

平成 27 年度
地層処分技術調査等事業
TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発
報告書
(第 5 分冊)

—ガス移行連成挙動評価手法の開発—

平成 28 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27年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発のうち、ガス移行連成挙動評価手法の開発の成果を取りまとめたものです。

報告書の構成

平成 27 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－ガス移行連成挙動評価手法の開発－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	平成 27 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上－
	第 2 分冊	平成 27 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－炭素 14 長期放出挙動評価－
	第 3 分冊	平成 27 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－ナチュラルアナログ調査－
	第 4 分冊	平成 27 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア評価の初期条件の設定－
◎	第 5 分冊	平成 27 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－ガス移行連成挙動評価手法の開発－

はじめに

長半減期低発熱放射性廃棄物（以下、TRU 廃棄物という。）の処分方策については、原子力委員会での方針等（平成 6 年の原子力長期計画等）を受けて、「TRU 廃棄物処分概念検討書」（以下、第 1 次 TRU レポート）、「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—」（以下、第 2 次 TRU レポート）によって、その地層処分の技術的成立性が示され、平成 19 年 6 月には最終処分法の一部の改正により、地層処分の対象廃棄物に追加された。これに伴い、平成 20 年 3 月に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」及び「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」が改定され、併置処分の実施も念頭に、TRU 廃棄物と高レベル放射性廃棄物は地層処分事業という統合された計画の中で、最終処分の開始を平成 40 年代後半を目途に事業を進めるというスケジュールが示されている。また、同改正法は平成 20 年 4 月より施行され、NUMO が高レベル放射性廃棄物の地層処分に加え、TRU 廃棄物の地層処分の実施主体としての認可を受けた。これらの背景を踏まえて、TRU 廃棄物の処分に向けた技術開発については、TRU 廃棄物の地層処分に関する全体基本計画（以下、基盤研究開発計画）に示されるように、高レベル放射性廃棄物処分の技術開発との整合を図りつつ、併置処分の技術的成立性をより確実にするための検討を含め、地層処分事業のスケジュールを考慮して進める必要がある。そして、NUMO が目的とする技術開発等へ直接的に反映させるために、処分事業に先行して技術基盤の整備を進めることに加え、科学的知見の拡充による技術的信頼性や安全性の向上を図るために、国の基盤研究開発として実施することが期待されている。

平成 27 年 5 月には、平成 26 年 4 月に閣議決定されたエネルギー基本計画や、同年 5 月に公表された放射性廃棄物 WG の「中間とりまとめ」を踏まえ、最終処分法に基づく基本方針の改定（閣議決定）が行われた。改定のポイントは、①現世代の責任と将来世代の選択可能性、②全国的な国民理解、地域理解の醸成、③国が前面に立った取組、④事業に貢献する地域に対する支援、⑤推進体制の改善等であり、特に、③国が前面に立った取組として、科学的有望地が提示されることで、今後処分地の選定プロセスが進むことが予想され、TRU 廃棄物特有の問題が地層処分の安全評価において大きな障壁とならないよう、技術開発を着実に進める必要がある。

このような TRU 廃棄物特有の重要課題として、人工バリア材および地質媒体への収着分配係数が小さく、レファレンスケースの被ばく線量評価では高レベル放射性廃棄物に比べ 2 桁以上高いことが示されている（第 2 次 TRU レポートのレファレンスケースでは最大線量が処分後 10,000 年で $2\mu\text{Sv/y}$ とされている）ヨウ素 129 および炭素 14 の低減対策に加え、その廃棄体の特性から大量のセメント系材料を使用することや金属腐食等によるガス発生による人工バリアの長期挙動への影響があげられる。

これらの重要課題に対して、TRU 廃棄物処分の技術開発において、TRU 廃棄物処分の重要核種であるヨウ素 129（グループ 1）および炭素 14（グループ 2）の影響を低減するための代替技術の開発として、10 万年以上のヨウ素閉じ込め性能を目標とした複数のヨウ素固化体開発に関して、その処理プロセスの成立性を見通しを示すとともに、長期評価のためのヨウ素放出の評価モ

デルを提案した。一方、炭素 14 対策としては、ソースタームの現実的な評価として、インベントリ設定方法の基本的な考え方を示すとともに、金属の腐食や炭素 14 浸出率のデータを一部取得して、長期予測のためのモデル化を検討した。さらに、炭素 14 の 10 半減期に相当する 6 万年間の閉じ込めのための容器を開発し、その実現性を示した。これらの成果により、環境条件に応じた評価・概念設計に対応できる基礎的な技術・手法を整備することができたが、それらを用いた長期安全性評価の信頼性を確保するためには、これまでに提案、構築した評価手法、評価モデルの信頼性を向上させるとともに、その説明の妥当性について十分な根拠を示すことが必要である。また、精密調査地区の選定時に、対象となる地質環境に応じた予備的安全評価や施設の概念設計を実現可能な現実的な条件で実施可能とするため、材料および地質環境の多様性に対応した、人工バリアの長期挙動に係わるデータ取得ならびに評価モデルの開発が行われたが、さらにその精緻化、信頼性向上が必要である。

長期安全性評価の信頼性を確保するためには、これまでに提案、構築した評価手法、評価モデルの信頼性を向上させるとともに、その説明の妥当性を示すための根拠を示すことが重要であり、そのためには、長期試験による評価モデルの確証に加え、類似の天然事例等による説明性の確保が必要である。

本開発では、TRU 廃棄物の地層処分における人工バリア材の特性ならびに重要核種の影響について、特に長期評価の信頼性確保の観点から、これまでに明らかになった課題を解決し、安全評価の信頼性を向上させることを目的とし、平成 25 年度から以下の各技術開発に取り組んできた。

- (1) ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上
- (2) 炭素 14 長期放出挙動評価
- (3) ナチュラルアナログ調査
- (4) 人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア評価の初期条件の設定
- (5) ガス移行連成挙動評価手法の開発

本分冊（第 5 分冊）では、ガス移行連成挙動評価手法の開発に関する平成 27 年度の成果を取り纏めた。

目 次

第 1 章 事業概要.....	1-1
1.1 背景.....	1-1
1.2 目的.....	1-2
1.3 本事業のこれまでの成果概要.....	1-5
1.3.1 ガス移行評価シナリオの拡張.....	1-11
(1) TRU 廃棄物処分概念全体を対象としたシナリオの構築と関連する不確実性の特定及び安全評価上の課題抽出.....	1-11
(2) TRU 廃棄物処分概念全体を対象としたシナリオの構築と関連する検討.....	1-13
1.3.2 ガス移行連成挙動解析ツールの高度化.....	1-17
(1) 人工バリア中のガス移行挙動の現象理解.....	1-17
(2) TRU 廃棄物処分施設の概念モデルを用いた時系列解析.....	1-34
1.3.3 ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充.....	1-46
(1) ベントナイト緩衝材におけるガス移行挙動評価に係るガス注入試験.....	1-46
(2) ベントナイト混合材料を用いた不飽和水分特性データの取得.....	1-49
1.3.4 セメント系材料のガス移行データ取得.....	1-51
1.3.5 まとめ.....	1-53
1.4 実施概要.....	1-59
1.4.1 全体計画.....	1-59
1.4.2 平成 27 年度の実施概要.....	1-59
(1) ガス移行評価シナリオの拡張.....	1-59
(2) ガス移行連成挙動解析ツールの高度化.....	1-60
(3) 人工バリアシステムのガス移行連成挙動評価.....	1-60
参考文献.....	1-63
第 2 章 ガス移行シナリオの拡張.....	2-1
2.1 背景と目的.....	2-1
2.2 実施内容.....	2-2
2.2.1 ガス影響に対する評価体系の整備.....	2-2
(1) ガス影響で対象とする評価体系の準備.....	2-2
(2) 評価体系の中での重要な要素の抽出.....	2-9
(3) 重要な要素に対する知見の整理.....	2-27
2.2.2 整備した評価体系に基づく技術課題の解決に向けた検討.....	2-32
(1) 評価体系から抽出された重要な要素に対する不確実性の整理.....	2-32
(2) 不確実性に対する技術課題の設定.....	2-40

(3) 技術課題解決に向けた対策の検討	2-47
2.3 まとめと今後の展開.....	2-50
2.3.1 まとめ.....	2-50
2.3.2 今後の展開.....	2-50
参考文献.....	2-52
第3章 ガス移行連成挙動解析ツールの高度化.....	3-1
3.1 背景と目的.....	3-1
3.2 実施内容.....	3-3
3.2.1 最新のガス移行試験データによる確証計算	3-3
3.2.2 確証データの登録およびデータの追加収集・整備（データの拡充）	3-3
3.2.3 TRU 廃棄物処分システムを対象としたガス移行解析における不確実性を考慮したガス移行挙動の評価	3-4
3.3 最新のガス移行試験データによる確証計算	3-7
3.3.1 ガス移行試験の概要.....	3-7
(1) 試験概要と実測データ	3-7
(2) 実測データの整理・分析.....	3-8
3.3.2 水・ガス 2相流解析コード（GETFLOWS）による確証計算	3-14
(1) 検討方針	3-14
(2) 解析コード.....	3-14
(3) 試験系のモデル化.....	3-16
(4) 再冠水フェーズの確証計算.....	3-17
(5) ガス注入フェーズの確証計算	3-23
3.3.3 力学連成 2相流解析コード（Code_Bright）による確証計算.....	3-30
(1) 検討方針	3-30
(2) 解析コード.....	3-30
(3) 試験系のモデル化.....	3-38
(4) 解析条件	3-39
(5) 解析結果	3-40
3.4 確証データの登録およびデータの追加収集・整備.....	3-48
3.5 TRU 廃棄物処分システムを対象としたガス移行解析における不確実性を考慮したガス移行挙動の評価	3-52
3.5.1 これまでに得られた成果のまとめと課題.....	3-52
3.5.2 人工バリア内の地下水組成に着目したガス発生モデリング.....	3-55
(1) 解析コード.....	3-55
(2) 熱・流体流動計算.....	3-55

(3) 解析モデル.....	3-60
(4) 解析条件.....	3-61
(5) 解析結果.....	3-68
3.6 まとめ.....	3-110
3.6.1 最新のガス移行試験データによる確証計算.....	3-110
3.6.2 確証データの登録およびデータの追加収集・整備.....	3-110
3.6.3 TRU 廃棄物処分システムを対象としたガス移行解析における不確実性を考慮したガス移行挙動の評価.....	3-111
参考文献.....	3-112
第 4 章 人工バリアシステムのガス移行連成挙動評価（現象理解）.....	4-1
4.1 背景と目的.....	4-1
4.2 実施内容.....	4-1
4.2.1 ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充.....	4-1
(1) 圧縮ベントナイトの二相流特性に係るデータの拡充.....	4-1
(2) ベントナイト・砂混合材料を用いた圧密変形特性データの取得.....	4-5
(3) ベントナイト系人工バリアの材料間界面を模擬したガス移行試験.....	4-5
4.2.2 セメント系材料のガス移行挙動データの取得.....	4-6
4.2.3 ガス移行挙動評価に係るシステム試験の実現に向けた検討.....	4-8
4.3 検討結果.....	4-9
4.3.1 ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充.....	4-9
(1) 圧縮ベントナイトの二相流特性に係るデータの拡充.....	4-9
(2) ベントナイト・砂混合材料を用いた圧密変形特性データの取得.....	4-45
(3) ベントナイト系人工バリアの材料間界面を模擬したガス移行試験.....	4-64
4.3.2 セメント系材料のガス移行挙動データの取得.....	4-99
(1) セメント系材料の特性確認試験.....	4-99
(2) セメント系人工バリアの材料界面を模擬したガス移行試験.....	4-106
4.3.3 ガス移行挙動評価に係るシステム試験の実現に向けた検討.....	4-126
(1) システム試験に係る国内外の既往知見の概要と整理.....	4-126
(2) システム試験の概念検討.....	4-130
4.4 まとめ.....	4-140
4.4.1 ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充.....	4-140
(1) 圧縮ベントナイトの二相流特性に係るデータの拡充.....	4-140
(2) ベントナイト・砂混合材料を用いた圧密変形特性データの取得.....	4-140
(3) ベントナイト系人工バリアの材料間界面を模擬したガス移行試験.....	4-141
4.4.2 セメント系材料のガス移行挙動データの取得.....	4-141

4.4.3 ガス移行挙動評価に係るシステム試験の実現に向けた検討.....	4-142
(1) システム試験に係る国内外の既往知見の整理.....	4-142
(2) システム試験の概念検討.....	4-142
参考文献.....	4-144
第 5 章 まとめ.....	5-1
5.1 平成 27 年度の実施成果のまとめ.....	5-1
5.2 今後の課題.....	5-3
参考文献.....	5-5

目 次

図 1.1.1-1	ガス移行挙動解析に基づくガス影響評価の流れ.....	1-2
図 1.2.1-1	本調査研究において想定対象とする TRU 廃棄物処分の人工バリアの概念図.....	1-3
図 1.3.1-1	検討実施項目（前フェーズ：平成 19-24 年度）の相関.....	1-7
図 1.3.1-2	ガス移行連成挙動評価手法の流れや展開.....	1-9
図 1.3.1-3	平成 25 年度に策定した 5 カ年（H25-29）の全体実施計画.....	1-10
図 1.3.1-4	ガス移行挙動高度化検討フローと既存の処分シナリオ開発フロー.....	1-12
図 1.3.1-5	TRU 廃棄物グループ 1 の処分概念を対象とした施設の状態変化表の一例.....	1-14
図 1.3.1-6	TRU 廃棄物グループ 4 の処分概念を対象とした施設の状態変化表の一例.....	1-14
図 1.3.1-7	廃棄物グループ 1 の処分概念を対象としたシナリオ整理シート.....	1-15
図 1.3.1-8	廃棄物グループ 4 の処分概念を対象としたシナリオ整理シート.....	1-15
図 1.3.1-9	各廃棄物グループ処分のガス移行シナリオにおける不確実性の共通点と特異 点.....	1-16
図 1.3.1-10	各廃棄物グループ処分のガス移行シナリオで共通点する 不確実性に係る技 術課題.....	1-16
図 1.3.2-1	既往検討で同定された相対浸透率曲線（左：水相、右：ガス相）.....	1-18
図 1.3.2-2	既往検討で同定された毛細管圧力曲線.....	1-19
図 1.3.2-3	予察解析結果（GETFLOWS による検討の一例）と 試験結果（供試体上面か らの累積排水量経時変化）との比較.....	1-19
図 1.3.2-4	予察解析結果（GETFLOWS による検討の一例）と 試験結果（水飽和度の深 度プロファイル）の比較.....	1-20
図 1.3.2-5	処分環境変化に伴うガス発生機構の概念[16].....	1-21
図 1.3.2-6	モデル化の対象とする処分システム.....	1-21
図 1.3.2-7	対象とする解析モデル（全体）と境界条件.....	1-22
図 1.3.2-8	解析モデルの人工バリア周辺拡大図.....	1-22
図 1.3.2-9	ガス相圧力分布（初期不飽和ケース）.....	1-24
図 1.3.2-10	水相飽和度分布（初期不飽和ケース）.....	1-25
図 1.3.2-11	温度分布（初期不飽和ケース）.....	1-26
図 1.3.2-12	水蒸気圧分布（初期不飽和ケース）.....	1-27
図 1.3.2-13	Fe ²⁺ 濃度分布（初期不飽和ケース）.....	1-28
図 1.3.2-14	H ₂ (aq)濃度分布（初期不飽和ケース）.....	1-29
図 1.3.2-15	O ₂ (aq)濃度分布（初期不飽和ケース）.....	1-30
図 1.3.2-16	Iron 沈殿量分布（正値が沈殿量、負値が溶解量）（初期不飽和ケース）.....	1-31
図 1.3.2-17	Magnetite 沈殿量分布（正値が沈殿量、負値が溶解量）（初期不飽和ケース）	1-32

図 1.3.2-18	H ₂ ガス発生量分布（初期不飽和ケース）	1-33
図 1.3.2-19	H ₂ ガス発生量の時間変化（初期不飽和ケースと初期飽和ケースの比較）	1-34
図 1.3.2-20	TRU 廃棄物処分施設の全体レイアウト[1]	1-35
図 1.3.2-21	3次元解析モデルのモデル化範囲[1]	1-35
図 1.3.2-22	3次元解析モデル	1-36
図 1.3.2-23	坑道縦断方向の断面図（上）と深度 500m における平面図（下）	1-37
図 1.3.2-24	廃棄体中央部におけるガス相圧力の時間変化（2次元モデルと3次元モデルの比較）	1-38
図 1.3.2-25	坑外への累積押し出し水量の時間変化(2次元モデルと3次元モデルの比較)	1-38
図 1.3.2-26	ガス相圧力と水相飽和度の分布	1-39
図 1.3.2-27	ガス相圧力と水相飽和度の分布を出力する断面位置図	1-40
図 1.3.2-28	人工バリア材料毎のガス相圧力と水相飽和度の時間変化を出力する評価点位置図	1-40
図 1.3.2-29	各断面位置におけるガス相圧力分布（1/2）	1-41
図 1.3.2-30	各断面位置におけるガス相圧力分布（2/2）	1-42
図 1.3.2-31	各断面位置における水相飽和度分布（1/2）	1-43
図 1.3.2-32	各断面位置における水相飽和度分布図（2/2）	1-44
図 1.3.2-33	各部材内におけるガス相圧力及び水相飽和度の時間変化	1-45
図 1.3.3-1	ベントナイト材料供試体を用いた試験装置の概念図	1-46
図 1.3.3-2	ガス注入に伴う単位面積当たりの排水量の経時変化（※経過日数はガス注入開始日が起点）	1-47
図 1.3.3-3	排水量の実測値と予察解析結果との比較	1-48
図 1.3.3-4	サクシオン制御可能なオエドメータ試験装置（a）試験セル；（b）下部ポーラスメタル上部にセットされた飽和アセチルセルローズ膜；（c）試験装置の断面模式図	1-49
図 1.3.3-5	各鉛直ネット応力一定条件下でのサクシオン減少に伴う吸水過程の膨潤挙動（左図）と各鉛直ネット応力一定条件下でのサクシオン増加に伴う排水過程の収縮挙動（右図）	1-50
図 1.3.4-1	GETFLOWS+UCODE_2005 による逆解析の流れ	1-51
図 1.3.4-2	ガス移行試験結果（実測）と逆解析（解析）結果	1-52
図 1.3.4-3	逆解析結果より同定された van Genuchten モデル曲線	1-52
図 1.3.5-1	これまでの成果・課題と H25-29 年度で取り組む検討内容と目標成果	1-55
図 1.3.5-2	検討実施項目（今フェーズ：平成 25-29 年度）の相関	1-56
図 1.3.5-3	これまでの検討で得られた成果と残された課題	1-57
図 1.3.5-4	これまでの検討で得られた成果と進捗状況の整理	1-58
図 1.4.1-1	「ガス移行連成挙動評価手法の開発」平成 27 年度 調査研究進捗表	1-59

図 2.2.1-1 評価体系検討の流れ	2-2
図 2.2.1-2 評価体系の対象.....	2-3
図 2.2.1-3 シナリオ整理シートにおける評価要素の抽出例[4]	2-4
図 2.2.1-4 ガス発生の影響評価の流れ[5]	2-5
図 2.2.1-5 状態変遷表作成における場と現象の理解プロセス[3].....	2-6
図 2.2.1-6 評価シナリオの作成例[3]	2-7
図 2.2.1-7 ハイブリッド・シナリオ設定手法[3]	2-7
図 2.2.1-8 評価ケースの設定とモデル選定の枠組み.....	2-8
図 2.2.1-9 ガス移行評価モデルにおけるパラメータの設定例	2-9
図 2.2.1-10 統合 FEP 関連図と構成要素.....	2-9
図 2.2.1-11 ガス発生に関わる統合 FEP[3]とガス発生量予測[2].....	2-10
図 2.2.1-12 廃棄物容器に関する統合 FEP[3]と容器の概念[2]	2-11
図 2.2.1-13 コンクリート中での統合 FEP とガス挙動概念[4].....	2-11
図 2.2.1-14 ベントナイト中の統合 FEP とガス移行挙動[3].....	2-12
図 2.2.1-15 EDZ 内での統合 FEP とガス移行挙動[4].....	2-13
図 2.2.1-16 人工バリア内亀裂での統合 FEP とガス移行挙動[3]	2-13
図 2.2.1-17 シナリオ設定手順における作業項目と作業内容.....	2-15
図 2.2.1-18 安全機能の設定例と不確実性[3]	2-16
図 2.2.1-19 シナリオ設定例と不確実性.....	2-17
図 2.2.1-20 シナリオ分類の例と不確実性.....	2-18
図 2.2.1-21 シナリオ整理表の作成例[3]と不確実性.....	2-19
図 2.2.1-22 評価ケースの設定の手順と着目する作業項目と作業内容	2-20
図 2.2.1-23 シナリオ整理表における評価ケース設定例	2-21
図 2.2.1-24 評価ケースの体系と安全評価モデル体系との関連	2-22
図 2.2.1-25 安全評価モデルとプロセスモデル[3]との関係.....	2-22
図 2.2.1-26 モデルチェーンの例（ガス発生→亀裂媒体→ベントナイト中のガス移行）	2-23
図 2.2.1-27 GETFLOWS におけるパラメータ設定と作業内容	2-25
図 2.2.1-28 CODE_BRIGHT におけるパラメータ設定手順と作業内容.....	2-26
図 2.2.1-29 根拠書を用いた知見の整理方法	2-27
図 2.2.1-30 根拠書記載事項の評価の流れ.....	2-27
図 2.2.2-1 検討の流れと検討内容.....	2-32
図 2.2.2-2 評価体系の作業項目と不確実性の伝播状況.....	2-38
図 3.2.1-1 WP 各検討項目間の相互関係と実施スケジュール.....	3-2
図 3.2.3-1 施設からの累積押し出し水量（2次元モデルと3次元モデルの比較）	3-5

図 3.2.3-2	予察解析結果（供試体からの累積排水量）と実験結果の比較	3-5
図 3.2.3-3	昨年度同定されたモルタル供試体の相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）（供試体 No.1）	3-6
図 3.2.3-4	昨年度同定されたモルタル供試体の相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）（供試体 No.2）	3-6
図 3.3.1-1	試験概要と利用可能な実測データ	3-7
図 3.3.1-2	再冠水フェーズで得られた注水差圧と累積注水量、排水量の時間変化	3-9
図 3.3.1-3	再冠水フェーズで得られた注水差圧と全応力の時間変化	3-10
図 3.3.1-4	ガス注入フェーズで得られた注入ガス差圧と累積排水量の時間変化	3-11
図 3.3.1-5	ガス注入フェーズで得られた注入ガス差圧と全応力、有効底面応力の時間変化	3-12
図 3.3.1-6	解体調査から得られた水飽和度の深度プロファイル	3-13
図 3.3.2-1	流路拡幅前後の間隙率と絶対浸透率の変化イメージ	3-15
図 3.3.2-2	解析モデルの基本諸元	3-17
図 3.3.2-3	既往文献から設定した絶対浸透率とガス侵入圧の関係[1]	3-19
図 3.3.2-4	GETFLOWS+UCODE_2005 による逆解析の流れ	3-20
図 3.3.2-5	累積注水量、排水量の再現結果（再冠水フェーズ）	3-21
図 3.3.2-6	同定された毛細管圧力（左）と相対浸透率（右）（再冠水フェーズ）	3-22
図 3.3.2-7	既往検討で同定された相対浸透率曲線（左：水相、右：ガス相）	3-27
図 3.3.2-8	既往検討で同定された毛細管圧力曲線	3-27
図 3.3.2-9	累積排水量の再現結果（ガス注入フェーズ）	3-28
図 3.3.2-10	同定された毛細管圧力（左）と相対浸透率（右）（ガス注入フェーズ）	3-29
図 3.3.2-11	水飽和度の再現結果（ガス注入フェーズ）	3-29
図 3.3.3-1	熱、力学（応力変形）、2相流の相互影響	3-30
図 3.3.3-2	不飽和多孔質体の概念	3-31
図 3.3.3-3	間隙比と平均有効応力の関係	3-35
図 3.3.3-4	サクションと間隙比の関係	3-36
図 3.3.3-5	(p, q) 面、 (p, s) 面および (p, q, s) 面での降伏曲面	3-37
図 3.3.3-6	有効応力およびサクションの変化による体積ひずみ挙動と降伏曲面	3-38
図 3.3.3-7	力学連成 2相流解析における解析モデル	3-38
図 3.3.3-8	初期設定値によるガス注入フェーズ後の間隙率分布（No.1）	3-41
図 3.3.3-9	累積注水量の再現結果（再冠水フェーズ）	3-42
図 3.3.3-10	全応力の再現結果（再冠水フェーズ）	3-43
図 3.3.3-11	累積排水量の再現結果（ガス注入フェーズ）	3-44
図 3.3.3-12	全応力の再現結果（ガス注入フェーズ）	3-45
図 3.3.3-13	水飽和度の再現結果（ガス注入フェーズ）	3-46

図 3.3.3-14	間隙率の再現結果（上段：再冠水フェーズ、下段：ガス注入フェーズ）	3-46
図 3.3.3-15	ガス注入フェーズ後の水飽和度と間隙率の分布	3-47
図 3.3.3-1	データライブラリの基本構成	3-48
図 3.3.3-2	データライブラリを用いた実行処理の流れ	3-48
図 3.5.2-1	TOUGHREACT の処理フロー	3-59
図 3.5.2-2	モデル化の対象とする処分システム	3-60
図 3.5.2-3	解析モデル（人工バリア周辺拡大）	3-61
図 3.5.2-4	反応速度定数の温度依存性	3-66
図 3.5.2-5	pH と鉄の溶解速度の関係[16]	3-66
図 3.5.2-6	廃棄体発熱量[17]	3-67
図 3.5.2-7	ガス相圧力分布（初期 pH7.0 ケース）	3-70
図 3.5.2-8	水相飽和度分布（初期 pH7.0 ケース）	3-71
図 3.5.2-9	温度分布（初期 pH7.0 ケース）	3-72
図 3.5.2-10	水蒸気圧分布（初期 pH7.0 ケース）	3-73
図 3.5.2-11	Fe ²⁺ 濃度分布（初期 pH7.0 ケース）	3-74
図 3.5.2-12	H ₂ (aq)濃度分布（初期 pH7.0 ケース）	3-75
図 3.5.2-13	O ₂ (aq)濃度分布（初期 pH7.0 ケース）	3-76
図 3.5.2-14	Iron 溶解量分布（負値が溶解量）（初期 pH7.0 ケース）	3-77
図 3.5.2-15	Magnetite 沈殿量分布（正值が沈殿量，負値が溶解量）（初期 pH7.0 ケース）	3-78
図 3.5.2-16	H ₂ ガス発生量分布（初期 pH7.0 ケース）	3-79
図 3.5.2-17	pH 分布（初期 pH7.0 ケース）	3-80
図 3.5.2-18	ガス相圧力分布（初期 pH12.5 ケース）	3-81
図 3.5.2-19	水相飽和度分布（初期 pH12.5 ケース）	3-82
図 3.5.2-20	温度分布（初期 pH12.5 ケース）	3-83
図 3.5.2-21	水蒸気圧分布（初期 pH12.5 ケース）	3-84
図 3.5.2-22	Fe ²⁺ 濃度分布（初期 pH12.5 ケース）	3-85
図 3.5.2-23	H ₂ (aq)濃度分布（初期 pH12.5 ケース）	3-86
図 3.5.2-24	O ₂ (aq)濃度分布（初期 pH12.5 ケース）	3-87
図 3.5.2-25	Iron 溶解量分布（負値が溶解量）（初期 pH12.5 ケース）	3-88
図 3.5.2-26	Magnetite 沈殿量分布（正值が沈殿量，負値が溶解量）（初期 pH12.5 ケース）	3-89
図 3.5.2-27	H ₂ ガス発生量分布（初期 pH12.5 ケース）	3-90
図 3.5.2-28	pH 分布（初期 pH12.5 ケース）	3-91
図 3.5.2-29	ガス相圧力分布（初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース）	3-92
図 3.5.2-30	水相飽和度分布（初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース）	3-93

図 3.5.2-31	温度分布 (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)	3-94
図 3.5.2-32	水蒸気圧分布 (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)	3-95
図 3.5.2-33	Fe ²⁺ 濃度分布 (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)	3-96
図 3.5.2-34	H ₂ (aq)濃度分布 (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)	3-97
図 3.5.2-35	O ₂ (aq)濃度分布 (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)	3-98
図 3.5.2-36	Iron 溶解量分布 (負値が溶解量) (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)	3-99
図 3.5.2-37	Magnetite 沈殿量分布 (正値が沈殿量, 負値が溶解量) (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)	3-100
図 3.5.2-38	H ₂ ガス発生量分布 (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)	3-101
図 3.5.2-39	pH 分布 (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)	3-102
図 3.5.2-40	H ₂ ガス発生量の時間変化 (初期 pH7.0 ケース、初期 pH12.5 ケース、初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケースの比較)	3-103
図 3.5.2-41	評価点位置図	3-103
図 3.5.2-42	評価点におけるガス相圧力の時間変化 (上段: 初期 pH7.0 ケース、中段: 初期 pH12.5 ケース、下段: 初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)	3-104
図 3.5.2-43	評価点における水相飽和度の時間変化 (上段: 初期 pH7.0 ケース、中段: 初期 pH12.5 ケース、下段: 初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)	3-105
図 3.5.2-44	評価点における温度の時間変化 (上段: 初期 pH7.0 ケース、中段: 初期 pH12.5 ケース、下段: 初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)	3-106
図 3.5.2-45	評価点での水蒸気圧の時間変化 (上段: 初期 pH7.0 ケース、中段: 初期 pH12.5 ケース、下段: 初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)	3-107
図 3.5.2-46	評価点での pH の時間変化 (上段: 初期 pH7.0 ケース、中段: 初期 pH12.5 ケース、下段: 初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)	3-108
図 3.5.2-47	坑外への排水流量と累積押し出し水量の時間変化 (上段: 初期 pH7.0 ケース、中段: 初期 pH12.5 ケース、下段: 初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)	3-109
図 4.2.1-1	本検討の実施フロー	4-2
図 4.2.1-2	供試体の解体 (分割) のイメージ	4-3
図 4.2.1-3	ベントナイト材料供試体を用いた試験装置の概念図	4-4
図 4.2.1-4	実施手順	4-5
図 4.2.1-5	人工バリアの現実的な施工手順 (ブロック定置方式[11]) を考慮した上部緩衝材の同一材料界面 (緑色の太線) と界面模擬供試体のイメージ	4-6
図 4.2.2-1	人工バリアにおける現実的な施工手順[11]を考慮した 充填材の同一材料界面 (拡大図内の赤丸部) と界面模擬供試体のイメージ	4-7
図 4.3.1-1	実施手順	4-9
図 4.3.1-2	供試体の解体 (分割) イメージ	4-10

図 4.3.1-3	ガス注入に伴う排水量の経時変化.....	4-14
図 4.3.1-4	ガス注入に伴う単位面積当たりの排水量の経時変化.....	4-15
図 4.3.1-5	ガス注入に伴う単位面積当たりの排水速度（ガス注入開始直後）.....	4-16
図 4.3.1-6	ガス注入に伴う単位面積当たりの排水速度（ガス注入 70 日~120 日 ; No,1 供 試体）.....	4-17
図 4.3.1-7	ガス注入に伴う単位面積当たりの排水速度.....	4-17
図 4.3.1-8	ガス注入に伴う単位面積当たりの排水速度.....	4-18
図 4.3.1-9	ガス注入に伴う排水量の経時変化（No.3 供試体）.....	4-20
図 4.3.1-10	ガス注入に伴う単位面積当たりの排水量の経時変化（No.3 供試体）.....	4-20
図 4.3.1-11	ガス注入に伴う単位面積当たりの排水速度（ガス注入開始直後）.....	4-21
図 4.3.1-12	ガス注入に伴う単位面積当たりの排水速度（ガス注入 70 日~120 日 ; No,1 供 試体）.....	4-22
図 4.3.1-13	ガス注入に伴う単位面積当たりの排水速度.....	4-22
図 4.3.1-14	供試体の注水量、膨潤圧の経時変化（No.4 供試体）.....	4-23
図 4.3.1-15	膨潤圧の経時変化(No.4 供試体).....	4-23
図 4.3.1-16	供試体の飽和確認以降の注水量と排水量の推移（No.4 供試体）.....	4-24
図 4.3.1-17	供試体の注水量、膨潤圧の経時変化（No.5 供試体）.....	4-25
図 4.3.1-18	膨潤圧の経時変化(No.5 供試体).....	4-25
図 4.3.1-19	供試体の飽和確認以降の注水量と排水量の推移（No.5 供試体）.....	4-26
図 4.3.1-20	含水比の深さ方向の分布（No.1 供試体）.....	4-31
図 4.3.1-21	乾燥密度の深さ方向の分布（No.1 供試体）.....	4-31
図 4.3.1-22	飽和度の深さ方向の分布（No.1 供試体）.....	4-32
図 4.3.1-23	含水比の深さ方向の分布（No.3 供試体）.....	4-37
図 4.3.1-24	乾燥密度の深さ方向の分布（No.3 供試体）.....	4-37
図 4.3.1-25	飽和度の深さ方向の分布（No.3 供試体）.....	4-38
図 4.3.1-26	含水比分布（No.4 供試体）.....	4-43
図 4.3.1-27	乾燥密度の分布（No.4 供試体）.....	4-43
図 4.3.1-28	飽和度の分布（No.4 供試体）.....	4-44
図 4.3.1-29	サクシオン制御試験装置の概念.....	4-45
図 4.3.1-30	载荷ステップと e-log P 曲線のイメージ.....	4-46
図 4.3.1-31	圧密度-時間曲線（サクシオン 0kPa, ネット応力 0.1MPa）.....	4-47
図 4.3.1-32	圧密度-時間曲線（サクシオン 0kPa, ネット応力 0.2MPa）.....	4-47
図 4.3.1-33	圧密度-時間曲線（サクシオン 0kPa, ネット応力 0.45MPa）.....	4-48
図 4.3.1-34	圧密度-時間曲線（サクシオン 0kPa, ネット応力 1.0MPa）.....	4-48
図 4.3.1-35	圧密度-時間曲線（サクシオン 0kPa, ネット応力 1.5MPa）.....	4-49
図 4.3.1-36	圧密度-時間曲線（サクシオン 0kPa, ネット応力 3.0MPa）.....	4-49

図 4.3.1-37	圧密度－時間曲線	(サクシヨン 0kPa, ネット応力 1.5MPa, 除荷)	.....4-50
図 4.3.1-38	圧密度－時間曲線	(サクシヨン 0kPa, ネット応力 1.0MPa, 除荷)	.....4-50
図 4.3.1-39	圧密度－時間曲線	(サクシヨン 400kPa, ネット応力 0.1MPa)	.....4-51
図 4.3.1-40	圧密度－時間曲線	(サクシヨン 400kPa, ネット応力 0.2MPa)	.....4-51
図 4.3.1-41	圧密度－時間曲線	(サクシヨン 400kPa, ネット応力 0.45MPa)	.....4-52
図 4.3.1-42	圧密度－時間曲線	(サクシヨン 400kPa, ネット応力 1.0MPa)	.....4-52
図 4.3.1-43	圧密度－時間曲線	(サクシヨン 400kPa, ネット応力 1.5MPa)	.....4-53
図 4.3.1-44	圧密度－時間曲線	(サクシヨン 400kPa, ネット応力 3.0MPa)	.....4-53
図 4.3.1-45	圧密度－時間曲線	(サクシヨン 400kPa, ネット応力 1.5MPa, 除荷)	.....4-54
図 4.3.1-46	圧密度－時間曲線	(サクシヨン 400kPa, ネット応力 1.0MPa, 除荷)	.....4-54
図 4.3.1-47	圧密度－時間曲線	(サクシヨン 900kPa, ネット応力 0.1MPa)	.....4-55
図 4.3.1-48	圧密度－時間曲線	(サクシヨン 900kPa, ネット応力 0.2MPa)	.....4-55
図 4.3.1-49	圧密度－時間曲線	(サクシヨン 900kPa, ネット応力 0.45MPa)	.....4-56
図 4.3.1-50	圧密度－時間曲線	(サクシヨン 900kPa, ネット応力 1.0MPa)	.....4-56
図 4.3.1-51	圧密度－時間曲線	(サクシヨン 900kPa, ネット応力 1.5MPa)	.....4-57
図 4.3.1-52	圧密度－時間曲線	(サクシヨン 900kPa, ネット応力 3.0MPa)	.....4-57
図 4.3.1-53	圧密度－時間曲線	(サクシヨン 900kPa, ネット応力 1.5MPa, 除荷)	.....4-58
図 4.3.1-54	圧密度－時間曲線	(サクシヨン 900kPa, ネット応力 1.0MPa, 除荷)	.....4-58
図 4.3.1-55	載荷ネット応力 (圧密圧力)－間隙比の関係		.....4-59
図 4.3.1-56	異なるサクシヨンにおける載荷ネット応力 (圧密圧力)－間隙比の関係		.....4-61
図 4.3.1-57	最小二乗近似による圧縮指数 (λ) と膨潤指数 (κ) の算定		.....4-61
図 4.3.1-58	圧縮指数, 膨潤指数のサクシヨン依存性と BB モデルによるフィッティング		.....4-62
図 4.3.1-59	膨潤指数に非線形を考慮した場合のフィッティング結果		.....4-63
図 4.3.1-60	供試体の作製手順 (上: 概念図、下: 実施状況写真)		.....4-65
図 4.3.1-61	1mm スリット 4 分割注水 スリットの閉塞過程		.....4-67
図 4.3.1-62	1mm スリット 2 分割注水 閉塞過程		.....4-71
図 4.3.1-63	1mm スリット 1.2ml 注水 閉鎖過程		.....4-75
図 4.3.1-64	圧縮整形応力		.....4-81
図 4.3.1-65	飽和過程の状況(供試体 No.1)		.....4-83
図 4.3.1-66	飽和過程の状況(供試体 No.2)		.....4-83
図 4.3.1-67	注水量と排水量の経時変化 (供試体 No.1)		.....4-84
図 4.3.1-68	注水量と排水量の経時変化(供試体 No.2)		.....4-85
図 4.3.1-69	1 層ごとの分割		.....4-86
図 4.3.1-70	含水比の深度分布 (No.2)		.....4-90
図 4.3.1-71	含水比の深度分布 (No.2) (試料の内周部、外周部)		.....4-90
図 4.3.1-72	含水比の深度分布 (No.2) (スリットからの距離の影響)		.....4-90

図 4.3.1-73	実施手順（大破過に至るまで段階的に昇圧）	4-91
図 4.3.1-74	注水過程からガス移行過程への切り替え手順	4-91
図 4.3.1-75	ガス注入過程の状況（排水量の変化）	4-94
図 4.3.1-76	ガス注入過程の状況（供試体断面の単位面積当たりの排水量の変化）	4-94
図 4.3.1-77	1層ごとの分割図	4-95
図 4.3.1-78	含水比の分布	4-96
図 4.3.1-79	含水比の分布（外周と中央部）	4-96
図 4.3.1-80	含水比の分布(スリットとの関係)	4-96
図 4.3.2-1	ケース 2 配合モルタルの材令 28 日一軸圧縮強度測定結果	4-104
図 4.3.2-2	ケース 2 配合モルタルの材令 91 日一軸圧縮強度測定結果	4-104
図 4.3.2-3	ケース 1 配合モルタルの材令 28 日一軸圧縮強度測定結果	4-104
図 4.3.2-4	ケース 1 配合モルタルの材令 91 日一軸圧縮強度測定結果	4-105
図 4.3.2-5	ケース 3 配合モルタルの材令 28 日一軸圧縮強度測定結果	4-105
図 4.3.2-6	ケース 3 配合モルタルの材令 91 日一軸圧縮強度測定結果	4-105
図 4.3.2-7	ケース 4 配合モルタルの材令 28 日一軸圧縮強度測定結果	4-106
図 4.3.2-8	ケース 4 配合モルタルの材令 91 日一軸圧縮強度測定結果	4-106
図 4.3.2-9	供試体作製手順	4-107
図 4.3.2-10	モルタルケース 1 配合供試体の時間～透水量関係	4-110
図 4.3.2-11	モルタルケース 2 配合供試体の時間～透水量関係	4-110
図 4.3.2-12	モルタルケース 3 配合供試体の時間～流量関係	4-111
図 4.3.2-13	モルタルケース 4 配合供試体の時間～流量関係	4-111
図 4.3.2-14	配合ケース 1 打継供試体 No.1	4-113
図 4.3.2-15	配合ケース 1 打継供試体 No.1	4-113
図 4.3.2-16	配合ケース 1 打継供試体 No.1 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）	4-113
図 4.3.2-17	配合ケース 1 打継供試体 No.2	4-114
図 4.3.2-18	配合ケース 1 打継供試体 No.2	4-114
図 4.3.2-19	配合ケース 1 打継供試体 No.2 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）	4-114
図 4.3.2-20	配合ケース 1 打継無し供試体	4-115
図 4.3.2-21	配合ケース 1 打継無し供試体	4-115
図 4.3.2-22	配合ケース 1 打継無し供試体の透気量（補正值）の定常区間（黒線）	4-115
図 4.3.2-23	配合ケース 2 打継供試体 No.1	4-116
図 4.3.2-24	配合ケース 2 打継供試体 No.1	4-116
図 4.3.2-25	配合ケース 2 打継供試体 No.1 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）	4-116
図 4.3.2-26	配合ケース 2 打継供試体 No.2 時間-排水量相関	4-117
図 4.3.2-27	配合ケース 2 打継供試体 No.2 時間-透気量相関	4-117
図 4.3.2-28	配合ケース 2 打継供試体 No.2 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）	4-117

図 4.3.2-29	配合ケース 2 打継無し供試体	4-118
図 4.3.2-30	配合ケース 2 打継無し供試体	4-118
図 4.3.2-31	配合ケース 2 打継無し供試体の透気量（補正值）の定常区間（黒線）	4-118
図 4.3.2-32	配合ケース 3 打継供試体 No.1	4-119
図 4.3.2-33	配合ケース 3 打継供試体 No.1	4-119
図 4.3.2-34	配合ケース 3 打継供試体 No.1 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）	4-119
図 4.3.2-35	配合ケース 3 打継無し供試体	4-120
図 4.3.2-36	配合ケース 3 打継無し供試体	4-120
図 4.3.2-37	配合ケース 3 打継無し供試体の透気量（補正值）の定常区間（黒線）	4-120
図 4.3.2-38	配合ケース 4 打継供試体 No.1 時間-排水量相関	4-121
図 4.3.2-39	配合ケース 4 打継供試体 No.1 時間-透気量相関	4-121
図 4.3.2-40	配合ケース 4 打継供試体 No.1 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）	4-121
図 4.3.2-41	配合ケース 4 打継供試体 No.2	4-122
図 4.3.2-42	配合ケース 4 打継供試体 No.2	4-122
図 4.3.2-43	配合ケース 4 打継供試体 No.2 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）	4-122
図 4.3.2-44	配合ケース 4 打継無供試体	4-123
図 4.3.2-45	配合ケース 4 打継無供試体	4-123
図 4.3.2-46	配合ケース 4 打継無供試体の透気量（補正值）の定常区間（黒線）	4-123
図 4.3.3-1	システム試験で対象とする処分概念	4-130
図 4.3.3-2	システム試験体の概念	4-131
図 4.3.3-3	計測用センターの配置案	4-133
図 4.3.3-4	検討対象とした模型概念	4-135
図 4.3.3-5	力学連成二相流モデルにおける計算フローの例	4-136
図 4.3.3-6	第2次 TRU レポートにおいて想定された施設内の最大ガス圧と 排水流量の経 時変化	4-138
図 4.3.3-7	システム試験体の概念と設定すべき寸法	4-139
図 5.1.1-1	平成 26-27 年度に取り組んだ各検討項目の相関	5-2
図 5.1.1-2	平成 27 年度までの検討で得られた成果と進捗状況の整理	5-2
図 5.2.1-1	本事業における成果の補強に有効と思われる検討項目	5-4

表 目 次

表 1.2.1-1 本調査研究において想定する人工バリア材料とその仕様（スペック）や要求機能.....	1-4
表 1.3.1-1 第2次 TRU レポートで提示された解決すべき課題に対して本事業で取り組んだ検討項目と内容.....	1-6
表 1.3.1-2 検討（前フェーズ：平成 19-24 年度）の成果より抽出された課題.....	1-8
表 1.3.2-1 相対浸透率、毛細管圧力曲線を表現する構成モデル（ vG モデル） [14].....	1-18
表 1.3.3-1 各試験結果における $e-\ln(s+P_{atm})$ 関係の傾き κ_s	1-50
表 1.3.3-2 吸水膨潤変形および排水収縮変形に関する Barcelona Basic Model モデルパラメータ.....	1-50
表 1.3.4-1 同定された van Genuchten モデル[14]パラメータ.....	1-52
表 2.2.1-1 統合 FEP から抽出した重要要素と不確実性の取りまとめ.....	2-14
表 2.2.1-2 シナリオ設定における重要要素と不確実性のまとめ.....	2-19
表 2.2.1-3 評価ケースとモデル選定における重要要素と不確実性のまとめ.....	2-24
表 2.2.1-4 GETFLOWS のパラメータ設定上の重要要素と不確実性のまとめ.....	2-25
表 2.2.1-5 CODE_BRITHG のパラメータ設定上の重要要素と不確実性.....	2-26
表 2.2.1-6 グループ 2 を対象としたニアフィールド状態変化表（RWMC, 2012）.....	2-28
表 2.2.1-7 根拠書の評価結果の一覧.....	2-29
表 2.2.1-8 変化の各段階におけるガス挙動の不確実性.....	2-30
表 2.2.1-9 ガス挙動評価における重要要素の知見の状況と評価のまとめ.....	2-31
表 2.2.2-1 場と現象理解における不確実性の分析結果.....	2-33
表 2.2.2-2 シナリオ設定時における不確実性の分析結果.....	2-34
表 2.2.2-3 評価ケースとモデル設定時の不確実性の分析結果.....	2-34
表 2.2.2-4 場と現象理解に係わる重要要素の表示.....	2-35
表 2.2.2-5 FETFLOWS におけるパラメータ設定時の不確実性分析結果.....	2-36
表 2.2.2-6 CODE_BRIGHT のパラメータ設定時の不確実性分析.....	2-37
表 2.2.2-7 代表的な不確実性の伝播状況の分析.....	2-39
表 2.2.2-8 場と現象の理解における技術課題の設定と評価.....	2-41
表 2.2.2-9 シナリオ設定における技術課題の設定と評価.....	2-42
表 2.2.2-10 評価ケース・モデル設定時における技術課題の設定と評価.....	2-43
表 2.2.2-11 GETFLOWS のパラメータ設定における技術課題と評価.....	2-44
表 2.2.2-12 CODE_BRIGHT のパラメータ設定における技術課題と評価.....	2-44
表 2.2.2-13 評価体系の作業項目に係わる不確実性抽出から技術課題設定及び評価までの整理（その1）.....	2-45

表 2.2.2-14	評価体系の作業項目に係わる不確実性抽出から技術課題設定及び評価までの整理 (その2)	2-46
表 2.2.2-15	技術課題項目とそのレベル	2-47
表 2.2.2-16	1 技術課題と解決策の概要	2-49
表 3.2.1-1	平成 25 年度の検討で設定した 3 つの Work Package と検討項目	3-2
表 3.3.1-1	各試験フェーズにおける試験条件と実測データ	3-7
表 3.3.1-2	供試体の試験進捗状況	3-7
表 3.3.2-1	再冠水フェーズの確証計算で用いる相対浸透率や毛細管圧力を表現する構成モデル	3-18
表 3.3.2-2	同定された 2 相流パラメータ (再冠水フェーズ)	3-22
表 3.3.2-3	再冠水フェーズの確証計算で絶対浸透率、毛細管圧力曲線を表現する構成モデル	3-23
表 3.3.2-4	既存研究で実施された室内ガス透気試験の概要	3-25
表 3.3.2-5	既存検討で同定された 2 相流パラメータ	3-26
表 3.3.2-6	同定された 2 相流パラメータ (ガス注入フェーズ)	3-29
表 3.3.3-1	各モジュールの要求機能	3-49
表 3.3.3-2	開発環境	3-49
表 3.3.3-3	同定された基本物性一覧	3-50
表 3.3.3-4	同定された非線形物性一覧 (毛細管圧力)	3-50
表 3.3.3-5	同定された非線形物性一覧 (相対浸透率)	3-51
表 3.5.1-1	データに関する最新知見の整理	3-53
表 3.5.1-2	モデルに関する最新知見の整理	3-54
表 3.5.2-1	本検討で取り扱う流体・熱移動現象	3-56
表 3.5.2-2	2 相流曲線を表現する構成モデル	3-62
表 3.5.2-3	人工バリア構成材料の熱物性	3-62
表 3.5.2-4	人工バリア構成材料の水理物性	3-63
表 3.5.2-5	考慮するイオン反応式	3-64
表 3.5.2-6	初期組成	3-65
表 4.2.1-1	ガス移行試験の検討項目	4-3
表 4.2.1-2	試験装置の構成および特徴	4-4
表 4.3.1-1	供試体の条件	4-10
表 4.3.1-2	試験概況	4-11
表 4.3.1-3	ガス注入過程	4-12
表 4.3.1-4	停電期間	4-12

表 4.3.1-5	排水速度の変化の状態.....	4-13
表 4.3.1-6	ガス侵入位置の推定.....	4-13
表 4.3.1-7	ガス移行段階の排水速度（供試体 No.1）	4-16
表 4.3.1-8	ガス移行段階の排水速度（供試体 No.3）	4-21
表 4.3.1-9	飽和確認中の注水量と透水係数の計算（No.4 供試体）	4-24
表 4.3.1-10	飽和確認中の注水量と透水係数の計算（No.5 供試体）	4-26
表 4.3.1-11	No.1 供試体の含水比計測結果（2015年4月27日解体）	4-27
表 4.3.1-12	No.3 供試体の含水比計測結果.....	4-33
表 4.3.1-13	No.4 供試体の含水比計測結果（2015年7月10日解体）	4-39
表 4.3.1-14	載荷ネット応力（圧密圧力）と間隙比の整理結果	4-59
表 4.3.1-15	不飽和ベントナイトの圧縮指数、膨潤指数に関わるパラメータ	4-62
表 4.3.1-16	不飽和ベントナイトの膨潤指数の非線形を考慮した場合のパラメータ	4-63
表 4.3.1-17	作製する供試体リスト	4-65
表 4.3.1-18	ベントナイト供試体の条件.....	4-66
表 4.3.1-19	予備試験(1)における供試体下面からの注水条件	4-66
表 4.3.1-20	予備試験(2)における供試体下面からの注水条件	4-71
表 4.3.1-21	予備試験(3)における供試体下面からの注水条件	4-75
表 4.3.1-22	ベントナイト供試体の条件.....	4-78
表 4.3.1-23	試験概況.....	4-82
表 4.3.1-24	界面を有する供試体の膨潤圧	4-84
表 4.3.1-25	飽和後定常状態における注水量から求めた透水係数.....	4-85
表 4.3.1-26	供試体の試験一覧（供試体 No.2）	4-86
表 4.3.1-27	供試体調査結果（分割層ごとの重量と高さ）（No.2 供試体）	4-89
表 4.3.1-28	供試体含水比（各分割ブロックの含水比）（No.2 供試体）	4-89
表 4.3.1-29	供試体密度（No.2 供試体）	4-89
表 4.3.1-30	試験概況.....	4-92
表 4.3.1-31	ガス注入工程.....	4-93
表 4.3.1-32	含水比計測結果.....	4-95
表 4.3.2-1	供試体モルタルの配合[8].....	4-99
表 4.3.2-2	供試体モルタルの配合	4-99
表 4.3.2-3	試験条件.....	4-106
表 4.3.2-4	材料作製および透水試験の実施状況	4-109
表 4.3.2-5	モルタル供試体 透水試験結果	4-112
表 4.3.2-6	モルタル供試体 寸法および透水試験前後の重量比較.....	4-112
表 4.3.2-7	ガス注入試験の実施状況	4-113
表 4.3.2-8	配合ケース1モルタル供試体の透気試験結果.....	4-124

表 4.3.2-9	配合ケース 2 モルタル供試体の透気試験結果.....	4-124
表 4.3.2-10	配合ケース 3 モルタル供試体の透気試験結果.....	4-124
表 4.3.2-11	配合ケース 4 モルタル供試体の透気試験結果.....	4-124
表 4.3.3-1	調査対象とする文献と選定理由	4-127
表 4.3.3-2	センサー設置仕様案.....	4-134
表 4.4.1-1	BB モデルにおける不飽和特性パラメータ	4-141

第1章 事業概要

1.1 背景

TRU 放射性廃棄物処分場では、廃棄物に含まれる金属の還元腐食その他による水素などのガスの発生が想定される。これらガスの発生による内圧上昇により破過が生じた場合、その時に生じた破過経路が核種の移行経路になると考えられる。このため、処分場で生じるガスの人工バリア中の移行挙動を予測し、その影響を評価しておくことは重要である。

「TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発とりまとめ－」[1]（以下、「第2次 TRU レポート」、あるいは「TRU-2」と称する）では、核種移行解析および線量評価におけるガス影響モデルにおいて、廃棄体内部で発生したガスに関して、以下の事象が想定されている。

- ・ 地下水に溶解し、人工バリアの外部へと移行する
- ・ 気相を形成し、発生した体積に相当する地下水を押し出す（発生量が多い場合）
- ・ 緩衝材内部に選択的移行経路を形成し通気する（緩衝材を用いる概念）

第2次 TRU レポートでは地下水移行シナリオにおいて、上記の3つの事象はガス発生による人工バリア内部の地下水の押し出しに伴う核種移行率の上昇として考慮され、基本モデルの拡張（サブシナリオ：ガス影響ケース）として影響評価が実施されている[1]。第2次 TRU レポートでは、ガス影響ケースではレファレンスケースとほぼ同じ最大線量（約 2×10^{-6} Sv/y）と示されているが、ガス発生による排水継続期間が長くなる場合は、ガス影響が顕著に現れて最大線量に影響を与える可能性が示唆されている。また、ガス状核種（ $^{14}\text{CH}_4$ ）を対象とした核種移行評価では、ガス状核種の移行による線量はガス移行挙動評価解析の結果、最大で約 1×10^{-9} Sv/y と地下水移行による線量値（約 2×10^{-6} Sv/y）に比較して十分小さいことが示されている。

第2次 TRU レポートをもとに作成したガス影響評価の流れを図 1.1.1-1 に示す。

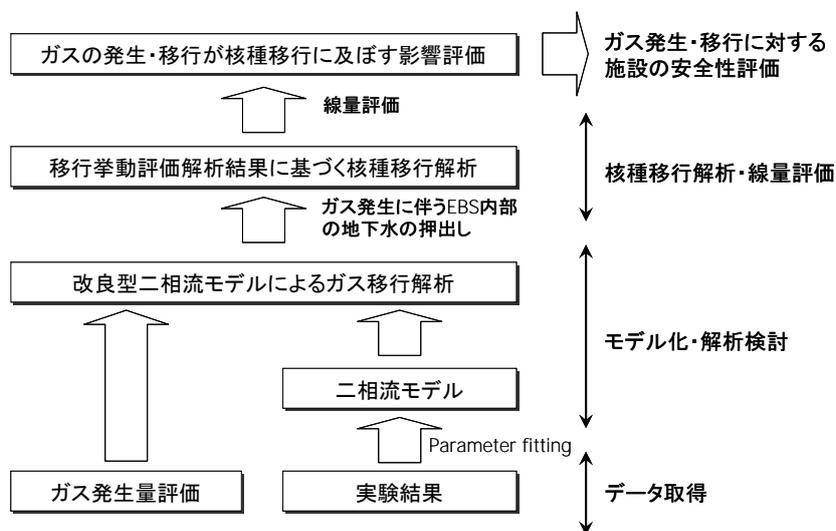


図 1.1.1-1 ガス移行挙動解析に基づくガス影響評価の流れ

一連のガス影響評価において、ガス移行挙動評価解析は、ガスの移行に特有な現象（卓越流路の形成やガス圧力による透過性の変化）を組み込んだ改良型の連続媒体気液二相流モデルにより実施されている。このモデルを用いた解析に必要な、実験結果に基づく二相流モデルやガス発生量には保守的な仮定に基づいて設定されているものの、処分環境及び材料の多様性や材料特性データの不足に起因する不確実性が存在しているのが現状である。

このような背景の下、第 2 次 TRU レポートや「TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画」[2]（以下、基盤研究全体マップ）では、処分施設内で発生したガスが処分の長期安全性に及ぼす影響に関して、緩衝材中の応力連成を伴うガス移行を考慮した評価モデルの開発、き裂媒体（周辺岩盤）におけるガス移行評価モデルの開発、及び堆積岩の掘削影響領域（EDZ）を含むニアフィールド全体におけるガス移行評価モデルの開発等が課題として提起されている。

TRU 廃棄物の処分施設の内部で発生したガスが処分施設の長期安全性に及ぼす影響に関連して、このような不確実性を低減することは、より現実的なガス発生影響の評価を可能とし、処分施設の安全性評価の信頼性を向上すると同時に、施設概念や設計の合理化への貢献も期待することができる。

1.2 目的

前節の背景に基づき、平成 19 年度から平成 24 年度に実施した「ガス移行挙動の評価に関する検討」[5][6][7][8][9][10]によって、人工バリア材料のうちベントナイト系材料中のガスの移行挙動については、水とガスの透過性および力学特性データの取得やガス移行解析モデルの構築／高度化が図られた。しかしその一方で、現実的なガス移行挙動評価において未だ不確実性の残る課題も多く残された。従って、本開発では、TRU 廃棄物の処分に係る人工バリアの長期性能評価の信頼性向上等へ寄与することを目的として、残された課題を解決する手段として、以下について実施する。

- ① 材料試験によってガス移行挙動を把握しつつ、試験結果の再現解析（ガス移行挙動における素過程が反映されたモデルを用いた解析）の信頼性向上を図る。
- ② 廃棄物や材料（セメント系）の特性及びそれらを組み合わせた構造（界面など）を考慮した人工バリアシステムのガス移行連成挙動の評価手法とガス移行に係る処分シナリオの高度化を図る。

具体的には、室内試験により人工バリア構成部材中のガス移行挙動に関する各種データの取得、ガス移行挙動に関して連成挙動を取り入れての室内試験の現象解明、及び TRU 廃棄物の長期変遷による挙動を把握できるツールの確立、ガス移行挙動評価のためのシナリオの拡張によって、TRU 廃棄物処分事業におけるガス移行挙動評価の技術的貢献を目指す。図 1.2.1-1 には、本調査研究において想定対象とする TRU 廃棄物処分の人工バリアの概念を、また表 1.2.1-1 には、本調査研究において想定する人工バリアの構成材料とその仕様（スペック）や要求機能を、第 2 次 TRU レポートや TRU レベル 3 報告書（NUMO-TR-10-03）[3]を参考に概念図および表に示した。ただし、今後の処分事業の進捗や本調査研究にて得られる成果によって、下記の概念が修

正される可能性があることに留意が必要である。

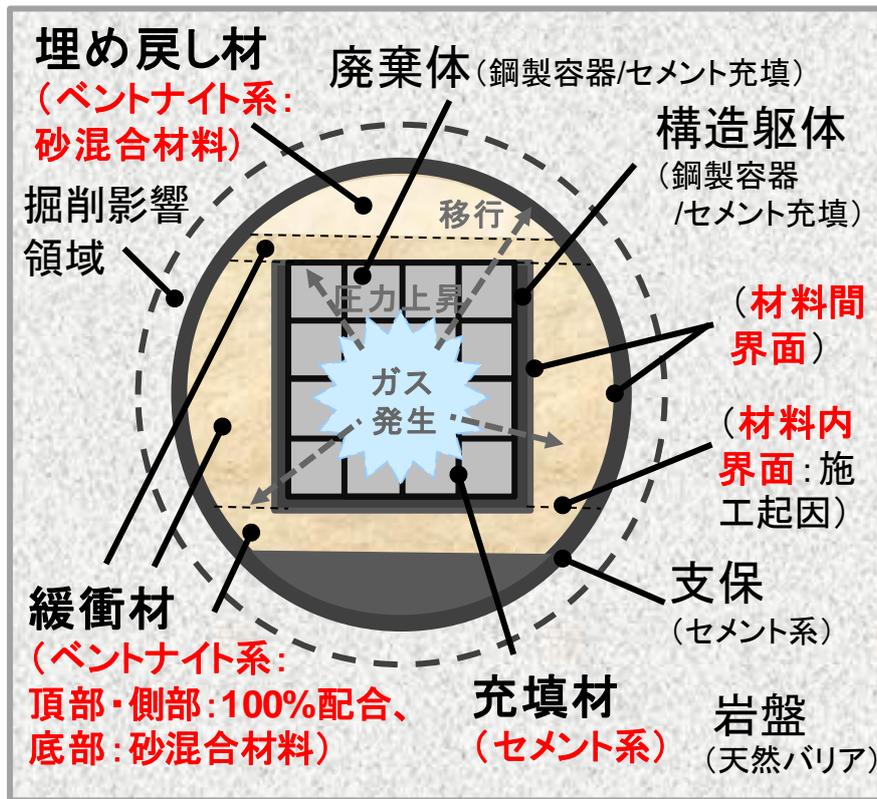


図 1.2.1-1 本調査研究において想定対象とする TRU 廃棄物処分の人工バリアの概念図

表 1.2.1-1 本調査研究において想定する人工バリア材料とその仕様（スペック）や要求機能

部位	材料	スペック	要求機能
廃棄体容器	鋼材	ステンレス	止水性、低拡散性、収着性
充填材	セメント系（モルタル）	強度30N/mm ²	止水性、低拡散性、収着性
構造躯体	鋼材	厚さ5cm（1mm厚SM490他）	安全性、形状確保
緩衝材（上部/側部）	ベントナイト系	100%クニゲルV1, 密度1.36Mg/m ³	止水性、低拡散性、収着性
緩衝材（底部）	ベントナイト系	70%クニゲルV1+砂30%, 有効粘土密度1.36Mg/m ³	止水性、低拡散性、収着性
埋め戻し材	ベントナイト系	有効粘土密度1.2Mg/m ³ 以上（混合材料他）	収着性、低拡散性
支保/インバート	セメント系（コンクリート）	（天然バリアを考慮し決定）	安全性、形状確保

1.3 本事業のこれまでの成果概要

ここでは、まず始めに本事業のこれまでの成果概要について述べる。

検討の背景として、前節（「1.1 背景」および「1.2 目的」を参照）で述べたように、まず前フェーズ（平成 19-24 年度）の調査研究[5][6][7][8][9][10]によって抽出された解決すべき重要度の高い課題が取りまとめられていることがある。これを踏まえ、今フェーズ（平成 25-29 年度）の検討では、前フェーズの検討で顕在化した課題の解決に資する実施計画を策定したうえで、新たな調査研究を推進している。

まず、平成 19-24 年度において実施された「ガス移行挙動の評価」の調査研究においては、TRU 廃棄物処分事業における精密調査地区の選定スケジュールを念頭に置き、ガス移行データやガス移行挙動評価結果の提供による貢献を目指して、平成 19（2007）年度～平成 24（2012）年度の 6 年間（当初の 5 年を 1 年延長）を 1 フェーズとした研究開発期間が設定された。当該期間においては、処分事業の進展に伴ってその都度求められるニーズに則した成果の提示を念頭に置きつつ、主に第 2 次 TRU レポートで抽出された課題（「1.1 背景」および「1.2 目的」を参照）の解決を目的として、TRU 処分施設の人工バリアを構成する材料、特にベントナイト緩衝材中におけるガス移行特性の把握に重点をおき、人工バリアの長期安定性評価や性能評価におけるガス影響評価の信頼性の向上を図ることを目指し、以下に示す検討を実施した。

- ・ ガス移行に関する材料特性データの取得
- ・ モデル化／解析手法の高度化
- ・ ガス移行挙動評価手法の構築

表 1.3.1-1 に、第 2 次 TRU レポートで提示された解決すべき課題に対して本事業で取り組んだ検討項目と内容を整理して示す。

なお、当該期間においては、上記の検討に加え、「人工バリア長期性能評価技術開発」のうち、人工バリアの長期挙動の評価（以下、人工バリア長期挙動評価）における人工バリアの長期変遷に係る成果や知見を反映した、ガス発生影響と人工バリア変遷との連成評価の可能性についても、適宜評価しつつ検討を行い、得られた成果について、最終年度（平成 24 年度）に総合評価としての 6 年間の取りまとめ報告書を作成している。

表 1.3.1-1 第2次 TRU レポートで提示された解決すべき課題に対して本事業で取り組んだ検討項目と内容

	第2次 TRU レポートで提示された ガス移行挙動評価で解決すべき主な課題	本事業でこれまでに取り組んだ調査研究内容 (平成 19-24 年度の「ガス移行挙動評価」)	
		検討項目	検討内容
1-6	<ul style="list-style-type: none"> ・ 解析に必要なデータの取得： 地下水条件・応力条件・飽和度条件等の異なる試験条件でのガス移行特性データのほか、再冠水過程をより現実的に評価するためにも、ヒステリシス特性の把握を含めた吸水（imbibition）過程に対する二相流パラメータの取得を行うことが必要である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ガス移行に関する材料特性データの取得 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 処分施設の再冠水時やガス移行時のベントナイト緩衝材の挙動解明に資する、応力や飽和度（サクション）を制御した要素試験を実施し、力学・二相流特性値を取得した ・ ガス注入圧力を制御した要素試験により、ガス移行モード（圧力依存性）に関する破過現象メカニズムを把握した
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 連成モデルの開発： 膨潤性を有する粘土系材料は応力場の影響を受ける可能性が高く、応力-物質移行を連成させた気液移行モデルの開発が必要である。 ・ 解析ツールの高度化開発： 各種媒体の評価に適切なモデルを統合した解析ツールの開発を行うとともに原位置試験による確証を行う必要がある（これにより信頼性の高い評価が可能となる）。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ モデル化・解析手法の高度化 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 選定した既存の気液二相流モデル（圧力依存透過特性モデルおよび力学連成モデル）と解析コードを用い、要素試験で見られた現象の再現とモデルの確証に関する検討を通して解析手法を高度化したとともに、破過現象メカニズムのモデル化した
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 既往の安全評価における不確実性の低減： 既往の安全評価に関し、これまでの保守的な仮定条件を主としたガス発生影響評価のみならず、現実的な条件での評価が必要である。このためには、TRU 廃棄物の処分環境及び材料の多様性に起因する潜在的な不確実性を低減させていく必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ガス移行挙動評価手法の構築 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 潜在する不確実性の低減に資する、既往の安全評価シナリオ開発手法（第2次 TRU レポート等）の高度化と、現実的なガス移行シナリオの構築とガス移行挙動評価手法に関わる検討

また、「ガス移行に関する材料特性データの取得」、「モデル化・解析手法の高度化」、「ガス移行挙動評価手法の構築」の3つの項目は、お互いに連携を取り合い進めていくものとした。

3つの検討実施項目の相互関係を図 1.3.1-1 に示す。

この中で特に「ガス移行挙動評価手法の構築」においては、これまでに詳細な検討が成されなかった「安全評価の観点からガス移行挙動が処分場にどのような影響が想定されるのか」を評価するための手法を構築するものであり、処分場で現実的に想定されるガス移行に係る現象を時系列的な評価シナリオとして構築するものであるが、その根拠に実現象の把握（ガス移行に関する材料特性データの取得）や実現象のメカニズムの妥当性や再現性の確認（モデル化／解析手法の高度化）が必要となってくる。これが各検討項目で連携が必要な理由である。

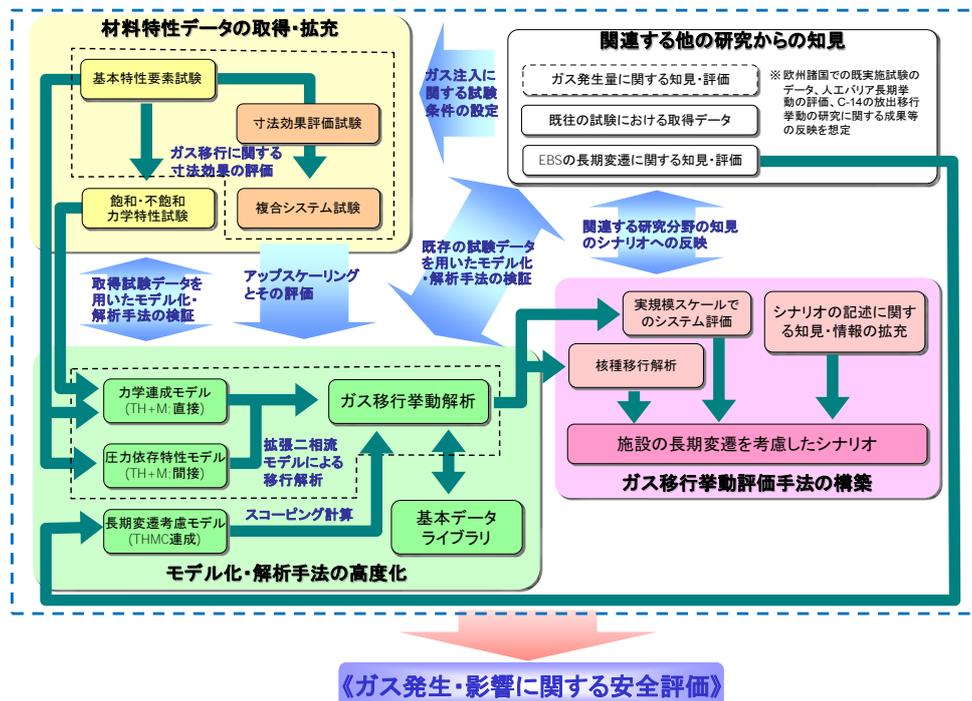


図 1.3.1-1 検討実施項目（前フェーズ：平成 19-24 年度）の相関

検討の結果、その成果から表 1.3.1-2 に示されるような課題が抽出された。

表 1.3.1-2 検討（前フェーズ：平成 19-24 年度）の成果より抽出された課題

課題の項目	課題の内容
<ul style="list-style-type: none"> ・ ガス移行挙動評価手法に関する課題 	<ul style="list-style-type: none"> ・ TRU 廃棄物の他グループや容器などを考慮した現実的なガス移行シナリオ構築の余地が存在 ⇒課題解決のためには、最新の研究結果を整理し、TRU 廃棄物処分技術検討書（第2次TRUレポート）のガス発生量、発生時期を再検討し、必要に応じ修正を施す必要がある
<ul style="list-style-type: none"> ・ モデル化、解析手法に関する課題 	<ul style="list-style-type: none"> ・ モデル化・解析手法の検討において、連成問題への対応への余地が存在 ⇒課題解決のためには、複合材料システム（セメント・ベントナイト）の連成（THMG）モデル化について、既存の連成解析コードを利用することを前提とした、当該コードのガス問題への適用性確認とモデル化・解析手法の検討を進めていく必要がある
<ul style="list-style-type: none"> ・ 材料特性データの取得に関する課題 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ベントナイトに係るガス移行の知見について十分把握されておらず、セメントについては殆ど把握されていない。また、人工バリアの複合材料システム（セメント・ベントナイト・界面）のガス移行挙動評価に関する検討には未着手 ⇒課題解決のためには、ベントナイト、セメント系材料（の一部）のガス移行に関する課題を整理したうえで、複合材料システムのガス移行データ取得に着手（必要な試験を実施）し、さらに複合材料システムや現実的な施工状況を反映したガス移行挙動の把握のためのシステム試験の検討を実施する必要がある

そこで、今フェーズ（平成 25-29 年度）で新たに着手した「ガス移行連成挙動評価手法の開発」では、表 1.3.1-2 で示される課題解決のために、以下に示す 4 つの項目を推進した。

- ① ガス移行評価シナリオの拡張（前フェーズ「ガス移行挙動評価手法の構築」の課題に対応）
- ② ガス移行連成挙動解析ツールの高度化（前フェーズ「モデル化／解析手法の高度化」の課題に対応）
- ③ ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充（前フェーズ「ガス移行に関する材料特性データの取得」の課題に対応）
- ④ セメント系材料のガス移行挙動データの取得（セメント系材料特性に関する知見が不足していたため新たに課題提起して対応）

なお、本事業で目標とする成果は、“開発した「ガス移行連成挙動評価手法」によって施設成

立性が評価できること”であり、具体的には人工バリアシステムに対するガスの影響（どの時期に・どのような現象が生じて・EBS 全体の挙動にどのような影響をもたらすか）を確実に把握できることである。またその成果は、“処分実施主体（NUMO 等）が将来的に行うことになっている、予備的安全評価のために必要な安全評価手法の整備に活用されること”を想定している。

図 1.3.1-2 は、上記のような成果目標等を想定した場合、これまでの検討経緯と実績を踏えつつ、TRU 廃棄物処分施設の安全評価にも関連したガス移行連成挙動を評価するのに必要な検討の流れや展開を、概念図として示したものである。

今フェーズの調査研究は、図 1.3.1-2 で示す流れに則して実施しているが、その根底には表 1.3.1-1 で示したような TRU レポート（第 1 次および 2 次）より得られた知見と解決すべき課題があり、表 1.3.1-2 で示したように、これらの記述内容における課題解決のための調査研究を展開している。一方で、平成 9-18 年度においてはガス移行に係る原位置試験を中心とした研究である GMT プロジェクト[4]で得られた知見があるが、本事業の調査研究で必要とされた試験や解析の具体的な進め方を構築するにあたり、このプロジェクトにおける調査研究手法も参考としている。図 1.3.1-3 に、上記の背景を踏まえて平成 25 年度に策定した 5 カ年（H25-29）の全体実施計画を示す。

次項以降（1.3.1 ～1.3.4 項）に、本フェーズ（平成 25-29 年度）で検討する前述の①～④の 4 項目について、これまでの成果（平成 19-25 年度）の概要を記すとともに、その成果より抽出された課題（課題①：第 2 次 TRU レポートで抽出された課題、課題②：平成 19-24 年度の検討で抽出された課題）が本フェーズへどのように反映され、どのように検討が進められてきたかを整理して示す。

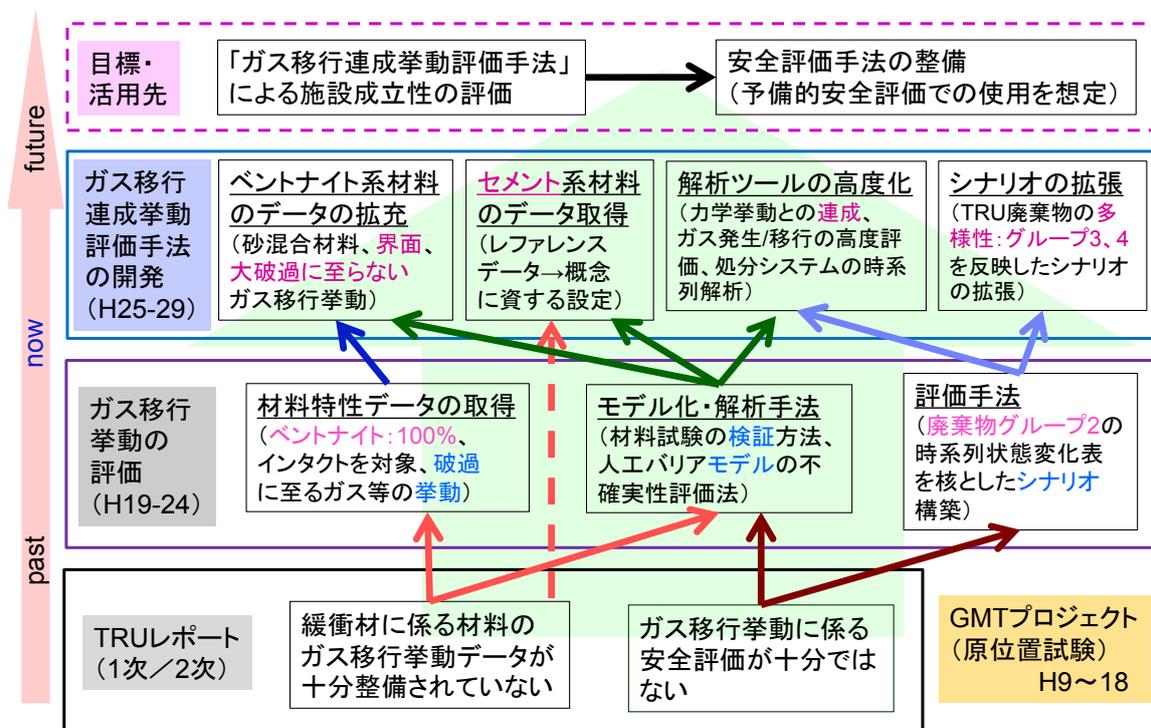


図 1.3.1-2 ガス移行連成挙動評価手法の流れや展開

事業項目	～平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度～
1. 実施計画策定 ／とりまとめ	(平成25年度までの「ガス移行挙動評価」の成果を反映)	全体計画の策定 年度の実施計画策定	年度の実施計画策定	年度の実施計画策定	年度の実施計画策定	年度の実施計画策定 5年間取りまとめ	目標成果 開発した「ガス移行連成挙動評価手法」による 施設成立性の評価 (技術移転) 安全評価手法の整備 予備的安全評価(NUMO)で使用 ・ガス移行連成解析モデルと評価手法 (不確定な要素) ・廃棄物インベントリー ・処分サハ環境 Safety Caseとしての説明性向上のために必要な検討 現実的な処分環境下でのガス発生挙動の評価 ・ガス発生挙動の解明とモデル化／移行モデルとの連成挙動評価
2. ガス移行評価シナリオの拡充	ガス移行挙動評価手法の構築 予備的安全評価に係る検討 システム試験の提案	・ガス移行挙動評価シナリオの高度化に係る課題抽出 ・廃棄物グループ3のシナリオ検討	・廃棄物グループ1および4のシナリオ検討 ・ガス発生に係る不確実性の検討	・ガス影響に対する評価体系の整備 ・整備した評価体系に基づく技術課題の解決に向けた検討	・天然バリアへの影響評価シナリオ検討 ・ガス移行モードに係る不確実性の検討 ・核種移行評価(ヨウ素129、炭素14を含む)の信頼性向上に資するガス移行シナリオの検討と重要シナリオの提示	・ガス移行挙動評価シナリオに関するとりまとめ	
3. ガス移行連成挙動解析ツールの高度化	材料試験の検証による解析・モデル化および不確実性の評価に係る検討 ガス移行データライブラリの構築	・課題の整理と実施項目の設定 ・確認および試解析の実施	・施設のガス発生や力学条件等のモデル化と確認 ・材料の変形構成モデル(THMおよびTHC連成)モデル化と確認			・ガス移行解析・モデル化手法の構築に関する知見の取りまとめ	
4. 人工バリアシステムのガス移行連成挙動評価 4-1. ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充	ベントナイト材料の基本特性および寸法効果(破過圧と供試体長の関係)についての検討	・課題の整理と試験条件の設定 ・ベントナイト砂混合材料の水分特性取得試験	・低圧条件下でのガス移行特性把握試験 ・膨潤変形特性取得試験 ・ガス移行試験の複合システム化に係る予備検討	・ガス発生条件(ガス圧)等を考慮した界面のガス移行特性把握試験 ・圧密変形特性取得試験	・せん断強度特性取得試験	・ベントナイト系材料のガス移行特性のとりまとめ ・ベントナイト砂混合材料の材料特性のとりまとめ ・ガス移行試験の複合システム化に係る取りまとめ	
4-2. セメント系材料のガス移行挙動データの取得		・セメント系バリアのガス移行挙動の課題の整理と試験条件の設定 ・予備データの取得	・セメント系バリアのガス二相流特性把握試験(透気性を有するモルタル供試体) ・現実的なセメント系材料(充填材)の特性や界面(施工継ぎ面)を考慮した気液二相流特性の把握試験			・セメント系バリアのガス移行挙動に係る知見のとりまとめ	
研究の評価			中間評価(到達点および課題の確認、全体計画の見直し)			総合評価 成果の取りまとめ 新たな課題の確認	

図 1.3.1-3 平成 25 年度に策定した 5 年 (H25-29) の全体実施計画

1.3.1 ガス移行評価シナリオの拡張

本項目では、平成 19-24 年度に実施した「ガス移行挙動評価手法に関する検討」[5][6][7][8][9][10]にて構築した手法（図 1.3.1-4、「ガス移行挙動高度化検討フロー」）をもとに、シナリオおよび FEP の拡張のための予備検討を、TRU 概念に係る最新の知見等を参考として実施するものとした。

そこで平成 25 年度[11]以降の検討では、平成 24 年度までに検討した TRU 廃棄物グループ 2 の処分概念以外のシナリオ構築に係る検討等を行うこととし、このうち平成 25 年度の検討においては廃棄物グループ 3 の処分概念（セメント系バリア材料を主体とした緩衝材を設置しない処分概念）を対象としたガス移行評価シナリオの構築等を行った。

平成 26 年度[12]は、上記成果に加えて廃棄物グループ 1 の処分概念（グループ 2 と同じく人工バリアに緩衝材を設置する処分概念）およびグループ 4（グループ 3 と同じくセメント系バリア材料を主体とした緩衝材を設置しない処分概念）を検討対象として、全廃棄物グループ（1～4）処分概念のガス移行評価シナリオを構築した。さらに、各廃棄物グループとの整合性を考慮した安全評価上の課題をシナリオから抽出・整理したとともに、シナリオの不確実性要因の一つとなるガス発生メカニズムとプロセスに関し、現状での課題を整理した。

具体的な実施内容を以下に示す。

(1) TRU 廃棄物処分概念全体を対象としたシナリオの構築と関連する不確実性の特定及び安全評価上の課題抽出

平成 25 年度までのグループ 2 および 3 の処分概念を対象としたシナリオ検討成果をベースに、他のグループを対象としたシナリオを構築し、シナリオ設定上の不確実性を特定したうえで、技術課題を抽出した。主要な検討項目と成果は以下の通りである。

① 各グループの特徴の整理および状態変化表の作成

第 2 次 TRU レポートおよびの処分概念を対象に、残されたグループ 1 と 4 の特徴を整理し、それぞれについて、状態変化表、安全機能の展開表、統合 FEP の設定、統合 FEP 関連図を作成した（図 1.3.1-5 および図 1.3.1-6）。

② シナリオ整理シートの作成

上記「①」の作業をベースに、シナリオ設定上での不確実性を考慮した上で、各グループの整合性をとりつつシナリオ整理シートを取りまとめた（図 1.3.1-7 および図 1.3.1-8）。

③ 予備的安全評価における不確実性の検討と関連する技術課題の抽出

シナリオ構築上の不確実性を考慮した整理シートをもとに、ガス影響に係わる予備的安全評価に向けての不確実性を特定し、技術課題として取りまとめた。この場合、各グループでの共通点、特異点を明確にして課題を整理した（図 1.3.1-9 および図 1.3.1-10）。

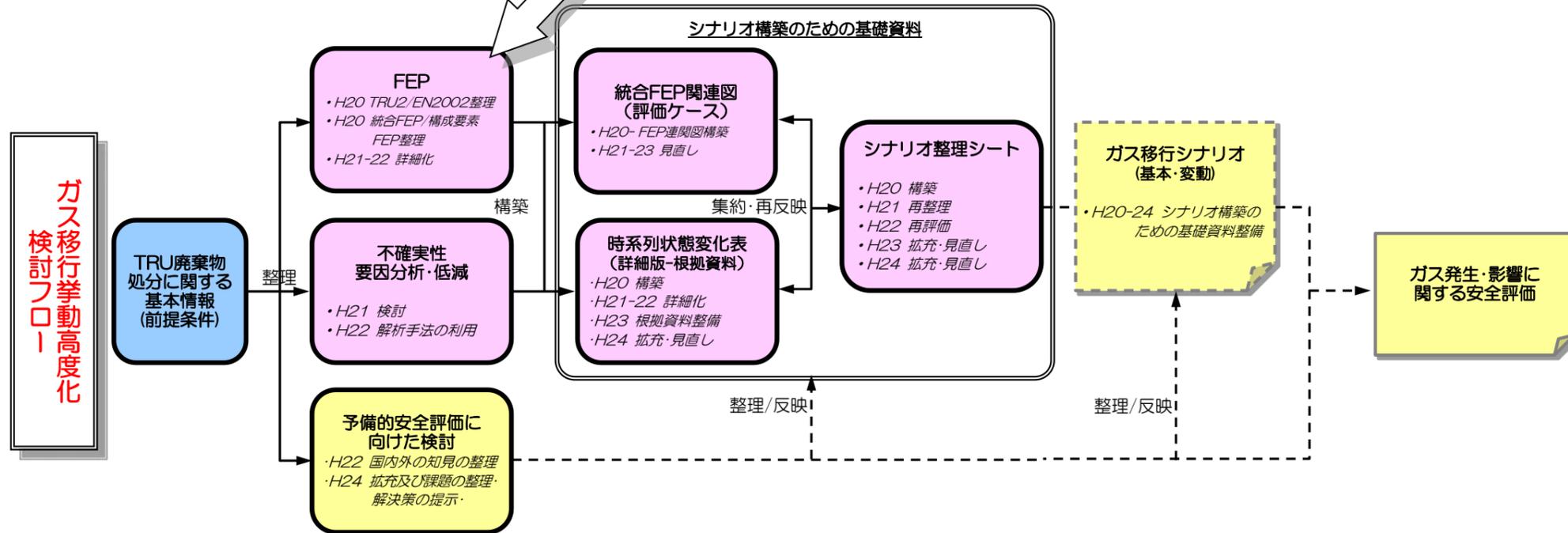
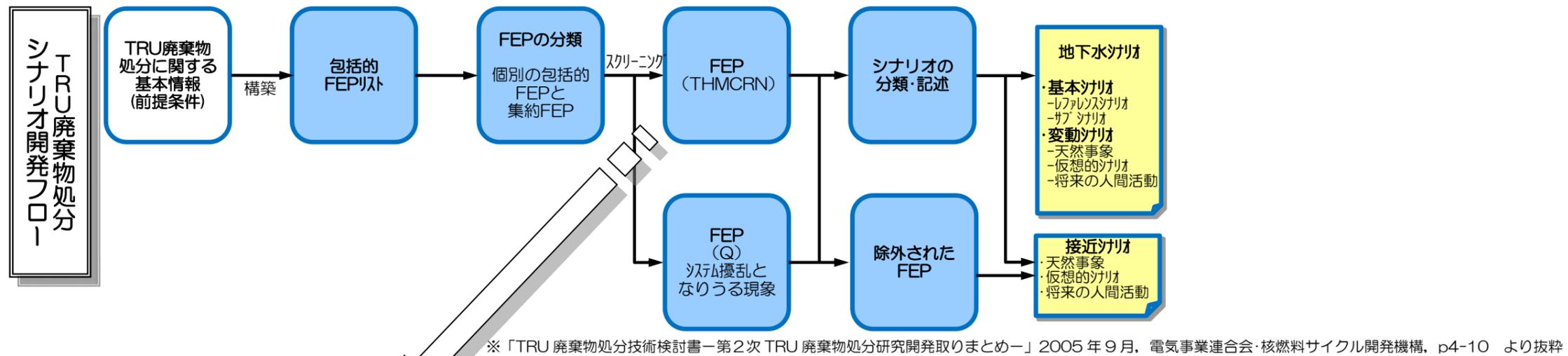
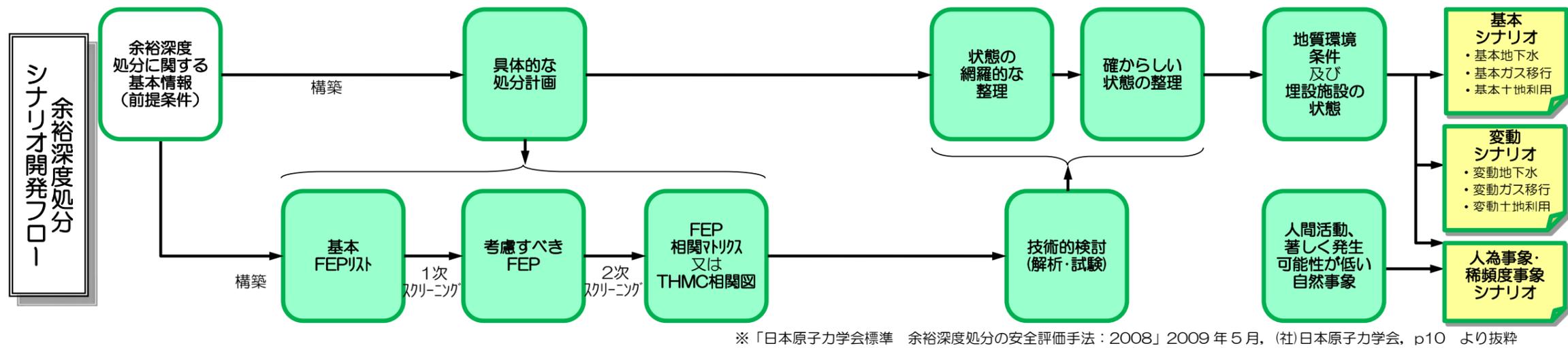


図 1.3.1-4 ガス移行挙動高度化検討フローと既存の処分シナリオ開発フロー

(2) TRU 廃棄物処分概念全体を対象としたシナリオの構築と関連する検討

これまでの検討で明らかとなったガス発生に関わる不確実性（種類、発生速度、発生量）に着目して、各グループでのガス発生源（ソース）と発生メカニズム、処分環境（酸化・還元、水分量、高 pH 環境、微生物の存在等）が及ぼす影響について最新の知見を整理した。

また、第 2 次 TRU レポートに提示されたガス発生源の情報をベースに、概略定量検討を実施し、第 2 次 TRU レポートに提示されたガスの種類と発生速度・発生量と比較するとともに、影響因子との関連を整理し課題として取りまとめた。

変化の段階	掘削直後	廃棄体定置中：水との接触防止	埋戻し～内部飽和	廃棄体から核種放出	天然バリアでの閉じ込め
状態イメージ					
主要な変化	支保工外周のドレーンシステムで処分坑道内への地下水の浸入抑制	支保工外周のドレーンシステムで処分坑道内への地下水浸入抑制	ドレーンシステムの停止により処分坑道に還元地下水が浸透	ドラム缶が損傷し、内部廃棄物より放射性核種（ヨウ素が主）が放出	処分坑道内の核種、ガスは天然バリア中に放出
廃棄物 [200 ㎏ドラム缶]	-	ドラム缶内の空隙はモルタルで充填、初期強度、水はなし	高 pH 間隙水の廃棄体の隔離性能で水との接触なし 廃棄体パッケージの水密性損傷に伴う高 pH 還元地下水と接触	高 pH 還元地下水との接触⇒腐食⇒水素ガス発生⇒ドラム缶損傷⇒放射性核種の地下水への溶出	廃棄物からの放射性核種の大部分は高 pH 還元地下水に溶出し、移流場で天然バリアに放出 ガスソースはなくなる
炭素鋼廃棄体パッケージ	-	ドラム缶 4 本を収納、空隙はモルタル充填、水分なし モラリスとして強度確保 （廃棄体パッケージ設置後施工）	高 pH の還元地下水との接触⇒腐食⇒腐食膨張⇒水素ガス発生 充填モルタルの亀裂発生 拡散場	腐食による二次生成物の発生・沈着 充填モルタルに亀裂発生 核種、ガスは亀裂中を拡散場で移行	腐食生成物の一部は取捨核種ともに場に残留 残存ガスはすべて外部に放出
パッケージ間隙充填モルタル	-	（廃棄体パッケージ設置後施工） 高 pH 環境、水和熱の発生⇒炭素鋼との反応で腐食開始（速度は遅い）	地下水の浸透 廃棄体パッケージの腐食膨張による切れる発生 拡散場	Ca の溶出・沈殿により、亀裂性媒体を形成 ガスは亀裂内を二相流で移行 核種は移流場で移行	処分坑道内には Ca の溶解・沈殿が繰り返し起こり、時間の経過とともに pH 値が中性に向かう
鉄筋コンクリートピット	-	埋戻まで力学的強度を維持	間隙水との接触⇒内部への浸透 鉄筋の腐食膨張⇒ガス発生⇒亀裂発生 物質移行は拡散場	亀裂媒体、Ca の溶出・沈殿 拡散場での核種移行、ガス移行（二相流）	Ca の溶出・沈殿 亀裂媒体から多孔質媒体に移行 移流場での物質移行
ベントナイト緩衝材	-	不飽和環境	外周からの地下水の浸透⇒不飽和から飽和に移行⇒膨潤圧発生 物質移行は拡散場	高 pH 間隙水の影響⇒変質の推進 放射性核種の移行遅延 二相流でのガス移行 破過の発生⇒自己修復性で拡散場維持	劣化により多孔質媒体に変化 拡散場から移流場
埋戻しコンクリート	-	（底部・側部・頂部に施工） 自立する強度は期待 水和熱の発生 廃棄体との接触による腐食開始	外部からの圧力、水和熱、廃棄体の腐食膨張等によりひび割れ発生、還元地下水の浸透による Ca の溶出（高 pH 環境の生成）	Ca の溶出・沈殿により、亀裂性媒体を形成 ガスは亀裂内を二相流で移行 核種は移流場で移行	処分坑道内には Ca の溶解・沈殿が繰り返し起こり、時間の経過とともに pH 値が中性に向かう
鉄筋コンクリート支保工	水圧を除く岩盤からの応力への抵抗（背後での止水と排水システム）⇒処分坑道内部への地下水浸透防止	内部の充填圧で応力均衡が保持 乾燥収縮、拘束圧による複雑な応力履歴⇒ひび割れが発生	内外の圧力によるひび割れ発生、鉄筋の腐食膨張⇒ひび割れの促進⇒水素ガスの発生	Ca の溶出・沈殿により、亀裂性媒体を形成 ガスは亀裂内を二相流で移行 核種は移流場で移行	処分坑道内には Ca の溶解・沈殿が繰り返し起こり、時間の経過とともに pH 値が中性に向かう
EDZ+岩盤	EDZ：掘削による応力解放⇒支保設置後回復、不飽和領域を形成 岩盤：泥岩、飽和、還元雰囲気、500m の初期応力：約 10MPa	岩盤クリープ変形により、EDZ 内の応力場の回復 不飽和、高 pH 環境	岩盤クリープ、水圧の作用により EDZ 内の応力回復、ドレーンシステム停止による飽和環境、支保工からの Ca 溶出	天然バリアとしての機能 放射性核種の移流場での移行 ガスは処分坑道外周に蓄積し、坑道に沿って移動する可能性あり⇒放射性ガスの地表への短経路形成の可能性あり。	天然バリアとしての核種の閉じ込め機能が機能

図 1.3.1-5 TRU 廃棄物グループ 1 の処分概念を対象とした施設の状態変化表の一例

変化の段階	掘削直後	廃棄体定置中：水との接触防止	埋戻し～飽和	廃棄体から核種放出	天然バリアでの閉じ込め
状態イメージ					
主要な変化	支保工外周のドレーンシステムで処分坑道内への浸出水なし	支保工外周のドレーンシステムで処分坑道内への浸出水なし	ドレーンシステムの停止により処分坑道に還元地下水が浸透	ドラム缶が損傷し、内部廃棄物より放射性核種が放出	処分坑道内の核種、ガスは一部を除き天然バリアに放出
廃棄物 [200 ㎏ドラム缶]	-	ドラム缶内の空隙はモルタルで充填、初期強度、水はなし 高 pH 状態	廃棄体の隔離性能で水との接触なし、強度維持 廃棄体パッケージの水密性損傷に伴う高 pH 還元地下水と接触	高 pH 還元地下水との接触⇒腐食⇒水素ガス発生⇒ドラム缶損傷⇒放射性核種の地下水への溶出⇒有機物分解による放射性 C14、CH4 ガスの発生	廃棄物からの放射性核種の大部分は高 pH 還元地下水に溶出し、移流場で天然バリアに放出
炭素鋼廃棄体パッケージ	-	ドラム缶 4 本を収納、空隙はモルタル充填、水分なし モラリスとして強度確保 空気中の水分により腐食開始	高 pH の還元地下水との接触⇒腐食⇒腐食膨張⇒水素ガス発生⇒廃棄体パッケージとしての水密性の損傷	腐食による二次生成物の発生・沈着⇒核種の一部吸着 ガスは不飽和部を通過、核種を含む地下水は移流場で移行	腐食生成物の一部は取捨核種ともに場に残留 残存ガスはすべて外部に放出
充填モルタル	-	（廃棄体パッケージ設置後施工） 高 pH 環境、水和熱の発生⇒炭素鋼との反応で腐食開始（速度は遅い）	拘束圧、水和熱および廃棄体の腐食膨張によりひび割れ発生、地下水の浸入によりひび割れは飽和（Ca の溶出）	Ca の溶出・沈殿により、亀裂性媒体を形成 ガスは亀裂内を二相流で移行 核種は移流場で移行	処分坑道内には Ca の溶解・沈殿が繰り返し起こり、時間の経過とともに pH 値が中性に向かう
埋戻しコンクリート	-	（底部・側部・頂部に施工） 自立する強度は期待 水和熱の発生 廃棄体との接触による腐食開始	外部からの圧力、水和熱、廃棄体の腐食膨張等によりひび割れ発生、還元地下水の浸透による Ca の溶出（高 pH 環境の生成）	Ca の溶出・沈殿により、亀裂性媒体を形成 ガスは亀裂内を二相流で移行 核種は移流場で移行	処分坑道内には Ca の溶解・沈殿が繰り返し起こり、時間の経過とともに pH 値が中性に向かう
鉄筋コンクリート支保工	水圧を除く岩盤からの応力への抵抗（背後での止水と排水システム）⇒処分坑道内部への水の浸入防止	内部の充填圧で応力均衡が保持 乾燥収縮、拘束圧による複雑な応力履歴⇒ひび割れが発生	内外の圧力によるひび割れ発生、鉄筋の腐食膨張⇒ひび割れの促進⇒水素ガスの発生	Ca の溶出・沈殿により、亀裂性媒体を形成 ガスは亀裂内を二相流で移行 核種は移流場で移行	処分坑道内には Ca の溶解・沈殿が繰り返し起こり、時間の経過とともに pH 値が中性に向かう
EDZ+岩盤	EDZ：掘削による応力解放⇒支保設置後回復、不飽和領域を形成 岩盤：泥岩、飽和、還元雰囲気、500m の初期応力：約 10MPa	岩盤クリープ変形により、EDZ 内の応力場の回復 不飽和、高 pH 環境	岩盤クリープ、水圧の作用により EDZ 内の応力回復、ドレーンシステム停止による飽和環境、支保工からの Ca 溶出	天然バリアとしての機能 放射性核種の移流場での移行 ガスは処分坑道外周に蓄積し、坑道に沿って移動する可能性あり⇒放射性ガスの地表への短経路形成の可能性あり。	天然バリアとしての核種の閉じ込め機能が機能

図 1.3.1-6 TRU 廃棄物グループ 4 の処分概念を対象とした施設の状態変化表の一例

変化の段階	掘削直後	廃棄体定置中：水との接触防止	埋戻し～内部飽和	ベントナイト機能喪失まで	天然バリアでの閉じ込め
状態イメージ					
統合 FEP 関連図	-	-			
廃棄体			腐食⇒腐食膨張・ガス発生	核種溶出、ガス発生	
ドラム缶と充填材				腐食生成物	
炭素鋼パッケージ+充填			腐食⇒腐食膨張・ガス発生	腐食生成物	
ビット内部充填					
コンクリートビット				亀裂発生	
ベントナイト緩衝材					
コンクリート支保工				亀裂発生	
EDZ+岩盤	不飽和				
ガス	発生部位	支保工鉄筋	支保工鉄筋、廃棄体パッケージ、ドラム缶	コンクリートビット、廃棄体パッケージ、ドラム缶、廃棄物	
発生速度 (推定)					
評価	ガス移行モード		ガス状、拡散、分散、亀裂内の移行、	ガス状、拡散、分散、亀裂内の移行	移流・分散・拡散
ケース	核種移行モード			溶解、分散・拡散	移流・分散・拡散
モデル設定			不飽和内ガス状移行、染盛	溶存ガス、二相流、カ学連成モデル (破過) として拡散移行	溶存ガス、二相流として移流

図 1.3.1-7 廃棄物グループ 1 の処分概念を対象としたシナリオ整理シート

変化の段階	掘削直後	廃棄体定置中：水との接触防止	埋戻し～内部飽和	廃棄体から核種放出	天然バリアでの閉じ込め
状態イメージ					
統合 FEP 関連図	-	-			
廃棄物				核種溶出、ガス発生	
ドラム缶と充填材			腐食⇒腐食膨張・ガス発生	腐食生成物	
炭素鋼パッケージ			腐食⇒腐食膨張・ガス発生	腐食生成物	
充填モルタル				亀裂発生	
埋戻しコンクリート				亀裂発生	
コンクリート支保工				亀裂発生	
EDZ+岩盤	不飽和				
ガス	発生部位	地表から酸素を含む大気を取り入れ	支保工鉄筋、廃棄体パッケージ、ドラム缶、有機物の分解	廃棄体パッケージ、ドラム缶、廃棄物	廃棄物
発生速度 (推定)		大気がコンクリート中に浸入し不飽和領域を形成			
評価	ガス移行モード		ガス状、拡散、分散、亀裂内の移行、	ガス状、拡散、分散、亀裂内の移行	移流・分散・拡散
ケース	核種移行モード			溶出、溶解、移流・分散・拡散	移流・分散・拡散
モデル設定			多孔質媒体と亀裂媒体中のガス移行モデル (拡散と二相流モデル)	亀裂媒体中のガス移行モデル (二相流モデル)	ガスは二相流から溶存ガスとして地下水流動モデルを適用

図 1.3.1-8 廃棄物グループ 4 の処分概念を対象としたシナリオ整理シート

不確実性の共通点	グループ	特異点
① ベントナイト緩衝材の破過によるガスの突出、汚染水の放出メカニズムとモデル(グループ1、2)	グループ1	・不飽和状態でのガス状I-129の放出と移行挙動
② 有機物の微生物分解によるガス発生メカニズムとモデル化(各グループ、特にグループ3、4)		
③ 金属腐食の表面積の算定(各グループ)	グループ2	・C14による放射性ガス発生メカニズムと発生量 ・廃棄体内以外での放射線分解によるガス発生の可能性
④ 還元、無酸素、高pH、塩水など複合環境下でのガス発生メカニズムとモデル(各グループ)		
⑤ 媒体の異方性の影響を大きく受けるガス移行挙動とミキシングセルとして扱う核種移行モデルとの整合性(グループ1、2)		
⑥ 周辺の地質環境により、放出されたガス移行シナリオの変化(各グループ)	グループ3	・セルロース、アスファルト固化体の微生物分解によるガス発生メカニズムとモデル化
⑦ 廃棄体容器(ドラム缶、ステンレスカニスター)の初期の核種閉じ込め性に対する評価が明確でない(各グループ)		
⑧ 廃棄体およびパッケージ内のセメントモルタルの密実性がガス発生と移行挙動に与える影響(各グループ)	グループ4	・有機物の微生物分解によるガス発生メカニズムとモデル化 ・焼却灰のセメント固化の微生物分解によるガス発生
⑨ ガス消費のメカニズムとモデル化(各グループ)		
⑩ ガス挙動に関する形状や寸法の影響(各グループ)		
⑪ 腐食二次鉱物の核種移行への影響(還元性や収着性向上などのプラス要因)		

図 1.3.1-9 各廃棄物グループ処分のガス移行シナリオにおける不確実性の共通点と特異点

不確実性の整理	技術課題
①ベントナイト緩衝材の破過によるガスの突出、汚染水の放出メカニズムとモデル(グループ1、2)	⑥および⑩の不確実性ととも、ベントナイト緩衝材中のガス移行モードについては、形状および厚さ、力学特性、周辺環境(水圧)を考慮した状態変化の理解が不可欠
②有機物の微生物分解によるガス発生メカニズムとモデル化(各グループ、特にグループ3、4)	ガスソースの明確化とともに、微生物による有機物分解、ガスの消費メカニズムの究明とモデル化が必要
③金属腐食での表面積の算定(各グループ)	金属廃棄物の形状、寸法に関する情報整理
④還元、無酸素、高pH、塩水等の複合環境下でのガス発生メカニズムとモデル(各グループ)	⑥と⑧とも関連し、複合環境下での境界条件の違いによる腐食メカニズムの究明とモデル化
⑤媒体の異方性の影響を大きく受けるガス移行挙動とミキシングセルとして扱う核種移行モデルとの整合性(グループ1、2)	⑧と⑩とも関連し、異なる媒体中(亀裂媒体と高密度な多孔質媒体)でのガス移行挙動の究明
⑥周辺の地質環境により、放出されたガス移行シナリオの変化(各グループ)	周辺地質環境条件と処分場全体でのガス移行挙動の評価が必要
⑦廃棄体容器(ドラム缶、ステンレスカニスター)の初期の核種閉じ込め性に対する評価(各グループ)	不飽和～飽和環境でのドラム缶とキャニスターの核種閉じ込め性能の現実的な評価
⑧廃棄体およびパッケージ内のセメントモルタルの密実性がガス発生と移行挙動に与える影響(各グループ)	密実なモルタル中での腐食ガス発生とガス移行挙動の解明
⑨ガス消費のメカニズムとモデル化(各グループ)	微生物活動、固定化など消費メカニズムの解明
⑩ガス挙動に関する形状や寸法の影響(各グループ)	要素モデルでの挙動との実規模での相違点と適用性の究明
⑪腐食二次鉱物の核種移行への影響(還元性や収着性の向上などプラス要因)	腐食膨張や二次鉱物の特徴と影響の理解

図 1.3.1-10 各廃棄物グループ処分のガス移行シナリオで共通点する不確実性に係る技術課題

1.3.2 ガス移行連成挙動解析ツールの高度化

本検討では、ガス移行解析ツールの高度化を目的に、マルチスケール系（材料／領域）を対象としたガス移行に係る THMC 連成現象の解明促進に係る検討として、ガス移行挙動との関連性が示唆された変形場／力学場との連成事象に着目し、試験データを用いた確認計算等によって現象理解を進めるとともに、様々な不確実性や変動要因のモデル化を含めた解析手法の高度化を図るものとした。

また、ガス移行挙動に係るデータのさらなる蓄積と適用性向上のため、これまでに構築したガス移行データライブラリのデータ拡充と効果的な利用・再評価（確認）を進めるとともに、国内外の研究機関による成果を含めたデータの蓄積を継続することとした。

さらに、より複雑な現象解明のために次世代モデリング・コンピューティング技術を応用し、TRU 廃棄物処分施設の成立性および性能／安全評価に資する解析ツールとしての開発整備と高度化検討も進めていくものとした。

平成 26 年度は、これまでの検討[5][6][7][8][9][10][11]で整備したガス移行モデルの確認やデータベース（モデルパラメータ等）の更新を行うとともに、高度化を図った解析ツールによるガス移行解析（ガス移行試験の予察解析等）を実施し、TRU 廃棄物処分システムのモデリング上の不確実性（解析格子モデルの次元性に着目）したガス移行挙動の評価を行った。

具体的な実施内容を以下に示す。

(1) 人工バリア中のガス移行挙動の現象理解

本項目は、これまでに整備・確認されたガス移行モデルや解析ツール等（GETFLOWS[4][5][6][7][8][9][10][11][12][13]等）の活用、並びにこれらのガス移行挙動評価における適用性・信頼性向上と更なる高度化を目的として、当該ツールによるガス移行試験の予察解析等を実施し、ガス移行挙動の現象理解に資する検討を行ったものである。主要な検討項目と成果は以下の通りである。

1) ガス移行試験の予察解析

本項目と並行して、「1.3.3 『ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充』」の中で、ベントナイト供試体（乾燥密度 1.6Mg/m³、クニゲル V1）を用いたガス注入試験が実施された。この試験は、これまで実施してきたベントナイト供試体内での流路拡幅（大破過）を発生させ、破過を伴うガス移行挙動の現象理解を目的とした試験とは異なり、供試体中のガスが気液 2 相流れによって流動することを想定した低注入圧条件（但し、ベントナイト供試体の平衡膨潤圧以下）によるガス透気を試みたもので、国内外の既往の検討においても例の少ない人工バリア中の破過を伴わないガス移行挙動の現象理解を目的とするものであった。

本予察解析では、上記試験におけるガス透気時期の推定や試験期間中のモニタリング結果との比較検証を目的として、ガス注入試験系を模擬した予察解析を実施した。

予察解析の二相流パラメータとして、既往検討で同定・確認された 5 パターンの組合せ（表 1.3.2-1

および図 1.3.2-1、図 1.3.2-2)を適用した結果、解析結果(GETFLOWS による検討の一例)と実験値とが概ね整合することが確認でき(図 1.3.2-3)、累積排水量やガス透気量の時間変化を良好に予測可能であることが示唆された。

さらに、ガス透気試験のうち、解体調査を行った供試体 No.2(累積排水量の経時変化が定常化に至る傾向を示した供試体)の水飽和度の深度プロファイルと比較検証したところ、実測データは概ね予測されたデータと整合する結果となった(図 1.3.2-4)。

以上の検討により、既往検討で確認されたモデルとパラメータの妥当性、並びに信頼性を向上させた。

表 1.3.2-1 相対浸透率、毛細管圧力曲線を表現する構成モデル (vGモデル) [14]

相対浸透率 (vGモデル)	毛細管圧力 (vGモデル)
$k_{rw} = \sqrt{S_{we}}(1 - (1 - S_{we}^{1/m_w})m_w)^2$ $k_{rg} = \sqrt{S_{ge}}(1 - (1 - S_{ge}^{1/m_g})m_g)^2$ $S_{we} = (S_w - S_{wr})/(1 - S_{wr} - S_{gr})$ $S_{ge} = (S_g - S_{gr})/(1 - S_{wr} - S_{gr})$ $m_w = 1 - 1/n_w \quad m_g = 1 - 1/n_g$	$P_c = P_0 (S_{we}^{-1/m} - 1)^{1/n}$ $S_{we} = (S_w - S_{wr})/(1 - S_{wr} - S_{gr})$ $m = 1 - 1/n$

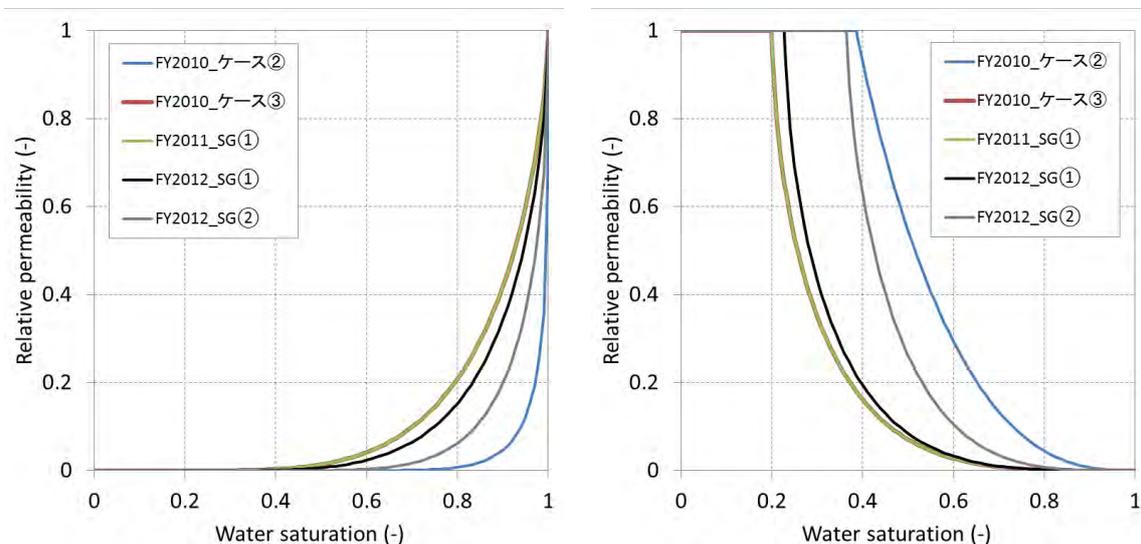


図 1.3.2-1 既往検討で同定された相対浸透率曲線 (左：水相、右：ガス相)

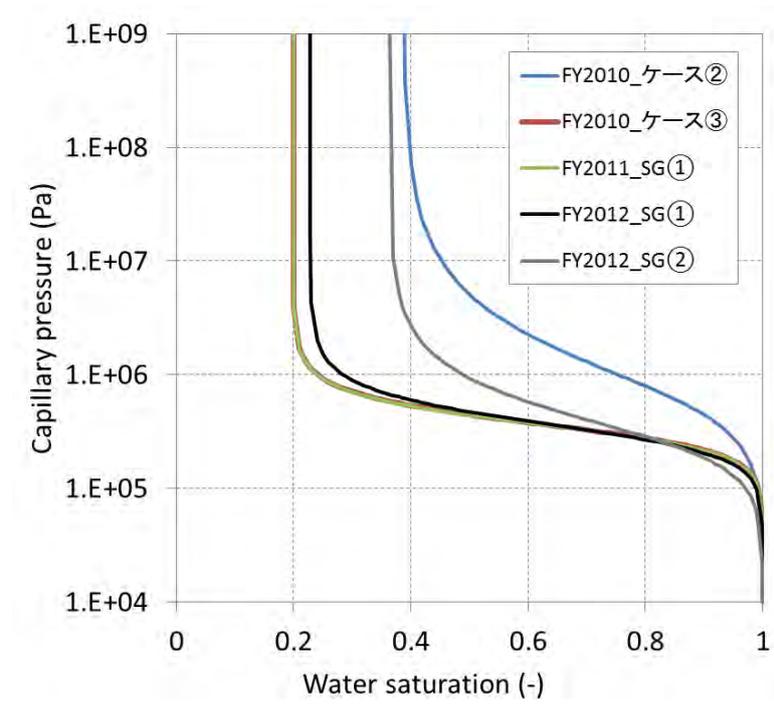


図 1.3.2-2 既往検討で同定された毛細管圧力曲線

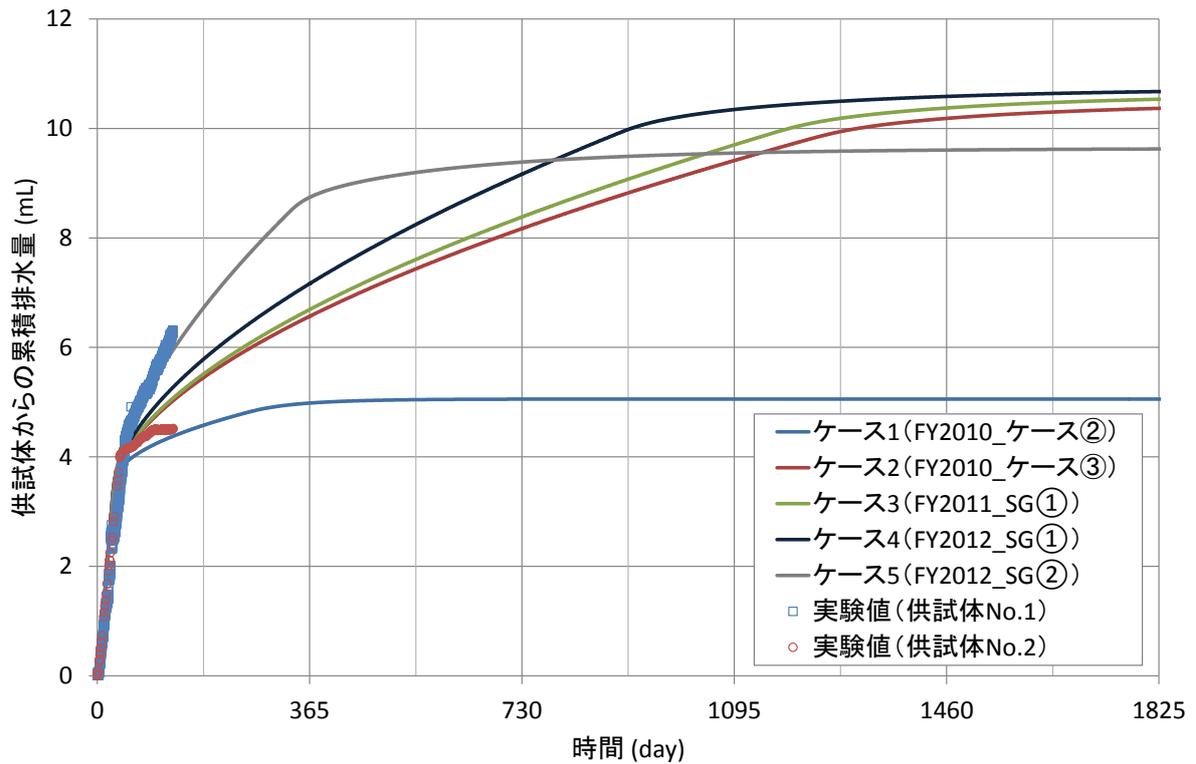


図 1.3.2-3 予察解析結果 (GETFLOWS による検討の一例) と 試験結果 (供試体上面からの累積排水量経時変化) との比較

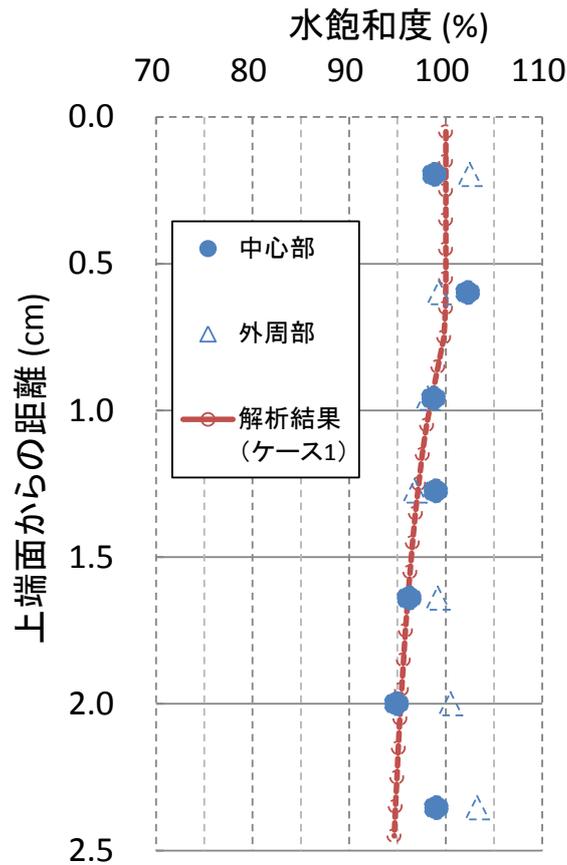


図 1.3.2-4 予察解析結果（GETFLOWS による検討の一例）と
試験結果（水飽和度の深度プロファイル）の比較

2) ガス発生モデリングの検討

人工バリア中のガス移行挙動は、処分施設内でのガス発生速度に大きく依存すると考えられるが、これまで処分施設の長期変遷を考慮したガス発生速度の検討例は少ない。

一方で、ガス発生速度は、廃棄体周囲の処分環境（水分状態など、図 1.3.2-5）等に強く影響を受けるため、廃棄体周囲で起こる THC 連成事象の現象理解や可視化も重要な視点の 1 つとなる。

ここでは、ガス発生速度の定量化やモデリングに資するため、廃棄体周辺での流体ダイナミクス（周囲からの水の移流、廃棄体からの熱発生に伴う温度変化、水蒸気発生・拡散・凝縮、相対湿度変化、ガス発生等）に着目した検討を進めた。

具体的には、TRU 廃棄物処分のリファレンス概念のうち廃棄物グループ 2 の概念を対象とした 2 次元断面モデルを構築したうえで、地球化学計算（ガス発生に係わる金属腐食反応等を考慮）と水・ガス二相流および物質移行解析を組み合わせた解析コードである TOUGHREACT[17]を用い、THC 連成解析を実施した。

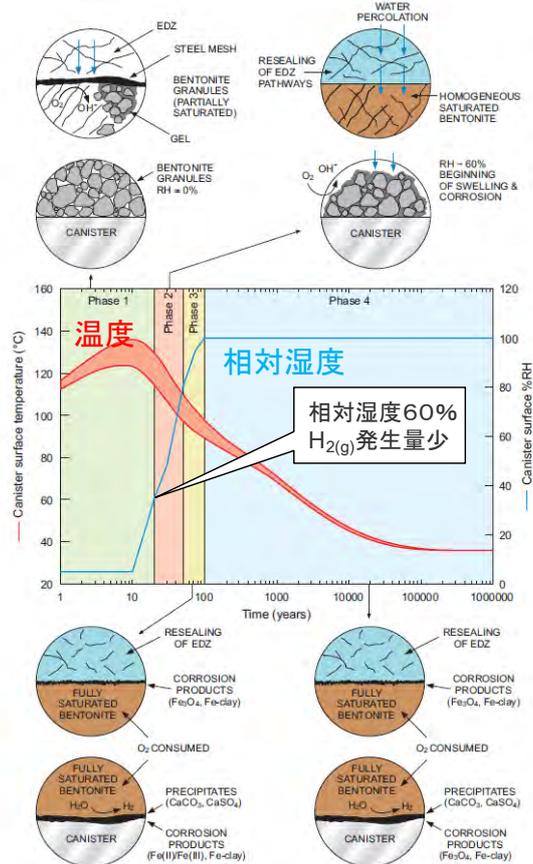


図 1.3.2-5 処分環境変化に伴うガス発生機構の概念[16]

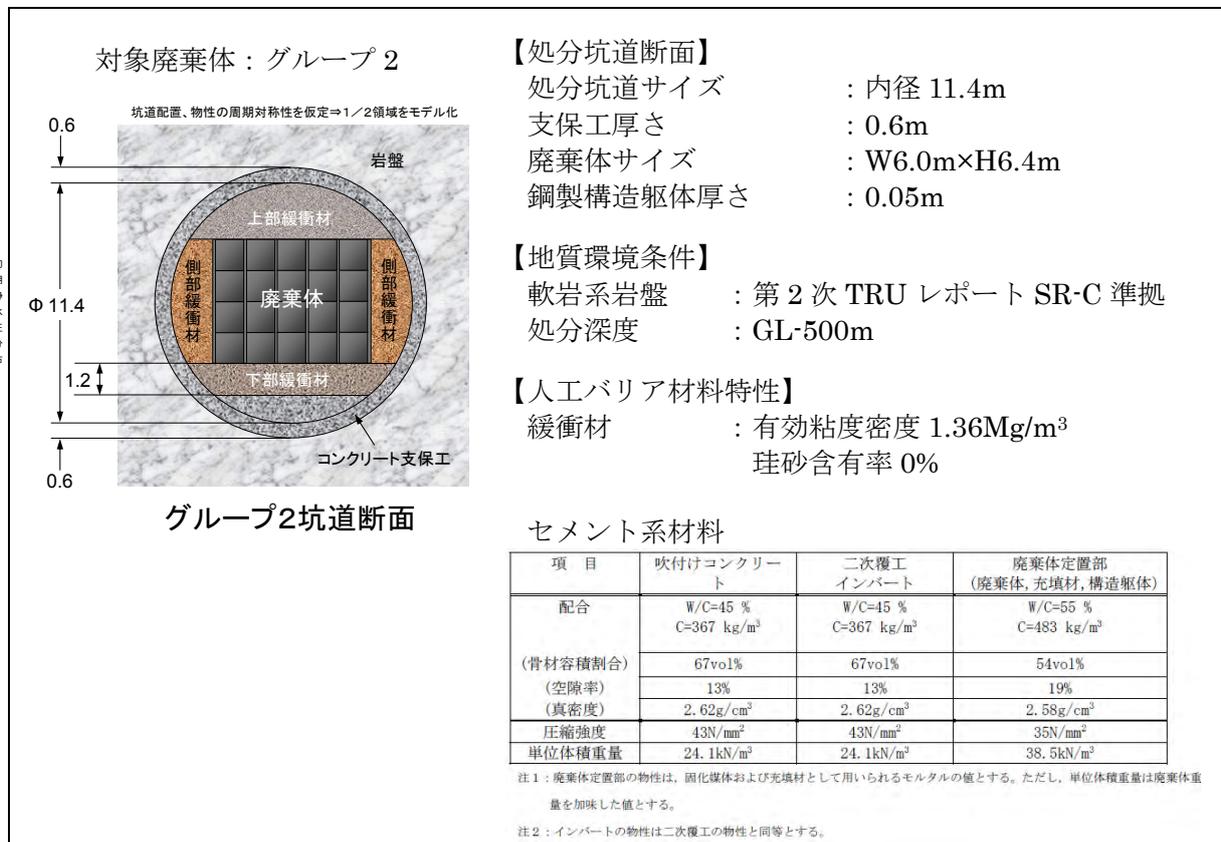


図 1.3.2-6 モデル化の対象とする処分システム

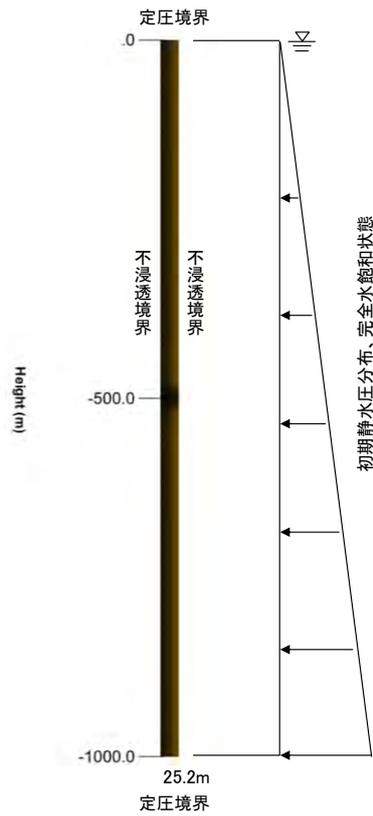


図 1.3.2-7 対象とする解析モデル（全体）と境界条件

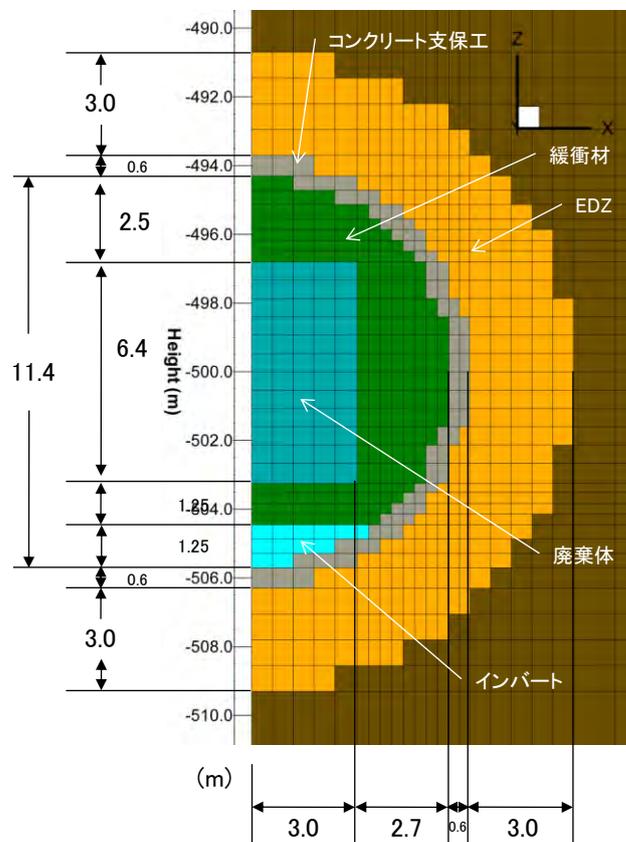


図 1.3.2-8 解析モデルの人工バリア周辺拡大図

検討では、地下水の組成は希薄溶液系であるとの仮定のもと、初期不飽和状態と飽和状態の 2 つを対象とし、廃棄体周辺のガス相圧力や水相飽和度、温度、水蒸気圧や各化学種濃度、ガスの流動方向の可視化等を行った。

その結果の一例として、実際の処分場で想定される環境と同じ不飽和状態を仮定した場合（図 1.3.2-9～図 1.3.2-18）、その初期段階では、周囲岩盤からの再冠水と廃棄体からの水素ガス発生によって、施設内部の圧力は上昇し、水飽和度も増加する結果となった。また、廃棄体からの発熱による温度上昇によって、水蒸気圧も上昇する結果となった。水相中の化学種に着目すれば、廃棄体に含まれる iron(Fe)が溶解し（ Fe^{2+} 濃度、iron(Fe)溶解量の上昇）、好気性腐食反応によって O_2 (aq)が速やかに消費される結果となった。その後、嫌気性腐食反応が支配的となり、iron(Fe)の溶解（ Fe^{2+} 濃度、iron(Fe)溶解量の上昇）は継続され、腐食生成物である magnetite(Fe_3O_4)の沈殿量が増加していく結果となった。

一方で、ガス発生メカニズムに着目すると、初期段階において廃棄体に含まれる鉄の好気性腐食反応が起こり、水分量も飽和状態を想定した場合と比較して少なく、ガス発生量が小さくなる結果が得られている。しかし、約 20 年後以降は、好気性腐食反応による溶存酸素の消費と周囲岩盤からの再冠水による水分量の上昇によって、嫌気性腐食反応が支配的となり、飽和状態を想定した場合とほぼ同じガス発生量となる結果となった（図 1.3.2-19）。

一連の検討の結果、処分場におけるガス発生・移行挙動に対しては、人工バリア周辺の環境変化が大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

このため、他の地下水組成の溶液系を考えた場合のガス発生挙動や他のガス発生機構を考慮したガス移行解析の必要性が今後の課題として示唆された。

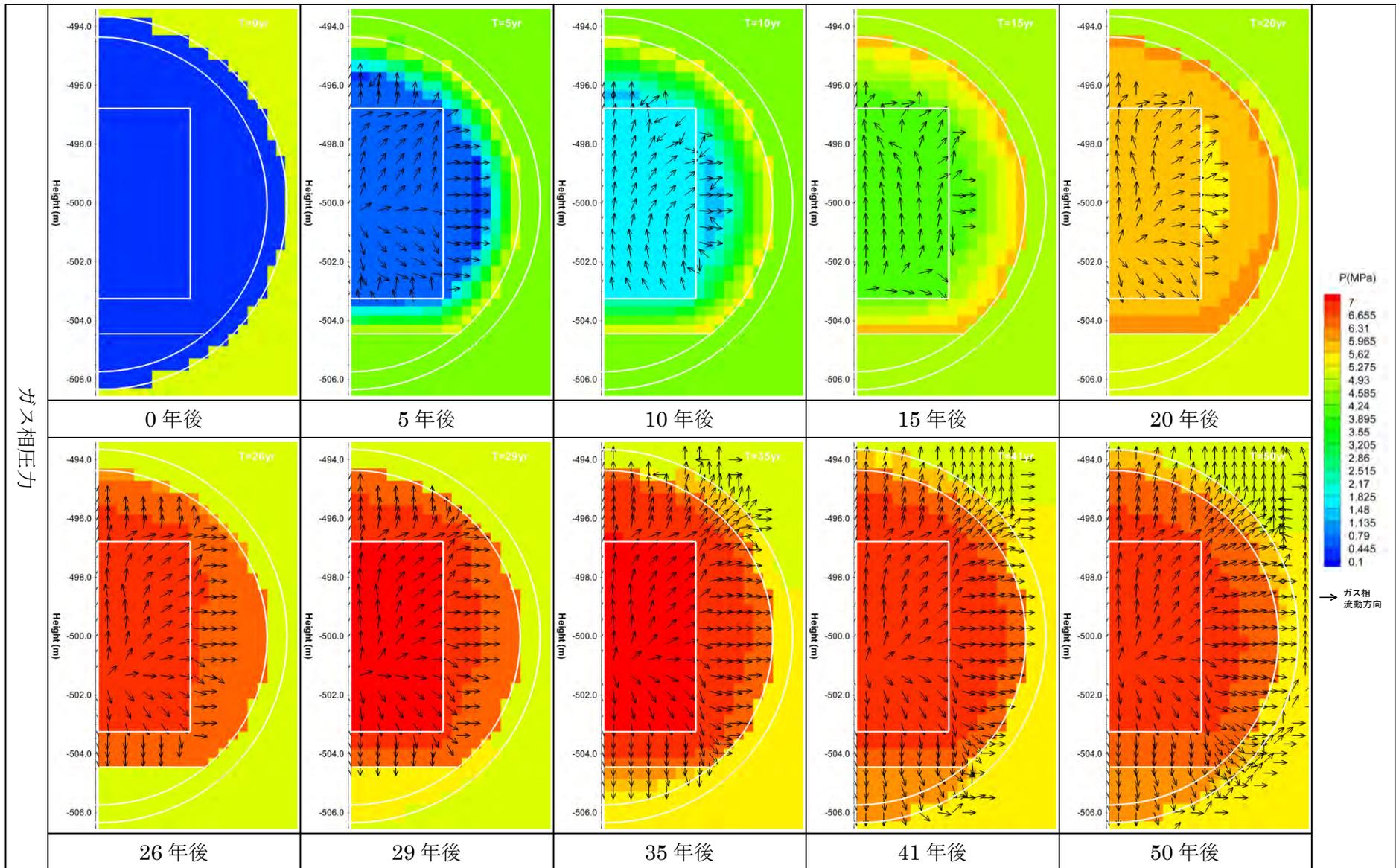


図 1.3.2-9 ガス相圧力分布 (初期不飽和ケース)

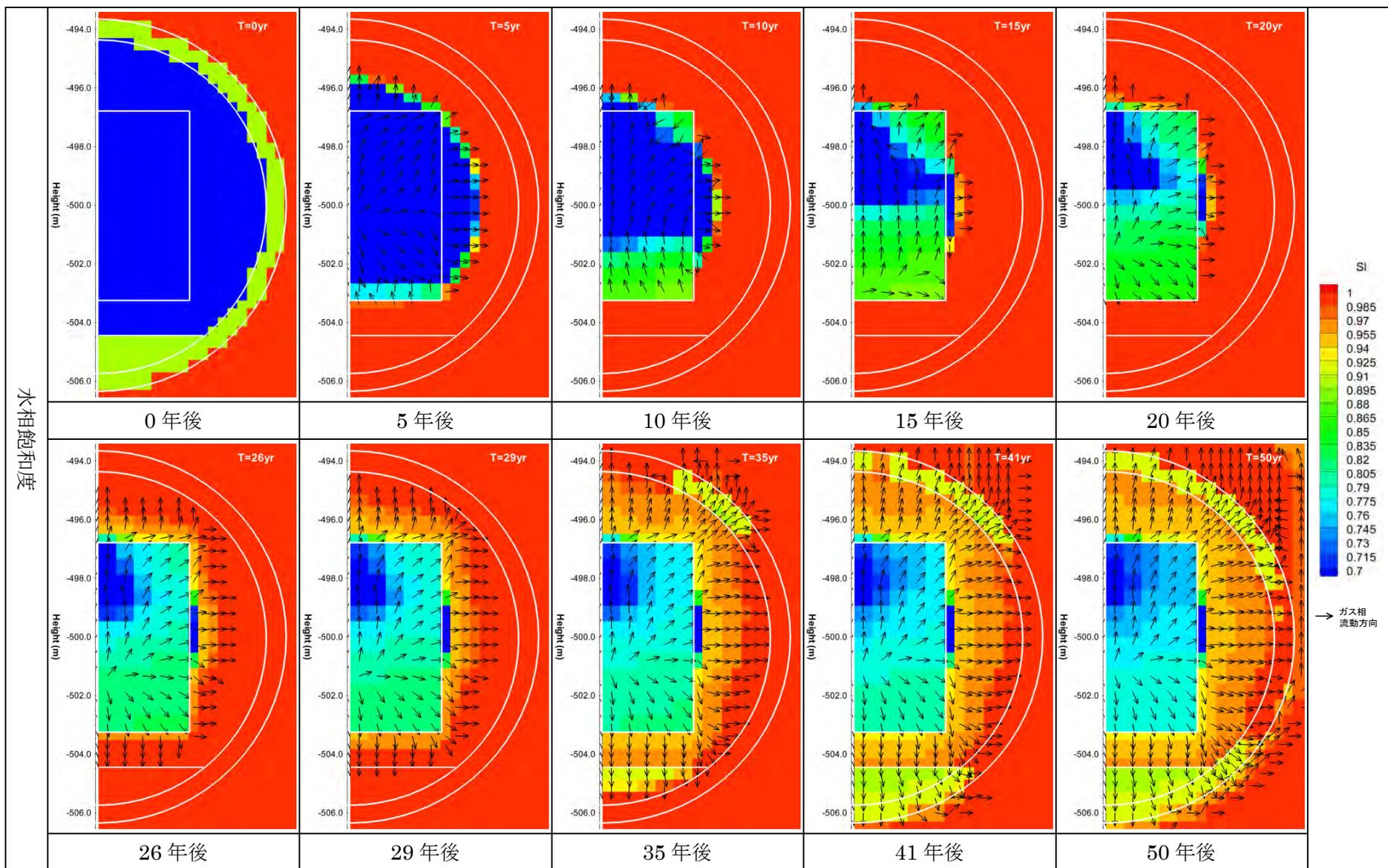


図 1.3.2-10 水相飽和度分布（初期不飽和ケース）

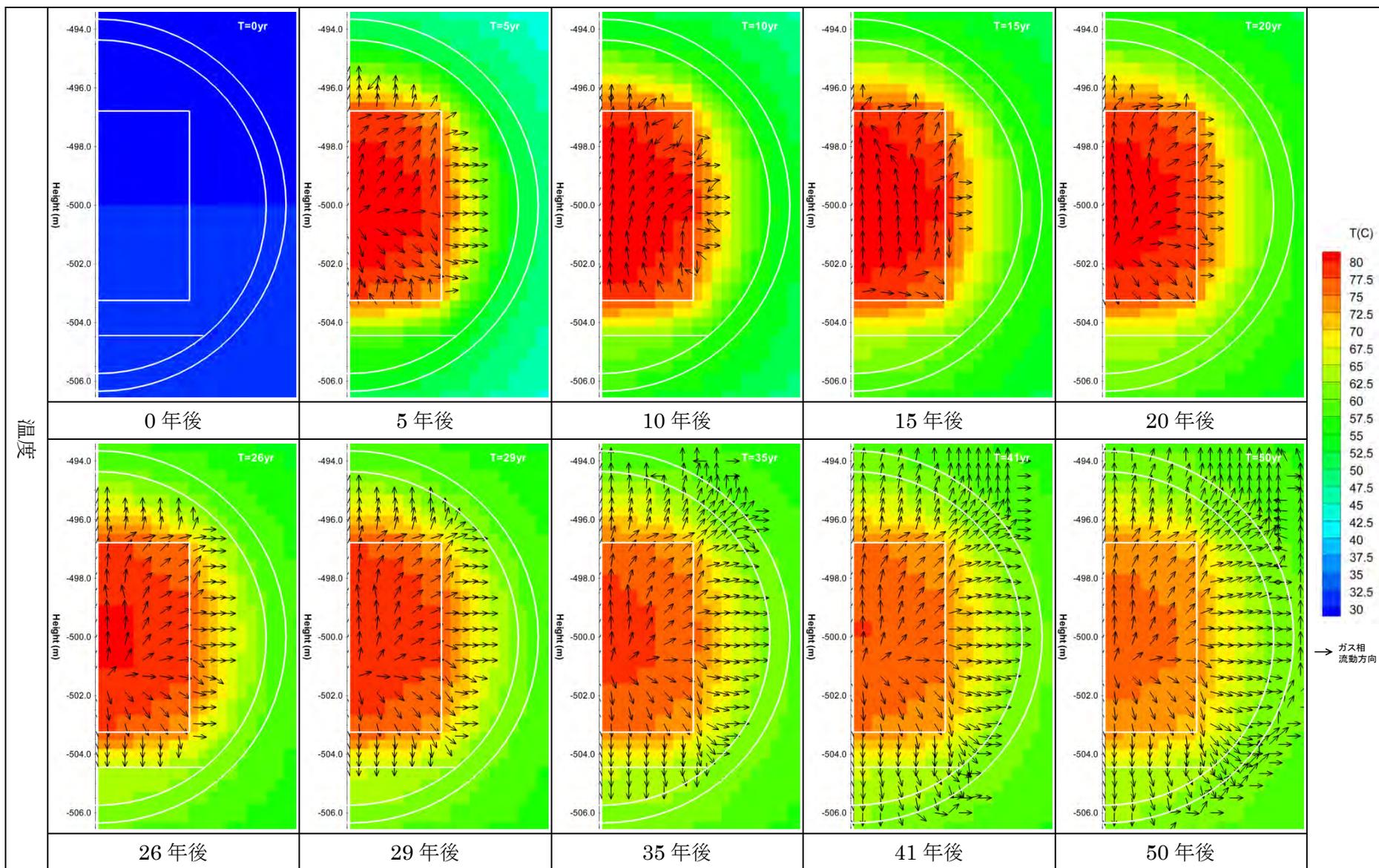


図 1.3.2-11 温度分布（初期不飽和ケース）

水蒸気圧

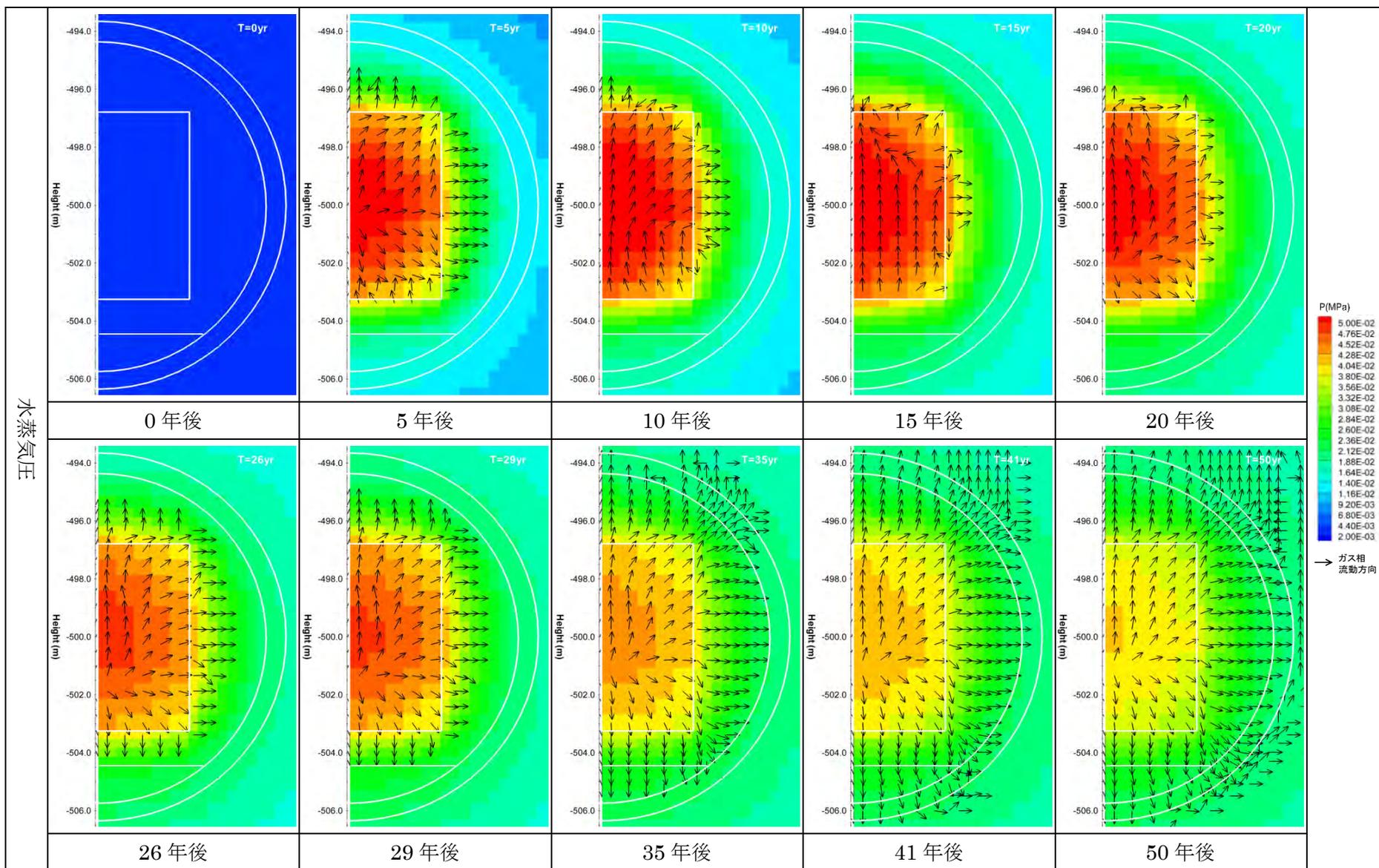


図 1.3.2-12 水蒸気圧分布（初期不飽和ケース）

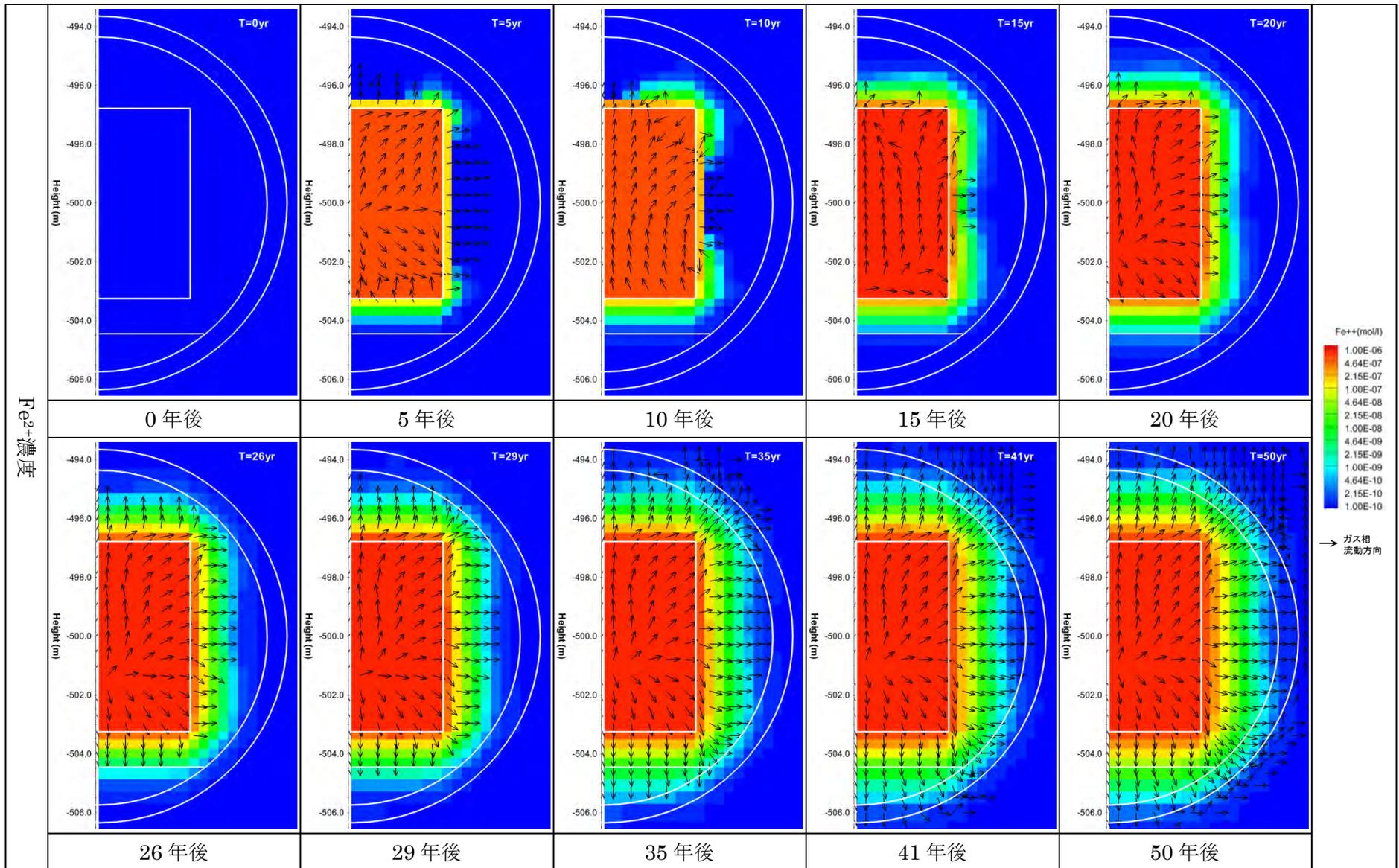


図 1.3.2-13 Fe^{2+} 濃度分布（初期不飽和ケース）

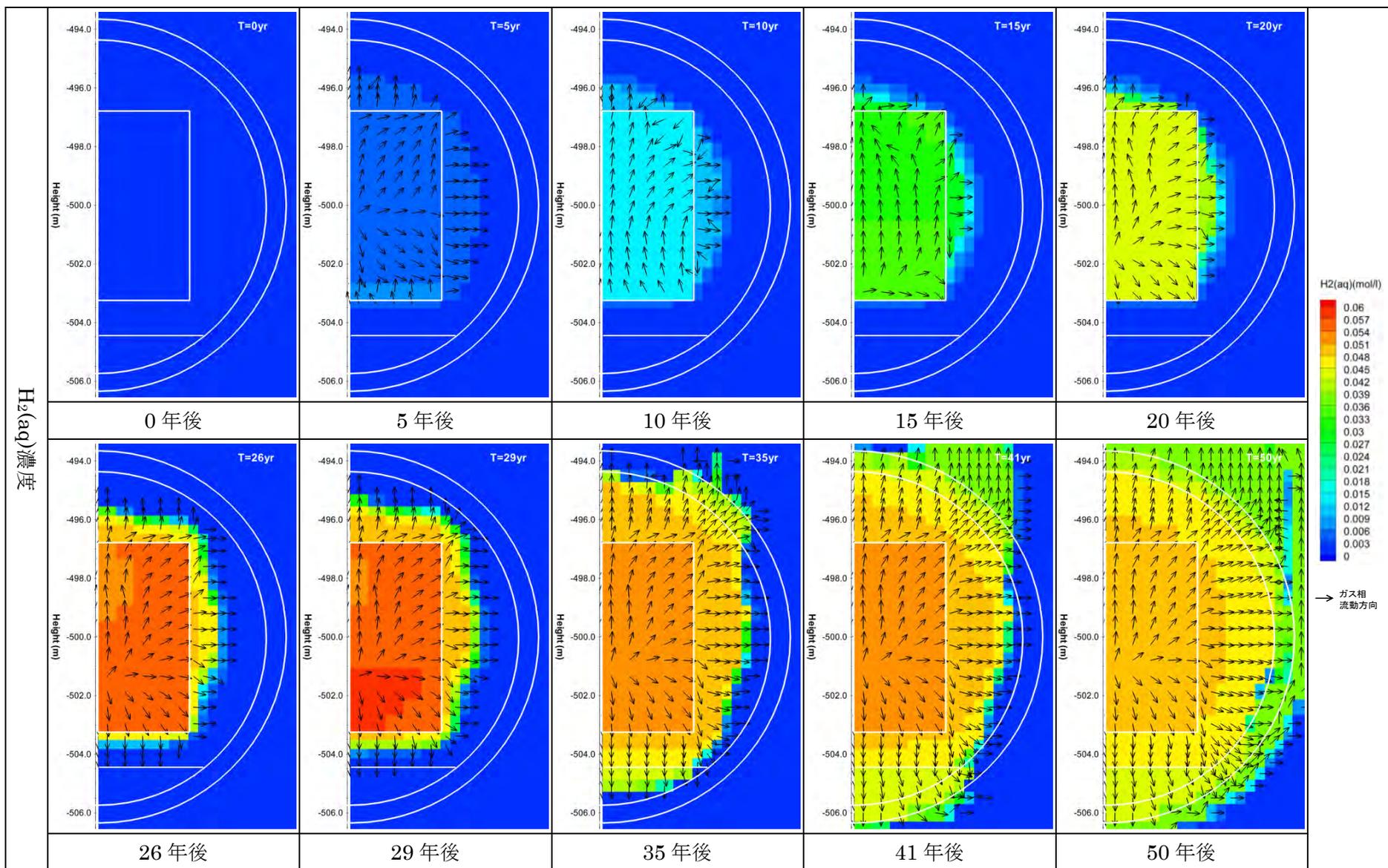


図 1.3.2-14 H₂(aq)濃度分布 (初期不飽和ケース)

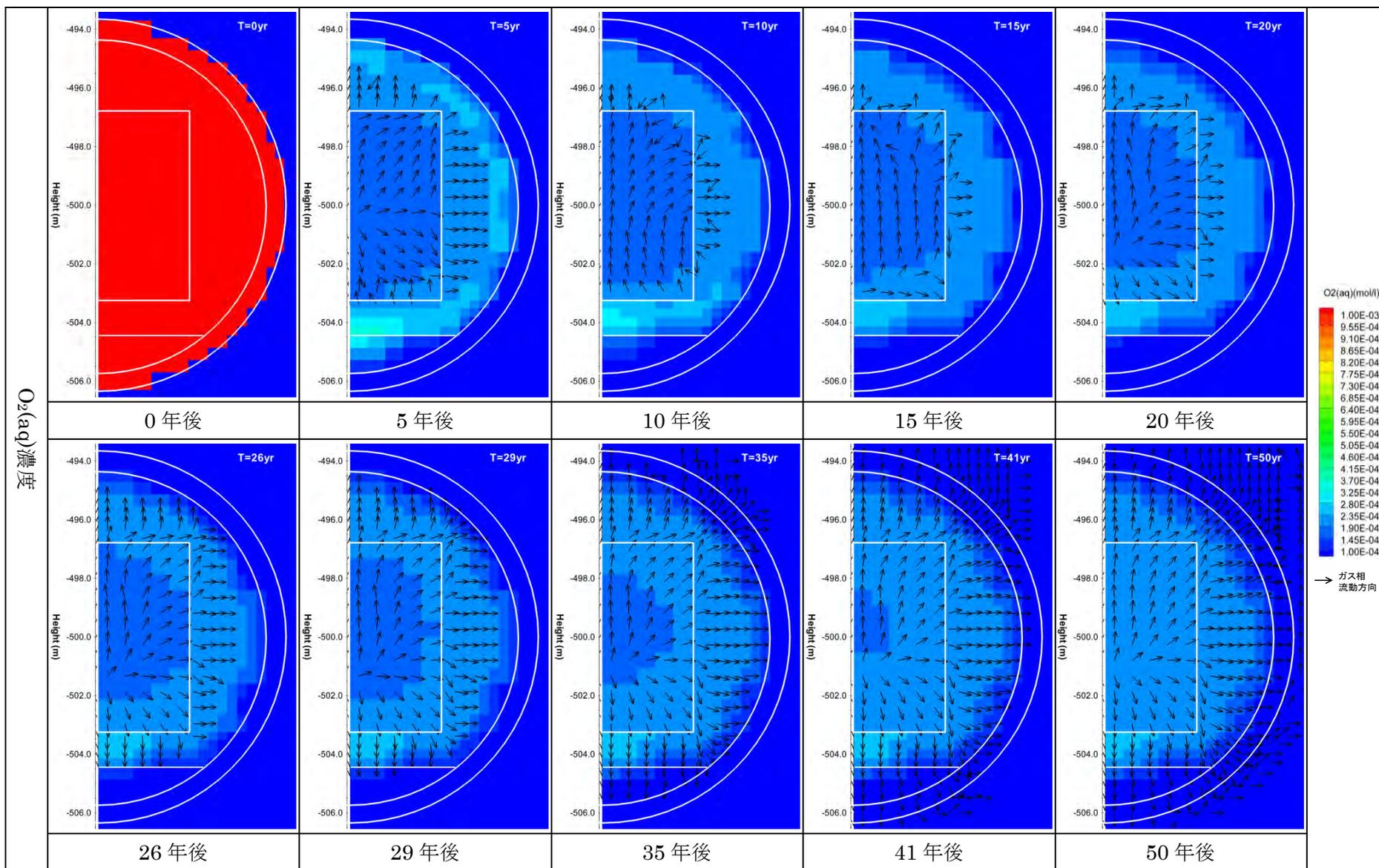


図 1.3.2-15 $O_2(aq)$ 濃度分布 (初期不飽和ケース)

