

平成 28 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 29 年 3 月

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

本報告書は、経済産業省からの委託研究として、公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した平成28年度地層処分技術調査等事業 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 28 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 28 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 28 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 28 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 28 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 28 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、平成 40 年代後半を目途に最終処分事業を開始す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 が必要な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、多様な廃棄体が存在し、HLW のようなオーバーパックの機能がない坑道集積型の処分場概念する TRU 廃棄物の処分では、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の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 28 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.....	1-4
1.3.1 ガス移行評価シナリオの拡張.....	1-10
(1) ガス影響で対象とする評価体系の整備.....	1-12
(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.....	1-14
1.3.2 ガス移行連成挙動解析ツールの高度化.....	1-21
(1) 最新のガス移行試験データによる確証計算.....	1-21
(2) 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.....	1-25
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.....	1-39
(1) 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.....	1-39
(2) ベントナイト系人工バリアの材料界面を模擬したガス移行試験.....	1-40
1.3.4 まとめ.....	1-42
1.4 実施概要.....	1-48
1.4.1 全体計画.....	1-48
1.4.2 平成 28 年度の実施概要.....	1-48
(1) ガス移行評価シナリオの拡張.....	1-48
(2) ガス移行連成挙動解析ツールの高度化.....	1-49
(3) 人工バリアシステムのガス移行連成挙動評価.....	1-50
参考文献.....	1-52
第 2 章 ガス移行評価シナリオの拡張.....	2-1
2.1 背景と目的.....	2-1
2.2 実施内容.....	2-1
2.2.1 ガス移行評価シナリオ（ガス影響評価体系）における不確実性低減のための 具体的対応策の検討.....	2-1
(1) ガス移行プロセスと核種移行プロセス複合現象のシナリオ上での対応策の検討.....	2-2
(2) 複合プロセスモデルを組み合わせた評価モデルの整備に向けての検討.....	2-27
2.2.2 ガス発生・移行の影響評価で対象とする事象や現象（FEP）の絞り込みに係る 検討.....	2-31
(1) ガス移行評価シナリオの成立性に係る FEP の抽出.....	2-32
(2) 抽出した FEP の整理に基づく評価対象とすべき事象や現象の絞り込みに係る	

検討.....	2-43
(3) 重要 FEP に関する現状での知見の整理と課題の取りまとめ.....	2-46
(4) ガス移行評価シナリオの不確実性低減に向けての方策の考察と取りまとめ.....	2-48
2.3 まとめと今後の展開.....	2-51
2.3.1 まとめ.....	2-51
2.3.2 今後の展開.....	2-52
参考文献.....	2-53
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.....	3-5
3.2.1 最新の室内ガス移行試験データによる確証計算（モデル化手法の高度化を 目的とした試験データの再現解析によるモデルパラメータの同定）.....	3-5
(1) ガス移行試験の概要.....	3-5
(2) 本確証計算に用いる解析コード.....	3-25
(3) 圧縮ベントナイトを用いたガス移行試験を対象とした確証計算.....	3-27
(4) ベントナイト系人工バリアの材料界面を模擬したガス移行試験を対象とした 確証計算.....	3-35
(5) セメント系材料を用いたガス移行試験を対象とした確証計算.....	3-42
3.2.2 確証データの登録およびデータの追加収集・整備.....	3-53
(1) データライブラリの概要.....	3-53
(2) 確証データの登録（データの拡充）.....	3-55
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.....	3-61
(1) 検討概要.....	3-61
(2) 対象システムの設定.....	3-61
(3) 解析コード.....	3-62
(4) 解析モデル.....	3-62
(5) 解析ケース.....	3-63
(6) 解析条件.....	3-63
(7) 出力諸量.....	3-73
(8) 解析結果.....	3-74
3.3 まとめ.....	3-79
3.3.1 最新の室内ガス移行試験データによる確証計算.....	3-79
3.3.2 確証データの登録およびデータの追加収集・整備.....	3-79
3.3.3 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.....	3-79
参考文献.....	3-81
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	4-2
4.2.1 人工バリアシステムのうち底部緩衝材（ベントナイト・砂混合材料）を対象 とした力学特性評価試験	4-2
(1) 実施項目	4-2
(2) 試験装置	4-2
(3) 供試体	4-4
(4) 試験方法・手順.....	4-4
(5) 実施結果と考察.....	4-4
4.2.2 人工バリアシステムのうち緩衝材（ベントナイト系材料）界面を模擬した ガス移行挙動評価試験	4-8
(1) 実施項目	4-8
(2) 試験装置	4-10
(3) 供試体および試験条件	4-11
(4) 試験方法・手順.....	4-12
(5) 実施結果と考察.....	4-14
4.2.3 人工バリアシステムのうち充填材（セメント系材料）界面を対象とした ガス移行特性評価試験	4-57
(1) 実施項目	4-57
(2) 供試体（および試験条件）	4-58
(3) 試験装置および試験方法・手順.....	4-59
(4) 実施結果と考察.....	4-61
4.2.4 ガス移行挙動評価に係わる複合システム試験の検討.....	4-93
(1) 実施項目	4-93
(2) 実施結果	4-93
4.3 まとめ.....	4-97
4.3.1 人工バリアシステムのうち底部緩衝材（ベントナイト・砂混合材料）を対象 とした力学特性評価試験.....	4-97
4.3.2 人工バリアシステムのうち緩衝材（ベントナイト系材料）界面を模擬した ガス移行挙動評価試験	4-97
4.3.3 人工バリアシステムのうち充填材（セメント系材料）界面を対象とした ガス移行特性評価試験	4-98

4.3.4 ガス移行挙動評価に係わる複合システム試験の検討.....	4-98
参考文献.....	4-99
第 5 章 まとめ	5-1
5.1 平成 28 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.....	5-4

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.....	1-1
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.....	1-6
図 1.3.1-2	ガス移行連成挙動評価手法の流れや展開	1-8
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	1-9
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	1-11
図 1.3.1-5	ガス発生の影響評価の流れ[13]	1-13
図 1.3.2-1	再現解析結果	1-22
図 1.3.2-2	既往のモデルパラメータと本項目で同定されたパラメータの比較	1-23
図 1.3.2-3	再現解析結果（その 1）	1-23
図 1.3.2-4	再現解析結果（その 2）	1-24
図 1.3.2-5	処分環境変化に伴うガス発生機構の概念[21]	1-25
図 1.3.2-6	モデル化の対象とする処分システム	1-26
図 1.3.2-7	対象とする解析モデル（全体）と境界条件.....	1-26
図 1.3.2-8	解析モデルの人工バリア周辺拡大図	1-27
図 1.3.2-9	ガス相圧力分布.....	1-28
図 1.3.2-10	水相飽和度分布.....	1-29
図 1.3.2-11	温度分布	1-30
図 1.3.2-12	水蒸気圧分布	1-31
図 1.3.2-13	Fe ²⁺ 濃度分布	1-32
図 1.3.2-14	H ₂ (aq)濃度分布.....	1-33
図 1.3.2-15	O ₂ (aq)濃度分布.....	1-34
図 1.3.2-16	Iron 沈殿量分布（正值が沈殿量、負値が溶解量）	1-35
図 1.3.2-17	Magnetite 沈殿量分布（正值が沈殿量、負値が溶解量）	1-36
図 1.3.2-18	H ₂ ガス発生量分布.....	1-37
図 1.3.2-19	H ₂ ガス発生量の時間変化(pHや反応速度定数の変化に伴う影響程度の比較)	1-38
図 1.3.3-1	各サクシオンにおけるベントナイト・砂混合材料の圧縮挙動と膨潤挙動（左図）、 および圧縮指数 λ・膨潤指数 κ のサクシオン依存性（右図）	1-40
図 1.3.3-2	人工バリアの現実的な施工手順（ブロック定置方式[1]）を考慮した上部緩衝材 の同一材料界面（緑色の太線）と界面模擬供試体とガス移行試験のイメージ.....	1-40
図 1.3.3-3	ガス注入（排水）過程における供試体からの排水挙動と有効応力の経時変化	1-41
図 1.3.4-1	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	1-44
図 1.3.4-2	検討実施項目（今フェーズ：平成 25-29 年度）の相関.....	1-45

図 1.3.4-3	これまでの検討で得られた成果と残された課題.....	1-46
図 1.3.4-4	これまでの検討で得られた成果と進捗状況の整理.....	1-47
図 1.4.1-1	「ガス移行連成挙動評価手法の開発」平成 28 年度 調査研究進捗表	1-48
図 2.2.1-1	検討項目と検討の進め方	2-3
図 2.2.1-2	ガス発生と挙動に関する要因分析.....	2-3
図 2.2.1-3	TRU 廃棄物の分類 (NUMO TR-14-03 [8])	2-4
図 2.2.1-4	プロセス・インフルエンス・ダイアグラムと FEP 関連図の整理.....	2-7
図 2.2.1-5	処分坑道の建設から廃棄体パッケージ設置までの媒体の変遷 PID.....	2-9
図 2.2.1-6	処分坑道の建設から廃棄体パッケージ設置までのガスと核種移行の統合 FEP 関連図.....	2-9
図 2.2.1-7	処分場閉鎖までの場と媒体の変遷 PID	2-10
図 2.2.1-8	処分場閉鎖段階におけるガスと核種移行の統合 FEP 関連図.....	2-11
図 2.2.1-9	閉鎖後ベントナイトバリアの飽和段階の場と媒体の変遷 PID.....	2-12
図 2.2.1-10	閉鎖からベントナイトバリア飽和までのガスと核種移動の統合 FEP 関連図....	2-12
図 2.2.1-11	バリア内飽和から廃棄体パッケージの損傷までの場と媒体変遷の PID.....	2-13
図 2.2.1-12	廃棄体パッケージの腐食が進行段階のガスと核種移行統合 FEP 関連図.....	2-14
図 2.2.1-13	放射性核種がバリア外に放出される段階の場と媒体変遷の PID	2-15
図 2.2.1-14	放射性核種がバリア外に放出される場合の統合 FEP 関連図.....	2-15
図 2.2.1-15	ベントナイトバリアが機能を維持している段階での場と媒体変遷の PID.....	2-16
図 2.2.1-16	ベントナイトバリアが機能維持し絵いる段階でのガスと核種移行の統合 FEP 関連図.....	2-17
図 2.2.1-17	ベントナイトバリア機能損傷後の場と媒体の変遷 PID	2-18
図 2.2.1-18	ベントナイトバリア機能損傷後のガスと核種移行の統合 FEP 関連図	2-18
図 2.2.1-19	TRU 廃棄物グループ 2 のガス発生速度 (第 2 次 TRU レポートに一部加筆) .	2-19
図 2.2.1-20	バリア内亀裂媒体中の二相流と拡散による核種移行イメージ	2-20
図 2.2.1-21	ベントナイトバリア中のガスと核種移行のイメージ (Nagra EN2002 に一部追記)	2-20
図 2.2.1-22	ガスと核種移行の複合プロセスにおける場と媒体.....	2-21
図 2.2.1-23	廃棄体パッケージ内でのガスと核種移行の複合プロセスの統合 FEP 関連図....	2-22
図 2.2.1-24	充填材中でのガスと核種移行の複合プロセスの統合 FEP 関連図.....	2-23
図 2.2.1-25	ベントナイトバリア中と界面におけるガスと核種移行の複合プロセスの統合 FEP 関連図	2-24
図 2.2.1-26	埋戻し材中のガスと核種移行の複合プロセスの統合 FEP 関連図.....	2-25
図 2.2.1-27	シナリオ設定における優先度の高い技術課題と検討方針 (平成 27 年度報告書[4])	2-25

図 2.2.1-28	廃棄体パッケージ、充填材中での複合プロセスに係る不確実性と対応策	2-26
図 2.2.1-29	ベントナイトバリアと埋戻し材中での複合プロセスに係る不確実性と対応策 ..	2-26
図 2.2.1-30	ガス移行挙動を評価する解析モデル例[4]	2-27
図 2.2.1-31	TRU 廃棄物を対象とした核種移行モデル例 (NUMO TR-14-03 [8])	2-27
図 2.2.1-32	複合プロセスの評価ケース例	2-28
図 2.2.1-33	現実複合プロセスの媒体と現状のプロセスモデル	2-28
図 2.2.1-34	異なる媒体中でのガスと核種移行の複合プロセスの連携	2-29
図 2.2.1-35	場と媒体の状態変遷とガス・核種移行プロセスを明示した PID	2-30
図 2.2.1-36	4つの複合プロセスを考慮したモデル化例	2-30
図 2.2.2-1	重要事象 (FEP) 抽出と評価の実施イメージ	2-32
図 2.2.2-2	検討項目と検討概要	2-33
図 2.2.2-3	基本シナリオにおける考慮する現象	2-34
図 2.2.2-4	基本シナリオにおける現象と統合 FEP 関連図	2-34
図 2.2.2-5	ガス挙動が支配的となる現象	2-35
図 2.2.2-6	サポートするエビデンスと関連する FEP 群	2-35
図 2.2.2-7	ガス挙動が引き起こす可能性が否定できない現象	2-36
図 2.2.2-8	サポートするエビデンスと関連する FEP 群	2-36
図 2.2.2-9	ガス挙動以外が引き起こすバリア機能損傷の現象	2-37
図 2.2.2-10	断層変位によるバリア機能損傷現象	2-37
図 2.2.2-11	熱水・強酸性地下水浸入によるバリア機能損傷現象	2-38
図 2.2.2-12	面内せん断破壊によるバリア機能損傷現象	2-38
図 2.2.2-13	バリア内部崩壊によるバリア機能損傷現象	2-39
図 2.2.2-14	支保工の劣化によるバリア機能損傷現象	2-39
図 2.2.2-15	作業項目と作業概要	2-40
図 2.2.2-16	ガス挙動が支配するシナリオ	2-40
図 2.2.2-17	ガス挙動が引き起こす可能性が否定できないシナリオ	2-41
図 2.2.2-18	断層変位シナリオ	2-41
図 2.2.2-19	熱水・強酸性地下水浸入シナリオ	2-42
図 2.2.2-20	面内せん断破壊シナリオ	2-42
図 2.2.2-21	バリア内外構造崩壊シナリオ	2-43
図 2.2.2-22	検討項目と検討手順	2-43
図 2.2.2-23	シナリオ成立上重要な FEP 設定手法	2-44
図 2.2.2-24	ガス挙動が支配的となるシナリオでの重要 FEP	2-44
図 2.2.2-25	ガス挙動が引き起こす可能性が否定できないシナリオの重要 FEP	2-45
図 2.2.2-26	ガス挙動以外の要因でバリア機能が劣化損傷するシナリオの重要 FEP	2-45
図 2.2.2-27	ガス挙動が支配的となるシナリオでの不確実性低減方策例	2-48

図 2.2.2-28	ガス挙動が引き起こす可能性を否定できないシナリオの課題と課題解決 方策例.....	2-49
図 2.2.2-29	ガス挙動以外の要因でバリア機能が劣化損傷するシナリオの不確実性と解決 方策例.....	2-49
図 3.1.1-1	典型的な TRU 廃棄物処分システムを対象とした解析格子モデルの例.....	3-2
図 3.1.1-2	既往検討（排水過程）で同定された相対浸透率曲線（左：水相、右：ガス相）	3-3
図 3.1.1-3	既往検討（排水過程）で同定された毛細管圧力曲線.....	3-4
図 3.1.1-4	WP 各検討項目間の相互関係と実施スケジュール.....	3-4
図 3.2.1-1	圧縮ベントナイト供試体による再冠水フェーズの試験結果.....	3-11
図 3.2.1-2	圧縮ベントナイト供試体によるガス注入フェーズの試験結果.....	3-12
図 3.2.1-3	圧縮ベントナイトによる解体試験の試験結果（1/2）.....	3-13
図 3.2.1-4	圧縮ベントナイトによる解体試験の試験結果（2/2）.....	3-14
図 3.2.1-5	ベントナイト界面を含む供試体による再冠水フェーズの試験結果.....	3-16
図 3.2.1-6	ベントナイト界面を含む供試体によるガス注入フェーズの試験結果（No.1）....	3-17
図 3.2.1-7	ベントナイト界面を含む供試体による解体試験の試験結果（1/2）.....	3-18
図 3.2.1-8	ベントナイト界面を含む供試体による解体試験の試験結果（2/2）.....	3-19
図 3.2.1-9	ガス移行試験装置概要図.....	3-20
図 3.2.1-10	モルタル供試体による変水位透水試験結果（累積排水量）.....	3-22
図 3.2.1-11	モルタル供試体によるガス注入試験結果（累積排水排気量）.....	3-23
図 3.2.1-12	モルタル供試体によるガス注入試験結果（みかけの累積排水量）.....	3-24
図 3.2.1-13	流路拡幅前後の間隙率と絶対浸透率の変化イメージ.....	3-26
図 3.2.1-14	解析モデルの基本諸元.....	3-27
図 3.2.1-15	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].....	3-29
図 3.2.1-16	GETFLOWS+UCODE_2014 による逆解析の流れ.....	3-30
図 3.2.1-17	累積注水量の再現結果（No.4）.....	3-31
図 3.2.1-18	累積注水量の再現結果（No.5）.....	3-32
図 3.2.1-19	同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）（No.4、No.5）.....	3-32
図 3.2.1-20	既往検討及び本検討で同定された浸潤過程における水相の相対浸透率.....	3-34
図 3.2.1-21	既往検討及び本検討で同定された浸潤過程における気相の相対浸透率.....	3-34
図 3.2.1-22	既往検討及び本検討で同定された浸潤過程における毛細管圧力.....	3-35
図 3.2.1-23	解析モデルの基本諸元.....	3-36
図 3.2.1-24	累積注水量の再現結果（再冠水フェーズ、No.1）.....	3-38
図 3.2.1-25	累積注水量の再現結果（再冠水フェーズ、No.2）.....	3-39
図 3.2.1-26	同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）（再冠水フェーズ、No.1、	

No.2)	3-39
図 3.2.1-27 累積排水量の再現結果（ガス注入フェーズ、No.1）	3-40
図 3.2.1-28 排気流量の再現結果（ガス注入フェーズ、No.1）	3-41
図 3.2.1-29 同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）（ガス注入フェーズ：No.1）	3-41
図 3.2.1-30 推定した真の累積排水量	3-43
図 3.2.1-31 推定した真の累積排気量	3-44
図 3.2.1-32 解析モデルの基本諸元	3-45
図 3.2.1-33 目的関数に用いる平滑化後の真の累積排水量、累積排気量	3-47
図 3.2.1-34 実測値から推定されるガス透気試験時の絶対浸透率（配合ケース 1、打継無）	3-49
図 3.2.1-35 累積排水量と累積排気量の再現結果	3-51
図 3.2.1-36 同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）	3-52
図 3.2.2-1 データライブラリの基本構成	3-53
図 3.2.2-2 データライブラリを用いた実行処理の流れ	3-53
図 3.2.3-1 モデル化の対象とする処分システム	3-61
図 3.2.3-2 解析モデル（左：全体図、右：人工バリア周辺拡大図）	3-62
図 3.2.3-3 相対浸透率と毛細管圧力曲線（廃棄体）（ケース 1）	3-68
図 3.2.3-4 相対浸透率と毛細管圧力曲線（廃棄体）（ケース 2、3）	3-68
図 3.2.3-5 相対浸透率と毛細管圧力曲線（構造躯体、支保工、インバート）	3-69
図 3.2.3-6 相対浸透率と毛細管圧力曲線（緩衝材）（ケース 1）	3-69
図 3.2.3-7 相対浸透率と毛細管圧力曲線（緩衝材）（ケース 2）	3-69
図 3.2.3-8 相対浸透率と毛細管圧力曲線（緩衝材）（ケース 3）	3-70
図 3.2.3-9 相対浸透率と毛細管圧力曲線（掘削影響域、岩盤）	3-70
図 3.2.3-10 初期・境界条件	3-71
図 3.2.3-11 ガス発生速度の時間変化（出典：安藤ら, 2005[12]）	3-72
図 3.2.3-12 評価点位置図	3-73
図 3.2.3-13 評価点におけるガス相圧力と坑道からの累積押し出し水量の比較	3-75
図 3.2.3-14 ガス相圧力の比較	3-76
図 3.2.3-15 水相飽和度の比較	3-77
図 3.2.3-16 流路拡幅箇所の比較	3-78
図 4.2.1-1 サクション制御可能な三軸試験装置	4-3
図 4.2.1-2 三軸試験より得られた最大軸差応力 (q_{ls}) と平均ネット応力 (p'') の関係	4-5
図 4.2.1-3 粘着力のサクション依存性	4-6
図 4.2.1-4 三軸試験結果：軸ひずみ～偏差応力関係	4-7

図 4.2.2-1	人工バリアにおける現実的な施工手順（ブロック定置方式）[7]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	4-9
図 4.2.2-2	ガス移行試験装置を用いた供試体（界面を模擬）へのガス注入／排出の イメージ	4-10
図 4.2.2-3	ガス移行挙動評価試験の流れ	4-12
図 4.2.2-4	供試体の作製手順	4-13
図 4.2.2-5	注水過程からガス移行過程への切り替え手順（案）	4-13
図 4.2.2-6	ガスの昇圧方法（大破過に至るまで段階的に昇圧）	4-14
図 4.2.2-7	1mm スリットの閉塞過程	4-18
図 4.2.2-8	1mm スリット 2分割注水 閉塞過程	4-22
図 4.2.2-9	1mm スリット 12ml 注水 閉鎖過程	4-26
図 4.2.2-10	圧縮整形応力	4-34
図 4.2.2-11	飽和過程の状況（供試体スリット 3mm No.1）	4-36
図 4.2.2-12	飽和過程の状況（供試体スリット 3mm No.2）	4-36
図 4.2.2-13	注水量と排水量の経時変化（スリット 3mm No.,1）	4-37
図 4.2.2-14	注水量と排水量の経時変化（スリット 3mm No.,2）	4-37
図 4.2.2-15	1層ごとの分割	4-38
図 4.2.2-16	含水比の深度分布	4-42
図 4.2.2-17	スリットからの離れと含水比の深度分布	4-42
図 4.2.2-18	スリット幅 1mm の既往の予備試験結果における含水比分布	4-42
図 4.2.2-19	ガスの昇圧方法（大破過に至るまで段階的に昇圧）	4-43
図 4.2.2-20	注水過程からガス移行過程への切り替え手順	4-43
図 4.2.2-21	破過時の有効ガス圧、ガス注入量の経時変化	4-45
図 4.2.2-22	破過時の注入ガス量、排出ガス量の経時変化	4-45
図 4.2.2-23	破過時の注入ガス量、排出ガス量の経時変化(拡大)	4-45
図 4.2.2-24	1層ごとの分割	4-46
図 4.2.2-25	含水比の深度分布	4-49
図 4.2.2-26	スリットからの離れと含水比の深度分布	4-49
図 4.2.2-27	スリット幅 1mm の既往の予備試験結果における含水比分布	4-49
図 4.2.2-28	圧縮整形応力と供試体変位量	4-52
図 4.2.2-29	飽和過程の状況（供試体スリット 1mm No.1）	4-54
図 4.2.2-30	飽和過程の状況（供試体スリット 1mm No.2）	4-54
図 4.2.2-31	注水量と排水量の経時変化（スリット 1mm No.1）	4-55
図 4.2.2-32	注水量と排水量の経時変化（スリット 1mm No.2）	4-56
図 4.2.3-1	人工バリアにおける現実的な施工手順（ブロック定置方式）[7]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	4-57

図 4.2.3-2	打継供試体の作成方法.....	4-58
図 4.2.3-3	ガス移行試験装置の概念図.....	4-59
図 4.2.3-4	試験の実施フロー.....	4-60
図 4.2.3-5	1次打設時 28日強度試験（混和剤有りケース応力～ひずみ関係）.....	4-67
図 4.2.3-6	2次打設時 28日強度試験（混和剤有りケース応力～ひずみ関係）.....	4-67
図 4.2.3-7	1次打設時 28日強度試験（混和剤無しケース応力～ひずみ関係）.....	4-68
図 4.2.3-8	2次打設時 28日強度試験（混和剤無しケース応力～ひずみ関係）.....	4-68
図 4.2.3-9	91日強度試験（1次打設時混和剤無しケース応力～ひずみ関係）.....	4-69
図 4.2.3-10	91日強度試験（2次打設時混和剤無しケース応力～ひずみ関係）.....	4-69
図 4.2.3-11	91日強度試験 1次打設時混和剤有りケース応力～ひずみ関係.....	4-70
図 4.2.3-12	91日強度試験 2次打設時混和剤有りケース応力～ひずみ関係.....	4-70
図 4.2.3-13	混和剤有りの打継供試体 28日養生透水試験結果.....	4-77
図 4.2.3-14	混和剤無しの打継供試体 28日養生透水試験結果.....	4-77
図 4.2.3-15	混和剤有りの打継供試体 No.3～No.5 透水試験結果.....	4-78
図 4.2.3-16	混和剤無しの打継供試体 No.3～No.5 透水試験結果.....	4-79
図 4.2.3-17	混和剤有り打継供試体 No.3 時間-排水量相関.....	4-82
図 4.2.3-18	混和剤有り打継供試体 No.3 時間-透気量相関.....	4-82
図 4.2.3-19	混和剤有り打継供試体 No.3 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）.....	4-82
図 4.2.3-20	混和剤有り打継供試体 No.4 時間-排水量相関.....	4-82
図 4.2.3-21	混和剤有り打継供試体 No.4 時間-透気量相関.....	4-82
図 4.2.3-22	混和剤有り打継供試体 No.4 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）.....	4-83
図 4.2.3-23	混和剤有り打継供試体 No.5 時間-排水量相関.....	4-83
図 4.2.3-24	混和剤有り打継供試体 No.5 時間-透気量相関.....	4-83
図 4.2.3-25	混和剤有り打継供試体 No.5 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）.....	4-83
図 4.2.3-26	混和剤有り打継無し供試体 時間-排水量相関.....	4-84
図 4.2.3-27	混和剤有り打継無し供試体 時間-透気量相関.....	4-84
図 4.2.3-28	混和剤有り打継無し供試体の透気量（補正值）の定常区間（黒線）.....	4-84
図 4.2.3-29	混和剤無し打継供試体 No.3 時間-排水量相関.....	4-85
図 4.2.3-30	混和剤無し打継供試体 No.3 時間-透気量相関.....	4-85
図 4.2.3-31	混和剤無し打継供試体 No.3 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）.....	4-85
図 4.2.3-32	混和剤無し打継供試体 No.4 時間-排水量相関.....	4-85
図 4.2.3-33	混和剤無し打継供試体 No.4 時間-透気量相関.....	4-85
図 4.2.3-34	混和剤無し打継供試体 No.4 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）.....	4-86
図 4.2.3-35	混和剤無し打継供試体 No.5 時間-排水量相関.....	4-86
図 4.2.3-36	混和剤無し打継供試体 No.5 時間-透気量相関.....	4-86
図 4.2.3-37	混和剤無し打継供試体 No.5 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）.....	4-86

図 4.2.3-38	混和剤無し打継無し供試体 時間-排水量相関	4-87
図 4.2.3-39	混和剤無し打継無し供試体 時間-透気量相関	4-87
図 4.2.3-40	混和剤無し打継無し供試体の透気量（補正值）の定常区間（黒線）	4-87
図 4.2.4-1	システム試験で対象とする処分概念（①廃棄体G 2、円形処分坑道・軟岩系 岩盤の概念） [7].....	4-94
図 4.2.4-2	構築したシステム試験体の概念（緩衝材最大厚さの 1/10 程度の寸法・規模で 検討） [16]	4-94
図 5.1.1-1	平成 26-28 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 28 年度までの検討で得られた成果と進捗状況の整理	5-2

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	1-3
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	1-5
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	1-7
表 1.3.1-3	変化の各段階におけるガス挙動の不確実性	1-14
表 1.3.1-4	代表的な不確実性の伝播状況の分析	1-15
表 1.3.1-5	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までの整理（その1）	1-16
表 1.3.1-6	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までの整理（その2）	1-17
表 1.3.1-7	技術課題項目とそのレベル	1-18
表 1.3.1-8	1 技術課題と解決策の概要	1-20
表 1.3.2-1	既往の数理モデル（ vGモデル ）とパラメータ一覧[10]	1-22
表 1.3.2-2	同定された2相流パラメータ	1-22
表 2.2.1-1	TRU 廃棄体の処理仕様例（NUMO TR-14-03 [8]）	2-5
表 2.2.1-2	TRU 廃棄物グループ2の状態変遷表	2-8
表 2.2.2-1	成立性を評価する各シナリオの重要 FEP と現状の知見および課題の整理表	2-47
表 2.2.2-2	不確実性と具体的な解決策例	2-50
表 3.1.1-1	平成 25 年度の検討で設定した3つの Work Package と検討項目	3-4
表 3.2.1-1	平成 27 年度に実施された試験概要[4]	3-5
表 3.2.1-2	各試験フェーズにおける試験条件と実測データ	3-7
表 3.2.1-3	供試体の試験実施状況	3-8
表 3.2.1-4	注水速度から算定した絶対浸透率（圧縮ベントナイト）	3-9
表 3.2.1-5	注水速度から算定した絶対浸透率（圧縮ベントナイト界面）	3-15
表 3.2.1-6	各供試体の寸法、試験条件および実測データの整理	3-21
表 3.2.1-7	相対浸透率や毛細管圧力を表現する構成モデル	3-28
表 3.2.1-8	同定された2相流パラメータ（No.4、No.5）	3-32
表 3.2.1-9	既往検討及び本検討で同定された浸潤過程における2相流パラメータ	3-33
表 3.2.1-10	ガス注入フェーズで用いる相対浸透率を表現する構成モデル（ <i>van Genuchten</i> モデル）	3-37

表 3.2.1-11	同定された 2 相流パラメータ (再冠水フェーズ、No.1、No.2)	3-39
表 3.2.1-12	同定された 2 相流パラメータ (ガス注入フェーズ、No.1)	3-41
表 3.2.1-13	同定された空隙損傷モデルパラメータ (ガス注入フェーズ、No.1)	3-41
表 3.2.1-14	同定された 2 相流パラメータ	3-50
表 3.2.2-1	各モジュールの要求機能	3-54
表 3.2.2-2	開発環境	3-54
表 3.2.2-3	同定された基本物性一覧	3-56
表 3.2.2-4	同定された非線形物性一覧 (毛細管圧力)	3-57
表 3.2.2-5	同定された非線形物性一覧 (相対浸透率)	3-58
表 3.2.2-6	同定された非線形物性一覧 (空隙損傷モデルパラメータ)	3-59
表 3.2.2-7	相対浸透率を表現する構成モデル (1/2)	3-59
表 3.2.2-8	毛細管圧力を表現する構成モデル (2/2)	3-59
表 3.2.3-1	水理物性一覧 (ケース 1)	3-65
表 3.2.3-2	水理物性一覧 (ケース 2)	3-66
表 3.2.3-3	水理物性一覧 (ケース 3)	3-67
表 3.2.3-4	相対浸透率曲線を表現する構成モデル	3-68
表 3.2.3-5	毛細管圧力曲線を表現する構成モデル	3-68
表 3.2.3-6	空隙損傷モデルパラメータ (ケース 2、ケース 3)	3-70
表 4.2.1-1	三軸試験ケース	4-4
表 4.2.2-1	ガス移行試験の検討項目	4-8
表 4.2.2-2	界面を模擬したガス移行試験 (界面性状の影響評価試験) での検討項目	4-9
表 4.2.2-3	ガス移行試験装置の構成および試験の実施において必要とされる機能	4-10
表 4.2.2-4	供試体の諸元	4-11
表 4.2.2-5	供試体の試験条件と供試体数	4-11
表 4.2.2-6	実施概況	4-15
表 4.2.2-7	ベントナイト供試体の条件	4-16
表 4.2.2-8	予備試験(1)における供試体下面からの注水条件	4-17
表 4.2.2-9	予備試験(2)における供試体下面からの注水条件	4-22
表 4.2.2-10	予備試験(3)における供試体下面からの注水条件	4-26
表 4.2.2-11	スリット 3mm 供試体における供試体下面からの注水条件	4-29
表 4.2.2-12	ベントナイト供試体の条件	4-32
表 4.2.2-13	実施概況	4-35
表 4.2.2-14	スリット 3mm を有する供試体の膨潤圧	4-37
表 4.2.2-15	飽和後定常状態における注水量から求めた透水係数	4-38
表 4.2.2-16	供試体の試験一覧 (スリット 3mmNo.1)	4-38

表 4.2.2-17	供試体調査結果（分割層ごとの重量と高さ）（スリット 3mm No.1 供試体）	4-41
表 4.2.2-18	供試体含水比（各分割ブロックの含水比）（スリット 3mm No.1 供試体）	4-41
表 4.2.2-19	ガス注入工程	4-44
表 4.2.2-20	供試体の試験一覧（スリット 3mm No.1）	4-46
表 4.2.2-21	供試体含水比（各分割ブロックの含水比）（スリット 3mm No.2 供試体）	4-47
表 4.2.2-22	ベントナイト供試体の条件（スリット 1mm 供試体）	4-50
表 4.2.2-23	実施概況	4-53
表 4.2.2-24	スリット 1mm を有する供試体の膨潤圧	4-55
表 4.2.2-25	飽和後定常状態における注水量から求めた透水係数	4-56
表 4.2.3-1	界面を模擬したガス移行試験（界面性状の影響評価試験）での検討項目	4-58
表 4.2.3-2	供試体モルタルの配合	4-61
表 4.2.3-3	1次打設時 28日強度試験結果一覧（混和剤有りケース）	4-67
表 4.2.3-4	2次打設時 28日強度試験結果一覧（混和剤有りケース）	4-67
表 4.2.3-5	1次打設時 28日強度試験結果一覧（混和剤無し1次打設時ケース）	4-68
表 4.2.3-6	2次打設時 28日強度試験結果一覧	4-68
表 4.2.3-7	91日強度試験結果一覧（1次打設時混和剤無しケース）	4-69
表 4.2.3-8	91日強度試験結果一覧（2次打設時混和剤無しケース）	4-69
表 4.2.3-9	91日強度試験 1次打設時混和剤有りケース結果一覧	4-70
表 4.2.3-10	91日強度試験 2次打設時混和剤有りケース結果一覧	4-70
表 4.2.3-11	混和剤有りケースと混和剤無しケースの 28日および 91日強度	4-70
表 4.2.3-12	試験条件	4-71
表 4.2.3-13	材料作製および透水試験の実施状況	4-71
表 4.2.3-14	混和剤有り供試体の打継面の状況	4-73
表 4.2.3-15	混和剤無し供試体の打継面の状況	4-75
表 4.2.3-16	混和剤有りの打継供試体 28日養生透水試験結果	4-77
表 4.2.3-17	混和剤無しの打継供試体 28日養生透水試験結果	4-78
表 4.2.3-18	透水試験結果	4-79
表 4.2.3-19	モルタル供試体 寸法および透水試験前後の重量比較	4-80
表 4.2.3-20	ガス注入試験の実施状況	4-81
表 4.2.3-21	混和剤有り供試体の透気試験結果	4-84
表 4.2.3-22	混和剤無し供試体の透気試験結果	4-87
表 4.2.3-23	水中不分性離混和剤有りケース	4-88
表 4.2.3-24	水中不分性離混和剤無しケース	4-88
表 4.2.3-25	混和剤有供試体の透気試験結果	4-88
表 4.2.3-26	混和剤無し供試体の透気試験結果	4-89
表 4.2.3-27	混和剤有り供試体の透水・透気試験結果	4-89

表 4.2.3-28	混和剤有り供試体の透水・透気試験前後の重量計測結果	4-90
表 4.2.3-29	混和剤有り供試体の水飽和時および絶乾時間隙率	4-90
表 4.2.3-30	混和剤無し供試体の透水・透気試験結果	4-90
表 4.2.3-31	混和剤無し供試体の透水・透気試験前後の重量計測結果	4-91
表 4.2.3-32	混和剤無し供試体の水飽和時および絶乾時間隙率	4-91
表 4.2.4-1	概略工程案	4-96

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。

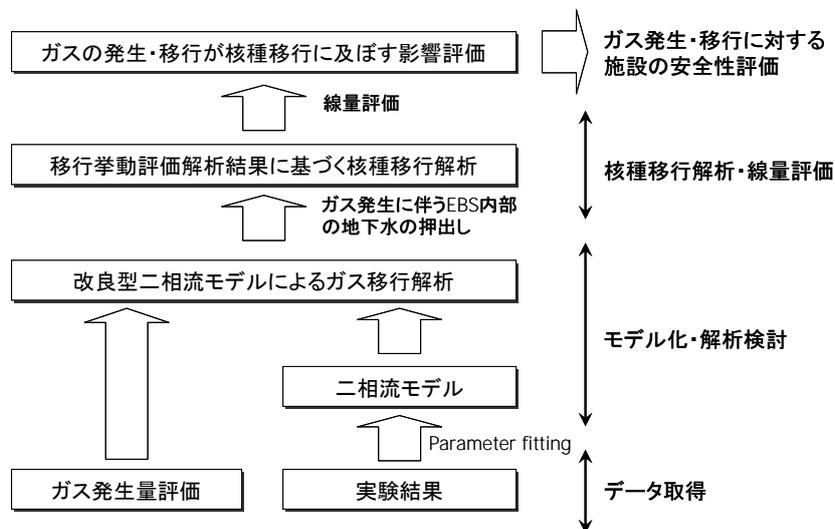


図 1.1.1-1 ガス移行挙動解析に基づくガス影響評価の流れ

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地下水シナリオに基づく保守的な仮定に基づいて設定されているものの、ガス移行評価に際してその保守性を適用する妥当性については不明確であり、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に、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。

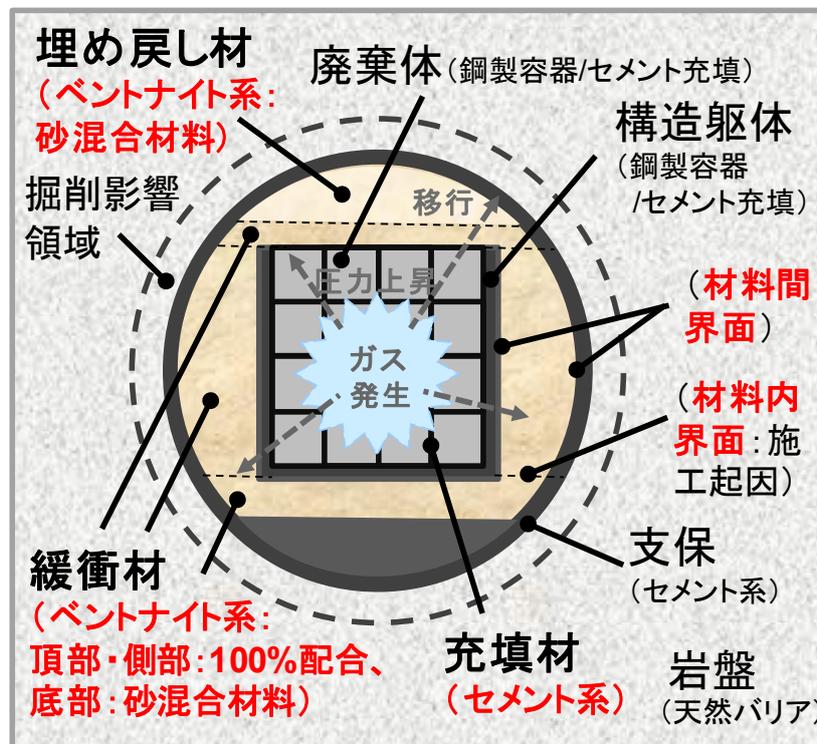


図 1.2.1-1 本調査研究において想定対象とする TRU 廃棄物処分の人工バリアの概念図

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/インパート	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
1.5	<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。

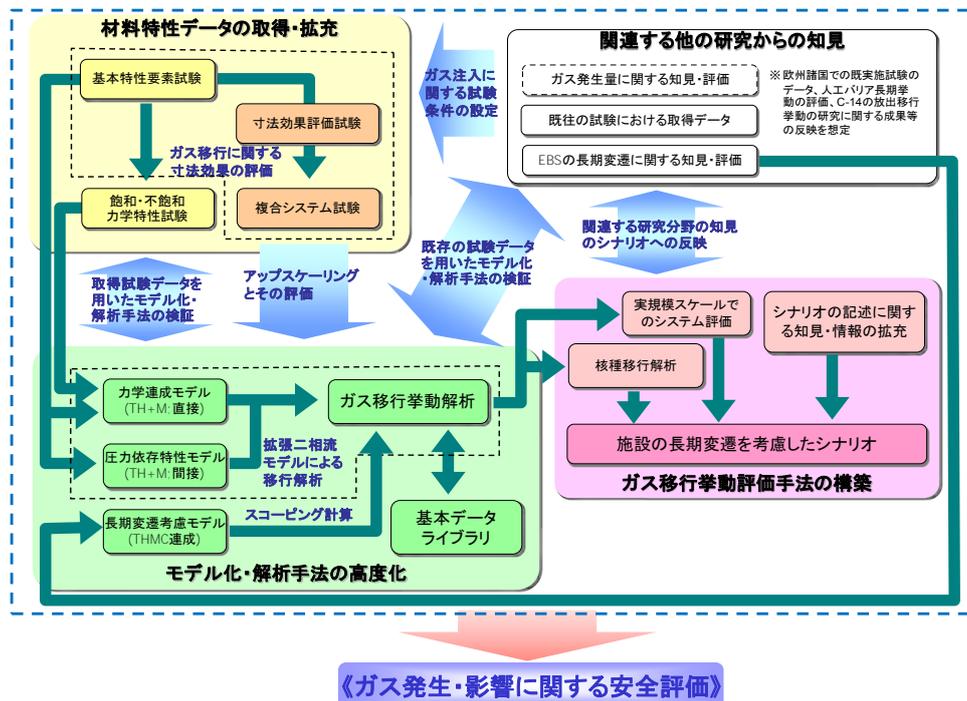


図 1.3.1-1 検討実施項目（前フェーズ：平成 19-24 年度）の相関

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（Engineered Barrier System）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（Gas Migration Test）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 ～1.3.3 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。

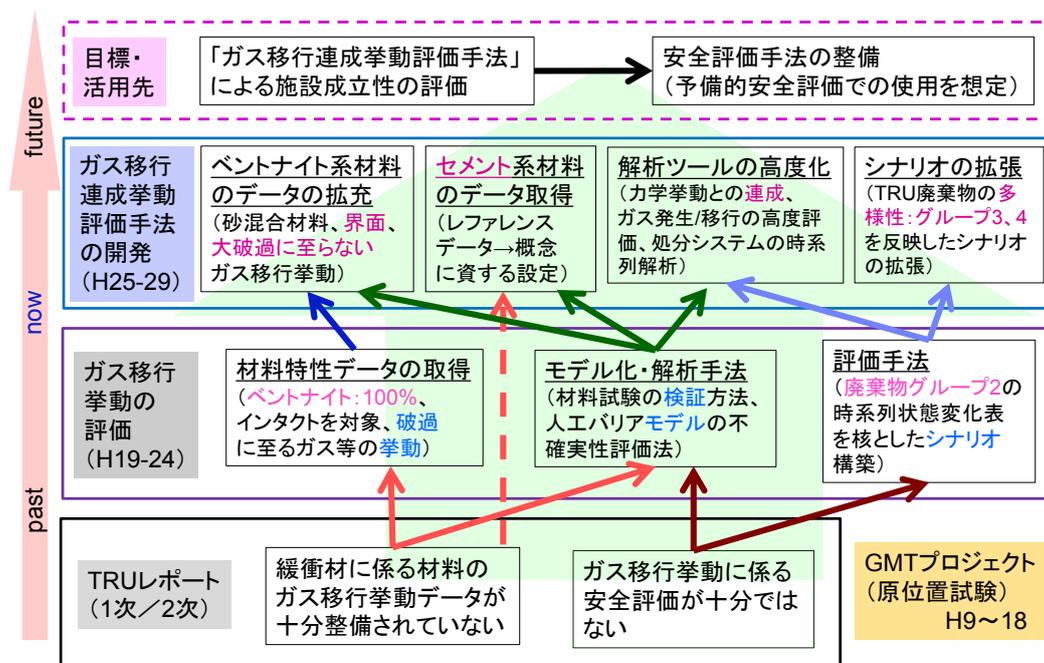


図 1.3.1-2 ガス移行連成挙動評価手法の流れや展開

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)	年度の実施計画策定 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 5年間取りまとめ	目標成果 開発した「ガス移行達成挙動評価手法」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 ・ガス移行達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 ・処分サイト環境 ↓ 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／移行モデルとの達成挙動評価
2. ガス移行評価シナリオの拡張	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	・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 ・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してのとりまとめ	
3. ガス移行達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 ・検証および試験の実施	・施設のガス発生や力学条件等のモデル化と検証 ・材料の変形構成モデル(THMおよびTHC連成)モデル化と検証			・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達成挙動評価	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 ・ガス移行試験の複合システム化に係る詳細検討	・せん断強度特性取得試験 ・ガス移行試験の複合システム化に係る詳細検討	・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	
4-1. 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							
4-2. 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。

平成 27 年度[13]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「ガス発生の影響を評価するための評価体系」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低減策（解決方針）を検討することで、課題解決に向けての方向性を見出した。一方で、このような取り組みを通して、不確実性の低減を図りながらも、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整理・抽出し、評価対象とする事象や現象（FEP）の絞り込みを進めていくことが課題となった。

平成 27 年度は、上記の課題解決のために必要な検討を行った。

具体的な実施内容を以降に示す。

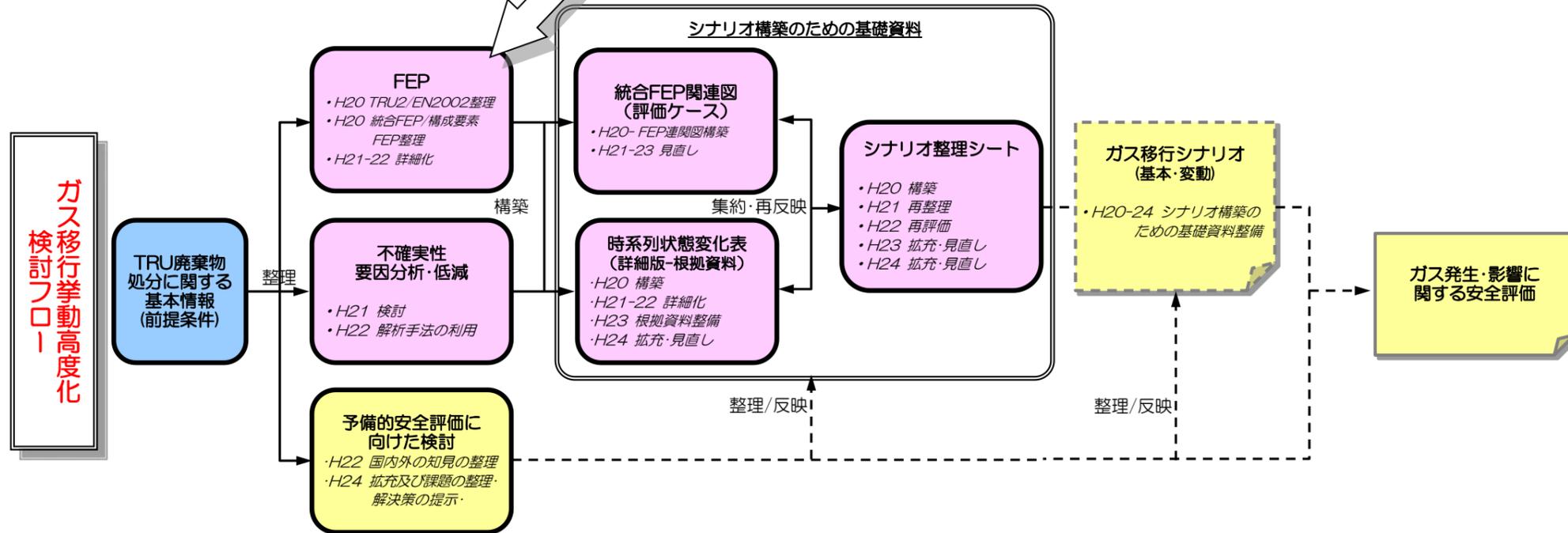
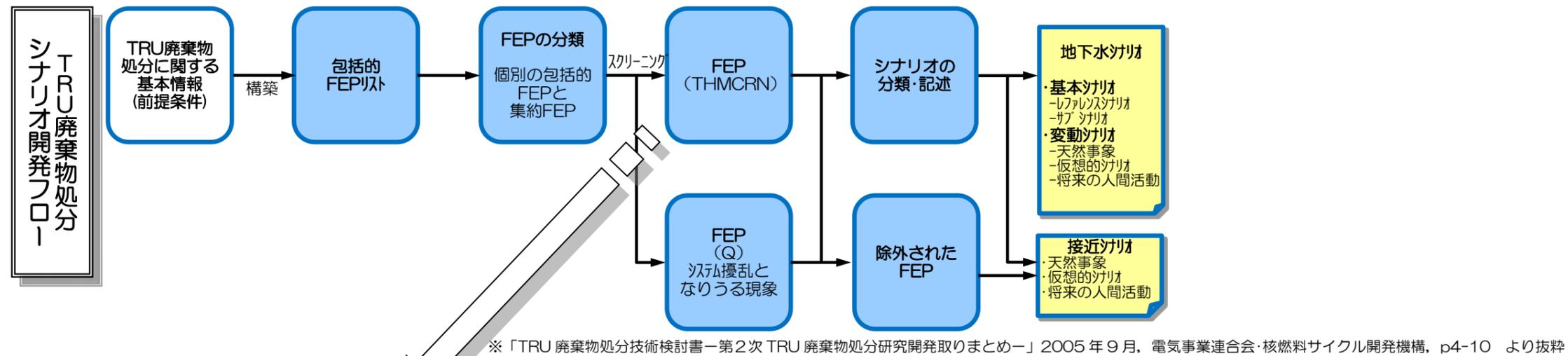
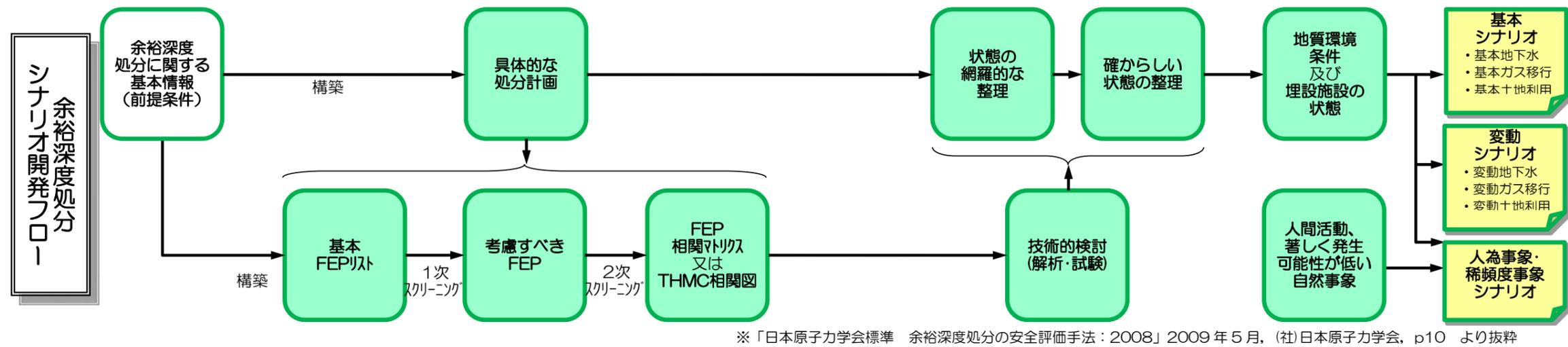


図 1.3.1-4 ガス移行挙動高度化検討フローと既存の処分シナリオ開発フロー

(1) ガス影響で対象と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。

- ・ガス影響で対象とする評価体系の準備
- ・評価体系中での不確実性の抽出

1) ガス影響で対象とする評価体系の準備

ガス影響における評価体系は、ガス発生 of 処分システム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した。

【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

上記の要件に基づくと、ガス影響評価の手順は、図 1.3.1-5 のように整理することができる。すなわち、評価の流れから抽出された作業要素は、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。

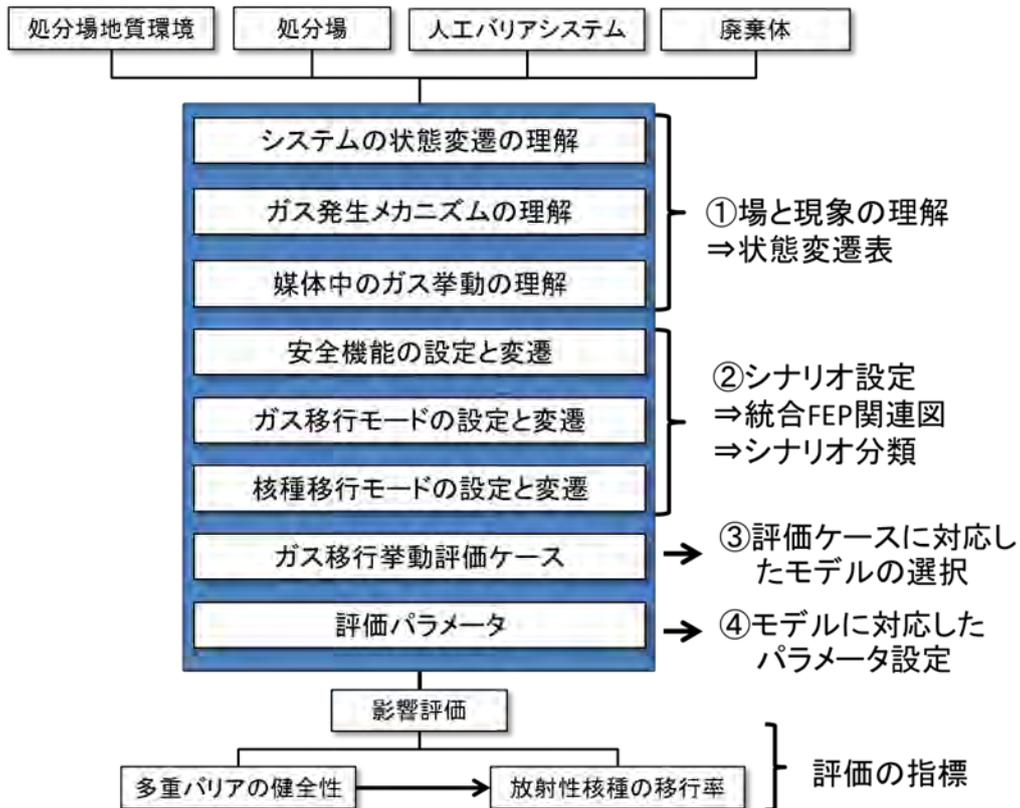


図 1.3.1-5 ガス発生の影響評価の流れ[13]

2) 評価体系の中での不確実性の抽出

整理した作業要素①～④に基づき、特に評価の時間枠（変化の段階）に着目して評価体系から抽出したガス挙動に関する不確実性を表 1.3.1-3 に示す。

以上の検討結果により、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明確となった。

表 1.3.1-3 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100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、二相流で移行	・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

(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

本検討項目では、前項で抽出した不確実性を整理し、これに対する技術課題を設定・取り纏めるとともに、その解決策を検討した。

1) 評価体系から抽出された不確実性の整理

評価体系における4つの作業要素（①場と現象の理解，②評価シナリオの設定，③評価ケースの設定と適用可能なモデルの選定，④パラメータ設定）に係る代表的な不確実性を表1.3.1-2に示すように5種類（ガス発生，媒体の状態変遷，異なる媒体中のガス挙動，処分立地環境・廃棄体仕様等，その他）に分類・整理した。その結果、「①場と現象の理解」における不確実性は、その後の「②シナリオ設定」における不確実性にも伝播することが分かったとともに、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ことが分かった。

表 1.3.1-4 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

評価体系の作業要素（①場と現象の理解，②評価シナリオの設定，③評価ケースの設定と適用可能なモデルの選定，④パラメータ設定）に対する不確実性抽出から技術課題設定までの一連の検討を行った結果を表 1.3.1-4 および表 1.3.1-6 に示した。表中で、優先度の高い技術課題は黄色を施している。

表 1.3.1-5 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"> 産業体の特性、形態、量、表面積、インペディ 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"> 産業体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"> ⇒ 産業体の性状等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"> ⇒ 対象となる産業体の種類や性状の確定 (Waste Stream の分析) ⇒ 人工バリアの状態を考慮した異なる産業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 	<ul style="list-style-type: none"> III III 	<ul style="list-style-type: none"> III III 	<ul style="list-style-type: none"> III III
	b. 産業体容器内のガス挙動	<ul style="list-style-type: none"> 産業体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"> 産業体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"> ⇒ 容器の仕様が決定されれば推定可能 ⇒ 充填材の仕様が決定されれば推定可能 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ 産業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) 	<ul style="list-style-type: none"> I (III) (グループ3, 4では重要課題となる) I 	<ul style="list-style-type: none"> I (III) (III) I 	<ul style="list-style-type: none"> I (III) (III) 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"> コンクリートの初期性能 (強度、密度、変形) 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 (産業体グループにより影響が異なる) 	<ul style="list-style-type: none"> I (III) (グループ3, 4では重要課題となる) 	<ul style="list-style-type: none"> I (III) (III) 	<ul style="list-style-type: none"> I (III) (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 ベントナイトの性能維持期間 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 	<ul style="list-style-type: none"> III III 	<ul style="list-style-type: none"> II II 	<ul style="list-style-type: none"> 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"> ⇒ 特定の岩盤と地質環境条件を対象とした影響程度の把握 	<ul style="list-style-type: none"> III 	<ul style="list-style-type: none"> III 	<ul style="list-style-type: none"> 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"> ⇒ 複雑な系であり、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) 	<ul style="list-style-type: none"> III 	<ul style="list-style-type: none"> III 	<ul style="list-style-type: none"> III
②シナリオ設定	a. 安全機能設定	<ul style="list-style-type: none"> (各産業体グループを対象) 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 設計上の性能維持期間 	<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) 	<ul style="list-style-type: none"> III III 	<ul style="list-style-type: none"> II II 	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<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 	<ul style="list-style-type: none"> III 	<ul style="list-style-type: none"> III 	<ul style="list-style-type: none"> 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"> 媒体の変遷予測の偶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 	<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偶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 	<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 	<ul style="list-style-type: none"> III 	<ul style="list-style-type: none"> II 	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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"> 異なる産業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 	<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"> ⇒ 産業体の種類、人工バリア構成、層状環境、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推定 ⇒ 産業体の種類、人工バリア構成、層状環境、ニアフィールドの状態変遷を考慮し 	<ul style="list-style-type: none"> III III 	<ul style="list-style-type: none"> II III 	<ul style="list-style-type: none"> II III

表 1.3.1-6 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までの整理 (その2)

		・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	・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	⇒ a ⇒ b	⇒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	・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	・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	・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時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示が不十分である	・不確実性の影響を考慮した複合系から単体系への評価モデルの構築(モデルチェンジの設定に開示)	III	III	III
	c. プロセスモデルの設定	・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	・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	⇒ a, b, c ⇒ a, b, c	⇒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な系に展開するための知見は不十分	・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(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. モデルチェーンの設定	・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	・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	⇒ a, b	⇒ミキシングセルとしての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)	・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
④i)パラメータの設定 (GETFLOWS)	a. 既存データの収集	・網羅性の確保	・網羅的に収集できているかの確認と品質の調査の確認	⇒ a	⇒関連するデータの収集作業に落ちがある可能性	・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 ・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	・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	⇒ a ⇒ b ⇒ b	⇒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不十分性に依存	・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 ⇒試験結果のパラッ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. 検証計算(ガス移行試験の再現解析)	・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) ・逆解析から同定された複数のパラメータからの選定	・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	⇒ a ⇒ b ⇒ a, b	⇒理解の不十分さ、知見の不十分さに依存する	⇒ベントナイトの要素試験で支配している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	・要素試験での材料特性・信頼性 ・要素試験の方法	・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	⇒材料の特性のパラッ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
④ii)パラメータの設定 (CODE_BRIGHT)	a. 既存データの収集	・対象とする試験条件、材料条件が一致しているか	・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)	⇒ a	⇒知見が不十分	⇒コードに対応した試験によるデータの蓄積(現状での規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	・設定する膨潤圧 ・初期膨潤比、初期サクシジョンの設定	・小室の膨潤評価式で用いるパラメータ ・膨潤計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	⇒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)	・試験データの解釈 ・初期設定値の決定 ・境界条件	・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	⇒ a	⇒システムとして改正する場合の知見と情報の不十分さ	⇒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検証	III	III	III
	d. 力学状態の確認	・膨潤率分布 ・塑性域の妥当性	・試験結果との整合性	⇒ a, b	⇒要素レベルの情報の不十分さ	⇒コードに用いられ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

a. 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検討を行い、対策案を提示した。

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段階で評価した。

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 1.3.1-7 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以下に分類されることが分かった。

表 1.3.1-7 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

b. 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付け可能なことが分かった（海外の参考文献[14][16][17][18]）。

□ 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。

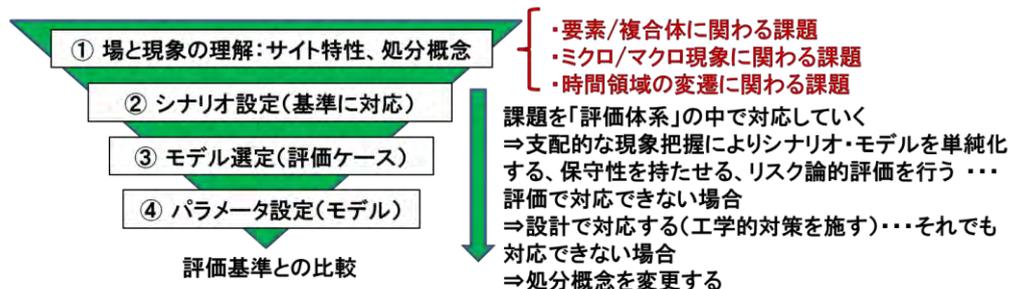
⇒問題点は指摘されているがまだ系統的な取り組みはなされていない。

⇒課題番号4、5、7に関係

c. 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】 モデル確証のための試験、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を検討することとした。

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を検討し、その概要を表 1.3.1-8 のように整理した。これらのうち、特に時間の経過に伴い増加する不確実性の低減については、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課題である。

表 1.3.1-8 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。
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・確認(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)

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証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（確証）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 27 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証計算として、平成 26 年度に実施したガス移行試験の実測データ[12]を対象に、逆解析手法によって再現解析を行うとともに、実現象（試験の実測データ）を良く表現可能なパラメータを同定し、解析ツールとしての高度化を図った。なお、同定したモデルパラメータは、既存の複数の同定パラメータ[5][6][7][8][9][10]のバラつきの範囲内に収まっており、これまで不明確であったパラメータの不確実性の幅の絞り込みが図られてきたことを示唆する成果が得られている。

また、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に資するべく実施した「不確実性を考慮したガス移行解析手法の構築」では、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。加えて、実施事例の少ない 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である TOUGHREACT を用い、想定される処分環境（高 pH 環境）における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。

具体的な実施内容を以下に示す。

(1) 最新のガス移行試験データによる確証計算

本項目では、これまでに整備・確証されたガス移行モデルや解析ツール（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、最新のガス移行試験で得られた実測データを対象とした再現解析等を実施し、解析ツールの高度化に資する検討を行った。

主要な検討項目と成果は以下の通りである。

1) 水・ガス 2 相流解析コード（GETFLOWS）による確証計算

これまでの検討で解析ツールとしての高度化を図ってきた水・ガス 2 相流解析コードである

GETFLOWS と既往のガス移行モデル（数理モデル）・パラメータ（表 1.3.2-1）を用い、水・ガス移行モデルの検証計算として、実現象（実測データ；ガス移行過程における供試体からの排水挙動）を対象とした再現解析を実施した。

表 1.3.2-1 既往の数理モデル（ vG モデル）とパラメータ一覧[10]

	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_w(-)$	$n_g(-)$	$P_0(MPa)$	$n_c(-)$	相対浸透率	毛細管圧力
1	0.3867	0.0	1.449	13.70	0.661	1.821	$k_{rp} = \sqrt{S_{pe}}(1 - (1 - S_{pe}^{1/m_p})^{m_p})^2$ $S_{pe} = \frac{S_p - S_{pr}}{1 - S_{wr} - S_{gr}}$ $m_p = 1 - 1/n_p$ $p = w, g \text{ (water, gas phase)}$	$P_c = P_0(S_{we}^{-1/m_c} - 1)^{1/n_c}$ $S_{we} = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr} - S_{gr}}$ $m_c = 1 - 1/n_c$
2	0.2000	0.0	2.884	2.451	0.336	3.709		
3	0.2000	0.0	2.884	2.451	0.333	3.709		
4	0.2280	0.0	2.455	2.474	0.324	3.297		
5	0.3639	0.0	2.011	2.953	0.291	2.290		

検討の結果、実測データのフィッティング（逆解析手法を用いた既往パラメータの幅の範囲内での微調整と同定）により、図 1.3.2-1 に示すように複数の試験データを良好に再現可能となったこと、並びに、これまで不明確であったパラメータの適用幅が既往パラメータの範囲内であることが確認できたことで（表 1.3.2-2 および図 1.3.2-2）、数理モデル・パラメータの信頼性を向上させた。

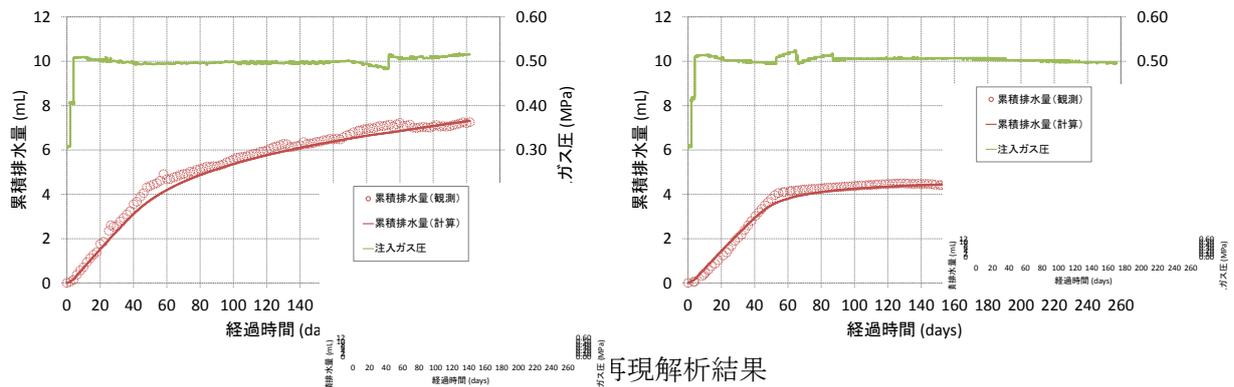


表 1.3.2-2 同定された2相流パラメータ

供試体	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_w(-)$	$n_g(-)$	$P_0(MPa)$	$n_c(-)$
No.1	0.360	0.0	2.01	2.95	0.20	2.29
No.2	0.387	0.0	1.45	13.7	0.56	1.82

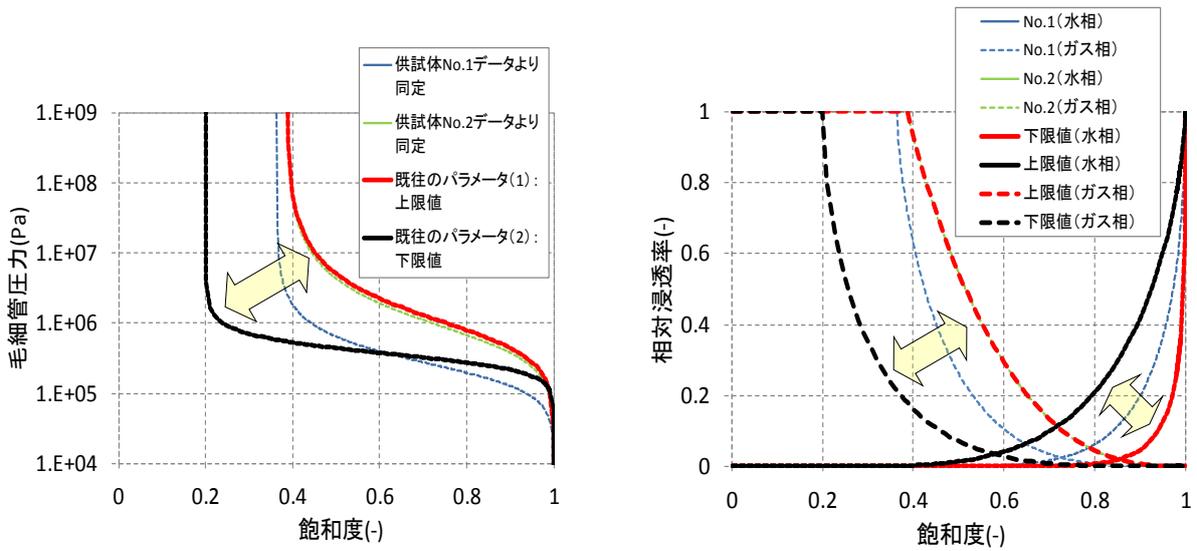


図 1.3.2-2 既往のモデルパラメータと本項目で同定されたパラメータの比較
 (同定されたパラメータは、それぞれ既往のパラメータ幅の中(黄色の「⇔印」の範囲内)に収まっている)

2) 力学連成 2 相流解析コード (Code_Bright) による検証計算

前述の GETFLOWS と並行し、これまでの検討で解析ツールとしての高度化を図ってきた力学連成 2 相流解析コードである Code_Bright と、前述の「1) 水・ガス 2 相流解析コード (GETFLOWS) による検証計算」で同定したパラメータ (表 1.3.2-1) を用い、力学連成ガス移行モデルの検証計算として、実現象 (実測データ ; ガス移行過程における供試体からの排水挙動) を対象とした再現解析を実施した。

検討の結果、図 1.3.2-3 および図 1.3.2-4 に示すように、複数個の試験データを良好に再現可能となったことで、力学連成モデルの信頼性も向上させることができた。

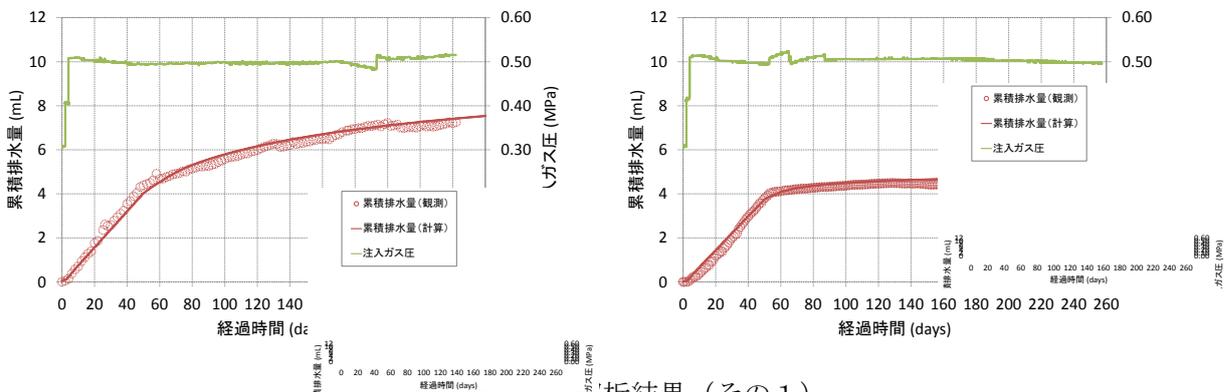
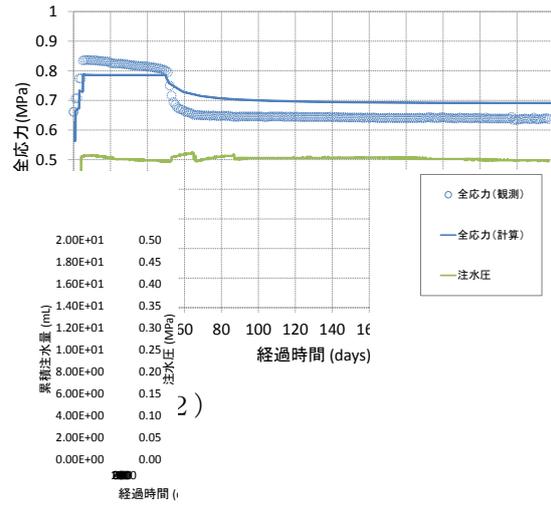
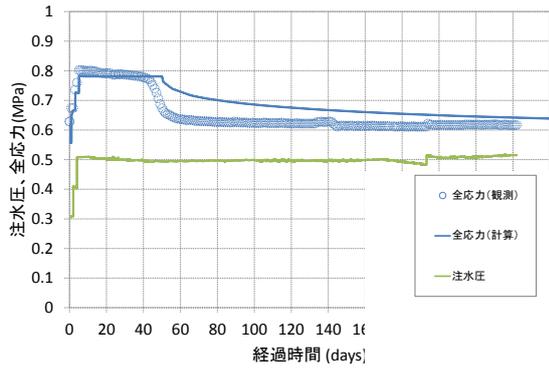


図 1.3.2-3 再現解析結果 (その 1)



(2) 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

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、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は重要な視点の 1 つである。

ところが、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のような THC 連成解析の実施例は少なく、ガス移行解析における不確実性の一つとなっている[1][3]。

ここでは、不確実性の低減を目標として、ガス発生速度の定量化やモデリングに資する、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[23]を用い、THC 連成解析を実施した。

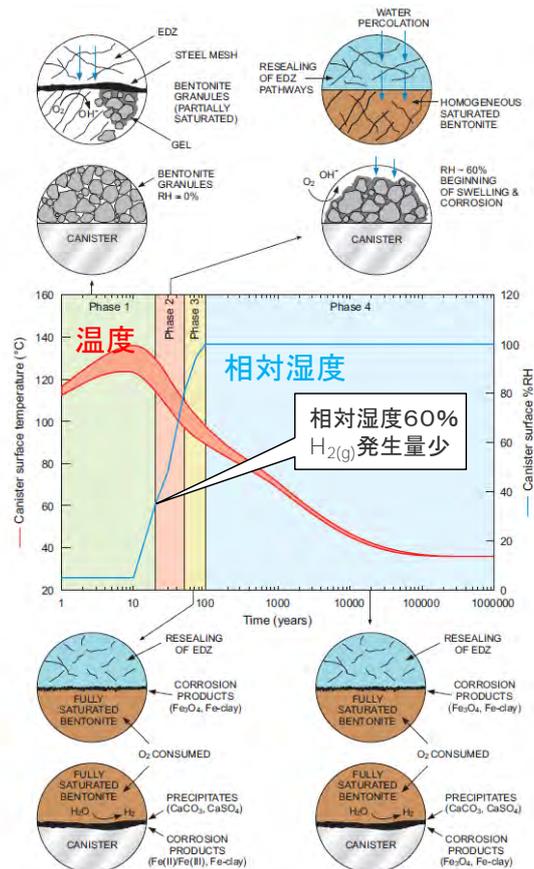


図 1.3.2-5 処分環境変化に伴うガス発生機構の概念[22]

定圧境界
不浸透境界
初期静水圧分布
4D (25.2m)

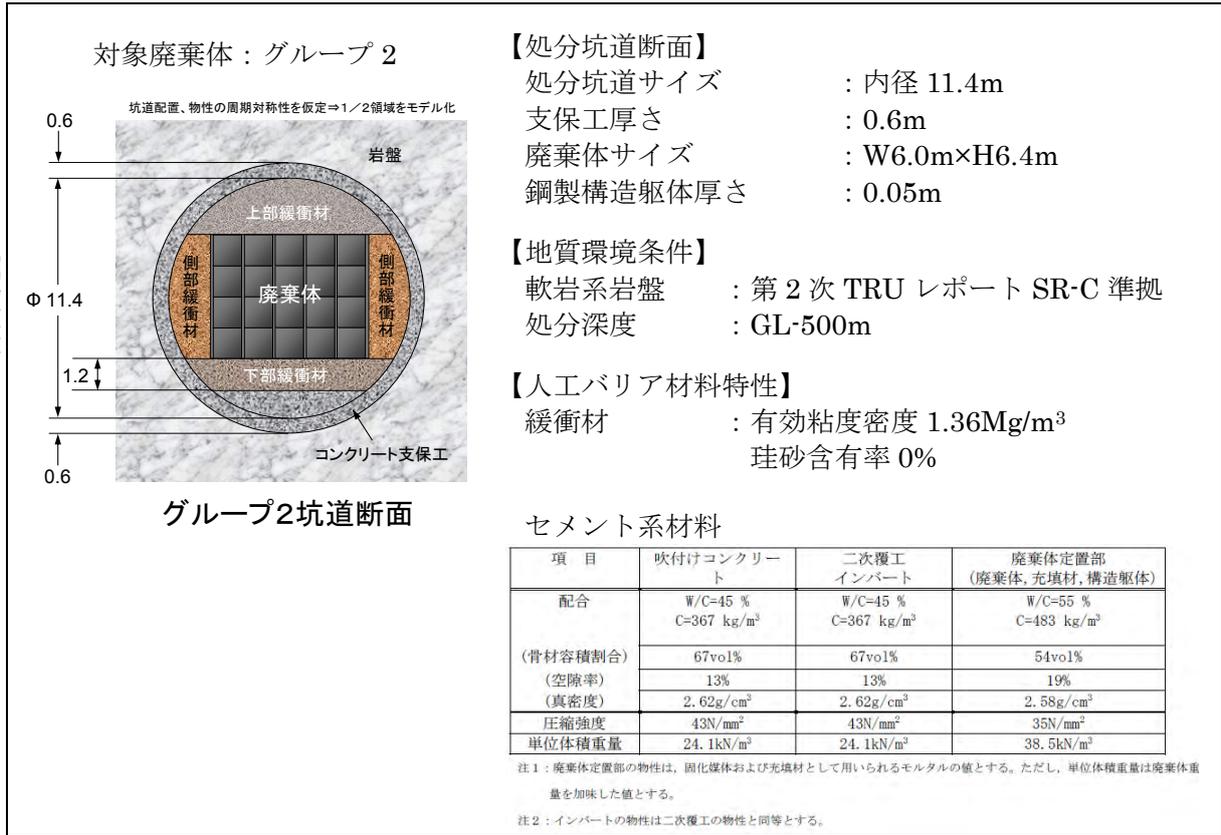


図 1.3.2-6 モデル化の対象とする処分システム

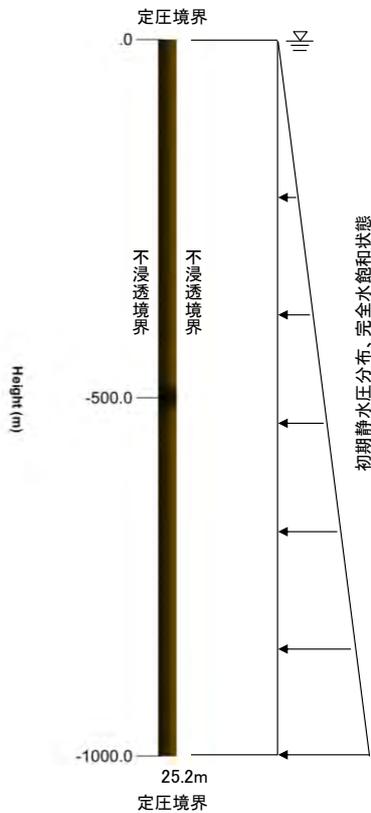


図 1.3.2-7 対象とする解析モデル（全体）と境界条件

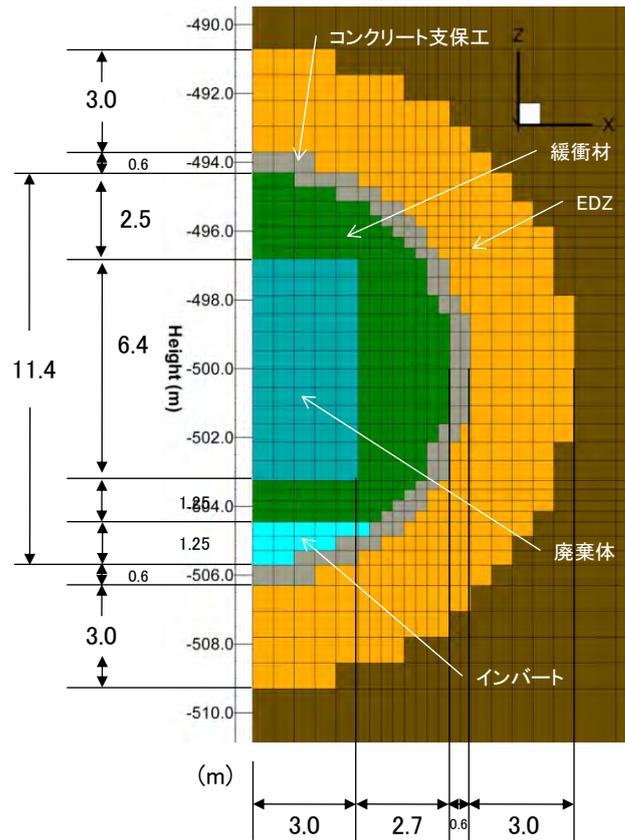


図 1.3.2-8 解析モデルの人工バリア周辺拡大図

検討では、地下水の組成は高 pH となることを想定（セメント系材料からアルカリ成分が溶出すると考えられる Region I～III までのステージのうち、Region II の pH=12.5 を想定し、希薄地下水 pH=7 程度の理想環境と比較して鉄の還元腐食反応速度が 1/4 程度に低下すること等を考慮）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。

その一例として、実際の処分場で想定される環境での現実的な金属 (Fe) の腐食速度（反応速度定数が低下すると仮定）を考慮した検討では（図 1.3.2-9～図 1.3.2-18）、初期段階から鉄の嫌気性腐食反応（iron(Fe)溶解⇒Fe²⁺濃度の増加、(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結果となった。一方で水中のイオン種に着目すると、Fe²⁺イオンがほとんど存在しない結果となっている。これは、高 pH 環境下であることから、Fe²⁺イオンから magnetite(Fe₃O₄)への反応が起こることに起因している。また、図 1.3.2-19 に示すように、鉄の還元腐食反応速度定数の低下を考慮しない場合と比較して水素ガス発生量が小さくなることでバリア内の圧力上昇や排水に伴う水飽和度の低下の傾向が緩慢になる結果となった。

以上から、バリア内でのガス発生（腐食に起因）で支配的なパラメータとなる反応速度定数は、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。本検討では定数と仮定して取扱ったが、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を考慮した検討が今後必要であると考えられる。

ガス相圧力

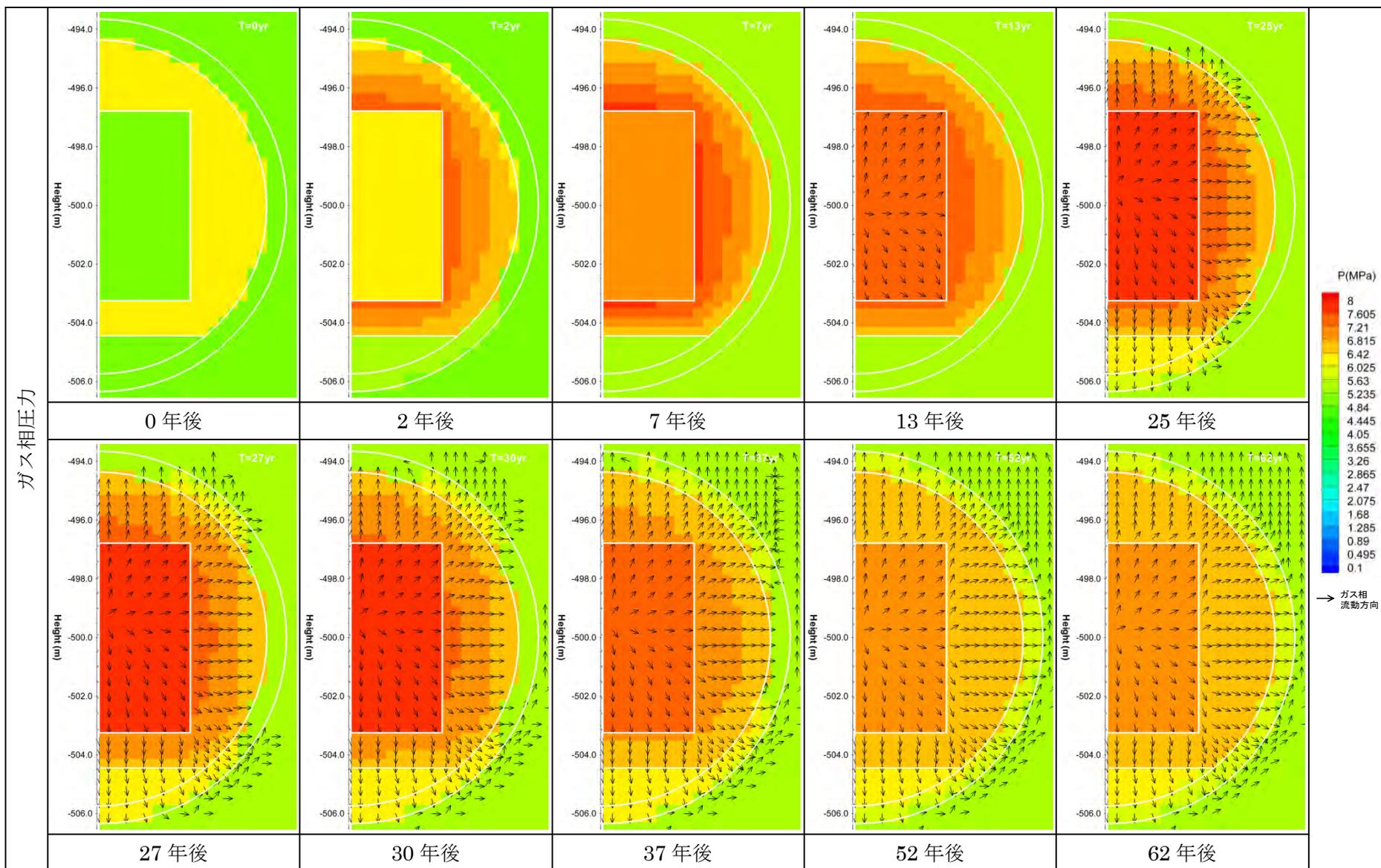


図 1.3.2-9 ガス相圧力分布

水相飽和度

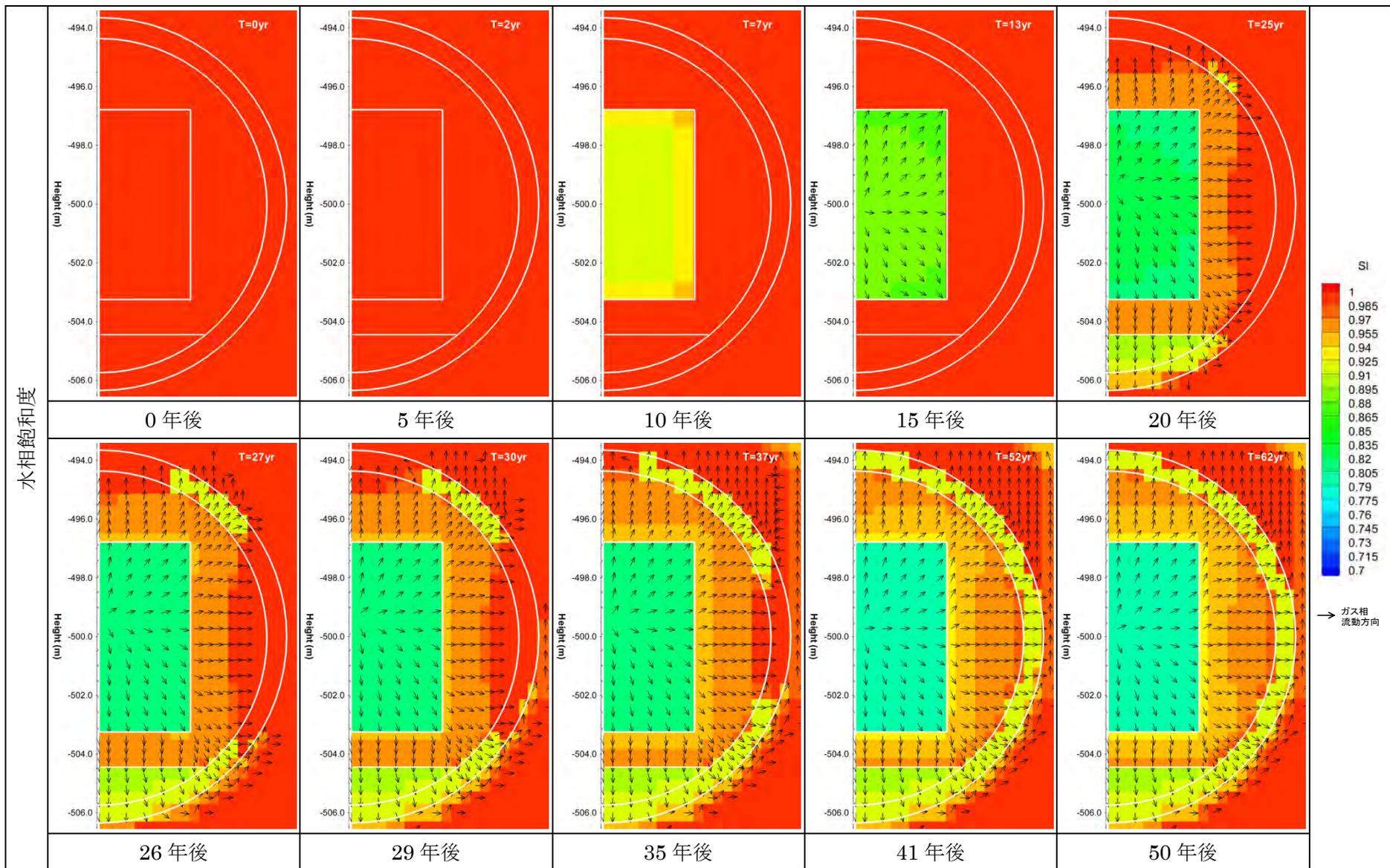


図 1.3.2-10 水相飽和度分布

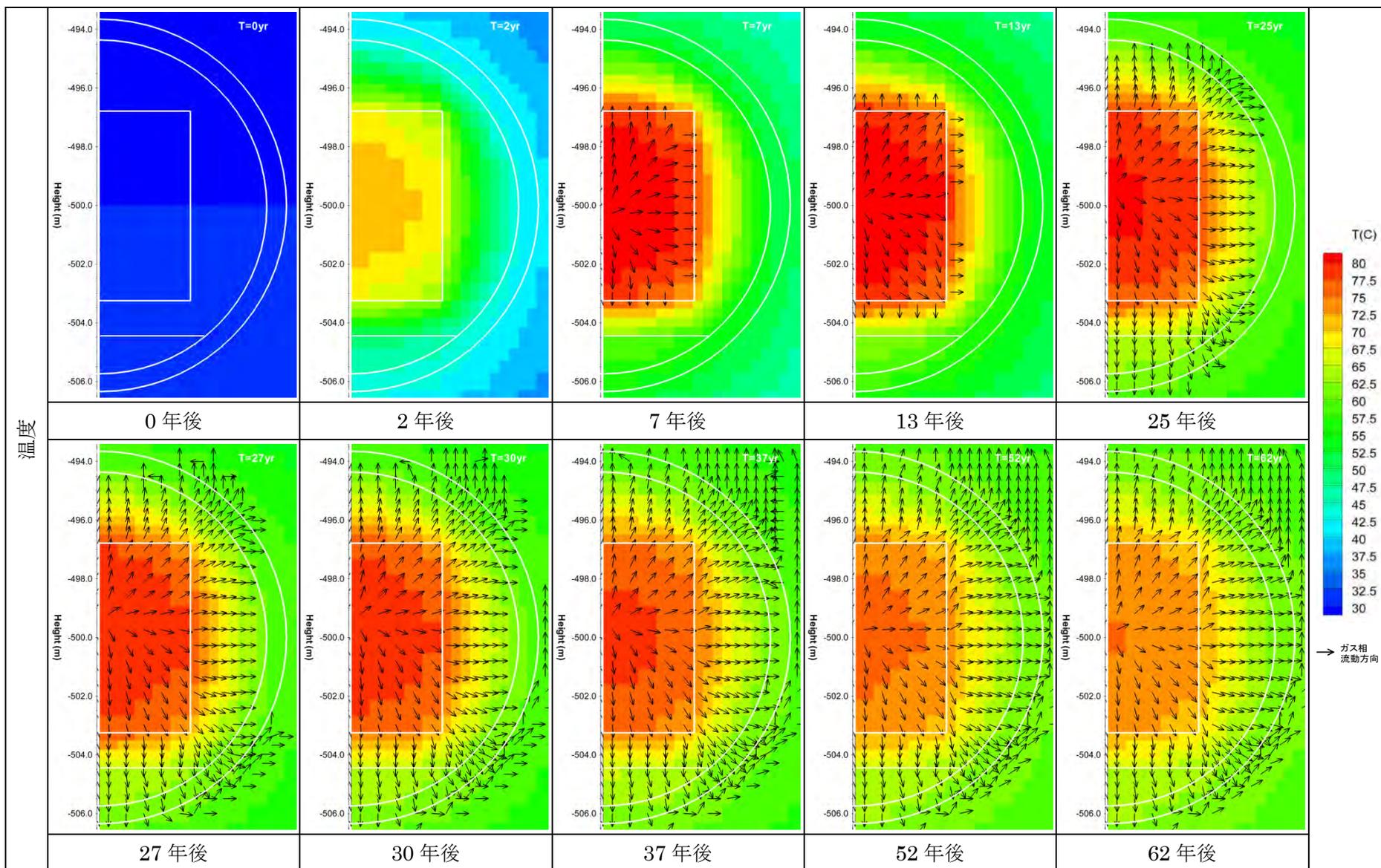


図 1.3.2-11 温度分布

水蒸気圧

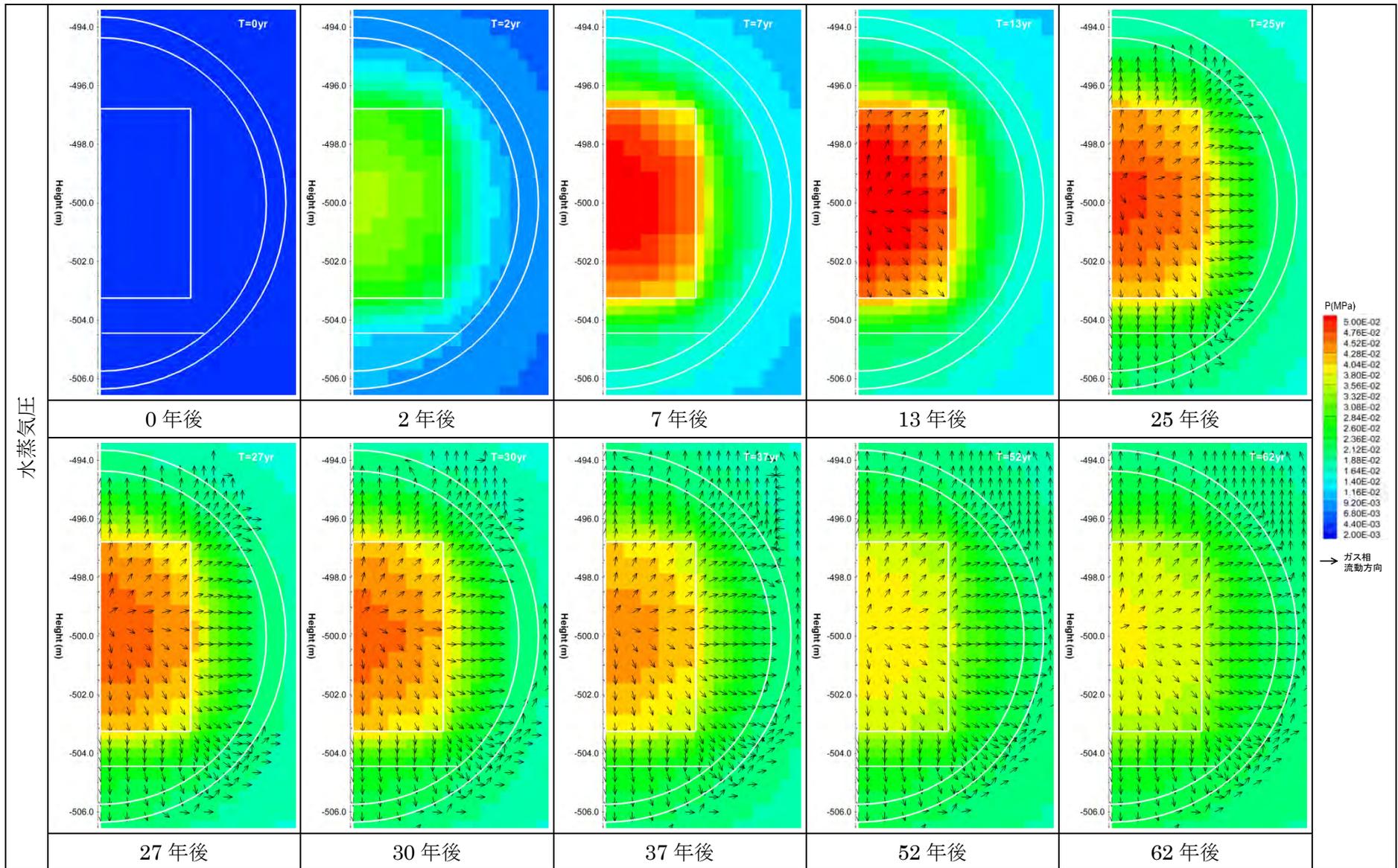


図 1.3.2-12 水蒸気圧分布

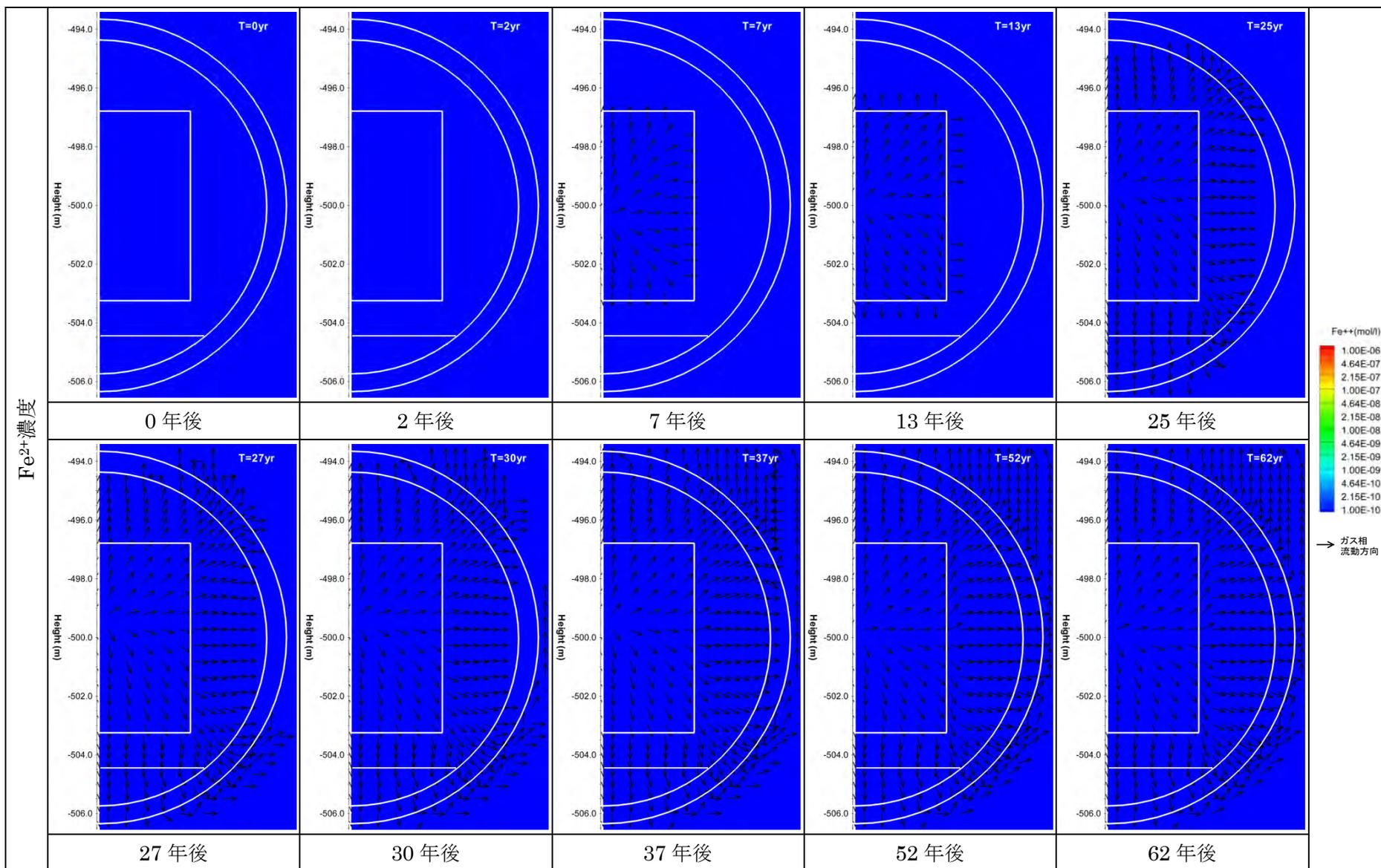


図 1.3.2-13 Fe²⁺濃度分布

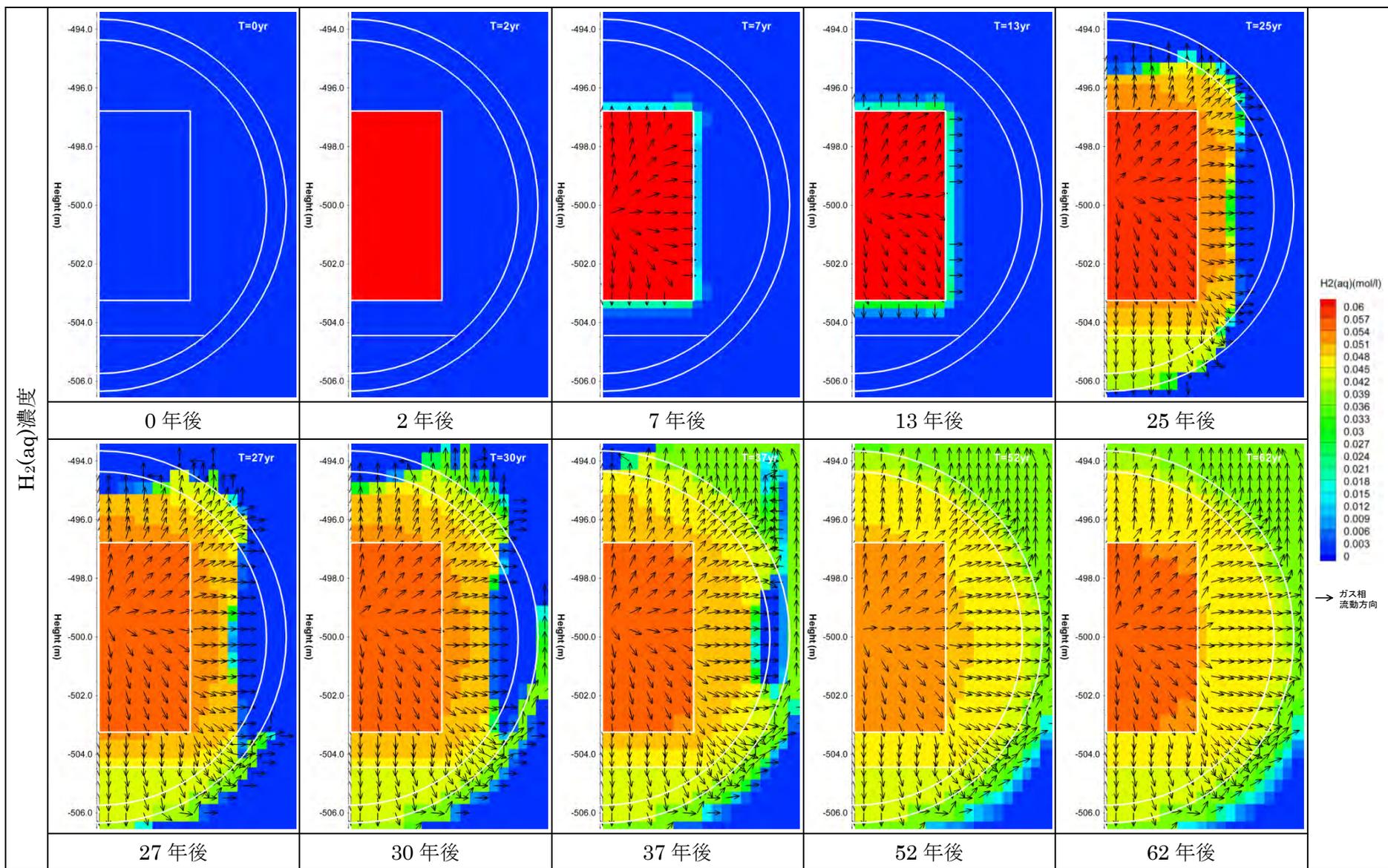


図 1.3.2-14 $H_2(aq)$ 濃度分布

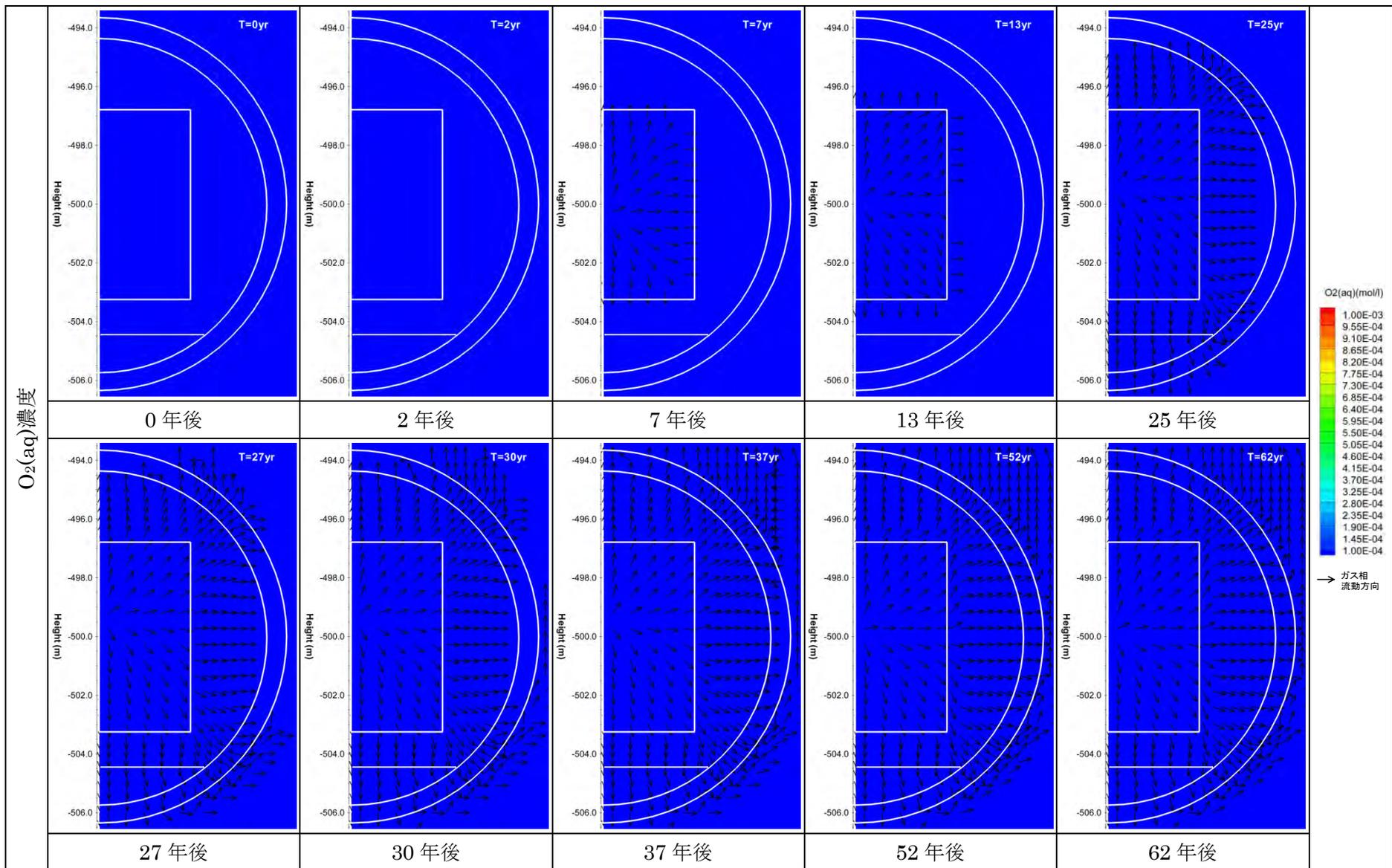


図 1.3.2-15 $O_2(aq)$ 濃度分布

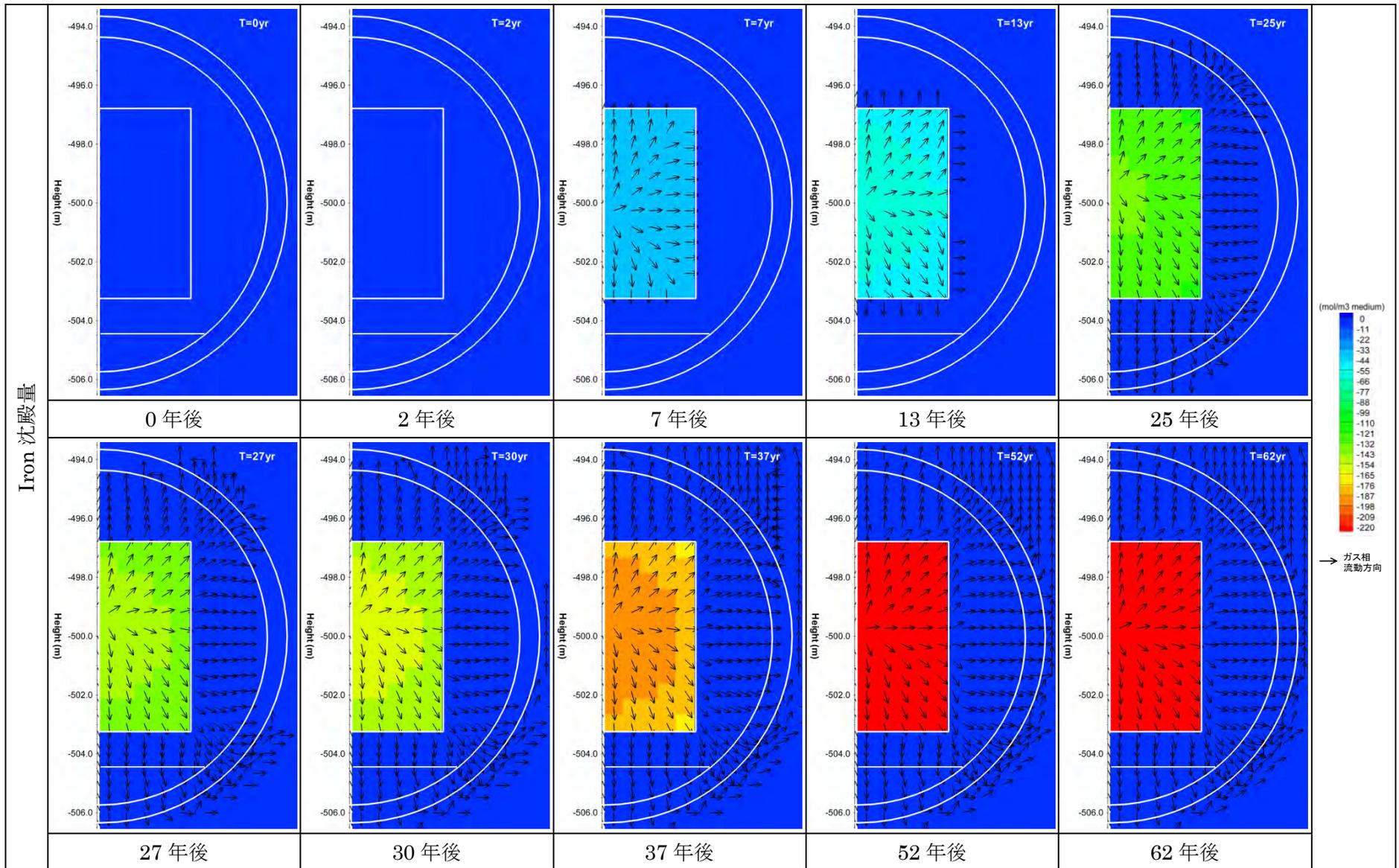


図 1.3.2-16 Iron 沈殿量分布 (正值が沈殿量、負値が溶解量)

