

平成 29 年度
高レベル放射性廃棄物等の地層処分に
関する技術開発事業
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 30 年 3 月

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

本報告書は、経済産業省からの委託研究として、公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 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 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発ーガス移行連成挙動評価手法の開発ーは、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 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発ーヨウ素 129 対策技術の信頼性向上ー
	第 2 分冊	平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発ー炭素 14 長期放出挙動評価ー
	第 3 分冊	平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発ーナチュラルアナログ調査ー
	第 4 分冊	平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発ー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ー
◎	第 5 分冊	平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発ーガス移行連成挙動評価手法の開発ー

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る。その国が前面に立った取組として、平成 29 年 7 月には地層処分に関係する地域の科学的特性が整理された科学的特性マップが公表された。これにより処分地選定調査を進めるために地層処分に関する広範な国民理解を得る重要性が改めて認識されるとともに、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である 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 29 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・拡充	1-10
(1) 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.....	1-12
(2) 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.....	1-13
(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.....	1-16
1.3.2 ガス移行連成挙動解析ツールの高度化.....	1-19
(1) 最新のガス移行試験データによる確証計算.....	1-19
(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	1-22
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.....	1-28
(1) ベントナイト混合材料を用いた不飽和せん断強度特性データの取得	1-28
(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.....	1-30
1.3.4 これまでの検討を踏まえた課題.....	1-33
1.4 実施概要.....	1-39
1.4.1 全体計画	1-39
1.4.2 平成 29 年度の実施概要.....	1-39
(1) 人工バリアシステムのガス移行連成挙動評価（現象理解）	1-39
(2) ガス移行連成挙動解析ツールを用いた人工バリアシステムの成立性評価	1-40
参考文献.....	1-42
第 2 章 人工バリアシステムのガス移行連成挙動の評価（現象理解）	2-1
2.1 背景と目的	2-1
2.2 検討内容（人工バリアシステムの材料界面（廃棄体容器と容器間充填材の境界面）を 対象としたガス移行特性評価試験）	2-2
2.2.1 供試体概要.....	2-4
2.2.2 ガス移行試験方法・手順	2-5
2.3 検討成果（人工バリアシステムのうち充填材（セメント系材料）を対象としたガス移 行特性評価試験）	2-7
2.3.1 供試体作製.....	2-7
2.3.2 供試体の飽和（透水試験結果）	2-17

(1) 試験条件	2-17
(2) 実施状況	2-17
2.3.3 ガス注入試験	2-24
(1) 実施状況	2-24
(2) 供試体へのガス注入過程	2-24
2.3.4 セメント系材料への熱影響による強度低下とガス移行特性への影響について	2-30
2.4 まとめ	2-32
参考文献	2-34
第3章 ガス移行解析ツールを用いた人工バリアシステムの 成立性評価	3-1
3.1 本研究の背景と目的	3-1
3.2 検討内容	3-3
3.2.1 ガス移行解析評価に係る検討内容	3-3
(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）	3-3
(2) 確証データの登録およびデータの追加収集・整備（既存ガス移行データライブラリ の拡充）	3-4
(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 たガス移行挙動の解析的評価	3-5
3.2.2 核種移行評価に係る検討内容	3-8
(1) 核種移行解析評価に使用する解析コードの選定とパラメータの設定	3-8
(2) 核種移行解析の実施等	3-8
(3) TRU 廃棄物処分システム（人工バリア）の成立性評価	3-8
3.3 ガス移行解析評価に係る検討成果	3-9
3.3.1 最新の室内ガス移行試験データによる確証計算	3-9
(1) ガス移行試験の概要	3-9
(2) 本確証計算に用いる解析コード	3-24
(3) 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(スリット 3mm)を対象とした確証計算	3-26
(4) 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(スリット 1mm)を対象とした確証計算	3-36
(5) 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 特性評価試験を対象とした確証計算	3-42
3.3.2 確証データの登録およびデータの追加収集・整備	3-51
(1) データライブラリの概要	3-51
(2) 確証データの登録（データの拡充）	3-53

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解析的評価	3-58
(1) 安全評価上重要となる事象の抽出と把握	3-59
(2) 解析的評価に用いるシナリオの設定	3-72
(3) 解析的評価に用いる評価ケースの設定とモデルの選定	3-79
(4) ガス移行挙動解析の実施	3-86
(5) 出力諸量	3-97
(6) 解析結果	3-98
3.3.4 まとめ	3-115
(1) 最新の室内ガス移行試験データによる確証計算	3-115
(2) 確証データの登録およびデータの追加収集・整備	3-116
(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解析的評価	3-116
3.4 核種移行評価に係る検討成果	3-117
3.4.1 核種移行解析評価に使用する解析コードの選定とパラメータの設定	3-117
(1) 基本的な考え方	3-117
(2) 解析コードの選定	3-118
(3) パラメータの設定	3-118
3.4.2 核種移行解析の実施等	3-119
(1) 解析ケースの設定	3-119
(2) ガス影響についての整理	3-125
(3) 解析モデルの構築	3-139
(4) パラメータ設定	3-141
(5) 核種移行解析の実施	3-151
3.4.3 TRU 廃棄物処分システム（人工バリア）の成立性評価	3-158
(1) 主要核種へ与える影響を考慮した評価	3-158
(2) ガス発生／ガス移行挙動による核種移行への影響評価に関する検討	3-169
3.4.4 まとめ	3-172
(1) 核種移行解析評価に使用する解析コードの選定とパラメータの設定	3-172
(2) 核種移行解析の実施等	3-172
(3) TRU 廃棄物処分システム（人工バリア）の成立性評価	3-172
参考文献	3-173
第 4 章 まとめ	4-1
4.1 平成 29 年度の実施成果のまとめ	4-1
4.2 今後の課題	4-3

参考文献.....	4-4
-----------	-----

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	1-2
図 1.2.1-1	本調査研究において想定対象とする TRU 廃棄物処分の人工バリアの概念図	1-3
図 1.3.1-1	検討実施項目（前フェーズ：平成 19-24 年度）の相関	1-6
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）の全体実施計画と本年度（平成 29 年度）の実施内容	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	重要事象（FEP）抽出と評価の実施イメージ	1-13
図 1.3.1-6	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	1-16
図 1.3.1-7	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シナリオの課題と課題解決方策例	1-17
図 1.3.1-8	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	1-17
図 1.3.2-1	累積排水量の再現結果	1-20
図 1.3.2-2	排気流量の再現結果	1-20
図 1.3.2-3	同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）	1-21
図 1.3.2-4	モデル化の対象とする TRU 廃棄物グループ 2 の処分概念	1-22
図 1.3.2-5	ガス移行解析用モデル（左：全体図、右：人工バリア周辺拡大図）	1-23
図 1.3.2-6	解析結果（ガス圧の経時変化）の出力点（評価点）位置図	1-23
図 1.3.2-7	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	1-26
図 1.3.2-8	ガス相圧力の比較	1-27
図 1.3.3-1	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	1-29
図 1.3.3-2	粘着力のサクシオン依存性	1-30
図 1.3.3-3	人工バリアの現実的な施工手順（ブロック定置方式）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	1-31
図 1.3.3-4	ガス注入（排水）過程における供試体（界面幅 1mm）からの排水挙動と有効応力の経時変化	1-32
図 1.3.3-5	ガス注入（排水）過程における供試体（界面幅 3mm）からの排水挙動と有効応力の経時変化	1-32
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	1-35
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	1-36
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	1-37
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	1-38
図 1.4.1-1	「ガス移行連成挙動評価手法の開発」平成 29 年度 調査研究進捗表	1-39

図 2.2.1-1	人工バリアにおける現実的な施工手順を考慮した 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	2-2
図 2.2.1-2	人工バリア内で卓越移行経路になることが懸念される材料界面（白色破線部）と界面模擬供試体のイメージ	2-3
図 2.2.1-3	供試体の概要	2-4
図 2.2.2-1	ガス移行試験装置の概念図	2-6
図 2.2.2-2	試験の実施フロー	2-6
図 2.3.1-1	細骨材の粒径加積曲線	2-7
図 2.3.1-2	モルタル供試体と熱水の温度計測結果	2-11
図 2.3.1-3	常温養生 28 日強度試験	2-14
図 2.3.1-4	80°C養生 28 日強度試験	2-14
図 2.3.1-5	常温養生 90 日強度試験	2-15
図 2.3.1-6	80°C養生 90 日強度試験	2-15
図 2.3.1-7	モルタルの圧縮強度	2-16
図 2.3.2-1	界面有 28 日 80°C養生供試体	2-20
図 2.3.2-2	界面有 28 日常温養生供試体	2-20
図 2.3.2-3	界面無 28 日 80°C養生供試体	2-20
図 2.3.2-4	界面無 28 日常温養生供試体	2-20
図 2.3.2-5	界面有 80°C養生供試体 No. 1	2-21
図 2.3.2-6	界面有 80°C養生供試体 No. 2	2-21
図 2.3.2-7	界面有常温養生供試体 No.1	2-21
図 2.3.2-8	界面有常温養生供試体 No.2	2-21
図 2.3.2-9	界面無 80°C養生供試体 No.1	2-22
図 2.3.2-10	界面無 80°C養生供試体 No.2	2-22
図 2.3.2-11	界面無常温養生供試体 No.1	2-22
図 2.3.2-12	界面無し常温養生供試体 No.2	2-22
図 2.3.3-1	界面有 80°C-1 時間-排水量関係	2-25
図 2.3.3-2	界面有 80°C-1 時間-透気量関係	2-25
図 2.3.3-3	界面有 80°C-1 の時間-透気量関係の定常区間（黒線）	2-25
図 2.3.3-4	界面有 80°C-2 時間-排水量相関	2-25
図 2.3.3-5	界面有 80°C-2 時間-透気量相関	2-25
図 2.3.3-6	界面有 80°C-2 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）	2-25
図 2.3.3-7	界面有常温-1 時間-排水量相関	2-26
図 2.3.3-8	界面有常温-1 時間-透気量相関	2-26
図 2.3.3-9	界面有常温-1 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）	2-26

図 2.3.3-10	界面有常温-2 時間-排水量相関	2-26
図 2.3.3-11	界面有常温-2 時間-透気量相関	2-26
図 2.3.3-12	界面有常温-2 の透気量 (補正值) の定常区間 (黒線)	2-26
図 2.3.3-13	界面無 80°C-1 時間-排水量相関	2-27
図 2.3.3-14	界面無 80°C-1 時間-透気量相関	2-27
図 2.3.3-15	界面無 80°C-1 の透気量 (補正值) の定常区間 (黒線)	2-27
図 2.3.3-16	界面無 80°C-2 時間-排水量相関	2-28
図 2.3.3-17	界面無 80°C-2 時間-透気量相関	2-28
図 2.3.3-18	界面無 80°C-2 の透気量 (補正值) の定常区間 (黒線)	2-28
図 2.3.3-19	界面無常温-1 時間-排水量相関	2-28
図 2.3.3-20	界面無常温-1 時間-透気量相関	2-28
図 2.3.3-21	界面無常温-1 の透気量 (補正值) の定常区間 (黒線)	2-29
図 2.3.3-22	界面無常温-2 時間-排水量相関	2-29
図 2.3.3-23	界面無常温-2 時間-透気量相関	2-29
図 2.3.3-24	界面無常温-2 の透気量 (補正值) の定常区間 (黒線)	2-29
図 2.3.4-1	温度養生前の細孔径分布	2-31
図 2.3.4-2	W/C=60%の温度養生後の細孔径分布	2-31
図 2.4.1-1	界面の有無と透水試験から求めた透過係数の関係	2-32
図 2.4.1-2	界面の有無と透気試験から求めた透過係数の関係	2-32
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	3-3
図 3.2.1-1	鉛直 2 次元断面モデルの例	3-6
図 3.2.1-2	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)	3-7
図 3.2.1-3	既往検討 (排水過程) で同定された毛細管圧力曲線	3-7
図 3.3.1-1	ベントナイト界面(スリット 3mm)を含む供試体による再冠水フェーズの試験結果	3-13
図 3.3.1-2	ベントナイト界面(スリット 3mm)を含む供試体によるガス注入フェーズの試験結果 (No.2)	3-14
図 3.3.1-3	ベントナイト界面(スリット 3mm)を含む供試体による解体試験の試験結果 (1/2)	3-15
図 3.3.1-4	ベントナイト界面(スリット 3mm)を含む供試体による解体試験の試験結果 (2/2)	3-16
図 3.3.1-5	ベントナイト界面(スリット 1mm)を含む供試体による再冠水フェーズの試験結果	3-18
図 3.3.1-6	ガス移行試験装置概要図	3-19
図 3.3.1-7	モルタル供試体による変水位透水試験結果 (累積排水量)	3-21

図 3.3.1-8	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）	3-22
図 3.3.1-9	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）	3-23
図 3.3.1-10	流路拡幅前後の間隙率と絶対浸透率の変化イメージ	3-25
図 3.3.1-11	解析モデルの基本諸元	3-27
図 3.3.1-12	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]	3-30
図 3.3.1-13	GETFLOWS+UCODE_2014による逆解析の流れ	3-31
図 3.3.1-14	累積注水量の再現結果（再冠水フェーズ、No.2）	3-32
図 3.3.1-15	同定された毛細管圧力（左）と相対浸透率（右）（再冠水フェーズ、No.2）	3-33
図 3.3.1-16	既往検討（浸潤過程）で同定された相対浸透率曲線（左：水相、右：ガス圧）	3-33
図 3.3.1-17	既往検討（浸潤過程）で同定された毛細管圧力曲線	3-33
図 3.3.1-18	累積排水量の再現結果（ガス注入フェーズ、No.2）	3-34
図 3.3.1-19	排気流量の再現結果（ガス注入フェーズ、No.2）	3-34
図 3.3.1-20	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.2）	3-35
図 3.3.1-21	解析モデルの基本諸元	3-37
図 3.3.1-22	累積注水量の再現結果（再冠水フェーズ、No.1）	3-39
図 3.3.1-23	累積注水量の再現結果（再冠水フェーズ、No.2）	3-40
図 3.3.1-24	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）	3-40
図 3.3.1-25	既往検討及び本検討で同定され水相（左）と気相（右）の相対浸透率	3-41
図 3.3.1-26	既往検討及び本検討で同定された毛細管圧力	3-41
図 3.3.1-27	推定した真の累積排水量・累積排気量	3-43
図 3.3.1-28	解析モデルの基本諸元	3-44
図 3.3.1-29	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	3-46
図 3.3.1-30	実測値から推定されるガス透気試験時の絶対浸透率（混和剤無し、No.3）	3-48
図 3.3.1-31	累積排水量と累積排気量の再現結果・同定された二相流曲線	3-50
図 3.3.2-1	データライブラリの基本構成	3-51
図 3.3.2-2	データライブラリを用いた実行処理の流れ	3-51
図 3.3.3-1	ガス挙動を考慮した安全評価体系	3-59
図 3.3.3-2	グループ2の統合FEPの関連図	3-60
図 3.3.3-3	評価シナリオ設定フロー	3-62
図 3.3.3-4	評価ケースとモデル選定の作業	3-64
図 3.3.3-5	重要要素の不確実性の伝播	3-67
図 3.3.3-6	シナリオ設定作業で最も優先度の高い技術課題	3-70
図 3.3.3-7	統合FEPを用いた関連図における複合プロセスの扱い	3-71
図 3.3.3-8	ガス移行と核種移行の統合FEP関連図	3-72
図 3.3.3-9	解析的評価に用いる複合プロセスのシナリオ分類例	3-73

図 3.3.3-10	ガス挙動が支配的なシナリオの構成要素	3-74
図 3.3.3-11	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構成要素	3-75
図 3.3.3-12	ガス挙動と核種移行挙動の PID 例	3-76
図 3.3.3-13	複合プロセスのイメージ化	3-76
図 3.3.3-14	ガスと核種が移行する媒体（環境）	3-77
図 3.3.3-15	媒体中の複合プロセス	3-78
図 3.3.3-16	検討概要と進め方	3-79
図 3.3.3-17	複合プロセスのモデルチェーンのイメージと評価ケースへの展開例	3-80
図 3.3.3-18	解析的評価ケースの設定例	3-81
図 3.3.3-19	放射性核種移行解析のモデル化	3-82
図 3.3.3-20	ガス挙動解析モデル例	3-83
図 3.3.3-21	モデル化の対象とする処分システム	3-86
図 3.3.3-22	不確実性を考慮したガス移行解析用モデル（左：全体図、右：人工バリア周辺 拡大図）	3-87
図 3.3.3-23	詳細評価解析用モデル（左：全体図、右：人工バリア周辺拡大図）	3-88
図 3.3.3-24	相対浸透率と毛細管圧力曲線（廃棄体、構造躯体、支保工、インバート）	3-93
図 3.3.3-25	相対浸透率と毛細管圧力曲線（緩衝材）（B1 ケース）	3-93
図 3.3.3-26	相対浸透率と毛細管圧力曲線（緩衝材）（B2 ケース）	3-94
図 3.3.3-27	相対浸透率と毛細管圧力曲線（掘削影響域、岩盤）	3-94
図 3.3.3-28	初期・境界条件	3-95
図 3.3.3-29	ガス発生速度の時間変化（出典：安藤ら, 2005）	3-96
図 3.3.3-30	評価点位置図（左：2007 年モデル図、右：2010 年モデル図）	3-97
図 3.3.3-31	廃棄体外側への排水量ピーク値	3-100
図 3.3.3-32	緩衝材外側への排水量ピーク値	3-101
図 3.3.3-33	廃棄体外側への累積排水量ピーク値	3-102
図 3.3.3-34	緩衝材外側への累積排水量ピーク値	3-103
図 3.3.3-35	廃棄体外側・緩衝材外側・坑道外側への排水量	3-106
図 3.3.3-36	廃棄体外側・緩衝材外側・坑道外側への累積排水量	3-107
図 3.3.3-37	廃棄体ガス相圧力	3-108
図 3.3.3-38	ガス相圧力の比較（ガス発生量 1 倍ケース）	3-109
図 3.3.3-39	ガス相圧力の比較（ガス発生量 10 倍ケース）	3-110
図 3.3.3-40	水相飽和度の比較（ガス発生量 1 倍ケース）	3-111
図 3.3.3-41	水相飽和度の比較（ガス発生量 10 倍ケース）	3-112
図 3.3.3-42	流路拡幅箇所と比較（ガス発生量 1 倍ケース）	3-113
図 3.3.3-43	流路拡幅箇所と比較（ガス発生量 10 倍ケース）	3-114
図 3.4.2-1	第 2 次 TRU レポートにおけるガス事象のロジックツリー	3-120

図 3.4.2-2	本検討におけるガス事象のロジックツリー	3-121
図 3.4.2-3	ガス発生量の評価結果（堆積岩系岩盤、廃棄体グループ2／キャニスタ）	3-125
図 3.4.2-4	廃棄体外側境界でのガス移行解析結果（G1W1B1P0）	3-126
図 3.4.2-5	緩衝材外側境界でのガス移行解析結果（G1W1B1P0）	3-126
図 3.4.2-6	廃棄体外側境界および緩衝材外側境界でのガス移行解析結果（G1W2B2P1）	3-127
図 3.4.2-7	流路拡幅状況（G1W2B2P1）	3-127
図 3.4.2-8	廃棄体外側境界および緩衝材外側境界でのガス移行解析結果（G1W2B2P2）	3-128
図 3.4.2-9	流路拡幅状況（G1W2B2P2）	3-128
図 3.4.2-10	廃棄体外側境界および緩衝材外側境界でのガス移行解析結果（G3W1B2P1）	3-129
図 3.4.2-11	流路拡幅状況（G3W1B2P1）	3-129
図 3.4.2-12	廃棄体外側境界および緩衝材外側境界でのガス移行解析結果（G3W1B2P2）	3-130
図 3.4.2-13	流路拡幅状況（G3W2B2P2）	3-130
図 3.4.2-14	流路拡幅状態の設定に応じた核種移行モデルの考え方	3-132
図 3.4.2-15	ガス移行解析の観測点（廃棄体外側境界と緩衝材外側境界）	3-133
図 3.4.2-16	核種移行解析上のガス移行解析結果の近似（G1W1B1P0）	3-134
図 3.4.2-17	核種移行解析上のガス移行解析結果の近似（G1W2B2P1）	3-135
図 3.4.2-18	核種移行解析上のガス移行解析結果の近似（G1W2B2P2）	3-136
図 3.4.2-19	核種移行解析上のガス移行解析結果の近似（G3W1B2P1）	3-137
図 3.4.2-20	核種移行解析上のガス移行解析結果の近似（G3W1B2P2）	3-138
図 3.4.2-21	核種移行経路の概念図	3-139
図 3.4.2-22	廃棄体と廃棄体パッケージ	3-143
図 3.4.2-23	軟岩系岩盤の処分坑道断面図（SR-C、深度 500m、円形断面）	3-144
図 3.4.2-24	軟岩系岩盤のレイアウト（SR-C、深度 500m、円形断面）	3-145
図 3.4.2-25	各観測点でのフラックス（リファレンスケース）	3-151
図 3.4.2-26	各観測点での線量率（リファレンスケース）	3-151
図 3.4.2-27	各観測点でのフラックス（G1W1B1P0）	3-152
図 3.4.2-28	各観測点での線量率（G1W1B1P0）	3-152
図 3.4.2-29	各観測点でのフラックス（G1W2B2P1）	3-153
図 3.4.2-30	各観測点での線量率（G1W2B2P1）	3-153
図 3.4.2-31	各観測点でのフラックス（G1W2B2P2）	3-154
図 3.4.2-32	各観測点での線量率（G1W2B2P2）	3-154
図 3.4.2-33	各観測点でのフラックス（G3W1B2P1 開口幅:1.0m）	3-155
図 3.4.2-34	各観測点での線量率（G3W1B2P1 開口幅:1.0m）	3-155
図 3.4.2-35	各観測点でのフラックス（G3W1B2P1 開口幅:2.2m）	3-156
図 3.4.2-36	各観測点での線量率（G3W1B2P1 開口幅:2.2m）	3-156
図 3.4.2-37	各観測点でのフラックス（G3W1B2P2）	3-157

図 3.4.2-38 各観測点での線量率 (G3W1B2P2)	3-157
図 3.4.3-1 解析ケース毎の人工バリア出口フラックスの比較 (C-14)	3-158
図 3.4.3-2 解析ケース毎の人工バリア出口フラックスの比較 (NI-63)	3-158
図 3.4.3-3 解析ケース毎の人工バリア出口フラックスの比較 (Sr-90)	3-159
図 3.4.3-4 解析ケース毎の人工バリア出口フラックスの比較 (Cs-137)	3-159
図 3.4.3-5 解析ケース毎の人工バリア出口フラックスの比較 (Am-241)	3-160
図 3.4.3-6 多重バリア内での核種の存在割合 (Ni-63)	3-162
図 3.4.3-7 多重バリア内での核種の存在割合 (Sr-90)	3-163
図 3.4.3-8 多重バリア内での核種の存在割合 (Cs-137)	3-164
図 3.4.3-9 多重バリア内での核種の存在割合 (Am-241)	3-165
図 3.4.3-10 多重バリア内での核種の存在割合 (Cl-36)	3-166
図 3.4.3-11 多重バリア内での核種の存在割合 (I-129)	3-167
図 3.4.3-12 多重バリア内での核種の存在割合 (C-14)	3-168
図 3.4.3-13 ガス移行解析結果の近似と EDZ フラックス	3-169
図 3.4.3-14 EDZ フラックスにおける解析ケースの比較 (Sr-90)	3-170
図 3.4.3-15 生物圏での線量率における解析ケースの比較 (C-14)	3-171
図 4.1.1-1 平成 26-29 年度に取り組んだ各検討項目の相関	4-2
図 4.1.1-2 平成 29 年度までの検討で得られた成果と進捗状況の整理	4-2

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 1.3.1-1 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.....	1-15
表 1.3.1-2 不確実性と具体的な解決策例.....	1-18
表 1.3.2-1 同定された 2 相流パラメータ.....	1-21
表 1.3.2-2 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）.....	1-21
表 1.3.2-3 解析ケース一覧.....	1-24
表 1.3.2-4 各解析ケースに適用したモデルおよびパラメータ.....	1-24
表 1.3.3-1 三軸試験ケース	1-29
表 2.2.1-1 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.....	2-3
表 2.2.1-1 モルタルの配合	2-5
表 2.2.1-2 試験ケースと試験数量	2-5
表 2.3.1-1 供試体モルタルの配合	2-7
表 2.3.1-2 常温養生 28 日強度試験結果一覧.....	2-14
表 2.3.1-3 80℃養生 28 日強度試験結果一覧	2-14
表 2.3.1-4 常温養生 90 日強度試験結果一覧.....	2-15
表 2.3.1-5 80℃養生 90 日強度試験結果一覧	2-15
表 2.3.1-6 常温養生ケースと 80℃養生ケースの 28 日および 91 日強度	2-15
表 2.3.1-7 常温養生ケースと 80℃養生ケースの 28 日および 91 日養生の単位体積重量	2-16
表 2.3.2-1 試験条件.....	2-17
表 2.3.2-2 材料作製および透水試験の実施状況.....	2-17
表 2.3.2-3 界面有供試体の状況	2-18
表 2.3.2-4 界面無供試体の状況	2-19
表 2.3.2-5 界面有 28 日 80℃養生試体と常温養生透水試験結果.....	2-20
表 2.3.2-6 界面無 28 日 80℃養生試体と常温養生透水試験結果.....	2-21
表 2.3.2-7 透水試験結果.....	2-23
表 2.3.2-8 モルタル供試体 寸法および透水試験前後の重量比較	2-23
表 2.3.3-1 ガス注入試験の実施状況.....	2-24
表 2.3.3-2 界面有供試体の透気試験結果.....	2-27
表 2.3.3-3 界面無供試体の透気試験結果.....	2-30

表 2.3.3-4	界面有供試体の試験結果.....	2-30
表 2.3.3-5	界面無供試体の試験結果.....	2-30
表 3.2.1-1	検討対象とする昨年度実施された試験一覧	3-4
表 3.3.1-1	各試験フェーズにおける試験条件と実測データ	3-10
表 3.3.1-2	供試体の試験実施状況	3-11
表 3.3.1-3	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スリット 3mm）	3-12
表 3.3.1-4	注水速度から算定した絶対浸透率（圧縮ベントナイト界面スリット 1mm）	3-17
表 3.3.1-5	各供試体の寸法、試験条件および実測データの整理.....	3-20
表 3.3.1-6	再冠水フェーズで用いる相対浸透率や毛細管圧力を表現する構成モデル.....	3-29
表 3.3.1-7	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）	3-29
表 3.3.1-8	同定された 2 相流パラメータ（再冠水フェーズ、No.2）	3-33
表 3.3.1-9	同定された 2 相流パラメータ（ガス注入フェーズ、No.2）	3-35
表 3.3.1-10	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.2）	3-35
表 3.3.1-11	同定された 2 相流パラメータ（再冠水フェーズ、No.1、No.2）	3-40
表 3.3.1-12	既往検討及び本検討で同定された 2 相流パラメータ	3-41
表 3.3.1-13	同定された 2 相流パラメータ	3-49
表 3.3.2-1	各モジュールの要求機能.....	3-52
表 3.3.2-2	開発環境.....	3-52
表 3.3.2-3	同定された基本物性一覧.....	3-54
表 3.3.2-4	同定された非線形物性一覧（毛細管圧力）	3-55
表 3.3.2-5	同定された非線形物性一覧（相対浸透率）	3-56
表 3.3.2-6	同定された非線形物性一覧（空隙損傷モデルパラメータ）	3-57
表 3.3.2-7	相対浸透率を表現する構成モデル（1/2）	3-57
表 3.3.2-8	毛細管圧力を表現する構成モデル（2/2）	3-57
表 3.3.3-1	状態変遷表から抽出された重要要素と不確実性のまとめ.....	3-61
表 3.3.3-2	評価シナリオ設定作業の重要要素と不確実性の整理.....	3-63
表 3.3.3-3	評価ケースとモデル選定の重要要素と不確実性の整理	3-64
表 3.3.3-4	重要要素に対する評価例.....	3-66
表 3.3.3-5	重要要素の不確実性への対応例	3-69
表 3.3.3-6	複合プロセスに着目した安全評価体系作業要素のまとめ.....	3-85
表 3.3.3-7	不確実性を考慮したガス移行解析のケース一覧	3-90
表 3.3.3-8	水理物性一覧.....	3-92
表 3.3.3-9	相対浸透率曲線を表現する構成モデル	3-93
表 3.3.3-10	毛細管圧力曲線を表現する構成モデル	3-93

表 3.3.3-11 空隙損傷モデルパラメータ (B1P1、B2P1、B2P2 ケース)	3-94
表 3.3.3-12 排水量・累積排水量ピーク値(廃棄体・緩衝材・坑道).....	3-99
表 3.3.3-13 詳細評価解析ケース一覧.....	3-105
表 3.4.2-1 不確実性を考慮したガス移行解析のケース一覧	3-123
表 3.4.2-2 ガス影響を考慮した核種移行解析のケース設定	3-124
表 3.4.2-3 評価対象廃棄物	3-141
表 3.4.2-4 核種移行評価で用いるモデルインベントリ (Gr2-C)	3-142
表 3.4.2-5 核種漏えいモデルに応じた初期インベントリの分配.....	3-147
表 3.4.2-6 溶解度および収着分配係数	3-148
表 3.4.2-7 媒体物性諸元.....	3-149
表 3.4.2-8 天然バリアに関する条件設定.....	3-150

第1章 事業概要

1.1 背景

TRU 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。

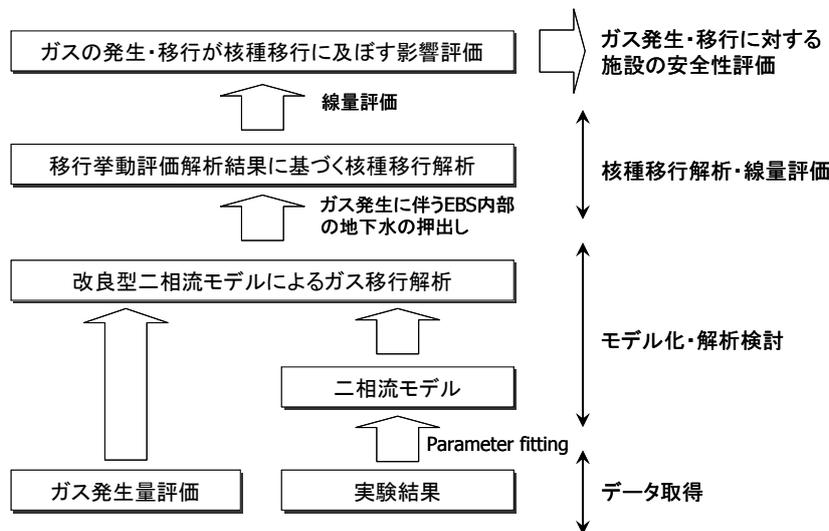


図 1.1.1-1 ガス移行挙動解析に基づくガス影響評価の流れ

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。

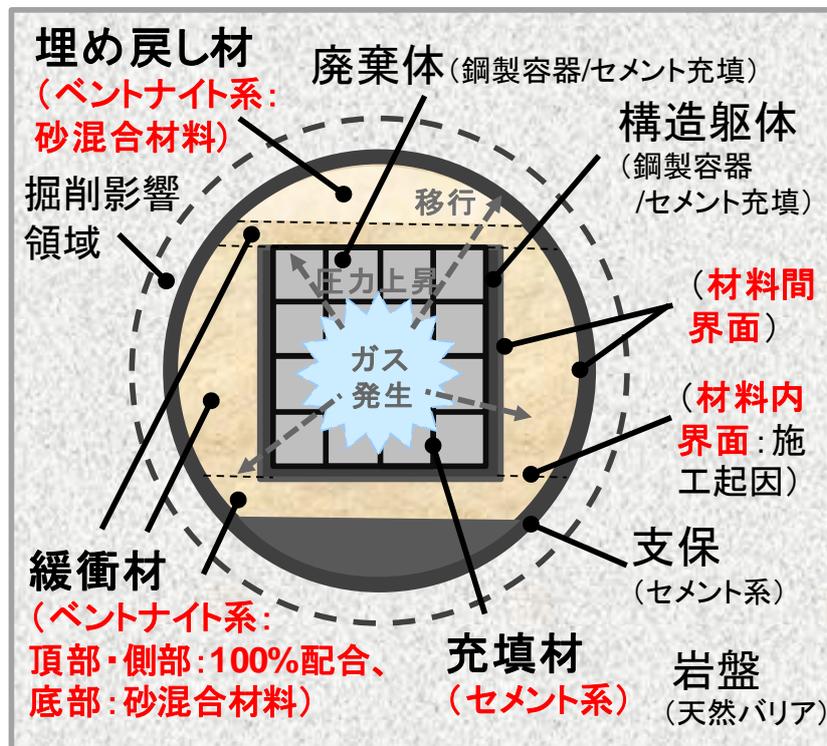


図 1.2.1-1 本調査研究において想定対象とする TRU 廃棄物処分の人工バリアの概念図

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。

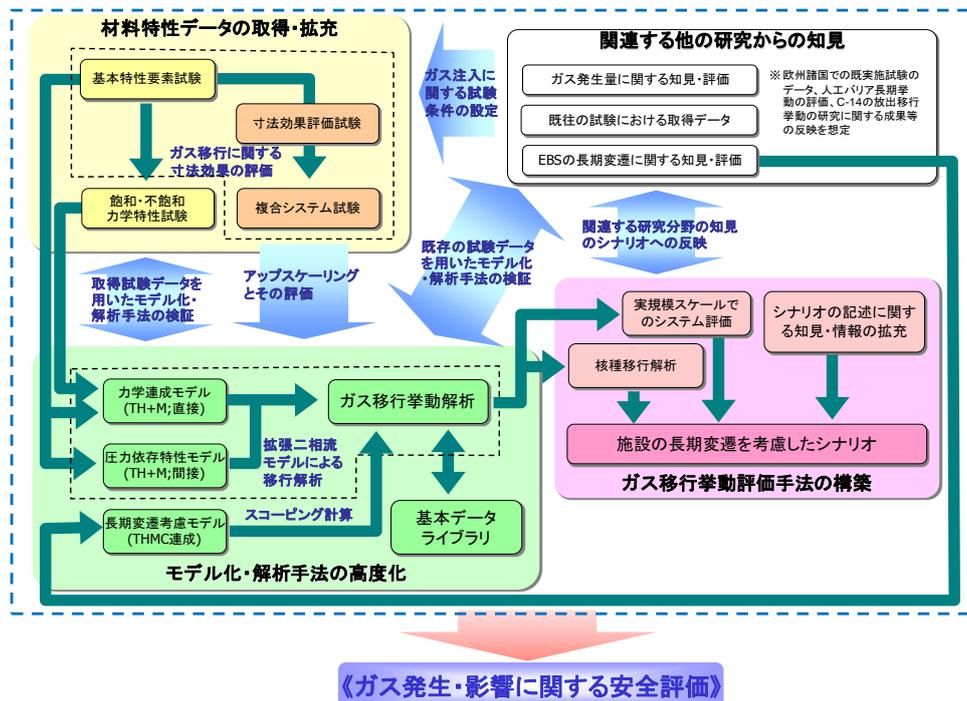


図 1.3.1-1 検討実施項目（前フェーズ：平成 19-24 年度）の相互関係

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、並びに本年度（平成 29 年度）の実施内容を示す。

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。

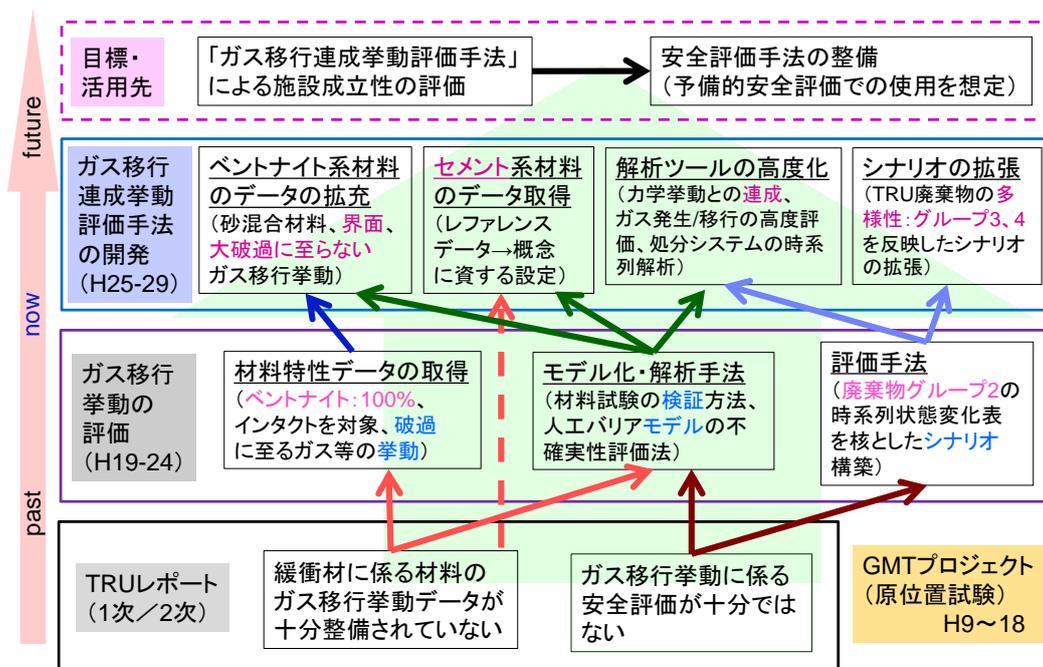


図 1.3.1-2 ガス移行連成挙動評価手法の流れや展開

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)	全体計画の策定	年度の実実施計画策定	年度の実実施計画策定	年度の実実施計画策定	年度の実実施計画策定 次フェーズに向けた課題抽出	目標成果 開発した「ガス移行連成挙動評価手法」による 施設成立性の評価 (技術移転) 安全評価手法の整備 予備的安全評価(NUMO)で使用 ・ガス移行連成解析モデルと評価手法 (不確定な要素) ・廃棄物インベントリー ・処分サイト環境 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／移行モデルとの連成挙動評価
2. ガス移行評価シナリオの拡充	ガス移行挙動評価手法の構築 予備的安全評価に係る検討 システム試験の提案	・ガス移行挙動評価シナリオの高度化に係る課題抽出 ・廃棄物グループ3のシナリオ検討	・廃棄物グループ1および4のシナリオ検討 ・ガス発生に係る不確実性の検討	・ガス影響に対する評価体系の整備 ・整備した評価体系に基づく技術課題の解決に向けた検討	・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 ・重要度を考慮した具体的対応策の取組み	・ガス移行挙動評価シナリオに関するとりまとめ	
3. ガス移行連成挙動解析ツールの高度化	材料試験の検証による解析・モデル化および不確実性の評価に係る検討 ガス移行データライブラリの構築	・課題の整理と実施項目の設定 ・確認および試験の実施	・施設のガス発生や力学条件等のモデル化と確認 ・材料の変形構成 (THMおよびTHC連成) のモデル化と確認 ・処分施設のガス移行挙動と影響評価解析手法の確立			・重要なガス移行シナリオの反映した核種移行解析評価 ・ガス移行解析・モデル化手法の構築に関する知見のとりまとめ	
4. 人工バリアシステムのガス移行連成挙動評価(現象理解)	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	・ガス発生条件(ガス圧)等を考慮した界面のガス移行特性把握試験 ・圧密変形特性取得試験	・せん断強度特性取得試験	・ベントナイト系材料のガス移行特性のとりまとめ ・ベントナイト砂混合材料の材料特性のとりまとめ	
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			・ガス移行試験の複合システム化に係る予備検討	・ガス移行試験の複合システム化に係る詳細検討		・ガス移行試験の複合システム化に係る取りまとめ	
4-2. セメント系材料のガス移行挙動データの取得		・セメント系バリアのガス移行挙動の課題の整理と試験条件の設定 ・予備データの取得	・セメント系バリアのガス二相流特性把握試験(透気性を有するモルタル供試体)	・現実的なセメント系材料(充填材)の特性や界面(施工継ぎ面)を考慮した気液二相流特性の把握試験		・セメント系バリアのガス移行挙動に係る知見のとりまとめ	
研究の評価			中間評価(到達点および課題の確認、全体計画の見直し)			総合評価 5年間の取りまとめ	

図 1.3.1-3 平成 25 年度に策定した 5 カ年 (H25-29) の全体実施計画と本年度 (平成 29 年度) の実施内容

1.3.1 ガス移行評価シナリオの拡張・拡充

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 1.3.1-1、「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・抽出した。

平成 28 年度[14]は、平成 27 年度に整理・抽出した重要要素から、特にガス発生影響評価上で重要となる事象（FEP）の抽出・絞込みや、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に係る検討を進めた。

具体的な実施内容を以降に示す。

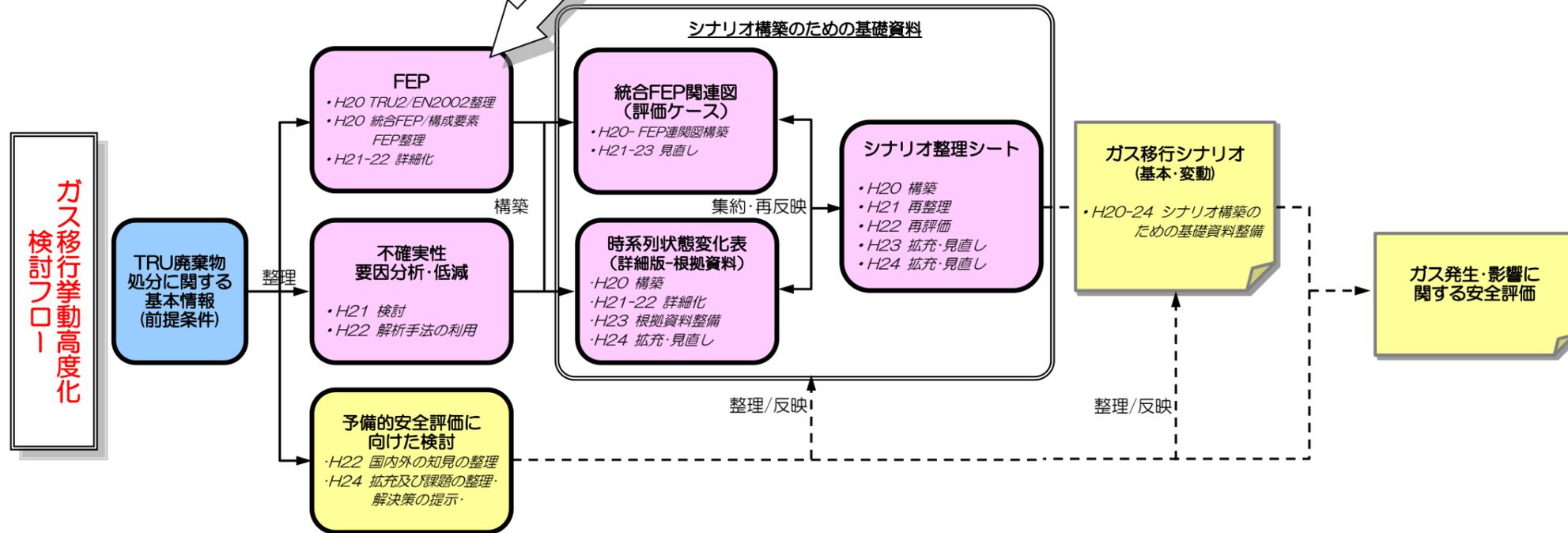
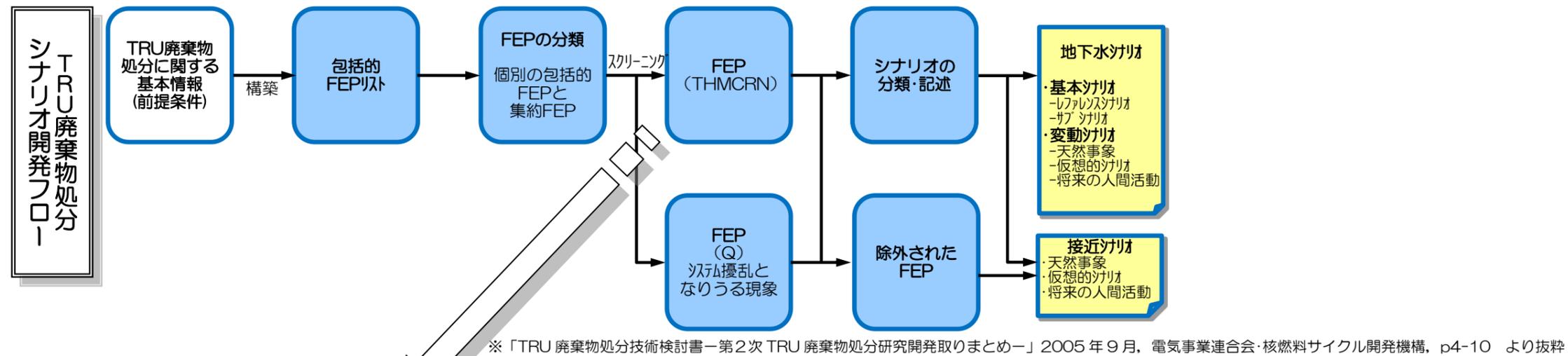
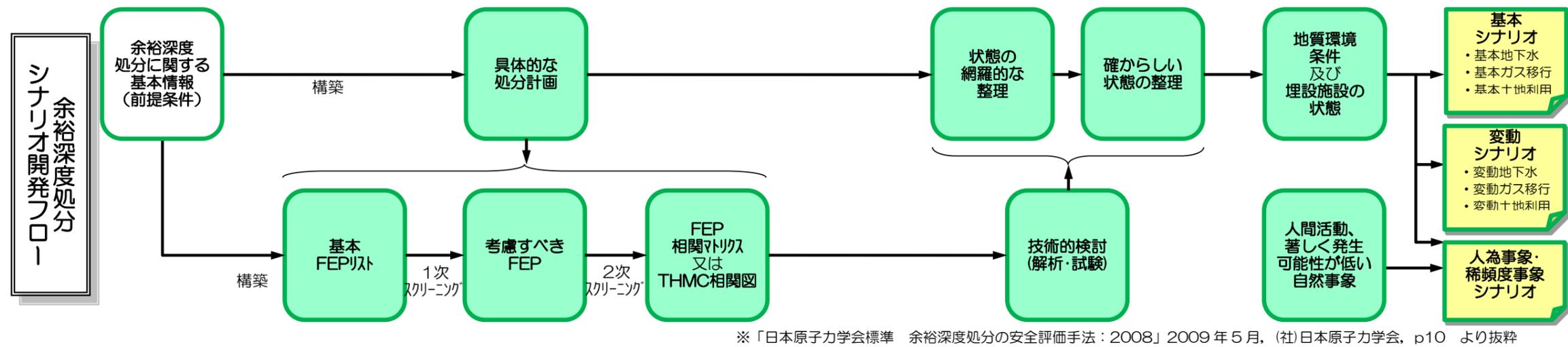


図 1.3.1-1 ガス移行挙動高度化検討フローと既存の処分シナリオ開発フロー

(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

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[11][12]）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[13]）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[14]）を、過年度（平成 25～27 年度[11][12][13]）の実施成果との相関と併せて図 1.3.1-2 に示す。

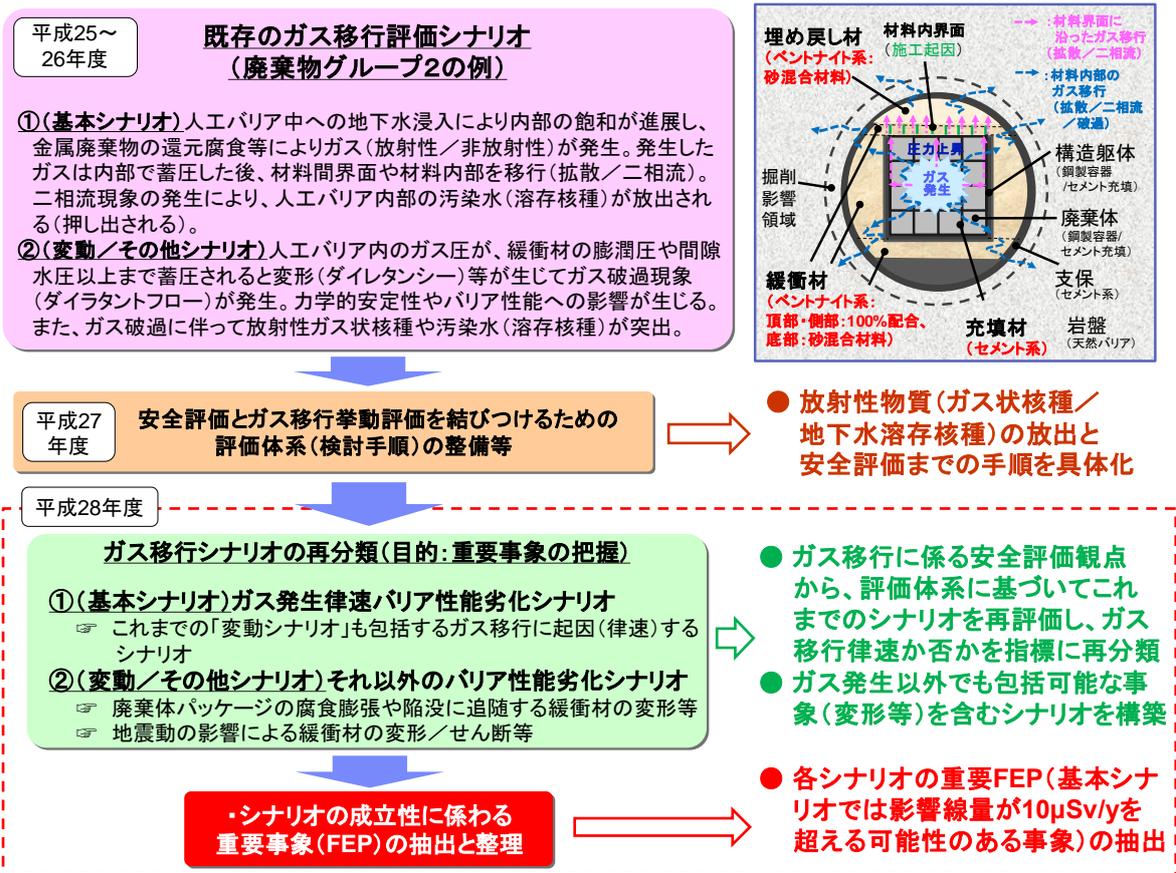


図 1.3.1-2 重要事象 (FEP) 抽出と評価の実施イメージ

(2) 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 1.3.1-1 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、まだ十分な確認が得られていない。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

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 1.3.1-1 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、断層面に沿った二相流での移行、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 	<p>TRU処分では評価された例がなく、全て今後の課題となる</p>
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 	

(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

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。

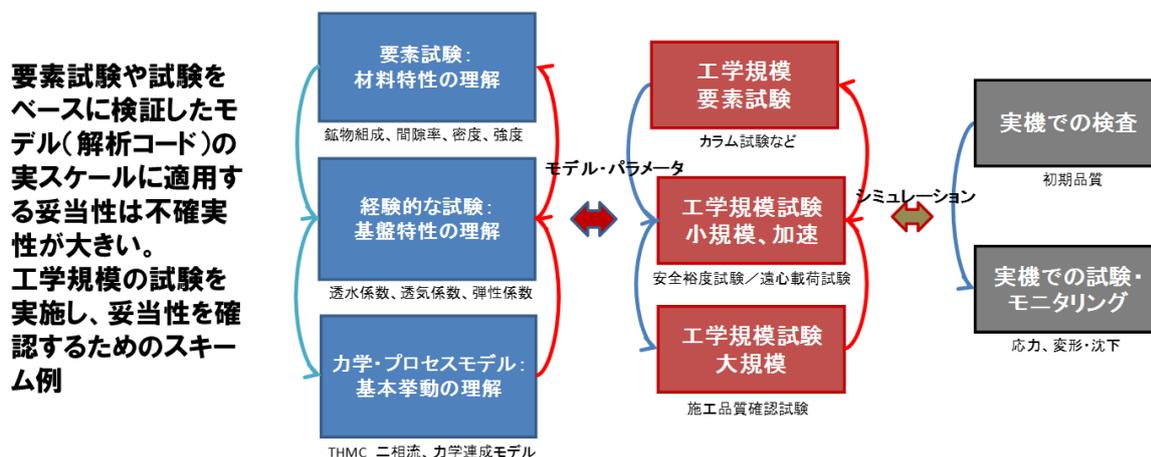


図 1.3.1-3 ガス発生の影響が支配的となるシナリオでの不確実性低減方策例

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。

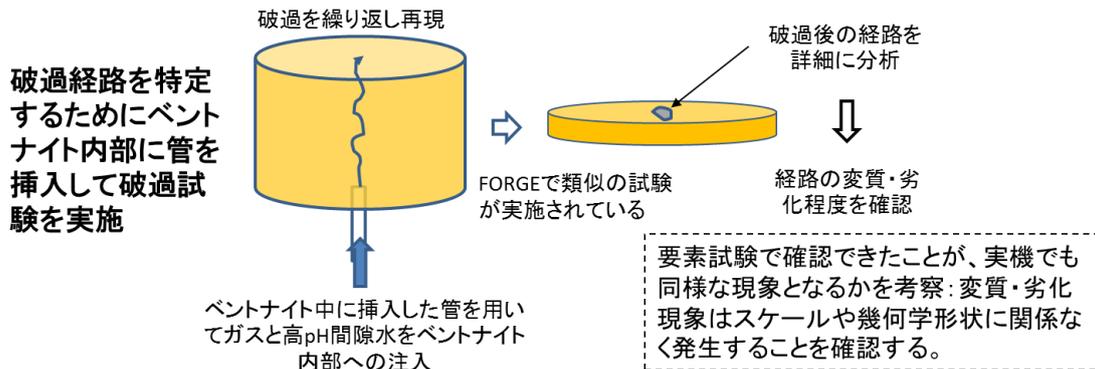


図 1.3.1-4 ガス発生によって引き起こされる可能性が否定できないシナリオの課題と課題解決方策例

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 地層処分で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FEP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。

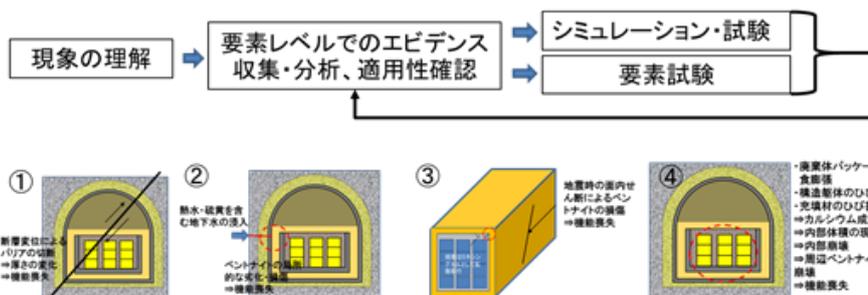


図 1.3.1-5 ガス発生以外の要因によって引き起こされるバリア機能損傷シナリオの不確実性と解決方策例

表 1.3.1-2 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

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 28 年度は、これまでの検討[5][6][7][8][9][10][11][12][13]で整備したガス移行モデルの確証計算として、平成 27 年度に実施したガス移行試験の実測データ[13]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。

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挙動の評価」では、TRU 廃棄物グループ 2 の処分概念を対象に鉛直 2 次元断面の解析モデルを構築した上で、既往検討[1]やこれまでに同定・蓄積したモデルパラメータを利用したガス移行解析を実施した。解析結果の評価においては、人工バリア内でのガス移行挙動やバリア内の最大ガス圧、バリア内部からの押し出し排水量に対する不確実性の低減に資するべく、その基準となる既往検討結果[1]からの変化や相違等を着目点として取り纏めた。

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・確証を図ってきたガス移行モデルや解析ツール（水・ガス二相流解析コードである GETFLOWS（General-purpose Terrestrial fluid-FLOW Simulator、[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[13]を対象とした再現解析（逆解析）等を実施し、解析ツールの高度化に資する検討を行った。実測データとしては、ベントナイト系緩衝材中の材料界面（ベントナイトブロック定置間の隙間）を模擬した供試体（直径 60mm に対して模擬する界面幅は 1mm）において、ガス移行試験中（段階的な昇圧によるガスの注入）に供試体から観測された排水挙動や透気挙動の経時変化を対象とした。

逆解析によって再現された実測データの累積排水量及び透気流量の解析結果をそれぞれ図

1.3.2-1、図 1.3.2-2 に示す。同定された 2 相流パラメータを表 1.3.2-1 に、相対浸透率及び毛細管圧力を図 1.3.2-3 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。

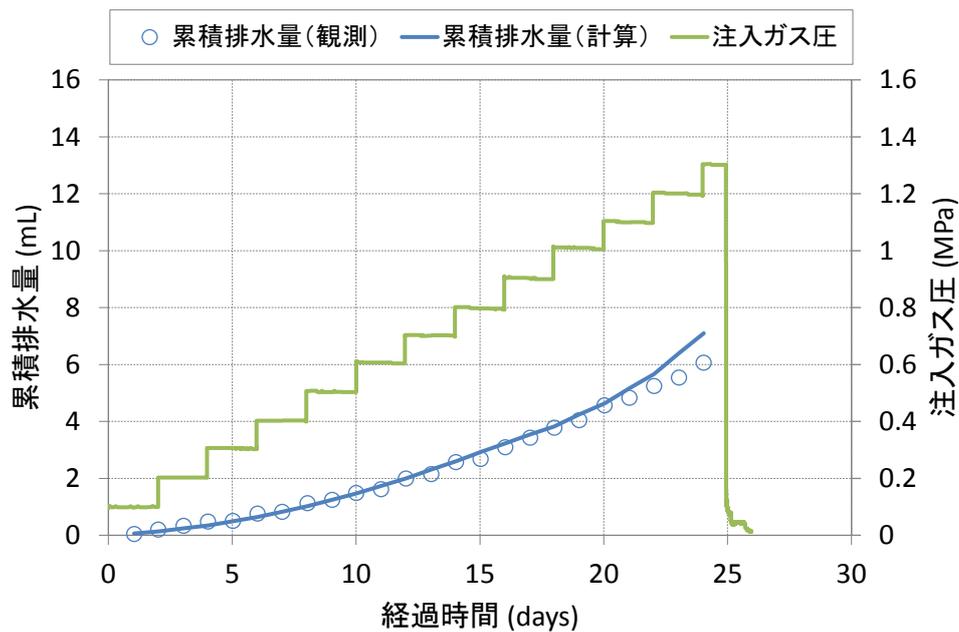


図 1.3.2-1 累積排水量の再現結果

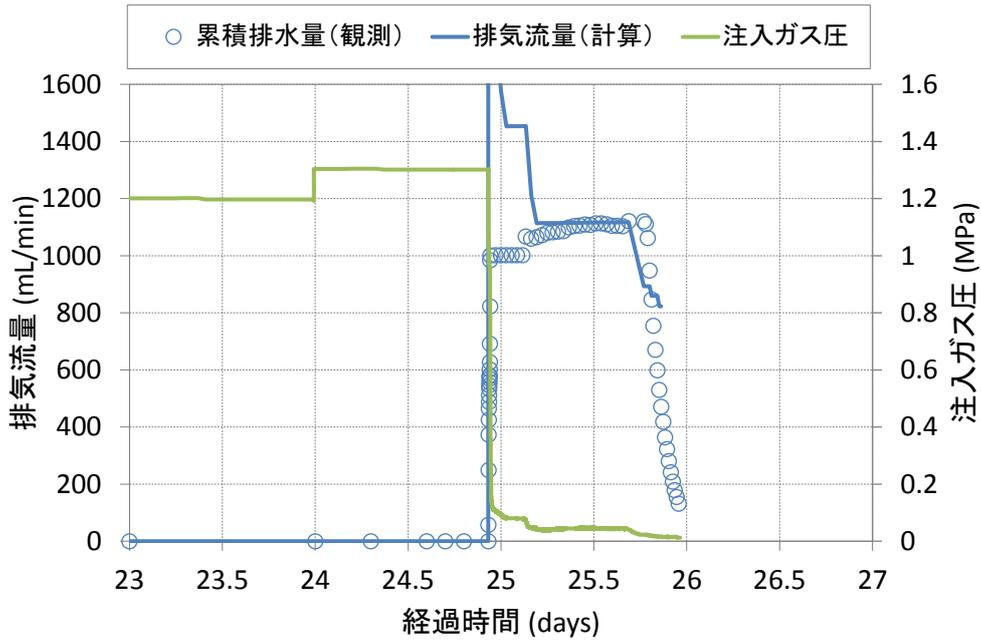


図 1.3.2-2 排気流量の再現結果

表 1.3.2-1 同定された 2 相流パラメータ

$K(m^2)$	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_w(-)$	$n_g(-)$	$P_0(MPa)$	$n_c(-)$
3.75×10^{-20}	0.370	0.0	19.90	1.50	0.137	2.00

表 1.3.2-2 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)

$C(-)$	$n(-)$	$F(-)$	$P_s(MPa)$
3.50×10^6	1.000	1.500	0.309

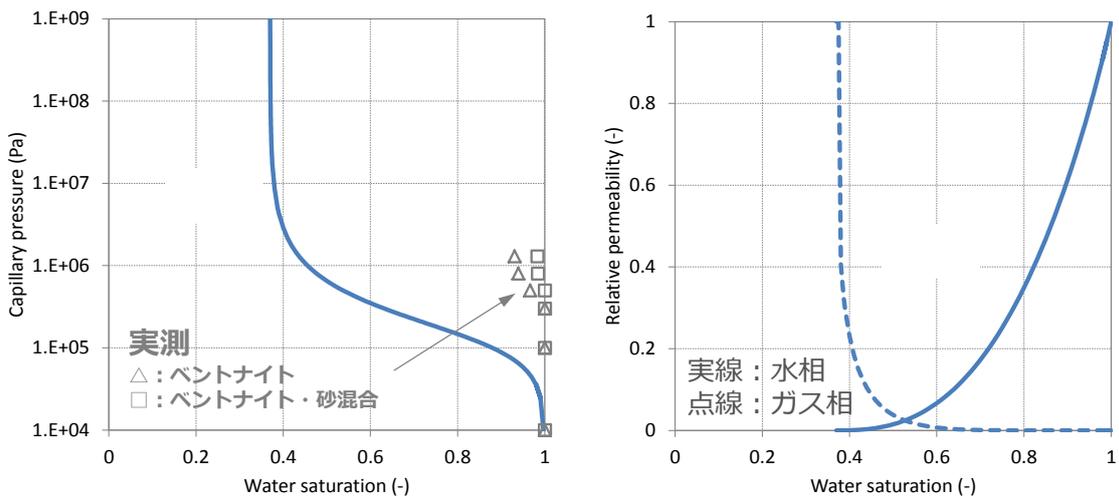


図 1.3.2-3 同定された相対浸透率 (左) と毛細管圧力 (右)

(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

ここでは、図 1.3.2-4 に示す TRU 廃棄物グループ 2 の処分概念を対象[1]に鉛直 2 次元断面の解析モデルを構築した上で、既往検討[1]や様々な条件下でのガス移行試験（飽和した緩衝材中へのガス浸入～大破過に至るまでの排水挙動を評価した試験等）により取得したデータを再現可能なガス移行モデル（数理モデル）やパラメータ、並びに解析ツール（二相流解析コード：GETFLOWS 等）を用いたガス移行解析を実施した。解析結果の評価においては、人工バリア内でのガス移行挙動やバリア内の最大ガス圧、バリア内部からの押し出し排水量に対する不確実性の低減に資するべく、その基準となる既往検討結果[1]からの変化や相違等を着目点として検討を進めた。

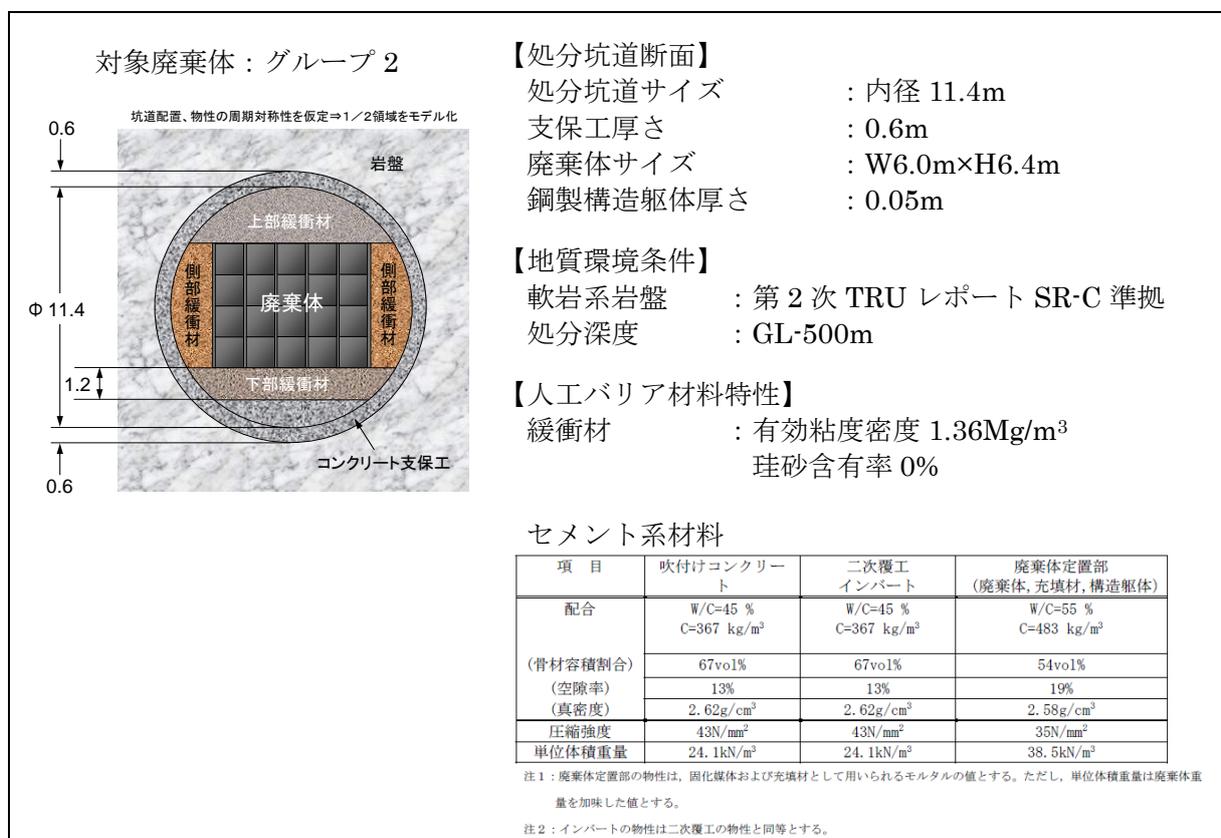


図 1.3.2-4 モデル化の対象とする TRU 廃棄物グループ 2 の処分概念[1]

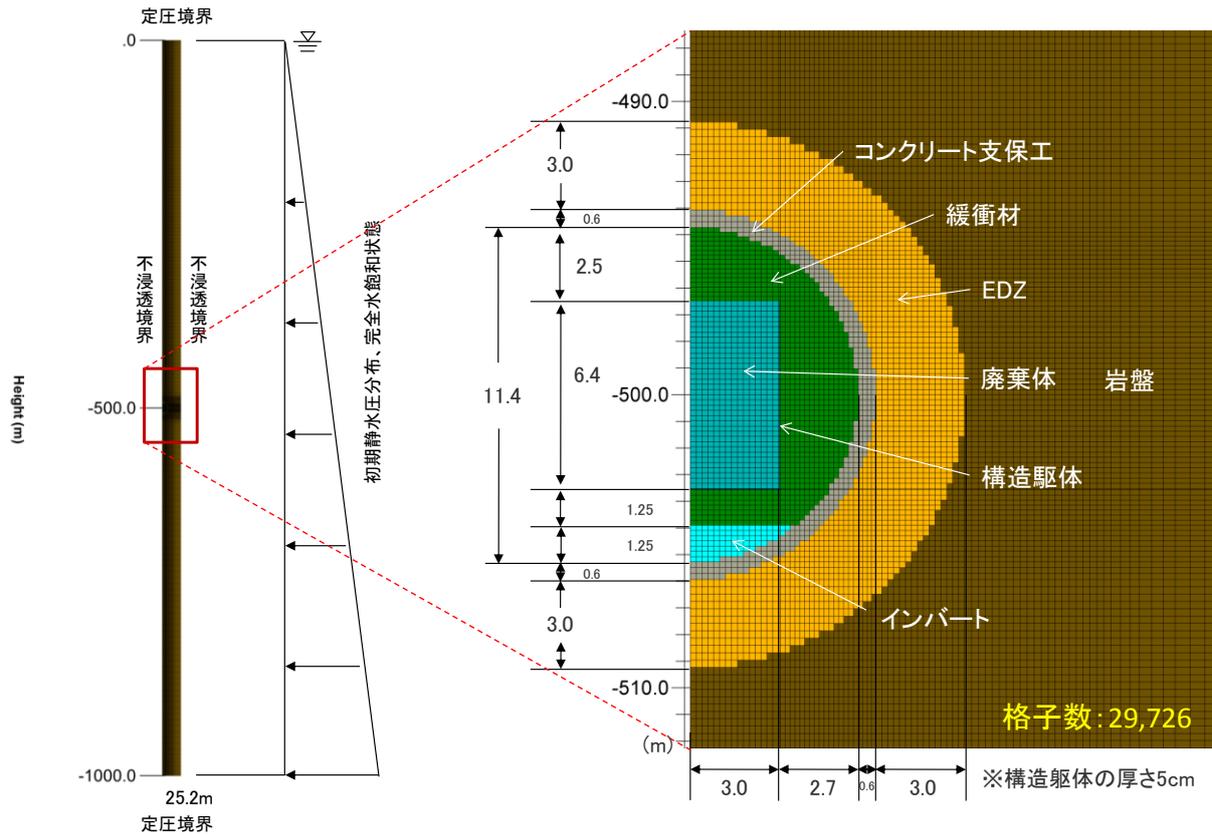


図 1.3.2-5 ガス移行解析用モデル（左：全体図、右：人工バリア周辺拡大図）

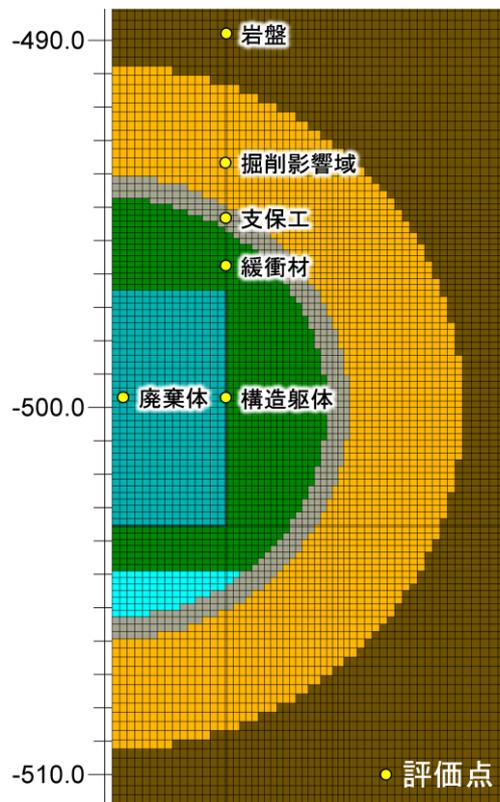


図 1.3.2-6 解析結果（ガス圧の経時変化）の出力点（評価点）位置図

設定した解析ケース一覧を表 1.3.2-3 に、各ケースに適用したモデルおよびパラメータを表 1.3.2-4 に示す。

表 1.3.2-3 解析ケース一覧

No.	概要
ケース 1	緩衝材部に、第 2 次 TRU レポートで用いられたパラメータを適用
ケース 2	緩衝材部に、これまでに実施したガス移行試験の再現解析から同定されたパラメータ (5 パターン) のうち、最も排水量が小さい結果を示したものを適用
ケース 3	緩衝材部に、これまでに実施したガス移行試験の再現解析から同定されたパラメータ (5 パターン) のうち、最も排水量が大きい結果を示したものを適用

表 1.3.2-4 各解析ケースに適用したモデルおよびパラメータ

毛細管圧力曲線 (ケース 1 : Corey モデル) (ケース 2・3 : van Genuchten モデル)	相対浸透率曲線 (ケース 1 : Narasimhan モデル) (ケース 2・3 : van Genuchten モデル)																																					
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>$S_{wr}(-)$</th> <th>$S_{gr}(-)$</th> <th>$n_w(-)$</th> <th>$n_g(-)$</th> <th>$P_0(MPa)$</th> <th>$n_c(-)$</th> <th>毛細管圧力曲線モデル</th> <th>相対浸透率曲線モデル</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ケース 1</td> <td>0.94</td> <td>0.0</td> <td>2.3</td> <td>2.3</td> <td>2.5</td> <td>0.45</td> <td>Corey Model $P_c = P_e + P_0 \left(\frac{1 - S_w}{S_w - S_{wr}} \right)^{1/n}$</td> <td>Narasimhan Model $k_{rw} = S_{we}^m$ $k_{rg} = (1 - S_{we})^n (1 - S_{we}^m)$ $S_{we} = (S_w - S_{wr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr})$</td> </tr> <tr> <td>ケース 2</td> <td>0.387</td> <td>0.0</td> <td>1.45</td> <td>13.70</td> <td>0.66</td> <td>1.82</td> <td>van Genuchten Model $P_c = P_0 (S_{we}^{-1/m_c} - 1)^{1/n_c}$</td> <td>van Genuchten Model $k_{rp} = \sqrt{S_{pe}} (1 - (1 - S_{pe}^{1/m_p})^{m_p})^2$</td> </tr> <tr> <td>ケース 3</td> <td>0.364</td> <td>0.0</td> <td>2.01</td> <td>2.95</td> <td>0.29</td> <td>2.29</td> <td>$S_{we} = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr} - S_{gr}}$ $m_c = 1 - 1/n_c$</td> <td>$S_{pe} = \frac{S_p - S_{gr}}{1 - S_{wr} - S_{gr}}$ $m_p = 1 - 1/n_p$ $p = w, g \text{ (water, gas phase)}$</td> </tr> </tbody> </table>		$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_w(-)$	$n_g(-)$	$P_0(MPa)$	$n_c(-)$	毛細管圧力曲線モデル	相対浸透率曲線モデル	ケース 1	0.94	0.0	2.3	2.3	2.5	0.45	Corey Model $P_c = P_e + P_0 \left(\frac{1 - S_w}{S_w - S_{wr}} \right)^{1/n}$	Narasimhan Model $k_{rw} = S_{we}^m$ $k_{rg} = (1 - S_{we})^n (1 - S_{we}^m)$ $S_{we} = (S_w - S_{wr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr})$	ケース 2	0.387	0.0	1.45	13.70	0.66	1.82	van Genuchten Model $P_c = P_0 (S_{we}^{-1/m_c} - 1)^{1/n_c}$	van Genuchten Model $k_{rp} = \sqrt{S_{pe}} (1 - (1 - S_{pe}^{1/m_p})^{m_p})^2$	ケース 3	0.364	0.0	2.01	2.95	0.29	2.29	$S_{we} = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr} - S_{gr}}$ $m_c = 1 - 1/n_c$	$S_{pe} = \frac{S_p - S_{gr}}{1 - S_{wr} - S_{gr}}$ $m_p = 1 - 1/n_p$ $p = w, g \text{ (water, gas phase)}$	
	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_w(-)$	$n_g(-)$	$P_0(MPa)$	$n_c(-)$	毛細管圧力曲線モデル	相対浸透率曲線モデル																														
ケース 1	0.94	0.0	2.3	2.3	2.5	0.45	Corey Model $P_c = P_e + P_0 \left(\frac{1 - S_w}{S_w - S_{wr}} \right)^{1/n}$	Narasimhan Model $k_{rw} = S_{we}^m$ $k_{rg} = (1 - S_{we})^n (1 - S_{we}^m)$ $S_{we} = (S_w - S_{wr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr})$																														
ケース 2	0.387	0.0	1.45	13.70	0.66	1.82	van Genuchten Model $P_c = P_0 (S_{we}^{-1/m_c} - 1)^{1/n_c}$	van Genuchten Model $k_{rp} = \sqrt{S_{pe}} (1 - (1 - S_{pe}^{1/m_p})^{m_p})^2$																														
ケース 3	0.364	0.0	2.01	2.95	0.29	2.29	$S_{we} = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr} - S_{gr}}$ $m_c = 1 - 1/n_c$	$S_{pe} = \frac{S_p - S_{gr}}{1 - S_{wr} - S_{gr}}$ $m_p = 1 - 1/n_p$ $p = w, g \text{ (water, gas phase)}$																														

解析の結果、図 1.3.2-7 および図 1.3.2-8 に示すようにリファレンスのために実施した基本ケース (第 2 次 TRU レポートで提示されたモデル・パラメータ 1) を用いたケース) と比較して、ケース 1 および 5 (表-1 に示す 5 つのパラメータのうち、緩衝材からの累積押し出し水量が各々最大・最小となった試験データから同定したものをを用いたケース) では、人工バリア (奥行き 1m 当たり) からの累積押し出し水量 (m³/y/m) は増加するが、内部の最大ガス圧は減少することが分かった。このことから、第 2 次 TRU レポートの知見 1) を用いた評価では、ガス圧については保

守的評価となるが、累積押し排水量については少なく見積もる（安全裕度が小さい）可能性が示唆された。一方で、ガス圧については基本ケース（最大値）とケース 5（最小値）の範囲に収まるとともに、累積押し水量もケース 5（最大値）と基本ケース（最小値）の範囲に収まることが分かった。

以上により、シナリオで想定する事象（ガスの蓄圧や汚染水の押し出し）の規模は、信頼性の高いモデル・パラメータを複数用いたガス移行解析からガス圧や累積押し排水量の最大・最小値等を見積もることによって得られる「定量的な幅」の範囲で評価できる可能性が示唆された。

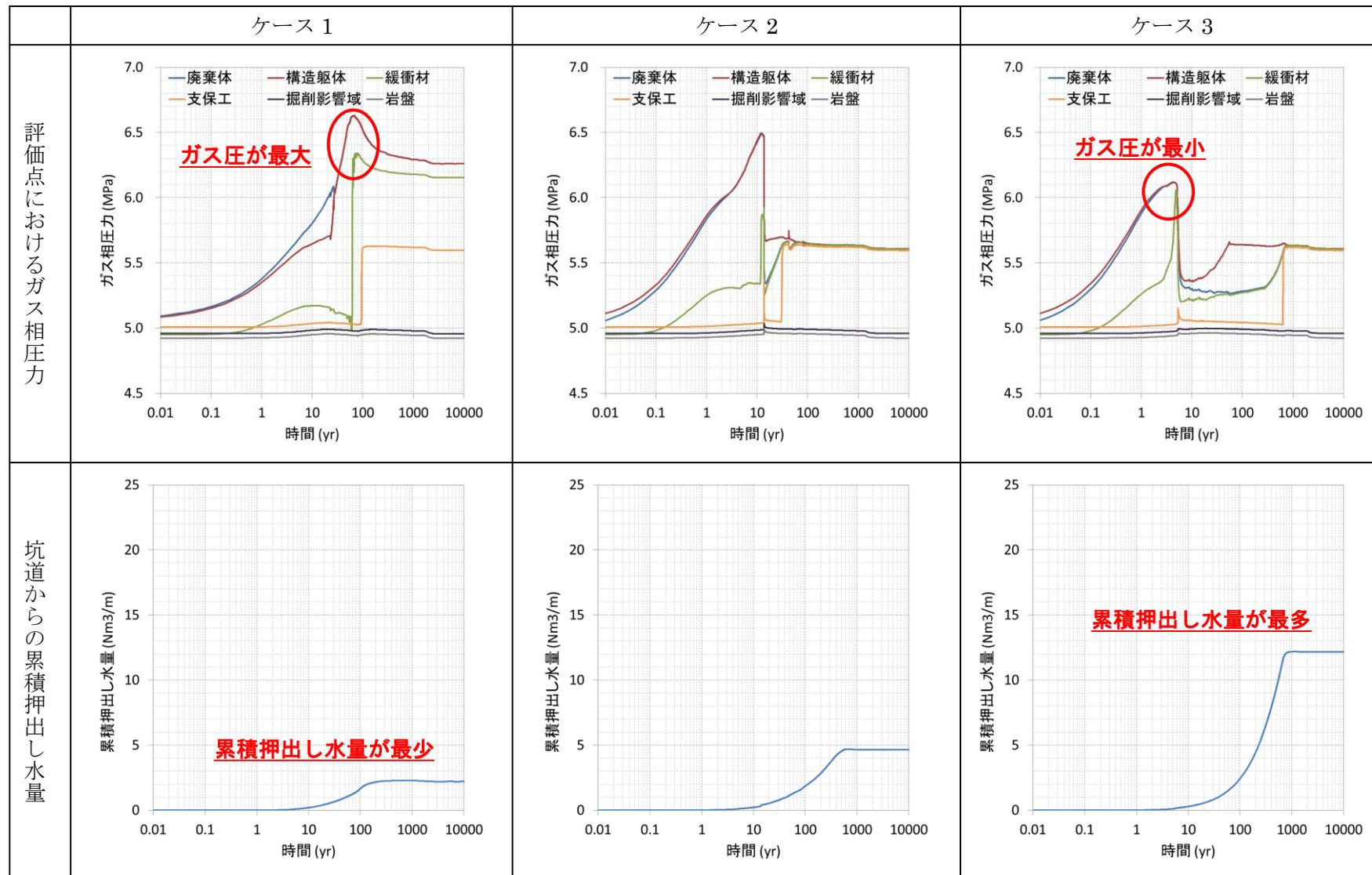


図 1.3.2-7 評価点におけるガス相圧力と坑道からの累積押し出し水量の比較

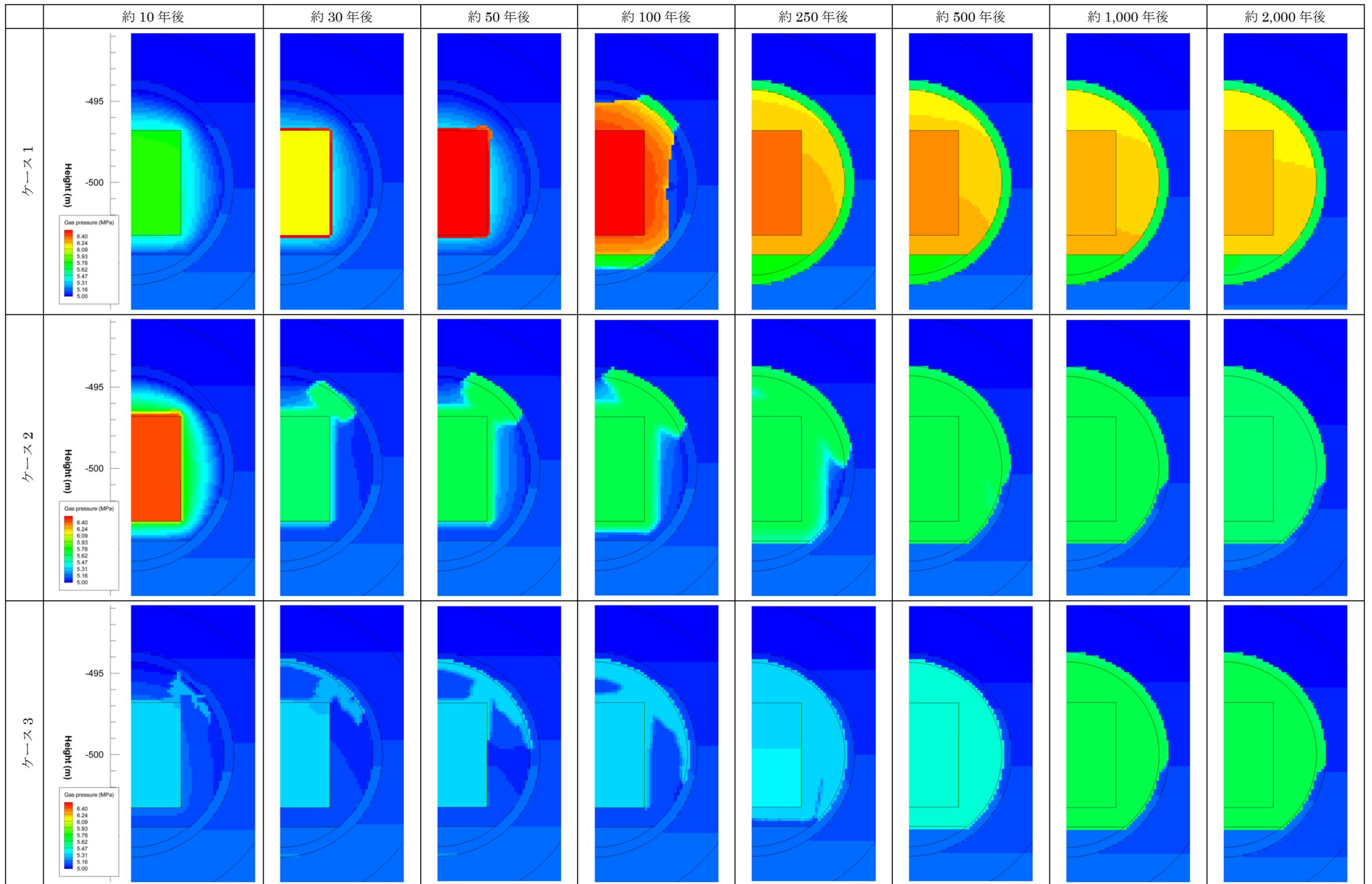


図 1.3.2-8 ガス相圧力の比較

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 28 年度[14]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三軸圧縮試験装置を用い、材料の不飽和せん断強度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、模擬供試体を用いた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せん断強度特性データの取得

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[5][6][7][8][9][10]を更に拡充することを目的として、平成 27 年度[13]においては「底部緩衝材（ベントナイト・砂混合材料、乾燥重量比＝7：3）」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。

平成 28 年度[14]は、力学特性評価に係る更なる知見拡充のため、同じくベントナイト・砂混合材料の「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、本項目においては、ネット応力、サクシオンなどを以下のように定義した。

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

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）

試験ケースを表 1.3.3-1 に示す。

2 水準の一定サクシオン（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。

* 『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。

表 1.3.3-1 三軸試験ケース

サクシオン 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	

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'') の関係を図 1.3.3-1 に示す。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 はサクシオン $s=400\text{kPa}$ 、 $s=800\text{kPa}$ 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' はサクシオン s に依存しないことがわかる。

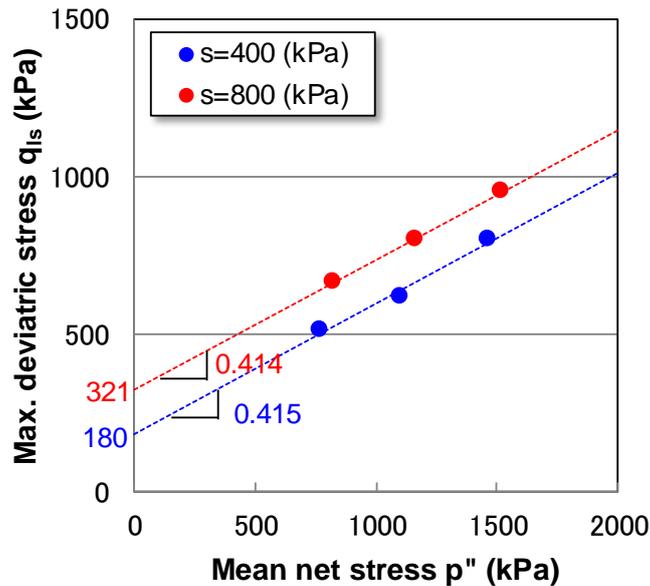


図 1.3.3-1 三軸試験より得られた最大軸差応力 (q_{1s}) と平均ネット応力 (p'') の関係

ここに、 M と ϕ' の関係は下記の通りである。

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

一方で、高治ら[27]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_{ts}) 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。

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

式(1)を考慮すれば、

$$q_{ts} = Mp'' + Mc'(s) \cdot \cot\phi' \quad (3)$$

そこで、 $M=0.415$ ($\phi'=11.2^\circ$) 一定として、図 1.3.3-1 の切片値から式(3)に基づいて c' を求めた結果を図 1.3.3-2 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った。

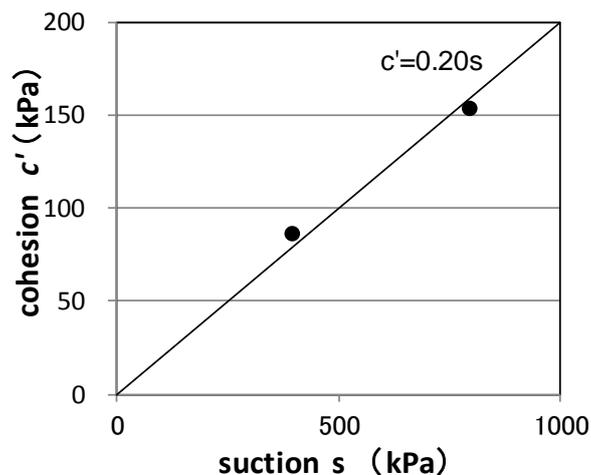


図 1.3.3-2 粘着力のサクシオン依存性

以上から以下のことが明らかとなった。

- ・ 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) [28] と一致する

(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 1.3.3-3 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。なお、模擬する界面幅は供試体直径（φ60mm）に対して 1～3mm 幅としたが、これは実際の定置時における緩衝材ブロック（約 1,000mm 四方）間隔の水平幅（界面幅）を大きく見積もり、最大約 18mm～54mm 程度になることを仮定した場合の「想定値」から換算・設定したものである。