Iron 沈殿量

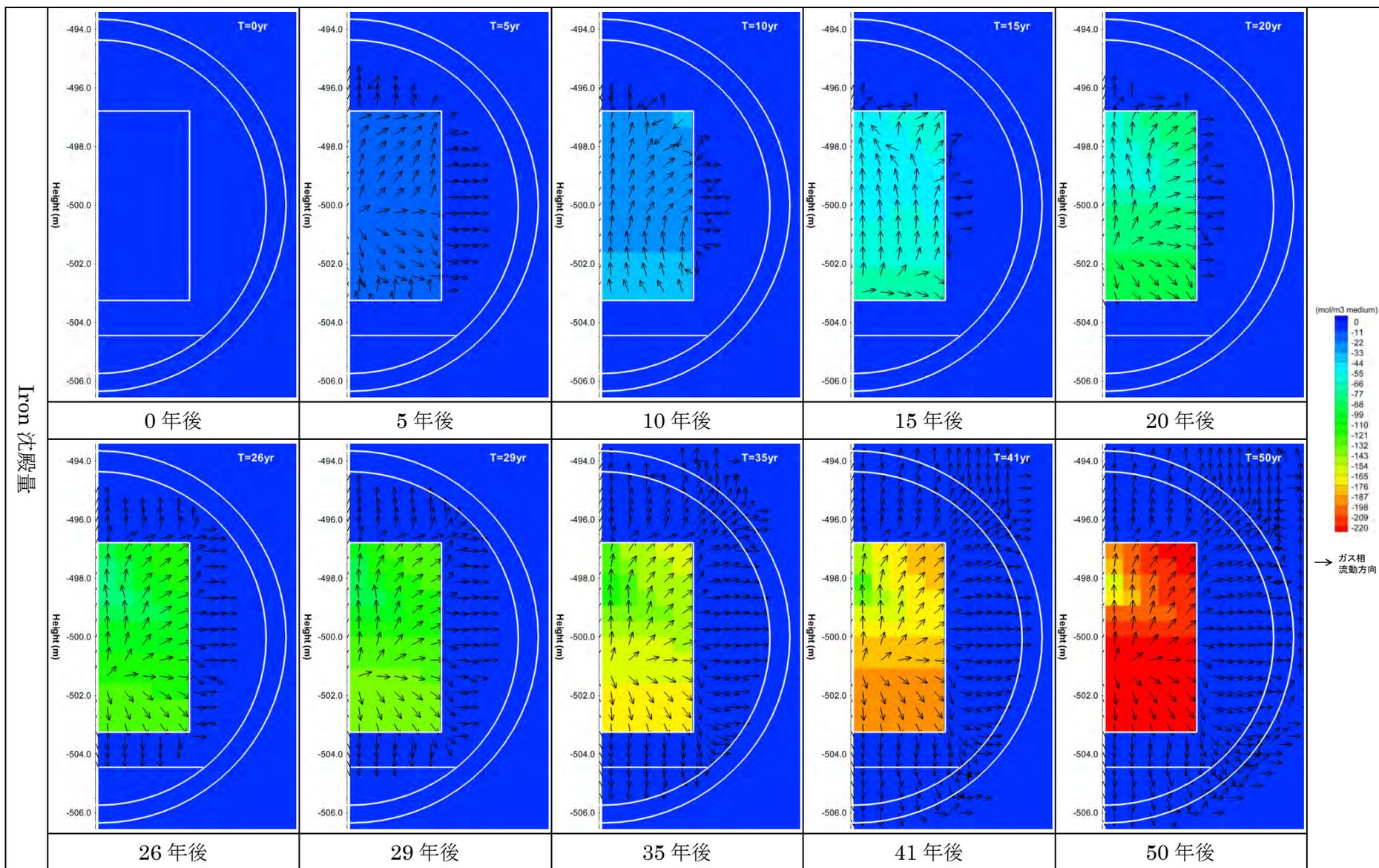


図 1.3.2-16 Iron 沈殿量分布 (正值が沈殿量、負値が溶解量) (初期不飽和ケース)

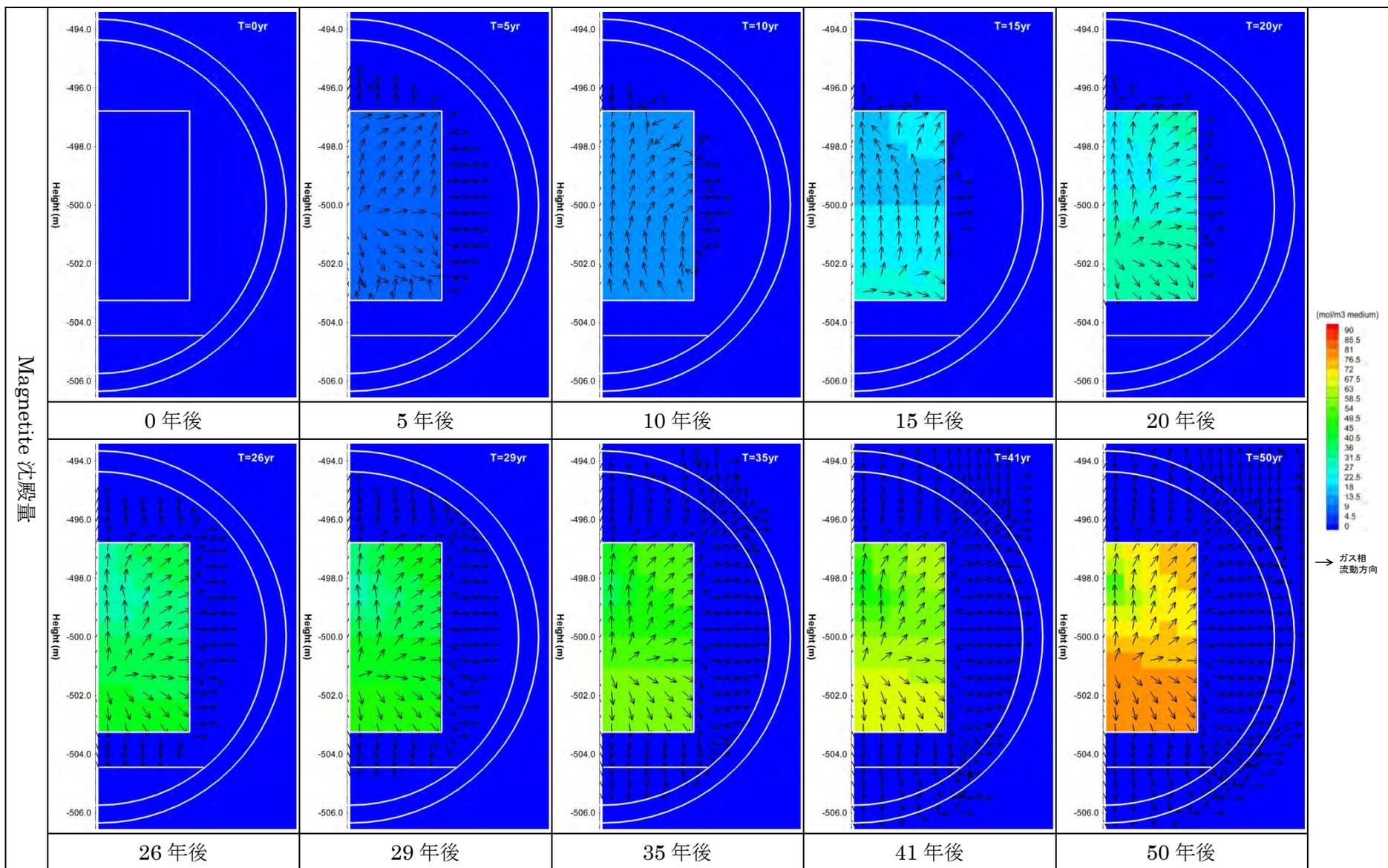
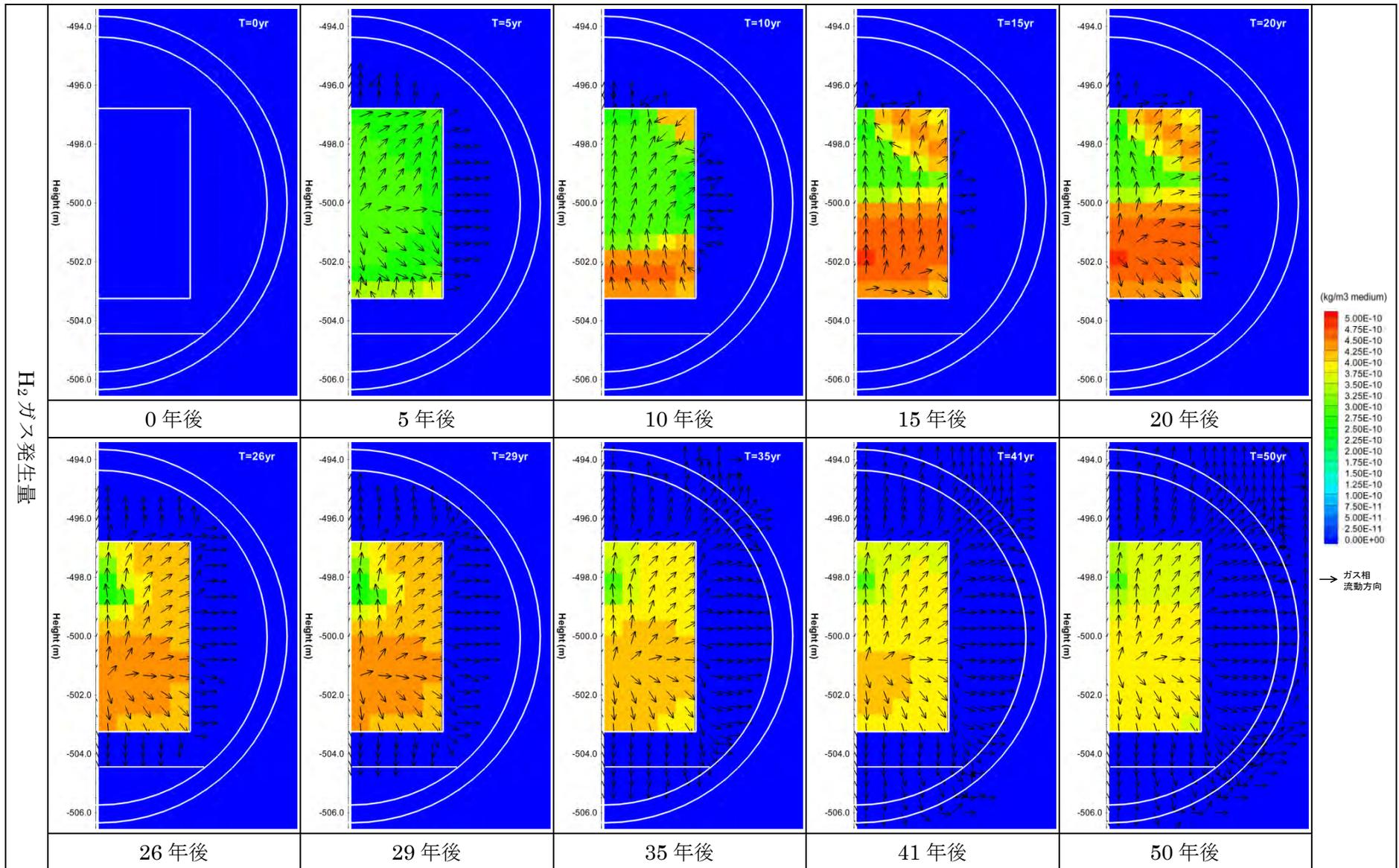


図 1.3.2-17 Magnetite 沈殿量分布（正值が沈殿量、負値が溶解量）（初期不飽和ケース）

H₂ガス発生量図 1.3.2-18 H₂ガス発生量分布 (初期不飽和ケース)

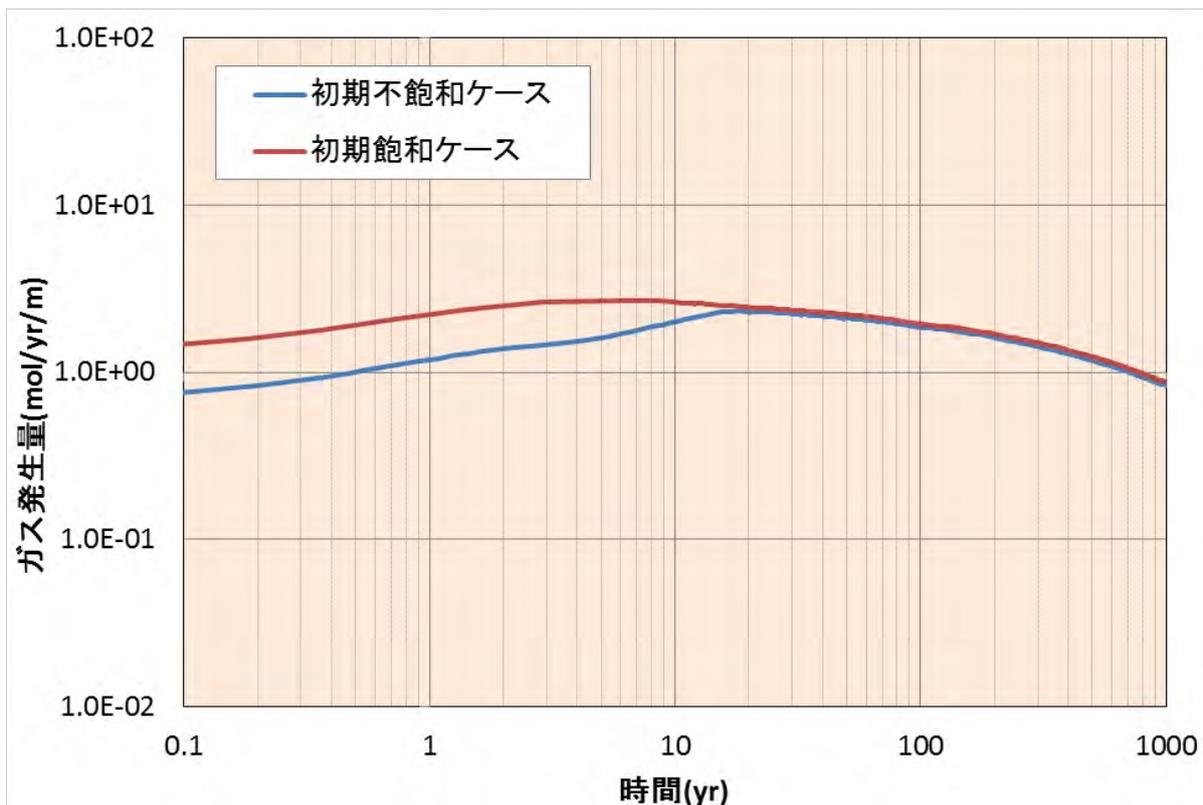


図 1.3.2-19 H₂ ガス発生量の時間変化 (初期不飽和ケースと初期飽和ケースの比較)

(2) TRU 廃棄物処分施設の概念モデルを用いた時系列解析

TRU 廃棄物処分のリファレンス概念のうち廃棄物グループ 2 の概念 (図 1.3.2-20、図 1.3.2-21) を対象とした 3 次元モデル (図 1.3.2-22) を構築し、次元性に着目したガス移行解析を実施した。

モデル化範囲は、坑道の横断方向 (図 1.3.2-20 の上下方向) には、鏡面对称性を前提とし、坑道中央から坑道離間距離の半分の距離までを設定し、縦断方向 (図 1.3.2-21 の左右方向) は、廃棄体から十分に離れた距離として、処分坑道の端部までを設定した。深度方向は、地表面から深度 1000m までとした。

考慮する材料は、廃棄体、鋼製構造躯体 (底部と側部を区別)、緩衝材、インバート、支保工、掘削影響域 (EDZ)、岩盤、埋戻し材とし、人工バリア内を格子解像度 0.5m~1.0m 程度で表現し、総格子数は 579,700 となった (図 1.3.2-22、図 1.3.2-23)。

検討の結果、廃棄体中央部におけるガス相圧力は、本検討の範囲内では 2 次元モデルと 3 次元モデルでほぼ同じ挙動を示した (図 1.3.2-24)。

一方、坑外への累積押し出し水量は 2 次元モデルと 3 次元モデルで、流路拡幅による圧力低下が起こる約 30 年後以降、徐々に差異が大きくなっていく現象が確認されたが (図 1.3.2-25)、この要因として主要なガス移行経路が 2 次元断面による解析結果とは異なる (図 1.3.2-26~図 1.3.2-33 で示されるように、3 次元モデルでは坑道端部の断面 F において、ガス圧の上昇やガス移行に伴う飽和度の低下していることから、坑道縦断方向へのガスの流れが考慮される) ためであることが示唆された。

以上の検討から、対象とする処分システムを坑道横断方向の 2 次元断面モデルによってガス移

行解析を行うことで、多くの場合問題ないと考えられるが、主要なガス移行経路が、2次元断面モデルでは表現困難となる場合、その解析結果の取扱いにおいて注意が必要となることが示唆された。

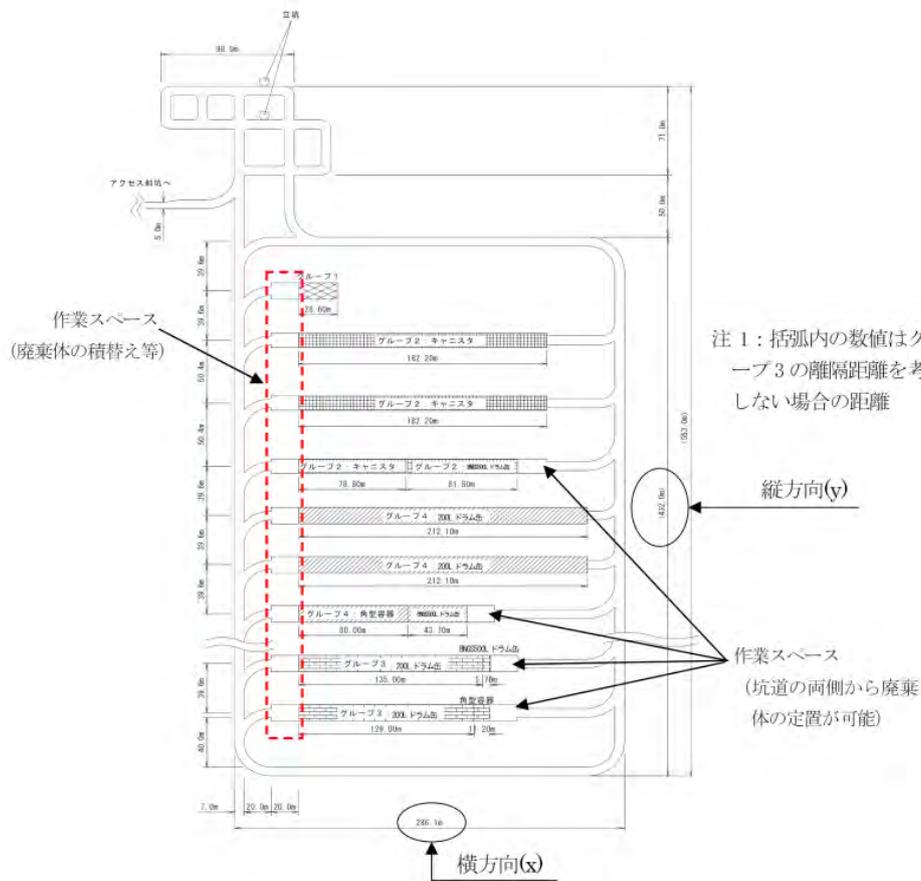


図-1 全体レイアウトの設定

図 1.3.2-20 TRU 廃棄物処分施設の全体レイアウト[1]

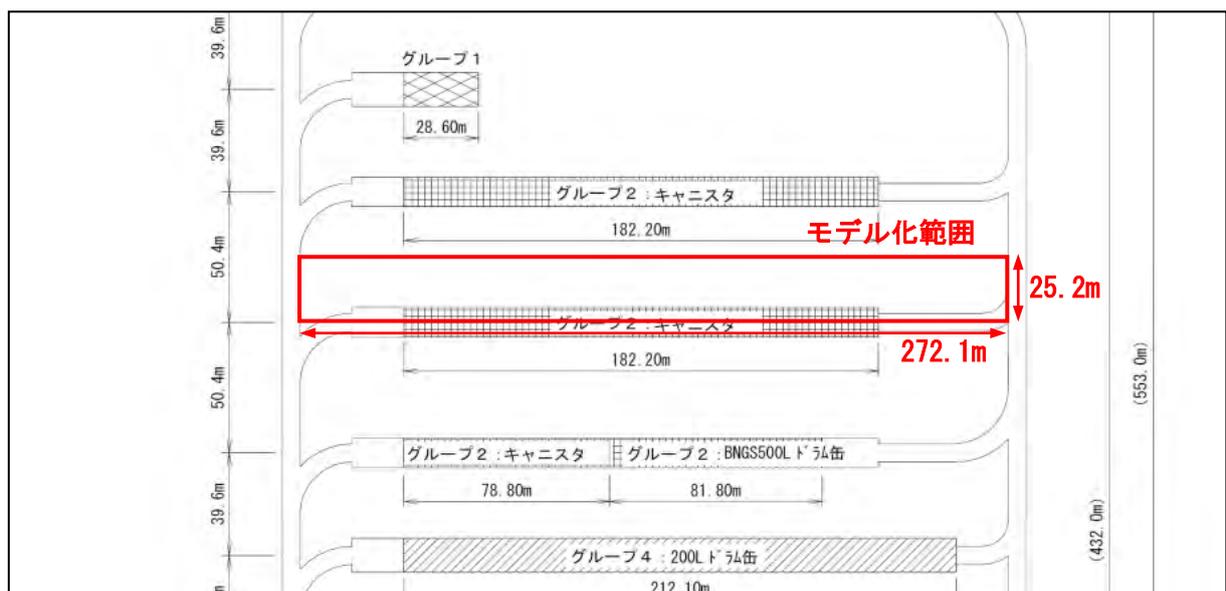


図 1.3.2-21 3次元解析モデルのモデル化範囲[1]

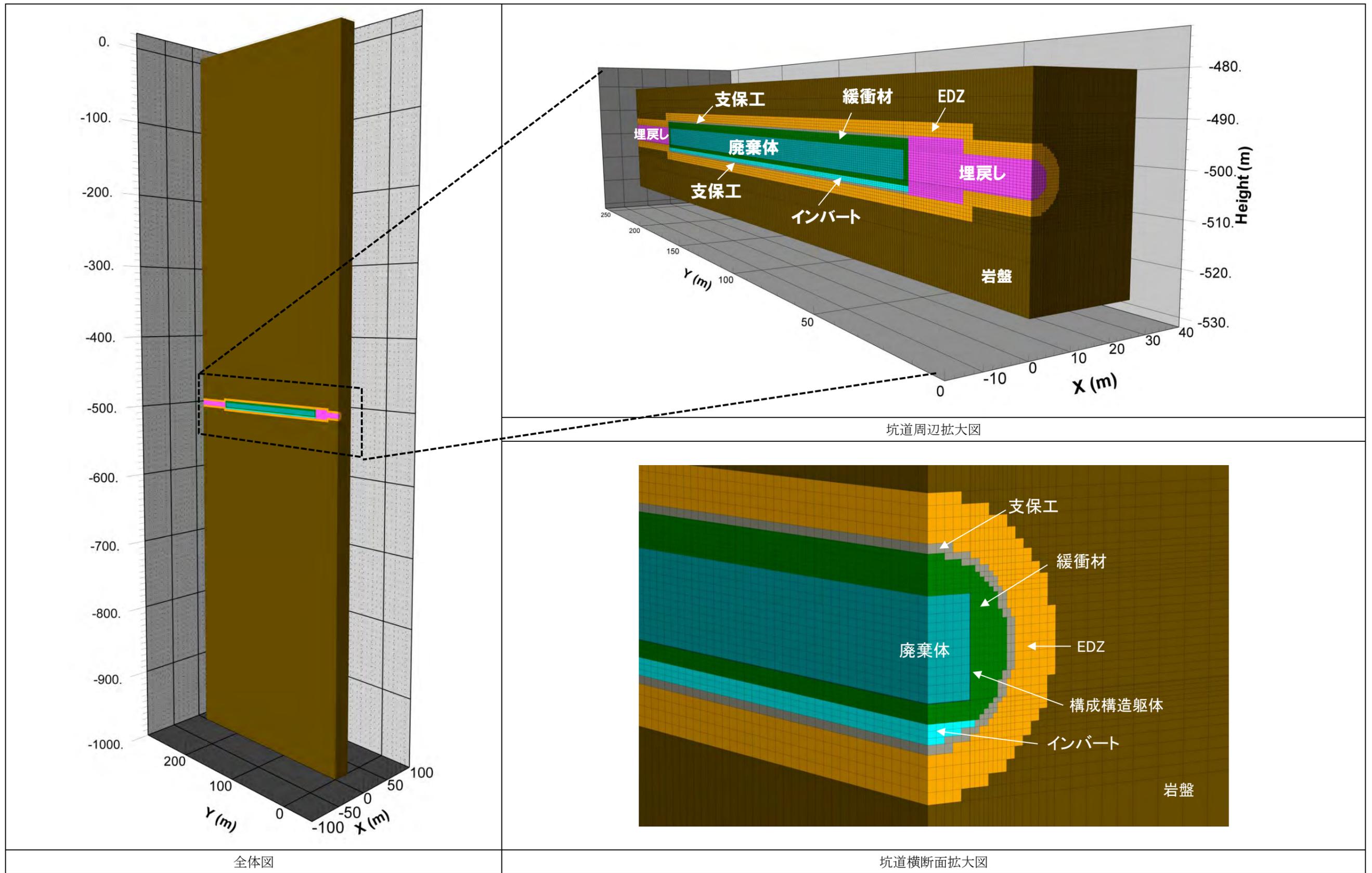


図 1.3.2-22 3次元解析モデル

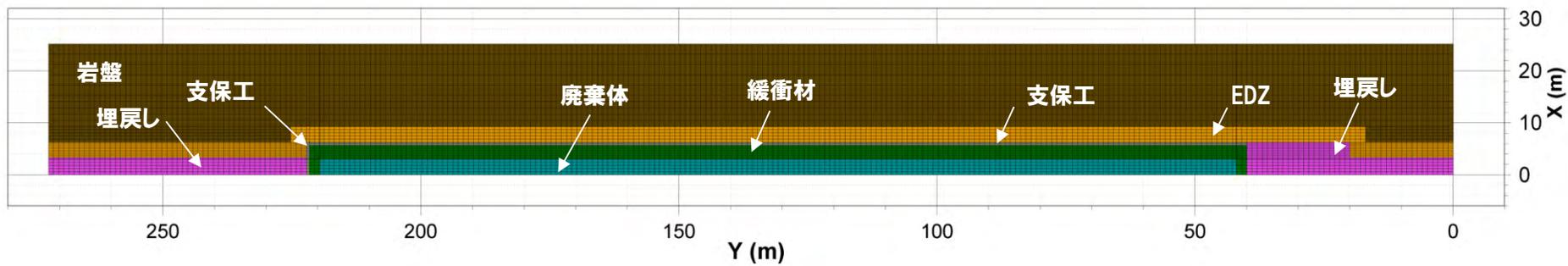
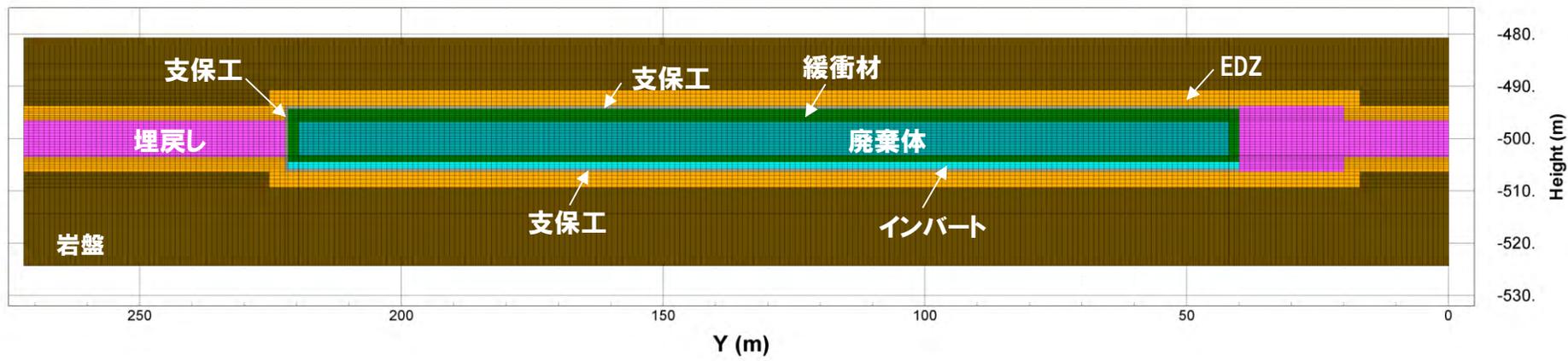


図 1.3.2-23 坑道縦断方向の断面図（上）と深度 500m における平面図（下）

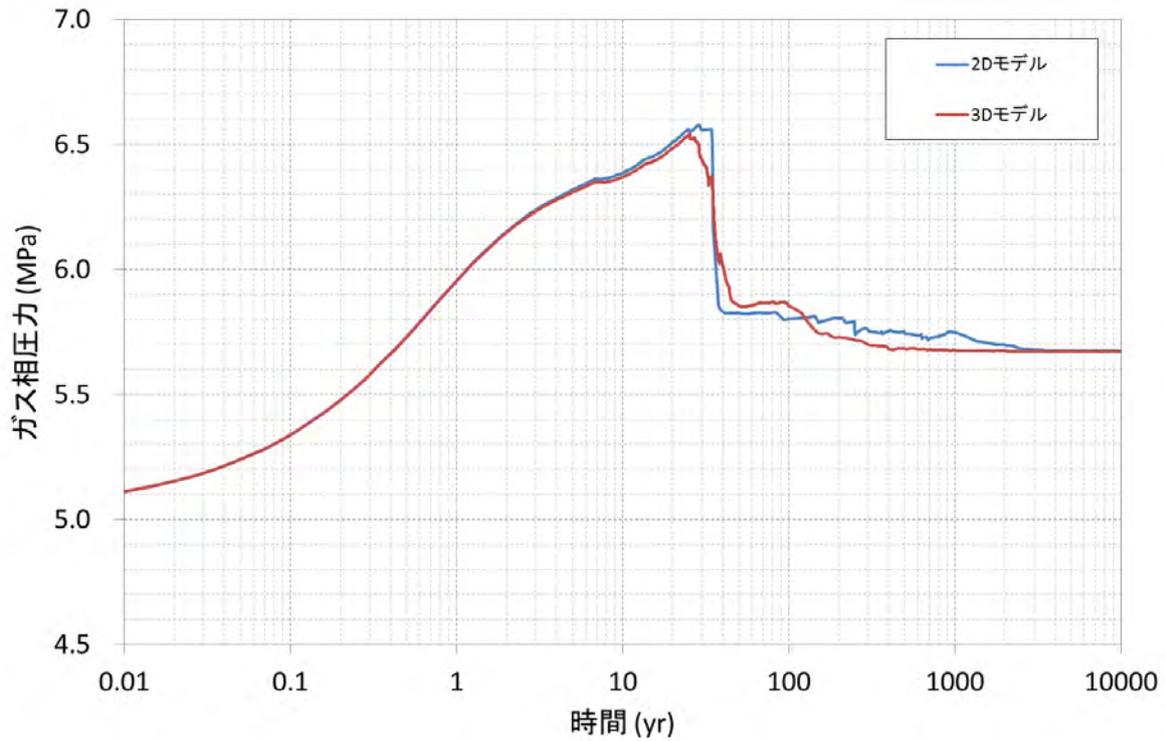


図 1.3.2-24 廃棄体中央部におけるガス相圧力の時間変化
(2次元モデルと3次元モデルの比較)

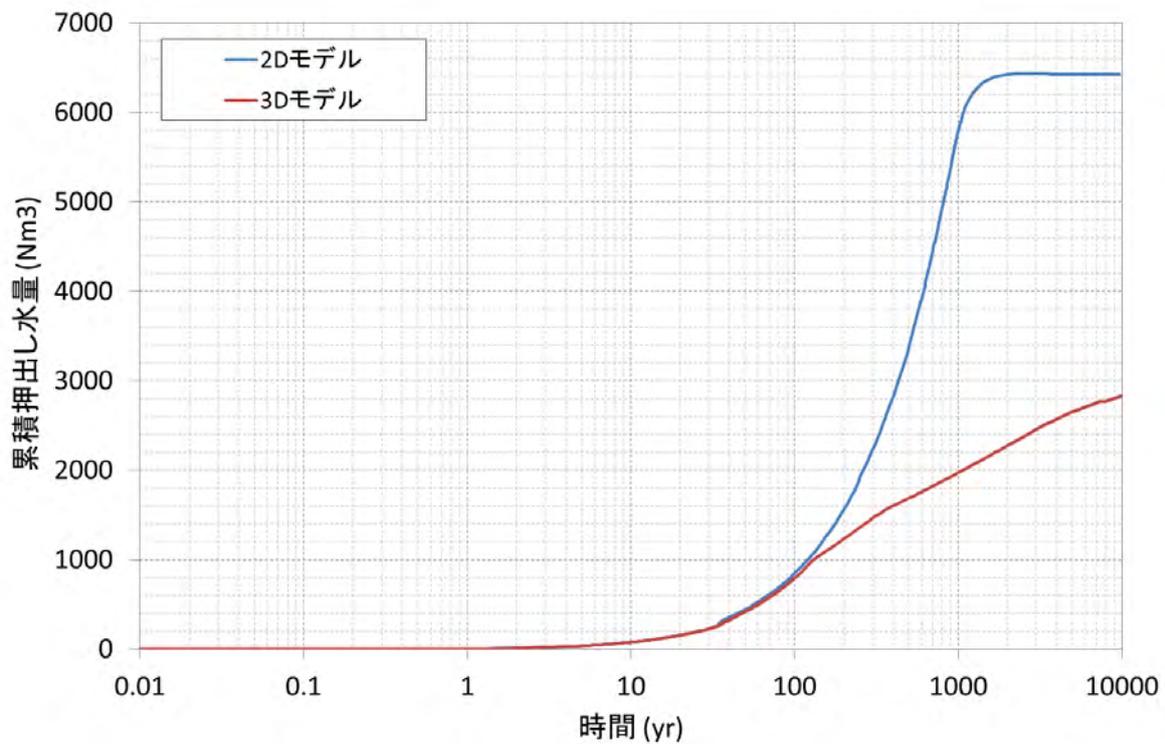


図 1.3.2-25 坑外への累積押し出し水量の時間変化 (2次元モデルと3次元モデルの比較)

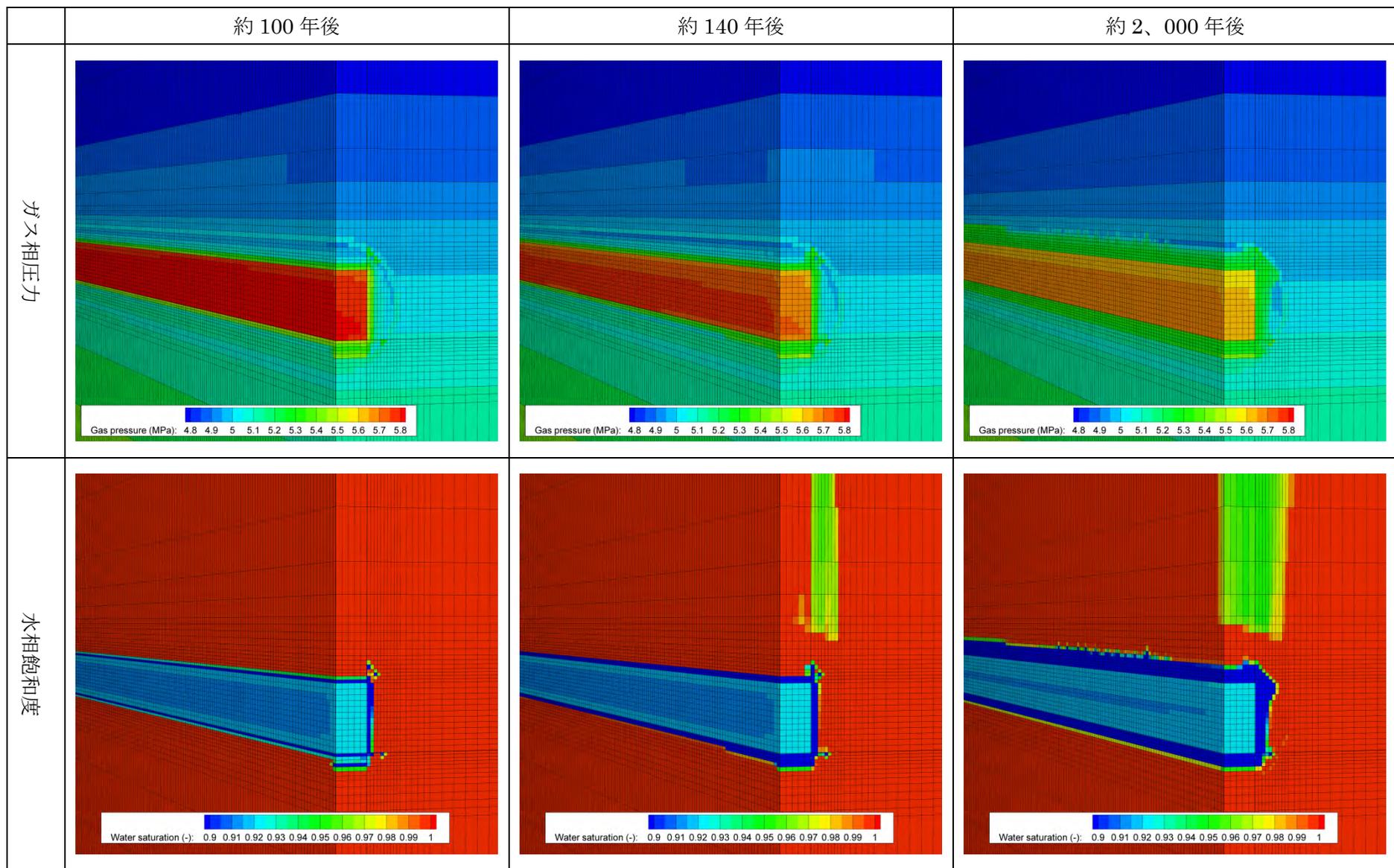


図 1.3.2-26 ガス相圧力と水相飽和度の分布

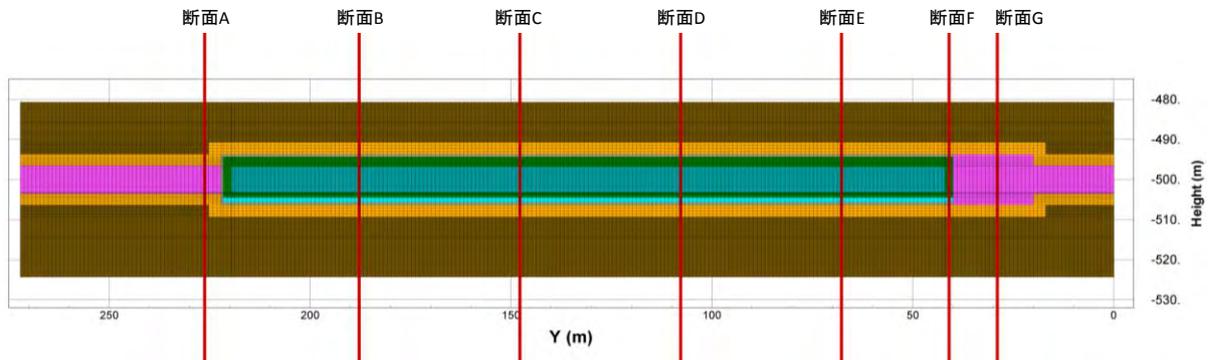


図 1.3.2-27 ガス相圧力と水相飽和度の分布を出力する断面位置図

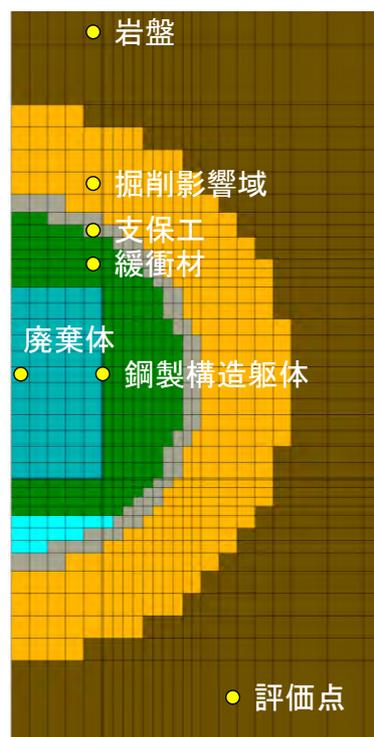


図 1.3.2-28 人工バリア材料毎のガス相圧力と水相飽和度の時間変化を出力する評価点位置図

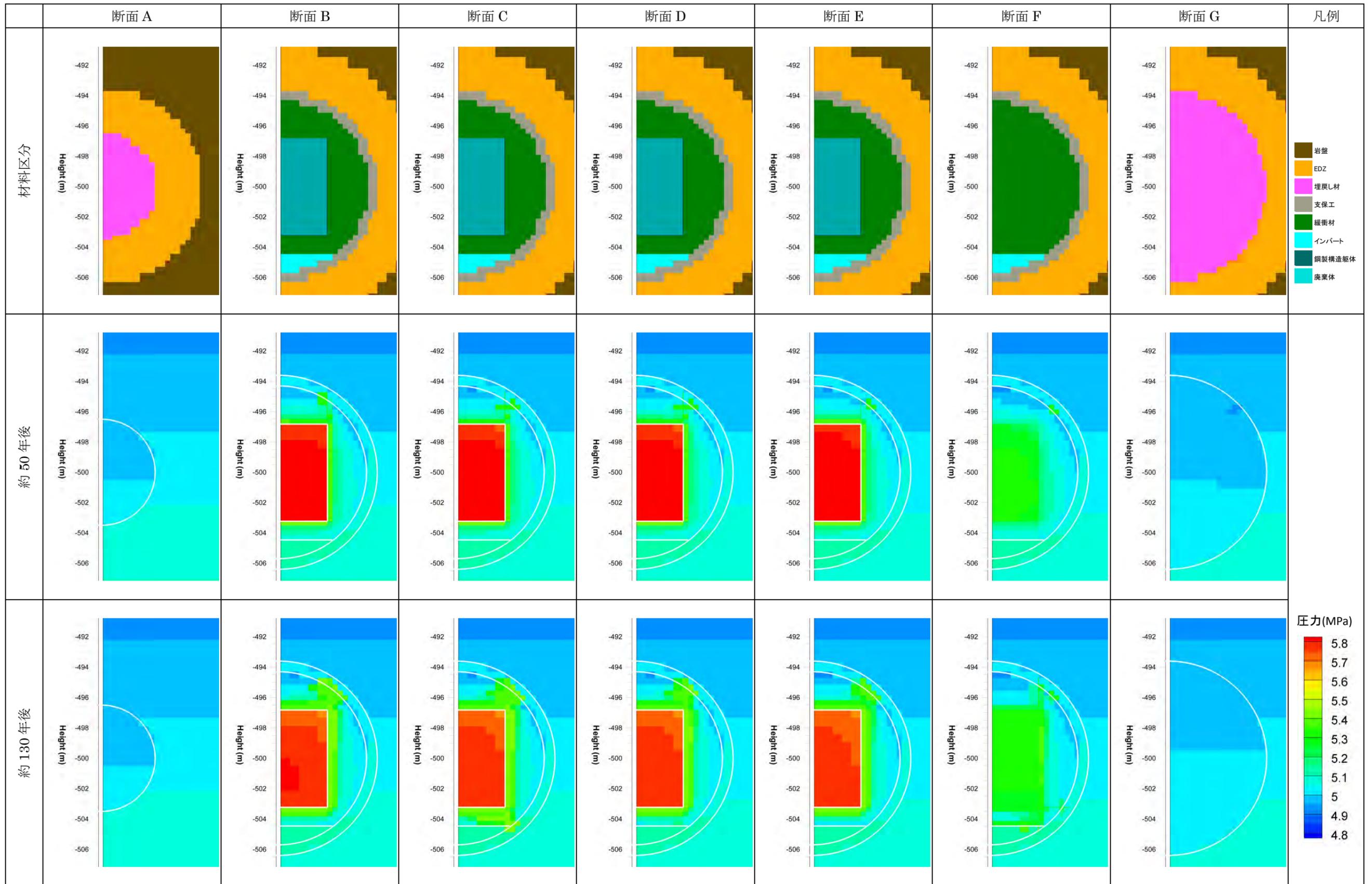


図 1.3.2-29 各断面位置におけるガス相圧力分布 (1/2)

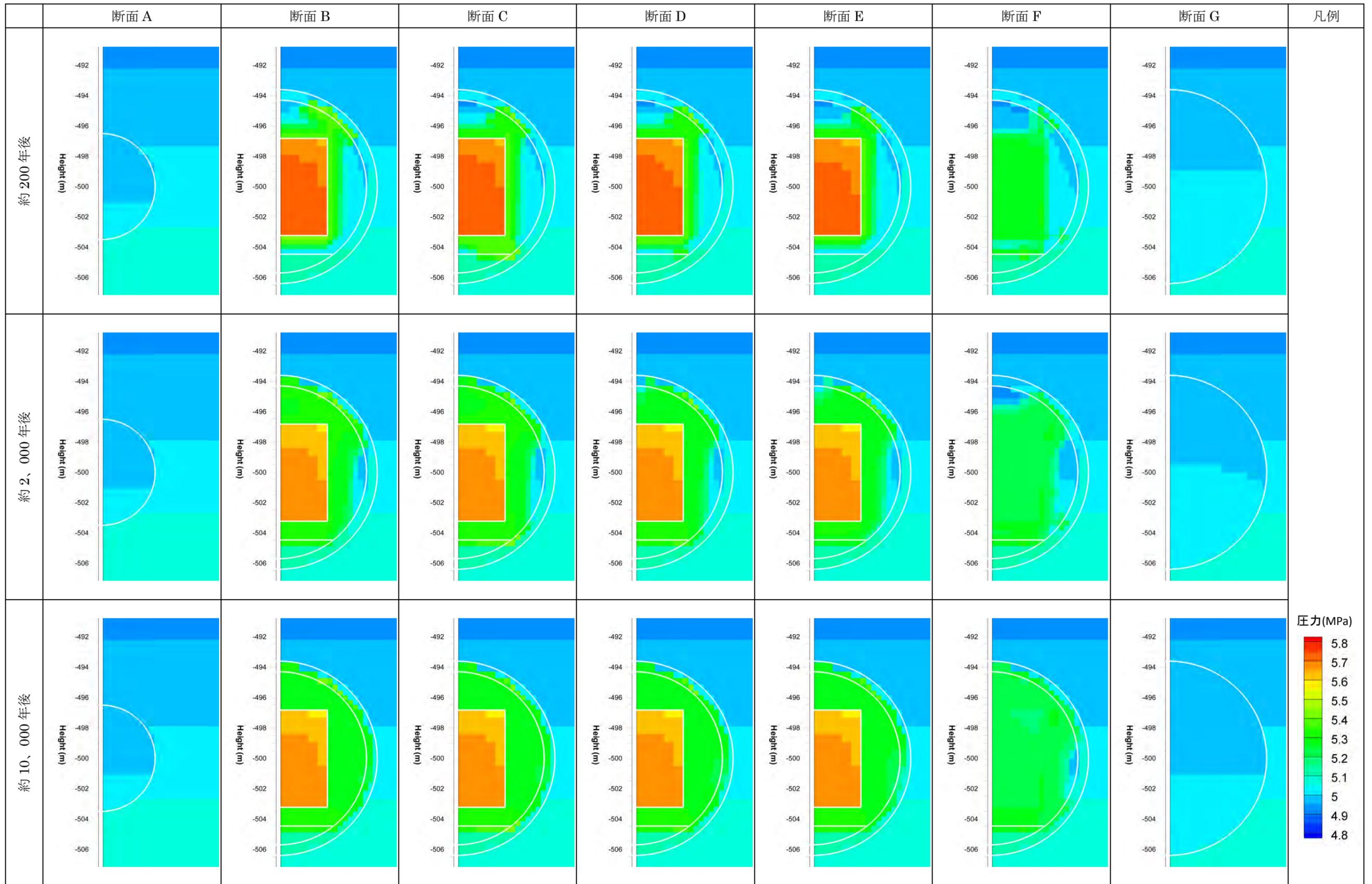


図 1.3.2-30 各断面位置におけるガス相圧力分布 (2/2)

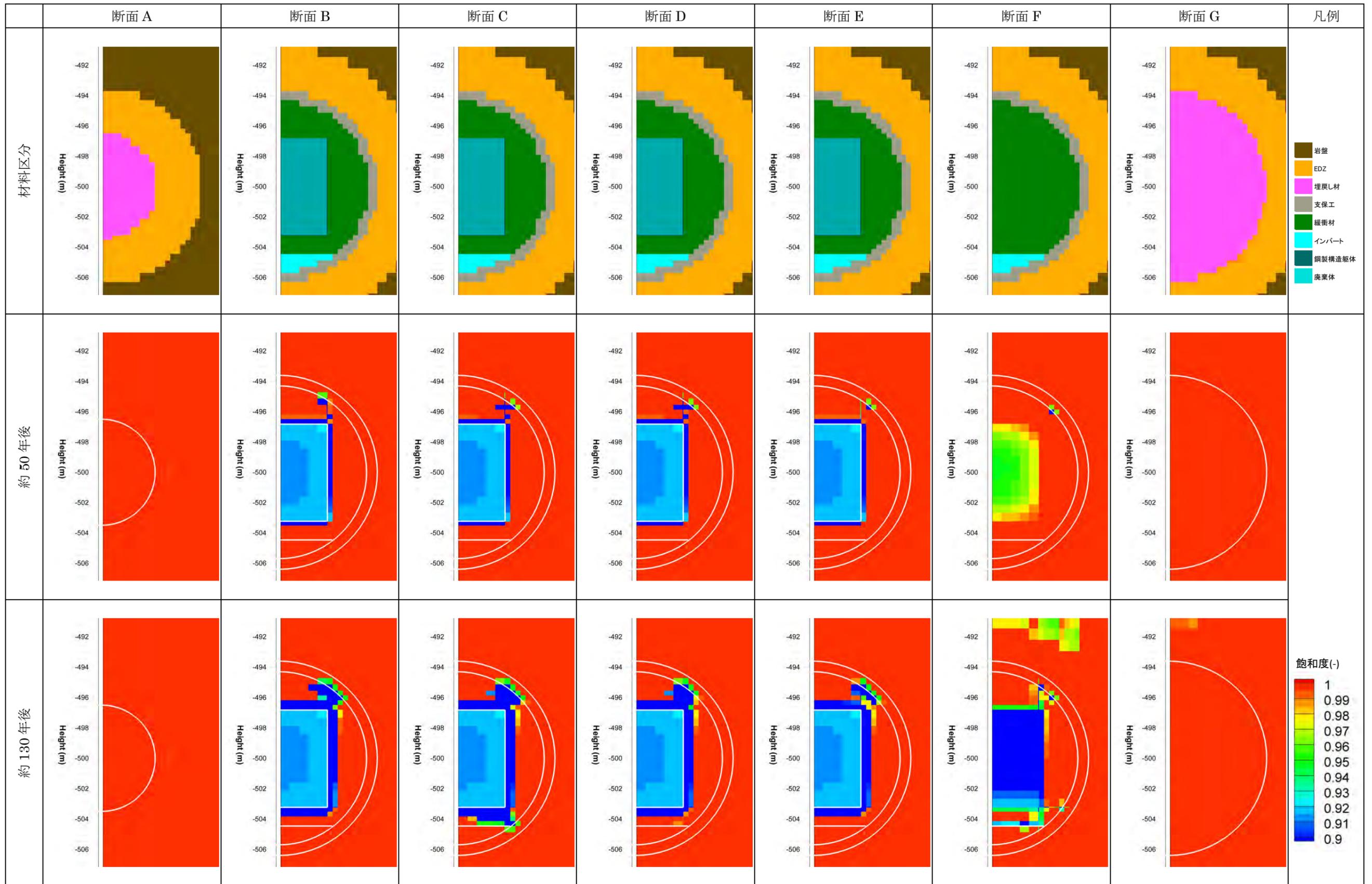


図 1.3.2-31 各断面位置における水相飽和度分布 (1/2)

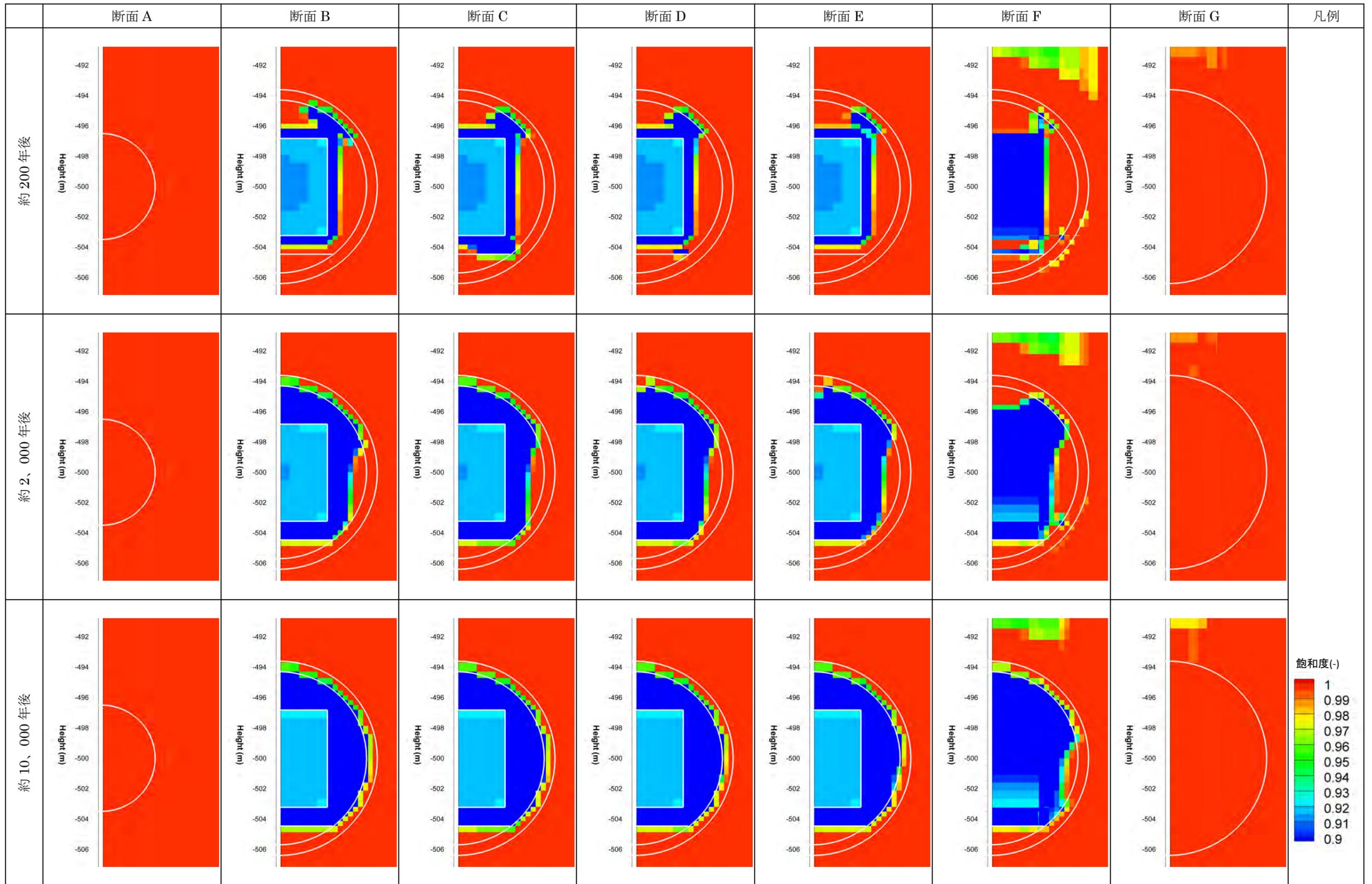


図 1.3.2-32 各断面位置における水相飽和度分布図 (2/2)

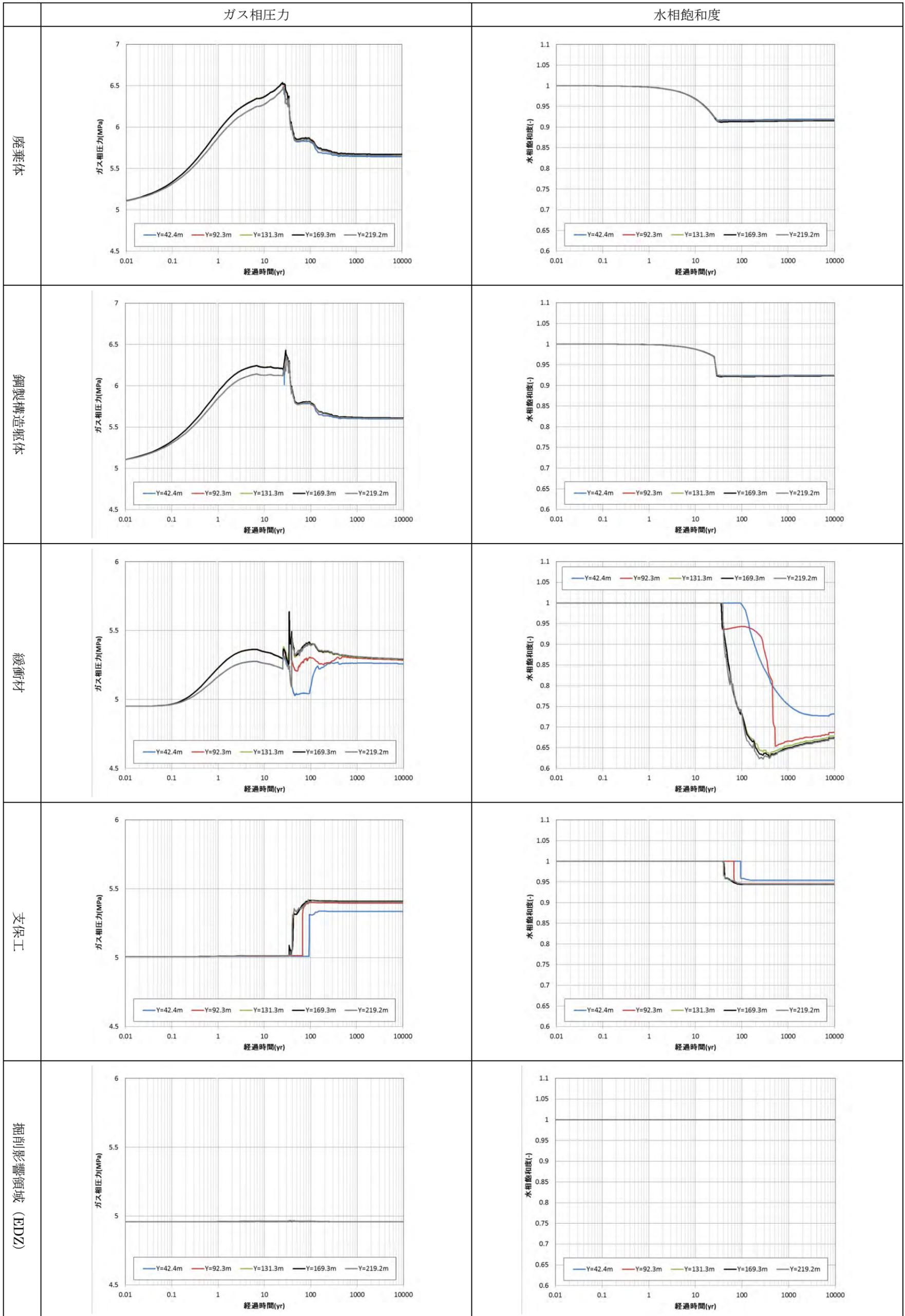


図 1.3.2-33 各部材内におけるガス相圧力及び水相飽和度の時間変化

1.3.3 ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充

本項目は、これまで（平成 19-24 年度）に実施した「ガス移行挙動の評価 材料試験データの取得」[5][6][7][8][9][10]において得られた知見（再冠水試験、飽和および不飽和ベントナイト供試体を用いたガス移行（透気）試験における大破過*を伴うガス移行挙動および基本特性や寸法効果に対する評価による）を基盤として、緩衝材のガス移行挙動評価に係る残された課題の解決を目的とするものである。

平成 26 年度はベントナイト系緩衝材材料の飽和および不飽和供試体を用いた試験を実施した。

また、TRU 処分施設内で卓越したガス移行経路になる可能性がある異なる材料間や同一材料の内部にて生じる界面のガス移行特性把握を目的とした試験計画の策定、及び界面を含む TRU 処分システムとしてのガス移行挙動を把握するため、当該構造を模擬したシステム試験の実現に向けた予備検討を実施した。

(1) ベントナイト緩衝材におけるガス移行挙動評価に係るガス注入試験

これまでに一定の知見が得られている、大破過を伴うものとは異なるガス移行現象・挙動の把握を目的としたガス注入試験を実施した（試験装置の概念は図 1.3.3-1 の通り）。

具体的には、供試体中に大破過を伴わず気液二相流のみが生じることを想定した低注入圧条件（ベントナイト供試体の平衡膨潤圧以下のガス注入圧）によるガス注入試験を実施した。

なお、ガス注入試験は取得データの信頼性や再現性向上の観点にて、同一条件下の供試体（同一ガス圧・同一材料）で同時進行する形式とした。

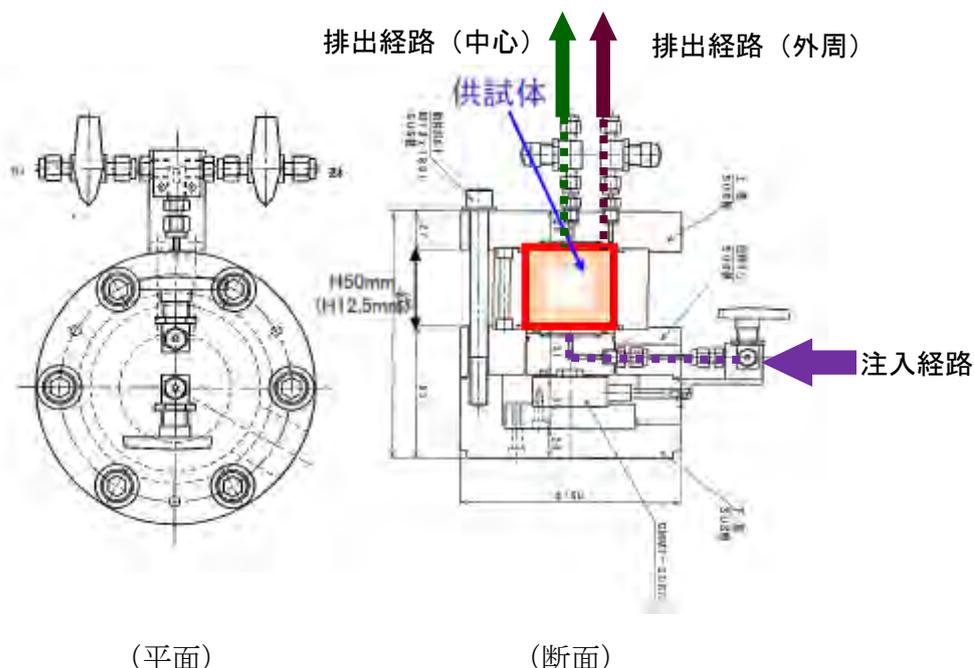
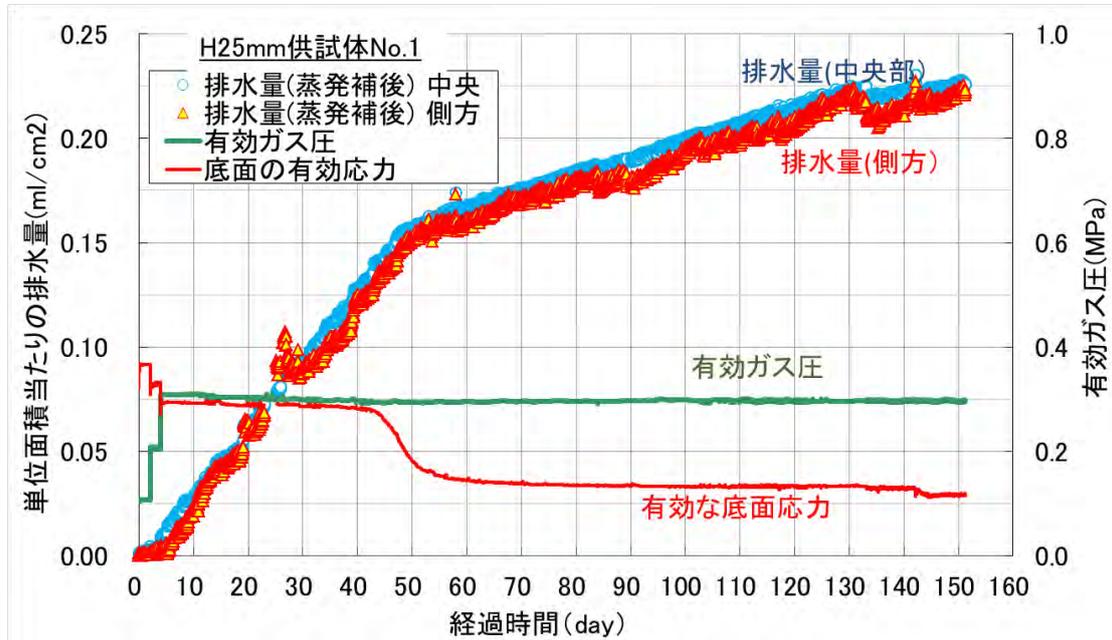


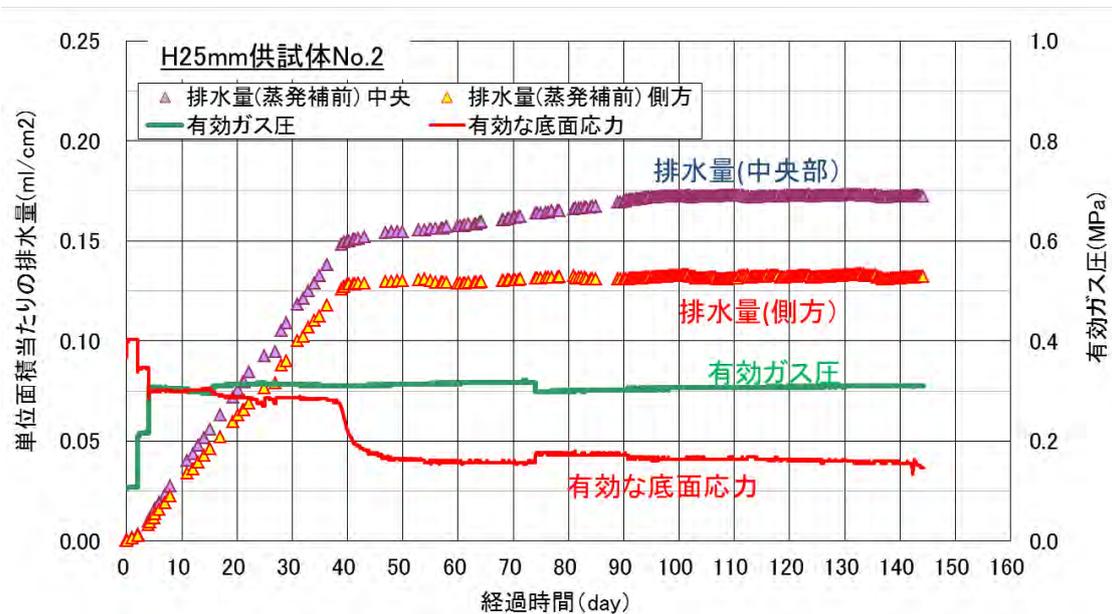
図 1.3.3-1 ベントナイト材料供試体を用いた試験装置の概念図

* 『ガス加圧中に排気量が急激に増大する現象』と定義。一般財団法人 電力中央研究所, 2012.8. 処分施設条件を考慮した締固めたベントナイトのガス移行特性評価 電力中央研究所報告。

ガス移行試験中に取得される累積排水量の経時変化（図 1.3.3-2）を精査したところ、観測される排水挙動はガス・水の二相流によって供試体内の間隙水の排出メカニズムに依るものである可能性が示唆され、予め予測された挙動（「1.3.2 (1) 1) ガス移行試験の予察解析」の成果、図 1.3.3-3）が観察されていることが分かった。



(1) 供試体 No.1



(2) 供試体 No.2

図 1.3.3-2 ガス注入に伴う単位面積当たりの排水量の経時変化
 (※経過日数はガス注入開始日が起点)

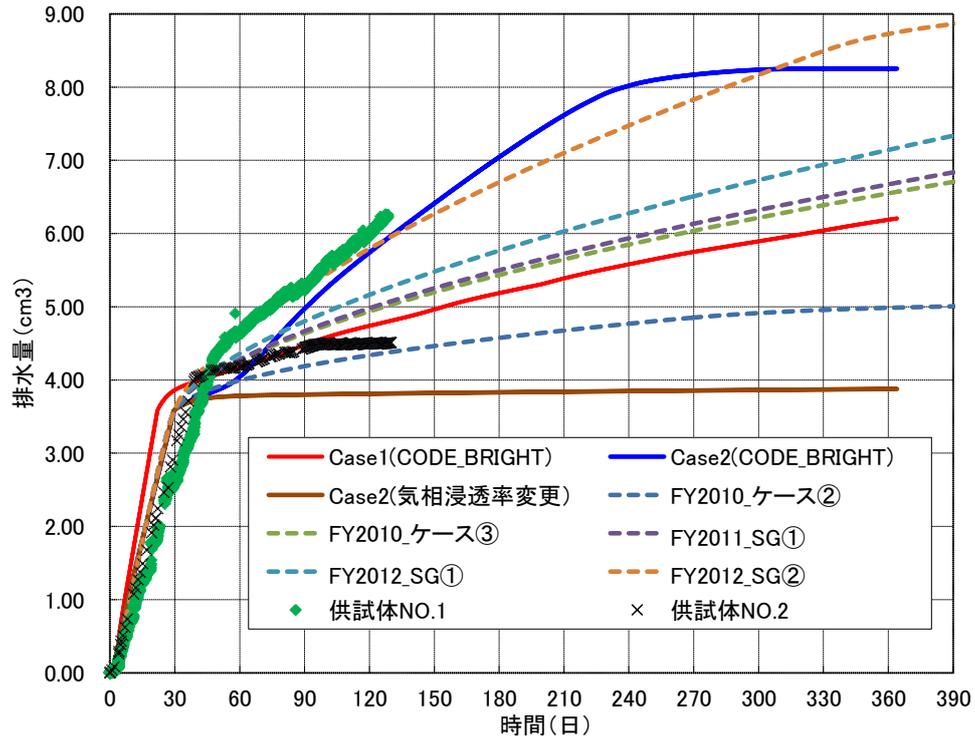


図 1.3.3-3 排水量の実測値と予察解析結果との比較

(2) ベントナイト混合材料を用いた不飽和水分特性データの取得

TRU 処分概念の人工バリアのうち、底部緩衝材材料として想定されている砂混合材料（ベントナイト・砂の乾燥重量比 7 : 3）の特性のうち、施設の再冠水（飽和・吸水）過程における膨潤挙動や、ガス移行（排水）過程における収縮挙動といった「膨潤変形特性」に関して、そのサクシオン（飽和度と相関）依存性（膨潤変形量～サクシオンの関係）をサクシオン制御式のおエドメータ試験（図 1.3.3-4）により取得した。

具体的には砂混合材料の供試体に対してサクシオンを減少・増加させ、サクシオン減少過程（吸水過程）とサクシオン増加過程（排水過程）について、吸水膨潤変形特性と排水収縮変形特性を把握した。取得された膨潤変形量～サクシオン（飽和度と相関）の関係を整理したところ、その挙動はほぼ線形近似で解釈可能となった（図 1.3.3-5、表 1.3.3-1）。

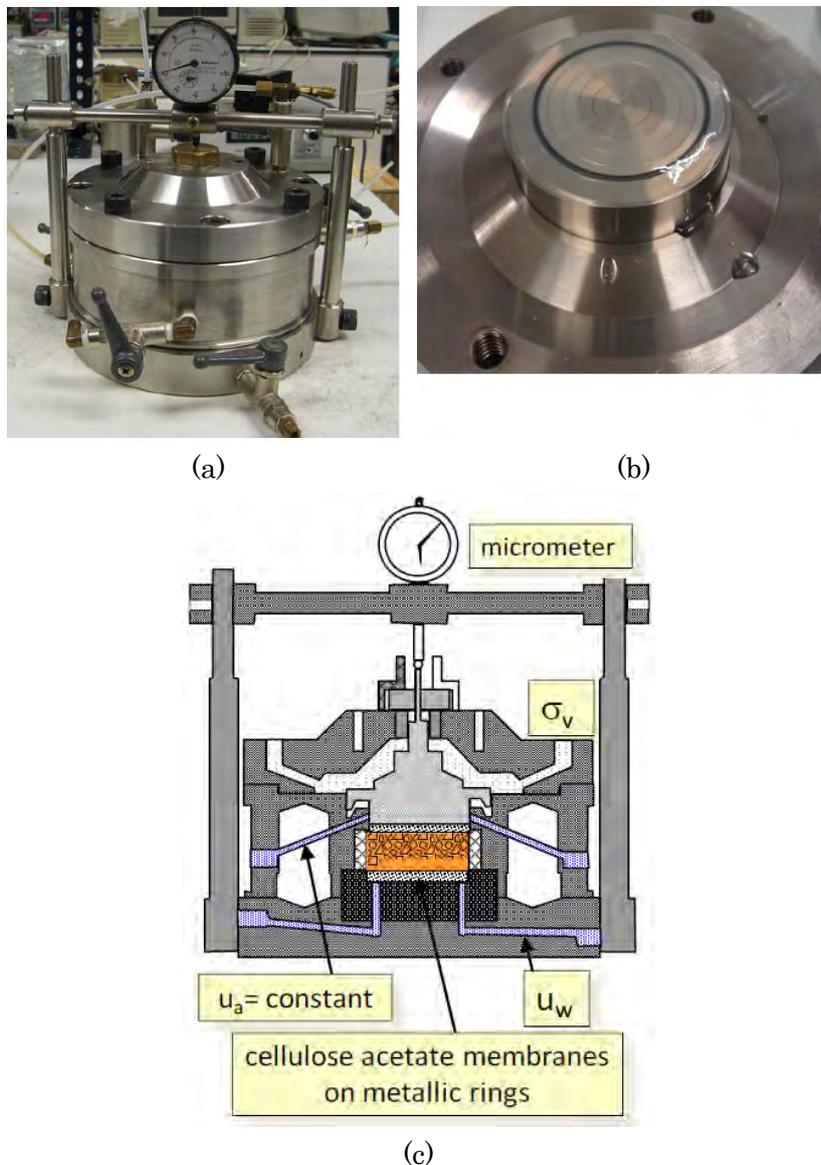


図 1.3.3-4 サクシオン制御可能なオエドメータ試験装置 (a)試験セル；(b)下部ポーラスメタル 上部にセットされた飽和アセチルセルロース膜；(c)試験装置の断面模式図

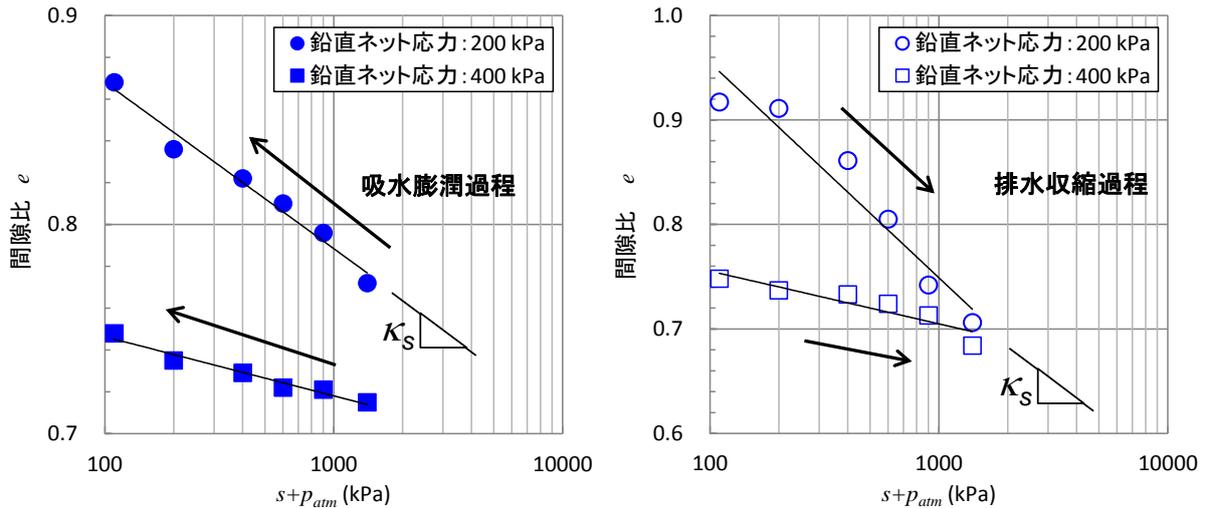


図 1.3.3-5 各鉛直ネット応力一定条件下でのサクシオン減少に伴う吸水過程の膨潤挙動(左図)と各鉛直ネット応力一定条件下でのサクシオン増加に伴う排水過程の収縮挙動(右図)

表 1.3.3-1 各試験結果における $e-\ln(s+P_{atm})$ 関係の傾き κ_s

鉛直ネット応力 p_v (kPa)	平均ネット応力 p (kPa)	吸水過程の κ_s	排水過程の κ_s
200	161.9	0.0345	0.0894
400	323.8	0.0123	0.0195

また、線形近似された挙動は Barcelona Basic Model (処分施設のガス移行挙動評価に必須である力学連成二相流解析の構成則・数学モデル、式(1)および(2))で再現可能であることが分かり、実験結果をモデルでフィッティングすることにより、当該モデルのパラメータを同定・取得することが出来た(表 1.3.3-2)。

$$de = -\kappa_s \frac{ds}{s + p_{atm}} \quad \text{式(1)}$$

$$\kappa_s = \kappa_{s0} \left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p}{p_{ref}} \right) \exp(\alpha_{ss} \cdot s) \quad \text{式(2)}$$

表 1.3.3-2 吸水膨潤変形および排水収縮変形に関する

Barcelona Basic Model モデルパラメータ

過程	α_{ss}	p_{ref} (kPa)	α_{sp}	κ_{s0}
吸水	0	100	-0.641	0.050
排水	0	100	-0.731	0.138

1.3.4 セメント系材料のガス移行データ取得

本項目は、TRU 廃棄物処分概念の人工バリア材料のうち、セメント系材料の詳細なガス移行特性（気液二相流特性）の把握を目指すものである。

平成 26 年度は、平成 25 年度の検討で策定した今後 5 カ年間（平成 25-29 年度）の実実施計画と予備試験結果[11]に基づき、セメント系材料のうち廃棄体間パッケージの充填材として想定されるモルタル材料の気液二相流特性データ（透水・透気係数、モデルパラメータ等）の取得・評価法の確立に向けた基礎データ取得を目的として、特にガス移行過程（排水過程）の詳細な挙動把握に主眼を置いた気液二相流特性データ取得試験およびモデルパラメータの同定逆解析を実施した。

具体的には、飽和したモルタル供試体（n=2）に対して透気試験を実施することで、透気特性データ（ガス注入時の累積排水・排気量が定常に至るまでの経時変化）取得・整理したとともに、順解析コード（GETFLOWS[13]）および汎用逆解析コード（UCODE_2005[18]）を併用した逆解析手法（図 1.3.4-1）の適用による実測データ（整理した累積排水量・排出ガス量データ）の再現検討により（図 1.3.4-2）、実測データを良好に再現可能な二相流特性（van Genuchten モデル[14]パラメータ）を同定した。

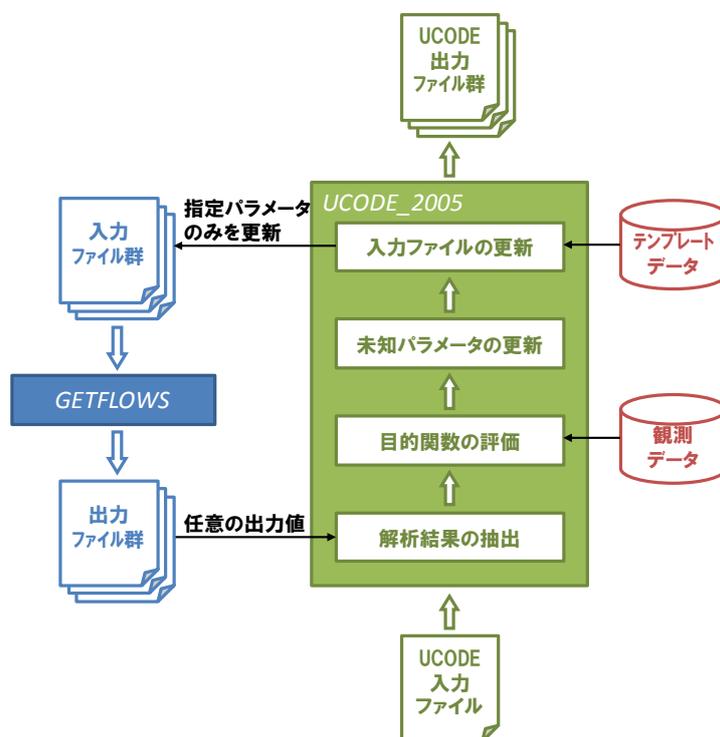


図 1.3.4-1 GETFLOWS+UCODE_2005 による逆解析の流れ

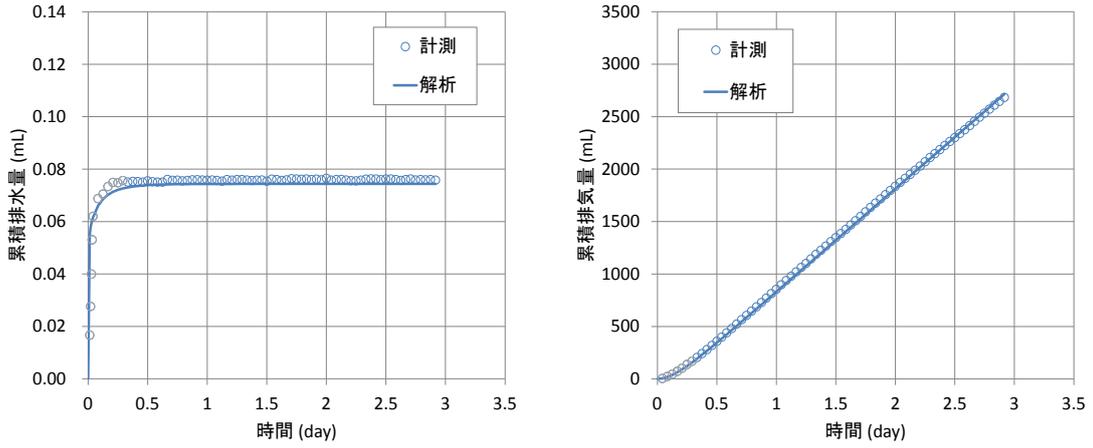


図 1.3.4-2 ガス移行試験結果（実測）と逆解析（解析）結果

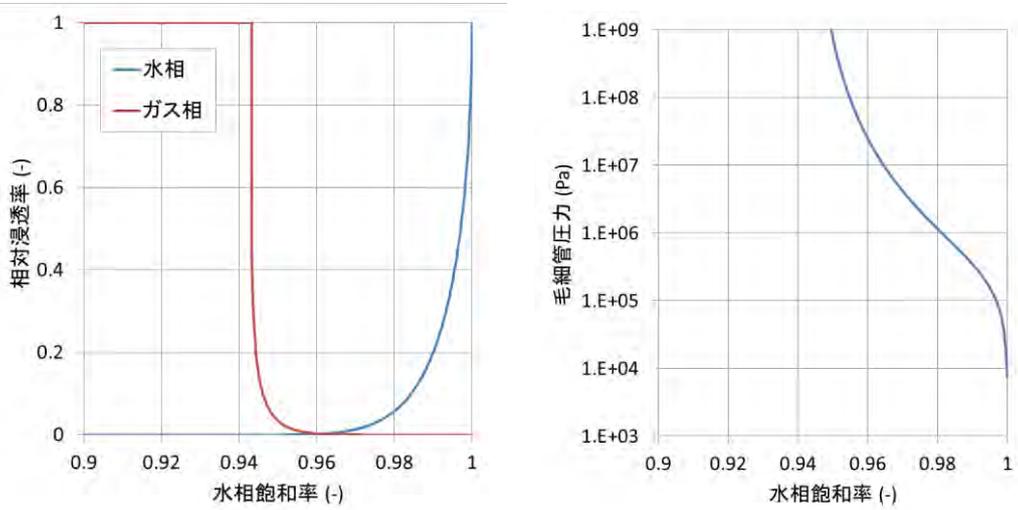


図 1.3.4-3 逆解析結果より同定された van Genuchten モデル曲線

表 1.3.4-1 同定された van Genuchten モデル[14]パラメータ

モデルパラメータ		値
相対浸透率	S_{wr}	0.9432
	n_w	2.140
	n_g	1.316
毛細管圧力	S_{wr}	0.9432
	P_o	2.484×10^5 (Pa)
	n	1.264

1.3.5 まとめ

本事業では、TRU 放射性廃棄物処分場で想定されるような、廃棄物に含まれる金属の還元腐食その他による水素などのガス発生による施設への様々な影響（施設内でのガス圧上昇により破過が生じた場合、その時に緩衝材中等に生じた破過経路が核種の移行経路となったり、ガス圧によって力学的な安定性が損なわれる等）を評価するために必要な「ガス移行連成挙動評価手法の開発」にこれまで取り組んできた。

また、本事業で目標とする成果は、“開発（整備）した「ガス移行連成挙動評価手法」によって施設成立性が評価できること”であり、具体的には人工バリアシステムに対するガスの影響（どの時期に・どのような現象が生じて・EBS 全体の挙動にどのような影響をもたらすか）を確実に把握できることである。

上記のような背景のもと、まず前フェーズ（平成 19-24 年度）の調査研究によって抽出された解決すべき重要度の高い課題が取りまとめられていることがある。これを踏まえ、今フェーズ（平成 25-29 年度）の検討では、前フェーズの検討で顕在化した課題の解決に資する実施計画を策定したうえで、新たな調査研究を推進してきている、といった時系列的な経緯を有するのが、本事業の特徴である。

図 1.3.5-1 に、これまでの調査研究の成果より抽出された課題（課題①：第 2 次 TRU レポートで抽出された課題、課題②：平成 19-24 年度の検討で抽出された課題）が今フェーズへどのように反映され、どのように検討が進められてきたかを具体的に整理して示す。

さらに、今フェーズ（平成 25-29 年度）で実施する「ガス移行シナリオの拡張（ガス移行シナリオの構築と根拠の拡充）」、「ガス移行連成挙動解析ツールの高度化（連成現象メカニズムのモデル化と解析的検討）」、「ガス移行挙動に係る材料データの取得（ガス移行連成現象のメカニズム解明）」の 3 つの検討項目はお互いに連携を取り合い、優先度を定めて進めていくものとした。

図 1.3.5-2 に上記の 3 つの検討実施項目の相互関係を示す。

この中で特に、「ガス移行シナリオの構築と根拠の拡充」においては、これまでに詳細な検討が成されなかった「安全評価の観点からガス移行挙動が処分場にどのような影響を与えるのか」を評価するのに必要な検討であり、処分場で現実的に想定されるガス移行に係る現象を時系列的なシナリオとして構築するものであるが、その根拠に実現象の把握（ガス移行に関する材料データの取得）や実現象のメカニズムの妥当性や再現性の確認（連成現象メカニズムのモデル化と解析的検討）が必要となってくる。これが各検討項目で連携が必要な理由である。

以上のような取り組みを経て得られた主な平成 25 年度までの主な成果と残された課題を取りまとめたものを図 1.3.5-3 に、また、前フェーズ（平成 19-24 年度）までの成果を含めた本事業の進捗状況を整理したものを図 1.3.5-4 に示す。

図 1.3.5-3 に示した通り、これまでの検討（平成 19-24 年度）において課題とされてきた TRU 廃棄物処分施設で想定される人工バリア材料の大破過を伴うガス移行特性は平成 26 年度までの成果として把握できつつあるが、より処分施設の現実的な条件（施設形状・処分環境・天然バリアへの影響評価等）を考慮して検討を進めた結果、残された課題（さらなる不確実性と解決

すべき課題)が抽出されている。

今フェーズのうち残された3カ年(平成27-29年度)では、これらの課題の解決に向け、平成25年度に策定した全体計画(図1.3.1-3)に基づいて検討を進めていくものであるが、その一方で、全体計画や本事業の最終目標に対する成果と進捗状況を整理すると図1.3.5-4に示した通りとなる。

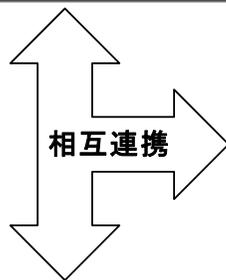
詳細は後述するが、本年度(平成27年度)の全体計画(1.4節)や成果(第2章～第5章)は図1.3.5-4に示すような位置付けとなっており、次年度以降の検討成果との関連を意識しつつ、最終目標を達成すべく検討を進めていくものである。



図 1.3.5-1 これまでの成果・課題と H25-29 年度で取り組む検討内容と目標成果

ガス移行シナリオの構築と根拠の拡充

・第2次TRULレポート等、既往の検討で開発されたシナリオ構築手法をベースに、具体的な処分施設の長期状態変遷表やシナリオ整理シート作成、および作成根拠の拡充を進める等の「ガス移行シナリオの検討」により、これらに基づいた現実的なガス移行シナリオと評価手法の構築に取り組んでいる。



ガス移行連成現象のメカニズム(素過程)解明

・人工バリア(右図)のうち、ベントナイト系/セメント系材料や界面を対象として、「室内試験の実施」にて取得された水とガスの透過性や力学特性データを評価することによって、シナリオで想定されるようなガス移行に伴って生じる人工バリア材料中の連成現象のメカニズム(素過程)解明に取り組んでいる。

連成現象メカニズムのモデル化と解析的検討

・解明された連成現象メカニズムのモデル化と検証を進め、検証されたモデルやシナリオで想定される境界条件が反映されたガス移行解析を実施して等の「解析的検討の実施」により、処分施設で想定されるガス移行挙動の把握に取り組んでいる。

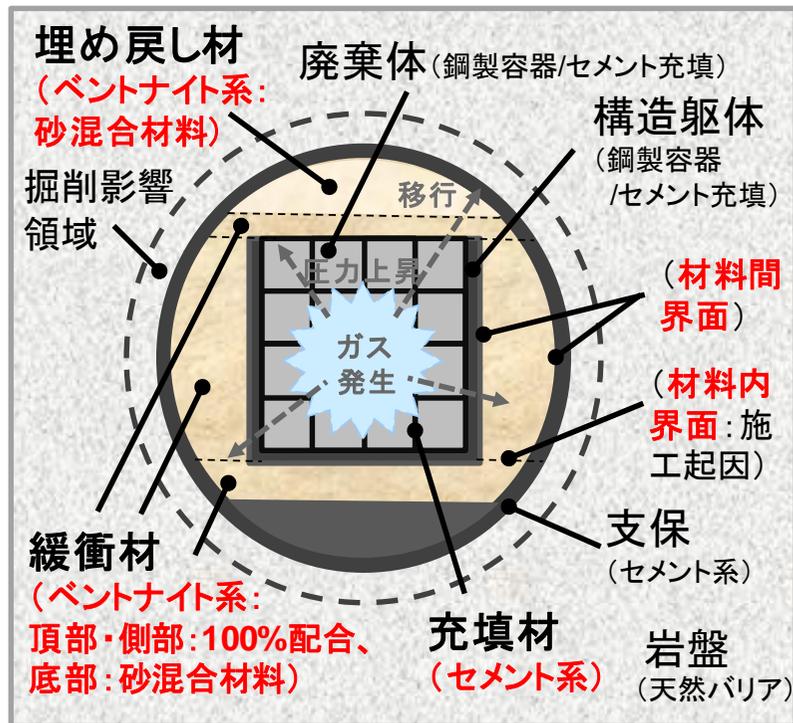
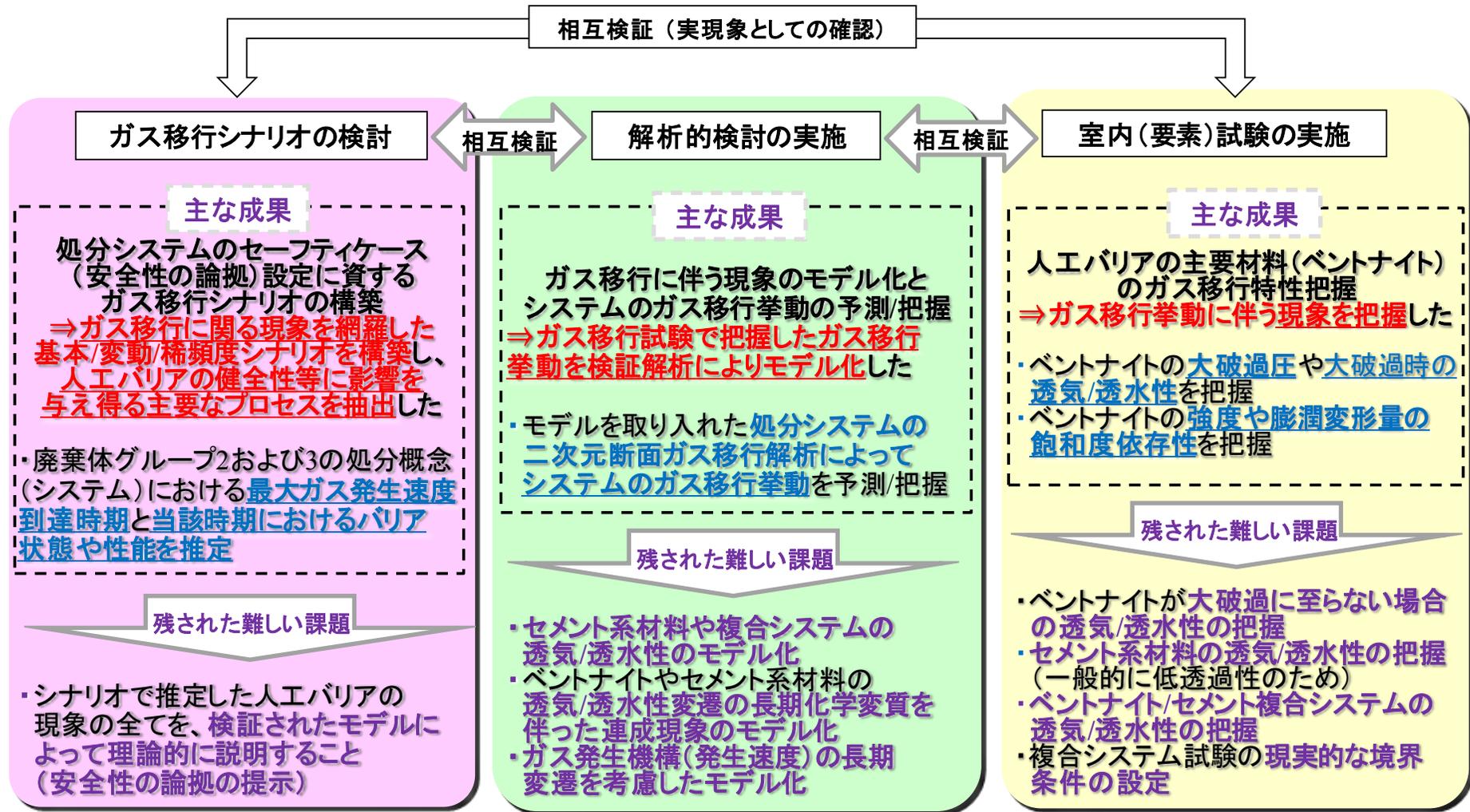


図 1.3.5-2 検討実施項目（今フェーズ：平成 25-29 年度）の相関



➤ 残された課題の解決に向け、平成25～29年度の全体計画を策定

図 1.3.5-3 これまでの検討で得られた成果と残された課題

凡例 ○:達成、△:不足していること(検討途中)
×:未達成(未実施)

実施内容	最終目標	H19 (2007)	H20 (2008)	H21 (2009)	H22 (2010)	H23 (2011)	H24 (2012)	H25 (2013)	H26 (2014)	H27 (2015)	H28 (2016)	H29 (2017)
		廃棄物Gr.2の処分概念を対象							Gr.3	Gr.1&4	施設全体を対象	
施設全体のガス移行シナリオ作成・整備	ガス移行評価手法の整備		シナリオ整理シート構築 △	ガス移行シナリオ構築 △	シナリオに基づく解析評価 △	現実的なシナリオの構築 △	シナリオ整理シート再評価 ○	Gr.3のシナリオ構築 ○	Gr.1&4のシナリオ構築 ○	評価体系の整備 ○	施設全体(EBS+NBS)のガス移行シナリオ構築と重要事象の抽出	
ガス移行シナリオ作成や評価手法の整備に必要なもの	エビデンスの拡充		×	×	×	根拠資料集の整備(既往の文献調査の反映) △	根拠資料集の拡充(最新知見の反映) △	根拠資料集の拡充(最新知見の反映) △	・ガス発生に係る最新知見の反映 △	・ガス移行挙動に係る最新知見の反映 △	・ガス移行モデルやパラメータに係る最新知見の反映 △	・根拠資料集への統合、整理
	モデルの構築・解析手法の整備		(国内外の既往試験結果の再現解析による)		(H20-24年度の試験の再現解析による)			(H25-28年度の試験の予察解析による)				
	データの拡充	全材料/EBSの二相流・力学挙動の把握と再現(想定される現象の確認)		飽和ベントナイトのガス移行モデルの構築 ○	不飽和ベントナイトのガス移行モデルの構築 ○	・室内試験成果の再現解析・評価によるガス移行モデルの確証 ・確証されたモデルによるGr.2の処分概念を対象としたガス移行解析とガス移行挙動の把握 △			確証されたモデルによる室内試験の予察解析と評価(モデルや解析手法の信頼度の評価) △		処分システム全体を対象としたガス移行解析とガス移行挙動の把握	
			・飽和および不飽和ベントナイトの大破過に至るまでのガス移行特性の把握(ガス注入圧の段階的な昇圧によるガス注入試験) ・ガス移行に伴う力学特性の把握(飽和・不飽和力学試験) ・ガス移行特性の寸法依存性の把握(高さの異なる供試体) △		△			大破過に至らないガス移行特性の把握 △		EBS界面(施工/異種材間)のガス移行特性の把握 △		処分システム全体の特性検討

EBS(人工バリアシステム)のガス移行シナリオは、ほぼ完成

施設全体を対象としたシナリオの構築と重要事象の抽出が課題

図 1.3.5-4 これまでの検討で得られた成果と進捗状況の整理

1.4 実施概要

1.4.1 全体計画

前節「1.3 本事業のこれまでの成果概要」で述べたように、平成 25 年度の検討[11]において、国内外で得られている知見の整理および解決すべき課題の抽出を行ったうえで、平成 25-29 年度にわたる 5 カ年の実施計画（図 1.3.1-3）が策定されている。また、実施計画に基づいた平成 26 年度までの検討で、多岐にわたるデータ取得および知見の取りまとめ等の成果が得られている。

平成 27 年度は、平成 26 年度までの実施成果を踏まえつつ、5 カ年の実施計画のうち平成 27 年度の実施内容を遂行した。図 1.4.1-1 に、平成 27 年度の調査研究進捗表を示す。

実施項目	平成27年(2015)						平成28年(2016)						
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
1. 実施計画策定	H72年度実施計画策定												
2. ガス移行評価シナリオの拡充	計画の具体化		ガス発生が処分システムの安全機能に与える影響を評価するための体系(評価体系)の整備				整備した評価体系に基づく技術課題の抽出と解決に向けた検討		成果取りまとめ				
3. ガス移行連成挙動解析ツールの高度化	計画の具体化		ガス移行モデルの検証(ベントナイト系試験の予察解析および再現解析)				TRU廃棄物処分システムを対象としたガス移行挙動における不確実性を考慮したガス移行挙動の解析的評価		成果取りまとめ				
4. 人工バリアシステムのガス移行連成挙動評価													
4-1. ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充	計画の具体化		二相流特性データ取得・不飽和力学特性データ取得・ガス移行挙動評価				人工バリア材料界面のガス移行挙動評価・複合システム試験の検討		成果取りまとめ				
4-2. セメント系材料のガス移行挙動データの取得	計画の具体化		人工バリア材料界面のガス移行挙動評価・二相流特性データ取得				成果取りまとめ						
5. 委員会 △:委員会による決定、レビュー等							△ 第1回委員会 (実施計画の評価)		△ 第2回委員会 (調査結果の中間評価)		△ 第3回委員会 (最終評価)		
6. 報告書作成										報告書ドラフト作成		修正	

図 1.4.1-1 「ガス移行連成挙動評価手法の開発」平成 27 年度 調査研究進捗表

次項より、各項目の実施概要を記す。また、各項目の詳細な内容を次節以降に記す。

1.4.2 平成 27 年度の実施概要

(1) ガス移行評価シナリオの拡張

前節「1.3.1 ガス移行評価シナリオの拡張」で述べたように、平成 24 年度までの検討[5][6][7][8][9][10]において、TRU 廃棄物処分概念（廃棄物グループ 2 を対象とした人工バリアに緩衝材を敷設する概念）を対象としたガス移行評価シナリオの整備を通して「ガス移行挙動評

価手法」を開発しているが、平成 26 年度までの検討[11][12]では、このうち「廃棄物グループ 1（グループ 2 と同様に緩衝材有り）」並びに「廃棄物グループ 3 および 4（緩衝材無し）」を対象としたガス移行評価シナリオが整備できている。

なお、ガス移行評価シナリオの検討の中では、「①人工バリアの状態変遷表」、「②人工バリアに求められる安全機能の展開表」、および「③状態変遷に係わる FEP グループのつながりを系統的に示す統合 FEP 関連図」を作成しており、評価シナリオ設定での不確実性を考慮した上で、①～③を統合しシナリオ整理シートとして取りまとめている。

さらには、上記①～③の成果をもとに廃棄物グループごとの評価上の不確実性を抽出し、解決すべき技術課題を整理してきた。

平成 27 年度は、上記で整理した技術課題の解決を目的として、これまでの検討成果を踏まえつつ、予備的安全評価におけるガス発生の影響評価に係わる評価体系を構築するとともに、体系を構成する要素の不確実性を系統的に抽出・分析し、これらの削減に向けての方策を検討した。

以下に実施項目を示す。

- ・ ガス影響に対する評価体系の整備
- ・ 整備した評価体系に基づく技術課題の解決に向けた検討

(2) ガス移行連成挙動解析ツールの高度化

前節「1.3.2 ガス移行連成挙動解析ツールの高度化」で述べたように、平成 26 年度までの検討[5][6][7][8][9][10][11][12]においては、TRU 廃棄物処分システムのガス移行挙動評価に資する解析手法等の検討を通し、解析ツールの構築と高度化を推進してきた。

平成 27 年度は、既存の解析ツールを TRU 廃棄物処分施設の性能評価や安全評価に資するガス移行連成評価ツールとして更に高度化していくことを目的とした検討を実施した。

具体的には、平成 26 年度までに整備したガス移行モデルやパラメータの検証を通じた信頼性向上のための検討を行ったほか、検証済みのモデルパラメータ等でデータベースが更新された解析ツールによるガス移行解析を実施することで、TRU 廃棄物処分システムの不確実性（人工バリア材料のガス移行特性値のバラつき等）を考慮した際に想定されるガス移行挙動の解析的評価等を行った。

以下に実施項目を示す。

- ・ ガス移行試験の予察解析（ガス移行モデルの検証）
- ・ ガス移行データライブラリの拡充（データベースの更新）
- ・ TRU 廃棄物処分システムの不確実性を考慮したガス移行解析（ガス移行挙動の解析的評価）

(3) 人工バリアシステムのガス移行連成挙動評価

前節「1.3.3 ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充」並びに「1.3.4 セメント系材料のガス移行データ取得」で述べたように、平成 26 年度までの検討

[5][6][7][8][9][10][11][12]においては、人工バリアの構成材料単体を対象としたガス移行挙動の評価を行ってきたが、このうちベントナイト系材料（緩衝材）の二相流特性の不確実性（ガス圧依存性）に係る課題が抽出されている。

また、底部緩衝材の候補材料である「ベントナイト-砂混合材料」に関しては、ガス移行に伴う力学特性を適切に評価しなければならないが、このために必要なデータも継続的に取得していく必要がある。

一方で、多様な材料から構成される人工バリアは「多重バリアシステム」であることから、人工バリアシステムのガス移行連成挙動を評価するためには人工バリアの形状等を考慮した「複合材料システム」としてのガス移行挙動を把握しておく必要である。

ここでは、必要なデータ取得試験の実施等を通して、上記課題の解決に資する検討を行った。

1) ベントナイト系材料のガス移行挙動評価に係るデータの拡充

5 年間で（平成 25-29 年度）の実施計画[11]に基づき、かつ平成 26 年度の検討成果[12]を踏まえながら、飽和および不飽和ベントナイト系材料供試体を用いたガス移行挙動評価に係るデータ取得試験を実施し、ベントナイト系材料（緩衝材）中のガス移行挙動評価における課題解決に資することとした。

以下に実施項目を示す。

- ・ 緩衝材の二相流特性評価に係るデータの拡充（圧縮飽和ベントナイト中のガス移行挙動評価に係る一定ガス圧注入試験等）
- ・ 底部緩衝材の圧密変形特性評価（ベントナイト-砂混合材料を対象としたサクシオン制御の圧密試験等）
- ・ 頂部緩衝材材料間界面のガス移行挙動評価（界面模擬のためにスリット部を設けたベントナイト中のガス移行挙動評価に係る昇圧速度一定でのガス注入試験）

2) セメント系材料のガス移行挙動評価に係るデータの取得

5 年間で（平成 25-29 年度）の実施計画[11]に基づき、かつ「モルタル（隙間充填材）」を評価対象とした平成 26 年度の検討成果[12]を踏まえながら、飽和および不飽和セメント系材料（隙間充填材）中のガス移行挙動評価における課題解決に資することとした。

以下に実施項目を示す。

- ・ 隙間充填材間界面のガス移行挙動評価（界面模擬のために打継ぎ面を設けたモルタル中のガス移行挙動評価に係る一定ガス圧注入試験等）

3) 人工バリアシステムのガス移行連成挙動評価に係る複合材料システム試験の実現に向けた検討

人工バリアシステム中で想定されるガス移行挙動を評価するためには、上記で検討したようにシステム内で選択的なガス移行経路になることが想定される（人工バリア材料間で生じる得る）

界面のガス移行特性評価のほか、人工バリアシステム全体を模擬した複合材料システムとしてのガス移行挙動を把握しておく必要がある。

ここでは、人工バリアシステム全体としてのガス移行挙動を評価するために必要な、複合材料システム試験の実現に向けた検討を行うこととした。

以下に実施項目を示す。

- ・ 複合材料システム試験の実施事例や既往知見の整理等
- ・ **TRU** 廃棄物処分概念の人工バリアシステムを対象とした複合材料システム試験の概略計画の策定

参考文献

- [1] 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とりまとめ－(2005).
- [2] 資源エネルギー庁 日本原子力研究開発機構：TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画(2006).
- [3] 原子力発電環境整備機構 (2011)：地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性、NUMO-TR-10-03
- [4] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 18 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査人工バリア・天然バリアガス移行挙動評価報告書 (2007).
- [5] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 2 分冊)－ガス移行挙動の評価－(2008).
- [6] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 2 分冊)－ガス移行挙動の評価－(2009).
- [7] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 21 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 2 分冊)－ガス移行挙動の評価－(2010)
- [8] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 22 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 2 分冊)－ガス移行挙動の評価－(2011)
- [9] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 2 分冊)－ガス移行挙動の評価－(2012)
- [10] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 2 分冊)－ガス移行挙動の評価－(2013)
- [11] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 25 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発報告書 (第 5 分冊)－ガス移行連成挙動評価手法の開発－ (2014)
- [12] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 26 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発報告書 (第 5 分冊)－ガス移行連成挙動評価手法の開発－ (2015)
- [13] Hiroyuki TOSAKA、 Koji MORI、 Kazuhiro TADA、 Yasuhiro TAWARA and Koji YAMASHITA、 2010. A General-purpose Terrestrial Fluids/Heat Flow Simulator for Watershed System Management、 IAHR International Groundwater Symposium 2010.

- [14] van Genuchten, M.Th. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898, 1980.
- [15] Narasimhan, T. N., Witherspoon, P. A. and Edwards, A. L. : Numerical model for Saturated-Unsaturated Flow in Deformable Porous Media” , Part 2: The algorithm. *Water Resources Research*, vol.14(2), pp255-261, 1978.
- [16] D. Landolt, A. Davenport, J. Payer, D. Shoesmith, 2009. A Review of Materials and Corrosion Issues Regarding Canisters for Disposal of Spent Fuel and High-level Waste in Opalinus Clay, Technical Report 09-02, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste.
- [17] Tianfu Xu, Eric Sonnenthal, Nicolas Spycher and Karsten Preuss, 2004. TOUGHREACT User's Guide: A Simulation Program for Non-isothermal Multiphase Reactive Geochemical Transport in Variably Saturated Geologic Media, LBNL-55460.
- [18] Eileen P. Poeter, Mary C. Hill, et al., 2005. UCODE_2005 and Six Other Computer Codes for Universal Sensitivity Analysis, Calibration, and Uncertainty Evaluation, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.

第2章 ガス移行シナリオの拡張

2.1 背景と目的

ガス発生の影響評価に関しては、既往研究[1][2]のように、処分施設の安全評価に係わる「ガス発生影響」と「核種移行挙動」を、それぞれ単独で検討・評価されてきた。公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、原環センター）殿では、平成 19～24 年度までの検討[3]において、上記既往研究におけるシナリオ開発フローをもとに、本業務独自の検討フローを整理した上で、両者を互いに包括するガス移行挙動評価手法を構築してきた。

本検討は、上記のような取り組みを通し、人工バリア材の長期挙動及びガス移行挙動に対する理解を深め、人工バリア性能評価に係わる技術的信頼性の向上及び技術基盤の確立に向けた一助（ガス影響に係わるセーフティケースの構築）となることを目的としている。

これまでの成果を受けた平成 26 年度までの検討[4]においては、上記のガス移行挙動評価手法の手順に基づき、周辺岩盤を含む人工バリアの時系列状態変遷とそれらが有する不確実性を考慮したガス移行挙動評価シナリオ（TRU 廃棄体グループ 1～4 を対象）を設定したとともに、①人工バリアの状態変遷表、②人工バリアに求められる安全機能の展開表、および③状態変遷に係わる FEP グループのつながりを系統的に示す統合 FEP 関連図を作成した他、評価シナリオ設定での不確実性を考慮した上で、①～③を統合しシナリオ整理シートとして取りまとめた。また、これらの一連の作業に関連する知見を根拠書として整備し、廃棄物グループごとの評価上の不確実性を抽出し、解決すべき技術課題を整理してきた。

そこで平成 27 年度は、TRU 廃棄物処分に係る人工バリアの長期性能評価に関する課題の解決に向けた取り組みとして、これまでの検討成果を基にした予備的安全評価におけるガス発生の影響評価に係わる評価体系を構築するとともに、体系を構成する要素の不確実性を系統的に抽出・分析し、これらの削減に向けた以下の検討を実施した。

- ① ガス影響に対する評価体系の整備
- ② 整備した評価体系に基づく技術課題の解決に向けた検討

2.2 実施内容

2.2.1 ガス影響に対する評価体系の整備

TRU 廃棄物処分のガス影響に関わるセーフティケース構築に資することを目的として、ガス発生がバリアシステムの安全機能に与える影響を評価する体系を整備し、評価体系を構成する作業の中で重要な要素を設定したうえで、関連する不確実性を抽出した。評価体系の原形は昨年度まで検討してきた「シナリオ整理シート」に凝縮されており、ここでは以下に示す検討を進めることで、評価体系を構成する重要な要素に関わる不確実性や現状での知見を整理し、3.2 節の技術課題の検討に結び付けた。

- ・ガス影響で対象とする評価体系の準備
- ・評価体系中での重要要素と不確実性の抽出
- ・重要要素に対する知見の整理

(1) ガス影響で対象とする評価体系の準備

ガス影響で対象とする評価体系の準備では、図 2.2.1-1 に示す作業手順で実施する。

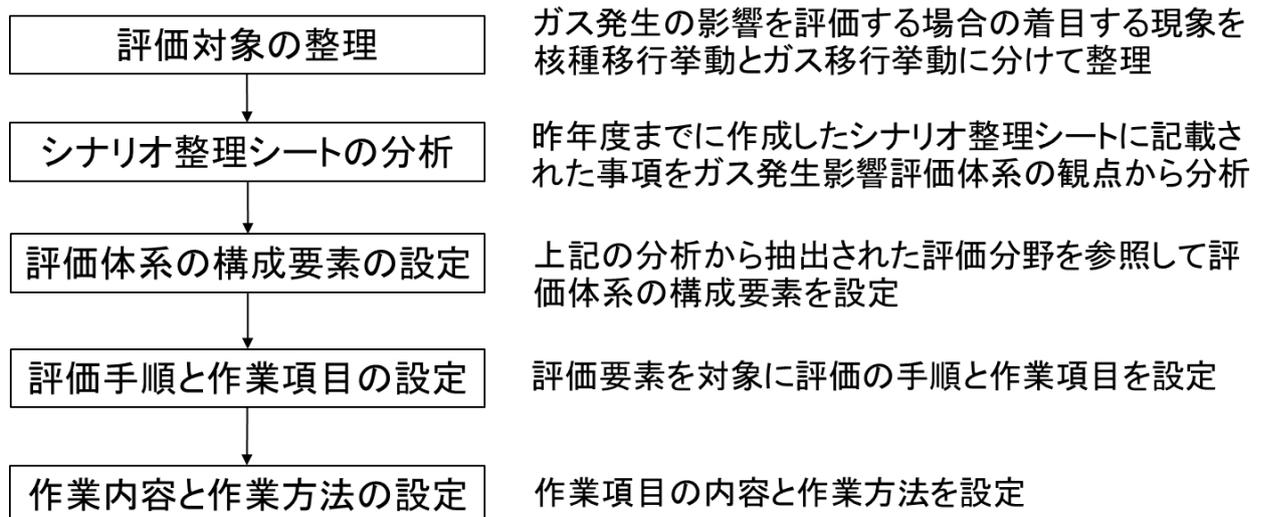


図 2.2.1-1 評価体系検討の流れ

1) 評価対象の整理

TRU 廃棄物処分におけるガス発生が人工バリアシステムの安全機能に及ぼす影響の評価体系の準備として、これまでの検討や議論に基づき評価の対象を抽出・整理する。ガス発生の影響は、①放射性ガスの人工バリア外への放出、②ガス蓄圧によるバリア内亀裂（破過など）発生による溶存核種の EDZ への放出、および③バリアシステムの核種閉じ込め機能の早期喪失可能性が考えられる。これらの関係を図 2.2.1-2 に示す。安全評価全体の体系は、ガスの発生を考慮したものとガス発生を考慮した評価から構成される。これらの移行挙動は、図の中の統合 FEP 関連図とし

て表わすことができる。

ガスの挙動は、異なる媒体の中で、二相流として移行、間隙水に溶解した状態で移行、ガス亀裂を発生して人工バリア外に核種を放出するモードが想定されている。これらの移行モードの違いは、ガスの発生速度や量、移行媒体の特性（グループ2では、廃棄体、廃棄体容器、充填材、コンクリートピット、ベントナイト、支保、掘削影響領域（EDZ）が相当）、及び周辺環境からの制約条件によって異なってくる。通常の核種移行解析では、間隙水等に溶解した核種の移行（移流、拡散、分散）を扱うため、媒体環境は水で飽和されていることが前提条件となるが、ガス移行は媒体の飽和度に関係なくガス状、あるいはガス溶存の状態でも移動する特徴がある。

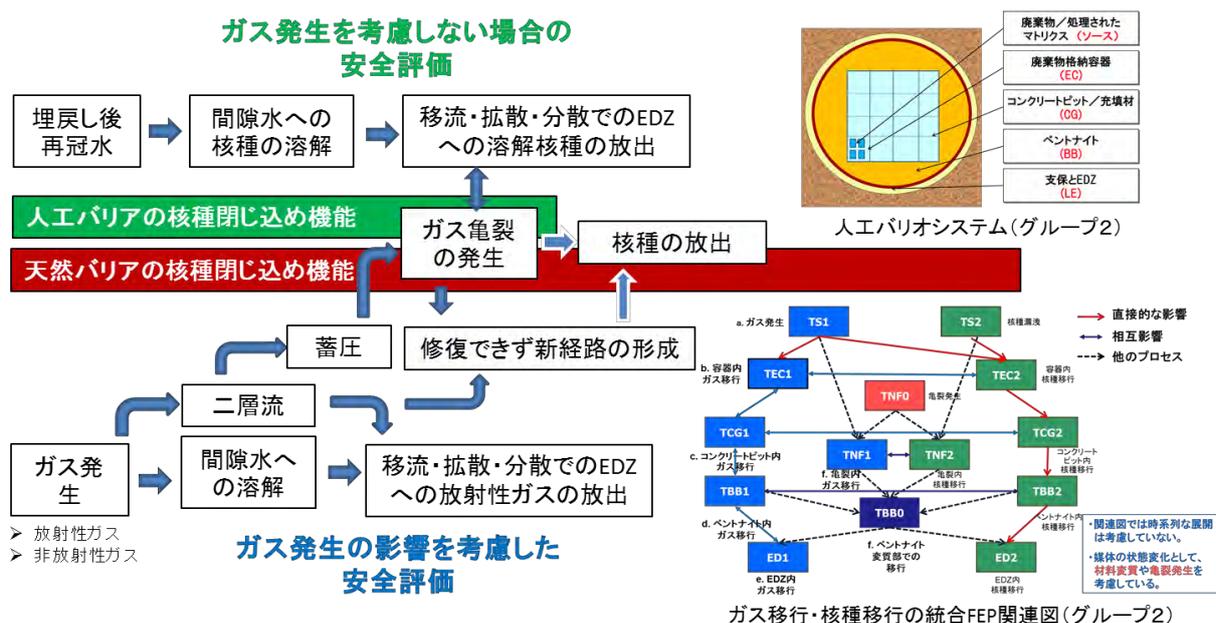


図 2.2.1-2 評価体系の対象

2) シナリオ整理シート of 分析

平成 26 年度までの検討成果[4]として、網羅的な状態変遷表から作成したシナリオ整理シート（例えば図 2.2.1-3 参照）は、構築を目指す評価体系の原形となっており、下段にある評価ケースを作成することを目的として、時系列的に変化する評価要素（場と現象の理解→シナリオ設定→評価ケースの設定→モデル選択→パラメータ設定）から構成されている。

これらの評価要素は、言い換えれば、ガス発生の影響評価体系の作業要素に相当する。以下これらの作業要素を対象に検討を進める。

ガス挙動評価に関わるシナリオ整理シート例(グループ2)

	埋戻し～閉鎖	廃棄体容器が健全な期間	容器損傷、廃棄体飽和～	ベントナイト機能損失まで	ベントナイト機能損失後
EBSの状態変遷と核種移行のプロセスイメージ					
統合FEP関連図					
廃棄体	発熱	劣化	腐食		
廃棄体容器/充填材		劣化			
コンクリートピット		劣化			
ベントナイト緩衝材		膨潤	変質・劣化		
処分空洞埋戻し材		膨潤・変質・劣化			
支保工	変質・劣化				
掘削影響領域	不飽和	飽和・応力回復		周辺岩盤応力	
ガス	発生部位 発生速度	充填材(放射線分解) 充填材(放射線分解)、充填材・構造躯体・支保工(腐食)	廃棄体(放射線分解)、廃棄体・充填材・構造躯体(腐食)	廃棄体(放射線分解)、廃棄体・充填材・構造躯体(腐食)	人工バリア全領域(微生物)
構造躯体の状態劣化	T(温度)				
	H(水理) 内側 外側				
	M(力学)				
	C(化学) 内側 外側				
R(放射線分解)					
評価ケース	ガス移行モード	気みち中の移流	EBS内の蓄積、拡散、破過	EBS内の蓄積、拡散、破過	EBS内の蓄積、拡散、破過
	核種移行モード		溶解、拡散、浮力、汚染水押出	溶解、拡散、浮力、汚染水押出	亀裂媒体中の移流
	モデル設定		多孔質媒体二相流 (+力学達成)	多孔質媒体二相流 (+力学達成)	亀裂媒体+多孔質媒体二相流 (+力学達成)	亀裂媒体二相流

※: 赤枠は影響が大きい期間を、橙枠は影響が発現している期間を示す

評価体系の要素

状態変遷表
⇒場と現象の理解
⇒統合FEPに集約

統合FEP関連図:ガス+核種移行プロセス⇒シナリオ設定

EBS構成要素の状態変遷
⇒評価ケースの設定

ガス発生部位と速度
⇒評価ケースの設定

評価ケース:ガス移行モード、核種移行モード
⇒モデル設定

⇒評価の時間枠によってすべての要素が変化している

図 2.2.1-3 シナリオ整理シートにおける評価要素の抽出例[4]

3) 評価体系の要件

構築を目指す「評価体系」は、ガス発生の影響評価作業への安全機能への影響を定量的に評価するために、関連する作業の内容、評価方法、判断指標・尺度などを理論的な整合性をとりつつ系統的にとりまとめたものとなる。そのため、評価体系の準備では、体系を構成する以下の要件に着目する。

【評価体系の要件】

- ・ 評価の流れが示されていること⇒ガス発生の影響評価作業の手順を構築
- ・ 評価での作業項目が明確に規定されていること⇒影響評価の流れを構成する作業項目を設定
- ・ 作業内容が明確に規定されていること⇒各作業項目の具体的な内容を設定
- ・ 評価方法が規定されていること⇒作業で用いる前提や手法を整備
- ・ 判断指標と尺度が設定されていること⇒シナリオ設定、評価ケースの設定、モデル選択、パラメータ設定における妥当性判断の指標と尺度（多くは専門家の判断やレビューによる）を準備

4) 評価手順と作業項目

ガス発生の影響評価の手順は、これまでの検討[5]から図 2.2.1-4 のように示すことができる。

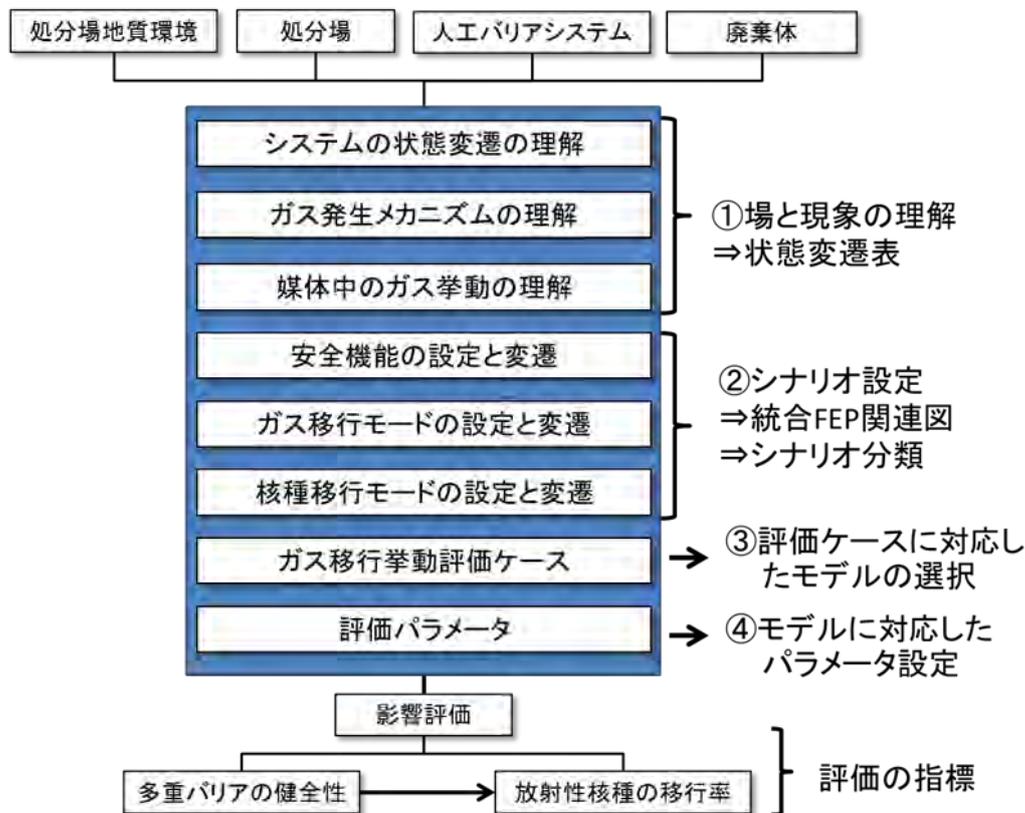


図 2.2.1-4 ガス発生の影響評価の流れ[5]

評価の流れから抽出された作業項目は、以下に示す4項目に整理することができる。

- ①場と現象の理解は、処分場が立地する地点の地質環境条件、処分場の形態、人工バリアシステムおよび廃棄体の特性に依存し、周辺岩盤を含む人工バリアの状態変遷表を作成する過程で統合FEPを構築しつつ把握していく。
- ②評価シナリオの設定は、場と現象の理解に基づき、人工バリアシステムの安全機能に対するガス移行モード、核種移行モードの安全機能への影響を考慮して構築され、シナリオ構成要素の統合FEPの蓋然性により分類される。
- ③評価ケースの設定と適用可能なモデルの選定は、状態変遷、シナリオ分類を考慮して評価ケースが設定され、評価ケースに対応した評価モデルやプロセスモデルが選定される。
- ④パラメータ設定は、評価モデルやプロセスモデルを対象に、実験や専門家の判断をもとに実施される。

5) 作業内容と方法

5項目の作業項目に対応して、以下に作業内容と作業の方法を取りまとめる。

① 場と現象の理解

【作業内容】場と現象の理解は、処分場が立地する地質環境条件、処分場概念、人工バリアシステム概念、処分場の建設・操業・閉鎖作業に関する情報をもとに、周辺岩盤を含む人工バリアシステムの状態変遷（THMC）にガス挙動に関わる状態変遷（G.R）を組み合わせた表を作成することで行う。例えば、図2.2.1-5にグループ2を対象とした状態変遷表を示す。

【方法】場と現象の理解の方法は、状態変遷表の作成段階での関連する知見の分析・整理、専門家の判断による。それらの理解の妥当性は、集積した知見の解釈や専門家のレビューで判断する。現状では十分な情報がないこともあり、多くは専門家の判断に依存している。



図 2.2.1-5 状態変遷表作成における場と現象の理解プロセス[3]

② 評価シナリオの設定

【作業内容】評価シナリオ設定作業は以下の項目からなる作業を行った。

- ・バリアの構成要素を単位とした統合 FEP の作成
- ・状態変遷と安全機能展開を考慮した統合 FEP 関連図作成
- ・シナリオ整理シートの作成
- ・シナリオ分類とシナリオの記述

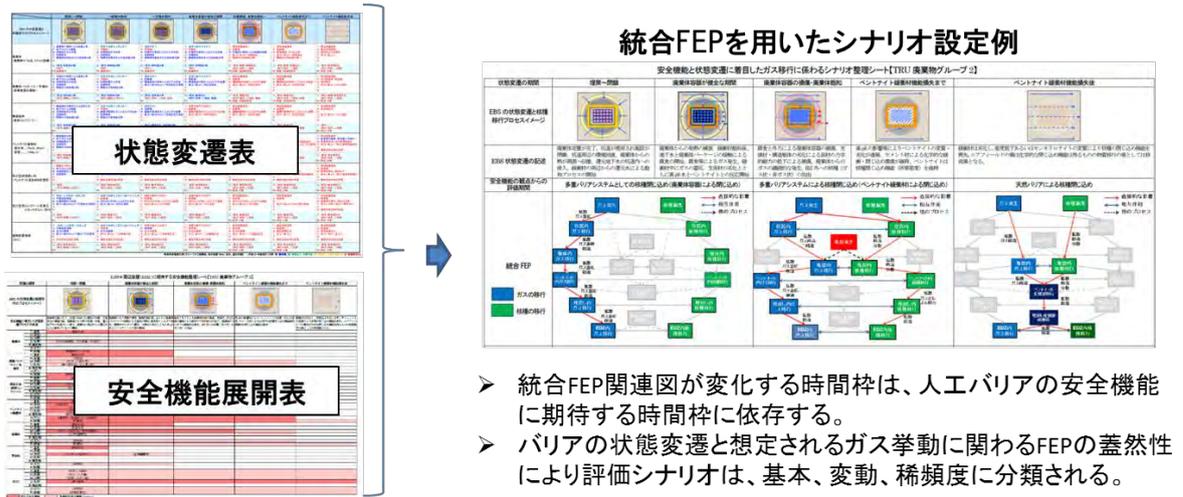


図 2.2.1-6 評価シナリオの作成例[3]

【方法】シナリオ設定は、本検討で開発してきた「ハイブリッド・シナリオ設定手法（図 2.2.1-7）」に従い、専門家の判断で上記の作業を実施する。ハイブリッド・シナリオ設定手法を用いることでシナリオ設定作業の透明性と追跡性を確保した。

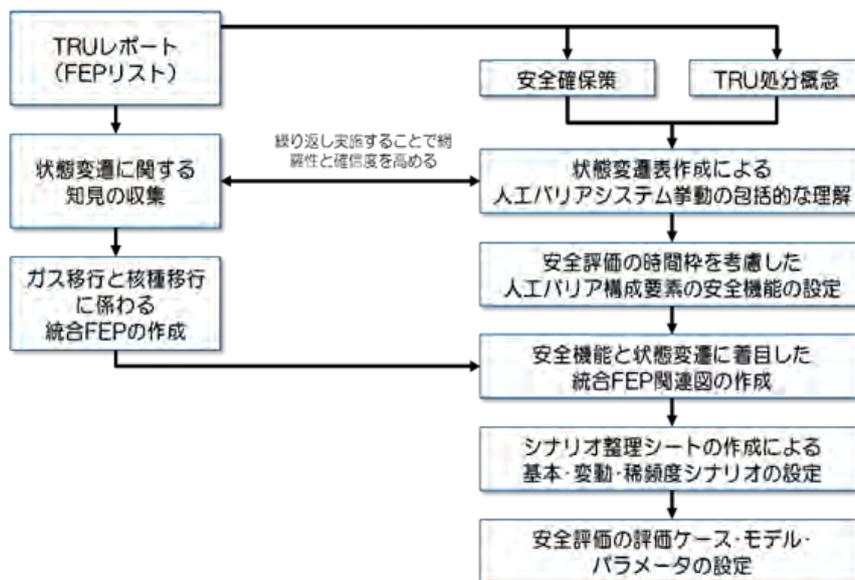


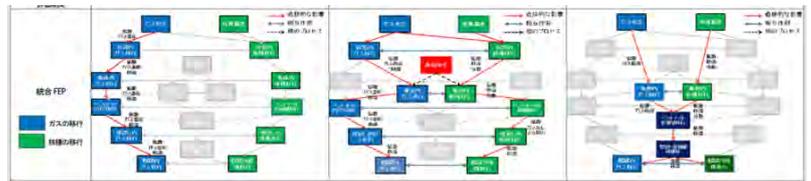
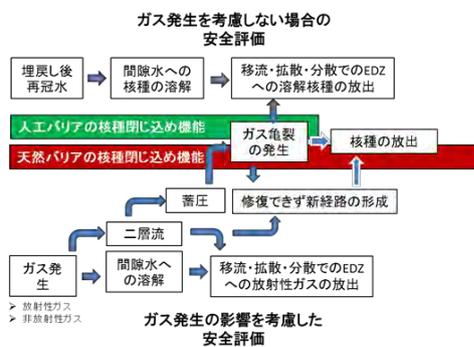
図 2.2.1-7 ハイブリッド・シナリオ設定手法[3]

③ 評価ケースの設定と適用可能なモデルの選定

【作業内容】統合 FEP 関連図と着目する状態変遷とガス挙動および核種挙動を整理し、基本シナリオ、変動シナリオ、稀頻度シナリオに対する評価ケースを設定し、対応する評価モデルとプロセスモデルを選定した。ガス挙動は核種の人工バリア外への放射性核種の放出プロセスに影響することに留意する。

【方法】評価ケースの設定は、評価の時間枠ごとに設定した統合 FEP 関連図を用いて行う。統合 FEP 関連図の時系列変遷は、状態変遷の専門家の分析による。これらの変遷を再現する評価モデルとプロセスモデルからなるモデルチェーンは、実験などの知見と専門家の判断により設定した。

評価ケースのモデルチェーン例



状態	容器健全 亀裂なし、拡散場	内部亀裂発生 ベントナイト機能維持	ベントナイト機能喪失
評価 ケース	拡散場での核種移行 二相流でのガス移行 ガス蓄圧→汚染水と放 射性ガスの放出	拡散場での核種移行 二相流でのガス移行 ガス蓄圧→汚染水と 放射性ガスの放出	移流場での核種移行 二相流でのガス移行
モデル	・移流・拡散・分散物質 移行モデル ・二相流ガス移行モデ ル⇒放射性ガス ・力学連成モデル	・移流・拡散・分散物質 移行モデル ・二相流ガス移行モデ ル⇒蓄圧計算 ・力学連成モデル	・移流・拡散・分散物質 移行モデル ・二相流ガス移行モデ ル

図 2.2.1-8 評価ケースの設定とモデル選定の枠組み

④ パラメータの設定

【作業内容】選定した評価モデル、プロセスモデルに対応したパラメータを実験データやデータ分析により設定した（現段階では、核種移行を含めた評価モデルは存在せず、プロセスモデルでの個別解析を組み合わせて評価している）。

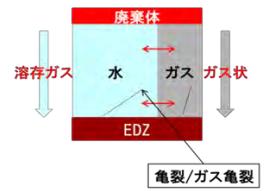
【方法】プロセスモデル（二相流、力学連成二相流モデル）のパラメータ設定は、試験データと専門家の判断に依存する。多くの試験データは要素試験であり、システムとしての挙動を再現したものでないことに留意しておく必要がある。

二相流モデルのパラメータ設定: GETFLOWを用いて要素試験のシミュレーションを行うことで、ガス移行挙動への解析コードの適用性を検証し、パラメータを設定している。このパラメータを用いてTRU処分システムのガス挙動解析を実施している。パラメータは、コンクリート材料、ベントナイト材料それぞれで設定している。

力学連成モデルのパラメータ設定: CODE-BRIGHTを用いてGETFLOWと同様な解析コードの適用性を検証している。要素試験の破過現象は追跡できていない。

c. 多相媒体での移行

- 二相流移流・拡散モデル(1, 2, 3次元) が用いられる。Henry's Law のガス交換率に基づいた物理・化学特性が異なる2層以上のバリアをモデル化でき、亀裂も扱うことができる。
- TOUGHファミリーのコードで対応が可能であるが、より詳細なデータとモデルの適用性に関する検証が必要とされる。



e. ガス亀裂での移行

- ガス亀裂を形成しながら流動するガス(脈流か連続流、あるいは相互作用)に着目したプロセスモデルが必要となる。
- 低透水性、または塑性体(ベントナイトや粘性土)での簡単なモデルが存在することから、他の媒体への適用も可能と推察される。
- 但し、必要となるデータベースは極めて限定されているため、ガス状での移行モデルにおける複雑な反応を取扱うことは難しい状態にある。



図 2.2.1-9 ガス移行評価モデルにおけるパラメータの設定例

(2) 評価体系の中での重要な要素の抽出

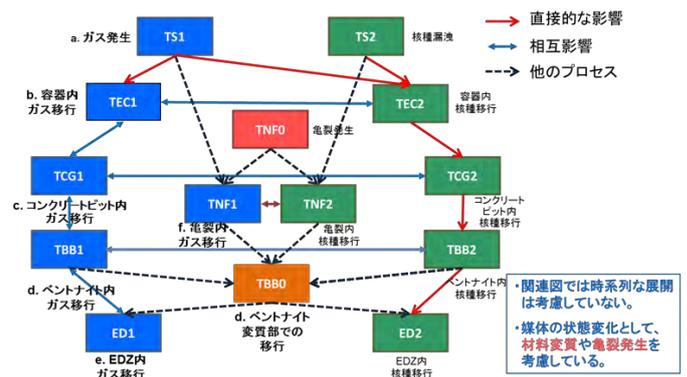
1) 状態変遷の理解

評価体系の中で状態変遷の理解は最初の作業であり、そこでの見落としや間違いはその後の評価まで影響を及ぼす(不確実性の伝播も含めて)。

状態設定から統合 FEP 関連図作成までの作業に沿って、ガス挙動評価で重要と考えられる要素と不確実性を抽出する。統合 FEP 関連図は以下に示す要素から構成される。

- a. ガス発生:** ガス発生のソースタームとしては、様々な種類の廃棄物(金属、有機物など)、鋼製容器、鉄筋コンクリート、ロックボルトなどが考えられ、様々な発生メカニズムが存在する。
- b. 廃棄体容器内ガス挙動:** 容器内でのガス挙動を支配するのは、充填材の種類と密度、間隙の大きさ、飽和度、容器の劣化変質プロセスとなる。
- c. コンクリートピットと充填材内ガス挙動:** コンクリートピットと内部のモルタル充填材の密度、時間とともに変化する亀裂状態と間隙の大きさがガス挙動に影響を及ぼすと考えられる。
- d. ベントナイト内ガス挙動:** ベントナイトの有効密度、厚さ、形状によりガス挙動のモードが変化する。ベントナイトの変質によりガス挙動の支配的なモードも変化する。
- e. 掘削影響領域(EDZ)内ガス挙動:** 亀裂の分布、間隙分布、飽和度によりガス挙動は影響を受ける。
- f. 人工バリア亀裂内ガス挙動:** 亀裂の密度、連続性、飽和度によりガス挙動は影響を受ける。

統合FEPの関連図



グループ2における統合FEP関連図

図 2.2.1-10 統合 FEP 関連図と構成要素

a. ガス発生に関わる重要要素と不確実性

ガス発生に関わる統合 FEP（下表）では、ガスの発生と消失のプロセスを要素 FEP として取り込み、これらに対応したガス発生メカニズムを推定し、様々な仮定の上、定量的に発生量が計算されている（TRU 二次レポート）。これまでのガス発生に関わる定量的な検討では、①金属腐食、②有機物分解、③放射線分解が支配的なプロセスとして扱われ、その結果として非放射性ガスの水素（H₂）、放射性ガスのメタン（CH₄）や二酸化炭素（CO₂）の発生が知られている。FEP にはガス消失もふくまれるが、評価では間隙水への溶解のみを考慮した。

【重要要素】

- ①ガス発生源となる廃棄物、容器の種類と性状、表面積、量、インベントリ
- ②発生源周辺の環境：残存酸素量、境界面上の圧力、間隙量、飽和度、接触間隙水の特性（pH, Eh）

【不確実性】

TRU 廃棄物の特性や周辺の地質環境が決定されていないこともあり、重要要素そのものに多くの不確実性が存在し、時間の経過とともに大きくなっていく。

記号	統合 FEPの要素FEP / FEP グループ
TS 1 ガス発生源	金属腐食によるガス発生 (H ₂) 放射線分解によるガス発生 (H ₂) 微生物活動によるガス発生 (CO ₂ , CH ₄) 放射能崩壊によるガス発生 (He) 有機物からのガス発生 (CO ₂ , CH ₄) 微生物活動によるガス消失 化学反応によるガス消失 (収着を含む) 間隙水への溶解によるガス消失
TS 2 核種漏洩	廃棄体からの核種溶出 (溶解・溶脱) 化学反応による核種の消失 (沈殿、収着)

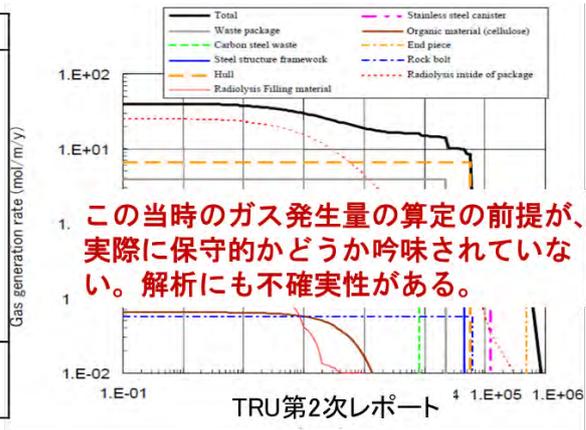


図 2.2.1-11 ガス発生に関わる統合 FEP[3]とガス発生量予測[2]

b. 廃棄体容器内でのガス挙動に関わる重要要素と不確実性

廃棄体容器への安全機能要求が明確でないこともあり、仕様は今後大きく変更される可能性がある。回収可能性を要求されることを前提とすると、容器には水密性、気密性が求められる可能性がある。

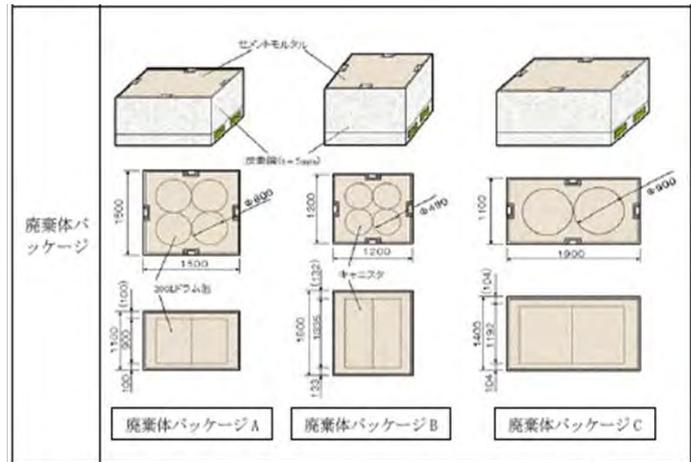
【重要要素】

- ①容器内の廃棄物と充填材の性状および間隙量・・・内部の状態は時間の経過とともに変化
- ②容器の健全性維持期間・・・容器内でのガス発生、ガスの放出時間とも関連

【不確実性】

これらの重要要素に関わる不確実性は、仕様の詳細が決定されていないことに依存する。特に容器の仕様と安全機能はガスと核種の放出に大きな影響を及ぼす。

記号	要素FEPs/FEPグループ
TEC 1 容器内での ガス挙動	拡散によるガスの移行 移流によるガスの移行 溶解によるガスの消失 化学反応によるガスの消失 微生物活動によるガスの消失 鉱物離溶によるガスの発生 化学反応によるガスの発生 微生物活動によるガスの発生 放射線分解によるガスの発生 放射能崩壊によるガスの発生
TEC 2 容器内での 核種挙動	押し出された汚染地下水の移行 化学反応による溶存核種の消滅 崩壊による核種の消滅 化学反応による溶存核種の生成 崩壊による溶存核種の生成 核種とコロイドとの会合 核種と有機物との会合 核種と微生物との会合



TRU第2次レポートでの容器の概念

図 2.2.1-12 廃棄物容器に関する統合 FEP[3]と容器の概念[2]

c. コンクリートピットと充填材内での重要要素と不確実性

鉄筋コンクリート製ピットとモルタル充填材には、閉鎖までの期間の健全性が期待されている。埋戻し後は周辺岩盤から地下水が浸透するものの、内部は不飽和の状態が長く続くと推定され、ガス発生速度や量に影響を与える。

【重要要素】

- ①コンクリートピット：初期強度、密度、ひび割れ本数、透水・透気係数
- ②廃棄体容器周辺の充填材：初期強度、密度、ひび割れ本数、透水・透気係数

【不確実性】

現在の仕様の蜜実な環境の中で想定するガス挙動に多くの不確実性が存在する。地下水の浸透速度を遅くし、ガス発生速度を抑制するが、時間の経過とともに亀裂が増加し、ガスの移行モードが変化。外側にベントナイトがある場合、亀裂や間隙にガスが蓄圧

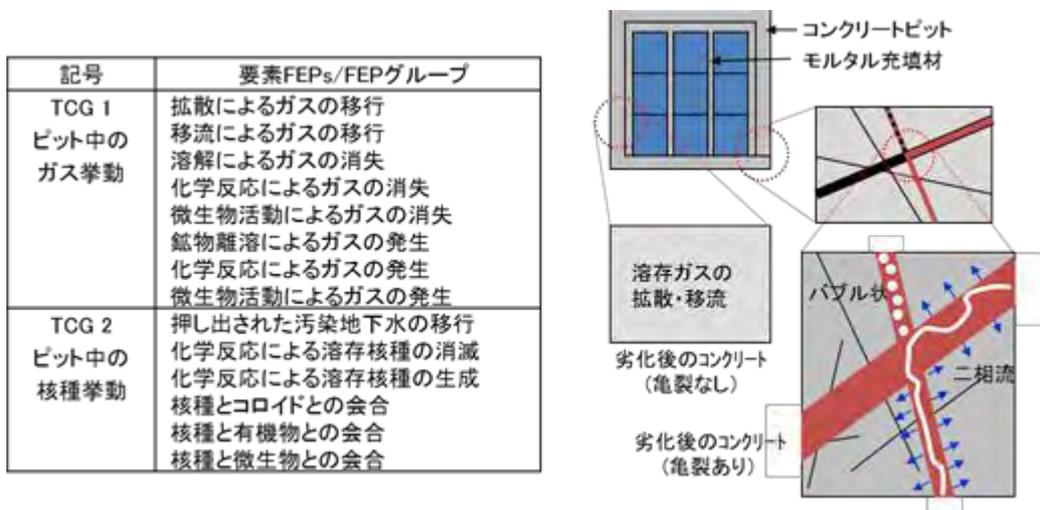


図 2.2.1-13 コンクリート中での統合 FEP とガス挙動概念[4]

d. ベントナイト中のガス挙動に関する重要要素と不確実性

ベントナイト中のガス挙動は、ベントナイトの密度とガス圧との関係から様々なモードを示すことが知られている。これらのモードの変化は、理論的に説明されているが全ての状態を再現できるモデルは存在しない（FORGE の結論の一つ）

【重要要素】

- ①ベントナイト中のガス移行に係る要素：ベントナイトの密度、形状、厚さ、ガスの浸透圧と速度
- ②ベントナイトの健全性に影響を与える要素：ガス破過後の自己修復性の喪失(変質劣化による)

【不確実性】

ベントナイトの変質劣化に関わるプロセスと時間、生じた場合の範囲の推定

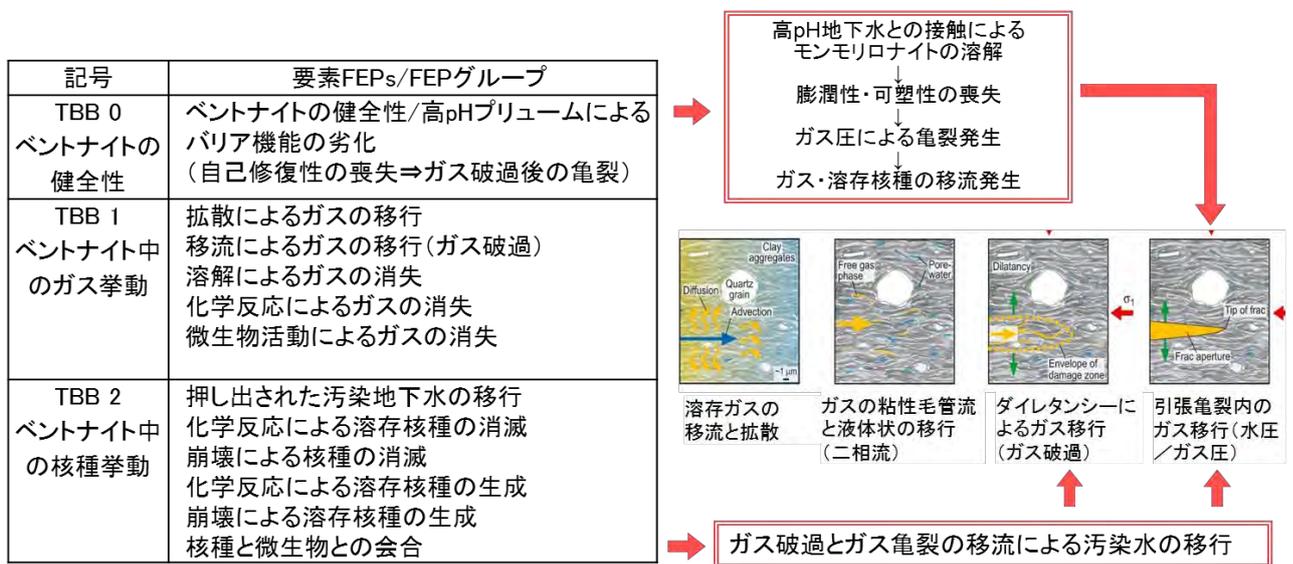


図 2.2.1-14 ベントナイト中の統合 FEP とガス移行挙動[3]

e. EDZ 内でのガス挙動に関する重要要素と不確実性

掘削影響領域（EDZ）は、人工バリアから放出された、あるいは移行したガスが天然バリアと接する境界領域となる。ここでのガス挙動は、岩盤の種類に大きく依存する。支保工の鉄筋やロックボルトは早い時間帯で腐食により消失していく。EDZ 内でのガス移行は、母岩の透水性が低い場合、地表へのショートカットを構築する可能性がある。

【重要要素】

EDZ の間隙率、地下水の化学特性、透水係数、フラックス

【不確実性】

母岩の岩種や地下水特性が決まっていないこと。EDZ の時系列的な特性の変化（元の特性に戻っていく？）

記号	スーパー FEPの 要素FEP/ FEPグループ
ED 1 EDZ内での ガス挙動	拡散によるガス移行 移流によるガス移行 溶解によるガスの消失 化学反応によるガスの消失 微生物活動によるガスの消失 鉱物の離溶によるガス生成
ED 2 EDZ内での 核種挙動	追い出された地下水の移行 化学反応による溶存核種のロス 放射能崩壊による溶存核種のロス 化学反応による溶存核種の生成 核種崩壊による溶存核種の生成 コロイドと結合した核種 有機物と結合した核種 微生物と結合した核種

EDZ内の地下水流動

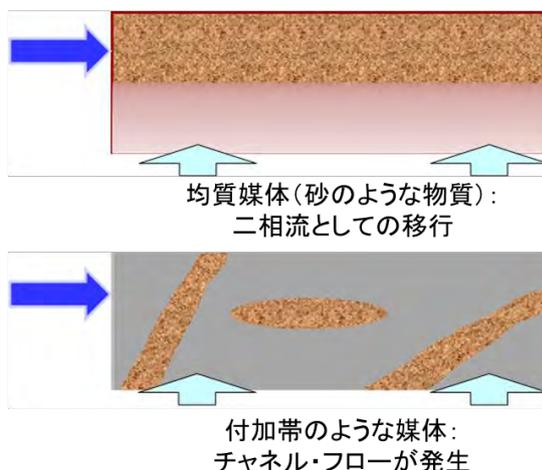


図 2.2.1-15 EDZ 内での統合 FEP とガス移行挙動[4]

f. 人工バリア亀裂内でのガス挙動に関する重要要素と不確実性

人工バリア（ベントナイト、充填材、コンクリートピット）は、時間の経過とともに変質・劣化により貫通亀裂が発生し、内部で発生したガスが直接天然バリアに放出される可能性があり、それに伴い核種も放出される可能性が発生する。

【重要要素】

人工バリア内から EDZ に至る状態変遷：貫通亀裂の発生⇒短絡路が形成⇒安全機能の喪失のプロセス

【不確実性】

貫通亀裂発生時の時期：人工バリア内が蜜実であれば、貫通ひび割れの発生確率は高くなる可能性がある。

記号	要素FEPs/FEPグループ
TNF 0	ガスの蓄圧による新しい亀裂の発生 腐食生成物の膨張による新しい亀裂の発生 岩盤の挙動による新しい亀裂の発生
TNF 1 亀裂内での ガス挙動	拡散によるガスの移行 移流によるガスの移行 溶解によるガスの消失 化学反応によるガスの消失 微生物活動によるガスの消失
TNF 2 亀裂内での 核種挙動	押し出された汚染地下水の移行 化学反応による溶存核種の消滅 崩壊による核種の消滅 化学反応による溶存核種の生成 核種とコロイドとの会合 核種と有機物との会合 核種と微生物との会合

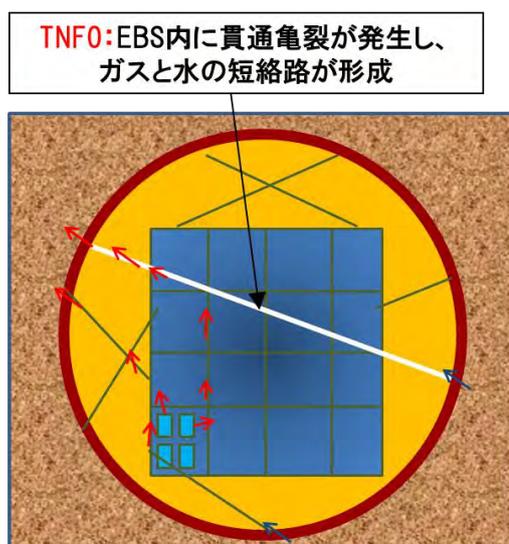


図 2.2.1-16 人工バリア内亀裂での統合 FEP とガス移行挙動[3]

g. 状態変遷の理解における重要要素と不確実性のまとめ

状態変遷の理解から作成される統合 FEP に着目して抽出した重要要素と関連する不確実性を表 2.2.1-1 に取りまとめた。

表 2.2.1-1 統合 FEP から抽出した重要要素と不確実性の取りまとめ

状態変遷	重要要素	不確実性
a. ガス発生	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス発生源の形態、量、表面積、インベントリ ・ガス発生・消失メカニズムとモデル ・周辺環境・境界条件 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体の性状に不明点が多い ・実際の環境とガス発生メカニズムの関連が明確でない
b. 廃棄体容器内のガス挙動	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体容器の仕様と安全機能 ・容器内の充填材の特性 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体容器の仕様が決まっていないため特性が規定できない ・充填材の仕様が決まっていない
c. コンクリートピットと充填材中のガス挙動	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの初期性能(強度、密度、変形能)と性能維持期間 ・充填材の初期性能(密度)と性能維持期間 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートピットの早期劣化の可能性 ・充填材の早期劣化の可能性
d. ベントナイト中のガス挙動	<ul style="list-style-type: none"> ・ベントナイトの密度、厚さ、形状 ・ベントナイトの機能維持期間 ・ベントナイトの変質・劣化プロセス ・ガスの侵入圧と侵入速度 	<ul style="list-style-type: none"> ・ベントナイトの変質・劣化プロセスと速度 ・変質・劣化したベントナイト中でのガス移行と核種移行挙動
e. EDZ内のガス挙動	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の特性(均質性、亀裂、付加帯) ・ガス破過による汚染水の放出量 	<ul style="list-style-type: none"> ・母岩が決定されていないこと
f. 人工バリア内亀裂中のガス挙動	<ul style="list-style-type: none"> ・貫通亀裂発生(人工バリアの閉じ込め性の喪失) 	<ul style="list-style-type: none"> ・人工バリア内状態と貫通亀裂の発生可能性

2) シナリオ設定

ガス発生の影響評価シナリオは、放射性核種の移行抑制のために設計された人工バリアシステムの安全機能に対するガス影響を定量的に評価するために、状態変遷の理解に基づき、統合 FEP を用いて構築され、蓋然性を考慮した分類が実施される。これらの作業の中からシナリオ設定上重要な要素を不確実性ととも抽出した。

シナリオ設定の作業項目と作業手順、及び各作業の内容は図 2.2.1-17 にまとめて示す。作業項目は、安全機能の設定、シナリオ構築、シナリオ分類、シナリオ整理表の作成に分類できる。

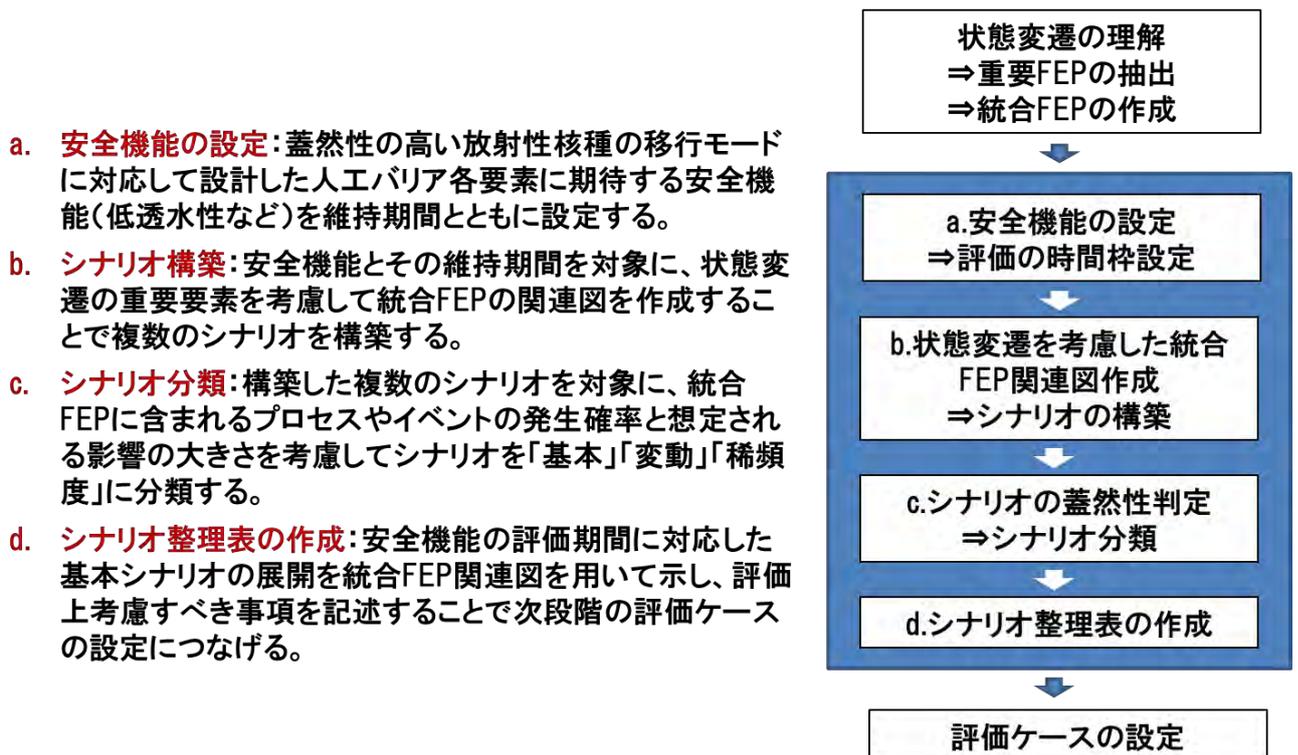


図 2.2.1-17 シナリオ設定手順における作業項目と作業内容

a. 安全機能の設定における重要要素と不確実性

シナリオ作成は、核種の閉じ込め性を考慮した人工バリア各要素の安全機能を対象に、期待する期間とともに設定する作業から開始する。安全機能には、バリア材を設計することで確保するものと周辺の地質環境が本来的に有する特性（地下水の還元性など）がある。図 2.2.1-18 は、TRU グループ 2 を対象とした安全機能の展開例[3]である。濃い赤は安全評価上で考慮する期間を示している。薄い赤は、予備的な安全機能であり、安全評価上では取り扱われていない。安全機能設定における重要要素と関連する不確実性は以下の項目である。