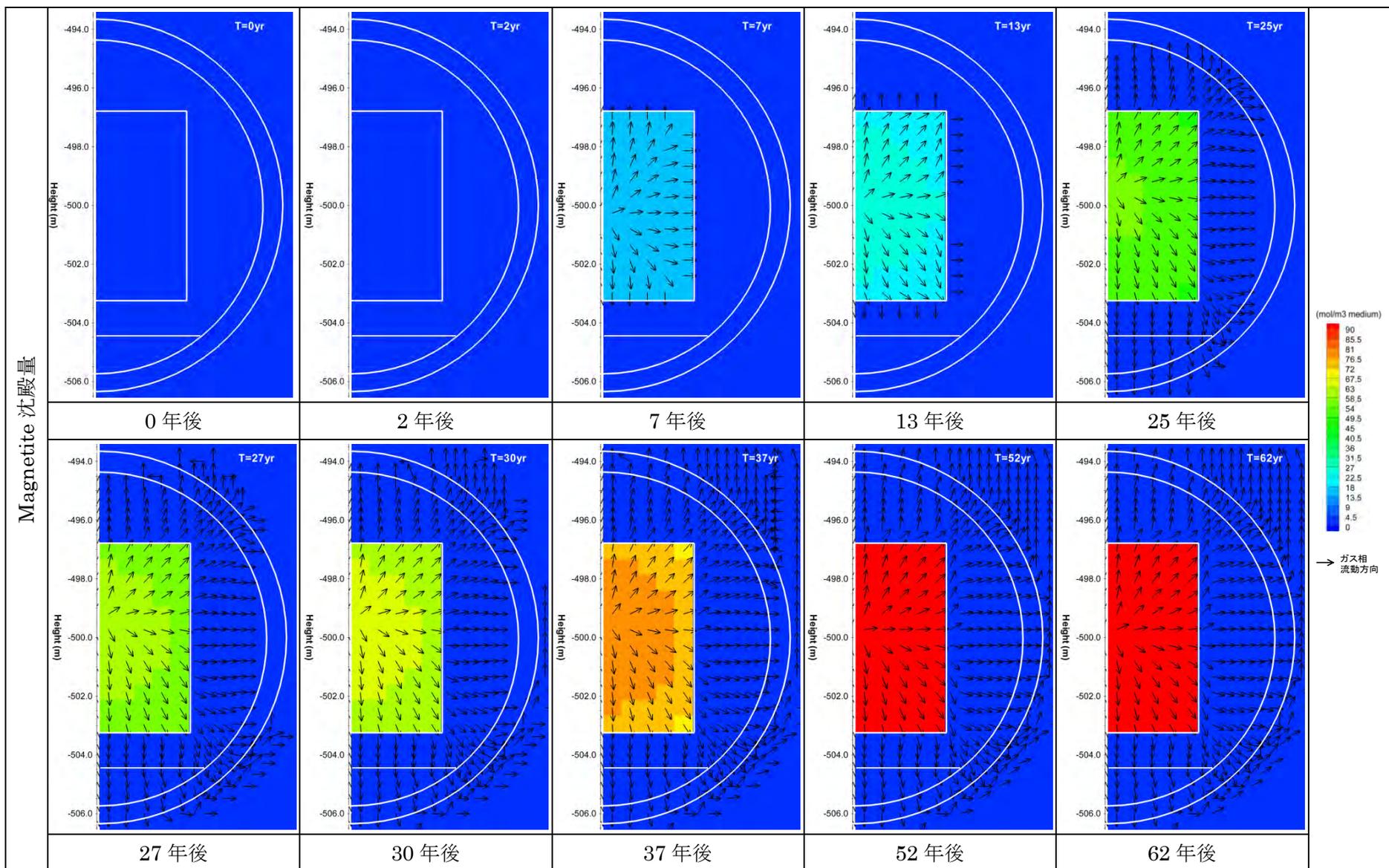


図 1.3.2-17 Magnetite 沈殿量分布 (正值が沈殿量、負値が溶解量)

H₂ ガス発生量

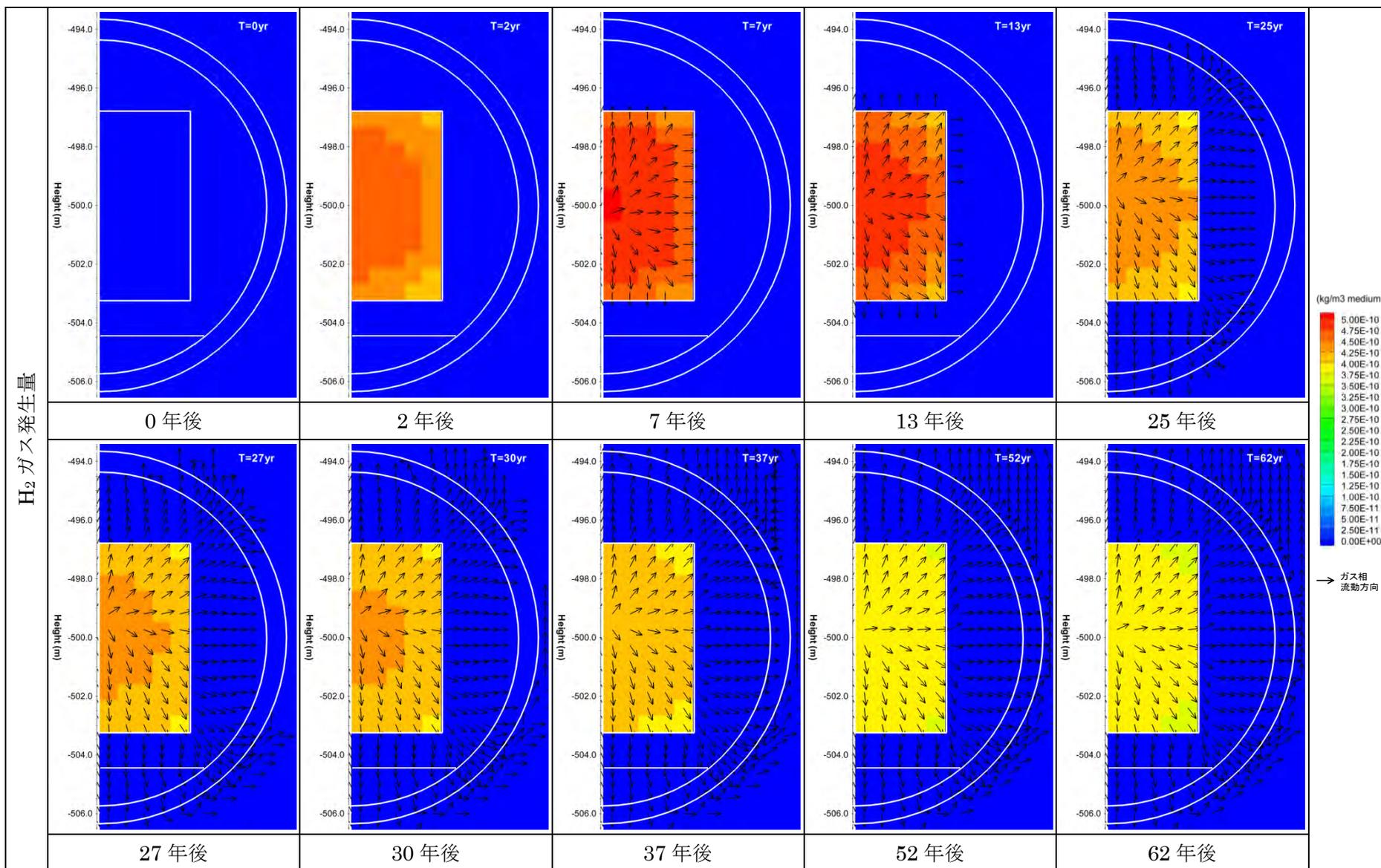


図 1.3.2-18 H₂ ガス発生量分布

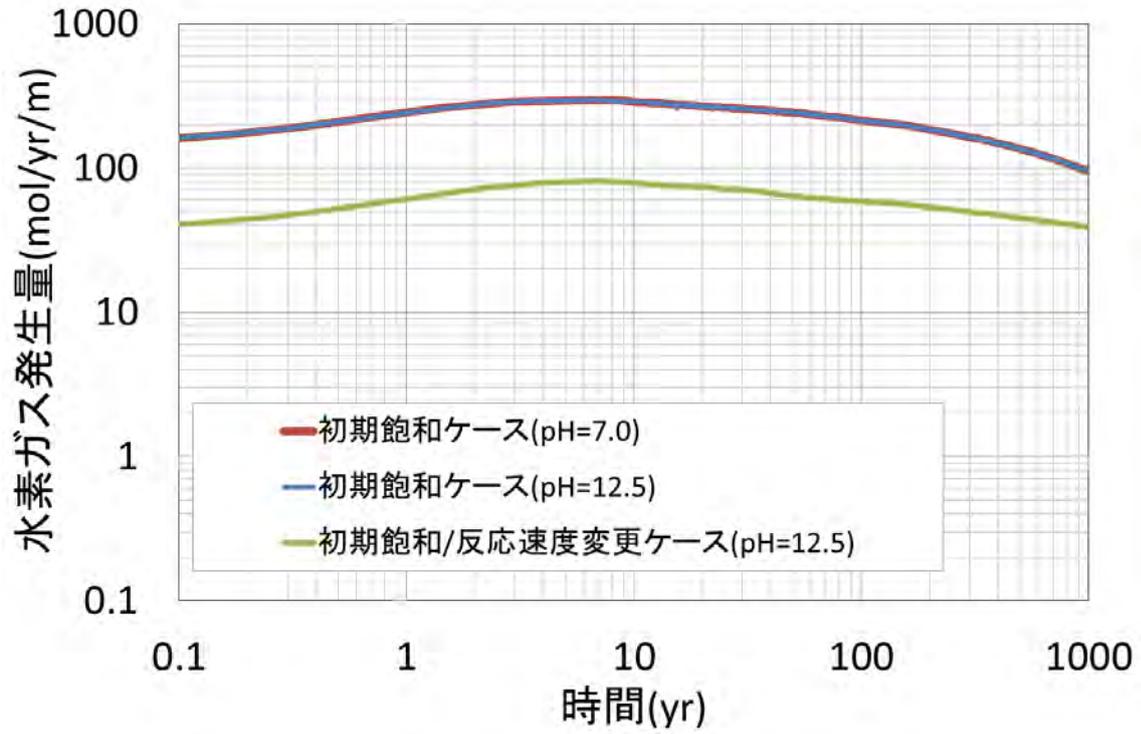


図 1.3.2-19 H₂ ガス発生量の時間変化 (pH や反応速度定数の変化に伴う影響程度の比較)

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 27 年度は、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とともに、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した。

(1) 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「圧密変形特性」に関して、そのサクシオン（飽和度と相関）依存性（圧密変形量～サクシオンの関係）を評価した。

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、一定サクシオン載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。

図 1.3.3-1 に取得された圧密変形量～時間の相関、並びに載荷ネット応力（圧密圧力）～間隙比の関係（ $e\text{-log}P$ 曲線）を取得したうえで、圧密変形特性のサクシオン依存性について整理した結果を示す。また同図に示すように、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。また、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。

^{*} 『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.

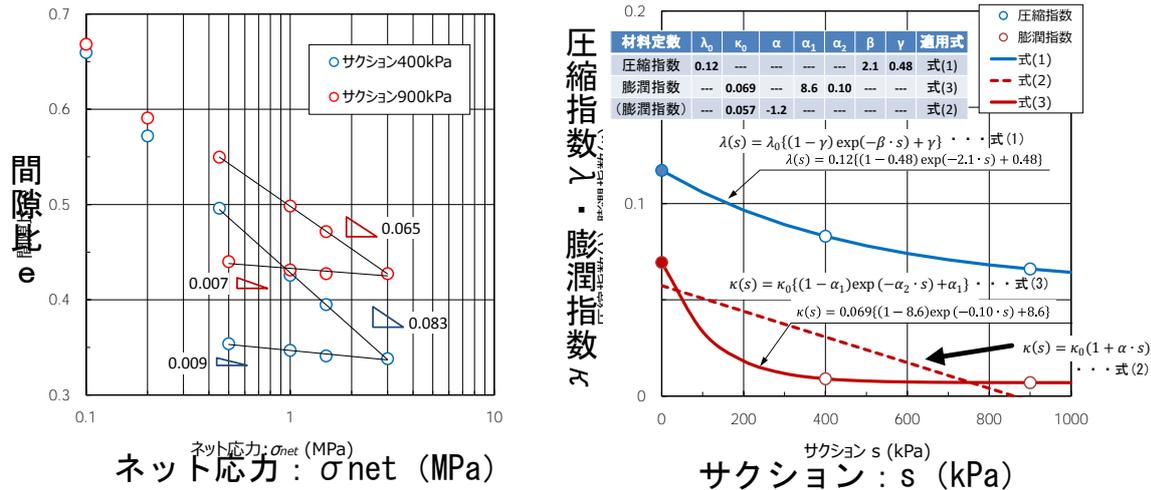


図 1.3.3-1 各サクシオンにおけるベントナイト・砂混合材料の圧縮挙動と膨潤挙動（左図）、および圧縮指数 λ ・膨潤指数 κ のサクシオン依存性（右図）

(2) ベントナイト系人工バリアの材料界面を模擬したガス移行試験

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の重要な課題である、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を目的として、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 1.3.3-2 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。

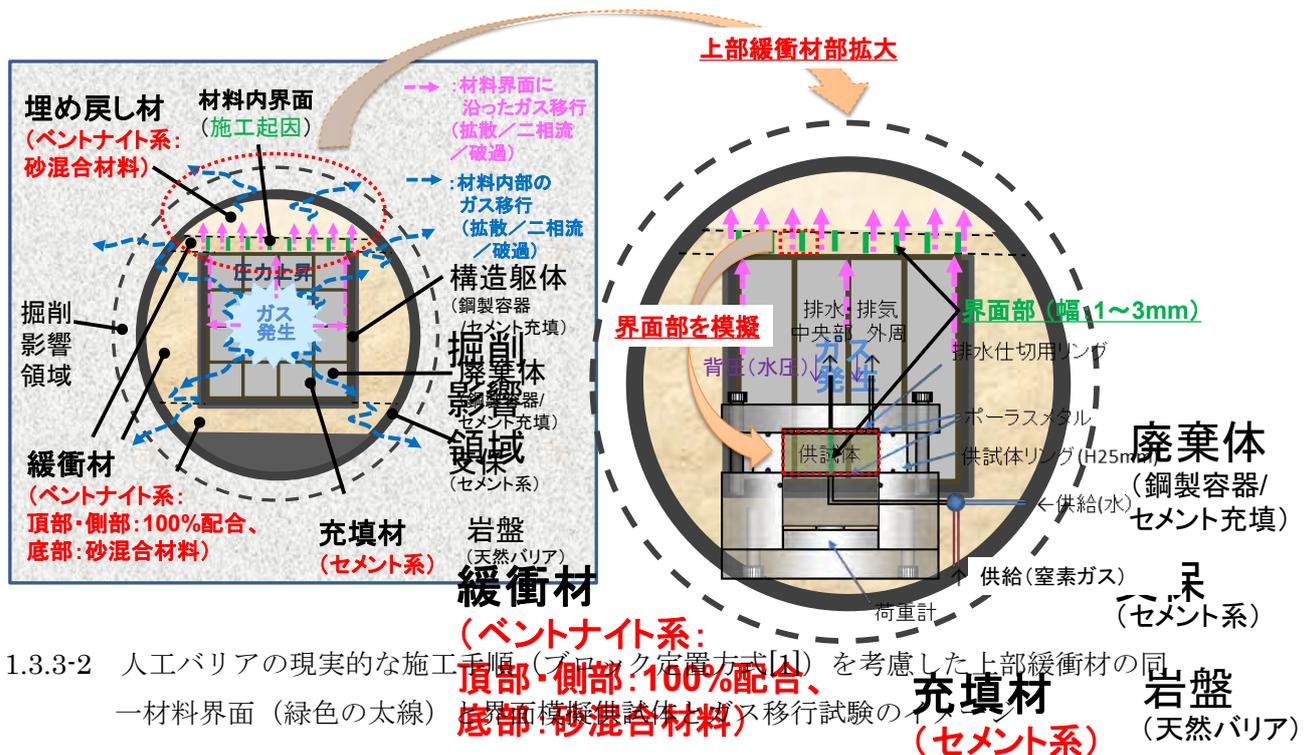


図 1.3.3-2 人工バリアの現実的な施工手順（ブロック定置方式[1]）を考慮した上部緩衝材の同一材料界面（緑色の太線）を模擬した供試体によるガス移行試験のイメージ

図 1.3.3-3 に、ガス移行試験結果の一例を示す。排出側から 0.2MPa の背圧（水圧）を載荷した状態（ガスの浸入・移行方向に対抗して水が浸潤してくる状況を模擬）で段階的な昇圧によってガスの注入を実施した。結果として、約 1.5MPa の有効圧（＝ガス注入圧－背圧）を載荷した段階で破過が生じた。この破過圧は、界面を有しない健全な供試体での同条件でのガス移行（既往試験）で得られた結果と同等であった。このことから、飽和した緩衝材中のガス移行に関して、界面がガスの卓越経路になる可能性は小さいことが示唆された。

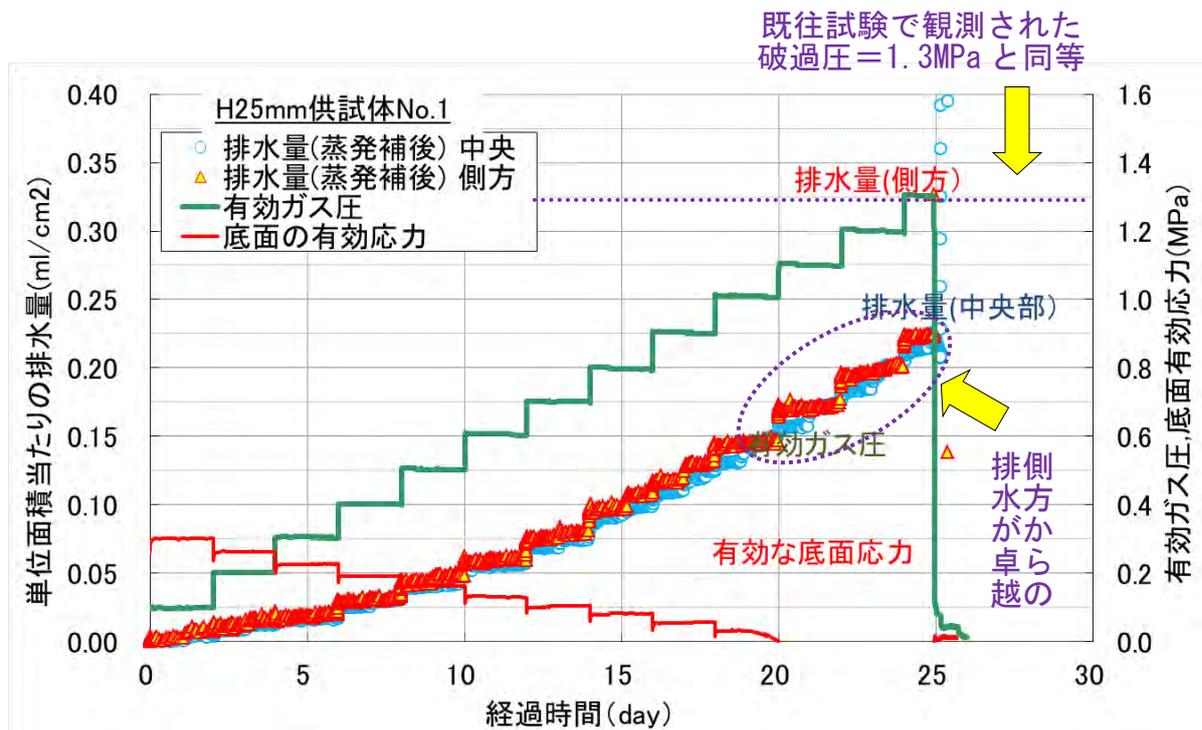


図 1.3.3-3 ガス注入（排水）過程における供試体からの排水挙動と有効応力の経時変化

1.3.4 これまでの検討を踏まえた課題

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 1.3.4-1 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 1.3.4-2 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 1.3.4-3 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 1.3.4-4 に示す。

図 1.3.4-3 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 24 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2カ年(平成28-29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1.3.4-4に示した通りとなる。

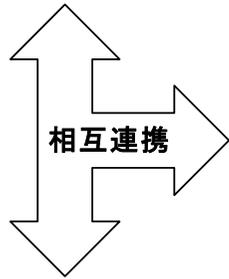
詳細は後述するが、本年度(平成28年度)の全体計画(1.4節)や成果(第2章～第5章)は図1.3.4-2に示すような位置付けとなっており、次年度以降の検討成果との関連を意識しつつ、最終目標を達成すべく検討を進めていくものである。



図 1.3.4-1 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。

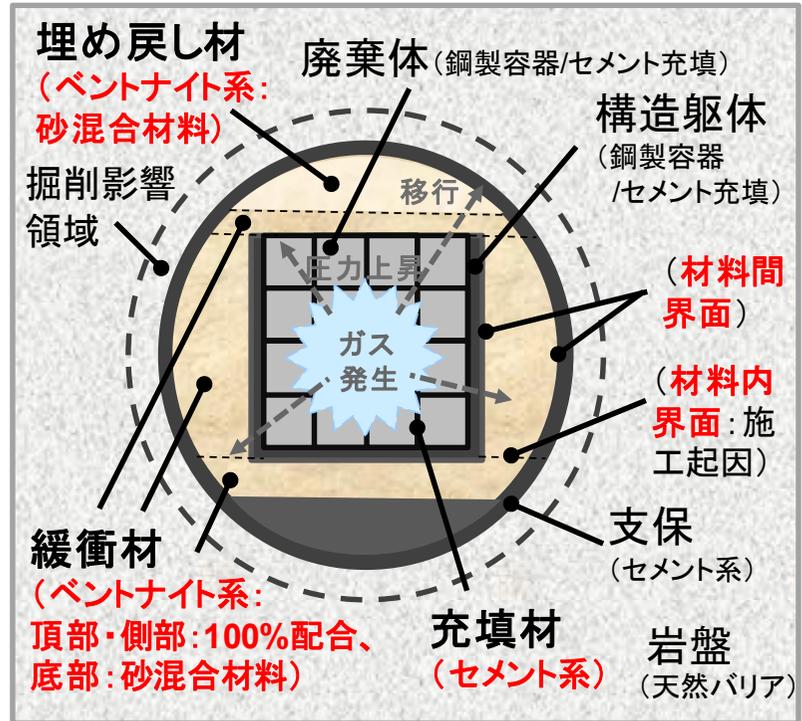
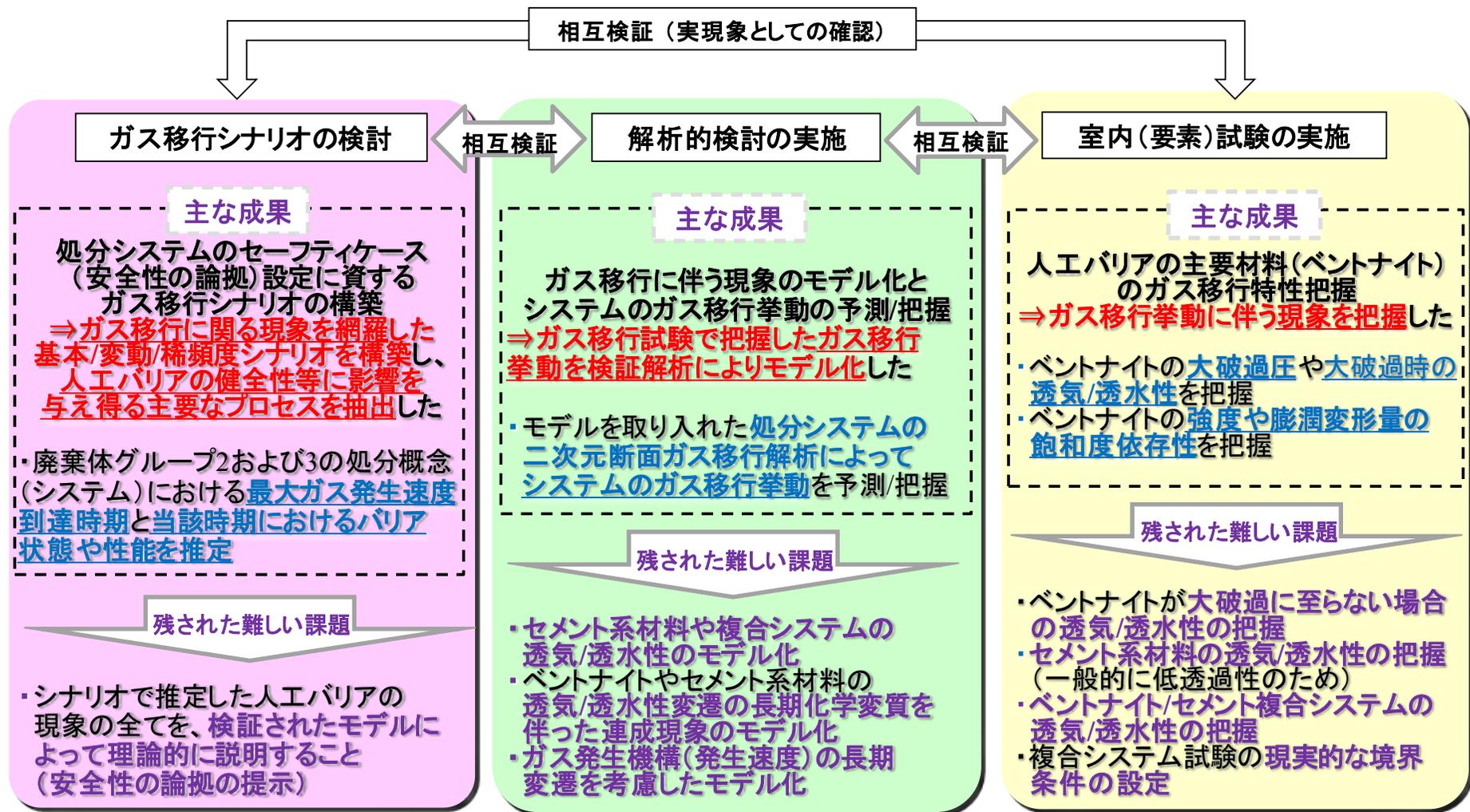


図 1.3.4-2 検討実施項目 (今フェーズ: 平成 25-29 年度) の相関



➤ 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 1.3.4-3 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の処分概念のEBS(人工バリア)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構築・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	
	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証)	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影響評価解析によるガス移行影響の把握と施設健全性の評価	
		・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) △ △ △ △ △		破過に至らない緩衝材やセメント系材料の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と安全評価が課題

図 1.3.4-4 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28年(2016)						平成29年(2017)						
	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	H28年度実施計画策定												
2. ガス移行評価シナリオの拡張	計画の具体化		ガス影響の評価体系に基づいて抽出された不確実性の低減策検討				優先度/重要度等を考慮した低減策の整理による 具体的対応策としての取組み			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		ガス移行モデルの確認(ガス移行試験の予察解析および再現解析)				確認されたモデルによるガス移行解析と挙動評価			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		不飽和力学特性データ取得				計画の具体化			人工バリア材料界面のガス移行挙動評価・複合システム試験の検討			
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			成果取りまとめ			
5. 委員会	△:委員会による決定、レビュー等 ▲:Workshop等				▲ 第1回委員会 (実施計画の評価)			▲ ワークショップ (これまでの成果のまとめと最終 年度に向けた方向性の確認)			▲ 第2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 28 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 28 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、本検討項目は 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取り組むものであり、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。

これまでの背景として、既往研究[1]のように処分施設の安全評価に係る「ガス発生影響」と「核種移行挙動」は各々単独で検討・評価されてきたが、基盤研究における平成 19～24 年度までの検討[5][6][7][8][9][10]においては、既往研究[1]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の整備を進めている。

さらに、平成 27 年度までの検討[11][12][13]では、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踏まえて構築したガス移行評価シナリオ（廃棄体グループ 1～4 を対象）を、ガス移行評価の体系化を図ったうえでより現実的なシナリオとして再整理し、重要事象の抽出に係る意思決定事項（シナリオ分類における重要要素）等を整理した。さらには、重要要素に係る不確実性を整理するとともに、これらを削減するための技術課題の設定と課題解決に向けた方針を検討することで、評価対象とすべき重要事象を抽出するための方向性を見出している。具体的には、TRU 廃棄物の各グループを対象に作成してきた既存のシナリオ整理表を起点に、「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 項目の要素作業を設定したうえで、それらの方法・手順・必要な情報を体系的に取り纏めることで、「ガス発生の影響評価体系」を整備した。さらに、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（不確実性が作業展開に従い伝播していくこと等）を分析し、不確実性そのものを低減するための技術課題を設定したうえで、その低減策（解決方針）を検討した。このような取り組みを通して、不確実性の低減を図りながらも、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整理・抽出し、評価対象とする事象や現象（FEP）の絞り込みを進めていくことが課題となった。

本年度は、上記の課題解決のために必要な検討を行う。

以下に実施項目を示す。

- ・ ガス移行評価シナリオ（ガス影響評価体系）における不確実性低減のための具体的対応策の検討
- ・ ガス発生・移行の影響評価で対象とする事象や現象（FEP）の絞り込みに係る検討

(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 年度の検討では[13]、「人工バリア中のガス発生・移行挙動の現象理解」において、最新のガス移行試験の実測データを再現対象として、水・ガス 2 相流モデルと逆解析手法によってパラメータを同定した。これら新規に同定したモデルパラメータは、既存の複数の同定パラメータ[5][6][7][8][9][10]のバラツキの範囲内に収まっており、これまで不明確であったパラメータの

不確実性の幅の絞り込みが図られてきたことを示唆する成果が得られている。

さらに、「ガス移行データの蓄積と活用」では、上記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。

「不確実性を考慮したガス移行解析手法の構築」では、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。加えて、実施事例の少ない 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である TOUGHREACT を用い、想定される処分環境（高 pH 環境）における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。

以上を背景として、平成 28 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、以下に示す内容を検討する。

以下に実施項目を示す。

- ・ 最新の室内ガス移行試験データによる確証計算（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（これまでに蓄積してきたデータベースの更新）
- ・ 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」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「ベントナイトー砂混合材料」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 カ年間（平成 25-29 年度）の実施計画[11]に基づき、かつ平成 27 年度までの検討成果[12][13]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。

- ・ 底部緩衝材のせん断強度特性評価（ベントナイトー砂混合材料を対象としたサクシヨン制御の三軸圧縮試験）
- ・ 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による界面幅の影響評価）

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カ年間（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 27 年度の検討成果[12][13]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による界面性状の影響評価試験）

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。

- ・ 実現可能な複合システム試験の基本計画等の検討

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] 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 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－（2016）

- [14] FORGE, Summary of Gas Generation and Migration Current State-of-the-Art, January 2010.
- [15] 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
- [16] NDA (2011), Geological Disposal, Gas Status Report, NDA Report no. NDA/RWMD/037
- [17] 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
- [18] 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
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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 ガス移行評価シナリオの拡張

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」は各々単独で検討・評価されてきた。本研究における平成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の整備を進めてられている。

さらに、平成27年度までの検討[4]では、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踏まえて構築したガス移行評価シナリオ（TRU廃棄体グループ1～4を対象）を、ガス移行評価の体系を図ったうえでより現実的なシナリオとして再整理し、重要事項の抽出に係る意思決定事項（シナリオ分類における重要要素）等を整理した。さらには、重要要素に係る不確実性を整理するとともに、これらを削減するための技術課題の設定と課題解決に向けた方針を検討することで、評価対象とすべき重要事象を抽出するための方向性を見出してきた。

そこで、平成28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取り組みとして、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た検討を実施した。

2.2 実施内容

平成27年度の検討[4]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「ガス発生の影響を評価するための評価体系」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低減策（解決方針）を検討することで、課題解決に向けての方向性を見出した。一方で、このような取り組みを通して、不確実性の低減を図りながらも、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整理・抽出し、評価対象とする事象や現象（FEP）の絞り込みを進めていくことが課題となった。

次項以降に、具体的な実施項目を記す。

2.2.1 ガス移行評価シナリオ（ガス影響評価体系）における不確実性低減のための具体的対応策の検討

本検討項目では、平成27年度の成果のうち、ガス発生の影響評価体系に基づいて抽出されたシナリオ関連の不確実性の低減策（解決方針）に基づき設定した課題に対し、以下のような具体的

な対応策を検討した。

① ガス移行プロセスと核種移行プロセス複合現象のシナリオ上での対応策の検討

様々な媒体からなる人工バリア内におけるガス移行と核種移行の異なる挙動特性の把握に基づき、ガス発生の影響に律速される不確実性を考慮した現象と放射性核種の移行シナリオとの関連を整理し、ガス発生の影響シナリオ設定上で考慮すべき FEP（あるいは統合 FEP）とその関連図を系統的に設定し、不確実性低減に向けた対応策を具体的に設定した。

② 複合プロセスモデルを組み合わせた評価モデルの整備に向けての検討

上記の統合 FEP とその関連図をもとに、ガス移行の現実的な挙動をシミュレーションするプロセスモデルとその影響を受ける核種移行挙動プロセスをモデルとの組み合わせを検討し、シナリオに対応する評価ケースの設定および対応する評価モデル整備に向けての不確実性削減の具体的な対応策を検討した。

不確実性低減への対応では、現実的な評価を追求するアプローチと、シナリオや評価ケース設定等での保守的な設定により不確実性を包含するアプローチがある。

①の検討では、前者のより現実的な現象分析に基づく不確実性低減に向けてのアプローチを、②の検討では保守性を考慮したシナリオ設定と評価ケース設定での不確実性低減へのアプローチを検討した。

(1) ガス移行プロセスと核種移行プロセス複合現象のシナリオ上での対応策の検討

様々な媒体からなる人工バリア内におけるガス移行と核種移行の異なる挙動特性の把握に基づき、ガス発生の影響に律速される不確実性を考慮した現象と放射性核種の移行シナリオとの関連を整理し、ガス発生の影響シナリオ設定上で考慮すべき統合 FEP とその関連図を系統的に設定し、不確実性低減のための具体的な対応策を検討した。

【検討の進め方】

本節における対応策の検討は、図 2.2.1-1 に示す手順で実施した。

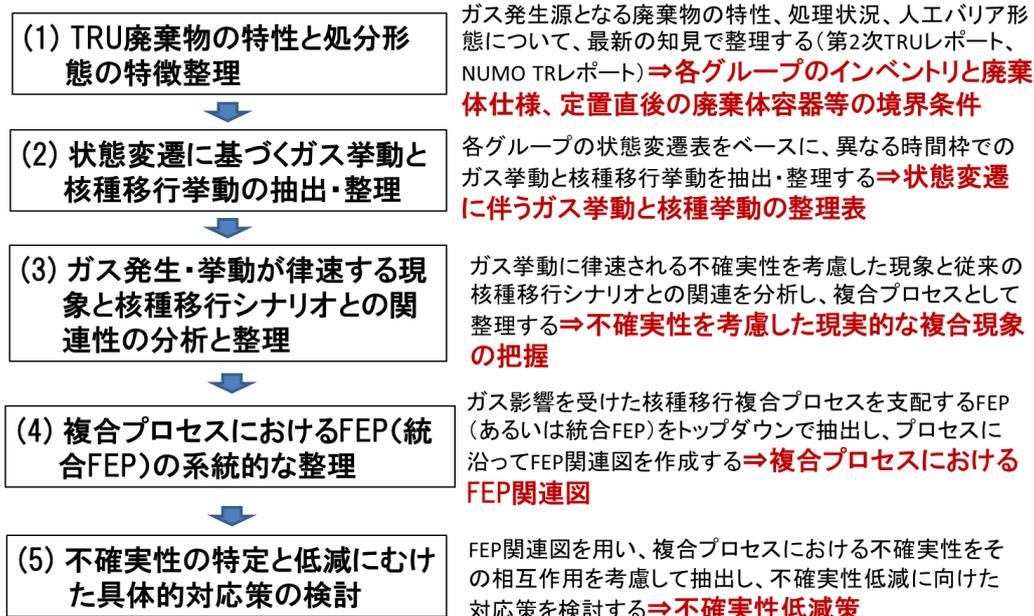


図 2.2.1-1 検討項目と検討の進め方

1) TRU 廃棄物の特性と処分形態の特徴整理

図 2.2.1-2 に示す。ガスの発生源（ソースターム）となる TRU 廃棄物の特徴は、NUMO が公表した報告書 (NUMO TR-14-03[8]) に取りまとめられている。また、処分形態については、NUMO セーフティケース[9]で継続的に検討されている。これらの特徴を整理し、状態変遷表を見直すことでガス発生と核種溶出の関連性について検討を進めた。

これまでの検討で、不確実性が大きいとされている事項として取り上げられた「ガス発生と挙動」に関しては、それぞれのグループでの廃棄物の形態とインベントリ、廃棄体パッケージを含めた固化方法、パッケージ周辺の充填材を含めた処分形態、処分場の地質環境が主要な因子として抽出されている。最初の作業として、新たな情報に従い、以下の事項を整理することとした。ガス発生と挙動に関連する因子は下図の要因分析図で分析されている（平成 21 年度検討[3]）。

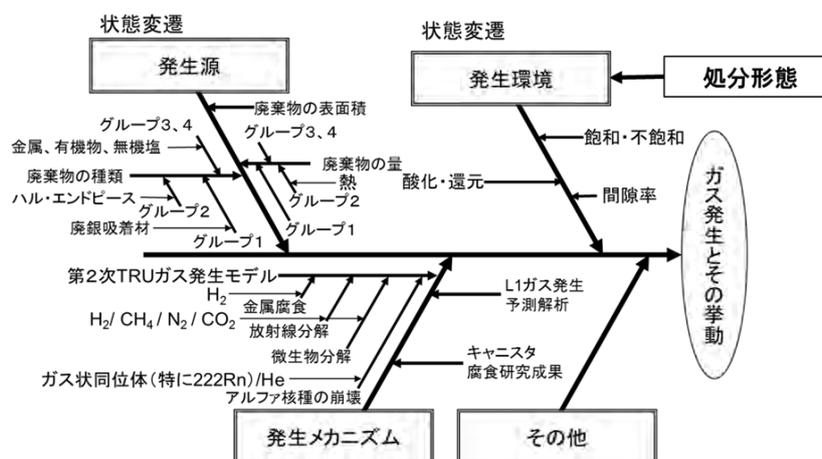


図 2.2.1-2 ガス発生と挙動に関する要因分析

これらの要素を考慮し、本節では、以下の事項を前提条件として再整理することとした。

- ・廃棄物の分類
- ・各グループのインベントリ
- ・廃棄物の処理仕様
- ・廃棄物パッケージの仕様
- ・人工バリアシステム
- ・処分空洞の仕様

a. 廃棄物の分類

廃棄物の分類の考え方は、第2次 TRU レポート以来変更されていない。NUMO セーフティーケース[9]ではグループ4の廃棄物に熱発生のものが含まれるとし、発熱性の廃棄物（グループ4H）と低発熱性の廃棄物（グループ4L）に分類している。

処分方法	地層処分を想定		余裕深度処分・浅地中処分を想定	
	概要	<p>放射性のヨウ素を除去する吸着材料</p>	<p>細断・圧縮</p>	<p>乾燥・ペレット化</p>
廃棄体イメージ(例)				
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・放射性ヨウ素 (I-129)を含む ・セメント固化体 	<ul style="list-style-type: none"> ・発熱量が比較的大 ・放射性炭素 (C-14)を含む 	<ul style="list-style-type: none"> ・硝酸塩を含む ・モルタル、アスファルトによる固化体等 	<ul style="list-style-type: none"> ・焼却灰、不燃物 ・セメント固化体等
グループ	1	2	3	4

図 2.1-3 TRU 廃棄物のグループ分類と特徴
(総合資源エネルギー調査会, 2006a を一部修正)

図 2.2.1-3 TRU 廃棄物の分類 (NUMO TR-14-03 [8])

b. 各グループのインベントリ

TRU 廃棄物各グループのインベントリについては、NUMO セーフティーケース[9]で見直しが検討されており、全体としては 18,000m³の発生量が見込まれる可能性がある。

c. 廃棄物の処理仕様

NUMO TR-14-03[8]における TRU 廃棄物の処理方法は、第2次 TRU レポートの記述を踏襲している。多くはセメント固化、モルタル充填仕様であるが、JAEA から発生する TRU 廃棄物の一部はアスファルト固化されている。

ルが充填されると仮定した。

e. 処分坑道の形態と仕様

NUMO セーフティケース[9]で検討されている処分坑道は、それぞれの廃棄物グループ別に、廃棄体パッケージの集積度、人工バリアの構成と寸法、安全かつ効率的な作業スペースを考慮して、各廃棄物グループ毎に坑道の安定性確保の解析から支保工の仕様も含めた設定が検討されている。

2) 状態変遷に基づくガス移行挙動と核種移行挙動の抽出・整理

状態変遷表を作成することで把握する事項を下図に示す二つの流れでシナリオ構築と評価ケース・モデル設定に結び付けていく。

プロセス・インフルエンス・ダイアグラム（Process Influence Diagram：以下PID）は、状態変遷中重要となる媒体の変化を表すFEP（Features, Events, Processes）を要因と影響プロセスの伝播にわけ時系列に整理し、ガスや核種が移行する媒体変遷（熱や温度(T)、水理(H)、力学(M)、化学(C)の各々の場で分類）モデル作成につなげる役割を果たす。

統合FEP（関連するFEPを集積したFEP群）を用いたFEP関連図は、変遷する媒体中でのガス移行挙動と核種挙動の関係を整理したもので、ガス発生の影響を評価するシナリオ構築につなげていく役割を果たす。

媒体の変遷を整理したPIDの中で、ガス移行挙動が支配的になり媒体の特性を変化させる（例えば、ガスの破過によりベントナイトバリアの低透水機能が劣化するなど）、あるいはその他の外力によりバリアの安全機能が損傷する（例えば、地震や断層変位によりベントナイトバリアが損傷を受け、機能を損傷する）場合の影響因子とその結果をPIDとして表わすことで、影響評価のためのモデル選定や構築に結びつけることができる。

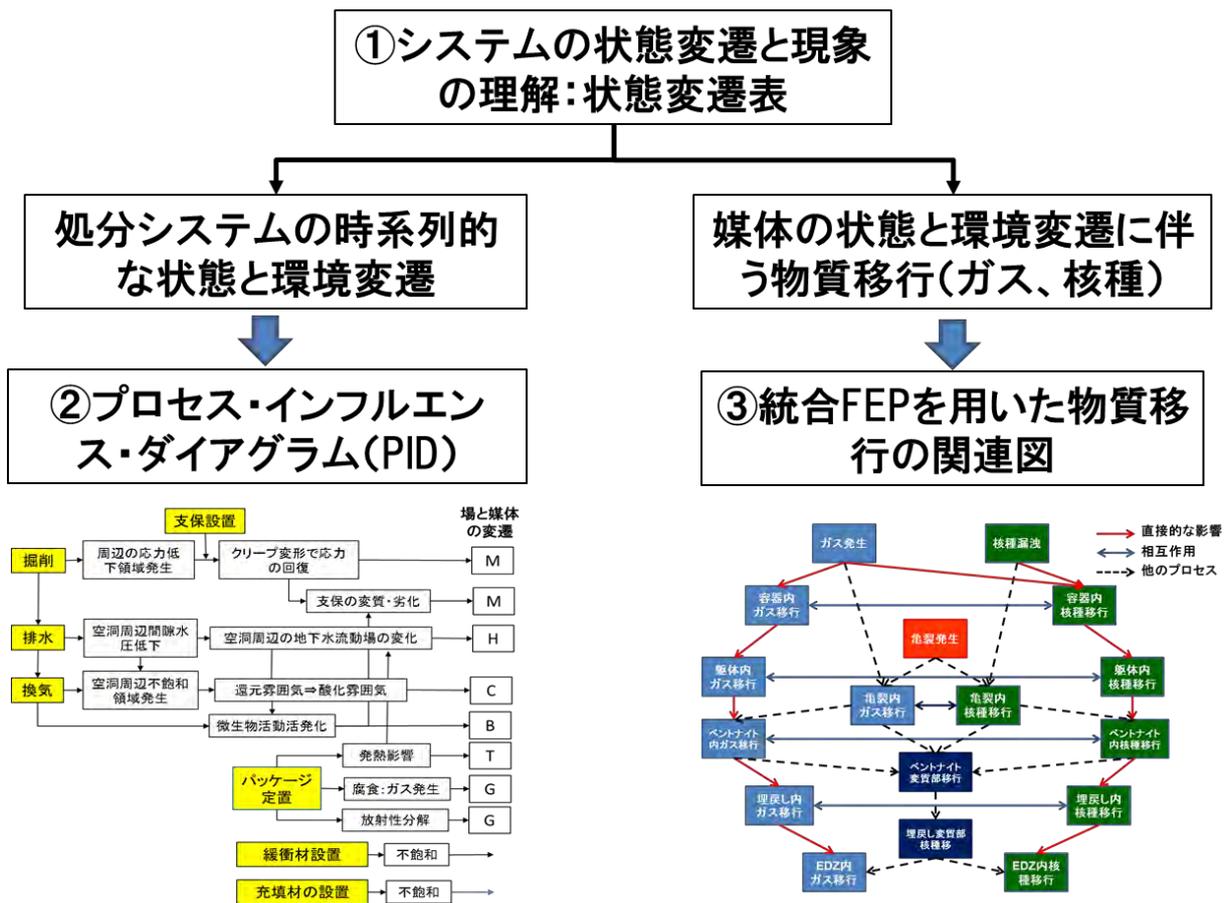


図 2.2.1-4 プロセス・インフルエンス・ダイアグラムと FEP 関連図の整理

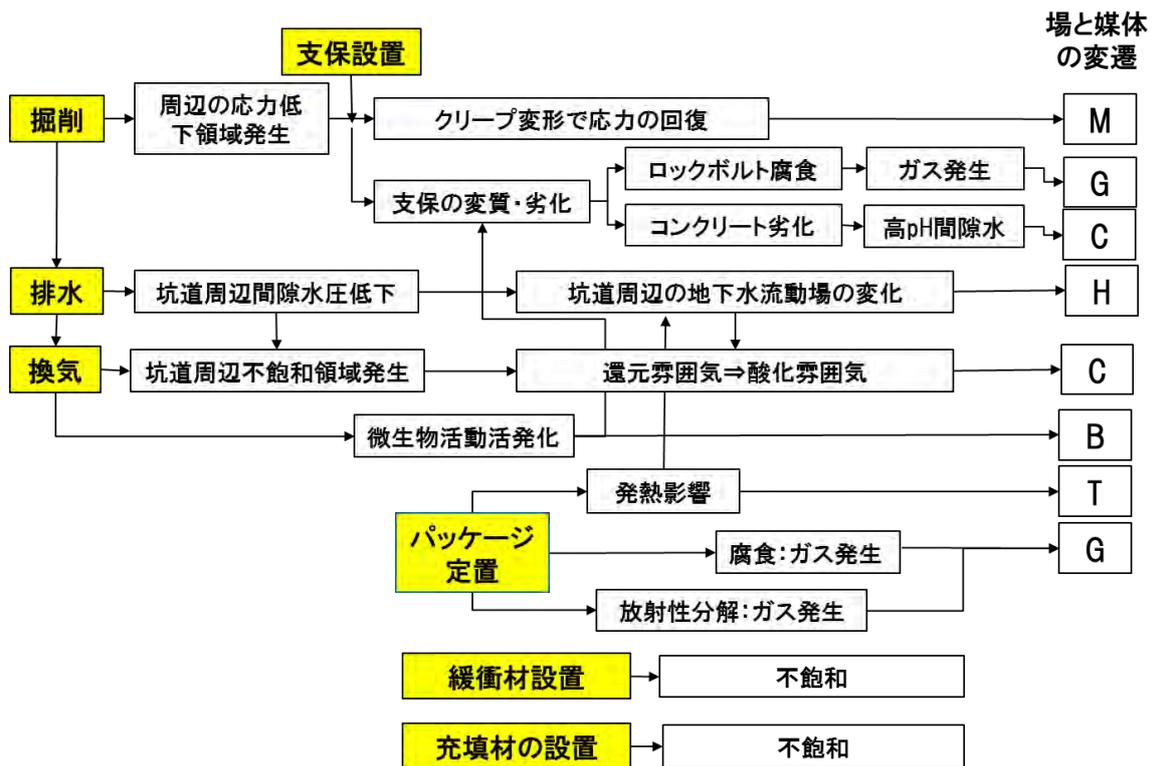


図 2.2.1-5 処分坑道の建設から廃棄体パッケージ設置までの媒体の変遷 PID

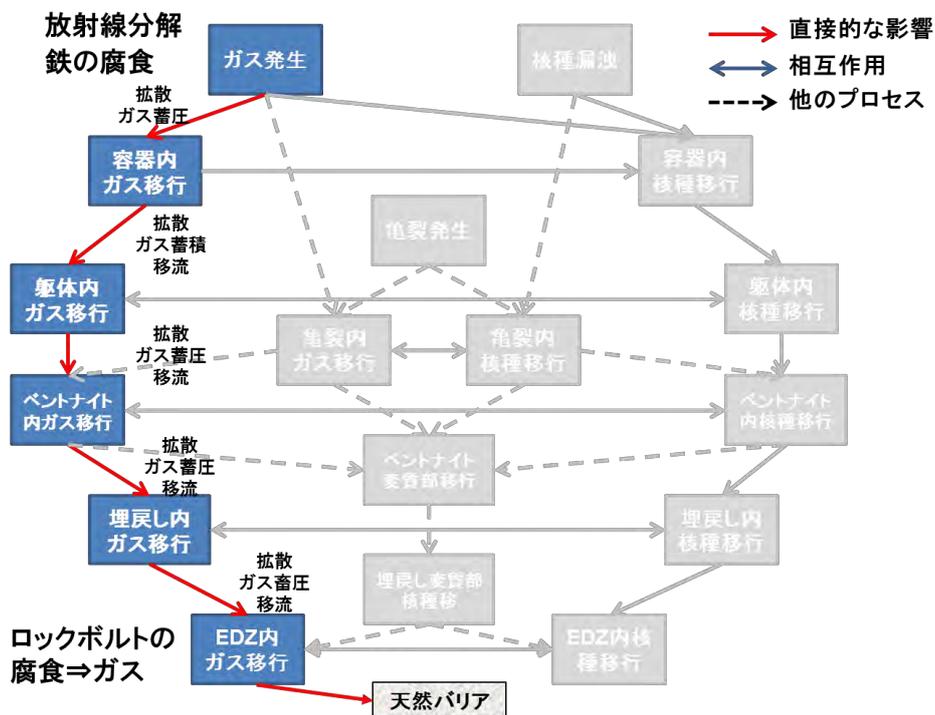


図 2.2.1-6 処分坑道の建設から廃棄体パッケージ設置までのガスと核種移行の統合 FEP 関連図

b. 処分坑道上部埋戻し⇒換気・排水の停止⇒処分場の閉鎖

廃棄体パッケージの定置が終了したのち、パッケージ間にモルタルを充填し、上部のベントナイトバリアを施工する。その後上部に埋戻し材を設置し、坑道端部にはプラグを建設したのち、アクセス坑道を埋戻し処分場全体を閉鎖する。この段階では以下の状態変遷が発生する。

- ① 廃棄体パッケージの定置終了⇒上部のベントナイト緩衝材設置⇒上部の埋戻し
- ② 処分坑道内の換気・排水の停止⇒坑道周辺の間隙水圧の上昇⇒坑道内部への地下水の浸透⇒埋戻し部分の再冠水(不飽和⇒飽和)⇒膨潤圧の発生
- ③ ベントナイト緩衝材の再冠水開始
- ④ 廃棄体パッケージの腐食⇒ガス発生⇒不飽和間隙での蓄圧
- ⑤ 廃棄体による放射性分解⇒水素ガスの発生⇒不飽和間隙での蓄圧

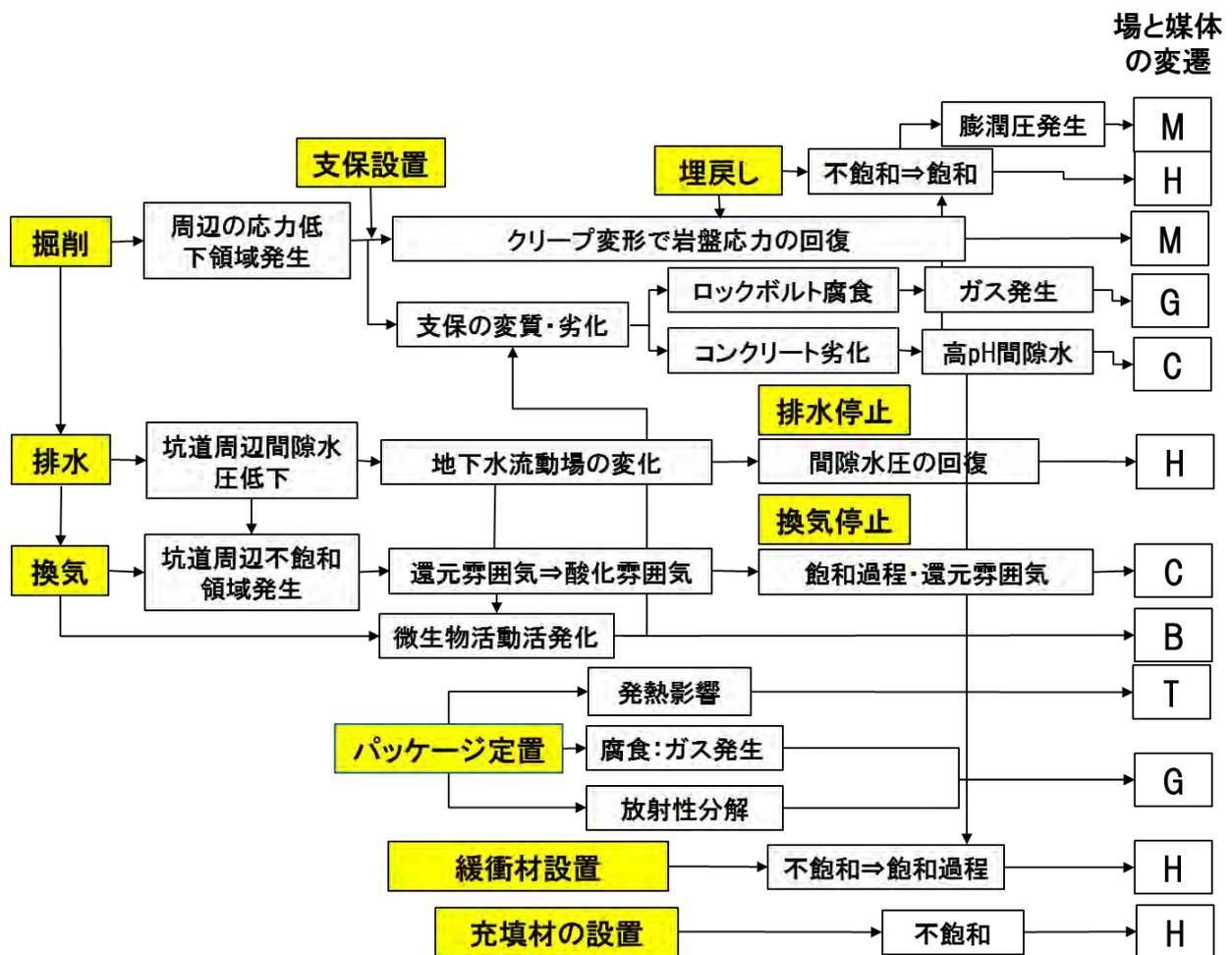
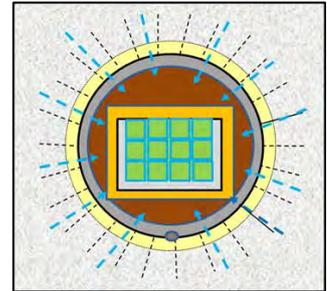


図 2.2.1-7 処分場閉鎖までの場と媒体の変遷 PID

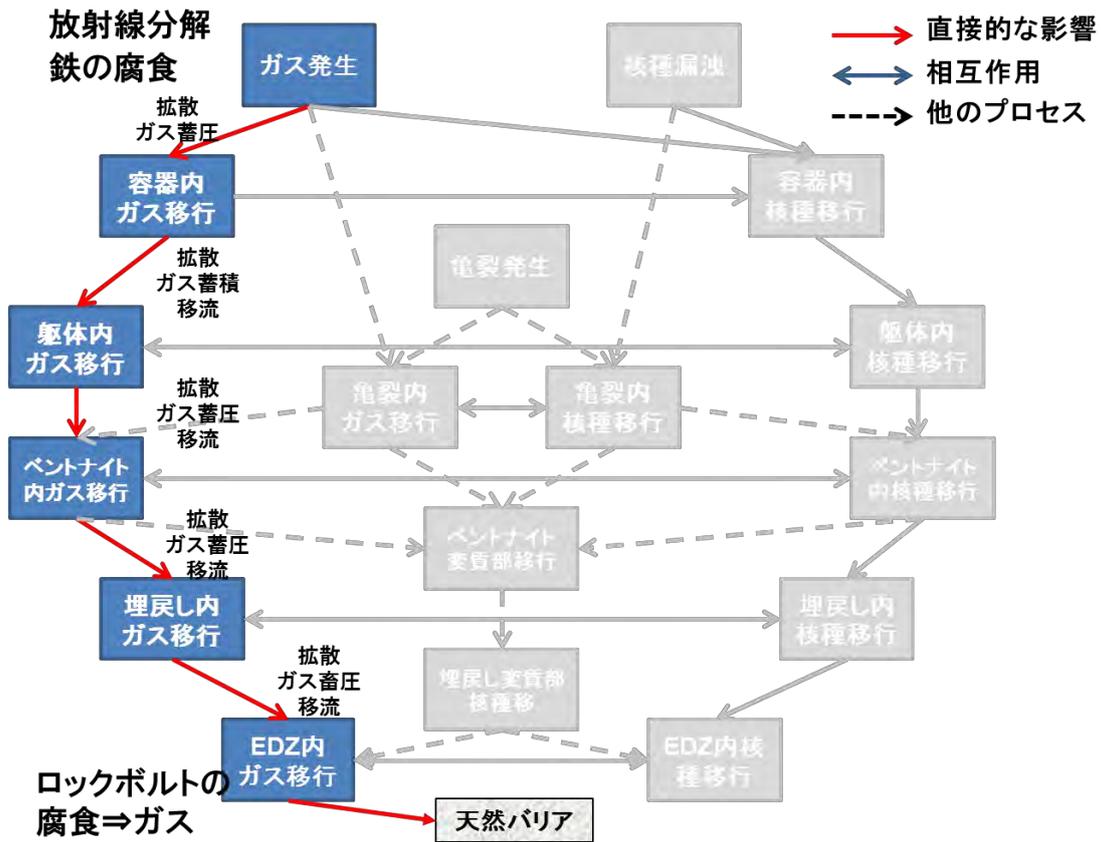
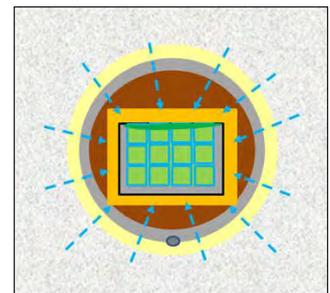


図 2.2.1-8 処分場閉鎖段階におけるガスと核種移行の統合 FEP 関連図

c. 閉鎖⇒ベントナイトベントナイトバリアの飽和

処分場の閉鎖により地下処分場内には地下水が浸透し始め、建設・操業段階での周辺母岩の特性への擾乱が回復に向かって進む段階である。

- ① ロックボルトの腐食継続⇒ガス発生
- ② 周辺岩盤の飽和による地下水流動場の回復
- ③ 処分坑道EDZ内の地下水流動場の発生
- ④ ベントナイト緩衝材への地下水浸透⇒飽和⇒膨潤圧発生
- ⑤ 廃棄体パッケージの腐食⇒ガス発生⇒不飽和間隙での蓄圧
- ⑥ 廃棄体による放射性分解⇒水素ガスの発生⇒不飽和間隙での蓄圧
- ⑦ 有機物の微生物分解によるCO₂の発生



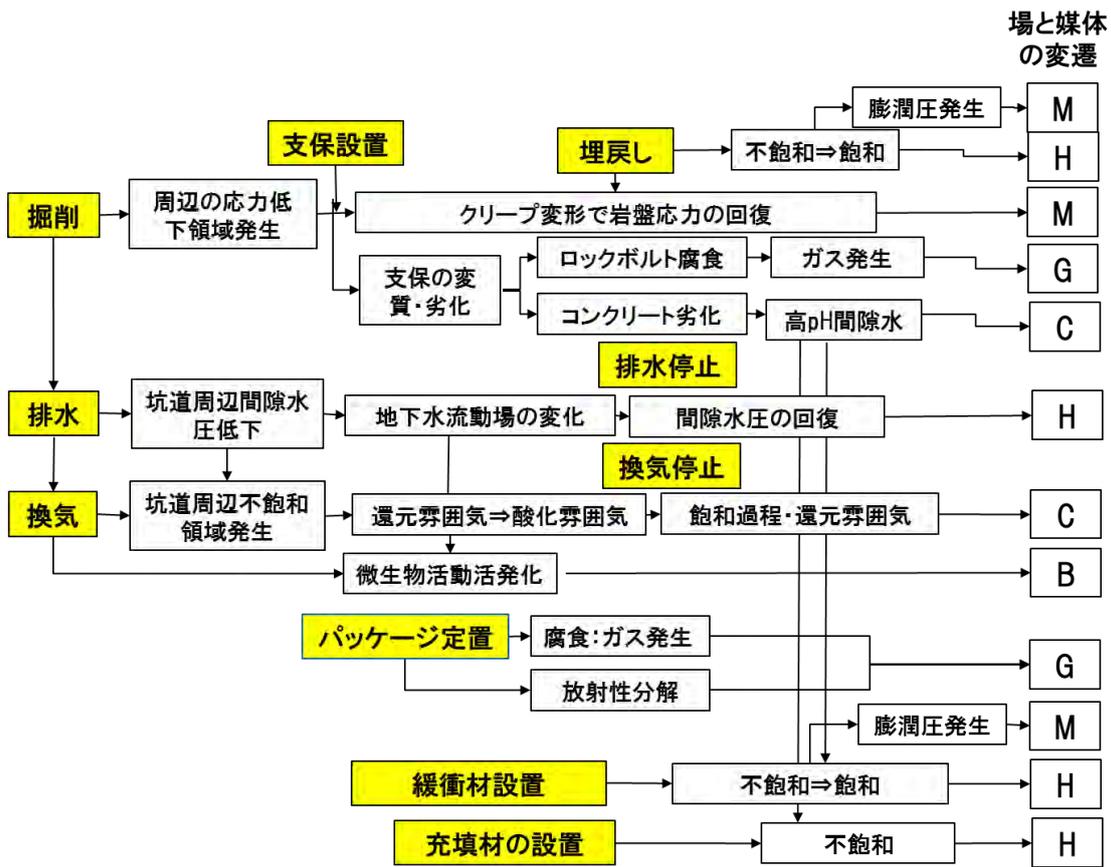


図 2.2.1-9 閉鎖後ベントナイトバリアの飽和段階の場と媒体の変遷 PID

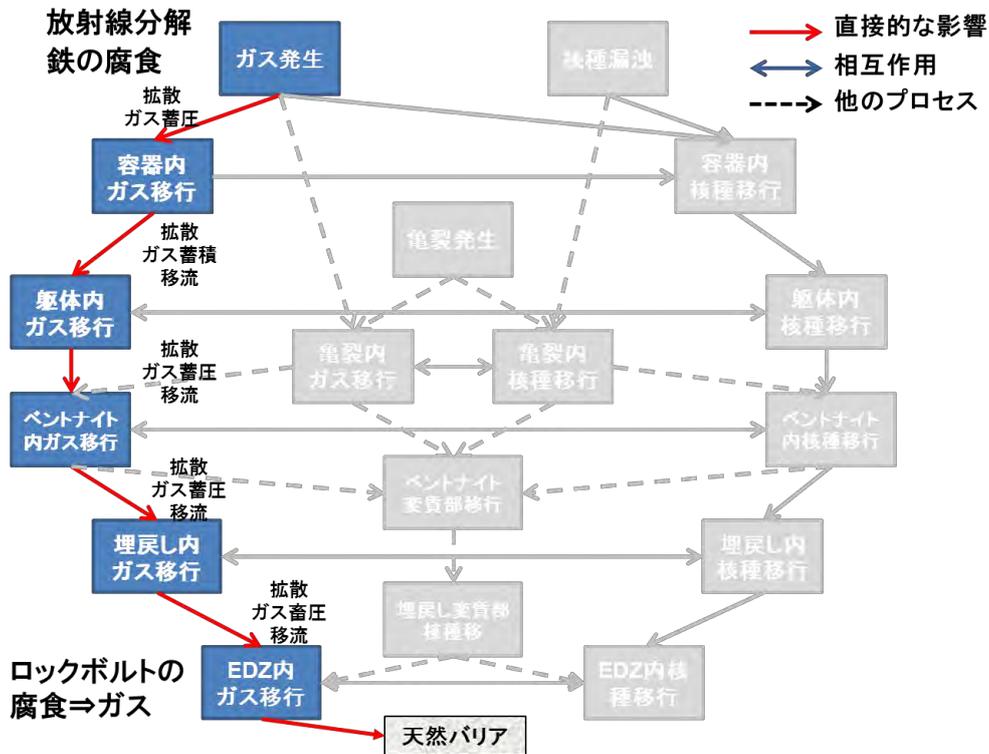


図 2.2.1-10 閉鎖からベントナイトバリア飽和までのガスと核種移動の統合 FEP 関連図

d. ベントナイトバリアの飽和⇒充填材の飽和⇒廃棄体パッケージの損傷

ベントナイトバリアの飽和プロセスに従って外部からの水分はバリア内に浸透する。水分との接触により鋼製の廃棄体パッケージの腐食が進行し、損傷が進むが、放射性物質を閉じ込める機能は維持している。

- ① ロックボルトの継続した腐食⇒ガス発生
- ② コンクリート覆工の劣化⇒高pH間隙水の発生⇒人工バリア内部への移行
- ③ コンクリートピット・充填材への地下水浸透⇒飽和
- ④ 廃棄体パッケージの腐食⇒ガス発生⇒飽和間隙中の蓄圧⇒充填材、コンクリートピットの亀裂発生
- ⑤ 廃棄体による放射性分解⇒水素ガスの発生⇒不飽和間隙での蓄圧
- ⑥ 微生物分解によるCO₂の発生

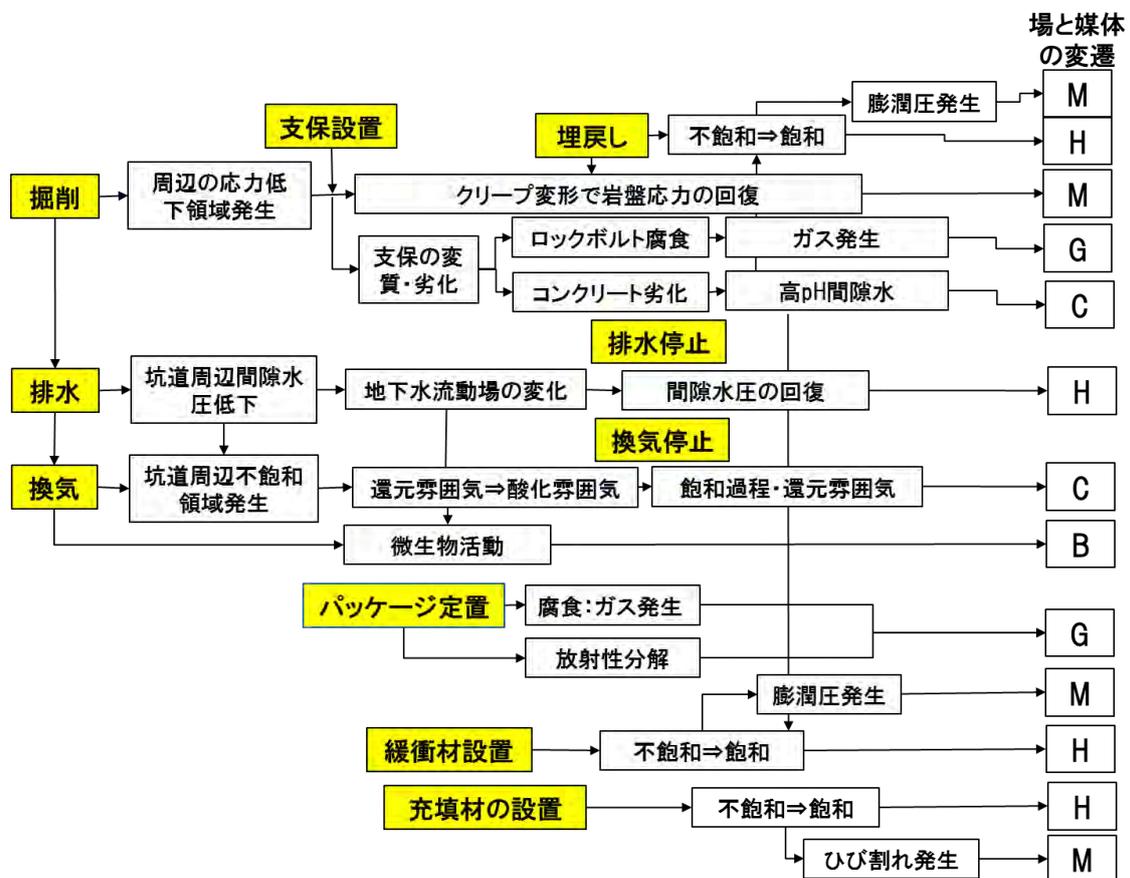
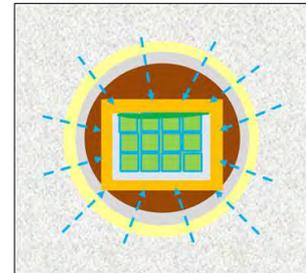


図 2.2.1-11 バリア内飽和から廃棄体パッケージの損傷までの場と媒体変遷の PID

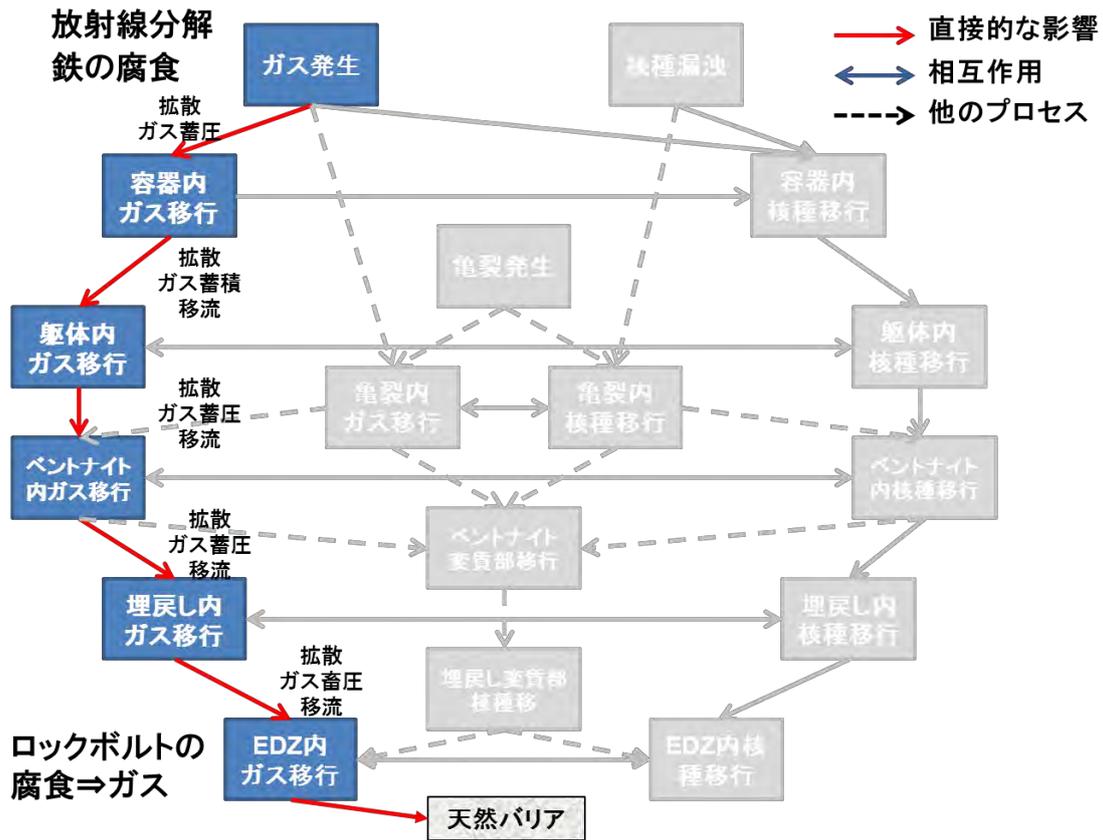
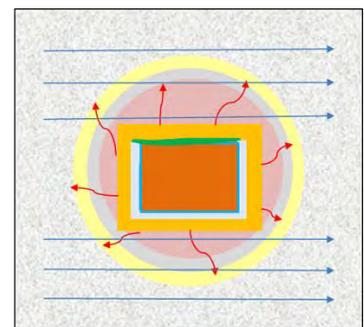


図 2.2.1-12 廃棄体パッケージの腐食が進行段階のガスと核種移行統合 FEP 関連図

e. 廃棄体パッケージの損傷⇒放射性核種の間隙水中への放出

鋼製の廃棄体パッケージの腐食が進行し、パッケージが損傷、放射性物質を閉じ込める機能が損なわれ、廃棄体の核種が浸入した間隙水に溶出し、拡散によりバリア外に放出される。

- ① ロックボルトの継続した腐食⇒ガス発生
- ② コンクリート支保工の劣化⇒高pH間隙水
- ③ 緩衝材の膨潤圧発生
- ④ 充填材のひび割れ発生
- ⑤ 廃棄体容器の損傷・飽和⇒廃棄体の損傷⇒放射性核種の間隙水への溶解⇒拡散でのバリア内移行
- ⑥ 廃棄体パッケージの腐食⇒ガス発生⇒飽和間隙中の蓄圧
- ⑦ 廃棄体による放射性分解⇒水素ガスの発生⇒蓄圧
- ⑧ 微生物分解によるCO₂の発生



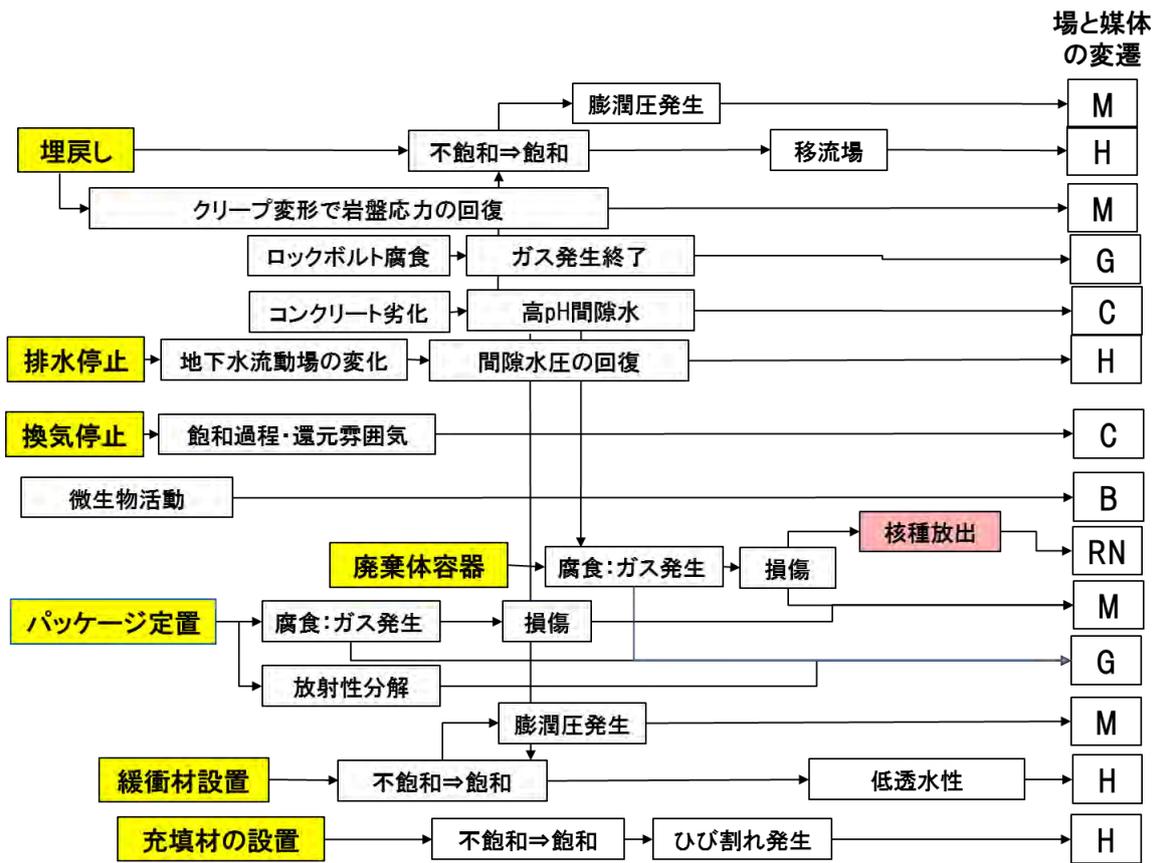


図 2.2.1-13 放射性核種がバリア外に放出される段階の場と媒体変遷の PID

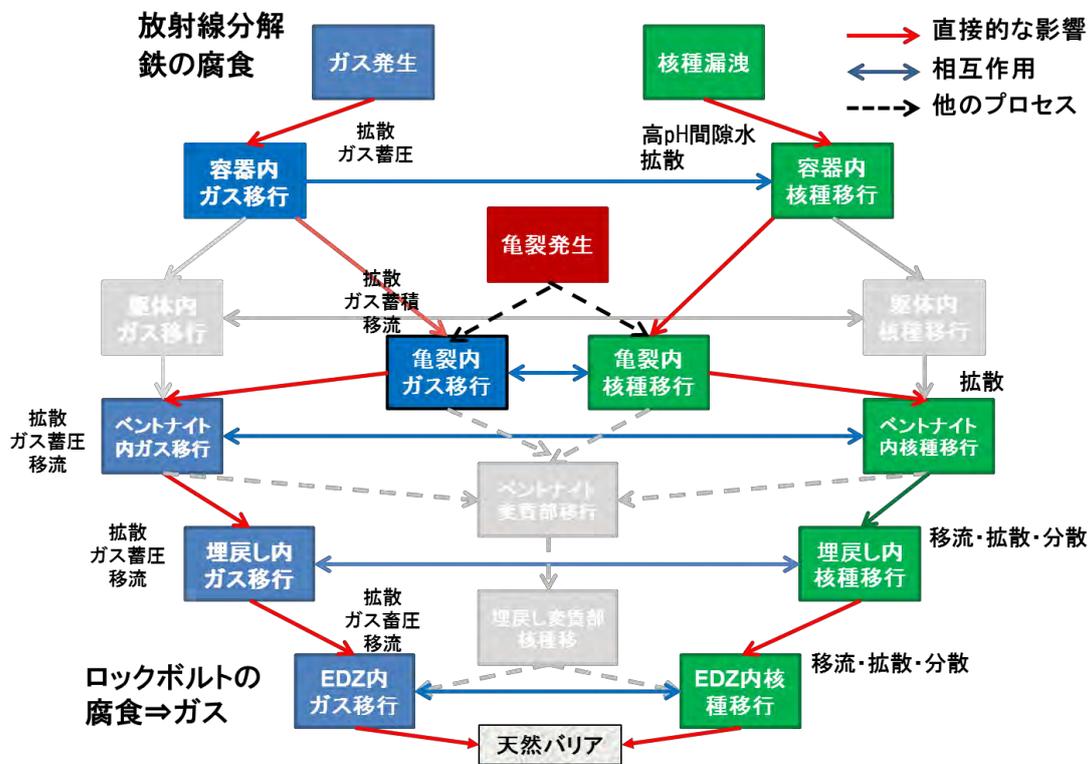


図 2.2.1-14 放射性核種がバリア外に放出される場合の統合 FEP 関連図

f. ベントナイトバリアの機能維持段階

バリア内では放射性核種が間隙水に溶出するとともにガスが継続して発生し、二相流としてベントナイトバリア中を移行する段階。ガスの蓄圧により破過は発生するがベントナイトの自己修復性で機能は維持される。

- ① ロックボルトの腐食終了
- ② コンクリート支保工の劣化⇒高pH間隙水⇒外部へ流出
- ③ 緩衝材の低透水性維持、膨潤圧発生
- ④ 充填材の変質⇒高pH間隙水の発生
- ⑤ 廃棄体の損傷⇒放射性核種の間隙水への溶解⇒拡散でのバリア内移行⇒人工バリア外への放出
- ⑥ 廃棄体パッケージの腐食⇒ガス発生⇒飽和間隙中の蓄圧
- ⑦ 廃棄体による放射性分解⇒水素ガスの発生⇒蓄圧
- ⑧ 微生物分解によるCO₂の発生

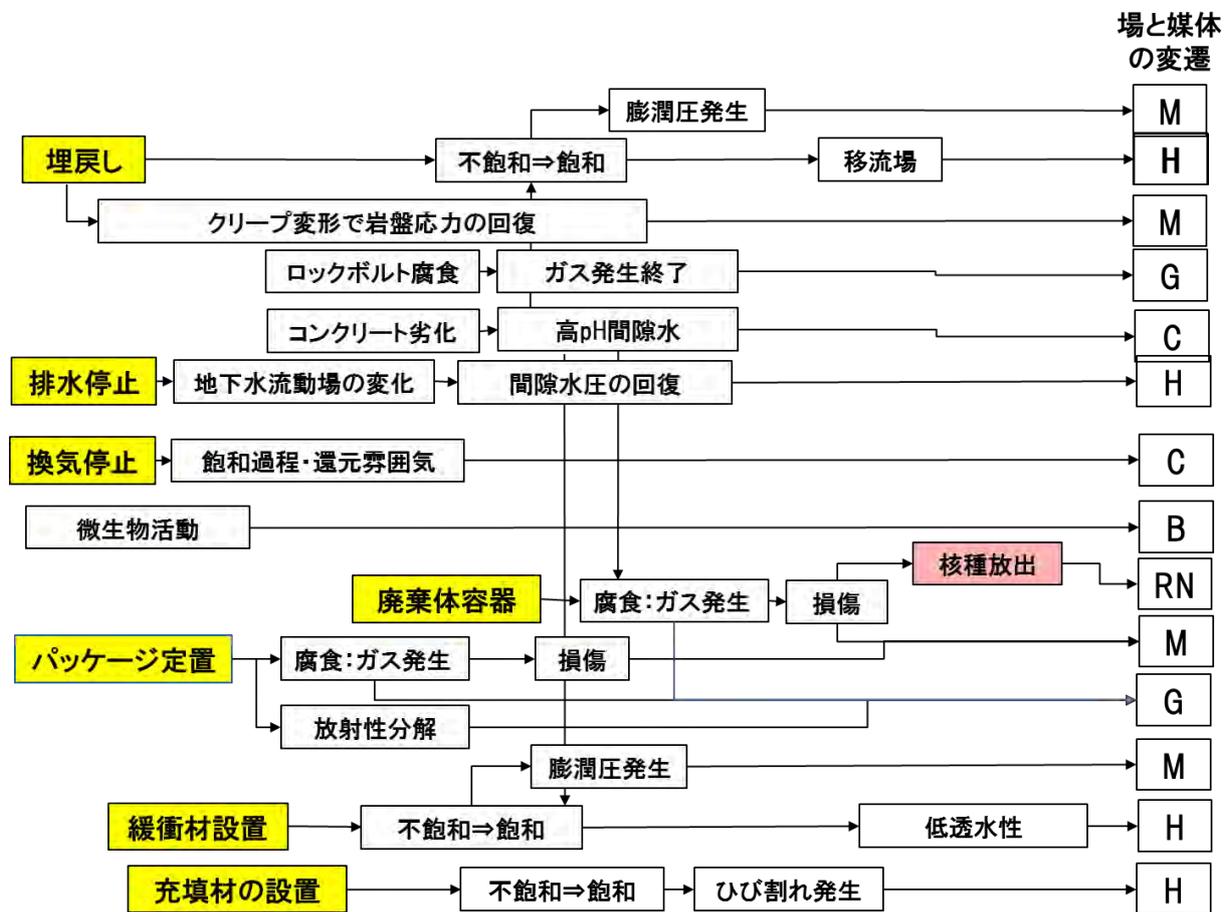
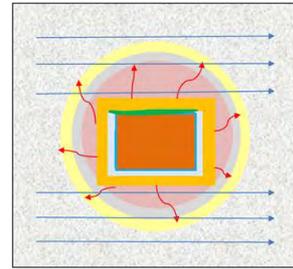