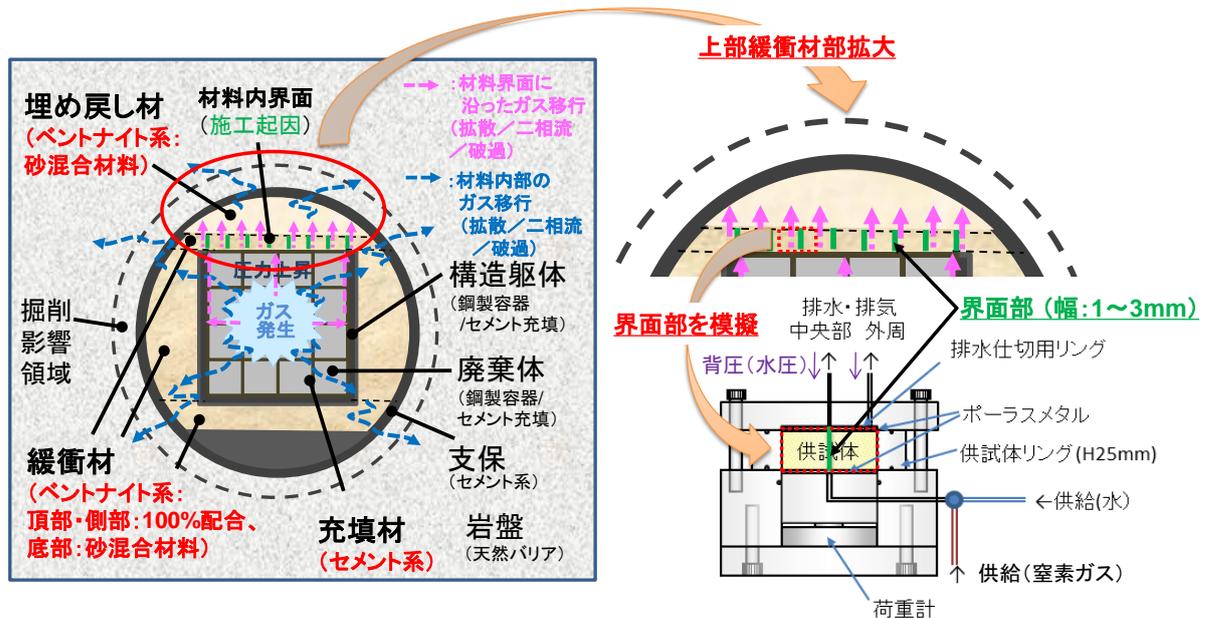


図 1.3.3-3 人工バリアの現実的な施工手順（ブロック定置方式[1]）を考慮した上部緩衝材の同一材料界面（緑色の太線）と界面模擬供試体とガス移行試験のイメージ

図 1.3.3-4 およびガス移行試験結果の一例を示す。排出側から 0.1 MPa 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。

当該試験の結果、界面幅を 1mm とした供試体（図-9）では、既往のガス移行試験結果 4）（界面の無い同一寸法のベントナイト供試体による）とほぼ同様に、間隙へのガス浸入（間隙圧の上昇）による有効応力の低下を伴いながら、供試体側方からの排水挙動（ガス移行に伴う間隙水の押出し）やガスの破過圧が観測されたことから、当該界面は飽和過程で自己閉塞（十分に一体化）しており、ガス移行挙動や破過圧に対して与える影響は小さい可能性が示唆された。一方で、界面幅を 3mm とした供試体（図-10）でのガスの破過圧は 1.1MPa であり、界面幅 1mm の供試体と比較して約 0.2MPa 低い値を得た。この要因解明のため、ガス破過に至るまでの排水挙動に着目して両者を比較したところ、排水が卓越しているのは界面幅 1mm の供試体では側方（界面以外）なのに対し、界面幅 3mm の供試体は中央部（界面付近）であることから、後者は前者と比較して界面の自己閉塞が緩慢な状態であり、卓越した水・ガス移行経路となったことに依る可能性が示唆された。

以上により、界面幅が 3mm（図-8 での寸法）を超えると自己閉塞性に影響が及ぶ可能性があることから、実際の緩衝材ブロック定置時の間隔は約 50mm 以下に抑えるのが望ましいと思われる。

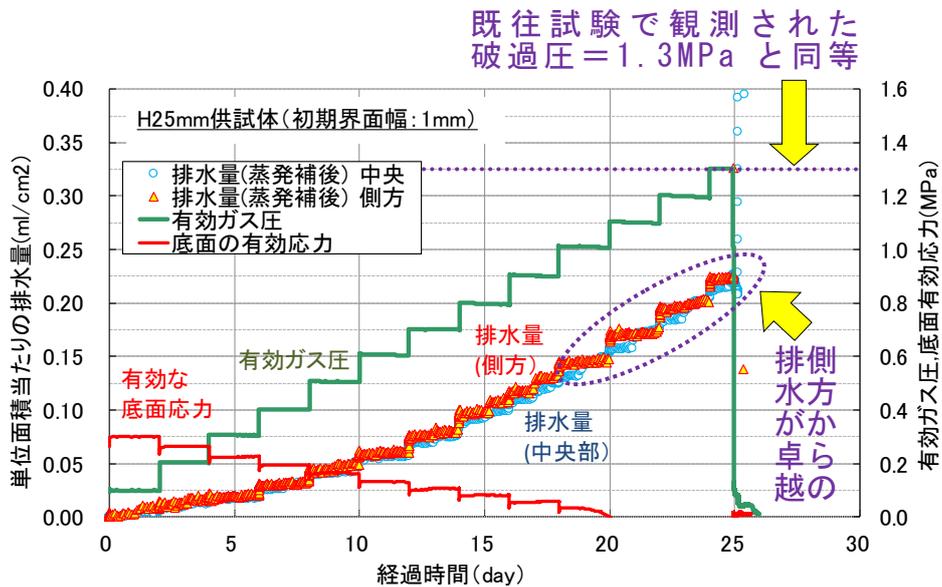


図 1.3.3-4 ガス注入（排水）過程における供試体（界面幅 1mm）からの排水挙動と有効応力の経時変化

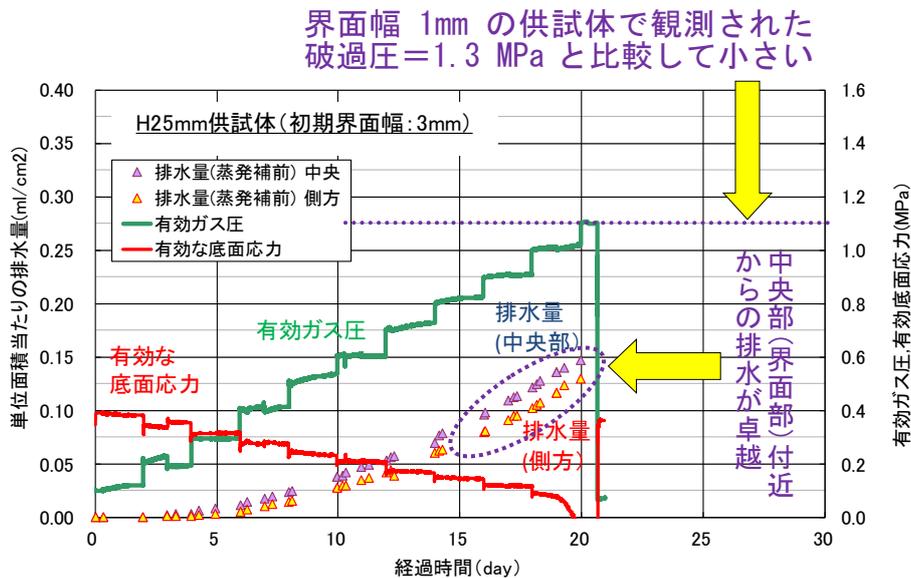


図 1.3.3-5 ガス注入（排水）過程における供試体（界面幅 3mm）からの排水挙動と有効応力の経時変化

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、その根拠に実現現象の把握（ガス移行に関する材料データの取得）や実現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。

今フェーズの最終年度である本年度(平成 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)に基づき、前年度までの進捗を踏まえ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 29 年度)の全体計画(1.4 節)や成果(第 2 章～第 4 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。

評価対象	TRU-2の成果と抽出された課題 (課題①)	H19～24年度の検討成果と抽出された課題 (課題②)	H25～29年度の検討
緩衝材 (ベントナイト)	<p>(成果と課題)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・リファレンスケース(ガス移行評価において、もっとも安全側である施設の再冠水後を対象)での概略検討等によって、人工バリア内の圧力上昇は、初期地下水初期地下水圧から1.3～1.4 MPa程度であり、緩衝材等の破壊の可能性は小さいと判断されているが、その根拠を明確に示すとともに、より現実的な条件を考慮したガス発生影響を評価する必要がある ⇒ 膨潤性を有する緩衝材の応力場の影響を考慮できる応力-物質移行を連成させた気液移行モデルの開発と解析ツールの高度化が必要 ⇒ 気液移行モデルによる解析に必要なデータの取得が必要 	<p>(成果 データの取得)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・人工バリアの主要材料(ベントナイト)のガス移行特性把握 ⇒ ガス移行挙動に伴う現象を把握した ・ベントナイトの大破過圧や大破過時の透気/透水性を把握 ・ベントナイトの強度や膨潤変形量の飽和度依存性を把握 <p>(課題 データの取得)</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇒ ベントナイトが大破過に至らない場合の透気/透水性の把握 ・セメント系材料の透気/透水性の把握(一般的に低透過性のため) ・ベントナイト/セメント複合材料システムの透気/透水性の把握 ・複合材料システム試験の現実的な境界条件の設定 	<p>実施内容と目標成果</p> <p>重要性 優先度 (A>B>C)</p>
充填材 (モルタル)	<p>(成果と課題)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・施設内で発生したガス(放射性/非放射性)が及ぼす天然バリア中の核種移行経路の地下水の動きに対する影響は小さいと判断されている ・地下水移行による線量評価値は2 μSv/y、ガス状核種移行による線量評価値は最大で1×10³ μSv/yと、共に±0.1と小さいことが示されている ⇒ ただし、ガス発生による排水継続時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あるため、現実的な条件を考慮したガス発生影響を評価する必要がある 	<p>(成果 解析ツールの高度化)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ガス移行に伴う現象のモデル化とシステムのガス移行挙動の予測/把握 ⇒ ガス移行試験で把握したガス移行挙動を検証解析によりモデル化した ・モデルを取り入れた処分システムの二次元断面ガス移行解析によってシステムのガス移行挙動を予測/把握 <p>(課題 解析ツールの高度化)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・セメント系材料や複合システムの透気/透水性のモデル化 ・ベントナイトやセメント系材料の透気/透水性変遷の長期化学変質を伴った連成現象のモデル化 	<p>(実施内容)</p> <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 ⇒ 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。 ● 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する。 ⇒ 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る。 <p>(目標成果)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ベントナイト、セメント系材料(の一部)に関する個々のガス移行挙動の知見拡充、及び複合材料システム(セメント・ベントナイト・界面)や現実的な施工状況を反映したガス移行挙動を把握する。 ● 複合材料システム(セメント・ベントナイト)の連成(THMG)挙動を再現できるモデル・解析手法を整備・提示する。
施設全体 / その他	<p>(成果と課題)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・施設内で発生したガス(放射性/非放射性)が及ぼす天然バリア中の核種移行経路の地下水の動きに対する影響は小さいと判断されている ・地下水移行による線量評価値は2 μSv/y、ガス状核種移行による線量評価値は最大で1×10³ μSv/yと、共に±0.1と小さいことが示されている ⇒ ただし、ガス発生による排水継続時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あるため、現実的な条件を考慮したガス発生影響を評価する必要がある 	<p>(成果 ガス発生)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・現実的な条件を考慮したガス発生影響を評価するため、ジルカロイ(HAL)の処分環境における腐食挙動の長期予測モデルの構築と検証に必要なデータ取得試験計画を策定した <p>(課題 ガス発生)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・腐食挙動に与える影響因子(材料?環境?)の把握 ・ガス発生機構(発生速度)の長期変遷を考慮したモデル化 <p>(成果 シナリオ)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・処分システムのセーフティケース(安全性の論拠)設定に資するガス移行シナリオの構築 ⇒ ガス移行に関する現象を網羅した基本/変動/稀頻度シナリオを構築し、人工バリアの健全性等に影響を与え得る主要なプロセスを抽出した ・廃棄体グループ2および3の処分概念(システム)における最大ガス発生速度到達時期と当該時期におけるバリア状態や性能を推定 <p>(課題 シナリオ)</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇒ シナリオで推定した人工バリアの現象の全てを、検証されたモデルによって理論的に説明すること(安全性の論拠の提示) 	<p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● H24年度までの成果を受け、金属廃棄物の腐食にともなって発生する水素ガスの現実的な評価の必要性が明らかになったため、金属毎(ジルカロイやステンレス鋼)に、長期的な腐食モデルを構築し、水素発生量の評価を行う。 ● ジルカロイに加え、還元環境におけるステンレス鋼からのガス発生長期のデータや環境影響を考慮したデータを取得し、現実的な腐食に伴うガス発生速度を設定する。 ● 各放射化金属の長期腐食モデルの構築(短期試験含む) ● 金属腐食以外のガス発生(微生物活動や水の放射線分解等に起因するガス発生)挙動のモデル化・解析手法を検討する。 ● 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する。 ⇒ 最新の研究成果を整理し、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。 <p>(目標成果)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 現実的な腐食に伴うガス発生速度の設定 ● ジルカロイの水素ガス発生・吸収の反応メカニズムの理解 ● 放射性ガスの発生に係る知見(材料の腐食データ等)の拡充 ● 上記知見を元にした各放射化金属の長期腐食のモデル化や、金属由来以外のガス発生メカニズムのモデル化 ● ガス移行評価シナリオの拡張(リファレンスケース以外) ● TRU廃棄物処分技術検討書(第2次TRUレポート)のガス発生に係る記載を改訂する。

課題①の解決に資する検討の実施

課題②の解決に資する検討の実施

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。

相互連携

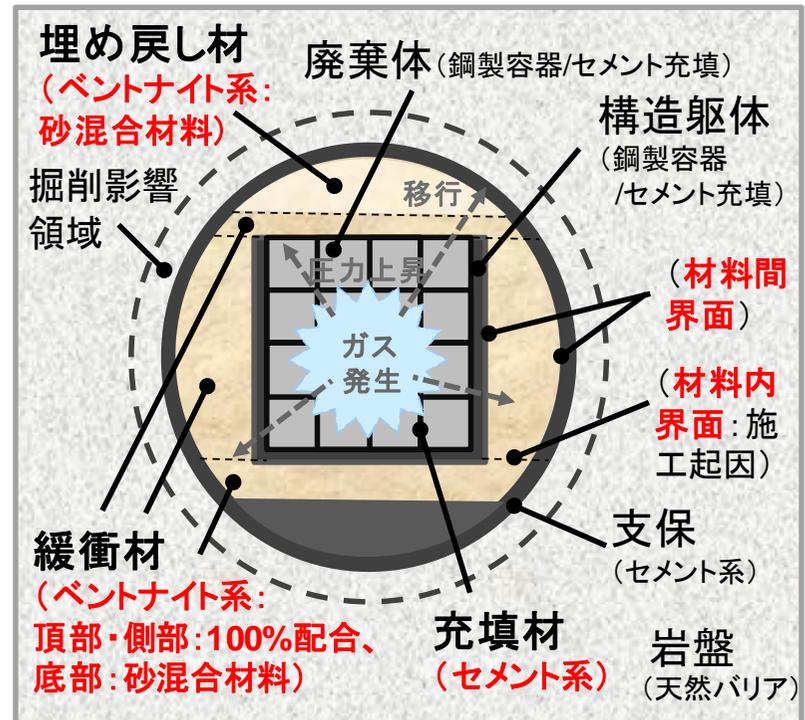
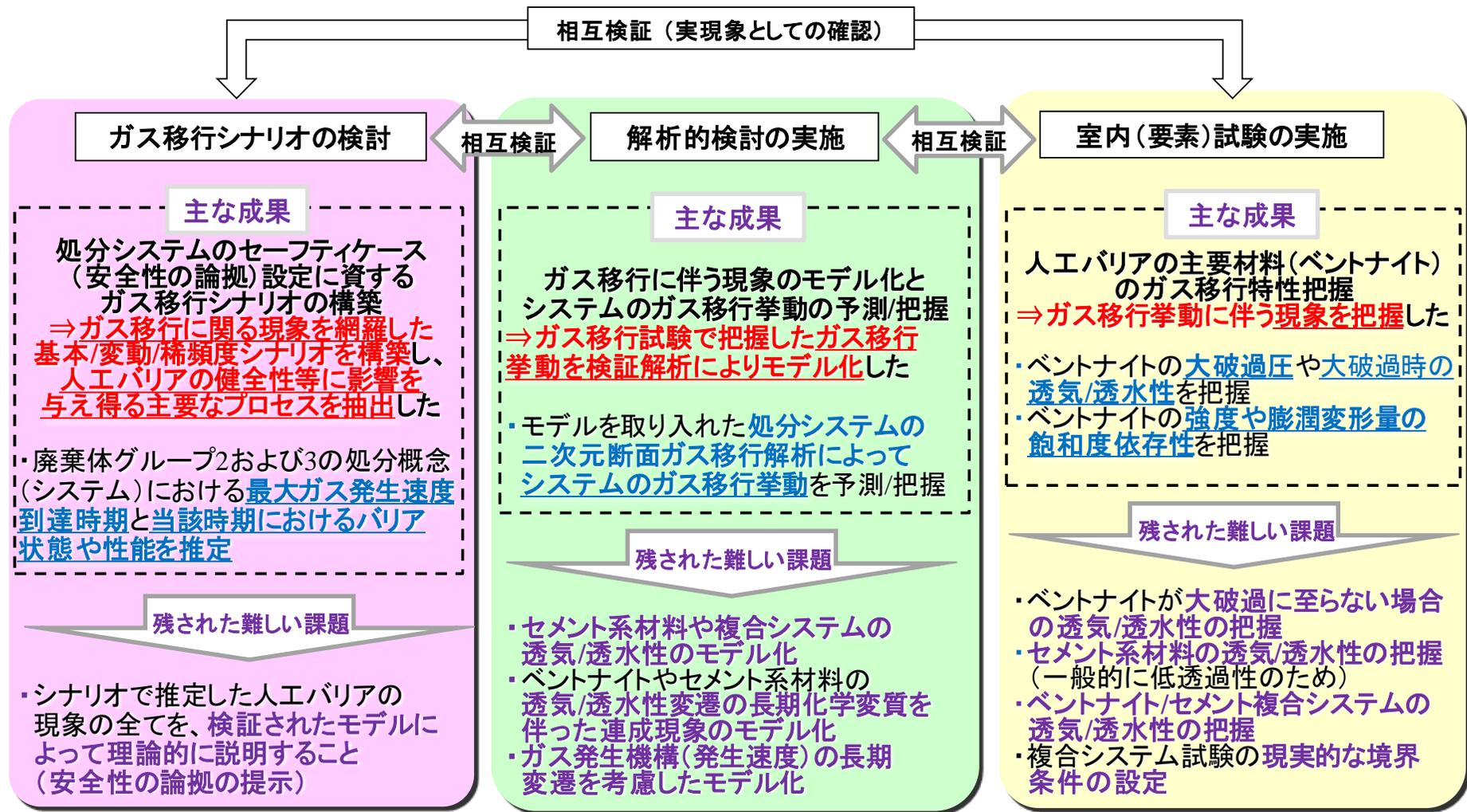


図 1.3.4-2 検討実施項目 (今フェーズ: 平成 25-29 年度) の相関



➤ 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 ○	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	全材料／EBSの二相流・力学挙動の把握と再現(想定される現象の確認)		飽和ベントナイトのガス移行モデルの構築 ○	不飽和ベントナイトのガス移行モデルの構築 ○	・室内試験成果の再現解析・評価によるガス移行モデルの確証 ・確認されたモデルによるGr.2の処分概念を対象としたガス移行解析とガス移行挙動の把握 △			確証されたモデルによる室内試験の予察解析と評価(モデルや解析手法の信頼度の評価) △		処分システム全体を対象とした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 △

第2次EBSレポートの課題解決のための詳細計画を策定

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 29 年度は、平成 28 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 29 年度の実施内容を遂行した。図 1.4.1-1 に、平成 29 年度の調査研究進捗表を示す。

実施項目	平成29年(2017)												平成30年(2018)		
	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	H29年度実施計画策定														
②. 人工バリアシステムのガス移行連成挙動評価(現象理解)	計画の具体化 人工バリア材料界面(廃棄体パッケージ/パッケージ間充填材)のガス移行試験による特性評価 人工バリア材料(ベントナイト系、セメント系材料単体)のガス移行挙動特性評価の取り纏め 成果取りまとめ														
③. ガス移行連成挙動解析ツールを用いた人工バリアシステムの成立性評価 ※5か年計画における 「2.ガス移行評価シナリオの拡充」 「3.ガス移行連成挙動解析ツールの高度化」を統合	計画の具体化 ガス移行モデルの検証(ガス移行試験の再現解析) 確認されたモデルによるガス移行解析評価 核種移行評価の信頼性向上に資する重要なシナリオの整理 ガス移行を考慮した核種移行解析評価 成果取りまとめ														
④. 5か年の成果のとりまとめ	ガス移行連成挙動評価としての成果取りまとめ														
⑤. 委員会 △:委員会による決定、レビュー等	△ 第1回委員会 (実施計画の評価) △ 第2回委員会 (中間評価) △ 第3回委員会 (最終評価)														
⑥. 報告書作成	報告書ドラフト作成 修正 5か年の成果報告書作成														

図 1.4.1-1 「ガス移行連成挙動評価手法の開発」平成 29 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項以降に記す。

1.4.2 平成 29 年度の実施概要

(1) 人工バリアシステムのガス移行連成挙動評価（現象理解）

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における無垢な（健全な）状態を対象としたガス移行挙動の評価を行ってきた。しかしながら、人工バリア

アは多様な材料によって構成される複雑な形状を有しており、そのガス移行挙動を評価するためには、人工バリアの形状等を考慮・模擬した材料のガス移行挙動を把握することが課題となった。そこで平成 27 年度以降は、人工バリア構造のうち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界面のガス移行特性を評価していくこととした。

平成 29 年度は、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（廃棄体パッケージ間充填材）」を評価対象とした平成 26～28 年度までの検討成果[12][13][14]を踏まえながら、硬化後の飽和および不飽和モルタル中の材料間界面における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。

- ・ 人工バリア内で想定される材料界面のうち、廃棄体パッケージ（炭素鋼）／パッケージ間充填材（モルタル）間の異種材料界面を模擬した複合供試体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）

(2) ガス移行連成挙動解析ツールを用いた人工バリアシステムの成立性評価

前節「1.3.1 ガス移行評価シナリオの拡張・拡充」や「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、本検討項目は TRU 廃棄物処分に係る人工バリアシステムの成立性評価に必要な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きている。

さらに、平成 28 年度までの検討[11][12][13][14]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遷移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）について、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。

一方で、上記のようなシナリオ構築に係る検討の他、シナリオで想定される現象の定量化に資するガス移行解析評価技術の高度化も推進しており、特に解析に用いるモデルやパラメータの不確実性低減にも取り組んで来た。平成 28 年度は、従来多くの検討で用いられてきた第 2 次 TRU レポートで提示されたパラメータ、及びこれらによるガス移行解析結果を評価するため、本研究でこれまでに蓄積・確認されてきた信頼性の高いパラメータと水・ガス 2 相流解析コード（GETFLOWS）を用いてガス移行解析を実施した。具体的には、第 2 次 TRU レポートで提示

されたパラメータ（既往の知見）と、本研究で蓄積・確証されてきたパラメータ（最新の知見）を用いて、計 3 ケースのガス移行解析を実施した。その結果、処分概念成立性評価の指標の一つである施設内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やや小さくなり、また、もう一つの指標である施設外への累積押し出し水量（放射性核種の溶解した汚染水の人工バリアからの排水量）については、最新の知見を反映した場合の方がやや大きくなる等の結果を得た。これらの検討を通し、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「定量的な幅」を確認することができている。

そこで平成 29 年度の検討でも、上記に示したようなシナリオやデータ（パラメータ）、およびモデルの不確実性を低減するための継続的な取り組みを行うと同時に、ガス移行解析から得られる汚染水の押し出し挙動を考慮した核種移行解析手法を確立して人工バリアからの核種移行率等を評価するとともに、既往の安全評価等で提示されている目安値（TRU 廃棄物処分施設の人工バリアとして成立するために下回るべき核種移行率の最大値等）を指標として、ガス移行の影響の大きさを評価する手法を既往の安全評価手法等を基に提示した。さらに、同評価手法により、重要事象に影響を与える影響因子の特定や定量的な許容幅等を把握することで、人工バリアの成立性を評価した。

以下に実施項目を示す。

- ・ ガス移行に係る安全評価上重要となる事象の絞込み（不確実性の低減）
- ・ 重要事象を考慮したガス移行解析評価に用いるシナリオの設定
- ・ シナリオに基づく評価ケース（解析ケース）の設定とモデルの選定
- ・ 評価ケースに基づくガス移行解析と核種移行解析
- ・ 核種移行解析結果に基づく TRU 廃棄物処分システム（人工バリア）の成立性評価

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] 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 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—（2017）
- [15] FORGE, Summary of Gas Generation and Migration Current State-of-the-Art, January 2010.
- [16] 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
- [17] NDA (2011), Geological Disposal, Gas Status Report, NDA Report no. NDA/RWMD/037
- [18] 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
- [19] 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
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Grant, M.A., 1982. Geothermal reservoir engineering, Academic Press, New York.
- [24] D. Landolt, A. Davenport, J. Payer, D. Shoemith, 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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
- [28] E. Alonso, A. Gens, A. Josa (1990) : A constitutive model for partially saturated soils, Géotechnique, 40, No.3.

第2章 人工バリアシステムのガス移行連成挙動の評価

(現象理解)

2.1 背景と目的

平成 19 年度から平成 24 年度にかけて実施した「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 29 年度は、5 カ年間に亘る実施計画（平成 25 年度に策定）[9]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界面（廃棄体容器／各容器間の区画充填材）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（炭素鋼／モルタル界面）によるガス移行試験を実施するとともに、国内外の最新の知見等と比較しながら試験結果を評価する。さらに、当該界面挙動のモデル化に向け、試験で取得したデータの整理等を行う。

[※] 『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.

2.2 検討内容（人工バリアシステムの材料界面（廃棄体容器と容器間充填材の境界面）を対象としたガス移行特性評価試験）

これまでの検討成果[11][12]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 28 年度に検討した「人工バリアシステムのガス移行連成挙動評価（現象理解）」[12]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 2.2.1-1 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その性状（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介在するか否か）に大きな影響を受けることが分かっている。

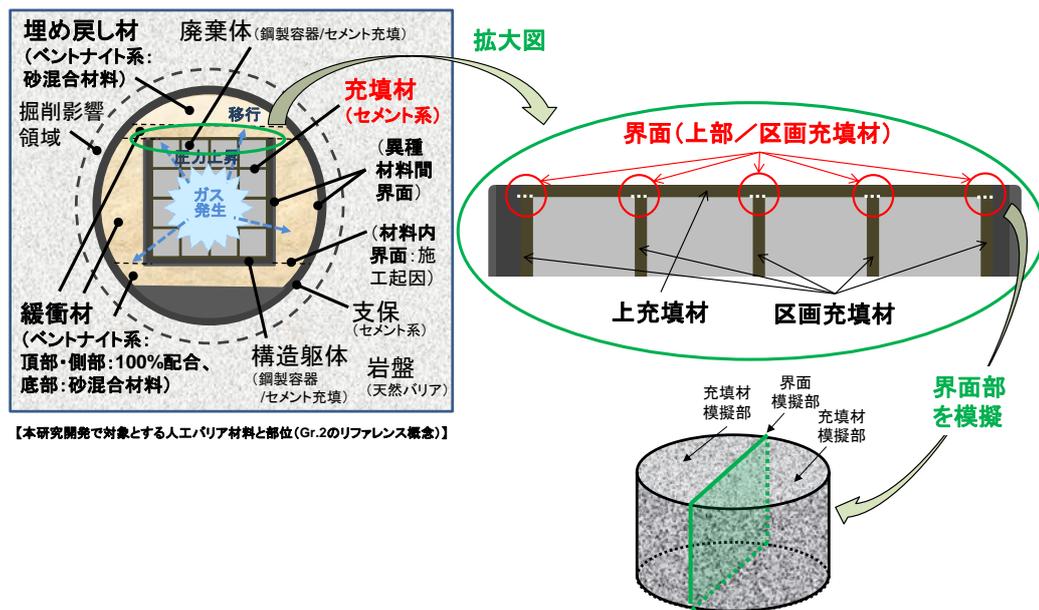


図 2.2.1-1 人工バリアにおける現実的な施工手順を考慮した充填材の同一材料界面（拡大図内の赤丸部）と界面模擬供試体のイメージ

そこで平成 29 年度は、平成 28 年度の成果[12]を基に、人工バリア内でセメント系材料界面と同様に卓越移行経路になることが懸念される「廃棄体容器／容器間区画充填材」の境界面（図 2.2.1-2 参照）について、当該界面を対象とした模擬供試体を作製し、ガス注入試験を行うことでガス移行特性を評価する。なお、取得した試験データは、当該界面のガス移行特性のモデル化に向けた整理等も行う。

検討項目については表 2.2.1-1 に示す通りとする。

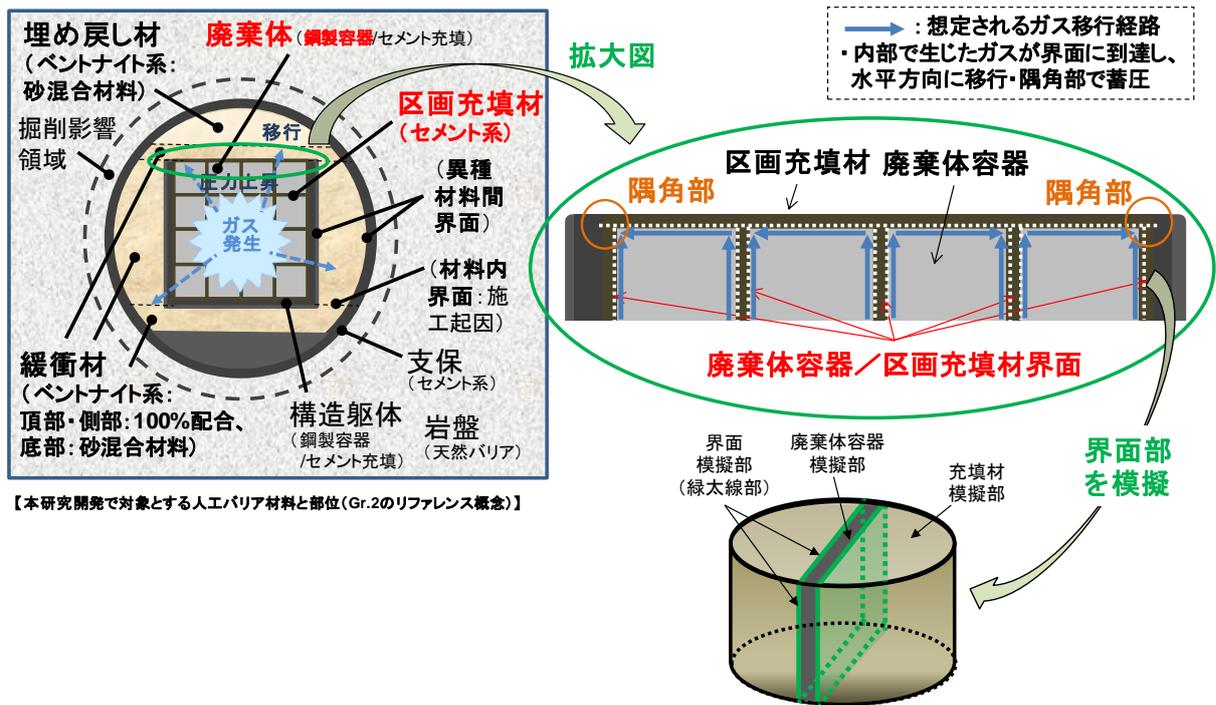


図 2.2.1-2 人工バリア内で卓越移行経路になることが懸念される材料界面（白色破線部）と界面模擬供試体のイメージ

表 2.2.1-1 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	

2.2.1 供試体概要

材料境界面を有する供試体（モルタルー炭素鋼板の複合構造）の概要を、図 2.2.1-3 に示す。

供試体は、参直径 50mm、高さ 50mm で、写真 2.2.1-1 に示す幅 40.0mm×高さ 50.0mm×厚さ 1.0mm の炭素鋼 S45C の板（以下、金属板）を中心に有するものとする。

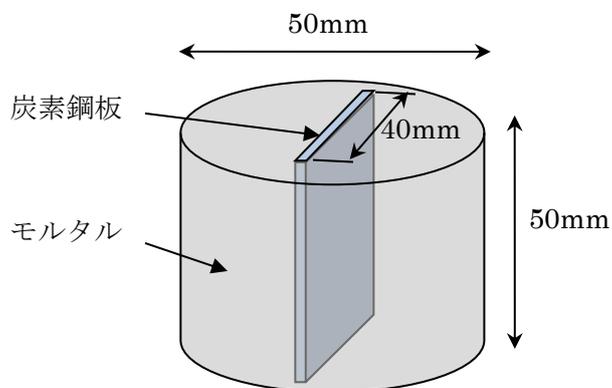


図 2.2.1-3 供試体の概要

金属板（写真 2.2.1-1）の設置は、直径 50mm・高さ 60mm に切断したプラスチック製二つ割りモールドの底板に、設置位置を正確にケガキして、写真 2.2.1-2 に示すようにスコヤを使用し、垂直に接着剤で固定するものとする。

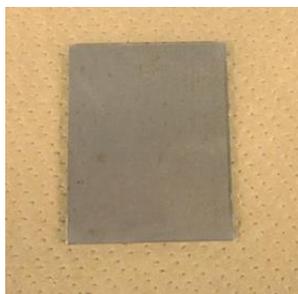


写真 2.2.1-1 金属板



写真 2.2.1-2 プラスチックモールド（左）と底板への設置方法（右）

なお、モルタルは、H27～H28 年度に実施した透水性が比較的高くなるよう配合したモルタルを用いる。表 2.2.1-1 に供試体として用いるモルタルの配合を示す。

表 2.2.1-1 モルタルの配合

ケース ^ρ	W/C ^ρ (%) ^ρ	S/C ^ρ (-) ^ρ	単位重量(kg/m ³) ^ρ					計測値 ^ρ
			W ^ρ	C ^ρ	S ^ρ	混和剤 ^ρ (×1000) ^ρ	消泡剤 (×5) ^ρ	エア量 (%) ^ρ
混和剤 有 ^ρ	65 ^ρ	1.5 ^ρ	407 ^ρ	626 ^ρ	938 ^ρ	5.2 ^ρ	2.1 ^ρ	11.8 ^ρ

廃棄体パッケージは廃棄体が熱を持つことから 50℃～90℃の温度条件が考えられている。ここで用いる炭素鋼から 25mm という周辺のモルタルは、実際ほぼ瞬時に廃棄体パッケージと同一温度となることが予想される。したがって、金属板を入れた供試体の全体を常温で打設し、モールドのまま耐熱性のビニール袋に入れて、80℃の熱水中で所定の期間養生を行い、常温で透水・透気試験を実施することとする。比較のため、金属板を含まない供試体についておよび金属板を含む供試体それぞれ常温の水中養生と 80℃熱水養生の 2 ケースをそれぞれ実施する。試験ケースと試験数量を表 2.2.1-2 に示す。

表 2.2.1-2 試験ケースと試験数量

	無垢モルタル		金属板挿入モルタル		試験数計
	常温水中養生	80℃養生	常温水中養生	80℃養生	
28 日透気・透水	1	1	1	1	4
90 日透気・透水	2	2	2	2	8
28 日強度	3	3	-	-	6
90 日強度	3	3	-	-	6

2.2.2 ガス移行試験方法・手順

ガス移行試験装置の概念図を図 2.2.2-1 に、ガス移行試験（注気過程）を含めた全実施フローを図 2.2.2-2 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）」にて構成する。

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（ σ_{28} および σ_{90} ）を測定する。

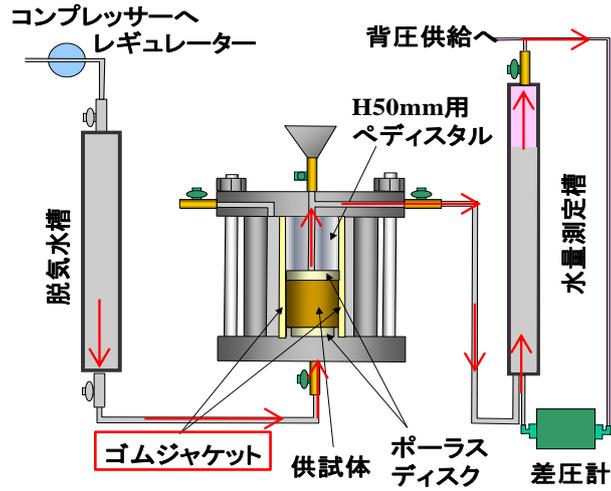


図 2.2.2-1 ガス移行試験装置の概念図

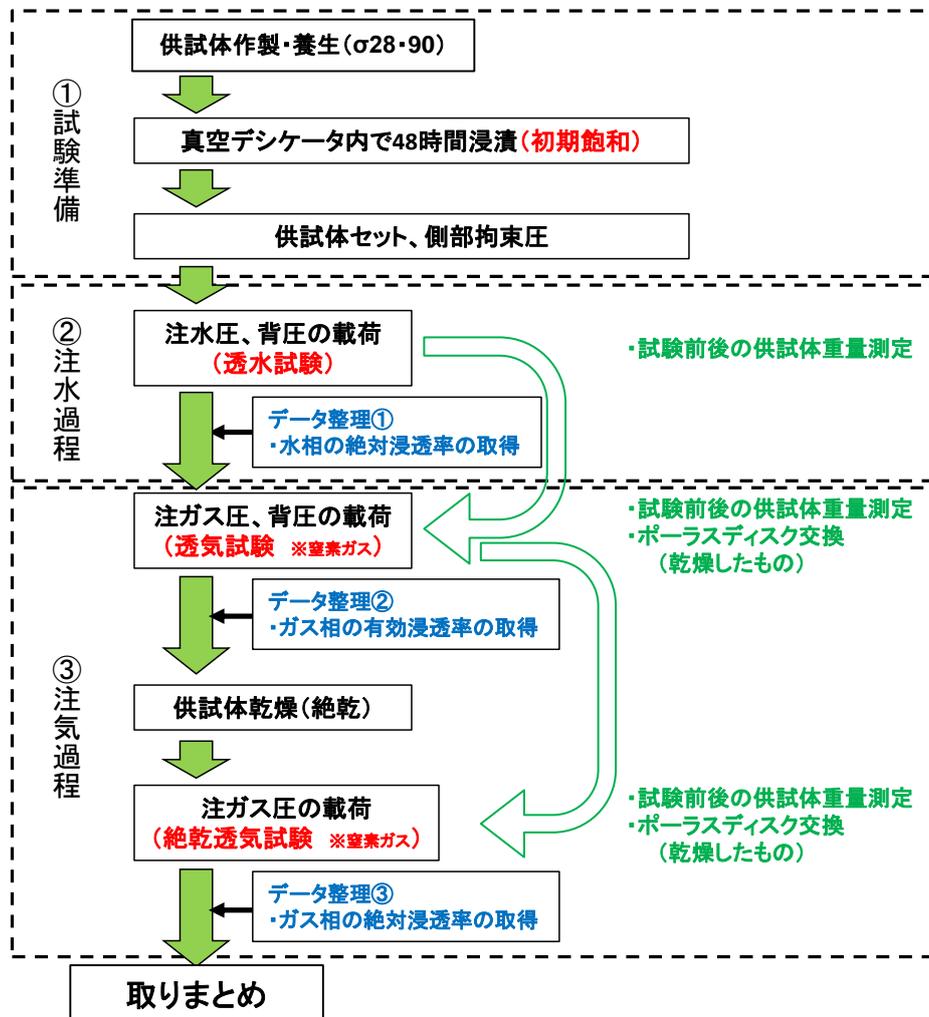


図 2.2.2-2 試験の実施フロー

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

2.3.1 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た。表 2.3.1-1 に配合を示す。

表 2.3.1-1 供試体モルタルの配合

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(%)
65	1.5	407	626	938	5.2 アスカクリン	2.1	11.8

細骨材については、昨年度同様にふるい分けを実施して調整した（写真 2.3.1-1）。細骨材の粒度分布を図 2.3.1-1 に示す。

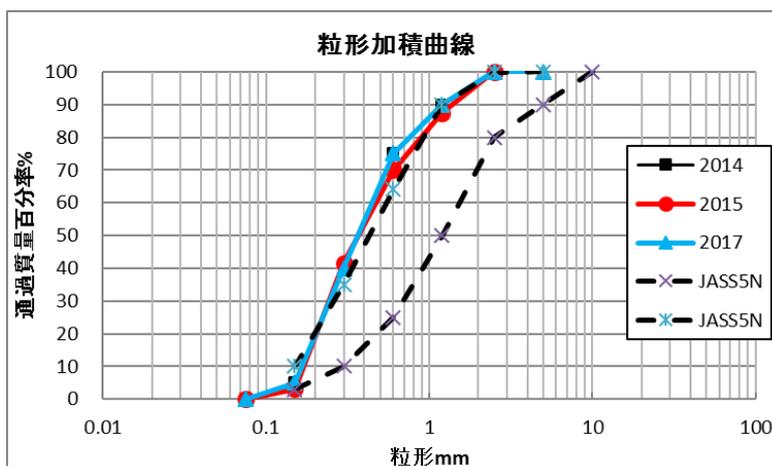


図 2.3.1-1 細骨材の粒径加積曲線

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 供試体用モールドに打設 1 日後に、熱水槽と試料養生室で養生開始
- ⑥ 材齢 28 日の数日前に、端面を研磨して高さ 50mm になるように成形し、予備透水試験実施

- ⑦ 材齢 28 日後に一軸圧縮試験を実施
- ⑧ 材齢 90 日後に一軸圧縮試験を実施、並行して透水・透気試験開始

写真 2.3.1-2 スコヤ設置に金属板を入れた界面有供試体用の金属板設置補助としてのスコヤ設置状況、写真 2.3.1-3 に金属板取付けモールド、写真 2.3.1-4 に打設準備状況、写真 2.3.1-5 に砂投入状況、写真 2.3.1-6 にミキサー攪拌状況、写真 2.3.1-7 にエア量確認試験を、写真 2.3.1-8 にブリージング試験の状況を示す。また、写真 2.3.1-9 に透水・透気試験用モールドへの打設状況、写真 2.3.1-10 に一軸圧縮試験用モールドへの打設状況を示す。透水・透気試験用モールドは、界面有供試体用モールドが 8 個+予備 2 個の計 10 個、界面無供試体用モールドが 6 個、一軸圧縮試験用モールドが熱水と常温でそれぞれ 28 日強度と 90 日強度を調べるために 3 個ずつの計 12 個に、熱水養生した場合のモルタル内の温度計測を行うために熱電対を挿入したもの 1 個である。写真 2.3.1-11 に透水・透気用モールド打設完了状況を、写真 2.3.1-12 に一軸圧縮試験用モールドへの打設完了状況を示す。両ケースの打設完了後 1 日養生状況を写真 2.3.1-13 に示す。



写真 2.3.1-1 粒度調整のための篩分け



写真 2.3.1-2 スコヤ設置



写真 2.3.1-3 金属板取付けモールド



写真 2.3.1-4 打設準備状況



写真 2.3.1-5 砂投入



写真 2.3.1-6 ミキサー攪拌状況



写真 2.3.1-7 エア量の確認 (7.8%)



写真 2.3.1-8 一軸圧縮試験用モールド



写真 2.3.1-9 透水・透気用モールド
金属板取付けモールド 10 個
金属板無しモールド 6 個



写真 2.3.1-10 一軸圧縮試験用モールド
28 日強度用常温 3 個 80°C 3 個
90 日強度用常温 3 個 80°C 3 個+温度計測用 1 個



写真 2.3.1-11 透水・透気用モールド打設完了

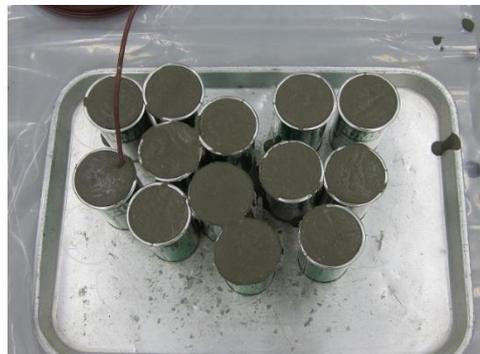


写真 2.3.1-12 一軸圧縮試験用モールド打設完了



写真 2.3.1-13 打設完了後 1 日養生状況

養生用ビニール袋 2 種を写真 2.3.1-14 に示す。右側のビニール袋でモールドのまま包み（写真 2.3.1-15）、左側のジップロックにまとめて 4 個を入れて水が入らないようにした（写真 2.3.1-16 および写真 2.3.1-16）。写真 2.3.1-18 に熱水恒温槽を示す。熱水恒温槽は、温度を 80℃に維持するようにヒーターを制御するものである。写真 2.3.1-20 に熱水槽での養生状況を、写真 2.3.1-21 には試料養生室（室温 20℃）での養生状況を示す。



写真 2.3.1-14 養生用ビニール袋 2 種



写真 2.3.1-15 1 重目ビニール袋



写真 2.3.1-16 透水・透気試験用モールド 2 重ビニール養生状況

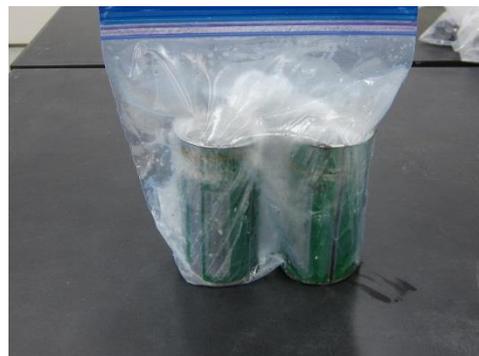


写真 2.3.1-17 一軸圧縮試験用モールド 2 重ビニール養生状況



写真 2.3.1-18 熱水槽 80℃養生



写真 2.3.1-19 熱水槽での 80℃養生状況



写真 2.3.1-20 試料養生室の常温養生状況

熱水槽養生では、一軸圧縮試験モールドに熱電対を設置して、モルタル内の温度と熱水槽の温度を計測した。結果を図 2.3.1-2 に示す。

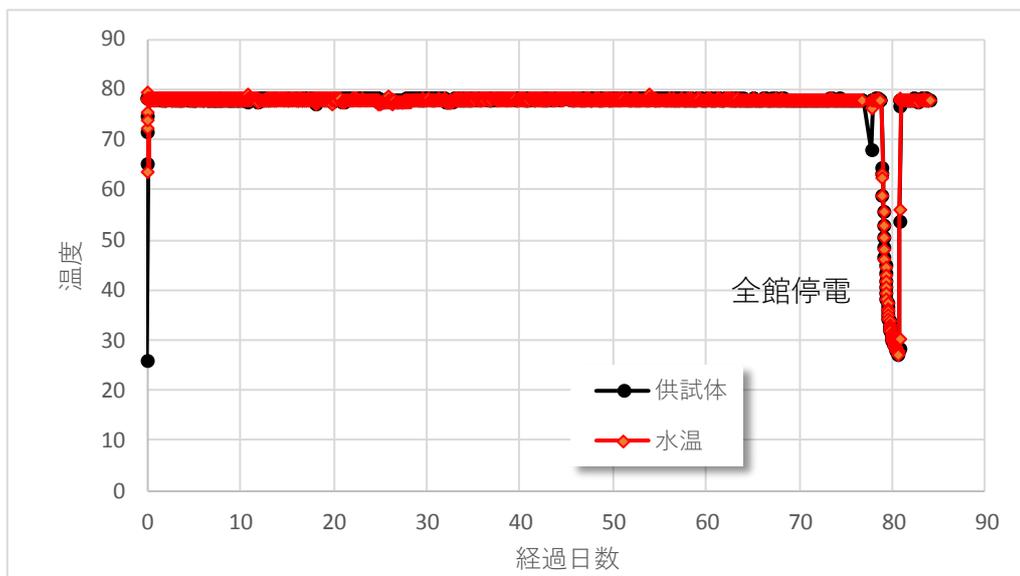


図 2.3.1-2 モルタル供試体と熱水の温度計測結果

この結果より、直径 50mm のモールド内のモルタルは 30 分以内で熱水恒温槽の温度まで上昇し、その後熱水高温槽の温度とほぼ等しい動きをする。たまたま停電の影響が捉えられて熱水恒温槽の温度と連動することがわかった。

脱型後のモルタル供試体の端面整形の状況を写真 2.3.1-25 に示す。一軸圧縮試験用供試体の状況を写真 2.3.1-26 に示す。金属板入りの界面有供試体を写真 2.3.1-27 に、無垢モルタルによる界面無供試体を写真 2.3.1-28 に示す。また、金属板入りの界面有供試体端面の状況を写真 2.3.1-27 と写真 2.3.1-27 に、無垢モルタルによる界面無供試体端面の状況を写真 2.3.1-28 と写真 2.3.1-28 に示す。



写真 2.3.1-21 養生後の端面研磨状況



写真 2.3.1-22 一軸圧縮試験用



写真 2.3.1-23 金属板入り界面有供試体



写真 2.3.1-24 無垢モルタル界面無供試体



写真 2.3.1-25 界面有り供試体の端面状況上面



写真 2.3.1-26 界面有り供試体の端面状況下面



写真 2.3.1-27 界面無し供試体の端面状況上面



写真 2.3.1-28 界面無し供試体の端面状況下面

材令 28 日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 2.3.1-3 は常温養生 28 日モルタルの応力～ひずみ関係、図 2.3.1-4 は 80℃養生 28 日モルタルの応力～ひずみ関係である。また、常温養生 28 日モルタルの破壊状況を写真 2.3.1-29 に、80℃養生 28 日モルタルの破壊状況を写真 2.3.1-30 に示す。強度および単位体積重量の一覧を表 2.3.1-2 および表 2.3.1-3 に示す。表より、常温養生 28 日モルタルの強度は 21.26MPa、と 80℃養生 28 日モルタルの強度は 18.95MPa となった。

80℃養生は、常温養生の 89%に強度低下した。

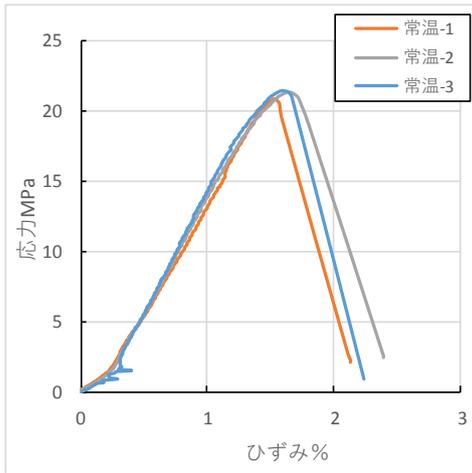


図 2.3.1-3 常温養生 28 日強度試験

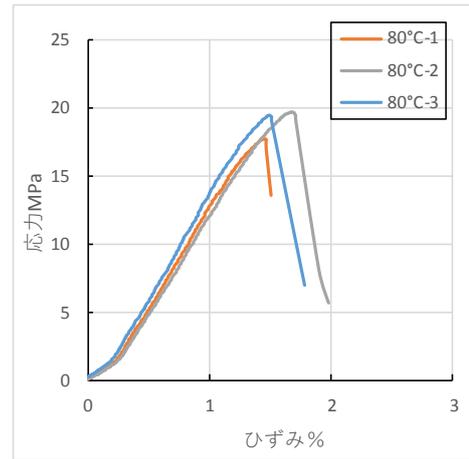


図 2.3.1-4 80°C養生 28 日強度試験



写真 2.3.1-29 常温養生 28 日強度試験破壊状況



写真 2.3.1-30 80°C養生 28 日強度試験破壊状況

表 2.3.1-2 常温養生 28 日強度試験結果一覧

No.	一軸圧縮強さ	単位体積重量
	MPa	gf/cm ³
常温-1	20.87	1.963
常温-2	21.40	1.959
常温-3	21.50	1.951
average	21.26	1.958

表 2.3.1-3 80°C養生 28 日強度試験結果一覧

No.	一軸圧縮強さ	単位体積重量
	MPa	gf/cm ³
80°C-1	17.71	1.917
80°C-2	19.69	1.913
80°C-3	19.47	1.939
average	18.95	1.923

材令 90 日のモルタルの一軸圧縮強度測定結果 (σ_{90}) を、以下に示す。

図 2.3.1-5 は常温養生 90 日モルタルの応力～ひずみ関係、図 2.3.1-6 は 80°C養生 90 日モルタルの応力～ひずみ関係である。また、常温養生 90 日モルタルの破壊状況を写真 2.3.1-29 に、80°C養生 90 日モルタルの破壊状況を写真 2.3.1-30 に示す。強度および単位体積重量の一覧を表 2.3.1-2 および表 2.3.1-3 に示す。表より、常温養生 90 日モルタルの強度は 26.00MPa、と 80°C養生 90 日モルタルの強度は 21.94MPa となった。

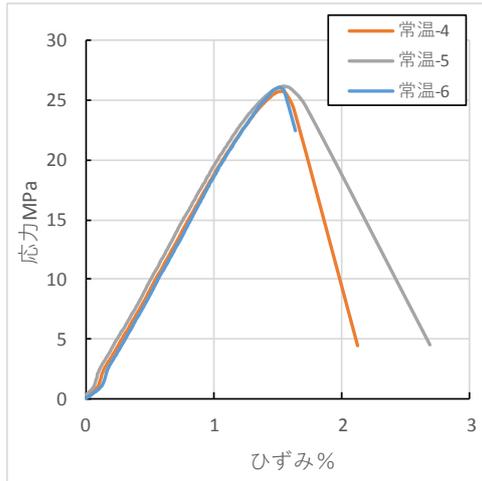


図 2.3.1-5 常温養生 90 日強度試験

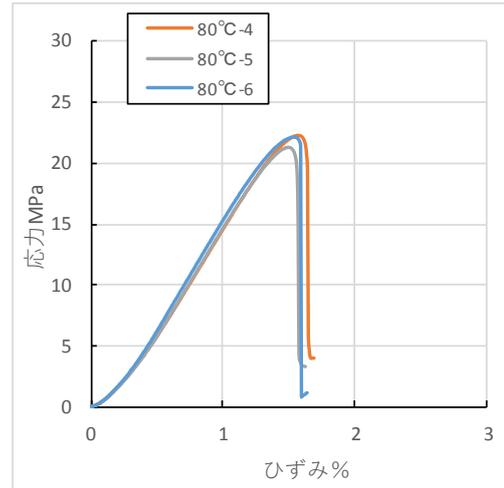


図 2.3.1-6 80°C養生 90 日強度試験



写真 2.3.1-31 常温養生 90 日強度試験



写真 2.3.1-32 80°C養生 90 日強度試験

表 2.3.1-4 常温養生 90 日強度試験結果一覧

No.	一軸圧縮強さ	単位体積重量
	MPa	gf/cm ³
常温-1	25.76	1.959
常温-2	26.14	1.987
常温-3	26.09	1.948
average	26.00	1.964

表 2.3.1-5 80°C養生 90 日強度試験結果一覧

No.	一軸圧縮強さ	単位体積重量
	MPa	gf/cm ³
80°C-4	22.25	1.884
80°C-5	21.35	1.909
80°C-6	22.20	1.906
average	21.94	1.900

28 日および 91 日強度試験結果を表 2.3.1-6 にまとめた。

表 2.3.1-6 常温養生ケースと 80°C養生ケースの 28 日および 91 日強度

	28 日強度 (MPa)	91 日強度 (MPa)
常温養生ケース	21.26	26.00
80°C養生ケース	18.95	21.94
強度低下	0.89	0.84

80°C水中下での杉山らの養生実験結果を図 2.3.1-7 に示す。空気量 7%、W/C 比 60%の結果では、80°C養生の圧縮強度 (□) は 20°C養生のそれ (○) の約 1/3 まで低下しており、今回の結果に比べて

大きな低下を示している。杉山らの実験と今回の実験の違いは、供試体の大きさ（杉山ら $\phi 10 \times h20\text{cm}$ に対して、 $\phi 5 \times h10\text{cm}$ ）と外部からの水分供給の有無（杉山らはモールドをそのまま水浸することで上面からは水分供給はあるが、今回の実験では、ビニール袋に入れての養生であるので水分供給はない）である。

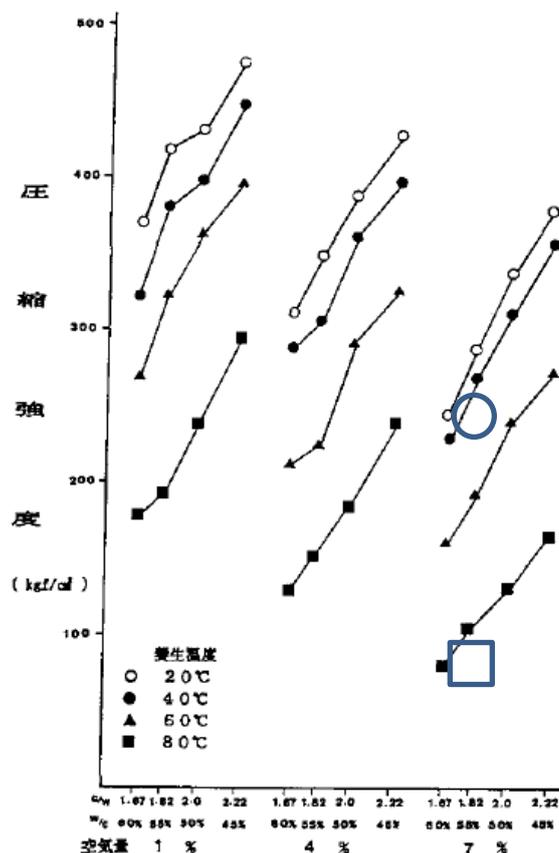


図 2.3.1-7 モルタルの圧縮強度

単位体積重量の 80°C養生と常温養生との比較を表 2.3.1-7 に示す。80°C養生の方が 28 日養生で 2%、91 日養生で 3%の低下で、非常に小さい。この差が空隙の量に依存するので養生温度による透水性の違いも小さいことが予想される。

表 2.3.1-7 常温養生ケースと 80°C養生ケースの 28 日および 91 日養生の単位体積重量

	28 日養生時単位体積重量 (kN/m ³)	91 日養生時単位体積重量 (kN/m ³)
常温養生ケース	19.20	19.26
80°C養生ケース	18.86	18.63
強度低下	0.98	0.97

*SI 単位に変換 (1gf/cm³=9.80655kN/m³)

2.3.2 供試体の飽和（透水試験結果）

(1) 試験条件

表 2.3.2-1 に透水試験の条件を示す。

表 2.3.2-1 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

(2) 実施状況

表 2.3.2-2 に各ケースの透水試験の実施状況を示す。

また、写真 2.3.2-1 に供試体のセット状況、写真 2.3.2-2 にペディスタルの設置状況、写真 2.3.2-3 にゴムジャケット装着状況、写真 2.3.2-4 に試験装置全体図を示す。

表 2.3.2-2 材料作製および透水試験の実施状況

ケース	打設日	透水試験日程
常温養生 界面有り	8/9	
常温養生 界面無し	8/9	11/27
80℃養生 界面有り	8/9	11/9、11/20
80℃養生 界面無し	8/9	11/20、11/27



写真 2.3.2-1 供試体のセット状況



写真 2.3.2-2 ペディスタル設置



写真 2.3.2-3 ゴムジャケット装着状況



写真 2.3.2-4 試験装置全体図

表 2.3.2-3 界面有供試体の状況

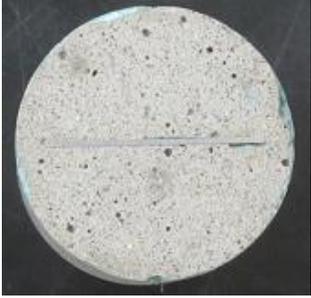
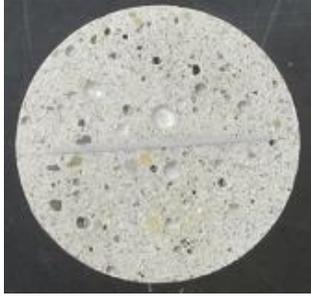
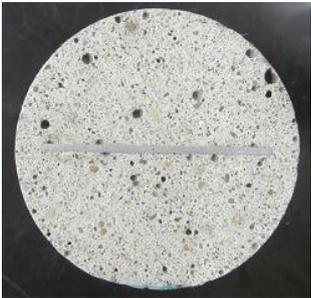
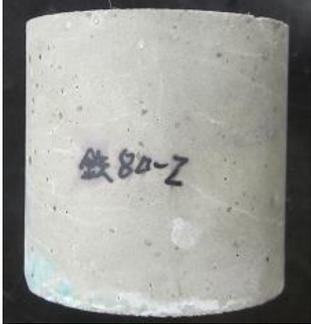
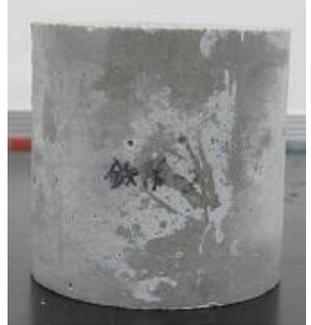
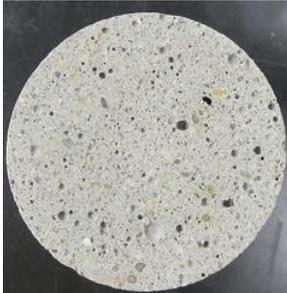
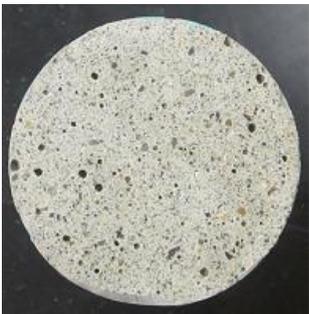
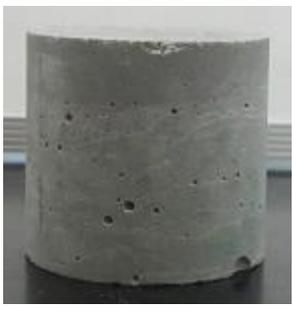
			
80°C養生界面有-1 下面	80°C養生界面有-1 側面 1	80°C養生界面有-1 側面 2	80°C養生界面有-1 上面
			
80°C養生界面有-2 下面	80°C養生界面有-2 側面 1	80°C養生界面有-2 側面 2	80°C養生界面有-2 上面
			
常温養生界面有-1 下面	常温養生界面有-1 側面 1	常温養生界面有-1 側面 2	常温養生界面有-1 上面
			
常温養生界面有-2 下面	常温養生界面有-2 側面 1	常温養生界面有-2 側面 2	常温養生界面有-2 上面

表 2.3.2-4 界面無供試体の状況

			
80°C養生界面無-1 下面	80°C養生界面無-1 側面 1	80°C養生界面無-1 側面 2	80°C養生界面無-1 上面
			
80°C養生界面無-2 下面	80°C養生界面無-2 側面 1	80°C養生界面無-2 側面 2	80°C養生界面無-2 上面
			
常温養生界面無-1 下面	常温養生界面無-1 側面 1	常温養生界面無-1 側面 2	常温養生界面無-1 上面
			
常温養生界面無-2 下面	常温養生界面無-2 側面 1	常温養生界面無-2 側面 2	常温養生界面無-2 上面

予備試験として実施した 28 日養生での透水試験結果をまとめると次のようになる。

界面有 28 日 80℃養生供試体と常温養生の透水試験から得られた累積透水量（排水量）の経時変化をそれぞれ図 2.3.2-1 と図 2.3.2-2 に、透水係数の算定結果を表 2.3.2-5 に示す。

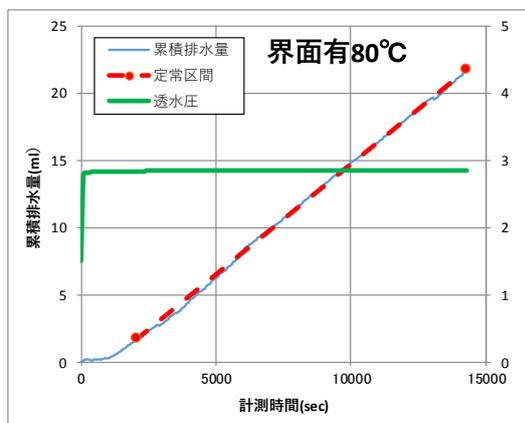


図 2.3.2-1 界面有 28 日 80℃養生供試体の透水試験結果

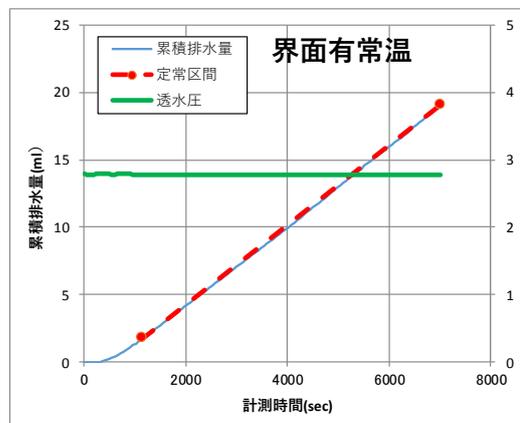


図 2.3.2-2 界面有 28 日常温養生供試体の透水試験結果

表 2.3.2-5 界面有 28 日 80℃養生試体と常温養生透水試験結果

供試体 No.	透水係数 (m/s)
界面有 80℃	1.51×10^{-10}
界面有常温	2.79×10^{-10}

界面無 28 日 80℃養生試体と常温養生供試体の透水試験から得られた累積透水量（排水量）の経時変化をそれぞれ図 2.3.2-3 と図 2.3.2-4 に、透水係数の算定結果を表 2.3.2-6 に示す。

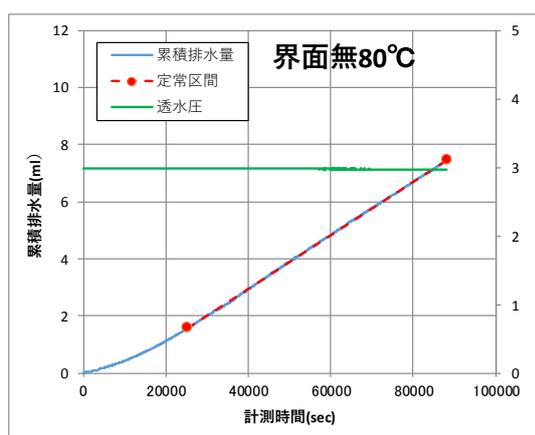


図 2.3.2-3 界面無 28 日 80℃養生供試体の透水試験結果

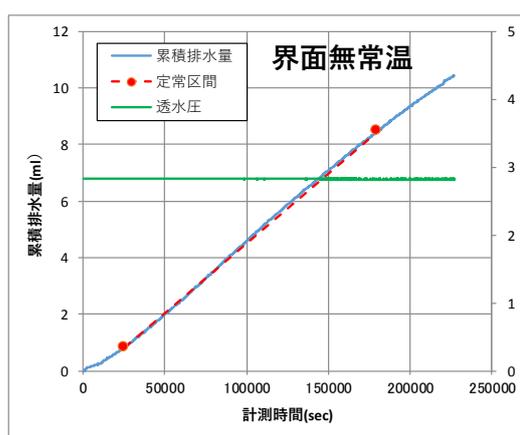


図 2.3.2-4 界面無 28 日常温養生供試体の透水試験結果

表 2.3.2-6 界面無 28 日 80℃養生試体と常温養生透水試験結果

供試体 No.	透水係数 (m/s)
界面無 80℃	1.02×10^{-11}
界面無常温	5.13×10^{-12}

90 日養生の供試体について、ガス注入試験実施前に供試体を水で飽和させるために実施した透水試験結果を次に示す。

界面有 80℃養生の No.1 と No.2 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 2.3.2-5 と図 2.3.2-6 に、界面無 80℃養生の No.1 と No.2 供試体の透水試験から得られた累積透水量（排水量）の経時変化をとに示す。これらの結果から得られた透水係数の一覧を表 2.3.2-7 に示す。80℃養生と常温養生で、界面の有無による違いは見られなかった。

界面無しの場合は、常温養生の透水係数に比べて 80℃養生の透水係数は 1 桁大きくなる傾向が認められた。

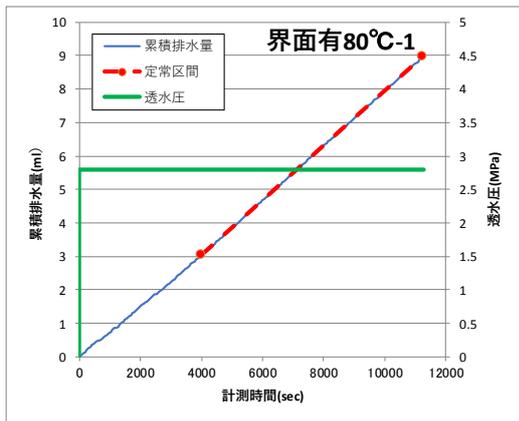


図 2.3.2-5 界面有 80℃養生供試体 No. 1 の透水試験結果

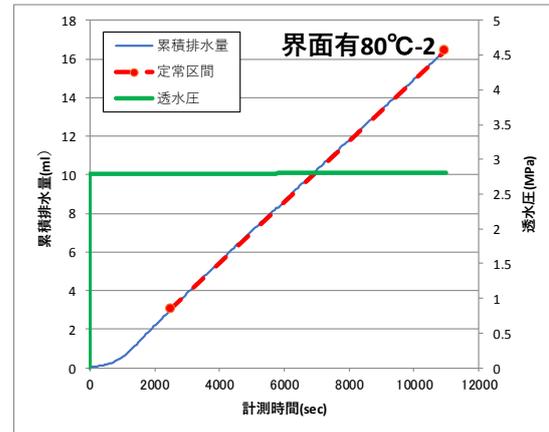


図 2.3.2-6 界面有 80℃養生供試体 No. 2 の透水試験結果

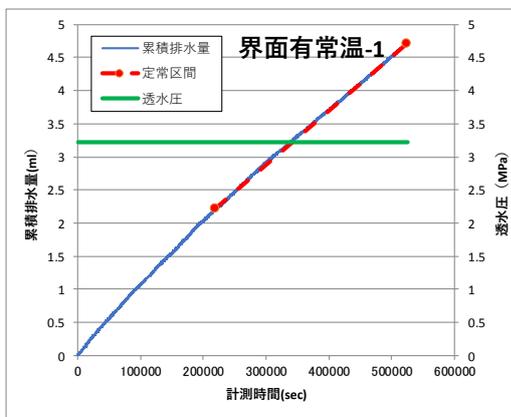


図 2.3.2-7 界面有常温養生供試体 No.1 の透水試験結果

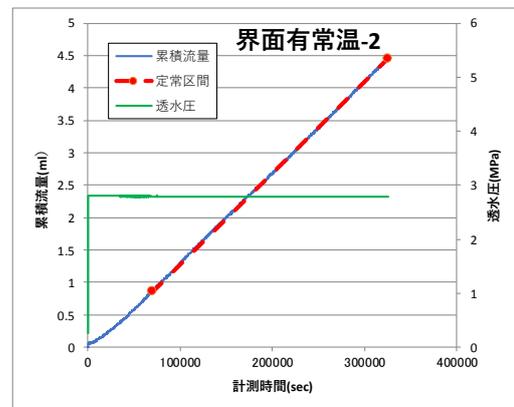


図 2.3.2-8 界面有常温養生供試体 No.2 の透水試験結果

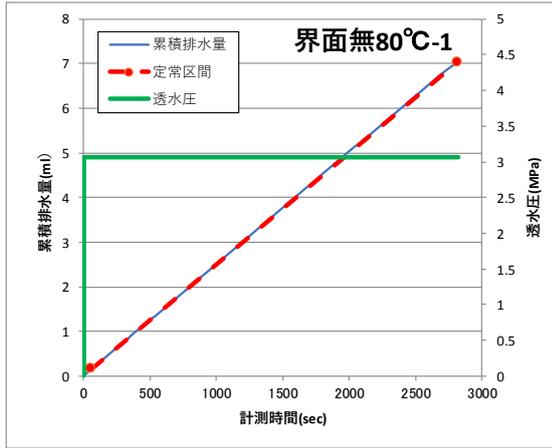


図 2.3.2-9 界面無 80°C養生供試体 No.1
の透水試験結果

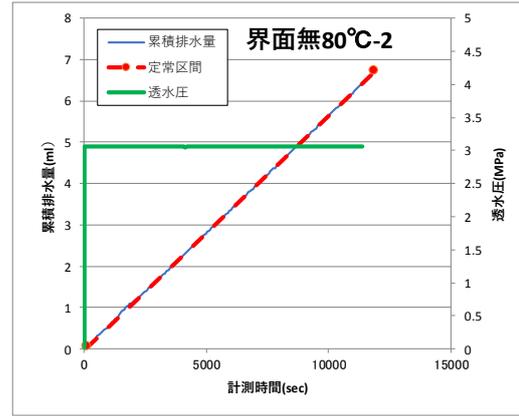


図 2.3.2-10 界面無 80°C養生供試体 No.2
の透水試験結果

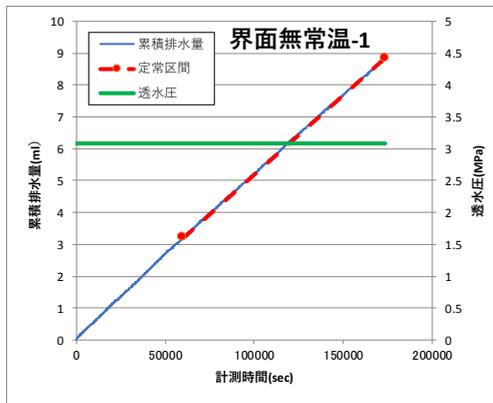


図 2.3.2-11 界面無常温養生供試体 No.1
の透水試験結果

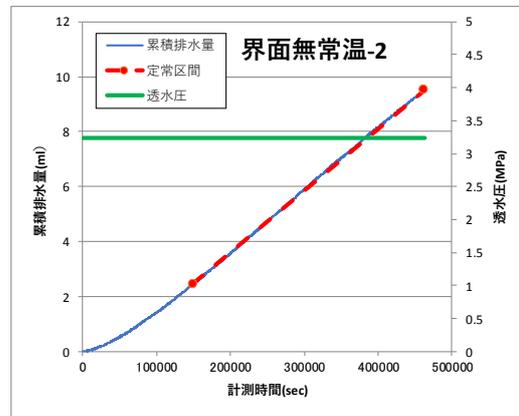


図 2.3.2-12 界面無し常温養生供試体 No.2
の透水試験結果

$$k = \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \log_e \frac{h_1}{h_2} = \frac{2.303aL}{A(t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad \text{式 2.3.2-1}$$

ここで、 k : 透水係数(m/s)、 A : 供試体断面積(m^2)、 a はビューレットの断面積(m^2)、 L は供試体長さ(m)、 h_1 と h_2 はそれぞれ時刻 t_1 (s)と t_2 (s)の時の水頭(m)である。透水係数の算定結果を表 2.3.2-7 に示す。

表 2.3.2-7 透水試験結果

供試体 No.		拘束圧 (MPa)	透水圧 (MPa)	背圧 (MPa)	t1 (s)	t2 (s)	透水係数 (m/s)
界面有	80°C-1	3.0	2.8	0.1	4,020	11,280	7.66E-11
	80°C-2	3.1	2.8	0.1	2,520	10,980	1.50E-10
	常温-1	3.2	3.0	0.1	220,015	524,993	7.05E-13
	常温-2	3.0	2.8	0.1	70,020	325,620	1.31E-12
界面無	80°C-1	3.1	2.8	0.1	60	2,820	3.10E-10
	80°C-2	3.1	2.8	0.1	120	11,880	4.64E-11
	常温-1	3.1	2.8	0.1	60,000	173,940	4.69E-12
	常温-2	3.2	3.0	0.1	150,000	463,200	2.26E-12

透水試験前後に供試体の重量を測定した結果を表 2.3.2-8 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 2.3.2-8 モルタル供試体 寸法および透水試験前後の重量比較

供試体 No.	高さ	直径	透水試験前 (g)	透水試験後 (g)	増分 (g)	
	mm	mm				
界面有	80°C-1	49.88	50.21	207.077	207.540	0.463
	80°C-2	49.49	50.19	201.362	203.872	2.510
	常温-1	49.68	49.94	202.553	205.603	3.050
	常温-2	49.71	49.83	204.270	206.628	2.358
界面無	80°C-1	43.15	50.08	163.828	165.908	2.080
	80°C-2	44.63	50.08	173.381	174.079	0.698
	常温-1	49.41	50.06	187.663	191.667	4.004
	常温-2	46.28	50.16	177.739	182.163	4.424

2.3.3 ガス注入試験

(1) 実施状況

表 2.3.3-1 に各ケースのガス注入試験の実施状況を示す。

表 2.3.3-1 ガス注入試験の実施状況

試験ケース	打設日	透気試験日程
界面有 80°C	8/9	11/20、12/21
界面有常温	8/9	12/19、12/25
界面無 80°C	8/9	11/21、11/13
界面無常温	8/9	11/30、1/4

(2) 供試体へのガス注入過程

界面有 80°C 供試体 No.1 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 2.3.3-1 と図 2.3.3-2 に、時間～透気量関係の定常区間を図 2.3.3-3 に示す。界面有 80°C 供試体 No.2 の透気試験結果を図 2.3.3-4 と図 2.3.3-5 に、時間～透気量関係の定常区間を図 2.3.3-6 に示す。

界面有常温供試体 No.1 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 2.3.3-7 と図 2.3.3-8 に、時間～透気量関係の定常区間を図 2.3.3-9 に示す。界面有常温供試体 No.2 の透気試験結果を図 2.3.3-10 と図 2.3.3-11 に、時間～透気量関係の定常区間を図 2.3.3-12 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)を式 2.3.3-1 により算定した。

$$K = \frac{2Q\mu p_a}{A} \frac{L}{p_0^2 - p_L^2} \quad \text{式 2.3.3-1}$$

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 2.3.3-3、図 2.3.3-6、図 2.3.3-9 および図 2.3.3-12) から算定したガス有効浸透率の算定結果を表 2.3.3-2 に示す。

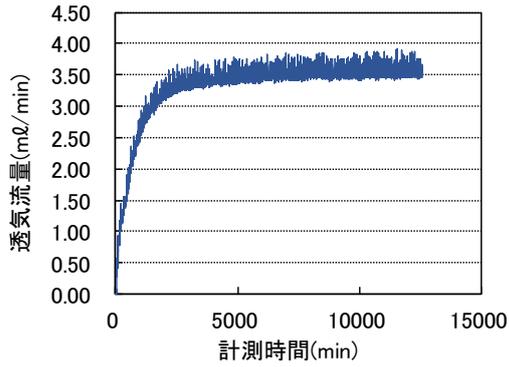


図 2.3.3-1 界面有 80°C-1 時間-排水量関係

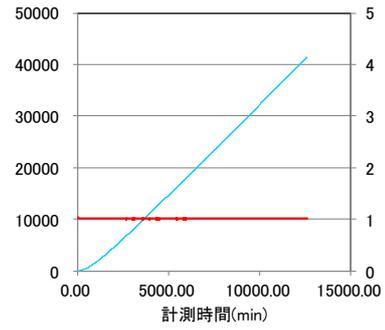


図 2.3.3-2 界面有 80°C-1 時間-透気量関係

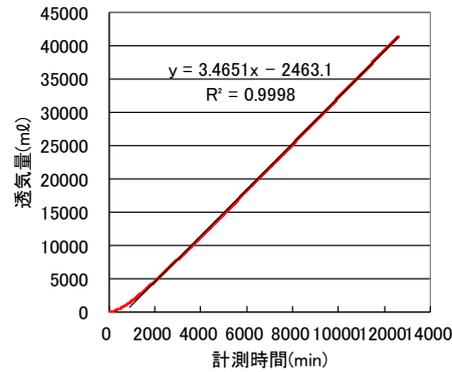


図 2.3.3-3 界面有 80°C-1 の時間-透気量関係の定常区間 (黒線)

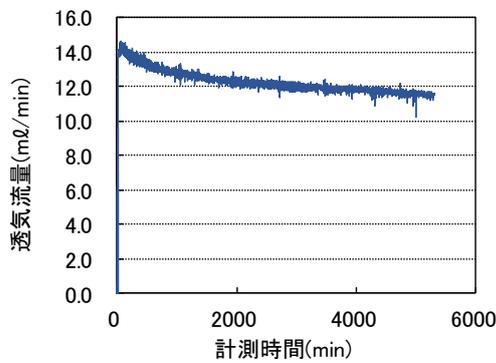


図 2.3.3-4 界面有 80°C-2 時間-排水量相関

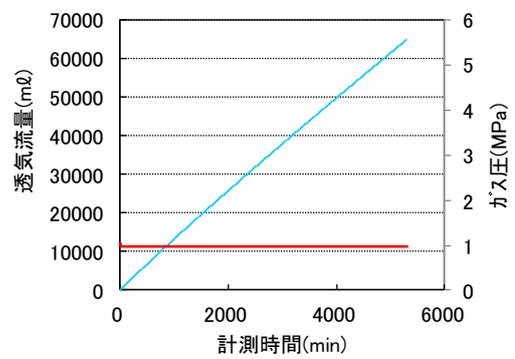


図 2.3.3-5 界面有 80°C-2 時間-透気量相関

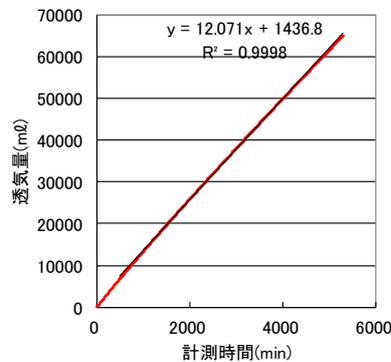


図 2.3.3-6 界面有 80°C-2 の透気量 (補正值) の定常区間 (黒線)

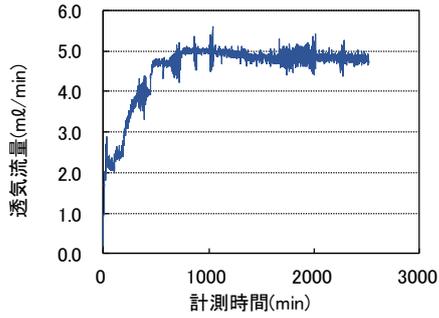


図 2.3.3-7 界面有常温-1 時間-排水量相関

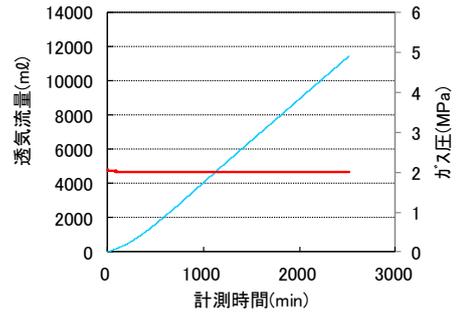


図 2.3.3-8 界面有常温-1 時間-透気量相関

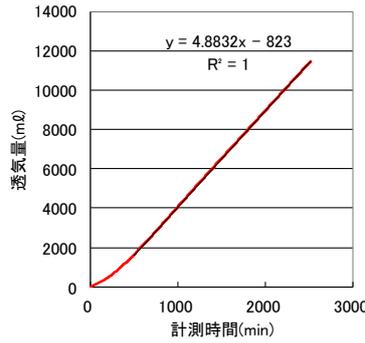


図 2.3.3-9 界面有常温-1 の透気量 (補正值) の定常区間 (黒線)

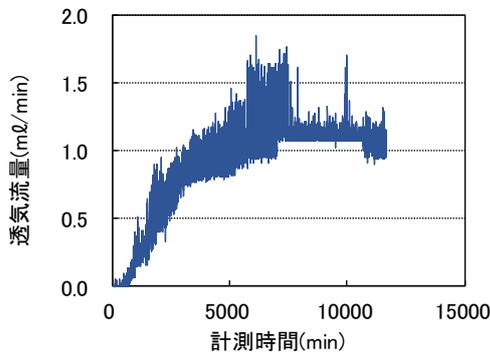


図 2.3.3-10 界面有常温-2 時間-排水量相関

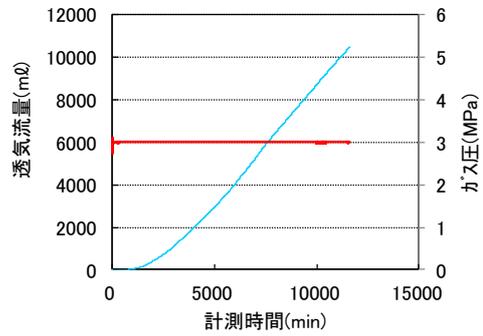


図 2.3.3-11 界面有常温-2 時間-透気量相関

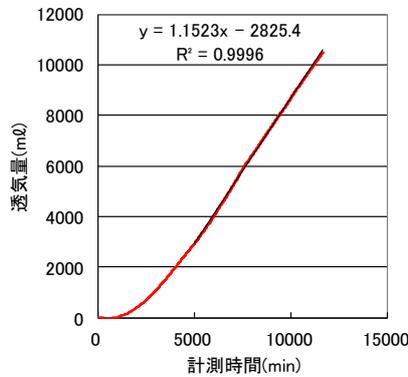


図 2.3.3-12 界面有常温-2 の透気量 (補正值) の定常区間 (黒線)

表 2.3.3-2 界面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)	総排水量 (mL)
界面有 80℃-1	3.00	1.00	0.10	5.14E-18	26.02
界面有 80℃-2	3.04	0.98	0.10	1.16E-16	3.37
界面有常温-1	3.23	2.01	0.10	1.10E-17	0.67
界面有常温-2	3.02	2.42	0.10	1.67E-19	0.29

界面無 80℃供試体 No.1 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 2.3.3-13 と図 2.3.3-14 に、時間～透気量関係の定常区間を図 2.3.3-15 に示す。界面無 80℃供試体 No.2 の透気試験結果を図 2.3.3-16 と図 2.3.3-17 に、時間～透気量関係の定常区間を図 2.3.3-18 に示す。

界面無常温供試体 No.1 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 2.3.3-19 と図 2.3.3-20 に、時間～透気量関係の定常区間を図 2.3.3-21 に示す。界面無常温供試体 No.2 の透気試験結果を図 2.3.3-22 と図 2.3.3-23 に、時間～透気量関係の定常区間を図 2.3.3-24 に示す。

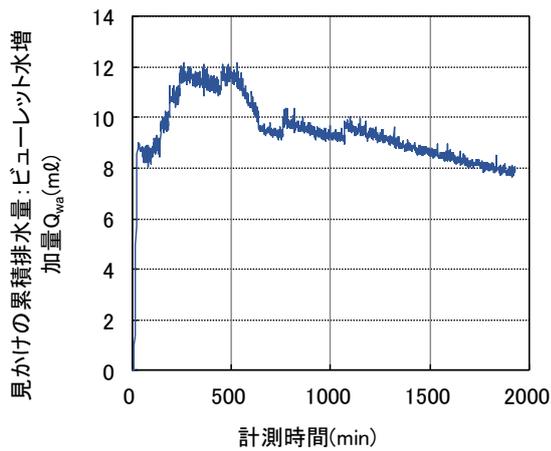


図 2.3.3-13 界面無 80℃-1 時間-排水量相関

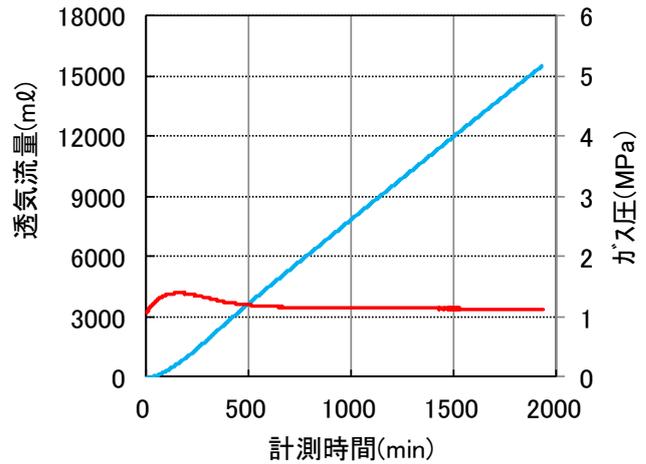


図 2.3.3-14 界面無 80℃-1 時間-透気量相関

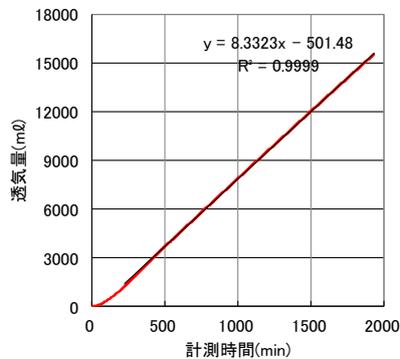


図 2.3.3-15 界面無 80℃-1 の透気量 (補正值) の定常区間 (黒線)