【重要要素】

- ・ サイト特性に対応した安全概念の設定（バリアに期待する期間も含めて）
- ・ 安全概念に対応した人工バリアの特性の設定
- ・ 人工バリア仕様の設計
- ・ 人工バリア構築上の初期品質の確保

【不確実性】

- ・ 処分場の立地環境が決まっていないことによる境界条件や前提が不明瞭であること
- ・ 人工バリア間のインターフェースでの挙動が明確でないこと
- ・ 人工バリアの機能喪失因子が特定されていないこと
- ・ 人工バリアの劣化・変質プロセスの速度が明確でないこと

安全機能設定に関わる不確実性は、セーフケースが設定されていないこと、地質環境が決定されていないことにより期待する性能のレベルと期間が明確に設定できていないことがあげられる。特に、それぞれの機能が材料の劣化・変質により喪失していくプロセスに関する知見が十分そろっていない。

EBS+周辺岩盤(EDZ)に期待する安全機能整理シート【TRU 廃棄物グループ2】

評価の期間	初期・早期	廃棄体容器が健全な期間	廃棄体容器の劣化・高放射期	ベントナイト継ぎ材機能喪失まで	ベントナイト継ぎ材機能喪失後
EBSの性状変動と目標移行のプロセスシナリオ					
安全機能に期待する期間	廃棄体容器が健全な期間、初期・早期	廃棄体容器が健全な期間	廃棄体容器の劣化・高放射期	ベントナイト継ぎ材機能喪失まで	ベントナイト継ぎ材機能喪失後
安全機能の期待	廃棄体容器が健全な期間、初期・早期	廃棄体容器が健全な期間	廃棄体容器の劣化・高放射期	ベントナイト継ぎ材機能喪失まで	ベントナイト継ぎ材機能喪失後
廃棄体	初期・早期	中期	後期		
高放射シナリオ	初期・早期	中期	後期		
ベントナイト継ぎ材	初期・早期	中期	後期		
廃棄体容器	初期・早期	中期	後期		
EDZ	初期・早期	中期	後期		

図 2.2.1-18 安全機能の設定例と不確実性[3]

b. シナリオ構築における重要要素と不確実性

安全機能に期待する期間を対象に、状態変遷の重要要素を考慮して統合 FEP 関連図を作成することで複数のシナリオを構築する。図 2.2.1-19 では、状態変遷と各バリアの安全機能の展開を考慮して、統合 FEP の関連図を評価の期間ごとに組み替えシナリオを設定した例[3]である。下記に、これらのシナリオ設定における重要要素と関連する不確実性を示す。

【重要要素】

- ① 処分坑道が閉鎖され容器が安全機能を維持している状態での重要要素：不飽和から飽和状態での異なる媒体中のガス移行モード、容器の核種閉じ込め機能
- ② ベントナイトが安全機能を維持している状態での重要要素：ベントナイト内側でのガスと核種の挙動溶存ガス移行と二相流での移行、ガス破過現象後のベントナイト自己修復性による機能維持
- ③ ベントナイトの安全機能喪失後の重要要素：ガスと核種は二相流で移行

【不確実性】

- ① 不飽和環境での放射性ガスの発生と移行、廃棄体容器の初期段階での安全機能喪失
- ② 廃棄体容器の機能喪失の時期、ベントナイトの早期の変質劣化によるガス破過現象によるベントナイトの機能喪失
- ③ 残存した間隙におけるガス蓄圧・突出による溶存核種の放出

シナリオ構築上の不確実性の多くは、異なる媒体中でのガスと核種を溶存した間隙水の挙動に対する現象理解が十分でないこと、特にガス挙動のミクロ的な動きとマクロ的な影響との関連が明確にされていないことに依存する。

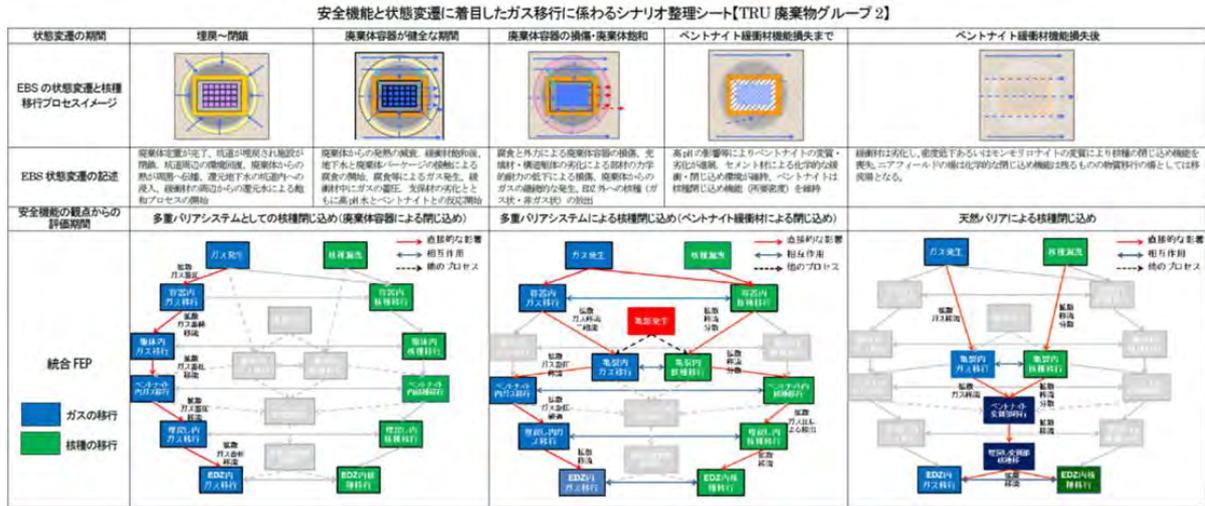


図 2.2.1-19 シナリオ設定例と不確実性

c. シナリオ分類における重要要素と不確実性

シナリオ分類は、作成したシナリオを対象に、シナリオの支配的なプロセスやイベントの発生確率と想定される影響の大きさを考慮し、「基本」「変動」「稀頻度」に分類される[2]。多くのプロセスやイベントの発生確率は陽の形で設定することが困難であることから、現状ではシミュレーションや実験結果をもとに専門家の判断で実施している。

ガス発生による影響を評価するシナリオ分類は、図 2.2.1-20 に示すように蓋然性を考慮して3種類に分類される。これらの分類では、媒体の変遷によって着目する現象の蓋然性が変化し、その結果として、例えば、基本シナリオが変化していくことを意味する。以下にシナリオ設定での重要要素と関連する不確実性を示す。

【重要要素】

- シナリオを構成する主要な FEP の発生の蓋然性と影響の大きさの推定
- ガス発生に伴う移行モード変遷（溶存、二相流、破過、亀裂によるガス状遺構）、移行媒体の状態変遷の変化、バリア機能喪失の発生確率

【不確実性】

ガス挙動は、媒体の特性と環境により移行モードが容易に変化する。媒体の特性と環境は時系列的に変化していき、その予測には不確実性が存在する（知見が十分でない）。

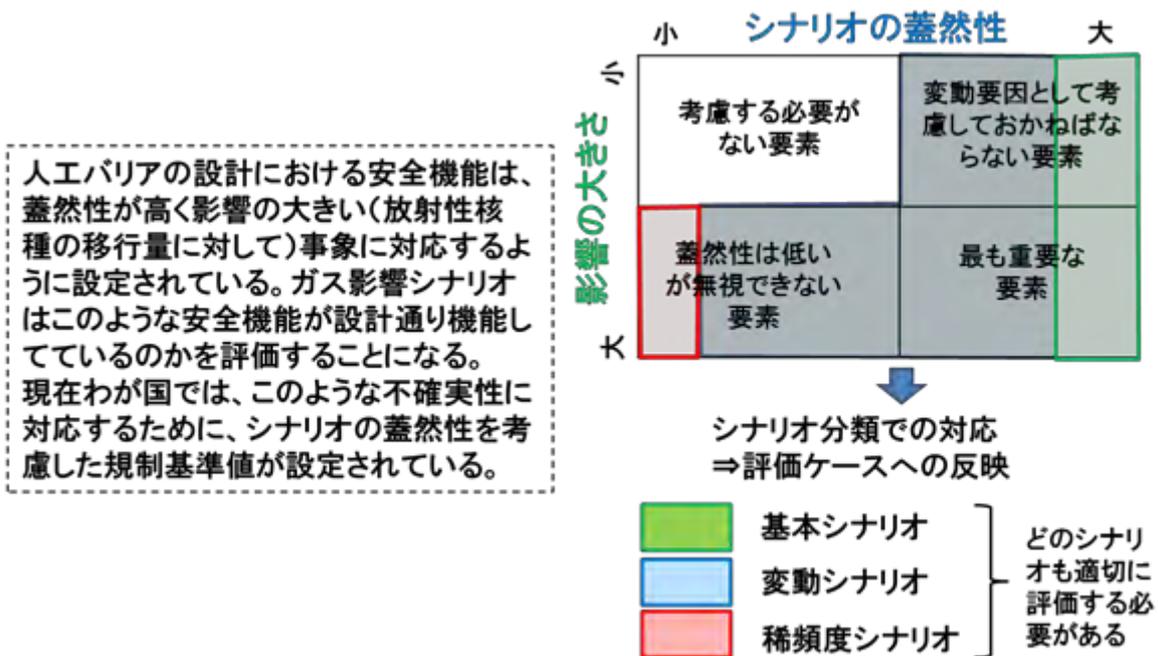


図 2.2.1-20 シナリオ分類の例と不確実性

d. シナリオ整理表作成における重要要素と不確実性

シナリオ整理表は、統合 FEP 関連図で示すシナリオと評価ケースとの関連性を整理するために図 2.2.1-21 に示す枠組みで作成される。整理表を作成上着目する重要要素と不確実性は、それぞれの作業での不確実性を包含することになる。

【重要要素】

- ・ ガス発生、移行挙動と核種の溶出、移行挙動との相互作用の明示
- ・ 移行媒体の状態の明示（飽和・不飽和、連続体・亀裂媒体、間隙の存在など）
- ・ 上記状態の時系列的な変遷の連続性

【不確実性】

- ・ ガス発生予測とガス挙動モードの変遷時期、媒体の状態変遷の予測

整理表中の評価ケース、モデル設定、パラメータ設定については、次節で言及する。

ガス挙動評価に関わるシナリオ整理シート例(グループ2)

シナリオ整理表作成時の確実性の多くは、十分な知見が準備されていない、予測するための手法が整備されていないことにも依存する。

また、試験的なアプローチでの現象理解も進められているが、多くは短期間の要素試験であり、システムとしての挙動や形状効果、長期的に支配的になる現象などが十分把握されていないことも不確実性の要因となっている。

	埋戻し-初期	埋戻し-初期+健全な初期	初期浸透、気体挙動初期	ベントナイト初期浸透まで	ベントナイト初期浸透中後
図5の状態変遷と核種移行のプロセスイメージ					
社会 100%閉鎖					
商業体	浸蝕	劣化	腐食		
商業体容器/充てん材		劣化			
コンクリートピット		劣化			
ベントナイト補修材		膨張	変質、劣化		
高分空間埋戻し材		膨張、変質、劣化			
充填工	変質、劣化				
周辺浸透領域	初期・劣化	初期・劣化		周辺浸透能力	
発生部位	充てん材 (放射線分解)	充てん材 (放射線分解)、充てん材、構造躯体、充填工 (腐食)	商業体 (放射線分解)、商業体、躯体、構造躯体 (腐食)	商業体 (放射線分解)、商業体、充てん材、構造躯体 (腐食)	人工バリア全領域 (微生物)
発生経路					
I (浸蝕)					
H (水漏) 内側					
H (水漏) 外側					
M (化学) 内側					
M (化学) 外側					
R (放射線分解)					
ガス移行モード	気相中の移行	図5内の浸透、拡散、吸着	図5内の浸透、拡散、吸着	図5内の浸透、拡散、吸着	亀裂媒体中の移行
核種移行モード			溶解、拡散、浮力、汚染水排出	溶解、拡散、浮力、汚染水排出	溶解、浮力
移行経路		多孔隙媒体二次相流	多孔隙媒体二次相流 (+ナラ構造)	亀裂媒体+多孔隙媒体二次相流 (+ナラ構造)	亀裂媒体二次相流

図 2.2.1-21 シナリオ整理表の作成例[3]と不確実性

e. シナリオ設定における重要事項と不確実性のまとめ
シナリオ設定における重要要素と不確実性を表 2.2.1-2 にまとめて示す。

表 2.2.1-2 シナリオ設定における重要要素と不確実性のまとめ

シナリオ設定	重要要素	不確実性
a. 安全機能の設定	<ul style="list-style-type: none"> ・周辺環境に対応した安全概念 ・安全概念に対応したバリア機能 ・バリア機能を具現化した設計仕様 ・定置段階での初期品質 ・設計上の機能維持期間 	<ul style="list-style-type: none"> ・周辺環境 ・バリア間の相互作用 ・機能喪失因子 ・劣化・変質プロセス
b. シナリオ構築	<ul style="list-style-type: none"> ・媒体の状態変遷に伴うガス移行モードの変化の時間枠の設定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス亀裂の発生、破過発生のシナリオ上での扱い
c. シナリオ分類	<ul style="list-style-type: none"> ・シナリオの変遷に関わる要素(ガス発生に伴う移行モード変遷の発生確率、移行媒体の変化) 	<ul style="list-style-type: none"> ・媒体の変遷予測とガス移行モードの変遷の組合せ(複雑系)
d. シナリオ整理シートの作成	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス発生と移行モードの変遷 ・核種移行との相互作用 ・ガス・核種移行媒体の状態変遷 ・周辺環境の変遷 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス発生予測 ・ガス挙動モードの変遷時期 ・媒体の状態変遷の予測

3) 評価ケースの設定

シナリオ分類をもとに作成したシナリオ整理表をベースに、評価ケースを設定し、対応する評価モデルおよびプロセスモデルを選定する作業における重要要素と不確実性を抽出する。

評価ケース設定とモデル選定作業は図 2.2.1-22 に示す流れで実施する。それぞれの作業における作業項目と作業内容を以下に示す。

- a. **評価ケースの設定**:シナリオ整理表をベースに、基本シナリオの着目する評価の時間枠における統合 FEP 関連図を用いて、状態変遷、ガス発生、着目する媒体でのガス移行モードと核種移行モードから作成する。
- b. **評価モデルの設定**:評価ケース(人工バリアの健全性と核種移行)に対する評価モデルを設定する。この場合、評価期間ごとの着目するプロセスとイベントについても記述しておく。
- c. **プロセスモデルの設定**:評価モデル設定で記述した着目するプロセスやイベントに対応するプロセスモデルを選定する。
- d. **モデルチェーンの構築**:評価モデルとプロセスモデルを組み合わせたモデルチェーンを構築する。

現状では、統合化されたガス影響評価モデルは存在せず、プロセスモデルで対応されている。

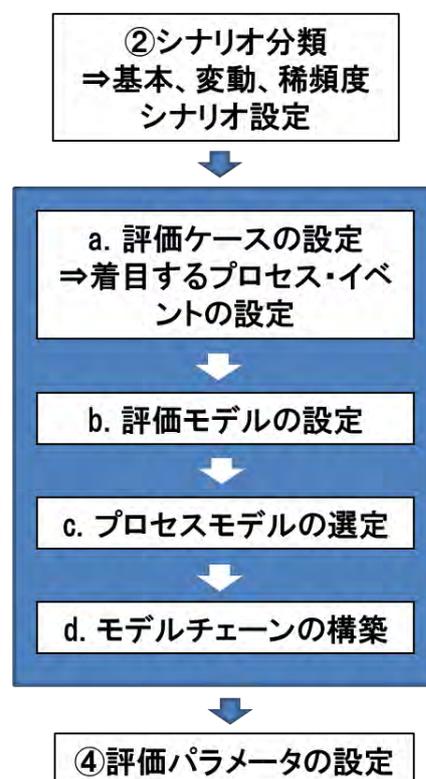


図 2.2.1-22 評価ケースの設定の手順と着目する作業項目と作業内容

a. 評価ケース設定上の重要要素と不確実性

基本シナリオに対する評価ケースは、着目する評価の時間枠における統合 FEP 関連図を用いて、人工バリアシステムの状態変遷、ガス発生の時系列変化を考慮し、評価するガス移行モードと核種移行モードから作成した。これまでの検討に基づいて基本シナリオの評価ケースは以下に示す二つを対象とした。

- ①核種移行量への影響に関わるシナリオ
- ②人工バリアの安全機能維持に関わるシナリオ

これらのシナリオは、連続したシナリオとして評価すべきであるが、現状の評価では、図 2.2.1-23 に示すように核種移行とバリア性能への影響ケースとして別々に取り扱っている。

【重要要素】

ガス発生メカニズムと発生量・速度の設定、媒体の特性(状態変遷)とガス移行モードの変化、安全機能の維持期間の設定

【不確実性】

上記の重要要素の設定ともに核種移行モードとガス移行モードとの相互作用の扱い。バリア間の相互影響(亀裂発生、亀裂への浸入、境界面での間隙分布など)

	埋戻し-初期	埋戻し初期が埋戻し初期	容器破壊、漏洩開始期	ベントナイト機能減衰期	ベントナイト機能喪失期
EDZの核種浸透と核種移行のシナリオイメージ					
核種移行シナリオ					
現象	浸潤	浸潤	浸潤	浸潤	浸潤
腐蝕性物質/充填材	変化	変化			
コンクリートピット		変化			
ベントナイト構築材		破壊			
処分空間埋戻し材		破壊、浸潤、変化	浸潤、変化	浸潤、変化	
充填土		浸潤、変化			
放射性物質	不溶解	溶解、核力密度			
ガス	発生しない	発生しない	発生しない	発生しない	発生しない
発生位置	充填材、放射線分解	充填材、放射線分解、充填材、構造崩壊、浸潤、浸潤	浸潤、浸潤、浸潤、浸潤	浸潤、浸潤、浸潤、浸潤	浸潤、浸潤、浸潤、浸潤
T (温度)					
H (湿度)	内側				
M (力学)	内側				
D (化学)	内側				
R (放射線)	内側				
核種移行モード	気相中の移行	EDZ内の溶解、拡散、透過	EDZ内の溶解、拡散、透過	EDZ内の溶解、拡散、透過	EDZ内の溶解、拡散、透過
核種移行モード		溶解、拡散、浮力、汚染水移行	溶解、拡散、浮力、汚染水移行	溶解、拡散、浮力、汚染水移行	溶解、拡散、浮力、汚染水移行
モデル設定		多孔質媒体二相流	多孔質媒体二相流	多孔質媒体二相流	多孔質媒体二相流

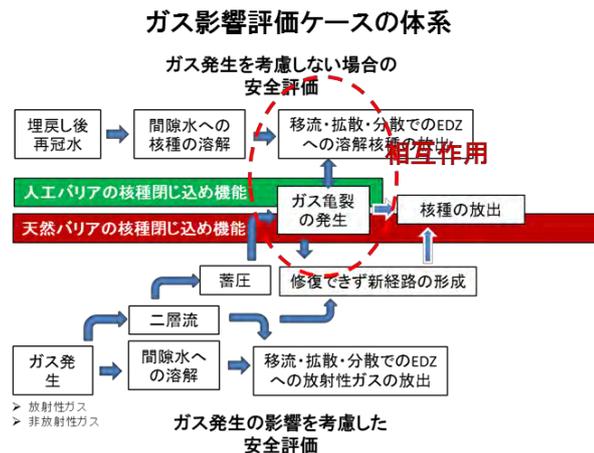


図 2.2.1-23 シナリオ整理表における評価ケース設定例

b. 評価モデル設定上の重要要素と不確実性

評価モデルの設定は、評価ケースに対応する安全評価モデルを選定する作業となる。これまで検討では、安全評価上のガス影響については、ガス挙動解析が中心で、核種移行とガス移行を同時に扱う評価モデルは作成されていない。図 2.2.1-24 には、ガス発生影響の評価ケースの体系と安全評価におけるモデルの体系の関係を示す。

今後、新たに評価モデルを作成することも想定し、重要要素と関連する不確実性を以下に示す。

【重要要素】

ガス亀裂（破過）の発生による放射性核種の放出のモデル設定、対応する放射性核種移行のモデル設定（現状のモデルでは、人工バリア内の核種移行はミキシングセル・拡散場で移行として扱い、ガス発生の影響は考慮せず）

【不確実性】

移行媒体の状態変遷を考慮した統合したモデル化の可能性。核種移行とガス影響の相互作用を考慮できるモデル化の可能性

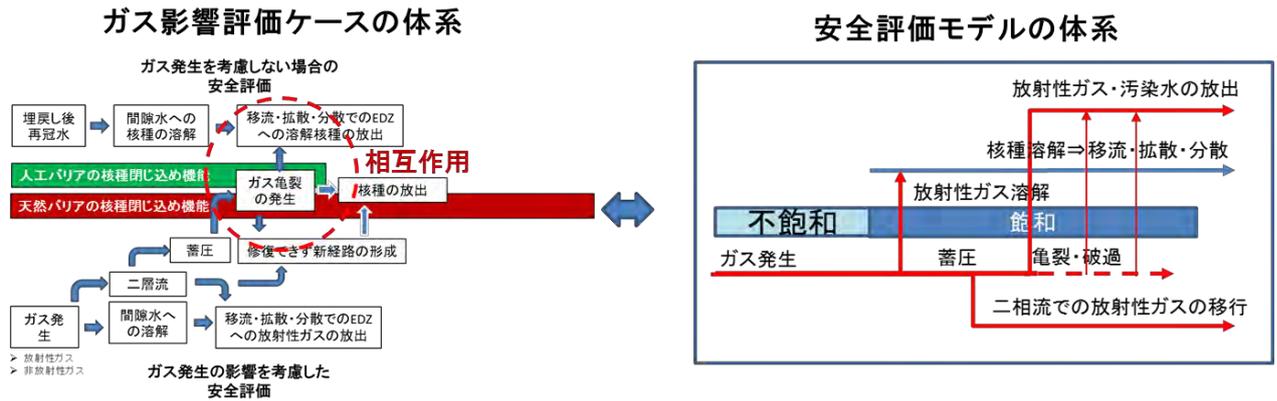


図 2.2.1-24 評価ケースの体系と安全評価モデル体系との関連

c. プロセスモデル設定上の重要要素と不確実性

評価モデルで着目するプロセスや事象に対応するプロセスモデル（二相流でのガス移行、力学連成を考慮した二相流モデルなど）を選定する。現状での検討成果を参照し、モデル選定上の重要要素と関連する不確実性を以下に示す。

【重要要素】

実規模施設で考慮する状態変遷、対応する異なる媒体での複合体での放射性核種移行モードとガス移行モード、複合体の境界面での挙動、形状効果と3次元的な挙動

【不確実性】

重要要素としての事項に対する現状のモデル化のレベル。複雑系でのガス亀裂・破過現象の現実的なモデル化

プロセスモデルの例: GETFLOW, CODE-BRIGHT等

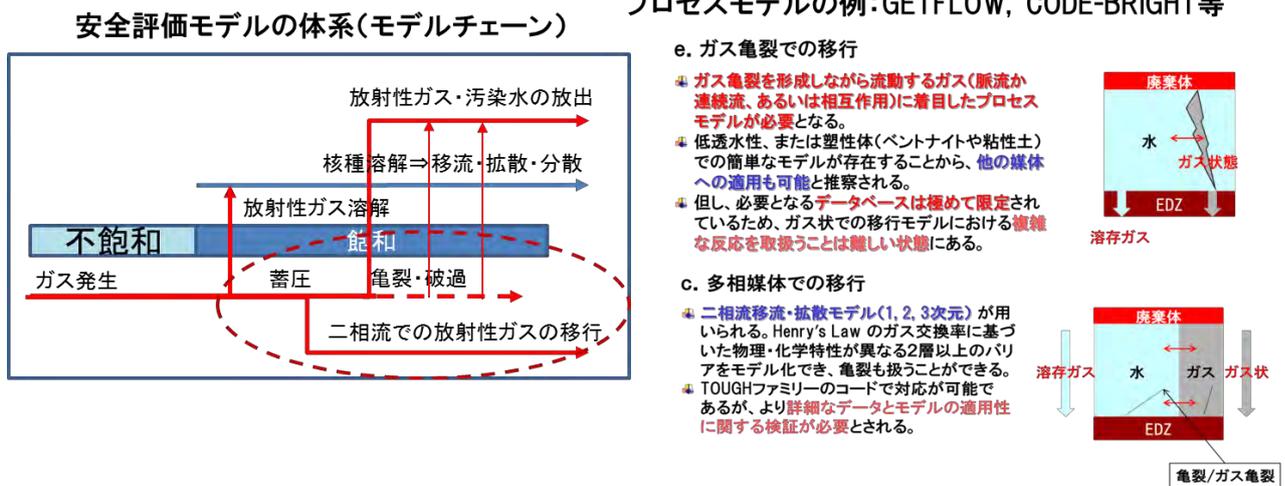


図 2.2.1-25 安全評価モデルとプロセスモデル[3]との関係

d. モデルチェーン設定上の重要要素と不確実性

評価モデルとプロセスモデルを組み合わせたモデルチェーンを構築する場合の重要要素と不確実性を抽出した。現状では評価のためのモデルチェーンは存在しないことから、今後設定する場合を想定して抽出することとした。例えば、図 2.2.1-26 にガス発生から人工バリア内の亀裂媒体（充填材やコンクリートピット）でのガス移行、ベントナイト中のガス移行挙動をシミュレートするモデルチェーンを表わしている。

【重要要素】

評価ケースに従い、・ガス発生と移行モードの変遷、・核種移行との相互作用、・ガス・核種移行媒体の状態変遷、・周辺環境の変遷

【不確実性】

人工バリア内の状態変遷に伴い変化するガス発生量、バリア内の亀裂に蓄積するガスと溶存した核種を含む間隙水の量の時刻歴変化、ベントナイトとの境界面での蓄圧、ガス浸入モードの変化、ガス破過による間隙水の放出量の算定までの連続したプロセスがモデル化されていない。

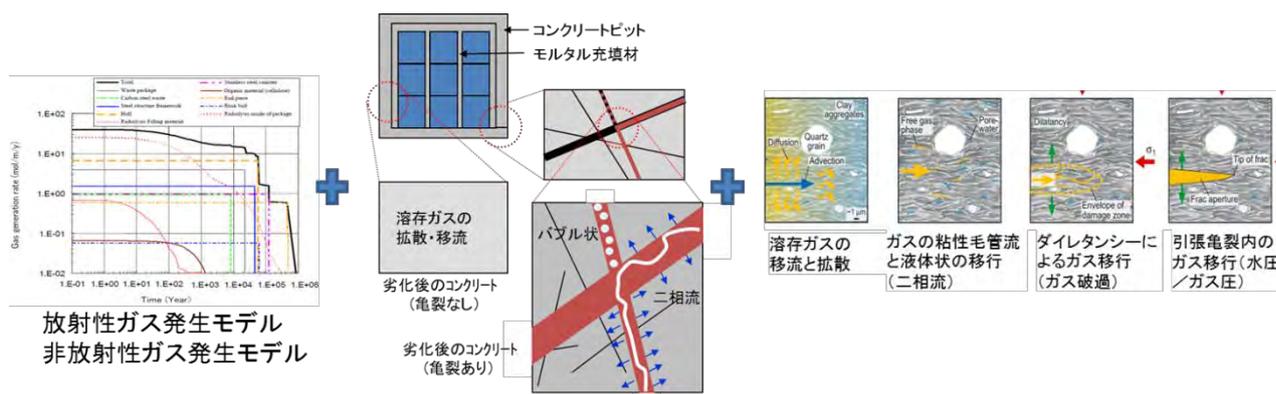


図 2.2.1-26 モデルチェーンの例（ガス発生→亀裂媒体→ベントナイト中のガス移行）

e. 評価ケースとモデル選定における重要要素と不確実性のまとめ

表 2.2.1-1 に評価ケースとモデル選定における重要要素と不確実性の検討結果をまとめて示す。

表 2.2.1-3 評価ケースとモデル選定における重要要素と不確実性のまとめ

評価ケース設定・モデル選定	重要要素	不確実性
a. 評価ケース設定	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス発生メカニズムと発生量・速度 ・媒体特性とその状態変遷 ・媒体特性に対応したガス移行モード ・安全機能の変遷の時間枠 	<ul style="list-style-type: none"> ・重要要素の設定 ・核種移行とガス移行の相互作用の扱い ・バリア間の相互作用
b. 評価モデルの設定	<ul style="list-style-type: none"> ・媒体の状態変遷に伴うガス移行モードの変化の時間枠の設定と対応する放射性核種の移行 	<ul style="list-style-type: none"> ・重要要素の実現性:媒体の状態変遷を考慮した相互作用モデル化の可能性
c. プロセスモデルの設定	<ul style="list-style-type: none"> ・実規模施設で考慮する状態変遷 ・対応する異なる媒体での複合体での放射性核種移行モードとガス移行モード ・複合体の境界面での挙動、形状効果と3次元的な挙動 	<ul style="list-style-type: none"> ・重要要素のプロセスモデル化の可能性 ・複雑系への展開可能性
d. モデルチェーンの設定	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス発生と移行モードの変遷 ・核種移行との相互作用 ・ガス・核種移行媒体の状態変遷 ・周辺環境の変遷 	<ul style="list-style-type: none"> ・重要要素のプロセスモデル統合化の可能性

4) パラメータ設定

長期を含めたガス評価モデルに用いるパラメータの多くは、異なる媒体中（コンクリート、モルタル、ベントナイト）の飽和過程を考慮した「短期的なガス移行要素試験」から求められている。例えば、ベントナイトに関しては、不飽和時のサクションや飽和時のガス侵入圧を考慮したモデルに対して、各種パラメータが設定されている。一般的な事項としては以下にまとめることができる。

【重要な要素】

媒体の状態設定（飽和/不飽和、変質/劣化）、界面でのガス挙動、異なる媒体中でのガス移行モード

【不確実性】

モデル検証のための要素試験から得られたパラメータが実施設における3次元的な複合媒体での挙動を推定するパラメータとして適用できるか確かめられていない。

パラメータ設定における重要要素と不確実性については、現在ガス挙動解析で用いられている以下に示す二つの解析コードでの作業に着目して検討した。

- ・ GETFLOWS
- ・ CODE_BRIGHT

a. GETFLOWS における重要要素と不確実性

ガス移行挙動解析コードの内、二層流での挙動を解析する GETFLOWS におけるパラメータ設定の作業手順と作業内容を図 2.2.1-27 示す。

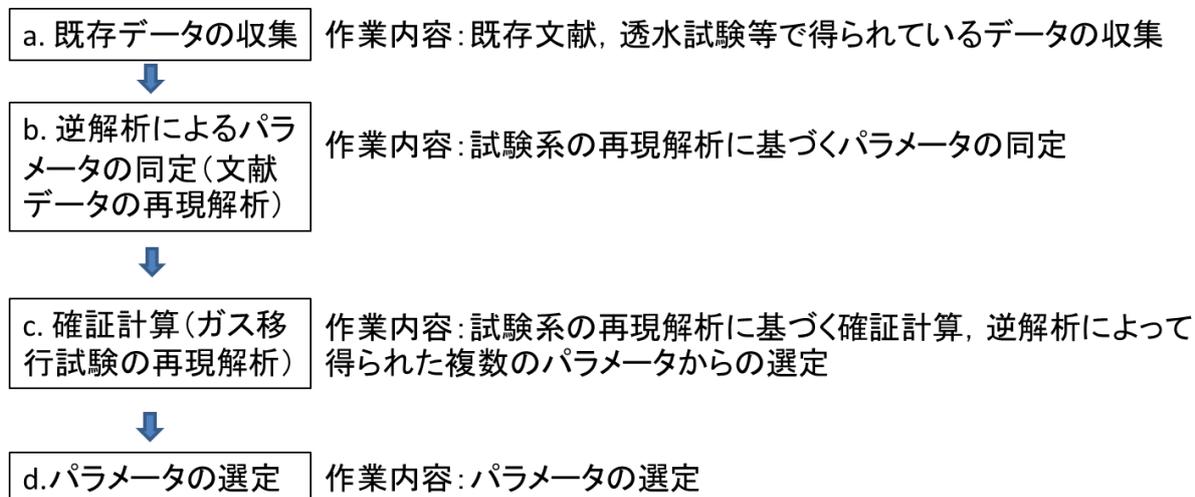


図 2.2.1-27 GETFLOWS におけるパラメータ設定と作業内容

GETFLOWS のパラメータ設定作業に伴う重要要素と不確実性をまとめたものを表 2.2.1-4 に示す。

表 2.2.1-4 GETFLOWS のパラメータ設定上の重要要素と不確実性のまとめ

パラメータ設定の作業手順	作業時の重要要素	重要要素に関わる不確実性
a. 既存データの収集	<ul style="list-style-type: none"> 網羅性 	<ul style="list-style-type: none"> 網羅的に収集できているか
b. 逆解析によるパラメータの同定(文献データの再現解析)	<ul style="list-style-type: none"> 試験データの解釈 逆問題の設計(目的関数, 制約条件, 与条件) 初期設定値の決定 	<ul style="list-style-type: none"> 逆問題の設計内容(目的関数, 制約条件, 与条件の設定方法) 初期設定値による不確実性 同定値の不確実性
c. 確証計算(ガス移行試験の再現解析)	<ul style="list-style-type: none"> 試験データの解釈 確証計算問題の設計(初期条件, 制約条件, 与条件) 逆解析から同定された複数のパラメータからの選定 	<ul style="list-style-type: none"> 確証計算問題の設計内容(制約条件, 与条件の設定方法) ガスの水への溶解の有無, または溶解速度の不確実性 初期設定値による不確実性 同定値の不確実性
d. パラメータの選定	<ul style="list-style-type: none"> 材料が同一か, またはほぼ同一とみなせるか どういう手法で取得されたか 	<ul style="list-style-type: none"> 材料がほぼ同一とみなせるか否か 取得された手法, パラメータを使用して良いか否か

b. CODE_BRIGHT のパラメータ設定における重要要素と不確実性

ガス移行挙動解析コードである CODE_BRIGHT は二相流としての扱いと力学連成を考慮で

きるコードである。解析に用いるパラメータ設定手順と関連する作業を図 2.2.1-28 に示す。

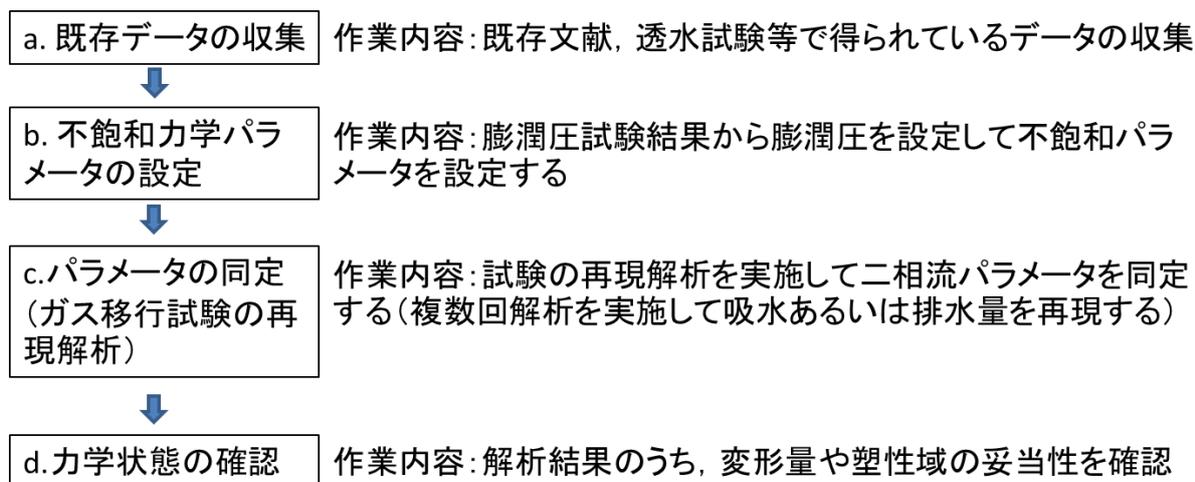


図 2.2.1-28 CODE_BRIGHT におけるパラメータ設定手順と作業内容

CODE_BRIGHT でのパラメータ設定上の重要要素と不確実性を表 2.2.1-5 にまとめて示す。

表 2.2.1-5 CODE_BRITHG のパラメータ設定上の重要要素と不確実性

パラメータ設定の作業手順	作業時の重要要素	重要要素に関わる不確実性
a. 既存データの収集	<ul style="list-style-type: none"> 対象とする試験条件, 材料条件が一致しているかの照査 	<ul style="list-style-type: none"> 既往の文献に記載のない条件(モンモリロナイト含有量, 拡散係数等)
b. 不飽和力学パラメータの設定	<ul style="list-style-type: none"> 設定する膨潤圧 初期間隙比, 初期サクシジョンの設定 	<ul style="list-style-type: none"> 小峯の膨潤評価式で用いるパラメータ 空隙比算出時に用いる真密度の仮定 水分特性曲線の設定
c. パラメータの同定 (ガス移行試験の再現解析)	<ul style="list-style-type: none"> 試験データの解釈 初期設定値の決定 境界条件 	<ul style="list-style-type: none"> 初期設定値による不確実性 同定値の不確実性 境界条件の不確実性
d. 力学状態の確認	<ul style="list-style-type: none"> 間隙率分布 塑性域の妥当性 	<ul style="list-style-type: none"> 試験結果との整合性

(3) 重要な要素に対する知見の整理

1) 基本方針

平成 20 年度より収集整理している知見は、状態変遷表を用いた根拠整理シートとして取りまとめられている。このシートをベースに「重要要素」に関連するシートを抜粋し、図 2.2.1-29 に示す「関連する知見がない」、「知見は存在するが想定であり、エビデンス等が揃っていない」、「エビデンス等の根拠が整備されている」の 3 段階で分析・評価した。

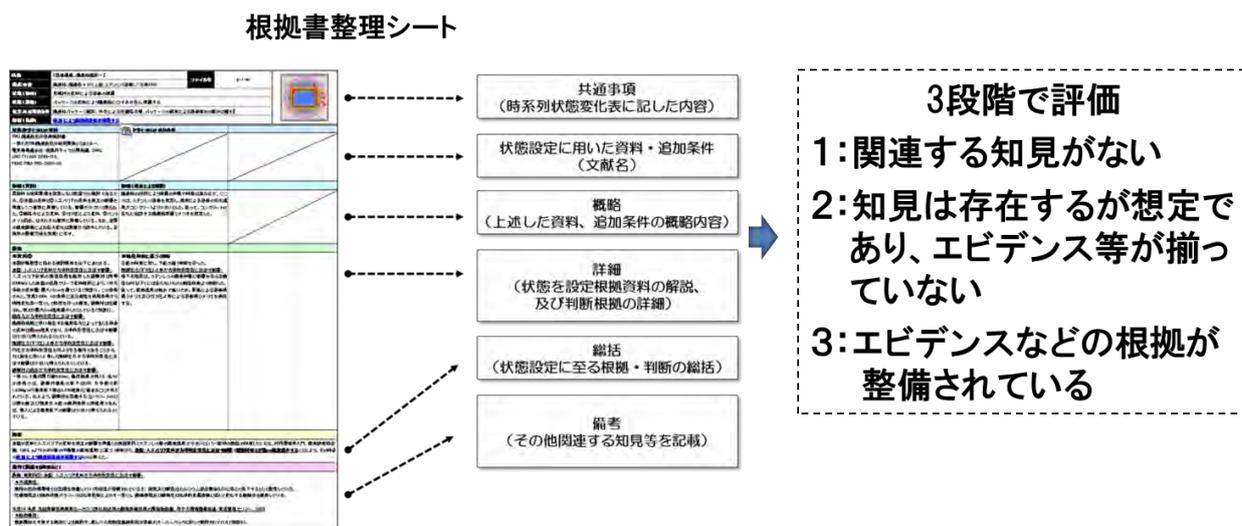


図 2.2.1-29 根拠書を用いた知見の整理方法

2) 評価の手順

根拠書は、平成 23 年度に作成されたグループ 2 の時系列的状態変化表をベースに、関連する情報を資料とともに整備されている。本節では、これらの根拠書を対象に、表 2.2.1-1 に従い評価・整理を実施した。

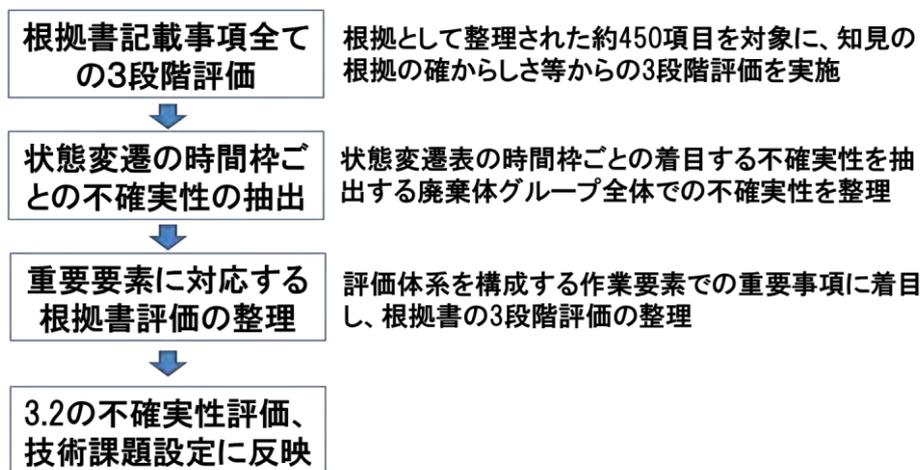
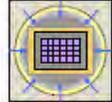
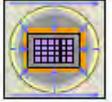
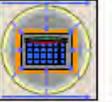
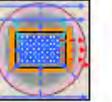
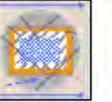
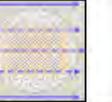


図 2.2.1-30 根拠書記載事項の評価の流れ

表 2.2.1-7 根拠書の評価結果の一覧

	1. 埋戻し～閉鎖	2. 閉鎖～緩衝材飽和	3. 緩衝材飽和	4. 廃棄体容器が健全	5. 容器損傷、廃棄体飽和	6. ベントナイト機能損失まで	7. ベントナイト機能損失後
EBS の状態家産と核種移行のプロセスイメージ							
1. 廃棄体・廃棄物 + ドラム、ステンレス容器	T:発熱による温度上昇 3 H:不飽和状態 3 M:初期放射力状態 3 C:初期の化学特性 3 R:初期水分の放射線分解 3 B:容器にバイオフィーム(菌膜)形成 1 Q:放射線分解によるガス発生(H ₂) 3 Rn:放射線内 2	T:発熱による温度上昇 3 H:不飽和状態 3 M:初期放射力状態 3 C:初期の化学特性 3 R:初期水分の放射線分解 3 B:容器にバイオフィーム(菌膜)形成 1 Q:放射線分解によるガス発生(H ₂) 2 Rn:放射線内 2	T:温度低下 2 H:不飽和状態 1 M:初期放射力状態 2 C:初期の化学特性 2 R:初期水分の放射線分解 2 B:容器にバイオフィーム(菌膜)形成 1 Q:放射線分解によるガス発生(H ₂) 2 Rn:放射線内 2	T:温度低下(廃棄体温度) 2 H:廃棄体・容器との接触-飽和状態 2 M:廃棄体・ガス圧上昇 2 C:高 pH 環境、核種溶出、腐食 1 R:放射線分解によるガス発生 2 B:容器にバイオフィーム(菌膜)形成 1 Q:化学反応・有機物反応等によるガス発生 2 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:飽和状態、放射 2 M:廃棄体・ガス圧上昇 2 C:高 pH 環境、核種溶出、腐食 1 R:放射線分解によるガス発生 2 B:容器にバイオフィーム(菌膜)形成 1 Q:化学反応・有機物反応等によるガス発生 2 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:飽和状態、放射 2 M:廃棄体・ガス圧上昇 2 C:高 pH 環境、核種溶出、腐食 1 R:放射線分解によるガス発生(減少) 1 B:容器にバイオフィーム(菌膜)形成 1 Q:化学反応・有機物反応等によるガス発生 2 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:飽和状態、放射 2 M:廃棄体・ガス圧上昇 2 C:高 pH 環境、核種溶出、腐食 1 R:放射線分解によるガス発生 2 B:容器にバイオフィーム(菌膜)形成 1 Q:化学反応・有機物反応等によるガス発生 2 Rn:放射線内 2
2. 廃棄体容器/充填材 (容器表面は鋼板)	T:発熱による温度上昇 3 H:廃棄体の水分からの蒸発、不飽和 2 M:重量による応力発生、健全性維持 2 C:初期の化学特性 2 R:影響なし 2 B:容器にバイオフィーム(菌膜)形成 2 Q:ガス発生 2 Rn:移行なし 2	T:発熱による温度上昇から低下 2 H:廃棄体の水分からの蒸発、不飽和 2 M:重量による応力発生、健全性維持 2 C:初期の化学特性 2 R:放射線分解 2 B:容器にバイオフィーム(菌膜)形成 1 Q:ガス発生 2 Rn:放射線内 2	T:温度低下 2 H:不飽和から飽和、不飽和 1 M:重量による応力発生、健全性維持 1 C:初期の化学特性 2 Q:放射線分解によるガス発生 1 B:容器にバイオフィーム(菌膜)形成 1 Q:ガス発生 2 Rn:放射線内 2	T:温度低下(廃棄体温度) 2 H:飽和から飽和状態 1 M:飽和からの圧力、D:ひび割れ発生 2 C:地下水への溶解、高 pH 環境 2 R:放射線分解によるガス発生 2 B:容器にバイオフィーム(菌膜)形成 1 Q:化学反応・有機物反応等によるガス発生 2 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:飽和、多孔質媒体、放射 2 M:D:ひび割れ発生、形状喪失 2 C:地下水への溶解、高 pH 環境 2 R:放射線分解によるガス発生 2 B:容器にバイオフィーム(菌膜)形成 1 Q:容器にガスが蓄積、移行 2 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:多孔質媒体、放射 2 M:形状喪失 1 C:地下水への溶解、高 pH 環境 1 R:放射線内 2 B:不明 1 Q:不明 1 Rn:二相流での移行 1	T:廃棄体温度 2 H:多孔質媒体、放射 2 M:形状喪失 1 C:地下水への溶解、高 pH 環境 1 R:放射線内 2 B:不明 1 Q:不明 1 Rn:二相流での移行 1
3. コンクリートピット/充填材(鉄筋コンクリート)	T:光線による温度上昇 3 H:不飽和、低透水(放射線) 2 M:外圧による応力発生 2 C:初期の化学特性 2 R:発生なし 2 B:微生物増殖 2 Q:発生なし 2 Rn:移行なし 2	T:廃棄体温度に低下 2 H:不飽和、低透水(放射線) 2 M:外圧による応力発生 2 C:初期の化学特性 2 R:放射線分解 2 B:微生物増殖(CO ₂) 2 Q:放射線の発生 2 Rn:放射線内 2	T:温度低下 2 H:飽和から飽和、飽和 1 M:外圧による応力発生 2 C:初期の化学特性 2 R:放射線分解によるガス発生 2 B:微生物増殖 2 Q:放射線の発生によるガス発生、蓄積 1 Rn:放射線内 2	T:温度低下(廃棄体温度) 2 H:飽和から飽和状態 1 M:外圧による応力発生 2 C:容器からの Ca 溶出(高 pH) 2 R:放射線分解によるガス発生 2 B:微生物増殖 2 Q:放射線の発生によるガス発生、蓄積 1 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:D:ひび割れ発生、核種溶出 2 M:重量による応力発生 2 C:放射線の発生、Ca 溶出(高 pH) 2 R:放射線分解によるガス発生 2 B:微生物増殖の発生 2 Q:放射線の発生によるガス発生、蓄積 2 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:核種溶出、核種溶出 2 M:重量による応力発生 2 C:放射線の発生、Ca 溶出(高 pH) 2 R:放射線分解によるガス発生 2 B:微生物増殖の発生 2 Q:放射線の発生によるガス発生、蓄積 2 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:核種溶出、核種溶出 2 M:重量による応力発生 2 C:放射線の発生、Ca 溶出(高 pH) 2 R:放射線分解によるガス発生 2 B:微生物増殖の発生 2 Q:放射線の発生によるガス発生、蓄積 2 Rn:放射線内 2
4. ベントナイト緩衝材 (70.30 割合 1.6)	T:廃棄体、水和熱での温度上昇 2 H:地下水の蒸発、不飽和(放射線) 3 M:地下水接触による膨潤力発生 3 C:一部高 pH 浸入水との反応抑制 2 R:放射線分解ガス発生 2 B:空気中の微生物の存在 2 Q:分解ガスの放射 2 Rn:移行なし 2	T:廃棄体温度に低下 2 H:不飽和から飽和へ(放射線) 3 M:地下水接触による膨潤力発生 3 C:高 pH 浸入水との反応、腐食 2 R:放射線分解ガス発生 2 B:微生物増殖の発生 1 Q:不飽和中のガス移行 1 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度に低下 2 H:不飽和から飽和へ(放射線) 3 M:地下水接触による膨潤力発生 3 C:高 pH 浸入水との反応、腐食 2 R:放射線分解ガス発生 2 B:微生物増殖の発生(CO ₂) 1 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:飽和から飽和へ(放射線) 3 M:地下水接触による膨潤力発生 3 C:高 pH 浸入水との反応、腐食 2 R:放射線分解ガス発生 2 B:微生物増殖の発生(CO ₂) 1 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:D:ひび割れ発生、核種溶出 2 M:重量による応力発生 2 C:放射線の発生、Ca 溶出(高 pH) 2 R:放射線分解によるガス発生 2 B:微生物増殖の発生 1 Q:放射線の発生によるガス発生、蓄積 2 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:放射線(放射線)、腐食の発生 2 M:重量による膨潤力発生 1 C:高 pH 浸入水との反応、腐食 1 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生 1 Q:放射線の発生によるガス発生、蓄積 1 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:放射線(放射線)、腐食の発生 2 M:重量による膨潤力発生 1 C:高 pH 浸入水との反応、腐食 1 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生 1 Q:放射線の発生によるガス発生、蓄積 1 Rn:放射線内 2
5. 部分空洞増長材 (ベントナイト混合材料を想定)	T:内部からの熱的影響 2 H:不飽和から飽和へ、核種溶出 2 M:初期放射力状態 2 C:高 pH 地下水による腐食抑制 2 R:放射線内 2 B:空気中の微生物の存在 2 Q:ガスの不飽和核種移行 1 Rn:移行なし 2	T:廃棄体温度 2 H:低透水(放射線) 2 M:内外圧の作用による変形 2 C:高 pH 地下水の浸入による腐食 2 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生(CO ₂ 発生) 1 Q:ガスの二相流 2 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:低透水(放射線) 2 M:内外圧の作用による変形 2 C:高 pH 地下水の浸入による腐食 2 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生 1 Q:ガスの二相流 2 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:低透水(放射線) 2 M:内外圧の作用による変形 2 C:高 pH 地下水の浸入による腐食 2 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生 2 Q:ガスの二相流 2 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:低透水(放射線) 2 M:内外圧の作用による変形 2 C:高 pH 地下水の浸入による腐食 2 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生 2 Q:二相流、ガス状で移行 2 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:核種溶出 2 M:基礎材料特性、腐食応力 1 C:高 pH 環境 1 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生 2 Q:二相流 2 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:核種溶出 2 M:基礎材料特性、腐食応力 1 C:高 pH 環境 1 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生 2 Q:二相流 2 Rn:放射線内 2
6. 部分空洞コンクリート 吹き付け	T:水和熱による温度上昇 2 H:不飽和から飽和へ、核種溶出 2 M:内外の重量による膨潤力 2 C:高 pH 地下水による腐食抑制 2 R:放射線内 2 B:空気中の微生物の存在 2 Q:ロックボルトの腐食によるガス発生 2 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:低透水(放射線) 2 M:内外圧の作用による変形 2 C:高 pH 地下水の浸入による腐食 2 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生(CO ₂ 発生) 2 Q:ロックボルトの腐食によるガス発生 2 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:低透水(放射線) 2 M:内外圧の作用による変形 2 C:高 pH 地下水の浸入による腐食 2 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生 2 Q:ロックボルトの腐食によるガス発生 2 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:低透水(放射線) 2 M:内外圧の作用による変形 2 C:高 pH 地下水の浸入による腐食 2 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生 2 Q:ロックボルトの腐食によるガス発生 2 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:低透水(放射線) 2 M:一部腐食による強度特性喪失 2 C:高 pH 環境による腐食 2 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生 2 Q:ロックボルトの腐食によるガス発生 2 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:核種溶出 2 M:基礎材料特性、腐食応力 1 C:高 pH 環境 1 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生 1 Q:二相流 1 Rn:放射線内 2	T:廃棄体温度 2 H:核種溶出 2 M:基礎材料特性、腐食応力 1 C:高 pH 環境 1 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生 1 Q:二相流 1 Rn:放射線内 2
7. 遮断影響領域 (EOZ)	T:温度による大気圏→岩盤温度 2 H:不飽和→飽和 2 M:初期放射力の減少(クリップ) 2 C:酸化環境、高 pH 環境 2 R:放射線内 2 B:好気性微生物の活動(CO ₂) 2 Q:なし 2 Rn:移行なし 2	T:温度 2 H:核種に依っての核種溶出の発生 1 M:応力の発生 2 C:還元性環境、高 pH 環境 2 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生 2 Q:二相流で移行 1 Rn:放射線内 2	T:温度 2 H:核種に依っての核種溶出の発生 2 M:応力の発生 2 C:還元性環境、高 pH 環境 2 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生 2 Q:二相流で移行 1 Rn:放射線内 2	T:温度 2 H:核種に依っての核種溶出の発生 2 M:応力の発生 2 C:還元性環境、高 pH 環境 2 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生 2 Q:二相流で移行 1 Rn:放射線内 2	T:温度 2 H:核種に依っての核種溶出の発生 2 M:応力の発生 2 C:還元性環境、高 pH 環境 2 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生 2 Q:二相流で移行 1 Rn:放射線内 2	T:温度 2 H:核種に依っての核種溶出の発生 2 M:応力の発生 2 C:還元性環境、高 pH 環境 2 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生 2 Q:二相流 1 Rn:放射線内 2	T:温度 2 H:核種に依っての核種溶出の発生 2 M:応力の発生 2 C:還元性環境、高 pH 環境 2 R:放射線内 2 B:微生物増殖の発生 2 Q:二相流 1 Rn:放射線内 2
不確実性	-閉鎖前の廃棄体管理状況が十分でないため、廃棄体活動や容器材料の不具合によるガスの存在が不明	-不飽和状態での放射線ガスの移行 -閉鎖系でのガス発生予測 -微生物増殖によるガス発生	-廃棄体・容器のガス発生メカニズムが不明 -部分空洞での材料腐食に関する見解が不明 -不飽和→飽和核種移行時のベントナイト中のガス挙動	-廃棄体・容器のガス発生メカニズムが不明 -部分空洞での材料腐食に関する見解が不明 -多孔質媒体でのガス移行モードの見解が不明 -ガス透過後の状態家産の見解	-化学環境の変遷に関する見解が不明 -容器損傷のプロセス不明 -多孔質媒体でのガス移行モードの見解が不明	-家産設定にあるベントナイト内での物質移行とガス移行挙動の見解がない -ベントナイト/リウソウム系での化学環境と状態に関する見解がない	-家産設定にあるベントナイト内での物質移行、ガス移行挙動の見解がない -ベントナイト/リウソウム系での化学環境と状態に関する見解がない

5) ガス挙動に関する不確実性の整理

状態変化表の評価の時間枠（変化の段階）に着目して抽出したガス挙動に関する不確実性を表 2.2.1-8 に整理して示す。

低透水のベントナイトバリアを用いるグループ 2 では、人工バリア内が飽和するまで数 100 年の期間を要すると想定されているため、この間の不飽和状況でのガスの発生や挙動に対する知見がほとんど存在しないことが分かった。また、知見として用いられたベースには、要素試験によるもの、解析による推定が多く用いられている。

表 2.2.1-8 変化の各段階におけるガス挙動の不確実性

段階 (根拠書での年数)	状態	ガス挙動に関する不確実性
1. 埋戻し～閉鎖	処分坑道・アクセス坑道が埋め戻され、周辺から坑道内への地下水の浸透が開始、放射線分解でガス発生	・閉鎖前の周辺岩盤環境設定が十分でないため、残存された微生物活動や金属材料の腐食によるガスの発生と不飽和環境でのガス挙動が不明
2. 閉鎖～緩衝材飽和 (閉鎖～約100年後)	地下水はベントナイト緩衝材に浸透し、不飽和状態から飽和に移行、不飽和環境でのガス移行	・バリア内の不飽和環境での放射性ガスの発生と挙動が不明 ・不飽和環境でのガス発生状態が不明 ・微生物活動によるガス発生状態が不明
3. ～充填材飽和 (数1000年経過)	ベントナイトは飽和し、処分空洞内の充填材中も飽和に移行、廃棄体容器が水に接触、拡散でガス移行	・廃棄体容器の仕様が不明のため、ガスの閉込め性能等の状態変遷が不明 ・不飽和⇒飽和環境移行時でのベントナイト中のガス挙動が不明
4. ～廃棄体容器が健全 (数1000年経過)	容器の腐食はむが健全性を確保、金属材料の腐食によるガス発生、二相流、拡散で移行	・複合体での廃棄体の腐食、容器のガス発生メカニズムが不明 ・処分環境、複合体での材料特性変化に関する知見が極めて少ない ・ベントナイト中でのガス破過後の状態変遷の知見が少ない
5. 廃棄体容器損傷、飽和 (数1000年経過)	廃棄体容器は腐食で損傷し、放射性核種がバリア内に放出、ベントナイトを経てEDZに移行、ガスは拡散と二相流で移行	・複合体での化学環境の変遷に関する知見が不足 ・容器損傷のプロセスが不明確 ・複合体の異なる媒体でのガス移行モードの知見が不十分
6. ～ベントナイト機能損失 (数1000～10数万年)	ベントナイトの核種閉じ込め機能を維持している状態、バリア内は拡散支配、ガスは拡散、二相流	・変質過程にあるベントナイト内での物質移行とガス移行挙動に関する知見がない ・複合系での化学環境の変遷と状態変化に関する知見がない
7. ベントナイト機能損失後 (10数万年以降)	ベントナイトが閉じ込め機能喪失、バリア内は移流場に変化、ガスは、二層流で移行	・変質後のベントナイト内での物質移行、ガス挙動の知見がない ・ガス発生源の特性変化に関する情報がない

6) 重要要素に関する根拠書評価の整理

表 2.2.1-9 にガス挙動に係わる根拠書での知見の状況と分析結果の評価をまとめて示す。重要要素を、大きく「異なるガス発生要因と発生源の時系列的な変化」、「ガス移行媒体の状態変化とそこでのガス挙動」「ガス移行と放射性核種移行の相互作用」に分類し、それらに関する根拠書に記述された知見の現状に対する過不足や課題を整理した。

表 2.2.1-9 ガス挙動評価における重要要素の知見の状況と評価のまとめ

重要要素	根拠書での知見の状況	評価
異なるガスの発生要因と発生源の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス発生に係わる知見として、金属腐食、放射性分解、微生物分解が取り上げられている。 ・ガス発生源の劣化・変質等による物性変化等は記述されていない 	<p>⇒処分環境、複合体でのガス発生メカニズムに関する知見は集約されていない。また、ガス発生源の時系列変化に係わる情報がない。</p>
媒体の状態変化とそこでのガス挙動	<ul style="list-style-type: none"> ・媒体(廃棄体、容器、充填材、コンクリート躯体、ベントナイト、EDZ)の個々の材料についての状態変遷に関する変質・劣化の記述、および化学環境への影響の知見はある。 	<p>⇒劣化・変質により変化したガス移行に関係する媒体の特性についての知見は集約されていない。 ⇒複合体としての化学環境の変化の知見はない。 ⇒マイクロでのガス移行に関するエビデンスは集約されていない。</p>
ガス移行と放射性核種移行の相互作用	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス移行モードに関しては、これまでの解析結果をもとに推定した知見が整理されている。 	<p>⇒媒体の時系列的状態変化に伴うガス移行モードの変遷に係わる情報はない。 ⇒核種との相互作用に関連する知見は集約されていない</p>
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・処分環境にうち、セメントや金属による化学環境の分析結果の知見が多く記載されている。 	<p>⇒化学環境(pHやEh)が時間の経過とともに媒体の変質・劣化に伴いどのように変化していくかの知見が少ない(ガス発生速度にも影響)</p>

2.2.2 整備した評価体系に基づく技術課題の解決に向けた検討

ここでは、平成 26 年度に抽出した「ガス挙動に関わる安全評価シナリオ」の不確実性要素を参照・分析を行い、「1. ガス影響に対する評価体系の整備」を通じて抽出した重要な要素に関わる不確実性を整理した。さらに、整理した不確実性に対する技術課題を設定・取りまとめるとともにその解決策を検討した。

本節での検討項目と内容を図 2.2.2-1 に示す。

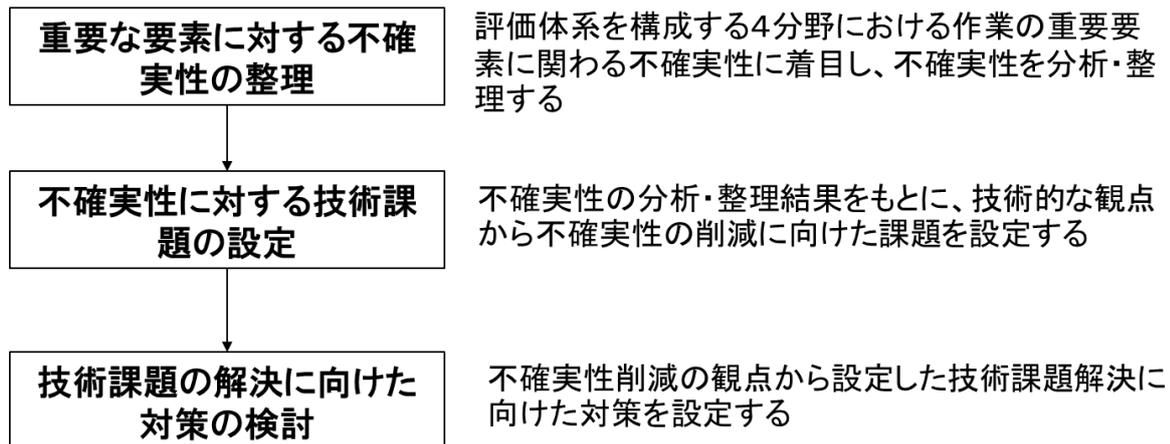


図 2.2.2-1 検討の流れと検討内容

(1) 評価体系から抽出された重要な要素に対する不確実性の整理

前節までに構築したガス発生の影響を評価する体系は、①場と現象の理解、②シナリオ設定、③評価ケースとモデル選定、④パラメータ設定から構成され、それぞれに関連する重要要素が不確実性ととともに抽出整理された。

本節では、これらの不確実性を以下の3つの観点から分析・整理することから作業を開始する。

- a. 関連する知見がなく不確実性とみなされている事項
- b. 個々の知見はあるが、システムとしての挙動理解に関する知見がなく不確実性とされている事項
- c. システム本来が有する不確実性

a.と b.は、今後知見が蓄積されるに従い、不確実性は減少する。一方、c.は、本質的に存在する不確実性で、評価においては、保守性を取り入れた単純化や安全側でのパラメータ設定という対応策がとられる性格を有する。時空間の不確実性の中で特の時間軸に関わる不確実性に多い。

1) 場と現象の理解からの不確実性の分析

人工バリアを含むニアフィールドの場と現象の理解は、統合 FEP 関連図を構成する 6 項目が対象となる。それぞれの項目の重要要素、不確実性に対する不確実性の分類およびそれらの特徴を表 2.2.2-1 に整理して示す。

表 2.2.2-1 場と現象理解における不確実性の分析結果

状態変遷	重要要素	不確実性	不確実性分類	不確実性の特徴
a. ガス発生	・ガス発生源の形態、量、表面積、インベントリ ・処分システムの中でのガス発生・消失メカニズムとモデル	・廃棄体の性状に不明点が多いため、ガス発生予測が不確実 ・実際の環境とガス発生メカニズムの関連が明確でない	⇒ a ⇒ a, b	⇒ 廃棄体の性状が決定されれば削減される ⇒ 実験的なアプローチが多く、ガス発生のメカニズムや環境・境界条件の違いによる知見が少ない
b. 廃棄体容器内のガス挙動	・廃棄体容器の仕様と安全機能の ・容器内の充填材の特性	・廃棄体容器の仕様が決まっていないため特性が規定できない ・充填材の仕様が決まっていないため特性が規定できない	⇒ b ⇒ b	⇒ 容器の仕様が決定されれば削減される ⇒ 充填材の仕様が決定されれば削減される
c. コンクリートピットと充填材中のガス挙動	・コンクリートの初期性能(強度、密度、変形能)と性能維持期間 ・充填材の初期性能(密度)と性能維持期間	・コンクリートの処分環境での劣化・変質プロセスと速度、変質した状態でのガス挙動予測 ・充填材についても同様	⇒ b ⇒ b	⇒ 劣化を推定する知見は存在するが速度推定は環境に依存 ⇒ 充填材の劣化を推定する知見は存在するが速度推定は環境に依存
d. ベントナイト中のガス挙動	・ベントナイトの密度、厚さ、形状 ・ベントナイトの機能維持期間 ・ベントナイトの変質・劣化プロセス ・ガスの侵入圧と侵入速度	・ベントナイトの処分環境での変質・劣化プロセスと速度 ・変質・劣化したベントナイト中でのガス移行と核種移行挙動	⇒ b ⇒ a	⇒ 変質・劣化を推定する知見は存在するが速度は環境に依存 ⇒ 関連する知見は存在しない
e. EDZ内のガス挙動	・周辺岩盤の特性(多孔質、亀裂、付加帯)と立地環境(水理、化学特性)	・母岩や立地場所の特性により変化するガス挙動予測	⇒ b	⇒ 特定の岩盤についての知見は海外に存在している(亀裂岩盤、多孔質岩盤)
f. 人工バリア内亀裂中のガス挙動	・貫通亀裂発生(人工バリアの閉じ込め性の早期喪失)	・人工バリア内状態と貫通亀裂の発生可能性とそこでのガス挙動	⇒ b	⇒ 複雑な系であり、システムとしての知見は存在しない

不確実性の大部分は、b(個々の知見はあるが、システムとしての挙動等の知見が不十分である)に起因する不確実性となっている。その中で、ガス発生(ガスソース)に関わる不確実性では、環境や境界条件の違いによるガス発生に関わる知見が不十分なことに起因している不確実性がある。劣化・変質したベントナイト中でのガス挙動に関わる知見は、現状では存在しない。

2) シナリオ設定での不確実性の分析

シナリオ設定では、安全機能の設定からシナリオ整理シート作成までの作業における重要要素と不確実性が整理されており、それらの不確実性に対して、不確実性の分類と特徴を表 2.2.2-2 に整理して示す。

不確実性は、全て b に分類されている。いずれも関連する要素の知見は存在するがシステムとしての知見が不十分であることに起因する不確実性である。シナリオ分類に関連する不確実性については、長期の現象やプロセスの蓋然性予測に関わる本質的な不確実性が存在する。

表 2.2.2-2 シナリオ設定時における不確実性の分析結果

シナリオ設定作業	重要要素	不確実性	不確実性分類	不確実性の特徴
a. 安全機能設定	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体特性と周辺環境に対応した安全概念 ・安全概念に対応したバリア機能設定 ・安全機能に対応したバリア仕様設計 ・設計上の機能維持期間設定 	<ul style="list-style-type: none"> ・処分環境が決まっていない ・処分環境でのバリア間の相互作用がよく把握されていない ・機能喪失の要因と時期の処分環境での予測 ・処分環境での劣化・変質プロセスと安全機能の劣化の関係 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ b ⇒ b ⇒ b ⇒ b 	⇒いずれも要素に関連する知見は存在するが、システムとして機能するときの知見が不十分である
b. シナリオ構築	<ul style="list-style-type: none"> ・統合FEP関連図による媒体の状態変遷に伴うガス移行モードの変化の時間枠の設定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス亀裂の発生、破過発生のシナリオ上での扱い 	⇒ b	⇒プロセスや事象は個々に理解されているがシステム内での状態変遷に伴うガス移行モードの変化に関する知見が不十分
c. シナリオ分類	<ul style="list-style-type: none"> ・シナリオの変遷に関わる要素（ガス発生に伴う移行モード変遷の発生確率、移行媒体の変化の設定） 	<ul style="list-style-type: none"> ・媒体の変遷予測の蓋然性に対応するガス移行モードの変遷の発生確率の予測 	⇒ b, c	⇒複雑系においてきわめて長期にわたる現象の蓋然性や影響の大きさ、発生時期の予測の知見は不十分、実験系等で再現できない可能性がある
d. シナリオ整理シートの作成	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス発生と移行モードの変遷 ・核種移行との相互作用の設定 ・媒体の状態変遷に対応したガス移行モードの設定 ・処分環境の変遷の設定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス発生予測と移行モードの組合せ ・核種移行とガス移行の相互作用の扱い ・媒体の変遷とガス・核種移行とのつながり ・処分環境の変遷予測 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ b ⇒ b ⇒ b 	⇒いずれも要素に関連する知見は存在するが、システムとして機能するときの知見が不十分である

3) 評価ケース・モデル設定に関わる不確実性の分析

評価ケースとモデル設定時の不確実分析結果を表 2.2.2-3 に示す。不確実性の大部分は、知見がないか、知見が不十分であることに起因している。また現象の理解につながるプロセスモデルの設定では、本質的な不確実性も存在する。

表 2.2.2-3 評価ケースとモデル設定時の不確実性の分析結果

評価ケース設定・モデル選定	重要要素	不確実性	不確実性分類	不確実性の特徴
a. 評価ケース設定	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス発生メカニズムと発生量・速度の予測 ・システムとしての媒体特性とその状態変遷の予測 ・媒体特性の変化に対応したガス移行モードの設定 ・安全機能変遷の期間設定 ・処分場の立地環境を考慮した処分場全体でのガス影響評価 	<ul style="list-style-type: none"> ・異なる廃棄体グループごとのバリア環境内でのガス発生予測 ・システムとしての媒体の状態変遷予測 ・媒体の状態変遷に対応したガス移行モードの割り付け ・複雑な形態となるTRU処分場での時系列的変遷を考慮した場合のガス挙動評価 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ a, b ⇒ a, b ⇒ b ⇒ b 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒現象の理解の不十分さに依存する不確実性 ⇒人工バリア要素と複合体としての状態変遷の対応するガス挙動の知見が十分でない ⇒ガス挙動に関する安全機能の議論がなされていない ⇒TRU処分場全体での影響評価の議論がされていない
b. 評価モデルの設定	<ul style="list-style-type: none"> ・媒体の状態変遷に伴うガス移行モードの変化の時間枠の設定と対応する放射性核種の移行モデルの選定 	<ul style="list-style-type: none"> ・人工バリアシステム内でのガス挙動と核種挙動を同時に扱う必要性があるかの吟味がなされていない 	⇒ a, b	⇒上記の評価ケース設定上の不確実性に対応し、評価モデルの議論や開発が不十分である(20年前の評価と変わっていない)
c. プロセスモデルの設定	<ul style="list-style-type: none"> ・実規模施設で考慮する状態変遷 ・対応する異なる媒体での複合体での放射性核種移行モードとガス移行モード ・複合体の境界面での挙動、形状効果と3次元的な挙動 	<ul style="list-style-type: none"> ・実規模スケールで着目する状態変遷とガス移行プロセスのモデル化の可能性 ・要素試験の複合系(システム)への展開可能性 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ a, b, c ⇒ a, b, c 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒実規模スケールでのガス移行挙動に関する知見はなく、要素試験での推定のみ。時間的な変動を予測するには本質的な不確実性が存在 ⇒複合系(システム)での境界面でのミクロな挙動をマクロな系に展開するための知見は不十分
d. モデルチェーンの設定	<ul style="list-style-type: none"> ・核種移行とガス移行モデルの相互作用 ・ガス・核種移行媒体の状態変遷 ・周辺環境の変遷 	<ul style="list-style-type: none"> ・核種移行モデルとガス移行モデルの場のモデル化の違い ・相互作用の時系列変遷 	⇒ a, b	⇒ミクシングセルとしている核種移行モデルでの状態の見直しが必要(場のモデル化の整合性をとるため)

4) 重要要素に係わる知見の評価

「場と現象の理解」に関する重要要素は、表 2.2.2-4 の黄色の項目となり、それらは、「異なるガスの発生と発生源の変化」、「媒体の状態変化とそこでのガス挙動」、「ガスと放射性核種の相互作用」としてまとめることができる。

全体の 80%評価 (2) となった。記載された事項はほとんど短期間での試験結果や解析結果からの推定・想定であり、サポートするエビデンスや解析結果の検証がなされていない。

(3) と評価された知見は、短期間での試験結果で得られた情報 (例えば、ベントナイトの飽和過程での状態変化、金属腐食、セメント材料の溶解など) であった。

長期の状態変化に関する知見は (1) となり、短期の知見からの「想定」での記述となっている。

表 2.2.2-4 場と現象理解に係わる重要要素の表示

	1. 埋戻し～閉鎖	2. 閉鎖～緩衝材飽和	3. 充填材飽和	4. 廃棄体容器が健全	5. 容器損傷、廃棄体飽和	6. ベントナイト機能損失まで	7. ベントナイト機能損失後	
EBS の状態変遷と核種移行のプロセスマイメージ								
1. 廃棄体：廃棄物+ドラム、ステンレス容器	T: 発熱による温度上昇 3 H: 不飽和状態 3 M: 初期放射力状態 3 C: 初期の化学特性 3 R: 初期含水分の放射線分解 3 B: 表面にバイオフィーム(菌膜)形成 1 G: 放射線分解によるガス発生(減少) 3 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 発熱による温度上昇 3 H: 不飽和状態 3 M: 初期放射力状態 3 C: 初期の化学特性 3 R: 初期含水分の放射線分解 3 B: 表面にバイオフィーム(菌膜)形成 1 G: 放射線分解によるガス発生(減少) 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 温度低下 2 H: 不飽和状態 2 M: 初期放射力状態 2 C: 初期の化学特性 2 R: 初期含水分の放射線分解 2 B: 表面にバイオフィーム(菌膜)形成 1 G: 放射線分解によるガス発生(減少) 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 温度低下(周辺岩盤温度) 2 H: 浸入地下水との接触-飽和状態 2 M: 腐食影響、ガス圧上昇 2 C: 高 pH 環境、核種溶出、腐食 2 R: 放射線分解によるガス発生(減少) 2 B: 表面にバイオフィーム(菌膜)形成 1 G: 放射線分解によるガス発生(減少) 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 飽和状態、低 pH 2 M: 腐食影響、ガス圧上昇 2 C: 高 pH 環境、核種溶出、腐食 2 R: 放射線分解によるガス発生(減少) 2 B: 表面にバイオフィーム(菌膜)形成 1 G: 放射線分解によるガス発生(減少) 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 飽和状態、低 pH 2 M: 腐食影響、ガス圧上昇 2 C: 高 pH 環境、核種溶出、腐食 2 R: 放射線分解によるガス発生(減少) 2 B: 表面にバイオフィーム(菌膜)形成 1 G: 放射線分解によるガス発生(減少) 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 飽和状態、低 pH 2 M: 腐食影響、ガス圧上昇 2 C: 高 pH 環境、核種溶出、腐食 2 R: 放射線分解によるガス発生(減少) 2 B: 表面にバイオフィーム(菌膜)形成 1 G: 放射線分解によるガス発生(減少) 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	
2. 廃棄体容器/充填材(容器表面は鋼板)	T: 発熱による温度上昇 3 H: 周辺の水からの隔離、不飽和 2 M: 自重による応力発生、健全性維持 2 C: 初期の化学特性 2 R: 放射線分解 2 B: 表面にバイオフィーム(菌膜)形成 1 G: ガス発生 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 充填による温度上昇から低下 2 H: 周辺の水からの隔離、不飽和 2 M: 自重による応力発生、健全性維持 2 C: 初期の化学特性 2 R: 放射線分解 2 B: 表面にバイオフィーム(菌膜)形成 1 G: ガス発生 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 温度低下 2 H: 不飽和から飽和、不飽和 2 M: 自重による応力発生、健全性維持 2 C: 初期の化学特性 2 R: 放射線分解によるガス発生 1 B: 表面にバイオフィーム(菌膜)形成 1 G: ガス発生 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 温度低下(周辺岩盤温度) 2 H: 不飽和から飽和状態 2 M: 自重による応力発生、健全性維持 2 C: 浸入地下水の溶解、高 pH 環境 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 表面にバイオフィーム(菌膜)形成 1 G: ガス発生 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 飽和、多孔質媒体、低 pH 2 M: 多孔質媒体の圧力、ひび割れ発生 2 C: 浸入地下水の溶解、高 pH 環境 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 表面にバイオフィーム(菌膜)形成 1 G: ガス発生 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 飽和、多孔質媒体、低 pH 2 M: ひび割れ発生、形状喪失 1 C: 浸入地下水の溶解、高 pH 環境 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 表面にバイオフィーム(菌膜)形成 1 G: ガス発生 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 多孔質媒体、移流場 1 M: 移流場 1 C: 地下水への溶解 1 R: 放射線分解によるガス発生(減少) 2 B: 表面にバイオフィーム(菌膜)形成 1 G: ガス発生 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 多孔質媒体、移流場 1 M: 移流場 1 C: 地下水への溶解 1 R: 放射線分解によるガス発生(減少) 2 B: 表面にバイオフィーム(菌膜)形成 1 G: ガス発生 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2
3. コンクリートピット/充填材(鉄筋コンクリート)	T: 埋戻しによる温度上昇 3 H: 不飽和、低透水(低蒸発) 2 M: 外部荷重による応力発生 2 C: 初期の化学特性 2 R: 放射線分解 2 B: 微生物増殖 2 G: ガス発生 2 PN: 移行なし 2	T: 周辺岩盤温度に移行 2 H: 不飽和、低透水(低蒸発) 2 M: 外部荷重による応力発生 2 C: 初期の化学特性 2 R: 放射線分解 2 B: 微生物増殖 2 G: ガス発生 2 PN: 移行なし 2	T: 温度低下 2 H: 飽和と移行、局地的移流場形成 2 M: 外部荷重によるひび割れ発生 2 C: 高 pH 浸入水との反応、変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖 2 G: 鉄筋の腐食によるガス発生、腐食 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 温度低下(周辺岩盤温度) 2 H: 飽和と移行、局地的移流場形成 2 M: 外部荷重によるひび割れ発生 2 C: 高 pH 浸入水との反応、変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖 2 G: 鉄筋の腐食によるガス発生、腐食 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: ひび割れ発生、移流場形成 2 M: 腐食影響と劣化で強度低下 2 C: 鉄筋の腐食生成物、高 pH 環境 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖 2 G: 鉄筋の腐食によるガス発生、腐食 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: ひび割れ発生、移流場形成 2 M: 腐食影響と劣化で強度低下 2 C: 鉄筋の腐食生成物、高 pH 環境 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖 2 G: 鉄筋の腐食によるガス発生、腐食 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 移流場形成 2 M: 腐食影響と劣化で強度低下 2 C: 鉄筋の腐食生成物、高 pH 環境 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖 2 G: 鉄筋の腐食によるガス発生、腐食 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 移流場形成 2 M: 腐食影響と劣化で強度低下 2 C: 鉄筋の腐食生成物、高 pH 環境 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖 2 G: 鉄筋の腐食によるガス発生、腐食 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2
4. ベントナイト緩衝材(70.3% 密度 1.6)	T: 埋戻しによる温度上昇 3 H: 地下の浸透、不飽和(低蒸発) 3 M: 地下水接触による膨潤力発生 3 C: 高 pH 浸入水との反応開始 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 放射線分解によるガス発生 2 G: 放射線分解によるガス発生 2 PN: 移行なし 2	T: 埋戻しによる温度上昇 3 H: 地下の浸透、不飽和(低蒸発) 3 M: 地下水接触による膨潤力発生 3 C: 高 pH 浸入水との反応開始 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 放射線分解によるガス発生 2 G: 放射線分解によるガス発生 2 PN: 移行なし 2	T: 温度低下 2 H: 不飽和から飽和へ(監視場) 3 M: 地下水接触による膨潤力発生 3 C: 高 pH 浸入水との反応、変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖の定義 1 G: 放射線分解によるガス発生(減少) 1 PN: 移行なし 2	T: 温度低下(周辺岩盤温度) 2 H: 不飽和から飽和へ(監視場) 3 M: 地下水接触による膨潤力発生 3 C: 高 pH 浸入水との反応、変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖の定義 1 G: 放射線分解によるガス発生(減少) 1 PN: 移行なし 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 飽和(低蒸発) 2 M: 膨潤力維持 2 C: 高 pH 浸入水との反応、変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖の定義 1 G: 放射線分解によるガス発生(減少) 1 PN: 移行なし 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 飽和(低蒸発) 2 M: 膨潤力維持 2 C: 高 pH 浸入水との反応、変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖の定義 1 G: 放射線分解によるガス発生(減少) 1 PN: 移行なし 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 膨潤力維持、変質部特性喪失 1 C: 高 pH 浸入水との反応、変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖の定義 1 G: 放射線分解によるガス発生(減少) 1 PN: 移行なし 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 膨潤力維持、変質部特性喪失 1 C: 高 pH 浸入水との反応、変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖の定義 1 G: 放射線分解によるガス発生(減少) 1 PN: 移行なし 2
5. 処分空洞埋戻し材(ベントナイト混合材料を想定)	T: 埋戻しによる温度上昇 3 H: 不飽和から飽和へ、移流場 2 M: 初期放射力状態 2 C: 高 pH 地下水による変質開始 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 放射線分解によるガス発生 2 G: 放射線分解によるガス発生 2 PN: 移行なし 2	T: 埋戻しによる温度上昇 3 H: 不飽和から飽和へ、移流場 2 M: 初期放射力状態 2 C: 高 pH 地下水による変質開始 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 放射線分解によるガス発生 2 G: 放射線分解によるガス発生 2 PN: 移行なし 2	T: 温度低下 2 H: 低透水(移流場) 2 M: 内外圧差による変形 2 C: 高 pH 地下水の浸入による変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖の活動 1 G: ガス発生 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 温度低下(周辺岩盤温度) 2 H: 低透水(移流場) 2 M: 内外圧差による変形 2 C: 高 pH 地下水の浸入による変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖の活動 1 G: ガス発生 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 低透水(移流場) 2 M: 内外圧差による変形 2 C: 高 pH 地下水の浸入による変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖の活動 1 G: 二相流、ガス状で移行 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 低透水(移流場) 2 M: 内外圧差による変形 2 C: 高 pH 地下水の浸入による変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖の活動 1 G: 二相流、ガス状で移行 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 低透水(移流場) 2 M: 内外圧差による変形 2 C: 高 pH 地下水の浸入による変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖の活動 1 G: 二相流、ガス状で移行 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 低透水(移流場) 2 M: 内外圧差による変形 2 C: 高 pH 地下水の浸入による変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖の活動 1 G: 二相流、ガス状で移行 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2
6. 処分空洞コンクリート支保工+ロックポルト、吹き付け	T: 水和熱から周辺岩盤温度に 2 H: 不飽和から飽和へ、移流場 2 M: 初期放射力状態 2 C: 高 pH 地下水による変質開始 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 放射線分解によるガス発生 2 G: ロックポルトの腐食によるガス発生 2 PN: 移行なし 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 低透水(移流場) 2 M: 内外圧差による変形 2 C: 高 pH 地下水の浸入による変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖の活動 2 G: ロックポルトの腐食によるガス発生 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 温度低下 2 H: 低透水(移流場) 2 M: 内外圧差による変形 2 C: 高 pH 地下水の浸入による変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖の活動 2 G: ロックポルトの腐食によるガス発生 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 温度低下(周辺岩盤温度) 2 H: 低透水(移流場) 2 M: 内外圧差による変形 2 C: 高 pH 地下水の浸入による変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖の活動 2 G: ロックポルトの腐食によるガス発生 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 低透水(移流場) 2 M: 内外圧差による変形 2 C: 高 pH 地下水の浸入による変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖の活動 2 G: ロックポルトの腐食によるガス発生 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 低透水(移流場) 2 M: 内外圧差による変形 2 C: 高 pH 地下水の浸入による変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖の活動 2 G: ロックポルトの腐食によるガス発生 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 低透水(移流場) 2 M: 内外圧差による変形 2 C: 高 pH 地下水の浸入による変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖の活動 2 G: ロックポルトの腐食によるガス発生 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 低透水(移流場) 2 M: 内外圧差による変形 2 C: 高 pH 地下水の浸入による変質 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 微生物増殖の活動 2 G: ロックポルトの腐食によるガス発生 2 PN: ガス状-溶存状態 転移 2
7. 規制影響領域(EDZ)	T: 発熱による温度上昇 3 H: 不飽和と飽和 2 M: 初期放射力(グループ) 2 C: 高 pH 環境、高 pH 環境 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 放射線分解によるガス発生 2 G: 放射線分解によるガス発生 2 PN: 移行なし 2	T: 発熱による温度上昇 3 H: 不飽和と飽和 2 M: 初期放射力(グループ) 2 C: 高 pH 環境、高 pH 環境 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 放射線分解によるガス発生 2 G: 放射線分解によるガス発生 2 PN: 移行なし 2	T: 温度低下 2 H: 不飽和と飽和 2 M: 初期放射力(グループ) 2 C: 高 pH 環境、高 pH 環境 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 放射線分解によるガス発生 2 G: 放射線分解によるガス発生 2 PN: 移行なし 2	T: 温度低下(周辺岩盤温度) 2 H: 不飽和と飽和 2 M: 初期放射力(グループ) 2 C: 高 pH 環境、高 pH 環境 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 放射線分解によるガス発生 2 G: 放射線分解によるガス発生 2 PN: 移行なし 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 飽和と飽和 2 M: 初期放射力(グループ) 2 C: 高 pH 環境、高 pH 環境 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 放射線分解によるガス発生 2 G: 放射線分解によるガス発生 2 PN: 移行なし 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 飽和と飽和 2 M: 初期放射力(グループ) 2 C: 高 pH 環境、高 pH 環境 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 放射線分解によるガス発生 2 G: 放射線分解によるガス発生 2 PN: 移行なし 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 飽和と飽和 2 M: 初期放射力(グループ) 2 C: 高 pH 環境、高 pH 環境 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 放射線分解によるガス発生 2 G: 放射線分解によるガス発生 2 PN: 移行なし 2	T: 周辺岩盤温度 2 H: 飽和と飽和 2 M: 初期放射力(グループ) 2 C: 高 pH 環境、高 pH 環境 2 R: 放射線分解によるガス発生 2 B: 放射線分解によるガス発生 2 G: 放射線分解によるガス発生 2 PN: 移行なし 2
不確実性	- 閉鎖前の周辺岩盤環境設定が十分でない。微生物活動や金属材料の浸潤によるガスの存在が不明	- 不飽和環境での放射性ガスの移行	- 廃棄体容器の環境変遷とガス発生との関係が不明	- 飽和環境での材料変質に関する知見が不十分	- 化学環境の変遷に関する知見が不足	- 変質部におけるベントナイト内の物質移行、ガス挙動の知見が不十分	- 変質後のベントナイト内の物質移行、ガス挙動の知見が不十分	

5) パラメータ設定時の不確実性の分析

パラメータ設定時の不確実性抽出では、大きく二つの観点からのアプローチを実施した。最初の不確実性は、要素試験で設定したパラメータを実規模スケールに適用できるかという不確実性で、もう一つは、現在ガス挙動解析で用いられている解析コードのパラメータ設定上の不確実性である。

a. 対象のスケールの違いによるパラメータ設定時の不確実性分析

要素試験や逆解析で得られたパラメータを用いて実規模スケールのガス挙動解析を実施することに対する不確実性は、その適用性が確認できていないことに起因する。不確実性の分析えではbとなる。

b. 解析コードに用いるパラメータ設定での不確実性分析

ガス挙動解析に用いられているGETFLOWSやCODE_BRITGHTのパラメータ設定上の不確実性の分析結果は、表 2.2.2-5、表 2.2.2-6 にそれぞれ示す。

これらの作業の主たる不確実性は、知識が不十分で理解や把握が十分でないことに起因するものと、関連する知見や情報が十分取得されていないことに起因している。パラメータの多くが、要素試験の結果をシミュレーションできることで得られているため、要素試験の信頼性にも依存する。スケールの違いや境界条件の違いは、モデル作成により考慮されることになるため、a.で取り上げた不確実性はそのまま残ることになる。

表 2.2.2-5 FETFLOWS におけるパラメータ設定時の不確実性分析結果

パラメータ設定の作業手順	重要要素	不確実性	不確実性分類	不確実性の特徴
a. 既存データの収集	<ul style="list-style-type: none"> 網羅性の確保 	<ul style="list-style-type: none"> 網羅的に収集できているかの確認 	⇒ b	⇒ 関連するデータの収集作業に落ちがある可能性
b. 逆解析によるパラメータの同定(文献データの再現解析)	<ul style="list-style-type: none"> 試験データの解釈 逆問題の設計(目的関数, 制約条件, 与条件) 初期設定値の決定 	<ul style="list-style-type: none"> 試験データの解釈における知見の十分性 逆問題の設計内容(目的関数, 制約条件, 与条件の設定方法)の把握 初期設定値による不確実性と同定値の不確実性 	⇒ b ⇒ b ⇒ b	⇒ 試験のデータの把握と現象理解に関連する知見の不十分性に係る ⇒ 理解が十分でないことによる ⇒ それぞれ関連する知見の不十分性に依存
c. 確証計算(ガス移行試験の再現解析)	<ul style="list-style-type: none"> 試験データの解釈 確証計算問題の設計(初期条件, 制約条件, 与条件) 逆解析から同定された複数のパラメータからの選定 	<ul style="list-style-type: none"> 確証計算問題の設計内容(制約条件, 与条件の設定方法) ガスの水への溶解の有無, または溶解速度の不確実性 初期設定値による不確実性と同定値の不確実性 	⇒ b ⇒ b ⇒ a, b	⇒ 理解の不十分さ, 知見の不十分さに依存する
d. パラメータの選定	<ul style="list-style-type: none"> 要素試験での材料特性の信頼性 要素試験の方法 	<ul style="list-style-type: none"> 材料がほぼ同一とみなせるか否か 取得された手法, パラメータを使用して良いか否か 	⇒ b ⇒ a, b	⇒ 知見と情報の不十分さ ⇒ 知見の不十分さ

表 2.2.2-6 CODE_BRIGHT のパラメータ設定時の不確実性分析

パラメータ設定の作業手順	重要要素	不確実性	不確実性分類	不確実性の特徴
a. 既存データの収集	<ul style="list-style-type: none"> 対象とする試験条件, 材料条件が一致しているか 	<ul style="list-style-type: none"> 既往の文献に記載のない条件 (モンモロロナイト含有量, 拡散係数等) 	⇒ a	⇒ 知見が不十分
b. 不飽和力学パラメータの設定	<ul style="list-style-type: none"> 設定する膨潤圧 初期間隙比, 初期サクションの設定 	<ul style="list-style-type: none"> 小峯の膨潤評価式で用いるパラメータ 空隙比算出時に用いる真密度の仮定 水分特性曲線の設定 	⇒ b	⇒ システムとしての知見の不十分さ
c. パラメータの同定 (ガス移行試験の再現解析)	<ul style="list-style-type: none"> 試験データの解釈 初期設定値の決定 境界条件 	<ul style="list-style-type: none"> 初期設定値による不確実性 同定値の不確実性 境界条件の不確実性 	⇒ b	⇒ システムとして改正する場合の知識と情報の不十分さ
d. 力学状態の確認	<ul style="list-style-type: none"> 空隙率分布 塑性域の妥当性 	<ul style="list-style-type: none"> 試験結果との整合性 	⇒ a, b	⇒ 要素レベルの情報の不十分さ

6) 不確実性伝播状況の分析

ガス発生の影響評価の体系は、4つの作業から構成され、それぞれでの重要作業（要素）に係わる不確実性は、場と現象の理解に端を発して、下流側に伝播していく。ここでは、その状況を評価に大きく関係すると推定される不確実性を対象に分析した結果を図 2.2.2-2 に示す。

場と現象の理解で抽出された種類の異なる不確実性は、その後のシナリオ設定、評価ケース設定まで伝播していくが、モデルを選択し、パラメータを設定する作業では、多くの不確実性は前提条件や与条件としての扱いとなり、その影響は伝播しない。

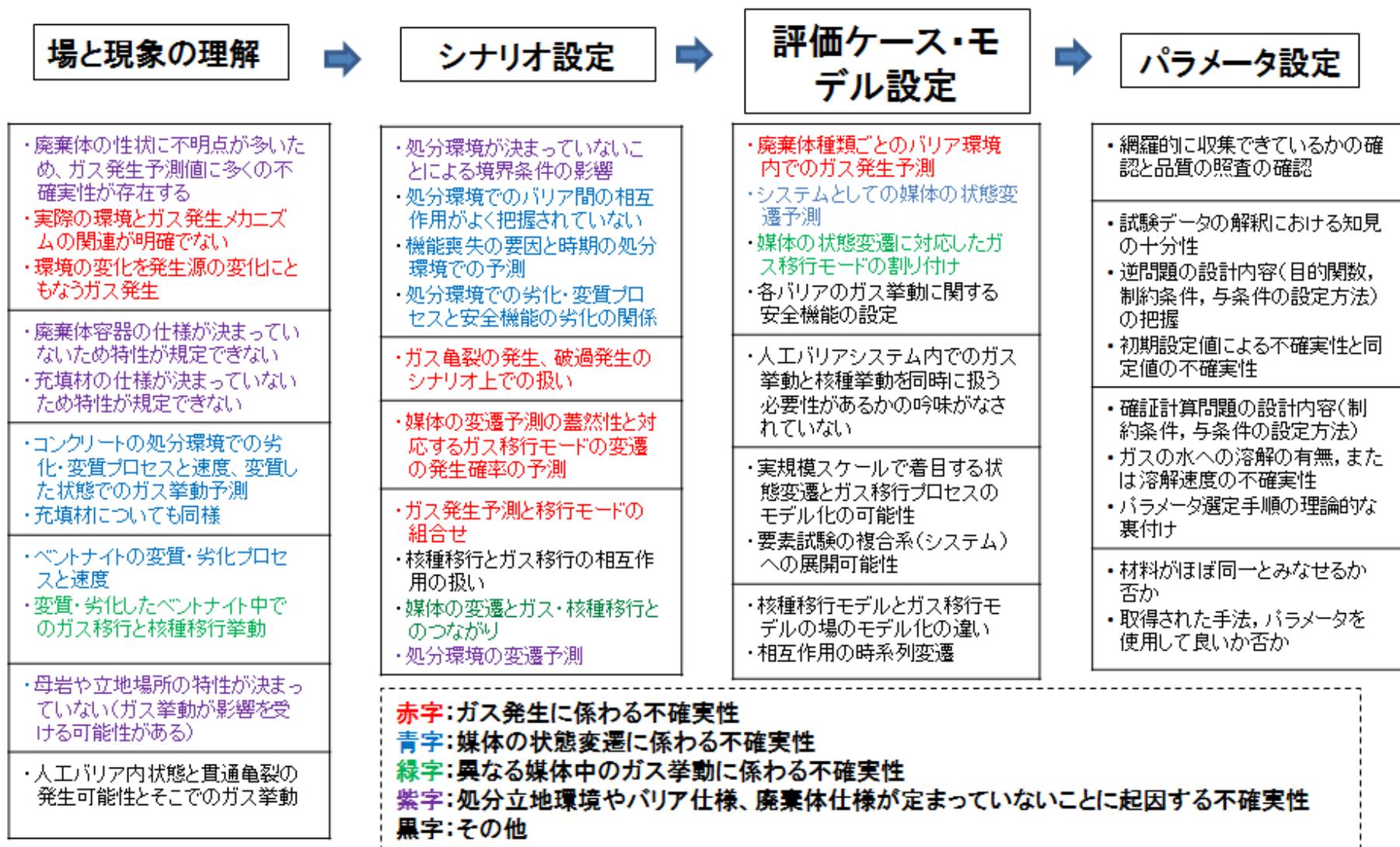


図 2.2.2-2 評価体系の作業項目と不確実性の伝播状況

7) 不確実性の分析結果のまとめ

4つの作業要素に係わる不確実性を以下に示す5種類に分類した結果、場と現象の理解における不確実性は、その後のシナリオ設定にも伝播していることが分かった。表 2.2.2-7 代表的な不確実性の伝播状況の分析に代表的な不確実性の伝播状況を示す。処分環境や概念が決定していないことに起因する不確実性、特にガス発生に係わる不確実性、媒体の状態変遷に係わる不確実性がそのまま評価ケースの設定まで継続して伝播していく。

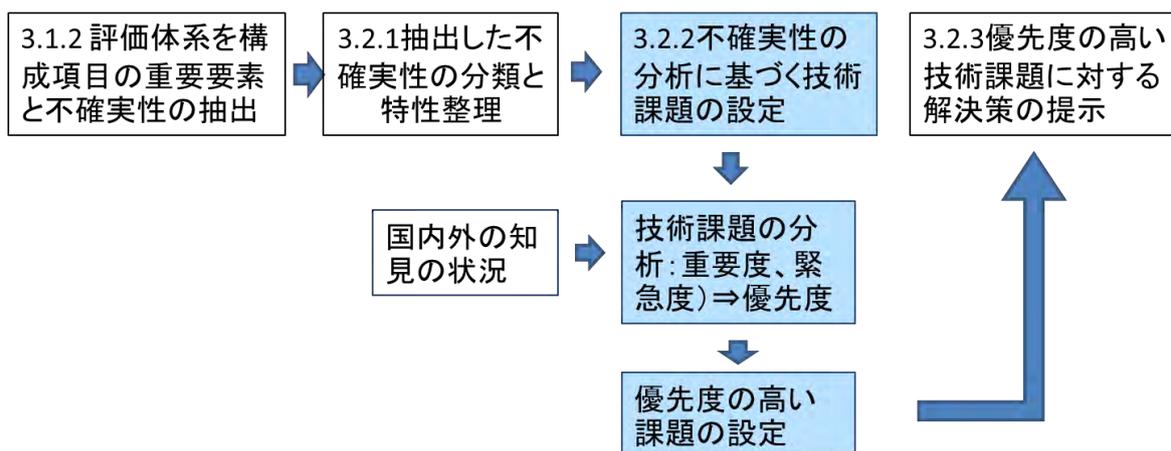
表 2.2.2-7 代表的な不確実性の伝播状況の分析

不確実性	①場と現象の理解	②シナリオ設定	③評価ケース・モデル設定	④パラメータ設定
ガス発生	・処分環境での異なる媒体中でのガス発生メカニズム ・環境と発生源の変化に伴うガス発生	⇒ガス発生量と移行モードの組合せとしての扱い(破過とその後の状態設定)	⇒シナリオ分類に対応する評価ケースの設定とモデルの選定(現状、ガス発生は組込まれていない)	⇒ガス発生量と速度は前提として取扱う
媒体の状態変遷	・金属容器、コンクリート、ベントナイトの処分環境での変質・劣化に伴う特性変化	⇒媒体の特性変化に伴うガス移行モードの変化(統合FEP関連図の変遷)	⇒媒体の状態変遷は扱っていない	⇒媒体の特性変化は扱っていない
異なる媒体中のガス挙動	・複合体での媒体変遷とそこでのガス挙動	⇒実機の複合体でのガス移行挙動の扱い(シナリオ分類)	⇒単純系での知見を用いたモデル設定	⇒異なる媒体の試験からのパラメータ設定
処分立地環境・廃棄体仕様等が未決定	・廃棄体の特性 ・人工バリア材の特性 ・周辺岩盤の特性と環境条件	⇒境界条件や前提条件としての扱い	⇒境界条件や前提条件としての扱い	⇒境界条件や前提条件としての扱い
その他	・ガスと核種移行の相互作用	⇒統合FEP関連図での扱い	⇒モデルチェーンとして明示	⇒独立したプロセスとして取扱

(2) 不確実性に対する技術課題の設定

評価体系を構成する重要要素と関連因子に関わる不確実性（これまでの知見から良く分かっていない事項）をベースに、①場と現象の理解、②シナリオ設定、③モデル選択、④パラメータ設定に関わる技術課題として設定する。

技術課題の設定では、TRU処分の廃棄物グループの特徴も考慮し、設定した課題を以下の手順で分類・整理する。



不確実性に関する分析の内、重要度、緊急度は以下の観点から3段階に分類する。それらを総合的に判断し、不確実性の削減に向けての優先度を設定する。

【重要度】重要度は、影響評価の信頼性を高めるための障害の大きさレベルを示す。

レベルⅠ：重要度は低い

レベルⅡ：重要度は中程度

レベルⅢ：重要度が高い

【緊急度】緊急度は、影響評価の信頼性を高めるために解決に向けて手を付けるレベルを示す。

レベルⅠ：緊急度は低い

レベルⅡ：緊急度は中程度

レベルⅢ：緊急度が高い

【優先度】優先度は、重要度と緊急度を総合的に判断し、解決に向けて解決すべき優先レベルを示す。

レベルⅠ：優先度は低い

レベルⅡ：優先度は中程度

レベルⅢ：優先度が高い

1) 場と現象の理解における技術課題の設定

場と現象の理解で明らかとなった不確実性とその種類をベースに重要度、緊急度および優先度の評価をした結果を表 2.2.2-8 に整理して示す。

表 2.2.2-8 場と現象の理解における技術課題の設定と評価

状態変遷	不確実性	技術課題	重要度	緊急度	優先度
a. ガス発生	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体の性状に不明点が多いため、ガス発生予測が不確実 ・実際の環境とガス発生メカニズムの関連が明確でない 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒対象となる廃棄体の種類や性状等の確定(Waste Streamの分析) ⇒人工バリアの状態変遷を考慮した異なる廃棄体のガス発生メカニズムの特定と発生環境を考慮した発生量の推定 	Ⅲ Ⅲ	Ⅲ Ⅲ	Ⅲ Ⅲ
b. 廃棄体容器内のガス挙動	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体容器の仕様が決まっていないため特性が規定できない ・充填材の仕様が決まっていないため特性が規定できない 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒廃棄体ごとの閉じ込め性を考慮した容器の設計と試作・性能確認(⇒次段階で劣化が課題) ⇒要求機能を考慮した容器内の充填材の開発(次段階で劣化が課題) 	Ⅰ Ⅰ	Ⅰ Ⅰ	Ⅰ Ⅰ
c. コンクリートピットと充填材中のガス挙動	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの処分環境での劣化・変質プロセスと速度、変質した状態でのガス挙動予測 ・充填材についても同様 	⇒処分環境と複合系でのコンクリート、充填材の劣化・変質状態の把握と変質媒体でのガス挙動評価(廃棄体グループにより影響が異なる)	Ⅰ Ⅰ	Ⅰ Ⅰ	Ⅰ Ⅰ
d. ベントナイト中のガス挙動	<ul style="list-style-type: none"> ・ベントナイトの処分環境での変質・劣化プロセスと速度 ・変質・劣化したベントナイト中でのガス移行と核種移行挙動 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒処分環境を考慮したベントナイトの劣化・変質状況の把握 ⇒劣化・変質環境下でのガス移行挙動の把握 	Ⅲ Ⅲ	Ⅱ Ⅱ	Ⅱ Ⅱ
e. EDZ内のガス挙動	<ul style="list-style-type: none"> ・母岩や立地場所の特性により変化するガス挙動予測 	⇒特定の母岩と地質環境条件を対象とした影響程度の把握	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
f. 人工バリア内亀裂中のガス挙動	<ul style="list-style-type: none"> ・人工バリア内状態と貫通亀裂の発生可能性とそこでのガス挙動 	⇒人工バリア内での貫通ひびわれが発生する可能性の照査(試験等での再現)	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ

場と現象の理解に関連する優先度の高い技術課題は、以下の4項目となる。

- ① ガス発生に係わる不確実性に対し、対象となる廃棄体の性状から処理・処分に至る廃棄体の流れ(Waste Stream)の明確化に関する課題
- ② ガス発生に係わる不確実性に対し、人工バリアの状態変遷を考慮した異なる廃棄体のガス発生メカニズムの特定と発生環境を考慮した現実的な発生量推定に係わる課題
- ③ 処分が立地する地質環境や地形等に関わる不確実性に対し、母岩の特性によりガス移行挙動評価の影響が異なってくることに對する課題
- ④ 人工バリア亀裂内での貫通亀裂の発生に係わる不確実性に対し、その発生可能性を再現するための技術課題

2) シナリオ設定時における技術課題の設定

シナリオ設定時における不確実性分析結果に基づく技術課題の設定とその評価結果を表 2.2.2-9 に示す。シナリオ設定で重要と評価された課題は以下のものである。

- ① システムの状態変化と対応する統合 FEP 関連図でのガス移行挙動と放射性核種移行挙動との相互作用に係わる課題

表 2.2.2-9 シナリオ設定における技術課題の設定と評価

シナリオ設定作業	不確実性	技術課題	重要度	緊急度	優先度
a. 安全機能設定	<ul style="list-style-type: none"> ・処分環境が決まっていないことによる境界条件の影響 ・処分環境でのバリア間の相互作用がよく把握されていない ・機能喪失の要因と時期の処分環境での予測 ・処分環境での劣化・変質プロセスと安全機能の劣化の関係 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒代表的な環境の設定による環境の違いによる影響度の把握 ⇒異なる環境条件での人工バリアシステムの相互作用挙動の把握(劣化・変質、力学連成、安全機能の喪失に係わる特性の時系列的な変化) 	Ⅲ Ⅲ	Ⅱ Ⅱ	Ⅱ Ⅱ
b. シナリオ構築	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス亀裂の発生、破過発生のシナリオ上での扱い 	⇒システムの状態変遷と統合FEP関連図におけるガス移行・核種移行の相互作用の把握	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
c. シナリオ分類	<ul style="list-style-type: none"> ・媒体の変遷予測の蓋然性に対応するガス移行モードの変遷の発生確率の予測 	⇒ガス発生の影響シナリオ分類の考え方の整理、影響の大きさの推定	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ
d. シナリオ整理シートの作成	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス発生予測と移行モードの組合せ ・核種移行とガス移行の相互作用の扱い ・媒体の変遷とガス・核種移行とのつながり ・処分環境の変遷予測 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒シナリオ展開上での発生ガスの種類と量の扱い方の定型化 ⇒統合FEP関連図を用いた移行挙動モード変遷時期の推定 ⇒ガス移行挙動媒体の変化のシナリオ上での扱い方の整理 	a. B. c. における技術課題と同様		

3) 評価ケース・モデル設定時における技術課題の設定

評価ケース・モデル設定時における不確実性分析から設定された技術課題とその評価結果を表 2.2.2-10 に示す。技術課題として優先度の高い項目は以下の 4 ケースとなる。

- ① 評価ケースの設定での不確実性に対し、異なる媒体の状態変遷に対応したガス挙動評価ケース設定に係わる課題
- ② グループ個別のガス挙動評価だけでなく、処分形態やレイアウトを考慮した処分場全体でのガス挙動評価ケース設定に係わる課題
- ③ 評価モデルの設定に係わる不確実性への対応を考慮した複合系から単純系のモデルに展開する場合の課題
- ④ プロセスモデル設定に関する課題で、評価モデルをサポートする各プロセスモデルの作成と検証・確証（マイクロ現象のマクロへの展開、要素試験の実規模挙動予測への適用性評価）

表 2.2.2-10 評価ケース・モデル設定時における技術課題の設定と評価

評価ケース設定・モデル選定	不確実性	技術課題	重要度	緊急度	優先度
a. 評価ケース設定	<ul style="list-style-type: none"> 異なる廃棄体グループごとのバリア環境内でのガス発生予測 システムとしての媒体の状態変遷予測 媒体の状態変遷に対応したガス移行モードの割り付け 各バリアのガス挙動に関する安全機能の設定 複雑な形態となるTRU処分場での時系列的変遷を考慮した場合のガス挙動評価 	⇒廃棄体の種類、人工バリア構成、周辺環境、ニアフィールドの状態変遷を考慮したガス発生予測モデルの設定	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ
		⇒廃棄体の種類、人工バリア構成、周辺環境、ニアフィールドの状態変遷を考慮した異なる媒体でのガス挙動評価ケースの設定	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
		⇒TRU処分場全体を対象とした影響評価ケースの設定	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
b. 評価モデルの設定	<ul style="list-style-type: none"> 媒体の状態変遷を考慮した相互作用モデル化の可能性 	⇒不確実性の影響を考慮した複合系から単純系への評価モデルの構築（モデルチェーンの設定に展開）	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
c. プロセスモデルの設定	<ul style="list-style-type: none"> 実規模スケールで着目するプロセスのモデル化の可能性 要素試験の複雑系への展開可能性 	⇒評価モデルをサポートする各プロセスモデルの作成と検証・確証（マイクロ現象のマクロへの展開、要素試験の実規模挙動予測への適用性評価）	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
d. モデルチェーンの設定	<ul style="list-style-type: none"> 核種移行モデルとガス移行モデルの場のモデル化の違い 相互作用の時系列変遷 	⇒実規模への適用を考慮した評価ケースに対応した評価モデルとプロセスモデルの最適な組合せ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ

4) パラメータ設定時における技術開発の設定

パラメータ設定時における技術課題は、GETFLOWS と CODE_BROUGHT の解析コードに関して設定する。

a. GETFLOWS

二相流としてガス移行挙動を解析する GETFLOWS を、ベントナイト中のガス挙動評価に用いることの妥当性と限界を把握しておくことが必須となる。また、要素試験からパラメータを設定する、あるいは検証している場合、実規模への適用に向けての妥当性の証明が不可欠となる。

GETFLOWS におけるパラメータ設定に係わる不確実性に対応して設定した技術課題と評価結果を表 2.2.2-11 に示す。優先度の高い技術課題は、以下の二項目となった。

- ① ベントナイトの要素試験で支配している実現象と解析コードでの仮定の違いの分析（二相流でない現象を二相流でシミュレーションすることの妥当性の説明）
- ② 材料の特性のバラツキがガス移行挙動評価にどの程度影響を及ぼすかの把握

表 2.2.2-11 GETFLOWS のパラメータ設定における技術課題と評価

パラメータ設定の作業手順	不確実性	技術課題	重要度	緊急度	優先度
a.既存データの収集	・網羅的に収集できているかの確認と品質の照査の確認	⇒既存データの系統的な収集と品質確認	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ
b.逆解析によるパラメータの同定(文献データの再現解析)	・試験データの解釈における知見の十分性 ・逆問題の設計内容(目的関数, 制約条件, 与条件の設定方法)の把握 ・初期設定値による不確実性と同定値の不確実性	⇒試験が再現している現象とコード化している数式のアプローチの分析 ⇒逆問題としての検証方法の妥当性検討 ⇒試験結果のバラツキの要因分析と統計処理によるパラメータの設定	Ⅲ Ⅲ Ⅱ	Ⅱ Ⅱ Ⅰ	Ⅱ Ⅱ Ⅰ
c.確認計算(ガス移行試験の再現解析)	・確認計算問題の設計内容(制約条件, 与条件の設定方法) ・ガスの水への溶解の有無, または溶解速度の不確実性 ・パラメータ選定手順の理論的な裏付け	⇒ベントナイトの要素試験で支配している実現象と解析コードでの仮定の違いの分析(二相流でない現象を二相流でシミュレーションすることの妥当性の説明)	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
d.パラメータの選定	・材料がほぼ同一とみなせるか否か ・取得された手法, パラメータを使用して良いか否か	⇒材料の特性のバラツキがガス移行挙動評価にどの程度影響を及ぼすかの把握	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ

b. CODE_BRIGHT

国際的にベントナイト中のガス挙動解析に用いられている CODE_BRIGHT におけるパラメータ設定作業の不確実性に対する技術課題とその評価結果を表 2.2.2-12 に示す。重要な技術課題は、以下の項目となった。

- ① 要素試験で得られたデータの分析、統計処理、要素試験のパラメータが実規模にも適用可能であるとする理論的な根拠の整理

表 2.2.2-12 CODE_BRIGHT のパラメータ設定における技術課題と評価

パラメータ設定の作業手順	不確実性	技術課題	重要度	緊急度	優先度
a.既存データの収集	・ 既往の文献に記載のない条件(モンモリロナイト含有量, 拡散係数等)	⇒コードに対応した試験によるデータの蓄積(現状での設定による不確実性の影響程度の把握も含め)	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ
b.不飽和力学パラメータの設定	・ 小峯の膨潤評価式で用いるパラメータ ・ 間隙比算出時に用いる真密度の仮定 ・ 水分特性曲線の設定	⇒要素試験結果から不飽和力学パラメータ設定に関する物理学的(理論的)な整合性の証明	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ
c.パラメータの同定(ガス移行試験の再現解析)	・ 初期設定値による不確実性 ・ 同定値の不確実性 ・ 境界条件の不確実性	⇒要素試験で得られたデータの分析、統計処理、要素試験のパラメータが実規模にも適用可能であるとする理論的な根拠の整理	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
d.力学状態の確認	・ 試験結果との整合性	⇒コードに用いられている数式のアプローチと実現象との違いの分析とその影響評価	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ

5) 技術課題の整理

評価体系の作業項目に対する不確実性抽出から技術課題設定までの一連の結果を表 2.2.2-13 表 2.2.2-14 に整理して示す。表中優先度の高い技術課題は黄色を施している。

表 2.2.2-13 評価体系の作業項目に係わる不確実性抽出から技術課題設定及び評価までの整理（その1）

評価作業	作業構成要素	重要要素	不確実性	不確実性分類	不確実性の特徴	技術課題	重要度	緊急度	優先度
①場と現象の理解	a. ガス発生	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄物の特性、形態、量、表面積、インペドメント 処分システムの中でのガス発生・消失メカニズムと発生モデル 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄物の性状等に不明点が多いため、ガス発生予測が不確実 実際の環境とガス発生メカニズムの関連、モデル化へのつながりが明確でない 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ a ⇒ a, b 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 廃棄物の性状等が決定されれば削減される ⇒ 実証的なアプローチが多く、ガス発生メカニズムや環境・境界条件の違いによる知見が少ない 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 対象となる廃棄物の種類や性状等の確定(Waste Streamの分析) ⇒ 人工バリアの状態変化を考慮した異なる廃棄物のガス発生メカニズムの特定と処分環境を考慮した発生量の推定 	III	III	III
	b. 廃棄物容器内のガス挙動	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄物容器の仕様と安全機能の割り振り 容器内の充填材の特性 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄物容器の仕様が決まっていないためガス挙動が推定できない 充填材の仕様が決まっていないためガス挙動が推定できない 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ b ⇒ b 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 容器の仕様が決まれば推定可能 ⇒ 充填材の仕様が決まれば推定可能 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 廃棄物ごとの閉じ込め性を考慮した容器の設計と試作・性能確認(⇒次段階で劣化が課題) ⇒ 要求機能を考慮した容器内の充填材の開発(次段階で劣化が課題) 	I(III)	I(III)	I(III)
	c. コンクリートピットと充填材中のガス挙動	<ul style="list-style-type: none"> コンクリートの初期性能(強度、密度、変形率)と性能維持期間 充填材の初期性能(密度)と性能維持期間 	<ul style="list-style-type: none"> コンクリートの処分環境での劣化・変質プロセスと速度、変質した状態でのガス挙動予測 充填材についても同様 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ b ⇒ b 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ ともに単体では劣化を推定する知見は存在するが複合系での速度推定は不明 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 処分環境と複合系でのコンクリート、充填材の劣化・変質状態の把握と変質媒体でのガス挙動評価(廃棄物グループにより影響が異なる) 	I(III)	I(III)	I(III)
	d. ベントナイト中のガス挙動	<ul style="list-style-type: none"> ベントナイトの密度、厚さ、形状 ベントナイトの機能維持期間 ベントナイトの変質・劣化プロセス ガスの侵入圧と侵入速度 	<ul style="list-style-type: none"> ベントナイトの処分環境と複合媒体での劣化・変質プロセスと速度 変質・劣化したベントナイト中でのガス移行と核種移行挙動 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ b ⇒ a 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 単体としての劣化・変質を推定する知見は存在するが複合媒体、処分環境での知見はない、変質媒体でのガス挙動に関する知見はない 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 処分環境を考慮したベントナイトの劣化・変質状況の把握 ⇒ 劣化・変質環境下でのガス移行挙動の把握 	III	II	II
	e. EDZ内のガス挙動	<ul style="list-style-type: none"> 層状岩盤の特性(均質性、亀裂、付加層)と立地環境(水理特性) 	<ul style="list-style-type: none"> 母岩や立地場所の特性により変化するガス挙動予測 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ b 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 特定の岩盤についての知見は海外に存在している(亀裂岩盤、多孔質岩盤) 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 特定の母岩と地質環境条件を対象とした影響程度の把握 	III	III	III
	f. 人工バリア内亀裂中のガス挙動	<ul style="list-style-type: none"> 貫通亀裂発生(人工バリアの閉じ込め性の喪失) 	<ul style="list-style-type: none"> 人工バリア内状態と貫通亀裂の発生可能性とそこでのガス挙動 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ b 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 複合系であり、システムとしての知見は存在しない 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 人工バリア内での貫通ひびわれが発生する可能性の調査(試験等での再現) 	III	III	III
②シナリオ設定	a. 安全機能設定	<ul style="list-style-type: none"> (各廃棄物グループを対象) 層状環境に対応した安全概念 安全概念に対応したバリア機能 安全機能に対応したバリア仕様 設計上の機能維持期間 	<ul style="list-style-type: none"> 処分環境が決まっていない 処分環境でのバリア間の相互作用がよく把握されていない 機能喪失の要因と時期の処分環境での予測 処分環境での劣化・変質プロセスと安全機能の劣化の関係 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ b ⇒ b ⇒ b ⇒ b 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ いずれも要素に関する知見は存在するが、複合媒体として機能するときの時間依存の変化に関する知見が不十分である 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 代表的な環境の設定による環境の違いによる影響度の把握 ⇒ 異なる環境条件下での人工バリアシステムの相互作用挙動の把握(劣化・変質、力学構成、安全機能の喪失に係わる特性の時系列的な変化) 	III	II	II
	b. シナリオ構築	<ul style="list-style-type: none"> 統合 FEP 関連図による媒体の状態変遷に伴うガス移行モードの変化の表示とモード変遷の時間軸 	<ul style="list-style-type: none"> ガス亀裂の発生、破過発生シナリオ上での扱い 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ b 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ プロセスや現象は個々に理解されているがシステム内での状態変遷に伴うガス移行モードの変化に関する知見が不十分 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ システムの状態変遷と統合FEP関連図におけるガス移行・核種移行の相互作用の把握 	III	III	III
	c. シナリオ分類	<ul style="list-style-type: none"> シナリオの変遷に関わる要素(ガス発生に伴う移行モード変遷の発生確率、移行媒体の変化の設定) 	<ul style="list-style-type: none"> 媒体の変遷予測の豊かさと対応するガス移行モードの変遷の発生確率の予測 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ b, c 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 複合系においてきわめて長期にわたる現象の豊か性や影響の大きさ、発生時期の予測の知見は不十分、実験系等で再現できない可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ ガス発生の影響シナリオ分類の考え方の整理、影響の大きさの推定 	III	II	II
	d. シナリオ整理シートの作成	<ul style="list-style-type: none"> ガス発生と移行モードの変遷 核種移行との相互作用の設定 媒体の状態変遷に対応したガス移行モードの設定 処分環境の変遷の設定 	<ul style="list-style-type: none"> ガス発生予測と移行モードの組合せ 核種移行とガス移行の相互作用の扱い 媒体の変遷とガス・核種移行とのつながり 処分環境の変遷予測 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ b ⇒ b ⇒ b 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ いずれも要素に関する知見は存在するが、システムとして機能するときの知見が不十分である 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ シナリオ展開上での発生ガスの種類と量の扱いの定型化 ⇒ 統合 FEP 関連図を用いた移行挙動モード変遷時期の推定 ⇒ ガス移行挙動媒体の変化のシナリオ上での扱い方の整理 	a, b, c. における技術課題と同様		
③評価ケース・モデルの設定	a. 評価ケース設定	<ul style="list-style-type: none"> ガス発生メカニズムと発生量・速度の予測 システムとしての媒体特性とその状態変遷の予測 媒体特性の変化に対応したガス移行モードの設定 	<ul style="list-style-type: none"> 異なる廃棄物グループごとのバリア環境内でのガス発生予測 システムとしての媒体の状態変遷予測 媒体の状態変遷に対応したガス移行モードの割り付け 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ a, b ⇒ a, b ⇒ b 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 現象の理解の不十分さに依存する不確実性 ⇒ 人工バリア要素と複合媒体としての状態変遷の対応するガス挙動の知見が不十分でない 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 廃棄物の種類、人工バリア構成、処分環境、ニアフィールドの状態変遷を考慮したガス発生予測モデルの設定 ⇒ 廃棄物の種類、人工バリア構成、処分環境、ニアフィールドの状態変遷を考慮し 	III	II	II
							III	III	III

表 2.2.2-14 評価体系の作業項目に係わる不確実性抽出から技術課題設定及び評価までの整理 (その2)

		<ul style="list-style-type: none"> 安全機能変遷の期間設定 TRU処分場全体でのガス挙動評価ケースの設定 	<ul style="list-style-type: none"> 各バリエーションのガス挙動に関する安全機能の設定 複雑な形態となる TRU 処分場での時系列的変遷を考慮した場合のガス挙動評価 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ a ⇒ b 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ ガス挙動に関する安全機能の議論がなされていない ⇒ TRU 処分場全体での影響評価の議論がされていない 	<ul style="list-style-type: none"> 異なる媒体でのガス挙動評価ケースの設定 ⇒ TRU 処分場全体を対象とした影響評価ケースの設定 	III	III	III
	b. 評価モデルの設定	<ul style="list-style-type: none"> 媒体の状態変遷に伴うガス移行モードの変化の時間枠の設定と対応する放射核種の移行モデルの選定 	<ul style="list-style-type: none"> 人工バリエーション内でのガス挙動と核種挙動を同時に扱う必要性があるかの吟味がなされていない 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ a, b 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 上記の評価ケース設定上の不確実性に対応し、評価モデルの議論や開発が不十分である 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 不確実性の影響を考慮した複合系から単線系への評価モデルの構築(モデルチェインの設定)に展開 	III	III	III
	c. プロセスモデルの設定	<ul style="list-style-type: none"> 実規模施設で考慮する状態変遷 対応する異なる媒体での複合体での放射核種移行モードとガス移行モード 複合体の境界面での挙動、形状効果と3次元的な挙動 	<ul style="list-style-type: none"> 実規模スケールで着目する状態変遷とガス移行プロセスのモデル化の可能性 要素試験の複合系(システム)への展開可能性 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ a, b, c ⇒ a, b, c 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 実規模スケールでのガス移行挙動に関する知見はなく、要素試験での推定のみ、時間的な挙動を予測するには本質的な不確実性が存在 ⇒ 複合系(システム)での境界面でのミクロな挙動をマクロ系に展開するための知見は不十分 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 評価モデルをサポートする各プロセスモデルの作成と検証・確認(ミクロ現象のマクロへの展開、要素試験の実規模挙動予測への適用性評価) 	III	III	III
	d. モデルチェインの設定	<ul style="list-style-type: none"> 核種移行とガス移行モデルの相互作用 ガス・核種移行媒体の状態変遷 周辺環境の変遷 	<ul style="list-style-type: none"> 核種移行モデルとガス移行モデルの間のモデル化の違い 相互作用の時系列変遷 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ a, b 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ ミキシングセルとしている核種移行モデルでの状態の見直しが必要(場のモデル化の整合性をとるため) 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 実規模への適用を考慮した評価ケースに対応した評価モデルとプロセスモデルの最適な組合せ 	III	II	II
④①パラメータの設定 (GETFLOWS)	a. 既存データの収集	<ul style="list-style-type: none"> 網羅性の確保 	<ul style="list-style-type: none"> 網羅的に収集できているかの確認と品質の調査の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ b 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 関連するデータの収集作業に落ちがある可能性 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 既存データの系統的な収集と品質確認 	II	I	I
	b. 逆解析によるパラメータの固定(文献データの再現解析)	<ul style="list-style-type: none"> 試験データの解釈 逆問題の設計(目的関数、制約条件、与条件) 初期設定値の決定 	<ul style="list-style-type: none"> 試験データの解釈における知見の十分性 逆問題の設計内容(目的関数、制約条件、与条件の設定方法)の把握 初期設定値による不確実性と固定値の不確実性 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ b ⇒ b ⇒ b 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 試験のデータの把握と現象理解に関連する知見の十分性に係る ⇒ 理解が十分でないことによる ⇒ それぞれ関連する知見の十分性に依存 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 試験が再現している現象とコード化している数式のアルゴリズムの分析 ⇒ 逆問題としての検証方法の妥当性検討 ⇒ 試験結果のパラメータの要因分析と統計処理によるパラメータの設定 	III	II	II
	c. 検証計算(ガス移行試験の再現解析)	<ul style="list-style-type: none"> 試験データの解釈 検証計算問題の設計(初期条件、制約条件、与条件) 逆解析から固定された複数のパラメータからの選定 	<ul style="list-style-type: none"> 検証計算問題の設計内容(制約条件、与条件の設定方法) ガスの水への溶解の有無、または溶解速度の不確実性 パラメータ選定手順の理論的な裏付け 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ b ⇒ b ⇒ a, b 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 理解の十分性、知見の十分性に依存する 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ ベントナイトの要素試験で実施している実現象と解析コードでの仮定の違いの分析(二相系でない現象を二相系でシミュレーションすることの妥当性の説明) 	III	III	III
	d. パラメータの選定	<ul style="list-style-type: none"> 要素試験での材料特性・信頼性 要素試験の方法 	<ul style="list-style-type: none"> 材料がほぼ同一とみなせるか否か 取得された手法、パラメータを使用して良いか否か 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ b ⇒ a, b 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 知見と情報の不十分さ ⇒ 知見の不十分さ 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 材料の特性のパラメータがガス移行挙動評価にどの程度影響を及ぼすかの把握 	III	III	III
④②パラメータの設定 (CODE_BRIGHT)	a. 既存データの収集	<ul style="list-style-type: none"> 対象とする試験条件、材料条件が一致しているか 	<ul style="list-style-type: none"> 既存の文献に記載のない条件(モンモリロナイト含有量、拡散係数等) 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ a 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 知見が不十分 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ コードに対応した試験によるデータの蓄積(現状での設定による不確実性の影響程度の把握も含め) 	II	I	I
	b. 不飽和力学パラメータの設定	<ul style="list-style-type: none"> 設定する膨潤圧 初期膨潤比、初期サクシジョンの設定 	<ul style="list-style-type: none"> 小室の膨潤計備式で用いるパラメータ 膨潤比算出時に用いる真密度の仮定 水分特性曲線の設定 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ b 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ システムとしての知見の不十分さ 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 要素試験結果から不飽和力学パラメータ設定に関する物理学的(理論的)な整合性の証明 	III	II	II
	c. パラメータの固定(ガス移行試験の再現解析)	<ul style="list-style-type: none"> 試験データの解釈 初期設定値の決定 境界条件 	<ul style="list-style-type: none"> 初期設定値による不確実性 固定値の不確実性 境界条件の不確実性 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ c 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ システムとして改正する場合の知見と情報の不十分さ 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 要素試験で得られたデータの分析、統計処理、要素試験のパラメータが実規模にも適用可能であるとする理論的な裏付けの整理 	III	III	III
	d. 力学状態の確認	<ul style="list-style-type: none"> 膨潤率分布 塑性域の妥当性 	<ul style="list-style-type: none"> 試験結果との整合性 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ a, b 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 要素レベルの情報の不十分さ 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ コードに用いられている数式のアルゴリズムと実現象との違いの分析とその影響評価 	III	II	II

(3) 技術課題解決に向けた対策の検討

1) 設定した技術課題項目のレベル分析

前節で実施した技術課題の整理に基づき、優先度の高いと評価された技術課題を対象に解決に向けた対策案を提示する。

最初の作業は、技術課題の現状分析から開始する。これまでの知見の収集、海外での研究状況（参考文献、11, 13, 14）をベースに、取り上げた技術課題が現状、どのレベルにあるのかを以下の5段階で評価する。

レベル	レベルの説明	留意点
1	課題として認識されている段階	優先度の高い課題は、不確実性の影響が大きいと推定される項目
2	課題の分析がなされている段階	課題の分析では、不確実性を削減するための因子分解がなされている
3	課題解決策が設定されている段階	課題として認識され、分析を終わり解決策が明らかにされている
4	課題解決のアクションが始まっている段階	それぞれの国、あるいは共同開発として解決へのアクションがプログラム化されている
5	解決の見通しがついている段階	関連する解決の報告がなされている

表 2.2.1-1 に設定した技術課題とそのレベルを示す。多くの課題はレベル3以下となっている。

表 2.2.2-15 技術課題項目とそのレベル

評価作業項目	作業要素	技術課題	レベル
①場と現象の理解	a. ガス発生	1. 対象となる廃棄体の種類や性状等の確定(Waste Streamの分析)	3
		2. 人工バリアの状態変遷を考慮した異なる廃棄体のガス発生メカニズムの特定と発生環境を考慮した発生量の推定	1
	e. EDZ内でのガス挙動	3. 特定の母岩と地質環境条件を対象とした影響程度の把握(例えば、沿岸海底下処分での環境)	3
②シナリオ設定	b.シナリオ構築	4. システムの状態変遷と統合FEP関連図におけるガス移行・核種移行の相互作用の把握	1
③評価ケース・モデルの設定	a.評価ケースの設定	5. 廃棄体の種類、人工バリア構成、周辺環境、ニアフィールドの状態変遷を考慮した異なる媒体でのガス挙動評価ケースの設定	2
		6. TRU処分場全体を対象とした影響評価ケースの設定	1
	b.評価モデルの設定	7. 不確実性の影響を考慮した複合系から単純系への評価モデルの構築(モデルチェーンの設定に展開)	2
	c.プロセスモデルの設定	8. 評価モデルをサポートする各プロセスモデルの検証・確証(マイクロ現象のマクロ化、要素試験の実規模挙動予測への適用性評価)	2
④パラメータ設定(GETFLOWS)	c.確証計算	9. ベントナイトの要素試験で支配している実現象と解析コードでの仮定の違いの分析(二相流でない現象を二相流でシミュレーションすることの妥当性の説明)	3
	d.パラメータの選定	10. 材料の特性のパラツキがガス移行挙動評価にどの程度影響を及ぼすかの把握	4
④パラメータ設定(CODE_BRIGHT)	c.パラメータの同定	11. 要素試験で得られたデータの分析、統計処理、要素試験のパラメータが実規模にも適用可能であるとする理論的な根拠の整理	3

2) 国際的な議論等で課題とされている事項例

FORGE など国際共同プロジェクトでは、以下に示す課題が取り上げられている。これらの課題は、ガス挙動評価に係わる本質的な課題として位置付けることができ、今回分析した評価体系構成要素の不確実性とも結びつけることができる。(海外の参考文献、[9][10][11][12])

□ **ガスの媒体中でのミクロ的な挙動が、マクロ的に正しくモデル化されているか。**例えば、ガス移動は、フィンガー現象に見られるように媒体境界の不均質性に大きく依存する、これとガスの侵入圧力との関係がモデルで正確に扱われているか。粘土中のガス移行モードは、ガスの供給量と媒体中の応力に依存し、また応力は、境界条件(拘束条件)に影響を受けることが知られているが、これらがモデルに正しく取り入れられているか、関係するパラメータが取得されているか。

⇒上記の現象に対してモデル化に対する論理的なロジックが構築されていない。

⇒課題番号8、9、10、11に関係

□ **実規模の形状、寸法、境界条件が上記のミクロ挙動の組合せでモデル化できるか。**何が影響を受けにくく、何が影響を受けやすいか

⇒ベントナイトの厚さの影響は実験・研究されているが、複合体での3次元的な応力状態や制約条件の影響については、実験も含めて系統的な議論されていない。

⇒課題番号8、9、10、11に関係

□ **システムの状態変遷を含めたガス移行挙動評価のモデルチェーンを構築できるか。**

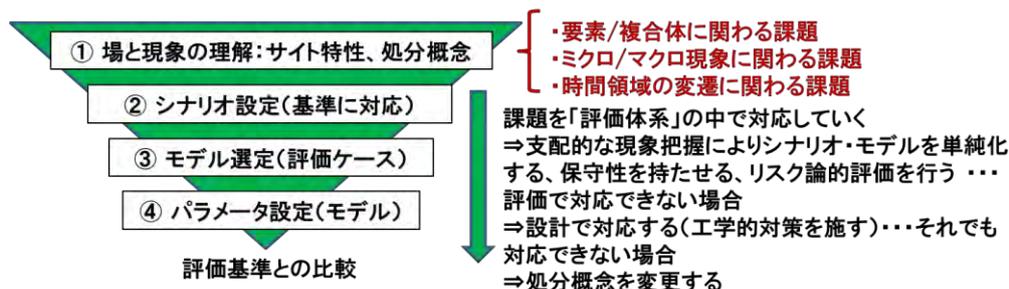
⇒問題点は指摘されているがまだ系統的な取り組みはなされていない。

⇒課題番号4、5、7に関係

3) 技術課題解決策の要素

技術課題解決策は、作業の特徴によって異なる。例えば、下記のように作業項目ごとに個別に対応する方策と単純化する、保守性を持たせるといった作業手段によって対応する方策、また、工学的な対応で不確実性を削減する、あるいは不確実性のもとになる処分概念を変更することで解決するといった方策が考えられる。

- ① 場と現象の理解⇒【手段/方法】 既存の知見の収集、実験(要素、複合体)、ナチュラルアナログ、数値解析、専門家の判断
- ② シナリオ設定⇒【手段/方法】 統合FEP関連図作成のロジック、時系列的変遷の合理的な説明、シナリオ分類での蓋然性、シミュレーション、専門家の判断
- ③ モデル選定⇒【手段/方法】 モデル検証のための試験、評価ケースとの整合性(プロセスモデルと評価モデルとの結合)、専門家の判断
- ④ パラメータ設定⇒【手段・方法】 モデル特性に対応した試験体系構築、実機での挙動との対比



ここでは、これらの対策の内、それぞれの項目ごとに解決を図る対策について検討する。

4) 技術課題とその解決策

前節までに設定した 11 項目の技術課題を対象に作成した課題解決策の概要を表 2.2.2-16 に示す。

表 2.2.2-16 1 技術課題と解決策の概要

技術課題	課題解決策の概要
1.【場と現象の理解】対象となる廃棄体の種類や性状等の確定(Waste Streamの分析)	TRU廃棄体の発生過程から処分に至るまでの流れ(Waste Stream)を整理し、ガスの発生源としての特徴を明確にする。
2.【場と現象の理解】人工バリアの状態変遷を考慮した異なる廃棄体のガス発生メカニズムの特定と発生環境を考慮した発生量の推定	発生源となる廃棄体の特徴を把握したうえで、処分環境の変化、境界条件の変化による媒体のガス評価に係わる特徴への影響を分析、支配的なプロセスを再現する試験体の作成とメカニズムのモデル化をはかる(評価モデル作成に展開)。
3.【場と現象の理解】特定の母岩と地質環境条件を対象とした影響程度の把握	新たに提示された沿岸海底下処分概念での地質環境特性(特に塩水、水理環境)をベースに、ガス発生が及ぼす影響を核種移行とともに再評価する。(技術課題の解明の一步)
4.【シナリオ設定】システムの状態変遷と統合FEP関連図におけるガス移行・核種移行の相互作用の把握	統合FEP関連図を媒体の時系列的な状態変化と組合せ、ガス移行と核種移行プロセスモデルの合体を行う。試験で再現することは困難なため、シミュレーション試験で相互作用を評価する(評価モデル作成に展開)。
5.【評価ケースの設定】廃棄体の種類、人工バリア構成、周辺環境、ニアフィールドの状態変遷を考慮した異なる媒体でのガス挙動評価ケースの設定	4.5の課題と連携し、処分環境での複合体を要素となる媒体の状態変遷を知見とともに系統的に組み立て、ガス発生モデルとの連携をはかり影響評価につながる評価ケースを構築する(評価モデルに展開)。
6.【評価ケースの設定】TRU処分場全体を対象とした影響評価ケースの設定	対象となる全ての廃棄物の処分形態(坑道型、サイロ型など)を対象に、処分場全体を対象とした影響評価ケースを作成し、関連するモデルを設定する。

技術課題	課題解決策
7.【モデル設定】不確実性の影響を考慮した複合系から単純系への評価モデルの構築(モデルチェーンの設定に展開)	異なる廃棄体の処分形態を対象に、ニアフィールドの状態変化の理解に基づく複合系のガス発生影響の評価モデルを構築し、支配的なプロセスに着目した単純化をはかるとともに、その妥当性を論拠で説明する。
8.【モデル設定】評価モデルをサポートする各プロセスモデルの検証・確証(マイクロ現象のマクロ化、要素試験の実規模挙動予測への適用性評価)	ガス移行挙動に係わるミクロ的なプロセスを分析し、マクロ的に扱うことの妥当性を理論的に解明する。また、要素試験でのプロセスモデルが実規模の評価モデルとして適用できることを証明するための工学規模の試験を行う。(適用できるコードの選定ともリンク)
9.【GETFLOWS】ベントナイトの要素試験で支配している実現現象と解析コードでの仮定の違いの分析(二相流でない現象を二相流でシミュレーションすることの妥当性の説明)	ベントナイト中のガス移行挙動のミクロ的なプロセスをGETFLOWSで解析できることの理論的な解明を行う。破過現象への適用の限界を明確にしておく。要素試験を用いた検証が実規模評価にも展開できることの理論的な説明を整理する。
10.【GETFLOWS】材料の特性のバラツキがガス移行挙動評価にどの程度影響を及ぼすかの把握	要素試験でのバラツキと実規模でのそれとの程度の比較を実施しておく。また、バラツキによるパラメータ設定の統計処理を行うとともに感度分析による重要なパラメータを同定する。
11.【CODE_BRITGHT】要素試験で得られたデータの分析、統計処理、要素試験のパラメータが実規模にも適用可能であると理論的な根拠の整理	CODE_BRITGHTが対象とするガス挙動プロセスの範囲と限界の解明。要素試験でのパラメータ設定が実規模評価に適用できることの理論的な説明。各パラメータの評価に与える感度を分析する。

2.3 まとめと今後の展開

2.3.1 まとめ

平成 27 年度の「ガス移行シナリオの拡張に関する検討」の成果を以下にまとめる。

- ・ ガス発生の影響を評価するための評価体系構築では、昨年度までの TRU 廃棄物の各グループを対象に作成してきたシナリオ整理表を出発点に、「場と現象の理解」、「シナリオ設定」、「評価ケース・モデル設定」、「パラメータ設定」の 4 項目の作業を設定し、その方法、手順、必要な情報を体系として取りまとめた。
- ・ 設定した評価体系の作業項目を対象に、作業の中での重要な意思決定事項（重要要素）を抽出するとともに重要要素に係わる不確実性を抽出した。
- ・ ニアフィールドの時系列的な状態変化表をテンプレートとして知見を集約した「根拠書」を対象に、知見の性格とレベルを分析した結果、多くの知見が短期間の試験や仮定に基づいた解析によるもので、長期の時間枠では想定による判断であることが分かった。複合系でのガス発生や時間が経過するに従って特性が変化する媒体中でのガス挙動に関する知見は極めて限定されている。
- ・ 評価体系を構成する作業の重要要素に対する不確実性について、その特徴を分析するとともに作業展開上での不確実性の伝播について考察した結果、場と現象の理解に源を発する多くの不確実性は、モデル設定やパラメータ設定の作業では、前提や与条件として取り扱われており、不確実性を分析する作業が途中で消滅していることが分かった。
- ・ ガス発生の影響を評価における不確実性を削減するための技術課題を設定し、その重要度、緊急度から優先度を評価した結果、11 項目の技術課題が選定された。多くの技術課題は、わが国固有のものでなく、各国で共通した課題としても取り上げられているものであった。その根底には、時間に係わるもの（短期の知見を長期に展開する）、スケールに係わるもの（マイクロ現象をバルク現象として取り扱うこと）、単純化に係わるもの（要素試験での知見を実規模に展開すること）が主体となっている。
- ・ 選定した技術課題を対象に、課題解決に向けての対策案を構築した。これらの内、ガス発生に係わる課題については、発生から処理・処分方策までの **Waste Stream** を整理することから検討を進めるべきである。また、現実的な環境や境界条件でのガス発生メカニズムについてももう一步掘り下げて検討を進める必要がある。時間の経過に伴い増加する不確実性については、実験で再現できるものと再現が極めて難しい現象があることの整理から作業を開始すべきである。わが国で新たな処分候補環境として取り上げつつある沿岸海底下でのガス発生影響の課題を認識することも重要な技術課題となりうる。

2.3.2 今後の展開

今後の展開については、11 項目設定した技術課題の中で、まとめとして記述した以下の課題に着手する必要がある。

- ・ ガスの発生源となる多様な TRU 廃棄物を対象に、現在の知見をベースに **Waste Stream** を作成すること
- ・ 現実的な環境と境界条件の中でのガス発生メカニズムについての知見を整理し、今後の取り

組み方策を具体化すること

- 沿岸海底下処分概念を対象として評価体系に沿った概略検討を行い、ガス発生の影響評価上の課題を抽出しておくこと
- ガス移行媒体の状態変化を再現する方策を検討し、再現が困難な場合についての評価上の扱いについての対策を準備すること
- 本検討で提案したガス移行挙動と核種移行挙動の相互作用について、ニアフィールドの環境変化を考慮した評価ケースと評価モデルを設定する作業に着手すること
- 根拠書の評価で、不十分と認識された分野についての知見を国内だけでなく、海外の情報を含めて収集し、再整理すること

参考文献

- [1] (社) 日本原子力学会、日本原子力学会標準 (2008)、余裕深度処分の安全評価手法、2009年5月
- [2] 電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構(2005)、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—、2005年9月
- [3] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター、地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第2分冊) —ガス移行挙動の評価—、平成19~24年度
- [4] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター、地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書 (第5分冊) —ガス移行連成挙動評価手法の開発、平成25~26年度
- [5] 古賀、大和田、河村 (2015)、TRU 廃棄物処分におけるガス移行連成挙動評価手法の開発 (その1) —TRU 廃棄物処分におけるガス影響シナリオに係る不確実性の検討—、第70回土木学会年次学術講演会予稿集 (CS12-026)
- [6] NEA FORGE Project, Gas Generation and Migration, International Symposium and Workshop, Luxembourg, Feb. 2013
(参照元 URL)
<ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/euratom-fission/docs/d0-09.pdf#search='microbial+transformation+of+radioactive+waste%3A+implications+on+Gas+generation++A.J.+Frances'>
- [7] 原子力規制局、第二種廃棄物埋設施設の新規制基準骨子 (案)、平成26年
- [8] FORGE, Summary of Gas Generation and Migration Current State-of-the-Art, January 2010
- [9] Nagra (2008b), Effects of post-disposal gas generation in a repository for low and intermediate-level waste sited in Opalinus Clay of Northern Switzerland, Nagra TR-08-07, 2008
- [10] NDA (2011), Geological Disposal, Gas Status Report, NDA Report no. NDA/RWMD/037
- [11] Jean Talandier, Gerhard Mayer, Jean Croise (2006), Simulation of the Hydrogen Migration out of Intermediate –Level Radioactive Waste Disposal Drifts using TOUPH2, Proceeding , TOUGH Symposium 2006
- [12] Wolfgang Müller (2000), Gas Generation, Session 1, Gas Generation and Migration in Radioactive Waste Disposal Safety-relevant Issues, Workshop Proceedings Reims, France, 26-28 June 2000, OECD/NEA

第3章 ガス移行連成挙動解析ツールの高度化

3.1 背景と目的

平成 19 年度から平成 24 年度にかけて実施した TRU 廃棄物処分システムにおけるガス移行挙動評価のための解析手法・モデル化の高度化研究の成果[1]より、以下に示す課題が抽出されている。

- 水分状態と関連付けた 2 相流パラメータの動的変化のモデル化と実測データによる検証
- 媒体変形と水・ガス 2 相流れの挙動を関連付ける構成モデルの開発・検証（力学連成）
- ガス発生機構のモデル化（腐食反応、酸素消費、微生物活動の影響など）
- セメント系材料、岩盤、材料界面などを対象としたガス移行挙動の実態解明
- ガス移行挙動に関連する素過程及び関連パラメータのフィールドスケールへの適用性検討

本検討は、これらの課題を踏まえ、上記の後続研究として平成 25 年度より検討を開始したものである。

平成 25 年度の検討[2]では、平成 24 年度までの検討で得られた課題と、国内外を含めた最新の研究動向を踏まえて、平成 29 年度までを目途とした実施計画を策定した。この実施計画の中で設定した 3 つの Work Package (WP : 人工バリア中のガス移行挙動の現象理解、ガス移行データライブラリの拡充、ガス移行モデリング技術開発) とその検討項目を整理したものを表 3.2.1-1 に示す。なお、各検討項目間の相互関係と実施予定スケジュールは図 3.2.1-1 に示す通りである。

平成 26 年度の検討内容[3]として、「人工バリア中のガス移行挙動の現象理解」の中では、本検討と並行して行われた「第 4 章 4.1.2 ベントナイト緩衝材におけるガス移行挙動評価に係るガス注入試験」で実施されたガス移行試験系に対し、これまでに同定された複数の 2 相流パラメータを用いた予察解析を行い、試験時のモニタリングに資する基礎情報の提示を行った。さらに、ガス発生モデリングの高度化として、人工バリア内の初期不飽和状態を想定し、水・ガス 2 相流解析と地球化学計算を連成させた TOUGHREACT を用いて金属の腐食反応に伴うガス発生を考慮した THC 連成解析を実施した。「ガス移行データライブラリの拡充」では、平成 25 年度の検討の中で同定されたデータの登録を行い、データライブラリの追加整備を行った。「ガス移行モデリング技術開発」では、想定される TRU 廃棄物処分システムを 3 次元モデルによって表現し、ガス移行解析を行うことで、従来の 2 次元断面解析との違いを考察した。

以上を背景として、本年度は TRU 廃棄物処分施設の性能評価や安全評価に資するガス移行連成モデリングツールの構築を目的とし、以下に示す内容を目標成果とする。

- ① 最新の室内ガス透気試験データを用いた再現解析（確証計算）による 2 相流パラメータの取得
- ② ガス移行データライブラリの拡充（基礎データの蓄積）
- ③ 不確実性を考慮したガス移行挙動評価のための解析手法・モデル化手法の高度化

表 3.2.1-1 平成 25 年度の検討で設定した 3 つの Work Package と検討項目

<p>WP1：人工バリア中のガス移行挙動の現象理解</p> <p>目標成果：ガス発生・移行挙動を説明可能なモデル化手法を高度化すること</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ガス透気試験系の確証計算（粘土系材料、他材料） ● 同定パラメータの再評価（適用性検証、次元性、不均質性、アップスケーリング） ● 媒体変形と水・ガス 2 相流の挙動を関連付ける構成モデルの改良（最新の構成モデルの調査と組み込み、THM 連成） ● ガス発生モデリングの高度化
<p>WP2：ガス移行データライブラリの運用</p> <p>目標成果：より多くの確証データ・構成モデルを蓄積し、有効利用すること</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 確証されたデータ・構成モデルの蓄積 ● 蓄積データ・モデルの有効利用
<p>WP3：ガス移行モデリング技術開発</p> <p>目標成果：データ・モデル等の不確実性を考慮し、最適な規模・解像度のモデルによってガス移行経路を評価すること</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 高解像度・大容量モデルによるガス移行経路の評価（圧力依存透過性モデル、力学連成モデルなど） ● アンサンブル評価（不確実性、確率論的取扱、サロゲートモデリング）

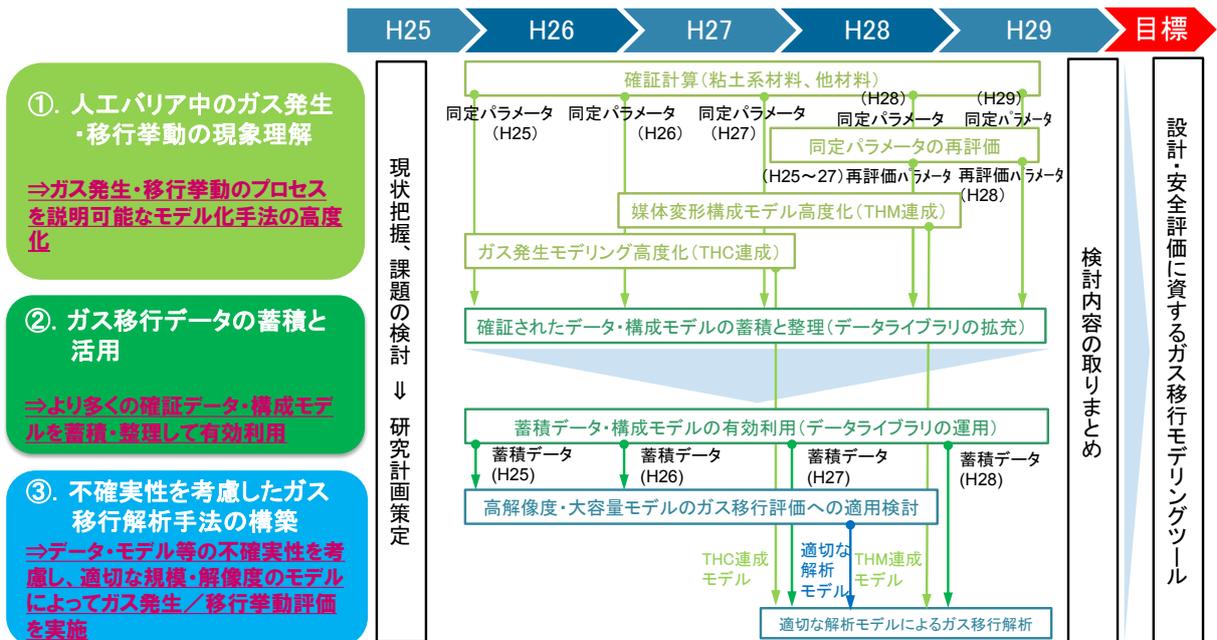


図 3.2.1-1 WP 各検討項目間の相互関係と実施スケジュール

3.2 実施内容

3.2.1 最新のガス移行試験データによる検証計算

平成 26 年度に実施した「ガス移行連成挙動評価手法の開発」[3]において、ベントナイト供試体（乾燥密度 1.36Mg/m³、クニゲル V1）を用いたガス注入試験が実施されている。この試験は、これまで実施してきたようなベントナイト供試体内での流路拡幅（大破過）を発生させ、破過を伴うガス移行挙動の理解を目的とした試験とは異なり、供試体内で気液 2 相流れのみが生じることを想定した低注入圧条件（但し、ベントナイト供試体の平衡膨潤圧以下）によるガス透気を試みたもので、国内外の既往検討においても例の少ない人工バリア中の破過を伴わないガス移行挙動の現象理解を目的とするものであった。昨年度は、ガス透気時期や試験期間中のモニタリングに資する基礎情報の提示を目的とした予察解析を実施した。予察解析では、平成 24 年度までの検討で検証された複数パラメータおよび解析コード（水・ガス 2 相流解析コード：GETFLOWS と力学連成解析コード：Code_Bright）を用いて、注入ガスの透気時期や供試体内部の圧力や飽和度、応力状態の変化等を幅で評価する解析検討を行った。

本検討では、昨年度実施された 2 つのガス注入試験データを利用し、再現解析を行うことで、2 相流パラメータや力学パラメータの同定を行う。解析コードには、水・ガス 2 相流解析コード：GETFLOWS と力学連成解析コード：Code_Bright を用いた。

3.2.2 検証データの登録およびデータの追加収集・整備（データの拡充）

ガス移行解析手法の高度化検討においては、得られた知見や最新の研究成果を速やかにモデリング検討に反映することが重要であるが、効果的な試行錯誤が可能となることを目的として、検証されたモデルやパラメータを容易に登録・蓄積（アップデート）でき、かつ各種解析コードと連携可能なデータベースとして、「ガス移行データライブラリ」を構築してきた。

本検討では、「人工バリア中のガス移行挙動の現象理解」で今年度同定される 2 相流パラメータや力学パラメータの追加登録を行う。また、他の研究機関等で検証されたデータに対し、追加収集を行い、ガス移行データライブラリのアップデート（データの拡充）を行った。

3.2.3 TRU 廃棄物処分システムを対象としたガス移行解析における不確実性を考慮したガス移行挙動の評価

放射性廃棄物処分施設におけるガスの問題には、ガス発生速度（金属腐食速度、微生物分解速度など）や、想定されるバリア材料（ベントナイト、コンクリート、岩盤、材料界面）におけるガス移行を支配するメカニズム、処分性能を低下させる連成事象の取扱い等、様々な不確実性が存在し、これまでに多くの機関で、これらの不確実性を低減するための取り組みが行われてきている[4]。本検討でも以下に示すように、シナリオやデータ（パラメータ）、モデルの不確実性を低減するための取り組みや、不確実性が施設内最大ガス圧や累積押し出し水量に与える影響評価を行ってきている。

昨年度は TRU 廃棄物処分システムをモデル化する際の次元性に着目し、想定される処分システムを 3 次元モデルによって表現し、従来の 2 次元断面モデルによる解析結果（施設内の最大ガス圧、施設からの累積押し出し水量）との比較を行った。施設内の最大ガス圧は両モデルともほぼ同じ結果を示したが、施設からの累積押し出し水量に関しては、10,000 年時点において、3 次元モデルから得られた結果は 2 次元モデルと比較して約 3,500Nm³小さい結果を示した（図 3.2.3-1）。これは、3 次元モデルによる解析では、坑道端部の埋戻し層へのガス透気が、主要なガス移行経路となり、2 次元断面モデルでは表現されないものであることに起因する。従って、主要なガス移行経路が 2 次元断面モデルでは表現困難となる場合、3 次元モデルによる評価の必要性が示された。

また、昨年度の「人工バリア中のガス移行挙動の現象理解」では、既に述べたように、ベントナイト供試体を用いた 2 つのガス注入試験を対象とし、これまでに同定された複数の 2 相流パラメータの組合せを用いてガス移行解析を行った。このうち、試験データは最も早い排水速度を示した計算結果と、最も遅い排水速度を示したものと概ね整合する結果が得られた（図 3.2.3-2）。試験データは計算された累積排水量の幅の中で概ね推移する結果となり、これまでに同定された 2 相流パラメータの適用性が検証された。さらに、これまでの検討ではベントナイトを対象とした基礎データ蓄積のみを実施していたが、セメント系材料の基礎データ取得として、モルタル供試体を対象としたガス注入試験系の再現解析を通じて、2 相流パラメータの同定を行った（図 3.2.3-3、図 3.2.3-4）。

基礎データ（パラメータ）の蓄積を進める一方で、水・ガス 2 相流解析コード（GETFLOWS、TOUGH2）による TH 連成解析のみならず、力学連成を考慮した THM 連成解析（Code_Bright）や、金属の腐食反応に伴う水素ガスの発生をモデル化した THC 連成解析（TOUGHREACT）など、異なる複数の解析モデルを用いた検討を継続して行い、解析コードの整備も進めてきている。さらに、本検討も含めた「ガス移行連成挙動評価手法の開発」においては、ガス移行シナリオや FEP の整備等を行っている。

本検討では、上記のようなシナリオやデータ（パラメータ）、モデルの不確実性低減・評価に資する取り組みを継続する。具体的には、国内外でこれまでに得られている成果と、本研究での成果の対比を取りまとめ、重要となる現状で残された課題を抽出する。このうち、TRU 廃棄物処分施設を対象としたガス移行解析結果に影響を与える可能性のあるもの（例えば、材料界面やセメント系材料、母岩の水理物性など）を対象とした解析検討を必要に応じて行い、それらの不確実

性が施設内最大ガス圧や累積押し出し水量に及ぼす影響を評価した。

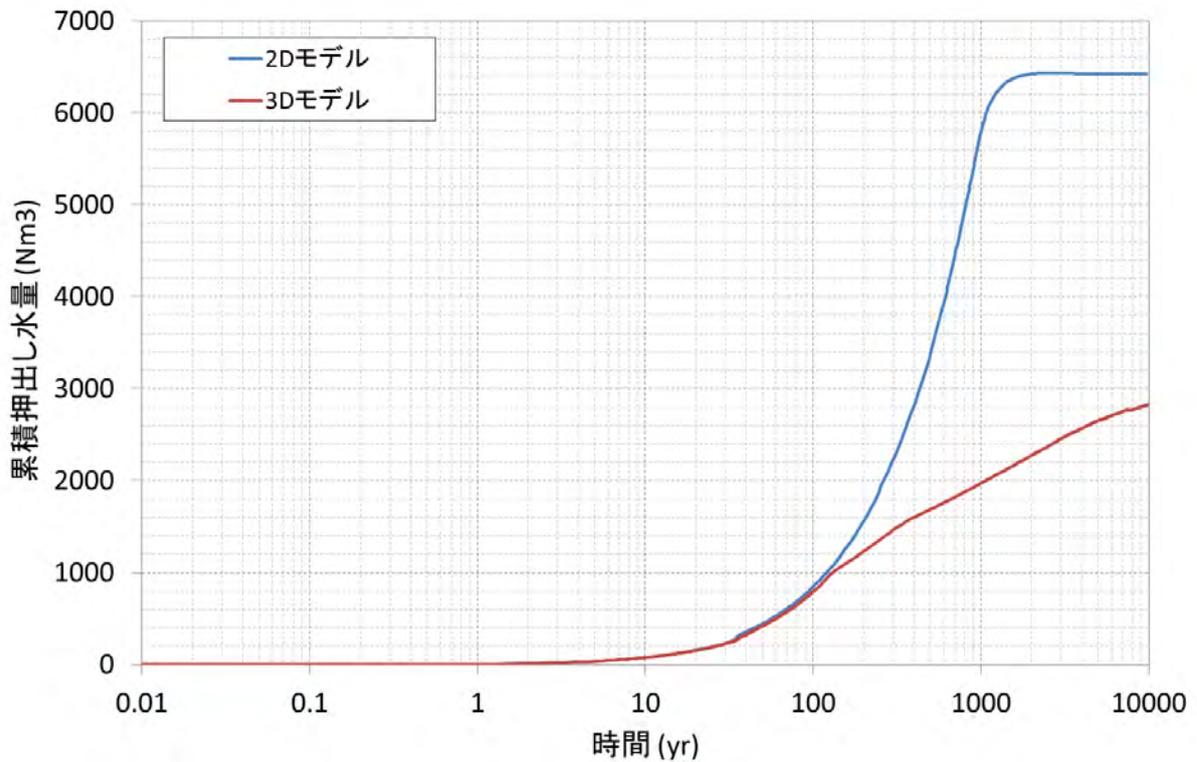


図 3.2.3-1 施設からの累積押し出し水量 (2次元モデルと3次元モデルの比較)

