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―

平成 27 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 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 26 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－ガス移行連成挙動評価手法の開発－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 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－ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上－
	第２分冊	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－炭素 14 長期放出挙動評価－
	第３分冊	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－ナチュラルアナログ調査－
	第４分冊	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－人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア評価の初期条件の設定－
◎	第５分冊	平成 26 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－ガス移行連成挙動評価手法の開発－

はじめに

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

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 レポートから最大線量が処分後 10,000 年で 2μSv/y）ヨウ素 129 および炭素 14 の低減対策に加え、その廃棄体の特性から大量のセメント材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。

したがって、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 26 年度の成果を取り纏めた。

目　次

図　目　次

表　目　次

第１章　調査の概要

1.1　背景

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

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

- 地下水に溶解し、人工バリアの外部へと移行する
- 気相を形成し、発生した体積に相当する地下水を押出す（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]。ここではガス移行挙動評価解析の結果、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（$^{14}CH_4$）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。

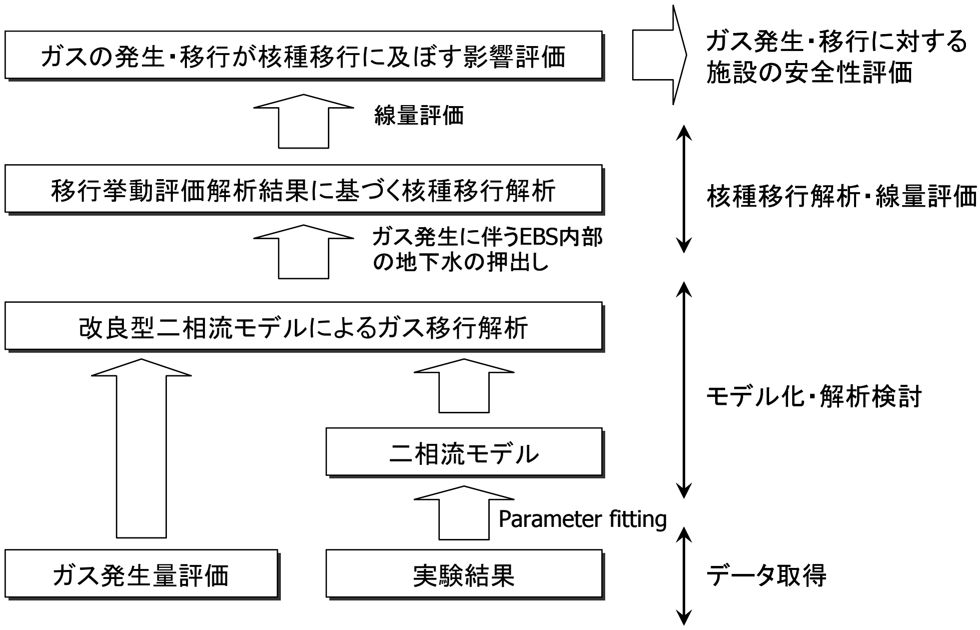


図 1.1.1-1 ガス移行挙動解析に基づくガス影響評価の流れ

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が、実験結果に基づく二相流モデルの構築やガス発生量の評価等が必要であり、これらは保守的な仮定に基づいているものの、そこには、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 廃棄物処分施設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

前項における背景に基づき、平成 19-24 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、人工バリアのうちベントナイト緩衝材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、材料試験によるガス移行挙動の把握し、ガス移行挙動における素過程を反

映し、試験結果の再現性ができる解析手法（モデル）の信頼性向上を図るとともに、廃棄物や材料（セメント系）及び構造（界面）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の係る処分シナリオの高度化を図ることで、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の寄与を目的とする。

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を取得し、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 廃棄体の長期変遷による挙動を把握できるツールを確立すると共に、ガス移行挙動評価のためのシナリオを拡張し、TRU 廃棄物処分事業におけるガス移行挙動評価の技術的貢献を目指す。図 1.2.1-1 には、本調査研究において想定対象とする TRU 廃棄物処分の人工バリアの概念を、また表 1.2.1-1 には、本調査研究において想定する人工バリアの構成材料とその仕様（スペック）や要求機能を、第 2 次 TRU レポートや TRU レベル 3 報告書（NUMO-TR-10-03）[3]を参考に概念図および表に示した。ただし、今後の処分事業の進捗や本調査研究にて得られる成果によって、下記の概念が修正される可能性があることに留意が必要である。

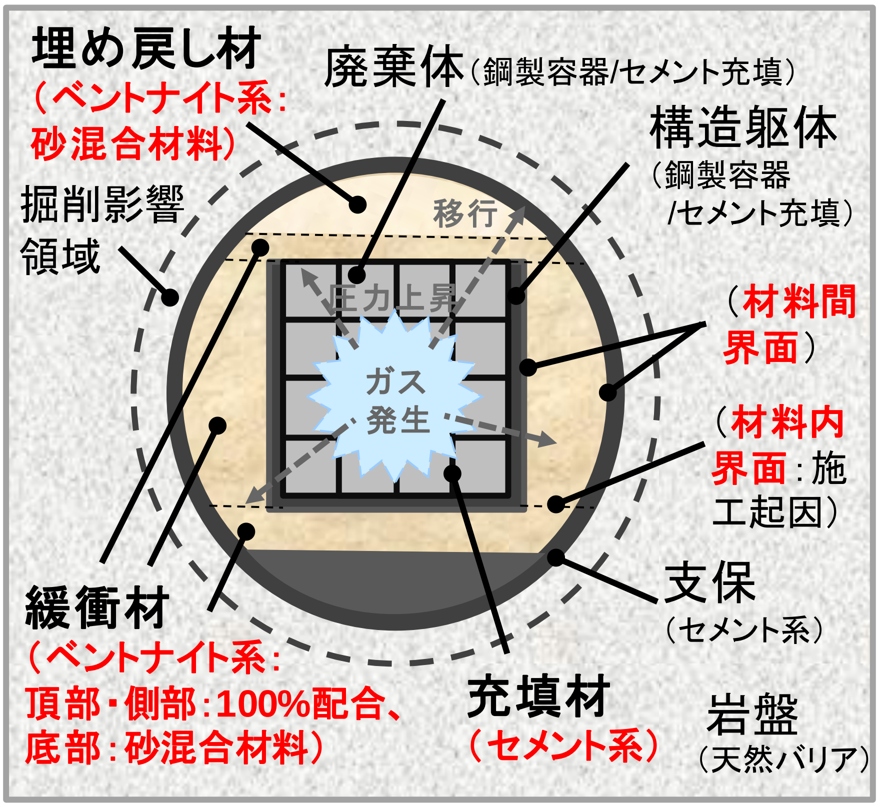


図 1.2.1－1　本調査研究において想定対象とする TRU 廃棄物処分の人工バリアの概念図

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

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

1.3　本事業の実施概要

1.3.1　これまでの成果と全体概要

ここでは、まず始めに本事業のこれまでの成果と全体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	・ **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。	・ **ガス移行に関する材料特性データの取得**	・ 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
2	・ **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）。	・ **モデル化・解析手法の高度化**	・ 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
3	・ **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。	・ **ガス移行挙動評価手法の構築**	・ 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を与えるのか」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シナリオとして構築するものであるが、その根拠に実現象の把握（ガス移行に関する材料特性データの取得）や実現象のメカニズムの妥当性や再現性の確認（モデル化・解析手法の高度化）が必要となってくる。これが各検討項目で連携が必要な理由である。

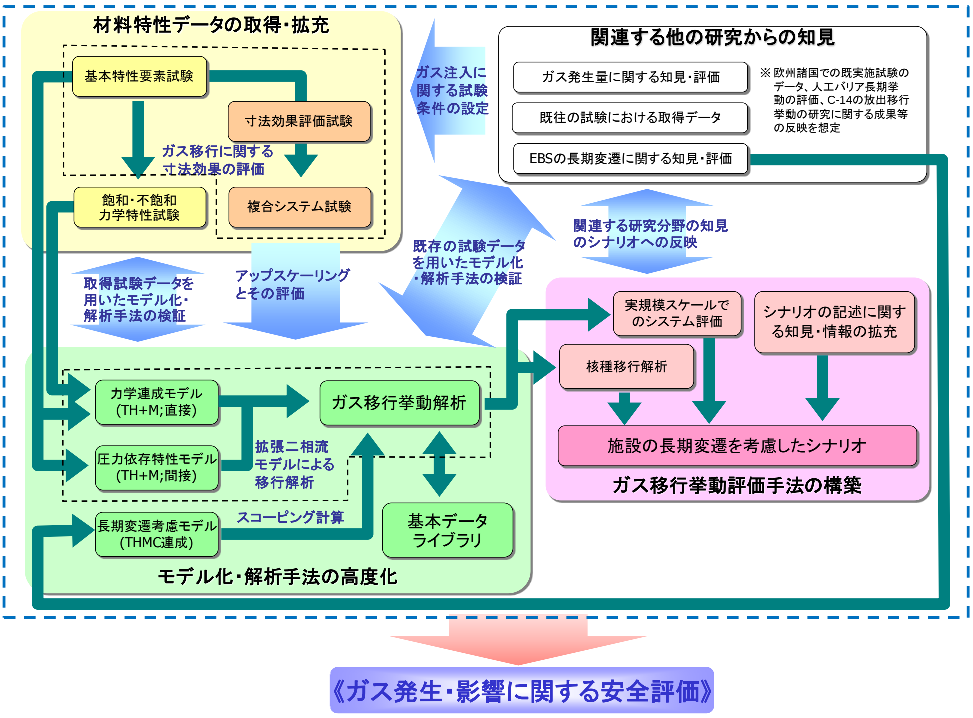


図 1.3.1-1　検討実施項目（前フェーズ：平成 19-24 年度）の相関

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

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

課題の項目	課題の内容
・　ガス移行挙動評価手法に関する課題	・　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
・　モデル化、解析手法に関する課題	・　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
・　材料特性データの取得に関する課題	・　ベントナイトに係るガス移行の知見について十分把握されておらず、セメントについては殆ど把握されていない。また、人工バリアの複合材料システム（セメント・ベントナイト・界面）のガス移行挙動評価に関する検討には未着手 ⇒課題解決のためには、ベントナイト、セメント系材料（の一部）のガス移行に関する課題を整理したうえで、複合材料システムのガス移行データ取得に着手（必要な試験を実施）し，さらに複合材料システムや現実的な施工状況を反映したガス移行挙動の把握のためのシステム試験の検討を実施する必要がある

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

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

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

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

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

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

次項以降（1.3.2 ～1.3.5 項）に、本フェーズ（平成 25-29 年度）で検討する前述の①～④の 4 項目について、これまでの成果（平成 19-25 年度）の概要を記すとともに、その成果より抽出された課題（課題①：第 2 次 TRU レポートで抽出された課題、課題②：平成 19-24 年度の検討で抽出された課題）が本フェーズへどのように反映され、どのように検討が進められてきたかを整理して示す。

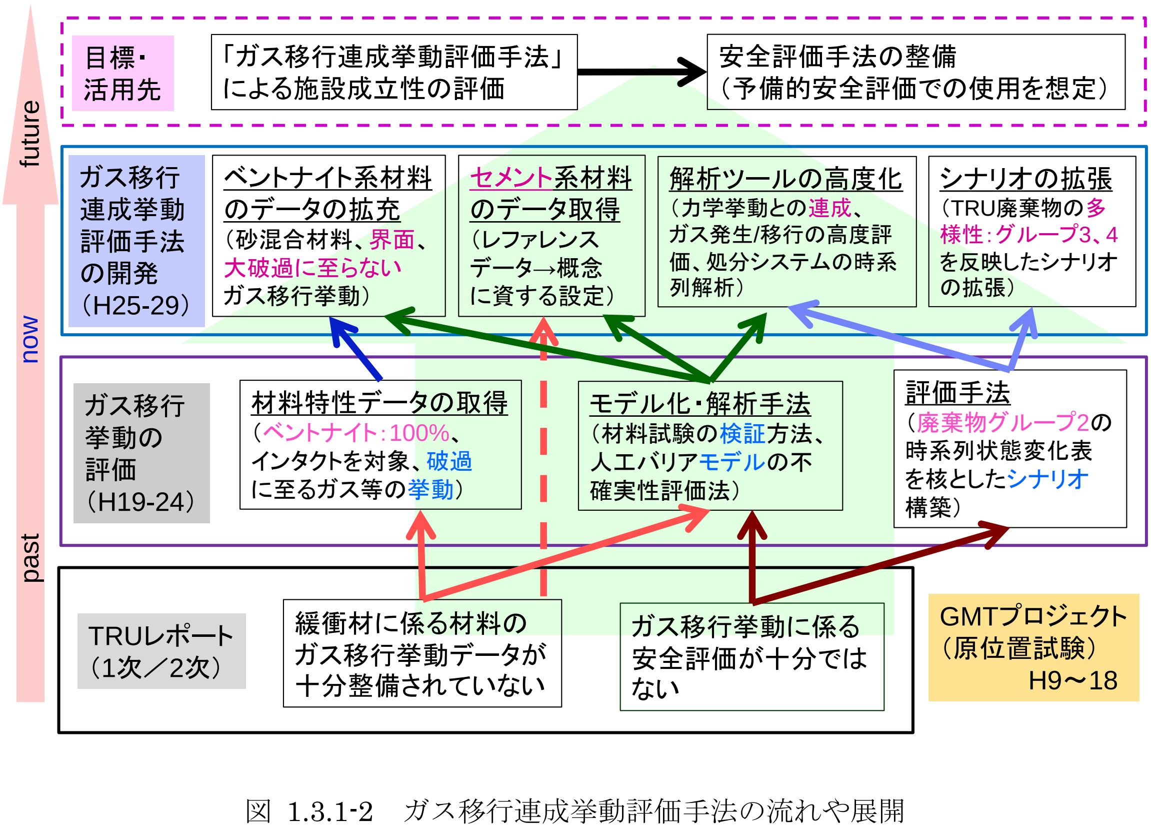


図 1.3.1-2　ガス移行連成挙動評価手法の流れや展開

事業項目	～平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度～
1.実施計画策定／とりまとめ	（平成25年度までの「ガス移行挙動評価」の成果を反映）	全体計画の策定 年度の実施計画策定	年度の実施計画策定	年度の実施計画策定	年度の実施計画策定	年度の実施計画策定 5年間取りまとめ	
2. ガス移行評価シナリオの拡張	ガス移行挙動評価手法の構築 予備的安全評価に係る検討 システム試験の提案	・ガス移行挙動評価シナリオの高度化に係る課題抽出 ・廃棄物グループ3のシナリオ検討	・全人工バリア概念（廃棄物グループ1～4）と天然バリアのシナリオ統合 ・シナリオ設定根拠の拡充			・ガス移行挙動評価シナリオに関してのとりまとめ	目標成果 開発した「ガス移行連成挙動評価手法」による施設成立性の評価 ↓ 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
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 ・確証および試解析の実施	・施設のガス発生や力学条件等のモデル化と確証 ・材料の変形構成モデル（THM連成）モデル化と確証			・ガス移行解析・モデル化手法の構築に関する知見の取りまとめ	
4.ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充	ベントナイト材料の基本特性および寸法効果（破過圧と供試体長の関係）についての検討	・課題の整理と試験条件の設定 ・ベントナイト砂混合材料の水分特性取得試験	・低圧条件下でのガス移行特性把握試験 ・膨潤変形特性取得試験 ・ガス移行試験の複合システム化に係る予備検討	・ガス発生条件（ガス圧）等を考慮した界面のガス移行特性把握試験 ・圧密変形特性取得試験 ・ガス移行試験の複合システム化に係る詳細検討	・せん断強度特性取得試験	・ベントナイト系材料のガス移行特性のとりまとめ ・ベントナイト砂混合材料の材料特性のとりまとめ ・ガス移行試験の複合システムに係る取りまとめ	
5.セメント系材料のガス移行挙動データの取得		・セメント系バリアのガス移行挙動の課題の整理と試験条件の設定 ・予備データの取得	・セメント系バリアのガス二相流特性把握試験（透気性を有するモルタル供試体）	・現実的なセメント系材料（充填材）の特性や界面（施工継ぎ面）を考慮した気液二相流特性の把握試験		・セメント系バリアのガス移行挙動に係る知見のとりまとめ	
研究の評価			中間評価（到達点および課題の確認、全体計画の見直し）			総合評価 成果の取りまとめ 新たな課題の確認	

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

1.3.2　ガス移行評価シナリオの拡張

本項目では、平成 19-24 年度に実施した「ガス移行挙動評価手法に関する検討」[5][6][7][8][9][10]にて構築した手法（図 1.3.2-1、「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。このうち平成 25 年度[11]は、TRU 廃棄物処分グループのグループ２以外のシナリオ構築に係る検討等を行った。具体的な実施内容を以下に示す。

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

昨年度までのグループ 2 の処分概念を対象としたシナリオ検討成果をベースに、他のグループを対象としたシナリオを構築することを目的に、処分概念における不確実性を特定した上で、技術課題を抽出することができた。主要な成果を以下に示す。

① 各グループの特徴の整理および状態変化表の作成

第 2 次 TRU レポートおよび NUMO の地層処分低レベル廃棄物の処分概念を対象に、廃棄物分類、人工バリアシステム概念、ガス発生の要素などの特徴を整理した。検討対象にはグループ 3 を選定し、状態変化表を作成した（図 1.3.2-2）。

② シナリオ整理シートの作成

上記「①」の作業をベースに、選定したグループ 3 を対象にシナリオ設定上での不確実性を考慮した上で、安全機能の展開表、統合 FEP の関連図を統合し、シナリオ整理シートを作成した（図 1.3.2-3）。

③ 予備的安全評価における不確実性の検討と関連する技術課題の抽出

シナリオ構築上の不確実性を考慮した整理表をもとに、ガス影響に係わる予備的安全評価に向けての不確実性を特定し、技術課題として取りまとめた。

(2) TRU 廃棄物処分概念に係る人工バリア材料に係る現状の知見の整理

本検討では、TRU レポート（一次および二次）、ならびにそれ以降に JAEA、NUMO その他機関より提示されている TRU 処分概念について人工バリア材料とガス発生・移行の概念の整合性の観点で整理し、そのうえで解決すべき課題とそのための研究についてとりまとめ、平成 24 年度までに整備した知見の整理シートに追記することができた。その際、海外における放射性廃棄物処分に係るガス移行対策に係る知見（FORGE プロジェクトにおけるヨーロッパ諸国間での論点、および日本の TRU 廃棄物処分と類似したスウェーデンおよびスイスの処分概念におけるガスの取扱い）を反映し、より現実的なシナリオの構築に資する成果として取りまとめた。

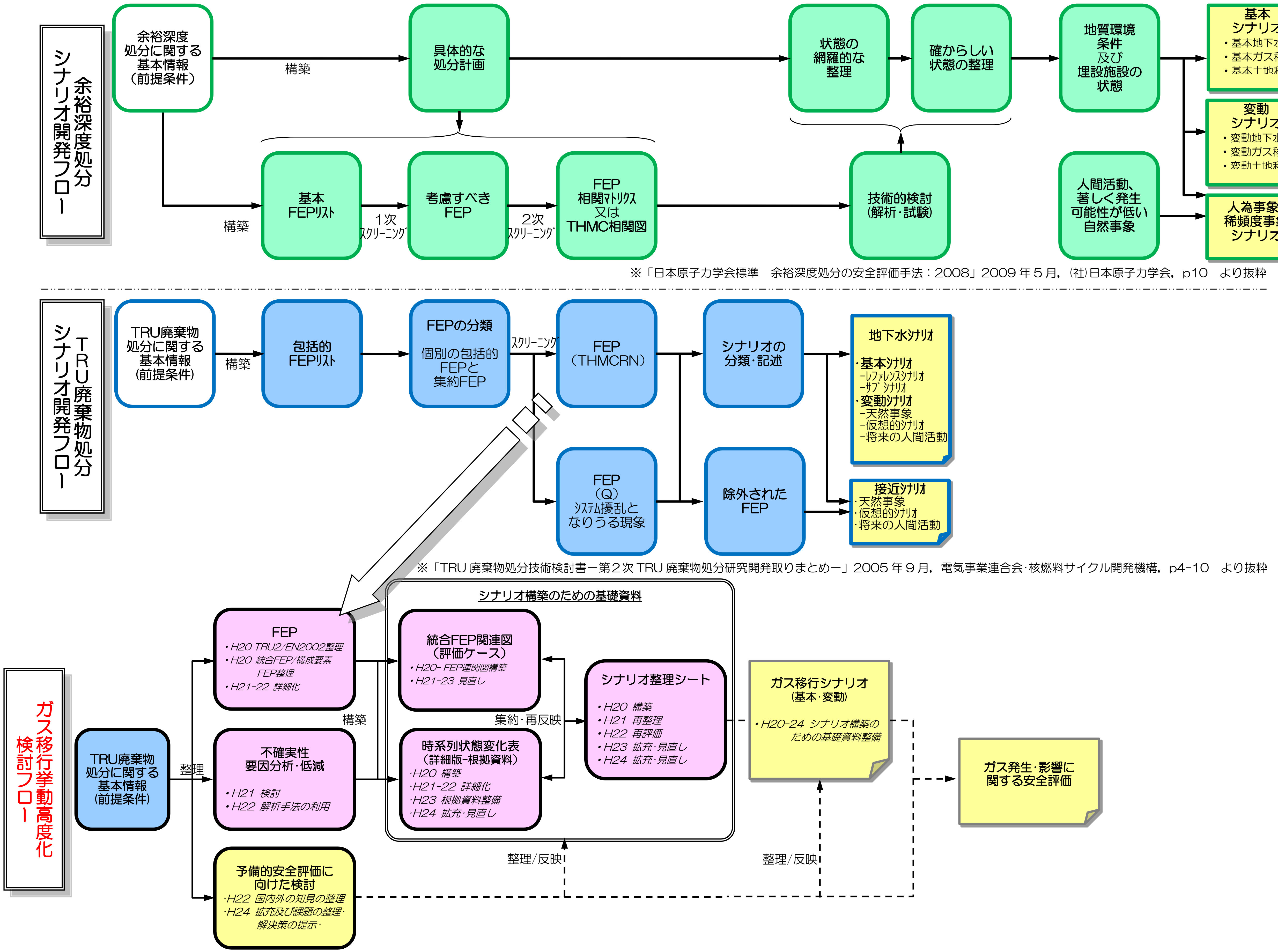


図 1.3.2-1　ガス移行挙動高度化検討フローと既存の処分シナリオ開発フロー

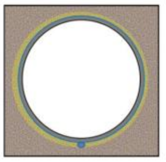
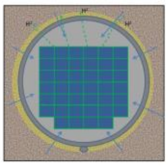
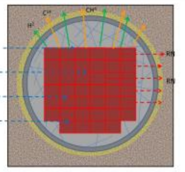
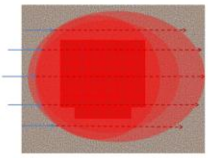
変化の段階	掘削直後	廃棄体定置中：水との接触防止	埋戻し後：廃棄体で閉じ込め	廃棄体から核種放出	天然バリアでの閉じ込め
状態イメージ					
主要な変化	支保工外周のドレーンシステムで処分坑道内への浸出水なし	支保工外周のドレーンシステムで処分坑道内への浸出水なし	ドレーンシステムの停止により処分坑道に還元地下水が浸出	ドラム缶が損傷し、内部廃棄物より放射性核種が放出	処分坑道内の核種、ガスは一部を除き天然バリアに放出
廃棄物 [200 ﾘｯﾄﾙ ドラム缶]	－	ドラム缶内の空隙はモルタルで充填、初期強度、水はなし 高 pH 状態	廃棄体の隔離性能で水との接触ない、強度維持 廃棄体パッケ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

図 1.3.2-2　廃棄物グループ 3 の処分概念を対象とした施設の状態変化表

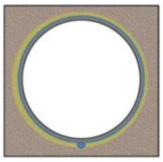
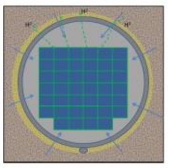
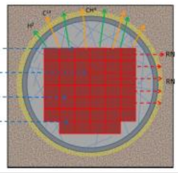
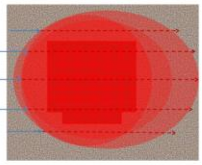
変化の段階	掘削直後	廃棄体定置中：水との接触防止	埋戻し後：廃棄体で閉じ込め	廃棄体から核種放出	天然バリアでの閉じ込め
状態イメージ					
統合 FEP 関連図	－	－			
廃棄物とドラム缶	閉じ込め性		腐食⇒腐食膨張・ガス発生		
炭素鋼パッケージ	閉じ込め性		腐食⇒腐食膨張・ガス発生	腐食生成物	
充填モルタル			亀裂発生		
埋戻しコンクリート			亀裂発生		
コンクリート支保工			亀裂発生		
EDZ+岩盤	不飽和				
ガス　発生部位	地表から酸素を含む大気の取り入れ	大気がコンクリート中に浸入し不飽和領域を形成	支保工鉄筋、廃棄体パッケージ、ドラム缶、有機物の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

図 1.3.2-3　廃棄物グループ 3 の処分概念を対象としたシナリオ整理シート

1.3.3　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）を対象としたガスの移行に係る THMC 連成現象の解明促進として、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の向上のため、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。さらに、より複雑な現象解明のための次世代モデリング・コンピューティング技術を用いた評価ツールの開発整備と高度化を行う。本年度は、国内外の最新の研究成果を整理し、抽出された課題を踏まえて今後達成すべき到達点の設定と研究計画の策定を行ったうえで具体的な解析検討を行った。

(1) ガス移行挙動解析ツールの高度化に係る解析検討

本項目は、ガス移行挙動評価のために必要な解析ツールの高度化を主な目的とするものであるが、このうち平成 25 年度の検討では、構築したガス移行シナリオのうち「大破過」を伴わないガス移行挙動のメカニズムの把握を目的として、「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 ―ガス移行挙動の評価―」[10]における「材料試験データの取得」の中で実施された、大型供試体（直径 60mm、高さ 200mm）を用いたガス移行試験データを整理し、試験データの再現解析を見据えたデータの分析を行って注目点を整理したうえで、ガス移行試験系の再現解析を実施した。解析には、以下の 2 つの解析コードを適用し、解析によって得られた結果を用いて、大型供試体内でのガス移行やその他の挙動について検証した。

- ベントナイトの空隙の損傷を考慮した圧力依存透過特性モデル（GETFLOWS）
- 力学連成解析モデル（CODE_BRIGHT）

検証の結果、空隙の損傷を考慮した解析モデルを適用した場合、ガス注入によって空隙の損傷を発生することなく二相流によって飽和度が減少した範囲が形成される状況が再現できた。また力学連成モデルの適用によって、ガス注入によってベントナイトが注入側から排出側に圧密される状況およびこれに伴う材料中の水の排出等といったガス移行メカニズムを把握し、ガス移行解析ツールとしての高度化を図ることができた。

(2) 解析・モデル化手法の展開に係る課題（連成挙動評価、不確実性評価等）についての検討

1) 国内外の最新動向を踏まえた解析手法・モデル化に関する課題の取りまとめと解析手法・モデル化の高度化のための研究計画策定

これまでの検討を通じて得られた以下の課題に対して、国内外の最新の研究成果を踏まえ、現状を整理すると共に、今後の方向性について検討した。

- 水分状態と関連付けた 2 相流パラメータの動的変化と実測データによる検証
- 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（力学連成）
- ガス発生モデルの高度化（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

上記を踏まえ、今後 5 年程度で達成すべき到達点を設定し、解析手法・モデル化の高度化に向けた具体的な研究計画を策定した。研究計画の策定に際しては、年度毎の到達点（マイルストーン）を明らかにし、最終目標との関連付けを具体化する点に留意した。

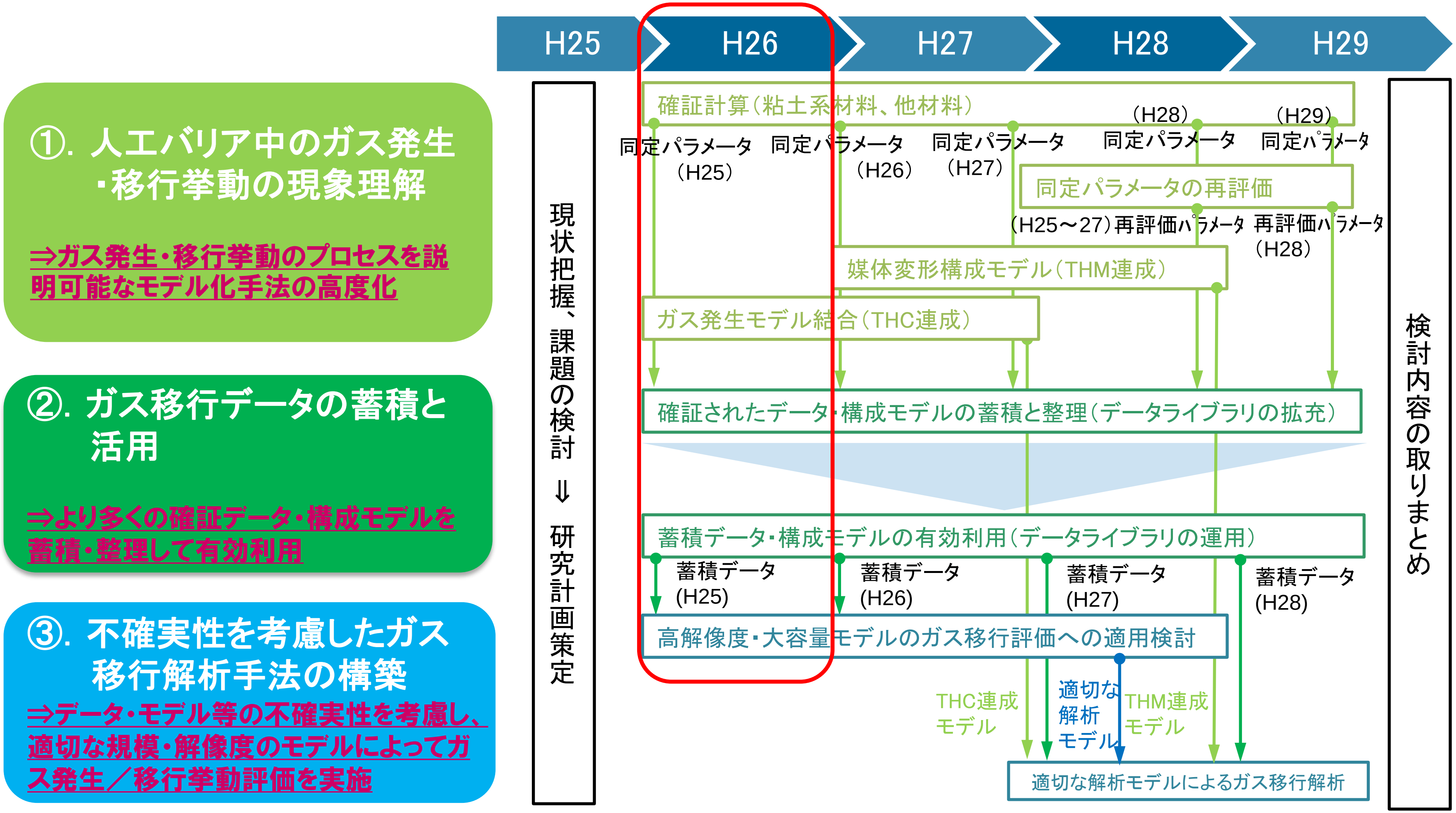


図 1.3.3-1　今後の研究計画

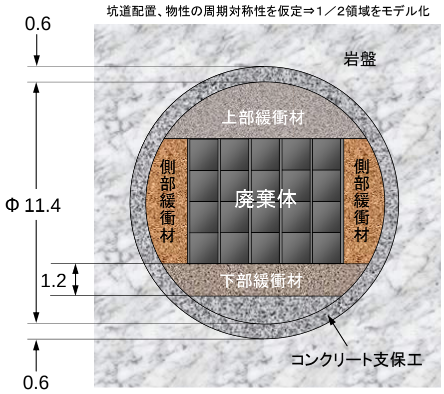
2）TRU 廃棄物処分施設の概念モデルを用いた時系列解析

前項にて整理した課題をもとに、TRU 廃棄物処分施設概念を用いた時系列解析で対象とする処分システム（処分概念、環境条件)、流体成分及び考慮する素過程等を考慮したうえで、TRU 処分システムを対象とした解析モデルを構築し（図 1.3.3-3～図 1.3.3-5)、時系列のガス移行解析を実施した（図 1.3.3-6、図 1.3.3-7)。

得られた成果及び課題について明確に整理するとともに、TRU 廃棄物処分を対象とした緩衝材の飽和及びガス移行プロセス等の評価に係る高度化等についての課題を解析・モデル化の観点よりとりまとめることができた。

特に、格子数の異なる解析モデルでの検証により、ガス移行経路の発生箇所は解析モデルの精度（解析格子数の規模）に依存して変化することが分かったが（図 1.3.3-6，図 1.3.3-7)、その影響の程度を評価することが新たな課題となった。

対象廃棄体：グループ 2



【処分坑道断面】
- 処分坑道サイズ　：内径 11.4m
- 支保工厚さ　：0.6m
- 廃棄体サイズ　：W6.0m×H6.4m
- 鋼製構造躯体厚さ　：0.05m

【地質環境条件】
- 軟岩系岩盤　：第 2 次 TRU レポート SR-C 準拠
- 処分深度　：GL-500m

【人工バリア材料特性】
- 緩衝材　：有効粘度密度 1.36Mg/m³
珪砂含有率 0%

セメント系材料

項　目	吹付けコンクリート	二次覆工 インバート	廃棄体定置部 (廃棄体, 充填材, 構造躯体)
配合	W/C=45 % C=367 kg/m³	W/C=45 % C=367 kg/m³	W/C=55 % C=483 kg/m³
(骨材容積割合)	67vol%	67vol%	54vol%
(空隙率)	13%	13%	19%
(真密度)	2.62g/cm³	2.62g/cm³	2.58g/cm³
圧縮強度	43N/mm²	43N/mm²	35N/mm²
単位体積重量	24.1kN/m³	24.1kN/m³	38.5kN/m³