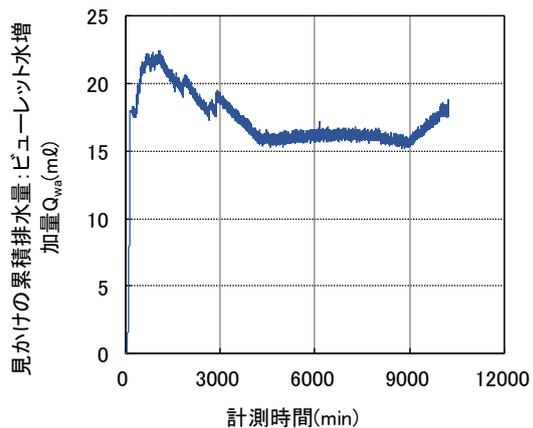


図 2.3.3-16 界面無 80°C-2 時間-排水量相関

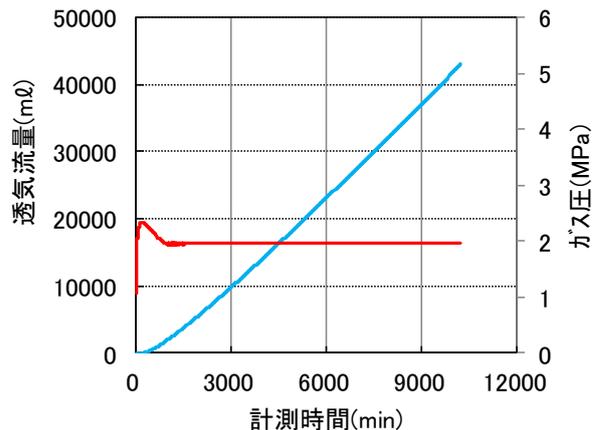


図 2.3.3-17 界面無 80°C-2 時間-透気量相関

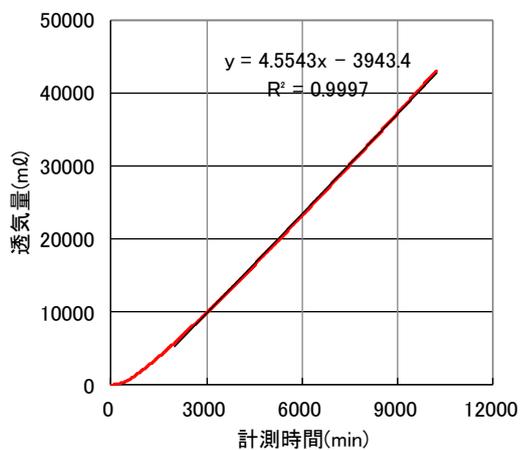


図 2.3.3-18 界面無 80°C-2 の透気量 (補正值) の定常区間 (黒線)

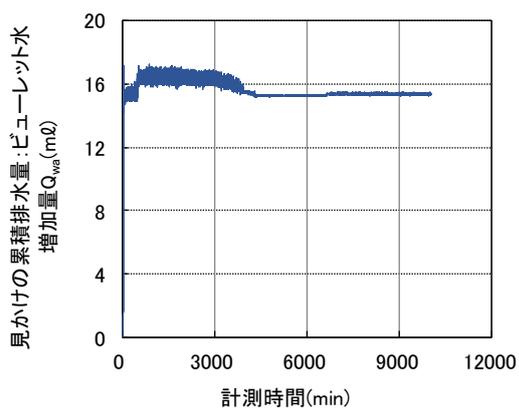


図 2.3.3-19 界面無常温-1 時間-排水量相関

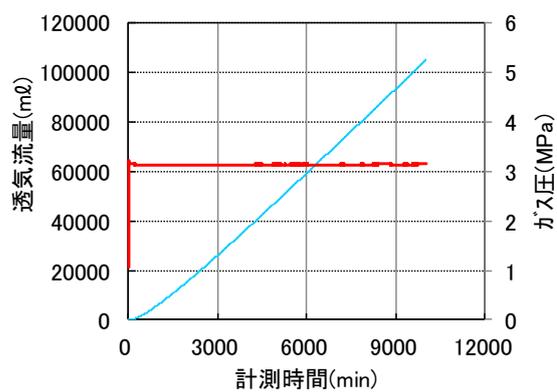


図 2.3.3-20 界面無常温-1 時間-透気量相関

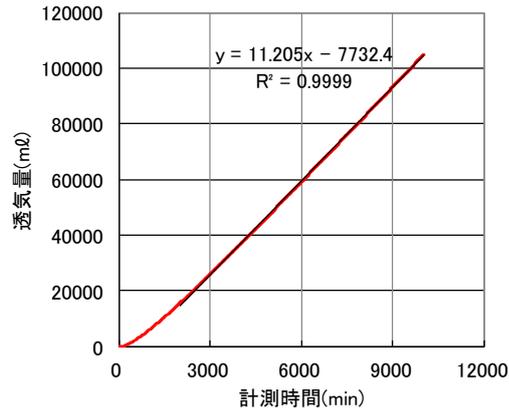


図 2.3.3-21 界面無常温-1 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）

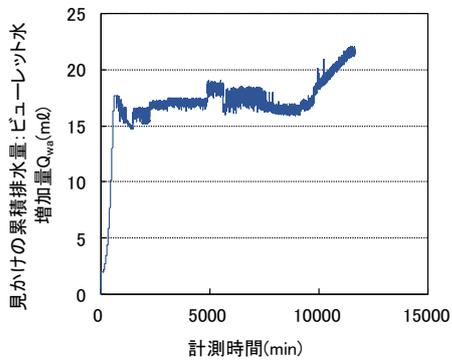


図 2.3.3-22 界面無常温-2 時間-排水量相関

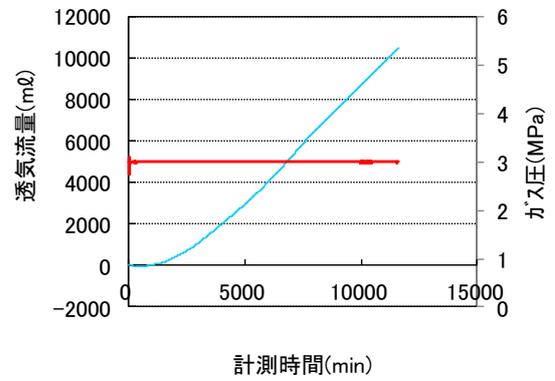


図 2.3.3-23 界面無常温-2 時間-透気量相関

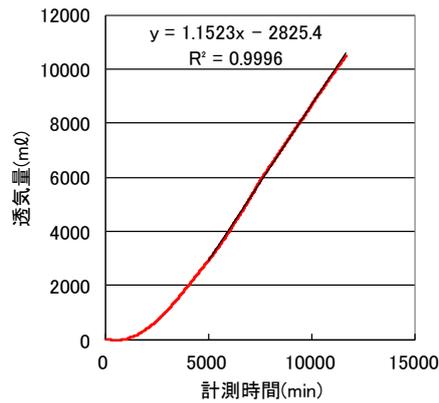


図 2.3.3-24 界面無常温-2 の透気量（補正值）の定常区間（黒線）

表 2.3.3-3 界面無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)
界面無 80°C-1	3.04	1.30	0.10	3.87E-17	6.783
界面無 80°C-2	2.99	2.02	0.10	9.12E-18	9.025
界面無常温-1	3.49	3.13	0.10	1.02E-17	3.500
界面無常温-2	3.23	2.99	0.10	1.81E-19	3.874

今年度は、金属板を挿入した界面の有る供試体について、実際の廃棄体の温度 80°Cを考慮した養生によるモルタルと界面のガス透過性を調べ、界面の無いもの、常温で養生したものとの比較を行った。実験結果を総合すると以下のようなものである。

表 2.3.3-4 界面有供試体の試験結果

	透水係数 (m/s)	水飽和透過係数 (m ²)	透気係数 (m ²)	絶乾状態透気 (m ²)
界面有 80°C-1	1.50×10 ⁻¹⁰	1.84×10 ⁻¹⁷	5.14×10 ⁻¹⁸	1.52×10 ⁻¹⁵
界面有 80°C-2	5.17×10 ⁻¹¹	6.34×10 ⁻¹⁸	1.94×10 ⁻¹⁷	7.94×10 ⁻¹⁶
界面有常温-1	7.05×10 ⁻¹³	8.63×10 ⁻²⁰	1.84×10 ⁻¹⁸	9.32×10 ⁻¹⁶
界面有常温-2	1.31×10 ⁻¹²	1.61×10 ⁻¹⁹	1.67×10 ⁻¹⁹	1.04×10 ⁻¹⁴

表 2.3.3-5 界面無供試体の試験結果

	透水係数 (m/s)	水飽和透過係数 (m ²)	透気係数 (m ²)	絶乾状態透気 (m ²)
界面無 80°C-1	3.10×10 ⁻¹⁰	3.80×10 ⁻¹⁷	6.45×10 ⁻¹⁸	4.34×10 ⁻¹⁷
界面無 80°C-2	4.64×10 ⁻¹¹	5.68×10 ⁻¹⁸	1.52×10 ⁻¹⁸	1.47×10 ⁻¹⁷
界面無常温-1	4.69×10 ⁻¹²	5.74×10 ⁻¹⁹	1.71×10 ⁻¹⁸	9.34×10 ⁻¹⁷
界面無常温-2	2.26×10 ⁻¹²	2.76×10 ⁻¹⁹	1.80×10 ⁻¹⁹	1.46×10 ⁻¹⁶

界面の存在は、モルタルのガス透過に大きな影響を及ぼさないことが示された。一方、養生温度が 80°Cの場合、すなわち実際に廃棄体周辺をモルタルで充填した場合には、常温養生に比べて 1 オーダー透過性能が上がるのがわかった。

2.3.4 セメント系材料への熱影響による強度低下とガス移行特性への影響について

2.3.1 に示したとおり、廃棄体パッケージ周辺のモルタルは施工後ほぼ瞬時に廃棄体パッケージと同一温度となることが予想されており、供試体についても常温養生に加え、80°Cの熱水中で養生したものをを用いた。

国内の研究では、養生温度の影響について、強度について研究されている例がある。ガス移行特性を考えるには、強度がモルタルの構造に影響を受けているという研究が参考になる。

前述の杉山らの研究[13]では、80℃水中下での養生の圧縮強度は 20℃水中下での養生のその約 1/3 まで低下しており、今回の結果に比べて大きな低下を示している。杉山らの実験と今回の実験の違いは、供試体の大きさ（杉山ら $\phi 10 \times h20\text{cm}$ に対して、 $\phi 5 \times h10\text{cm}$ ）と外部からの水分供給の有無（杉山らはモールドをそのまま水浸することで上面からは水分供給はあるが、今回の実験では、ビニール袋に入れての養生であるので水分供給はない）である。

また、松沢らの研究[14]では、モルタルの細孔構造から強度変化を推定している。図 2.3.4-1 に温度養生前の細孔径分布を示す。今回の供試体に配合条件は $W/C=65\%$ であるので、 $W/C=60\%$ のケースを見ると、直径 50 ナノメートル付近の空隙が多いことがわかる。

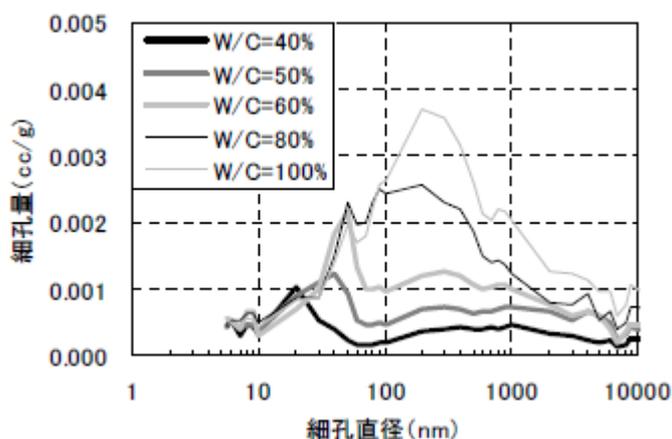


図 2.3.4-1 温度養生前の細孔径分布

$W/C=60\%$ 供試体の温度養生後の細孔構造を図 2.3.4-2 に示す。今回の養生温度 80℃を見ると、直径 200 ナノメートル付近にピークがある。この結果を、比較的高い水セメント比であると、余剰水が存在していて第 2 ピークとなるような大きな空隙が多く、熱の影響が加わることで空隙がさらに増加したと推定している。

すなわち、元々の空隙径分布のピークが 50 ナノメートルから高温の条件下にあると大きな空隙径にピークがシフトする可能性が示されており、ガス移行特性としても細孔構造の意味から増加傾向にあることが示され、今回得られた傾向と一致すると考えられる。

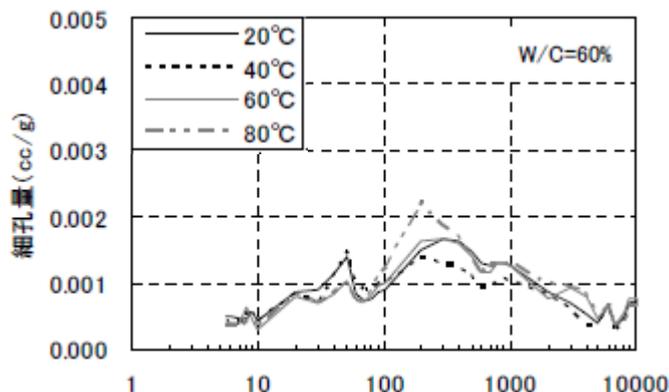


図 2.3.4-2 $W/C=60\%$ の温度養生後の細孔径分布

2.4 まとめ

人工バリアシステムのうち充填材（セメント系材料）を対象としたガス移行特性評価試験結果を取り纏めたものを図 2.4.1-1 および図 2.4.1-2 示す。

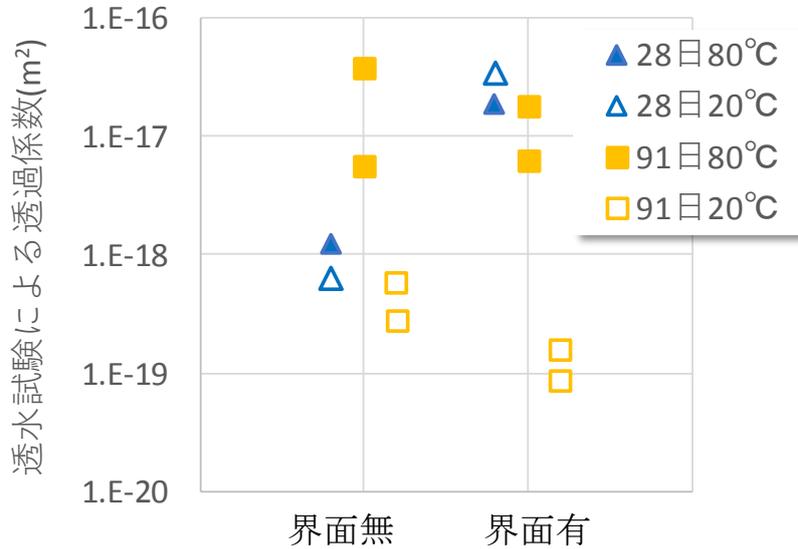


図 2.4.1-1 界面の有無と透水試験から求めた透過係数の関係

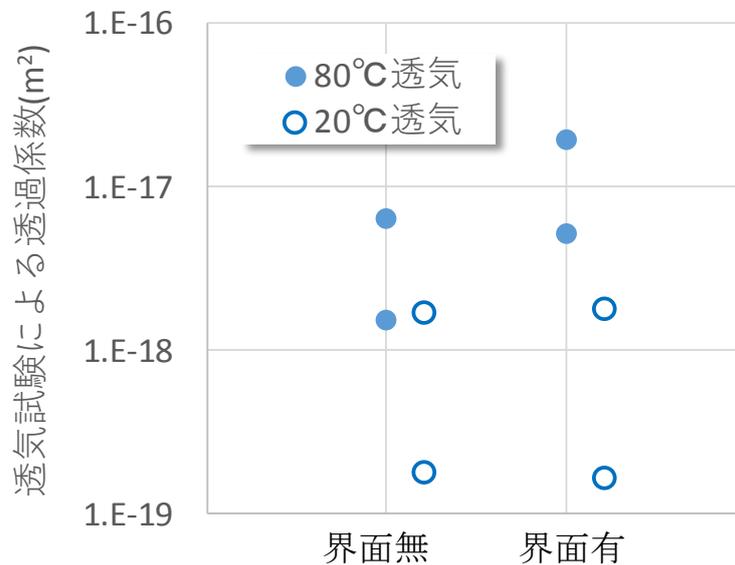


図 2.4.1-2 界面の有無と透気試験から求めた透過係数の関係

図 2.4.1-1 は、充填材中の界面の有無に着目し、その透過係数（ここでは透水特性）への影響を評価するために整理したものであり、養生期間 28 日を 三角印で、養生期間 91 日を 四角印で示し、それぞれ塗りつぶしてあるものが 80°C養生、中抜きのもが 20°C養生を示している。この結果から透水特性

に関して以下の点が指摘される。

- ・ 養生期間が短い 28 日のものは、界面の影響が明確に現れ、界面有のものが 1 桁大きな透過係数となる。
- ・ 91 日養生となると 80℃養生でも 20℃養生でも界面の有無の影響が見られなくなる。
- ・ 長期でのガス移行特性を考える場合には、実際の打設時には 80℃養生となるため、常温（20℃養生）での透過係数に対して、1～2 桁透過係数を高く見積もっておく必要がある。

一方で、図 2.4.1-2 は、同じく充填材中の界面の有無が、その透過係数（ここでは透気特性）への影響を評価するために整理したものである。整理結果から透気特性に関して以下の点が指摘される。

- ・ 透気試験から得られる透過係数では、80℃養生において、界面の影響が現れ、界面有の場合の方が界面無と比較して大きくなる傾向がある。

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] 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)
- [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 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)
- [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 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)
- [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 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－(2017)
- [13] 杉山秋博，飯坂武男，吉田弥智：高温養生下におけるモルタルの強度と水セメント比の関係について，土木学会第 43 回年次学術講演会，pp.510-511，1988

- [14] 松沢晃一，橘高義典，塚越雅幸，船越貴恵：異なる温度養生の影響を受けたモルタルの細孔構造からの強度推定式の検討コンクリート工学年次論文集，vol.33，No.1，2011.

第3章 ガス移行解析ツールを用いた人工バリアシステムの 成立性評価

3.1 本研究の背景と目的

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、以下に示す課題が抽出した。

- 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

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

平成 25 年度の検討では、平成 24 年度までの検討で得られた課題と、国内外を含めた最新の研究動向を踏まえて、平成 29 年度までを目途とした実施計画を策定した。この実施計画の中で設定した 3 つの Work Package（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。

昨年度の検討内容を示す。人工バリア中のガス発生・移行挙動の現象理解として実施された「最新の室内ガス移行試験データによる確証計算」の中では、本検討と並行して実施されている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。昨年度はこれまでに検討対象としてきたベントナイト系材料のみならず、ベントナイト系材料界面やセメント系材料を対象とした再現解析を実施し、パラメータの同定を行った。

さらに、ガス移行データの蓄積と活用として行われた「確証データの登録およびデータの追加収集・整理」では、上記の検討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として行われた「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」では、ガス移行解析におけるデータの不確実性に着目し、これまでに本研究で同定されたパラメータを用いて、鉛直 2 次元断面モデルによるガス移行解析を実施した。第 2 次 TRU レポートに示されたパラメータを適用した場合と、最新の研究成果を基に設定したパラメータを用いた場合で、施設内ガス圧や累積押出し水量へ与える影響を評価した。

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発生・移行挙動の現象理解</p> <p>目標成果：ガス発生・移行挙動を説明可能なモデル化手法を高度化すること</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ガス透気試験系の確証計算（粘土系材料、他材料） ● 同定パラメータの再評価（適用性検証、次元性、不均質性、アップスケーリング） ● 媒体変形と水・ガス 2 相流の挙動を関連付ける構成モデルの改良（最新の構成モデルの調査と組み込み、THM 連成） ● ガス発生モデリングの高度化
<p>WP2：ガス移行データの蓄積と活用</p> <p>目標成果：より多くの確証データ・構成モデルを蓄積し、有効利用すること</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 確証されたデータ・構成モデルの蓄積 ● 蓄積データ・モデルの有効利用
<p>WP3：不確実性を考慮したガス移行解析手法の構築</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）

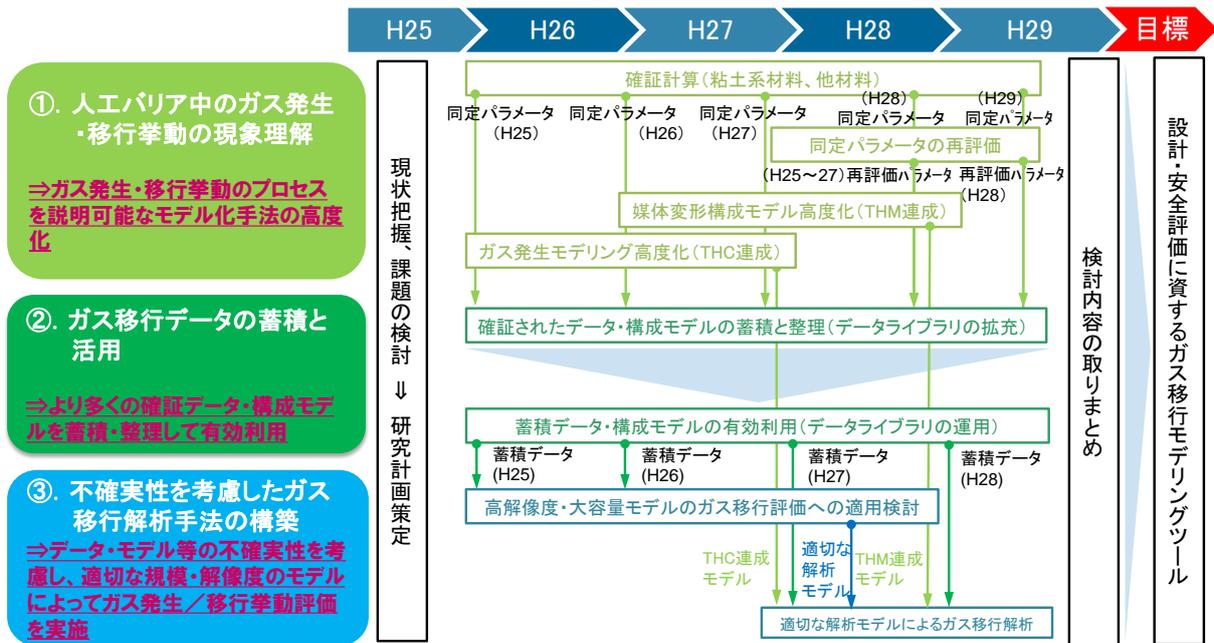


図 3.1.1-1 WP 各検討項目間の相互関係と実施スケジュール

以上を背景として、平成 29 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（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）
- 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（既存ガス移行データライブラリの拡充）
- 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解析的評価

3.2 検討内容

本年度の検討項目を以下に示す。

3.2.1 ガス移行解析評価に係る検討内容

- (1) 最新の室内ガス移行試験データによる検証計算（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）

昨年度に検討した「人工バリアシステムのガス移行連成挙動評価（現象理解）」[2]において、ベントナイト供試体（乾燥密度 1.6Mg/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を実施している。これらの試験は、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。

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に、試験系を1次元の等価多孔質媒体ないし2次元断面系としてモデル化した再現解析を通じ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。今年度、検討対象とする昨年度実施された試験を表 3.2.1-1 にまとめた。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 検討対象とする昨年度実施された試験一覧

材料	供試体	注水試験	ガス注入試験	解体試験
ベントナイト系材料界面	3mm 幅 No.1	X		X
	3mm 幅 No.2	X	X	X
	1mm 幅 No.1	X		
	1mm 幅 No.2	X		
セメント系材料界面	混和剤有 No.1	X(養生試験)		
	混和剤有 No.2	X(養生試験)		
	混和剤有 No.3	X	X	
	混和剤有 No.4	X	X	
	混和剤有 No.5	X	X	
	混和剤有 No.6	X	X	
	混和剤有打継無	X	X	
	混和剤無 No.1	X(養生試験)		
	混和剤無 No.2	X(養生試験)		
	混和剤無 No.3	X	X	
	混和剤無 No.4	X	X	
	混和剤無 No.5	X	X	
	混和剤無 No.6	X	X	
	混和剤無打継無	X	X	

(2) 確証データの登録およびデータの追加収集・整備（既存ガス移行データライブラリの拡充）

ガス移行解析手法の高度化検討の中で得られた知見や、最新の研究成果を速やかにモデリング検討に反映し、効果的なケーススタディを重ねていくために、確証されたモデルやパラメータを容易に登録・蓄積（アップデート）でき、かつ各種解析コードと連携可能なデータベースとして、「ガス移行データライブラリ」を構築してきた。

本検討では、前項「(1) 最新の室内ガス移行試験データによる確証計算」で今年度同定された2相流パラメータや力学パラメータの追加登録を行った。また、他の研究機関等で確証されたデータに対し、追加収集を行い、ガス移行データライブラリのアップデート（データの拡充）を行っ

た。

(3) 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解析的評価

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[3]。本検討でも以下に示すように、シナリオやデータ（パラメータ）、モデルの不確実性を低減する取り組みを行ってきている。

昨年度は、従来多くの検討で用いられてきた第 2 次 TRU レポートで提示されたパラメータ、及びこれらによるガス移行解析結果を評価するため、本研究でこれまでに蓄積・確認されてきた信頼性の高いパラメータと水・ガス 2 相流解析コード（GETFLOWS）を用いてガス移行解析を実施した。具体的には、第 2 次 TRU レポートで提示されたパラメータ（既往の知見）と、本研究で蓄積・確認されてきたパラメータ（最新の知見）を用いて、計 3 ケースのガス移行解析を実施した。その結果、処分概念成立性評価の指標の一つである施設内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やや小さくなり、また、もう一つの指標である施設外への累積押し出し水量については、最新の知見を反映した場合の方がやや大きくなる等の結果を得た。これらの検討を通し、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「定量的な幅」を確認することができた。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。さらに、本検討と並行して昨年度に実施した「ガス移行評価シナリオの拡張に関する検討」[2]においては、シナリオ・FEP 整備等の面からのアプローチにより、不確実性の低減に係る検討を行っている。

そこで本検討(平成 29 年度の検討)でも、上記に示したようなシナリオやデータ（パラメータ）、モデルの不確実性を低減するための継続的な取り組みを行った。具体的には、昨年度に構築したガス移行評価シナリオから安全評価上で重要な事象を抽出・把握した上で、これらが考慮された解析的評価を実施する際に必要な評価ケースと解析手法を整備し、同手法によるガス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した。評価に当たっては、確率統計論的な取り扱いを含めた検討も考慮した。なお、ガス移行解析では、既往検討や本検討における確認計算で蓄積されてきた同定パラメータを利用し、TRU 廃棄物処分システム（廃棄物グループ 2 のリファレンス処分概念）を対象とした。解析コードには、水・ガス 2 相流解析コード GETFLOWS を用いた。解析格子モデルは鉛直 2 次元断面を基本とした（図 3.2.1-1）。

さらに、ガス/核種移行等の連成挙動評価に資する評価手法の確立を目的とした検討を行った。

具体的には、先ず既存のガス移行評価シナリオで想定する、重要核種が反映されたガス移行挙動（別途実施する気液二相流解析結果等）や、絞り込んだ重要 FEP の不確実性を考慮した核種移行解析手法の検討を行うとともに、気液二相流等に伴う排水挙動と核種移行の相互影響等を考慮

して得られた解析結果を、既往の安全評価等で提示されている目安値（TRU 廃棄物処分施設の人工バリアとして成立するために下回るべき核種移行率の最大値等）を指標として、ガス移行の影響の大きさを評価する手法を既往の安全評価手法等（例えば、第 2 次 TRU レポート[1]）を基に提示することとした。

さらに、同評価手法により、重要事象に影響を与える影響因子の特定や定量的な許容幅等を把握することで、人工バリアの成立性を評価する。

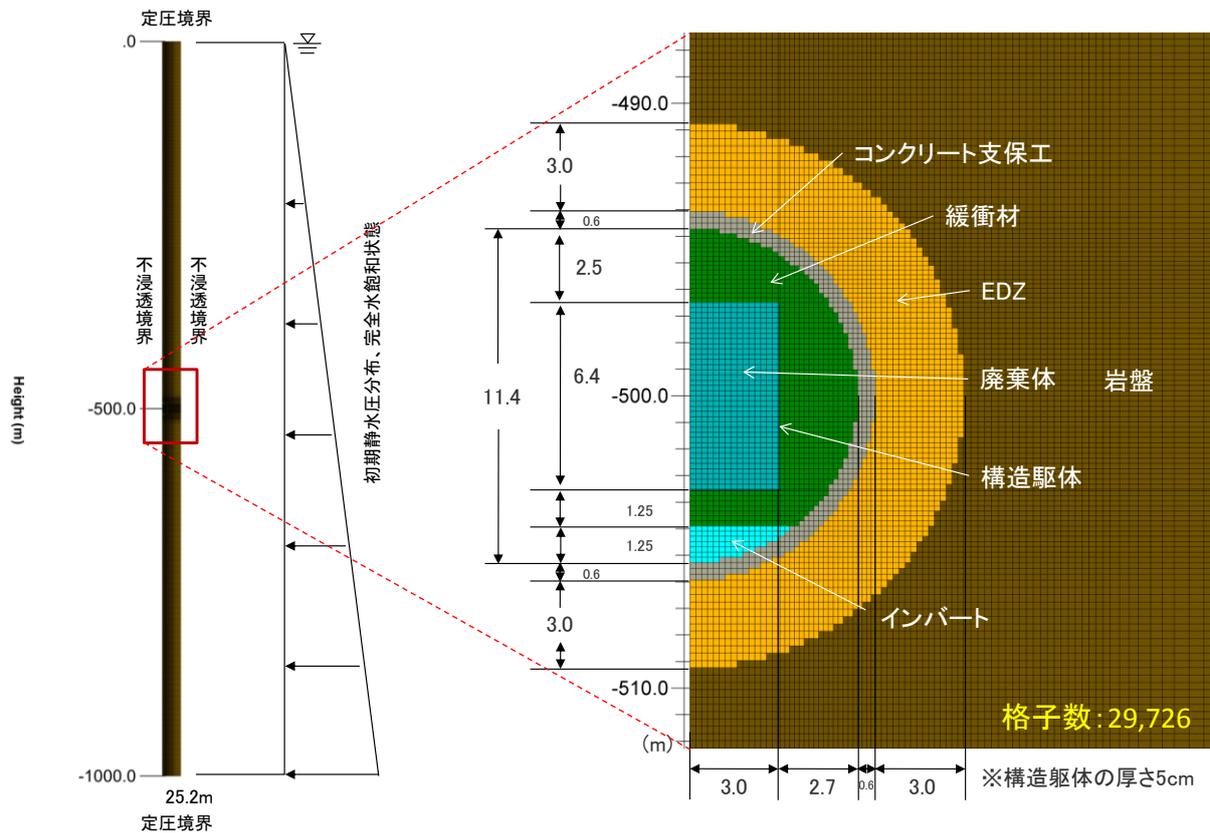


図 3.2.1-1 鉛直 2 次元断面モデルの例

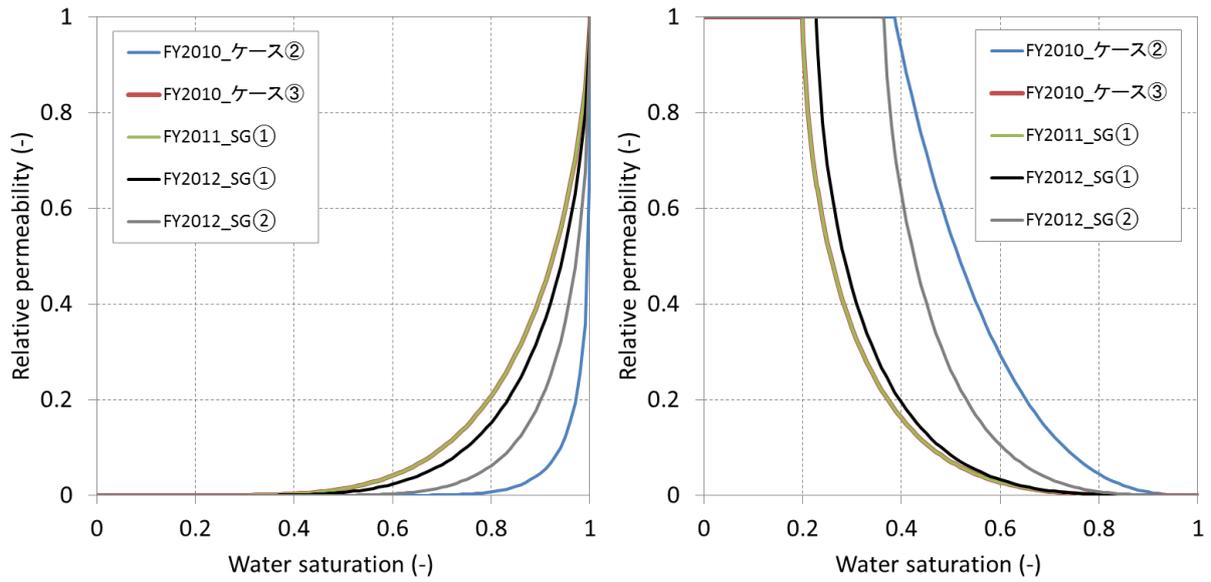


図 3.2.1-2 既往検討（排水過程）で同定された相対浸透率曲線（左：水相、右：ガス相）

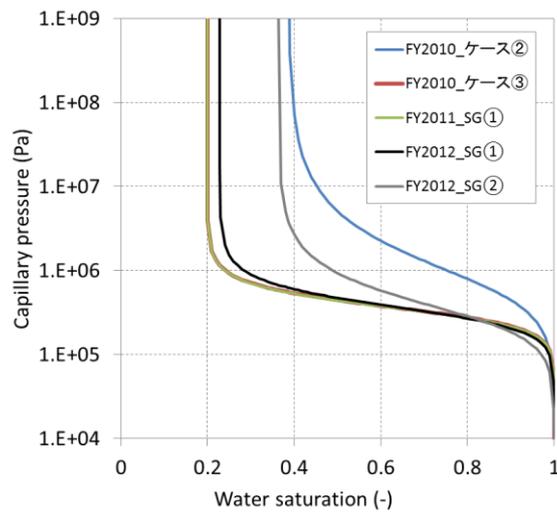


図 3.2.1-3 既往検討（排水過程）で同定された毛細管圧力曲線

3.2.2 核種移行評価に係る検討内容

(1) 核種移行解析評価に使用する解析コードの選定とパラメータの設定

核種移行解析で必要となる解析コードを選定すると共に、最新の知見（周辺動向等）を踏まえたパラメータを設定した。

(2) 核種移行解析の実施等

1) 解析ケースの設定

核種移行解析で評価対象となる解析ケースを設定した。なお、解析ケースの設定では、既存のガス移行評価シナリオで想定するようなガス移行挙動や FEP の不確実性を考慮することとした。

2) 解析モデルの構築

「3.2 (1) 核種移行解析評価に使用する解析コードの選定とパラメータの設定」で選定した解析コードおよび設定したパラメータを用い、TRU 廃棄物グループ 2 の処分概念（人工バリア）を対象とした解析モデルを構築した。

3) 核種移行解析の実施

前項「1）」で設定した解析ケースを対象に、前項「2）」で構築した解析モデルを用いてガス移行挙動を考慮した解析手法の検討を行うとともに、同手法による核種移行解析を実施する。解析結果については、人工バリア出口の核種フラックス等（人工バリアからの核種移行率等）の経時変化等で整理した。

(3) TRU 廃棄物処分システム（人工バリア）の成立性評価

前項「3.2 (2) 3) 核種移行解析の実施」で実施した核種移行評価結果について、既往の安全評価の目安値（例えば第 2 次 TRU レポートでの安全評価結果等）を比較対象・参考とした、ガス移行の影響の大きさを評価する手法を、既往の安全評価手法等を基に検討することとした。さらに同評価手法を用いて TRU 廃棄物処分システム（人工バリアシステム）の成立性について評価した（成立性に重要な影響を与える影響因子の特定や、成立条件としての定量的な許容幅の把握・提示等）。

3.3 ガス移行解析評価に係る検討成果

3.3.1 最新の室内ガス移行試験データによる確証計算

ここでは、「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—」における「人工バリアシステムのガス移行連成挙動評価（現象理解）」の中で実施された最新の室内試験データを用いて確証計算を行う。

(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 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—」における「人工バリアシステムのガス移行連成挙動評価（現象理解）」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。

- 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（スリット 3mm）
- 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（スリット 1mm）
- 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

試験は 3 つの試験フェーズ（再冠水試験、ガス注入試験、解体調査）から成る。各試験フェーズにおける試験条件及び実測データを表 3.3.1-1 にまとめた。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（スリット 3mm、及び 1mm）はそれぞれ 2 つの同一供試体、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は 2 パターンの配合による、それぞれ 7 つの供試体（打継を設けた 6 つの同一供試体、打継が無い 1 つの供試体）の計 14 個の供試体で実施された。表 3.3.1-2 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。

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 3.3.1-1 各試験フェーズにおける試験条件と実測データ

試験対象	寸法※	試験フェーズ	試験条件	実測データ
ベントナイト系 材料界面 スリット 3mm	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、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）
ベントナイト系 材料界面 スリット 1mm	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	—	—
		解体調査	—	—
セメント系 材料界面	φ50mm h50mm	再冠水 (透水試験)	0.22~2.97MPa の一定差圧で変水位 透水試験を実施（背圧 0.2MPa）	累積排水量、ビュレット内水位
		ガス注入	0.18~2.88MPa の一定差圧で 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 3.3.1-2 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	
ベントナイト界面 (スリット 3mm)	No.1	2016/7/11～2016/10/19	—	2016/10/19	
	No.2	2016/7/11～2016/10/20	2016/10/21～2016/11/11	2016/11/11	
ベントナイト界面 (スリット 1mm)	No.1	2016/10/20～2017/1/30	—	—	
	No.2	2016/10/20～2017/1/30	—	—	
セメント界面	混和剤有り	No.1	28 日養生試験に使用*	—	—
		No.2	28 日養生試験に使用*	—	—
		No.3	2016/12/7	2016/12/9	—
		No.4	2016/11/25～2016/11/29	2016/11/29～2016/11/30	—
		No.5	2016/11/28～2016/11/29	2016/11/30～2016/12/1	—
		No.6	2016/12/12～2016/12/13	2016/12/13～2016/12/15	—
		打継無	2016/12/6～2016/12/7	2016/12/9	—
	混和剤無し	No.1	28 日養生試験に使用*	—	—
		No.2	28 日養生試験に使用*	—	—
		No.3	2016/11/17～2016/11/22	2016/11/24	—
		No.4	2016/11/24～2016/11/25	2016/11/25～2016/11/28	—
		No.5	2016/12/12～2016/12/13	2016/12/13	—
		No.6	2016/12/21	2016/12/22	—
		打継無	2016/12/7～2016/12/8	2016/12/8	—

※セメント界面(混和剤有り・無し)の供試体 No.1 及び No.2 は、予備試験である 28 日養生試験に使用したためデータ無し

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データの整理・分析(スリット 3mm)

a. 再冠水フェーズ

ベントナイト系材料界面(スリット 3mm)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 3.3.1-1 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 3.3.1-3 に示す。絶対浸透率は、 $5.80 \times 10^{-20}(\text{m}^2)$ 、 $4.72 \times 10^{-20}(\text{m}^2)$ 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 ($3.55 \sim 4.50 \times 10^{-20}(\text{m}^2)$) ともほぼ同じ結果となった[2]。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.2 では、供試体作成時のスリット幅 (3mm) を考慮した供試体の寸法と間隙率 (0.5283)、初期飽和度 (79.20%) から推定される飽和に必要な水量 (約 11.34mL) 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。一方 No.1 では、上記の飽和に必要な水量 (約 11.34mL) に、累積注水量が達した時点よりも遅れて排水が生じている。

表 3.3.1-3 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スリット 3mm)

供試体	絶対浸透率 (m^2)
No.1	5.80×10^{-20}
No.2	4.72×10^{-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.2 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 3.3.1-2 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 20 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 3.3.1-3、図 3.3.1-4 に示す。再冠水フェーズのみを実施した No.1 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。一方、ガス注入を実施した No.2 のデータを見ると、No.1 と比較して、供試体全体の水飽和率が低下しており、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。

また、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。

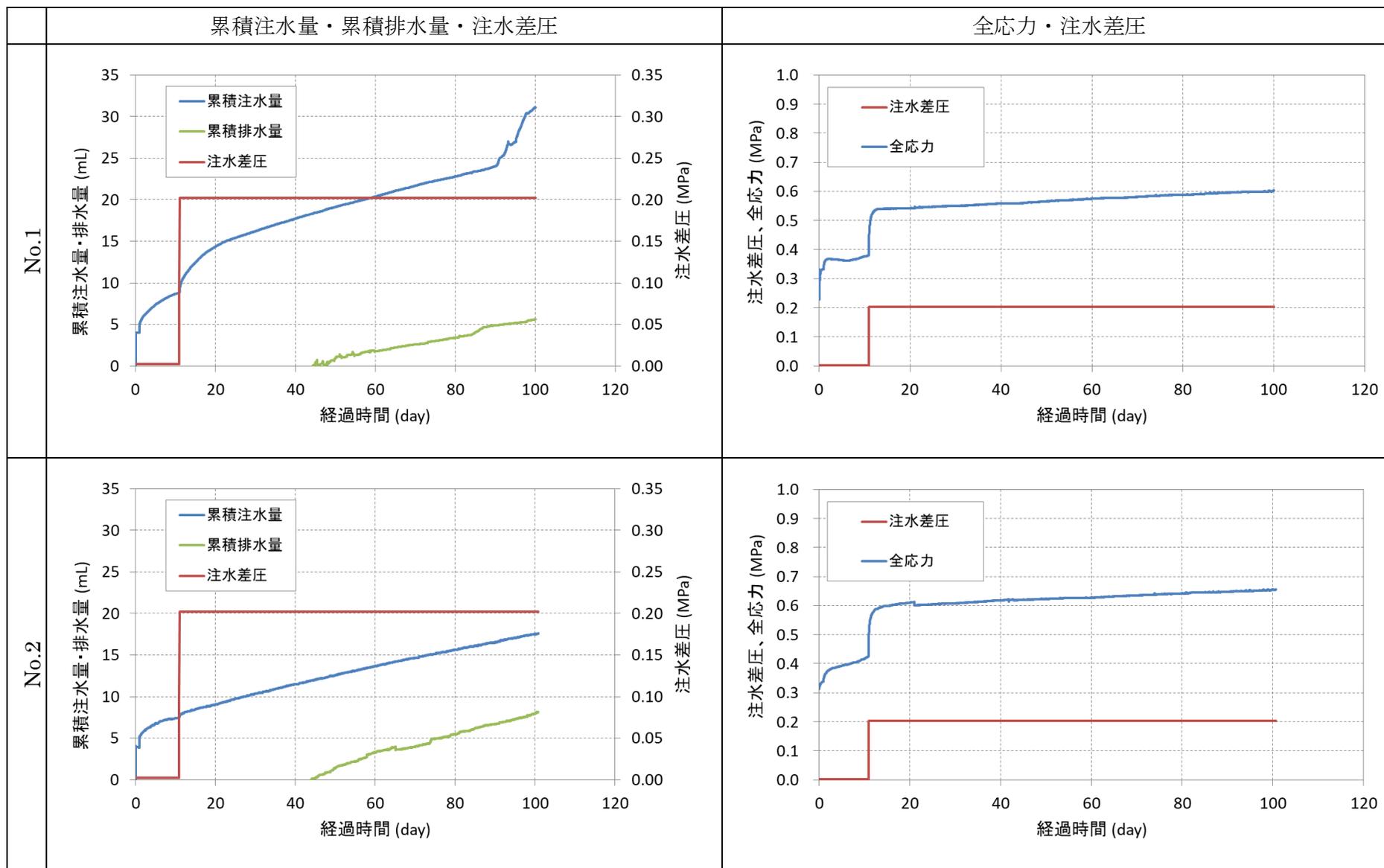


図 3.3.1-1 ベントナイト界面(スリット 3mm)を含む供試体による再冠水フェーズの試験結果

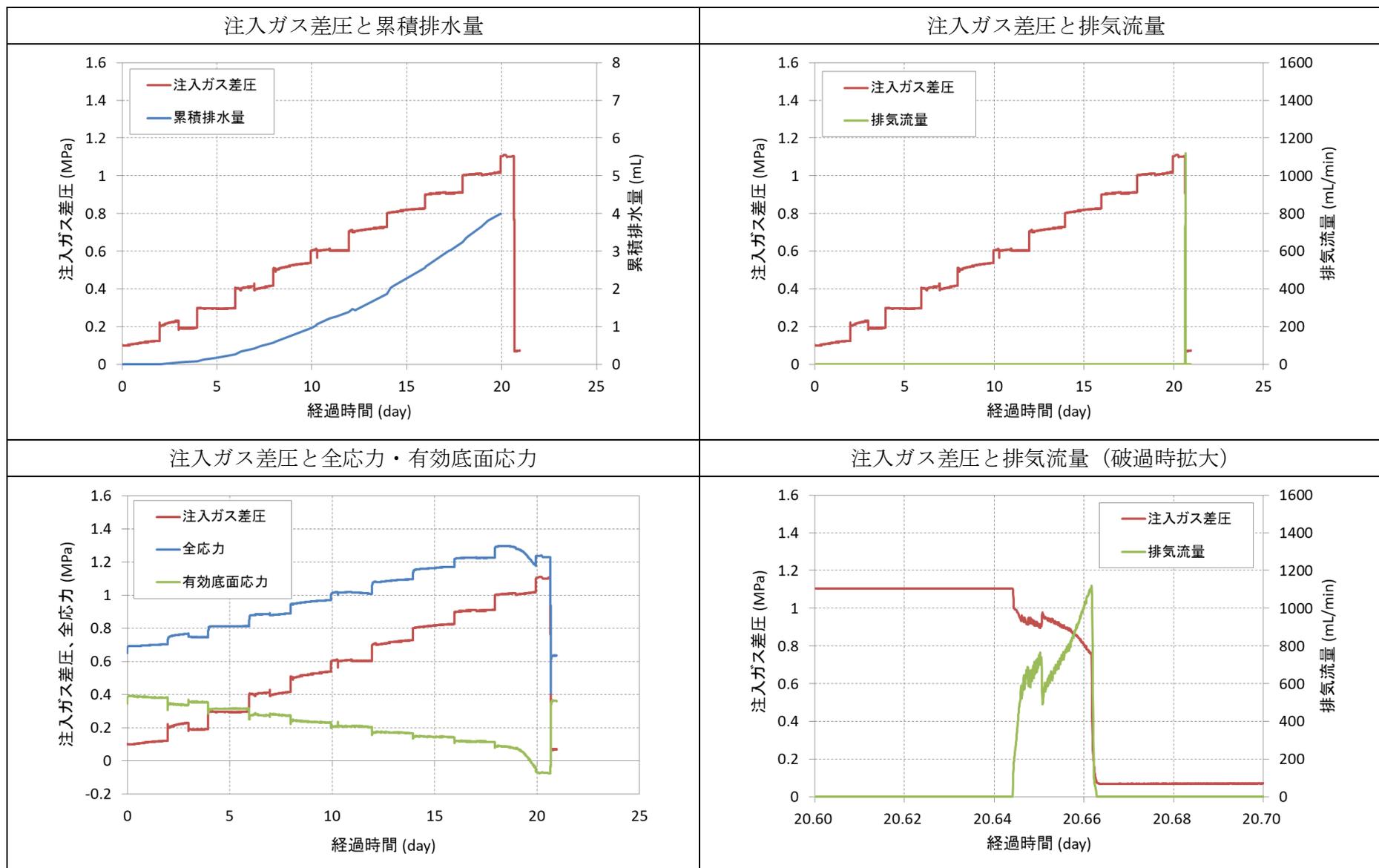


図 3.3.1-2 ベントナイト界面(スリット 3mm)を含む供試体によるガス注入フェーズの試験結果 (No.2)

	間隙率 (全体)	含水比 (全体)	水飽和度 (全体)	備考
No.1				再冠水試験 →解体試験
No.2				再冠水試験 →ガス注入試験 →解体試験

図 3.3.1-3 ベントナイト界面(スリット 3mm)を含む供試体による解体試験の試験結果 (1/2)

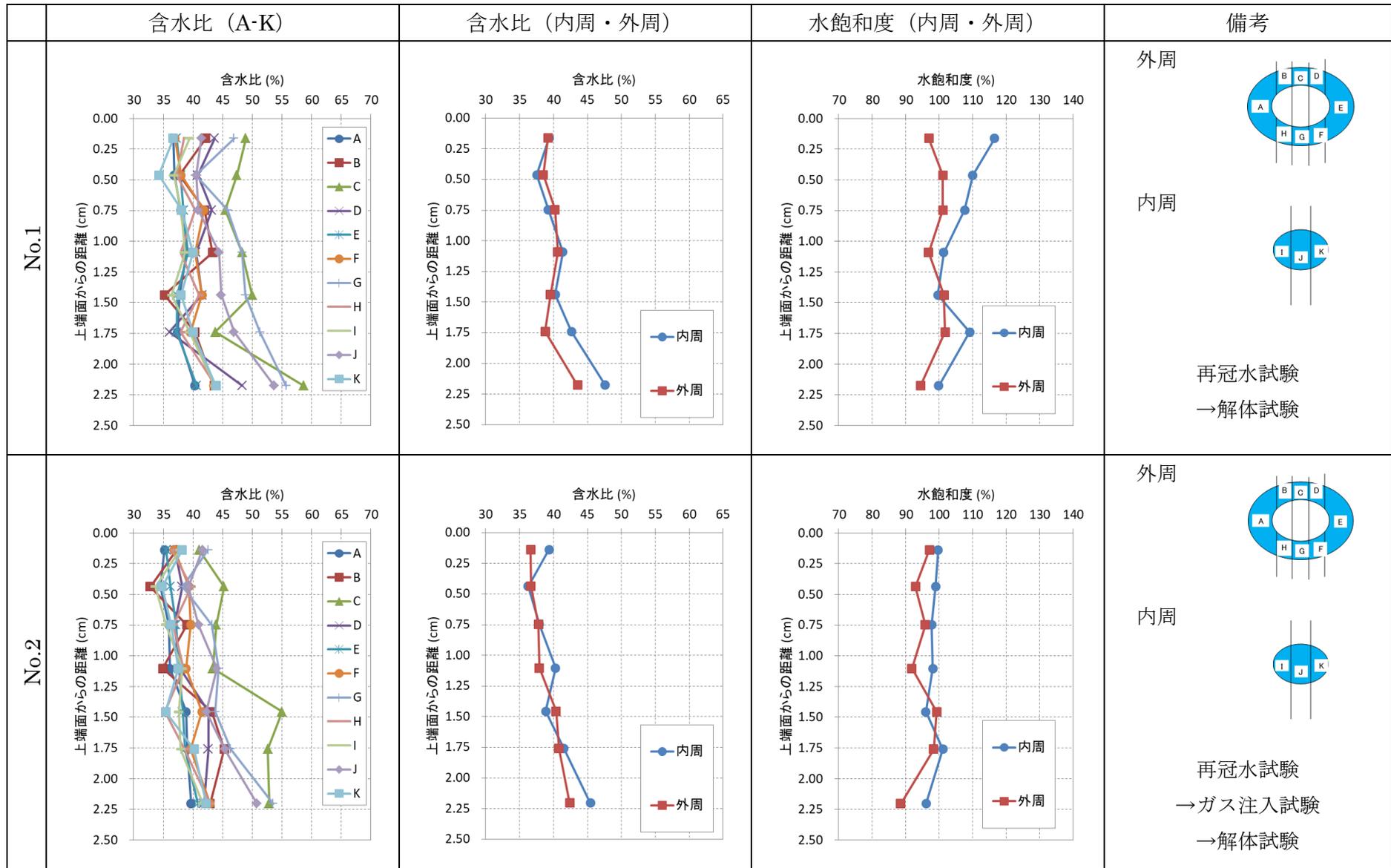


図 3.3.1-4 ベントナイト界面(スリット 3mm)を含む供試体による解体試験の試験結果 (2/2)

3) 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データの整理・分析(スリット 1mm)

ベントナイト系材料界面(スリット 1mm)を用いたガス移行試験では、再冠水フェーズのみを実施している。そ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 3.3.1-5 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 3.3.1-4 に示す。絶対浸透率は、 $4.23 \times 10^{-20}(\text{m}^2)$ 、 $5.08 \times 10^{-20}(\text{m}^2)$ 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[2]。また全応力の時間変化を見ると、No.1 では約 0.8MPa、No.2 では約 0.7MPa で推移しており、圧縮ベントナイトにおける試験で得られた全応力の約 0.6MPa よりも大きな値となっている。No.1、No.2 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 3.3.1-4 注水速度から算定した絶対浸透率 (圧縮ベントナイト界面スリット 1mm)

供試体	絶対浸透率 (m^2)
No.1	4.23×10^{-20}
No.2	5.08×10^{-20}

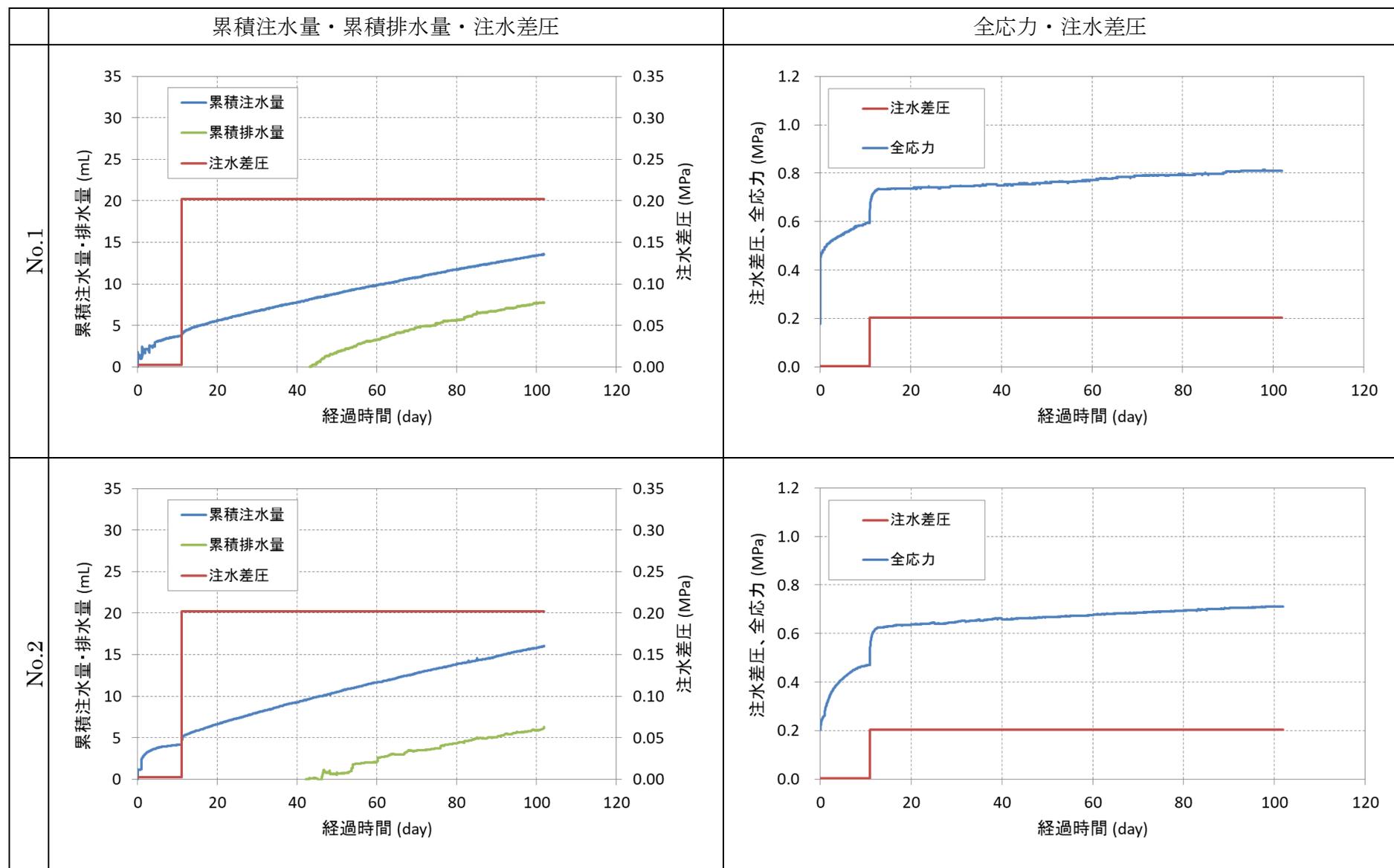


図 3.3.1-5 ベントナイト界面(スリット 1mm)を含む供試体による再冠水フェーズの試験結果

4) 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 3.3.1-6 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 3.3.1-6 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 3.3.1-6 の Q_{wa})
- 試験前後の重量差から得られた総累積排水量 (図 3.3.1-6 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

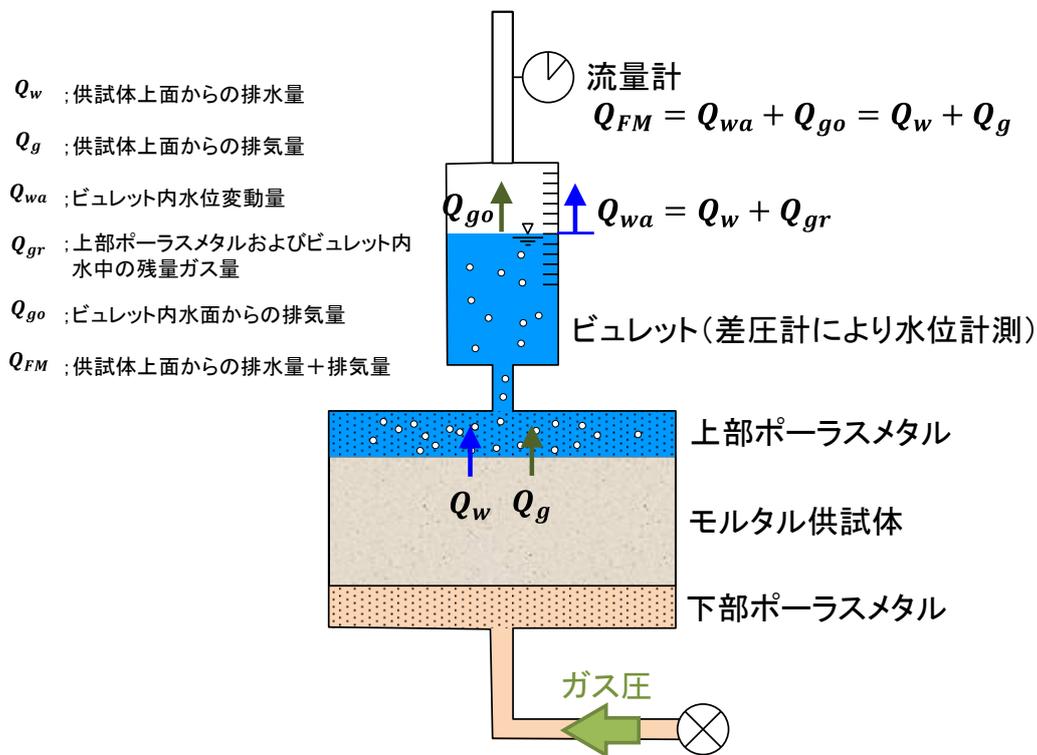


図 3.3.1-6 ガス移行試験装置概要図

表 3.3.1-5 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 3.3.1-7 に変水位透水試験から得られた累積排水量を、図 3.3.1-8～図 3.3.1-9 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 3.3.1-5 各供試体の寸法、試験条件および実測データの整理

混和剤	供試体	寸法※1	供試体体積 (cm ³)	载荷ガス圧 (MPa)※2	背圧 (MPa)※2	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)	
有り	No.3	φ50mm	98.2	2.869	0.207	200.246	32.159	0.219	5.00×10 ⁻¹⁸	1.11×10 ⁻¹⁴	
		h50mm				168.087	0.328	0.00223		5.24×10 ⁻¹⁷	
	No.4	φ50mm	98.2	3.078	0.201	204.075	31.853	0.360	3.81×10 ⁻²⁰	7.45×10 ⁻¹⁷	
		h50mm				172.222	0.324	0.00367		1.58×10 ⁻¹⁸	
	No.5	φ50mm	98.2	2.867	0.200	203.101	29.912	0.084	3.21×10 ⁻²⁰	8.02×10 ⁻¹⁴	
		h50mm				173.189	0.305	0.00086		1.13×10 ⁻¹⁸	
	No.6	φ50mm	98.2	2.832	0.198	201.083	31.231	0.065	6.62×10 ⁻²⁰	1.94×10 ⁻¹⁵	
		h50mm				169.852	0.318	0.00066		1.19×10 ⁻¹⁸	
	打継無	φ50mm	98.2	2.896	0.200	197.591	31.187	0.038	1.74×10 ⁻²¹	1.33×10 ⁻¹⁶	
		h50mm				166.404	0.318	0.00039		5.08×10 ⁻¹⁸	
	無し	No.3	φ50mm	98.2	0.406	0.203	204.648	31.085	0.283	5.31×10 ⁻¹⁹	4.94×10 ⁻¹³
			h50mm				173.563	0.317	0.00288		5.43×10 ⁻¹⁵
No.4		φ50mm	98.2	0.393	0.207	210.279	28.762	3.400	1.54×10 ⁻¹⁷	9.51×10 ⁻¹⁴	
		h50mm				181.517	0.293	0.03463		1.40×10 ⁻¹⁴	
No.5		φ50mm	98.2	0.405	0.212	206.905	29.298	0.322	5.26×10 ⁻¹⁸	4.01×10 ⁻¹⁴	
		h50mm				177.607	0.298	0.00328		3.64×10 ⁻¹⁴	
No.6		φ50mm	98.2	0.621	0.217	206.062	31.317	0.233	1.61×10 ⁻¹⁶	1.47×10 ⁻¹³	
		h50mm				174.745	0.319	0.00237		3.19×10 ⁻¹⁵	
打継無		φ50mm	98.2	0.900	0.202	202.183	28.334	0.119	1.00×10 ⁻¹⁸	4.58×10 ⁻¹⁵	
		h50mm				173.849	0.289	0.00121		8.21×10 ⁻¹⁶	

※1：φは直径、hは高さを示す。

※2：圧力は絶対圧

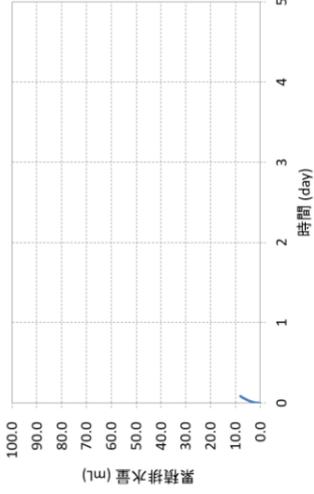
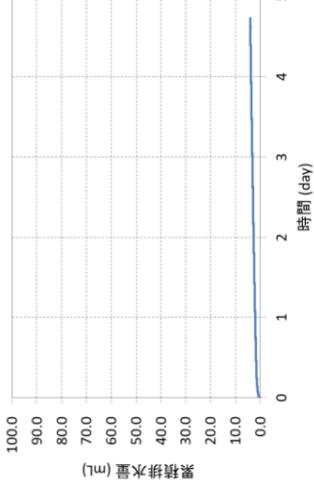
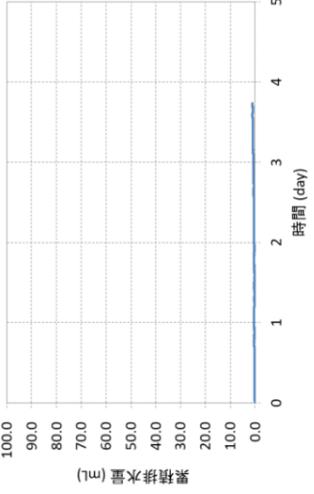
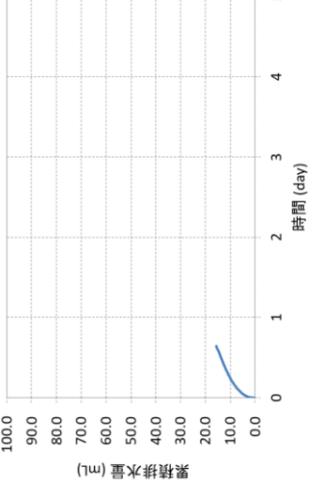
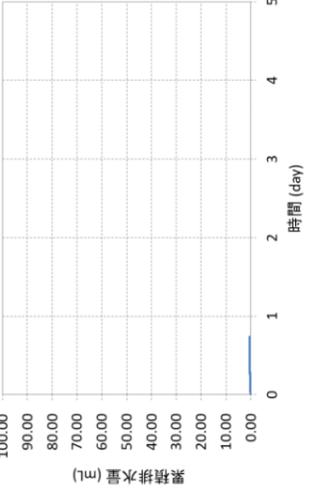
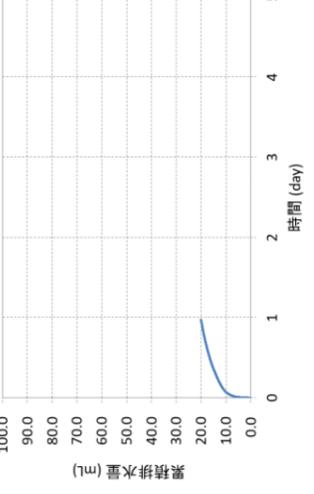
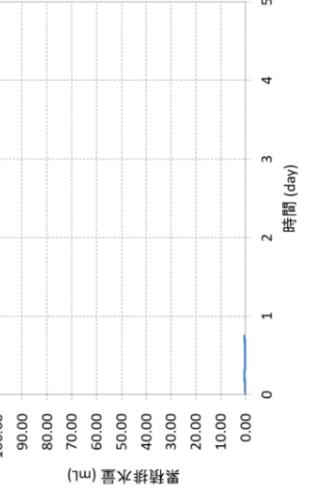
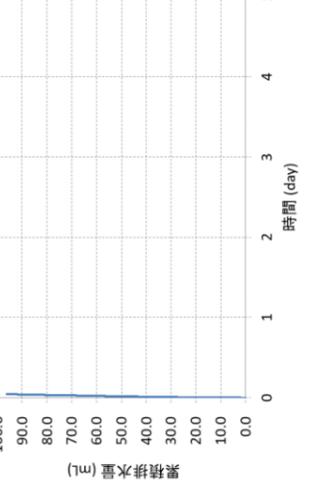
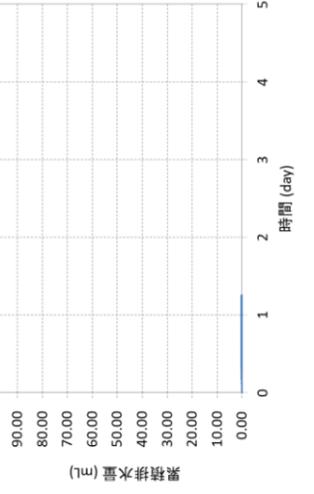
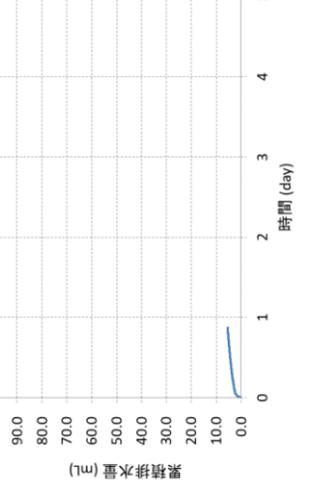
	混和剤有りケース	混和剤無しケース
供試体 1	養生試験に使用したため データなし	養生試験に使用したため データなし
供試体 2	養生試験に使用したため データなし	養生試験に使用したため データなし
供試体 3		
供試体 4		
供試体 5		
供試体 6		
打継無		

図 3.3.1-7 モルタル供試体による変水位透水試験結果 (累積排水量)

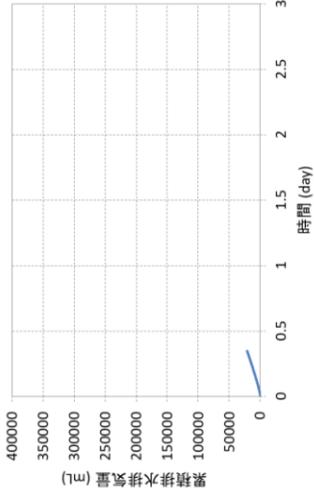
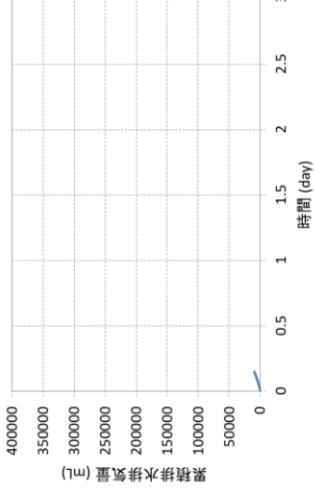
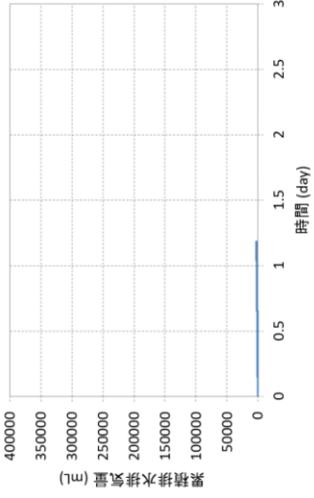
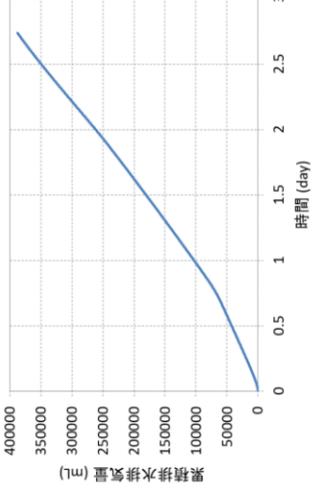
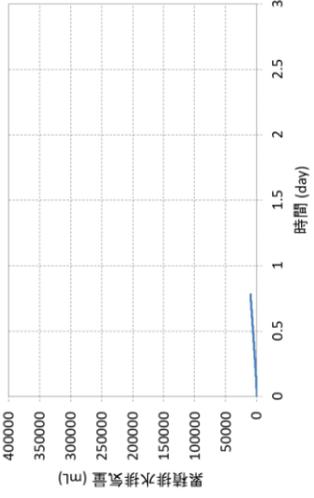
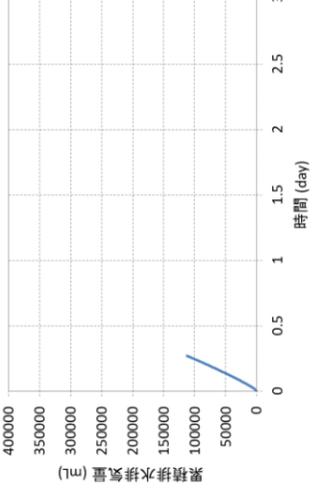
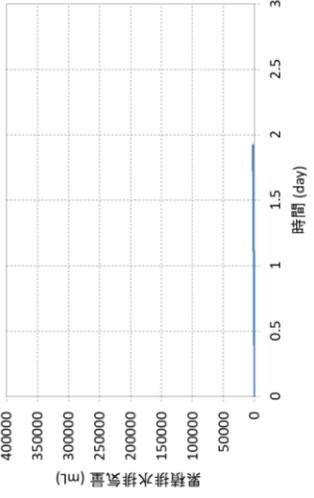
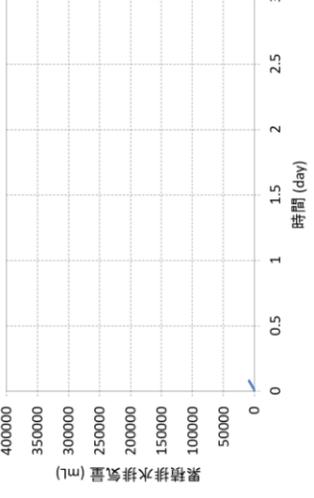
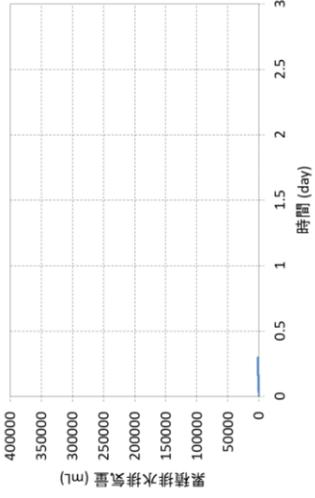
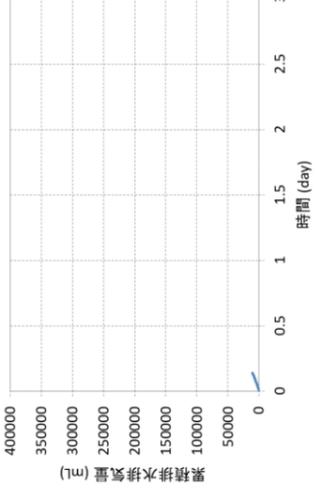
	混和剤有りケース	混和剤無しケース
供試体 1	養生試験に使用したため データなし	養生試験に使用したため データなし
供試体 2	養生試験に使用したため データなし	養生試験に使用したため データなし
供試体 3		
供試体 4		
供試体 5		
供試体 6		
打継無		

図 3.3.1-8 モルタル供試体によるガス注入試験結果（累積排水排水気量）

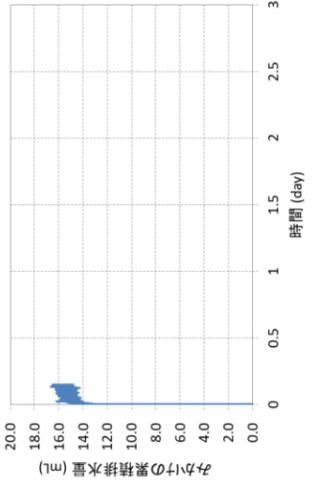
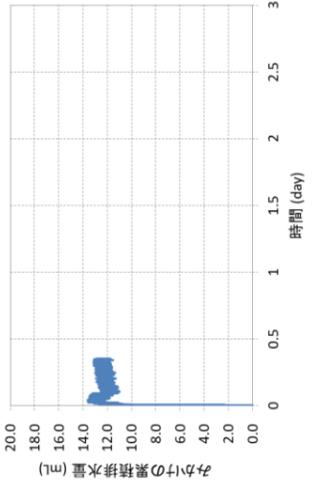
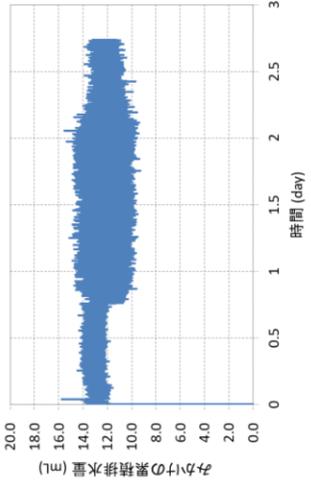
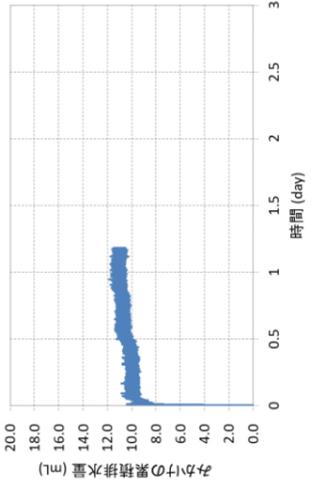
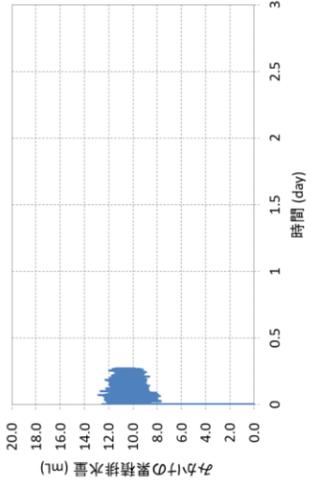
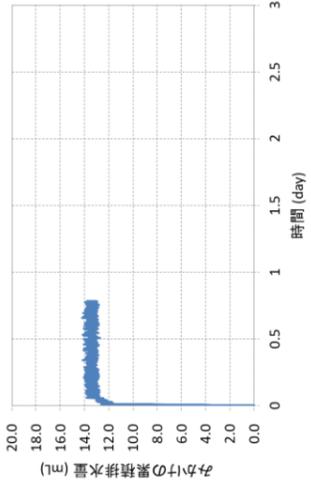
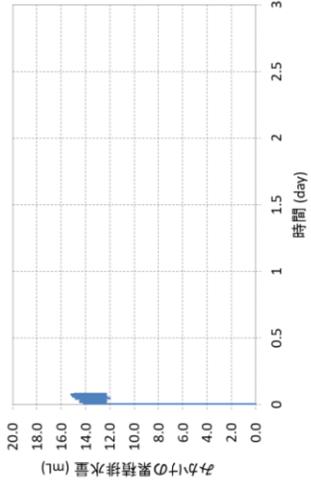
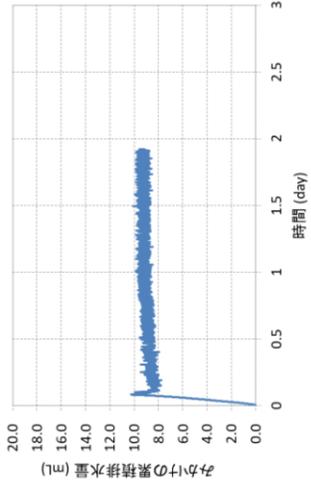
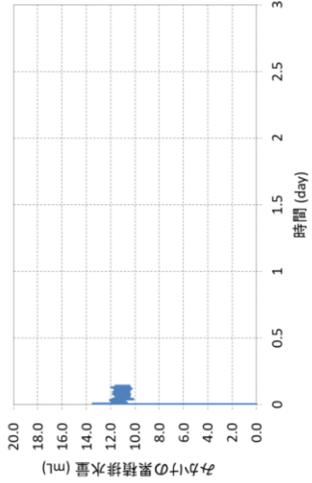
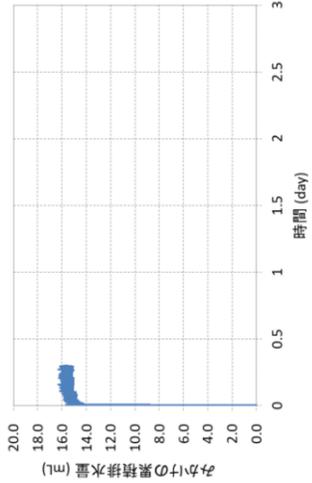
混和剤無しケース	混和剤有りケース
<p>養生試験に使用したため データなし</p>	<p>養生試験に使用したため データなし</p>
<p>養生試験に使用したため データなし</p>	<p>養生試験に使用したため データなし</p>
	
	
	
	
	

図 3.3.1-9 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、多相多成分流体系を対象とした汎用地圏流体シミュレータ GETFLOWS [5]を用いた。

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

$$-\nabla \cdot \left(-\rho_w \frac{K_w k_{rw}}{\mu_w} \nabla \Psi_w \right) - \rho_w q_w = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \phi S_w) \quad (3.3.1-1)$$

$$-\nabla \cdot \left(-\rho_g \frac{K_g k_{rg}}{\mu_g} \nabla \Psi_g \right) - \rho_g q_g = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g \phi S_g) \quad (3.3.1-2)$$

式中の記号の説明は以下の通りである。

K_p	; 流体相 $p(= w, g)$ の絶対浸透率(m^2)
k_{rp}	; 流体相 $p(= w, g)$ の相対浸透率(-)
S_p	; 流体相 $p(= w, g)$ の飽和度(-)
P_p	; 流体相 $p(= w, g)$ の圧力(Pa)
μ_p	; 流体相 $p(= w, g)$ の粘性係数(Pa・s)
ρ_p	; 流体相 $p(= w, g)$ の密度(kg/m^3)
Ψ_p	; 流体相 $p(= w, g)$ の水理ポテンシャル(Pa)
ϕ	; 有効間隙率(-)
q_p	; 流体相 $p(= w, g)$ の生成・消滅量($m^3/m^3/s$)
t	; 時間(s)
w, g	; 流体相 (それぞれ水相、ガス相) を識別する添え字を示す

水相、ガス相の流体ポテンシャルは、それぞれ次式で表される。

$$\Psi_w = P_w + \rho_w g Z \quad (3.3.1-3)$$

$$\Psi_g = P_g + \rho_g g Z \quad (3.3.1-4)$$

ここに、 Z は基準面からの標高(m)、 g は重力加速度(m/s^2)である。基礎方程式中の未知量には P_g 、 S_w をとり、他のパラメータは等温状態を仮定して以下のような関数として扱う。

$$P_c = P_c[S_w] = P_g - P_w \quad (3.3.1-5)$$

$$\phi = \phi[P_g] = \phi_0(1 + C_r(P_g - P_0)) \quad (3.3.1-6)$$

$$k_{rp} = k_{rp}[S_w] \quad (3.3.1-7)$$

$$\rho_p = \rho_p[P_p] \quad (3.3.1-8)$$

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。

$$\begin{aligned} (P_g & \leq P_w + P_s) & \phi &= \phi_0(1 + C_r(P - P_0)) \\ & & K_p &= K_{p0} \end{aligned} \quad (3.3.1-9)$$

$$\begin{aligned} (P_g & > P_w + P_s) & \phi &= \phi_0(1 + C_r(P_s - P_0) + F C_r(P - P_s)) \\ & & K_p &= C K_{p0}(\phi/\phi_0)^{n_{PD}} \end{aligned} \quad (3.3.1-10)$$

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。

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 3.3.1-10 に示す。

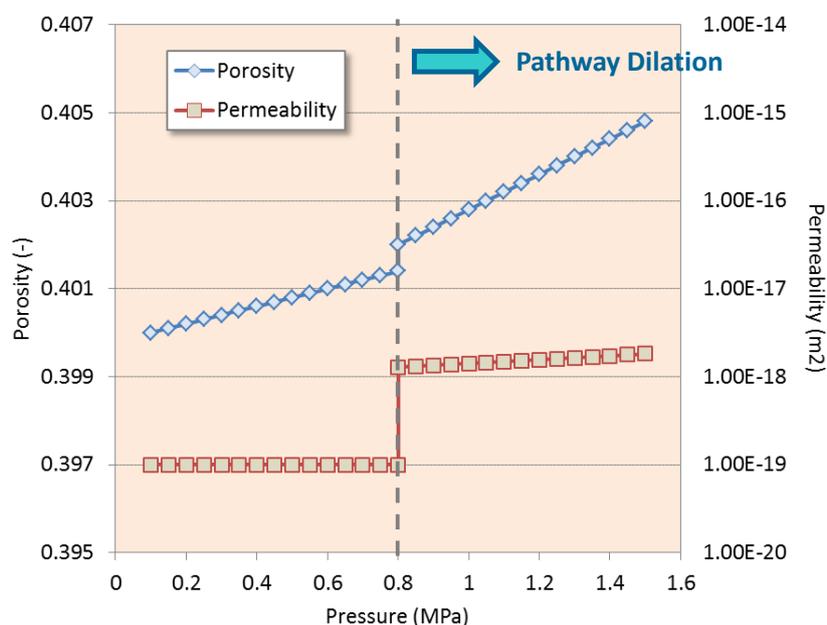


図 3.3.1-10 流路拡幅前後の間隙率と絶対浸透率の変化イメージ

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[6]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）[7]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) 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(スリット 3mm)を対象とした検証計算

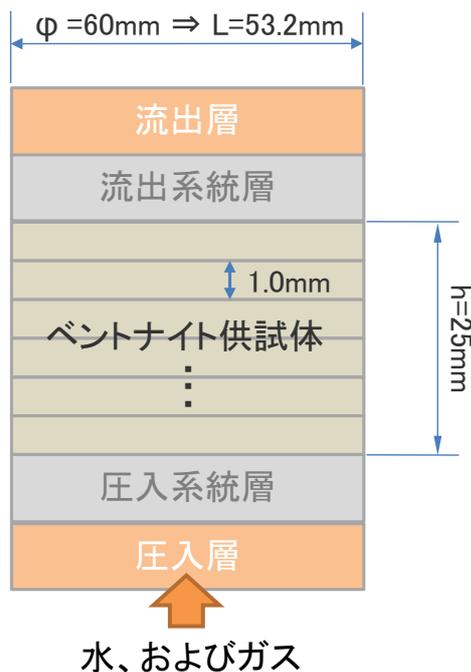
1) 検討方針

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のみに対して、No.2 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、3mm 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、3mm 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、湿潤過程におけるベントナイトの膨潤作用によって、3mm 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(φ60mm×h25mm)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 3.3.1-11 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℃とし、試験中の温度変化は考慮しないものとした。



流出境界層

背圧条件を与える

流出系統層

フィルタ、配管等 (3.57mL) を表現

ベントナイト供試体

鉛直方向を 1mm 幅に等分割した格子群

- 初期圧力：背圧と同じ
- 初期水飽和度：90% (再冠水フェーズ)、100% (ガス注入フェーズ)
- 初期温度：25°C (一定)

圧入系統層

フィルタ、配管等 (3.57mL) を表現

圧入境界層

試験条件となる水圧 (再冠水フェーズ)、ガス圧 (ガス注入フェーズ) を与える

図 3.3.1-11 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。(3)

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 $997.04(kg/m^3)$ 、粘性係数 μ_0 を $0.890 \times 10^{-3}(Pa \cdot s)$ とし、以下の式により水圧の関数として取り扱う。

$$\rho = \rho_0(1 + C_f(P_w - P_0)) \quad (3.3.1-11)$$

$$\mu = \mu_0(1 + C_\mu(P_w - P_0)) \quad (3.3.1-12)$$

ここに、 ρ 、 μ 、 C_f 、 C_μ 、 P_w はそれぞれ、水の密度 (kg/m^3)、粘性係数 ($Pa \cdot s$)、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 $0.45 \times 10^{-9}(1/Pa)$ 、粘性係数の増加率には $1.0 \times 10^{-10}(1/Pa)$ を設定した。

標準大気圧での空気の密度を $1.184 \times 10^{-3}(kg/m^3)$ 、粘性係数を $18.2 \times 10^{-6}(Pa \cdot s)$ 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：0.5283(-) (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 × 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 (再冠水フェーズでは表 3.3.1-6 の n_w 、ガス注入フェーズでは表 3.3.1-7 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 (再冠水フェーズでは表 3.3.1-6 の P_0 、 n_c 、ガス注入フェーズでは表 3.3.1-6 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ける水・空気の相互作用を表現するための相対浸透率、毛細管圧力には表 3.3.1-6 に示す構成モデルを採用した。

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には、表 3.3.1-7 に示す構成モデルを採用した。毛細管圧力は表 3.3.1-6 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。

表 3.3.1-6 再冠水フェーズで用いる相対浸透率や毛細管圧力を表現する構成モデル

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

表 3.3.1-7 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
$k_{rw} = \sqrt{S_{we}}(1 - (1 - S_{we}^{1/m_w})^{m_w})^2$ $S_{we} = (S_w - S_{wr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr})$ $m_w = 1 - 1/n_w$	$k_{rg} = \sqrt{S_{ge}}(1 - (1 - S_{ge}^{1/m_g})^{m_g})^2$ $S_{ge} = (S_g - S_{gr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr})$ $m_g = 1 - 1/n_g$

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 3.3.1-12 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、 $4.0 \times 10^{-20}(\text{m}^2)$ のとき約2.2(MPa)となるため、 $\pm 1.0(\text{MPa})$ 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 に関しても、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。

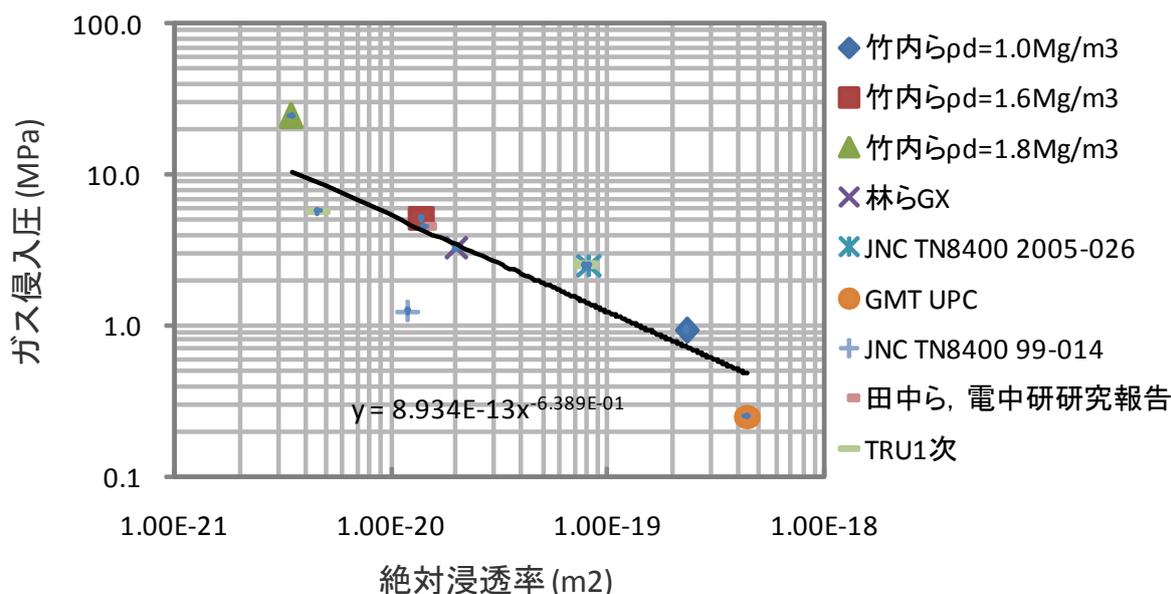


図 3.3.1-12 既往文献から設定した絶対浸透率とガス侵入圧の関係[1]

c. 初期・境界条件

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、79.20%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

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[8]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 3.3.1-13にGETFLOWSを例にUCODE_2014を用いた自動逆解析の流れを示す。