図 2.2.1-15 ベントナイトバリアが機能を維持している段階での場と媒体変遷の PID

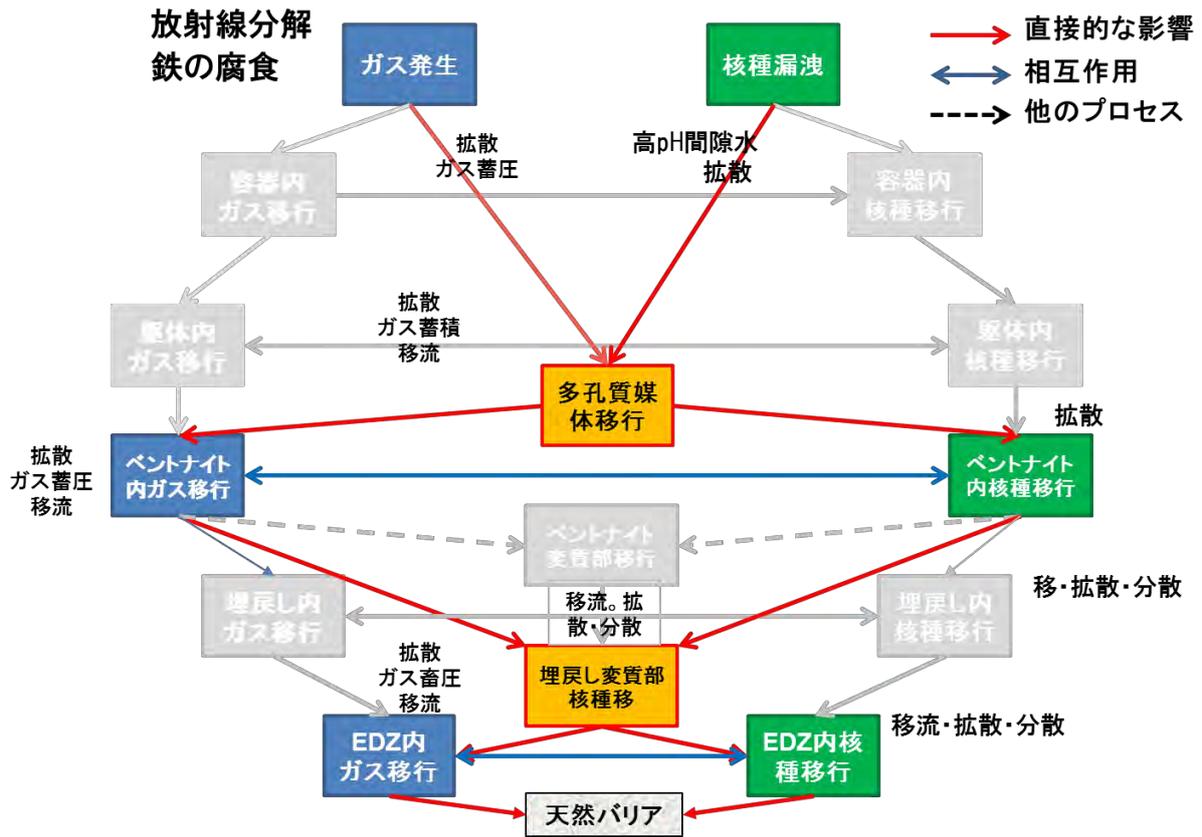
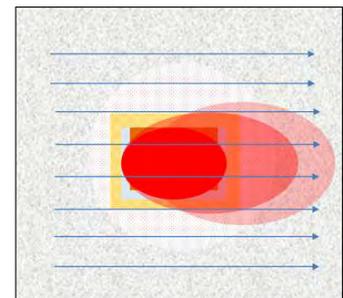


図 2.2.1-16 ベントナイトバリアが機能維持し絵いる段階でのガスと核種移行の統合 FEP 関連図

g. ベントナイトの機能損傷後

ベントナイトバリアが変質等で核種閉じ込め機能を損傷したのちの、人工バリア内で発生したガスと放射性物質は地下水に溶出し、二相流として天然バリア内に放出される。

- ① 緩衝材の変質⇒多孔質媒体⇒低透水性喪失
- ② 充填材の変質⇒多孔質媒体⇒高pH間隙水の存在
- ③ 廃棄体の損傷⇒放射性核種の間隙水への溶解⇒移流でのバリア外への移動(プルームとして移行)
- ④ 廃棄体の腐食⇒ガス発生⇒二相流で外部への移行
- ⑤ 微生物分解によるCO₂の発生



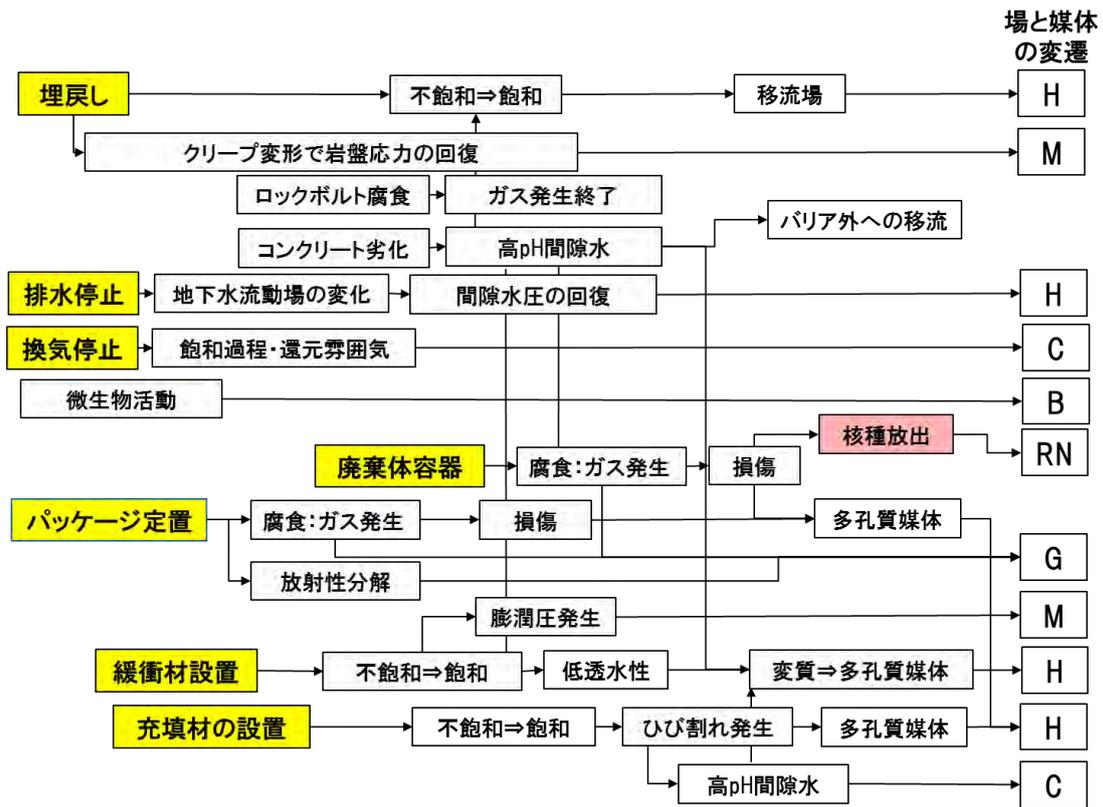


図 2.2.1-17 ベントナイトバリア機能損傷後の場と媒体の変遷 PID

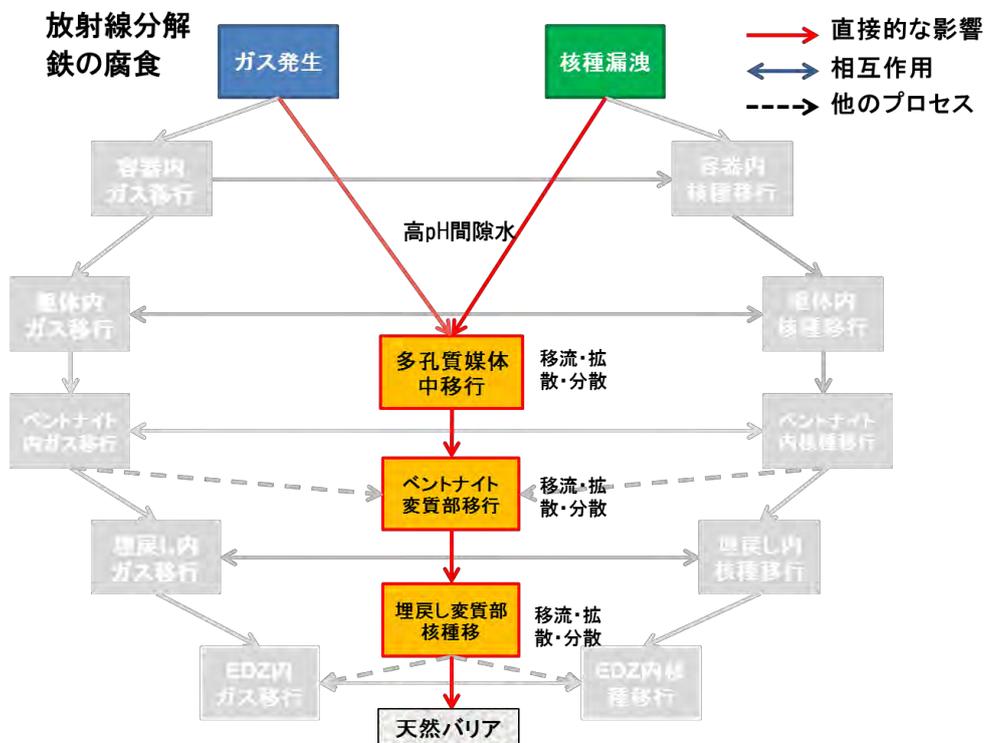


図 2.2.1-18 ベントナイトバリア機能損傷後のガスと核種移行の統合 FEP 関連図

5) ガス発生・挙動が律速する現象と核種移行シナリオとの関連性の分析と整理

前節では、人工バリア内の状態変遷表に基づいて場と媒体の変遷に係る PID とそこでのガスと核種移行の統合 FEP 関連図を作成してきた。本節では、それらの関係を整理し、ガス発生・挙動が律速する現象と核種移行シナリオの関連を分析・整理することとした。

a. 処分場閉鎖前の期間

バリア内に存在する水分の放射性分解や腐食によりガスはバリア内が不飽和の状態時から発生し、媒体中の空隙に蓄積するあるいはガス状で移行し、バリアの内側に蓄積される。バリア内が飽和するおよそ 100 年程度、その間に発生する非放射性ガス（主として水素ガス）は、酸化性の空気が残存する不飽和環境で亀裂などの空隙が少ない環境で発生することになる。この間、廃棄体パッケージは放射性物質の閉じ込め性を維持している。

b. 閉鎖後バリアが飽和過程にあり廃棄体パッケージが機能維持している期間

放射性物質はパッケージ内に閉じ込められている。不飽和環境で継続して発生するガスは充填材の空隙で蓄積し、充填材に亀裂を発生させる可能性があるが、充填材そのものには安全機能が期待されていない。ベントナイトバリア内にガスが蓄積されることから、この段階で回収という行為が発生したときに、回収作業の安全性に影響を及ぼす可能性がある。

c. バリア内が飽和、廃棄体パッケージが損傷し放射性核種が放出される期間

廃棄体パッケージが腐食により閉じ込め機能を喪失し、内部の放射性核種が間隙水に溶出、拡散あるいは二相流でバリア内側に移動する。フィンガー現象でバリア内部に浸透し、二相流で移行するとともに蓄積し、破過現象が発生しする。このような現象はガスが支配的に働くことで発生する。破過後は自己修復性で機能が回復し、また二相流での移行が支配的になるとされている。第 2 次 TRU レポートではこのような期間は 10 万年程度と推察している。

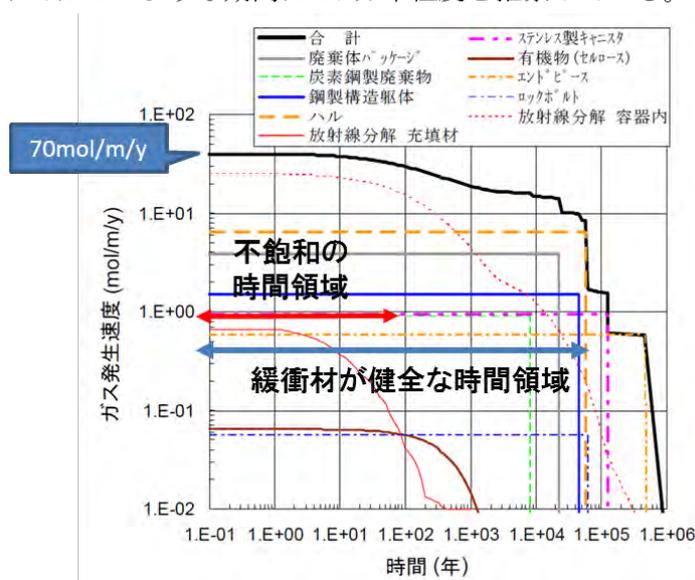


図 2.2.1-19 TRU 廃棄物グループ 2 のガス発生速度 (第 2 次 TRU レポートに一部加筆)

d. 異方性を有する媒体中でのガス発生の影響が支配する核種移行挙動

廃棄体パッケージが損傷してもその形態が残っている段階から放射性核種は間隙水に溶解していく。パッケージの腐食によるガス、放射線分解によるガスは異方性を有する媒体中を、核種を溶存した間隙水を押し上げながら亀裂中の二相流として移動し、バリアの界面の間隙に蓄圧、あるいは二相流としてバリア中に拡散していく。核種移行のドライビングフォースはガス圧と物質の濃度勾配となる。

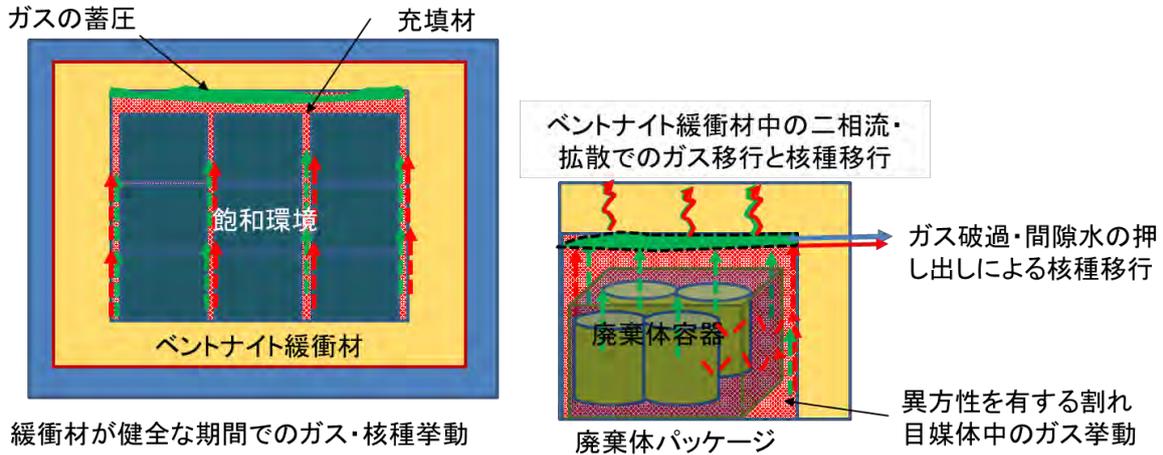


図 2.2.1-20 バリア内亀裂媒体中の二相流と拡散による核種移行イメージ

ベントナイトバリアが閉じ込め機能を維持している期間、その内部は、充填材、廃棄体パッケージが劣化・変質、あるいは腐食による二次鉱物の生成、損傷の残存物など不均質で飽和した多孔質媒体のような状態になると推定する。このような場や媒体中でガスは放射性核種の放射線分解と腐食および微生物の活動により発生し、圧力の低い部位や間隙を伝い上部に向けてガス状あるいは二相流として移行する。放射性核種や様々な要素を溶存する間隙水はガスの流れに影響を受けて、ベントナイトバリア中に二相流として移動していく。間隙で蓄圧し、ベントナイトの膨潤圧と外部からの水圧を加えた圧力を超えるとガス「破過」が発生し、蓄圧したガスが方位社製物質を溶存した間隙水とともにバリア外に放出する。破過後、ベントナイトは自己修復機能を発揮し、ガスの破過経路は低透水に回復し、二相流として移行が継続する。これらの現象は全てガス発生の影響が支配的となる。

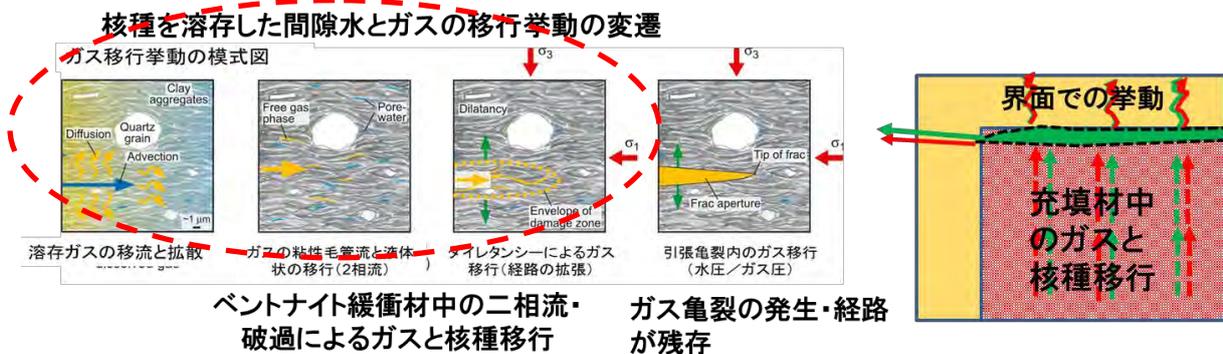


図 2.2.1-21 ベントナイトバリア中のガスと核種移行のイメージ (Nagra EN2002 に一部追記)

6) 複合プロセスにおける FEP (統合 FEP) の系統的な整理

ガスと放射性核種の移行における複合プロセスとしては、以下の媒体中でのプロセスを取り上げ、それぞれに係る統合 FEP を関連図として系統的に整理する。ここでの作業は、前述したガス発生の影響が支配すると想定される核種移行プロセスに着目している。

① 廃棄体パッケージ内でのガス移行と核種移行

ガス発生源となる物質と放射性物質が閉じ込められた廃棄体パッケージ内でのガスと核種の移行は、ガス発生の影響に支配される。

② 充填材中のガス移行と核種移行

廃棄体パッケージ内あるいはパッケージ周辺にはモルタルの充填材が設置される。乾燥収縮等により、充填材中に亀裂が発生する。亀裂媒体中のガス移行と核種移行が連成する。

③ ベントナイトバリア中と充填材の界面におけるガス移行と核種移行

ベントナイトバリア中でのガスと核種移行を支配する界面でのガス移行挙動に着目する。

④ 埋戻し材中のガス移行と核種移行

埋戻し内部での間隙は多孔質媒体となることから、多孔質媒体中でのガス移行と核種移行に着目する。

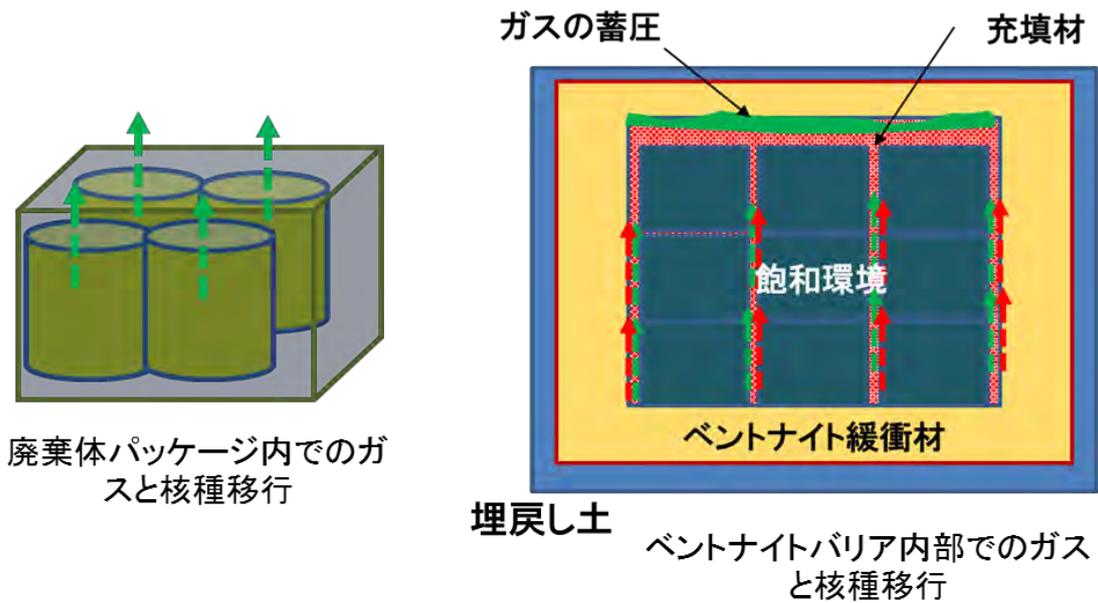


図 2.2.1-22 ガスと核種移行の複合プロセスにおける場と媒体

以下、①～④の複合プロセスについて、場の状態を考慮した統合 FEP の関連図を詳細化して整理する。

a. 廃棄体パッケージ内でのガスと核種移行挙動

- ・ 金属腐食、放射線分解からのガスは初期の不飽和環境の段階から発生し、発生したガスはガス状で廃棄体パッケージ内に蓄圧される。
- ・ パッケージが閉じ込め機能を損傷したのち、間隙水が内部に浸透し飽和に至る。この段階で放射性核種は浸入した間隙水に溶出する（溶解度で溶出する量は制約）。発生しているガスもこの浸入間隙水に溶け込む、あるいはガス状で移行する。
- ・ パッケージ内内部が飽和した段階で、放射性核種は拡散で水中を移動する。また間隙に蓄圧したガスと二相流として充填材中に移行する。
- ・ この状態でパッケージの存在は無視できる。

ガス発生が支配的となる現象

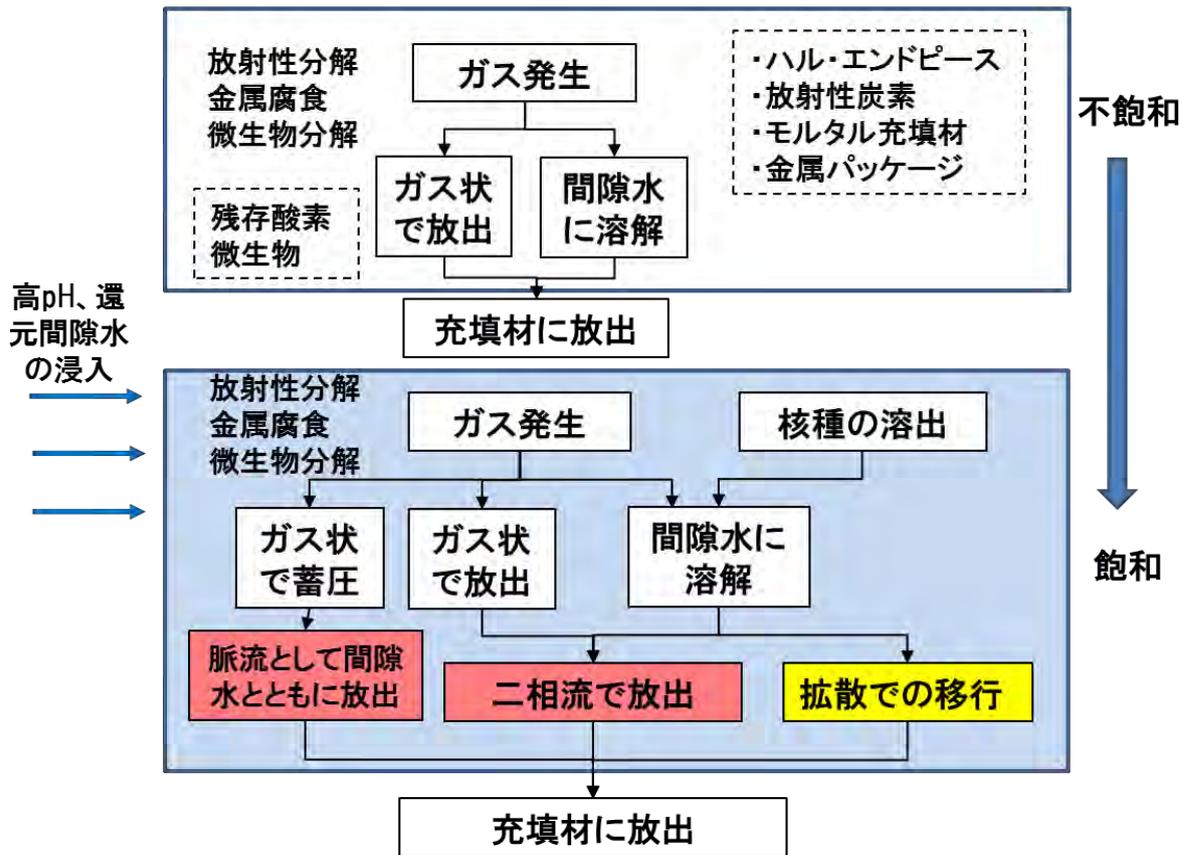


図 2.2.1-23 廃棄体パッケージ内でのガスと核種移行の複合プロセスの統合 FEP 関連図

b. 充填材中のガス移行と核種移行

- ・ 不飽和環境でのガスは、亀裂が入った異方性の高い充填材中をガス状で移行する。
- ・ 飽和環境では、廃棄体パッケージから放出された放射性核種を含む間隙水が亀裂媒体中をガスとともに二相流で移行する。そのドライビングフォースはガス圧。
- ・ 間隙水に溶存した放射性核種はベントナイトバリアの界面に到達して蓄圧する。
- ・ 充填材はカルシウムの溶脱により最後は多孔質媒体となり、放射性核種は拡散か二相流として移行する。

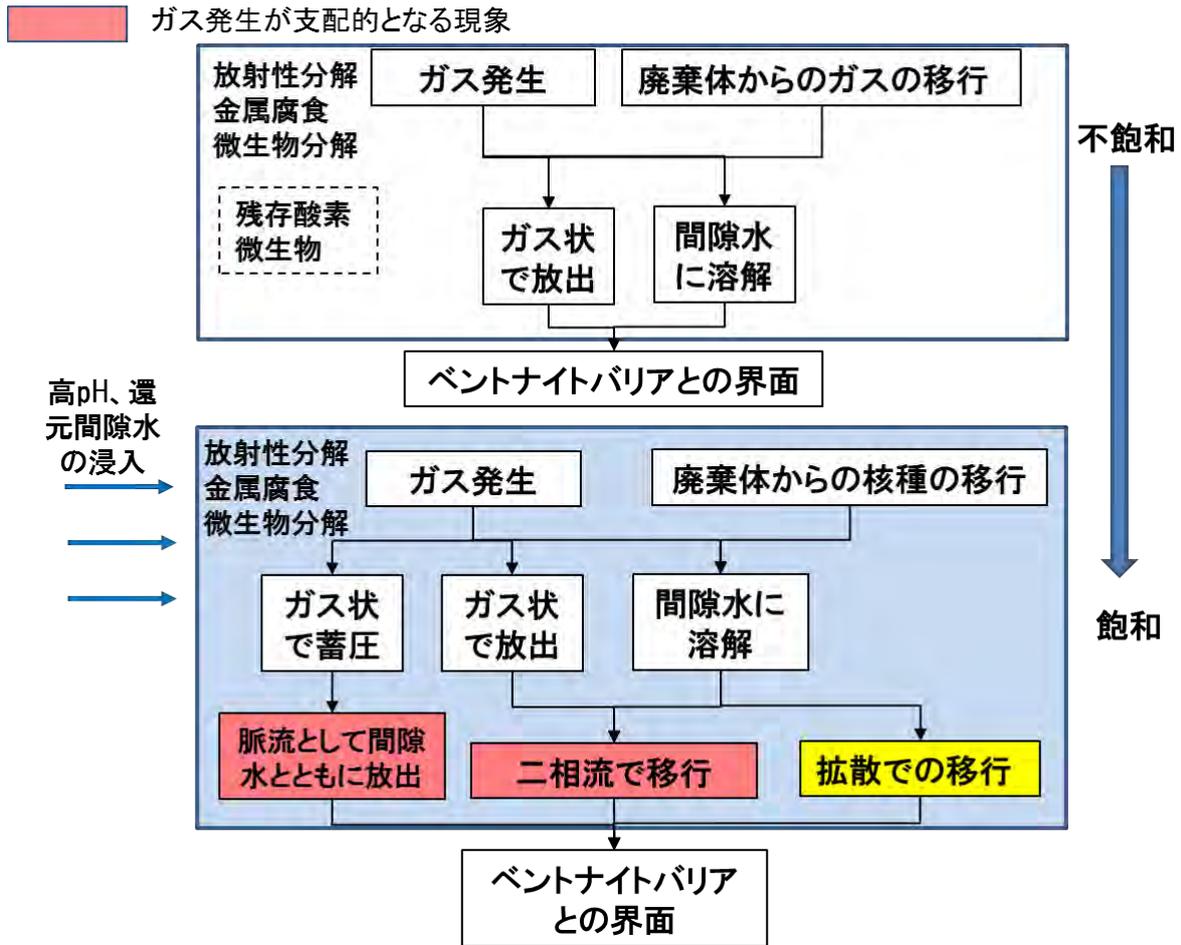


図 2.2.1-24 充填材中でのガスと核種移行の複合プロセスの統合 FEP 関連図

c. ベントナイトバリア中と充填材の界面におけるガス移行と核種移行

- ・ 不飽和環境で界面に達したガスは、界面に蓄圧するとともにベントナイトバリア中にフィンガー状に浸透して行く。
- ・ 飽和環境で界面に達したガスは、核種を含む二相流として蓄圧し、破過によりガスと間隙水がベントナイトバリア外部に放出される。
- ・ 破過が繰り返し発生することによるベントナイトバリアの劣化や損傷により核移行が促進される可能性有り。
- ・ ガス発生量が少ない場合は、二相流としてベントナイトバリア中を継続して移行する。
- ・ 界面を移行するガスあるいは二相流も存在する。ガスの蓄圧は、間隙の大きな部位で発生する。

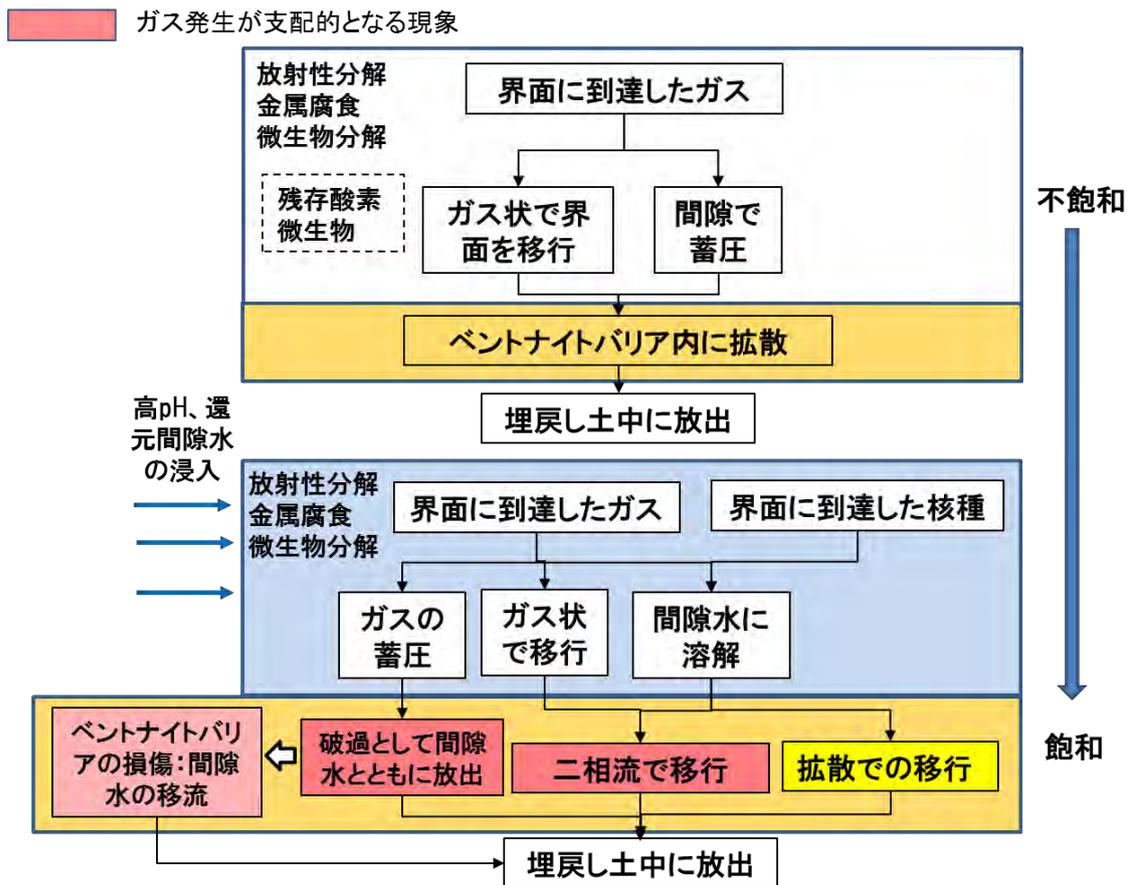


図 2.2.1-25 ベントナイトバリア中と界面におけるガスと核種移行の複合プロセスの統合 FEP 関連図

d. 埋戻し材中のガスと核種移行

- ・ ベントナイトバリア周辺の埋戻し材は、ベントナイトと砂の混合土あるいはコンクリートが予定されている。
- ・ 廃棄体の定置段階で側部と底部は施工されており、不飽和の状態の間隙を有する。
- ・ 不飽和過程でベントナイトバリア内部から発生し、移行してきたガスは、この不飽和間隙の中をガス状で移行する、あるいは浸透してくる地下水に溶解し、拡散あるいは二相流で移行し、坑道周辺の EDZ に移行する。
- ・ 飽和の場合は、核種を含む間隙水が二相流として多孔質媒体中を移行し、EDZ に放出される。この時のドライビングフォースはガス圧となる。

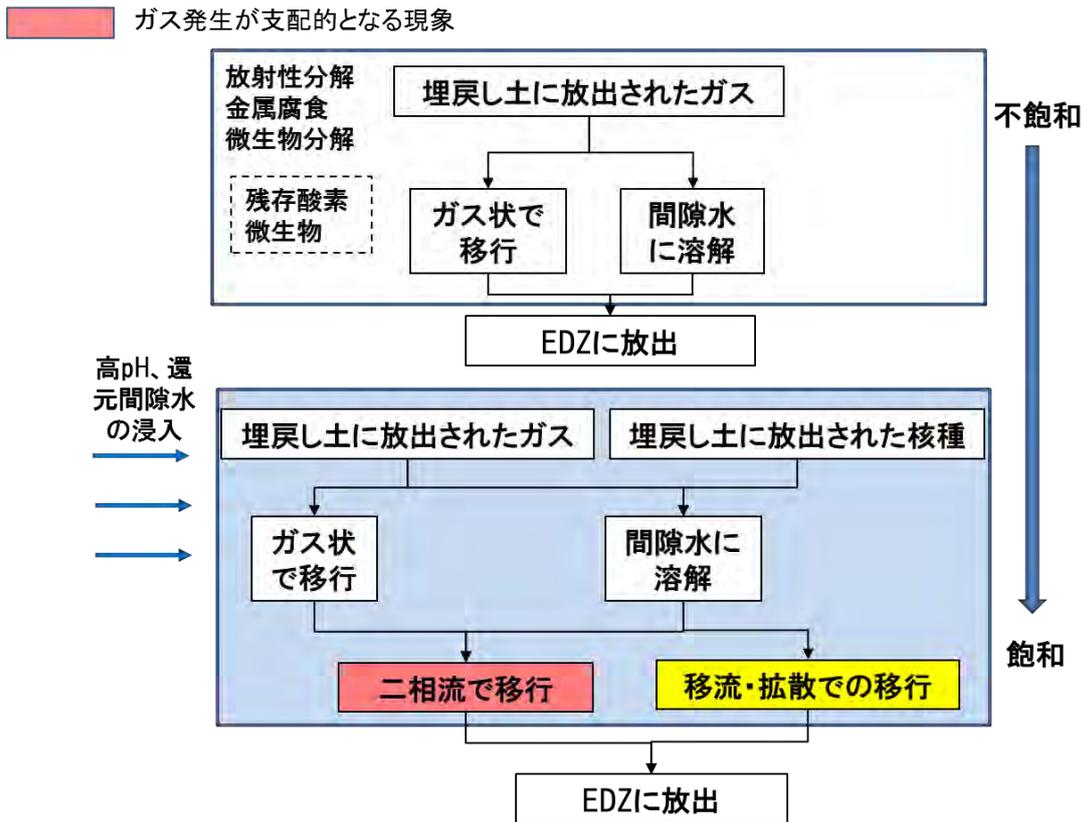


図 2.2.1-26 埋戻し材中のガスと核種移行の複合プロセスの統合 FEP 関連図

7) 不確実性の特定と低減に向けた具体的な対応策の検討

平成 27 年度は、作成した評価体系に基づく各作業要素の不確実性抽出を実施した。評価シナリオの設定に関しては、これまで検討してきた「核種移行との複合プロセス」に関する不確実性が最も大きいと結論し、下図に示す優先度の高い技術課題を設定した。

本節では、前節で整理したガスと核種移行の複合プロセス関連図に着目し、そこでの不確実性の抽出とその具体的な対応策を検討する。

②シナリオ設定作業	優先度の高い技術課題	検討方針
	✓ システムの状態変遷と統合FEP関連図における「ガス移行・核種移行の複合プロセス」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の各プロセスモデル(既存の二相流モデル等)を統合した評価モデル(達成モデル)の概念を構築



図 2.2.1-27 シナリオ設定における優先度の高い技術課題と検討方針 (平成 27 年度報告書[4])

前節で整理した複合プロセスの統合 FEP 関連図に係る不確実性とその低減に向けた具体的な対応策を下図に示す。

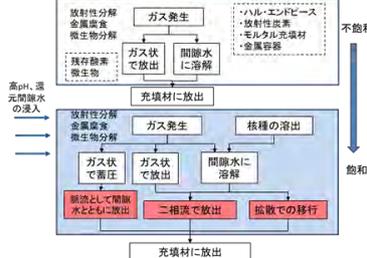
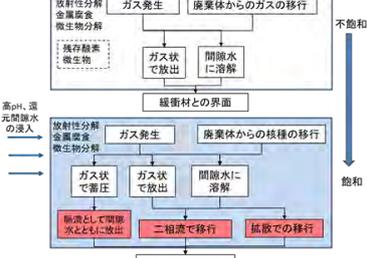
複合プロセスの統合FEP関連図	不確実性	低減に向けた具体的対応策
<p>廃棄体パッケージ中のガスと核種移行</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス発生メカニズムに関して、廃棄体パッケージ内の状態設定と廃棄体と充填物の接触面の状況が不明 ・不飽和の状況での腐食、放射線分解によるガス発生速度が不明 ・ガス状での廃棄体内での挙動は間隙の状態に依存するため、充填状況の把握が必要 ・飽和環境でのガス移行と核種移行の三つの複合プロセスの割合が不明 	<ul style="list-style-type: none"> ・不飽和環境での異なるガス発生メカニズムと発生量を現実的な場を設定して解析的に求める ・不飽和環境でのガス挙動が廃棄体内部への間隙水浸透に与える影響を解析で求める ・飽和環境での間隙水への核種溶解量は計算可能 ・充填材に放出されるガスと核種の複合プロセスの扱いは、二相流と間隙水の放出プロセスにおける核種移行を追加してモデル化することで対処可能
<p>充填材中のガスと核種移行</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・不飽和環境でのガス移行とガス発生については未検討 ・廃棄体パッケージが鋼製パッケージになったことによる腐食ガスの発生、放射線分解での発生量が変化 ・飽和環境では、初期段階は亀裂媒体中でのガスと核種移行の三つの複合プロセスの割合が不明 	<ul style="list-style-type: none"> ・不飽和環境でのガス挙動が内部飽和過程に与える影響は解析的に評価可能 ・廃棄体パッケージの変更に係るガス発生への影響については、解析に求めることが可能 ・飽和環境では、亀裂媒体の状態と変質後の多孔質媒体での三つの複合プロセスが考えられるが、基本的に二相流問題として移行挙動を解析可能。亀裂媒体では、狭い間隙での移行となるがこれもモデル化可能

図 2.2.1-28 廃棄体パッケージ、充填材中での複合プロセスに係る不確実性と対応策

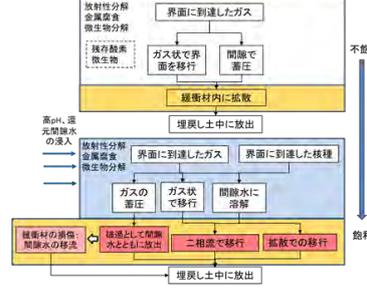
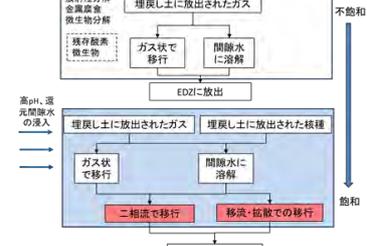
複合プロセスの統合FEP関連図	不確実性	低減に向けた具体的対応策
<p>ベントナイトバリア中と界面での移行</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・不飽和環境でのガス挙動についてはこれまで未検討ベントナイトバリア界面に膜を作る可能性があり ・飽和環境でのガス移行と核種移行の複合プロセスは三つのモードで説明できるがそれぞれの割合は不明 ・界面でのガス蓄圧による破過が繰り返し発生した場合のベントナイトバリアの変質や損傷可能性が不明(損傷のメカニズム、化学変化) 	<ul style="list-style-type: none"> ・不飽和環境でのガス挙動の把握は解析的に求めることが可能。ベントナイトバリア内部の界面にガスが蓄圧されることで地下水浸透に時間がかかる可能性があり ・ガスと核種移行の複合プロセスは二相流問題として解析可能。破過による一時的な汚染間隙水の放出も解析で可能 ・繰り返し発生すると推定されるガス破過によりベントナイトバリアがどのような影響を受けるについては、実験と破過経路での劣化や損傷状態を高pH間隙水を用いて実験的に確認
<p>埋戻し材中でのガスと核種移行</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・不飽和環境でのガス移行については検討されていない。飽和プロセスとの相互作用が明確ではないが操業中の安全性に与える影響は無視できない。 ・飽和環境でのガスと核種移行の複合プロセスは二相流と移行・拡散になるがそれぞれの割合は不明。 	<ul style="list-style-type: none"> ・不飽和時のガス挙動は蓄圧を含めて間隙中のガス移行として解析的に求めることが可能 ・多孔質媒体中での複合プロセスは二相流問題として解析可能

図 2.2.1-29 ベントナイトバリアと埋戻し材中での複合プロセスに係る不確実性と対応策

(2) 複合プロセスモデルを組み合わせた評価モデルの整備に向けての検討

第2次 TRU レポート、NUMO 技術レポート (TR-14-03 [8]) では、ガス発生量の定量的な影響評価実施されておらず、第1次 TRU レポートの結果を定性的に考察しているだけである。一方、ガス移行挙動のメカニズムを考慮したプロセスモデルは、第1次 TRU レポートが作成された約16年前に比較して実験等を踏まえて開発・改良されてきている (例えば、FORGE 報告書)。また、核種移行モデルは第1次 TRU レポートの時代 (2000 年前後) から進歩しておらず、ガス移行と核種移行は全く別のプロセスモデルで取り扱われ、ベントナイト中のガスの挙動のみに焦点をあてて評価されている。

その最大の原因は、モデル化の制約から、TRU 廃棄物処分固有の人工バリア内の形状や特質が考慮されていないことにある。現状ガス移行解析では、連続した多孔質媒体として取り扱われ、核種移行解析では、バリア内はミキシングセルとして幾何学的な形状等は考慮されていない。

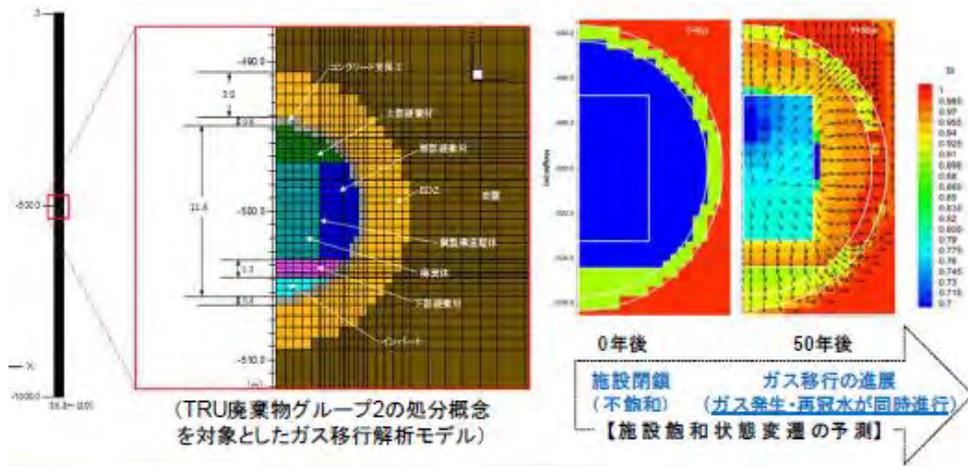


図 2.2.1-30 ガス移行挙動を評価する解析モデル例[4]

NUMOの技術レポートにおける核種移行モデルは、基本的に1次レポートの考え方を踏襲し、飽和後人工バリア内は、拡散支配場で直交1次元多孔質媒体で近似されている。人工バリアの形状、異方性は考慮されていない。

ガス発生と挙動は、人工バリア内の廃棄体パッケージの特性と定置形状、充填材の特性、ベントナイトバリアの特性に大きく影響される。ガスの蓄圧により人工バリア内は拡散場ではなくなる可能性もある。また、ガスの蓄圧は間隙の大きさに大きく影響を受け、局地的なガス圧の上昇によるベントナイト中への汚染水 (核種が溶出した間隙水) の浸入が加速される可能性がある。

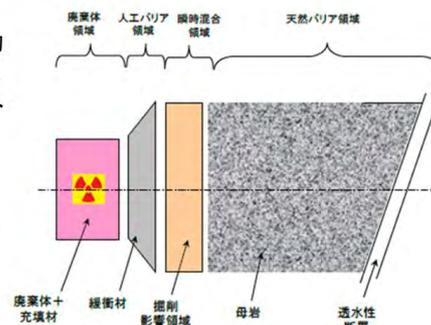


図 8.4.3-1 核種移行解析においてモデル化された領域

ガスの問題は、媒体の性状と特性に大きく影響を受ける。このような場での核種移行挙動を評価する必要がある。

複合現象の把握の重要性

表 8.4.3-1 人工バリア核種移行解析の概念モデル詳細

領域	廃棄体領域	人工バリア領域	掘削影響領域
実際の部位	廃棄体+充填材	緩衝材	掘削影響領域
モデル	直交1次元 多孔質媒体近似		
概念モデル上の役割	ソースターム (領域内での核種濃度の空間分布なし)	移行媒体 (領域内での核種濃度の空間分布あり)	ミキシングセル (領域内での核種濃度の空間分布なし)
想定する現象	<ul style="list-style-type: none"> 放射性壊変 廃棄体からの核種の浸出 拡散 移流, 分散 瞬時溶解沈殿平衡 瞬時吸着分配平衡 	<ul style="list-style-type: none"> 放射性壊変 拡散 移流, 分散 取着分配平衡 	<ul style="list-style-type: none"> 放射性壊変 拡散 移流, 分散

図 2.2.1-31 TRU 廃棄物を対象とした核種移行モデル例 (NUMO TR-14-03 [8])

そこで、「2.2.1 項(1) ガス移行プロセスと核種移行プロセス複合現象のシナリオ上での対応策の検討」で検討した TRU 人工バリア概念における現実的なガス移行のプロセスを考慮しつつ、異方性の高いガス移行挙動が支配する場での核種挙動との複合現象を定量的に取り扱うために必要なモデル化、評価ケースについて言及し、それらを実現するための課題を整理するとともにモデル化、評価ケース設定における不確実性低減対策を検討することとした。

1) ガス発生の影響に律速される複合プロセスの評価ケースの設定

評価体系に従えば、現象と場の理解からトップダウン的に設定するシナリオは、できる限り現実的な事象やプロセスを追跡し作成するものである。そのような現実的なシナリオ設定の分析により、ガス発生の影響に律速される複合プロセスは以下に示す3つの現象に集約できる。これらは媒体が異なった場合も同様である。いずれも核種が溶解した間隙水の外部への移行現象となる。これらの複合プロセスは、また相互に関連する。

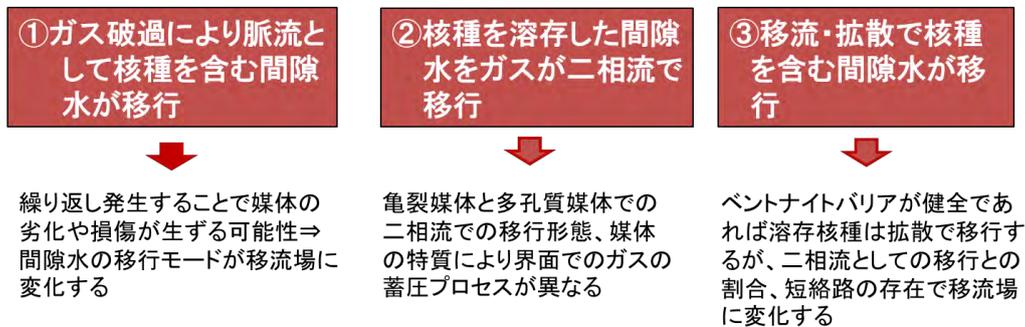


図 2.2.1-32 複合プロセスの評価ケース例

2) 複合プロセスのモデル化に向けてのアプローチ

ガスと核種移行の複合プロセスは、現状でのガス移行プロセスモデルと核種移行プロセスモデルを組合せてできるものではない。前述したようにそれぞれのモデル化の考え方が異なるためである（下図参照）。

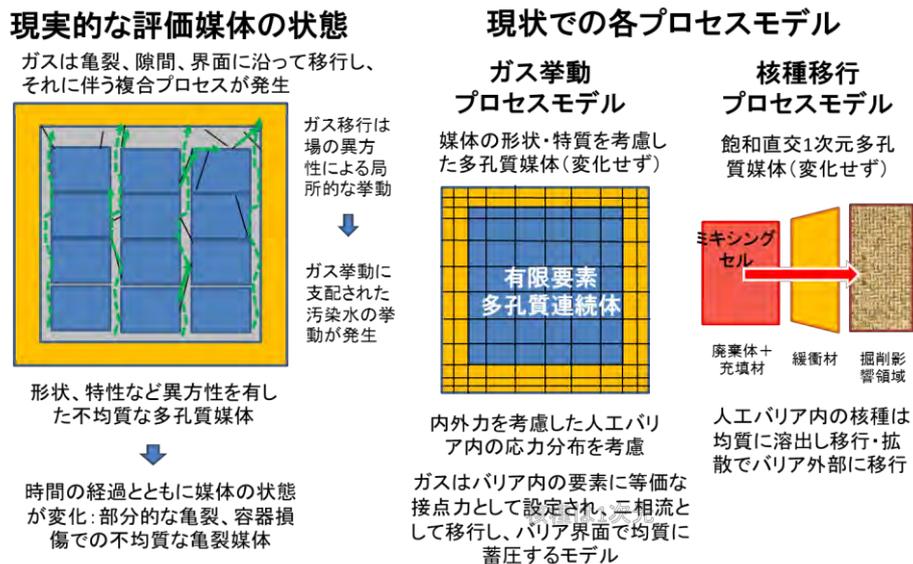


図 2.2.1-33 現実複合プロセスの媒体と現状のプロセスモデル

3) 複合プロセスのモデル化例

ガスと核種移行の複合プロセスのモデル化に向けては、前節で設定した複合プロセスの統合FEP関連図を考慮したモデル化を行うことになる。

4つの複合プロセスは、下図に示すようにそれぞれ異なる媒体と環境でのガスと核種移行挙動となる。これらの媒体モデルが不飽和の環境でのガス移行、また飽和環境でのガス移行と核種移行の複合プロセスを形成する。

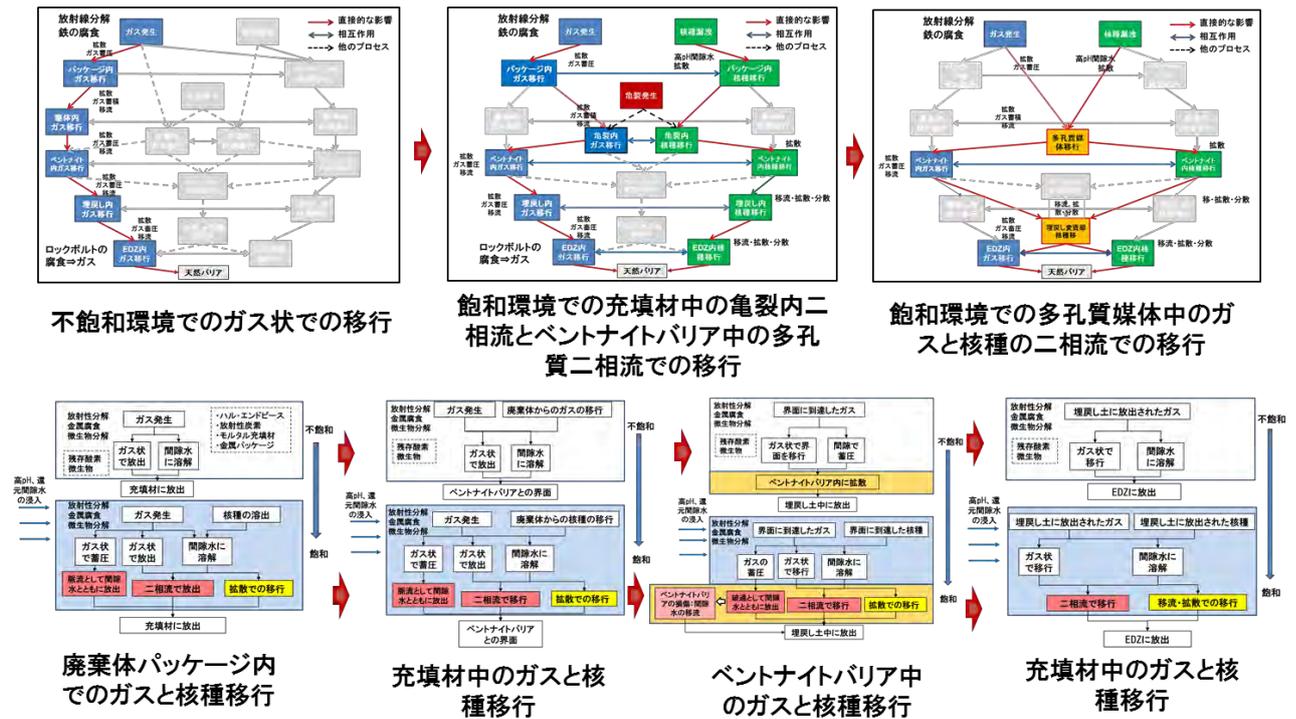


図 2.2.1-34 異なる媒体中でのガスと核種移行の複合プロセスの連携

複合プロセスのモデル化では、ベントナイトバリアは安全機能を維持することを前提に上図4つのプロセスをモデル化することになる。モデル化するには、FEP関連図だけでなく、場と環境の変化を追跡できるプロセス・インフルエンス・ダイアグラム（PID）の作成が必要となる。4つのプロセスと場と媒体の状態変遷を考慮した複合プロセスの変遷を図 2.2.1-35 に示す。

この図では、場と媒体の状態変遷を力学、水理、化学、熱の特性変化で示している。腐食や変質で発生するガスの移行はそれぞれの変化した媒体中をガス状あるいは二相流で移行する。廃棄体の放射性物質は間隙水に溶出し、拡散あるいは二相流で媒体中を移行していく複合プロセスを示した。

このようなガスと核種移行の複合プロセスをモデル化する一つの事例として、図 2.2.1-36 にPIDで整理した状態変遷をモデルチェーンとして提示した。

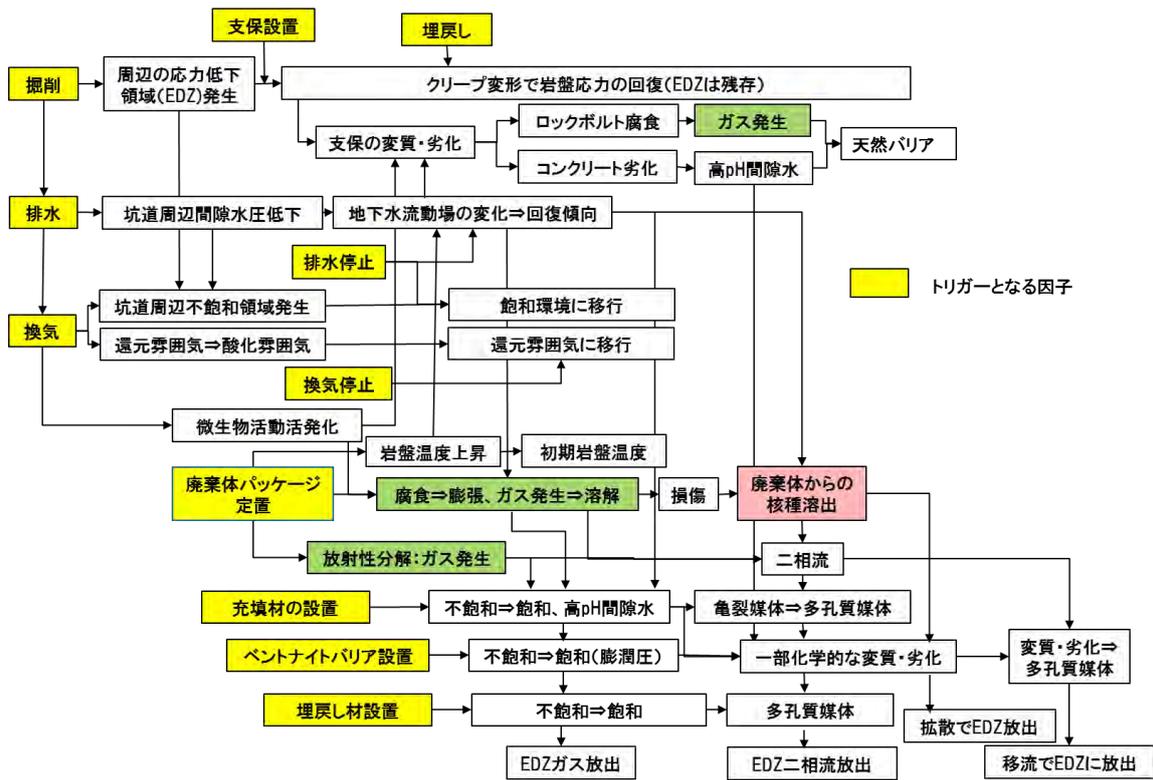


図 2.2.1-35 場と媒体の状態変遷とガス・核種移行プロセスを明示した PID

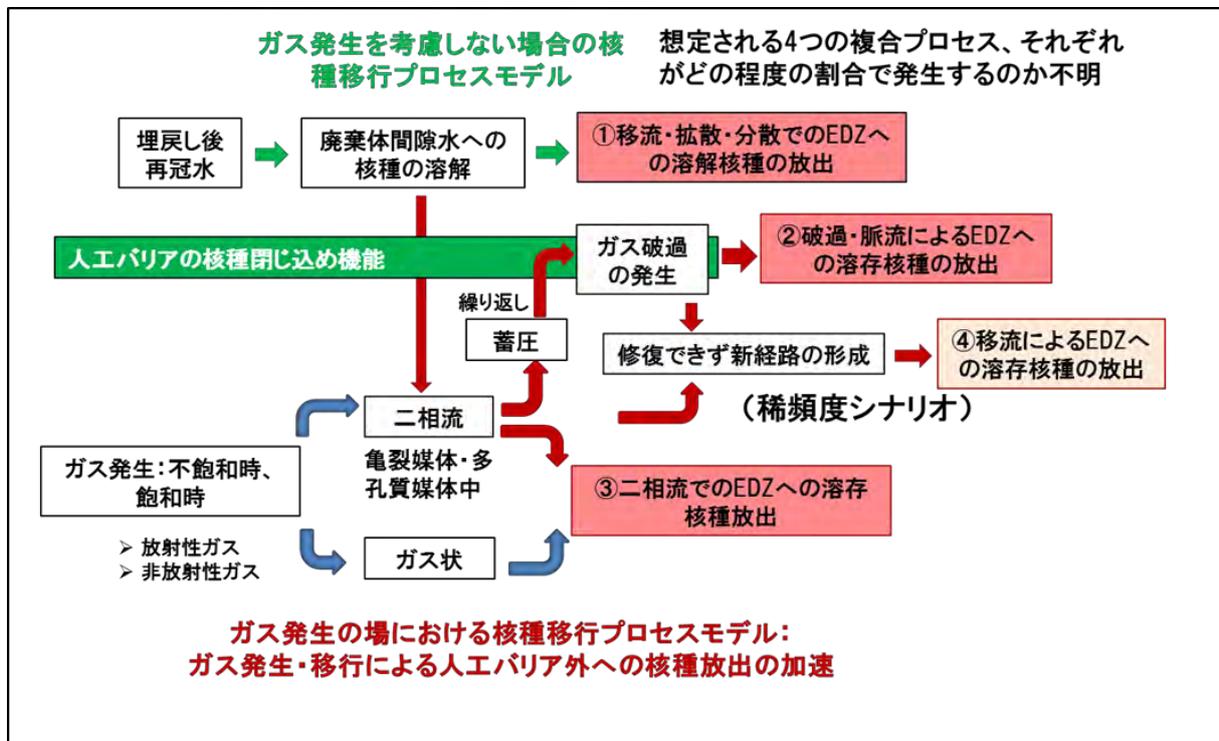


図 2.2.1-36 4つの複合プロセスを考慮したモデル化例

2.2.2 ガス発生・移行の影響評価で対象とする事象や現象（FEP）の絞り込みに係る検討

2.2.1 項では、TRU 廃棄物処分概念における人工バリアシステムの時系列的な状態設定（既存のシナリオ）をベースに、ガス発生によるバリア機能等への影響と核種移行の複合現象の現実的なシナリオ設定とそれに対応する評価ケースの設定に係わる検討を実施してきた。本項では、同じく既存のシナリオをベースとして、想定される複合現象の内、ガス発生が律速する影響評価シナリオとガス以外の現象に律速されるバリア性能の劣化・損傷に着目した異なるシナリオを設定し、それらに関連する FEP（あるいは統合 FEP）を抽出するとともに、その内容を吟味し、設定したシナリオの成立性の評価に結びつけていくため、以下の検討を実施した。

① ガス移行評価シナリオの成立性に係る FEP の抽出

既存のガス移行評価シナリオ（平成 25～26 年度に整備[4]）をベースとして、バリア性能への影響因子を、ガス発生によるものとそれ以外に区分したうえで、評価体系（平成 27 年度に整備[4]）に基づいてそれぞれの影響伝搬（評価の流れの中で上流側からの不確実性が下流側へ伝搬する）シナリオ、例えば下記の 3 つに分類したのち、トップダウンでシナリオを構成する FEP（あるいは統合 FEP）を抽出した（基本・変動・その他の分類についても、検討の中で吟味）。

- ・ 基本シナリオ（「ガス発生のみによって律速されるバリア性能の劣化事象」が想定されるシナリオ）の成立性に係る FEP の抽出
- ・ 変動シナリオ（「ガス発生以外の要因によって律速されるバリア性能の劣化事象で包含できない事象」が想定されるシナリオ）の成立性に係る FEP の抽出
⇒基本シナリオでの保守性を考慮した場合、発生の可能性が否定できない FEP
- ・ その他シナリオ（「ガス発生以外の要因によって律速されるバリア性能の劣化事象」が想定されるシナリオ）の成立性に係る FEP の抽出

② 抽出した FEP の整理に基づく評価対象とすべき事象や現象の把握

前項で抽出した FEP の整理に基づき、評価対象とすべき事象や現象を把握することでシナリオ成立上の重要 FEP を絞り込み、関連する知見を吟味することでガス移行評価シナリオの不確実性低減に資する成果として取りまとめた。

以上の実施イメージ（平成 28 年度）を、「2.2.1 項」や過年度（平成 25～27 年度[4]）の実施成果との相関と併せて図 2.2.2-1 に示す。

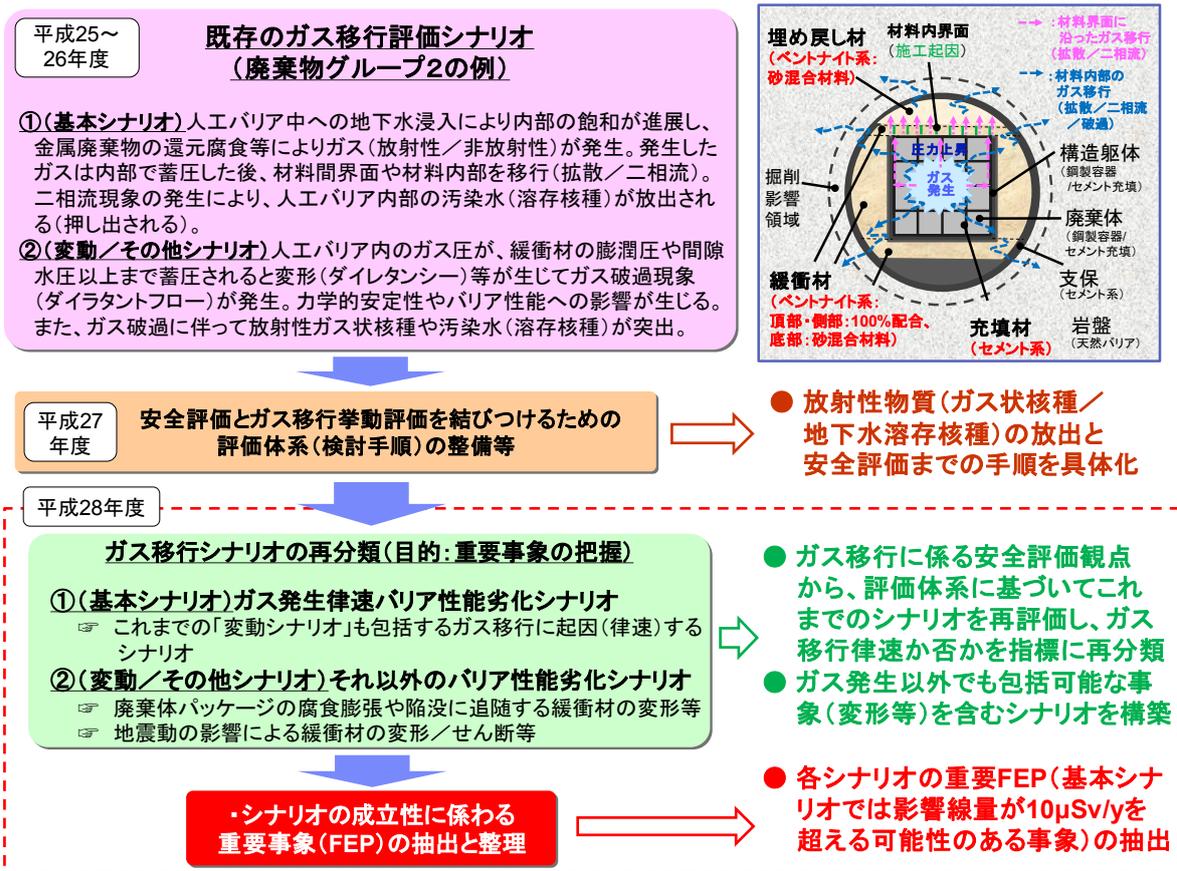


図 2.2.2-1 重要事象 (FEP) 抽出と評価の実施イメージ

(1) ガス移行評価シナリオの成立性に係る FEP の抽出

1) 検討の前提と検討方針

a. 検討の前提

第2次 TRU レポート[2]、NUMO TR-14-03[8]では、ガス移行評価のシナリオ設定において、レファレンスシナリオのサブシナリオとして扱い、二相流による汚染水の押し出しの影響を評価しており、バリア劣化を含めた影響については取り扱っていない。

FORGE 等の共同研究において、ガス発生の影響をまとめているが、TRU 廃棄物処分に類似の処分概念では、ベントナイト緩衝材を用いていない例が多いため、ガス影響による健全性を含めた評価は実施されていない。

地震や断層活等、自然現象によるベントナイトバリアの健全性評価も HLW 処分を対象に実施されているが、TRU 廃棄物処分を対象とした評価はなされていない。

これらの背景を考慮して、バリア性能への影響因子を、ガス発生によるものとそれ以外に区分し、それぞれの影響伝搬シナリオを、例えば下記の3つに分類したのち、シナリオを構成する FEP (あるいは統合 FEP) を抽出することとした。(基本、変動、その他の分類についても、検討の中で吟味する)

b. 検討方針

ガス発生が支配的となる現象、ガス発生の影響が否定できない現象、ガス発生以外の現象が支

配的になる現象をトップダウン的に設定することとした。

設定した現象を分析することで、関連する要素を FEP として抽出し、重要な FEP を用いて FEP 関連図を作成し、安全概念の成立性評価のシナリオとして取りまとめることとした。

2) 検討項目と検討の進め方

本節での検討目的は、TRU 廃棄物処分における安全概念（特に人工バリアの安全機能）の成立性評価に資するシナリオの内、ガス発生の影響に支配されると推定される現象を把握し、関連するシナリオを詳細に分析することで関連する FEP をトップダウンで抽出し、次節での重要 FEP 設定につなげていくこととした。

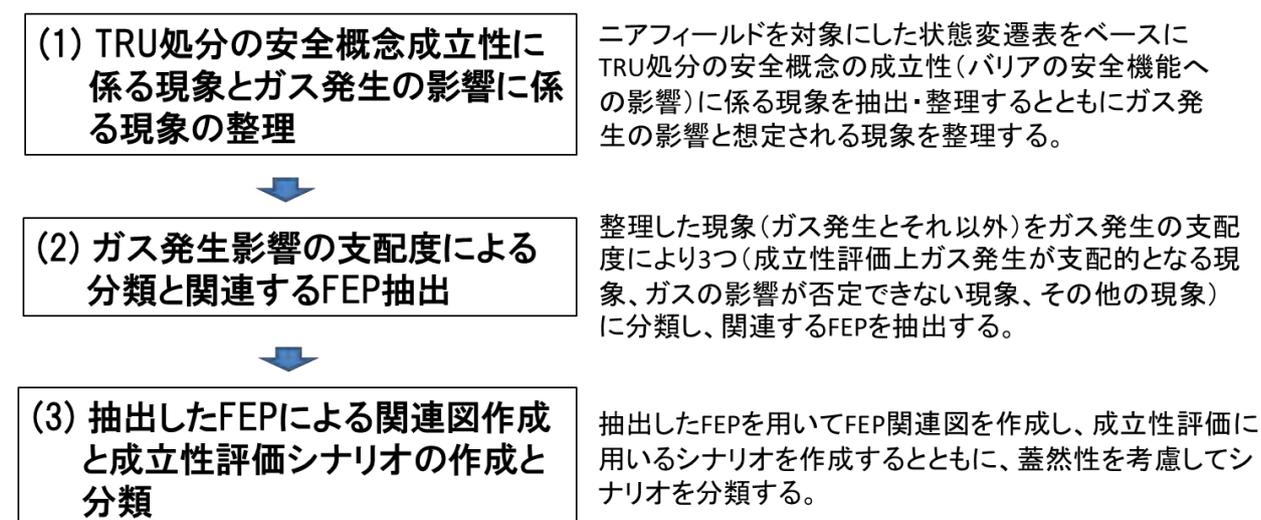


図 2.2.2-2 検討項目と検討概要

3) TRU 廃棄物処分の安全概念成立性に係る現象とガス発生の影響に係る現象の整理

a. 基本シナリオでの考慮すべき現象

本節では、ニアフィールドを対象にした状態変遷表をベースに TRU 廃棄物処分の安全概念の成立性（バリアの安全機能への影響）に係る現象を抽出・整理するとともにガス発生の影響と想定される現象を整理することとした。

これまでの検討から基本シナリオとして考慮する現象は、下図に示す状態変遷から点線内に記述した要素が考えられる。

1. 廃棄体容器の位置	2. 坑道内環境	3. 坑道内放射線	4. 坑道内放射線	5. ペントナイトの飽和状態	6. ペントナイトの飽和状態
<p>放射線分解の腐食</p> <p>放射線分解の腐食</p> <p>放射線分解の腐食</p>					
<p>グループ2のレファレンスとする状態変遷表</p>					

- 閉鎖後の処分坑道内のガスと放射性核種の移行に係る基本シナリオ
- 不飽和環境での放射線分解、腐食によるガス発生⇒間隙での蓄圧⇒ガス状でバリア外へ放出
 - 還元地下水の坑道内への浸入(高pH)⇒放射線分解によるガス発生・蓄圧
 - ペントナイト再冠水⇒飽和環境に移行
 - 内部充填材の飽和
 - 廃棄体鋼製パッケージの腐食⇒ガス発生
 - 廃棄体パッケージの損傷
 - パッケージ内への間隙水浸入
 - 廃棄体から核種溶出
 - 放射性核種の拡散での移行
 - 核種を含む間隙水の二相流での移行
 - 緩衝材内部でのガスの蓄圧⇒破過⇒核種を含む間隙水のバリア外への放出

上記のガス発生・移行と核種溶出・移行挙動は統合FEP関連図ですでに分析済み。

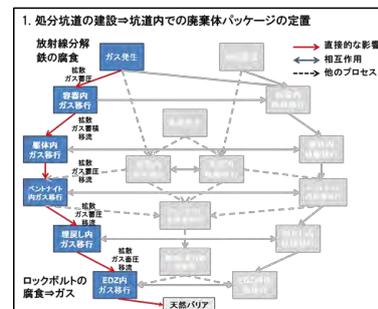
図 2.2.2-3 基本シナリオにおける考慮する現象

b. 基本シナリオの主要な現象と統合 FEP 関連図との関係

基本シナリオでは、状態変遷表の理解から下図に示すように大きく場と媒体が不飽和環境にある場合と飽和環境になりガスと核種移行が複合して挙動する段階に分けることができる。

【放射性物質の溶出はなくガスだけの挙動】

1. 処分坑道の建設⇒坑道内での廃棄体パッケージの位置
2. 処分坑道上部埋戻し⇒換気・排水の停止⇒回収可能性維持
3. 閉鎖⇒ペントナイト緩衝材の飽和
4. ペントナイト緩衝材の飽和⇒内部の飽和



【ガスと放射性物質の挙動】

5. バリア内部に亀裂が発生し多孔質媒体として二相流移行
6. 二相流としてペントナイト中を移行、破過により間隙水が放出、破過後自己修復で機能維持
7. ペントナイトバリアが変質劣化等で機能喪失、多孔質媒体中で二相流で移行

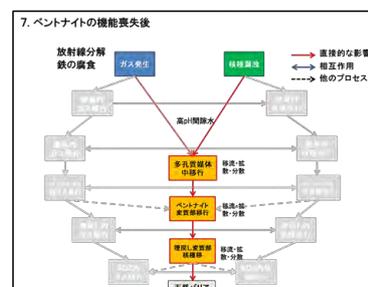
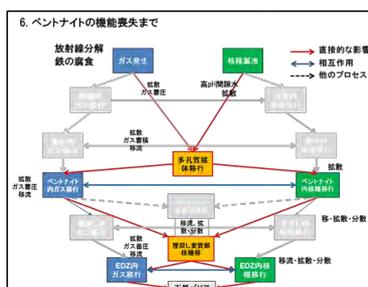
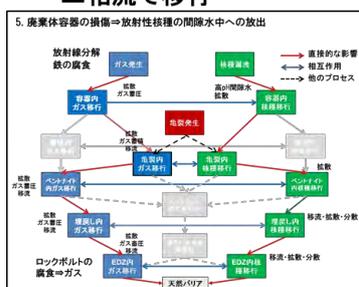
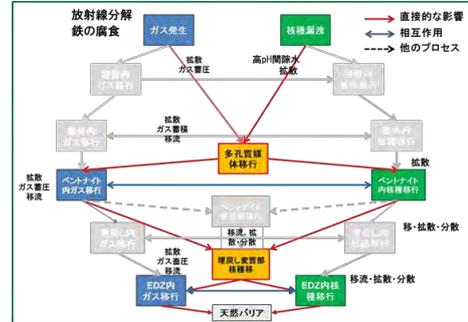


図 2.2.2-4 基本シナリオにおける現象と統合 FEP 関連図

4) TRU 廃棄物処分の安全概念成立性に対するガス発生影響の支配度による分類と関連する FEP 抽出

a. ガス発生の影響が支配的となる現象

- ① 継続したガス発生(放射線分解と腐食)により、廃棄体パッケージと充填材中の間隙にガスが蓄圧、間隙水にガスが溶解⇒二相流としてベントナイト緩衝材の境界面に移行⇒ベントナイト境界面でガスの蓄圧、ベントナイト中にフィンガー現象で侵透⇒ベントナイト中を二相流で移行、ガス圧の増加による破過(ダイランシー)発生⇒ベントナイトの外側に核種を溶存した間隙水と一緒にガスが放出
- ② 破過によるガス・間隙水の通過経路はベントナイトの自己修復機能により修復され、二相流での移行媒体に回復する。①と②の現象が繰り返し発生。



数10年～数万年間のガス・核種の移行モード

レファレンスとする挙動では、ガスの発生は埋め戻した直後から継続的に発生し、ベントナイトの密度、形状、厚さが維持されれば低透水性と自己修復性が発揮され①と②が繰り返し発生する。ベントナイトの機能は、ガス発生の影響を受けない。

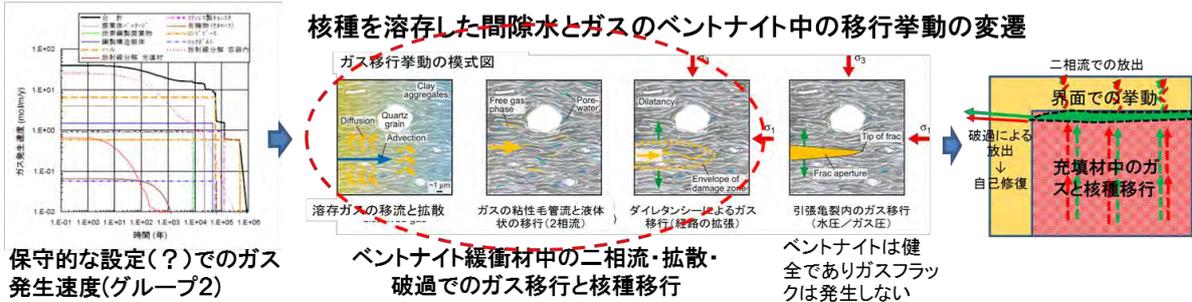
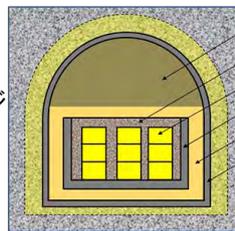


図 2.2.2-5 ガス発生の影響が支配的となる現象

- 【サポートするエビデンス】 飽和ベントナイトのガス透気試験、ベントナイト自己修復確認試験、ベントナイト中の力学連成を考慮した二相流解析
- 【未解決な不確実性】 ガス発生速度と量、ガス移行経路の同定、高pH間隙水の経路侵透による局所的な変質、ベントナイト内部の廃棄体パッケージ、充填材の変質・劣化による体積変化、外力によるベントナイトの損傷、処分坑道周辺の水圧の不均質性

【関連するFEP群】

- | | |
|--|---|
| <p>「ガス発生」</p> <ul style="list-style-type: none"> 放射線分解 金属腐食 微生物分解 有機物分解 核種崩壊 <p>「物質移行」</p> <ul style="list-style-type: none"> 移流・拡散・分散 二相流 破過(・ガスフラック) 核種溶解(溶解度) ガス溶解(溶解度) | <p>「媒体の特性(劣化/変質含む)」</p> <ul style="list-style-type: none"> 周辺母岩 掘削影響領域 ロックボルト コンクリート支保工 埋戻し材 ベントナイト 間隙充填材 廃棄体パッケージ 廃棄体充填材 廃棄体 <p>「環境(THMC)」</p> <ul style="list-style-type: none"> 岩盤温度/廃棄体発生熱 地下水挙動/不飽和・飽和 岩盤応力/水圧/ベントナイト膨潤圧 酸化/還元/高pH |
|--|---|



飽和ベントナイト中: 二相流
 ガス破過・蓄圧 > (水圧 + 膨潤圧)
 ↓
 深度 密度

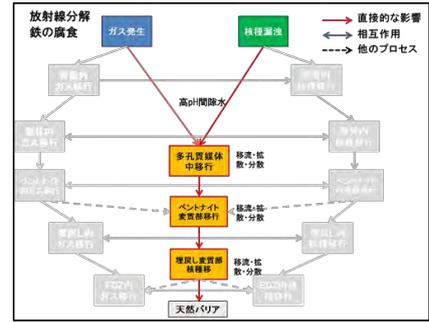
【考慮していないFEP群】

- 「外部からの擾乱」
- 熱水活動
 - 断層変位
 - 地震時面内せん断力
 - 火山噴出
 - 深部流体
 - 隆起・侵食
- 「構成部材の変質・破損」
- 廃棄体パッケージの初期欠陥
 - 充填材のひび割れ/変質
 - 鉄筋腐食膨張での構造躯体の崩壊
 - 支保材の劣化・流失

図 2.2.2-6 サポートするエビデンスと関連する FEP 群

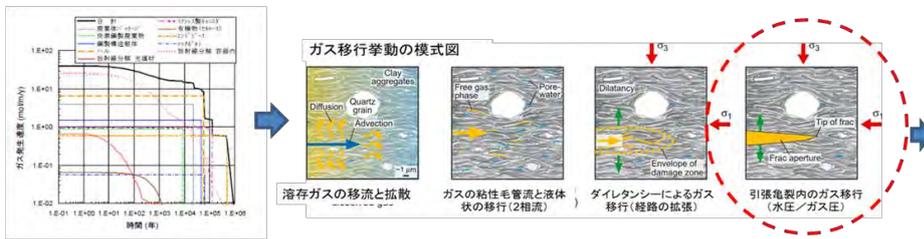
b. ガス発生によって引き起こされる可能性が否定できない現象

- ①と②の現象が繰り返して発生している期間内で、以下の現象がガスの影響で発生する可能性がある。
- ③ 高pH間隙水が二相流や破過でベントナイト中を継続して移動することで、ベントナイトに局地的な変質が発生し、自己修復性を喪失して「ガスフラック現象」が発生し、回復しない移行経路が形成される。
 - ④ 継続的な移行経路を放射性物質を溶存した間隙水が二相流でベントナイト外部に放出される。(ガスは媒体の間隙が大きな部位を優先的に移動するため)



ベントナイト緩衝材の局地的な損傷部位からガス・核種が放出するFEP関連図

上記のような現象は、ガスと高pH間隙水の影響でベントナイトの局所的な劣化によりバリア機能が損傷し、拡散支配の核種移行プロセスを変動されるシナリオとなる。



保守的な設定(?)でのガス発生速度(グループ2)

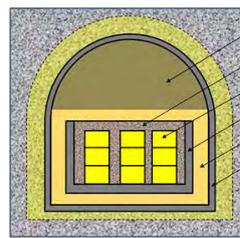
自己修復性の損傷⇒ガスフラックの発生⇒短絡経路の形成⇒亀裂内二相流

図 2.2.2-7 ガス発生によって引き起こされる可能性が否定できない現象

【サポートするエビデンス】ガスフラックの現象確認原位置試験(Mont.Teri URLなど)。高pH溶液を用いたベントナイト変質・劣化促進試験。亀裂媒体での二相流解析
 【未解決な不確実性】ガス発生速度、ベントナイト内部の間隙分布、変質・劣化したベントナイト中のガスフラックの形成メカニズム。

【関連するFEP群】

- | | | |
|--|--|---|
| <p>「ガス発生」</p> <ul style="list-style-type: none"> ・放射性分解 ・金属腐食 ・微生物分解 ・有機物分解 ・核種崩壊 | <p>「媒体の特性(劣化/変質含む)」</p> <ul style="list-style-type: none"> ・周辺母岩 ・掘削影響領域 ・ロックボルト ・コンクリート支保工 ・埋戻し材 | <ul style="list-style-type: none"> ・ベントナイト ・間隙充填材 ・廃棄体パッケージ ・廃棄体充填材 ・廃棄体 |
| <p>「物質移行」</p> <ul style="list-style-type: none"> ・移流・拡散・分散 ・二相流 ・破過(・ガスフラック) ・核種溶解(溶解度) ・ガス溶解(溶解度) | <p>「環境(THMC)」</p> <ul style="list-style-type: none"> ・岩盤温度/廃棄体発生熱 ・地下水挙動/不飽和・飽和 ・岩盤応力/水圧/ベントナイト膨潤圧 ・酸化/還元/高pH | <p>「複合作用による現象」</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ベントナイトの局地的な変質・劣化 ・変質部でのガスフラックの発生 ・鋼製パッケージの損傷 |



【考慮していないFEP群】

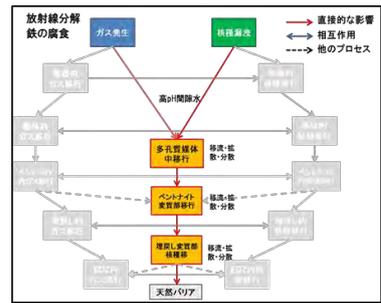
- 「外部からの擾乱」**
- ・熱水活動
 - ・断層変位
 - ・地震時面内せん断力
 - ・火山噴出
 - ・深部流体
 - ・隆起・侵食
- 「構成部材の変質・破損」**
- ・廃棄体パッケージの初期欠陥
 - ・充填材のひび割れ/変質
 - ・鉄筋腐食膨張での構造 躯体の崩壊
 - ・支保材の劣化・流失

図 2.2.2-8 サポートするエビデンスと関連する FEP 群

c. ガス発生以外の要因によって引き起こされるバリア機能損傷の現象

レファレンスシナリオで考慮していなかったFEP群が原因となり、ベントナイトバリアの安全機能が損なわれる可能性は否定できない。ガス発生に係らずベントナイトバリア機能を喪失する以下の現象を検討する。

- ① 断層変位によるベントナイトの破壊
 - ② 熱水の直撃によるベントナイトの変質
 - ③ 地震力によるベントナイトの面内せん断破壊
 - ④ ベントナイトの形状を確保する内・外部構造の崩壊
 - ⑤ 火山の噴火による廃棄物の放出・・・処分坑道全体が破壊
 - ⑥ 隆起・侵食による核種放出・・・人工バリアはすでに機能喪失
- } 考慮



上記のような事象によるTRU処分におけるベントナイトバリアの安全機能喪失シナリオは、これまで検討されてこなかった。その主たる理由として、著しい影響を及ぼす天然事象はサイト選定で除外できるとしてきたことによる。

Total Performance Assessmentというアプローチをとる場合、ベントナイトバリアが局部的に機能を損傷しても、放射性核種を溶存した間隙水はその部位を優先的に移行することはなく、バルクとしての拡散移行が支配する場として評価される。一方、ガス圧による二相流では、局地的な損傷を受けた部位を優先的に移行することから、その影響は大きな被ばく線量につながる可能性がある。

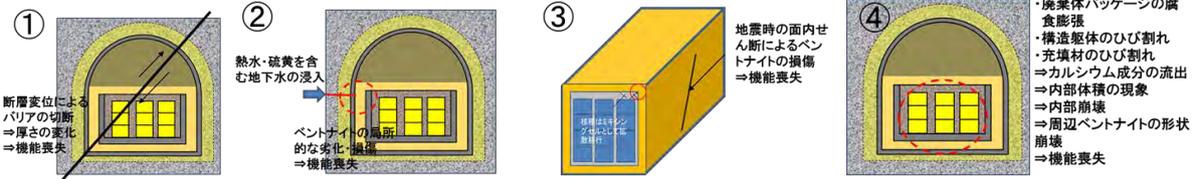


図 2.2.2-9 ガス発生以外の要因によって引き起こされるバリア機能損傷の現象

① 断層変位によるバリアの機能損傷

- ◆ バリア内部は多孔質媒体
 - ◆ ガスの継続的な発生
 - ◆ 核種の間隙水への溶出
- ⇒ 拡散と二相流で人工バリア外に核種移行
 ⇒ 蓄圧によるベントナイト中のガス破過
 ⇒ 核種を溶存した間隙水が放出
 ⇒ 破過後自己修復により機能維持

【新たなFEP群】

- ・断層変位 (50cm以上)
- ・ベントナイトの破断
- ・形状・厚さ崩壊
- ・自己修復性喪失
- ・亀裂媒体中の二相流
- ・断層面に沿った移行
- ・地下からの流体浸入
- ・拡散場の消失

- ◆ ガスの継続的な発生
 - ◆ バリア内部は多孔質媒体
 - ◆ 新たな断層が処分坑道を切断
- ⇒ ベントナイトが自己修復性を喪失
 ⇒ 亀裂媒体中の二相流でガスと核種が人工バリア外に移行

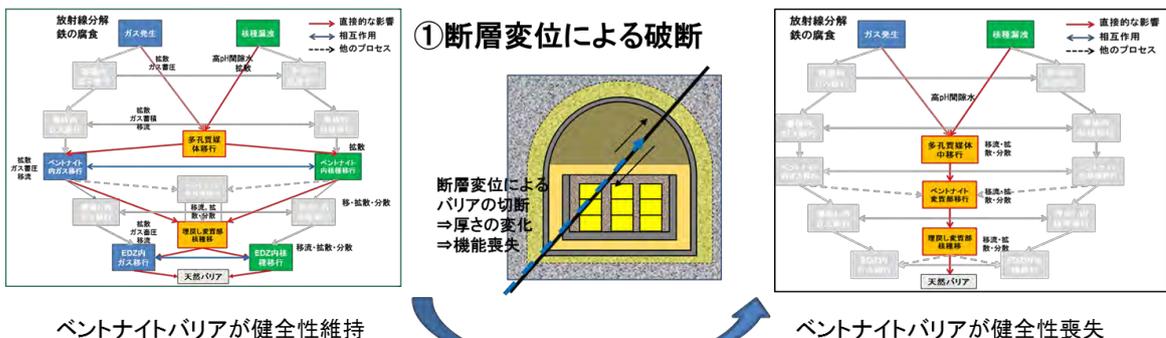


図 2.2.2-10 断層変位によるバリア機能損傷現象

② 熱水・強酸性地下水浸入によるバリア機能損傷現象

- ◆ バリア内部は多孔質媒体
- ◆ ガスの継続的な発生
- ◆ 核種の間隙水への溶出

⇒ 拡散と二相流で人工バリア外に核種移行
 ⇒ 蓄圧によるベントナイト中のガス破過
 ⇒ 核種を溶存した間隙水が放出
 ⇒ 破過後自己修復により機能維持

【新たなFEP群】
 ・熱水の浸入 (100°C以上)
 ・強酸性地下水浸入 (pH<3)
 ・ベントナイトの劣化
 ・自己修復性喪失
 ・亀裂媒体中の二相流
 ・断層面に沿った移行
 ・拡散場の消失

- ◆ ガスの継続的な発生
 - ◆ バリア内部は多孔質媒体
 - ◆ 熱水・強酸性地下水の浸入
- ⇒ ベントナイトが局部的に変質
 ⇒ 自己修復機能を喪失
 ⇒ 亀裂媒体中の二相流でガスと核種が人工バリア外に移行

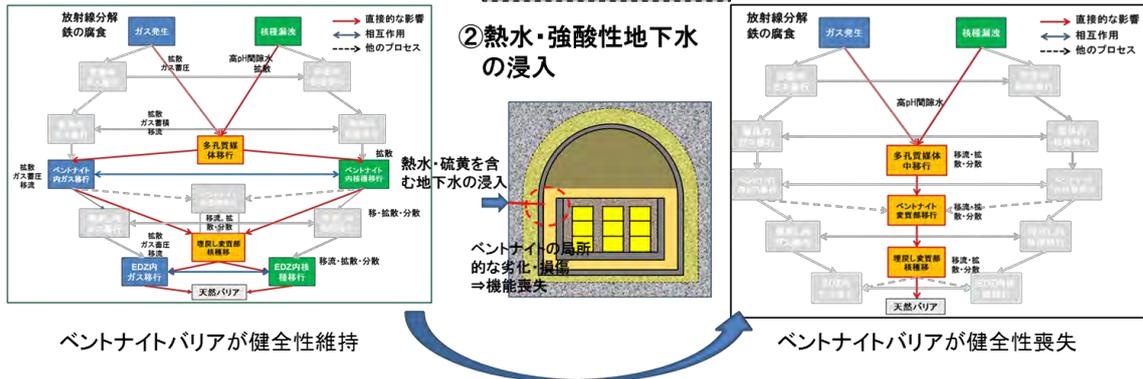


図 2.2.2-11 熱水・強酸性地下水浸入によるバリア機能損傷現象

③ 地震による面内せん断破壊によるバリア機能損傷現象

- ◆ バリア内部は多孔質媒体
- ◆ ガスの継続的な発生
- ◆ 核種の間隙水への溶出

⇒ 拡散と二相流で人工バリア外に核種移行
 ⇒ 蓄圧によるベントナイト中のガス破過
 ⇒ 核種を溶存した間隙水が放出
 ⇒ 破過後自己修復により機能維持

【新たなFEP群】
 ・地震
 ・面内せん断破壊
 ・高pH間隙水の浸透
 ・ベントナイト変質
 ・自己修復性喪失
 ・亀裂媒体中の二相流

- ◆ ガスの継続的な発生
 - ◆ バリア内部は多孔質媒体
 - ◆ ベントナイトの面内せん断破壊
- ⇒ 高pH間隙水の浸透
 ⇒ ベントナイトが局部的に変質
 ⇒ 自己修復機能を喪失
 ⇒ 亀裂媒体中の二相流でガスと核種が人工バリア外に移行

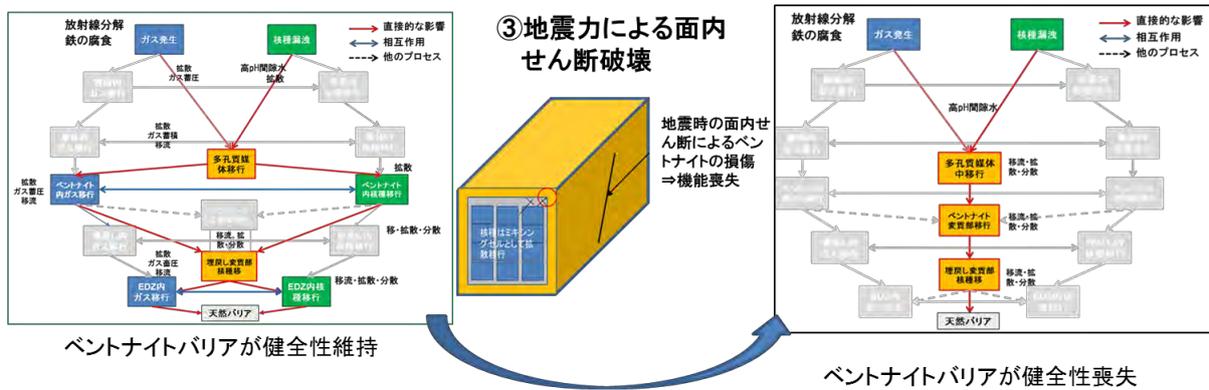


図 2.2.2-12 面内せん断破壊によるバリア機能損傷現象

④ バリア内部崩壊によるバリア機能損傷現象

人工バリア内の廃棄体パッケージ、充填材、構造躯体が変質等により固結性を損傷し、ベントナイトバリア形状を維持する強度低減、体積減少を発生する。

- ◆ バリア内部は多孔質媒体
- ◆ ガスの継続的な発生
- ◆ 核種の間隙水への溶出
- ⇒ 拡散と二相流で人工バリア外に核種移行
- ⇒ 蓄圧によるベントナイト中のガス破過
- ⇒ 核種を溶存した間隙水が放出
- ⇒ 破過後自己修復により機能維持

- 【新たなFEP群】
- ・充填材劣化・体積減少
 - ・廃棄体の分解・溶出
 - ・廃棄体の体積減少
 - ・内部強度の低下・変形
 - ・ベントナイトの膨潤
 - ・密度低下、形状破壊
 - ・機能喪失

- ◆ ガスの継続的な発生
- ◆ バリア内部は多孔質媒体
- ◆ 内部の体積減少
- ◆ 内部の強度低下
- ◆ ベントナイトの形状破壊
- ⇒ 局所的な機能喪失
- ⇒ 亀裂性二相流による核種放出

④内部崩壊による形状破壊

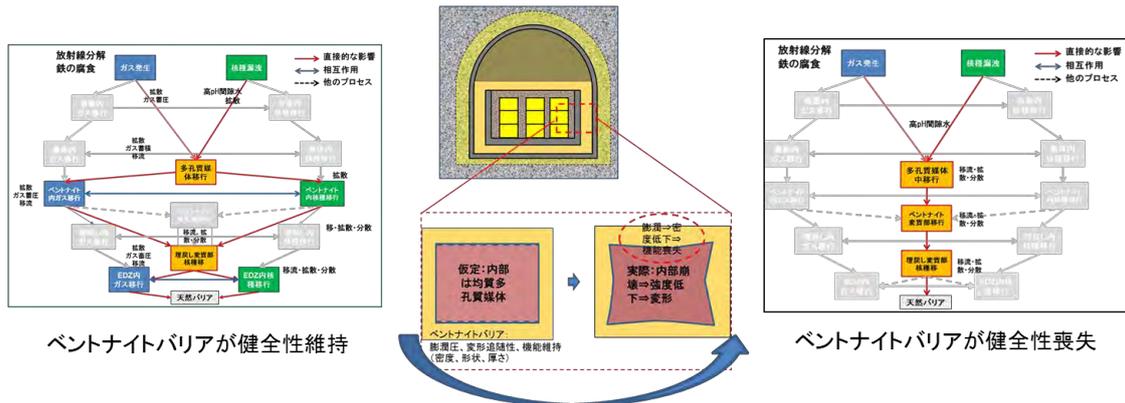


図 2.2.2-13 バリア内部崩壊によるバリア機能損傷現象

⑤ 外部コンクリート支保工の劣化によるバリア機能損傷現象

- ◆ バリア内部は多孔質媒体
- ◆ ガスの継続的な発生
- ◆ 核種の間隙水への溶出
- ⇒ 拡散と二相流で人工バリア外に核種移行
- ⇒ 蓄圧によるベントナイト中のガス破過
- ⇒ 核種を溶存した間隙水が放出
- ⇒ 破過後自己修復により機能維持

- 【新たなFEP群】
- ・コンクリート支保工の劣化
 - ・形状崩壊
 - ・体積減少
 - ・ベントナイト膨潤
 - ・密度減少
 - ・流出
 - ・機能喪失
 - ・亀裂性二相流

