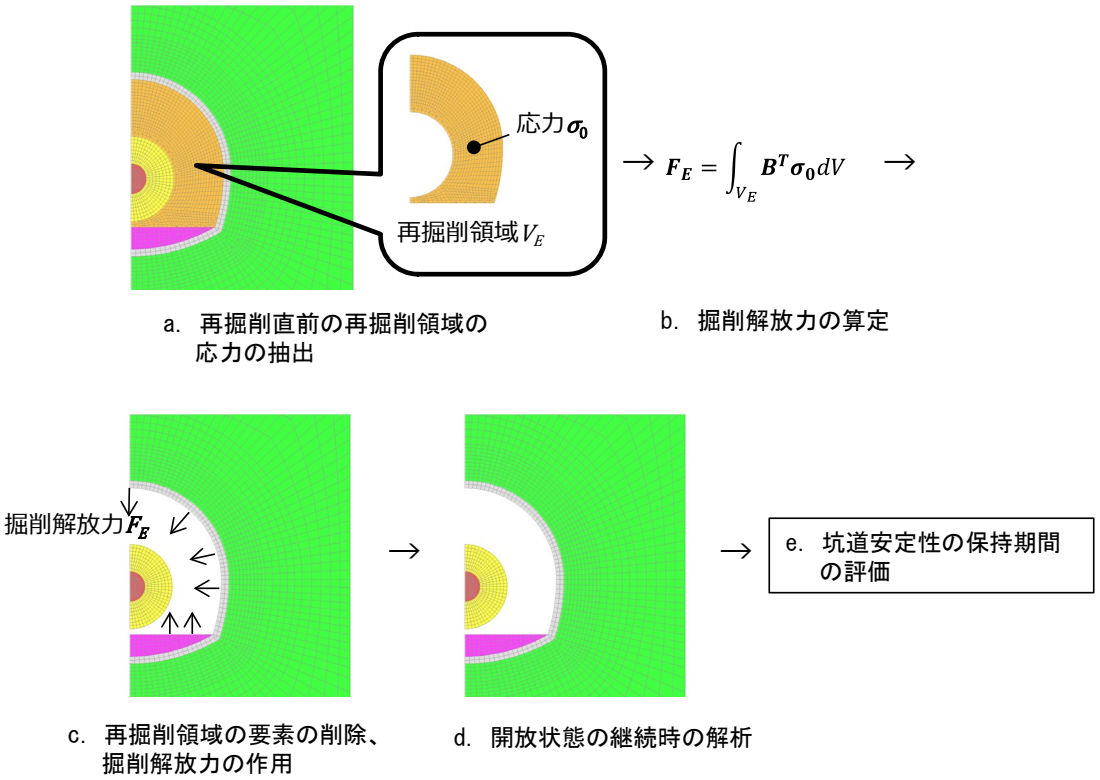


図 3.3.3-16　再掘削時の力学的影響評価の解析手順

(3)　力学的影響評価の検討のまとめと課題の整理

1)　検討のまとめ

本年度の力学的影響評価の検討として、化学的影響評価の結果を基に、昨年度までの力学的解析の条件としていた支保工等のパラメータの妥当性を検討した。また、回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性に関連して、再掘削時の力学的影響評価方法についても検討を行った。検討結果を以下にまとめる。

a　支保工等のパラメータの妥当性の検討

地下水の引き込みによる岩盤や支保工への影響を検討するために行ったファーフィールドモデルによる化学的影響評価の結果から、吹付けコンクリートのヤング率を推定すると、そのヤング率の経時変化は地質環境条件によって大きく変わることが分かった。また、力学的影響評価で設定したヤング率の低下の程度に関して、それに近いケースも存在したが、標準的なケースと比較すると過小評価であったこと、速度論係数を小さくしたケースと比較すると過大評価であったことが分かった。

b　再掘削時の力学的影響評価の方法の検討

一度埋め戻した坑道の再掘削／再利用した時の坑道の力学的影響については、再掘削という工程が加わるものの、従来から行われている坑道の掘削解析や昨年度まで実施してきた「開

放坑道の健全性(空間安定性)」の検討方法の延長線上で評価することができることを示した。

評価対象としては、再掘削から回収完了まで開放状態が継続している期間の、岩盤や支保工の変形の進行による坑道安定性を挙げた。そして、考慮する現象として岩盤のクリープ変形や透水性変化を挙げた。また、支保工については溶脱による剛性低下を挙げた。

そして、再掘削の考慮方法として、埋め戻し材の再掘削に伴う掘削解放力の算定方法を示すとともに、再掘削時の力学的影響評価方法の手順も示した。

2)　課題の整理

ここでは、昨年度までの検討結果[1]、[2]から得られた課題も含めて、力学的影響評価の課題を示す。昨年度までの検討によって示された力学的影響評価の課題をまとめると、以下のようになる。

- 岩石を対象とした構成則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ているのがほとんどであり、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。よって、一軸引張の試験結果を蓄積することで、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則の妥当性の確認が求められる。また、本検討で用いた岩盤のコンプライアンス可変型モデルに関して、実際の坑道との計測例による妥当性確認の事例は多くなかったこと、妥当性確認の事例における計測は 1 年程度の計測であった。したがって、今後、現地計測との比較事例を積み上げる必要がある。また、長期間にわたる計測例を取得し、その結果とも比較する必要がある。
- セメントの溶脱による劣化を考慮した吹付けコンクリートの構成則に関して、モデルの違いが坑道安定性の保持期間に影響を与えることが分かった。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溶脱現象の評価やそれに伴う力学特性の変化のモデル化に関する検討が必要である。
- 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が必要である。
- 坑道安定性の保持期間の評価に関連して、坑道の補修・補強工の効果についての検討が挙げられる。補修・補強工の効果を解析的に検討するためには、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り、そのモデル化の研究が必要である。また、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。
- 回収可能性維持期間のような長期間に対応できる坑道安定性に関する岩盤の応力の限界値について、幾つか提案されているものがあったが、回収可能性維持期間の評価に適用するためには不十分であった。また、長期間に対応したひずみの限界値に関する研究事例は見当たらなかった。今後、載荷時間を変えた圧縮試験のデータの拡充を図ったうえで、検討を行う必要があると考えられる。また、強度回復現象に関しては、これを回収可能性維持期間の影響の評価に実装するためには、現在の研究状況は、まだ十分ではないと考えらえる。今後、現象理解も含めて、強度回復の条件、および強度回復過程の構

成則の研究が必要と考えられるが、ハードルは高いと思われる。

上記に示された通り、吹付けコンクリートの劣化に伴う剛性低下が坑道安定性の保持期間に影響を与えることが分かったことから、本年度は化学的影響評価の検討の結果を基にして、昨年度までの支保工のパラメータの妥当性について検討を行った。また、R&R 検討会による技術検討項目に関連して、再掘削時の力学的影響評価方法の検討も行った。それらの結果から今後の課題としては、以下のようなものが考えられる。

- 化学的影響評価の結果に基づくと、岩盤の透水係数、地下水の水質、速度論的係数の地質環境条件が異なると、吹付けコンクリートのカルシウムの溶脱率やヤング率低下の経時変化が大きく異なった。一方、これまでの検討で用いていた吹付けコンクリートの劣化を考慮した構成則は、そのような地質環境条件の違いを考慮していなかった。したがって、より確からしい予測のためには、地質環境条件による劣化の違いを考慮した吹付けコンクリートの構成則を設定する必要がある。その例として、地質環境条件に応じて図 3.3.3-13 や図 3.3.3-14 に示したヤング率を適用することが考えられる。
- 再掘削時の力学的影響評価では、その前段階として、埋め戻した状態での岩盤や支保工の応力やひずみの力学量を求めておく必要がある。埋め戻し状態における吹付けコンクリートのパラメータ設定に関連して、埋め戻し後の水圧の回復過程では、坑道開放時と比較して吹付けコンクリートに作用している地下水の流速は遅くなり、それに応じてカルシウムの溶脱速度やヤング率の低下速度も遅くなっていることに留意する必要がある。したがって、より確からしい予測のためには、化学的影響評価等により、坑道開放時と埋め戻し後の回復過程における吹付けコンクリートの溶脱の違いも検討する必要がある。なお、現時点では、埋め戻した状態の溶脱量の知見がないことから、埋め戻した状態の岩盤や支保工の力学量を求める際、吹付けコンクリートのパラメータには開放状態の結果を利用するしかない。しかし、それを用いて再掘削後の坑道安定性の保持期間を評価したとしても、安全側の評価になることが予想される。
- 化学的影響評価や室内試験に基づいて設定した溶脱による劣化を考慮した吹付けコンクリートの構成則に関して、開放状態または埋め戻し後に再掘削された坑道の調査、吹付けコンクリートの変質・劣化状況の化学分析、坑道周辺岩盤の地球化学的特性の調査、力学特性を取得する室内試験、数値解析による変質・劣化の再現解析等により妥当性確認を行う必要がある。
- 再掘削後の坑道の挙動予測に関して、埋め戻ししないで開放状態が継続した場合と同様に、その妥当性確認が必要である。ただし、埋め戻した坑道を再掘削した後に内空変位等を計測した事例については、見つけることができなかった。したがって、今後、妥当性確認に資するような再掘削後の計測データの取得も検討する必要がある。

第３章　参考文献

[1] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 28 年度地層処分技術調査等事業　可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発　報告書（第２分冊：その１），2017.

[2] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 29 年度地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書 (第３分冊)，2018.

[3] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 29 年度地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学確証技術開発）人工バリア品質／健全性評価手法の構築（その２）－緩衝材, 2018.

[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，　東京，2016.

[5] 山本修一，佐藤伸，武内邦文，佐々木規行：トンネル型処分施設における人工バリアの長期力学挙動解析．土木学会年次学術講演会講演論文集，仙台，CS05-47，p.261-262，2008.

[6] 安藤賢一，納多勝，山本幹彦，三原守弘：TRU 廃棄物処分におけるガス発生・移行解析(研究報告)，核燃料サイクル開発機構，JNC TN8400 2005-026，2005.

[7] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りまとめ　分冊２－　地層処分の工学技術，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 99-022，1999.

[8] 戸井田克，須山泰宏，名児耶薫，渥美博行：東濃鉱山における連続波レーダーによる不飽和領域の計測, 核燃料サイクル開発機構　契約業務報告書 (鹿島建設株式会社), JNC-TJ7440 2003-001，2003.

[9] 藪内 聡，國丸貴紀，岸 敦康，小松 満：水平坑道の掘削に伴う坑道周辺の間隙水圧・岩盤水分量モニタリング―幌延深地層研究所 140m 調査坑道での測定―, 土木学会論文集 C (地圏工学)，67 (4)，pp.464-473，2011.

[10] 杉田裕，青柳和平，窪田健二，中田英二，大山隆弘：幌延深地層研究施設における掘削影響領域の評価(その 1) ―深度 140m を対象とした試験― (共同研究), JAEA-Research 2018-002，2018.

[11] 青柳和平，津坂仁和，窪田健二，常盤哲也，近藤桂二，稲垣大介：幌延深地層研究所の 250m 調査坑道における掘削損傷領域の経時変化に関する検討，土木学会論文集 C (地圏工学)，70 (4)，pp.412-423，2014.

[12] 末永弘，中田英二：沿岸海底下堆積岩における空洞掘削に伴う地下水理への影響，電力中央研究所報告，N07043，2008.

[13] 小松満，佐藤友哉，榊利博：大気圧変動による水分移動促進効果に関する基礎的研究，土木学会第 66 回年次学術講演会講演論文集，Ⅲ-206，p.411-412，2011.

[14] 小松満，佐藤友哉，榊利博：大気圧変動による水分移動促進効果に関する基礎的検討 (その 2)，土木学会第 67 回年次学術講演会講演論文集，Ⅲ-138，pp.275-276，2012.

[15] 榊利博，小松満：地下水面下の不飽和領域における空気残留特性：地下水位の上昇に伴う冠水過程，地下水学会誌，55 (3)，pp.269-277，2013.

[16] 駒田広也，中川加明一郎，北原義浩，林正夫：水封式燃料地下貯蔵用空洞周辺岩盤の浸透流に関する検討，土木学会論文報告集，第 300 号，p.69-80，1980.

[17] 山石毅，小林仁，谷藤吉郎，岡本明夫，登坂博行，小島圭二：地下石油備蓄基地建設に伴う水文・水理挙動の数値シミュレーション，地下水学会誌，第 40 巻，第 2 号，p.167-183，1998.

[18] 登坂博行，小島圭二，三木章生，千野剛史：地表流と地下水流を結合した 3 次元陸水シミュレーション手法の開発，地下水学会誌，第 38 巻，第 4 号，p.253-267，1996.

[19] 今井久，雨宮清，松井裕哉，佐藤念紀，三枝博光，渡邉邦夫：地下空洞周辺岩盤内の不飽和領域解析手法に関する提案－岩石の不飽和浸透パラメータと空洞壁面境界条件の設定方法－，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol.69，No.3，p.285-296，2013.

[20] Loomis, A.G. Solubilities of Gases in Water, in: International Critical Tables, Vol. III, E. W. Washburn, (ed.), McGraw-Hill, New York, NY, pp. 255–257, 1928.

[21] Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J.: Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3—A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations, U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, https://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/, 2013.

[22] Parkhurst, D.L., Kipp, K.L., and Charlton, S.R.: PHAST Version 2—A program for simulating groundwater flow, solute transport, and multicomponent geochemical reactions: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A35, https://pubs.usgs.gov/tm/06A35/, 2010.

[23] 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ー，JNC TY1400 2005-013，FEPC TRU－TR-2005-02，2005.

[24] 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ー，JNC TY1400 2005-013，FEPC TRU-TR2-2005-02，根拠資料集 4-2，2005.

[25] Simunek, J., van Genuchten, M.T. and Sejna, M.: Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. VADOSE ZONE JOURNAL, 15(7), http://dx.doi.org/10.2136/vzj2016.04.0033, 2016.

[26] Tsai, P., Yeh, G.-T. and Ni, C.-F.: HYDROGEOCHEM 6.0: A Model to Couple Thermal-Hydrology-Mechanics-Chemical (THMC) Processes, 2014.

[27] Xu, T., E. Sonnenthal, N. Spycher, K. Pruess: TOUGHREACT User's Guide: A simulation program for non-isothermal multiphase reactive geochemical transport in variably saturated geologic media, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-55460, Berkeley, California, 2004.

[28] Beisman, J.J., Maxwell, R.M., Navarre-Sitchler, A.K. et al.: ParCrunchFlow: an efficient, parallel reactive transport simulation tool for physically and chemically heterogeneous saturated subsurface environments, Comput. Geosci. 19(2) pp. 403–412, https://doi.org/10.1007/s10596-015-9475-x, 2015.

[29] Hammond, G.E., Lichtner, P.C., Lu, C., Mills, R. T.: PFLOTRAN: Reactive flow and transport code for use on laptops to leadership-class supercomputers, in. In: Parker JC, editor; Zhang F, Yeh G, editors. Groundwater Reactive Transport Models. Sharjah: Bentham Sci., pp.141–159, 2012.

[30] Hammond, G.E., Lichtner, P.C., Rockhold, M.L.: Stochastic simulation of uranium migration at the Hanford 300 Area. J. Contam. Hydrol., pp.120–121, pp.115–128, 2011.

[31] Randolph C. Arthur et al.: Development of Thermodynamic Databases for Hyperalkalone, Argillaceous Systems. JNC, TN8400 2005-010, 2005.

[32] 大藤弘明：フランボイダルパイライト―天然における鉱物の不思議な自己組織化作用―，日本結晶学会誌，53，p.46-51，2011.

[33] 土木学会：吹付けコンクリート指針（案）［トンネル編］，丸善，東京，p.45，2005.

[34] 原子力発電環境整備機構：包括的技術報告書：わが国における安全な地層処分の実現―適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築－，付属書 3-31，検討対象母岩の地下水水質のモデル化，レビュー版，NUMO-TR-18-03，p.21，2018.

[35] 古江良治，岩月輝希，水野崇：MSB-2 号孔・MSB-4 号孔における地下水水質観測（2003 年 1 月～2004 年 3 月），JNC-TN7450 2004-002，p.120，2005.

[36] 齋正貴，萩原大樹，松島博之 他：超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究；－瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集－（2004 年 4 月～2008 年 3 月），JAEA-Data/Code 2010-010，2010.

[37] 西村繭果，棚井憲治，高治和彦，重野義政，下河内隆文：ニアフィールドの長期力学連成解析手法の構築，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2007-004，2007.

[38] 戸井田克，笹倉剛，横関康祐，小林一三，渡邉賢三，芦澤良一：人工バリア材料の力学物性取得試験，核燃料サイクル開発機構　業務契約報告書，JNC TJ8400 2004-036，2005.

[39] 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.

[40] 市川康明：地盤力学における有限要素法入門，日科技連出版社，東京，pp.111-112，1990.

第4章　回収容易性に関する検討

4.1　検討方針と検討項目の概要

OECD/NEA の Reversibility and Retrievability プロジェクト（以下、「R&R プロジェクト」という。）では、高レベル放射性廃棄物及び使用済燃料の深地層処分のための可逆性と回収可能性に関し、その概念に関する問題の範囲と考え方について NEA 加盟国による調査・議論が行われた。この R&R プロジェクトの議論をとおして、地層処分が有する特徴や概念に対して、“閉鎖後の一定期間までは回収が技術的に可能である”との国際的な共通認識がある。そのような認識のもと、回収の実現性に関する議論が回収の容易性に関する議論へと帰結する可能性が示唆されるとともに 、回収可能性の実現性を示しいくうえでの技術的な取組の方向性（回収可能性に関する戦略）が示されている[1]。R&R 検討会では、この回収可能性に関する技術的な取組の方向性を我が国でも採用し得るものとして、次の２つの共存可能な技術的アプローチが存在し得るとしてまとめた[2]。

技術的アプローチ１：回収方法（技術･装置）の開発に重点をおくアプローチ

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

技術的アプローチ１は、処分場の設計の種類や内容を問わず、回収実施の際に必要となる回収方法（技術・装置）を開発しておくアプローチで、処分孔竪置き定置方式を対象に塩水を利用した緩衝材除去技術の実証試験が実施され、緩衝材除去システムの整備、技術の適用性等が評価された[3]。また本事業においても、処分坑道横置き定置方式を対象に、PEM－坑道間の充填材の除去技術や重量物である PEM の回収技術の整備及び適用性評価を進めている[4]。一方、技術的アプローチ２は、回収の容易性を設計（開発）に考慮するアプローチで、回収をより容易にするための方法や程度との関係で、表 4.1-1 に示すような多様な考え方や方法が想定されている[2]。廃棄体を完全に埋め戻さないフランスの処分場の設計例は、技術的アプローチ２を具体化したものである。

表 4.1-1　回収の容易性を設計に考慮する際の多様な方法の例[2]

設計への考慮の考え方	設計への考慮の方法の例（操業手順の設定等を含む）
①回収可能性の維持期間内において、廃棄体へのアクセスを容易にしておく ②回収可能性の維持期間内において、可能性のある将来の回収作業が容易となるようにしておく	○回収の容易性を坑道の埋め戻し状態を工夫することで考慮する（廃棄体を完全に埋め戻さない設計など：図 4.1-1） ○操業手順を工夫する ○回収時に解体・破壊しやすい地下構造物を導入する（材料選定の工夫など） ○回収の容易性を念頭に置いたレイアウトや坑道寸法設計、定置方法を工夫する、など

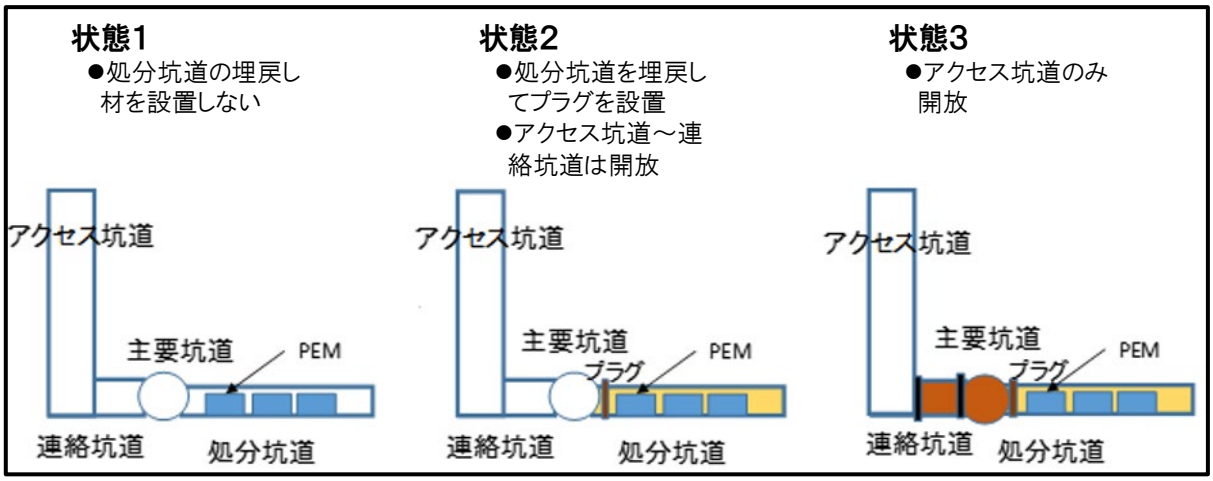


図 4.1-1　回収の容易性を坑道の埋め戻し状態を工夫することで考慮する方法の例

1.2 節で述べたように、R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目（表 4.1-2）には、上述した回収可能性に関する技術的アプローチ２に対応した項目が「２．回収の容易性」にまとめられている。表 4.1-2 の「1）より合理的な回収作業の実現に向けた技術検討／技術開発」に関しては、上述したように処分坑道横置き定置方式を対象に本事業の“地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発”で進めていることから、ここでは“回収可能性の維持についての検討”の一環として、表 4.1-2 の「2）より回収の容易性を高めた処分場の設計開発」に着手することとした。そのような検討の進め方として、次の 2 つの方針に基づき検討を進めることとした。

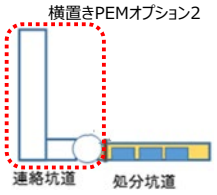
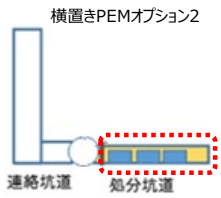
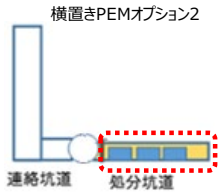
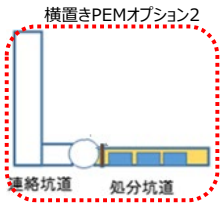
検討方針１：現時点で有望とされる２つの処分概念（以下、「基本概念」という。）を前提に、埋め戻し状態のバリエーション（図 4.1-1）や開放坑道の水没オプション等の設計オプションに関する有効性や優劣の比較検討に着手する

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

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

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

表 4.1-2　R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目[2]（表 2.2.1-1 再掲）

<table>
<tr><th colspan="4">R&R 検討会で示された「定量化すべき情報」と、例示された「今後の技術検討項目」</th></tr>
<tr><th colspan="3">定量化すべき情報</th><th>定量化に必要な技術検討項目(例)及び技術検討の視点</th><th>検討対象(イメージ)</th></tr>
<tr><td rowspan="4">1.
安全性への影響</td><td rowspan="3">(1)
操業期間中の安全性への影響</td><td>①
回収可能性維持期間中の開放坑道の安全性への影響</td><td>1)開放坑道内の作業空間の安全性
保守管理のために開放坑道内に人が出入りするため、開放坑道内の作業空間の安全性確保の観点から、以下の評価・検討や技術の具体化を行う。
a.開放坑道の健全性（空間安定性）
b.開放坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響</td><td>  </td></tr>
<tr><td>②
回収作業時の安全性への影響（回収を実施する場合）</td><td>1)回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性
一度埋め戻した坑道の再掘削／再利用を前提とする場合に、回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性確保の観点から、以下の評価・検討や技術の具体化を行う。
a.埋め戻した坑道の再利用時の健全性
b.再利用する坑道内（作業空間）への廃棄体からの熱影響</td><td rowspan="2">  </td></tr>
<tr><td>2)回収時の廃棄体容器の健全性
回収装置による把持・取り出しの際には、廃棄体容器に一定の機械強度が要求されることから、廃棄体容器の健全性に関する評価や検討を行う。</td></tr>
<tr><td colspan="2">(2)
閉鎖後長期の安全性への影響
：回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合の、人工バリアや天然バリア（母岩）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響</td><td>1)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う人工バリア等に期待する安全機能への影響
維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ、人工バリア（及び他の地下構造物）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響を下記観点から評価する。
a.開放坑道を介した空気（酸素）の持ち込みによる人工バリア等の地下構造物の機能劣化等の影響
b.廃棄体からの熱による影響
c.坑道開放期間中に継続する坑内湧水の影響</td><td>  </td></tr>
<tr><td colspan="2">(2)
閉鎖後長期の安全性への影響
：回収可能性維持期間の後に回収せずに最終閉鎖する場合の、人工バリアや天然バリア（母岩）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響</td><td>2)回収可能性維持期間中の開放坑道の存在に伴う天然バリア(母岩)に期待する安全機能への影響
維持期間中の開放坑道の存在を踏まえ、天然バリア（母岩）に期待される閉鎖後長期の安全機能に係わる次のような影響を評価する。
a.地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度（化学組成の異なる地下水の引き込みの影響
b.開放坑道を介した酸素の供給や乾燥環境の持ち込みによる母岩側への影響範囲と程度
c.ベースライン（建設前の元の地下環境の状態）への回復過程と回復の程度</td><td>  </td></tr>
<tr><td>2.
回収の容易性（回収作業時間）</td><td colspan="2">(1)単位ユニットあたりの回収時間(廃棄体１体又は処分坑道１本)
(2)全ての廃棄体回収に係る全体作業時間</td><td colspan="2">1)より合理的な回収作業の実現に向けた技術検討／技術開発
a.回収時間の短縮に向けた回収方法（技術・装置）の高度化
b.回収作業手順の具体化
2)より回収の容易性を高めた処分場の設計開発：回収の容易性を設計に考慮する際の多様な方法の導入や組合せに関する検討を進め、前提とした２つの処分概念オプション以外の新たなものを含めて、より回収の容易性を高めた処分場の設計開発に係る検討を進める。</td></tr>
</table>