注１：廃棄体定置部の物性は，固化媒体および充填材として用いられるモルタルの値とする。ただし，単位体積重量は廃棄体重量を加味した値とする。

注２：インバートの物性は二次覆工の物性と同等とする。

図 1.3.3-2　モデル化の対象とする処分システム

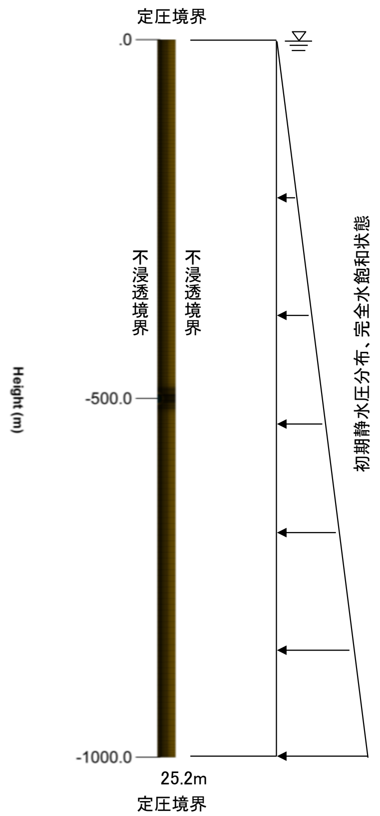


図 1.3.3-3　対象とする解析モデル（全体）と境界条件

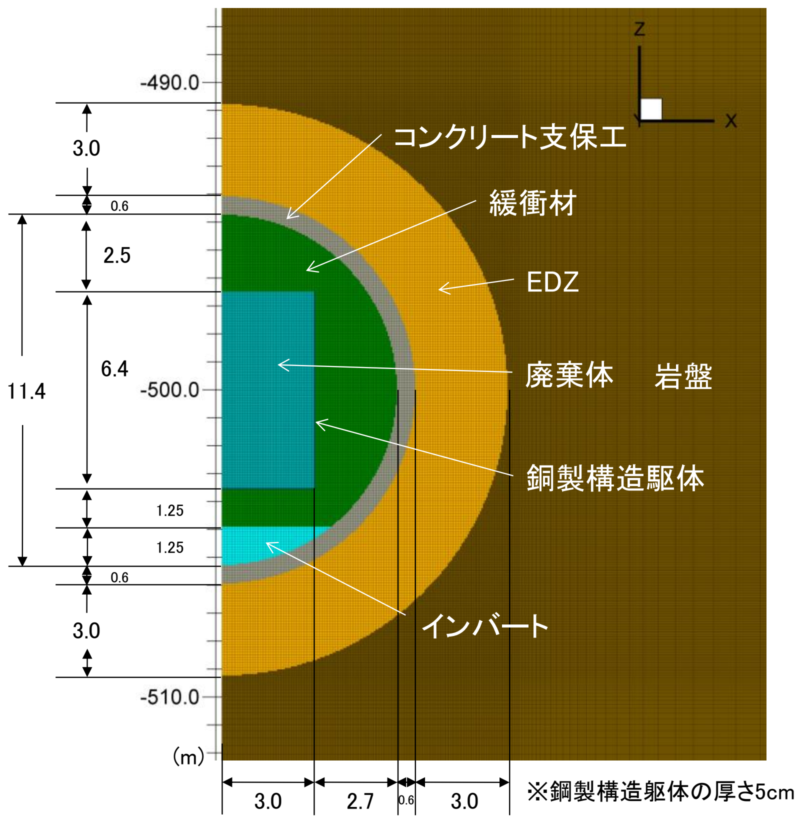


図 1.3.3-4　解析モデル（拡大：GL-500m の人工バリア部）

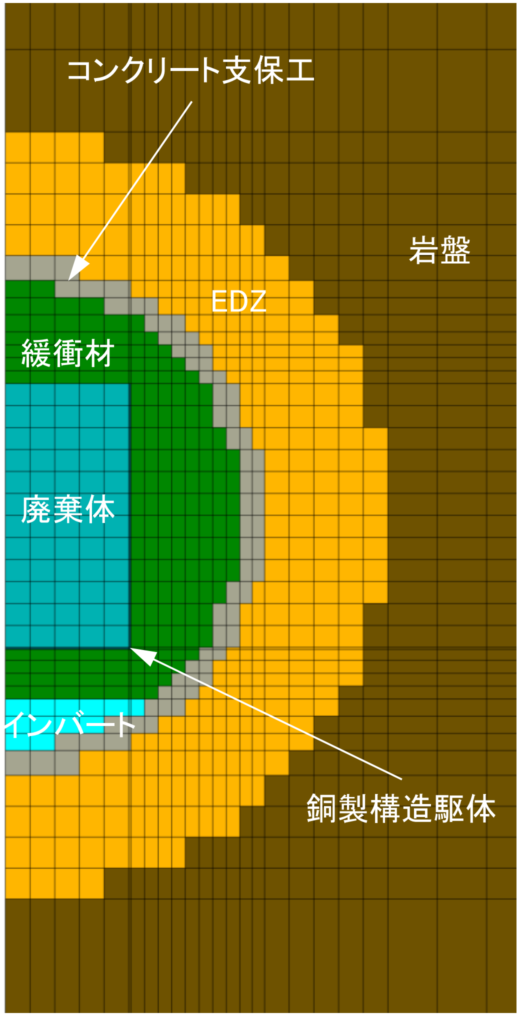
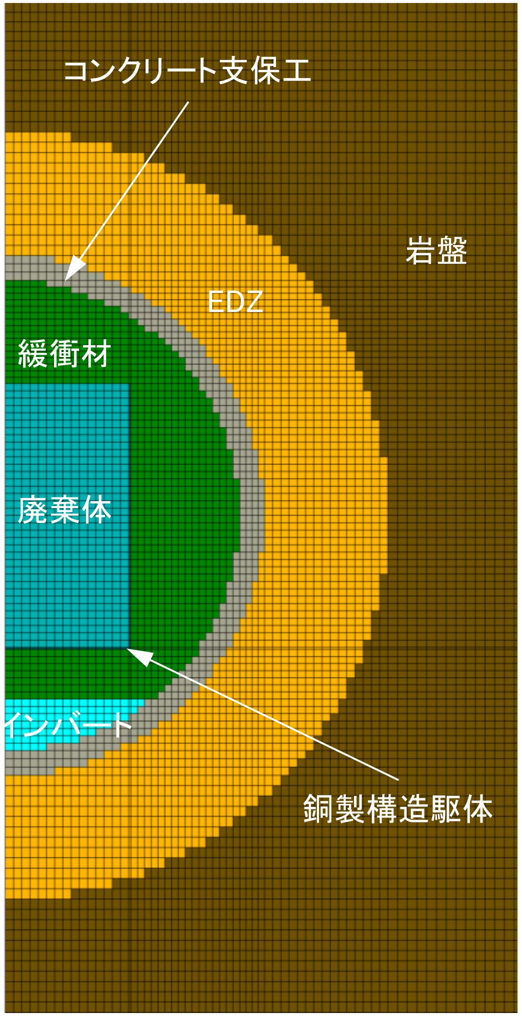
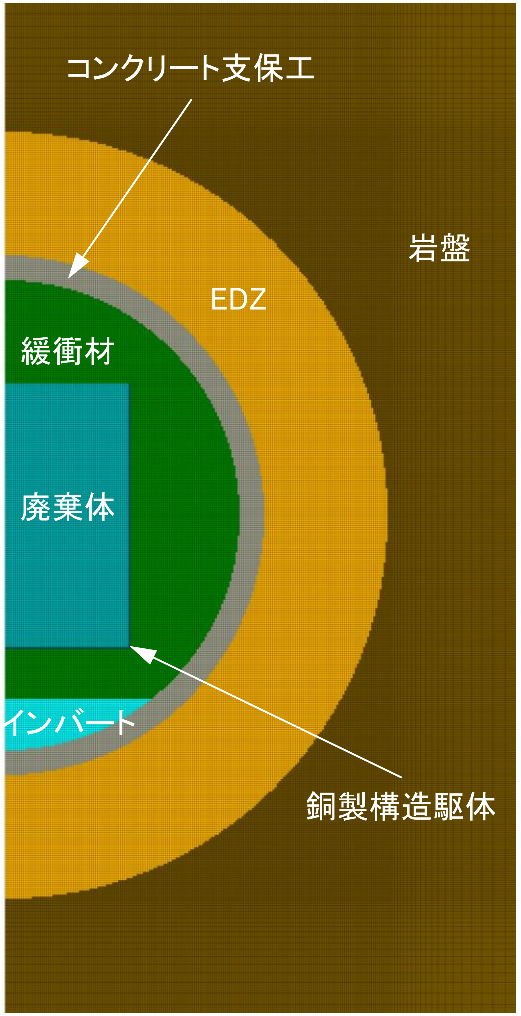
2007 年モデル	2010 年モデル	2013 年モデル
		
総格子数：2,139、施設内解像度：約 60cm	総格子数：29,548、施設内解像度：約 20cm	総格子数：144,504、施設内解像度：5cm

図 1.3.3-5　比較対象とした解析モデル一覧

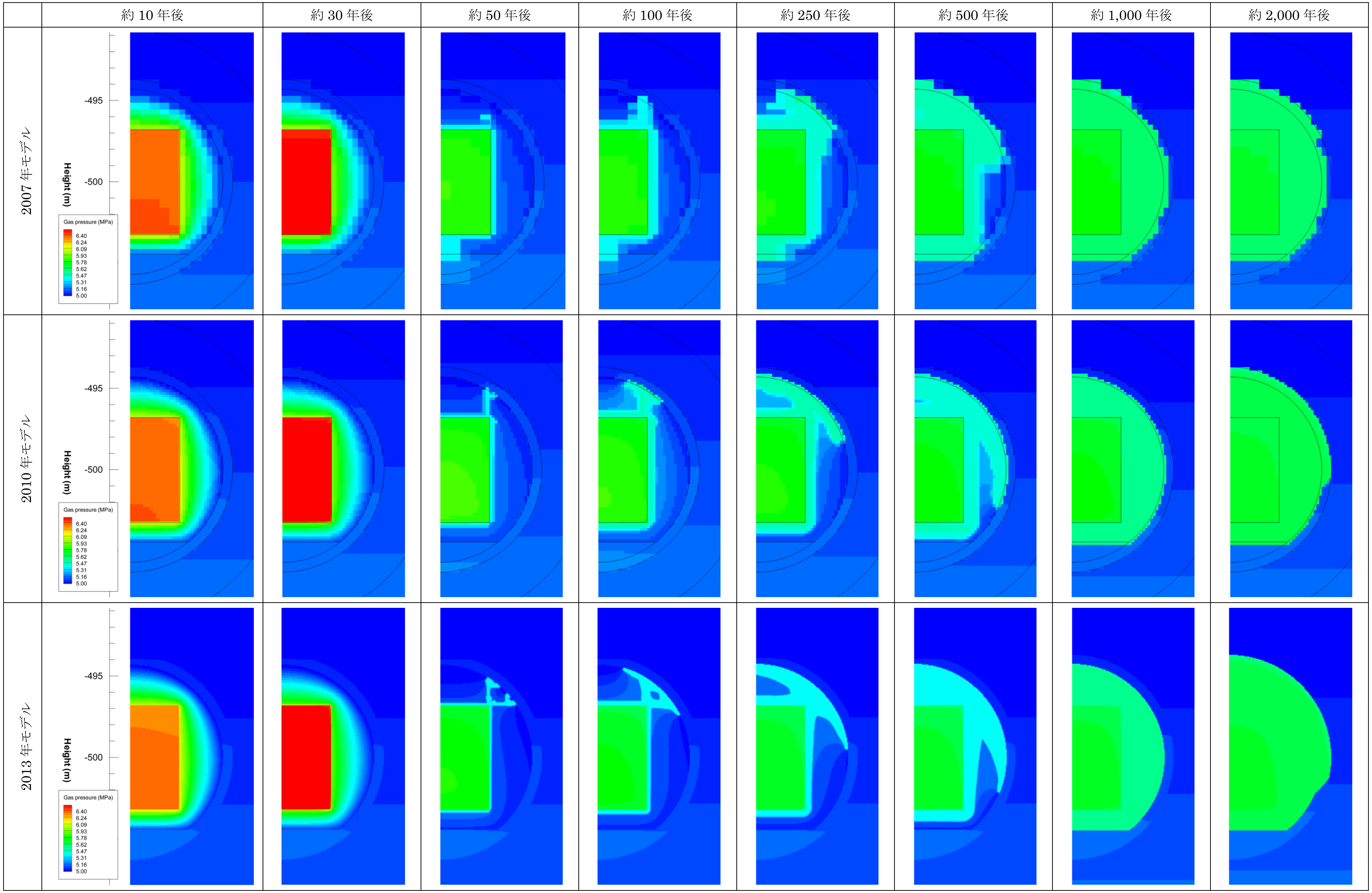


図 1.3.3-6　ガス圧分布の経時変化

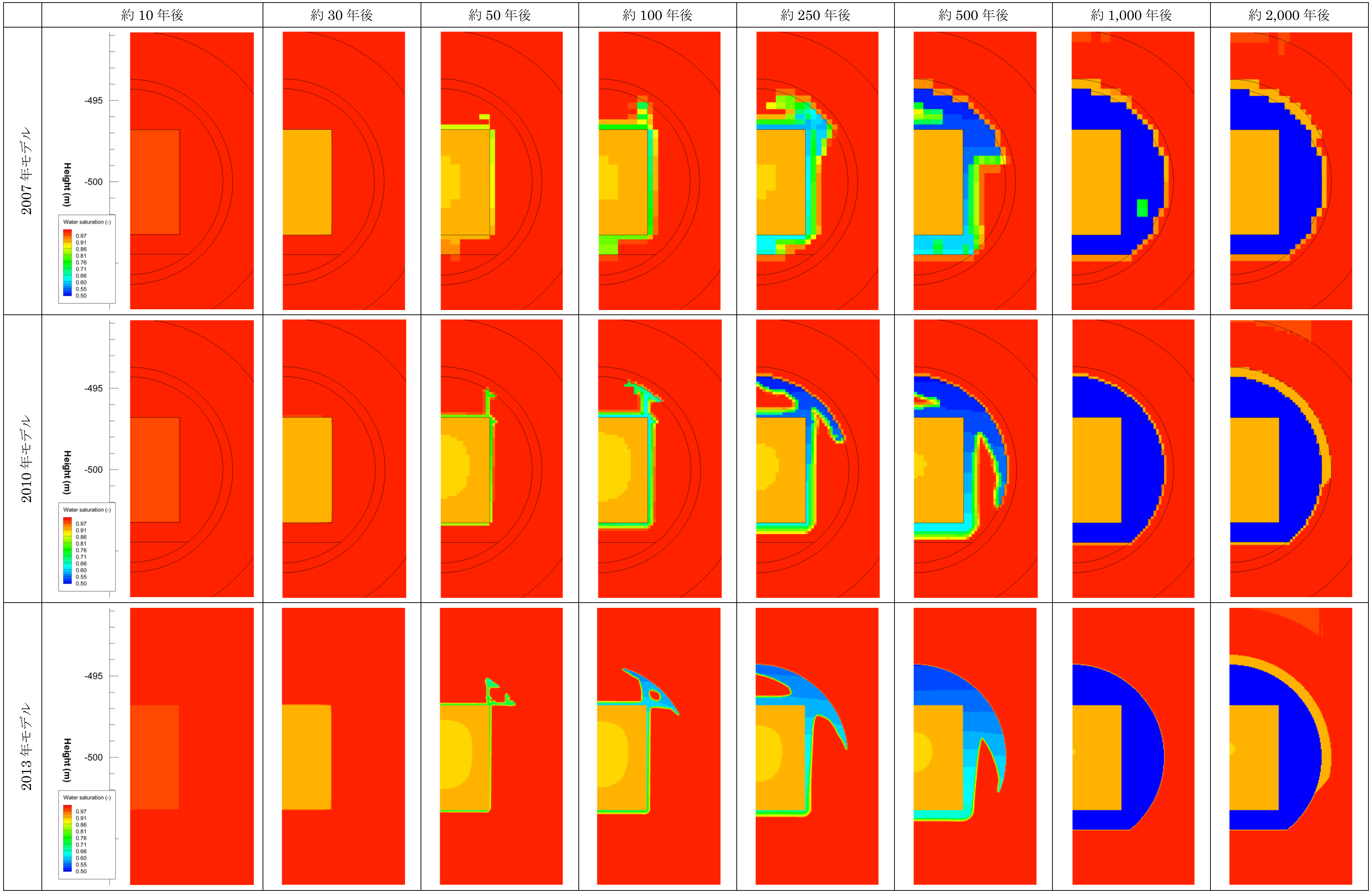


図 1.3.3-7　飽和度分布の経時変化

1.3.4　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

本項目においては、平成 19-24 年度にわたって実施した「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]の実施において蓄積された知見を基に、新たなベントナイト緩衝材のガス移行挙動評価をスケールアップの観点にて実施することを目的とした。

平成 25 年度の検討[11]においては、ベントナイト系緩衝材材料を用いたガス移行試験における現状での課題（異なる材料間や同一材料の内部にて生じる界面や、現実的なガス移行形態（ガスの圧力、発生量および種類）の試験系における取組み）について国内外の処分概念に係る知見と対照しながら整理を行った。次に、その課題について優先度や準備期間等を考慮し、ガス移行試験の実施計画を策定した。

(1) ベントナイト緩衝材におけるガス移行挙動に係る材料特性の課題の抽出

平成 19-24 年度の「ガス移行挙動の評価 材料試験データの取得」においては、ベントナイト緩衝材中のガス移行に係る特性評価を目的とした試験を行い、小型供試体（高さ 50mm 以下）を用いて実施した試験においては、水とガスの透過性および力学特性に係るデータを取得し、またダイレタンシーの作用による破過現象を確認した。また、大型供試体のガス移行試験（ガス注入）の実施においては、破過は発生しなかったが、試験後の解体/供試体内部の測定において、ガス注入によって生じた「ガス移行フロント」と考えられる構造が生じている状況が確認できた。「寸法効果」については、飽和過程およびガス移行過程での供試体内部の水理/力学的挙動を評価したうえで検証する必要があることを示唆した。

本検討では上記検討において蓄積された知見を基に新たな検討を行うため、ベントナイト系緩衝材材料を用いたガス移行試験における現状での課題抽出を国内外の処分概念に係る知見をもとに取りまとめた。具体的には、ベントナイト緩衝材におけるガス移行挙動の評価に係る材料特性の課題について、国内外における知見をとりまとめ、処分概念と照合のうえで、材料や概念上での課題を抽出した。具体的には、異なる材料間や同一材料の内部にて生じる界面や、現実的なガス移行形態（ガスの圧力、発生量および種類）の試験系における取組みについて検討することによって課題を抽出した。

(2) ベントナイト緩衝材を用いた材料データの取得計画策定

前項にて抽出された課題をもとに、5 カ年にわたるガス移行挙動評価試験の実施計画の策定を行った。図 1.3.4-1 のうち「①」にベントナイト緩衝材を対象とした実施計画を示す。

実施計画においては、試験装置、対象とする緩衝材材料（配合、概念等を反映させたもの）や供試体の詳細仕様、および試験における圧力等諸条件、得られるデータを設定し、またこれに際して前提となる試験装置の改造計画を必要に応じ織り込んで策定した。

なお、図 1.3.4-1 には後述の「②セメント系材料」を対象とした実施計画（詳細は第 5 章を参照）と、これと連動して検討すべき「③界面を含む複合システム系」を対象とした実施計画（詳細は第 4 章を参照）も併記している。

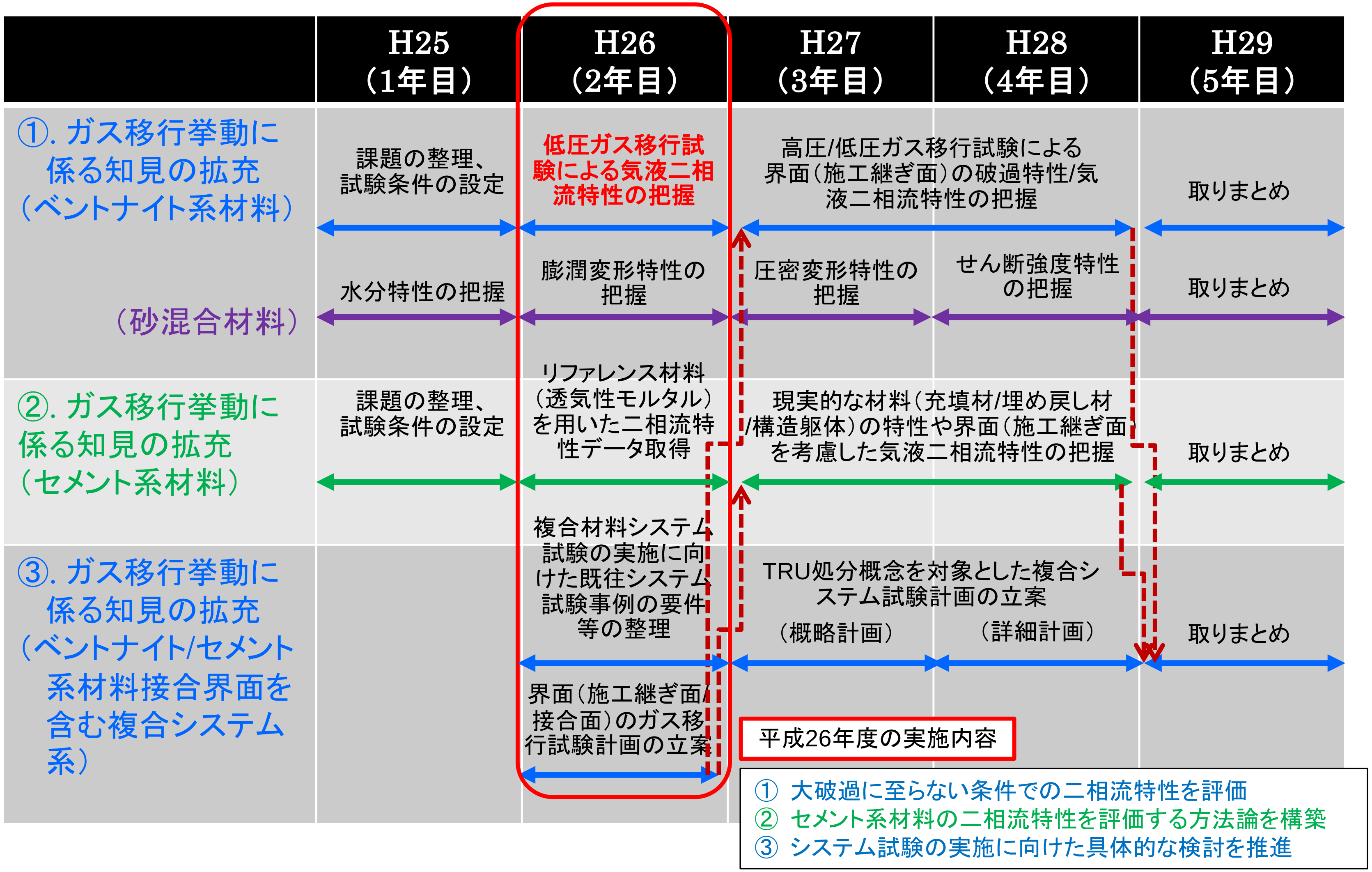


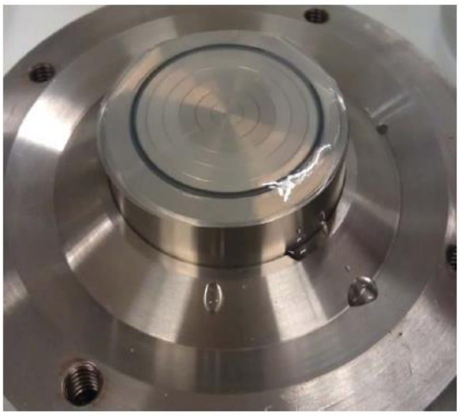
図 1.3.4-1　5 カ年の実施計画

(3) ベントナイト混合材料を用いた不飽和水分特性データの取得

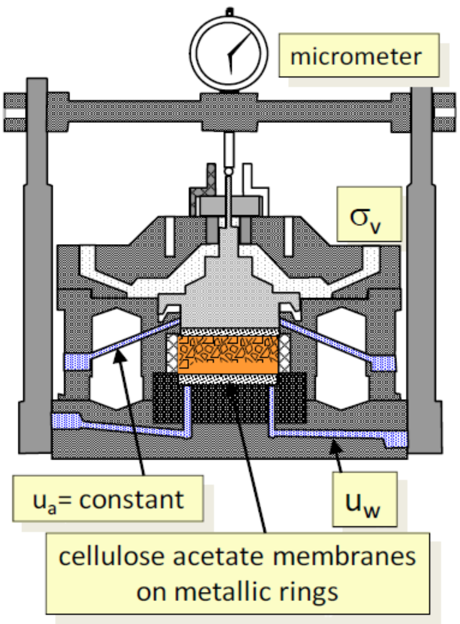
TRU 廃棄物処分場のガス移行特性やガス発生影響を詳細に把握するためには、気液二相流解析や力学を連成させた二相流解析を行う必要がある。これらの解析に必須で、かつ、ガス移行挙動に大きな影響を及ぼす材料特性の一つに人工バリア材料の水分特性がある。

これを受け、平成 25 年度の検討[11]では、第 2 次 TRU レポート[1]において底部緩衝材の材料に想定されている砂混合ベントナイトを対象に、サクション制御式のオエドメータ試験を実施することで水分特性データを取得した。また、取得データの既存の二相流モデル（van Genuchten[12]と Narashimhan[13]）での近似によって試験結果が良好に再現でき、二相流解析に必要なモデルパラメータも取得することができた。

(a)



(b)



(c)

図 1.3.4-2 サクション制御可能なオエドメータ試験装置 (a)試験セル；(b)下部ポーラスメタル上部にセットされた飽和アセチルセルロース膜；(c)試験装置の断面模式図

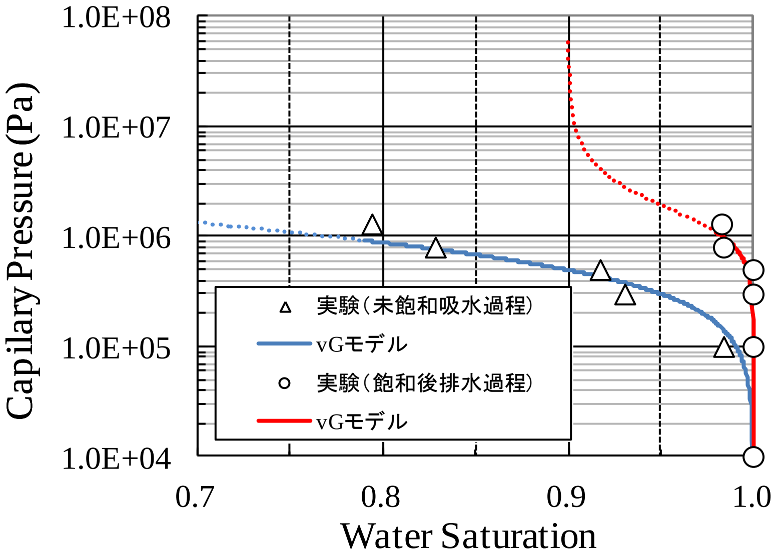


図 1.3.4-3　取得された水分特性と van Genuchten モデル[12]近似

表 1.3.4-1　近似により同定された van Genuchten モデル[12]パラメータ

近似モデル	パラメータ	パラメータ値	
		未飽和吸水過程	飽和後排水過程
van Genuchten $P_c = P_0\left(S_e^{-1/\lambda} - 1\right)^{1-\lambda}$ $S_e = (S_l - S_{lr})/(S_{ls} - S_{lr})$	適用範囲	Sr＞0.79	Sr＞0.98
	P_0（MPa）	1.00	1.50
	λ	1.60	2.70
	Slr	0.00	0.90
	Sls	1.00	1.00

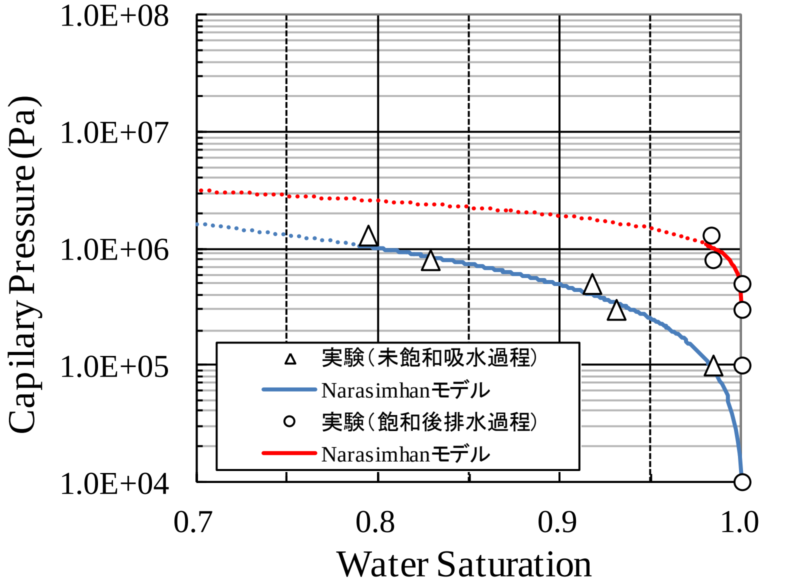


図 1.3.4-4　取得された水分特性と Narasimhan[13]モデル近似

表 1.3.4-2　近似により同定された Narasimhan[13]モデルパラメータ

近似モデル	パラメータ	パラメータ値	
		未飽和吸水過程	飽和後排水過程
Narashimhan $P_c = P_e + P_0\left(\frac{(1-S_l)}{(S_l - S_{lr})}\right)^{\frac{1}{\eta}}$	適用範囲	Sr＞0.79	Sr＞0.98
	Pe （MPa）	0.01	0.30
	P_0 （MPa）	3.50	4.00
	η	1.10	2.40
	Slr	0.00	0.00

1.3.5　セメント系材料のガス移行データ取得

本検討では、平成 25 年度の検討[11]において、TRU 処分概念におけるガス移行の取扱とこれに重要な役割を果たすセメント系材料の設計要件についての整理を行い、本検討における設定条件などについて検討した。さらに、セメント系材料のガス移行特性に係わるレファレンスデータ取得の観点から、人工バリアの構成材料である廃棄体パッケージの充填材として想定されている

モルタル材料（第 2 次 TRU レポート[1]に示されるリファレンス配合を対象）の気液二相流物性を取得し、その結果を整理することによってガス移行解析に必要なモルタルの物性パラメータを取得した。

(1) TRU 廃棄物処分概念におけるセメント系材料についての要件整理

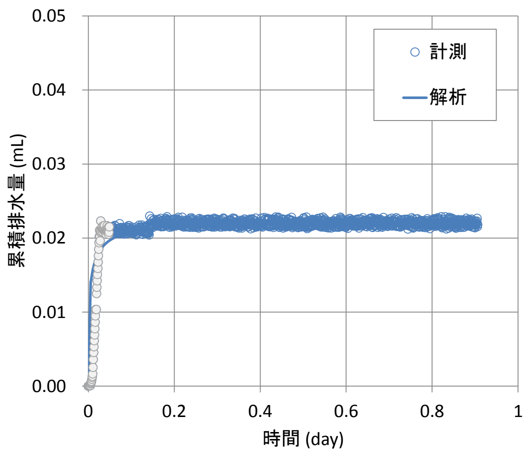
TRU 処分概念におけるガス移行の取扱とこれに重要な役割を果たすセメント系材料の設計要件についての整理を以下の資料等を用いて行い、本検討における設定条件や課題について検討・整理した。

・TRU レポート（第 1 次／第 2 次）
・TRU レベル 3 報告書（NUMO-TR-10-03）
・海外諸国における「ガス移行に係るセメント系材料」の特性評価に関する諸文献

(2) セメント系材料の気液二相流パラメータの取得

人工バリアの構成材料として重要なセメント系材料を対象にガス移行（透気）試験を実施するとともに、試験結果の逆解析によって二相流モデルパラメータの取得を取得することとした。

平成 25 年度においては、今後の研究展開について検討するとともに（図 1.3.4-1 参照、「ベントナイト緩衝材を用いた材料データの取得計画策定」と併記）、そのためのレファレンスデータ取得という位置付けで、廃棄体パッケージの充填材として想定されているモルタル（リファレンス配合）の気液二相流特性を取得した。



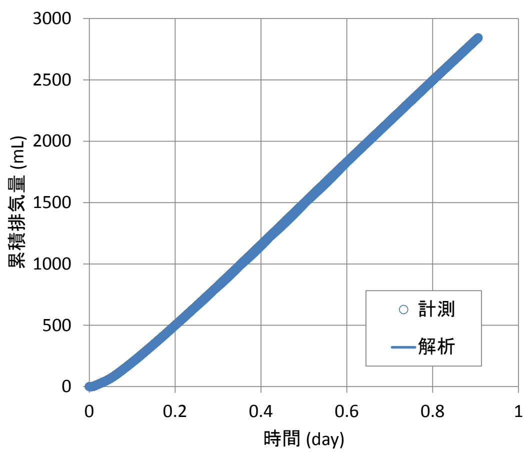


図 1.3.5-1　ガス移行試験結果（計測）と逆解析（解析）結果

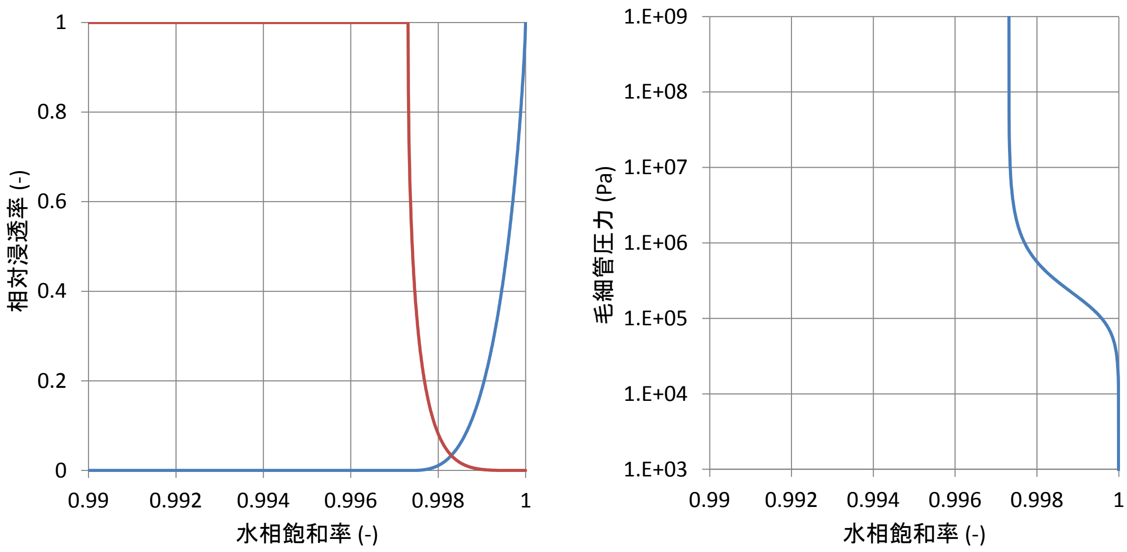


図 1.3.5-2　逆解析結果より同定された van Genuchten モデル曲線

表 1.3.5-1　同定された van Genuchten モデルパラメータ

未知パラメータ		供試体 No.2、検討 1
相対浸透率(vG)	S_{wr}	0.9973
	n_w	4.012
	n_g	2.092
毛細管圧力(vG)	P_0	2.302×10^5 (Pa)
	n	2.136

1.3.6　まとめ

本事業では、TRU 放射性廃棄物処分場で想定されるような、廃棄物に含まれる金属の還元腐食その他による水素などのガス発生による施設への様々な影響（施設内でのガス圧上昇により破過が生じた場合、その時に緩衝材中等に生じた破過経路が核種の移行経路になったり、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 1.3.6-1 に、これまでの調査研究の成果より抽出された課題（<u>課題①</u>：第 2 次 TRU レポートで抽出された課題、<u>課題②</u>：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 1.3.6-2 に上記の３つの検討実施項目の相互関係を示す。

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

以上のような取り組みを経て得られた主な平成 25 年度までの主な成果と残された課題を取りまとめたものを図 1.3.6-3 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 1.3.6-4 に示す。

図 1.3.6-3 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 25 年度の成果として把握できつつあるが、より処分施設の現実的な条件（施設形状・処分環境・天然バリアへの影響評価等）を考慮して検討を進めた結果、残された課題（さらなる不確実性と解決すべ

き課題）が抽出されている。

今フェーズのうち残された４カ年（平成 26-29 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 1.3.4-1）に基づいて検討を進めていくものであるが、その一方で、全体計画や本事業の最終目標に対する成果と進捗状況を整理すると図 1.3.6-4 に示した通りとなる。

詳細は後述するが、本年度（平成 26 年度）の全体計画（1.4　節）や成果（第 2 章～第 5 章）は図 1.3.6-4 に示すような位置付けとなっており、次年度以降の検討成果との関連を意識しつつ、最終目標を達成すべく検討を進めていくものである。

<table>
<tr><th rowspan="2">評価
対象</th><th rowspan="2">TRU-2の成果と
抽出された課題
（課題①）</th><th rowspan="5">課題①の解決に資する検討の実施</th><th rowspan="2">H19～24年度の検討成果と
抽出された課題
（課題②）</th><th rowspan="5">課題②の解決に資する検討の実施</th><th colspan="2">H25～29年度の検討</th></tr>
<tr><th>実施内容と
目標成果</th><th>重要性
／優先度
（A>B>C）</th></tr>
<tr><td>緩衝材
（ベントナイト）</td><td rowspan="2">（成果と課題）
・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</td><td rowspan="2">（成果_データの取得）
・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
（課題_データの取得）
⇒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

（成果_解析ツールの高度化）
・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
（課題_解析ツールの高度化）
・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</td><td rowspan="2">（実施内容）
●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く。
（目標成果）
●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。</td><td>A
／
A</td></tr>
<tr><td>充填材
（モルタル）</td><td>A
／
B</td></tr>
<tr><td>施設全体
／
その他</td><td>（成果と課題）
・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1×10⁻³μSv/yと、共に十分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</td><td>（成果_ガス発生）
・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（ハル）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確証に必要なデータ取得試験計画を策定した
（課題_ガス発生）
・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

（成果_シナリオ）
・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
（課題_シナリオ）
⇒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）</td><td>（実施内容）
●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の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。
（目標成果）
●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。</td><td>A
／
C</td></tr>
</table>