- ◆ ガスの継続的な発生
- ◆ バリア内部は多孔質媒体
- ◆ 外周支保工の劣化・体積減少
- ◆ ベントナイトの密度減少
- ⇒ 局所的な機能喪失
- ⇒ 亀裂性二相流による核種放出

⑤外周支保工の劣化による密度減少

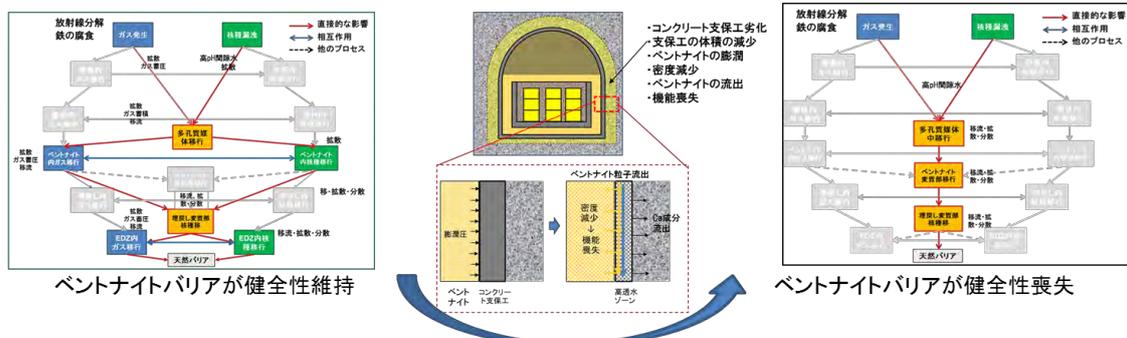


図 2.2.2-14 支保工の劣化によるバリア機能損傷現象

5) 抽出した FEP による関連図作成と成立性評価シナリオの作成と分類

3) と 4) の作業を通じて、3 つに分類できる現象を整理し、それらに係る主要な FEP 群を抽出した。本節では、安全評価体系に従い、着目する現象を評価シナリオに組み立てるために、抽出した FEP 群を用いてプロセス・インフルエンス・ダイアグラム (PID) を作成する。本節での作業項目と作業概要を下記に示す。

<p>1) ガス発生のみによって律速されるバリア性能の劣化・損傷現象</p>	<p>不飽和時: ガスは間隙をガス状で移行⇒蓄圧しない限りバリア性能を低下させることはない 飽和時: ガスの蓄圧による媒体中の亀裂発生 ⇒セメント充填材は亀裂が進行し強度・変形能が喪失 ⇒ベントナイトバリアは破過による損傷を受けるが自己修復性を維持する限りバリア機能は維持</p>
<p>2) ガス発生以外の要因によって律速されるバリア性能の劣化事象で包含できない事象</p>	<p>飽和時のガスと他の事象の複合現象: ⇒高pH間隙水がガスと二相流でベントナイト中に浸透 ⇒繰り返される破過時の間隙水の移流で経路が変質 ⇒自己修復性を喪失、核種を溶存する間隙水が二相流として優先的にこの経路を移行</p>
<p>3) ガス発生以外の要因によって律速されるバリア性能の劣化事象</p>	<p>現在考慮されていないガス以外の事象が起因となってバリア性能が劣化・損傷し、ガス発生の影響が卓越するような複合現象: ①断層変位によるバリアの破断 ②熱水・強酸性水の浸入による局所的な劣化 ③地震時の面内せん断力によるバリアの破壊 ④内外の支持構造物の体積減少、強度低下、変形によるバリアの形状破壊、密度減少</p>

図 2.2.2-15 作業項目と作業概要

a. ガス発生の影響が支配的となるシナリオ

【不飽和環境】

➢ バリア内の間隙をガス状で移行。バリア性能はガスにより影響を受けることはない。

【飽和環境】

- ガスは間隙水に溶存するとともにバリア内間隙で蓄圧、放射性物質を溶存した間隙水とバリア内部の亀裂を二相流で移動し、蓄圧で破過し、放射性核種を溶存した間隙水をバリア外に放出する。
- ガスの蓄圧及び破過でベントナイトバリアは一瞬、低透水機能を喪失するが、ベントナイトバリアの有する自己修復機能で低透水性を回復する。

二相流と破過でバリア外に搬出される放射性物質を含む間隙水が及ぼす被ばく線量評価<10μSv/年

ガス発生の影響で放出される放射性物質の線量は十分低いことから「バリア性能」は損傷を受けていないシナリオ

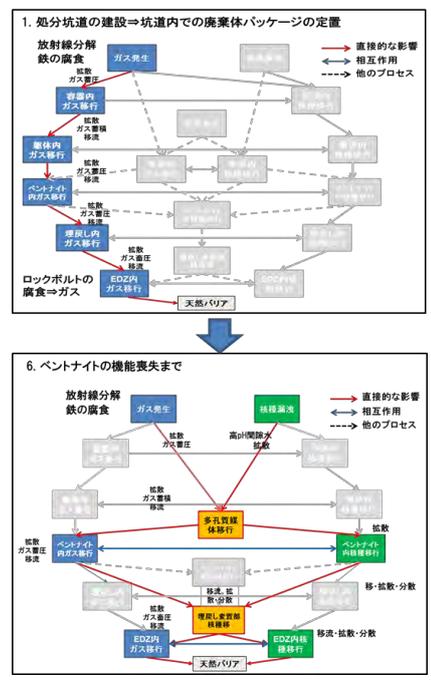
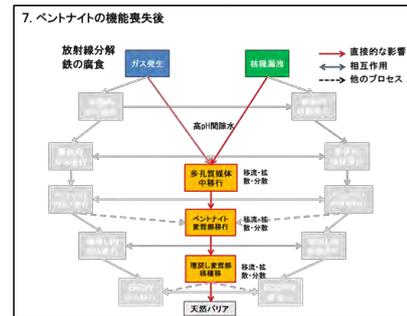
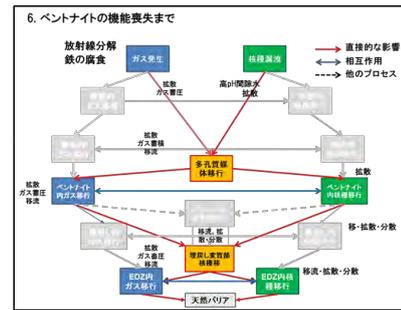


図 2.2.2-16 ガス発生の影響が支配的となるシナリオ

b. ガス発生によって引き起こされる可能性が否定できないシナリオ

【飽和環境】

- ガスは間隙水に溶解するとともに間隙で蓄圧、放射性物質を溶解した間隙水と内部亀裂を二相流移動するとともにベントナイト中を二相流で移行し、蓄圧で破過し、放射性核種を溶解した間隙水を放出する。
- 繰り返しの破過と高pH成分を含む間隙水の透過で、ベントナイト中のガス移行経路が変質・劣化する。
- その結果、ベントナイトバリアが局部的に自己修復機能を喪失。
- 内部で継続的に発生するガス圧により、放射性物質を含む間隙水が二相流として、この局部的に機能を低下した部位を通過し、外部に放出される。



放射性物質を含む間隙水の連続的な放出に対する評価
(二相流として解析)

ガス発生と高pHの間隙水の複合作用によりベントナイトバリアが局部的に変質し機能を喪失するシナリオ

図 2.2.2-17 ガス発生によって引き起こされる可能性が否定できないシナリオ

c. ガス発生以外の要因によって引き起こされるバリア機能損傷シナリオ

① 断層変位シナリオ

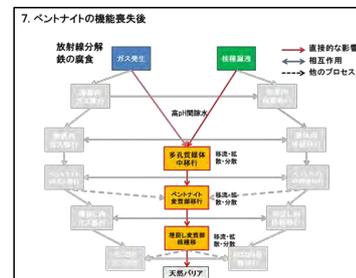
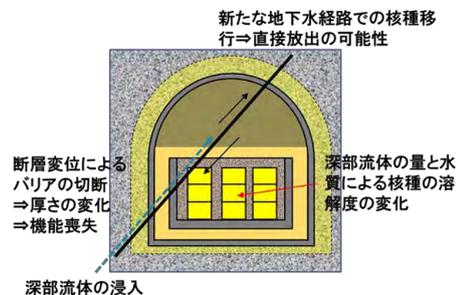
- 考慮するのは以下の現象
- ① 断層変位によるベントナイトの破壊
 - ② 熱水・強酸性水によるベントナイトの変質
 - ③ 地震力によるベントナイトの面内せん断破壊
 - ④ ベントナイトの形状を確保する内・外部構造崩壊

- ① 断層変位 (50cm以上:1m厚さのベントナイトの厚さが半分以下となる)
⇒ベントナイトバリアの切断(形状、厚さの維持できず)
⇒バリア機能(核種閉じ込め)喪失
⇒バリア内部への断層に沿ったあらたな地下水の浸入
⇒核種の溶出量の増加⇒地下水に溶出した核種は、継続して発生しているガス溶存水と二相流でバリア外に放出
⇒断層に沿って生物圏に直接放出可能性⇒被ばく

【不確実性】

- ・50cm以上の変位を有する断層の発生確率
- ・断層の種類(逆断層が主)と断層に沿っての深部地下水の上昇
- ・深部地下水の量と化学特性
- ・地表への到達の可能性

ベントナイトバリア機能喪失のほかに、水理と化学環境が変化し、核種溶解速度の変化、あらたな移行経路の形成シナリオ



バリア内は移流場に変化

図 2.2.2-18 断層変位シナリオ

② 熱水・強酸性地下水浸入シナリオ

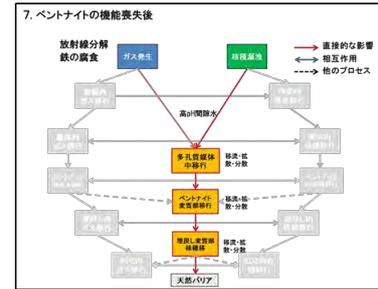
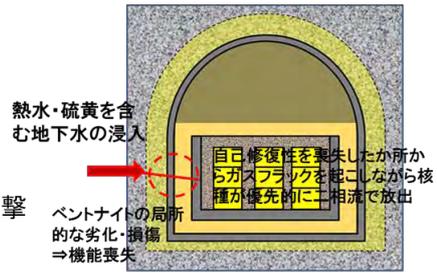
- 考慮するのは以下の現象
- ① 断層変位によるベントナイトの破壊
 - ② **熱水・強酸性水によるベントナイトの変質**
 - ③ 地震力によるベントナイトの面内せん断破壊
 - ④ ベントナイトの形状を確保する内・外部構造崩壊

②熱水(100°C以上)、強酸性水(pH<3)のベントナイトバリアを直撃
 ⇒ベントナイトの部分的な変質・劣化(ゆっくり)
 ⇒局地的に核種閉じ込め機能(自己修復性など)喪失
 ⇒核種はガス圧による二相流でバリア外に放出
 ⇒天然バリアを生物圏に移行⇒被ばく

【不確実性】

- ・熱水・強酸性水が処分場を直撃する可能性
- ・それらのベントナイト変質・劣化のメカニズムと速さ
- ・熱水、強酸性水の他の化学特性(溶解度に影響)
- ・熱水・強酸性水の量(変質・劣化の範囲)

ベントナイトバリア機能喪失のほかに、水理と化学環境の場が変化し、核種溶解速度の変化シナリオ、周辺岩盤の天然バリアとしての特性変化シナリオ



バリア内は移流場に変化

図 2.2.2-19 熱水・強酸性地下水浸入シナリオ

③ 面内せん断破壊シナリオ

- 考慮するのは以下の現象
- ① 断層変位によるベントナイトの破壊
 - ② 熱水・強酸性水によるベントナイトの変質
 - ③ **地震力によるベントナイトの面内せん断破壊**
 - ④ ベントナイトの形状を確保する内・外部構造崩壊

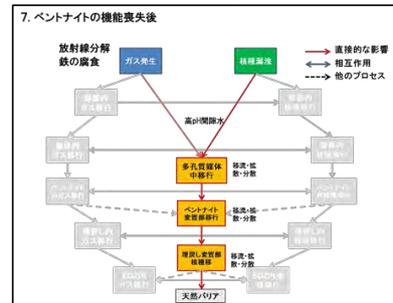
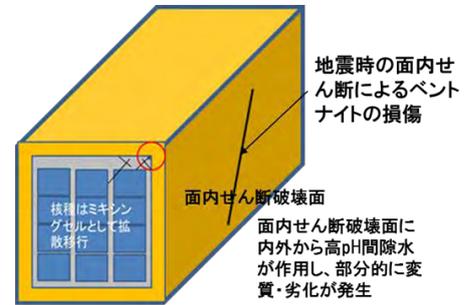
③地震発生

⇒面内せん断力で側部ベントナイトバリアの破壊
 ⇒高PH間隙水の大量浸入
 ⇒破壊面で局地的な変質・劣化
 ⇒二相流からガスフラック発生
 ⇒新たな短絡路を形成
 ⇒継続した二相流の透過
 ⇒天然バリアを移行⇒被ばく

【不確実性】

- ・側部ベントナイトを面内せん断で破壊する地震力の大きさ
- ・せん断破壊面での変質・劣化のメカニズムと速度

ガス以外の要因で発生するバリアの損傷シナリオ。二相流が優先的に移行することで核種の放出量が増加する。天然バリアは影響を受けない。

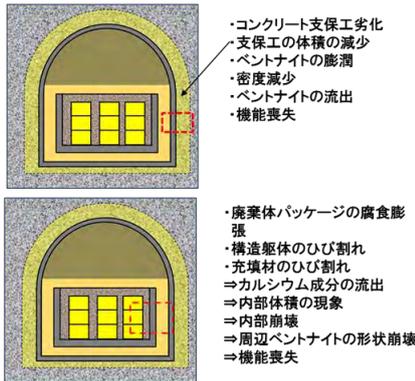


バリア内は移流場に変化

図 2.2.2-20 面内せん断破壊シナリオ

④ ベントナイト内外構造崩壊シナリオ

- 考慮するのは以下の現象
- ① 断層変位によるベントナイトの破壊
 - ② 熱水・強酸性水によるベントナイトの変質
 - ③ 地震力によるベントナイトの面内せん断破壊
 - ④ **ベントナイトの形状を確保する内・外部構造崩壊**



- ④ ベントナイトバリア内外の構造崩壊
- ⇒強度の減少、形状の喪失
 - ⇒ベントナイトが形状変化に追従のため膨潤
 - ⇒密度減少
 - ⇒ベントナイト機能喪失
 - ⇒二相流でバリア外に放出⇒天然バリアを移行⇒被ばく

【不確実性】
 この現象は時間をかけて確実に発生する
 ・ベントナイトの追随性(設計で考慮されていない?)
 ・密度減少、形状崩壊のメカニズムが検討されていない



ガス以外の要因でベントナイトバリアが形状維持できなくなり機能を喪失するシナリオ。ベントナイト機能喪失後の状態での二相流での移行となる。

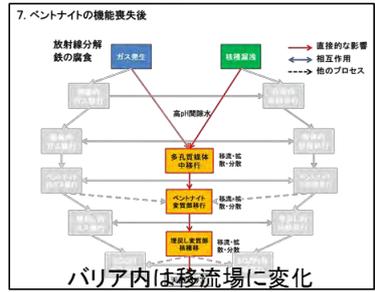


図 2.2.2-21 バリア内外構造崩壊シナリオ

(2) 抽出した FEP の整理に基づく評価対象とすべき事象や現象の絞り込みに係る検討

1) 検討項目と検討の進め方

前項で抽出した FEP の整理に基づき、評価対象とすべき事象や現象を把握することでそれぞれのシナリオ成立上の重要 FEP を絞り込み、関連する知見を吟味することでガス移行評価シナリオの不確実性低減に資する成果として取りまとめる。

検討は以下の手順と項目で実施する。

<p>(1) シナリオ成立上の重要FEPの絞り込み</p>	<p>3.2.1で設定分析した3種類のシナリオにおける影響因子と影響伝搬に係る要素(統合FEP)から、TRU処分システムの成立性評価上重要となる要素(統合FEP)を絞り込む。</p>
↓	
<p>(2) 重要FEPに関する現状での知見の整理と課題のとりまとめ</p>	<p>前節で絞り込まれたFEPを対象に、現状での知見を整理し、知見の十分や信頼性を分析することで課題を設定する。</p>
↓	
<p>(3) ガス移行評価シナリオの不確実性低減に向けての方策の考察と取りまとめ</p>	<p>ガス移行評価シナリオに影響を与える上記の現象(FEP群)の現状の課題を含む知見をベースに、ガス移行評価シナリオが内蔵する不確実性を具体化することで低減に向けての方策を考察する。</p>

図 2.2.2-22 検討項目と検討手順

2) シナリオ成立上の重要 FEP の絞り込み

【シナリオ成立上の重要 FEP の絞り込み方法】

TRU 廃棄物処分システム（廃棄物グループ 2 を対象）の成立性評価のためのシナリオ上重要となる FEP の絞り込みは、想定されるシナリオの蓋然性とその影響の大きさとで判定する。

蓋然性：起こりやすさを支配する FEP（トリガーとなる因子と影響伝搬プロセス）

影響：影響伝搬プロセスから導き出される結果を示す FEP

着目するのは下図での右下の象限：蓋然性が高く、大きな影響を及ぼす FEP となる。

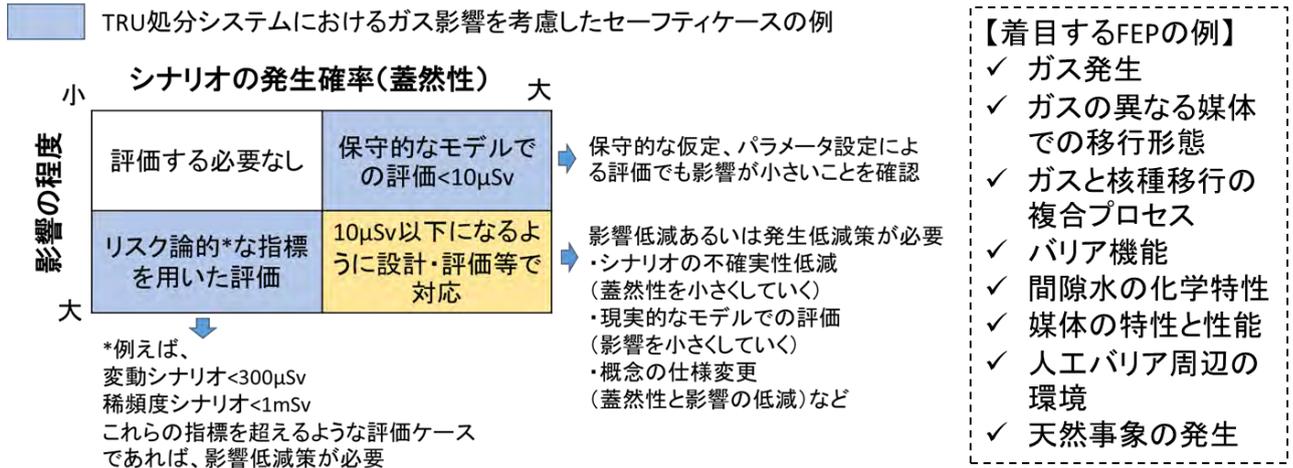


図 2.2.2-23 シナリオ成立上重要な FEP 設定手法

a. ガス発生の影響が支配的になるシナリオ

継続したガス発生（放射線分解と腐食）により、廃棄体パッケージと充填材中の間隙にガスが蓄圧、間隙水にガスが溶解、**廃棄体パッケージの損傷**による放射性物質の間隙水への溶出（**間隙水の化学特性による溶解度**）

⇒ 二相流としてベントナイト緩衝材の境界面に移行

⇒ ベントナイト境界面でガスの蓄圧、ベントナイト中にフィンガー現象で侵透

⇒ ベントナイト中を二相流で移行、ガス圧の増加による**破過（ダイレタンス）発生**

⇒ ベントナイトの外側に**核種を溶存した間隙水と一緒にガスが放出**

⇒ 破過によるガス・間隙水の通過経路はベントナイトの**自己修復機能**により修復され、二相流での移行媒体に回復する。

重要FEPの絞り込み: ガス発生、廃棄体パッケージの損傷、間隙水の化学特性、二相流、破過発生、間隙水の放出、自己修復性

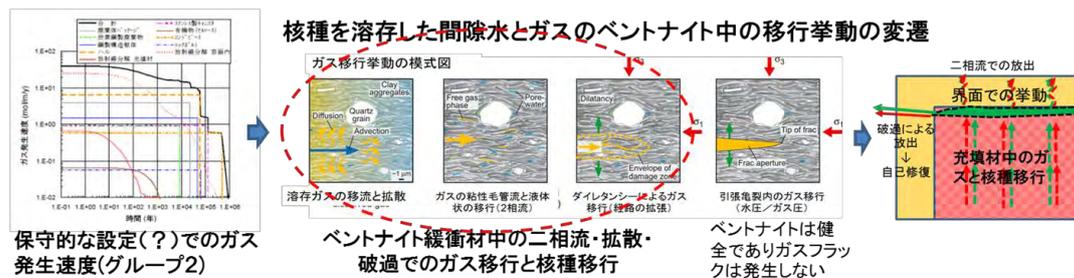


図 2.2.2-24 ガス発生の影響が支配的となるシナリオでの重要 FEP

b. ガス発生によって引き起こされる可能性が否定できないシナリオ

ガス発生によって引き起こされる可能性が否定できないシナリオは、前述したように、ガス発生の影響単独でなく、他の要因と複合して発生する可能性がある（その可能性のレベルは未確認）と思われるシナリオである。その一つとして想定したのが、下図に示す繰り返し発生する破過現象と高 pH 間隙水によるガス経路の変質・劣化により、ベントナイトバリアが局地的に機能を損傷するケースとなる。

- ガスは継続して発生し、放射性物質が間隙水に継続して溶出
- ⇒二相流でベントナイトバリア中を移行、破過が繰り返し発生
- ⇒高 pH 間隙水が二相流や破過でベントナイト中を継続して移動することで、ベントナイトに局地的な変質が発生し、自己修復性を喪失
- ⇒ガスの蓄圧により自己修復性を喪失したベントナイトバリア中にガスフラックが発生し、継続的な移行経路が形成
- ⇒継続的な移行経路を放射性物質を溶存した間隙水が二相流でベントナイト外部に放出（ガスは媒体の間隙が大きな部位を優先的に移動するため）

重要FEPの絞り込み:ガス発生、間隙水の化学特性、二相流、破過発生、高pH間隙水、自己修復性喪失、ガスフラック、バリア内移行経路発生

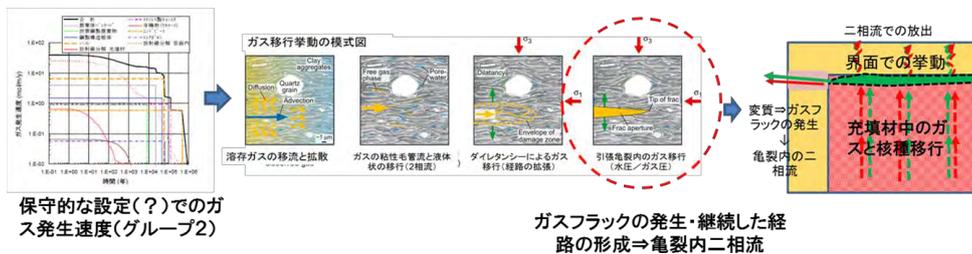
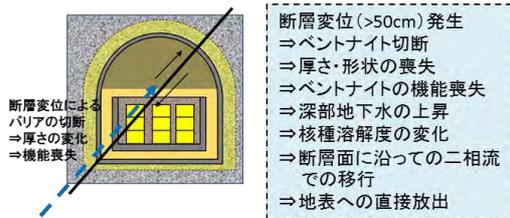


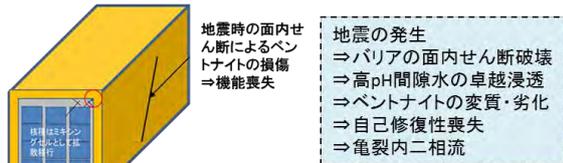
図 2.2.2-25 ガス発生によって引き起こされる可能性が否定できないシナリオの重要 FEP

c. ガス発生以外の要因でバリア機能が劣化損傷するシナリオ

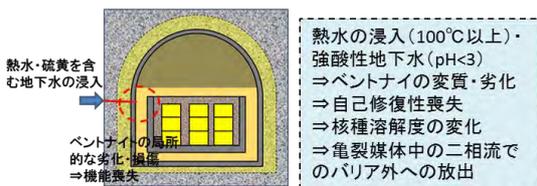
① 断層変位シナリオ



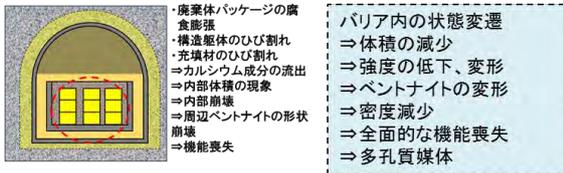
③ 面内せん断破壊シナリオ



② 熱水・強酸性流体の浸入シナリオ



④ 内部崩壊シナリオ



⑤ 外周支保工の劣化シナリオ

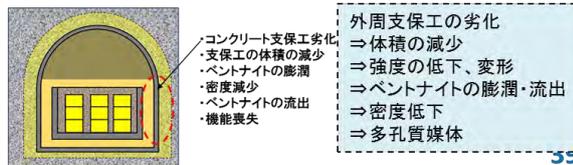


図 2.2.2-26 ガス発生以外の要因でバリア機能が劣化損傷するシナリオの重要 FEP

(3) 重要 FEP に関する現状での知見の整理と課題の取りまとめ

それぞれのシナリオにおける重要 FEP、現状での知見および課題を表 2.2.2-1 に整理した。現存する知見は、ベントナイトバリアを対象としたガス発生影響確認（主に移行挙動の確認）の要素試験が中心で、得られた現象を再現するためのシミュレーションモデルが検証されてきている。このシナリオにおける知見が十分でない事項は、ベントナイト周辺の地下水圧が均質でないこと、そのために破過の経路が特定され、同じ場所での破過が容易に発生する可能性がある点である。このような現象は要素試験や工学規模の試験では再現することが難しい。

ガス発生の影響が引き起こす可能性が否定できないシナリオでは、ベントナイトバリアの劣化・変質が推定よりも早く進むとガス圧により「ガスフラック（フラクチャー：亀裂）」が発生し、亀裂部が卓越した透水経路となることで低透水性が損なわれ、結果としてバリア機能が喪失する事態となる。このような現象については、ベントナイトバリアへの化学的なアタックに係る実験やモデルによる推定がなされているが、長期にわたる現象であるため、まだ十分な確証が得られていない。ベントナイト内部は高 pH の環境であり、同じ場所でガス破過が繰り返し発生することで、経路に沿って危惧する変質が発生することは現状の知見で否定できない。

ガス移行挙動以外でバリア機能が損傷をうけ、結果的にガスの影響が発生するシナリオについては、これまで TRU 廃棄物処分概念を対象として検討されてきたことがない。いずれの現象についても、科学的には発生することは否定できない現象であるが、実験を含めたエビデンスそのものが存在しない。これまでの安全評価では、処分坑道全体の評価となっていることもあり、局地的にバリア機能が損傷を受けても、多重バリア、あるいは多機能バリアによりトータルの被ばく線量には影響を与えないとされている。しかし、ガス圧に促進される核種移行を考慮した場合、バリアの局地的な損傷部を優先的に核種が移動する現象が発生する可能性があり、核種移行では無視することはできないレベルとなる。

表 2.2.2-1 成立性を評価する各シナリオの重要 FEP と現状の知見および課題の整理表

シナリオ区分	重要FEP	現状の知見(概略)	課題
1)	ガス発生、廃棄体パッケージの損傷、間隙水の化学特性、二相流、破過発生、間隙水の放出、自己修復性	<ul style="list-style-type: none"> ・要素試験でのガス移行挙動把握、破過後の自己修復性確認 ・力学連成を考慮した二相流の解析 	<ul style="list-style-type: none"> ・要素試験とその再現のシミュレーションモデルの整備であり、実規模スケールへの展開が未確認
2)	ガス発生、間隙水の化学特性、二相流、破過発生、高pH間隙水、自己修復性喪失、ガスフラック、バリア内移行経路発生	<ul style="list-style-type: none"> ・高pH間隙水がベントナイトに与える影響は実験的に評価 ・二相流での破過を含む影響は評価なし 	<ul style="list-style-type: none"> ・メカニズムは理解されているので再現試験が必要
3)-①	断層変位(>50cm)発生、ベントナイト切断、厚さ・形状の喪失、ベントナイトの機能喪失、深部地下水の上昇、核種溶解度の変化、断層面に沿っての二相流での移行、地表への直接放出	<ul style="list-style-type: none"> ・TRU処分では断層変位の影響は評価された例がない ・HLW処分での評価例は存在(オーバパックの健全性) ・深層地下水の影響は評価例がない 	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;"> TRU処分では評価された例がなく、全て今後の課題となる </div>
3)-②	熱水の浸入(100℃以上)、強酸性地下水(pH<3)、ベントナイトの変質・劣化、自己修復性喪失、核種溶解度の変化、亀裂媒体中の二相流でのバリア外への放出	<ul style="list-style-type: none"> ・TRU処分では熱水や強酸性水浸入の影響を評価した例はない ・HLWでも安全評価の例はない 	
3)-③	地震の発生、バリアの面内せん断破壊、高pH間隙水の卓越浸透、ベントナイトの変質・劣化、自己修復性喪失、亀裂内二相流	<ul style="list-style-type: none"> ・TRU処分では評価された例はない ・高pH間隙水のベントナイトへの影響は実験的に確かめられている 	
3)-④	バリア内の状態変遷、体積の減少、強度の低下、変形、ベントナイトの変形、密度減少、全面的な機能喪失、多孔質媒体中の二相流	<ul style="list-style-type: none"> ・TRU処分では評価された例はない 	
3)-⑤	外周支保工の劣化、体積の減少、強度の低下、変形、ベントナイトの膨潤・流出、密度低下、多孔質媒体中の二相流	<ul style="list-style-type: none"> ・TRU処分では評価された例はない 	

(4) ガス移行評価シナリオの不確実性低減に向けての方策の考察と取りまとめ

1) ガス発生の影響が支配的となるシナリオ

ガス発生の影響が支配的となるシナリオでは、これまでの知見から最も蓋然性の高い現象として、バリアの機能を劣化・損傷することなく、破過を含む二相流での移行が主として発生する。また、外周に作用する水圧の不均質性の影響を評価しておく必要がある。予備解析で確認し、試験で再現してその影響を評価することが解決策となる。

要素試験では、バリア構成要素の一次元的な特性が把握できるだけであり、形状効果や拘束条件の影響、不均質性の影響を再現することは不可能である。要素試験で検証したモデルや解析コードが実規模の挙動を評価できるかを含めての吟味が不可欠で、そのためには、下図に示したような類似環境での工学試験の実施が望まれる。

2) ガス移行評価シナリオの不確実性低減に向けての方策の考察と取りまとめ

a. ガス発生の影響が支配的となるシナリオ

ガス発生の影響が支配的となるシナリオでは、これまでの知見から最も蓋然性の高い現象として、バリアの機能を劣化・損傷することなく、破過を含む二相流での移行が主として発生する。

シナリオ区分	課題・不確実性	課題解決・不確実性低減策
1) ガス挙動が支配的となるシナリオ	要素試験とその再現のシミュレーションモデルの整備であり、実規模スケールへの展開が未確認	人工バリアシステムを構成する工学規模試験を実施し、二相流でのガス挙動を確認し、解析モデルを実証する。

これまでの検討からこのシナリオは高い蓋然性で発生する。しかし要素試験での現象理解が実規模スケールでも発生するのかの確認は不可欠である。

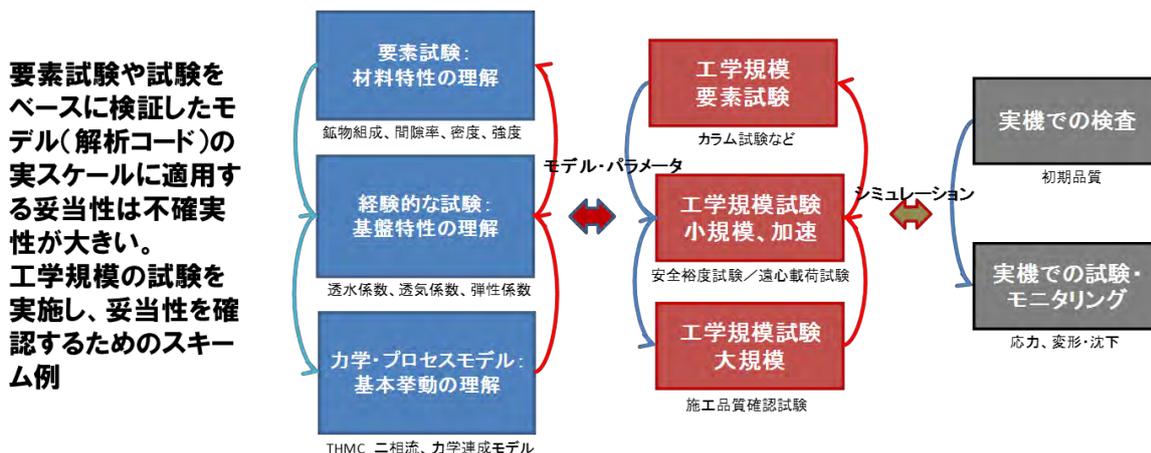


図 2.2.2-27 ガス発生の影響が支配的となるシナリオでの不確実性低減方策例

b. ガス発生によって引き起こされる可能性が否定できないシナリオ

シナリオ区分	課題・不確実性	課題解決・不確実性低減策
2) ガス挙動が引き起こす可能性が否定できない現象	メカニズムは理解されているので再現試験が必要	高pH間隙水を用いた要素試験で繰り返しガス移行挙動(破過)試験を実施し、試験体を分析することで劣化の可能性を評価する

このシナリオはベントナイト性能が維持される期間中に発生する可能性は否定できない。下図の要素試験で発生の可能性を考察する。

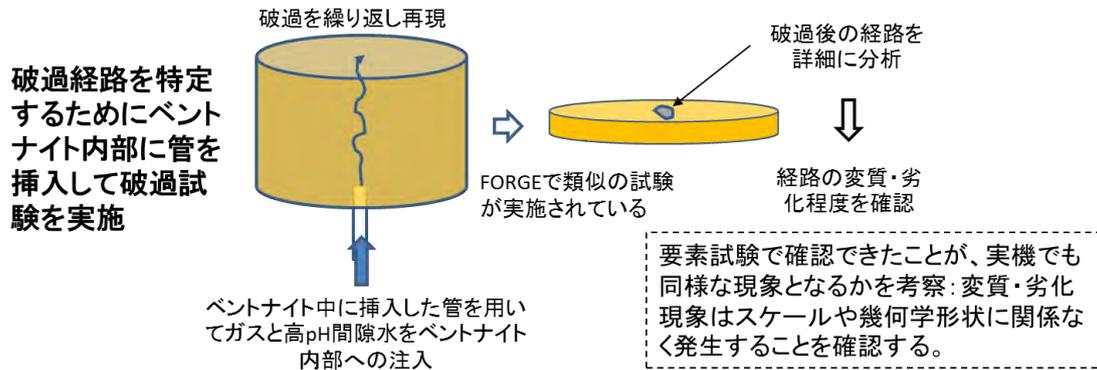


図 2.2.2-28 ガス発生によって引き起こされる可能性が否定できないシナリオの課題と課題解決方策例

c. ガス発生以外の要因によって引き起こされるバリア機能損傷シナリオ

ガス発生以外の要因によって引き起こされるバリア機能損傷として、前述したように4種類想定できる。いずれのシナリオもこれまで TRU 地層処分への検討では評価されたことがないという共通した課題を有している。特に外的な要因となる自然事象の影響については、HLW で一部取り扱われているが検討のベースとなる情報が不足しているのが現実である。現状の知見をベースに下記に課題・不確実性とその解決策について取りまとめた。

シナリオ区分	課題・不確実性	課題解決・不確実性低減策
3) ガス挙動以外の要因でバリアが劣化損傷するシナリオ	①～⑤の現象について、TRU処分では評価された例がない。発生した場合はガス影響よりも大きな影響を与える可能性がある。ベントナイトバリアが機能を喪失したのち、内部から核種を含む間隙水の放出はガス圧の影響を受ける。	HLWで一部評価されている。その時の手法や根拠を参照し解決策を構築する。 今回設定した重要FEPIは いずれもガス発生とは直接関係しない。しかし、処分システム成立性評価上重要な要素となる。

これらのシナリオはベントナイト性能期間中に発生するかどうか現在の知見では判定は難しい。

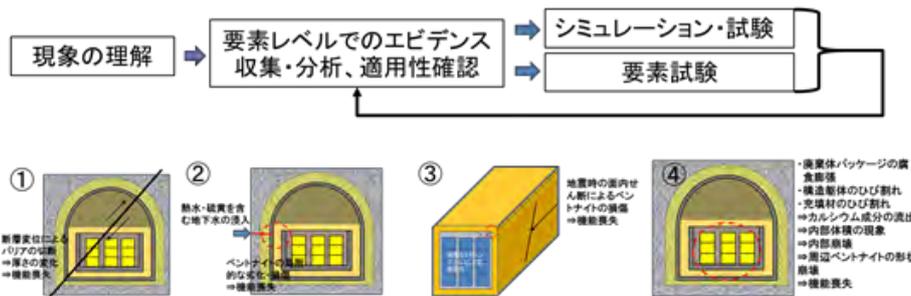


図 2.2.2-29 ガス発生以外の要因によって引き起こされるバリア機能損傷シナリオの不確実性と解決方策例

表 2.2.2-2 不確実性と具体的な解決策例

個別シナリオ	不確実性	具体的な解決策
① 断層変位によるベントナイト機能喪失	<ul style="list-style-type: none"> ・50cm以上の変位を有する断層の発生確率 ・断層に沿っての深部地下水の上昇可能性 ・深部地下水の量と化学特性 ・地表への到達の可能性 	<ul style="list-style-type: none"> ・発生確率は統計的な処理 ・深部地下水の特性調査 ・新しい断層変位の発生メカニズムの調査
② 熱水・強酸性水の浸入によるベントナイトの機能喪失	<ul style="list-style-type: none"> ・熱水・強酸性水が処分場を直撃する可能性 ・それらのベントナイト変質・劣化のメカニズムと速さ ・熱水、強酸性水の他の化学特性(溶解度に影響) ・熱水・強酸性水の量(変質・劣化の範囲) 	<ul style="list-style-type: none"> ・熱水・強酸性地下水の浸入可能性は統計処理 ・熱水や強酸性地下水の特性調査、ベントナイトへの影響を試験で確認 ・解析コードの開発
③ 地震の面内せん断破壊による機能喪失	<ul style="list-style-type: none"> ・面内せん断で破壊する地震力特性 ・せん断破壊面での変質・劣化のメカニズムと速度 	<ul style="list-style-type: none"> ・解析モデルでの損傷モードの確認 ・高pHの浸入状況の確認
④ 内部変形によるベントナイト機能喪失	<ul style="list-style-type: none"> ・バリア内部の劣化・変質プロセス ・ベントナイトの変形追従性 ・密度現象のメカニズム 	<ul style="list-style-type: none"> ・内部の状態変遷のメカニズムの解明 ・モデル化
⑤ 外部支保工劣化によるベントナイト機能喪失	<ul style="list-style-type: none"> ・支保工の劣化プロセス、劣化後の特性 ・ベントナイトバリアの膨潤・変形、密度減少プロセス 	<ul style="list-style-type: none"> ・劣化メカニズムの解明 ・モデル化

2.3 まとめと今後の展開

2.3.1 まとめ

平成 28 年度の実施成果を以下にまとめる。

ガス移行評価シナリオにおける不確実性低減のための具体的対応策の検討では、最近の新たな TRU 廃棄物処分概念を参照し、前提条件を整理した後、状態変遷表を見直し、現実的な事象やプロセスを抽出したのち、統合 FEP 関連図とともにプロセスの時系列のつながりを示すプロセス・インフルエンス・ダイアグラム (PID) を作成した。

廃棄物グループ 2 を対象に、状態変遷を詳細に分析することで、ガス移行と核種移行の複合プロセスの変遷を媒体の変化とともに PID を用いて示し、評価シナリオとして取りまとめた。この評価シナリオの特徴は、時間の経過とともに媒体の変化とガスと核種の複合プロセスが変化していく現実的な現象に着目している点である。

ガスと核種移行の複合プロセスに含まれる不確実性抽出では、時系列的に変化する評価シナリオに着目し、それぞれの統合 FEP 関連図に係る不確実性（ここでは、統合 FEP に係る知見の十分さを抽出の尺度とした）を抽出し、その低減方策を提示した。ガスと核種を溶存した間隙水との二相流による間隙水のベントナイトバリア外への放出量は、ベントナイトバリアの有効粘土密度に依存する膨潤圧と外部の水圧に依存する。現状での解析では、ベントナイトに処分深度に相当する水圧が均等に作用すると仮定しているが、ガス移行に関しては、この仮定は保守的でなく、危険側にあることに留意しておくべきである。また、核種移行のモデルはソースと移行媒体を極めて簡略して取り扱っているため、このモデルに対しても安全側にあるとは言えない。このような評価のアプローチを分析すると、少なくとも現実的な境界条件と媒体の状態を考慮できる複合プロセスのモデル化は必須となる。

ガス発生・移行の影響評価で対象とする事象や現象 (FEP) の絞り込みに係る検討では、大きく 3 つのシナリオ群に分類して、ガス移行と核種移行の複合プロセスについて考察した。

ガス発生の影響が支配的となる複合プロセスでは、ガスと核種を溶存した間隙水が二相流でベントナイト中を移行することを基本とし、ガスが蓄圧すると破過が発生し、一度に間隙水が放出されるように解析される。このような現象は一次元の要素試験で確認されているが、異なる境界条件と形状を有する実機でも同じようになるかは、現状では解析モデルでのシミュレーションでしかいえないのが現状の知見の限界である。不確実性の抽出の中でも言及したようにベントナイト周辺の水圧は均質でなく、また岩盤やベントナイト内部には応力的に弱部が存在することに起因し、低圧での破過が同じ場所で発生する可能性は否定できず、その結果としてベントナイトバリアが局所的に損傷し機能を喪失することも考えうる。これらを否定するようなエビデンスは存在しない。

このような現象は、ベントナイト内部の間隙水が高 pH であることと関連して、同じ経路を繰り返し破過することで、ベントナイトが局所的に変質・劣化し、閉じ込め機能を喪失するというシナリオにも結び付く。核種移行だけであれば、局所的な損傷は問題にはならないが、ガス移行を考慮すると核種を含む間隙水が二相流として変質部を優先的に移行することでの影響が無視できないレベルとなる可能性がある。このようなシナリオについてもこれまで考慮されてきていな

い。

ガス発生以外の原因でベントナイトバリアの機能損失が起こり得るシナリオにも言及した。断層変位によるバリアの破断、熱水や強酸性湧水の浸入によるバリアの変質、地震による面内せん断破壊、ベントナイト内外に存在するコンクリート材料の劣化による強度と剛性の低下、体積の減少に伴うベントナイトの形状破壊や流出現象など、いずれも現状の知見では否定できないシナリオとなる。これらのベントナイト機能の損傷や喪失は、核種移行の拡散場の一部が移流場に変化しても全体としての被ばく線量に与える影響は小さいかもしれないが、ガス圧が作用する二相流場であれば、局所的な弱部を優先的に移行するため、放射性核種を溶存した間隙水が連続的に放出される可能性が発生する。これらの複合プロセスについてもこれまで評価の対象にされてこなかったのが現状である。

2.3.2 今後の展開

平成 28 年度の検討で明らかになった課題は、大きく以下の 3 項目にまとめることができる。

- ・ 現状でのガス影響を評価するモデルと核種移行評価のモデルとは、物質移行の媒体のモデル化および境界条件や異方性の取り扱いで整合性が取れておらず、複合プロセスを考慮できるレベルまで整備されていない。
- ・ ガス移行挙動評価に係る要素試験からの基礎的な現象理解はできているが、現実の地下深部で遭遇する岩盤力学特性のバラツキや水圧作用の不均質性の境界条件が考慮されおらず、また、媒体の変化も考慮されていない理想的な条件を前提とした解析が実施されている。このことは、現実での現象を考慮した保守的な評価ケース設定とはなっておらず、結果的に危険側になっている可能性がある。
- ・ ガス発生の影響が支配する、ガスの影響が否定できない、ガス以外の要因でベントナイトバリアの機能を損傷するといったシナリオについては、現象を構成する FEP に係るエビデンスや知見が不十分で、現状での二相流を中心とした解析がガス影響を十分反映した評価となっているとは言い難い。

以上の課題を「ガス発生の影響評価に係わる不確実性」とするならば、それらを低減するための知見の収集や実験、モデル化をさらに図るべきである。それには、今年度の検討で分析した現実的なシナリオとそれを構成する FEP 群をもとに、実験や類似の知見を整理し、シナリオに対応した評価ケースの設定が不可欠となる。このような新たなアプローチをせず、現状モデルでのガス移行挙動評価と二相流解析で求められた核種を含む間隙水をインベントリとした核種移行解析を実施しても、十分性の説明にはならず、これまでの検討をトレースしただけとなる。その意味で、次年度では、次の展開を見据えて、現実性を追求したモデル開発や実験での実証イメージに結びつく評価ケースの設定を行うことが重要となる。

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25~27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
- [6] NEA FORGE Project, Gas Generation and Migration, International Symposium and Workshop, Luxembourg, Feb. 2013,
<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] NUMO(2014) : 地層処分低レベル放射性廃棄物の安全性向上に関する検討, NUMO-TR-14-03.
- [9] NUMO 藤山ほか(2016) : 地層処分セーフティケース、2016年原子力学会秋の年会予稿集、PL2D01~04、総合講演・報告3 (NUMO[バックエンド部会共催]).
- [10] FORGE, Summary of Gas Generation and Migration Current State-of-the-Art, January 2010.
- [11] 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,
- [12] NDA (2011), Geological Disposal, Gas Status Report, NDA Report no. NDA/RWMD/037
- [13] 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
- [14] Wolfgang Muller (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 年度にかけて検討した「ガス移行挙動の評価」[1]において、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に関して、以下に示す課題を抽出した。

- 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

これらの課題や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、上記の後続研究として平成 25 年度より新たな検討を開始した。

この実施計画の中で設定した 3 つの Work Package（人工バリア中のガス発生・移行挙動の現象理解、ガス移行データの蓄積と活用、不確実性を考慮したガス移行解析手法の構築）とその検討項目を整理したものを表 3.1.1-1 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 3.1.1-1 に示す通りである。

表 3.1.1-1 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認計算（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：より多くの確認データ・構成モデルを蓄積し、有効利用すること</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 確認されたデータ・構成モデルの蓄積 ● 蓄積データ・モデルの有効利用
<p>WP3：不確実性を考慮した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）

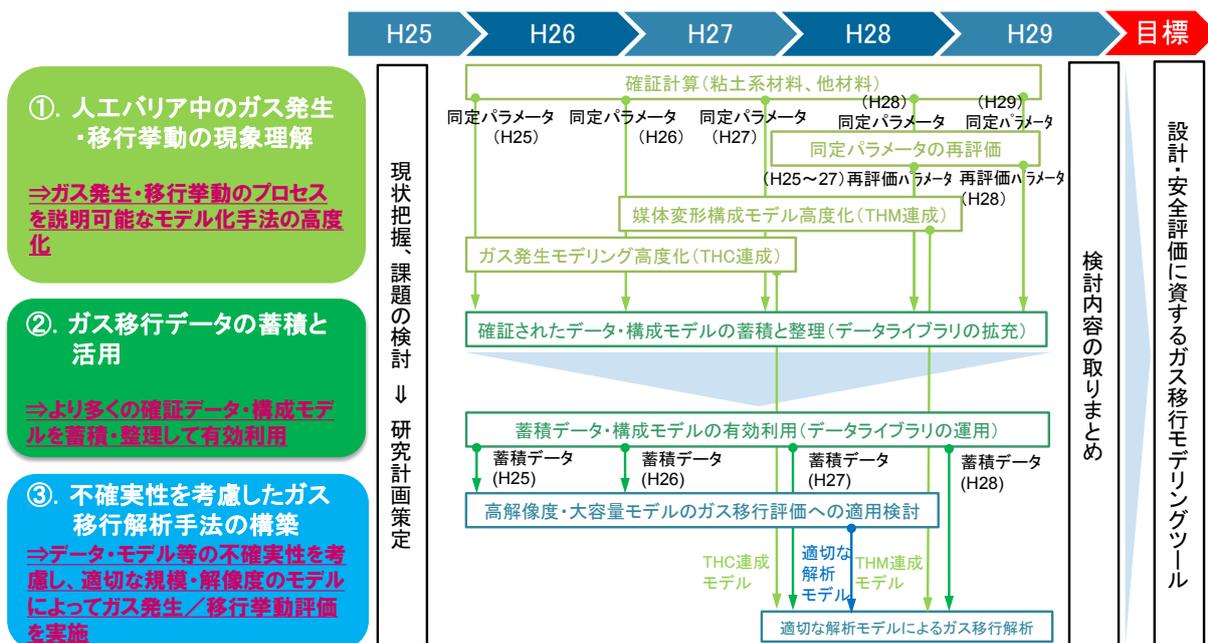


図 3.1.1-1 WP 各検討項目間の相互関係と実施スケジュール

平成 27 年度の検討として、「人工バリア中のガス発生・移行挙動の現象理解」の中では、本検討と並行して実施されたガス移行試験の実測データを再現対象として、水・ガス 2 相流モデルと逆解析手法によってパラメータを同定した。これら新規に同定したモデルパラメータは、既存の複数の同定パラメータのバラつきの範囲内に収まっており、これまで不明確であったパラメータの不確実性の幅の絞り込みが図られてきたことを示唆する成果を得ている。

さらに、「ガス移行データの蓄積と活用」では、上記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。

「不確実性を考慮したガス移行解析手法の構築」では、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。加えて、実施事例の少ない 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である TOUGHREACT を用い、想定される処分環境（高 pH 環境）における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。このうち pH の上昇に伴い腐食反応速度の減少を考慮した結果、処分施設内でのガス発生量（発生速度）が小さくなり、ガス圧上昇や水飽和度低下が緩慢になることが分かった。このように、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。

一方で、TRU 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[5]。

そこで本検討（平成 28 年度の検討）においては、別途検討を進めているシナリオ構築やデータ（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も併せて行った。具体的には、TRU 廃棄物グループ 2 の処分概念を対象とし（図 3.1.1-2）、既往検討や本検討における確証計算で蓄積されてきた同定パラメータ（図 3.1.1-3 および図 3.1.1-4）を利用したガス移行解析による挙動評価を実施した。解析コードには、水・ガス 2 相流解析コード GETFLOWS (General- purpose Terrestrial fluid-FLOW Simulator)[7]を用いた。解析格子モデルは鉛直 2 次元断面とした。室内試験データを用いた確証計算（再現解析）によって蓄積されてきた、信頼性の高い同定パラメータを用いることで、TRU 廃棄物処分システム内のガス移行挙動や、施設内の最大ガス圧、押し排水量に対し、第 2 次 TRU レポートからの変化を着眼点として取り纏めることとした。

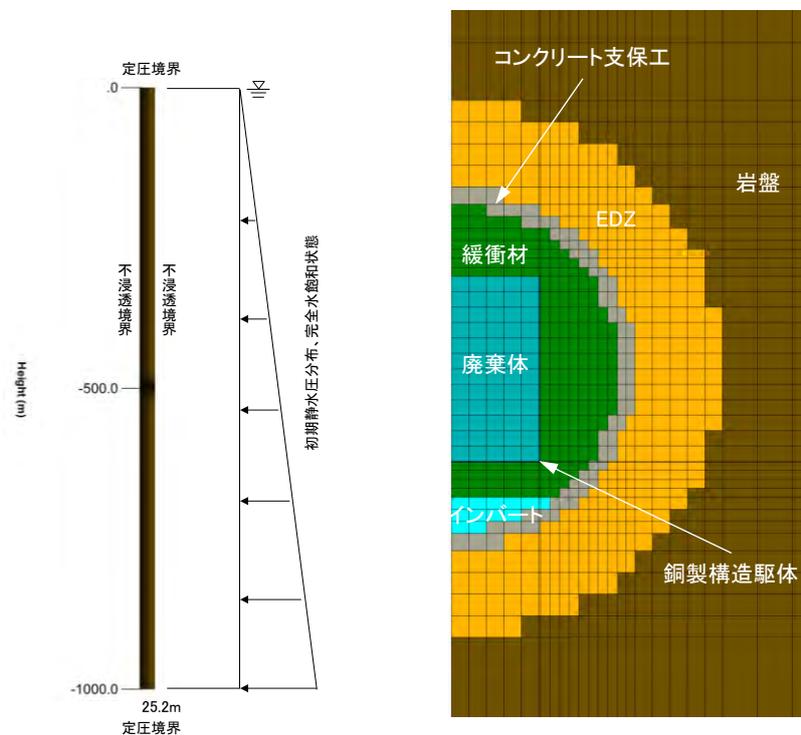


図 3.1.1-2 典型的な TRU 廃棄物処分システムを対象とした解析格子モデルの例

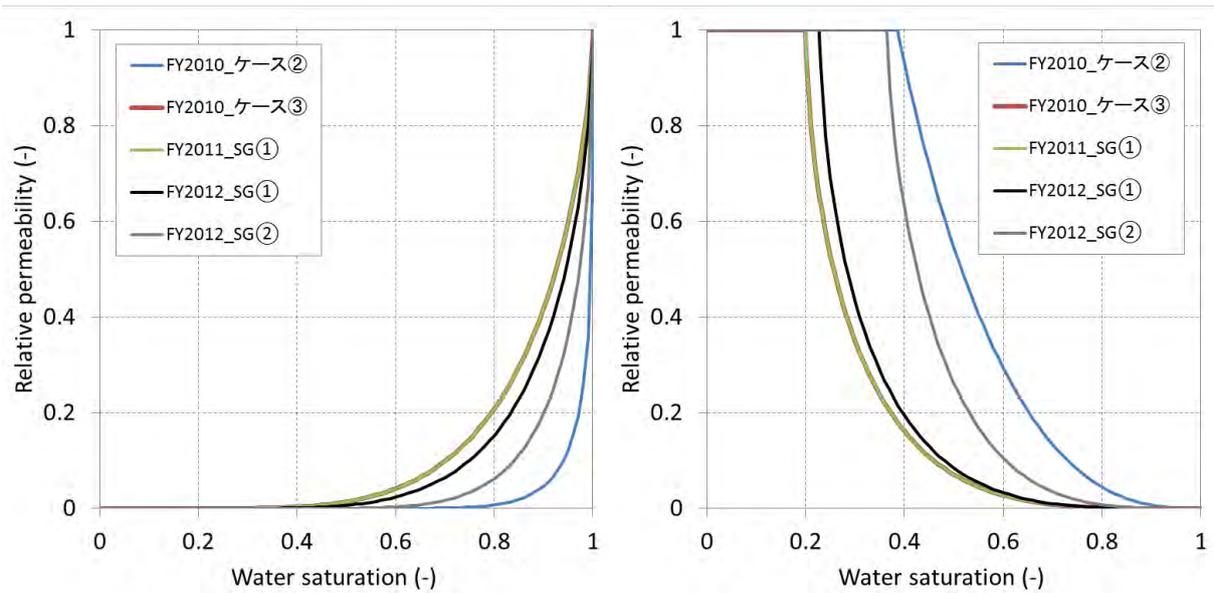


図 3.1.1-3 既往検討（排水過程）で同定された相対浸透率曲線（左：水相、右：ガス相）

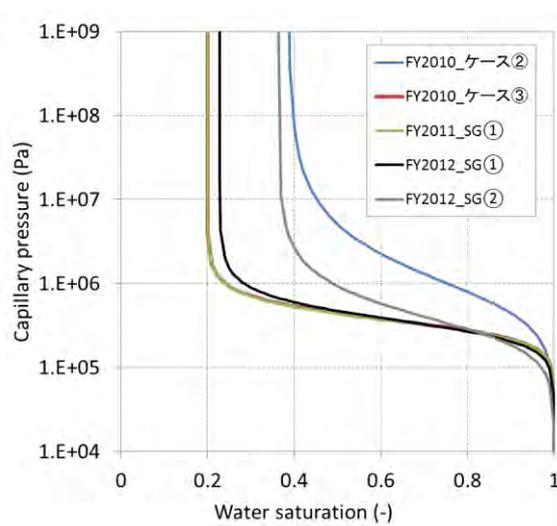


図 3.1.1-4 既往検討（排水過程）で同定された毛細管圧力曲線

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、以下に示す内容を検討した。

- ① 人工バリア中のガス発生・移行挙動の現象理解
 - 最新の室内ガス移行試験データによる検証計算
- ② ガス移行データの蓄積と活用
 - 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）
- ③ 不確実性を考慮したガス移行解析手法の構築
 - 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

3.2 実施内容

3.2.1 最新の室内ガス移行試験データによる確証計算（モデル化手法の高度化を目的とした試験データの再現解析によるモデルパラメータの同定）

昨年度に実施した「平成 27 年度ガス移行連成挙動評価手法の開発」[4]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）およびセメント供試体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人工バリア材料単体のガス移行挙動の理解を目的とした試験とは異なり、人工バリア中で卓越したガス移行経路になることが懸念される「バリア材料間の界面」のガス移行特性の把握を目的とするものであった。実施された試験の概要を表 3.2.1-1 に示す。

本検討では、上記「バリア材料間の界面」のガス移行挙動が説明可能なモデル化手法の高度化を目的として、昨年度実施した上記のガス注入試験データを対象とした再現解析によってモデルパラメータの同定を行った。また、既往検討における再現解析結果に基づくガス移行挙動の評価を通じて、モデル化手法の妥当性やフィールドスケールへの適用性等について検討した。解析コードには、水・ガス 2 相流解析コード GETFLOWS を用いた。

表 3.2.1-1 平成 27 年度に実施された試験概要[4]

試験タイプ	試験フェーズ
ベントナイト界面を模擬したガス移行試験（同一供試体 No.1、No.2 の 2 ケース）	注水飽和試験（定圧注水） ガス注入試験（段階昇圧ガス注入）（※No.1 のみ） 解体調査
セメント界面を模擬したガス移行試験（4 パターンの配合を変えた No.1、No.2、打継無の 12 ケース）	注水飽和試験（定圧注水） ガス注入試験（定圧ガス注入） 解体調査

(1) ガス移行試験の概要

1) 試験概要と実測データ

本確証計算で対象とする室内試験データは、「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—」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、以下に示す 3 つの試験から得られたものである。

- 圧縮ベントナイトを用いたガス移行試験
- ベントナイト系人工バリアの材料界面を模擬したガス移行試験
- セメント系材料を用いたガス移行試験

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 3.2.1-2 にまとめた。圧縮ベントナイトを用いたガス移行試験は 5 つの同一供試体、ベントナイト系人工バリアの材料界面を模擬したガス移行試験は 2

つの同一供試体、セメント系材料を用いたガス移行試験は 4 パターンの配合による、それぞれ 3 つの供試体（打継を設けた 2 つの同一供試体、打継が無い 1 つの供試体）の計 12 個の供試体で実施された。表 3.2.1-3 に各供試体の各試験フェーズの実施状況をまとめた。試験は 25℃の恒温環境下で行われている。圧縮ベントナイトを用いたガス移行試験のうち、No.1～No.3 については、昨年度の検討において既に確証計算が実施されている。本検討では、No.4、No.5 を対象として検討を進めた。

次項より、各試験及び各試験フェーズの実測データについて整理・分析を行った。

表 3.2.1-2 各試験フェーズにおける試験条件と実測データ

試験対象	寸法※	試験フェーズ	試験条件	実測データ
圧縮 ベントナイト	φ60mm h25mm	再冠水	初期飽和度 90%から、差圧 0.2MPa に よって底面から注水（背圧 0.1MPa）	注水圧、累積注水量、累積排水量、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（背圧 0.2MPa）	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）、有効底面応力、全応力
		解体調査	厚さ約 3mm で分割	寸法、湿潤、乾燥重量（→含水比、水飽和度）
ベントナイト系 材料界面	φ50mm h25mm	再冠水	初期飽和度 90%から差圧 0.2MPa に よって底面から注水（背圧 0.1MPa）	注水圧、累積注水量、累積排水量、全応力
		ガス注入	再冠水試験後、段階昇圧しながら 底面からガス注入（背圧 0.2MPa）	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）、有効底面応力、全応力
		解体調査	厚さ約 3mm で分割	寸法、湿潤、乾燥重量（→含水比、水飽和度）
セメント系 材料	φ50mm h50mm	再冠水 (透水試験)	2.7~2.9MPa の一定差圧で変水位 透水試験を実施（背圧 0.1MPa）	累積排水量、ビュレット内水位
		ガス注入	差圧 2.76~2.97MPa によって 底面からガス注入（背圧 0.2MPa）	注入ガス圧、累積排水量、累積排水排気量
		解体調査	—	—

※φ は直径、h は高さを示す

表 3.2.1-3 供試体の試験実施状況

供試体		再冠水フェーズ	ガス注入試験フェーズ	解体調査	
圧縮ベントナイト	No.1	2014/5/20～2014/8/27	2014/8/28～2015/4/27	2015/4/27	
	No.2	2014/5/20～2014/8/27	2014/8/28～2015/1/19	2015/1/20	
	No.3	2014/9/2～2015/2/19	2015/2/21～2016/2/22	2016/2/22	
	No.4	2015/3/31～2015/7/10	—	2015/7/10	
	No.5	2016/1/8～2016/3/23	—	—	
ベントナイト系 材料界面	No.1	2015/9/16～2016/1/4	2016/1/5～2016/1/31	2016/1/31	
	No.2	2015/9/16～2016/1/4	—	2016/1/4	
セメント系 材料	配合ケース 1	No.1	2016/1/14～2016/1/17	2016/1/19～2016/1/20	—
		No.2	2016/2/23～2016/2/26	2016/2/26～2016/3/1	—
		打継無	2016/1/13～2016/1/15	2016/1/15～2016/1/19	—
	配合ケース 2	No.1	2015/12/20～2016/1/4	2016/1/4～2016/1/7	—
		No.2	2015/12/24～2016/1/4	2016/1/4～2016/1/5	—
		打継無	2016/1/5～2016/1/12	2016/1/12～2016/1/13	—
	配合ケース 3	No.1	2016/1/20～2016/1/27	2016/1/28～2016/1/29	—
		No.2	不透水のためデータなし	不透水のためデータなし	—
		打継無	2016/1/23～2016/1/27	2016/1/28～2016/1/29	—
	配合ケース 4	No.1	2016/2/10～2016/2/15	2016/2/15～2016/2/17	—
		No.2	2016/2/4～2016/2/10	2016/2/10～2016/2/17	—
		打継無	2016/2/22～2016/2/23	2016/2/24～2016/2/26	—

2) 圧縮ベントナイトを用いたガス移行試験データの整理・分析

a. 再冠水フェーズ

圧縮ベントナイトを用いたガス移行試験の再冠水フェーズにおける、注水差圧と累積注水量、累積排水量、全応力の実測データを図 3.2.1-1 にまとめた。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注水速度から算出した絶対浸透率を表 3.2.1-4 に示す。絶対浸透率は、 $3.55\sim 4.50\times 10^{-20}(\text{m}^2)$ の範囲となり、比較的ばらつきの小さい結果が得られている。また、全応力の時間変化を見ても 0.6MPa 前後で推移しており、全応力データにおいても比較的ばらつきが小さいことが分かる。No.1~No.3 においては、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ており、この結果に関して試験者側は、この期間、大気圧が上昇しており、その影響を受けているのではないかと解釈している。No.4、No.5 については、供試体の寸法と間隙率、初期飽和度から推定される飽和に必要な水量（約 7.1mL）に、累積注水量が達した時点よりも、大幅に遅れて排水が生じている。実際の試験では、排水側のポーラスメタル側で排水が確認されてから、排水側の配管を変更し、配管内を飽和する作業を行った後に排水量を計測する手順で行っている。No.4、No.5 については、上記の配管接続の再設定が排水確認から時間がある程度経過してしまったため、実質的に正しい排水量の測定ができていない。そのため、以降の確証計算では参考データとして使用するものとした。

表 3.2.1-4 注水速度から算定した絶対浸透率（圧縮ベントナイト）

供試体	絶対浸透率 (m^2)
No.1	4.18×10^{-20}
No.2	3.55×10^{-20}
No.3	3.95×10^{-20}
No.4	4.50×10^{-20}
No.5	4.41×10^{-20}

b. 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 3.2.1-2 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、ガス溶解の影響等が考えられる。昨年度の確証計算では、ガス溶解を考慮することで、この挙動を再現できることが示されている。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。

c. 解体試験

再冠水フェーズ、ガス注入フェーズ終了後の解体調査から得られたデータを用いて得られた間隙率、含水比、水飽和度の深度プロファイルを図 3.2.1-3、図 3.2.1-4 に示す。図中の赤点線は、ガス注入フェーズの供試体からの累積排水量から推定された平均水飽和度を示している。ガス注入を実施した No.1～No.3 のデータを見ると、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、No.3 では小さい結果となっている。このことは、両者（累積排水量から推定される水飽和度と解体調査から得られた水飽和度）が矛盾するデータであることを示している。No.4 については、ほぼ飽和状態（水飽和度 100%）に達していることが分かる。また、図 3.2.1-4 に示した水飽和度では同一位置であってもばらつきが大きく、試験体から供試体を分離し、いくつか分割して重量等を測定していることから、誤差が大きくなったと考えられる。間隙率データを見ると、供試体下部の間隙率がやや大きい傾向が認められる。これは下端からの注水やガス圧入による影響と考えられる。但し、上部との間隙率の差は小さく、供試体内で力学的な変形は強く生じていないと見られる。

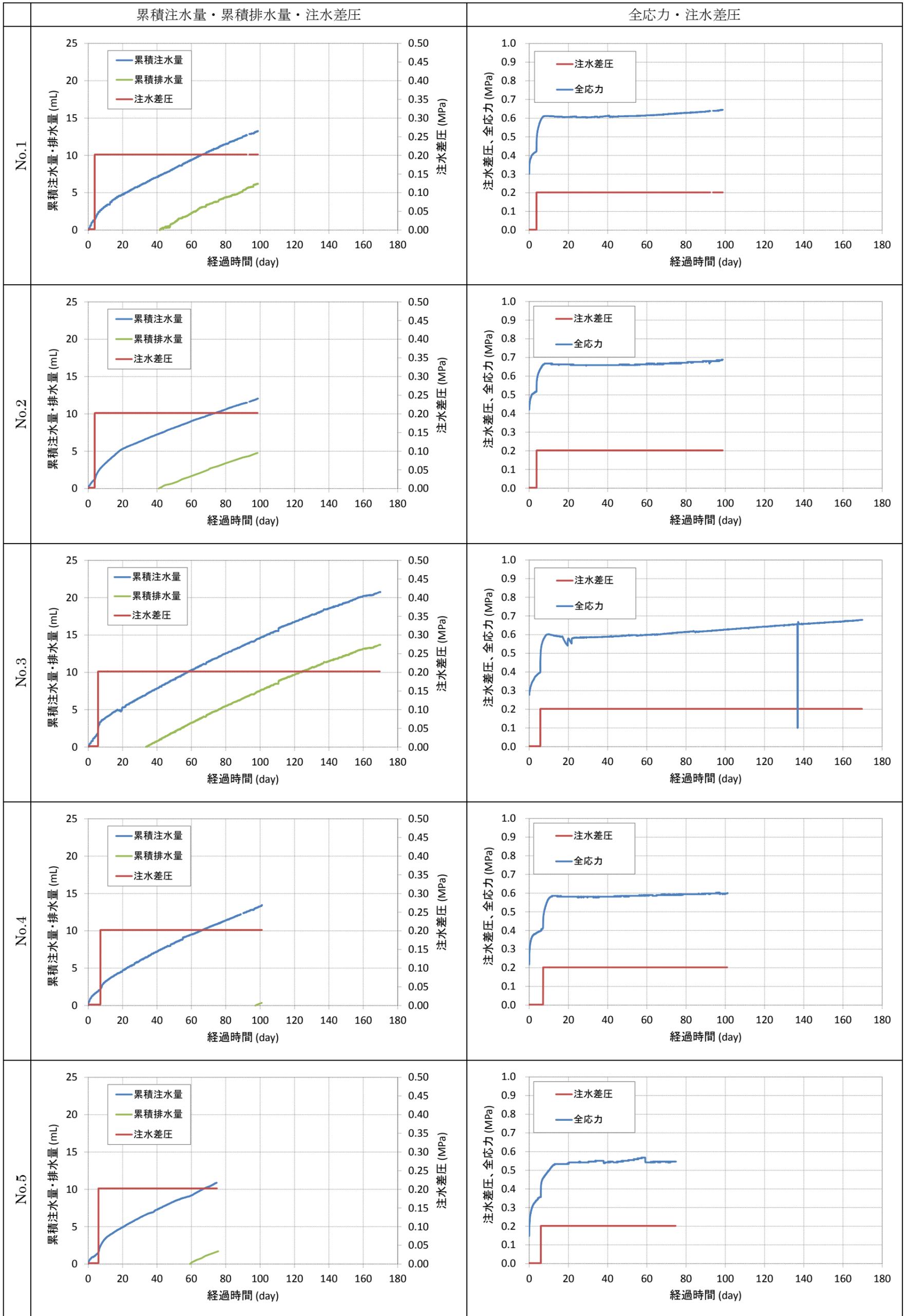


図 3.2.1-1 圧縮ベントナイト供試体による再冠水フェーズの試験結果

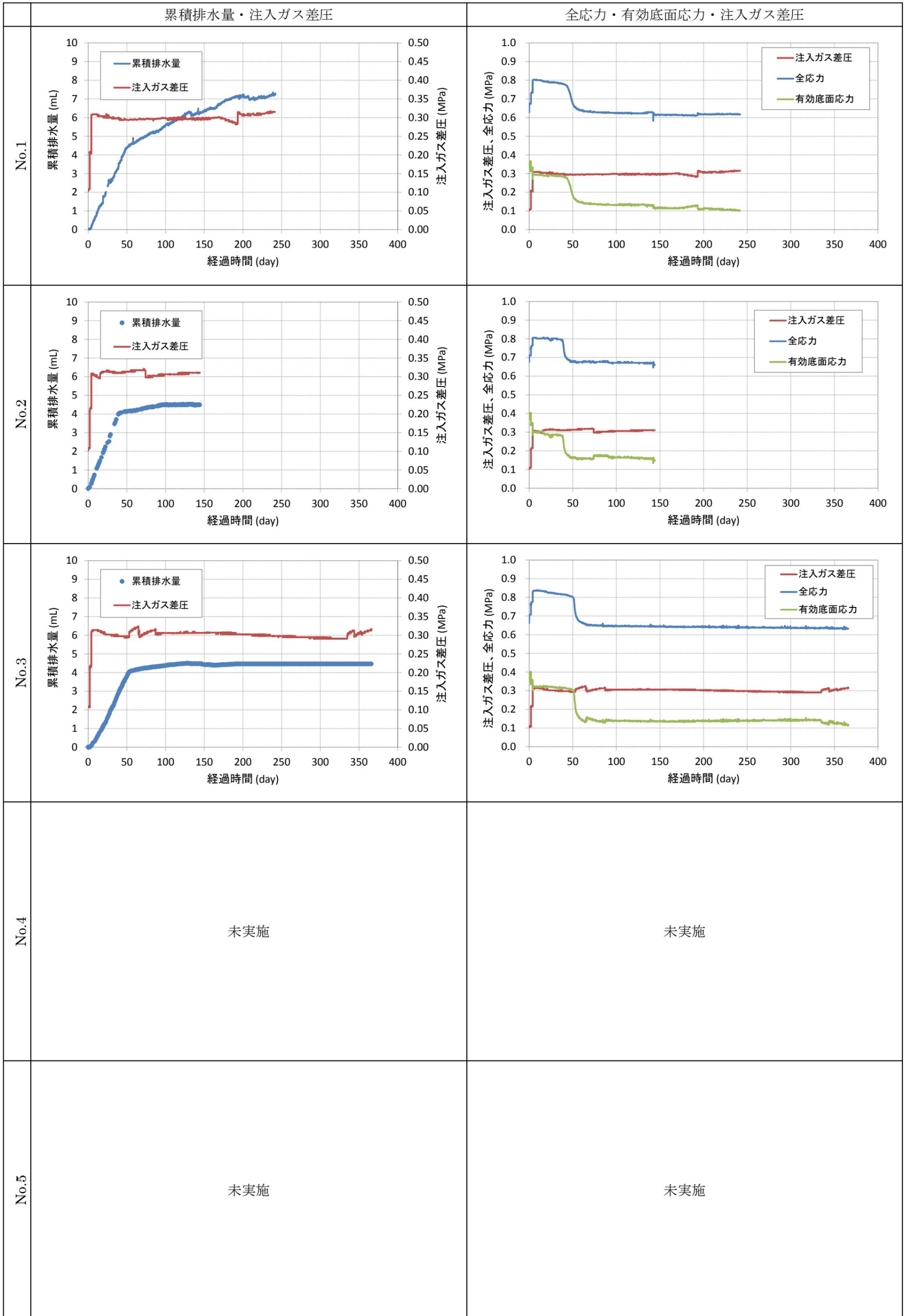


図 3.2.1-2 圧縮ベントナイト供試体によるガス注入フェーズの試験結果

	間隙率 (全体)	含水比 (全体)	水飽和度 (全体)	備考
No.1	<p>間隙率 (-)</p>	<p>含水比 (%)</p>	<p>水飽和度 (%)</p>	再冠水試験 →ガス注入試験 →解体試験
No.2	<p>間隙率 (-)</p>	<p>含水比 (%)</p>	<p>水飽和度 (%)</p>	再冠水試験 →ガス注入試験 →解体試験
No.3	<p>間隙率 (-)</p>	<p>含水比 (%)</p>	<p>水飽和度 (%)</p>	再冠水試験 →ガス注入試験 →解体試験
No.4	<p>間隙率 (-)</p>	<p>含水比 (%)</p>	<p>水飽和度 (%)</p>	再冠水試験 →解体試験
No.5	未実施	未実施	未実施	未実施

図 3.2.1-3 圧縮ペントナイトによる解体試験の試験結果 (1/2)

	間隙率 (全体)	含水比 (A、B、C)	水飽和度 (A、B、C)	備考
No.1	<p>間隙率 (-)</p>	<p>含水比 (%)</p>	<p>水飽和度 (%)</p>	<p>排出側 注入側</p> <p>排出側からの観察 測定箇所図</p> <p>再冠水試験 →ガス注入試験 →解体試験</p>
No.2	<p>間隙率 (-)</p>	<p>含水比 (%)</p>	<p>水飽和度 (%)</p>	<p>排出側 注入側</p> <p>排出側からの観察 測定箇所図</p> <p>再冠水試験 →ガス注入試験 →解体試験</p>
No.3	<p>間隙率 (-)</p>	<p>含水比 (%)</p>	<p>水飽和度 (%)</p>	<p>排出側 注入側</p> <p>排出側からの観察 測定箇所図</p> <p>再冠水試験 →ガス注入試験 →解体試験</p>
No.4	<p>間隙率 (-)</p>	<p>含水比 (%)</p>	<p>水飽和度 (%)</p>	<p>排出側 注入側</p> <p>排出側からの観察 測定箇所図</p> <p>再冠水試験 →解体試験</p>
No.5	未実施	未実施	未実施	未実施

図 3.2.1-4 圧縮ベントナイトによる解体試験の試験結果 (2/2)

3) ベントナイト系人工バリアの材料界面を模擬したガス移行試験データの整理・分析

a. 再冠水フェーズ

圧縮ベントナイトを用いたガス移行試験の再冠水フェーズにおける、注水差圧と累積注水量、累積排水量、全応力の実測データを図 3.2.1-5 にまとめた。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注水速度から算出した絶対浸透率を表 3.2.1-4 に示す。絶対浸透率は、 $4.86 \times 10^{-20}(\text{m}^2)$ 、 $5.31 \times 10^{-20}(\text{m}^2)$ と算出され、両者はほぼ同じ値となっており、さらに、圧縮ベントナイトの再冠水フェーズから得られた絶対浸透率の値 ($3.55 \sim 4.50 \times 10^{-20}(\text{m}^2)$) とほぼ同じ結果となった。また、全応力の時間変化を見ても約 0.6MPa で推移しており、全応力データにおいても両者はほぼ同じ値となり、圧縮ベントナイトともほぼ同じ結果となった。No.1、No.2 とともに、供試体作成時のスリット幅 (1mm) を考慮した供試体の寸法と間隙率 (0.5070)、初期飽和度 (86.28%) から推定される飽和に必要な水量 (約 8.49mL) に、累積注水量が達した時点で、排水が確認されていることが分かる。

表 3.2.1-5 注水速度から算定した絶対浸透率 (圧縮ベントナイト界面)

供試体	絶対浸透率 (m^2)
No.1	4.86×10^{-20}
No.2	5.31×10^{-20}

b. ガス注入フェーズ

ガス注入フェーズが実施された No.1 についてのみ、ガス注入フェーズで実測されたデータのうち、累積排水量と排気流量、全応力、有効底面圧力の時間変化を図 3.2.1-6 に示す。ガス圧が載荷された直後から排水が生じており、約 25 日経過した時点でガスが排出され、破過が起こる挙動を示している。

c. 解体試験

再冠水フェーズ、ガス注入フェーズ終了後の解体調査から得られたデータを用いて得られた間隙率、含水比、水飽和度の深度プロファイルを図 3.2.1-7、図 3.2.1-8 に示す。ガス注入を実施した No.1 のデータを見ると、供試体下部の水飽和度が低下しており、ガスが供試体内に侵入し、水を押し出したことを示すデータが得られている。一方、再冠水フェーズのみを実施した No.2 では、ほぼ供試体内が飽和に達していることを示している。

また、図 3.2.1-8 に示した No.1 の含水比、水飽和度データからは、ガスは外側からより多く透気したものと見られる。間隙率データを見ると、多少のばらつきはあるものの差は小さく、供試体内で力学的な変形は強く生じていないと見られる。

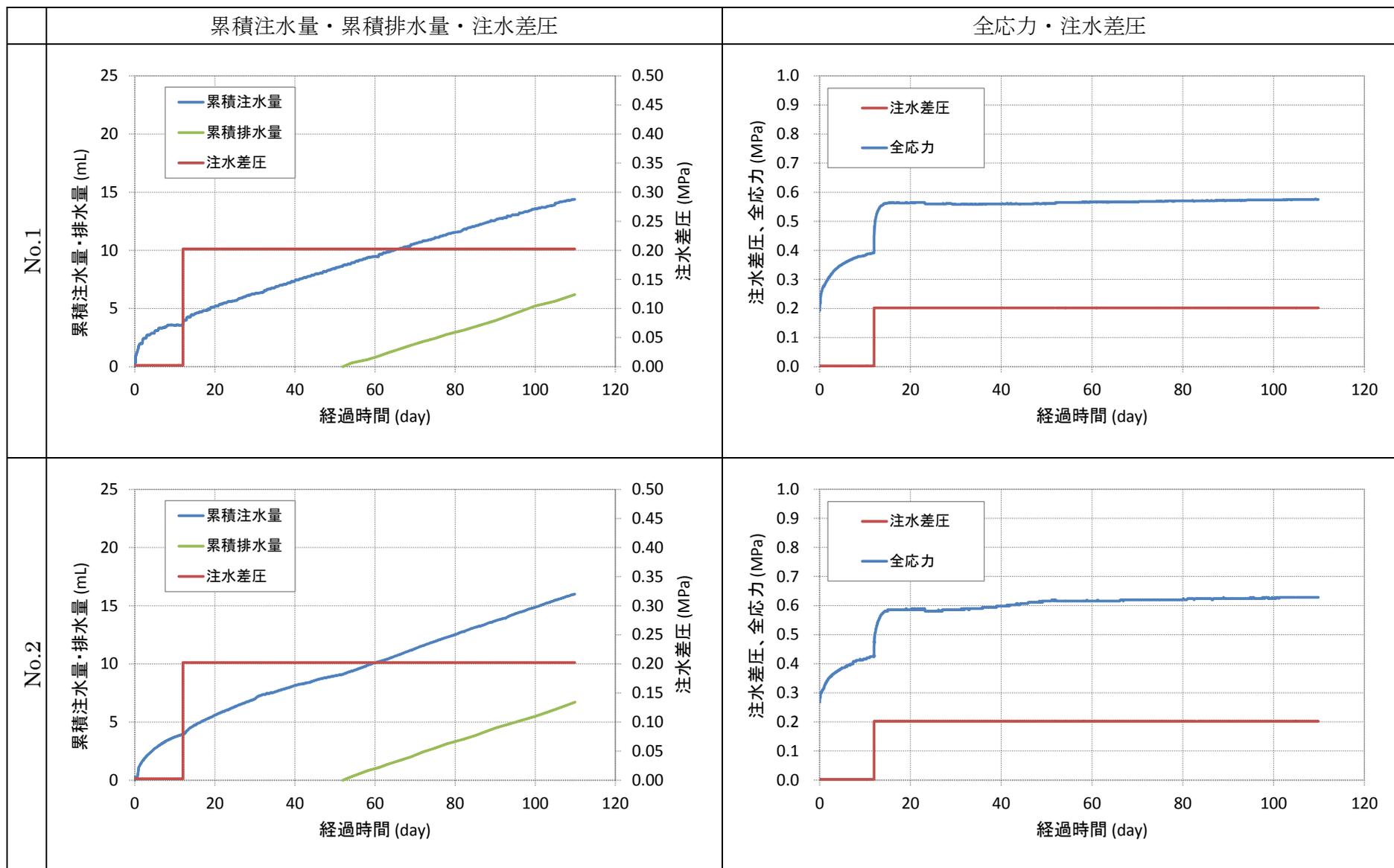


図 3.2.1-5 ベントナイト界面を含む供試体による再冠水フェーズの試験結果

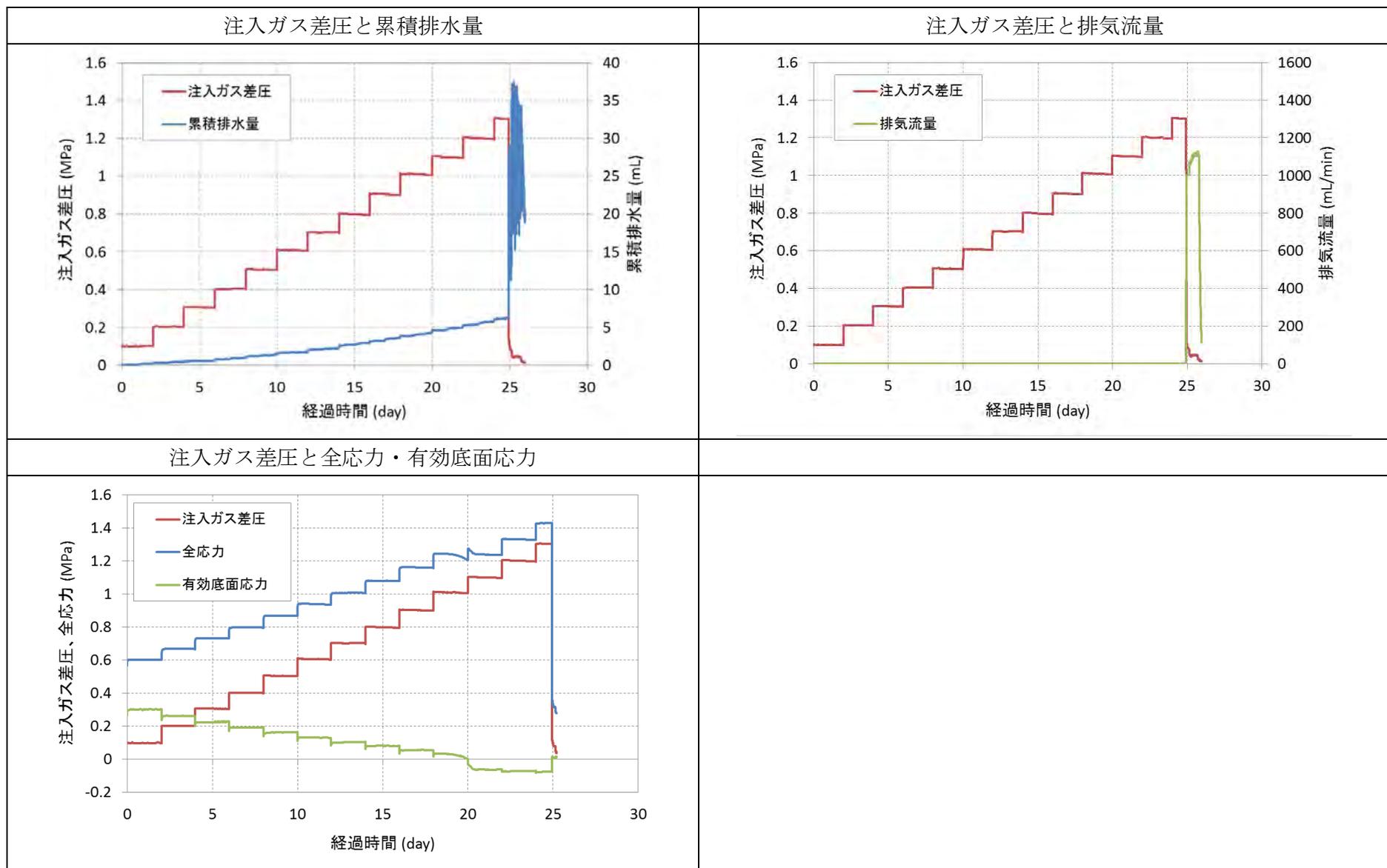


図 3.2.1-6 ペントナイト界面を含む供試体によるガス注入フェーズの試験結果 (No.1)

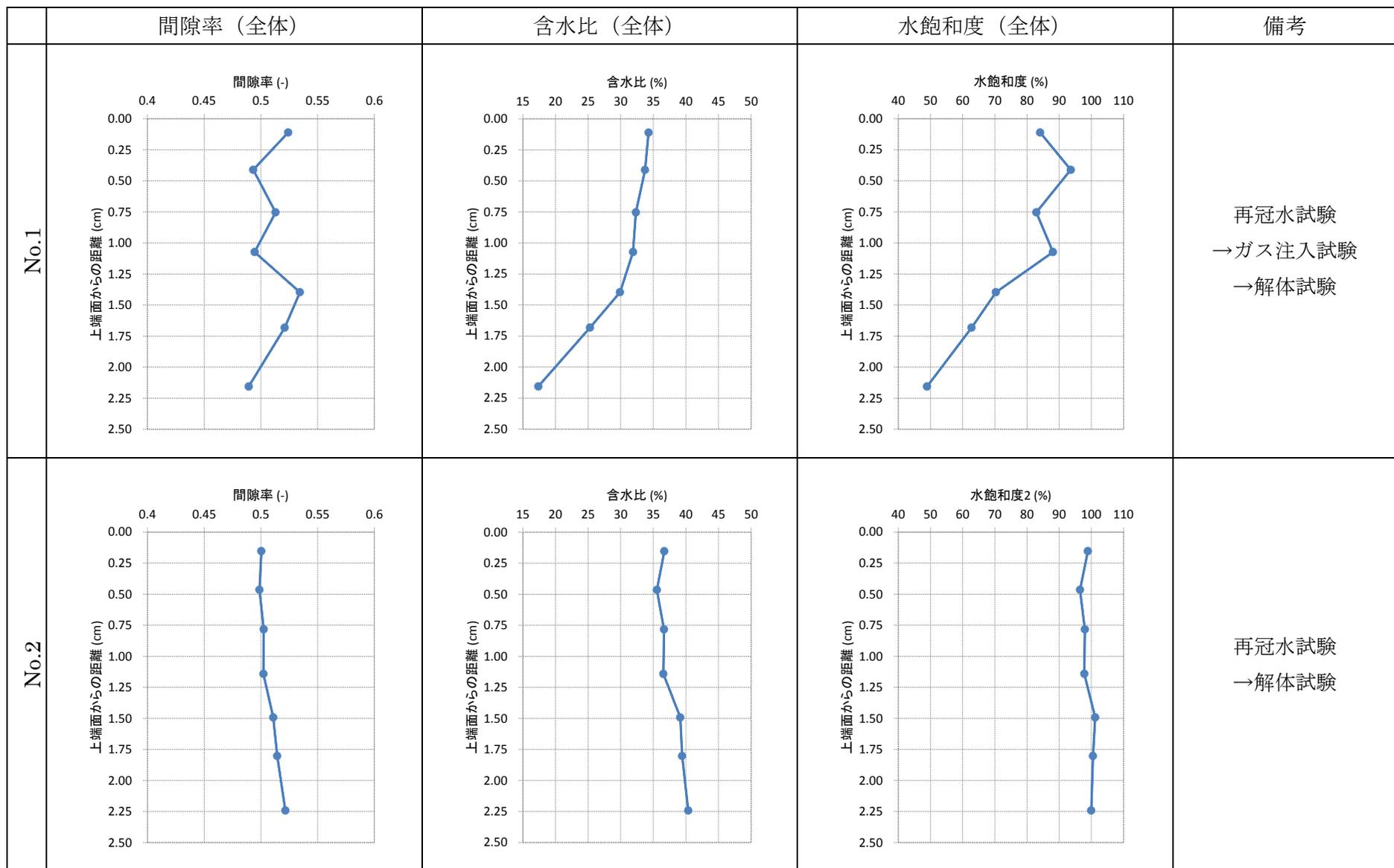


図 3.2.1-7 ベントナイト界面を含む供試体による解体試験の試験結果 (1/2)

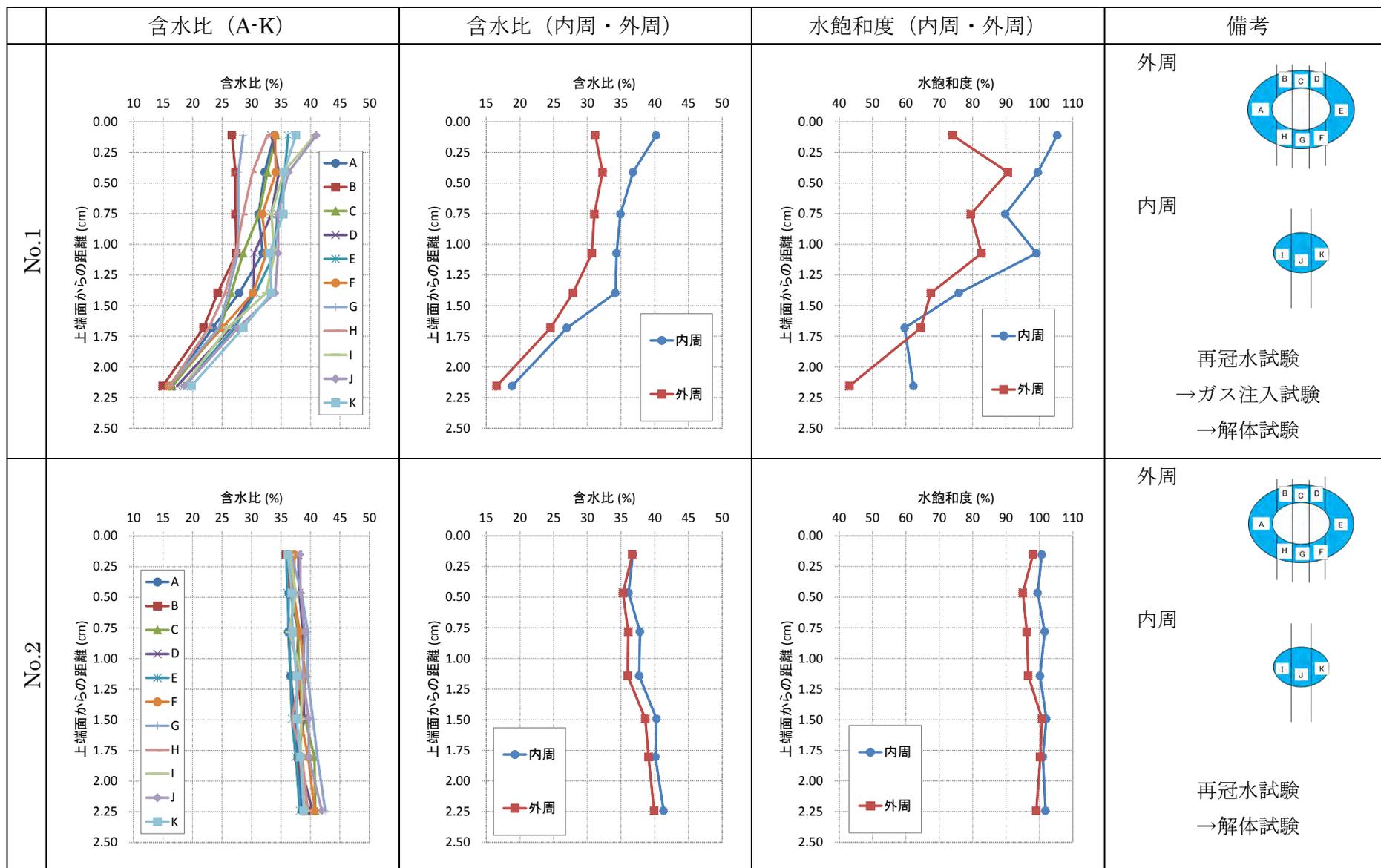


図 3.2.1-8 ペントナイト界面を含む供試体による解体試験の試験結果 (2/2)

4) セメント系材料を用いたガス移行試験データの整理・分析

セメント系材料を用いたガス移行試験の試験装置概要図を図 3.2.1-9 に示す。以下に利用可能なデータを示す。

- 流量計で計測した累積排水排気量変化 (図 3.2.1-9 の Q_{FM})
- ビュレット内の増加水量変化 (みかけの累積排水量) (図 3.2.1-9 の Q_{wa})
- 試験前後の重量差から得られた総累積排水量 (図 3.2.1-9 の Q_w の最終値)
- 変水位透水試験から算出された水相の絶対浸透率
- 絶乾状態でのガス相の絶対浸透率
- ガス透気試験後、定常状態に至ったときの排気流量から算出されたガス相の有効浸透率
- 飽和時、乾燥時の重量

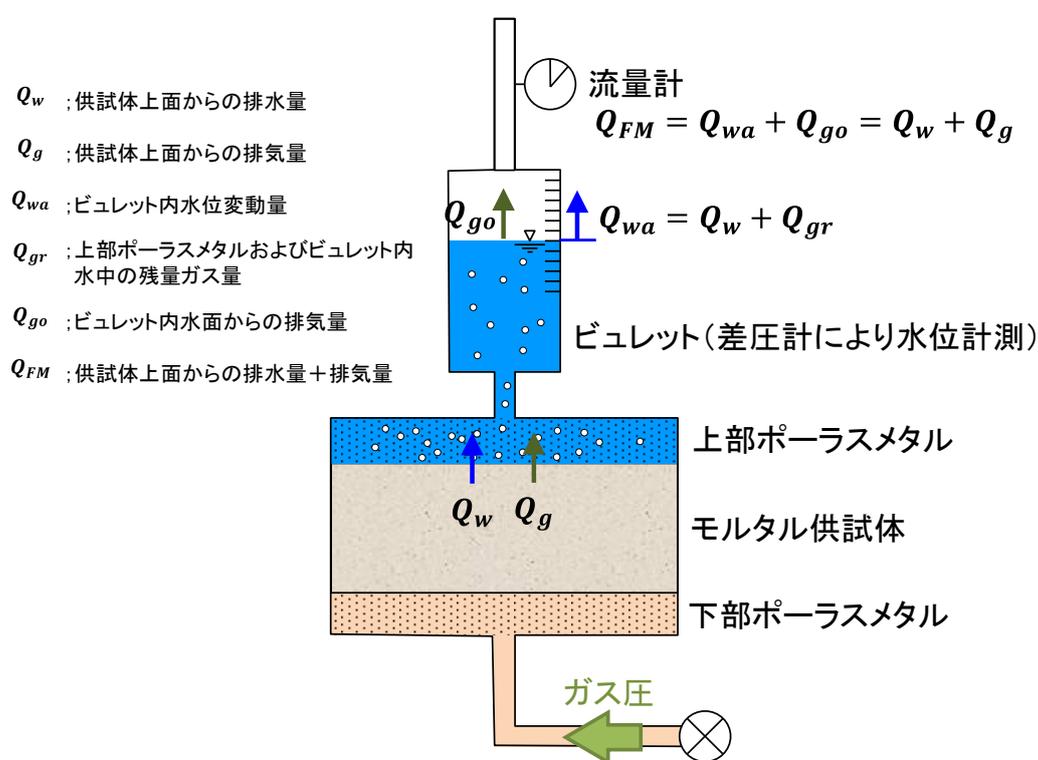


図 3.2.1-9 ガス移行試験装置概要図

表 3.2.1-6 に各供試体の寸法、体積、載荷ガス圧、背圧、飽和時・乾燥時重量、間隙率・間隙体積、累積排水量、みかけの間隙率、水相の絶対浸透率、ガス相の絶対浸透率、有効浸透率をまとめた。載荷ガス圧と背圧はゲージ圧で表記している。みかけの間隙率とは、累積排水量を供試体体積で割った値のことである。ガス相の有効浸透率は、ガス透気が平衡状態に至ったときの透気速度から算出した値である。図 3.2.1-10 に変水位透水試験から得られた累積排水量を、図 3.2.1-11～図 3.2.1-12 にガス注入試験で実測された累積排水排気量 Q_{FM} 、みかけの累積排水量 Q_{wa} の時間変化を示した。これらの実測データを見ると、いずれの供試体でも、ガス圧載荷後すぐにみかけの累積排水量が増加し、ある時点で排水が停止する(ほぼ一定の値となる)。その後、累積排水排気量の増加速度が一定となり平衡状態となる傾向が認められる。