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

また、NUMO の処分概念設定の中で「設計オプション」に関しては以下のように記述されている[5]。

> わが国の多様な地質環境特性を考慮すると，現時点で処分場の仕様を一つに絞り込むことは必ずしも合理的ではない。むしろ，特定のサイトを持たない現段階においては，設計因子から導かれる処分場への要求事項を実現可能とする複数の設計仕様を整備することで，わが国の多様な条件に柔軟に対応して処分場の設計を可能にすることが重要である。このような設計の代替案を設計オプションと呼ぶこととする。

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

以上の検討方針を踏まえて、より回収の容易性を高めた処分場の設計開発を行うために、図 4.1-2 に示す検討の流れに沿って検討を進める。なお、図 4.1-2 は、平成 31 年度までを見据えた検討の流れを示している。

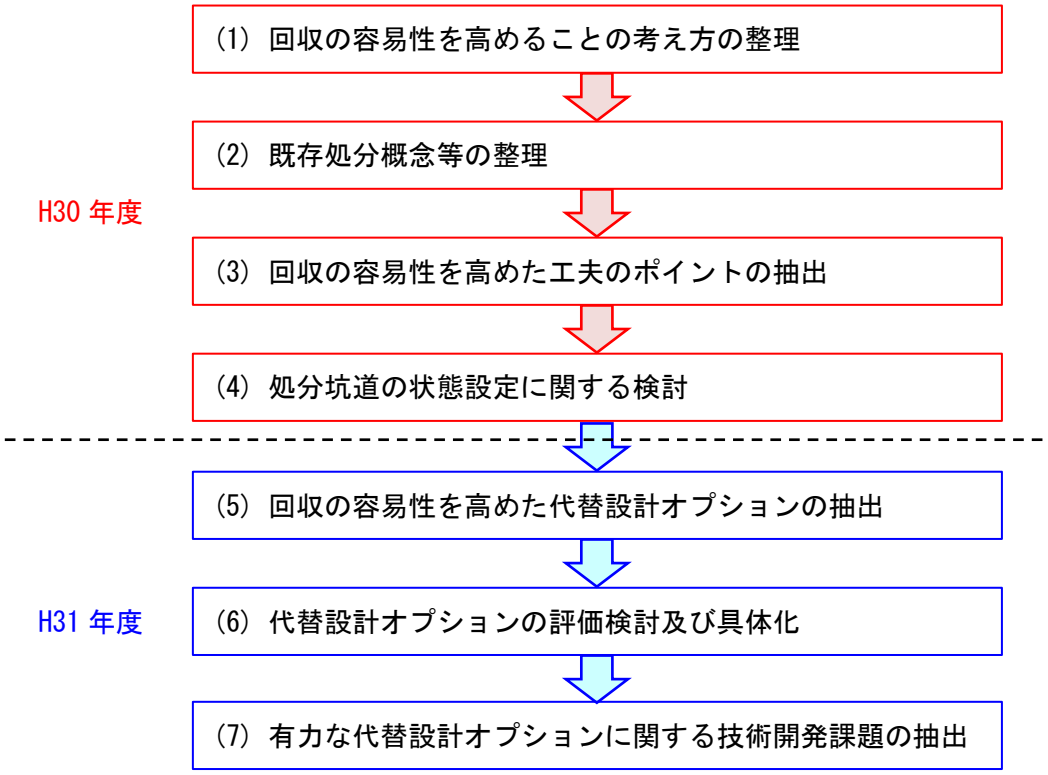


図 4.1-2　回収の容易性に係る検討の流れ

以下に各検討項目の概要を述べる。

(1) 回収の容易性を高めることの考え方の整理（4.2 節）

“回収の容易性を高める”という意味合いの定義、すなわち、容易性として何を高めるのか、また何を変えることでその容易性が高まるのか等について整理を行い、回収の容易性を高めた概念を考えるうえでの視点を整理する。また、回収の容易性を高めた代替設計オプションを検討する際には、我が国の処分環境条件（地質環境ならびに処分場や処分場構成要素に対する要件）への適合性について確認する必要があることから、そのような条件となる事項についての整理も行う。

(2) 既存処分概念等の整理（4.3 節）

国内外でこれまでに検討されてきた処分概念（ここでは、処分場概念と定置・回収概念をいう）を調査し、回収の容易性を高めることに寄与すると考えられる設計考慮事項、或いは、回収の容易性を意図して開発された概念ではなくても、結果として回収の容易性を高めることに寄与するような設計要素等について、(1)で整理した回収の容易性向上の視点を踏まえた整理を行う。

(3) 回収の容易性を高めた工夫のポイントの抽出（4.4 節）

(1)で整理した回収の容易性向上の視点と (2)で調査・整理した結果から、代替設計オプションの抽出に向けて参考となる、代替設計検討における工夫のポイントを抽出する。

(4) 処分坑道の状態設定に関する検討（4.5 節）

検討方針 1 で述べたように、基本概念を前提とした坑道の状態設定の違い（処分坑道を開放した状態で維持する、水没させる、あるいは撤去しやすい埋め戻し材を用いるなど）が、回収の容易性に対して、どのような効果があるか、どのようなデメリットがあるかなどについて、技術的な観点から検討を行う。

本年度は以上の(1)～(4)までの整理や検討を進めた。平成 31 年度の検討内容については、本年度の成果から得られる定置方法に関する工夫のポイント等を基に、回収の容易性を高めた代替設計オプションの抽出し（図 4.1-2 の(5)）、抽出した代替設計オプションに対して(1)で整理した適応性等について（例えば熱影響など）、定量的な評価手法も含めた検討や代替設計オプションの具体化を行う（図 4.1-2 の(6)）。その上で、有力な代替設計オプションに関する技術開発課題の抽出を行う（図 4.1-2 の(7)）ことを予定している。

4.2　回収の容易性を高めることの考え方の整理

4.2.1　回収の容易性向上の視点の整理

ここでは、より回収の容易性を高めた処分場の設計開発を進めていく上で、回収の容易性の考え方として、回収の容易性として何を高めるか、また何を変えることでその容易性が高まるのか等の検討を行い、回収の容易性向上を考えるうえでの視点の整理を行った。既出の表 4.1-2 に示した定量化に必要な技術検討項目では、「２．回収の容易性」の定量化の対象として、“回収作業時間”を設定している。回収の容易性に関して、OECD/NEA では、地層処分施設の受け入れを検討している地元の利害関係者が主に問題とするのは、廃棄物を容易に回収できるかどうかということ、との記載がある[1]。従って、“廃棄体の回収作業”を容易にすることが重要である。これらのことを踏まえると、より回収の容易性を高めた処分場の設計開発を進めていく上では、“廃棄体の回収作業時間”を短縮することが、容易性を高めるということに対する指標の１つになり得ると考えられる。一方で、ジェネリックな現段階において、全ての廃棄体を地下施設から回収するための時間を定量的に示すことはできないことから、回収時間を他の視点に置き換える必要がある。そこで、表 4.1-1 にも示した、

①回収可能性の維持期間内において、廃棄体へのアクセスを容易にしておく

②回収可能性の維持期間内において、可能性のある将来の回収作業が容易となるようにしておく

の２つについて、設計への考慮の考え方を基に、①を“アクセス性”、②を“ハンドリング性“として、それらに関する回収容易性向上の視点を以下のように整理した。

① 廃棄体へのアクセス性の向上

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

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

それぞれの要素における考慮対象物や考慮事項の例を表 4.2.1-1 に示す。この表 4.2.1-1 に示すような考慮事項を踏まえながら、アクセス性が向上する代替設計オプションの検討を進めていくこととする。ただし、「廃棄体までの物理的な距離」に大きく関与するのは処分場のレイアウトであることから、本検討におけるアクセス性に関しては、主として「廃棄体までのアクセス経路を確保するための作業量の少なさ」となると考えられる。

表 4.2.1-1　アクセス性向上の要素における考慮事項の例

アクセス性向上の要素	容易性向上に対する考慮事項の例
廃棄体までのアクセス経路を確保するための作業量の少なさ	・埋め戻し材や緩衝材等の撤去する作業量 （撤去物の物量・重量・形状・状態、等を考慮） ・坑道の安定性を確保するための作業量 （坑道の大きさ・形状、支保工の耐久性、等を考慮） ・アクセスまでの環境を確保するための作業量 （排水、換気、維持管理、等を考慮）
廃棄体までの物理的な距離の短さ	・処分場レイアウトの工夫 （※本検討では検討対象外） ・1 本の処分坑道／処分孔の短縮

②廃棄体のハンドリング性向上

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

・物量：回収対象物の少なさ
・重量と形状：回収対象物の扱いやすさ
・健全性：回収対象物の健全性
・動線：回収対象物の動作の少なさ
・環境：作業環境の確保

また、ハンドリング性向上の各要素における考慮対象物や考慮事項の例を表 4.2.1-2 に示す。アクセス性と同様に、この表 4.2.1-2 に示すような考慮事項を踏まえながら、ハンドリング性が向上する代替設計オプションの検討を進めていくこととする。また、「動線」及び「環境」については、処分場レイアウトにも関与するものであるが、処分場レイアウトの検討は検討対象外としていることから、本検討においては、主として処分坑道や処分孔に対する「動線」及び「環境」のこととなる。

表 4.2.1-2　ハンドリング性向上の要素における考慮事項の例

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

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

4.2.2　我が国の処分環境条件として求められる事項の整理

回収の容易性を高めた代替設計オプションの検討では、回収作業の実現性や成立性を示すのは勿論であるが、同時に、地層処分システムとしての概念としての成立性や実現性、つまり操業及び閉鎖後長期の安全性の双方を満たす必要がある。従って、ここではその前提条件となる我が国の処分環境条件として求められる事項として、NUMO の包括的技術報告書（レビュー版）[5]で示された、設計因子と要求事項ならびに処分システムに期待する安全機能に関して整理を行った。また、本事業段階で特に考慮すべき評価事項を設定し、それらに対する適合性についての整理を行った。

(1)　設計因子と要求事項への対応性

NUMO の包括的技術報告書（レビュー版）[5]で示された設計因子と要求事項は、処分場や人工バリアの仕様設定に至る設計フローのなかで考慮すべき上位の要件である（図 4.2.2-1）。回収可能性については、施設の最終閉鎖までの回収可能性維持期間による短期・長期の安全性に有意な影響を及ぼさないことが要求事項となっている。

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

NUMO の要件管理では、上記の設計因子と要求事項は、設定される仕様や工学的対策の適合性を評価する指標としても用いられており、図 4.2.2-1 に示すように、仕様の設定までの流れは、設計要件に従い設計し、影響評価（安全評価）に基づき仕様の妥当性が照査され、満足できない場合は工学的対策（バリア材）が検討され、対策が困難な場合は仕様設定の再検討へとフィード

バックされる。

また、要求事項については、工学的な観点から設計で対応する事項のほかに、サイト選定（地質環境）で対応されるべき事項も含まれている。例えば、閉鎖前の放射性物質の漏洩の防止などは、バリアの物理的閉じ込め性に対する要求事項であり、容器の設計要件や仕様設定で考慮される。一方、閉鎖後の安全性への要求事項となる自然現象の著しい影響からの防護や放射性物質の移行抑制は、工学的対策ではなくサイト選定段階における指標となる母岩への要求事項となる。

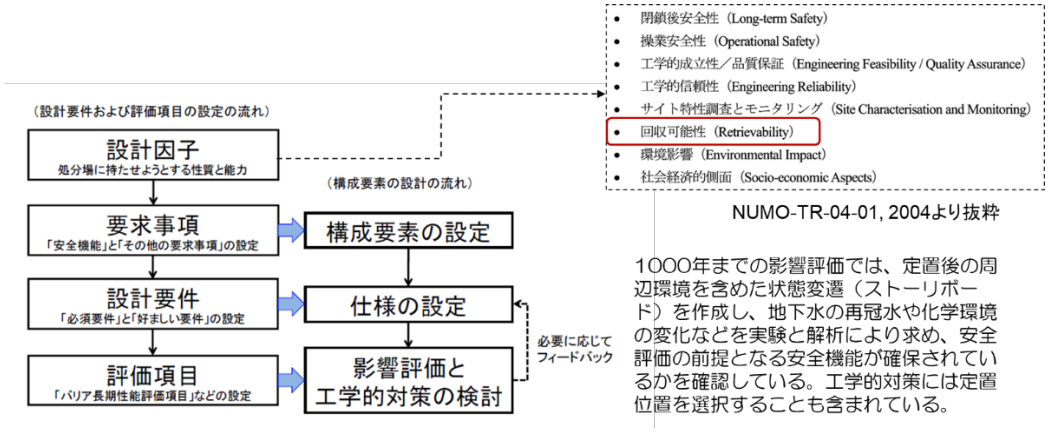


図 4.2.2-1　設計仕様設定までの流れ（[5]に一部加筆）

(2)　処分システムに期待する安全機能への適合性

NUMO の包括的技術報告書（レビュー版）[5]に示された、閉鎖前及び閉鎖後長期の安全性を確保するうえで処分システム（或いはシステムを構成するここの要素）に期待する安全機能と構成要素を表 4.2.2-1～表 4.2.2-3 に示す。例えば、閉鎖後長期の安全性に関する安全機能を維持させるという観点から個々のバリア等に対する設計要件や仕様が設定される。回収の容易性を高めた代替設計オプションの抽出においては、施工品質が適切なレベルにできるか（品質保証）、施工された人工バリア等が閉鎖後の長期にわたり期待通りの性能を発揮するか（性能評価）という点について確かめる必要がある。なお、表 4.2.2-3 には、構成要素が地質環境となっている項目がある（地質環境に安全機能を割り当てている項目）。これらは、サイト選定段階における地質環境に対する要件となることから、代替設計オプション対する適合性を示す必要のある項目ではない。

NUMO の人工バリア仕様設定では、これらの安全機能を満足する材料が選定され、安全機能の維持が期待される期間において、熱・水・力学・化学的作用が考慮されて、その仕様（例えば厚さや密度）が設計（設定）される。

以上のように、回収の容易性を高めた代替設計オプションを抽出する際には、閉鎖前及び閉鎖後長期の安全性に関する安全機能の維持の観点から、その代替設計オプションの適合性を示す必要がある。

表 4.2.2-1　閉鎖前の安全性に関する安全機能と構成要素（放射線防護）[5]

安全確保の基本概念	安全機能	構成要素
操業時閉じ込め	廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止	ガラス固化体，オーバーパック 廃棄体パッケージ
	施設外への放射性物質の放出の防止	廃棄体受入施設，換気設備（排気フィルタも含む）
放射線遮蔽	放射線の遮蔽	廃棄体パッケージ間充填材
		廃棄体受入施設建屋の遮蔽壁
		廃棄体搬送車両，定置装置などの設備・機器

表 4.2.2-2　閉鎖後長期の安全性に関する安全機能と構成要素（一般労働安全）[5]

安全確保の基本概念	安全機能	構成要素
作業環境の維持	換気能力	坑道の換気経路，換気設備（冷房設備を含む）
	排水能力	坑道の排水経路，排水設備
	照明能力	坑道の照明設備
災害の発生・拡大の防止	防火対策	防火設備，消火設備
	坑道の力学的安定性	支保工
	そのほかの災害防止対策	落下・転倒防止装置，非常用貯水槽
災害時の避難経路確保	避難経路の確保	アクセス坑道（入気），連絡坑道，緊急待避所，風門，通信・連絡設備

表 4.2.2-3　閉鎖後長期の安全性に関する安全機能と構成要素[5]

基本概念	安全機能		構成要素
隔離	自然現象の著しい影響からの防護		地質環境
	人間の接近の抑制		
閉じ込め	放射性物質の溶出の抑制	ガラスマトリクスによる溶出の抑制	ガラス固化体
		廃棄体と地下水の接触の防止	オーバーパック
	放射性物質の移行の抑制	放射性物質の溶解の抑制	地質環境
		遅い地下水流速による放射性物質の移行の抑制	地質環境
		放射性物質の移流による移行の抑制	緩衝材
		コロイド移行の抑制	緩衝材
		放射性物質の収着	緩衝材
			地質環境
		放射性物質の分散	地質環境
		坑道およびその周辺が卓越した放射性物質の移行経路となることの抑制	止水プラグ，埋め戻し材

(3)　本事業段階で考慮すべき評価事項への適合性

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

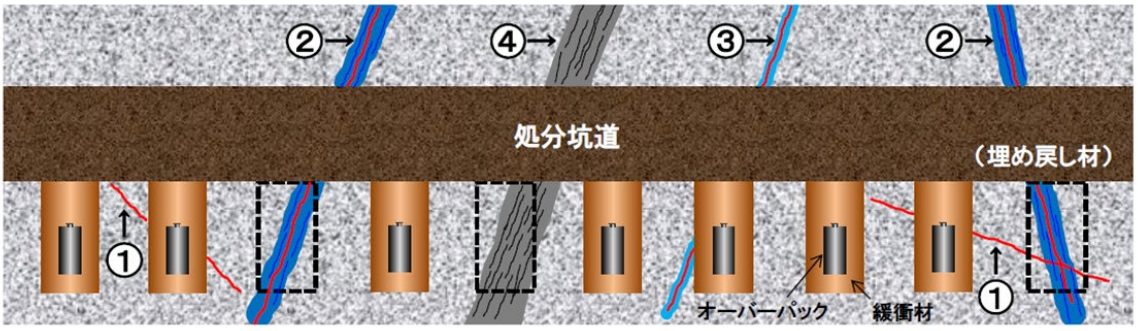
1)　坑道安定性評価：NUMO の包括的技術報告書（レビュー版）によれば、地下施設設置深度における坑道に対して、現実的な支保工の設計（設定仕様）で坑道の力学的安定性を確保することとされている。また坑道の設計要件として、建設・操業が安全かつ円滑に行われるように坑道の力学的安定性が確保されるべきことが示されている。坑道安定性の評価については、３種類の仮想地質モデルのそれぞれに、岩盤力学特性（初期応力や強度・変形特性など）が設定され、廃棄体の搬送・定置で用いる装置の建築限界を考慮して坑道仕様が設計され、掘削時の応力緩和領域（ゆるみ領域）の発生と地震時の安定性が評価されている。岩盤力学特性は処分場サイトの地質環境条件に依存するが、同様の方法で代替設計オプションに対する坑道安定性の評価を先行的に実施することが可能である。なお、これらの安定性評価の結果は、処分坑道のレイアウト設計に反映されていない。膨張地山や山はねが発生するような岩盤（特性）では、処分坑道等としての利用対象から除外することとなる。

2)　ベントナイト制限温度評価：地下施設設置深度の設計要件では、緩衝材に対して地温の増大に伴う温度上昇も考慮した上で、合理的な廃棄体占有面積で緩衝材の温度が制限温度（100℃）を超えないように抑える必要がある。これは廃棄体のからの熱影響に伴うイライト化によって、緩衝材の設計要件である低透水性やコロイドろ過能といった緩衝材への要求事項が満たされない可能性が懸念されているためである。また、坑道の設計要件としても、廃棄体からの熱影響により人工バリアの性能が著しく低下しないことが示されている。そのため、ガラス固化体の貯蔵期間の幅（30 年～50 年）を考慮し、坑道安定性から求まる処分場深度に対する地温とベントナイトの許容温度上限値（100℃）を境界条件として、廃棄体の埋設ピッチが設計され、処分坑道のレイアウト設計にも反映されている。回収の容易性を高めた代替設計オプションに対しても同様に、ベントナイト制限温度の観点から先行的に評価を行うことが可能である。

3)　湧水量評価：閉鎖前の安全性に関する安全機能として、排水能力に関する記述がある。また、オーバーパックの設計要件である耐食性にも影響する可能性がある。湧水量の評価は、

想定される坑道内への湧水量をレイアウト設計に対応させて解析的に求めて、排水システムの設計を行うこととなる。なお、竪置きブロック方式では、定置位置決定特性（EDF: Emplacement Determining Features）を湧水量の観点から設定し、処分孔の適正な配置を図ることとしている（図 4.2.2-2）。この考え方は、横置き PEM では鋼殻があるため、湧水によるパイピング現象は発生しないと考えられるため、考慮する必要がないとしている。また、湧水量の多い個所については止水グラウトで対応することを工学的対策とし、また処分坑道には勾配を設けることでの自然排水も考慮している。坑内湧水量は、処分場サイトの地質環境条件に依存するものであり、また、本検討では処分場レイアウト設計は検討対象外としているが、仮想地質モデル等を利用して、代替設計オプションに対して処分坑道の湧水量の評価が可能である。

4) 工学的成立性の評価：処分概念の工学的成立性の要求事項としては、建設・操業・閉鎖の各工程が計画期間中に完了すること、適用する技術の性能が実証されていることがある。現状の利用可能な技術（および開発の見通し）から、それらを評価することが可能である。



①：湧水を伴わない断層・割れ目，②，③：湧水を伴う断層あるいは透水性割れ目（3.3.3 項（4）参照），
④：断層・割れ目が密集し，力学的な強度が低下している領域

図 4.5-26　廃棄体を埋設する場所として好ましくない特性の模式図
（高レベル放射性廃棄物処分場の竪置き・ブロック方式の例）

以上に示したように，断層・割れ目からの湧水量を指標として，処分孔の掘削および緩衝材ブロックの処分孔への定置の可否，すなわちオーバーパックに封入したガラス固化体の定置の可否を決定することから，パネルスケールで記載される長さ 1 km 未満の断層・割れ目の水理学的特性を，定置位置決定特性（以下，EDF[9]という）と呼ぶこととする。EDF に基づいた判断指標となる湧水量を決定し，処分孔の掘削および緩衝材の施工の観点から，利用可能な処分孔の割合（以下，処分孔利用率という）を算出し，予備区画の必要量を見積もる。

図 4.2.2-2　定置位置決定特性の例[5]

4.3　既存処分概念等の整理

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

4.3.1　海外の処分概念の調査

海外の処分概念の調査は、報告書が公表されている以下の 8 か国を対象とした。

(1) フランス
(2) 米国
(3) スウェーデン
(4) フィンランド
(5) スイス
(6) ベルギー
(7) ドイツ
(8) カナダ

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

(1)　フランス

フランスの実施主体である ANDRA は、1991 年のバタイユ法で要求された可逆性を有する地層処分の実現性を 2005 年に提示し（Dossir 2005）、Meuse and Haute-Mame サイトを処分候補地として処分場建設認可申請の準備を進めている[7]。

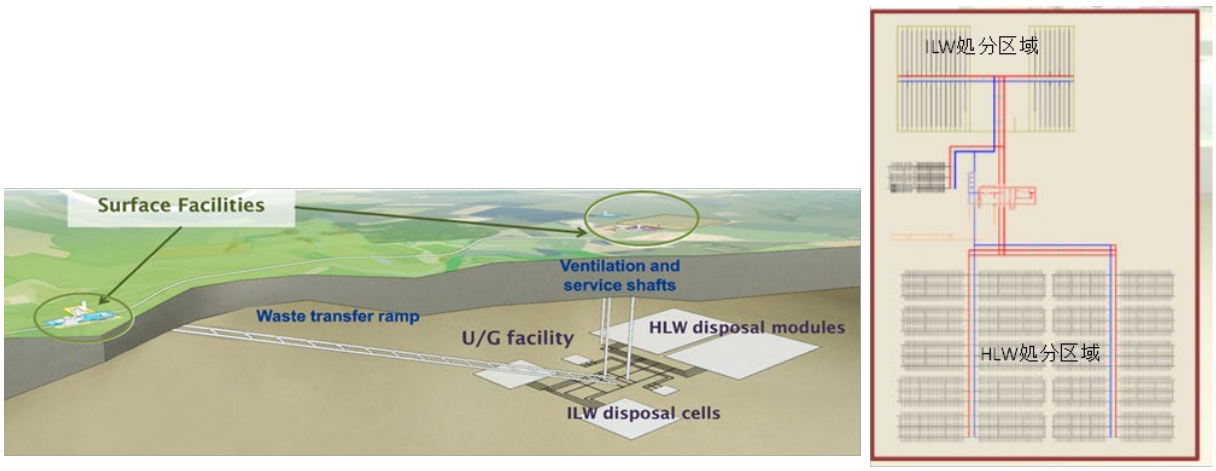


図 4.3.1-1　ANDRA が公表した処分場レイアウト（[7]に一部加筆）

フランスでは、2006 年に制定された放射性廃棄物用管理計画法により、処分場は少なくても 100 年間の可逆性を維持することが要求されており、ANDRA は可逆性を実現する方法として廃棄体の回収を考慮した定置概念を開発してきた。なお、回収容易性を考慮した定置概念構築の背景には、低透水性である Callovo-Oxfordian と呼ばれる古い泥岩であるサイトの地質環境も重要な因子となっている。主要坑道と定置坑道の組み合わせによる櫛型レイアウトとなっており、大口径の主要坑道から小口径の定置坑道に廃棄体容器をプッシングマシンで定置し、逆動線で回収する装置が開発され、地上で実規模での実証試験が実施されている[8]。