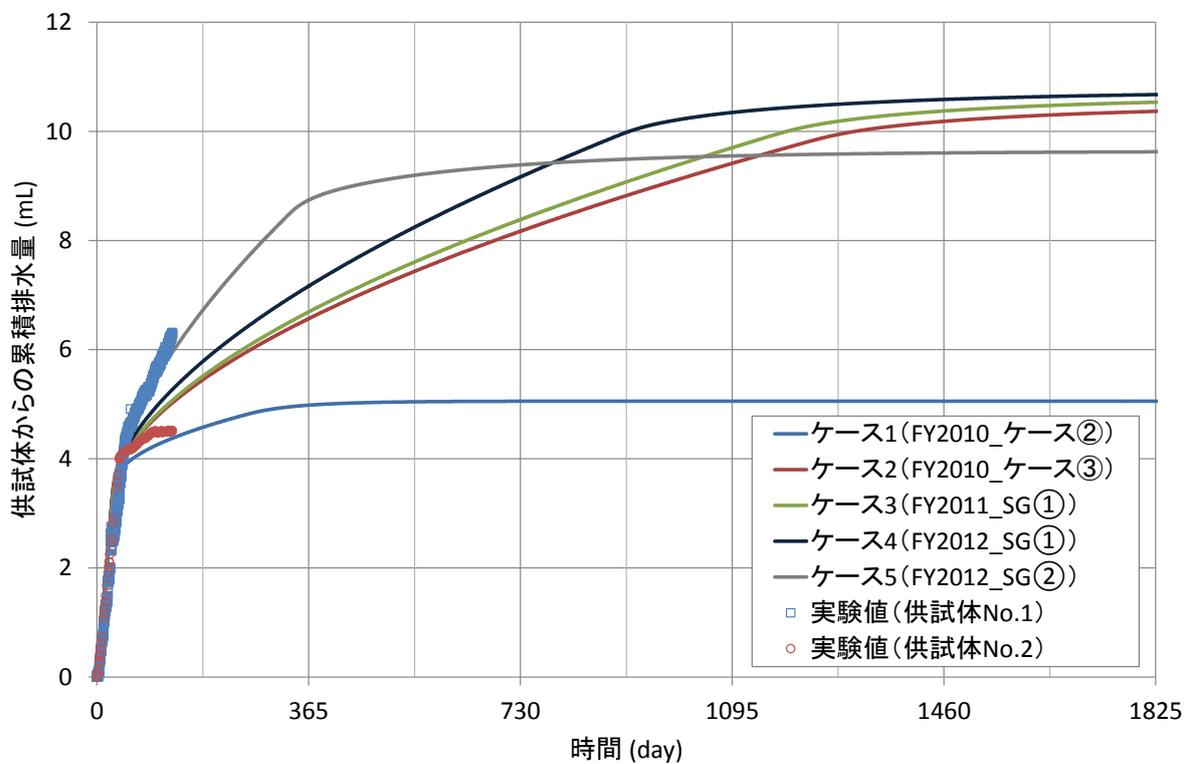


図 3.2.3-2 予察解析結果 (供試体からの累積排水量) と実験結果の比較

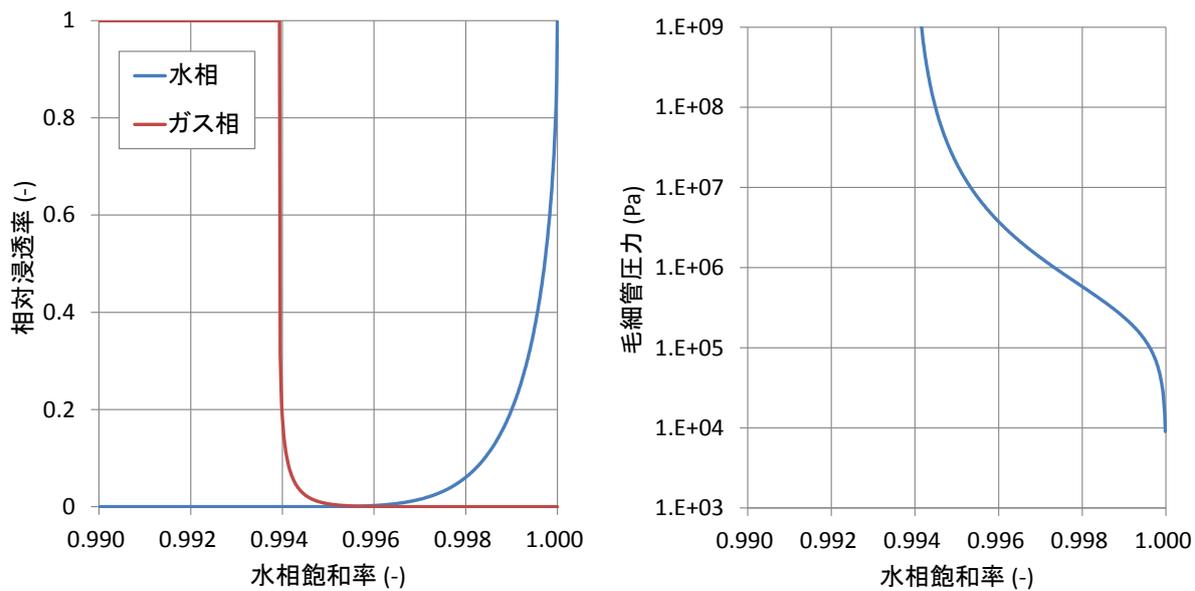


図 3.2.3-3 昨年度同定されたモルタル供試体の相対浸透率(左)と毛細管圧力(右) (供試体 No.1)

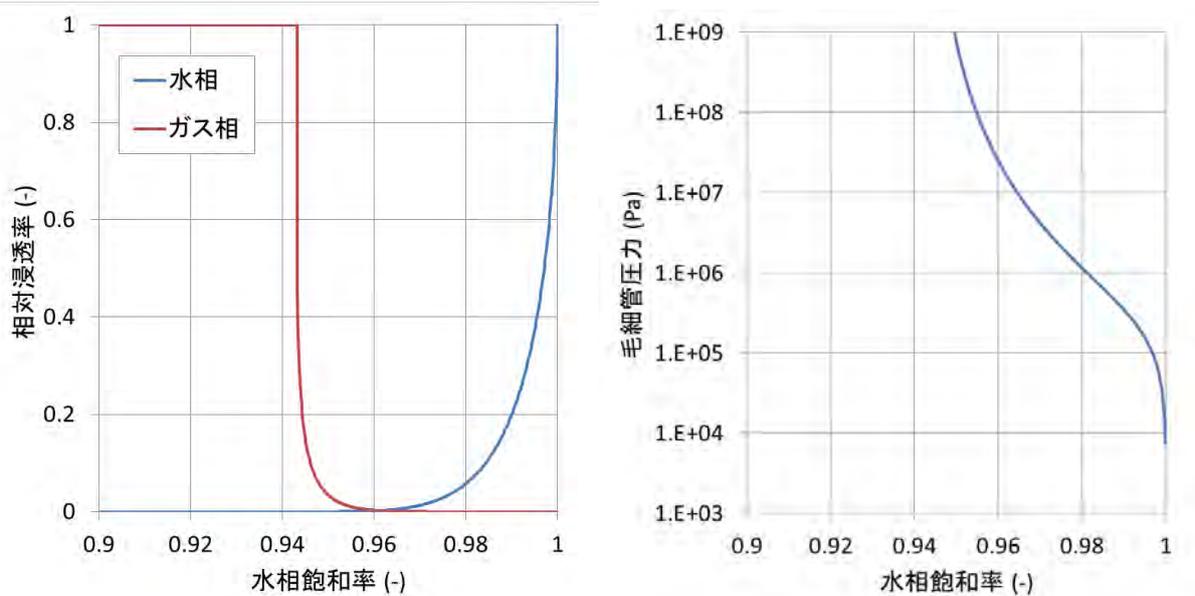


図 3.2.3-4 昨年度同定されたモルタル供試体の相対浸透率 (左) と毛細管圧力 (右) (供試体 No.2)

3.3 最新のガス移行試験データによる確証計算

3.3.1 ガス移行試験の概要

(1) 試験概要と実測データ

第2次 TRU レポート[5]での円形処分坑道概念における上部および側部の基本緩衝材とされる乾燥密度 1.36Mg/m^3 の 100%クニゲル V1 (直径 60mm、高さ 25mm) を用いたガス移行試験が実施されている[3]。本試験は、「平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発—ガス移行連成挙動評価手法の開発—」における「ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充」の中で実施されたものである。試験は 3 つの試験フェーズ (再冠水試験、ガス注入試験、解体調査) から成る。各試験フェーズにおける試験条件及び実測データを表 3.3.1-1 にまとめた。試験は 3 つの供試体 (No.1~No.3) を用いて行われ、No.1 と No.2 は解体調査まで試験が終了し、No.3 に関してはガス注入試験を実施中である (表 3.3.1-2)。なお、試験は 25°C の恒温環境下で行われた。

表 3.3.1-1 各試験フェーズにおける試験条件と実測データ

試験フェーズ	試験条件	実測データ
再冠水	初期飽和度 90%から、差圧 0.2 MPa によって底面から注水	注水圧 累積注水量 全応力
ガス注入	再冠水試験後、差圧 0.3MPa を維持したまま底面からガス注入	注入ガス圧 累積排水量 (中央部、外周部) 排気流量 (中央部、外周部) 全応力
解体調査	厚さ約 3mm で分割	寸法 (→含水比、水飽和度) 湿潤、乾燥重量

図 3.3.1-1 試験概要と利用可能な実測データ

表 3.3.1-2 供試体の試験進捗状況

供試体	再冠水フェーズ	ガス注入試験フェーズ	解体調査
No.1	実施済 (2014/5/20~2014/8/27)	実施済 (2014/8/28~2015/4/27)	実施済 (2015/4/27)
No.2	実施済 (2014/5/20~2014/8/27)	実施済 (2014/8/28~2015/1/19)	実施済 (2015/1/20)
No.3	実施済 (2014/9/2~2015/2/19)	実施中 (2015/2/21~)	

(2) 実測データの整理・分析

1) 再冠水フェーズ

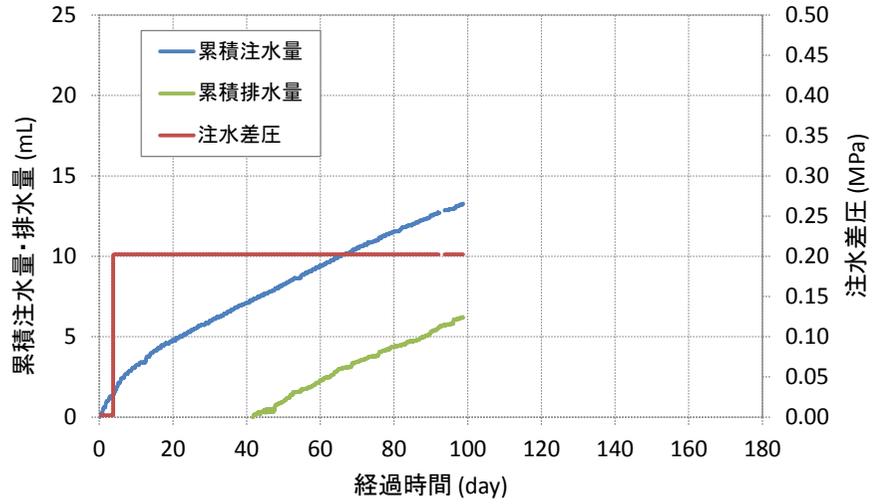
再冠水フェーズにおいて実測されたデータのうち、累積注水量と排水量及び全応力の時間変化を図 3.3.1-2、図 3.3.1-3 に示す。供試体がほぼ飽和に至り、注水速度と排水速度がほぼ一致する定常状態となった際の排水速度から算出した絶対浸透率は、No.1～No.3 でそれぞれ、 4.18×10^{-20} (m²)、 3.55×10^{-20} (m²)、 3.95×10^{-20} (m²)となり、いずれの供試体もほぼ同程度の数値となった。また、全応力の時間変化を見ると、いずれの供試体においても、排水が確認された約 40 日以降に全応力が徐々に上昇していく挙動が認められた。この原因としては、経験則ではあるが、この期間の、大気圧の上昇が考えられる。

2) ガス注入フェーズ

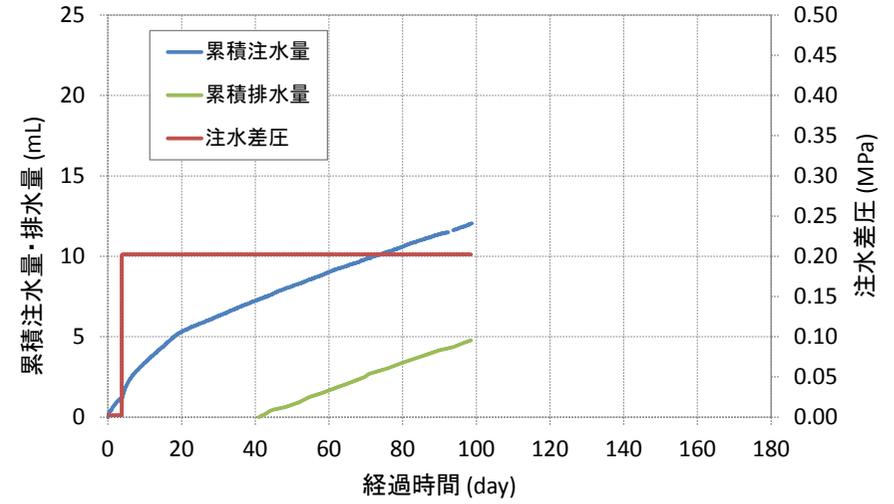
ガス注入フェーズにおいて実測されたデータのうち、累積排水量と全応力及び有効底面圧力の時間変化を図 3.3.1-4、図 3.3.1-5 に示す。ガス注入フェーズでは、初期段階において、注入されたガスによる、供試体下部に設置されたポーラスメタル内の排水が起こると考えられる。ポーラスメタル内の排水が終了し、供試体内にガスが侵入すると、排水速度の低下が起こるが、累積排水量の時間変化からも、その挙動を確認することができる。また、No.2、No.3 については、ガス注入フェーズの途中から排水がほぼ停止する挙動が確認されている。供試体内の不均質性によって、一部ガスが侵入しにくい箇所が存在しているか、ガス溶解の影響が考えられる。ガス注入フェーズ終了後の累積排水量からポーラスメタルの空隙量 3.57 (mL)を差し引いて算出された、供試体からの排水量は、No.1～No.3 でそれぞれ、2.8 (mL)、0.5 (mL)、0.5 (mL)となり、No.1 と No.2 及び No.3 で異なる結果となった。以降の検討で同定される 2 相流パラメータも異なってくる事が予想される。全応力や有効底面応力の時間変化を見ると、累積排水量の排水速度が変化する(ポーラスメタル内の水が排水され、注入ガスが供試体内に侵入したと考えられる)時期と、全応力が低下する時期が概ね整合している結果が得られている。

3) 解体調査

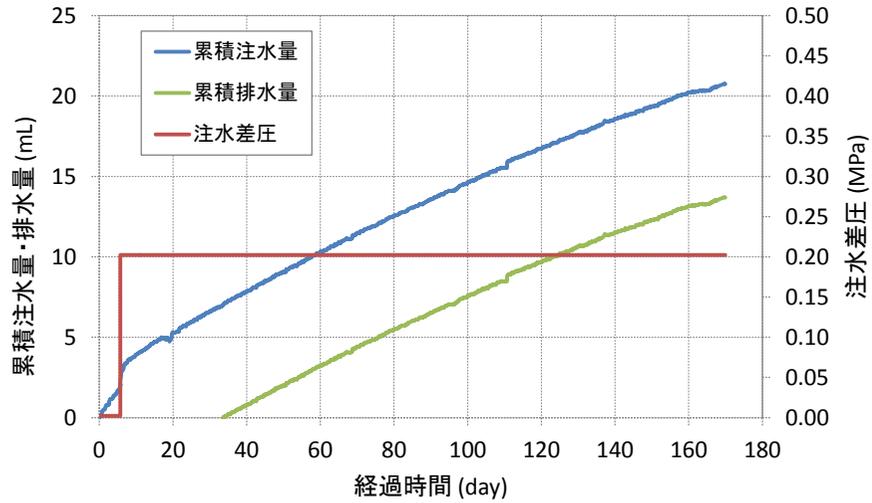
ガス注入試験終了後の解体調査から得られたデータを用いて水飽和度の深度プロファイルを図 3.3.1-6 に示した。図中の赤点線は、供試体からの累積排水量から推定された平均水飽和度である。これを見ると、明確な注入ガスの侵入フロントを確認することはできない。また、No.1 では推定される平均水飽和度よりも実測から算出された水飽和度は大きく、反対に、No.2 では小さい結果となっている。このことは、両者が矛盾するデータであることを示しており、試験体から供試体を分離し、いくつかに分割して重量等を測定していることから解体調査によって得られる水飽和度は誤差が大きいと考えられるため、以降の再現解析での水飽和度データの取扱いには注意が必要である。



(a) No.1

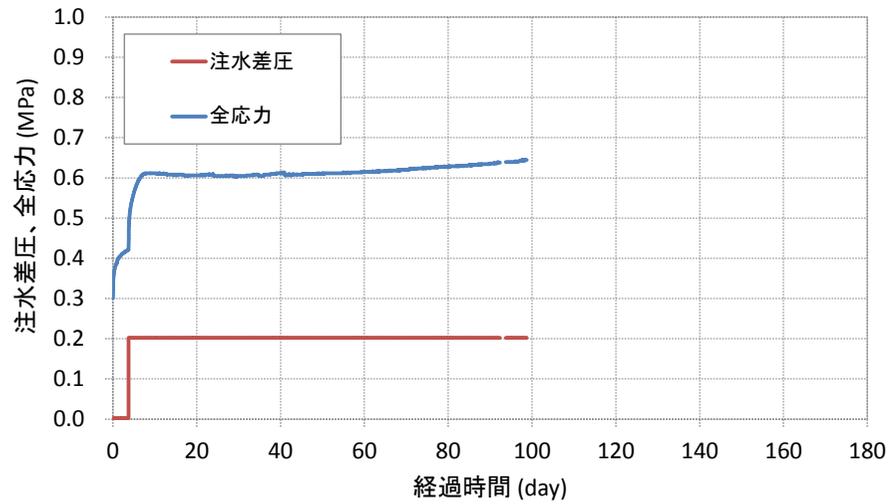


(b) No.2

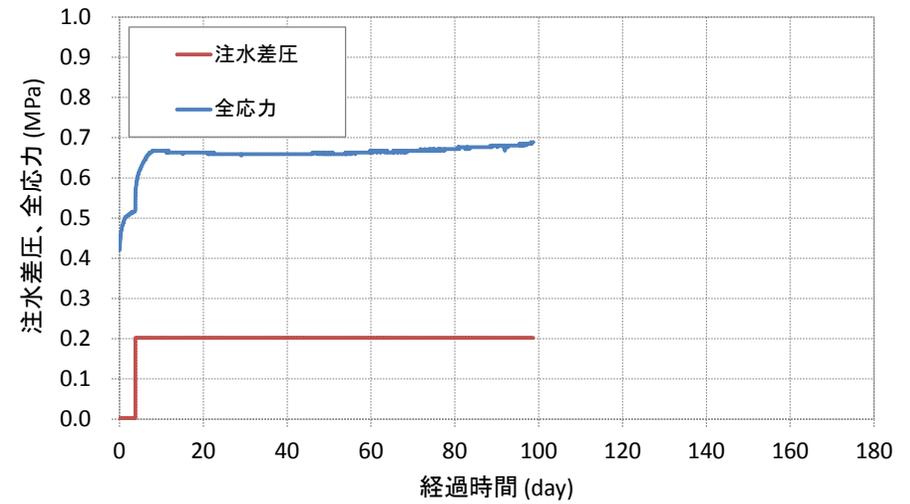


(c) No.3

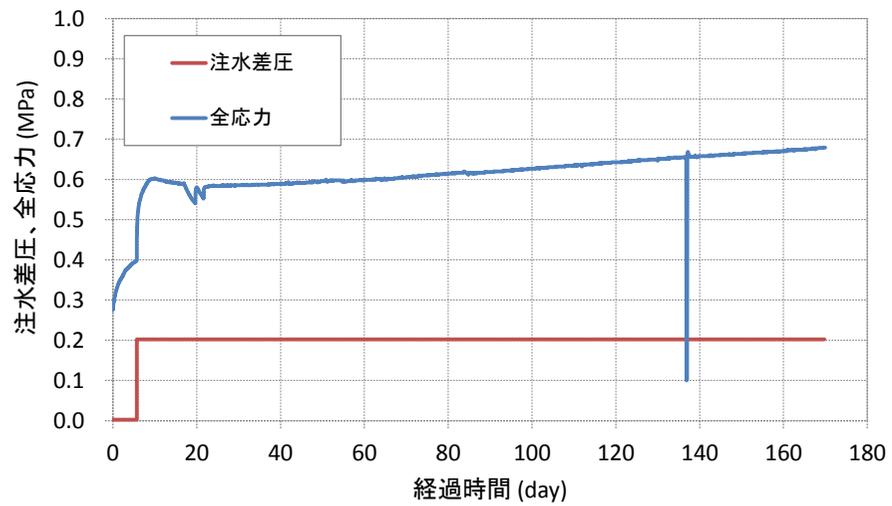
図 3.3.1-2 再冠水フェーズで得られた注水差圧と累積注水量、排水量の時間変化



(a) No.1

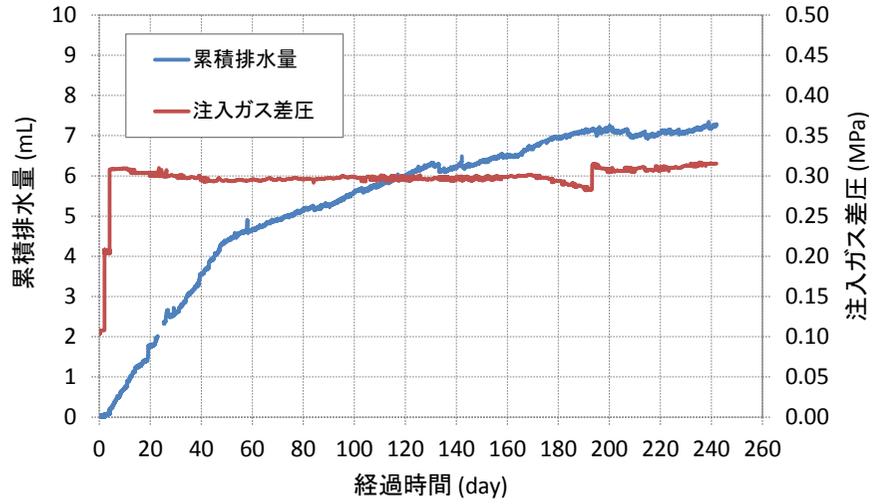


(b) No.2

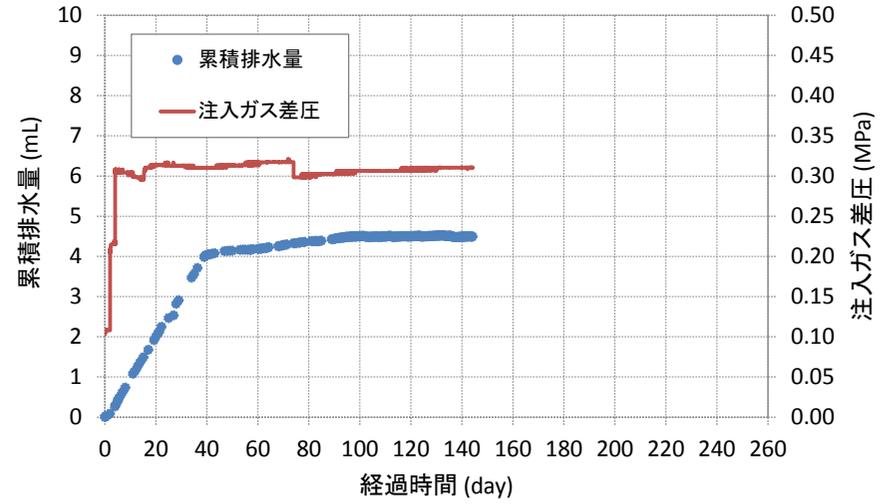


(c) No.3

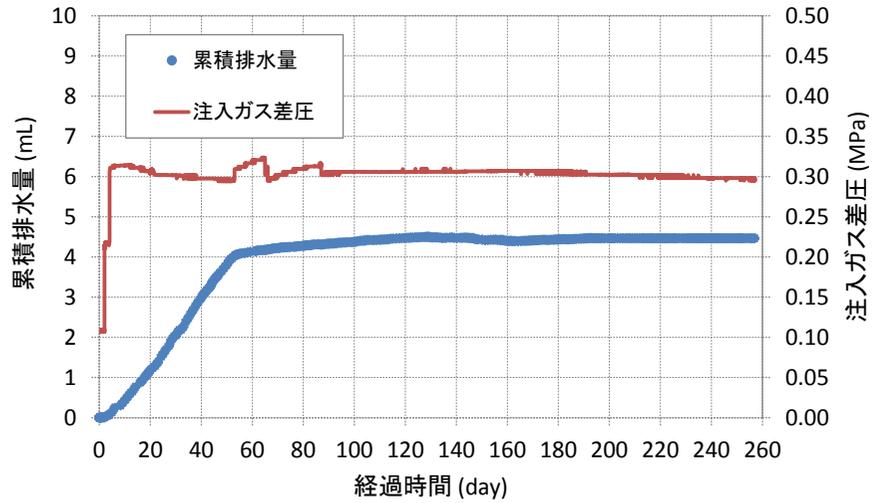
図 3.3.1-3 再冠水フェーズで得られた注水差圧と全応力の時間変化



(a) No.1

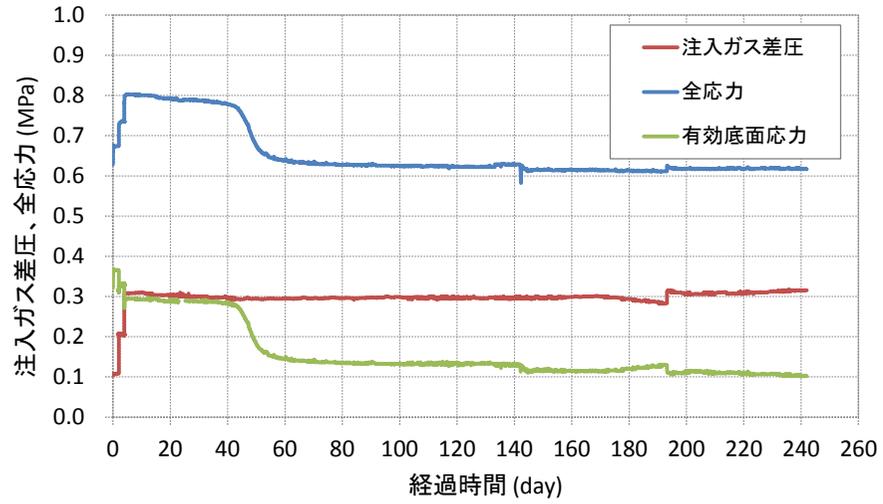


(b) No.2

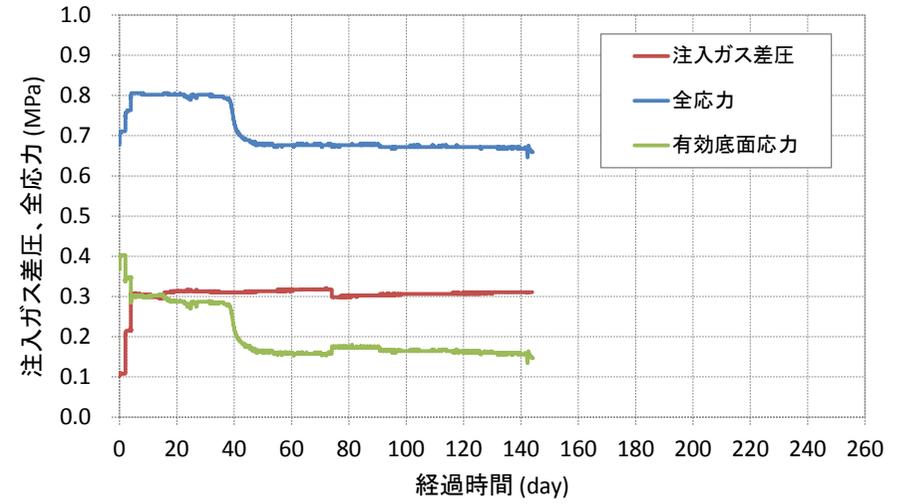


(c) No.3

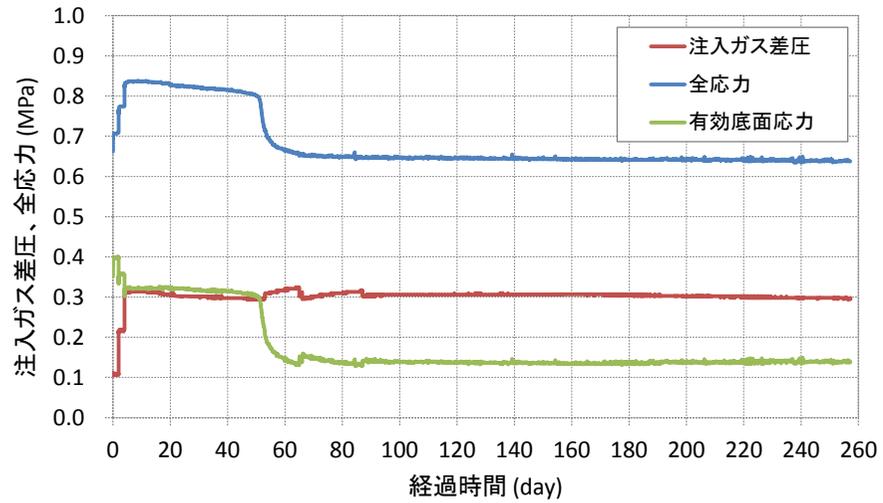
図 3.3.1-4 ガス注入フェーズで得られた注入ガス差圧と累積排水量の時間変化



(a) No.1

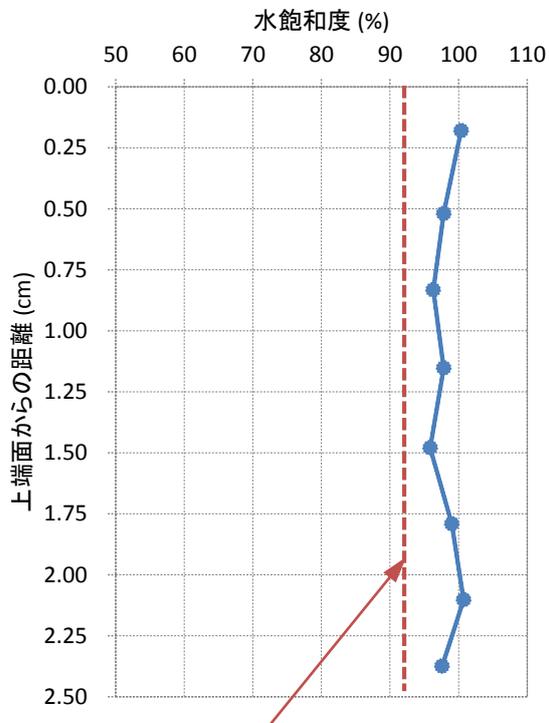


(b) No.2



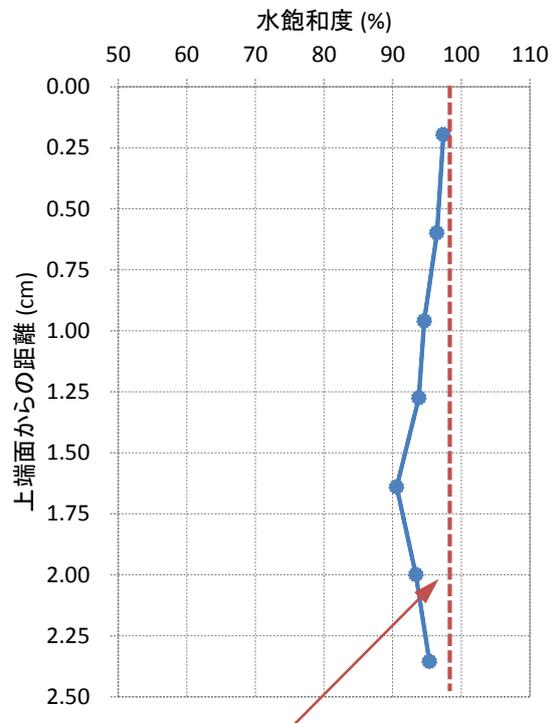
(c) No.3

図 3.3.1-5 ガス注入フェーズで得られた注入ガス差圧と全応力、有効底面応力の時間変化



排水量から推定される
平均水飽和度 92.0%

(a) No.1



排水量から推定される
平均水飽和度 98.6%

(b) No.2

図 3.3.1-6 解体調査から得られた水飽和度の深度プロファイル

3.3.2 水・ガス 2 相流解析コード (GETFLOWS) による確証計算

(1) 検討方針

再冠水フェーズを対象とした再現解析では、従来の検討と同様に逆解析による 2 相流パラメータの同定を実施する。ガス注入フェーズにおいて、注入したガスは排出側まで到達しておらず、排水量と解体後の水飽和度のみが測定されている。解体後の水飽和度は、(2)3) でも述べたように信頼性がやや低いデータであった。そのため、昨年度の予察解析結果を参考に、これまでに同定された 2 相流パラメータをベースとして、絶対浸透率及び毛細管圧力に対して微修正を加えることで、実測された排水量を概ね再現するパラメータを同定するものとした。昨年度の予察解析結果より、排水が停止する挙動を再現するために、ガス溶解を考慮した解析を実施した。

(2) 解析コード

解析には、多相多成分流体を対象とした汎用地圏流体シミュレータ GETFLOWS (General-purpose Terrestrial fluid-FLOW Simulator)[5]を用いた。

等温状態における水・ガスの 2 相 2 成分流体系の質量保存式は、以下に示す水相、ガス相の質量収支式によって記述される。

$$-\nabla \cdot \left(-\rho_w \frac{K_w k_{rw}}{\mu_w} \nabla \Psi_w \right) - \rho_w q_w = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w s \phi S_w) \quad (3.3-1)$$

$$-\nabla \cdot \left(-\rho_g \frac{K_g k_{rg}}{\mu_g} \nabla \Psi_g \right) - \rho_g q_g = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g s \phi S_g) \quad (3.3-2)$$

式中の記号の説明は以下の通りである。

K_p ; 流体相 $p(= w, g)$ の絶対浸透率 (m^2)

k_{rp} ; 流体相 $p(= w, g)$ の相対浸透率 (-)

S_p ; 流体相 $p(= w, g)$ の飽和度 (-)

P_p ; 流体相 $p(= w, g)$ の圧力 (Pa)

μ_p ; 流体相 $p(= w, g)$ の粘性係数 (Pa · s)

ρ_p ; 流体相 $p(= w, g)$ の密度 (kg/m^3)

Ψ_p ; 流体相 $p(= w, g)$ の水理ポテンシャル (Pa)

ϕ ; 有効間隙率 (-)

q_p ; 流体相 $p(= w, g)$ の生成・消滅量 ($m^3/m^3/s$)

t ; 時間 (s)

w, g ; 流体相 (それぞれ水相、ガス相) を識別する添え字を示す

水相、ガス相の流体ポテンシャルは、それぞれ次式で表される。

$$\Psi_w = P_w + \rho_w g Z \quad (3.3-3)$$

$$\Psi_g = P_g + \rho_g g Z \quad (3.3-4)$$

ここに、 Z は基準面からの標高 (m)、 g は重力加速度 (m/s^2) である。基礎方程式中の未知量には

P_g 、 S_w をとり、他のパラメータは等温状態を仮定して以下のような関数として扱う。

$$P_c = P_c[S_w] = P_g - P_w \quad (3.3-5)$$

$$\phi = \phi[P_g] = \phi_0(1 + C_r(P_g - P_0)) \quad (3.3-6)$$

$$k_{rp} = k_{rp}[S_w] \quad (3.3-7)$$

$$B_p = B_p[P_p] \quad (3.3-8)$$

$$\rho_p = \rho_p[P_p] = \rho_{ps}/B_p[P_p] \quad (3.3-9)$$

ここに、 P_c は水-ガス系の毛細管圧力(Pa)であり、式中の $k_{rp}[S_w]$ などは k_{rp} が S_w の関数であることを意味している。また、 C_r は固相圧縮率(1/Pa)を、 ϕ_0 は標準状態における間隙率(-)を、 P_0 は標準状態における圧力(Pa)を示す。

また、ベントナイトの流路拡幅に対しては、以下に示す空隙損傷モデルによって表現する。

$$\begin{aligned} (P_g \leq P_w + P_s) \quad & \phi = \phi_0(1 + C_r(P - P_0)) \\ & K = K_0 \end{aligned} \quad (3.3-10)$$

$$\begin{aligned} (P_g > P_w + P_s) \quad & \phi = \phi_0(1 + C_r(P_s - P_0) + FC_r(P_s - P_0)) \\ & K = CK_0(\phi/\phi_0)^{n_{PD}} \end{aligned} \quad (3.3-11)$$

ここに、 P_s ：流路拡幅の圧力判定閾値(Pa)、 F, C, n_{PD} ：空隙損傷モデルパラメータ(-)を示す。 K_0 は初期の絶対浸透率(m^2)を表す。

空隙損傷モデルは、ガス透気時の上流側のガス相圧力が、下流側の水相圧力と圧力閾値（膨潤圧）の和を超えた際に流路拡幅が起こり、間隙率と絶対浸透率が増加するものである。流路拡幅前後の間隙率と絶対浸透率の変化イメージを図 3.3.2-1 に示す。

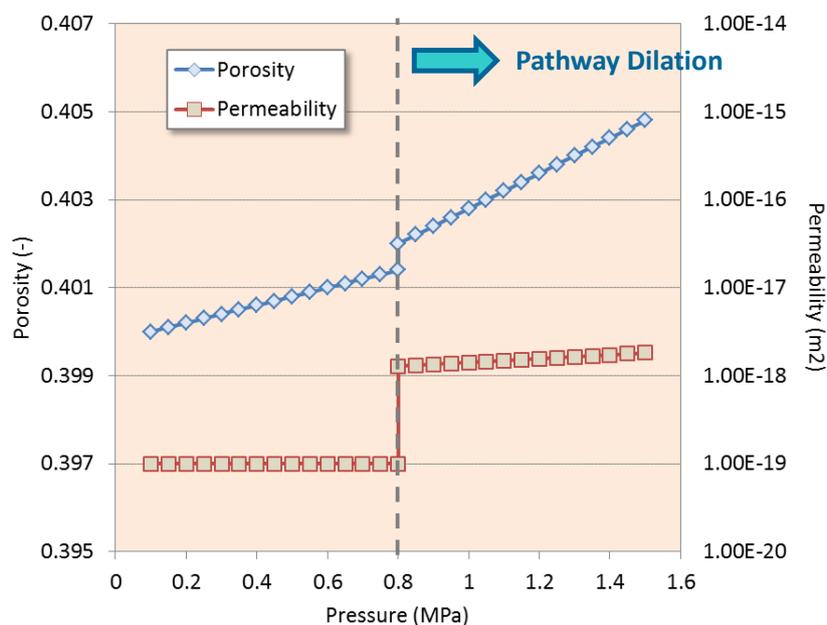


図 3.3.2-1 流路拡幅前後の間隙率と絶対浸透率の変化イメージ

ガスの水相への溶解を考慮する場合は、水相、ガス相の質量収支式に加え、以下の溶存ガスの質量収支式が加わることになる。

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left(\rho_w \frac{K_w k_{rw} R_w}{\mu_w} \nabla \Psi_w \right) + \nabla \cdot D_w \nabla (\rho_w R_w) + m_{g \rightarrow w} - \rho_w q_w R_w \\ = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w s \phi S_w R_w) \end{aligned} \quad (3.3-12)$$

式中の記号の説明は以下の通りである。

- R_w ; 水相中の溶存物質濃度(m^3/m^3)
- D_w ; 水相中の溶存物質の水力学的分散係数(m^2/s)
- $m_{g \rightarrow w}$; 水相、気相間の溶解・遊離項($kg/m^3/s$)

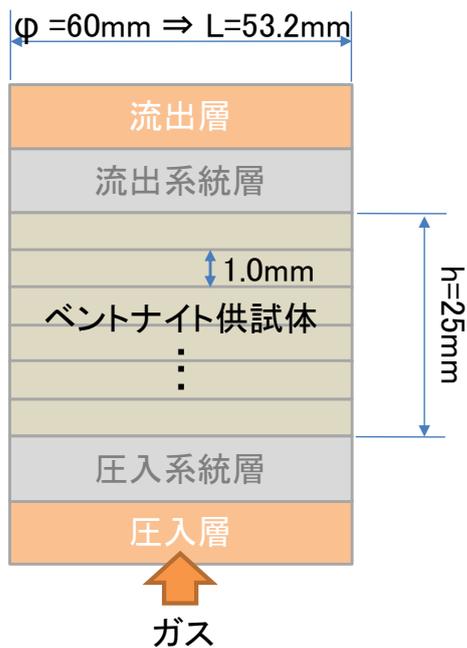
GETFLOWS における流体相間の相間物質移動（水相への空気の溶解など）の取扱いは非平衡状態を前提とする。この場合、水相中の溶存物質濃度 R_w は独立変数（主変数）となる。平衡状態における相変化は、相間物質移動速度が十分大きいケースの 1 つとして扱われ、本検討では平衡状態を仮定する。なお、希薄溶液系を前提とするため、ガスが溶存することによる水相の流体物性変化は考慮しない。

数値解法について示す。空間離散化は、複雑な地形起伏や地盤物性分布を、完全三次元格子を用いて表現可能な積分型有限差分法（Integral Finite Difference Method: IFDM）による。格子形状には、コーナーポイント型差分格子と呼ばれる多面体形状を用いることができ、それぞれの格子体積および隣接格子間の浸透率を正確に評価する。本手法は、格子毎の厳密な質量収支を保存することができるため、油層工学など、多相流れを取り扱う分野に多くの適用実績をもつ。

強い非線形性を有する三次元流体問題を解く必要性から、時間離散化には方程式系の完全陰的有限差分展開を行ったものに Newton-Raphson 法を適用し、各流体成分の方程式を反復的に解く手法を採用している。基本方程式を上記 IFDM によって空間離散化すると 7 重対角行列を係数行列とした連立方程式を得る。行列の各成分は解くべき変数であるガス相圧力 P_g 、水相飽和度 S_w 、溶存物質濃度 R_w を未知数とした 3×3 小行列となり、システム全体の自由度は格子数 NBLK \times 未知数 NEQ(=3)となる。これを、Nested Factorization[7]と呼ばれる三次元構造格子の入れ子構造に着目した前処理を行い共役残差法で解く。上述した流体圧縮性や 2 相流パラメータの非線形性はニュートン・ラプソン法により繰り返し収斂させる。また、大容量計算を高速処理するため、非線形反復過程の中で収斂した格子をソルバーから自動的に除外する逐次陽化処理（Successive Locking Process）[8]を採用し、実用規模の大規模三次元問題をより効率的に解く。

(3) 試験系のモデル化

供試体内の水・ガスの 1 次元的な流れを仮定し、解析モデルは供試体の寸法($\phi 60\text{mm} \times h 25\text{mm}$)をもとに、断面積が等価な矩形断面とし、鉛直方向を 1mm 幅で等分割した 1 次元モデルとした。供試体端部には、フィルタや配管等を表す圧入、流出系統層を付加し、さらにその両端に背圧及び試験条件となる水圧、ガス圧を与える境界格子を設けた。図 3.3.2-2 に解析モデルの基本諸元を示す。各供試体の初期水飽和度を与え、初期圧力は背圧と同じ、温度は 25℃とし、試験中の温度変化は考慮しないものとした。



流出境界層

背圧条件を与える

流出系統層

フィルタ、配管等 (3.57mL) を表現

ベントナイト供試体

鉛直方向を 1mm 幅に等分割した格子群

- 圧力：背圧と同じ
- 水飽和度：90% (再冠水フェーズ)、100% (ガス注入フェーズ)
- 温度：25°C

圧入系統層

フィルタ、配管等 (3.57mL) を表現

圧入境界層

試験条件となるガス圧を与える

図 3.3.2-2 解析モデルの基本諸元

(4) 再冠水フェーズの確証計算

1) 目的関数の設定

再冠水フェーズを対象とした再現解析で実施する逆解析における目的関数を設定する。目的関数は累積注水量の実測データと解析結果との残差ノルムを目的関数とする。従来の検討から、浸潤過程においては比較的高い水飽和度においてもガスは速やかに供試体外へ排出する機構が同定されていることから、気相の相対浸透率曲線を表現する構成モデルにはGrantモデルを適用した。また、解の一意性が問題となることから、同定するパラメータの値を既往検討から推定し、その範囲を限定して検討を行うものとした。

2) 与条件と未知パラメータ

再冠水フェーズの確証計算で取扱う流体 (水、空気) の物性を示す。本検討では等温状態25(°C)を仮定し、流体物性を圧力によってのみ変化させた。

標準大気圧101,325(Pa)での水の密度 ρ_0 を997.04(kg/m³)、粘性係数 μ_0 を 0.890×10^{-3} (Pa s)とし、以下の式により水圧の関数として取り扱った。

$$\rho = \rho_0(1 + C_f(P_w - P_0)) \quad (3.3-13)$$

$$\mu = \mu_0(1 + C_\mu(P_w - P_0)) \quad (3.3-14)$$

ここに、 ρ 、 μ 、 C_f 、 C_μ 、 P_w はそれぞれ、水の密度(kg/m³)、粘性係数(Pa s)、圧縮率(1/Pa)、粘性係数の増加率(1/Pa)、水圧(Pa)であり、圧縮率には 0.45×10^{-9} (1/Pa)、粘性係数の増加率には 1.0×10^{-10} (1/Pa)を設定した。

標準大気圧での空気の密度を 1.184×10^{-3} (kg/m³)、粘性係数を 18.2×10^{-6} (Pa s)とし、密度は

ガス圧に比例し、粘性係数は変化しないものとした。

水理物性に関して、事前に測定された以下のパラメータは与条件として扱った。

- 土粒子密度：2,700(kg/m³)
- 乾燥密度：1,360(kg/m³)
- 間隙率：0.4963(-) (土粒子密度と乾燥密度より算出)
- 固相圧縮率：1.0 × 10⁻⁹(Pa⁻¹) (推定値)

未知パラメータを以下に示す。

- 絶対浸透率(水相と気相は同じ、排水速度と注水差圧より算出した値を初期値として使用)
- 相対浸透率曲線を表現する構成モデルパラメータ (後述)
- 毛細管圧力曲線を表現する構成モデルパラメータ (後述)

水・空気の相互作用を表現するための相対浸透率、毛細管圧力には表 3.3.2-1 に示す構成モデル式を採用した。

表 3.3.2-1 再冠水フェーズの確証計算で用いる相対浸透率や毛細管圧力を表現する構成モデル

相対浸透率 (<i>van Genuchten/Grant</i> モデル)	毛細管圧力 (<i>van Genuchten</i> モデル)
$k_{rw} = \sqrt{S_{we}}(1 - (1 - S_{we}^{1/m_w})^{m_w})^2$ $k_{rg} = 1 - k_{rw}$ $S_{we} = (S_w - S_{wr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr})$ $m_w = 1 - 1/n_w$	$P_c = P_0(S_{we}^{-1/m_c} - 1)^{1/n_c}$ $S_{we} = (S_w - S_{wr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr})$ $m_c = 1 - 1/n_c$

表中の記号の説明は以下の通りである。

- S_p ; 流体相 $p(= w, g)$ の飽和度(-)
- S_{pe} ; 流体相 $p(= w, g)$ の有効飽和度(-)
- S_{pr} ; 流体相 $p(= w, g)$ の残留飽和度(-)
- k_{rp} ; 流体相 $p(= w, g)$ の相対浸透率(-)
- P_c ; 水-空気系の毛細管圧力(Pa)
- n_w ; モデルパラメータ(-)
- n_c ; モデルパラメータ(-)
- P_0 ; モデルパラメータ(Pa)
- w, g ; それぞれ水相、気相を示す

これまでの検討で、解の一意性が問題となったことから、2相流曲線を表現する構成モデルパラメータの範囲を限定して検討を行う。相対浸透率と毛細管圧力曲線における各流体相の残留飽和度は同じとした。また、再冠水試験の結果より供試体はほぼ飽和状態に至ることから、気相の残留飽和度は0とし、水相の残留飽和度も0に設定した。毛細管圧力を表現する構成モデルに用いるパラメータのうち P_0 に関しては、図 3.3.2-3 に示した絶対浸透率とガス侵入圧 P_e との関係式 $P_e = (8.934 \times 10^{-13})K^{-0.6389}$ より、 $4.0 \times 10^{-20}(m^2)$ のとき約2.2(MPa)となるため、 $\pm 1.0(MPa)$ 程度の幅を考慮して1.0 - 3.0(MPa)に設定した。モデルパラメータ P_0 とガス侵入圧 P_e は異なるが、両

者とも毛細管圧力の大きさを決めるパラメータあることから同程度の意味を持つとした。毛細管圧力曲線の間隙分布パラメータ n に関しても、既往成果[1]より乾燥密度 $1.0 - 1.8(Mg/m^3)$ のクニゲル V1 に対して $1.49 - 2.08$ の幅で得られていることから、本検討では $1.5 - 2.0$ の範囲に限定した。

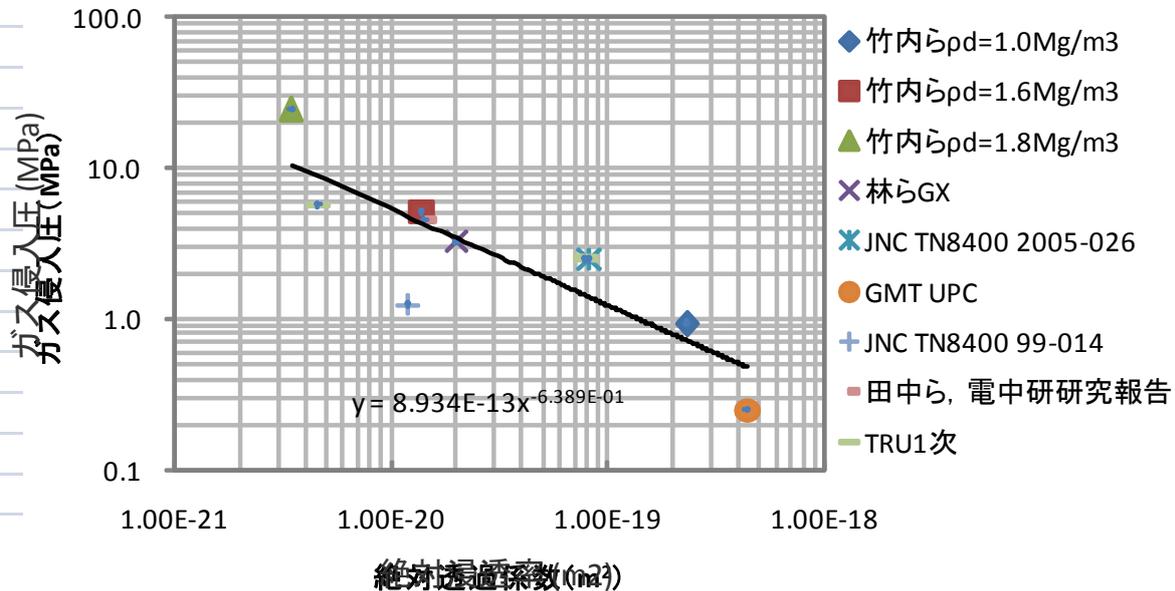


図 3.3.2-3 既往文献から設定した絶対浸透率とガス侵入圧の関係[1]

3) 初期、境界条件

供試体の初期圧力は背圧 (0.1MPa) と同じ、初期水飽和度は 90%とする。圧入系統層に該当する格子は、初期圧力は背圧 (0.1MPa) と同じ、初期完全水飽和状態とした。一方、流出系統層に該当する格子に関しては、初期圧力は背圧 (0.1MPa) と同じで、完全に乾燥した状態とした。圧入層と流出層は境界格子とする。圧入層は完全に水で飽和した状態とし、注入水圧 (0.3MPa) を与えた定圧境界格子とし、流出層は完全に乾燥した状態とし、背圧 (0.1MPa) を与えた定圧境界格子とした。

4) 逆解析手法

本検討における逆解析には、米地質調査所により公開されている汎用逆解析プログラム UCODE_2005[9]を用いる。UCODE_2005 は JUPITER API と呼ばれる逆解析、感度解析及び不確実性評価のための標準インターフェースを搭載し、解析コードのソースプログラムを一切変更することなく、入出力ファイルのみの操作により多数の試行計算を容易に自動化することが可能である。逆解析に必要な未知パラメータ、制約条件および目的関数の設定は任意に行うことができる。図 3.3.2-4 に GETFLOWS を例に UCODE_2005 を用いた自動逆解析の流れを示す。

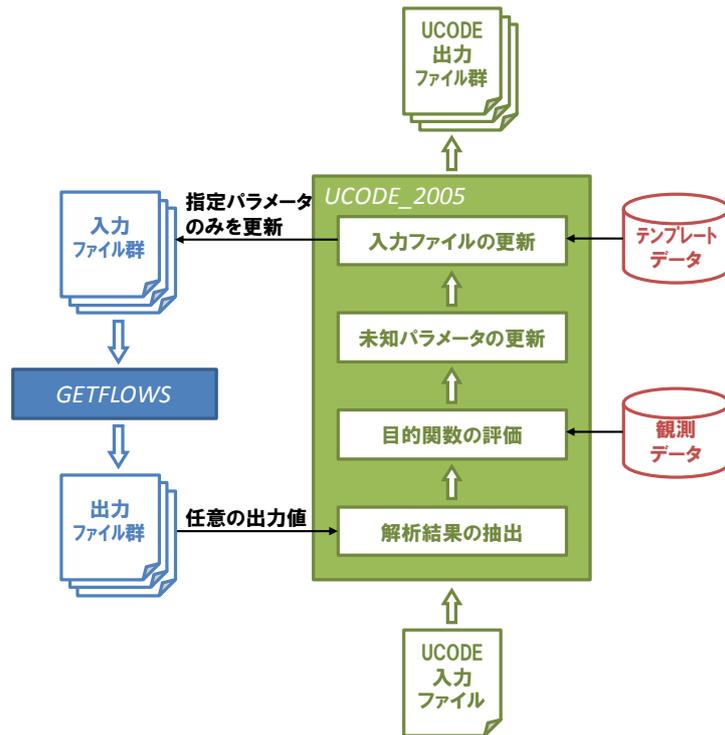


図 3.3.2-4 GETFLOWS+UCODE_2005 による逆解析の流れ

5) 解析結果

逆解析によって再現された累積注水量及び排水量の解析結果を図 3.3.2-5 に示す。実測された累積注水量と排水量を良好に再現することができた。同定された 2 相流パラメータを表 3.3.2-2 に、相対浸透率及び毛細管圧力を図 3.3.2-6 に示す。図中には、乾燥密度 1.36Mg/m^3 の 100%クニゲル V1 及び 30%砂を混合した乾燥密度 1.6Mg/m^3 のクニゲル V1 を用いて、試験から得られた毛細管圧力を併記している。得られた 2 相流パラメータは比較的ばらつきの少ないものが同定されており、試験から得られている毛細管圧力ともほぼ整合する結果であった。

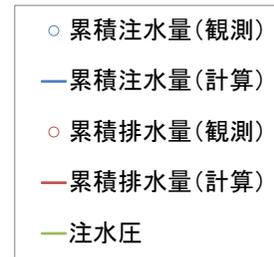
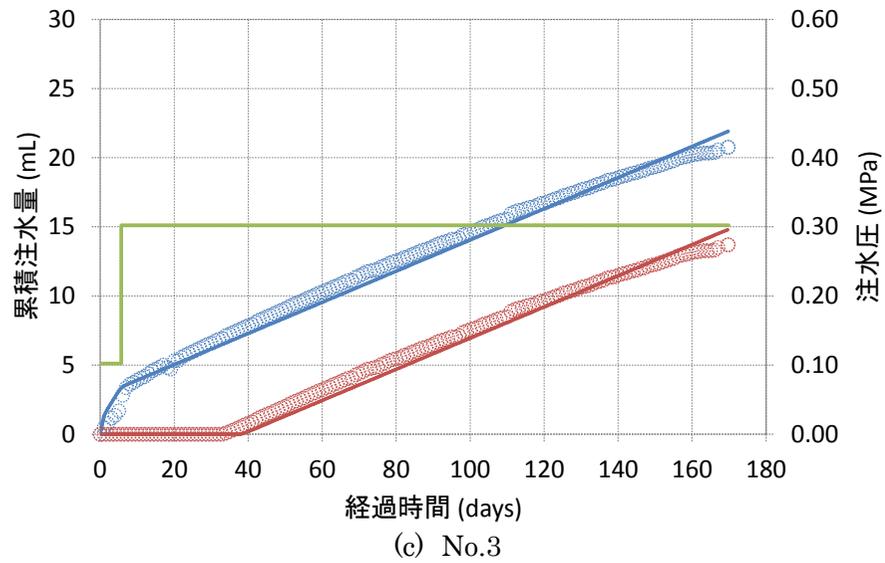
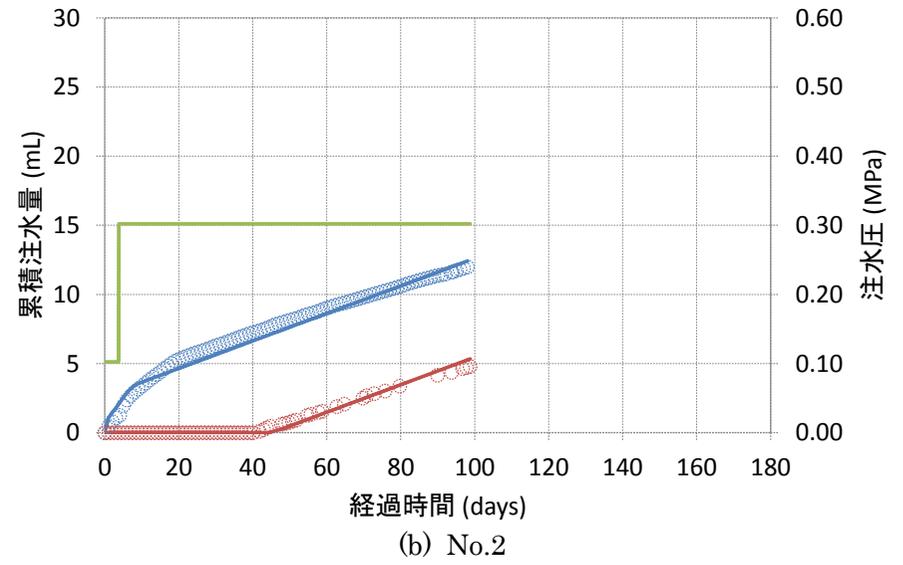
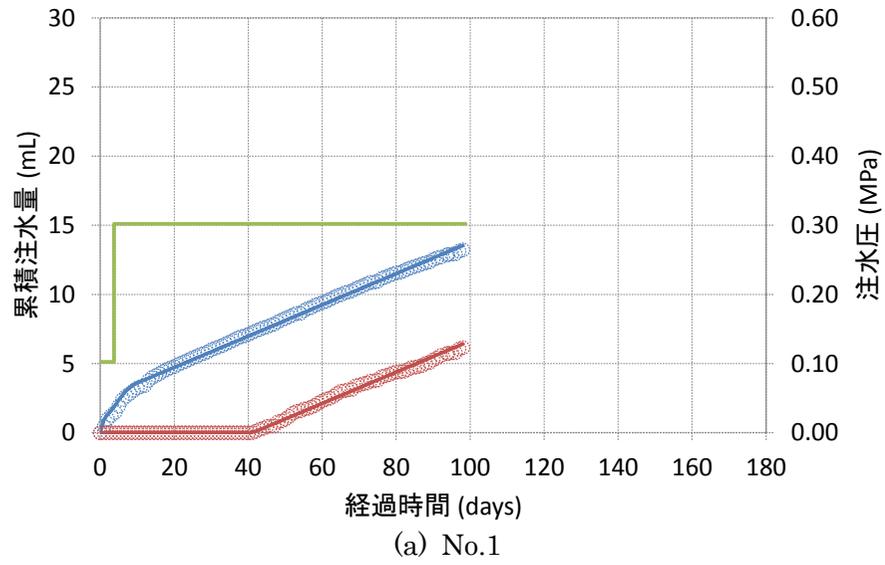


図 3.3.2-5 累積注水量、排水量の再現結果 (再冠水フェーズ)

表 3.3.2-2 同定された 2 相流パラメータ (再冠水フェーズ)

供試体	$K(m^2)$	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_w(-)$	$P_0(MPa)$	$n_c(-)$
No.1	5.153×10^{-20}	0.0	0.0	1.77	1.00	1.88
No.2	4.537×10^{-20}	0.0	0.0	1.72	1.39	2.00
No.3	5.136×10^{-20}	0.0	0.0	1.81	2.10	1.56

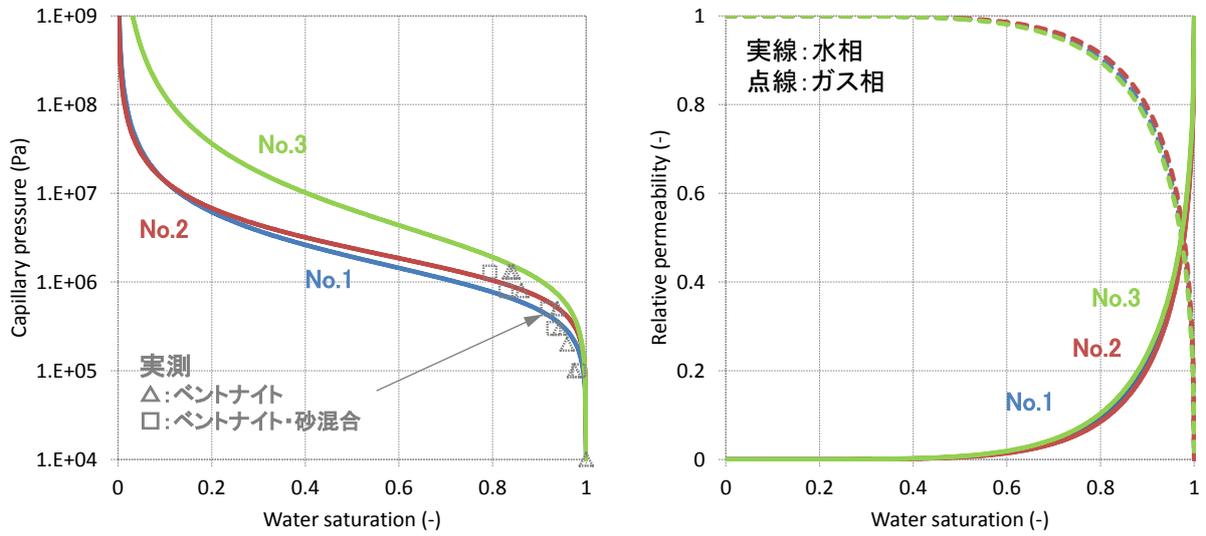


図 3.3.2-6 同定された毛細管圧力 (左) と相対浸透率 (右) (再冠水フェーズ)

(5) ガス注入フェーズの確証計算

1) 解析条件

ガス注入フェーズの確証計算で取扱う流体（水、窒素）の物性を示す。ここでは等温状態25(°C)を仮定し、流体物性を圧力によってのみ変化させた。

標準大気圧101,325(Pa)での水の密度 ρ_0 を997.04(kg/m³)、粘性係数 μ_0 を0.890 × 10⁻³(Pa s)とし、以下の式により水圧の関数として取り扱った。

$$\rho = \rho_0(1 + C_f(P_w - P_0)) \quad (3.3-15)$$

$$\mu = \mu_0(1 + C_\mu(P_w - P_0)) \quad (3.3-16)$$

ここに、 ρ 、 μ 、 C_f 、 C_μ 、 P_w はそれぞれ、水の密度(kg/m³)、粘性係数(Pa s)、圧縮率(1/Pa)、粘性係数の増加率(1/Pa)、水圧(Pa)であり、圧縮率には0.45 × 10⁻⁹(1/Pa)、粘性係数の増加率には1.0 × 10⁻¹⁰(1/Pa)を設定した。

標準大気圧での窒素の密度を1.145 × 10⁻³(kg/m³)、粘性係数を17.8 × 10⁻⁶(Pa s)とし、密度はガス圧に比例するものとし、粘性係数は変化しないものとした。

水理物性のうち、絶対浸透率、間隙率、固相圧縮率の初期設定値は以下のように設定した。

- 絶対浸透率（再冠水フェーズでの同定値、水相、ガス相とも同じ）
 - No.1 : 5.153 × 10⁻²⁰(m²)
 - No.2 : 4.537 × 10⁻²⁰(m²)
 - No.3 : 5.136 × 10⁻²⁰(m²)
- 間隙率 : 0.4963(-)（土粒子密度と乾燥密度より算出、No.1～No.3 共通）
- 固相圧縮率 : 1.0 × 10⁻⁹(Pa⁻¹)（推定値、No.1～No.3 共通）

水・空気の相互作用を表現するための相対浸透率、毛細管圧力は既往研究で同定されたものを初期設定値として用いた。既存研究で実施された室内ガス透気試験の概要と同定された2相流パラメータ及び流路拡幅を表現する構成モデルパラメータを表 3.3.2-4、表 3.3.2-5 に示す。なお、相対浸透率と毛細管圧力曲線を表現する構成モデルとしてvan Genuchten (vG)モデルを用いている。vGモデルの構成式を表 3.3.2-3 に示す。

表 3.3.2-3 再冠水フェーズの確証計算で絶対浸透率、毛細管圧力曲線を表現する構成モデル

相対浸透率 (van Genuchtenモデル)	毛細管圧力 (van Genuchtenモデル)
$k_{rw} = \sqrt{S_{we}}(1 - (1 - S_{we}^{1/m_w})^{m_w})^2$ $k_{rg} = \sqrt{S_{ge}}(1 - (1 - S_{ge}^{1/m_g})^{m_g})^2$ $S_{we} = (S_w - S_{wr})/(1 - S_{wr} - S_{gr})$ $S_{ge} = (S_g - S_{gr})/(1 - S_{wr} - S_{gr})$ $m_w = 1 - 1/n_w \quad m_g = 1 - 1/n_g$	$P_c = P_0(S_{we}^{-1/m_c} - 1)^{1/n_c}$ $S_{we} = (S_w - S_{wr})/(1 - S_{wr} - S_{gr})$ $m_c = 1 - 1/n_c$

表中の記号の説明は以下の通りである。

- S_p ; 流体相p(= w, g)の飽和度(-)
- S_{pe} ; 流体相p(= w, g)の有効飽和度(-)

S_{pr}	; 流体相 $p(= w, g)$ の残留飽和度(-)
k_{rp}	; 流体相 $p(= w, g)$ の相対浸透率(-)
P_c	; 水-空気系の毛細管圧力(Pa)
n_w, n_g	; モデルパラメータ(-)
n_c	; モデルパラメータ(-)
P_0	; モデルパラメータ(Pa)
w, g	; それぞれ水相、気相を示す

図 3.3.2-7、図 3.3.2-8 に既往研究で同定された相対浸透率、毛細管圧力曲線を示す。

図 3.2.3-2 に示したように、昨年度検討のガス注入試験系を対象とした予備解析の中で、これらの 2 相流パラメータを用いた解析を既に行っており、No.1 は FY2012_SG②、No.2 は FY2010_ケース②の 2 相流パラメータを用いたときに試験データを概ね再現する結果が得られている。ここでは、これらのパラメータを基本とし、毛細管圧力を微調整することで試験データの再現を試みる。なお、No.3 に関しては、累積排水量の実測データから、No.2 と同じ FY2010_ケース②をベースとした。

ここでは、水へのガス溶解を考慮することから、物質移行に関するパラメータを次のように設定した。溶存窒素の分子拡散係数は、 $2.0 \times 10^{-9}(m^2/s)$ とする。多孔質媒体中の実効拡散係数は分子拡散係数に間隙率、水飽和率を掛けた値となる。標準状態における飽和溶解度を $0.015(cm^3/cm^3)$ とし、圧力に比例するとした（ヘンリー則）。移行距離を供試体長さ（25mm）と考え、分散長にはその 1/10 倍となる 2.5mm を設定した。ガス溶解は瞬時平衡状態を仮定し、半減期、収着は考慮しない。なお、水の流体物性は物質濃度に依存しないものとした。

供試体の初期圧力は背圧（0.2MPa）と同じ、初期水飽和度は 100%とする。圧入・流出系統層に該当する格子は、初期圧力は背圧（0.2MPa）と同じ、初期完全水飽和状態とした。圧入層と流出層は境界格子とする。圧入層は完全に乾燥した状態とし、載荷ガス圧（0.5MPa）を与えた定圧境界格子とし、流出層は完全に水で飽和した状態とし、背圧（0.2MPa）を与えた定圧境界格子とした。

表 3.3.2-4 既存研究で実施された室内ガス透気試験の概要

試験ケース		寸法	初期飽和度	再冠水フェーズ試験条件	ガス注入フェーズ試験条件
2010 年度	ケース②	直径：60mm 高さ：50mm	90%	底面から段階昇圧注水（最大 0.2MPa）	底面から段階昇圧ガス注入（0.1MPa/2 日）
	ケース③	直径：60mm 高さ：25mm	0%	両端⇒底面から一定圧力注水（0.2MPa）	底面から段階昇圧ガス注入（0.1MPa/2 日）
2011 年度	SG①	直径：60mm 高さ：25mm	90%	底面から一定圧力注水（0.2MPa）	底面から段階昇圧ガス注入（0.1MPa/2 日）
2012 年度	SG①	直径：60mm 高さ：25mm	90%	底面から一定圧力注水（0.2MPa）	底面から段階昇圧ガス注入（0.1MPa/2 日）
	SG②	直径：60mm 高さ：50mm	90%	底面から一定圧力注水（0.2MPa）	底面から段階昇圧ガス注入（0.1MPa/2 日）

表 3.3.2-5 既存検討で同定された 2 相流パラメータ

年度	ケース名	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_w(-)$	$n_g(-)$	$P_0(MPa)$	$n_c(-)$	$P_s(MPa)$	$C(-)$	$n_{PD}(-)$	$F(-)$
2010	ケース②	0.3867	0.0	1.449	13.70	0.661	1.821	0.524	5.883×10^6	0.649	1.107
	ケース③	0.2	0.0	2.884	2.451	0.336	3.709	0.474	7.058×10^6	1.0	1.0
2011	SG①	0.2	0.0	2.884	2.451	0.333	3.709	0.275	6.058×10^4	0.4129	1.0
2012	SG①	0.2280	0.0	2.455	2.474	0.324	3.297	0.330	4.999×10^4	0.8346	1.154
	SG②	0.3639	0.0	2.011	2.953	0.291	2.290	0.600	1.482×10^5	0.202	1.030

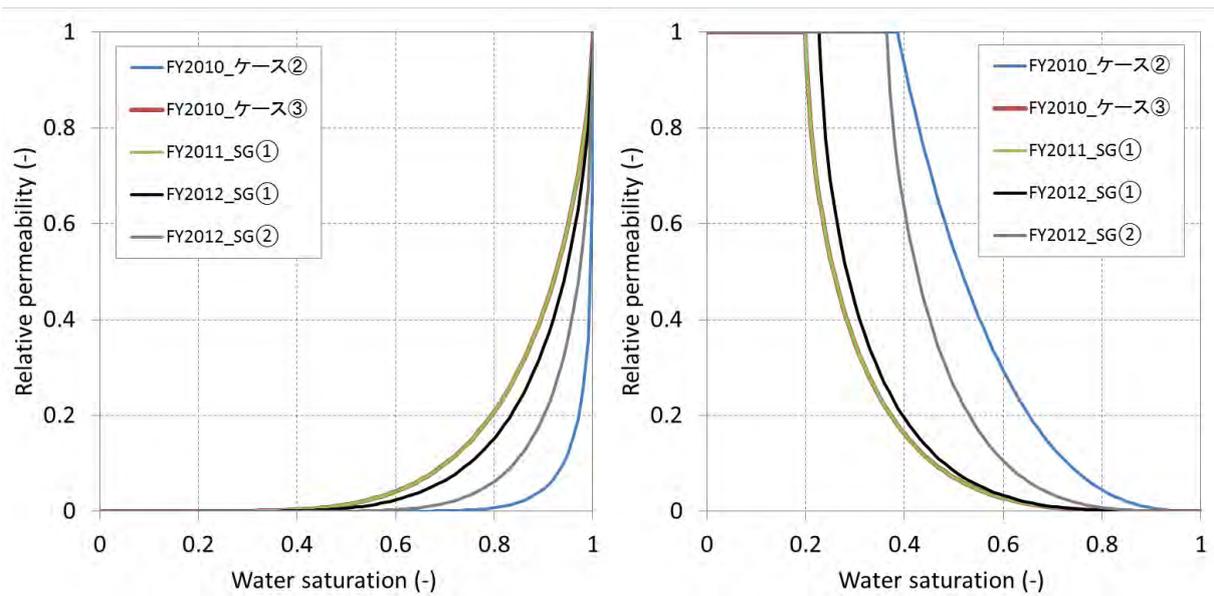


図 3.3.2-7 既往検討で同定された相対浸透率曲線（左：水相、右：ガス相）

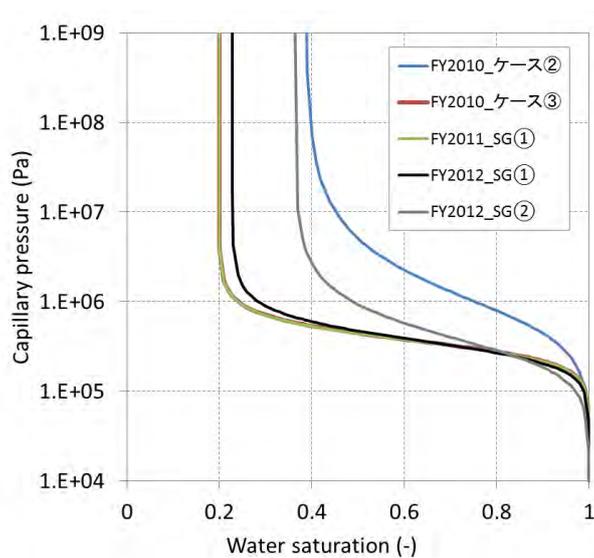
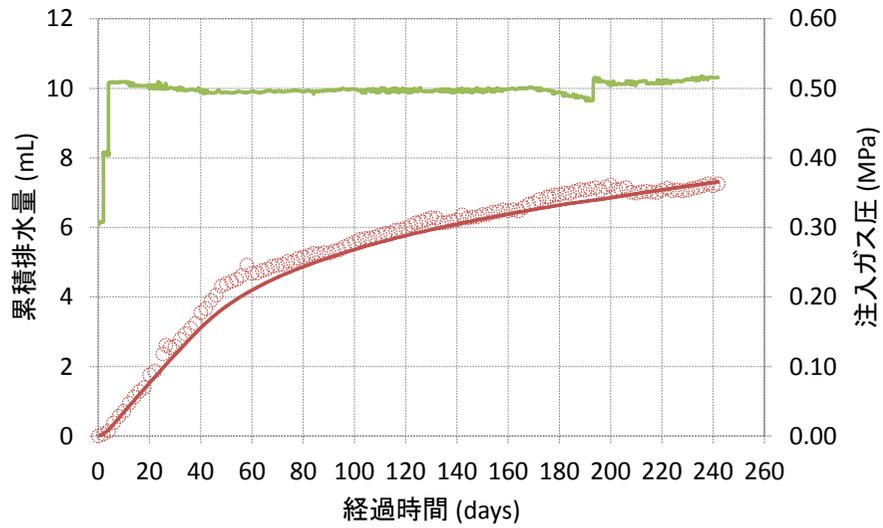


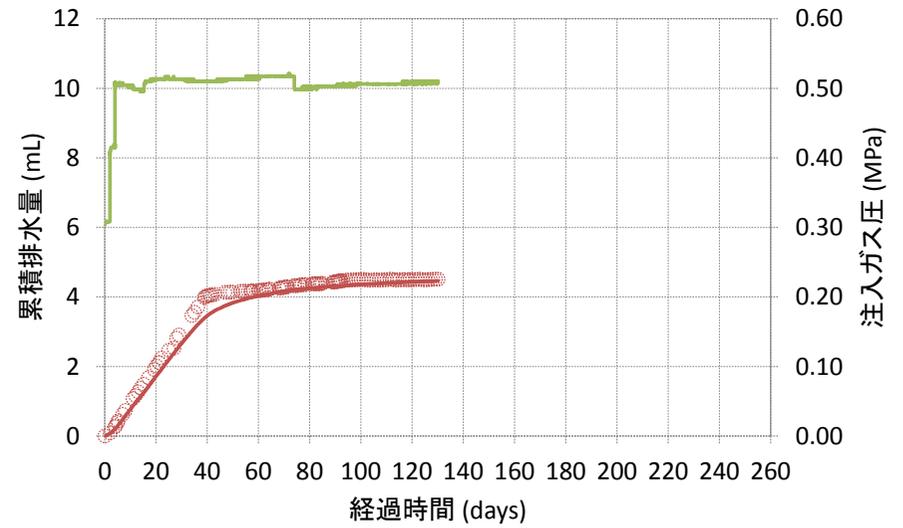
図 3.3.2-8 既往検討で同定された毛細管圧力曲線

2) 解析結果

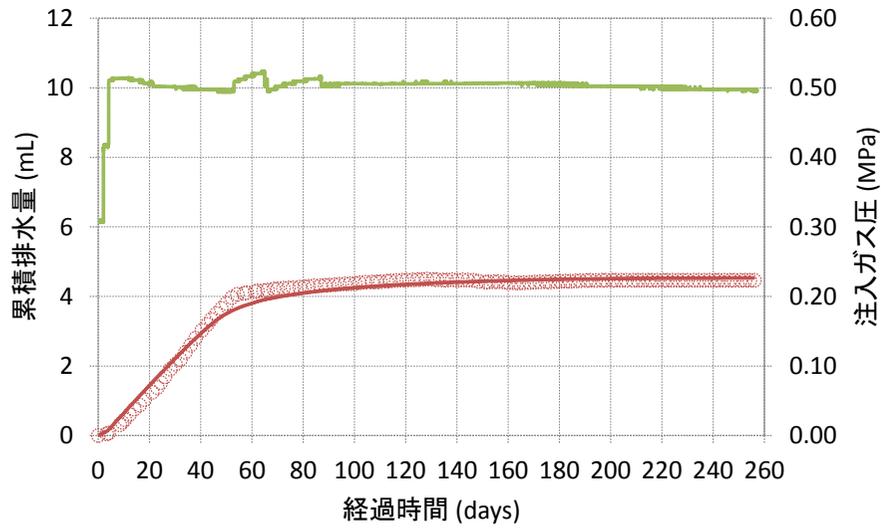
再現された累積排水量の解析結果を図 3.3.2-9 に示す。実測された累積注水量と排水量を良好に再現することができており、No.2、No.3 に関しては、試験期間の途中から排水がほぼ停止するという挙動を解析でも表現できている。同定された 2 相流パラメータを表 3.3.2-6 に、相対浸透率及び毛細管圧力を図 3.3.2-10 に示す。図中には、乾燥密度 1.36Mg/m^3 の 100%クニゲル V1 及び 30%砂を混合した乾燥密度 1.6Mg/m^3 のクニゲル V1 を用いて、試験から得られた毛細管圧力を併記している。得られた 2 相流パラメータは比較的ばらつきの大きく、試験から得られている毛細管圧力よりも小さい結果となっている。水飽和度の深度プロファイルの再現結果を図 3.3.2-11 に示す。(2)3) でも述べたように信頼性がやや低いデータであることから参考データとして示した。



(a) No.1



(b) No.2



(c) No.3

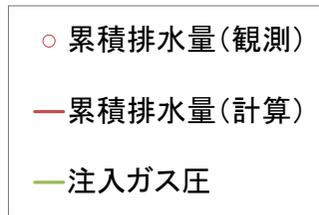


図 3.3.2-9 累積排水量の再現結果 (ガス注入フェーズ)

表 3.3.2-6 同定された 2 相流パラメータ (ガス注入フェーズ)

供試体	$K(m^2)$	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_w(-)$	$n_g(-)$	$P_0(MPa)$	$n_c(-)$
No.1	2.862×10^{-20}	0.36	0.0	2.01	2.95	0.20	2.29
No.2	3.250×10^{-20}	0.387	0.0	1.45	13.7	0.56	1.82
No.3	2.675×10^{-20}	0.387	0.0	1.45	13.7	0.56	1.82

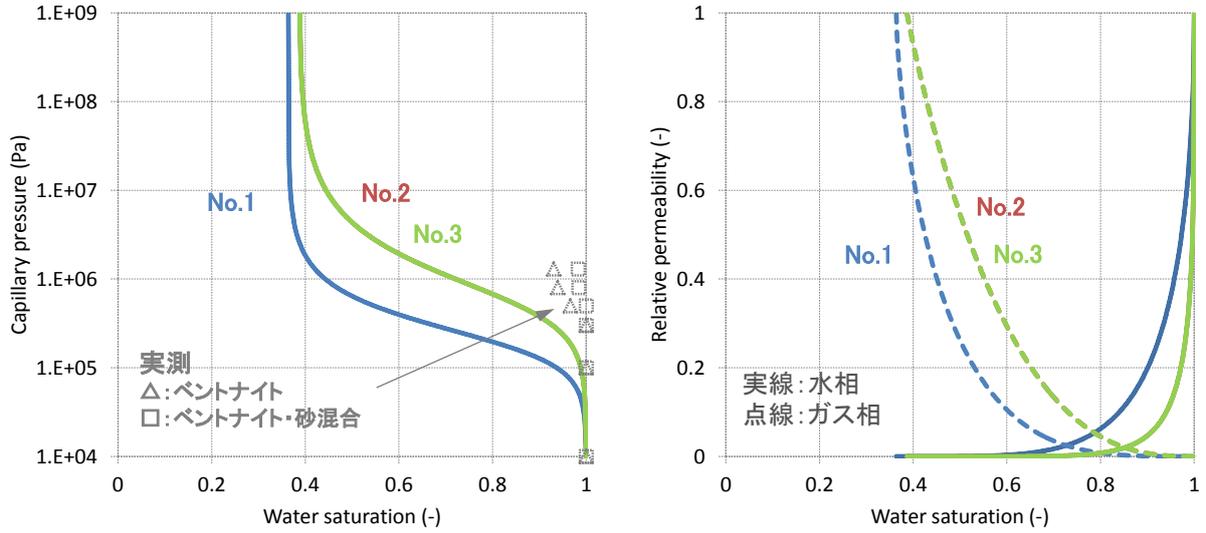


図 3.3.2-10 同定された毛細管圧力 (左) と相対浸透率 (右) (ガス注入フェーズ)

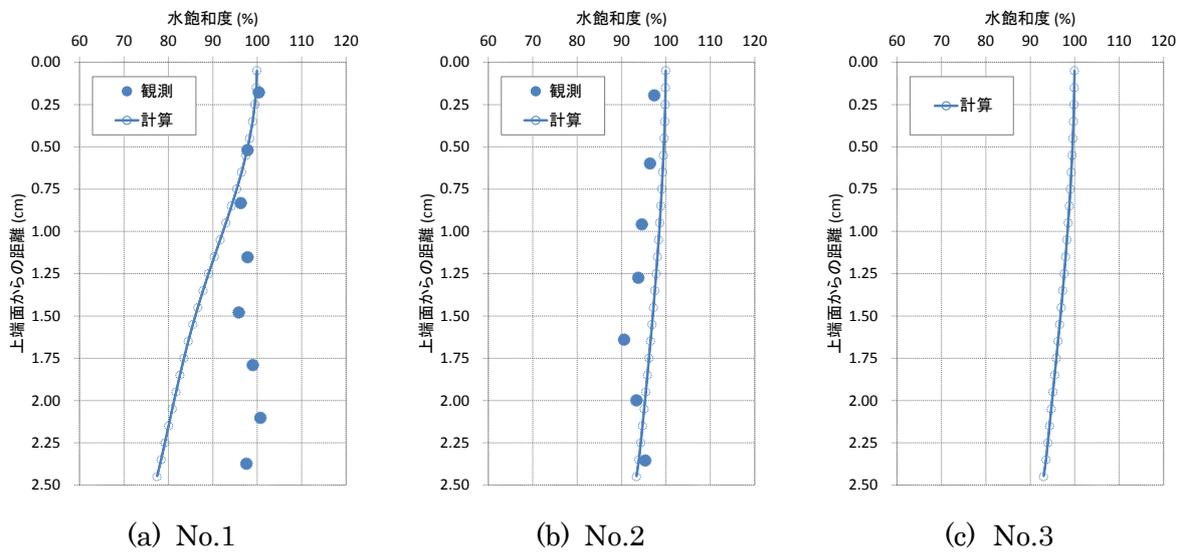


図 3.3.2-11 水飽和度の再現結果 (ガス注入フェーズ)

3.3.3 力学連成 2 相流解析コード (Code_Bright) による確証計算

(1) 検討方針

再冠水フェーズを対象とした再現解析では、逆解析によって同定された 2 相流パラメータ、および、既往の力学パラメータをベースとし、試行錯誤によって実測データの再現を試みる。ガス注入フェーズを対象とした再現解析においても、2 相流解析コード (GETFLOWS) によって同定された 2 相流パラメータ、および、既往の力学パラメータをベースとし、試行錯誤によって実測データの再現を試みる。

(2) 解析コード

1) 解析コード概要

解析には、カタルーニャ工科大学 (スペイン) で開発された地盤・岩盤など多孔質体の熱・水・応力・ガス連成解析コード (有限要素法、2 次元～3 次元)、Code_Bright を用いた。海外では放射性廃棄物地層処分における人工バリア、天然バリアの挙動評価に広く使用させている。Code_Bright は他の同種のコードと比較して以下の 2 点に特徴があり、これが海外で広く地層処分分野に適用されている理由でもある。

- 膨潤性粘土を含む不飽和土の弾塑性構成モデルが導入されている。
- 液相のみならず気相 (ガス移行) を扱う 2 相流と力学及び熱の連成コードである。

これにより、再冠水時のベントナイトの吸水 (不飽和から飽和) に伴う膨潤変形挙動が表現可能であり、ガス移行時の力学連成挙動が表現可能である。図 3.3.3-1 に熱、力学 (応力・変形)、2 相流の相互影響関係を示す。

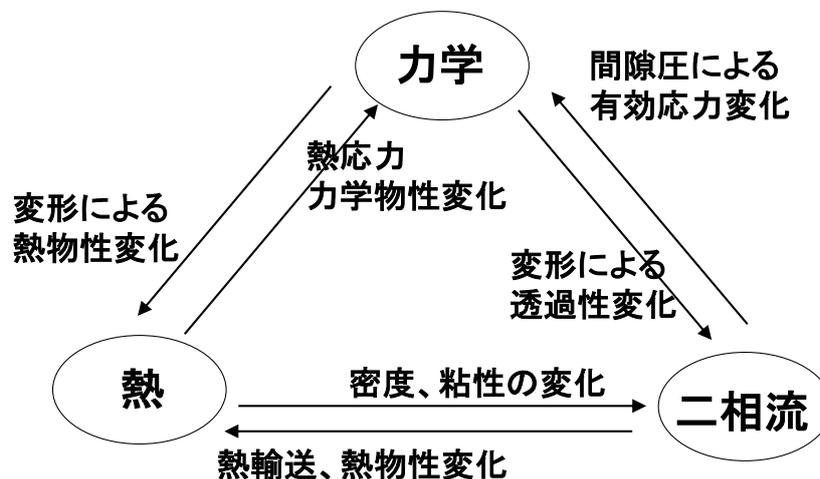


図 3.3.3-1 熱、力学 (応力変形)、2 相流の相互影響

2) 支配方程式

多孔質体は、図 3.3.3-2 に示すように固体粒子、水、ガスで構成されたものとし、以下の 3 つの相と 3 つの物質が考慮される。

<相>

- 固相：鉱物

- 液相：水、溶解ガス
- 気相：乾燥ガス、水蒸気

<物質成分>

- 鉱物
- 水：液相中の水、気相中の水蒸気
- ガス：気相中の乾燥ガス、気相中の溶解ガス

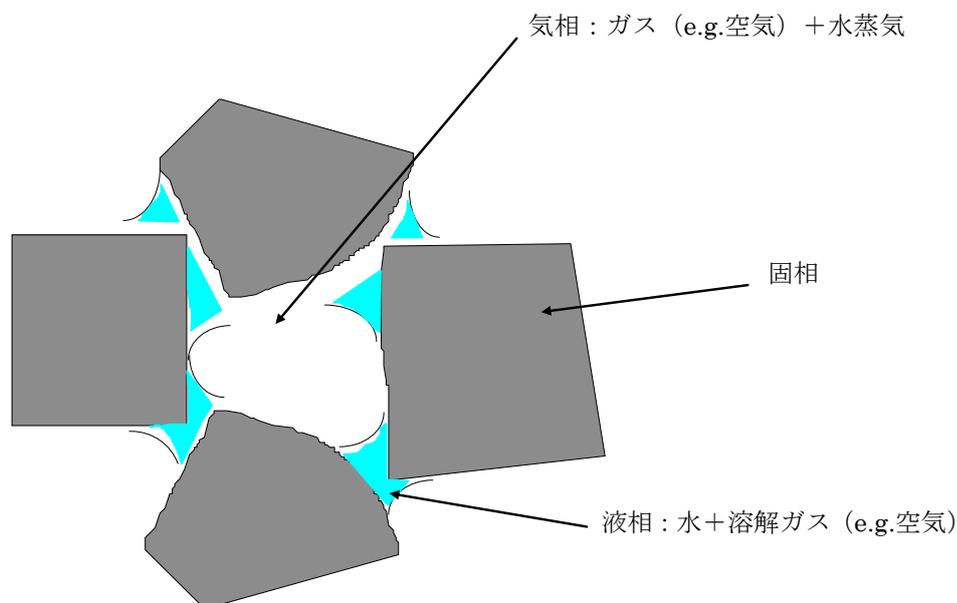


図 3.3.3-2 不飽和多孔質体の概念

上記の多相、多物質で構成される多孔質体のモデル化において、以下が仮定されている。

- 乾燥ガスは単一の物質であり、気相の主成分である。また、溶解ガスは Henry の平衡則に従う。
- 多相間では熱平衡状態を仮定しており、3つの相は同一点において同じ温度である。
- 水蒸気の濃度はサイクロメトリック則に従って液相と平衡する。
- 状態変数（未知数）は固体変位、水圧、ガス圧、温度である。
- 微小ひずみ、微小ひずみ速度が仮定されている。
- 溶解ガス及び液相の運動量のつりあいはそれぞれ、Fick 則と Darcy 則で考慮される。
- 構成則で用いる多くの物理パラメータは圧力と温度の関数である（例えば、水蒸気の濃度、表面張力、気体の粘性は温度に強く依存する）。

Code_Bright の支配方程式は以下に示すとおりであり、適用された構成則と平衡則を満たすように解かれる。

- 固体の質量保存
- 水の質量保存
- ガスの質量保存
- 運動量保存
- 内部エネルギー保存

なお、適用される構成則、平衡則は次のとおりである。

- Darcy 則：水・ガスの移流
- Fick 則：水蒸気、ガスの濃度拡散
- Fourier 則：熱伝導
- 水分特性：飽和度－サクション
- BB (Balcerona Basic) モデル：応力－ひずみ
- Henry 則：ガス溶解
- サイクロメトリック則：水蒸気量

それぞれの偏微分方程式は未知数に関連付けられている。これらの未知数は連成法を用いて解く、例えば、考慮できる全ての連成過程を実行することも可能であり、反対に、任意の非連成問題の一つの未知数を解くことも可能である。

Code_Bright における平衡方程式を以下に示す。

力学方程式：未知数は変位 ($\mathbf{u}=(u_x, u_y, u_z)$)

$$\text{divergence} \begin{pmatrix} \text{tensor} & \text{of} \\ \text{total} & \text{stress} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \text{vector} & \text{of} \\ \text{body} & \text{forces} \end{pmatrix} = \text{vector} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (3.3-17)$$

水の質量保存則：未知数は水圧 P_l

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \text{mass of water in} \\ \text{liquid and gas phase} \end{pmatrix} + \text{divergence} \begin{pmatrix} \text{total fluxes} \\ \text{of water} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{external supply} \\ \text{of water} \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta_l^a S_l \phi + \theta_g^a S_g \phi) + \nabla \cdot (\mathbf{j}_l^a + \mathbf{j}_g^a) = f^a \quad (3.3-18)$$

ガスの質量保存側：未知数はガス圧 P_g

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \text{mass of water in} \\ \text{liquid and gas phase} \end{pmatrix} + \text{divergence} \begin{pmatrix} \text{total fluxes} \\ \text{of air} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{external supply} \\ \text{of air} \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta_l^a S_l \phi + \theta_g^a S_g \phi) + \nabla \cdot (\mathbf{j}_l^a + \mathbf{j}_g^a) = f^a \quad (3.3-19)$$

内部エネルギー保存側：未知数は温度 T

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \text{internal energy in solid,} \\ \text{liquid and gas phase} \end{pmatrix} + \text{divergence} \begin{pmatrix} \text{total fluxes} \\ \text{of energy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{external supply} \\ \text{of heat} \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (E_s \rho_s (1-\phi) + E_l \rho_l S_l \phi + E_g \rho_g S_g \phi) + \nabla \cdot (\mathbf{i}_c + \mathbf{j}_{Es} + \mathbf{j}_{El} + \mathbf{j}_{Eg}) = f^Q \quad (3.3-20)$$

固相の質量保存側：未知数は間隙率

$$\frac{\partial}{\partial t}(\text{mass of solid}) + \text{divergence} \begin{pmatrix} \text{total fluxes} \\ \text{of salt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{external supply} \\ \text{of salt} \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_s(1-\phi)) + \nabla \cdot (\mathbf{j}_s) = 0 \quad (3.3-21)$$

式中の記号の説明は以下の通りである。

- σ ; 応力テンソル
- \mathbf{b} ; 物体力
- θ ; 相の単位体積あたりの質量含有率
- S_l ; 液相飽和度
- ϕ ; 間隙率
- S_g ; 気相飽和度
- \mathbf{j} ; 全質量流束
- ρ ; 密度
- E ; 内部エネルギー
- \mathbf{i}_c ; 熱伝導流束
- \mathbf{j}_E ; エネルギー流束

上付きの w と a は水と空気をそれぞれ示す。下付きの s 、 l 及び g は固相、液相及び気相をそれぞれ示す。なお、詳細については Code_Bright User's guide[11]あるいは Olivella et al.[12]を参照されたい。

3) 適用した構成則

Code_Bright に導入されている BB (Barcelona Basic) モデル[11][12]は、修正 Cam-Clay モデル[13]を不飽和粘土に拡張した弾塑性構成モデルであり、ベントナイトのような膨潤性粘土に対しても適用できるよう拡張されている。なお、飽和時の挙動は修正 Cam-Clay モデルと一致する。

BB モデルで考慮される不飽和粘土の一般的な力学特性を以下に示す。

- サクシヨンの増加（飽和率の低下）による降伏圧密応力の増加
- 不飽和粘土も飽和すると、飽和までのサクシヨン・応力経路とは関係なく、圧密に関しては同じ挙動をする（同じ間隙比～有効応力関係となる、同じ圧密ラインに乗る）。
- 不飽和粘土は湿潤により、拘束応力が小さい場合は膨潤し、高い場合は圧縮する。
- 不飽和粘土の体積変化は応力経路依存性がある（サクシヨンの変化が同時にあると経路依存の体積変化挙動をする）。
- サクシヨンの増加は有効粘着力を増大させるが、内部摩擦角に影響をほとんど与えない。

飽和時の挙動は修正 Cam-Clay モデルと同じことから、以下では特に、不飽和状態での挙動や飽和率（サクシヨン）が変化した場合の挙動に焦点を当てて、BB モデルについて記述する。

a. 応力（外力）の変化による圧縮、膨潤挙動（圧密）

不飽和粘土においても飽和粘土と同様に、正規圧密状態の間隙比増分 de と平均有効応力増分 dp' は圧縮指数により(3.3-22)式で表される（図 3.3.3-3 参照）。 $\lambda(s)$ ：サクシヨン s に依存する圧縮指数（ $s = p_g - p_l$ 、 p_g ：間隙ガス圧、 p_l ：間隙水圧）である。

$$de = -\lambda(s) \frac{dp'}{p'} \quad (3.3-22)$$

ここに、 e ：間隙比、 p' ：平均有効応力（平均応力 p 、間隙ガス圧 p_g 、間隙水圧 p_l ）により次式で定義される。

$$p' = p - \max(p_g, p_l) \quad (3.3-23)$$

(3.3-22)式を間隙比増分の代わりに体積ひずみ増分 $d\varepsilon_v$ で書き直せば次式となる。

$$d\varepsilon_v = \frac{\lambda(s)}{1+e_0} \frac{dp'}{p'} \quad (3.3-24)$$

ここに、 e_0 ：初期間隙比である

例えば、サクシヨン s 一定（飽和率一定）条件下では $\lambda(s)$ 一定なので(3.3-25)式より次式が成り立つ。

$$e = e_0 - \lambda(s) \ln \frac{p'}{p_0'} \quad (3.3-25)$$

ここに、 p_0' ：初期平均有効応力である。

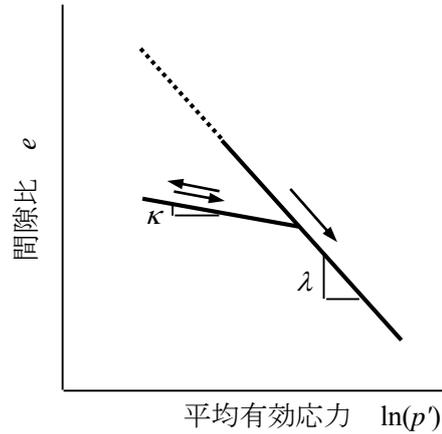


図 3.3.3-3 間隙比と平均有効応力の関係

同様に、過圧密状態あるいは除荷時の弾性的な間隙比増分 de と平均有効応力増分 dp' は膨潤指数により(3.3-26)式で表される。

$$de = -\kappa(s) \frac{dp'}{p'} \quad (3.3-26)$$

ここに、 $\kappa(s)$: サクシオン s に依存する膨潤指数である。

あるいは、このときの体積ひずみ増分 $d\varepsilon_v$ で書き直せば次式となる。

$$d\varepsilon_v = \frac{\kappa(s)}{1+e_0} \frac{dp'}{p'} \quad (3.3-27)$$

例えば、サクシオン s 一定 (飽和率一定) 条件下では次式が成り立つ。

$$e = e_0 - \kappa(s) \ln \frac{p'}{p_0} \quad (3.3-28)$$

なお、BB モデルでは圧縮指数、膨潤指数のサクシオン依存性は次式で定義される。

$$\lambda(s) = \lambda_0 [(1-\gamma)\exp(\beta \cdot s) + \gamma] \quad (3.3-29)$$

$$\kappa(s) = \kappa_0 (1 + \alpha \cdot s) \quad (3.3-30)$$

ここに、 λ_0 : 飽和時の圧縮指数 = $\lambda(0)$ 、 κ_0 : 飽和時の膨潤指数 = $\kappa(0)$ 、 α 、 β 、 γ : モデルパラメータである

飽和、不飽和に係わらず間隙比と平均有効応力の関係は(3.3-22)式、(3.3-26)式および図 3.3.3-3 で示される関係に従うので、拘束圧 (平均有効応力) が高くなれば間隙は小さくなって剛性は高くなる。例えば、過圧密状態での載荷時あるいは除荷時におけるヤング率 E と拘束圧 (平均有効応力 p') との関係は(3.3-27)式より次式のようになる。

$$E = 3(1-2\nu) \frac{dp'}{d\varepsilon_v} = 3(1-2\nu) \cdot (1+e_0) \cdot \frac{p'}{\kappa(s)} \quad (3.3-31)$$

ここに、 ν はポアソン比である。ヤング率 E は平均有効応力 p' に比例し、膨潤指数 $\kappa(s)$ に反比例することがわかる。

b. 飽和率の変化による膨潤、圧縮挙動

一般に不飽和粘土は飽和率の変化により体積ひずみが発生する。BB モデルではこれを表現す

るために、前記の応力変化による圧縮、膨潤挙動（圧密）と類似した下記の関係を導入している。圧密における圧密降伏応力の概念と同様に、過去に受けた最大のサクシオン（以下、降伏サクシオンと呼ぶ）を超えてサクシオンが増加（乾燥）する場合には次式で示される塑性的な体積減少が起こるとしている（図 3.3.3-4 参照）。

$$de = -\lambda_s \frac{ds}{s + p_{atm}} \quad (3.3-32)$$

ここに、 s ：サクシオン、 p_{atm} ：大気圧、 λ_s ：乾燥による圧縮指数（定数）である。

サクシオンが減少（湿潤）する場合、あるいは降伏サクシオン以内でサクシオンが増加（乾燥）する場合の体積変化は下記で定義される。

$$de = -\kappa_s \frac{ds}{s + p_{atm}} \quad (3.3-33)$$

ここに、 κ_s ：湿潤による膨潤指数である。

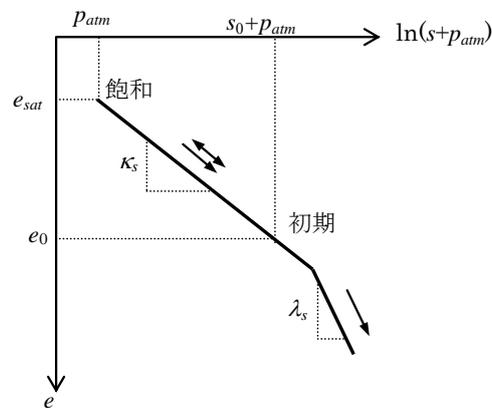


図 3.3.3-4 サクシオンと間隙比の関係

一般の粘土に対しては λ_s 、 κ_s は有効応力に依存しない定数と見なせるが、ベントナイトのような膨潤性粘土に対しては、湿潤による膨潤指数 κ_s は平均有効応力 p' に依存する次式が提案されている。

$$\kappa_s(p') = \kappa_{s0} \left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p'}{p'_{ref}} \right) \quad (3.3-34)$$

ここに、 κ_{s0} ： p'_{ref} での湿潤膨潤指数、 p'_{ref} ：参照平均有効応力、 α_{sp} ：湿潤膨潤指数の有効応力依存性の度合いを表すモデルパラメータである。

(3.3-34)式を用いれば、湿潤膨潤（サクシオンの減少）による体積ひずみ増分 $d\varepsilon_s$ は次式で表される。

$$d\varepsilon_s = \frac{\kappa_s(p')}{1 + e_0} \frac{ds}{s + p_{atm}} = \frac{1}{1 + e_0} \kappa_{s0} \left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p'}{p'_{ref}} \right) \frac{ds}{s + p_{atm}} \quad (3.3-35)$$

従って、平均有効応力 p' 一定の場合の体積ひずみは、

$$\varepsilon_s = \frac{1}{1 + e_0} \kappa_{s0} \left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p'}{p'_{ref}} \right) \cdot \ln \frac{s + p_{atm}}{s_0 + p_{atm}} \quad (3.3-36)$$

ここで、(3.3-36)式で $s=0$ （飽和）とすれば、一定有効応力下で湿潤飽和させた時の飽和時の膨

潤ひずみ ε_{smax} が得られる (ε_{smax} は便宜上、膨張を正、他の体積ひずみ ε_v 、 ε_s は圧縮を正としていることに注意)。

$$\varepsilon_{smax} = \frac{1}{1+e_0} \kappa_{s0} \left(1 + \alpha_p \ln \frac{p'}{p'_{ref}} \right) \ln \frac{p_{atm}}{s_0 + p_{atm}} \quad (3.3-37)$$

c. 強度の飽和率依存性

不飽和の場合の圧密降伏応力 p_0 は飽和の場合より増大し、次式で定義される(図 3.3.3-5 参照)。

$$p_0 = p^c \left(\frac{p_0^*}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa(0)}{\lambda(s)-\kappa(0)}} \quad (3.3-38)$$

ここに、 p_0^* : サクシオン $s=0$ (飽和時) の圧密降伏応力、 p^c : モデルパラメータ (参照応力) である。

(3.3-38)式で定義される降伏面は LC (Loading Collapse) 降伏面と呼ばれている。一方、過去に受けた最大のサクシオン (降伏サクシオン) で規定される降伏面は SI (Suction Increase) 降伏面と呼ばれている。

内部摩擦角 ϕ はサクシオンの影響を受けず、従って、限界状態応力比パラメータ M ($M=6\sin\phi(3-\sin\phi)$) も一定値をとるが、粘着力はサクシオンに比例して増大する。従って、引張り強度 p_s も比例的に増加し、次式で定義されている(図 3.3.3-5 参照)。

$$p_s = \kappa \cdot s \quad (3.3-39)$$

有効応力およびサクシオンの変化による体積ひずみ挙動を規定する線 ($\lambda(s)$ 、 $\kappa(s)$ 、 λ_s 、 κ_s) と降伏曲面を (e 、 p' 、 s) 空間で示すと図 3.3.3-6 のようになる。

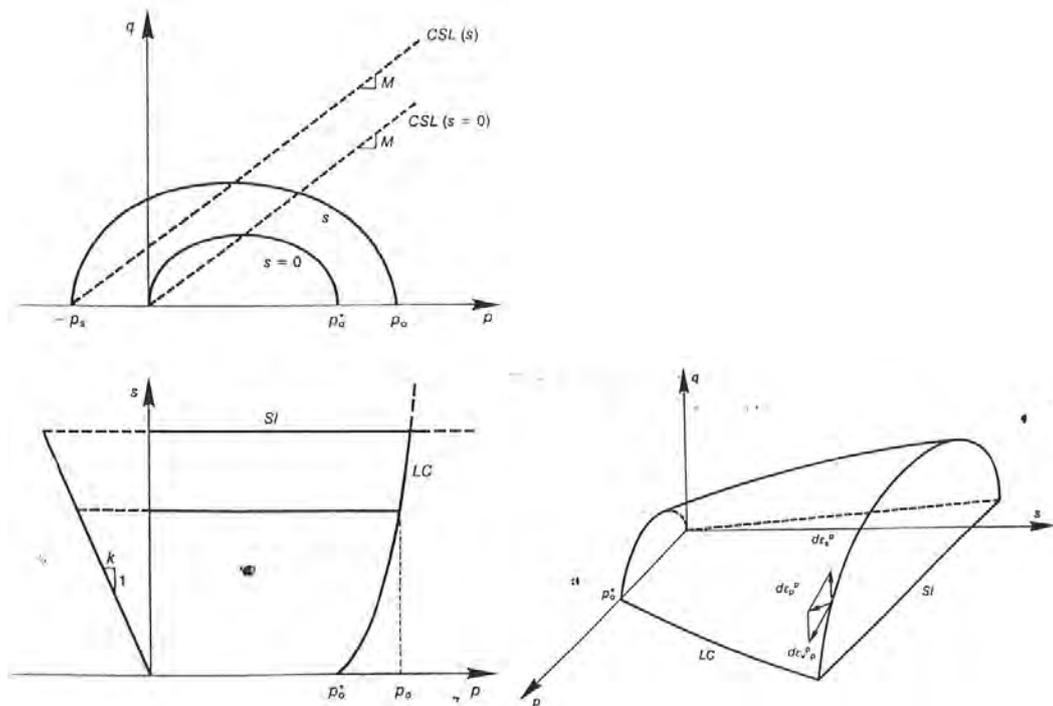


図 3.3.3-5 (p, q) 面、(p, s) 面および (p, q, s) 面での降伏曲面

有効応力およびサクションの変化による体積ひずみ挙動を規定する線 ($\lambda(s)$, $\kappa(s)$, λ_s , κ_s) と降伏曲面を (e , p' , s) 空間で示すと図 3.3.3-6 のようになる。

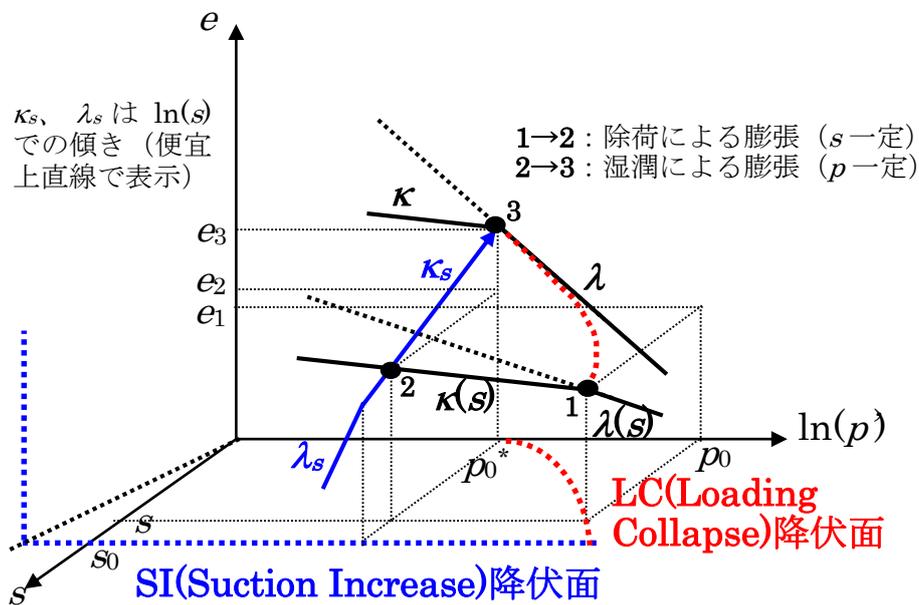


図 3.3.3-6 有効応力およびサクションの変化による体積ひずみ挙動と降伏曲面

(3) 試験系のモデル化

解析モデルは $\phi 60\text{mm} \times h25\text{mm}$ の軸対象モデルとする。要素の解像度は約 2.5mm 四方とし、要素数 195、節点数は 224 となった。節点数は 224 となった。検討に用いた解析モデルを図 3.3.3-7 に示す。

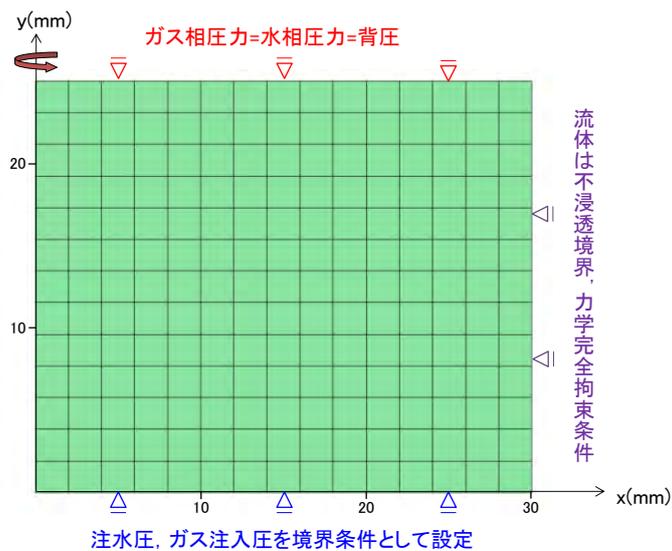


図 3.3.3-7 力学連成 2 相流解析における解析モデル

(4) 解析条件

1) 流体物性

検証計算で取扱う流体（水、空気、窒素）の物性を示す。なお、再冠水フェーズでは空気を、ガス注入フェーズでは窒素を取扱う。ここでは等温状態 $T = 25(^{\circ}\text{C})$ を仮定し、流体物性を圧力によってのみ変化させる。

標準大気圧 $101,325(\text{Pa})$ での水の密度 ρ_0 を $997.04(\text{kg}/\text{m}^3)$ とし、以下の式により水圧の関数として取扱う。

$$\rho = \rho_0(1 + C_f(P_w - P_0)) \quad (3.3-40)$$

ここに、 ρ 、 C_f 、 P_w はそれぞれ、水の密度(kg/m^3)、圧縮率($1/\text{Pa}$)、水圧(Pa)を示し、圧縮率は $0.45 \times 10^{-9}(1/\text{Pa})$ を設定した。粘性係数は $0.890 \times 10^{-3}(\text{Pa s})$ で一定と仮定した。

標準大気圧での空気及び窒素の密度をそれぞれ、 $1.184 \times 10^{-3}(\text{kg}/\text{m}^3)$ 、 $1.145 \times 10^{-3}(\text{kg}/\text{m}^3)$ 、粘性係数を $18.2 \times 10^{-6}(\text{Pa s})$ 、 $17.8 \times 10^{-6}(\text{Pa s})$ とし、密度はガス圧に比例するものとし、粘性係数は変化しないものとした。

2) 2相流物性

水理物性のうち、絶対浸透率、間隙率、固相圧縮率の初期設定値は以下のように設定した。

- 絶対浸透率（GETFLOWS による検討からの同定値、水相、ガス相とも同じ）
 - 再冠水フェーズ
 - No.1 : $5.153 \times 10^{-20}(\text{m}^2)$
 - No.2 : $4.537 \times 10^{-20}(\text{m}^2)$
 - No.3 : $5.136 \times 10^{-20}(\text{m}^2)$
 - ガス注入フェーズ
 - No.1 : $2.862 \times 10^{-20}(\text{m}^2)$
 - No.2 : $3.250 \times 10^{-20}(\text{m}^2)$
 - No.3 : $2.675 \times 10^{-20}(\text{m}^2)$
- 間隙率 : $0.4963(-)$ （土粒子密度と乾燥密度より算出、No.1~No.3 共通）
- 固相圧縮率 : $1.0 \times 10^{-9}(\text{Pa}^{-1})$ （推定値、No.1~No.3 共通）

水・空気の相互作用を表現するための相対浸透率、毛細管圧力に関しては、再冠水フェーズでは表 3.3.2-2、図 3.3.2-6 に示したものを、ガス注入フェーズでは表 3.3.2-6、図 3.3.2-10 に示したものを初期設定値として用いる。

3) 力学物性

力学物性については、平成 24 年度の検討[1]を基に設定する。なお、膨潤に係る係数 κ_{sp} 、 α_{sp} については、再冠水フェーズから得られた膨潤圧 P_s を $0.44(\text{MPa})$ と推定し、山本、小峯の方法[10]によって小峯の膨潤評価式から評価される膨潤圧を評価できるモデルパラメータとして設定した。

- 初期乾燥密度 ρ_d : $1.36(\text{MPa})$
- 真密度 ρ_s : $2.70(\text{MPa})$
- 初期間隙比 e : $0.985(-)$

- ポアソン比 ν : 0.44(-)
- 膨潤指数 (飽和時) κ_0 : 0.176(-)
- 圧縮指数 (飽和時) λ_0 : 0.252(-)
- サクシオン依存膨潤指数パラメータ α : 0.0(-)
- サクシオン依存圧縮指数パラメータ β : 0.0(1/MPa)
- 参照有効応力時の湿潤膨潤指数 (飽和時) κ_{s0} : 0.5722(-)
- 有効応力依存湿潤膨潤指数パラメータ α_{sp} : -0.678(-)
- 限界応力比 M : 0.486(-)
- 引張強度 P_{s0} : 0.0(MPa)
- 圧密先行応力 (飽和時) P_0^* : 0.67(MPa)

4) 初期、境界条件

再冠水フェーズにおける供試体の初期ガス相圧力は背圧 (0.1MPa) と同じとし、水相圧力は水飽和度が 90%となる値を与える。モデル底面は注水圧を与えた定圧境界、モデル上面は背圧 (0.1MPa) を与えた定圧境界とした。モデル側面は流体に関しては不浸透境界、力学に関しては完全拘束条件とした。

ガス注入フェーズにおける供試体の初期ガス相圧力及び水相圧力は背圧 (0.2MPa) と同じとする (初期水飽和度は 100%)。モデル底面は注入ガス圧を与えた定圧境界、モデル上面は背圧 (0.2MPa) を与えた定圧境界とした。モデル側面は流体に関しては不浸透境界、力学に関しては完全拘束条件とした。

(5) 解析結果

「(4)解析条件」で示した解析条件によって再冠水フェーズ及びガス注入フェーズの再現解析を行った。その結果、再冠水フェーズの累積注水量や全応力、ガス注入フェーズの累積排水量、全応力は良好に再現することができたが、ガス注入フェーズ後の間隙率分布が実際と大きく異なるものとなった (図 3.3.3-8)。この結果によれば、供試体下部で間隙率が初期よりも大きく変化する傾向が、実測では見られておらず、圧力上昇や水分状態の違いによる媒体の変形しやすさが実際とは異なることを示している。

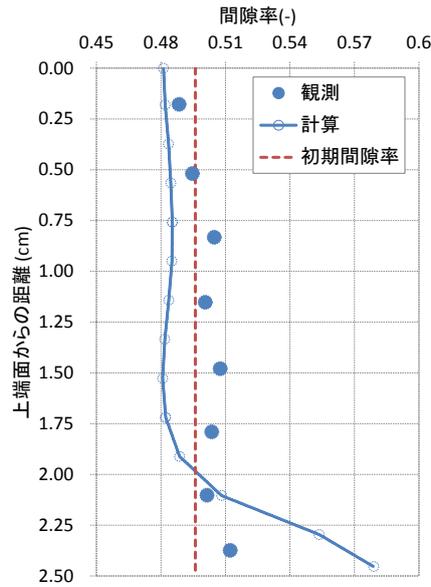


図 3.3.3-8 初期設定値によるガス注入フェーズ後の間隙率分布 (No.1)

そこで、引張強度 P_{s0} を0.0(MPa)から5.0(MPa)に、最低剛性 P_{s0} を1.0(MPa)から5.0(MPa)に変更することで、変形が抑制される状態を想定した検討を実施した。再現された再冠水フェーズの累積注水量と排水量及び全応力の解析結果を図 3.3.3-9、図 3.3.3-10 に示す。実測された累積注水量、排水量、全応力を良好に再現することができている。さらに、ガス注入フェーズにおける累積排水量と全応力の比較結果を図 3.3.3-11、図 3.3.3-12 に示す。ガス注入フェーズにおいても、実測された累積注水量と全応力を概ね良好に再現することができおり、No.2、No.3 に関しては、試験期間の途中から排水がほぼ停止するという挙動を解析でも表現できている。水飽和度の深度プロファイルの再現結果を図 3.3.3-13 に示す。(2)3) でも述べたように信頼性がやや低いデータであることから参考データとして示した。また、再冠水フェーズ後及びガス注入フェーズ後における間隙率の深度プロファイルを図 3.3.3-14 に示す。ガス注入フェーズ後の間隙率は概ね観測データと整合しており、初期設定値による検討から力学変形が抑制され、明らかな改善が認められた。ガス注入フェーズ後の水飽和度と間隙率の分布を図 3.3.3-15 に示した。

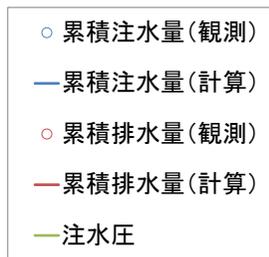
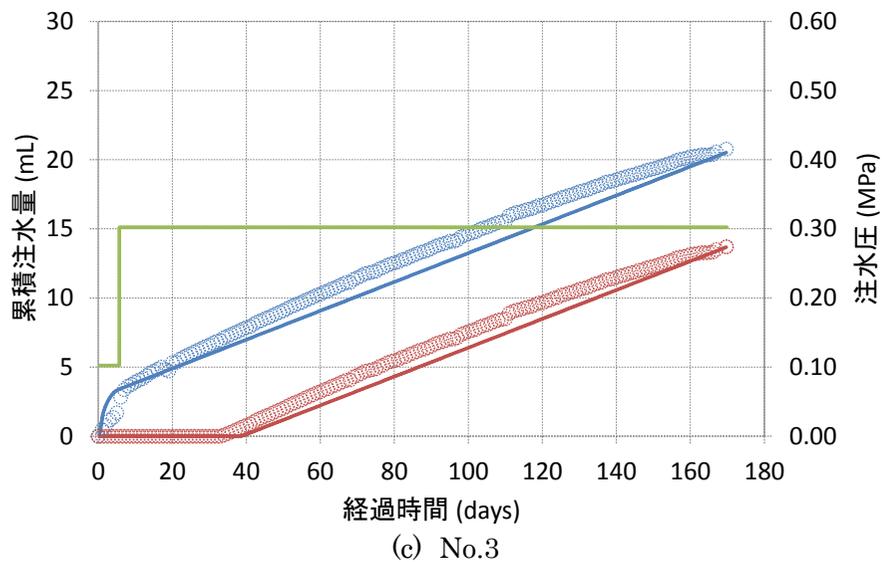
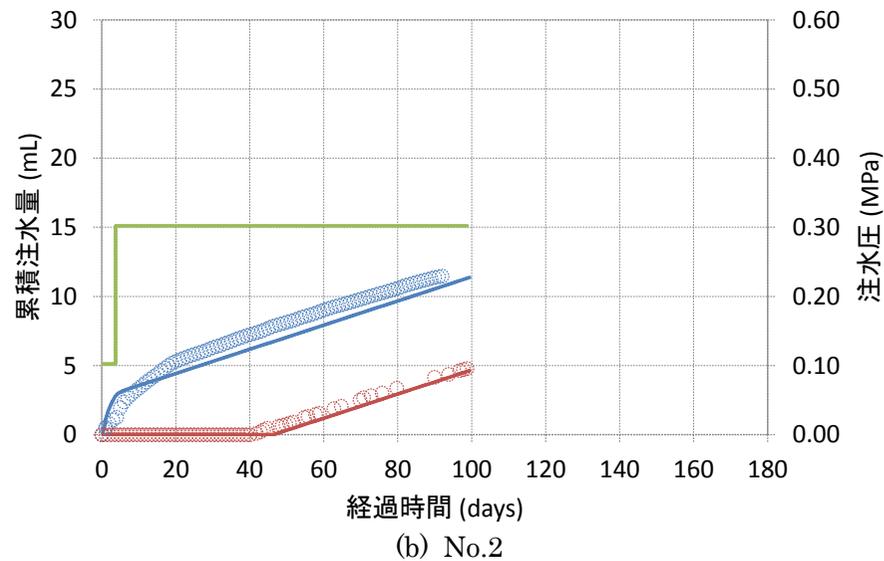
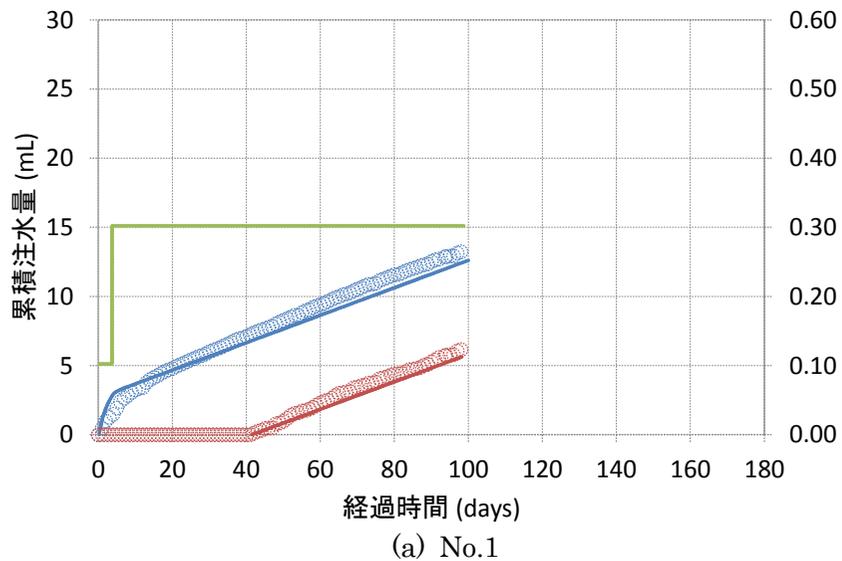
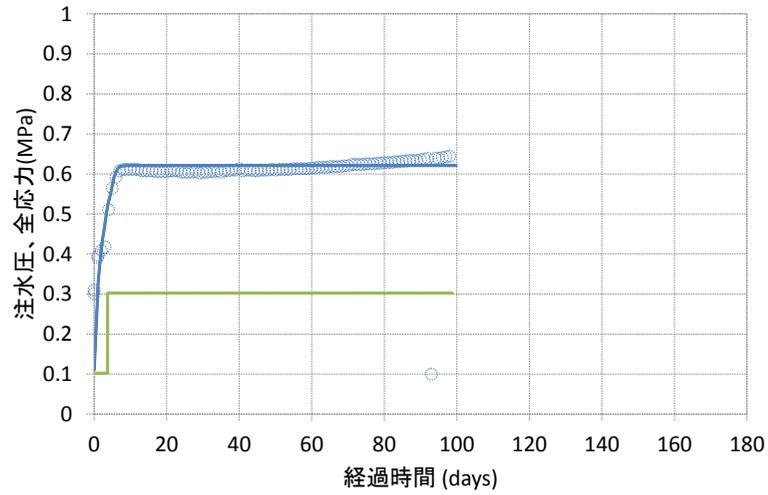
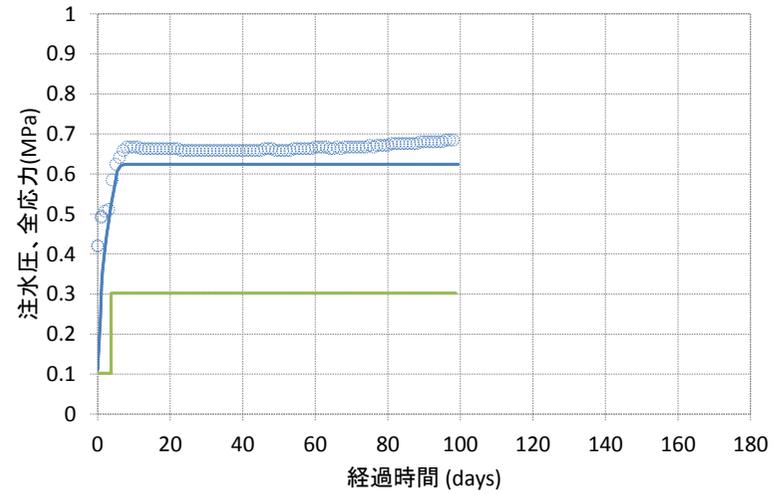


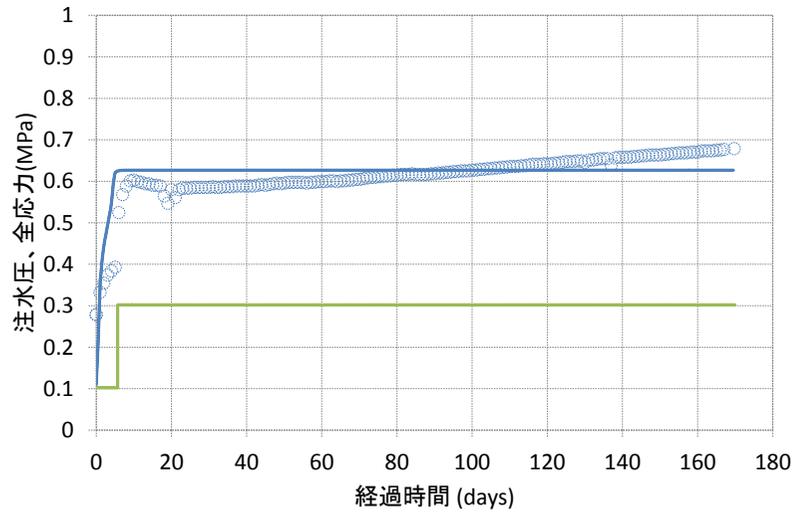
図 3.3.3-9 累積注水量の再現結果 (再冠水フェーズ)



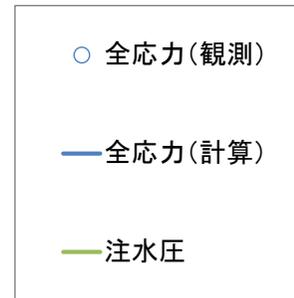
(a) No.1



(b) No.2

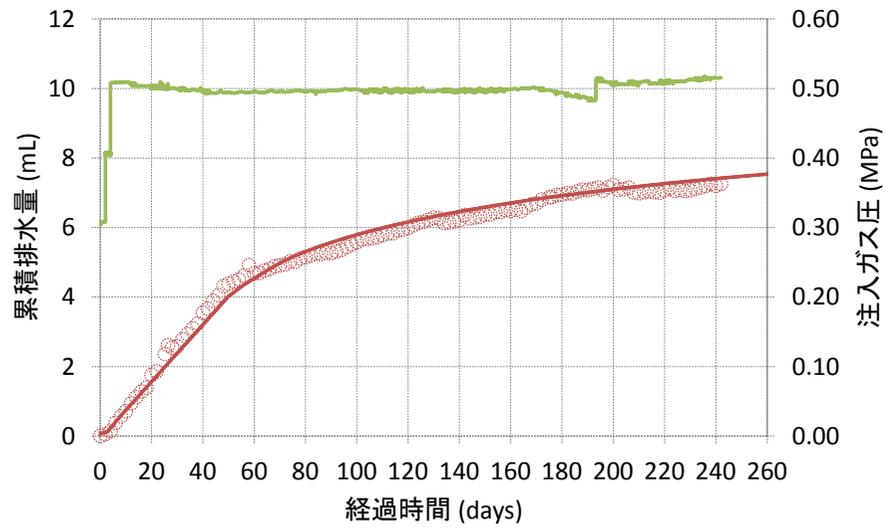


(c) No.3

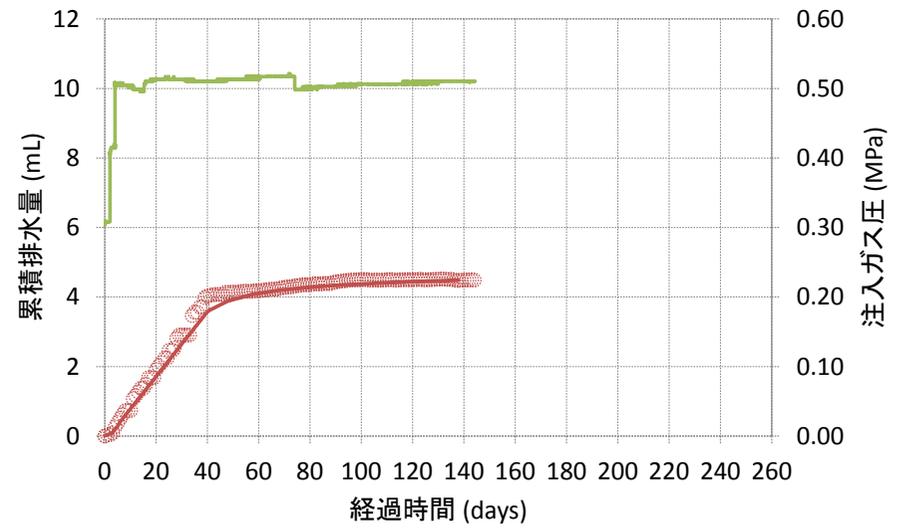


2.00E+01	0.50
1.80E+01	0.45
1.60E+01	0.40

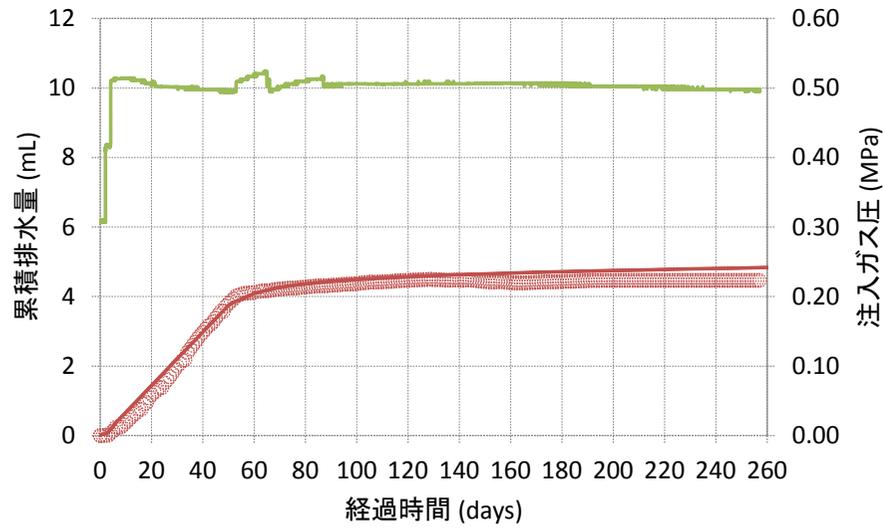
図 3.3.3-10 全応力の再現結果 (再冠水フェーズ)



(a) No.1



(b) No.2



(c) No.3

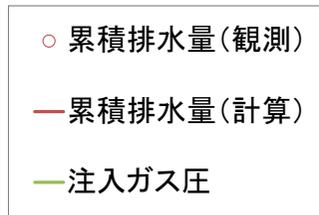
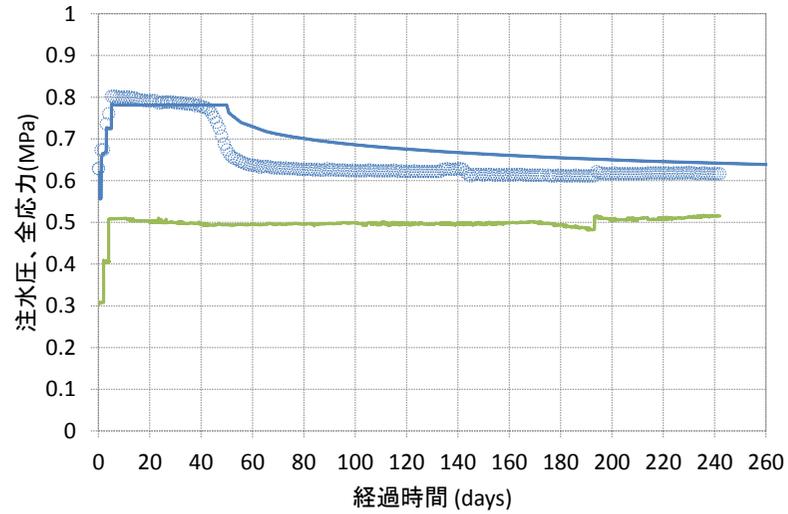
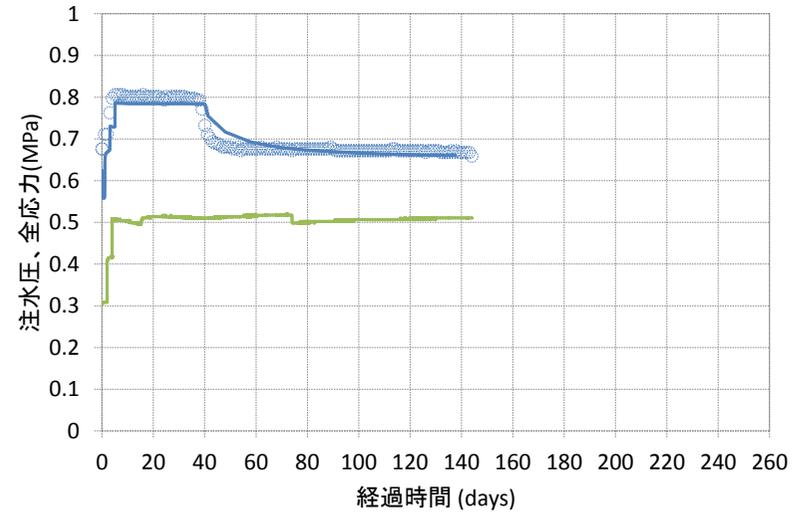


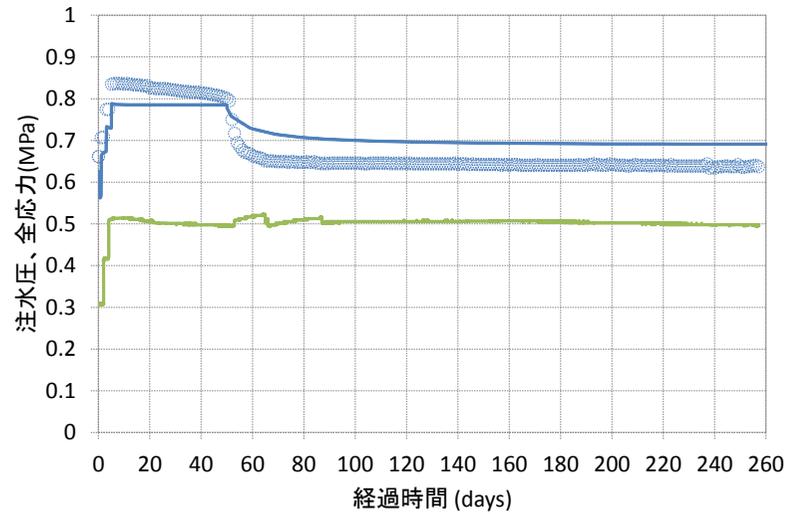
図 3.3.3-11 累積排水量の再現結果 (ガス注入フェーズ)



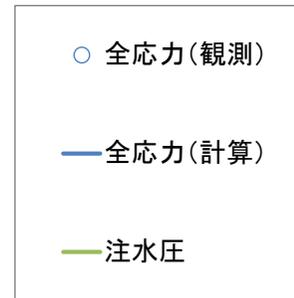
(a) No.1



(b) No.2

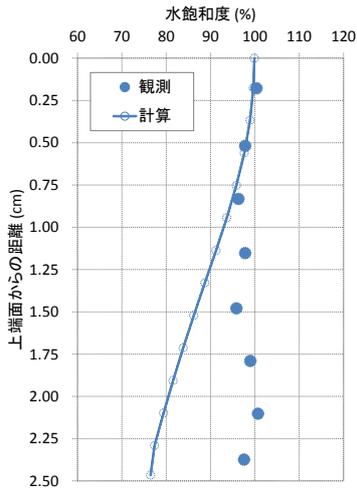


(c) No.3

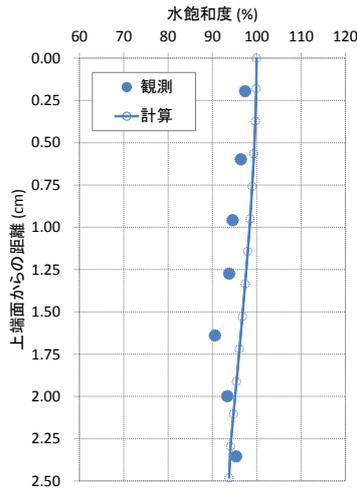


2.00E+01	0.50
1.80E+01	0.45
1.60E+01	0.40

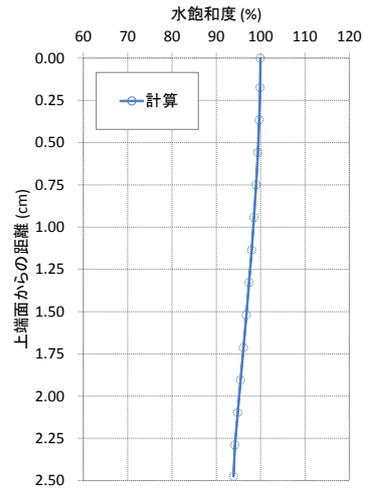
図 3.3.3-12 全応力の再現結果 (ガス注入フェーズ)



(a) No.1

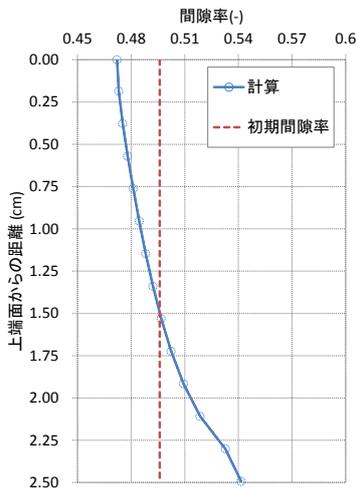


(b) No.2

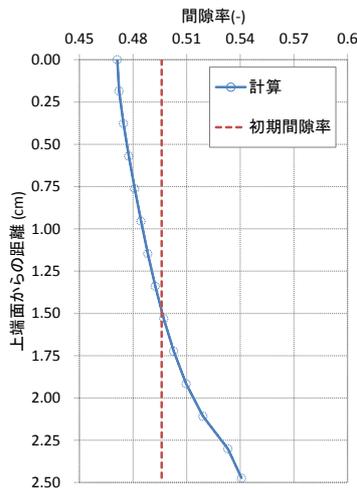


(c) No.3

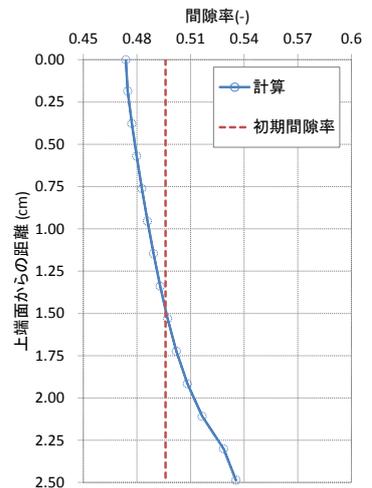
図 3.3.3-13 水飽和度の再現結果 (ガス注入フェーズ)



(a) No.1



(b) No.2



(c) No.3

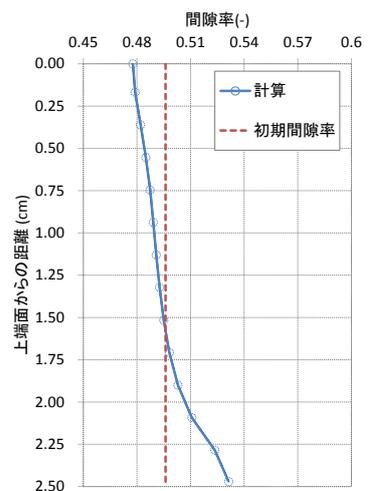
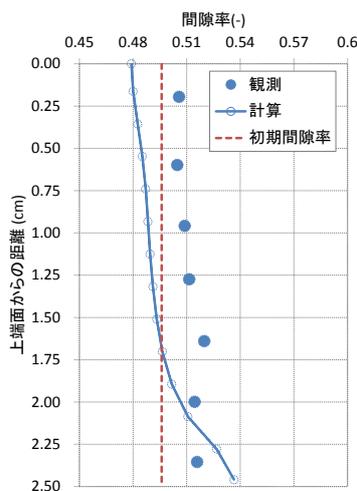
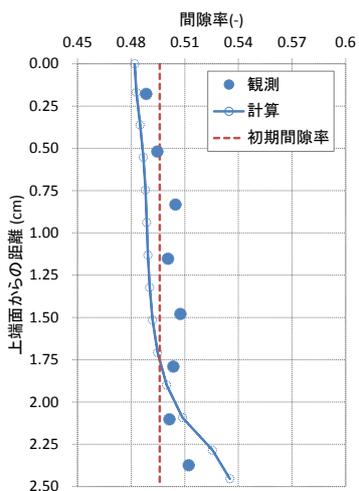


図 3.3.3-14 間隙率の再現結果 (上段：再冠水フェーズ、下段：ガス注入フェーズ)

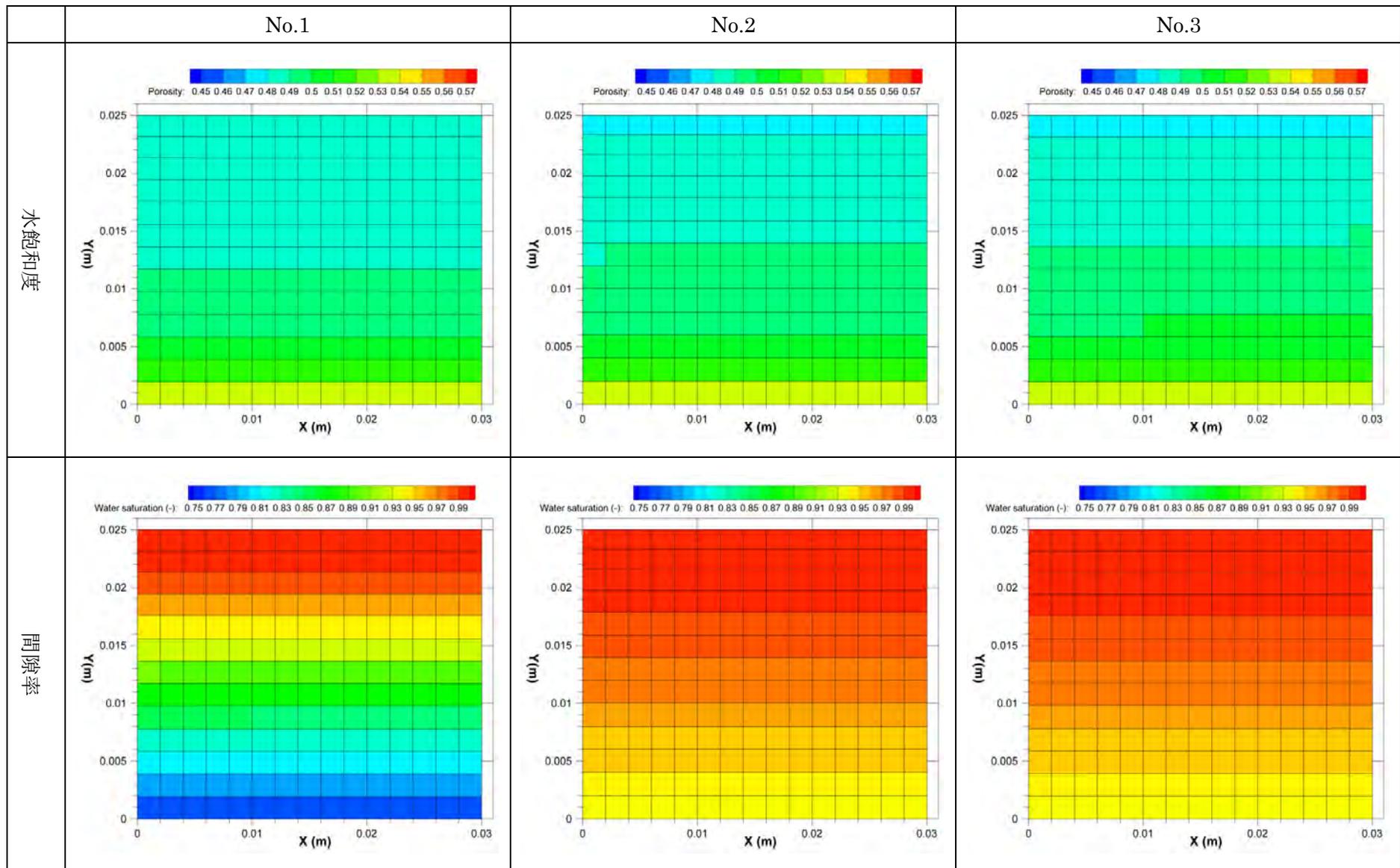


図 3.3.3-15 ガス注入フェーズ後の水飽和度と間隙率の分布

3.4 確証データの登録およびデータの追加収集・整備

ここでは、3.3 で実施した「最新のガス移行試験データによる確証計算」で同定されたパラメータの追加登録を実施する。

現在のデータライブラリの基本構成を図 3.3.3-1 に示す。データライブラリは 6 つのモジュールとマニュアルで構成されている。データライブラリを用いた実行処理の流れを図 3.3.3-2 に示す。また、各モジュールの要求機能を表 3.3.3-1 に、開発環境を表 3.3.3-2 に示した。

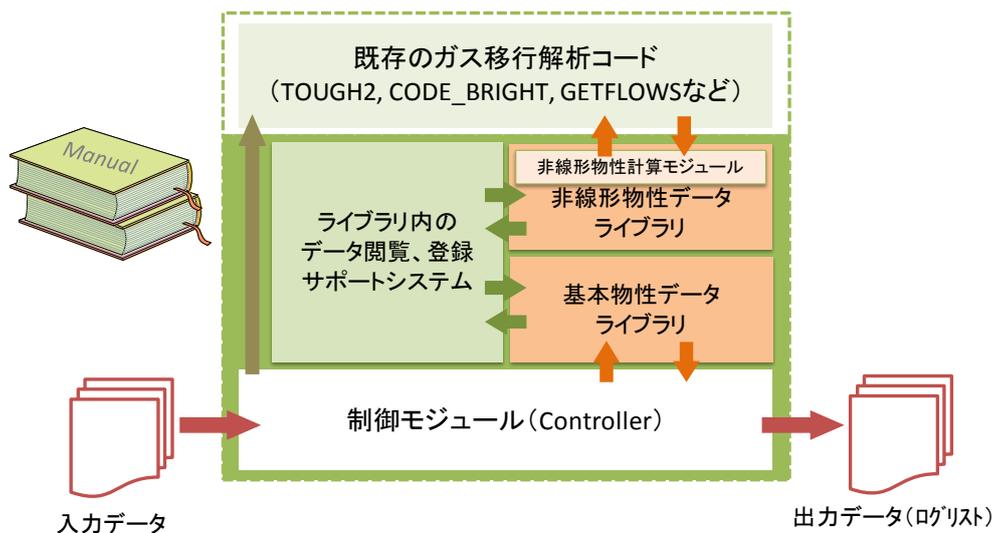


図 3.3.3-1 データライブラリの基本構成

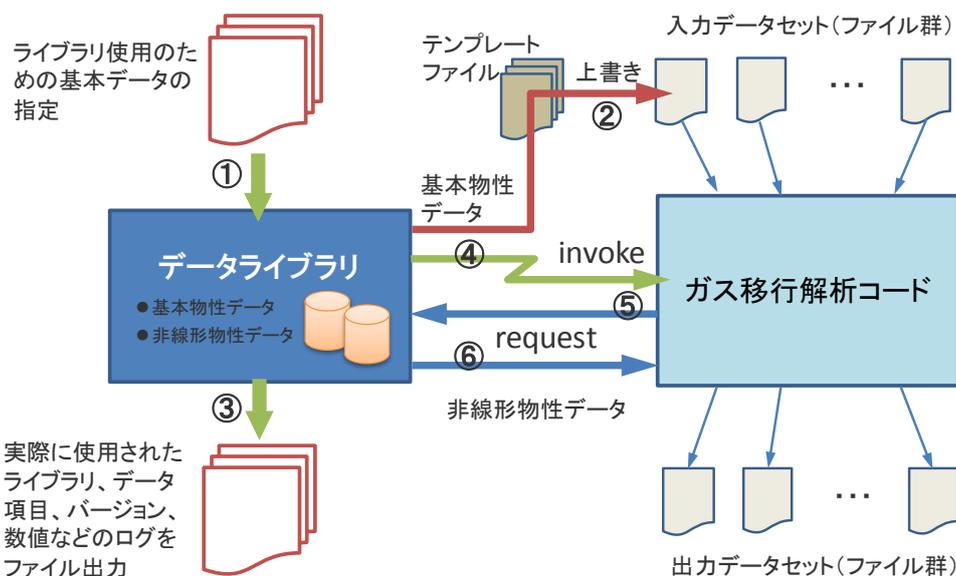


図 3.3.3-2 データライブラリを用いた実行処理の流れ

表 3.3.3-1 各モジュールの要求機能

構成要素		機能	備考
制御モジュール		① 入力読み込み ② ファイル内文字列検索 ③ テンプレートファイルの上書き・更新 ④ 解析コードの実行・監視 ⑤ ログ出力 ⑥ ばらつきを考慮したパラメータ生成	
データ ライブラリ	基本物性 データ ライブラリ	① 利用者が編集可能 ② 収録データは絶対浸透率（水、ガス）、間隙率、 圧縮率、熱伝導率、比熱、流体形態変化閾値（2 つ）、土粒子密度、乾燥密度、初期間隙比、ポア ソン比、膨潤指数、圧縮指数、限界応力比、先 行圧密応力	構造化された テキストファ イル
	非線形物性 データ ライブラリ	① 利用者が編集可能 ② 収録データは毛細管圧力、相対浸透率（水、ガ ス）、流動形態変化構成モデル、膨潤・圧縮指数	構造化された テキストファ イル
非線形物性計算 モジュール		① ファイル内文字列検索 ② 状態量に応じた非線形物性の計算 ③ 構成モデル内部の評価諸量出力	
解析コード		① ライブラリのリンク ② 関数の呼び出し、戻り値取得	既存コードに 改良が必要
データ格納 サポートシステム		① 登録データの収録状況の確認 ② データ操作（登録、追加、削除、修正） ③ ライブラリの更新、管理 ④ 使用方法、パラメータ、構成モデルの解説閲覧 ⑤ 誤操作防止機能	

表 3.3.3-2 開発環境

構成要素	プログラム言語	コンパイラ	OS
制御モジュール	Perl 5.8 Perl 5.10		Microsoft Windows 7, LINUX Fedora Core 6
データライブラリ	テキスト形式		
非線形物性計算モジ ュール	Fortran (77/90/95/2003)	Intel Fortran Compiler, GNU gFortran	
データ格納サポー トシステム	Visual Basic	Microsoft visual Basic 2010	

3.3 で実施した確証計算では、再冠水フェーズ及びガス注入フェーズの双方で、2 相流パラメータの同定を行っており、得られた 2 相流パラメータをデータライブラリに追加する。具体的には、基本物性データライブラリと非線形物性データライブラリ本体への登録を行う。表 3.3.3-3 に基本物性データライブラリへ登録する同定パラメータを、表 3.3.3-5～表 3.3.3-5 に非線形物性データライブラリへ登録する同定パラメータを示した。相対浸透率や毛細管圧力を表現する構成モデルに関しては、表 3.3.2-1、表 3.3.2-3 を参照されたい。

また登録した確証データを、マニュアル内の登録データ一覧、及び、マニュアル付録の収録パラメータの同定経緯に追加し、マニュアルの改定を行った。

表 3.3.3-3 同定された基本物性一覧

ケース	水相浸透率 (m^2)	ガス相浸透率 (m^2)	間隙率 (-)	固相圧縮率 (1/Pa)	流動形態変化 の閾値(MPa)
No.1 (再冠水)	5.153×10^{-20}	5.153×10^{-20}	0.4963	1.0×10^{-9}	—
No.2 (再冠水)	4.537×10^{-20}	4.537×10^{-20}	0.4963	1.0×10^{-9}	—
No.3 (再冠水)	5.136×10^{-20}	5.136×10^{-20}	0.4963	1.0×10^{-9}	—
No.1 (ガス注入)	2.862×10^{-20}	2.862×10^{-20}	0.4963	1.0×10^{-9}	—
No.2 (ガス注入)	3.250×10^{-20}	3.250×10^{-20}	0.4963	1.0×10^{-9}	—
No.3 (ガス注入)	2.675×10^{-20}	2.675×10^{-20}	0.4963	1.0×10^{-9}	—

表 3.3.3-4 同定された非線形物性一覧 (毛細管圧力)

ケース	モデル	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$P_0(MPa)$	$n(-)$
No.1 (再冠水)	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	1.00	1.88
No.2 (再冠水)	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	1.39	2.00
No.3 (再冠水)	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	2.10	1.56
No.1 (ガス注入)	<i>van Genuchten</i>	0.36	0.0	0.20	2.29
No.2 (ガス注入)	<i>van Genuchten</i>	0.387	0.0	0.56	1.82
No.3 (ガス注入)	<i>van Genuchten</i>	0.387	0.0	0.56	1.82

表 3.3.3-5 同定された非線形物性一覧 (相対浸透率)

ケース		モデル	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n(-)$
No.1 (再冠水)	水	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	1.77
	ガス	<i>Grant</i>	—	—	—
No.2 (再冠水)	水	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	1.72
	ガス	<i>Grant</i>	—	—	—
No.3 (再冠水)	水	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	1.81
	ガス	<i>Grant</i>	—	—	—
No.1 (ガス注入)	水	<i>van Genuchten</i>	0.36	0.0	2.01
	ガス	<i>van Genuchten</i>	0.36	0.0	2.95
No.2 (ガス注入)	水	<i>van Genuchten</i>	0.387	0.0	1.45
	ガス	<i>van Genuchten</i>	0.387	0.0	13.7
No.3 (ガス注入)	水	<i>van Genuchten</i>	0.387	0.0	1.45
	ガス	<i>van Genuchten</i>	0.387	0.0	13.7

3.5 TRU 廃棄物処分システムを対象としたガス移行解析における不確実性を考慮したガス移行挙動の評価

3.5.1 これまでに得られた成果のまとめと課題

TRU 廃棄物処分システムを対象としたガス移行解析における不確実性に着目し、これまでに本研究で得られた成果と、国内外で得られている成果との対比をまとめ、現状の課題を抽出する。