図 1.3.6-1　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

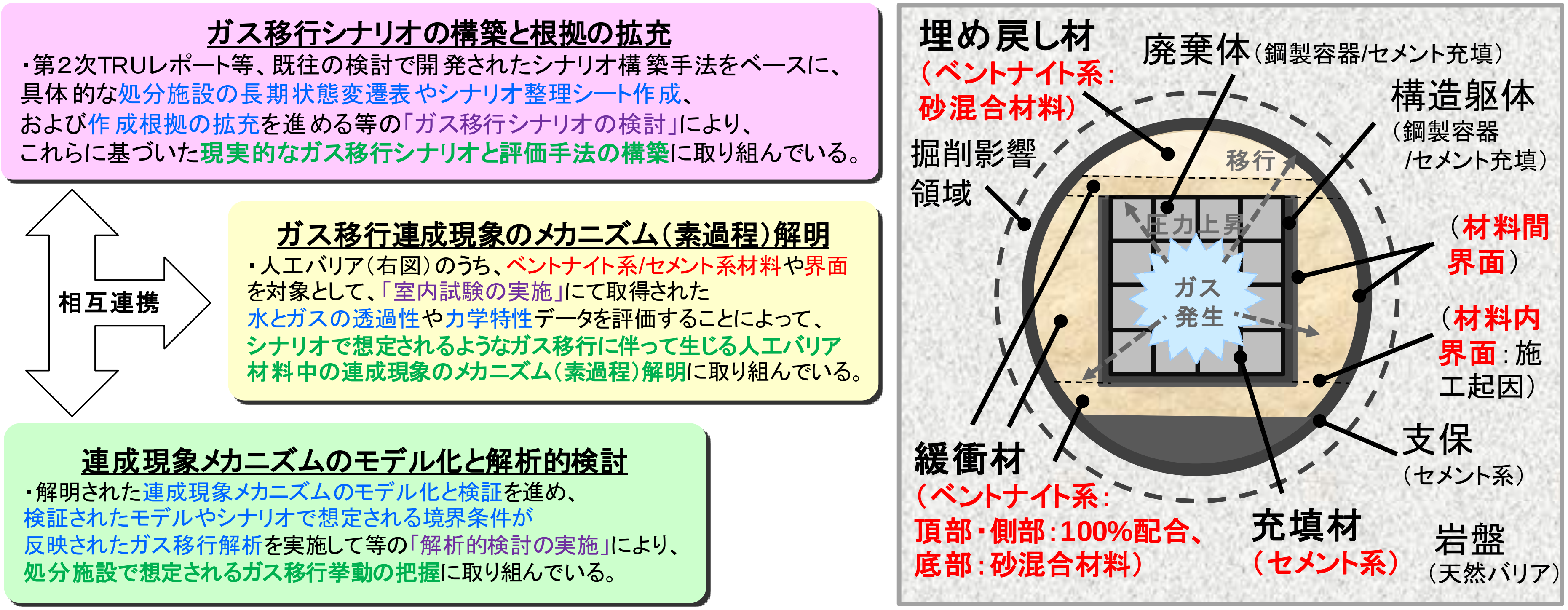


図 1.3.6-2 検討実施項目（今フェーズ：平成 25-29 年度）の相関

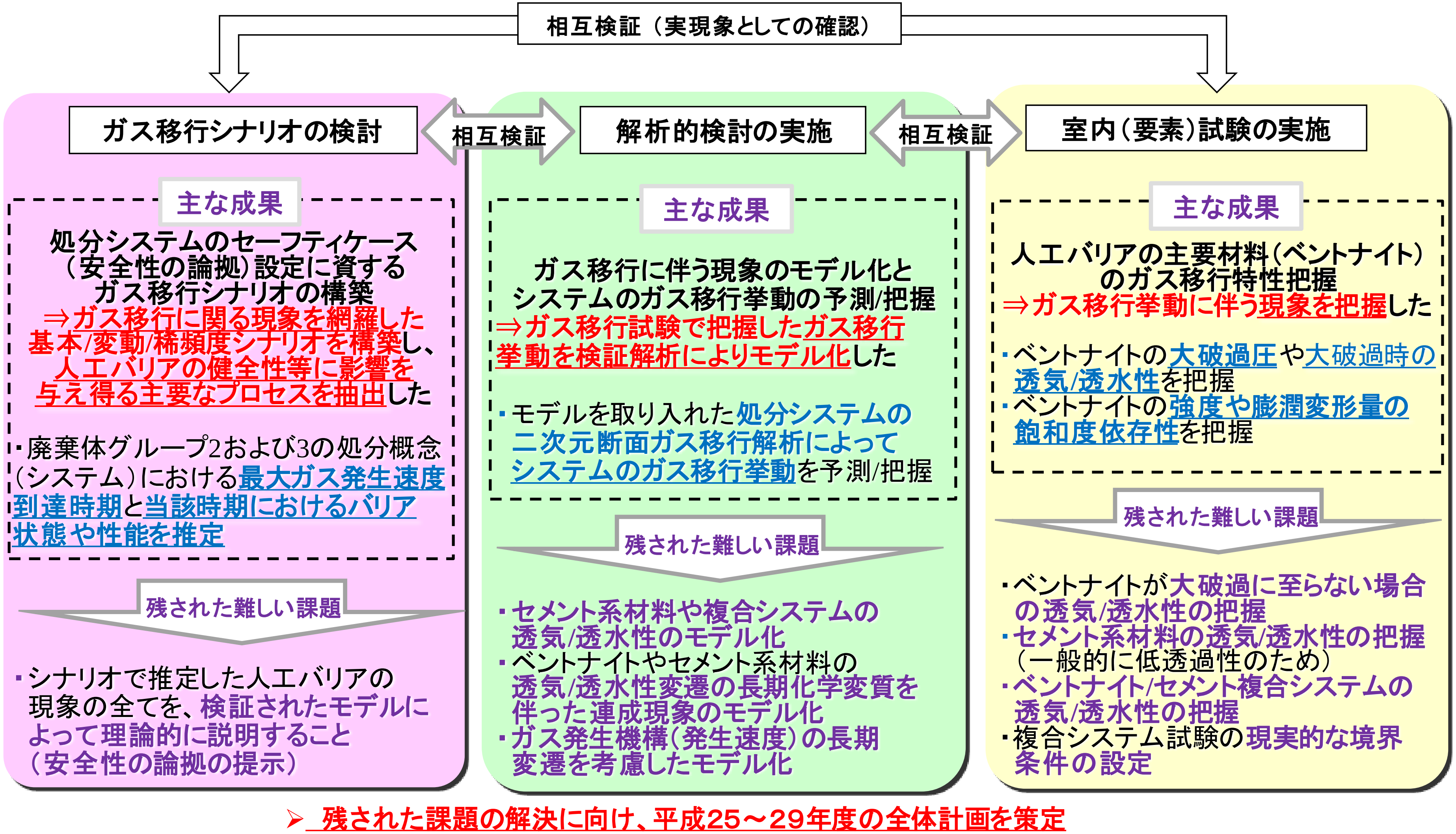


図 1.3.6-3　これまでの検討で得られた成果と残された課題

凡例 ○：達成、△：不足していること（検討途中）
×：未達成（未実施）

実施内容		最終目標	H19 (2007)	H20 (2008)	H21 (2009)	H22 (2010)	H23 (2011)	H24 (2012)	H25 (2013)	H26 (2014)	H27 (2015)	H28 (2016)	H29 (2017)
			廃棄物Gr.2の処分概念を対象						Gr.3	Gr.1&4	天然バリア	施設全体を対象	
施設全体のガス移行シナリオ作成・整備		ガス移行評価手法の整備	第2次TRUレポートの課題解決のための詳細計画を策定	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 ○	NBSのシナリオ構築	施設全体（EBS＋NBS）のガス移行シナリオ構築	
ガス移行シナリオ作成や評価手法の整備に必要なもの	エビデンスの拡充	施設全体のガス移行シナリオの補完（不確実性低減）		×	×	×	根拠資料の整備（既往の文献調査の反映） △	根拠資料の拡充（最新知見の反映） △	根拠資料の拡充（最新知見の反映） △	・ガス発生に係る最新の知見 △	・ガス移行挙動に係る最新の知見	・ガス移行モデルやパラメータに係る最新の知見	・根拠資料集への統合、整理
	モデルの構築・解析手法の整備	全材料／EBSの二相流・力学挙動の把握と再現（想定される現象の確証）		（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）			
				飽和ベントナイトのガス移行モデルの構築 ○	不飽和ベントナイトのガス移行モデルの構築 ○	・室内試験成果の再現解析・評価によるガス移行モデルの確証 ・確証されたモデルによるGr.2の処分概念を対象としたガス移行解析とガス移行挙動の把握				確証されたモデルによる室内試験の予察解析と評価（モデルや解析手法の信頼度の評価）		処分システム全体を対象としたガス移行解析とガス移行挙動の把握	
						△	△	△	○	△			
	データの拡充			・飽和および不飽和ベントナイトの大破過に至るまでのガス移行特性の把握（ガス注入圧の段階的な昇圧によるガス注入試験） ・ガス移行に伴う力学特性の把握（飽和・不飽和力学試験） ・ガス移行特性の寸法依存性の把握（高さの異なる供試体）						大破過に至らないガス移行特性の把握	EBS界面（施工/異種材間）のガス移行特性の把握		処分システム全体の特性検討
				△	△	△	△	△	○	△			

EBS（人工バリアシステム）のガス移行シナリオは、ほぼ完成予定

NBS（天然バリア）を含めたシナリオの構築が課題

図 1.3.6-4　これまでの検討で得られた成果と進捗状況の整理

1.4 平成 26 年度の実施概要

1.4.1 全体計画

平成 25 年度の検討[11]、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い、これに基づいて平成 25-29 年度にわたる 5 カ年の実施計画（図 1.3.1-3）を作成した。また、策定した実施計画のうち以下の各項目の内容について多岐にわたる検討を行い、データ取得および取りまとめなどの成果を得ている。

平成 26 年度は、平成 25 年度の実施成果を踏まえ、5 カ年の実施計画のうち平成 26 年度の実施内容を遂行した。図 1.4.1-1 に、平成 26 年度の調査研究進捗表を示す。

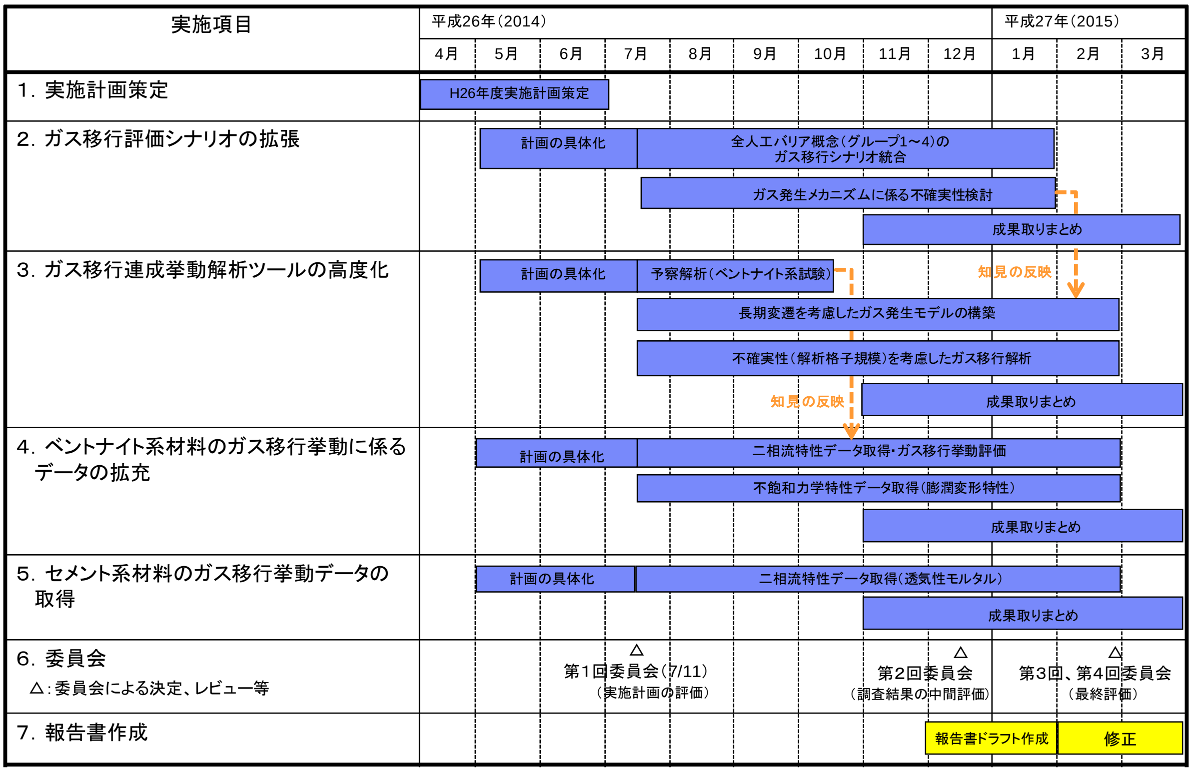


図 1.4.1-1 「ガス移行連成挙動評価手法の開発」平成 26 年度 調査研究進捗表

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

1.4.2 ガス移行評価シナリオの拡張

これまでの検討[5][6][7][8][9][10][11]において、TRU 廃棄物処分概念を対象とした「ガス移行挙動評価手法」を開発しているが、このうち「廃棄物グループ 2（緩衝材有り）」および「廃棄物グループ 3（緩衝材無し）」を対象としたガス移行シナリオが整備できている。本年度は、5 カ年間（平成 25-29 年度）の実施計画に基づき、これまでに開発してきた「ガス移行挙動評価手

法」を用い、既存のガス移行シナリオをその他の処分概念（廃棄物グループ 1 および 4）に対応・拡張させ、全体の統合化を図った。また、シナリオ構築に際しての不確実性の特定や構築根拠の拡充を行った。

以下に、実施項目を示す。

- TRU 廃棄物処分概念全体を対象としたガス移行シナリオの構築と関連する不確実性の特定および安全評価上の課題抽出
- 既存シナリオにおける根拠の拡充
- TRU 廃棄物処分概念に係るガス発生メカニズム等に関する検討

1.4.3 ガス移行連成挙動解析ツールの高度化

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て、これまでに整備したガス移行モデルの検証やデータベースの更新を行うとともに、高度化を図った解析ツールによるガス移行解析を実施し、TRU 廃棄物処分システムの不確実性を考慮（解析格子モデルの次元性に着目）したガス移行挙動の評価を行った。

以下に、実施項目を示す。

- ガス移行試験の予察解析（ガス移行モデルの検証）
- ガス移行データライブラリの拡充（データベースの更新）
- TRU 廃棄物処分施設を対象とした 3 次元の解析格子モデルによるガス移行解析（解析格子モデルの次元性に着目）

1.4.4 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

5 カ年間（平成 25-29 年度）の実施計画[11]に基づき、ベントナイト系緩衝材材料の飽和および不飽和供試体を用いた試験を実施し、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。

また、異なる材料間や同一材料の内部にて生じる界面、及びガス移行挙動評価に係わるシステム試験の予備検討を実施した。

以下に、実施項目を示す。

- ベントナイト緩衝材におけるガス移行挙動評価に係るガス注入試験
- ベントナイト緩衝材における膨潤変形特性取得試験
- ガス移行挙動評価に係わるシステム試験の実現に向けた検討

1.4.5　セメント系材料のガス移行データ取得

5 カ年間（平成 25-29 年度）の実施計画[11]に基づき、セメント系材料の気液二相流特性データ（透水・透気係数、モデルパラメータ等）の取得・評価法の確立に向けた基礎データ取得を目的として、特にモルタルのガス移行過程（排水過程）の詳細な挙動把握に主眼を置いた気液二相流特性データ取得試験およびモデルパラメータの同定逆解析を実施した。

以下に、実施項目を示す。

- モルタルの透水特性及びガス透気特性データ取得試験
- モルタルの水分特性データ取得試験
- モルタルの気液二相流特性モデルパラメータの取得（逆解析による二相流モデルパラメータの同定）

参考文献

[1] 電気事業連合会　核燃料サイクル開発機構：TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発とりまとめ－(2005).

[2] 資源エネルギー庁　日本原子力研究開発機構：TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画(2006).

[3] 原子力発電環境整備機構（2011）：地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性、NUMO-TR-10-03

[4] 財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 18 年度地層処分技術調査等ＴＲＵ廃棄物関連処分技術調査人工バリア・天然バリアガス移行挙動評価報告書 (2007).

[5] 財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 19 年度地層処分技術調査等委託費　TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発　報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2008).

[6] 財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 20 年度地層処分技術調査等委託費　TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発　報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2009).

[7] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 21 年度地層処分技術調査等委託費　TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発　報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2010)

[8] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 22 年度地層処分技術調査等委託費　TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発　報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2011)

[9] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度地層処分技術調査等事業　TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発　報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2012)

[10] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等事業　TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発　報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2013)

[11] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 25 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発報告書（第 5 分冊）―ガス移行連成挙動評価手法の開発―（2014）

[12] van Genuchten, M.Th.：A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44:892-898, 1980.

[13] 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.

第 2 章　ガス移行シナリオの拡張に関する検討

2.1　検討の概要

2.1.1　検討目的

本検討は、TRU 廃棄物の処分に係る人工バリアの長期性能評価に関する課題の解決に取り組むものであり、人工バリア材の長期挙動及びガス移行挙動に対する理解を深め、人工バリア性能評価に係る技術的信頼性の向上及び技術基盤の確立を目的とする。

2.1.2　検討背景

ガスに関わる検討は、電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構（現「日本原子力研究機構」）が公表した「TRU 廃棄物処分技術検討書－第２次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－、2005 年 7 月（以下「第 2 次 TRU レポート」と称す）」[1]の中で、グループ別のガス発生量の算定と影響評価を実施している。その後、原子力発電環境整備機構により取りまとめられた TRU レベル 3 報告書[2]では、ガスについては、第 2 次 TRU レポートでの記述を踏襲し、追加検討はなされていない。これらの二つの総括的な報告書では、ガス挙動は地下水シナリオにおいて核種移行への影響因子として取り扱われており、安全評価のシナリオとしては吟味されてこなかった。

一方、その後の国内外の検討では、類似した処分概念である余裕深度処分の評価において、ガス移行挙動を重要な課題として取り上げ、実験やモデル開発が精力的に進められている。また、海外では、ガスの影響を重要視し、EU が中核となって FORGE プロジェクトが推進され、ガス移行挙動に関する多くの知見とともに現状での技術課題が集約された[3]。わが国においても、余裕深度処分を対象にガス移行挙動の検討が進められてきた。このような背景から、原子力安全規制委員会は 2014 年に「第二種埋設施設の新規制基準（案）」[4]を公表し、ガス移行挙動に関しては、地下水移行シナリオと同様に、蓋然性の高い基本シナリオとして取り扱うことを規定した。

平成 19～24 年度にわたり原環センターで実施した「TRU 廃棄物処分技術人工バリア長期性能評価技術開発　―ガス移行挙動の評価 ―」[5]では、TRU 処分概念の時系列的な状態変化の把握に基づくトップダウンのシナリオ設定と従来の FEP をベースとしたボトムアップのシナリオ設定手法を合体し、安全上重要な FEP（統合 FEP）を用いたシナリオ設定手法を開発してきた。平成 24 年度には TRU 廃棄物処分概念のうち、ベントナイトを用いるグループ２を対象に、時系列的状態変化表の作成、関連する事項の根拠書作成、統合 FEP 関連図を用いたシナリオ整理シートの作成および安全評価上の不確実性の抽出を実施した。平成 25 年度の検討では、同様の手法をグループ３に適用し、シナリオを設定と安全評価上の不確実性に言及した[6]。

シナリオ検討の成果として、ガス移行挙動を安全評価における基本シナリオ、変動シナリオ、稀頻度シナリオに分類し、それぞれで対象とする現象に関わる不確実性を特定してきた。そこでのガス移行評価上の不確実性として、以下の項目を抽出した。

・ガスの発生（処分環境でのガスの種類別発生量と速度の設定）

・シナリオ（時系列的な状態変化の中でのガス移行モードと影響）
・モデル、パラメータ（定量的な評価に向けての挙動把握とモデル・パラメータの信頼性）

これらの成果を受け、平成 26 年度の検討では、グループ 1 と 4 を対象としたシナリオ構築を行い、他のグループとの整合性を考慮して、安全評価上の課題を整理するとともに、不確実性要因の一つとなるガス発生のメカニズムとプロセスに関して、現状での課題を整理することとした。

2.2　検討項目と検討概要

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

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

(1) 各グループの特徴の整理および状態変化表の作成
第 2 次 TRU レポートおよびの処分概念を対象に、残されたグループ 1 と 4 の特徴を整理し、それぞれについて、状態変化表、安全機能の展開表、統合 FEP の設定、統合 FEP 関連図を作成した。
(2) シナリオ整理シートの作成
(1)の成果をベースに、シナリオ設定上での不確実性を考慮した上で、各グループの整合性をとりつつシナリオ整理シートを取りまとめた。
(3) 予備的安全評価における不確実性の検討と関連する技術課題の抽出
シナリオ構築上の不確実性を考慮した整理シートをもとに、ガス影響に係わる予備的安全評価に向けての不確実性を特定し、技術課題として取りまとめた。この場合、各グループでの共通点、特異点を明確にして課題を整理した。

2.2.2　既存シナリオ整理シートにおける根拠の拡充

本検討では、設定したガス移行評価シナリオの信頼性向上に資するため、各グループのシナリオ整理シートに示される状態変化表の根拠資料を拡充した。特に、ガス発生に関わる微生物の影響に着目して根拠書を作成した。また。FORGE プロジェクトで取り上げられた新規の知見についても根拠シートとして取りまとめた。

2.2.3　TRU 廃棄物処分概念全体を対象としたシナリオの構築と関連する検討

これまでの検討で明らかとなったガス発生に関わる不確実性（種類、発生速度、発生量）に着目して、各グループでのガス発生源（ソース）と発生メカニズム、処分環境（酸化・還元、水分量、高 pH 環境、微生物の存在等）が及ぼす影響について最新の知見を整理した。第 2 次 TRU

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

2.3　検討結果

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

本検討では、昨年度までのグループ 2 の処分概念を対象としたシナリオ検討成果をベースに、他のグループを対象としたシナリオを構築することを目的に、処分概念における不確実性を特定した上で、技術課題を抽出した。

(1) 各グループの特徴の整理および状態変化表の作成

1) 各グループの特徴の整理

a. TRU 廃棄体の発生源

TRU 廃棄物（超ウラン核種を含む放射性廃棄物）は、図 2.3.1-1 に示すように核燃料サイクルにおける使用済燃料の再処理過程で発生する。このほかに、海外からの返還 TRU 廃棄物、JAEA で保管されている TRU 廃棄物がある。現状では、JAEA が実施した再処理や MOX 燃料施設からの廃棄物も同様なグループ分けがなされている。

発生する廃棄物は、廃棄物の特性と放射能レベルを考慮し大きく 4 つのグループに分類される。

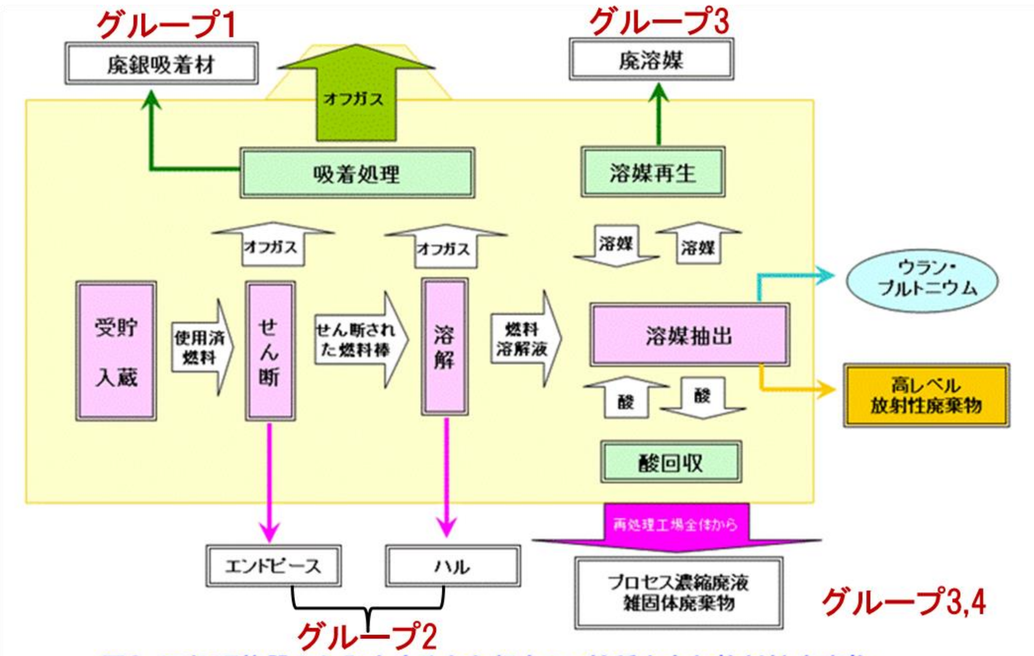


図3 再処理施設から発生する主な超ウラン核種を含む放射性廃棄物

［出所］原子力委員会 バックエンド対策専門部会:「超ウラン核種を含む放射性廃棄物の処理処分の基本的考え方について」
参考資料-1「再処理施設から発生する主な超ウラン核種を含む放射性廃棄物」（平成12年3月)、
http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2000/siryo20/11sanko1.htm

図 2.3.1-1　TRU 廃棄物の発生源とグループ分け（原子力委員会、2000）

b. TRU 廃棄物の種類

地層処分の対象となる TRU 廃棄物は、その発生プロセスおよび放射能レベルを考慮し、図 2.3.1-2 に示す 4 つのグループに分類されている。これらの分類は、第 2 次 TRU レポートによれば、含有する廃棄物の放射能濃度と廃棄物の特性に着目して分類したとされており、その中で地層処分の対象となる廃棄物は、含有する βγ 放射濃度と α 濃度により、表 2.3.1-1 に示す放射能濃度以上の廃棄物と規定されている。それ以下の廃棄物は余裕深度処分あるいは浅地中処分に分類される。

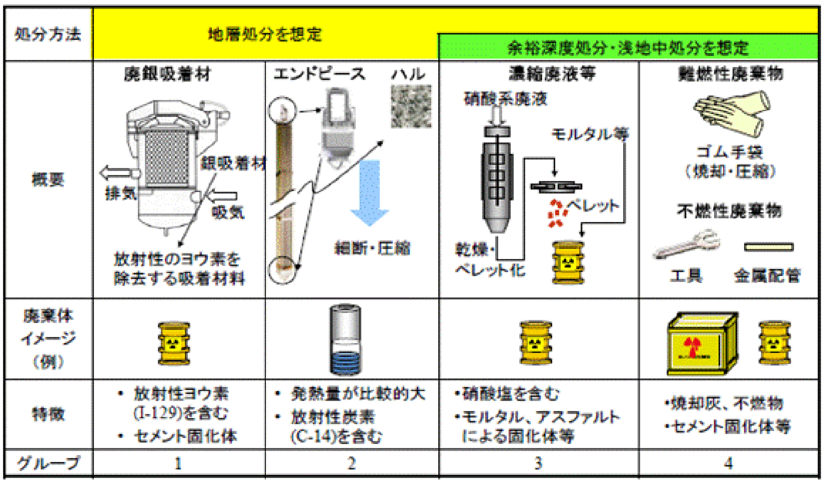


図 2.1-3 TRU 廃棄物のグループ分類と特徴
（総合資源エネルギー調査会，2006a を一部修正）

図 2.3.1-2 TRU 廃棄物の分類（総合資源エネルギー調査会、2006）[7]

表 2.3.1-1 地層処分の対象となる TRU 廃棄物の放射能濃度
（「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律施行令」（政令，2007a）の第三条）

対象核種	放射能濃度（Bq/t）
C-14	1×10^{16}
Cl-36	1×10^{13}
Tc-99	1×10^{14}
I-129	1×10^{12}
全α	1×10^{11}

c. TRU 廃棄物の発生量

TRU 廃棄物の発生量は、TRU レベル 3 報告書（NUMO2011）によれば、約 1 万 8000m3 と推定されている。その中には、前述した日本原燃の再処理事業からのものだけでなく、日本原子力開発機構（JAEA）、フランスからの返還廃棄物も含まれる。表 2.3.1-2 に各グループの発生数量、表 2.3.1-3 にその内訳を示す。表 2.3.1-3 には、それぞれの廃棄物に含まれる物質が概略記載されており、そのほとんどがガス発生源（ソースターム）となりえる物質である。金属類、濃縮廃液を固化した物質、可燃物、非金属の不燃物など、多種多様な物質から構成されている。ガス発生は、これらの内容物とともに、放射性物質の放射能にも依存する。

表 2.3.1-2　TRU 廃棄物の各グループの発生数量（NUMO TR-10-3, 2011）

グループ	主な廃棄体	発生量(m³)	グルーピングの根拠
1	廃銀吸着材のセメント混練固化体	319	人工バリア，天然バリアへの収着性が低いI-129を多く含む廃棄体
2	ハル・エンドピースの圧縮体 返還廃棄体	5,792	人工バリア，天然バリアへの収着性が低いC-14を多く含み，発熱量の比較的大きい廃棄体
3	低レベル濃縮廃液のアスファルト固化体およびモルタル充填固化体など	5,228	硝酸塩を多く含み核種の収着性・溶解度へ影響を及ぼす可能性のある廃棄体
4	可燃，難燃，不燃廃棄物のモルタル充填固化体など	6,745	その他の廃棄体
総発生量		18084≒18,100	

表 2.3.1-3　各グループの発生量内訳（NUMO-TR-10-3, 2011）

グループ	廃棄物種類	最終処分計画における名称	廃棄体体積 (m^3/本)	発生本数 (本)	発生量 (m^3)
1	原燃再処理操業	廃銀吸着材	0.2	1,400	280
	JAEA再処理操業	廃銀吸着材	0.2	193	39
			合計	1,593	319
2	原燃再処理操業	ハル・エンドピース	0.194	25,000	4,852
	JAEA再処理操業	ハル・エンドピース	0.194	1,211	235
	仏国返還廃棄物	固型物収納体（ハルなど）(CSD-C)	0.194	最大3600	699
	仏国返還廃棄物	低レベル廃液ガラス固化体(CSD-B)	0.194	最大28	6
			合計	29,839	5,792
3	原燃再処理操業	低レベル濃縮廃液Ⅰ（分析廃液）	0.2	6,272	1,256
		部分除染廃液Ⅰ（機器更新）	0.2	708	140
	原燃再処理解体	系統除染廃液(施設廃止)	0.2	311	63
		部分除染廃液Ⅰ（施設廃止）	0.2	485	97
	JAEA再処理操業	溶媒洗浄廃液Ⅰ（アスファルト固化体（MA系））	0.2	16,155	3,231
		溶媒洗浄廃液Ⅱ（スラリー固化体）	0.2	1,237	248
		溶媒洗浄廃液Ⅲ（リン酸廃液固化体）	0.2	594	119
	JAEA再処理解体	二次除染廃液スラリー固化体	0.2	369	74
			合計	26,131	5,228
4	原燃再処理操業	焼却灰＋ハル缶水	0.2	1,556	312
		ハル缶水	0.2	3,440	688
		不燃物Ⅰ（特殊機器廃品等）	3.1	196	608
		不燃物Ⅰ（ＧＢパネル）	3.1	16	48
		不燃物Ⅰ（機器廃品等）	0.2	4,104	820
		不燃物Ⅰ（機器更新）	0.2	8	2
		不燃物Ⅰ（溶融炉）	0.38	1,080	412
	原燃MOX操業	焼却灰（グローブボックス内）	0.2	1,220	244
		焼却灰（二次廃棄物）	0.2	424	84
		不燃物Ⅰ（溶融）	0.2	500	100
		不燃物Ⅰ（機器更新）	0.2	1,772	356
		不燃物Ⅰ（溶融以外）	0.2	84	16
		不燃物Ⅰ（ＧＢパネル）	3.1	16	48
	原燃再処理解体	不燃物Ⅰ（溶融）	0.2	351	70
		不燃物Ⅰ（圧縮）	0.2	488	98
		不燃物Ⅰ（溶融以外）	3.1	17	53
	原燃MOX解体	焼却灰	0.2	588	118
		不燃物Ⅰ（溶融）	0.2	2,669	535
		不燃物Ⅰ（ＧＢパネル）	3.1	24	75
	JAEA再処理操業	ハル缶水	0.2	24	5
		不燃物Ⅰ（金属Ⅰ）	0.2	785	158
		不燃物Ⅱ（金属Ⅱ）	3.1	2	7
		可燃物	0.2	45	9
		難燃物	0.2	12	3
		不燃物Ⅲ（非金属Ⅰ）	0.2	211	43
		不燃物Ⅳ（非金属Ⅱ）	0.43	34	15
	JAEA MOX操業	可燃物	0.2	485	97
		難燃物	0.2	267	54
		不燃物Ⅰ（金属）	0.2	2,175	436
		不燃物Ⅱ（非金属）	0.2	338	68
	JAEA再処理解体	不燃物Ⅰ（金属（一次廃棄物））	0.2	2,693	539
		不燃物Ⅱ（コンクリート（一次廃棄物））	0.2	84	17
		可燃物Ⅰ（二次廃棄物）	0.2	37	8
		難燃物Ⅰ（二次廃棄物）	0.2	7	2
		不燃物Ⅲ（金属（二次廃棄物））	0.2	102	21
		不燃物Ⅳ（非金属（二次廃棄物））	0.2	56	12
		不燃物Ⅴ（金属Ⅰ（廃棄体化処理））	0.2	84	17
		可燃物Ⅱ（廃棄体化処理）	0.2	34	7
		難燃物Ⅱ（廃棄体化処理）	0.2	10	2
		不燃物Ⅵ（非金属Ⅰ（廃棄体化処理））	0.2	46	10
		不燃物Ⅶ（非金属Ⅱ（廃棄体化処理））	0.43	17	8
	JAEA MOX解体	可燃物Ⅰ（一次廃棄物）	0.2	83	17
		難燃物Ⅰ（一次廃棄物）	0.2	19	4
		不燃物Ⅰ（金属（一次廃棄物））	0.2	1,959	392
		不燃物Ⅱ（コンクリート（一次廃棄物））	0.2	49	10
		可燃物Ⅱ（二次廃棄物）	0.2	103	21
		難燃物Ⅱ（二次廃棄物）	0.2	49	10
		不燃物Ⅲ（金属（二次廃棄物））	0.2	113	23
		不燃物Ⅳ（非金属（二次廃棄物））	0.2	21	5
		可燃物Ⅲ（廃棄体化処理）	0.2	54	11
		難燃物Ⅲ（廃棄体化処理）	0.2	26	6
		不燃物Ⅴ（金属（廃棄体化処理））	0.2	87	18
		不燃物Ⅵ（非金属（廃棄体化処理））	0.2	15	3
			合計	28,679	6,745
			総合計	86,242	18,084

d. 検討の対象とする TRU 廃棄物

TRU 廃棄物と呼ばれている廃棄物の放射能濃度は、図 2.3.1-3 に示すように広範囲に分布しており、その中で、α核種濃度が 10^{11}Bq/t 以上のものを「地層処分する低レベル放射性廃棄物」と区分している（原子力安全委員会、 2007)。本検討では、地層処分の対象とする TRU 廃棄物を対象とする。

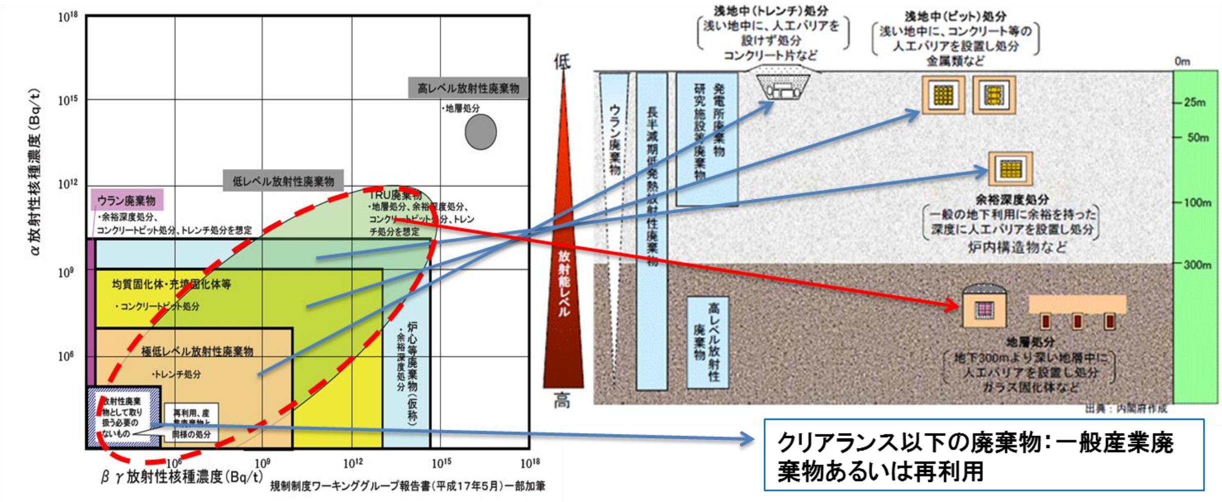


図 2.3.1-3 わが国での処分形態を考慮した廃棄物放射能濃度区分
（総合エネルギー調査会、2007）

e. 廃棄体パッケージの仕様

NUMO の処分計画（TR-10-02）によると、廃棄物は鋼製のドラム缶あるいはステンレス製のキャニスタに収納されモルタル充填されたのち、図 2.3.1-4 に示す 2 種類の炭素鋼廃棄体パッケージに格納され、空隙はセメントモルタルで充填されることになっている。現状の設計では、鋼製パッケージには蓋がなく、パッケージとしての物理的な核種閉じ込めは期待されていない。海外では、操業時でのガス発生の影響等を考慮して、水密性と気密性を有する厳重な容器が用いられている（例えば、スイス Nagra の概念[11]や英国 NDA の概念[14]）。第 2 次 TRU レポートや TRU レベル 3 報告書（NUMO2011）では、パッケージに関する検討は深くなされていない。

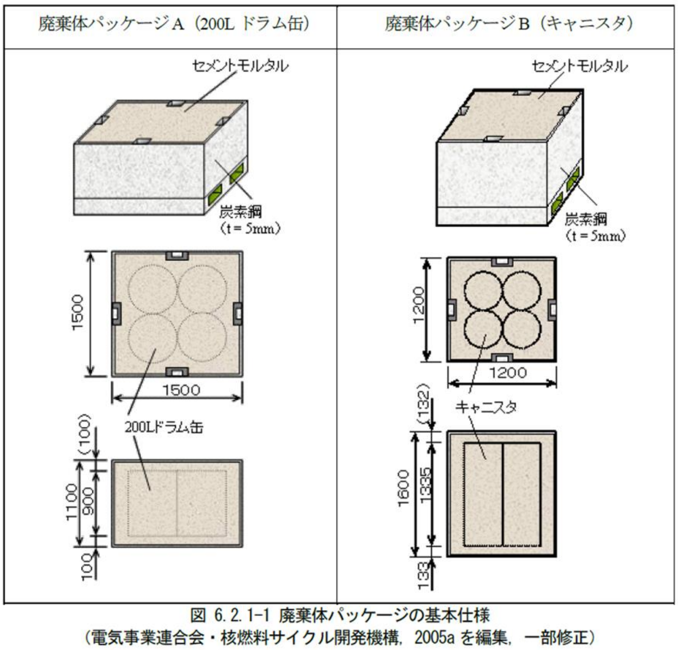


図 2.3.1-4　廃棄体パッケージの仕様例（NUMO-TR-10-03,2011）

f. 地層処分の対象となる TRU 廃棄物の処分概念

地層処分の対象となる TRU 廃棄物の処分場レイアウトを図 2.3.1-5 に示す。TRU レベル 3 報告書（NUMO2011）の処分場概念は、「第 2 次 TRU レポート」をそのまま踏襲しており、新たな事項は検討されていない。レイアウトでは、各グループの廃棄物が別々に定置されることを基本としている。

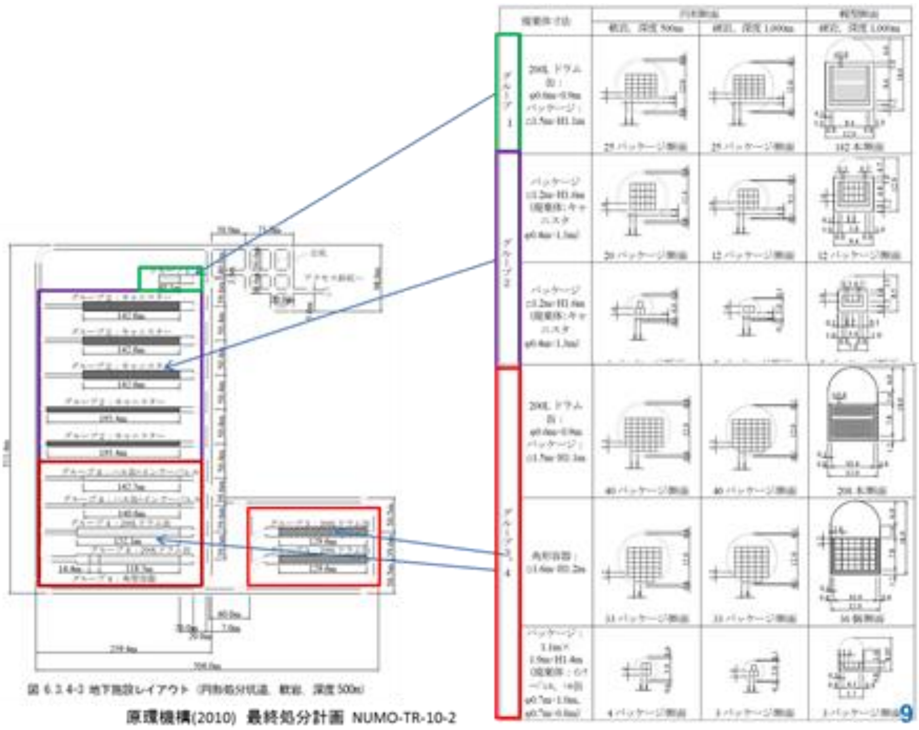


図 2.3.1-5　TRU 廃棄物の処分場概念（レイアウトは堆積岩の場合）（NUMO-TR-10-3, 2011）

g. 各グループの人工バリア概念

それぞれのグループに対する人工バリア概念を図 2.3.1-6 に示す。グループ１，２にはベントナイト緩衝材が設置され、グループ３，４は充填材としてセメント系材料が計画されている。