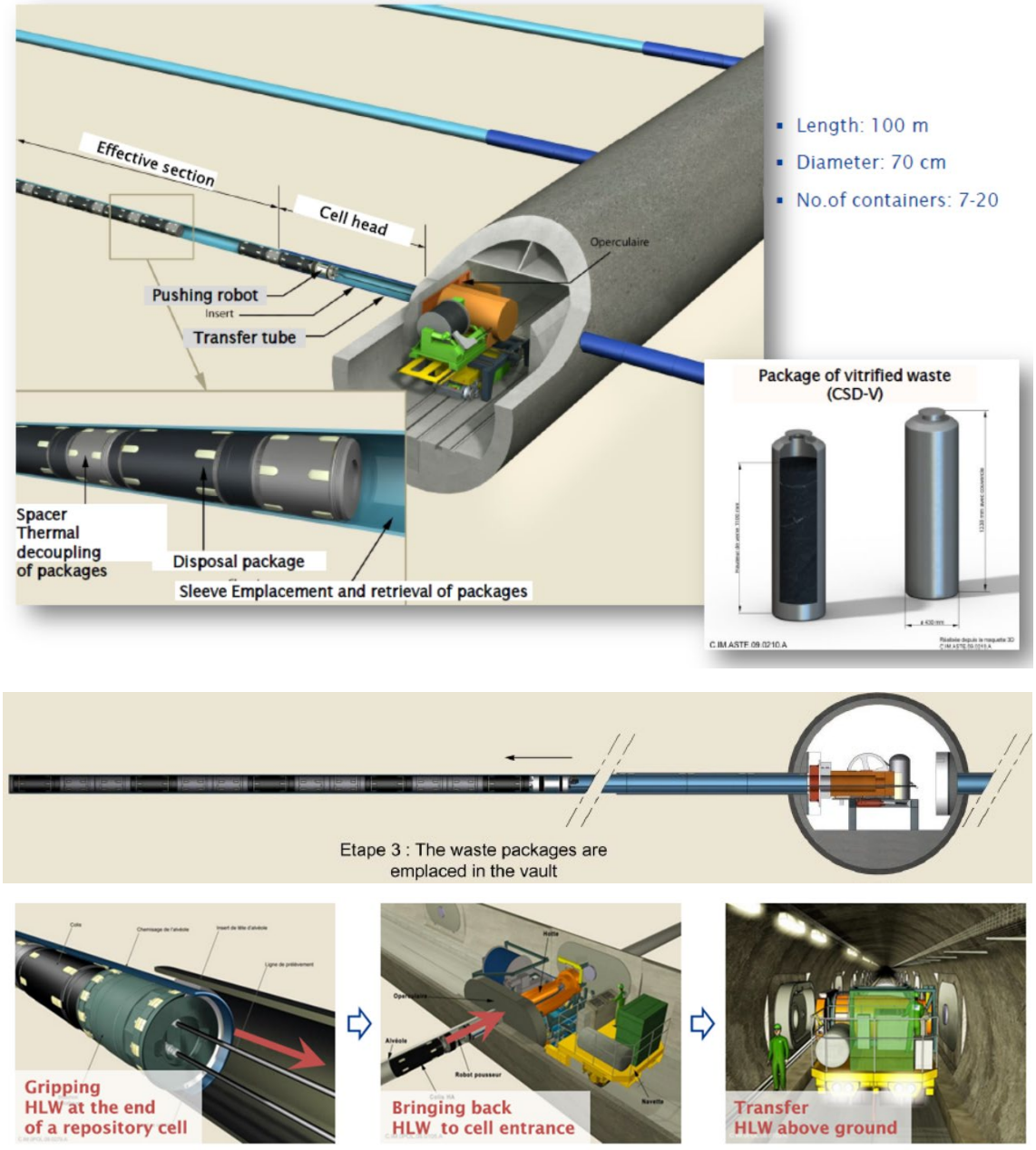


図 4.3.1-2　小口径定置坑道への廃棄体定置と回収概念[8]

○回収容易性向上の観点からの着目するポイント

回収を定置の逆動線としてとらえ、定置概念の高度化を図ることで回収の容易性を向上した概念となっている。

【アクセス性向上の視点】

・埋め戻し材を必要としない小口径坑道（鋼製スリーブ（ケーシング）を設置）への定置によって、廃棄体までのアクセス確保のための作業量の減少を図っている。
・小口径坑道に設置するケーシングに長期健全性を持たせることで、廃棄体までの経路の確保を図っている。

【ハンドリング性向上の視点】

・大口径坑道から小口径坑道への廃棄体定置と逆動線となる回収によって、作業空間と単純な作業動線が確保できる。
・廃棄体容器の外周にセラミックのランナーを装填することで、ケーシングと廃棄体容器の摩擦抵抗を小さくし、ケーシング内の移動を容易にしている。
・廃棄体容器に長期健全性を持たせることで、回収時の作業性が確保できる。

(2)　米国

米国の実施主体である DOE は、1987 年に選定したユッカマウンテンは、地下調査施設を含めサイト特性調査が実施されたが、2010 年、オバマ大統領により計画中止が決定された。2013 年、ブルーリボン委員会は使用済み燃料と高レベル放射性廃棄物処分に関する戦略を公表し、サイト選定をはじめ、処分事業を段階的な進め方で再出発することとしている[9]。以下は、ユッカマウンテンを対象とした開発結果を示す。

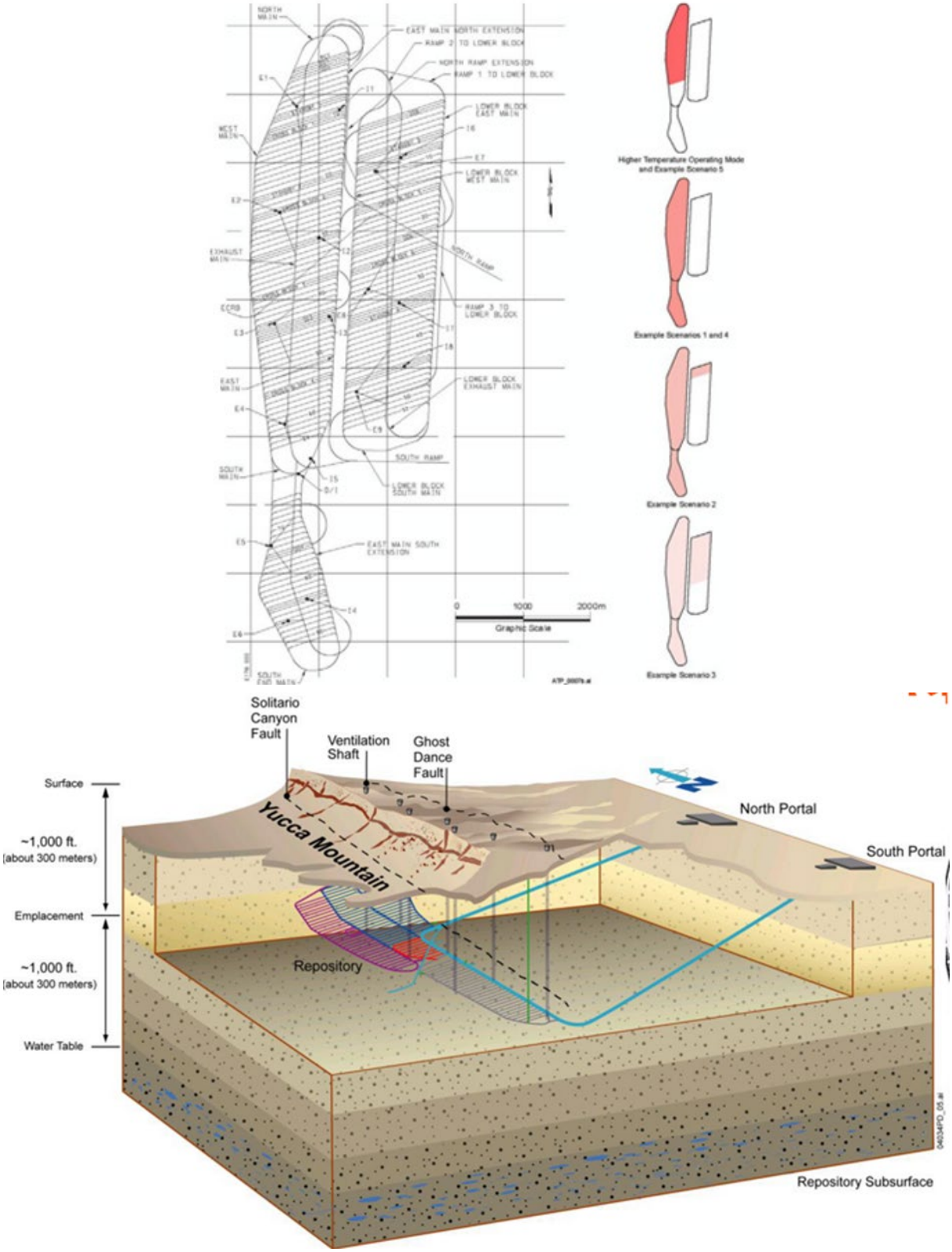


図 4.3.1-3　ユッカマウンテンでの処分場概念とレイアウト[10]

処分場レイアウトは、ユッカマウンテンの不飽和層となる凝灰岩層の分布に沿って、東西に 2km、南北に 10km に配置されている。使用済み燃料が主たる廃棄物となること、定置坑道が開放され

た状態であることから、廃棄体からの熱への対策が重要となる[10]。定置坑道は 1000m と長くなることから、図 4.3.1-4 に示す換気ルートの確保が設計上重要なポイントとされている。中央にサービス坑道と換気（排気）坑道を配置するレイアウトとなっている。立坑により外気を取り入れ、主要坑道から定置坑道に供給され、下部の排気坑道を経て立坑で排出される。また、二方向から定置位置にアプローチすることレイアウトとなっている。

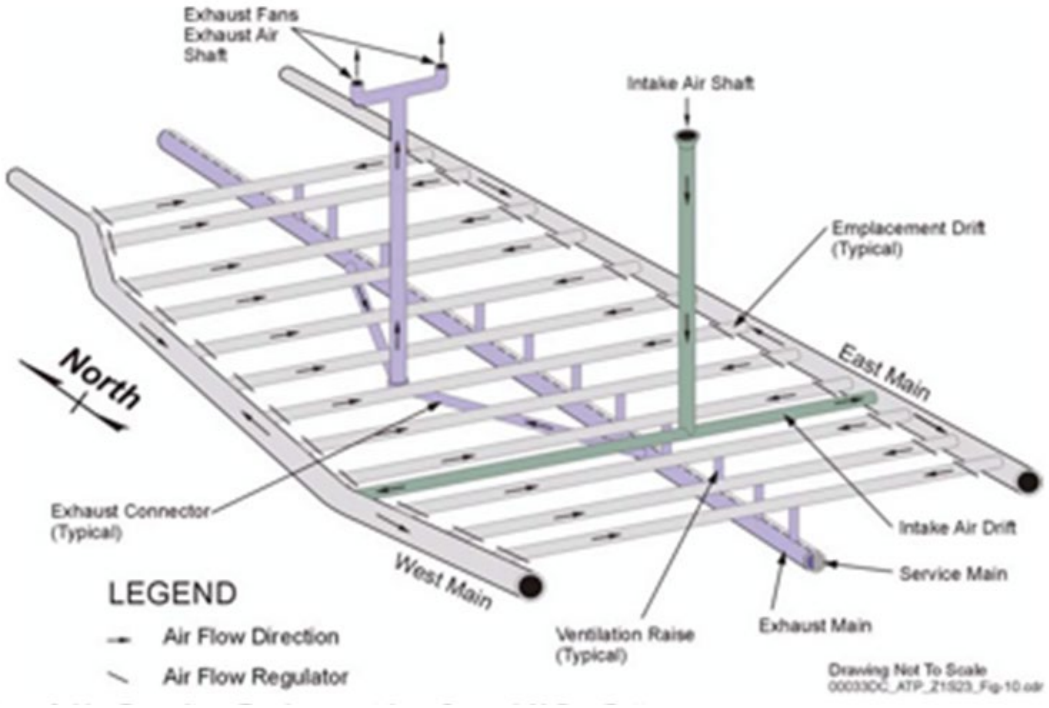


図 4.3.1-4　ユッカマウンテン処分場の換気システム[10]

米国では、原子力規制委員会 NRC がユッカマウンテンを対象とした規制（10CFR Part63[11]）として、以下を規定した。

「・・・定置期間中及びその後の期間で実施される性能確認プログラムの情報が NRC により確認されるまでの期間、あるいは定置作業が開始されてから 50 年間経過するまでの期間、廃棄物が回収できるように設計されていなければならない・・・」。

DOE はこの要件に対応するため、廃棄体容器の強度設計や坑道の安定性確保を図る設計、及び閉鎖後もドリップシールドの設置により廃棄体定置環境の安定性を確保できる方策を構築した。また、ユッカマウンテンの処分予定深度が不飽和環境にあることから、廃棄体定置坑道は埋め戻さず、性能確認プログラム終了後は、チタン製のドリップシールドを設置することを計画した。

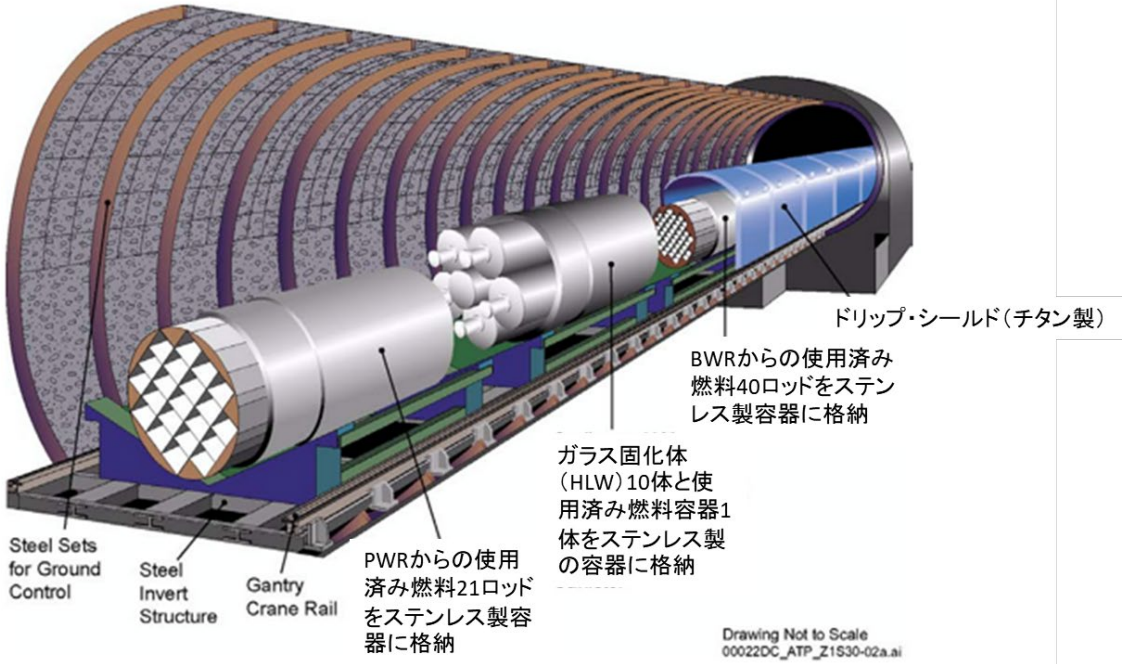


Figure 3. **Schematic Illustration of the Emplacement Drift, with Cutaway Views of Different Waste Packages**

図 4.3.1-5　ユッカマウンテンでの廃棄体定置概念（[10]に一部加筆）

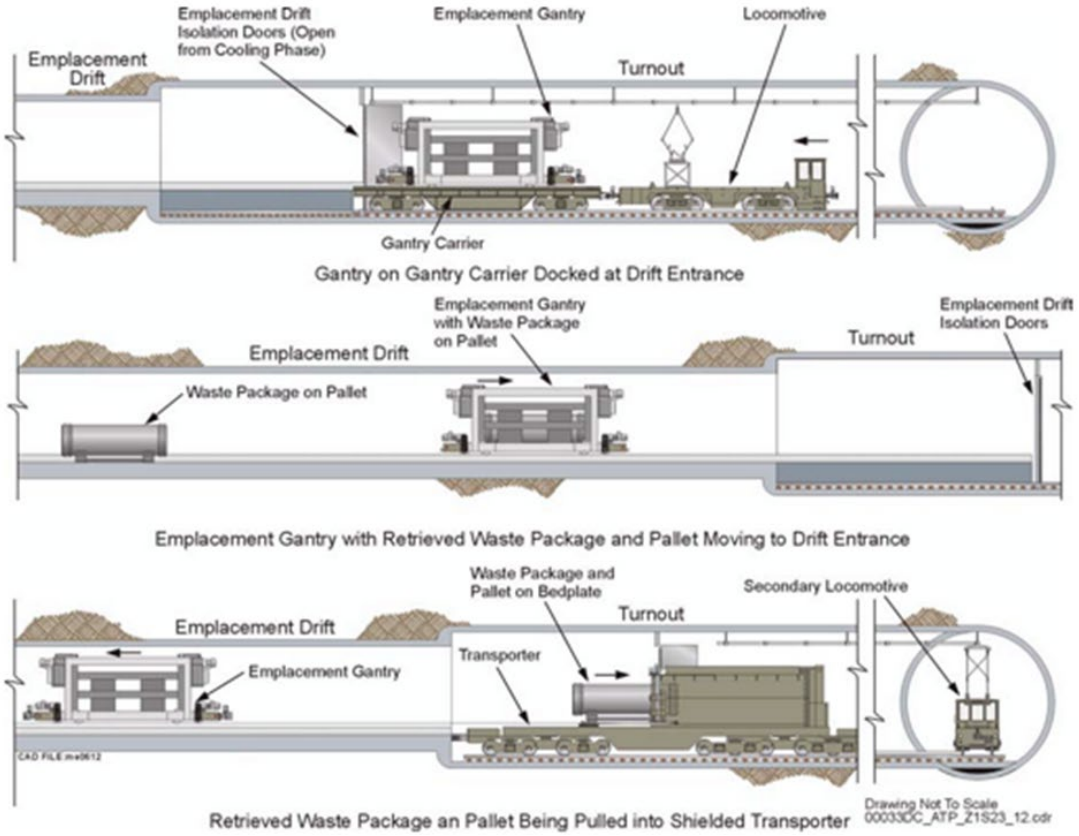


図 4.3.1-6　通常時での廃棄体回収概念（定置装置の利用）[10]

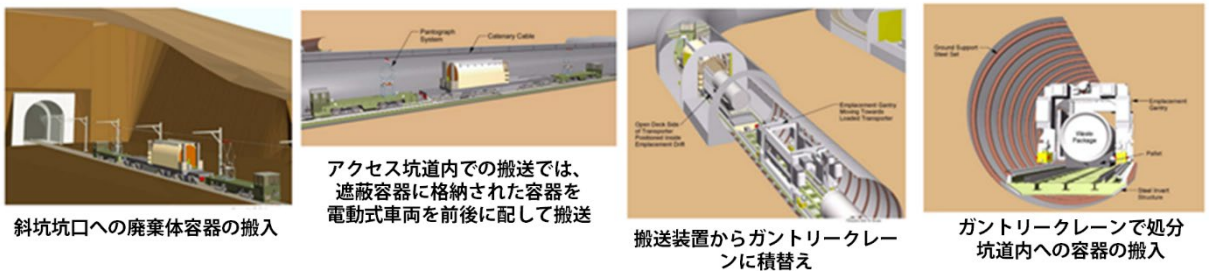


図 4.3.1-7　ユッカマウンテンにおける定置坑道内の廃棄体定置手順（[10]に一部加筆）

○回収容易性向上の観点から着目するポイント

ユッカマウンテンは、定置坑道を開放状態とすることから、廃棄体の回収は坑道の安定性が確保されている間は容易である。期間は定置が開始されてから長くても 50 年程度とされていることから坑道の安定性を図るための設計は現状技術の範囲内である。

【アクセス性向上の視点】

・定置坑道を開放状態とし、埋め戻し材を必要としない概念とすることで、廃棄体までのアクセス確保のための作業量が減少する。

【ハンドリング性向上の視点】

・廃棄体を複数格納する大型容器を使用することで、作業量の削減を図っている。
・定置時と逆動線となる回収作業により、単純な作業動線が確保できる。
・廃棄体容器に長期健全性を持たせることで、回収時の作業性が確保できる。

(3)　スウェーデン

スウェーデンの実施主体である SKB は、すでに花崗岩を母岩とする Forsmark に処分地を決定し、建設認可を待っている状態である。使用済燃料の直接処分を計画しており、1983 年に公表された KBS-3 レポートに記述された「処分孔竪置き概念（KBS-3V）」が基本となっている。

回収の技術的実現性を明示するために、2000 年から机上検討を開始し、2005 年には塩水を用いてベントナイトブロックをスラリー化し、使用済燃料格納容器を処分孔に定置する装置を用いて撤去する試験を Hard Rock Laboratory で実施した。スウェーデンでは、回収可能性について法的には要求されていないが、地層処分では基本的に回収は可能であるとしている。

処分場のレイアウトを図 4.2.1 2 に示す[12]。主要坑道と定置坑道を組み合わせた櫛型配置となっている。

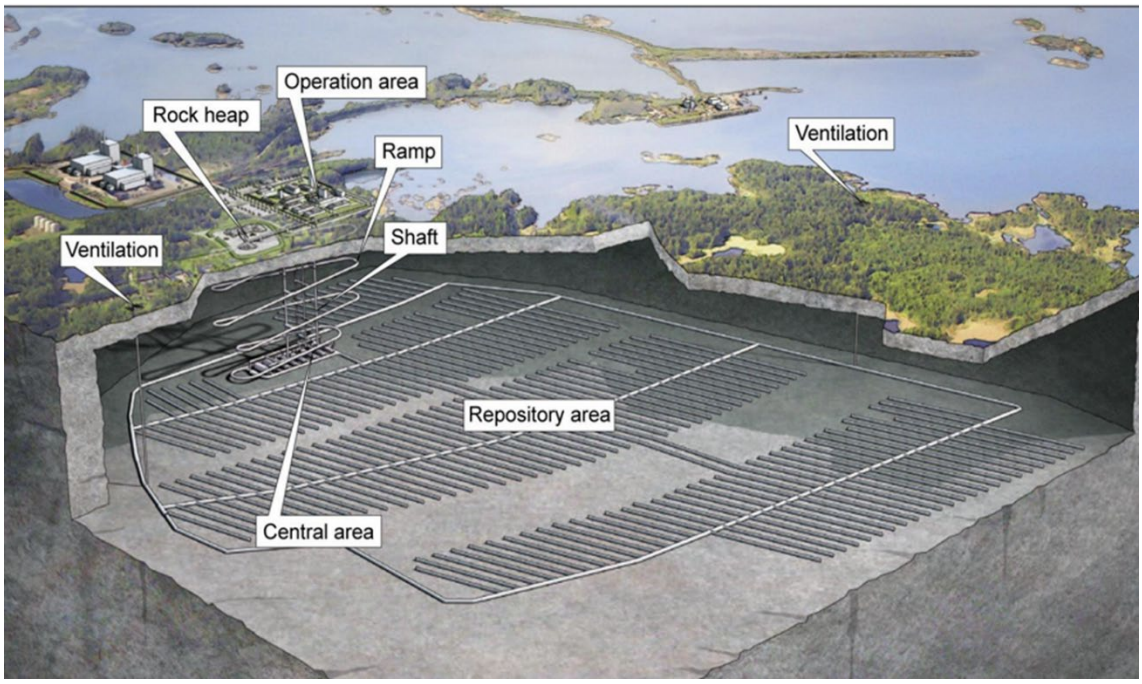


図 4.3.1-8　SKB が計画している処分場レイアウト概念[12]

2004 年～2007 年に HRL で実施したスーパーコンテナーを用いた処分孔への横置き定置概念では、大口径作業坑道から小口径の横孔に自走式定置装置（プッシングマシン）で押し込んで定置する。SKB では、この定置概念を KBS-3H と命名した[13]、[14]。

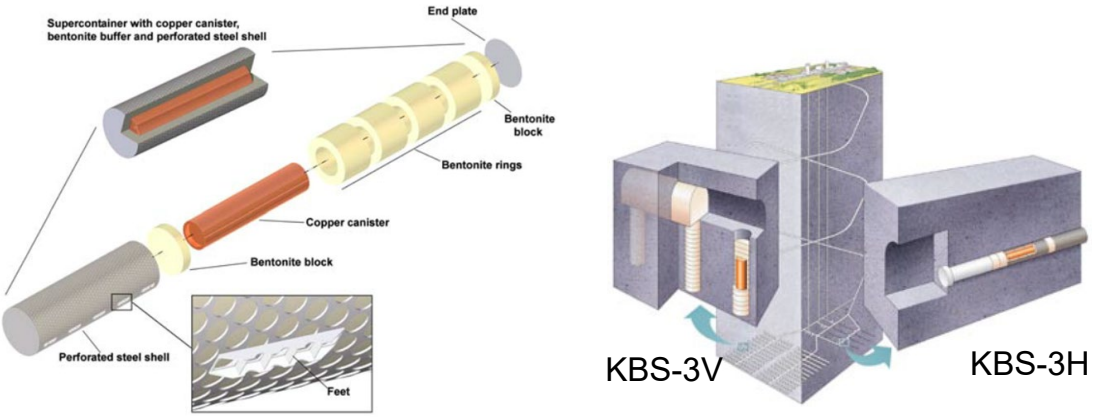
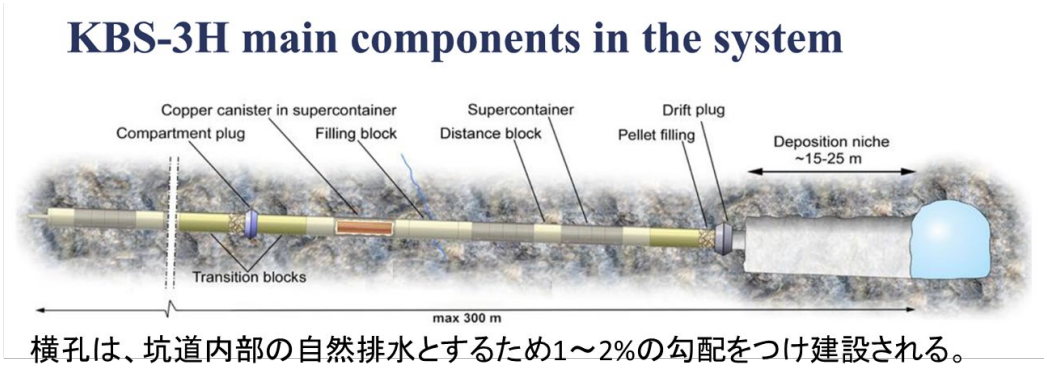
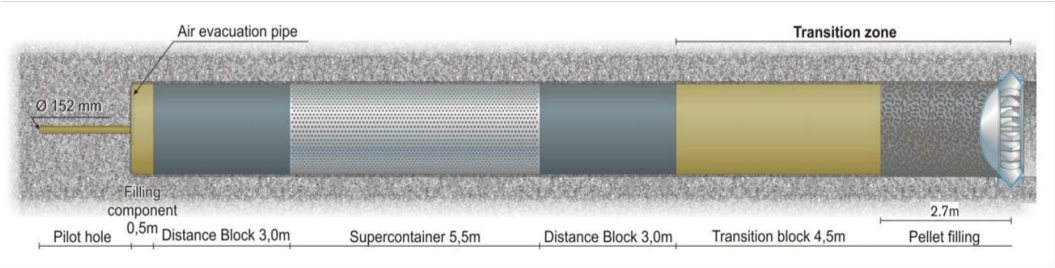