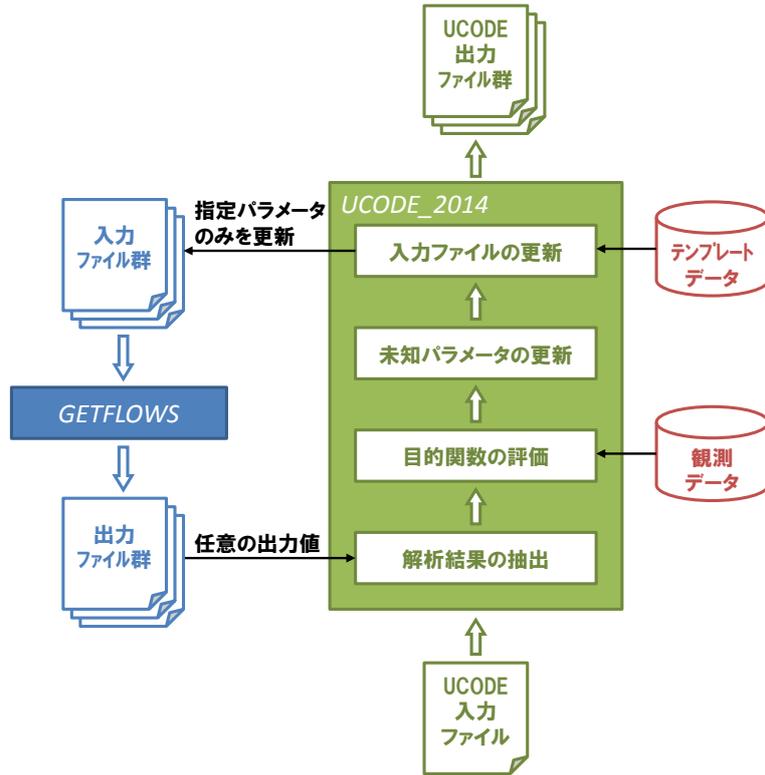


図 3.3.1-13 GETFLOWS+UCODE_2014 による逆解析の流れ

4) 逆解析結果

a. 再冠水フェーズ

逆解析逆解析によって再現された No.2 の累積注水量の解析結果を図 3.3.1-14 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 3.3.1-8 に、相対浸透率及び毛細管圧力を図 3.3.1-15 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（浸潤過程）も併記している。また、今回のベントナイト系材料界面（スリット 3mm）供試体の 2 相流曲線との比較のために、図 3.3.1-16 及び図 3.3.1-17 に既往検討（圧縮ベントナイト、浸潤過程）で同定された相対浸透率曲線、及び毛細管圧力曲線も示している。

3mm 幅の材料界面を模擬した圧縮ベントナイトでは、昨年度までに実施した材料界面の無い供試体と比較して、毛細管圧力は大きくなり、相対浸透率は同程度となるような 2 相流パラメータが得られた。この傾向が、ベントナイト系材料界面（スリット 3mm）供試体において常に同定されるものなのかどうかは、対象ケースが 1 つしかないことから判然としない。そのため今後データを蓄積し、ベントナイト系材料界面（スリット 3mm）供試体において、同様の傾向が得られるか調査する必要があると考えられる。

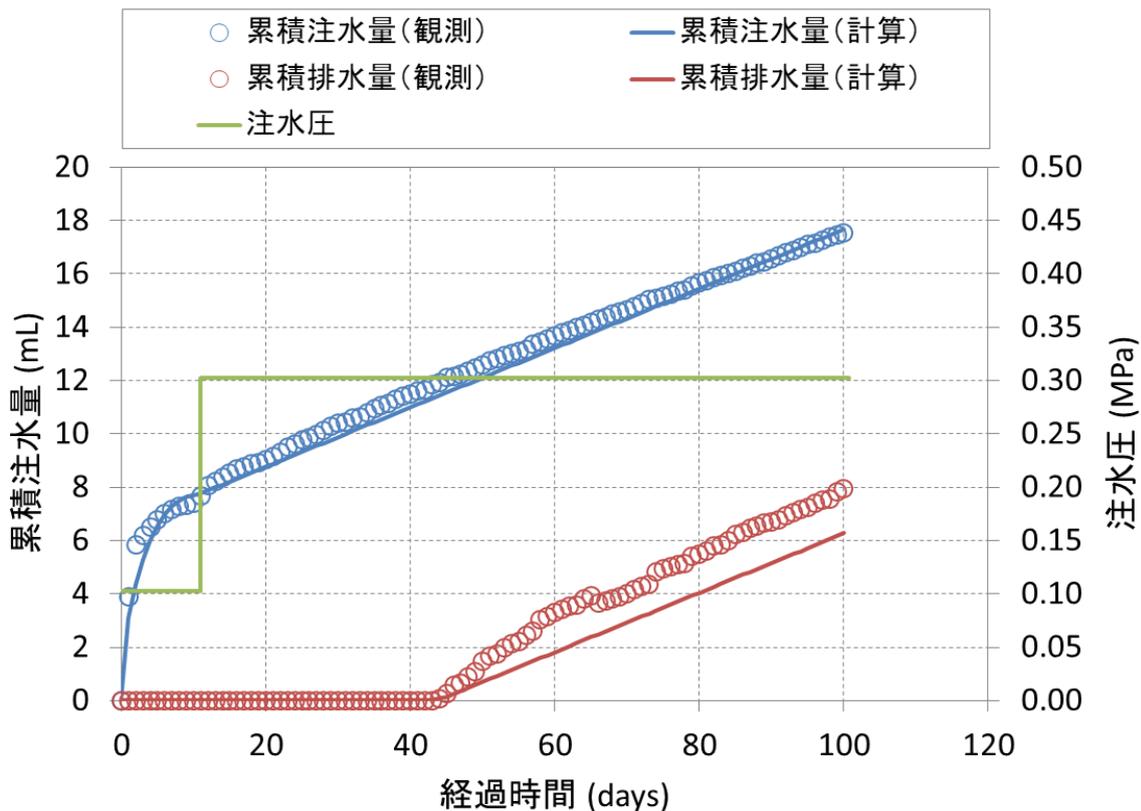


図 3.3.1-14 累積注水量の再現結果（再冠水フェーズ、No.2）

表 3.3.1-8 同定された 2 相流パラメータ (再冠水フェーズ、No.2)

供試体	$K(m^2)$	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_w(-)$	$P_0(MPa)$	$n_c(-)$
No.2	5.076×10^{-20}	0.0	0.0	2.79	2.57	1.50

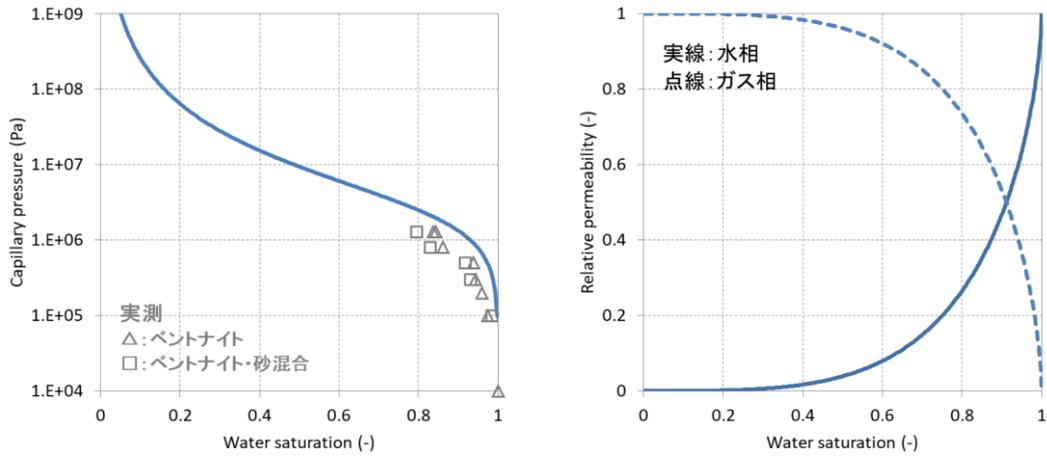


図 3.3.1-15 同定された毛細管圧力 (左) と相対浸透率 (右) (再冠水フェーズ、No.2)

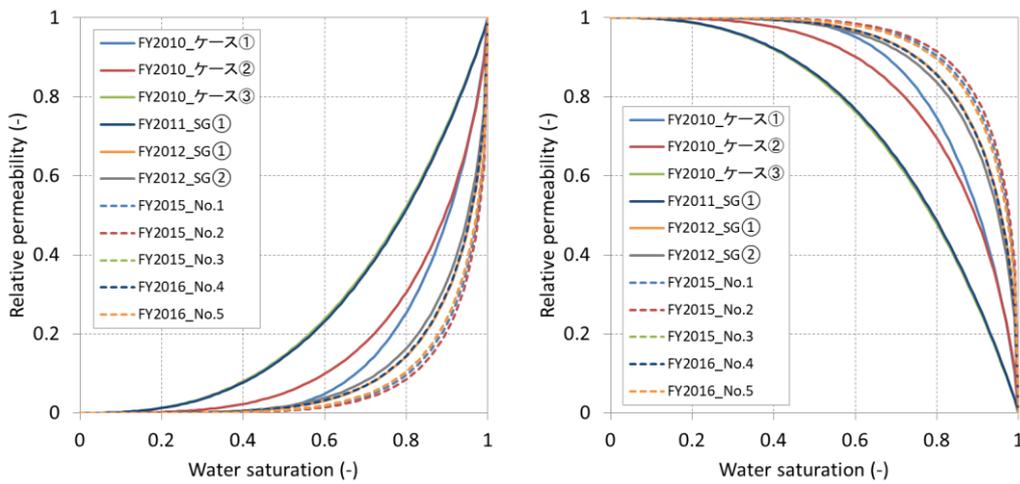


図 3.3.1-16 既往検討 (浸潤過程) で同定された相対浸透率曲線 (左: 水相、右: ガス相)

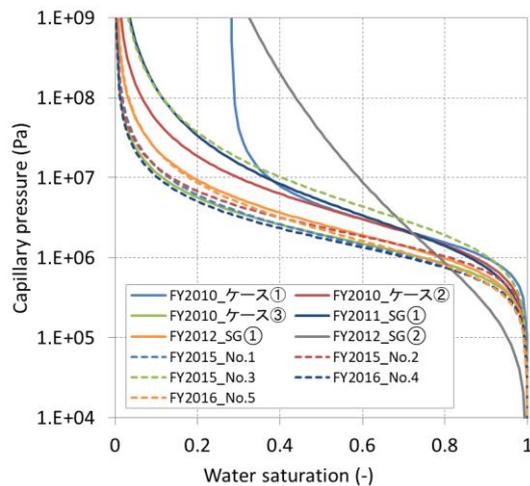


図 3.3.1-17 既往検討 (浸潤過程) で同定された毛細管圧力曲線

b. ガス注入フェーズ

逆解析によって再現された No.2 の累積排水量及び排気流量の解析結果をそれぞれ図 3.3.1-18、図 3.3.1-19 に示す。同定された 2 相流パラメータを表 3.3.1-9 に、相対浸透率及び毛細管圧力を図 3.3.1-20 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 1.36Mg/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。

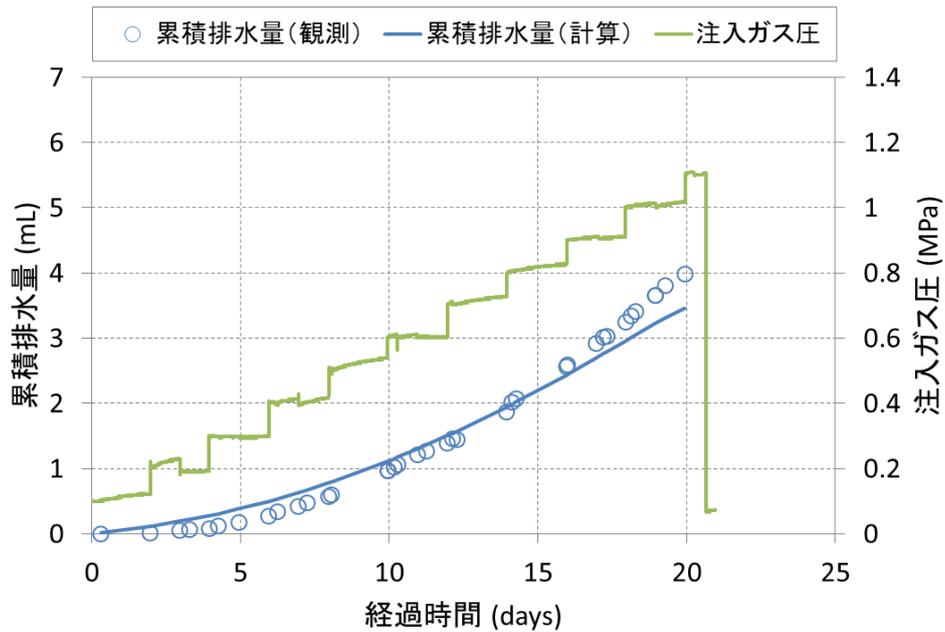


図 3.3.1-18 累積排水量の再現結果（ガス注入フェーズ、No.2）

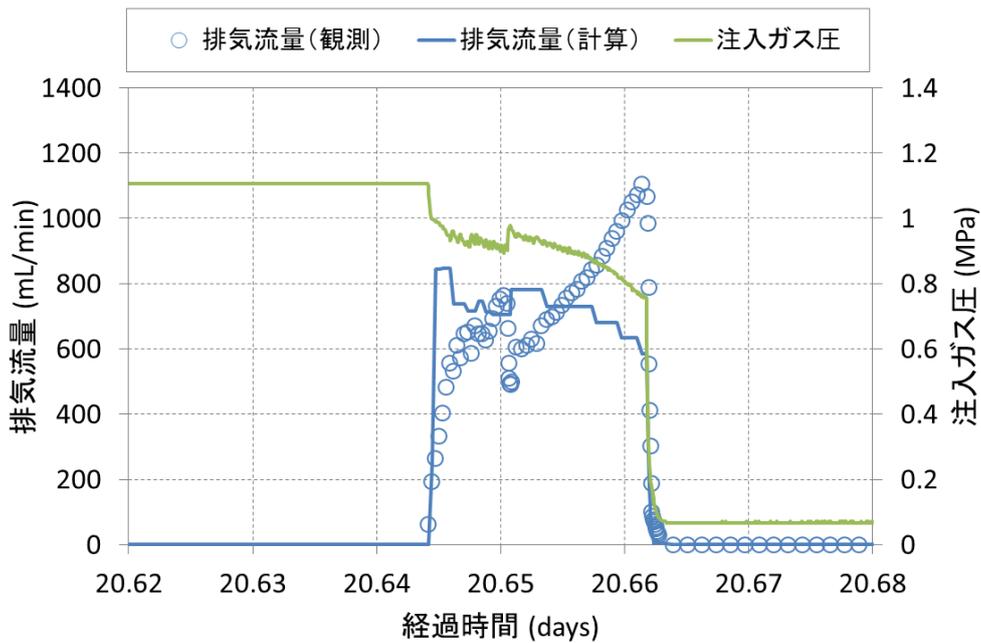


図 3.3.1-19 排気流量の再現結果（ガス注入フェーズ、No.2）

表 3.3.1-9 同定された 2 相流パラメータ (ガス注入フェーズ、No.2)

供試体	$K(m^2)$	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_w(-)$	$n_g(-)$	$P_0(MPa)$	$n_c(-)$
No.2	2.60×10^{-20}	0.400	0.0	2.00	19.90	1.765	1.60

表 3.3.1-10 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.2)

供試体	$C(-)$	$n(-)$	$F(-)$	$P_s(MPa)$
No.2	6.20×10^6	0.200	1.500	0.353

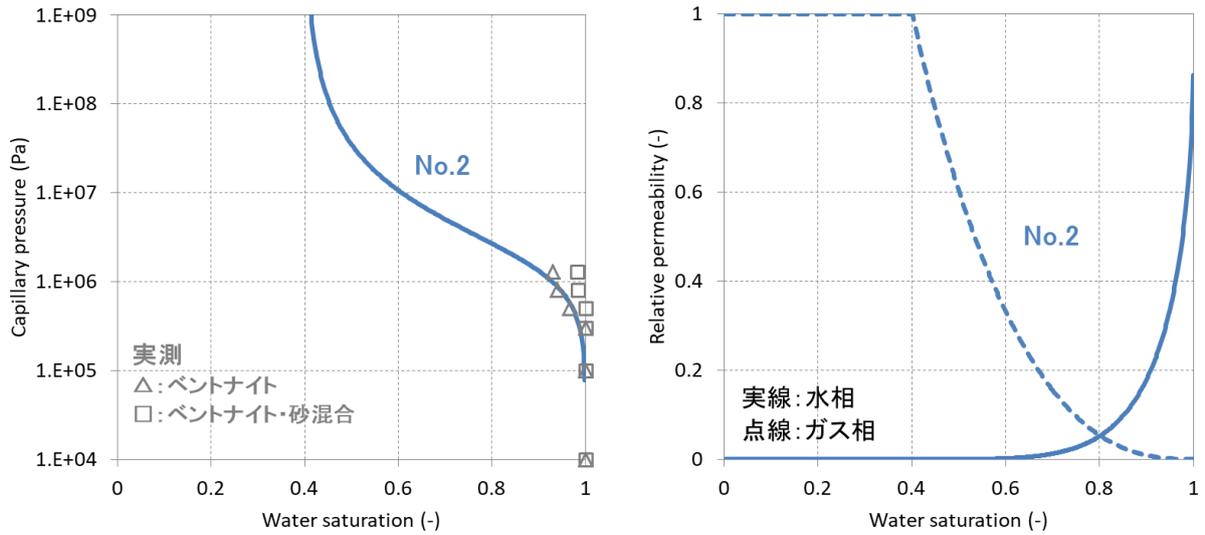


図 3.3.1-20 同定された相対浸透率 (左) と毛細管圧力 (右) (ガス注入フェーズ : No.2)

(4) 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(スリット 1mm)を対象とした検証計算

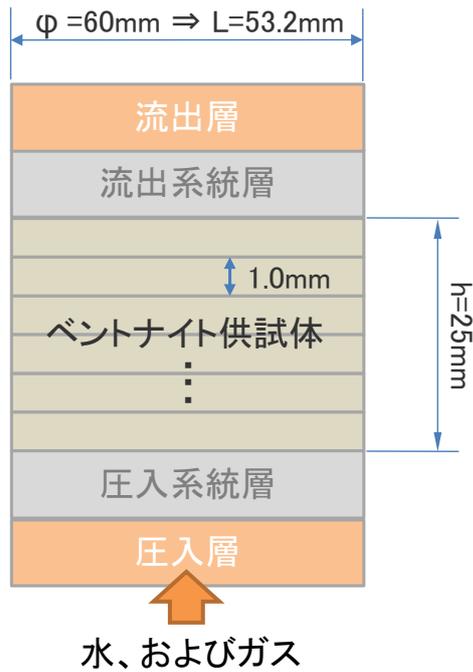
1) 検討方針

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、No.2 ともに再冠水フェーズ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。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、浸潤過程における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(φ60mm×h25mm)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 3.3.1-21 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℃とし、試験中の温度変化は考慮しないものとした。



流出境界層

背圧条件を与える

流出系統層

フィルタ、配管等 (3.57mL) を表現

ベントナイト供試体

鉛直方向を 1mm 幅に等分割した格子群

- 初期圧力：背圧と同じ
- 初期水飽和度：90% (再冠水フェーズ)
- 初期温度：25°C (一定)

圧入系統層

フィルタ、配管等 (3.57mL) を表現

圧入境界層

試験条件となる水圧を与える

図 3.3.1-21 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

累積注水量、累積排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(kg/m³)
- 乾燥密度：1,360(kg/m³)
- 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 × 10⁻⁹(Pa⁻¹) (推定値)

未知パラメータを以下に示す。

- 絶対浸透率 (水相と気相は同じ、排水速度と注水差圧より算出した値を初期値として使用)
- 相対浸透率曲線を表現する構成モデルパラメータ (表 3.3.1-6 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 3.3.1-6 の P_0 、 n_c)

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、前項「(3) 3) b」に示した考え方と同じとした。

水・空気の相互作用を表現するための相対浸透率、毛細管圧力には表 3.3.1-6 に示す構成モデルを採用した。

c. 初期・境界条件

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、注入水圧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

逆解析手法については、前項「(3) 3 d」に示したのと同じとした。

4) 逆解析結果

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 3.3.1-22、図 3.3.1-23 に示す。図 3.3.1-22 については、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 3.3.1-11 に、相対浸透率及び毛細管圧力を図 3.3.1-24 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 1.36Mg/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。得られた毛細管圧力のパラメータについては、比較的ばらつきの少ないものが同定されており、試験から得られている毛細管圧力ともほぼ整合する結果となった。一方、相対浸透率については、No.1 と No.2 で比較的差が大きなパラメータが同定された。また、本確認計算と昨年度の検討において、浸潤過程を対象として同定された二相流パラメータを表 3.3-12 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 3.3.1-25～図 3.3.1-26 にまとめた。

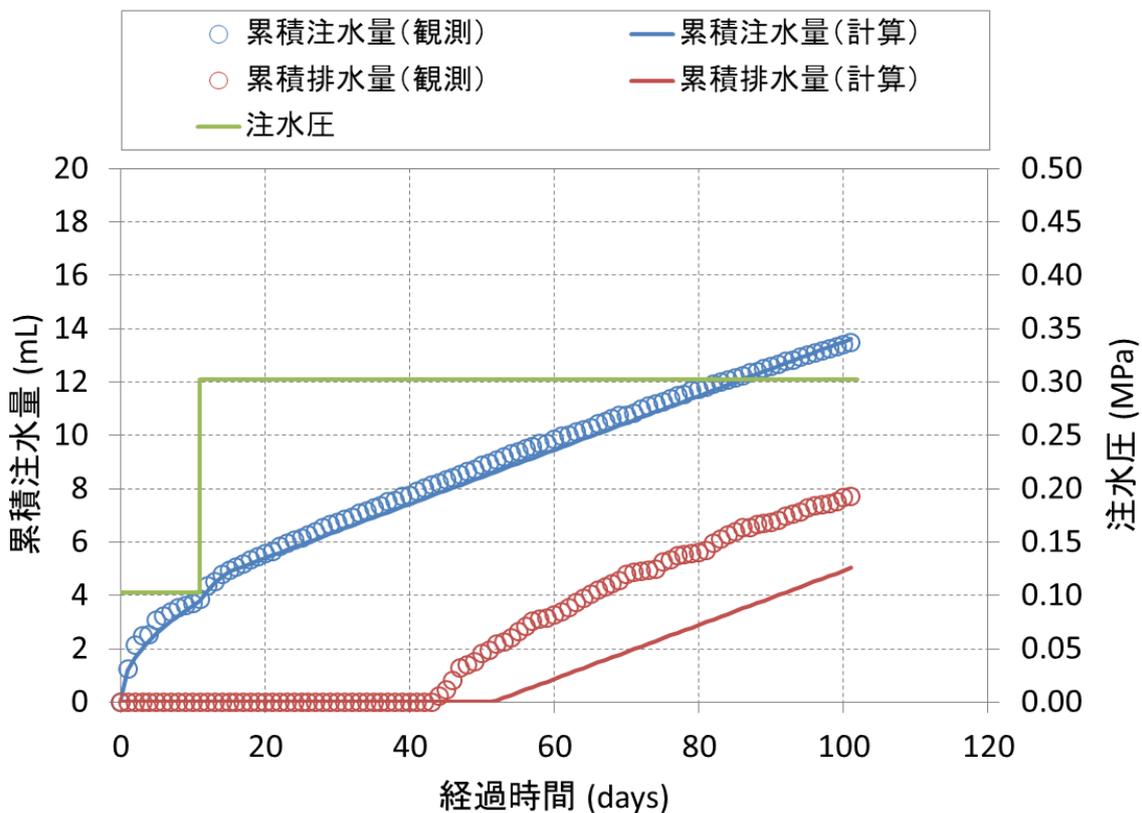


図 3.3.1-22 累積注水量の再現結果 (再冠水フェーズ、No.1)

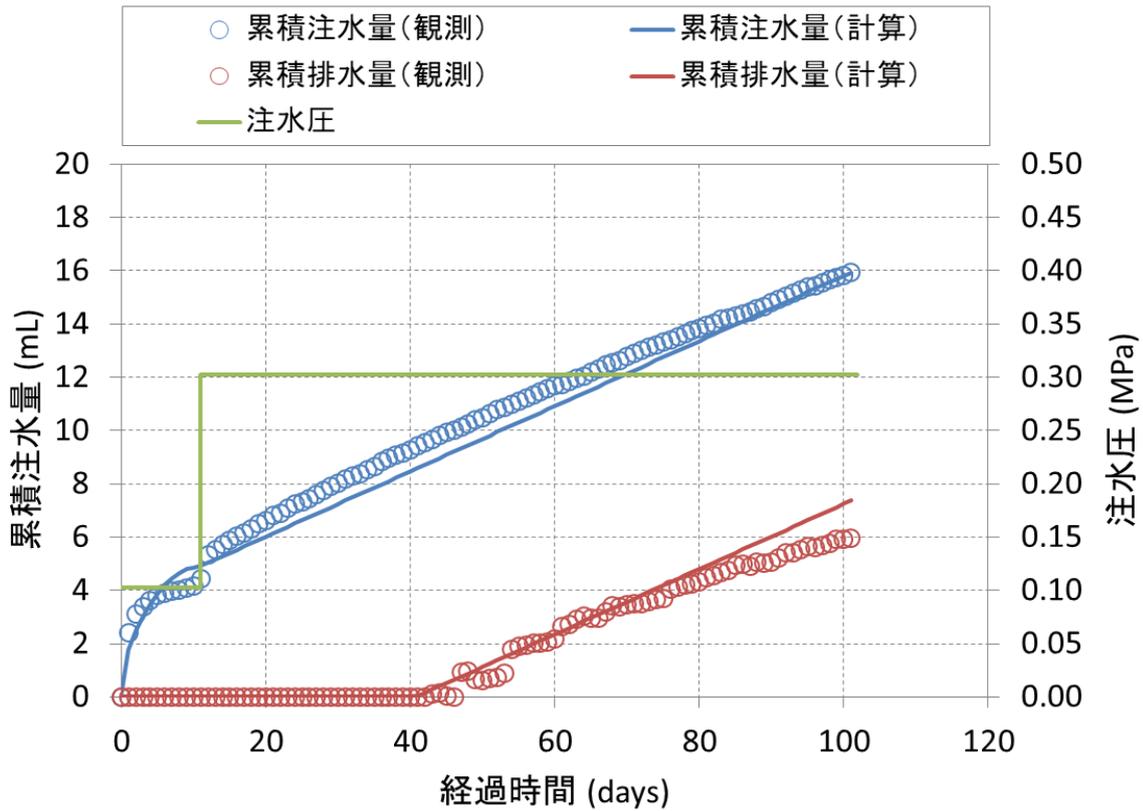


図 3.3.1-23 累積注水量の再現結果（再冠水フェーズ、No.2）

表 3.3.1-11 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	4.626×10^{-20}	0.0	0.0	1.61	1.20	2.00
No.2	5.585×10^{-20}	0.0	0.0	3.07	1.48	1.99

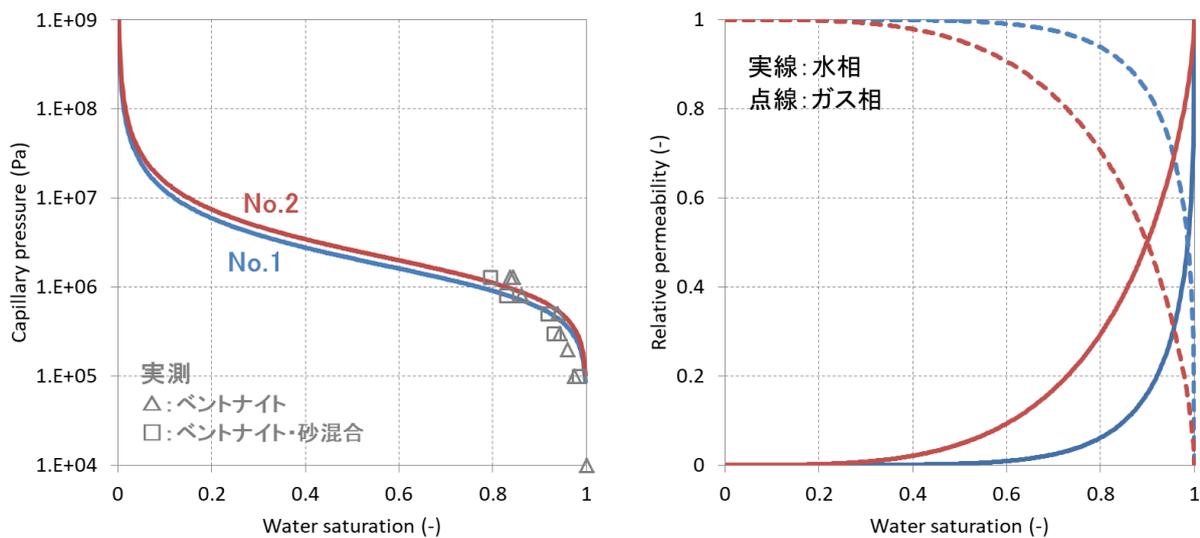


図 3.3.1-24 同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）（再冠水フェーズ、No.1、No.2）

表 3.3-12 既往検討及び本検討で同定された 2 相流パラメータ

検討年度	ケース名	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_w(-)$	$P_0(MPa)$	$n_c(-)$
2016	No.1	0.0	0.0	1.91	1.07	1.50
	No.2	0.0	0.0	1.75	1.01	1.71
2017	No.1	0.0	0.0	1.61	1.20	2.00
	No.2	0.0	0.0	3.07	1.48	1.99

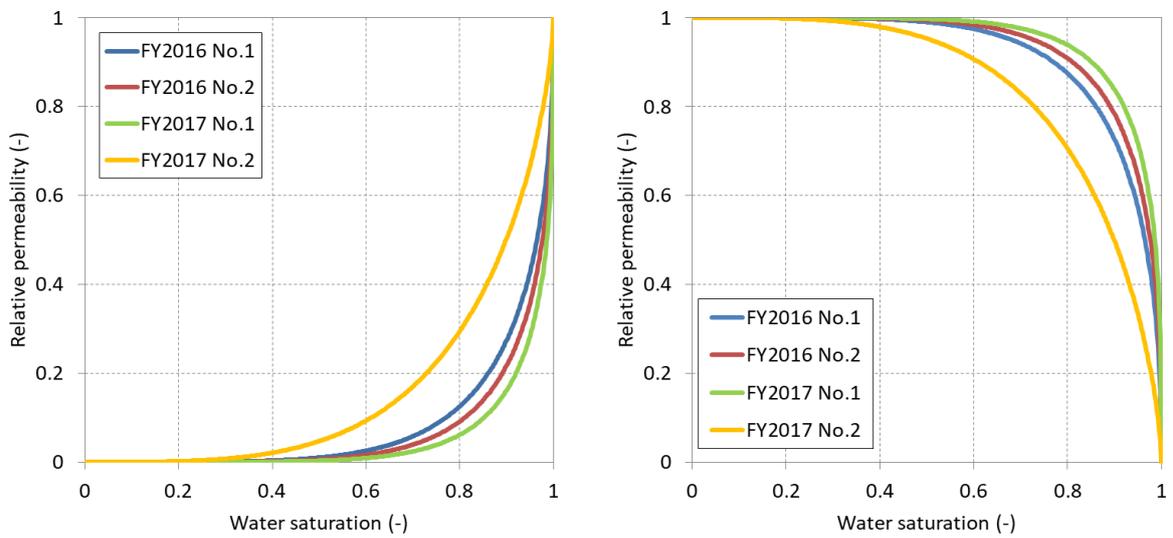


図 3.3.1-25 既往検討及び本検討で同定され水相（左）と気相（右）の相対浸透率

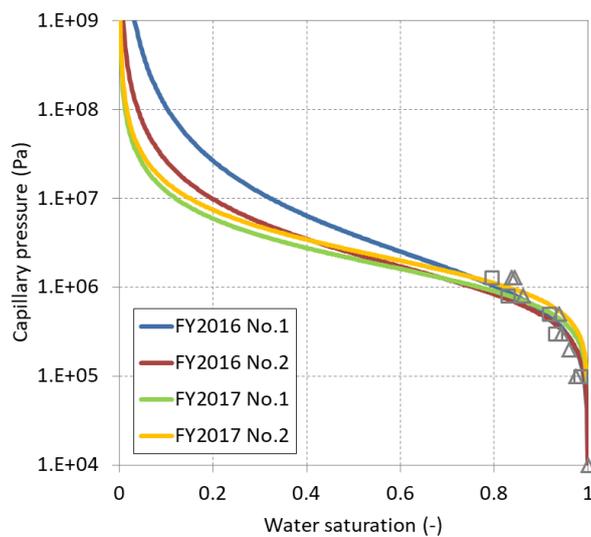


図 3.3.1-26 既往検討及び本検討で同定された毛細管圧力

(5) 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を対象とした確認計算

1) 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認計算を実施する。

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、ここで実施する確認計算では、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

混和剤有り・無しそれぞれの供試体 No.1、No.2 を用いて実施した 28 日養生試験は、透水試験・透気試験の予備試験であるため、これらの試験は検討対象から除外するものとした。また、混和剤有り・無しそれぞれの供試体 No.6 も、他の供試体と比較して透水係数が大きすぎるため、異常値とみなし、検討対象から除外するものとした。そのため、混和剤有り・無しそれぞれの No.3、No.4、No.5、打継無の計 8 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 3.3.1-27 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、混和剤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。

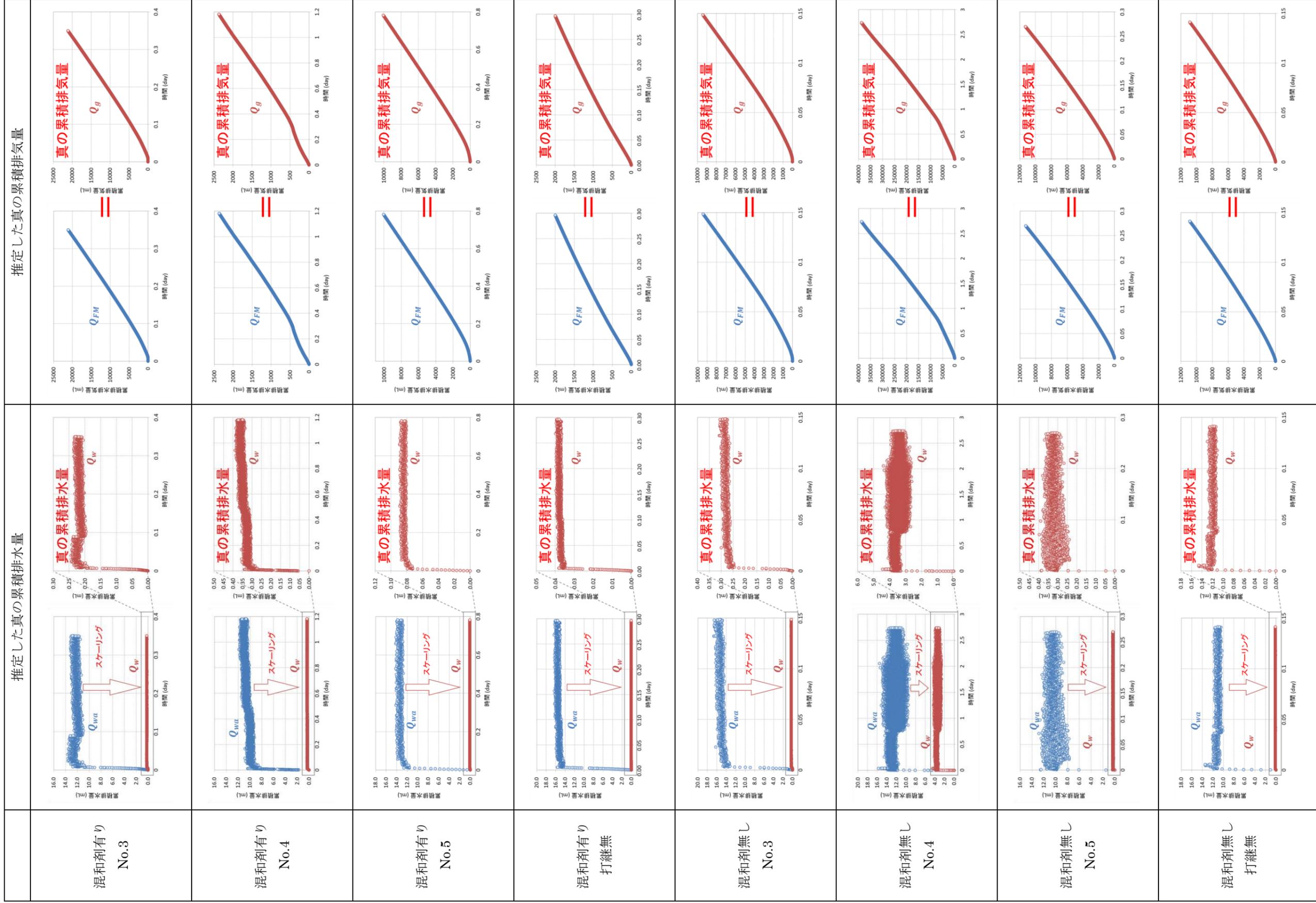


図 3.3.1-27 推定した真の累積排水量・累積排水量

2) 試験系のモデル化

解析モデルは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载荷ガス圧条件を与える境界格子（注入層、流出層）を設けた。図 3.3.1-28 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。

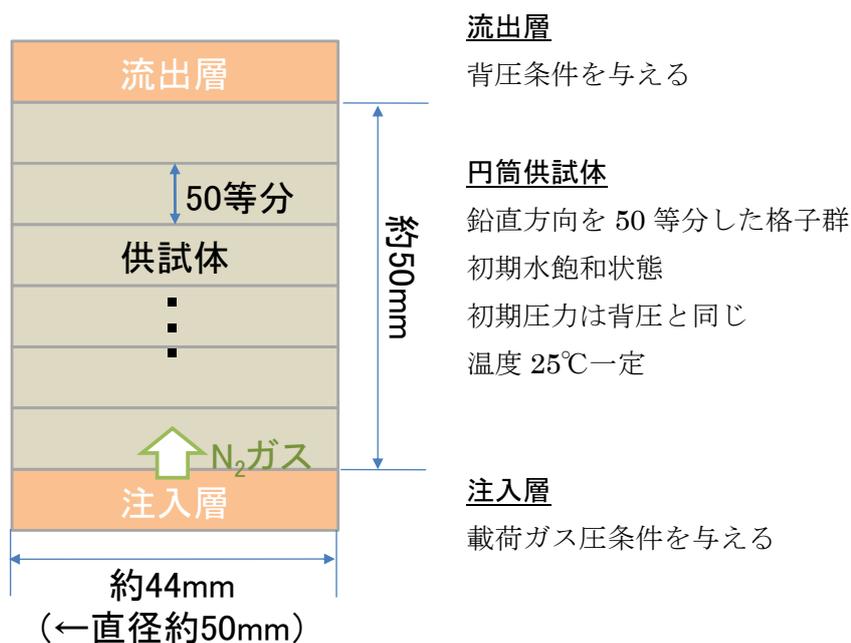


図 3.3.1-28 解析モデルの基本諸元

3) 逆問題の設計

a. 目的関数の設定

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 3.3.1-29 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。

$$f = \sum_{i=1}^{n_{ow}} w_w(i) (Q_{w_obs}(i) - Q_{w_cal}(i))^2 + \sum_{j=1}^{n_{og}} w_g(i) (Q_{g_obs}(j) - Q_{g_cal}(j))^2 \quad (3.3-13)$$

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

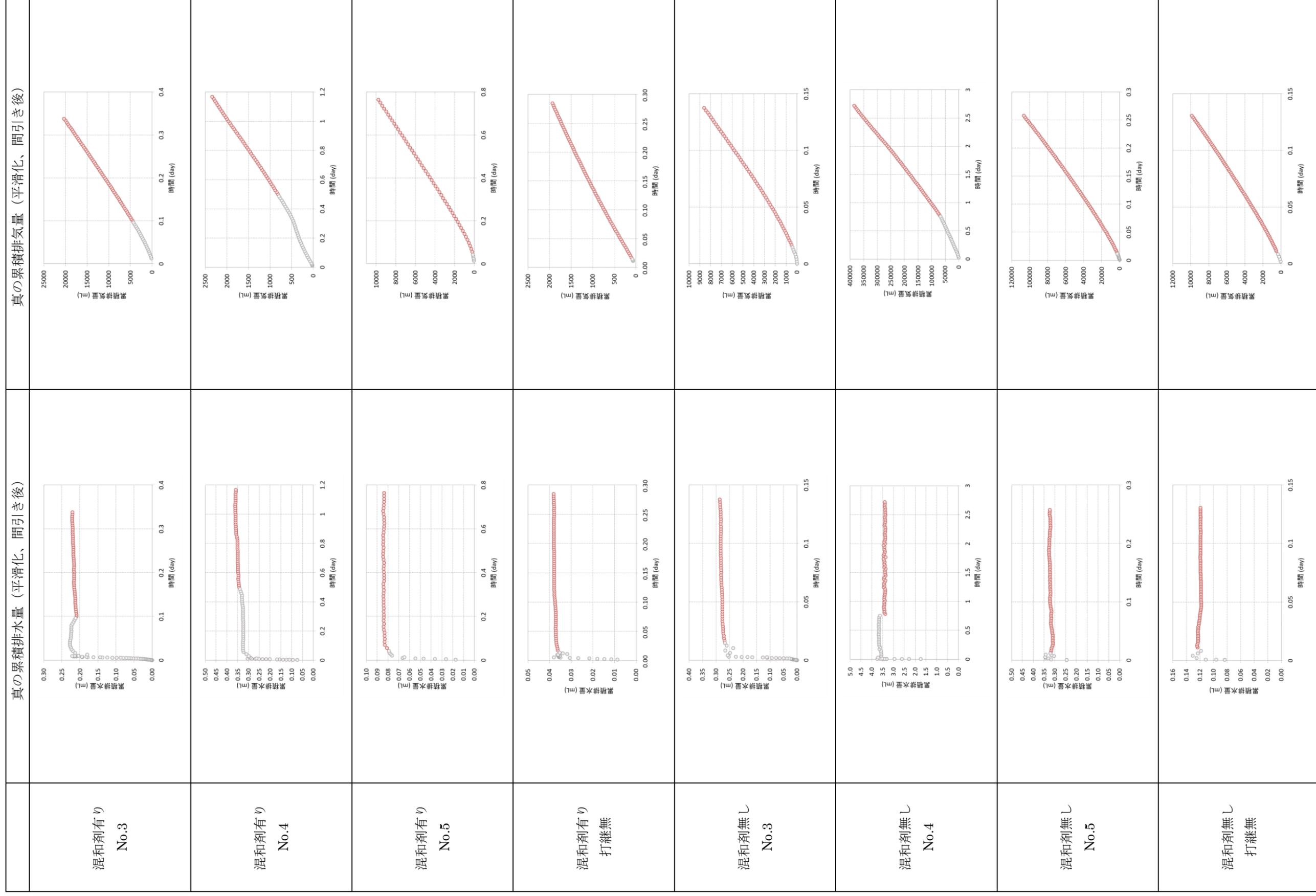


図 3.3.1-29 目的関数に用いる平滑化後の真の累積排水量、累積排水量

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 $1.184 \times 10^{-3}(\text{kg}/\text{m}^3)$ 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 $1.145 \times 10^{-3}(\text{kg}/\text{m}^3)$ 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 $17.8 \times 10^{-6}(\text{Pa s})$ 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。

$$\mu_{g0} = \mu_{20} \left(\frac{T_{20} + C}{T + C} \right) \left(\frac{T}{T_{20}} \right)^{3/2} \quad (3.3.1-14)$$

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。 $\mu_{20} = 17.6 \times 10^{-6}(\text{Pa s})$ 、 $T_{20} = 293.15(\text{K})$ 、窒素のサザランド定数には $C = 104(-)$ を設定した。

水物性に関して、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 3.3.1-5）
 - ガス相の絶対浸透率（表 3.3.1-5）
 - 間隙率（表 3.3.1-5）
 - 固相圧縮率： $3.863 \times 10^{-11}(\text{Pa s})$ （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 3.3.1-6 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 3.3.1-6 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 3.3.1-7 に示す構成モデルを採用した。毛細管圧力は表 3.3.1-6 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、载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、全項「(3) 3) d」に示したものと同一とした。

4) 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み合わ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 3.3.1-30 で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。この考え方に基くと、ガス注入時には、図中の赤点線で示した排水速度から算出される絶対浸透率 1.10×10^{-16} (m²) 程度であったと考えられる。混和剤有り No.3 の供試体以外については、全て共通の傾向であることから、水相の絶対浸透率もパラメータに加えた検討を実施した。

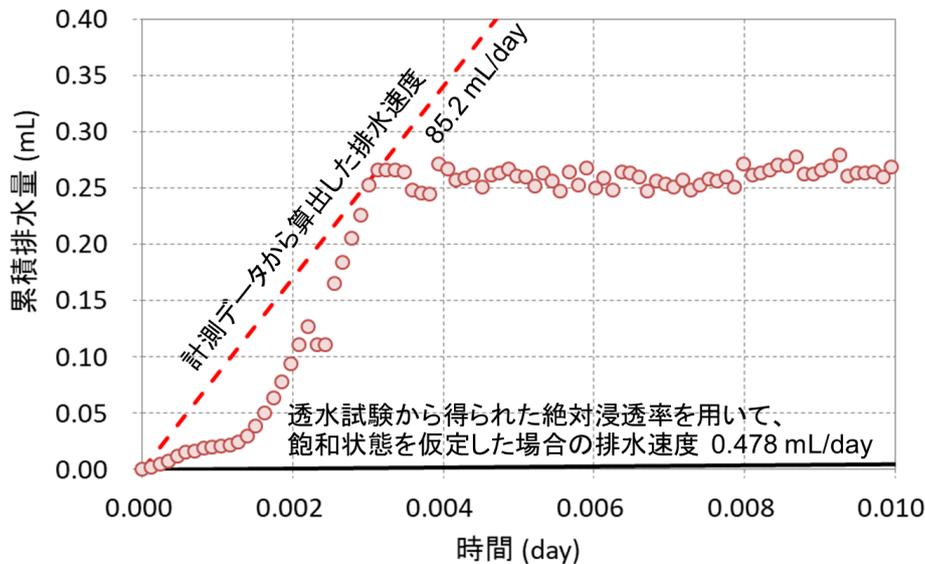


図 3.3.1-30 実測値から推定されるガス透気試験時の絶対浸透率（混和剤無し、No.3）

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 3.3.1-31 に累積排水量と累積排気量の再現結果、及び同定された相対浸透率・毛細管圧力を示す。またその際の二相流パラメータを表 3.3.1-13 に示す。実測された累積排水量や累積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。ただし、混和剤無しでは混和剤有りに比べて、絶対浸透率が1桁以上大きく、また毛細管圧力が小さいという結果になった。打継の有無による明確なパラメータの違いは観察されなかった。

表 3.3.1-13 同定された 2 相流パラメータ

供試体	$K(m^2)$	$S_{wr}(-)$	$n_w(-)$	$n_g(-)$	$P_0(Pa)$	$n_c(-)$
混和剤有り : No.3	1.272×10^{-18}	0.958	9.11	2.75	6.85×10^5	1.16
混和剤有り : No.4	6.276×10^{-18}	0.960	1.37	2.48	1.29×10^5	1.13
混和剤有り : No.5	4.079×10^{-19}	0.982	2.01	1.67	2.77×10^5	1.11
混和剤有り : 打継無	1.734×10^{-18}	0.990	10.00	5.65	8.82×10^5	1.24
混和剤無し : No.3	1.004×10^{-16}	0.944	9.25	10.00	1.29×10^5	1.94
混和剤無し : No.4	3.183×10^{-15}	0.827	1.73	1.99	1.52×10^4	1.89
混和剤無し : No.5	3.374×10^{-15}	0.985	1.86	5.99	1.21×10^4	1.85
混和剤無し : 打継無	6.703×10^{-17}	0.990	1.94	3.68	2.43×10^5	1.74

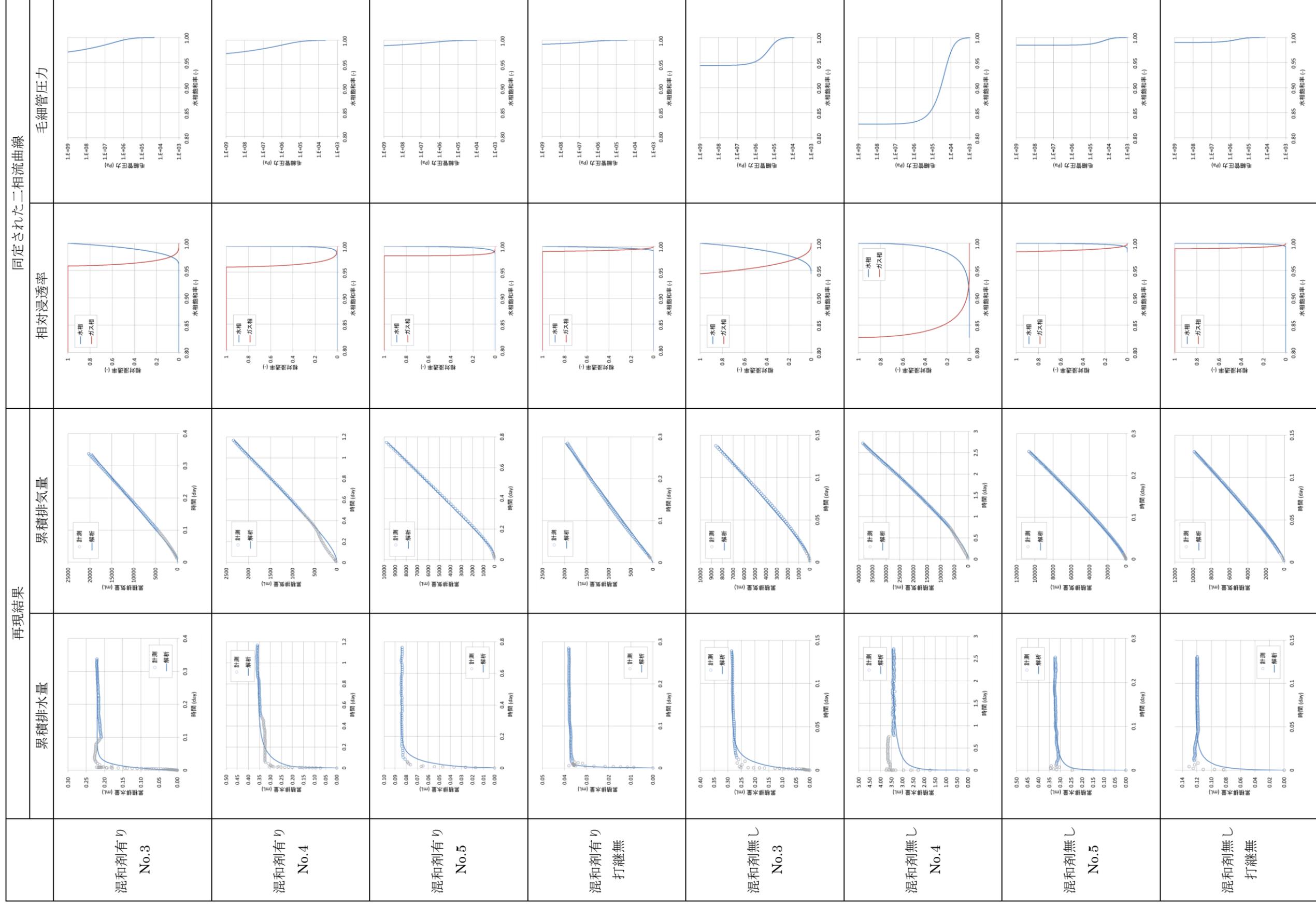


図 3.3.1-31 累積排水量と累積排気量の再現結果・同定された二相流曲線

3.3.2 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 3.3.2-1 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 3.3.2-2 に示す。また、各モジュールの要求機能を表 3.3.2-1 に、開発環境を表 3.3.2-2 に示した。

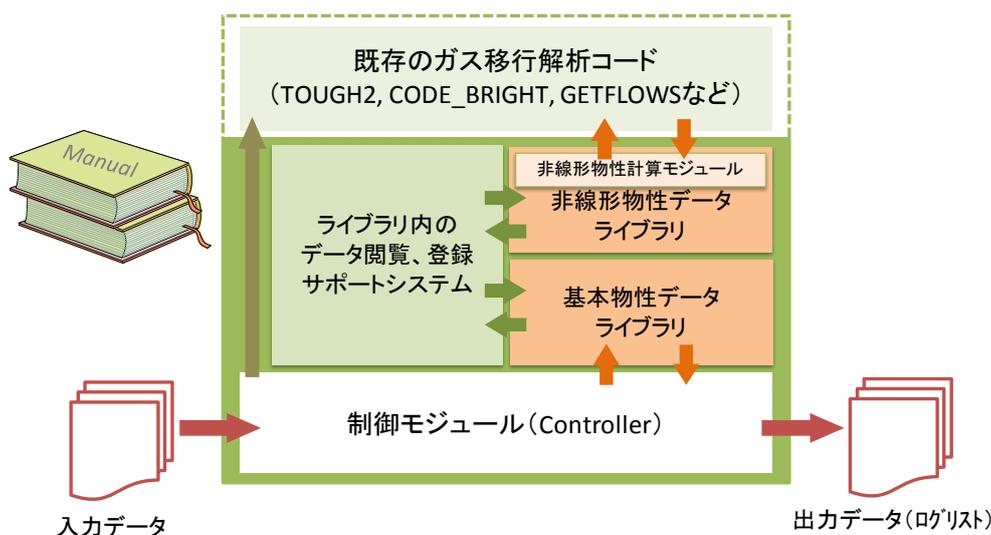


図 3.3.2-1 データライブラリの基本構成

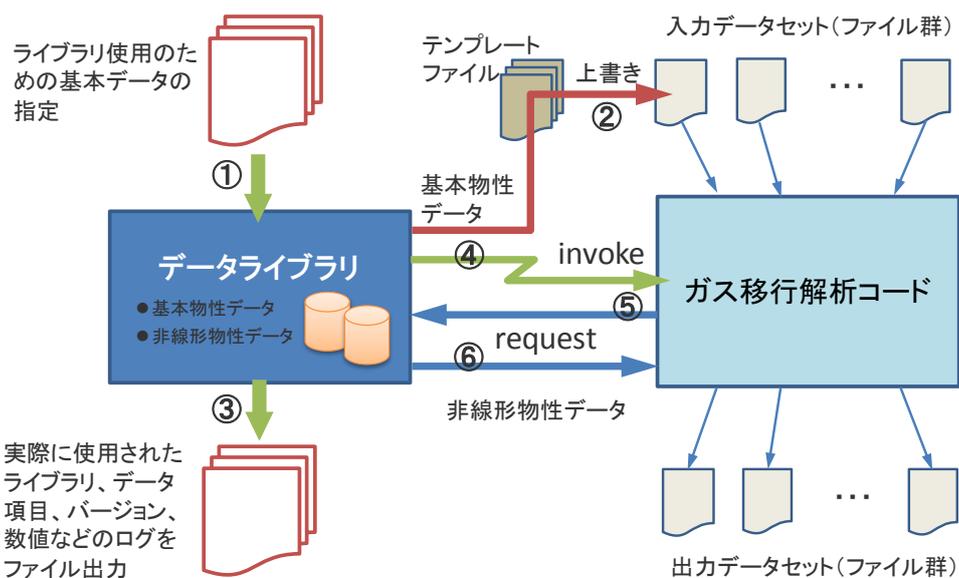


図 3.3.2-2 データライブラリを用いた実行処理の流れ

表 3.3.2-1 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 3.3.2-2 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）

前項「3.3.1(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 3.3.2-3 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 3.3.2-4～表 3.3.2-6 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 3.3.2-3 同定された基本物性一覧

過程	材料	ケース	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	ベントナイト系材料界面	スリット 3mm	No.2	5.076×10^{-20}	5.076×10^{-20}	0.5283	1.0×10^{-9}	—	
		スリット 1mm	No.1	4.626×10^{-20}	4.626×10^{-20}	0.5070	1.0×10^{-9}	—	
			No.2	5.585×10^{-20}	5.585×10^{-20}	0.5070	1.0×10^{-9}	—	
排水	ベントナイト系材料界面	スリット 3mm	No.2	2.597×10^{-20}	2.597×10^{-20}	0.5283	1.0×10^{-9}	0.353	
		セメント系材料	混和剤有り	No.3	1.272×10^{-18}	1.105×10^{-14}	0.3276	3.863×10^{-11}	—
				No.4	6.276×10^{-18}	7.449×10^{-17}	0.3245	3.863×10^{-11}	—
			No.5	4.079×10^{-19}	8.024×10^{-14}	0.3047	3.863×10^{-11}	—	
	混和剤無し	打継無		1.734×10^{-18}	1.331×10^{-16}	0.3177	3.863×10^{-11}	—	
			No.3	1.004×10^{-16}	4.942×10^{-13}	0.3166	3.863×10^{-11}	—	
			No.4	3.183×10^{-15}	9.506×10^{-14}	0.2930	3.863×10^{-11}	—	
		No.5	3.374×10^{-15}	4.010×10^{-14}	0.2984	3.863×10^{-11}	—		
		打継無		6.703×10^{-17}	4.578×10^{-15}	0.2886	3.863×10^{-11}	—	

表 3.3.2-4 同定された非線形物性一覧（毛細管圧力）

過程	材料	ケース	供試体	モデル	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$P_0(MPa)$	$n_c(-)$
湿潤	ベントナイト系材料界面	スリット 3mm	No.2	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	2.57	1.50
		スリット 1mm	No.1	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	1.20	2.00
			No.2	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	1.48	1.99
排水	ベントナイト系材料界面	スリット 3mm	No.2	<i>van Genuchten</i>	0.400	0.0	1.77	1.60
	セメント系材料	混和剤有り	No.3	<i>van Genuchten</i>	0.958	0.0	0.685	1.16
			No.4	<i>van Genuchten</i>	0.960	0.0	0.129	1.13
			No.5	<i>van Genuchten</i>	0.982	0.0	0.277	1.11
			打継無	<i>van Genuchten</i>	0.990	0.0	0.882	1.24
		混和剤無し	No.3	<i>van Genuchten</i>	0.944	0.0	0.129	1.94
			No.4	<i>van Genuchten</i>	0.827	0.0	0.015	1.89
			No.5	<i>van Genuchten</i>	0.985	0.0	0.012	1.85
		打継無	<i>van Genuchten</i>	0.990	0.0	0.243	1.74	

表 3.3.2-5 同定された非線形物性一覧 (相対浸透率)

過程	材料	ケース	供試体	相	モデル	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_w, n_g(-)$
湿潤	ベントナイト系材料界面	スリット 3mm	No.2	水	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	2.79
				ガス	<i>Grant</i>	—	—	—
				水	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	1.61
				ガス	<i>Grant</i>	—	—	—
				水	<i>van Genuchten</i>	0.0	0.0	3.07
排水	ベントナイト系材料界面	スリット 3mm	No.2	水	<i>van Genuchten</i>	0.400	0.0	2.00
				ガス	<i>van Genuchten</i>	0.400	0.0	19.90
				水	<i>van Genuchten</i>	0.958	0.0	9.11
				ガス	<i>van Genuchten</i>	0.958	0.0	2.75
				水	<i>van Genuchten</i>	0.960	0.0	1.37
				ガス	<i>van Genuchten</i>	0.960	0.0	2.48
				水	<i>van Genuchten</i>	0.982	0.0	2.01
				ガス	<i>van Genuchten</i>	0.982	0.0	1.67
				水	打継無	0.990	0.0	10.00
				ガス	<i>van Genuchten</i>	0.990	0.0	5.65
				水	混和剤無し	0.944	0.0	9.25
				ガス	<i>van Genuchten</i>	0.944	0.0	10.00
				水	No.4	0.827	0.0	1.73
				ガス	<i>van Genuchten</i>	0.827	0.0	1.99
				水	No.5	0.985	0.0	1.86
ガス	<i>van Genuchten</i>	0.985	0.0	5.99				
水	打継無	0.990	0.0	1.94				
ガス	<i>van Genuchten</i>	0.990	0.0	3.68				

表 3.3.2-6 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.2	6.20×10^6	0.200	1.500	0.353

相対浸透率や毛細管圧力を表現する構成モデルは表 3.3.2-7、表 3.3.2-8 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 3.3.2-7 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
$k_{rw} = \sqrt{S_{we}}(1 - (1 - S_{we}^{1/m_w})^{m_w})^2$	$k_{rw} = \sqrt{S_{we}}(1 - (1 - S_{we}^{1/m_w})^{m_w})^2$
$k_{rg} = 1 - k_{rw}$	$k_{rg} = \sqrt{S_{ge}}(1 - (1 - S_{ge}^{1/m_g})^{m_g})^2$
$S_{we} = (S_w - S_{wr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr})$	$S_{we} = (S_w - S_{wr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr})$
$m_w = 1 - 1/n_w$	$S_{ge} = (S_g - S_{gr}) / (1 - S_{wr} - S_{gr})$
	$m_w = 1 - 1/n_w \quad m_g = 1 - 1/n_g$

表 3.3.2-8 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。

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

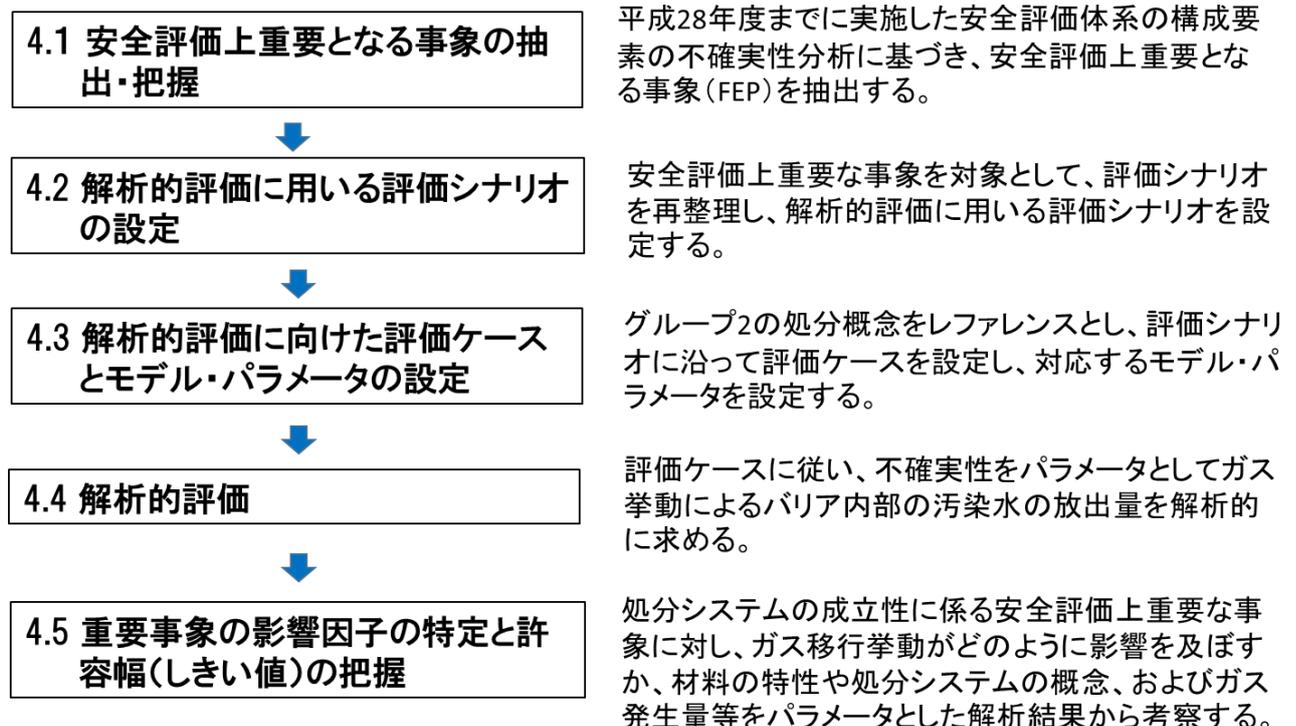
ここに、 P_g ：気相圧力(Pa)、 P_w ：水相圧力(Pa)、 P_s ：膨潤圧(Pa)、 ϕ ：間隙率(-)、 ϕ_0 ：初期間隙率(-)、 C_r ：固相圧縮率(1/Pa)、 P_0 ：標準大気圧(Pa)、 K ：絶対浸透率(m^2)、 K_0 ：流路拡幅前の絶対浸透率(m^2)、 F 、 C 、 n ：空隙損傷モデルパラメータを示す。

3.3.3 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解析的評価

本項目では、シナリオやデータ（パラメータ）、モデルの不確実性を低減するための継続的な取り組みとしてこれまでの検討成果を反映した評価シナリオと評価ケースを設定してガス移行挙動の解析的評価を行う。具体的には、昨年度に構築したガス移行評価シナリオから安全評価上で重要な事象を抽出・把握したうえで、これらが考慮された解析的評価を実施する際に必要な評価ケースと解析手法を整備し、同手法によるガス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。なお、ガス移行解析による挙動評価に当たっては、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を利用し、TRU 廃棄物処分システム（廃棄物グループ2のリファレンス処分概念）を対象とする。解析コードには、水・ガス2相流解析コード GETFLOWS を用いる。解析格子モデルは鉛直2次元断面を基本とする。

検討項目の概要と実施手順を下図に示す。水理物性や熱物性、処分システムの構造（考慮する材料、材料界面の有無）等、詳細な条件設定や解析ケース数に関しては、当センターと協議の上決定する。

【実施項目と手順】



(1) 安全評価上重要となる事象の抽出と把握

1) 安全評価体系と構成する作業要素

ガス移行を考慮した安全評価体系は、下図に示す①場と現象の理解、②シナリオ設定、③評価ケース設定とモデルの選択、④モデルに対応したデータ（パラメータ）の設定、の4つの作業要素に分類でき、それぞれの作業要素ごとに、作業内容に対応した重要要素および不確実性の抽出・整理実施してきた[9][10]。

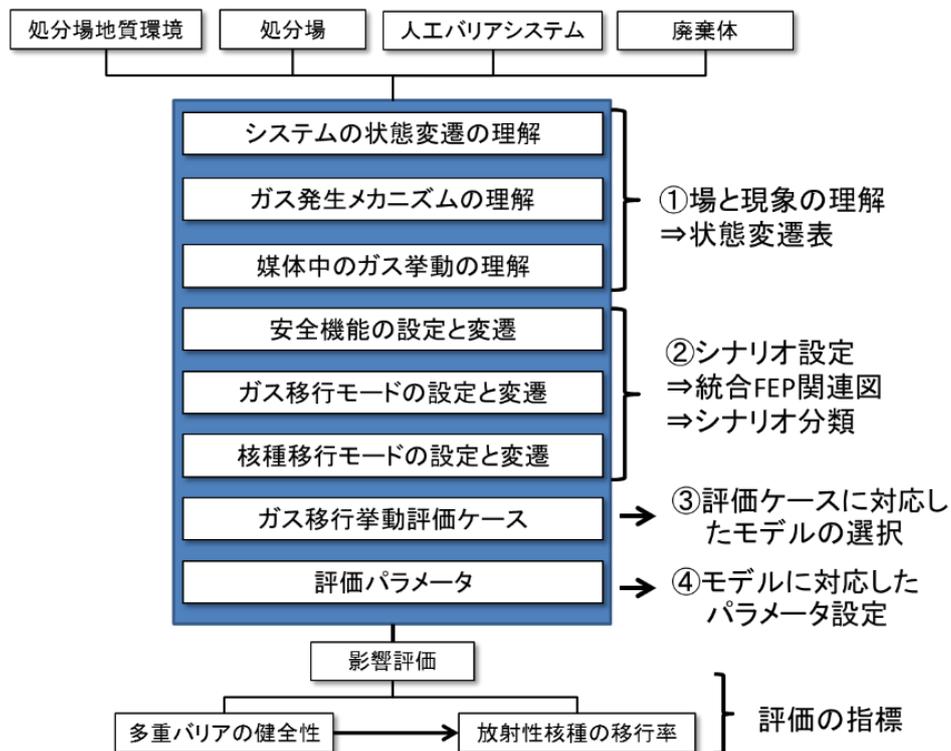


図 3.3.3-1 ガス挙動を考慮した安全評価体系[9]

それぞれの作業内容は以下の通り設定した。

- (ア)場と現象の理解：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。
- (イ)評価シナリオの設定：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への影響を考慮して、異なる媒体中でのガス挙動、核種挙動を時系列的な変遷を考慮して系統的に整理し、核種移行量の評価に向けてのストーリーをシナリオとして構築、シナリオを構成する要素の発生確率と影響の程度を考慮して分類する。
- (ウ)評価ケースの設定と適用可能なモデルの選定：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。
- (エ)パラメータ設定：評価モデルやプロセスモデルを対象に、選定した解析コードに必要なとなるパラメータ値を実験や専門家の判断をもとに設定する。また、評価ケース設定で考慮する不確実性への対応としてのパラメータのゆれ幅も設定する。

評価上重要な作業は、上記の内最初の①状態変遷表（ストーリーボード）を用いた場と現象の理解をベースとした安全評価上の重要要素（本検討では、安全性に係る統合 FEP として整理）の把握となり、それらを用いて系統的にシナリオを設定し、シナリオ毎の評価ケースを設定する。

2) ガス挙動の状態変遷の理解からの重要要素と不確実性の抽出

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

状態変遷の理解に伴い、統合 FEP の構築、統合 FEP を用いた関連図作成までの作業に沿って、ガス挙動評価で重要と考えられる要素と不確実性を抽出する。統合 FEP 関連図は、例えば、下図に示す複数の重要要素の統合 FEP をガスや核種の移行に沿ってリンクさせることで作成する。

統合FEPの関連図

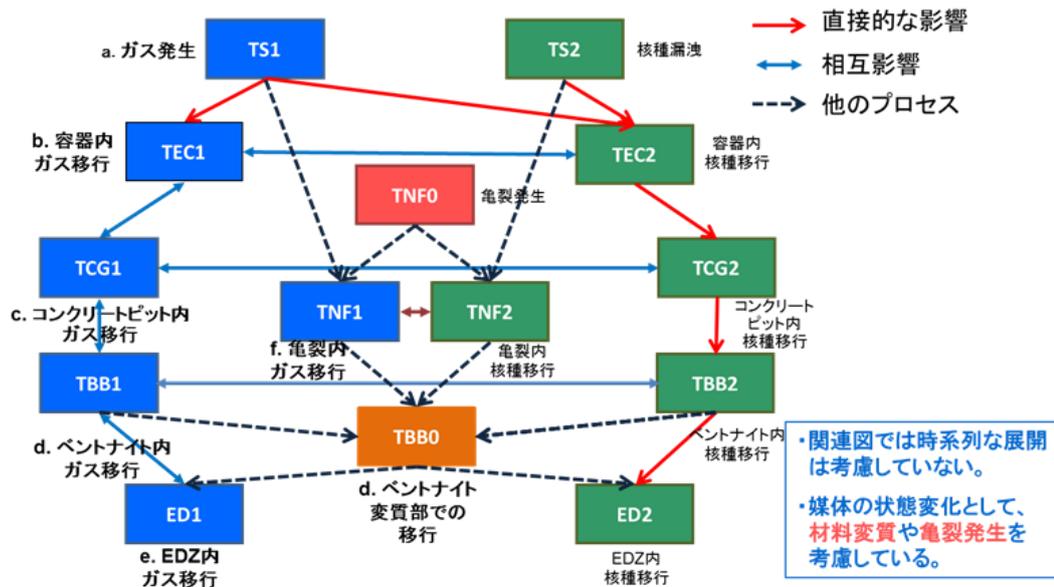


図 3.3.3-2 グループ 2 の統合 FEP の関連図[11]

それぞれガス移行挙動に係る統合 FEP には以下に示す重要要素を含む。

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

平成 27 年度の検討の結果、グループ 2 を対象として作成した状態変遷表の分析から得られた重要要素と不確実性は下表に整理された。統合 FEP 関連図では、ガス発生から異なる媒体中を移行し、処分坑道周辺の EDZ に放出するまでを対象としている。また、f として、バリアが変質・劣化し、亀裂媒体となる場合の状態についても言及している。

表 3.3.3-1 状態変遷表から抽出された重要要素と不確実性のまとめ[10]

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

3) シナリオ設定における重要要素と不確実性の抽出

ガス発生の影響評価シナリオは、図 3.3.3-3 に示す流れに沿って、放射性核種の閉じ込め機能としての移行抑制のために設計された人工バリアシステムの安全機能に対するガス影響を定量的に評価するために、状態変遷の理解に基づき、統合 FEP を用いて構築され、蓋然性を考慮した分類が実施される。本節では、これらの作業の中からシナリオ設定上重要な要素を不確実性ととも抽出する。

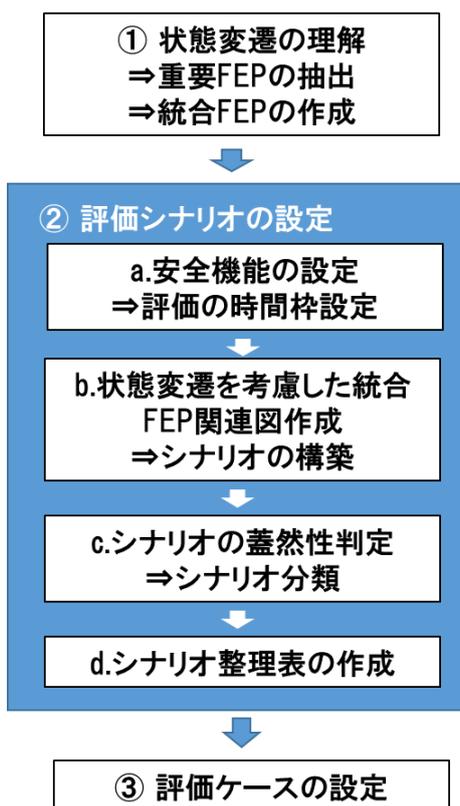


図 3.3.3-3 評価シナリオ設定フロー[10]

評価シナリオ設定フローの各作業における重要要素を以下に示す。

- a. 安全機能の設定：蓋然性の高い放射性核種の移行モードに対応して設計した人工バリア各要素に期待する安全機能（低透水性など）を維持期間とともに設定する。
- b. シナリオ構築：安全機能とその維持期間を対象に、状態変遷の重要要素を考慮して統合 FEP の関連図を作成することで複数のシナリオを構築する。
- c. シナリオ分類：構築した複数のシナリオを対象に、統合 FEP に含まれるプロセスやイベントの発生確率と想定される影響の大きさを考慮してシナリオを「基本」「変動」「稀頻度」に分類する。
- d. シナリオ整理表の作成：安全機能の評価期間に対応した基本シナリオの展開を、統合 FEP 関連図を用いて示し、評価上考慮すべき事項を記述することで次段階の評価ケースの設定につなげる。

評価シナリオ設定に係る作業の重要となる要素と関連する不確実性を整理した結果を表

3.3.3-2 に示す。

表 3.3.3-2 評価シナリオ設定作業の重要要素と不確実性の整理[10]

シナリオ設定	重要要素	不確実性
a. 安全機能の設定	<ul style="list-style-type: none"> ・処分環境に対応した安全概念 ・安全概念に対応したバリア機能 ・バリア機能を具現化した設計仕様 ・定置段階での初期品質 ・設計上の機能維持期間 	<ul style="list-style-type: none"> ・処分環境のゆれ幅 ・バリア間の相互作用 ・機能を喪失させる因子 ・劣化・変質プロセス
b. シナリオ構築	<ul style="list-style-type: none"> ・媒体の状態変遷に伴うガス移行挙動の時系列的変化とその時間枠の設定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス発生速度 ・核種移行との複合プロセス ・ガス移行挙動状態変遷の時期
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の発生確率(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) ・想定される核種移行への影響 	<ul style="list-style-type: none"> ・媒体の変遷予測とガス移行モードと状態変遷の組合せとその発生確率の設定 ・核種移行への影響程度の推定
d. シナリオ整理シートの作成	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス発生と移行モードの変遷 ・核種移行との相互作用 ・ガス・核種移行媒体の状態変遷 ・周辺環境の変遷 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス発生予測 ・ガス挙動モードの変遷時期 ・媒体の状態変遷の予測 ・核種移行との複合プロセス

4) 評価ケース設定とモデル選定における重要要素と不確実性の抽出

シナリオ分類をもとに作成したシナリオ整理シートを用いて、解析評価のための評価ケースを設定し、対応する評価モデルおよびプロセスモデルを選定する作業における重要要素と不確実性を抽出する。評価ケースとモデル選定は図 3.3.3-4 に示す手順と作業で設定する。

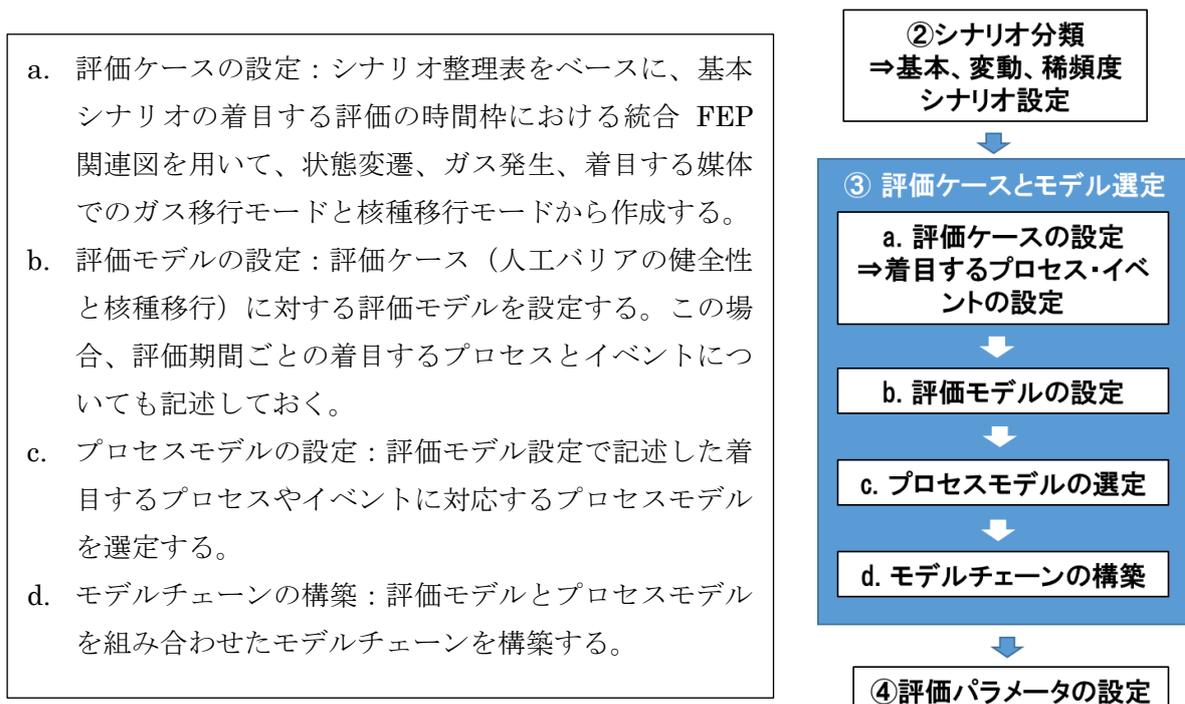


図 3.3.3-4 評価ケースとモデル選定の作業

表 3.3.3-3 評価ケースとモデル選定の重要要素と不確実性の整理[10]

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

5) 評価体系上の重要要素のまとめと現状の知見からの評価

状態変遷の理解から評価ケース設定までの作業における重要な要素は、以下の項目に集約することができる。

- ▶ 処分環境下でのガス発生予測
- ▶ 媒体の状態変遷とガス挙動
- ▶ バリア内の境界条件・界面の変化
- ▶ ガス挙動と放射性核種の複合プロセス

それぞれの項目に対する現状の知見（平成 27 年度までの知見の収集結果）から、重要要素に対する認識の程度を以下に評価することができる。重要要素に対する認識の程度が評価ケースで扱わねばならない不確実性となる。

a. 処分環境下でのガス発生予測

ガス発生量と速度および種類は、発生源がおかれた環境によって異なる。特に水理環境と化学環境の変遷および発生源周辺の間隙量により発生速度は変化することが報告されている（参考文献）。室内試験等では、処分環境を模擬した腐食試験が実施されているが、複合的な環境や環境の変化は考慮されていない。

b. 媒体の状態変遷とガス挙動

TRU 処分概念を対象としたバリア内構成要素の劣化・変質プロセスについては多くの研究が実施されているが、結果としての特性変化に係る試験データは限定されており、変化した媒体でのガス挙動に係る試験の事例はない。

c. 境界条件・界面の状態

バリア内の環境（THMC）や界面の状態は、時間の経過とともに変化していく。これらの環境の変化がガス発生プロセス、媒体の劣化・変質、放射性核種移行との複合作用に影響を与えることが推定されるが、これらの関する知見は極めて少ない。

d. ガス挙動と放射性核種挙動の複合プロセス

統合 FEP の関連図で示されるバリア内のガス挙動と核種移行との関係については、間隙水を介しての複合プロセスとなるが、評価ケースとモデル選定ではこれまで別個に扱われており、複合的なモデル化はなされていない。

表 3.3.3-4 重要要素に対する評価例[10]

重要要素	現状の知見	評価
異なるガスの発生要因と発生源の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・金属腐食、放射性分解、微生物分解が取り上げられ、室内試験での発生プロセスの理解が進んでいる。 ・処分環境における複合体での試験情報は無い。 	<p>⇒処分環境、複合体でのガス発生メカニズムに関する知見は集約されていない。また、ガス発生源の時系列変化に係わる情報がない。</p>
媒体の状態変化とガス挙動	<ul style="list-style-type: none"> ・媒体(廃棄体、容器、充填材、コンクリート躯体、ベントナイト、EDZ)の個々の材料についての状態変遷に関する変質・劣化の試験結果は存在するが、そこでのガス挙動に係る知見はない。 	<p>⇒劣化・変質により変化した媒体でのガス移行の知見はない。 ⇒複合体としての化学環境の変化の知見はない。 ⇒マイクロでのガス挙動に関するエビデンスは集約されていない。</p>
境界条件・界面の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・処分環境に係る知見やバリア仕様についてはレファレンスとして設定されている(TRU2次レポートなど)。 ・界面でのガス挙動の試験は実施されている。 	<p>⇒化学環境(pHやEh)が時間の経過とともに媒体の変質・劣化に伴いどのように変化していくかの知見が少ない(ガス発生速度にも影響)。</p>
ガス移行と放射性核種移行の複合プロセス	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス移行挙動については、室内試験をもとに現象理解が進んでいる。 ・核種移行については単純化された状態設定が用いられている。 	<p>⇒ガス移行と核種移行との複合プロセスに関連する知見は集約されていない。</p>

安全評価上重要となる要素についての現状での知見は、全体的に限定されており、特に時間の経過とともにその情報量は急激に少なくなっている。これらの知見の欠如が評価上の不確実性増大の要因となる。解析評価を行う場合、このような知見の欠如による不確実性をどのように取り扱うかが技術上の課題となる。

6) 安全評価体系における不確実性の取扱い

前節で言及した重要要素に関する知見の欠如による不確実性は、

- ・ ガス発生環境に係る不確実性
- ・ 媒体の状態変化に伴う特性変化に
- ・ 媒体変遷とガス挙動との複雑系に伴う不確実性
- ・ 媒体中の境界条件や界面の変遷とそこでのガス挙動に係る不確実性
- ・ ガス挙動と核種移行挙動の複合プロセスに係る不確実性

等にまとめることができる。安全評価体系における「場と現象の理解」の知見の不足によって生ずるこれらの不確実性は、シナリオ設定で専門家の判断としての状態遷移が構築され、評価ケース設定上での場合分けと対応するモデル作成、あるいはパラメータ設定でのゆれ幅として取り扱われる。これらの重要要素に付随する不確実性の伝播を図 3.3.3-5 に模式的に示す。

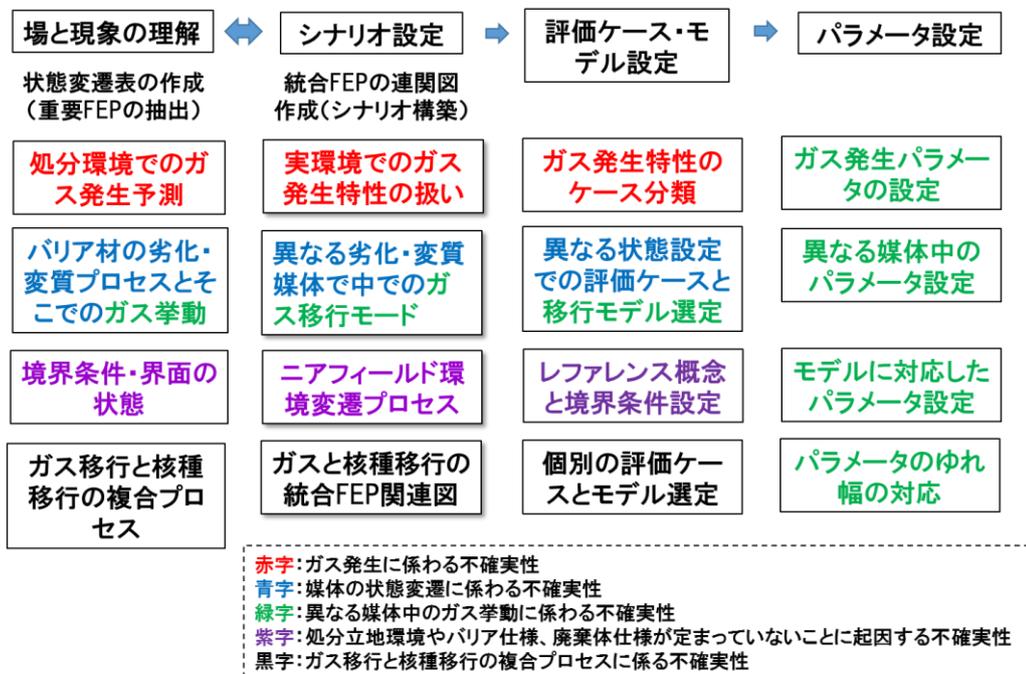


図 3.3.3-5 重要要素の不確実性の伝播

上記で取り上げた 4 項目の重要要素に係る不確実性は、主として場と現象の理解が不十分であることから発生している。これらの安全評価上の重要要素と不確実性に対するシナリオ設定、評価ケース設定都モデルの選定およびパラメータ設定での現状での対応策例を表 3.3.3-5 に示す。

a. ガス発生

ガス発生は、その発生源の特徴や環境条件によって大きく異なることが知られている。現状の知見は、個々の廃棄体に含まれる金属材料、有機物および放射エネルギーに着目し、腐食によるガス、有機物分解でのガス、放射線分解によるガスに焦点が当てられ、処分環境が飽和された状態での発生量を推定している。これらの個々のプロセスについては多

くの試験や研究がなされているが、人工バリア内での廃棄体内の状態、周辺環境の変化、間隙の分布など実機での状態や境界条件については考慮されていない。

b. 媒体の状態変遷とそこでのガス挙動

ニアフィールド内には様々な特性を有する構造体や環境が分布している。これらは、初期の状態が周辺環境を含めて時間の経過とともに変化していくことが劣化・変質の研究から指摘されている。ガス挙動や核種挙動にとってバリア等の構成部材とその環境が相互に関係しつつ特性等が幾何学的な変化とともに進展していくことは移行経路にとって重要な要素となるが、その形態や特性変化についての知見は極めて少ない。

c. 媒体中のガス挙動

媒体の劣化・変質により間隙や空隙が発生することでガスの移行挙動は大きな影響を受ける。特にバリア内の幾何学的な変化は、ガスの蓄圧やベントナイトへの浸入モードに影響する。また、ベントナイトバリアのように、ガス圧力により移行モードが変化したり、劣化・変質で異なる特性の物質になるような状態変遷については、一つのモデルでは再現できていない。

d. 地質環境や処分概念等の仕様が未決定

ガスの発生量や発生速度は、移行モードは構成要素の仕様や形状に大きく影響を受ける。特に、要素間の空隙や間隙の存在は、ガス発生とその移行挙動に密接に関係するが、現状では仕様が決定されていないため、モデル上はパラメータ的に扱うしか方法がない。

e. ガスと放射性核種移行の複合プロセス

ガスの影響は、人工バリアの安全機能の損傷と放射性核種移行を促進する可能性が指摘されている。安全機能の損傷は核種の放出量に直接的につながり、ガス圧による核種を溶存した間隙水の破過における放出は拡散場での核種移行を前提としている従来の量を増大させる。このような現象については、ガス影響評価と核種移行評価として個別に検討されており、複合プロセスとして取り扱われた事例はない。

安全評価上重要と考えられる要素は、状態変遷に係る知見が不十分であることに起因した不確実性につながっている。これらの不確実性を対象に、シナリオ設定、評価ケースとモデルの選定およびパラメータ設定で取り扱う方策を表 3.3.3-5 に整理した。

表 3.3.3-5 重要要素の不確実性への対応例

不確実性	①場と現象の理解からの不確実性	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	・処分環境下でのガス発生予測	⇒ガス発生は統合FEPの一つとしてシナリオに組み込み(変化は対応せず)	⇒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	⇒ガス発生特性(発生速度)をパラメータとして対応
媒体の状態変遷	・処分環境下での媒体の変質・劣化に伴う特性変化	⇒状態変遷は特性変化に伴うシナリオ分類として対応	⇒評価ケースの分類で対応とモデル選定	⇒媒体中の間隙率のゆれ幅として対応
異なる媒体中のガス挙動	・複合体での媒体の特性変化とそこでのガス挙動	⇒ガス状あるいは間隙水に溶存し気液二相流としての扱い	⇒同上	⇒異なる媒体の試験結果に基づく設定
処分立地環境・廃棄体仕様等が未決定	・廃棄体の特性 ・人工バリア材特性 ・周辺岩盤の特性と環境条件	⇒場の理解やレファレンス仕様に基づく境界条件や前提条件としての扱い	⇒レファレンスの環境設定や概念仕様を対象としたモデル化	⇒現状の知見に基づく特性試験、仕様に基づく設定
ガスと核種移行の複合プロセス	・ガスと核種移行の相互作用	⇒統合FEP関連図に基づきシナリオ分類上で相互作用としての扱い	⇒ガス移行と核種移行個別のプロセスモデル選定で対応	⇒モデルに対応したパラメータ設定