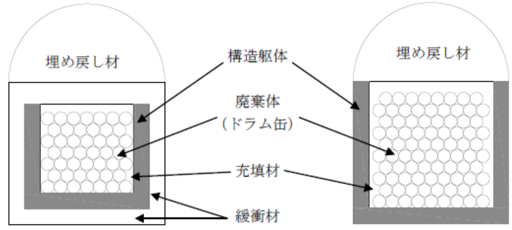


図 6.1.1-1 幌型処分坑道断面の構成
（廃棄体がドラム缶の例，左：緩衝材を設置する場合，右：設置しない場合）

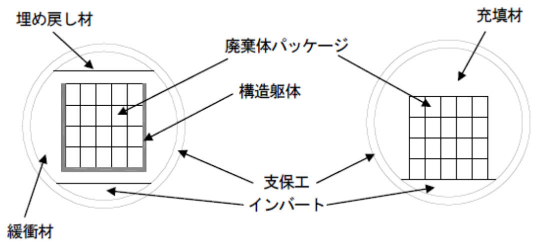


図 6.1.1-2 円形処分坑道断面の構成（左：緩衝材を設置する場合，右：設置しない場合）

図 2.3.1-6　各グループの人工バリア概念（NUMO-TR-10-03, 2011）

人工バリア構成部材について、TRU レベル 3 報告書（NUMO2011）では以下に記述されている（抜粋)。

- ➢ 廃棄体：廃棄物を容器に封入したものである。第 4 章で述べたように容器はドラム缶，キャニスタ，角形容器などがある。ドラム缶，角形容器は容器の中を固型化材で固めている。処分場には廃棄体の形で受け入れるため処分場設計の対象ではない。
- ➢ 廃棄体パッケージ：円形坑道の場合に定置の作業性を考慮していくつかの廃棄体をまとめて金属製などの箱に収納したもの。幌型坑道の場合もキャニスタ形態の廃棄体は俵積みできないので同様に廃棄体パッケージ化する。箱の中はセメント系などの充填材で充填している。角形容器は大きいため，パッケージとはしない。
- ➢ 構造躯体：幌型坑道では上述した収納ピットのこと。円形坑道のグループ 1，2 では鋼製構造躯体の設置が想定され，内部に廃棄体や廃棄体パッケージが，外部に緩衝材が定置される。円形坑道のグループ 3，4 には構造躯体はない。
- ➢ 充填材：上述の廃棄体パッケージの中，構造躯体内の廃棄体以外の隙間の空間ならびに構造躯体がない円形坑道グループ 3, 4 の場合は処分坑道内の廃棄体の側部と上部全体に充填される。セメント系材料が検討されている。操業期間中は万一の汚染拡大防止，処分場閉鎖後は長期間にわたって核種が容易に漏れ出ないようにする機能がある。
- ➢ 緩衝材：グループ 1，2 の構造躯体の外側に設置され，主に地下水浸入量を抑制する。ほかに浸水後膨潤することによる空隙の充填や，内側の廃棄体・廃棄体パッケージ，充填材，構造躯体などの支持機能もある。
- ➢ 埋め戻し材：幌型坑道の断面上部に残る空間や円形坑道グループ 1，2 の緩衝材施工後の坑道断面内上部に残る空間を埋めるものである。グループ 1，2 ではベントナイト系材料，グループ 3，4 ではセメント系材料が検討されている。
- ➢ 支保工：処分坑道のための掘削後，空洞安定性確保のために設置される。空洞安定性に問題のない硬岩でも壁面剥離防止のために薄い吹付コンクリート層を設ける場合が多い。

また、それぞれのバリア構成材料に対する長期安全評価上に期待する安全機能（放射性核種移行を抑制する機能）については、表 2.3.1-4 に記述されている。

閉鎖後の長期安全性に関しては、グループ１，２に導入されるベントナイト緩衝材が安全機能上の重要な役割を果たすことを前提に、仕様設定がなされている。その他の構成部材については、閉鎖までの安全性に着目した設計がなされ、閉鎖後はその効果を確認することとなっている。基本的には、それぞれの部材が有する材料特性の状態変遷を考慮するものの核種移行の抑制や閉じ込め等の安全機能は期待されていない。

グループ３，４に用いられるセメント系の充填材は、狭隘部に充填する必要があることから、流動性の高い緻密なモルタル等の適用を考慮している。そのため固化後の特性として、地下水の浸入抑制、核種の移行抑制、溶出制限などの核種を閉じ込める機能が存在するが、仕様設定上は考慮されていない。

廃棄体パッケージと処分坑道の埋戻し材として、グループ３，４ではコンクリートが計画されている。このコンクリートには、廃棄体パッケージの保持が主要な機能で、放射性核種の移行抑制に関わる役割は期待されていない。しかし、地下水と接触して溶出する Ca イオンによる高 pH 環境は、廃棄体パッケージの腐食速度を抑える役割を果たし、結果的には、核種の溶出を抑える役割を有している。

表 2.3.1-4　人工バリア構成要素の機能の整理（NUMO-TR-10-03, 2011）

表 6.1.1-1 各構成要素の機能の整理　（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, 2005a を一部修正）

区分	安全要件との対応	機能	機能の内容	廃棄体		充填材	構造躯体	緩衝材	埋め戻し材	支保工
				固型化材	容器パッケージ					
操業期間	操業中の安全確保	空洞安定性	坑道の形状維持および壁面剥離防止	–	–	–	–	–	–	●
		廃棄体の定置	廃棄体定置および充填材施工の効率化	–	●	–	●	–	–	–
		廃棄体の強度	廃棄体の耐埋設荷重強度	○	○	●	–	–	–	–
		汚染拡大防止	放射性核種の漏出防止	●	●	●	–	–	–	–
閉鎖後	溶出・移動の抑制	地下水移動の抑制	地下水浸入量の抑制	–	–	○	○	●	○	–
		放射性核種の溶出制限	放射性核種の物理的な閉じ込め	○	○	○	○	○	–	–
			化学的緩衝性	○	–	○	○	○	–	–
		放射性核種の収着	放射性核種の人工バリア材への収着	○	–	○	○	○	–	–
		自己シール性	発生空隙の充填	–	–	–	–	○	○	–
	力学的安定性	応力緩衝性	外力に対する緩衝性	–	–	–	–	○	○	○
		力学的支持性	廃棄体／構造躯体の支持	–	–	○	–	●	–	–
		坑道の安定性	処分坑道の力学的安定性	–	–	○	○	○	○	○
	化学的安定性	化学変質に対するバリア機能維持	長期的変質の考慮	○	○	○	○	●	–	○
	その他	熱伝導性	廃棄体発熱の放散	○	○	○	○	○	○	–
		透気性	ガス透過性／自己修復性	–	○	○	○	○	○	–
		コロイドの移動抑制	コロイドのろ過	–	–	–	–	○	–	–

●設計上考慮すべき機能

○設計上考慮せずに，設定された仕様によりその効果を確認する機能

h. 検討対象の選定

平成 25 年度までのグループ 2 と 3 を対象としたガス挙動評価の枠を広げることを目的として、今年度はグループ 1、4 に着目し検討を展開した。

グループ 1 は、主として廃銀吸着材を含む廃棄物、グループ 4 は、解体等から発生する可燃物の焼却灰などが含まれる。今年度の検討では、ガス発生に関わる課題抽出もターゲットとしていることから、それぞれのグループに属する処分概念、廃棄物の組成にも着目する。

以下にグループ 1 から 4 の人工バリアシステムの概念と期待されている機能を整理して示す。

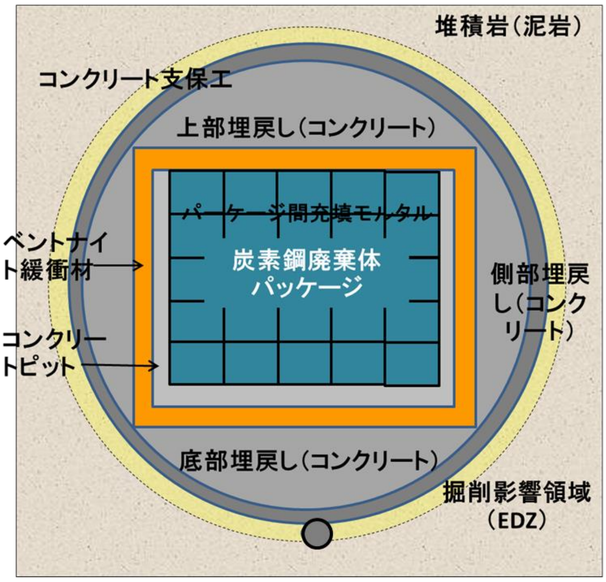
このうち、グループ 1 と 2 については、第 2 次 TRU レポートで提示された概念を一部変更している。

具体的な変更内容として、第 2 次 TRU レポートの基本概念では廃棄体パッケージの周囲にベントナイトが坑道内面（支保工のすぐ内側）まで定置されることとしているが、「(第 4 分冊）—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—」で検討している処分概念とは異なり、ここでは第 2 次 TRU レポートの根拠資料集（分冊 1）[22]に例示されている側部埋め戻しがコンクリートとした処分概念（現状の施工試験等の知見から実現性が高いと考えられる施工方法の一例）を参考として、ベントナイトの定置やパッケージの定置作業を技術的な観点から検討した。

その結果、現状で工学的な施工技術が確証されつつある余裕深度処分施設の概念[24][25]と同様に、一定厚さのベントナイト層を確保することも含め、ベントナイト内部にコンクリートピットを設けることとした現実的な処分概念を構築のうえ、検討を進めることとした。

図 2.3.1-7 および図 2.3.1-8 に本検討で構築した処分概念を示す。

グループ1、2

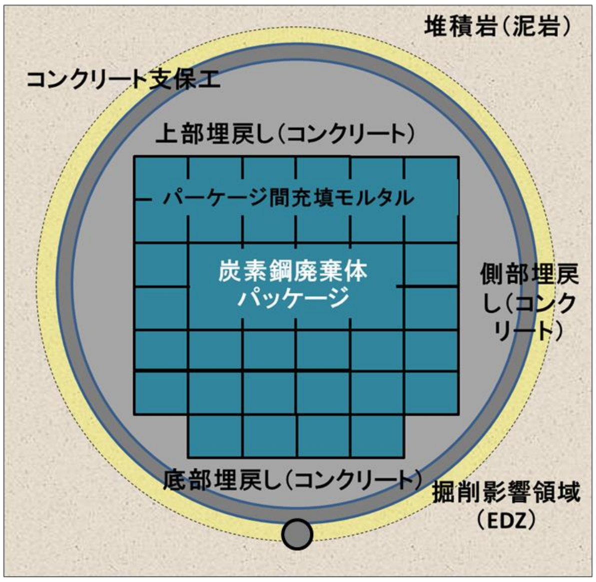


要素	操業時	長期*
廃棄体 （ドラム缶、キャニスター）	核種閉じこめ	還元雰囲気
廃棄体内充填材 （モルタル）	廃棄体固定	化学環境
廃棄体パッケージ （炭素鋼）	耐久性	還元雰囲気
パッケージ間充填材 （モルタル）	固定	化学環境
鉄筋コンクリートピット	安定性	化学環境
ベントナイト緩衝材	－	・低透水性 ・力学・化学的緩衝性 ・核種収着性 ・自己修復性
埋戻し材 （コンクリート）	安定性	化学環境
支保工 （コンクリート）	安定性	化学環境
掘削影響領域	－	核種収着性

* 処分坑道内は、大量のセメント系材料の存在により、高pH環境が長期に維持される

図 2.3.1-7　グループ１、２の人工バリアシステムと安全機能

グループ3、4



要素	操業時	長期*
廃棄体 （ドラム缶）	核種閉じこめ	腐食⇒還元雰囲気
廃棄体内充填材 （モルタル、アスファルト）	廃棄体固定	化学環境
廃棄体パッケージ （炭素鋼）	耐久性	腐食⇒還元雰囲気
パッケージ間充填材 （モルタル）	固定	化学環境
コンクリートピット	安定性	化学環境
埋戻し材 （コンクリート）	安定性	化学環境-
支保工 （コンクリート）	安定性	化学環境
掘削影響領域	－	核種収着性

* 処分坑道内は、大量のセメント系材料の存在により、高pH環境が長期に維持される

図 2.3.1-8　グループ３，４の人工バリアシステムと安全機能

i. 各グループの特徴の整理

a. ～h. までの検討を踏まえ、各グループの特徴をガス挙動評価の観点から表 2.3.1-5 に示すように取りまとめた。それぞれの廃棄物の発生量およびガスの発生源の量により、発生するガスの種類と量が大きく異なることが示唆される。

表 2.3.1-5　各グループにおける特徴の整理
（発生量は TRU レベル 3 報告書（NUMO2011）より）

	廃棄体の特徴	発生量（m^3）	パッケージ	ガス発生の観点からの特徴
グループ1	再処理過程で発生する廃銀吸着材を200Lドラム缶に格納、セメント固化した廃棄体。 バリアに収着しないI-129を多く含む。	319	鋼製パッケージにドラム缶を4本格納し、モルタルで充填 仕様：1.5mx1.5mx1.1m	・金属腐食による非放射性ガス
グループ2	再処理過程で発生するハル・エンドピースをせん断あるいは溶解し、ステンレス製の容器に格納。 発熱特性を有する。 放射性炭素（C-14）を含む。	5,792	鋼製パッケージにステンレス容器を4本格納し、モルタルで充填 仕様：1.2mx1.2mx1.6m	・放射性分解と金属腐食による非放射性ガス ・C-14による放射性ガス
グループ3	再処理過程で発生する廃溶媒、プロセス濃縮液をセメントあるいはアスファルトで固化し、200Lドラム缶に格納。 硝酸塩を含む。	5,228	鋼製パッケージにドラム缶を4本格納し、モルタルで充填 仕様：1.5mx1.5mx1.1m	・放射性分解と金属腐食による非放射性ガス ・C-14による放射性ガス ・有機物の微生物分解
グループ4	再処理過程で発生する上記以外の廃棄物で、可燃物の焼却灰、不燃物をセメント固化し、200Lドラム缶に格納。	6,745	鋼製パッケージにドラム缶を4本格納し、モルタルで充填 仕様：1.5mx1.5mx1.1m	・放射性分解と金属腐食による非放射性ガス ・有機物の微生物分解

2）状態変化表の作成

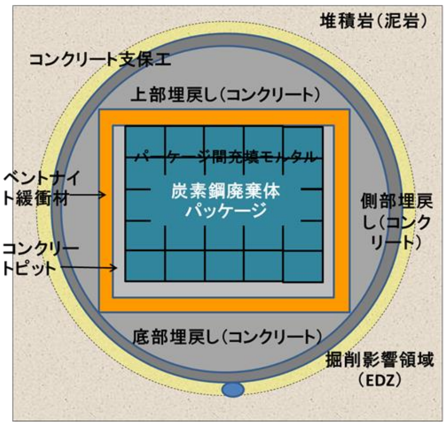
これまでの検討で、グループ２と３に関しては状態変化表を作成してきたことから、本年度の検討では、残りのグループ１と４を対象に状態変化表を作成し、構成部位の安全機能に着目して分類した統合 FEP を整理し、変化表の段階に沿った統合 FEP 関連図を作成した。

a. グループ１の状態変化表の作成

(a) 状態変化の初期状態

グループ１の状態変化を検討する上で、以下に示す地質環境条件と処分坑道の状況を仮定する。

- 堆積岩（泥岩と仮定）中地下500mに建設した処分坑道（直径約12m）に処分する。
- 周辺地下水は還元状態にある。
- 廃棄体パッケージは炭素鋼製で内部に200リットルドラム缶が4本定置される。
- ドラム缶とパッケージの空間はモルタルで充填されている。
- 廃棄体パッケージは処分坑道内の一断面あたり25体定置される。
- 廃棄体パッケージ間の空隙はモルタルで充填される。
- 完成時は空隙のないモラリス状態となっている。



(b) 状態変化の検討段階

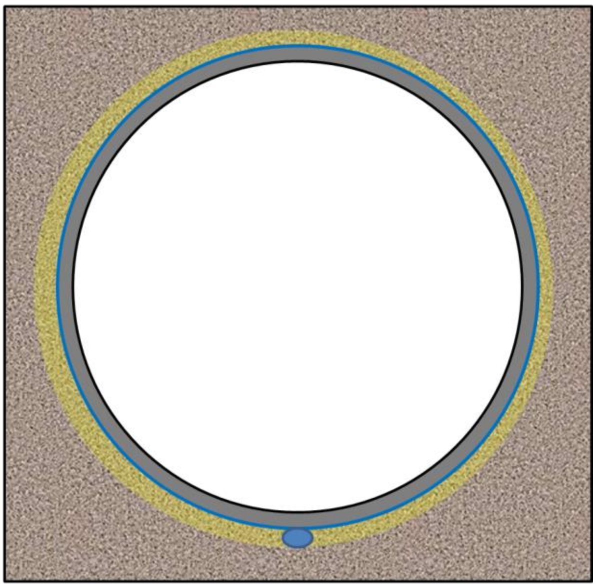
状態変化を検討するにあたり、バリアの安全機能等を考慮して、以下に示す５つの段階を考慮する。

① 処分坑道の建設段階
② 廃棄体パッケージの定置段階
③ 埋戻しから廃棄体飽和までの段階
④ 廃棄体からの放射性核種放出段階（多重バリアによる核種移行遅延）
⑤ 天然バリアによる核種移行抑制段階（人工バリアの機能喪失後）

以下に各段階における状態変化をイメージ図とともに記述する。

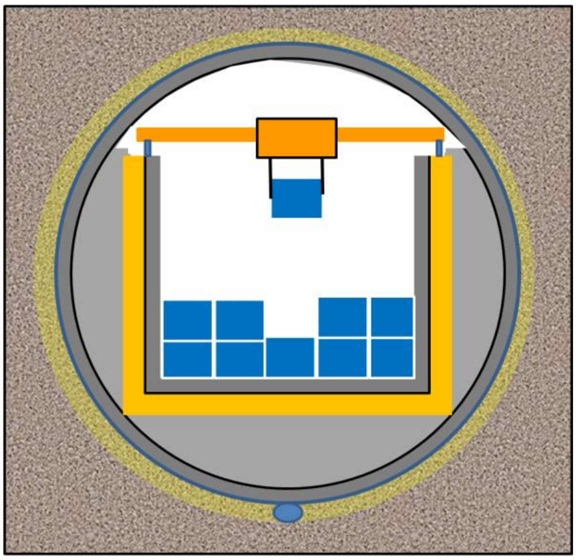
① 処分坑道建設段階

- 機械掘削で堆積岩中に処分坑道（直径約18m）を建設、コンクリート製支保工を設置
- 支保工背面には掘削影響領域が発生、厚さは1m程度と仮定
- 周辺地下水は支保工背面のドレーンシステムで排水、および支保工背面には止水シートを設置
  ⇒処分坑道内への地下水の浸透抑制
  ⇒掘削影響領域は不飽和状態
- 坑道内への地下水の浸透は抑制し、換気はしているが湿度は60%以上⇒金属類の腐食、微生物活動は進展



② 廃棄体パッケージ定置段階

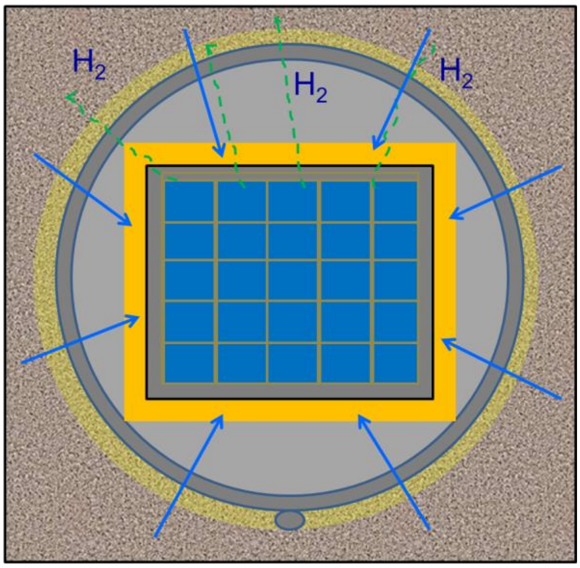
- ベントナイト緩衝材の底部設置後コンクリートピット構築、その後側壁のベントナイト施工
- クレーンで鋼製パッケージを定置
- 定置作業中は処分坑道内には排水により水は存在しない
- すべてのパッケージを定置後空隙にモルタルを充填し、上部の空間をコンクリートで埋戻し
- これら作業時に鋼製パッケージは大気中の水分、セメントから漏出した水分に接触し、腐食を開始する。パッケージ内部への水分の浸透は抑制



③ 埋戻しから廃棄体飽和までの段階

廃棄体まで飽和する時間は、おおよそ数 100 年後と推定される。この段階までに外部からの地下水浸入に伴い、ドラム缶等の金属類の腐食からの水素ガス発生が顕著になる。また、人工バリア内の酸素が消費されるにつれ、嫌気性の微生物の活動が活発化する。

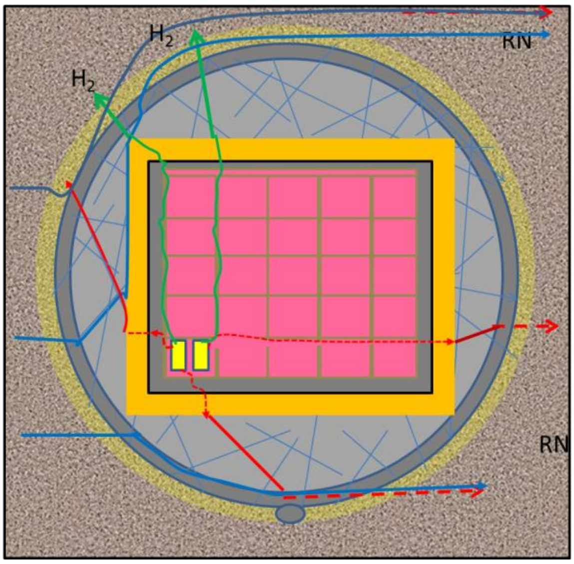
- 上部空隙が埋め戻され、処分坑道の端部にプラグが設置されたのち、下部のドレーンを閉鎖
  ⇒処分坑道内への還元性地下水の浸透
  ⇒ベントナイト緩衝材に浸透
  ⇒ベントナイトの膨潤圧
- ベントナイト緩衝材の飽和
  ⇒鋼製パッケージの腐食・膨張
  ⇒ガス発生、溶解、拡散
- パッケージ内の充填材中への間隙水の浸透(拡散)
  ⇒ドラム缶と接触
  ⇒腐食・膨張⇒ガス発生
  ⇒放射線分解でのガス発生
  ⇒ガスの溶解、分散



④ 廃棄体からの放射性核種放出段階

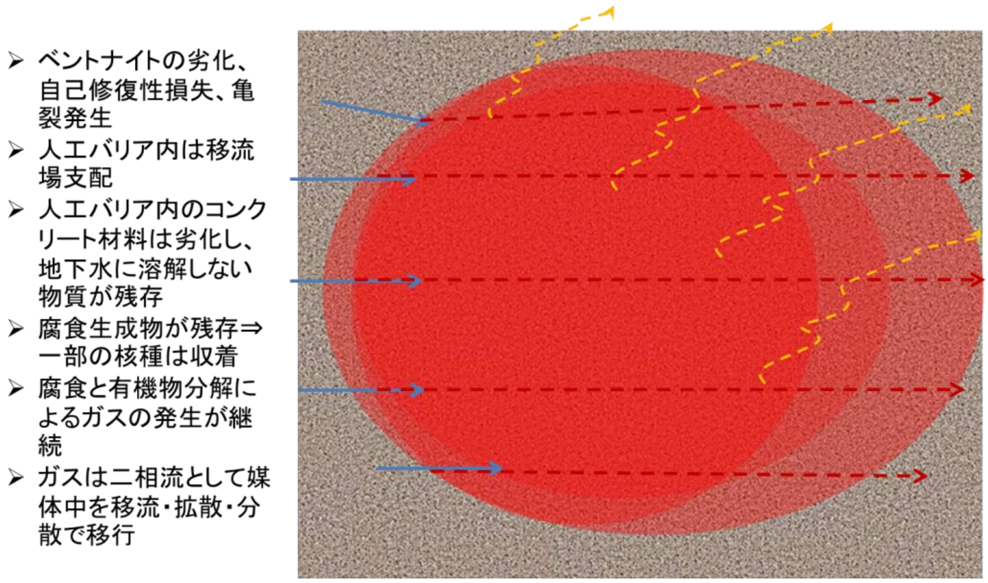
セメント系材料の亀裂発生が検挙になるにつれ、間隙が増え微生物活動が盛んとなる（参考文献)。グループ 1 ではセメント固化した廃銀吸着材の微生物分解やパッケージ等金属類の還元腐食が進み、ガスの発生が継続する。発生したガスは、人工バリア内の間隙に蓄積するとともに、ベントナイト緩衝材との境界に蓄積し、圧力が高まっていく。ベントナイト緩衝材は、内外に存在するセメント系材料からの高 pH 間隙水の影響で劣化を開始するとともに、内部の微生物活動により膨潤性を喪失していく。

- 支保工、埋戻しコンクリートには亀裂が発生し、周辺地下水は亀裂媒体中の移流場として緩衝材外周を移動
- 鋼製パッケージはすべて腐食膨張し、二次鉱物が沈着
  ⇒核種の収着性増加
- 鋼製パッケージ内のドラム缶もすべて腐食し、内部の放射性物質が周辺地下水に溶解
  ⇒拡散場で移行
- 金属材料の腐食による水素ガスの発生が継続
- セメント系・ベントナイト材料中の有機物の微生物分解
  ⇒ガス発生



⑤ 天然バリアによる核種移行抑制段階

この段階については、明確な期間について言及された報告書はないが、閉鎖後数万年後と想定される。ベントナイト緩衝材は、高 pH の影響、微生物活動等で当初の安全機能を喪失し、廃棄体内の放射性核種は、天然バリア中に放出される。金属類の腐食によるガス発生は現象するが、微生物分解でのガス発生が継続して進展する。



(c) グループ 1 の状態変化表作成

①から⑤までの時系列変化をまとめて表 2.3.1-6 に示す。横軸に状態変化を考慮した 5 つの段階、縦軸に人工バリアを構成する要素と EDZ を含む周辺岩盤に分類している。ガス発生とその影響を考慮する上では、廃棄体内部への飽和段階と飽和後、ベントナイト緩衝材の機能喪失までの段階が最も重要となる。ガス発生に関しては、金属類の腐食による水素ガス発生（酸化、還元雰囲気）、微生物分解（好気性、嫌気性）による非放射性ガス、C-14 を含む CO2、CH4 等の放射性ガスの発生が顕著となり、ベントナイト緩衝材内の間隙での蓄圧によるガスの昇圧、二相流としてベントナイト中への侵入、そしてガス破過現象の発生が推定される段階である。それらのガス特有の現象とともに、間隙水に溶解した核種の移行（拡散支配）への影響と放射性ガスとしての移行に着目する必要がある。この段階での THMC 等の状態変化を表表 2.3.1-7 に示す。

表 2.3.1-6　グループ１の状態変化表

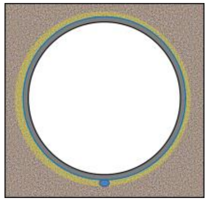
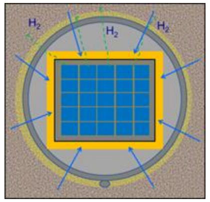
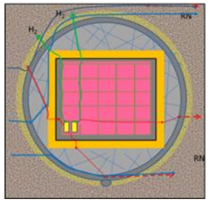
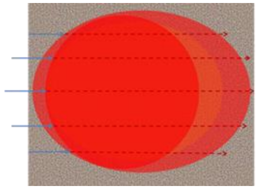
変化の段階	掘削直後	廃棄体定置中：水との接触防止	埋戻し～内部飽和	廃棄体から核種放出	天然バリアでの閉じ込め
状態イメージ					
主要な変化	支保工外周のドレーンシステムで処分坑道内への地下水の浸入抑制	支保工外周のドレーンシステムで処分坑道内への地下水浸入抑制	ドレーンシステムの停止により処分坑道に還元地下水が浸透	ドラム缶が損傷し、内部廃棄物より放射性核種（ヨウ素が主）が放出	処分坑道内の核種、ガスは天然バリア中に放出
廃棄物 [200 ﾘｯﾄﾙドラム缶] セメント固化	－	ドラム缶内の空隙はモルタルで充填、初期強度、水はなし	高 pH 間隙水の廃棄体の隔離性能で水との接触なし 廃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

表 2.3.1-7　ガスの発生が顕著な段階での THMC 等の状態変化

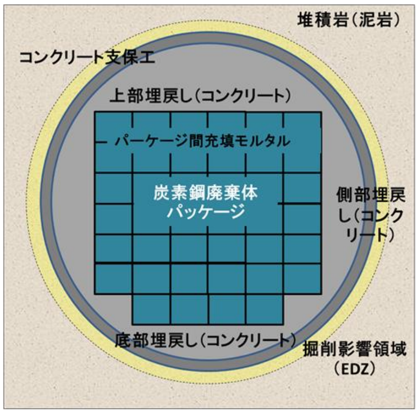
構成要素	温度 T	水理環境場 H	力学環境場 M	化学環境場 C	放射線 R	微生物環境 B	ガス発生 G	ガス移行 RH
廃棄体(ドラム、ステンレス容器)	周辺岩盤温度	局地的な動水勾配による地下水流動場（亀裂媒体	腐食膨張、内部のガス圧の上昇	放射性反応、溶出	影響なし	表面にバイオフィルムの形成	放射線分解、化学反応、有機物反応でのガス発生	ガス状あるいは溶存状態での拡散移行
容器内の充填材（モルタル）	周辺岩盤温度	局地的な動水勾配による地下水流動場（亀裂媒体	力学的特性の劣化、ひび割れ発生、ガスの透過	水和反応	影響なし	表面のバイオフィルムの形成あるいはバルクの固まり形成	微生物分解によるガス発--	バルクとしての拡散あるいは二相流としての亀裂内移行
廃棄体容器(コンクリート製)	周辺岩盤温度	局地的な動水勾配による地下水流動場（亀裂媒体	力学的な損傷・亀裂発生	無酸素腐食	影響なし	表面にバイオフィルムの形成	表面腐食による水素ガスの発生	拡散あるいは亀裂内の溶存ガスの移行
ピット内充填材（モルタル）	周辺岩盤温度	局地的な動水勾配による地下水流動場（亀裂媒体	力学的特性の劣化・亀裂発生	水和反応と溶出による高 pH 環境形成	影響なし	安定した微生物群	-微生物分解によるガス発	バルクとしての拡散あるいは二相流としての亀裂内移行
コンクリート・ピット	周辺岩盤温度	局地的な動水勾配による地下水流動場（亀裂媒体）	力学的特性の劣化（強度部材の喪失）、鉄筋の腐食膨張（破壊）	水和反応と溶出による高 pH 環境形成、鉄筋の腐食生成物	影響なし	安定した微生物群	鉄筋の腐食による水素の発生	バルクとしての拡散あるいは二相流としての亀裂内移行
ベントナイト緩衝材	周辺岩盤温度	飽和状態、変質による亀裂発生（亀裂媒体特性？）	膨潤圧維持→セメンテーション→亀裂発生	高 pH による鉱物の変質	影響なし	安定した微生物群	微生物分解によるガス発	バルクとしての拡散あるいは二相流としての亀裂内移行
埋戻（コンクリート）	周辺岩盤温度	飽和状態、変質による亀裂発生	力学特性の劣化	水和反応と溶出による高 pH 環境形成	影響な	安定した微生物群	微生物分解によるガス発生	バルクとしての拡散あるいは二相流としての亀裂内移行
コンクリート製支保工・補強工（ロックボルト）	周辺岩盤温度	局地的な地下水流動場（劣化による高透水ゾーン形成）	力学物性の劣化による低下	成分の浸出・劣化による化学環境場の変化	影響なし	周辺環境の安定した微生物群の存在	ロックボルトの腐食 H_2 の発生	バルクとしての拡散あるいは二相流としての亀裂内移行
EDZ	周辺岩盤温度	移流場 局地的な動水勾配の場	周辺の岩盤応力場	高 pH 環境での鉱物反応場	影響なし	周辺環境の安定した微生物群の存在	---	溶存状態での移流状態、断続的なガス移行状態

b. グループ４の状態変化表の作成

(a) 状態変化の初期状態

グループ４の状態変化を検討する上で、以下に示す地質環境条件と処分坑道の状況を仮定する。

- 堆積岩（泥岩と仮定）中地下500mに建設した処分坑道（直径約18m）に処分する。
- 周辺地下水は還元状態にある。
- 廃棄体パッケージは炭素鋼製で内部に200リットルドラム缶が4本定置される。
- ドラム缶とパッケージの空間はモルタルで充填されている。
- 廃棄体パッケージは処分坑道内の一断面あたり40体定置される。
- 廃棄体パッケージ間の空隙はモルタルで充填される。
- 完成時は空隙のないモラリス状態となっている。



(b) 状態変化の検討段階

状態変化を検討するにあたり、バリアの安全機能等を考慮して、以下に示す５つの段階を考慮する。

① 処分坑道の建設段階

② 廃棄体パッケージの定置段階

③ 埋戻しから廃棄体飽和までの段階

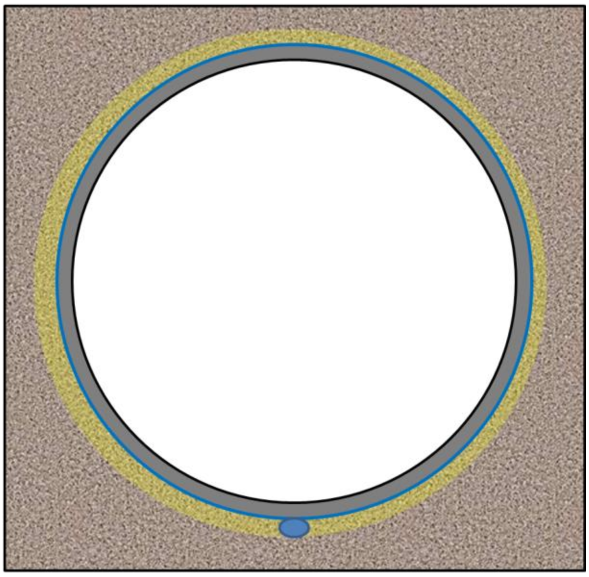
④ 廃棄体からの放射性核種放出段階（多重バリアによる核種移行遅延）

⑤ 天然バリアによる核種移行抑制段階（人工バリアの機能喪失後）

以下に各段階における状態変化をイメージ図とともに記述する。

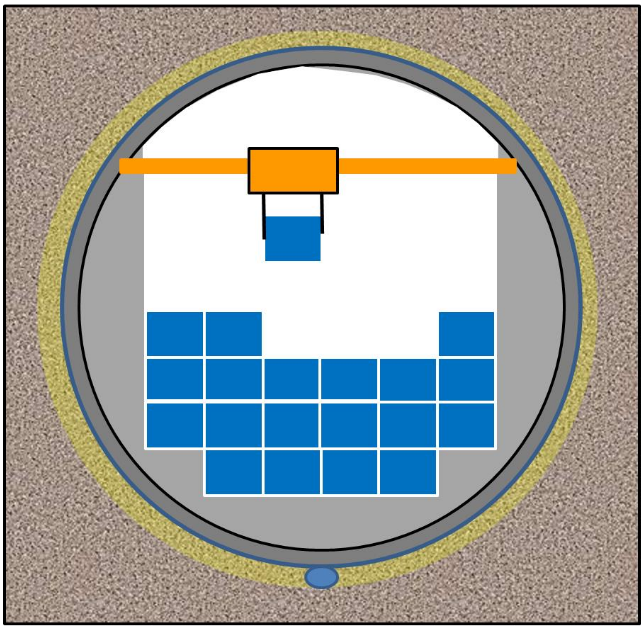
① 処分坑道の建設段階

- 機械掘削で堆積岩中に処分坑道（直径約18m）を建設、コンクリート製支保工を設置
- 支保工背面には掘削影響領域が発生、厚さは1m程度と仮定
- 周辺地下水は支保工背面のドレーンシステムで排水、および支保工背面には止水シートを設置
  ⇒処分坑道内への地下水の浸透抑制
  ⇒掘削影響領域は不飽和状態
- 坑道内への地下水の浸透は抑制し、換気はしているが湿度は60％以上⇒金属類の腐食、微生物活動は進展



② 廃棄体パッケージ定置段階

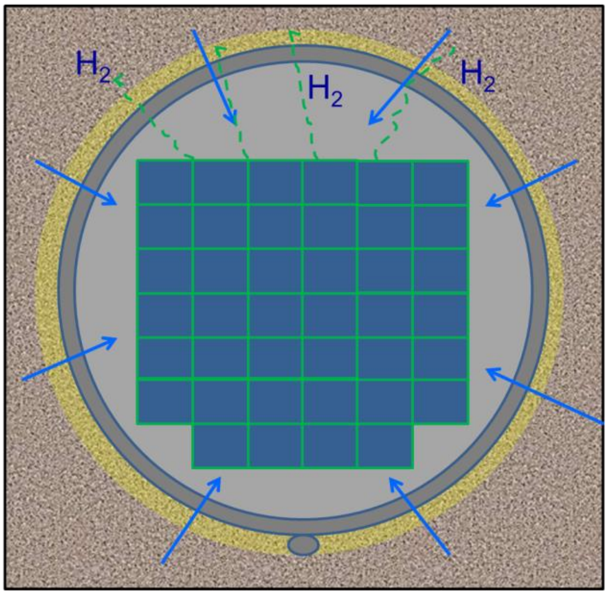
- 処分坑道側部、底部にコンクリートを廃棄体が定置できるように打設
- 天井クレーンで鋼製パッケージを定置
- 定置作業中は処分坑道内には排水により水は存在しない
- すべてのパッケージを定置後空隙にモルタルを充填し、上部の空間をコンクリート埋戻し
- これら作業時に鋼製パッケージは大気中の水分、セメントから漏出した水分に接触し、腐食を開始する。パッケージ内部への水分の浸透は抑制されている。