図 4.3.1-9　スーパーコンテナーと定置概念[14]





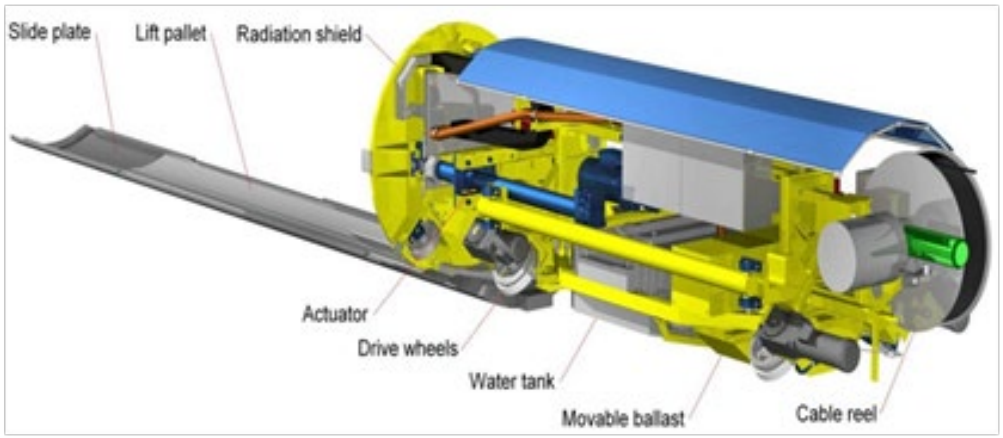


図 4.3.1-10　スウェーデン SKB が提唱した KBS-3H 定置概念と定置装置[14]

スウェーデンでは回収可能性維持に関する規制当局（MMS）からの要求はない。品質管理における是正措置としての回収は当然ながら必要とされている。SKB は地層処分を選択した段階から必要に応じて使用済燃料の回収は可能であるとしており、処分場概念（及び定置概念）の開発過程において、特に回収容易性を考慮した検討は実施していない。処分坑道は、KBS-3V、KBS-3H とも廃棄体定置後速やかに埋め戻すこととしている。

KBS-3V 概念を対象に、回収の技術的実現性を明示するために実規模原位置試験を実施した[15]。この試験では、使用済燃料容器周辺のベントナイトブロックを塩水でスラリー化して撤去する工法を実証したが、撤去までに相当時間を有し、回収技術については今後の技術課題とされた。KBS-3H 概念に対する回収方法については机上検討されているが関連する技術開発は実施されていない。

○回収容易性向上の観点からの着目ポイント

スウェーデンでは回収容易性向上の観点からの定置概念等の開発は実施してきていないが、現状までの概念検討の中で、回収容易性向上に寄与していると判断されるポイントをアクセス性とハンドリング性の視点から抽出した。

【アクセス性向上の視点】

・KBS-3H 概念では、埋め戻し材を必要としない小口径横孔にスーパーコンテナーを定置することから、廃棄体までのアクセス確保のための作業量の減少し、回収容易性が向上すると考えられる。

・KBS-3H 概念では、ベントナイト緩衝材とキャニスターを組み合わせたスーパーコンテナーにより、回収時にスーパーコンテナーが健全であればスーパーコンテナーごと回収することで、緩衝材の除去するための作業量が削減することから、回収容易性が向上すると考えられる。

【ハンドリング性向上の視点】

・KBS-3H 概念では、大口径作業坑道から小口径坑道への廃棄体定置と逆動線となる回収によって、作業空間と単純な作業動線が確保できる。

・高い耐腐食性の容器を用いて長期健全性を確保していることから、回収時の作業性が確保できると考えられる。

(4)　フィンランド

フィンランドの実施主体である POSIVA は、花崗岩を母岩とするオルキロートを処分地として選定し、2016 年処分施設建設の認可を得て、2020 年には操業を開始する予定である[16]。POSVA はスウェーデン SKB との長年の共同研究により、SKB と同様の定置概念（KBS-3V と KBS-3H）を基本としている[17]、[18]。

処分場レイアウトは、比較的口径が大きい主要坑道が平行に 2 本配置し、60m 程度の定置坑道を櫛型に配置する計画となっている。

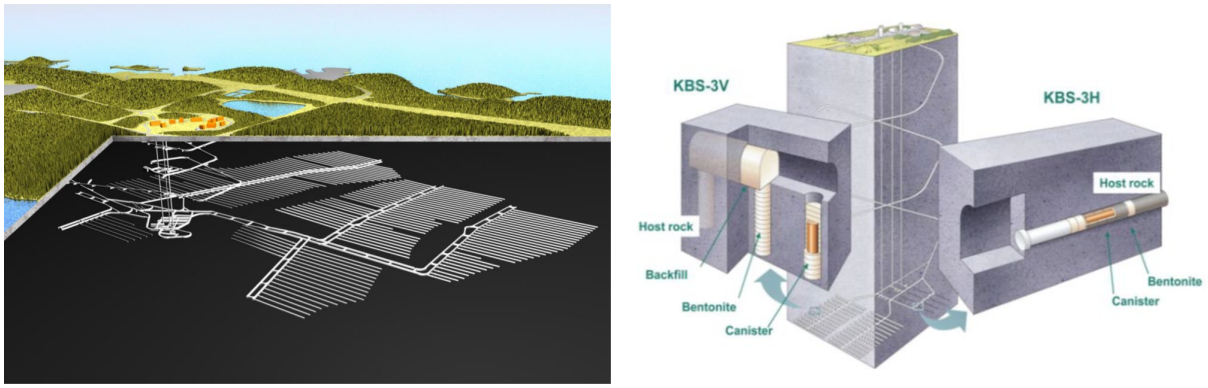


図 4.3.1-11　KBS-3V, KBS-3H の処分場概念と定置概念[18]

フィンランドの規制当局（STUD）は、回収可能性維持を要求していない。しかし、地層処分に関する国の原則決定（2000 年）では、回収可能性維持を要求している。POSIVA では、1999 年

に公表した包括的安全レポートで回収可能性維持に関して、以下の記述がある。
「処分場の閉鎖のあとでも、容器は銅と鋼で少なくても数 10 万年の耐用年数を有していることから、容器の所在に関する記録が残っている限り回収可能性は維持されている。」
処分場設計や定置概念の開発では、スウェーデン SKB の概念を共有しており、特に回収容易性を考慮した検討はなされていない。

○回収容易性向上の観点から着目すべきポイント
フィンランドでは回収容易性向上を考慮した定置概念等の開発はなされていないが、スウェーデンと同様の定置概念となることから、同様な回収容易性向上の視点が考えられる。ここではフィンランドの場合にのみに考えられる回収容易性向上に寄与していると判断されるポイントをアクセス性とハンドリング性の視点から抽出した。
【アクセス性向上の視点】
・処分坑道には撤去しやすいベントナイトブロックと粒状ベントナイトで埋め戻すことで、撤去時の作業量が低減することから、廃棄体までの経路の確保の点で回収容易性が向上すると考えられる。
・櫛型に配置される定置坑道が 60m 程度と比較的短いことから、廃棄体までの距離の点で回収容易性が向上すると考えられる。
【ハンドリング性向上の視点】
・特になし

(5) スイス
スイスの実施主体である NAGRA は、2006 年に公布された新原子力法に伴って策定した“Sector Plan”に従い段階的なサイト選定を実施している。処分場の候補地となった地区は、スイス北部に分布する Opalinus Clay(OPC) と呼ばれる粘板岩が広く分布する地区である。2018 年には 1 か所の候補地点を選定し、調査を開始する予定である。スイスでは、使用済燃料とガラス固化体及び長寿命中レベル廃棄物の併置処分を計画している[19]。処分場概念で特徴的なことは、実廃棄体を定置するパイロット施設を設置し、処分場の閉鎖措置の意思決定に反映する情報を取得する点がある。

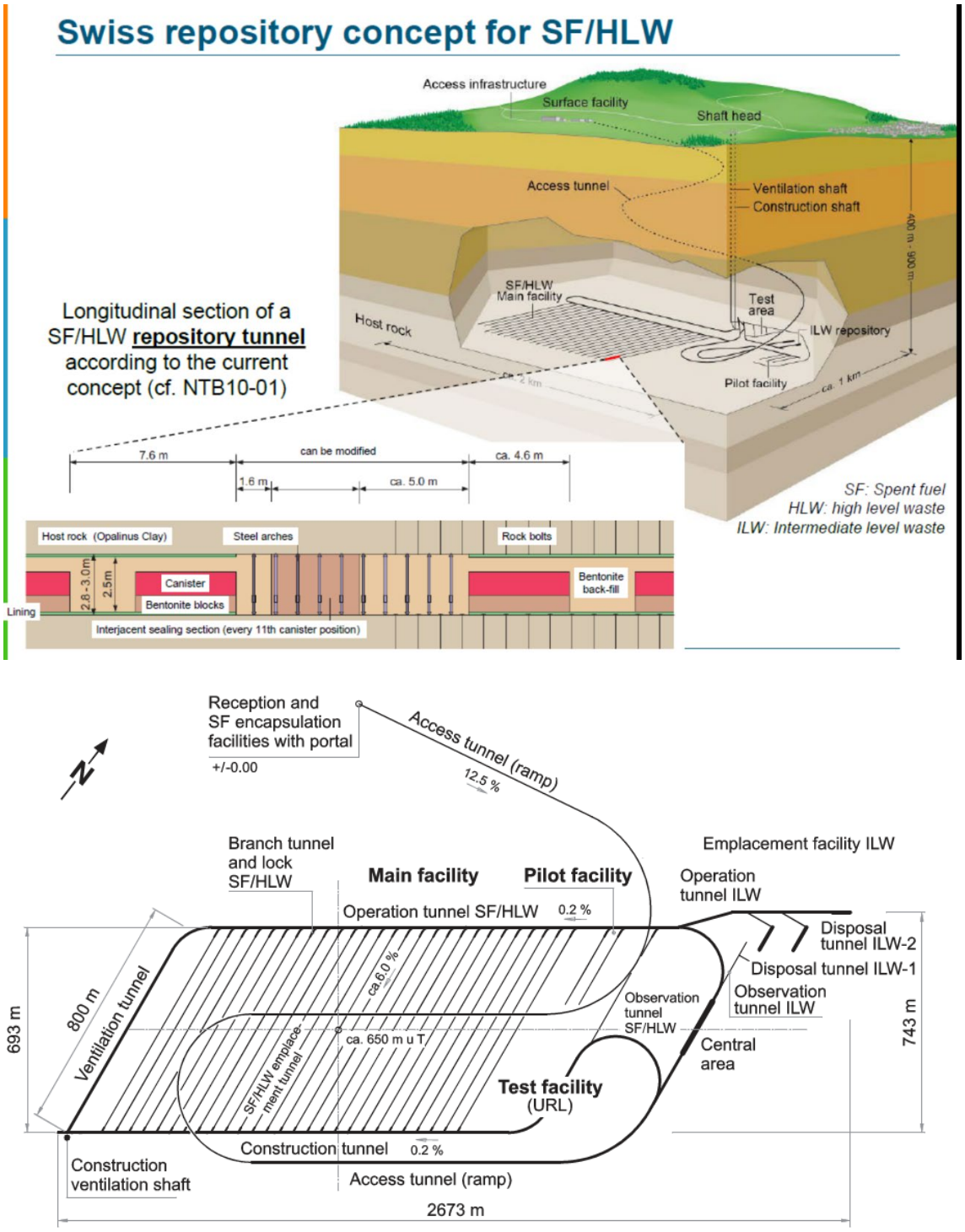


Figure 5: Overview of the underground facilities of the repository for SF/HLW and ILW
図 4.3.1-12　NAGRA が計画している併置処分概念と処分場レイアウト[19]

スイスの規制主体である ENSI は、「地層処分場の設計原則とセーフティケースに関する要件」の中で、処分場の閉鎖まで、多額の費用を発生させない回収可能性の維持を求めている。NAGRA は廃棄体の回収は、定置の逆動線としており、現時点では回収の容易性を向上させる技術開発は実施していない[20]。

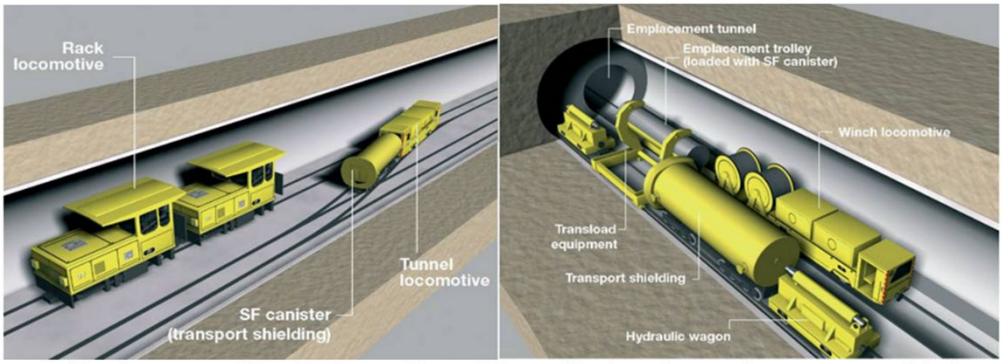


Figure 7: Emplacement of SF-Canister – Start niche and lock to the emplacement tunnel (schematic)

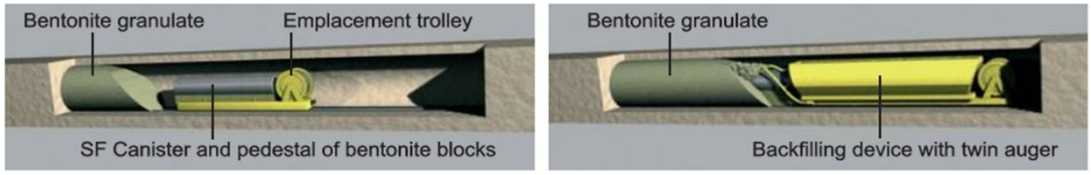


Figure 8: Emplacement trolley with spent fuel canister at emplacement position (left); Wagon emplacing bentonite granulate in disposal tunnel after a waste canister has been emplaced (right)

図 4.3.1-13　NAGRA が考案した処分坑道への廃棄体定置概念[59]

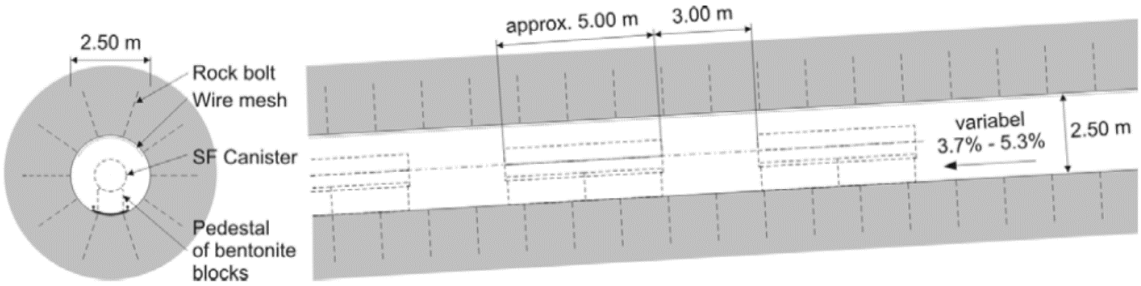


図 4.3.1-14　地層の傾斜に合わせた定置坑道の計画[58]

○回収容易性向上の観点から着目するポイント

NAGRA は、回収容易性向上の観点からの技術開発は実施していないが、回収容易性向上に寄与していると判断されるポイントをアクセス性とハンドリング性の視点から抽出した。

【アクセス性向上の視点】

・粒状ベントナイトを埋め戻し材の使用と乾燥状態の維持により、撤去時の作業量が低減することから、廃棄体までの経路の確保の点で回収容易性が向上すると考えられる。

【ハンドリング性向上の視点】

・大口径の定置坑道とすることで作業空間の確保の点で、回収容易性が向上すると考えられる。

(6)　ベルギー

ベルギーの実施主体である ONDRF/NIRAS は、2003 年の SAFIR-2 レポートで地層処分の実現性を明示したのち、処分場概念の合理性向上に向けての開発を進め、2017 年に新たな処分場レイアウトとスーパーコンテナーと呼ぶ定置概念を公表した[21]。また、国全体で広く分布している粘土（Bloom Clay）を候補母岩としている。処分場レイアウトは、櫛型レイアウトで主要坑道を二本並列に配置する。また、地表からは立坑により処分深度への廃棄体の搬送を行う。

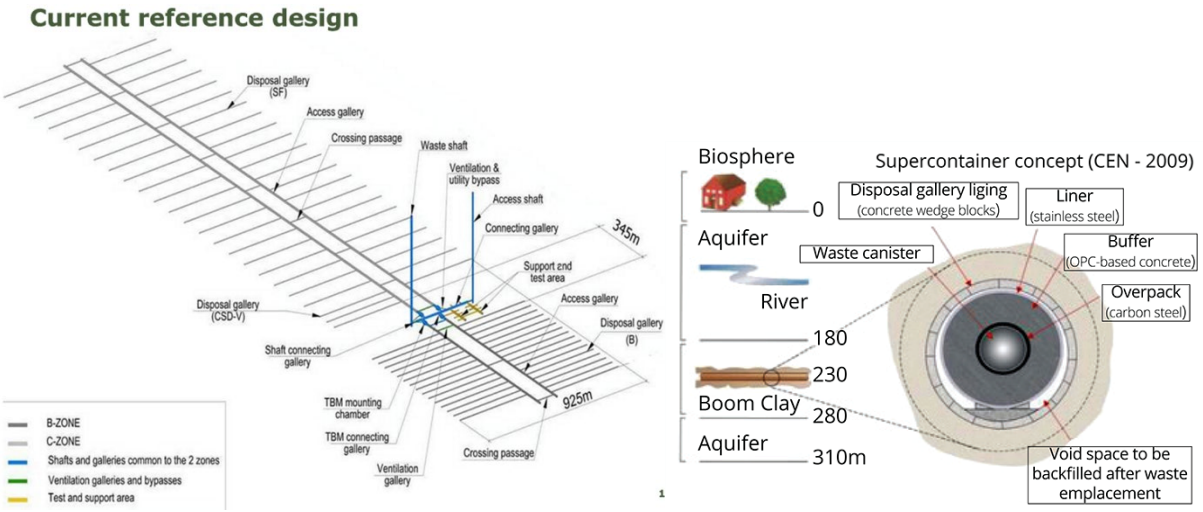
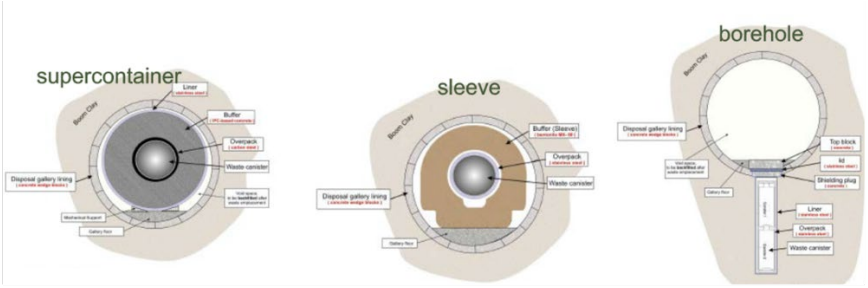


図 4.3.1-15　ベルギーでの処分場レイアウトとスーパーコンテナー概念[21]

ベルギーでは 2014 年に公布された法律で可逆性と回収可能性を考慮することが要求されている。ONDRAF は、回収の容易性を考慮した定置概念等を検討していないが、図 4.3.1-16 に示す三つの基本概念に対して、「Easy demonstration, Robustness, Technical Operation, Cost」といった指標・尺度を用いて専門家の判断で比較評価され、その結果、SC-IOC（スーパーコンテナー）がすべてにおいて最高点を得て選択された[22]。このことはスーパーコンテナーが定置時のハンドリング性が高いことを意味している。また、短い定置坑道に複数のスーパーコンテナーを同一動線で定置できる。



SC-IPC or OPC　　SL　　BH-V or H

	Reference	Techno	Cost	Ease of demonstration
SC – IPC	57	57	57	55
BH – V	54	54	54	53
SL	52	52	53	52
SC – OPC	61	61	59	59
BH - H	55	55	55	53

図 4.3.1-16　ベルギーにおける定置概念の比較[22]

○回収容易性向上の観点からの着目ポイント

ベルギーでは、回収容易性の向上を考慮した概念の開発はしていないが、定置の容易さなどの観点からスーパーコンテナーを開発した。回収容易性向上に寄与していると判断されるポイントをアクセス性とハンドリング性の視点から抽出した。

【アクセス性向上の視点】

・定置坑道支保工にセグメントを利用することで、長期間の坑道安定性の確保が期待できることから、作業環境の確保持の確実性が増し、廃棄体までの経路の確保の点で容易性があると考えられる。

・小口径の坑道によって埋め戻し材の量を削減されることから、廃棄体までの経路の確保の点で回収容易性の向上がすると考えられる。

・スーパーコンテナーにより、回収時にスーパーコンテナーが健全であればスーパーコンテナーごと回収することで、緩衝材の除去するための作業物量が削減することから、回収容易性が向上すると考えられる。

【ハンドリング性向上の視点】

・スーパーコンテナーにより、健全性の向上が期待できるため、回収時の作業性が確保できると考えられる。

・大口径坑道から小口径坑道への複数廃棄体定置と逆動線となる回収によって、作業空間と単純な作業動線が確保できると考えられる。

(7)　ドイツ

ドイツでは、2013 年の HLW サイト選定法及び 2015 年の処分計画制定に続き、2017 年には新たな実施主体である BGE が設立された。それに伴い、これまで岩塩であるゴアレーベンを候補地として調査や処分概念が構築されていたが、処分候補地は白紙状態に戻された。

以下は岩塩を母岩とした処分場レイアウトや定置概念の開発状況を記述する。処分場レイアウトはドーム状岩塩の形状に合わせ、同じ深さでの配置を考慮しているため、図 4.3.1-17 にあるように処分坑道は不定形のパネル割のようになっているが、二本の主要坑道と廃棄体を定置する処分坑道が櫛型に配置されている。廃棄体は２本の立坑から搬入される計画となっている[23]。

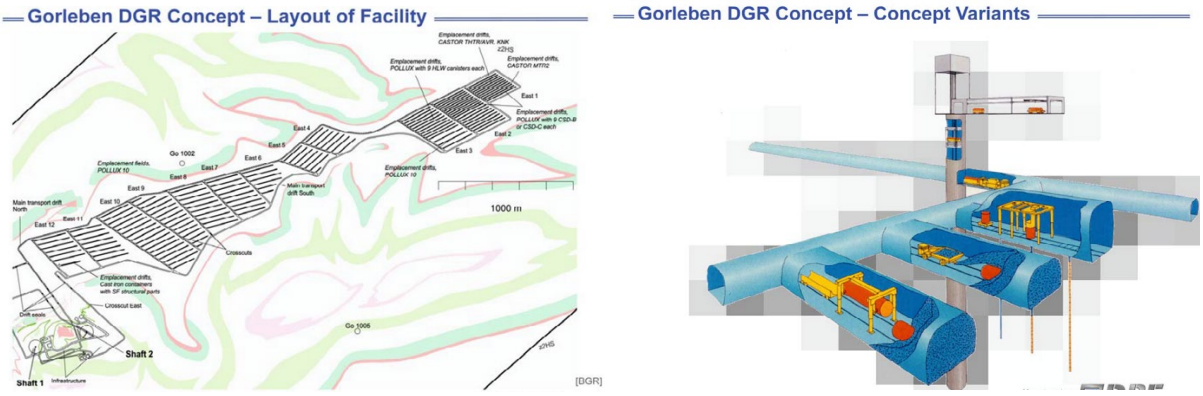


図 4.3.1-17　ゴアレーベンを対象とした処分場レイアウトと定置概念[23]