7) 解析的評価で着目する重要要素と不確実性への対応

本節では、現状アプローチが可能な解析手法を前提として、前節で整理した重要要素と不確実性への具体的な対応策を検討する。

a. ガス発生に関して：

処分環境におけるガス発生に伴う不確実性は優先度の高い技術課題であるが、新たな知見を得るためには複合系の試験を含めて数年以上の期間が必要となる。現状での対応策は、前提とする廃棄物を対象に物理的に発生量と速度が推定できる範囲を対象に、複数の解析ケースを設定し、解析上は発生速度のゆれ幅として扱う。

b. 媒体の状態変遷に関して：

複合媒体としての処分環境における時系列的な状態変遷が、ガス挙動に与える影響予測に伴う不確実性への課題には、各媒体の変質・劣化試験と再現する複合モデルの開発と実証が必要となり、解決には数年以上の期間がかかる。現状での対応として、ガス挙動解析のモデルでは、充填材等の劣化現象を間隙率の変化として扱い、ベントナイト材料では自己修復性を有するケースと変質等で自己修復性が喪失したケースに分類して扱う。

c. 媒体中のガス挙動に関して：

複合媒体内でのガス挙動に関する不確実性に関する技術解題への対応では、形状効果や境界条件の影響も含めて把握する必要から工学規模でのシステム系での試験が必須となる。現状では、媒体特性は材料試験情報をパラメータとして扱い、状態の大変な変化はバリア健全時と損傷時に分け評価ケースを作成し、損傷度をパラメータとして取り扱う。

d. 処分場立地環境、廃棄体仕様等が未決定であることにに関して：

本要素の係わる不確実性は、ガス挙動の解析検討に大きな影響をおよぼすが、現状で

は仮定したサイト環境や前提とする廃棄体の仕様をベースに状態変遷を推定し、モデル化やパラメータ設定に反映させることで対応する。

e. ガス・核種移行の複合プロセスに関して：

ガス・核種移行の複合プロセスへのアプローチは、人工バリアの成立性評価におけるガス挙動を考慮した安全評価での本質的な技術課題である。複合プロセスの試験およびモデル化は着手されていないこともあり、具体的にどのような不確実性が存在するのかわについては推定するしかない。その意味で他の重要要素に対する不確実性と異なり、現象理解からスタートする必要があることから、平成 27 年度の検討では、この複合プロセスが人工バリア成立性評価のシナリオ設定作業で最も優先度の高い技術課題と選定した。

現状でできることは、ガス挙動評価と核種移行評価を個別に対応し、放射性核種を溶存した間隙水のバリア外への放出プロセスに着目したシナリオと評価ケースを設定することで対応する。放出量は、a.~d.で設定した不確実性への対応を含め、解析上のパラメータのゆれ幅、やモデルの変化を考慮して求めることを基本とする。

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(連成モデル)の概念を構築



図 3.3.3-6 シナリオ設定作業で最も優先度の高い技術課題[10]

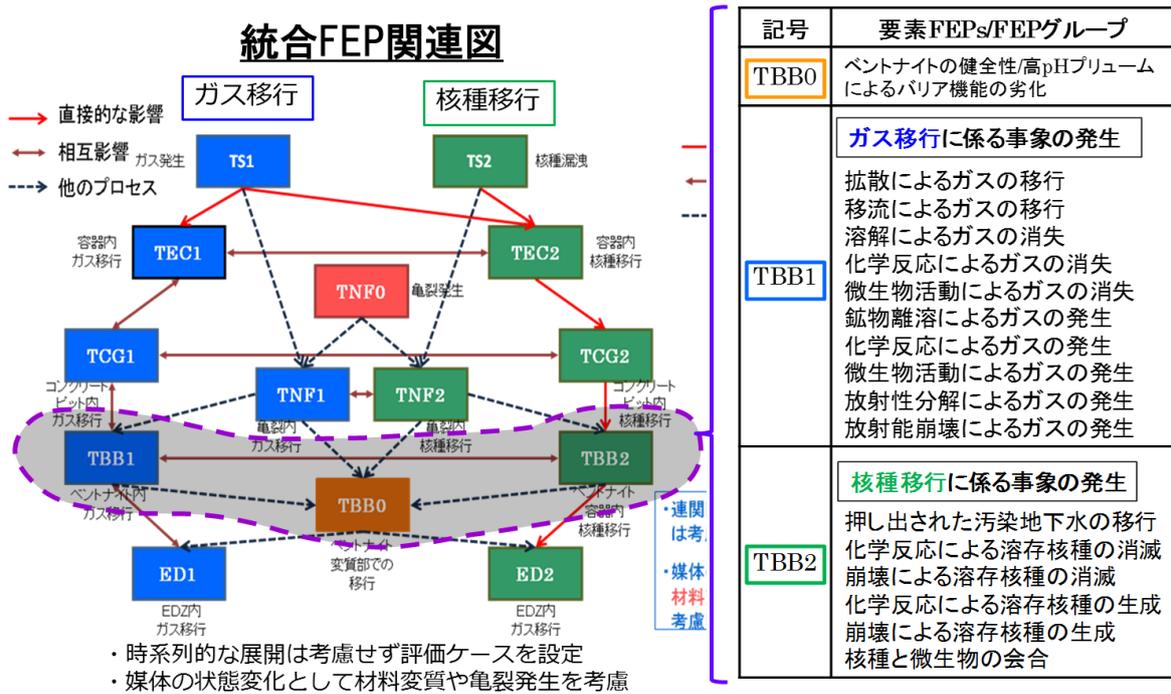


図 3.3.3-7 統合 FEP を用いた関連図における複合プロセスの扱い

人工バリアシステムの成立性の評価に資するための解析的評価のシナリオ設定では、図 3.3.3-7 に示すベントナイトバリアの健全性に焦点を当てたガス移行と核種移行の複合プロセスに係るシナリオ、評価ケース・モデル、パラメータの設定を行うこととする。

(2) 解析的評価に用いるシナリオの設定

ガス挙動を考慮した安全評価体系のうち、シナリオ設定の重要要素と不確実性分析からの人工バリア成立性の評価に資する優先度の高いベントナイトバリアの状態変遷に着目した複合プロセスに焦点をあて、解析的評価に用いるシナリオを設定する。

1) 複合プロセスに着目した統合 FEP 関連図

グループ 2 を対象とし複合プロセスを考慮したシナリオは、人工バリアの状態変遷に伴い下図に示す統合 FEP 関連図で示すことができる。このシナリオでは、バリア内が不飽和の段階、ベントナイトが変質せず自己修復性を維持する段階、および自己修復性を喪失する三つの段階を示しており、それぞれの段階でのガス移行と核種移行が複合する。

a. ベントナイトバリア内部が飽和されるまでの段階

人工バリア内に地下水が浸透してくる段階では、不飽和、酸化環境下でのガスが発生し、媒体中での蓄圧や移行が始まる。放射性核種の廃棄体容器は健全性を維持し、内部に閉じ込められた状態となっている。

b. ベントナイトバリアが安全機能を維持している段階

人工バリア内部が飽和し、還元雰囲気に移行していく段階で、腐食や劣化等で廃棄体容器は健全性を喪失し、間隙水中に放射性核種が溶出していく。腐食、有機物、放射線分解等でガスが継続的に発生し、間隙水中への溶存とガス状の気液二相流で媒体内を移行する。ベントナイト境界面とベントナイト内部に蓄圧し、ガス発生速度にも依存するがベントナイト中で破過を発生し、繰り返し間隙水をバリア外に放出する。

c. ベントナイトバリアが安全機能を喪失した段階

ベントナイトは、高 pH を溶存する間隙水がガスの影響で加速的に浸透することで変質が発生し、局地的に自己修復性を失い低透水性バリアとしての機能を喪失していく。時間の経過とともに損傷域は拡大し低透水性バリアとしての機能は喪失する。放射性核種を溶存した間隙水は亀裂媒体（あるいは多孔質媒体）中を二相流でバリア外に放出される。

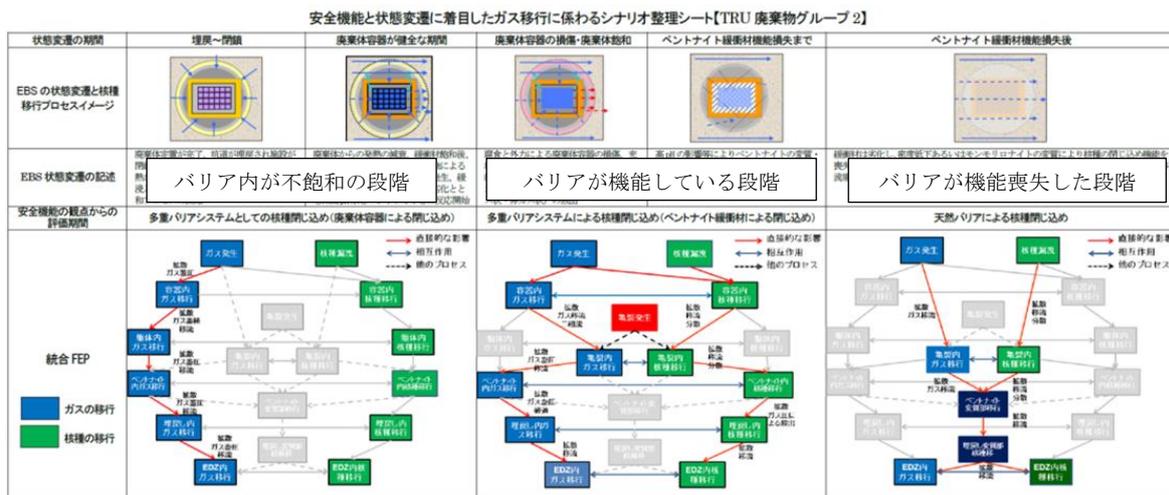


図 3.3.3-8 ガス移行と核種移行の統合 FEP 関連図[11]

2) 解析的評価のためのシナリオ設定

前節で記述したガス挙動と放射性核種挙動との複合プロセスを考慮した 3 段階のシナリオ設定と平成 28 年度に検討した放射性核種移行への影響を考慮したシナリオ分類の考え方を踏襲し、解析的評価に用いるシナリオとして、以下に示す 3 種類を設定した。

① ガス挙動が支配的となるシナリオ：ベントナイトバリアは健全性を維持している段階

人工バリア内でのガス発生により、放射性核種を溶存した間隙水が二相流でバリア外部に放出されるシナリオで、蓄圧によりバリア内での破過が発生してもベントナイトバリアは自己修復性から閉じ込め機能を維持する。

② ガス挙動が引き起こす可能性が否定できないシナリオ：ベントナイトバリアが健全性を喪失した段階

ガス発生によりバリア内部の高 pH 間隙水が二相流としてバリアに浸透することで、ベントナイトが変質し、本来有していた自己修復性を喪失し核種を閉じ込める機能を失い、間隙水が二相流でバリア外部に放出される。

③ 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：損傷後のガス発生の影響を評価するシナリオ

ガス以外の要因（例えば、断層変位、バリア内部の変形など）でベントナイトバリアが物理的な損傷を受け、核種閉じ込め機能を喪失することで、放射性核種を溶存した間隙水が二相流の移流場でバリア外に放出される。

上記のシナリオの内、②と③ではベントナイトの損傷モードが異なるが、基本的にベントナイトバリアが安全機能を喪失した状態でのガス挙動と核種挙動の複合プロセスとして取り扱うこととし、解析的評価では、図 3.3.3-9 に示す①と②を評価シナリオとして設定する。

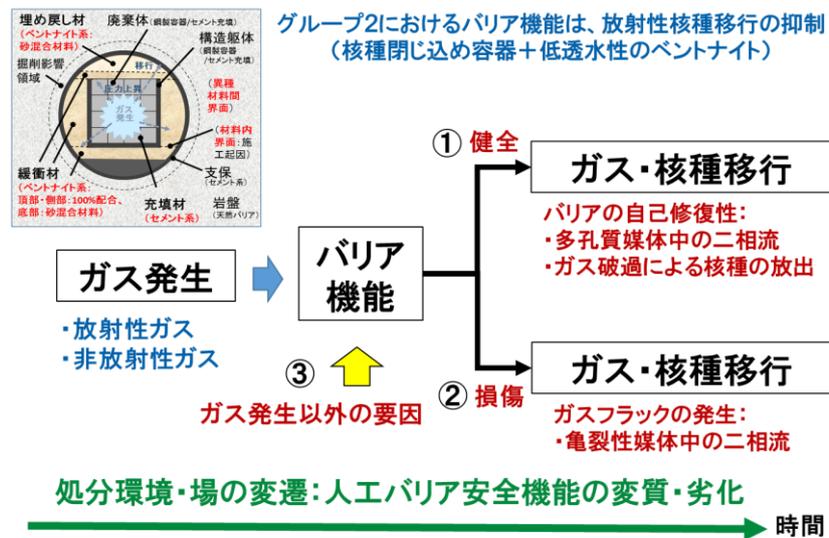


図 3.3.3-9 解析的評価に用いる複合プロセスのシナリオ分類例

3) ガス挙動が支配的なシナリオ：ベントナイトバリアが安全機能を維持している段階

飽和した人工バリア中の間隙水に溶出した放射性核種は、ベントナイトの低透水性機能が健全であれば、バリア外には拡散で移行していくのが核種移行の基本シナリオとされている（TRU2 次レポート他）。このような定常的な環境において、ガス挙動が支配的となるシナリオは、バリア内で発生したガスにより放射性核種を溶存した間隙水がベントナイトバリア中を二相流あるいは破過により放出されるとしたシナリオである。すなわち拡散での移行に二相流や破過での核種の放出が追加されるシナリオとして位置付けられる。

このシナリオで対象として現実的なプロセス、着目する重要統合 FEP、ベントナイト中での複合プロセスの模式図を以下に示す。赤点線で囲んだプロセスがガス圧の蓄積により繰り返し発生する。

【現実的なプロセス】継続したガス発生（放射線分解と腐食等）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・沈殿**）

- ⇒ **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**
- ⇒ 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、二相流が支配する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

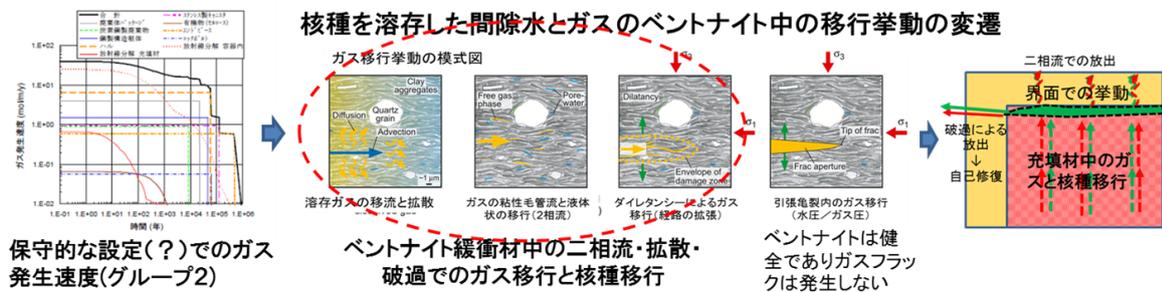


図 3.3.3-10 ガス挙動が支配的なシナリオの構成要素[2]

4) ガス挙動が引き起こす可能性が否定できないシナリオ：ベントナイトバリアが健全性を喪失した段階

この段階に相当する核種移行解析はこれまで実施されてきていない。ベントナイトバリアの安全機能を喪失する現象については、研究段階にあることも起因するがその状態や程度に係る知見はほとんどない。ベントナイトの内側の間隙水は周辺のセメント材料からのカルシウム溶脱により相当高い pH 環境になっていると推定される。ガス発生に起因するベントナイトバリアの安全機能損傷については、ガス破過時の高 pH 間隙水のバリア内の通過や二相流でのベントナイトバリア中への浸透現象を考慮するとベントナイトが局地

的に変質し、自己修復機能を喪失する可能性が否定できないことから、機能を損傷した系での核種移行プロセスとガスによる二相流での核種移行の複合プロセスを評価シナリオとして設定した。このシナリオの現実的なプロセスと重要な統合 FEP およびベントナイト中での挙動の模式図を以下に示す。下図では一度ガスフラックが発生するとその状態が継続するイメージとなっている。

- 【現実的なプロセス】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移動することで、ベントナイトに局地的な変質領域が発生し、自己修復性を喪失
⇒ガスの蓄圧により自己修復性を損傷したベントナイトバリア中にガスフラックが発生し、連続した亀裂媒体中の移行経路が形成
⇒連続した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、自己修復性損傷、ガスフラック、バリア内移行経路発生

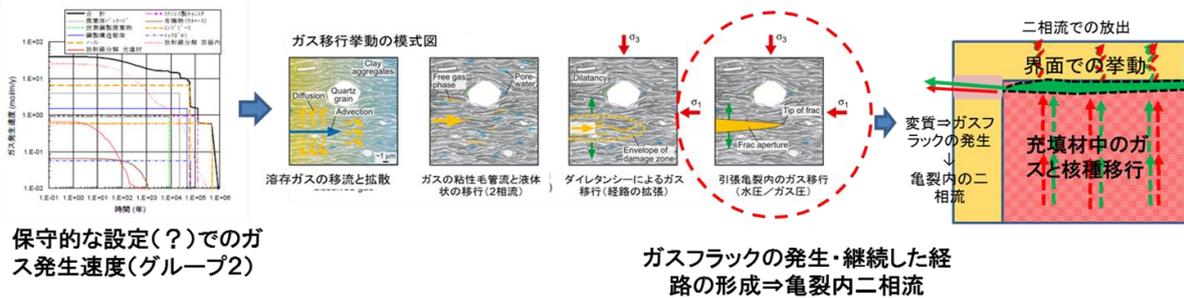


図 3.3.3-11 ガス挙動が引き起こす可能性が否定できないシナリオの構成要素[2]

5) ガス挙動と核種挙動の複合プロセス・インフルエンス・ダイアグラム

シナリオ設定後、評価ケースとモデル選定作業につなげていくには、前述の二つのシナリオでの重要 FEP を用いたプロセス・インフルエンス・ダイアグラム (以下「PID」という) を作成し、それぞれの挙動がどのように関連しているかを理解する必要がある。PID は、図 3.3.3-12 に示すように時系列的に事象やプロセス等の発生を相互の関係を考慮して矢印で結びつけるものであり、ガス挙動に関してはガス発生ソースと移行経路を、放射性核種については、廃棄体容器損傷後の間隙水への溶出とバリア外への拡散移行のプロセスを示している。

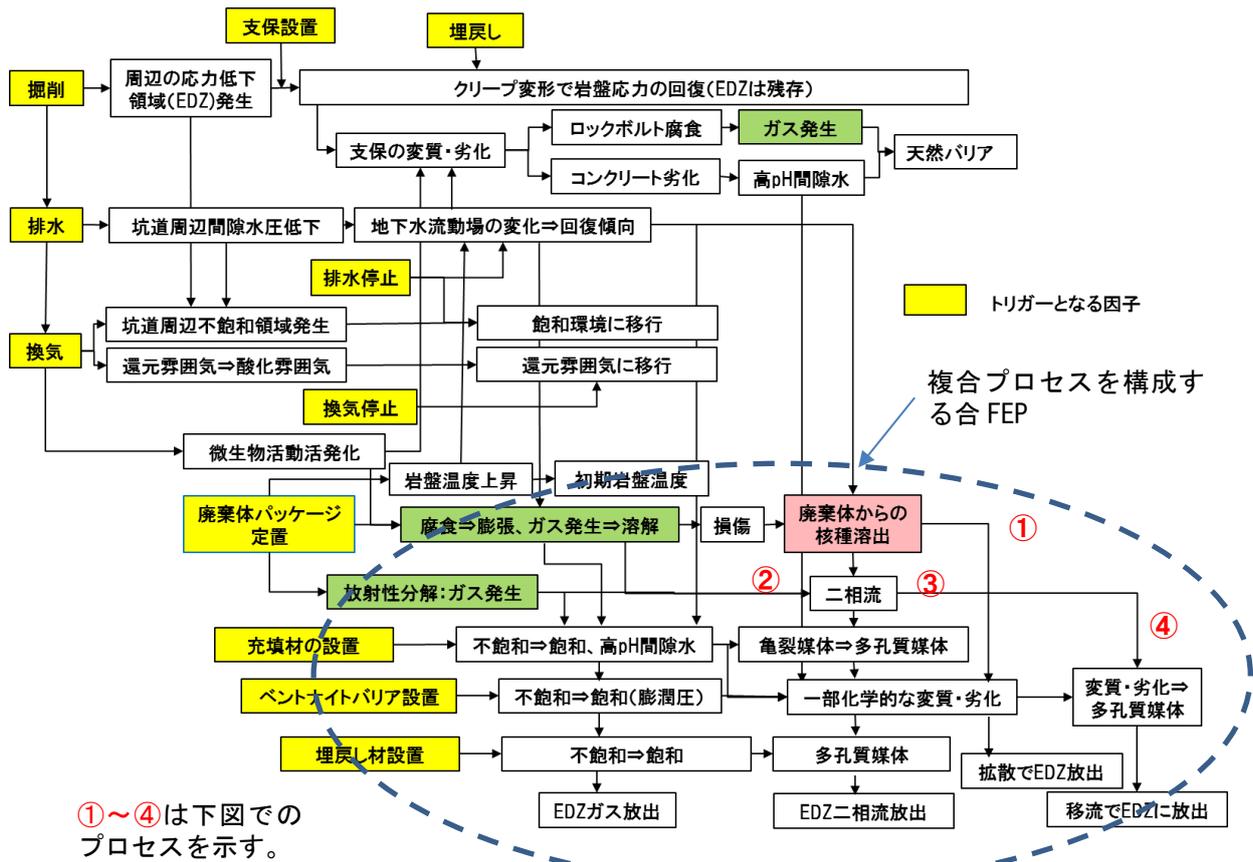


図 3.3.3-12 ガス挙動と核種移行挙動のPID例

6) 複合プロセスのモデルチェーンのイメージ

ガス発生に係る挙動プロセスと核種移行を扱うPIDの青点線内を対象とし、評価で考慮すべき複合プロセスのモデルチェーンのイメージを下図に示す。

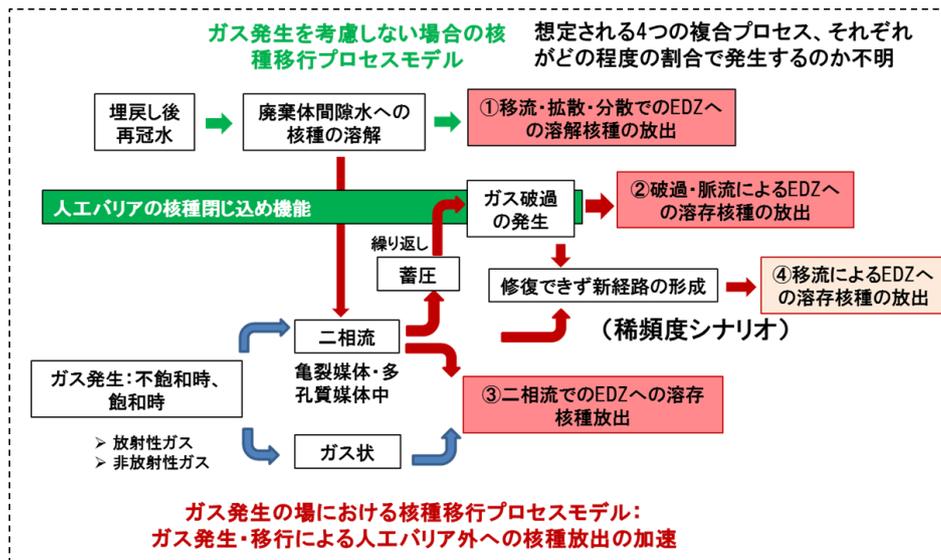


図 3.3.3-13 複合プロセスのイメージ化

複合プロセスのイメージで取り扱っているのは、ガス発生の影響で人工バリア外への放射性核

種の放出量が増える可能性のあるプロセスを単純化したモデルチェーンとして表わしている。

- (ア) ガス発生の影響を考慮しない場合：人工バリア内の間隙水に溶出した放射性核種は移流・拡散・分散により EDZ へ放出される。グループ 2 ではベントナイトが低透水性の機能を維持している場合は、拡散場として核種が移行する。
- (イ) ガス破過により放射性核種の移行が促進される場合：人工バリア内で発生したガスは、ガス状あるいは間隙水に溶存した気液二相流としてバリア内を移行し、境界面や低透水バリア内で蓄圧する。圧力がベントナイト中のしきい値（外側の水圧とベントナイト膨潤圧の和）を超えると破過を発生し、放射性核種を溶存した間隙水が EDZ に放出される。破過が発生したベントナイトバリアは自己修復機能を維持し、低透水性バリアとして機能する。
- (ウ) 気液二相流により放射性核種の移行が促進される場合：②と同様にガス状（放射性ガス）あるいは放射性核種が溶存した間隙水中に溶解込み、バリア内を気液二相流で移行していくことで放射性核種が EDZ に放出される。
- (エ) ベントナイトバリアが安全機能を喪失する場合：ガス破過等によりベントナイトが変質し自己修復機能が喪失し、放射性核種を溶存した間隙水が移流場で EDZ 外に放出される。（導水勾配での移流場での移行かガス圧による気液二相流での移行が卓越するかは、場の状態とガス発生量による）

7) 複合プロセスの系統的な整理：媒体のモデル化

グループ 2 を対象とした複合プロセスでガスと核種が移行するのは以下の A～D の媒体（あるいは環境）となる。これらの媒体をモデル化し、特性をパラメータとして設定することになる。

A 廃棄体パッケージ内でのガス挙動と核種の移行

ガスソースと核種ソースが格納された廃棄体パッケージ内でのガス挙動と核種の移行の關係に着目する。

B 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、初期の充填材が健全の間は、亀裂媒体中のガス移行と核種移行が連成する。

C ベントナイトバリア中と充填材の界面におけるガス挙動と核種移行

ベントナイトバリア中へのガスと核種移行を支配する内部と界面でのガス蓄圧に着目する。

D 埋戻し材中のガス挙動と核種移行

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挙動と核種移行に着目する。

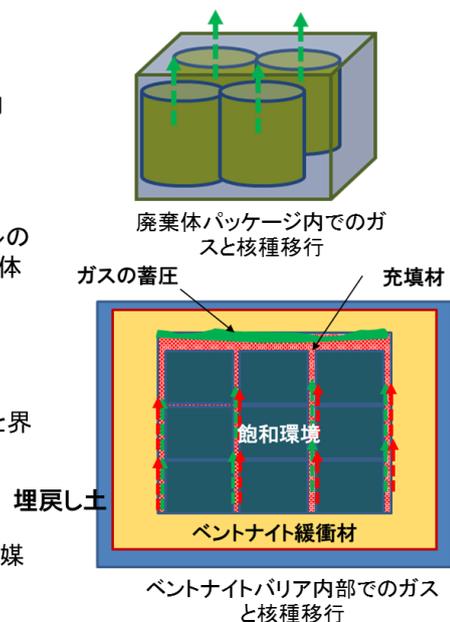


図 3.3.3-14 ガスと核種が移行する媒体（環境）

A～Dの各媒体でのガス挙動が支配的な複合プロセスは以下に整理することができる（平成28年度報告書の一部修正）。

統合FEP	ガス挙動が支配的な複合プロセス	複合プロセス関連図
<p>A 廃棄体パッケージ内でのガスと核種移行挙動</p> <p>廃棄体パッケージへの機能の設定についてはNUMOで検討中</p>	<ul style="list-style-type: none"> 金属腐食、放射線分解等からのガスは、初期の不飽和環境時から発生し、圧力によりガス状で廃棄体パッケージ外に放出される。 パッケージ内が浸入地下水で飽和に至る過程から放射性核種は水に溶出する（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地下水に溶け込む、あるいは圧力によりガス状で移行する。 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。 	
<p>B 充填材中のガスと核種移行挙動</p> <p>核種移行解析では、充填材は化学環境を提供する物質としてパラメータ化されている</p>	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	
<p>C ベントナイトバリア中と充填材の界面におけるガス挙動と核種移行</p> <p>ベントナイトバリアは長期にわたり機能を維持することを前提としている。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 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侵透して行く。 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がある。 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。 	
<p>D 埋戻し材中のガス挙動と核種移行</p> <p>核種移行解析では埋戻し材の存在は考慮していない。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ベントナイトバリア周辺の埋戻し材はベントナイト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一部は施工されており、不飽和の状態での間隙を有する。 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 	

図 3.3.3-15 媒体中の複合プロセス

(3) 解析的評価に用いる評価ケースの設定とモデルの選定

本項では、前項「(2)」の複合プロセスに着目したシナリオ設定に基づき、解析的評価に用いる評価ケースの設定とモデルの選定について検討する。

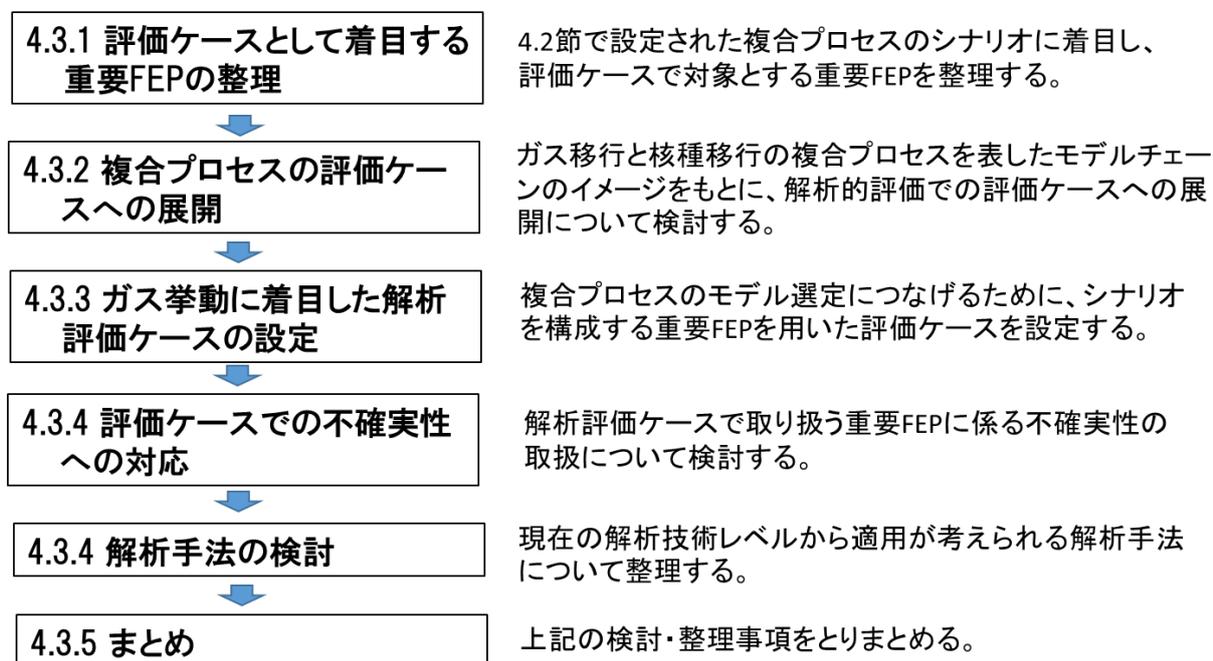


図 3.3.3-16 検討概要と進め方

1) 評価ケースとして着目する重要 FEP の整理

これまでの検討から設定された複合プロセスに係る下記の二つのシナリオをベースに、評価ケース設定において着目する重要 FEP を整理する。

- ・ ガス発生による人工バリアからの放射性核種放出の加速
 - ・ ガス移行挙動による人工バリアの機能喪失が加速され放射性核種放出量が増加
- a. ガス発生による人工バリアからの放射性核種放出の加速
- 人工バリア内の放射性核種が溶存した間隙水は、ガス発生により加圧され、溶存したガス（放射性・非放射性ガス）とともに気液二相流としてバリア外に放出される。バリア内では圧力により移行モードが変化する。その一つとして人工バリア内での蓄圧による破過により、放射性物質を含む一時的に間隙水が外部に放出される現象がある。この場合、破過後、ベントナイトバリアは、自己修復機能によりバリアとしての機能を維持することを前提とする。
- b. ガス移行挙動による人工バリアの機能喪失が加速され放射性核種放出量が増加
- 繰り返し発生するガス蓄圧による破過や脈流、およびフィンガー現象で、ベントナイトバリア内に高 pH 間隙水が二相流で浸透し、浸透する経路に沿ってベントナイトが内側から変質していくことで、自己修復性を喪失する現象を取り扱う。ベントナイトはガスフラックにより亀裂性媒体となり、亀裂媒体中の二相流で放射性核種を溶存した間隙

水が脈流としてバリア外に放出される。この場合、1) に比較して放出量は相当増加すると推定される。

2) 複合プロセスの評価ケースへの展開

前節の検討で、ガス発生と核種移行との複合プロセスは、モデルチェーンとしてイメージできることを示した。しかし、現実的には、モデルチェーンとして複合プロセスを解析できる手法が存在しないこともあり、本年度の解析的評価では、これまでの核種移行の解析とこれまでの気液二相流による間隙水の移行量を評価するケースとして展開する。

評価ケースの設定では、前節のシナリオ設定に対応し、放射性核種の掘削影響領域への放出量に対するガス影響を定量的に推定することを目的として、②、③、④の現象を対象とする。①の拡散による核種の放出はガス挙動によるものとの比較の目的で別途実施する。

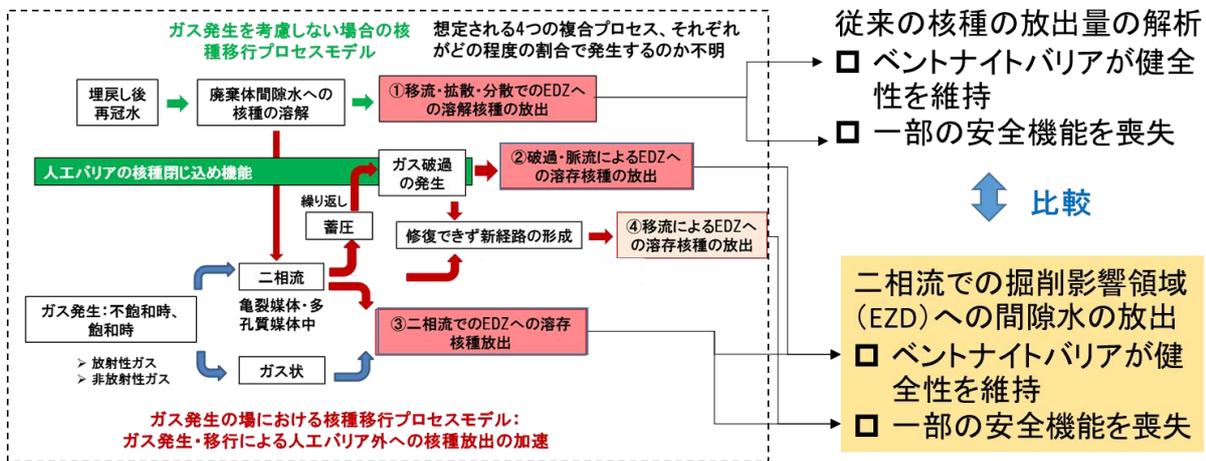


図 3.3.3-17 複合プロセスのモデルチェーンのイメージと評価ケースへの展開例

3) ガス挙動に着目した解析的評価の評価ケースの設定

前項「2)」での複合プロセスの評価ケースへの展開イメージをベースに、ガス挙動評価のシナリオに対応する評価ケースを図 3.3.3-18 に示すように設定する。

1) の核種移行を加速させる評価ケースでは、ベントナイトバリアが機能を維持することを前提に、これまでの実施してきた気液二相流でのガス移行挙動を評価する。

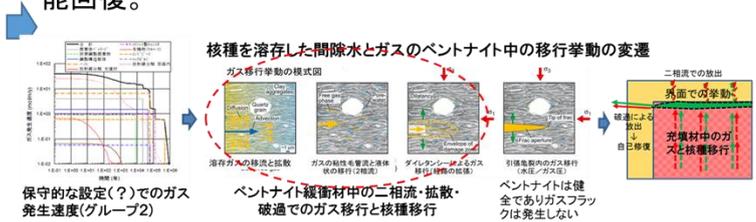
2) では、ベントナイトバリアが局地的に機能を喪失し、気液二相流として間隙水が放出される評価ケースを設定する。

1) ガス発生による人工バリアからの放射性核種放出の加速シナリオ

人工バリア内の放射性核種が溶存した間隙水がガス発生により加圧され溶存したガス(放射性・非放射性ガス)とともに二相流としてバリア外に放出される。また、人工バリア内での蓄圧による破過現象により、放射性物質を含む間隙水が外部に放出される現象で、ガスにより放射性核種の放出が加速される。

【評価ケース1】

ガス発生⇒人工バリア内に蓄圧⇒放射性核種が溶出した間隙水が二相流でバリア内を移行しバリア外に放出、蓄圧による破過発生。破過部は自己修復性で機能回復。



2) ガス移行挙動による人工バリアの機能喪失が加速され放射性核種放出量が増加シナリオ

ガス圧による高pH間隙水がベントナイトバリア内に浸透し、ベントナイトが内側から変質していくことで、バリアとしての機能を喪失し、放射性核種が二相流として移流で放出される。この現象は人工バリアの状態変遷がガスにより促進される現象となる。

【評価ケース2】

ガス発生⇒人工バリア内で蓄積⇒バリア内部のセメント系材料からの高pH間隙水が二相流でベントナイトバリア内に浸透⇒局所的な劣化・変質の加速⇒破過後の自己修復性を喪失⇒移流場での放射性核種を含む間隙水が二相流で放出。

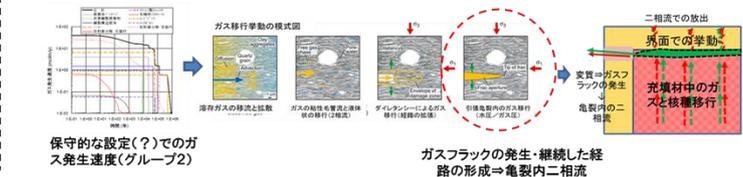


図 3.3.3-18 解析的評価ケースの設定例

4) 評価ケースに付随する不確実性への対応

それぞれの評価ケースに含まれる重要 FEP に係る不確実性(7 参照)への対応について、以下に設定する。

- ガス発生量に対する不確実性⇒ガス発生速度に着目し、想定しうる発生最大速度と最低速度を考慮したパラメータを設定
- 媒体の状態変遷(劣化・変質での特性変化)に係る不確実性⇒想定される範囲内での間隙率の変化をパラメータとして設定
- 間隙水の量と溶存放射性核種量に係る不確実性⇒初期状態での間隙水の量と溶存核種量はガス挙動を考慮しない状態での初期値を適用(間隙率の上層による間隙水量の変化はパラメータとして考慮)
- ベントナイトバリアの機能損傷領域の規模に係る不確実性⇒解析的評価では破過後にある大きさを有する経路としてモデル化。経路の規模は協議の上決定。
- バリア外部の地質環境条件による負荷圧の不均質性⇒今回の解析的評価では水圧は均等に作用すると仮定

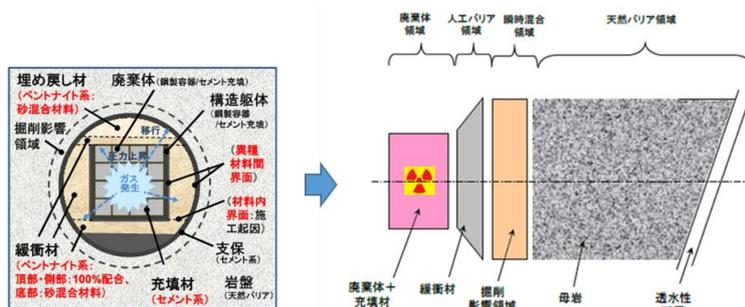
5) 解析的評価のモデルの選定

複合プロセスの評価ケースでは、ガス挙動と放射性核種挙動について、それぞれ別個に解析することを前提とした。その主な理由は、時系列的な状態変遷を考慮した複合プロセスを同時に解析できるモデルやコードはなく、核種移行解析とガス挙動解析のモデル化と解析コードが異なることによる。

a. 放射性核種移行モデルの特徴

TRU 処分におけるニアフィールドの放射性核種移行解析のモデルには以下の特徴がある。

- ▶ NUMO の NUMO TR-10-03[12]における核種移行モデルでは、図に示すように人工バリア内の廃棄体領域では、飽和環境でのソースタームの扱いとなり、内部の形状や構造および状態変遷は考慮しておらず、核種濃度の空間分布は想定せず、均質の mixing cell となっている。
- ▶ 人工バリアとしてはベントナイトバリアを対象とし、拡散支配の移行モデルで緩衝材の変質・劣化は考慮していない（健全性が維持される）。
- ▶ 掘削影響領域では、人工バリアから放出された核種が瞬時に周辺地下水と混合し、濃度分布のない均質のミキシングセルとしてモデル化されている。
- ▶ いずれの物質移行モデルは形状を考慮せず直交1次元の多孔質媒体近似モデルとしている。



グループ2の構成

図 8.4.3-1 核種移行解析においてモデル化された領域
異方性・不均質性を考慮せず直交1次元
多孔質近似モデルで核種移行を評価

ベントナイトバリアが健全であることを前提に解析

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	瞬時混合領域
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 瞬時収着分配平衡 	<ul style="list-style-type: none"> 放射性壊変 拡散 移流, 分散 収着分配平衡 	<ul style="list-style-type: none"> 放射性壊変 拡散 移流, 分散

図 3.3.3-19 放射性核種移行解析のモデル化[12]

b. ガス挙動解析モデルの特徴

これまでの検討で用いてきたグループ2のガス挙動解析モデルは以下の特徴がある。

- 気液二相流を基本としたガス移行挙動解析モデルでは、二次元 FEM で廃棄体、構造躯体、緩衝材、支保工、掘削影響領域、周辺岩盤までをモデル化し、実験等で得られたそれぞれの部材の透水係数、相対浸透率、毛細管圧力等をパラメータとし、ガスの発生速度をインプットとして再冠水完了後の排水過程を対象としてガス移行挙動解析を実施している。
- 基本的にベントナイトバリアの自己修復性は考慮していない。

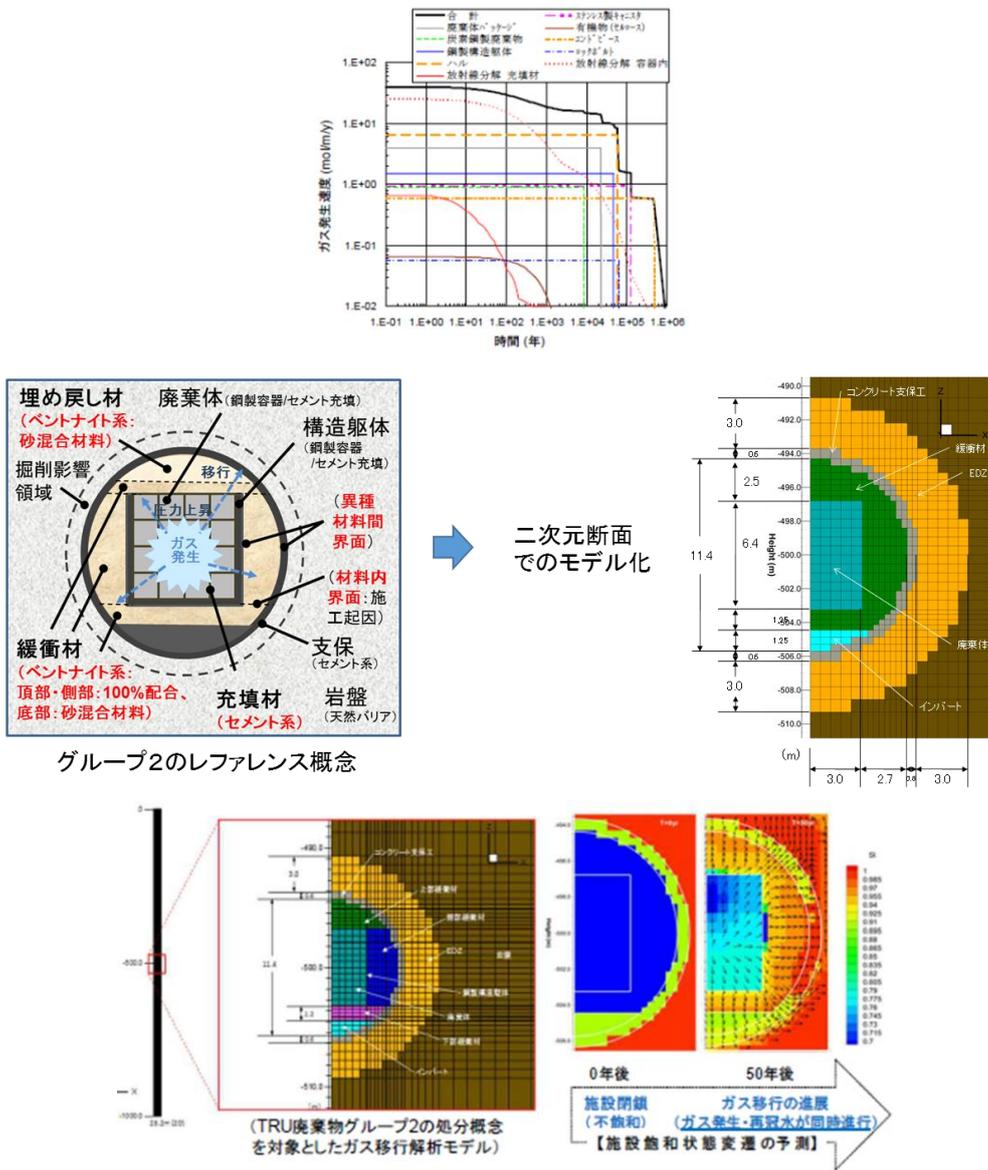


図 3.3.3-20 ガス挙動解析モデル例

6) 解析評価上のパラメータ設定

二つの評価ケースにおける不確実性に対応する方策として、解析上以下に示すパラメータを設定する。

- ▶ 処分環境におけるガス発生速度：TRU2 次レポートに示されたグループ 2 のガス発生速度を標準としてそれぞれ n 倍と $1/n$ 倍の幅を想定する。ガス発生速度のゆれ幅は、処分環境を模擬した試験により異なるメカニズムでのガス発生量を予測する必要があるが、現時点では十分な知見がないことから、変数として設定する。
- ▶ バリア内の不均質性：ガス移行量に関係するバリア内の間隙が小さい場合と大きい場合をパラメータとして設定する。バリア内の間隙量は、時間の経過とともに充填材等の変質・劣化で増加すると想定されるが十分な知見がないことから、これまで TRU2 次レポート等で扱われてきた数値をゆれ幅とする。
- ▶ ベントナイトバリアの変質域：ベントナイトバリアの水理特性がガス影響で変質する場合をパラメータとして設定する。変質域とモードについては、解析上でのモデル化で対応する。ベントナイトバリアの内側からのガス圧による変質挙動についての知見は十分でないこともあり、現時点では、ガス破過による経路に着目して自己修復性が維持される場合と変質し経路が残存する場合をパラメータとして取り扱う。
- ▶ ベントナイトバリアに作用する周辺圧力の異方性：作用荷重安全評価により対応することになるがサイトの条件に依存する。今回の解析評価では取り扱わないこととする。
- ▶ 間隙水の pH：バリア内の間隙水にセメント材料が溶出することによる pH 環境の変化をパラメータとして変質量を数値化できるが、今回の解析評価では取り扱わないこととする。
- ▶ 間隙水の溶存放射性核種量：間隙水への溶存核種量は、核種の種類・濃度限界により異なる。安全評価上は前述したように核種移行解析において均質な濃度として取り扱う。

7) まとめ

人工バリアの成立性を評価する上で重要な事象を対象として、評価シナリオを再整理し、解析的評価に用いる評価ケースと解析手法を設定してきた。解析的評価では、重要 FEP に係る不確実性要素は評価ケースに対応するモデルとパラメータで考慮することとする。

表 3.3.3-6 複合プロセスに着目した安全評価体系作業要素のまとめ

安全評価上重要な事象	評価シナリオ	評価ケース	考慮する不確実性 (パラメータとしての扱い)	評価手法
ガス発生による人工バリアからの放射性核種放出の加速	ガス発生⇒人工バリア内に蓄圧⇒放射性核種が溶出した間隙水が二相流でバリア内を移行しバリア外に放出、蓄圧による破過現象発生	1. ガス発生量(発生速度)と蓄圧メカニズム等を考慮し、二相流での放射性核種を含む間隙水の放出量を求め、拡散量と比較	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス発生量(発生速度) ・人工バリア内の不均質性(間隙率、境界) ・人工バリア外の作用圧力の異方性 ・溶存放射性核種量 	<ul style="list-style-type: none"> ・不確実性をモデルとパラメータで考慮した二相流解析 ・放射性核種の拡散移行解析
ガス移行挙動による人工バリアの機能喪失が加速され、放射性核種放出量が増加	ガス発生⇒人工バリア内で蓄積⇒セメント系材料からの高pH特性の間隙水が二相流でベントナイトバリア内に浸透⇒局所的な劣化・変質の加速⇒自己修復性を喪失⇒移流場での放射性核種を含む間隙水の放出	2. ガス発生量(発生速度)と蓄圧メカニズムを考慮し、二相流での高pH間隙水のベントナイト中への浸透量を求め、ベントナイトの変質量(低透水性の喪失)を推定し、核種の放出量を二相流で求め、拡散量と比較	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス発生量(発生速度) ・人工バリア内の不均質性(間隙率、境界) ・ベントナイトの変質域 ・人工バリア外の作用圧力の異方性 ・溶存放射性核種量 ・間隙水のpH 	<ul style="list-style-type: none"> ・不確実性をモデルとパラメータで考慮した二相流解析 ・ベントナイトバリアの変質解析 ・変質後の二相流解析

次項「(4)」以降の解析的評価において、考慮するパラメータの幅を検討し、それぞれについての検討ケースを設定する。

(4) ガス移行挙動解析の実施

本項では前項「5)」で述べた2つのモデルのうち、ガス移行挙動解析モデルに焦点を当て、そのモデルを用いた解析を行う。まず初めに対象システム・解析ケースの設定を行い、次に不確実性を考慮したガス移行解析を行った後、どのパラメータを用いたケースが核種移行率の幅を考慮する上で安全評価上重要となるかを明確にした。その後、その安全評価上重要と考えられるケースにおいて詳細評価解析を行った。

またその解析結果は、後述の「3.4 核種移行評価に係る検討成果」で行われる核種移行解析の入力データとして取り扱った。

1) 対象システムの設定

本項で対象とする廃棄体は、昨年度までと同じく第2次 TRU レポート[4]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 3.3.3-21 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、構造躯体の厚さは 0.05m である。

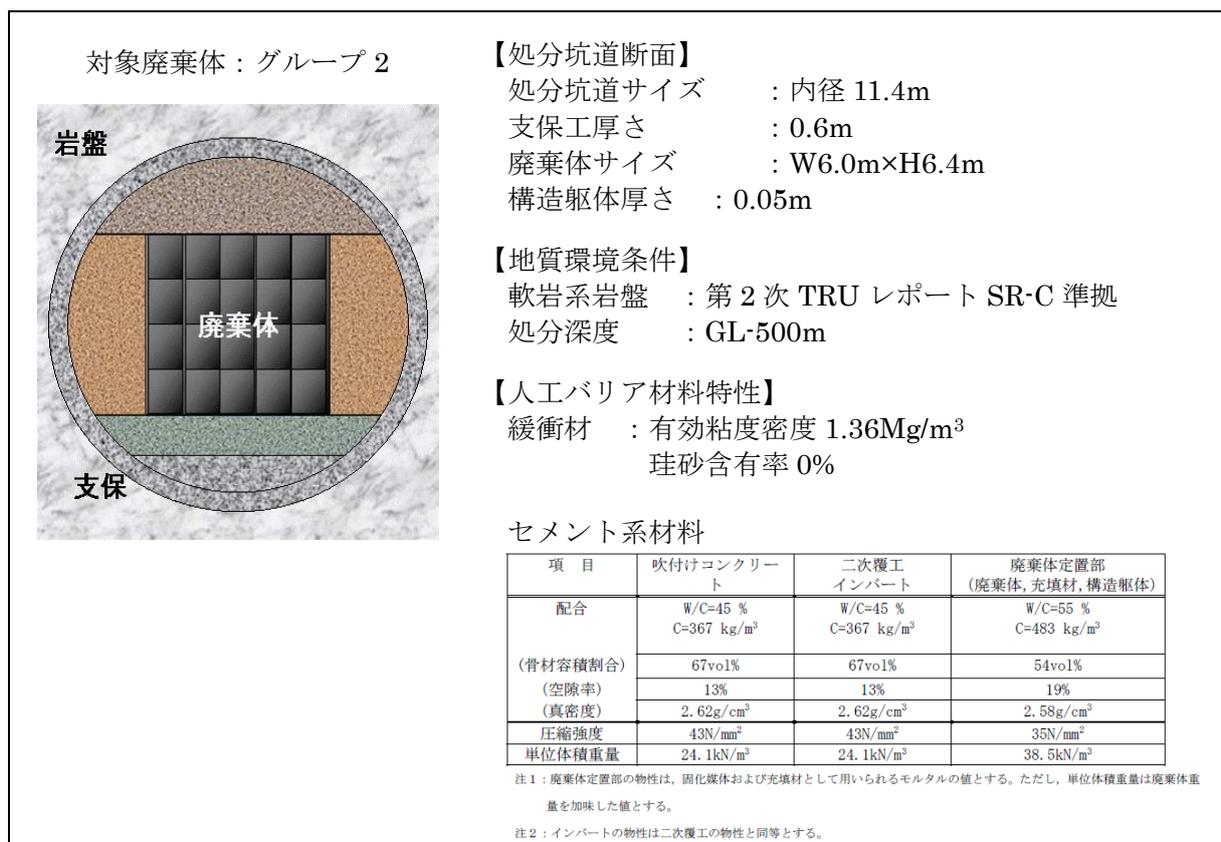


図 3.3.3-21 モデル化の対象とする処分システム

2) 解析コード

解析には、多相多成分流体を対象とした汎用地圏流体シミュレータ GETFLOWS [5]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。

3) 解析モデル

前項「1)」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と考えられる十分な範囲として、地表面から深度 1,000m までをモデル化とした。

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。不確実性を考慮したガス移行解析用モデルを図 3.3.3-22 に、詳細評価解析用モデルを図 3.3.3-23 に示す。考慮する材料は、廃棄体、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。不確実性を考慮したガス移行解析用モデルにおいては人工バリア内部の空間解像度を約 50cm とし、総格子数を 2,201 とした。また、詳細評価解析用モデルでは空間解像度は約 20cm とし、総格子数を 29,726 とした。

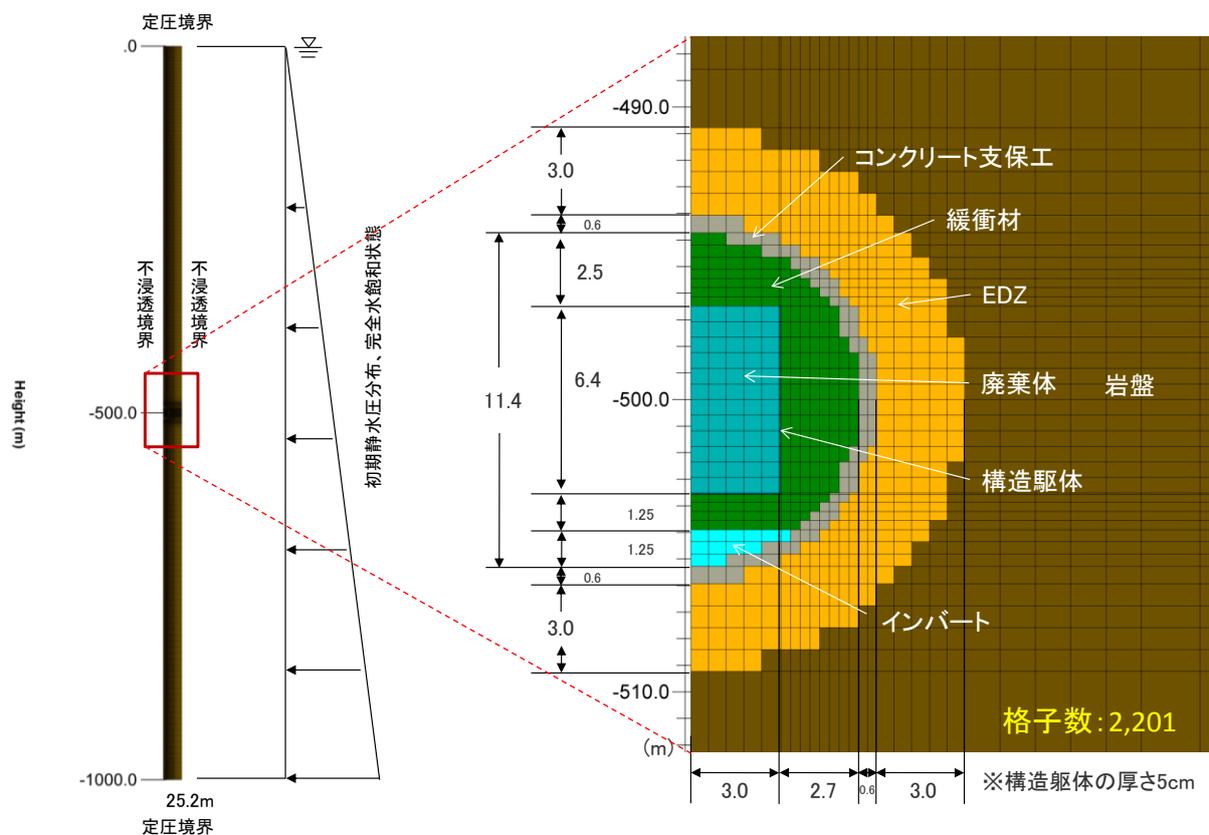


図 3.3.3-22 不確実性を考慮したガス移行解析用モデル (左：全体図、右：人工バリア周辺拡大図)

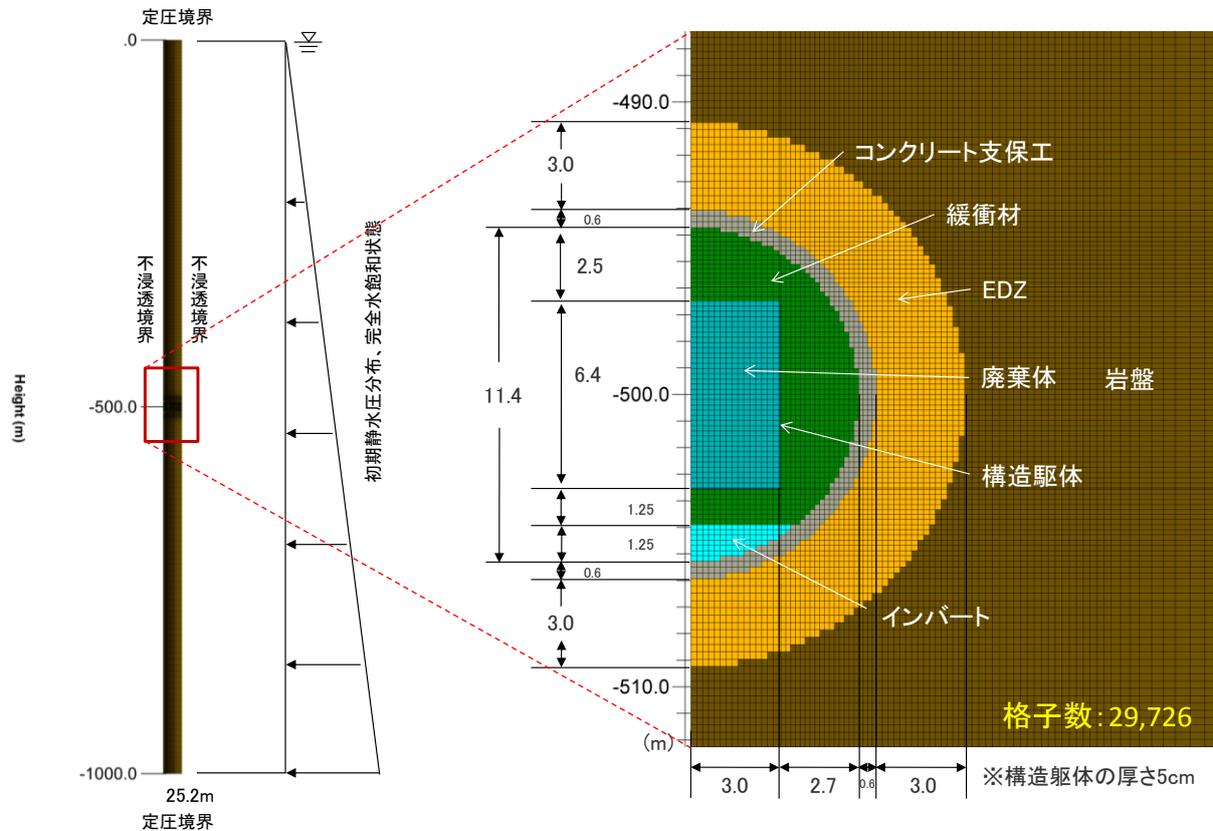


図 3.3.3-23 詳細評価解析用モデル（左：全体図、右：人工バリア周辺拡大図）

4) 解析ケース

a. ケース設定の考え方

前述の「3.3.3(1)7」や「3.3.3(2)6」で明確にした不確実性のうち、汚染水の排水(核種移行)への影響が大きいと考えられる以下の不確実性に着目した。

- ① ガス発生量に対する不確実性
- ② 間隙水の量に係る不確実性
- ③ 媒体内のガス挙動に係る不確実性
- ④ ベントナイトバリアの健全性に係る不確実性

上記の4つの不確実性をそれぞれ以下のパラメータとして考えた。

- 不確実性①→G:ガス発生量
- 不確実性②→W:廃棄体間隙率
- 不確実性③→B:緩衝材の水理物性
- 不確実性④→P:流路拡幅現象

これら4つのパラメータに対してそれぞれ幅を考慮、もしくは場合分けし、汚染水の排水量の幅を解析によって求めた。

b. ケース設定

それぞれのパラメータは下記のように設定した。

① G:ガス発生量について

- G1(ガス発生速度小ケース)として TRU2 の「ガス影響ケース」での提示値(廃棄物 Gr.2-C)を設定した。
- G2(ガス発生速度大ケース)として短期腐食を考慮し、0~0.1 年までは TRU2 の「ガス影響ケース」での提示値(廃棄物 Gr.2-C)の 10 倍の値、それ以降は 1 倍の値を設定した。
- G3 として、人工バリアからの核種移行率が目安値 (TRU-2 のガス影響ケースでの核種移行率最大値) を下回る条件を設定する。

② W:廃棄体間隙率について

- W1(間隙率小ケース)として、TRU2 の「ガス影響ケース」での提示値 $\phi=0.19$ を設定した。
- W2(間隙率大ケース)として、TRU2 の「人工バリア変質影響ケース」での提示値 $\phi=0.5$ を設定した。(これまでの知見から考えられる事象から想定される最大の間隙率(セメント系充填材中のペースト部分が流出してしまった場合に想定される間隙率)を設定)

③ B:緩衝材の水理物性について

- B1(排水量最少ケース)として、平成 28 年度報告書[2]で坑道からの累積押し出し水量が最少となった TRU2 の水理物性を設定した。
- B2(排水量最多ケース)として、平成 28 年度報告書[2]で坑道からの累積押し出し水量が最多となった FY2012_SG②の水理物性を設定した。

④ P:流路拡幅現象について

- P0 として、TRU2 と同じく流路拡幅を考慮しないケースを設定した。
- P1 として、緩衝材の流路拡幅は考慮するが、自己修復性は考慮しないケースを設定した。
- P2 として、緩衝材の流路拡幅を考慮し、自己修復性も考慮するケースを設定した。

上記パラメータ G、W、B、P を用いて不確実性を考慮したガス移行解析を総当たりで行った。その解析ケース一覧表を表 3.3.3-7 に示す。この不確実性を考慮したガス移行解析の結果、安全評価上重要と考えられるケースについては、さらに詳細評価解析を行った。

表 3.3.3-7 不確実性を考慮したガス移行解析のケース一覧

ケース名	G：ガス発生速度 (mol/m/y) 量	W：廃棄体間隙率	B：緩衝材水理物性	P：流路拡幅現象
Case-G1W1B1P0	1 倍 (全評価期間中)	0.19	TRU2	考慮しない
Case-G2W1B1P0	10 倍 (評価開始直後から 0.1 年まで)	↑	↑	↑
Case-G3W1B1P0	10 倍 (全評価期間中)	↑	↑	↑
Case-G1W2B1P0	1 倍 (全評価期間中)	0.5	↑	↑
Case-G2W2B1P0	10 倍 (評価開始直後から 0.1 年まで)	↑	↑	↑
Case-G3W2B1P0	10 倍 (全評価期間中)	↑	↑	↑
Case-G1W1B1P1	1 倍 (全評価期間中)	0.19	↑	考慮 (自己修復性無し)
Case-G2W1B1P1	10 倍 (評価開始直後から 0.1 年まで)	↑	↑	↑
Case-G3W1B1P1	10 倍 (全評価期間中)	↑	↑	↑
Case-G1W2B1P1	1 倍 (全評価期間中)	0.5	↑	↑
Case-G2W2B1P1	10 倍 (評価開始直後から 0.1 年まで)	↑	↑	↑
Case-G3W2B1P1	10 倍 (全評価期間中)	↑	↑	↑
Case-G1W1B2P1	1 倍 (全評価期間中)	0.19	FY2012_SG②	↑
Case-G2W1B2P1	10 倍 (評価開始直後から 0.1 年まで)	↑	↑	↑
Case-G3W1B2P1	10 倍 (全評価期間中)	↑	↑	↑
Case-G1W2B2P1	1 倍 (全評価期間中)	0.5	↑	↑
Case-G2W2B2P1	10 倍 (評価開始直後から 0.1 年まで)	↑	↑	↑
Case-G3W2B2P1	10 倍 (全評価期間中)	↑	↑	↑
Case-G1W1B2P2	1 倍 (全評価期間中)	0.19	↑	考慮 (自己修復性有り)
Case-G2W1B2P2	10 倍 (評価開始直後から 0.1 年まで)	↑	↑	↑
Case-G3W1B2P2	10 倍 (全評価期間中)	↑	↑	↑
Case-G1W2B2P2	1 倍 (全評価期間中)	0.5	↑	↑
Case-G2W2B2P2	10 倍 (評価開始直後から 0.1 年まで)	↑	↑	↑
Case-G3W2B2P2	10 倍 (全評価期間中)	↑	↑	↑

5) 解析条件

a. 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(°C)、地温勾配を0.03(°C/m)0.03°C/m とすると、処分坑道がある地表面から深度500m では30(°C)となるため、ここでは30(°C)の等温状態を前提とする。

理科年表より30(°C)における標準大気圧101,325(Pa)での水の密度 ρ_{w0} を995.65(kg/m³)、粘性係数 μ_{w0} を 0.797×10^{-3} (Pa s)とし、以下の式により水圧の関数として取り扱う。

$$\rho_w = \rho_{w0}(1 + C_f(P_w - P_0)) \quad (3.3.3-1)$$

$$\mu_w = \mu_{w0}(1 + C_\mu(P_w - P_0)) \quad (3.3.3-2)$$

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/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)、参照圧力(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)、参照圧力には標準大気圧と同じ101,325(Pa)を設定した。

理科年表より30(°C)における標準大気圧101,325(Pa)での空気の密度1.165(kg/m³)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 8.097×10^{-2} (kg/m³)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 9.007×10^{-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。

$$\mu_{g0} = \mu_{20} \left(\frac{T_{20} + C}{T + C} \right) \left(\frac{T}{T_{20}} \right)^{3/2} \quad (3.3.3-3)$$

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(°C)における値を示す。 $\mu_{20} = 8.8 \times 10^{-6}$ (Pa 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。

b. 水理物性

不確実性を考慮したガス移行解析、及び詳細評価解析における材料毎の水理物性の一覧を表 3.3.3-8 にまとめた。廃棄体の有効間隙率において $\phi = 0.19$ が W1 ケース、 $\phi = 0.5$ が W2 ケースに対応し、緩衝材の物性において TRU2 が B1 ケース、FY2012_SG②が B2 ケースに対応する。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 3.3.3-9、表 3.3.3-10 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 3.3.3-24～図 3.3.3-27 に示す。また、B1P1 ケース、B2P1 ケース、B2P2 ケースでは流路拡幅を考慮する。B1P1 ケースの空隙損傷モデルパラメータは、ガスが侵入するとすぐに破過するよう設定したパラメータで、B2P1 ケース、B2P2 ケースの空隙損傷モデルパラメータは、どちらも FY2012_SG②で同定したパラメータである。用いた空隙損傷モデルパラメータを表 3.3.3-11 に示した。

表 3.3.3-8 水理物性一覧

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 /0.5	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 B1 ケース (TRU2)	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												
緩衝材 B2 ケース (FY2012_SG②)	水	3.83E-20	vG	0.364	0.0	—	2.01	vG	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	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 3.3.3-9 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 3.3.3-10 毛細管圧力曲線を表現する構成モデル

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

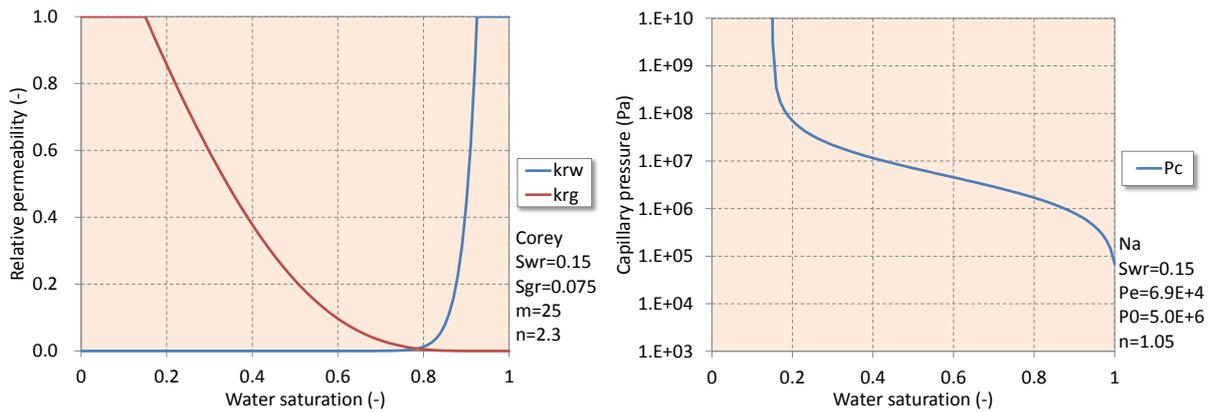


図 3.3.3-24 相対浸透率と毛細管圧力曲線（廃棄体、構造躯体、支保工、インバート）

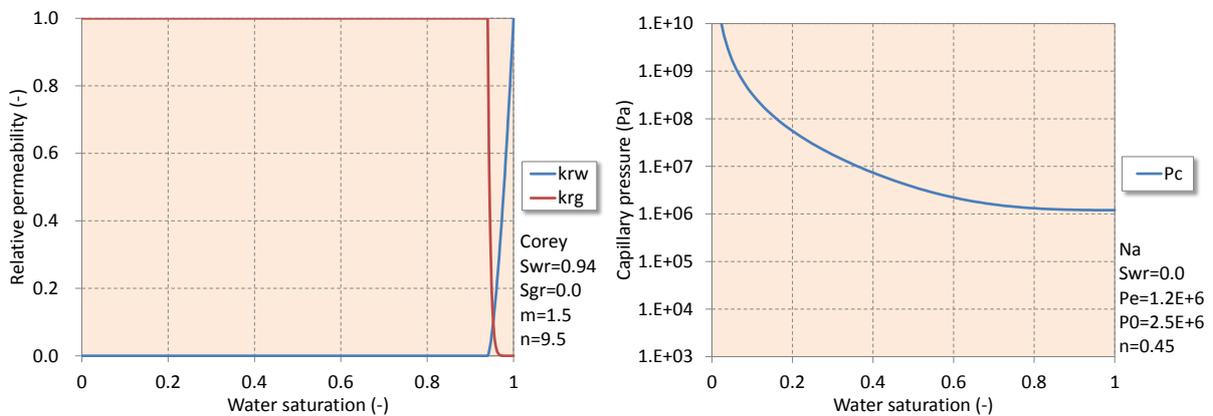


図 3.3.3-25 相対浸透率と毛細管圧力曲線（緩衝材）（B1 ケース）

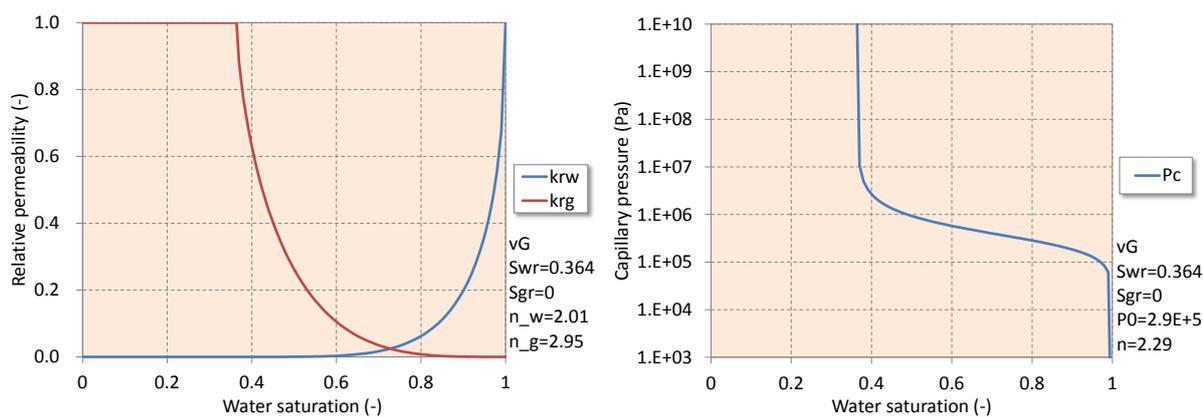


図 3.3.3-26 相対浸透率と毛細管圧力曲線（緩衝材）（B2 ケース）

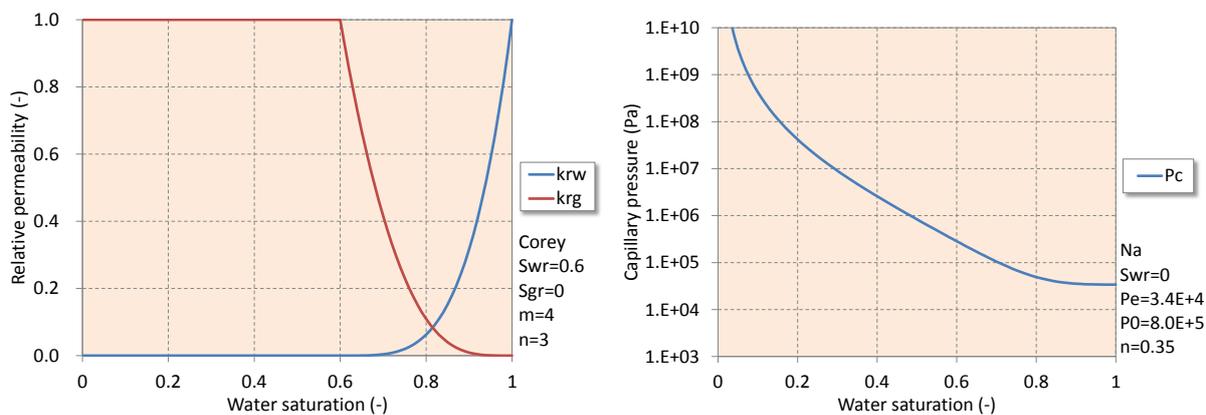


図 3.3.3-27 相対浸透率と毛細管圧力曲線（掘削影響域、岩盤）

表 3.3.3-11 空隙損傷モデルパラメータ（B1P1、B2P1、B2P2 ケース）

ケース	$C(-)$	$n(-)$	$F(-)$	$P_s(MPa)$
B1P1 ケース	1.000×10^4	1.000	1.000	0.500
B2P1 ケース	1.482×10^6	0.202	1.030	0.208
B2P2 ケース	1.482×10^6	0.202	1.030	0.208

6) 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 3.3.3-28)。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 3.3.3-28)。

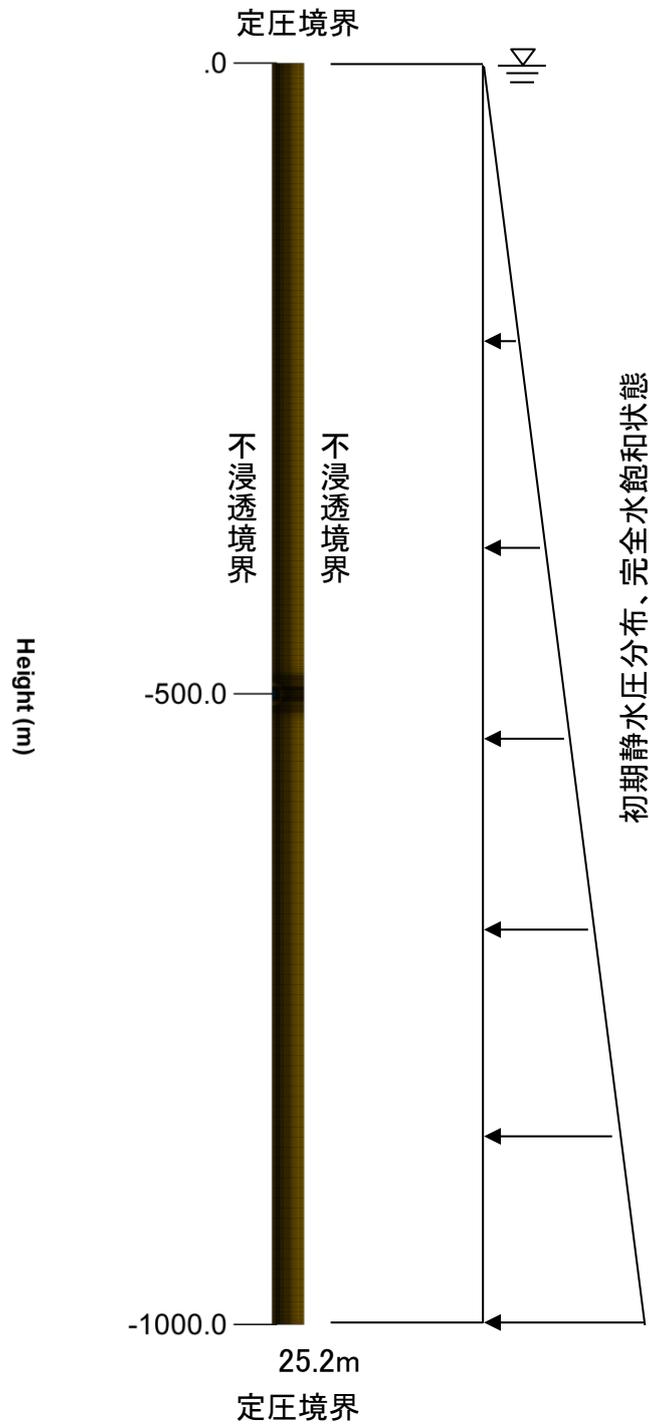


図 3.3.3-28 初期・境界条件

また、廃棄体からのガス発生を考慮する。ガス発生速度は G1 ケースでは第 2 次 TRU レポートにおける堆積系岩盤、廃棄体グループ 2 / キャニスタでの評価結果 (安藤ら (2005) [14]) をそのまま設定した (図 3.3.3-29)。G2 ケースでは 0~0.1 年の間のみ安藤ら (2005) [14] に示された値の 10 倍の値を用い、それ以降はそのまま安藤ら (2005) [14] に示された値の値を用いた。G3 ケースでは、人工バリアからの核種移行率が目安値 (TRU-2 のガス影響ケースでの核種移行率最大値) を上回る条件を設定した。ガス発生領域は廃棄体・構造躯体とした。

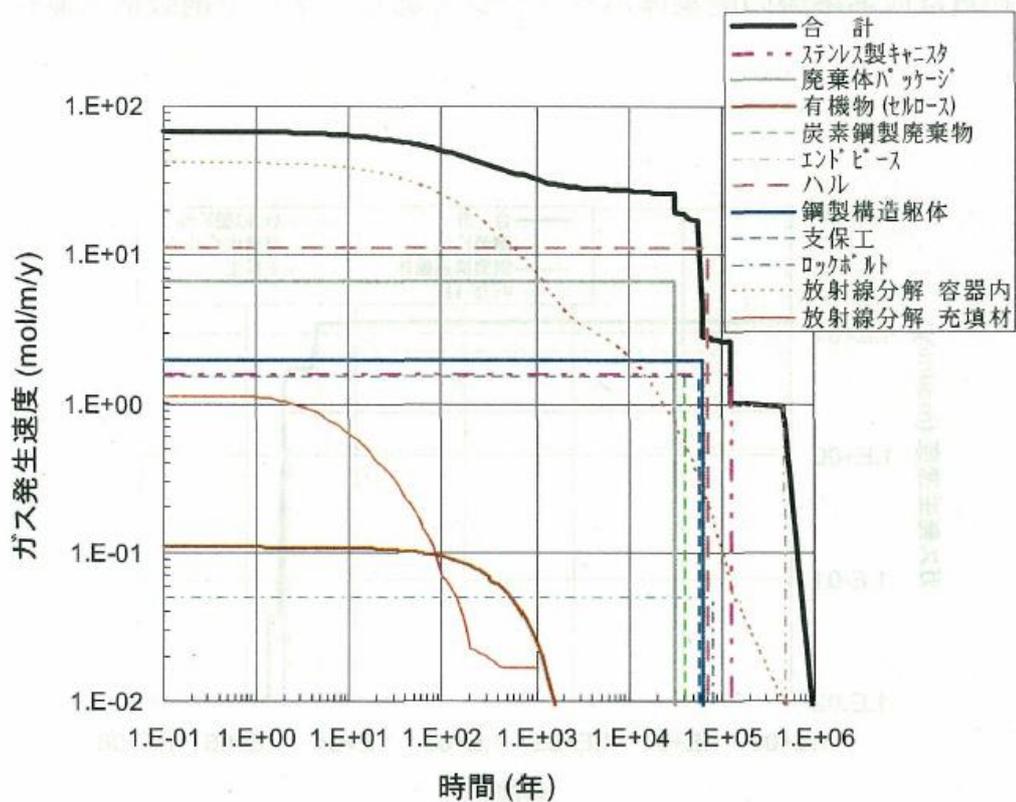


図 3.3.3-29 ガス発生速度の時間変化 (出典: 安藤ら, 2005[14])

(5) 出力諸量

出力諸量を以下に示す。なお、評価点は図 3.3.3-30 に示す位置とした。

- 評価点(廃棄体中心)におけるガス相圧力の時間変化
- 廃棄体外側からの排水量の時間変化
- 緩衝材外側からの排水量の時間変化
- 廃棄体外側からの累積排水量の時間変化
- 緩衝材外側からの累積排水量の時間変化
- ガス相圧力分布
- 水相飽和度分布
- 流路拡幅箇所分布

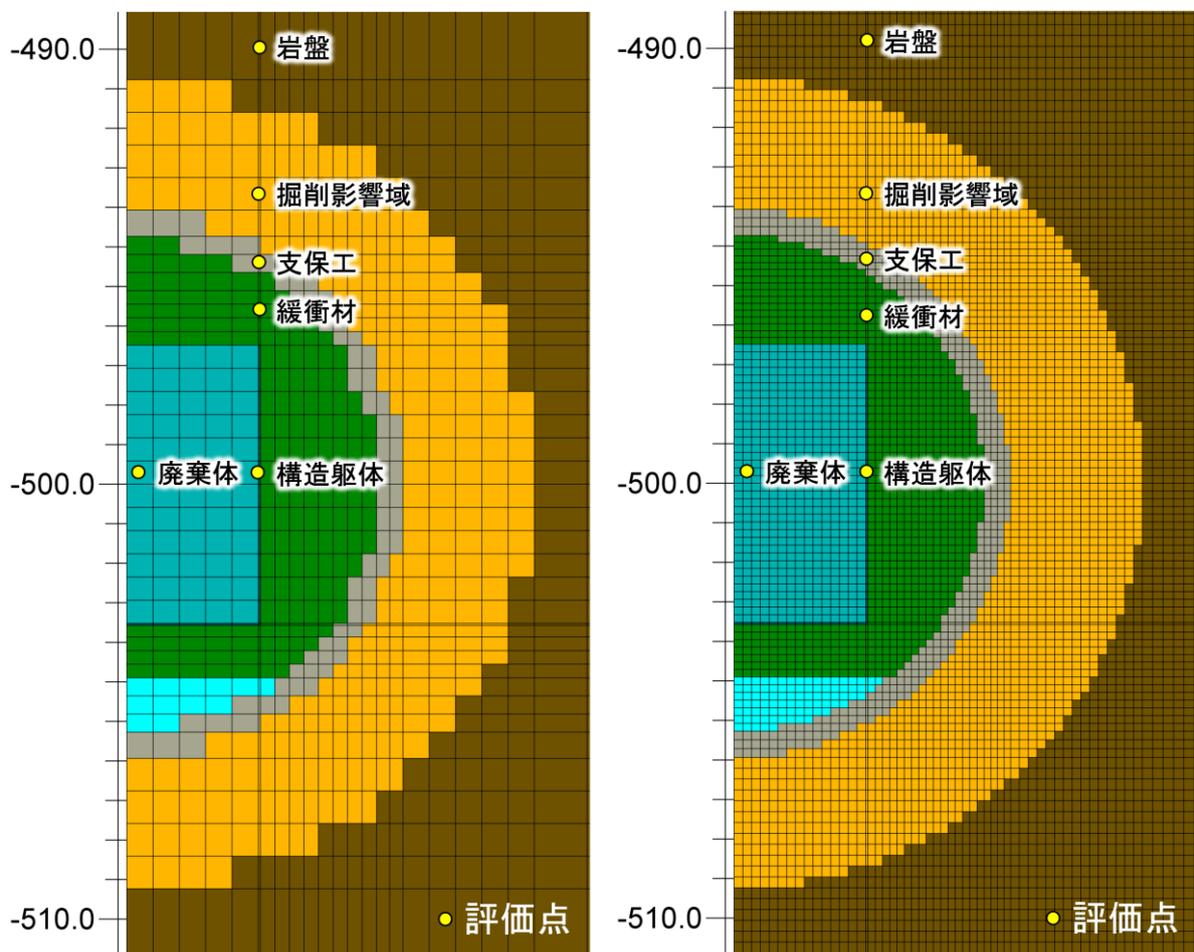


図 3.3.3-30 評価点位置図 (左：2007年モデル図、右：2010年モデル図)

(6) 解析結果

1) 不確実性を考慮したガス移行解析

廃棄体外側・緩衝材外側・坑道外側への排水量・累積排水量のそれぞれのピーク値をまとめた表を表 3.3.3-12 に示す。また、そのうち廃棄体外側・緩衝材外側へのそれぞれの排水量のピーク値をまとめたグラフを図 3.3.3-31、図 3.3.3-32 に、廃棄体外側・緩衝材外側へのそれぞれの累積排水量のピーク値をまとめたグラフを図 3.3.3-33、図 3.3.3-34 に示す。

表 3.3.3-12 排水量・累積排水量ピーク値(廃棄体・緩衝材・坑道)

ガス発生量	ケース名	廃棄体外側への			緩衝材外側への			坑道外側への		
		排水量 ピーク時間 (yr)	排水量 ピーク値 (Nm3/yr/m)	累積排水量 ピーク値 (Nm3/m)	排水量 ピーク時間 (yr)	排水量 ピーク値 (Nm3/yr/m)	累積排水量 ピーク値 (Nm3/m)	排水量 ピーク時間 (yr)	排水量 ピーク値 (Nm3/yr/m)	累積排水量 ピーク値 (Nm3/m)
1 倍	G1W1B1P0	0.2394	0.0271	1.2018	8.4922	0.0243	2.3426	8.5344	0.0242	2.6370
	G1W1B1P1	25.0322	0.0337	1.0492	25.2628	0.0629	1.2343	25.2660	0.0604	1.3029
	G1W2B1P0	1.2922	0.0261	3.1300	13.6454	0.0250	4.2651	13.6552	0.0250	4.5596
	G1W2B1P1	65.6514	0.0367	2.7607	65.6514	0.0441	2.9455	65.6514	0.0441	3.0141
	G1W1B2P1	28.5827	0.0657	0.6205	29.8722	0.1273	12.1644	29.8722	0.1265	12.3194
	G1W1B2P2	111.5028	0.7205	0.6144	60.0527	0.1386	12.1644	111.5272	0.1888	12.3193
	G1W2B2P1	60.0704	0.1274	1.5981	60.0647	0.1549	13.1472	60.0647	0.1487	13.3017
	G1W2B2P2	171.9272	0.1651	1.6190	172.0621	0.1035	13.1472	171.9272	0.1270	13.3017
0~0.1 年まで 10 倍	G2W1B1P0	0.0569	0.2293	1.2020	7.3869	0.0247	2.3426	7.3869	0.0247	2.6371
	G2W1B1P1	0.0569	0.2293	1.0492	23.6122	0.0624	1.2343	23.6122	0.0622	1.3031
	G2W2B1P0	0.1000	0.2030	3.1302	8.0364	0.0252	4.2652	8.0364	0.0252	4.5597
	G2W2B1P1	0.1000	0.2030	2.7607	67.9627	0.0873	2.9455	67.9627	0.0816	3.0141
	G2W1B2P1	0.0711	0.1469	0.6200	27.9446	0.1315	12.1645	27.9446	0.1308	12.3195
	G2W1B2P2	98.5027	0.4550	0.6148	38.9460	0.1711	12.1646	39.2300	0.1643	12.3195
	G2W2B2P1	0.1000	0.1076	1.6048	77.8032	0.0776	13.1473	77.8032	0.0774	13.3017
	G2W2B2P2	111.5028	0.7048	1.6174	134.2027	0.1403	13.1472	134.2027	0.1333	13.3017
10 倍	G3W1B1P0	0.0569	0.2293	1.4503	9.7172	0.1322	2.8313	10.8172	0.2000	3.1417
	G3W1B1P1	3.6583	0.3659	1.0559	4.0000	0.8617	1.3803	4.0000	0.8573	1.4773
	G3W2B1P0	0.1328	0.2038	3.7638	8.0364	0.1547	5.1524	22.0545	0.1565	5.4628
	G3W2B1P1	9.6455	0.4889	2.7768	9.9434	0.7573	3.0620	9.9434	0.7560	3.1807
	G3W1B2P1	4.7241	1.3059	0.6948	4.7241	4.5801	12.5039	4.7241	4.5428	12.6835
	G3W1B2P2	4.7241	1.3059	0.6836	4.7241	4.5801	12.5046	4.7241	4.5428	12.6843
	G3W2B2P1	10.6200	1.5650	1.8194	10.6200	2.7234	13.5930	10.6227	2.6485	13.7725
	G3W2B2P2	9.9887	0.9711	1.8013	12.5808	1.7148	13.5944	12.5808	1.7068	13.7742