③ 埋戻しから廃棄体飽和までの段階

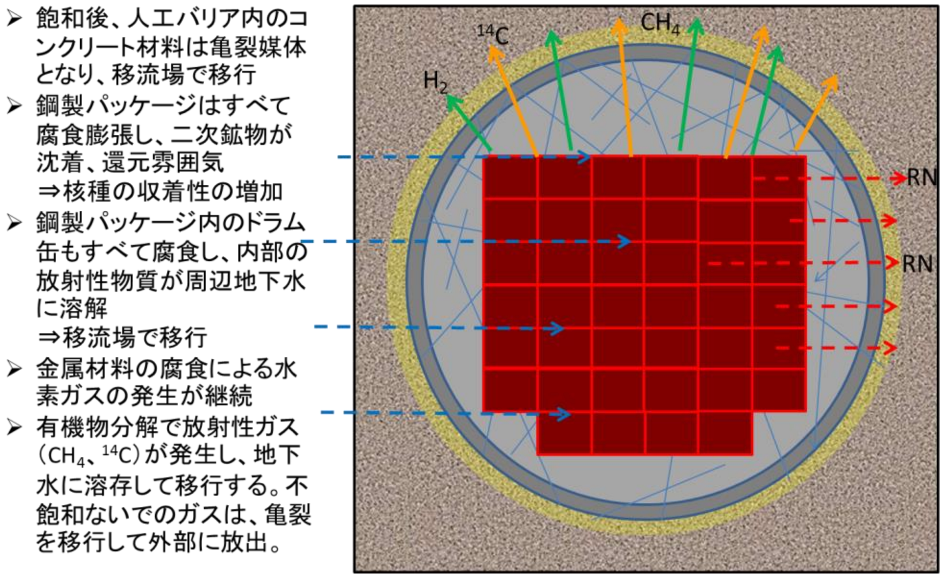
廃棄体まで飽和する時間は、おおよそ数 10 年後と推定される。この段階までに外部からの地下水浸入に伴い、ドラム缶等の金属類の腐食からの水素ガス発生が顕著になる。また、人工バリア内の酸素が消費されるにつれ、嫌気性の微生物の活動が活発になる。

- 上部空隙が埋め戻され、処分坑道の端部にプラグが設置されたのち、下部のドレーンを閉鎖
  ⇒処分坑道内への還元性地下水の浸透
  ⇒鋼製パッケージに接触
  ⇒表面から腐食開始
  ⇒水素ガス発生
- 鋼製パッケージの腐食・膨張
  ⇒亀裂発生
  ⇒パッケージ内部に地下水浸透
  ⇒ドラム缶腐食
  ⇒水素ガス発生
- ドラム缶内部への水の浸透
  ⇒放射性核種の溶解
- コンクリート支保工亀裂発生
  ⇒鉄筋腐食⇒水素ガス発生



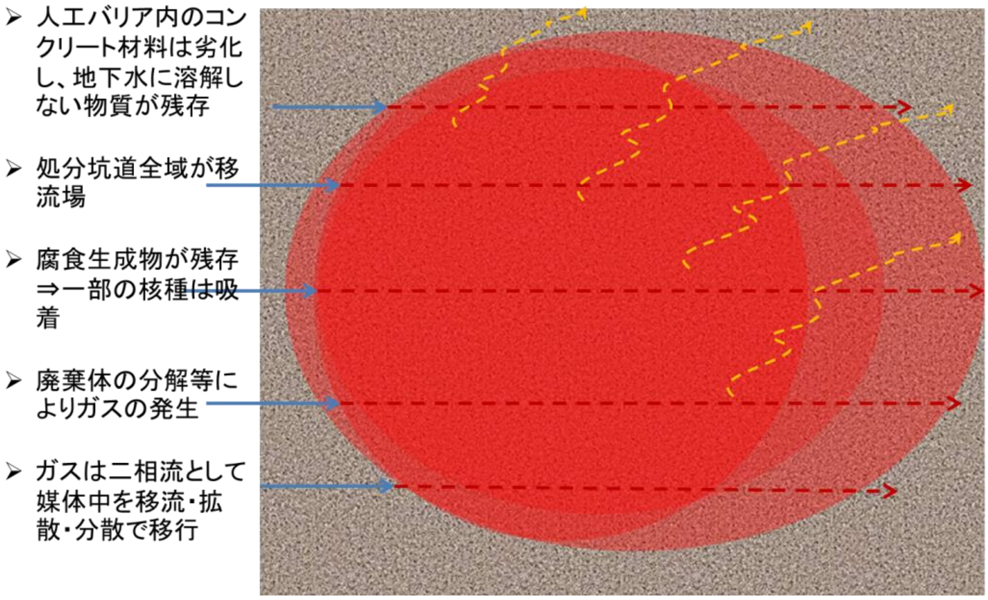
④ 廃棄体からの核種放出段階

セメント系材料の亀裂発生が顕著になるにつれ、間隙が増加し微生物活動が活発となる。グループ４には、有機物を多く含む廃棄物がセメント固化されていることもあり、微生物の活動とともに非放射性、放射性ガスの発生が増加する。処分坑道内は、セメント系材料が多く存在し、化学バリアとしての機能は残存するものの、水理的には移流場支配となっていることから、溶解した核種と地下水に溶存した放射性ガスが移流で移行する。地下水の移行が極めて遅い環境では、間隙水に溶存した放射性ガスは、バブルとして地表に向けて移行する可能性がある。



⑤　天然バリアによる核種移行遅延抑制段階

処分坑道内は、移流場支配となる。微生物分解によるガス発生は継続し、溶存あるいはガス状での放射性物質が移行する。



(c)　グループ 4 の状態変化表作成

①から⑤までの段階を時系列に整理し、表 2.3.1-8 に示す。特徴的な事項としては、グループ

１に比較してベントナイト層がないことから、廃棄体パッケージへの地下水浸透速度が 100 年程度早くなると推定されるため、構成パッケージやドラム缶の腐食が早期に発生する点である。これまでの検討では、パッケージ内やその間隙に密実なモルタルを充填することとされているために、廃棄体内に還元地下水が浸透するには 10 年以上かかることもあり、廃棄体パッケージが定置されているル外周から内部にかけて飽和していくには、数 10 年以上の時間がかかる可能性もある。これらの湿潤線の浸透とともに、腐食の進展と微生物の有機物分解が活発に進み、非放射性と放射性ガスが発生する。

ガスは、密実な充填材中での移行は難しく、間隙水に溶解するとともに二相流として拡散していくことになる。充填材に亀裂が発生すると、亀裂媒体中の移流場のなかで溶存状態あるいは二相流で移行する。この場合、間隙水に溶存した核種と同様の移行形態となることから、地下水移行シナリオとして放射性ガス移行も考慮する必要がある。

このようなガス移行挙動が活発となる段階での THMC 等に着目した状態変化表を表 2.3.1-9 に示す。

表 2.3.1-8　グループ 4 の状態変化表

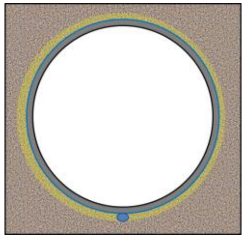
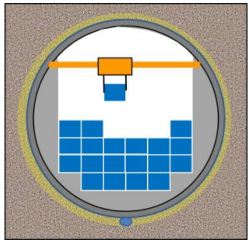
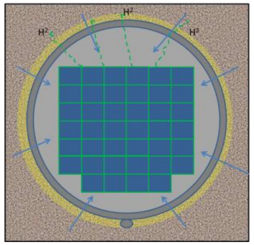
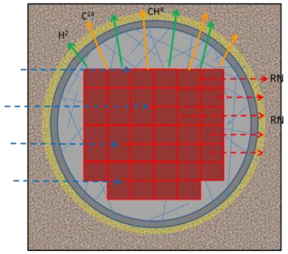
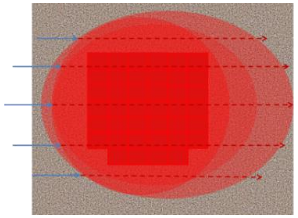
変化の段階	掘削直後	廃棄体定置中：水との接触防止	埋戻し～飽和	廃棄体から核種放出	天然バリアでの閉じ込め
状態イメージ					
主要な変化	支保工外周のドレーンシステムで処分坑道内への浸出水なし	支保工外周のドレーンシステムで処分坑道内への浸出水なし	ドレーンシステムの停止により処分坑道に還元地下水が浸出	ドラム缶が損傷し、内部廃棄物より放射性核種が放出	処分坑道内の核種、ガスは一部を除き天然バリアに放出
廃棄物 [200 ㍑ドラム缶]	－	ドラム缶内の空隙はモルタルで充填、初期強度、水はなし 高 pH 状態	廃棄体の隔離性能で水との接触ない、強度維持 廃棄体パッケージの水密性損傷に伴う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

表 2.3.1-9　ガス発生が活発となる段階での THMC 等の状態変化

構成要素	温度 T	水理環境場 H	力学環境場 M	化学環境場 C	放射線 R	微生物環境 B	ガス発生 G	ガス移行 RN
廃棄体(ドラム)	周辺岩盤温度	局地的な動水勾配による地下水流動場(亀裂媒体	腐食膨張、内部のガス圧の上昇	放射性反応、溶出	影響なし	表面にバイオフィルムの形成	放射線分解、化学反応、有機物反応でのガス発生	ガス状あるいは溶存状態での拡散移行
廃棄体容器内の充填材(モルタル)	周辺岩盤温度	局地的な動水勾配による地下水流動場(亀裂媒体	力学的特性の劣化、ひび割れ発生、ガスの透過	水和反応	影響なし	表面のバイオフィルムの形成あるいはバルクの固まり形成	---	バルクとしての拡散あるいは二相流としての亀裂内移行
廃棄体容器(鋼製パッケージ	周辺岩盤温度	局地的な動水勾配による地下水流動場(亀裂媒体	力学的な損傷・亀裂発生	無酸素腐食	影響なし	表面にバイオフィルムの形成	表面腐食による水素ガスの発生	拡散あるいは亀裂内の溶存ガスの移行
パッケージ間充填材(モルタル)	周辺岩盤温度	局地的な動水勾配による地下水流動場(亀裂媒体	力学的特性の劣化・亀裂発生	水和反応と溶出による高 pH 環境形成	影響なし	安定した微生物群	---	バルクとしての拡散あるいは二相流としての亀裂内移行
コンクリート製支保工・補強工(ロックボルト)	周辺岩盤温度	局地的な地下水流動場(劣化による高透水ゾーン形成)	力学物性の劣化による低下	成分の浸出・劣化による化学環境場の変化	影響なし	周辺環境の安定した微生物群の存在	ロックボルトの腐食 H_2 の発生	ガス状での拡散あるいは溶存状態で移行
埋戻(コンクリート)	周辺岩盤温度	局地的な動水勾配による地下水流動場(亀裂媒体)	力学的特性の劣化(強度部材の喪失)、鉄筋の腐食膨張(破壊)	水和反応と溶出による高 pH 環境形成、鉄筋の腐食生成物	影響なし	安定した微生物群	鉄筋の腐食による水素の発生	バルクとしての拡散あるいは二相流としての亀裂内移行
EDZ	周辺岩盤温度	移流場 局地的な動水勾配の場	周辺の岩盤応力場	高 pH 環境での鉱物反応場	影響なし	周辺環境の安定した微生物群の存在	---	溶存状態での移流状態、断続的なガス移行状態

3) グループ 1 およびグループ 4 の安全機能の展開

グループ 1 を対象とした安全機能の展開を、状態変化表での段階を考慮し、表 2.3.1-10 に整理した。グループ 1 の放射性核種移行シナリオに対するバリアとして重要な役割を担っているのは、ベントナイト緩衝材である。その他の安全機能は、特に設計上考慮したものでなく、構成要素が本来有する特性による化学的な環境となる。例えば、腐食生成物は還元環境に寄与し、核種を収着する機能があり、セメント系材料は高 pH 環境を生み出す。

表 2.3.1-10 グループ 1 の安全機能の展開

要素	定置～閉鎖	多重バリアによる核種閉じ込め(飽和からベントナイト緩衝材の機能喪失まで)	天然バリアによる核種閉じ込め
廃棄体 (ドラム缶、キャニスター)	核種閉じこめ	還元雰囲気*	還元雰囲気*
廃棄体内充填材 (モルタル)	廃棄体固定	化学環境*	化学環境*
廃棄体パッケージ (炭素鋼)	耐久性	還元雰囲気*	還元雰囲気*
パッケージ間充填材 (モルタル)	固定	化学環境*	化学環境*
鉄筋コンクリートピット	安定性	化学環境*	化学環境*
ベントナイト緩衝材	－	・低透水性 ・力学・化学的緩 衝性 ・核種収着性 ・自己修復性	
埋戻し材 (コンクリート)	安定性	化学環境*	化学環境*
支保工 (コンクリート)	安定性	化学環境*	化学環境*
掘削影響領域	－	核種収着性	核種収着性

グループ 4 を対象とした安全機能の展開を表 2.3.1-11 に整理して示す。グループ 4 では、ベントナイト緩衝材のように、具現化したバリアを設置していないが、構成要素本来有する特性に応じた安全機能が存在する。

表 2.3.1-11 グループ 4 の安全機能の展開

要素	定置～閉鎖	多重バリアによる核種閉じ込め
廃棄体 (ドラム缶、キャニスター)	核種閉じこめ	還元雰囲気*
廃棄体内充填材 (モルタル)	廃棄体固定	化学環境*
廃棄体パッケージ (炭素鋼)	耐久性	還元雰囲気*
パッケージ間充填材 (モルタル)	固定	化学環境*
埋戻し材 (コンクリート)	安定性	化学環境*
支保工 (コンクリート)	安定性	化学環境*
掘削影響領域	－	核種収着性

4）グループ 1 およびグループ 4 の統合 FEP 関連図の作成

a. 統合 FEP の導入理由

TRU 処分において、ガス移行挙動を基本シナリオとして評価するには、シナリオに蓋然性と網羅性が求められる。従前の FEP からスタートするシナリオ構築方法では、FEP 相互の順序や関係、とくに時系列な状態変化との関連を示すことが困難であった。本検討では、人工バリアシステムの状態変化の記述の中で、特にガス挙動に関する特質・プロセス・事象（FEP）を網羅的に抽出し、それらを安全評価シナリオ構築の観点から「統合 FEP」として整理することとした。

b. 統合 FEP 関連図作成の目的

安全評価上着目する単位（例えば、ガスソースやガス移行媒体）ごとに整理した統合 FEP を、状態変化の各段階において、ガス移行と核種移行の流れに沿った関連図として作成することで、ガス挙動に関わるそれぞれの媒体中でのプロセスを「モデル・チェーン」として構築することができる。また、統合 FEP を構成する個々の FEP を吟味することで、モデル設定時の簡略化や関連するパラメータの特定および不確実性について分析することが可能となる。第 2 次 TRU レポートを含めこれまでの検討では、このような試みはなされていない。

c. 統合 FEP の単位

統合 FEP の単位は、例えばグループ 1，2 を対象とした場合、図 2.3.1-9 に示す項目から構成されるとした。通常 FEP は、事象、プロセス、特質から構成されるが、ここでの統合 FEP は、評価の構成要素を単位として、核種移行とガス移行に関わる FEP をグループ化した。グループ 4 では、これらの統合 FEP の単位からベントナイト緩衝材がなくなった場合に相当する。（埋戻し材が含まれていないので、最終版には追記する）

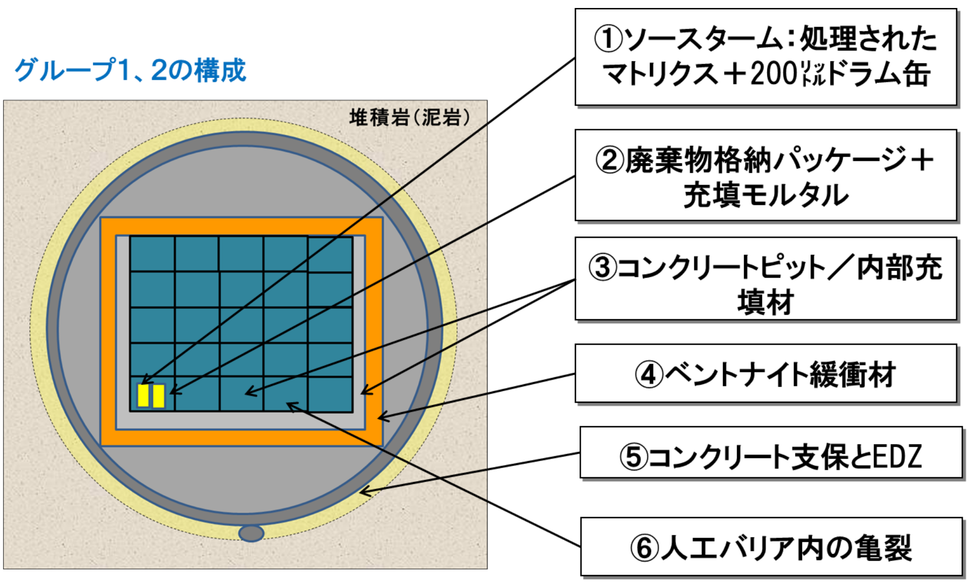


図 2.3.1-9 統合 FEP の要素

① ソースターム

ソースタームの統合 FEP は、図 2.3.1-10 に示すガス発生に関わる FEP と核種漏洩に関わる FEP に分類することができる。廃棄体からの核種漏洩に比較し、ガス発生に関わる FEP が数多く存在することがわかる。TRU レポートでは、このような多様なガス発生と消失について、「ガス発生」という一つの FEP で取り扱っていた。表中、右図のガス発生速度の図は、第 2 次 TRU レポートに記載されたグループ 2 のものである。

記号	要素FEP / FEP グループ
TS 1 ガス発生	金属腐食によるガス発生(H_2) 放射線分解によるガス発生(H_2) 微生物活動によるガス発生(CO_2, CH_4) 放射能崩壊によるガス発生(He) 有機物からのガス発生(CO_2, CH_4) 微生物活動によるガス消失 化学反応によるガス消失(収着を含む) 間隙水への溶解によるガス消失
TS 2 核種漏洩	廃棄体からの核種溶出(溶解・溶脱) 化学反応による核種の消失(沈殿、収着)

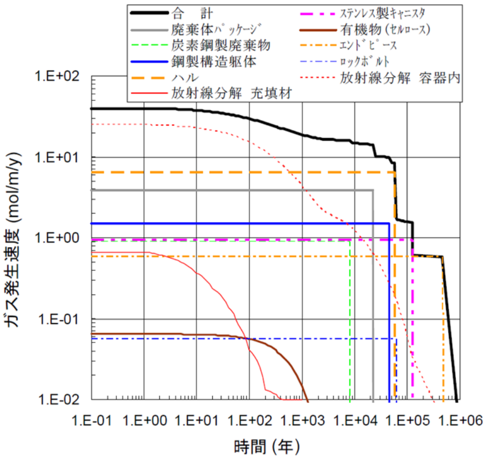


図 2.3.1-10 ソースタームに関わる統合 FEP とガス発生速度

② 廃棄体パッケージ

廃棄体パッケージは、廃棄体（鋼製 200 ﾘｯﾄﾙドラム缶）を格納し、間隙をモルタルで充填した鋼製容器である。統合 FEP は、図 2.3.1-11 に示すガス挙動と核種挙動に関わる FEP から構成される。

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

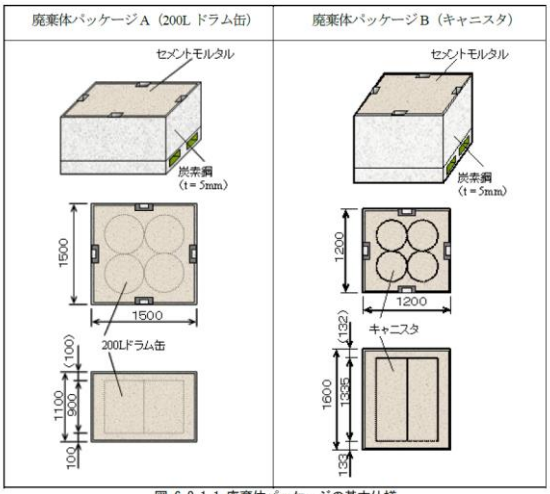


図 6.2.1-1 廃棄体パッケージの基本仕様
（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005a を編集，一部修正）

図 2.3.1-11 廃棄体パッケージの統合 FEP と廃棄体パッケージの概念図

③　コンクリートピットと充填材

ピットは鉄筋コンクリート、充填材はセメントモルタルである。図 2.3.1-12 に示す様に、施工直後は、ひび割れもなく密実な状態にあるが、時間の経過とともにひび割れ（応力ひび割れ）が発生する。

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

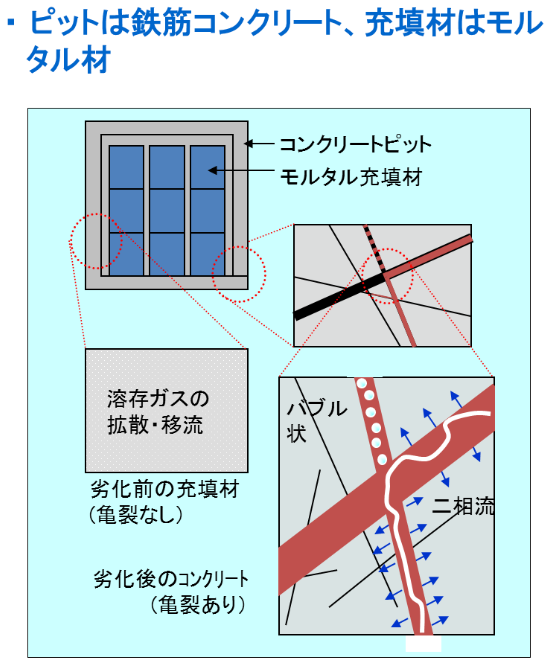


図 2.3.1-12　コンクリートピットと充填材に関する統合 FEP とひび割れの概念図

④ ベントナイト緩衝材

ベントナイト緩衝材は、グループ１と２に設置される。関連する FEP には、図 2.3.1-13 に示す媒体そのもの劣化・変質に伴う FEP とガス挙動、核種挙動に関わる FEP に分類される。

記号	要素FEPs/FEPグループ
TBB 0	ベントナイトの健全性/高pHプリュームによるバリア機能の劣化 （可塑性の喪失、ガス破過後の亀裂）
TBB 1 ベントナイト中のガス挙動	拡散によるガスの移行 移流によるガスの移行（ガス破過） 溶解によるガスの消失 化学反応によるガスの消失 微生物活動によるガスの消失 鉱物離溶によるガスの発生 化学反応によるガスの発生 微生物活動によるガスの発生 放射線分解によるガスの発生 放射能崩壊によるガスの発生
TBB 2 ベントナイト中の核種挙動	押し出された汚染地下水の移行 化学反応による溶存核種の消滅 崩壊による核種の消滅 化学反応による溶存核種の生成 崩壊による溶存核種の生成 核種と微生物との会合

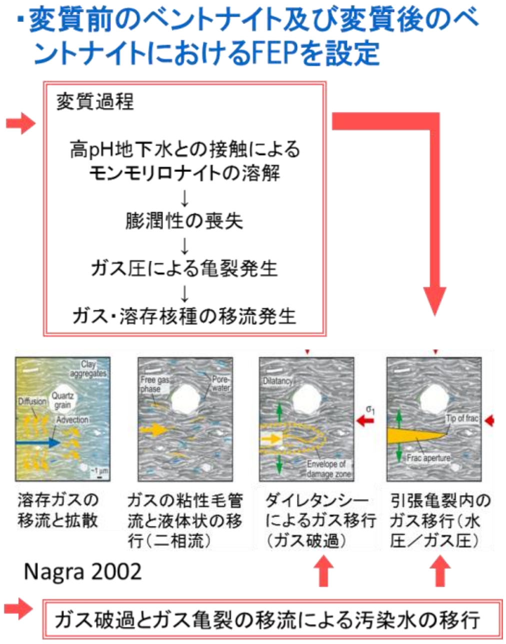


図 2.3.1-13　ベントナイト緩衝材に関する統合 FEP

⑤ 支保工と EDZ 内

鉄筋コンクリート製の支保工と岩盤掘削影響領域（EDZ）でのガス移行と核種移行に関わる FEP を図 2.3.1-14 に整理して示す。

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

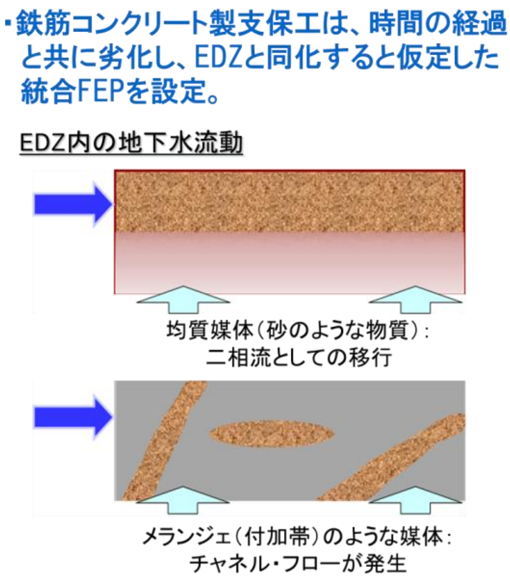


図 2.3.1-14　支保工と EDZ 内での統合 FEP

⑥ 人工バリア内の亀裂

ベントナイト緩衝材の内部は、応力ひび割れ等でひび割れが卓越し、亀裂媒体となるが、緩衝材が機能を維持している段階では、物質移動は拡散支配となる。ベントナイトの劣化に伴い、バリア内全体が亀裂媒体と変化していき、物質移行としては、移流・拡散場となる。

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

図 2.3.1-15　人工バリア内の亀裂に着目した統合 FEP

d. 統合 FEP 関連図の作成

(a) グループ 1 の統合 FEP 関連図

グループ 1 の統合 FEP 相互の関連は、図 2.3.1-16 に示す 6 つの統合 FEP の単位と埋戻材を含めた単位で構成される。この関連図を、状態変化表に従い、分解していく（各段階での統合 FEP 関連図）ことで、放射性核種とガス移行挙動に関わるシナリオを構築することが可能となる。

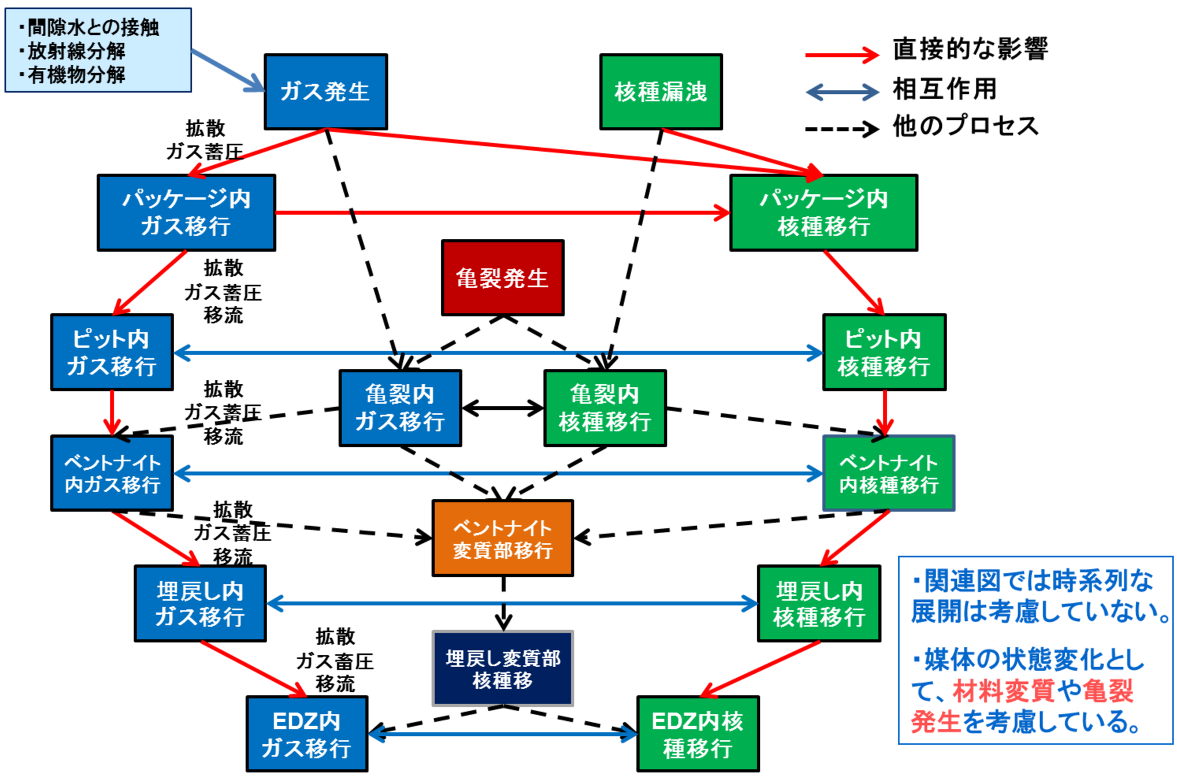


図 2.3.1-16　グループ 1 の統合 FEP 関連図

a)　埋戻しから飽和前の段階での統合 FEP 関連図

埋戻しから廃棄体内の飽和までの段階では、周辺岩盤から還元性の地下水の浸透により、鋼製パッケージ、ドラム缶等の金属廃棄物等の腐食によるガスが発生する。廃棄体はドラム缶に閉じ込められているため、浸透水との接触が抑制され、放射性物質は充填材とともに閉じ込められた状態にある。このような段階での統合 FEP の関連図を図 2.3.1-17 に示す。この段階では、腐食による非放射性水素ガスが主として発生し、間隙水に溶解、あるいは拡散により EDZ に放出される。

b)　放射性核種の漏洩から人工バリア機能喪失までの段階における統合 FEP 関連図

この段階では、ドラム缶の腐食により、廃棄体内部に間隙水が浸透し、放射性核種の間隙水への溶解による漏えいが開始するが、ベントナイト緩衝材の低透水性機能が維持されていることもあり、人工バリア内での物質移行は拡散支配となっている。ドラム缶やパッケージの腐食によるガス発生とともに、微生物分解による非放射性、放射性ガスの発生が活発になる。ガス発生は、廃棄体だけでなく、ベントナイトなど有機物を含む物質、鉄筋コンクリートの鉄筋の腐食によるガスの発生など、系全体でガスが発生する。また、この段階では、図 2.3.1-18 に示すようにバリア内の亀裂発生に伴う移行形態が生じる（亀裂媒体中の二相流、拡散）

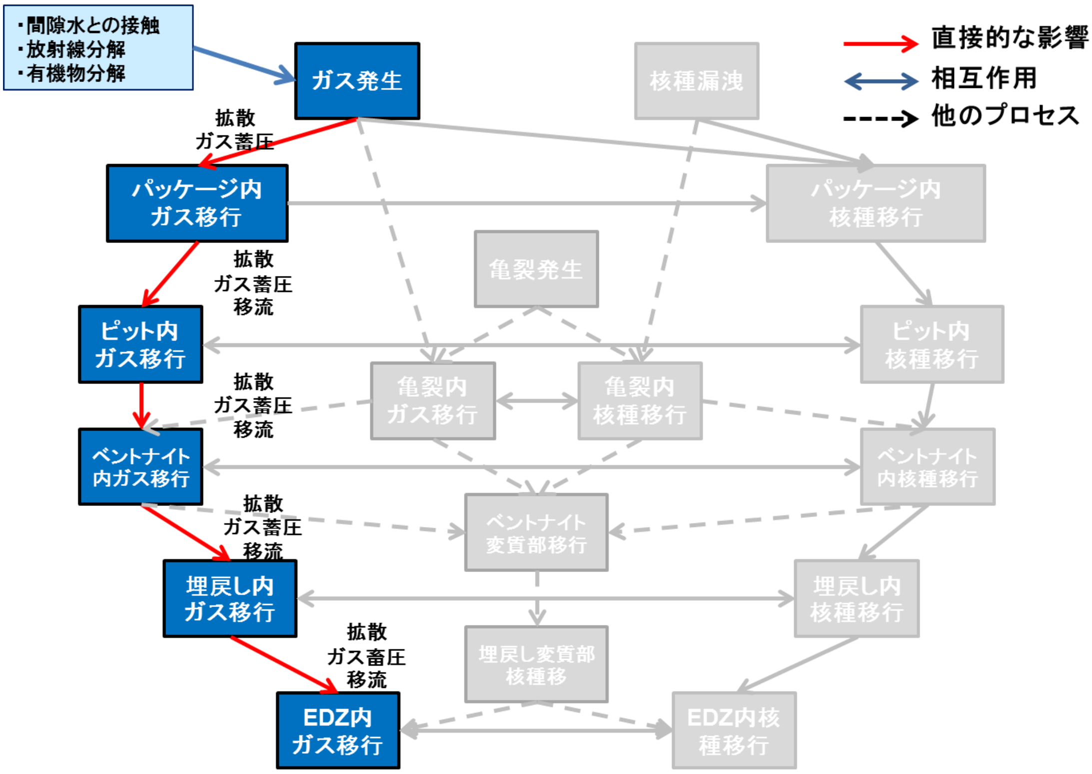


図 2.3.1-17　埋戻しから廃棄体飽和前までの段階での統合 FEP 関連図

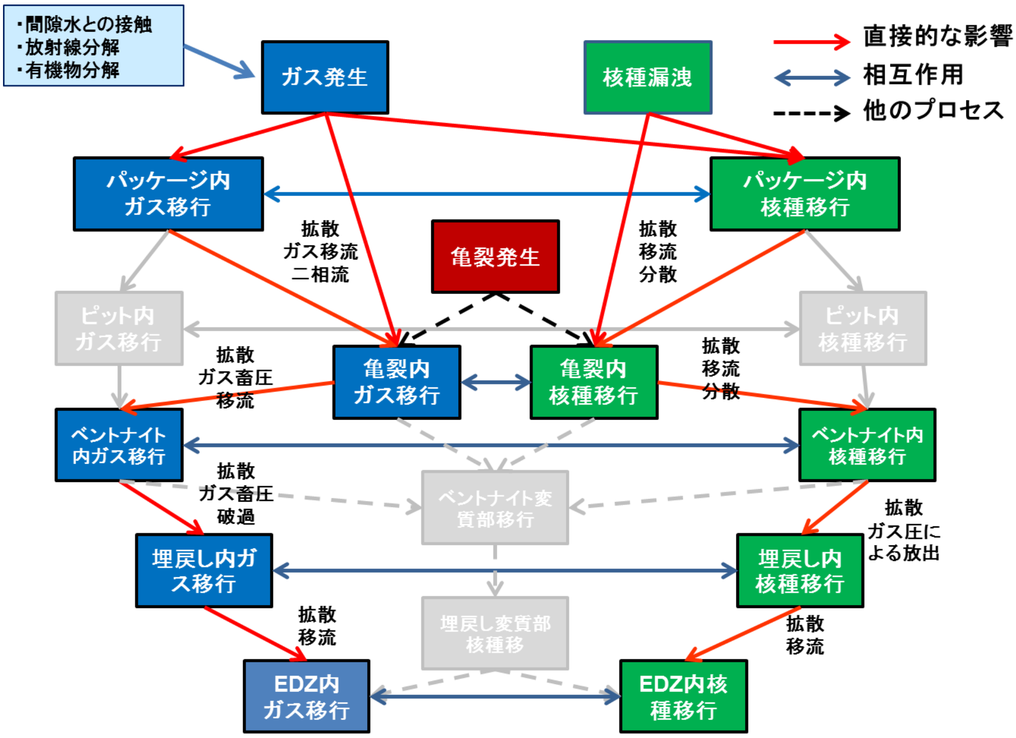


図 2.3.1-18　核種漏洩開始から人工バリア機能喪失までの段階での統合 FEP 関連図

c)　ベントナイト機能喪失後天然バリアによる放射性核種移行抑制段階での統合 FEP 関連図

ベントナイトが劣化・変質により膨潤性が低下することで、低透水バリアとしての安全機能を喪失した段階では、その内部は、図 2.3.1-19 に示す亀裂媒体となっており、ベントナイトの変質部を放射性核種とガスが移流・拡散で移行することになる。