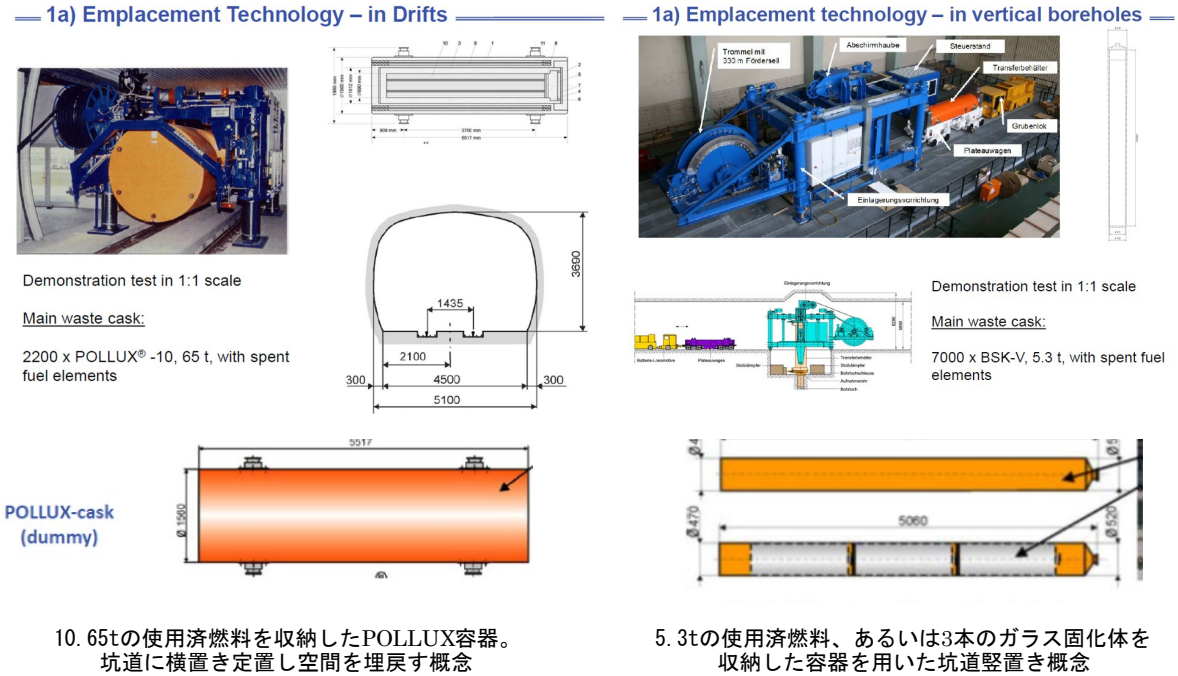


図 4.3.1-18　POLLUX を用いた大口径坑道横置き定置と廃棄物容器の竪置き定置概念
([24]に一部加筆)

ドイツでは、規制主体である BfE が、発熱性放射性廃棄物の最終処分に関する安全要件（2010）において、閉鎖後の処分場からの緊急回収を行う際に、廃棄物容器の健全性を 500 年間維持することを要求している。

BGE は、POLLUX という多機能容器（中間貯蔵容器と最終処分容器を兼用）を開発し、ガラス固化体であれば 9 体、使用済燃料の場合は 10.65 トン格納する容器を開発した。また竪置き方式には、ガラス固化体 3 体を直列に格納する容器を整備した。定置坑道は定置後、岩塩で速やかに埋め戻すこととしている[24]。

○回収容易性向上の観点から着目するポイント

回収容易性向上を意図した処分場概念や定置概念の開発について記述された報告書は見当たらなかったが、POLLOX 容器をはじめ、定置の容易性を考慮した開発がなされている。それらを基に、回収容易性向上に寄与していると判断されるポイントをアクセス性とハンドリング性の視点から抽出した。

【アクセス性向上の視点】

・長さの短い大口径坑道への定置により、廃棄体までの距離の短縮を図っている。

【ハンドリング性向上の視点】

・POLLUX の導入（500 年の耐用年数）により長期健全性を確保していることから、回収時の作業性が確保できると考えられる。
・廃棄体を複数格納する POLLUX 容器により、回収時の作業量が減り、回収容易性が向上すると考えられる。
・大口径定置坑道により、作業空間の確保の点で、回収容易性が向上すると考えられる。

(8)　カナダ

カナダの実施主体である NWMO は、2010 年にサイト選定計画最終版を公表し、2014 年に第一段階が終了し、9 サイトが選定された。母岩は、泥岩あるいは花崗岩である。NWMO は Adaptive Phased Management という基本方針のもと、三段階での地層処分計画を進めている[25]。処分場レイアウトは、廃棄体定置の櫛型レイアウトの周辺に周回坑道を配置する概念となっている。また、立坑を用いて廃棄体を搬入する。

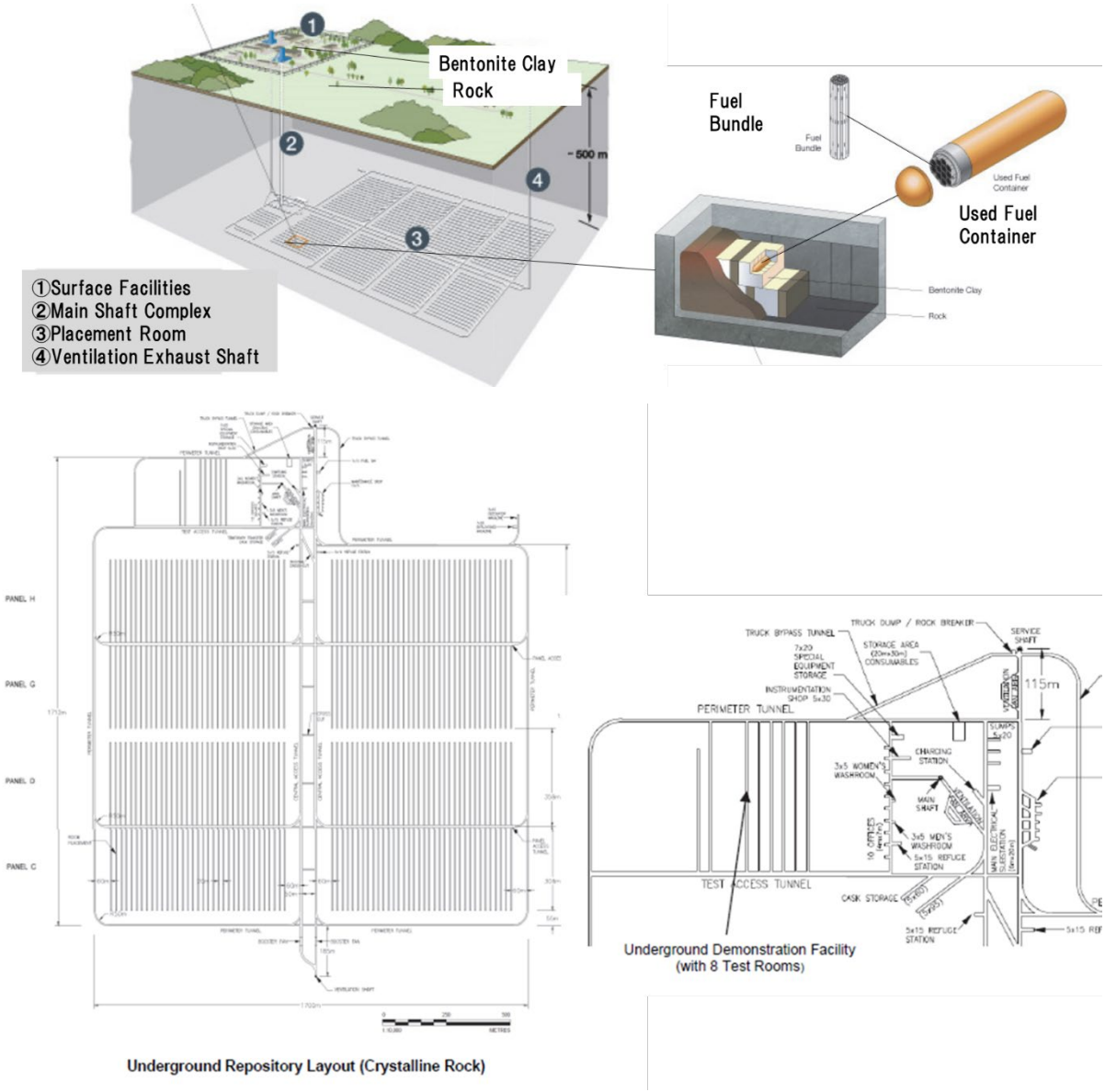
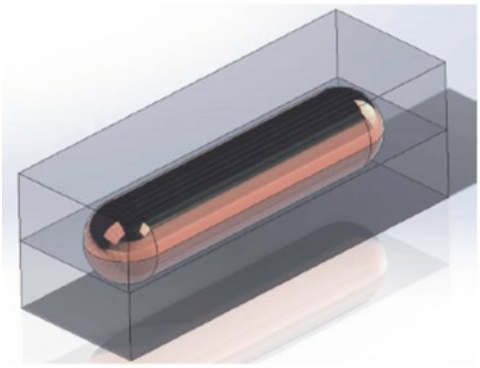


図 4.3.1-19　カナダにおける処分概念と処分場のレイアウト（[25]に一部加筆）

カナダでは回収可能性維持についての規定は法律にはなく、2011 年に改訂された原子力安全委員会の規定にも言及されていないが、NWMO が公表した処分場建設認可に向けての”A Way Forward 2005”では、回収可能性は、廃棄体が定置される期間（約 30 年間）と処分場が閉鎖されるまでのモニタリング期間（約 210 年間）合計で 240 年間維持されるとしている。NWMO は、定置性を高めるためにバッファーボックスという容器を開発し、大口径坑道に直交して横置きに定置する概念を採用している。



UFC with Buffer Box

CANDUの使用済燃料を銅でコーティングした鋼製容器（UFC）をベントナイトバッファーボックスに格納

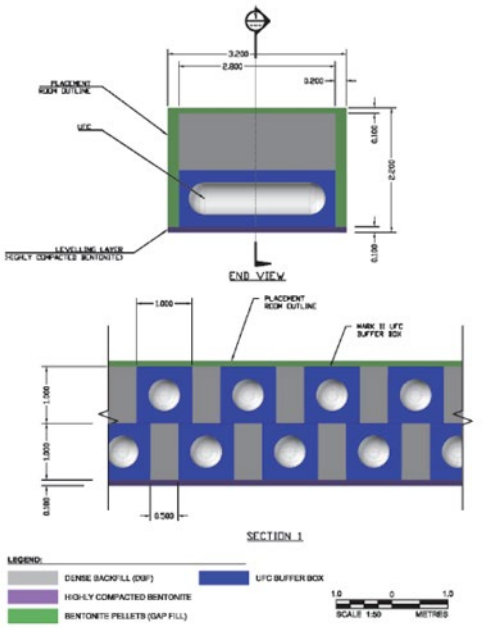


Figure 13: Sealing Material in Placement Room (Crystalline Geosphere)

図 4.3.1-20　バッファーボックスを用いた坑道横置き概念（[25]に一部加筆）

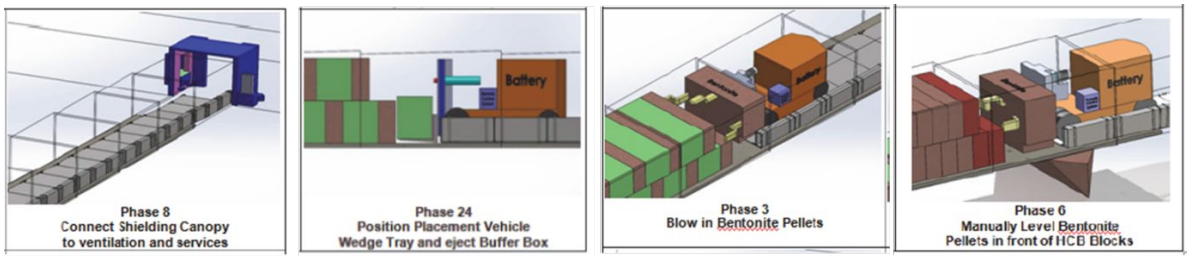


図 4.3.1-21　定置坑道内へのフォークリフトによるバッファーボックスの定置手順[25]

○回収容易性向上の観点から着目するポイント

カナダでは回収容易性を向上させるための技術開発は実施していないが、回収の容易性向上に寄与していると判断されるポイントをアクセス性とハンドリング性の視点から抽出した。

【アクセス性向上の視点】

・矩形のバッファーボックスを矩形の坑道断面に定置することで、埋め戻し材の量が削減されることから、廃棄体までの経路の確保の点で回収容易性が向上すると考えられる。

【ハンドリング性向上の視点】

・２段定置された矩形のバッファーボックスを、矩形の坑道断面からフォークリフトによって、定置とは逆動線によって回収することできるため、回収作業が単純化されることから、容易性が向上すると考えられる。

4.3.2　国内の処分概念の調査

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

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

これらの報告書において、何らかの形で回収可能性に言及したのは、2002 年以降に開始された NUMO の処分概念オプション検討からである（成果は、NUMO-TR-04-03[26]にまとめられている）。それまでの処分概念の検討では、回収可能性について概念開発上考慮されていない（1990 年代ではガラス固化体の地層処分の実現性明示に着目しており、回収可能性の議論は使用済燃料の直接処分の問題であると考えられていたことも背景にある）。

ここでは、回収可能性に関しての記載がある 2004 年以降の報告書に関して、処分概念を調査し、容易性向上の視点からの整理を行った。

(1)　NUMO-TR-04-01

NUMO-TR-04-01「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性」[6]に示された処分概念検討では、基本的に第２次取りまとめ概念を踏襲し、今後の段階的な処分概念構築に向けての評価の指標として図 4.3.2-1 に示す「設計因子」が設定された。

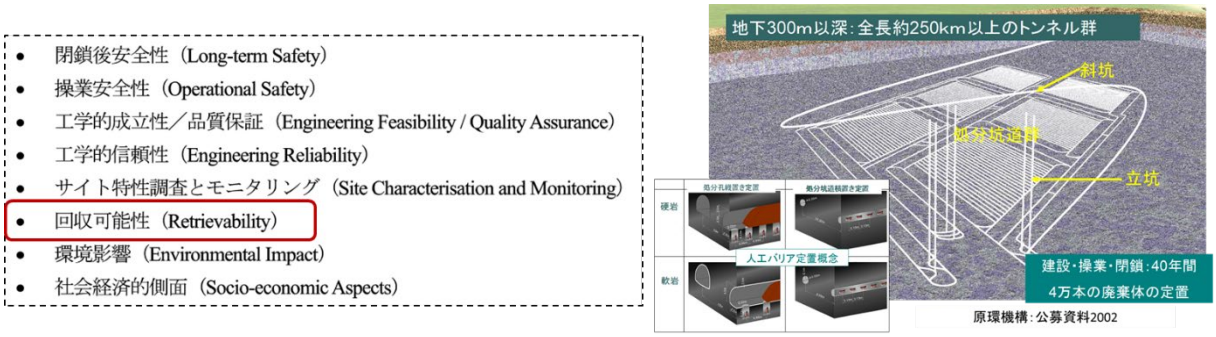


図 4.3.2-1　NUMO-TR-04-01 に記述された設計因子と処分概念（[6] に一部加筆）

これらの設計因子は、構築した処分概念を繰り返し評価する「構造化アプローチ」の指標として取り扱われており、「回収可能性」に関しては、「ハンドリング実現性：handling practicability」の視点からの評価事例（硬岩のほうが回収が容易など）が記載されている（第 7 章 段階的な処分場開発　pp 7-9）。

その後の NUMO の要件管理システム（RMS）の検討で、上記の設計因子は、「設計要件」として取り扱われているが、回収の容易性向上については言及されていない。RMS は処分概念構築のプロセスの追跡性と品質確保を主眼としており、合理性や容易性向上に関する視点は取り扱っていない。

(2)　NUMO-TR-04-03

NUMO-TR-04-03（英語版）[26]では、ジェネリックな環境ではなく、我が国の多様な地質環境への対応を考慮し、処分場の投影面積を削減すること、定置作業の合理化を図ることを目指した処分概念オプションが例示されており、それらの効果についての下記に示す定性的な見通しが記述されている。

① 複数の固化体をオーバーパックに格納することで廃棄体定置の合理化がはかれる（図 4.3.2-2）。
② 人工バリアシステムを PEM 化することで定置作業の合理化と乾燥ベントナイトを使用することで温度への耐久性を向上させ、埋設密度をあげる（図 4.3.2-3）。
③ 定置形態を工夫することで定置作業の合理化と処分場面積の縮小を図る（図 4.3.2-4、図 4.3.2-5）。
④ 処分場の様々なレイアウトを①、②、③の概念オプションと組み合わせる（図 4.3.2-6）。

回収の容易性向上に寄与していると判断されるポイントをアクセス性とハンドリング性の視点から抽出した。

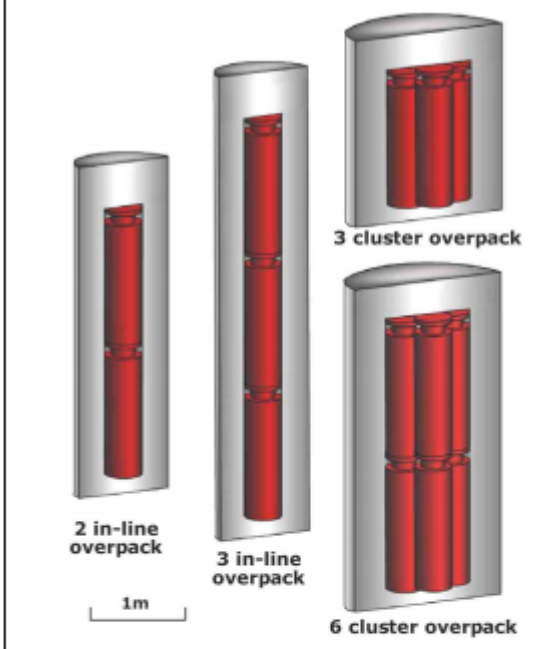
【アクセス性向上の視点】
- 人工バリアシステムを PEM 化し、回収時に PEM が健全であれば、PEM ごと回収することで、緩衝材の除去するための作業量が削減することから、回収容易性が向上すると考えられる。
- 乾燥ベントナイトを使用することで温度への耐久性を向上させ、埋設密度をあげることが可能となることから、坑道距離が短縮でき、回収容易性が向上すると考えられる。
- 1 つの処分孔に複数の廃棄体を定置することで、処分坑道の埋め戻し材の撤去量が減り、回収容易性が向上すると考えられる。

【ハンドリング性向上の視点】
- 複数の固化体をオーバーパックに格納することで、回収時の作業量が減り、回収容易性が向上すると考えられる。
- 大口径の定置坑道とすることで作業空間の確保の点で、回収容易性が向上すると考えられる。

4. Multiple waste canister overpack

2-6 waste canister overpack:

- Essentially a conventional overpack but with more than one waste canister;
- Simple steel overpack is shown but composite overpacks are also feasible and could reduce weight/size of the overpack;
- Void space in the cluster designs filled with glass beads.



5. Multi-purpose, very large overpack ("cask")

Containing up to 28 waste canisters:

- Could be designed for multiple use - transport / storage / disposal (with additional external packaging, neutron shield, etc. as required);
- Internal void space filled with glass beads.

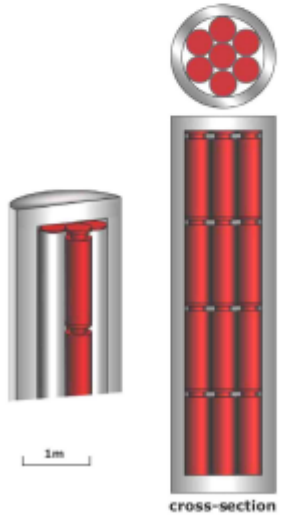


図 4.3.2-2　NUMO-TR-04-03 に提示された複数の固化体を格納するオーバーパックの概念オプション[26]

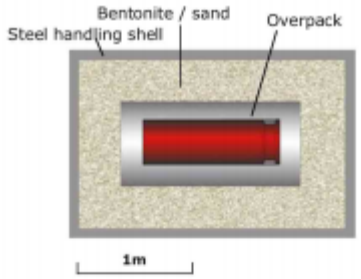
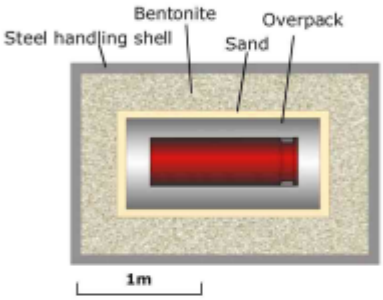
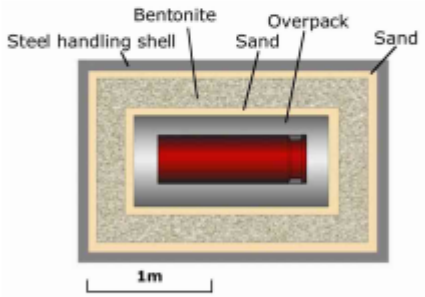
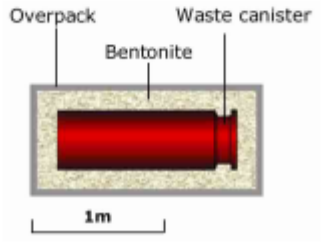
1. H12-based design • Waste canister. • Overpack. • Bentonite / sand buffer. • Steel handling shell.	
2. Variant 1 with separated bentonite and sand • 100% bentonite buffer. • Addition of a sand layer around the overpack: - acts to remove the possibility of overpack sinking by creep; - increases radionuclide transport resistance during the period of H_2 gas generation. (McKinley et al., 2004a)	
3. Variant 2 with separated bentonite and sand • 100% bentonite buffer. • Addition of a second sand layer outside the bentonite (acts to reduce the possibility of bentonite erosion by flowing groundwater). (Toyota and McKinley, 1998)	
4. Variant with external shell serving as overpack • Waste canister. • Bentonite buffer. • Outer steel layer (acts as overpack and handling shell for the unit). • Equivalent to the Integrated Waste Package (IWP) proposed by Apted (1998).	

図 4.3.2-3　NUMO-TR-04-03 に提示された様々な PEM の概念オプション[26]

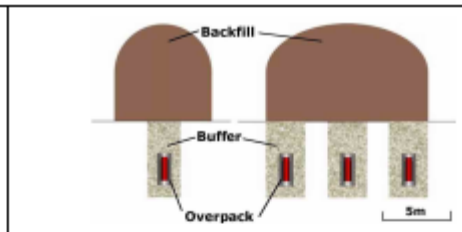
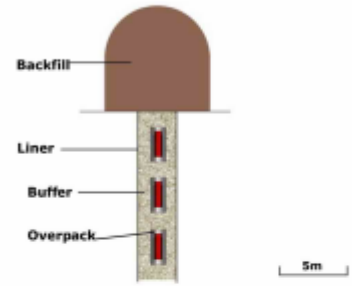
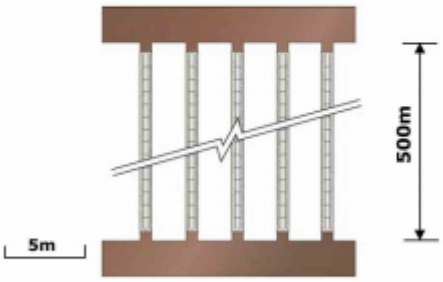
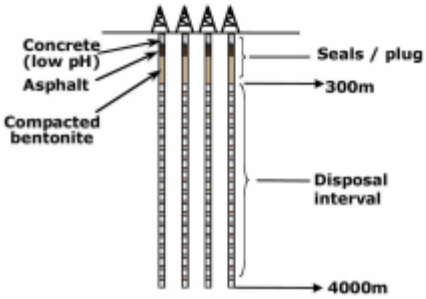
1. Pits Single waste package is emplaced in each pit. Buffer may be emplaced in-situ or as PEM.	 (left: H12)
2. Short boreholes (multiplex disposal) Multiple waste packages are emplaced in short boreholes. EBS may be emplaced in-situ or as PEM.	
3. Mined boreholes Boreholes some 100s of metres in depth. Waste packages most likely emplaced as PEM.	
4. Deep boreholes Boreholes some 1000s of metres in depth to ensure isolation. Waste packages most likely to be PEM. Safety ensured by isolation rather than specific host rock.	

図 4.3.2-4　NUMO-TR-04-03 に提示された様々な竪置き定置概念オプション[26]

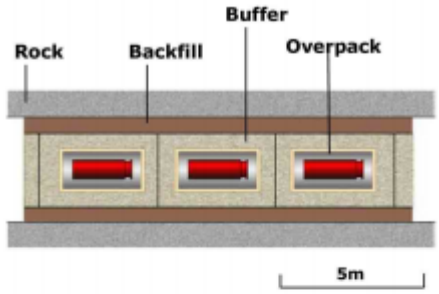
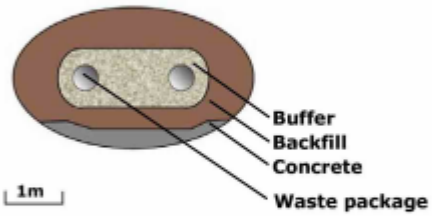
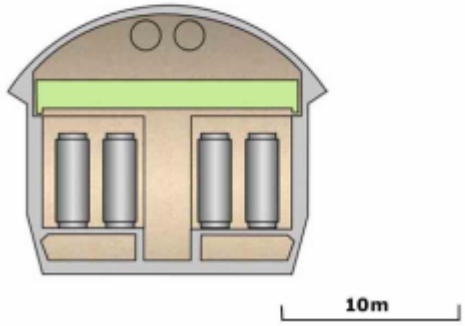
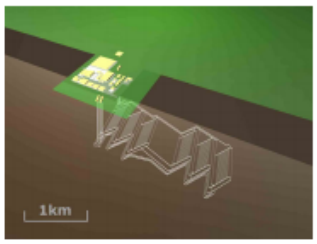
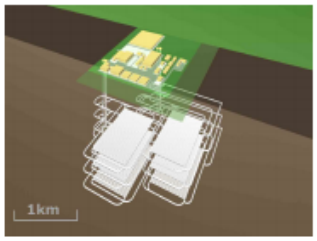
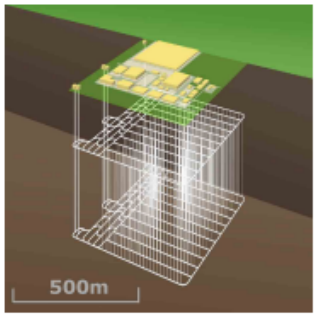
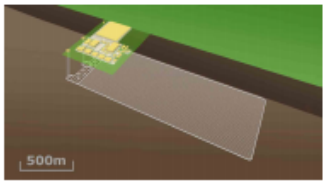
1. In-tunnel – linear (H12) Waste packages emplaced centrally in the disposal tunnel. Buffer may be emplaced in-situ or as PEM. PEM may be placed end-to-end or with backfill / buffer filling spaces between. For in-situ emplacement, waste packages are separated by sections of buffer.	
2. In-tunnel – duplex Two waste packages emplaced side-by-side (but separated by buffer). Has been developed for cases where anisotropic rock stresses do not allow the construction of circular tunnels.	
3. Caverns Waste packages arranged in large open cavern. May have an extended period between waste emplacement and emplacement of buffer / backfill.	