表 3.2.1-6 各供試体の寸法、試験条件および実測データの整理

配合 ケース	供試体	寸法*	供試体体積 (cm ³)	载荷ガス圧 (MPa)	背圧 (MPa)	飽和時重量 (g)	間隙体積 (cm ³)	累積排水量 (mL)	水相の絶対浸透率 (m ²)	ガス相の絶対浸透率 (m ²)
						乾燥時重量 (g)	間隙率 (-)	みかけの間隙率 (-)		ガス相の有効浸透率 (m ²)
1	No.1	φ50mm h50mm	98.2	2.771	0.101	176.894	28.264	-3.057	3.17×10 ⁻²⁰	6.04×10 ⁻¹⁶
						148.630	0.288	—		4.94×10 ⁻²⁰
	No.2	φ50mm h50mm	98.2	2.760	0.101	180.211	31.581	-0.072	3.30×10 ⁻²⁰	6.04×10 ⁻¹⁶
						148.630	0.322	—		9.04×10 ⁻²¹
	打継無	φ50mm h50mm	98.2	2.760	0.101	180.561	32.573	0.473	4.28×10 ⁻²⁰	1.05×10 ⁻¹⁵
						147.988	0.332	0.00482		1.62×10 ⁻¹⁹
2	No.1	φ50mm h50mm	98.2	2.786	0.103	205.235	31.125	0.479	2.17×10 ⁻²⁰	3.48×10 ⁻¹⁶
						174.11	0.317	0.00488		6.23×10 ⁻²⁰
	No.2	φ50mm h50mm	98.2	2.855	0.102	206.748	31.246	0.136	2.79×10 ⁻²⁰	3.23×10 ⁻¹⁶
						175.502	0.318	0.00139		1.24×10 ⁻¹⁹
	打継無	φ50mm h50mm	98.2	2.843	0.101	197.107	32.615	0.076	1.56×10 ⁻²⁰	2.01×10 ⁻¹⁶
						164.492	0.332	0.00077		1.16×10 ⁻¹⁸
3	No.1	φ50mm h50mm	98.2	2.817	0.100	187.777	32.137	-0.196	4.79×10 ⁻²⁰	1.03×10 ⁻¹⁵
						155.640	0.327	—		1.77×10 ⁻¹⁹
	No.2	不透气のためデータなし								
		打継無	φ50mm h50mm	98.2	2.790	0.101	188.002	34.772	-0.066	1.06×10 ⁻²⁰
	153.230						0.354	—	2.96×10 ⁻²⁰	
	4	No.1	φ50mm h50mm	98.2	2.973	0.103	201.416	33.824	0.081	9.45×10 ⁻²¹
167.592							0.345	0.00083	1.13×10 ⁻²⁰	
No.2		φ50mm h50mm	98.2	2.755	0.098	201.420	32.144	-0.279	2.48×10 ⁻²⁰	2.97×10 ⁻¹⁶
						169.276	0.327	—		1.16×10 ⁻²⁰
打継無		φ50mm h50mm	98.2	2.759	0.101	194.251	33.022	-0.224	3.15×10 ⁻¹⁹	4.14×10 ⁻¹⁶
						161.229	0.336	—		1.70×10 ⁻¹⁸

※φは直径、hは高さを示す

	No.1	No.2	打継無	増粘剤 (×1000)
配合ケース 1				5.2 SFCA (標準)
配合ケース 2				5.2 アスカクリン
配合ケース 3		不透水のためデータなし		3.9 SFCA (標準 75%)
配合ケース 4				2.6 SFCA (標準 50%)

図 3.2.1-10 モルタル供試体による変水位透水試験結果 (累積排水量)

	No.1	No.2	打継無	増粘剤 (×1000)
配合ケース 1				5.2 SFCA (標準)
配合ケース 2				5.2 アスカクリン
配合ケース 3		<p>透水試験において不透水のため 実施せず</p>		3.9 SFCA (標準 75%)
配合ケース 4				2.6 SFCA (標準 50%)

図 3.2.1-11 モルタル供試体によるガス注入試験結果 (累積排水排水量)

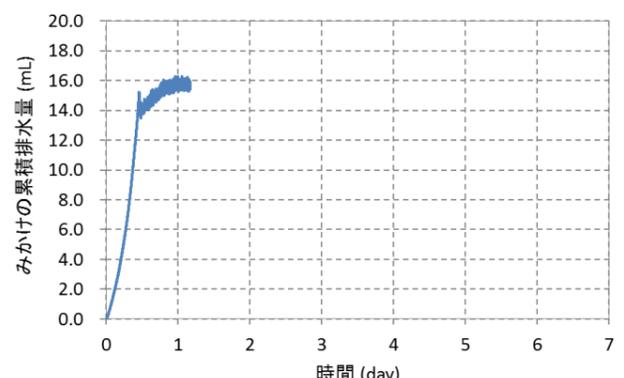
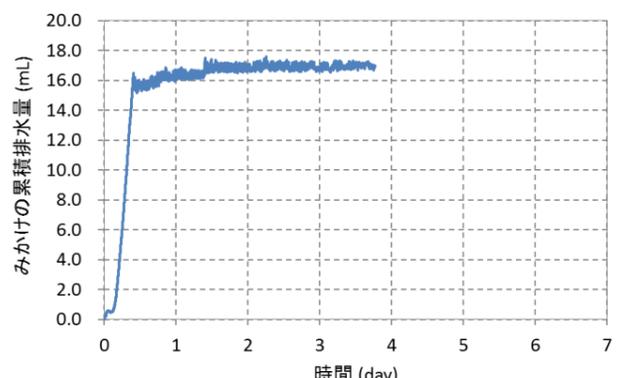
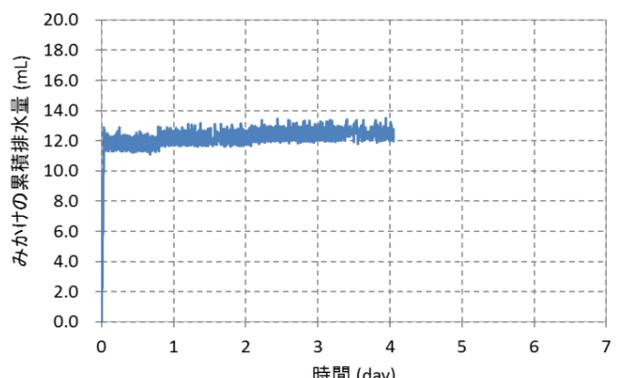
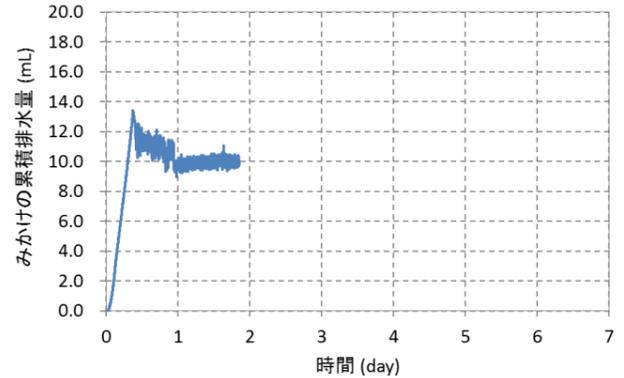
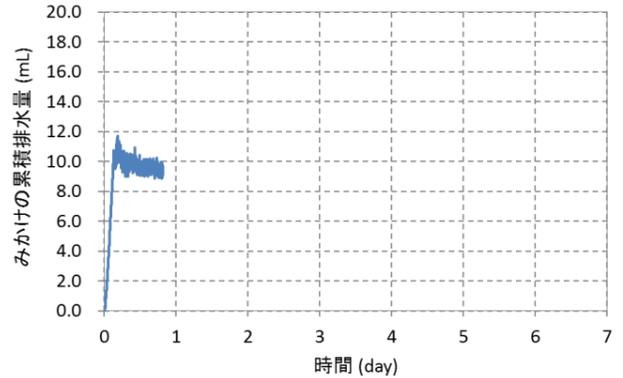
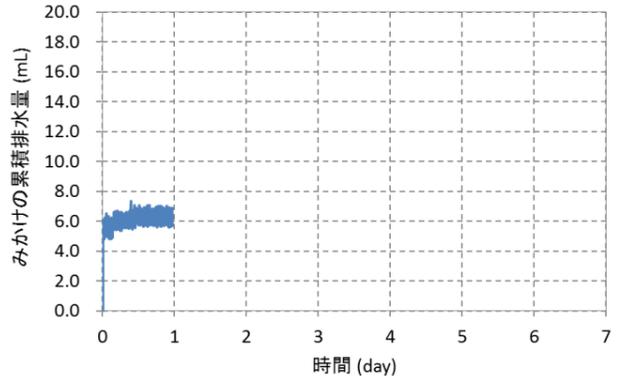
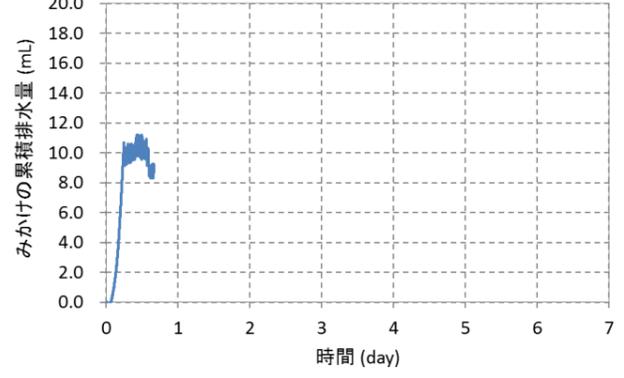
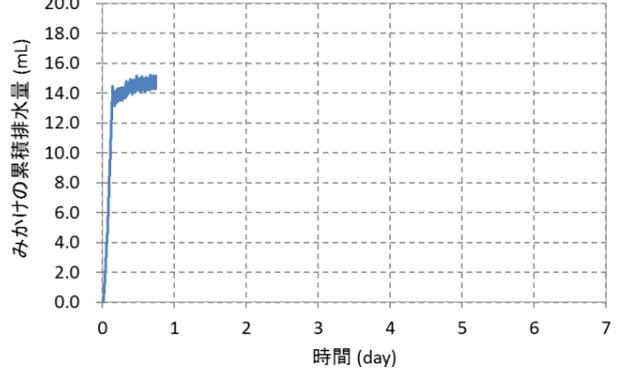
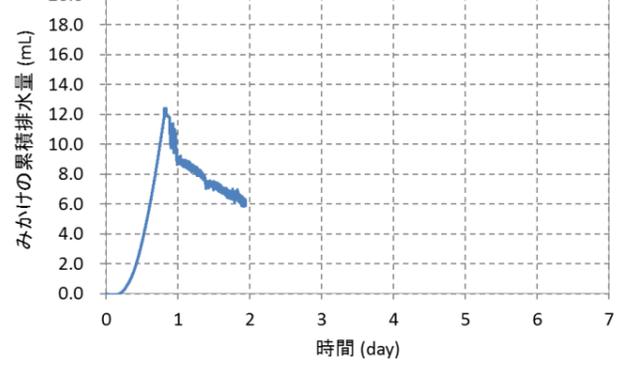
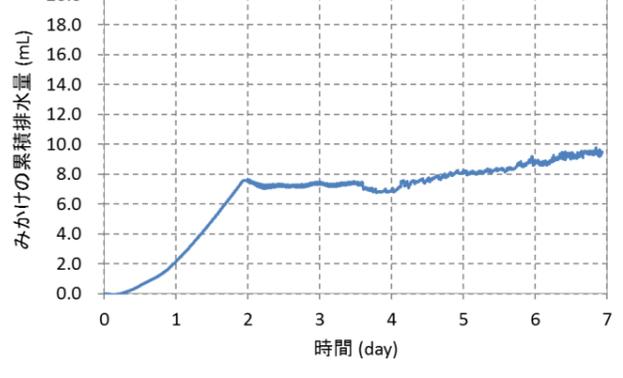
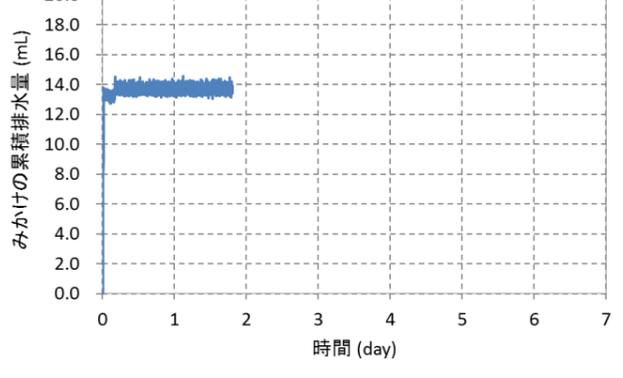
	No.1	No.2	打継無	増粘剤 (×1000)
配合ケース 1				5.2 SFCA (標準)
配合ケース 2				5.2 アスカクリン
配合ケース 3		透水試験において不透水のため 実施せず		3.9 SFCA (標準 75%)
配合ケース 4				2.6 SFCA (標準 50%)

図 3.2.1-12 モルタル供試体によるガス注入試験結果 (みかけの累積排水量)

(2) 本確認計算に用いる解析コード

解析には、多相多成分流体体系を対象とした汎用地圏流体シミュレータ GETFLOWS を用いた。等温状態における水・ガスの 2 相 2 成分流体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。

$$-\nabla \cdot \left(-\rho_w \frac{K_w k_{rw}}{\mu_w} \nabla \Psi_w \right) - \rho_w q_w = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \phi S_w) \quad (3.2-1)$$

$$-\nabla \cdot \left(-\rho_g \frac{K_g k_{rg}}{\mu_g} \nabla \Psi_g \right) - \rho_g q_g = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g \phi S_g) \quad (3.2-2)$$

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($Pa \cdot s$)
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。

$$\Psi_w = P_w + \rho_w g Z \quad (3.2-3)$$

$$\Psi_g = P_g + \rho_g g Z \quad (3.2-4)$$

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。

$$P_c = P_c[S_w] = P_g - P_w \quad (3.2-5)$$

$$\phi = \phi[P_g] = \phi_0(1 + C_r(P_g - P_0)) \quad (3.2-6)$$

$$k_{rp} = k_{rp}[S_w] \quad (3.2-7)$$

$$\rho_p = \rho_p[P_p] \quad (3.2-8)$$

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。

$$\begin{aligned} (P_g \leq P_w + P_s) \quad & \phi = \phi_0(1 + C_r(P - P_0)) \\ & K_p = K_{p0} \end{aligned} \quad (3.2-9)$$

$$\begin{aligned} (P_g > P_w + P_s) \quad & \phi = \phi_0(1 + C_r(P_s - P_0) + F C_r(P - P_s)) \\ & K_p = C K_{p0} (\phi / \phi_0)^{n_{PD}} \end{aligned} \quad (3.2-10)$$

ここに、 P_s は流路拡幅の圧力判定閾値(Pa)、 F 、 C 、 n_{PD} は空隙損傷モデルパラメータ(-)を示す。 K_{p0} は流路拡幅前の絶対浸透率(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 3.2.1-13 に示す。

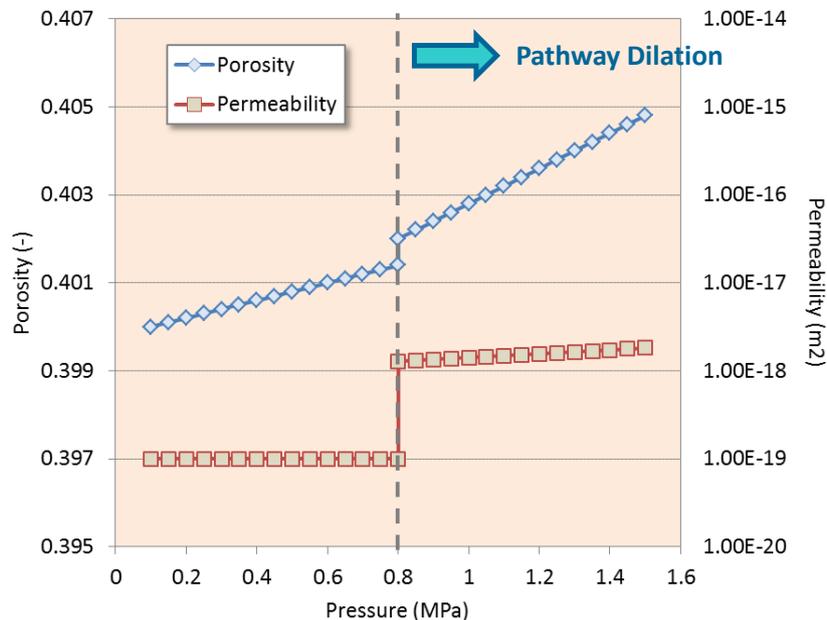


図 3.2.1-13 流路拡幅前後の間隙率と絶対浸透率の変化イメージ

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 を未知数とした 2×2 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 $NEQ(=2)$ となる。これを、Nested Factorization[8]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）[9]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) 圧縮ベントナイトを用いたガス移行試験を対象とした検証計算

1) 検討方針

供試体 No.1~No.3 については、昨年度、再冠水フェーズ及びガス注入フェーズを対象とした検証計算を実施している。ここでは、No.4、No.5 の再冠水フェーズを対象とし、逆解析によって 2 相流パラメータの同定を行う。2) a で示したように、試験の実施状況から累積排水量データについては、参考データとしての取扱いとなるため、逆解析の再現対象からは除外する。従来の検討から、浸潤過程（再冠水フェーズ）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、既往検討を参考に同定するパラメータの値の取り得る範囲を限定して検討を行う。なお、空気の水への溶解は考慮しないものとした。

2) 試験系のモデル化

供試体内の水、空気の 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（総空隙体積 3.57mL）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を与える境界格子（圧入、流出境界層）を設けた。図 3.2.1-14 に解析モデルの基本諸元を示す。初期水飽和度は 90%、初期圧力は背圧と同じ、温度は 25°C とし、試験中の温度変化は考慮しないものとした。

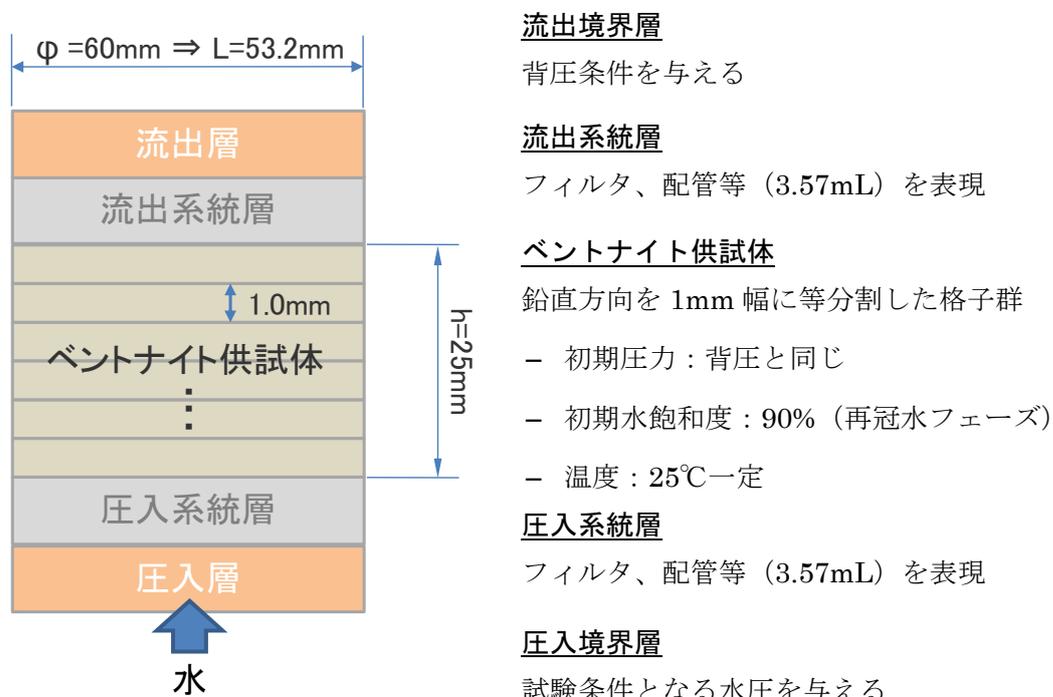


図 3.2.1-14 解析モデルの基本諸元

3) 逆問題の設計

a. 目的関数の設定

2) a で示したように、供試体 No.4、No.5 の累積排水量データについては再現対象から除外するため、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。なお、実測データを 1 日程度に間引いたものを用いた。

b. 与条件と未知パラメータ

取扱う流体（水、空気）の物性を示す。対象とする試験は等温状態25(°C)で実施されたことから、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(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う。

$$\rho = \rho_0(1 + C_f(P_w - P_0)) \quad (3.2-11)$$

$$\mu = \mu_0(1 + C_\mu(P_w - P_0)) \quad (3.2-12)$$

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う。

- 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、注水速度と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（表 3.2.1-7 の n_w ）
- 毛細管圧力曲線を表現する構成モデルパラメータ（表 3.2.1-7 の P_0 、 n_c ）

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 3.2.1-7 に示す構成モデルを採用した。

表 3.2.1-7 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 ; 流体相を識別する記号 (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0.0とし、水相の残留飽和度も0.0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 3.2.1-15 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で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_c についても、既往成果[1]より乾燥密度1.0 – 1.8(Mg/m³)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。

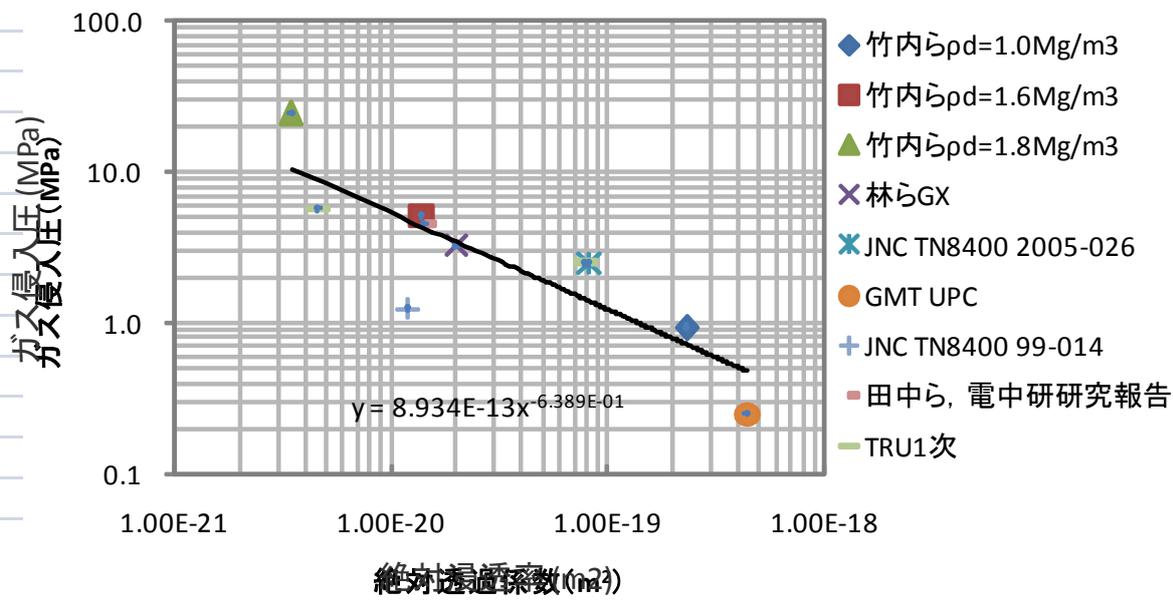


図 3.2.1-15 既往文献から設定した絶対浸透率とガス侵入圧の関係[1]

c. 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、注入水压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。

d. 逆解析手法

本検討における逆解析には、米国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_2014[10]を用いる。UCODE_2014 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 3.2.1-16 に GETFLOWS を例に UCODE_2014 を用いた自動逆解析の流れを示す。

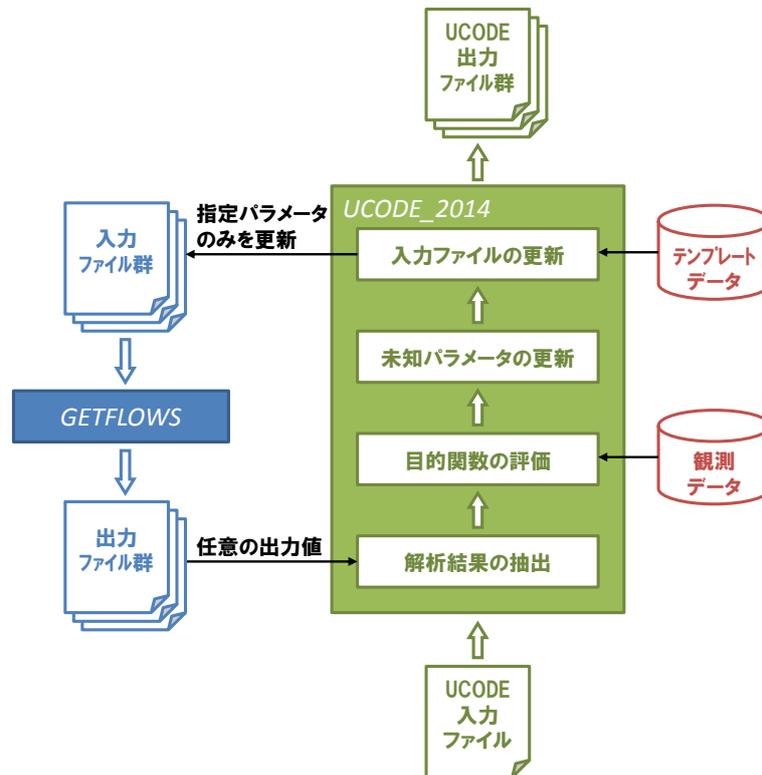


図 3.2.1-16 GETFLOWS+UCODE_2014 による逆解析の流れ

4) 逆解析結果

逆解析によって再現された No.4、No.5 の累積注水量の解析結果をそれぞれ図 3.2.1-17、図 3.2.1-18 に示す。同図中には参考として累積排水量のデータも示している。同定された 2 相流パラメータを表 3.2.1-8 に、相対浸透率及び毛細管圧力を図 3.2.1-19 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（湿潤過程）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が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となった。

また、本確認計算と従来の検討において、湿潤過程を対象として同定された 2 相流パラメータを表 3.2.1-9 に、水相の相対浸透率、ガス相の相対浸透率及び毛細管圧力をそれぞれ図 3.2.1-20～図 3.2.1-22 にまとめた。

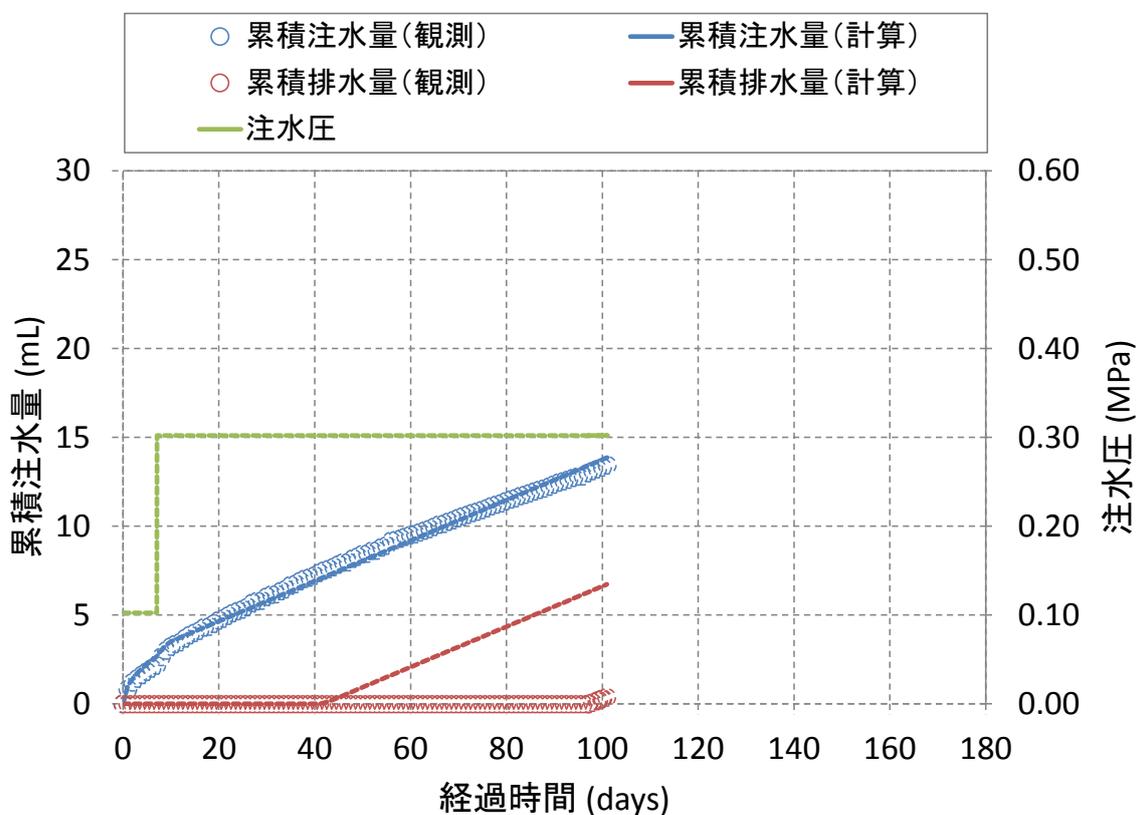


図 3.2.1-17 累積注水量の再現結果 (No.4)

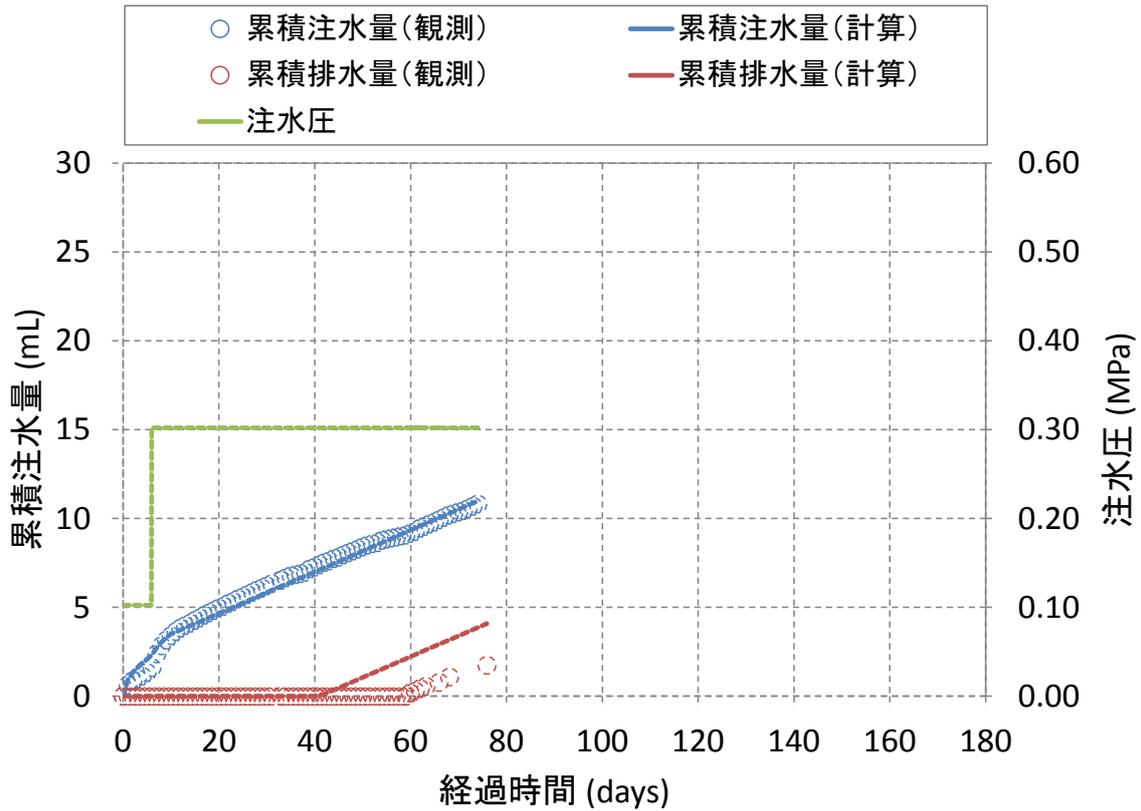


図 3.2.1-18 累積注水量の再現結果 (No.5)

表 3.2.1-8 同定された2相流パラメータ (No.4、No.5)

供試体	$K(m^2)$	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_w(-)$	$P_0(MPa)$	$n_c(-)$
No.4	5.184×10^{-20}	0.0	0.0	2.01	1.00	1.98
No.5	5.329×10^{-20}	0.0	0.0	1.81	1.00	1.74

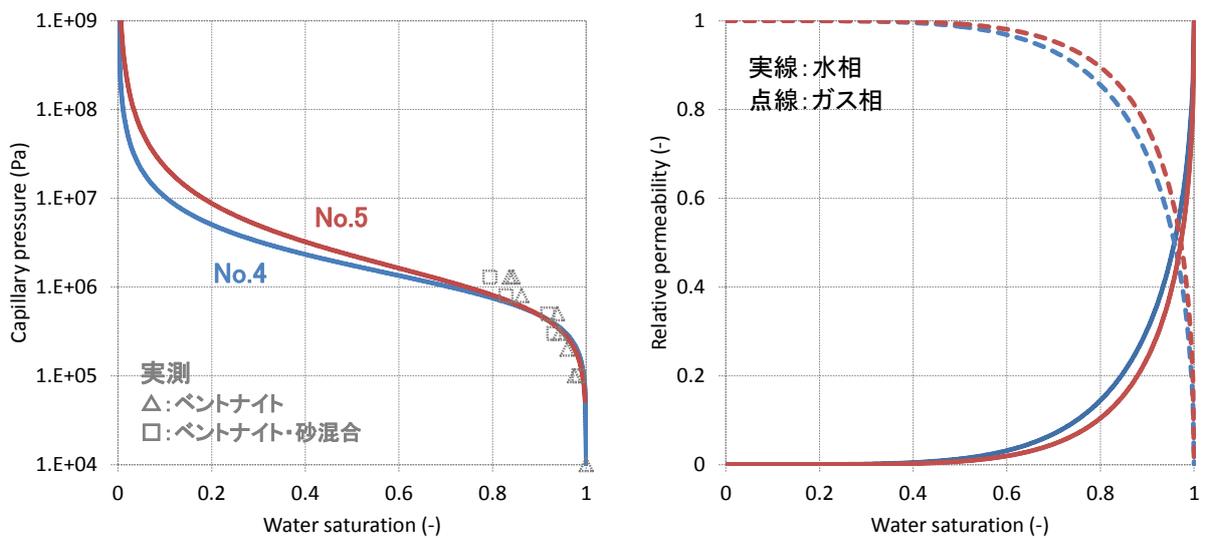


図 3.2.1-19 同定された相対浸透率 (左) と毛細管圧力 (右) (No.4、No.5)

表 3.2.1-9 既往検討及び本検討で同定された浸潤過程における 2 相流パラメータ

検討年度	ケース名	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_w(-)$	$P_0(MPa)$	$n_c(-)$
2010	ケース①	0.282	0.0	4.092	1.690	2.156
	ケース②	0.0	0.0	3.182	1.726	1.674
	ケース③	0.0	0.0	15.1	1.116	1.981
2011	SG①	0.0	0.0	13.19	1.471	1.513
2012	SG①	0.0	0.0	2.0	1.24	1.79
	SG②	0.0	0.0	2.11	0.176	1.13
2015	No.1	0.0	0.0	1.77	1.00	1.88
	No.2	0.0	0.0	1.72	1.39	2.00
	No.3	0.0	0.0	1.81	2.10	1.56
2016	No.4	0.0	0.0	2.01	1.00	1.98
	No.5	0.0	0.0	1.81	1.00	1.74

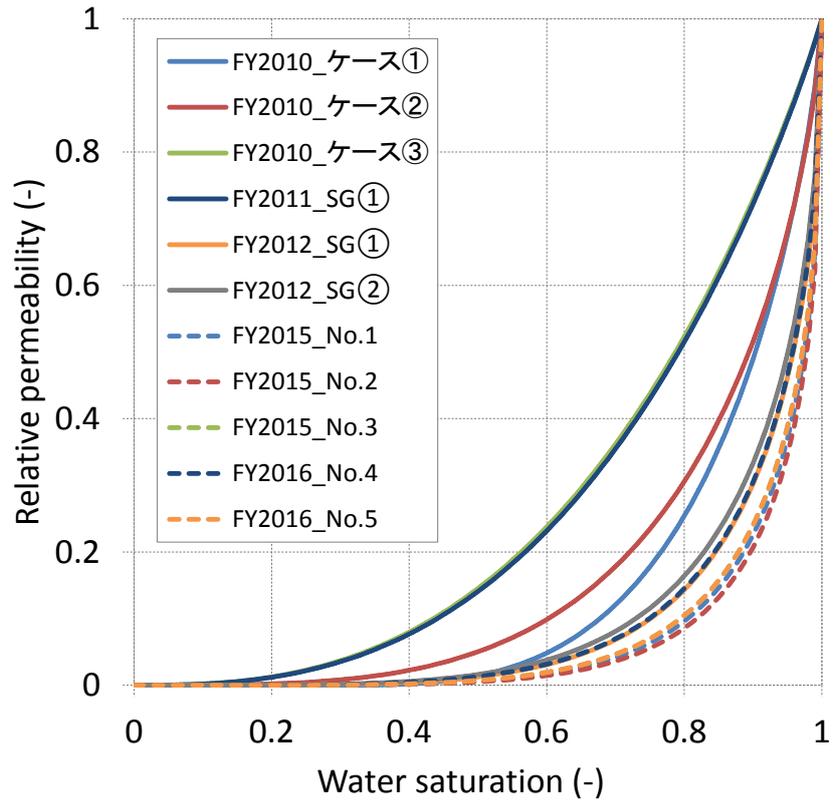


図 3.2.1-20 既往検討及び本検討で同定された浸潤過程における水相の相対浸透率

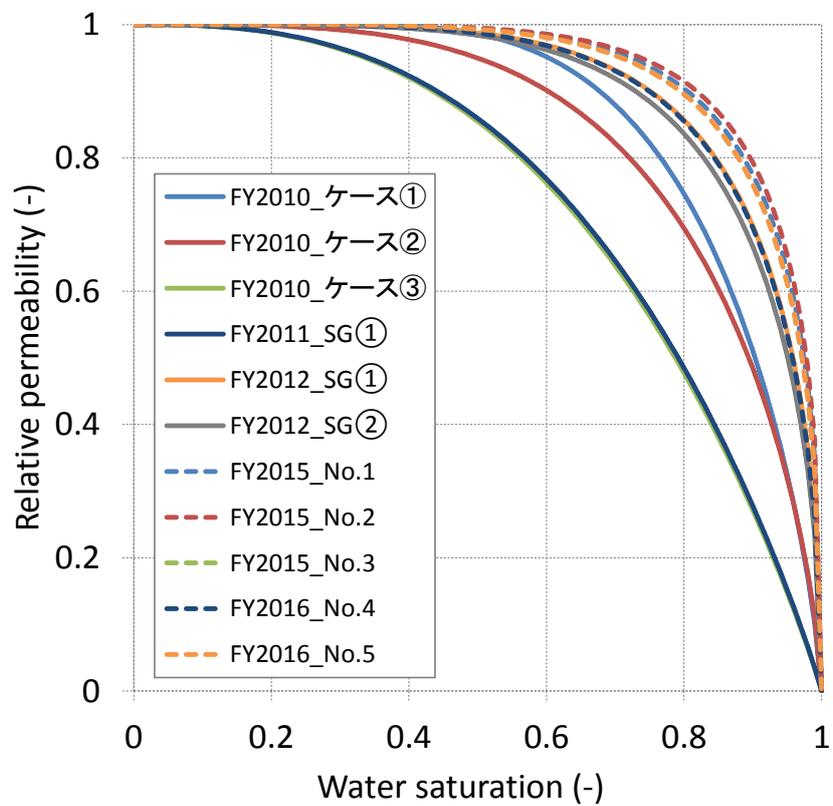


図 3.2.1-21 既往検討及び本検討で同定された浸潤過程における気相の相対浸透率

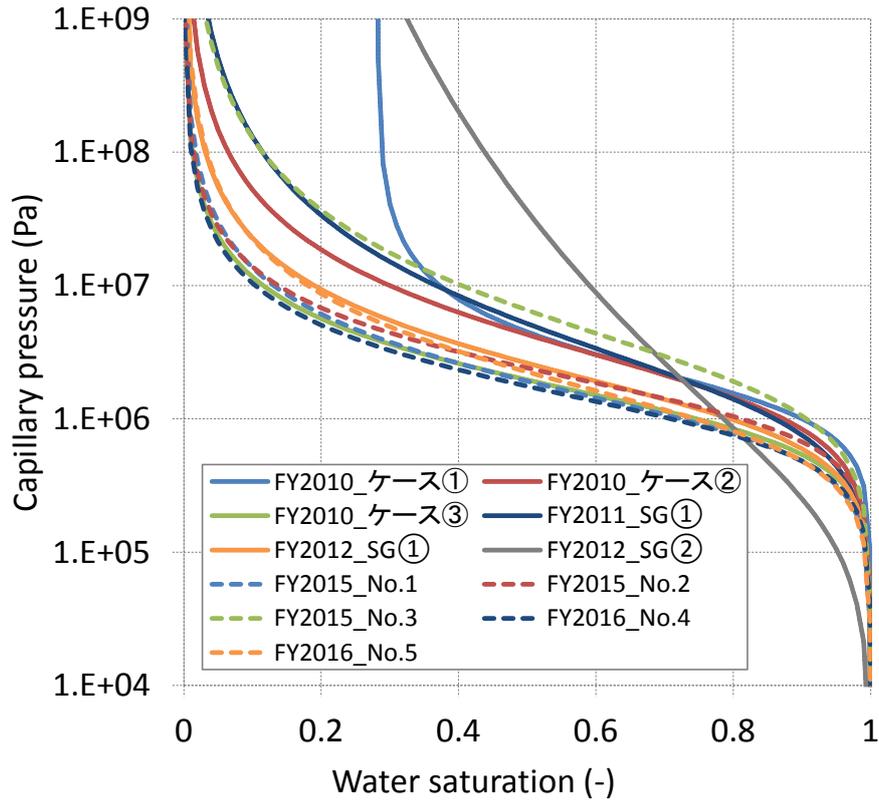


図 3.2.1-22 既往検討及び本検討で同定された浸潤過程における毛細管圧力

(4) ベントナイト系人工バリアの材料界面を模擬したガス移行試験を対象とした検証計算

1) 検討方針

ここでは、No.1、No.2 の試験データを対象とし、逆解析によって 2 相流パラメータの同定を行う。No.1 では、再冠水フェーズ及びガス注入フェーズの双方に対して、No.2 では再冠水フェーズのみに対して逆解析を実施する。

従来の検討から、浸潤過程（再冠水フェーズ）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[11]を適用した。また、解の一意性が問題となることから、既往検討を参考に同定するパラメータの値の取り得る範囲を限定して検討を行う。排水過程（ガス注入フェーズ）では、気相の相対浸透率曲線を表現する構成モデルには *van Genuchten* モデル[12]を適用した。なお、ガス注入フェーズでは注入ガスとして窒素が用いられているが、空気と近い物性を持つことから簡略化のために再冠水フェーズ及びガス注入フェーズの気相は空気として取扱うものとした。また、空気の水への溶解は考慮しないものとした。

2) 試験系のモデル化

再冠水フェーズ、ガス注入フェーズの試験データを見ると、双方とも、1mm 幅の材料界面を設けていない圧縮ベントナイト供試体の試験データと類似する挙動を示している。これは、1mm 幅の材料界面を設けた場合でも、選択的な移行経路とはならず、湿潤過程においてのベントナイトの膨潤作用によって、1mm 幅の材料界面が閉じたと考えられる。そこで、本供試体においても、

ベントナイトの水・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 (圧入、流出境界層) を設けた。図 3.2.1-14 に解析モデルの基本諸元を示す。初期水飽和度は 90% (再冠水フェーズ)、100% (ガス注入フェーズ) とし、初期圧力は再冠水フェーズ、ガス注入フェーズともに背圧と同じとした。温度は 25°C とし、試験中の温度変化は考慮しないものとした。

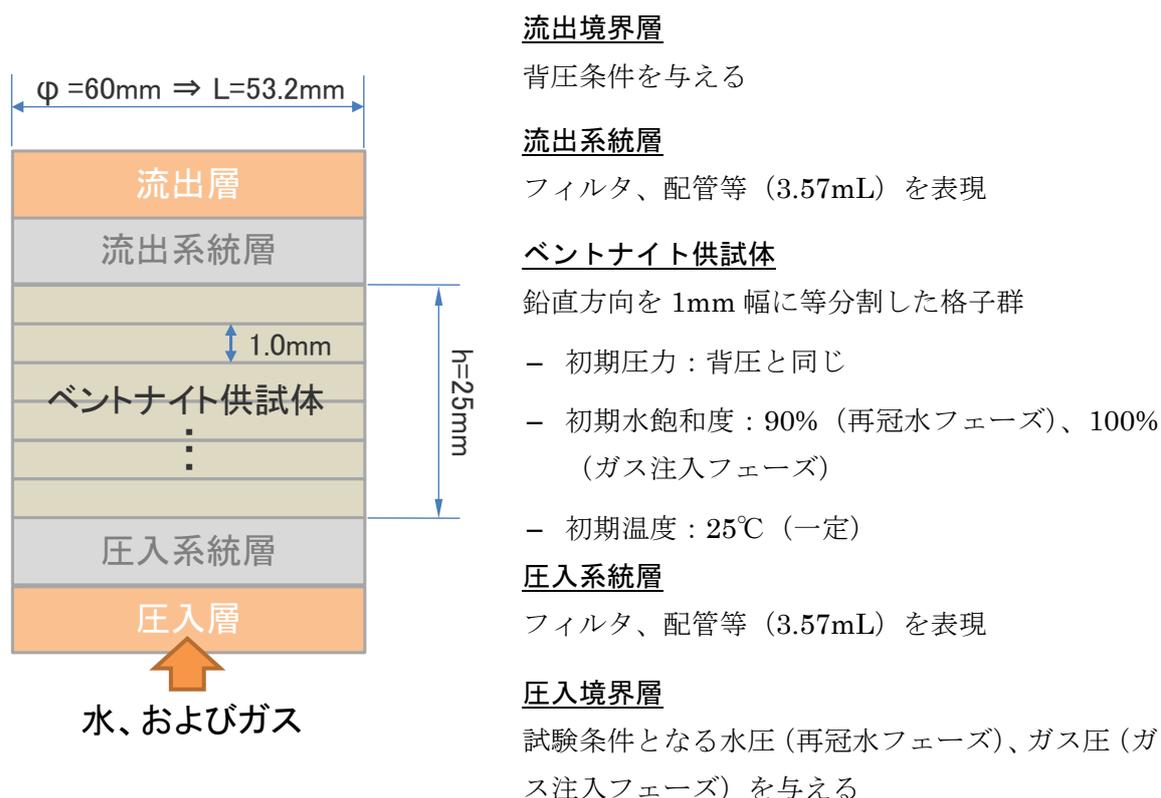


図 3.2.1-23 解析モデルの基本諸元

3) 逆問題の設計

a. 目的関数の設定

再冠水フェーズに対しては累積注水量、累積排水量の実測データ、ガス注入フェーズに対しては累積排水量、排気流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。なお、実測データを 1 日程度に間引いたものを用いた。

b. 与条件と未知パラメータ

取扱う流体 (水、空気) の物性は 3) b に示したものと同一とした。

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う。

- 土粒子密度 : $2,700(\text{kg}/\text{m}^3)$
- 乾燥密度 : $1,360(\text{kg}/\text{m}^3)$
- 間隙率 : 0.5070(-) (土粒子密度と乾燥密度及び供試体作成時に設けたスリットによる空間)

を考慮して算出)

- 固相圧縮率： $1.0 \times 10^{-9}(\text{Pa}^{-1})$ (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 (再冠水フェーズでは表 3.2.1-7 の n_w 、ガス注入フェーズでは表 3.2.1-10 の S_{wr} 、 n_w 、 n_g)
- 毛細管圧力曲線を表現する構成モデルパラメータ (再冠水フェーズでは表 3.2.1-7 の P_0 、 n_c 、ガス注入フェーズでは表 3.2.1-7 の S_{wr} 、 P_0 、 n_c)
- 空隙損傷モデルパラメータ (ガス注入フェーズのみで使用)

再冠水フェーズにおいて 2 相流曲線を表現する構成モデルパラメータの範囲については、3) b に示した考え方と同じとした。

また、ガス注入フェーズにおける水・空気の相互作用を表現するための相対浸透率表 3.2.1-10 に示す構成モデルを採用した。表中の記号の説明は以下の通りである。毛細管圧力は表 3.2.1-7 に示す構成モデルを採用した。本検討では、水相の残留飽和度 S_{wr} は相対浸透率と毛細管圧力で同じとし、ガス相の残留飽和度 S_{gr} を 0 として検討を進めた。

- 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(-)
- n_p ; 流体相 $p(= w, g)$ のモデルパラメータ(-)
- w, g ; 流体相を識別する (それぞれ水相, ガス相) 記号を示す

表 3.2.1-10 ガス注入フェーズで用いる相対浸透率を表現する構成モデル
(van Genuchtenモデル)

水相	ガス相
$k_{rw} = \sqrt{S_{we}}(1 - (1 - S_{we}^{1/m_w})m_w)^2$ $S_{we} = (S_w - S_{wr})/(1 - S_{wr} - S_{gr})$ $m_w = 1 - 1/n_w$	$k_{rg} = \sqrt{S_{ge}}(1 - (1 - S_{ge}^{1/m_g})m_g)^2$ $S_{ge} = (S_g - S_{gr})/(1 - S_{wr} - S_{gr})$ $m_g = 1 - 1/n_g$

c. 初期・境界条件

再冠水フェーズにおいては、供試体の初期圧力は背圧 (0.1MPa) と同じとし、初期水飽和度については、供試体作成時に設けたスリットを考慮し、86.28%とした。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、注入水压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。

ガス注入フェーズにおいては、供試体の初期圧力は背圧 (0.2MPa) と同じとし、水で飽和した

状態とした。圧入系統層に該当する格子は、初期圧力は背圧（0.2MPa）と同じ、完全に乾燥した状態とした。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（0.2MPa）と同じ、初期飽和状態とした。圧入層と流出層は再冠水フェーズと同様に境界格子とする。圧入層は完全に乾燥した状態で、注入ガス圧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（0.1MPa）を与えた定圧境界格子とした。

d. 逆解析手法

逆解析手法については、「3) d 逆解析手法」に示したものと同一とした。

4) 逆解析結果

a. 再冠水フェーズ

逆解析によって再現された No.1、No.2 の累積注水量の解析結果をそれぞれ図 3.2.1-24、図 3.2.1-25 に示す。同定された 2 相流パラメータを表 3.2.1-11 に、相対浸透率及び毛細管圧力を図 3.2.1-26 に示す。図中には、参考データとして、乾燥密度 1.36Mg/m³ の 100%クニゲル V1 及び 30%砂を混合した乾燥密度 1.6Mg/m³ のクニゲル V1 を用いて、試験から得られた毛細管圧力（湿潤過程）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た。また、1mm 幅の材料界面を模擬した圧縮ベントナイトであっても、材料界面の無い供試体とほぼ同程度の 2 相流パラメータとなった。

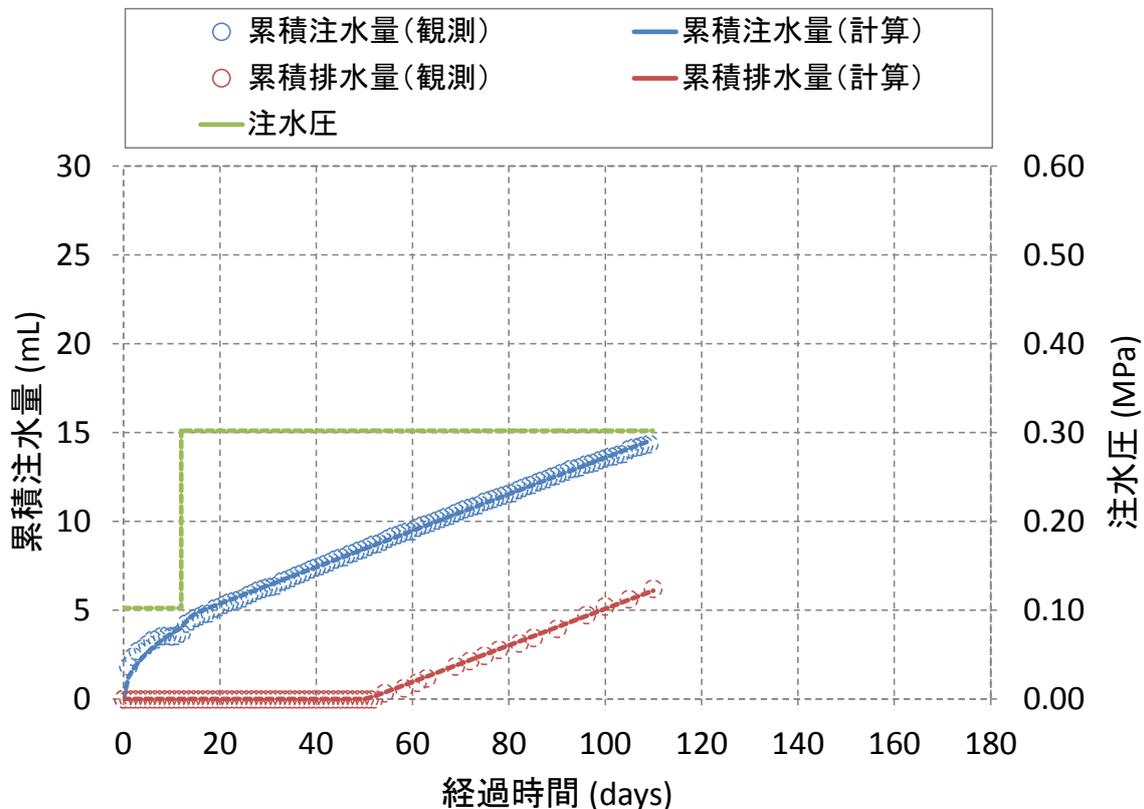


図 3.2.1-24 累積注水量の再現結果（再冠水フェーズ、No.1）

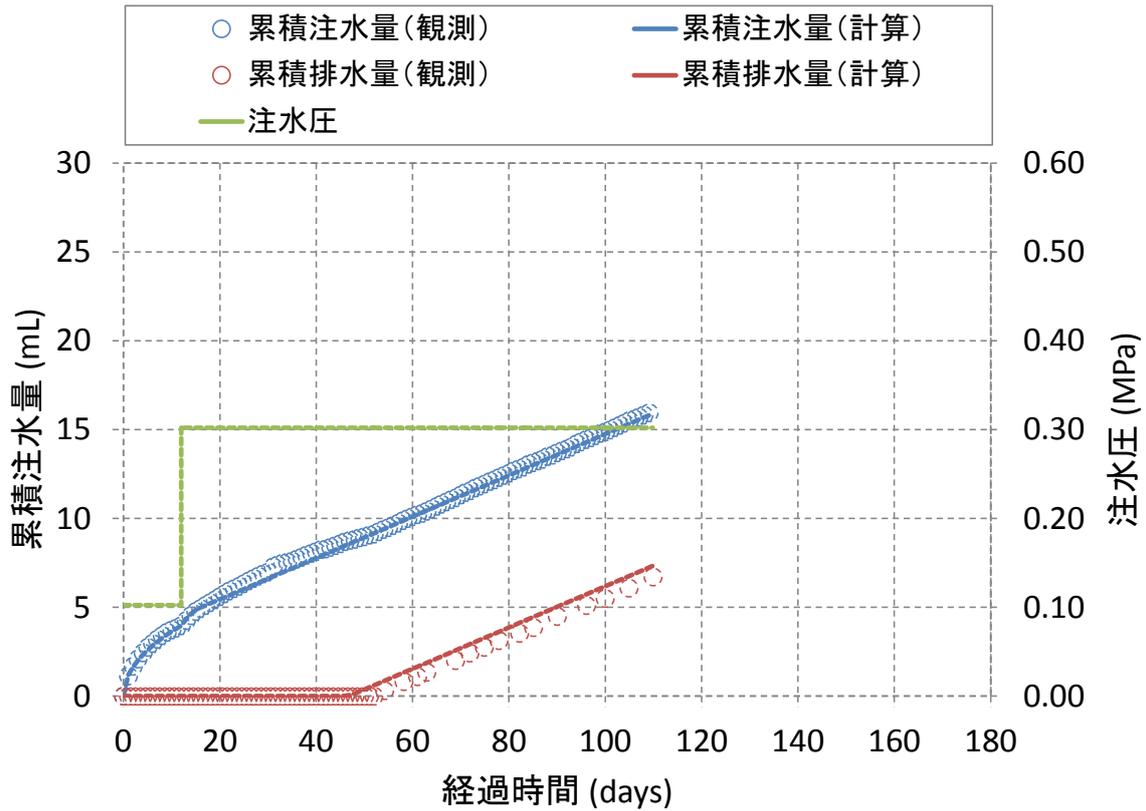


図 3.2.1-25 累積注水量の再現結果（再冠水フェーズ、No.2）

表 3.2.1-11 同定された2相流パラメータ（再冠水フェーズ、No.1、No.2）

供試体	$K(m^2)$	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_w(-)$	$P_0(MPa)$	$n_c(-)$
No.1	4.688×10^{-20}	0.0	0.0	1.91	1.07	1.50
No.2	5.304×10^{-20}	0.0	0.0	1.75	1.01	1.71

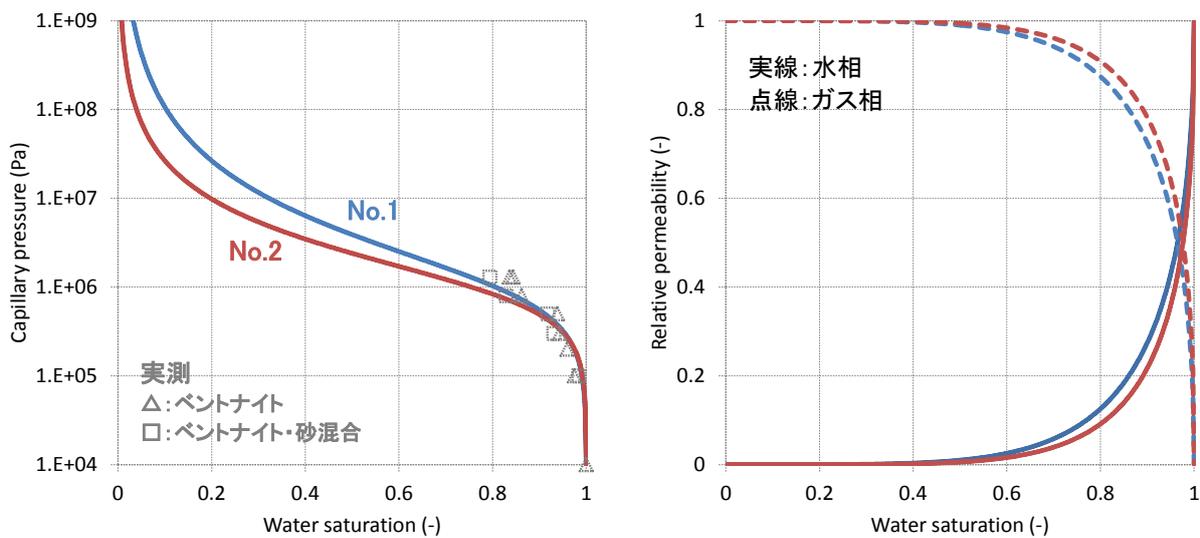


図 3.2.1-26 同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）（再冠水フェーズ、No.1、No.2）

b. ガス注入フェーズ

逆解析によって再現された No.1 の累積排水量及び排気流量の解析結果をそれぞれ図 3.2.1-27、図 3.2.1-28 に示す。同定された 2 相流パラメータを表 3.2.1-12 に、相対浸透率及び毛細管圧力を図 3.2.1-29 に示す。図中には、参考データとして、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（排水過程）を併記している。同定された毛細管圧力は、試験から得られているものよりも小さい結果となり、昨年検討と同様の傾向を示す結果となった。この相違は、緩やかに状態を変化させながら実測によって取得された毛細管圧力と、ガスを圧入することで間隙水を排水するような状態変化の激しい試験データをフィッティングすることで得られた毛細管圧力とを比較している点が理由として考えられる。今後、同等の状態変化の中で得られたデータで比較する等の検討が必要であると考えられる。1mm 幅の材料界面を模擬した圧縮ベントナイトを対象として同定された 2 相流パラメータは、図、図 に示した既往検討で材料界面の無い供試体から得られた幅の範囲内のパラメータが得られる結果となった。

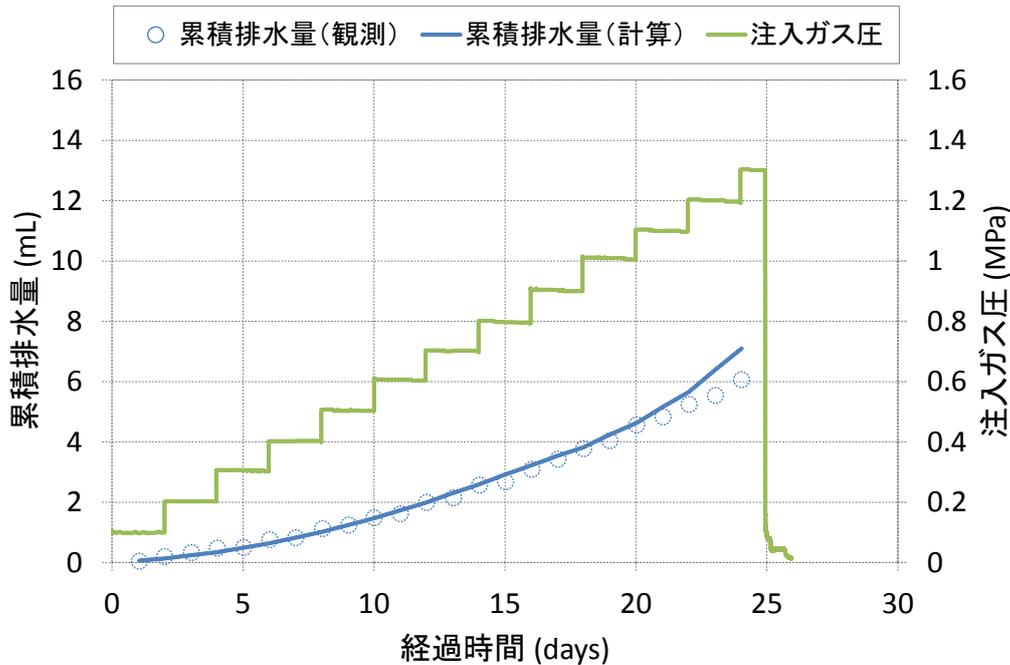


図 3.2.1-27 累積排水量の再現結果（ガス注入フェーズ、No.1）

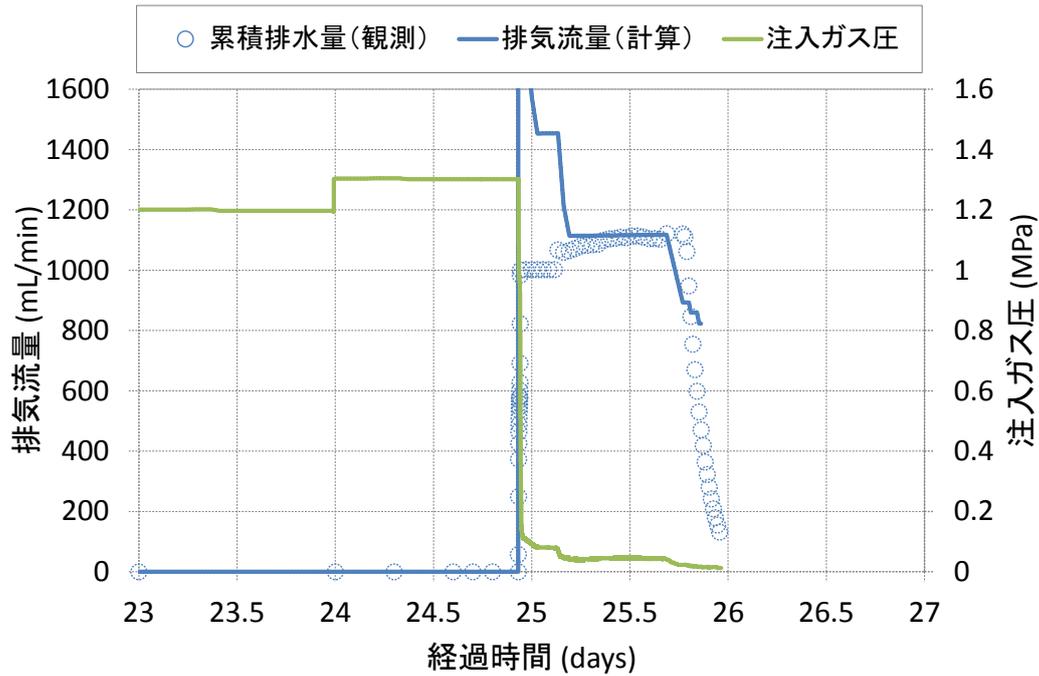


図 3.2.1-28 排気流量の再現結果 (ガス注入フェーズ、No.1)

表 3.2.1-12 同定された 2 相流パラメータ (ガス注入フェーズ、No.1)

供試体	$K(m^2)$	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_w(-)$	$n_g(-)$	$P_0(MPa)$	$n_c(-)$
No.1	3.75×10^{-20}	0.370	0.0	19.90	1.50	0.137	2.00

表 3.2.1-13 同定された空隙損傷モデルパラメータ (ガス注入フェーズ、No.1)

供試体	$C(-)$	$n(-)$	$F(-)$	$P_s(MPa)$
No.1	3.50×10^6	1.000	1.500	0.309

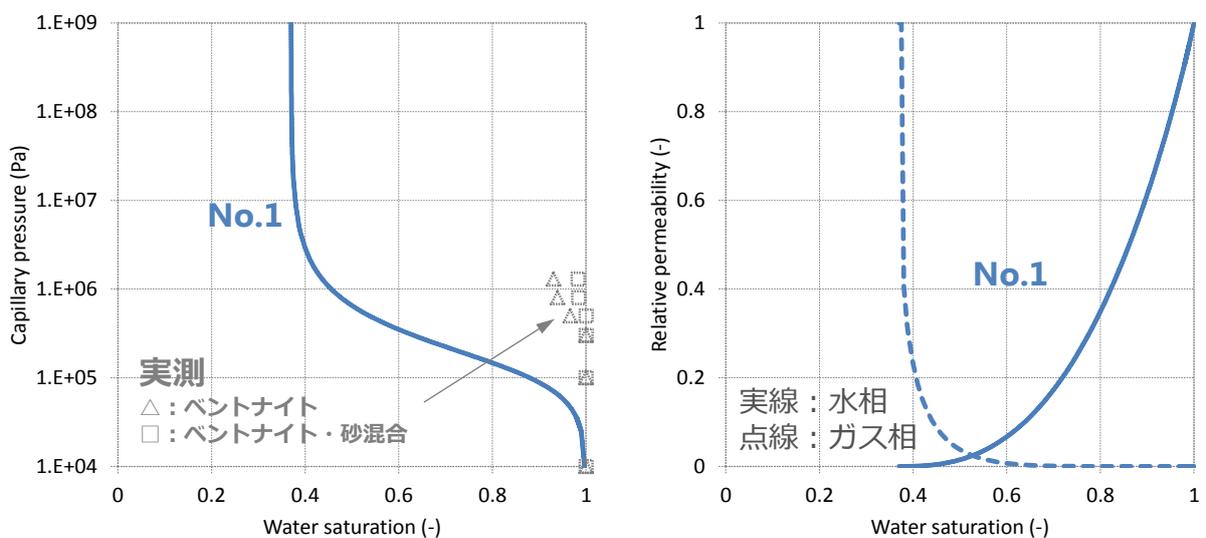


図 3.2.1-29 同定された相対浸透率 (左) と毛細管圧力 (右) (ガス注入フェーズ : No.1)

(5) セメント系材料を用いたガス移行試験を対象とした確証計算

a. 検討方針

ここでは、ガス注入フェーズの実測データを用いて確証計算を実施する。

セメント系材料を用いたガス移行試験では、試験系の制約上、供試体からの排水量と排気量を直接計測することができない（排水量と排気量の合計を計測）。しかし、より信頼性の高い 2 相流パラメータを同定するためには、より多くの水とガス双方の流体流動を示すデータを用いるのが望ましい。従って、ここで実施する確証計算では、以下の前提に基づき推定した真の累積排水量と累積排気量データを用いて検討を進めるものとする。

- 供試体からの累積排水量はごく小さいため、流量計で測定された値 Q_{FM} は供試体からの真の累積排気量 Q_g に等しいとする
- ビュレット内水位変動量 Q_{wa} （供試体からの排水量+上部ポーラスメタルおよびビュレット内水中の残量ガス量）は、供試体内の水・ガス置換挙動の影響を少なからず反映したものであると考え、上部ポーラスメタルおよびビュレット内では水・ガス置換の過渡的な期間はごく短く、速やかに平衡状態に至ると仮定し、ビュレット内水位変動量の最終値が総累積排水量となるようにスケーリングした曲線を真の累積排水量変化 Q_w とする

一部の試験では、試験前後の重量差から得られる総累積排水量が負の値になっている。これらの試験は検討対象から除外するものとし、配合ケース 1 の打継無、配合ケース 2 の No.1、No.2、打継無、配合ケース 4 の No.1 の計 5 ケースを検討対象とした。

上記の前提条件に基づき推定した真の累積排水量 Q_w と累積排気量 Q_g の時間変化を図 3.2.1-30～図 3.2.1-31 に示す。累積排水量と累積排気量の時間変化を見ると、いずれの供試体においても一定期間経過以降、累積排水量が概ね横ばいとなり（排水が停止する）、累積排気量が直線的に増加する。つまり、この時間以降は供試体内がほぼ平衡状態（排水が停止し、一定量のガスのみが透気している状態）に至っていると推定される。一方、この時間に至るまでは排水量と排気量を直接測定できていないため、相対的にデータの信頼性は低くなる。そのため、再現解析では平衡状態に至ったと考えられる時間以降の再現性を重視するものとした。

試験データを見ると、供試体毎に大きくばらついており、配合ケースの違いや打継の有無によって、明確な試験結果の違いを読み取ることは困難である。そこで、解析モデルは、打継の有無にかかわらず、供試体内の流体の流れが鉛直方向の 1 次元的な流れと仮定し、流体の通過断面積が実際と等しくなるような矩形断面として、円筒供試体を直方体でモデル化した。

水相・ガス相の絶対浸透率や間隙率は試験から得られた値を与条件として与えた。

本検討で対象とする試験データを見ると供試体体積に比べ総累積排水量が非常に小さい。このことは、大部分の間隙水が非常に強く間隙中に捕捉され、一部のごくわずかな間隙のみが選択的な流動経路となり、その内部の水がガスによって置換される内部構造を示唆している。同定される 2 相流パラメータ（相対浸透率、毛細管圧力）は水相の残留飽和度が 1.0 に近く、非常に極端な形状をしたものが同定されると予想される。

なお、本検討では注入ガス（窒素ガス）の水への溶解は考慮しない。

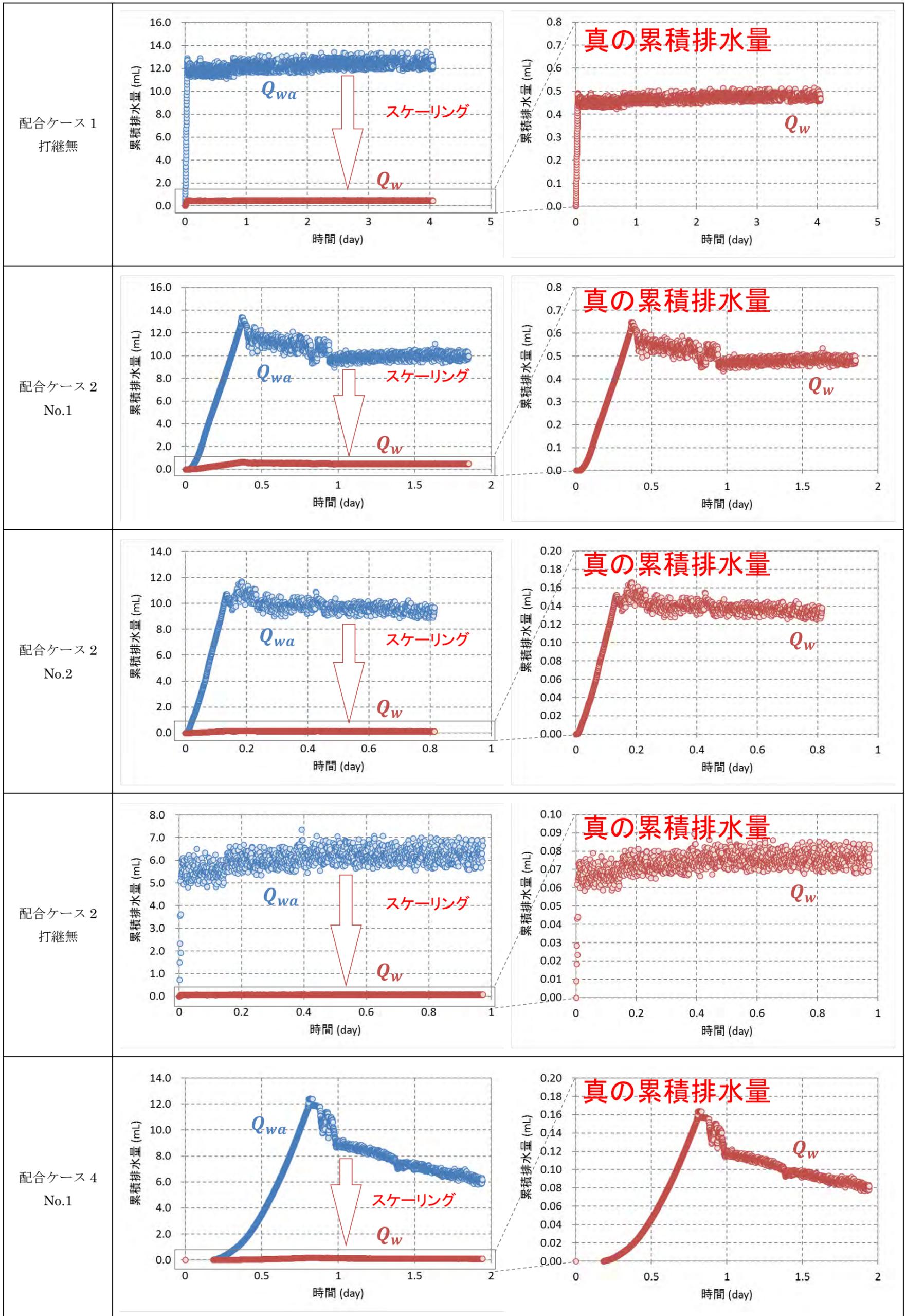


図 3.2.1-30 推定した真の累積排水量

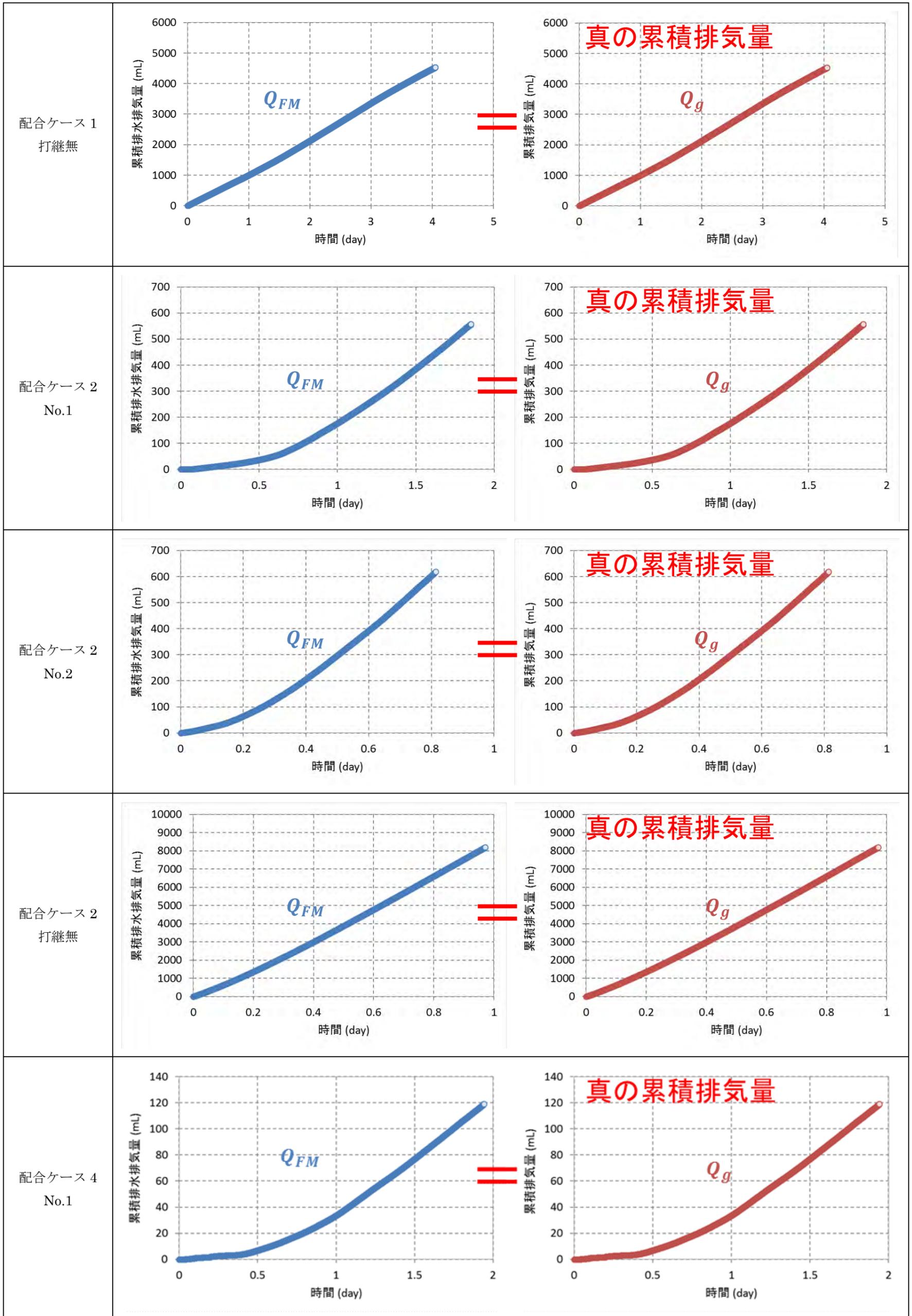


図 3.2.1-31 推定した真の累積排気量

b. 試験系のモデル化

解析モデルは上述したように、打継の有無にかかわらず、供試体の寸法（直径約 50mm×高さ約 50mm）をもとに、断面積が等価な一辺が約 44mm の矩形断面をもつ直方体とし、鉛直方向を 50 等分した 1 次元モデルとした。このモデルは、モルタル供試体内の水・ガスの選択的な流動経路を含む供試体全体を等価多孔質媒体モデルとして表現したものである。供試体端部には背圧及び荷重ガス圧条件を与える境界格子（注入層、流出層）を設けた。図 3.2.1-32 に解析モデルの基本諸元を示す。初期水飽和状態とし、初期圧力は背圧と同じ、温度は 25°C 一定とした。

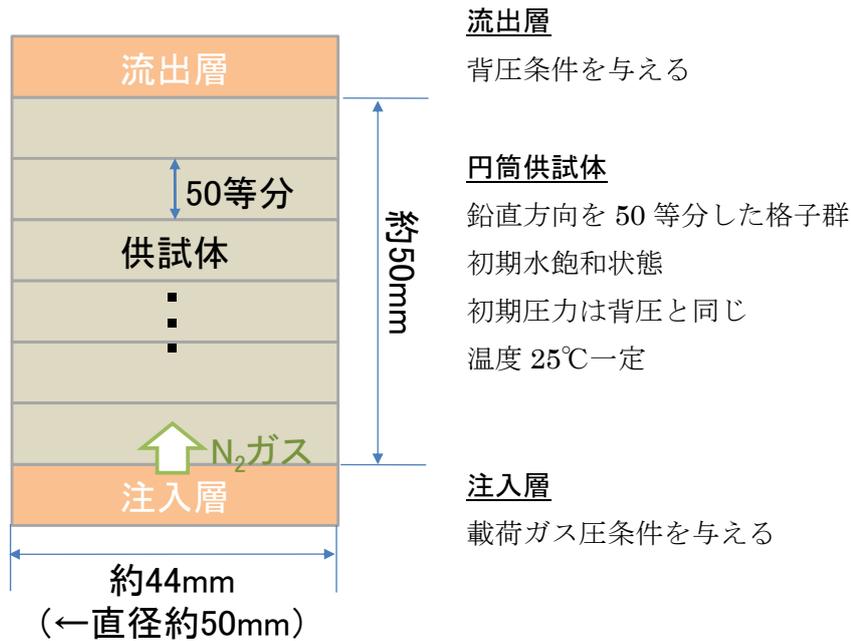


図 3.2.1-32 解析モデルの基本諸元

5) 逆問題の設計

a. 目的関数の設定

上記の前提に基づき推定した真の累積排水量、累積排気量と解析結果の残差ノルムを目的関数に設定した。なお、これらのデータには短周期の変動成分が見られるため、変動推移の傾向を失わない範囲でデータを平滑化し、さらにデータの間引きを行った。目的関数に用いる累積排水量と累積排気量データを図 3.2.1-33 に示す。目的関数 f は以下の式で記述される。図 3.2.1-33 に示した累積排水量、累積排気量データの中で、初期段階の灰色で示した箇所に関しては重み付け係数を小さくして検討を行った。

$$f = \sum_{i=1}^{n_{ow}} w_w(i) (Q_{w_obs}(i) - Q_{w_cal}(i))^2 + \sum_{j=1}^{n_{og}} w_g(i) (Q_{g_obs}(j) - Q_{g_cal}(j))^2 \quad (3.2-13)$$

式中の記号の説明は以下の通りである。

- f ; 目的関数
- Q_{w_obs} ; 生成した累積排水量

Q_{w_cal}	; 解析から得られた累積排水量
Q_{g_obs}	; 生成した累積排気量
Q_{g_cal}	; 解析から得られた累積排気量
n_{ow}	; 生成した累積排水量データの総数 (平滑化後)
n_{og}	; 生成した累積排気量データの総数 (平滑化後)
w_w	; 累積排水量に対する残差ノルムを計算する際の重み付け係数
w_g	; 累積排気量に対する残差ノルムを計算する際の重み付け係数

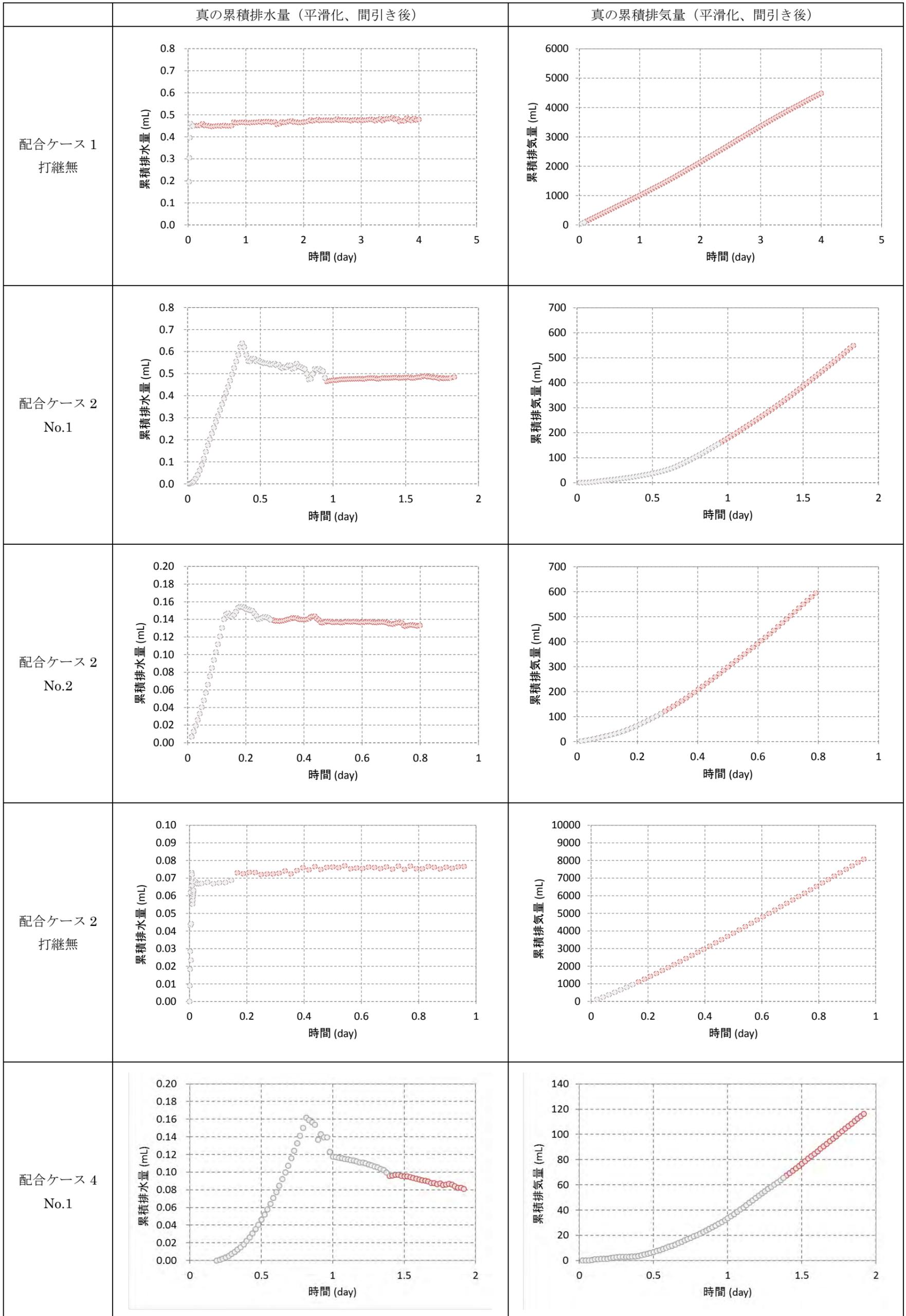


図 3.2.1-33 目的関数に用いる平滑化後の真の累積排水量、累積排気量

b. 与条件と未知パラメータ

本検討で取扱う流体（水、窒素）の物性を示す。対象とする試験は等温状態25(°C)で実施されたことから、流体物性を圧力によってのみ変化させる。

水の物性については、3) b に示した通りである。

理科年表（国立天文台編集，丸善株式会社出版）より25(°C)における標準大気圧101,325(Pa)での空気の密度 $1.184 \times 10^{-3}(kg/m^3)$ と、窒素の空気に対する比重0.967(-)から、標準大気圧での窒素の密度 ρ_{g0} を $1.145 \times 10^{-3}(kg/m^3)$ とした。また、粘性係数 μ_{g0} は理科年表に記載された以下の式より $17.8 \times 10^{-6}(Pa s)$ とした。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。

$$\mu_{g0} = \mu_{20} \left(\frac{T_{20} + C}{T + C} \right) \left(\frac{T}{T_{20}} \right)^{3/2} \quad (3.2-14)$$

ここに、 T 、 C はそれぞれ、温度(K)、窒素のサザランド定数(-)であり、添え字20は標準大気圧101,325(Pa)、20(°C)における値を示す。 $\mu_{20} = 17.6 \times 10^{-6}(Pa s)$ 、 $T_{20} = 293.15(K)$ 、窒素のサザランド定数には $C = 104(-)$ を設定した。

水理物性に関して、以下のパラメータは与条件として扱う。

- ・ 水相の絶対浸透率（表 3.2.1-6）
- ・ ガス相の絶対浸透率（表 3.2.1-6）
- ・ 間隙率（表 3.2.1-6）
- ・ 固相圧縮率： $3.863 \times 10^{-11}(Pa s)$ （田中ら（2009）の充填材（モルタル）の値を引用）

未知パラメータを以下に示す。

- ・ 相対浸透率を表現する構成モデルパラメータ（表 3.2.1-7 の S_{wr} 、 n_w 、 n_g ）
- ・ 毛細管圧力曲線を表現する構成モデルパラメータ（表 3.2.1-7 の S_{wr} 、 P_0 、 n_c ）

水・ガスの相互作用を表現するための相対浸透率には、表 3.2.1-10 に示す構成モデルを採用した。毛細管圧力は表 3.2.1-7 に示す構成モデルを採用した。本検討では、水相の残留飽和度 S_{wr} は相対浸透率と毛細管圧力で同じとし、ガス相の残留飽和度 S_{gr} を0として検討を進めた。

c. 初期・境界条件

供試体の初期圧力は背圧（0.2MPa）と同じとし、初期水飽和状態とした。注入層と流出層は境界格子とする。注入層は完全に乾燥した状態とし、載荷ガス圧条件を与えた定圧境界格子とした。流出層については完全に飽和した状態とし、背圧（0.2MPa）を与えた定圧境界格子とした。

d. 逆解析手法

逆解析手法については、3) d に示したのと同じとした。

6) 逆解析結果

a. 水相の絶対浸透率に実測値を用いた検討

水相の絶対浸透率に透水試験結果から算出した値を用いて、2相流パラメータの同定を試みた。

水相の絶対浸透率に実測値を適用した場合、いずれの2相流パラメータの組合せを用いても、実測データを良好に再現することは困難であった。実測値と計算値の違いを解釈するために、図3.2.1-34に再現対象としている累積排水量の時間変化と、実測された絶対浸透率から飽和流れを仮定したときの排水量変化（図中の黒実線）を比較した。実測された絶対浸透率を用いた場合、最もモビリティが大きい飽和流れによって排水されたとしても、実測された累積排水量を大幅に下回っており、再現することが困難であることが分かる。この考え方に基づく、ガス注入時には、図中の黒点線で示した排水速度から算出される絶対浸透率 $1.49 \times 10^{-18}(\text{m}^2)$ 程度であったと考えられる。ここで対象とする5つの供試体は、すべて共通の傾向であることから、水相の絶対浸透率も同定パラメータに加えた検討を実施した。

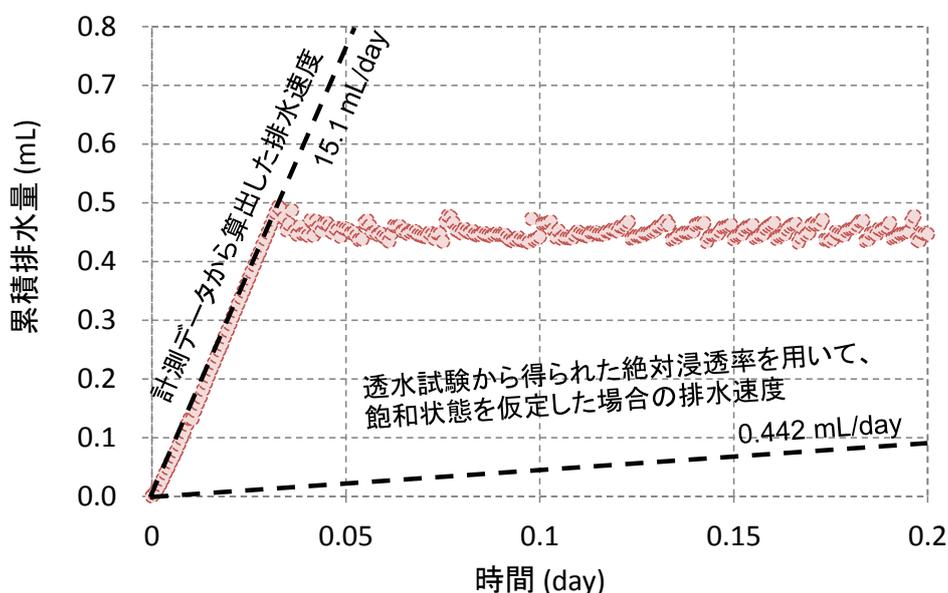


図 3.2.1-34 実測値から推定されるガス透気試験時の絶対浸透率（配合ケース 1、打継無）

b. 水相の絶対浸透率を同定パラメータに加えた検討

水相の絶対浸透率を同定パラメータに加え逆解析を実施した。図 3.2.1-35 に累積排水量と累積排気量の再現結果を示す。いずれの結果も概ね良好に実測データを再現している。同定された 2 相流パラメータを表 3.2.1-14 に、相対浸透率及び毛細管圧力を図 3.2.1-36 に示す。実測された累積排水量や排気量のばらつきが大きいため、同定された 2 相流曲線も供試体間で比較的ばらつきの大きいものが得られる結果となった。

表 3.2.1-14 同定された 2 相流パラメータ

供試体	$K(m^2)$	$S_{wr}(-)$	$n_w(-)$	$n_g(-)$	$P_0(Pa)$	$n_c(-)$
配合ケース 1 : 打継無	2.855×10^{-18}	0.939	5.33	1.77	1.33×10^5	1.11
配合ケース 2 : No.1	2.213×10^{-19}	0.959	2.79	1.46	1.97×10^5	1.22
配合ケース 2 : No.2	2.461×10^{-19}	0.983	2.19	1.72	2.46×10^5	1.18
配合ケース 2 : 打継無	6.863×10^{-18}	0.991	1.46	2.40	5.47×10^5	1.32
配合ケース 4 : No.1	9.640×10^{-20}	0.994	4.86	1.17	4.98×10^5	1.72

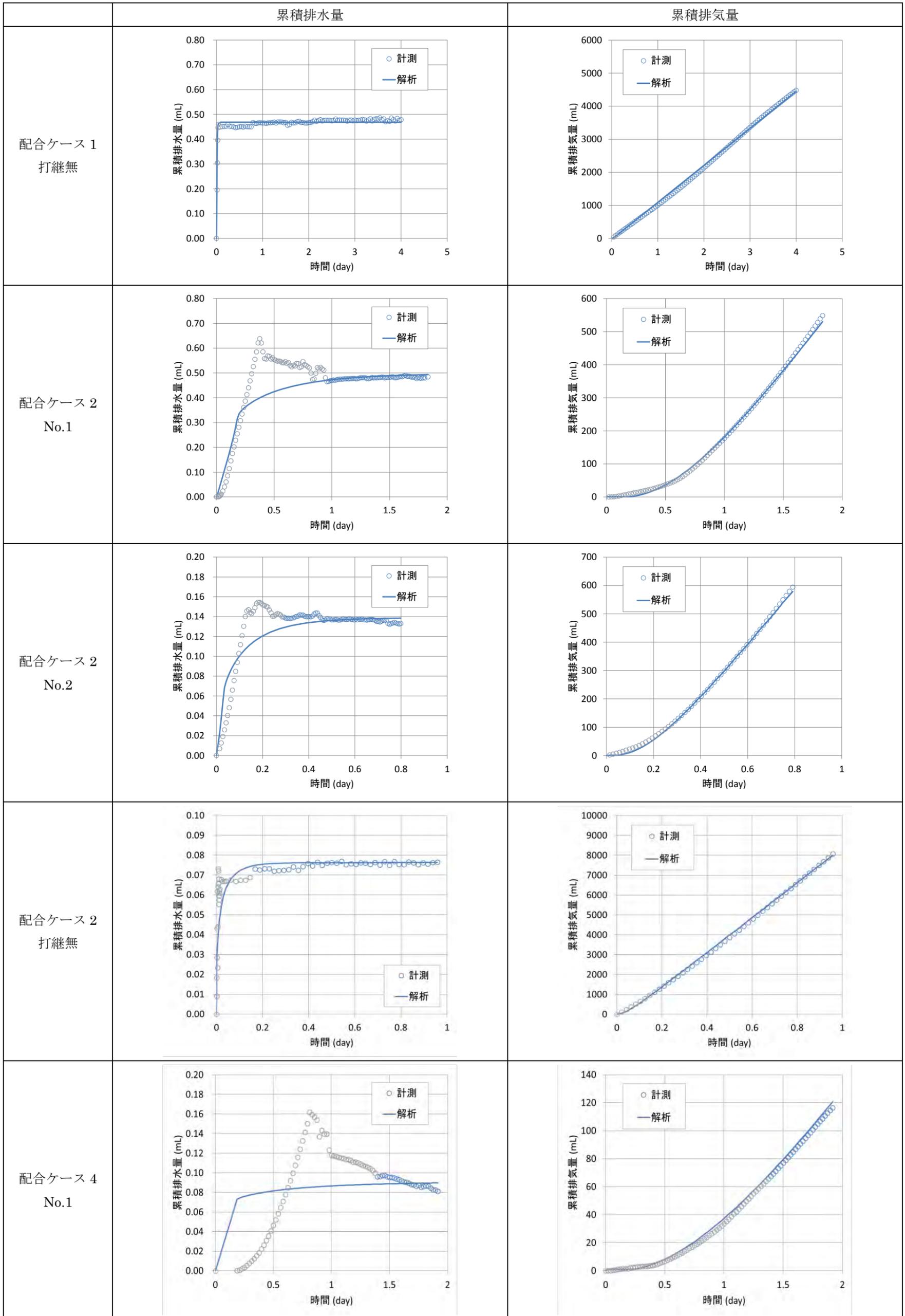


図 3.2.1-35 累積排水量と累積排気量の再現結果

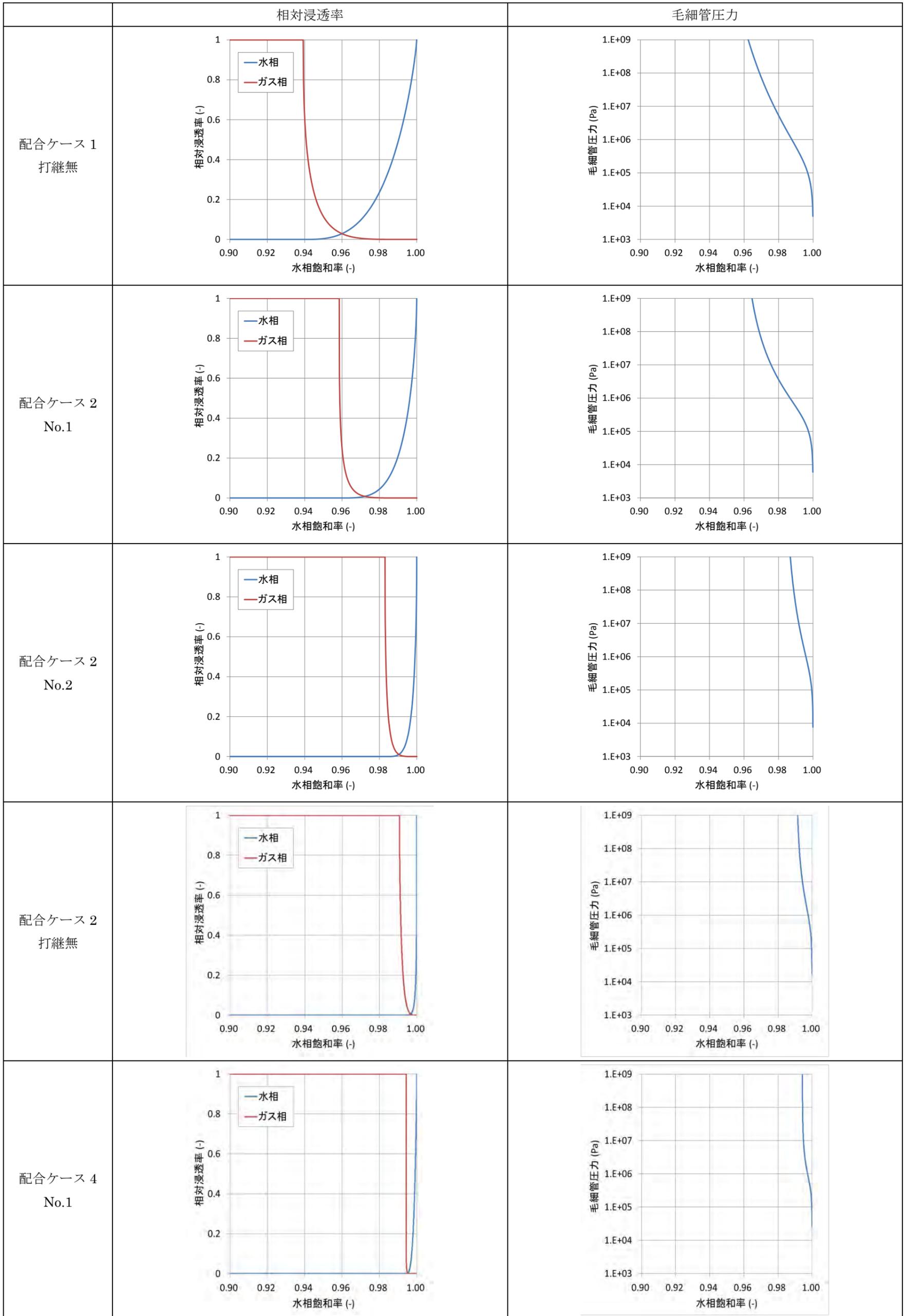


図 3.2.1-36 同定された相対浸透率 (左) と毛細管圧力 (右)