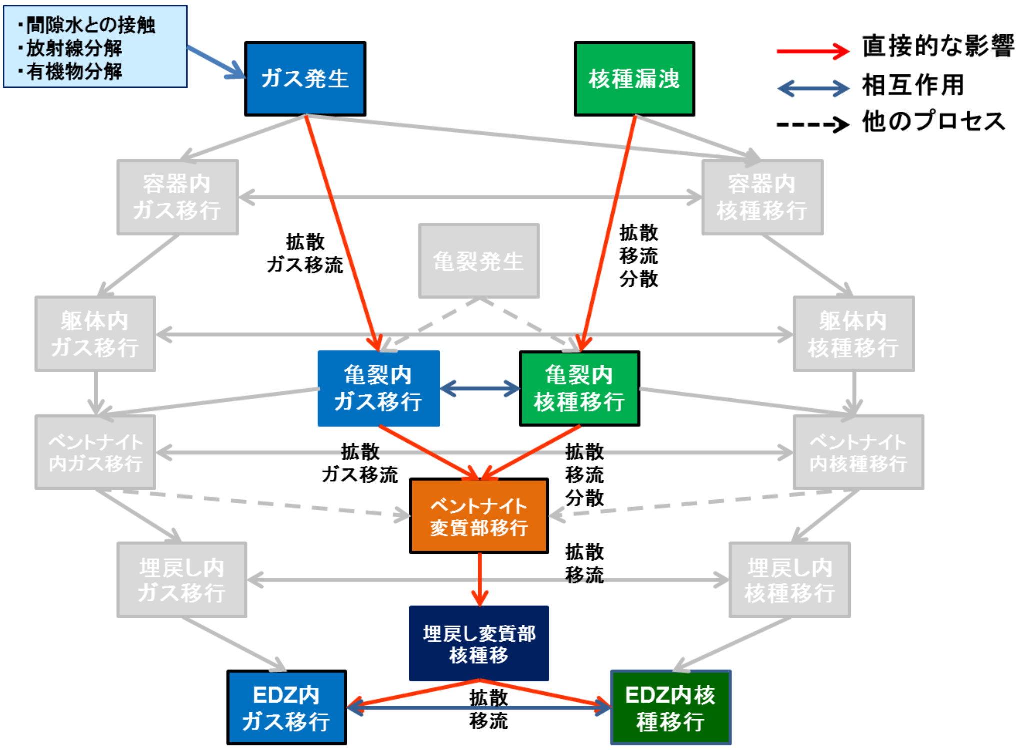


図 2.3.1-19　天然バリアでの核種移行抑制段階における統合 FEP 関連図

(b) グループ 4 の統合 FEP 関連図の作成

グループ 4 は、ベントナイト緩衝材のない状態での統合 FEP 相互の関連を図 2.3.1-20 に示す。関連図は、5 つの統合 FEP の単位と埋戻しの単位から構成される。この関連図をベースとして、状態変化表作成で考慮した埋戻し以降の 3 つの段階での関連図を作成する。

a)　埋戻しから飽和前の段階での統合 FEP 関連図

埋戻しにより周辺岩盤からの還元性地下水が処分坑道内に浸透を開始し、廃棄体パッケージとの接触による腐食ガスが発生する。ガスは浸透水や間隙水に溶存、あるいはガス状で、図 2.3.1-21 に示すように主として拡散で EDZ に移行する。廃棄体はドラム缶に密閉されていることから、ドラム缶が腐食で閉じ込め機能を喪失するまでは、放射性核種は閉じ込められた状態にある。

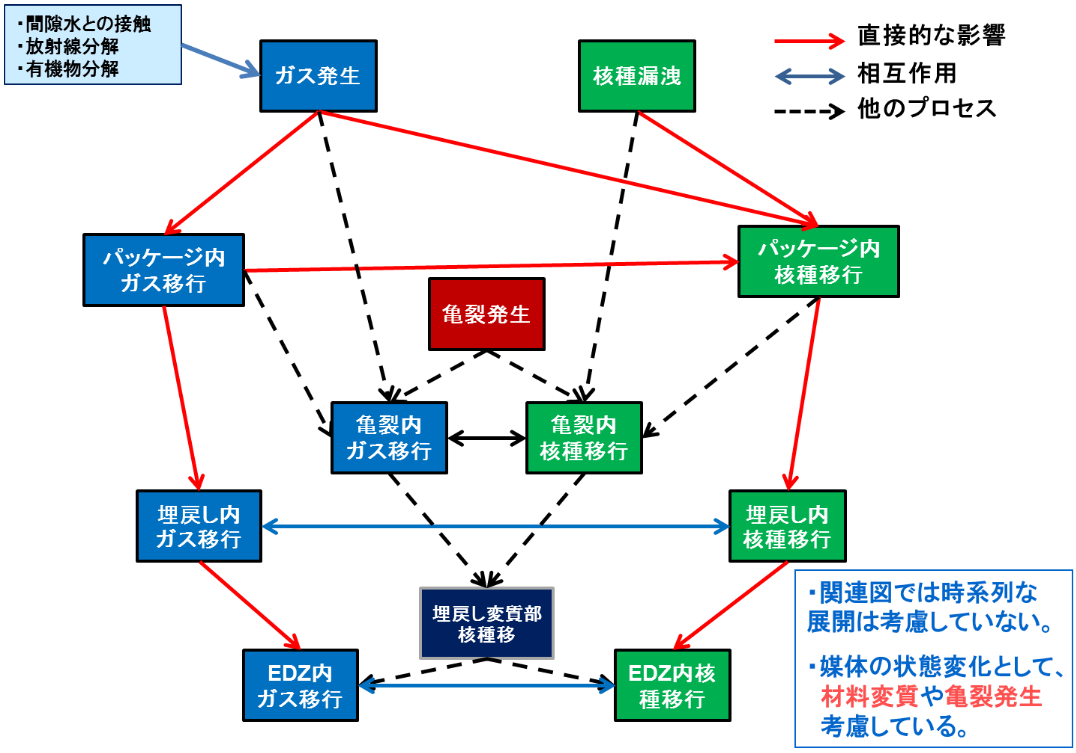


図 2.3.1-20　グループ 4 の統合 FEP 相互の関連図

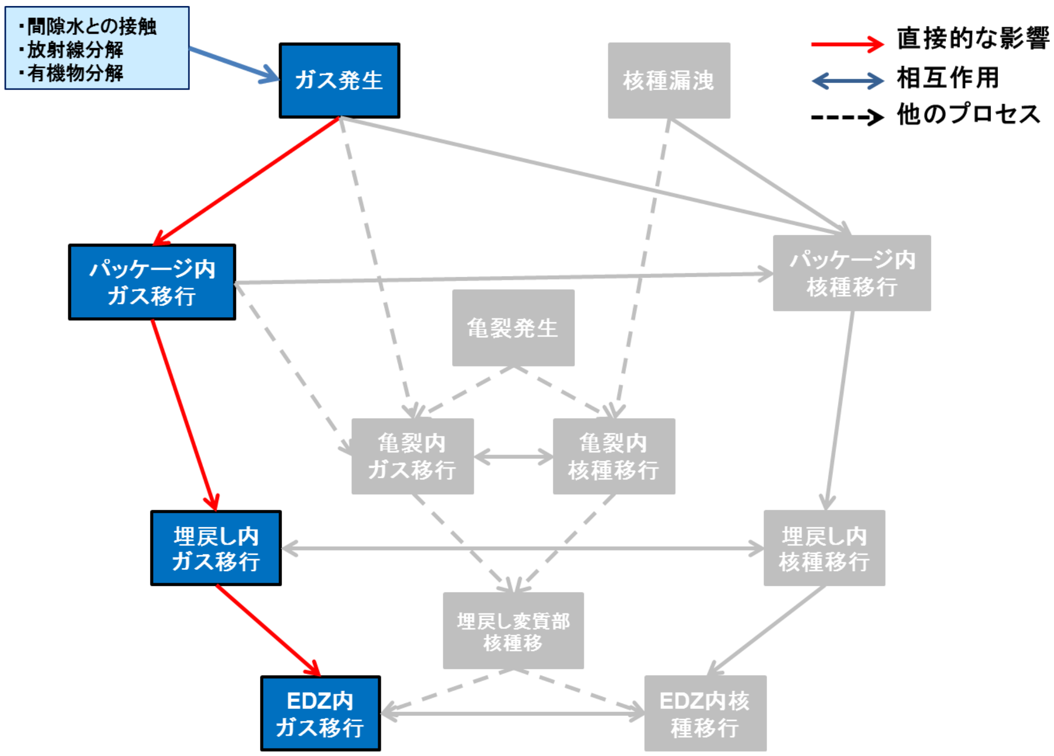


図 2.3.1-21　埋戻しから廃棄体飽和前の段階での統合 FEP 関連図

b)　放射性核種の放出段階（廃棄体パッケージ内は密実な状態を維持）

ドラム缶の腐食により、間隙水が廃棄体と接触し、放射性核種の溶解が開始する段階である。しかし、以降媒体としては、パッケージ内の密実な充填材は健全で、核種移行としては拡散に近い状態で移動すると推定される。

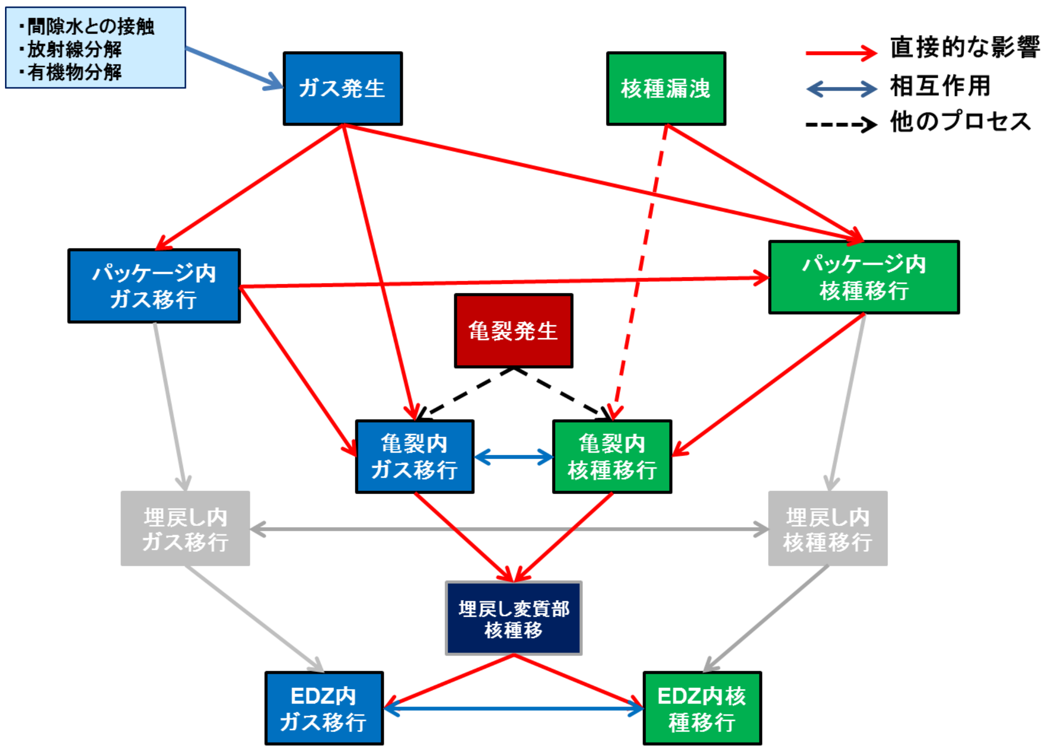


図 2.3.1-22　放射性核種の放出段階（廃棄体パッケージ内は健全）での統合 FEP 関連図

c)　天然バリアによる放射性核種移行抑制段階

この段階では、図 2.3.1-23 に示すように、パッケージ内の充填材も劣化・変質等で亀裂が発生し、処分坑道内全体が亀裂媒体、あるいは多孔質媒体に変化することで、物質移行からは、移流・拡散場となる。ガスは核種ともに間隙水に溶解する、あるいはガス状で亀裂媒体を移行する。

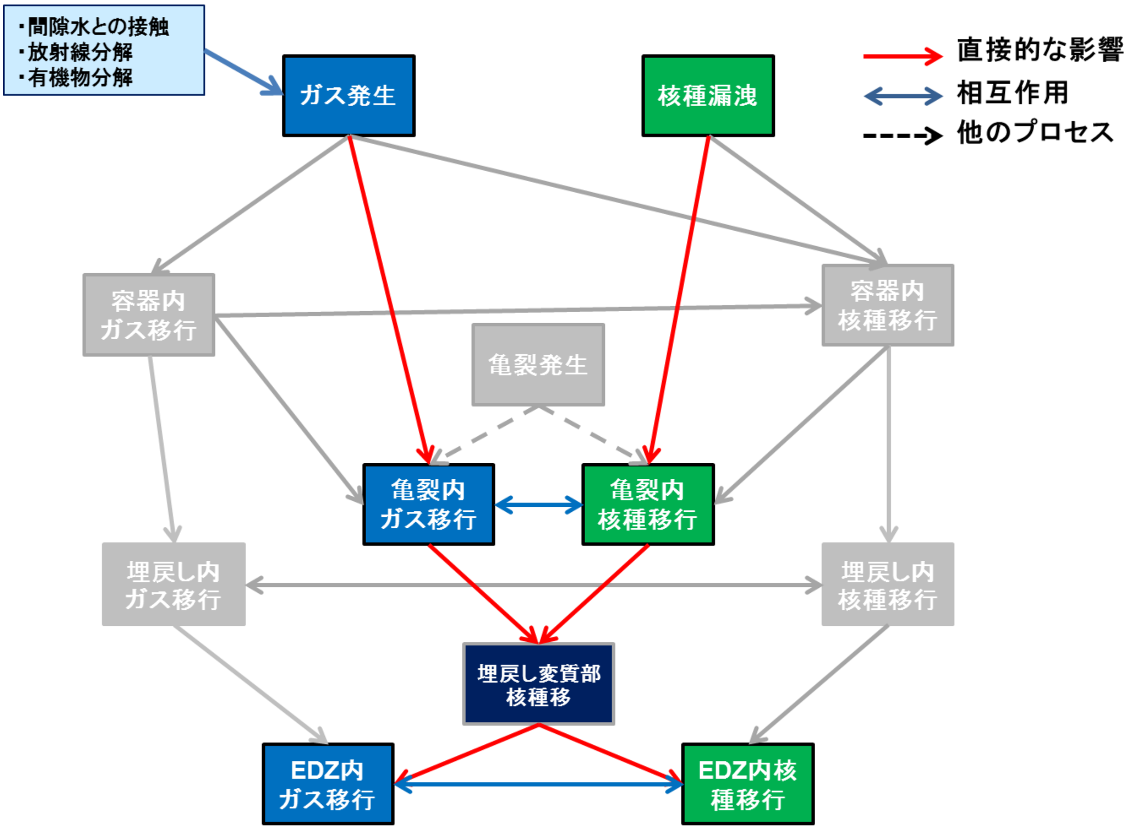


図 2.3.1-23　天然バリアによる放射性核種移行抑制段階における統合 FEP 関連図

(2) シナリオ整理シートの作成

シナリオ整理シートは、最も蓋然性の高いと推定されるニアフィールドの段階的な状態変化表とガス移行シナリオ上考慮すべき統合 FEP の関連図を結合することで、安全評価に関わるシナリオを設定するために作成する。構造的には、このシナリオ整理シートに背面には、状態変化表、根拠書が存在する。

1) グループ 1 のシナリオ整理シートと不確実性を考慮したシナリオ設定

グループ 1 を対象としたシナリオ整理シートを

図 2.3.1-24 に示す。シナリオ整理シートには、5 つの段階での統合 FEP 関連図と処分坑道内の各部材の状態変化、およびガス発生に関わる状態、評価ケースについて整理した。評価ケースについては、これまでの検討や知見の集約から、発生するガスの量とガス移行媒体の状態を考慮し、専門家的な判断で記述した。

シナリオ整理シートをベースに、蓋然性を考慮してグループ 1 を対象とした 3 つのガス移行シナリオを設定した。蓋然性の定量的な評価はできていないが、リスク論的なシナリオ設定の考え方[23]を踏襲すると、ガスの発生と移行は確実に発生する現象（蓋然性の高い現象）として「基本シナリオ」と定義し、基本シナリオで着目する現象が、ガスの発生速度や量および媒体の密度や特性に影響を受けるシナリオとして「変動シナリオ」を設定した。ガスの破過現象などはこのシナリオに含まれる。また、破過などの現象後に、ベントナイト緩衝材が安全機能を喪失するような否定できない現象を「稀頻度シナリオ」として設定した。

表 2.3.1-12　グループ 1 のガス移行シナリオ分類と関連する不確実性

ガスシナリオ	シナリオの記述	不確実性
基本シナリオ	腐食、放射線分解、有機物の微生物分解等で発生した非放射性/放射性ガスは、EBS内の間隙水に溶解し、放射性核種とともに拡散、あるいはガス状で移行する。ベントナイト緩衝材が飽和し、機能を維持している期間中は、ベントナイトと充填材の界面での蓄圧、あるいは二相流として緩衝材外部に移行し、埋戻材を通じて外部に移行する。変質によりベントナイトの膨潤性が喪失した後、EBS内は亀裂媒体あるいは多孔質媒体となり、ガスは主として二相流で放射性核種とともにEBS外部に放出される。	・ガスソースは単純で、量も少ないことから、ガス発生量に関する不確実性は小さい。 ・ベントナイト緩衝材中での蓄圧量は少ないと見込んでいるため、ガスは溶存状態、気液二相流で移行する。
変動シナリオ	ガス発生速度・量が増加することで、ガス状での移行モードが卓越し、ベントナイト緩衝材の内側に存在する空隙に蓄圧され、ベントナイト緩衝材内での破過が発生し、放射性核種を含む汚染水を放射性ガスとともに脈動的に外部に押し出される。破過後はベントナイト緩衝材は自己修復性を発揮し、機能を回復する。	・破過のメカニズム、破過による汚染間隙水の放出メカニズムはよく分かっていない(1次元要素試験での知見であり、実規模での挙動は明らかにされていない)。
稀頻度シナリオ	ベントナイト緩衝材が破過による高濃度のpH間隙水の影響で変質し、膨潤性を喪失することで、早期の段階から放射性核種がEBS外部に放出される。 （周辺の地質環境条件が低透水性岩盤、あるいは動水勾配が限りなく小さい場合） ・ガス状としてEDZを移行し、地表への短経路を構築する。	・Caを大量に含む高pHの間隙水の移行によるベントナイトへの影響はよく知られていない。

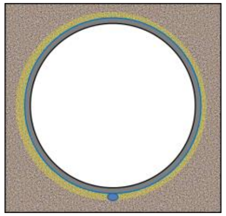
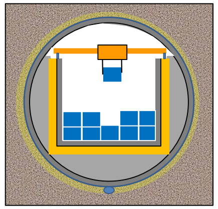
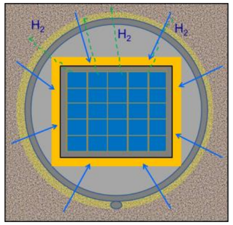
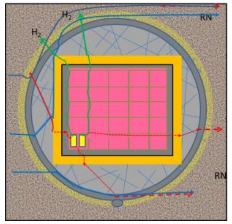
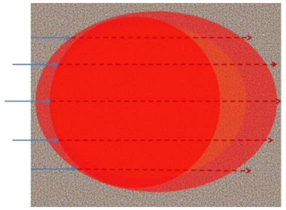
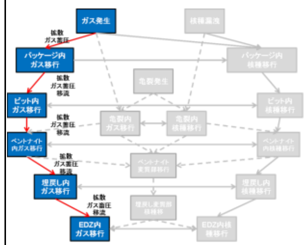
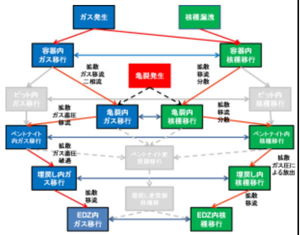
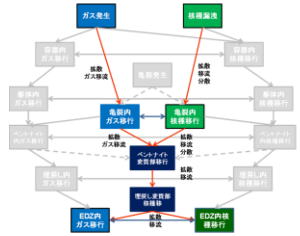
変化の段階	掘削直後	廃棄体定置中：水との接触防止	埋戻し～内部飽和	ベントナイト機能喪失まで	天然バリアでの閉じ込め
状態イメージ					
統合 FEP 関連図	―	―			
廃棄体				核種溶出、ガス発生	
ドラム缶と充填材			腐食⇒腐食膨張・ガス発生	腐食生成物	
炭素鋼パッケージ+充填			腐食⇒腐食膨張・ガス発生	腐食生成物	
ピット内部充填					
コンクリートピット			亀裂発生		
ベントナイト緩衝材					
コンクリート支保工			亀裂発生		
EDZ+岩盤	不飽和				
ガス 発生部位		支保工鉄筋	支保工鉄筋、廃棄体パッケージ、ドラム缶	コンクリートピット、廃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

図 2.3.1-24　グループ 1 のシナリオ整理シート

2) グループ４のシナリオ整理シートと不確実性を考慮したシナリオ設定

グループ４のシナリオ整理シートを図 2.3.1-25 に示す。５段階の状態変化表に従い関連する統合 FEP 関連図を配置し、対象とする処分場構成部位の状態を簡略化して示している。評価ケースでのガス移行モードや核種移行モード、移行モデルの設定では、これまでの検討性かを受け、専門的な判断で記述した。

シナリオ整理シートに基づく蓋然性を考慮したシナリオ分類と関連する不確実性を表 2.3.1-13 に整理した。シナリオ分類はグループ１と同様な考え方を用いた。グループ４では、ベントナイト緩衝材を用いていないこともあり、基本的には坑道内に発生する亀裂に沿ってガスがガス状あるいは二相流で移行することになるが、充填材が密実で、微細な亀裂の場合、ガスが蓄圧し、脈動的な核種の放出モードになる可能性がある[10]。このような現象を変動シナリオとして分類した。稀頻度シナリオは、周辺岩盤の特性に対応して発生する現象とした。このようなシナリオについては、海外で特に検討されている[10]。

表 2.3.1-13　グループ４のガス移行シナリオ分類と関連する不確実性

ガスシナリオ	シナリオの記述	不確実性
基本シナリオ	腐食、放射線分解、有機物の微生物分解等で発生した非放射性/放射性ガスは、飽和したEBS内の放射性核種を含む間隙水に溶解した状態で移流・拡散・分散で移行、気液二相流として移行、あるいはガス状で移行する。移行媒体は、亀裂媒体あるいは多孔質媒体となる。	・廃棄物は多種多様で、ガスソースは複雑となることから、ガス発生量や速度に対する不確実性が大きい。特に有機物の微生物分解によるガスの発生とその消費に関する知見は少ない。
変動シナリオ	ガス発生速度・量が増加することで、ガス状での移行モードが卓越し、亀裂媒体内に存在する空隙に蓄圧され、ガス突出とともに放射性核種を含む汚染水が脈動的に外部に押し出される。	・亀裂媒体中のガスの蓄圧、突出現象に関する知見は少ない。亀裂中には溶出したCaが沈着していることもあり、蓄圧、突出プロセスは複雑な系になる。
稀頻度シナリオ	(周辺岩盤の特性に依存するシナリオ) ①低透水性岩盤の場合、ニアフィールドに蓄圧したガスが周辺岩盤に亀裂を引き起こし、新たな核種移行経路を構築する。 ②動水勾配が限りなく小さい場合、ニアフィールドに放出されたガスが、EDZに沿って移行し、アクセス坑道を経て地表に達する短経路を形成する。	・二相流で移行したガスが圧力の低下でガスが分離され、バブルとして蓄圧あるいは地表に達する現象に関する知見は少ない。(フランス、スイスでは変動シナリオとして取り扱い)

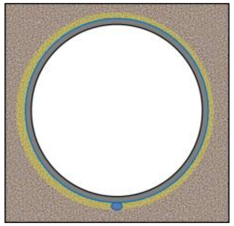
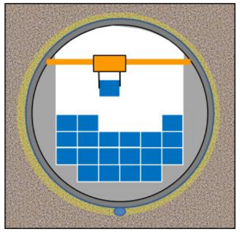
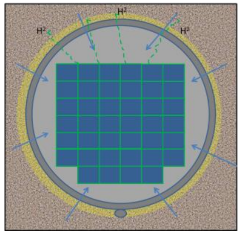
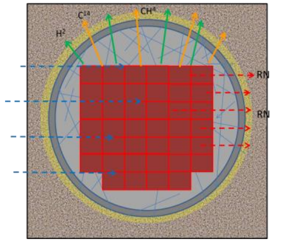
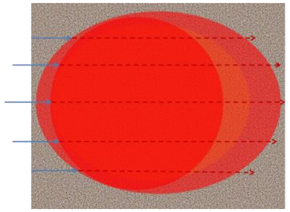
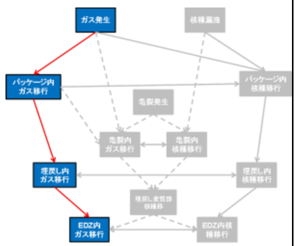
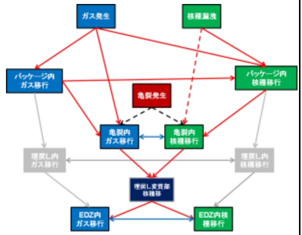
変化の段階	掘削直後	廃棄体定置中：水との接触防止	埋戻し～内部飽和	廃棄体から核種放出	天然バリアでの閉じ込め
状態イメージ					
統合 FEP 関連図	―	―			
廃棄物				核種溶出、ガス発生	
ドラム缶と充填材			腐食⇒腐食膨張・ガス発生	腐食生成物	
炭素鋼パッケージ			腐食⇒腐食膨張・ガス発生	腐食生成物	
充填モルタル				亀裂発生	
埋戻しコンクリート				亀裂発生	
コンクリート支保工				亀裂発生	
EDZ+岩盤	不飽和				
ガス 発生部位	地表から酸素を含む大気の取り入れ	大気がコンクリート中に浸入し不飽和領域を形成	支保工鉄筋、廃棄体パッケージ、ド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

図 2.3.1-25　グループ４のシナリオ整理シート

(3) 予備的安全評価における不確実性の検討と技術課題の抽出

昨年度まで検討を進めてきたグループ１と４のガス移行に係るシナリオ設定では、不確実性の要因として、ガスの発生速度と量、廃棄体パッケージの機能喪失時期、坑道内の媒体の状況を取り上げた。これらに関しての安全評価上の扱いについて、以下に、不確実性の共通点と特異点を分析し、技術課題を取りまとめる。

1）不確実性の共通点と特異点

各グループに共通する不確実性とグループ個別の不確実性を整理し、表 2.3.1-14 に示す。

各グループで共通している不確実性は、以下の 8 項目である。この中には、シナリオだけでなく、ガス発生や影響評価に関わる項目も含まれる。

① 破過によるガスの突出、汚染水の放出メカニズム
② 有機物の微生物分解によるガス発生メカニズムとモデル化について
③ 金属腐食における表面積の算定方法
④ 還元、無酸素、高 pH、塩水などの複合環境下でのガス発生メカニズム
⑥ 周辺の地質環境によるガス移行シナリオの変化
⑦ 廃棄体容器の初期の閉じ込め性の評価
⑧ セメントモルタル充填物のガス発生と移行に与える影響評価
⑨ ガス挙動に関する試験における形状や寸法の影響
⑩ ガスの消費メカニズムとモデル化
⑪ 腐食二次鉱物の核種移行への影響
⑫ シナリオの各段階への移行に関わる時間の設定（実施できていない事項）

グループごとの不確実性に関しては、ガス発生メカニズムに関わる項目が多い。これらの不確実性に関しては、2.3.3　項（「TRU 廃棄物処分概念に係るガス発生メカニズム等に関する検討」で記述する。

表 2.3.1-14　各グループの不確実性の共通点と特異点

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

2) 不確実性に関わる技術課題

前節で抽出したグループ共通の不確実性について、技術課題として図 2.3.1-26 に整理して示す。それぞれの不確実性に対する技術課題は以下にまとめることができる。

① 破過、汚染水放出のモデル化
② 有機物の微生物分解によるガス発生メカニズムとモデル化
③ 金属腐食に関する表面積の算定
④ 複合環境下でのガス発生メカニズムとモデル化
⑤ ガス移行挙動と核種移行挙動評価における媒体の異方性の扱い
⑥ 処分坑道周辺の地質環境との関連によるガス移行シナリオ
⑦ 廃棄物容器の閉じ込め性能の評価
⑧ 充填モルタルの特性によるガス移行挙動への影響
⑨ ガス消費のメカニズムとモデル化
⑩ ガス挙動試験における形状や寸法の影響
⑪ 腐食二次鉱物の核種移行への影響
⑫ 状態変遷における各段階の時間経過

図 2.3.1-26 共通的な不確実性に関わる技術課題

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

2.3.2　既存シナリオ整理シートにおける根拠の拡充

各グループの状態変化表作成、およびガス発生メカニズム検討で取得した知見を根拠書として整理する。今年度は、3.1.3 で整理した不確実性に関わる技術課題に着目し、微生物活動によるガス発生、放射性ガスの発生、周辺岩盤を考慮したガス移行挙動、ガス移行モデルおよびガス発生モデルに関する知見を取りまとめた。

(1) 微生物活動によるガス発生に関連する知見

微生物による有機物分解に関する最近の研究（Francis,2013[16]）では、以下の記述がある。「好気性、嫌気性の環境を問わず微生物の活動により、非放射性ガスである CO_2, N_2O, N_2, H_2, H_2S が発生するとともに、HT, $^{14}CO_2$, $^{14}CH_4$, CH_3T, $^{14}CH_3T$ 等の放射性ガスも発生する。一方、微生物は、水素ガスが存在する環境において、放射性ガスである $^{14}CO_2$ や $^{14}CH_4$ を消費する特性を有する。また、好気性雰囲気では、$^{14}CH_4$ を酸化により $^{14}CO_2$ に変換する作用もある。さらに、微生物は、ヨウ素やセシウムのメタン化を促進し、メチルヨウ素（$CH_3{}^{129}I$）や、$(CH_3)_2{}^{79}Se$、（CH_3）$_2{}^{79}Se_2$ を揮発性の物質に変換する働きがある。微生物の有機物分解により発生するガスは、放射性核種の溶解度や種形成に影響を与える」

第 2 次 TRU レポートにおける微生物の有機物分解によるガス発生は、JAEA の研究成果（嶺ら, 2000[15]）をもとに記述されている。嶺らは、地下水に含まれる有機物であるフミン酸とベントナイトに含まれる酢酸、TRU 廃棄物に含まれるセルロースを対象に、メタン生成細菌の活動による CO_2 と CH_4 の発生量を、温度とｐＨをパラメータに実験的に求め、その結果は以下にまとめられている。

> その結果、フミン酸の微生物分解にともなって発生するメタンの量は、定量下限値未満であるため、フミン酸はメタン生成細菌の炭素源になりにくいことを明らかにした。また、酢酸及びセルロースを使用した試験結果から培養液の pH が 7 から 10 と大きくなるにつれ、メタンの発生量が少なくなる、つまり、pH が高くなれば、メタン生成細菌の活性が低下することを明らかにした。
>
> したがって、処分施設においてセメント系材料の使用を想定した場合には、地球化学環境が pH=12.5 程度の高アルカリとなると考えられているため（Atkinson et al., 1988）、処分施設内部の地球化学環境が長期にわたって高アルカリに維持されれば、処分施設内部に持ち込まれたメタン生成細菌の活動にともなうメタン発生量はさらに少なくなると考えられる。
>
> 本研究では、メタンだけではなく、二酸化炭素の発生も確認されているが、二酸化炭素の発生量が pH の上昇にともなって減少することは確認できなかった。しかしながら、メタン生成細菌の活動にともなって発生する二酸化炭素の量については、メタンの発生量と同様に pH の上昇にともなって減少すると考えられる。

極めて透水性の低い粘性土内に構築される処分場や人工バリアシステムにおける微生物活動に

ついて取りまとめられた GRS レポート（2011）[17]では、微生物活動によるガスの発生と消費について最近の知見が取りまとめられている。ベントナイト中の微生物活動については、ベントナイトの有効粘土密度が重要な要因となる。密度が低いと間隙が多くなり、微生物活動が活動的となることが実験的に確かめられている。同様な実験により、SKB[9]では、緩衝材には 100%ベントナイトを用い、膨潤圧が 2MPa 以上とすることを設計指標として設定している。GRS レポートでは、さらに微生物活動として重要なものとして、「発酵によるガス発生」、「嫌気性メタンガスの発生」、「好気性のメタンによる酸化現象」があげられており、これらの活動により、ガスの発生（H_2, CH_4, CO_2, H_2S）とガスの消費（H_2, CH_4, CO_2）現象が起こることが紹介されている。

TRU や低中レベル廃棄物の地層処分の分野での微生物活動によるガス発生に関する研究は、あまり数多くない。発生のメカニズムに関しては、大気環境での好気性、嫌気性の微生物を対象とした実験や観測結果から吟味されている。微生物の活動は、周辺環境と活動媒体、およびその滋養物の存在に支配されるため、ガスの消費を含めた定量的な評価にはまだ研究が必要である。

(2) 放射性ガスに関わる知見

放射性ガスの発生に関して、第 2 次 TRU レポートでは、グループ２のハル・エンドピースに含まれる C_{14} が全て放射性の $^{14}CH_4$ になったとし、グループ３では、有機物が微生物分解で放射性 $^{14}CH_4$ ガスになったと仮定して発生量を求めており、いずれも被ばく線量の観点からは影響が小さいと結論している。しかし、これらの背景の実験データや知見については明示されていない。

例えば、NDA/RWMD/037 , 2010）[14]では、放射性トリチウム（T）と炭素（^{14}C）、および二酸化炭素（$^{14}CO_2$）とラドン（^{222}R） があげられている。さらに、微生物活動により揮発性として発生するセシウムやヨウ素がある。放射性トリチウムは、主として燃料を切断した金属腐食から発生する水素と結びついて（HT）発生する。トリチウムガスは半減期が短い（12.3 年）こともあり、その影響は、容器の設計等の工学的な対応で可能であるとしている。また、放射性 ^{14}C は、低中レベル廃棄物に着目すると、主として放射化金属、放射化グラファイトおよび有機物から発生する。このうち、有機物については、微生物による分解により発生する。このほかに、^{226}Ra の崩壊から発生する ^{222}R は、その半減期が 3.82 日と短いこともあり、影響は小さいと考えられている。

FORGE プロジェクト[10]では、金属腐食の水素ガスに着目した研究成果が取りまとめられ、放射性ガスの発生については言及していない。この背景には、FORGE に参加している各国における放射性ガスに関する評価では、いずれも影響が小さいとしているためと考えられる。

(3) 周辺岩盤との関係に着目したガス移行シナリオに関する知見

周辺岩盤を含めた全体系でのガス移行挙動に関連する文献は、数多く存在する（例えば、総括的安全評価書である（Nagra EN(2002)[11] , SKB SR-SITE(2002)[7], ANDRA Dossier(2005)[18], 個別のプロジェクトとして FORGE, 2010[10]）。それぞれの報告書で共通していることは、人工バリア内のガス発生と移行挙動に関して、ガスの発生源である廃棄物特性の把握とともに、サイトの固有の環境条件と処分場のレイアウトおよび人工バリアの構成要素が移

行挙動評価に不可欠との認識である。

FORGE では、ガスの移行媒体として亀裂性岩盤と堆積岩盤に分類し、特に低透水性である堆積岩盤を母岩とする国（フランス Oxford 層、スイス Opalinus Clay、ベルギーBloom Clay）では、人工バリアや処分場から放出されたガスが母岩に与える影響に焦点をあてた原位置試験（例えば、Nagra 技術レポート[13]）や解析評価がなされている（例えば、Nagra 技術レポート2004[12] ）。

また、英国の実施主体である NDA の Gas Status レポート[14]では、難透水性の堆積軟岩中でのガスの移行に触れ、Nagra,EN2002[11]に示されたガス移行モードに言及し、破過により岩盤が損傷することで放射性核種の放出増加を危惧している。こられの影響は、人工バリアや処分場の閉鎖の設計により低減することの可能性があると示唆している。NDA はサイト選定中であり、このレポートはこれまでの研究成果を英国の地質環境の観点から整理している。

前述した GRS レポートでは、母岩となる粘性土中での微生物活動によるガス発生に着目しており、ガスの蓄圧による母岩の亀裂発生（Fracturing）を考慮した処分場の位置、レイアウトを考慮すべきであると示唆している。また、粘性土では、有機炭素が含まれているため、微生物活動によりガスが発生している。

フランス ANDRA（Jean Talandier1 他、2006[19]）は、人工バリアから放出されるガスがアクセス坑道に沿って地表に達するシナリオを考慮しており、坑道周辺の掘削影響領域（EDZ）を通過するガスを抑制するプラグの設計と原位置での試験が進めている（ANDRA レポート[20]）。

(4) ガス移行挙動のモデリングに関する不確実性

ガス移行挙動のモデリングに関する多くの研究が報告されている（例えば、FORGE プロジェクト[10]）。これらの報告も反映し、前述の Gas Status レポートでは、今後明らかにすべき事項として以下の項目を記述している。

- アップスケール：試験室での要素試験レベルで取得されている様々なパラメータを用いて、10m 以上のスケールと異なる拘束条件を有する実規模施設のガス移行挙動を予測することの妥当性に関しての根拠が必要となる。例えば、ガス田など規模の大きな場所での挙動を推定する場合のパラメータやモデル化が参考になる。
- フィンガリング現象：これまでの試験等では、ガスの媒体への侵入は、フィンガリング現象が支配していると報告されている。このような現象をモデル化（要素試験レベルのスケール）する必要がある。
- 異方性：ガス移行媒体の多くは異方性の高い物質であり、特にガス移行はこの異方性に支配されることが知られている。このような異方性は、大規模なフィンガリングを発生すると推定されるため、処分場を含めた周辺の地質構造のモデル化が必要となる。
- 不確実性への対応：着目するガス移行モデルにおいて、どの部位、どの時間帯において移行経路に不確実性があるかについて明らかにすることで、評価結果の信頼度が高まる。
- 処分場スケールでの解析：周辺岩盤等の地質環境条件によっては、処分場全体をモデル化することでガスの移行経路等が明らかになる場合がある。しかし、ガス移行モデルに多く用いられる二相流解析では、これらの全てをモデル化することが現状では不可能である。

FORGE プロジェクトのサマリーレポート（2010）[10]では、ガス移行挙動の評価に関わるシナリオを構築し、そこでの不確実性を認識したうえで、モデル化や試験によるデータの取得を進めることが重要であると指摘したうえで、アップスケールに関して以下の事項がまとめられている。

- 実規模施設スケールでのガス移行挙動を推定する数値解析の妥当性を検証するための「ベンチマーク試験」が必要である。FORGE 実施されているが、水素ガスの移行挙動に着目した室内試験中心で、いわゆる工学規模での試験は実施されていない。
- 媒体の異方性や現象の異方性（フィンガリング等）をモデル化できる手法の開発が必要で、そのためには、マイクロスケールの現象の理解とマクロスケールへのモデル化手法が不可欠となる。また、媒体の状況は時間の経過とともに変化することも考慮しておかねばならない。
- 処分場規模を考慮した大規模のスケールのモデルと複雑な地質構造が扱うことができるガス移行挙動に関わる性能評価モデルの開発が必要である。
- 要素試験で得られる知見を大きなスケールに適用する場合の手法を調査すべきである。