不確実性は、「データ」「モデル」「シナリオ」に分類される。「シナリオ」に関しては、本研究と並行して進められている「ガス移行シナリオの拡張に関する検討」の中でまとめられているため、ここでは、「データ」「モデル」に焦点を当てる。表 3.5.1-1 に「データ」に関する不確実性についての最新知見の整理をまとめた。対象とする材料を、粘土系材料、セメント系材料、岩盤、材料界面に分類した。粘土系材料は、ベントナイト（クニゲル VI）及びベントナイト・砂混合材料（クニゲル VI、ケイ砂混合）とした。セメント系材料はモルタル、岩盤は堆積岩系、結晶質岩系岩盤とした。この表によると、粘土系材料（ベントナイト、ベントナイト・砂混合材料）に関しては、データが充実してきていることが分かる。国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）の成果と合わせると、絶対浸透率に関しては十分なデータが蓄積されており、2 相流パラメータ（毛細管圧力、相対浸透率）においても、その適用性が検証されており、不確実性の幅が捉えらえるようになってきている。セメント系材料に関しては、データの蓄積に着手した段階であり、引き続き取得データを増やしていく必要があると考えられる。岩盤及び材料界面については利用可能なデータがほとんど無く、今後、データの取得を行っていく必要がある。

表 3.5.1-2 に「モデル」に関する不確実性についての最新知見の整理を示す。考慮するプロセスを TH、THM、THC、THMC 連成事象に分類し、本研究やその他で実施されている検討事例を、対象フィールドや材料、次元等の観点でまとめたものである。これより、TH 連成解析による検討事例は本研究、その他を含め充実しており、3 次元解析も既に実施されている。THM 連成解析、THC 連成解析による検討も実施しているが、本研究では事例が少なく、各種構成モデルの検証も含めて適用事例を充実させていく必要があると考えられる。現段階では、本研究の中でファーストフィールドを対象とした検討事例が無く、将来の安全評価のための解析検討を見据えた場合に、より広域を対象とした解析を実施するための準備を進めていく必要がある。

表 3.5.1-1 データに関する最新知見の整理

区分		本研究における取得データ	国内外のその他の研究における取得データ	
粘土系材料	種別	<ul style="list-style-type: none"> ● ベントナイト (クニゲル VI) ● ベントナイト・砂混合材料 (クニゲル VI、ケイ砂混合) 	<ul style="list-style-type: none"> ● ベントナイト (クニゲル VI) ● ベントナイト・砂混合材料 (クニゲル VI、ケイ砂混合) 	
	パラメータ	絶対浸透率	12 件：逆解析より取得 (浸潤過程・排水過程含む) ▶ $2.7 \times 10^{-20} \sim 6.9 \times 10^{-20}(\text{m}^2)$	1 件：第 2 次 TRU レポート ▶ 水相： $8.2 \times 10^{-20}(\text{m}^2)$ 、ガス相： $1.0 \times 10^{-19}(\text{m}^2)$ 58 件：緩衝材基本特性データベース (JAEA) ▶ 水相： $1.5 \times 10^{-18} \sim 7.2 \times 10^{-18}(\text{m}^2)$ 15 件：緩衝材基本特性データベース (JAEA) ▶ ガス相： $5.0 \times 10^{-15} \sim 1.5 \times 10^{-13}(\text{m}^2)$
		間隙率	土粒子密度と乾燥密度より算出：0.497(-)	1 件：第 2 次 TRU レポート ▶ 0.4
		固相圧縮率	—	1 件：第 2 次 TRU レポート ▶ $2.8 \times 10^{-8}(1/\text{Pa})$
		毛細管圧力、相対浸透率	12 件：逆解析より取得 (浸潤過程・排水過程含む) 4 件：室内試験より取得 (浸潤過程・排水過程含む) ※毛細管圧力のみ	1 件：第 2 次 TRU レポート
		圧力依存透過特性モデルパラメータ	5 件：逆解析より取得	—
セメント系材料	種別	● モルタル	● モルタル	
	パラメータ	絶対浸透率	4 件：室内試験及び逆解析より取得 ▶ 水相： $1.23 \times 10^{-18} \sim 2.22 \times 10^{-18}(\text{m}^2)$ 、ガス相： $1.51 \times 10^{-18} \sim 4.27 \times 10^{-15}(\text{m}^2)$	1 件：第 2 次 TRU レポート ▶ 水相： $4.1 \times 10^{-18}(\text{m}^2)$ 、ガス相： $3.0 \times 10^{-15}(\text{m}^2)$
		間隙率	2 件：室内試験より取得 ▶ 0.313~0.323	1 件：第 2 次 TRU レポート ▶ 0.13
		固相圧縮率	—	1 件：第 2 次 TRU レポート ▶ $6.08 \times 10^{-11}(1/\text{Pa})$
毛細管圧力、相対浸透率	4 件：逆解析より取得	1 件：第 2 次 TRU レポート		
岩盤	種別	—	● 堆積岩系岩盤、結晶質岩系岩盤	
	パラメータ	絶対浸透率	—	2 件：第 2 次 TRU レポート ▶ 水相： $8.20 \times 10^{-17}(\text{m}^2)$ 、ガス相： $7.80 \times 10^{-16} \sim 3.30 \times 10^{-15}(\text{m}^2)$
		間隙率	—	2 件：第 2 次 TRU レポート ▶ 0.02~0.3
		固相圧縮率	—	4 件：第 2 次 TRU レポート ▶ $4.05 \times 10^{-11} \sim 4.80 \times 10^{-10}(1/\text{Pa})$
		毛細管圧力、相対浸透率	—	2 件：第 2 次 TRU レポート
		相対浸透率	—	2 件：第 2 次 TRU レポート
材料	種別	—	—	
界面	パラメータ	—	—	

表 3.5.1-2 モデルに関する最新知見の整理

考慮するプロセス	本研究		国内外におけるその他の研究事例	
	対象フィールド、材料、次元等	解析コード	対象フィールド、材料、次元等	解析コード
TH	<ul style="list-style-type: none"> 室内試験系におけるベントナイト中のガス移行解析 1D モデルを適用 	GETFLOWS	<ul style="list-style-type: none"> ニアフィールドにおける核種移行解析 PAMINA プロジェクトによる 1D、2D、3D モデルによるベンチマークテスト 	GoldSim PORFLOWS COMSOL Cast3m Melodie
	<ul style="list-style-type: none"> ニアフィールドにおけるガス移行解析 温度変化に伴う水蒸気生成・凝縮を考慮 2D 断面モデル、3D モデルを適用 	GETFLOWS	<ul style="list-style-type: none"> ゴアレーベン岩塩ドーム上の地層（ドイツ）を対象としたファーフィールド解析 2D モデルを適用 	d3f
			<ul style="list-style-type: none"> フィンランドオンカロ処分場を対象としたニアフィールド解析 3D モデルを適用 	FEFTRA
THM	<ul style="list-style-type: none"> 室内試験系におけるベントナイト中の力学連成の影響を考慮したガス移行解析 1D モデルを適用 	CODE_BRIGHT	<ul style="list-style-type: none"> 室内試験系及びニアフィールドにおける力学連成二相流解析 2D 及び 3D モデルを適用 	GeoSys/RockFlow
	<ul style="list-style-type: none"> 室内試験系及びニアフィールドにおけるガス移行解析 ベントナイトの膨潤収縮に伴う間隙構造の変化を、透過性や 2 相流パラメータに関連付けたモデル 1D 及び 2D モデルを適用 	GETFLOWS	<ul style="list-style-type: none"> ニアフィールドにおける力学連成二相流解析 オパリナス粘土層における施設周辺と母岩の相互作用を検証 3D モデルを適用 	TOUGH2 FLAC3D
THC	<ul style="list-style-type: none"> ニアフィールドにおけるガス移行解析 ベントナイトの Ca 化による水理パラメータの変化を考慮 2D 断面モデルを適用 	GETFLOWS	<ul style="list-style-type: none"> ニアフィールドにおけるガス移行解析 腐食ガス生成時の H2O 消費を考慮 3D モデルを適用 	TOUGHREACT
			<ul style="list-style-type: none"> ゴアレーベン岩塩層を対象としたファーフィールド解析 岩塩層中の化学反応を考慮 3D モデルを適用 	TOUGHREACT
	<ul style="list-style-type: none"> ニアフィールドにおけるガス移行解析 鉄の腐食に伴う水素ガス発生を考慮 2D 断面モデルを適用 	TOUGHREACT	<ul style="list-style-type: none"> ニアフィールドにおけるガス移行解析 金属腐食による水素ガス発生を考慮 有機物分解による水素・二酸化炭素・メタンガス発生を考慮 (SMOGG、MAGGAS) 放射線分解による水素ガス発生を考慮 (SMOGG、MAGGAS) 	T2GGM SMOGG MAGGAS
THMC	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ニアフィールドにおけるガス移行解析 ベントナイト中の塩類析出による水理パラメータの変化を考慮した解析 3D モデルを適用 	THAMES Dtransu-3DEL phreeqc 連成コード

3.5.2 人工バリア内の地下水組成に着目したガス発生モデリング

3.5.1 でまとめたように、本研究では THM 連成解析、THC 連成解析による検討を実施しているが、事例が少なく、各種構成モデルの検証も含めて適用事例を充実させていく必要があると考えられる。ここでは、THC 連成解析の適用事例の充実を目的とし、地球化学解析と水・ガス 2 相流解析および物質移行解析を組み合わせた解析コード TOUGHREACT を用いて、鉄の金属腐食に伴うガス発生・移行のモデリング検討を実施する。

これまで、平成 23 年度、平成 24 年度の検討において、人工バリア材料内が完全に地下水で飽和した嫌氣的雰囲気の状態を想定し、希薄溶液系を対象とし、鉄の金属腐食に伴うガス発生・移行のモデリング検討を行った。平成 26 年度には、人工バリア材料内の不飽和状態(酸化的雰囲気)を想定し、周囲からの再冠水と、廃棄体からの熱発生及び水素ガス発生が同時に起こる系を対象とし、廃棄体周辺での流体ダイナミクス(周囲からの水の移流、廃棄体からの熱発生に伴う温度変化、水蒸気発生・拡散・凝縮、ガス発生等)の可視化に焦点を当てた検討を実施した。

本研究と並行して進められている「人工バリアの長期挙動の評価」の成果において、周囲からの再冠水に伴い、セメント系材料からセメント成分の溶出が起り、人工バリア内は高 pH 環境(12.5 程度)となることが示唆されている。そこで本検討では、人工バリア内の間隙水が高 pH である状態を想定したガス発生モデリング検討を実施する。なお、初期状態は人工バリア材料内完全に地下水で飽和した嫌氣的雰囲気の状態とする。

(1) 解析コード

本検討では TOUGHREACT を使用する。TOUGHREACT は TOUGH2 をベースに開発された化学反応を考慮できる THC 連成解析コードである。温度、圧力、イオン強度の適用範囲は以下に示すとおりである。

- ・ 温度：0℃～300℃ (但し、熱力学データベースに依存)
- ・ 圧力：1bar～数 100bar (0.1MPa～数 10MPa)
- ・ イオン強度：塩水で最大 6mol/kg H₂O

TOUGHREACT は熱・流体流動計算と物質移行計算、地球科学計算から成る。それぞれの計算における支配方程式等を以下に示した。

(2) 熱・流体流動計算

本検討で対象とする流体系は、非等温状態の水、水素からなる 2 相流体系を基本とする。TOUGHREACT の熱・流体流動計算では TOUGH2 が用いられており、ここでは TOUGH2 EOS5 モジュールを使用する。本検討で考慮する流体、熱移動現象を表 3.5.2-1 に示した。なお、再冠水過程を取扱う場合、本来であれば初期不飽和状態の人工バリア内に水と空気が存在し、時間の経過とともに金属腐食ガスである水素が発生するが、現時点では空気と水素の双方を取扱うことができないため、初期に存在するガスは水素として検討を進める。

熱・流体流動計算 (TOUGH2 EOS5 モジュール) では、流体相間の相間物質移動(気相中への水蒸気生成や液相への水素ガス溶解)は温度、圧力に応じた熱力学的平衡状態(瞬時平衡分配)を前提とする。同様に、液相、固相(R)の間についても平衡熱交換を前提とする。このとき、非等温状態における水、水素 2 相 2 成分流体系の質量保存式は、流体相中 p の各成分 κ に対する質量収

支式に媒体（流体相+固相）のエネルギー保存式を加えた(3.5-1)、(3.5-2)式により記述される。以下の式より求められる離散格子あたりの独立変数は P_g, S_l および T の3変数である。気相中の水蒸気濃度や水相中の溶存水素濃度は、圧力と温度から求められる従属変数として扱われる。

表 3.5.2-1 本検討で取り扱う流体・熱移動現象

相	成分	現象
液	<ul style="list-style-type: none"> ● 水 ● 水素 	<ul style="list-style-type: none"> ● 移流 ● 拡散 ● 水素の溶解・遊離
気	<ul style="list-style-type: none"> ● 水（水蒸気） ● 水素 	<ul style="list-style-type: none"> ● 移流 ● 拡散 ● 水蒸気生成（蒸発）・凝縮 ● 水素発生
熱エネルギー		<ul style="list-style-type: none"> ● 熱移流（移流による熱移動） ● 固相、流体相の熱伝導

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left(\sum_p \rho_p \frac{K k_{rp} X_p^\kappa}{\mu_p} \nabla \Psi_p \right) + \nabla \cdot \left(\sum_p \rho_p \bar{D}_p^\kappa \nabla X_p^\kappa \right) - \rho_p q_p \\ = \frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_p X_p^\kappa \phi S_p \rho_p \right) \end{aligned} \quad (3.5-1)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left(\sum_p \rho_p \frac{K k_{rp} h_p}{\mu_p} \nabla \Psi_p \right) + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \rho_p h_p q_p \\ = \frac{\partial}{\partial t} \left[(1 - \phi) \rho_R C_R T + \phi \sum_p S_p \rho_p u_p \right] \end{aligned} \quad (3.5-2)$$

式中の記号の説明は以下のとおりである。

- K ; 絶対浸透率(m^2)
- k_{rp} ; 流体相 $p(= l, g)$ の相対浸透率(-)
- S_p ; 流体相 $p(= l, g)$ の飽和度(-)
- μ_p ; 流体相 $p(= l, g)$ の粘性係数($Pa \cdot s$)
- ρ_p ; 流体相 $p(= l, g, R)$ の密度(kg/m^3)
- Ψ_p ; 流体相 $p(= l, g)$ のポテンシャル(Pa)
- X_p^κ ; 流体相 $p(= l, g)$ の成分 $\kappa(= l, g)$ の質量分率(-)
- ϕ ; 有効間隙率(-)
- \bar{D}_p^κ ; 流体相 $p(= l, g)$ の成分 $\kappa(= l, g)$ の水力学的分散係数(m^2/s)

h_p	; 流体相 $p(= l, g)$ の比エンタルピー(J/kg)
u_p	; 流体相 $p(= l, g)$ の比内部エネルギー(J/kg)
T	; 温度(°C)
λ	; 熱伝導率(J/K/m/s)
q_p	; 流体相 $p(= l, g)$ の生産・消滅量(kg/m ³ /s)

1) 物質移行計算

物質移行計算における支配方程式は、以下に示す化学成分 j の移流拡散方程式によって記述される。移流拡散方程式の中で用いられる流速と温度は、熱・流体流動計算から引き渡される。物質移行計算と地球化学計算は流体相 $p(= l, g, s)$ の化学反応により生じる生産・消滅項 q_p^j でカップリングされている。

$$\nabla \cdot \left(\frac{K k_{rl} C_l^j}{\mu_l} \nabla \Psi_l \right) + \nabla \cdot (\bar{D}_l \nabla C_l^j) - \sum_p q_p^j = \frac{\partial}{\partial t} (C_l^j \phi S_l) \quad (3.5-3)$$

式中の記号の説明は以下のとおりである。

K	; 絶対浸透率(m ²)
k_{rl}	; 液相の相対浸透率(-)
S_l	; 液相の飽和度(-)
μ_l	; 液相の粘性係数(Pa・s)
Ψ_l	; 液相のポテンシャル(Pa)
C_l^j	; 液相の成分 j の濃度(kg/m ³)
ϕ	; 有効間隙率(-)
\bar{D}_l	; 液相中の水力学的分散係数(m ² /s)
q_p^j	; 流体相 $p(= l, g, s)$ の化学反応により生じる生産・消滅量(kg/m ³ /s)

2) 地球化学計算

TOUGHREACTの地球化学計算では、水溶性錯体、酸・塩基反応、酸化還元反応、鉱物の溶解/沈殿、ガスの溶解/遊離、陽イオン交換反応を取扱うことが可能である。基本的に局所平衡状態を前提とするが、鉱物の溶解/沈殿は水溶性化学種の反応と比較してはるかにゆっくりと進行するため、鉱物の反応速度を考慮することが可能である。本検討でも、鉄の腐食反応（溶解）に関しては反応速度を考慮する。反応速度を考慮した鉱物の溶解/沈殿の取扱いに関して以下に簡単に示す。

一般に水相中における鉱物 m の溶解/沈殿は、以下に示したイオン活動度積と平衡定数 K_m の比で定義される飽和指数 SI_m によって判定できる。平衡状態は $SI_m = 0$ 、沈殿は $SI_m > 0$ 、溶解は $SI_m < 0$ である。

$$SI_m = \log_{10} \Omega_m = \log_{10} \frac{\prod_{j=1}^{N_c} c_j^{v_{mj}} \gamma_j^{v_{mj}}}{K_m} \quad (3.5-4)$$

式中の記号の説明は以下のとおりである。

c_j	; 成分 j のモル濃度(mol/L)
γ_j	; 鉱物 m の溶解/沈殿反応における成分 j の活動度係数(-)

- v_{mj} ; 鉱物 m の溶解/沈殿反応における成分 j の化学量論係数(-)
 K_m ; 鉱物 m の溶解/沈殿反応における平衡定数
 N_c ; 鉱物 m の溶解/沈殿反応における成分数

反応速度 r_n (mol/s/kg H₂O)は以下の式で表される。

$$r_n = \pm k_n A_n |1 - \Omega_m^\theta|^\eta \quad n = 1 \dots N_q \quad (3.5-5)$$

$$k_n = k_{25} \exp \left[\frac{-E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15} \right) \right] \quad (3.5-6)$$

式中の記号の説明は以下のとおりである。

- k_n ; 反応速度定数(mol/m²/s)
 A_n ; 比反応表面積(m²/kg H₂O)
 θ, η ; 実験パラメータ(-)
 N_q ; 反応速度を考慮する鉱物数
 k_{25} ; 25°Cにおける反応速度定数(mol/m²/s)
 E_a ; 活性化エネルギー(kJ/mol)
 R ; 気体定数(Pa · L/mol/K)
 T ; 温度(K)

反応速度定数 k_n は温度の関数となり、比反応表面積 A_n は鉱物や間隙水の存在量の関数となる。数値解法としては、化学成分毎の質量収支を考え Newton-Raphson 法により解く。

3) 処理フロー

TOUGHREACT の処理フローを図 3.5.2-1 に示す。まず、TOUGH2 EOS5 モジュールによる熱・流体流動計算によって温度場と流速場が計算される。これを用いて化学成分毎に物質移行計算が行われ、求められた各成分の濃度を地球化学計算に引き渡す。格子毎に化学種濃度や鉱物の生成・溶解量等が計算される。物質移行計算と地球化学計算を繰り返す、所定の収束条件に達した後には化学場の変化に伴い熱・水理パラメータが更新され、熱・流体流動計算に戻るといった流れである。地球化学計算の中で発生した水素ガスは熱・流体流動計算の生産・圧入項に加えられる。

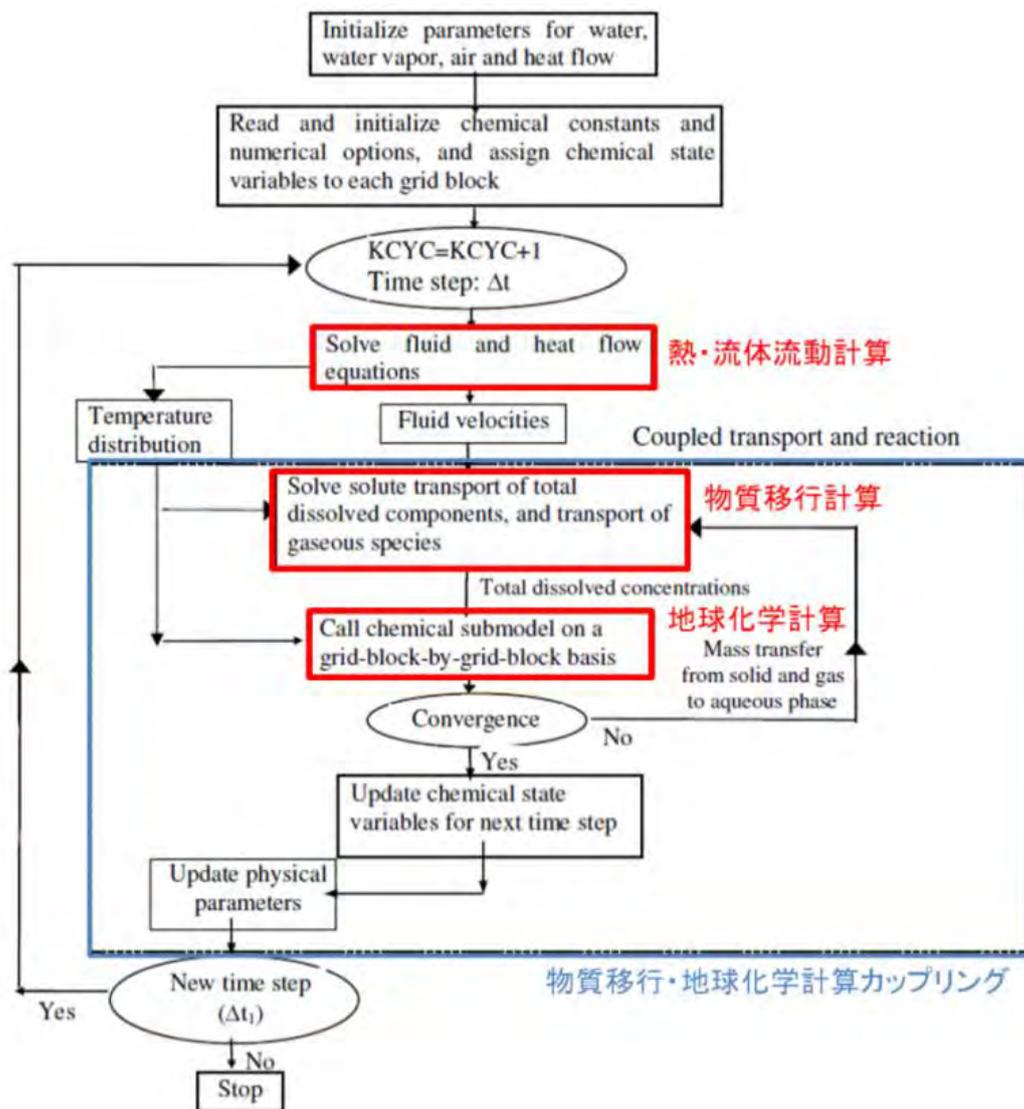


図 3.5.2-1 TOUGHREACT の処理フロー

(3) 解析モデル

1) 対象とする処分システム概念

本検討では、第2次 TRU レポート[5]より廃棄体グループ2 (ハル・エンドピース圧縮収納体)、軟岩系岩盤 (SR-C 準拠) を対象とする。対象とする処分システム概念を図 3.5.2-2 に示す。

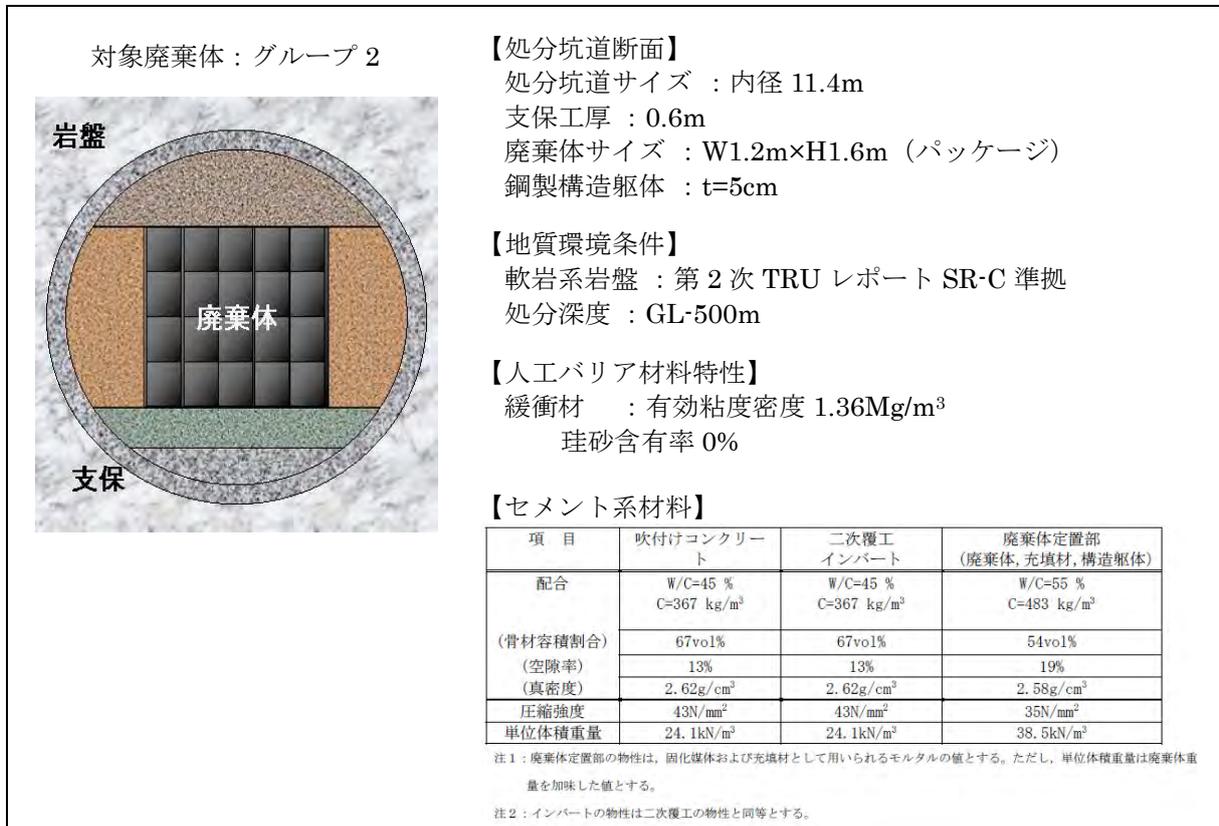


図 3.5.2-2 モデル化の対象とする処分システム

2) 解析モデル

モデル化範囲は地表面 (標高 0m) から深度 1,000m とし、処分坑道の半断面を対象とし、処分場の鏡面对称性を仮定して、坑道中心から 25.4m の範囲とした。第2次 TRU レポート[5]の廃棄体グループ2の坑道断面を対象とし構築した2次元モデルを図 3.5.2-3 に示す。考慮する材料区分は、廃棄体、緩衝材、インバート、支保工、EDZ (掘削影響域)、岩盤とした。なお、本検討では廃棄体周囲に存在する厚さ 5cm の構成構造躯体はモデル化しないものとした。

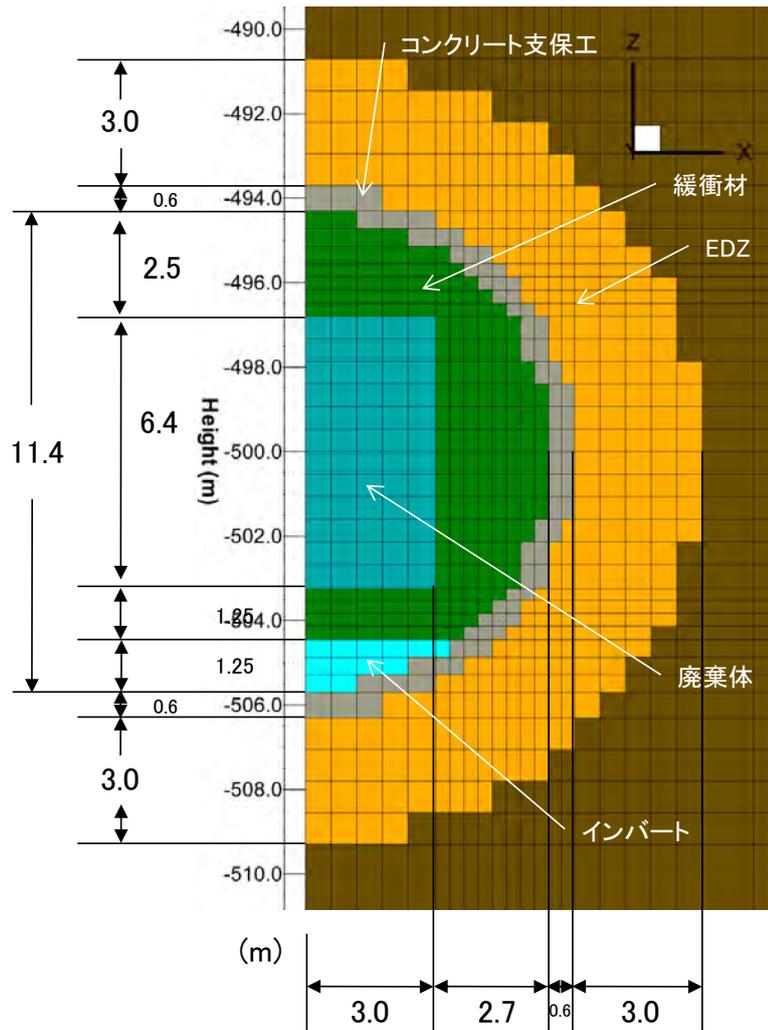


図 3.5.2-3 解析モデル (人工バリア周辺拡大)

(4) 解析条件

1) 流体物性

流体相毎の密度や粘性係数は、圧力、温度の関数としてシミュレータに組み込まれた補間式により計算される。これらは国際蒸気表あるいはそれに準じる国際補間式に基づいている。熱伝導率は固相媒体を含めた平均的な熱伝導率の水分依存性が組み込まれているため、流体相毎の熱伝導率を入力する必要がない。TOUGHREACT では温度、圧力に依存した内部エネルギーを用いるため、流体相毎の比熱を陽に入力する必要がない。

2) 水理物性

各材料の水理物性は第 2 次 TRU レポート[5]に準拠する。各材料の水理物性を表 3.5.2-4 にまとめた。固相圧縮率はヤング率とポアソン比より体積弾性率を算出し、その逆数とした。表中の 2 相流曲線を表現する構成モデルの構成式を以下の表 3.5.2-2 に示した。なお、表中の記号の説明は以下の通りである。

S_p ; 流体相 $p(= l, g)$ の飽和度(-)

- S_{pe} ; 流体相 $p(= l, g)$ の有効飽和度(-)
 S_{pr} ; 流体相 $p(= l, g)$ の残留飽和度(-)
 k_{rp} ; 流体相 $p(= l, g)$ の相対浸透率(-)
 P_c ; 水-ガス系の毛細管圧力(Pa)
 m, n ; 間隙分布パラメータ
 P_e ; ガス侵入圧(Pa)
 P_0 ; モデルパラメータ(Pa)
 l, g ; それぞれ液相、気相を示す

表 3.5.2-2 2相流曲線を表現する構成モデル

相対浸透率 (修正Coreyモデル)	毛細管圧力 (Narasimhanモデル)
$k_{rw} = S_{le}^m$ $k_{rg} = (1 - S_{le})^n (1 - S_{le}^n)$ $S_{le} = (S_l - S_{lr}) / (1 - S_{lr} - S_{gr})$	$P_c = P_e + P_0 \left(\frac{1 - S_l}{S_l - S_{lr}} \right)^{1/n}$

3) 熱物性

熱物性に関しても第2次 TRU レポート[5]に準拠する。各材料の熱物性を表 3.5.2-3 にまとめた。熱伝導率は固相媒体を含めた平均的な熱伝導率を絶乾状態と水飽和状態の値を入力する。本検討では表 3.5.2-3 の値を用いるものとし、水分依存性は考慮しない。

表 3.5.2-3 人工バリア構成材料の熱物性

構成材料	密度 $\rho(kg/m^3)$	比熱 $c(J/kg/K)$	熱伝導率 $\lambda(W/m/K)$
廃棄体 (グループ 2)	2,848	971	3.73
構造躯体	2,500	1,050	2.56
ベントナイト	1,712	590	0.78
支保工	2,500	1,050	2.56
インバート	2,350	1,050	2.56
EDZ	2,200	1,400	2.20
岩盤 (SR-C)	2,200	1,400	2.20

表 3.5.2-4 人工バリア構成材料の水理物性

部材	絶対浸透率 $K (m^2)$		相対浸透率 $k_r (-)$					毛細管圧力 $P_c (Pa)$					有効 間隙率 $\varphi (-)$	固相 圧縮率 $C_r(1/Pa)$
			モデル	残留液相 飽和度 $S_{lr} (-)$	残留気相 飽和度 $S_{gr} (-)$	係数 $m (-)$	係数 $n (-)$	モデル	残留液相 飽和度 $S_{lr} (-)$	ガス 侵入圧 $P_e (Pa)$	係数 $P_0 (Pa)$	間隙分 布係数 $n (-)$		
廃棄体 (グループ 2)	水	4.10E-18	Corey	0.15	0.075	25	2.3	Narasimhan	0.15	6.9E+4	5.0E+6	1.05	0.19	1.03E-10
	ガス	3.00E-15												
構造躯体	水	4.10E-18	Corey	0.15	0.075	25	2.3	Narasimhan	0.15	6.9E+4	5.0E+6	1.05	0.42	1.03E-10
	ガス	3.00E-15												
緩衝材	水	8.20E-20	Corey	0.94	0	1.5	9.5	Narasimhan	0	1.2E+6	2.5E+6	0.45	0.4	1.23E-8
	ガス	1.04E-19												
支保工	水	4.10E-18	Corey	0.15	0.075	25	2.3	Narasimhan	0.15	6.9E+4	5.0E+6	1.05	0.13	5.92E-10
	ガス	3.00E-15												
インバート	水	4.10E-18	Corey	0.15	0.075	25	2.3	Narasimhan	0.15	6.9E+4	5.0E+6	1.05	0.13	5.92E-10
	ガス	3.00E-15												
EDZ	水	8.20E-15	Corey	0.6	0	4	3	Narasimhan	0	3.4E+4	8.0E+5	0.35	0.3	3.43E-10
	ガス	7.80E-14												
岩盤 (SR-C)	水	8.20E-17	Corey	0.6	0	4	3	Narasimhan	0	3.4E+4	8.0E+5	0.35	0.3	3.43E-10
	ガス	7.80E-16												

4) 化学反応に関する解析条件

以下に示す反応系（鉄の酸化腐食反応、嫌気腐食反応、腐食生成物の沈殿反応）における水素ガスの発生を考慮する。本検討で考慮するイオン反応式を表 3.5.2-5 にまとめた。

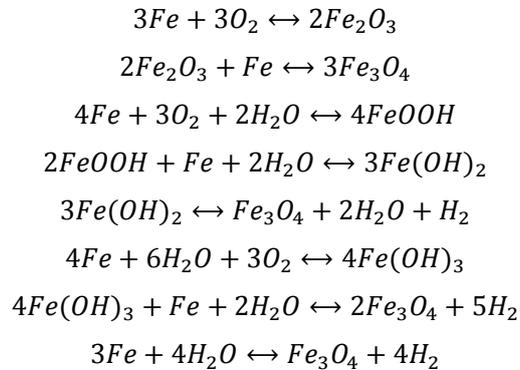


表 3.5.2-5 考慮するイオン反応式

水溶性	$OH^- \leftrightarrow H_2O + H^+$ $Fe^{3+} \leftrightarrow H^+ + Fe^{2+} - 0.5H_2(aq)$ $Fe(OH)_2(aq) \leftrightarrow 2H_2O - 2H^+ + Fe^{2+}$ $Fe(OH)_2^+ \leftrightarrow 2H_2O - H^+ + Fe^{2+} - 0.5H_2(aq)$ $Fe(OH)_3(aq) \leftrightarrow 3H_2O - 2H^+ + Fe^{2+} - 0.5H_2(aq)$ $Fe(OH)_3^- \leftrightarrow 3H_2O - 3H^+ + Fe^{2+}$ $Fe(OH)_4^- \leftrightarrow 4H_2O - 3H^+ + Fe^{2+} - 0.5H_2(aq)$ $O_2(aq) \leftrightarrow 2H_2O - 2H_2(aq)$ $Fe(OH)_4^{2-} \leftrightarrow 4H_2O - 4H^+ + Fe^{2+}$ $Fe(OH)_2^{4+} \leftrightarrow 2H_2O + 2Fe^{2+} - H_2(aq)$ $Fe_3(OH)_4^{5+} \leftrightarrow 4H_2O - H^+ + 3Fe^{2+} - 1.5H_2(aq)$ $FeOH^+ \leftrightarrow H_2O - H^+ + Fe^{2+}$ $FeOH^{2+} \leftrightarrow H_2O + Fe^{2+} - 0.5H_2(aq)$ $HO_2^- \leftrightarrow -H^+ + 2H_2O$
ガス	$H_2(g) \leftrightarrow H_2(aq)$ $O_2(g) \leftrightarrow O_2(aq)$
鉱物	$iron(Fe) \rightarrow Fe^{2+} + H_2(aq) - 2H^+$ $magnetite(Fe_3O_4) \leftrightarrow 3Fe^{2+} + 4H_2O - 6H^+ - H_2(aq)$ $hematite(Fe_2O_3) \leftrightarrow 2Fe^{2+} + 3H_2O - 4H^+ - H_2(aq)$ $goetite(FeOOH) \leftrightarrow Fe^{2+} + 2H_2O - 2H^+ - 0.5H_2(aq)$

初期組成は、地下水で飽和した状態の希薄溶液系を想定し、以下の表 3.5.2-6 に示すものとした。人工バリア内（廃棄体、緩衝材、支保工、インバート）の初期 pH は 12.5 とする。

表 3.5.2-6 初期組成

廃棄体 緩衝材 支保工 インバート	液相	Fe^{2+} : 1.0×10^{-10} (mol/kg)
		$H_2(aq)$: 1.0×10^{-10} (mol/kg)
		$O_2(aq)$: 1.0×10^{-10} (mol/kg)
	pH : 12.5	
固相	iron(Fe) : 固相の 50%とする (溶解のみを考慮、廃棄体 のみに設定)	
	magnetite(Fe_3O_4) : 存在しない (溶解・沈殿を考慮)	
	hematite(Fe_2O_3) : 存在しない (溶解・沈殿を考慮)	
	goethite($FeOOH$) : 存在しない (溶解・沈殿を考慮)	
気相	$H_2(g)$: 0.0 (bar)	
	$O_2(g)$: 0.0 (bar)	
岩盤 EDZ	液相	Fe^{2+} : 1.0×10^{-10} (mol/kg)
		$H_2(aq)$: 1.0×10^{-10} (mol/kg)
		$O_2(aq)$: 1.0×10^{-10} (mol/kg)
	pH : 7.0	
固相	iron(Fe) : 存在しない (溶解・沈殿を考慮)	
	magnetite(Fe_3O_4) : 存在しない (溶解・沈殿を考慮)	
	hematite(Fe_2O_3) : 存在しない (溶解・沈殿を考慮)	
	goethite($FeOOH$) : 存在しない (溶解・沈殿を考慮)	
気相	$H_2(g)$: 0.0 (bar)	
	$O_2(g)$: 0.0 (bar)	

反応速度を考慮した金属腐食に関するパラメータとして、(3.5-5)式、および、(3.5-6)式で示した25°Cにおける反応速度定数 k_{25} 、活性化エネルギー E_a 、比反応表面積 A_n 、実験パラメータ θ, η が挙げられる。本検討では、Xu, T. (2009)[14]の検討に基づき、反応速度定数 k_{25} を 1.0×10^{-12} (mol/m²/s)とし、比反応表面積 A_n を121.8 (cm²/g mineral)、実験パラメータ θ, η をそれぞれ1.0に設定した。活性化エネルギー E_a は本田ら(1993)[15]の検討より15.4 (kJ/mol)に設定した。本検討では鉄の腐食反応 (溶解) にのみ反応速度を適用する。図 3.5.2-4 に温度に対する反応速度定数の変化を示す。

また、反応速度定数 k_{25} は pH によっても変化することが知られている。図 3.5.2-5 に示すように、脱気した室温の水中での鉄の溶解速度は pH7.0 のときに比べ、pH12.5 では 25%程度に低下することが示されている。そこで、本検討では反応速度定数 k_{25} を 1.0×10^{-12} (mol/m²/s)から 0.25×10^{-12} (mol/m²/s)に低下させたケースも実施するものとした。

なお、本検討では鉱物 (鉄、マグネタイト) の溶解/沈殿に伴う絶対浸透率、間隙率の変化は考慮せず、収着やイオン交換反応も考慮しない。熱力学データベースには EQ3/6 v7.2b を使用した。

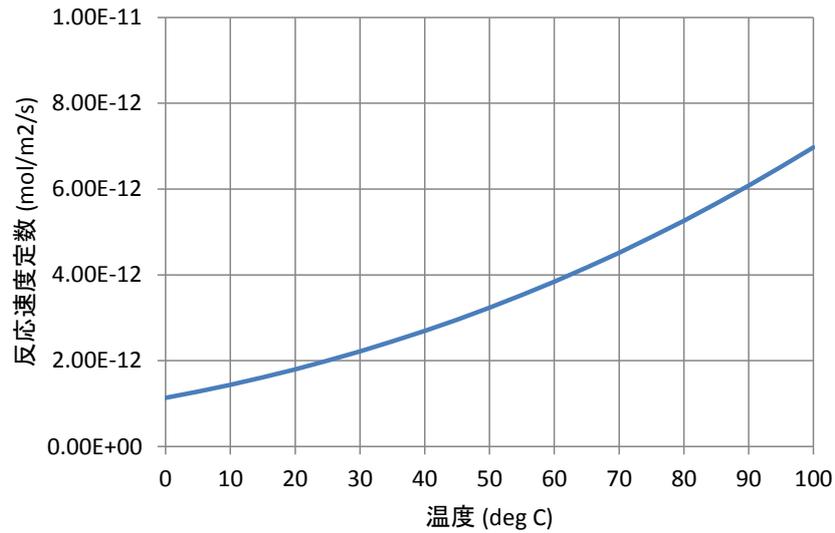


図 3.5.2-4 反応速度定数の温度依存性

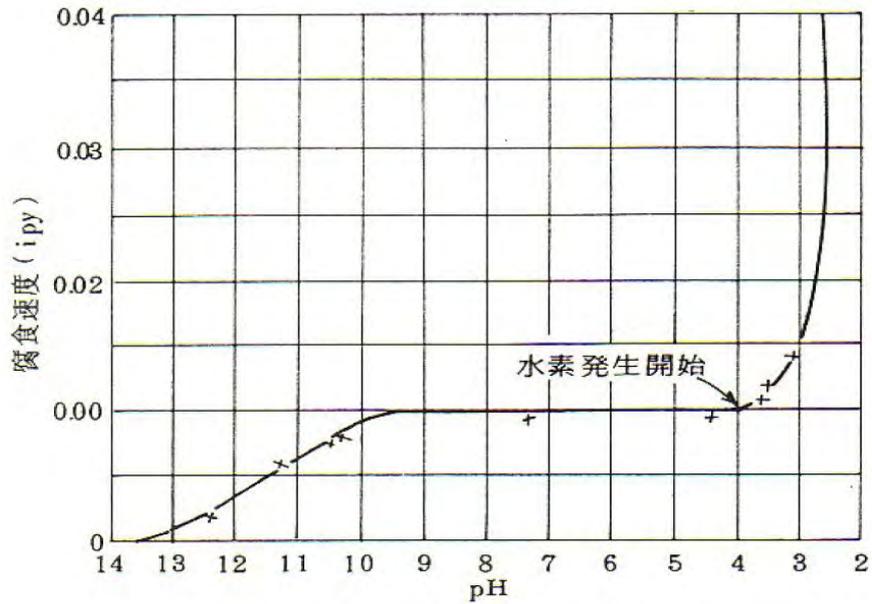


図 2.2 脱気した室温の水中の鉄の腐食に及ぼす pH の影響

図 3.5.2-5 pH と鉄の溶解速度の関係[16]

5) 初期、境界条件

初期状態は、人工バリア内は標準大気圧の不飽和状態（廃棄体 50%、緩衝材 65%、インバート 90%、支保工 90%）とし、岩盤および EDZ は静水圧とし、完全飽和状態とした。初期温度条件は地表面を 15°C とし、地温勾配 0.03°C/m とした。上面、底面、側面を定圧・等温境界とした。

また、本検討では廃棄体からの発熱を考慮する。解析に用いる発熱条件は、TRU 廃棄物処分概念検討書[17]、第 2 次 TRU レポート[5]に基づき設定した。図 3.5.2-6 に発熱条件を示す。このうち民間処理操業ハル・エンドピースを用い、さらに冷却期間 25 年を考慮し、図中時間軸の 25 年を解析時間の起点として与えることとした。また、第 2 次 TRU レポートにおける取扱いと同様

に、円形処分坑道に対する廃棄体パッケージ領域の断面積から図 3.5.2-6 に示す発熱量の 33.7% を廃棄体混合体の平均的な発熱率とした。

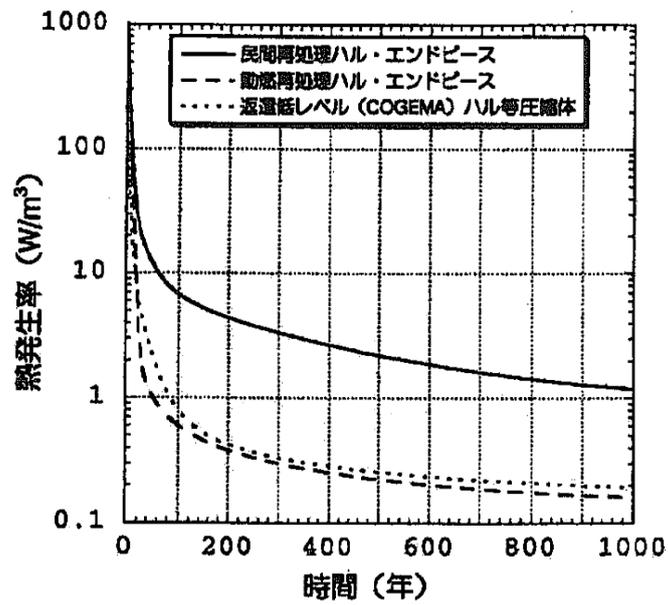


図 3.5.2-6 廃棄体発熱量[17]

(5) 解析結果

本検討では、(4)で示した解析条件に基づき、人工バリア内の初期 pH を 12.5 としたケースと、加えて反応速度定数 k_{25} を 1.0×10^{-12} ($\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)から 0.25×10^{-12} ($\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)に低下させたケースの 2 ケースを実施する。なお、平成 26 年度に実施した初期 pH を 7.0 としたケースの結果を比較として用いるものとした。

平成 26 年度に実施した初期 pH7.0 ケースに対し、異なる時間断面におけるガス相圧力と水相飽和度、温度、水蒸気圧の分布を図 3.5.2-7～図 3.5.2-10 に示す。また、表 3.5.2-6 に示した主要化学種の異なる時間断面における濃度分布を図 3.5.2-11～図 3.5.2-15 に示す。図 3.5.2-16、図 3.5.2-17 はそれぞれ水素ガス発生量、pH 分布を示している。なお、図中の矢印はガス相の流動方向を示している。

初期 pH12.5 ケースに対しても同様に、異なる時間断面におけるガス相圧力と水相飽和度、温度、水蒸気圧の分布を図 3.5.2-18～図 3.5.2-21 に示した。また、表 3.5.2-6 に示した主要化学種の異なる時間断面における濃度分布、および、水素ガス発生量、pH 分布を図 3.5.2-22～図 3.5.2-28 に示す。

いずれのケースにおいても、初期段階から鉄の嫌気性腐食反応 (*iron(Fe)*の溶解、*iron(Fe)*溶解量、*magnetite(Fe₃O₄)*沈殿量の増加)に伴う水素ガス発生と、温度上昇によって施設内部の圧力は上昇し、水飽和度は低下していく。初期 pH7.0 ケースと初期 pH12.5 ケースはほぼ同様の傾向を示す。但し、初期 pH7.0 ケースでは Fe^{2+} イオンが溶解しているのに対し、初期 pH12.5 ケースでは水中に Fe^{2+} イオンがほとんど存在しない。これは、高 pH 環境下であることから、 Fe^{2+} イオンから*magnetite(Fe₃O₄)*への反応が起こるためである。*magnetite(Fe₃O₄)*の沈殿量が初期 pH7.0 ケースと比較して多いことから、この反応が生じていることを示している。

初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケースに対して、異なる時間断面におけるガス相圧力と水相飽和度、温度、水蒸気圧の分布を図 3.5.2-29～図 3.5.2-32 に示した。また、表 3.5.2-6 に示した主要化学種の異なる時間断面における濃度分布、および、水素ガス発生量、pH 分布を図 3.5.2-33～図 3.5.2-39 に示す。

初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケースにおいても同様で、初期段階から鉄の嫌気性腐食反応に伴う水素ガス発生と、温度上昇によって施設内部の圧力は上昇し、水飽和度は低下していく。但し、反応速度が 0.25 倍となるため、水素ガス発生量は小さくなり、圧力上昇や水飽和度の低下は、初期 pH12.5 ケースと比較して緩慢となる。

次に、図 3.5.2-40 に水素ガス発生量の時間変化を示す。初期 pH7.0 ケース、初期 pH12.5 ケース及び初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケースで比較したものを示している。初期 pH7.0 ケース、初期 pH12.5 ケースはほぼ同じ水素ガス発生量となった。一方、初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケースでは反応速度定数が小さいために、他の 2 ケースと比較して約 0.25 倍の水素ガス発生量を示している。

図 3.5.2-41 に示した評価点位置におけるガス相圧力と水相飽和度、温度、水蒸気圧、pH の時間変化を図 3.5.2-42～図 3.5.2-46 に示す。また、坑外への排気流量と累積押し出し水量の時間変化を図 3.5.2-47 に示す。初期 pH7.0 ケースと初期 pH12.5 ケースは水素ガス発生量がほぼ同じであるため、ガス相圧力や水相飽和度、温度、水蒸気圧、坑外への排気流量、累積押し出し水量の時間変化もほぼ同じ変化となっている。初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケースでは、水素ガス発生量が

他の 2 ケースと比較して小さいため、ガス相圧力の上昇や水相飽和度の低下が緩慢となる。温度と水蒸気圧に関しては、他の 2 ケースと同様の変化を示している。pH に関しては初期状態の違いが現れている。10 年程度まで緩やかに pH が低下していくのは、温度上昇に起因している。温度上昇に伴い、水のイオン積 K_w (H^+ 濃度と OH^- 濃度の積) の値が大きくなるため、水の電離が進み、 H^+ 濃度が上昇するために pH が小さくなる。数 10 年以降は、温度低下に伴い反対に pH が上昇していく。EDZ や岩盤では水素ガス発生に伴い、内部の高 pH の水が排水されるため、pH の上昇が起こると解釈される。

反応速度定数は、pH や溶存酸素濃度、温度等の溶液組成に強く影響を受けると考えられる。本検討では定数として取扱っているが、実測データに基づいた信頼性の高い反応速度定数の評価が今後必要であると考えられる。

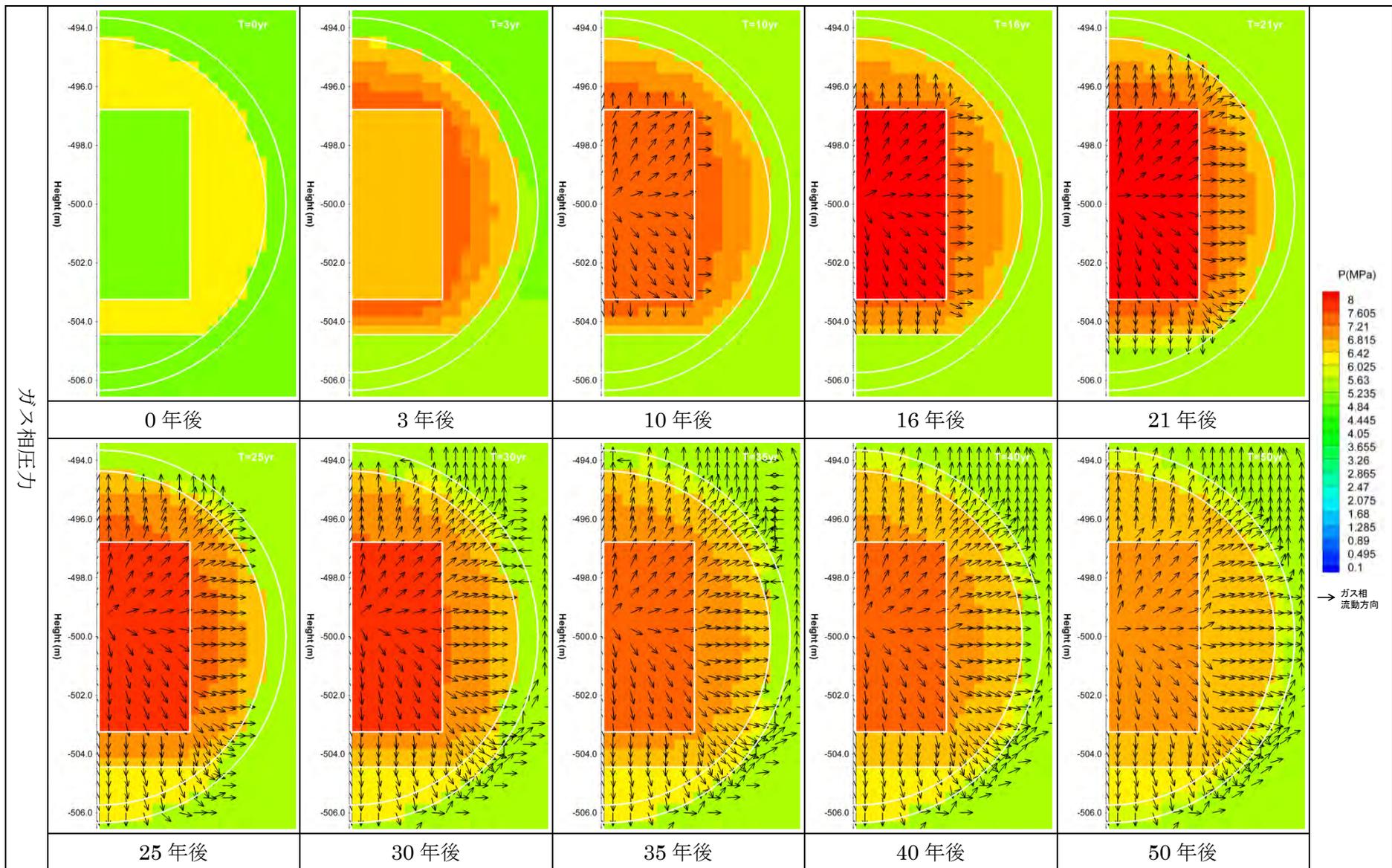


図 3.5.2-7 ガス相圧力分布 (初期 pH7.0 ケース)

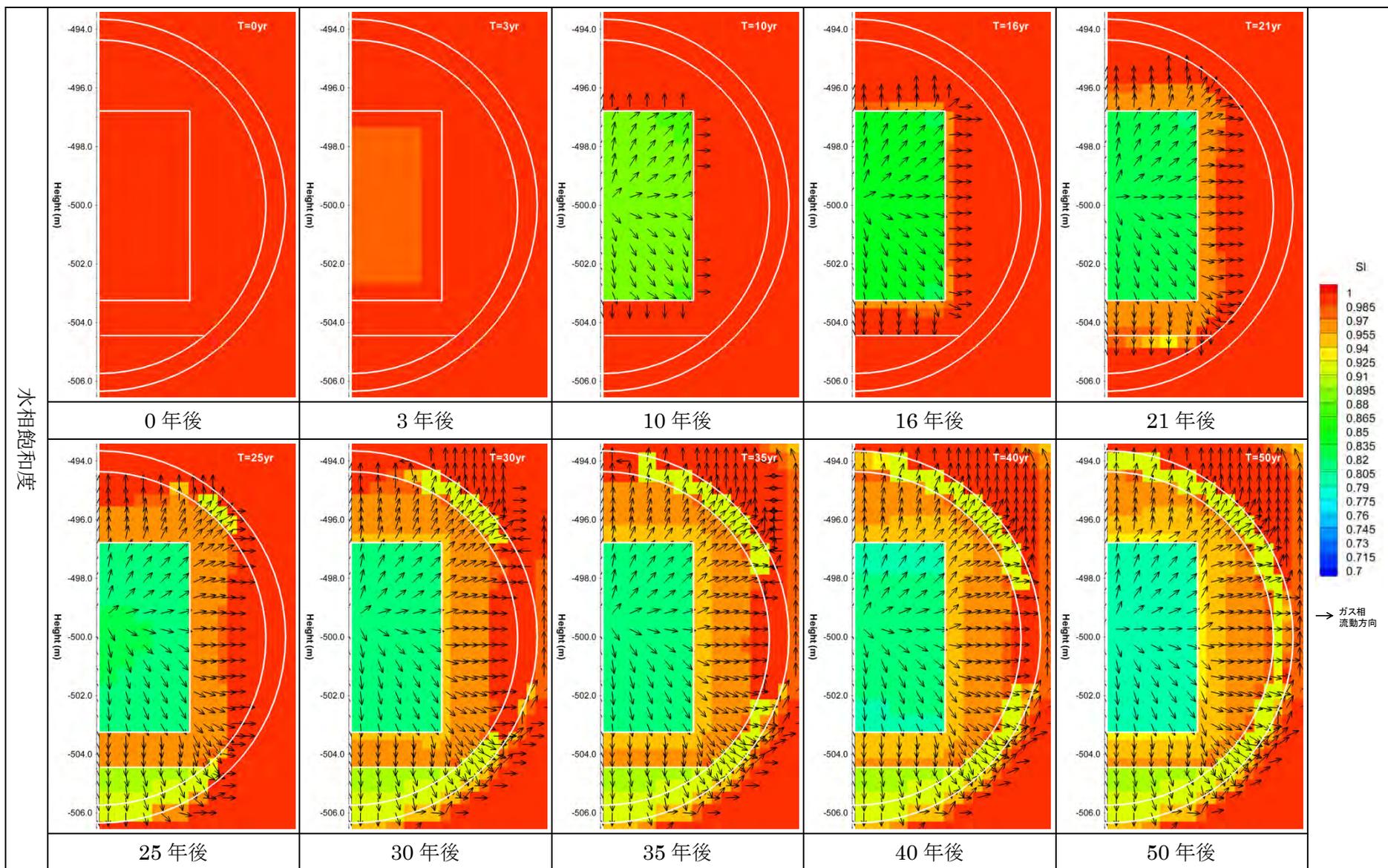


図 3.5.2-8 水相飽和度分布（初期 pH7.0 ケース）

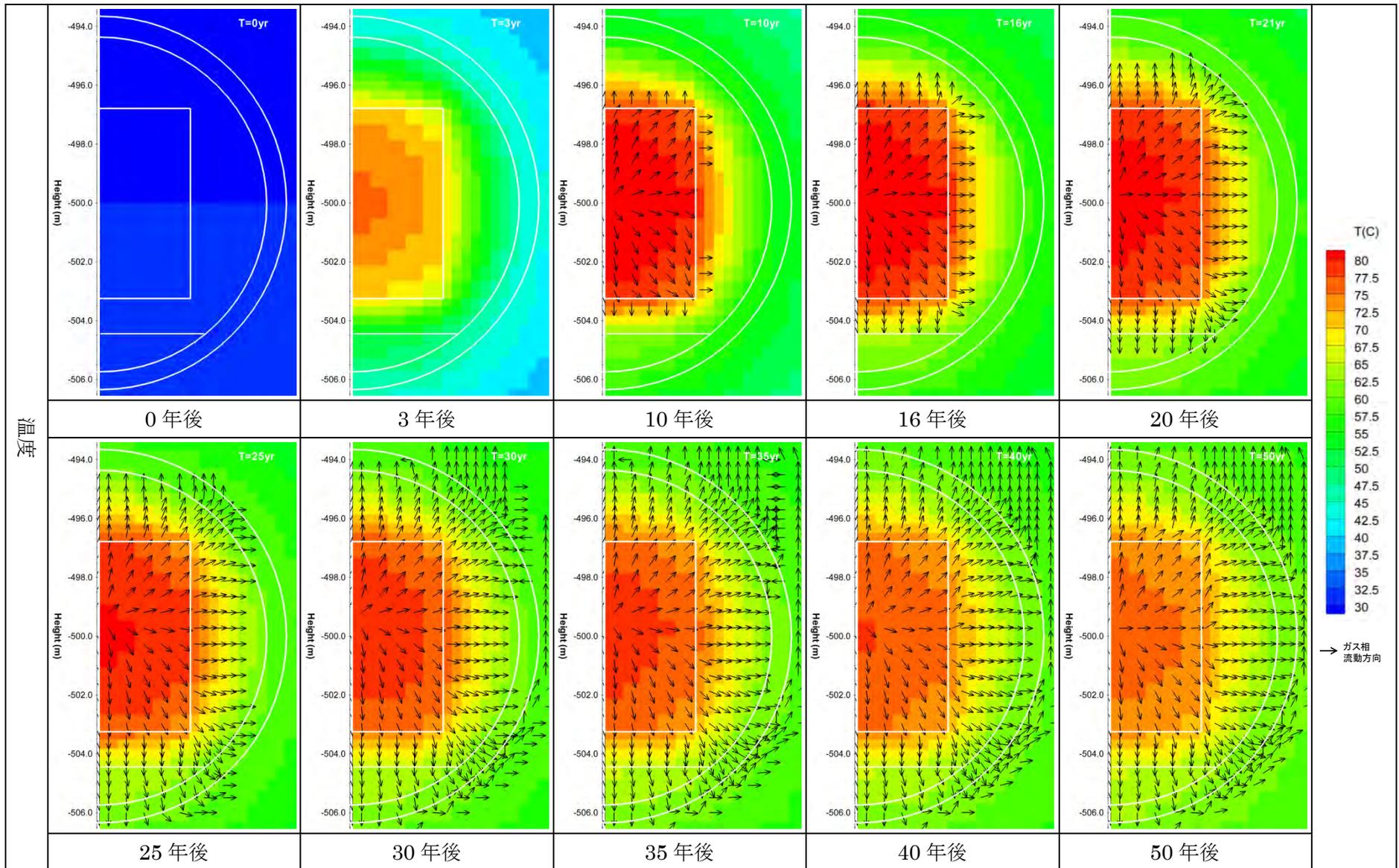


図 3.5.2-9 温度分布（初期 pH7.0 ケース）

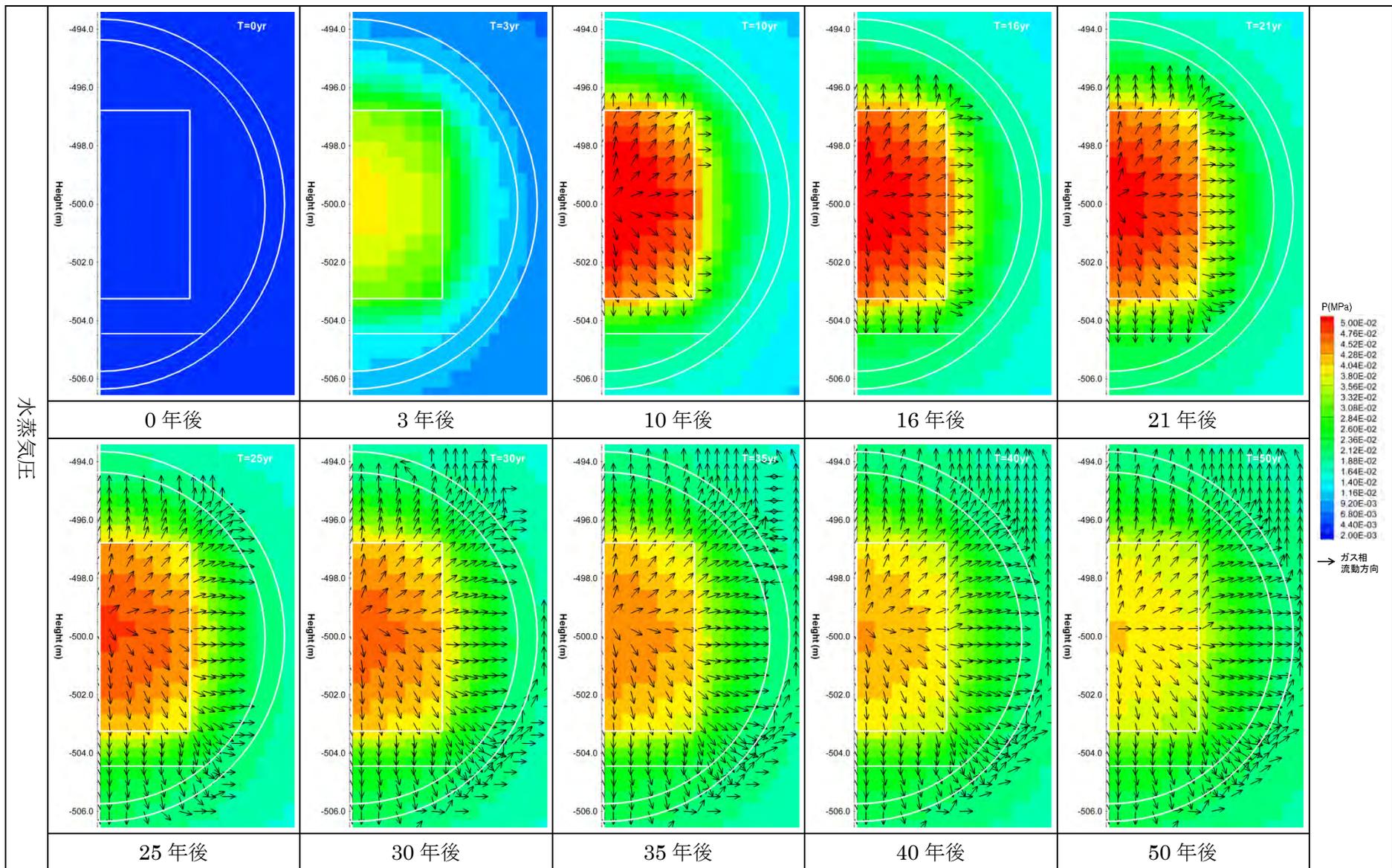


図 3.5.2-10 水蒸気圧分布 (初期 pH7.0 ケース)

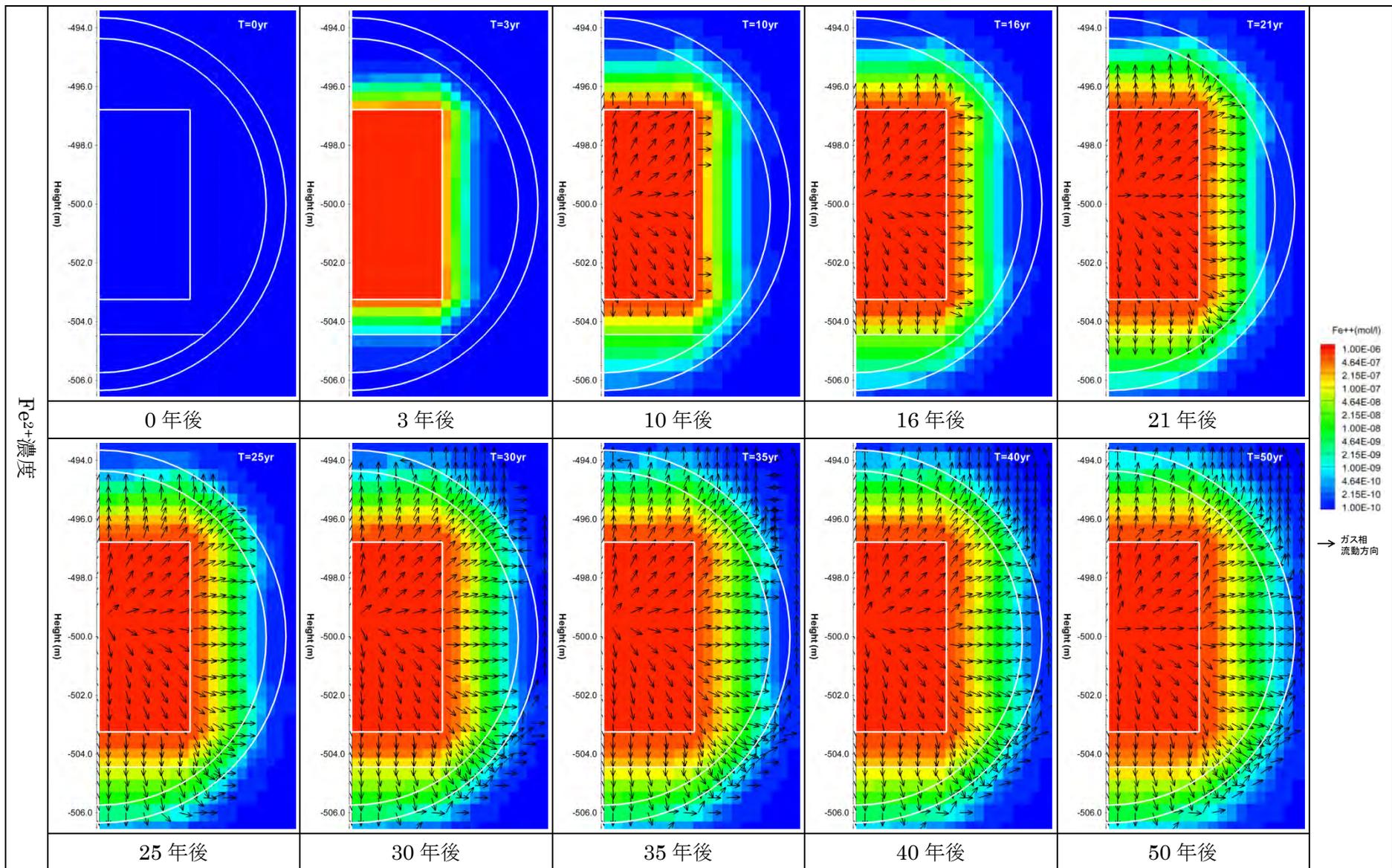


図 3.5.2-11 Fe^{2+} 濃度分布 (初期 pH7.0 ケース)

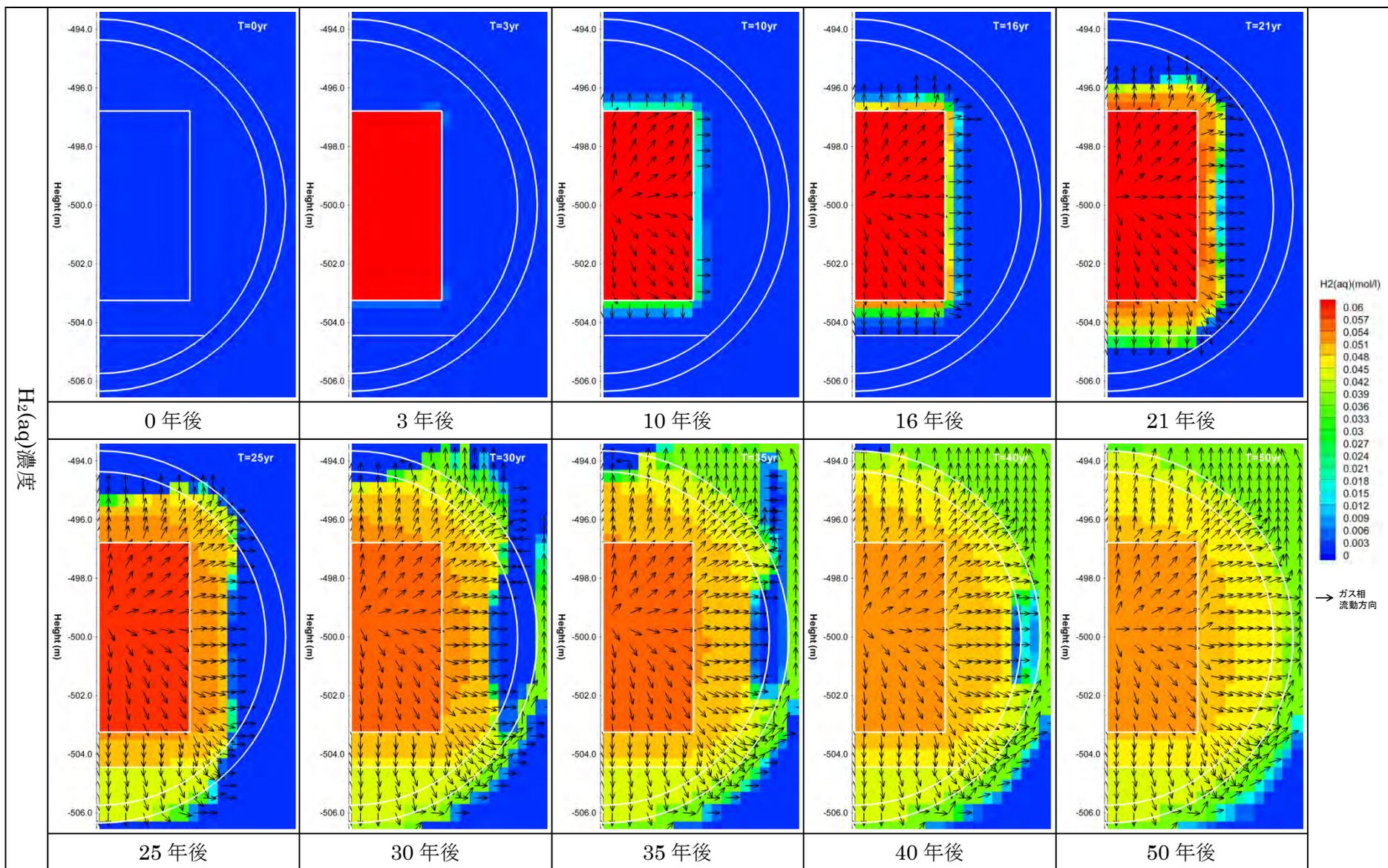


図 3.5.2-12 H₂(aq)濃度分布 (初期 pH7.0 ケース)

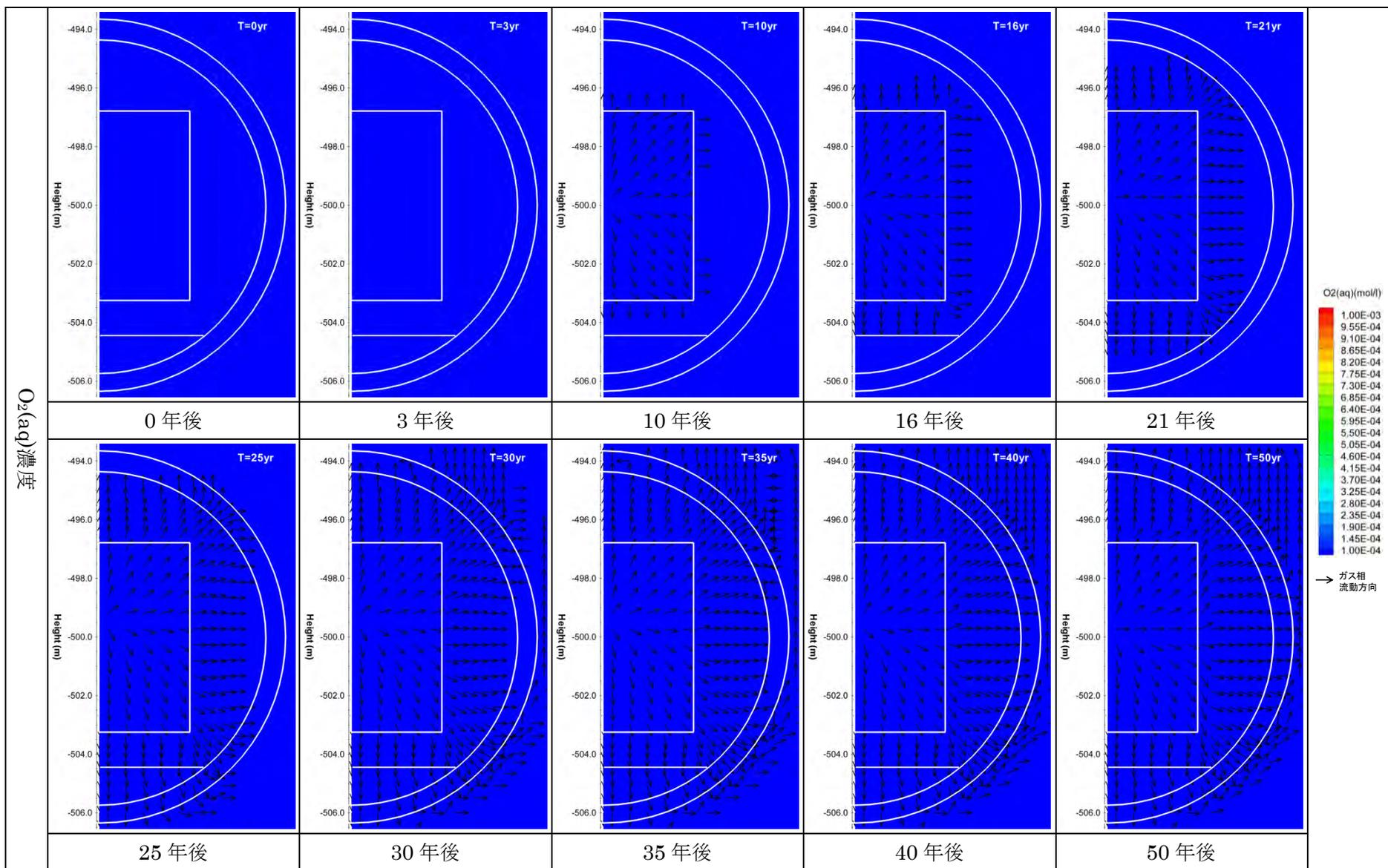


図 3.5.2-13 $O_2(aq)$ 濃度分布 (初期 pH7.0 ケース)

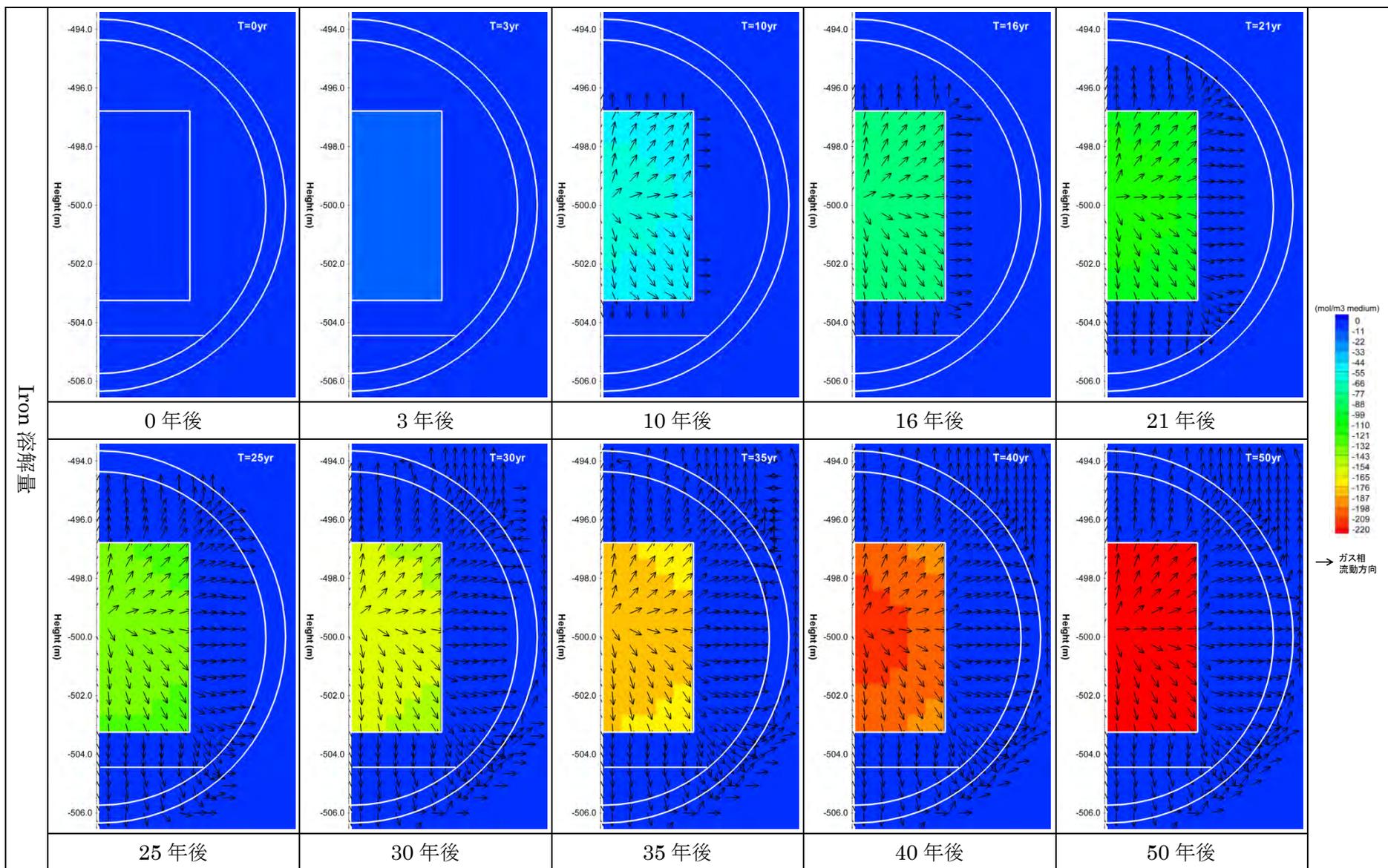


図 3.5.2-14 Iron 溶解量分布 (負値が溶解量) (初期 pH7.0 ケース)

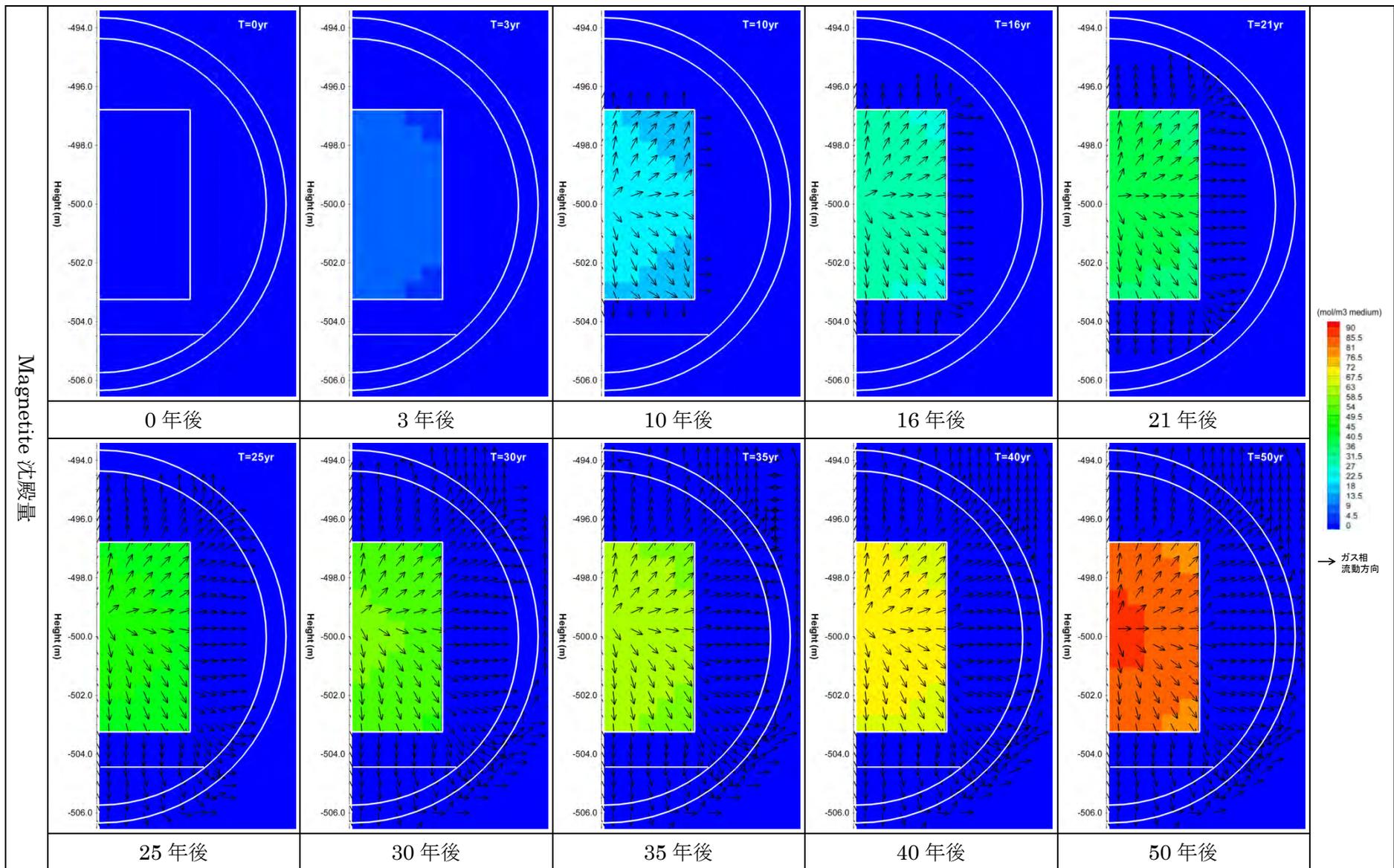
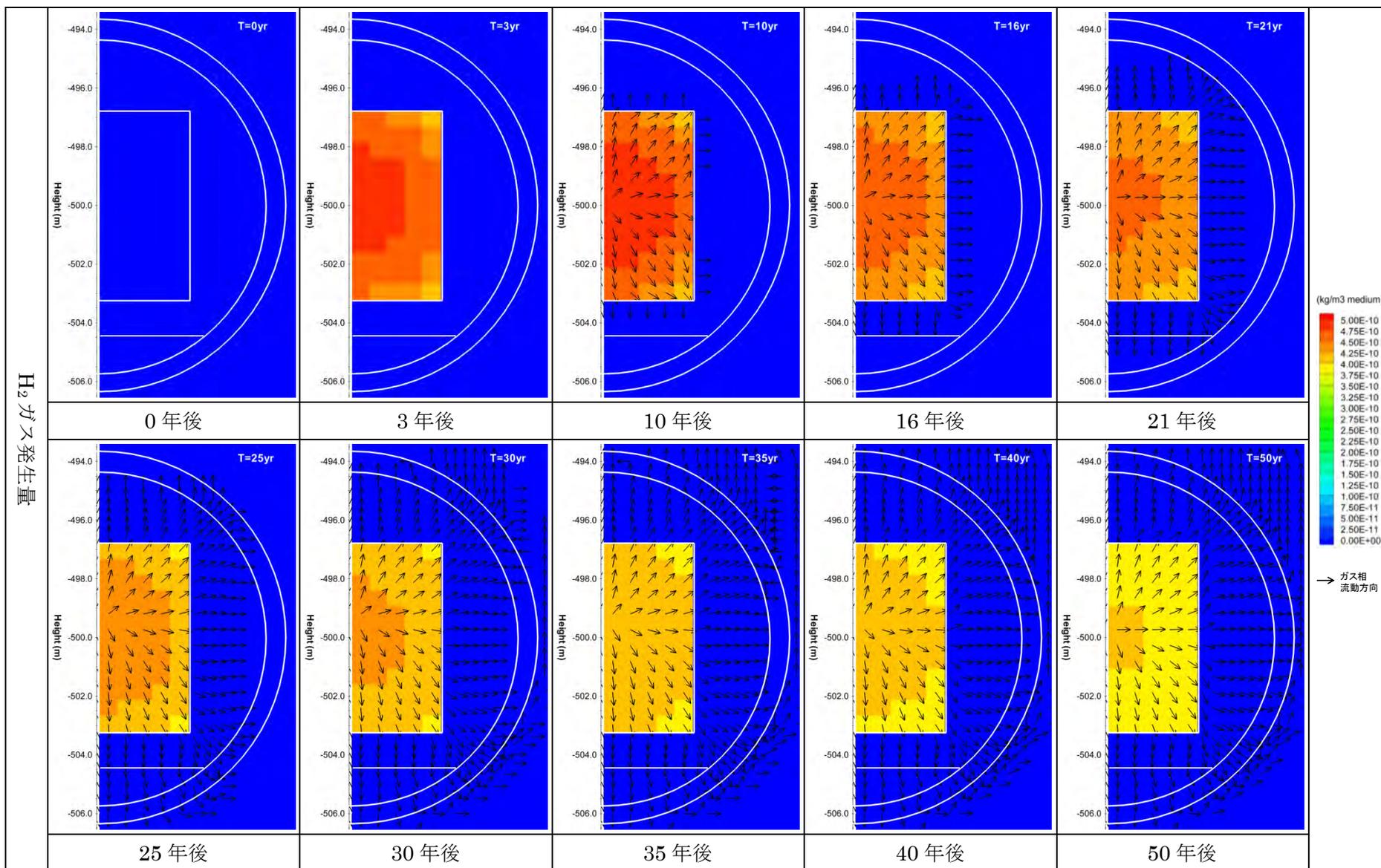


図 3.5.2-15 Magnetite 沈殿量分布（正值が沈殿量，負値が溶解量）（初期 pH7.0 ケース）

図 3.5.2-16 H₂ガス発生量分布 (初期 pH7.0 ケース)

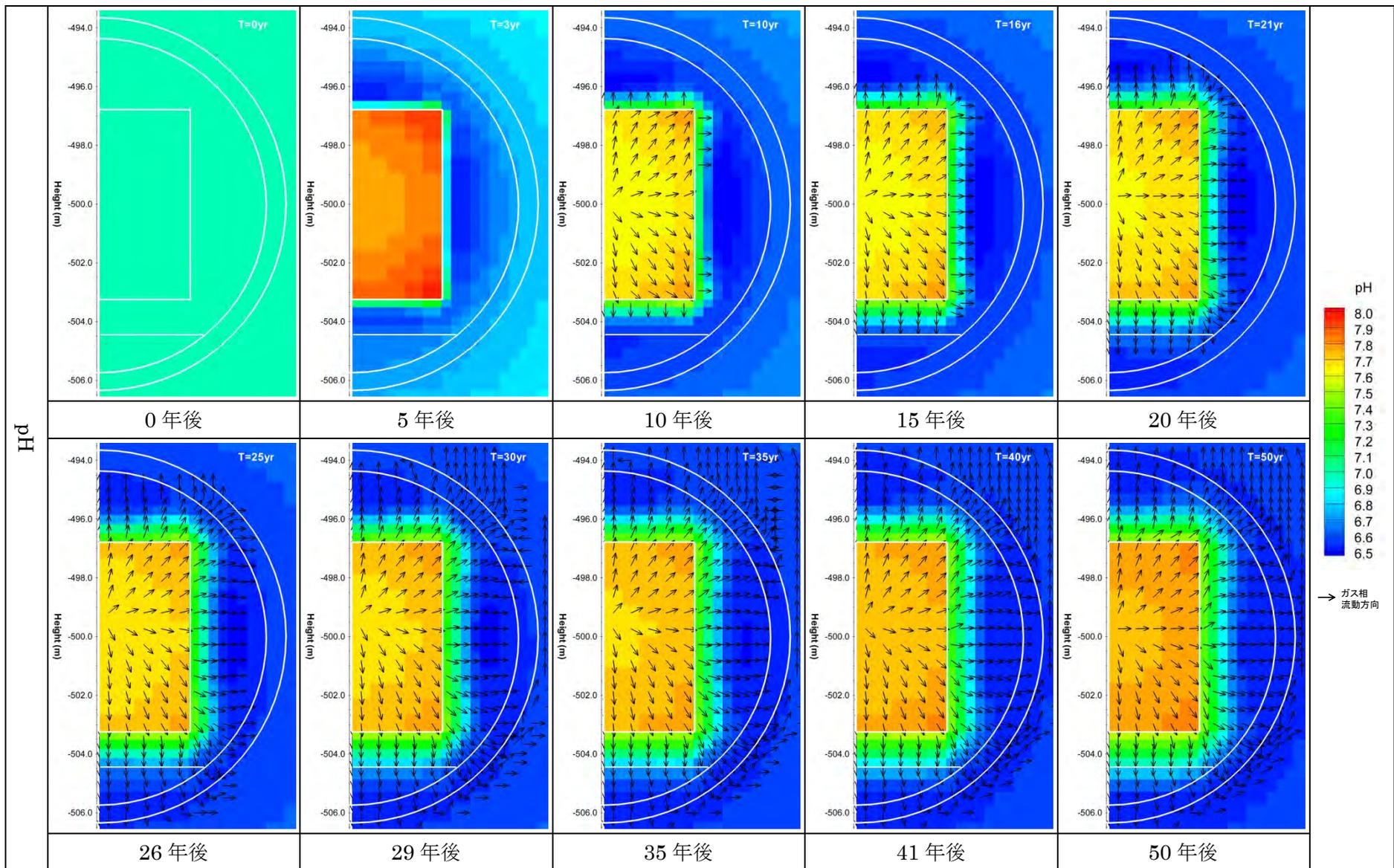


図 3.5.2-17 pH 分布 (初期 pH7.0 ケース)

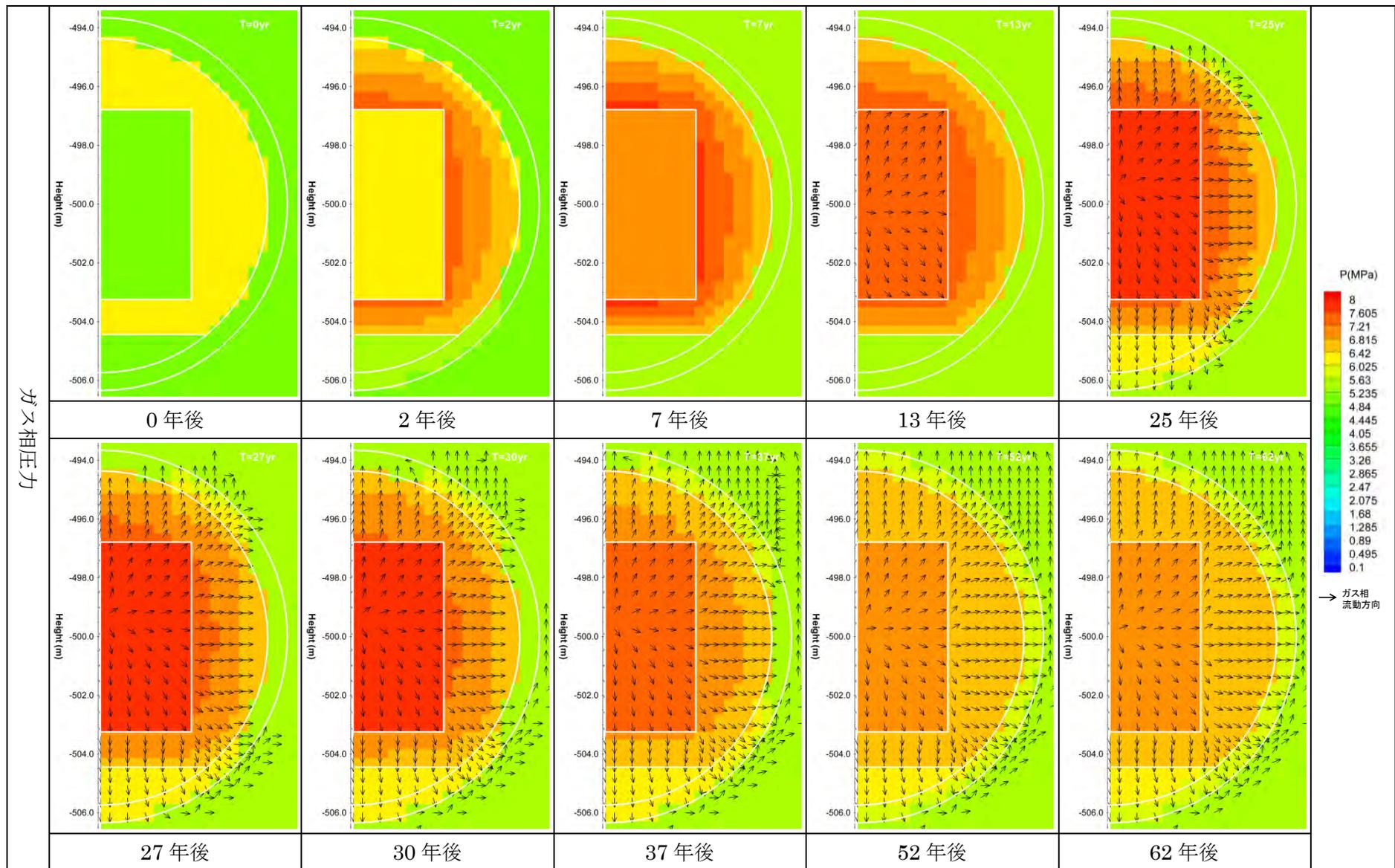


図 3.5.2-18 ガス相圧力分布 (初期 pH12.5 ケース)

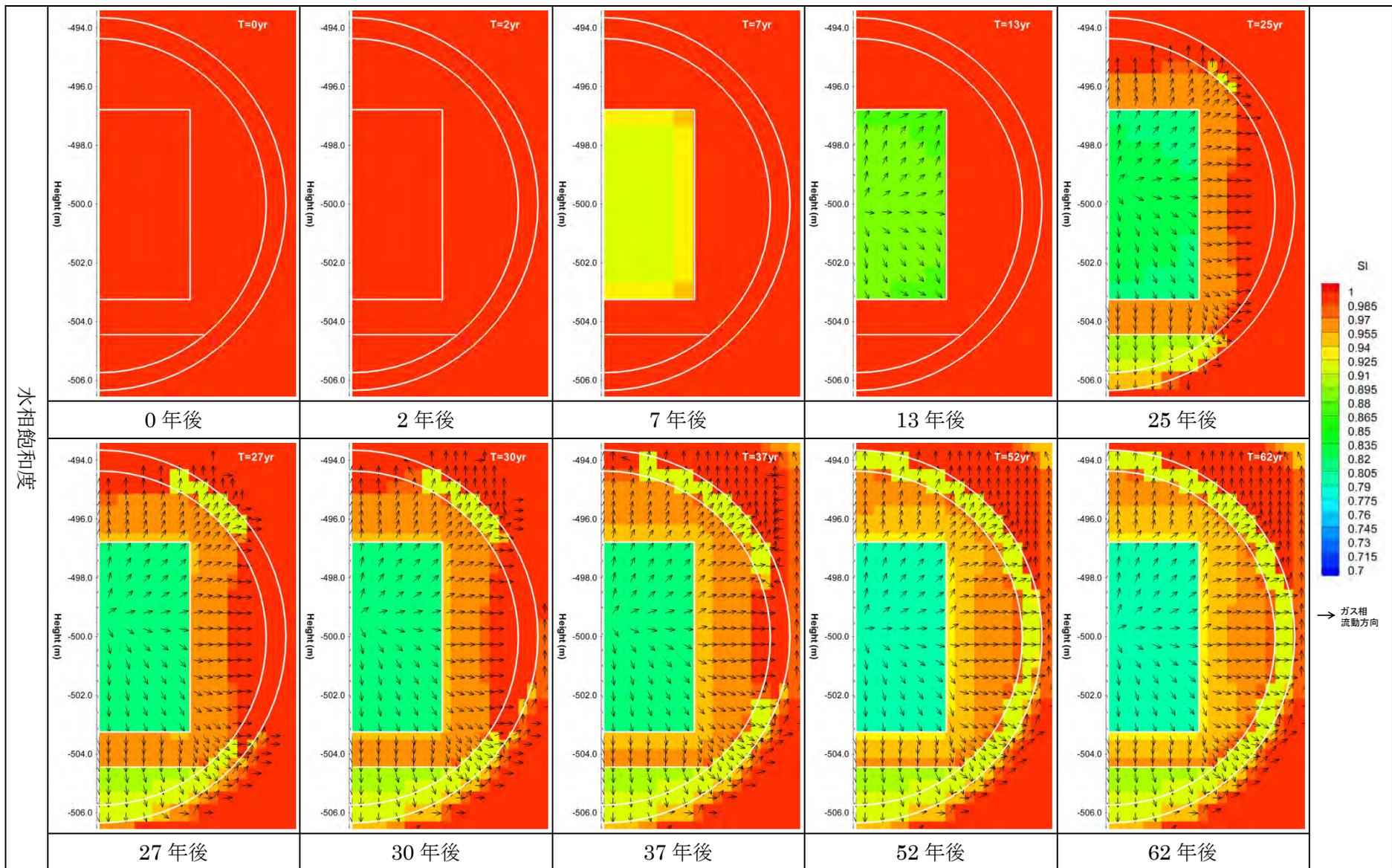


図 3.5.2-19 水相飽和度分布 (初期 pH12.5 ケース)

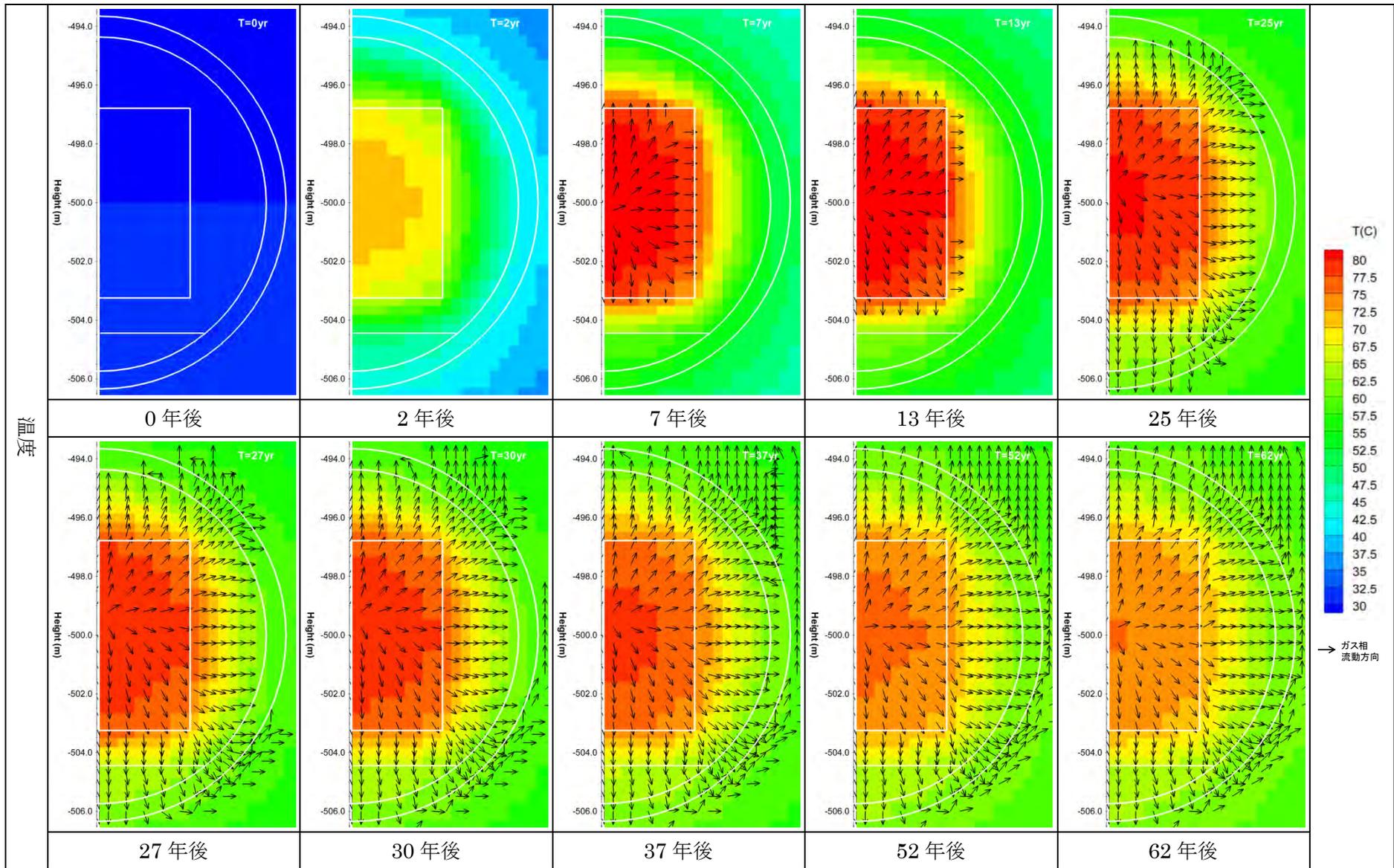


図 3.5.2-20 温度分布 (初期 pH12.5 ケース)

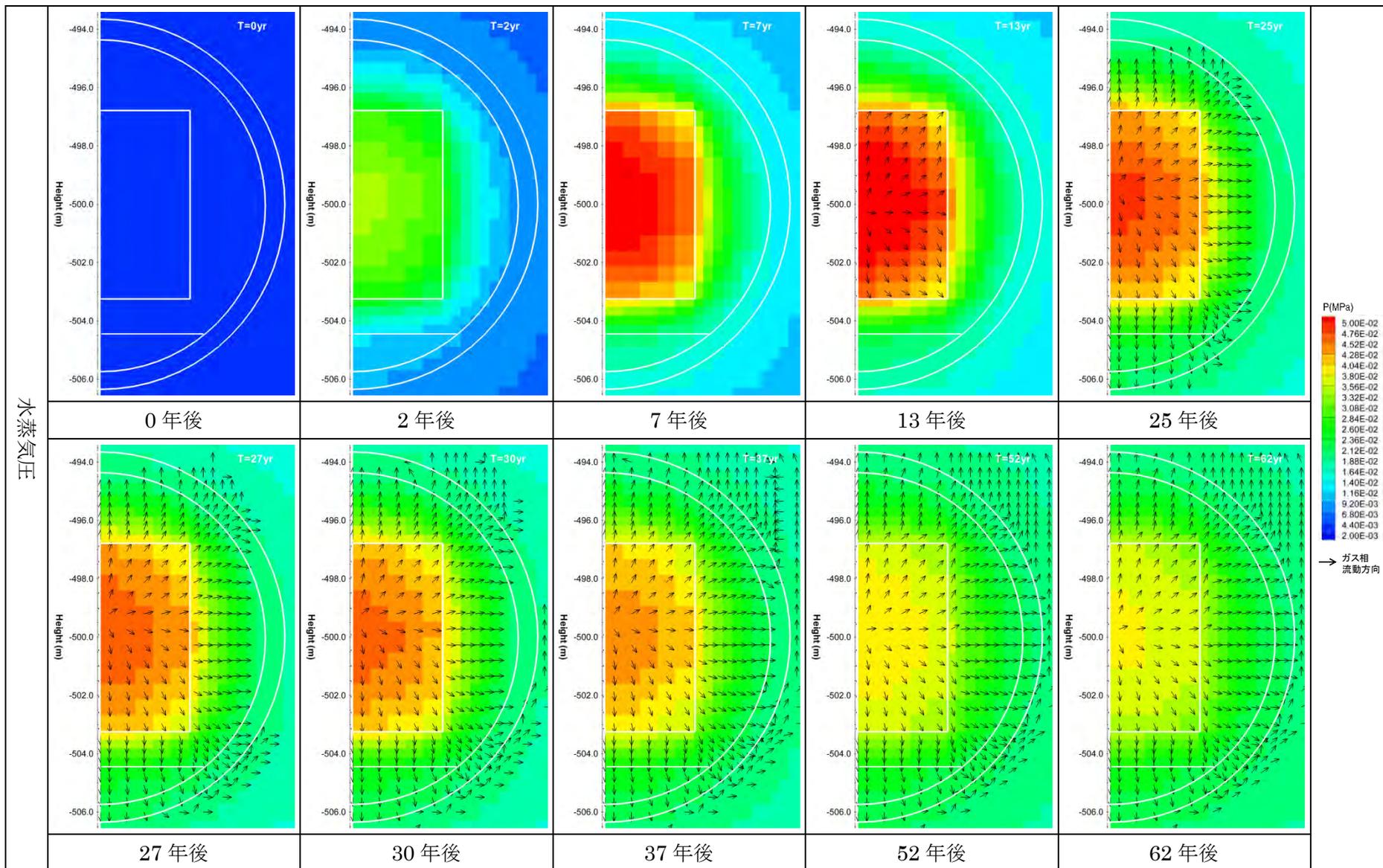


図 3.5.2-21 水蒸気圧分布 (初期 pH12.5 ケース)

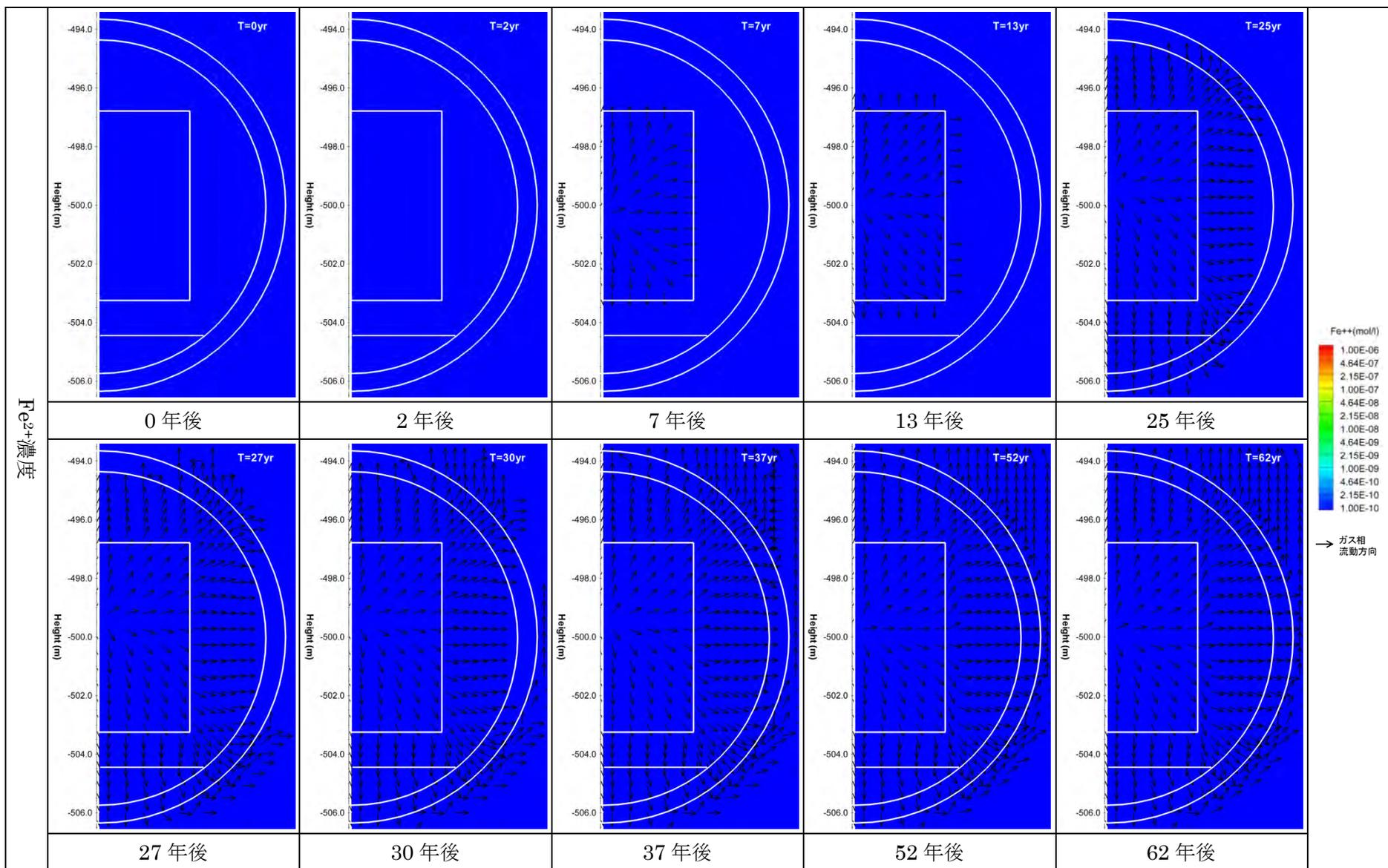


図 3.5.2-22 Fe^{2+} 濃度分布 (初期 pH12.5 ケース)

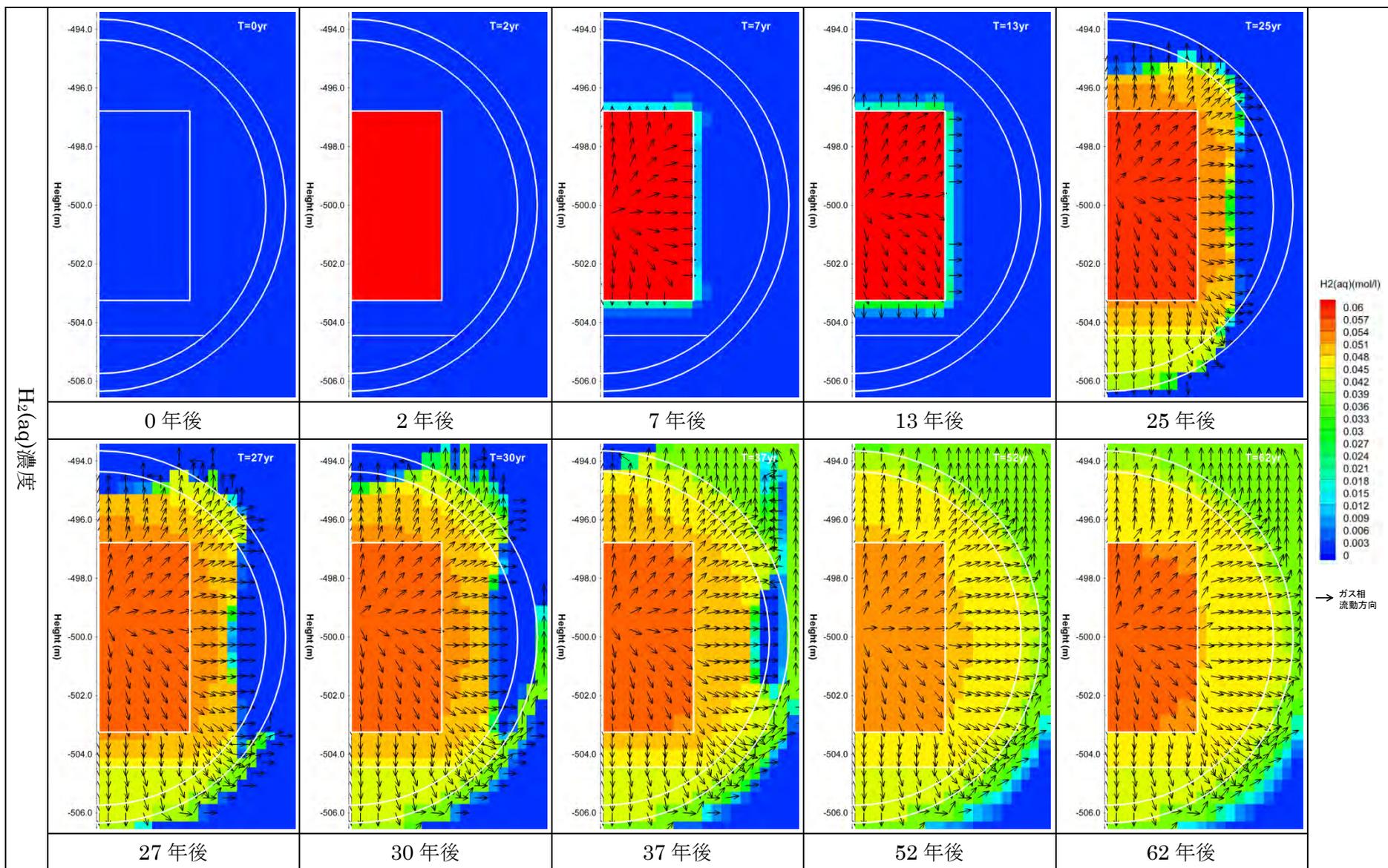


図 3.5.2-23 H₂(aq)濃度分布 (初期 pH12.5 ケース)

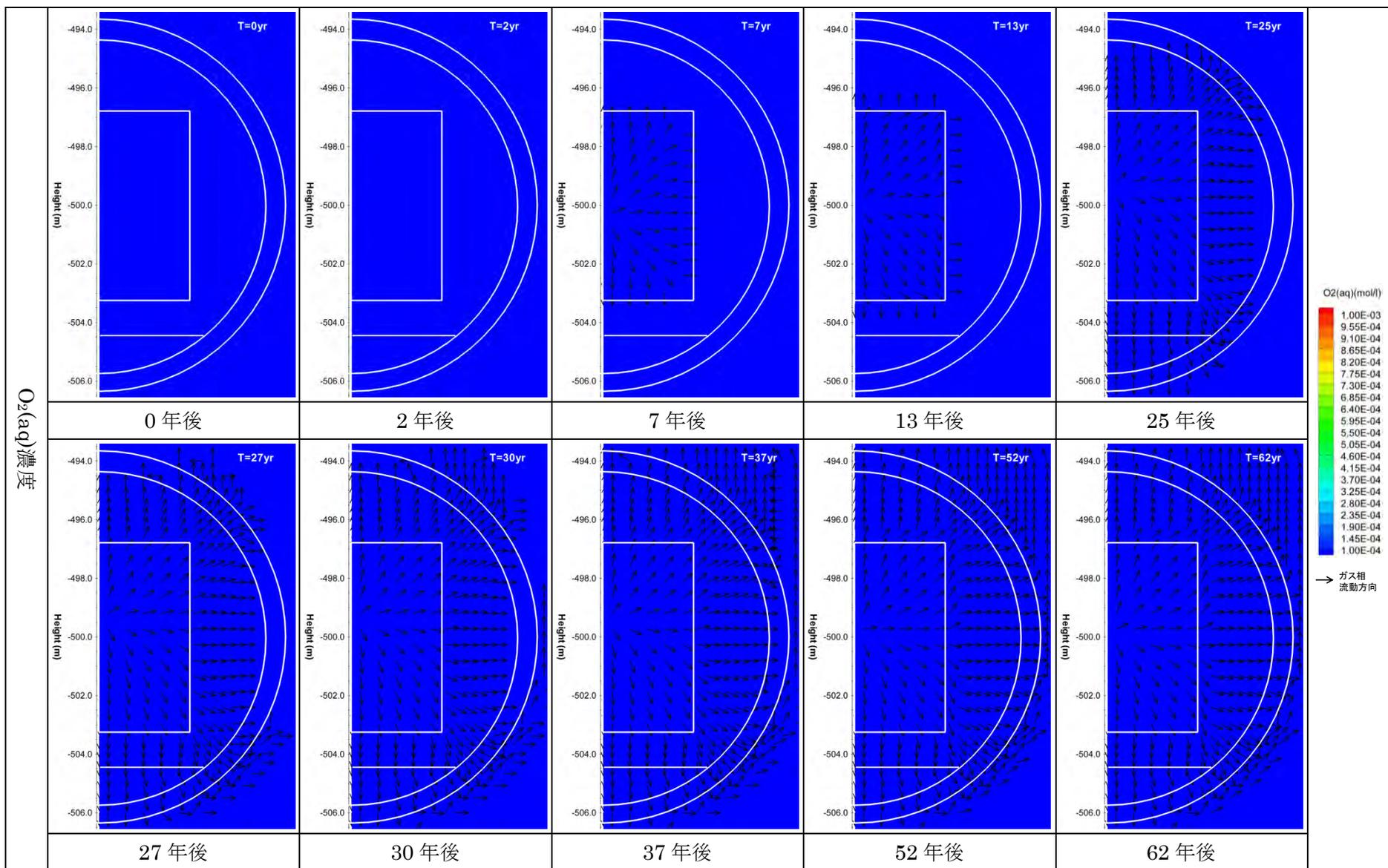


図 3.5.2-24 O₂(aq)濃度分布 (初期 pH12.5 ケース)

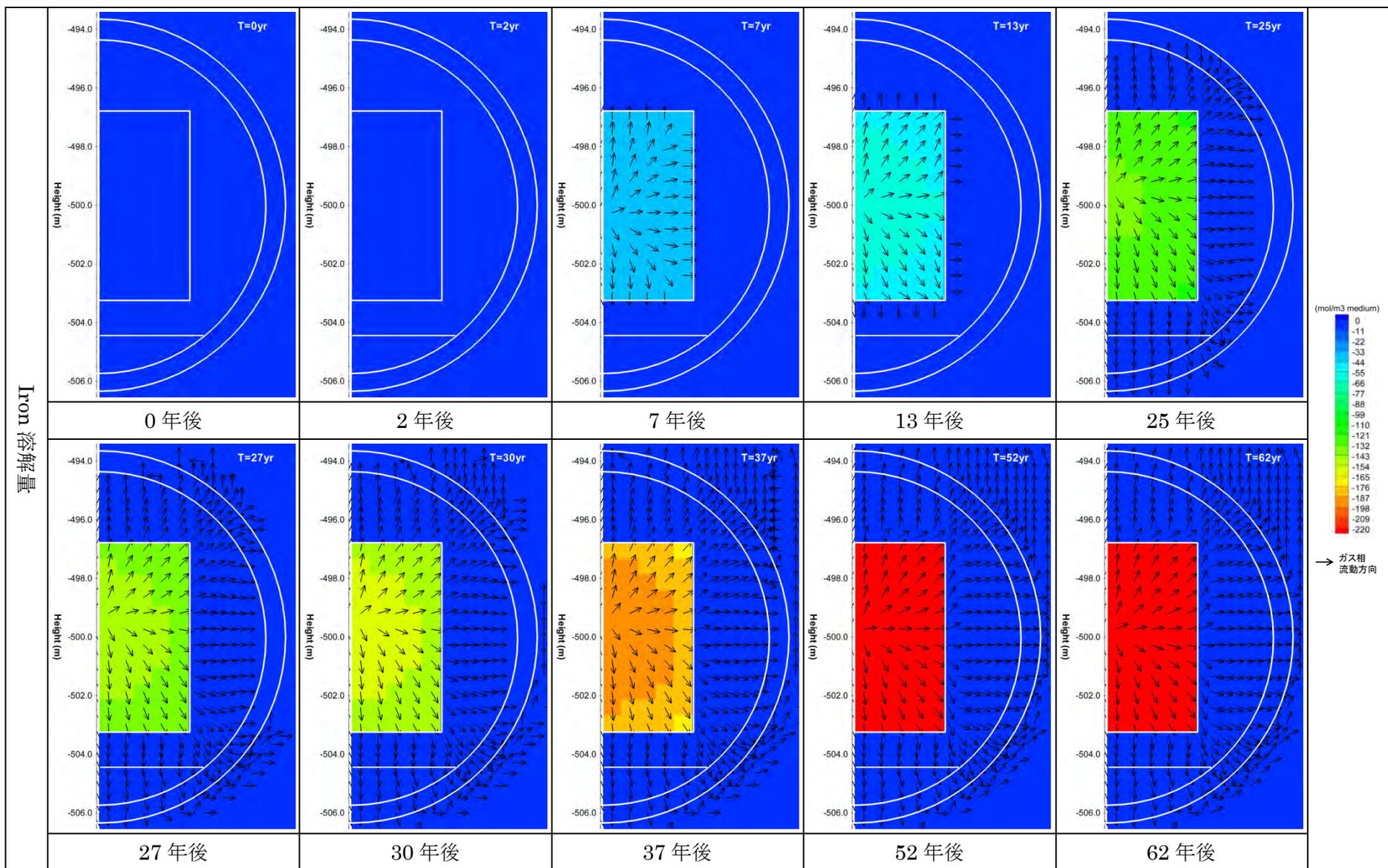


図 3.5.2-25 Iron 溶解量分布 (負値が溶解量) (初期 pH12.5 ケース)

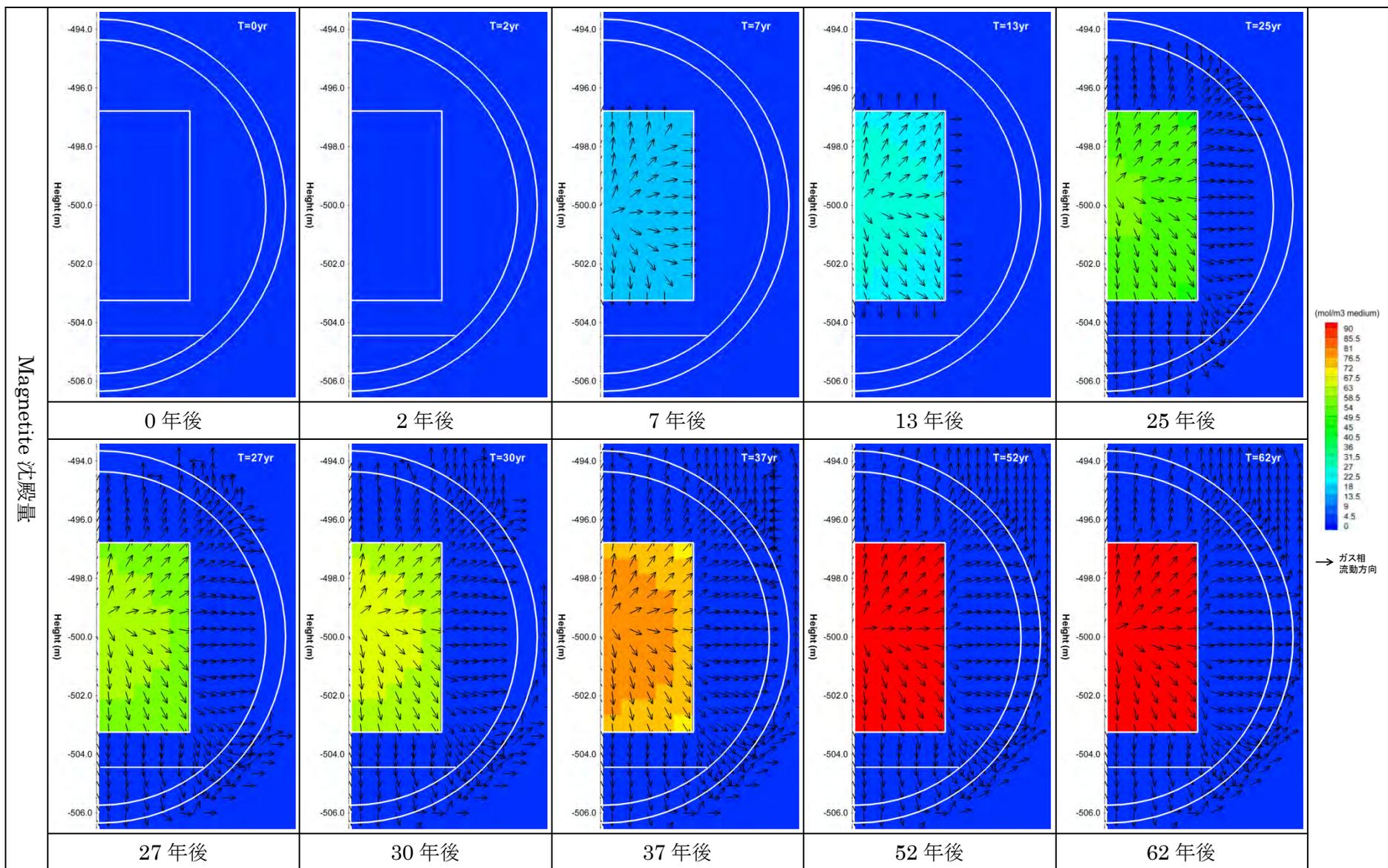


図 3.5.2-26 Magnetite 沈殿量分布 (正值が沈殿量, 負値が溶解量) (初期 pH12.5 ケース)

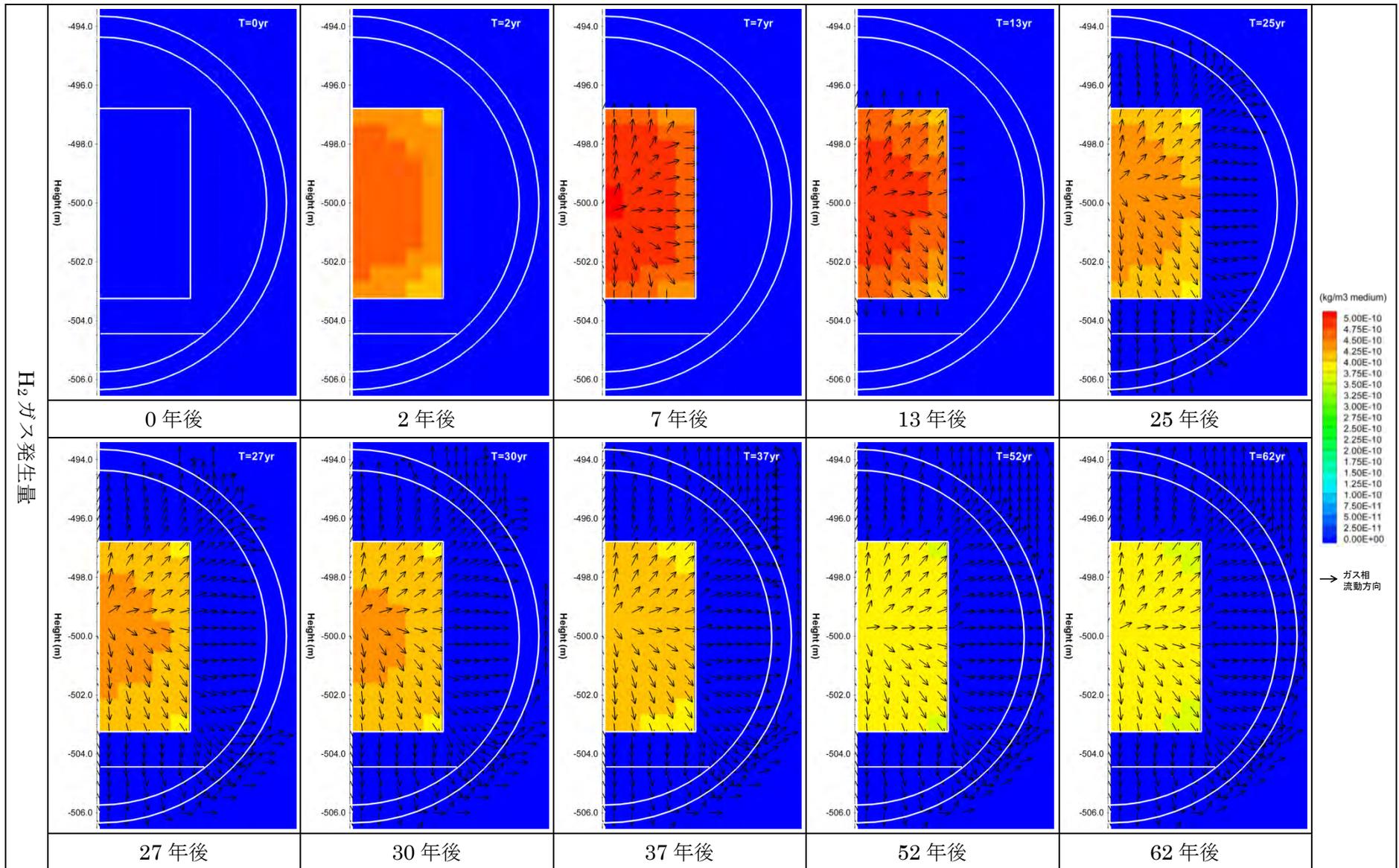


図 3.5.2-27 H₂ガス発生量分布 (初期 pH12.5 ケース)

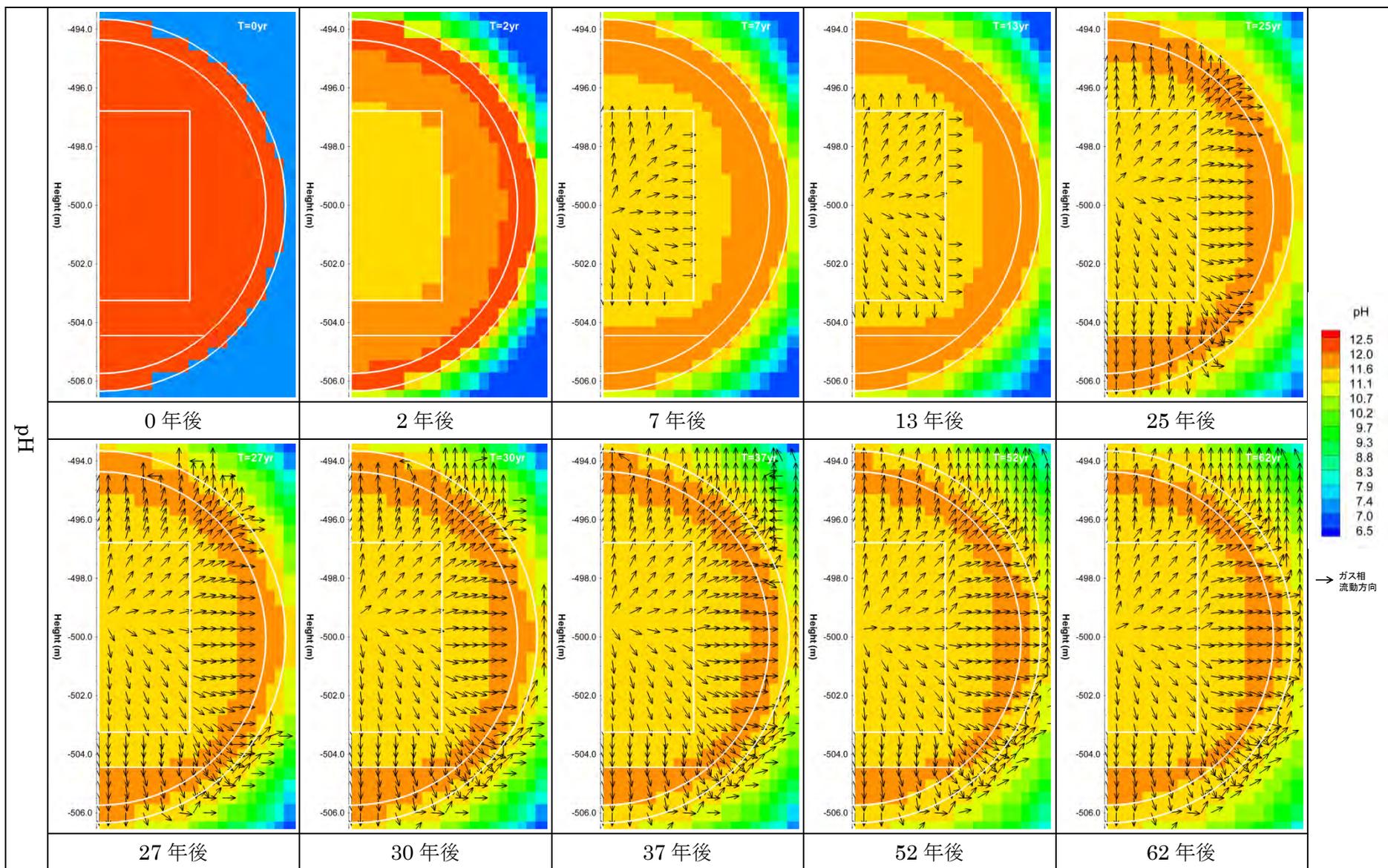


図 3.5.2-28 pH 分布 (初期 pH12.5 ケース)

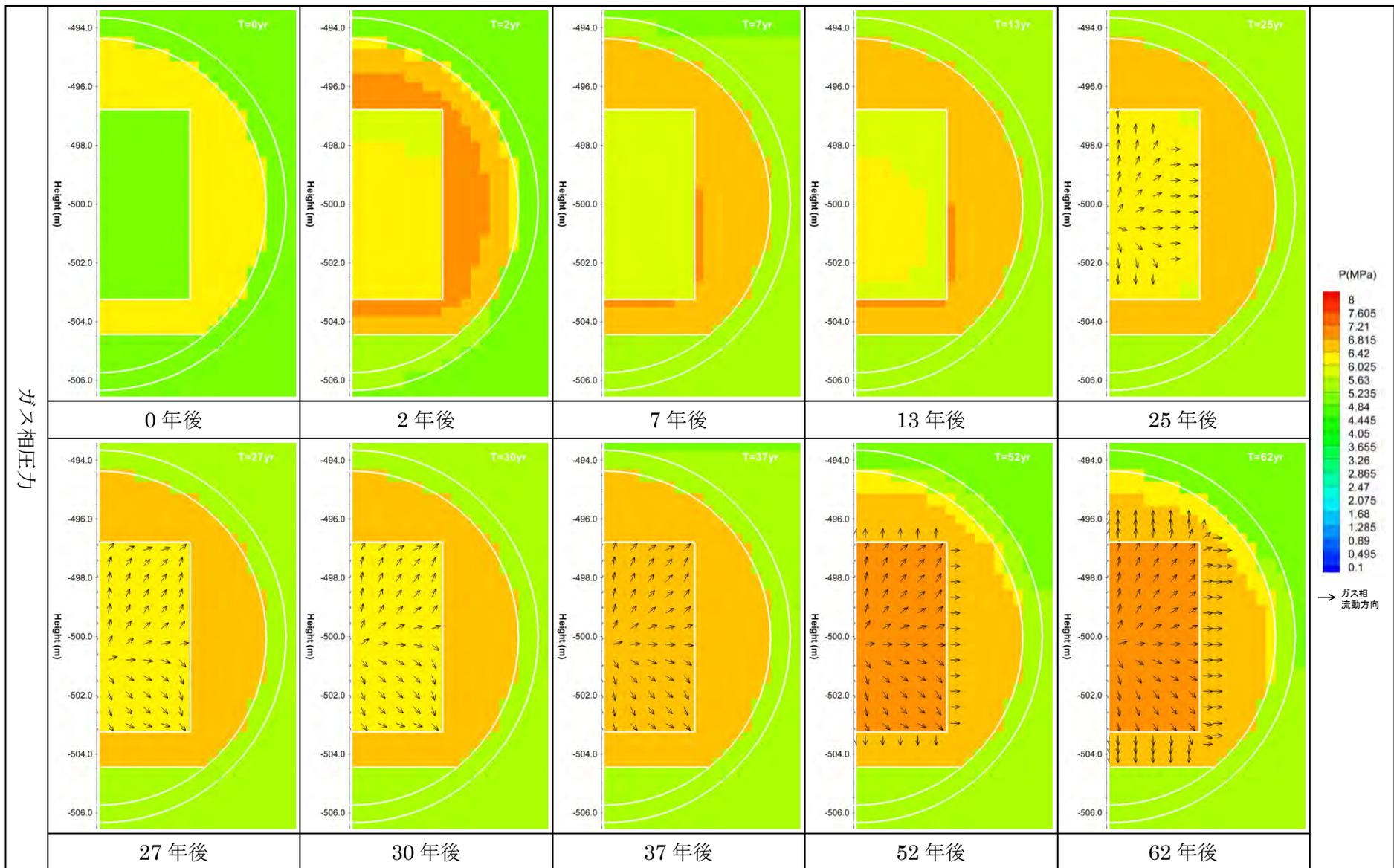


図 3.5.2-29 ガス相圧力分布 (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)

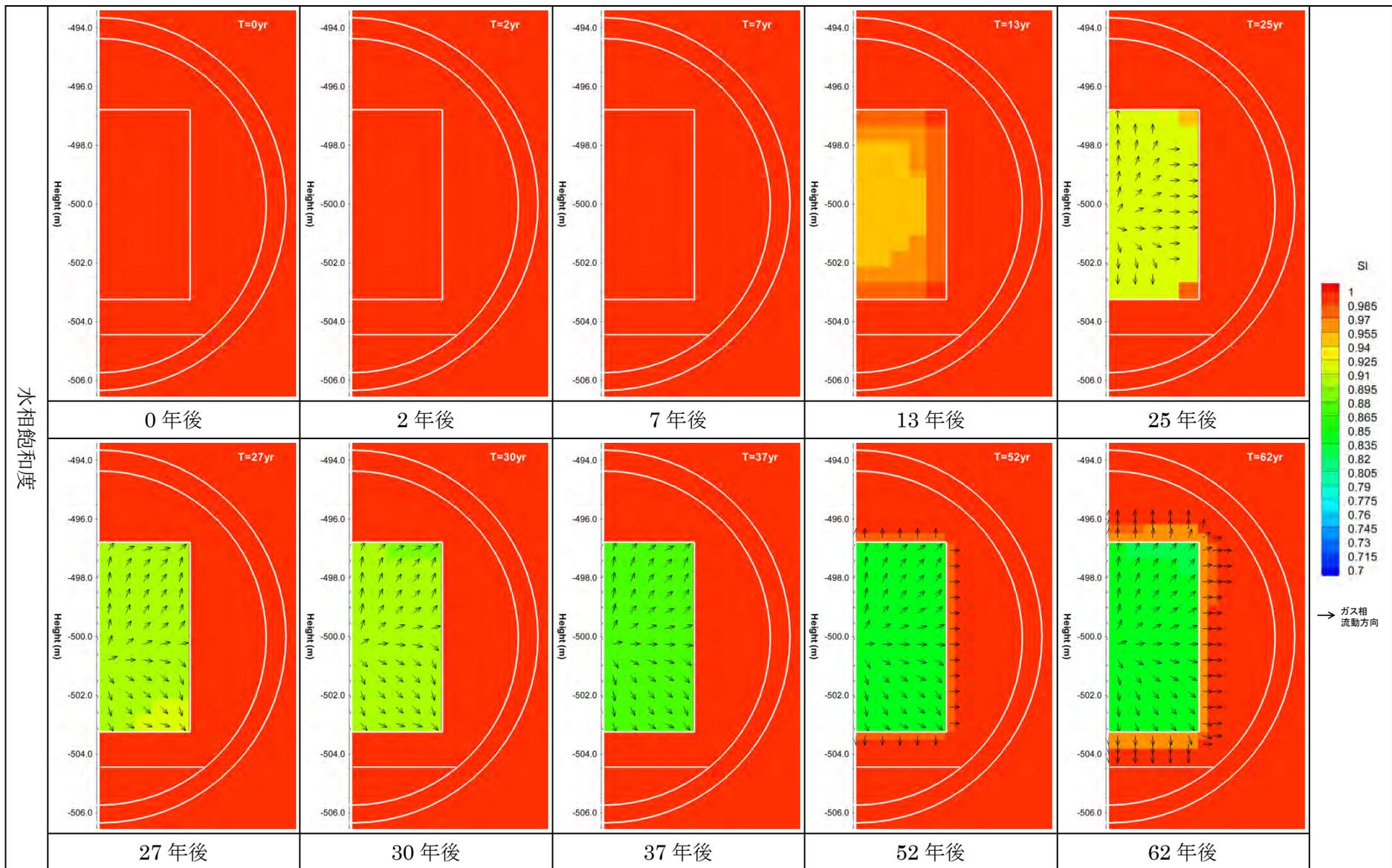


図 3.5.2-30 水相飽和度分布 (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)

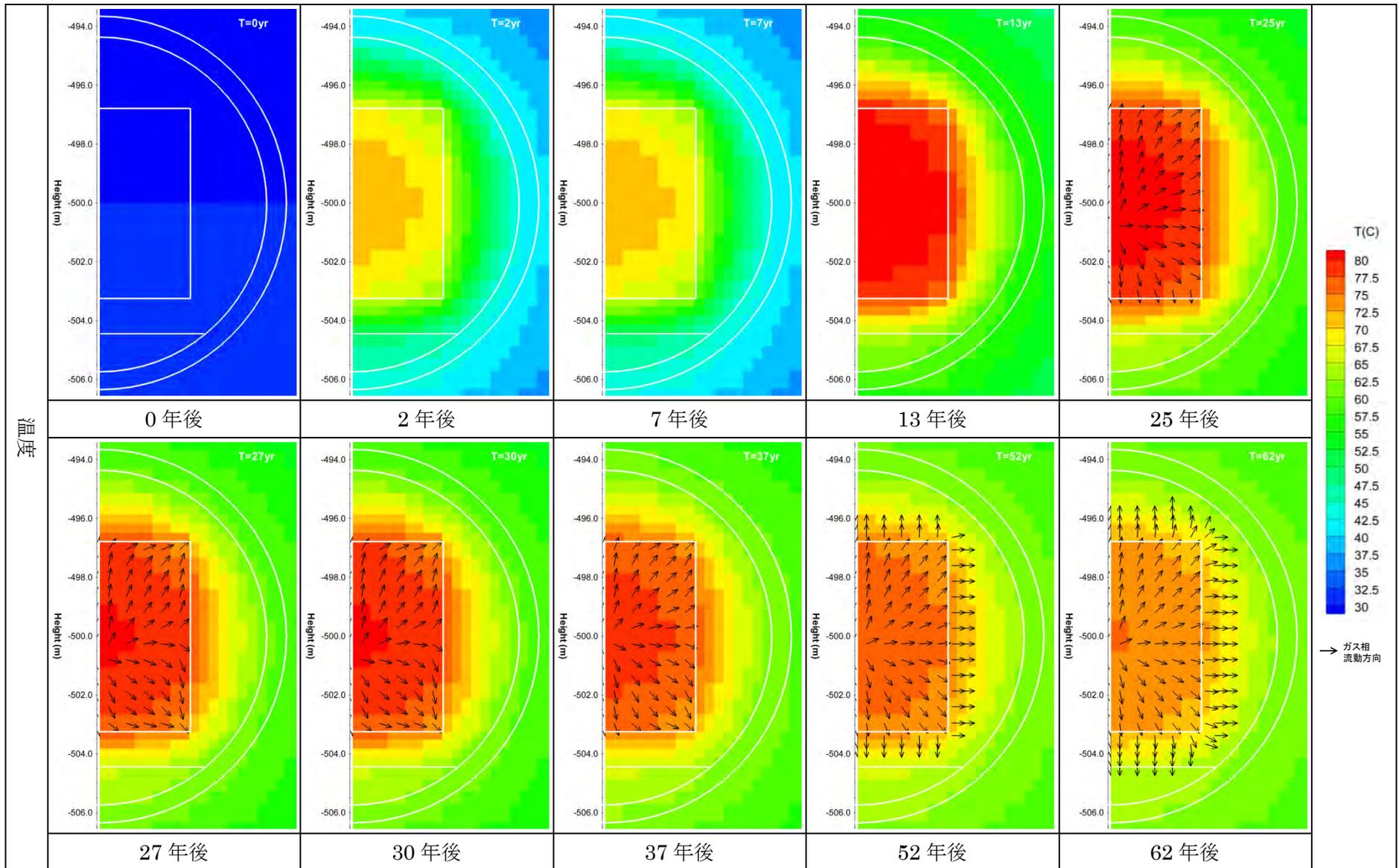


図 3.5.2-31 温度分布 (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)

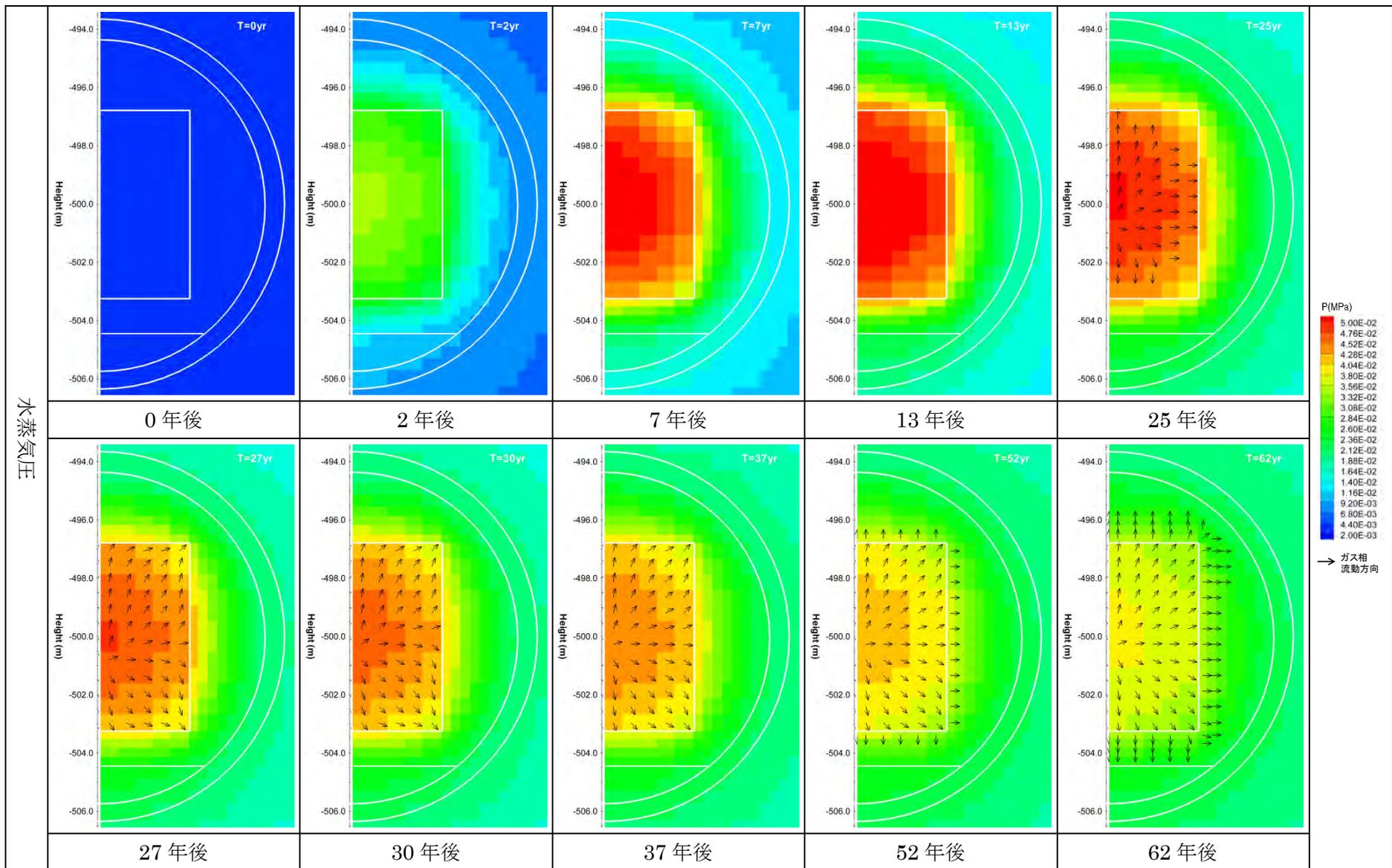


図 3.5.2-32 水蒸気圧分布 (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)

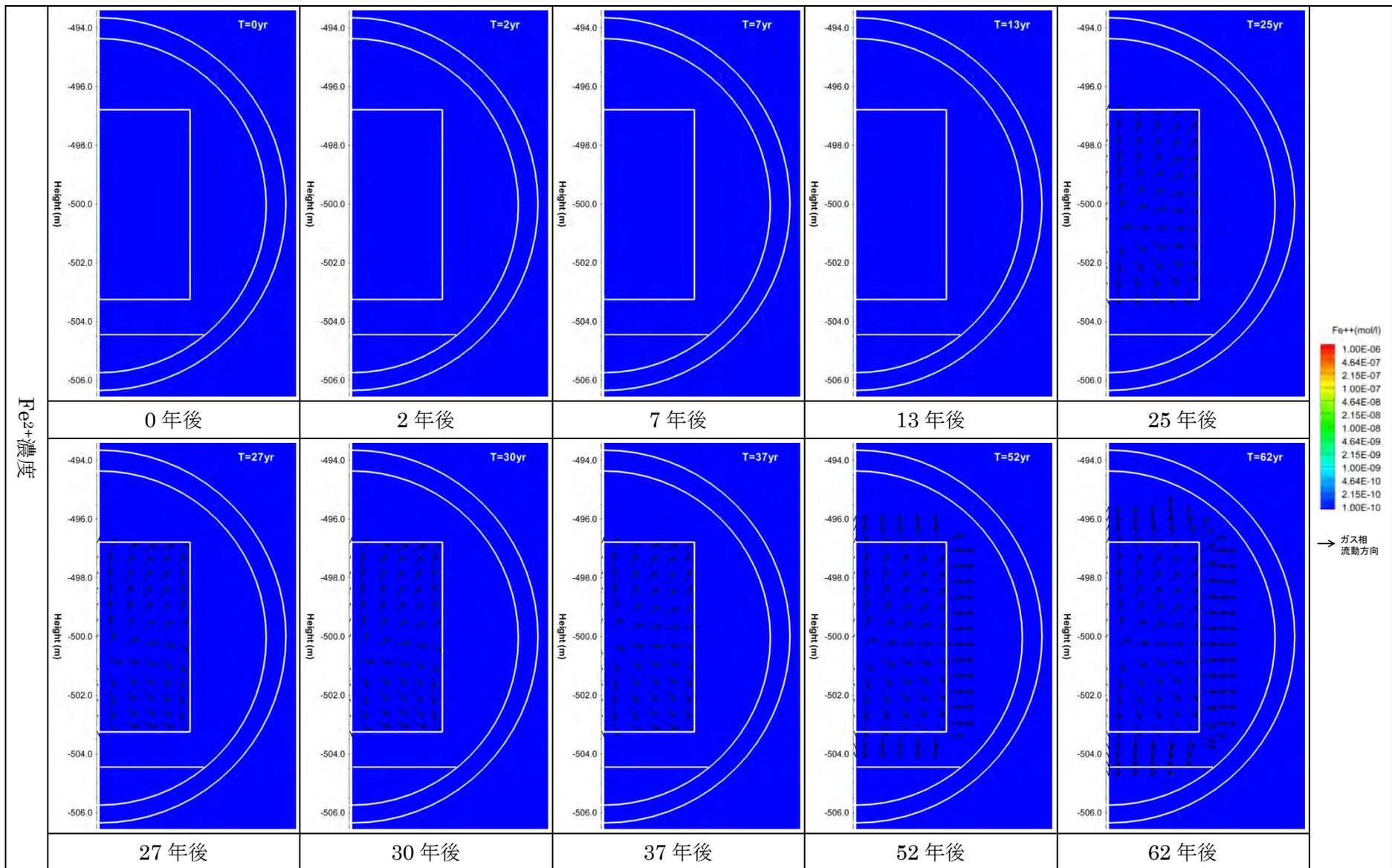


図 3.5.2-33 Fe^{2+} 濃度分布 (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)

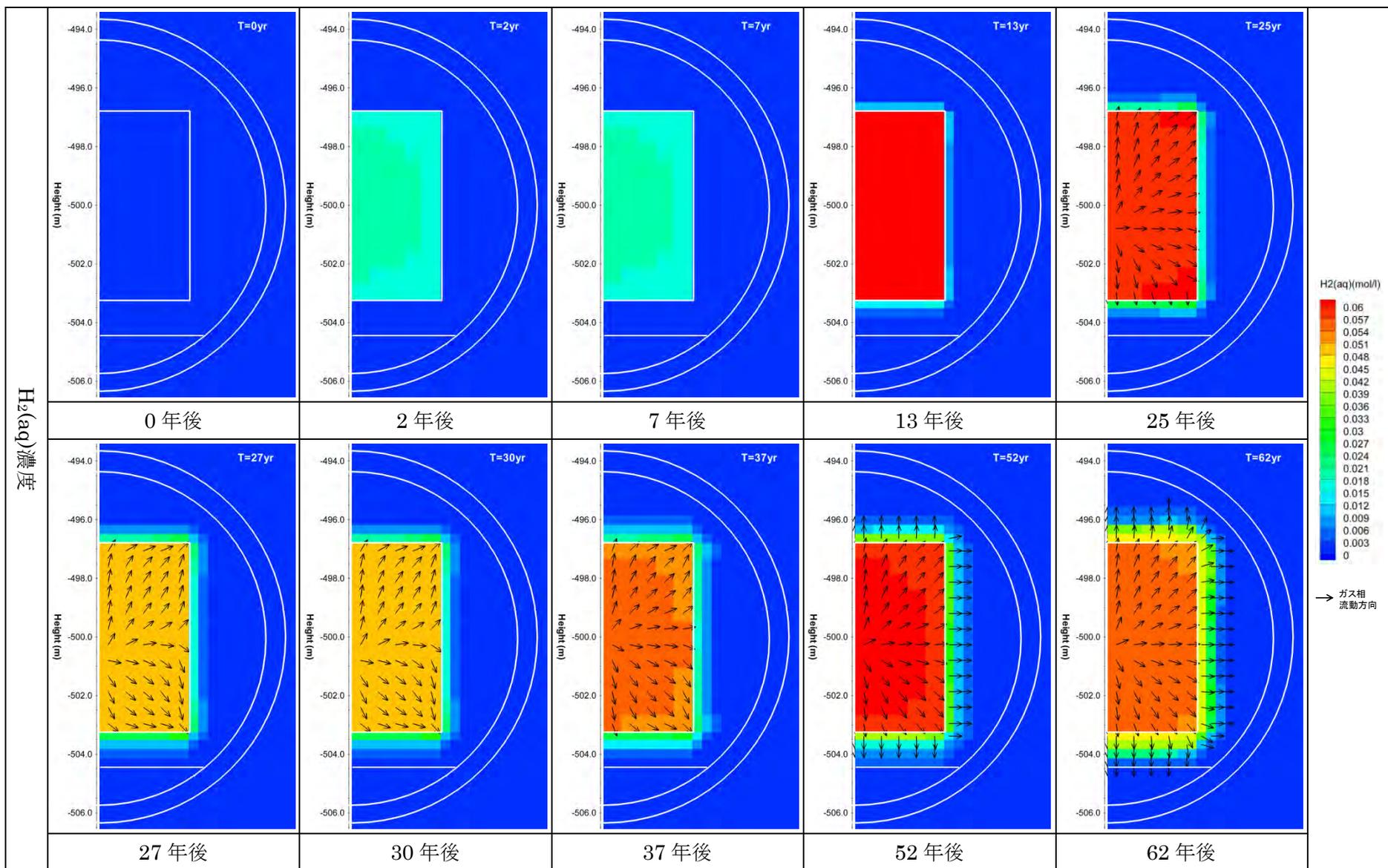


図 3.5.2-34 $H_2(aq)$ 濃度分布 (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)