3.2.2 確証データの登録およびデータの追加収集・整備

(1) データライブラリの概要

ここでは、(3)～(5)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 3.2.2-1 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 3.2.2-2 に示す。また、各モジュールの要求機能を表 3.2.2-1 に、開発環境を表 3.2.2-2 に示した。

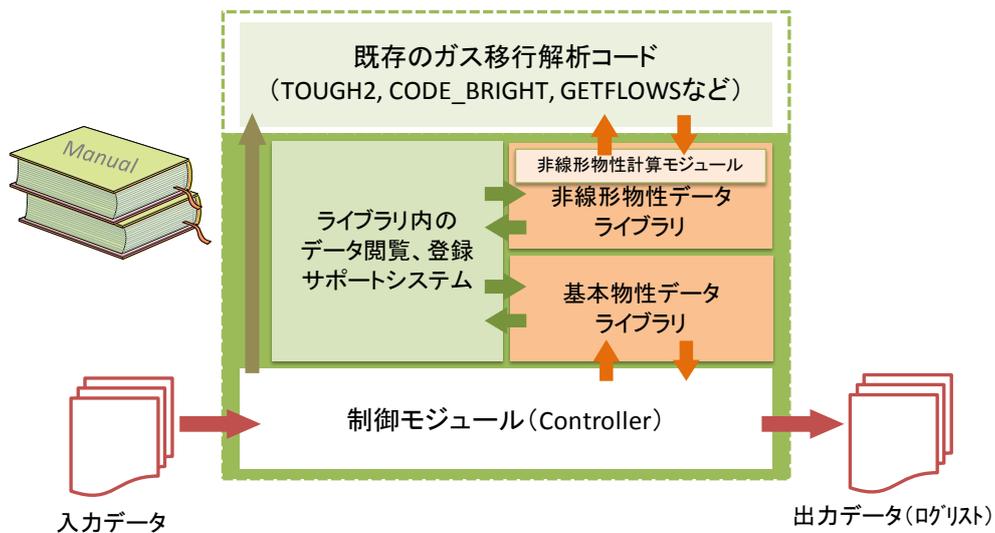


図 3.2.2-1 データライブラリの基本構成

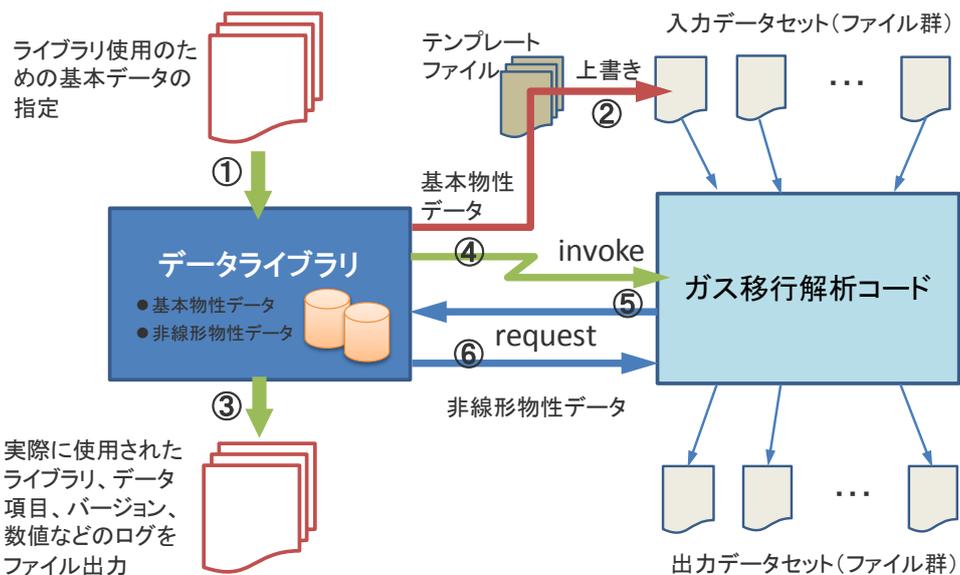


図 3.2.2-2 データライブラリを用いた実行処理の流れ

表 3.2.2-1 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 3.2.2-2 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	

(2) 確証データの登録（データの拡充）

(3)～(5)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 3.2.2-3 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 3.2.2-4～表 3.2.2-6 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。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 3.2.2-3 同定された基本物性一覧

過程	材料	供試体	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)	
湿潤	圧縮ベントナイト	No.4	5.184×10^{-20}	5.184×10^{-20}	0.4963	1.0×10^{-9}	—	
		No.5	5.329×10^{-20}	5.329×10^{-20}	0.4963	1.0×10^{-9}	—	
	ベントナイト系材料界面	No.1	4.688×10^{-20}	4.688×10^{-20}	0.5070	1.0×10^{-9}	—	
		No.2	5.304×10^{-20}	5.304×10^{-20}	0.5070	1.0×10^{-9}	—	
排水	ベントナイト系材料界面	No.1	3.751×10^{-20}	3.751×10^{-20}	0.5070	1.0×10^{-9}	0.309	
	セメント系材料	配合ケース 1 打継無	配合ケース 1	2.855×10^{-18}	1.05×10^{-15}	0.332	3.863×10^{-11}	—
			配合ケース 2	2.213×10^{-19}	3.48×10^{-16}	0.317	3.863×10^{-11}	—
		配合ケース 2 No.1	配合ケース 2	2.461×10^{-19}	3.23×10^{-16}	0.318	3.863×10^{-11}	—
			配合ケース 2	6.863×10^{-18}	2.01×10^{-16}	0.332	3.863×10^{-11}	—
		配合ケース 2 打継無	配合ケース 2	6.863×10^{-18}	2.01×10^{-16}	0.332	3.863×10^{-11}	—
			配合ケース 4	9.640×10^{-20}	2.68×10^{-16}	0.345	3.863×10^{-11}	—
		配合ケース 4 No.1	配合ケース 4	9.640×10^{-20}	2.68×10^{-16}	0.345	3.863×10^{-11}	—

表 3.2.2-4 同定された非線形物性一覧（毛細管圧力）

過程	材料	供試体	モデル	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$P_0(MPa)$	$n_c(-)$
湿潤	圧縮ベントナイト	No.4	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	1.00	1.98
		No.5	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	1.00	1.74
	ベントナイト系材料界面	No.1	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	1.07	1.50
		No.2	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	1.01	1.71
排水	ベントナイト系材料界面	No.1	<i>van Genuchten</i>	0.370	0.0	0.137	2.00
	セメント系材料	配合ケース 1 打継無	<i>van Genuchten</i>	0.939	0.0	0.133	1.11
		配合ケース 2 No.1	<i>van Genuchten</i>	0.959	0.0	0.197	1.22
		配合ケース 2 No.2	<i>van Genuchten</i>	0.983	0.0	0.246	1.18
		配合ケース 2 打継無	<i>van Genuchten</i>	0.991	0.0	0.547	1.32
		配合ケース 4 No.1	<i>van Genuchten</i>	0.994	0.0	0.498	1.72

表 3.2.2-5 同定された非線形物性一覧（相対浸透率）

過程	材料	供試体	相	モデル	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_w, n_g(-)$
湿潤	圧縮ベントナイト	No.4	水	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	2.01
			ガス	<i>Grant</i>	—	—	—
	ベントナイト系材料界面	No.5	水	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	1.81
			ガス	<i>Grant</i>	—	—	—
		No.1	水	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	1.91
			ガス	<i>Grant</i>	—	—	—
		No.2	水	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	1.75
			ガス	<i>Grant</i>	—	—	—
排水	ベントナイト系材料界面	No.1	水	<i>van Genuchten</i>	0.370	0.0	19.90
			ガス	<i>van Genuchten</i>	0.370	0.0	1.50
	セメント系材料	配合ケース 1 打継無	水	<i>van Genuchten</i>	0.939	0.0	5.33
			ガス	<i>van Genuchten</i>	0.939	0.0	1.77
		配合ケース 2 No.1	水	<i>van Genuchten</i>	0.959	0.0	2.79
			ガス	<i>van Genuchten</i>	0.959	0.0	1.46
		配合ケース 2 No.2	水	<i>van Genuchten</i>	0.983	0.0	2.19
			ガス	<i>van Genuchten</i>	0.983	0.0	1.72
		配合ケース 2 打継無	水	<i>van Genuchten</i>	0.991	0.0	1.46
			ガス	<i>van Genuchten</i>	0.991	0.0	2.40
	配合ケース 4 No.1	水	<i>van Genuchten</i>	0.994	0.0	4.86	
		ガス	<i>van Genuchten</i>	0.994	0.0	1.17	

表 3.2.2-6 同定された非線形物性一覧 (空隙損傷モデルパラメータ)

供試体	$C(-)$	$n(-)$	$F(-)$	$P_s(MPa)$
No.1	3.50×10^6	1.000	1.500	0.309

相対浸透率や毛細管圧力を表現する構成モデルは表 3.2.2-7、表 3.2.2-8 に示したとおりである。
 なお、表中の記号の説明は以下の通りである。

- S_p ; 流体相 $p(= w, g)$ 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_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 ; 流体相を識別する記号 (それぞれ水相、気相) を示す

表 3.2.2-7 相対浸透率を表現する構成モデル (1/2)

<i>van Genuchten/Grant</i> モデル	<i>van Genuchten/van Genuchten</i> モデル
$k_{rw} = \sqrt{S_{we}}(1 - (1 - S_{we}^{1/m_w})^{m_w})^2$ $k_{rg} = 1 - k_{rw}$ $S_{we} = (S_w - S_{wr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr})$ $m_w = 1 - 1/n_w$	$k_{rw} = \sqrt{S_{we}}(1 - (1 - S_{we}^{1/m_w})^{m_w})^2$ $k_{rg} = \sqrt{S_{ge}}(1 - (1 - S_{ge}^{1/m_g})^{m_g})^2$ $S_{we} = (S_w - S_{wr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr})$ $S_{ge} = (S_g - S_{gr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr})$ $m_w = 1 - 1/n_w \quad m_g = 1 - 1/n_g$

表 3.2.2-8 毛細管圧力を表現する構成モデル (2/2)

<i>van Genuchten</i> モデル
$P_c = P_0(S_{we}^{-1/m} - 1)^{1/n}$ $S_{we} = (S_w - S_{wr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr})$ $m = 1 - 1/n$

空隙損傷モデルは以下の式で構成される。

$$\begin{aligned}
 (P_g \leq P_w + P_s) \quad & \phi = \phi_0(1 + C_r(P - P_0)) \\
 & K = K_0 \\
 (P_g > P_w + P_s) \quad & \phi = \phi_0(1 + C_r(P_s - P_0) + FC_r(P_s - P_0)) \\
 & K = CK_0(\phi/\phi_0)^n
 \end{aligned}$$

ここに、 P_g : 気相圧力(Pa)、 P_w : 水相圧力(Pa)、 P_s : 膨潤圧(Pa)、 ϕ : 間隙率(-)、 ϕ_0 : 初期間隙率(-)、 C_r : 固相圧縮率(1/Pa)、 P_0 : 標準大気圧(Pa)、 K : 絶対浸透率(m^2)、 K_0 : 流路拡幅前の絶対浸透率(m^2)、 F 、 C 、 n : 空隙損傷モデルパラメータを示す。

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

(1) 検討概要

ここでは、典型的な TRU 廃棄物処分システムを対象とし、第 2 次 TRU レポート[6]に示されたパラメータに基づくガス移行解析と、これまでに同定されたパラメータを利用し、最新の知見に基づくガス移行解析の 2 ケースを実施する。ガス移行挙動や、施設内の最大ガス圧、押し出し排水量に対し、第 2 次 TRU レポート[6]からの変化を着眼点として検討を進めた。

(2) 対象システムの設定

本検討で対象とする廃棄体は、第 2 次 TRU レポート[6]に示された廃棄体グループ 2（ハル・エンドピース圧縮収納体）とし、地質環境条件は軟岩系岩盤（SR-C 準抛）、処分深度は地表面より 500m とする。対象とする処分システム概念を図 3.2.3-1 に示す。ここでは、処分坑道を深度方向に輪切りにした 2 次元断面として取扱う。処分坑道の内径は 11.4m、支保工の厚さは 0.6m、廃棄体サイズは幅 6.0m、高さ 6.4m、鋼製構造躯体の厚さは 0.05m である。

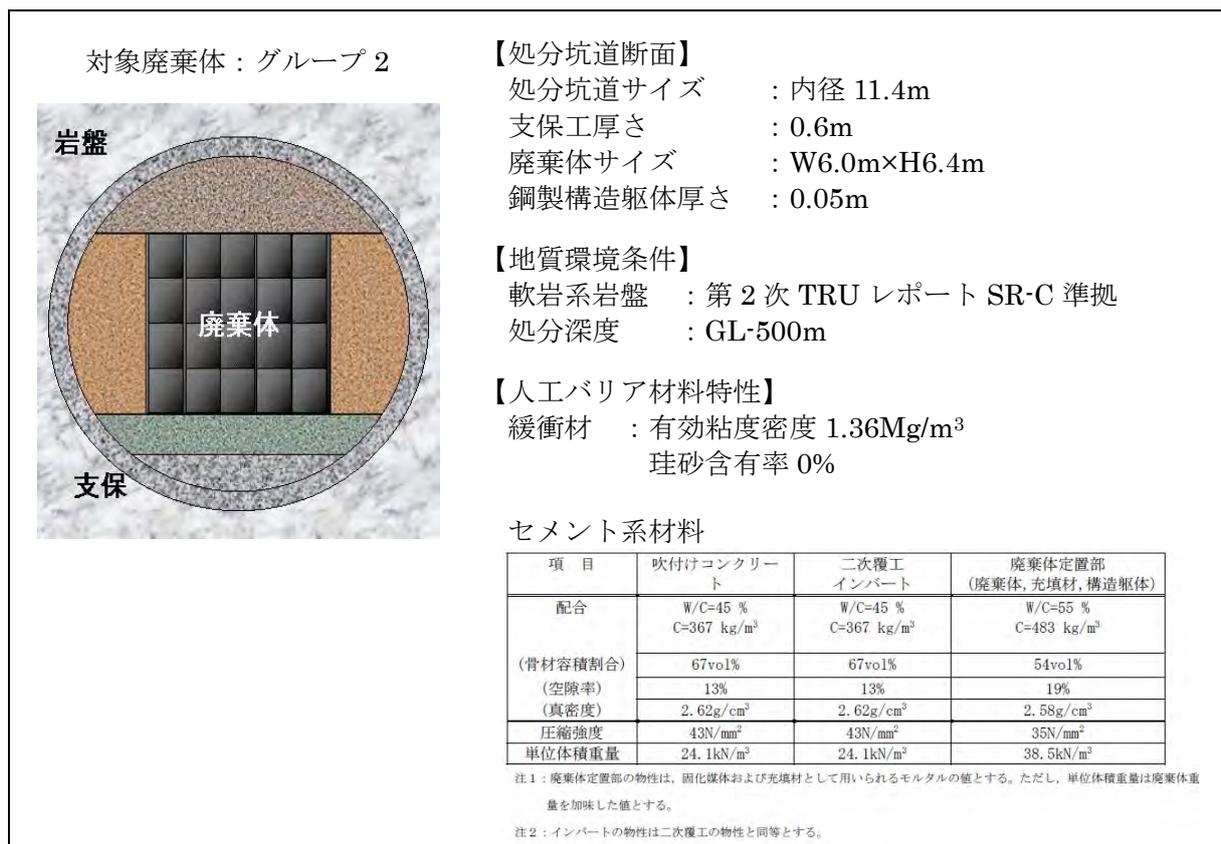


図 3.2.3-1 モデル化の対象とする処分システム

(3) 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)[7]を用いた。支配方程式や数値解法は(2)に示した通りである。

(4) 解析モデル

(2)で示した処分システムを対象とし、鉛直 2 次元の解析モデルを構築した。解析対象範囲は、第2次 TRU レポートの条件設定に基づき、坑道離間距離を 4D (Dは支保工を含む坑道内径 12.6m) とし、処分坑道配置の周期対称性を前提とした 1/2 対象領域とする。また、深度方向には廃棄体からのガス発生に伴う圧力上昇の影響が無視できる考えられる十分な範囲として、地表面から深度 1,000m までをモデル化した。

本検討では既往検討で構築された解析モデルを利用した。解析モデルを図 3.2.3-2 に示す。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)、岩盤である。人工バリア内部の空間解像度は約 20cm とし、総格子数は 29,548 となった。

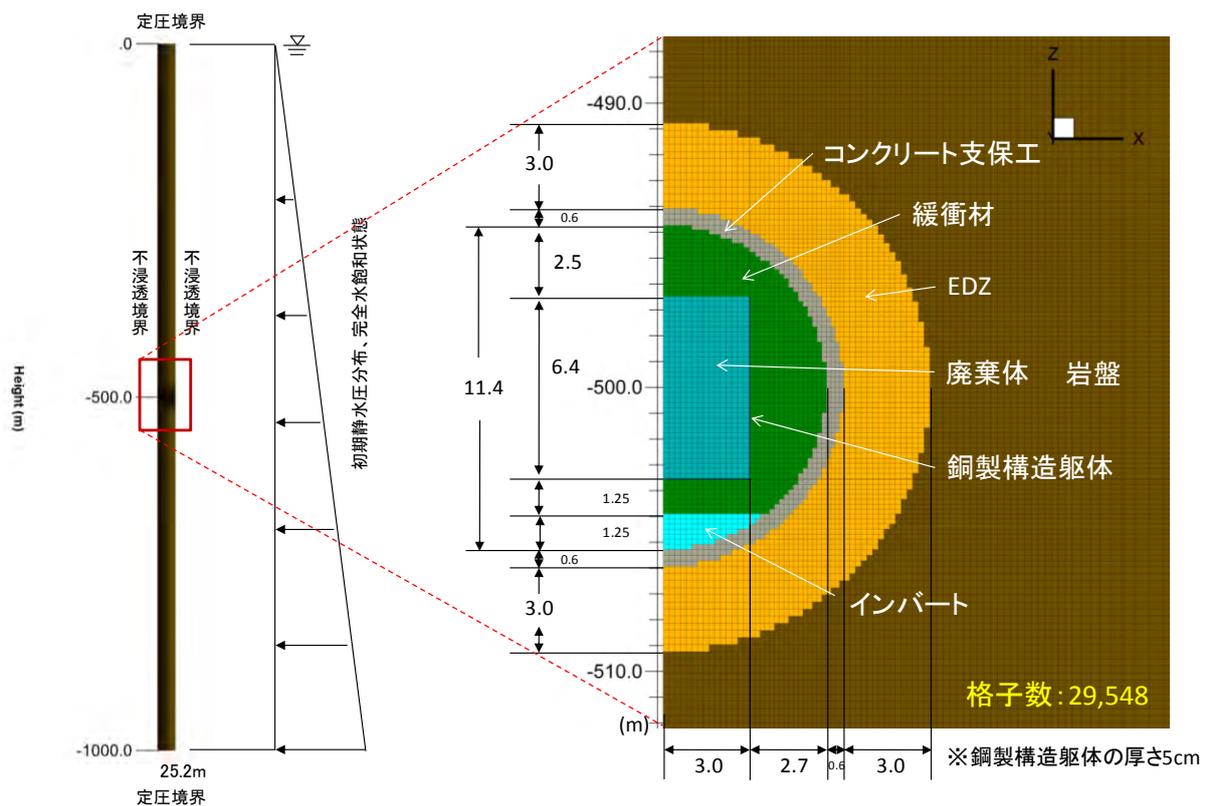


図 3.2.3-2 解析モデル (左：全体図、右：人工バリア周辺拡大図)

(5) 解析ケース

解析は以下に示す3つを実施した。

- ① ケース1：第2次 TRU レポートで用いられたパラメータを適用
- ② ケース2：廃棄体部に、既往検討（2013年度）で同定されたモルタル供試体のパラメータを適用し、緩衝材に対しては、ガス注入試験系の再現解析から同定されたパラメータのうち、最も排水量が小さい結果を示したものを適用
- ③ ケース3：ケース2と同様に廃棄体部には、既往検討（2013年度）で同定されたモルタル供試体のパラメータを適用し、緩衝材に対しては、ガス注入試験系の再現解析から同定されたパラメータのうち、最も排水量が大きい結果を示したものを適用

ケース2とケース3で用いる廃棄体部のパラメータについて示す。第2次 TRU レポートにおいて、充填材の設計の考え方として、充填固化体用の固化材料の設定値である 30N/mm^2 の圧縮強度が目安とされており、この仕様をみたす充填材に用いる材料として、流動性が大きく材料分離が少ないとされるプレパックドコンクリート用の注入モルタルに使用する材料と同等なものを採用することが有効と考えられている。そこで、本検討では、既往検討（2013年度）に同定されたプレパックドコンクリート用の注入モルタルのパラメータを適用するものとした。2013年度の検討では、No.1とNo.2の2つの供試体を用いて検討を行っている。ここでは、ガス注入試験での排水量が大きいNo.1で同定されたパラメータを適用した。

緩衝材については、図、図に示した、ガス注入試験系の再現解析から同定されたパラメータのうち、排水量の最も小さい「FY2010_ケース②」（ケース2）と、排水量の最も大きい「FY2012_SG②」（ケース3）を適用した。

(6) 解析条件

1) 流体物性

本検討で取扱う流体（水、水素）の物性を示す。本検討では等温状態を仮定するため、流体物性を圧力によってのみ変化させる。第2次 TRU レポートを参考に、地表面温度を $15(^{\circ}\text{C})$ 、地温勾配を $0.03(^{\circ}\text{C}/\text{m})$ とすると、処分坑道がある地表面から深度 500m では $30(^{\circ}\text{C})$ となるため、ここでは $30(^{\circ}\text{C})$ の等温状態を前提とする。

理科年表より $30(^{\circ}\text{C})$ における標準大気圧 $101,325(\text{Pa})$ での水の密度 ρ_{w0} を $995.65(\text{kg}/\text{m}^3)$ 、粘性係数 μ_{w0} を $0.797 \times 10^{-3}(\text{Pa}\cdot\text{s})$ とし、以下の式により水圧の関数として取り扱う。

$$\rho_w = \rho_{w0}(1 + C_f(P_w - P_0)) \quad (3.2-15)$$

$$\mu_w = \mu_{w0}(1 + C_\mu(P_w - P_0)) \quad (3.2-16)$$

ここに、 ρ_w 、 μ_w 、 C_f 、 C_μ 、 P_w 、 P_0 はそれぞれ、水の密度 (kg/m^3)、粘性係数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)、圧縮率 ($1/\text{Pa}$)、粘性係数の増加率 ($1/\text{Pa}$)、水圧 (Pa)、参照圧力 (Pa) であり、圧縮率には $0.45 \times 10^{-9}(1/\text{Pa})$ 、粘性係数の増加率には $1.0 \times 10^{-10}(1/\text{Pa})$ 、参照圧力には標準大気圧と同じ $101,325(\text{Pa})$ を設定した。

理科年表より $30(^{\circ}\text{C})$ における標準大気圧 $101,325(\text{Pa})$ での空気の密度 $1.165(\text{kg}/\text{m}^3)$ と、水素の空気に対する比重 $0.0695(-)$ から、標準大気圧での水素の密度 ρ_{g0} を $8.097 \times 10^{-2}(\text{kg}/\text{m}^3)$ とした。また、粘性係数 μ_{g0} は理科年表に記載された以下の式より $9.007 \times 10^{-6}(\text{Pa}\cdot\text{s})$ とした。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。

$$\mu_{g0} = \mu_{20} \left(\frac{T_{20} + C}{T + C} \right) \left(\frac{T}{T_{20}} \right)^{3/2} \quad (3.2-17)$$

ここに、 T 、 C はそれぞれ、温度(K)、水素のサザランド定数(-)であり、添え字20は標準大気圧101,325(Pa)、20($^{\circ}C$)における値を示す。 $\mu_{20} = 8.8 \times 10^{-6}(Pa \cdot s)$ 、 $T_{20} = 293.15(K)$ 、水素のサザランド定数には $C = 72(-)$ を設定した。

2) 水理物性

各ケースにおける材料毎の水理物性の一覧を表 3.2.3-1～表 3.2.3-3 にまとめた。相対浸透率及び毛細管圧力を表現する構成モデルをそれぞれ表 3.2.3-4、表 3.2.3-5 に示した。各材料の相対浸透率曲線及び毛細管圧力曲線を図 3.2.3-5～図 3.2.3-9 に示す。また、ケース 2、ケース 3 では流路拡幅を考慮する。用いた空隙損傷モデルパラメータを表 3.2.3-6 に示した。

表 3.2.3-1 水理物性一覧 (ケース 1)

部材	絶対浸透率 $K_p(m^2)$		相対浸透率 $k_r(-)$					毛細管圧力 $P_c(Pa)$					有効 間隙率 $\phi(-)$	固相 圧縮率 $C_r(1/Pa)$
			モデル	残留水相 飽和度 $S_{wr}(-)$	残留ガス 相飽和度 $S_{gr}(-)$	係数 $m(-)$	係数 $n(-)$	モデル	残留水相 飽和度 $S_{wr}(-)$	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	Na	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	Na	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	0.0	1.5	9.5	Na	0.0	1.2E+6	2.5E+6	0.45	0.40	1.23E-8
	ガス	1.04E-19												
支保工	水	4.10E-18	Corey	0.15	0.075	25	2.3	Na	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	Na	0.15	6.9E+4	5.0E+6	1.05	0.13	5.92E-10
	ガス	3.00E-15												
掘削影響域 (EDZ)	水	8.20E-15	Corey	0.6	0	4	3	Na	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	Na	0	3.4E+4	8.0E+5	0.35	0.3	3.43E-10
	ガス	7.80E-16												

※鋼製構造躯体の側部の有効間隙率は 0.50 とした

表 3.2.3-2 水理物性一覧 (ケース 2)

部材	絶対浸透率 $K_p(m^2)$		相対浸透率 $k_r(-)$					毛細管圧力 $P_c(Pa)$					有効 間隙率 $\phi(-)$	固相 圧縮率 $C_r(1/Pa)$
			モデル	残留水相 飽和度 $S_{wr}(-)$	残留ガス 相飽和度 $S_{gr}(-)$	係数 $m(-)$	係数 $n(-)$	モデル	残留水相 飽和度 $S_{wr}(-)$	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	1.51E-18	<i>vG</i>	0.955	0.0	—	5.76	<i>vG</i>	0.955	—	3.0E+4	1.27	0.15	3.86E-11
	ガス	1.05E-17					2.583							
構造躯体	水	4.10E-18	<i>Corey</i>	0.15	0.075	25	2.3	<i>Na</i>	0.15	6.9E+4	5.0E+6	1.05	0.42**	1.03E-10
	ガス	3.00E-15												
緩衝材	水	4.24E-20	<i>vG</i>	0.387	0	—	1.45	<i>vG</i>	0.387	—	6.6E+5	1.82	0.493	1.00E-9
	ガス	4.24E-20					13.70							
支保工	水	4.10E-18	<i>Corey</i>	0.15	0.075	25	2.3	<i>Na</i>	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	<i>Corey</i>	0.15	0.075	25	2.3	<i>Na</i>	0.15	6.9E+4	5.0E+6	1.05	0.13	5.92E-10
	ガス	3.00E-15												
掘削影響域 (EDZ)	水	8.20E-15	<i>Corey</i>	0.6	0	4	3	<i>Na</i>	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	<i>Corey</i>	0.6	0	4	3	<i>Na</i>	0	3.4E+4	8.0E+5	0.35	0.3	3.43E-10
	ガス	7.80E-16												

※鋼製構造躯体の側部の有効間隙率は 0.50 とした

表 3.2.3-3 水理物性一覧 (ケース 3)

部材	絶対浸透率 $K_p(m^2)$		相対浸透率 $k_r(-)$					毛細管圧力 $P_c(Pa)$					有効 間隙率 $\phi(-)$	固相 圧縮率 $C_r(1/Pa)$
			モデル	残留水相 飽和度 $S_{wr}(-)$	残留ガス 相飽和度 $S_{gr}(-)$	係数 $m(-)$	係数 $n(-)$	モデル	残留水相 飽和度 $S_{wr}(-)$	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	1.51E-18	<i>vG</i>	0.955	0.0	—	5.76	<i>vG</i>	0.955	—	3.0E+4	1.27	0.15	3.86E-11
	ガス	1.05E-17					2.583							
構造躯体	水	4.10E-18	<i>Corey</i>	0.15	0.075	25	2.3	<i>Na</i>	0.15	6.9E+4	5.0E+6	1.05	0.42 ^{**}	1.03E-10
	ガス	3.00E-15												
緩衝材	水	3.83E-20	<i>vG</i>	0.364	0.0	—	2.01	<i>vG</i>	0.364	—	2.9E+5	2.29	0.4963	1.00E-9
	ガス	3.83E-20					2.95							
支保工	水	4.10E-18	<i>Corey</i>	0.15	0.075	25	2.3	<i>Na</i>	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	<i>Corey</i>	0.15	0.075	25	2.3	<i>Na</i>	0.15	6.9E+4	5.0E+6	1.05	0.13	5.92E-10
	ガス	3.00E-15												
掘削影響域 (EDZ)	水	8.20E-15	<i>Corey</i>	0.6	0	4	3	<i>Na</i>	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	<i>Corey</i>	0.6	0	4	3	<i>Na</i>	0	3.4E+4	8.0E+5	0.35	0.3	3.43E-10
	ガス	7.80E-16												

※鋼製構造躯体の側部の有効間隙率は 0.50 とした

表 3.2.3-4 相対浸透率曲線を表現する構成モデル

Corey	van Genuchten (vG)
$k_{rw} = S_{we}^m$ $k_{rg} = (1 - S_{we})^n (1 - S_{we}^n)$ $S_{we} = (S_w - S_{wr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr})$	$k_{rw} = \sqrt{S_{we}} (1 - (1 - S_{we}^{1/m})^m)^2$ $k_{rg} = \sqrt{S_{ge}} (1 - (1 - S_{ge}^{1/m})^m)^2$ $S_{we} = (S_w - S_{wr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr})$ $S_{ge} = (S_g - S_{gr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr})$ $m = 1 - 1/n$

表 3.2.3-5 毛細管圧力曲線を表現する構成モデル

Narasimhan (Na)	van Genuchten (vG)
$P_c = P_e + P_0 \left(\frac{1 - S_w}{S_w - S_{wr}} \right)^{1/n}$	$P_c = P_0 (S_{we}^{-1/m} - 1)^{1/n}$ $S_{we} = (S_w - S_{wr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr})$ $m = 1 - 1/n$

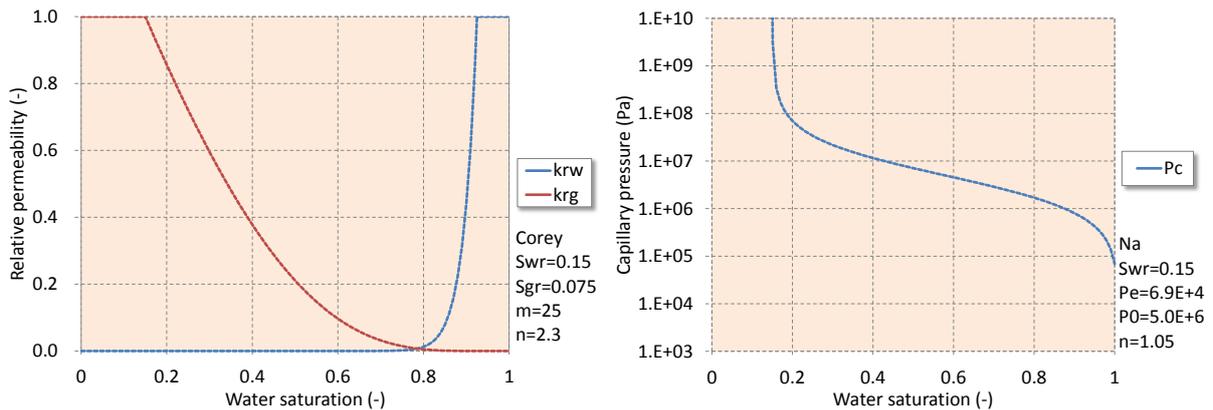


図 3.2.3-3 相対浸透率と毛細管圧力曲線（廃棄体）（ケース 1）

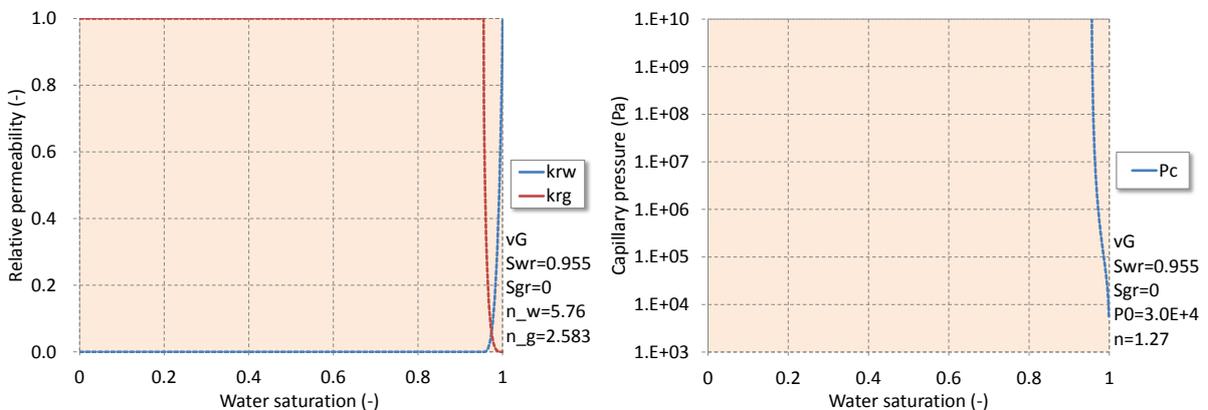


図 3.2.3-4 相対浸透率と毛細管圧力曲線（廃棄体）（ケース 2、3）

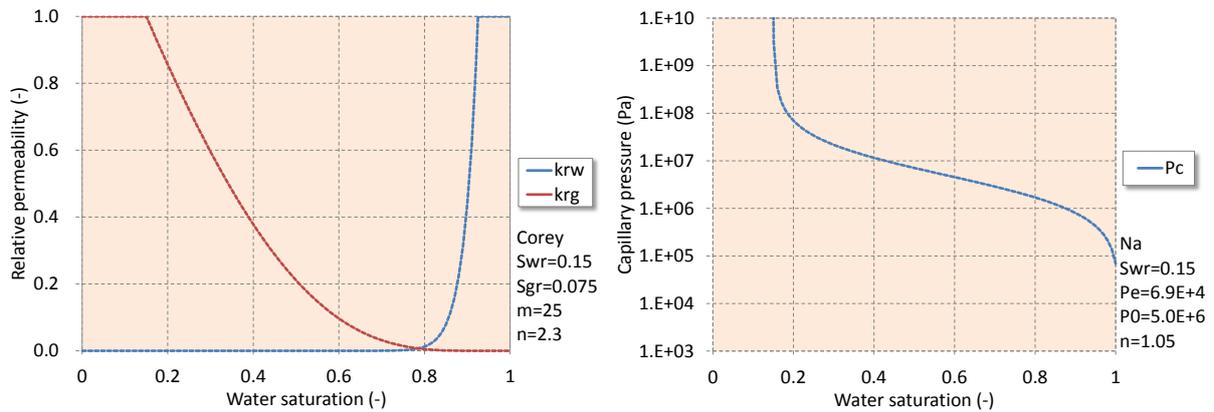


図 3.2.3-5 相対浸透率と毛細管圧力曲線（構造躯体、支保工、インバート）

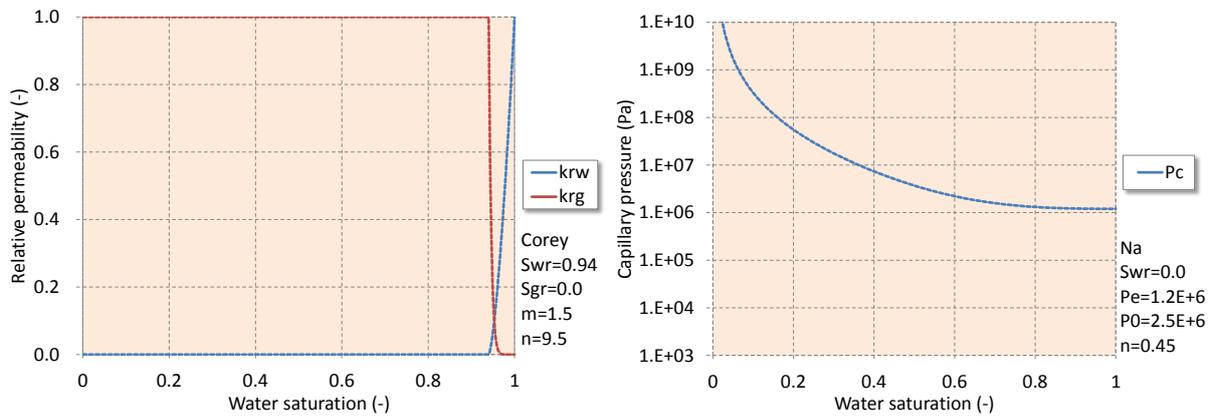


図 3.2.3-6 相対浸透率と毛細管圧力曲線（緩衝材）（ケース 1）

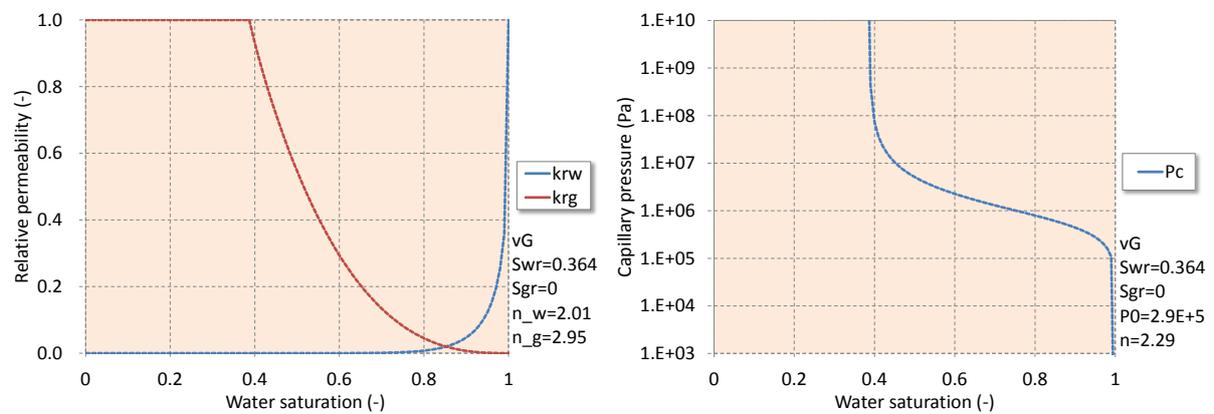


図 3.2.3-7 相対浸透率と毛細管圧力曲線（緩衝材）（ケース 2）

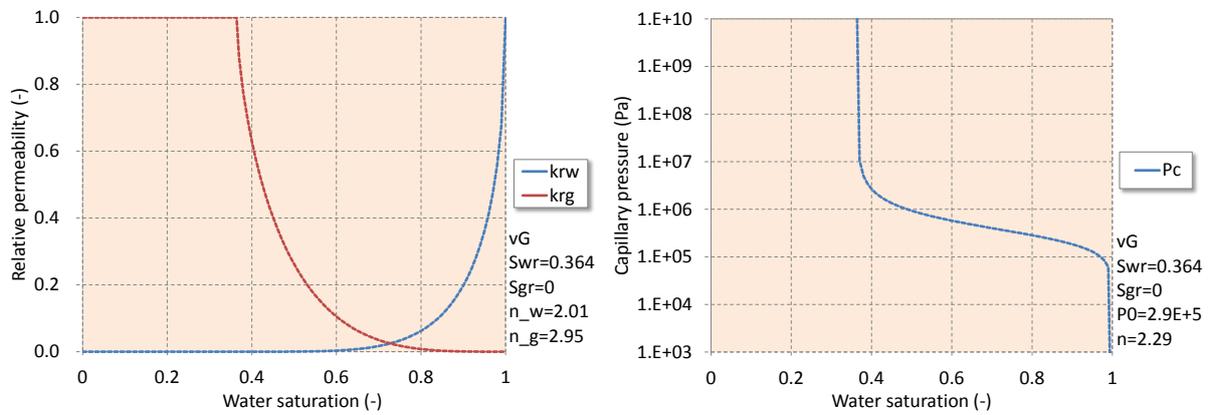


図 3.2.3-8 相対浸透率と毛細管圧力曲線（緩衝材）（ケース 3）

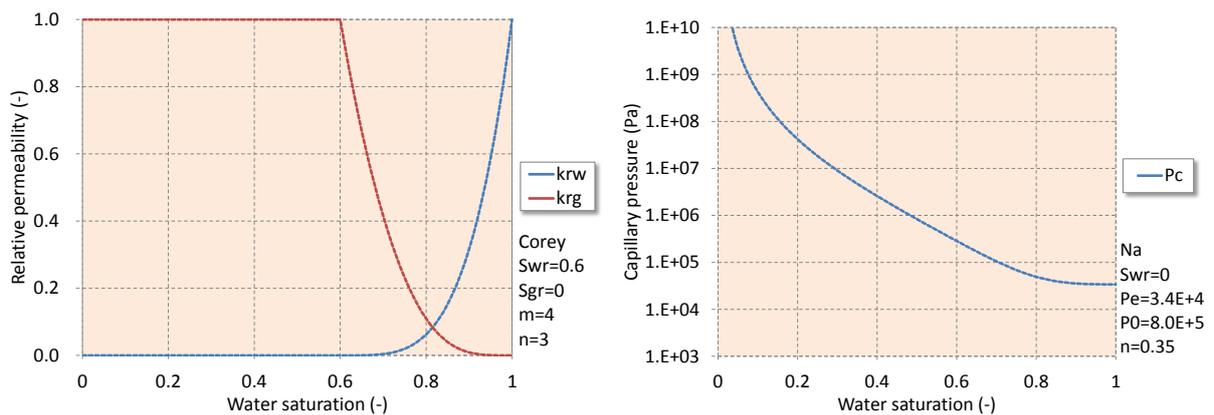


図 3.2.3-9 相対浸透率と毛細管圧力曲線（掘削影響域、岩盤）

表 3.2.3-6 空隙損傷モデルパラメータ（ケース 2、ケース 3）

ケース	$C(-)$	$n(-)$	$F(-)$	$P_s(MPa)$
ケース 2	5.883×10^6	0.649	1.107	0.524
ケース 3	1.482×10^6	0.202	1.030	0.208

3) 初期・境界条件

初期状態はモデル全域において地表面に水位があるとした静水圧、水飽和状態とした（図 3.2.3-10）。境界条件については、上面、底面は定圧境界、側面は不透水境界に設定した（図 3.2.3-10）。

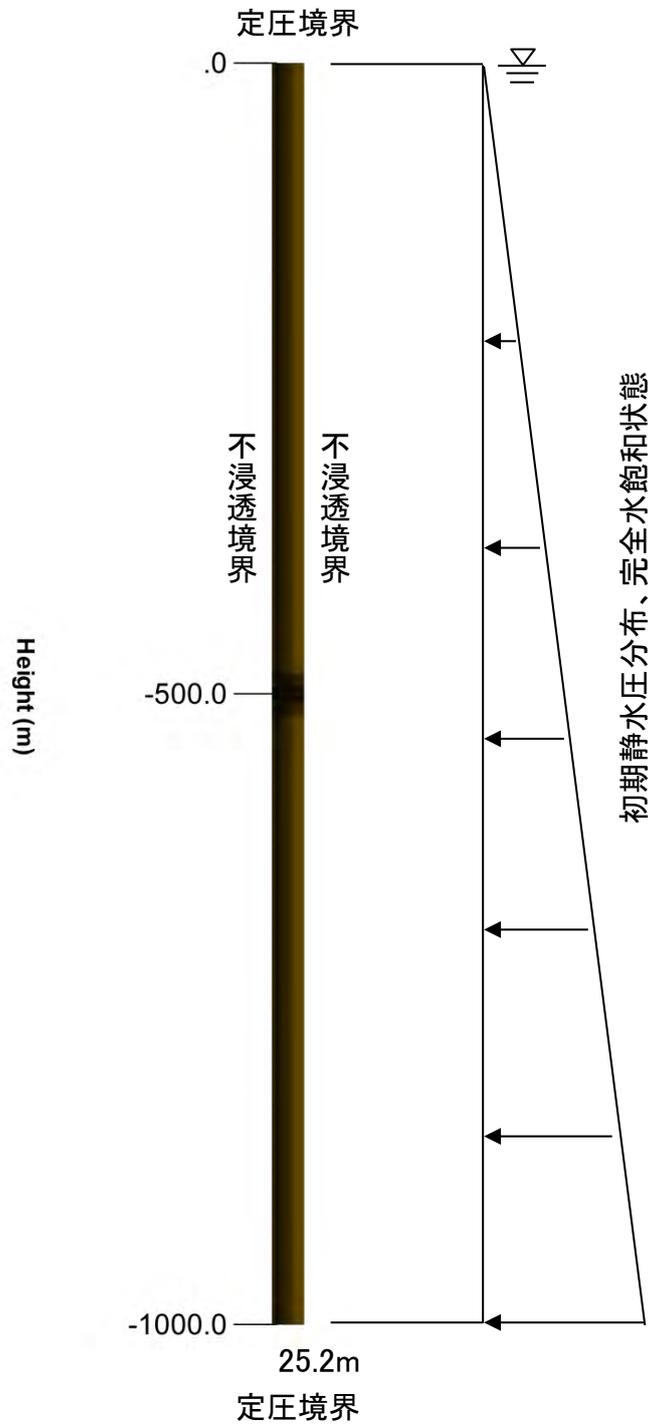


図 3.2.3-10 初期・境界条件

また、廃棄体からのガス発生を考慮する。ガス発生速度は安藤ら（2005）[14]に示されたものを設定した（図 3.2.3-11）。ガス発生領域は廃棄体のみとした。

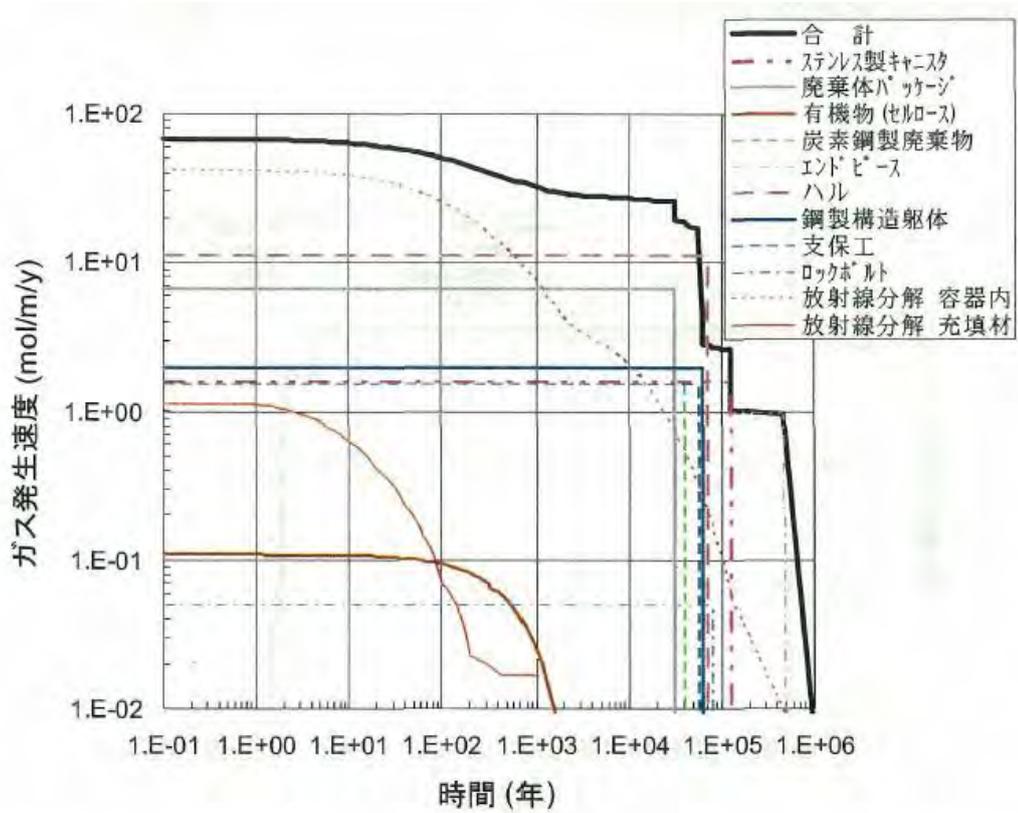


図 3-15 ガス発生速度—堆積岩系岩盤 廃棄体グループ 2（キャニスタ）

図 3.2.3-11 ガス発生速度の時間変化（出典：安藤ら, 2005[14]）

(7) 出力諸量

出力諸量を以下に示す。なお、評価点は図 3.2.3-12 に示す位置とした。

- 評価点におけるガス相圧力の時間変化
- 評価点における水相飽和度の時間変化
- 坑道からの累積押し出し水量の時間変化
- ガス相圧力分布
- 水相飽和度分布
- 流路拡幅箇所分布

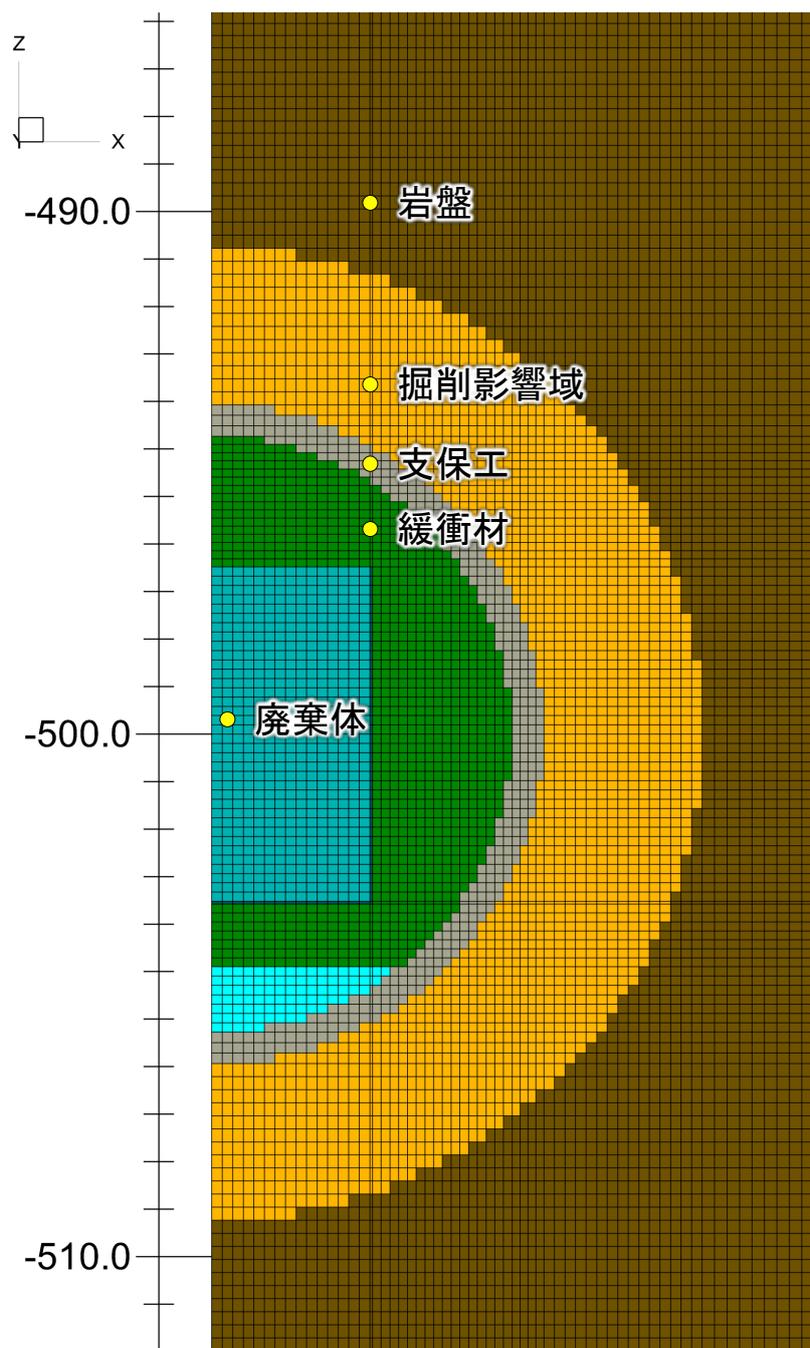


図 3.2.3-12 評価点位置図

(8) 解析結果

評価点におけるガス相圧力と坑道からの累積押し出し水量を図 3.2.3-13 に示す。図 3.2.3-14～図 3.2.3-16 に、約 10 年後、約 30 年後、約 50 年後、約 100 年後、約 250 年後、約 500 年後、約 1,000 年後、約 2,000 年後におけるガス相圧力分布、水相飽和度分布及び流路拡幅箇所分布を示す。

第 2 次 TRU レポートで使用されたパラメータによるケース 1 では、最大ガス圧は約 6.6MPa、10,000 年後における坑道からの累積押し出し水量は約 2.2Nm³/m であった。

最新の知見を反映したケース 2、ケース 3 では、最大ガス圧が約 6.1～6.5MPa、10,000 年後における坑道からの累積押し出し水量は約 4.6～12.2Nm³/m となった。ケース 2、ケース 3 では、流路拡幅を考慮したことにより、最大ガス圧はケース 1 よりも低下する結果となっている。また、ケース 3 では、流路拡幅発生時の圧力閾値（膨潤圧）がケース 2 と比較して小さいために、早く空隙損傷が発生し、最大ガス圧が小さくなったと解釈される。また、ケース 1 では、水相の残留飽和度が高く、毛細管圧力が大きいため、排水が抑制されるパラメータとなっていたが、ガス注入試験系の再現解析から同定された最新のパラメータを適用したケース 2、ケース 3 では、ケース 1 と比較して、水相の残留飽和度が低く、毛細管圧力も小さいため、累積排水量が相対的に大きくなる結果となった。本検討では、緩衝材（ベントナイト）、廃棄体に対してのみ最新の知見を反映したデータセットを整備したが、岩盤等その他の材料に対してもデータの蓄積を進めていき、同様の検討を継続していくことが望ましいと考えられる。

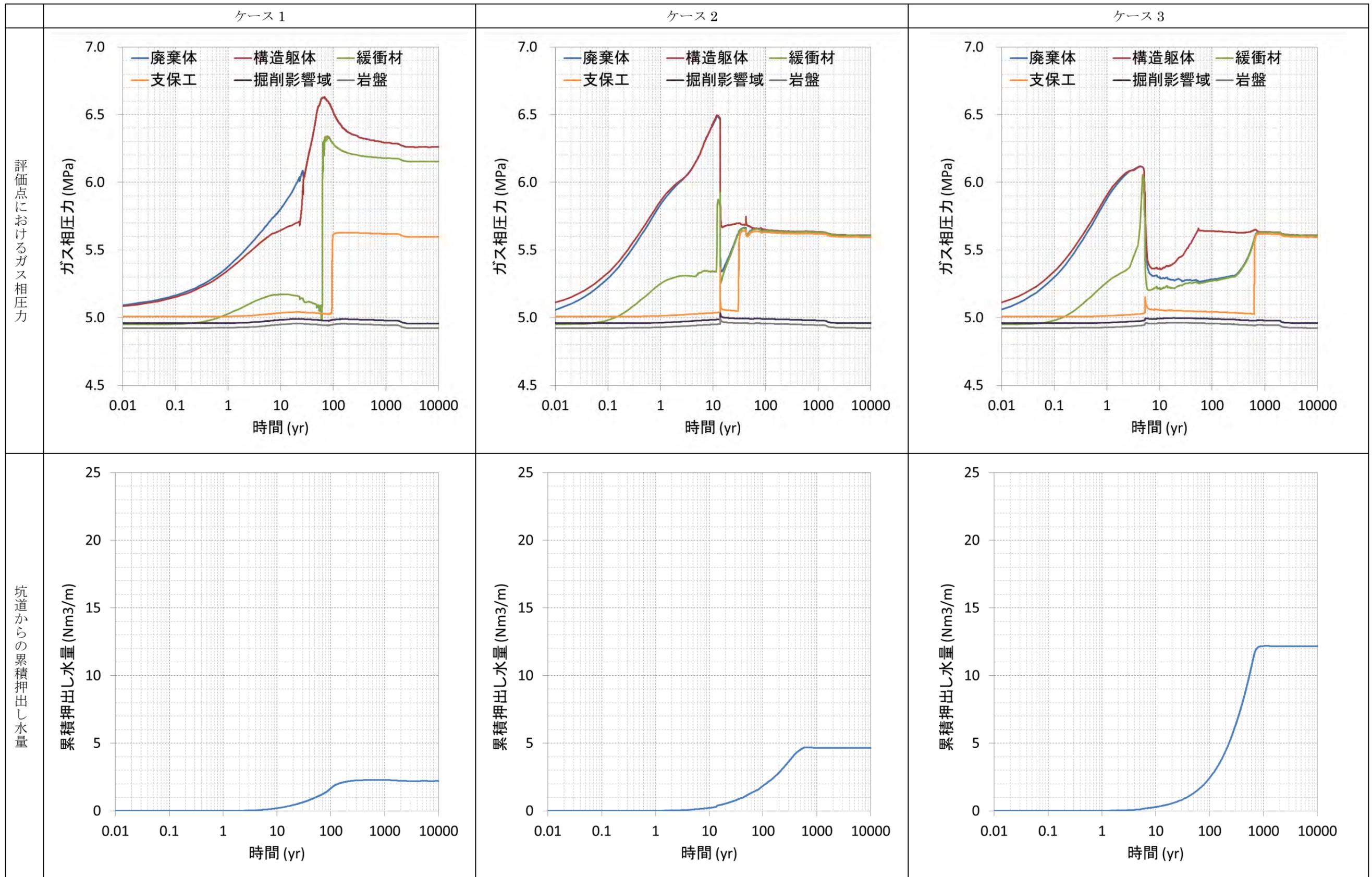


図 3.2.3-13 評価点におけるガス相圧力と坑道からの累積押し出し水量の比較

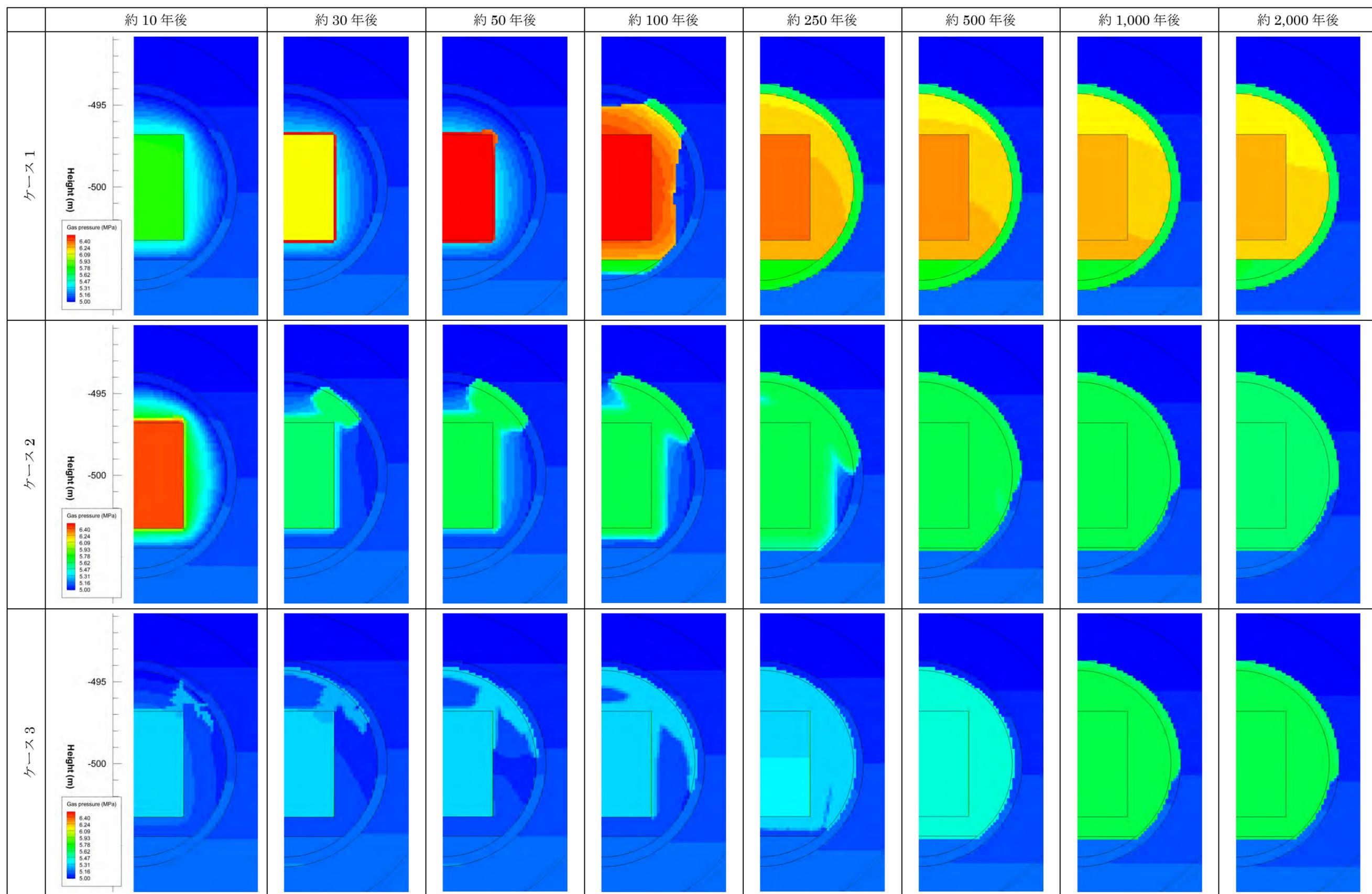


図 3.2.3-14 ガス相圧力の比較

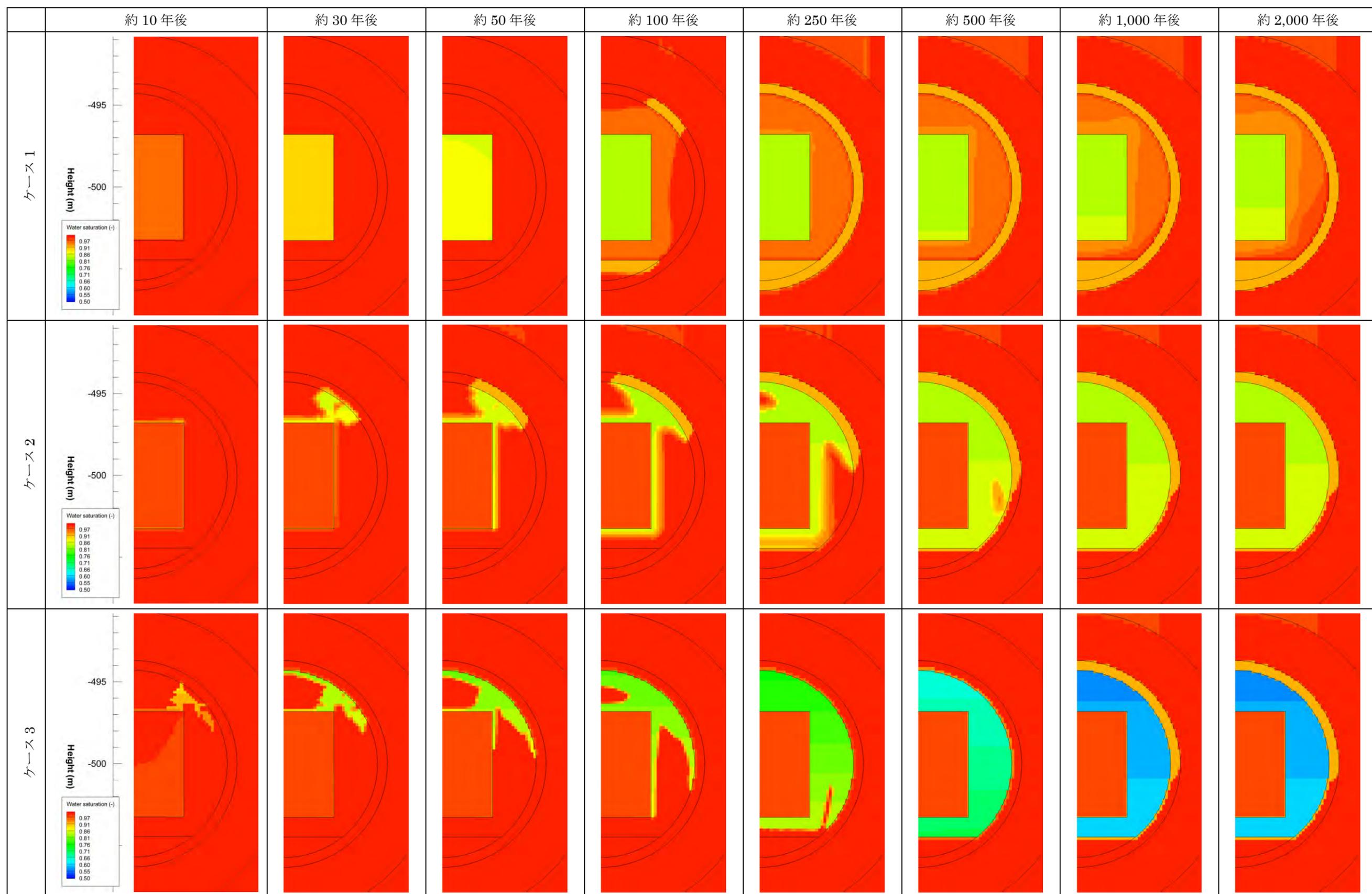


図 3.2.3-15 水相飽和度の比較

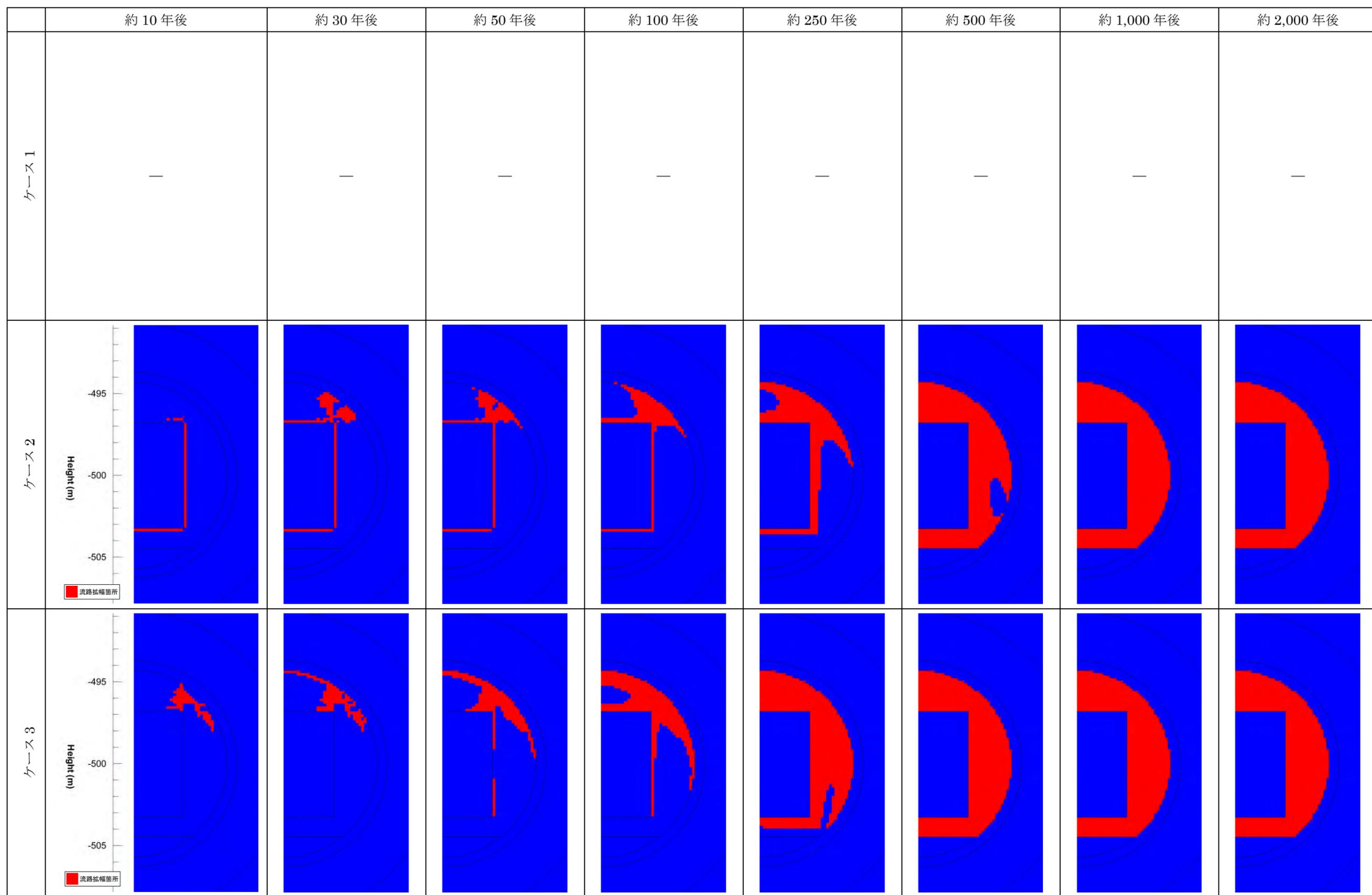


図 3.2.3-16 流路拡幅箇所の比較

3.3 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。

3.3.1 最新の室内ガス移行試験データによる検証計算

- ・ 水・ガス 2 相流解析コードを用いて、圧縮ベントナイトやモルタル供試体を対象としたガス移行試験データの再現解析を行った。再現解析では、解析結果と実測データの差を目的関数とした逆解析による 2 相流パラメータの同定を試みた結果、対象とした全供試体について、実測データを良好に再現する 2 相流パラメータを同定することができた。
- ・ このうち材料界面（締固め施工継ぎ目を模擬）を設けた圧縮ベントナイト供試体については、材料界面を設けない供試体とほぼ同程度の実測データが得られており、2 相流パラメータについても同程度のものが同定された。これは、透水試験時の吸水に伴うベントナイトの膨潤作用によって、材料界面として見立てた 1mm 幅の空間が閉塞されたと解釈される。従って、ベントナイトがガス発生以前に再冠水等によって高い水分状態に至れば、材料界面が人工バリアシステム内における選択的移行経路とはならないことが示唆される。
- ・ 一方で材料界面（打継ぎ面を模擬）モルタル供試体については、各供試体で結果のばらつきが大きく、配合パターンの違いや、打継部の有無で、明確な傾向の相違を確認することは困難であった。従って、引き続きデータの蓄積が必要であると結論付けた。

3.3.2 検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検証計算」において同定された 10 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うことで、解析ツールとしての利便性を向上させた。

3.3.3 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 廃棄物グループ 2 の処分概念を対象に、人工バリアを含む領域を鉛直 2 次元断面によってモデル化し（人工バリア周辺を約 20cm の空間解像度で表現し、廃棄体、構造躯体、緩衝材、インバート、支保工、掘削影響域、周辺岩盤を考慮）、本研究でこれまでに蓄積されてきた材料パラメータを用いて、緩衝材及び廃棄体のパラメータに対して最新の知見を反映した長期ガス移行解析を実施した結果、処分概念（人工バリアシステム）の成立性を評価するために必要な指標の幅を確認することができた。
- ・ 具体的には、第 2 次 TRU レポートに示された材料パラメータを用いた場合との比較を検討

し（第 2 次 TRU レポートに基づいて設定した物性データと、本研究で蓄積されてきた材料パラメータを用い、最新の知見を反映した物性データの 2 つのデータセットを整備）、計 3 ケースの長期ガス移行解析を実施した結果、処分概念成立性評価の指標の一つである最大ガス圧に対しては、最新の知見を反映した場合の方が、約 0.1~0.5MPa 小さくなった。また、もう一つの指標である施設外への累積押し排水量については、最新の知見を反映した場合の方が、約 2.4~10.0Nm³/m 大きくなる結果を得た。

- ・ 本検討では、緩衝材（ベントナイト）、廃棄体に対してのみ最新の知見を反映したデータセットを整備したが、将来的には岩盤等その他の材料に対してもデータの蓄積を進めていき、同様の検討（最新の材料パラメータを反映した長期ガス移行解析による評価）を継続していくことが必要である。

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] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター, 2016. 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— .
- [5] 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.
- [6] 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— .
- [7] 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.
- [8] J. R. Appleyard, I. M. Cheshire and R. K. Pollard, 1981. Special Techniques for Fully-Implicit Simulators, Enhanced oil recovery, pp.395-408.
- [9] 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.
- [10] Poeter, Eileen P., Mary C. Hill, Dan Lu, Claire R. Tiedeman, and Steffen Mehl, 2014. UCODE_2014, with new capabilities to define parameters unique to predictions, calculate weights using simulated values, estimate parameters with SVD, evaluate uncertainty with MCMC, and More, Integrated Groundwater Modeling Center Report Number: GWMI 2014-02.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 田中幸久, 廣永道彦, 森敦史, 2009. 放射性廃棄物処分施設へのガス移行解析コードの適用に関する研究—気液 2 相流解析コードの選定と適用—, 電力中央研究所報告: N09003.

[14] 安藤賢一，納多勝，山本幹彦，三原守弘，TRU廃棄物処分におけるガス発生・移行解析（研究報告），JNC TN8400 2005-026.

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

平成 24 年度までに実施した「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）を基盤に、ガス移行挙動評価に係る不確実性の低減および残された課題の解決を目的として、平成 25 年度より新たに「ガス移行連成挙動評価手法の開発」に着手している。

平成 28 年度は、5 年間に亘る実施計画（平成 25 年度に策定[14]）に基づき、TRU 廃棄物処分施設の人工バリアシステム（ベントナイト系（緩衝材）／セメント系（充填材）材料から構成される複合システム）としてのガス移行特性把握を目的とした検討を行う。

具体的には、人工バリアシステムの構成材料のうち底部緩衝材の候補材料となっているベントナイト・砂混合材料について、当該材料のガス移行に伴う詳細な力学特性を把握が重要であるが、これまでに未取得であった必要データのうち特に重要な「せん断強度特性のサクシオン依存性」に係るデータを取得し、それらを整理することによって力学特性を評価する。

さらに、人工バリアシステム内において卓越したガス移行経路となることが懸念されるバリア材料間（ベントナイト系／セメント系材料間）の界面について、そのガス移行特性を把握することが人工バリアシステムのガス移行挙動の理解においても特に重要であることから、人工バリア材料界面を模擬した供試体によるガス移行試験を実施し、取得データを整理することによってガス移行特性を評価する。

その一方で、TRU 廃棄物処分施設の人工バリアシステムを模擬した複合システム試験の実現に向けた検討（詳細な試験計画の策定等）を行う。なお、上記の要素試験の検討成果から、複合システム試験計画の策定において考慮すべき重要な情報等を抽出し、反映するものとする。

^{*} 『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

4.2 実施内容

4.2.1 人工バリアシステムのうち底部緩衝材（ベントナイト・砂混合材料）を対象とした力学特性評価試験

(1) 実施項目

平成 27 年に実施した「ガス移行連成挙動評価手法の開発」においては、平成 24 年度までに評価/蓄積した緩衝材（ベントナイト単体：1.36 Mg/m³）のガス移行に伴う力学特性の知見 [1][2][3][4][5][6] を更に拡充することを目的として、「底部緩衝材（ベントナイト・砂混合材料）」を対象に「膨潤・収縮特性」、「圧密変形特性」のサクシオン依存性を評価した [16]。

今年度は力学特性評価に係る更なる知見拡充のため、「せん断強度特性」のサクシオン依存性に係るデータを取得し、それらを整理することによって当該力学特性を評価した。

具体的には、サクシオン一定条件下で三軸圧縮試験を行い、内部摩擦角（ ϕ ）と粘着力（ c ）のサクシオン依存性を評価し、既往モデル（力学連成二相流モデル）の適用性を検討するとともにモデルパラメータを同定・評価した。

なお、本報告においては、ネット応力、サクシオンなどを以下のように定義する。

ネット応力 $p_{net} = (\text{全応力}) - (\text{間隙ガス圧})$

有効応力 $p' = (\text{全応力}) - \max(\text{間隙水圧}, \text{間隙ガス圧})$

サクシオン $s = (\text{間隙ガス圧}) - (\text{間隙水圧})$

偏差応力 $q = \left(\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right)^{1/2}$ ここに、 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 主応力（全応力）

(2) 試験装置

サクシオン制御可能な三軸試験装置を図 4.2.1-1 に示す。

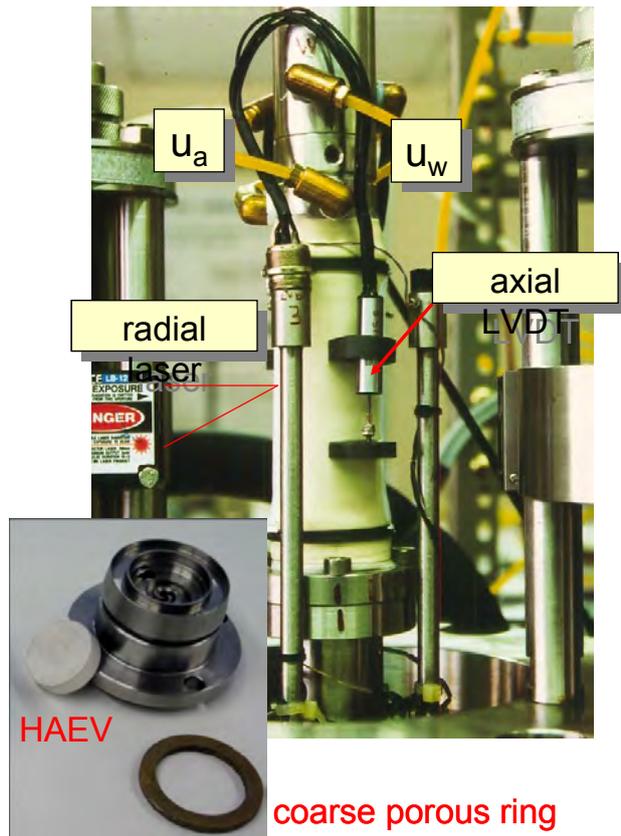
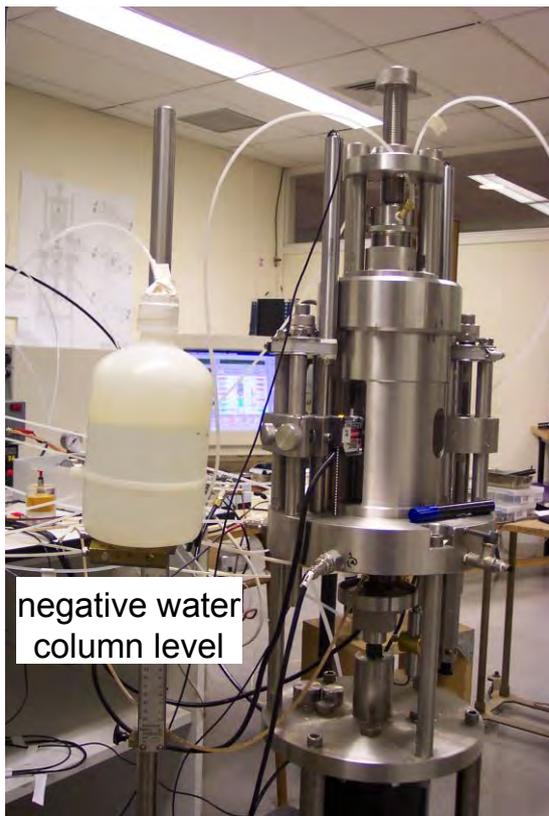
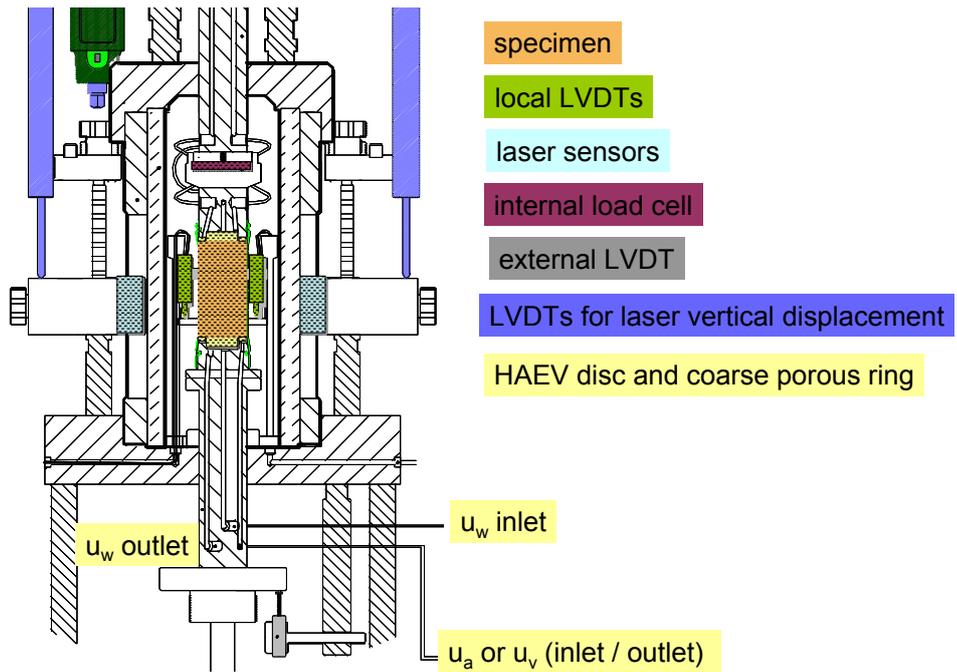


図 4.2.1-1 サクション制御可能な三軸試験装置

(3) 供試体

試料として、ベントナイト（クニゲル V1：クニミネ工業製）と、3号および5号ケイ砂を乾燥重量比で1:1に混合した砂を用いた。供試体は、ベントナイトと砂を乾燥重量比で7:3、含水比17%となるように蒸留水とともに混合し、乾燥密度1.60Mg/m³に静的に締固めて作製した（初期飽和度64.7%）。なお、供試体は試験時間を短縮するため標準的な寸法より小さい直径38mm、高さ40mmの供試体とした。

(4) 試験方法・手順

2水準の一定サクシヨン（400kPa および 800kPa）、3水準の一定ネット応力 600kPa, 900kPa, 1200kPa の側圧（側方ネット応力）条件で応力制御により排水三軸圧縮試験を行った。軸応力の載荷速度は過年度の試験と同様に0.05kPa/minとした。

試験ケースを表4.2.1-1に示す。

表 4.2.1-1 三軸試験ケース

サクシヨン s (kPa)	拘束ネット応力（側圧） (kPa)	軸圧縮方法
400	600	応力制御（0.05kPa/min）
	900	
	1200	
800	600	応力制御（0.05kPa/min）
	900	
	1200	

(5) 実施結果と考察

1) 内部摩擦角と粘着力

図4.2.1-2に三軸圧縮試験の結果として得られた最大軸差応力 (q_{1s}) と平均ネット応力 (p'') の関係を示している。ここに、試験は応力制御のため次節で示すように軸差応力ピーク（軟化挙動）は発現しないので、軸差応力がほぼ一定となる比較的大きなひずみ（軸ひずみが15%~20%）での軸差応力と平均ネット応力値を採用した。図の破線は最小二乗近似直線であり、その傾き M はサクシヨン $s=400\text{kPa}$ 、 $s=800\text{kPa}$ のそれぞれで、 $M=0.415$ 、 $M=0.414$ である。図より、最大軸差応力 (q_{1s}) と平均ネット応力 (p'') は線形関係にあること、また、その傾きはほぼ等しく、有効内部摩擦角 ϕ' はサクシヨン s に依存しないことがわかる。ここに、 M と ϕ' の関係は下記の通りである。

$$M = \frac{6\sin\phi'}{3 - \sin\phi'} \quad (1)$$

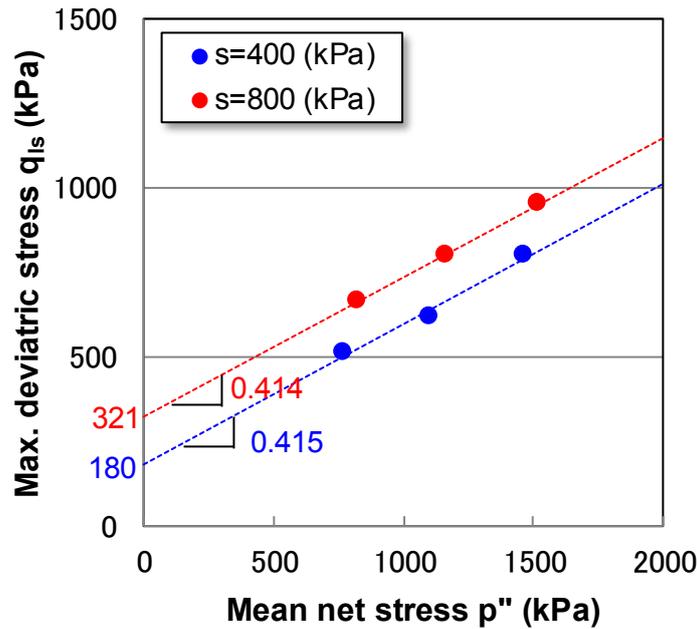


図 4.2.1-2 三軸試験より得られた最大軸差応力 (q_{1s}) と平均ネット応力 (p'') の関係

一方で、高治ら[12]が行った同仕様のベントナイト・ケイ砂混合土に対する飽和非排水三軸圧縮試験によると、軸差応力ピーク値から算定された有効内部摩擦角は 16.6° ($M=0.63$) と報告されている。本試験と同程度の軸ひずみ (15%) における応力から有効内部摩擦角を算定し直しても 15.9° であり、今回のサクシオン制御三軸試験結果の $\phi=11.2^\circ$ (サクシオンに依らず一定) と整合しない。原因として、サクシオン制御の有無の他に、排水条件、ひずみ速度、供試体寸法などの違いが考えられるが明らかではない。

次に、試験結果に基づいて粘着力 c のサクシオン依存性を定量化する。

Mohr-Coulomb の破壊基準に基づけば、最大軸差応力 (q_{1s}) と平均ネット応力 (p'')、有効内部摩擦角 ϕ' 、粘着力 c' の関係は以下の通りである。

$$q_{1s} = \frac{6 \cdot \sin\phi'}{3 - \sin\phi'} p'' + \frac{6 \cdot c'(s) \cdot \cos\phi'}{3 - \sin\phi'} \quad (2)$$

式(1)を考慮すれば、

$$q_{1s} = M p'' + M c'(s) \cdot \cot\phi' \quad (3)$$

そこで、 $M=0.415$ ($\phi'=11.2^\circ$) 一定として、図 4.2.1-2 の切片値から式(3)に基づいて c' を求めた結果を図 4.2.1-4 に示す。直線は、飽和の場合 ($s=0$) には粘着力 $c'=0$ と仮定して求めた最小二乗近似線を示している。図より粘着力はサクシオンに比例して増大し、 $c'=0.20s$ で近似できるのがわかる。

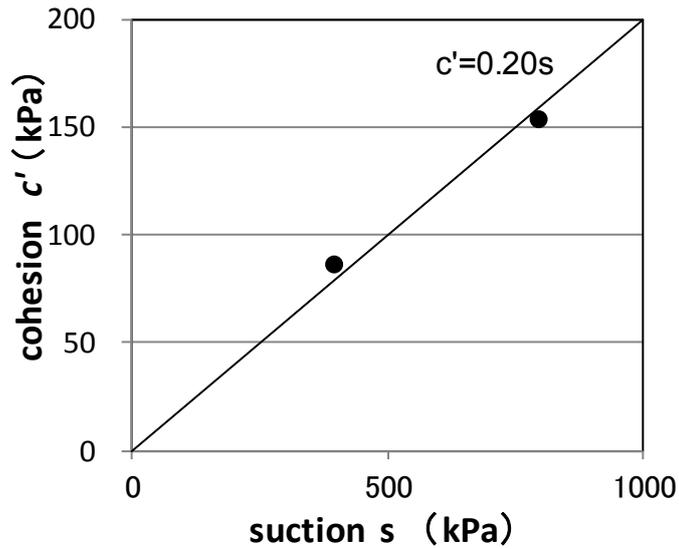


図 4.2.1-3 粘着力のサクシオン依存性

以上から以下のことが言える。

- ・ 今回の試験条件の範囲 ($s < 800\text{kPa}$ 、 $600 < p'' < 1200\text{kPa}$) では内部摩擦角 ϕ' はサクシオンの影響を受けない。
 - ・ 今回の試験条件の範囲では見かけの粘着力 c' はサクシオンに比例する ($c' = 0.20s$)
- 上記の特性は Alonso et al. のモデル (バルセロナベーシックモデル) [9] と一致する

2) 応力～ひずみ関係

三軸試験から得られた軸ひずみ～偏差応力関係を図 4.2.1-4 に示す。応力制御試験のため試験終了時点 (軸ひずみ 15～20%) が軸差応力の最大となるが、サクシオン 400kPa では軸ひずみ 7%程度まで、サクシオン 800kPa では軸ひずみ 13%程度まではひずみ硬化挙動を示し、その後ほぼ一定の軸差応力となるのが見られる。

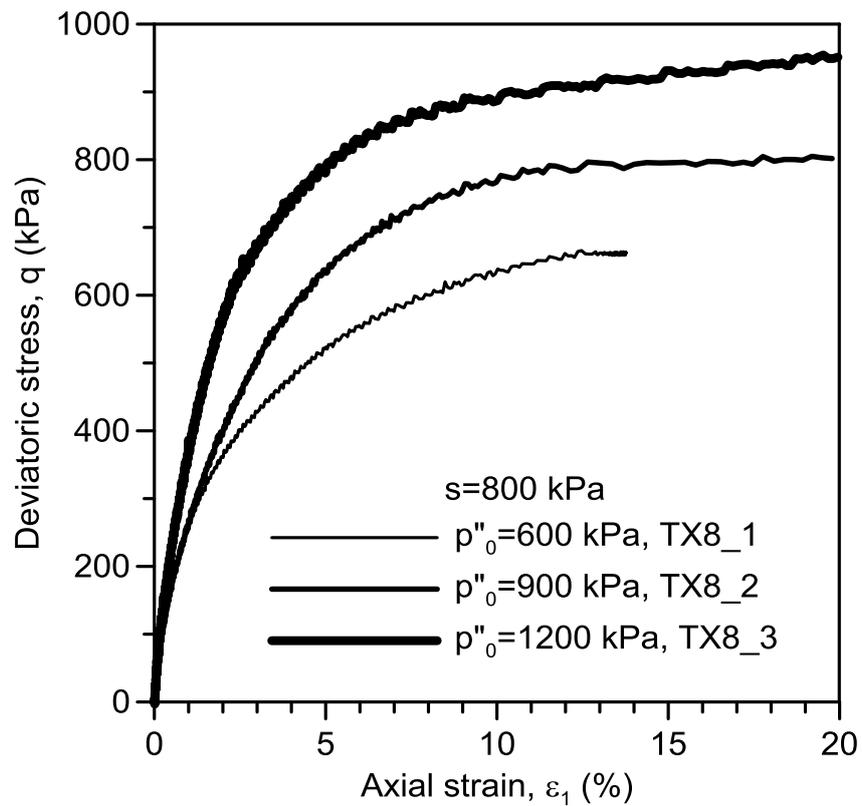
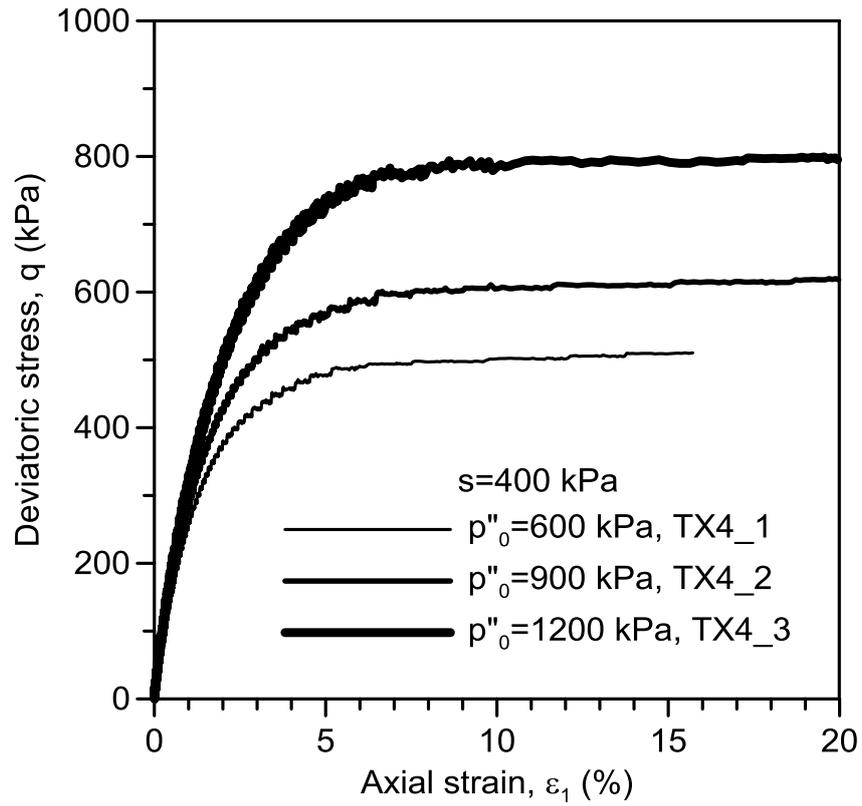


図 4.2.1-4 三軸試験結果：軸ひずみ～偏差応力関係

4.2.2 人工バリアシステムのうち緩衝材（ベントナイト系材料）界面を模擬したガス移行挙動評価試験

(1) 実施項目

平成 27 年度に実施した「ガス移行連成挙動評価手法の開発」[16]においては、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。具体的には、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、表 4.2.2-1 に示すデータを取得・整理のうえ、その取得目的の観点からベントナイト中のガス移行挙動を評価した。

表 4.2.2-1 ガス移行試験の検討項目

	項目	取得データ	目的	備考
①	試験中のデータ取得	ガス注入圧の経時変化	ガス侵入圧・破過圧（生じた場合）の把握	二相流特性の把握
		ガス注入量の経時変化	透気特性の把握	
		水の排出量の経時変化	透水特性の把握	
②	試験終了後のデータ取得	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	供試体の解体調査により実施

上記と併せたこれまでの検討成果[14][15]から、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。

上記の課題解決を目的に、昨年度は同一材料界面等を模擬した供試体による予備的なガス移行試験（要素試験、界面幅＝1 mm）を実施して、材料界面のガス移行に係る基本特性を評価した。

作製した模擬供試体は図 4.2.2-1 に示すイメージの通り、上部緩衝材施工において想定されるような「ブロック定置方式」で生じ得る同一材料界面（鉛直界面）を対象とした。

検討の結果、界面幅＝1 mm での飽和供試体について、界面のガス移行特性は基質部とほぼ同等（界面が無い供試体のガス移行特性とほぼ同等）となることが分かっているが、この要因については、供試体の飽和膨潤過程で界面が閉塞することで、界面部の特性が基質部と同等になったためである可能性が示唆されている[16]。

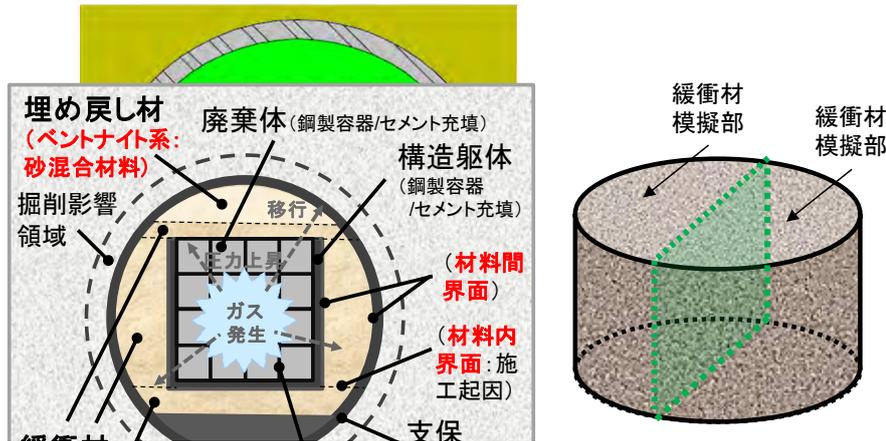


図 4.2.2-1 人工バリアにおける現実的な施工手順（ブロック定置方式）[7]を考慮した上部緩衝材の同一材料界面（緑色の太線）と界面模擬供試体のイメージ

そこで今年度は、予備試験[16]の成果を基に、界面性状の依存性に着目した検討を行った。

具体的には、図 4.2.2-1 に示した施工手順の場合、上部緩衝材ブロック定置後の界面幅は現実的に均等にはならない（界面幅のバラつきが生じる）ことを考慮して、界面幅をパラメータとしたガス移行特性評価試験を行った。

検討項目については表 4.2.2-2 に示す通りとした。

表 4.2.2-2 界面を模擬したガス移行試験（界面性状の影響評価試験）での検討項目

検討項目	実施項目	取得データ	目的	備考
① 緩衝材／緩衝材界面のガス移行特性の把握 ② <u>界面幅をパラメータとした特性評価</u>	飽和供試体作成	水の排水量の経時変化	飽和膨潤過程での界面閉塞状況の把握	界面幅（パラメータ）の影響程度の把握
	試験中のデータ取得	ガス注入圧の経時変化	ガス侵入圧・破過圧（生じた場合）の把握	二相流特性等の把握
		ガス注入量の経時変化	透気特性の把握	
			水の排出量の経時変化	透水特性の把握
	試験終了後のデータ取得	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	供試体の解体調査により実施