(5) ガス発生モデル

ガス発生のメカニズムとモデルに関する知見は、2000 年に OECD/NEA が開催したワークショップでの Wolfgang Müller のレポート[21]がよくまとめられている。扱っているガス発生のメカニズムは、腐食、放射線分解、微生物活動であり、実験室での試験、実際の廃棄物からの発生量測定、メカニズムからのガス発生モデルの比較がなされている。実際の廃棄物からのガス発生データの多くは、岩塩を母岩とする米国の WIPP での測定であり、そのデータを用いて発生モデルが作成されている。廃棄物の特徴と境界条件を考慮した複数のガス発生モデルが紹介されており、それぞれの特徴が完結にまとめられている。この文献は 2000 年に発表されたものであり、その後の進展については、前述した FORGE の 2013 年ワークショップでいくつか紹介されている（参考文献[3]内で紹介されている“引用文献”を参照)。

2.3.3 TRU 廃棄物処分概念に係るガス発生メカニズム等に関する検討

我が国においては、第 2 次 TRU レポート以降、TRU 廃棄物処分におけるガス発生について、一部金属腐食の試験等は実施されてきたが、発生メカニズムやモデル、パラメータなどの研究は取りまとめられていない。海外では、EU の FORGE プロジェクトを中心に、ガス発生、ガス移行、ガス影響の研究が精力的に進められその成果が取りまとめられている。最近では、英国の NDA が"Gas Status Report 2010 "（参考文献）として国内外のガス挙動に関する動向を調査し、自国の低・中レベル処分場評価への取り組みを提示している。

これまでのシナリオ検討におけるガス挙動評価に関して、不確実性の大きな領域としては、ガス発生、ガス移行挙動、ガス影響の評価があると指摘し、その中でもガス発生については、最も不確実性の大きな分野であることを示唆してきた。本年度は、このような背景から、第 2 次 TRU レポートで取り上げられた前提やガス発生モデル等を吟味し、ガス発生に係る現状の知見を整理するとともに簡略化したモデルを用いて定量的にガス発生量を求めることで、ガス発生に係る不確実性と技術課題を明らかにする検討に着手した。

本検討では、これまで課題としてきたガス発生メカニズム等について、以下の手順で実施することとした。検討に用いた新たな知見に関しては、既存シナリオシートにおける根拠の拡充として整理することとする。

- 前提条件の整理
- 対象とするガスの種類と発生モデル
- 第 2 次 TRU レポートでのガス発生に関する記述の分析
- ガス発生量の推定
- 第 2 次 TRU レポートとの比較
- ガス発生に係る不確実性の分析と課題

(1) 検討の前提条件の整理

ガス発生に係る検討を進める上で、以下に示す前提条件を第 2 次 TRU レポートでの取り扱いを含めて設定する。

- グループ 1～4 を対象として、ガス発生量と速度を概算する。
- ガス発生量と速度は、それぞれの処分概念を考慮し、処分坑道 1m あたりの量として算定する。
- 第 2 次 TRU レポートと比較するために、ガス発生源（ソース）は同じデータを使用する。この中で、地質環境条件としては、前節までのシナリオ検討との整合性を考慮し、堆積岩の深度 500m を対象とする⇒第 2 次 TRU レポートでは、花崗岩 1000m、堆積岩 500m で解析を実施しているが、岩盤条件や深度はガス発生解析では考慮されていない。
- ガス発生の解析におけるパラメータ設定では、温度、高 pH 環境、溶存酸素量を考慮したデ

ータを用いる⇒第 2 次 TRU レポートでも一部考慮されている。

- ガス発生モデルに関して、腐食については国際的に広く用いられている簡略化されたモデルを用い（第 2 次 TRU レポートと同様)、放射線分解や微生物分解については、第 2 次 TRU レポート以外の最新のモデルも考慮する。
- ガスの消費メカニズムについては考慮しない（次年度以降の課題)。例えば；
  - ・ H_2, CH_4 等による無機物の酸化⇒ 第 2 次 TRU レポートでは言及されていない
  - ・ H_2, CH_4, CO_2 等による微生物の活性化⇒同上
  - ・ 固体への CO_2 の取り込み⇒ 第 2 次 TRU レポートでは言及しているが定量化していない。
  - ・ H2, He の固体マトリクスへの拡散⇒ 第 2 次 TRU レポートでは言及されていない
- 腐食等の反応による主要なガス発生に着目しており、放射線分解で発生するエタン、プロパンなどのガス、腐食による発生するアセチレンなどの発生量の少ないガスについては取り扱わない。⇒第 2 次 TRU レポートでも言及されていない
- 廃棄体の定置や埋戻し前の作業で処分坑道内に残置される物質は考慮していない。⇒ 第 2 次 TRU レポートでも言及されていない
- 放射線分解は廃棄体容器内のみで発生すると仮定する。しかし、保守的な設定では、放射性核種は長期にわたり人工バリア内にとどまり、評価期間中に無くなることはない。⇒ 第 2 次 TRU レポートでは言及されていない

(2) 対象とするガスの種類とメカニズムの整理

1) 対象とする想定される深度で発生するガスの種類

処分坑道内で発生するガスの種類をこれまでの知見から以下に整理する。

- H_2 ：還元雰囲気での金属廃棄物の無機的な腐食と水分の放射線分解により発生
- H_2/ CH_4 / N_2 / CO_2… ：有機物の微生物分解と放射線分解により発生
- ガス状同位体（特に ^{222}Rn）: 長寿命親核種の崩壊より発生
- He : アルファ核種の崩壊から発生

これらのガスには以下の放射性のガスも含む。

- 水素ガス H_2 ・メタン（CH_4 ）中のトリチウム(T)
- メタン・二酸化炭素中の C-14
- 様々な同位体中の H_2Se, CH_3I, CH_3Cl（これらの核種はこれまで扱われていない）
- ガス状同位体（特に Rn, 同位体の混合）

シナリオ検討の中で、非放射性ガスについては、移行媒体（特にベントナイト緩衝材）の健全性評価、あるいは坑道内での放射性核種移行への影響を与える FEP として扱っており、放射性ガスについては、放射性核種の移行の一形態として取り扱っている。

2) ガス発生モデルの整理

上記に提示したガスの発生量を計算する場合のモデルは、以下の種類がある。これらのモデルについては、後述するそれぞれの発生メカニズムの節で詳述する。

- ガスソースのモデル（インベントリ）
  - 対象物の重量、体積、表面積、分布に関する情報
  - 含有される主要な核種の濃度分布
- 腐食モデル
  - 金属を中心とした腐食メカニズムとパラメータ
  - 腐食に関わる化学環境の設定
- 放射線に関わるガス発生モデル
  - α核種の崩壊（He）
  - 放射線分解（α、β、γ）
- 微生物分解モデル
  - 対象となる有機物の設定
  - 微生物分解に関わる化学環境の設定

(3) 第2次TRUレポートでのガス挙動の扱いの整理

第2次TRUレポートでのガス発生に関する記述では、その影響評価を含めて、グループ2に着目した解析結果が主に述べられている。図 2.3.3-1 には、グループ2を対象とした時系列的なガス発生速度の変遷をガスソースごとに示されている。この図の特徴として、

- 廃棄体の定置直後からガスが発生すると仮定している（初期段階の環境変化は考慮していない）
- 合計から見ると数万年わたり、坑道1mあたり数10モルのガスが継続して発生する。
- 腐食によるガス発生速度は変化しないと仮定している（環境の変化は考慮していない）。
- 数10万年後にはガスソースはすべて消滅する。

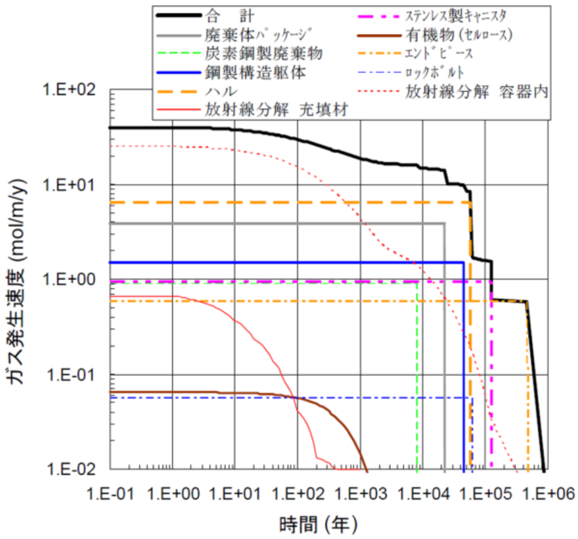


図 2.3.3-1　グループ2のガス発生速度の時系列的変遷（第2次TRUレポート、2005）

1）影響解析結果

グループ２のガス発生速度をベースに、第 2 次 TRU レポートでは、ベントナイト緩衝材内側で発生したガスが蓄圧し、破過することで内部の放射性核種を含む汚染水を処分坑道周辺に押し出すという仮定での影響解析を行っている（図 2.3.3-2 参照）。この時のガス圧を間隙圧の上昇圧として求め、ベントナイト緩衝材の膨潤圧と水圧（深度に依存）を超えることで破過が発生すると仮定した簡単なモデルでの計算である。ベントナイトの内側は、ミキシングセルとして核種が均一に混ざり合っており、その一定量が間隙水の排出量として外部に放出されるとした評価であった。

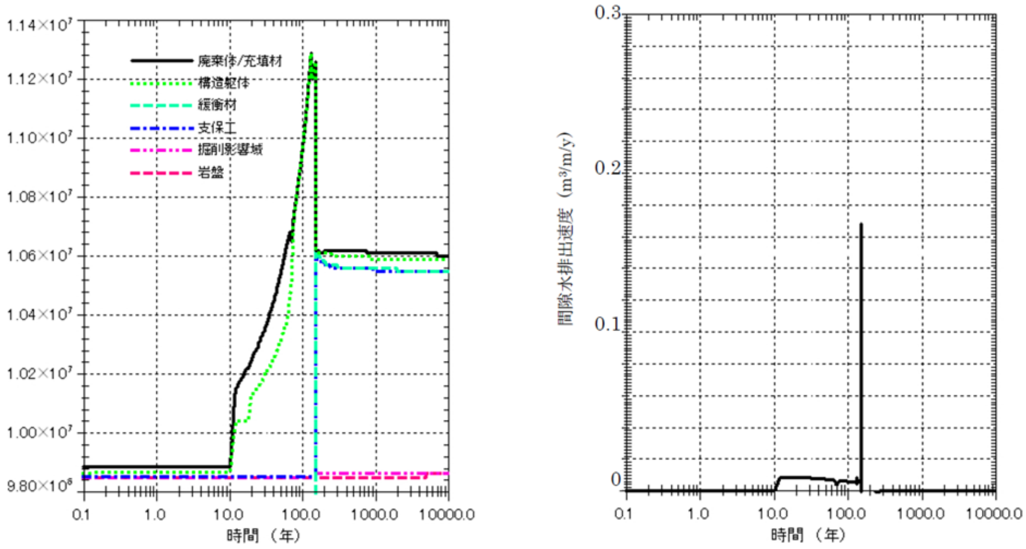


図 4.4.10.1-3　ガス移行解析結果の一例－結晶質岩系岩盤　グループ 2（ｷｬﾆｽﾀ）
（左図：処分施設内間隙圧力の変化，右図：間隙水排出速度の変化）

図 2.3.3-2　処分施設内の間隙水圧の変化（左図）と間隙水排出速度の変化（右図）
（第 2 次 TRU レポート、2005）

2）放射性ガスの発生

放射性ガスの発生速度については、グループ２を対象に実施されている。ハルの酸化被膜の微生物分解で発生するメタンや二酸化炭素は、$^{14}CH_4$ あるいは $^{14}CO_2$ に C-14 が含まれる放射性ガスとして発生する。定置後 1 年後では酸化被膜がすべて分解されるとし、その後はハルのバルクからの発生が支配することで、初期の数オーダー低い発生速度となっている。第 2 次 TRU レポートでは、このうち、$^{14}CO_2$ は周辺のセメント材料に炭酸塩として取り込まれるとし、メタンのみを考慮している（図 2.3.3-3 参照）。放射性ガス発生の算定で用いられた仮定やモデルについては、C-14 に関する検討はなされているが、まだ多くの課題が残されている[14]。

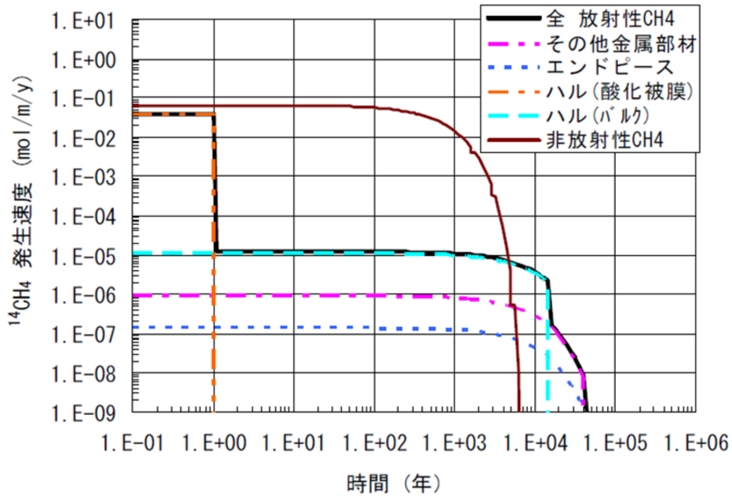


図 4.4.10.2-1　$^{14}CH_4$ 発生速度－結晶質岩系岩盤　グループ 2（ｷｬﾆｽﾀ）

図 2.3.3-3　放射性ガス（メタンからの C-14）の発生速度

3）第 2 次 TRU レポートでのガス発生に関する課題

10 年以上前に公表された第 2 次 TRU レポートに提示されたガス発生に関する記述では、以下の事項についての検討が不十分である。

- ✓ 廃棄体内の金属腐食を扱うときの表面積や金属物質の分布などは考慮されていない。
- ✓ 定置段階からの処分坑道内の時系列的な環境の変化（間隙水の量や化学特性、飽和・不飽和状態、酸素量の変化）が十分検討されていない。
- ✓ 有機物の微生物分解に関するモデルが設定されていない。特にアスファルト、セルロース、レジンなどからの放射性ガス発生のメカニズムが不明である。
- ✓ 塩水環境下、無酸素還元雰囲気、二次鉱物の存在、充填材による密実な環境など、複合的な条件が考慮されていない。
- ✓ 放射線分解によるガス発生メカニズムについての記述が不十分である。
- ✓ C-14 の存在による放射性ガスの発生メカニズムについても多くの仮定が設定されている。
- ✓ ガスの消費に関する検討がなされていない。
- ✓ ガス発生解析に適用された仮定の妥当性、モデルは十分検証されていない。

(4) ガス発生量の概算

1）各グループのインベントリ

各グループから発生するガス量を算定する上で、そのソースとなるインベントリを表 2.3.3-1 に示す。これらの数値は第 2 次 TRU レポートのデータを踏襲している。

表 2.3.3-1　各グループのインベントリ（第 2 次 TRU レポート、2005）

グループ名	廃棄物容器	本数	数量 m3	重量 t	パッケージ 鋼製容器 t	ステンレス t	廃棄体含有物 炭素鋼 t	ステンレス t	ジルカロイ t	有機物 t	TBP	α放射能 Bq	Β･γ放射能 Bq	全放射能
グループ1	200 Lドラム	1589	318	583	2	46						4.80E+09	5.10E+13	5.10E+13
	トータル	1589	318	583	2	46						4.80E+09	5.10E+13	5.10E+13
グループ2	キャニスタ	28800	5573	23783		3582	216	7991	12320	1		2.50E+16	1.50E+19	1.50E+19
	BNGS容器	2070	1159	3180		238		151	840			2.10E+14	2.20E+17	2.20E+17
	トータル	30870	6732	26963	0	3820	216	8142	13160	1		2.521E+16	1.52E+19	1.52E+19
グループ3	200 Lドラム	28058	5645	9257	622	209				2600	2.74	2.10E+14	9.80E+15	1.00E+16
	角型容器	199	390	1612	1751							5.50E+14	9.30E+16	9.36E+16
	BNGS容器	250	140	279		34						8.90E+10	7.80E+13	7.81E+13
	トータル	28507	6175	11148	2373	243				2600	2.74	7.60089E+14	1.03E+17	1.04E+17
グループ4	200 Lドラム	45089	9018	33709	673	679	10028	7400				1.30E+16	8.70E+17	8.83E+17
	角型容器	1621	3178	22812	14265	3	593	3583				2.20E+13	9.20E+15	9.22E+15
	BNGS容器	2180	1221	2549		290		1				6.70E+14	1.20E+17	1.21E+17
	トータル	48890	13417	59070	14938	972	10621	10984				1.3692E+16	9.99E+17	1.01E+18

2）ガス発生量算定上のパラメータ

ガス発生量算定に用いるパラメータを表 2.3.3-2 に設定する。多くは、第 2 次 TRU レポートの数字を踏襲している。Nagra のデータは、参考として用いている。

表 2.3.3-2　ガス発生量算定で用いたパラメータ

腐食速度		
NTB 04-06	**炭素鋼**	1.00E-05cm/year
	ステンレス鋼	1.00E-06cm/year
	インコネル	1.00E-06cm/year
	ジルカロイ	1.00E-06cm/year
TRU-2	**炭素鋼**	1.00E-05cm/year
	ステンレス鋼	2.00E-06cm/year
	インコネル	2.00E-06cm/year
	ジルカロイ	5.00E-07cm/year
微生物分解によるガス発生速度		
NTB 04-06	**セルロース**	0.7mol/kg/year
	有機物（プラスティック、レジン、アスファルト）	0.05mol/kg/year
TRUレポート	**セルロース**	0.09mol/kg/year
	アスファルト	0.09mol/kg/year
放射線分解		
TRU-2	**G α水**	1molecule/100eV
	G β水	0.7molecule/100eV
	G αアスファルト	0.5molecule/100eV
	G βアスファルト	0.2molecule/100eV
	α線源	5000000eV
	Β･γ線源	1000000eV
	アボガドロ数	6.022E+23

3) ガス発生メカニズムごとの発生速度と発生量の算定

ガス発生メカニズムとして、金属腐食、微生物分解、放射線分解によるものに分け、各グループの違いを考慮してガスの発生速度と発生量を算定した。いずれも処分坑道 1m あたりの速度（モル／年)、量（モル）として求めている。

a. 腐食によるガス発生速度と発生量

腐食によるガス発生の算定では、以下の仮定を設定する。

・合金は主要な金属から構成されているとする（鉄、あるいはジルカロイ）
・ガス発生源は、廃棄物に含まれる金属、容器、パッケージを想定する。
・金属腐食速度は、還元雰囲気で高 pH 環境でのデータを用いる。
・表面積の計算は第 2 次 TRU レポートの仮定を用いる。
・腐食モデルは以下の式からなる。

$$3Fe + 4H_2O \Rightarrow Fe_3O_4 + 4H_2$$ （炭素鋼、ステンレス鋼）

$$Zr + 2H_2O \Rightarrow ZrO_2 + 2H_2$$ （ジルカロイ）

・ガス発生速度の算定式

$$qH = -nH \rho A \gamma$$

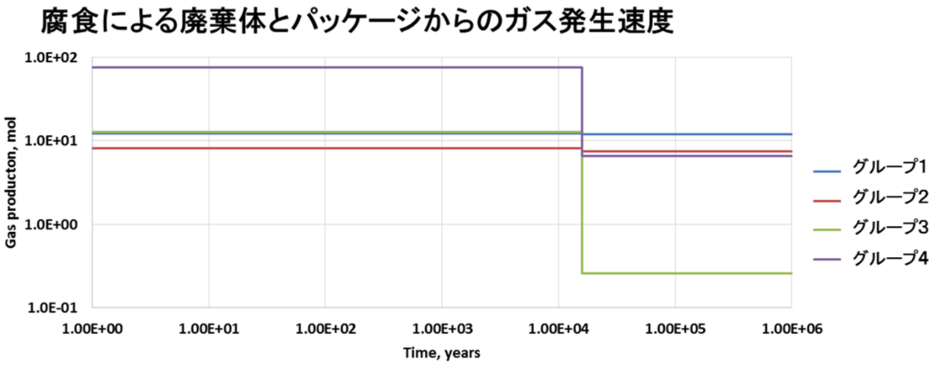
qH：ガス発生速度（モル/年）
nH：金属が 1 モル腐食することにより発生するガス量（モル）を示す係数
ρ ：金属のモル密度（モル/m3）
A ：金属の表面積（m3）
γ ：腐食速度（m/年）

なお、腐食速度のデータは表 2.3.3-3 に示すものを用いた。

表 2.3.3-3　腐食速度のデータ（第 2 次 TRU レポート）

TRU-2	炭素鋼	1.00E-05	cm/year
	ステンレス鋼	2.00E-06	cm/year
	インコネル	2.00E-06	cm/year
	ジルカロイ	5.00E-07	cm/year

図 2.3.3-4 に各グループに含まれる金属の腐食によるガスの発生速度と発生量を示す。約 16,000 年で、ドラム缶やパッケージの炭素鋼の腐食が終了し、ステンレス、ジルカロイのゆっくりした腐食が進展する。



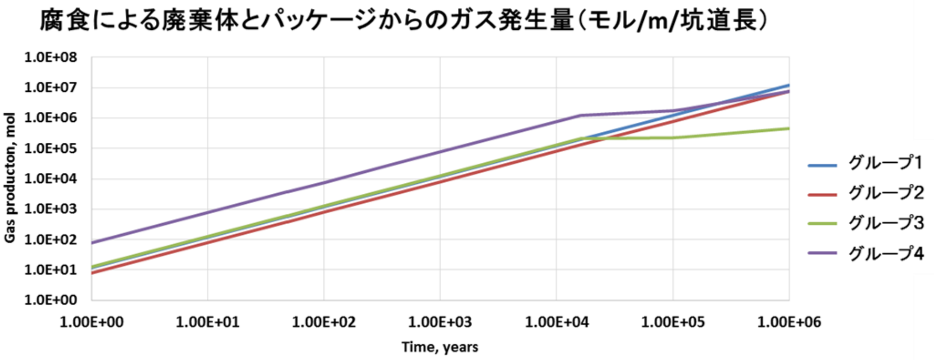


図 2.3.3-4 腐食によるガス発生速度と発生量

b. 微生物分解によるガス発生速度と発生量

微生物分解によるガス発生モデルでは、以下の仮定を設定した。

- 有機物の微生物分解によるガス発生は、廃棄物のほかにベントナイト緩衝材、セメントモルタル充填材、コンクリート支保工も対象とする。
- 処分坑道 1m あたりのセメント量とベントナイト量は、グループごとに算出する。
- セメントとベントナイトに含まれる有機物は、CH_2O の化学形態とし、重量は有機炭素の2倍とする。
- すべての有機物の微生物分解によるガス発生速度は 0.09 モル/kg/年とする。
- セメントとベントナイトの単位体積重量は同様と仮定する。
- 廃棄物の微生物分解によるガス発生速度（モル/年）は以下の式とする。

$$qH = SW$$

S：微生物分解でのガス発生速度（モル/kg/年）

W：有機物の重量（kg）

- 第 2 次 TRU レポートでの発生速度は、有機物にかかわらず同じ値を用いている。本解析でも 2 次レポートの 0.09 モル/kg/年を適用する。

図 2.3.3-5 に廃棄体とパッケージからの微生物分解によるガス発生速度と発生量の算定結果を示す。有機物は、グループ 1 には含まれていないことから、微生物分解によるガス発生は、グループ 2，3，4 が対象となる。おおよそ 370 年で含有有機物は微生物分解される。

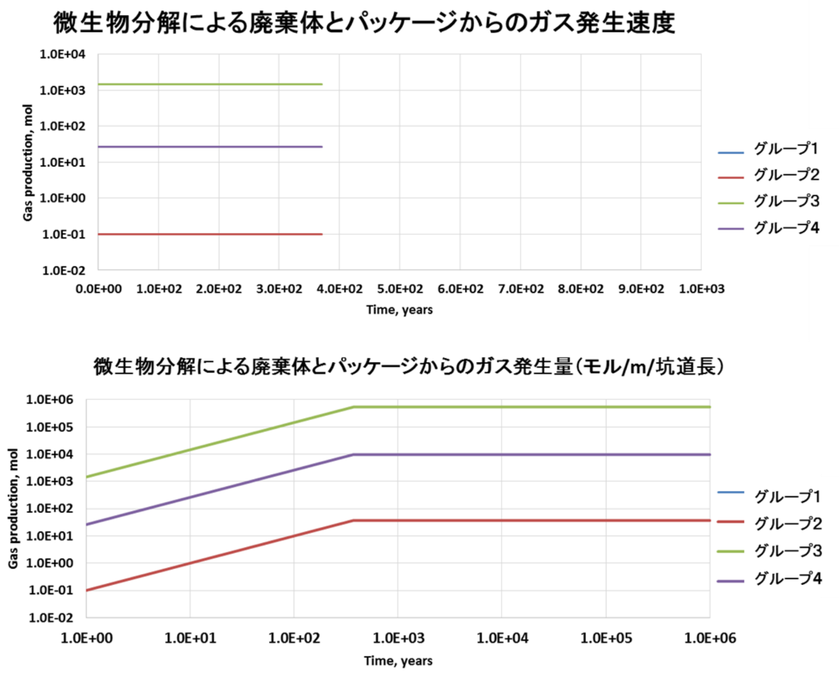


図 2.3.3-5 微生物分解による廃棄体とパッケージからのガス発生速度と発生量

c. 放射線分解によるガス発生

放射線分解によるガス発生算定において、以下に示す仮定を設定した。

- α線分解により、He が発生するとする（発生量は少ない）
- 放射性分解によるガス発生モデルはよく知られているが、算定に用いるパラメータとなる G 値については、よく吟味されていない。放射線分解に係る水の存在については、以下が想定される。
  - 自由水
  - セメント、コンクリートの間隙水
  - アスファルトに含まれる水
  - 樹脂に含まれる水
- 最初の 1 年で放射線分解による水素ガスの発生量（モル）は以下の式で求められる。

  $qH = Gd/100Na$

  Na : アボガドロ数（1 モルあたりの分子数）

  G : G 値（吸収された放射線エネルギー100eV あたりの水素ガスの分子数）

  d : 放射線エネルギー（eV）

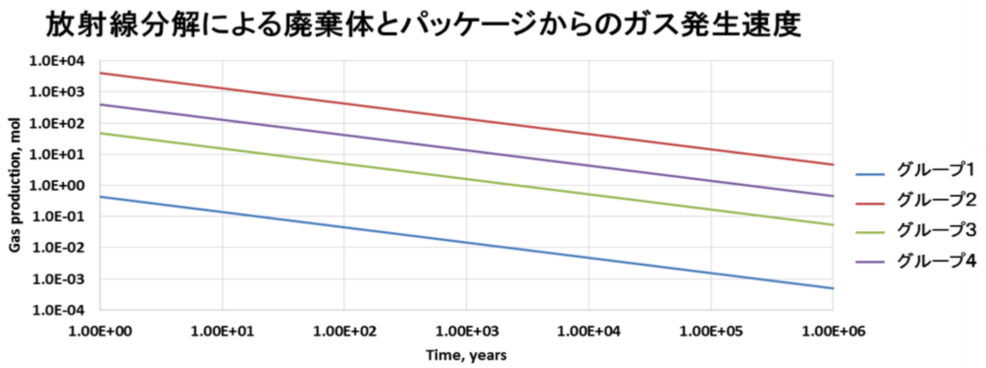
  なお、算定にあたっては、G 値は

  表 2.3.3-4 に示す値を用いた

表 2.3.3-4　算定に用いた G 値一覧

G 自由水、間隙水中のα	1molecule/100eV
G 自由水、間隙水中のβ	0.7molecule/100eV
G アスファルト中の水のα	0.7molecule/100eV
G アスファルト中の水のβ	0.3molecule/100eV
α線源	5000000eV
Β・γ線源	1000000eV
アボガドロ数	6.022E+23

図 2.3.3-6 に放射線分解によるガス発生速度の変化と累積発生量を示す。発生速度は、廃棄体の放射能量の減少に従い低下する。



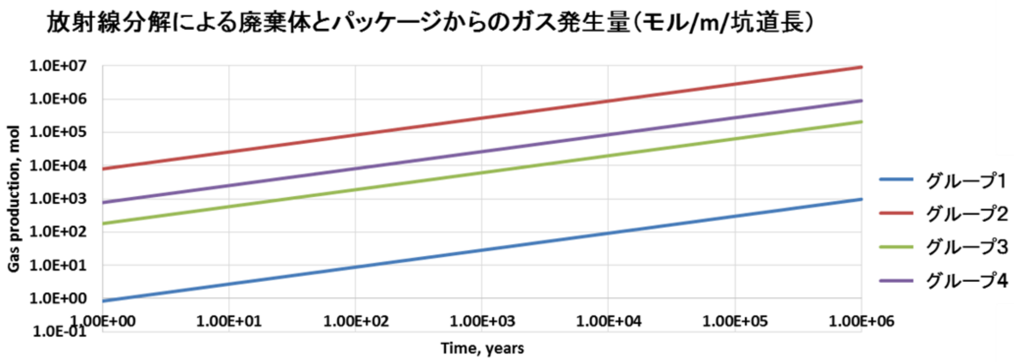


図 2.3.3-6 放射線分解によるガス発生速度と発生量

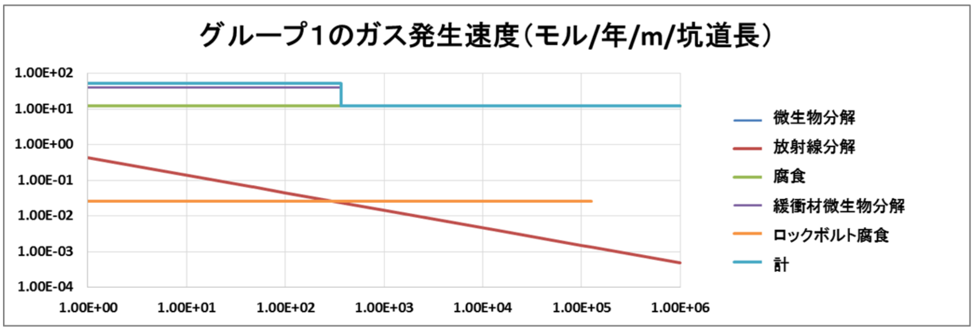
4) グループ別の発生速度と発生量の算定

それぞれのグループを対象に、異なる発生メカニズムでのガス発生速度の変遷と累積発生量を算定した。以下にその結果を示す。

a. グループ 1

グループ 1 の処分概念をベースに、廃棄体、パッケージ、セメント充填材、ベントナイト緩衝材、支保工材、ロックボルトを対象としたさまざまな発生メカニズムでのガス発生速度の変遷と

累積発生量を算定した（図 2.3.3-7 参照）。初期段階では微生物分解が支配し、その後腐食によるガス発生が継続する。この傾向は 100 万年過ぎても変わらない。



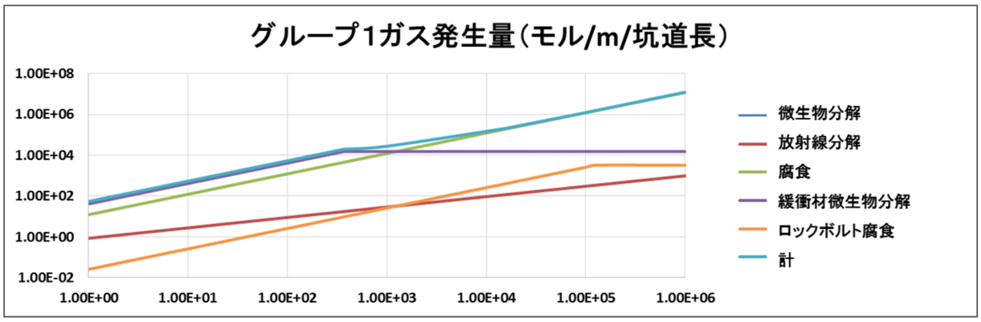
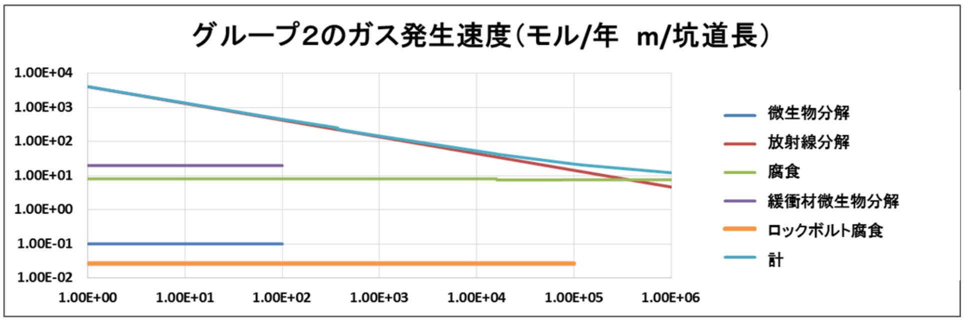


図 2.3.3-7 グループ 1 のガス発生速度の変遷と累積ガス発生量

b. グループ 2

グループ 2 は、切断されたハル・エンドピースがステンレス容器に格納され、鋼製パッケージに定置されて、処分坑道に埋設される。累積ガス発生量は、図 2.3.3-8 に示すように、放射線分解と腐食に支配される。



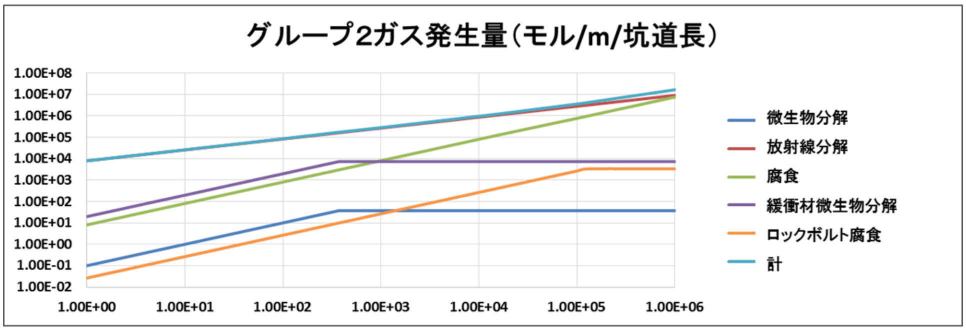


図 2.3.3-8 グループ２のガス発生速度の変遷と累積ガス発生量

c. グループ３

グループ３では、アスファルト固化を代表として、有機物が多く含まれることから図 2.3.3-9 に示すように微生物分解によるガス発生が支配的となる。

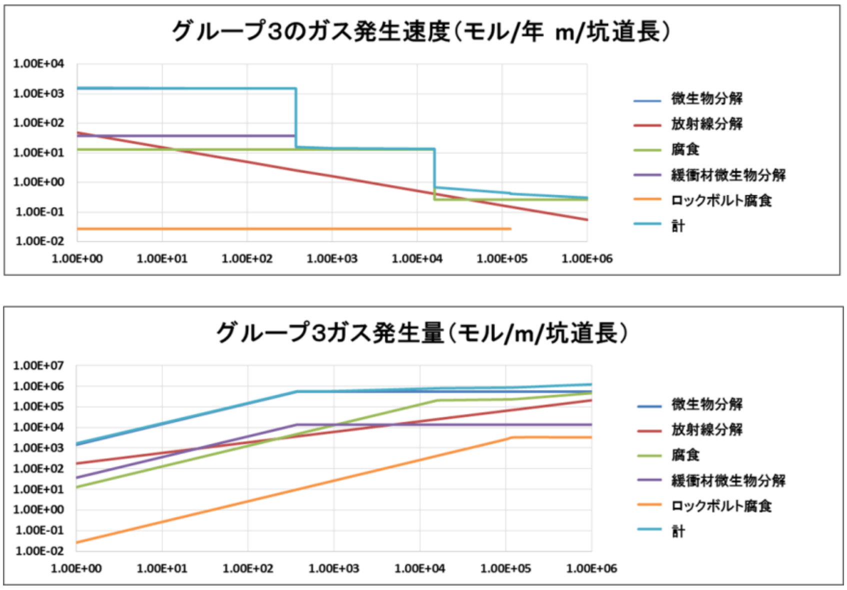


図 2.3.3-9 グループ３のガス発生速度の変遷と累積ガス発生量

d. グループ４

図 2.3.3-10 にグループ４のガス発生速度の変遷と累積ガス発生量を示す。グループ４には不燃物、焼却灰固化物が含まれ、初期段階では放射線分解、長期的には金属腐食によるガス発生が支配的となる。

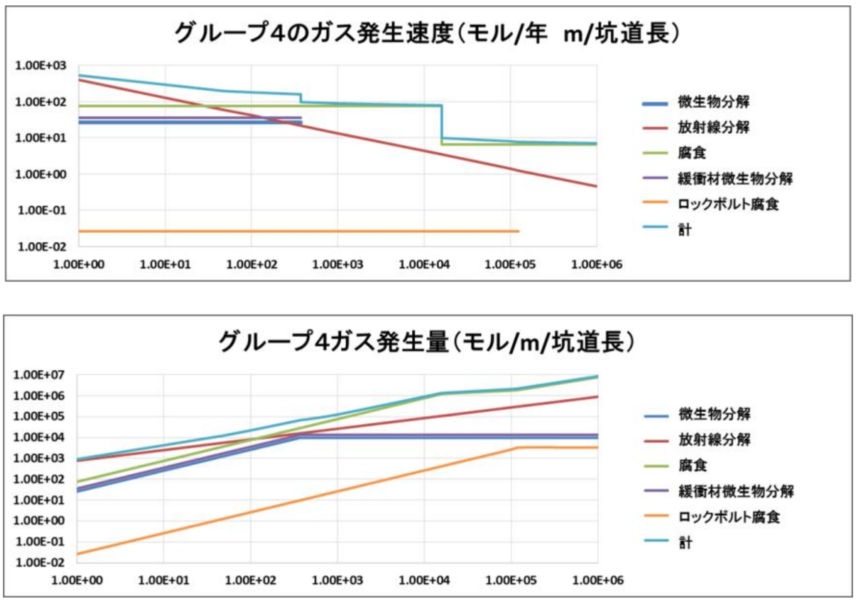


図 2.3.3-10 グループ４のガス発生速度の変遷と累積ガス発生量

5）処分場全体でのガス発生速度と発生量の算定

図 2.3.1-1 にグループごとのガス発生速度の変遷と累積ガス発生量を示す。これらの数字は処分坑道 1m あたりの発生モル数である。グループ１，２，３は廃棄体が含む金属や有機物の量に対応してガスの発生速度が段階的変化する。グループ２では、放射線分解が支配的であり、廃棄体の核種の減衰と放出によりガス発生速度が減少していく。