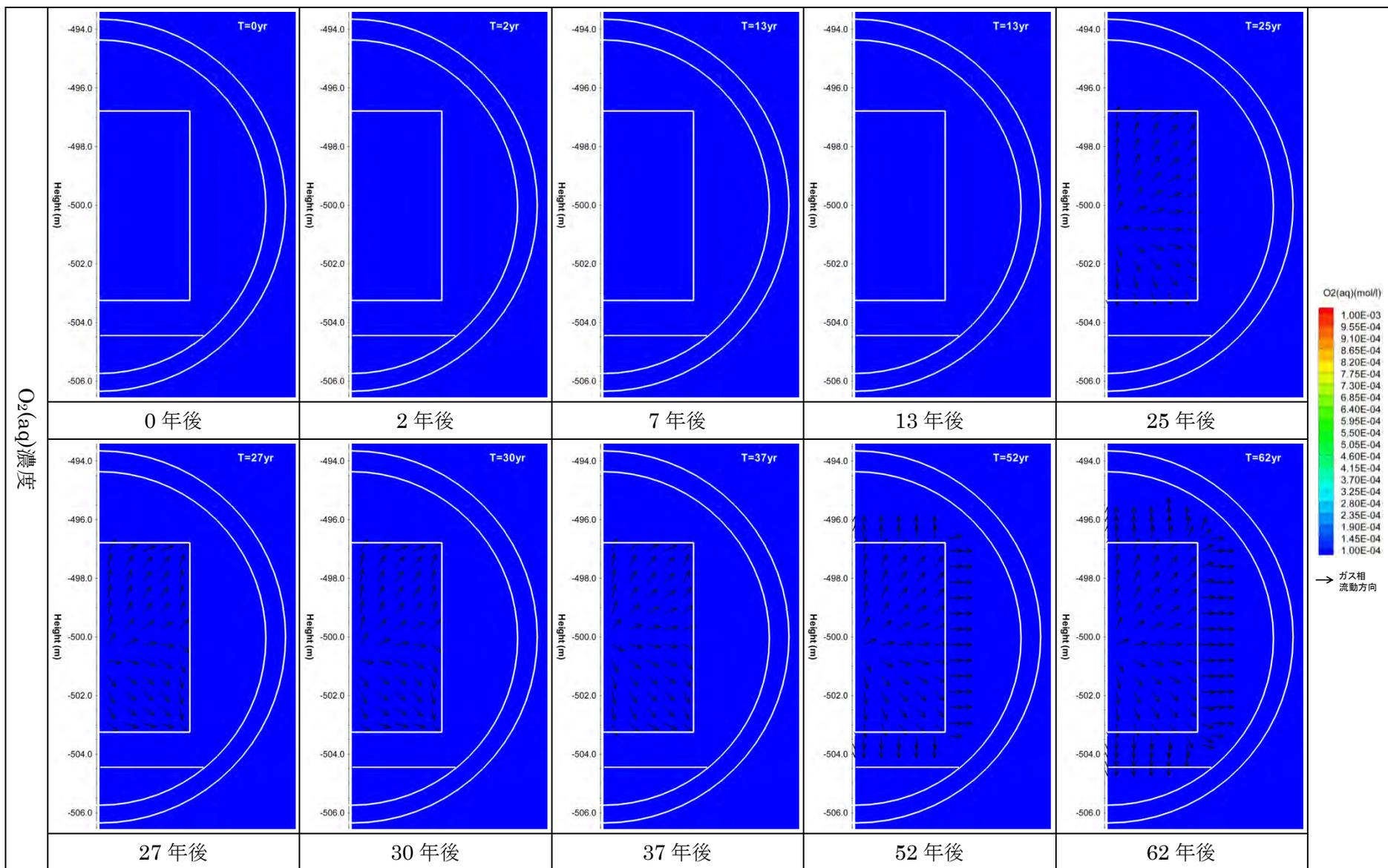


図 3.5.2-35 $O_2(aq)$ 濃度分布 (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)

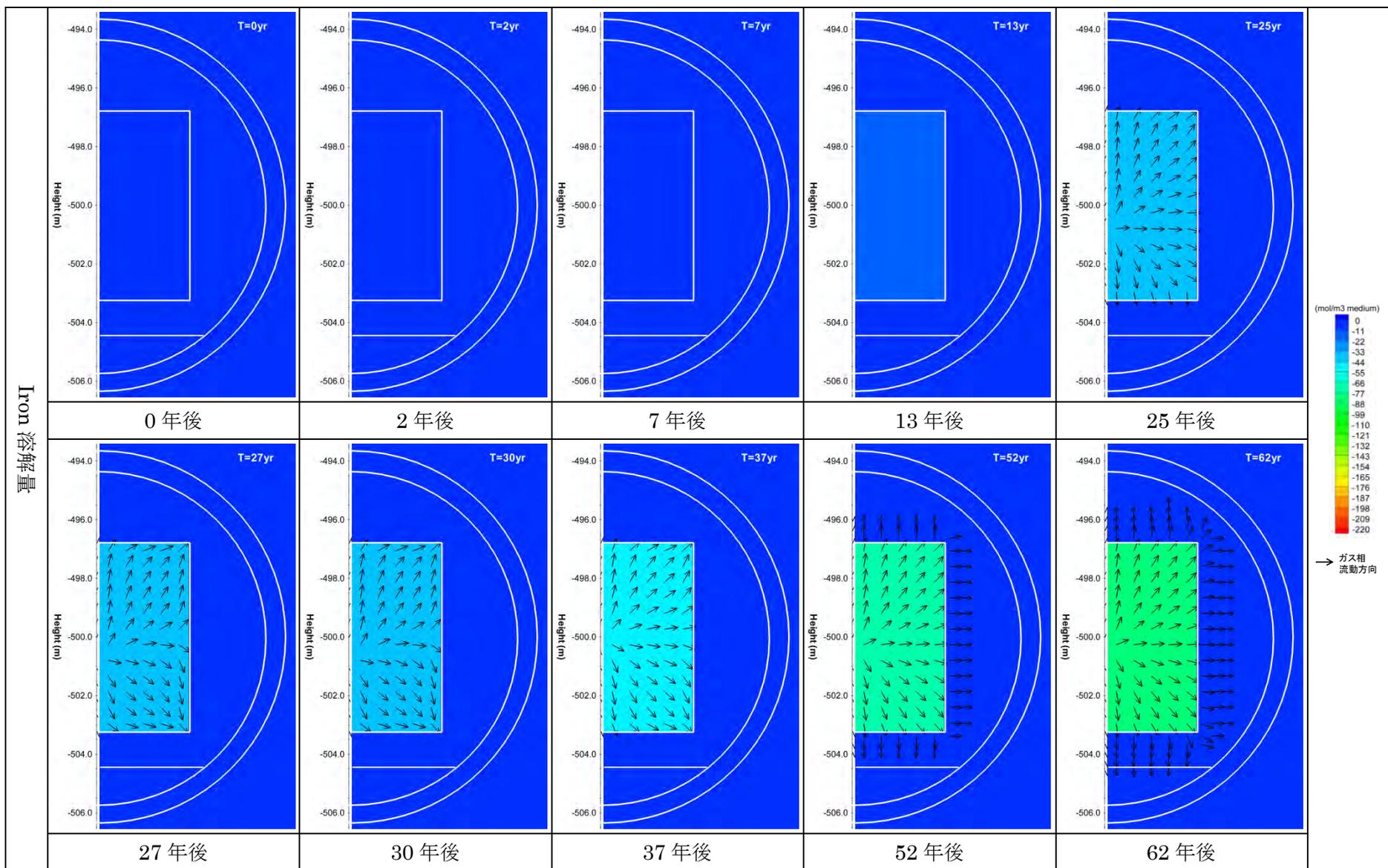


図 3.5.2-36 Iron 溶解量分布 (負値が溶解量) (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)

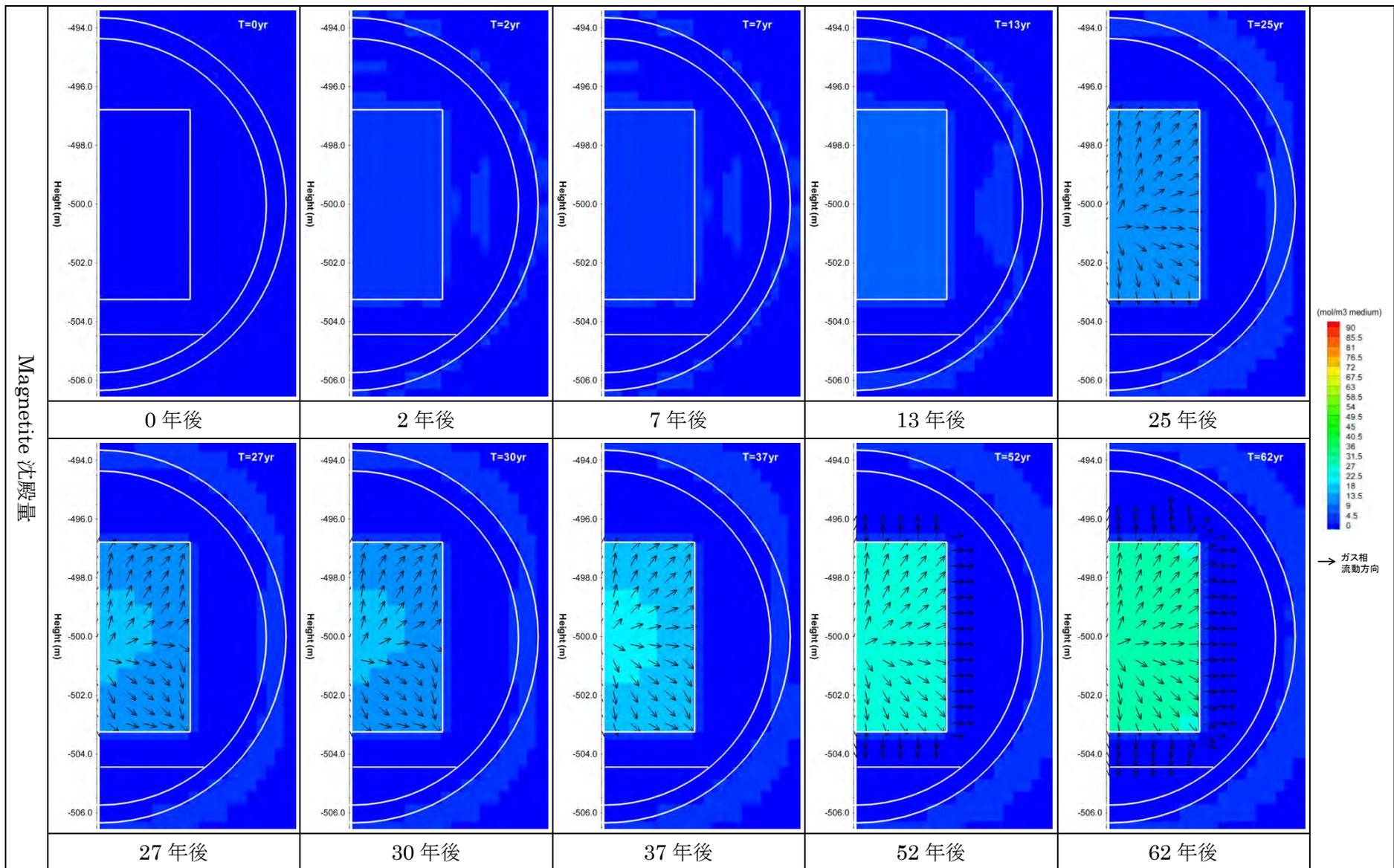
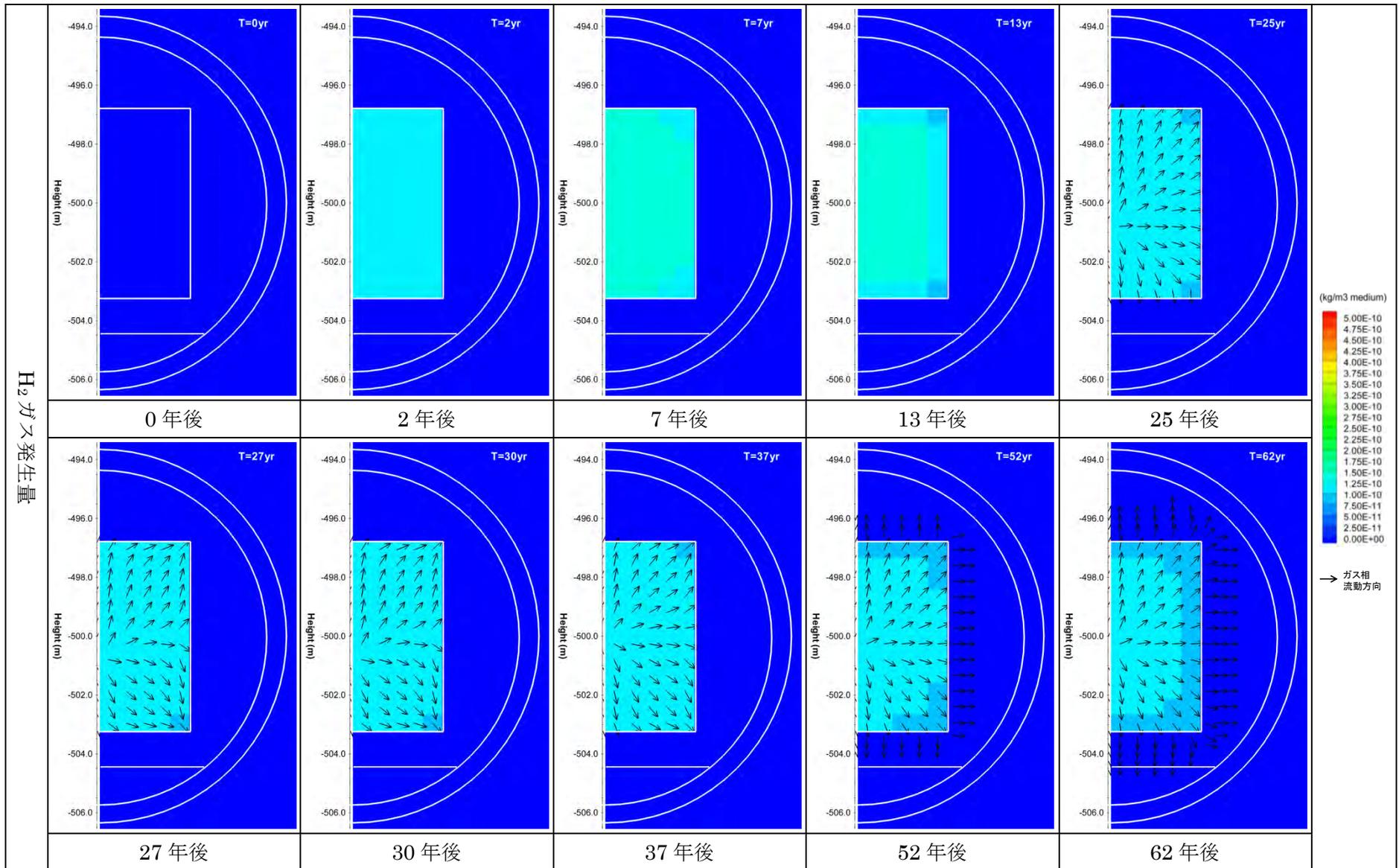


図 3.5.2-37 Magnetite 沈殿量分布 (正值が沈殿量, 負値が溶解量) (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)

H₂ガス発生量図 3.5.2-38 H₂ガス発生量分布 (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)

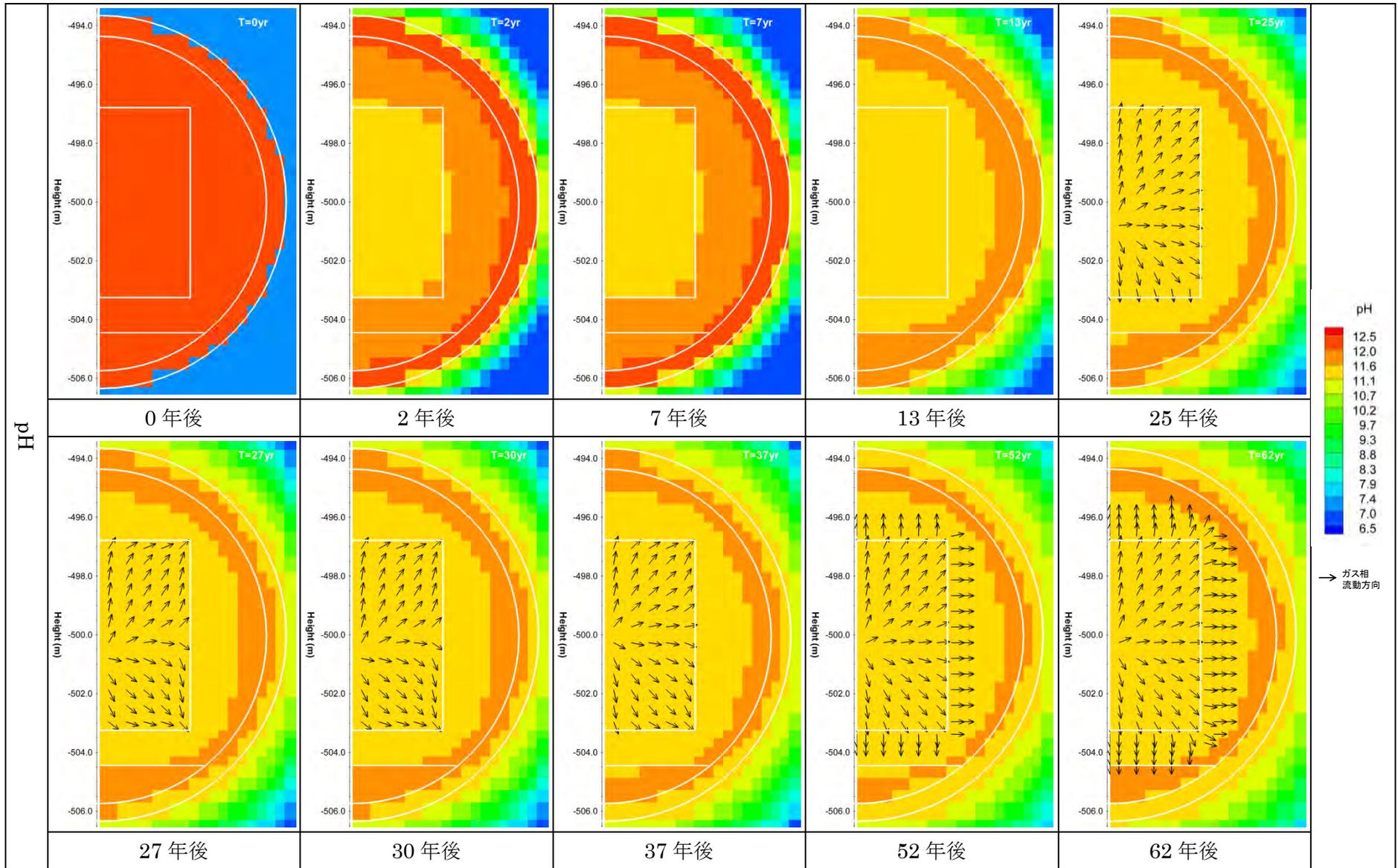


図 3.5.2-39 pH 分布 (初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)

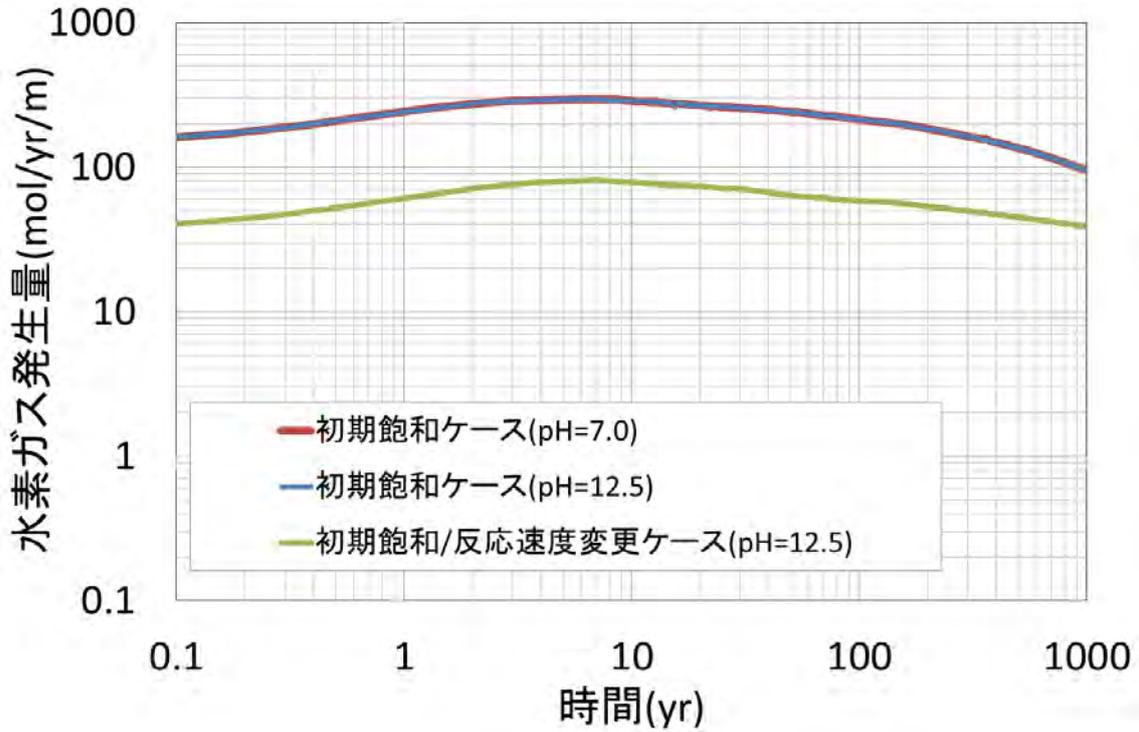


図 3.5.2-40 H₂ ガス発生量の時間変化 (初期 pH7.0 ケース、初期 pH12.5 ケース、初期 pH12.5/ 反応速度 0.25 倍ケースの比較)

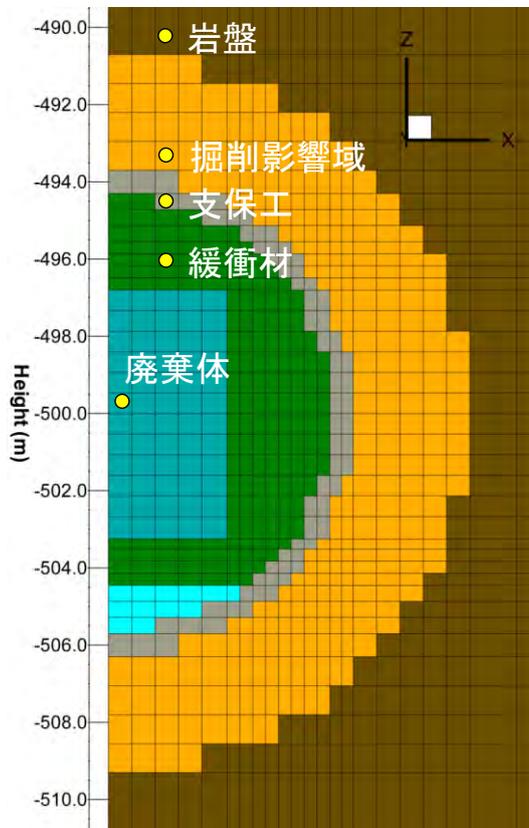


図 3.5.2-41 評価点位置図

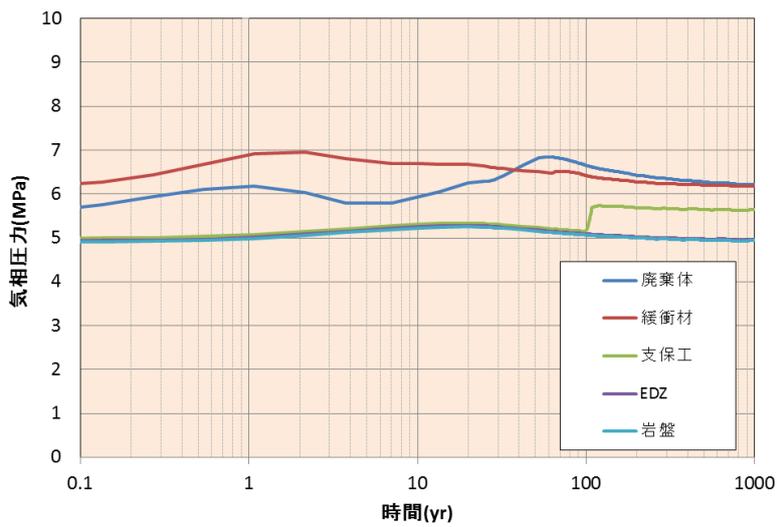
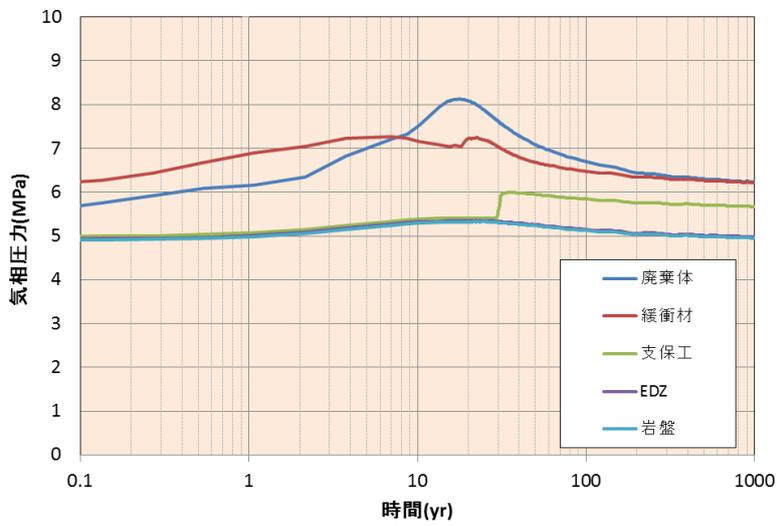
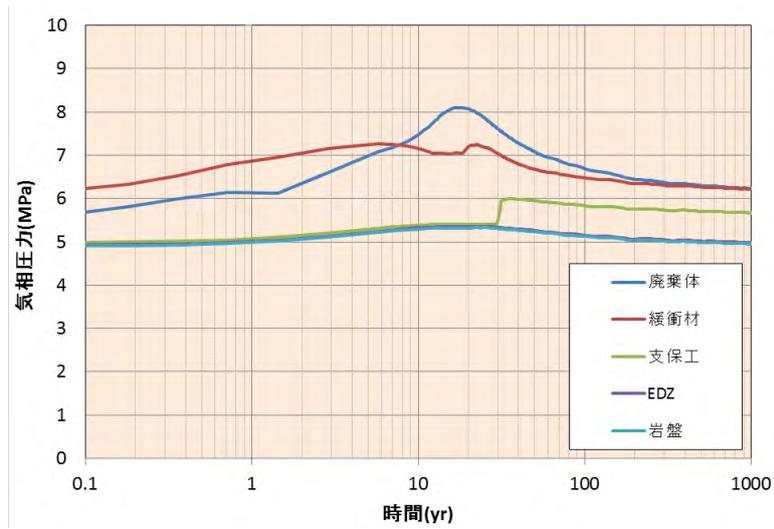


図 3.5.2-42 評価点におけるガス相圧力の時間変化(上段:初期 pH7.0 ケース、中段:初期 pH12.5 ケース、下段:初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)

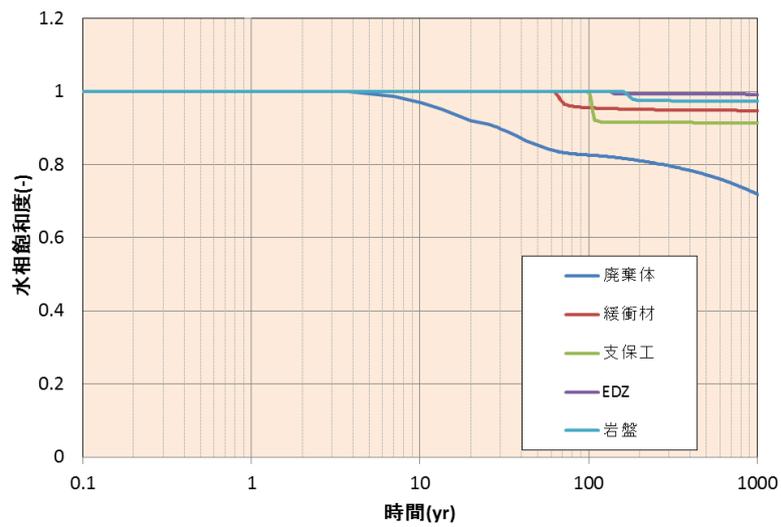
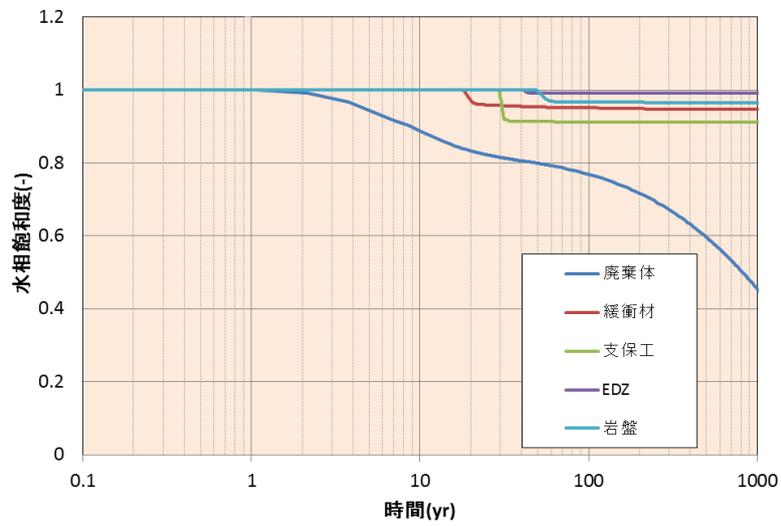
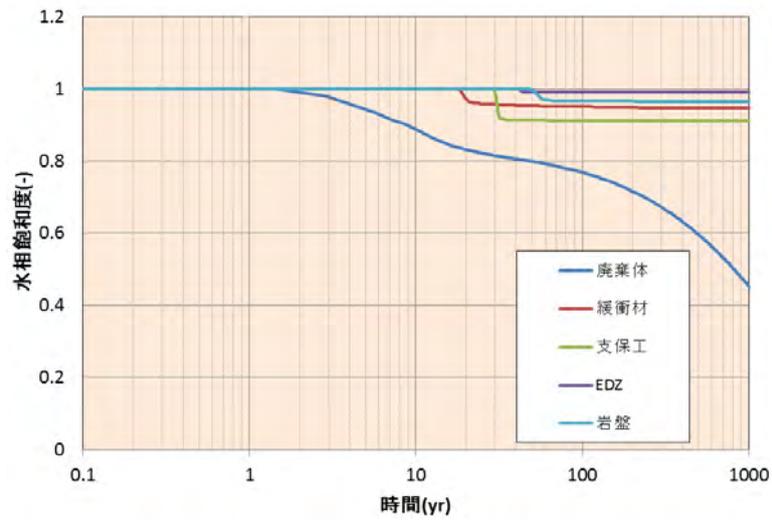


図 3.5.2-43 評価点における水相飽和度の時間変化(上段:初期 pH7.0 ケース、中段:初期 pH12.5 ケース、下段:初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)

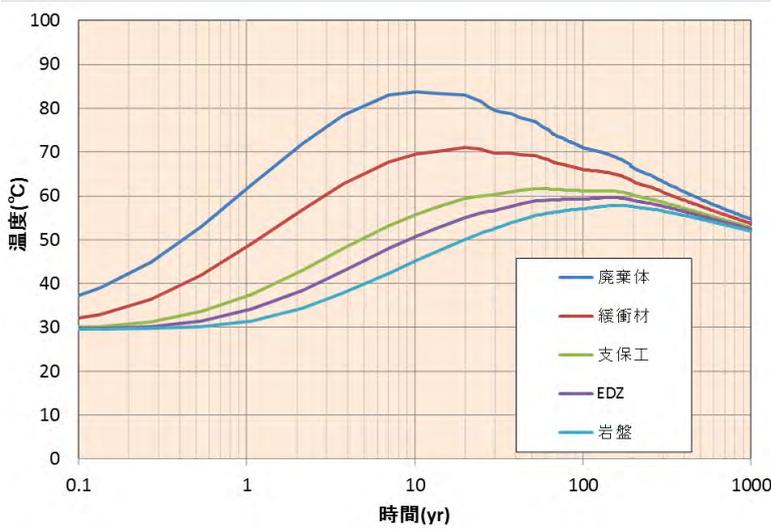
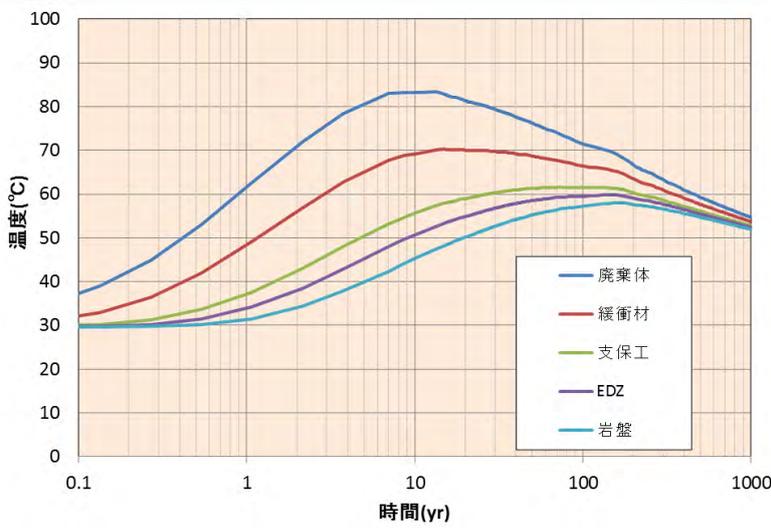
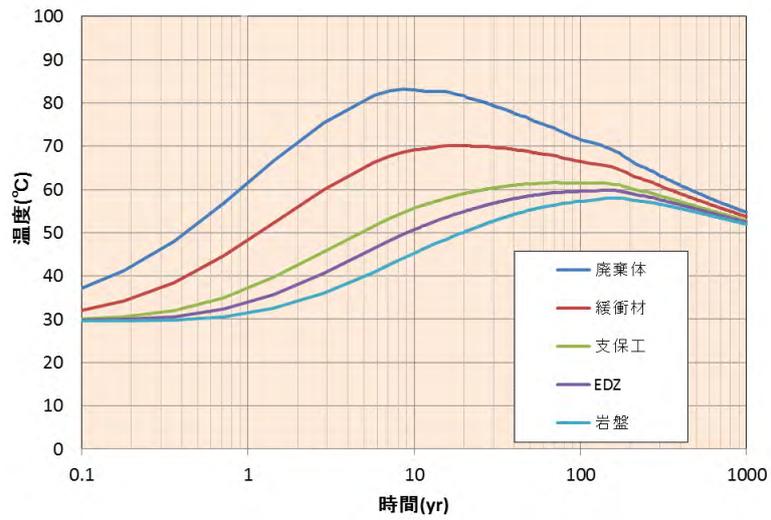


図 3.5.2-44 評価点における温度の時間変化（上段：初期 pH7.0 ケース、中段：初期 pH12.5 ケース、下段：初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース）

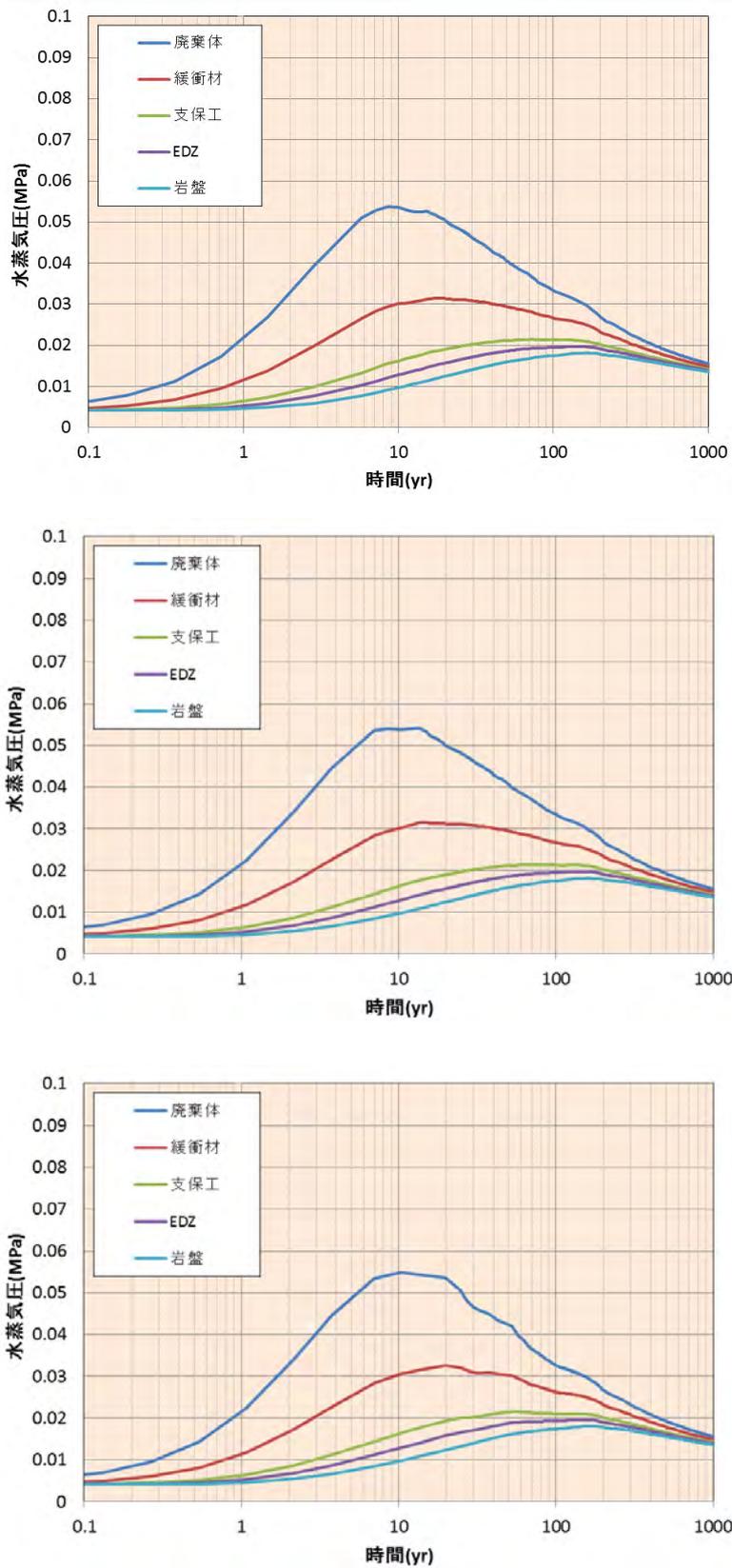


図 3.5.2-45 評価点での水蒸気圧の時間変化（上段：初期 pH7.0 ケース、中段：初期 pH12.5 ケース、下段：初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース）

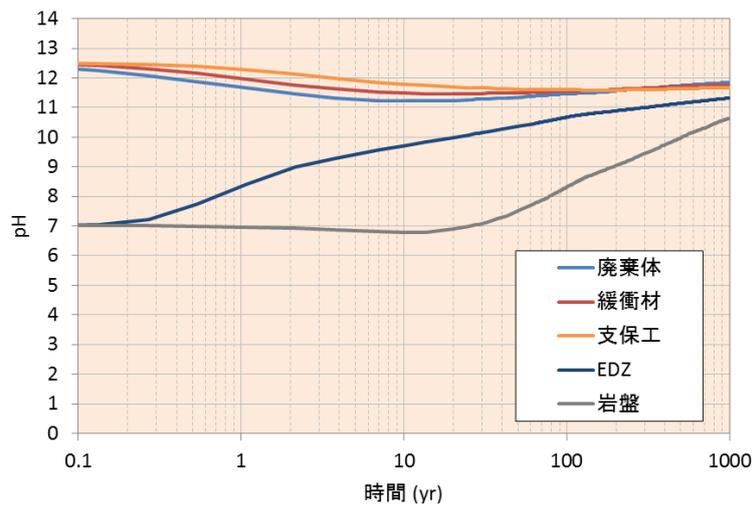
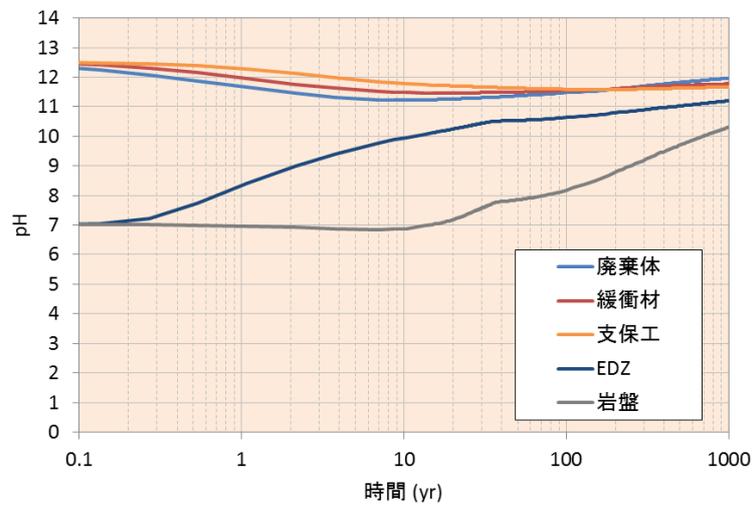
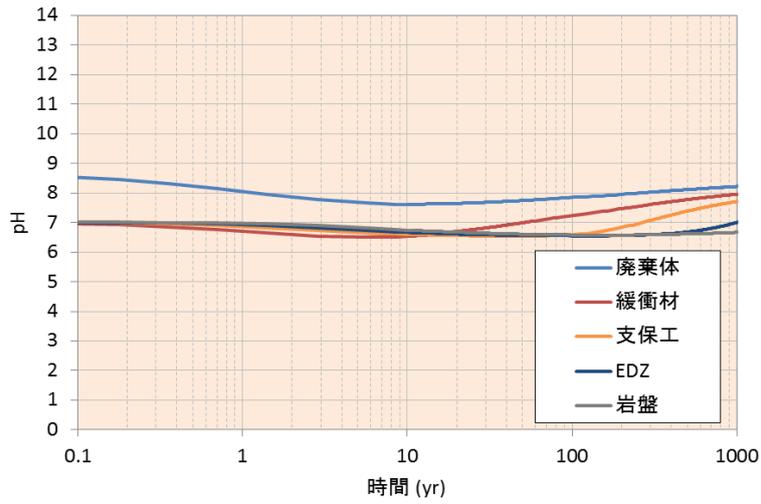


図 3.5.2-46 評価点での pH の時間変化 (上段: 初期 pH7.0 ケース、中段: 初期 pH12.5 ケース、
下段: 初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース)

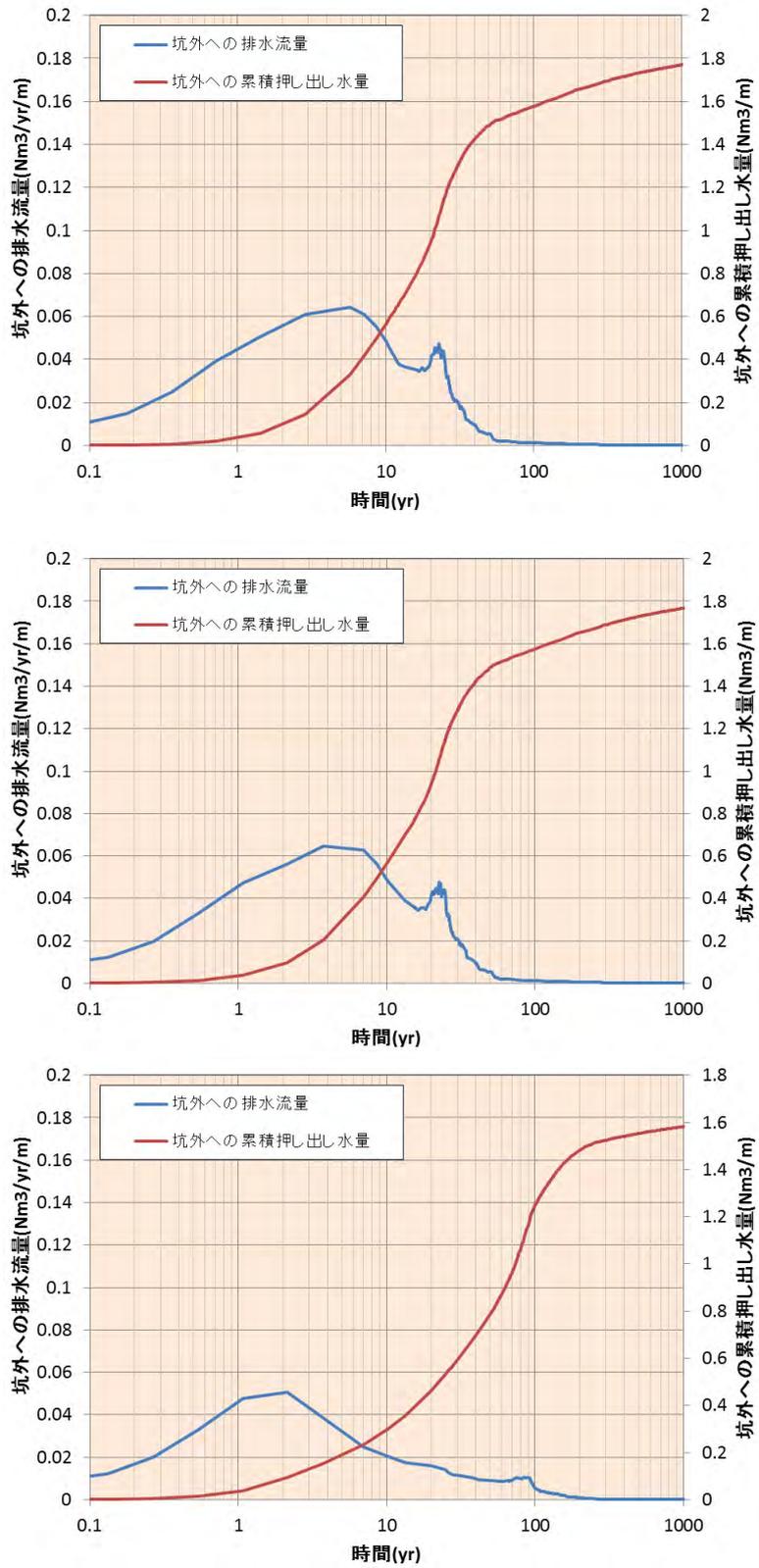


図 3.5.2-47 坑外への排水流量と累積押し出し水量の時間変化（上段：初期 pH7.0 ケース、中段：初期 pH12.5 ケース、下段：初期 pH12.5/反応速度 0.25 倍ケース）

3.6 まとめ

TRU 廃棄物処分施設の性能評価や安全評価に資するガス移行連成モデリングツールの構築を目的とし、以下の示す 3 つの項目に対して検討を行った。本検討で得られた成果は以下のように要約される。

3.6.1 最新のガス移行試験データによる確証計算

- 乾燥密度 1.36Mg/m^3 の 100%クニゲル V1 (直径 60mm、高さ 25mm) を用いた 3 つの供試体を使用して実施された、湿潤過程と排水 (ガス注入) 過程の両方を含む室内試験の実測データの整理、分析を行った。
- 水・ガス 2 相流解析コード及び力学連成 2 相流解析コードを用いて、これらの実測データの再現解析を行った。
- 水・ガス 2 相流解析コードを用いた検討では、湿潤過程において逆解析を用いることで実測データを良好に再現することが可能であり、実測された毛細管圧力とも整合するパラメータが同定された (ばらつきも小さい)。
- ガス注入過程では、これまでに同定されている 2 相流パラメータをベースとし、微調整によって実測データを良好に再現することが可能であった。但し、実測された毛細管圧力よりも小さくなるパラメータが同定された (ばらつきが大きい)。
- 力学連成 2 相流解析コードを用いた検討では、水・ガス 2 相流解析コードによる再現解析から同定された 2 相流パラメータを用いて再現解析を実施した。既往の力学パラメータを用いた場合、供試体下部での変形を過大評価しており、実測によって推定された間隙率を再現困難であった。そこで、実際はより力学変形が生じにくい媒体であったと推定し、力学パラメータの調整によって、間隙率を再現することができた。さらに、累積注水量や全応力等のその他の測定データも概ね良好に再現すること可能であった。
- 本検討では、これまでに同定された 2 相流パラメータをベースとし、わずかな調整によって実測データを再現することが可能であった。これまでの検討を通じて、2 相流パラメータの不確実性の幅が絞り込まれてきていると言える。

3.6.2 確証データの登録およびデータの追加収集・整備

- 「最新のガス移行試験データによる確証計算」において同定された 6 件のパラメータを、基本物性データライブラリ及び非線形物性データライブラリ本体へ追加登録した。
- 追加登録に伴い、マニュアル内の登録データ一覧及びマニュアル付録の収録パラメータの同定経緯を修正し、マニュアルの改定を行った。

3.6.3 TRU 廃棄物処分システムを対象としたガス移行解析における不確実性を考慮したガス移行挙動の評価

- TRU 廃棄物処分システムを対象としたガス移行解析におけるデータとモデルの不確実性に着目し、これまでに本研究で得られた成果と、国内外で得られている成果との対比をまとめ、現状の課題を抽出した。
- 粘土系材料（ベントナイト、ベントナイト・砂混合材料）に関しては、絶対浸透率は十分なデータが蓄積されてきており、2 相流パラメータ（毛細管圧力、相対浸透率）においても、その適用性が検証されており、不確実性の幅が捉えらえるようになってきている。セメント系材料に関しては、データの蓄積に着手した段階であり、引き続き取得データを増やしていく必要があると考えられる。岩盤及び材料界面については利用可能なデータがほとんど無く、今後、データの取得が必要である。
- TH 連成解析による検討事例は本研究、その他を含め充実しており、3 次元解析も既に実施されている。THM 連成解析、THC 連成解析による検討に関しては、本研究では事例が少なく、各種構成モデルの検証も含めて適用事例を充実させていく必要があると考えられる。現段階では、本研究の中でファーフールドを対象とした検討事例は無く、将来の安全評価のための解析検討を見据えた場合に、より広域を対象とした解析を実施するための準備を進めていく必要があろう。
- 典型的な TRU 廃棄物処分システムを対象とし、人工バリア内の間隙水が高 pH 状態を想定したガス発生モデリング検討を実施した。初期状態の pH を 12.5、さらに、鉄の溶解速度を 0.25 倍とした 2 つのケースを実施した。
- 初期状態の pH を 12.5 としたケースでは、初期 pH を 7.0 としたケースとほぼ同じ結果を示した。初期 pH の変更に加え、鉄の溶解速度を 0.25 倍としたケースでは、水素ガス発生量が小さくなり、圧力上昇や水飽和度の低下が緩慢になる結果となった。
- 反応速度定数は、pH や溶存酸素濃度、温度等の溶液組成に強く影響を受けると考えられる。本検討では定数として取扱っているが、実測データに基づいた信頼性の高い反応速度定数の評価が今後必要であると考えられる。

参考文献

- [1] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター, 2013. 平成 24 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 2 分冊) —ガス移行挙動の評価— .
- [2] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター, 2014. 平成 25 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書 (第 5 分冊) —ガス移行連成挙動評価手法の開発— .
- [3] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター, 2015. 平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書 (第 5 分冊) —ガス移行連成挙動評価手法の開発— .
- [4] SHAW, R. P., 2015. The Fate of Repository Gases (FORGE) project, Gas Generation and Migration in Deep Geological Radioactive Waste Repositories. Geological Society, London, Special Publications, 415, 1-7.
- [5] 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構, 2005. 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— .
- [6] Hiroyuki TOSAKA, Koji MORI, Kazuhiro TADA, Yasuhiro TAWARA and Koji YAMASHITA, 2010. A General-purpose Terrestrial Fluids/Heat Flow Simulator for Watershed System Management, IAHR International Groundwater Symposium 2010.
- [7] J. R. Appleyard, I. M. Cheshire and R. K. Pollard, 1981. Special Techniques for Fully-Implicit Simulators, Enhanced oil recovery, pp.395-408.
- [8] Hiroyuki TOSAKA and Yukihiro MATSUMOTO, 1987. An Efficient Reservoir Simulation by The Successive Explicitization Process, Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology Vol.52, No.4.
- [9] Eileen P. Poeter, Mary C. Hill, et al., 2005. UCODE_2005 and Six Other Computer Codes for Universal Sensitivity Analysis, Calibration, and Uncertainty Evaluation, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- [10] 山本修一, 小峯秀雄, 2008. THM 連成解析におけるベントナイトの膨潤特性の構成モデルに関する一考察, 第 63 回土木学会年次学術講演概要集, pp.205-206.
- [11] UPC (Technical University of Catalonia), CODE_BRIGTH User's Guide.
- [12] S. Olivella, A. Gens, J. Carrera and E. E. Alonso, 1996. Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGTH) for the coupled analysis of saline media, Engineering Computations, Vol.13, No.7, pp.87-112.
- [13] Roscoe, K. H. and Burland, J. B., 1998. On the Generalized Stress – Strain Behavior of „ Wet“ Clay, Engineering Plasticity, Cambridge University Press, pp.535-609.
- [14] Xu, T., 2009. Corrosion-induced gas generation in a nuclear waste repository: Reactive geochemistry and multiphase flow effects, LBNL Paper.
- [15] 本田明, 井上邦博, 小畑政道, 1993. 腐食メカニズムに基づく炭素鋼オーバーパックスの腐食モデルの開発 (1), PNC TN8410 93-299.

- [16] 長野博夫, 金属材料の腐食・防食 (<http://zkk.co.jp/reppdf/naga6.pdf> : 2016 年 3 月 18 日
閲覧)
- [17] 核燃料サイクル開発機構, 電気事業連合会, 2000. TRU 廃棄物処分概念検討書

第4章 人工バリアシステムのガス移行連成挙動評価

(現象理解)

4.1 背景と目的

本検討は、これまで（平成 19-24 年度）に実施した「ガス移行挙動の評価 材料試験データの取得」[1][2][3][4][5][6]において得られた知見（再冠水試験、飽和および不飽和ベントナイト供試体を用いたガス移行（透気）試験における大破過*を伴うガス移行挙動および基本特性や寸法効果に対する評価による）を基盤として、ガス移行挙動評価（現象理解）に係る残された課題の解決を目的とするものである。

4.2 実施内容

平成 25 年度[7]においては、同年度より新たに着手した「ガス移行連成挙動評価手法の開発」の検討の中で 5 カ年間（平成 25-29 年度）に亘る実施計画を策定しており、平成 27 年度は策定した実施計画と平成 26 年度[8]の検討成果に基づき、ガス移行挙動評価（現象理解を目的とするもの）における課題解決に資するベントナイト系緩衝材材料の飽和・不飽和供試体を用いた各試験を実施した。

具体的には、飽和供試体の膨潤圧以下（ガスの大破過に至らない条件下）でのガス注入試験によって気液二相流特性データ（ガス有効浸透率等）を取得し、大破過を伴わない場合のベントナイト緩衝材材料のガス移行特性（二相流挙動に注視）を把握するとともに、底部緩衝材の候補とされているベントナイト・砂混合材料について、サクシオン制御可能な圧密試験装置を用い、材料の飽和過程における圧密変形特性を把握した。一方で、処分施設内の異なる材料間や同一材料の内部にて生じる界面について、当該箇所が卓越したガス移行経路になることが懸念されているが、このような界面のガス移行特性の把握を目的として、模擬供試体による予備検討的なガス移行試験を実施するとともに、界面を含む TRU 廃棄物処分概念の人工バリアシステム全体としてのガス移行挙動把握を目的として、人工バリアシステムの構造を模擬したシステム試験の実施に際して必要な予備検討等を実施した。

次項より、具体的な実施内容を示す。

4.2.1 ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充

(1) 圧縮ベントナイトの二相流特性に係るデータの拡充

平成 19-24 年度の「ガス移行挙動の評価 材料試験データの取得」[1][1][2][3][4][5]において

* 『ガス加圧中に排気量が急激に増大する現象』と定義。一般財団法人 電力中央研究所, 2012.8. 処分施設条件を考慮した締固めたベントナイトのガス移行特性評価 電力中央研究所報告。

は、ベントナイト緩衝材中のガス移行に係る特性評価を目的とした試験を行い、小型供試体（圧縮ベントナイト）を用いて実施した試験においては、主に飽和した圧縮ベントナイト（クニゲル V1）中における水とガスの透過性および力学特性に係るデータを取得した他、ダイランシーの作用による破過現象を確認し、大破過を伴うガス移行現象理解において一定の知見が得られた。

一方、ガス移行挙動の寸法効果の把握を目的とした大型供試体（円筒形、φ 60mm、H200mm）のガス移行試験では破過は生じず（ダイランシーの作用を伴わず）、供試体へのガス侵入と間隙水の押し出しのみによって生じた「ガス移行フロント」と思われる水分分布状態が認められたことから、大破過を伴わない気液二相流のみを伴ったガス移行現象が生じ得る可能性が示唆された。

以上のようなガス移行試験で得られた知見を基盤に、平成 25 年度[7]においては特に飽和したベントナイト緩衝材材料中の、大破過を伴わないガス移行現象の理解に資する試験計画及び試験準備を行い、試験計画に基づいたガス移行試験を平成 26-27 年度に実施した。

具体的には、図 4.2.1-1 に示す実施フロー（飽和供試体作製からガス注入試験に至る内容）に従い、平成 26 年度に供試体中に気液二相流のみが生じることを想定した低注入圧条件（ベントナイト供試体の平衡膨潤圧以下のガス注入圧）によるガス注入試験に着手したが、目的とするデータを適切に取得する観点から 2 か年に亘って試験を行うこととしたため、平成 27 年度は表 4.2.1-2 に示す 2 か年分のデータを取得・整理のうえ、ガス移行挙動を評価した。

また、試験の実施に際しては以下の点に着目し、適正に対処することとした。

- ・ 試験装置の注水経路からガス注入経路への切り替え時における適切な処置
- ・ 注入圧の設定

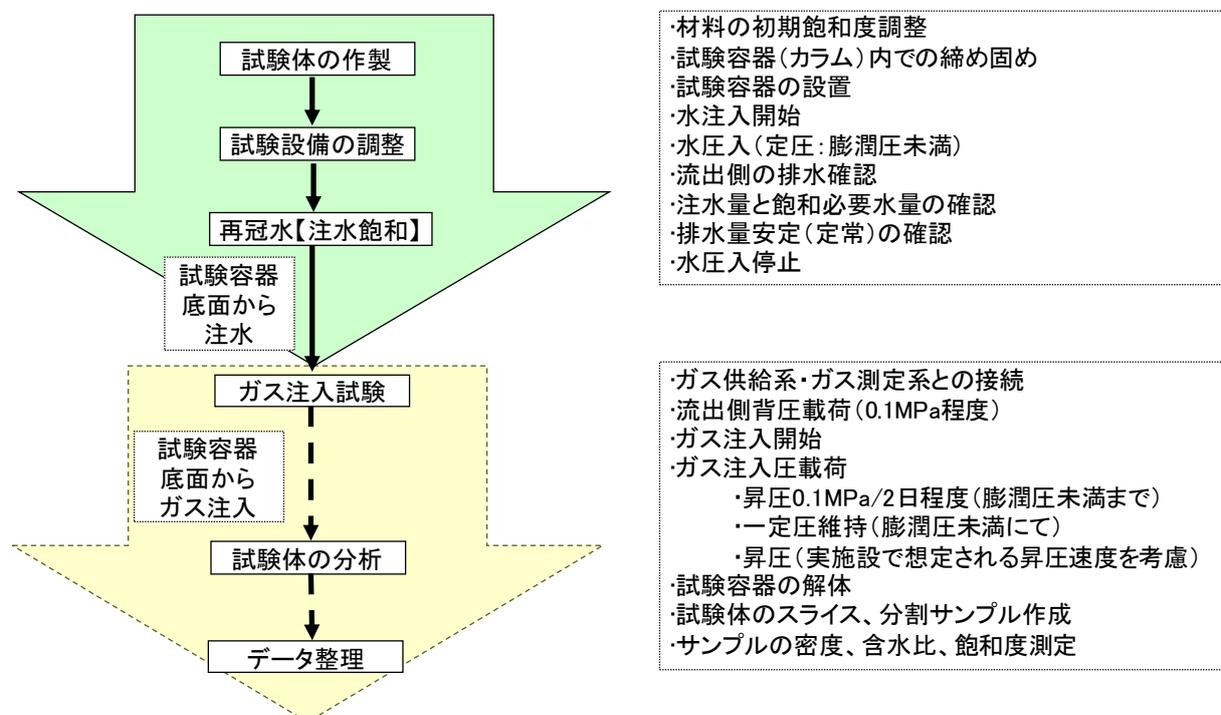


図 4.2.1-1 本検討の実施フロー

表 4.2.1-1 ガス移行試験の検討項目

	項目	取得データ	目的	備考
①	二相流特性の把握	ガス注入量の経時変化 水の排出量の経時変化	透気特性の把握 透水特性の把握	試験中の データ取得
②	供試体物性値の把握	供試体内の含水比分布 (水分分布プロファイル)	水の押し出しによって進展したガス移行フロントの把握	試験終了後の データ取得 (解体調査)
		供試体内の乾燥密度分布	ガス移行に伴う、変形挙動(力学的影響)の把握	

なお、データ取得手順は以下の通りとし、ガス注入試験によって供試体のガス相浸透率等を取
得するとともに、ガス注入試験後に供試体を解体することによって飽和度分布等を測定し、ガス
移行フロントを把握することとした。

- ① ガス注入試験：供試体（注入ガス圧=0.3 MPa 以下にて供試体下端よりのガス注入が
継続中）から排出される水／ガスの単位時間当たりの流量から、ガス相有効浸透率を
取得する。
- ② 供試体解体：ガス注入試験終了後、供試体を図 4.2.1-2 のように解体し、各々の部位毎
に含水比・乾燥密度を測定することにより飽和度を算定し、供試体全体としての飽和
度分布（平面方向分布および断面方向分布）を把握する。なお、解体に着手する時期
は図 4.2.1-4 に示す実施手順に準拠するものとした。

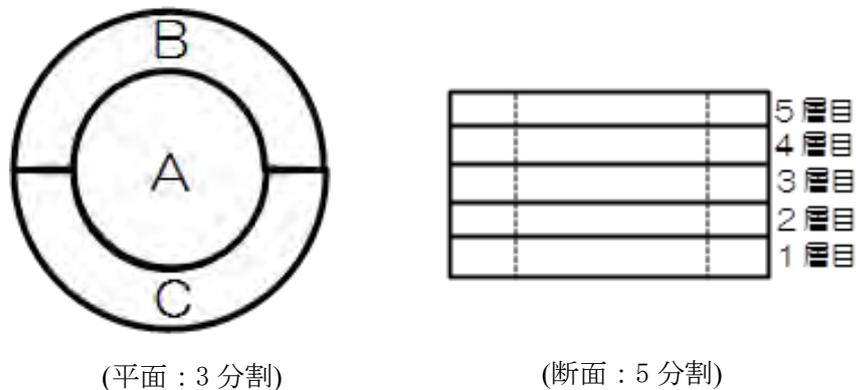


図 4.2.1-2 供試体の解体（分割）のイメージ

なお、試験の実施に際しては以下の点に着目し、適正に対処することとした。

- ・ 試験装置の注水経路からガス注入経路への切り替え時における適切な処置
- ・ 注入圧の設定

試験装置は、平成 19-24 年度の検討[1][2][3][4][5][6]に使用したガス移行挙動評価試験装置を用
いた。表 4.2.1-2 に試験装置の構成および特徴を、図 4.2.1-3 に試験装置の概念図を示す。

表 4.2.1-2 試験装置の構成および特徴

構成	特徴
<p>カラム試験容器</p>	<p>容器寸法: ϕ 60mm、高さは最大 200mm まで対応可能 容器概要: 体積ひずみ拘束型 材質: ステンレス(SUS316 他) 計測項目: 全応力、ガス圧 補助装置: 上端(排気、排水)側にて多孔質板をリングで仕切り、中央部と外周部との排気(ガス)、排水量の分離計測が可能</p>
<p>ガス注入装置</p>	<p>注入系統: 2 最大注入圧: 5.0MPa 計測項目: 注入圧力、注入ガス量 備考: 再冠水(注水)装置と機能が分離され、再冠水試験とガス移行試験を個別・同時に実施可能</p>

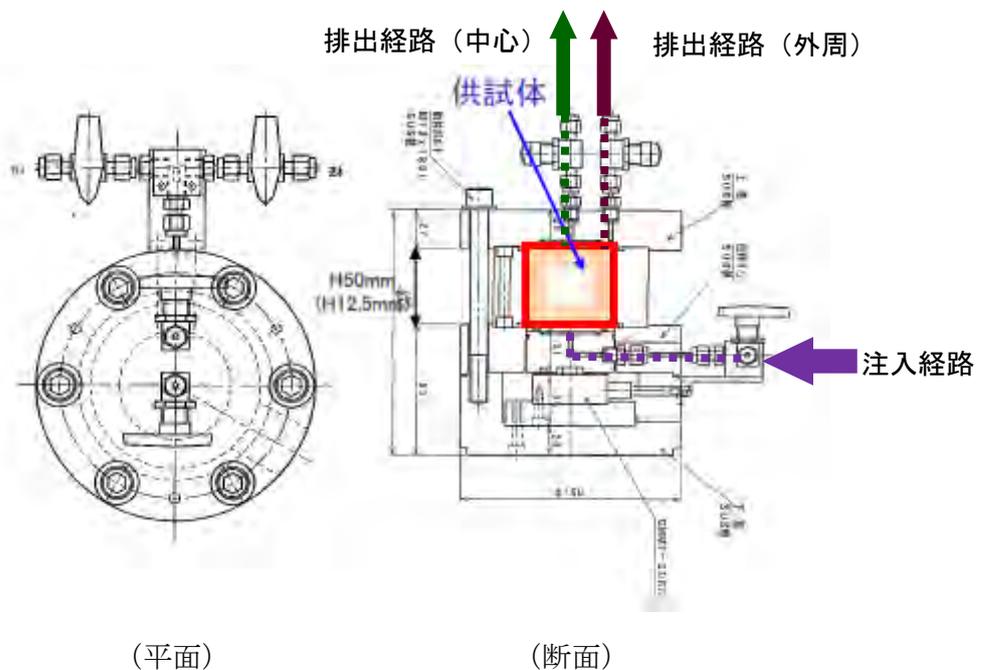


図 4.2.1-3 ベントナイト材料供試体を用いた試験装置の概念図

・実施手順

(膨潤圧付近まで比較的早く昇圧→一定圧を保持:H26年度より継続中)

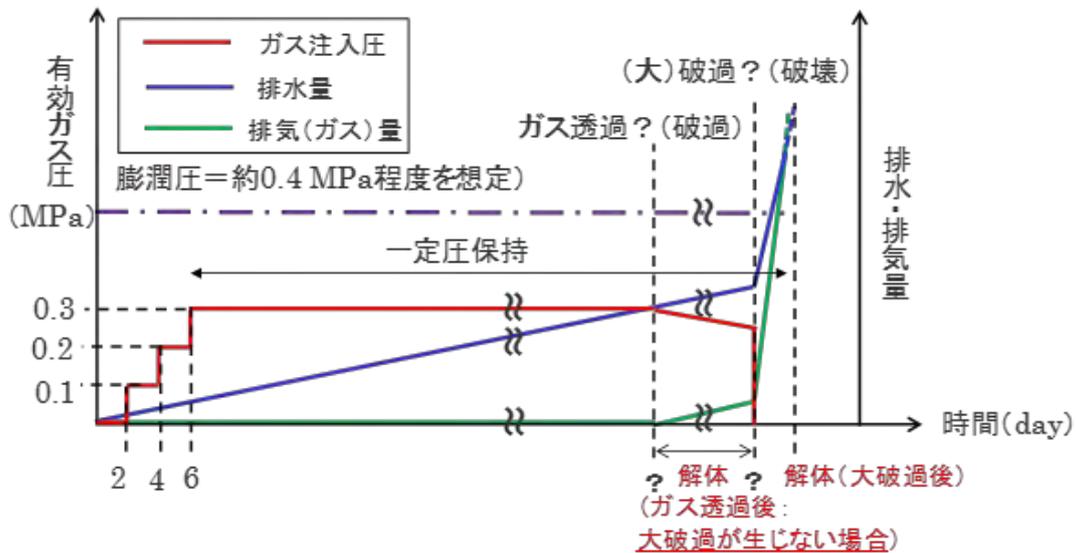


図 4.2.1-4 実施手順

(2) ベントナイト・砂混合材料を用いた圧密変形特性データの取得

TRU 廃棄物処分場のガス発生影響評価において、発生したガスの人工バリア中の移行挙動を詳細に把握・理解するためには、処分システムの「気液二相流析」や「力学挙動を連成させた二相流解析」を行う必要があるが、ガス移行挙動（解析解）は人工バリアの材料特性に大きく依存するため、解析に際してより精緻な材料特性データを取得しておくことが重要である。

そこで、平成 27 年度は、力学連成二相流解析に際して必須であり、かつ第 2 次 TRU レポートにおいて人工バリアの底部緩衝材に想定されている、ベントナイト系材料（砂混合材料）の特性のうち、圧密変形特性のサクシオン依存性に関するデータを取得し、上記の解析に反映させることとした。

具体的には、サクシオン制御可能な圧密試験装置を用いて、ベントナイト系材料（ベントナイト・砂混合材料）の飽和（吸水）過程の体積膨張（膨潤）挙動および排水過程の体積収縮挙動のサクシオン（飽和度）依存性を検討するための圧密変形特性取得試験を実施し、一定サクシオン载荷条件下での圧密変形特性（膨潤・収縮ひずみ）に関するデータを取得した。

(3) ベントナイト系人工バリアの材料間界面を模擬したガス移行試験

前項「4.2.1 (1) 圧縮ベントナイトの二相流特性に係るデータの拡充」で述べたように、平成 26 年度に実施した「ガス移行連成挙動評価手法の開発」[8]においては、平成 24 年度までの既往の検討（ベントナイトのガス移行特性の供試体寸法効果確認試験等）[1][2][3][4][5][6]で確認されたような“ベントナイトの大破過を伴わない（ダイレタンシーの作用を伴わない）ガス移行メカニズム”の把握を目的とした検討を行っている。

その成果として、飽和したベントナイト供試体中のガス移行が気液二相流主体となることを想定した低注入圧条件（ベントナイト供試体の平衡膨潤圧以下のガス注入圧）によるガス注入

試験を実施した結果、ベントナイト緩衝材中（単体要素）のガス移行メカニズムは概ね把握できつつあるが、人工バリアシステム全体としてのガス移行メカニズムを把握するためには、卓越移行経路になることが懸念されるバリア材料界面（同一材料間／異種材料間）のガス移行特性を把握することが重要な課題となった。

そこで平成 27 年度は、上記の課題解決を目的に、同一材料（ベントナイト系人工バリア）間に生じる得る界面を模擬し、飽和させた供試体によるガス移行試験（要素試験）を計画・実施した。具体的には、図 4.2.1-5 に示すような上部緩衝材施工において想定される「ブロック定置方式で生じるような、同一材料間の鉛直方向界面」を検討対象とし、飽和した模擬供試体を作製のうえ試験に供した。

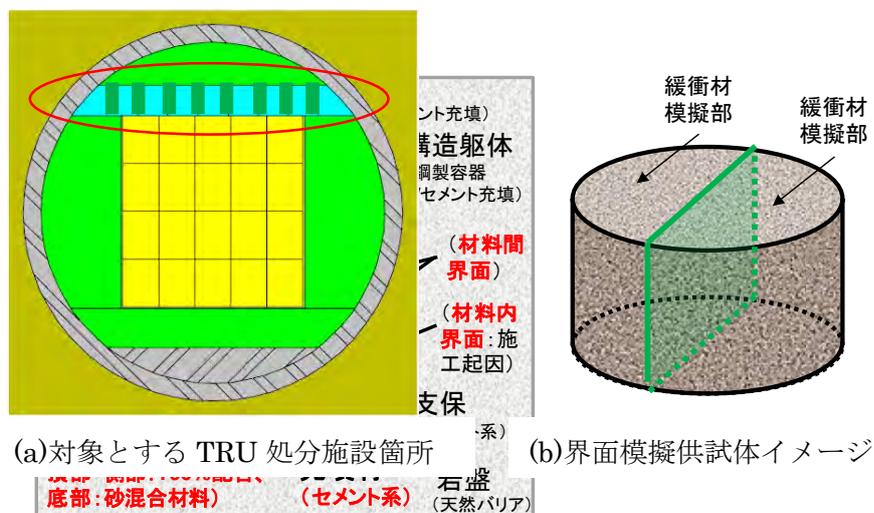


図 4.2.1-5 人工バリアの現実的な施工手順（ブロック定置方式[11]）を考慮した上部緩衝材の同一材料界面（緑色の太線）と界面模擬供試体のイメージ

また、表 4.2.1-1 で示した項目に準じたデータを取得・整理し、ガス移行挙動を評価した。なお、試験の実施フローは図 4.2.1-1 に準ずることとした。

4.2.2 セメント系材料のガス移行挙動データの取得

前項「4.2.1 (3) ベントナイト系人工バリアの材料間界面を模擬したガス移行試験」で述べた通り、人工バリアシステム全体としてのガス移行メカニズムを把握するためには、卓越移行経路になることが懸念されるバリア材料界面（同一材料間／異種材料間）のガス移行特性を把握することが重要な課題となっている。この課題解決のためには、このうちベントナイト系人工バリア材料間に生じ得る同一材料間の界面のみならず、セメント系人工バリア材料間に生じ得る界面（打継ぎ面）のガス移行特性も把握しておく必要がある。

そこで平成 27 年度は、上記の課題解決を目的に、平成 26 年度までの既往の検討成果[7][8]も踏まえた同一材料（セメント系人工バリア）間に生じる得る界面を模擬した供試体によるガス移行試験（要素試験）の検討として以下を実施した。

具体的には、図 4.2.2-1 に示すような充填材施工において想定される「鉛直方向に打設した

側部充填材に対して頂部充填材を打継ぐ際に生じ得るような、「同一材料間の水平方向界面」を検討対象とし、模擬供試体を作製のうえ試験に供した。

また、表 4.2.1-1 で示した項目に準じたデータを取得・整理し、ガス移行挙動を評価した。

なお、試験の実施フローは図 4.2.1-1 に準ずることとした。

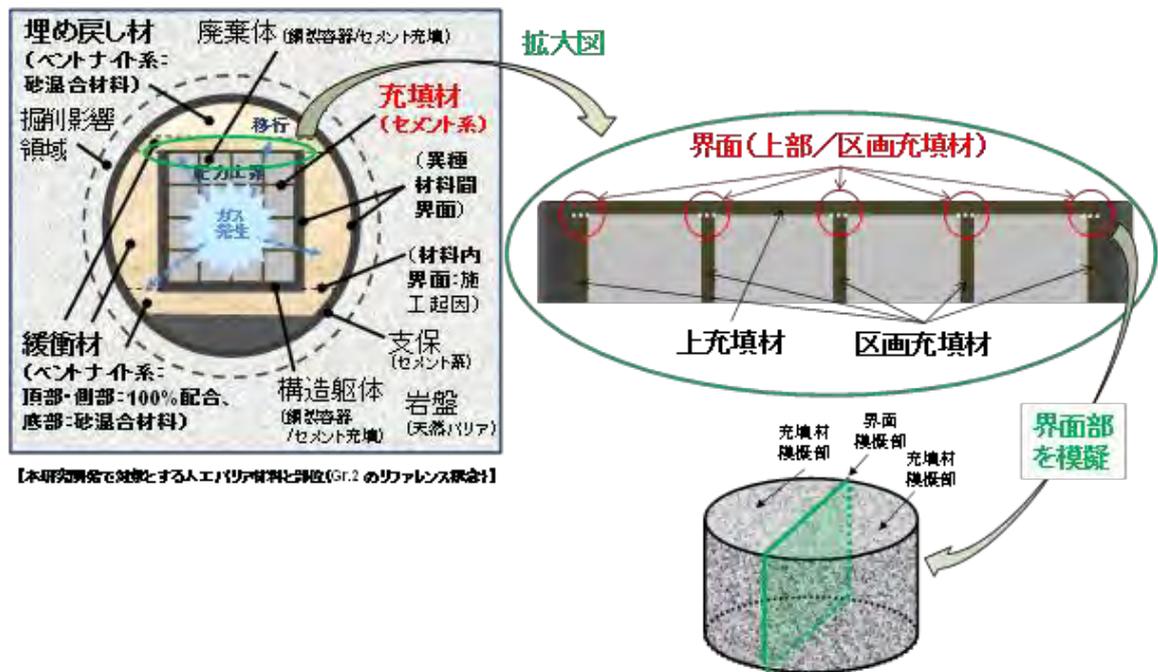


図 4.2.2-1 人工バリアにおける現実的な施工手順[11]を考慮した充填材の同一材料界面（拡大図内の赤丸部）と界面模擬供試体のイメージ

4.2.3 ガス移行挙動評価に係るシステム試験の実現に向けた検討

前節で述べたように、人工バリアシステム中で想定されるガス移行現象においては、ベントナイト中に生じる気液二相流のほか、バリア材料界面（同一材料間／異種材料間）が卓越したガス移行経路になることが懸念されている。

平成 26 年度の検討[8]においては、バリア材料界面も含めた人工バリア全体（複合構成材料中）のガス移行挙動の理解に必要不可欠である、実規模人工バリアの縮小模型を用いて行うガス移行挙動評価試験（複合システム試験）の実現に向け、以下の内容を取り纏めた。

- ・ 諸外国において実施された既往の複合システム試験（各国独自の処分概念がベース）事例の整理／試験で抽出された課題の整理
- ・ 複合システム試験（我が国の TRU 廃棄物処分概念がベース）を実施するに際しての留意点の整理

平成 27 年度は、上記の成果をもとに、バリア材料界面も含めた人工バリア全体（複合構成材料中）のガス移行挙動の理解に必要不可欠である、実規模人工バリアの縮小模型を用いて行うガス移行挙動評価試験（複合システム試験）を実現するために必要な項目のうち、以下についての検討を実施した。

- ・ 実現可能な複合システム試験の試験体概念の検討
- ・ 相似則（現象の加速）を考慮したシステム試験体の寸法に関する検討

4.3 検討結果

4.3.1 ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充

(1) 圧縮ベントナイトの二相流特性に係るデータの拡充

1) 試験計画とデータ取得手順

図 4.3.1-1 に示した手順によってガス注入試験を行い、供試体のガス相浸透率等を取得するとともに、ガス注入試験後に供試体を解体することによって飽和度分布等を測定し、ガス移行フロントを把握する計画とした。

・実施手順

(膨潤圧付近まで比較的早く昇圧→一定圧を保持:H26年度より継続中)

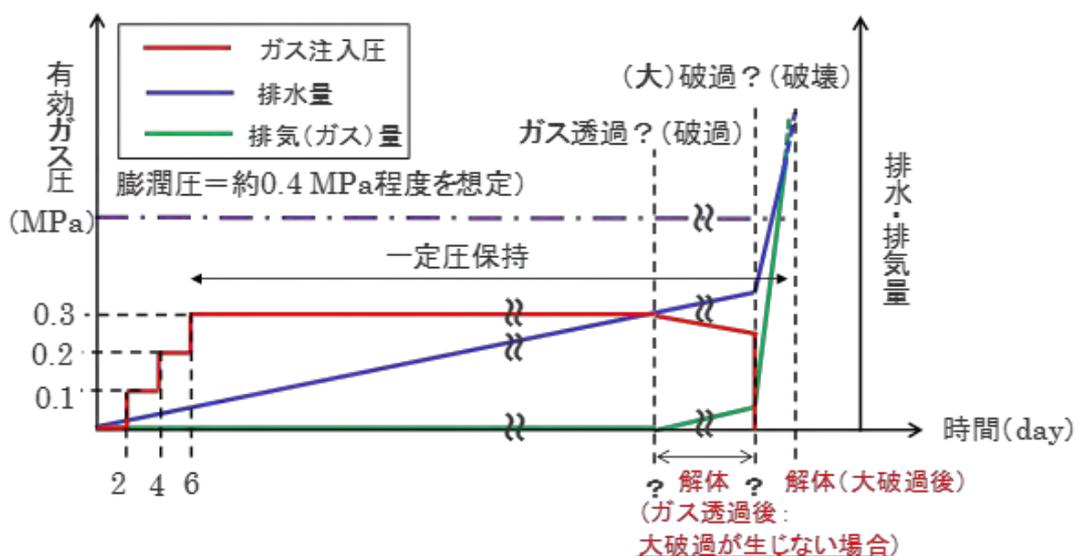


図 4.3.1-1 実施手順

a. 気液二相流特性の把握

図 4.2.1-3 にて示したガス注入試験装置を用い、供試体（注入ガス圧=0.3 MPa 以下にて供試体下端よりのガス注入が継続中）から排出される水/ガスの単位時間当たりの流量から、ガス相有効浸透率を取得した。

b. 供試体物性値の把握

ガス注入試験終了後、供試体を図 4.3.1-2 で示したように解体し、各々の部位毎に含水比・乾燥密度を測定することにより飽和度を算定し、供試体全体としての飽和度分布（平面方向分布および断面方向分布）を把握する。なお、解体に着手する時期は図 4.3.1-1 に示す実施手順に準拠するものとした。

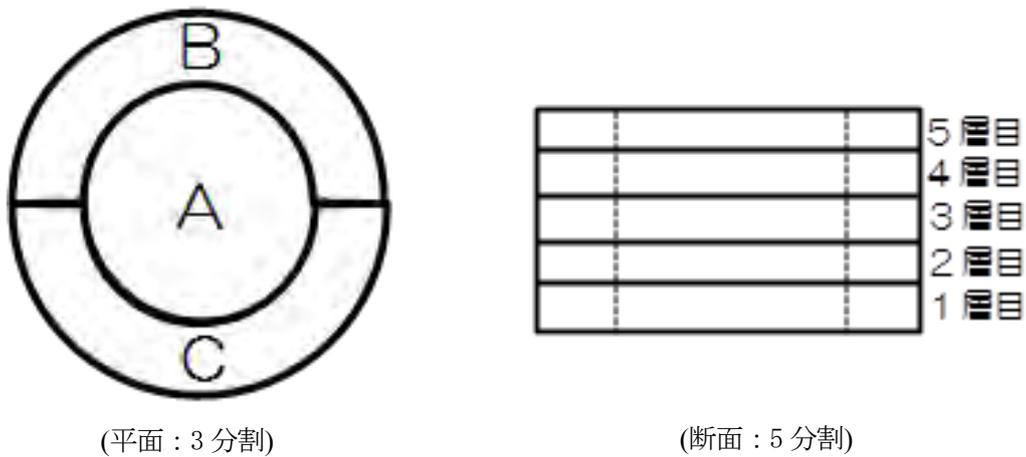


図 4.3.1-2 供試体の解体（分割）イメージ

2) 気液二相流特性の把握

a. 実施フローとガス注入量・排水量の経時変化

表 4.3.1-1 に供試体の条件を示した。

表 4.3.1-1 供試体の条件

項目		
材料	材料	クニゲル V1 100%
	ρ_s g/cm ³	2.700
供試体の作製方法	密度調整	目標密度 $\rho_d = 1.36$ g/cm ³
	圧縮速度	1mm/min
	圧縮層数	2層
供試体の大きさ	直径 D cm	6.00
	高さ H cm	2.50
	断面積 A cm ²	28.27
	体積 V cm ³	70.69
供試体の初期状態	含水比 w %	32.86
	湿潤質量 m g	127.72
	湿潤密度 ρ_t g/cm ³	1.807
	乾燥密度 ρ_d g/cm ³	1.360
	間隙比 e	0.985
	初期飽和度 Sr %	90.0
飽和状態	飽和含水比 w_{sat} %	36.49
	飽和密度 ρ_{sat} g/cm ³	1.856

表 4.3.1-2 に試験条件を示す。また同表には現況の試験状況をあわせて示した。

表 4.3.1-2 試験概況

供試体 No.		No.1 ガス移行 242 日間	No.2 ガス移行 144 日間	No.3 ガス移行 365 日間	N.4 飽和のみ	N.5 飽和のみ (継続中)
注 水 飽 和	注水開始	2014/5/20	同左	2014/9/2	2015/3/31	2016/1/8
	排水確認 (): 注水 経過日数	2014/6/30 (41 日目)	同左	2014/10/10 (38 日目)	2015/5/21 (51 日目)	
	排水量計測 開始 (): 注水 経過日数	2014/7/1 (42 日目)	同左	2014/11/26 (97 日目)	2015/7/6 (97 日目)	2016/3/7 (59 日目)
	飽和完了 (): 注水経 過日数	2014/8/27 (99 日目)	同左	2015/2/19 (170 日目)	2015/7/10 (101 日目)	2016/4/16 (99 日目 予定)
ガ ス 注 入	バックプレッシャ ー載荷	2014/8/27	同左	2015/2/19		
	ガス注入開 始	2014/8/28	同左	2015/2/21		
	有効ガス圧 0.3MPa (): ガス注 入経過日数	2014/9/1 (ガス注入 4 日目)	同左	2015/2/25 (ガス注入 4 日目)		
	ガス注入 停止 (): ガス注 入日数	2015/4/27 (242 日間)	2015/1/19 (144 日間)	2016/2/22 (365 日間)		
解 体	供試体解体	2015/4/27	2015/1/19	2016/2/22		
報告対象	ガス注入 解体調査	ガス注入 解体調査 ※	ガス注入 解体調査	飽和過程 解体調査	飽和過程 解体調査	

※No.2 供試体の報告は 2014 年度で報告済み

(a) 供試体 No.1 のガス注入過程

表 4.3.1-3 に供試体 No.1 のガス注入開始時期の試験手順と主な工程を示した。

表 4.3.1-3 ガス注入過程

Step	試験手順	日時
1	通水圧を 0.2MPa から 0.1MPa に低下	2014/8/27 9:00
2	排水側から 0.1MPa のバックプレッシャーを載荷	2014/8/27 10:00
3	注入側のバルブを閉じて 24 時間放置	2014/8/27 10:30
4	注入ガス圧を 0.2MPa に設定して保持(バルブは閉鎖)	2014/8/28 9:00
5	注入側のバルブを開けて透気開始	2014/8/28 9:30
6	注入ガス圧を 0.3MPa (有効ガス圧 0.2MPa) に上昇	2014/8/30 9:30
7	注入ガス圧を 0.4MPa (有効ガス圧 0.3MPa) に上昇	2014/9/1 9:30
8	ガス注入停止。供試体解体	2015/4/25

なお、これまでのガス注入過程で、表 4.3.1-4 に示す時期に停電があり、以下の対応を行った。

- ・ガス注入：継続
- ・バックプレッシャー：コンプレッサー停止に伴うバックプレッシャー圧力の低下の可能性があるため、レギュレーターを含まない管路の範囲で排気側のコックを閉鎖し圧力を維持。

表 4.3.1-4 停電期間

停電日	停電理由	ガス注入開始後
2014年9月20日	構内設備点検の為	23日目
2014年9月21日	〃	24日目
2014年9月23日	〃	26日目
2014年9月26日	東京電測架線飛来物の為	29日目

図 4.3.1-3 にガス注入開始後の排水量の経時変化を示す。図中には、集水範囲（中央部および側方）ごとの排水量と両者を合算した排水量を記入している。なお、上段は既往報告の 2015 年 1 月 26 日までの計測結果を、下段は解体（2015 年 4 月 27 日）までの計測データを記入した。

供試体 No.1 では、ガス注入開始後 48 日目付近で排水速度の変化が確認できる。排水速度が変化したタイミングは、供試体中央部と側方部はほぼ同時期に現れていることから、供試体外周でのモールドとの界面で現れた状況ではなく、供試体全体として平均的に生じている現象と考えられる。また変化後は、排水速度は急激に低下するもののその後ほぼ一定速度で排水が推移していた。

表 4.3.1-5 に、排水状況を排水速度の変化時期の状況を示した。ガス注入開始後 48 日目、排水量 4.3cm^3 で排水速度に変化が生じている。この排水量は、ガス注入開始時期には飽和になっている注入側ポーラスメタルの間隙量 3.57cm^3 および切り替え弁からの排水管の合計体積分(約 4cm^3)に相当する排水であることから、上記排水量の変化時期は、注入ガスが供試体に到達した時期と考えられ、そのため、排水速度の変化以前は、透水挙動、それ以降はガス注入状況になっていると考えられる。

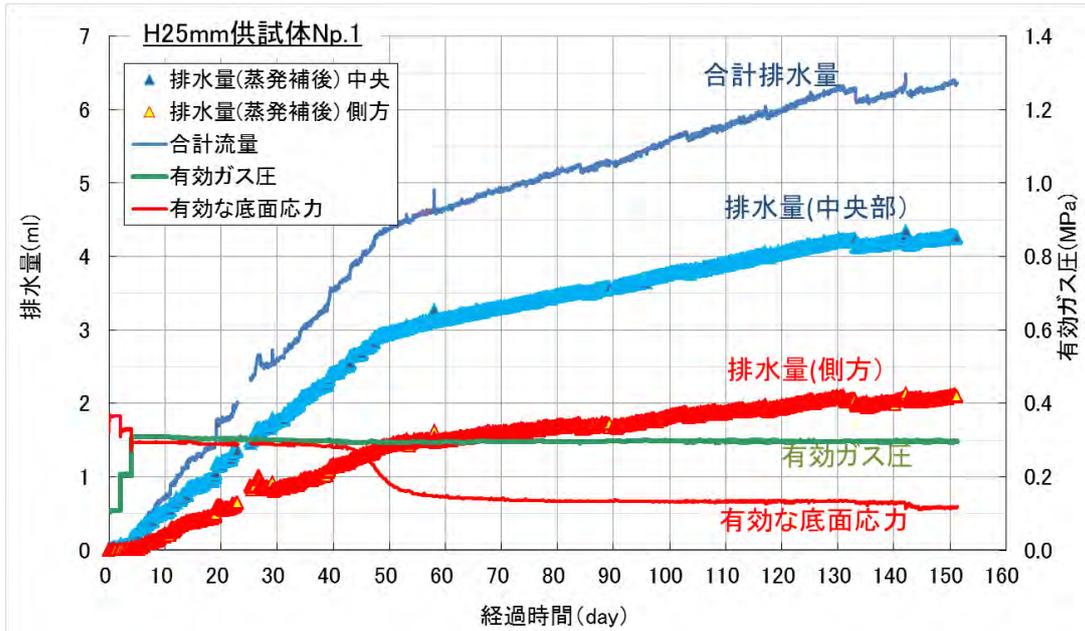
表 4.3.1-6 はガス注入状況から、ベントナイトの水分がゼロ、10%になる位置と仮定してガスの侵入位置を推定したものである。

表 4.3.1-5 排水速度の変化の状態

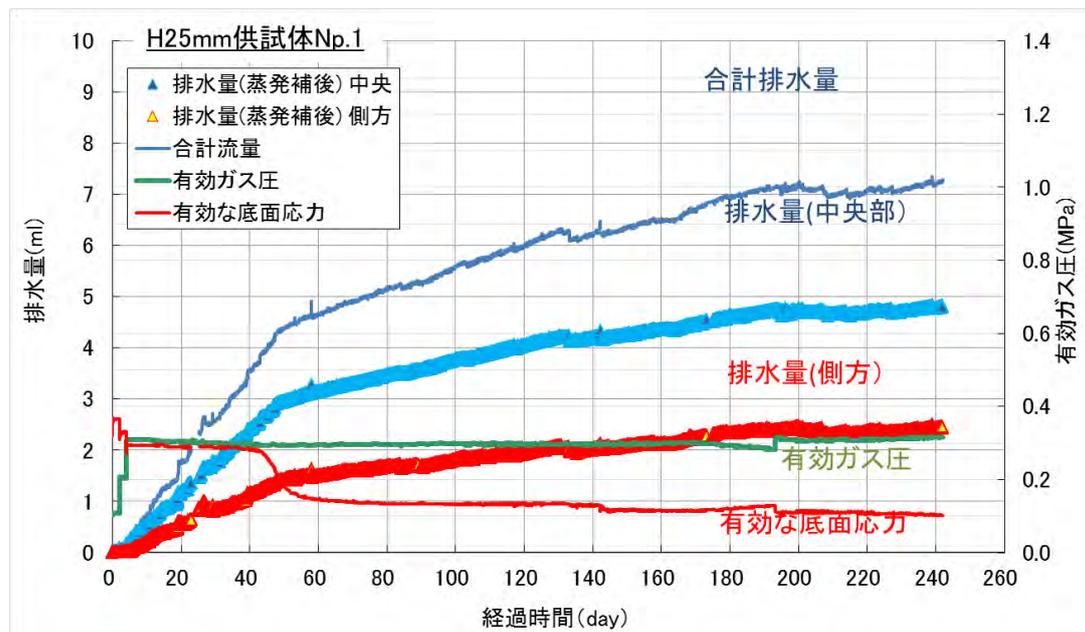
	供試体 No. 1
排水速度の変化時期	48 日目
排水速度の変化時の総排水量	4.3cm^3
有効な底面応力の低下開始時期 (その時の排水量)	42 日目 (3.9cm^3)
有効な底面応力の低下が定常化 (その時の排水量)	56 日目 (4.6cm^3)

表 4.3.1-6 ガス侵入位置の推定

		供試体 No. 1 2015 年 1 月 26 日推定	供試体 No. 1 2015 年 4 月 27 日推定
現在の総排水量		6.3cm^3	8.1cm^3
排水速度の変化時の総排水量		4.3cm^3	4.3cm^3
供試体への注入ガス量(推定)		2.0cm^3	3.8cm^3
ガスの侵入位 置(推定)	含水比 0%仮定	1.4mm	2.7mm
	含水比 10%と仮定	2.0mm	3.8mm



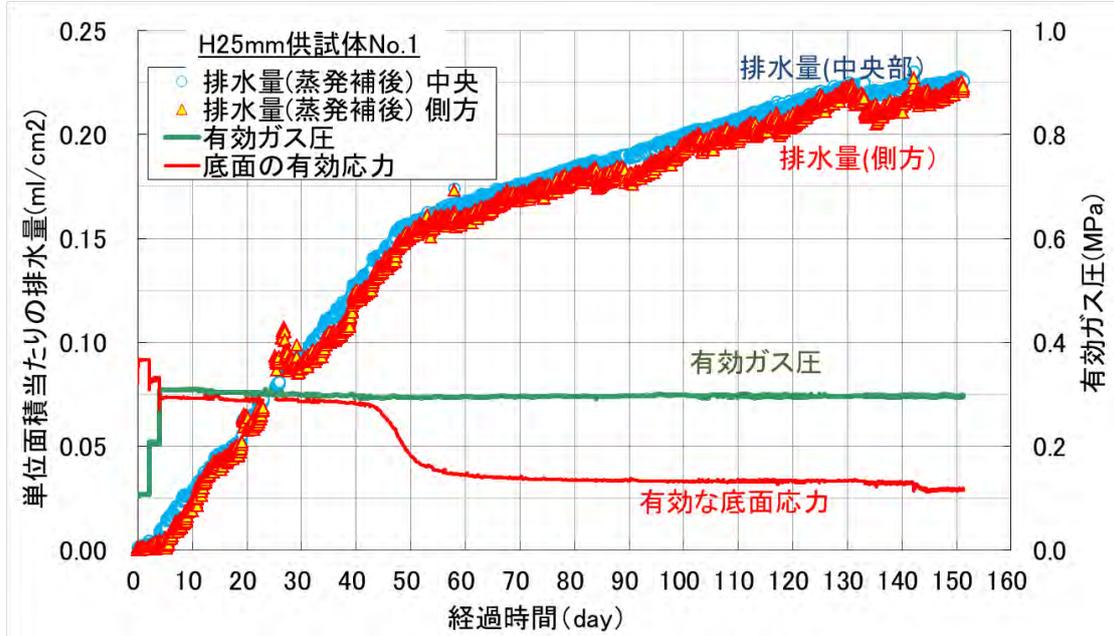
(1) 供試体 No.1 (計測データ 2015年1月26日まで)



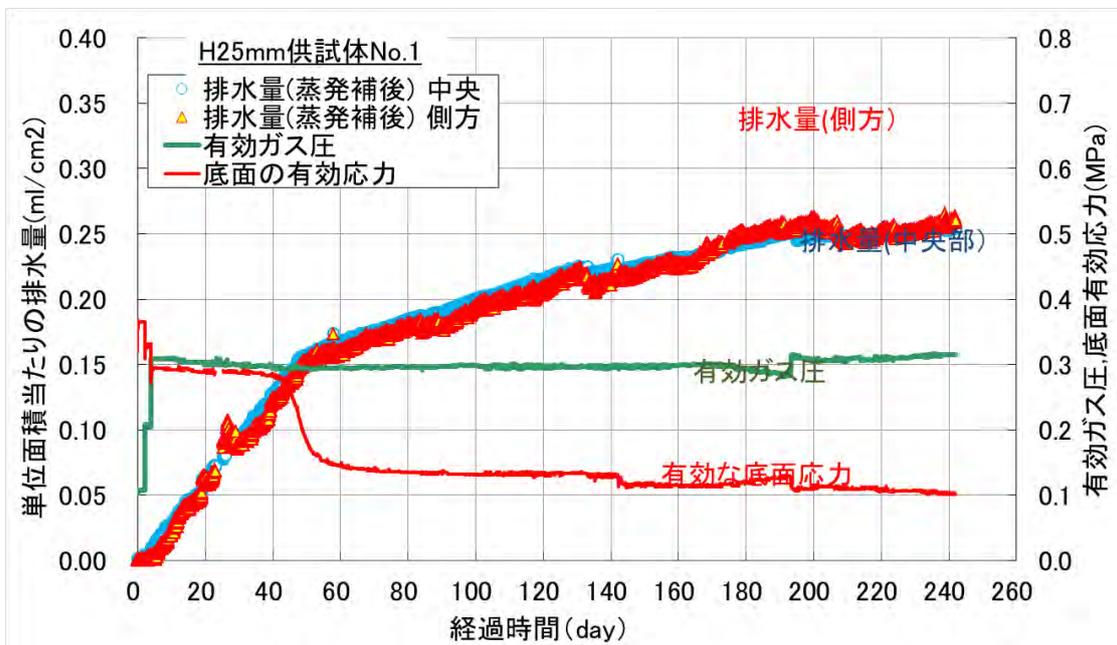
(2) 供試体 No.1 (計測データ 2015年4月27日まで)

図 4.3.1-3 ガス注入に伴う排水量の経時変化

図 4.3.1-2 の(1)および(2)には、中央部、外周部各々の水量を単位面積あたりに換算したものである。両供試体とも、中央部、外周部ともほぼ同等の排水量で経過している状況が確認できる。



(1) 供試体 No.1 (計測データ 2015年1月26日まで)



(2) 供試体 No.1 (計測データ 2015年4月27日まで)

図 4.3.1-4 ガス注入に伴う単位面積当たりの排水量の経時変化

図 4.3.1-5 は、有効ガス圧が 0.3MPa に到達後以降排水速度が大きく減少するまでの排水量の計測結果から、直線近似で排水速度を求めた結果である。排水計測位置、供試体に関わらずほぼ同様の排水速度を示している。

図 4.3.1-6 は、排水速度が大きく減少し、ガスが供試体に到達したと考えられる期間の排水量を前半と若干その勾配が小さくなる試験後半の計測結果である。排水量はほぼ一定の勾配で増加していることから、図 4.3.1-5 と同様に直線近似で排水速度を求めた。中央部、側方ともほぼ同程度の排水速度を示している。

図 4.3.1-7 には、ガス注入期間ごとの排水速度を一覧で示した。排水速度は、ガスが供試体に到達した 50 日目以降 1/4 程度に排水速度が低下し、ガスが供試体内へのガス移行が始まり、ガス注入期間後半 120 日目以降もさらにその 1/2 程度まで低下した。

表 4.3.1-7 ガス移行段階の排水速度 (供試体 No.1)

	ガス注入 50 日まで	ガス注入 70 日 ~120 日	ガス注入 120 日 ~242 日(試験終了)
中央部	3.3×10^{-3}	7.9×10^{-4}	3.3×10^{-4}
側方部	3.2×10^{-3}	7.6×10^{-4}	4.3×10^{-4}

単位 : $\text{cm}^3/\text{day} \cdot \text{cm}^2$

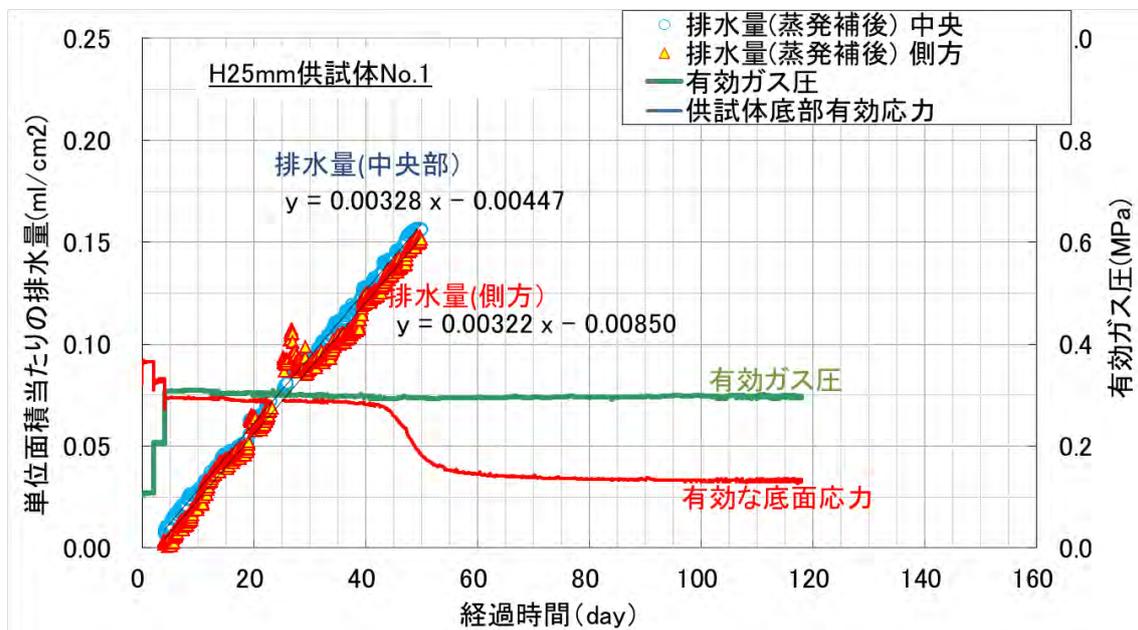


図 4.3.1-5 ガス注入に伴う単位面積当たりの排水速度 (ガス注入開始直後)

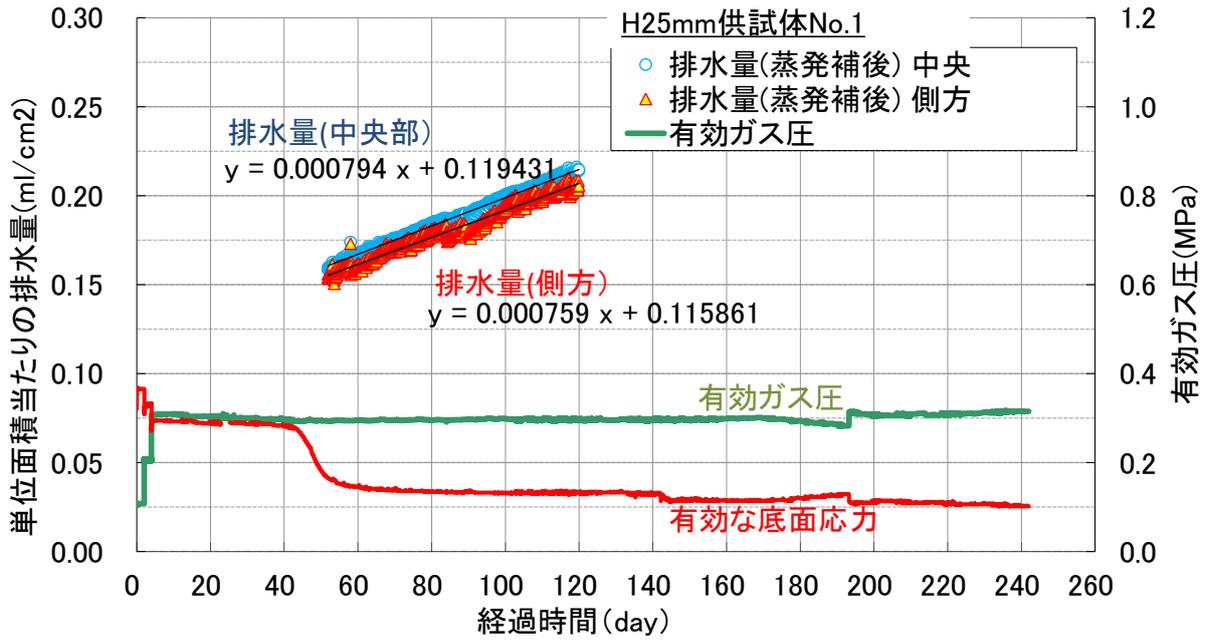


図 4.3.1-6 ガス注入に伴う単位面積当たりの排水速度 (ガス注入 70 日~120 日 ; No.1 供試体)

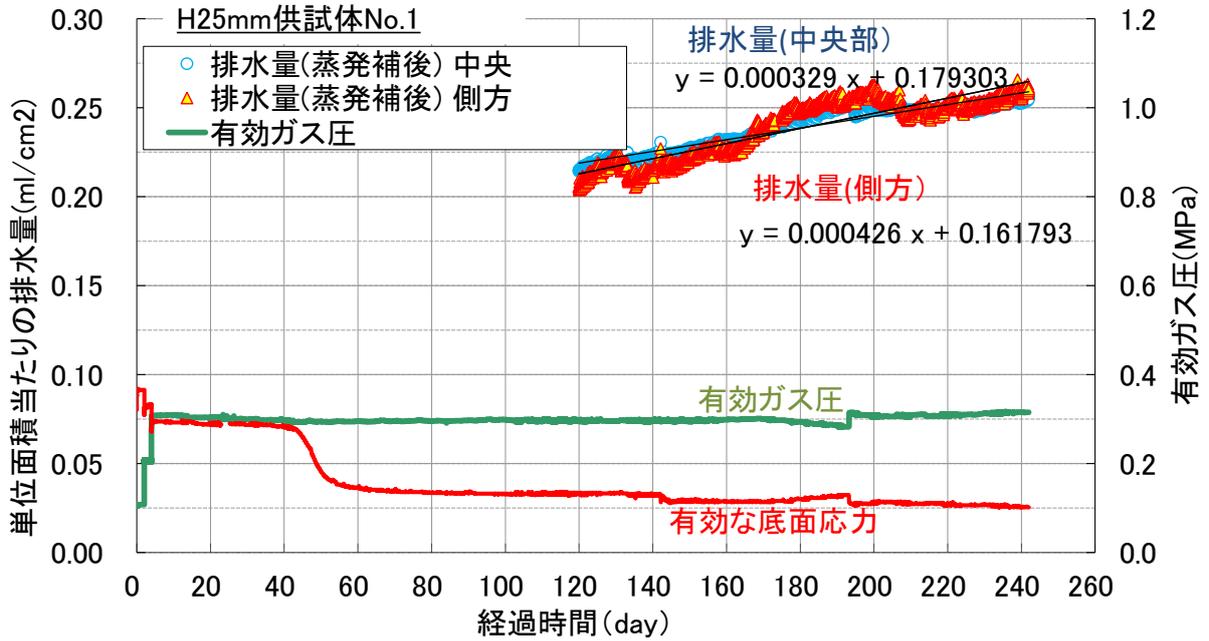
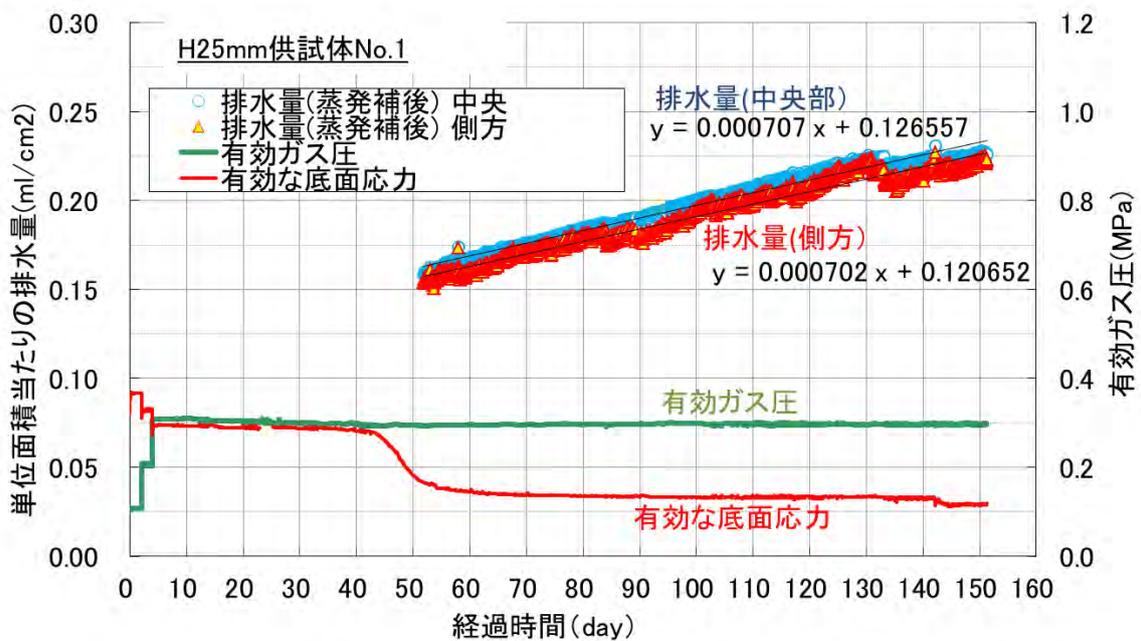
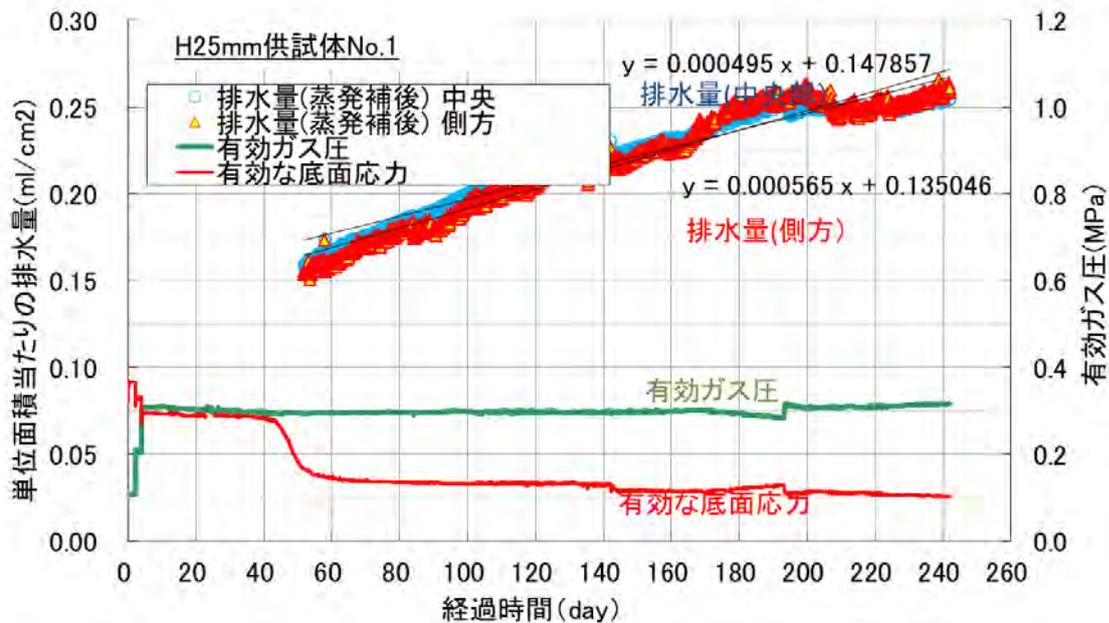


図 4.3.1-7 ガス注入に伴う単位面積当たりの排水速度
 (ガス注入 120 日~242 日(試験終了) ; No.1 供試体)

図 4.3.1-8 は、排水速度が変化した後の排水量の計測結果である。排水量はほぼ一定の勾配で増加していることから、図 4.3.1-1 と同様に直線近似で排水速度を求めた。供試体 No.1 の排水速度は、中央部、側方ともほぼ同様の排水速度を示している。これに対して供試体 No.2 の排水速度は供試体の外周部では特に小さく、100 日を経過するあたりから排水速度が著しく低下している。



(1) 供試体 No.1 (計測データ 2015 年 1 月 26 日まで)



(2) 供試体 No.1 (計測データ 2015 年 4 月 25 日まで)

図 4.3.1-8 ガス注入に伴う単位面積当たりの排水速度

(b) 供試体 No.3 のガス注入過程

図 4.3.1-9、図 4.3.1-10 に No.3 供試体のガス注入開始後の排水量の経時変化を示す。図中には、集水範囲（中央部および側方）ごとの排水量と両者を合算した排水量を記入している。

供試体 No.3 では、ガス注入開始後 50 日目付近で排水速度の減少が確認できる。排水速度が減少したタイミングは、供試体中央部と側方部はほぼ同時期に現れていることから、供試体外周でのモールド都の界面で現れた状況ではなく、供試体全体として平均的に生じている現象と考えられる。また変化後は、排水速度は急激に低下するものの、その後ほぼ一定速度で排水が推移している。

排水速度が低下したガス注入開始後 50 日目の排水量は 4.1cm^3 で、この排水量は、ガス注入開始時期には飽和になっている注入側ポーラスメタルの間隙量 3.57cm^3 および切り替え弁からの排水管の合計体積分(約 4cm^3)に相当することから、上記排水量の変化時期は、注入ガスが供試体に到達した時期と考えられ、そのため、排水速度の変化以前は、透水挙動、それ以降はガス注入状況になっている。

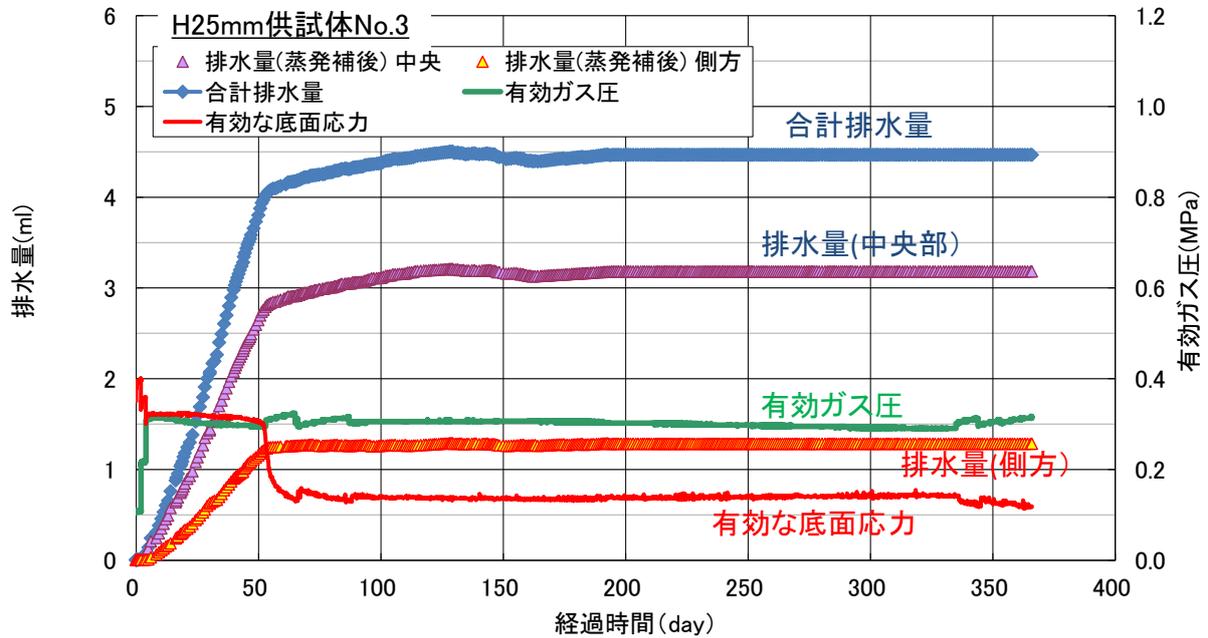


図 4.3.1-9 ガス注入に伴う排水量の経時変化 (No.3 供試体)

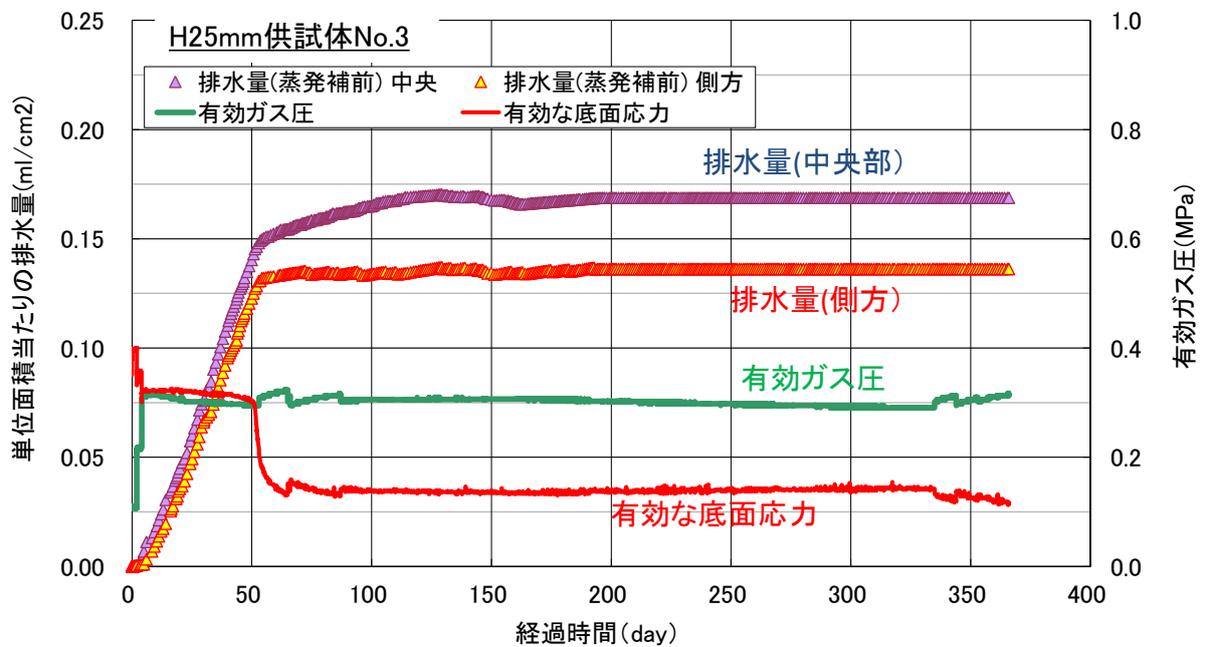


図 4.3.1-10 ガス注入に伴う単位面積当たりの排水量の経時変化 (No.3 供試体)

図 4.3.1-11 は、有効ガス圧が 0.3MPa に到達後以降排水速度が変化するまでの排水量の計測結果から、直線近似で排水速度を求めた結果である。排水計測位置、供試体に関わらずほぼ同様の排水速度を示している。

図 4.3.1-12、図 4.3.1-13 は、排水速度が変化した後の排水量の計測結果である。排水量はほぼ一定の勾配で増加していることから、同様に直線近似で排水速度を求めた。中央部、側方ともほぼ同程度の排水速度を示している。

表 4.3.1-8 には、ガス注入期間ごとの排水速度の一覧を示した。排水速度は、ガスが供試体に到達した 50 日目以降供試体中央部では、No.1 供試体と同様に 1/10 程度まで排水速度が低下している。また側方部の排水速度は 1/100 以下と大幅に低下している。ガス移行の時間が経過した 160 日以降の平均排水速度を見てみると、さらに排水速度が低下し、1/1000~2/1000 程度まで低下して推移した。

表 4.3.1-8 ガス移行段階の排水速度 (供試体 No.3)

	ガス注入 50 日まで	ガス注入 70 日 ~120 日	ガス注入 160 日 ~365 日(試験終了)
中央部	3.0×10^{-3}	3.0×10^{-4}	7.5×10^{-6}
側方部	2.9×10^{-3}	2.3×10^{-5}	4.4×10^{-6}

単位 : $\text{cm}^3/\text{day} \cdot \text{cm}^2$

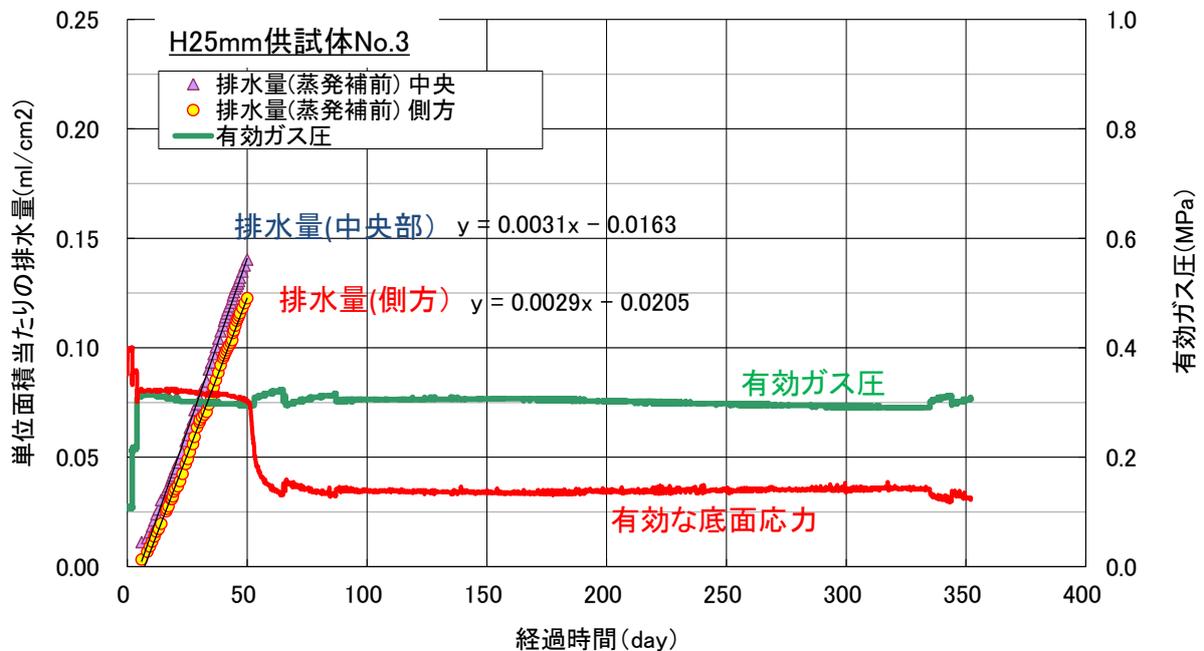


図 4.3.1-11 ガス注入に伴う単位面積当たりの排水速度 (ガス注入開始直後)

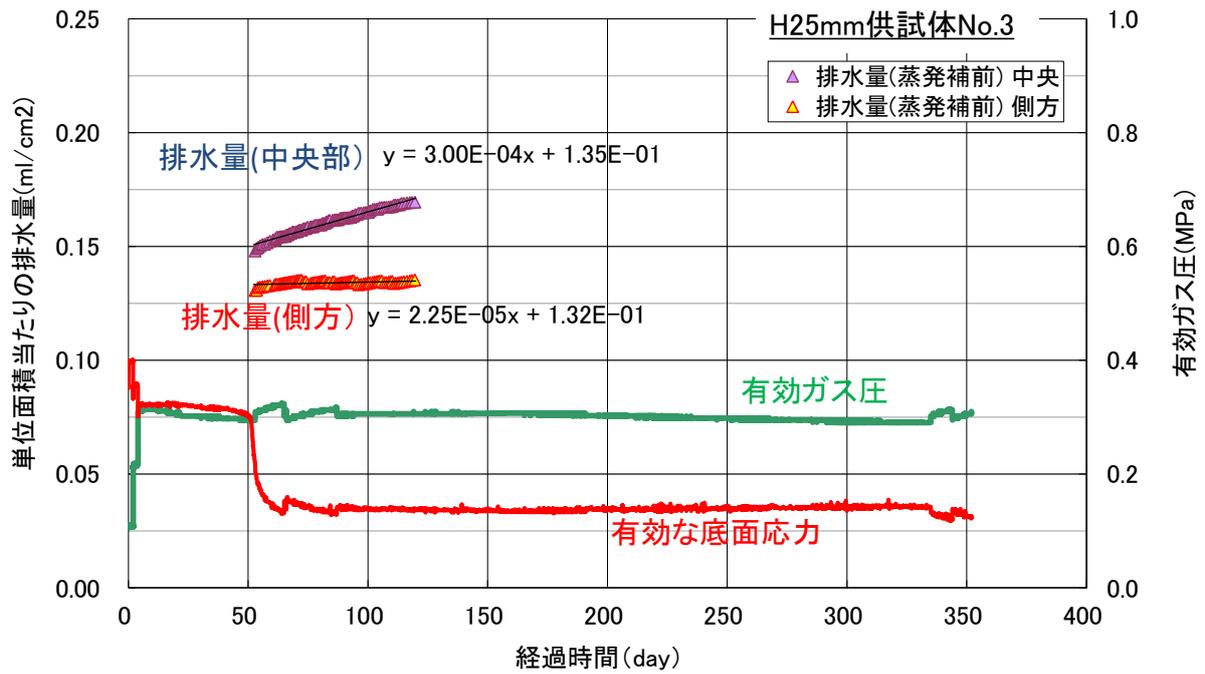


図 4.3.1-12 ガス注入に伴う単位面積当たりの排水速度 (ガス注入 70 日~120 日 ; No.1 供試体)

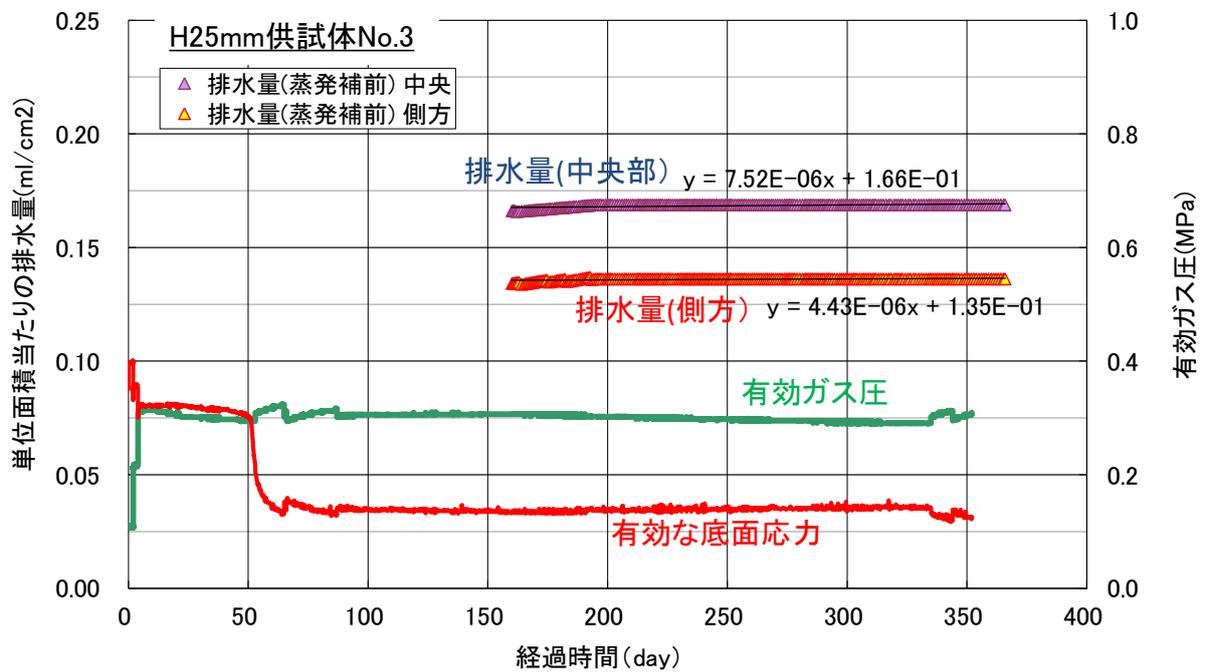


図 4.3.1-13 ガス注入に伴う単位面積当たりの排水速度
(ガス注入 120 日~365 日(試験終了) ; No.1 供試体)

(c) 供試体 No.4 の飽和過程（ガス注入初期状態の把握）

図 4.3.1-14 に No.4 供試体の飽和中の注水量、膨潤圧の経時変化を示す。図 4.3.1-15 は既往の No.1～No.3 の膨潤圧の結果と合わせて示した。膨潤圧は比較的通水初期の段階から 300kN/m^2 程度を示し、その後ほぼ同様の膨潤圧を示し比較的安定している。また膨潤圧の値は他の供試体とほぼ同様の値を示している。

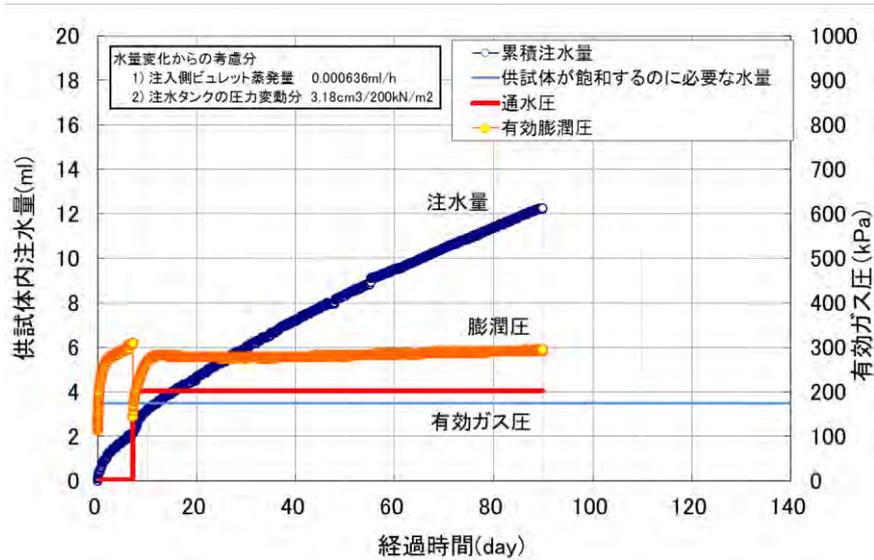


図 4.3.1-14 供試体の注水量、膨潤圧の経時変化 (No.4 供試体)

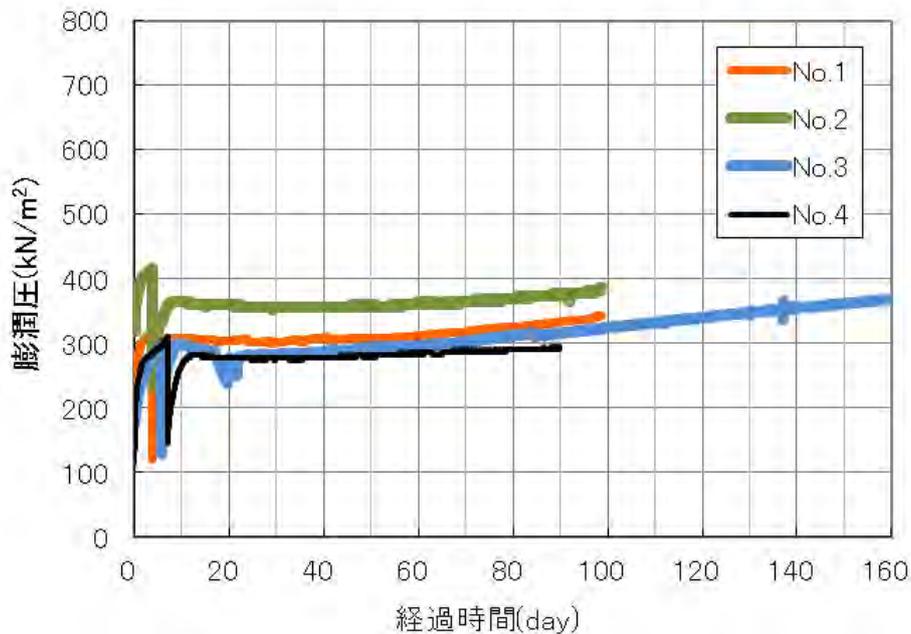


図 4.3.1-15 膨潤圧の経時変化(No.4 供試体)

図 4.3.1-16 は、排水確認後の注水量と排水量の変化である。両者同じ傾向を示し、供試体の飽和を排水状況からも推定することができる。

表 4.3.1-9 は、図 4.3.1-16 の注水速度を用いて求めた透水係数 k である。 $k = 4.9 \times 10^{-13}$ m/sec は既往の結果と同様の透水係数を示し、飽和供試体の品質を確認できた。

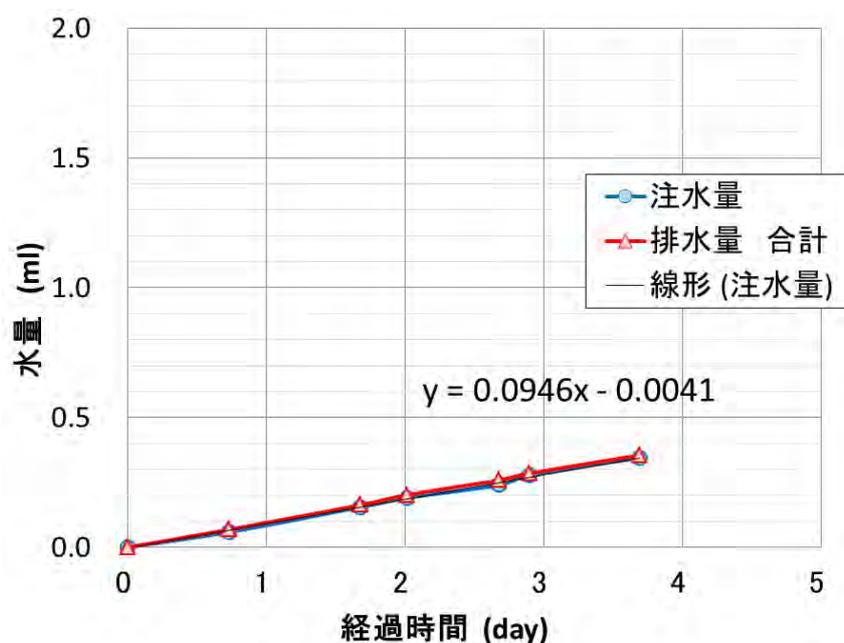


図 4.3.1-16 供試体の飽和確認以降の注水量と排水量の推移 (No.4 供試体)

表 4.3.1-9 飽和確認中の注水量と透水係数の計算 (No.4 供試体)

項目		単位
断面積	28.27	cm ²
供試体厚さ	2.5	cm
注水圧	0.2	MPa
透水量	0.0946	cm ³ /day
	1.09E-06	cm ³ /sec
透水係数	4.9×10^{-13}	m/sec

(d) 供試体 No.5 の飽和過程（飽和のみ；ガス注入初期状態の把握）

図 4.3.1-17 に No.5 供試体の飽和中の注水量、膨潤圧の経時変化を示す。図 4.3.1-18 は既往の No.1～No.4 の膨潤圧の結果と合わせて示した。膨潤圧は比較的通水初期の段階から 250kN/m² 程度を示し、その後ほぼ同様の膨潤圧を示し比較的安定している。また他の既往の供試体の膨潤圧の値に比べると若干小さな膨潤圧で推移している。

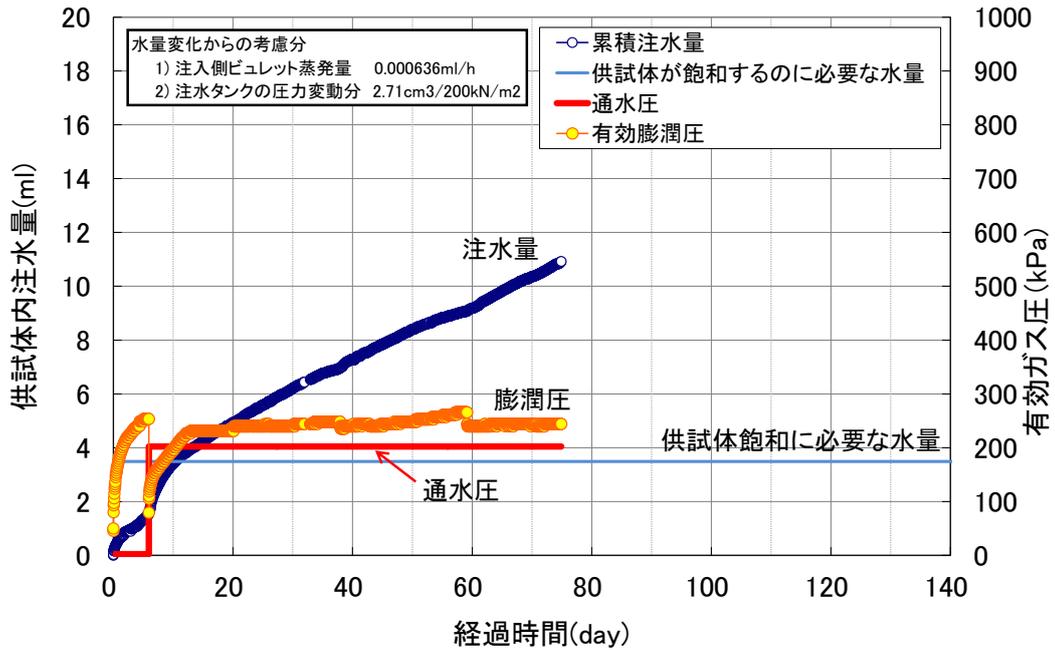


図 4.3.1-17 供試体の注水量、膨潤圧の経時変化 (No.5 供試体)

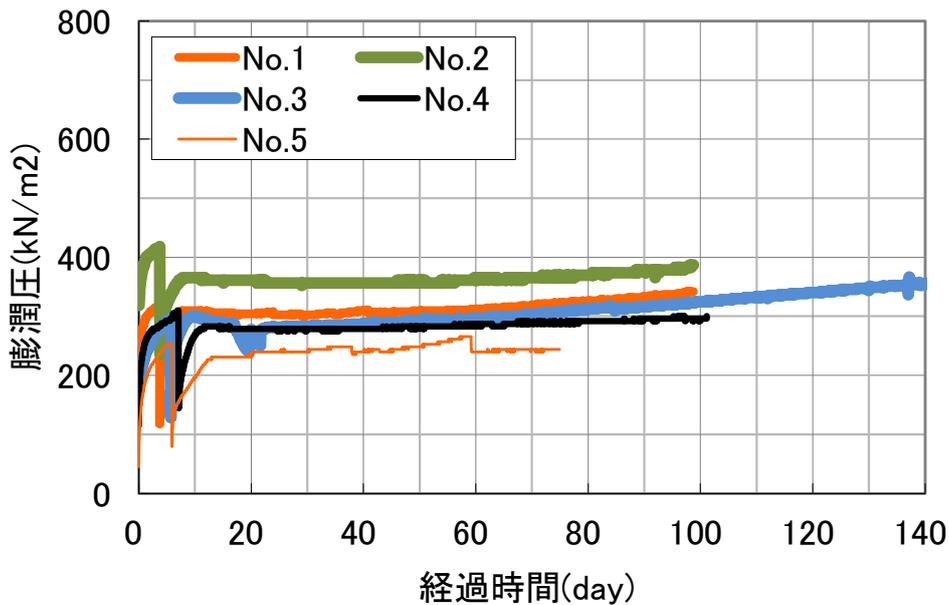


図 4.3.1-18 膨潤圧の経時変化 (No.5 供試体)

図 4.3.1-19 は、排水確認後の注水量と排水量の変化である。両者同じ傾向を示し、供試体の飽和を排水状況からも推定することができる。

表 4.3.1-10 は、図 4.3.1-19 の注水速度を用いて求めた透水係数 k である。 $k = 5.7 \times 10^{-13} \text{m/sec}$ と既往の結果と同様の透水係数を示し、飽和供試体の品質を確認できた。

今後は、所定期間の注水飽和後の解体調査を予定している。

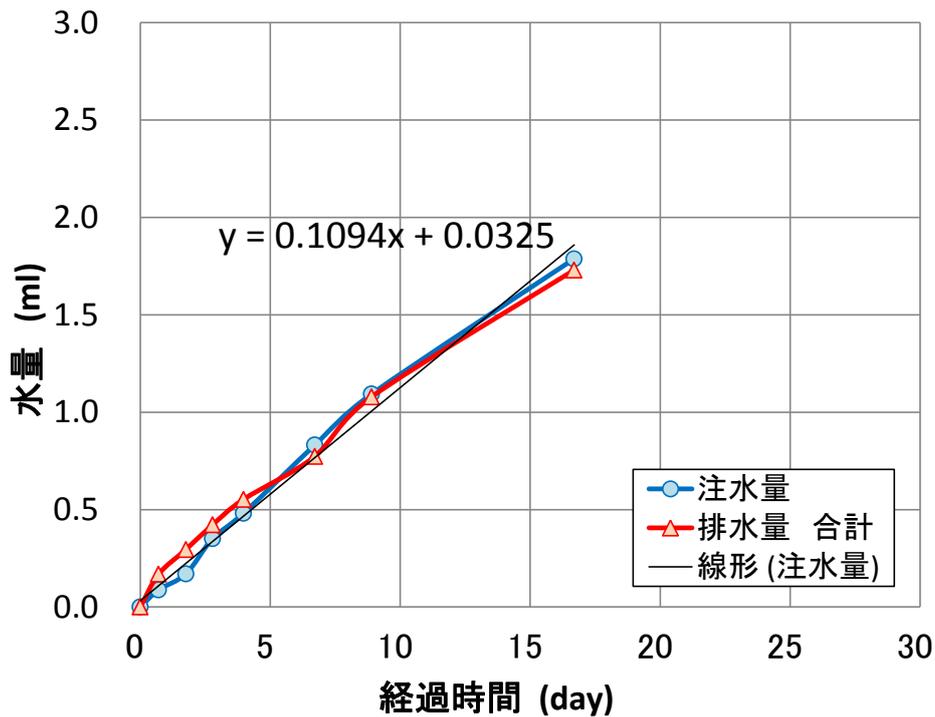


図 4.3.1-19 供試体の飽和確認以降の注水量と排水量の推移 (No.5 供試体)

表 4.3.1-10 飽和確認中の注水量と透水係数の計算 (No.5 供試体)

項目		単位
断面積	28.27	cm ²
供試体厚さ	2.5	cm
注水圧	0.2	MPa
透水量	0.1094	cm ³ /day
	1.27E-06	cm ³ /sec
透水係数	5.7×10^{-13}	m/sec

b. 供試体物性値の把握

(a) 供試体 No.1 の解体調査

供試体 No.1 は、242 日間のガス注入終了後、供試体の解体を行った。

写真 4.3.1-1 から写真 4.3.1-22 に供試体の解体状況を示す。解体は、供試体のガス注入側より順次スライスしながら重量、高さを計測し、含水比試験を行った。高さ 25mm の供試体を深さ方向に 8 分割、1 層ごとに中心部と周辺部 2 分割の合計 3 分割して、各々採取厚さ、湿潤重量、乾燥重量を計測し、密度、含水比を算出した。表 4.3.1-11 および図 4.3.1-20～図 4.3.1-22 に供試体の解体調査結果を示す。

図 4.3.1-20 に示した含水比分布は、ガス注入側 $w=38\%$ 、ガス排出側 $w=35.5\%$ とほぼ直線的に減少した分布になっている。供試体飽和時の供試体圧内の圧密と膨潤の影響が残った結果となっている。

図 4.3.1-21 に示した乾燥密度の分布は、ガス注入側の方がガス排出側に比べて、若干小さくなる分布を示している。含水比の分布と同様に、供試体飽和時の供試体内の圧密と膨潤の影響が残った結果となっている。注入側では初期密度 1.36g/cm^3 よりも最大 0.04 g/cm^3 程度小さく、排出側では初期密度よりも最大 0.04 g/cm^3 程度大きくなっている。

図 4.3.1-22 に示した飽和度の分布は、上記含水比と乾燥密度を用いて各層ごとに算出したものである。少しばらつきはあるが、注入側から 0.3 cm 程度の範囲で若干飽和度が低下している様子が推察される。

表 4.3.1-11 No.1 供試体の含水比計測結果 (2015 年 4 月 27 日解体)

	含水比 (%)			厚さ (cm)	上端面からの距離 (cm)
	A (中央部)	B (外周部)	C (外周部)		
1	35.34	35.79	35.37	0.359	0.18
2	35.64	35.45	35.34	0.322	0.52
3	36.32	36.46	36.34	0.305	0.83
4	36.32	36.43	36.25	0.335	1.15
5	36.62	36.76	36.46	0.319	1.48
6	37.37	37.10	37.19	0.304	1.79
7	37.41	37.68	37.50	0.319	2.10
8	38.10	37.94	37.86	0.224	2.37

供試体 No.1 解体時状況 (2015年4月27日)



写真 4.3.1-1 解体排出側



写真 4.3.1-2 解体注入側



写真 4.3.1-3 排出側端面

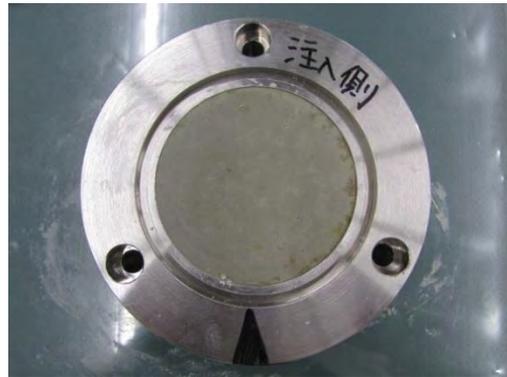


写真 4.3.1-4 注入側端面



写真 4.3.1-5 含水比測定



写真 4.3.1-6 含水比測定

注入側から解体



写真 4.3.1-7 排出-1

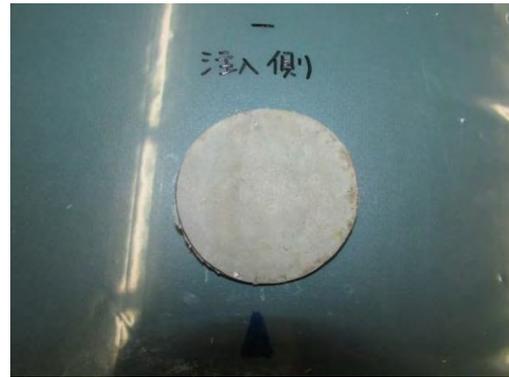


写真 4.3.1-8 注入-1

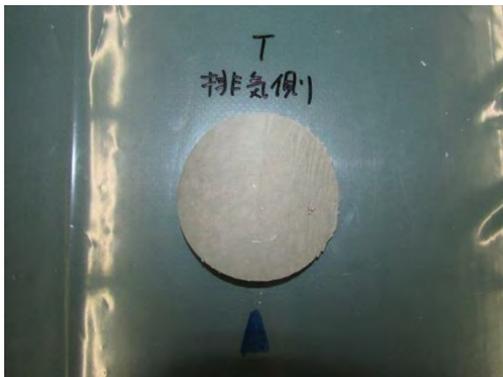


写真 4.3.1-9 排出-2

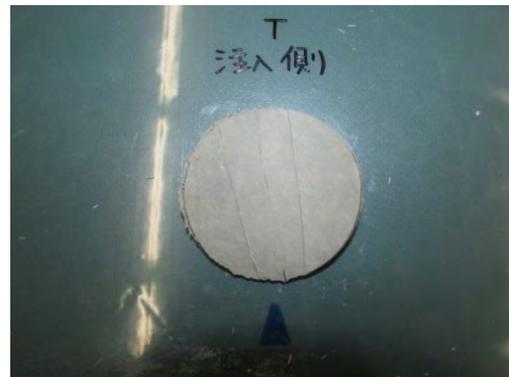


写真 4.3.1-10 注入-2

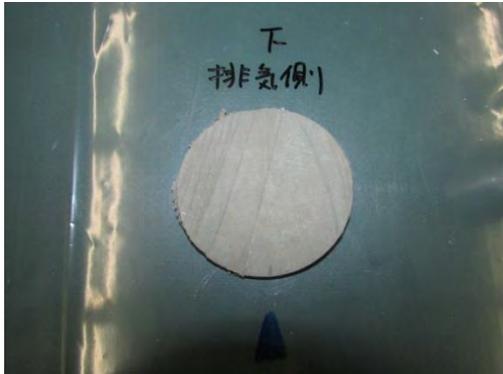


写真 4.3.1-11 排出-3

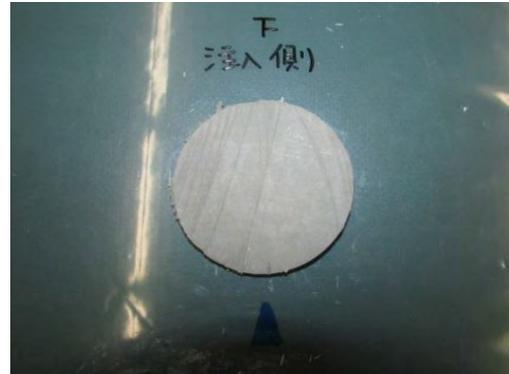


写真 4.3.1-12 注入-3

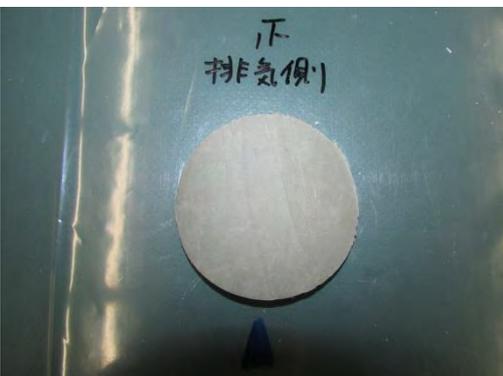


写真 4.3.1-13 排出-4

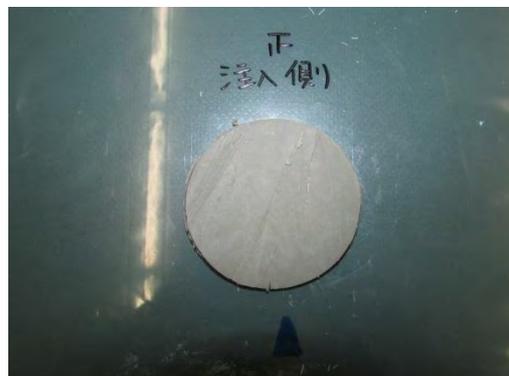


写真 4.3.1-14 注入-4



写真 4.3.1-15 排出-5

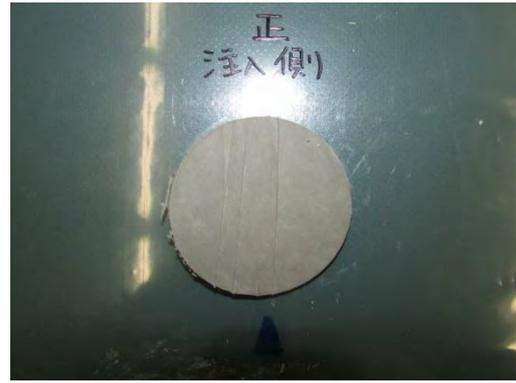


写真 4.3.1-16 注入-5

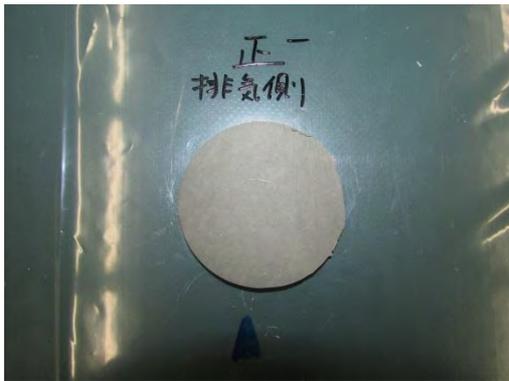


写真 4.3.1-17 排出-6

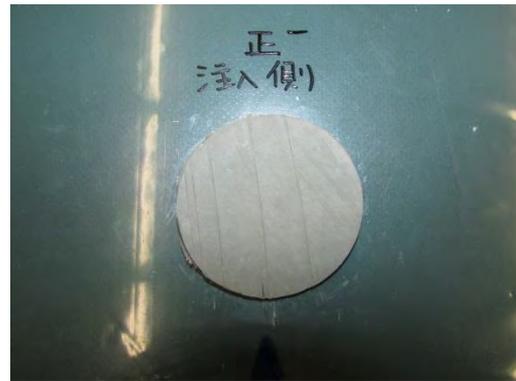


写真 4.3.1-18 注入-6

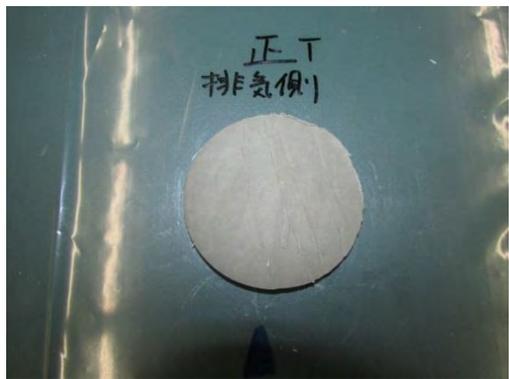


写真 4.3.1-19 排出-7



写真 4.3.1-20 注入-7



写真 4.3.1-21 排出-8



写真 4.3.1-22 注入-8

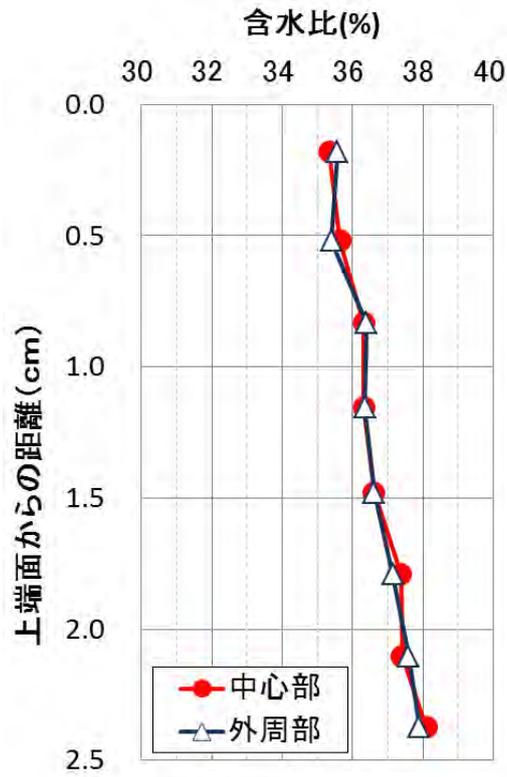


図 4.3.1-20 含水比の深さ方向の分布 (No.1 供試体)

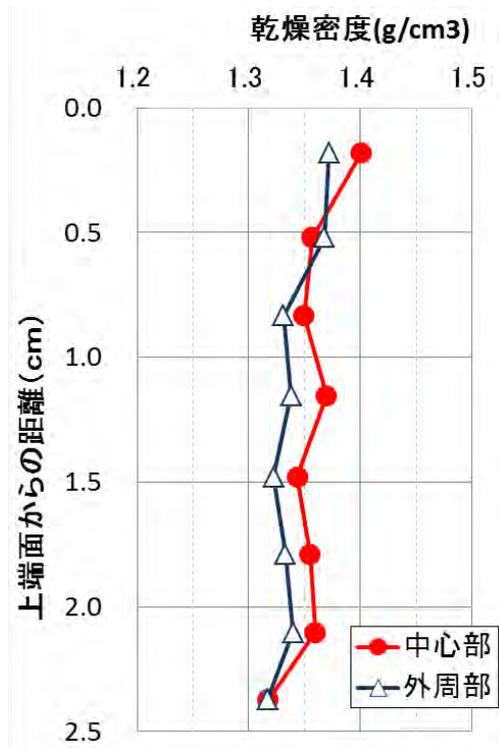


図 4.3.1-21 乾燥密度の深さ方向の分布 (No.1 供試体)

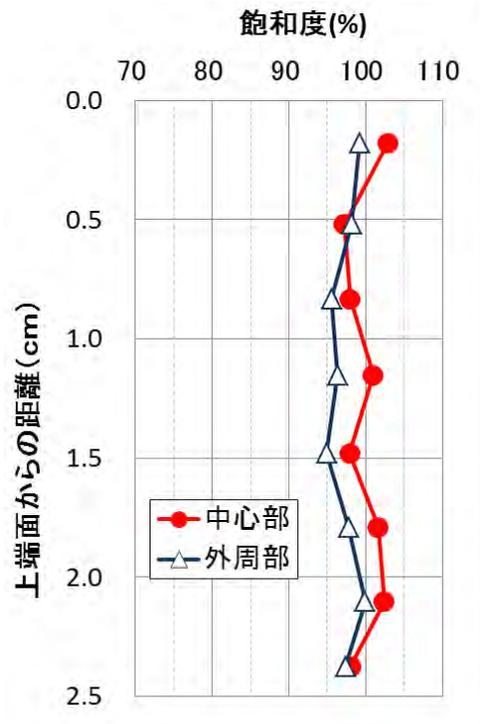


図 4.3.1-22 飽和度の深さ方向の分布 (No.1 供試体)