図 4.3.2-5　NUMO-TR-04-03 に提示された様々な横置き定置概念オプション[26]

1. Single level – distributed emplacement panels (H12) Waste emplaced in pits or tunnels, spread over several panels (tailored to site geology).	
2. Multiple level Waste emplaced in pits or tunnels, spread over several panels (tailored to site geology). Panels stacked on several levels to make optimum use of thick host rock.	
3. Vertical mined boreholes Extension of the multi-level layout to further increase utilisation of a thick formation with good isolation properties.	
4. Long horizontal tunnels Example could be used to take advantage of coastal sites (emplacement zone extending off-shore). Could be appropriate to a thin host rock formation. Probably utilise PEM.	

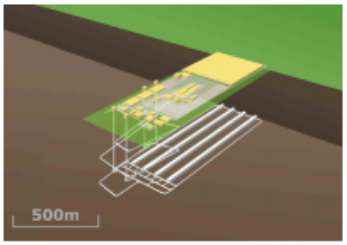
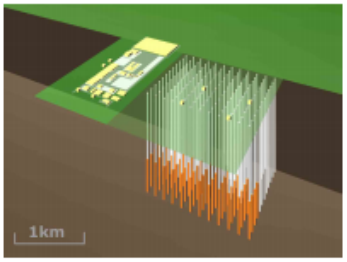
5. Caverns Mainly considered for use with very large overpacks. Dense waste disposal is possible if caverns are left without buffer / backfill for the thermal period. Large stable openings allow long period of institutional control and monitoring (and retrievability) due to delay in backfilling.	
6. Vertical deep boreholes Great depth of disposal increases waste isolation. Requirements on host formation reduced. Minimal EBS may be sufficient (e.g. overpack only or simple IWP). N.B.: This option involves some fundamental changes in the basic safety philosophy, but is included for the sake of completeness.	

図 4.3.2-6　NUMO-TR-04-03 に提示された様々な処分場レイアウト概念オプション[26]

(3)　NUMO-TR-11-01

NUMO-TR-11-01「地層処分事業の安全確保（2010 年度版）」[27]では、処分場の回収可能性について「6.6.4.4　廃棄体回収技術」に記述している。ここでの検討の前提は、何らかの理由で「特定の廃棄体」を回収する場合としており、処分坑道埋め戻し前、処分坑道埋め戻し後について、竪置きと横置き定置の廃棄体回収を対象に定性的な比較がなされている。なお、回収では PEM 定置概念は考慮されていない。

特定の廃棄体を回収する観点からの定性的な比較では、竪置き定置のほうが容易である（特定の廃棄体に近づき易い、撤去する材料が大幅に少ない）と評価し、どちらもオーバーパックと緩衝材の接触部位をオーバーコアリングで撤去し、定置装置を用いてオーバーパックを引き抜く技術を事例として示している（図 4.3.2-7）。ただしこれは技術の事例であり、特に廃棄体回収の容易性向上については言及されていない。オーバーコアリング以外の技術として、塩水を注入し緩衝材をスラリー化除去する技術について RWMC で開発中であることが紹介されている。

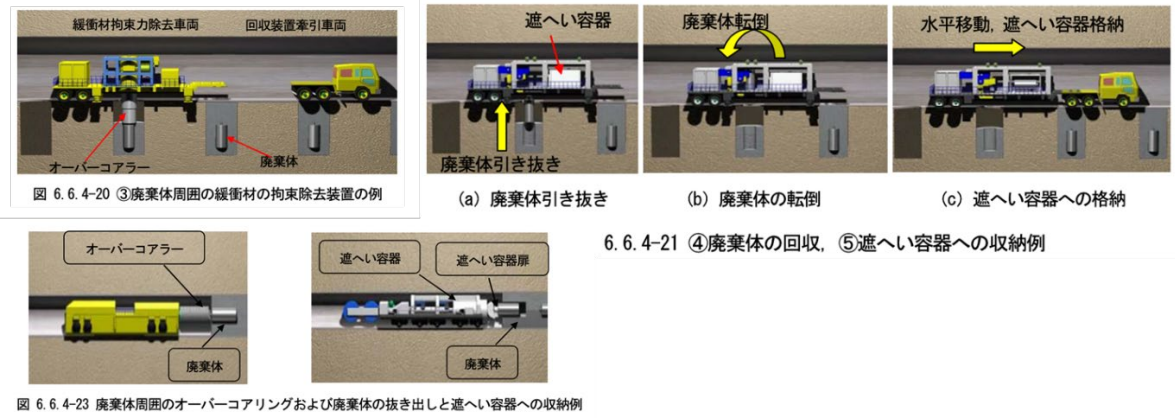


図 6.6.4-20 ③廃棄体周囲の緩衝材の拘束除去装置の例

(a) 廃棄体引き抜き　(b) 廃棄体の転倒　(c) 遮へい容器への格納

6.6.4-21 ④廃棄体の回収，⑤遮へい容器への収納例

図 6.6.4-23 廃棄体周囲のオーバーコアリングおよび廃棄体の抜き出しと遮へい容器への収納例

図 4.3.2-7　廃棄体回収のイメージ[27]

本報告書では、処分孔竪置きブロック定置方式、処分坑道横置き方式（原位置施工方式、PEM 方式）について、「作業性」と「地下環境への適応性」の観点から定性的な評価をしている（表 4.3.2-1）。定置の容易さに関しては、効率性（物流）の観点から評価しており、往復作業の有無、搬送距離、坑道の規模などが着眼点となっていると述べられているが、回収については言及されていない。

これらの定性的な評価で作業性の観点から、課題があるとされた横置き方式についての改良点として、図 4.3.2-8 に示す定置坑道を大きくし、定置作業回数を削減する方法が検討された。回収の容易性については直接的に言及されていないが、作業坑道が大きくなることで回収作業の容易性も向上されると推定される。

表 4.3.2-1　定置方式に関する定性的な比較[27]

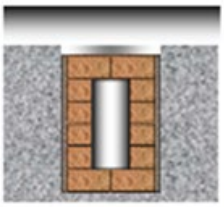
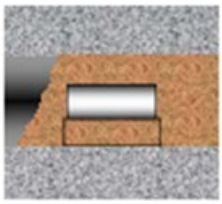
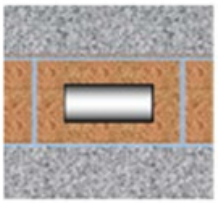
分類		処分孔竪置き定置方式	処分坑道横置き定置方式	
			原位置施工方式	PEM 方式
				
作業性	【定置作業性】	処分坑道に空間的余裕があり，定置装置の空間的制約は少ない。 緩衝材ブロック製作・定置に関する要素技術は実証試験が行われている。	底部緩衝材ブロック，側部・上部緩衝材吹付に関する要素技術は開発済みである。 吹付材料の圧送可能距離に応じて処分坑道長を設定する必要がある。	狭隘空間での重量物搬送・定置に関する要素技術は開発中である。
	【操業安全性】	処分坑道に空間的余裕があり定置装置の稼働は容易である。 坑道換気が可能である。 処分孔上部遮へい後，入坑が可能である。 2 方向の入坑・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。 廃棄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。 廃棄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。	狭隘空間での往復作業になるため，搬送距離が長いと効率が低下する。	狭隘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	【空洞安定性】	処分孔別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竪置き方式に比べて有利である。	坑道断面が小さいので竪置き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。	緩衝材が PEM 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】	処分孔別に湧水低減策，排水策，地下水と緩衝材の接触防止策で対応する。	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，本体については，湧水対策は不要である。 隙間充填に関しては，湧水対策を施す必要がある。

図 6.5.2-12 処分孔竪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応性

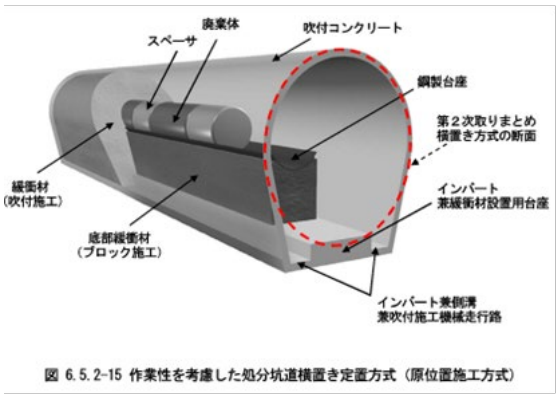


図 6.5.2-15 作業性を考慮した処分坑道横置き定置方式（原位置施工方式）

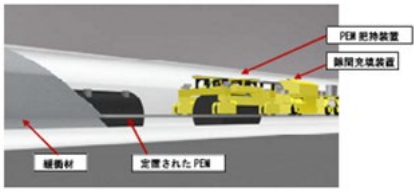


図 6.5.2-19 処分坑道断面の拡幅による作業性向上を指向した PEM の搬送概念

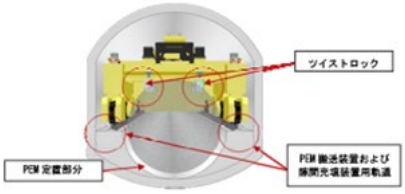


図 6.5.2-20 処分坑道断面を拡幅した PEM 概念（処分坑道断面形状例）

図 4.3.2-8　作業性を考慮した定置概念[27]

4.3.3　国内外の処分概念の調査のまとめ

国内外の既往処分概念からのアクセス性とハンドリング性の視点で回収容易性向上に寄与していると判断されたポイントを一覧表として、表 4.3.3-1 にまとめた。

海外の処分概念においては、各国とも母岩の特性を考慮してバリアシステムと定置概念を構築していることから、表 4.3.3-1 に示すような回収の容易性向上の視点からのポイントの全てが、我が国の処分環境において適用できるポイントとはならないことに注意が必要である。

表 4.3.3-1　国内外の処分概念における回収の容易性向上の視点からのポイント

調査対象	アクセス性向上の視点 からのポイント	ハンドリング性向上の視点 からのポイント
フランス	・埋め戻し材を必要としない小口径坑道への横置き定置 ・小口径定置坑道に設置するケーシングの長期健全性の確保	・大口径坑道から小口径坑道への廃棄体定置時と逆動線となる回収による作業性確保 ・廃棄体容器外周のセラミックランナーによるケーシング内の移動容易性 ・廃棄体容器の長期健全性の確保
米国	・埋め戻し材を必要としない横置き定置	・複数の廃棄体を格納する大型容器による作業物量の減少 ・定置時と逆動線となる回収による作業性確保 ・廃棄体容器の長期健全性の確保
スウェーデン	・埋め戻し材を必要としない小口径横孔への横置き定置 ・緩衝材の除去が不要と考えられるベントナイト緩衝材とキャニスターを組み合わせたスーパーコンテナー	・大口径作業坑道から小口径坑道への廃棄体定置時と逆動線回収による作業性確保 ・高い耐腐食性容器による長期健全性の確保
フィンランド ※スウェーデンと同様の定置概念、フィンランドのみのポイントを記載	・撤去しやすいベントナイトブロックと粒状ベントナイトでの処分坑道埋め戻し ・比較的短い（60m 程度）定置坑道の櫛型配置	・なし
スイス	・撤去しやすい粒状ベントナイトを用いた埋め戻し	・大口径の定置坑道での作業性確保
ベルギー	・定置坑道支保工のセグメント利用による長期間の坑道安定性の確保 ・小口径坑道による埋め戻し材量削減 ・緩衝材の除去が不要と考えられるスーパーコンテナー	・スーパーコンテナーによる健全性の向上 ・大口径坑道から小口径坑道への複数廃棄体定置と逆動線となる回収による作業性確保
ドイツ	・長さの短い大口径坑道への定置	・廃棄体容器の長期健全性の確保 ・複数の廃棄体を格納する容器による作業物量の減少 ・大口径定置坑道による作業空間確保
カナダ	・埋め戻し材量が削減できる矩形バッファーボックスを用いた矩形坑道断面定置	・矩形坑道断面に矩形バッファーボックスの２段定置と逆動線となる回収作業単純化
NUMO-TR-04-03 NUMO-TR-11-01	・緩衝材除去の削減が期待できる PEM ・乾燥ベントナイト（温度への耐久性を向上）の利用による埋設密度の増加（坑道距離の短縮＝埋め戻し材撤去作業量の削減） ・処分坑道の埋め戻し材の撤去量が減る１処分孔の複数廃棄体定置	・複数の固化体のオーバーパック格納による作業物量の減少 ・大口径の定置坑道による作業性確保

4.4　回収の容易性を高めた工夫のポイントの抽出

本節では、回収の容易性向上の視点、及び、前節の国内外の既往処分概念からアクセス性とハンドリング性の視点で回収容易性向上に寄与していると判断されたポイントを踏まえて、回収の容易性を高めた定置方法に関する工夫のポイントの抽出を行った。抽出した工夫のポイントの例を表 4.4-1 に示す。表 4.4-1 に示すような工夫のポイントを組み合わせていくことで、代替設計オプションの検討を進めることができると考えられる。表 4.4-1 に示す工夫のポイント例の中から、以下の 6 つについて、工夫のポイントのイメージ例と合わせて特徴と留意事項について述べる。

① 小口径坑道への定置
② 高耐久性のセグメント
③ 高耐久性のケーシング
④ 複数のガラス固化体格納容器
⑤ 大規模空洞
⑥ 集積定置

なお、廃棄体までのアクセス性向上の工夫のポイント例の中で、埋め戻しをしない、すなわち埋め戻しの状態設定については、4.5 節で述べる。また、工夫のポイントは、ここに挙げた例が全てではないと考えられ、代替オプションの検討を進めながら、さらに付加される可能性がある。

表 4.4-1　回収の容易性向上の視点からの工夫のポイント例

回収容易性向上の視点		容易性向上のポイント	工夫のポイント例
廃棄体までのアクセス性向上	廃棄体までのアクセス経路を確保するための作業量の少なさ	・埋め戻し材や緩衝材等の撤去作業量を削減	・埋め戻しをしない（埋め戻しの状態設定） ・撤去が容易な材料の使用 ・小口径定置坑道、小口径処分孔の採用 ・PEM タイプの一体型廃棄体の使用 ・温度耐久性を向上させた材料使用による廃棄体の高埋設密度定置 ・1 処分孔に複数の廃棄体を定置する定置方法の採用
		・坑道や処分孔の安定性を確保するための作業量を削減	・高耐久性の支保工の設置 ・高耐久性のケーシングの設置 ・保守作業、維持管理をしやすい坑道形状の採用
廃棄体のハンドリング性向上	物量	・1 回の回収作業における廃棄体本数を増加	・ガラス固化体を複数格納できる容器の使用
	重量と形状	・回収対象物の形状を扱いやすくする	・人工バリアの合理化（PEM の緩衝材厚さの減少など） ・金属容器の材質変更（チタン等） ・矩形容器の使用 ・把持のための治具を取り付けた容器の採用
	健全性	・回収対象物の健全性を確保	・高耐久材料の容器の使用 ・厚くした容器の使用
	動線	・回収対象物の動作を削減	・廃棄体の定置時と逆動線となる定置方法の採用 ・大口径の作業坑道と小口径の定置坑道を組み合わせた定置方法の採用
	環境	・作業性を高めるための空間を確保	・大口径の定置坑道の採用 ・大口径の作業坑道と小口径の定置坑道の採用 ・放射線防護を考えた定置方法の採用

① 工夫のポイント例：大口径作業坑道から小口径坑道への定置

回収の容易性向上の視点からの工夫のポイント例として、大口径作業坑道から小口径の定置坑道のイメージ例を図 4.4-1 に示す。廃棄体を定置する坑道の断面積を小さくすることで、埋め戻し材や緩衝材等の撤去量が削減し、撤去のための作業量も削減することとなる。一方で、埋め戻し材や緩衝材等の撤去作業量を削減するために小口径坑道にすると、回収時の作業性を高めるための空間を確保ができなくなることからハンドリング性が悪くなってしまう。そこで、図 4.4-1 に示すイメージ例では、大口径の作業坑道と小口径の定置坑道への定置を取り入れたイメージ例となっており、これにより定置・回収装置を据え付ける作業坑道は、回転、方向転換などの作業性を十分確保できると考えられる。また定置する小口径坑道の長さを短くすることで、廃棄体の回収時におけるスタック防止も考えられる。なお、定置する小口径坑道に複数の廃棄体を定置する場合は、ベントナイト制限温度評価が必要となる。加えて、横置きの場合は作業坑道が長くなり、縦置きの場合は荷重に対する容器等の耐圧性といったことも留意事項として考えらる。

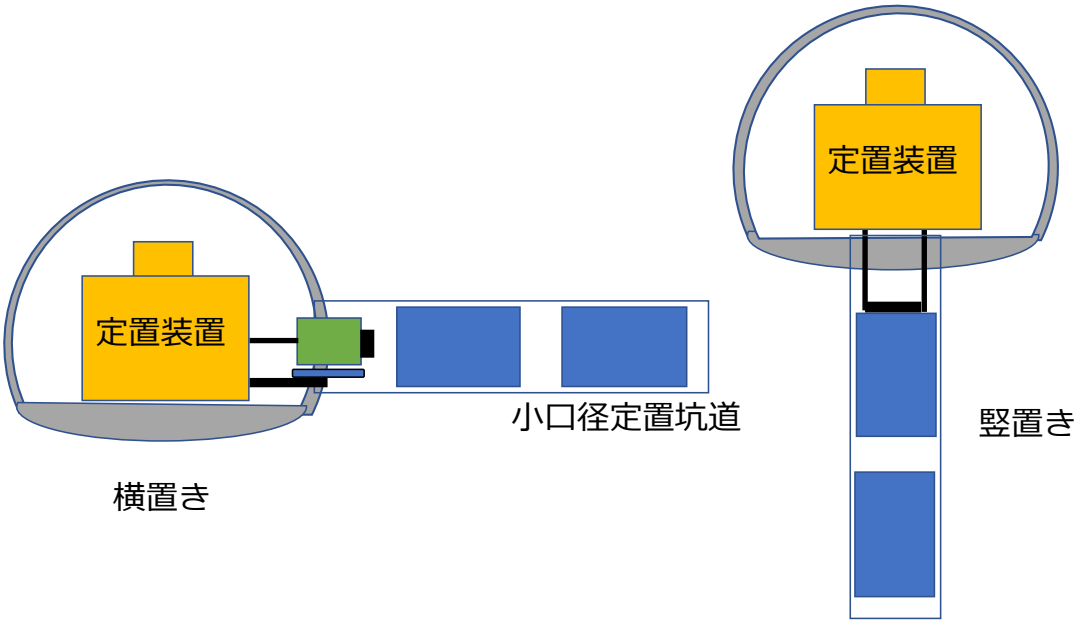


図 4.4-1　工夫のポイントのイメージ例：大口径作業坑道から小口径坑道への定置

② 工夫のポイント例：高耐久性のセグメント

回収の容易性向上の視点からの工夫のポイント例として、回収可能性維持期間中の坑道安定性を工学的で確保できると考えらえる高耐久性支保工の設置がある。その一例として、高耐久性セグメントのイメージ例を図 4.4-2 示す。廃棄体回収時に経路の安定性を確保について、処分施設を設計する時に考慮する事項となる可能性も考えられる。回収可能性維持期間が限定されていれば、設計は比較的容易と考えられる。設計時には、メンテフリーの仕様とするか、回収時に支保工等を補修・補強して作業を進める仕様とするかが考えられる。図 4.4-2 示すような高耐久性を有するコンクリート製セグメントを利用により、長期にわたり坑道の安定性を図れることとなり、アクセスまでの環境を確保するための作業量の低減に寄与すると考えられる。

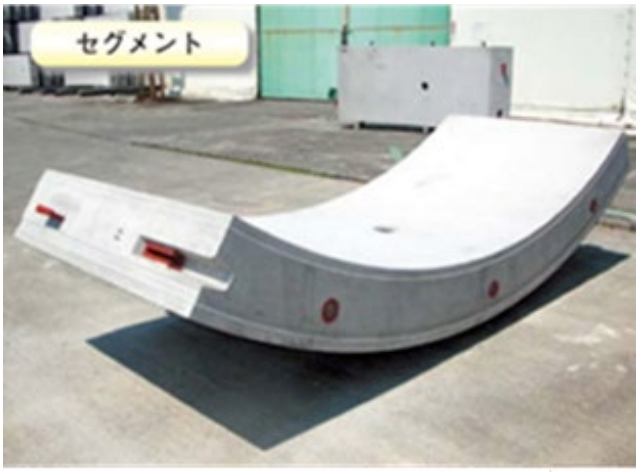


図 4.4-2　工夫のポイントのイメージ例：高耐久性のセグメント

③ 工夫のポイント例：高耐久性のケーシング

回収の容易性向上の視点からの工夫のポイント例として、前述と同様に、回収可能性維持期間中の坑道安定性を工学的で確保できると考えらえる高耐久ケーシングの設置が考えられる。その一例としてのイメージ例を図 4.4-3 に示す。長期にわたり坑道の安定性を図れることができれば、アクセスまでの環境を確保するための作業量の低減に寄与すると考えられる。また、ケーシングに水密性を持たせる設計が可能となれば、処分坑道内を乾燥状態に維持することができ、粒状の埋め戻し材や緩衝材であれば撤去も容易となり、ブロック型の埋め戻し材や緩衝材であれば定置と逆同線とすることで除去できると考える。加えて、廃棄体の高埋設密度の定置もできる可能性もある。このような工夫のポイント例を採用していく場合は、坑道安定性評価やベントナイト制限温度評価等が必要と考えられる。また、ケーシングの耐久性評価の際には、ケーシングにかかる水圧も考慮する必要があることから、排水状況も含めた周辺の水理環境の把握も必要になると考えられる。

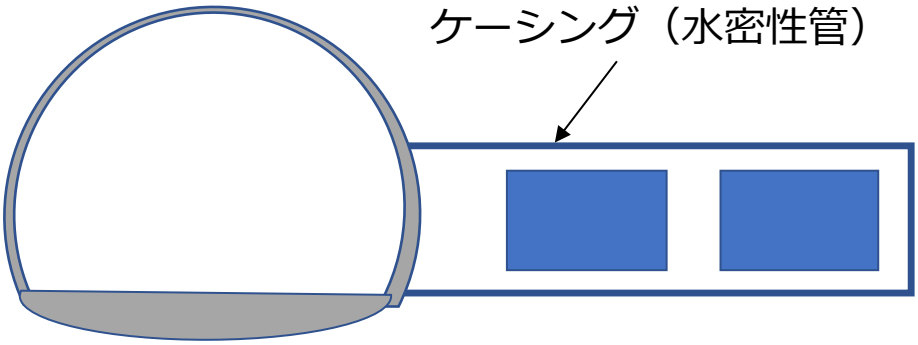


図 4.4-3　工夫のポイントのイメージ例：高耐久性のケーシング

④　工夫のポイント例：複数のガラス固化体格納容器

回収の容易性向上の視点からの工夫のポイント例として、複数のガラス固化体格納容器のイメージ例を図 4.4-4 に示す。複数のガラス固化体をオーバックに格納する、あるいは複数のオーバーを PEM に格納することで、1 回の回収作業における廃棄体本数を増やすことが可能となり、回収作業における物量を減らすことができる。また PEM 化することで、回収時に PEM が健全であるなら、緩衝材の撤去する作業量も削減することできるため、さらに回収の容易性が高まる可能性がある。一方で、複数のガラス固化体格納容器にすると、容器の重量が増え、サイズも大きくなることから、作業性が落ちてしまうこととなる。このような工夫のポイント例を採用していく場合は、容器の耐久性やベントナイト制限温度の評価等が必要と考えられる。

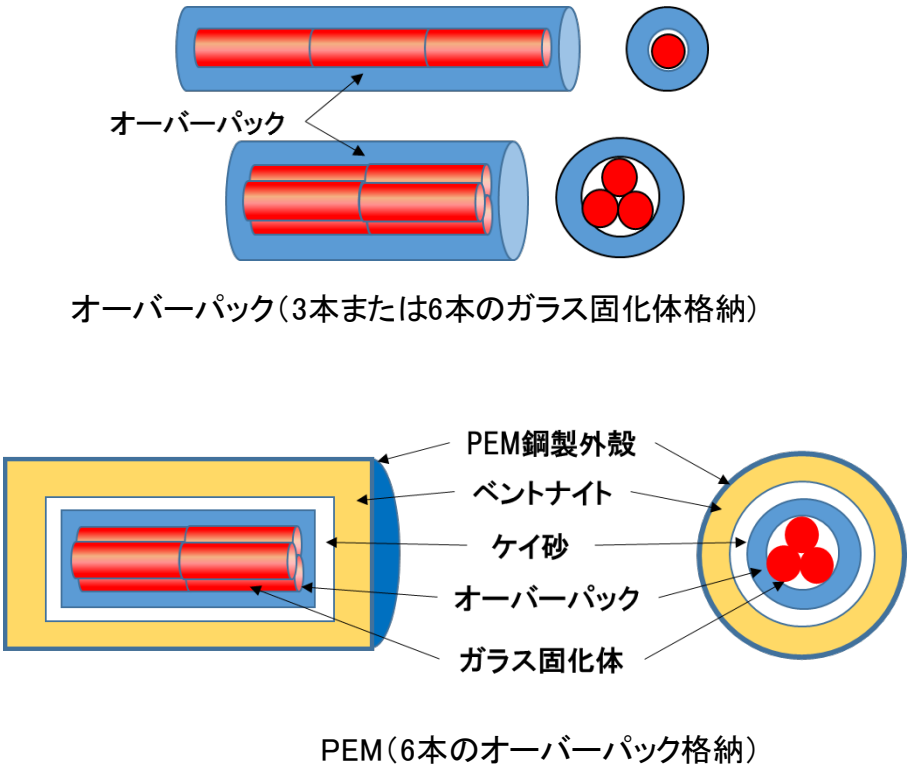


図 4.4-4　工夫のポイントのイメージ例：複数のガラス固化体格納容器

⑤　工夫のポイント例：大規模空洞

回収の容易性向上の視点からの工夫のポイント例として、大規模空洞のイメージ例を図 4.4-1 に示す。このイメージ例は、①の大口径作業坑道から小口径坑道への定置と同様な考え方の例で、大規模空洞の作業坑道から複数の小口径の竪孔を建設することで、定置坑道の緩衝材の埋め戻し材や緩衝材等の撤去作業量の削減や、作業坑道における回収装置の回転、方向転換などの作業性が確保できると考えられる。大規模空洞の断面積が増えることから、作業坑道の単位長さ当たりの埋め戻しの撤去作業量は増えるものの、作業坑道の長さは短くできることから、埋め戻しの撤去作業量が大きく増える可能性は低いと考えられる。このような工夫のポイント例を採用してい