※青字のケースが緩衝材外側への排水量ピーク値が最小となるケース、赤字が最大となるケース(ガス発生量 1 倍)

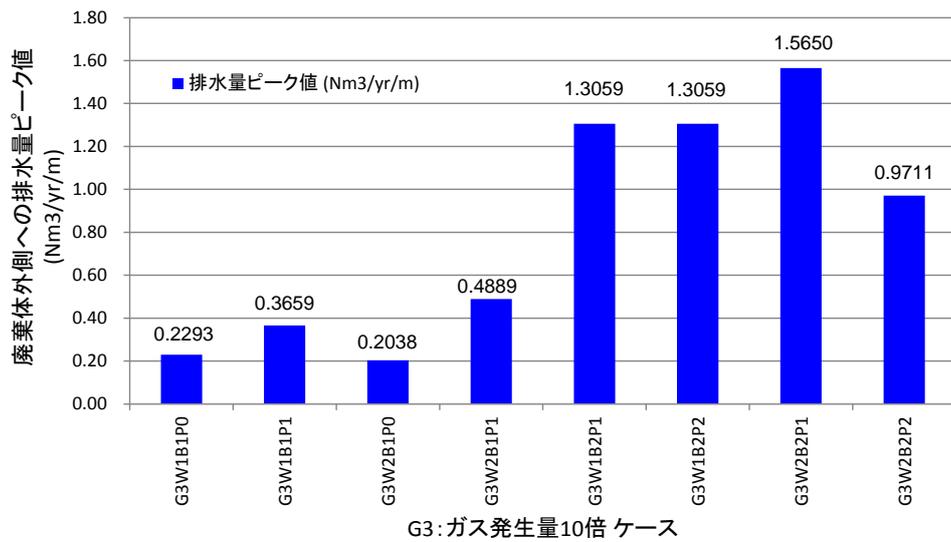
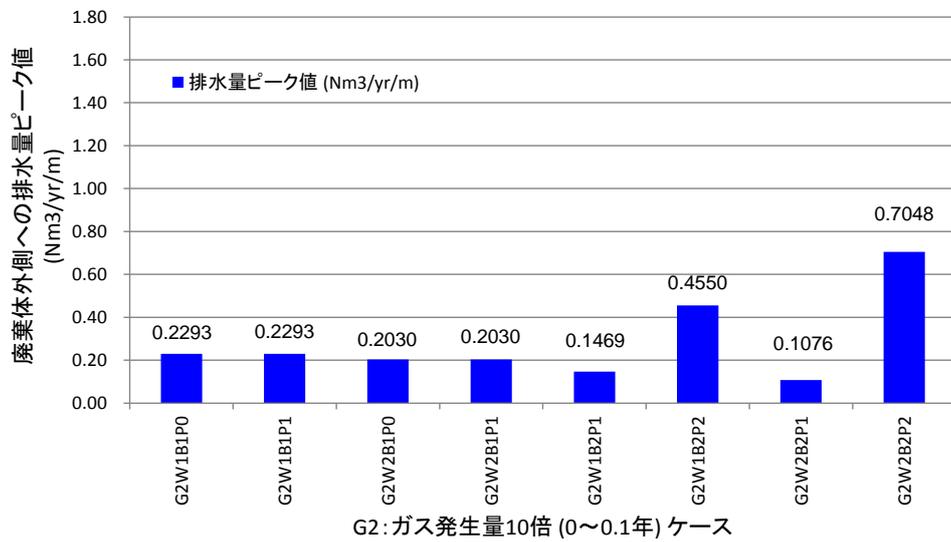
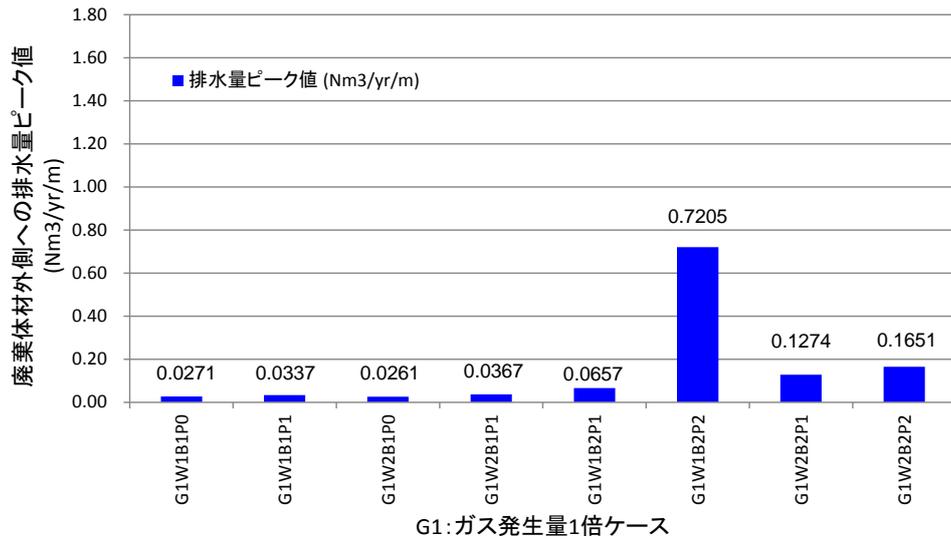


図 3.3.3-31 廃棄体外側への排水量ピーク値

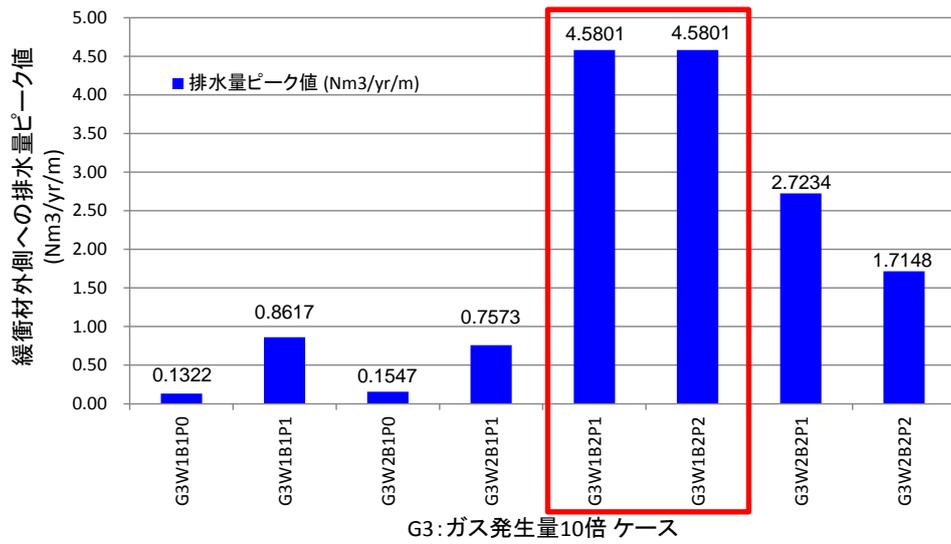
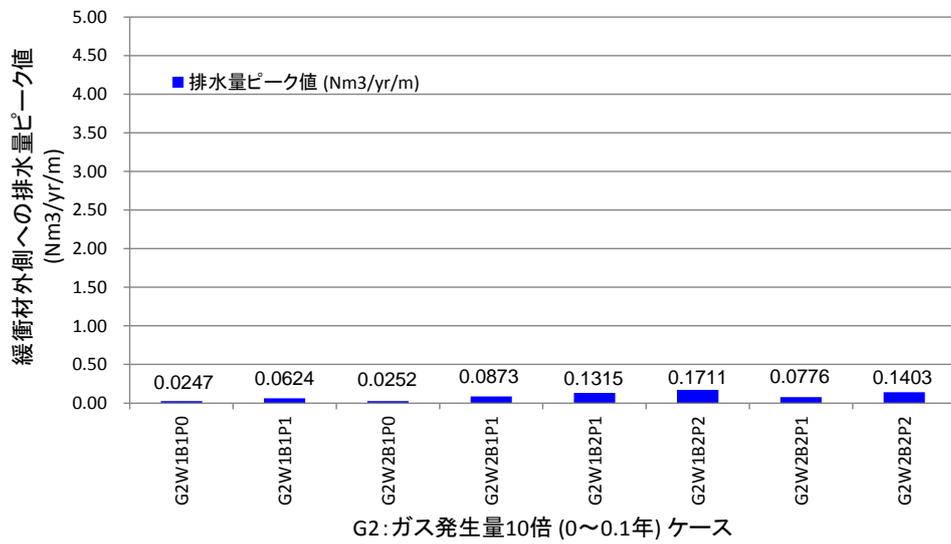
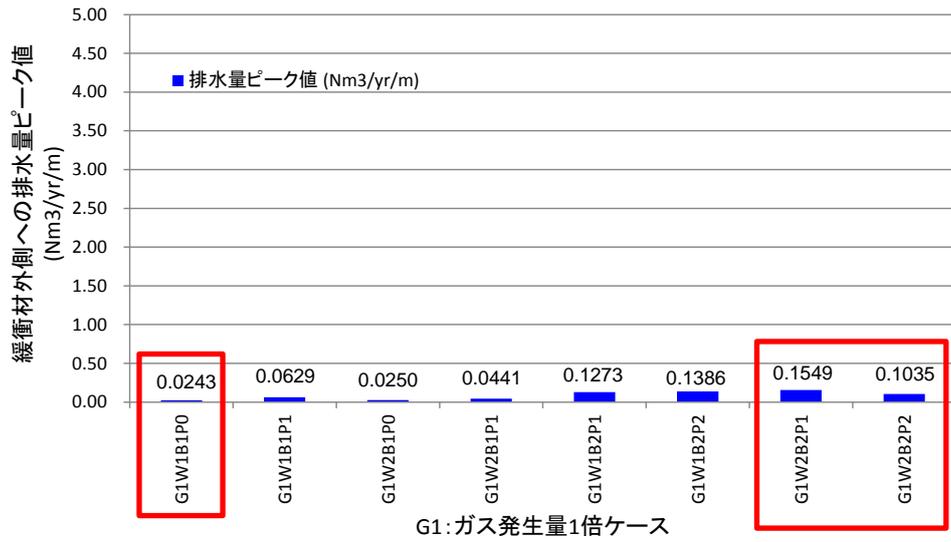


図 3.3.3-32 緩衝材外側への排水量ピーク値

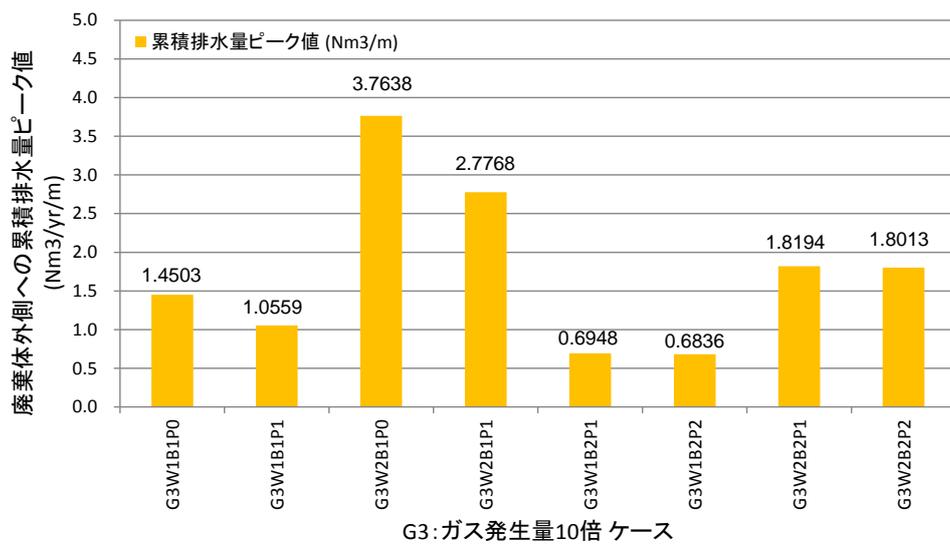
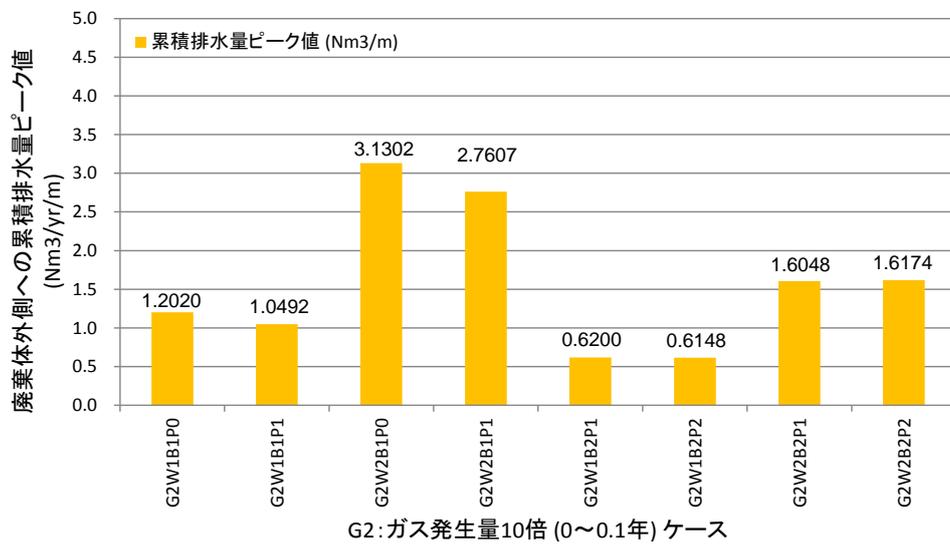
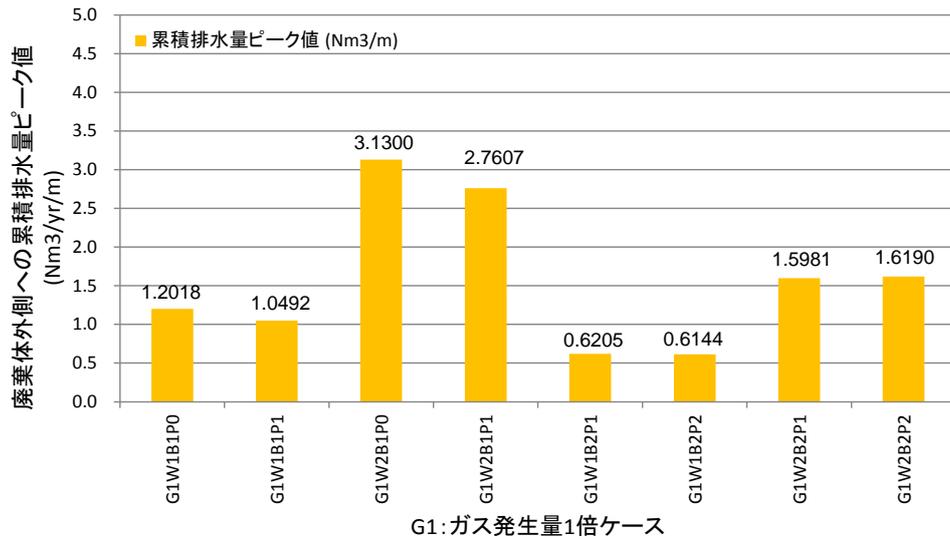


図 3.3.3-33 廃棄体外側への累積排水量ピーク値

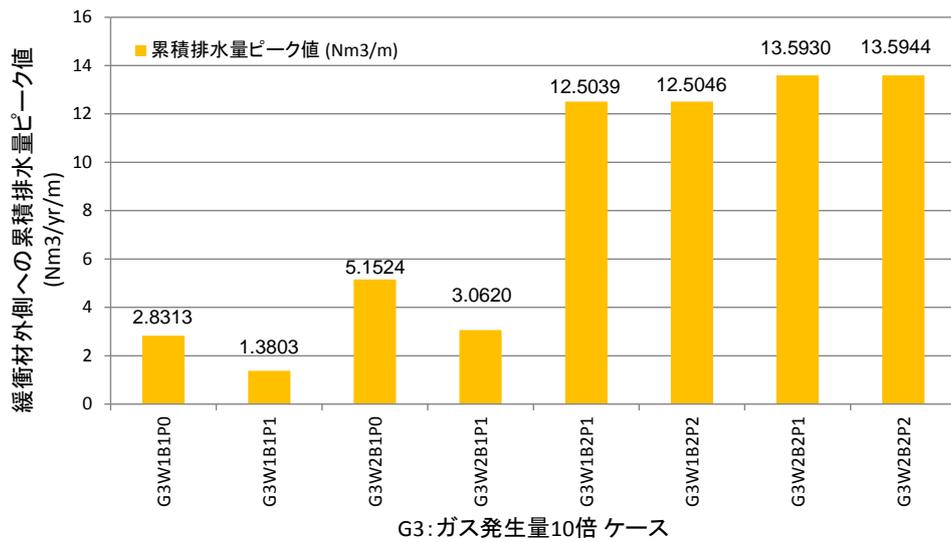
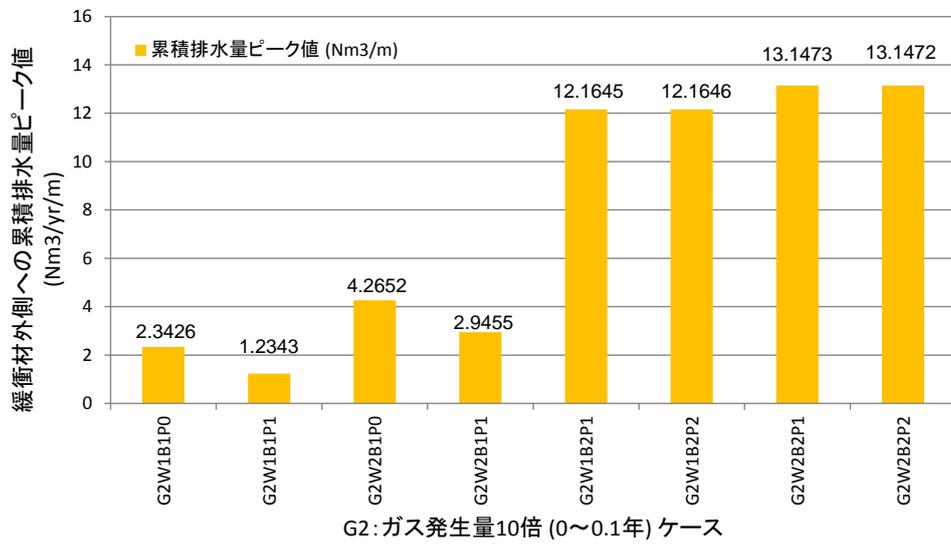
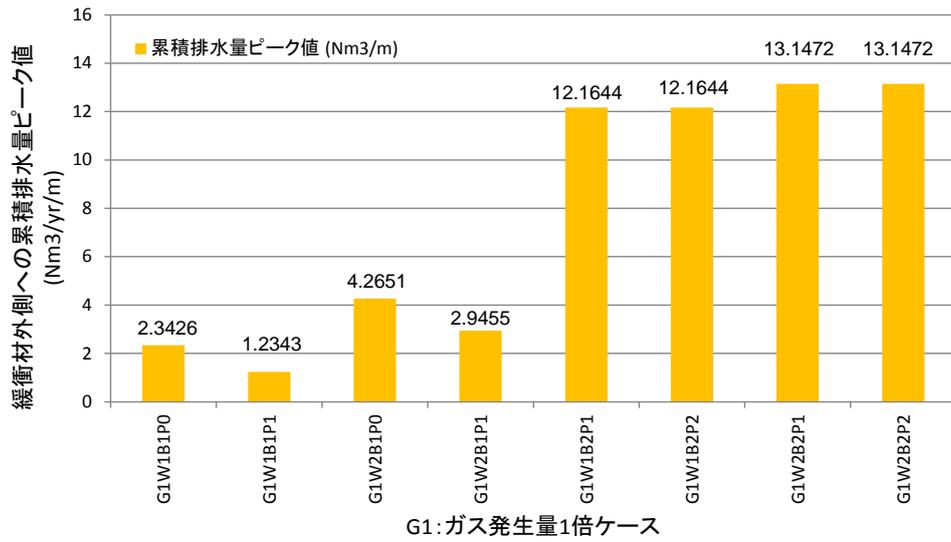


図 3.3.3-34 緩衝材外側への累積排水量ピーク値

2) 詳細評価解析

詳細評価解析を行ったケース一覧を表 3.3.3-13 に示す。また、それらのケースでの廃棄体外側・緩衝材外側・坑道外側への排水量・累積排水量のグラフをそれぞれ図 3.3.3-35、図 3.3.3-36 に、廃棄体層中心でのガス相圧力を図 3.3.3-37 に示す。また図 3.3.3-38、図 3.3.3-39、図 3.3.3-40、図 3.3.3-41、図 3.3.3-42、図 3.3.3-43 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、及び緩衝材外側への排水量ピーク時におけるガス相圧力分布図、水相飽和度分布図及び流路拡幅箇所分布図を示す。

第 2 次 TRU レポートと同じ条件である G1W1B1P0 では、破過を考慮していないため排水量のピークは存在せず、等方的な排水が起こっている。また破過により選択的な水の移行経路が生じることがないため、他のケースと比べて蓄圧が進んでいる。

G1W2B2P1 では、破過を考慮し、自己修復性を考慮していないため、排水量において明瞭な 1 つのピーク、流路拡幅箇所図において明瞭な選択的移行経路が生じ、ピーク後に急激にガス相圧力が低下している。

G1W2B2P2 では、破過及び自己修復性を両方考慮しているため、排水量において複数のピーク、流路拡幅箇所図において不明瞭な移行経路が生じている。G1W2B2P1 とは異なり明確な選択的移行経路が形成しないので、緩衝材の破過が起こっている間は、G1W2B2P1 よりも廃棄体のガス相圧力が高くなっている。

G3 ケースである G3W1B2P1 では、ガス発生量が全期間で G1 ケースの 10 倍であるので、ガス相圧力が G1 ケースより高く、早い時期で排水量のピークが生じている（G1 ケースでは排水量のピークは約 100 年で生じているが、G3W1B2P1 では約 4～7 年で生じている）。また排水量のピーク値も 2 倍以上になっている。自己修復性を考慮していないため、排水量のピークは 1～2 本であり、流路拡幅箇所図において明瞭な選択的移行経路（インバートとの接続部分）が生じ、ピーク後に急激にガス相圧力が低下している。

G3W1B2P2 では、破過及び自己修復性を両方考慮しているため、排水量において複数のピーク、流路拡幅箇所図において不明瞭な移行経路が生じている。G3W1B2P1 とは異なり明確な選択的移行経路が形成しないので、緩衝材の破過が起こっている間は、G3W1B2P1 と比較して廃棄体のガス相圧力の低下が遅くなっている。

これら詳細評価解析により得られた結果（排水量、累積排水量、廃棄体ガス相圧力データ、ピーク時流路拡幅箇所図）は、核種移行解析の入力データとして、核種移行解析側に引き渡した。

なお、一度目の破過圧と、一度破過したのち閉塞し、再び破過する際の圧力は異なる（二度目以降は小さくなる）という知見が一部存在しているが、本検討では両者（流路拡幅の判定条件）は同じとして解析を実施しているため、今後自己修復性有りのケースについて評価を行う際は、その点に留意する必要があると考えられる。

表 3.3.3-13 詳細評価解析ケース一覧

ケース名	G：ガス発生速度 (mol/m/y) 量	W：廃棄体 間隙率	B：緩衝材 水理物性	P：流路拡幅現象
Case- G1W1B1P0	1 倍 (全評価期間中)	0.19	TRU2	考慮しない
Case- G1W2B2P1	↑	0.5	FY2012_SG②	考慮 (自己修復性無し)
Case- G1W2B2P2	↑	↑	↑	考慮 (自己修復性有り)
Case- G3W1B2P1	10 倍 (全評価期間中)	0.19	↑	考慮 (自己修復性無し)
Case- G3W1B2P2	↑	↑	↑	考慮 (自己修復性有り)

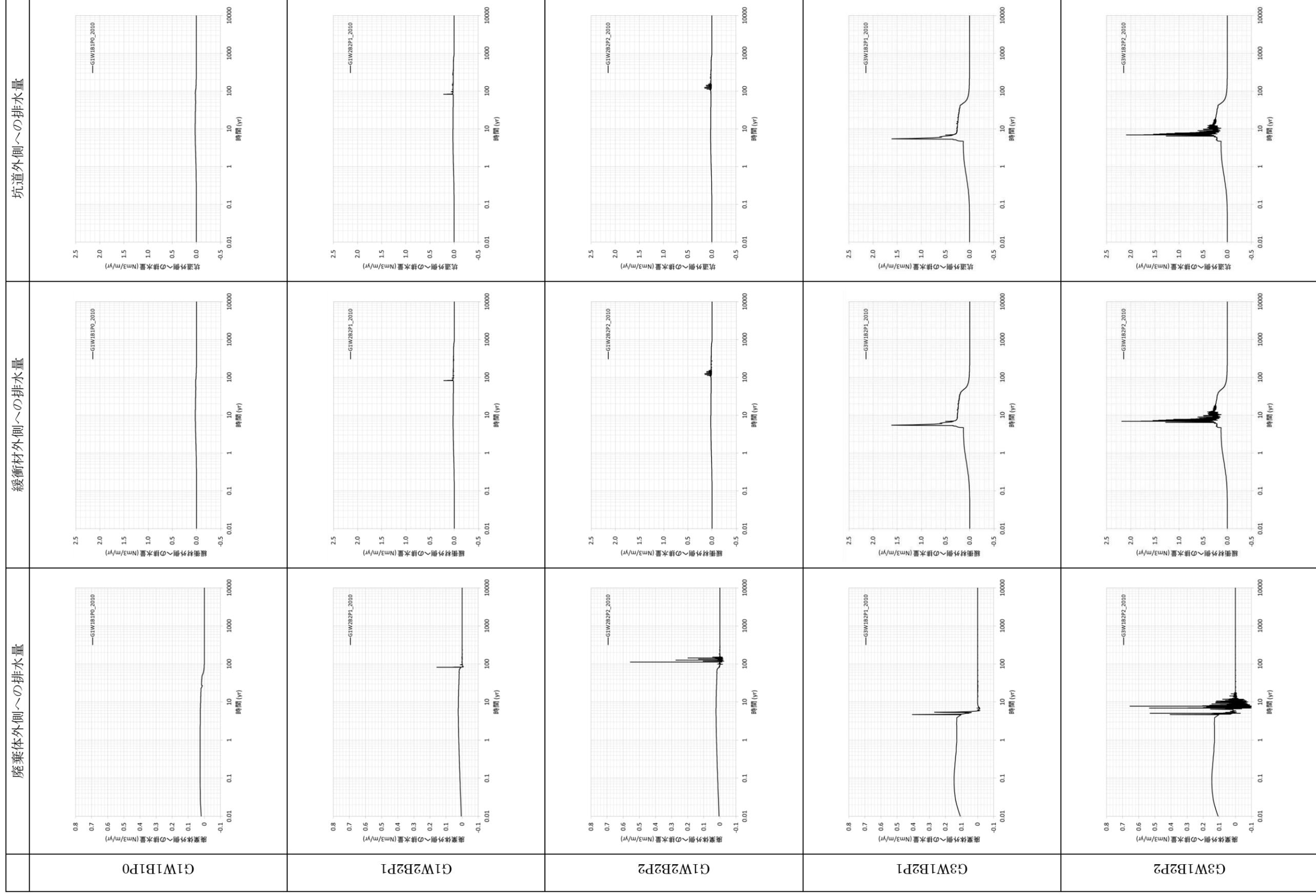


図 3.3.3-35 廃棄体外側・緩衝材外側・坑道外側への排水量

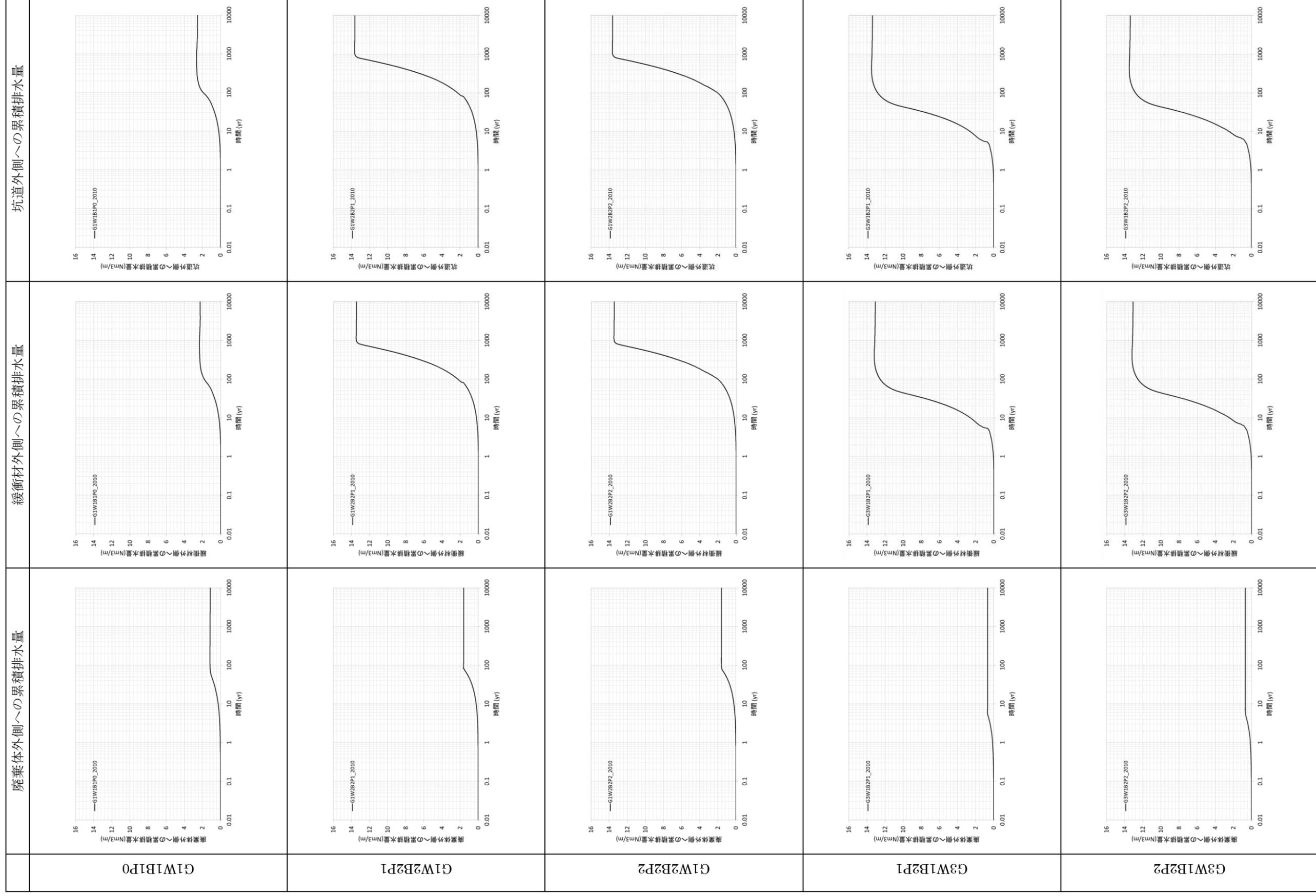


図 3.3.3-36 廃棄体外側・緩衝材外側・坑道外側への累積排水量

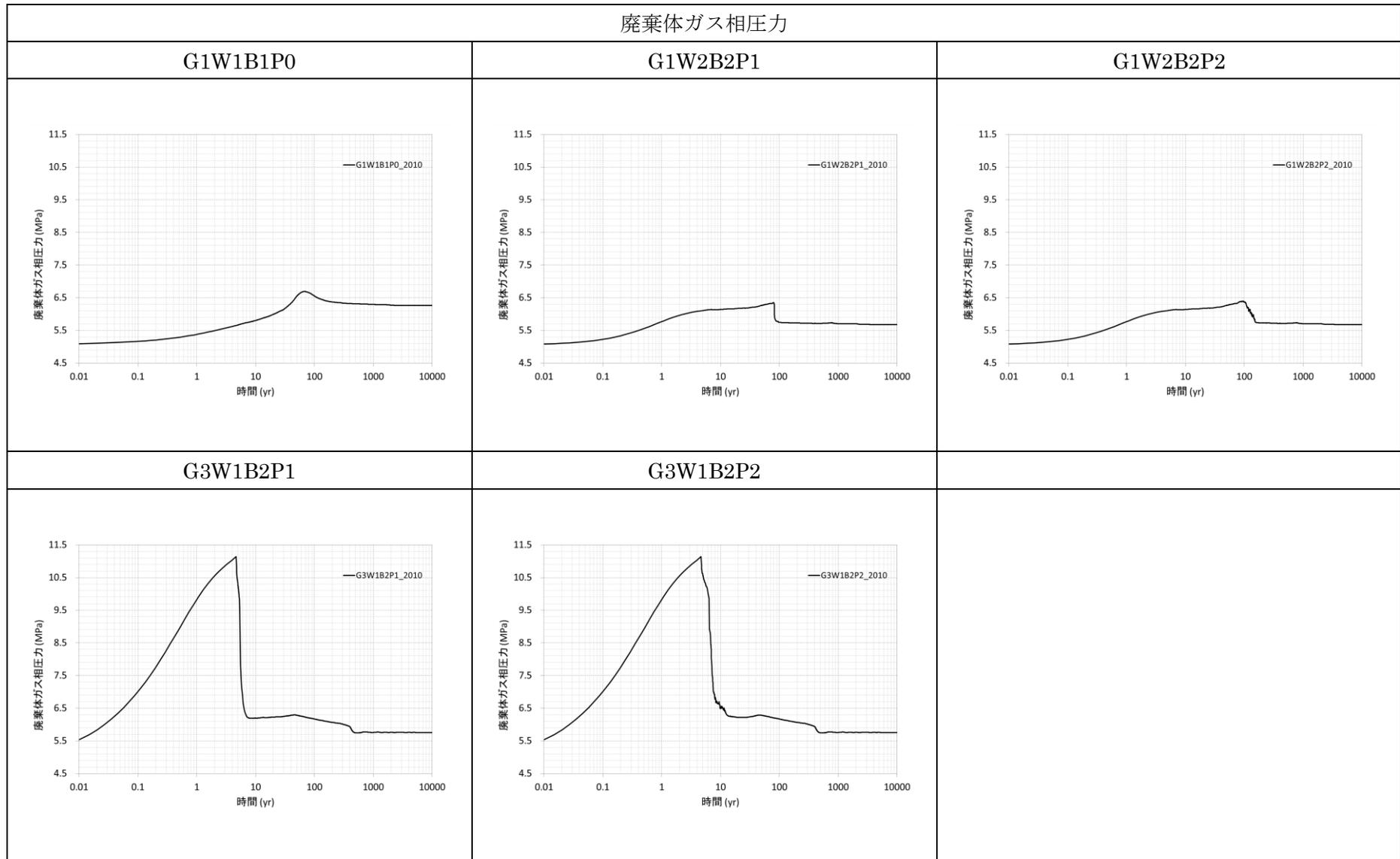


図 3.3.3-37 廃棄体ガス相圧力

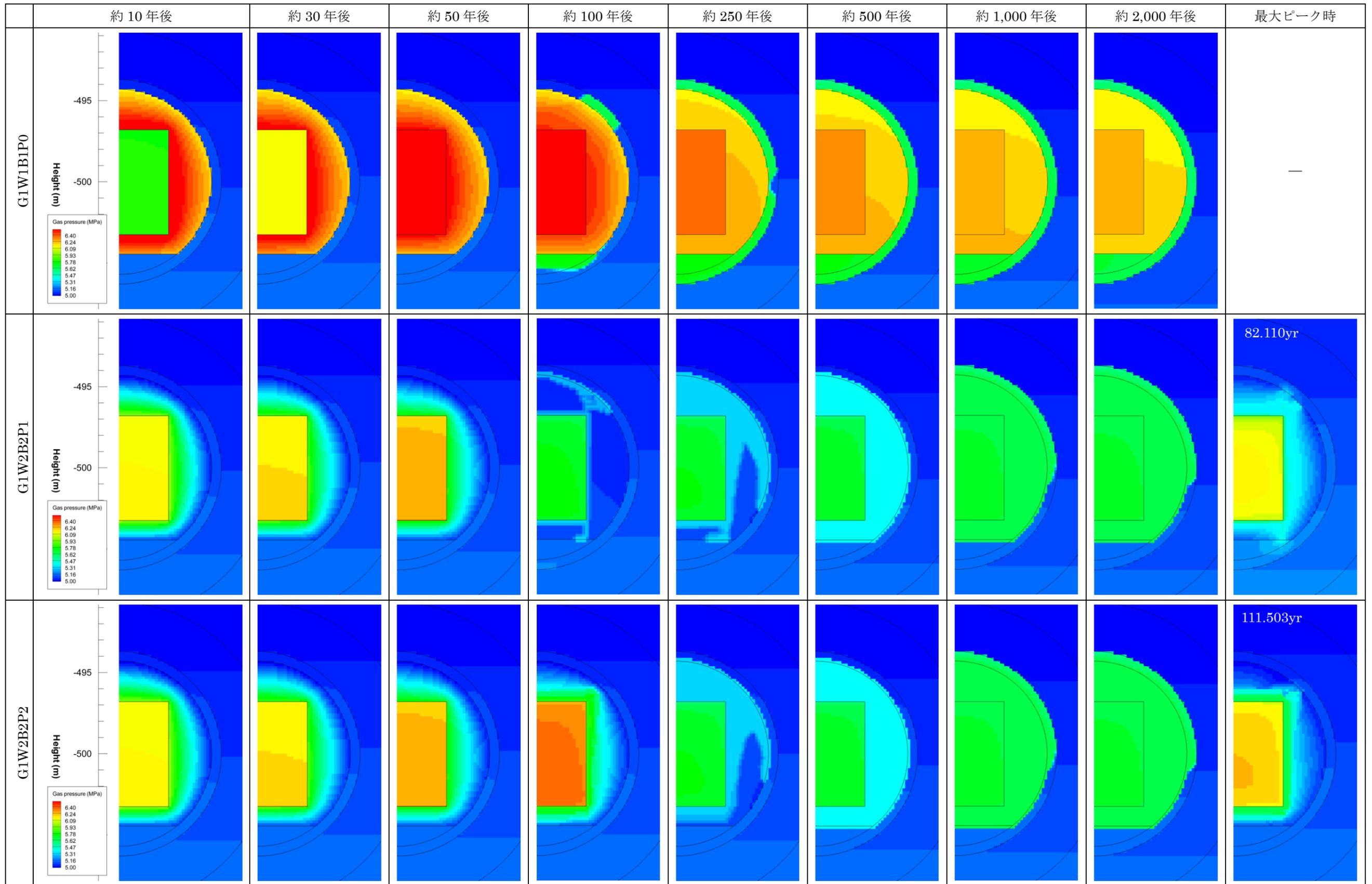


図 3.3.3-38 ガス相圧力の比較 (ガス発生量 1 倍ケース)

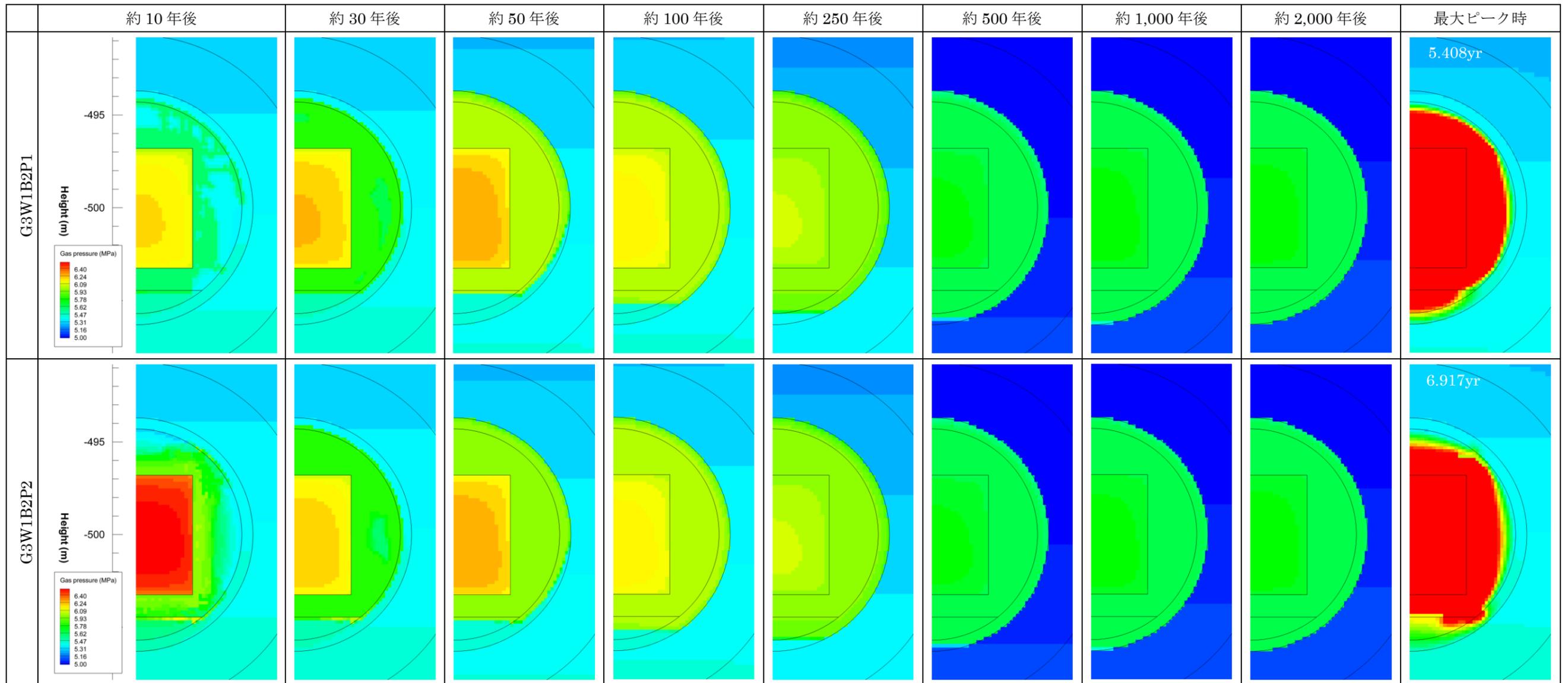


図 3.3.3-39 ガス相圧力の比較 (ガス発生量 10 倍ケース)

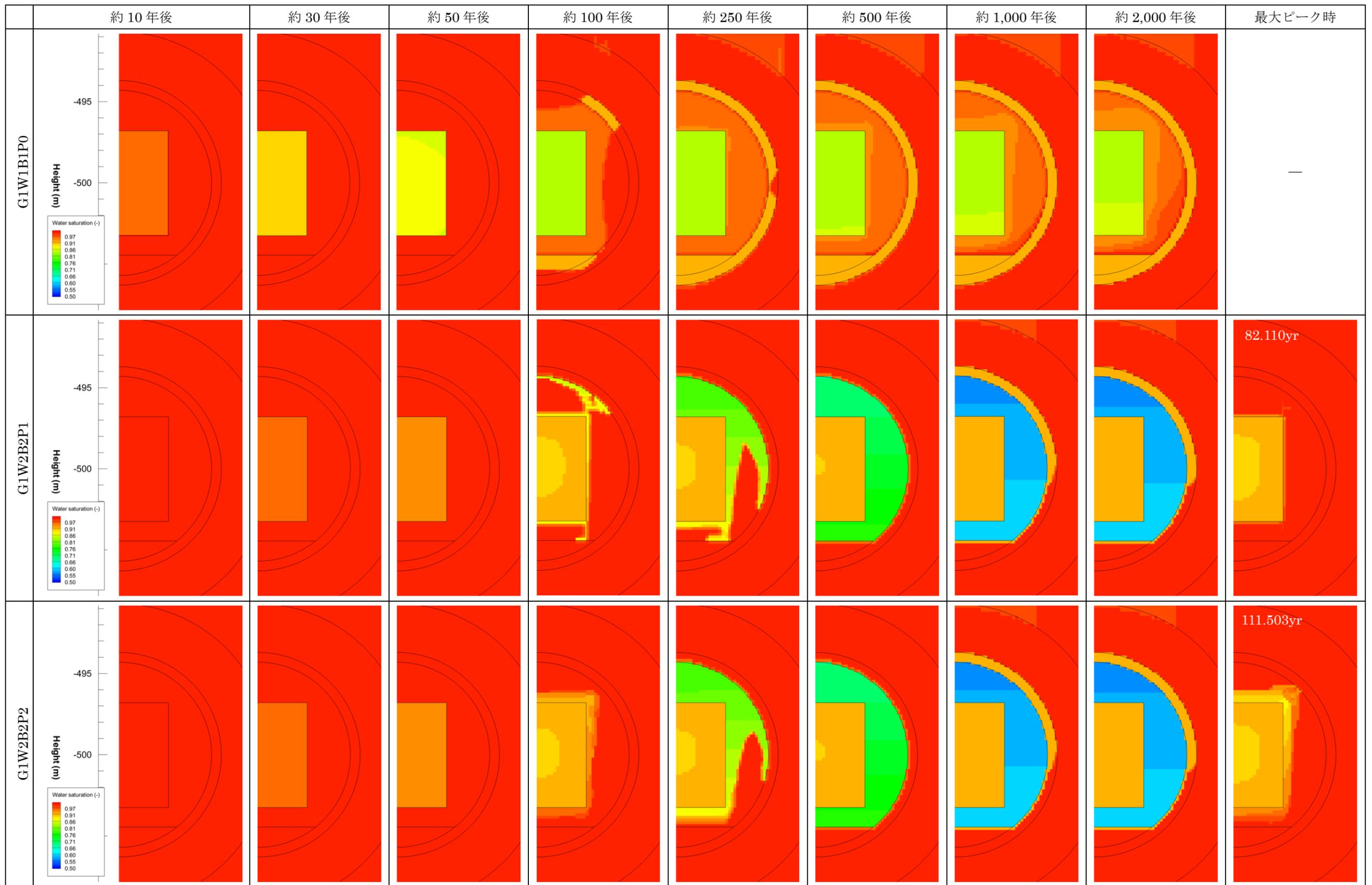


図 3.3.3-40 水相飽和度の比較 (ガス発生量 1 倍ケース)

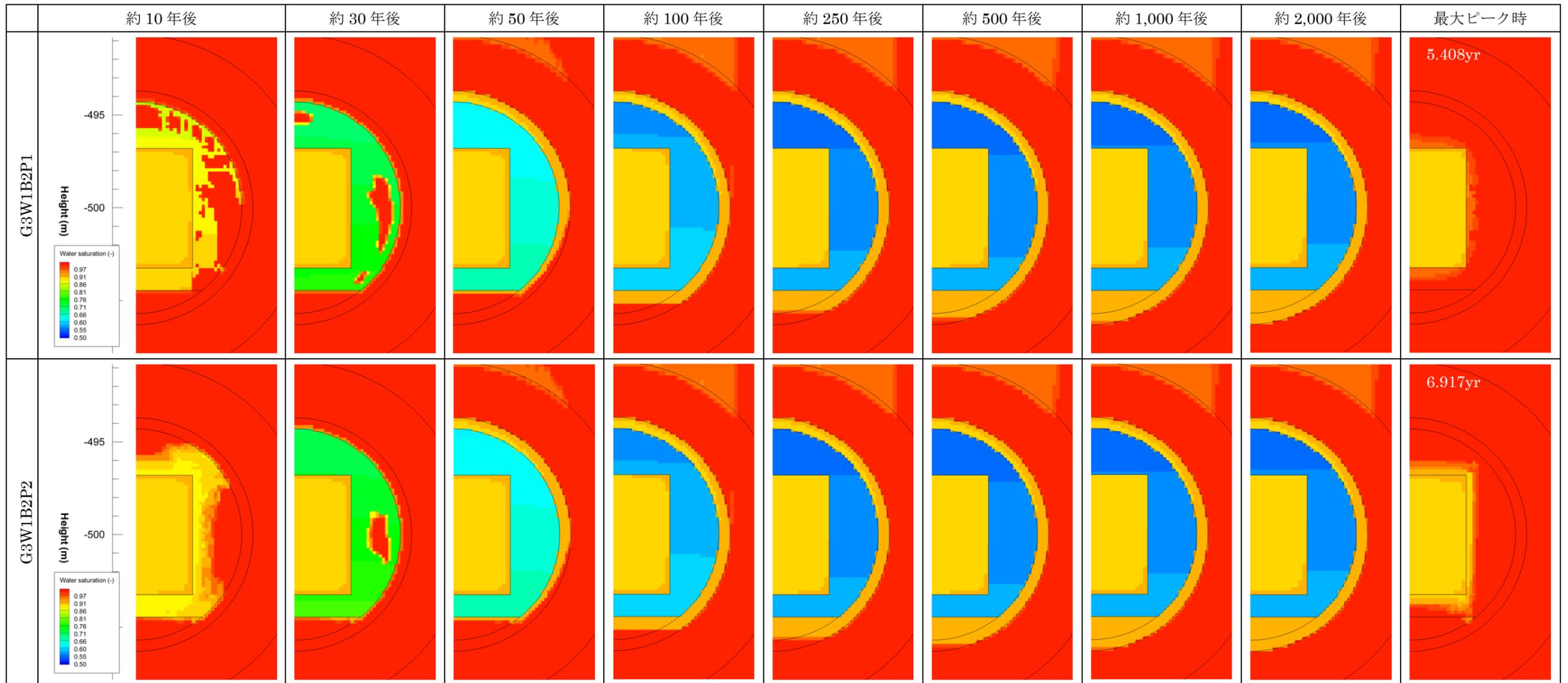


図 3.3.3-41 水相飽和度の比較 (ガス発生量 10 倍ケース)

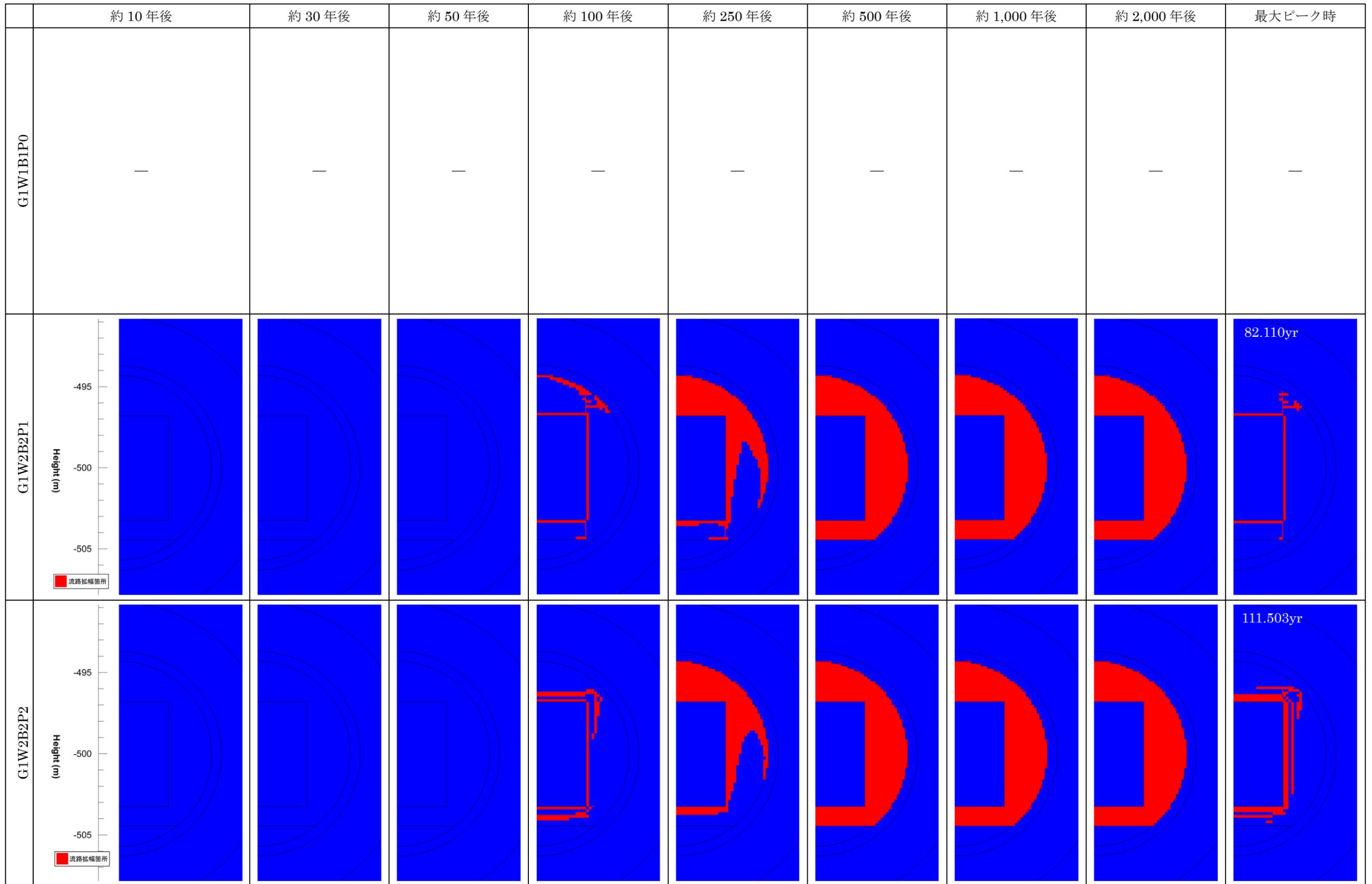


図 3.3.3-42 流路拡幅箇所の比較 (ガス発生量 1 倍ケース)

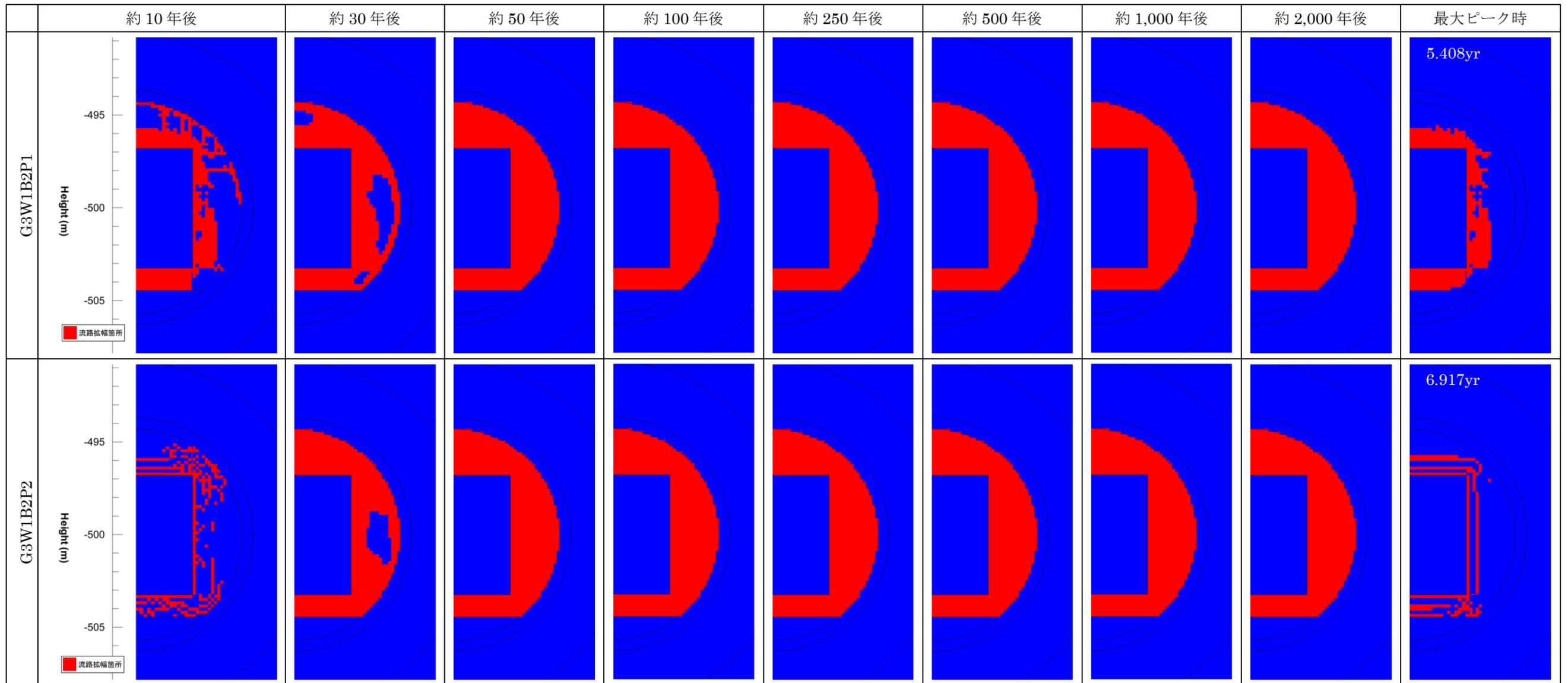


図 3.3.3-43 流路拡幅箇所の比較 (ガス発生量 10 倍ケース)

3.3.4 まとめ

(1) 最新の室内ガス移行試験データによる確証計算

- ✓ 以下に示す3つの室内試験の実測データの入手、整理、分析を行った。
 - 圧縮ベントナイト（直径 60mm、高さ 25mm、乾燥密度 1.36Mg/m³、100%クニゲル V1）供試体の中央部に 3mm 幅の空間を設け、材料界面に見立てた供試体による透水試験及びガス注入試験（計 2 体：No.1、No.2、但し、No.1 は透水試験のみ実施）
 - 圧縮ベントナイト（直径 60mm、高さ 25mm、乾燥密度 1.36Mg/m³、100%クニゲル V1）供試体の中央部に 1mm 幅の空間を設け、材料界面に見立てた供試体による透水試験（計 2 体：No.1、No.2）
 - 2つの配合パターンによるモルタル供試体（それぞれ、打継有が 4 体、打継無が 1 体）を用いた透水試験及びガス注入試験（計 10 体）
- ✓ 水・ガス 2 相流解析コードを用いて、これらの実測データの再現解析を行った。材料界面（スリット 3mm）を設けた圧縮ベントナイト供試体については、1 体の透水試験及び 1 体のガス注入試験データを対象として再現解析を行った。材料界面（スリット 1mm）を設けた圧縮ベントナイト供試体については、計 2 体の透水試験データを対象として再現解析を行った。また、モルタル供試体については、透水係数が他ケースと比べて大きく、異常値とみなすことのできる No.6 を除いた計 8 体のガス注入試験データを対象として再現解析を行った。
- ✓ 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って行い、2 相流パラメータの同定を実施した所、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。
- ✓ 材料界面（スリット 3mm）を設けた圧縮ベントナイト供試体の湿潤過程については、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、逆解析の結果、材料界面を設けない供試体と比較して、毛細管圧力は大きくなり、相対浸透率は同程度となるような 2 相流パラメータが得られた。また、排水過程においても、材料界面を設けない供試体と比較して、毛細管圧力は大きくなり、相対浸透率は同程度となるような 2 相流パラメータが得られた。ただし、ベントナイトの水飽和度が約 0.988 と、ほとんどベントナイトから排水が起こっていない時点で破過が起こっている。そのため、スリット部分が弱面になっている可能性が否定できない。また水飽和度 1～約 0.988 と、極めて限られた範囲のデータを用いてパラメータの同定を行っているので、パラメータが一意ではない可能性がある。このベントナイトからほとんど排水が起こっていない時点で破過が起こるといふ挙動が、ベントナイト系材料界面（スリット 3mm）供試体の排水過程において常に認められるものなのかどうかは、対象ケースが 1 つしかないことから判然としない。そのため今後データを蓄積し、ある程度スリット幅が大きいベントナイト系材料界面供試体において、同様の傾向が得られるか調査する必要があると考えられる。
- ✓ 材料界面（スリット 1mm）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、スリット 1mm はスリット 3mm ほど水の流動に影響を与えていないと説明することができる。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、1mm 程度の施工時の材料界面が、ガス透気に対しての有意な選択的移行経路とはならないことが示唆される結果となった。

- ✓ モルタル供試体については、各供試体間でばらつきの大きい 2 相流物性が同定された。打継部の有無によるパラメータの違いは見受けられなかった。混和剤無しでは混和剤有りに比べて、絶対浸透率が 1 桁以上大きく、また毛細管圧力が小さくなった。

(2) 確証データの登録およびデータの追加収集・整備

- ✓ 「最新のガス移行試験データによる確証計算」において同定された 12 件のパラメータを、基本物性データライブラリ及び非線形物性データライブラリ本体へ追加登録した。
- ✓ 追加登録に伴い、マニュアル内の登録データ一覧及びマニュアル付録の収録パラメータの同定経緯を修正し、マニュアルの改定を行った。

(3) 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解析的評価

- ✓ 人工バリアの安全評価における不確実性に着目し、特に汚染水の排水（核種移行）への影響が大きいと考えられる「ガス発生量:G」「廃棄体間隙率:W」「緩衝材 2 相流物性:B」「流路拡幅現象:P」に対してそれぞれ場合分けをして、汚染水の排水量の幅を解析によって求めた。
- ✓ 解析においては、まず不確実性を考慮したガス移行解析を行った後、どのパラメータを用いたケースが核種移行率の幅を考慮する上で安全評価上重要となるかを明確にした。その後、その安全評価上重要と考えられるケースにおいてさらに詳細評価解析を行い、別途業務で行われる核種移行解析の入力データとするために、核種移行解析側に引き渡し、核種移行率の幅を評価した。
- ✓ 典型的な TRU 廃棄物処分システムを、鉛直 2 次元断面によってモデル化した。人工バリア周辺を、不確実性を考慮したガス移行解析では約 50cm（総格子数 2,201）、詳細評価解析では約 20cm（総格子数 29,726）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（EDZ）、岩盤を考慮した。
- ✓ 不確実性を考慮したガス移行解析の結果、G1 ケースにおいて「G1W1B1P0」が緩衝材外側への排水量最小、「G1W2B2P1」が緩衝材外側への排水量最大となった。また、G3 ケースにおいて「G3W1B2P1」「G3W1B2P2」が緩衝材外側への排水量最大となった。これに「G1W2B2P1」の自己修復を考慮したケースである「G1W2B2P2」を加えた 5 ケースが、核種移行率の幅を考慮する上で安全評価上重要と考えられた。そのため上記 5 ケースにおいてさらに詳細評価解析を実施し、別途業務で実施する核種移行解析側に結果を引き渡した。
- ✓ 詳細評価解析より、G3 ケースでは G1 ケースに比べて排水量の最大ピーク値が大きく、また最大ピーク時間が早くなることが判明した。また、自己修復性無し（P1）ケースでは排水量のピークは 1~2 度で、明瞭な選択的移行経路を生じるのに対し、自己修復性有り（P2）ケースでは排水量のピークは複数生じ、明瞭な選択的移行経路を生じないことが明らかになった。
- ✓ 一度目の破過圧と、一度破過したのち閉塞し、再び破過する際の圧力は異なる（二度目以降は小さくなる）という知見が一部存在しているが、本検討では両者（流路拡幅の判定条件）は同じとして解析を実施しているため、今後自己修復性有りのケースについて評価を行う際は、その点に留意する必要があると考えられる。

3.4 核種移行評価に係る検討成果

3.4.1 核種移行解析評価に使用する解析コードの選定とパラメータの設定

(1) 基本的な考え方

1) 評価対象

本検討では、TRU 地層処分システムにおいて発生する非放射性ガスによる核種移行への影響を評価した。具体的には、TRU 廃棄物のうち廃棄体グループ 2（ハルエンドピース等の発熱性廃棄物）から発生する非放射性ガスが対象とした。

2) ガスシナリオに関する評価項目

TRU 地層処分システムにおけるガスシナリオの影響把握のためには、以下の項目が必要である。

①ガス発生量の評価、②ガス移行解析、③核種移行解析

本検討では、このうち③のガスシナリオの核種移行評価を実施したものである。なお、定量的な核種移行評価を実施するためには、定量的なガス発生量評価及びガス移行解析が前提条件として必要である。

ガス発生量については、基本的に第 2 次 TRU レポート（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、2005）での評価結果を引用するものとした。廃棄体グループ 2 からの非放射性ガスの発生にあたっては、以下のガス発生機構が考慮されている。

- ・ 金属の嫌気性腐食に伴う水素ガス
- ・ 水の放射線分解に伴う水素ガス
- ・ 有機物の分解に伴うメタン等

また、ガス移行については、前述の「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解析的評価」で実施した 2 相流解析（ガス移行解析）の評価結果に基づいて、核種移行解析における入力条件を設定することとなる。

(2) 解析コードの選定

本検討における核種移行解析では、米国 Yucca Mountain プロジェクトの総合安全評価において使用実績があり、その後、我が国における地層処分の安全評価における de facto standard ともなっている汎用的シミュレーションソフトウェア GoldSim (Golder Associates, 2001[15]) を用いるものとした。

後述するように、本検討で行う核種移行解析は、様々な側面で第 2 次 TRU レポートに準拠することとなるが、使用する解析コードは主要な相違点のひとつとなる。第 2 次 TRU レポートでは TIGER コード¹ (三原・大井, 2004[16]) によって人工バリア/天然バリアの核種移行を評価しているからである。TIGER コードと GoldSim による解析結果の比較は別途実施されており、どちらのコードによる解析結果も概ね等しい結果となることが示されている (原子力発電環境整備機構, 2011[17])。

(3) パラメータの設定

核種移行解析の実施に必要となるパラメータの種類とその定量的な設定値については、次章「核種移行解析の実施等」において、解析モデルの説明を行った後に、詳述するものとした。

大まかな方向性としては、核種移行解析の前提となるインベントリ、処分坑道設計、人工バリア条件、天然バリア条件等は、第 2 次 TRU レポートに準拠する一方、ガスシナリオを特徴づけるガス発生に伴う汚染水の排水に係るパラメータ (排水量、排水期間等) は、前述のされるガス移行解析結果に基づくものとした。

1 TIGER コードは当時の核燃料サイクル開発機構が開発した解析ツールであり、知的所有権は当該機構にある。

3.4.2 核種移行解析の実施等

(1) 解析ケースの設定

1) ガス影響シナリオの検討

TRU 廃棄物の地層処分システム（緩衝材を有する）における核種移行解析において、ガスによる影響を評価で対象とすべき事象としては、以下の大きく 3 つのパターンが想定できる。

●パターン 1：等方的な排水

形成されたガス相とそこでのガス圧の上昇によって、ガスの透気を伴うことなく汚染水を排水する事象。

●パターン 2：EBS の破壊・変形を伴う透気

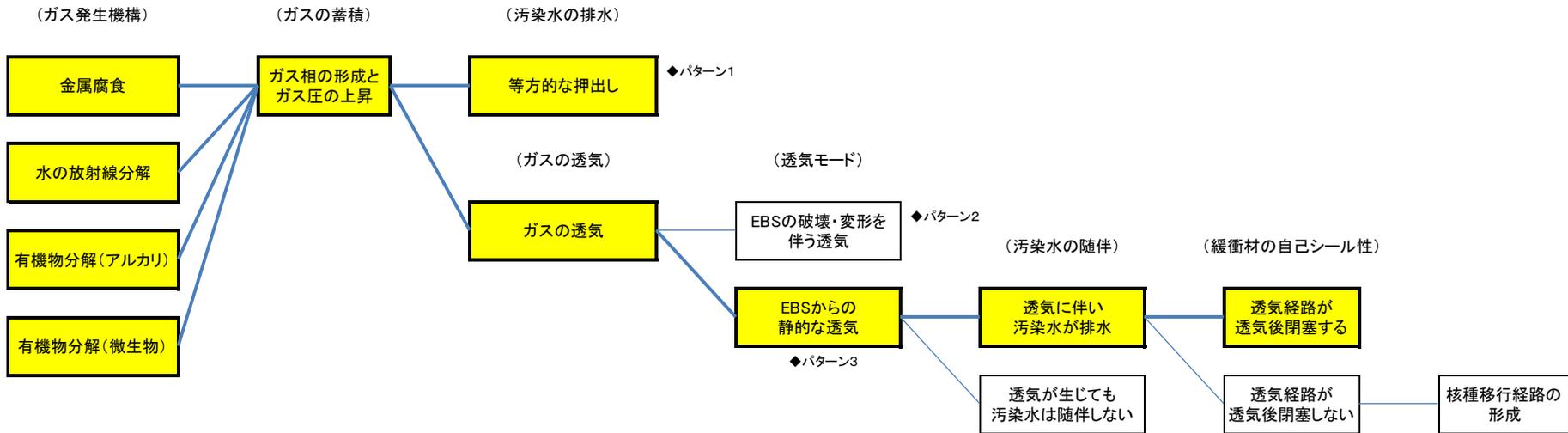
蓄積されたガスが非常に大きなエネルギーを有した結果、それが透気する際に、EBS の破壊や変形を引き起こすような事象。

●パターン 3：EBS からの静的な透気

蓄積されたガスが選択的な透気経路を形成して透気し、大きな力学的擾乱を与えることなく透気するような事象。

第 2 次 TRU レポート（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）では、基本的にパターン 1 及びパターン 3 のような事象を想定していた。ただしパターン 3 において、緩衝材の自己シール性によって経路は閉塞し、透気経路は核種移行経路としては残らないという想定の下で、ガスシナリオの影響評価を行っている。第 2 次 TRU レポートにおけるガス事象のロジックツリーを図 3.4.2-1 に示す。

本検討におけるガスシナリオにおいても、基本的な想定は第 2 次 TRU レポートに準拠して、パターン 1 の等方的な排水及びパターン 3 の静的な透気を想定した。ただし、本検討でガス移行解析に使用する GETFLOWS では、透気経路をある程度把握できることもあり、パターン 3 のバリエーションとして、前述の「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解析的評価」で整理したシナリオや評価ケースに基づき、緩衝材の自己シール性が失われて透気経路が透気後も閉塞せず、核種移行経路として残存するような状況も仮想的に想定するものとした。本検討におけるガス事象のロジックツリーを図 3.4.2-2 に示す。



第2次TRUレポートにおけるガス事象のロジックツリー

- 等方的な押し出しにより、ある期間、想定される移行速度／拡散速度より早く汚染水を排水する。
- 緩衝材層からの透気に伴い汚染水が排水されるが、自己シール性により透気経路は閉塞する。(汚染水の移行経路として残らない)
- パターン3における透気経路が特定できない。

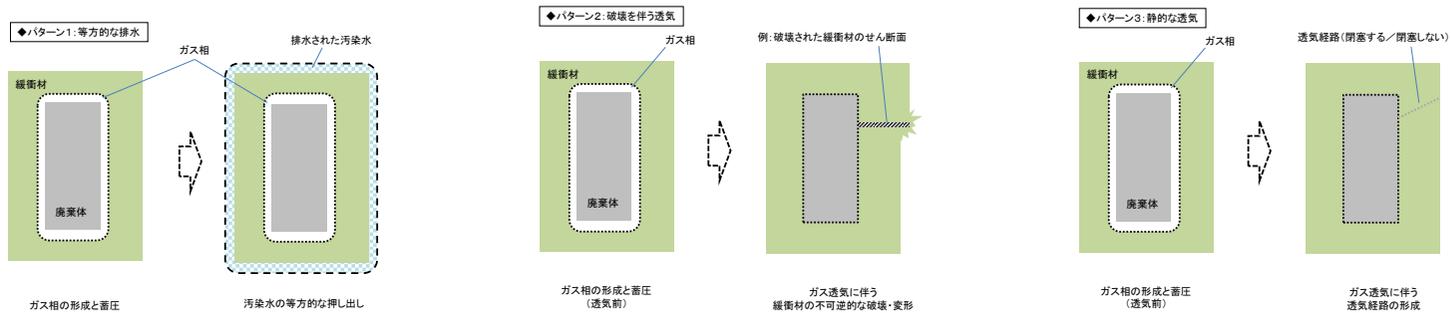
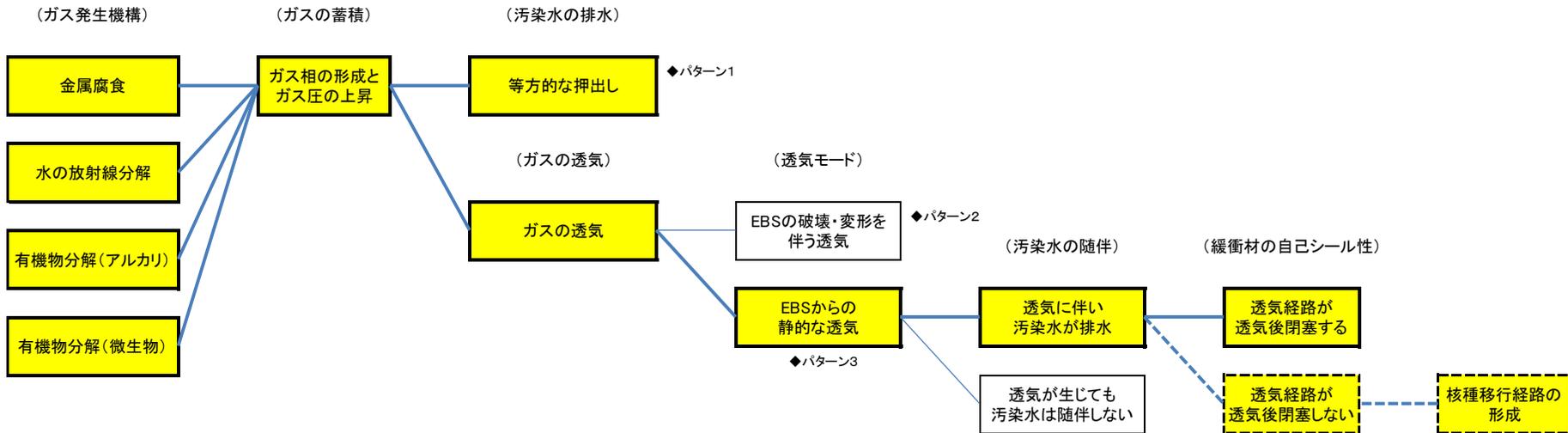


図 3.4.2-1 第2次 TRU レポートにおけるガス事象のロジックツリー



本業務におけるガス事象のロジックツリー

- 等方的な押し出しにより、ある期間、想定される移行速度／拡散速度より早く汚染水を排水する。
- 静的な透気と汚染水の随伴において、緩衝材の自己シール性が失われ、透気経路が汚染水の移行経路として残るケースも仮想的に想定する。
- パターン3における透気経路がある程度把握できる。

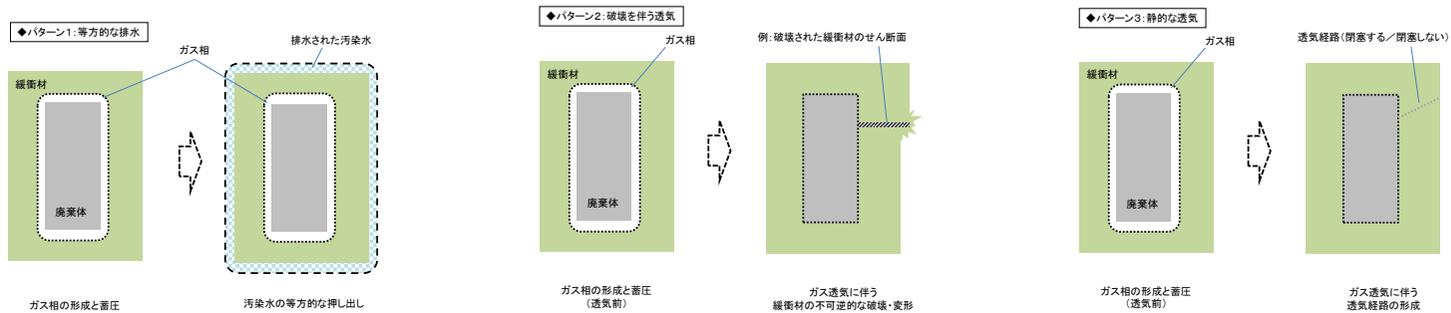


図 3.4.2-2 本検討におけるガス事象のロジックツリー

2) 核種移行解析における解析ケースの設定

a. ガス移行解析における解析ケース設定

「3.3.3」項で述べたガス移行解析におけるケース設定を表 3.4.2-1 に示す。

核種移行解析への主要な引き渡し条件となる汚染水の排水への影響が大きいと考えられる以下の不確実性に着目し、それぞれを代表するパラメータあるいは現象を以下のように設定している。

- ① ガス発生量に係る不確実性→G：ガス発生量
- ② 間隙水の量に係る不確実性→W：廃棄体間隙率
- ③ 媒体内のガス挙動に係る不確実性→B：緩衝材の水理物性
- ④ ベントナイトバリアの健全性に係る不確実性→P：流路拡幅現象

各不確実性における設定概要を以下に記述する。

ガス発生量 G については、G1 (TRU-2 相当)、G2 (TRU-2 より発生量大)、G3 (TRU-2 より発生量小) と設定した。

廃棄体間隙率 W については、W1 (TRU-2 相当、 $\phi=0.19$)、W2 (人工バリア変質影響ケース相当、 $\phi=0.5$) と設定した。

緩衝材の水理特性 B については、B1 (排水量最少ケース) となる水理物性、および B2 (排水量最大ケース) となる水理物性を設定した。

流路拡幅現象 P は、ガスの透気現象を記述するフラッグであるが、ガス影響による核種移行におけるバリアの状態を記述する、最も重要な因子のひとつである。

P0 はガス移行では流路拡幅を考慮しないケース (TRU-2 相当) であり、核種移行ではガス透気による破過が発生せず、ガス影響によって汚染水が等方的に排水されるシナリオとなる。

P1 はガス移行では緩衝材の流路拡幅は考慮するが自己修復性は考慮しないケースである。これは核種移行では、ガス透気による破過が生じ透気経路 (=核種移行経路) が形成されるが、緩衝材の自己シール性は機能せず同経路は閉塞せず、同経路が評価期間中存在し続けるシナリオとなる。

P2 はガス移行では緩衝材の流路拡幅を考慮するが、同時に自己修復性も考慮するケースである。これは核種移行では、ガス透気による破過が生じ透気経路 (=核種移行経路) が形成されるが、緩衝材の自己シール性が機能して、一定期間後には同経路は閉塞するシナリオとなる。

表 3.4.2-1 不確実性を考慮したガス移行解析のケース一覧

ケース名	G：ガス発生速度 (mol/m/y) 量	W：廃棄体間隙率	B：緩衝材水理物性	P：流路拡幅現象
Case-G1W1B1P0	1 倍 (全評価期間中)	0.19	TRU2	考慮しない
Case-G2W1B1P0	10 倍 (評価開始直後から 0.1 年まで)	↑	↑	↑
Case-G3W1B1P0	10 倍 (全評価期間中)	↑	↑	↑
Case-G1W2B1P0	1 倍 (全評価期間中)	0.5	↑	↑
Case-G2W2B1P0	10 倍 (評価開始直後から 0.1 年まで)	↑	↑	↑
Case-G3W2B1P0	10 倍 (全評価期間中)	↑	↑	↑
Case-G1W1B1P1	1 倍 (全評価期間中)	0.19	↑	考慮 (自己修復性無し)
Case-G2W1B1P1	10 倍 (評価開始直後から 0.1 年まで)	↑	↑	↑
Case-G3W1B1P1	10 倍 (全評価期間中)	↑	↑	↑
Case-G1W2B1P1	1 倍 (全評価期間中)	0.5	↑	↑
Case-G2W2B1P1	10 倍 (評価開始直後から 0.1 年まで)	↑	↑	↑
Case-G3W2B1P1	10 倍 (全評価期間中)	↑	↑	↑
Case-G1W1B2P1	1 倍 (全評価期間中)	0.19	FY2012_SG②	↑
Case-G2W1B2P1	10 倍 (評価開始直後から 0.1 年まで)	↑	↑	↑
Case-G3W1B2P1	10 倍 (全評価期間中)	↑	↑	↑
Case-G1W2B2P1	1 倍 (全評価期間中)	0.5	↑	↑
Case-G2W2B2P1	10 倍 (評価開始直後から 0.1 年まで)	↑	↑	↑
Case-G3W2B2P1	10 倍 (全評価期間中)	↑	↑	↑
Case-G1W1B2P2	1 倍 (全評価期間中)	0.19	↑	考慮 (自己修復性有り)
Case-G2W1B2P2	10 倍 (評価開始直後から 0.1 年まで)	↑	↑	↑
Case-G3W1B2P2	10 倍 (全評価期間中)	↑	↑	↑
Case-G1W2B2P2	1 倍 (全評価期間中)	0.5	↑	↑
Case-G2W2B2P2	10 倍 (評価開始直後から 0.1 年まで)	↑	↑	↑
Case-G3W2B2P2	10 倍 (全評価期間中)	↑	↑	↑

b. ガス影響を考慮した核種移行解析の解析ケース設定

核種移行解析におけるケース設定を表 3.4.2-2 に示す。核種移行解析では、ガス影響を考慮したガス移行解析ケースから抜粋した代表的な解析ケースに加え、核種移行解析の標準となるリファレンスケース（第2次 TRU レポート相当）を実施する。

表 3.4.2-2 ガス影響を考慮した核種移行解析のケース設定

ケース名	ガス発生量(G)	廃棄体間隙率(W)	緩衝材水理物性(B)	緩衝材の流路拡幅(P)	
				破過	自己修復性
リファレンス	—	標準設定 ($\phi = 0.19$)	標準設定 (TRU-2 相当)	なし	(ガス透気とは無関係に自己シール性あり)
G1W1B1P0	TRU-2 相当	$\phi = 0.19$	TRU-2 相当	なし (等方的な排水)	(ガス透気とは無関係に自己シール性あり)
G1W2B2P1	TRU-2 相当	$\phi = 0.5$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞しない
G1W2B2P2	TRU-2 相当	$\phi = 0.5$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞する
G3W1B2P1	10 倍 (全評価期間)	$\phi = 0.19$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞しない
G3W1B2P2	10 倍 (全評価期間)	$\phi = 0.19$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞する

(2) ガス影響についての整理

1) ガス発生量評価結果

ガス発生量については、ガス移行解析と同様、第2次 TRU レポートにおける堆積系岩盤、廃棄体グループ2/キャニスタでの評価結果(図 3.4.2-3 参照、安藤ら(2005) [14]より)を基本的な条件として引用することとした。

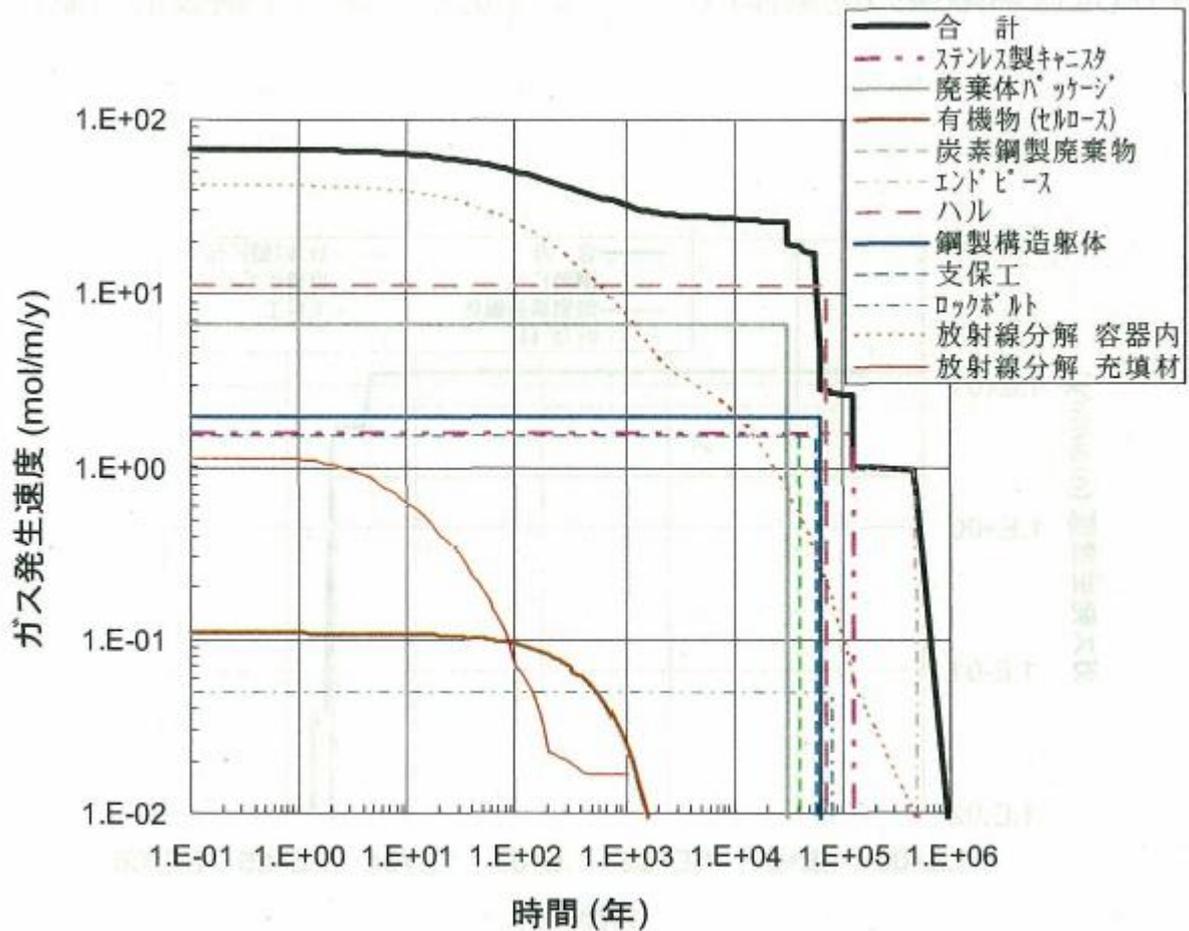


図 3.4.2-3 ガス発生量の評価結果 (堆積系岩盤、廃棄体グループ2/キャニスタ)

2) ガス移行解析結果

a. ケース G1W1B1P0

ガス移行解析側で実施した、ケース G1W1B1P0 でのガス移行解析結果のうち、廃棄体外側境界を観測点とした排水速度および累積排水量を図 3.4.2-4 に、緩衝材外側境界を観測点とした考慮する排水速度および累積排水量を図 3.4.2-5 に示す。

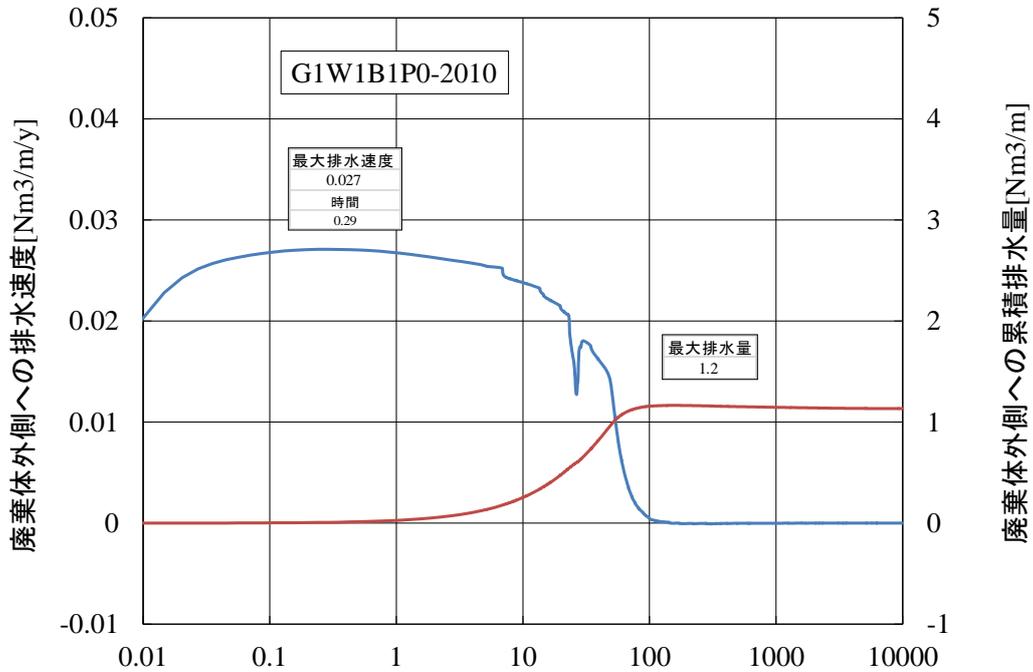


図 3.4.2-4 廃棄体外側境界でのガス移行解析結果 (G1W1B1P0)