なお、検討においては以下の点に着目し、適正に対処した。

- ・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

(2) 試験装置

試験装置については、平成 27 年度の検討に使用したガス移行挙動評価試験装置を用いた。

表 4.2.2-3 に試験装置の構成および必要とされる機能を、図 4.2.2-2 にガス移行試験（ガス注入過程）の実施概念図を示す。

表 4.2.2-3 ガス移行試験装置の構成および試験の実施において必要とされる機能

構成	必要とされる機能
カラム試験容器	容器寸法：φ60mm、高さは最大 12.5mm・200mm まで対応可能なこと 容器概要：体積ひずみ拘束型であること 材質：ステンレス (SUS316 他) であること 計測項目：全応力、ガス圧が計測可能なこと 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なこと
ガス注入装置	注入系統：1 系統以上を有すること 最大注入圧：5.0MPa まで対応可能なこと 計測項目：注入圧力、注入ガス量が計測可能なこと 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・同時に実施可能なこと

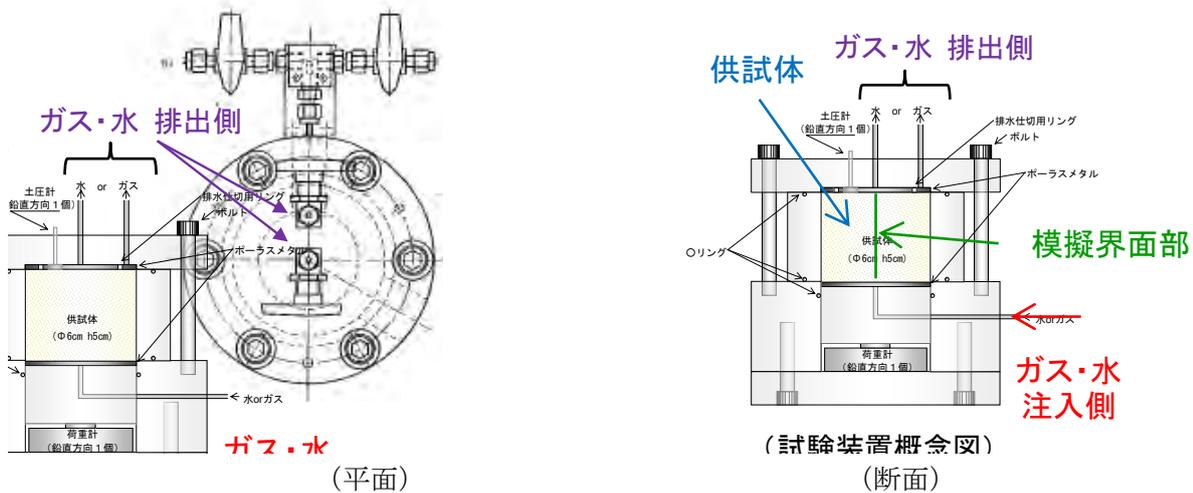


図 4.2.2-2 ガス移行試験装置を用いた供試体（界面を模擬）へのガス注入／排出のイメージ

(3) 供試体および試験条件

表 4.2.2-4 に緩衝材供試体の諸元を示す。

表 4.2.2-4 供試体の諸元

項目		仕様
寸法		φ 60 mm × H 25 mm
材料		クニゲル V1
初期 状態	含水比	32.9%
	乾燥密度	1.360 Mg/m ³
	湿潤密度	1.807 Mg/m ³
	飽和度	90.0%
供試体中の界面幅		1mm、および 3mm

※ φ 60mm 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。

表 4.2.2-5 に供試体の試験条件と供試体数を示す。界面を有する供試体の飽和方法に関しては、平成 27 年度実施の初期飽和方法に準じて、初期の通水に界面が閉塞しその後の飽和過程に対して、「卓越した水みち」にならないことを確認する。

表 4.2.2-5 供試体の試験条件と供試体数

供試体条件	予備試験	飽和試験(解体)	飽和試験 + ガス移行(解体)
界面幅 1mm	平成 27 年度 実施済み	1	1
界面幅 3mm	1	1	1

(4) 試験方法・手順

ガス移行挙動評価の手順を図 4.2.2-3 に示す。試験体は同時に 2 ケ作製し、同じ時間経過で飽和確認まで進行した後、1 つの供試体はガス移行試験に、残りの供試体については、この段階で解体調査して、ガス移行試験開始時の初期状態を把握する手順とした。

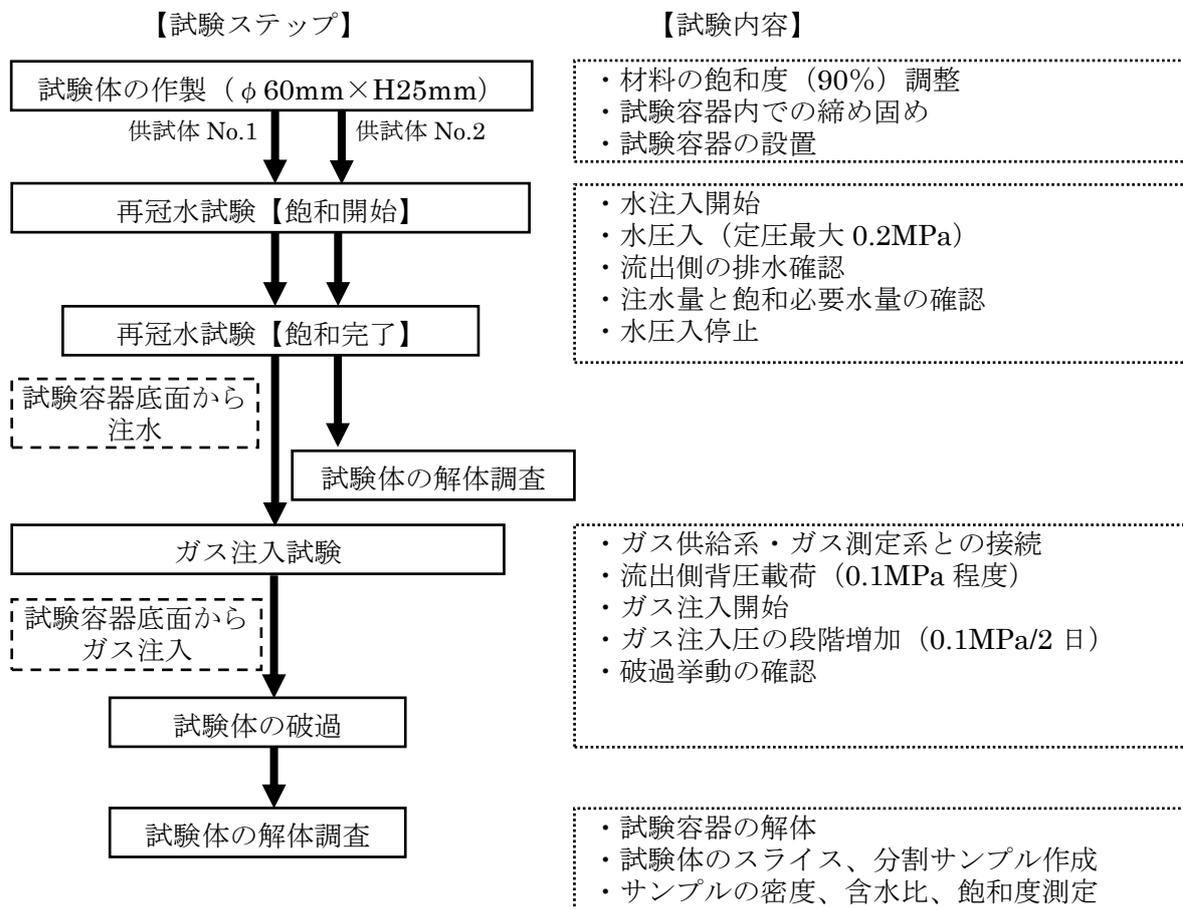


図 4.2.2-3 ガス移行挙動評価試験の流れ

供試体の作製手順を図 4.2.2-4 に示す。モールドの中央に界面用の厚さ 1mm（または 3mm）のスリット作製用スペーサーを設置し、その両側に含水比を調整したベントナイトを充填した後、静的載荷で上面から圧縮成型する。締固め時の載荷速度は 1mm/min の一定載荷速度で圧縮成型する。締固めは 2 層に分けて行い、1 層目を所定の高さまで締め固め後、含水比調整済みのベントナイト試料を再度投入し、1 層目と同様に静的締固めを行い、供試体の作製を終了する手順とした。

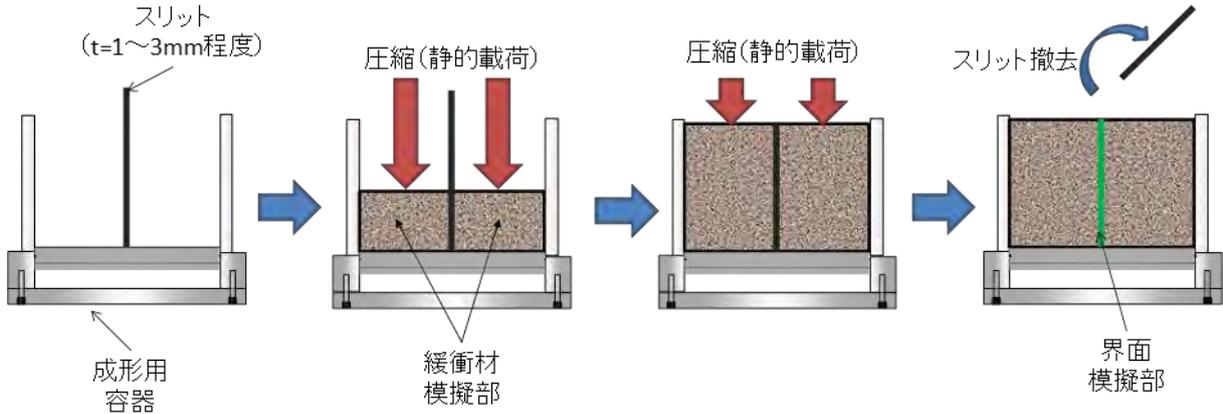


図 4.2.2-4 供試体の作製手順

供試体の飽和を確認した後、供試体下面の注水経路をガス注入経路に切り替えて、ガス移行試験に移行する手順とした。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、供試体の排出側からの水の逆流を防止することと、供試体内応力の急激な変化を避ける観点から、図 4.2.2-5 の通りとした。

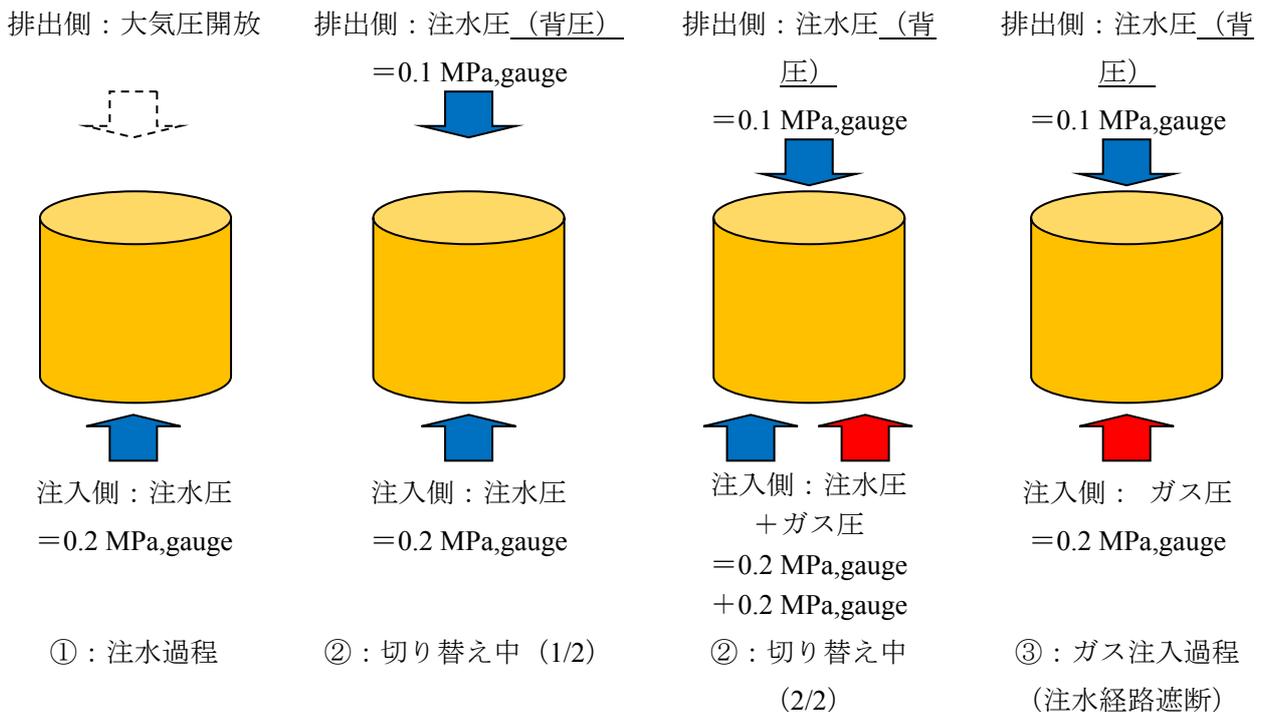


図 4.2.2-5 注水過程からガス移行過程への切り替え手順（案）

図 4.2.2-6 にガス注入過程の昇圧方法を示す。注水による供試体の飽和過程完了後、ガス注入は、0.1MPa/2 日の段階昇圧として、破過が発生するまで昇圧を継続する手順とした。

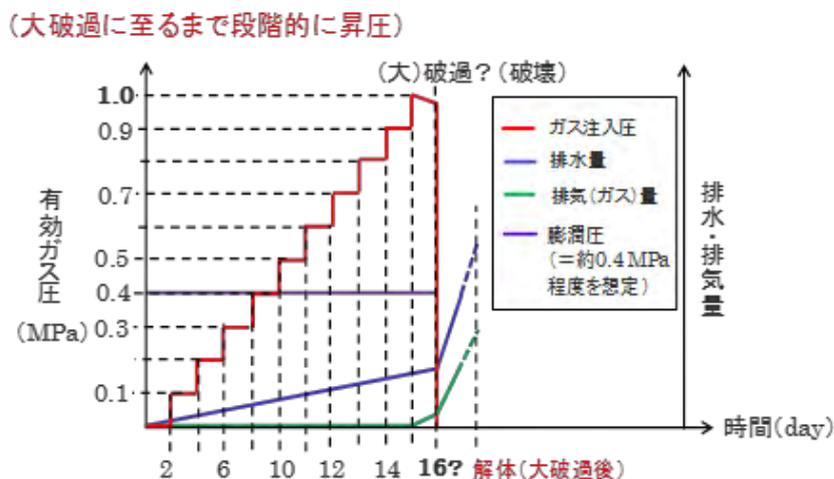


図 4.2.2-6 ガスの昇圧方法 (大破過に至るまで段階的に昇圧)

(5) 実施結果と考察

1) 実施概況

表 4.2.2-6 に試験の実施概況を示した。

再冠水時の初期注水方法に関する予備試験として、スリット 3mm 供試体に関して、昨年度実施したスリット 1mm の供試体の初期冠水方法に準じて、初期注水を行った後、一旦注水を停止して、スリット部が膨潤し閉塞することを確認した。

界面スリット 3mm の供試体については、2016 年 7 月 12 日に同時に 2 供試体を注水開始して、所定期間の飽和膨潤を行った後、1 つの供試体は解体調査し、残りの供試体はガス注入過程に進行してその後破過を確認した。

表 4.2.2-6 実施概況

		予備試験	界面(t3mm)		界面(t1mm)	
			初期注水 1 回 (4cm ³)	スリット 3mm No.1	スリット 3mm No.2	スリット 1mm No.1
注 水 飽 和	注水開始	2016/7/7	2016/7/12	2016/7/12	2016/10/20	2016/10/20
	排水確認		2016/8/22 (注水 41 日)	2016/8/22 (注水 41 日)	2015/11/10 (注水 21 日 目)	2015/11/10 (注水 21 日 目)
	排水量計 測開始		2016/8/24	2016/8/24	2015/12/1	2015/12/1
	飽和完了		2016/10/19 (注水 99 日)	2016/10/20 (注水 100 日)	2017/1/30 (注水 102 日)	2017/1/30 (注水 102 日)
ガ ス 注 入	バックプレッシャー 载荷			2016/10/20		
	ガス注入 開始			2016/10/21		
	ガス圧 昇圧速度			0.1 MPa/2 日		
	破過			2016/11/11		
	破過圧			1.1 MPa		
解 体	供試体 解体調査	2016/7/11	2016/10/19	2016/11/11		

2) 供試体の初期飽和方法に関する予備試験

a. 予備試験の目的

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）まで達してしまつた場合、供試体上面からも飽和が開始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つ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、注水方法を試行してスリットの閉塞状況を確認した。

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た。スリット幅 1 mm の試験条件については、昨年度初期注水で閉塞させる条件を検討して、スリット 1mm の供試体の飽和試験、ガス移行試験を行うことができた。ここでは、昨年度実施したスリット幅 1mm を再記述するとともに、同様の手法で行つたスリット幅 3mm の供試体の閉塞確認試験結果についても示す。

b. 試料条件

表 4.2.2-7 に予備試験供試体の試験条件を示す。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 4.2.2-7 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	70.69 cm ³
	スリットの幅	0.1 cm	0.3 cm
	スリットの体積	1.50 cm ³	4.50 cm ³
	ベントナイト部分体積 V	69.19 cm ³	66.19 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	119.59 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. スリット 1mm 予備試験結果 (1)

供試体を作製後、表 4.2.2-8 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 4.2.2-8 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

表 4.2.2-7 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 4.2.2-1 から写真 4.2.2-18 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。

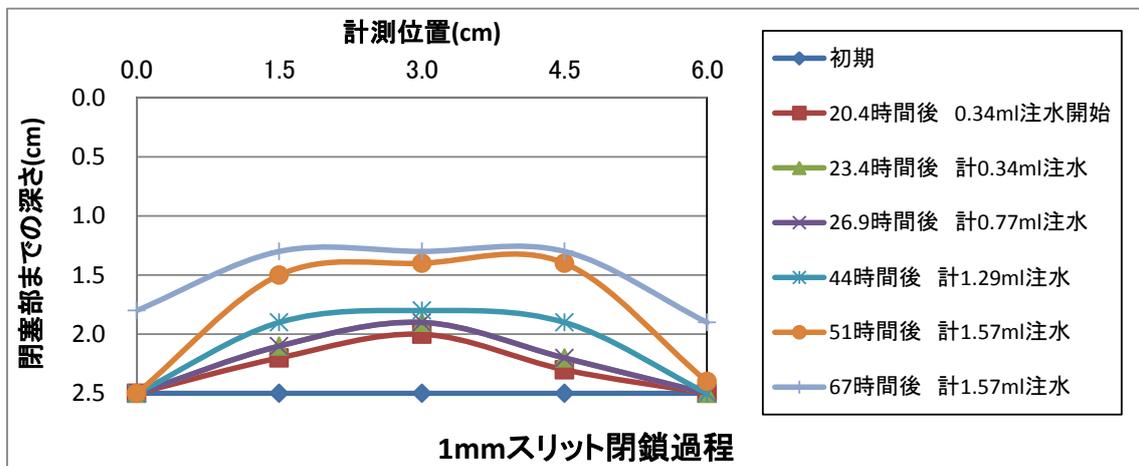


図 4.2.2-7 1mm スリットの閉塞過程



写真 4.2.2-1 注水前 排出側



写真 4.2.2-2 注水前 注入側



写真 4.2.2-3 注水状況



写真 4.2.2-4 注水過程



写真 4.2.2-5 注水過程



写真 4.2.2-6 注水過程

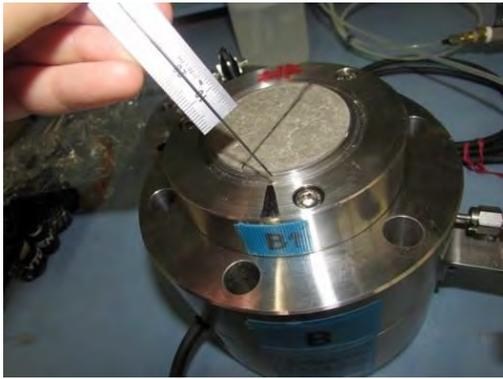


写真 4.2.2-7 閉鎖部計測

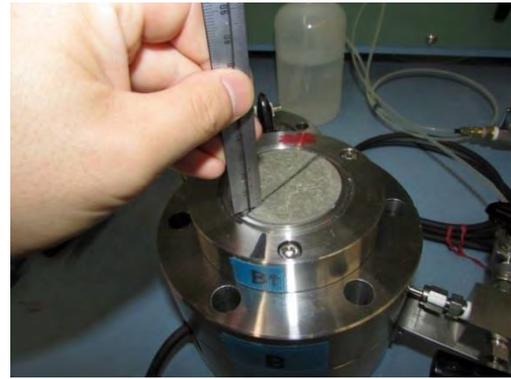


写真 4.2.2-8 閉鎖部計測



写真 4.2.2-9 試験後取り外し



写真 4.2.2-10 試験後 注入側



写真 4.2.2-11 試験後 側面



写真 4.2.2-12 試験後 側面



写真 4.2.2-13 解体位置



写真 4.2.2-14 断面 1



写真 4.2.2-15 断面 2



写真 4.2.2-16 断面 3



写真 4.2.2-17 断面 4



写真 4.2.2-18 全断面

d. スリット 1mm 予備試験結果 (2)

予備試験(2)では、供試体を作製後、表 4.2.2-9 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 4.2.2-9 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 4.2.2-8 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 4.2.2-8 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 4.2.2-19 から写真 4.2.2-35 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。

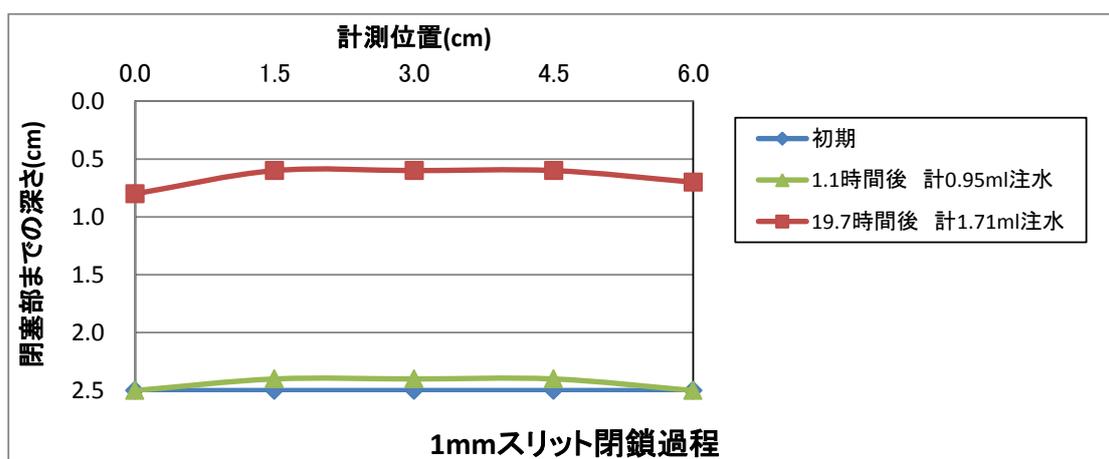


図 4.2.2-8 1mm スリット 2 分割注水 閉塞過程

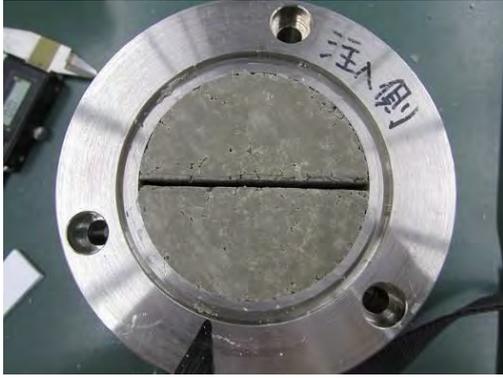


写真 4.2.2-19 注水前 排出側



写真 4.2.2-20 注水前 注入側



写真 4.2.2-21 注水状況



写真 4.2.2-22 注水過程



写真 4.2.2-23 注水過程



写真 4.2.2-24 閉鎖部計測



写真 4.2.2-25 試験後 排出側

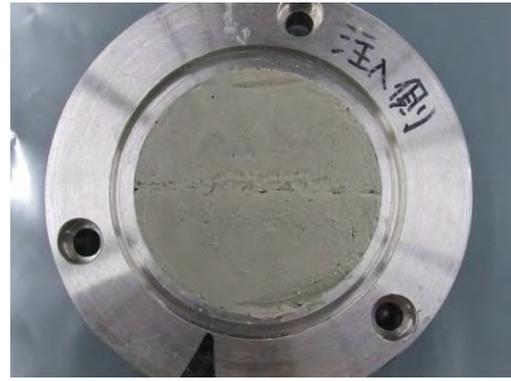


写真 4.2.2-26 試験後 注入側



写真 4.2.2-27 試験後 側面



写真 4.2.2-28 試験後 側面

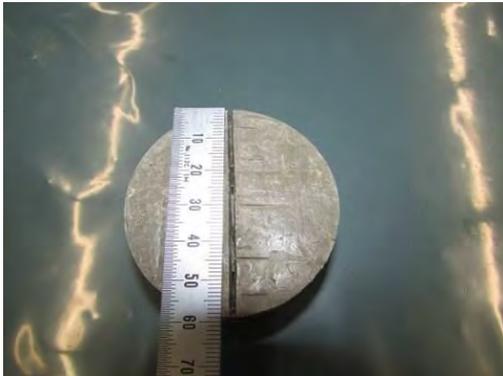


写真 4.2.2-29 解体位置



写真 4.2.2-30 断面 1



写真 4.2.2-31 断面 2



写真 4.2.2-32 断面 3



写真 4.2.2-33 断面 4



写真 4.2.2-34 断面 5



写真 4.2.2-35 全断面

e. スリット 1mm 予備試験結果 (3)

予備試験(3)では、供試体を作製後、表 4.2.2-10 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 4.2.2-10 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、1.2 cm 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 4.2.2-9 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(1.2 cm³)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 4.2.2-36 から写真 4.2.2-47 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、供試体作製後、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。

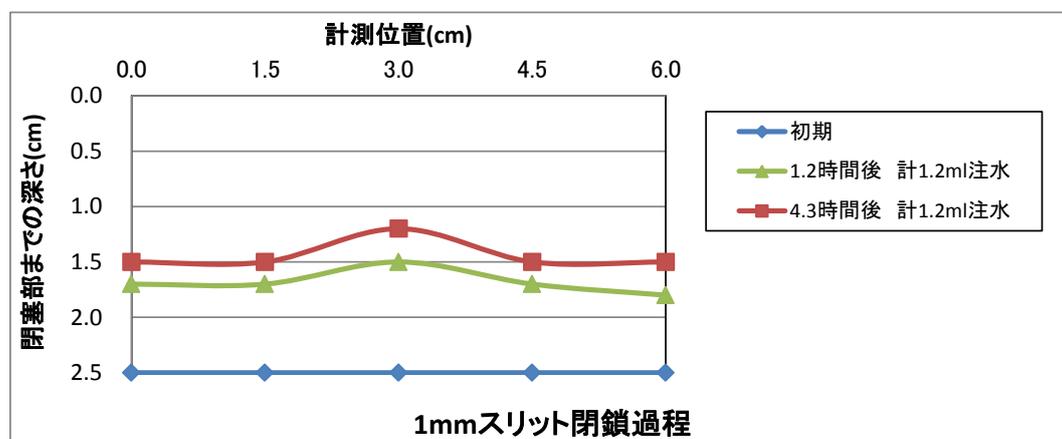


図 4.2.2-9 1mm スリット 12ml 注水 閉鎖過程

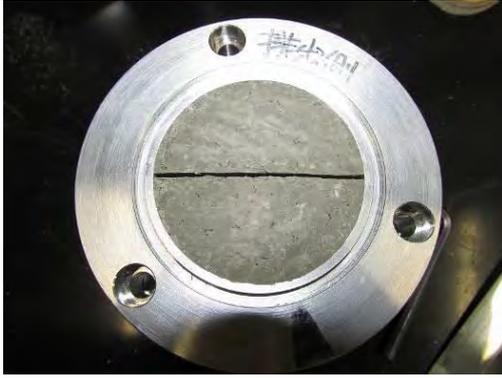


写真 4.2.2-36 注水前 排出側



写真 4.2.2-37 注水前 注入側

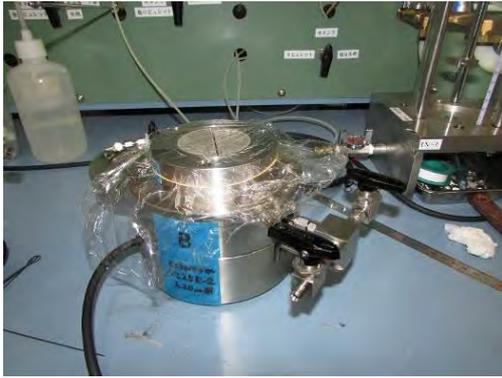


写真 4.2.2-38 注水状況



写真 4.2.2-39 注水過程



写真 4.2.2-40 注水過程



写真 4.2.2-41 閉鎖部計測

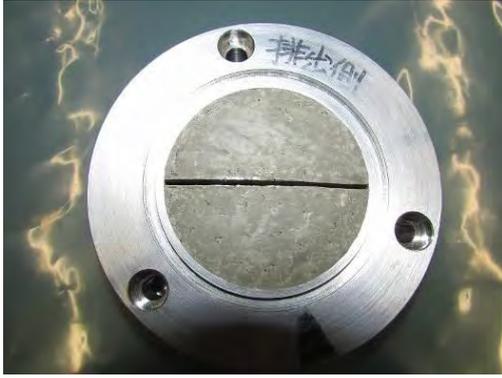


写真 4.2.2-42 試験後 排出側

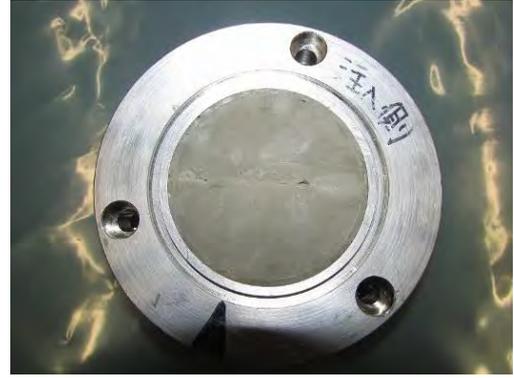


写真 4.2.2-43 試験後 注入側



写真 4.2.2-44 試験後 側面

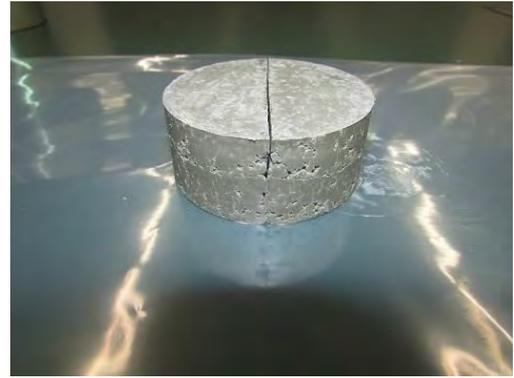


写真 4.2.2-45 試験後 側面

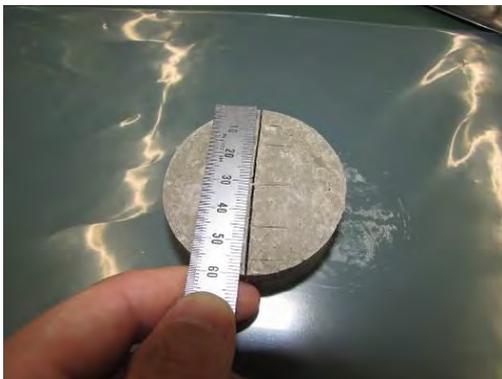


写真 4.2.2-46 解体位置



写真 4.2.2-47 断面 1

f. スリット 3mm 予備試験結果

スリット 3mm 供試体の初期通水予備試験では、供試体を作製後、表 4.2.2-11 に示す注水条件にて試験を進めた。

この注水条件は、スリット幅 1mm の供試体の予備試験においては最初の注水量が、スリット初期体積相当程度注水すると、スリット全体で十分な膨潤、閉塞が行われることを確認したため、スリット 3mm の供試体においても同様にスリット体積(4.5cm³)に近い 4.0cm³の初期注水を供試体下面より行い、初期通水によるスリット閉塞を確認した。

写真 4.2.2-48 から写真 4.2.2-53 に供試体の作製状況を示す。厚さ 3mm のプラスチック製のスペーサーを供試体中央部に設置して、含水比を調整したベントナイトをスペーサーの左右に投入後、載荷板にてその他の供試体作製と同様 1mm/min の静的圧縮成型にて供試体を作製した。1 つ鎖 25mm の供試体は 2 層に分けて作製した。供試体作製後、注水に伴う供試体表面の変形状況の確認用に 5mm 間隔にマーカーを設置し、その後透明アクリル板を上面にかぶせて、上面への膨張を拘束した状態とした。

写真 4.2.2-54 は、供試体下面より注水した直後の状況である。スリット内に水面が確認できる。写真 4.2.2-55 は、その後観察を継続して、スリット内に自由水がほぼベントナイト供試体に吸収された状況を示したものである。供試体はスリット上面を除いて膨潤して閉塞している状況が確認できた。その後約 16 時間経過後、自然水頭で注水（水頭差約 30 cm）し、供試体上面からの漏水無を確認し、自然水頭で通水を継続し、4 日後通水飽和時の通水圧 0.2MPa を載荷して、変化ないことを確認し、予備試験を終了した。写真 4.2.2-56～写真 4.2.2-59 は、予備試験後の供試体の状況である。供試体下面（通水側）では、空隙が特に残置せずスリット部分の閉塞状況にあること、供試体上面（排水側）では、スリットが深さ 5mm 程度閉塞していないものの、その他の部分では全面的に閉塞している状況が確認でき、供試体の初期注水方法としては、この方法で行うことにした。

表 4.2.2-11 スリット 3mm 供試体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、4.0 cm ³
2	27 分後	供試体上面より、スリット部の注水した自由水が供試体の膨潤に伴い消失を確認
3	16 時間後	自然水頭で注水（水頭差約 30 cm）
4	4 日後	注水圧を 0.2MPa 載荷。供試体上面（排水側）より漏水ないことを確認後、試験終了して、解体調査



写真 4.2.2-48 供試体の作製 (ガミースリットの設置)



写真 4.2.2-49 供試体の圧縮成型



写真 4.2.2-50 圧縮成型後の供試体 (排水側)



写真 4.2.2-51 排水側の評点設置 (5mm 間隔)

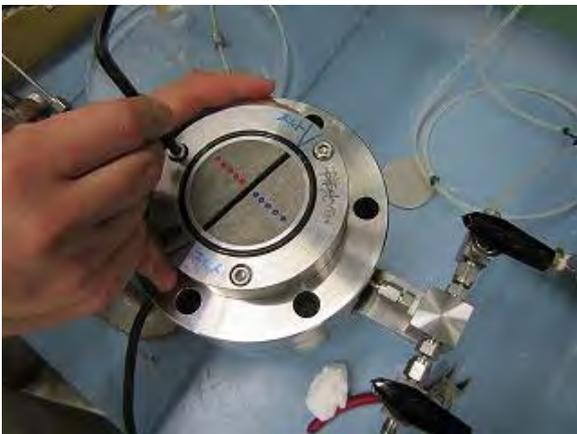


写真 4.2.2-52 装置への取付け



写真 4.2.2-53 排水側の拘束 (アクリル板設置)

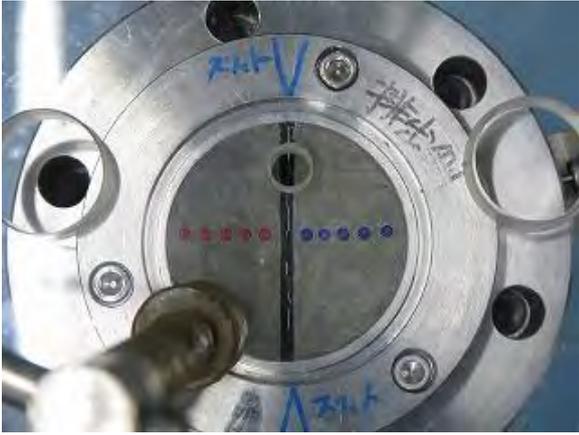


写真 4.2.2-54 注水直後

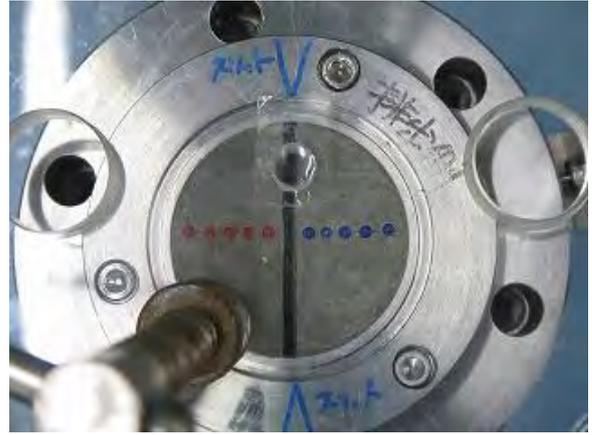


写真 4.2.2-55 スリット内の自由水が消失
(注水後 27 分経過)

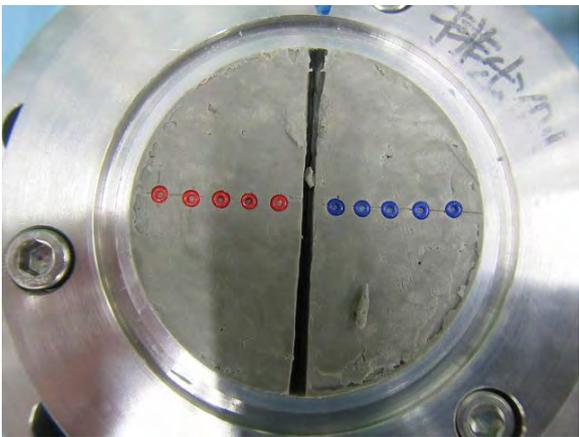


写真 4.2.2-56 予備試験後の排水側状況

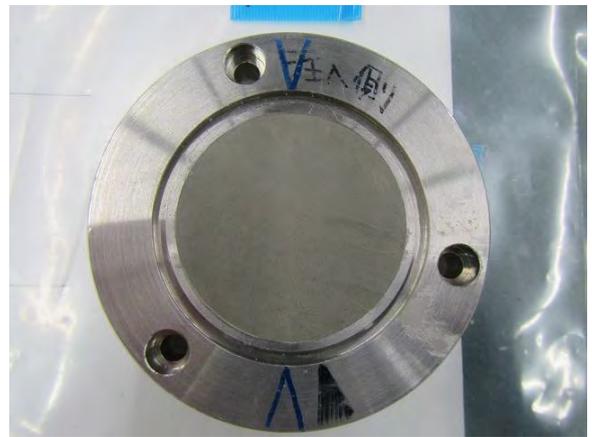


写真 4.2.2-57 予備試験後の注水側状況

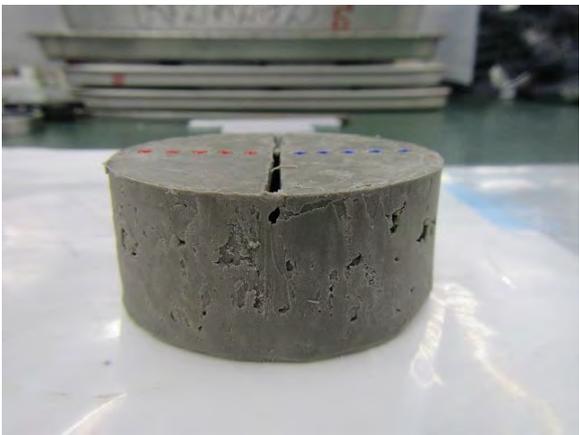


写真 4.2.2-58 予備試験後の側面状況



写真 4.2.2-59 予備試験後の中央断面状況

3) スリット 3mm 供試体作製（再冠水試験結果）

a. 試験条件

表 4.2.2-12 に予備試験供試体の試験条件を示す。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注水飽和を行った。

表 4.2.2-12 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	0.3 cm
	スリットの体積	4.50 cm ³
	ベントナイト部分体積 V	66.19 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	119.59 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. 供試体の作製

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、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、圧縮成形によって作製した。圧縮成形時の圧縮速度は 1mm/min である。写真 4.2.2-60 から～写真 4.2.2-65 に供試体の作製状況を示した。厚さ 3mm のスペーサーを設置して一旦静的締固め後、スペーサーを撤去する方法で、スリットを有する供試体を作製した。

図 4.2.2-10 に圧縮成形時の圧縮応力と圧縮応力に伴う供試体の変位量を示す。430~830 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、スペ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 4.2.2-60 供試体作製冶具

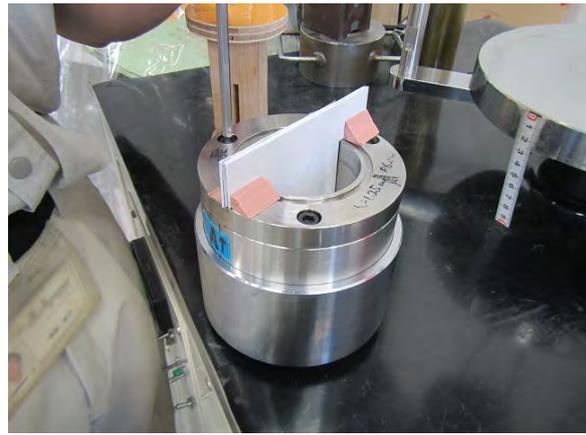


写真 4.2.2-61 スリット設置



写真 4.2.2-62 試料投入



写真 4.2.2-63 圧縮成型状況

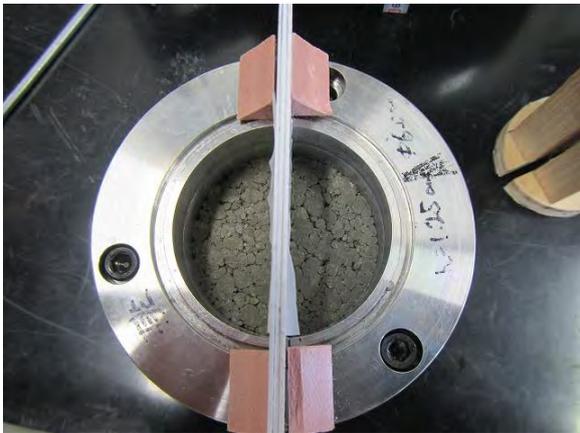
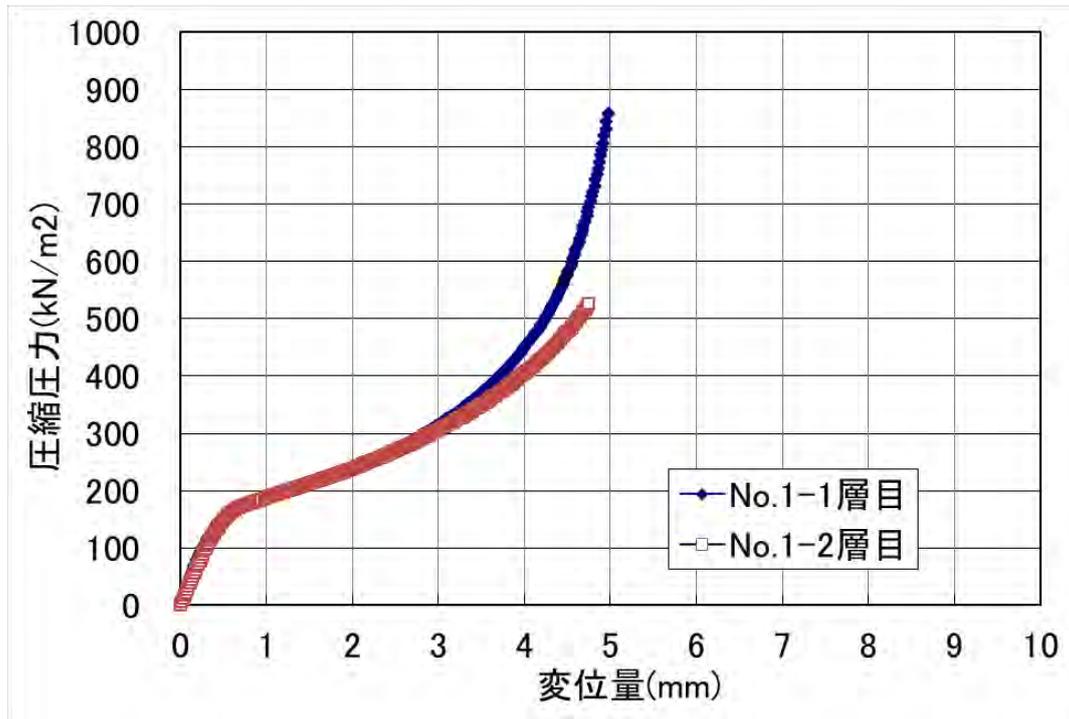


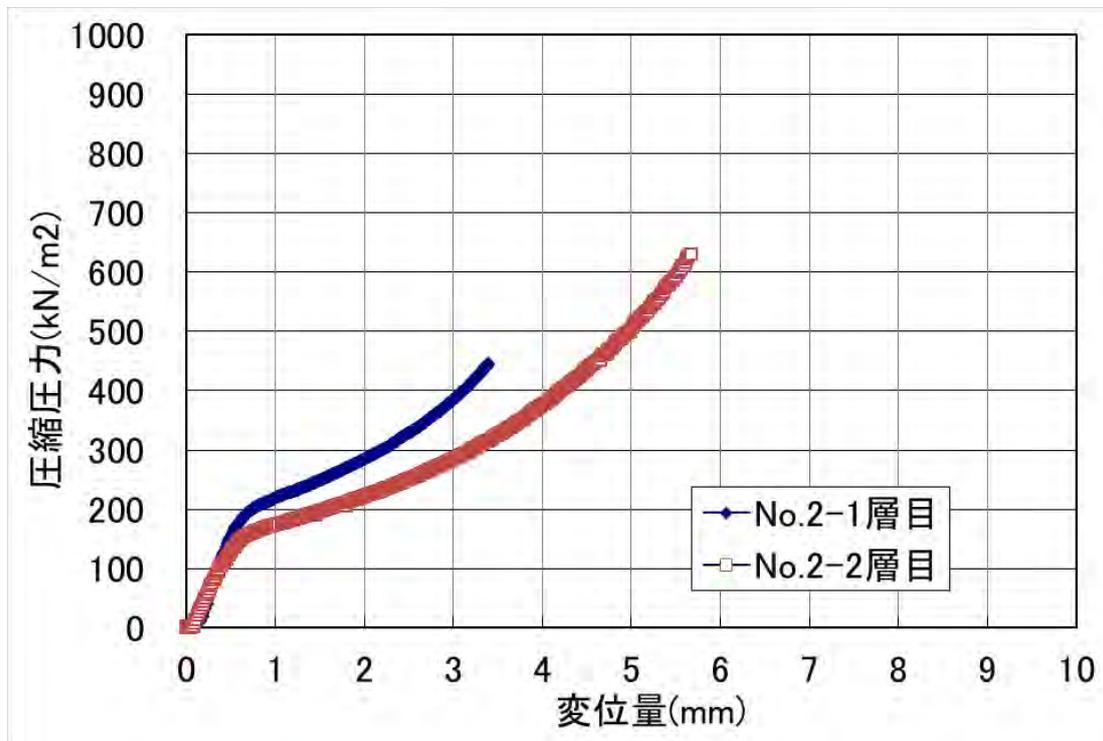
写真 4.2.2-64 1層目締め後



写真 4.2.2-65 供試体完成



(1)供試体スリット 3mmNo.1



(2)供試体スリット 3mmNo.2

図 4.2.2-10 圧縮整形応力

c. 実施状況

表 4.2.2-13 に試験の実施状況を示した。

スリット 3mm を有する 2 つの供試体については、2016 年 7 月 12 日に注水を開始し、その内 No.1 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 10 月 19 日に解体調査を実施した。一方、No.2 供試体については、翌日、飽和過程からガス注入過程に移行した。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進めた。

表 4.2.2-13 実施概況

		予備試験	界面(t3mm)		界面(t1mm)	
			初期注水 1 回 (4cm ³)	スリット 3mm No.1	スリット 3mm No.2	スリット 1mm No.1
注水飽和	注水開始	2016/7/7	2016/7/11	2016/7/11	2016/10/20	2016/10/20
	排水確認		2016/8/22 (注水 42 日)	2016/8/22 (注水 42 日)	2015/11/10 (注水 21 日)	2015/11/10 (注水 21 日)
	排水量計測開始		2016/8/24	2016/8/24	2015/12/1	2015/12/1
	飽和完了		2016/10/19 (注水 100 日)	2016/10/20 (注水 101 日)	2017/1/30 (注水 102 日)	2017/1/30 (注水 102 日)
ガス注入	バックプレッシャー 載荷			2016/10/20		
	ガス注入開始			2016/10/21		
	ガス圧昇圧速度			0.1 MPa/2 日		
	破過			2016/11/11		
	破過圧			1.1 MPa		
解体	供試体 解体調査	2016/7/11	2016/10/19	2016/11/11		

d. スリット 3mm 供試体の注水飽和過程

図 4.2.2-11、図 4.2.2-12 に飽和中の注水量、膨潤圧の経時変化を示した。また表 4.2.2-14 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大差ない。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）と差が少ないことが認められた。

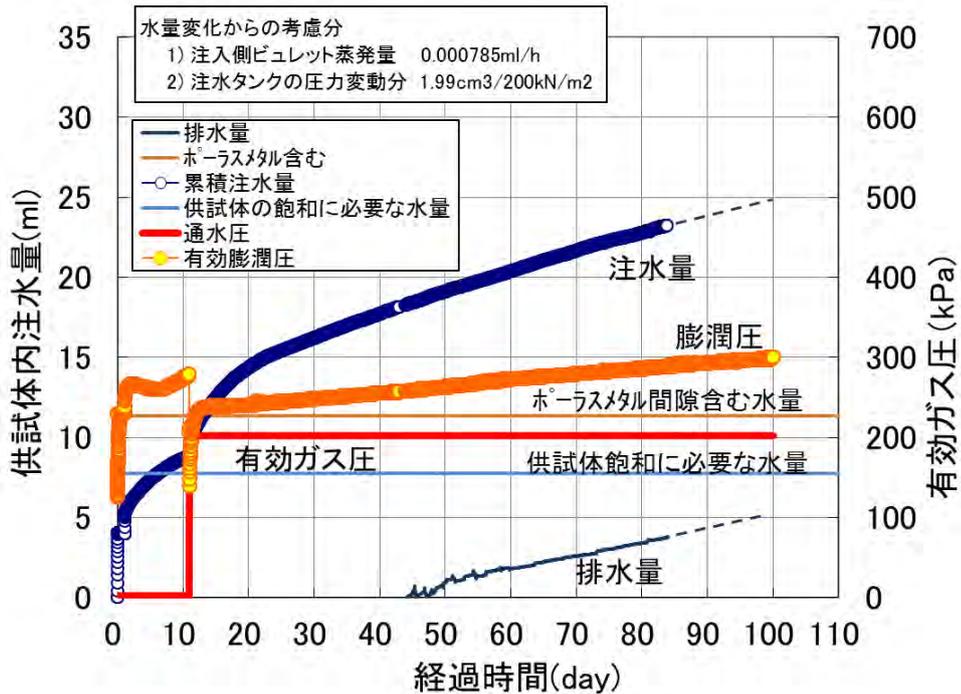


図 4.2.2-11 飽和過程の状況（供試体スリット 3mmNo.1）

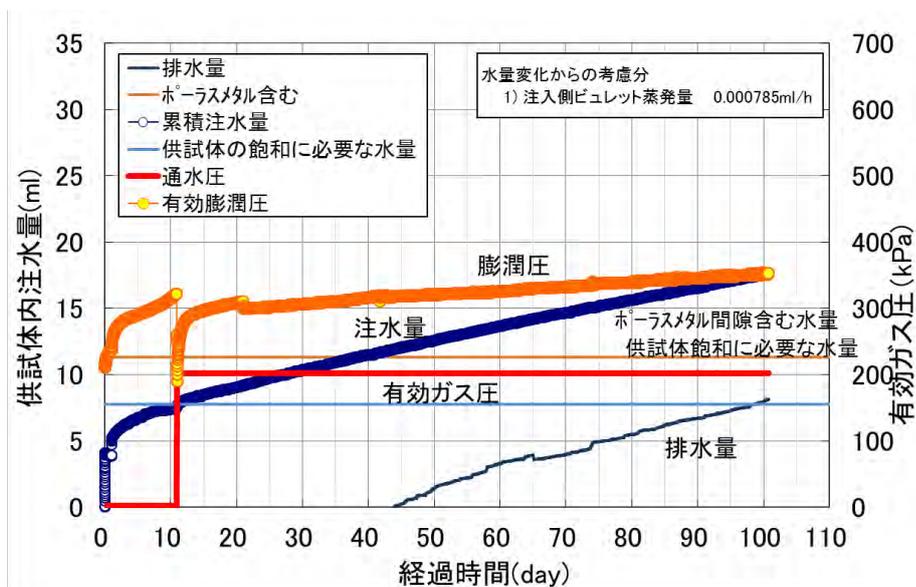


図 4.2.2-12 飽和過程の状況（供試体スリット 3mmNo.2）

表 4.2.2-14 スリット 3mm を有する供試体の膨潤圧

膨潤圧		スリット 3mm No.1	スリット 3mm No.2
有効膨潤圧	kPa	300	351
平均有効膨潤圧	kPa	326	
昨年度のスリット 1mm 予備試験の平均膨潤圧	kPa	300	

図 4.2.2-13、図 4.2.2-14 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る。

表 4.2.2-15 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がない供試体と大差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。

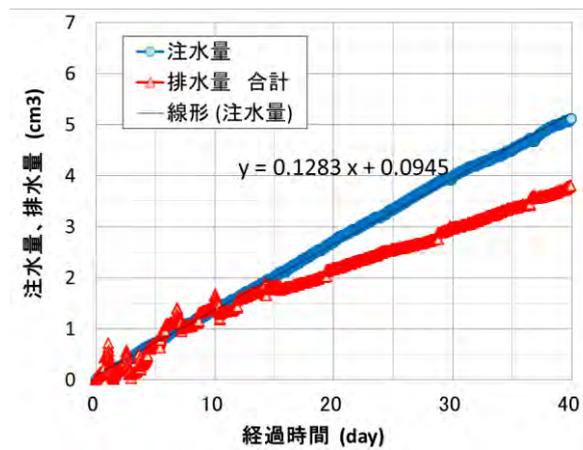


図 4.2.2-13 注水量と排水量の経時変化（スリット 3mm No.,1）

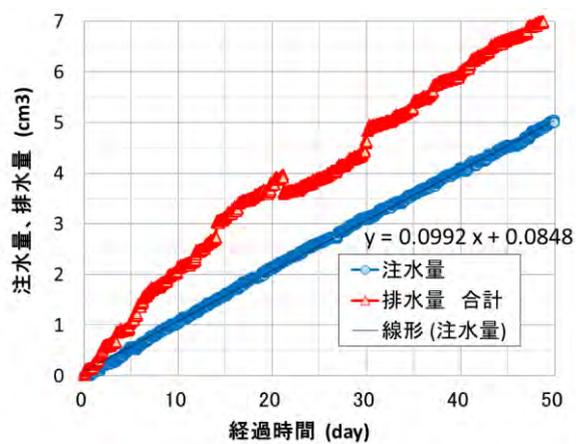


図 4.2.2-14 注水量と排水量の経時変化（スリット 3mm No.,2）

表 4.2.2-15 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.		スリット 3mm No.1	スリット 3mm 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	0.128	0.099
透水係数	m/sec	6.7 × 10 ⁻¹³	5.2 × 10 ⁻¹³
		平均値 6.0 × 10 ⁻¹³	

スリット 3mm No.1 供試体については、ガス注入試験前の初期状態（含水状況等）確認のため、表 4.2.2-16 および図 4.2.2-15 に示すように、深さ方向分割数：7 層、1 層ごとの分割数：11 分割、合計、77 ケに分割して、分割試料の厚さ、湿潤重量を計測した。

写真 4.2.2-66 から写真 4.2.2-81 に供試体 No.2 の解体状況を示す。

表 4.2.2-16 供試体の試験一覧（スリット 3mmNo.1）

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

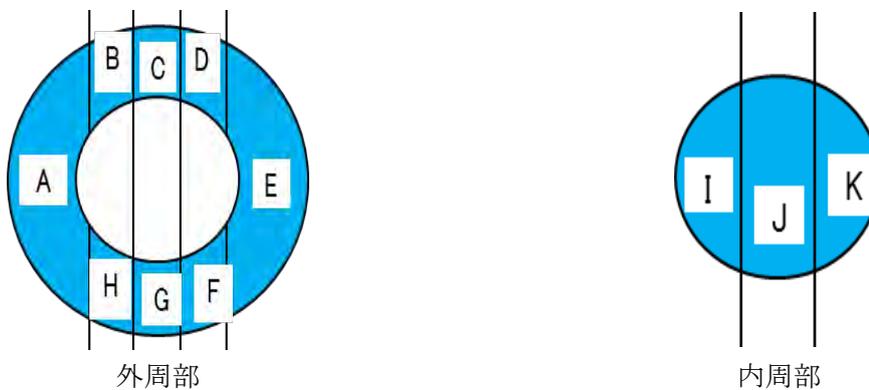


図 4.2.2-15 1 層ごとの分割

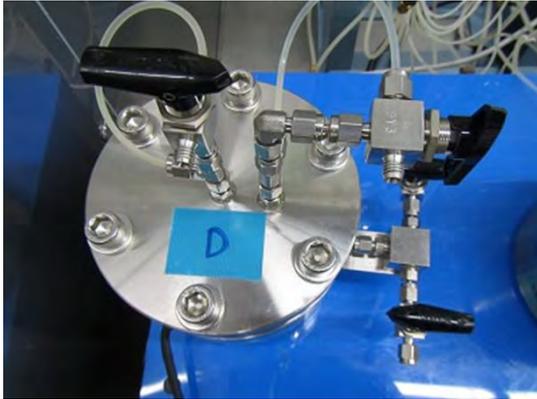


写真 4.2.2-66 供試体解体前

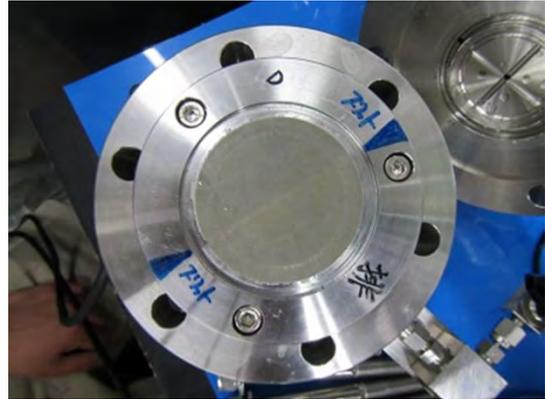


写真 4.2.2-67 供試体解体表面(排水側)

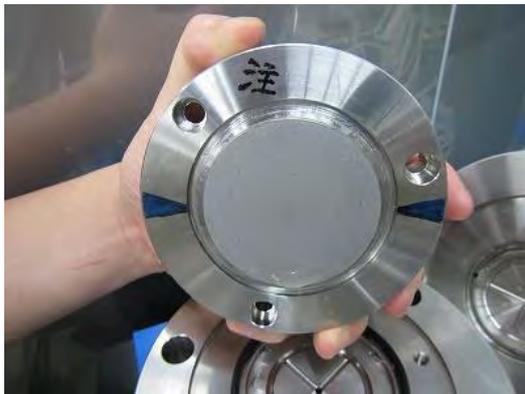


写真 4.2.2-68 供試体注水側



写真 4.2.2-69 供試体表面(排水側)

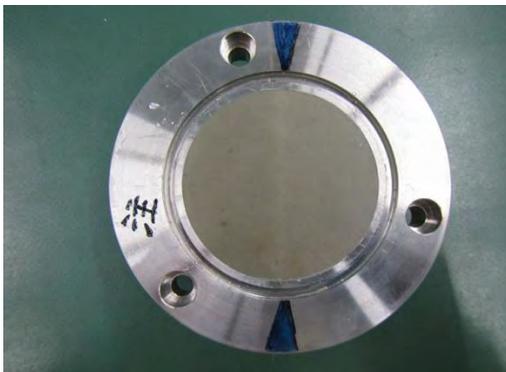


写真 4.2.2-70 供試体表面 (注水側)



写真 4.2.2-71 供試体の分割前



写真 4.2.2-72 供試体の中央部の分割

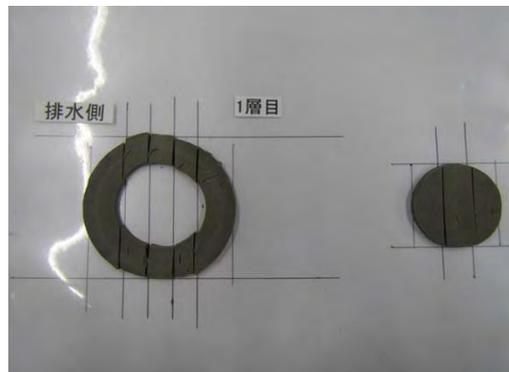


写真 4.2.2-73 供試体の細分(11分割)



写真 4.2.2-74 1-2層目の切断面(排水側)



写真 4.2.2-75 2-3層目の切断面(排水側)

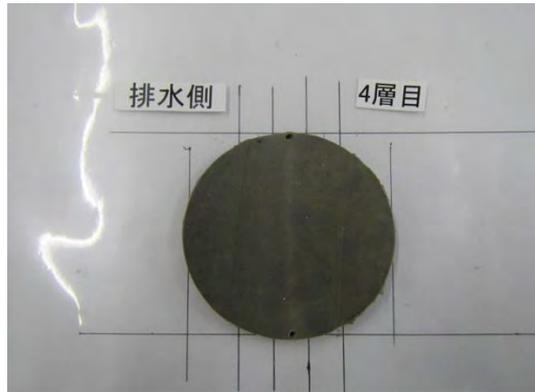


写真 4.2.2-76 3-4層目の切断面(排水側)

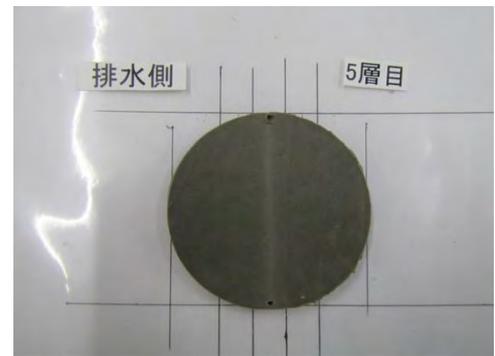


写真 4.2.2-77 4-5層目の切断面(排水側)

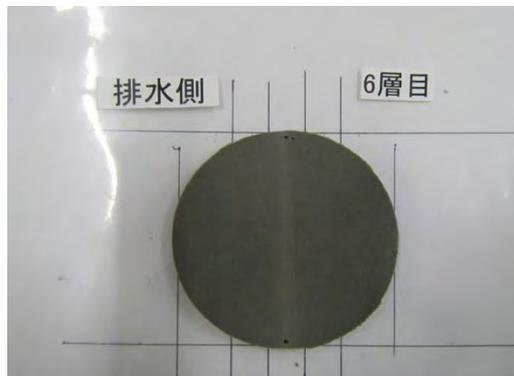


写真 4.2.2-78 5-6層目の切断面(排水側)

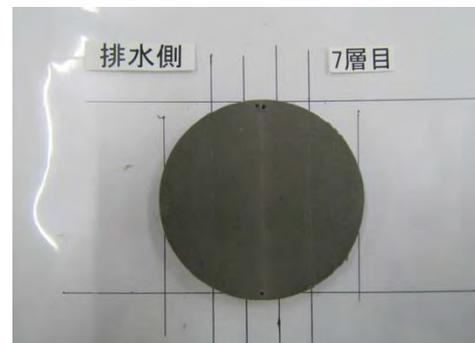


写真 4.2.2-79 6-7層目の切断面(排水側)



写真 4.2.2-80 7層目の表面(注水側)



写真 4.2.2-81 含水比試験後の試料

表 4.2.2-17 にスライスごとの試料重量と厚さを示した。最後に残る 7 染を除き、3mm 程度の厚さで合計 7 層に分割して計測した。

表 4.2.2-18 に供試体分割後の含水比の計測結果を示した。含水比の深度分布を図 4.2.2-16 に示した。注水側（供試体下面）の含水比が大きい傾向を示している。この傾向は界面がない供試体と同様の傾向である。供試体の加圧注水に伴い浸透力が供試体排水側に働きその結果浸透力が累積する排水側の方が圧密し、注水側が若干膨潤傾向で飽和する影響と考えられる。図 4.2.2-18 には、スリットの影響を検討するためにスリットからの距離ごと整理したものである。界面が飽和に伴い膨潤した影響が現れているものであるが、その影響範囲は界面周辺に限定されることがわかる。昨年実施したスリット幅 1mm の試験結果に比べても、スリットを含む供試体中央付近の含水比の増加はより顕著になっている。

表 4.2.2-17 供試体調査結果（分割層ごとの重量と高さ）（スリット 3mm No.1 供試体）

層	重量(g)		供試体高さ (mm)
	外周	内周	
1	11.20	5.97	3.27
2	9.47	4.85	2.69
3	10.49	5.28	3.02
4	13.19	6.52	3.89
5	10.44	5.04	3.00
6	10.66	5.21	3.02
7	18.93	9.27	5.76

表 4.2.2-18 供試体含水比（各分割ブロックの含水比）（スリット 3mm No.1 供試体）

層	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	36.7	42.1	48.9	43.6	37.2	37.0	46.9	38.5	39.4	41.4	36.6
2	36.8	37.7	47.4	40.8	37.9	38.0	40.4	37.3	36.7	40.6	34.3
3	37.9	41.9	45.5	43.1	38.4	41.8	45.8	40.3	38.0	40.9	38.1
4	39.0	43.3	48.3	40.5	39.1	40.4	48.3	37.9	38.6	44.4	40.0
5	37.7	35.2	50.0	41.5	37.3	41.5	48.8	41.0	36.4	44.8	38.0
6	37.4	40.4	43.8	36.1	37.2	39.6	51.3	37.9	39.4	46.9	40.0
7	40.3	43.6	58.7	48.4	40.6	43.5	55.7	43.8	43.7	53.7	43.8

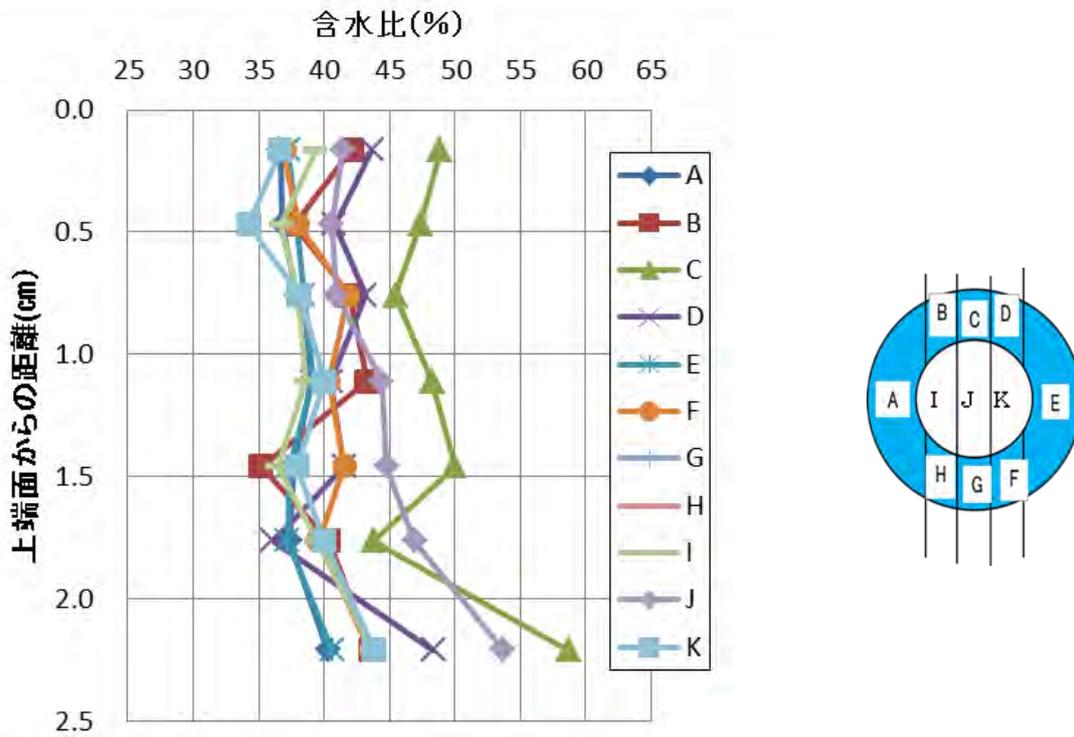


図 4.2.2-16 含水比の深度分布

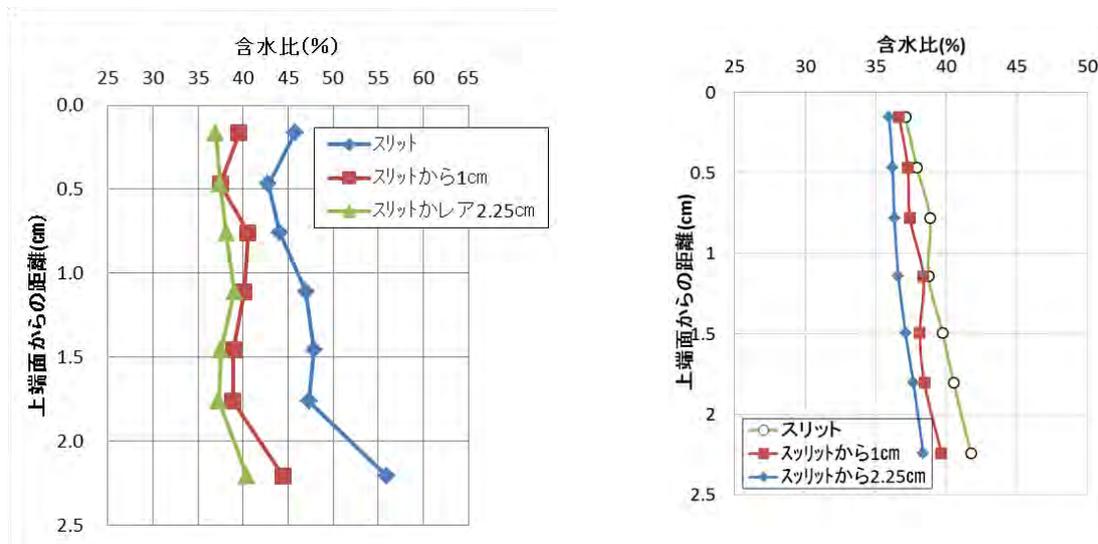


図 4.2.2-17 スリットからの離れと含水比の深度分布

図 4.2.2-18 スリット幅 1mm の既往の予備試験結果における含水比分布

b. 実施状況

表 4.2.2-19 に供試体 No.2 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 10 月 20 日にバックプレッシャー載荷過程の後、2016 年 10 月 21 日から有効ガス圧 0.1MPa の載荷より開始した。

表 4.2.2-19 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	2016/10/20
2	排水側から 0.1MPa のバックプレッシャーを載荷	2016/10/20
3	注入側のバルブを閉じて 24 時間放置	2016/10/20
4	注入ガス圧を 0.2MPa に設定して保持(バルブは閉鎖)	2016/1/21
5	注入側のバルブを開けて透気開始	2016/10/21
6	注入ガス圧を 0.3MPa (有効ガス圧 0.2MPa)に上昇	2016/10/23
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	2016/10/25
8	破過後、ガス注入停止。供試体解体	2016/11/11

c. 供試体へのガス注入過程

図 4.2.2-21～図 4.2.2-23 にガス注入過程の状況を示す。注水飽和完了後に 0.1MPa/2 日の昇圧速度でガス注入圧を増加したガス注入過程の有効ガス圧、排水量の経時変化である。ガス注入開始後 21 日目、有効ガス圧 1.1MPa で破過が発生した。ガス移行経路は初めに供試体外周部であったが、約 2 分程度の遅れで中央部からの排気経路でもガス排出を計測している。破過発生後約 25 分で排気量が 1000Nml/min に到達したため、電磁弁の作動によりガス供給が停止された。破過圧はスリットがない供試体の破過圧 1.52MPa に比べて若干小さく、また昨年実施したスリット 1mm の予備試験結果の破過圧 1.3MPa に比べても小さい状況を示した。

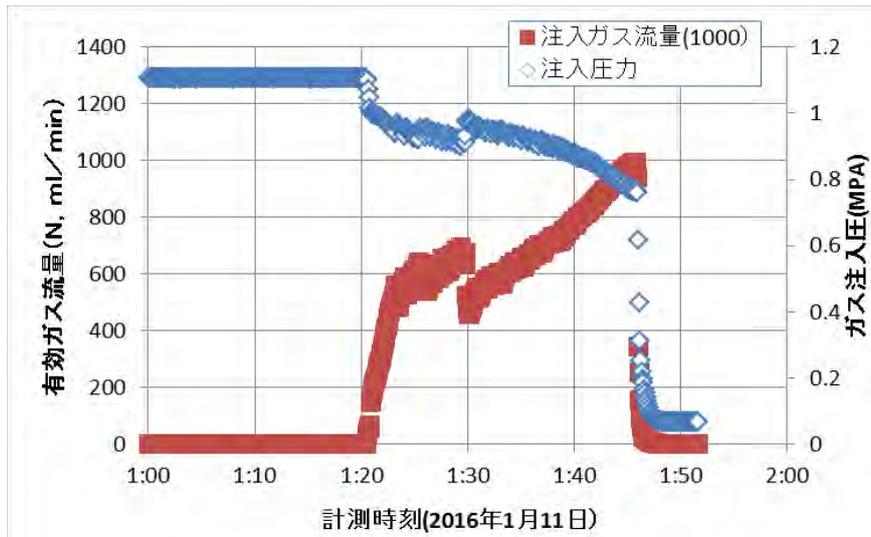


図 4.2.2-21 破過時の有効ガス圧、ガス注入量の経時変化

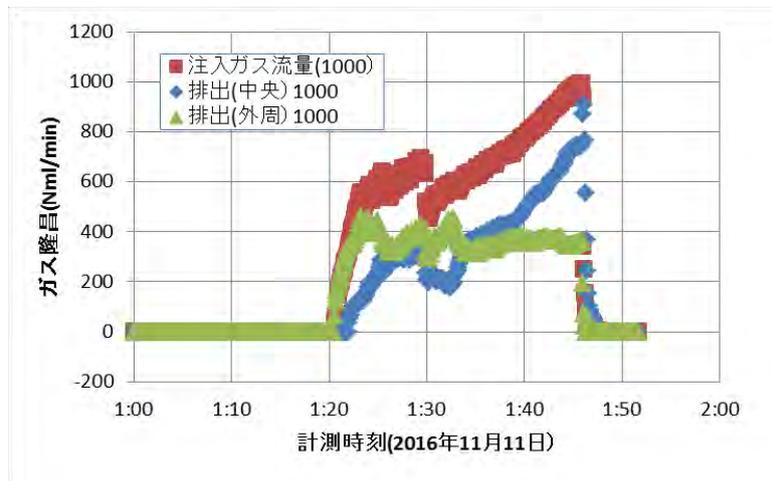


図 4.2.2-22 破過時の注入ガス量、排出ガス量の経時変化

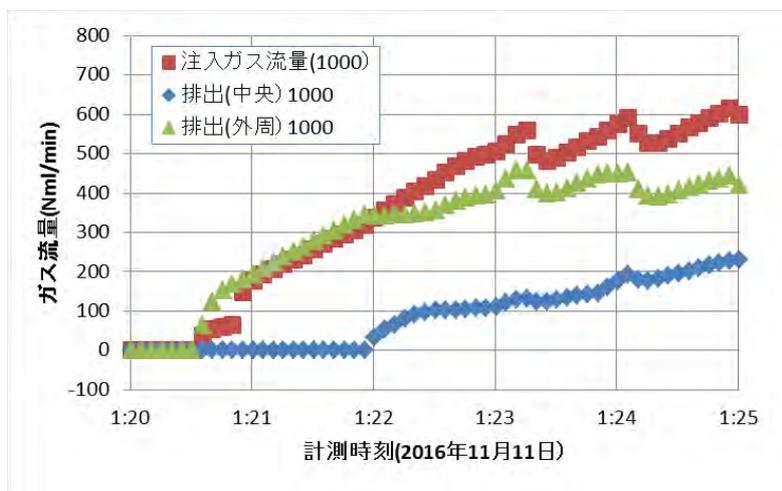


図 4.2.2-23 破過時の注入ガス量、排出ガス量の経時変化(拡大)

d. 破過後の供試体の解体調査

スリット 3mm No.2 供試体については、破過後の状態（含水状況等）確認のため、表 4.2.2-20、および図 4.2.2-24 に示すように、深さ方向分割数：7 層、1 層ごとの分割数：11 分割、合計、77 ケに分割して、分割試料の厚さ、湿潤重量を計測した。

写真 4.2.2-82 から写真 4.2.2-91 に供試体 No.2 の解体状況を示す。供試体の注入部、排出部ともスリット位置外周部でピンホールらしき空洞が確認できた。スリット部中央付近でのピンホールは確認できなかった。

表 4.2.2-20 供試体の試験一覧（スリット 3mmNo.1）

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

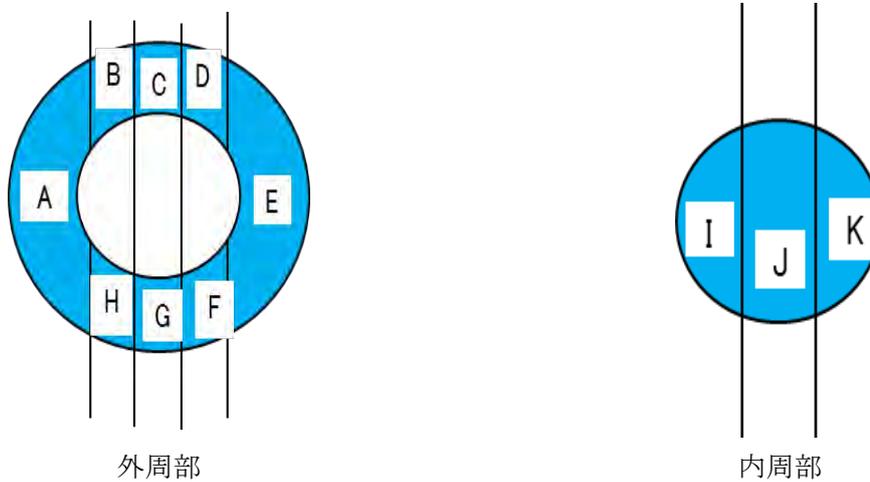


図 4.2.2-24 1 層ごとの分割

表 4.2.2-21 供試体含水比（各分割ブロックの含水比）（スリット3mm No.2 供試体）

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	35.2	37.3	41.0	37.0	35.5	36.8	42.6	36.4	37.8	41.6	38.1
2	34.5	32.8	45.2	38.2	36.2	39.3	38.3	39.7	33.6	39.2	34.8
3	35.9	39.0	43.9	36.8	37.1	39.6	43.2	36.7	35.5	40.9	36.3
4	36.1	34.9	43.3	37.8	37.6	38.8	44.3	38.4	38.2	44.0	37.5
5	38.8	43.1	55.0	42.6	38.3	41.5	43.8	35.3	37.6	42.3	35.4
6	39.1	45.3	52.6	42.6	38.7	39.6	46.3	38.6	37.9	45.4	40.2
7	39.7	42.9	52.9	41.8	40.8	42.9	53.5	42.9	41.7	50.8	42.2



写真 4.2.2-82 供試体表面(排水側)



写真 4.2.2-83 供試体表面（注入側）



写真 4.2.2-84 1層目の切断面(排水側)

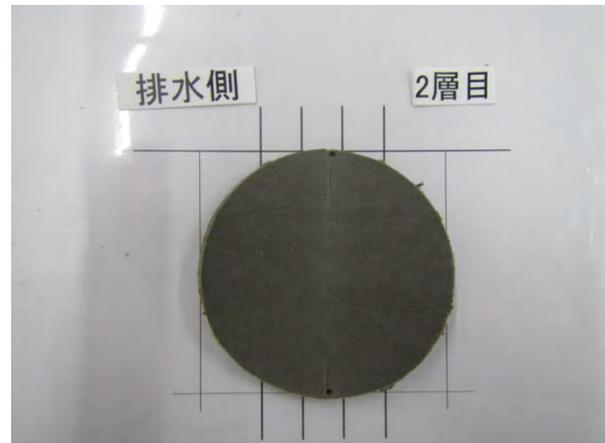


写真 4.2.2-85 2-3層目の切断面(排水側)



写真 4.2.2-86 3-4層目の切断面(排水側)



写真 4.2.2-87 4-5層目の切断面 (排水側)



写真 4.2.2-88 5-6層目の表面(排水側)

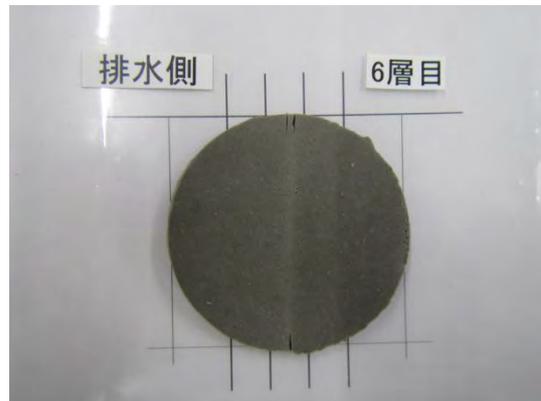


写真 4.2.2-89 6-7層目の表面(排水側)

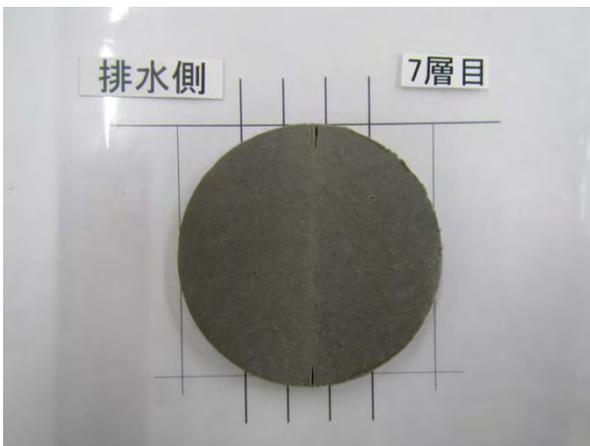


写真 4.2.2-90 6-7層目の切断面(排水側)

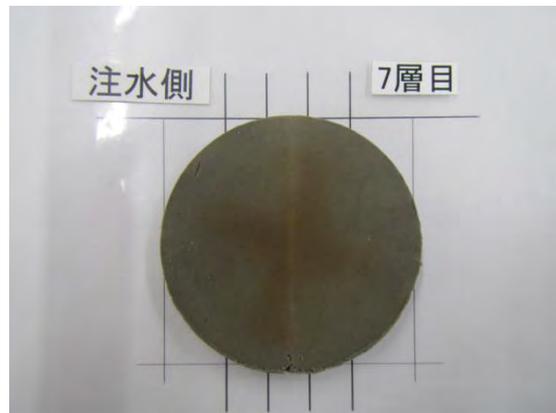


写真 4.2.2-91 6-7層目の切断面 (注入側)

図 4.2.2-25 に含水比分布を示す。ガス注入前と同様に供試体上面の方が含水比が低い状況は同じ傾向である。また、スリットを含む中央部の含水比が特に大きな傾向も同様の状況を示し手織り、ガス移行に伴い、大きな変化はない。破過発生からガス供給停止までのガス流量が小さかったため、特に局所的な感想状況は特に確認できず。全体に湿った状態を維持している。

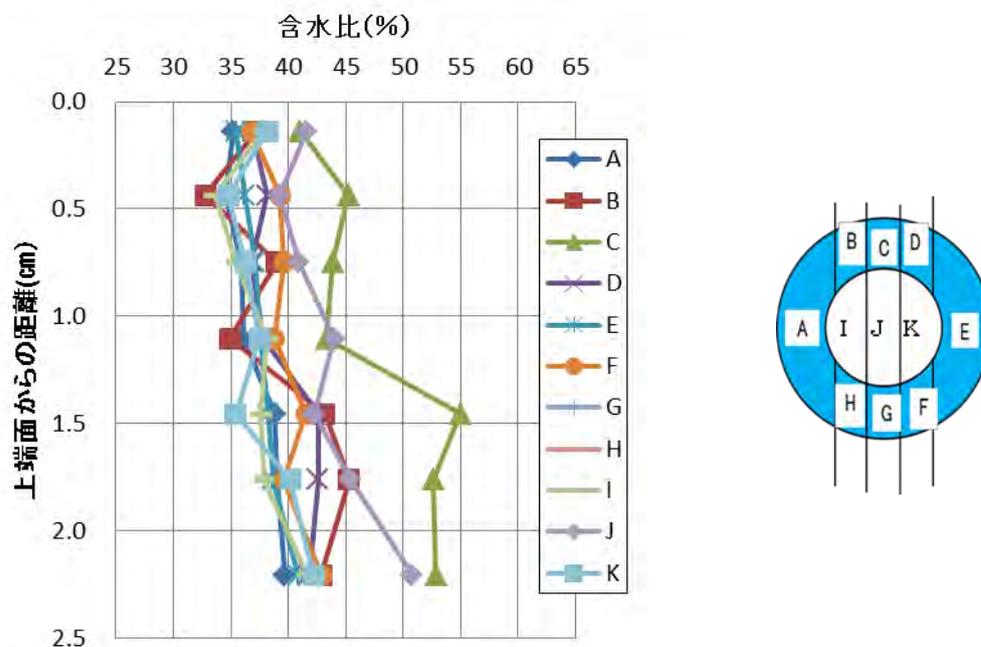


図 4.2.2-25 含水比の深度分布

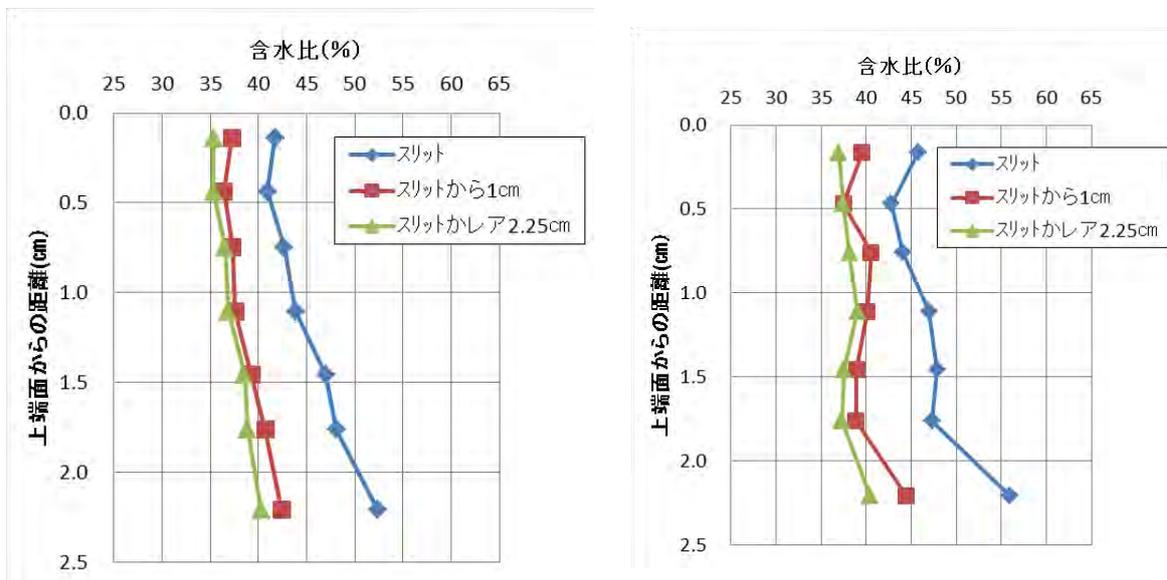


図 4.2.2-26 スリットからの離れと含水比の深度分布

図 4.2.2-27 スリット幅 1mm の既往の予備試験結果における含水比分布

5) スリット 1mm 供試体の試験（再冠水試験結果）

a. 試験条件

表 4.2.2-22 に試験供試体の試験条件を示す。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注水飽和を行った。

表 4.2.2-22 ベントナイト供試体の条件（スリット 1mm 供試体）

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	119.59 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. 供試体の作製

供試体（ $\phi 6.0\text{cm} \times h 2.5\text{cm}$ ）は、平成 27 年度実施の予備試験と同様に、事前に含水比調製したベントナイト材料を用い、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、圧縮成形によって作製した。圧縮成形時の圧縮速度は 1mm/min である。写真 4.2.2-92 から写真 4.2.2-97 に供試体の作製状況を示した。厚さ 1mm のスペーサーを設置して一旦静的締固め後、スペーサーを撤去する方法で、スリットを有する供試体を作製した。

図 4.2.2-28 に圧縮成形時の圧縮応力と圧縮応力に伴う供試体の変位量を示す。369~584 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、前述のスリット幅 3mm の供試体作成時に比べるとスリットなしの供試体と同様の荷重を示した。



写真 4.2.2-92 供試体作製治具



写真 4.2.2-93 スリット設置



写真 4.2.2-94 試料投入



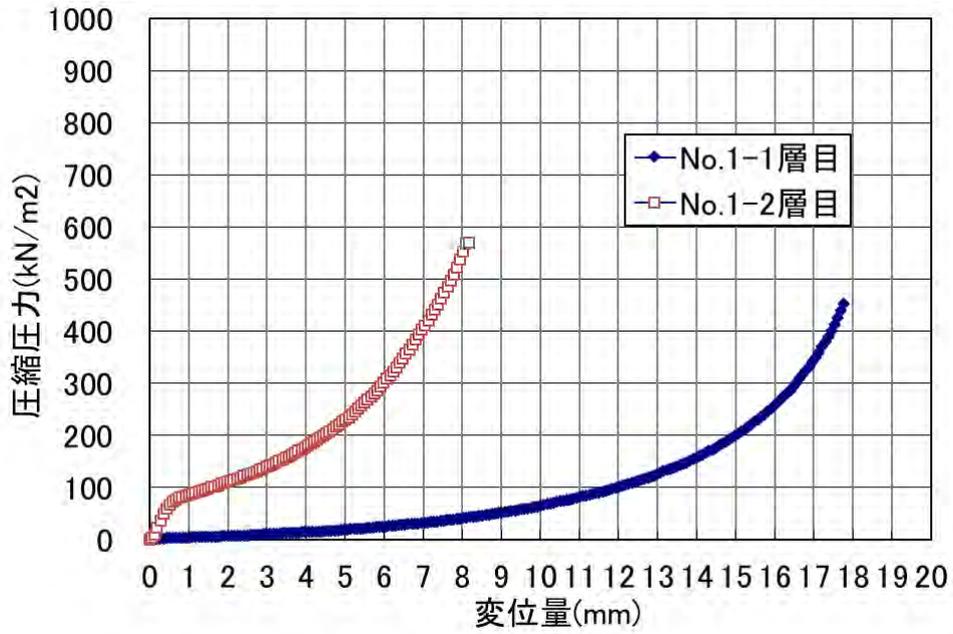
写真 4.2.2-95 圧縮成型状況



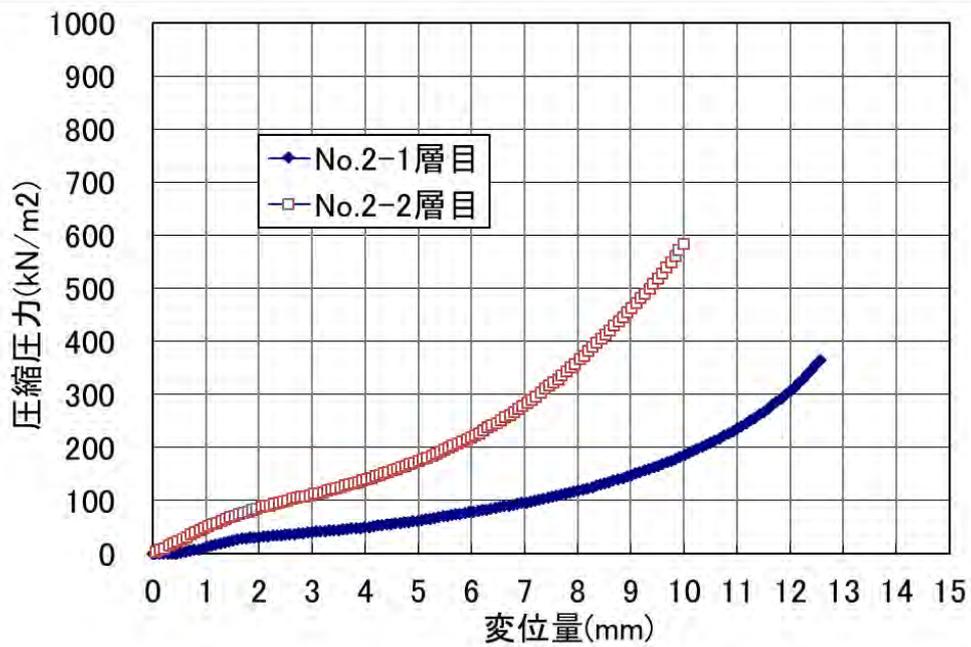
写真 4.2.2-96 1層目締固め後



写真 4.2.2-97 供試体完成



(1)供試体スリット 1mm No.1



(2)供試体スリット mm No.2

図 4.2.2-28 圧縮整形応力と供試体変位量

c. 実施状況

表 4.2.2-23 に試験の実施状況を示した。

スリット 1mm を有する 2 つの供試体については、2016 年 10 月 20 日に注水を開始し、飽和継続中である。供試体排水側ポーラスメタル上面における排水確認は注水 21 日目に確認し、その後排水量は 2017 年 1 月 30 日までの 102 日間に亘って計測した。

表 4.2.2-23 実施概況

		予備試験	界面(t3mm)		界面(t1mm)	
		初期注水 1 回 (4cm ³)	No.1	No.2	No.1	No.2
注 水 飽 和	注水開始	2016/7/7	2016/7/11	2016/7/11	2016/10/20	2016/10/20
	排水確認		2016/8/22 (注水 42 日)	2016/8/22 (注水 42 日)	2016/11/10 (注水 21 日目)	2016/11/10 (注水 21 日目)
	排水量 計測開始		2016/8/24	2016/8/24	2016/12/2	2016/12/2
	飽和完了		2016/10/19 (注水 100 日)	2016/10/20 (注水 101 日)	2017/1/30 (注水 102 日)	2017/1/30 (注水 102 日)
ガ ス 注 入	背圧載荷			2016/10/20		
	ガス注入 開始			2016/10/21		
	ガス圧 昇圧速度			0.1 MPa/2 日		
	破過			2016/11/11		
	破過圧			1.1 MPa		
解 体	供試体 解体調査	2016/7/11	2016/10/19	2016/11/11		

d. スリット1mm 供試体の注水飽和過程

図 4.2.2-29 および図 4.2.2-30 に飽和過程の注水量、膨潤圧の経時変化を示した。また表 4.2.2-24 には、注水飽和完了時点の膨潤圧を示した。各々500kPa および 400kPa、平均 450kPa であった。既往の界面を有しない供試体に比べて大きい。注水開始初期の段階で比較的大きな底面反力を計測しているため、供試体の初期設定の影響が大きく反映していることが考えられる。なお、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（φ 6.0cm 断面積 28.27cm²）に対して 0.7%に相当し、この差が膨潤圧合力に及ぼす影響はスリット幅 3mm の供試体に比べてより小さく、供試体の膨潤圧（合力を全面積で除したもの）に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

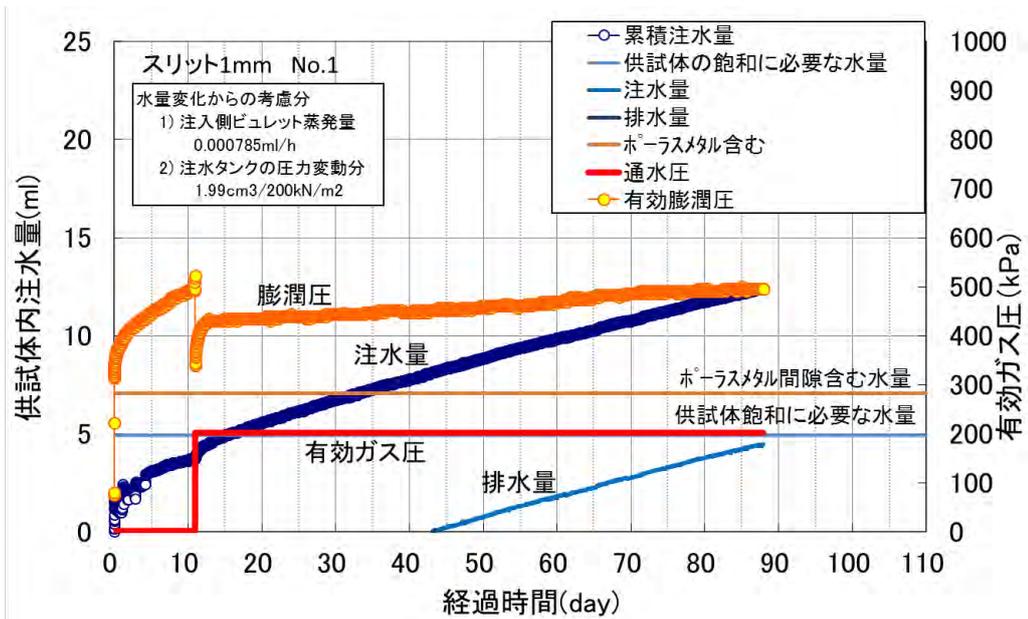


図 4.2.2-29 飽和過程の状況（供試体スリット1mm No.1）

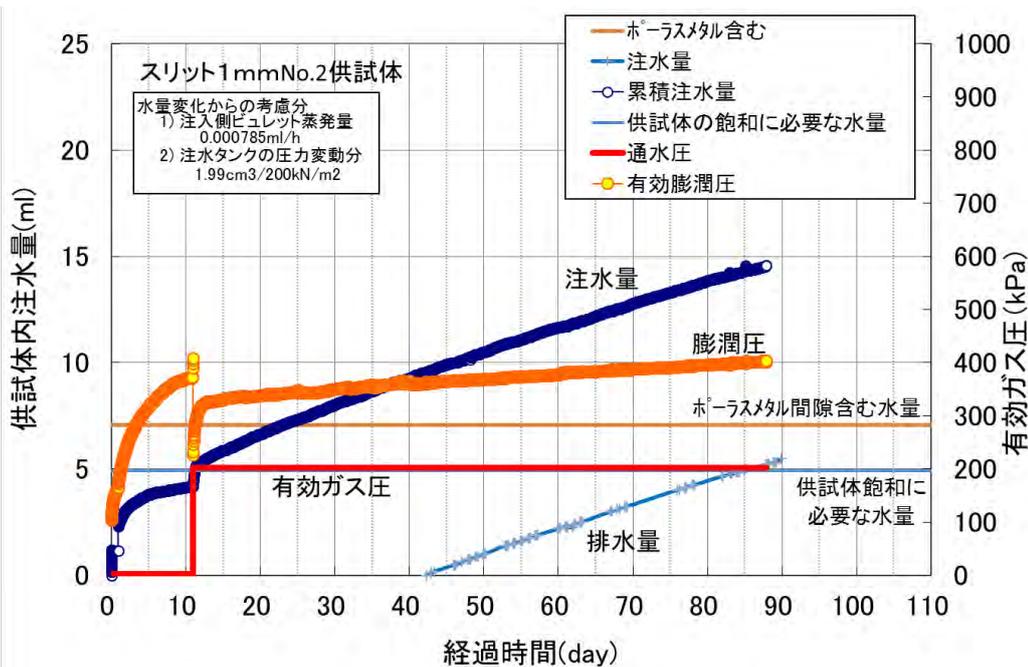


図 4.2.2-30 飽和過程の状況（供試体スリット1mm No.2）

表 4.2.2-24 スリット 1mm を有する供試体の膨潤圧

膨潤圧		スリット 1mm No.1	スリット 1mm No.2
有効膨潤圧	kPa	500	400
平均有効膨潤圧	kPa	450	
昨年度のスリット 1mm 予備試験の 平均膨潤圧	kPa	300	