く場合においても、坑道安定性評価やベントナイト制限温度評価等が必要と考えられる。

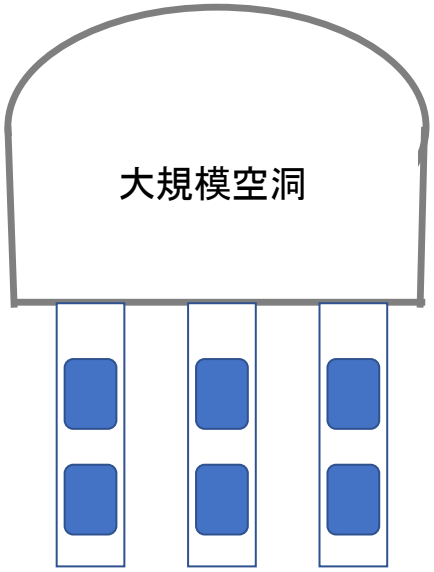


図 4.4-5　工夫のポイントのイメージ例：大規模空洞

⑥ 工夫のポイント例：集積定置

回収の容易性向上の視点からの工夫のポイント例として、大規模空洞のイメージ例を図 4.4-1 に示す。このイメージ例は、大規模空洞となる定置行動に複数の廃棄体を格納した矩形の大型容器や PEM を定置することで、回収作業における物量を減らし、かつ扱いやすさも向上できると考えられる。また、大規模空洞に集積して定置することで、坑道の長さを短くすることができ、動線や作業空間等の作業性が向上できる可能性がある。一方で、④で述べたように、複数のガラス固化体格納容器にすると、容器の重量が増え、サイズも大きくなることから、作業性が落ちてしまうこととなる。このような工夫のポイント例を採用していく場合においても、坑道安定性や容器の耐久性の評価が必要となる。廃棄体を集積定置することから熱の影響も非常に大きくなることが予想され、特にベントナイト制限温度評価について重要となる。

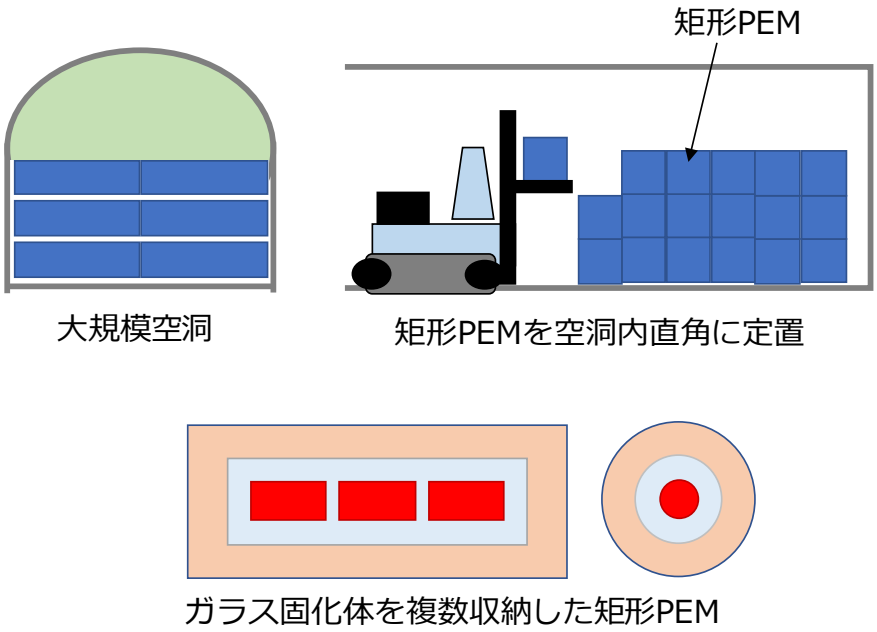


図 4.4-6　工夫のポイントのイメージ例：集積定置

上述してきたように、表 4.4-1 に示す工夫のポイントにおいては、採用するうえでトレードオフの関係となるものも存在することも考えられる。代替設計オプションを検討していく上では、どちらの工夫のポイントを採用した方が廃棄体の回収作業時間を短縮できるかの定性的な判断は難しいことから、回収容易性だけではなく、実現可能性、操業及び閉鎖後長期の安全性、維持管理の容易性等について総合的に判断していくことが重要と考えられる。

4.5　処分坑道の状態設定に関する検討

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

4.5.1　処分坑道の状態設定

平成 27 年、28 年度の回収可能性維持の影響検討[28]、[29]では、基本概念として竪置きブロック方式と横置き PEM 方式を対象に、処分坑道を開放状態とした場合、及び埋め戻した場合について、回収可能性を維持した場合の閉鎖前の安全性への影響と閉鎖後長期の安全性への影響について定性的に言及してきた。

本節では、これらの状態設定に処分坑道を水没させた場合を追加し、図 4.5.1-1 に示す横置き PEM 方式を対象に、回収するケースと回収しないケースを考慮して回収容易性向上の観点から技術的なメリットとデメリットを吟味する。

竪置きブロック方式では、廃棄体容器（オーバーパック）は処分孔に定置され、ベントナイト緩衝材が周辺に設置された状態での上部の処分坑道が対象となる。横置き PEM と比較して上部坑道の状態によって人工バリアが何らかの影響を受ける可能性が低いこと（NUMO レビュー版[5]ではパイピングに関し、処分孔の位置選定の段階で可能性のある割れ目や亀裂は排除すると記述されていることから、処分坑道の開放状態での水理的影響は小さいと考えられるため）、また、周辺の岩盤の地質環境への影響については横置き PEM の場合と同様であると考えられる。よって、ここでは横置き PEM 方式を代表として比較検討することとした。

図 4.5.1-1　処分坑道の状態設定のイメージ（横置き PEM 方式の場合）

4.5.2　状態設定の展開と特徴

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

・PEM が定置された処分坑道は放射線管理下にあるものとした。

・状態設定ごとの整理と比較のため、状態設定①の埋め戻し状態における PEM 定置後の埋め

戻し作業は回収可能性維持期間の作業に含めることとした。
・水没状態について、強制的に注水して水没させる方法や坑道内への湧水により自然に水没させる方法などがあるが、ここでは方法は限定しないこととした。
・全ての状態設定について、回収作業後は現状復旧の観点から坑道を埋め戻すこととした。

(1)　状態設定①（基本ケース）：PEM 定置後処分坑道を埋め戻した状態で回収可能性を維持

状態設定①は、NUMO レビュー版における回収可能性維持の基本ケースとしている状態と設定した。この状態では処分坑道に PEM 定置後、坑道は埋め戻され、坑道端部には力学プラグが設置される。処分場の閉鎖措置が決定されるまでアクセス坑道、主要坑道、連絡坑道は開放状態とし、処分坑道のみが埋め戻した状態を維持することになる。（図 4.5.2-1）。PEM 定置後の処分坑道端部には力学プラグが設置されることから、本検討では処分坑道に対する回収可能性維持期間中の維持作業は行われないと設定した。

【建設～回収可能性維持期間】
① 処分坑道の建設
② 坑道の安定性維持、換気・排水等
③ PEM の定置
④ 処分坑道の埋め戻し
⑤ 処分坑道の端部に力学プラグを設置

【回収する場合】
① 力学プラグの撤去、撤去部の坑道安定性確認
② 処分坑道の埋め戻し材撤去、坑道の安定性（支保工の健全性）の点検、必要に応じて補強・補修
③ 作業環境の再整備（排水・換気等）
④ PEM の外殻の健全性確認、必要に応じて補強、もしくは廃棄体を取りだす。
⑤ PEM の回収
①～⑤の作業を繰り返し実施
⑥ 処分坑道の埋め戻し

【回収しない場合】
特に作業なし

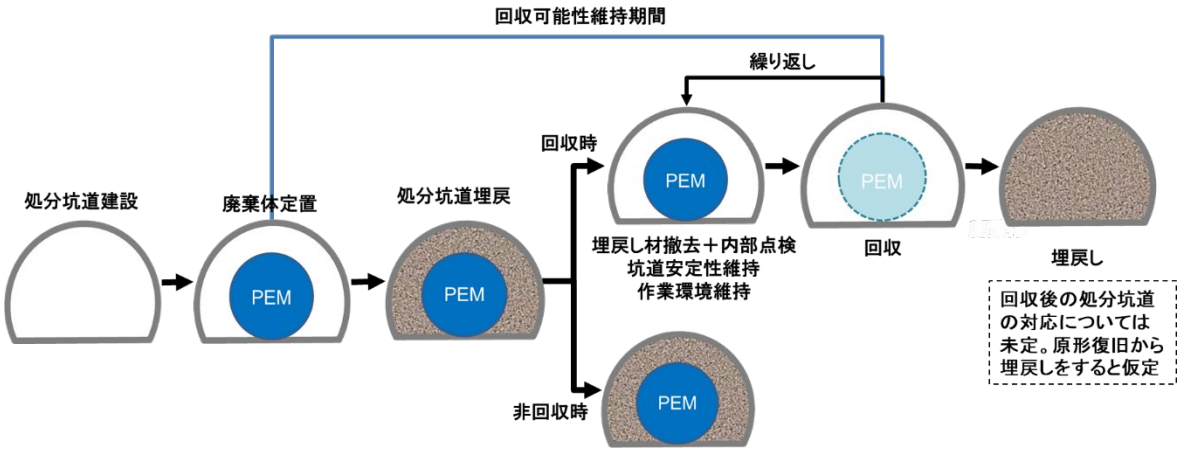


図 4.5.2-1　状態設定①：PEM 定置後処分坑道を埋め戻し状態とした場合の作業展開

(2)　状態設定②：PEM 定置後処分坑道を開放状態で回収可能性維持

状態設定②は、処分坑道に PEM を定置したのち、閉鎖措置が決定されるまで処分坑道を開放した状態に置くことで回収可能性を維持する状態である（図 4.5.2-2）。

【建設～回収可能性維持期間】

① 処分坑道の建設

② 坑道の安定性維持、換気・排水

③ PEM の定置

④ 坑道の安定性維持、作業環境の維持のための換気・排水等

【回収する場合】

① PEM の外殻の健全性確認、必要に応じて補強、もしくは廃棄体を取りだす。

② PEM の回収

③ 処分坑道の埋め戻し

【回収しない場合】

① PEM の状態確認（埋め戻しの可否の判断、必要に応じて廃棄体の一部回収）

② 処分坑道の埋め戻し

③ 処分坑道端部に力学プラグを設置

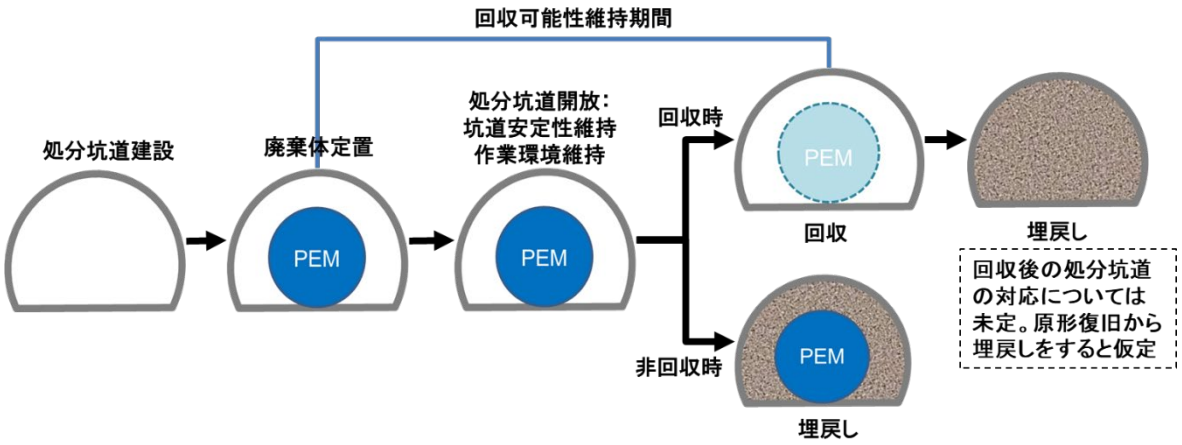


図 4.5.2-2　状態設定②：PEM 定置後処分坑道を開放状態とした場合の作業展開

(3)　状態設定③：PEM 定置後処分坑道を開放状態で回収可能性維持

状態設定③は、処分坑道に PEM を定置したのち、坑道内を水没させて回収可能性を維持する状態である（図 4.5.2-3）。

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

前者のように全地下坑道を水没させた後、再開した事例はほとんど見当たらないが、国内では北海道の幌内炭鉱（1977 年）で 2 年間水没させた例が記録に残されている[30]。後者のように一部の坑道を水没させる例は、青函トンネルの大出水事故（1974 年 12 月）でバルクヘッドの設置により、全坑道の水没を防いだ例がある。どちらの例も水没させることを意図した設計はなされておらず、水没の与える影響についても評価されていない。幌内炭鉱での水没は地下 1000m で発生したガス爆発による火災を止めるためであった。水没後、2 年後に揚水され採掘が再開された。青函トンネルでは大出水から約 6 か月後に部分水没させたままで迂回路を建設する工事が再開された。

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

【建設～回収可能性維持期間】

①　処分坑道の建設

②　坑道の安定性維持、換気・排水

③　PEM の定置

④　坑道内水没

「一部の坑道を水没状態とする場合」の追加作業

・バルクヘッドの設置（④の前）

【回収する場合】

①　坑道内の水を揚水することによる排水

②　排水後の坑道の安定性（支保工の健全性）の点検、必要に応じて補強・補修

③　作業環境の再整備（換気・排水等）

④　PEM の外殻の健全性確認、必要に応じて補強

⑤　PEM の回収

⑥　処分坑道の埋め戻し

「部分的に水没させた場合」の追加作業

・　バルクヘッド内の水の排水（①の前）

・　バルクヘッドの解体・撤去、周辺岩盤の補強、必要に応じて支保工の設置（②の前）

【回収しない場合】

①　坑道内の水を揚水することによる排水

②　排水後の坑道の安定性（支保工の健全性）の点検、必要に応じて補強・補修

③　作業環境の再整備（換気・排水等）

④　PEM の状態確認（埋め戻しの可否の判断、必要に応じて廃棄体の一部回収）

⑤　処分坑道の埋め戻し

⑥　処分坑道端部に力学プラグ設置

「部分的に水没させた場合」の追加作業

・　バルクヘッド内の水の排水（①の前）

・　バルクヘッドの解体・撤去、周辺岩盤の補強、必要に応じて支保工の設置（②の前）

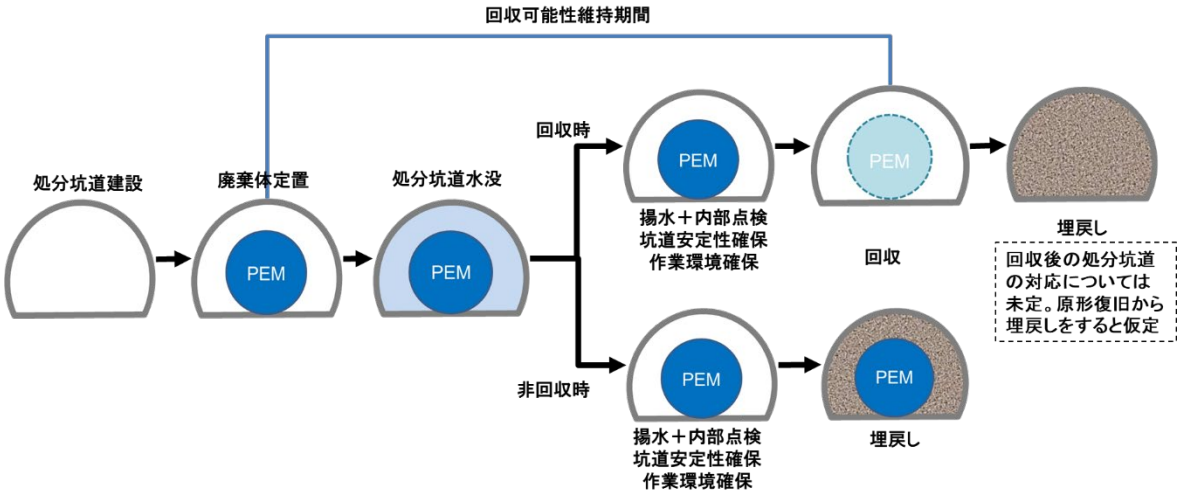


図 4.5.2-3　状態設定③：PEM 定置後地下施設全体を水没状態とした場合の作業展開

4.5.3　各状態設定で想定した作業に伴う負荷と安全性への影響

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

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

(1)　維持作業への負荷

1)　状態設定①：埋め戻し状態

NUMO レビュー版では、処分坑道ごとに PEM を定置したのち坑道全体を埋め戻すことにしている。処分坑道は PEM 定置後速やかに埋め戻され、坑道端部に力学プラグが設置されることから、処分坑道に対する回収可能性維持期間中の維持作業は行われないことが予想される。

2)　状態設定②：開放状態

処分坑道は PEM 定置後開放状態であり、狭隘空間かつ放射線管理下において維持期間中の処分坑道の安定性確保、換気・排水などの作業環境の維持などの作業が発生する。維持作業の負荷は維持期間の長さとともに増加し、点検に用いる機器、補修や補強に用いる手法と機器の性能にも依存する。維持期間が長くなった場合、坑道支保工の更新が必要となるが、坑道内には PEM が存在しており、狭隘空間かつ放射線管理下での作業は困難性が増大する。

3)　状態設定③：水没状態

処分坑道は PEM 定置後に水没状態にすることで回収可能性を維持することになる。処分坑道に対しては、処分坑道端部にバルクヘッドが設置され、坑道は水没することから、回収可能性維持期間中の処分坑道に対する維持作業は発生しないが、処分坑道端部のバルクヘッドの維持作業が発生する。この維持作業の負荷は維持期間の長さとともに増加すると考えられる。

仮に、水没した処分坑道に対する回収可能性維持期間中の維持作業を行う場合は、狭隘空間かつ放射線管理下での環境に加え、照明等が無い中での水中作業となる可能性が高く、困難が予想される。また、場合によっては高水圧下での作業となる。なお、前項で述べたように回収可能性維持期間中の水没状態で維持作業の必要性や必要な技術を判断するのに十分な情報がないが、例えば、海水中に沈没した船などの状態は、泥に埋まっていない限り金属部の腐食は進展することが知られている。

(2)　回収作業への負荷

1)　状態設定①：埋め戻し状態

処分坑道に定置されている PEM を回収する場合、坑道端部のプラグを撤去する作業、プラグ設置箇所の坑道安定性の確認作業を経て、坑道内の埋め戻し材の撤去作業に移行する。撤去作業は、狭隘空間かつ放射線管理下で坑道の安定性確認、換気・排水の回復を並行して実施し、必要に応じ、補修・補強を行いながら作業を進める。PEM 周辺の埋め戻し材を撤去し、PEM 容器の健全性を確認したのち、回収装置を用いて PEM を坑道外に搬出する。このように、既設のプラグや埋め戻し材を撤去する必要があることや、回収可能性維持期間中に維持作業が行われていない処分坑道に対する安定性確保及び作業環境の再整備作業が発生するため、回収作業の負荷は比較的大きいと推定される。撤去した埋め戻し材は地表に搬出せず、PEM が撤去された後の処分坑道の埋め戻し材の一部として転用できる。

2)　状態設定②：開放状態

処分坑道は開放されており、(1)で整理した維持作業により坑道の安定性維持、換気・排水の整備は行われている前提である。よって、維持作業を継続しつつ、PEM 容器の健全性を確認し、回収装置を用いて処分坑道外へ搬出する作業が主となる。よって、PEM の回収そのものに係る作業の負荷は最も小さくなる。

3)　状態設定③：水没状態

処分坑道に定置されている PEM を回収する場合､水没した坑道の水を排水して排水の処理後、坑道端部のバルクヘッドを撤去する作業、プラグ設置箇所の坑道安定性の確認作業を行う。そして、狭隘空間かつ放射線管理下で、水没させていた坑道の支保工の健全性確認、必要に応じての補修、補強作業とともに全設備の回復、換気・排水システムの回復作業が発生することから、回収作業の負荷は比較的大きいと推定される。PEM の回収に当たっては、PEM 容器の健全性確認作業が発生するが、回収作業は開放坑道と同様の負荷と考えられる。

(3)　閉鎖前の安全性への影響（回収しない場合の作業への負荷を含む）

1)　状態設定①：埋め戻し状態

処分坑道は埋め戻されているために維持作業は行われないと想定した場合、維持作業時の閉鎖前の安全性への影響は発生しない。

回収時には、プラグ撤去、埋め戻し材撤去、坑道の安定性確認と保守作業、PEM 容器の健全性を確認した後に PEM の回収、回収後の埋め戻し作業が発生し、関連する作業の一般労働安全性確保、放射線管理下での作業に伴う放射線影響への対応が必要となる。PEM が定置された長い坑道の狭隘空間かつ放射線管理下で、坑道の安定性確認と保守作業、PEM の回収を行う必要があるため、閉鎖前の安全性を確保するために、これらの作業は作業員ではなく、遠隔操作によるロボット等を用いることが想定される。

回収しない場合は埋め戻した状態のまま閉鎖に移行することから閉鎖前の安全性への影響は発生しない。

2)　状態設定②：開放状態

処分坑道は、回収可能性維持期間中、坑道の安定性維持が最も重要な作業として発生し、その作業は PEM が定置された長い坑道の狭隘空間かつ放射線管理下で行う必要がある。閉鎖前の安全性を確保するために、これらの作業は作業員ではなく、遠隔操作によるロボット等を用いることが想定される。

回収時においても同様に遠隔操作によるロボット等でPEM容器の健全性を確認した後にPEMを回収することになる。

回収しない場合の処分坑道埋め戻し作業は、放射線環境下での長い坑道の狭隘空間での作業となり、閉鎖前の安全性確保への対策が必要となるが、これはいずれも状態設定①の PEM 定置後に行う作業と同様である。ただし、坑道を開放していることから、PEM の状態確認等により、埋め戻しの可否の判断も必要になると考えられる。

3)　状態設定③：水没状態

処分坑道は、回収可能性維持期間中水没状態におかれるため、維持作業は行われないと想定した場合、維持作業時の閉鎖前の安全性への影響は発生しない。

回収時には、排水後、バルクヘッドの撤去、坑道の安定性確認と保守作業、PEM 容器の健全性を確認した後に PEM の回収、等の作業が発生し、関連する作業の一般労働安全の確保、放射線管理下での作業に伴う放射線安全確保への対応が必要となる。PEM が定置された長い坑道の狭隘空間かつ放射線管理下で、坑道の安定性確認と保守作業、PEM の回収を行う必要があるため、閉鎖前の安全性を確保するためにこれらの作業は作業員ではなく、遠隔操作によるロボット等を用いることが想定される。

回収しない場合は、放射線環境下での長い坑道の狭隘空間での作業となり、閉鎖前の安全確保への対策が必要となるが、これはいずれも状態設定①の PEM 定置後に行う作業と同様である。ただし、水没状態から開放されて酸素が供給されると金属材料の腐食や吹き付けコンクリートの変質が急激に進むことが多くの暴露試験等で確認されている。このことにより鋼製支保工の耐力が劣化し坑道の安全性が損なわれたり、PEM の鋼製外殻が腐食して構造健全性が損なわれたりする可能性が増大する。水没させた後に再利用する坑道における閉鎖前安全性への影響についてはこれまで評価事例がないため、発生する事象とその評価や作業への対策等の検討が必要となる。

(4)　閉鎖後長期の安全性への影響（回収しない場合に相当）

1)　状態設定①：埋め戻し状態

PEM 定置後速やかに処分坑道を埋め戻す場合、回収可能性維持による閉鎖後長期の安全性への影響は、埋め戻しされた坑道周辺の地質環境（熱環境、水理場、力学場、化学場）への影響が主と考えられる。人工バリアに対する影響については、もともと定置後速やかに埋め戻されることを前提とした処分場仕様が設計されているため、ほとんど生じないと考えられる。

2)　状態設定②：開放状態

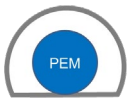
回収可能性維持期間中の坑道開放状態に対する坑道周辺の地質環境と人工バリアの安全機能への影響については、これまでの検討から坑道開放期間の長さに依存することが予測される。しかし、その影響の程度については、サイト固有の条件に依存することに加え、評価に用いるデータが十分取得されていないため、明らかではないが、少なくてもすぐに埋め戻す場合に比較して影響は大きくなると考えられる。一方で、坑道が開放されていることから PEM の状態を把握することが容易となり、人工バリアの安全機能への影響を評価するための情報を得ることができると考えられる。

3)　状態設定③：水没状態

回収可能性維持期間中、坑道を水没させ、その後排水して埋め戻すことによる坑道周辺の地質環境や人工バリアに与える影響の程度については十分に把握されていない。坑道を水没させた状態で人工バリア等の状態を把握する手段を講じることは難しいと考えられる。排水による周辺環境への影響は坑道開放時と同様になると予想される。