(b) 供試体 No.3 の解体調査

供試体 No.3 は、ガス注入 365 日間のガス注入後に解体調査した。

写真 4.3.1-23 から写真 4.3.1-44 に供試体の解体状況を示す。高さ 25mm の供試体を深さ方向に 8 分割、1 層ごとに中心部と周辺部 2 分割の合計 3 分割して、各々採取厚さ、湿潤重量、乾燥重量を計測し、密度、含水比を算出した。

表 4.3.1-12 および図 4.3.1-23～図 4.3.1-25 に供試体の解体調査結果を示す。

図 4.3.1-23 に示した含水比分布は、ガス注入側 $w=37.8\%$ 、ガス排出側 $w=35.8\%$ とほぼ直線的に減少した分布になっている。供試体飽和時の供試体圧内の圧密と膨潤の影響が残った結果となっている。

図 4.3.1-24 に示した乾燥密度の分布は、ガス注入側の方がガス排出側に比べて、若干小さくなる分布を示している。含水比の分布と同様に、供試体飽和時の供試体内の圧密と膨潤の影響が残った結果となっている。注入側では初期密度 $1.36\text{g}/\text{cm}^3$ よりも最大 $0.04\text{g}/\text{cm}^3$ 程度小さく、排出側では初期密度よりも最大 $0.06\text{g}/\text{cm}^3$ 程度大きくなっている。

図 4.3.1-25 に示した飽和度の分布は、上記含水比と乾燥密度を用いて各層ごとに算出したものである。少しばらつきはあるが、注入側から 1.0 cm 程度の範囲で若干飽和度が低下している様子が推察される。

表 4.3.1-12 No.3 供試体の含水比計測結果

No.	含水比 (%)			厚さ (cm)	上端面からの距離 (cm)
	A (中央部)	B (外周部)	C (外周部)		
1 (排出側)	36.44	36.10	36.29	0.288	0.14
2	35.68	35.29	35.63	0.325	0.45
3	36.32	36.14	36.48	0.309	0.77
4	37.15	37.06	37.14	0.406	1.12
5	37.43	37.43	37.14	0.317	1.49
6	37.40	37.35	37.33	0.316	1.80
7	37.60	37.76	37.39	0.105	2.01
8 (注入側)	37.76	37.61	37.86	0.499	2.32

注) 試料 No. は供試体ガス排出側から順次ナンバリング



写真 4.3.1-23 解体排出側



写真 4.3.1-24 解体注入側

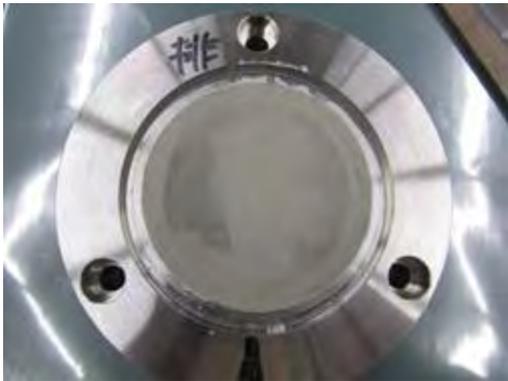


写真 4.3.1-25 排出側端面

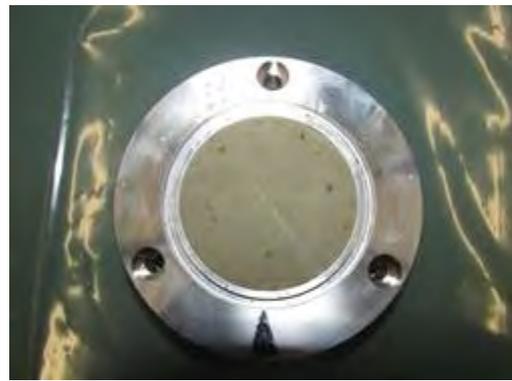


写真 4.3.1-26 注入側端面



写真 4.3.1-27 含水比測定



写真 4.3.1-28 含水比測定



写真 4.3.1-29 排出-1 (排出側端面)



写真 4.3.1-30 注入-1

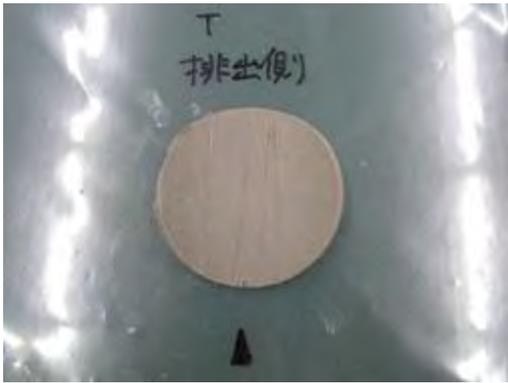


写真 4.3.1-31 排出-2



写真 4.3.1-32 注入-2

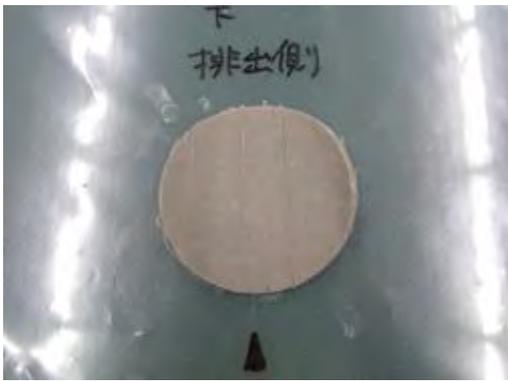


写真 4.3.1-33 排出-3

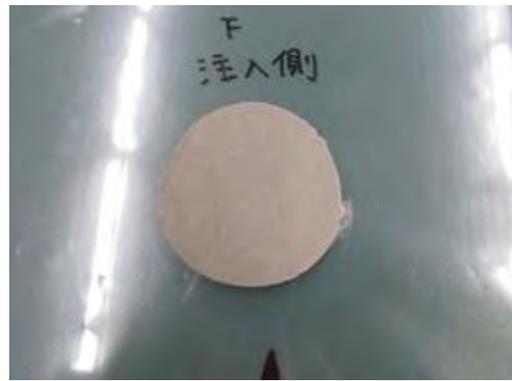


写真 4.3.1-34 注入-3

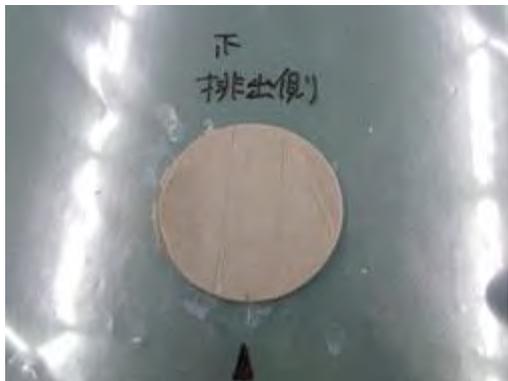


写真 4.3.1-35 排出-4



写真 4.3.1-36 注入-4

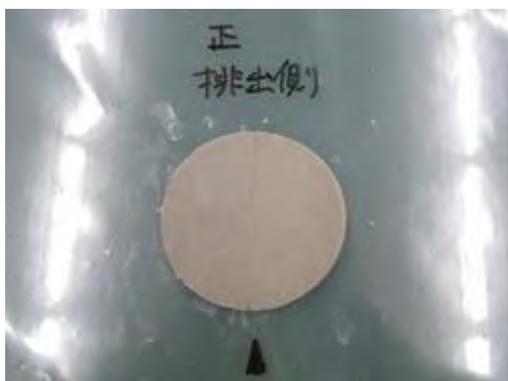


写真 4.3.1-37 排出-5

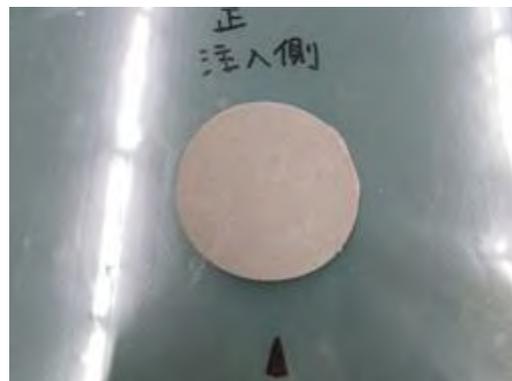


写真 4.3.1-38 注入-5

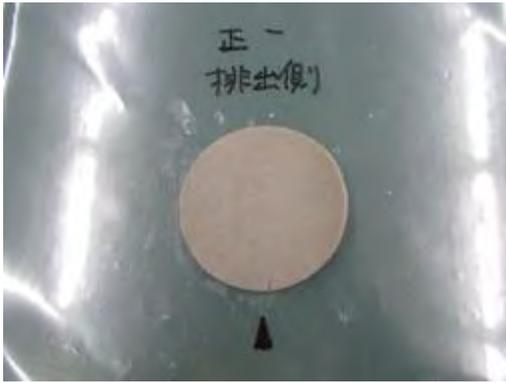


写真 4.3.1-39 排出-6

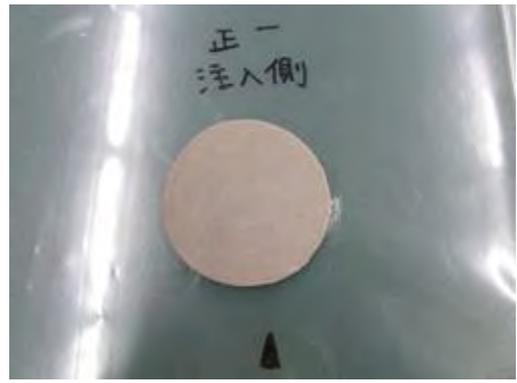


写真 4.3.1-40 注入-6



写真 4.3.1-41 排出-7



写真 4.3.1-42 注入-7

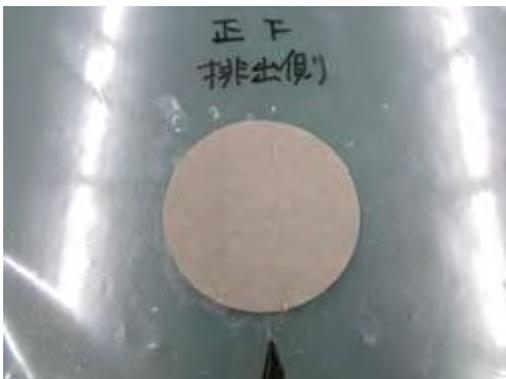


写真 4.3.1-43 排出-8



写真 4.3.1-44 注入-8 (注入側端面)

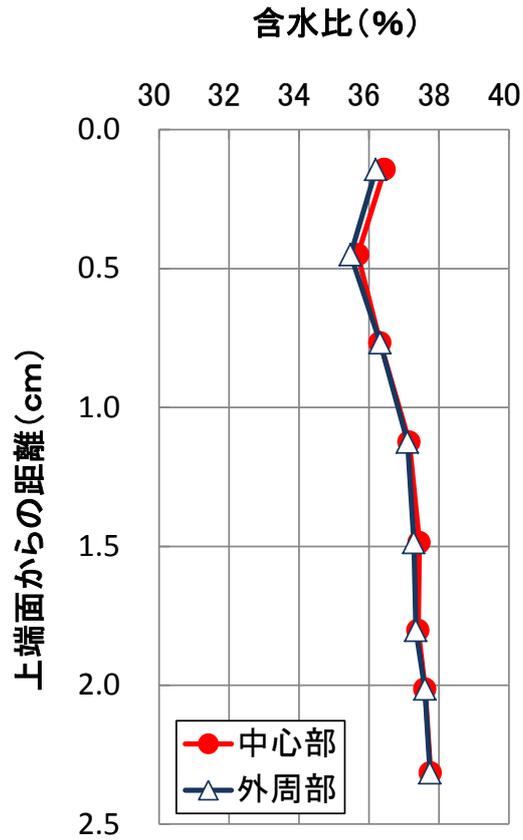


図 4.3.1-23 含水比の深さ方向の分布 (No.3 供試体)

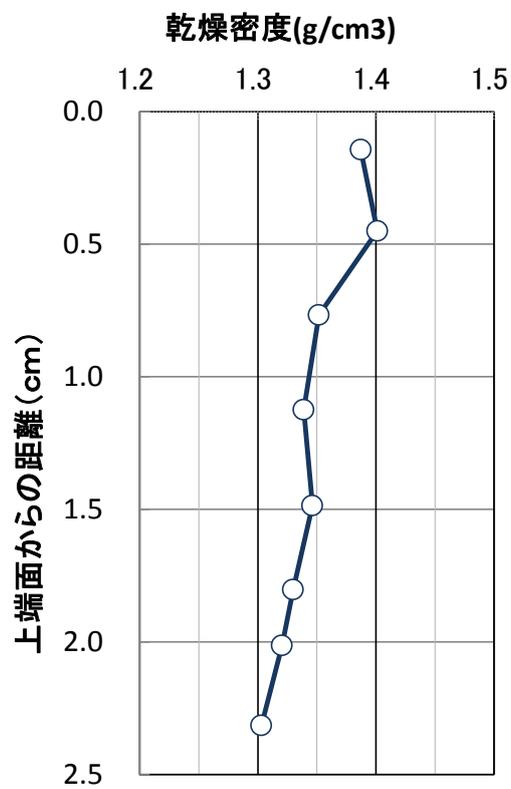


図 4.3.1-24 乾燥密度の深さ方向の分布 (No.3 供試体)

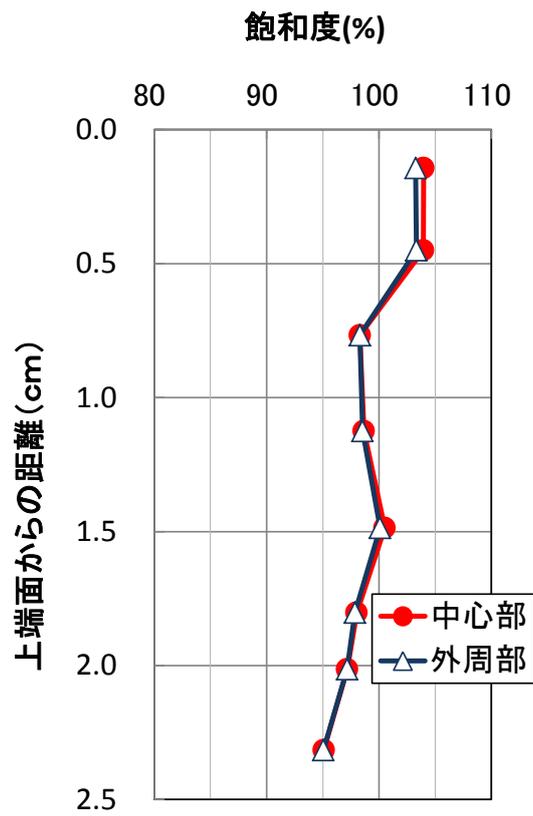


図 4.3.1-25 飽和度の深さ方向の分布 (No.3 供試体)

(c) 供試体 No.4 の解体調査

供試体 No.4 は、ガス注入前の供試体初期状態の把握を目的に 101 日間の注水飽和過程のみで試験を終了し供試体の解体を行った。

写真 4.3.1-45 から写真 4.3.1-64 に供試体の解体状況を示す。高さ 25mm の供試体を深さ方向に 7 分割、1 層ごとに中心部と周辺部 2 分割の合計 3 分割して、各々採取厚さ、湿潤重量、乾燥重量を計測し、密度、含水比を算出した。

表 4.3.1-13 および図 4.3.1-26～図 4.3.1-28 に供試体の解体調査結果を示す。以下の傾向がみられる。

- ・ 含水比は、供試体下面（注水側）に比べて、供試体上面（排水側）の方が小さい。供試体鉛直方向の含水比の差異は 3%程度見られた。
- ・ 乾燥密度は、供試体下面（注水側）に比べて、供試体上面（排水側）の方が大きい。供試体鉛直方向で乾燥密度の碎波 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ 程度見られた。供試体作成時の初期密度 $1.36\text{g}/\text{cm}^3$ に比べて、供試体下面は $0.06\text{g}/\text{cm}^3$ 程度小さく、一方供試体上面では $0.04\text{g}/\text{cm}^3$ 程度大きくなっている。通水飽和過程で、供試体下面では膨張し、上面では圧縮が生じている。
- ・ 飽和度は若干のばらつきはあるものの、概ね 100%で供試体全体が飽和状態を示している。

上記含水比、乾燥密度の分布が生じる原因としては、注水圧 0.2MPa による注水飽和過程における供試体下流側（供試体上面）の圧密に加えて、供試体下面の拘束圧が減じる影響で供試体下面は膨張したものと考えられる。

表 4.3.1-13 No.4 供試体の含水比計測結果（2015 年 7 月 10 日解体）

層	含水比(%)			厚さ(cm)	上端面からの距離(cm)
	A(中央部)	B(外周部)	C(外周部)		
1	35.78	36.32	35.93	0.486	0.24
2	36.81	37.02	37.07	0.354	0.66
3	37.02	37.57	37.30	0.285	0.98
4	37.25	37.72	37.12	0.404	1.33
5	37.50	37.53	37.75	0.298	1.68
6	38.12	38.04	37.89	0.348	2.00
7	39.02	38.97	38.64	0.325	2.34

供試体 No.4 解体時状況 (2015年7月10日)

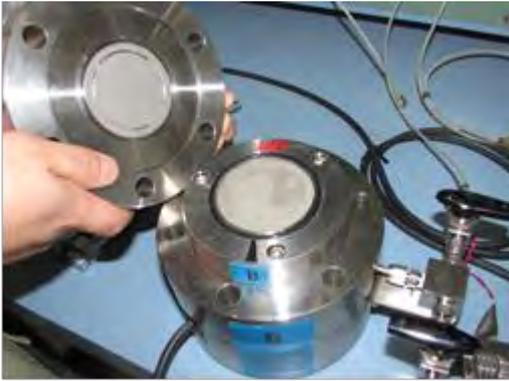


写真 4.3.1-45 解体排出側



写真 4.3.1-46 解体注入側



写真 4.3.1-47 排出側端面



写真 4.3.1-48 注入側端面



写真 4.3.1-49 含水比測定



写真 4.3.1-50 含水比測定

供試体 No.4 解体時状況 (2015年7月10日) 排出側から解体



写真 4.3.1-51 排出-1

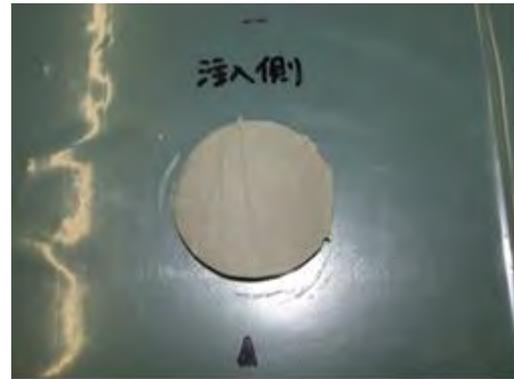


写真 4.3.1-52 注入-1

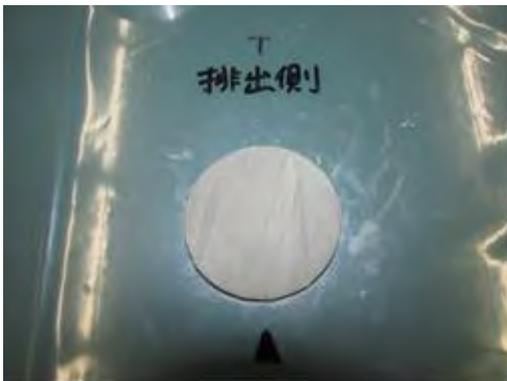


写真 4.3.1-53 排出-2

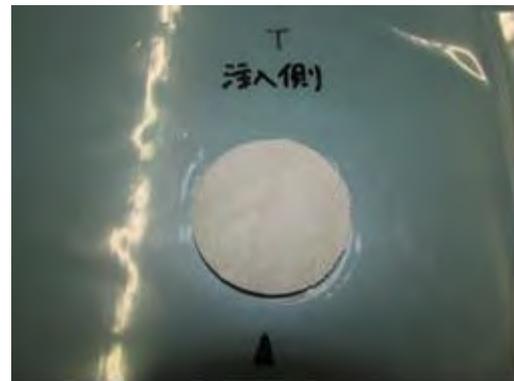


写真 4.3.1-54 注入-2



写真 4.3.1-55 排出-3

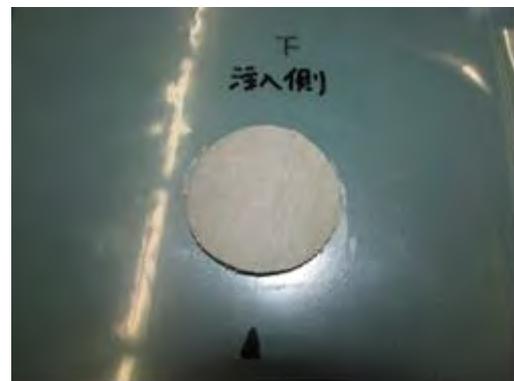


写真 4.3.1-56 注入-3

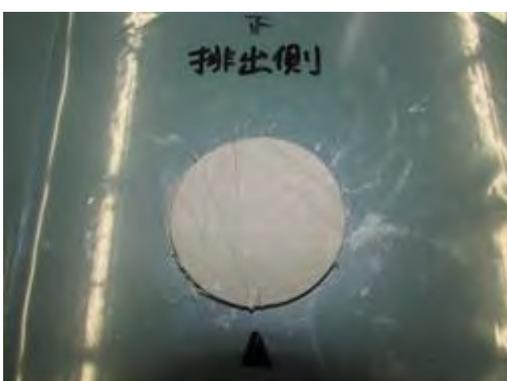


写真 4.3.1-57 排出-4

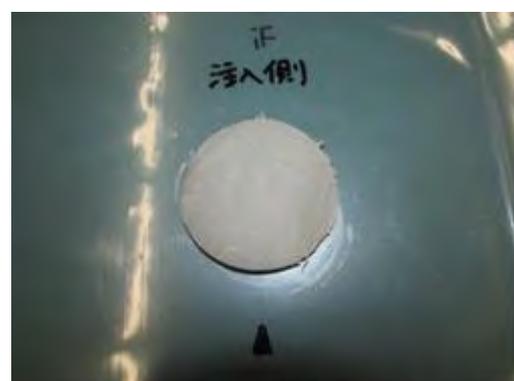


写真 4.3.1-58 注入-4

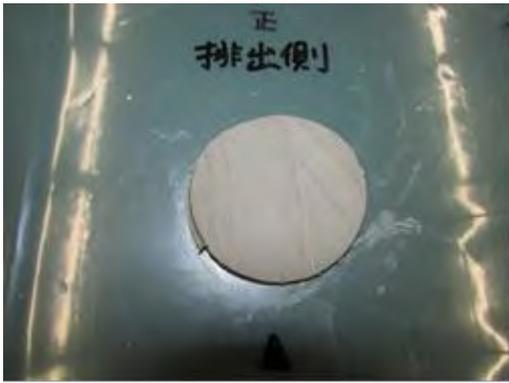


写真 4.3.1-59 排出-5

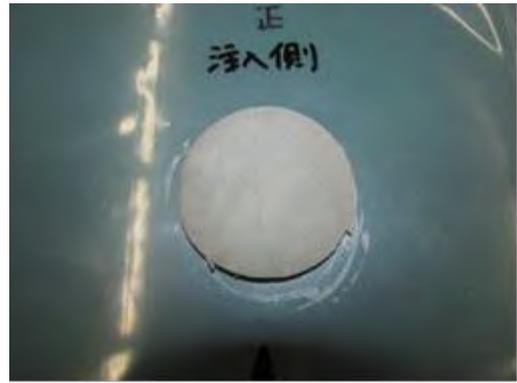


写真 4.3.1-60 注入-5

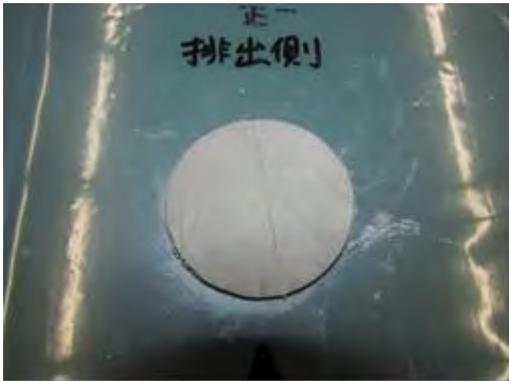


写真 4.3.1-61 排出-6

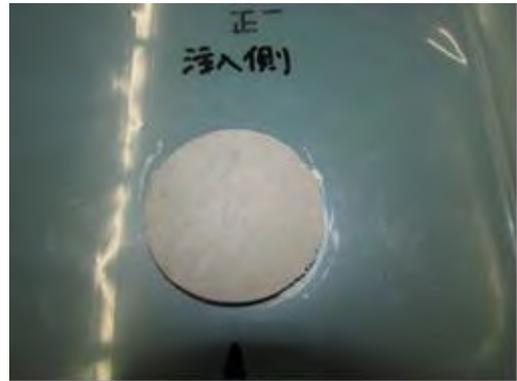


写真 4.3.1-62 注入-6

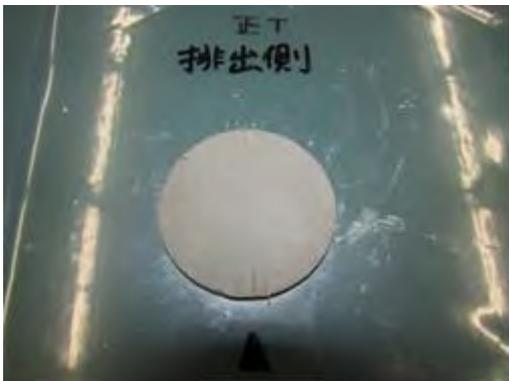


写真 4.3.1-63 排出-7

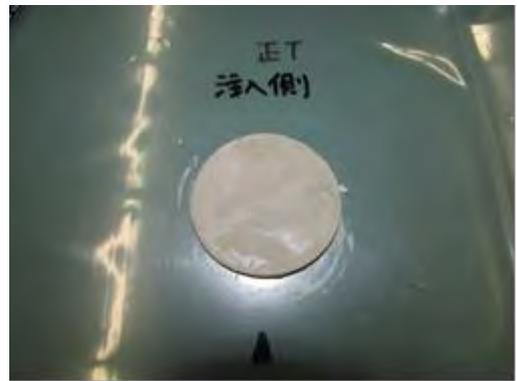


写真 4.3.1-64 注入-7

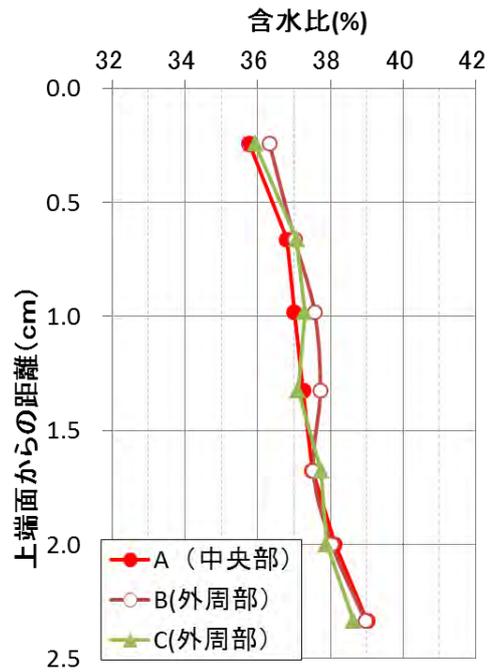


図 4.3.1-26 含水比分布 (No.4 供試体)

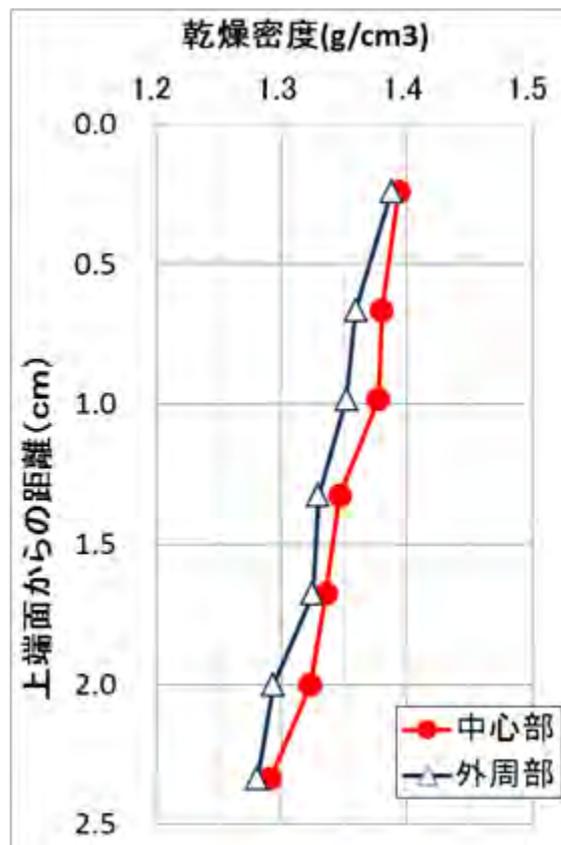


図 4.3.1-27 乾燥密度の分布 (No.4 供試体)

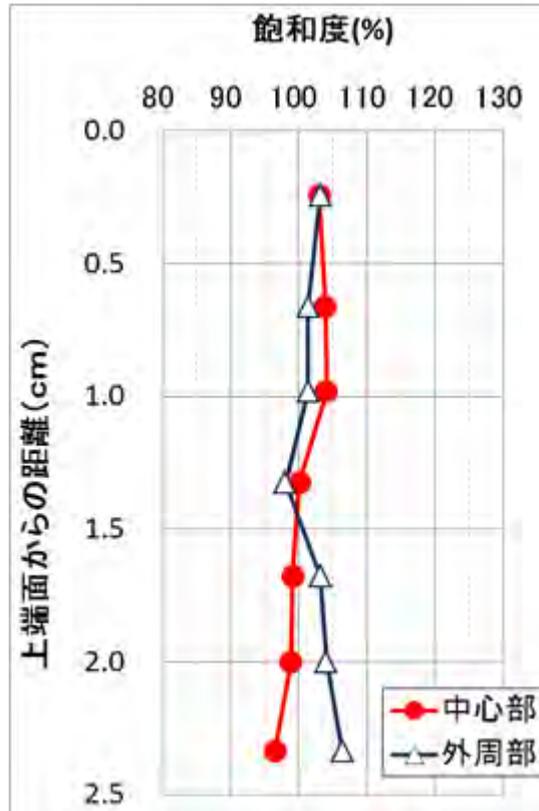


図 4.3.1-28 飽和度の分布 (No.4 供試体)

(2) ベントナイト・砂混合材料を用いた圧密変形特性データの取得

1) 試験装置

試験装置の概念図を図 4.3.1-29 に示す。

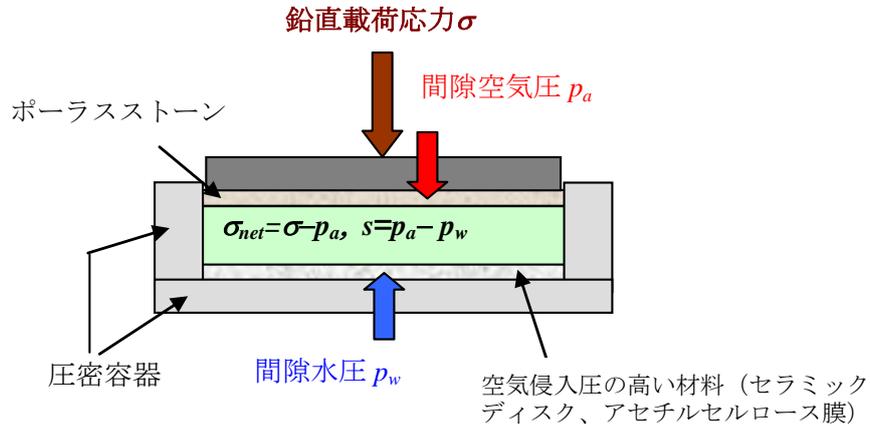


図 4.3.1-29 サクション制御試験装置の概念

2) 供試体および試験条件

a. 供試体条件

(a) 使用材料

ベントナイト/砂混合材料 ((ベントナイト : クニゲル V1 (クニミネ工業製)、砂 : 3 号および 5 号ケイ砂を混合 (重量比で 1:1))

(b) 混合条件

- ・ ベントナイト : 砂 = 7 : 3 (乾燥重量比)
- ・ 初期含水比 : 17%
- ・ 初期乾燥密度 : 1.6Mg/m³

(c) 供試体寸法

- ・ 直径 $\phi = 60\text{mm}$, 高さ $h = 10\text{mm}$

b. 試験条件

- ・ 試験雰囲気温度は一定とした
- ・ 試験に用いる水は蒸留水とした

3) 試験方法

a. 試験手順

- ① 所定のサクシオンが作用するよう、供試体のセット後、下部から間隙水圧 (p_w =大気圧) を与えると同時に上部から所定の間隙ガス圧 (p_a) を与えた (サクシオン $s=p_a-p_w$)。
- ② 給排水条件、体積拘束条件のもとで、膨潤圧が一定となるまで給水させた。
- ③ 膨潤圧が一定となった後、サクシオン一定の下で圧密載荷、除荷試験を実施した。

b. 載荷条件

(a) サクシオンの設定

- ① 試験に適用するサクシオンとしては、以下の 3 水準をとした。
- ② 0 kPa (飽和状態)
- ③ 400 kPa (飽和過程での飽和度約 92%)
- ④ 900 kPa (飽和過程での飽和度約 83%)

(b) 載荷ステップ

- ① 拘束ネット応力 ($\sigma - p_a$) 載荷過程 (圧密収縮過程)
- ② 膨潤応力相当より 4 段階を予定し、各水準で各々のひずみ量を測定
- ③ サクシオン 400kPa の場合の載荷段階の設定例 \Rightarrow (初期:0.2MPa 程度) \Rightarrow (0.45 MPa) \Rightarrow 1.0 MPa \Rightarrow 1.5 MPa \Rightarrow 3.0 MPa の順に載荷
- ④ 拘束ネット応力 ($\sigma - p_a$) 除荷過程 (膨潤過程)
- ⑤ 最大載荷ステップより 3 段階を予定し、各水準で各々のひずみ量を測定
- ⑥ サクシオン 400kPa の場合の除荷段階の設定例 \Rightarrow 3.0 MPa \Rightarrow 1.5 MPa \Rightarrow 1.0 MPa の順に除荷

c. 試験結果の整理方法

試験結果は土質材料に対する圧密試験に準じて、試験結果の整理・評価を実施した。結果の整理の例として、 $e-\log P$ 曲線のイメージを図 4.3.1-30 に示す。

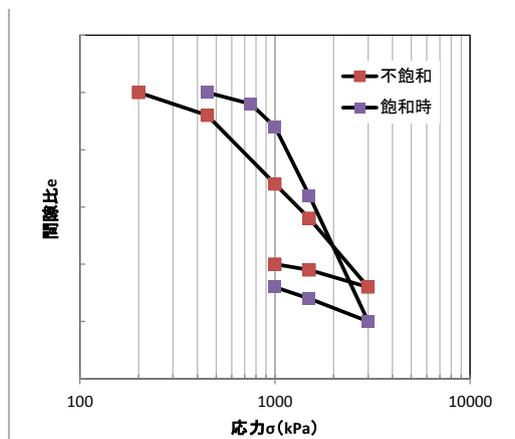


図 4.3.1-30 載荷ステップと $e-\log P$ 曲線のイメージ

4) 試験結果

a. 圧密量-時間曲線 (飽和土)

サクション $s = 0\text{kPa}$ (飽和状態) における載荷, 除荷の各応力段階での圧密量-時間曲線について、図 4.3.1-31~図 4.3.1-38 に示す。

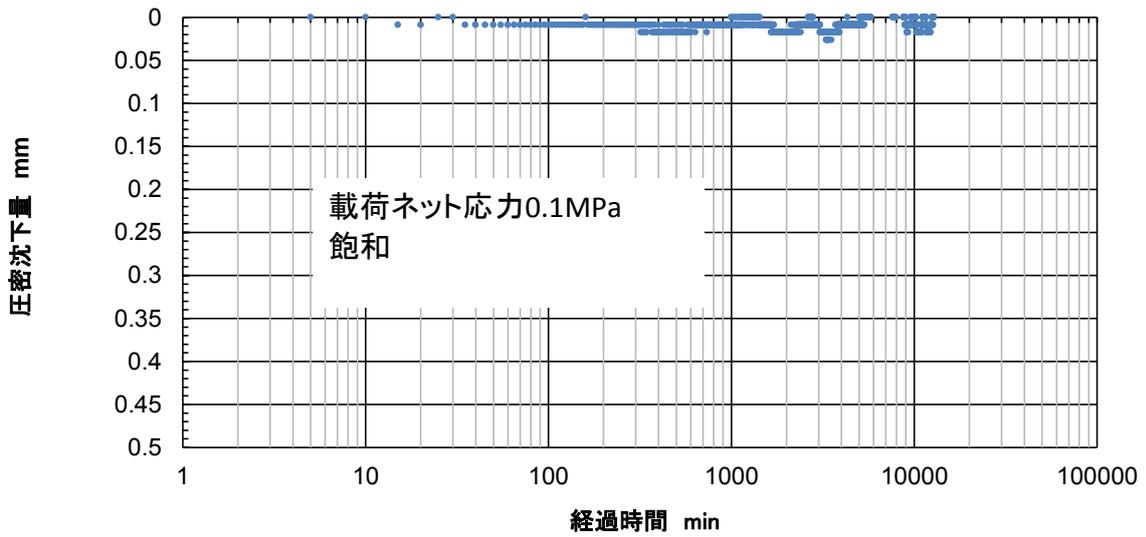


図 4.3.1-31 圧密量-時間曲線 (サクション 0kPa , ネット応力 0.1MPa)

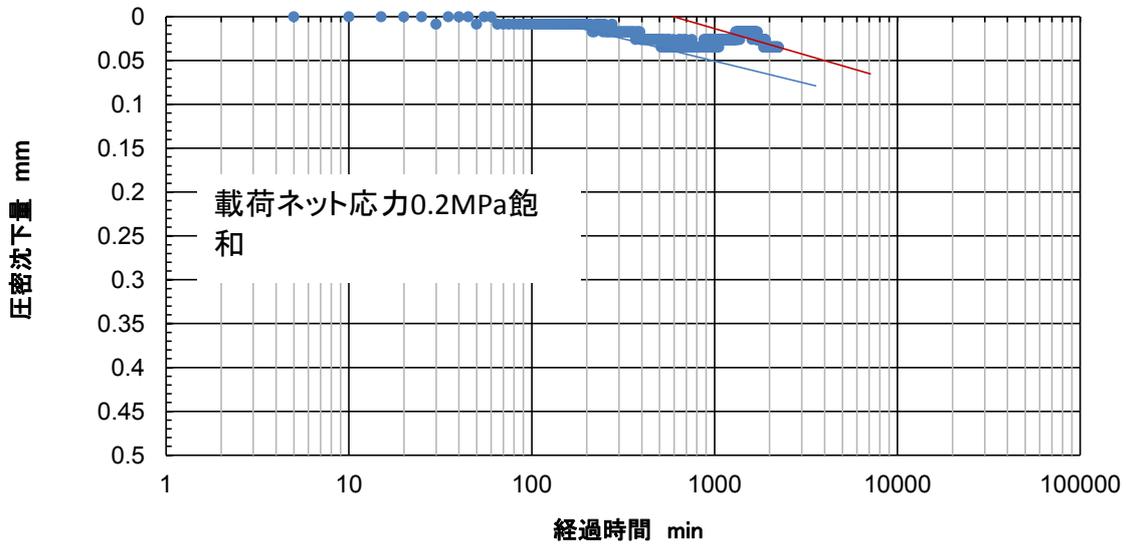


図 4.3.1-32 圧密量-時間曲線 (サクション 0kPa , ネット応力 0.2MPa)

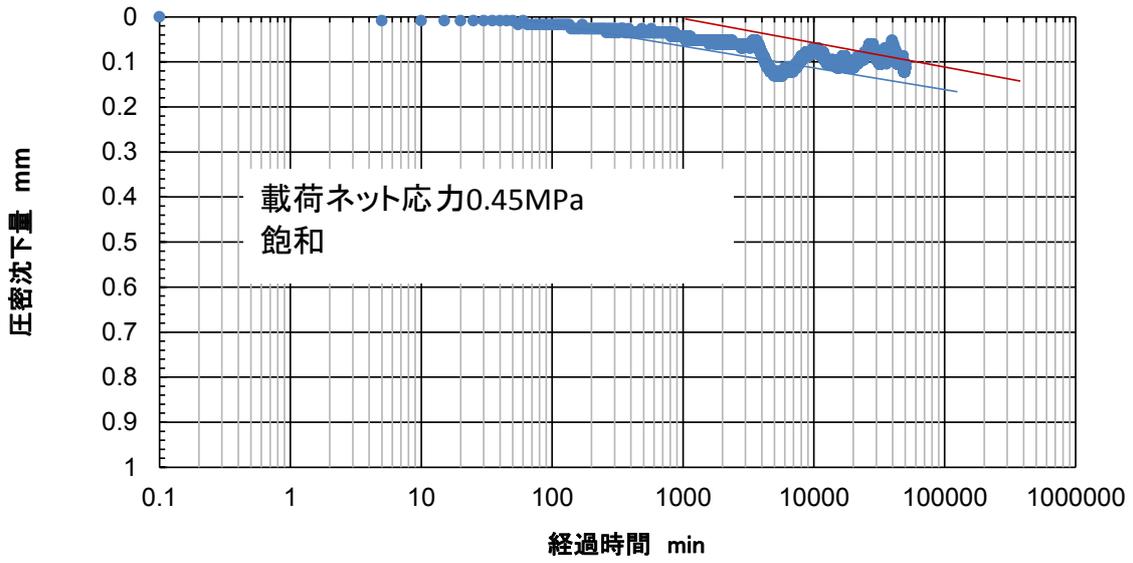


図 4.3.1-33 圧密量-時間曲線 (サクシオン 0kPa, ネット応力 0.45MPa)

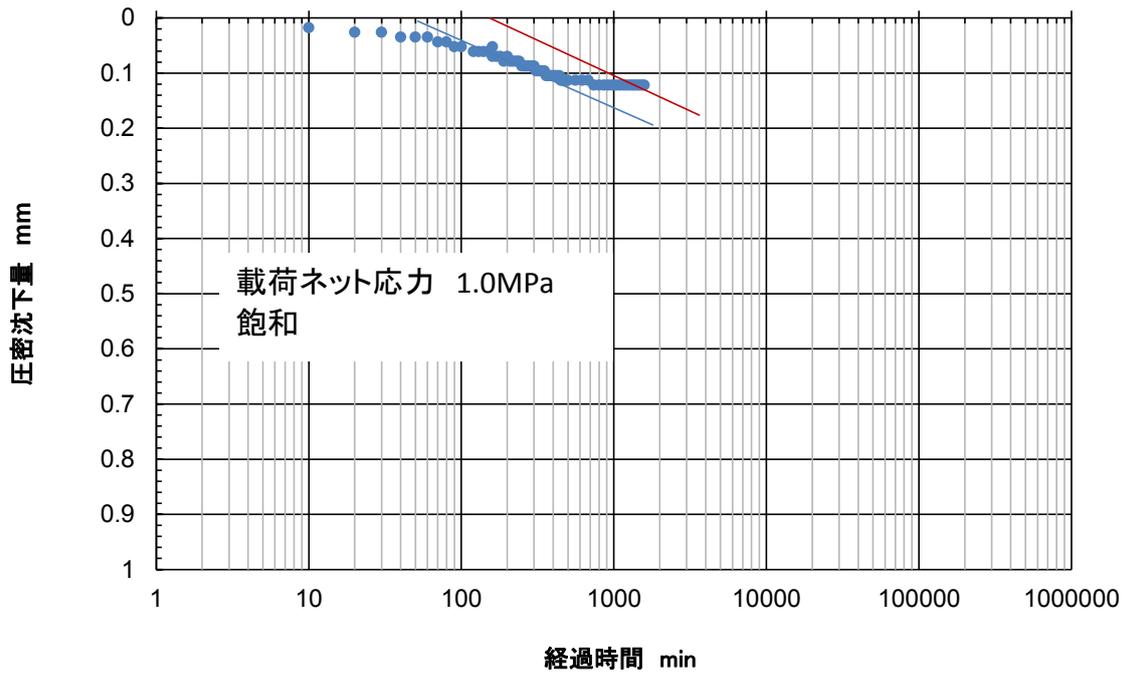


図 4.3.1-34 圧密量-時間曲線 (サクシオン 0kPa, ネット応力 1.0MPa)

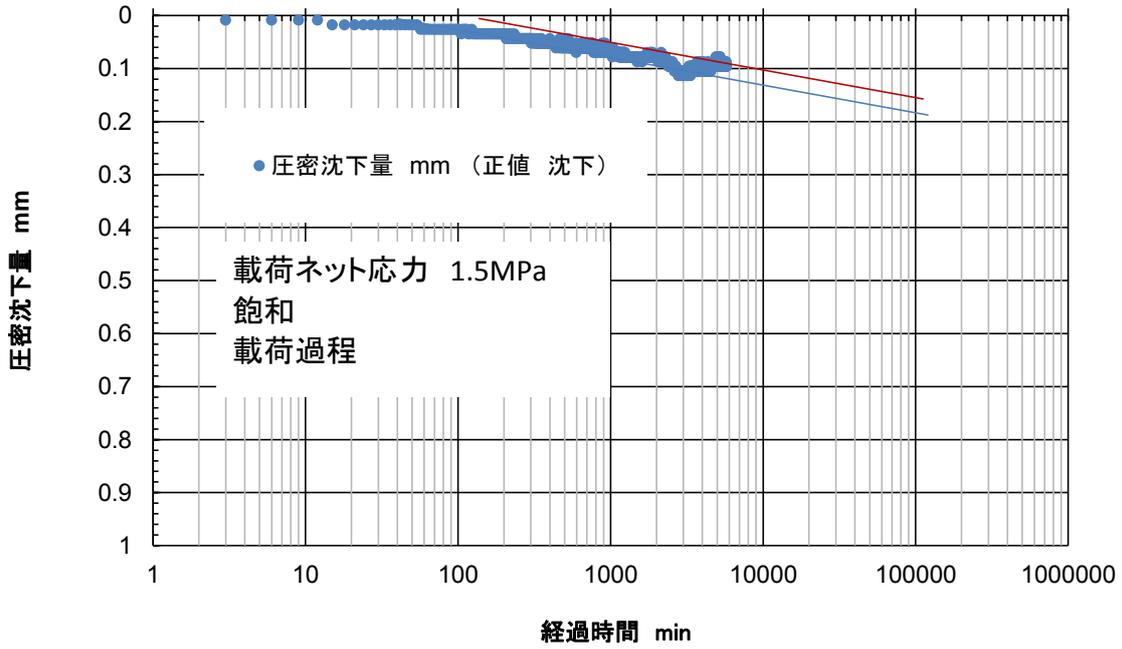


図 4.3.1-35 圧密量—時間曲線 (サクシヨン 0kPa, ネット応力 1.5MPa)

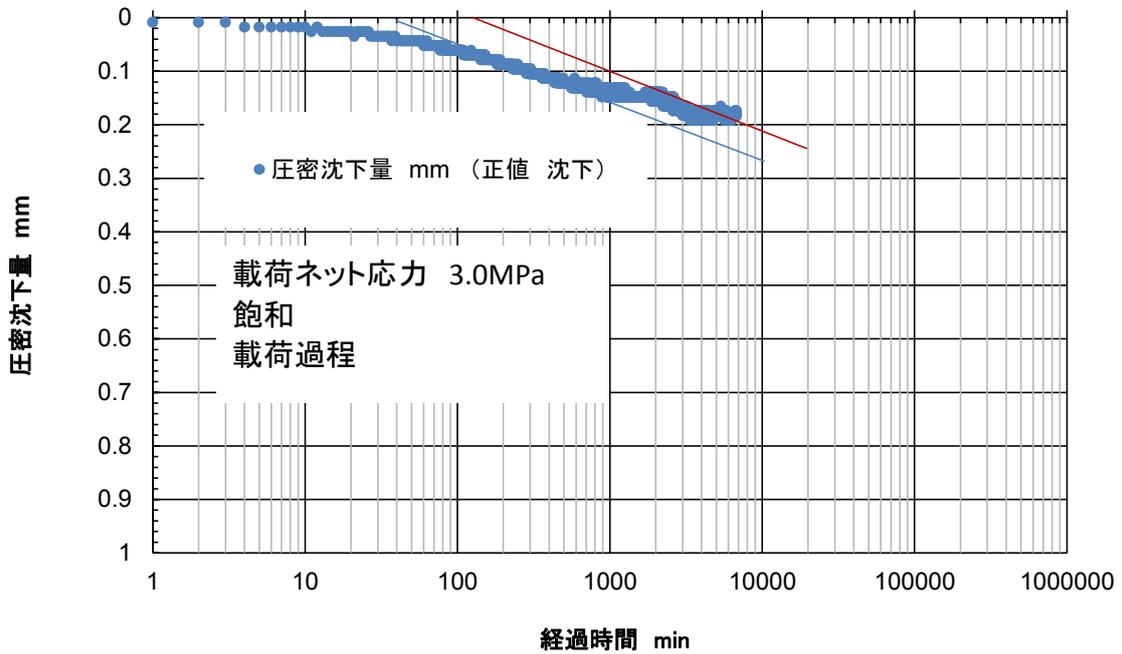


図 4.3.1-36 圧密量—時間曲線 (サクシヨン 0kPa, ネット応力 3.0MPa)

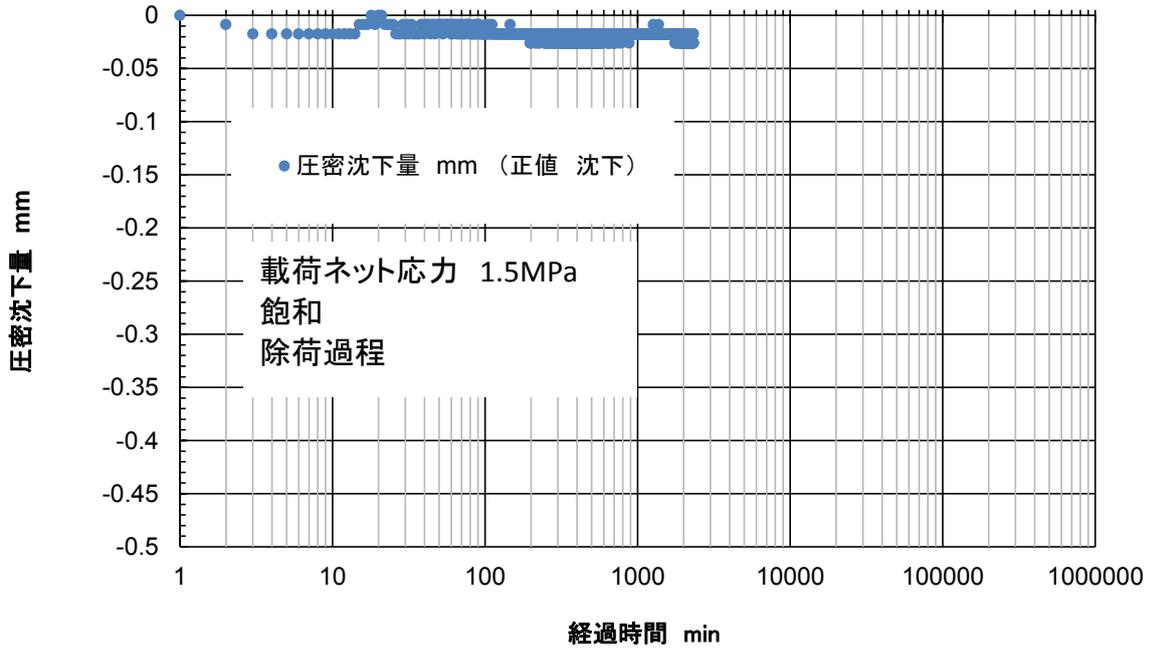


図 4.3.1-37 圧密量-時間曲線 (サクシヨン 0kPa, ネット応力 1.5MPa, 除荷)

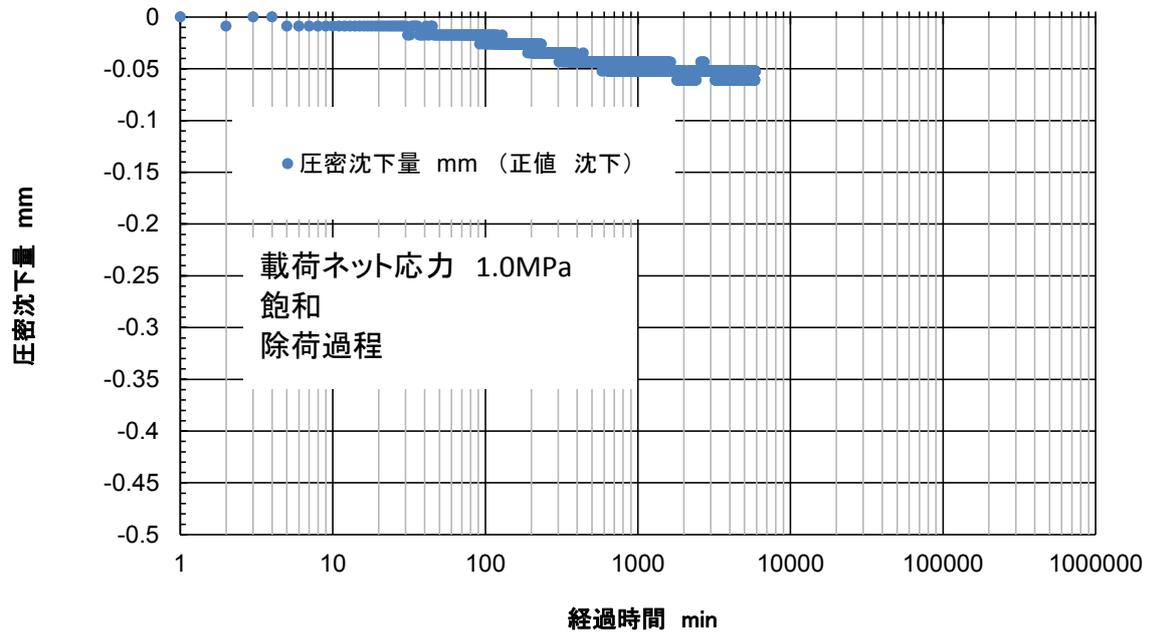


図 4.3.1-38 圧密量-時間曲線 (サクシヨン 0kPa, ネット応力 1.0MPa, 除荷)

b. 圧密量—時間曲線（サクシヨン 400kPa, 荷重ネット応力：0.1MPa~1.0MPa）

サクシヨン $s = 400\text{kPa}$ （飽和状態）における荷重，除荷の各応力段階での圧密量—時間曲線について、図 4.3.1-39～図 4.3.1-46 に示す。

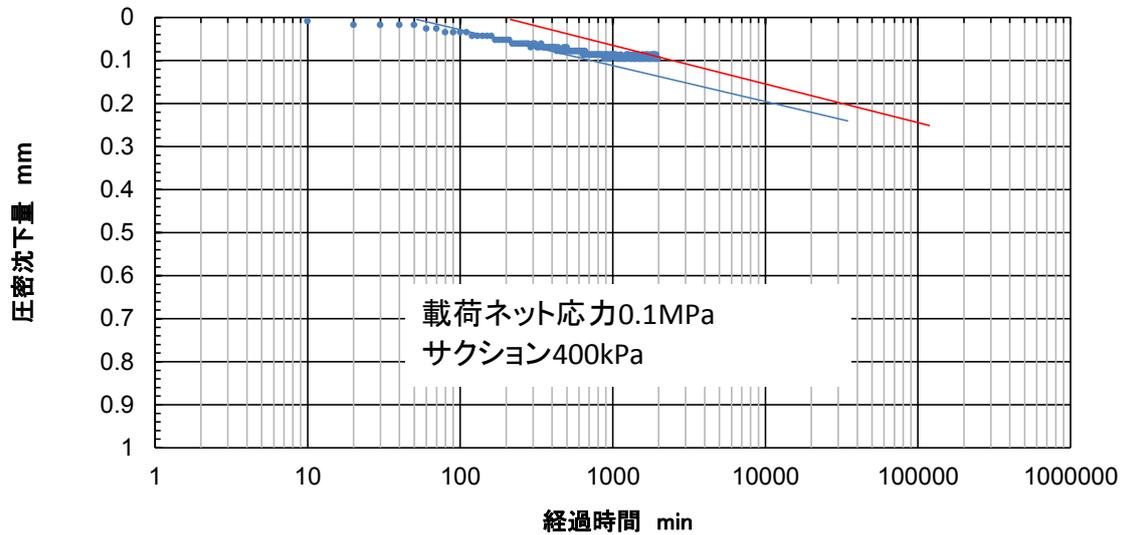


図 4.3.1-39 圧密量—時間曲線（サクシヨン 400kPa, ネット応力 0.1MPa）

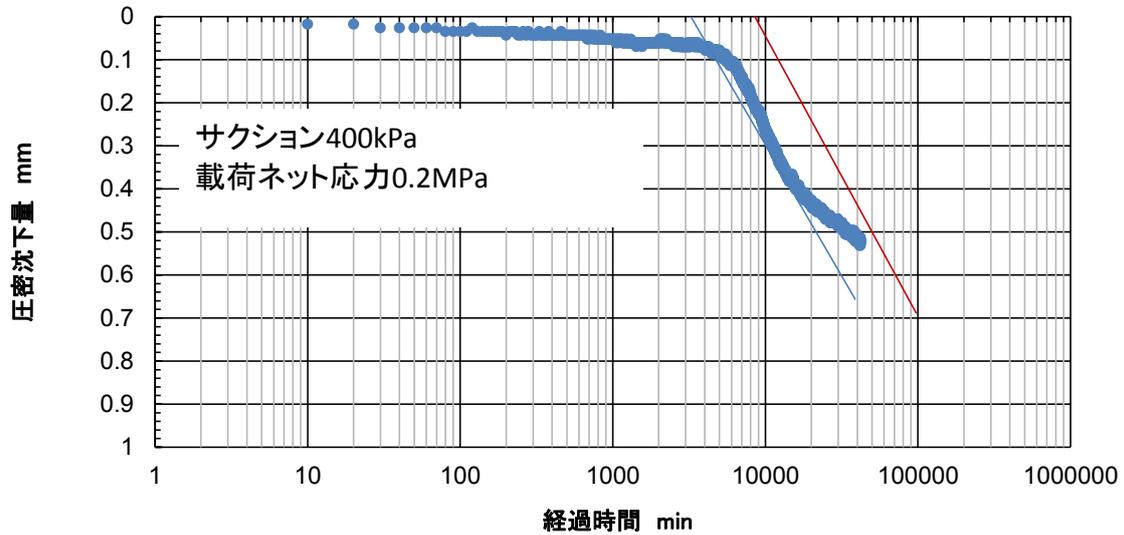


図 4.3.1-40 圧密量—時間曲線（サクシヨン 400kPa, ネット応力 0.2MPa）

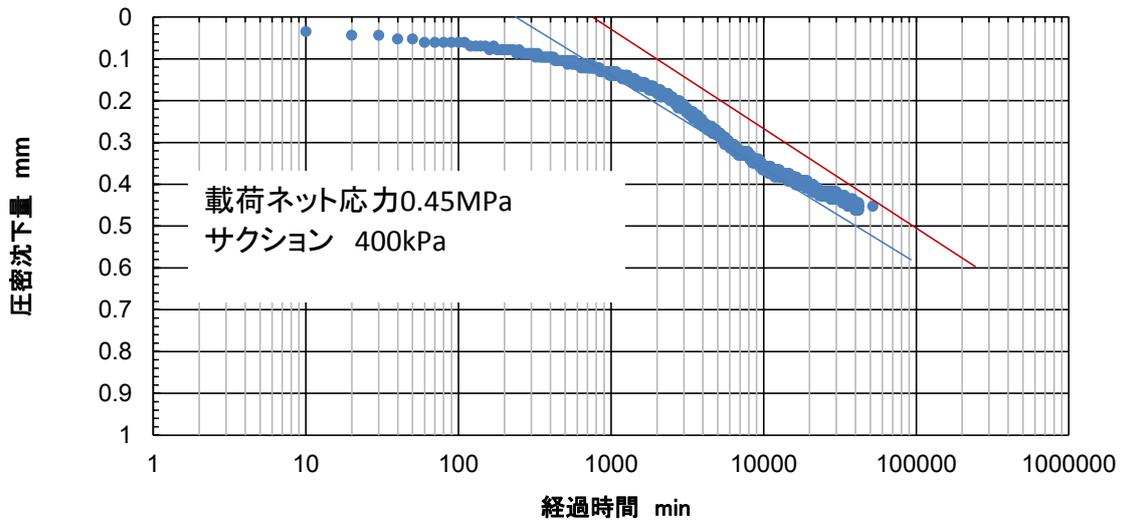


図 4.3.1-41 圧密量-時間曲線 (サクシヨン 400kPa, ネット応力 0.45MPa)

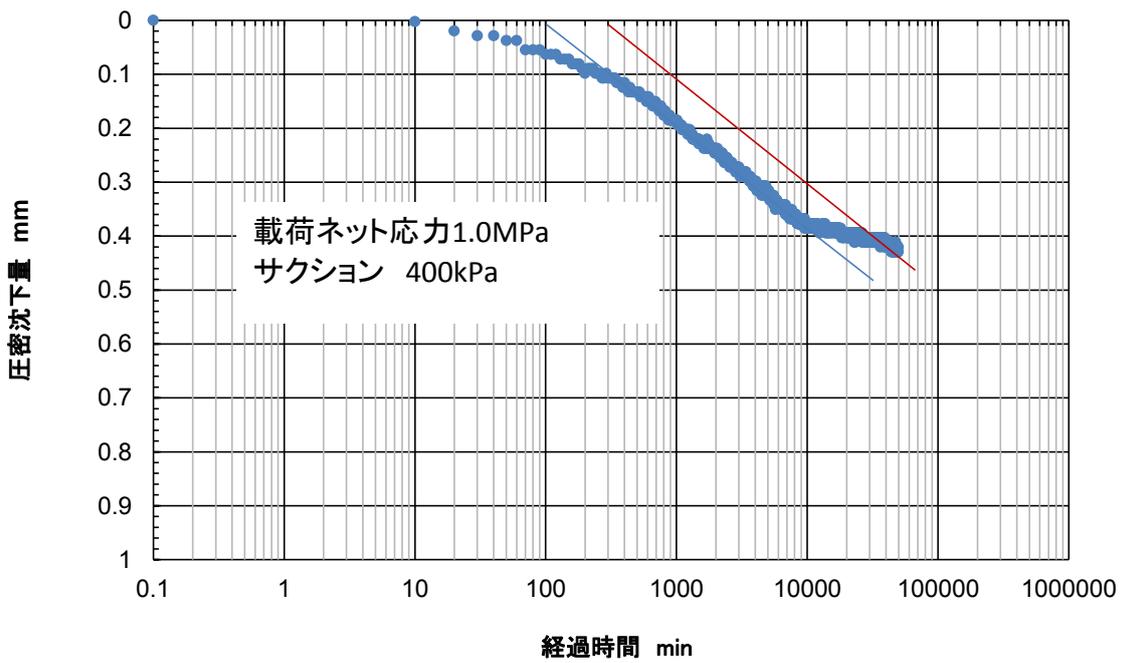


図 4.3.1-42 圧密量-時間曲線 (サクシヨン 400kPa, ネット応力 1.0MPa)

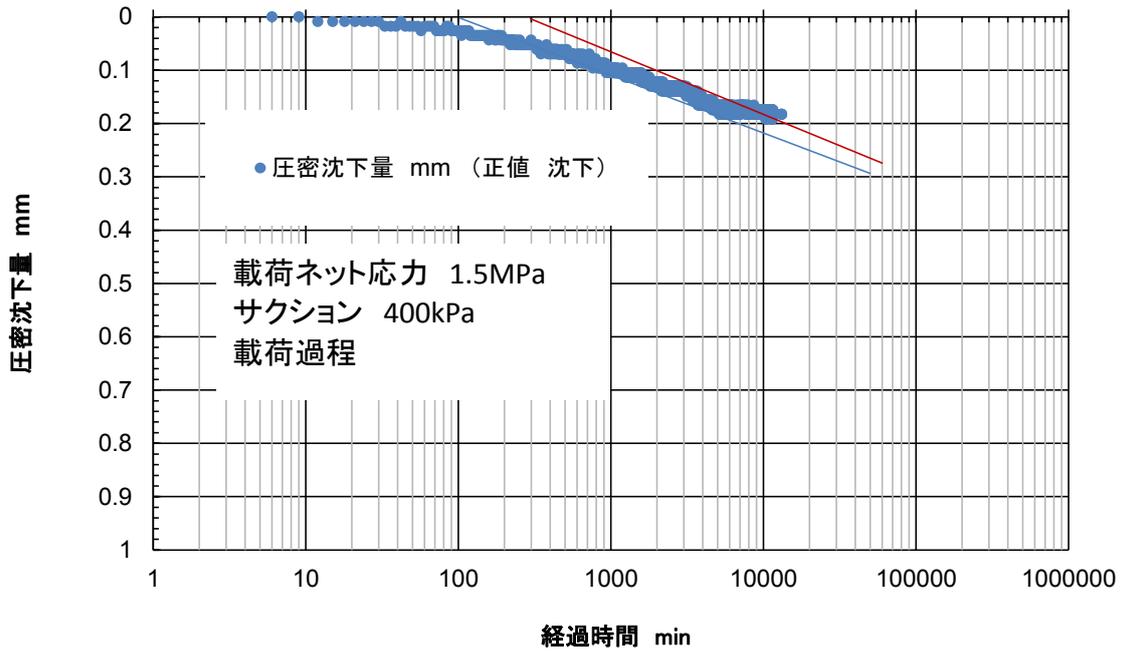


図 4.3.1-43 圧密量—時間曲線 (サクシヨン 400kPa, ネット応力 1.5MPa)

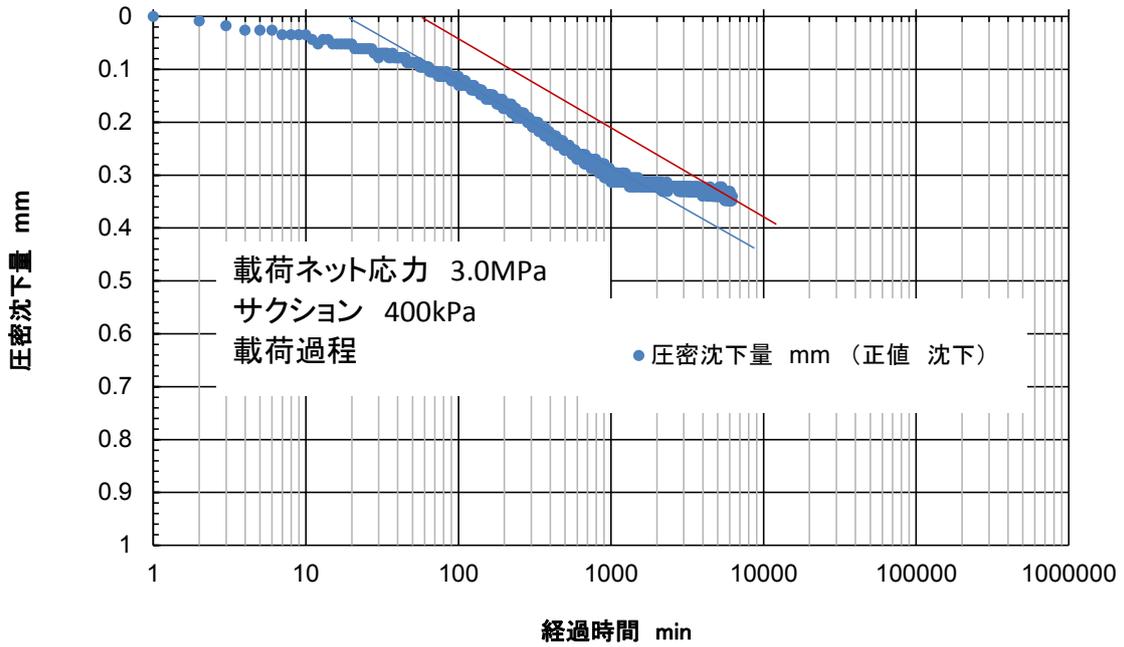


図 4.3.1-44 圧密量—時間曲線 (サクシヨン 400kPa, ネット応力 3.0MPa)

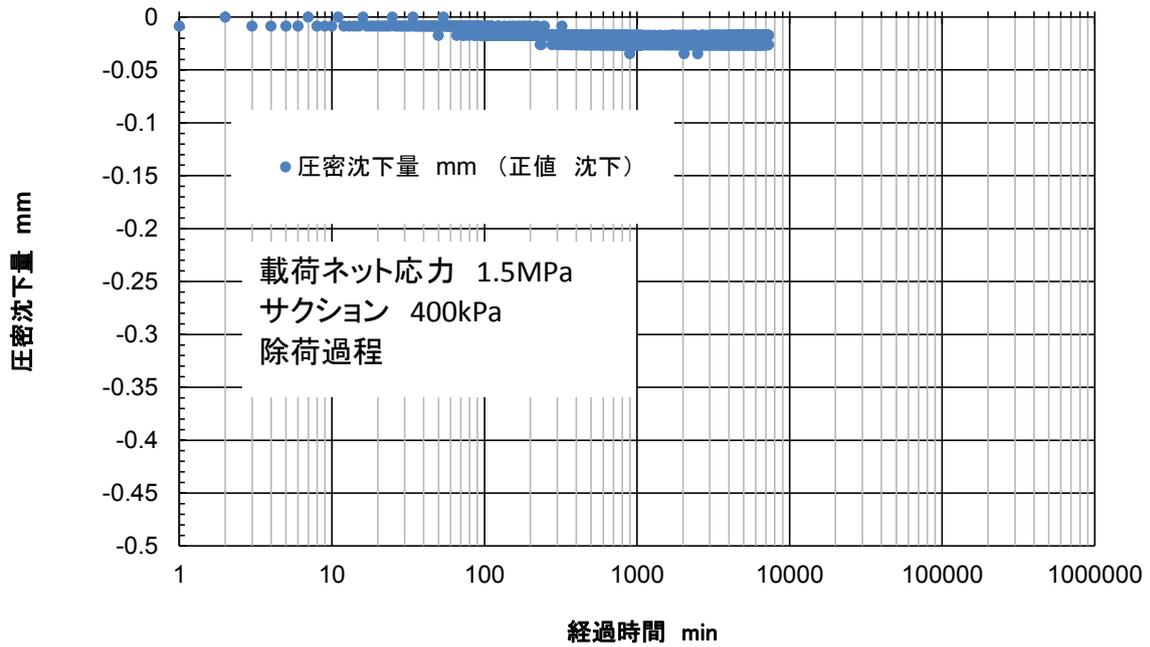


図 4.3.1-45 圧密量—時間曲線 (サクション 400kPa, ネット応力 1.5MPa, 除荷)

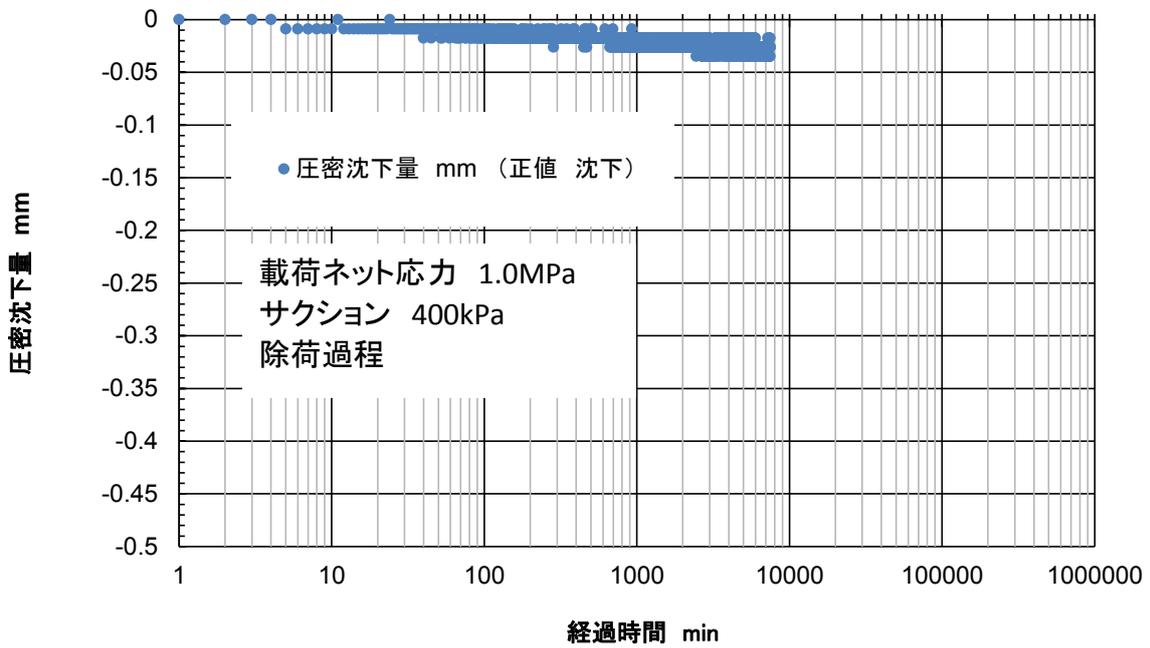


図 4.3.1-46 圧密量—時間曲線 (サクション 400kPa, ネット応力 1.0MPa, 除荷)

c. 圧密量—時間曲線（サクシヨン 900kPa, 荷重ネット応力：0.1MPa~1.0MPa）

サクシヨン $s = 900\text{kPa}$ （飽和状態）における荷重，除荷の各応力段階での圧密量—時間曲線について、図 4.3.1-47～図 4.3.1-54 に示す。

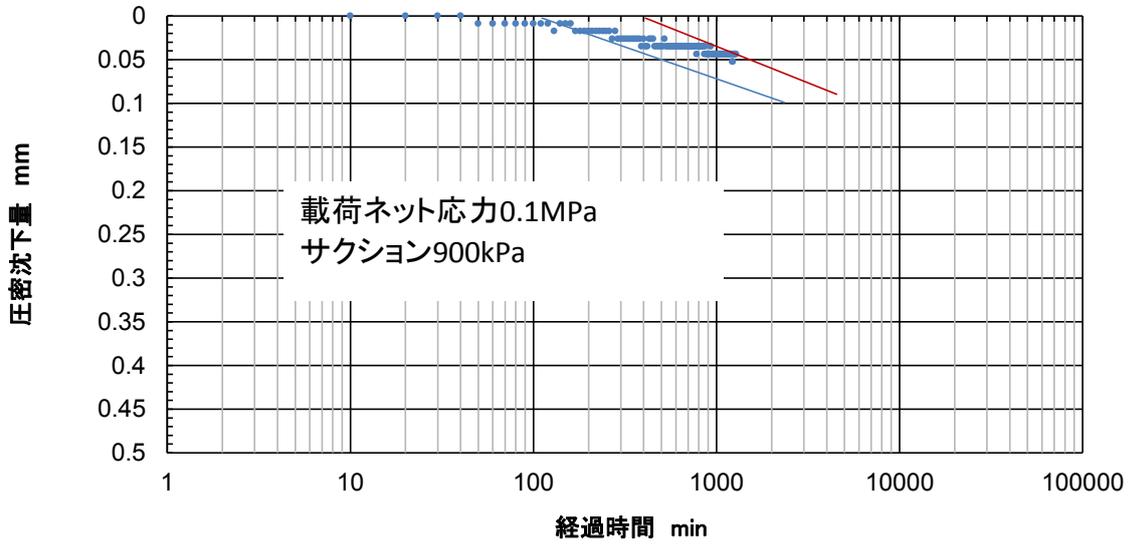


図 4.3.1-47 圧密量—時間曲線（サクシヨン 900kPa, ネット応力 0.1MPa）

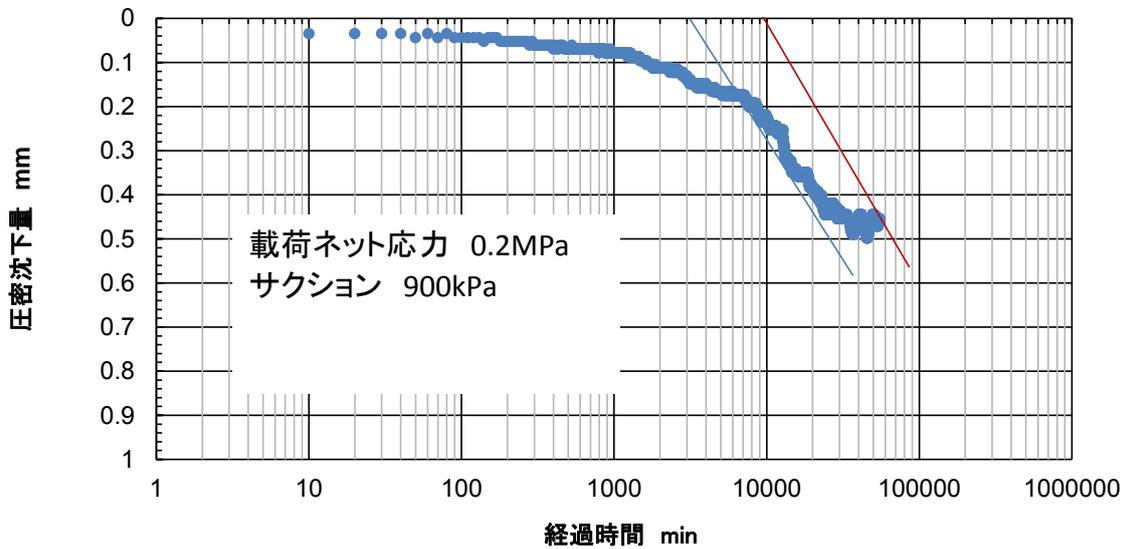


図 4.3.1-48 圧密量—時間曲線（サクシヨン 900kPa, ネット応力 0.2MPa）

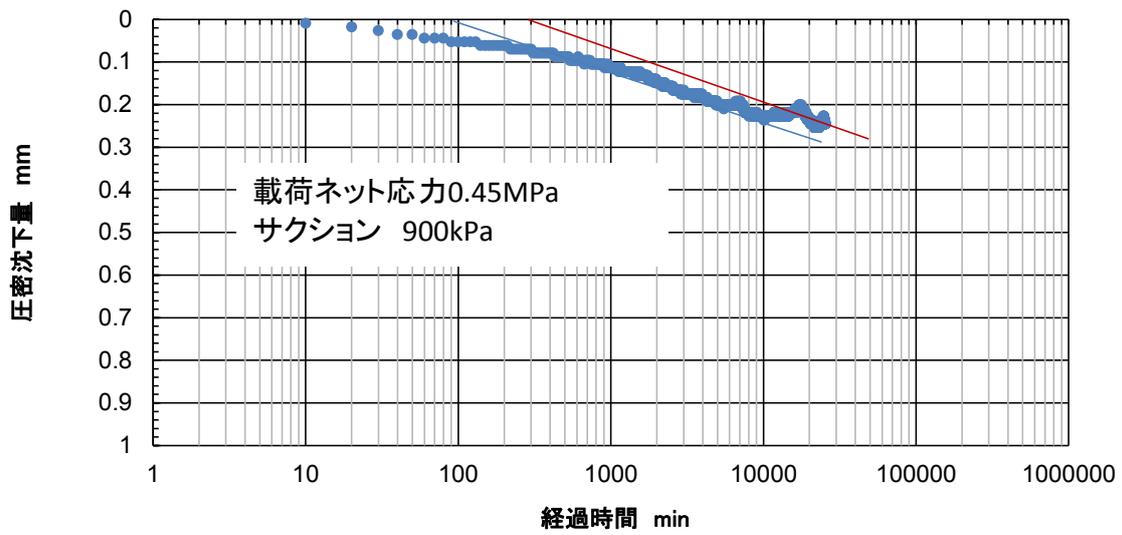


図 4.3.1-49 圧密量-時間曲線 (サクシオン 900kPa, ネット応力 0.45MPa)

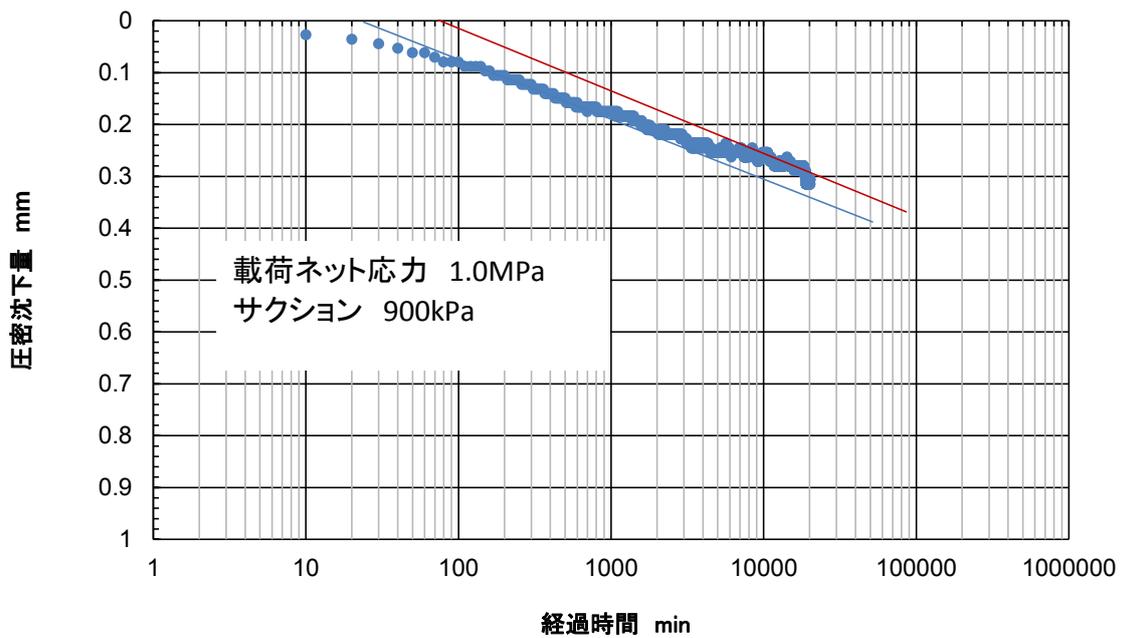


図 4.3.1-50 圧密量-時間曲線 (サクシオン 900kPa, ネット応力 1.0MPa)

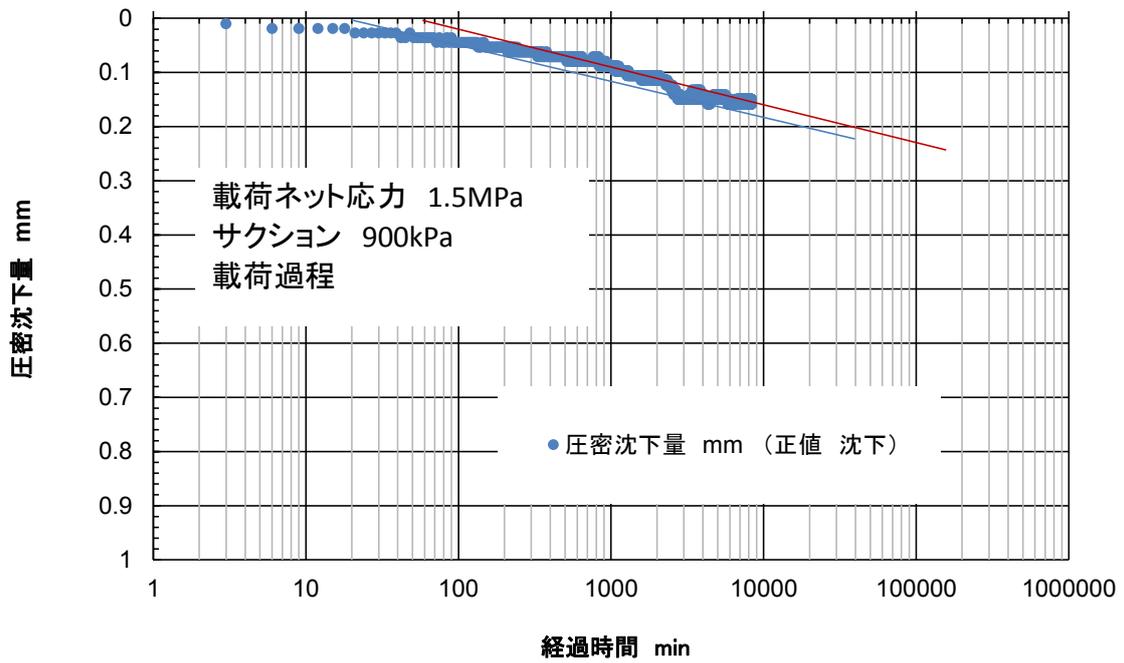


図 4.3.1-51 圧密量—時間曲線 (サクシオン 900kPa, ネット応力 1.5MPa)

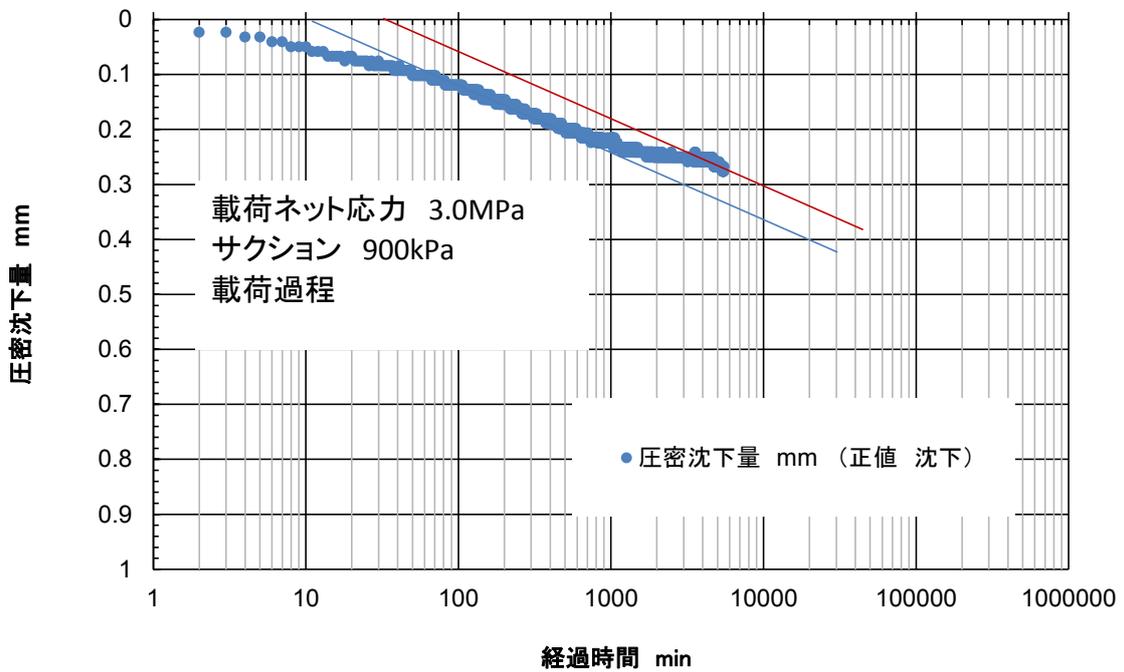


図 4.3.1-52 圧密量—時間曲線 (サクシオン 900kPa, ネット応力 3.0MPa)

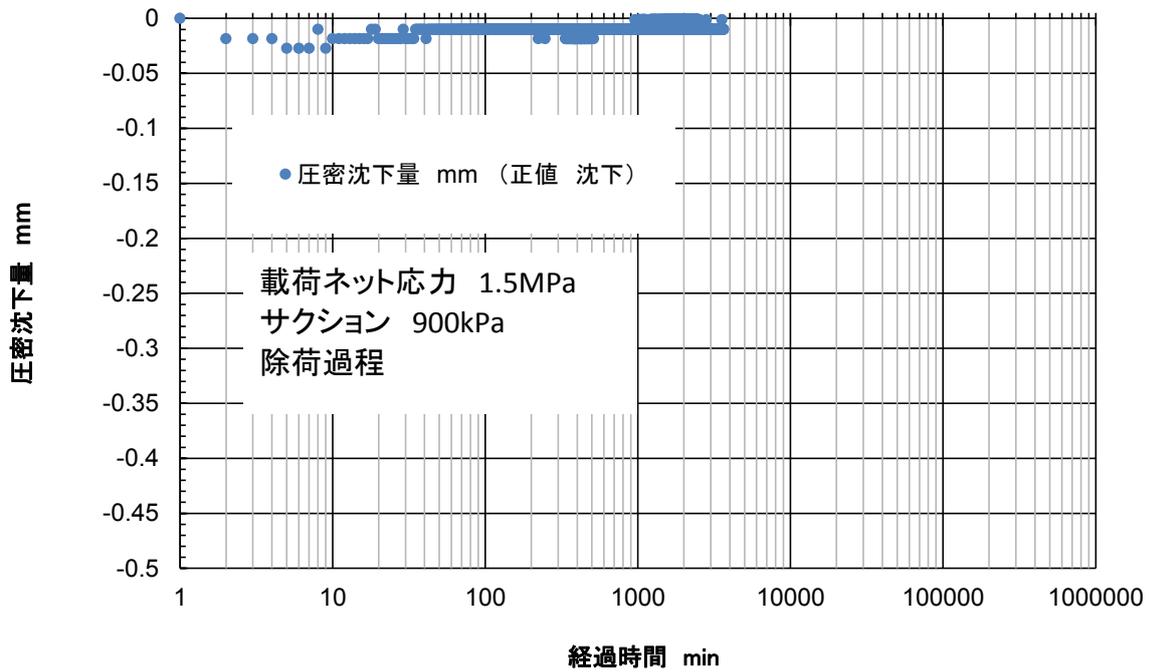


図 4.3.1-53 圧密量-時間曲線 (サクシヨ 900kPa, ネット応力 1.5MPa, 除荷)

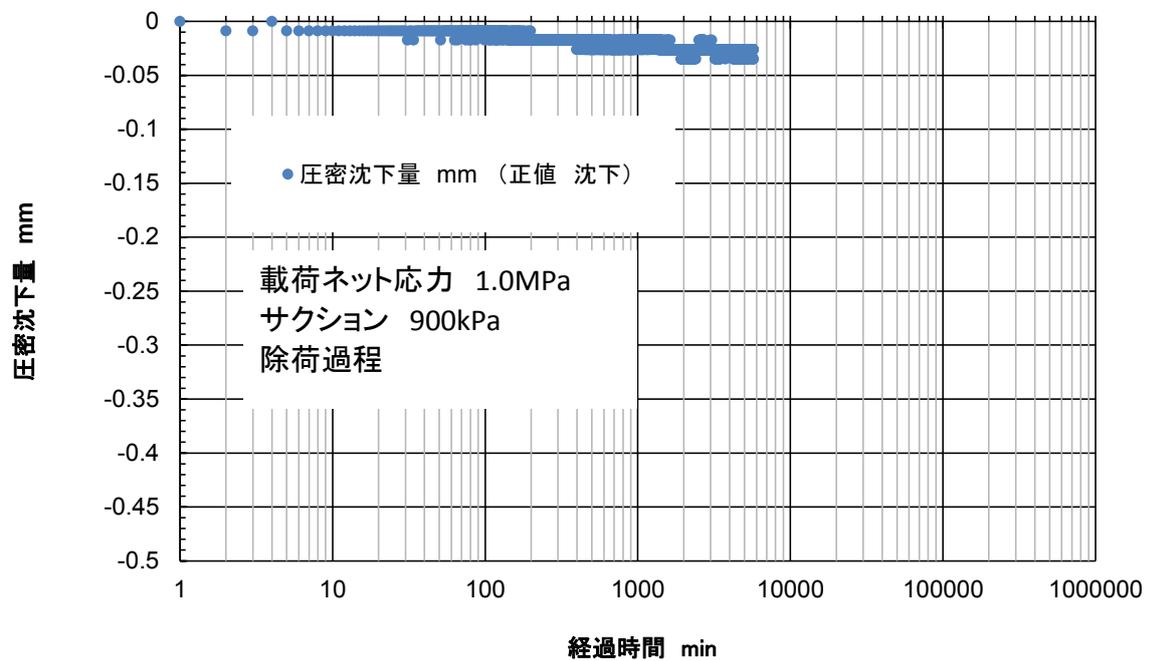


図 4.3.1-54 圧密量-時間曲線 (サクシヨ 900kPa, ネット応力 1.0MPa, 除荷)

d. 載荷ネット応力と間隙比の関係

試験結果に基づき、載荷ネット応力と間隙比の関係について整理して、表 4.3.1-14 および図 4.3.1-55 に示す。

表 4.3.1-14 載荷ネット応力（圧密圧力）と間隙比の整理結果

載荷ネット 応力(MPa)	飽和		サクシヨン 400kPa		サクシヨン 900kPa	
	載荷過程	除荷過程	載荷過程	除荷過程	載荷過程	除荷過程
0.1	0.674					
0.2	0.668					
0.45	0.649					
1	0.629					
1.5	0.615					
3	0.583					
1.5		0.586				
1		0.595				
0.5		0.603				
0.1			0.660			
0.2			0.572			
0.45			0.496			
1			0.426			
1.5			0.395			
3			0.338			
1.5				0.341		
1				0.347		
0.5				0.354		
0.1					0.668	
0.2					0.591	
0.45					0.550	
1					0.498	
1.5					0.472	
3					0.427	
1.5						0.427
1						0.431
0.5						0.440

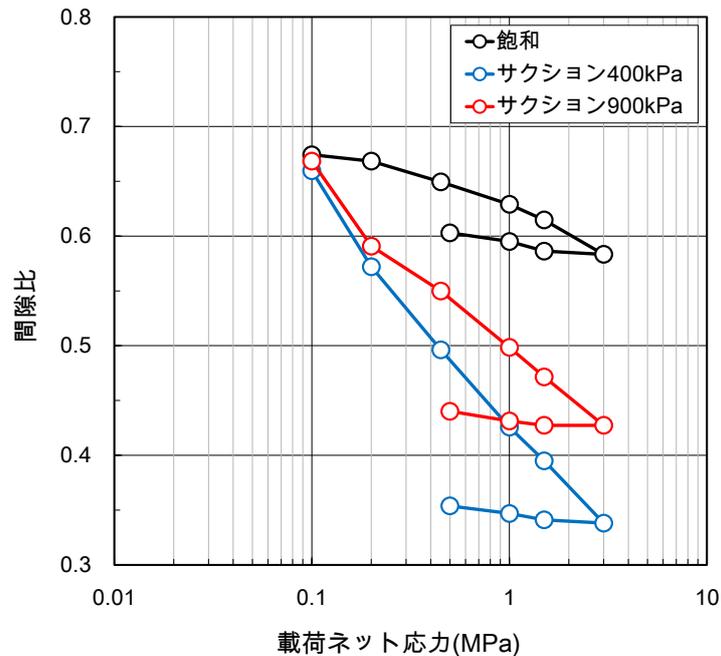


図 4.3.1-55 載荷ネット応力（圧密圧力）－間隙比の関係

5) 試験結果の考察

a. 圧密量－時間特性に関する考察

異なるサクシオン条件下での圧密試験の結果（圧密量－時間特性の関係）を 2.1.4 (1)～(3)に示した。圧密量－時間（分）曲線を描き、3t 法によって一次圧密終了時間を決定した。ベントナイト系材料の飽和状態と不飽和状態の一次圧密終了時間は明らかに飽和状態が短く、短時間で一次圧密が終了している。不飽和状態においてサクシオン 400kPa とサクシオン 900kPa での相違を確認すると、サクシオン 400kPa の方が、一次圧密終了に要する時間が増大している。また、一次圧密終了時の圧密量にもサクシオンの大きさによって違いが見られ、サクシオン 400kPa の方が圧密量は大きい。

次に個々の結果を見ると、飽和状態で載荷ネット応力が 0.45MPa の際に、圧密時間が 3000 分を経過した辺りから圧密量に変動が確認された。載荷ネット応力は一定であったにもかかわらずこのような測定結果になった原因は不明である。

明確な圧密量増大を示していたのが、サクシオン 400kPa、900kPa の載荷ネット応力 0.2MPa の条件であった。それぞれの圧密量時間は 5000 分付近、7000 分付近と異なるが、他の試験条件で示される緩やかな圧密量－時間（分）曲線とは異なる。

b. 載荷ネット応力－間隙比の関係に関する考察

次に載荷ネット応力と間隙比の関係（圧密曲線または圧縮曲線）では、飽和状態の場合、載荷ネット応力が 3.0MPa まで増大した場合、初期間隙比に比べて間隙比は 0.092 減少した。一方、不飽和状態のサクシオン 900kPa 場合、初期間隙比に比べて 0.249 の減少、さらにサクシオン 400kPa 場合、初期間隙比に比べて 0.338 の減少を示しており、間隙構造の剛性に対してサクシオンの効果が見られた。

また、不飽和状態の圧縮指数（Cc）、膨潤指数（Cs）を算定すると、圧縮指数はサクシオン 400kPa の場合に 0.191 であったが、サクシオン 900kPa に増大すると 0.150 となり、また、膨潤指数は、サクシオン 400kPa の場合の 0.020 に対して、サクシオン 900kPa では 0.016 となり、圧縮・膨潤特性にはサクシオン効果が確認された。

以上のように、微細なモンモリロナイト鉱物を主成分とするベントナイト系材料の圧密特性の内、圧密量－時間（分）曲線、載荷ネット応力と間隙比の関係（圧密曲線または圧縮曲線）について飽和状態と不飽和状態で異なることが確認された。また不飽和状態であっても間隙構造の剛性にはサクシオン効果の影響が見られた。

c. 圧縮指数、膨潤指数のサクシオン依存性について

サクシオン 400kPa および 900kPa における載荷ネット応力－間隙比の関係に、日本原子力研究開発機構（JAEA）による飽和時（サクシオン 0kPa）の試験結果[9]を追記して整理したものを図 4.3.1-56 に示す。図 4.3.1-56 において直線区間できると考えられる区間を最小二乗近似により、圧密降伏後の勾配である圧縮指数（ λ ）と除荷時の勾配である膨潤指数（ κ ）を求めた（図 4.3.1-57）。

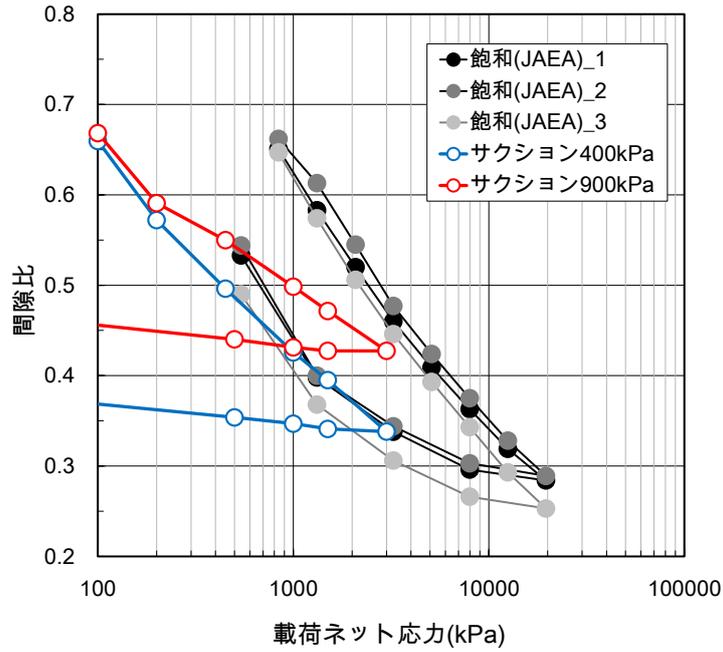


図 4.3.1-56 異なるサクシオンにおける載荷ネット応力（圧密圧力）－間隙比の関係

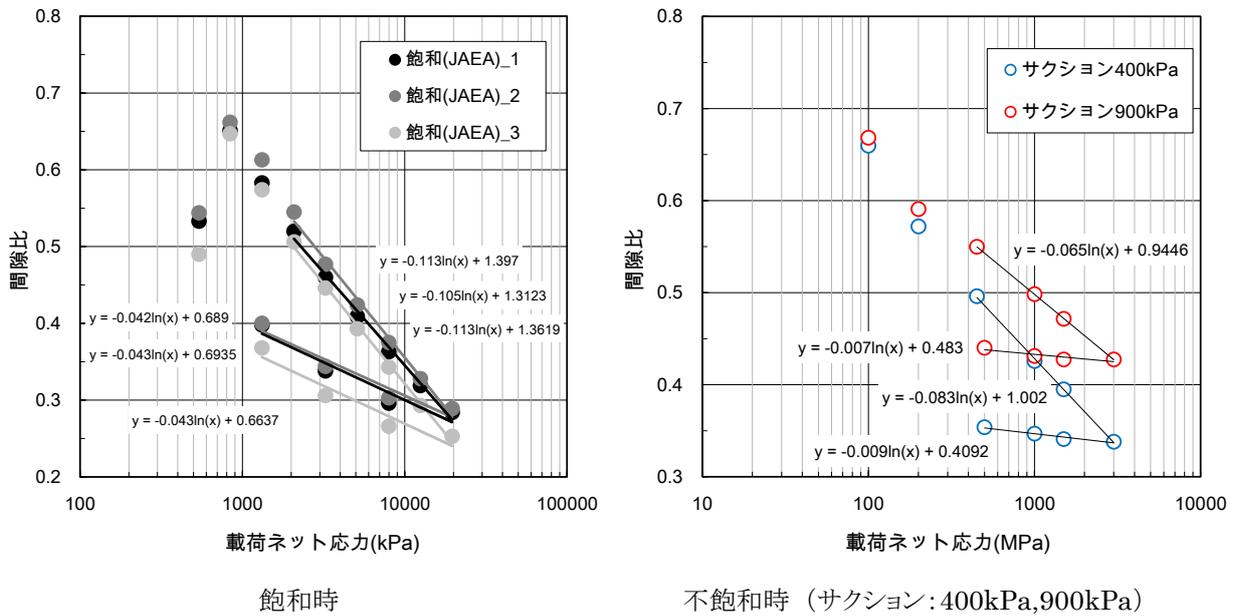


図 4.3.1-57 最小二乗近似による圧縮指数（ λ ）と膨潤指数（ κ ）の算定

図 4.3.1-58 は、これらの圧縮指数、膨潤指数とサクシヨンの関係を示したものであるが、サクシヨンが大きい（飽和の程度が低い）ほど、圧縮指数、膨潤指数は小さくなる傾向が認められ、この傾向は既往の研究結果[10]と整合するものである。

ベントナイト系材料の圧縮、膨潤特性のサクシヨン依存性を表現可能なモデルとしては、Alonso らが提案する膨潤性粘土の不飽和状態を包含する力学構成則（BB モデル: Barcelona Basic model） [13]があげられる。

BB モデルにおいて、圧縮指数 $\lambda(s)$ 、膨潤指数 $\kappa(s)$ のサクシヨン依存性は次式で表される。

$$\lambda(s) = \lambda_0 [(1 - \gamma) \exp(-\beta \cdot s) + \gamma] \quad \text{式 4.3.1-1}$$

$$\kappa(s) = \kappa_0 (1 + \alpha \cdot s) \quad \text{式 4.3.1-2}$$

ここに、 λ_0 、 κ_0 は飽和時の圧縮指数、膨潤指数、 α 、 β 、 γ は材料パラメータである。

図 4.3.1-58 中の 2 本の実線（青、赤）は、実験結果を BB モデルでフィッティングしたものであり、フィッティングにより求められたモデルパラメータは表 4.3.1-15 のとおりである。フィッティング結果は、圧縮指数に関しては実験結果とよく一致しているが、膨潤指数に関しては、やや整合度が低くなっている。

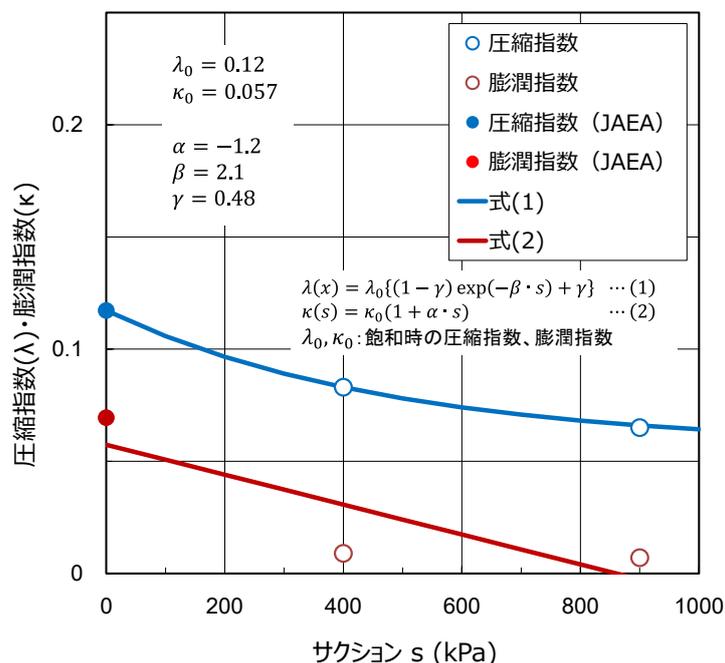


図 4.3.1-58 圧縮指数、膨潤指数のサクシヨン依存性と BB モデルによるフィッティング

表 4.3.1-15 不飽和ベントナイトの圧縮指数、膨潤指数に関わるパラメータ

パラメータ	λ_0	κ_0	α	β	γ
値	0.12	0.057	-1.2	2.1	0.48

膨潤指数に関して、BB モデルにおいては膨潤指数のサクシオン依存性は線形関係で表現されているが（式 4.3.1-2）、今回の試験結果（図 4.3.1-58）において膨潤指数には線形性が認められない。そこで、膨潤指数についても、圧縮指数と同様の指数関数（式 4.3.1-3）により近似することを試みた。

$$\kappa(s) = \kappa_0\{(1 - \alpha_1)\exp(-\alpha_2 \cdot s) + \alpha_1\} \quad \text{式 4.3.1-3}$$

ここに、 κ_0 ：飽和時の膨潤指数、 α_1 、 α_2 ：材料定数

試験結果を式、および式によりフィッティングした結果を図 4.3.1-59 に示す。図中、実線（青線、赤線）は、圧縮指数と膨潤指数を式 4.3.1-1、式 4.3.1-3 によりフィッティングした結果である（破線は、式 4.3.1-2 による膨潤指数の直線関係でのフィッティング）。膨潤指数を圧縮指数同様の指数関数で近似することにより、圧縮指数、膨潤指数ともに、試験結果と良好な一致を得ることができた。

式 4.3.1-1 および式 4.3.1-3 により得られた各パラメータを表 4.3.1-16 に示す。

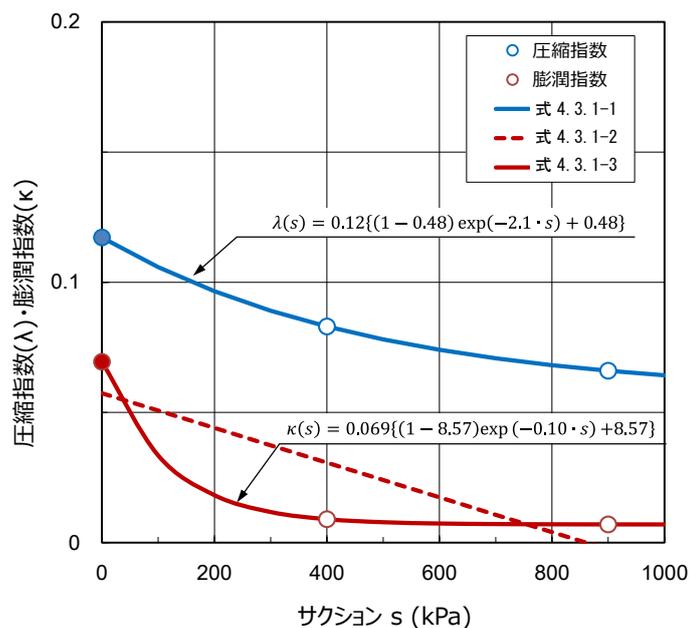


図 4.3.1-59 膨潤指数に非線形を考慮した場合のフィッティング結果

表 4.3.1-16 不飽和ベントナイトの膨潤指数の非線形を考慮した場合のパラメータ

材料定数	λ_0	κ_0	α	α_1	α_2	β	γ	適用式
圧縮指数	0.12	---	---	---	---	2.1	0.48	式 4.3.1-1
膨潤指数	---	0.069	---	8.57	0.10	---	---	式 4.3.1-3

(3) ベントナイト系人工バリアの材料間界面を模擬したガス移行試験

1) 供試体の作製に係る予備試験

供試体の作製にあたっては、事前の予備試験を経て仕様等を決定した。

a. 予備試験の目的と概要

界面（スリット）を有する供試体の注水飽和にあたっては、注水速度が大きいとスリット部の注水でスリット部が飽和膨潤によって閉塞する前にスリット内に供給された間隙水がスリットを通過し供試体上面（下流側）まで達してしまった場合、供試体上面からも飽和が進行してしまうことが考えられる。この間隙水の動きは、実際に想定している飽和過程と異なった状況となることが想定される。そのため、この状況を回避するための注水条件を事前に把握するために、複数の注水方法を試行してスリットの閉塞状況を確認することとした。また、試験中はスリットの閉塞状況を観察するため、スリットを含む供試体の上面を解放した状態で飽和を進行させることとした。

作製する供試体の形状については、実処分施設での緩衝材ブロック定置時に生じ得るスリット幅のバラつきを考慮して、表 4.3.1-17 に示す供試体リストから選定する計画としたが、別途実施した作製試験の結果から、界面幅を極力小さくでき、タイプ 1 を選定することとした。

表 4.3.1-17 作製する供試体リスト

供試体名称	界面幅	作製手順
タイプ 1	1mm 幅	図 4.3.1-60 参照
タイプ 2	2mm 幅	
タイプ 3	3mm 幅	

※φ60mmの供試体の界面幅1mmを水平面積比で換算すると、上部緩衝材で想定されるブロック寸法(1,000mm四方)における界面幅約18mmに相当。

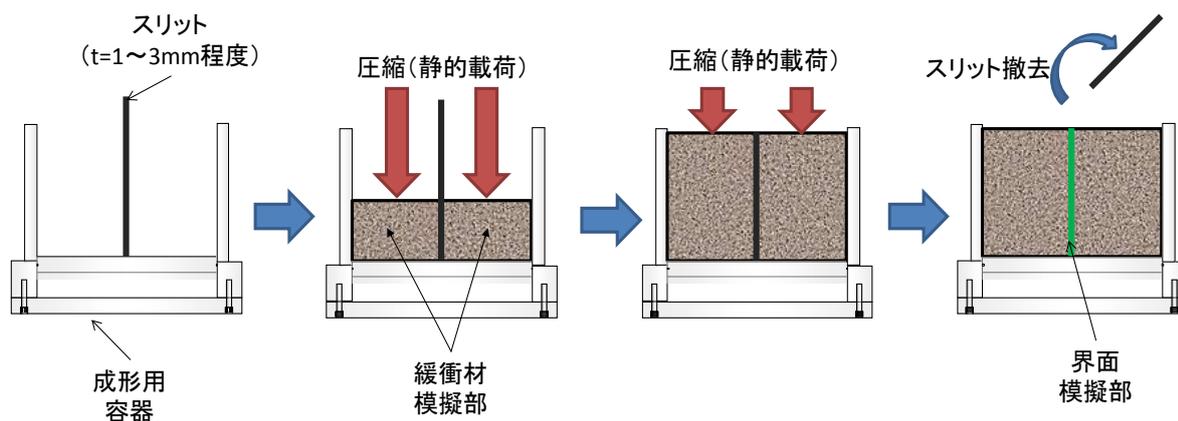


図 4.3.1-60 供試体の作製手順 (上:概念図、下:実施状況写真)

次項に予備試験の条件や主な結果を示す。

b. 試験条件

表 4.3.1-18 に予備試験供試体の条件を示す。ベントナイトの初期条件や作成条件は、一連の供試体と同条件で作製して予備試験を行った。

表 4.3.1-18 ベントナイト供試体の条件

項目		条件
試料	ベントナイト試料	クニゲル V1
	土粒子の密度 ρ_s	2.700 g/cm ³
供試体作製	供試体作製方法	圧縮成型
	作製圧縮速度	1mm/min
供試体の大きさ	直径 D	6.00 cm
	高さ H	2.50 cm
	断面積 A	28.27 cm ²
体積	供試体全体積	70.69 cm ³
	スリットの幅	0.1 cm
	スリットの体積	1.50 cm ³
	ベントナイト部分体積 V	69.19 cm ³
試料の初期状態	初期含水比 w	32.86 %
	乾燥密度 ρ_d	1.360 g/cm ³
	湿潤密度 ρ_t	1.807 g/cm ³
	質量 m	125.03 g
	間隙比 e	0.985
	飽和度 Sr	90.0 %
試料の飽和状態	飽和含水比 w_{sat}	36.49 %
	飽和密度 ρ_{sat}	1.856 g/cm ³

c. 予備試験結果(1)

供試体を作製後、表 4.3.1-19 に示す注水条件にて試験を進めた。供試体下部から、スリット体積を、2 日間にわたって 4 回に分けて注水した。注水中はスリット内に隙間ゲージなどを利用し、注水過程においてはスリットが閉鎖されている深さを 5 ヶ所計測した。

表 4.3.1-19 予備試験(1)における供試体下面からの注水条件

ステップ	経過時間	供試体下面からの注水条件
1	0hr	飽和した下部ポーラスメタルの上に供試体を設置し、半日程度放置
2	20hr	供試体下面より 0.34cm ³ 注水
3	27hr	供試体下面より注水追加。累計注水量 0.77cm ³
4	44hr	供試体下面より注水追加。累計注水量 1.29cm ³
5	51hr	供試体下面より注水追加。累計注水量 1.57cm ³
6	67hr	供試体下面より連続注水開始し、閉塞程度を確認

図 4.3.1-61 に飽和過程に伴うスリットの閉塞状況を計測した結果を示す。

注水開始でスリット内へ優先的に水が入り込むと考えていたが、実際は1回の注水量 0.4ml 程度では下部端面全体に吸水される量が多いため、スリットへ水がほとんど入りこまなかった。その後注水量がスリット体積相当に達した後はスリット下部が閉塞された状態となっていた。

注水開始後 67 時間経過した後に注水バルブを全開にして注水し、スリットの閉塞状況を確認した。注水開始すると、注水は止まらずスリット内への間隙水の浸入が認められ、閉塞していないことが確認できた。

写真 4.3.1-65 から写真 4.3.1-82 は、注水状況と注水試験後の供試体解体した状況である。供試体端部など十分に閉塞されていない部分が目視で確認でき、この注水条件では注水飽和初期段階でのスリットの閉塞性を確保できないことがわかった。

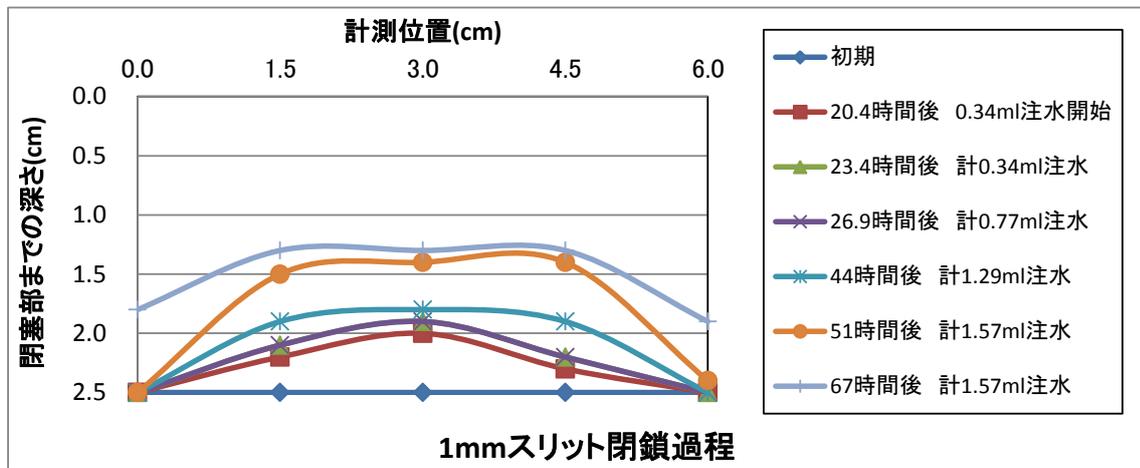


図 4.3.1-61 1mm スリット 4 分割注水 スリットの閉塞過程



写真 4.3.1-65 注水前 排出側



写真 4.3.1-66 注水前 注入側



写真 4.3.1-67 注水状況



写真 4.3.1-68 注水過程



写真 4.3.1-69 注水過程

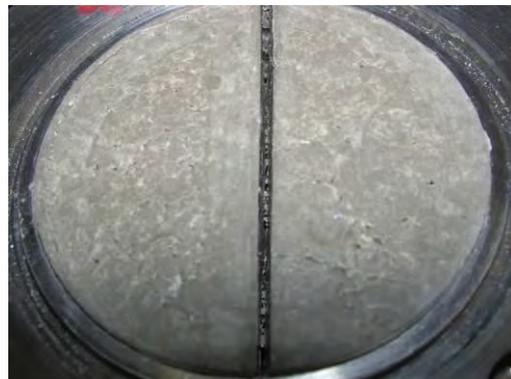


写真 4.3.1-70 注水過程

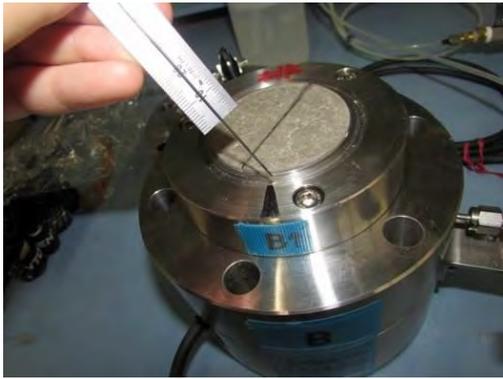


写真 4.3.1-71 閉鎖部計測

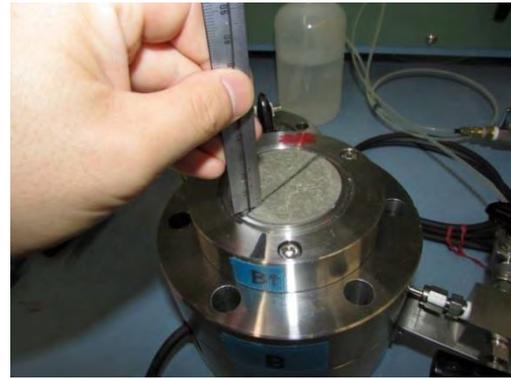


写真 4.3.1-72 閉鎖部計測



写真 4.3.1-73 試験後取り外し



写真 4.3.1-74 試験後 注入側



写真 4.3.1-75 試験後 側面



写真 4.3.1-76 試験後 側面



写真 4.3.1-77 解体位置



写真 4.3.1-78 断面 1



写真 4.3.1-79 断面 2



写真 4.3.1-80 断面 3



写真 4.3.1-81 断面 4



写真 4.3.1-82 全断面

d. 予備試験結果(2)

予備試験(2)では、供試体を作製後、表 4.3.1-20 予備試験(2)における供試体下面からの注水条件に示す注水条件にて試験を進めた。この注水条件は、予備試験(1)においては最初の注水量（スリット体積の 1/4 相当）では面積の大きな底面部分の飽和膨潤に間隙水が消費された様子うかがえたため、初期の飽和注水量をスリット体積相当の 1/2 を目安に注水量を増やしてスリット部の閉塞状況を観察する試験条件に変更した。なお、注水中は、予備試験(1)と同様にスリットが閉塞されている深さを 5 ヶ所計測した。

表 4.3.1-20 予備試験(2)における供試体下面からの注水条件

ステップ	経過時間	供試体下面からの注水条件
1	0hr	飽和した下部ポーラスメタルの上に供試体を設置した後、1.0cm ³ 注水
2	20hr	供試体下面より注水追加。累計注水量 1.7cm ³

図 4.3.1-62 に飽和過程に伴うスリットの閉塞状況を計測した結果を示す。

注水開始でスリット内へ優先的に水が入り込むと考えていたが、実際は 1 回の注水量 0.4cm³ 程度では下部端面全体に吸水される量が多いため、スリットへ水がほとんど入りこまなかった。その後、注水量がスリット体積相当に達した後はスリット下部が閉塞された状態となっていた。

これに対して、図 4.3.1-62 で示した注水量を増加した注水方法では、一度の注水量を増やした結果、閉鎖にかかる時間は短くなり、閉鎖部分も大きくなった。

注水開始後 19 時間経過した後に注水バルブを全開にして注水し、スリットの閉塞状況を確認した。注水開始すると、注水は止まらずスリット内への間隙水の浸入が認められ、スリットが完全に閉塞していないことが確認できた。

写真 4.3.1-83 から写真 4.3.1-99 は、注水状況と注水試験後の供試体解体した状況である。供試体端部など十分に閉塞されていない部分が目視で確認でき、この注水条件では注水飽和初期段階でのスリットの閉塞性を確保できないことがわかった。

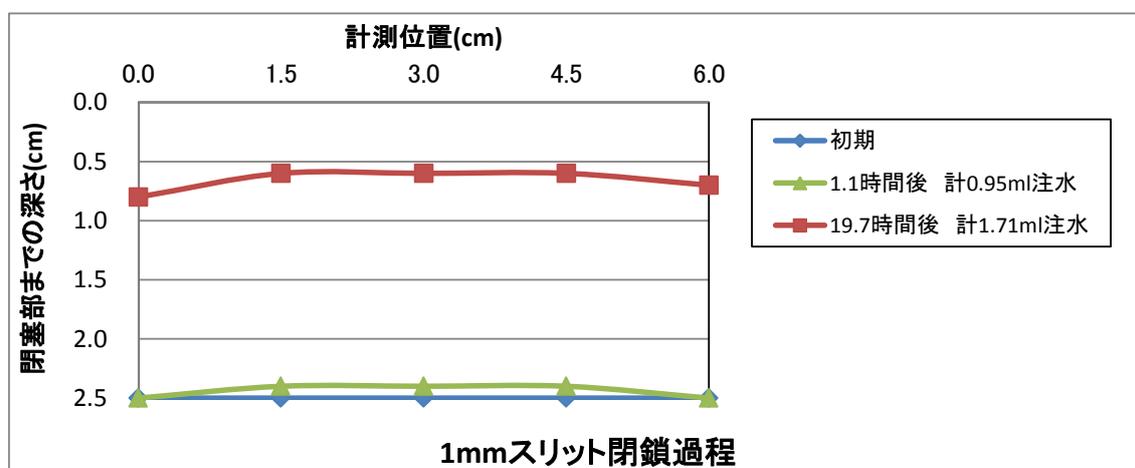


図 4.3.1-62 1mm スリット 2 分割注水 閉塞過程

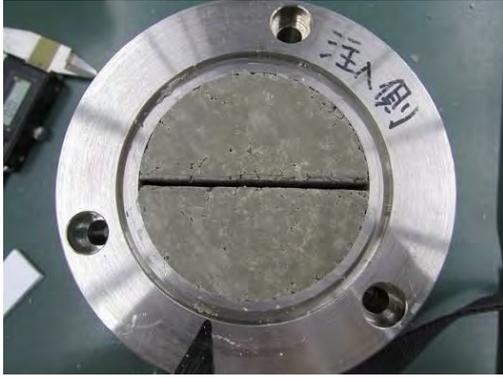


写真 4.3.1-83 注水前 排出側



写真 4.3.1-84 注水前 注入側



写真 4.3.1-85 注水状況



写真 4.3.1-86 注水過程



写真 4.3.1-87 注水過程



写真 4.3.1-88 閉鎖部計測



写真 4.3.1-89 試験後 排出側

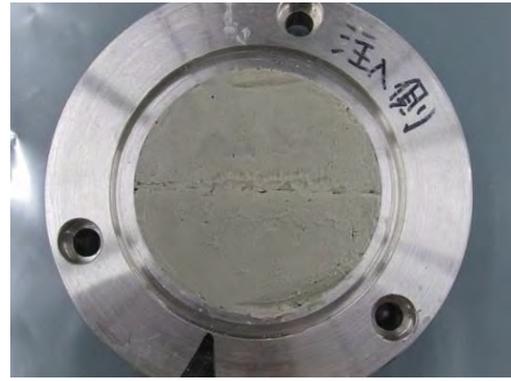


写真 4.3.1-90 試験後 注入側



写真 4.3.1-91 試験後 側面



写真 4.3.1-92 試験後 側面



写真 4.3.1-93 解体位置



写真 4.3.1-94 断面 1



写真 4.3.1-95 断面 2



写真 4.3.1-96 断面 3



写真 4.3.1-97 断面 4



写真 4.3.1-98 断面 5



写真 4.3.1-99 全断面

e. 予備試験結果(3)

予備試験(3)では、供試体を作製後、表 4.3.1-21 に示す注水条件にて試験を進めた。この注水条件は、予備試験(1)においては最初の注水量（スリット体積の 1/4 相当）では面積の大きな底面部分の飽和膨潤に間隙水が消費された様子が見られたため、初期の飽和注水量をスリット体積相当の 1/2 を目安に注水量を増やしてスリット部の閉塞状況を観察する試験条件に変更した。なお、注水中は、予備試験(1)と同様にスリットが閉塞されている深さを 5 ヶ所計測した。

表 4.3.1-21 予備試験(3)における供試体下面からの注水条件

ステップ	経過時間	供試体下面からの注水条件
1	0hr	飽和した下部ポーラスメタルの上に供試体を設置した後、注水スリット部分に水が回りスリット下部が水で満たされたことを目視で確認した時点で注水を止めて、閉鎖の過程を観測した。 累計注水量は、1.2cm ³
2	4hr	供試体下面より注水。スリット部からの浸出なしを確認

図 4.3.1-63 に飽和過程に伴うスリットの閉塞状況を計測した結果を示す。スリットに水が回りスリット下部が水で満たされたことを目視で確認した時点で注水(1.2ml)を止めて、閉鎖の過程を観測した結果である。注水完了後、スリット下面の閉塞を目視により観察した。

4 時間経過後、注水バルブを全開にして注水し、スリット部分からの浸水がなく、スリット部分は閉塞されていることが確認できた。

写真 4.3.1-100 から写真 4.3.1-111 は、注水状況と注水試験後の供試体解体した状況である。供試体端部など十分に閉塞が目視で確認でき、この注水条件では注水飽和初期段階でのスリットの閉塞性を確保できることがわかった。

一連の予備試験の結果を受けて、その後の飽和過程確認試験体、およびガス移行試験用の供試体については、供試体作成後、予備試験(3)の手法にそって、初期注水後飽和を開始する方法とした。

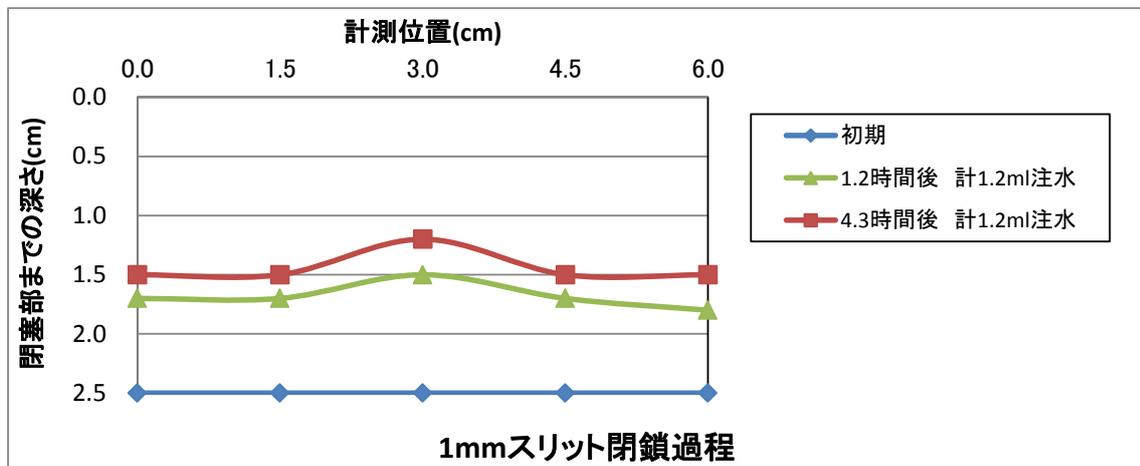


図 4.3.1-63 1mm スリット 1.2ml 注水 閉鎖過程

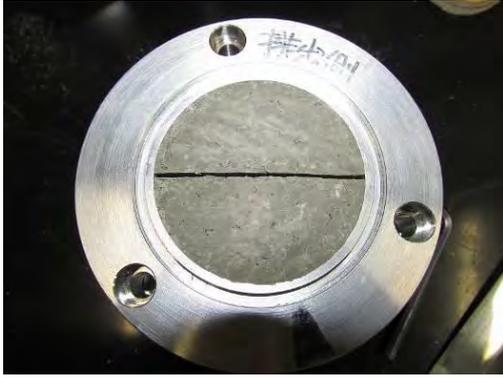


写真 4.3.1-100 注水前 排出側



写真 4.3.1-101 注水前 注入側



写真 4.3.1-102 注水状況



写真 4.3.1-103 注水過程



写真 4.3.1-104 注水過程



写真 4.3.1-105 閉鎖部計測

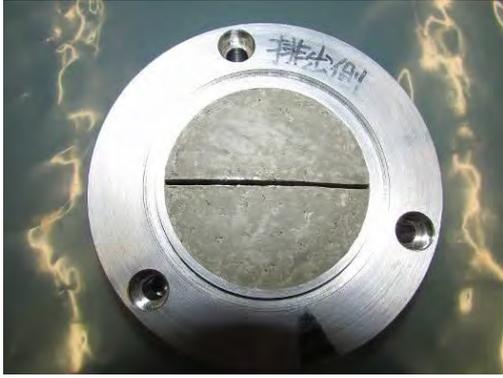


写真 4.3.1-106 試験後 排出側

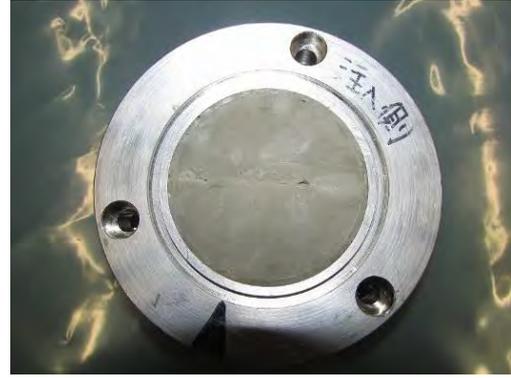


写真 4.3.1-107 試験後 注入側



写真 4.3.1-108 試験後 側面

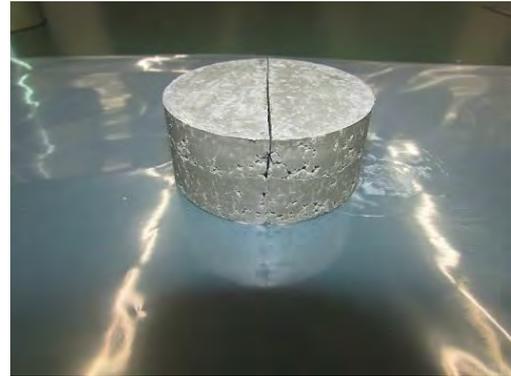


写真 4.3.1-109 試験後 側面

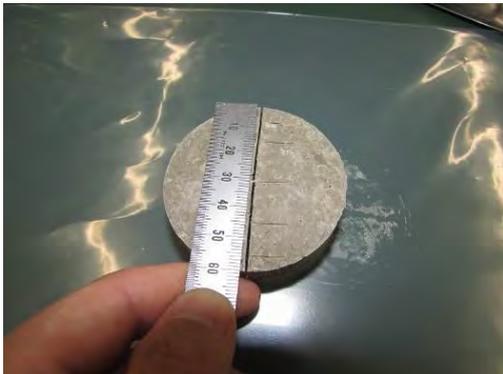


写真 4.3.1-110 解体位置



写真 4.3.1-111 断面 1

2) 供試体本作製（再冠水試験結果）

a. 供試体条件

ガス移行試験で作製する供試体の条件を表 4.3.1-22 に示す。

表 4.3.1-22 ベントナイト供試体の条件

項目		条件
試料	ベントナイト試料	クニゲル V1
	土粒子の密度 ρ_s	2.700 g/cm ³
供試体作製	供試体作製方法	圧縮成型
	作製圧縮速度	1mm/min
供試体の大きさ	直径 D	6.00 cm
	高さ H	2.50 cm
	断面積 A	28.27 cm ²
体積	供試体全体積	70.69 cm ³
	スリットの幅	01.cm
	スリットの体積 cm ³	1.5 cm ³
	ベントナイト部分体積 V cm ³	69.19 cm ³
試料の初期状態	初期含水比 w	32.86 %
	乾燥密度 ρ_d	1.360 g/cm ³
	湿潤密度 ρ_t	1.807 g/cm ³
	質量 m	125.03 g
	間隙比 e	0.985
	飽和度 Sr	90.0 %
試料の飽和状態	飽和含水比 w_{sat}	36.49 %
	飽和密度 ρ_{sat}	1.856 g/cm ³

b. 供試体の整形

作製した供試体(φ 6cm×h2.5cm)は、事前に含水比調製したベントナイト材料を用い、表 4.3.1-22 に示す通り初期乾燥密度 1.36 Mg/m³、初期飽和度 90%となるよう、2 層に分け、圧縮成型によって作製した。圧縮成型時の圧縮速度は 1mm/min である。写真 4.3.1-112 から写真 4.3.1-124 に供試体の作成状況を示した。

図 4.3.1-64 に圧縮成型時の圧縮応力と圧縮応力に伴う供試体の変位量を示す。520~720 kN/m² の圧縮荷重で目標の密度($\rho_d=1.36\text{g/cm}^3$)の供試体を作製することができた。この圧縮成型時の最大応力は、既往の試験結果(300~420kN/m²)に比べて若干大きい。この理由としては供試体モールド外周に加えてスリットを設けた影響で、スパーサー両側での圧縮前の間隙部分が増えているため、また仕切り板の摩擦の影響などが考えられる。



写真 4.3.1-112 模型作製部品



写真 4.3.1-113 含水調整試料

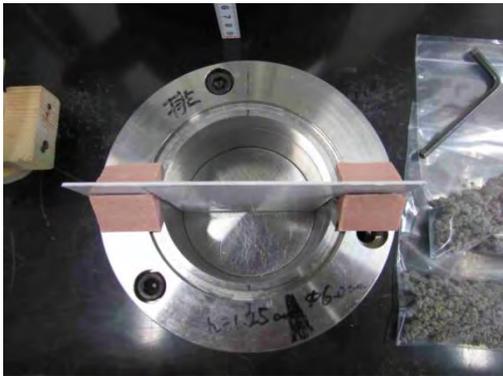


写真 4.3.1-114 仕切り板設置状況(1)



写真 4.3.1-115 仕切り板設置状況(2)



写真 4.3.1-116 1層目の試料投入



写真 4.3.1-117 1層目の圧縮成型

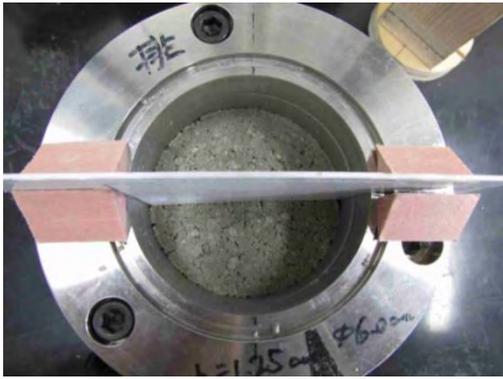


写真 4.3.1-118 1層目の試料投入

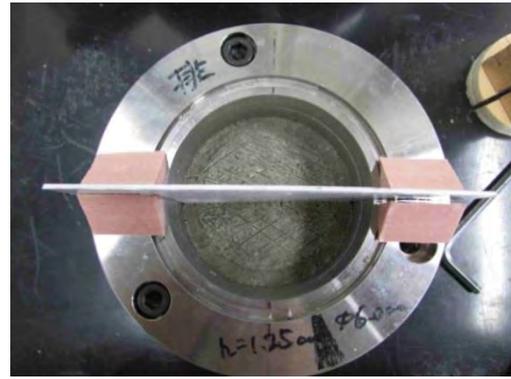


写真 4.3.1-119 1層目の圧縮成型

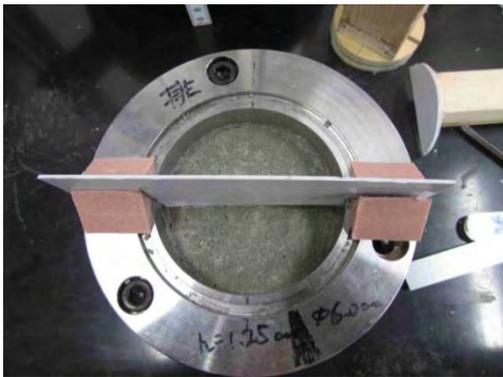


写真 4.3.1-120 2層目の圧縮成型後入

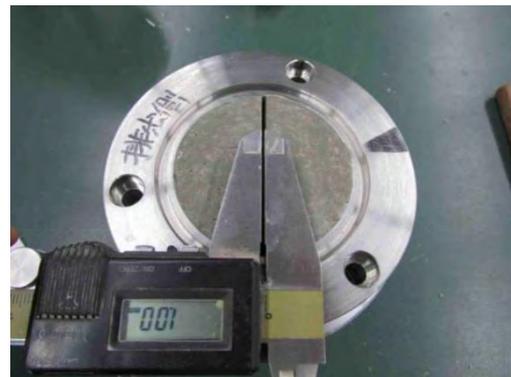


写真 4.3.1-121 2層目の圧縮成型

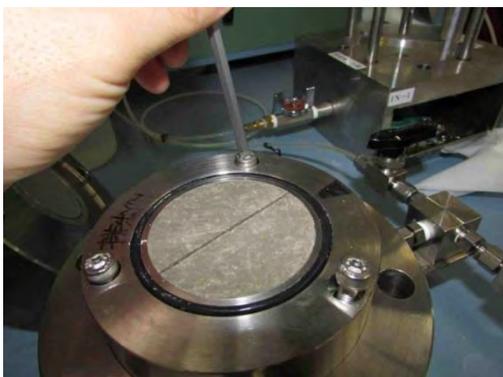
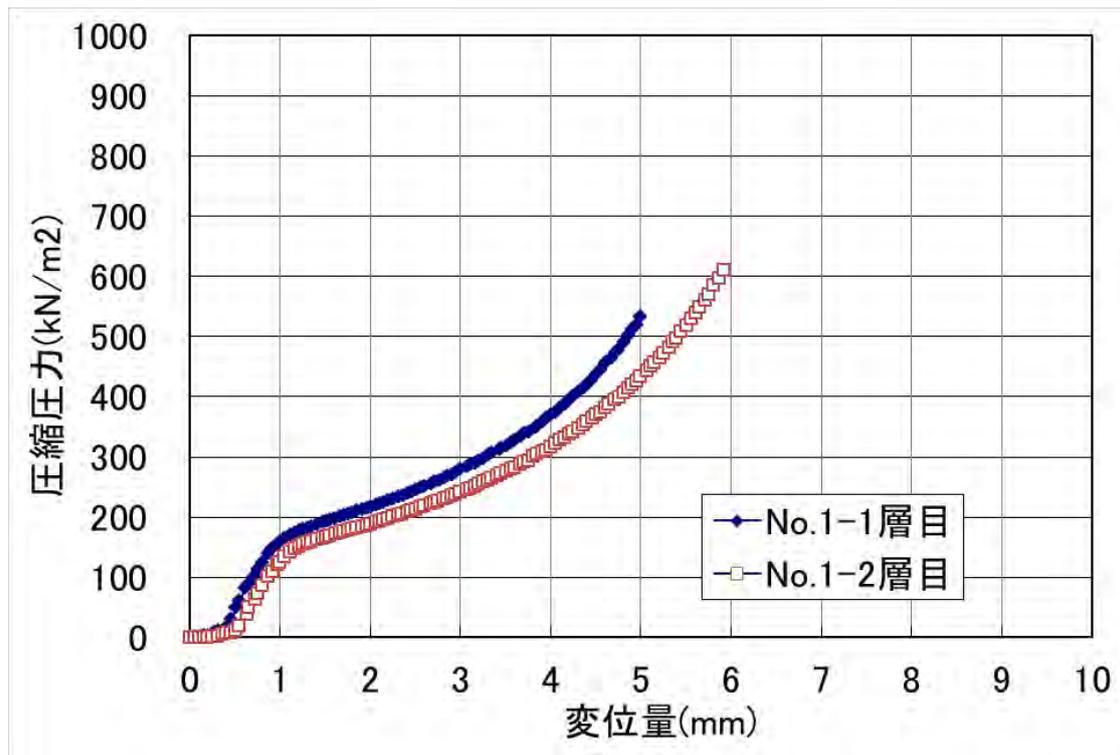


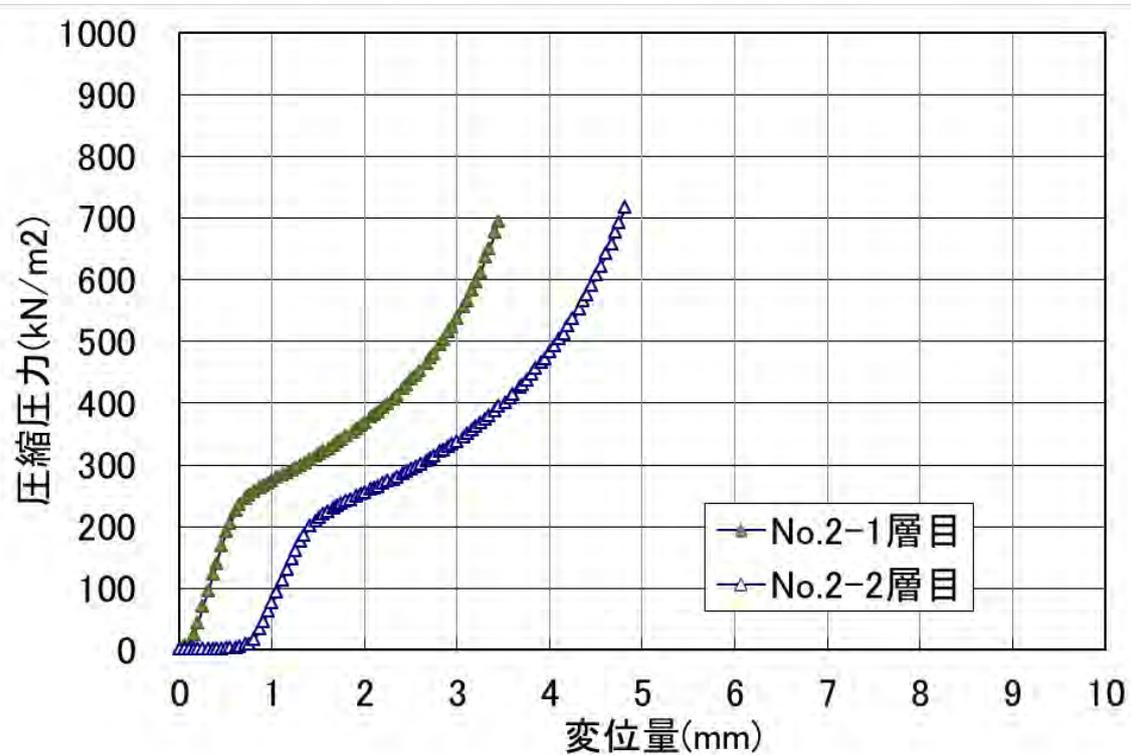
写真 4.3.1-122 モールドの装置への固定



写真 4.3.1-123 モールド組立完了



(1)供試体 No.1



(2)供試体 No.2

図 4.3.1-64 圧縮整形応力

c. 供試体の注水飽和過程

表 4.3.1-23 に試験の実施状況を示した。

なお、表には注水飽和完了後に移行したガス注入試験状況も合わせて示している。

界面を有する 2 つの供試体については、2015 年 9 月 16 日に注水を開始し、その内 No.2 供試体については、ガス移行開始時の初期状況把握を目的に所定の飽和期間に到達した 2016 年 1 月 4 日に解体調査を実施した。一方、No.1 供試体については、同日、飽和過程からガス注入過程に移行し、現在ガス注入を継続している。ガス圧昇圧に伴い、破過が確認された時点で、供試体を分解調査する予定である。

表 4.3.1-23 試験概況

供試体 No.		予備試験			界面を有する供試体の 飽和・ガス移行試験	
		注水 4 分割	注水 2 分割	初期注水	No.2	No.1
注水飽和	注水開始	2015/9/7	2015/9/10	2015/9/15	2015/9/16	2015/9/16
	排水確認				2015/11/7 (注水 52 日目)	2015/11/7 (注水 52 日目)
	排水量計測開始				2014/11/7 (注水 52 日目)	2015/11/7 (注水 52 日目)
	飽和完了				2016/1/4 (注水 110 日目)	2016/1/4 (注水 110 日目)
ガス注入	バックプレッシャー ー載荷					同 上
	ガス注入開始					2016/ 1/ 5
	有効ガス 圧昇圧					0.1MPa/2 日 破過まで
	ガス注入 状況					(継続中)
解体	供試体解体調査	2015/9/10	2015/9/11	2015/9/15	2016/1/4	破過後

図 4.3.1-65、図 4.3.1-66 に飽和中の注水量、膨潤圧の経時変化を示した。また表 4.3.1-24 には、注水飽和完了時点の膨潤圧を示した。各々273kPa および 326kPa、平均300kPa であった。既往の界面を有しない供試体の膨潤圧と比べて大差はみられない。今回の初期界面の面積（幅 0.1cm×長さ 6.0cm=0.6cm²）は供試体全体面積（φ6.0 cm 断面積 28.27cm²）に対して 2.2%に相当し、この差が膨潤圧合力に及ぼす影響は小さい。実際計測された界面を有する供試体の膨潤圧（合力を全面積で除したもの）と差が認められないことが確認できた。

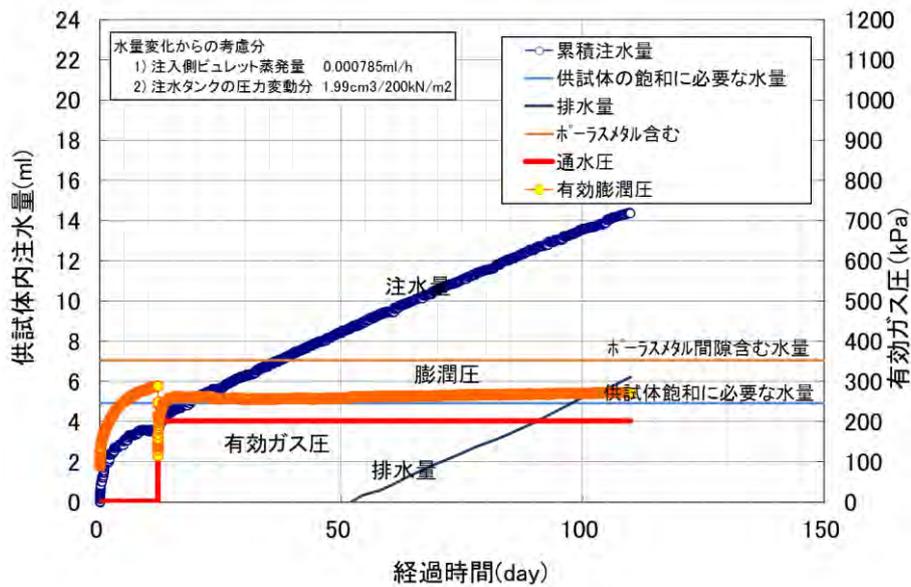


図 4.3.1-65 飽和過程の状況(供試体 No.1)

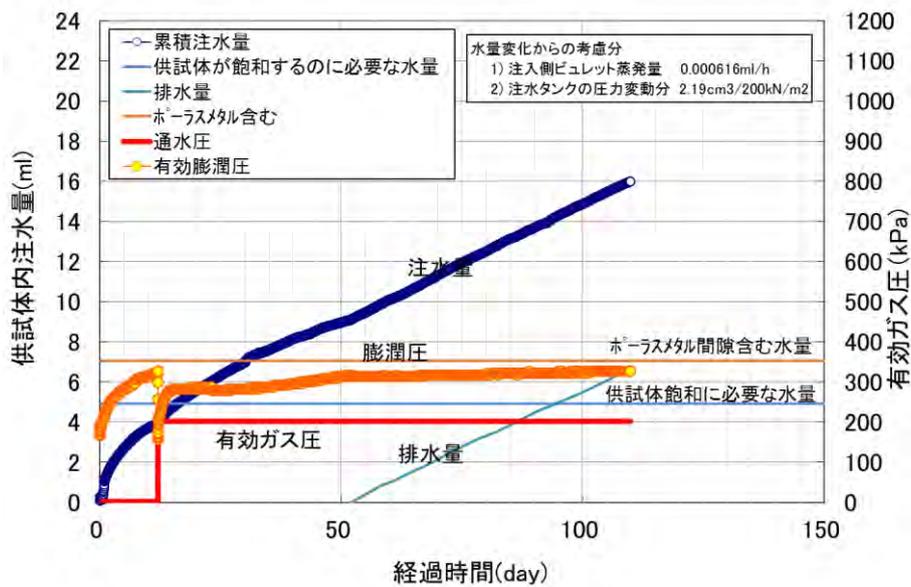


図 4.3.1-66 飽和過程の状況(供試体 No.2)

表 4.3.1-24 界面を有する供試体の膨潤圧

膨潤圧		No.1	No.2
有効膨潤圧	kPa	273	326
平均値	kPa	300	

図 4.3.1-67、図 4.3.1-68 には、排水側ポーラスメタル上面での飽和確認後に計測した注水量と排水量の経時変化である。両試料とも注水量、排水量は一致し、供試体が飽和状態にあることを確認できた。

表 4.3.1-25 は、定常状態での排水量の勾配から透水係数を算定した結果である。両供試体ともほぼ同程度の透水係数を示し、その値はこれまでの界面のない供試体と大差がないことが確認できた。またこの結果から、予備試験で界面からの漏水が確認できた界面の閉塞が不十分な状況はなく、初期の幅 1mm のスリットは十分に閉塞していることが間接的に確認できる。

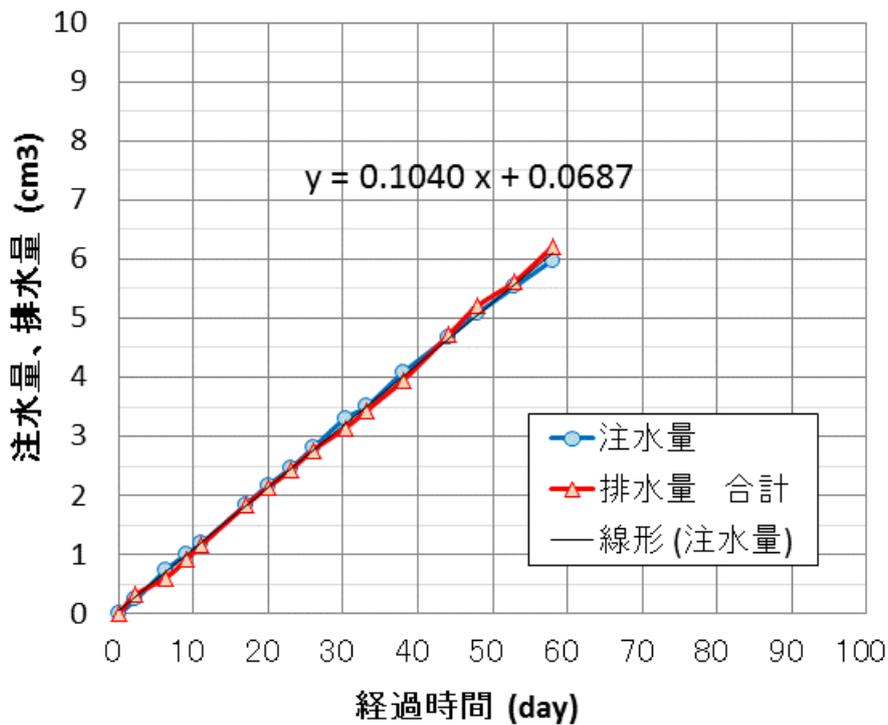


図 4.3.1-67 注水量と排水量の経時変化 (供試体 No.1)

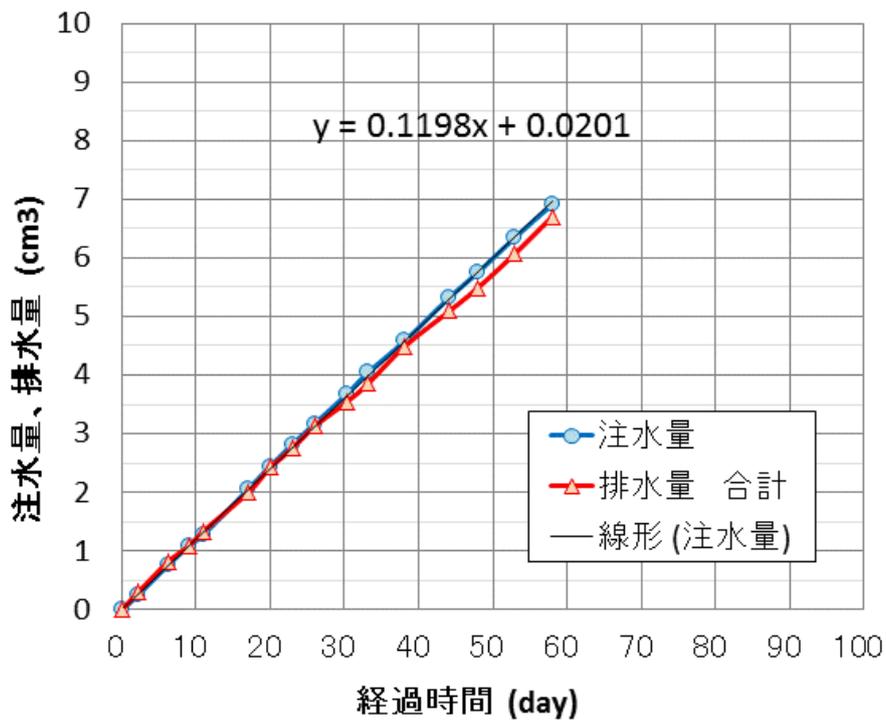


図 4.3.1-68 注水量と排水量の経時変化(供試体 No.2)

表 4.3.1-25 飽和後定常状態における注水量から求めた透水係数

供試体 No.		No.1	No.2
断面積	cm ²	28.27	28.27
供試体厚さ	cm	2.5	2.5
注水圧	MPa	0.2	0.2
透水速度	cm ³ /day	0.1040	0.1198
透水係数	m/sec	6.3 × 10 ⁻¹³	5.2 × 10 ⁻¹³
		平均値 = 5.8 × 10 ⁻¹³	

d. 解体調査による供試体の飽和状況確認

供試体 No.2 については、ガス注入試験前の初期状態（含水状況等）確認のため、表 4.3.1-26 および図 4.3.1-69 に示すように、高さ 25mm の供試体を以下の通り分割（合計 77 ケ）して、分割試料の厚さ、湿潤重量を計測した。今後、乾燥重量計測を用いて含水比を算出した。

- 深さ方向分割数：7 層
- 1 層ごとの分割数：11 ケ（写真-5 参照）

写真 4.3.1-124～写真 4.3.1-137 に供試体の解体状況を示す。

表 4.3.1-26 供試体の試験一覧（供試体 No.2）

排水側から	分割数	厚さ ※1	含水比
1 層目	11	1	11
2 層目	11	1	11
3 層目	11	1	11
4 層目	11	1	11
5 層目	11	1	11
6 層目	11	1	11
7 層目	11	1	11
合計	77	7	77

※1：分割前に外周部 4 か所で計測して平均厚さ算出

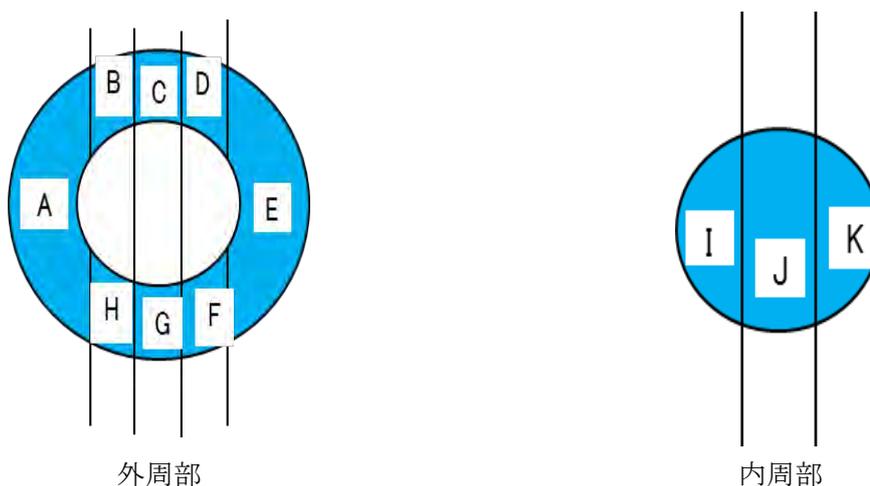


図 4.3.1-69 1 層ごとの分割

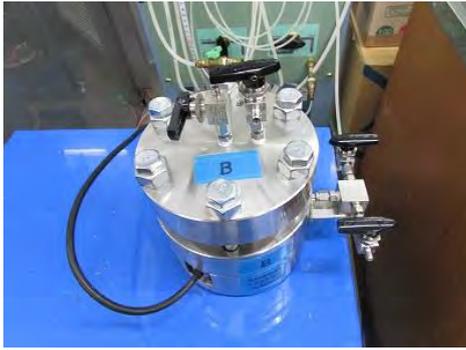


写真 4.3.1-124 供試体解体前



写真 4.3.1-125 供試体解体表面(排水側)