図 4.2.2-31 および図 4.2.2-32 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る。

表 4.2.2-25 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がない供試体と大差ないことが確認できた。またこの結果から、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。

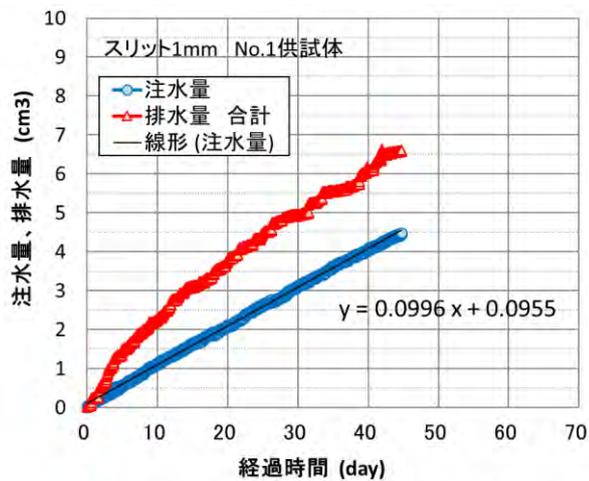


図 4.2.2-31 注水量と排水量の経時変化 (スリット 1mm No.1)

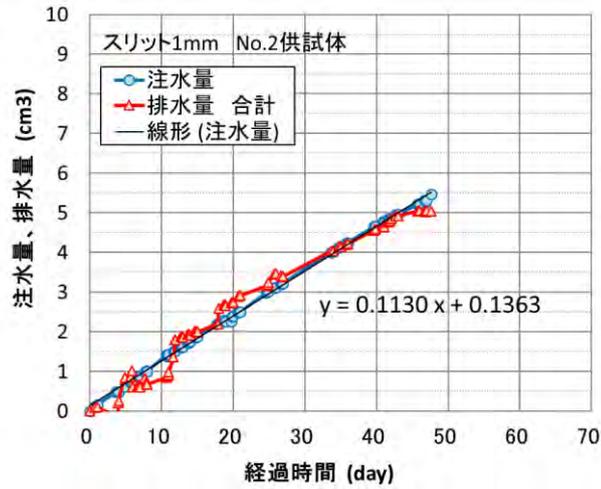


図 4.2.2-32 注水量と排水量の経時変化 (スリット 1mm No.2)

表 4.2.2-25 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.		スリット 1mm No.1	スリット 1mm No.2	スリット 3mm 試験結果
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	0.100	0.113	
透水係数	m/sec	5.9×10^{-13}	5.4×10^{-13}	
		平均値 5.7×10^{-13}		平均値 6.0×10^{-13}

4.2.3 人工バリアシステムのうち充填材（セメント系材料）界面を対象としたガス移行特性評価試験

(1) 実施項目

これまでの検討成果[14][15]から、ベントナイト系緩衝材と同様に人工バリア構成材料であるセメント系充填材中（材料単体）のガス移行メカニズムも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。

上記の課題解決を目的に、平成 27 年度に実施した「ガス移行連成挙動評価手法の開発」[16]においては、同一材料界面（モルタル材料の水平打継目）を模擬した供試体による予備的なガス移行試験を実施して、材料界面のガス移行に係る基本特性を評価した。

作製した模擬供試体は図 4.2.3-1 に示すイメージの通り、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」を対象とした。

検討の結果、界面を有する供試体について、界面のガス移行特性は基質部と異なる（界面が無い供試体のガス移行特性と異なる）ことが分かっている。

この要因については、供試体内部の間隙構造が、界面部近傍と基質部で異なったためである可能性が示唆されている。

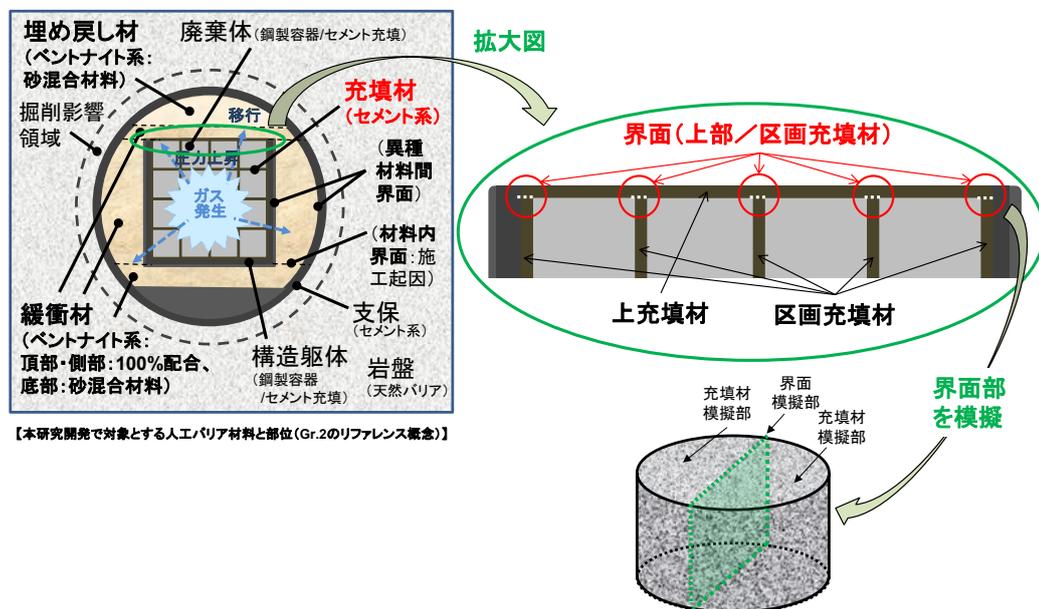


図 4.2.3-1 人工バリアにおける現実的な施工手順（ブロック定置方式）[7]を考慮した充填材の同一材料界面（拡大図内の赤丸部）と界面模擬供試体のイメージ

そこで平成 28 年度では、予備試験[16]の成果を基盤として、界面の性状に着目した検討を行った。

具体的には、図 4.2.3-1 に示した施工手順の場合、充填材施工後の界面（水平打継ぎ面）の性状は現実的に均質にはならない（例えば水平打継ぎ面のうち、既に硬化している下側充填材の表面に脆弱なレイタンス層*が生じるか否かで界面の付着強度は大きく異なる）ことを考慮して、レイタンス層の有無（フレッシュな充填材のブリージングを抑えるか否か）を評価指標としたガス移行特性評価試験を行った。

検討項目については表 4.2.3-1 に示す通りとした。

表 4.2.3-1 界面を模擬したガス移行試験（界面性状の影響評価試験）での検討項目

検討項目	実施項目	取得データ	目的	備考
① 充填材／充填材界面のガス移行特性の把握 ② 界面性状（レイタンス層の有無）を指標とした特性評価	飽和供試体作成	水の排水量の経時変化	界面を有する充填材の透水特性の把握	界面性状（パラメータ）の影響程度の把握
	試験中のデータ取得	水の排出量の経時変化	透気特性（ガス有効浸透率）の把握	二相流特性等の把握
		ガスの排出量の経時変化		
試験終了後のデータ取得	供試体内の含水量測定（炉乾燥法による）	供試体内の（見掛けの）間隙率の把握	供試体の解体調査により実施	

(2) 供試体（および試験条件）

供試体の製作は、図 4.2.3-2 のように実施する。

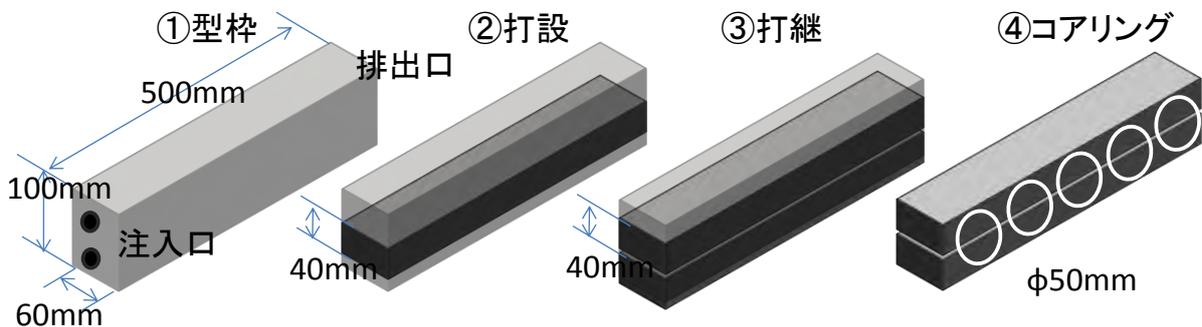


図 4.2.3-2 打継供試体の作成方法

* 充填材のようなセメント系材料を打設する際、セメントの主に石灰石よりなる微粒子や骨材の微粒分が、ブリーディング水（ブリーディング水）とともに打継ぎ面上昇して堆積した、多孔質で脆弱な泥膜層のこと

この供試体の製作方法の目的を以下に示す。

- ・ 昨年は、 $\phi 100\text{mm} \times h200$ のサミット管に底部 50mm ずつ打設したが、できるだけ広い面積、薄い打設により、乾燥クラックを誘発させる。(打継の影響だけでない)
- ・ 均等に上から打設するのではなく、片側から押すようにして、できるだけ現実に近づける。
- ・ 個数は 5 個程度にしてバラつき範囲を調べる。
- ・ バラつきは、後の解析の物性のバラつきに反映させ、要素実験から実規模評価につなげる。
- ・ 水中不分離性混和材 (アスカクリーン; 信越化学工業株製) を用いるか、用いないかにより、打継界面に材料分離によるブリージングの強弱により界面の状態にバラつきをもたせる。

(3) 試験装置および試験方法・手順

ガス移行試験装置の概念図を図 4.2.3-3 に、ガス移行試験 (注気過程) を含めた全実施フローを図 4.2.3-4 に示す。試験は大きく、「①試験準備」「②注水過程」「③注気過程 (ガス移行試験)」にて構成した。

なお、「①試験準備」においては供試体の品質管理事項として、所定の養生期間後に一軸圧縮強度 ($\sigma 28$ および $\sigma 91$) を測定した。

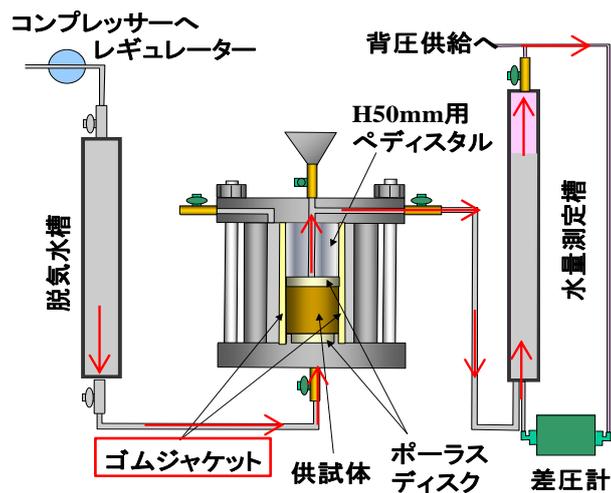


図 4.2.3-3 ガス移行試験装置の概念図

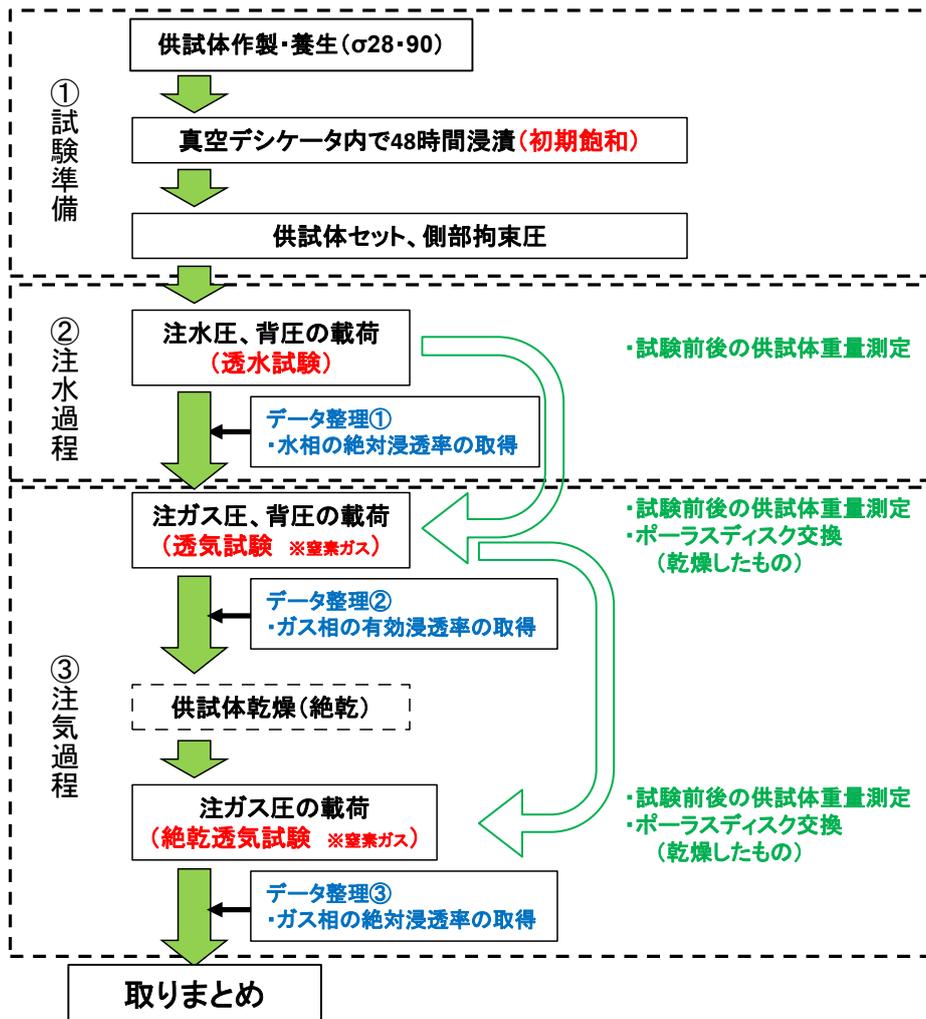


図 4.2.3-4 試験の実施フロー

(4) 実施結果と考察

1) 供試体作製

供試体は、昨年度実施した比較的高い透水性を有するモルタルを形成する配合を用い、かつ打継部での分離を促すために混和剤を用いないケースの表 4.2.3-2 に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 4.2.3-2 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	混和剤 (×1000)	消泡剤 (×5)	エア量 (%)
混和剤有り ケース	65	1.5	407	626	938	5.2 アスカクリン	2.1	11.8
混和剤無し ケース	65	1.5	407	626	938	なし	2.1	10.5

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 4.2.3-1 に打設準備状況，写真 4.2.3-2 に砂投入状況，写真 4.2.3-3 にミキサー攪拌状況，写真 4.2.3-4 に型枠，写真 4.2.3-5 に混和剤有り 1 次打設（8/8）エア一量確認試験，写真 4.2.3-6 に混和剤無し 1 次打設（8/8）エア一量確認試験，写真 4.2.3-7 に混和剤有り 2 次打設（8/9）エア一量確認試験を，写真 4.2.3-8 に混和剤無し 2 次打設（8/9）エア一量確認試験を示す。また，写真 4.2.3-9 および写真 4.2.3-10 に混和剤有り 1 次打設状況を、写真 4.2.3-11 および写真 4.2.3-12 に混和剤無し 1 次打設状況を示す。両ケースの打設完了状況を写真 4.2.3-13 に示す。1 日後の混和剤有りケースと混和剤無しケースの表面の状態を写真 4.2.3-14 および写真 4.2.3-15 にそれぞれ示す。混和剤有のケースの打継面は比較的滑らかであるが、混和剤無しのケースの打継面はモルタル材料が分離して砂やセメントペーストのカスが浮いているのがわかる。

この上からそれぞれ打継を実施した。

写真 4.2.3-16～写真 4.2.3-18 には混和剤有りケースの打継の状況を、写真 4.2.3-19～写真 4.2.3-21 には混和剤無しケースの打継の状況を示す。これらは1日後に脱型して水中養生を行った。混和剤無しケースの脱型後の状況を写真 4.2.3-22 に、混和剤有りケースの脱型後の状況を写真 4.2.3-23 に、両者の水中養生の状況を写真 4.2.3-24 に示す。



写真 4.2.3-1 打設準備



写真 4.2.3-2 砂投入



写真 4.2.3-3 ミキサー攪拌状況



写真 4.2.3-4 型枠



写真 4.2.3-5 混和剤有り 1次打設 (8/8)
エア一量確認試験



写真 4.2.3-6 混和剤無し 1次打設 (8/8)
エア一量確認試験



写真 4.2.3-7 混和剤有り 2次打設 (8/9)
エア一量確認試験



写真 4.2.3-8 混和剤無し 2次打設 (8/9)
エア一量確認試験



写真 4.2.3-9 混和剤有り 1次打設 1



写真 4.2.3-10 混和剤有り 1次打設 2



写真 4.2.3-11 混和剤無し 1次打設 1



写真 4.2.3-12 混和剤無し 1次打設 2



写真 4.2.3-13 次打設完了状況



写真 4.2.3-14 混和剤有り打継面



写真 4.2.3-15 混和剤無し打継面



写真 4.2.3-16 混和剤有り 2次打設 1



写真 4.2.3-17 混和剤有り 2次打設 2



写真 4.2.3-18 混和剤有り 2次打設完了



写真 4.2.3-19 混和剤無し 2次打設 1



写真 4.2.3-20 混和剤無し 2次打設 2



写真 4.2.3-21 混和剤無し 2次打設完了

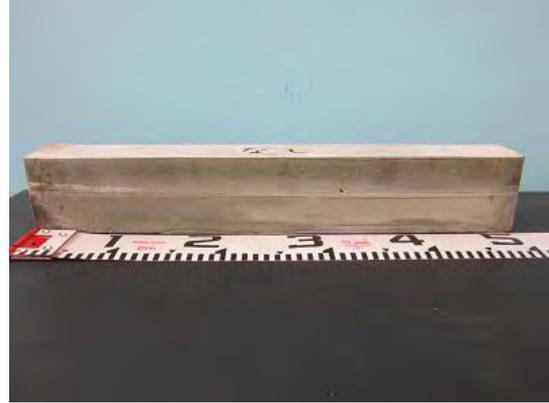


写真 4.2.3-22 混和剤無し脱型

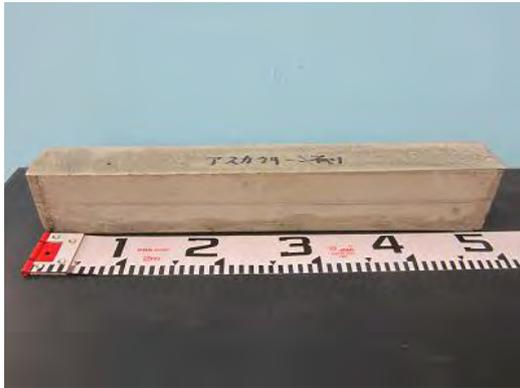


写真 4.2.3-23 混和剤有り脱型

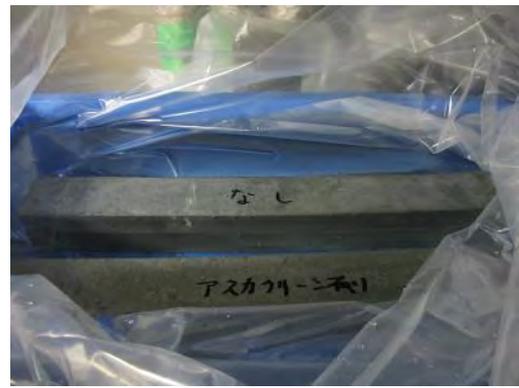


写真 4.2.3-24 水中養生状況

コア抜きを写真 4.2.3-25 に示す。コア抜きされた供試体の状況を写真 4.2.3-26 に示す。混和剤有りの打継面の状況と混和剤無しの打継面の状況をそれぞれ写真 4.2.3-27 と写真 4.2.3-28 に示す。作成した供試体の打継面の詳細な状況は、透水・透気試験の結果とともに次項に示す。



写真 4.2.3-25 コア抜き (右側が1次打設部)



写真 4.2.3-26 供試体状況



写真 4.2.3-27 混和剤有り打継面供試体（線入り部が1次打設）



写真 4.2.3-28 混和剤無し打継面供試体（線入り部が1次打設）

材令 28 日の混和剤有りのモルタルの一軸圧縮強度測定結果（ σ_{28} ）を以下に示す。

図 4.2.3-5 は 1 次打設混和剤有りモルタルの応力～ひずみ関係、図 4.2.3-6 は 2 次打設混和剤有りモルタルの応力～ひずみ関係である。また、1 次打設混和剤有りモルタルの破壊状況を写真 4.2.3-29 に、2 次打設混和剤有りモルタルの破壊状況を写真 4.2.3-30 に示す。強度および単位体積重量の一覧を表 4.2.3-3 および表 4.2.3-4 に示す。表より、1 次打設混和剤有りモルタルの 28 日強度は 21.53MPa と 20.73MPa となり、ほぼ同一のモルタルとみなせる。

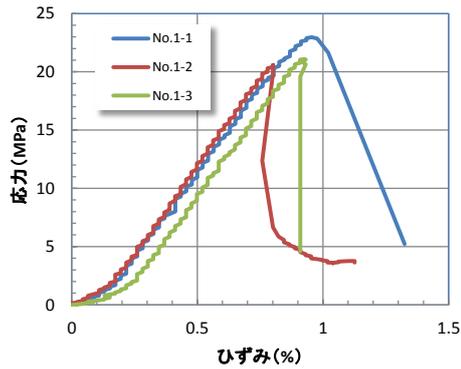


図 4.2.3-5 1次打設時 28日強度試験（混和剤有り）
ケース応力～ひずみ関係）

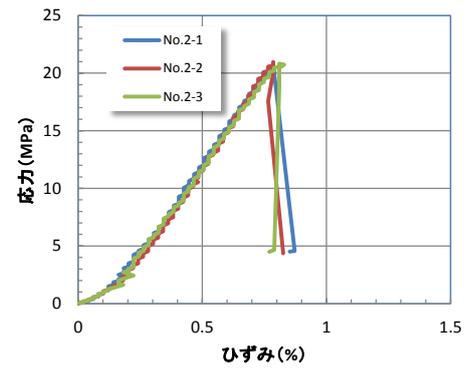


図 4.2.3-6 2次打設時 28日強度試験（混和剤有り）
ケース応力～ひずみ関係）



写真 4.2.3-29 1次打設時 28日強度試験破壊状況
（混和剤有りケース）



写真 4.2.3-30 2次打設時 28日強度試験破壊状況
（混和剤有りケース）

表 4.2.3-3 1次打設時 28日強度試験結果一覧（混和剤有りケース）

	最大応力	単位体積重量
1次打設	Mpa	g/cm ³
No.1-1	22.96	2.045
No.1-2	20.59	2.042
No.1-3	21.05	2.011
average	21.53	2.032

表 4.2.3-4 2次打設時 28日強度試験結果一覧（混和剤有りケース）

	最大応力	単位体積重量
2次打設	Mpa	g/cm ³
No.2-1	20.40	2.001
No.2-2	20.95	2.035
No.2-3	20.84	2.003
average	20.73	2.013

材令 28 日の混和剤無しのモルタルの一軸圧縮強度測定結果（ σ_{28} ）を、以下に示す。図 4.2.3-7 は、1次打設混和剤有りモルタルの応力～ひずみ関係、図 4.2.3-8 は、2次打設混和剤有りモルタルの応力～ひずみ関係である。また、1次打設混和剤有りモルタルの破壊状況を写真 4.2.3-31 に、1次打設混和剤有りモルタルの破壊状況を写真 4.2.3-32 に示す。強度および単位体積重量の一覧を表 4.2.3-5 および表 4.2.3-6 に示す。表より、1次打設混和剤有りモルタルの 28 日強度は 21.53MPa と 20.73MPa となり、ほぼ同一のモルタルとみなせる。

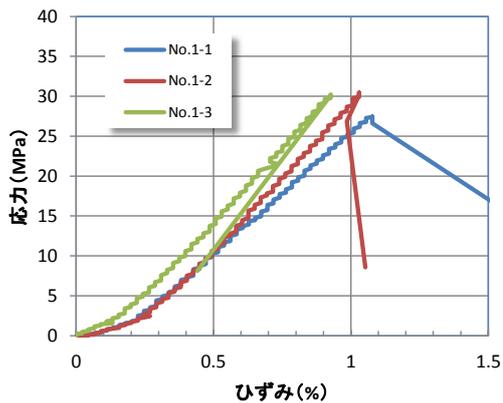


図 4.2.3-7 1次打設時 28日強度試験（混和剤無しケース応力～ひずみ関係）

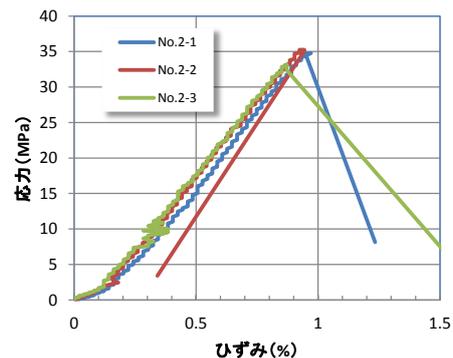


図 4.2.3-8 2次打設時 28日強度試験（混和剤無しケース応力～ひずみ関係）



写真 4.2.3-31 1次打設時 28日強度試験（混和剤無しケース破壊状況）



写真 4.2.3-32 2次打設時 28日強度試験（混和剤無しケース破壊状況）

表 4.2.3-5 1次打設時 28日強度試験結果一覧（混和剤無し1次打設時ケース）

	最大応力	単位体積重量
1次打設	MPa	g/cm ³
No.1-1	27.46	2.148
No.1-2	30.45	2.153
No.1-3	30.17	2.169
average	29.36	2.157

表 4.2.3-6 2次打設時 28日強度試験結果一覧（混和剤無し2次打設時ケース）

	最大応力	単位体積重量
2次打設	MPa	g/cm ³
No.2-1	34.78	2.033
No.2-2	35.24	1.988
No.2-3	33.14	2.024
average	34.39	2.015

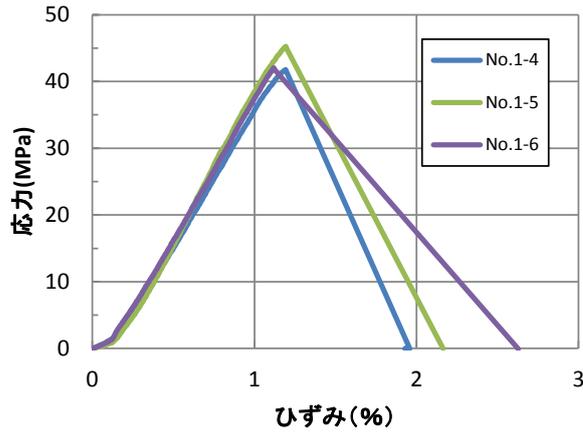


図 4.2.3-9 91日強度試験（1次打設時混和剤無しケース応力～ひずみ関係）

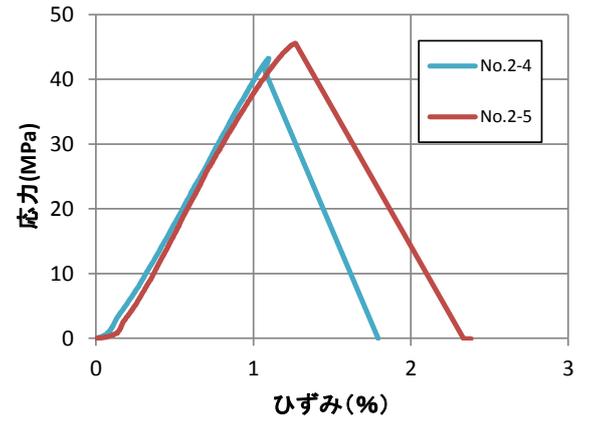


図 4.2.3-10 91日強度試験（2次打設時混和剤無しケース応力～ひずみ関係）



写真 4.2.3-33 91日強度試験（1次打設時混和剤無しケース破壊状況）



写真 4.2.3-34 91日強度試験（2次打設時混和剤無しケース破壊状況）

表 4.2.3-7 91日強度試験結果一覧（1次打設時混和剤無しケース）

	最大応力	単位体積重量
1次打設	MPa	g/cm ³
No.1-1	41.78	2.164
No.1-2	45.25	2.186
No.1-3	42.03	2.161
average	43.02	2.170

1次打設時

表 4.2.3-8 91日強度試験結果一覧（2次打設時混和剤無しケース）

	最大応力	単位体積重量
2次打設	MPa	g/cm ³
No.2-1	43.23	2.184
No.2-2	45.53	2.125
average	44.38	2.155

2次打設時

混和剤無しケースモルタルの材令91日一軸圧縮強度測定結果

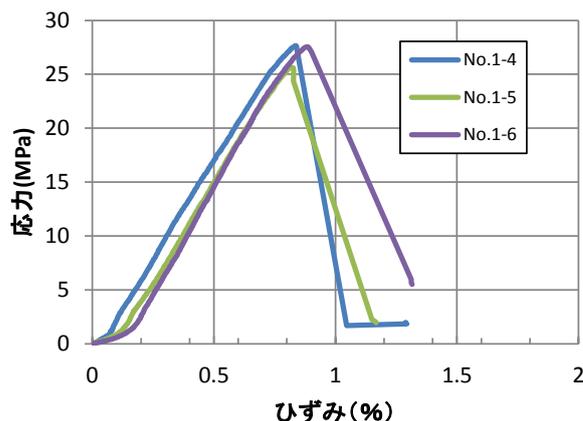


図 4.2.3-11 91日強度試験 1次打設時混和剤有りケース応力～ひずみ関係

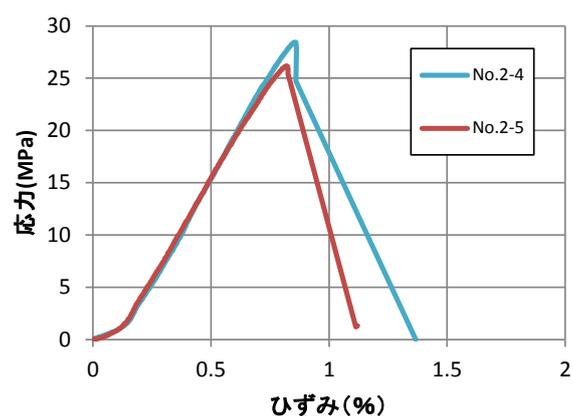


図 4.2.3-12 91日強度試験 2次打設時混和剤有りケース応力～ひずみ関係



写真 4.2.3-35 91日強度試験 1次打設時混和剤有りケース試験破壊状況



写真 4.2.3-36 91日強度試験 2次打設時混和剤有りケース破壊状況

表 4.2.3-9 91日強度試験 1次打設時混和剤有りケース結果一覧

	最大応力	単位体積重量
1次打設	MPa	g/cm ³
No.1-1	27.65	2.065
No.1-2	25.64	2.004
No.1-3	27.53	2.039
average	26.94	2.036

表 4.2.3-10 91日強度試験 2次打設時混和剤有りケース結果一覧

	最大応力	単位体積重量
2次打設	MPa	g/cm ³
No.2-1	28.46	2.044
No.2-2	26.16	1.999
average	27.31	2.021

28日および91日強度試験結果を表 4.2.3-11 にまとめた。

表 4.2.3-11 混和剤有りケースと混和剤無しケースの28日および91日強度

	28日強度 (MPa)		91日強度 (MPa)	
	1次打設	2次打設	1次打設	2次打設
混和剤有りケース	21.53	20.73	26.94	27.31
混和剤無しケース	29.30	34.39	43.02	44.38

2) 供試体の飽和 (透水試験結果)

a. 試験条件

表 4.2.3-12 に透水試験の条件を示す。

表 4.2.3-12 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. 実施状況

表 4.2.3-13 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 4.2.3-37 に供試体のセット状況、写真 4.2.3-38 にペディスタルの設置状況、写真 4.2.3-39 にゴムジャケット装着状況、写真 4.2.3-40 に試験装置全体図を示す。

表 4.2.3-13 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
混和剤有り 打継	8/8 および 8/9	12/7、11/25、11/28
混和剤有り 打継無し	8/8 および 8/9	12/6
混和剤無し 打継	8/8 および 8/9	11/17、11/24、12/12
混和剤無し 打継無し	8/8 および 8/9	12/2



写真 4.2.3-37 供試体のセット状況



写真 4.2.3-38 ペディスタル設置



写真 4.2.3-39 ゴムジャケット装着状況



写真 4.2.3-40 試験装置全体図

混和剤無しの供試体の打継面の状況を上下面側面として表 4.2.3-14 に示した。

混和剤有り No.1 は、打継面としては認識できるが、密着している。

混和剤有り No.2 も打継面として認識できるが、密着している。

混和剤有り No.3 は、打継面として認識でき、密着していた。しかし、透気試験後の 60℃ 炉乾燥により分離した。

混和剤有り No.4 は、打継面としては認識できるが、密着している。

混和剤有り No.5 は、打継面として認識でき、密着していた。しかし、透気試験後の 60℃ 炉乾燥により分離した。

打継無しの供試体は、一軸圧縮試験用に作成した直径 50mm、高さ 100mm の試料から高さ 50mm としたものである。

表 4.2.3-14 混和剤有り供試体の打継面の状況

 混和剤有り No.1 下面	 混和剤有り No.1 側面 1	 混和剤有り No.1 側面 2	 混和剤有り No.1 上面
混和剤有り No.1 下面	混和剤有り No.1 側面 1	混和剤有り No.1 側面 2	混和剤有り No.1 上面
 混和剤有り No.2 下面	 混和剤有り No.2 側面 1	 混和剤有り No.2 側面 2	 混和剤有り No.2 上面
混和剤有り No.2 下面	混和剤有り No.2 側面 1	混和剤有り No.2 側面 2	混和剤有り No.2 上面
 混和剤有り No.3 下面	 混和剤有り No.3 側面 1	 混和剤有り No.3 側面 2	 混和剤有り No.3 上面
混和剤有り No.3 下面	混和剤有り No.3 側面 1	混和剤有り No.3 側面 2	混和剤有り No.3 上面
 混和剤有り No.4 下面	 混和剤有り No.4 側面 1	 混和剤有り No.4 側面 2	 混和剤有り No.4 上面
混和剤有り No.4 下面	混和剤有り No.4 側面 1	混和剤有り No.4 側面 2	混和剤有り No.4 上面

			
混和剤有り No.5 下面	混和剤有り No.5 側面 1	混和剤有り No.5 側面 2	混和剤有り No.5 上面
混和剤有り No.5 下面	混和剤有り No.5 側面 1	混和剤有り No.5 側面 2	混和剤有り No.5 上面
			
打継無し混和剤有り No.6 下面	打継無し混和剤有り No.6 側面 1	打継無し混和剤有り No.6 側面 2	打継無し混和剤有り No.6 上面
打継無し混和剤有り No.6 下面	打継無し混和剤有り No.6 側面 1	打継無し混和剤有り No.6 側面 2	打継無し混和剤有り No.6 上面

混和剤無しの供試体の打継面の状況を上下面側面として表 4.2.3-15 示した。

混和剤無し No.1 は、打継面としては認識できるが、密着している。

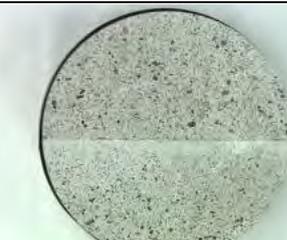
混和剤無し No.2 は、打継面としては認識でき、ところどころ間隙がみられる。

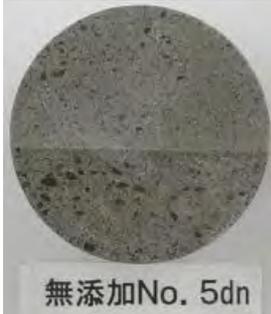
混和剤無し No.3 は、打継面として認識でき、ところどころ間隙がみられた。透気試験後の 60℃ 炉乾燥により分離した。

混和剤無し No.4 は、打継面としては認識できるが、密着している。

混和剤無し No.5 は、打継面としては認識できるが、密着している。

表 4.2.3-15 混和剤無し供試体の打継面の状況

 混和剤無し No.1 下面	 混和剤無し No.1 側面 1	 混和剤無し No.1 側面 2	 混和剤無し No.1 上面
混和剤無し No.1 下面	混和剤無し No.1 側面 1	混和剤無し No.1 側面 2	混和剤無し No.1 上面
 混和剤無し No.2 下面	 混和剤無し No.2 側面 1	 混和剤無し No.2 側面 2	 混和剤無し No.2 上面
混和剤無し No.2 下面	混和剤無し No.2 側面 1	混和剤無し No.2 側面 2	混和剤無し No.2 上面
 混和剤無し No.3 下面	 混和剤無し No.3 側面 1	 混和剤無し No.3 側面 2	 混和剤無し No.3 上面
混和剤無し No.3 下面	混和剤無し No.3 側面 1	混和剤無し No.3 側面 2	混和剤無し No.3 上面
 無添加No. 4dn	 無添加No. 4sd	 無添加No. 4sd2	 無添加No. 4up
混和剤無し No.4 下面	混和剤無し No.4 側面 1	混和剤無し No.4 側面 2	混和剤無し No.4 上面

			
無添加No. 5dn	無添加No. 5sd1	無添加No. 5sd2	無添加No. 5up
混和剤無し No.5 下面	混和剤無し No.5 側面 1	混和剤無し No.5 側面 2	混和剤無し No.5 上面
			
打継無し混和剤無し No.6 下面	打継無し混和剤無し No.6 側面 1	打継無し混和剤無し No.6 側面 2	打継無し混和剤無し No.6 上面
打継無し混和剤無し No.6 下面	打継無し混和剤無し No.6 側面 1	打継無し混和剤無し No.6 側面 2	打継無し混和剤無し No.6 上面

混和剤有り No.1 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 4.2.3-13 に、透水係数の算定結果を表 4.2.3-16 に示す。

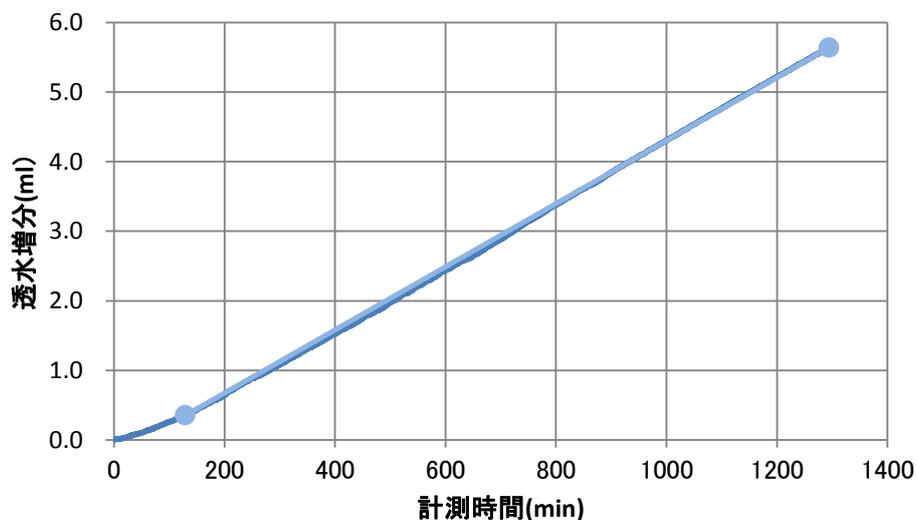


図 4.2.3-13 混和剤有りの打継供試体 28 日養生透水試験結果

表 4.2.3-16 混和剤有りの打継供試体 28 日養生透水試験結果

供試体 No.	透水係数 (m/s)
No.1	6.61×10^{-12}
No.2	
No.3	

混和剤無し 28 日養生の No.1~No.3 供試体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 4.2.3-14 に、透水係数の算定結果を表 4.2.3-17 に示す。

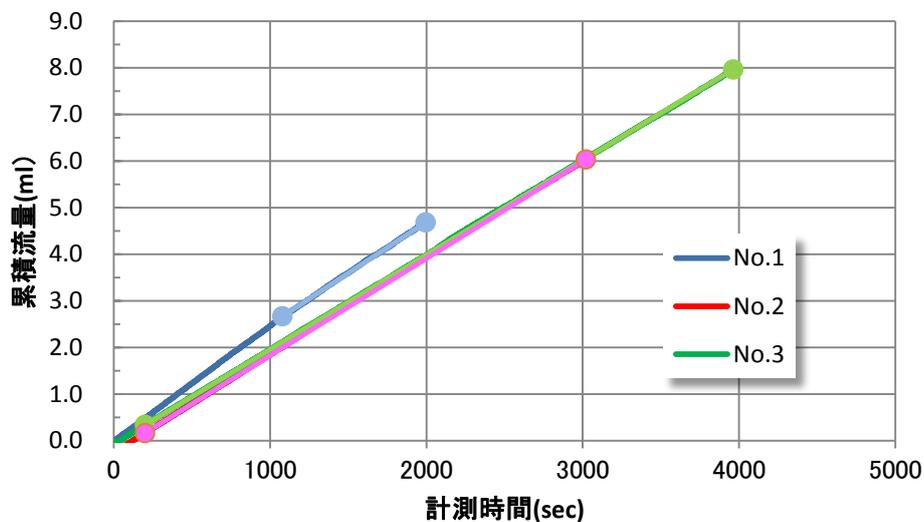


図 4.2.3-14 混和剤無しの打継供試体 28 日養生透水試験結果

表 4.2.3-17 混和剤無しの打継供試体 28 日養生透水試験結果

供試体 No.	透水係数 (m/s)
No.1	1.25×10^{-9}
No.2	1.17×10^{-9}
No.3	1.14×10^{-9}

混和剤有り No.3~No.5 供試体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 4.2.3-15 に、混和剤無しの No.3~No.5 供試体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 4.2.3-16 に示す。これらの結果から得られた透水係数の一覧を表 4.2.3-18 に示す。

混和剤有り No.3 は透気試験後の炉乾燥によって分離した打継面であり、No.4 と No.5 と比べて 2 オーダー高い透水係数となった。一方、混和剤無しの No.3 は、No.4 と No.5 と比べて 1/30、1/10 となっている。打継面の状況は、No.3 が乾燥によって分離したものの 3 者の中で最小の透水係数となっている。

透水係数としては、打継面から作成した供試体は、混和剤の有り、無しに係らず大きなバラつきを有することが認められた。

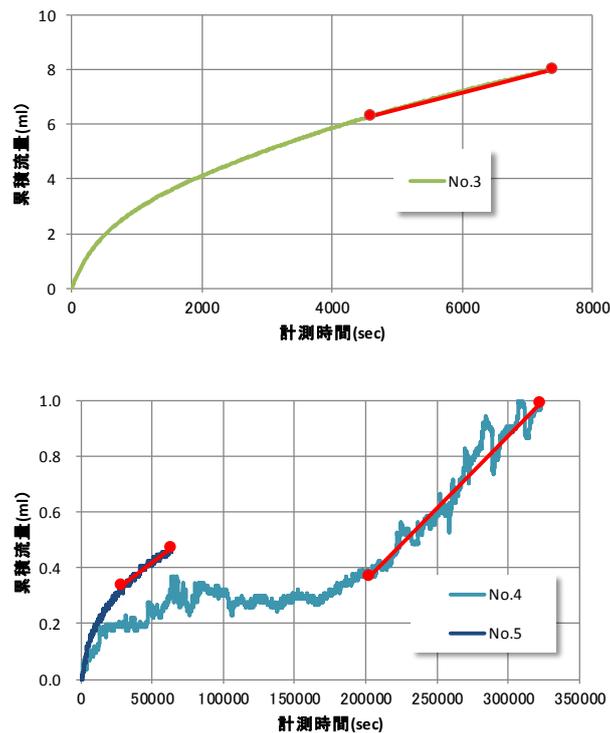


図 4.2.3-15 混和剤有りの打継供試体 No.3~No.5 透水試験結果

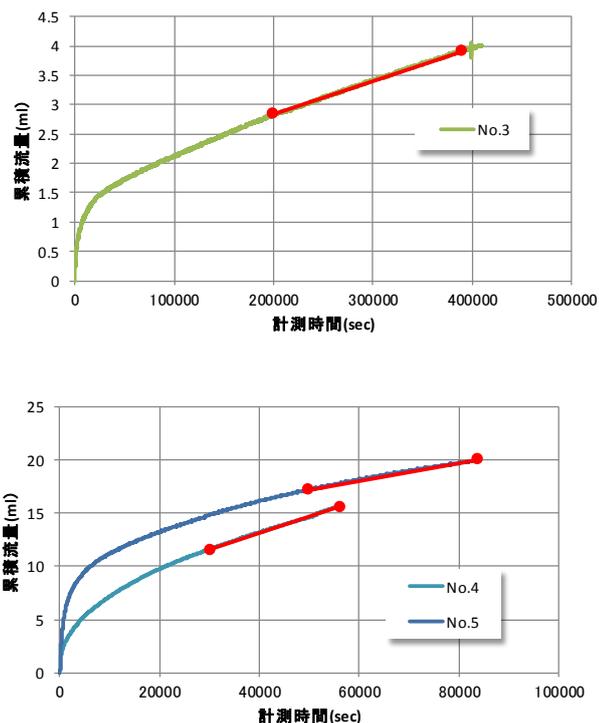


図 4.2.3-16 混和剤無しの打継供試体 No.3~No.5 透水試験結果

$$k = \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \log_e \frac{h_1}{h_2} = \frac{2.303aL}{A(t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (4.2-1)$$

ここで、 k ：透水係数(m/s)， A ：供試体断面積(m²)， a はビューレットの断面積(m²)， 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 4.2.3-18 に示す。

表 4.2.3-18 透水試験結果

供試体 No.		拘束圧 (MPa)	透水圧 (MPa)	背圧 (MPa)	t_1 (s)	t_2 (s)	透水係数 (m/s)
混和剤 有り配合	No.3	3.0	2.8	0.1	4,610	74,00	5.50E-11
	No.4	3.2	3.1	0.1	202,560	323,100	4.19E-13
	No.5	3.0	2.8	0.1	28,680	639,00	3.52E-13
	打継無	3.2	3.0	0.1	2,600	107,860	1.92E-14
混和剤 無し配合	No.3	0.5	0.3	0.1	199,998	389,998	5.84E-12
	No.4	0.5	0.3	0.1	30,000	56,010	1.69E-10
	No.5	0.5	0.3	0.1	50,000	83,950	5.78E-11
	打継無 6	2.9	0.8	0.1	41,940	75,660	1.10E-11

透水試験前後に供試体の重量を測定した結果を表 4.2.3-19 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 4.2.3-19 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		高さ	直径	透水試験前	透水試験後	増分
No.		mm	mm	(g)	(g)	(g)
混和剤有り配 合	No.3	49.59	50.38	200.016	200.246	0.230
	No.4	49.64	50.44	202.598	204.075	1.477
	No.5	49.50	50.47	201.673	203.101	1.428
	打継無	48.98	50.06	196.118	197.772	1.654
混和剤無し配 合	No.3	49.40	50.47	204.159	204.648	0.489
	No.4	49.58	50.47	203.770	206.740	2.970
	No.5	48.98	50.47	210.235	210.279	0.044
	打継無	48.60	50.03	202.002	202.183	0.181

3) ガス注入試験

a. 実施状況

表 4.2.3-20 に各ケースのガス注入試験の実施状況を示す。

表 4.2.3-20 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
混和剤有り 打継	8/8 および 8/9	12/9、11/29、11/30
混和剤有り 打継無し	8/8 および 8/9	12/9
混和剤無し 打継	8/8 および 8/9	11/24、11/25、12/13
混和剤無し 打継無し	8/8 および 8/9	12/8

b. 供試体へのガス注入過程

混和剤有り打継供試体 No.3～No.5 の透気試験における時間～排水量関係と時間～透気量関係を図 4.2.3-17～図 4.2.3-26 に示す。打継なしの透気試験結果を図 4.2.3-27～図 4.2.3-29 に示す。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(4.2-2)により算定した。

$$K = \frac{2Q\mu p_a}{A} \frac{L}{p_0^2 - p_L^2} \quad (4.2-2)$$

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 4.2.3-19、図 4.2.3-22、図 4.2.3-25 および図 4.2.3-29)から算定したガス有効浸透率の算定結果を表 4.2.3-21 に示す。

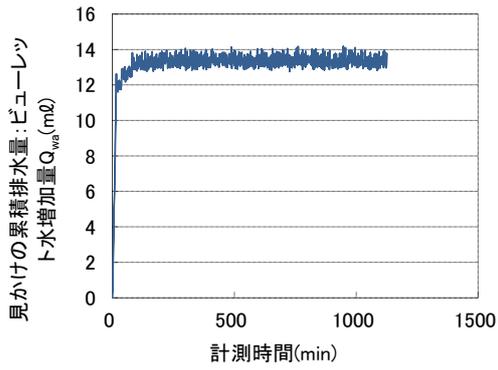


図 4.2.3-17 混和剤有り打継供試体 No.3 時間-排水量相関

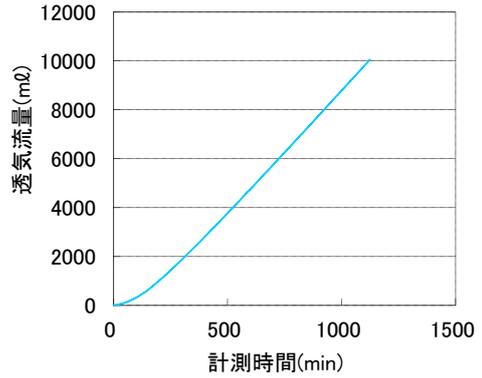


図 4.2.3-18 混和剤有り打継供試体 No.3 時間-透気量相関

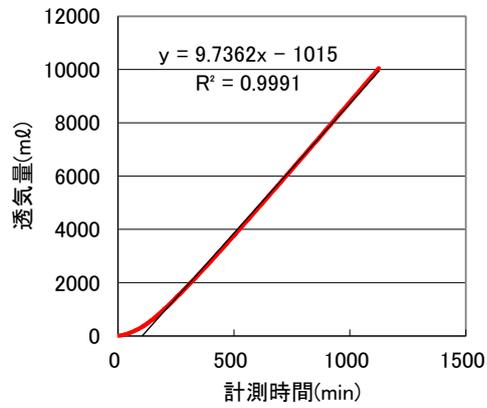


図 4.2.3-19 混和剤有り打継供試体 No.3 の透気量 (補正值) の定常区間 (黒線)

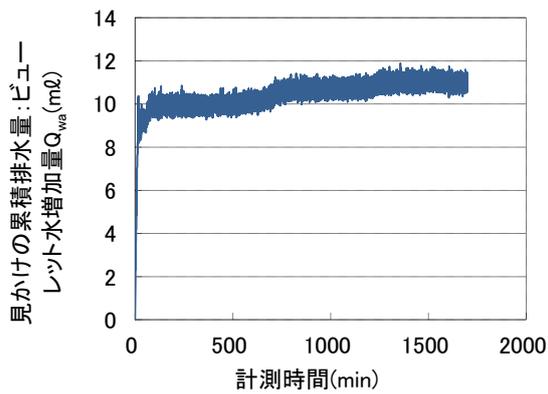


図 4.2.3-20 混和剤有り打継供試体 No.4 時間-排水量相関

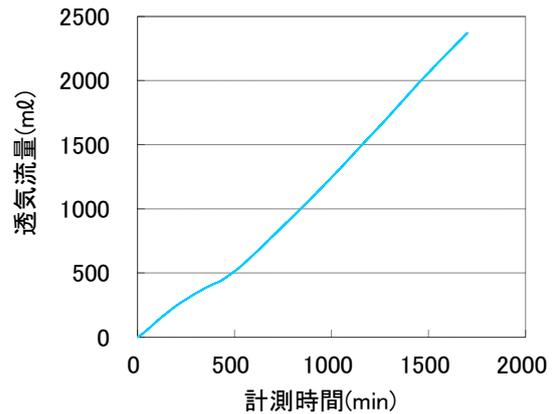


図 4.2.3-21 混和剤有り打継供試体 No.4 時間-透気量相関

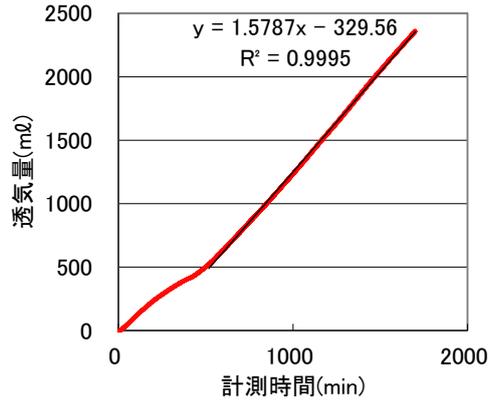


図 4.2.3-22 混和剤有り打継供試体 No.4 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）

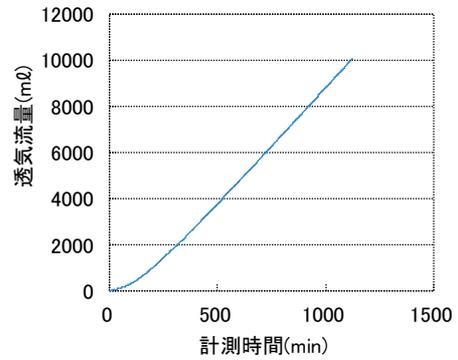
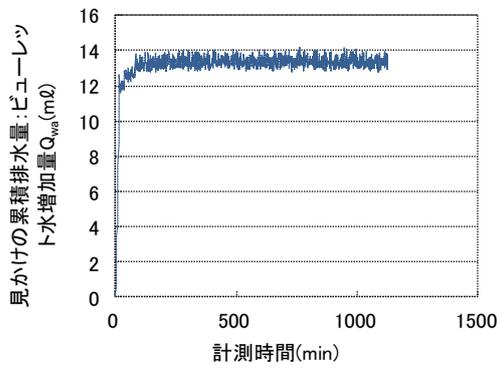


図 4.2.3-23 混和剤有り打継供試体 No.5 時間-排水量相関

図 4.2.3-24 混和剤有り打継供試体 No.5 時間-透気量相関

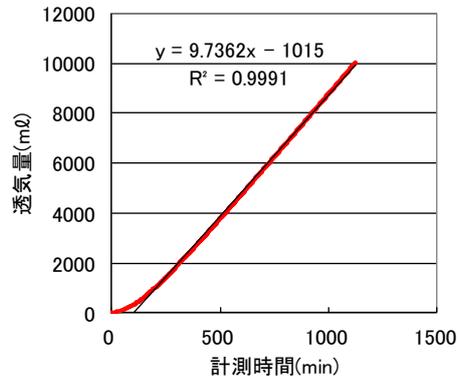


図 4.2.3-25 混和剤有り打継供試体 No.5 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）

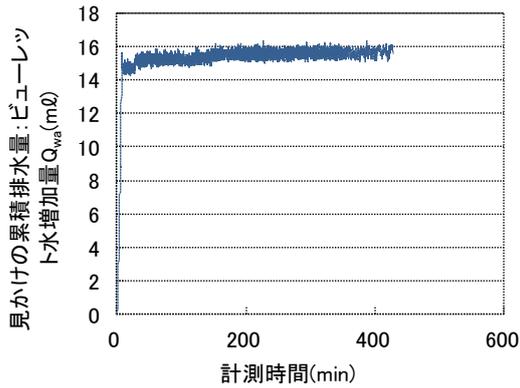


図 4.2.3-26 混和剤有り打継無し供試体 時間-排水量相関

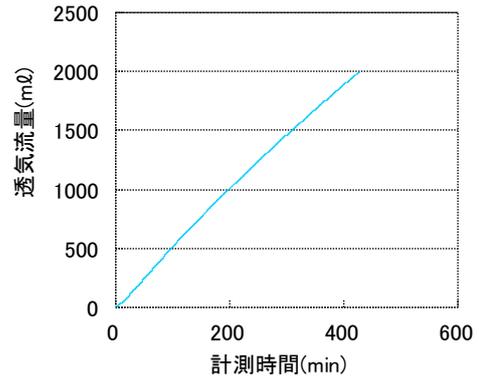


図 4.2.3-27 混和剤有り打継無し供試体 時間-透気量相関

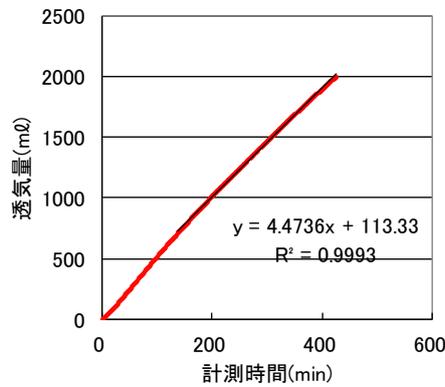


図 4.2.3-28 混和剤有り打継無し供試体の透気量（補正值）の定常区間（黒線）

表 4.2.3-21 混和剤有り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.3	3.03	2.77	0.11	5.24E-17	0.219
No.4	3.20	2.98	0.10	1.58E-18	0.360
No.5	3.03	2.77	0.10	1.13E-18	0.084
打継無し	3.02	2.84	0.10	5.08E-18	0.038

混和剤無し打継供試体 No.3～No.5 の透気試験における時間～排水量関係と時間～透気量関係を図 4.2.3-29～図 4.2.3-37 に示す。打継なしの透気試験結果を図 4.2.3-38～図 4.2.3-40 に示す。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（4.2-2 により算定した。結果を表 4.2.3-22 に示す。

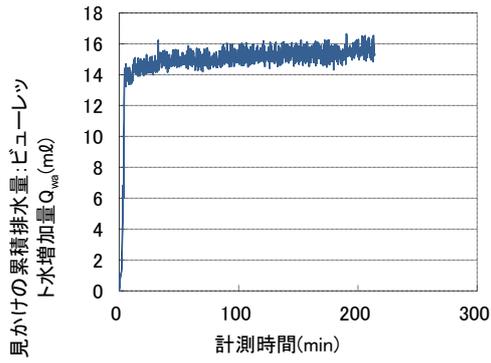


図 4.2.3-29 混和剤無し打継供試体 No.3 時間-排水量相関

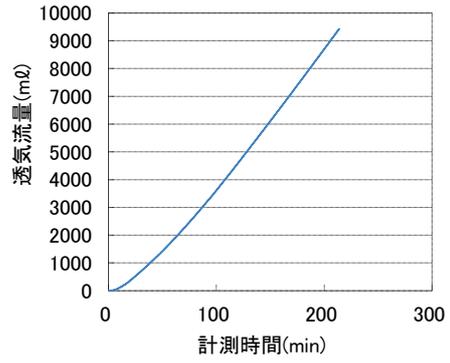


図 4.2.3-30 混和剤無し打継供試体 No.3 時間-透気量相関

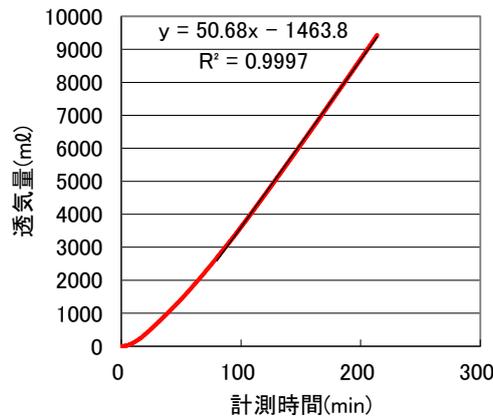


図 4.2.3-31 混和剤無し打継供試体 No.3 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）

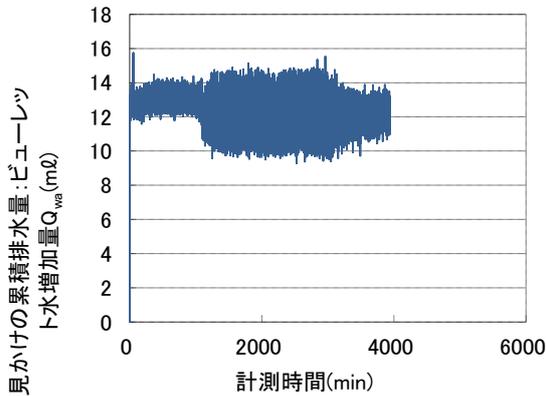


図 4.2.3-32 混和剤無し打継供試体 No.4 時間-排水量相関

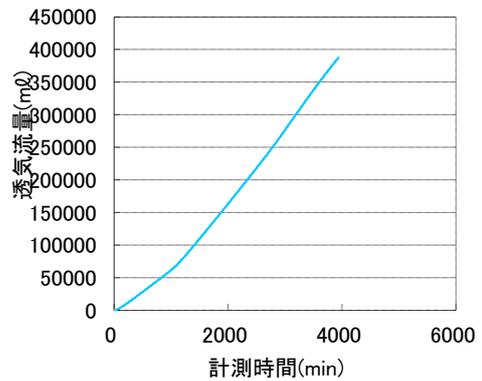


図 4.2.3-33 混和剤無し打継供試体 No.4 時間-透気量相関

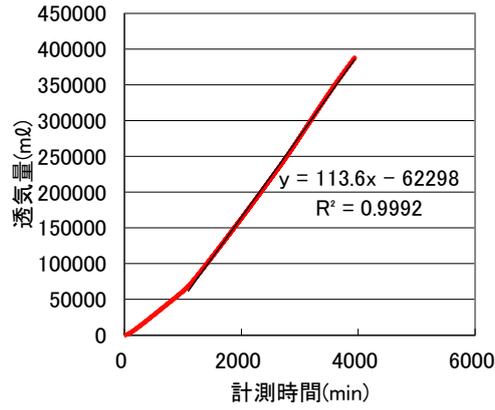


図 4.2.3-34 混和剤無し打継供試体 No.4 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）

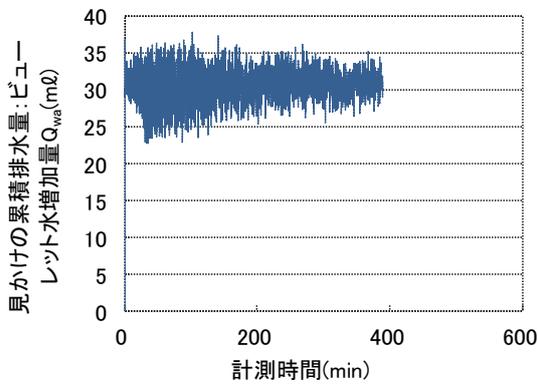


図 4.2.3-35 混和剤無し打継供試体 No.5 時間-排水量相関

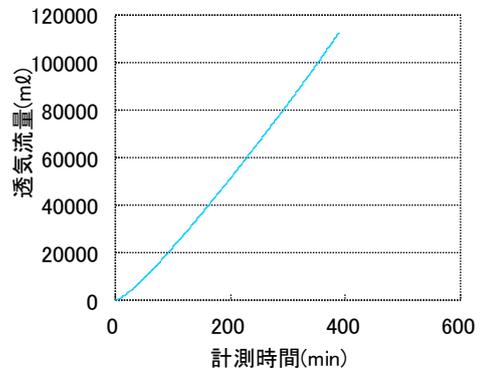


図 4.2.3-36 混和剤無し打継供試体 No.5 時間-透気量相関

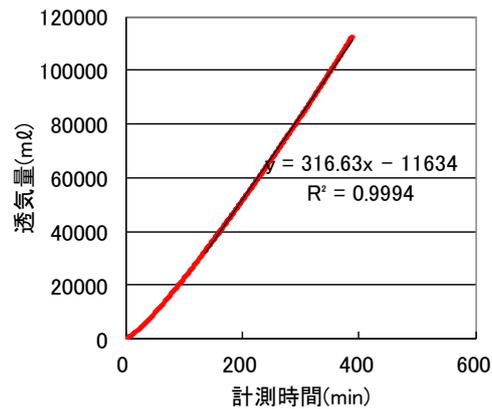


図 4.2.3-37 混和剤無し打継供試体 No.5 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）

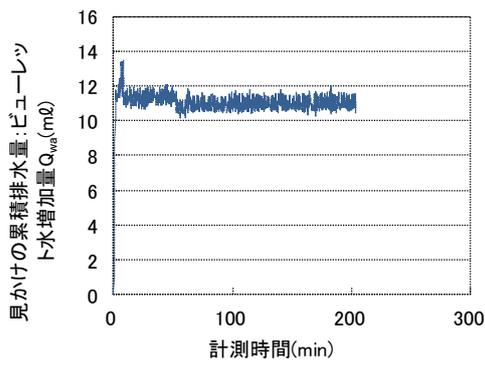


図 4.2.3-38 混和剤無し打継無し供試体 時間-排水量相関

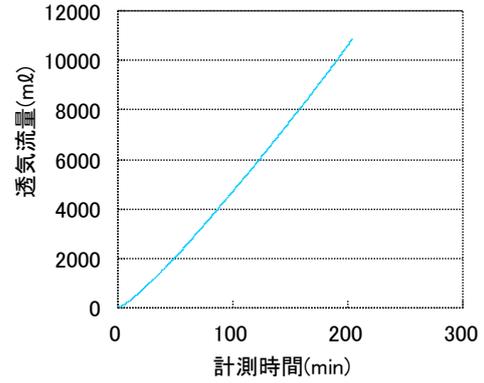


図 4.2.3-39 混和剤無し打継無し供試体 時間-透気量相関

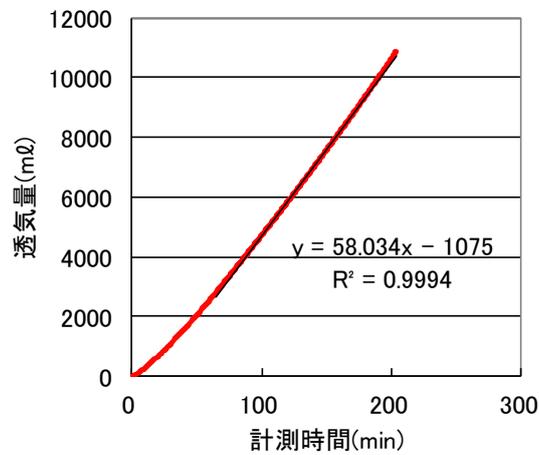


図 4.2.3-40 混和剤無し打継無し供試体の透気量（補正值）の定常区間（黒線）

表 4.2.3-22 混和剤無し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.3	0.52	0.31	0.10	5.43E-15	0.283
No.4	0.51	0.30	0.11	1.40E-14	3.40
No.5	0.51	0.31	0.11	3.64E-14	0.322
打継無し	1.49	0.80	0.10	8.21E-16	0.119

本検討では、水中不溶性離混和剤を用いたモルタルと用いないモルタルにより、実際の打設を模擬して1日後に打継を行った場合に、打継が透水・透気の弱面に成り得るか、そしてその中で物性のバラつきはどの程度かを把握することにより、より現実的な範囲でのガスの移行経路の形成を実験的に確かめた。

実験結果を総合すると以下のようなものである。

表 4.2.3-23 水中不溶性離混和剤有りケース

	透水係数 (m/s)	打継無しからの倍率	透気係数 (m ²)	打継無しからの倍率
打継無し	1.92×10^{-14}	1	5.43×10^{-18}	1
No.3	5.50×10^{-11}	2865	5.24×10^{-17}	10
No.4	4.19×10^{-13}	22	1.58×10^{-18}	0.3
No.5	3.52×10^{-13}	18	1.13×10^{-18}	0.2

表 4.2.3-24 水中不溶性離混和剤無しケース

	透水係数 (m/s)	打継無しからの倍率	透気係数 (m ²)	打継無しからの倍率
打継無し	1.10×10^{-11}	1	8.21×10^{-16}	1
No.3	5.84×10^{-12}	1	5.43×10^{-15}	7
No.4	1.69×10^{-10}	15	1.40×10^{-14}	17
No.5	5.78×10^{-11}	5	3.64×10^{-14}	44

混和剤有りの場合は、No.3 は異常値であるとして除外すると、打継の影響よりむしろモルタルそのもののバラつきの範囲であると考えられる。一方、混和剤無しの場合は、目視では密着していたような打継面であっても7~44倍ガスが通りやすくなると考えるべきである。

最後に、絶対乾燥状態（48時間に亘る炉乾燥後の供試体による）での透気試験を実施した。結果を表 4.2.3-25（混和剤有）および表 4.2.3-26（混和剤無）に示す。透気係数（ガス有効浸透率）は（4.2-2により算定した）。

表 4.2.3-25 混和剤有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)
No.3	1.07	0.22	0.10	1.11E-14
No.4	3.08	0.49	0.11	7.45E-17
No.5	0.53	0.20	0.11	8.02E-14
打継無	2.90	2.77	0.10	1.33E-16

表 4.2.3-26 混和剤無し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)
No.3	0.55	0.20	0.14	4.94E-13
No.4	2.90	0.18	0.14	9.51E-14
No.5	3.04	0.21	0.15	4.01E-14
打継無	2.95	0.51	0.11	4.58E-15

以下に今年度の試験を結果まとめる。

表 4.2.3-27 には、混和剤有り供試体の透水・透気試験結果を示した。打継無を基準として、打継有の透水係数、水飽和時ガス有効浸透率および絶乾時ガス有効浸透率のそれぞれの比率を示した。透水係数においては、No.3 の異常値を除くと 20 倍から 40 倍打継の透水係数が大きい結果となった。水飽和時のガス有効浸透率では打継に対して 0.2 倍から 10 倍の範囲で明瞭な差が認められなかった。絶乾時ガス有効浸透率では 0.6 倍から 603 倍と大きくばらついた。

表 4.2.3-28 に混和剤有り供試体の透水・透気試験前後の重量計測結果を示した。これより求めた水飽和時および絶乾時の間隙率を表 4.2.3-29 に示した。

表 4.2.3-27 混和剤有り供試体の透水・透気試験結果

混和剤有り							
	透水係数 (m/s)	水絶対 浸透率 (m ²)	打継有/ 打継無	水飽和時 ガス有効 浸透率 (m ²)	打継 倍率	絶乾時 ガス絶対 浸透率 (m ²)	打継有/ 打継無
打継無し	1.92E-14	1.92E-21	1	5.08E-18	1	1.33E-16	1
No.3	5.50E-11	5.50E-18	2865	5.24E-17	10	1.11E-14	83
No.4	4.19E-13	4.19E-20	22	1.58E-18	0.3	7.45E-17	0.6
No.5	3.52E-13	3.52E-20	18	1.13E-18	0.2	8.02E-14	602.8

表 4.2.3-28 混和剤有り供試体の透水・透気試験前後の重量計測結果

	供試体重量(g)					
	透水前	透水後	透気前	透気後	透気前	透気後
打継無	196.118	197.772	197.591	197.553	166.404	166.394
No.3	200.016	200.246	200.246	200.027	168.087	168.044
No.4	202.598	204.075	204.075	203.715	172.222	172.084
No.5	201.673	203.101	203.101	203.017	173.189	173.119

表 4.2.3-29 混和剤有り供試体の水飽和時および絶乾時間隙率

	水飽和時排水量 (g)	間隙率 (%)	絶乾時重量差 (g)	間隙率 (%)
No.3	0.219	0.22	32.202	32.80
No.4	0.36	0.37	31.991	32.59
No.5	0.084	0.09	29.982	30.54
打継無	0.219	0.22	31.197	31.78

表 4.2.3-30 には、混和剤無し供試体の透水・透気試験結果を示した。打継無を基準として、打継有の透水係数、水飽和時ガス有効浸透率および絶乾時ガス有効浸透率のそれぞれの比率を示した。透水係数においては、打継の透水係数が 0.5 倍から 161 倍とばらついた。水飽和時のガス有効浸透率では打継に対して 4 倍から 44 倍の範囲で明瞭な差が認められなかった。絶乾時ガス有効浸透率では 0.6 倍から 108 倍とばらついたが、混和剤有りに比べるとバラつきは小さい。

表 4.2.3-31 に混和剤無し供試体の透水・透気試験前後の重量計測結果を示した。これより求めた水飽和時および絶乾時の間隙率を表 4.2.3-32 に示した。

表 4.2.3-30 混和剤無し供試体の透水・透気試験結果

混和剤無し							
	透水係数 (m/s)	水絶対 浸透率 (m ²)	打継有/ 打継無	水飽和時 ガス有効 浸透率 (m ²)	打継 倍率	絶乾時 ガス絶対 浸透率 (m ²)	打継有/ 打継無
打継無し	1.10E-11	1.10E-18	1	8.21E-16	1	4.58E-15	1
No.3	5.84E-12	5.84E-19	0.5	5.43E-15	7	4.94E-13	108
No.4	1.69E-10	1.69E-17	15	1.40E-14	17	9.51E-14	21
No.5	5.78E-11	5.78E-18	5	3.64E-14	44	4.01E-14	9

表 4.2.3-31 混和剤無し供試体の透水・透気試験前後の重量計測結果

	供試体重量(g)					
	透水前	透水後	透気前	透気後	透気前	透気後
打継無	202.002	202.183	202.183	202.064	173.849	173.877
No.3	204.159	204.648	204.648	204.365	173.563	173.492
No.4	210.235	210.279	210.279	206.879	181.517	181.509
No.5	206.698	206.905	206.905	206.583	177.607	179.43

表 4.2.3-32 混和剤無し供試体の水飽和時および絶乾時間隙率

	水飽和時排水量 (g)	間隙率 (%)	絶乾時重量差 (g)	間隙率 (%)
No.3	0.283	0.29	31.156	31.74
No.4	3.4	3.46	28.77	29.30
No.5	0.322	0.33	27.475	27.99
打継無	0.119	0.12	28.306	28.83

求めたガス有効浸透率を有効間隙率に対してプロットしたのが図 4.2-85 である。色塗の印は、透水試験後に窒素ガスを圧入した場合の初期の水飽和時の透気試験結果である。白抜き印で示した絶乾状態のガス有効間隙率は混和剤の有無によらず 28.8~31.9%の範囲であった。水飽和時の透気試験での有効間隙率は、ほとんどのケースで 0.3%以下の小さな間隙をガスが透過していくものであった。

○印の混和剤が無いケース（実線で囲んだ範囲）では、△印の混和剤を用いたケース（破線で囲んだ範囲）と比べて明らかにガス有効浸透率が高くなり、飽和時と絶乾時の有効間隙率の差も小さい。一方、混和剤を用いたケースは、飽和時と絶乾時でおよそ 4 桁の違いがあるが、打継無と打継有供試体に明確な違いがない。従って、処分場スケールで材料特性を考える場合、充填材については、水飽和時から絶乾状態まで同程度のバラつきを持った分布になることを考慮しておく必要がある。

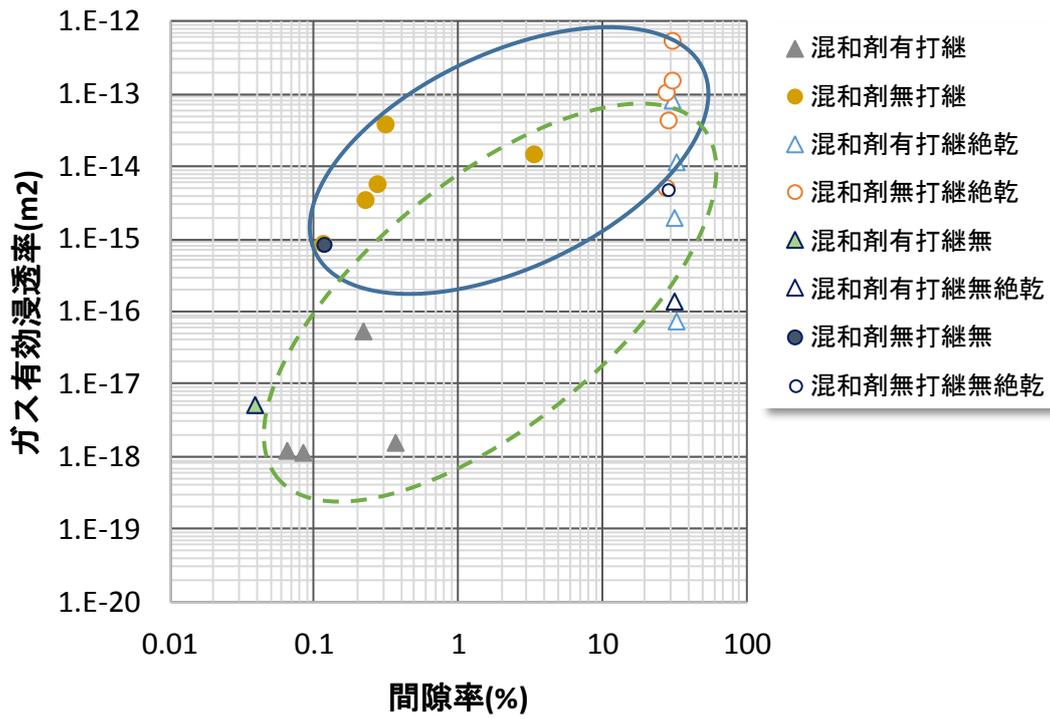


図 4.2-85 間隙率とガス有効浸透率の関係

4.2.4 ガス移行挙動評価に係わる複合システム試験の検討

(1) 実施項目

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 27 年度の検討[16]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、実現可能な複合システム試験の試験体概念、および相似則（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内容を取り纏めた。

本年度は上記の成果をもとに、『4.2.2 ～4.2.3』項の検討から得られた知見を反映しつつ、実現可能な複合システム試験（処分施設閉鎖後長期における人工バリア飽和完了後を評価対象とする）の基本計画等について検討した。

(2) 実施結果

複合システム試験を実施するための基本計画において、特に重要な検討項目を以下の通り選定した。

- ・ 試験体内部の飽和手順（複合材料中の間隙空気の脱気と給水方法、供給圧と給水量の計測方法 等）
- ・ 試験体内部へのガス注入手順（定量供給を基本とした給気量の計測方法、大破過時に想定される大流量計測への対応方法、大破過発生箇所の特定制法 等）
- ・ 試験体の解体方法（ガス注入過程終了後におけるベントナイト緩衝材の状態確認方法、破過経路の特定制法等）
- ・ 実施工程（飽和期間やガス注入期間、および解体調査期間 等）

次項以降に、各項目についての検討結果を示す。

1) 試験体内部の飽和手順の検討結果

試験体内部の飽和手順としては、実処分環境における地下水圧に相当する圧力にて加圧注水し、人工バリアの再冠水過程を模擬しながら実施できることが望ましい。

上記を考慮しつつ、図 4.2.4-1 に示す処分概念[7]を対象に、昨年度の検討[16]において構築したシステム試験体の概念を図 4.2.4-2 に示す。

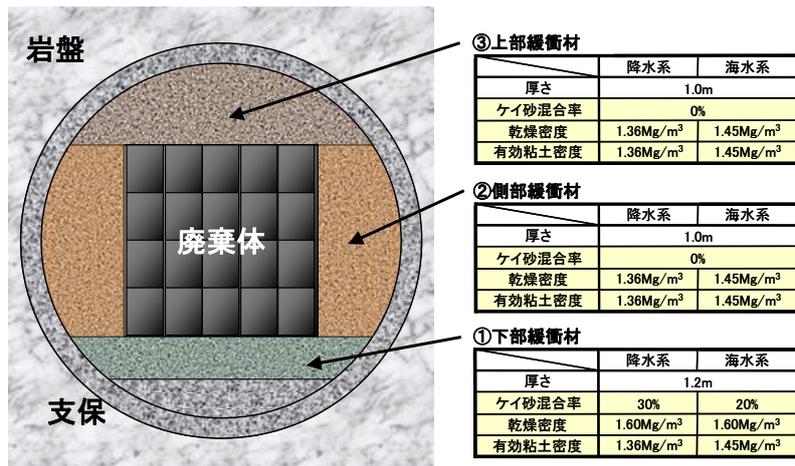


図 4.2.4-1 システム試験で対象とする処分概念
(①廃棄体G 2、円形処分坑道・軟岩系岩盤の概念) [7]

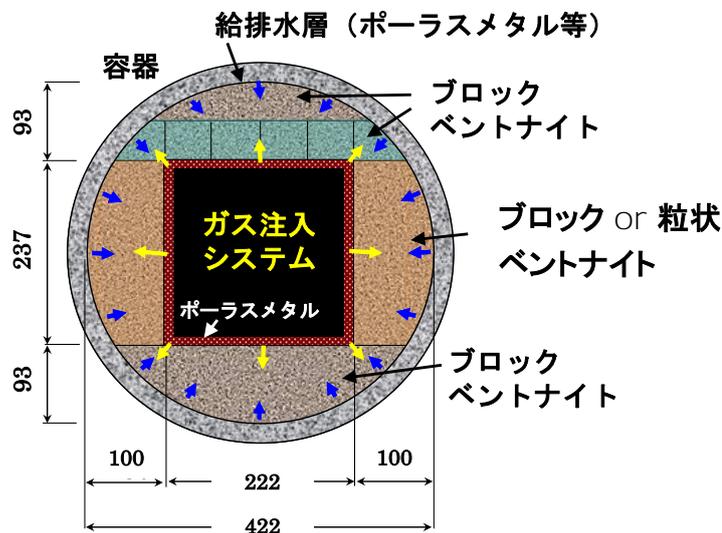


図 4.2.4-2 構築したシステム試験体の概念
(緩衝材最大厚さの 1/10 程度の寸法・規模で検討) [16]

図に示すように、システム試験体の概念では、実処分概念における緩衝材の再冠水過程を模擬するため、支保工に相当する箇所を給水層（ポーラスメタル等の多孔質材で製作、ガス注入試験時には水やガスの排出層となる）としているが、このような外周から内側に向けての注水手順では、試験体内部の残存空気が浸潤してくる注入水中に逐次溶解していくことが想定されるが、水への溶解度を越えた一部の残存空気は注入水の浸潤とともに試験体内の中心（廃棄体部）方向に向けて移行した後、注水圧により圧縮され続けることになる。

このような場合、圧縮空気圧と注水圧との間で圧力勾配が小さくなるため、注水が進展せずに緩衝材の飽和完了までに時間を要する、或いは飽和完了が困難となる可能性がある。

その対策として、圧力勾配を大きくとるために廃棄体部を意図的に大気圧解放することが有効であるが、そのための解放弁を予め試験体内に設置しておく必要がある。これ以外の対策案とし

ては、水への溶解度の大きい CO₂ ガスを注水前の試験体内に予め加圧注入することで圧縮空気をパージ (CO₂ ガスで置換) させ、その後の給水時に注入水中への溶解する効果により、飽和促進が期待できる手法も考えられる。

なお、注水圧については安定した圧力供給の観点から、試験体外部に設置したコンプレッサー装置等による圧縮ガス (空気等) 圧を供給源として、圧力計を取り付けた調整装置 (圧縮ガスの常時排出によって圧力を制御するタイプのレギュレーター等) によって管理することが望ましい。また、給水量については大流量から極微流量まで測定可能な流量計を設置することによって計測することが望ましいが、計測レンジ (計測範囲) を外れる流量となる場合は供給圧を必要に応じて制御することにより、計測可能な給水流量の範囲に調整するものとする。

2) 試験体内部へのガス注入手順の検討結果

試験体内部へのガス注入手順としては、再冠水が完了 (完全飽和) した人工バリアの状態を模擬しながら実施できることが望ましい。すなわち、ガス注入系の圧力供給源は、前述した給水系のものとは独立したシステムで構築する必要がある。ガス注入系の圧力供給源としては工業用ガスボンベ (高純度かつ内圧 14 MPa 程度のもの) が比較的取扱い易く、調整装置 (ガスボンベを供給源とするため密閉式のレギュレーター等を用いる必要がある) によって容易に供給圧力が管理できる。ただし、ガス注入量が比較的多くなることが想定される場合には、複数ボンベの並列化等によって安定した供給量を確保する等の対応策検討が必要となってくるため、高圧のガス取扱いに関する安全管理にも留意する必要がある。なお、試験体内 (ガス注入ラインの末端部等) にも圧力計を設置し、供給圧とのバランス (供給圧と試験体内圧との平衡状態) をモニタリングしながら管理することが重要である。

3) 試験体の解体方法に関する検討結果

ガス注入試験後におけるベントナイト緩衝材の状態確認や、破過経路の特定等を目的として実施する試験体解体の方法としては、試験後の状態を極力維持した状態で実施することが望ましい。

特にガス注入試験終了後の供試体内圧は高くなっていることが想定されるため、減圧後に解体に着手することになるが、減圧に伴う圧力解放時に生じる緩衝材の体積変化 (密度変化) を極力小さくする (試験後の状態を極力維持する) ため、試験体内に設置した間隙圧計を注視しながら内圧が急落しないよう徐々に減圧していく必要がある。なお、減圧時に少なからず緩衝材が体積変化 (膨張) する可能性を考慮して高精度なひずみゲージ等を設置し、体積変化を計測可能な状態にしておくことも重要である。

減圧完了後は緩衝材を中心に解体していくことになるが、前項 (4.2.2 ~4.2.3) で実施した界面を有する供試体での室内試験結果により、システム試験体内部においても各部材の界面付近がガス移行の経路になる可能性が高いことを考慮して、当該箇所を中心に細断・分析するとともに、緩衝材の厚さ方向にも細断してガスの移行状態を調査することが重要である。

4) 実施工程の検討結果

実施工程としては、予備試験、試験体の製作、システム試験体の飽和・ガス注入試験、解体までの全工程を5年程度で完了できる計画であることが望ましい。

ここでは、上記を考慮した完了までの概略工程について検討した。

表 4.2.4-1 に5か年に亘る概略工程案を示す。

注水飽和やガス注入に要する期間は概ね1年以内としているが、試験の状況に応じて工程を延伸する可能性があるため、今後はこれらを考慮した詳細計画の策定が必要である。

表 4.2.4-1 概略工程案

時期 項目	初年度	2年度	3年度	4年度	5年度	備考
詳細 計画	■					試験体の設計／予備 試験計画の策定を含 む
試験 準備		■				予備試験の実施を含 む
供試 体 作製		■	■			計測センサー類の開 発期間を含む
注水 飽和			■	■		(状況に応じて工程延伸)
ガス 注入				■	■	(状況に応じて工程延伸)
解体 調査					■	物性値測定等の期間 を含む

4.3 まとめ

4.3.1 人工バリアシステムのうち底部緩衝材（ベントナイト・砂混合材料）を対象とした力学特性評価試験

- ・ 緩衝材のガス移行に伴う力学特性の知見拡充を目的として、「底部緩衝材（ベントナイト・砂混合材料）」を対象に、「せん断強度特性（内部摩擦角 ϕ' および粘着力 c' ）」のサクシヨン依存性に係るデータを取得し、それらを整理することによって当該力学特性を評価した結果、試験条件で設定したサクシヨン s の範囲（ $0 < s < 800$ kPa、 $600 < s < 1,200$ kPa）では、内部摩擦角 ϕ' はサクシヨンの影響をやや受けていることが分かり、同様の試験条件の範囲（設定したサクシヨンの範囲）で、見かけの粘着力 c' はサクシヨンに比例することが分かった。
- ・ 内部摩擦角 ϕ' を一定と考えれば、上記の特性は Alonso et al.のモデル（バルセロナベリックモデル）と一致し、当該モデルで表現可能であることが分かった。

4.3.2 人工バリアシステムのうち緩衝材（ベントナイト系材料）界面を模擬したガス移行挙動評価試験

- ・ 昨年のスリット 1mm の予備試験結果[16]を反映し、1mm、および 3mm のスリット幅を有する緩衝材を模擬したベントナイト供試体（圧縮成形時の初期飽和度 90%程度）を対象に、緩衝材界面（スリット）の破過挙動への影響について検討したところ、まず供試体を飽和させるための注水方法を検討した結果より、スリット体積の 80%程度に相当する水量を供給する（ゲージ圧は 0 MPa）ことでスリット面側からの選択的な吸水と膨潤が生じ、これに伴って界面は比較的初期の段階で閉塞することが確認できた。その後の給水（ゲージ圧 0.2MPa）においても、スリット部からの選択的な漏水は確認できず、供試体全体の飽和過程に移行していることを確認した。
- ・ 飽和過程における膨潤圧は、スリットの有無、幅の大きさに依らず、大きな差は見られなかった。これは、スリット幅の全体に占める割合（供試体直径 60mm に対してスリット幅 1mm~3mm なので約 1.6~5.0%）が小さいことから、全体の膨潤圧には影響が小さかったためであると考察した。
- ・ 飽和終了後の含水比分布では、スリットが大きい供試体では、スリット部分を中心に含水比が大きく、スリット部分からの飽和の影響は、飽和終了後も狭い範囲ではあるが、局所的に残っていることが確認できた。
- ・ ガス移行過程における結果は、スリット幅が大きいほど、破過圧が小さくなる傾向が確認できた。スリット 3mm の今日下では破過圧はスリットがない供試体に比べて、20%程度低下したが、ともに膨潤圧以上であった。このことから、界面幅の全体占める割合を少なくとも 5%以下に抑えた場合、緩衝材界面が卓越したガス移行経路には成らない可能性が高いと結論付けた。

4.3.3 人工バリアシステムのうち充填材（セメント系材料）界面を対象としたガス移行特性評価試験

- ・ 昨年度実施した予備試験[16]の成果を基に、充填材界面（打継ぎ面）の性状（レイタンス層の有無）がガス移行挙動へ及ぼす影響の程度を把握するため、昨年度実施した比較的高い透水性を有するモルタルを形成する混和剤を用いた配合（レイタンス層が形成されない配合）[16]に加えて、打継部での分離を促すために混和剤を用いない配合（レイタンス層が形成される配合）を用いた検討を行い、それぞれの打継無しの供試体（ガス移行媒体としてのバックグラウンド性状確認）も作製して試験を実施した結果、混和剤を用いた場合、ガス移行特性は打継ぎ面性状の影響は小さく、むしろモルタル自体の（バックグラウンドとなる母材自体の）材料特性のバラつきに大きく影響を受けることが分かった。
- ・ 一方で、混和剤を用いない場合は、目視では密着していたような打継ぎ面であっても、バックグラウンドの透気係数に対して7～44倍程度大きくなることが分かった。

4.3.4 ガス移行挙動評価に係わる複合システム試験の検討

- ・ 昨年度の検討[16]で構築したシステム試験体概念をベースに、実現可能な試験の基本計画を策定したが、このうち供試体内部の飽和手順やガス注入手順の詳細な検討により、試験体内部の飽和手順については、複合材料中の間隙空気の脱気と動水勾配を大きくとる給水方法を策定でき、結果として工程短縮に資する成果を得ることができた。一方で、試験体内部へのガス注入手順については、定量供給を基本とした給気量の計測方法や、大破過時に想定される大流量計測への対応方法、大破過発生箇所の特定期間について策定することができた。
- ・ また、ガス注入過程終了後における試験体の解体方法については、ひずみゲージ等を用いたベントナイト緩衝材の状態確認方法（圧力解放に伴う変形挙動の追従確認）、破過経路の特定に有効な解体手順等を策定することができた。
- ・ 実施工程についても全体を5年程度で完了させるために飽和期間やガス注入期間、および解体調査期間等について検討した結果、基本工期は各々で1年以内とすることが望ましいが、このうち飽和過程やガス注入過程においては、試験状況によって何れか一方の工期延伸の可能性が否定できないため、これらを考慮した詳細計画の策定が今後の課題として抽出できた。

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] 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).
- [8] 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).
- [9] E. Alonso, A. Gens, A. Josa (1990) : A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique*, 40, No.3.
- [10] 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, CS9-19, pp.37-38.
- [11] Jaky, J. (1944): *Talajmechanika (Soil mechanics in Hungarian)*, *J.Hungarian Arch. & Eng.*, Budapest, pp. 355-358.
- [12] 高治, 鈴木：緩衝材の静的力学特性（研究報告）, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 99-041, 1991
- [13] 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.
- [14] 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）.

- [15] 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）。
- [16] 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 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—（2016）。

第5章 まとめ

5.1 平成 28 年度の実施成果のまとめ

本事業においては、TRU 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[4][5][6][7][8][9]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[4][5][6][7][8][9]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 28 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』では、昨年度の検討で構築した評価体系（TRU 廃棄物の各グループを対象に作成してきた既存の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もの）に基づき抽出された「シナリオ設定」に係る不確実性について、その低減策（解決方針）と技術課題への具体的対応策を検討し、課題解決に向けての方法論を明らかにした。

このような取組みを通じた不確実性の低減を図りながら、シナリオからガス移行影響評価上で重要な要素を整理・抽出した上での施設成立性評価（ガス移行影響評価解析）に資する検討として、これまでの検討で構築した既存のガス移行評価シナリオをベースに、ガス移行が律速するものと、それ以外の現象に律速される評価シナリオとに再分類して評価対象とすべき事象や現象（FEP）を絞り込んで整理することで、現実的な評価ケース設定（ガス移行影響評価解析ケース設定）に向けての方法論を明らかにした。

②『ガス移行挙動解析ツールの高度化』の検討では、ガス移行影響評価解析のために必要な、ガス移行モデルや解析コード、並びに既存解析手法の高度化を進めた。その成果として、ガス移行シナリオで想定される（シナリオで蓋然性の高い現象として想定される）ような“ベントナイト緩衝材中やセメント系材料中の界面（施工継ぎ目）におけるガス移行”を確認するために実施した界面を模擬した供試体によるガス試験により（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』により実施）、界面におけるガス移行挙動（供試体からの間隙水や間隙ガスの排出挙動）を把握したとともに、界面「幅」や「性状」が人工バリア材料の透水・透気特性に与える影響の程度を把握した。

また、試験で把握したガス移行挙動をガス移行モデルで再現（フィッティング）することで、界面におけるガス移行挙動を表現可能なモデルパラメータを同定し、現実的なガス移行影響評価解析に向けての方向性を見出した。

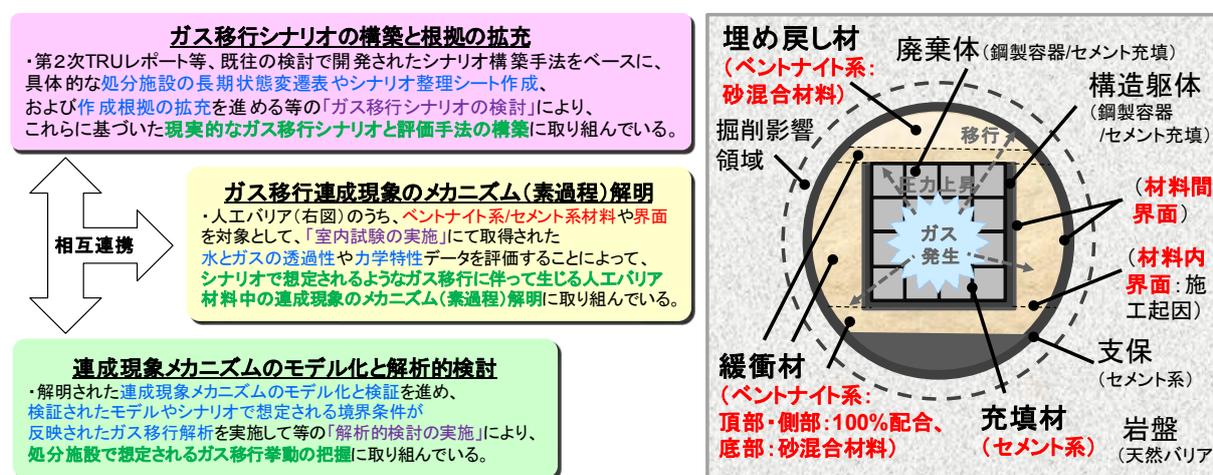


図 5.1.1-1 平成 26-28 年度に取り組んだ各検討項目の相関

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	年度											
		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の処分概念のEBS(人工バリア)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構築・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 △	シナリオ整理シート構築 △	現実的なシナリオに基づく解析評価 △	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 ○	ガス移行シナリオからの重要事象の抽出(○)評価 △			
ガス移行シナリオ構築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検証 ・検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 △			△	△	△	△	△	△	△
		・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) △			△	△	△	△	△	△	△	△	△
		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や重要事象の抽出と安全評価が課題					

図 5.1.1-2 平成 28 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が懸念されているため、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、このうち「界面（同種材料間の施工継ぎ目）」における基本的なガス移行挙動のモデル化は達成できたものの、「界面（異種材料間。例えば廃棄体容器／区画充填モルタル間）」については未確認につき、当該箇所における移行挙動の把握やモデル化が課題であるとともに、確認された知見を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。

また、人工バリアシステムの成立性に重大な影響を与える因子の特定や許容幅の把握等を目的として、本年度の検討で絞り込んだガス移行影響評価上で重要な事象（FEP）を対象とした評価ケースを構築／提示するとともに、評価ケースに対応可能な解析評価手法を構築し、同手法によるガス移行解析や核種移行解析を実施することで、重要事象に与える影響因子の特定や許容幅等を把握するとともに、人工バリアシステムの成立性を評価することが課題である。

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：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] 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 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—（2016）
- [4] 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).
- [5] 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).
- [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 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)
- [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 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)
- [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 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)
- [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 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)