以上の状態設定の違いによる維持作業、回収作業への負荷、閉鎖前と閉鎖後長期への安全性への影響について、表 4.5.3-1 に取りまとめた。

表 4.5.3-1　処分坑道の状態設定の違いによる各作業の負荷及び安全性への影響

処分坑道の状態	維持作業の負荷	回収作業への負荷	閉鎖前の安全性 （回収しない場合の作業への負荷を含む）	閉鎖後の安全性 （回収しない場合に相当）
 状態設定①：基本ケース PEM定置後埋戻し	• PEM定置後、処分坑道は順次埋め戻し、坑道端部に力学プラグが設置されることから、維持作業は行われない。	• 処分坑道ごとにプラグ、埋め戻し材を撤去し、PEM が存在する狭隘かつ放射線管理下で、坑道安定性の確認、換気・排水をしつつ作業環境を整えPEMを回収するため、作業負荷は大きい。	• 維持作業は行われない。 • 回収作業への一般労働安全、及び放射線安全への対策が必要。 • 回収しない場合は、埋め戻し作業が発生しない。	• 埋め戻しが適切に実施されれば閉鎖後の安全性は確保される。
 状態設定②： PEM定置後坑道開放	• PEM が存在する狭隘かつ放射線管理下の全処分坑道での遠隔操作による保守点検、補修・更新のための維持作業の負荷は大きい。	• 処分坑道が開放・維持されているため回収作業の負荷は小さい。 • 処分坑道の安定性確保や作業環境維持の作業は維持作業の継続。	• 維持作業への一般労働安全、及び放射線安全への対策が必要。 • 回収作業への一般労働安全、及び放射線安全への対策が必要。 • 回収しない場合は、埋め戻し作業への一般労働安全、及び放射線安全への対策が必要。	• 処分坑道を長期間開放しておくことの閉鎖後安全性への影響については十分把握されていないが、良い影響は及ぼさない。 • 維持期間中は開放坑道のため人工バリアの安全機能への影響を評価する情報を得られる手段を講じられる。
 状態設定③： PEM定置後水没	• PEM定置後、坑道端部にバルクヘッドが設置され、坑道は水没することから坑道に対する維持作業は発生しないが、バルクヘッドの維持管理が必要。 ※仮に維持作業を行う場合は、狭隘かつ放射線管理下で、場合によっては高水圧作用下のため負荷は大きい。	• 坑道内の排水と排水処理、バルクヘッドの撤去後、PEM が存在する狭隘かつ放射線管理下での坑道の安定性確認、作業環境の回復などの作業後にPEMを回収するため負荷は非常に大きい。	• 水没させた坑道内の維持作業は行われない。 • 回収作業への一般労働安全、及び放射線安全への対策が必要。 • 回収しない場合は、埋め戻し作業への一般労働安全、及び放射線安全への対策が必要。	• 処分坑道を回収可能性維持期間中水没させておくことの地質環境特性や人工バリアに関する閉鎖後安全性への影響については十分把握されていない。 • 維持期間中、水没状態で情報を得ることは難しい。

4.5.4　状態設定のまとめと技術課題

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

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

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

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

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

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

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

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

・バルクヘッド設計と構築、排水、解体技術の開発と実証

・回収の有無にかかわらず水没状態から開放状態とする段階での遠隔による処分坑道の安定性点検・補修技術の開発と実証

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

4.6　回収容易性に関する検討のまとめ

本章では、回収の容易性を高めた処分場の代替設計オプションの検討を進めるために、検討方針を設定し、回収の容易性向上の視点の整理と我が国の処分環境条件として求められる事項の整理を行った。そして、国内外でこれまでに検討されてきた処分概念（ここでは、処分場概念と定置・回収概念をいう）を調査し、代替設計オプションの抽出に向けて参考とする定置方法に関する工夫のポイントを抽出した。また、現時点で有望とされる処分概念を前提として、回収維持期間における状態設定の違い（処分坑道を開放した状態で維持する、水没させる、あるいは撤去しやすい埋め戻し材を用いるなど）が、回収の容易性向上に対してどのような効果があるか、或いはどのようなデメリットがあるか、技術的な観点から検討を行った。

本章の検討結果を以下にまとめる。

4.1 節では、R&R 検討会を基にした回収容易性に関する検討を着手する背景と目的を整理し、「より回収の容易性を高めた処分場の設計開発」のために、現状の NUMO の２つの処分概念を前提にした埋め戻し状態設定の検討と回収の容易性を高めた代替設計オプションの抽出を行うことを述べた。また代替設計オプションの抽出に関しては、処分場レイアウトを検討対象外として、安全性確保のための人工バリアの構成要素は変更せず、廃棄体の全量回収を前提とした定置方法のみを対象とした技術的な検討を進めることを方針として整理した。そして、検討目的と方針を踏まえて、今後 2 年間の検討の流れを示した。

4.2 節では回収容易性向上の視点の整理として、R&R 検討会の検討結果を基に、回収の容易性を高めるためには廃棄体の回収作業時間を短縮することを重要と考え、その視点として「廃棄体までのアクセス性向上」と「廃棄体のハンドリング性向上」の二つを設定した。また、抽出される回収の容易性を高めた代替設計オプションに対しては、その実現可能を示すとともに、操業及び閉鎖後長期の安全性の双方を満たす必要があることから、その前提条件となる我が国の処分環境条件として求められる事項として、NUMO の包括的技術報告書（レビュー版）に提示された、設計因子と要求事項、及び処分システムに期待する安全機能に対する適合性に関しての整理と本事業段階で特に考慮すべき評価事項に対する適合性についての整理を行った。

4.3 節では、報告書が公表されている、フランス、米国、スウェーデン、フィンランド、スイス、ベルギー、ドイツ、カナダの 8 か国を対象に処分概念を調査し、各国とも母岩の特性を考慮してバリアシステムと定置概念を構築しているものの、アクセス性とハンドリング性の回収容易性向上の視点から、回収の容易性を高めていると考えられる設計考慮事項、または回収の容易性を意図して定置概念を開発していなくても、結果として回収の容易性が高まっている事項等について整理を行った。また国内についても、主として NUMO-TR-04-03 に関して、回収の容易性向上の視点を踏まえた整理を行った。

4.4 節では、4.3 節での調査・整理したアクセス性とハンドリング性の視点で回収容易性向上に寄与していると判断されたポイントを踏まえて、「廃棄体までのアクセス性向上」と「廃棄体のハ

ンドリング性向上」視点から回収の容易性を高めた定置方法に関する工夫のポイントの抽出を行った（表 4.4-1）。また、抽出した工夫のポイント例の中から、①小口径坑道への定置、②高耐久性のセグメント、③高耐久性のケーシング、④複数のガラス固化体格納容器、⑤大規模空洞、⑥集積定置の 6 つについて、工夫のポイントのイメージ例と合わせて特徴と留意事項について述べた。

4.5 節では、回収容易性向上の視点のうち、廃棄体へのアクセス性の向上の視点の要素の一つである経路の状態、すなわち、処分坑道を埋め戻した状態で維持する、開放した状態で維持する、水没させた状態で維持するという三つの状態設定に対して、NUMO の基本概念の一つである横置き PEM 方式を代表として技術的な観点から検討を行った。検討は、様々な条件や作業を仮定した概略の定性的な評価ではあるが、埋め戻し状態と開放状態についてはそれぞれ優れた点があることが整理できた。ただし、処分坑道の三つの状態設定のうち水没状態が技術的な課題が大きくなると考えられた。例えば、数十年坑道を水没させた後の坑道内や周辺岩盤の状態については、我が国では経験がないため未知であり、評価事例もないため再利用時にどのような技術が必要となるのかも不明である。

本年度に得られた上記の成果を踏まえ、今後、回収の容易性を高めた代替設計オプションの抽出や具体化等を行っていく予定である。本年度に抽出した定置方法に関する工夫のポイントの例については、採用するうえでトレードオフの関係となるものも存在することも考えられた。従って、代替設計オプションを検討していく上では、どちらの工夫のポイントを採用した方が廃棄体の回収作業時間を短縮できるかの定性的な判断は難しいことから、回収容易性だけではなく、実現可能性、操業及び閉鎖後長期の安全性、維持管理の容易性等について総合的に判断しながら、代替設計オプションの抽出を行っていくこととする。そして、抽出した代替設計オプションに対しては、坑道安定性、ベントナイト制限温度、湧水量、工学的成立性といった、現時点で評価が可能なものについての評価を行う。このような検討を進めることにより、有力な代替設計オプションをさらに抽出できると考えられる。特にベントナイト制限温度に関しては、処分場サイトの地質条件に大きく依存しないことから、現時点での評価が可能で、影響の程度によっては対策の検討等も実施できると考えられる。また、工学的成立性についても評価し、適用する技術の性能を実証していくことを考える必要がある。小口径定置坑道を構築する工法（掘削、ケーシング設置）、大規模空洞の構築方法の検討、使用する材料の選定とその耐久性評価のための試験、基本概念よりも重量のある PEM やオーバーパックを扱う場合の遠隔操作による定置・回収作業時の技術・装置や安全性といった検討など行っていくことが想定される。そして将来的には、有力な代替設計オプションの構築及び操業で用いられる各技術に対して、試作や小規模実証試験などによる工学的な成立性の確認に加え、回収に係る各作業や工程に要する所要時間（サイクルタイム）を実証試験などにより把握して、回収の容易性を示していく必要があると思われる。また、実証試験により得られた結果を分析して回収の作業手順の中で、回収時間に影響が大きい工程を把握することは、回収作業や工程の工夫や、回収装置を高度化するための有用な情報になると考えられる。

第４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 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発　報告書（第３分冊），2018.

[3] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 26 年度 地層処分技術調査等事業（地層処分回収技術高度化開発）報告書，2015.

[4] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発　報告書（第２分冊），2018.

[5] 原子力発電環境整備機構：「包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－（レビュー版）」，2018.

[6] 原子力発電環境整備機構：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性－「処分場の概要」の説明資料－，NUMO-TR-04-01，2004.

[7] ANDRA: THE CIGEO PROJECT, MEUSE/HAUTE-MARNE Reversible geological Disposal Facility for Radioactive Waste, 2013.

[8] Richard Poisson: Current status of the CIGEO Project, NUMO Presentation November 13th, 2015.

[9] DOE: STRATEGY FOR THE MANAGEMENT AND DISPOSAL OF USED NUCLEAR FUEL AND HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTE, 2013.

[10] DOE: Yucca Mountain Science and Engineering Report, Technical Information Supporting Site Recommendation Consideration, 2002.

[11] US NRC 10CFR PART 63—DISPOSAL OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTES IN A GEOLOGIC REPOSITORY AT YUCCA MOUNTAIN, NEVADA.

[12] SKB: Design, construction and initial state of the underground openings, SKB TR-10-18, 2010.

[13] SKB: RD&D Programme 2016, Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste Technical Report, TR-16-15, 2016.

[14] Bo Halvarsson: KBS-3H Horizontal emplacement technique of supercontainer and distance blocks Test evaluation report, R-08-43, 2008.

[15] Aspo Hard Rock Laboratory, retrieval of deposited canister for spent nuclear fuel, IPR-08-04, SKB, 2007.

[16] Petteri Vuorio: Progress in Geological Disposal Programme in Finland, LUCOEX workshop, 2015.

[17] Posiva: KBS-3H System Design Phase, SKB Report, 2017.
[18] POSIVA homepage, Final Repository, http://www.posiva.fi/en/final_disposal/basics_of_the_final_disposal#.XJGBeaD7Tcs.
[19] Thomas Ernst: Radioactive Waste Management in Switzerland Site Selection Process- Progress, Experience and Outlook, NUMO 講演会（2016 年 7 月 8 日）資料, 2016.
[20] Homas Fries, et al.: THE SWISS CONCEPT FOR THE DISPOSAL OF SPENT FUEL AND VITRIFIED HLW, International Conference Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository 16-18 June 2008, Prague.
[21] M. Van Geet: Preliminary R&D and design work for monitoring and retrieving waste in a geologic disposal facility in Belgium, NWTRB, 2018N.
[22] M. Van Geet: Belgium's supercontainer concept, https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2015/12/Beilage-06-Belgiums-supercontainer-concept, 2015.
[23] Niklas Bertrams: Concepts and Emplacement Technologies for an HLW Repository in Germany, 3rd Sino-German Workshop on Radioactive Waste Disposal, Jiayuguan May 2017, 16th – 19th.
[24] Wolfgang. Filbert et. Al.: Disposal of Spent Fuel from German Nuclear Power Plants: The Third Option - Disposal of Transport and Storage Casks (Status) – 11517, WM2011 Conference, February 27-March 3, 2011, Phoenix, AZ.
[25] J. Noronha: Deep Geological Repository Conceptual Design Report Crystalline / Sedimentary Rock Environment, NWMO Report, APM-REP-00440-0015 R001, 2016.
[26] NUMO: Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments TR-04-03, 2004.
[27] 原子力発電環境整備機構：地層処分事業の安全確保（2010 年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－，NUMO-TR-11-01，2011.
[28] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 27 年度地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）報告書　第２編，2016.
[29] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 28 年度地層処分技術調査等事業　可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発　報告書（第２分冊：その１），2017.
[30] 竹川雅治、平尾武久：1975 年（昭和 50 年）の北炭幌内炭鉱ガス爆発大災害と労働組合、産研論集、No.18、pp.97-127，1997.

第5章　まとめ

本年度の検討結果を以下にまとめる。

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

本検討では、R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目に対して、安全性への影響の定量的な評価技術の整備に向けての既存技術の整理と課題抽出を行った。まずは、R&R 検討会で示された定量化に必要な技術検討項目に対して、安全性への影響の意味や指標の整理を行った。その上で、指標を時間依存で評価できる既存の解析技術を整理し、既存の解析技術を用いて評価を行う解析的評価技術について現状レベルの整理を行い、技術検討項目の定量的評価実施に向けた課題を抽出した。また、課題に対する本事業での取り組み状況の有無を整理し、本事業で取り組んでいる技術検討項目については取り組み状況も整理した。各技術検討項目に対する既存技術の整理と課題抽出についてまとめたものは第 2 章の表 2.3-1～表 2.3-3 の通りである。複数の技術検討項目に関係する課題や解析技術を用いて定量的な評価を行う際の共通した課題については以下の 4 つと考えられた。

課題１．解析に用いる物性値とその変化（劣化など）に関する不確実性の取り扱い

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

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

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

課題３．安全性への影響低減のための対策とその効果の定量的評価技術の検討

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

課題４．予測解析の信頼性確保への取り組み

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

5.2　回収可能性維持期間の影響に関する定量的評価

回収可能性維持期間の影響に関する定量的評価については、回収可能性維持期間に起こることが想定される現象を図示し、本検討で取り組んでいる技術検討項目、6 項目について現象間の相互影響について整理した上で、力学的影響評価、水理学的影響評価、化学的影響評価で評価される事象を整理した。その後、それぞれの影響評価の関連する内容を抽出し、うけわたされるべき情報と共に評価方法の流れ、フロー図を作成した。

以上のような整理のもと、本検討では、力学的影響評価、水理学的影響評価、化学的影響評価について、個別に解析に基づき、影響の要因を抽出することを方針としたため、それぞれの手法の適用性の検討を含めて、技術検討項目についての評価手法と結果の例示を行った。

以下にそれぞれの検討結果を示す。

5.2.1　水理学的影響評価の検討結果

水理学的な影響評価のための解析条件は、サイトスペシフィックな条件となる流動場の不均質性、不確実性、境界条件の影響を考慮しないこととした。また、従来の検討では実施されていない「回収可能性維持期間を想定」した場合の時間依存性を考慮した非定常解析評価を実施するため、母岩の不均質性、不確実性の影響については検討対象としない解析条件として、「水理地質構造」は、多孔質媒体、均質場の設定とした。

今年度は、回収可能性維持期間の影響を評価する手法としての水理解析方法の検討として、以下の 4 項目について検討し、技術検討項目に関する検討については、「地下水の引き込みによる擾乱影響の範囲と程度」についての評価方法を例示した。

- 岩盤の透水係数の違いに関する検討
- 岩盤の不飽和特性の違いに関する検討
- 水理学的影響評価手法の適用性評価検討
- 処分坑道奥行き方向のメッシュ分割影響の検討

手法の検討は、感度解析、手法の比較等により、適切な設定条件、影響の有無を示した。その結果、岩盤の透水係数による影響はその設定に比例して湧水量が決まるため、地下水位の低下速度、再冠水速度に大きく影響するため、評価のための設定が重要となること、不飽和特性については、既往の４つの特性について比較検討したところ、現実的な不飽和領域評価を実施できる不飽和特

性として、登坂ら[1]]が用いられている不飽和特性が妥当であると判断し、本検討での岩盤の不飽和特性として用いることとした。ただし、岩盤に対する不飽和領域の測定事例や不飽和特性データは少なく、今後適切なデータを取得する必要があると思われる。評価手法の適用性については、飽和・不飽和解析手法（FEM）と二相流解析手法の適用性について、不飽和領域評価や再冠水評価の観点から比較検討した結果、解析手法によらずほぼ同様の解析結果が得られたことから、解析手法としてはどちらの手法も適用できると考えられた。また、坑道周辺のメッシュ分割の妥当性について、感度解析を実施したところ、坑道奥行方向のメッシュ分割に対する湧水量評価への精度影響は小さいことがわかった。

「地下水位が低下する場合の水理学的影響評価方法」については、従来の飽和・不飽和解析手法が適用できることを示すとともに、地表面からの降雨涵養量を想定した解析条件を設定し、「パネルスケールモデル」による感度解析を実施した。解析の手法としては、地下水位が低下する処分坑道より上部のメッシュ分割を細かくしなければ、解析における収束解が得られないことがわかり、結果は、涵養量が少ないほど水位低下量が大きくなることが例示された。地下水位が低下した領域については、空気の混入により還元性雰囲気だった環境が酸化雰囲気に変化し、「回収可能性維持」期間中は継続する可能性があるため、最終的には閉鎖後の再冠水挙動評価によるベースラインへの回復に対する影響を及ぼすと考えられる。地下水位が低下する条件での再冠水挙動（ベースラインへの回復挙動）評価を実施していないため、今後の実施し、再冠水挙動の評価を行い、ベースラインへの回復までの挙動と時間の評価をする必要がある。また、地下水位の低下に関しては、地下水流動の可視化について検討し、流跡線演算結果を用いて、化学組成の異なる水の引き込み範囲の評価の可視化方法を示した。

5.2.2　化学的影響評価の検討結果

本年度の化学的影響評価については、地表面から坑道までの一次元ニアフィールドモデルを構築し、飽和浸透流と地球化学的反応との連成解析により、坑道への地下水の引き込みによる母岩および支保工への影響を検討した。解析コードには、PFLOTRAN を用いた。

地下水の引き込みによる化学的な変化については、地下水位が坑道開放時も地表面に維持される設定（海底下に相当する設定）としてファーフィールドモデルでの解析を行った。その結果、地表から母岩への酸素の供給は地下水中の溶存酸素に限られ、かつそれはごく表層の黄鉄鉱の溶解に消費されて酸化的な地下水が母岩の奥深くまで浸入する状況にはならなかった。一方、母岩の地下水の pH は、表層地下水の移流・分散による移行に対応じて変化する結果となった。

地下水の引き込みによる支保工の吹付けコンクリートへの影響に関しては、岩盤の透水係数、岩盤中の地下水組成、およびセメント鉱物の溶解反応の速度論係数の設定を組み合わせた解析を実施した。その結果、これらのパラメータの設定が支保工の吹付けコンクリートのセメント鉱物の溶解や、間隙水中の pH の形成に大きく影響することがわかった。具体的には、鉱物の溶解速度には岩盤の透水係数と速度論係数が、溶解・沈殿する鉱物の種類や pH の変化には、岩盤中の地下水組成が大きく関係していると推察される。

5.2.3　力学的影響評価の検討結果

本年度の力学的影響評価は、昨年度までの検討結果に示された課題について取り組んだ。化学的影響評価の結果を基に、昨年度までの力学的解析の条件としていた支保工等のパラメータの妥当性を検討した。また、回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性に関連して、再掘削時の力学的影響評価方法についても検討した。

地下水の引き込みの影響に関する化学的影響評価により得られた吹付けコンクリートの溶脱及び組成変化の結果から、コンクリートのヤング率を推定すると、そのヤング率の経時変化は地質環境条件によって大きく変わることが分かった。また、力学的影響評価で想定したヤング率の低下の程度に関して、それに近いケースも存在したが、岩盤の透水係数とコンクリートの透水係数に依存した。また、反応速度への依存性は比較的小さいという結果が得られた。

回収時に再利用する坑道内の作業空間の安全性への影響に係る技術検討項目について、再掘削時の力学的影響評価方法について検討を行った。一度埋め戻した坑道の再掘削／再利用した時の坑道の力学的影響についての評価対象としては、再掘削から回収完了まで開放状態が継続している期間の、岩盤や支保工の変形の進行による坑道安定性となる。また、考慮する現象として、岩盤のクリープ変形や透水性変化が挙げられる。支保工の強度の変化については再掘削という工程が加わる。以上の評価は、従来から行われている坑道の掘削解析や昨年度まで実施してきた「開放坑道の健全性（空間安定性）」の検討方法の延長線上で評価することができると考えられる。

5.3　回収容易性に関する検討

R&R 検討会を基にした回収容易性に関する検討を着手する背景と目的を整理し、「より回収の容易性を高めた処分場の設計開発」のために、現状の NUMO の２つの処分概念を前提にした埋め戻し状態設定の検討と回収の容易性を高めた代替設計オプションの抽出に向けた検討を開始した。代替設計オプションの抽出に関する検討方針として、処分場レイアウトを検討対象外とし、安全性確保のための人工バリアの構成要素は変更せず、廃棄体の全量回収を前提とした定置方法のみを対象とした技術的な検討を進めることとして、今後 2 年間の検討の流れを示した上で、本年度は以下の検討を行った。

回収容易性向上の視点の整理として、R&R 検討会の検討結果を基に、回収の容易性を高めるためには廃棄体の回収作業時間を短縮することを重要と考え、その視点として「廃棄体までのアクセス性向上」と「廃棄体のハンドリング性向上」の二つを設定した。また、抽出される回収の容易性を高めた代替設計オプションに対しては、その実現可能を示すとともに、操業及び閉鎖後長期の安全性の双方を満たす必要があることから、その前提条件となる我が国の処分環境条件として求められる事項本事業段階で特に考慮すべき評価事項の整理を行った。

次に、報告書が公表されている、フランス、米国、スウェーデン、フィンランド、スイス、ベルギー、ドイツ、カナダの 8 か国を対象に処分概念を調査し、各国とも母岩の特性を考慮してバリアシステムと定置概念を構築しているものの、アクセス性とハンドリング性の回収容易性向上の視点から、回収の容易性を高めていると考えられる設計考慮事項、または回収の容易性を意図して定置概念を開発していなくても、結果として回収の容易性が高まっている事項等について整理

を行った。また国内についても、主としてNUMO-TR-04-03に関して、回収の容易性向上の視点を踏まえた整理を行った。そして、上記の調査・整理したアクセス性とハンドリング性の視点で回収容易性向上に寄与していると判断されたポイントを踏まえて、「廃棄体までのアクセス性向上」と「廃棄体のハンドリング性向上」視点から回収の容易性を高めた定置方法に関する工夫のポイントの抽出を行った（表 4.4-1）。また、抽出した工夫のポイント例の中から、①小口径坑道への定置、②高耐久性のセグメント、③高耐久性のケーシング、④複数のガラス固化体格納容器、⑤大規模空洞、⑥集積定置の 6 つについて、工夫のポイントのイメージ例と合わせて特徴と留意事項について述べた。

また、回収容易性向上の視点のうち、廃棄体へのアクセス性の向上の視点の要素の一つである経路の状態、すなわち、処分坑道を埋め戻した状態で維持する、開放した状態で維持する、水没させた状態で維持するという三つの状態設定に対して、NUMO の基本概念の一つである横置きPEM 方式を代表として技術的な観点から検討を行った。検討は、様々な条件や作業を仮定した概略の定性的な評価ではあるが、埋め戻し状態と開放状態についてはそれぞれ優れた点があることが整理できた。ただし、処分坑道の三つの状態設定のうち水没状態が技術的な課題が大きくなると考えられた。

本年度に得られた上記の成果を踏まえ、今後、回収の容易性を高めた代替設計オプションの抽出や具体化等を行っていく予定である。代替設計オプションを検討していく上では、廃棄体の回収作業時間を短縮できるかの定性的な判断は難しいことから、回収容易性だけではなく、実現可能性、操業及び閉鎖後長期の安全性、維持管理の容易性等について総合的に判断しながら、代替設計オプションの抽出を行っていくこととする。そして、抽出した代替設計オプションに対しては、坑道安定性、ベントナイト制限温度、湧水量、工学的成立性といった、現時点で評価が可能なものについての評価を行う。このような検討を進めることにより、有力な代替設計オプションをさらに抽出できると考えられる。特にベントナイト制限温度に関しては、処分場サイトの地質条件に大きく依存しないことから、現時点での評価が可能で、影響の程度によっては対策の検討等も実施できると考えられる。また、工学的成立性についても評価し、適用する技術の性能を実証していくことを考える必要がある。小口径定置坑道を構築する工法（掘削、ケーシング設置）、大規模空洞の構築方法の検討、使用する材料の選定とその耐久性評価のための試験、基本概念よりも重量のある PEM やオーバーパックを扱う場合の遠隔操作による定置・回収作業時の技術・装置や安全性といった検討など行っていくことが想定される。そして将来的には、有力な代替設計オプションの構築及び操業で用いられる各技術に対して、試作や小規模実証試験などによる工学的な成立性の確認に加え、回収に係る各作業や工程に要する所要時間（サイクルタイム）を実証試験などにより把握して、回収の容易性を示していく必要があると思われる。また、実証試験により得られた結果を分析して回収の作業手順の中で、回収時間に影響が大きい工程を把握することは、回収作業や工程の工夫や、回収装置を高度化するための有用な情報になると考えられる。

第５章　参考文献

[1]　登坂博行，小島圭二，三木章生，千野剛史：地表流と地下水流を結合した 3 次元陸水シミュレーション手法の開発，地下水学会誌，第 38 巻，第 4 号，p.253-267，1996.