写真 4.3.1-126 供試体の押し出し



写真 4.3.1-127 供試体のスライス



写真 4.3.1-128 供試体の分割位置



写真 4.3.1-129 11分割した供試体



写真 4.3.1-130 含水比計測の試料



写真 4.3.1-131 供試体解体前(排水側)



写真 4.3.1-132 供試体解体表面(排水側)

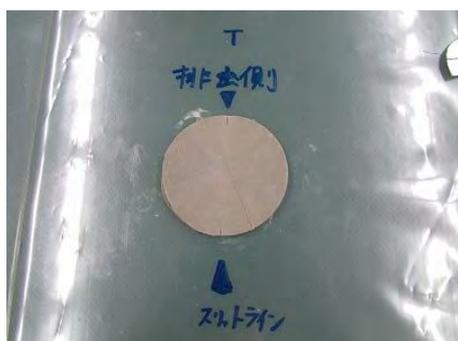


写真 4.3.1-133 1-2層目の切断面



写真 4.3.1-134 2-3層目の切断面



写真 4.3.1-135 3-4層目の切断面

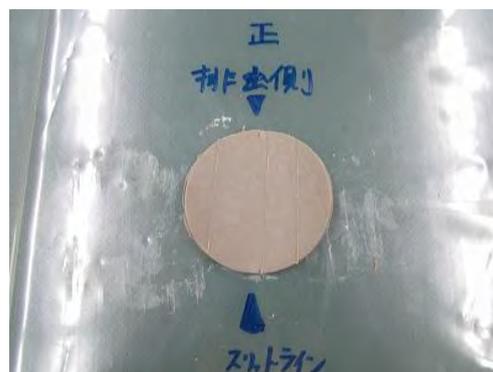


写真 4.3.1-136 4-5層目の切断面



写真 4.3.1-137 5-6層目の切断面



写真 4.3.1-138 供試体解体前(注水側)

表 4.3.1-27 には、スライスごとの試料重量と厚さを示した。表 4.3.1-28 から表 4.3.1-29 に供試体分割後の含水比および密度の計測結果を示し、含水比の深度分布を図 4.3.1-70 から図 4.3.1-72 に示した。図より、供試体内は概ね均質な状態となっていることが分かった

表 4.3.1-27 供試体調査結果（分割層ごとの重量と高さ）（No.2 供試体）

層	重量(g)		供試体高さ (cm)
	外周	内周	
1	10.62	5.36	0.307
2	10.93	5.54	0.318
3	10.94	5.54	0.318
4	13.83	6.94	0.400
5	10.45	5.19	0.301
6	11.10	5.52	0.322
7	18.97	9.51	0.556

表 4.3.1-28 供試体含水比（各分割ブロックの含水比）（No.2 供試体）

層	含水比										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	36.0	35.8	36.4	37.9	35.9	37.3	36.7	36.2	36.5	38.2	36.2
2	36.3	36.6	37.0	38.1	36.1	37.1	38.5	37.5	37.5	38.3	36.8
3	36.2	37.9	37.9	38.7	36.4	38.2	39.6	36.4	36.4	39.0	37.0
4	36.6	37.7	38.0	38.8	36.6	39.2	39.5	38.3	38.6	38.7	37.6
5	37.4	38.7	39.1	38.9	36.8	38.3	40.4	36.8	38.4	39.7	37.7
6	37.8	37.9	40.7	37.9	37.5	39.6	41.2	38.6	38.3	39.7	38.3
7	38.5	39.3	40.8	40.4	38.2	40.7	42.5	39.6	39.1	41.9	38.9

表 4.3.1-29 供試体密度（No.2 供試体）

層	湿潤質量(g)			湿潤密度(g/cm ³)			含水比(g)			乾燥密度(g/cm ³)		
	外周	内周	全体	外周	内周	全体	外周	内周	全体	外周	内周	全体
1	10.62	5.36	15.98	1.836	1.860	1.844	36.3	37.0	36.5	1.347	1.358	1.351
2	10.93	5.54	16.47	1.824	1.856	1.835	36.8	37.6	37.0	1.334	1.349	1.339
3	10.94	5.54	16.48	1.826	1.856	1.836	37.1	37.6	37.2	1.332	1.349	1.338
4	13.83	6.94	20.77	1.831	1.844	1.835	37.5	38.3	37.7	1.332	1.333	1.332
5	10.45	5.19	15.64	1.840	1.834	1.838	37.8	38.6	38.1	1.335	1.323	1.331
6	11.10	5.52	16.62	1.829	1.826	1.828	38.3	38.8	38.5	1.322	1.315	1.320
7	18.97	9.51	28.48	1.810	1.821	1.813	39.3	40.1	39.6	1.299	1.299	1.299

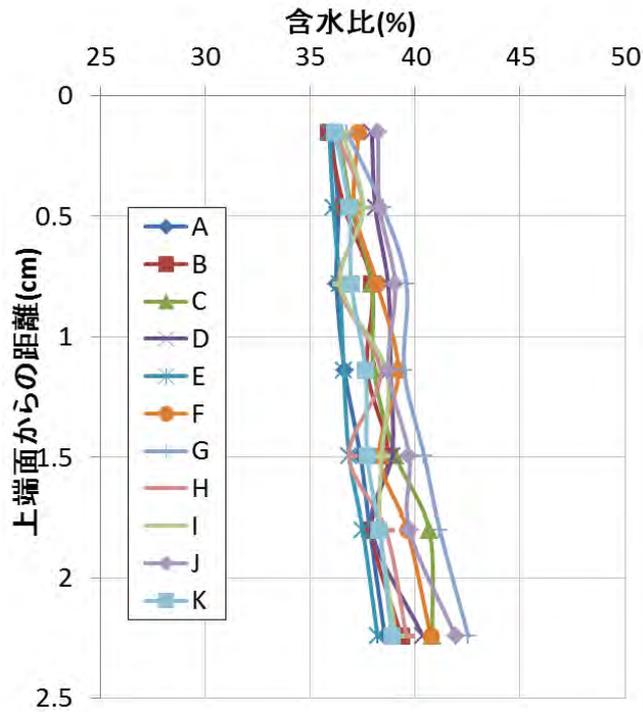


図 4.3.1-70 含水比の深度分布 (No.2)

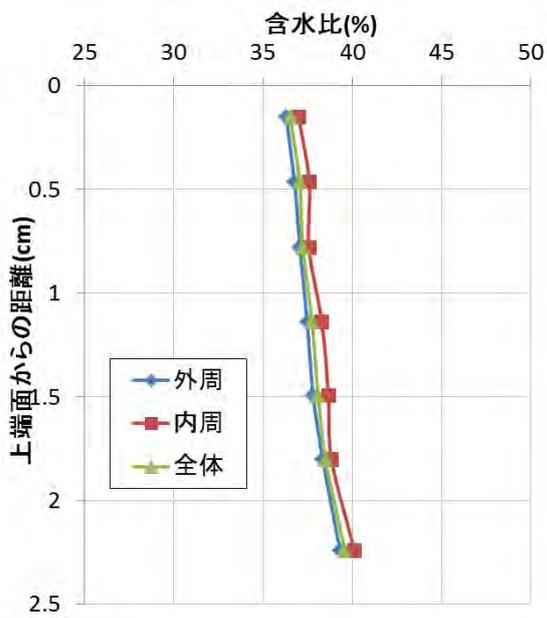


図 4.3.1-71 含水比の深度分布 (No.2) (試料の内周部、外周部)

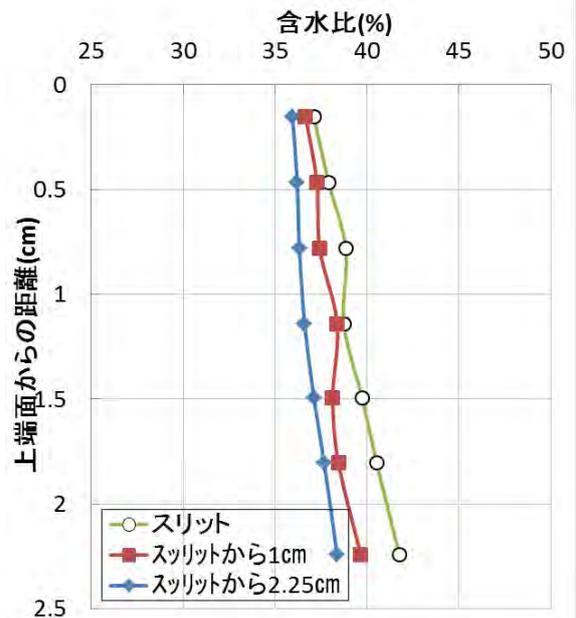


図 4.3.1-72 含水比の深度分布 (No.2) (スリットからの距離の影響)

3) ガス注入試験

a. 試験計画 (ガス注入試験手順)

前述の飽和供試体作成後、注水による供試体の飽和過程を経て、図 4.3.1-73 に示す実施手順でガス移行試験を実施した。当該手順は把握すべき界面のガス移行特性のうち、平成 24 年度までの検討[6]と同様に「緩衝材が大破過に至るまでのガス移行挙動の解明」を目的とするもので、平成 24 年度までの検討手順に準拠している。

具体的には、供試体 No.1 の注水飽和終了後、バックプレッシャー (背圧) を載荷後、大破過に至るまで 2 日ごとに 0.1MPa 昇圧する段階的な昇圧方法でガス注入を進めた。

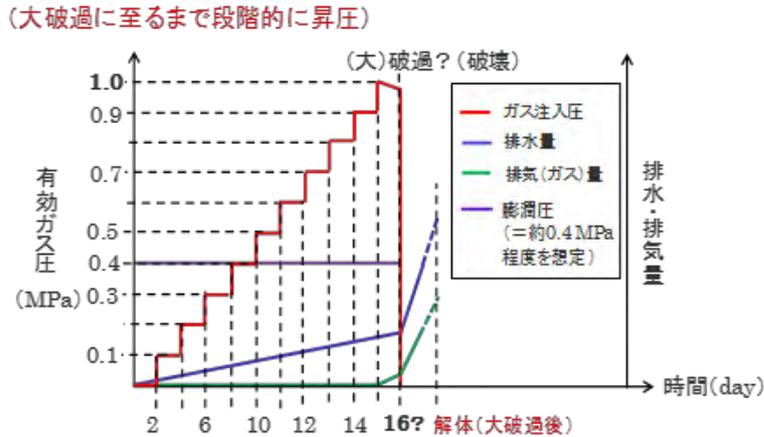


図 4.3.1-73 実施手順 (大破過に至るまで段階的に昇圧)

なお、試験体の注水過程からガス注入過程への切り替え操作 (飽和供試体へのガス注入手順) については、供試体内応力の急激な変化を避ける観点から、図 4.3.1-74 の通りとした。

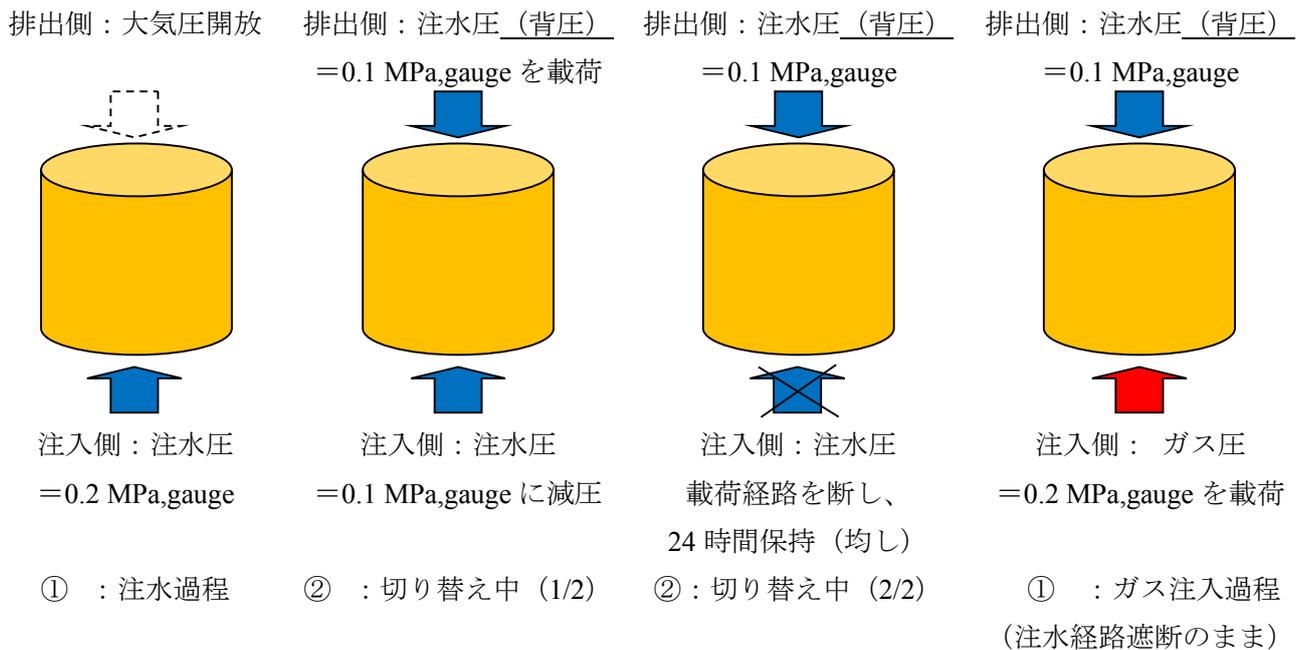


図 4.3.1-74 注水過程からガス移行過程への切り替え手順

b. 供試体へのガス注入過程

表 4.3.1-30 および表 4.3.1-31 に、既実施した予備試験を含む供試体 No.1 のガス注入開始時期の試験実施手順と実施日時を示した。2016年1月4日にバックプレッシャー載荷過程の後、2016年1月5日から有効ガス圧 0.1MPa の載荷より開始した。

表 4.3.1-30 試験概況

供試体 No.		予備試験			界面を有する供試体の飽和・ガス移行試験	
		注水 4 分割	注水 2 分割	初期注水	No.2	No.1
注水飽和	注水開始	2015/9/7	2015/9/10	2015/9/15	2015/9/16	2015/9/16
	排水確認				2015/11/7 (注水 52 日目)	2015/11/7 (注水 52 日目)
	排水量計測開始				2014/11/7 (注水 52 日目)	2015/11/7 (注水 52 日目)
	飽和完了				2016/1/4 (注水 110 日目)	2016/1/4 (注水 110 日目)
ガス注入	バックプレッシャー載荷					同上
	ガス注入開始					2016/ 1/ 5
	有効ガス圧昇圧					0.1MPa/2 日 破過まで
	ガス注入状況					2016/1/31 1.3MPa で破過
解体	供試体解体	2015/9/10	2015/9/11	2015/9/15	2016/ 1/ 4	2016/1/31

表 4.3.1-31 ガス注入工程

Step	試験実施手順	実施日時
1	通水圧を 0.2MPa から 0.1MPa に低下	2016/1/4
2	排水側から 0.1MPa のバックプレッシャーを載荷	2016/1/4
3	注入側のバルブを閉じて 24 時間放置	2016/1/4
4	注入ガス圧を 0.2MPa に設定して保持(バルブは閉鎖)	2016/1/5
5	注入側のバルブを開けて透気開始	2016/1/5
6	注入ガス圧を 0.3MPa (有効ガス圧 0.2MPa) に上昇	2016/1/5
7	注入ガス圧を 0.4MPa (有効ガス圧 0.3MPa) に上昇 以後、2 日ごとに昇圧	2016/1/7
8	破過後、ガス注入停止。供試体解体	2016/1/31

図 4.3.1-75 にガス注入過程の状況を示す。2 日ごとのガス圧昇圧 (0.1MPa/2 日) に伴って有効な底面応力は徐々に低下していったことが分かる。また、ガス圧注入圧に伴って供試体が圧密され有効な膨潤圧を計測している供試体上流側の応力が低下している状況が進行した状況も確認された。

また、ガス注入に伴い排水も確認されている。

上記のガス圧昇圧を継続した結果、有効ガス圧が 1.3 MPa に到達した際に破過が生じ、ガス注入を停止して解体調査に供した。

なお、図 4.3.1-76 には供試体断面の単位面積当たりの排水量の変化を示しているが、破過の直前に供試体外周部からの排水が観測されていることが確認されている。すなわち、供試体に浸入したガスは、供試体内の主に外周部の間隙水を押し出しながら外部に放出されたものと推定できる。したがって、ガス移行経路も供試体の外周部に生じたものと考えられる。

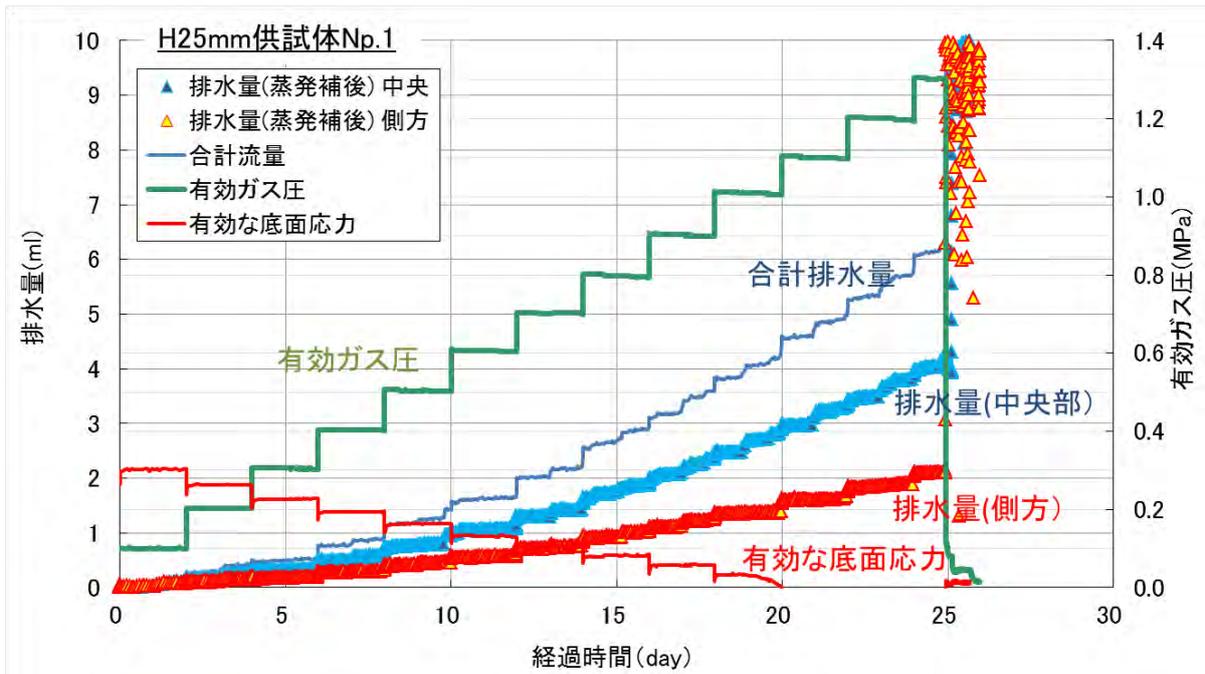


図 4.3.1-75 ガス注入過程の状況 (排水量の変化)

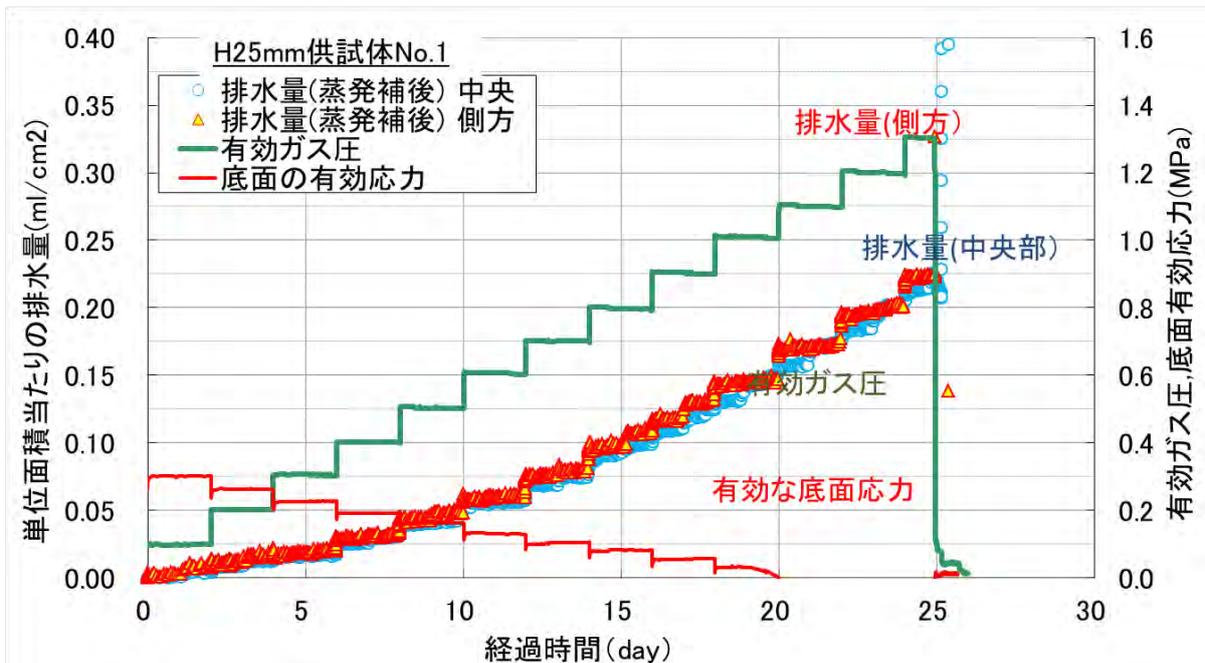


図 4.3.1-76 ガス注入過程の状況 (供試体断面の単位面積当たりの排水量の変化)

4) 供試体の解体調査

破過後の供試体内の状態を詳細に確認し、ガス移行挙動を詳細に把握することを目的として、高さ 25mm の供試体を鉛直方向に 5mm/層にて分割したうえで、更に平面方向で図 4.3.1-77 に示すように再分割し、各分割資料の密度や水分分布を測定した。この試料の分割区分は

- ・ 界面 (C、J、G) を挟んで界面からの距離の影響を把握

- ・ 外周部、中央部での破過経路を把握
- ・ 含水比計測中の最小限の乾燥の影響を加味して、通常計測で用いる 1/100 g 計測の電子天秤の含水比算出制度への影響

等を考慮したものである。

各測定結果は、供試体の鉛直方向にプロットして整理することで、内部の詳細な状態把握のための考察に供した。

図 4.3.1-78 から図 4.3.1-80、および表 4.3.1-32 に含水比の分布を示した。破過後ガス流量が継続したため、注入側で乾燥が進行した影響で注入側は乾燥が進行しているが（写真 4.3.1-140 参照）、供試体解体時の観察より供試体外周部からのガス移行が確認できた。

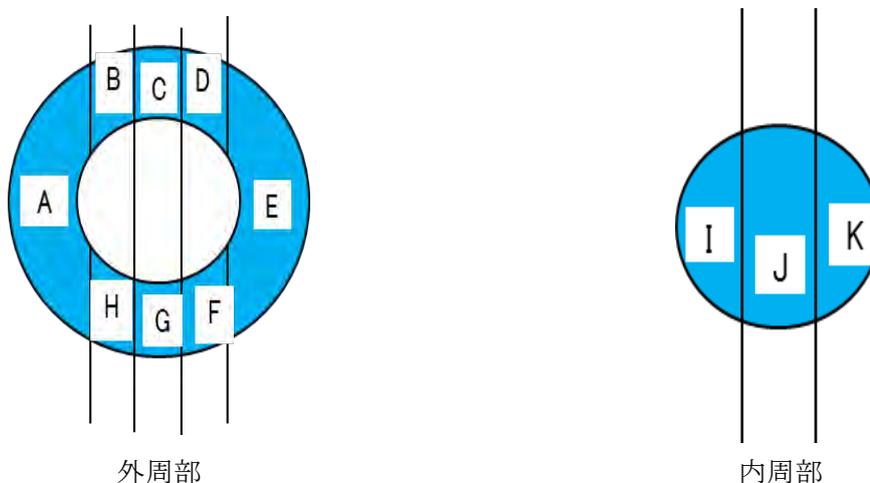


図 4.3.1-77 1層ごとの分割図

表 4.3.1-32 含水比計測結果

層	重量(g)		供試体高さ (cm)	中心位置 cm	含水比										
	外周	内周			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	6.90	3.87	0.221	0.110	33.8	26.7	34.1	33.3	36.2	34.0	28.6	32.7	40.7	41.0	37.5
2	13.08	6.62	0.381	0.411	32.2	27.3	32.7	34.6	35.6	34.1	27.8	30.1	35.4	36.3	35.5
3	9.92	5.10	0.305	0.754	31.2	27.3	31.3	33.3	34.4	31.8	27.8	28.6	33.3	34.5	35.3
4	11.08	5.87	0.333	1.073	31.9	27.4	28.6	30.4	33.9	32.5	27.7	27.3	33.9	34.5	33.1
5	9.68	4.83	0.314	1.397	27.9	24.2	26.5	30.3	30.7	30.2	26.0	25.5	32.5	34.0	33.3
6	8.02	3.72	0.256	1.682	23.4	21.8	24.7	26.4	27.0	25.0	24.4	22.7	25.9	27.7	28.6
7	20.15	11.48	0.691	2.156	16.3	14.9	16.5	17.3	18.5	16.0	16.0	16.1	18.5	18.6	19.8

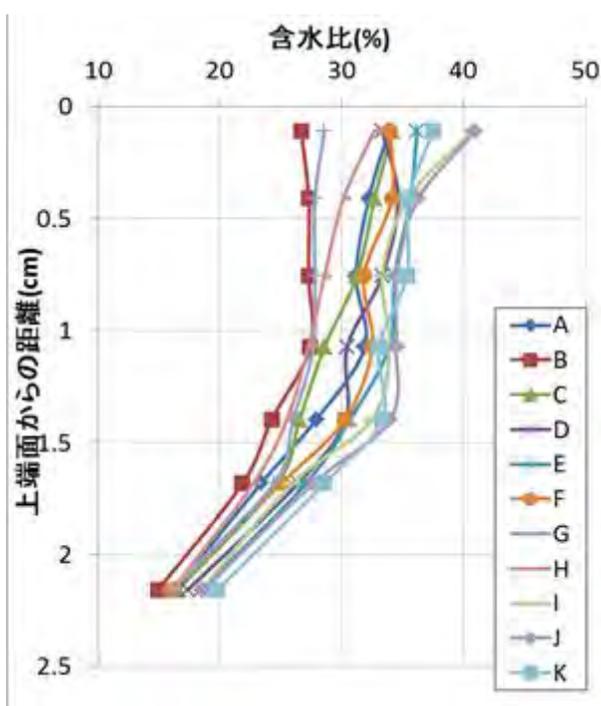


図 4.3.1-78 含水比の分布

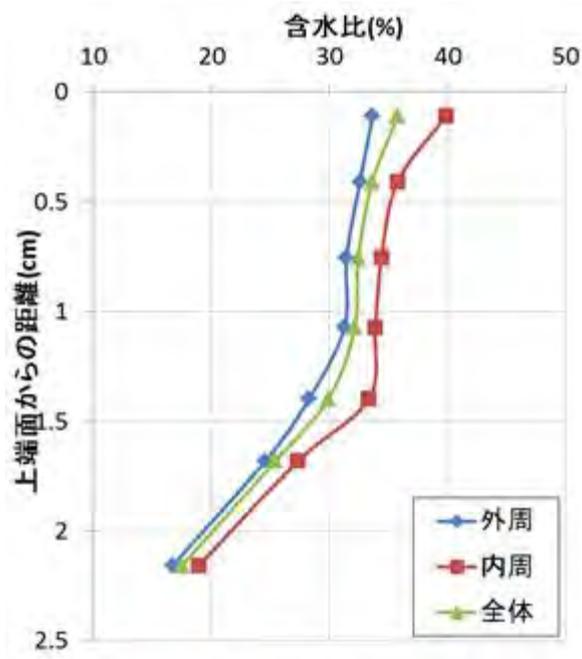


図 4.3.1-79 含水比の分布 (外周と中央部)

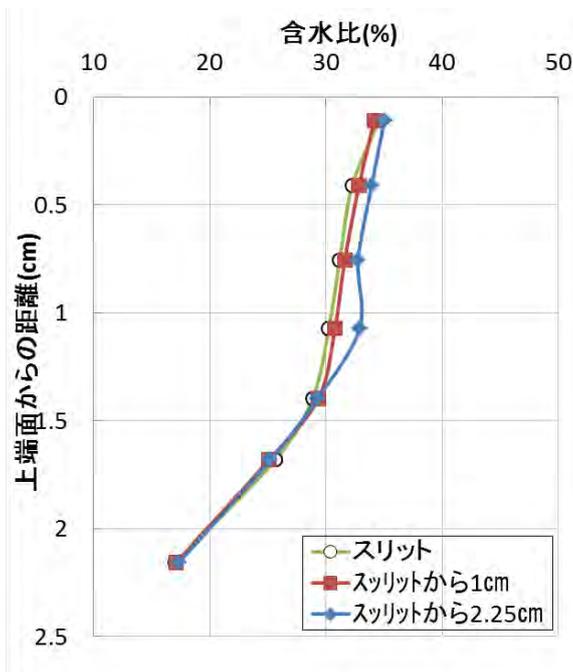


図 4.3.1-80 含水比の分布(スリットとの関係)

写真 4.3.1-139～写真 4.3.1-150 に解体時の状況を示す。ガス注入側では破過後ガス流量が継続したため、注入側で乾燥が進行した影響で注入側は乾燥が進行している。



写真 4.3.1-139 排出側のポーラスメタル撤去前の状況

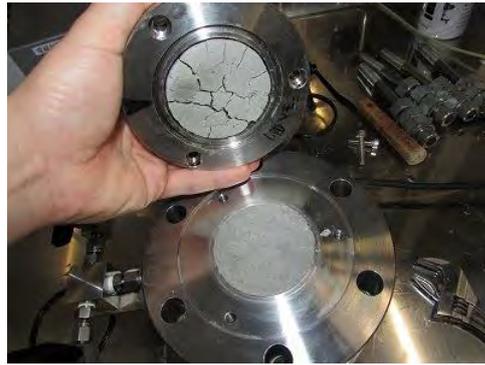


写真 4.3.1-140 注入側の供試体端面



写真 4.3.1-141 試料の分割状況



写真 4.3.1-142 供試体解体前(注水側)



写真 4.3.1-143 供試体解体前(排水側)



写真 4.3.1-144 供試体解体表面(排水側)

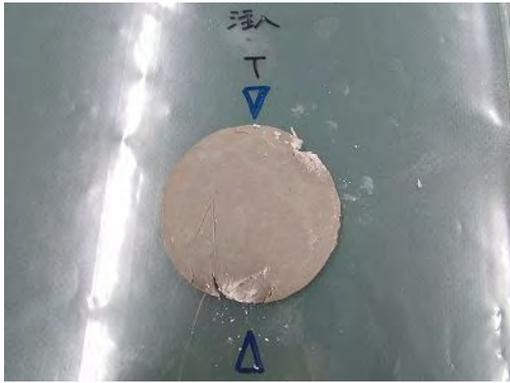


写真 4.3.1-145 1-2 層目の切断面

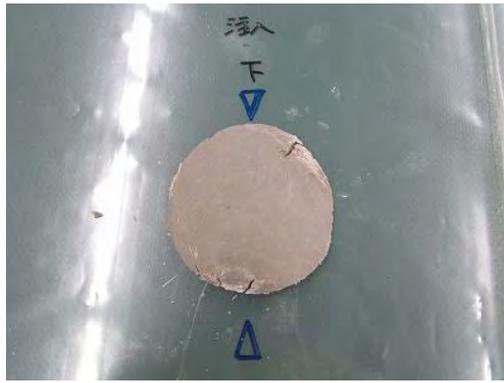


写真 4.3.1-146 2-3 層目の切断面

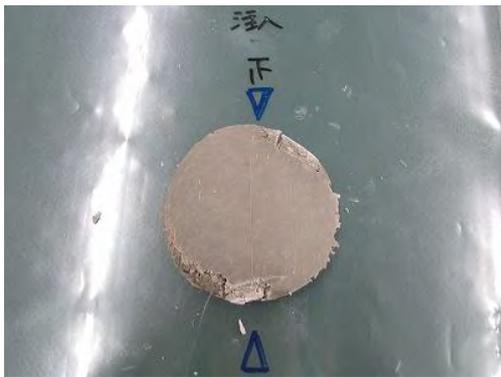


写真 4.3.1-147 3-4 層目の切断面

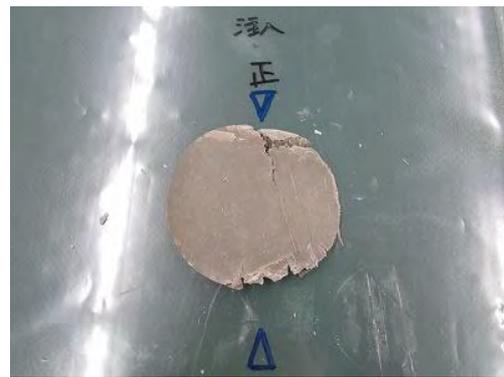


写真 4.3.1-148 4-5 層目の切断面

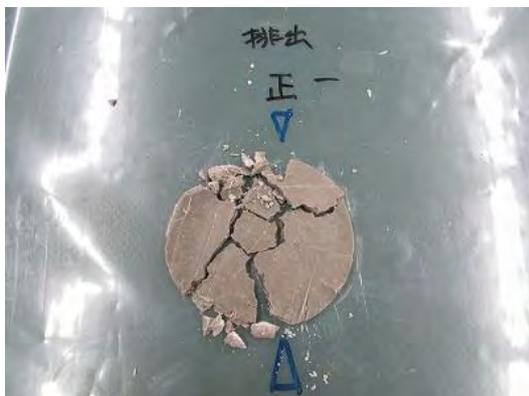


写真 4.3.1-149 5-6 層目の切断面



写真 4.3.1-150 供試体解体前(注水側)

5) 考察

界面を有する圧縮ベントナイト供試体に対して、注水飽和およびガス注入試験によってガス移行特性を検討した。その結果、界面の影響は飽和後の含水比分布・乾燥密度分布に影響するがその範囲は小さいこと、また破過圧は界面が無い供試体に比べ若干小さいものの同程度であること、そしてそのガス移行経路は供試体外周で発生が認められ界面部がガス移行経路にならなかったことが確認できた。今後は界面幅の影響など継続検討が必要と考えられる。

4.3.2 セメント系材料のガス移行挙動データの取得

(1) セメント系材料の特性確認試験

1) 供試体作製

供試体は、平成 26 年度までの成果[8]を基にした表 4.3.2-1 に示した配合を検討したが、平成 27 年度は、試験結果の評価・解釈の観点から、より透水性の高い供試体を得るために表 4.3.2-2 示した配合を追加し、それぞれの打継無しの供試体も作成し、試験を実施することとした。

表 4.3.2-1 供試体モルタルの配合[8]

W/C(%)	S/C(-)	単位重量(kg/m ³)					計測値
		W	C	S	増粘剤 (×1000)	消泡剤 (×5)	エア量 (%)
65	1.5	407	626	938	5.2	2.1	9.5

表 4.3.2-2 供試体モルタルの配合

ケース	W/C(%)	S/C(-)	単位重量(kg/m ³)					計測値
			W	C	S	増粘剤 (×1000)	消泡剤 (×5)	エア量 (%)
ケース 1 (標準)	65	1.5	407	626	938	5.2 SFCA	2.1	9.5
ケース 2	65	1.5	407	626	938	5.2 アスカクリン	2.1	9.5
ケース 3	65	1.5	407	626	938	3.9 SFCA	2.1	9.5
ケース 4	65	1.5	407	626	938	2.6 SFCA	2.1	9.5

また、モルタルの練混ぜは以下のように実施した。材料の練混ぜは以下のように実施した。

- ① セメント+細骨材を混ぜてミキサーにて 30 秒間空練り
- ② 上記に水を混ぜてミキサーにて 1 分間本練り
- ③ ミキサーを止め容器の底や周囲に付いたモルタルをかき落とす
- ④ 再度 1 分間混練り
- ⑤ 供試体用鋼製モールドに打設し、恒温室（室温 25℃，湿度 90%）で 1 週間養生
- ⑥ 恒温室内での養生完了後、脱型して恒温恒湿の養生室（室温 25℃，湿度 90%）にて水中養生
- ⑦ 材齢 28 日の数日前に、端面を研磨して高さ 50mm になるように成形（透水・透気試験用）

- ⑧ 材齢 28 日後に一軸圧縮強度を測定（一軸圧縮強度試験用）
- ⑨ 材齢 90 日後に一軸圧縮強度を測定（一軸圧縮強度試験用）および試験開始

写真 4.3.2-1 にモルタル試料、写真 4.3.2-2 にミキサー攪拌状況、写真 4.3.2-3 打継供試体用サミット管、写真 4.3.2-4 打継供試体用サミット管、写真 4.3.2-5 1 次打設状況（打継面）、写真 4.3.2-6 打継状況、写真 4.3.2-7 にエア一量確認試験を、写真 4.3.2-8 に供試体の水中養生状況（透水・透気試験用、および一軸圧縮強度確認用）を示す。



写真 4.3.2-1 モルタル試料



写真 4.3.2-2 ミキサー攪拌状況



写真 4.3.2-3 打継供試体用サミット管



写真 4.3.2-4 打継供試体用サミット管



写真 4.3.2-5 1 次打設状況（打継面）



写真 4.3.2-6 打継状況



写真 4.3.2-7 エア一量確認試験



写真 4.3.2-8 供試体の水中養生状況（透水・透気試験用、および一軸圧縮強度確認用）

2) 一軸圧縮強度試験

写真写真 4.3.2-9 に供試体の一軸圧縮試験状況を、写真 4.3.2-10～写真 4.3.2-17 に各供試体の破壊状況を示した。

図 4.3.2-1～図 4.3.2-8 に配合ケース 1 から 4 のモルタルの、材令 28 日の一軸圧縮強度測定結果 (σ_{28}) および材令 91 日の一軸圧縮強度測定結果 (σ_{91}) 示す。これらの図の右欄にそれぞれ、供試体の一軸圧縮強さは平均値を示した。



写真 4.3.2-9 モルタルの一軸圧縮強度測定状況 (n=3)



写真 4.3.2-10 一軸圧縮強度試験後のケース 1 配合モルタル状況 (n=3) 28 日



写真 4.3.2-11 一軸圧縮強度試験後のケース 1 配合モルタル状況 (n=2) 28 日



写真 4.3.2-12 一軸圧縮強度試験後のケース 1
配合モルタル状況 (n=3) 91 日



写真 4.3.2-13 一軸圧縮強度試験後のケース 1
配合モルタル状況 (n=3) 91 日



写真 4.3.2-13 一軸圧縮強度試験後のケース 2
配合モルタル状況 (n=3) 28 日



写真 4.3.2-14 一軸圧縮強度試験後のケース 2
配合モルタル状況 (n=3) 28 日



写真 4.3.2-15 一軸圧縮強度試験後のケース 2
配合モルタル状況 (n=3) 91 日



写真 4.3.2-16 一軸圧縮強度試験後のケース 2
配合モルタル状況 (n=3) 91 日



写真 4.3.2-17 一軸圧縮強度試験後のケース 3
配合モルタル状況 (n=2) 28 日



写真 4.3.2-19 一軸圧縮強度試験後のケース 3
配合モルタル状況 (n=2) 28 日



写真 4.3.2-20 一軸圧縮強度試験後のケース 3
配合モルタル状況 (n=3) 91 日



写真 4.3.2-21 一軸圧縮強度試験後のケース 3
配合モルタル状況 (n=3) 91 日



写真 4.3.2-22 一軸圧縮強度試験後のケース 4
配合モルタル状況 (n=2) 28 日



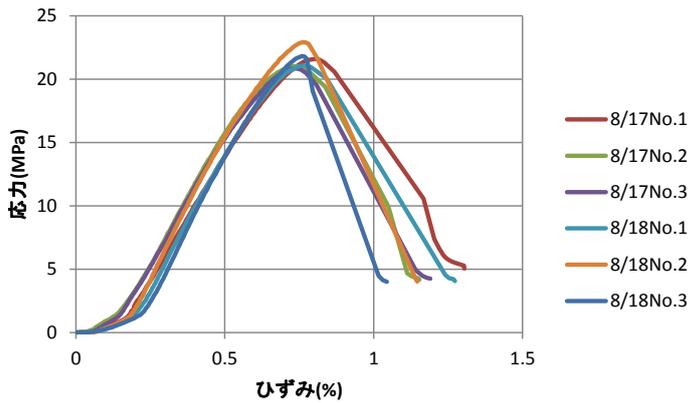
写真 4.3.2-23 一軸圧縮強度試験後のケース 4
配合モルタル状況 (n=2) 28 日



写真 4.3.2-24 一軸圧縮強度試験後のケース 4
配合モルタル状況 (n=3) 91 日

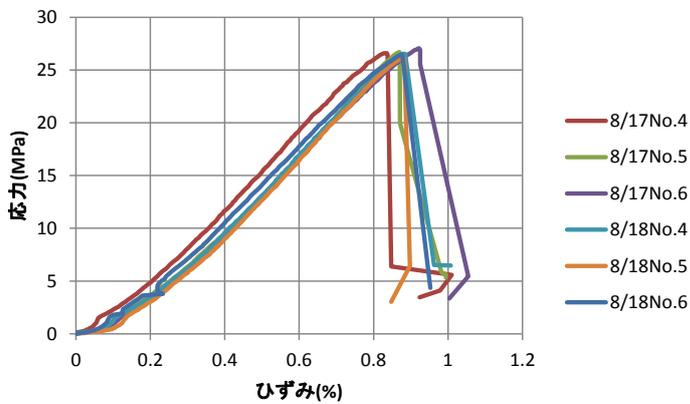


写真 4.3.2-25 一軸圧縮強度試験後のケース 4
配合モルタル状況 (n=3) 91 日



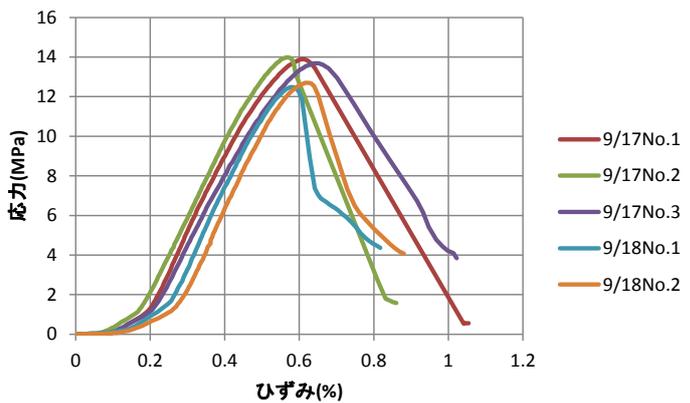
	密度(gf/cm ³)	応力(Mpa)
8/17No.1	2.001	21.58
8/17No.2	1.989	21.01
8/17No.3	1.991	20.85
average	1.994	21.15
8/18No.1	1.985	21.07
8/18No.2	2.012	22.91
8/18No.3	1.985	21.81
average	1.994	21.93
全平均	1.994	21.54

図 4.3.2-1 ケース 2 配合モルタルの材令 28 日一軸圧縮強度測定結果



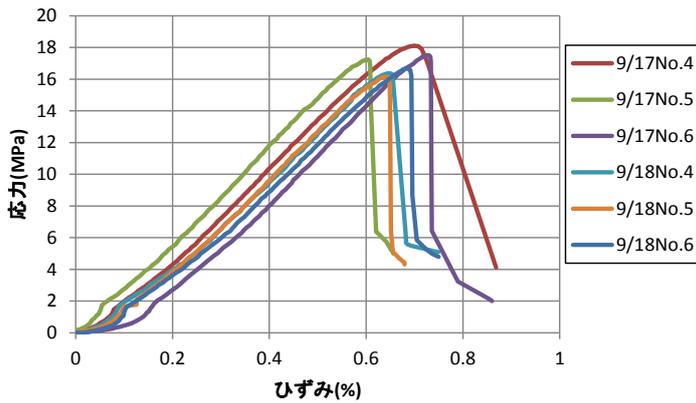
	密度(gf/cm ³)	応力(Mpa)
8/17No.4	1.989	26.59
8/17No.5	1.987	26.70
8/17No.6	1.978	27.04
average	1.985	26.78
8/18No.4	2.011	26.54
8/18No.5	2.001	26.13
8/18No.6	1.988	26.44
average	2.000	26.37
全平均	1.992	26.57

図 4.3.2-2 ケース 2 配合モルタルの材令 91 日一軸圧縮強度測定結果



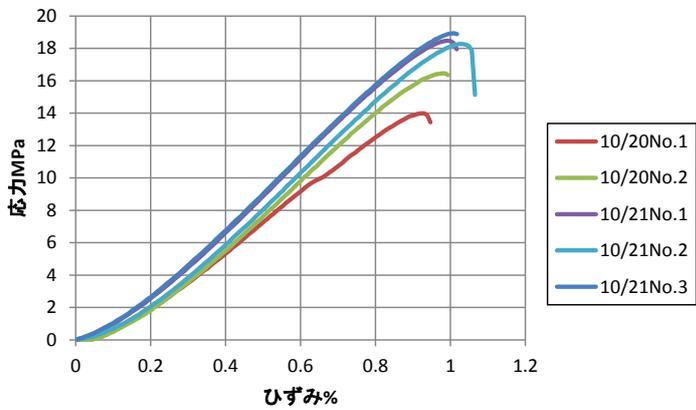
	密度(gf/cm ³)	応力(Mpa)
9/17No.1	1.746	13.89
9/17No.2	1.753	13.99
9/17No.3	1.758	13.68
average	1.752	13.85
9/18No.1	1.725	12.48
9/18No.2	1.727	12.70
average	1.726	12.59
全平均	1.742	13.35

図 4.3.2-3 ケース 1 配合モルタルの材令 28 日一軸圧縮強度測定結果



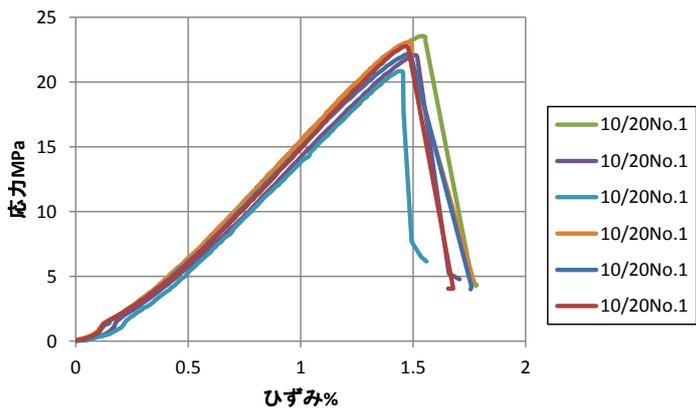
	密度(gf/cm ³)	応力(Mpa)
9/17No.4	1.753	18.11
9/17No.5	1.757	17.23
9/17No.6	1.757	17.52
average	1.756	17.62
9/18No.4	1.723	16.36
9/18No.5	1.721	16.17
9/18No.6	1.724	16.66
average	1.723	16.40
全平均	1.739	17.01

図 4.3.2-4 ケース 1 配合モルタルの材令 91 日一軸圧縮強度測定結果



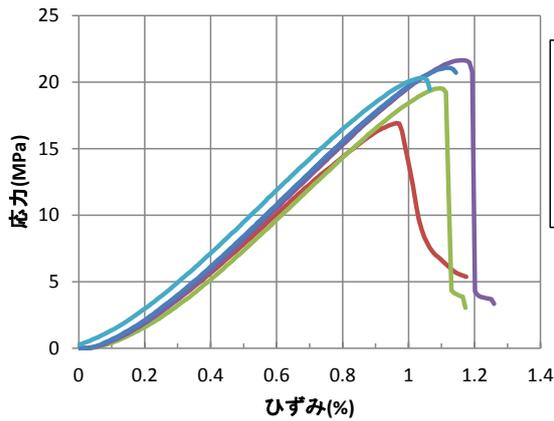
	密度(gf/cm ³)	応力(Mpa)
10/20No.1	1.867	13.99
10/20No.2	1.857	18.17
average	1.862	16.08
10/21No.1	1.864	17.59
10/21No.2	1.870	17.59
10/21No.3	1.863	18.43
average	1.866	17.87
全平均	1.864	17.16

図 4.3.2-5 ケース 3 配合モルタルの材令 28 日一軸圧縮強度測定結果



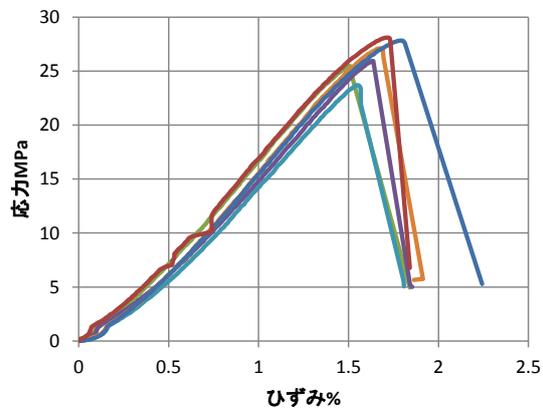
	密度(gf/cm ³)	応力(Mpa)
10/20No.1	1.88	23.54
10/20No.2	1.87	22.09
10/20No.3	1.86	20.83
average	1.868	22.15
10/21No.1	1.87	23.07
10/21No.2	1.88	22.17
10/21No.3	1.88	22.75
average	1.876	22.66
全平均	1.872	22.41

図 4.3.2-6 ケース 3 配合モルタルの材令 91 日一軸圧縮強度測定結果



	密度(gf/cm ³)	応力(Mpa)
10/20No.1	1.963	16.91
10/20No.2	1.969	19.53
average	1.966	18.22
10/21No.1	1.965	21.64
10/21No.2	1.963	21.08
10/21No.3	1.963	20.29
average	1.964	21.01
全平均	1.965	19.89

図 4.3.2-7 ケース 4 配合モルタルの材令 28 日一軸圧縮強度測定結果



	密度(gf/cm ³)	応力(Mpa)
10/20No.1	1.976	25.46
10/20No.2	1.978	25.93
10/20No.3	1.980	23.71
average	1.978	25.03
10/21No.1	1.973	27.12
10/21No.2	1.974	27.84
10/21No.3	1.974	28.10
average	1.973	27.69
全平均	1.976	26.36

図 4.3.2-8 ケース 4 配合モルタルの材令 91 日一軸圧縮強度測定結果

(2) セメント系人工バリアの材料界面を模擬したガス移行試験

1) 供試体の飽和（透水試験結果）

a. 試験条件

表 4.3.2-3 に飽和供試体の作製、並びに透水性を把握するために実施した透水試験の条件を示す。

表 4.3.2-3 試験条件

透水試験条件	拘束圧 (MPa)	透水圧 (MPa)	背圧 (MPa)
設定値	3.0	2.8	0.1

b. 供試体の整形

供試体の整形手順を図 4.3.2-9 に、また実施状況を写真 4.3.2-18～写真 4.3.2-23 示す。

なお、下層打設後、上層を打設（打継ぐ）までは既往の知見^{※1}に倣って気中養生とし、養生期間は1日間とした。

また、下層打設後の供試体天端については、同じく既往の知見に倣って特に打継ぎ面処理等の手順は踏まないものとした。

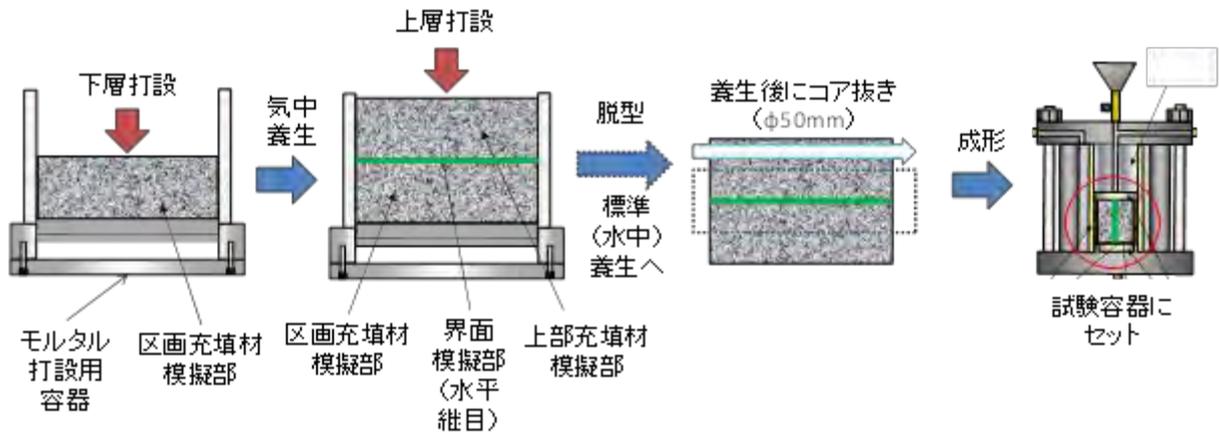


図 4.3.2-9 供試体作製手順



写真 4.3.2-18 真空槽を用いた脱気浸水法によるモルタルの初期飽和状況



写真 4.3.2-19 コアリング状況



写真 4.3.2-20 コアリングした打継試料



写真 4.3.2-21 コアリングした打継試料の端面カット状況

※1 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター, 2011.3. 平成 22 年度 管理型処分技術調査等委託費 地下空洞型処分施設性能確認試験 報告書, p.2-1~2-77、p3-1~3-162.



写真 4.3.2-22 コアリングした打継試料の端面整形状況



写真 4.3.2-23 整形された供試体

2) 透水試験

表 4.3.2-4 に各ケースの材料作製および透水試験の実施状況を示す。

また、写真 4.3.2-24 および写真 4.3.2-25 に供試体の状況を示す。

表 4.3.2-4 材料作製および透水試験の実施状況

配合ケース	打設日	透水試験日程
ケース 1 標準	9/17 および 9/18	1/14-1/17
ケース 2 アスカクリン	9/17 および 9/18	12/20-12/24、1/5-1/12 (打継無)
ケース 3 標準 75%	10/20 および 10/21	1/19-1/21
ケース 4 標準 50%	10/20 および 10/21	2/4-2/23

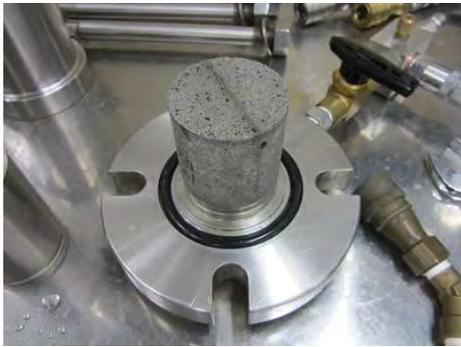


写真 4.3.2-24 No.1 供試体のセット状況



写真 4.3.2-25 ゴムジャケットで覆われた
供試体

モルタル供試体（ケース 1～ケース 4）の透水試験から得られた累積透水量（排水量）の経時変化を図 4.3.2-11～図 4.3.2-13 に示す。時間～流量関係が線形となった状態から、式 4.3.2-1 より透水係数を算定した。

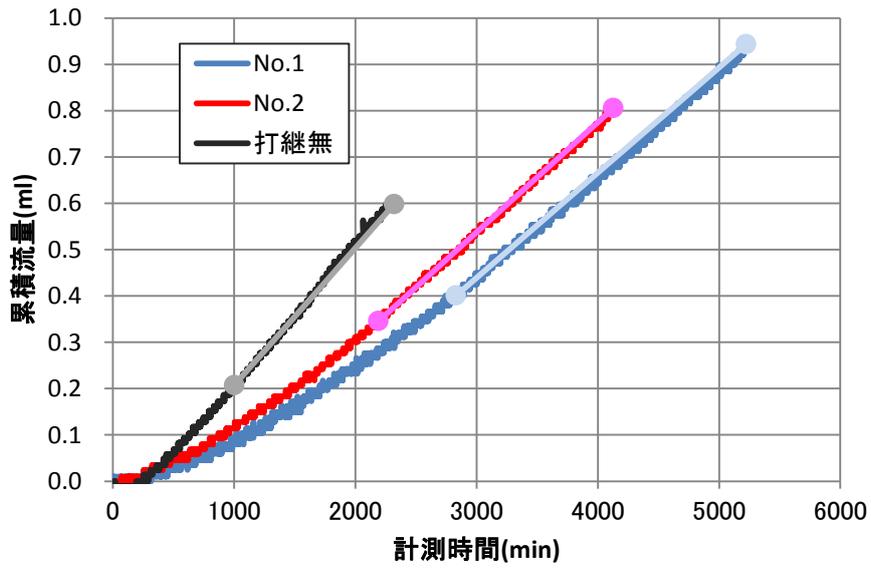


図 4.3.2-10 モルタルケース 1 配合供試体の時間～透水量関係

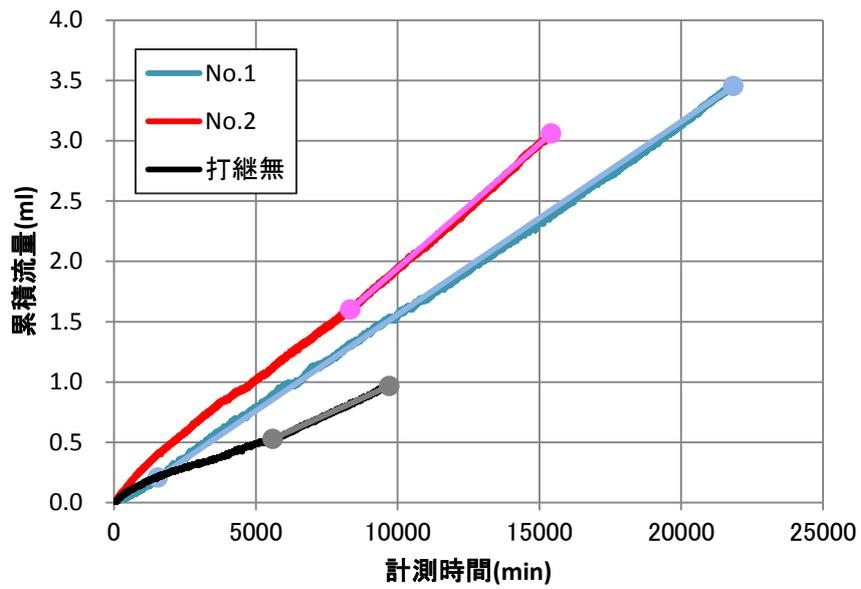


図 4.3.2-11 モルタルケース 2 配合供試体の時間～透水量関係

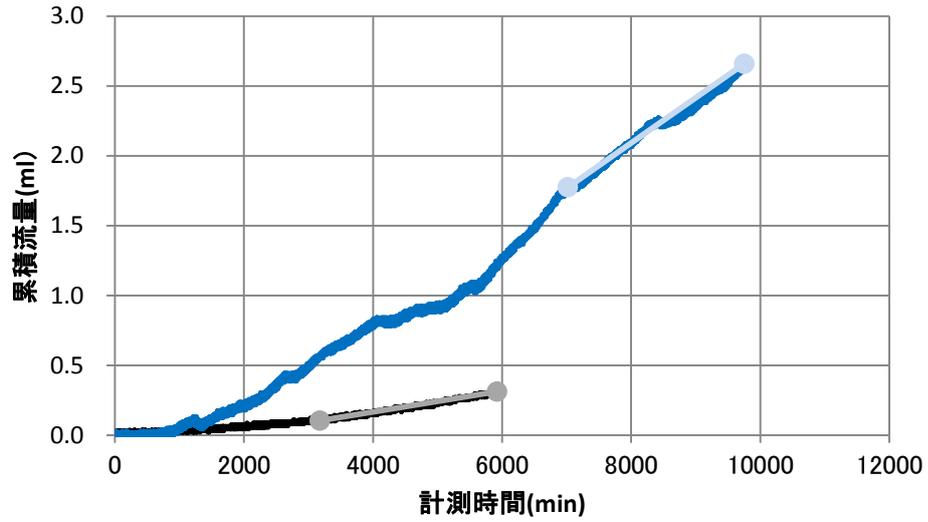


図 4.3.2-12 モルタルケース 3 配合供試体の時間～流量関係

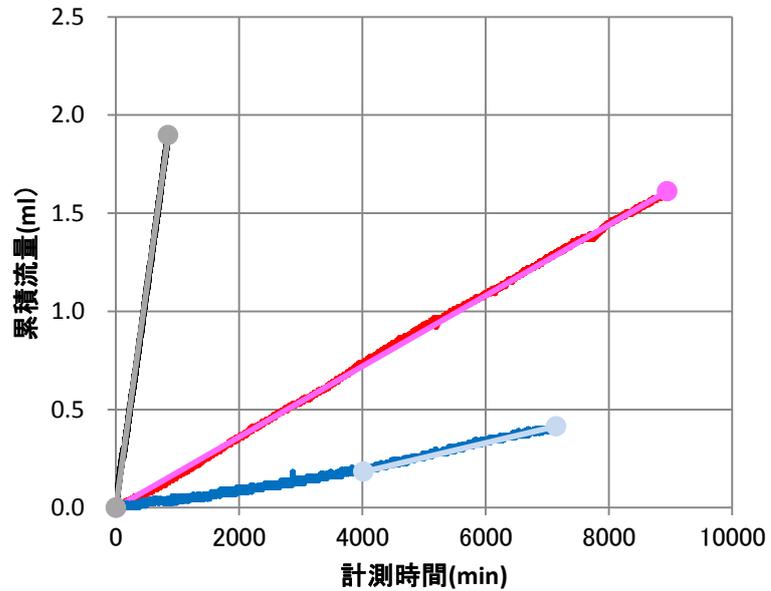


図 4.3.2-13 モルタルケース 4 配合供試体の時間～流量関係

$$k = \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \log_e \frac{h_1}{h_2} = \frac{2.303aL}{A(t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad \text{式 4.3.2-1}$$

ここで、 k : 透水係数(m/s), A : 供試体断面積(m^2), a はビューレットの断面積(m^2), L は供試体長さ(m), h_1 と h_2 はそれぞれ時刻 t_1 (s)と t_2 (s)の時の水頭(m)である。透水係数の算定結果を表 4.3.2-5 に示す。

表 4.3.2-5 モルタル供試体 透水試験結果

供試体 No.		拘束圧 (MPa)	透水圧 (MPa)	背圧 (MPa)	t1 (s)	t2 (s)	透水係数 (m/s)
ケース 1 配合	No.1	3.0	2.8	0.1	169,800	313,440	3.48E-13
	No.2	3.0	2.8	0.1	131,460	247,680	3.63E-13
	打継無	3.0	2.8	0.1	60,000	139,140	4.70E-13
ケース 2 配合	No.1	3.0	2.9	0.1	92,820	1310,665	2.38E-13
	No.2	3.0	2.9	0.1	500,040	925,080	3.06E-13
	打継無	3.0	2.8	0.1	335,640	582,360	1.71E-13
ケース 3 配合	No.1	3.0	2.8	0.1	421,020	585,300	5.26E-13
	No.2	3.0	2.8	0.1	不透水		
	打継無	3.0	2.8	0.1	190,620	355,500	1.17E-13
ケース 4 配合	No.1	3.3	3.0	0.1	241,080	428,760	1.04E-13
	No.2	3.0	2.8	0.1	300	536,700	2.73E-13
	打継無	3.0	2.8	0.1	0	50890	3.46E-12

透水試験前後に供試体の重量を測定した結果を表 4.3.2-6 に示す。透水試験前の状態は、48 時間（2 日間）の脱気浸水後の重量であり、透水試験後には全ての供試体で増加した。これは浸水脱気のみでは飽和が完全ではないが、透水試験で定常状態に達する間に有効間隙（透水試験によって供試体内の動き得る水が存在する空隙）が完全飽和したものと考えられる。

表 4.3.2-6 モルタル供試体 寸法および透水試験前後の重量比較

供試体 No.	高さ	直径	透水試験前 (g)	透水試験後 (g)	増分 (g)	
	mm	mm				
ケース 1 配合	No.1	50.34	49.97	176.894	179.031	2.137
	No.2	50.10	50.37	176.537	180.211	3.674
	打継無	50.21	49.31	179.032	180.561	1.529
ケース 2 配合	No.1	49.89	50.34	202.171	205.235	3.064
	No.2	50.00	50.37	203.770	206.740	2.970
	打継無	50.10	49.27	195.078	197.107	2.029
ケース 3 配合	No.1	49.89	50.34	202.171	205.235	3.064
	No.2	50.00	50.37	203.770	206.740	2.970
	打継無	50.10	49.27	195.078	197.107	2.029
ケース 4 配合	No.1	49.89	50.34	197.418	201.416	3.998
	No.2	49.95	50.29	198.973	201.420	2.447
	打継無	50.04	50.05	192.555	201.416	8.861

3) ガス注入試験

a. 実施状況

表 4.3.2-7 に各ケースのガス注入試験の実施状況を示す。

表 4.3.2-7 ガス注入試験の実施状況

配合ケース	打設日	透気試験日程
ケース 1 標準	9/17 および 9/18	1/19-1/20
ケース 2 アスカクリン	9/17 および 9/18	1/4-1/7、1/12-13 (打継無)
ケース 3 標準 75%	10/20 および 10/21	1/25-1/27
ケース 4 標準 50%	10/20 および 10/21	2/10-3/14

b. 供試体へのガス注入過程と結果の考察

配合ケース 1 打継供試体 No.1, No.2 および打継無供試体の透気試験における時間～排水量関係と時間～透気量関係を、供試体毎に図 4.3.2-14～図 4.3.2-22 に示す。これらの図において、それぞれ図 4.3.2-16、図 4.3.2-19 およびのプロットで示す定常状態区間(赤線)から透気係数 (ガス有効浸透率) を式 4.3.2-2 により算定した。

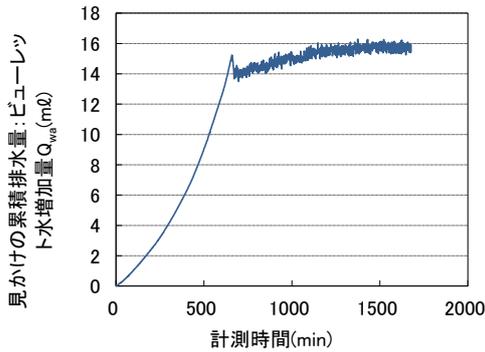


図 4.3.2-14 配合ケース 1 打継供試体 No.1
時間-排水量相関

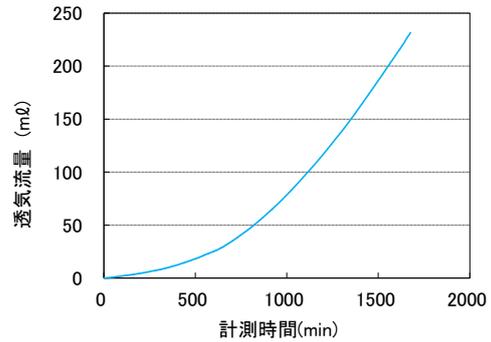


図 4.3.2-15 配合ケース 1 打継供試体 No.1
時間-透気量相関

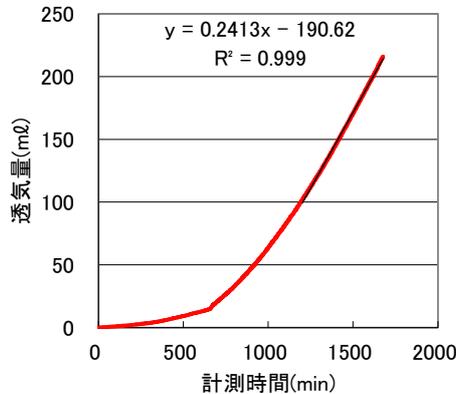


図 4.3.2-16 配合ケース 1 打継供試体 No.1 の透気量 (補正值) の定常区間 (黒線)

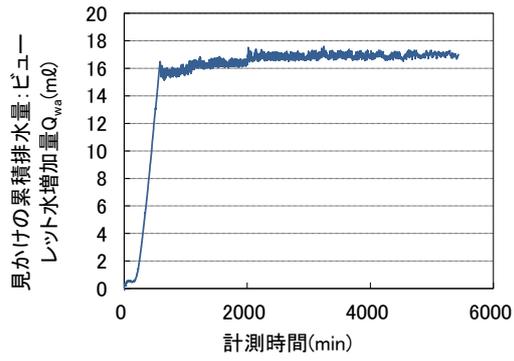


図 4.3.2-17 配合ケース 1 打継供試体 No.2
時間-排水量相関

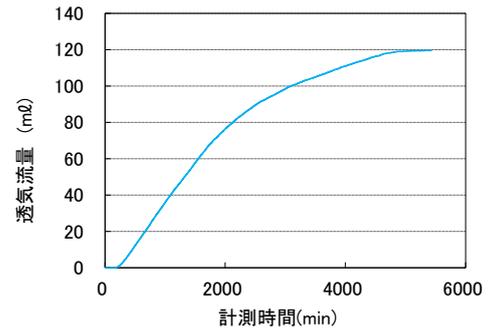


図 4.3.2-18 配合ケース 1 打継供試体 No.2
時間-透気量相関

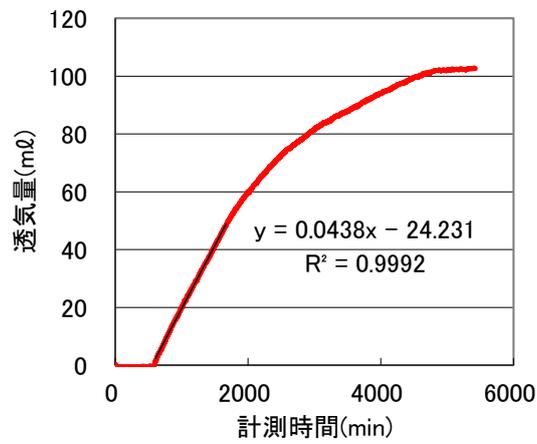


図 4.3.2-19 配合ケース 1 打継供試体 No.2 の透気量 (補正值) の定常区間 (黒線)

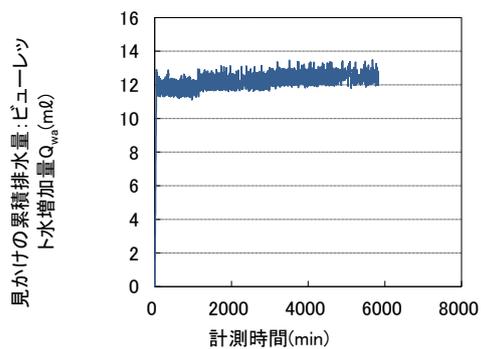


図 4.3.2-20 配合ケース 1 打継無し供試体
時間-排水量相関

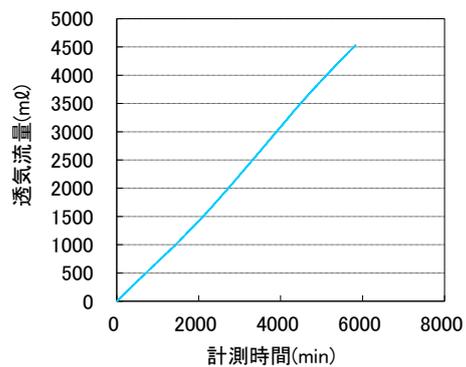


図 4.3.2-21 配合ケース 1 打継無し供試体
時間-透気量相関

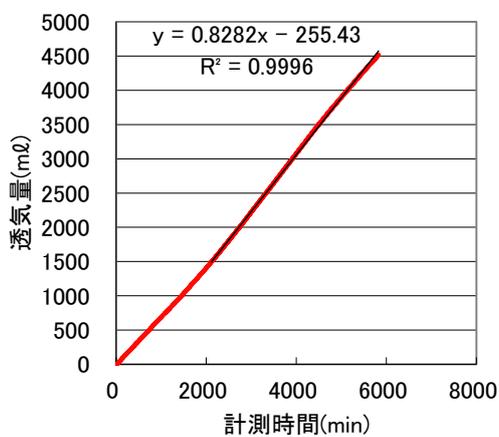


図 4.3.2-22 配合ケース 1 打継無し供試体の透気量（補正值）の定常区間
（黒線）

配合ケース 2 打継供試体 No.1, No.2 および打継無供試体の透気試験における時間～排水量関係と時間～透気量関係を供試体毎に図 4.3.2-23～図 4.3.2-31 に示す。これらの図において、それぞれ図 4.3.2-25、図 4.3.2-28 および図 4.3.2-31 のプロットで示す定常状態区間(赤線)から透気係数（ガス有効浸透率）を式 4.3.2-2 により算定した。

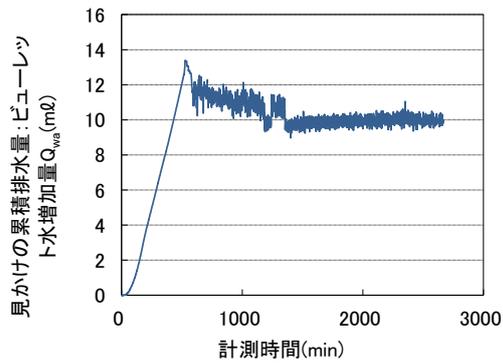


図 4.3.2-23 配合ケース 2 打継供試体 No.1
時間-排水量相関

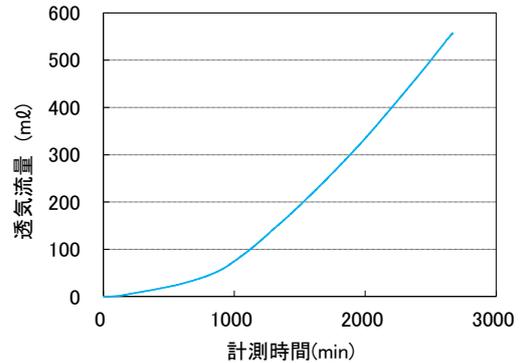


図 4.3.2-24 配合ケース 2 打継供試体 No.1
時間-透気量相関

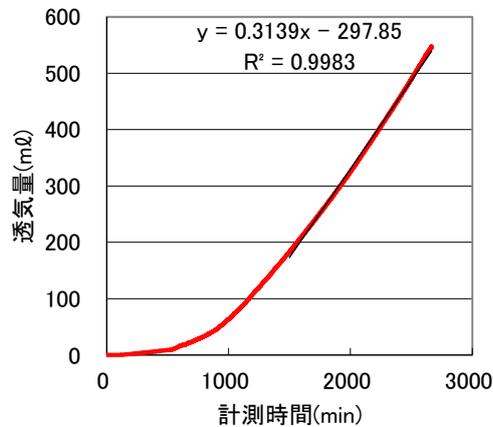


図 4.3.2-25 配合ケース 2 打継供試体 No.1 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）

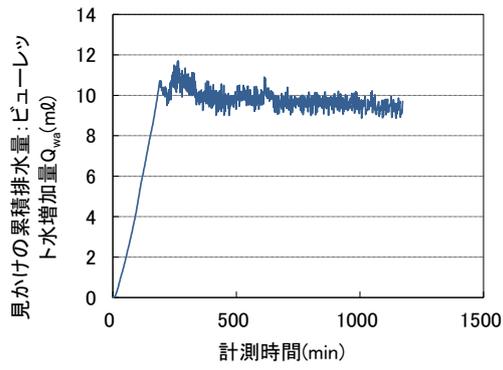


図 4.3.2-26 配合ケース 2 打継供試体 No.2
時間-排水量相関

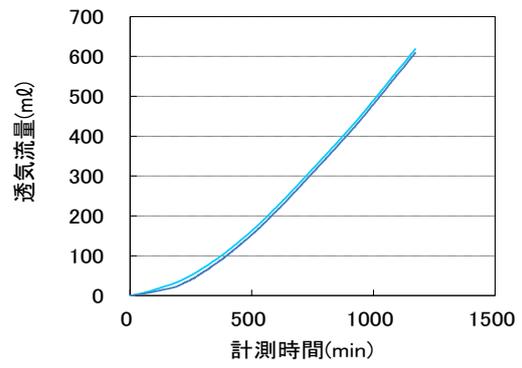


図 4.3.2-27 配合ケース 2 打継供試体 No.2
時間-透気量相関

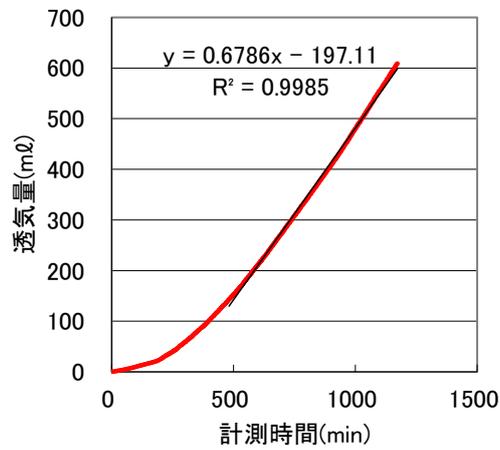


図 4.3.2-28 配合ケース 2 打継供試体 No.2 の透気量 (補正值) の定常区間 (黒線)

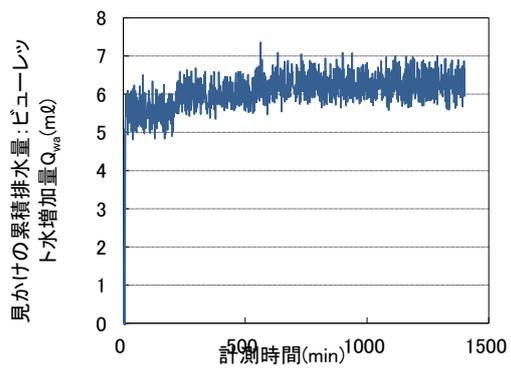


図 4.3.2-29 配合ケース 2 打継無し供試体
時間-排水量相関

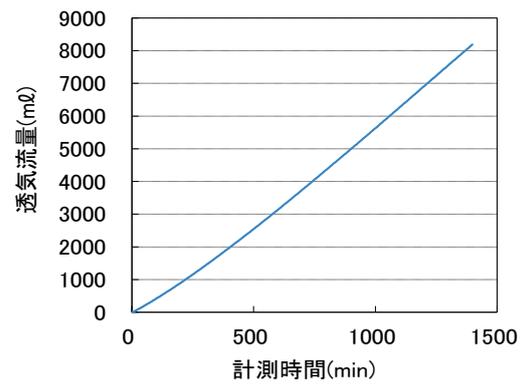


図 4.3.2-30 配合ケース 2 打継無し供試体
時間-透気量相関

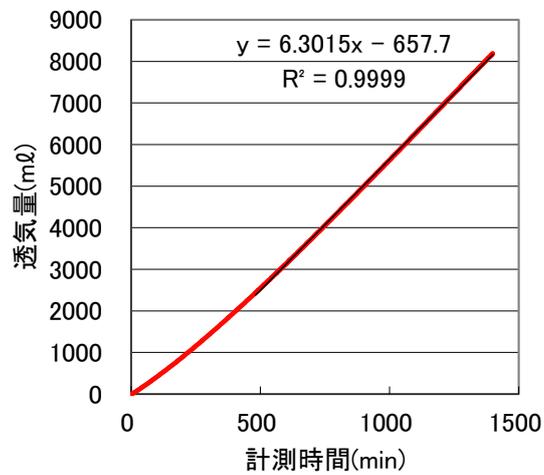


図 4.3.2-31 配合ケース 2 打継無し供試体の透気量 (補正值) の定常区間 (黒線)

配合ケース 3 打継供試体 No.1 および打継無供試体の透気試験における時間～排水量関係と時間～透気量関係を供試体毎図 4.3.2-32～図 4.3.2-36 に示す。これらの図において、それぞれ図 4.3.2-34 および図 4.3.2-37 のプロットで示す定常状態区間(赤線)から透気係数（ガス有効浸透率）を式 4.3.2-2 により算定した。

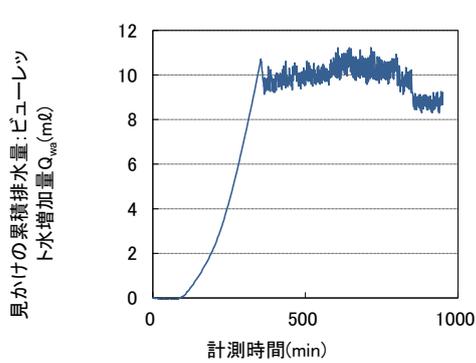


図 4.3.2-32 配合ケース 3 打継供試体 No.1
時間-排水量相関

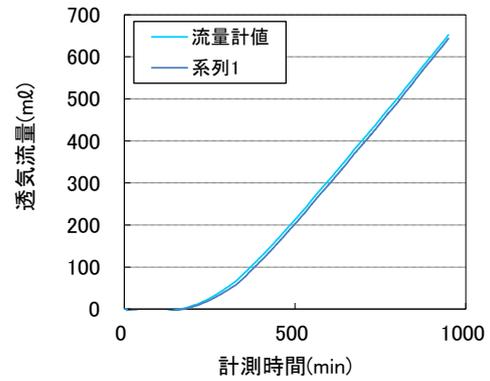


図 4.3.2-33 配合ケース 3 打継供試体 No.1
時間-透気量相関

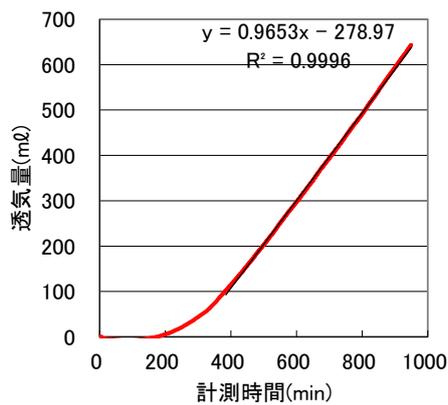


図 4.3.2-34 配合ケース 3 打継供試体 No.1 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）

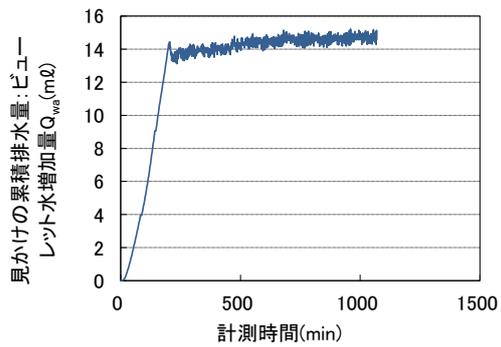


図 4.3.2-35 配合ケース 3 打継無し供試体
時間-排水量相関

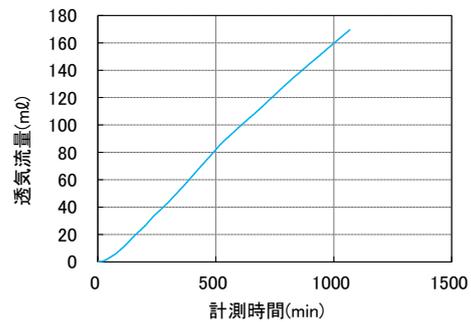


図 4.3.2-36 配合ケース 3 打継無し供試体
時間-透気量相関

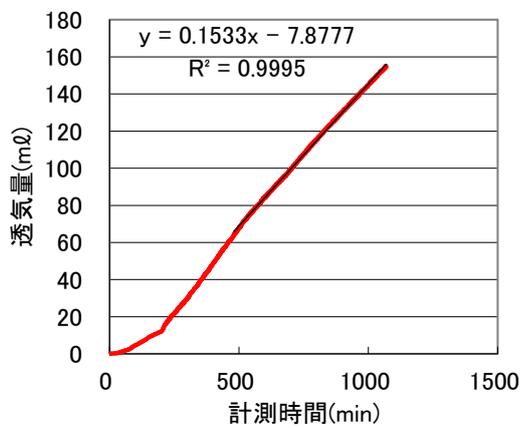


図 4.3.2-37 配合ケース 3 打継無し供試体の透気量 (補正值) の定常区間 (黒線)

配合ケース4打継供試体 No.1, No.2 および打継無供試体の透気試験における時間～排水量関係と時間～透気量関係を供試体毎に図 4.3.2-38～図 4.3.2-45 に示す。これらの図において、それぞれ図 4.3.2-40、図 4.3.2-43 および図 4.3.2-46 のプロットで示す定常状態区間(赤線)から透気係数(ガス有効浸透率)を式 4.3.2-2 により算定した。

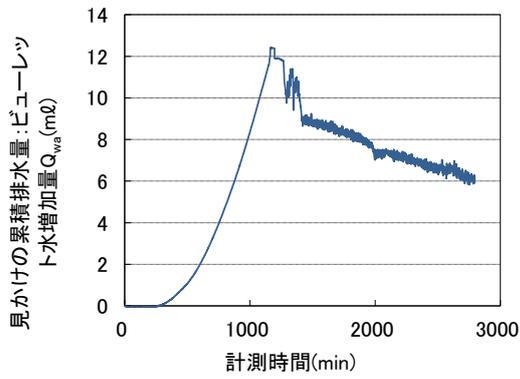


図 4.3.2-38 配合ケース4打継供試体 No.1
時間-排水量相関

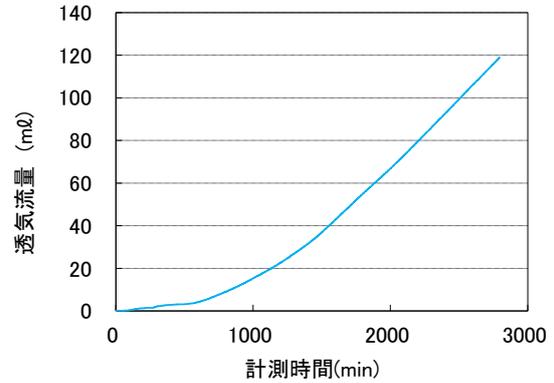


図 4.3.2-39 配合ケース4打継供試体 No.1
時間-透気量相関

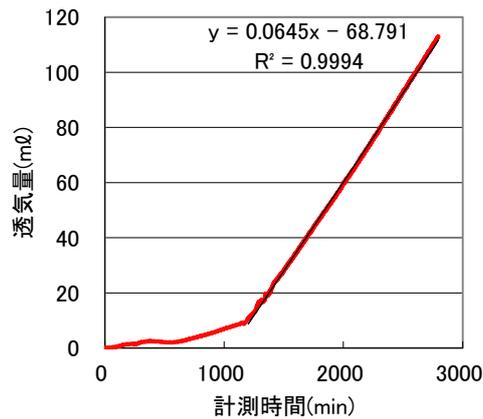


図 4.3.2-40 配合ケース4打継供試体 No.1 の透気量(補正值)の定常区間(黒線)

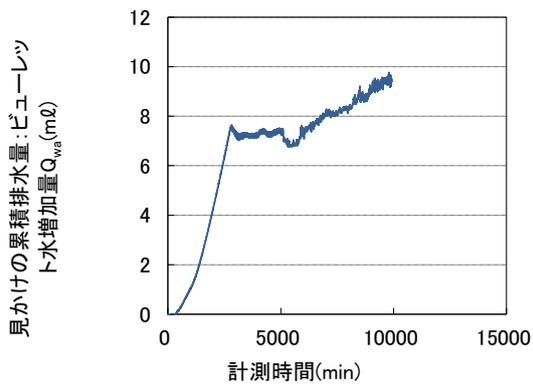


図 4.3.2-41 配合ケース 4 打継供試体 No.2
時間-排水量相関

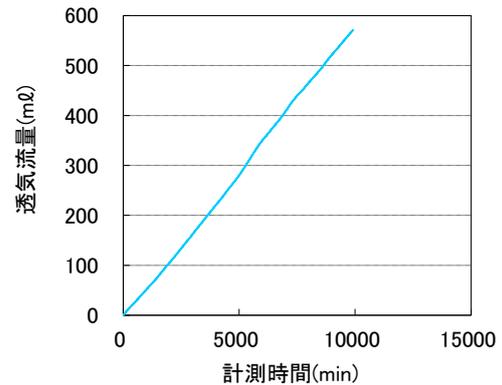


図 4.3.2-42 配合ケース 4 打継供試体 No.2
時間-透気量相関

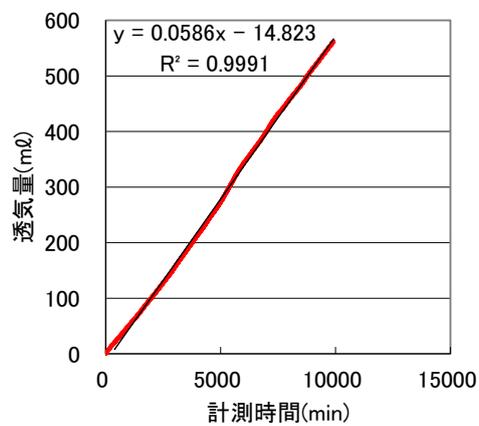


図 4.3.2-43 配合ケース 4 打継供試体 No.2 の透気量 (補正值) の定常区間 (黒線)

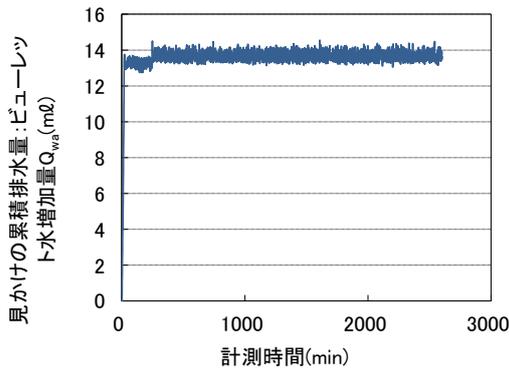


図 4.3.2-44 配合ケース 4 打継無供試体
時間-排水量相関

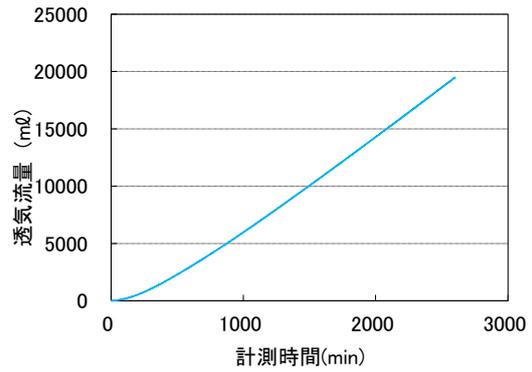


図 4.3.2-45 配合ケース 4 打継無供試体
時間-透気量相関

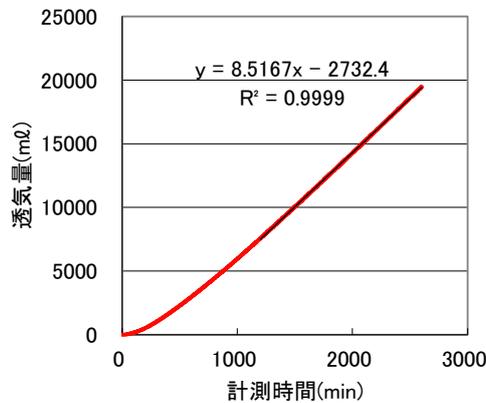


図 4.3.2-46 配合ケース 4 打継無供試体の透気量（補正值）の定常区間（黒線）

$$K = \frac{2Q\mu p_a}{A} \frac{L}{p_0^2 - p_L^2} \quad \text{式 4.3.2-2}$$

ここで、 K ：ガス有効浸透率(m^2)、 Q は大気圧下における透気体積(m^3)、 μ は気体の粘性係数（ここでは窒素を用いたので、 $1.76 \times 10^{-5} (Pa \cdot s)$ ）、 A は供試体断面積(m^2)、 L は供試体の長さ(m)、 p_a は大気圧(Pa)、 p_0 と p_L はそれぞれ供試体の気体入口と出口の境界圧力(Pa)である。各図の透気量は、ガス透気直後の瞬時的な供試体より排水量（＝表中の「総排水量」）を差し引いた「補正值」も併せて示しており、この補正值の黒線区間（図 4.3.2-10 および図 4.3.2-13）から算定したガス有効浸透率の算定結果を表 4.3.2-8～表 4.3.2-11 に示す。

表 4.3.2-8 配合ケース 1 モルタル供試体の透気試験結果

供試体 No.	拘束圧 (MPa)	ガス圧 (MPa)	背圧 (MPa)	ガス 有効浸透率 (m^2)	総排水量 (mL)
No.1	3.01	2.77	0.10	4.94E-20	15.911
No.2	2.98	2.76	0.10	9.04E-21	9.769
打継無	3.00	2.76	0.10	1.62E-19	12.192

表 4.3.2-9 配合ケース 2 モルタル供試体の透気試験結果

供試体 No.	拘束圧 (MPa)	ガス圧 (MPa)	背圧 (MPa)	ガス 有効浸透率 (m^2)	総排水量 (mL)
No.1	3.02	2.79	0.10	6.23E-20	10.069
No.2	3.03	2.86	0.10	1.24E-19	9.295
打継無	3.02	2.84	0.10	1.16E-18	6.547

表 4.3.2-10 配合ケース 3 モルタル供試体の透気試験結果

供試体 No.	拘束圧 (MPa)	ガス圧 (MPa)	背圧 (MPa)	ガス 有効浸透率 (m^2)	総排水量 (mL)
No.1	2.99	2.82	0.10	1.77E-19	9.212
No.2	不透水のため実施せず				
打継無	2.99	2.79	0.10	2.96E-20	14.580

表 4.3.2-11 配合ケース 4 モルタル供試体の透気試験結果

供試体 No.	拘束圧 (MPa)	ガス圧 (MPa)	背圧 (MPa)	ガス 有効浸透率 (m^2)	総排水量 (mL)
No.1	3.21	2.97	0.10	1.13E-20	6.212 (12.423)
No.2	3.02	2.76	0.10	1.16E-20	9.409
打継無	2.98	2.76	0.10	1.70E-18	13.633

配合ケース1では、打継無供試体は打継のある供試体よりもガスの有効浸透率は小さいという逆の結果となった。配合ケース2では、打継無供試体のガス有効浸透率が打継供試体より大きく、配合ケース3では打継供試体の方が小さく、配合ケース4では打継供試体の方が大きい結果となった。これらの結果を総合すると打継の影響は、供試体の有効浸透率のバラつきの範囲で、打継境界が顕著な気体の透過する気みちとなるリスクは大きくないことを示している。

4.3.3 ガス移行挙動評価に係るシステム試験の実現に向けた検討

平成 26 年度の検討[8]においては、バリア材料界面も含めた人工バリア全体（複合構成材料中）のガス移行挙動の理解に必要不可欠である、実規模人工バリアの縮小模型を用いて行うガス移行挙動評価試験（複合システム試験）の実現に向け、以下の内容を取り纏めた。

- ・ 諸外国において実施された既往の複合システム試験（各国独自の処分概念がベース）事例の整理／試験で抽出された課題の整理
- ・ 複合システム試験（我が国の TRU 廃棄物処分概念がベース）を実施するに際しての留意点の整理

次項に、上記の調査結果の概要と整理結果を示す。

(1) システム試験に係る国内外の既往知見の概要と整理

1) 調査文献の概要

研究については、ベントナイト中の水の浸潤とガス移行挙動に関する実規模試験を含むものとし、海外の事例を主体として調査を行った。

以下に、対象とした文献を示す。

- a. ベントナイトや砂・ベントナイト混合物中の水の浸潤やガスの移行の把握を目的とした実規模試験の事例
 - ・ The Grimsel Test Site – Going into the fourth decade of applied RD&D, 14th International High-Level radioactive waste management conference, 2013, (GAST: 砂・ベントナイト混合物, FEBEX: ベントナイト).
 - ・ Large scale gas injection test (Lasgit) performed at the Aspo Hard Rock Laboratory, SKB Technical Report, TR-10-38, February 2010, (ベントナイト).
- b. 砂・ベントナイト混合物中の水の浸潤やガス移行の把握を目的とした要素試験およびモックアップ試験の事例
 - ・ FORGE Report D3.34, Final Laboratory Report, May 2013.
- c. ベントナイト、界面や粘土岩中の水の浸潤やガスの移行の把握を目的とした要素試験の事例
 - ・ FORGE Report D3.33, Key Gas Migration Processes in Compact Bentonite, 2014, (ベントナイト).
 - ・ FORGE Report D3.36, Results from interface laboratory experiments, June 2013, (界面).
 - ・ Cuss R, Harrington J, Giot R and Auvray, C, Experimental observations of mechanical dilation at the onset of gas flow in Callovo-Oxfordian claystone, Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement, 400, 507-519, May 2014, (粘土岩).

選定した文献と記載されている技術の概要、選定理由について整理した結果を表 4.3.3-1 に示す。

表 4.3.3-1 調査対象とする文献と選定理由

No.	文献名	技術名	技術概要	選定理由	備考
1	FORGE (Fate of Repository Gases) Final Laboratory Report, D3.34 - Final, 2013.5	FORGE (処分施設ガスの長期挙動) ファイナル実験レポート	スイスのL/ILW処分施設で行われた、人工バリアの長期的挙動を確認する目的で実施され。室内試験に提供する「境界条件の影響」を理解することを目的とした実験である。	本検討と同様のガス移行試験を実施した研究であり選定した。	
2	The Grimsel Test Site - Going into the fourth decade of applied RD&D, 2013	グリムゼル試験サイト - RD&Dの適用から40年経ってー	大規模(フルスケール)でのガス移行試験を実施したものであり、人工バリア定置、放射性核種輸送、トンネル効果、材料腐食に言及する技術レポートである。	大規模(フルスケール)でのガス移行試験を実施したものであり選定した。	14 th International High-Level radioactive waste management conference, 2013
3	Large scale gas injection test (Lasgit) performed at the Aspo Hard Rock Laboratory, 2010	Aspoハードロック研究所で行われた大規模なガス注入試験(Lasgit)	実験的な境界条件へのガス移行プロセスの感度と測定された反応の現実的なスケール依存が不確かなため、それらを確認する目的で、大規模なガス注入試験(Lasgit)を実施した実験である。	本検討と同様のガス移行試験を実施した研究である。スケール依存にも言及したものであり選定した。	SKB Technical Report, TR-10-38, 2月2010年
4	Results from interface laboratory experiments, FORGE Report D3.36, 2013	界面研究実験の結果	ガスの注入時の界面に注目し、ベントナイトブロック同士の界面の水理力学的特性、ベントナイトブロックとコンクリートさらに母岩(花崗岩)への力学的接点を確認した実験である。	本検討で予定されている今後の実験で使用するベントナイト材料や母岩の種類は文献とは異なる。しかし、実験における条件設定や界面に着目した実験結果への考え方は共通するものとし選定した。	総括版:「FORGE D.3.38 レポート」(P.346-349, 369-382)
5	Key Gas Migration Processes in Compact Bentonite, FORGE Report D3.33, 2014	コンパクトベントナイトにおける主要なガス移行プロセス	MX80ベントナイトを用いたガス移行試験の室内試験であり、水文条件、圧力条件、密度条件(界面における二種密度ベントナイト)を考慮し、ガス移行試験を実施した実験である。	本検討で行う実験に際し、条件(均一性・水文地質条件やスケール効果)の設定の参考資料になり得ること、また使用予定のベントナイト材料が類似していることから選定した。	総括版:「FORGE D.3.38 レポート」(P.233-255)
6	Experimental observations of mechanical dilation at the onset of gas flow in Callovo-Oxfordian claystone, 2014	Callovo-Oxfordian粘土岩内のガス流の発生時力学的な拡張の実験観察	母岩中のガスの移動は(i)間隙水としての拡散および/または溶解(ii)内部構造の元の間隙率での粘弾性毛細管(または二相流)流れ、(iii)局所的なダイラタント経路(微細亀裂)に沿った流れ、(iv)岩のガスフラクチャリングの主要な現象論的モデルで定義される。この研究では、ガスの移動を制御するメカニズムを調べるために、Callovo-Oxfordian粘土岩(COx)を使用し特殊三軸セルを用いたステップ実験である。	TRU処分場の母岩として想定されているうちの一つである堆積岩と類似した粘土岩を用いた三軸セル内ガス移行試験が行われているため選定対象とした。	Cuss R, Harrington J, Giot R and Auvray, C, 2014. Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement, 400, 507-519

2) 調査結果のまとめ

a. 試験の一般性

- ・ 試験を行う際には、同一の要素試験、モックアップ試験、実規模試験などにあたり、同じ種類の材料を使用することが重要である。
- ・ 実規模試験で材料を配置する際には、実際の施工作业と同様の手順で行う必要がある。
- ・ モニタリングや測定機器は、校正を行い、予想される最大圧力と季節変化の下でも良好に機能する容量を確保する必要がある。

b. 試験の適用性

- ・ Febex 試験では、ベントナイトは完全飽和に至っていない。Lasgit 試験ではフィルタマットが使用され飽和を促進したが、それでも完全飽和に至っていない。これらは、試験結果にも影響を与えており、試験材料の準備には十分な時間をかけ、または飽和促進の一助を考慮する必要がある。
- ・ 計画されている TRU に使用するベントナイトは、Febex 試験、Lasgit 試験に用いた材料と比較として、飽和期間は長くとる必要がある。よって、試験計画の策定にあたっては、この点に留意した計画とする必要がある。

c. 留意点及び課題

- ・ 実験結果に影響を与えるため、要素試験やモックアップ試験で使われる材料（同じ種類の材料）及び試験条件（同じ種類の水を注入など）を実際のフィールド条件と同様に維持することが重要である。
- ・ モックアップや実規模試験は長期的な試験である。したがって、監視装置のそれに対応する適性を確認する必要がある。また、試験中に装置を変更する必要がある際に緊急対応についての計画も行っておく必要がある。
- ・ 試験中に温度変化の影響がある場合、試験そのものに問題が発生したのか、または監視装置の機能に起因する問題であるか、特定する必要がある。
- ・ ガス注入を開始する前に、試料が完全飽和条件に達した事を確認する必要がある。したがって、完全飽和を確実にするために、フィルタマットなど飽和促進材料などを検討・配置する必要がある。
- ・ 母岩として堆積岩が使用される場合、実験情報（軸方向応力、拘束圧等）や実験結果に影響を与える条件（試料調製法、試料のマイクロまたはマクロ亀裂、試料の初期状態等）は天然の岩盤であるため、選定には留意すべきである。
- ・ 調査手法の適用においては、個々の技術の有する課題の解決と適用性、データの精度の確認を適切に決定することが必要である。

d. まとめ

ガス移行プロセスは、実験における境界条件と測定されるスケールに依存する。（例えば要素試験と実規模試験の結果を比べ、定性的には一致するが、定量的には不一致であるこ

と)

したがって、このような点に留意して要素試験の解釈をするとともに、TRU 処分施設のガス移行の挙動特性を詳細に確認するために、実規模試験の実施も望まれる。

実規模試験では、材料の飽和条件が最も重要な課題となる。文献調査では、適用される飽和ステップを抽出することができている。しかし、使用する材料の種類が TRU と異なっているため、文献情報を適用する際には留意が必要である。また、試験期間については実規模試験と比較し、材料の飽和处理に最も時間が必要であることに十分考慮が必要となる。

(2) システム試験の概念検討

前項（「4.3.3 (1) システム試験に係る国内外の既往知見の概要と整理」）での検討において、既往のシステム試験の調査結果より、本検討で留意すべき点が以下のように抽出された。

- ・ 対象とする処分施設概念の構造や形状効果を考慮したガス移行試験計画の策定
- ・ 対象とするガス移行現象を捉えるためのモックアップ供試体の作製
- ・ 対象とするガス現象を捉えるために必要なモックアップ供試体内での計測機器の配置計画

ここでは上記の留意点を踏まえ、バリア材料界面も含めた人工バリア全体（複合構成材料中）のガス移行挙動の理解に必要不可欠である、実規模人工バリアの縮小模型を用いて行うガス移行挙動評価試験（複合システム試験）を実現するために必要な項目のうち、以下についての検討を実施した。

- ・ 実現可能な複合システム試験の試験体概念の検討
- ・ 相似則（現象の加速）を考慮したシステム試験体の寸法に関する検討

1) 実現可能な複合システム試験の概念検討

本検討では、TRU 廃棄物グループ 2 の処分概念（ベントナイト系材料を用いた緩衝材敷設の処分概念）を対象として、人工バリア構成・形状を考慮したシステム試験体概念を構築した。

a. 評価対象とする処分概念

システム試験で評価対象とする処分概念は、ガス発生量が多くガス移行が処分システムの安全性に影響を及ぼす可能性が最も高いと思われる、第 2 次 TRU レポートで提示された「廃棄体 G 2」の処分概念のうち、「①廃棄体 G 2、円形処分坑道・軟岩系岩盤の概念」とした。

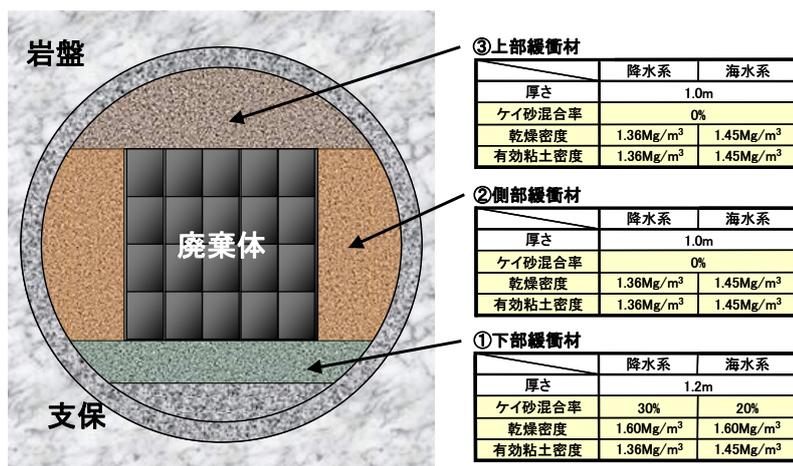


図 4.3.3-1 システム試験で対象とする処分概念

b. システム試験体の概念

評価対象とした処分概念におけるガス移行挙動の評価に際し、二次元での水・ガス移行場をモデル化したシステム試験を行うことを前提に、システム試験体の概念を検討した。

実処分施設で想定されるガス移行挙動評価に係わる主な想定事象としては、施設の再冠水（飽和）とその後に生じるガス発生と移行であるが、緩衝材の層厚と飽和期間の関係を考慮すると、緩衝材ベントナイトの最大厚を仮に約 180mm 程度とすれば、人工バリア概念をそのまま 1/15 程度に縮小した図 4.3.3-2 に示すような試験体の概念が構築できる。

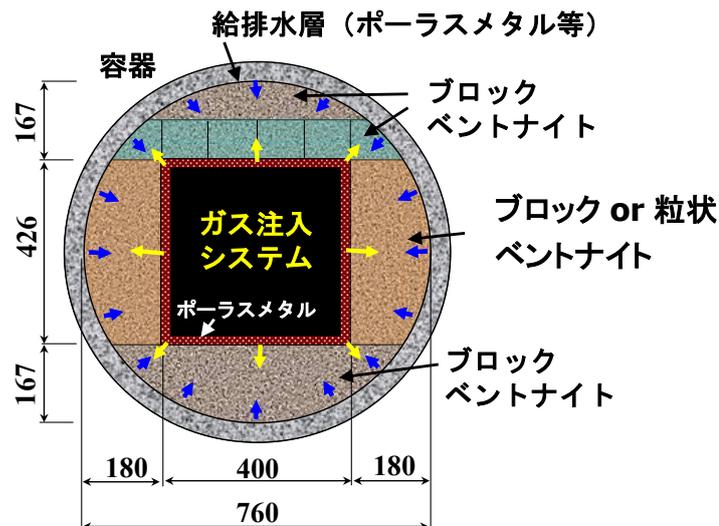


図 4.3.3-2 システム試験体の概念

c. 試験体設計で考慮すべき応力と圧力

実処分施設における想定事象を再現する際には、システム試験体においても最大で以下の圧力、応力が作用する（自重は無視できる）ことを考慮する必要がある。

- ・ 膨潤圧：0.6MPa（第2次 TRU レポート等より）
- ・ 背圧（処分施設に被圧地する下水を模擬する、試験体外側から内側に向けての加圧注水圧）：e.g. 0.3MPa
- ・ ガス圧増分：1.5MPa（ガス侵入圧および第2次 TRU 二次レポート解析結果より）

従って、全応力は最大 2.4MPa、設計荷重として 3.2MPa（安全率 1.3）程度を考慮する必要がある。試験の実施に際しては、背圧側に例えば 0.4MPa の圧力弁を付けることになるため、この場合は試験容器に作用する応力は、間隙圧最大値が 0.4MPa、有効応力が 0.6MPa となり合計 1.0MPa 程度である。上記圧力下で水およびガス・タイトな装置を設計する必要がある。

d. 計測センサー設置および注入システムについて

(a) 基本的な考え方、留意点の整理

システム試験の実施に際しての計測センサー設置や注入システムについての基本的な考え方や留意点は、以下のように整理できる。

- ・ 飽和状況やガス移行経路がモニタリング可能な計測機器と配置（GMT 等参考）。
- ・ 飽和時に水みちにならない、ガス注入時にガスみちにならない配置と処置（GMT 等参考）。
- ・ 頑健性を担保するために、同じ計測項目に対して複数種類のセンサーを適切に配置すること。
- ・ 壊れた場合のバックアップを考慮。
- ・ 給排水システムおよびガス注入システムも正副の二重ラインとする。
- ・ 時間的要因、圧力的要因、環境要因などセンサーの動作の可否が不確実な場合は予備試験により確認する。
- ・ 計測項目は、湿度、水分量（飽和度）、サクション、間隙圧力、全応力、温度。
- ・ 上記の時間空間分布が評価できるように、また、計測器により挙動が変わらないよう、センサー選択と配置、配線計画を実施する。

(b) 計測センサーの配置案

システム試験で考慮すべき計測用センサーの配置案を検討した結果、図 4.3.3-3 の通りとなった。

設置すべきセンサーの種類としては以下の通りとした。

- ・ 土圧計
- ・ 間隙水圧計
- ・ 水分計
- ・ 温度計

センサーの設置場所は、センサー類やそのケーブル経路の漏気の可能性を考慮し、ベントナイト内には、設置しない配置案としている。図中で、ベントナイト内に記入しているセンサー類は、オプション的な側壁への埋設配置や、あるいは配管等を利用して漏気対策を講じた上での、ベントナイト中への埋設設置を想定したものである。

また破過時の場所の特定も考慮し、ベントナイトの外周、およびない夕のポーラスメタル等配置場所において、仕切り壁を設けその範囲を特定できる構造として検討した。

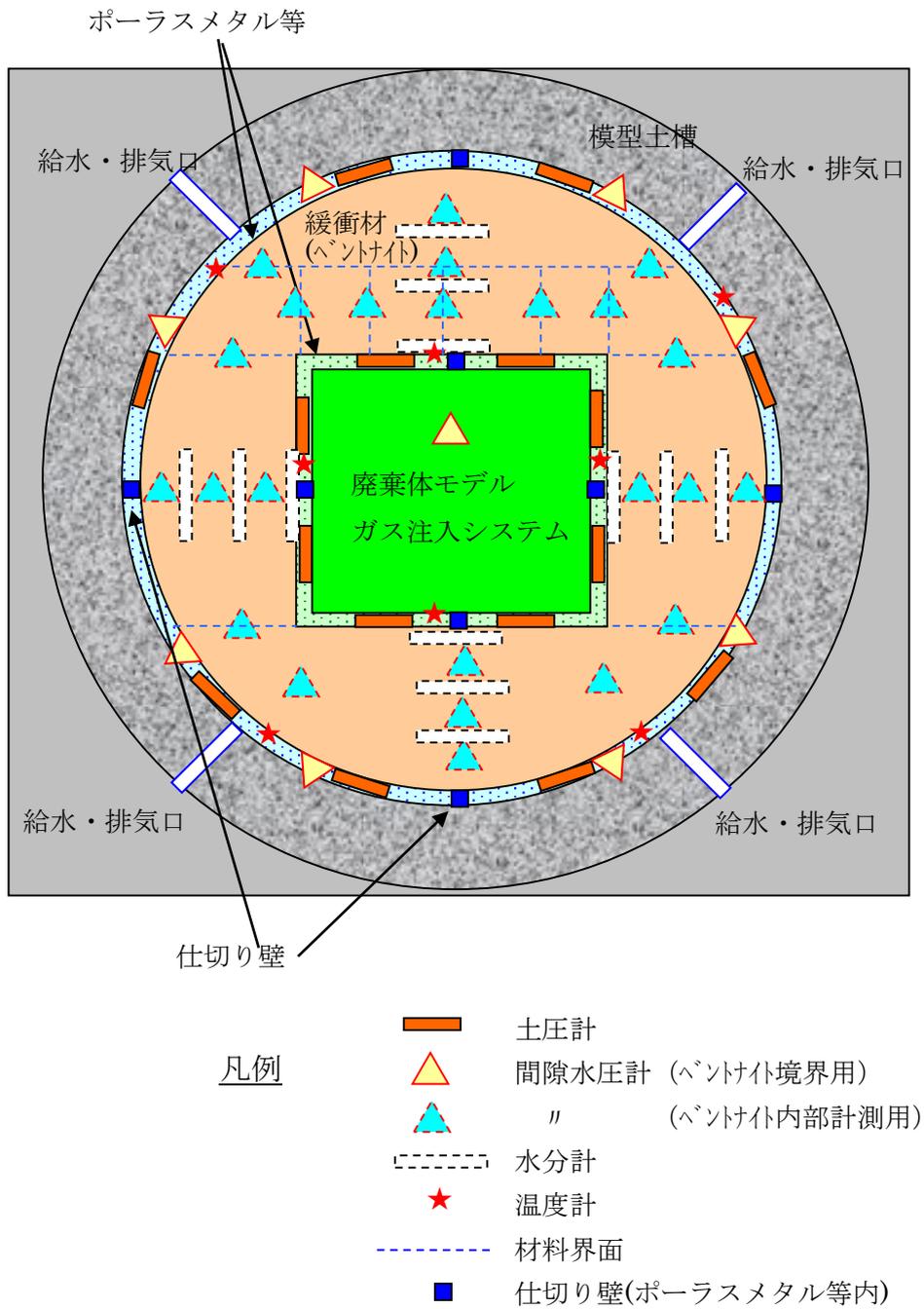


図 4.3.3-3 計測用センターの配置案

(c) センサーの候補と計測レンジ、精度、配置

表 4.3.3-2 に各計測項目に対するセンサーのタイプと仕様、設置位置と計測数に関する検討結果の一覧（案）を示す。

表 4.3.3-2 センサー設置仕様案

計測項目	センサー／タイプ	計測レンジ／精度	設置位置	計測数案
間隙圧	間隙圧計	0～3MPa／1kPa	側壁外部取り付け 緩衝材内部(側面)	外周 : 8 側壁 : 2 4 廃棄体 : 1
緩衝材の膨潤過程のモニター (全応力)	土圧計 ○ロードセル型 △ダイヤフラム型	0～4MPa／1kPa	緩衝材外周 廃棄体模型表面	外周 : 8 廃棄体 : 8
緩衝材の飽和過程、水分量変化のモニター	水分計 (TRD、テ ンシオメータ他、 地盤内)	飽和度で 60%～ 100%／1%		側壁 : 1 2 (各 2 種類)
温度	温度計 (熱伝対 他)	10℃～30℃／ 0.1℃	実験室 緩衝材 外周部 緩衝材 廃棄体側	外周 : 4 廃棄体 : 4
透気量のモニター	流量計 (低容量～大容量)		流入側／流出側 流出側は廃棄経路を パーティションで区切 り、経路ごとに計測	
破過の可視化 (予備実験の結果を踏まえて今後検討)	AE 法 (AE センサーシ ステム)		容器内面にセンサー 内臓設置	

2) 相似則（現象の加速）を考慮したシステム試験体の寸法に関する検討

ここでは、ガス移行試験の力学的相似則に関する既往の知見[17][18]を参考に、システム試験体で設定すべき適切な寸法について検討した。

a. 力学的相似則に基づく H^2 則の定義と考え方

ベントナイトのガス移行特性を調べるために必要なガス移行試験について、通常は小さな寸法の供試体で行われるため、試験結果を規模の大きい実物へ適切に反映させるには、ガス移行試験に関する力学的相似則を考慮した上でガス移行試験を実施する必要がある。

既往の知見[17][18]によれば、ガス移行試験の力学的相似則について、力学連成二相流モデルの考え方をを用いて以下のように説明している。

まず、図 4.3.3-4(a)に示すような実寸法の模型と図 4.3.3-4(b)に示す実寸法を $1/N$ に縮尺した寸法の模型を考える。実寸法の模型と縮尺寸法模型で①材質が等しく、②幾何学的相似点における初期の応力、水圧・ガス圧・飽和度・密度が等しく、境界条件も等しいとする。また、③自重は作用せず、④ベントナイトの応力-ひずみ関係にクリープの影響がなく、⑤材料の粒径の影響もなく、⑥ガス相と水相間のガスの移動もないとする。さらに、図 4.3.3-4(a)と図 4.3.3-4(b)に示すように模型の一部分にガス圧を加えた場合の挙動は、⑦力学連成気液二相流モデルで表せるとする。

図 4.3.3-5 は、力学連成気液二相流モデルによる計算の手順を簡略化（[19]より引用・加筆）して表したものである[17]。図 4.3.3-5 中の式(iv-a)と式(iv-b)で示すように、⑧液相ならびに気相に対してダルシー則が成立することを仮定している。

以上のような①～⑧の条件を前提に、縮尺寸法模型における寸法は、実寸法模型の $1/N$ であるため、縮尺寸法模型における図 4.3.3-5 中の m_w と m_g はいずれも実寸法模型の N^2 倍となるが、縮尺模型における時間の縮尺を $1/N^2$ 倍にすれば、実寸法模型と縮尺模型における m_w と m_g はいずれも等しくなるとしている。

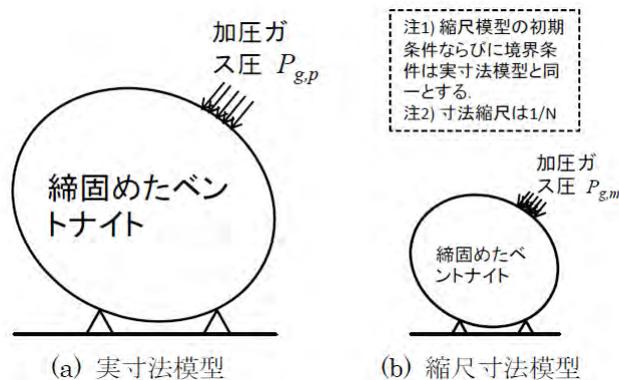


図 4.3.3-4 検討対象とした模型概念

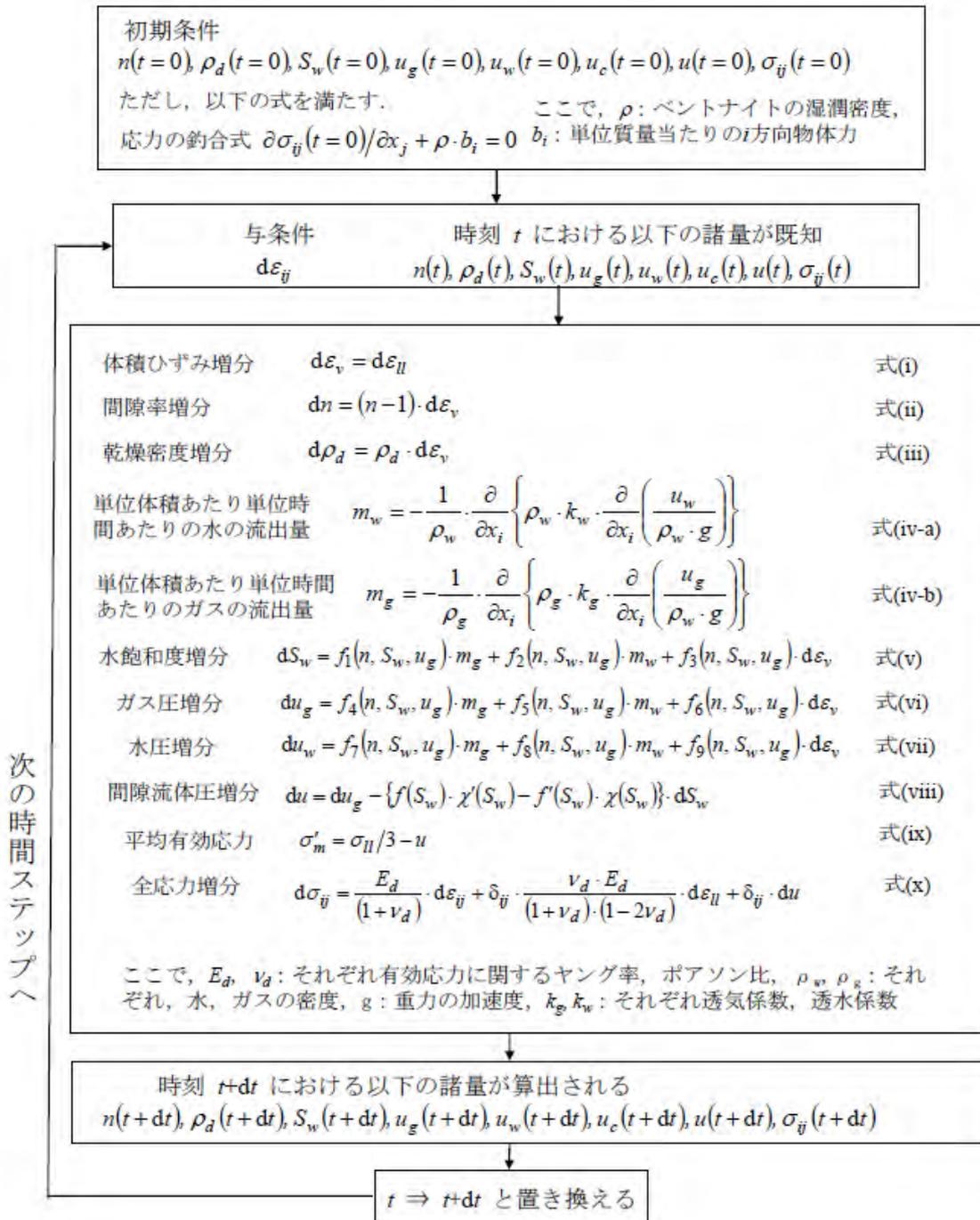


図 4.3.3-5 力学連成二相流モデルにおける計算フローの例

縮尺寸法モデルにおける寸法は、実寸法モデルの $1/N$ であるため、縮尺寸法モデルにおける図 4.3.3-5 中の m_w と m_g はいずれも実寸法モデルの N^2 倍となるが、縮尺モデルにおける時間の縮尺を $1/N^2$ 倍にすれば、実寸法モデルと縮尺モデルにおける m_w と m_g はいずれも等しくなるとしている。

図 4.3.3-4(a)および図 4.3.3-4(b)の境界に加圧されるガス圧 $P_{g,p}$ と $P_{g,m}$ は次式で表されるとする。

$$P_{g,p} = c_{p,p} \cdot t_p$$

$$P_{g,m} = c_{p,m} \cdot t_m$$

ここで、 $c_{p,p}$ と $c_{p,m}$: それぞれ実寸法模型と縮尺寸法模型におけるガス加圧速度、 t_p と t_m : それぞれ実寸法模型と縮尺寸法模型におけるガス加圧開始からの経過時間縮尺寸法模型における時間の縮尺を $1/N^2$ 倍とすれば、 $c_{p,p}$ と $c_{p,m}$ の間には次式が成立しなければならないとしている。

$$c_{p,m} = N^2 \cdot c_{p,p}$$

従って、微小な時間 dt_m における縮尺模型における加圧ガス圧の増分 $dP_{g,m}$ は、以下に示すように実物模型における加圧ガス圧の増分 $dP_{g,p}$ に等しくなるとしている。

$$dP_{g,m} = c_{p,m} \cdot dt_m = N^2 \cdot c_{p,p} \cdot dt_m = c_{p,p} \cdot dt_p = dP_{g,p}$$

図 4.3.3-4(a)および図 4.3.3-4(b)の幾何学的な相似点における時刻 t_p と t_m における間隙率・水圧・ガス圧・水飽和度が等しければ、変形性（弾性体であればヤング率ならびにポアソン比）も等しくなるので、境界に同じガス圧増分 $dP_g (=dP_{g,p}=dP_{g,m})$ を作用させた時のひずみ増分 $d\varepsilon_{ij}$ は等しい。

以上により、縮尺模型における時間の縮尺を $1/N^2$ 倍と設定することにより、初期条件と境界条件が同一である図 4.3.3-4(a)および図 4.3.3-4(b)の模型の幾何学的な相似点において生じるひずみ $d\varepsilon_{ij}$ ならびに m_w と m_g は等しくなるため、図 4.3.3-5 の計算の手順に従えば、実寸法模型と縮尺模型の幾何学的相似点におけるそれぞれ時刻 t_p と t_m における応力・ひずみ・水圧・ガス圧・飽和度・密度の増分ならびにその積分値はすべて等しくなる。この相似則を一次元圧密における相似則と同様に「 H^2 則」として定義している。

b. H^2 則の考え方にに基づくシステム試験体寸法の検討

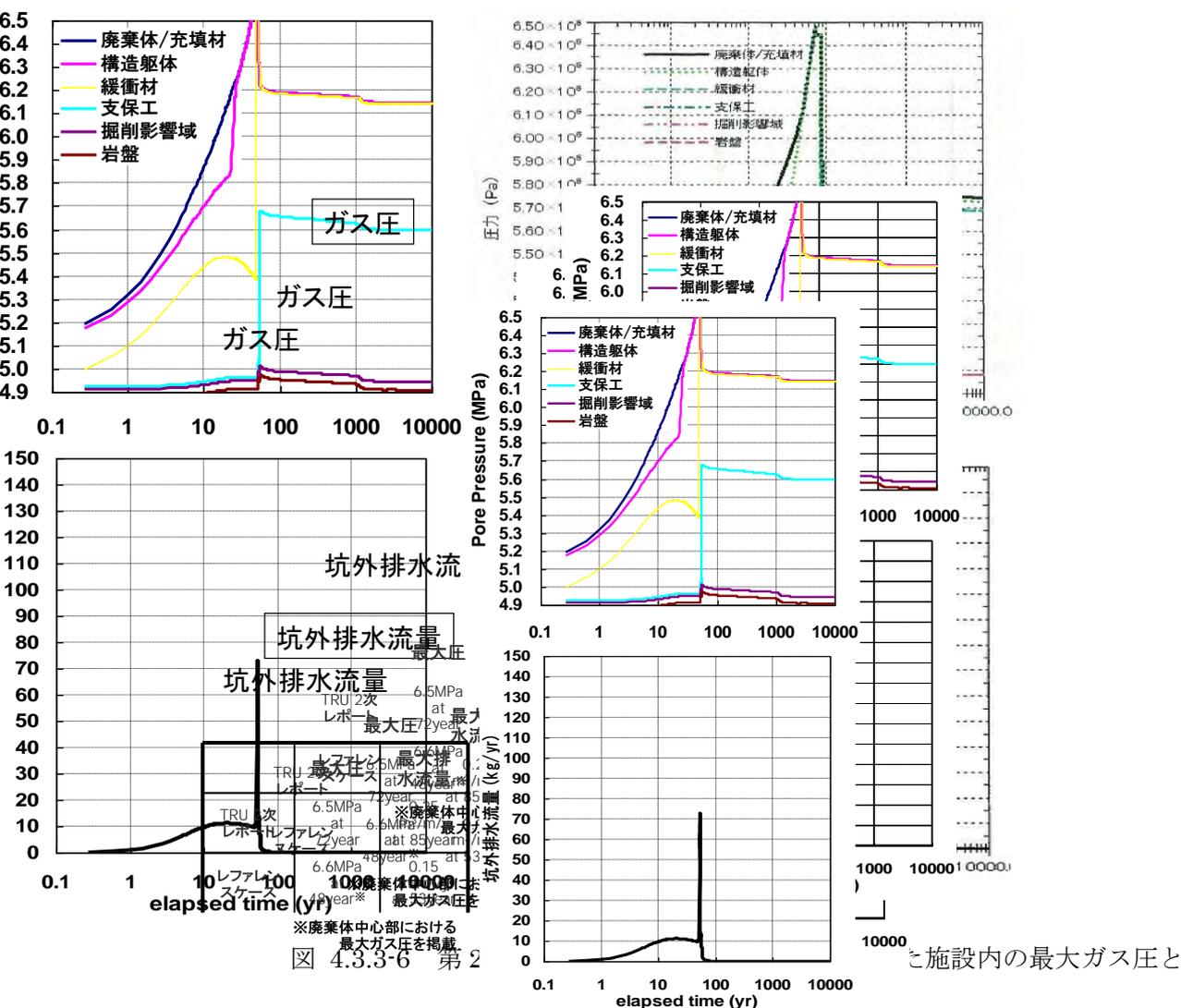
ここでは、 H^2 則の考え方に基づき、システム試験対で設定すべき試験体の寸法について検討した。

H^2 則の考え方によれば、縮尺模型による試験（ここではシステム試験に相当）時間の縮尺を実寸法模型による試験（ここでは実処分システムで生じ得る事象に相当）の $1/N^2$ 倍と設定することで、その寸法も $1/N$ 倍に設定できることになる。ただし、 H^2 則が適用可能な範囲として、ベントナイトの破過が生じる直前までとしている。これは前提条件のうち「⑤材料の粒径の影響が無いこと」と「⑧液相ならびに気相に対してダルシー則が成立すること」の2つが必要なため

である。

そこで、システム試験で設定すべき現実的な試験期間の指標として、第2次 TRU レポートにおいて想定された施設内の最大ガス圧と排水流量の経時変化（実処分施設の二次元断面ガス移行解析モデルでの検討結果）を考慮したところ、破過が生じると想定される（施設内のガス圧が最大となった後に急減する、あるいは施設内からの排水流量が最大値となって急減する）時間は、施設の飽和完了から約 72~85 年後であると想定されたが、仮に実施設で想定される挙動（破過に至るまでの挙動）を模擬したガス移行試験を、システム試験体を用いて 1 年間という現実的な（実現可能な）時間枠で完遂しようとするれば（現象を加速しようとするれば）、時間縮尺は 1/72~1/85 倍となる。

従って、システム試験体の寸法は約 1/8.5~1/9.2 倍（ $=1/\sqrt{72}\sim 1/\sqrt{85}$ 倍）となり、実施設で想定する寸法の約 1/10 倍程度の縮尺を設定すれば良いことになる。



以上により、例えば緩衝材模擬部の寸法は実施設での想定値である 1.0m の約 1/10 として、0.1m (=100 mm) 程度に設定することが現実的であると思われる。

結果として設定すべきシステム試験体の寸法を図 4.3.3-7 に示す。

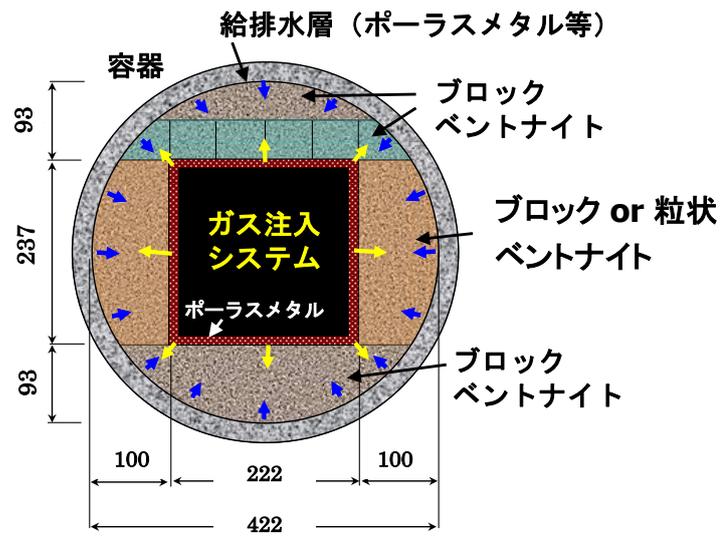


図 4.3.3-7 システム試験体の概念と設定すべき寸法

4.4 まとめ

4.4.1 ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充

(1) 圧縮ベントナイトの二相流特性に係るデータの拡充

- ・ これまでに一定の知見が得られている、大破過を伴うものとは異なるガス移行現象・挙動の把握を目的としたガス注入試験を実施した。
- ・ 具体的には、供試体中に大破過を伴わず気液二相流のみが生じることを想定した低注入圧条件（ベントナイト供試体の平衡膨潤圧以下のガス注入圧）によるガス注入試験を実施した。
- ・ なお、ガス注入試験は取得データの信頼性や再現性向上の観点にて、同一条件下の4つの供試体（同一ガス圧・同一材料）で同時進行する形式とした。
- ・ また、供試体中の二相流挙動の変遷（過渡的な挙動・状態）を把握に資するため、4つの供試体にて同時進行しているもののうち、1体を解体することによって供試体内の水分分布データを精査したところ、初期状態（飽和状態）と比較して水分が低下している箇所が確認された。この水分の低下は、上記で観測されたガス浸入（間隙水の押し出し）に依る現象を捉えている可能性が高いと示唆された。
- ・ 飽和のみの条件の供試体（No.4）の含水比分布は、上面すなわち排水側ほど含水比が小さくなる分布を示した。注水圧は、従来の試験条件と同じく膨潤圧以下の200kPaで設定し注水飽和を進めたが、注水に伴う浸透力の影響で供試体下流側が上流側より大きな圧密の影響をうけて、含水比が低下したものであり、これまでの試験結果と同様の結果が示唆された。
- ・ ガス注入を行った3供試体についても、ガス注入開始時の初期状態はほぼ同様の状況であったことが定量的に推察される。また含水比の分布状況では、供試体の中央部と外周部でその位置関係に関係なく、ほぼ同様の値が確認でき、平面的にはほぼ均質な条件でのガス移行モードに移っていることが確認された。

(2) ベントナイト・砂混合材料を用いた圧密変形特性データの取得

- ・ TRU 処分概念の人工バリアのうち、底部緩衝材材料として想定されている砂混合材料（ベントナイト・砂の乾燥重量比 7 : 3）の特性のうち、施設の再冠水（飽和・吸水）過程における膨潤挙動や、ガス移行（排水）過程における収縮挙動といった「膨潤変形特性」に関して、圧密変形特性のサクシオン（飽和度と相関）依存性（圧密沈下量～サクシオンの関係）をサクシオン制御式のおエドメータ試験により取得した。
- ・ 具体的には砂混合材料の供試体に対して所定のサクシオンを作用させた条件下で、圧密載荷、除荷試験を実施し、圧密変形特性（膨潤・収縮ひずみ）に関するデータを取得した。
- ・ 取得された圧密変形量～時間の関係を整理し、載荷ネット応力（圧密圧力）～間隙比の関係（ e -log P 曲線）を取得し、圧密変形特性のサクシオン依存性について考察を行った結果、サクシオンが大きい（飽和の程度が低い）ほど、圧縮指数（ λ ）、膨潤指数（ κ ）は小さくなる傾向が認められた。

- ・ 圧密指数、膨潤指数のサクシオン依存性について、BB モデルによるフィッティングを行った結果、以下のモデル化パラメータを得た。

表 4.4.1-1 BB モデルにおける不飽和特性パラメータ

パラメータ	λ_0	κ_0	α	β	γ
値	0.12	0.057	-1.2	2.1	0.48

- ・ また、膨潤指数の整合性を高めるために、圧縮指数同様の指数関数にてフィッティングした結果、膨潤指数についても良好に近似することができる結果が得られた。
- ・ なお、今回の実験を通じて取得したデータやパラメータは、現時点では限定的なものであり、材料特性の信頼性をより高め、精度の良い評価を実現するためには、さらなるデータの蓄積が必要である。また、今回の試験より取得したデータやパラメータを用いた、モデル化手法の検証についても実施していく必要がある。

(3) ベントナイト系人工バリアの材料間界面を模擬したガス移行試験

- ・ 界面を模擬するため、直径 6.0 cm の中央部で幅 0.1 cm の隙間を設けた供試体を作成し、注水飽和後ガス注入試験を実施した。
- ・ 界面が閉塞した部分が弱部となるかを検証する目的に対して、注水初期段階で隙間比較的均質に閉塞する方法を予備試験で確認した結果、隙間の初期体積相当の注水を行った場合により均質に閉塞する状況を確認し、この手順に沿って飽和過程にそって注水を進めた。
- ・ 界面を有する供試体は、界面を有しない供試体とほぼ同程度の透水性を示し、供試体の初期条件は供試体全体の透水性に及ぼす影響は小さいことが確認された。
- ・ 飽和終了後の供試体の 1 つを解体し、含水比分布の調査を行った結果、含水比は供試体下流側の方が小さくなる、界面に近いほど含水比は大きい傾向が確認された。また、界面の有無の影響は飽和後の供試体にも残っていることが確認された。
- ・ 界面を有する圧縮ベントナイト供試体に対して、注水飽和およびガス注入試験によってガス移行特性を検討した。その結果、界面の影響は飽和後の含水比分布・乾燥密度分布に影響するがその範囲は小さいこと、また破過圧は界面が無い供試体に比べ若干小さいものの同程度であること、そしてそのガス移行経路は供試体外周で発生が認められ界面部がガス移行経路にならなかったことが確認できた。今後は界面幅の影響など継続検討が必要と考えられる。

4.4.2 セメント系材料のガス移行挙動データの取得

- ・ 平成 25 年度での検討では、人工バリアのセメント系材料のうち充填材に求められる性能（強度や安定性）と同等な“プレパックドコンクリート用のモルタル”を「リファレンス材料」として透気・透水特性データの取得・整理することでモルタル材料の基本特性の把握を試みたが、その透過性の低さから評価が困難であることが分かっている。

- ・ この結果を踏まえ、平成 26 年度の検討では、二相流特性評価試験の手法の妥当性の確認やセメント系材料の二相流特性を評価するための方法論の構築に資するデータを取得することに主眼をおき、TRU 廃棄物処分場に用いると想定されている配合には拘らず、現実的な時間範囲で有効な結果を得るため、試験に適した高い透過性を有する設計にて供試体を作製することで対処し、モルタルの気液二相流特性を適切に評価した。
- ・ 27 年度は、26 年度の充填材のガス移行挙動との比較による充填材界面のガス移行挙動の評価であったが、配合が同一であってもバラつきの範囲で異なることが予測されたので、充填材自体のガス移行挙動も同時に行うものとして、配合もより透過性の高いものを得られるように変化させたケースを実施した。
- ・ 充填材界面の作成に当たっては、打継面には何の処理も行なわないものとした。供試体の目視からは明らかな境界があることがわかる状況であった。
- ・ 透水特性およびガス移行特性も界面の影響による明瞭な違いが見いだせなかった。すなわちバラつきの範囲で、境界の影響は小さいものと考えられる。

4.4.3 ガス移行挙動評価に係るシステム試験の実現に向けた検討

(1) システム試験に係る国内外の既往知見の整理

- ・ TRU 廃棄物処分システムを模擬したシステム試験の実現に資する情報を収集・整理するため、既往のガス移行試験事例（界面を模擬した試験および工学規模のシステム試験事例等）を調査した。
- ・ 既往のガス移行試験事例を精査することにより、TRU 廃棄物処分システムを模擬したシステム試験を検討するに際しての留意点等を抽出した。
- ・ 特に、ガス移行挙動評価の観点では、どの事例においても「飽和した材料」を対象として、詳細なガス移行メカニズムを把握するための検討を行っている点や着目点（解決すべきと思っているポイント）は、本検討のコンセプトと一致するものであった。
- ・ また、システム試験でのガス移行挙動を把握するためには、可能な限り「実施工条件」に近い手順で供試体を作製する必要があること、また、システム試験の規模によってはモニタリングが長期に及ぶことも想定し、使用する測定機器は校正が容易で、かつ想定される最大圧力に対して季節変動幅の影響を受けないレンジを持つものを採用すべきとされていた。
- ・ さらに、目的の現象（システムとしてのガス移行挙動）を捉えるため、供試体内の測定機器の数・設置方法・配置計画には十分留意する必要があるとされていたことから、この点に配慮しつつ、TRU 処分概念を対象としたシステム試験計画策定において考慮すべき重要なポイントを整理することが出来た。

(2) システム試験の概念検討

- ・ TRU 廃棄物処分施設内のガス移行挙動を把握するためのシステム試験に際し、TRU 廃棄物グループ 2 の処分概念（ベントナイト系材料を用いた緩衝材敷設の処分概念）の人工バリア構成・形状を考慮した、システム試験体概念や寸法設定方法等を検討・提示した。

- ・ また、着目すべき現象を把握するための各種センサー類の配置案を検討するとともに、具体的な仕様を検討・提示した。

参考文献

- [1] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2008).
- [2] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2009).
- [3] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 21 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2010).
- [4] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 22 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2011).
- [5] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2012).
- [6] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2013).
- [7] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 25 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発報告書（第 5 分冊）－ガス移行連成挙動評価手法の開発－（2014）.
- [8] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 26 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発報告書（第 5 分冊）－ガス移行連成挙動評価手法の開発－（2015）.
- [9] 高治一彦，鈴木英明：緩衝材の静的力学特性（研究報告），核燃料サイクル機構，JNC TN8400 99-041（1999）.
- [10] 山本修一他（2009）：飽和・不飽和ベントナイトの圧密特性とそのモデル化，土木学会第 64 回年次学術講演会，CS5-40.
- [11] 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とりまとめ－(2005).
- [12] 資源エネルギー庁 日本原子力研究開発機構：TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画(2006).
- [13] E. Alonso, A. Gens, A. Josa (1990) : A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique*, 40, No.3.
- [14] 山本，佐藤，西村(2014)：サクシオン制御変形試験に基づく圧縮ベントナイトの膨潤・収縮

- モデル, 土木学会第 69 回年次学術講演会, CS9-019, pp.37-38.
- [15] Jaky, J. (1944): Talajmechanika (Soil mechanics in Hungarian), J.Hungarian Arch. & Eng., Budapest, pp. 355-358.
- [16] 核燃料サイクル開発機構 (1999) : 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 pp.IV-98.
- [17] 田中 (2014) : 締固めたベントナイトのガス移行試験における相似則について, 土木学会第 69 回年次学術講演会, CS9-027, pp.53-54.
- [18] 電力中央研究所 (2014) : ベントナイトならびにベントナイト混合土のガス移行特性評価, 電力中央研究所報告, 総合報告 N23
- [19] 田中(2010) : 飽和した高密度ベントナイトの力学連成ガス移行解析手法の開発, 土木学会論文集 C, Vol.66, No.3, pp.530-549.

第5章 まとめ

5.1 平成 27 年度の実施成果のまとめ

本事業においては、TRU 放射性廃棄物処分場で想定されるような、廃棄物に含まれる金属の還元腐食その他による水素などのガス発生による施設への様々な影響（施設内でのガス圧上昇により破過が生じた場合、その時に緩衝材中に生じた破過経路が核種の移行経路となったり、ガス圧によって力学的な安定性が損なわれる等）を評価するために必要な「ガス移行連成挙動評価手法の開発」[1][2]に、これまでの検討成果[3][4][5][6][7][8]を踏まえて取り組んできている。

また、上記のような緩衝材中に破過が生じる現象も含め、人工バリアシステムに対するガスの影響を網羅的に把握するためには「どの時期に」・「どのような現象が生じて」・「EBS 全体の挙動にどのような影響をもたらすか」といった事象を確実に把握する必要がある。

そこで平成 26 年度[2]以降においては、「開発（整備）した“ガス移行連成挙動評価手法”による施設成立性の評価」を本事業の最終目標成果とし、平成 27 年度においても目標達成に向けた検討を継続した。

前フェーズ（平成 19-24 年度）の調査研究成果[3][4][5][6][7][8]より抽出され顕在化した重要度の高い課題があるが、まず、この課題解決のために策定された今フェーズ（平成 25-29 年度）の実施計画を基軸として（かつ平成 26 年度までの成果[2]を踏まえ）、①『ガス移行評価シナリオの拡張』によってガス移行シナリオの構築と根拠の拡充を図り、②『ガス移行挙動解析ツールの高度化』によって連成現象メカニズムのモデル化と解析的検討を進め、③『ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充およびセメント系材料のガス移行データ取得』によってガス移行連成現象のメカニズム（素過程）の解明を図った。さらに、図 5.1.1-1 に示すように、これら①～③の 3 つの検討成果を相互に連携／統合することで、網羅的な課題の解決に取り組んだ。

検討の結果、平成 27 年度においては、図 5.1.1-2 に示すような成果が得られた。

①『ガス移行評価シナリオの拡張』の検討により、ガス発生の影響を評価するための評価体系構築では、昨年度までの TRU 廃棄物の各グループを対象に作成してきたシナリオ整理表を出発点に、「場と現象の理解」、「シナリオ設定」、「評価ケース・モデル設定」、「パラメータ設定」の 4 項目の作業を設定し、その方法、手順、必要な情報を体系として取りまとめた。また、設定した評価体系の作業項目を対象に、作業の中での重要な意思決定事項（重要要素）を抽出するとともに、重要要素に係わる不確実性を抽出した。さらに、ガス発生の影響を評価における不確実性を削減するための技術課題を設定するとともに、設定した技術課題の対策案を策定することで、課題解決に向けての方向性を見出した。

②『ガス移行挙動解析ツールの高度化』の検討では、同じくガス移行シナリオ作成や評価手法の整備に必要な、ガス移行モデルの構築や解析手法の整備を進めた。その成果として、ガス移行シナリオで想定（特に基本シナリオで蓋然性の高い現象として想定）するような“ベントナイト緩衝材中やセメント系材料中において気液二相流が主体となる（特に緩衝材中で大破過等が生じ

ない) ガス移行挙動”を模擬した試験によって把握された現象 (③『ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充およびセメント系材料のガス移行データ取得』で取り纏め) が、これまでに整備した解析ツールと確認されたガス移行モデルによる再現解析によって表現可能であることを示した。さらには、再現解析で得られたモデルパラメータとこれまでに確認されたモデルパラメータとを比較検証したところ、両者のバラツキの幅に差は認められなかったことから、ガス移行モデルの信頼性や妥当性についても示すことができた。

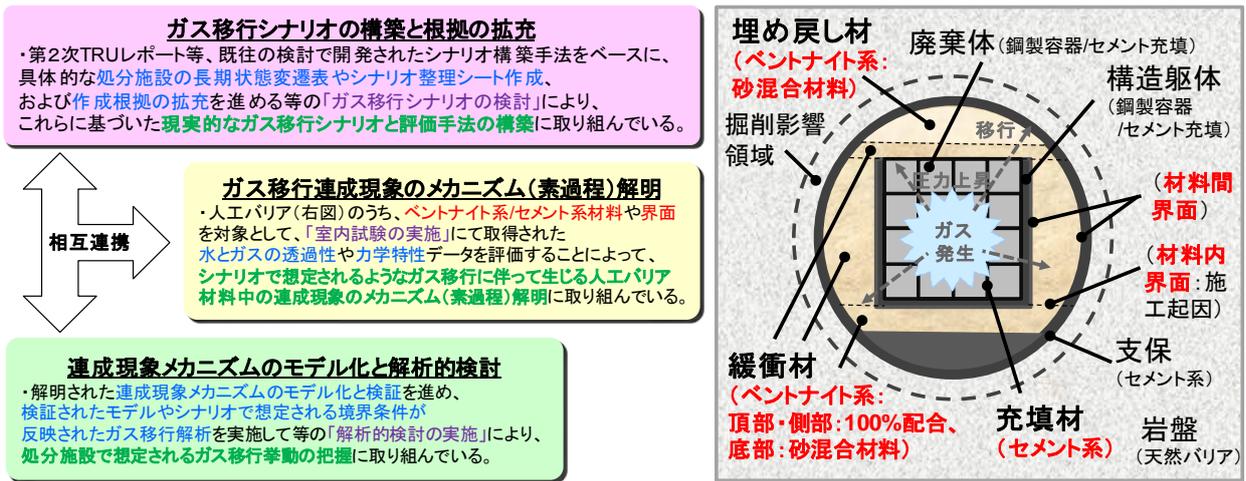


図 5.1.1-1 平成 26-27 年度に取り組んだ各検討項目の相関

凡例 ○: 達成、△: 不足していること(検討途中) ×: 未達成(未実施)

実施内容	最終目標	H19 (2007)	H20 (2008)	H21 (2009)	H22 (2010)	H23 (2011)	H24 (2012)	H25 (2013)	H26 (2014)	H27 (2015)	H28 (2016)	H29 (2017)
		廃棄物Gr.2の処分概念を対象						Gr.3	Gr.1&4	施設全体を対象		
施設全体のガス移行シナリオ作成・整備	ガス移行評価手法の整備	シナリオ整理シート構築 △	ガス移行シナリオ構築 △	シナリオに基づく解析評価 △	現実的なシナリオの構築 △	シナリオ整理シート再評価 ○	Gr.3のシナリオ構築 ○	Gr.1&4のシナリオ構築 ○	評価体系の整備 ○	施設全体 (EBS+NBS) のガス移行シナリオ構築と重要事象の抽出		
ガス移行シナリオ作成や評価手法の整備に必要なもの	エビデンスの拡充	×	×	×	根拠資料集の整備(既往の文献調査の反映) △	根拠資料集の拡充(最新知見の反映) △	根拠資料集の拡充(最新知見の反映) △	・ガス発生に係る最新知見の反映 △	・ガス移行挙動に係る最新知見の反映 △	・ガス移行モデルやパラメータに係る最新知見の反映	・根拠資料集への統合、整理	
	モデルの構築・解析手法の整備	(国内外の既往試験結果の再現解析による)		(H20-24年度の試験の再現解析による)			(H25-28年度の試験の予察解析による)					
	データの拡充	飽和ヘンケイトのガス移行モデルの構築 ○	不飽和ベントナイトのガス移行モデルの構築 ○	・室内試験成果の再現解析・評価によるガス移行モデルの検証 △	・確認されたモデルによるGr.2の処分概念を対象としたガス移行解析とガス移行挙動の把握 △	△	△	確認されたモデルによる室内試験の予察解析と評価 (モデルや解析手法の信頼度の評価) △	△	△	処分システム全体を対象としたガス移行解析とガス移行挙動の把握	
		・飽和および不飽和ベントナイトの大破過に至るまでのガス移行特性の把握(ガス注入圧の段階的な昇圧によるガス注入試験)	・ガス移行に伴う力学特性の把握(飽和・不飽和力学試験)	・ガス移行特性の寸法依存性の把握(高さの異なる供試体)				大破過に至らないEBS界面(施工/異種材間)のガス移行特性の把握 △	△	△	処分システム全体の特性検討	

EBS(人エバリアシステム)のガス移行シナリオは、ほぼ完成

施設全体を対象としたシナリオの構築と重要事象の抽出が課題

図 5.1.1-2 平成 27 年度までの検討で得られた成果と進捗状況の整理

5.2 今後の課題

これまでの成果は図 5.1.1-2 に示した通りであり、目標成果（ガス移行連成挙動評価手法の整備と施設成立性の評価、並びにガス発生影響の不確実性を考慮したセーフティケースの構築）の達成に向けた検討項目のうち、セーフティケース構築の指標となるガス移行評価シナリオ（以下、「シナリオ」）は概ね完成しつつある。

しかしながら、設定したシナリオについては多くの不確実性が含まれるため、その低減に資するべく、引き続き最新の知見等を取り入れながらシナリオの根拠の拡充を図っていく必要がある。

その不確実性の一例として、人工バリアのガス移行シナリオのうち、ガスの“移行挙動”（例えば、緩衝材中の主たるガス移行モードが「気液二相流」になるのか、粘土粒子のダイレタンシーを伴う「気みちを形成したガスの単相流」になるのか、また、移行モードの分岐点が生じるとすれば、どのような事象に基づくのか）に係る不確実性がある他、人工バリア内の「界面（同種／異種材料間）」が卓越したガス移行経路と成り得る可能性も懸念されている。したがって、界面部分の詳細なガス移行挙動の理解・把握も重要であり、その移行挙動のモデル化も含め、シナリオのエビデンスとして拡充していくことが今後の課題である。

このような取り組みを通して、シナリオから蓋然性の高い事象やガス発生影響評価上で重要な要素を抽出し、不確実性の低減を図りながらも評価対象とする事象や現象（FEP）の絞り込みを進めていく必要がある。

すなわち、重要な要素の一つである「ガス発生によって律速されるバリア性能の劣化事象」に係る FEP の抽出と整理を基軸としつつ、これ以外の事象（ガス発生以外で律速されるバリア性能の劣化事象）に係る FEP についても抽出・整理し、後者で前者の FEP が包含できる事象を明らかとすることで、評価対象とすべき事象や現象の絞り込みが可能となる。

一方で、絞り込んだ事象や現象に係るプロセス（ガスの“発生”と“移行”のメカニズム）のモデル化と検証・確証を引き続き進めていく必要があるとともに、確証された数学モデルを搭載した解析コードと TRU 処分システムの人工バリアを対象とした解析モデルにより、処分システムの時系列的な影響評価解析（ガス移行解析）を進め、これらも含めてシナリオのエビデンスとして拡充していくことが必要である。

このうち、評価モデルの精度に係わる課題の解決も必要となってくるが、その取り組みの一例として、上記で述べたような優先度・順位を設定しつつ評価対象とする事象（FEP）の絞り込みと併せて、図 5.2.1-1 に示すような検討も並行して行っていくことが有効である。

以上の検討による成果とも組み合わせ、本事業のこれまでの成果と対比・統合していくことで、シナリオの説明性の向上や目標成果でもある不確実性を考慮したセーフティケースとしての説明性向上（本事業の成果の補強）が期待できると思われる。

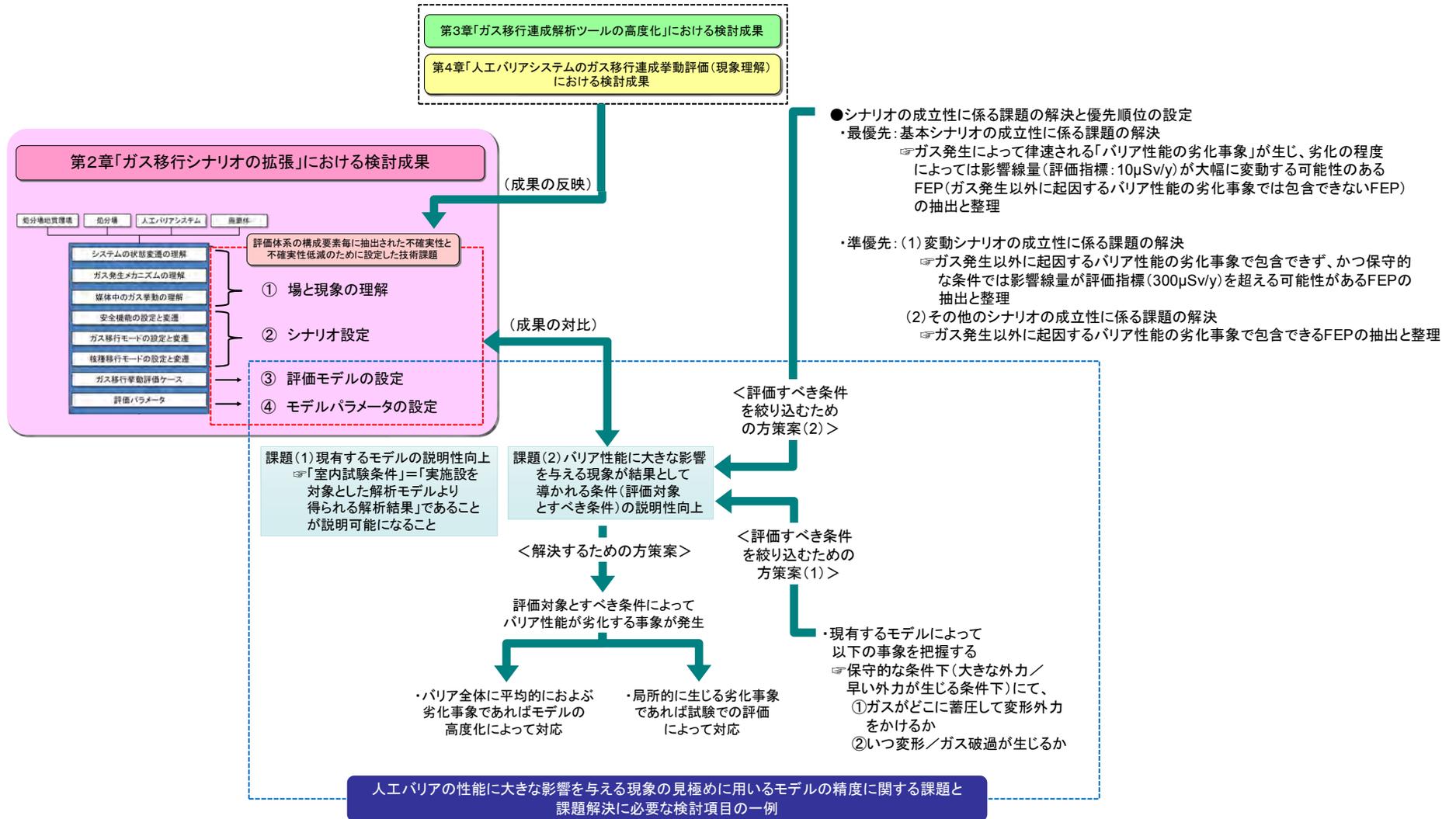


図 5.2.1-1 本事業における成果の補強に有効と思われる検討項目

参考文献

- [1] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 25 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発報告書（第 5 分冊）—ガス移行連成挙動評価手法の開発—（2014）
- [2] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 26 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発報告書（第 5 分冊）—ガス移行連成挙動評価手法の開発—（2015）
- [3] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書（第 2 分冊）—ガス移行挙動の評価—（2008）.
- [4] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書（第 2 分冊）—ガス移行挙動の評価—（2009）.
- [5] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 21 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書（第 2 分冊）—ガス移行挙動の評価—（2010）
- [6] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 22 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書（第 2 分冊）—ガス移行挙動の評価—（2011）
- [7] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書（第 2 分冊）—ガス移行挙動の評価—（2012）
- [8] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書（第 2 分冊）—ガス移行挙動の評価—（2013）