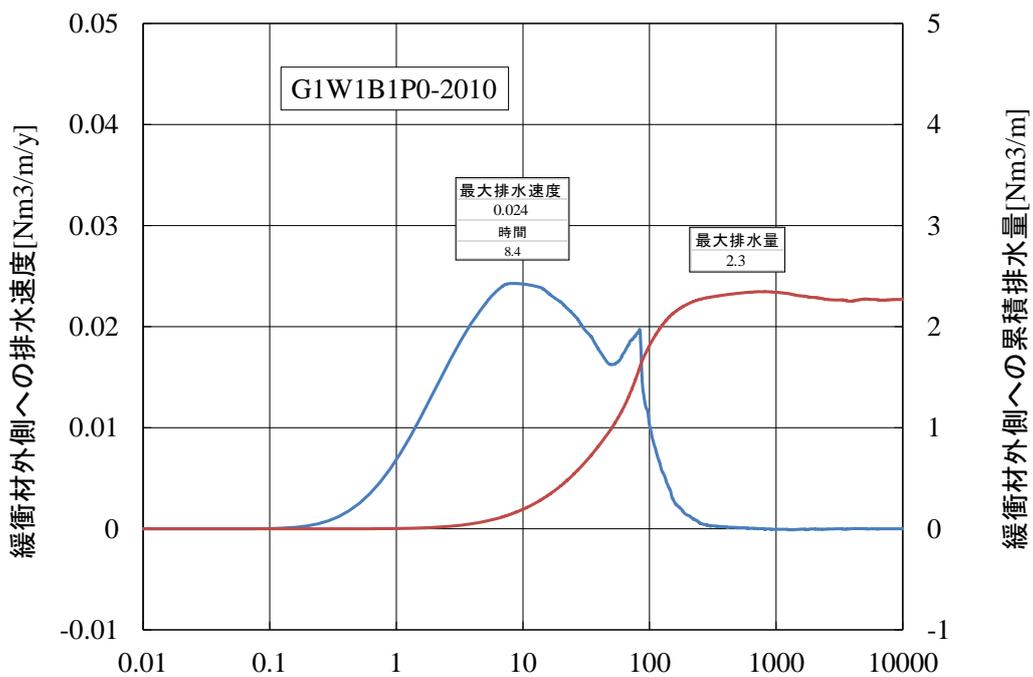


図 3.4.2-5 緩衝材外側境界でのガス移行解析結果 (G1W1B1P0)

b. ケース G1W2B2P1

ガス移行解析側で実施した、ケース G1W2B2P1 でのガス移行解析結果のうち、廃棄体外側境界および緩衝材外側境界を観測点とした排水速度および累積排水量を図 3.4.2-6 に示す。

また同ケースはガス移行解析において流路拡幅を考慮する設定となっており、ガスの透気時に破過が生じ、透気経路=核種移行経路が形成され、同経路が閉塞しない設定となっている。排水量がピークとなる時点における流路拡幅状況を図 3.4.2-7 に示す。

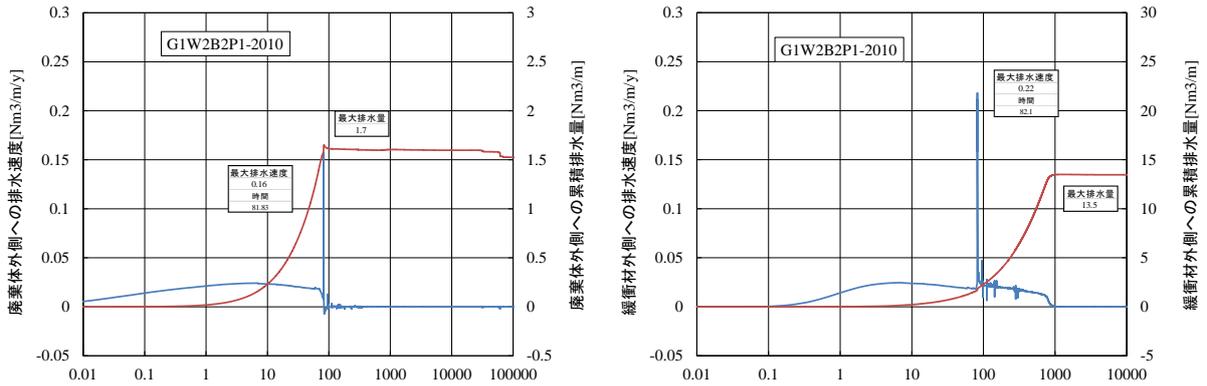


図 3.4.2-6 廃棄体外側境界および緩衝材外側境界でのガス移行解析結果 (G1W2B2P1)

◆ G1W2B2P1の結果

排水量最大ピーク時

- ・緩衝材外側への排水量グラフにおける最大ピーク
時間: 82.110 yr、排水量: 0.218 Nm³/yr/m
- ・左図、下図に上記最大ピーク時の流路拡幅箇所図を示す。
- ・透気経路と考えられる流路拡幅箇所は2か所(うち一か所は枝分かれ)存在していた。



- ・②は排水量のピークが観察される前からインバートにつながっていた
→透気経路ではないと考えられる
- ・①の□の部分がつながったときに排水量のピークが観察された
→下図①の黄色の矢印部分が透気経路と考えられる

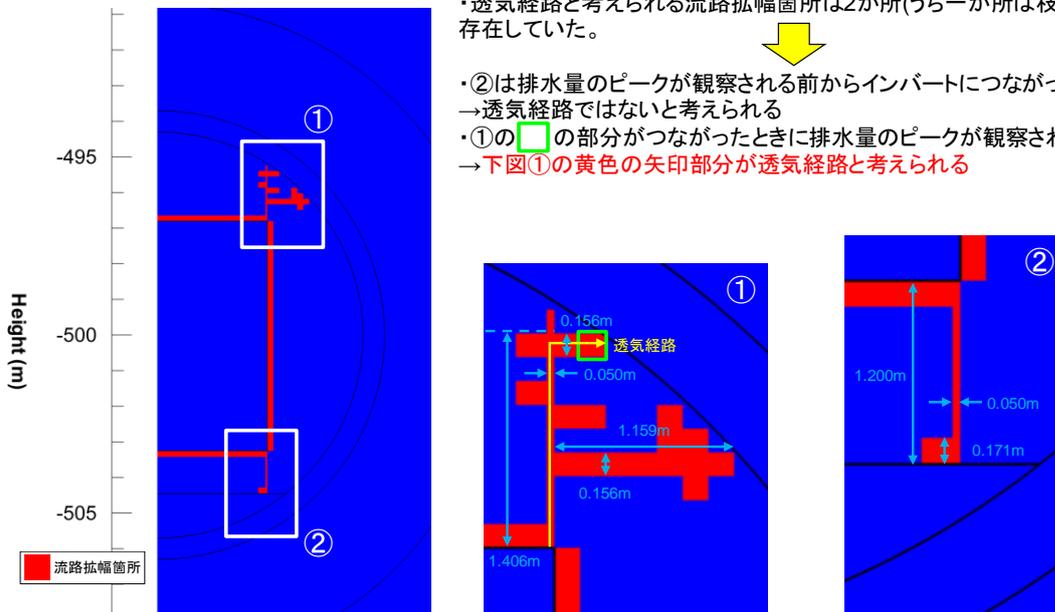


図 3.4.2-7 流路拡幅状況 (G1W2B2P1)

c. ケース G1W2B2P2

ガス移行解析側で実施した、ケース G1W2B2P2 でのガス移行解析結果のうち、廃棄体外側境界および緩衝材外側境界を観測点とした排水速度および累積排水量を図 3.4.2-8 に示す。

また同ケースはガス移行解析において流路拡幅を考慮する設定となっており、ガスの透気時に破過が生じ、透気経路=核種移行経路が形成されるが、緩衝材は自己修復性が機能し、透気後は同経路が閉塞する設定となっている。排水量がピークとなる時点における流路拡幅状況を図 3.4.2-9 に示す。

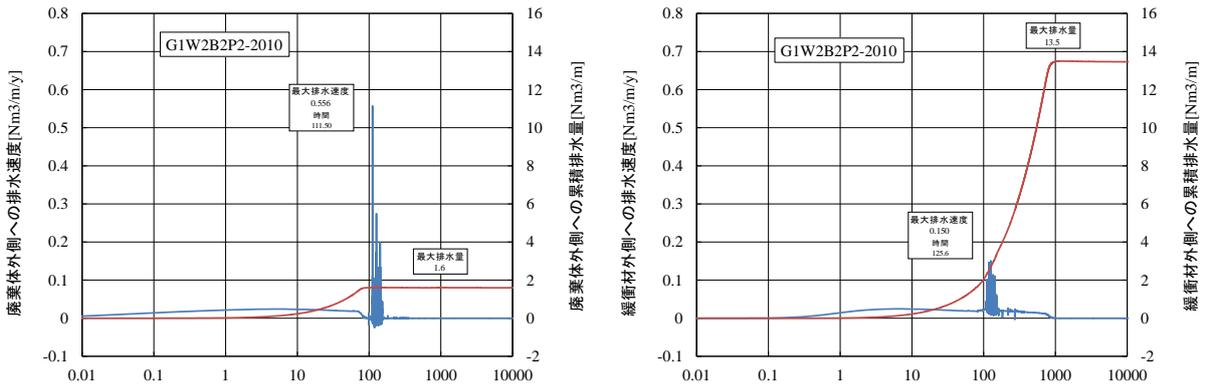
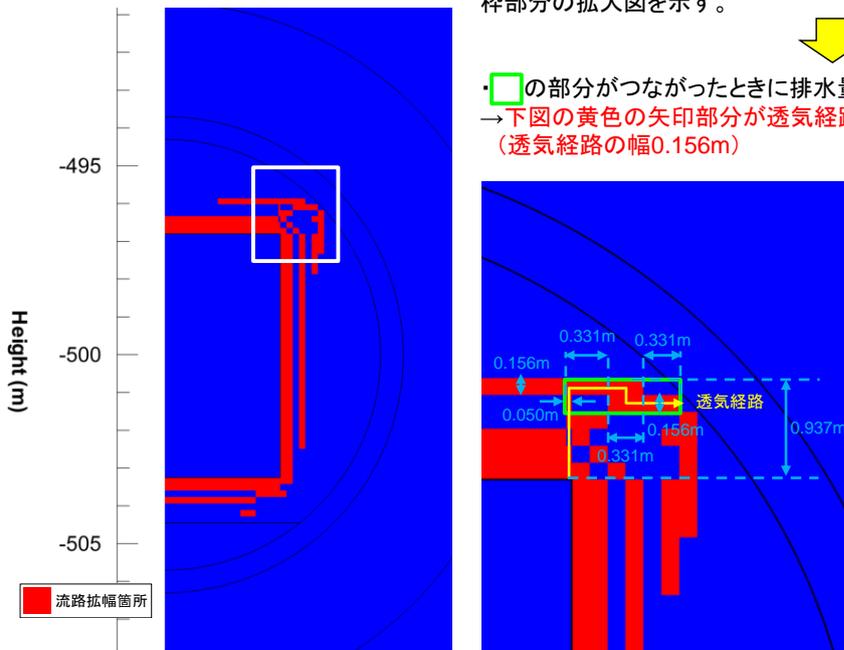


図 3.4.2-8 廃棄体外側境界および緩衝材外側境界でのガス移行解析結果 (G1W2B2P2)

◆ G1W2B2P2の結果

廃棄体外側への排水量最大ピーク時

- ・廃棄体外側への排水量グラフにおける最大ピーク
時間: 111.503 yr、排水量: 0.556 Nm³/yr/m
- ・左図、下図にそれぞれ上記最大ピーク時の流路拡幅箇所図、及び白枠部分の拡大図を示す。



- ・□の部分がつながったときに排水量のピークが観察された
→下図の黄色の矢印部分が透気経路と考えられる。
(透気経路の幅0.156m)

図 3.4.2-9 流路拡幅状況 (G1W2B2P2)

d. ケース G3W1B2P1

ガス移行解析側で実施した、ケース G3W1B2P1 でのガス移行解析結果のうち、廃棄体外側境界および緩衝材外側境界を観測点とした排水速度および累積排水量を図 3.4.2-10 に示す。

また同ケースはガス移行解析において流路拡幅を考慮する設定となっており、ガスの透気時に破過が生じ、透気経路=核種移行経路が形成され、同経路が閉塞しない設定となっている。排水量がピークとなる時点における流路拡幅状況を図 3.4.2-11 に示す。

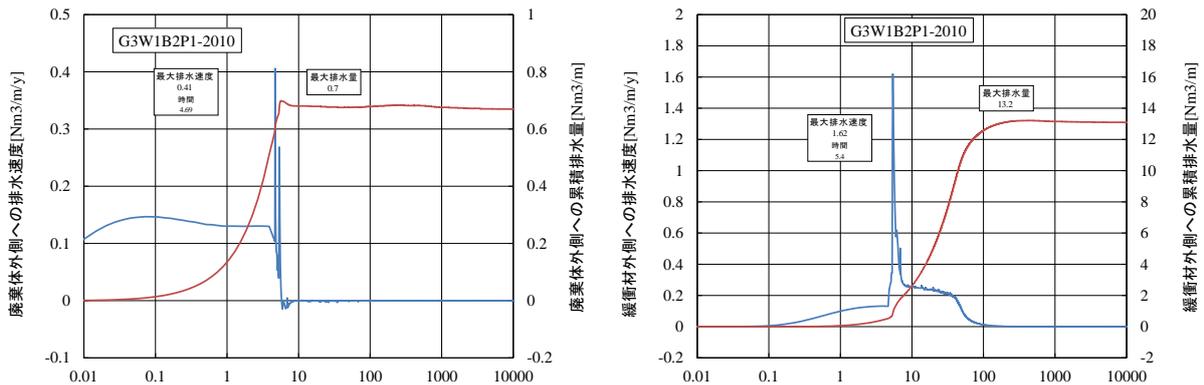
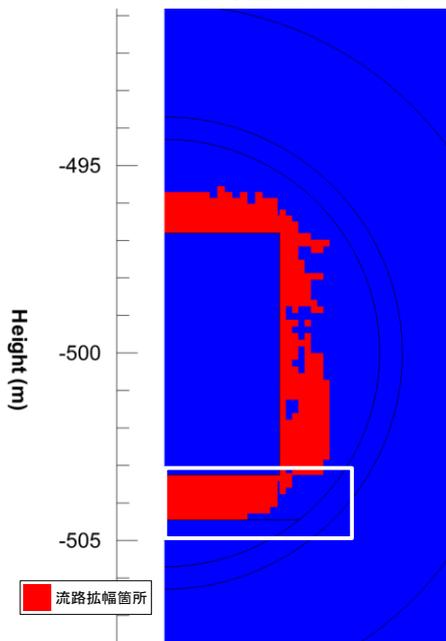


図 3.4.2-10 廃棄体外側境界および緩衝材外側境界でのガス移行解析結果 (G3W1B2P1)

◆ G3W1B2P1の結果

緩衝材外側への
排水量最大ピーク時



- ・緩衝材外側への排水量グラフにおける最大ピーク
時間: 5.40777yr、排水量: 1.619Nm³/yr/m
- ・左図、下図にそれぞれ上記最大ピーク時の流路拡幅箇所図、及び白枠部分の拡大図を示す。



- ・の部分が破過したときに排水量のピークが観察された
→透気経路の幅の考え方が難しいため、ピーク直前→ピーク時で破過したベントナイト底部の幅と、ピーク時に破過しているベントナイト底部全ての幅の、両方の幅を提示する。
- ・それぞれの幅は以下の通り
ピーク直前→ピーク時で破過したベントナイト底部の幅: 1.000 m
ピーク時に破過しているベントナイト底部全ての幅: 2.200 m

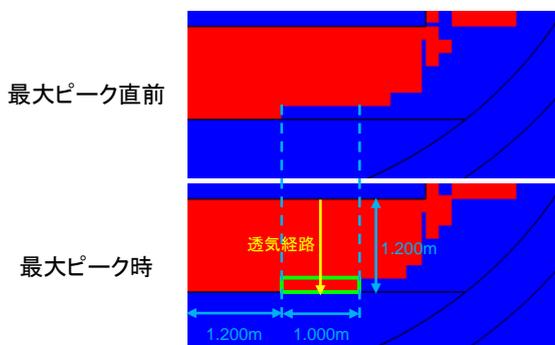


図 3.4.2-11 流路拡幅状況 (G3W1B2P1)

e. ケース G3W1B2P2

ガス移行解析側で実施した、ケース G3W1B2P2 でのガス移行解析結果のうち、廃棄体外側境界および緩衝材外側境界を観測点とした排水速度および累積排水量を図 3.4.2-12 に示す。

また同ケースはガス移行解析において流路拡幅を考慮する設定となっており、ガスの透気時に破過が生じ、透気経路=核種移行経路が形成されるが、緩衝材は自己修復性が機能し、透気後は同経路が閉塞する設定となっている。排水量がピークとなる時点における流路拡幅状況を図 3.4.2-13 に示す。

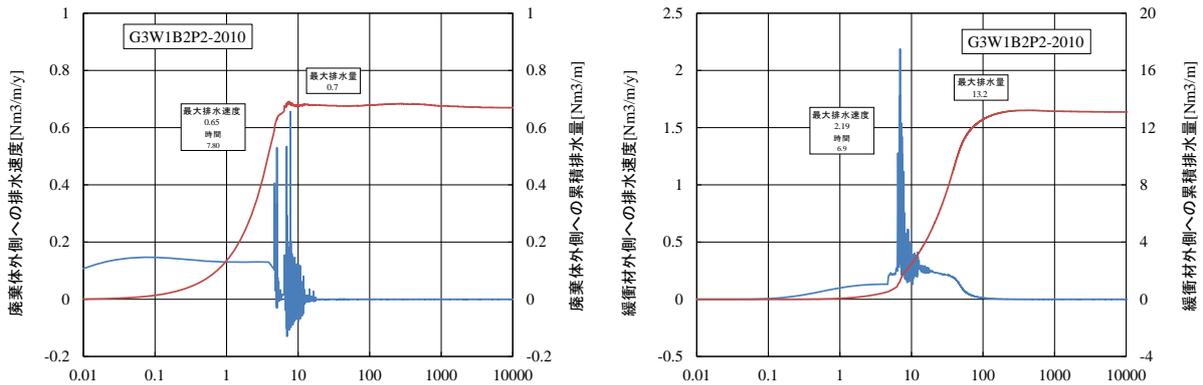


図 3.4.2-12 廃棄体外側境界および緩衝材外側境界でのガス移行解析結果 (G3W1B2P2)

◆ G3W1B2P2の結果

緩衝材外側への
排水量最大ピーク時

- ・緩衝材外側への排水量グラフにおける最大ピーク
時間: 6.91718yr、排水量: 2.188Nm3/yr/m
- ・左図、下図にそれぞれ上記最大ピーク時の流路拡幅箇所図、及び白枠部分の拡大図を示す。



- ・□の部分が破過したときに排水量のピークが観察された
→下図の黄色の矢印部分が透気経路と考えられる。
(透気経路の幅0.166m)

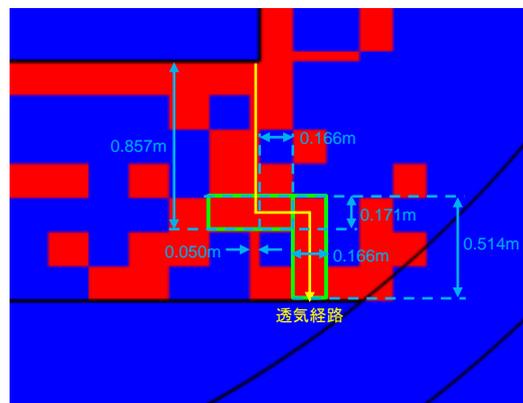
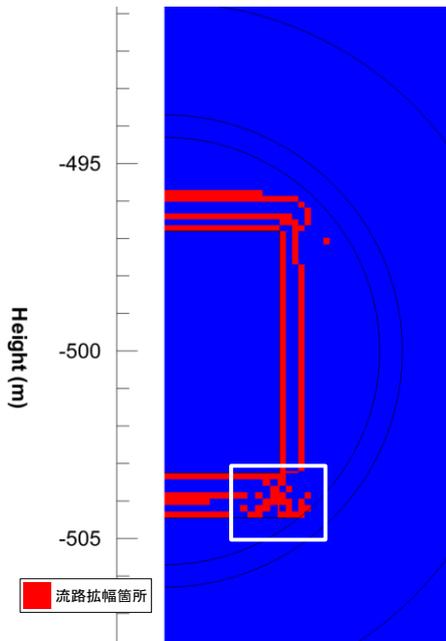


図 3.4.2-13 流路拡幅状況 (G3W2B2P2)

3) ガス移行解析結果の解釈と核種移行解析への取込

本項では、前項に示したガス移行解析結果を核種移行解析に反映するための近似方法について記述する。

ガス移行解析の設定のうち、流路拡縮状態の設定 (P0/P1/P2) によって核種移行解析における移行媒体のモデル化が変更となる。モデル化の変更の模式図を図 3.4.2-14 に示す。

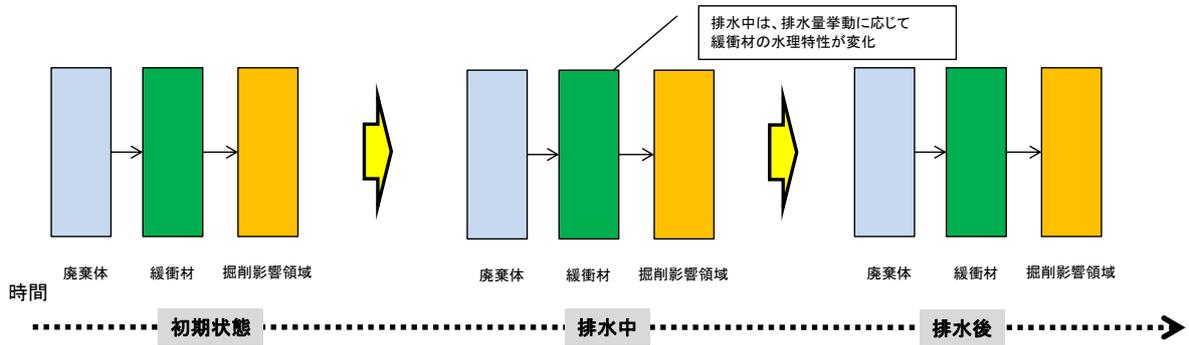
P0 のように流路拡幅を考慮せず、破過が生じないケースでは、評価期間中、移行媒体の構成には変更はない。ただし排水期間中は、排水挙動に応じて緩衝材の水理特性が変化するものとして汚染水が等方的に排水される挙動を模擬する²。

P1 のように流路拡幅を考慮し、しかも自己修復性を考慮しないケースでは、透気期間中に緩衝材領域に透気経路＝移行経路が緩衝材領域に新たに形成され、しかもそれが評価期間中残存するようなモデル構成となる。

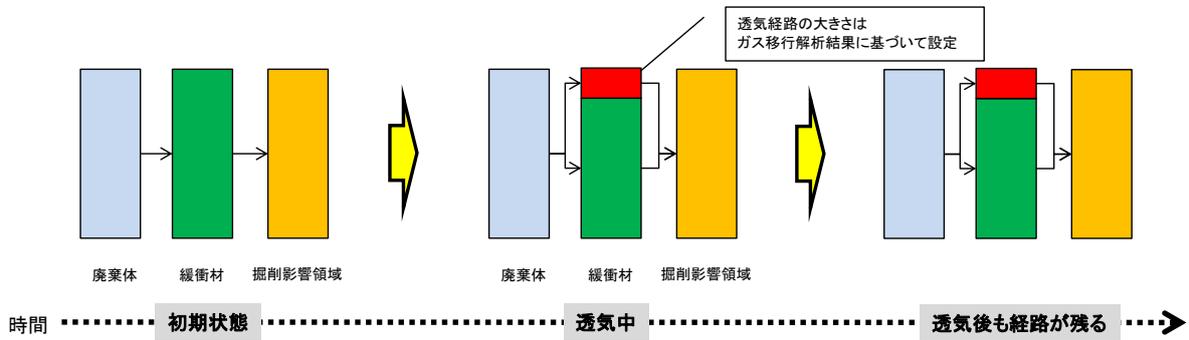
P2 のように流路拡幅を考慮し、同時に自己修復性を考慮するケースでは、透気期間中に緩衝材領域に透気経路＝移行経路が緩衝材領域に新たに形成されるが、透気後は同経路は消失し、緩衝材だけを移行媒体とする初期の状態に復帰するモデル構成となる。

汚染水の排水現象については、ガス移行解析における排水速度と累積排水量を勘案して核種移行解析上のパラメータ設定を行うが、排水速度／累積排水量の観測点については廃棄体外側境界および緩衝材外側境界とした場合の 2 つのガス移行解析結果をにらんで、核種移行上の設定を行うものとする (図 3.4.2-15 参照)。廃棄体外側境界を観測点とした場合、汚染水の移動という観点でほぼ正しく反映できているという長所がある一方、緩衝材側に汚染水を排水しているのみであり、人工バリア外に出る汚染水を表していないという短所がある。緩衝材外側境界を観測点とした場合、緩衝材の止水性能を阻害するという観点でガス影響を直接的に表しているという長所がある一方、特に排水現象が早期に生じる場合には汚染水の排水を表現していない (緩衝材外側近傍まで、拡散支配の場をまだ核種が移行していない) 可能性があるという短所がある。核種移行解析上の近似を行う場合には、廃棄体外側／緩衝材外側を観測点とした評価結果をみて、排水速度および累積排水量の観点でより大きな結果となった方を保存するように設定することで、保守的な評価を行うものとする。透気経路＝移行経路が形成される場合の当該経路の大きさについては、排水速度が最大となる時点での流路拡幅状況から設定するものとした。

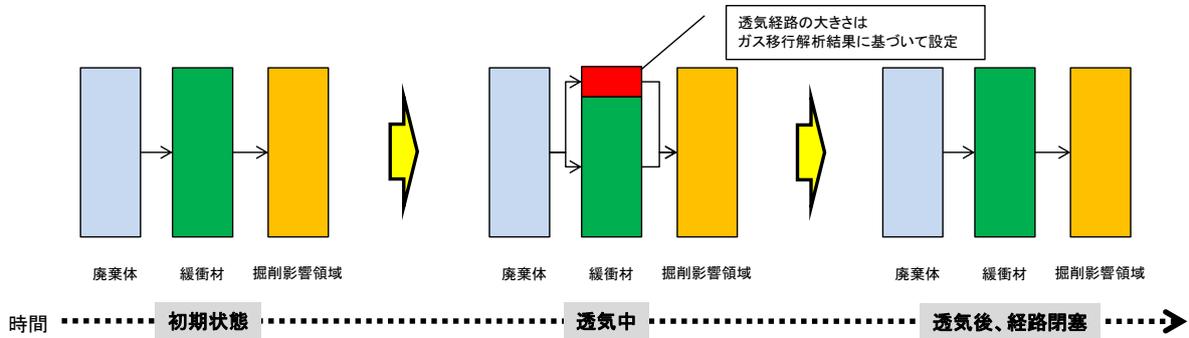
² 現実的には、動水勾配だけの driving force が動水勾配+ガス圧の driving force となることで排水量の増大が生じるが、核種移行解析上は、該当時間における緩衝材の透水係数の上昇として表現する。



(1) P0 : 破過が生じない (等方的な排水)



(2) P1 : 透気経路=核種移行経路生成 (閉塞しない)



(3) P2 : 透気経路=核種移行経路生成 (透気後、閉塞する)

図 3.4.2-14 流路拡幅状態の設定に応じた核種移行モデルの考え方

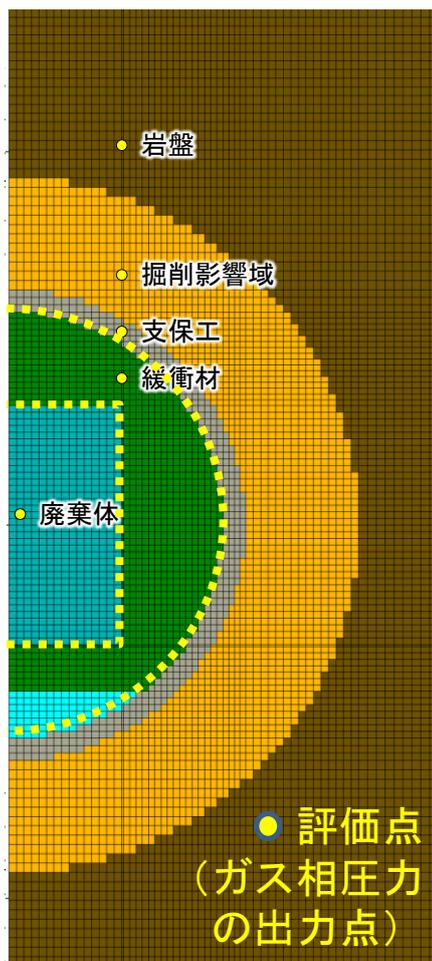


図 3.4.2-15 ガス移行解析の観測点 (廃棄体外側境界と緩衝材外側境界)

a. ケース G1W1B1P0

ケースG1W1B1P0におけるガス移行解析結果の核種移行解析への近似を図 3.4.2-16に示す。
 主な条件は次の通りである。

- 破過なし（等方的排水）
- 最大排水速度：廃棄体外側より選択（ $0.027 \text{ Nm}^3/\text{m/y}$ ）
- 累積排水量：緩衝材外側より選択（ $2.3 \text{ Nm}^3/\text{m}$ ）
- 核種移行解析のための近似： $0.03 \text{ Nm}^3/\text{m/y}$ で、 $0.01 \sim 100$ 年排水（累積 約 $3 \text{ Nm}^3/\text{m}$ ）。
- 透気経路=移行経路の大きさ：－（破過なし）

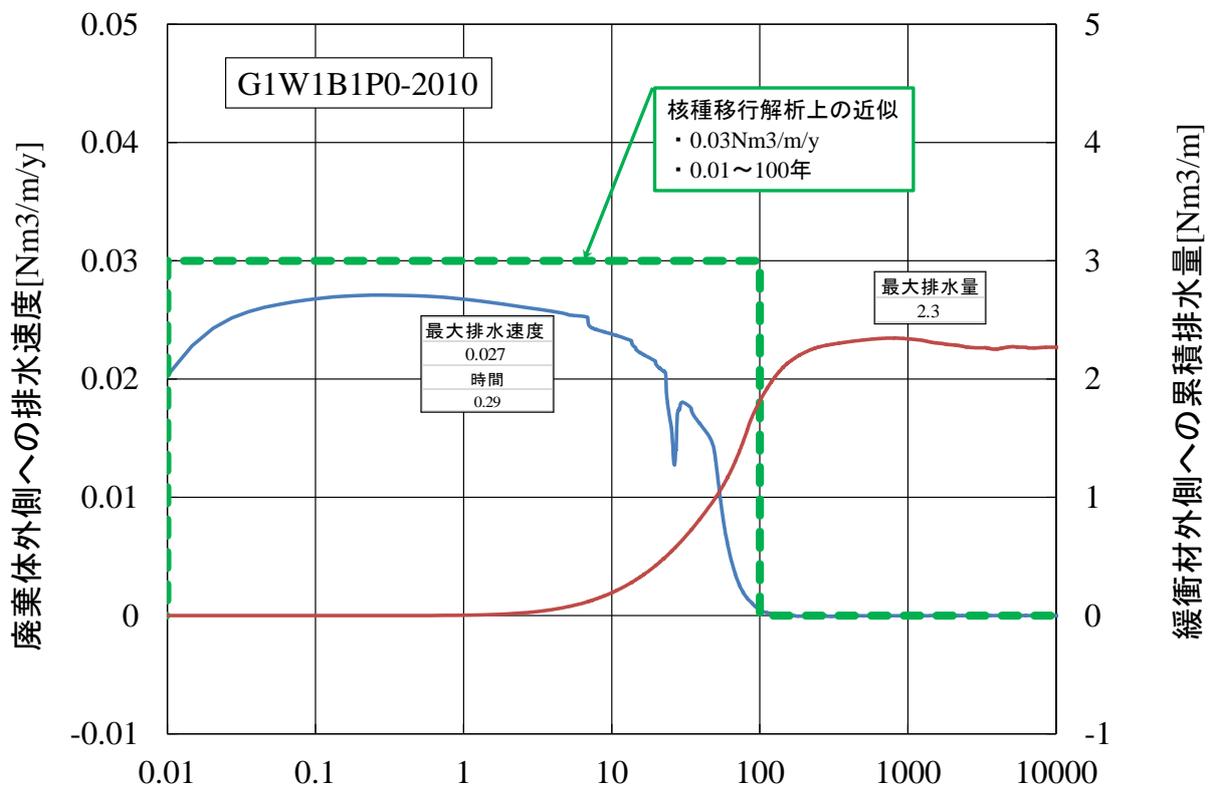


図 3.4.2-16 核種移行解析上のガス移行解析結果の近似 (G1W1B1P0)

b. ケース G1W2B2P1

ケースG1W2B2P1におけるガス移行解析結果の核種移行解析への近似を図 3.4.2-17に示す。
 主な条件は次の通りである。

- 破過あり、透気経路=移行経路の閉塞なし
- 最大排水速度：緩衝材外側より選択 (0.22 Nm³/m/y、82.1 年)
- 累積排水量：緩衝材外側より選択 (13.5 Nm³/m/y)
- 核種移行解析のための近似：閉鎖後 80 年より、0.23 Nm³/m/y (その後継続)
- 透気経路=移行経路の大きさ：0.156 m²

新たに形成された透気経路=移行経路は閉塞しないため、累積排水量は核種移行解析の方が過大となっている。また移行経路の大きさは、流路拡幅状況の観察結果より、0.156m (2 次元断面上の透気経路幅幅) ×1m (ガス移行解析の 2 次元断面は単位坑道長さで実施) =0.156m² とした。

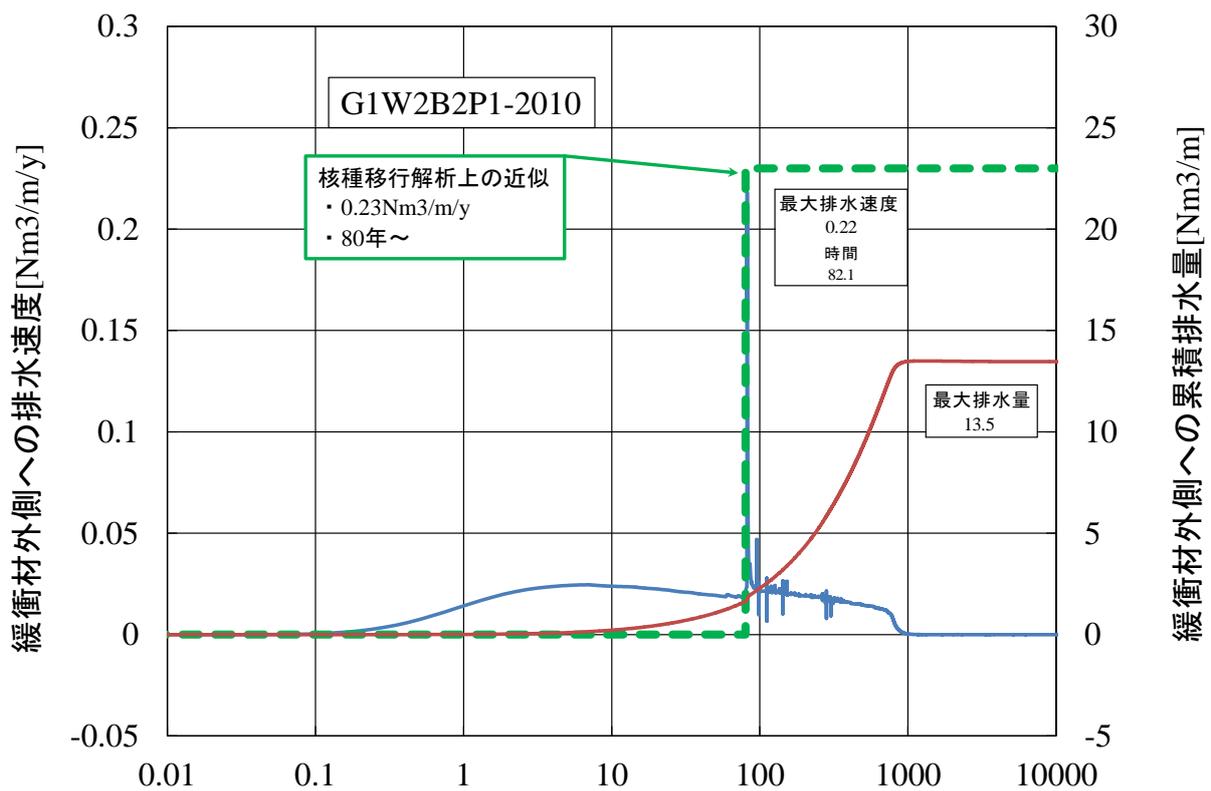


図 3.4.2-17 核種移行解析上のガス移行解析結果の近似 (G1W2B2P1)

c. ケース G1W2B2P2

ケースG1W2B2P2におけるガス移行解析結果の核種移行解析への近似を図 3.4.2-18に示す。主な条件は次の通りである。

- 破過あり、透気経路=移行経路の閉塞あり
- 最大排水速度：廃棄体外側より選択 (0.556 Nm³/m/y、111.5 年)
- 累積排水量：緩衝材外側より選択 (13.5 Nm³/m)
- 核種移行解析のための近似：閉鎖後 110~140 年、0.56 Nm³/m/y、累積排水量 16.8 Nm³/m
- 透気経路=移行経路の大きさ：0.156 m²

新たに形成された透気経路=移行経路は自己修復して閉塞するため、ガス移行結果に合わせて排水速度は **peaky** になるとともに、累積排水量もガス解析結果に比較的良好に近似できている。

移行経路の大きさについては、流路拡幅状況の観察結果より保守的な透気経路幅として0.156mを選定し、透気経路面積は、0.156 m (2次元断面上の透気経路幅) × 1m (ガス移行解析の2次元断面は単位坑道長さで実施) = 0.156m² とした。

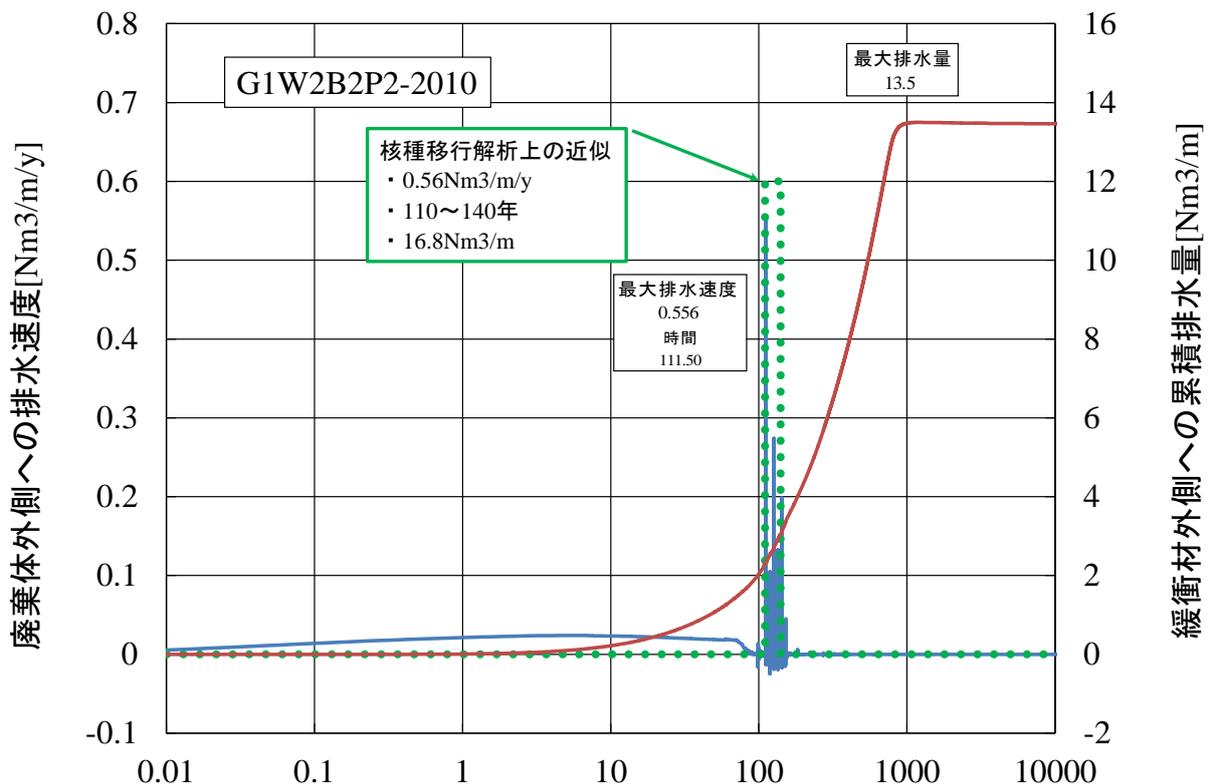


図 3.4.2-18 核種移行解析上のガス移行解析結果の近似 (G1W2B2P2)

d. ケース G3W1B2P1

ケース G3W1B2P1 におけるガス移行解析結果の核種移行解析への近似を図 3.4.2-19 に示す。
 主な条件は次の通りである。

- 破過あり、透気経路=移行経路の閉塞なし
- 最大排水速度：緩衝材外側より選択 (1.62 Nm³/m/y、5.4 年)
- 累積排水量：緩衝材外側より選択 (13.2 Nm³/m)
- 核種移行解析のための近似：閉鎖後 5 年より、1.7 Nm³/m/y (その後継続)
- 透気経路=移行経路の大きさ：1.0 m²(破過時のメッシュ増分から決定)、または、
 2.2 m²(破過時のメッシュ増分から決定)

新たに形成された透気経路=移行経路は閉塞しないため、累積排水量は核種移行解析の方が過大となっている。また、同ケースでは底部ベントナイトにてガス透気の破過が生じることが示唆されているが、移行経路幅の同定が難しいため、次の 2 つのケースで核種移行解析を行うこととした。

- ◆移行経路幅 (破過時近傍時点でのメッシュ幅の増分) : 1.0m
- ◆移行経路幅 (破過時点でのメッシュ幅全体) : 2.2m

したがって、同ケースでは、透気経路面積は、1.0 m (2 次元断面上の透気経路幅幅) × 1m (ガス移行解析の 2 次元断面は単位坑道長さで実施) = 1.0m² とした場合と、2.2 m (2 次元断面上の透気経路幅幅) × 1m (ガス移行解析の 2 次元断面は単位坑道長さで実施) = 2.2m² とした場合について、併せて解析を行うこととする。

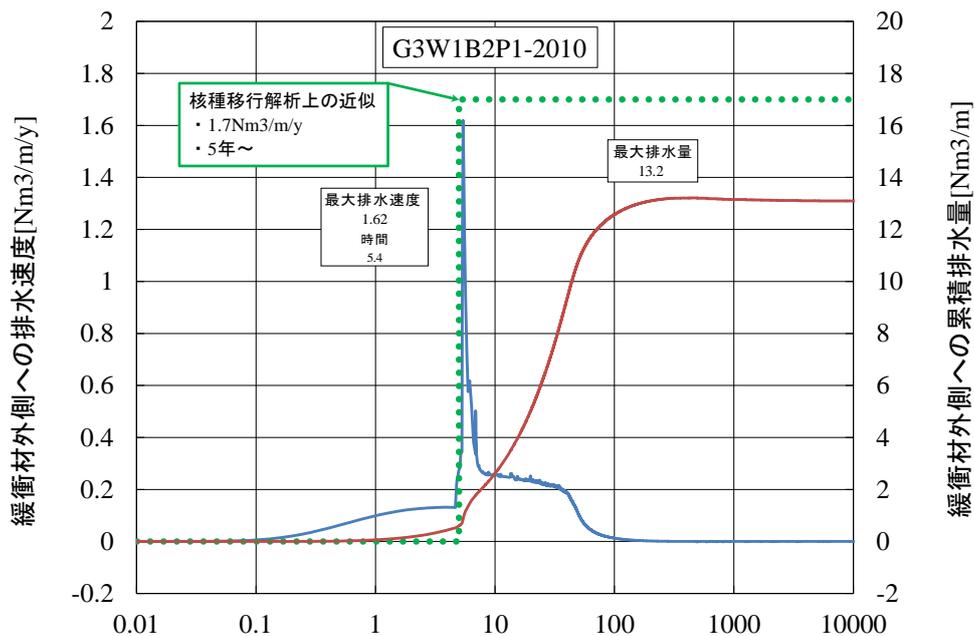


図 3.4.2-19 核種移行解析上のガス移行解析結果の近似 (G3W1B2P1)

e. ケース G3W1B2P1

ケース G3W1B2P2 におけるガス移行解析結果の核種移行解析への近似を図 3.4.2-20 に示す。
 主な条件は次の通りである。

- 破過あり、透気経路=移行経路の閉塞あり
- 最大排水速度：緩衝材外側より選択 (2.19 Nm³/m/y、6.9 年)
- 累積排水量：緩衝材外側より選択 (13.2 Nm³/m)
- 核種移行解析のための近似：閉鎖後 6~13 年、2.2 Nm³/m/y、累積排水量 15.4 Nm³/m
- 透気経路=移行経路の大きさ：0.166 m²

新たに形成された透気経路=移行経路は自己修復して閉塞するため、ガス移行結果に合わせて排水速度は peaky になるとともに、累積排水量もガス解析結果に比較的良好に近似できている。

移行経路の大きさについては、流路拡幅状況の観察結果より保守的な透気経路幅として 0.166m を選定し、透気経路面積は、0.166 m (2 次元断面上の透気経路幅) × 1m (ガス移行解析の 2 次元断面は単位坑道長さで実施) = 0.166m² とした。

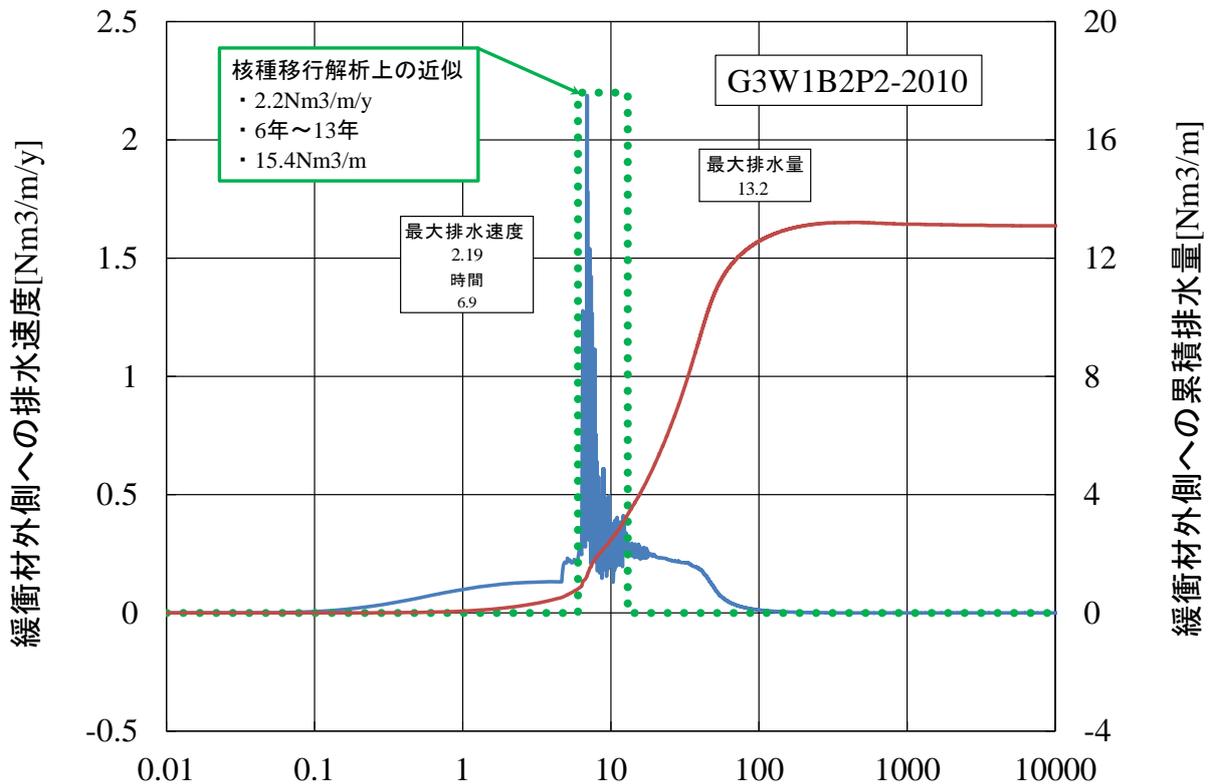


図 3.4.2-20 核種移行解析上のガス移行解析結果の近似 (G3W1B2P2)

(3) 解析モデルの構築

1) 全体像

核種移行解析における解析モデルは、第2次 TRU レポート[4]における解析モデルに準拠する。同レポートでは、廃棄体からの核種漏洩に始まり、生物圏に至るまでの核種の移行経路について、図 3.4.2-21 のような概念を想定している。

核種の移行経路は次のようになる。

廃棄体→人工バリア（充填材、緩衝材等）→母岩→断層破碎帯→生物圏

安全評価においては生物圏に流入した核種と線量換算係数から算出される線量当量率が評価の指標となるが、本業務においては、人工バリアの成立性を議論すべく、影響因子の特定することや許容幅を見定めることが目的であるので、核種移行解析における評価点（人工バリア出口、断層入口、等）や指標（核種フラックス、流入量、等）は、議論の目的に応じて適宜判断するものとする。

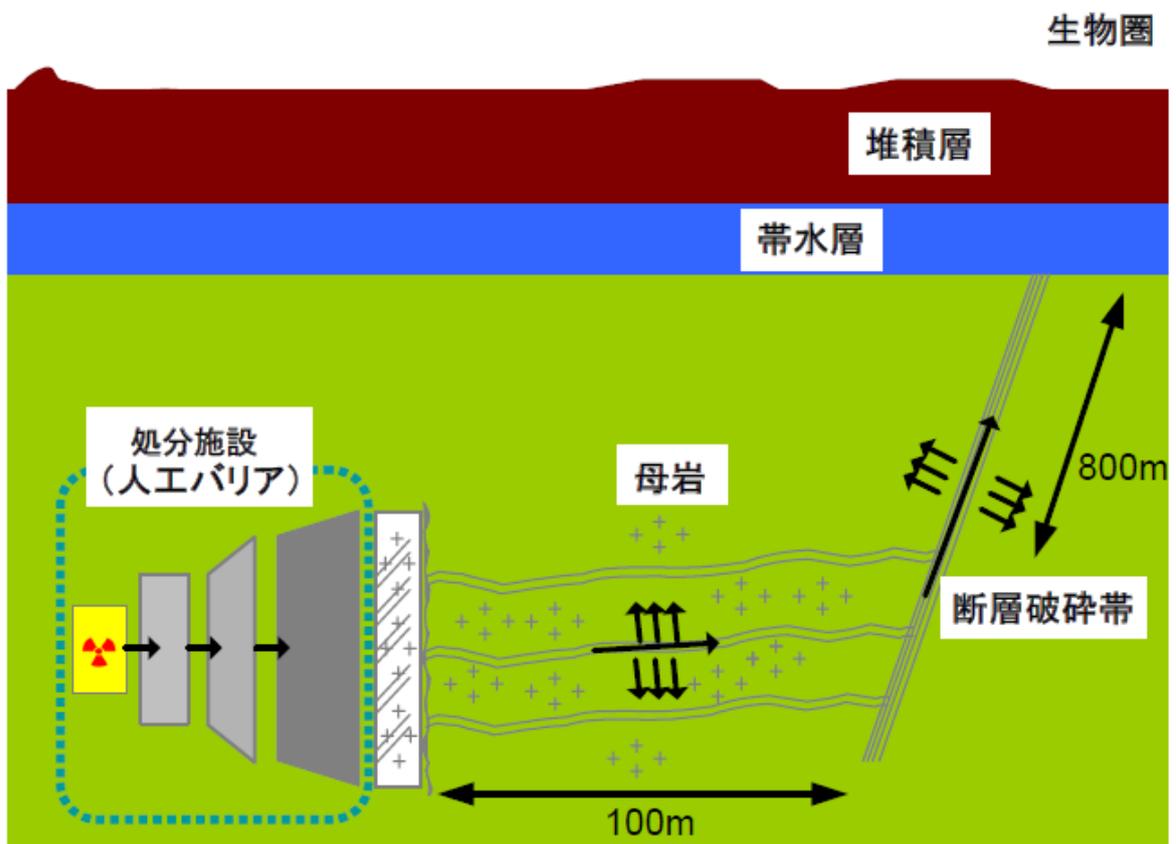


図 3.4.2-21 核種移行経路の概念図

2) 人工バリア中核種移行解析モデル

人工バリアは1次元の多孔質媒体としてモデル化する。評価対象となる廃棄体はグループ2であるので、廃棄体からの核種漏洩にあたっては、ハル・エンドピースの金属腐食に伴う腐食率モデル (band release) を想定する。

人工バリア中の移行媒体としては、セメントからなる充填材領域とベントナイトからなる緩衝材領域を想定する。レファレンスとなる状態では緩衝材は止水バリアとして機能し、水理場を拡散場に維持するが、ガスによる透気現象が生じる場合には、局所的かつ一時的に水理場が乱れる状況を想定する。

人工バリアを通過した核種は掘削影響領域に流入し、そこで空間分布のない核種濃度になっていると仮定する (mixing cell model)³。核種移行における概念モデルとしては、掘削影響領域は人工バリア中の核種移行と天然バリア中の核種移行とを接続する領域として機能する。掘削影響領域内の核種濃度が、天然バリア中核種移行解析における内側境界条件となる。

なお、人工バリア中の核種移行の数学モデルは第2次 TRU レポートと同等であり、ここでは詳述を割愛する。

3) 天然バリア中核種移行解析モデル

天然バリアでの移行経路は、母岩と断層破碎帯から構成される。

母岩での概念モデルは、1次元平行平板モデルの重ね合わせで表現する。核種は1次元平行平板でモデル化された亀裂内を移行すると同時に、亀裂に隣接する母岩マトリクス内部へ拡散する。

母岩を通過した核種は断層破碎帯に流入する。断層破碎帯は単一の1次元平行平板モデルで表現する。

ガスの透気現象による影響は人工バリア内に限定されるものと想定する。したがって、ガス透気現象に伴う天然バリア中核種移行モデルあるいはそのパラメータの設定見直しは生じない。

なお、天然バリア中の核種移行の数学モデルは第2次 TRU レポート[4]と同等であり、ここでは詳述を割愛する。

3 掘削影響領域内の核種濃度は空間分布を持たないが、そこでの経時変化は考慮する。

(4) パラメータ設定

1) 廃棄体

a. 評価対象廃棄物

廃棄体グループ2のうち、収納容器としてキャニスタが適用される表 3.4.2-3 の廃棄物 (Gr2-C) を、核種移行評価の対象とする。4

表 3.4.2-3 評価対象廃棄物

廃棄物		収納容器	発生本数 [体]
発生元	種類		
民間再処理操業	ハル・エンドピース (圧縮体)	キャニスタ	24,150
JNC 再処理操業	ハル・エンドピース (圧縮体)	キャニスタ	1,050
COGEMA	固型物収納体 (圧縮体)	キャニスタ	3,600
Total			28,800

キャニスタ：ステンレス鋼、430φ×1,335H mm

4 廃棄体グループ2としてはこれら以外に BNGS 容器に収納されたセメント固化体もあるが、ガス発生評価の対象となっていないので、核種移行解析においても評価対象から除外する。

b. インベントリ

評価対象となる廃棄体グループ2／キャニスタ (Gr2-C) のモデルインベントリを表 3.4.2-4 に示す。25 年間の中間貯蔵を考慮した設定となっている。

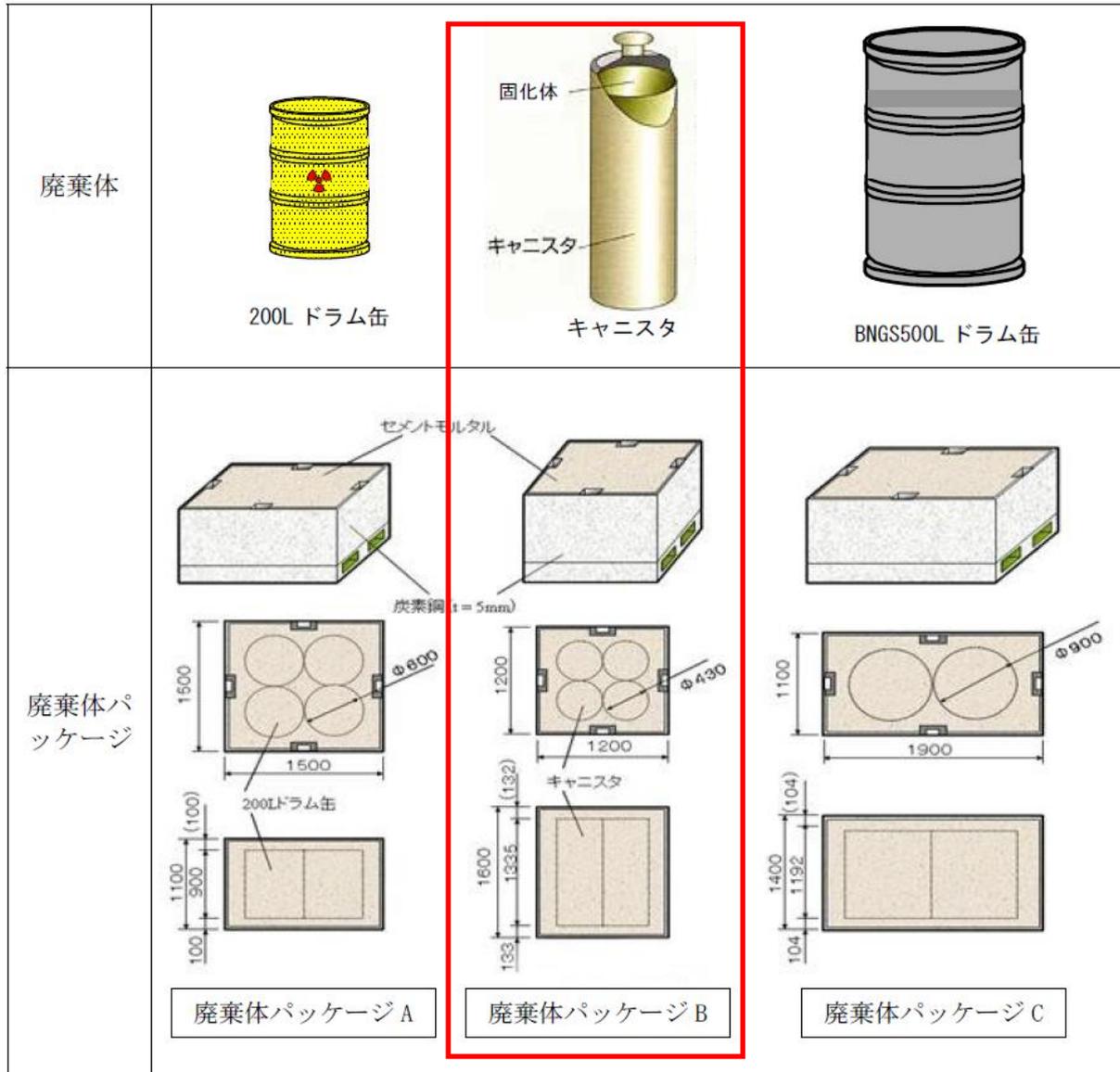
表 3.4.2-4 核種移行評価で用いるモデルインベントリ (Gr2-C)

	半減期*	Gr1-D	Gr2-C	Gr2-B	Gr3-D	Gr3-X	Gr3-B	Gr4-D	Gr4-X	Gr4-B
C-14	5.73E+03	0.0E+00	5.0E+14	3.3E+13	5.6E+12	7.0E+10	2.4E+13	8.4E+11	7.5E+09	4.0E+09
Cl-36	3.01E+05	0.0E+00	8.5E+12	1.8E+08	2.7E+11	1.4E+09	3.6E+04	1.3E+10	1.5E+08	4.3E+07
Co-60	5.27E+00	9.5E+04	5.7E+16	1.8E+15	1.9E+12	2.9E+11	1.8E+12	6.0E+13	3.1E+10	9.1E+13
Ni-59	8.00E+04	4.2E+03	7.0E+15	2.3E+14	8.6E+07	1.3E+09	0.0E+00	1.6E+12	1.4E+08	0.0E+00
Ni-63	9.20E+01	5.4E+05	9.6E+17	2.5E+16	9.9E+09	1.6E+11	0.0E+00	2.1E+14	1.8E+10	0.0E+00
Se-79	6.50E+04	3.0E+05	2.2E+12	0.0E+00	2.2E+09	6.4E+10	0.0E+00	4.4E+11	5.8E+09	0.0E+00
Sr-90	2.91E+01	2.8E+10	2.4E+17	1.6E+15	7.2E+14	5.8E+15	4.6E+11	7.8E+16	6.2E+14	2.8E+15
Zr-93	1.53E+06	1.4E+06	2.8E+14	1.6E+13	1.0E+10	2.8E+11	0.0E+00	6.1E+12	3.0E+10	0.0E+00
Nb-94	2.03E+04	2.5E+06	2.5E+15	9.2E+13	5.7E+05	2.0E+07	0.0E+00	5.0E+11	2.2E+06	0.0E+00
Mo-93	3.50E+03	2.9E+01	5.2E+13	0.0E+00	2.3E+06	8.7E+07	0.0E+00	1.2E+10	9.4E+06	0.0E+00
Tc-99	2.13E+05	0.0E+00	6.1E+14	7.0E+11	9.7E+10	2.0E+12	2.4E+08	4.0E+13	2.1E+11	2.5E+11
Pd-107	6.50E+06	8.0E+04	5.1E+11	0.0E+00	2.8E+08	1.6E+10	0.0E+00	1.6E+10	1.5E+09	0.0E+00
Sn-126	1.00E+05	5.7E+05	3.6E+12	0.0E+00	3.6E+09	1.1E+11	0.0E+00	2.4E+12	1.2E+10	0.0E+00
I-129	1.57E+07	5.1E+13	1.7E+11	1.2E+09	9.1E+11	4.8E+09	9.0E+10	2.9E+10	5.1E+08	4.6E+08
Cs-135	2.30E+06	3.3E+05	2.3E+12	1.0E+11	2.3E+09	6.6E+10	5.3E+06	8.8E+11	7.1E+09	6.4E+09
Cs-137	3.00E+01	4.0E+10	2.9E+17	1.2E+16	6.5E+14	8.2E+15	6.8E+11	1.1E+17	8.8E+14	9.3E+15
Cm-244	1.81E+01	6.1E+08	2.9E+15	1.1E+13	9.1E+12	6.9E+13	6.3E+09	6.2E+14	2.8E+12	8.1E+12
Pu-240	6.54E+03	2.8E+08	1.6E+15	2.5E+13	1.2E+13	3.3E+13	7.7E+09	1.5E+15	1.4E+12	1.5E+14
U-236	2.34E+07	1.9E+05	9.1E+11	1.5E+10	4.8E+09	2.2E+10	3.9E+06	2.1E+11	8.3E+08	4.7E+09
Th-232	1.41E+10	2.4E-04	4.9E+04	1.8E+01	6.8E+00	2.7E+01	4.8E-03	2.7E+02	1.0E+00	5.8E+00
Ra-228	6.70E+00	1.5E-04	4.7E+04	1.2E+01	4.7E+00	1.7E+01	3.1E-03	1.7E+02	6.6E-01	3.7E+00
Th-228	1.91E+00	1.1E+07	2.7E+12	1.0E+01	9.5E+09	6.5E+10	2.6E-03	2.5E+11	2.5E+09	3.1E+00
Cm-245	8.50E+03	1.7E+05	7.6E+11	0.0E+00	3.3E+09	1.9E+10	0.0E+00	1.9E+11	7.7E+08	0.0E+00
Pu-241	1.44E+01	1.3E+11	7.1E+17	1.1E+16	5.5E+15	1.5E+16	3.5E+12	6.6E+17	6.2E+14	6.8E+16
Am-241	4.32E+02	2.3E+09	1.1E+16	1.4E+14	1.1E+14	4.1E+14	5.2E+10	7.0E+15	4.0E+13	4.4E+14
Np-237	2.14E+06	1.3E+04	1.2E+12	1.1E+10	6.0E+09	3.0E+10	4.2E+06	1.2E+12	1.3E+09	6.5E+09
U-233	1.59E+05	7.8E+00	4.8E+09	1.2E+06	8.9E+05	4.0E+06	4.4E+02	1.5E+08	1.6E+05	5.6E+05
Th-229	7.34E+03	6.9E-02	1.4E+07	1.4E+03	2.4E+03	1.2E+04	5.1E-01	2.4E+05	4.5E+02	6.1E+02
Cm-246	4.73E+03	0.0E+00	4.0E+08	0.0E+00	1.9E+08	0.0E+00	0.0E+00	3.2E+08	0.0E+00	0.0E+00
Pu-242	3.87E+05	1.2E+06	6.7E+12	0.0E+00	2.0E+10	1.4E+11	0.0E+00	3.7E+12	5.8E+09	1.9E+11
U-238	4.47E+09	1.6E+05	7.6E+11	3.2E+10	1.2E+10	1.8E+10	4.6E+06	2.5E+11	6.9E+08	6.7E+09
U-234	2.45E+05	2.2E+06	5.5E+12	2.8E+11	6.6E+10	1.1E+11	4.8E+07	4.5E+12	4.6E+09	1.6E+11
Th-230	7.70E+04	1.6E+02	1.8E+08	2.9E+07	5.8E+06	2.6E+06	4.1E+03	3.1E+08	1.1E+05	7.6E+06
Ra-226	1.60E+03	8.3E-01	9.4E+05	1.6E+05	3.9E+04	1.1E+04	2.2E+01	1.7E+06	4.4E+02	3.7E+04
Pb-210	2.23E+01	1.8E-01	2.1E+05	3.4E+04	1.0E+04	2.1E+03	4.7E+00	3.7E+05	8.2E+01	7.7E+03
Am-243	7.38E+03	1.3E+07	1.9E+14	4.1E+11	1.5E+11	1.5E+12	2.2E+08	1.5E+13	6.2E+10	2.1E+11
Pu-239	2.41E+04	1.8E+08	9.8E+14	2.3E+13	8.9E+12	2.1E+13	5.0E+09	1.3E+15	8.4E+11	1.0E+14
U-235	7.04E+08	1.1E+04	5.4E+10	3.5E+09	1.2E+09	1.3E+09	2.9E+05	5.2E+10	4.8E+07	4.1E+08
Pa-231	3.28E+04	6.0E+00	3.2E+07	1.9E+06	7.9E+05	6.7E+05	1.5E+02	2.9E+07	2.5E+04	2.2E+05
Ac-227	2.18E+01	1.9E+00	1.1E+07	5.8E+05	3.0E+05	2.1E+05	4.8E+01	9.7E+06	7.8E+03	6.7E+04

※Gr2-C のデータを用いる。

c. 廃棄体パッケージ

評価対象となる廃棄体グループ2/キャニスタの外形寸法は、 $\phi 430\text{mm} \times \text{H}1,355\text{mm}$ となっている。定置にあたっては、図 3.4.2-22 のようにキャニスタ 4 本単位で取り扱う廃棄体パッケージ B とする。廃棄体パッケージ B の外形寸法は、 $\square 1,200\text{mm} \times \text{H}1,600\text{mm}$ となっている。廃棄体パッケージ B は厚さ 5mm の炭素鋼で構成され、キャニスタ 4 本を収納した後の間隙はセメントモルタルで充填される設定となっている。

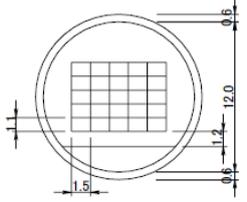
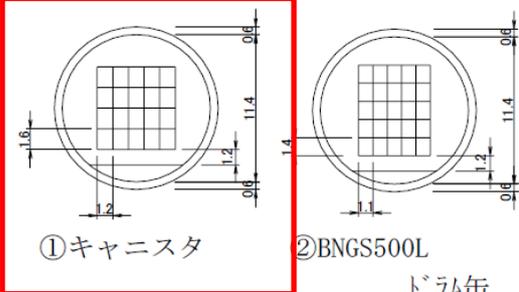
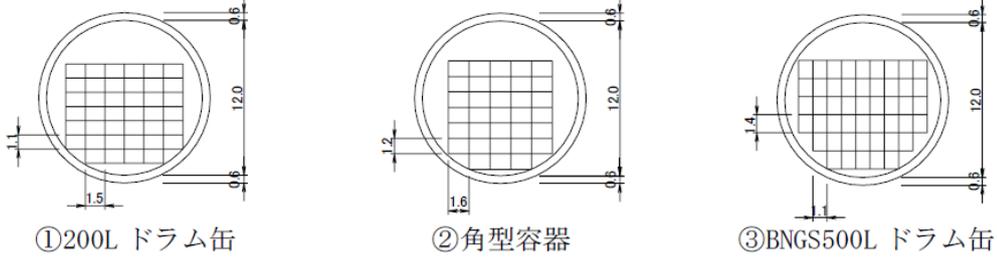


※廃棄体パッケージ B が評価対象となる。

図 3.4.2-22 廃棄体と廃棄体パッケージ

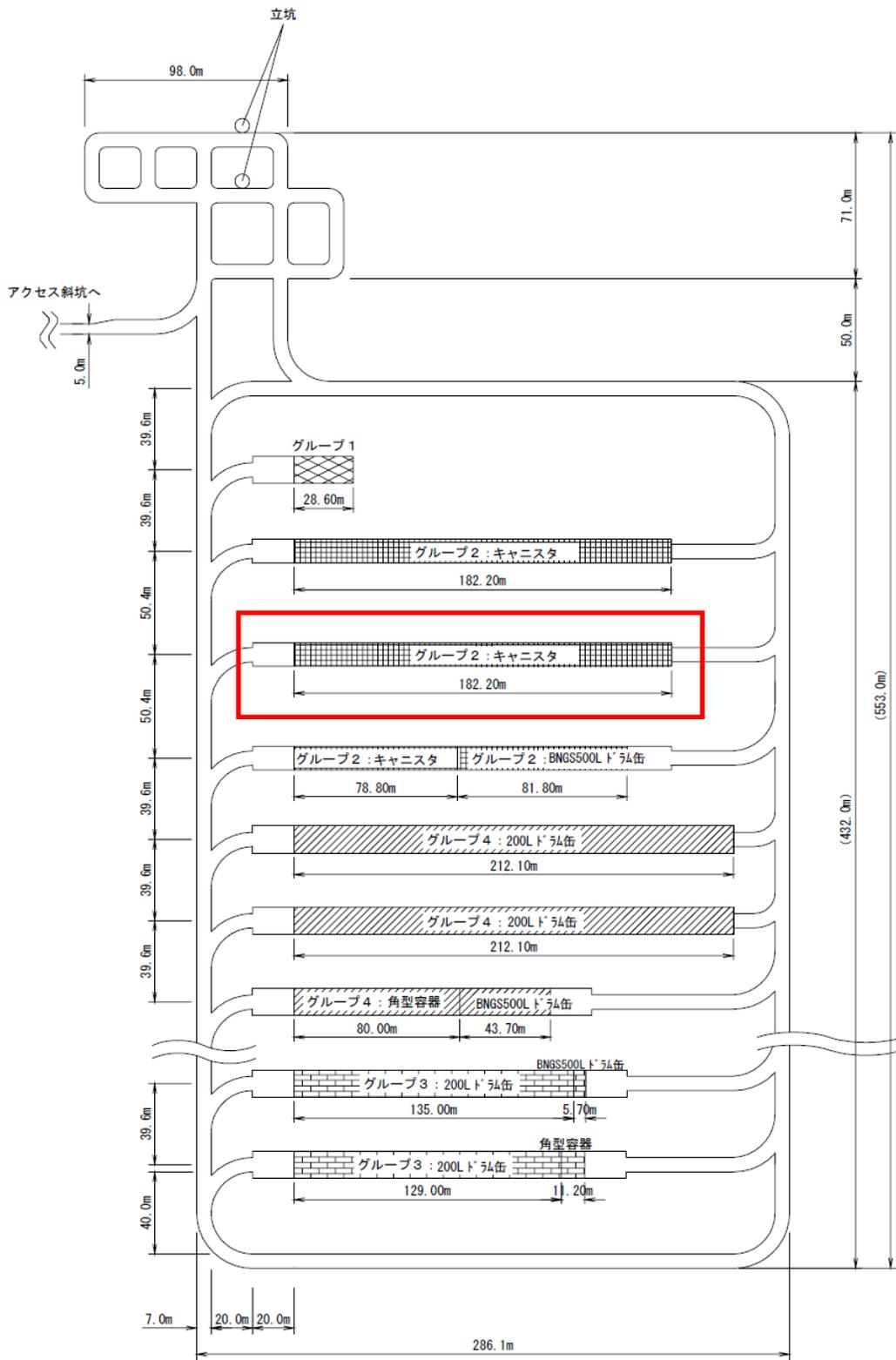
2) 処分坑道設計

処分坑道の設計は、定置する廃棄物の種類と母岩の力学的特性によって決まる。核種移行解析では、廃棄物は廃棄体グループ2のキャニスタ (Gr2-C)、母岩は軟岩系岩盤 (SR-C) を想定した場合の処分坑道設計を対象とした。

処 分 坑 道 断 面	
グループ1	 <p> 処分坑道サイズ 内径 12m 支保工厚 0.6m 廃棄体種類 200L ドラム缶 廃棄体数 1,589 本 廃棄体パッケージサイズ □1500×H1100 廃棄体パッケージ数 398 個 </p>
グループ2	 <p> ①キャニスタ ②BNGS500L ドラム缶 </p> <p> 処分坑道サイズ 内径 11.4m 支保工厚 0.6m 廃棄体種類 ①キャニスタ ②BNGS500L ドラム缶 廃棄体数 ①28,800 本 ②2,070 本 廃棄体パッケージサイズ ①□1,200×H1,600 ②1,100×1,900×1,400 廃棄体パッケージ数 ①7,200 個 ②1,035 個 </p>
グループ3・4	 <p> ①200L ドラム缶 ②角型容器 ③BNGS500L ドラム缶 </p> <p> 処分坑道サイズ 内径 12m 支保工厚 0.6m 廃棄体種類 ①200L ドラム缶 ②角型容器 ③BNGS500L ドラム缶 廃棄体数 [グループ3] ①28,058 本 ②199 個 ③250 本 [グループ4] ①45,089 本 ②1,621 個 ③2,180 本 廃棄体パッケージサイズ①□1,500×H1,100 (②□1,600×H1,200) ③1,100×1,900×1,400 廃棄体パッケージ数 [グループ3] ①7,015 個 ②199 個 ③125 個 [グループ4] ①11,273 個 ②1,621 個 ③1,090 個 </p>

※廃棄体グループ2/キャニスタが評価対象となる。

図 3.4.2-23 軟岩系岩盤の処分坑道断面図 (SR-C、深度 500m、円形断面)



※廃棄体グループ2／キャニスタの処分坑道が評価対象となる。

図 3.4.2-24 軟岩系岩盤のレイアウト (SR-C、深度 500m、円形断面)

3) 廃棄物からの核種漏えい

ハル・エンドピースからの核種漏えいについては、核種の存在状況に応じて、①地下水との接触時に瞬時に水側に放出されるモデル（瞬時放出モデル）と、②金属母材中に存在する核種が母材の腐食に応じてより緩慢に放出されるモデル（金属腐食モデル）を組み合わせた。廃棄物表面およびジルカロイ酸化被膜に存在する成分は瞬時放出、ジルカロイ母材に存在する成分は地下水接触後 11,400 年の期間での band release、ステンレス鋼・インコネルに存在する成分は地下水接触後 8,500 年の期間での band release によって、最大 3 種類のモードによって放出されるとした。表 3.4.2-5 に核種漏えいモデルに応じた各核種のインベントリの分配を示す。C-14 を例にとると、初期インベントリの 13%が瞬時放出、53%が 11,400 年の band release、34%が 8,500 年の band release となる。

表 3.4.2-5 核種漏えいモデルに応じた初期インベントリの分配

	瞬時放出		11,400年	8,500年
	表面付着	ジルカロイ		ステンレス鋼・ インコネル
		酸化被膜	母材	
C-14	0	0.13	0.53	0.34
Cl-36	0.01	0.2	0.79	0
Co-60	0.01	0.04	0.18	0.77
Ni-59	0	0	0	1
Ni-63	0	0	0	1
Se-79	0.98	0	0	0.02
Sr-90	1	-	-	-
Zr-93	0.04	0.19	0.77	0
Nb-94	0	0.01	0.02	0.97
Mo-93	0	0.01	0.02	0.97
Tc-99	1	-	-	-
Pd-107	1	-	-	-
Sn-126	1	-	-	-
I-129	1	-	-	-
Cs-135	1	-	-	-
Cs-137	1	-	-	-
Cm-244	1	-	-	-
Pu-240	1	-	-	-
U-236	1	-	-	-
Th-232	1	-	-	-
Ra-228	1	-	-	-
Th-228	1	-	-	-
Cm-245	1	-	-	-
Pu-241	1	-	-	-
Am-241	1	-	-	-
Np-237	1	-	-	-
U-233	1	-	-	-
Th-229	1	-	-	-
Pu-242	1	-	-	-
U-238	1	-	-	-
U-234	1	-	-	-
Th-230	1	-	-	-
Ra-226	1	-	-	-
Pd-210	1	-	-	-
Am-243	1	-	-	-
Pu-239	1	-	-	-
U-235	1	-	-	-
Pa-231	1	-	-	-
Ac-227	1	-	-	-

4) 溶解度・分配係数

廃棄体グループ2／キャニスタの場合の溶解度および収着分配係数の設定を表 3.4.2-6 に示す。

廃棄体グループ2／キャニスタには有意な量の有機物が含有されるとされており、その分解生成物である ISA の影響により、人工バリア内では溶解度の上昇あるいは収着分配係数の低下が生じる、とする。同表における網掛部は、有機物影響を受けて標準状態の条件から補正した数値となっている。

表 3.4.2-6 溶解度および収着分配係数

	セメントモルタル		緩衝材	泥岩・凝灰岩
	収着分配係数	溶解度	収着分配係数	収着分配係数
	[m ³ /kg]	[mol/dm ³]	[m ³ /kg]	[m ³ /kg]
C	0.00025	可溶性	0	0.0001
Cl	0	可溶性	0	0.0001
Co	0.0125	5E-4	0.05	0.1
Ni	0.0125	5E-4	0.05	0.1
Se	0.0025	5E-6	0	0.01
Sr	0.00125	5E-3	0.001	0.5
Zr	0.125	1E-3	1	1
Nb	0	5E-2	0.1	1
Mo	0.0025	1E-3	0	0.0001
Tc	2.5	1E-6	1	1
Pd	0.0125	可溶性	0.05	1
Sn	0.125	可溶性	1	5
I	0.00125	可溶性	0	0.0001
Cs	0.0025	可溶性	0.05	0.1
Pb	0.0125	5E-2	0.05	1
Ra	0.00125	1E-6	0.001	0.5
Ac	0.0125	1E-8	1	5
Th	0.0125	2E-8	5	1
Pa	0.0125	1E-6	5	1
U	0.0125	1E-7	5	1
Np	0.0125	1E-7	5	1
Pu	0.0125	2E-9	5	1
Am	0.0125	1E-8	1	5
Cm	0.0125	1E-8	1	5

5) 媒体物性諸元

人工バリアおよび天然バリアの各移行媒体の物性に関する諸元を表 3.4.2-7 に示す。

表 3.4.2-7 媒体物性諸元

セメント透水係数	m/s	4E-6	母岩透水係数	m/s	2E-10
セメント間隙率	-	0.19	母岩中の移行距離	m	100
セメント真密度	kg/m ³	2580	母岩の間隙率	-	0.2
セメント実効拡散係数	m ² /s	8E-10	母岩真密度	kg/m ³	2700
緩衝材厚さ	m	1	母岩実効拡散係数	m ² /s	9E-12
緩衝材透水係数	m/s	2E-11	母岩動水勾配	-	0.01
緩衝材間隙率	-	0.4	断層破碎帯の移行距離	m	300
緩衝材真密度	kg/m ³	2680	断層破碎帯の間隙率	-	0.2
緩衝材実効拡散係数 [Cl,Se,Mo,I]	m ² /s	4E-11	断層破碎帯真密度	kg/m ³	2700
緩衝材実効拡散係数 [Cs]	m ² /s	4E-10	断層破碎帯実効拡散係数	m ² /s	9E-12
緩衝材実効拡散係数 [上記以外]	m ² /s	3E-10	断層破碎帯動水勾配	-	0.01
掘削影響領域透水係数	m/s	2E-8			

6) 天然バリアに関する近似と条件設定

天然バリアとしては、母岩および断層破碎帯からなるものと想定し、断層破碎帯の末端となる GBI (Geosphere Biosphere Interface) までの核種移行率を核種移行解析ツールによって評価する。母岩も断層破碎帯も亀裂性媒体を想定するが、母岩は水理特性の異なる複数の 1 次元平行平板亀裂の集合体としてモデル化する一方、断層破碎帯は単一の水理特性を有する 1 次元平行平板亀裂としてモデル化する。

母岩および断層破碎帯に関する条件設定を表 3.4.2-8 に示す。

表 3.4.2-8 天然バリアに関する条件設定

パラメータ	母岩 (1次元平行平板モデルの重ね合わせ)	断層破碎帯 (1次元平行平板モデル)
岩種	泥岩・凝灰岩	
地下水	降水系地下水	
動水勾配	0.01	
入力とする核種移行率	人工バリアからの移行率	母岩からの移行率
移行距離[m]	100	300
透水量係数[m ² /s]	対数正規分布 (平均値-9.99,標準偏差1.07, 透水量係数の最大値及び 最小値,10 ⁻⁷ 及び10 ⁻¹³)	10 ⁻⁷
亀裂内地下水ダルシー流速[m/s]	0.5√透水量係数×動水勾配	
縦方向分散長[m]	10	30
マトリクス拡散深さ[m]	0.1	
間隙率[-]	0.2	
乾燥密度[Mg/m ³]	2.64	
実効拡散係数[m ² /s]	9E-12	

(5) 核種移行解析の実施

1) リファレンスケース

リファレンスケースにおける、人工バリア出口/母岩出口/断層出口での核種フラックスおよび線量率を図 3.4.2-25 および図 3.4.2-26 に示す。

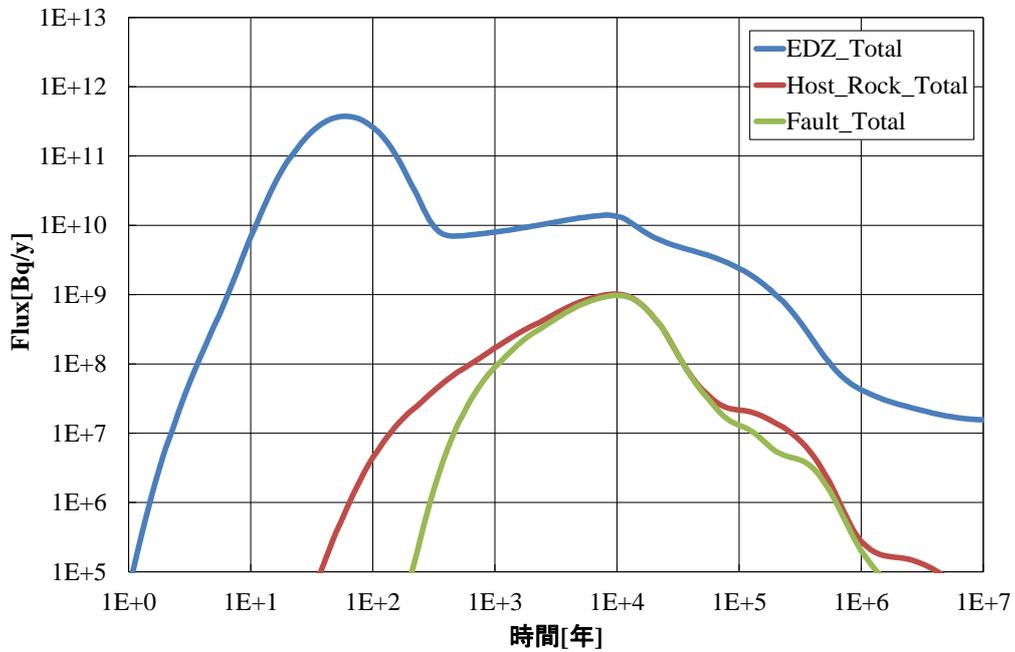


図 3.4.2-25 各観測点でのフラックス (リファレンスケース)

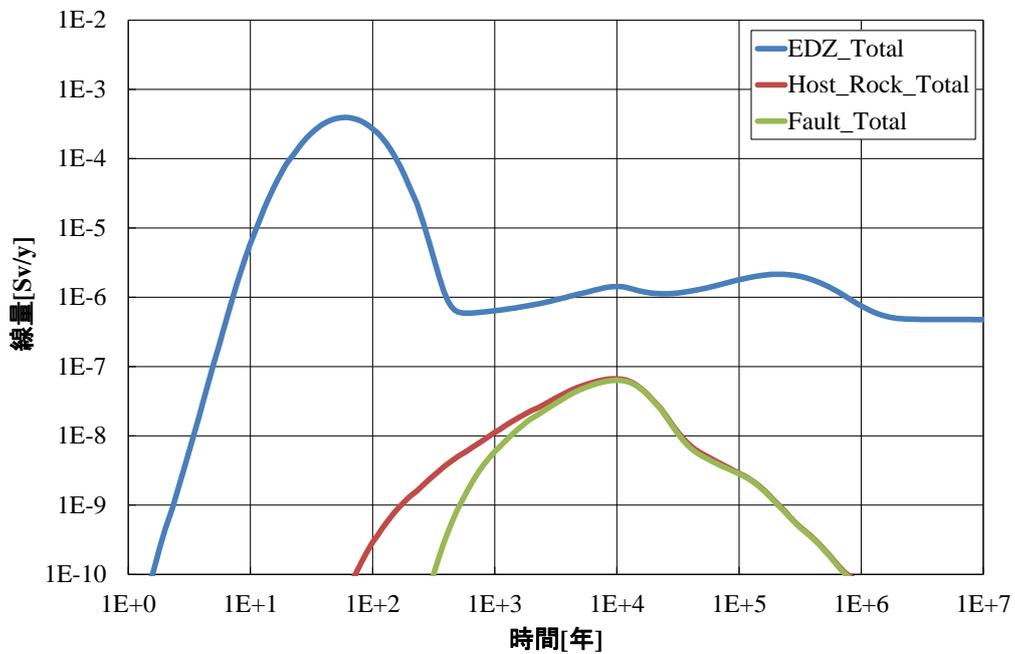


図 3.4.2-26 各観測点での線量率 (リファレンスケース)

2) ガス影響ケース

a. ケース G1W1B1P0

ケース G1W1B1P0 における、人工バリア出口/母岩出口/断層出口での核種フラックスおよび線量率を図 3.4.2-27 および図 3.4.2-28 に示す。

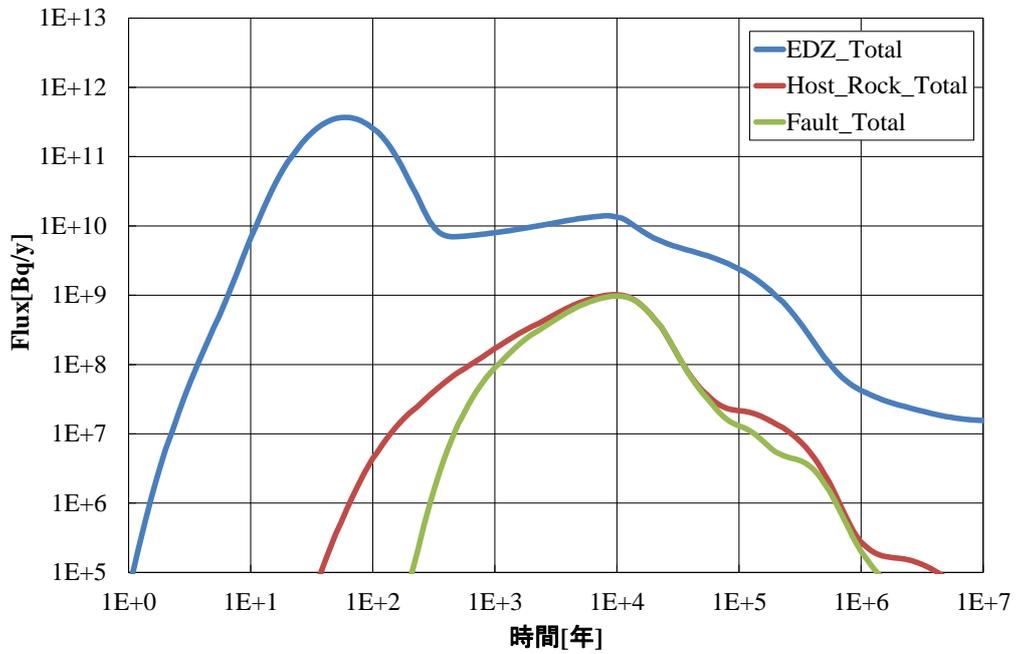


図 3.4.2-27 各観測点でのフラックス (G1W1B1P0)

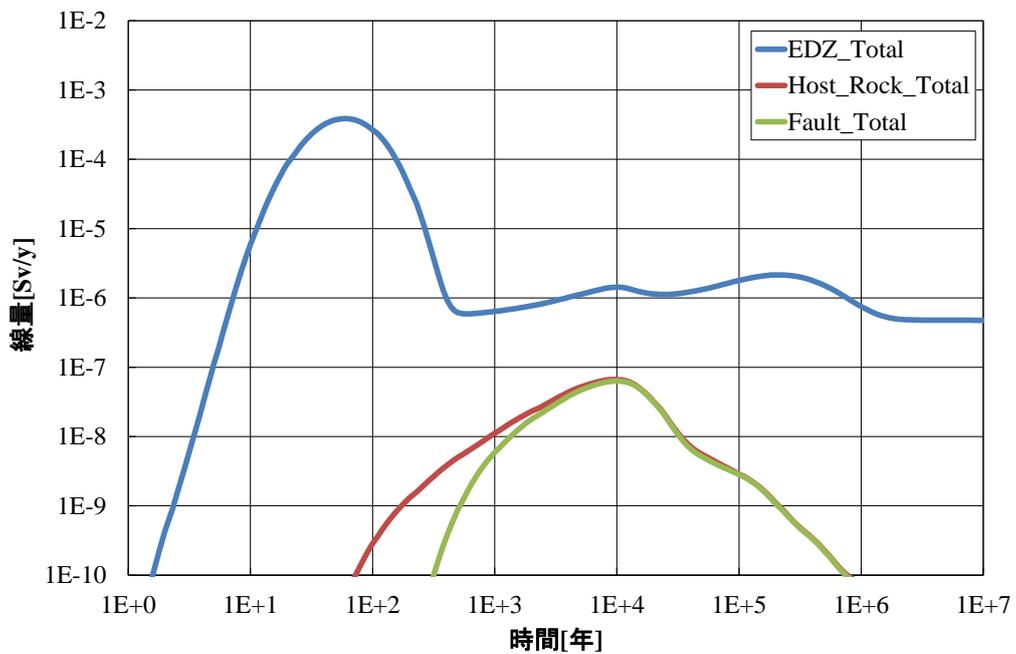


図 3.4.2-28 各観測点での線量率 (G1W1B1P0)

b. ケース G1W2B2P1

ケース G1W2B2P1 における、人工バリア出口/母岩出口/断層出口での核種フラックスおよび線量率を図 3.4.2-27 および図 3.4.2-28 に示す。

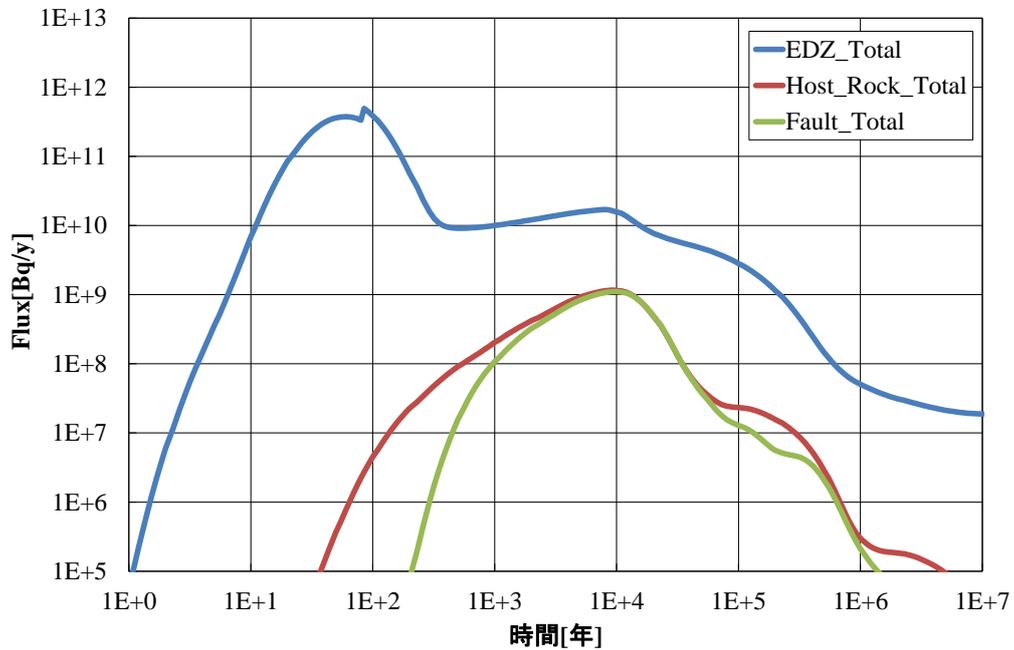


図 3.4.2-29 各観測点でのフラックス (G1W2B2P1)

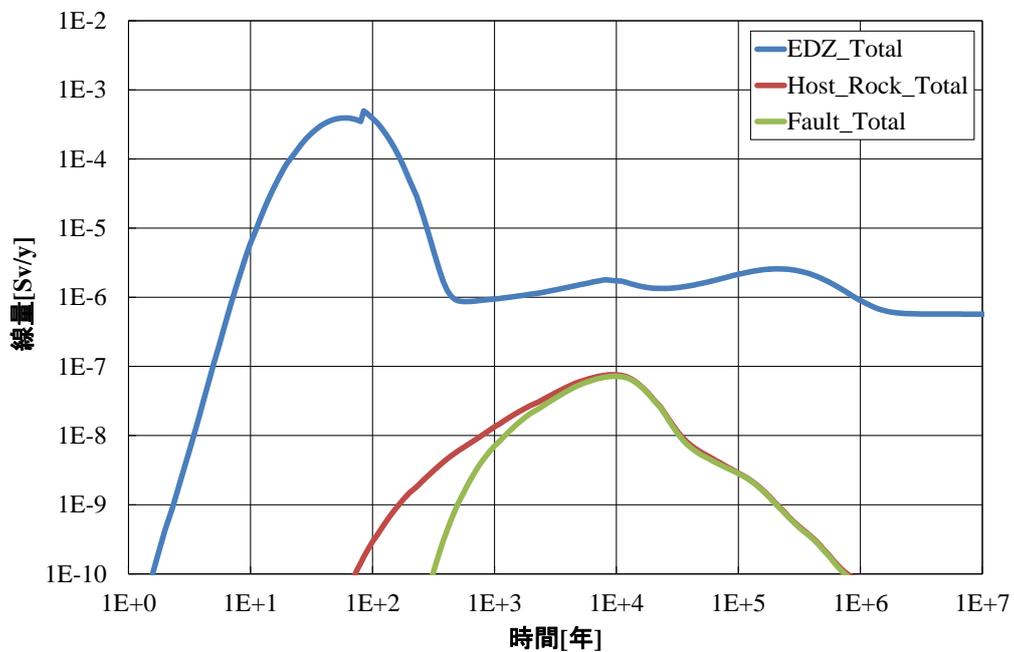


図 3.4.2-30 各観測点での線量率 (G1W2B2P1)

c. ケース G1W2B2P2

ケース G1W2B2P2 における、人工バリア出口/母岩出口/断層出口での核種フラックスおよび線量率を図 3.4.2-27 および図 3.4.2-28 に示す。

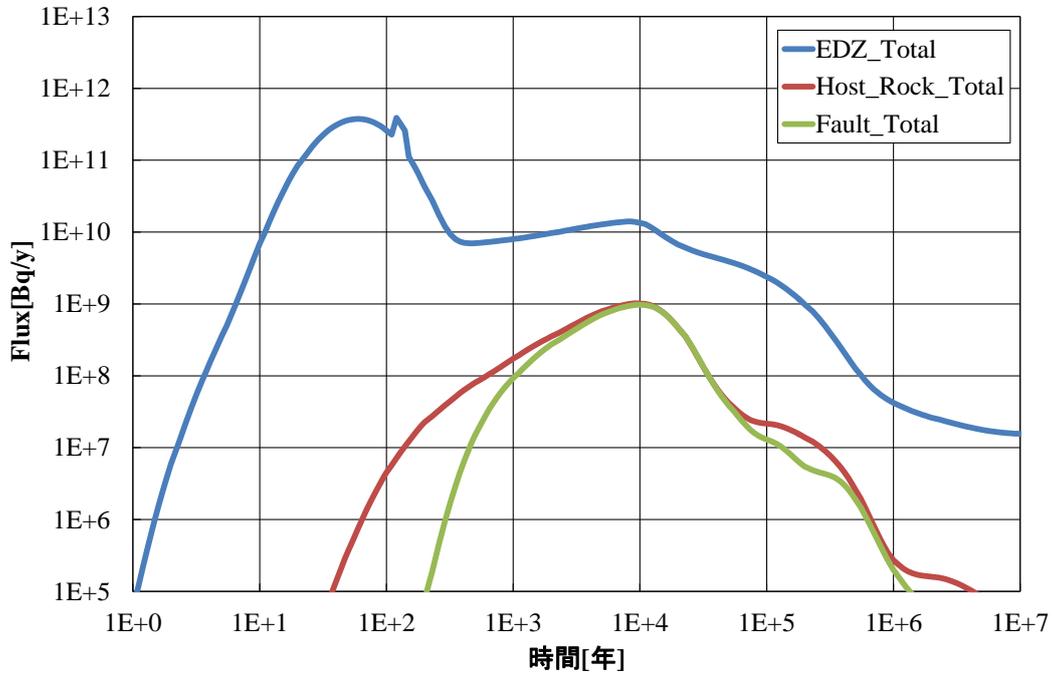


図 3.4.2-31 各観測点でのフラックス (G1W2B2P2)

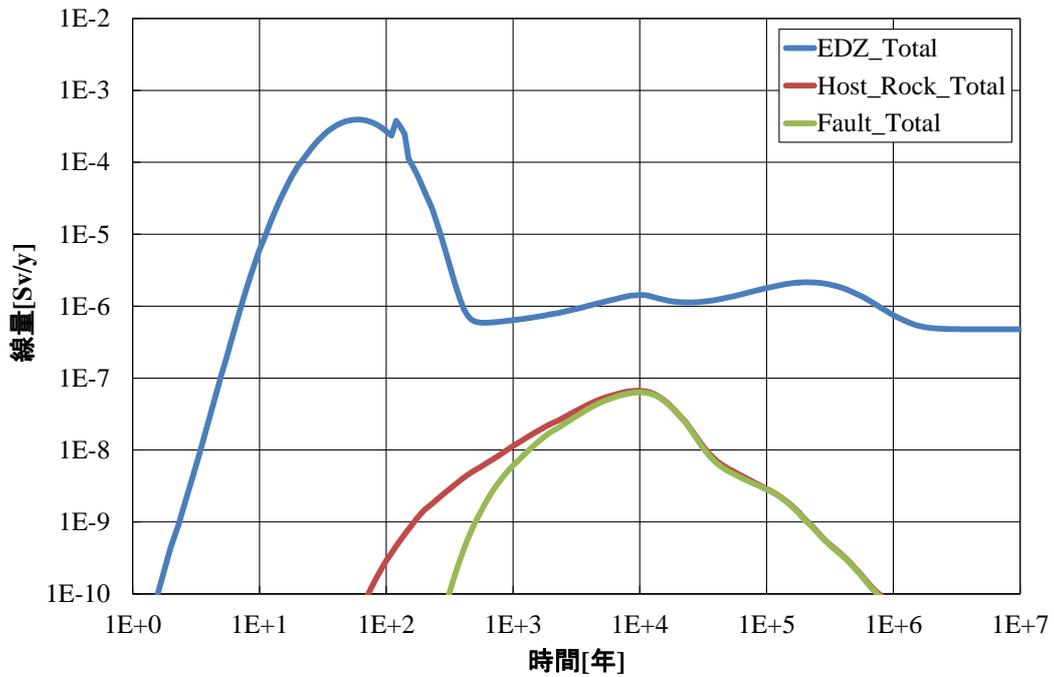


図 3.4.2-32 各観測点での線量率 (G1W2B2P2)

d. ケース G3W1B2P1

ケース G3W1B2P1 では、破過時のガス透気経路=核種移行経路の大きさを一意に決めることが困難であったため、開口幅 1.0 m（断面積としては 1.0 m²）の場合と開口幅 2.2 m（断面積としては 2.2 m²）の場合の核種移行解析を行った。

開口幅 1.0 m の場合における、人工バリア出口/母岩出口/断層出口での核種フラックスおよび線量率を図 3.4.2-33 および図 3.4.2-34 に示す。開口幅 2.2 m の場合における、人工バリア出口/母岩出口/断層出口での核種フラックスおよび線量率を図 3.4.2-35 および図 3.4.2-36 に示す。

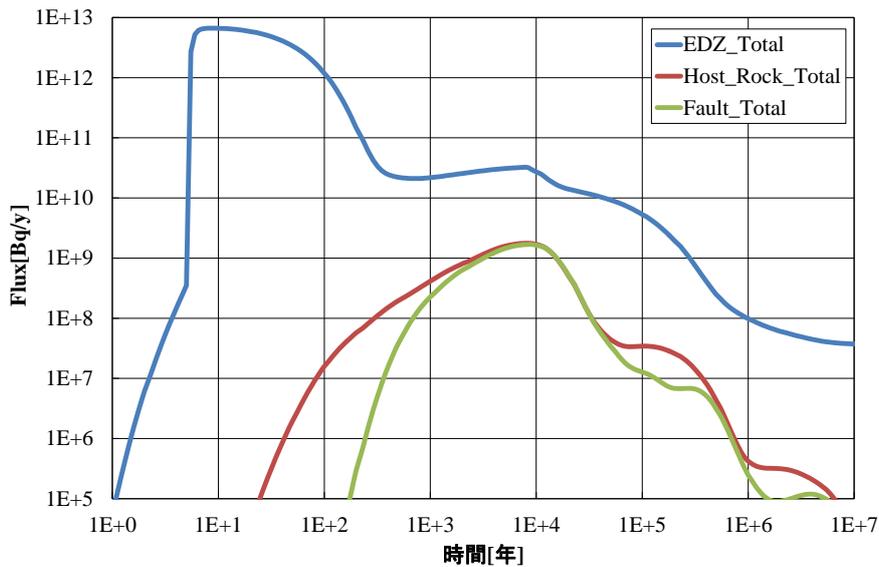


図 3.4.2-33 各観測点でのフラックス (G3W1B2P1 開口幅:1.0m)

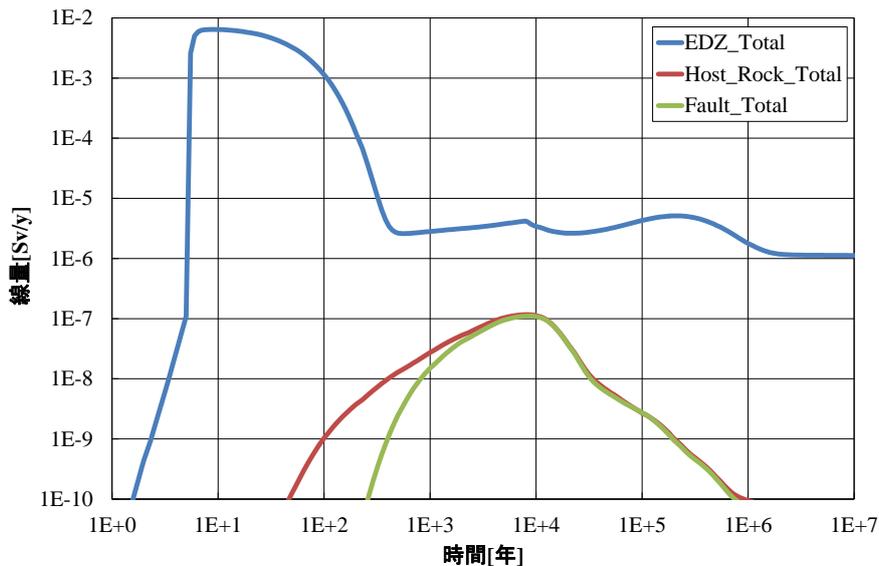


図 3.4.2-34 各観測点での線量率 (G3W1B2P1 開口幅:1.0m)

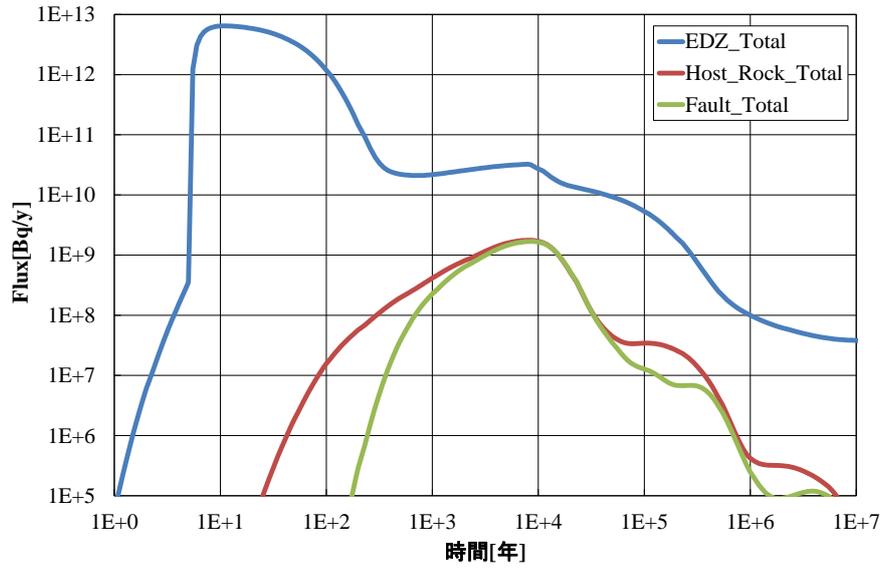


図 3.4.2-35 各観測点でのフラックス (G3W1B2P1 開口幅:2.2m)

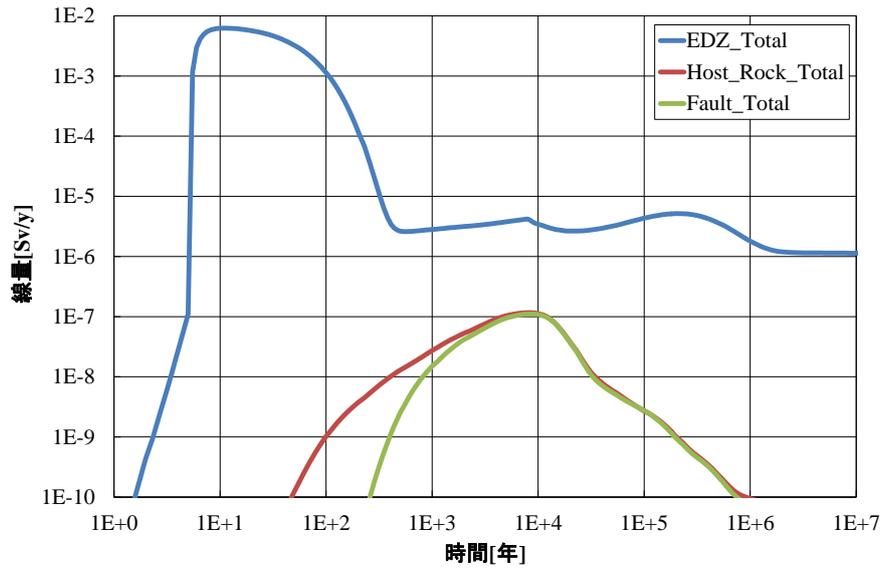


図 3.4.2-36 各観測点での線量率 (G3W1B2P1 開口幅:2.2m)

e. ケース G3W1B2P2

ケース G3W1B2P2 における、人工バリア出口/母岩出口/断層出口での核種フラックスおよび線量率を図 3.4.2-27 および図 3.4.2-28 に示す。

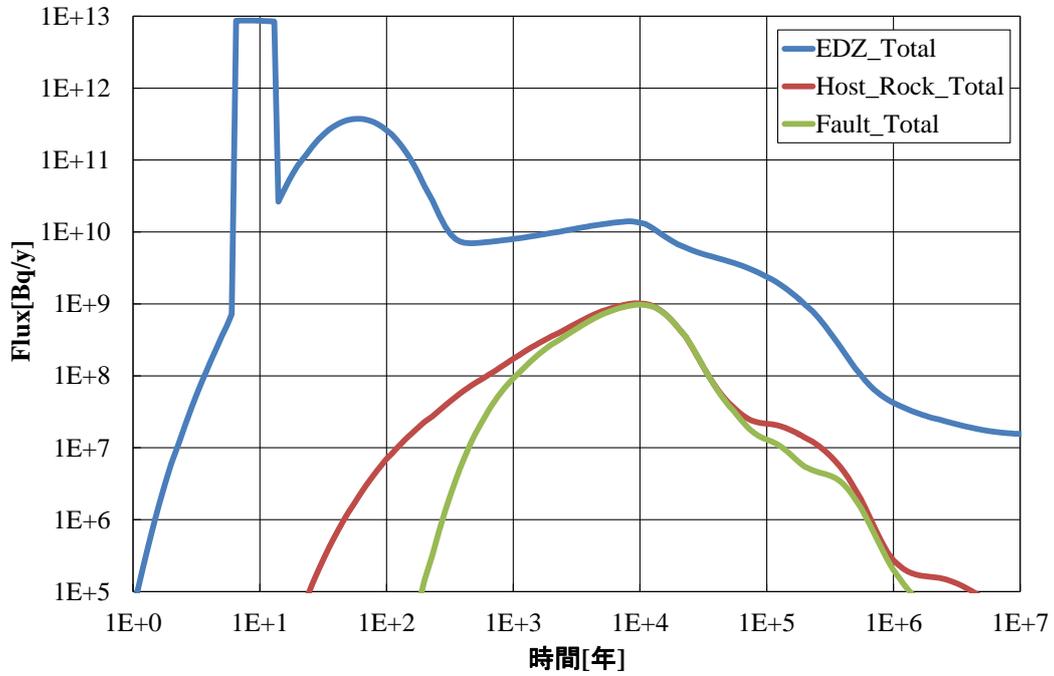


図 3.4.2-37 各観測点でのフラックス (G3W1B2P2)

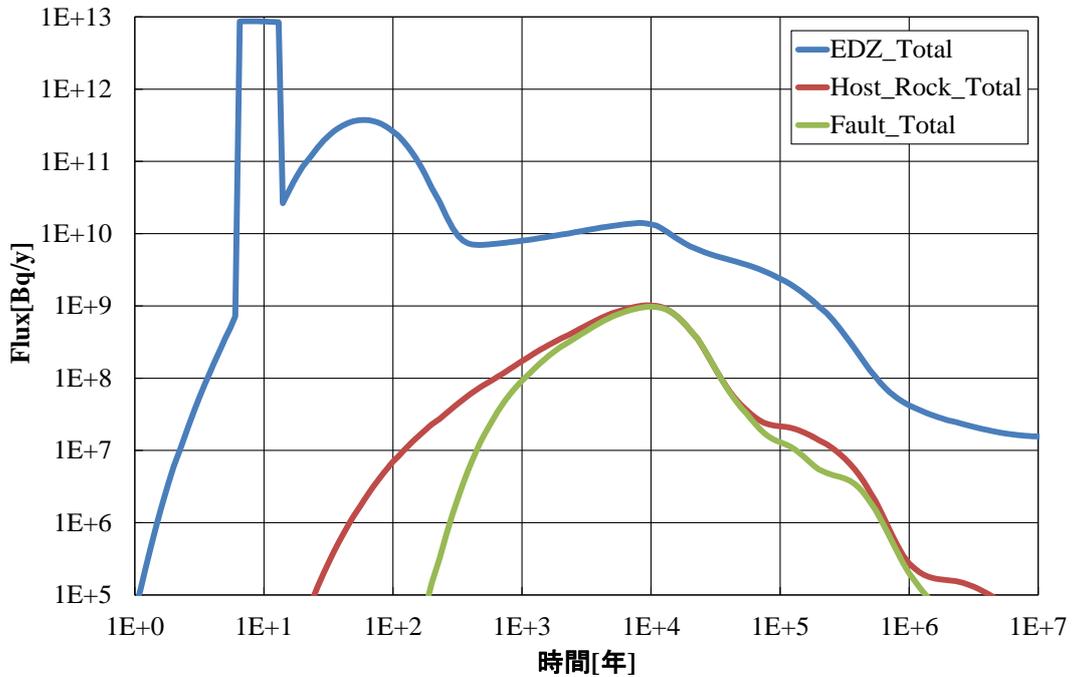


図 3.4.2-38 各観測点での線量率 (G3W1B2P2)

3.4.3 TRU 廃棄物処分システム（人工バリア）の成立性評価

(1) 主要核種へ与える影響を考慮した評価

1) 人工バリア出口でのフラックス

主要元素として C-14, Ni-63, Sr-90, Cs-137 および Am-241 に注目した場合に、各核種の人工バリア出口でのフラックスを解析ケース毎に比較したものを図 3.4.3-1～図 3.4.3-5 に示す。

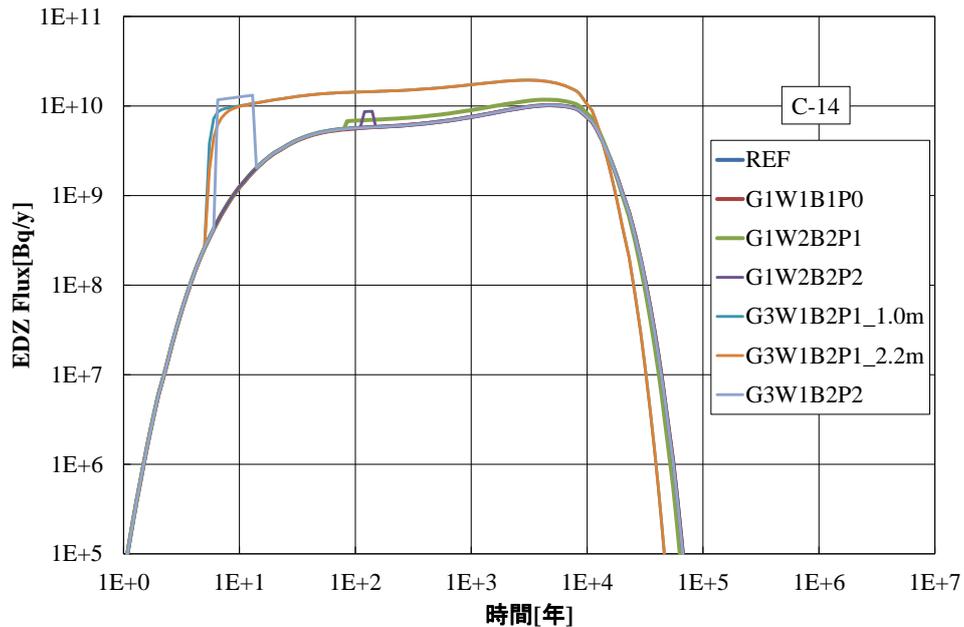


図 3.4.3-1 解析ケース毎の人工バリア出口フラックスの比較 (C-14)

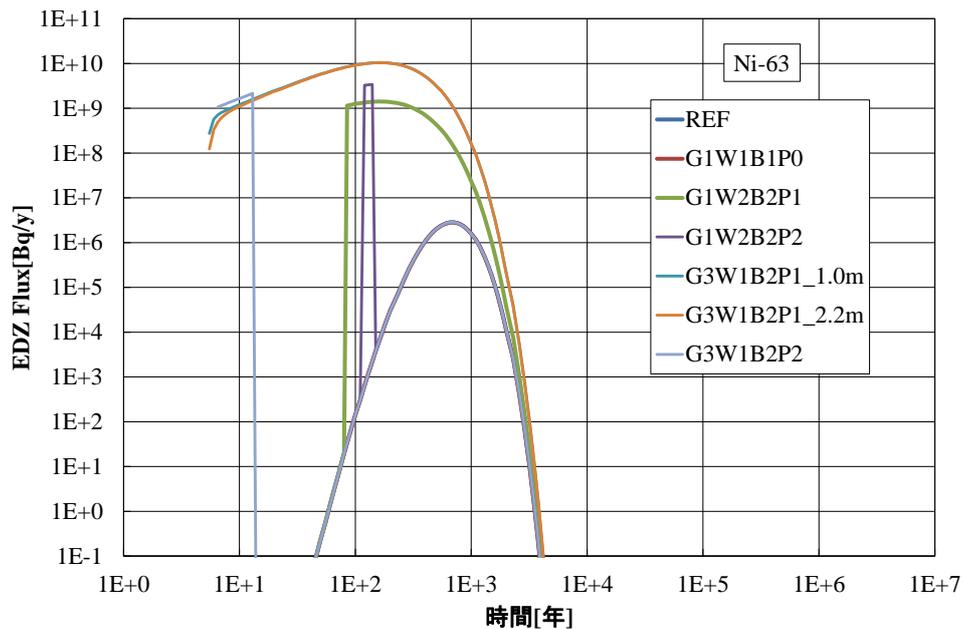


図 3.4.3-2 解析ケース毎の人工バリア出口フラックスの比較 (NI-63)

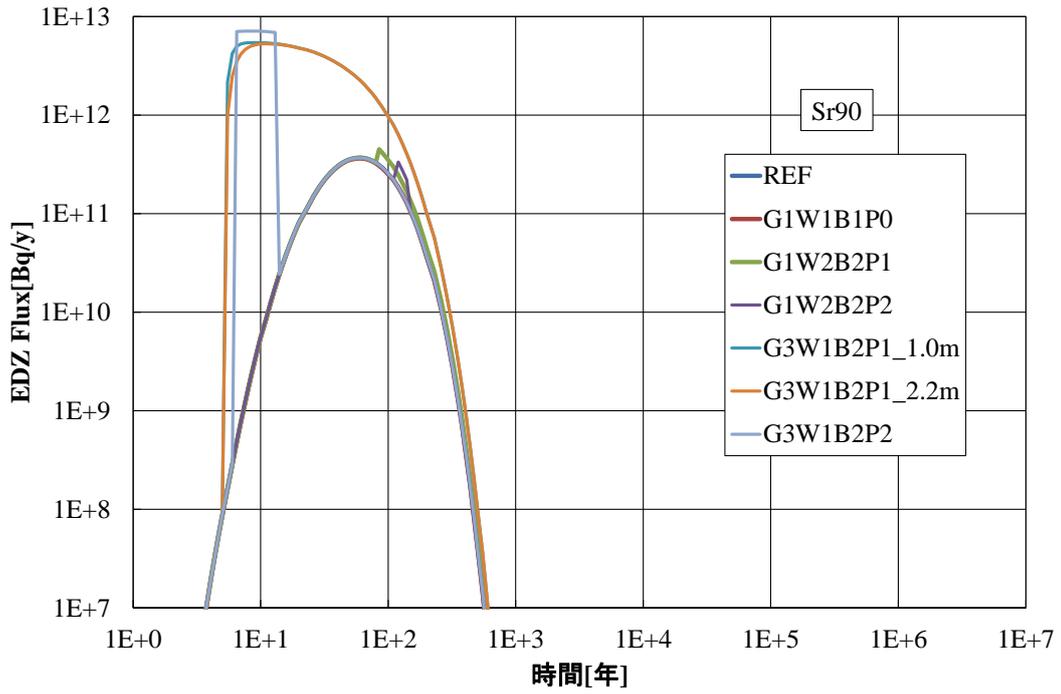


図 3.4.3-3 解析ケース毎の人工バリア出口フラックスの比較 (Sr-90)

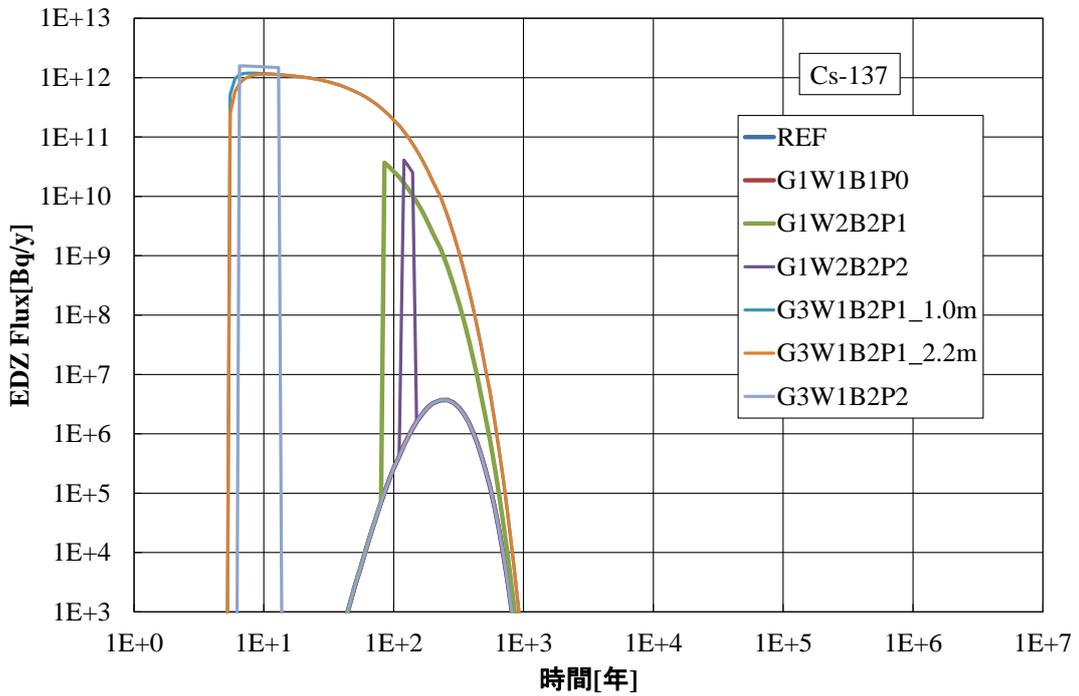


図 3.4.3-4 解析ケース毎の人工バリア出口フラックスの比較 (Cs-137)

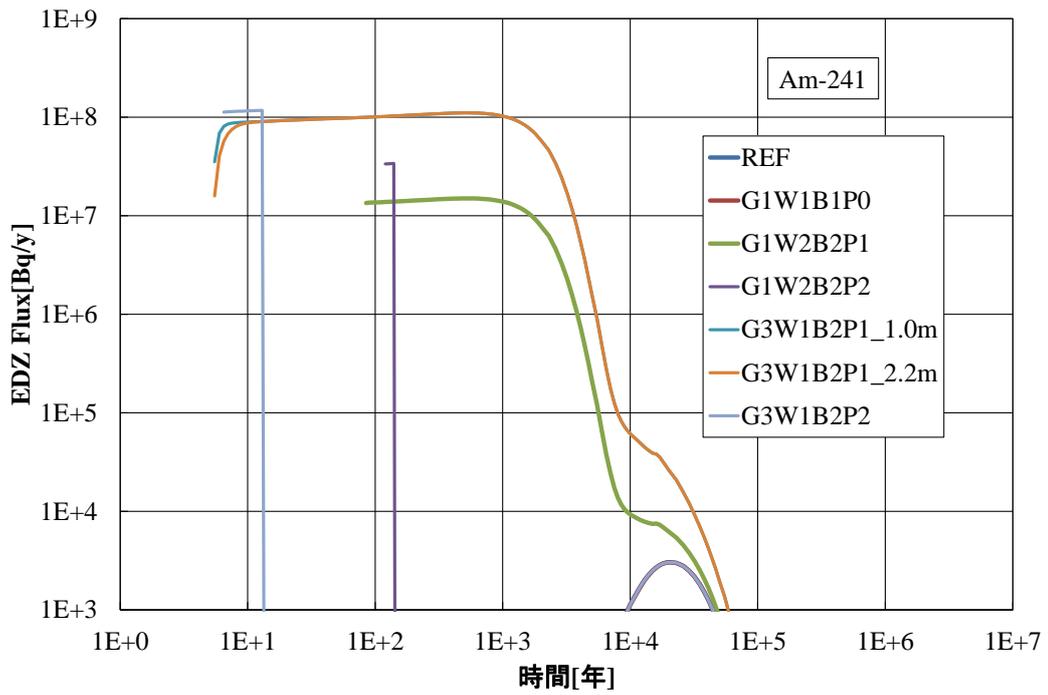


図 3.4.3-5 解析ケース毎の人工バリア出口フラックスの比較 (Am-241)

2) 多重バリアシステム内での核種の存在

核種移行解析における媒体として、人工バリア (EBS)、天然バリア (NBS : 母岩+断層破砕帯) および生物圏 (GBI 通過後) の各領域における核種の存在割合は、各検討ケースにおける各バリアの保持能力を表す一つの指標となりうる。主要元素として、前項の C-14, Ni-63, Sr-90, Cs-137 及び Am-241 に、比較対照のために Cl-36 及び I-129 を追加して、各バリア内での存在割合を解析ケース毎に比較したものを図 3.4.3-6~図 3.4.3-12 に示す。

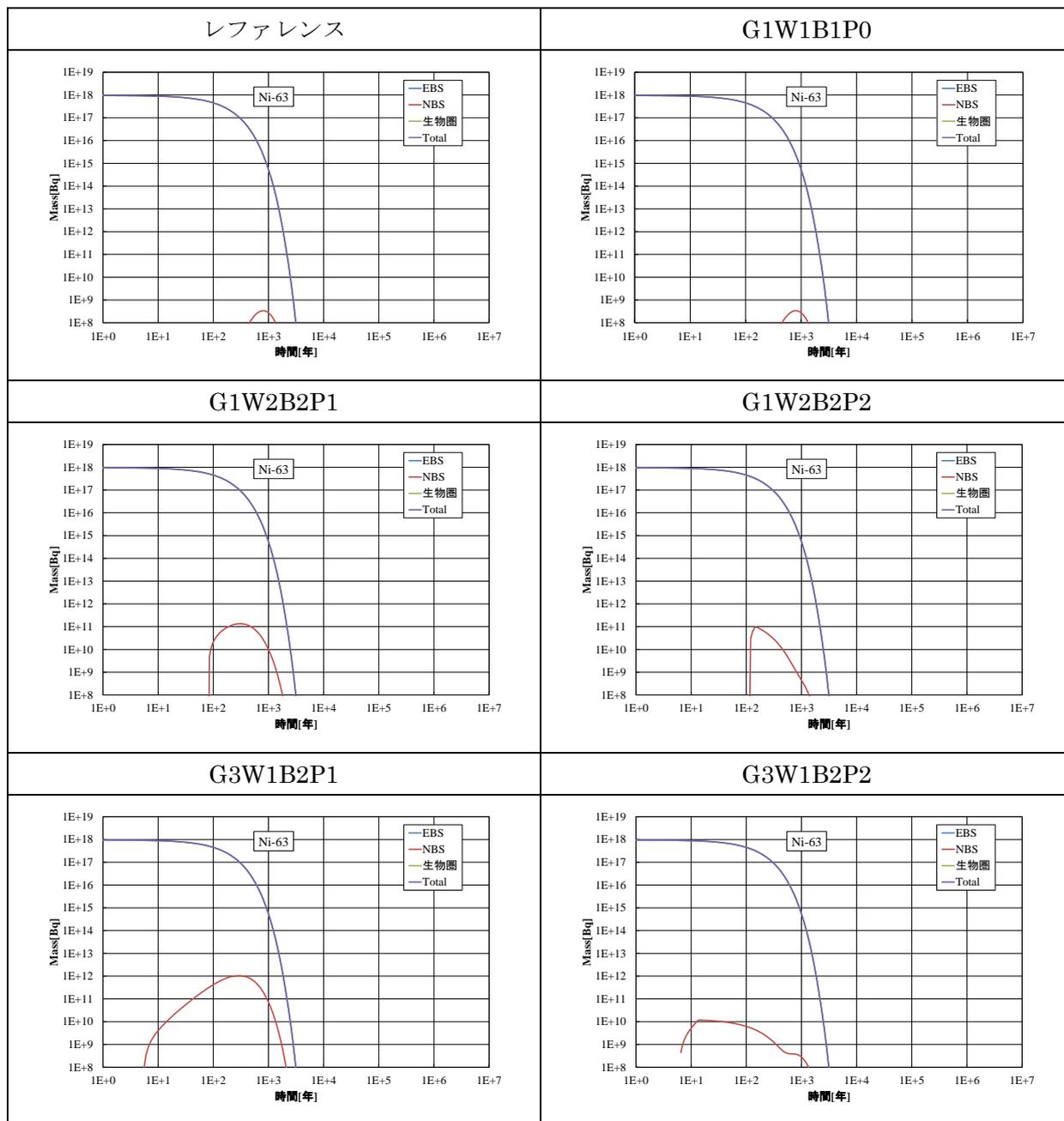
各図の下部の表は、初期インベントリとその減衰から定まる存在量を 100%としたときの、人工バリア EBS、天然バリア NBS 及び生物圏の各領域での存在割合を示している (経時変化プロフィールの積分値)。

Ni-63、Sr-90、Cs-137、Am-241 では、いずれの解析ケースの場合でも、生物圏にまで到達することはなく、減衰し終わるまでのその生涯に渡り、ほとんどが人工バリア内にとどまっていることがわかる。その理由は、半減期が比較的短いこと、及び収着性等人工バリアでの閉じ込め性能が良好なことによる。一方、比較対照のために追加した Cl-36 及び I-129 では、上述の核種とは対照的に、半減期が長いため、及び人工バリアでの収着性に乏しいために、いずれの解析ケースでも、最終的にはそのほとんどが生物圏にまで到達してしまうことがわかる (Cl-36 では 58%~59%、I-129 では 95%)。

廃棄体グループ 2 (キャニスタ) において、被ばく評価上、最も重要な核種となる C-14 については、生物圏にまで到達する割合は 3.0%~4.7%となっている。生物圏にまで到達する割合は決して大きくはないが、それが生物圏での線量当量率を支配していることがわかる。また、透気経路=移行経路が閉塞するケース⁵ではいずれも生物圏にまで到達する割合は 3.0%であるのに対して、透気経路=移行経路が閉塞しないケースでは、3.3% (G1W2B2P1 ケース)、4.7% (G3W1B2P1 ケース) とわずかながら上昇しており、それが線量当量率の上昇を招いている。

⁵ 実際には透気経路が形成されないレファレンスケース及び等方的な排水のケース (G1W1B1P0 ケース) を含む。

Ni-63

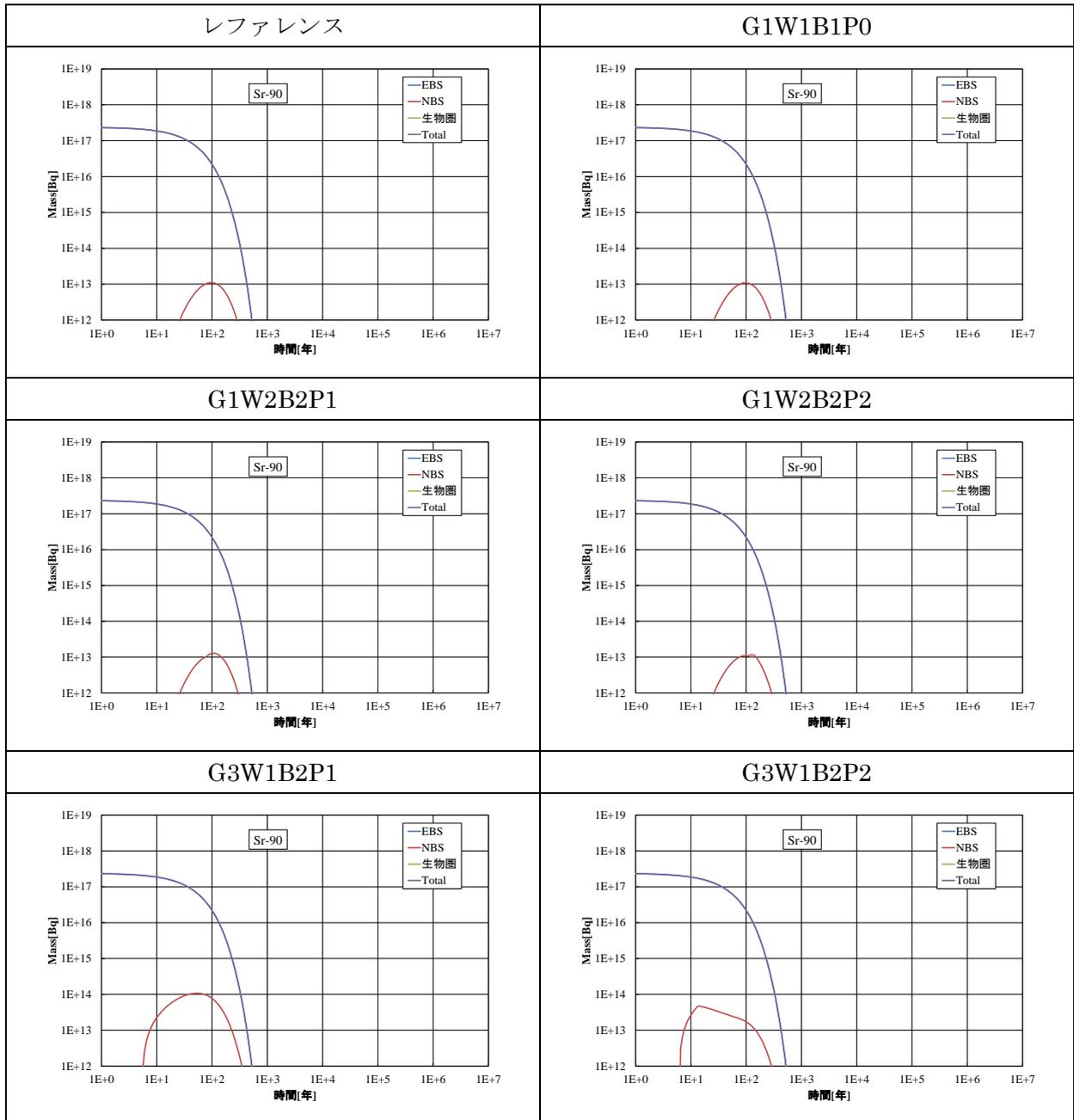


Ni-63 ケース名	ガス	廃棄体	緩衝材	緩衝材の流路拡幅(P)		存在量[%]		
	発生量(G)	間隙率(W)	水理物性(B)	破過	自己修復性	EBS	NBS	生物圏
リファレンス	—	標準設定 ($\phi=0.19$)	標準設定 (TRU-2相当)	なし	(ガス透気とは無関係に 自己シール性あり)	100.00	0.00	0.00
G1W1B1P0	TRU-2相当	$\phi=0.19$	TRU-2相当	なし (等方的な排水)	(ガス透気とは無関係に 自己シール性あり)	100.00	0.00	0.00
G1W2B2P1	TRU-2相当	$\phi=0.5$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞しない	100.00	0.00	0.00
G1W2B2P2	TRU-2相当	$\phi=0.5$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞する	100.00	0.00	0.00
G3W1B2P1	10倍 (全評価期間)	$\phi=0.19$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞しない	100.00	0.00	0.00
G3W1B2P2	10倍 (全評価期間)	$\phi=0.19$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞する	100.00	0.00	0.00

※：透気経路=移行経路が閉塞しないケースを網掛け表示した。

図 3.4.3-6 多重バリア内での核種の存在割合 (Ni-63)

Sr-90

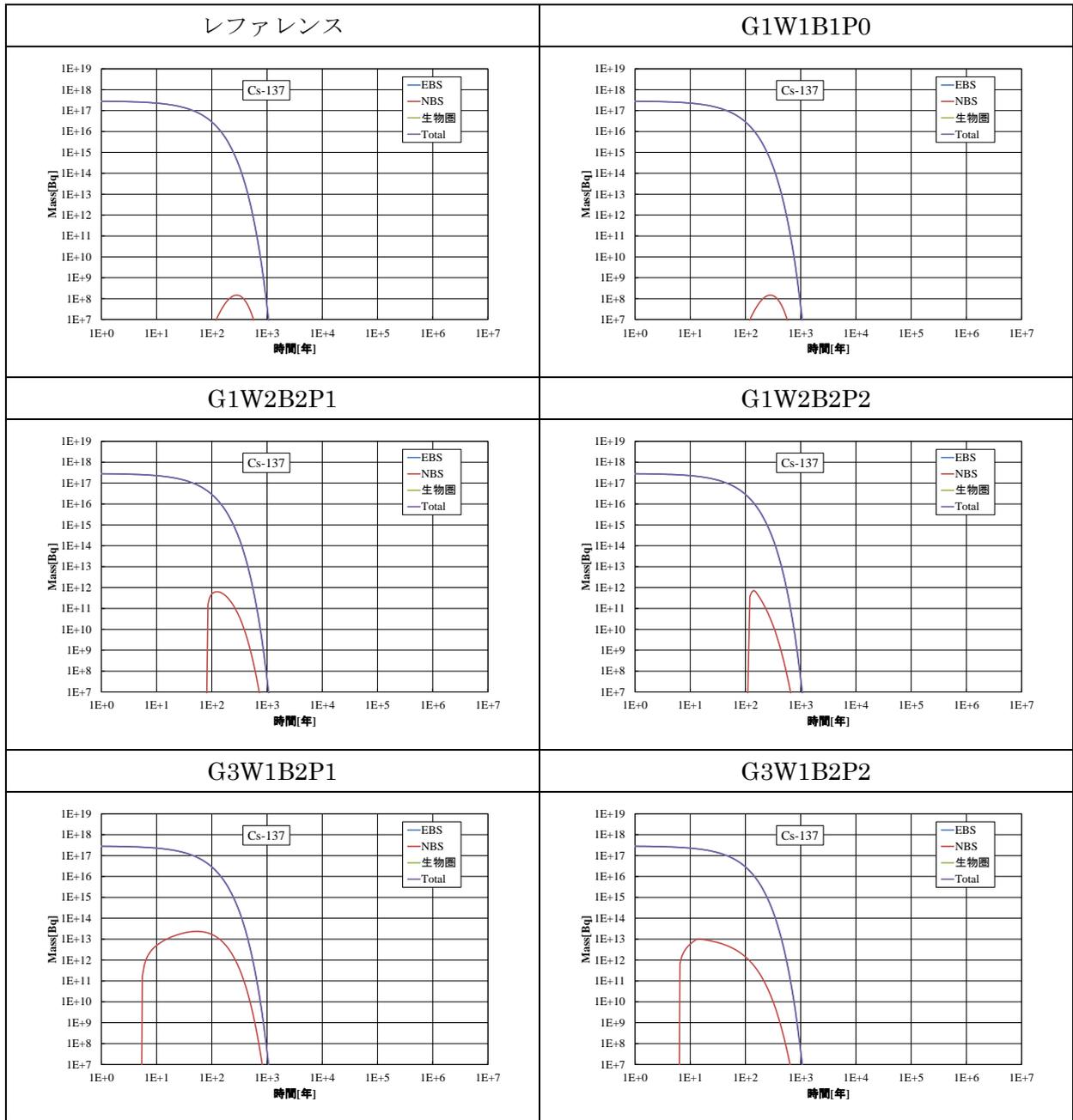


Sr-90 ケース名	ガス	廃棄体	緩衝材	緩衝材の流路幅(P)		存在量[%]		
	発生量(G)	間隙率(W)	水理物性(B)	破過	自己修復性	EBS	NBS	生物圏
リファレンス	—	標準設定 ($\phi=0.19$)	標準設定 (TRU-2相当)	なし	(ガス透気とは無関係に 自己シール性あり)	99.98	0.02	0.00
G1W1B1P0	TRU-2相当	$\phi=0.19$	TRU-2相当	なし (等方的な排水)	(ガス透気とは無関係に 自己シール性あり)	99.98	0.02	0.00
G1W2B2P1	TRU-2相当	$\phi=0.5$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞しない	99.98	0.02	0.00
G1W2B2P2	TRU-2相当	$\phi=0.5$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞する	99.98	0.02	0.00
G3W1B2P1	10倍 (全評価期間)	$\phi=0.19$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞しない	99.87	0.13	0.00
G3W1B2P2	10倍 (全評価期間)	$\phi=0.19$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞する	99.96	0.04	0.00

※：透気経路=移行経路が閉塞しないケースを網掛け表示した。

図 3.4.3-7 多重バリア内での核種の存在割合 (Sr-90)

Cs-137

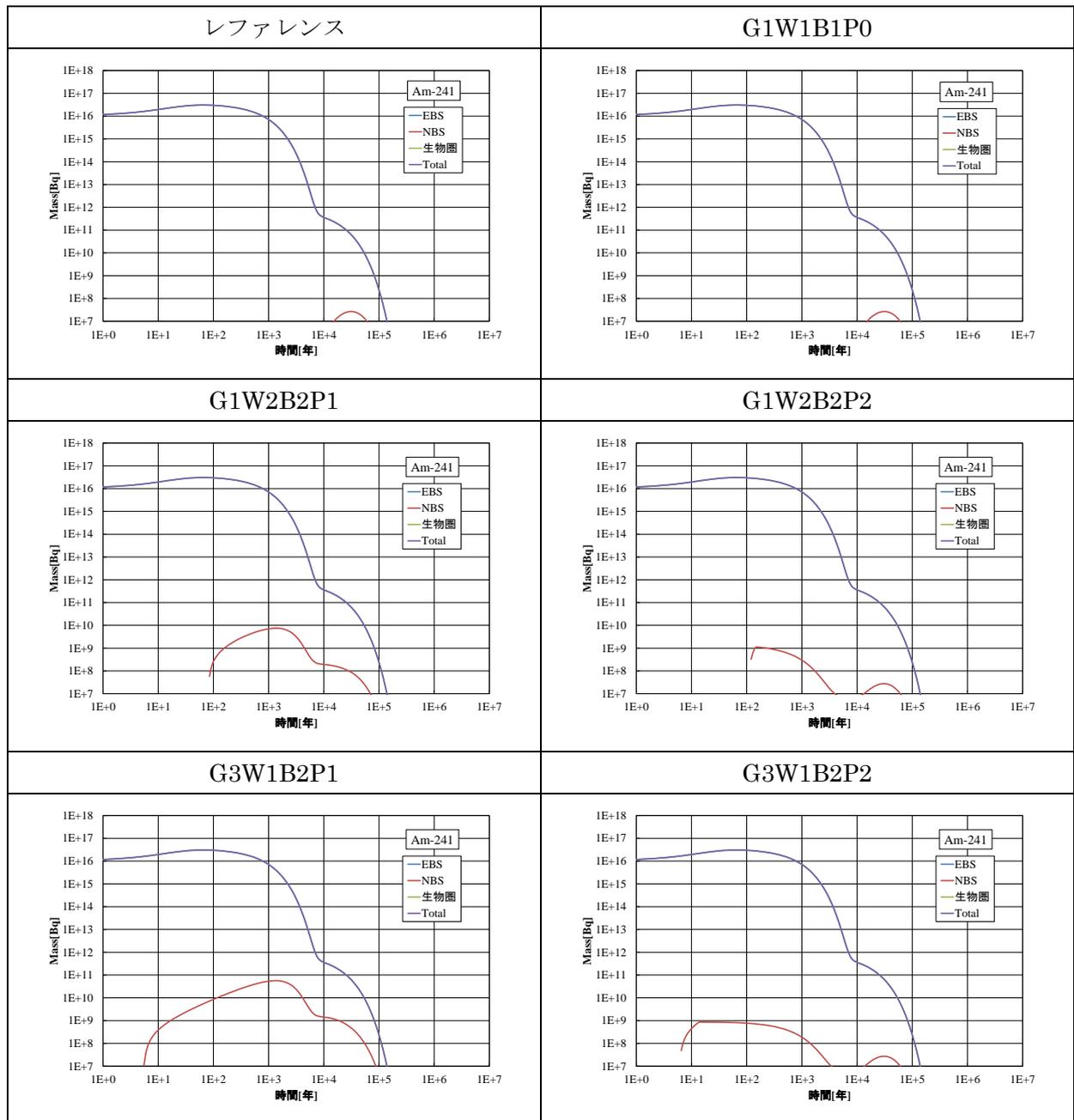


Cs-137 ケース名	ガス	廃棄体	緩衝材	緩衝材の流路拡幅(P)		存在量[%]		
	発生量(G)	間隙率(W)	水理物性(B)	破過	自己修復性	EBS	NBS	生物圏
リファレンス	—	標準設定 ($\varphi=0.19$)	標準設定 (TRU-2相当)	なし	(ガス透気とは無関係に 自己シール性あり)	100.00	0.00	0.00
G1W1B1P0	TRU-2相当	$\varphi=0.19$	TRU-2相当	なし (等方的な排水)	(ガス透気とは無関係に 自己シール性あり)	100.00	0.00	0.00
G1W2B2P1	TRU-2相当	$\varphi=0.5$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞しない	100.00	0.00	0.00
G1W2B2P2	TRU-2相当	$\varphi=0.5$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞する	100.00	0.00	0.00
G3W1B2P1	10倍 (全評価期間)	$\varphi=0.19$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞しない	99.98	0.02	0.00
G3W1B2P2	10倍 (全評価期間)	$\varphi=0.19$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞する	100.00	0.00	0.00

※：透気経路=移行経路が閉塞しないケースを網掛け表示した。

図 3.4.3-8 多重バリア内での核種の存在割合 (Cs-137)

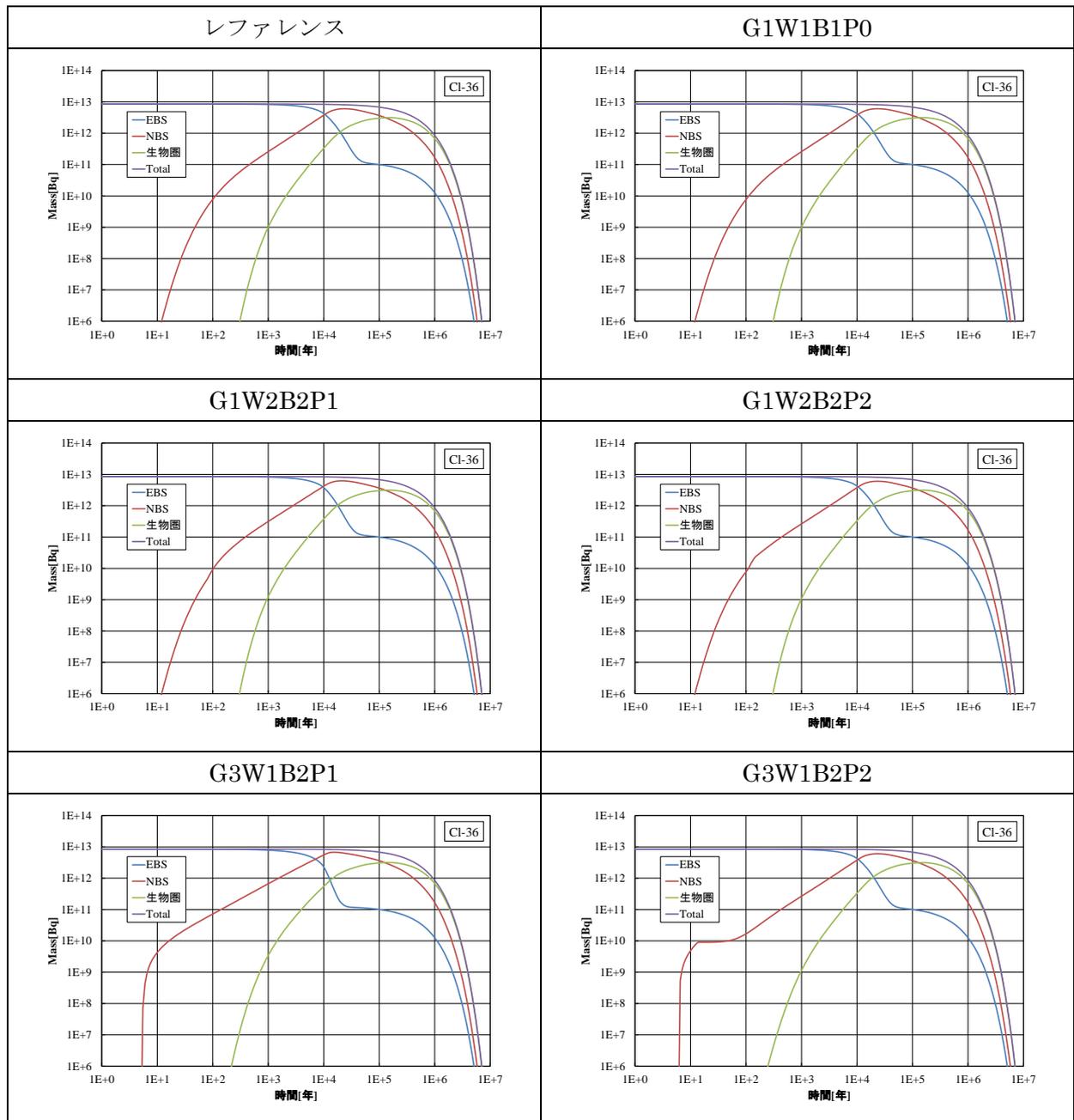
Am-241



Am-241 ケース名	ガス	廃棄体	緩衝材	緩衝材の流路拡幅(P)		存在量[%]		
	発生量(G)	間隙率(W)	水理物性(B)	破過	自己修復性	EBS	NBS	生物圏
リファレンス	—	標準設定 ($\phi = 0.19$)	標準設定 (TRU-2相当)	なし	(ガス透気とは無関係に 自己シール性あり)	100.00	0.00	0.00
G1W1B1P0	TRU-2相当	$\phi = 0.19$	TRU-2相当	なし (等方的な排水)	(ガス透気とは無関係に 自己シール性あり)	100.00	0.00	0.00
G1W2B2P1	TRU-2相当	$\phi = 0.5$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞しない	100.00	0.00	0.00
G1W2B2P2	TRU-2相当	$\phi = 0.5$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞する	100.00	0.00	0.00
G3W1B2P1	10倍 (全評価期間)	$\phi = 0.19$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞しない	100.00	0.00	0.00
G3W1B2P2	10倍 (全評価期間)	$\phi = 0.19$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞する	100.00	0.00	0.00

※：透気経路=移行経路が閉塞しないケースを網掛け表示した。

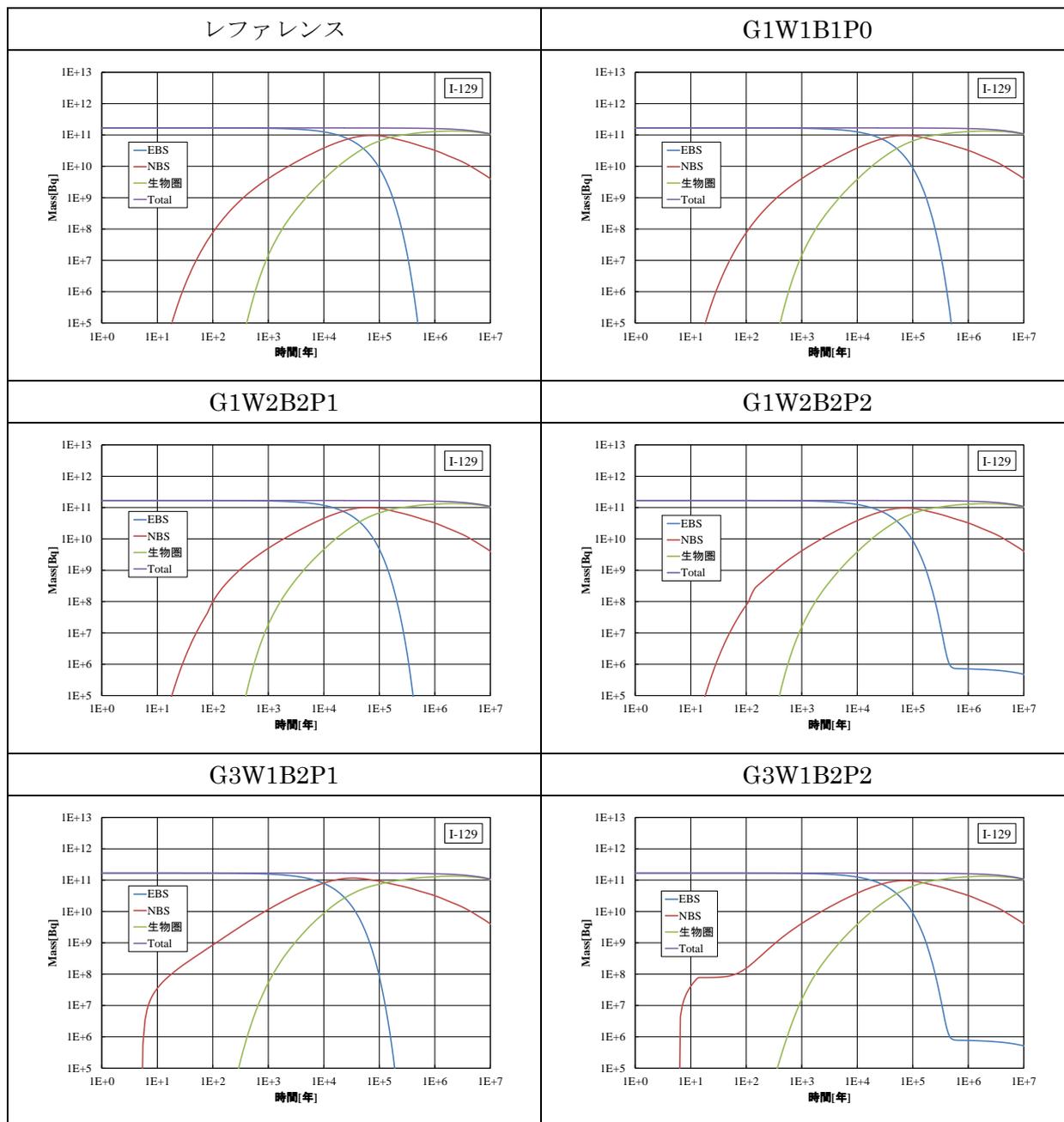
図 3.4.3-9 多重バリア内での核種の存在割合 (Am-241)



Cl-36 ケース名	ガス	廃棄体	緩衝材	緩衝材の流路拡幅(P)		存在量[%]		
	発生量(G)	間隙率(W)	水理物性(B)	破過	自己修復性	EBS	NBS	生物圏
リファレンス	—	標準設定 ($\phi = 0.19$)	標準設定 (TRU-2相当)	なし	(ガス透気とは無関係に 自己シール性あり)	3.97	37.54	58.48
G1W1B1P0	TRU-2相当	$\phi = 0.19$	TRU-2相当	なし (等方的な排水)	(ガス透気とは無関係に 自己シール性あり)	3.97	37.54	58.48
G1W2B2P1	TRU-2相当	$\phi = 0.5$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞しない	3.71	37.65	58.65
G1W2B2P2	TRU-2相当	$\phi = 0.5$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞する	3.97	37.54	58.48
G3W1B2P1	10倍 (全評価期間)	$\phi = 0.19$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞しない	3.04	37.91	59.05
G3W1B2P2	10倍 (全評価期間)	$\phi = 0.19$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞する	3.97	37.54	58.48

※：透気経路=移行経路が閉塞しないケースを網掛け表示した。

図 3.4.3-10 多重バリア内での核種の存在割合 (Cl-36)

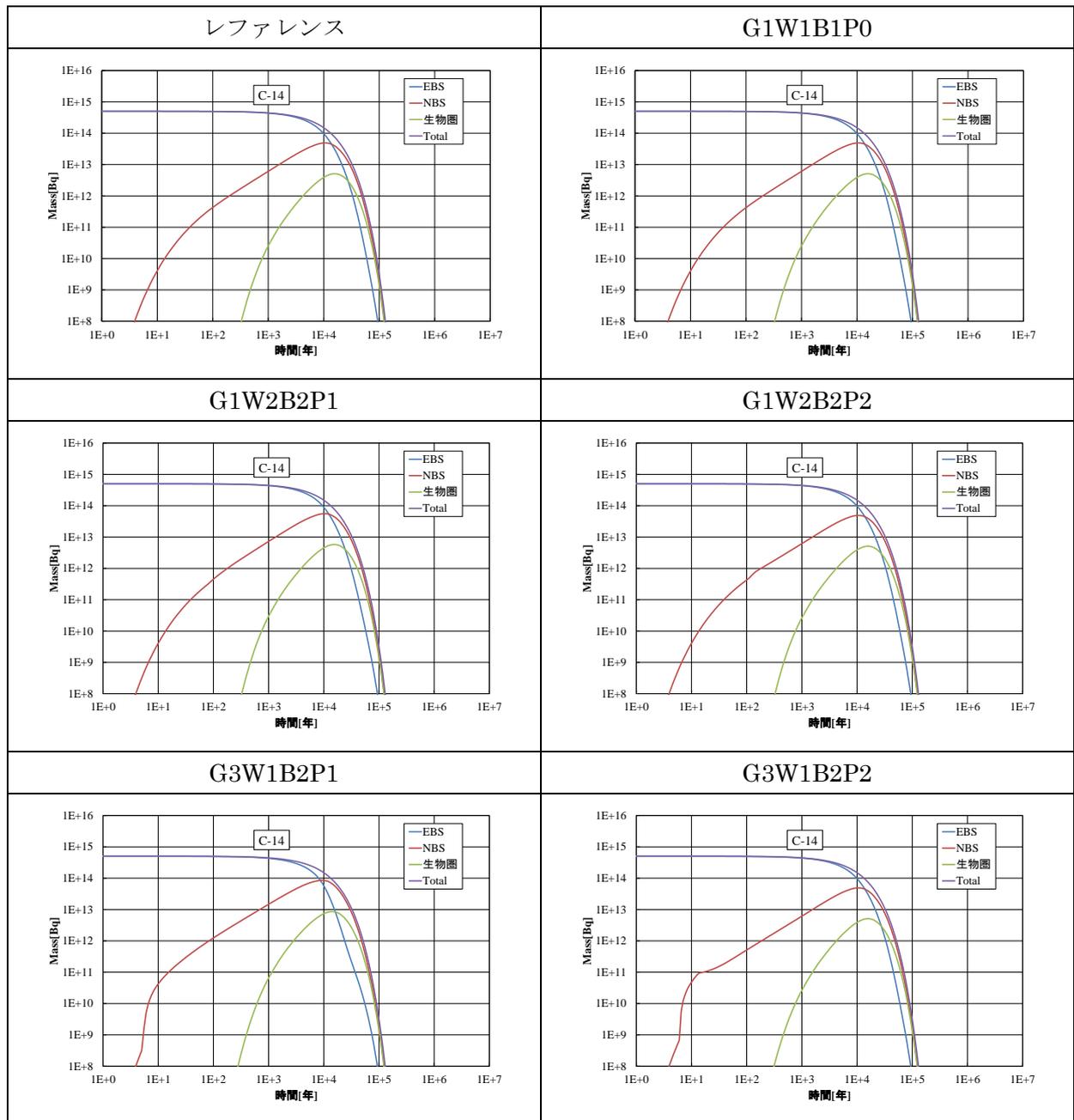


I-129 ケース名	ガス	廃棄体	緩衝材	緩衝材の流路幅(P)		存在量[%]		
	発生量(G)	間隙率(W)	水理物性(B)	破過	自己修復性	EBS	NBS	生物圏
リファレンス	—	標準設定 ($\varphi = 0.19$)	標準設定 (TRU-2相当)	なし	(ガス透気とは無関係に 自己シール性あり)	0.15	4.96	94.89
G1W1B1P0	TRU-2相当	$\varphi = 0.19$	TRU-2相当	なし (等方的な排水)	(ガス透気とは無関係に 自己シール性あり)	0.15	4.96	94.89
G1W2B2P1	TRU-2相当	$\varphi = 0.5$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞しない	0.13	4.96	94.91
G1W2B2P2	TRU-2相当	$\varphi = 0.5$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞する	0.15	4.96	94.89
G3W1B2P1	10倍 (全評価期間)	$\varphi = 0.19$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞しない	0.06	4.96	94.98
G3W1B2P2	10倍 (全評価期間)	$\varphi = 0.19$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞する	0.15	4.96	94.89

※：透気経路=移行経路が閉塞しないケースを網掛け表示した。

図 3.4.3-11 多重バリア内での核種の存在割合 (I-129)

C-14



C-14 ケース名	ガス	廃棄体	緩衝材	緩衝材の流路拡幅(P)		存在量[%]		
	発生量(G)	間隙率(W)	水理物性(B)	破過	自己修復性	EBS	NBS	生物圏
リファレンス	—	標準設定 ($\phi = 0.19$)	標準設定 (TRU-2相当)	なし	(ガス透気とは無関係に 自己シール性あり)	74.14	22.86	3.00
G1W1B1P0	TRU-2相当	$\phi = 0.19$	TRU-2相当	なし (等方的な排水)	(ガス透気とは無関係に 自己シール性あり)	74.14	22.86	3.00
G1W2B2P1	TRU-2相当	$\phi = 0.5$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞しない	71.26	25.41	3.33
G1W2B2P2	TRU-2相当	$\phi = 0.5$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞する	74.13	22.87	3.00
G3W1B2P1	10倍 (全評価期間)	$\phi = 0.19$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞しない	59.91	35.44	4.65
G3W1B2P2	10倍 (全評価期間)	$\phi = 0.19$	排水量最大	あり	透気後、経路は閉塞する	74.13	22.87	3.00

※：透気経路=移行経路が閉塞しないケースを網掛け表示した。

図 3.4.3-12 多重バリア内での核種の存在割合 (C-14)

(2) ガス発生／ガス移行挙動による核種移行への影響評価に関する検討

1) ガス発生（ガス発生速度とタイミング）

図 3.4.3-13 に各解析ケースにおけるガス移行解析結果を近似した排水速度と、リファレンスケースの場合の人工バリア出口における核種フラックス（EDZ フラックス）とを、時間軸を同期させた図として示す。

透気経路＝排水経路の形成されない G1W1B1P0 ケース（等方的な排水のみ）では、近似モデルにおいて排水速度のピークは生じない。

一方、透気経路＝排水経路の形成されるケース（P1 または P2）では、近似モデルのプロファイルは、ガス発生量に関する設定（G1 または G3）によって大きく 2 つに傾向が分かれた。TRU-2 レポート相当のガス発生量を想定した G1W2B2P1/G1W2B2P2 のケースでは、排水速度のピークは、リファレンスケースにおける核種フラックスピーク（処分後 60 年）以降に立ち上がっており（G1W2B2P1 では 80 年、G1W2B2P2 では 110 年）、排水速度の大きさもそれほど大きくない。これに対して、仮想的に TRU-2 レポートの 10 倍のガス発生量を想定した G3W1B2P1/G3W1B2P2 のケースでは、排水速度のピークは、リファレンスケースにおける核種フラックスピーク（処分後 60 年）以前に立ち上がっており（G3W1B2P1 では 5 年、G3W1B2P2 では 6 年）、排水速度も比較的大きい。

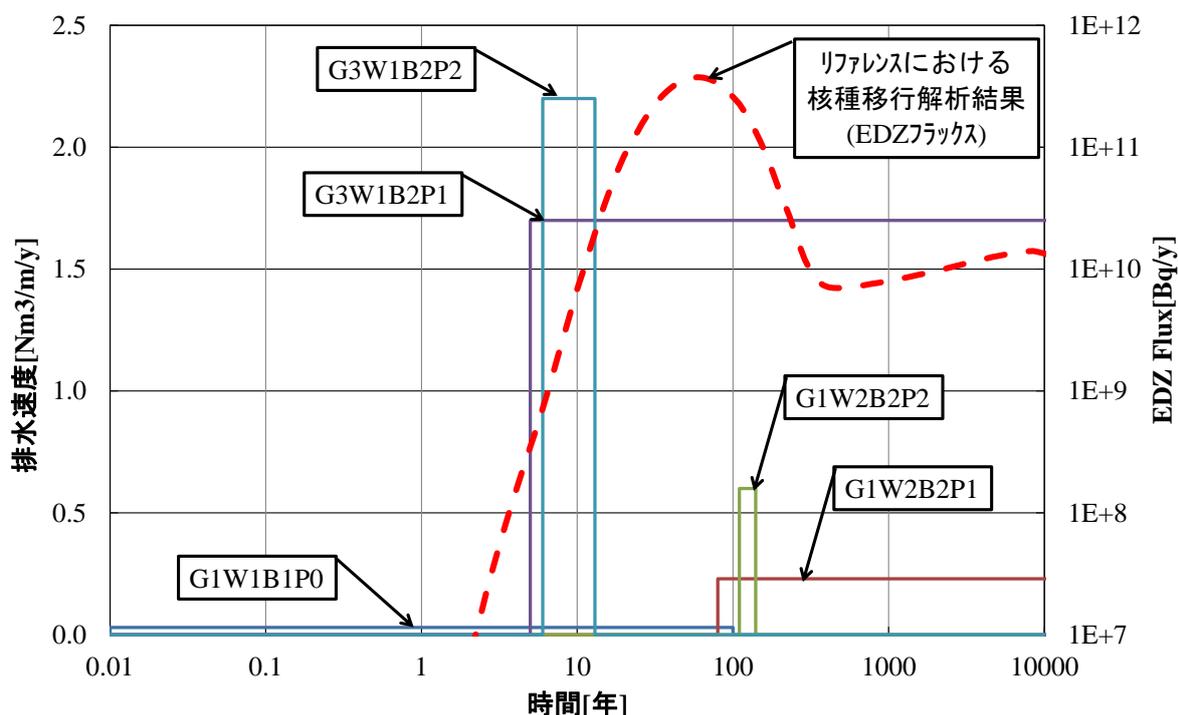


図 3.4.3-13 ガス移行解析結果の近似と EDZ フラックス

リファレンスケースにおいて EDZ フラックスのピークを与える Sr-90 に着目して、各解析ケースにおける EDZ フラックスの経時変化を比較したものを、図 3.4.3-14 に示す。TRU-2 レポート相当のガス発生量を想定した G1W1B1P0/G1W2B2P1/G1W2B2P2 のケースでは、Sr-90 の EDZ フラックスにはほとんど変化がないか（G1W1B1P0）、変化がある場合でも、その相違はごくわずか（G1W2B2P1/G1W2B2P2）であった。一方、TRU-2 レポートの 10 倍のガス発生量を想定

した G3W1B2P1/G3W1B2P2 のケースでは、Sr-90 の EDZ フラックスが 2 オーダー程度まで上昇する結果となった。これは、近似モデルにおける排水速度が大きい効果ばかりでなく、非常に早期に排水現象が生じることによって、リファレンスケースで期待される核種の減衰効果が発揮されていない効果大きい。

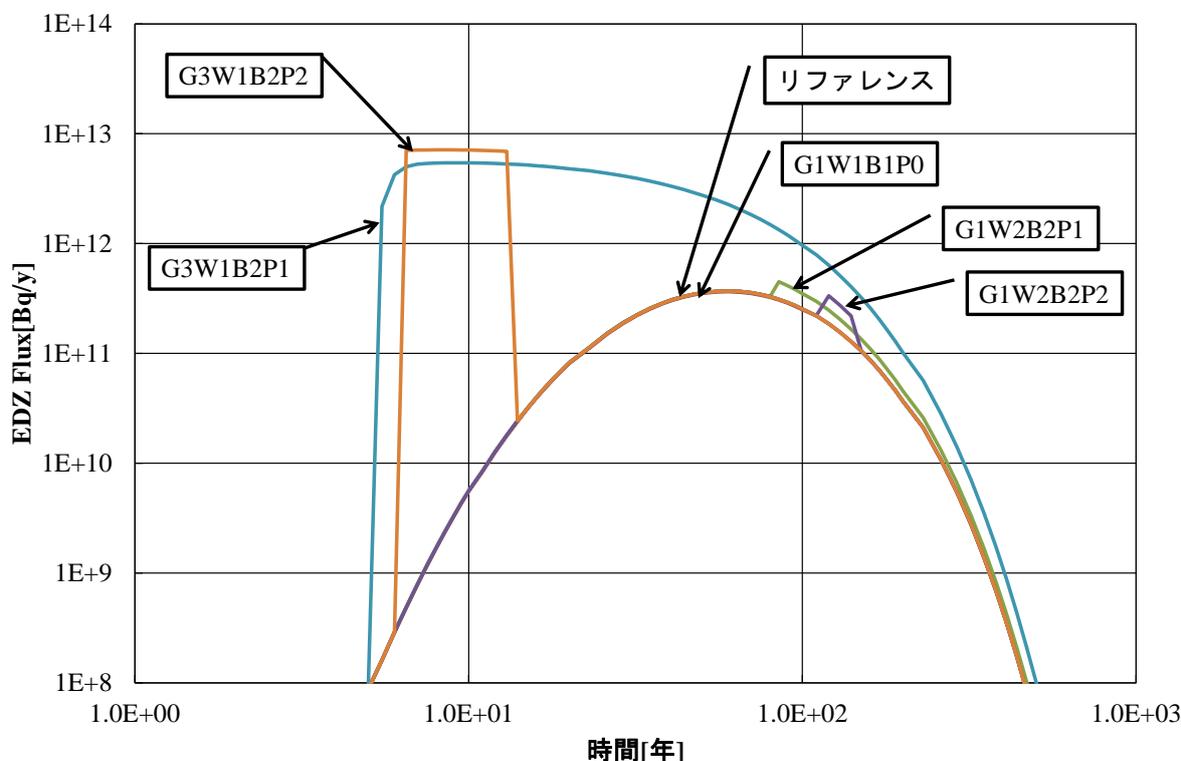


図 3.4.3-14 EDZ フラックスにおける解析ケースの比較 (Sr-90)

以上より、ガス影響シナリオについて、核種移行の観点からは次のように結論することができる。

- ガス発生量が多いことは、人工バリア出口でのフラックスを増大させる可能性がある。
- 特に排水現象が早期に生じる場合、比較的、半減期の短い核種の減衰効果を阻害することで、より大きな影響を可能性がある。

今回の考察からは、ガス影響シナリオを正しく評価する上で、やはりガス発生量の評価が重要であることが再認識された、と言える。さらに、処分後のごく早期に排水が生じる場合に影響が大きくなることから、容器の健全性に関する設定や、閉鎖後初期の過渡的な現象（再冠水等）を踏まえたガス発生／ガス移行／核種移行が求められることが示唆されている。

2) ガス移行（緩衝材における透気経路の自己修復性）

リファレンスケースにおいて生物圏での線量率への寄与が最も大きい C-14 に着目して、各解析ケースにおける C-14 の線量率の経時変化を比較したものを、図 3.4.3-15 に示す。EDZ フラックスを視座とした場合には各解析ケースにおける相違が認められたものの、生物圏における線量率を視座とした場合には、総じて、各解析ケースにおける相違は小さくなっている。これは母岩における核種移行遅延効果によるものである。しかしながら、それでも、緩衝材の自己修復性を考慮せず、透気に生じた透気経路が閉塞すると仮定した G1W2B2P1/G3W1B2P1 ケースでは、線量率の上昇が認められた。リファレンスケースでは最大線量率 $0.058 \mu \text{ Sv/y}$ だったのに対し、G1W2B2P1 ケースでは最大線量率 $0.066 \mu \text{ Sv/y}$ 、G3W1B2P1 ケースでは最大線量率 $0.10 \mu \text{ Sv/y}$ となった。

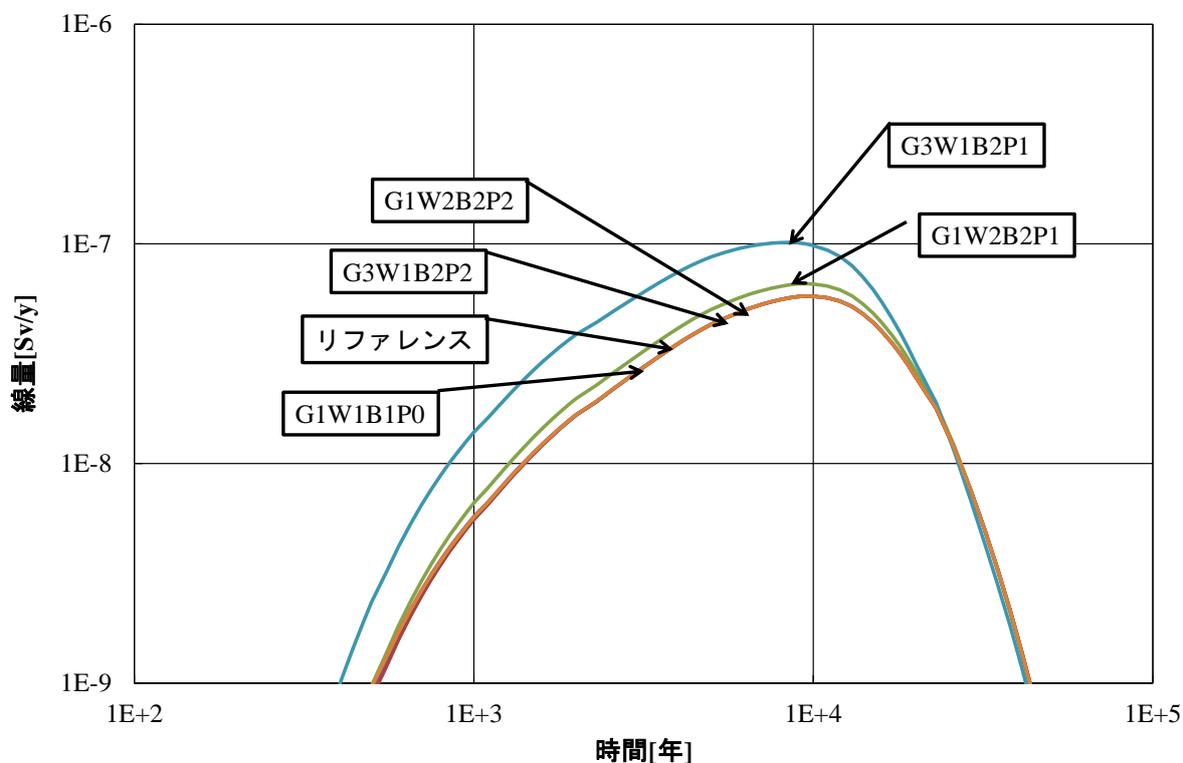


図 3.4.3-15 生物圏での線量率における解析ケースの比較 (C-14)

このことから、ガス影響シナリオについて、核種移行の観点からは次のように結論することができる。

- 緩衝材の自己修復性が期待できず、透気後も透気経路が残存する状況では、線量率が増大する可能性がある。

3.4.4 まとめ

- (1) 核種移行解析評価に使用する解析コードの選定とパラメータの設定
 - ・ 以下「(2)」で実施する核種移行解析結果と第2次 TRU レポートでの安全評価結果とを比較検証するため、当該レポートで検討された解析条件を基準として、解析コードは既存の TIGER コードとの比較検証済みである GoldSim を選定し、パラメータも既存の数値を援用して設定した。
- (2) 核種移行解析の実施等
 - ・ 第2次 TRU レポートに準拠し、人工バリアから天然バリアまでの核種移行経路を1次元でモデル化した。
 - ・ 「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解析的評価」におけるガス移行解析に準拠した核種移行解析ケースを設定することで、汚染水の排水量の想定幅を基に実施した核種移行解析を実施した。
- (3) TRU 廃棄物処分システム（人工バリア）の成立性評価
 - ・ 核種移行解析結果を基に人工バリアからの核種移行率等を評価することで、人工バリアの成立性（核種の閉じ込め性能）が担保される条件として以下のように見出した。
 - ① 人工バリア内におけるガス発生速度（mol/y、処分坑道奥行き 1m 当たり）は、第2次 TRU レポートでの評価結果程（図 3.4.2-3 参照）度までは許容できる
 - ② 上記「①」のガス発生速度において、人工バリア内で気相が形成された結果として、人工バリア内部でガスが移行することで緩衝材に到達してガス破過が生じても、緩衝材の自己修復性が期待通りに発揮されれば、繰り返される汚染水の押出し挙動において、その排水流量（Nm³/y、処分坑道奥行き 1m 当たり）のピーク値出現時刻が後ろ倒しになることに伴い、人工バリアの核種移行率（Bq/y）のピーク値（移行率の支配核種である Sr-90 の移行挙動に由来）が低減することにより、その結果として核種移行率のピーク値が第2次 TRU レポートでの評価結果（安全性が確認されたリファレンスケースでの評価結果）と同等かそれ以下になることから、核種の閉じ込め性能が担保される

参考文献

- [1] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター, 2013. 平成 24 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 2 分冊) —ガス移行挙動の評価—
- [2] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター, 2017. 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—
- [3] 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
- [4] 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—
- [5] 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
- [6] J. R. Appleyard, I. M. Cheshire and R. K. Pollard, 1981. Special Techniques for Fully-Implicit Simulators, Enhanced oil recovery, pp.395-408.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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—
- [10] 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—
- [11] 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—
- [12] 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
- [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.

- [15] Golder Associates,2001. GoldSim Contaminant Transport Module, User's Guide, Golder Associates Inc.
- [16] 三原守弘, 大井貴夫 ,2004. パラメータの時間的变化を考慮した核種移行解析コード (TIGER) の開発, サイクル機構技報, No.22, pp.27-28.
- [17] 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 -付録資料-, 「処分場の概要」の説明資料、 NUMO-TR-10-04.

第4章 まとめ

4.1 平成 29 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][3][4]に、これまでの検討成果[5][6][7][8][9][10]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 29 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[5][6][7][8][9][10]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充』によってガス移行シナリオの拡張や構築根拠の拡充を図り、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 4.1.1-1 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 29 年度においては、図 4.1.1-2 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充』および②『ガス移行挙動解析ツールの高度化』では、これまで各々独立した検討成果の統合化を図った。具体的には、これまでのシナリオ検討[1][2][3][4]で想定・抽出された安全評価上の重要事象に対し、ガス発生・移行が与える影響の度合いを定量的に把握するため、シナリオに準拠した解析ケースを設定し、これまでに高度化と検証を図ってきた解析ツールを用いたガス移行解析や核種移行解析を実施した。

このうち①『ガス移行評価シナリオの拡充』では、人工バリアの成立性を評価する上で重要な事象を対象として評価シナリオを再整理し、解析的評価に用いる評価ケースと解析手法を設定した。解析的評価では、重要 FEP に係る不確実性要素は評価ケースに対応するモデルとパラメータで考慮することとした。

上記「①」を受けた②『ガス移行挙動解析ツールの高度化』の検討では、先ずこれまでに検証を図ってきたガス移行モデルとモデルパラメータを用い、シナリオの不確実性要素に対応する解析ケースを設定したうえで人工バリアの 2 次元断面を対象としたガス移行解析を行った。ガス移

図 4.1.1-2 平成 29 年度までの検討で得られた成果と進捗状況の整理

4.2 今後の課題

これまでの成果は図 4.1.1-2 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」）は整備できている。

しかしながら、設定したシナリオにおける多くの不確実性については、本フェーズで可能な限りの低減を図ったものの全てが解消されたわけではない。これは、未だ解明されていない事象や技術的に解決の難しい課題等があるためである。従って、引き続き最新の知見等を取り入れつつ不確実性の低減を図り、シナリオの根拠の拡充していく必要がある。

その不確実性の一例としては、未だ知見の無い「人工バリアシステムとしてのガス移行特性」がある。具体的には、人工バリアは複数の異なる材料から成る「複合構造物」であり、各々の個別材料のガス移行特性が異なることその他、形状的にも複雑な構造形態であるため、人工バリア内の部位によっては密度や応力状態が異なることに起因して、ガス移行特性が大きく異なってくる可能性があることから、人工バリアシステムとしてのガス移行特性を厳密に評価するためには、人工バリアシステムの複合構造を極力模擬した mock up（複合システム試験体）を製作し、そのガス移行特性を評価していく必要がある。また、これと同時に複合システム試験体のガス移行特性のモデル化と高度化を図りながら、人工バリアシステム全体のガス移行連成挙動評価手法（ガス移行連成挙動の解析評価手法）を構築していくことが必要である。

これらの検討を通し、NUMO が目指す Safety Case の構築に必要な「閉鎖後長期の安定性の評価」のうち、シナリオ構築（TRU 廃棄物処分システムの状態設定のための現象モデルの高度化）に資する「放射性廃棄物由来の発生ガスに関する現象モデルの妥当性」を検証していくことが課題である。また、検証した現象モデル（ガス移行連成挙動の解析評価モデル）によってガス影響に係る施設（人工バリア）の成立性を評価し、評価結果（施設の成立条件）をガス対策を考慮した処分施設の設計等に反映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] 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 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—（2017）
- [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)