累積ガス発生量は、グループ１，２，４は 100 万年まで漸増し、最終的におおよそ 1.0E+7 モルの発生量となっている。グループ１では、長期の金属腐食と初期段階のベントナイトやセメント材料に含まれる有機物の微生物分解が寄与している。グループ２では放射線分解が支配的であり、グループ３では、発生するガス量は、1.0E+6 モル程度で、初期段階のセメント材料の微生物分解と長期的には金属腐食が支配している。グループ４では、初期段階では金属腐食と放射線分解、長期的には金属腐食が支配的となる。

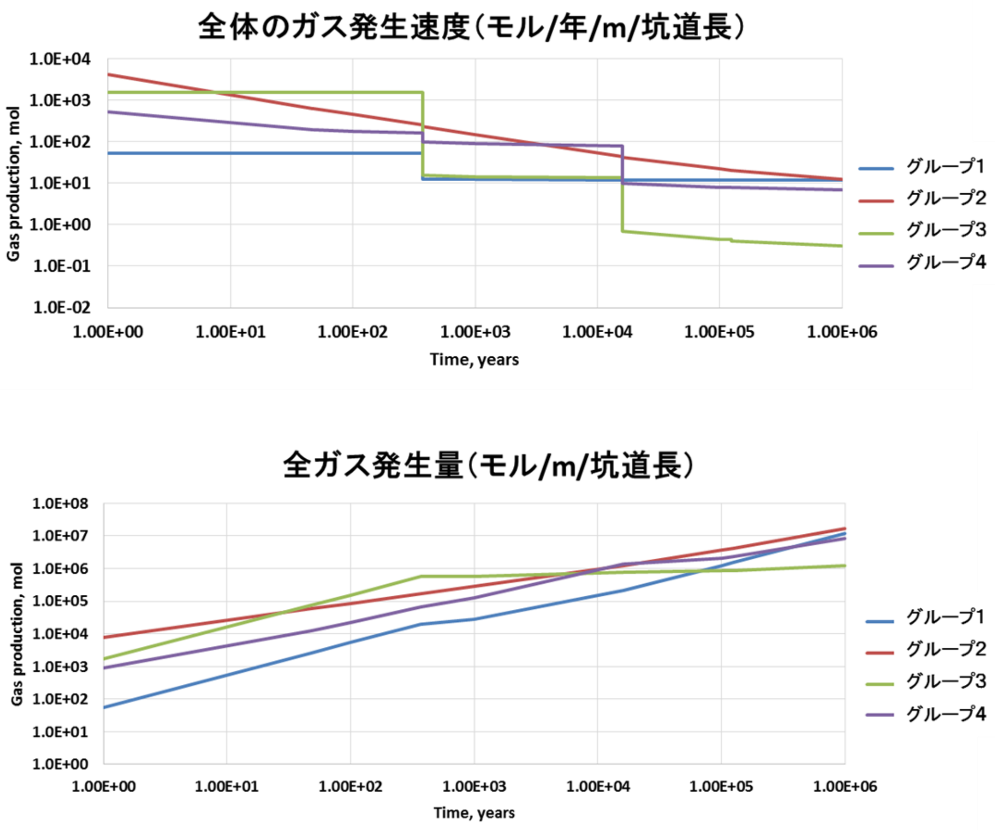


図 2.3.3-11 グループごとのガス発生速度の変遷と累積ガス発生量

(5) 第 2 次 TRU レポートとの比較

本項では、第 2 次 TRU レポートに記載されたガス発生量の算定結果をベースに、今回算定したそれぞれのグループの平均的なガス発生速度と累積ガス発生量を定量的に比較する。また、グループ 2 に着目し、ガス発生速度の時系列的な変遷について考察する。

1) 全ガス発生速度と発生量の比較

a. グループ 1

グループ 1 では、初期段階の微生物分解によるガス発生が支配的で、長期的には金属腐食によるガス発生が寄与している。 2 次レポートと比較すると図 2.3.3-12 に示すように、今回の解析での最大ガス発生速度は 50 モル／年程度、累積ガス発生量は 1E+7 モル程度となり、いずれも 2 次レポートを上回った。この原因の一つにベントナイト緩衝材、セメント材料の微生物分解によるガス発生を考慮したことがある。また、金属腐食は 100 万年まで継続して発生するとしたことも関係すると考えられる。

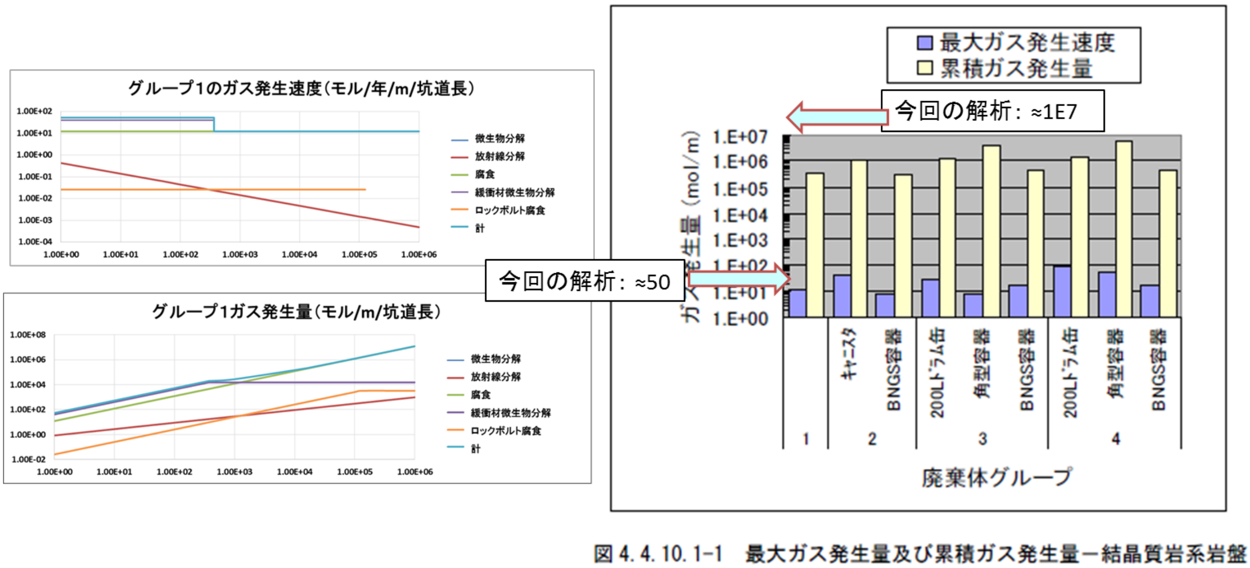


図 2.3.3-12 グループ 1 の比較

b. グループ 2

グループ 2 では、初期の段階から継続して放射線分解によるガス発生がある。初期段階の発生速度と発生量は放射線分解に支配される。長期的には、金属腐食によるガス発生量が支配的である。図 2.3.3-13 に示すように、2 次レポートと比較すると、今回の算定での発生速度、累積発生量は、ともに大きく上回っている。この原因として、初期段階での放射性分解によるガス発生を考慮していることがあげられる。放射線分解によるガス発生は、廃棄物容器の健全性、再冠水までの時間に大きく依存する。

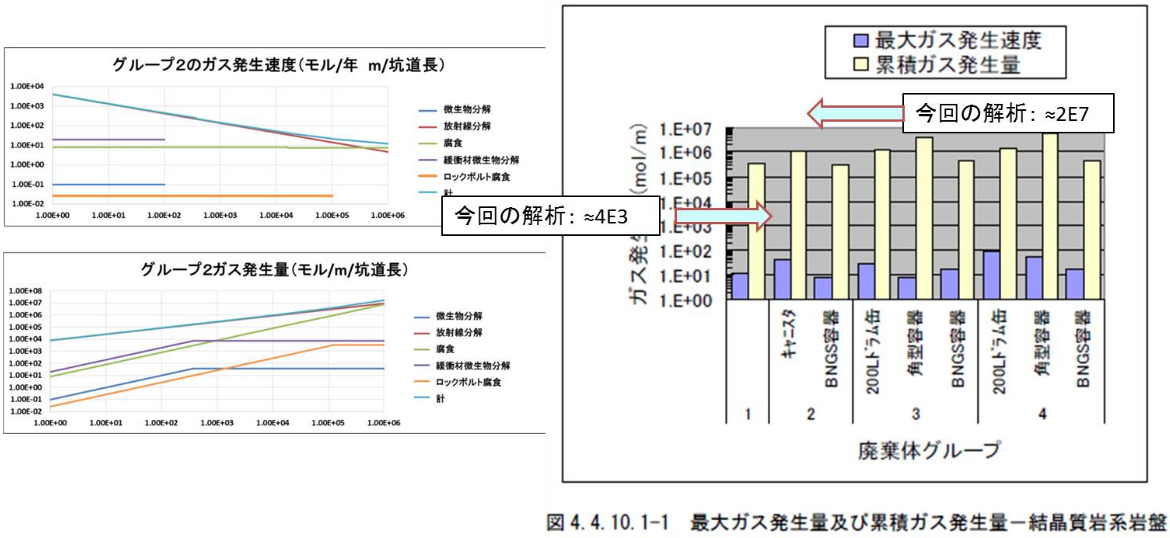


図 2.3.3-13 グループ２の比較

c. グループ３

グループ３では、短期的に微生物分解によるガス発生が多く、長期的には金属腐食に依存する。図 2.3.1-1 に示す２次レポートとの比較では、発生速度の最大値は初期段階の微生物分解に支配されて今回の算定が大きくなるが、累積ガス発生量は同じレベルとなる。

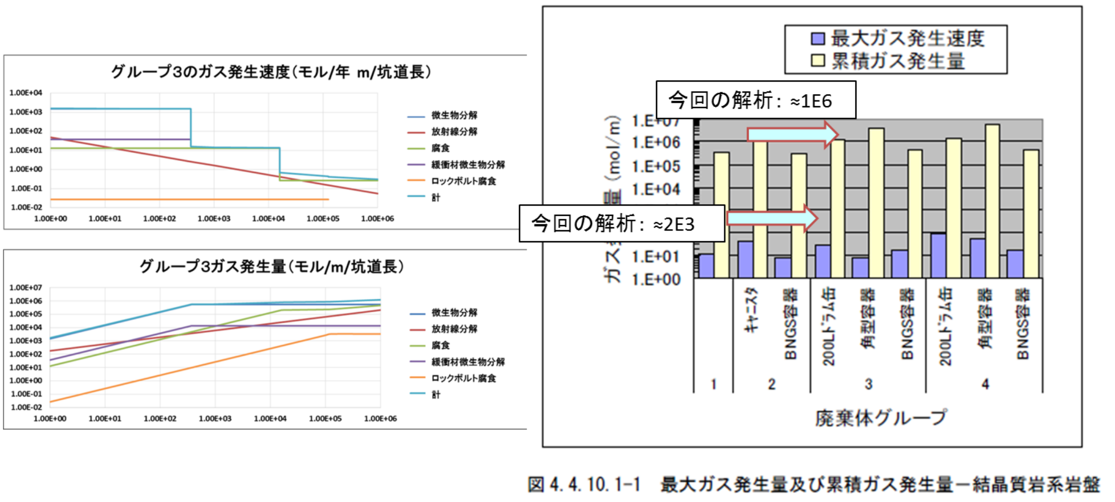


図 2.3.3-14 グループ３の比較

d. グループ４

グループ４は、グループ２と同様に初期の段階では放射線分解が寄与し、長期的には金属腐食に支配される。図 2.3.3-15 に示す２次レポートとの比較では、ほぼ同じレベルの数値となっている。２次レポートでのグループ３とグループ４のガス発生速度が異なるのに、累積ガス発生量が類似していることに対する見解は言及されていない。

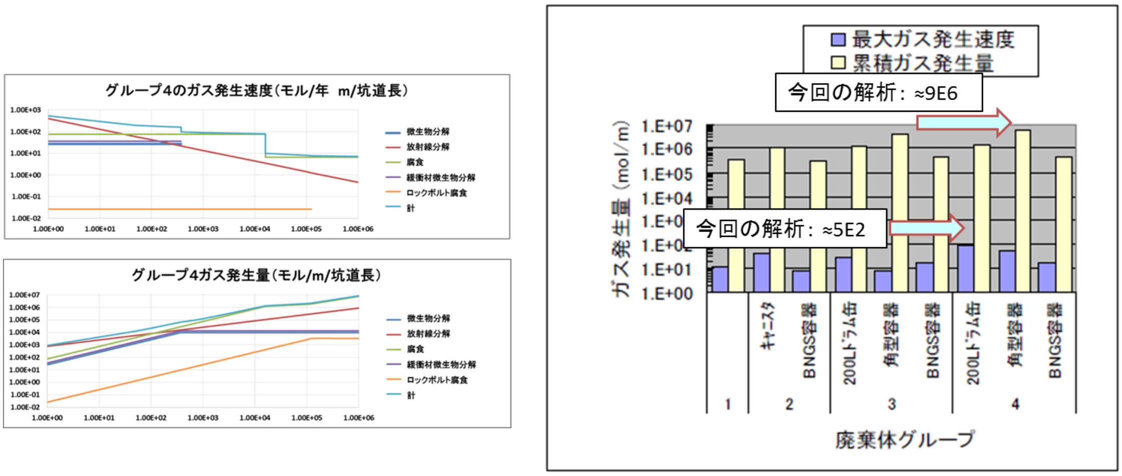


図 4.4.10.1-1 最大ガス発生量及び累積ガス発生量－結晶質岩系岩盤

図 2.3.3-15 グループ４の比較

2) グループ２に着目した発生速度の考察

グループ２の発生速度の時系列的変遷のグラフが２次レポートに示されている。これまでの多くのガス評価は、このグラフでの発生速度をベースに実施されていることを勘案すると、その妥当性の吟味は特に重要となる。そこで、今回のグループ２のガス発生速度算定と比較し相違を考察することとした。 図 2.3.3-16 の左側に今回の解析で求めた発生メカニズムごとのガス発生速度の変遷、右側に２次レポートに掲載されているそれを示した。大きく異なる点は、２次レポートでは、ガス発生のソースが 100 万年までに全てなくなるとしている点である。このことは、金属腐食であれば、すべての金属の腐食反応がストップすることを意味する。また、すべての放射性物質は処分坑道外に放出されるとしている。例えば、１万年までの期間を想定すると、どちらも支配的なメカニズムは放射線分解であるが、その速度は、２オーダー異なっている。このことはガス発生量にも影響を及ぼしている。

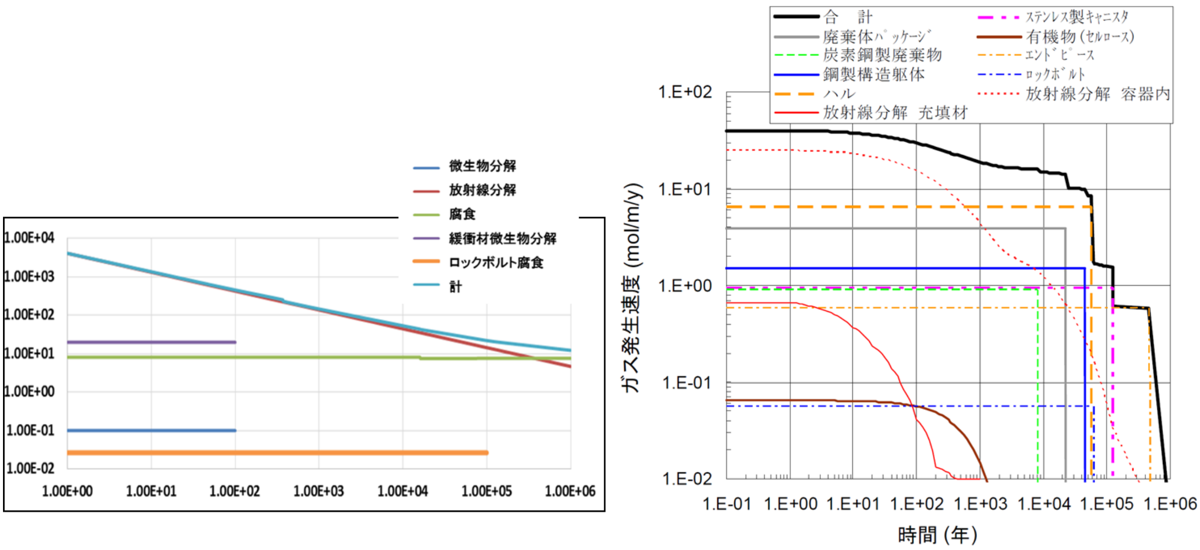


図 2.3.3-16 グループ２のガス発生速度の時系列的変遷の比較

(6) ガス発生量の算定に関する考察

ガス発生に関する検討では、第 2 次 TRU レポートでの発生量算定等をベースに、各グループの廃棄物特性、廃棄物容器、パッケージおよびセメント系の充填材、ベントナイト緩衝材、セメント系の埋戻材や支保工、ロックボルトなど、処分坑道に定置される材料を対象として、３つガス発生メカニズム（金属腐食、微生物分解、放射線分解）を考慮したガス発生速度の時系列的変遷、累積ガス発生量を定量的に求め、第 2 次 TRU レポートとのそれと比較した。その結果を以下に取りまとめる。

- 第 2 次 TRU レポートのガス発生の検討では、処分深度 1000m の花崗岩に立地することを仮定しており、今回の検討では深度 500m の堆積岩に立地するとした。これらの立地条件の差は、ガス発生解析上、どちらも考慮していない。実際には、飽和速度の変化、圧力の違いによる腐食速度の変化が想定される。
- 同じデータと仮定を用いたこともあり、廃棄体やパッケージ等の金属腐食に着目したガス発生結果はよく一致している。このことは腐食のモデルは妥当性があると考えられる。
- 廃棄体内の微生物分解によるガス発生累積量は、類似した値であったが、発生速度は、Nagra の低・中レベル処分場の解析でのパラメータを用いるとおおよそ 1 オーダー異なる。
- 充填材（セメントモルタル）やベントナイト緩衝材に含まれる有機物の微生物分解によるガス発生については、TRU レポートでは考慮されていない。グループ 2 では、この影響が廃棄体に含まれる有機物の微生物分解よりオーダーで大きくなる。
- 最も大きな差異は、放射線分解による、特に初期段階でのガス発生である。このような違いは、同じ G モデルと G 値を用いたとしても、発生量は、容器の健全性や再冠水の速度などの仮定に依存していると考えられる。
- 今回の解析では、保守的に水分やアスファルトの約半分のエネルギーが消費され放射線分解に寄与すると仮定した。水の放射線分解については、グループ 2 では、容器の健全性の期間と人工バリア内の飽和までの期間に依存する。また、廃棄体内部の放射性分解に寄与する核種の分布状況にも依存する。
- どちらの解析も、定置直後から飽和までの期間の環境条件の変遷（浸入地下水量、酸化から還元への移行、建設・操業時に持ち込んだ微生物の影響、高 pH 間隙水の影響、塩水の影響）などを考慮していない。これらの環境の変化は腐食速度、微生物活動に影響を与えると推定される。

(7) ガス発生に関わる不確実性と技術課題

ガス発生に関わる不確実性と技術課題については、前述した解析結果の考察にも記述した事項とも重複するが、以下にまとめることができる。ここでの用いた参考文献は、3.2 章での根拠書として取りまとめている。

1) ガス発生量算定における不確実性

ガス発生に関わる不確実性は、大きく以下に分けることができる。

- 周辺環境の影響
- ガス発生環境の変遷
- ソースタームの特定とバラツキ
- 容器、パッケージの閉じ込め性
- ガス発生メカニズム、モデル、パラメータ
- 腐食等による二次鉱物がガス発生速度に与える影響
- セメント材料の微生物分解でのガス発生
- ベントナイト材料の微生物分解でのガス発生
- ガス消費メカニズム
- 放射性ガスの発生メカニズムと移行モデル

① 周辺環境の影響

TRU 処分概念は、深地層処分することとされており、その深度は 300m 以深となっている。その環境は、一般的に地下水は還元状態にあり、中性で場所によっては塩水環境下、温度は地温勾配に依存しおおよそ 30℃前後としている。地下の環境は、換気しないと 100%の湿度となる。岩盤の特性としては、亀裂性の硬岩、多孔質性の軟岩が考えられている。このような環境設定は、ガスの発生メカニズム、発生速度、移行形態に大きく影響を及ぼす。

② ガス発生環境の変遷

処分は建設段階から操業段階を経て、埋戻し、閉鎖と変遷していく。その期間は数 10 年以上と想定されている。閉鎖されるまで、処分坑道内は大気圧であり、高い湿度が保たれ、酸素が存在し、地表から持ち込んだ微生物の活動が極めて活発になっている。閉鎖されることで、周辺の還元地下水がゆっくり処分坑道内に浸透し、ベントナイト緩衝材の密度にも依存するが 100 年以上かけて内部が飽和していく。内部にはもともと間隙水が存在し、無酸素状態になるまでに腐食や微生物分解が進む。外部から浸透する地下水は、還元性であり、セメント系材料を通過することで高 pH の間隙水に変化する。サイトによっては、浸透する地下水は塩水あるいは古海水の可能性もある。いずれも腐食速度等に大きな影響を与える。

③ ソースタームの特定とバラツキ

廃棄物に含まれるソースタームは種類が多く、不均質であり、放射性核種はばらついて分

布している。金属腐食はこのようなソースタームの面積に大きく依存する。また放射性ガスの発生は、ソースタームと核種のバラツキに依存する。現状での解析では、処分坑道内でのソースタームのバラツキは考慮せず、全数が平均的に同じ環境で腐食すると仮定している。この仮定は、放射性核種移行の観点から保守的かどうかは確認されていない。

④ 容器、パッケージの閉じ込め性

廃棄物は 200L ドラム缶、角型容器、スンレス容器に格納され、空隙はモルタルで充填されている。現状の放射線分解によるガス発生の算定は、地下水の浸透に伴う容器内での発生のみを考慮している。廃棄物容器がどの程度閉じ込め性を確保するかが放射性分解や放射性ガスの発生に影響を与える。

⑤ ガス発生メカニズム、モデル、パラメータ

ガス発生メカニズム（腐食、微生物分解、放射線分解）は、いずれも多面的な不確実性が存在する。腐食については、前述の発生環境の条件、ソースタームの不均質性による要因が大きい。微生物分解については、好気性から嫌気性への環境変化による活性の変化、種類の変化、放射性ガス発生への寄与など不明確な事項が多い（参考文献）。放射線分解によるガス発生は、廃棄体がどのような状態になっているのか、水の存在量の設定など、発生メカニズムよりモデルやパラメータ設定に不確実性がある。

⑥ 腐食等の二次生成物がガス発生速度を抑制する可能性

腐食に二次生成物が膜を作り腐食の進展を抑制するとする研究成果が多くある（参考文献）。２次レポートを含め、ガス発生算定では、保守的な観点からこのような抑制効果を考慮していない。このような抑制効果を定量的に評価することの必要性も含めて議論が必要とされる。

⑦ セメント材料の微生物分解でのガス発生

セメント材には、製品とともに施工時の添加材を含め多くの有機物が含まれる。これらの有機物は、浸透地下水に含まれる微生物、あるいはもともと存在していた微生物により分解されガスが発生する。メカニズムは研究されているが（参考文献）、処分環境での発生モデルやパラメータの設定に未確認な事項が多くある。

⑧ ベントナイト材料の微生物分解でのガス発生

ベントナイト材料の加工方法にも依存するが、自然材料の多くは有機物と微生物を多く含む。微生物分解によりガスは発生するが定量的な評価を行うためのモデルやパラメータは十分整備されていない。ベントナイト中の微生物活動を削減するために、例えば、SKB では密度を 2.0 以上にして、微生物活動による影響評価を除外している（参考文献）。

⑨ ガス消費メカニズム

微生物の多くは、酸素を栄養分としている。嫌気性の環境の中でも、メタンや二酸化炭素を影響分として消費する微生物が存在する（参考文献）。また、二酸化炭素は、セメント系材料と結びついて炭酸塩を生成することで消費される。このような消費のメカニズムを考慮することで処分坑道内のガス発生量が削減される可能性がある。

⑩ 放射性ガスの発生メカニズムと移行モデル

放射性ガスの発生について、TRU 二次取りまとめでは、グループ２と３に着目し、廃棄物に含まれる C-14 が全てメタンとして放出されると仮定し、C-14 の放出速度とメタンの発生速度を算定している。これら算定では、知見が不十分のこともあり、多くの単純化した仮定を用いている。それらの仮定が保守的かどうかは不明である。

2) 技術課題と対応策

上記の不確実性の中では、現状の知見で対応できる課題と今後さらなる検討が必要な課題がある。以下に対応可能な事項を整理する。

- 処分場や人工バリア内の状態変化（不飽和から飽和、酸化から還元雰囲気、高 pH 間隙水、塩水、微生物存在などのガス解析上の境界条件）について、数値解析を含め、時系列的に照査し、定量的な状態変化の設定を行う。この場合、周辺の地質環境を考慮する。この作業は、現状の解析ツールでの対応が可能であり、シナリオ検討の定量化として次年度以降に実施する。
- 廃棄体の種類に対応したインベントリと容器の寿命などをパラメータ的に設定し、周辺環境の変遷に対応したガス発生メカニズムを整理するとともに、対応したモデルデータセットを行う。ガス発生に関する検討の一環として次年度以降に実施する。
- 放射線分解によるガス発生モデル、パラメータについて、容器の健全性の評価も含め、最新の知見を取り入れて再計算する。この場合、容器内、容器周辺等の環境も考慮する。
- 放射性ガスの発生メカニズムについて、２次レポートの仮定を吟味し、定量的なアプローチ方法を検討する。この時に、周辺の地質環境条件、処分場のレイアウトも考慮事項として取り入れる。

ガス発生で今後さらに検討な必要な項目は以下の通り。

- 微生物分解による現実的なガス発生モデルの整備
- ガス消費のメカニズムの究明
- 二次生成物のガス発生速度抑制効果
- ソースタームの不均質性とガス発生メカニズムへの影響
- セメント系材料とベントナイト系材料の微生物分解によるガス発生の評価

2.4　まとめ

これまで（平成 19-25 年度）の検討[26][27][28][29][30][31][32]において、TRU 廃棄物処分概念を対象とした「ガス移行挙動評価手法」を開発しているが、このうち「廃棄物グループ 2（緩衝材有り）」および「廃棄物グループ 3（緩衝材無し）」を対象としたガス移行シナリオが整備できている。本年度は、5 カ年間（平成 25-29 年度）の実施計画に基づき、これまでに開発してきた「ガス移行挙動評価手法」を用い、既存のガス移行シナリオをその他の処分概念（廃棄物グループ 1 および 4）に対応・拡張させ、全体の統合化を図った。また、シナリオ構築に際しての不確実性の特定や構築根拠の拡充を行った。

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

- TRU 廃棄物として分類されているグループ１と４を対象に、昨年度までに構築してきたシナリオ設定手法を用いて、処分坑道の状態変化表、統合 FEP の関連図を作成し、それらを用いてシナリオ整理シートを作成した。統合 FEP 関連図の検討では、廃棄体容器が健全性を維持しているがガスが発生し移行する段階、浸透地下水が廃棄物に接触し放射性物質が溶出する段階、人工バリアが機能を喪失し、天然バリアが核種移行を抑制する段階を対象に作成した。
- シナリオ整理シートに基づき、想定される①ガス発生に関わる不確実性、②容器の健全性維持に関する不確実性、③腐食生成物の挙動に関する不確実性を抽出し、蓋然性と不確実性の大きさをシナリオ上どのように扱うかを定性的に検討することで、３つのシナリオグループ（基本シナリオ、変動シナリオ、稀頻度シナリオ）を設定した。
- これまでのグループ２と３　のシナリオ構築と合体し、共通的な不確実性と個別の不確実性を抽出することで、安全評価上の課題を設定した。
- 共通した不確実性には、ガス発生に関わる事項として、特に微生物分解や放射線分解に関連するメカニズムとモデル化がある。ガス移行挙動に関しては、媒体の変化に伴う不均質性や異方性の中でのガスの侵入と蓄圧、間隙のダイレタンシーとガスフラック（破過）に至るプロセスのモデル化などが抽出された。また放射性ガスを含めた核種移行への影響評価では、処分坑道内だけではなく、周辺岩盤の状態や地質環境条件を考慮した評価モデルの作成などを取り上げた。
- 不確実性を考慮した技術課題の抽出では、ガスの影響評価に対してどのように取り組むかという基本的な課題から、状態変化表の定量化に関わる実務的な課題まで設定することが出来た。
- ガス評価に関わるセーフティケースとしては、シナリオ設定での専門家の知見の集約とともに、解析による状態予測、試験による重要プロセスや事象の再現など、ガス移行挙動に関わる多面的なエビデンスの集約が求められることを示唆した。
- 試験による現象理解のアプローチでは、実規模での挙動を支配しているプロセスを再現でき

ること、形状による拘束影響、寸法効果、加速性の影響などを考慮することを指摘した。

- シナリオ設定では、各グループの特徴を考慮して作成した定性的な状態変化表を、複数の処分場立地環境を考慮し、定量的な状態変化を追跡できる表として今後完成させる必要があり、さらに、これらの定量化した条件をベースに、ガス発生の算定、ガス移行挙動解析、安全評価に結び付ける体系を構築していくことの必要性を今後の課題として抽出することが出来た。
- 第 2 次 TRU レポートでは、放射性核種の地下水移行に対するセーフティケースを中心に議論が進められていたが、もう一方の基本シナリオとなる「ガス移行に対するセーフティケース」の記述はなく、容器の核種閉じ込め性や廃棄体パッケージへの要件、セメント系の充填材や埋戻材への要件が明確に設定されず仕様が定められていた。そのため、ガス影響の評価対象と評価の指標や基準を設定することが困難な状況である。海外の事例等を参照して、容器、パッケージ、充填材、埋戻材への要求を複数設定し、ガス影響に対するセーフティケースの論拠を整備していく必要性を今後の課題として抽出することが出来た。
- ガス移行挙動について、処分坑道内の構成要素それぞれが、時系列的な変遷の中でガス移行媒体としての特性が変化していくことから、周辺母岩を含めて全体の系でのガス挙動を推定するモデル体系整備の必要性を今後の課題として抽出することが出来た。
- 現実的なガス移行挙動評価のためには周辺地質環境の条件に対応したガス評価のセーフティケースとなる処分概念の構築が求められるが、スイスの知見を考慮すると、処分坑道内の埋戻しコンクリートの設計に関して、ガス挙動を考慮した配慮が必要であることが分かった。特に処分坑道内にバッファーとしてガスを蓄積する空間を設ける概念は検討に値すると思われる。

2.4.2 既存シナリオシートにおける根拠の拡充

- ガス発生に関わる事項として、特に微生物分解や放射線分解に関連するメカニズムとモデル化がある。ガス移行挙動に関しては、媒体の変化に伴う不均質性や異方性の中でのガスの侵入と蓄圧、間隙のダイレタンシーとガスフラック（破過）に至るプロセスのモデル化などが抽出された。また放射性ガスを含めた核種移行への影響評価では、処分坑道内だけではなく、周辺岩盤の状態や地質環境条件を考慮した評価モデルの作成などを取り上げた。
- 現状の解析等で、微視的なスケールでのガス挙動（特にベントナイトなどの粘土材料）プロセスの理解に基づきモデル化がなされているかについての吟味をモデルグループと行い、試験での再現を含めた論拠を拡充していくこと、また、微視的なスケールから実スケールへの展開の正当な手法を確立していくことの必要性を今後の課題として抽出することが出来た。

2.4.3 TRU 廃棄物処分概念に係るガス発生メカニズム等に関する検討

- 第 2 次 TRU レポートで設定した条件やデータを踏襲し、グループ 1 から 4 を対象に、金属腐食、微生物分解、放射線分解によるガス発生メカニズムを考慮して、簡略化したモデルを用いてガス発生速度の変遷と累積ガス発生量を吟味した。

- それぞれのグループの廃棄物の特性に依存して、支配的なガス発生メカニズムが異なることに着目し整理した結果、累積ガス発生量は、各グループとも処分坑道 1m あたり、おおよそ 1E+6～7 モルと見積もることが出来た。
- グループ 1 では、初期の微生物分解と全期間での金属腐食が支配的である。グループ 2 では、放射線分解がガス発生の支配要因となっている。グループ 3 では、初期段階で微生物分解、長期的には金属腐食が寄与している。グループ 4 では、初期段階での放射線分解と微生物分解、長期的には金属腐食が支配していることが明確になった。
- 上記検討結果に対する第 2 次 TRU レポート成果との比較では、金属腐食によるガス発生速度、累積量はよく一致したが、微生物分解による発生では、セメント充填材、ベントナイト緩衝材の影響が加味されていないこともあり、ガス発生量が異なることが分かった。また、放射線分解では、廃棄物容器（ドラム缶やステンレス製キャニスタ）の健全性の期間、地下水の飽和までの期間の設定により、発生するガス量が異なることを推測することが出来た。
- なお、本検討では放射性ガス（$^{14}CH_4$ 等）発生量の算定を実施していないため、第 2 次 TRU レポートとの比較ができていないが、最新の知見を取りまとめ、放射性ガス発生のメカニズムを整理して取り纏めた。
- ガス発生メカニズムやその環境変遷等について、現状での不確実性と技術課題をとりまとめることが出来た。

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の取りまとめ－、JNC TY1400 2005-002, FEPC TRU-TRU2-2005-01 平成 17 年

[2] 原子力発電環境整備機構、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,　2011 年

[3] NEA FORGE Project, Gas Generation and Migration, International Symposium and Workshop, Luxembourg, Feb. 2013,

[4] 原子力規制局、第二種廃棄物埋設施設の新規制基準骨子（案）、平成 26 年

[5] 原子力環境整備・資金管理センター、TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発　―ガス移行挙動の評価―、平成 19 年度から 24 年度

[6] 原子力環境整備・資金管理センター、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」、平成 26 年 3 月

[7] 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会（2006）:「放射性廃棄物の地層処分に係る安全規制制度のあり方について」.

[8] SKB SR-Site (2011), Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. SKB TR-11-01

[9] SKB (2010), Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-47

[10] FORGE, Summary of Gas Generation and Migration Current State-of-the-Art, January 2010

[11] Nagra (2002b), Project Opalinus Clay: Safety report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-loved intermediate-level waste, NTB -2-05, 2002

[12] Nagra (2004), Effect of post-disposal gas generation in a repository for spent fuel, vitrified high-level waste and long-loved intermediate-level waste sited in Opalinus Clay, Nagra NTB 04-06

[13] 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

[14] NDA (2011), Geological Disposal, Gas Status Report, NDA Report no. NDA/RWMD/037

[15] 嶺　達也、三原守弘、大木貴夫（2000)、微生物によるガス発生挙動に関する実験的研究（試験報告)、JNC TN8430 2000-010

[16] A. J. Francis (2013), Microbial Transformation of Radioactive Wastes: Implications on Gas Generation and Radionuclide Speciation, Proceedings FORGE Symposium,

Luxembourg 5 to 7 February 2013
[17] GRS (2011), Microbial Processes Relevant for Long-Term Performances of Radioactive Repository in Clays, GRS-291 ISBN 978-3-939355-67-0, 2011
[18] ANDRA (2005), Dossier 2005, Andra research on the geological disposal of high-level and long-lived radioactive waste, results and pperspectives, June 2005
[19] 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
[20] ANDRA (2014), "Full Scale Demonstration of Plugs and Seals" DOPAS - Work Package 3 Deliverable D3.11: "Report on FSS cast concrete plug construction", EU Community Research
[21] 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
[22] 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の取りまとめ－　根拠資料集　分冊 1　地層処分の工学技術、廃棄物処分の合理化、TRU 廃棄物処分の代替技術、JNC TY1400 2005-001(1), FEPC TRU-TRU2-2005-03 平成 17 年
[23] 原子力安全委員会（2004）、放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な事項について、平成 16 年 6 月 10 日、p.6
[24] 財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度管理型処分技術調査等事業　地下空洞型処分施設性能確証試験　報告書（2013）.
[25] 財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 25 年度管理型処分技術調査等事業地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験　報告書（2014）.
[26] 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).
[27] 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).
[28] 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)
[29] 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)
[30] 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)
[31] 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)
[32] 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）

第 3 章　ガス移行連成挙動解析ツールの高度化

3.1　実施概要

3.1.1　本検討の背景と目的

原環センターでは、平成 11 年度から 18 年度にかけての原位置ガス移行試験（GMT）[1]、および平成 19 年度から平成 24 年度にかけて 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を実施しており[1][3][4][5][6]、昨年度（平成 25 年度）よりこの後続研究を開始している[7]。

昨年度の成果は、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て策定された実施計画である。実施計画で設定された 3 つの Work Package と、その検討項目を整理したものを表 3.1.2-1 に示す。なお、各検討項目間の相互関係と実施スケジュールは図 3.1.2-1 に示す通りである。

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

① ガス移行試験系を模擬した予察解析による予測データの提示
② ガス発生モデルとの連成
③ データライブラリへのデータ追加と整理
④ TRU 廃棄物処分システムのモデル化に関する次元性の影響把握

3.1.2　実施項目

本年度の実施項目を以下に示す。

(1) 人工バリア中のガス移行挙動の現象理解
- ガス移行試験の予察解析
- ガス発生モデリングの検討

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

(3) 次世代モデリング技術開発
- TRU 廃棄物処分システムの不確実性を考慮したガス移行解析の評価

表 3.1.2-1　昨年度検討で設定した 3 つの Work Package と検討項目

WP1：人工バリア中のガス移行挙動の現象理解 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
● 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） ● ガス発生モデルとの結合
WP2：ガス移行データライブラリの運用 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
● 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
WP3：次世代モデリング技術開発 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
● 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）

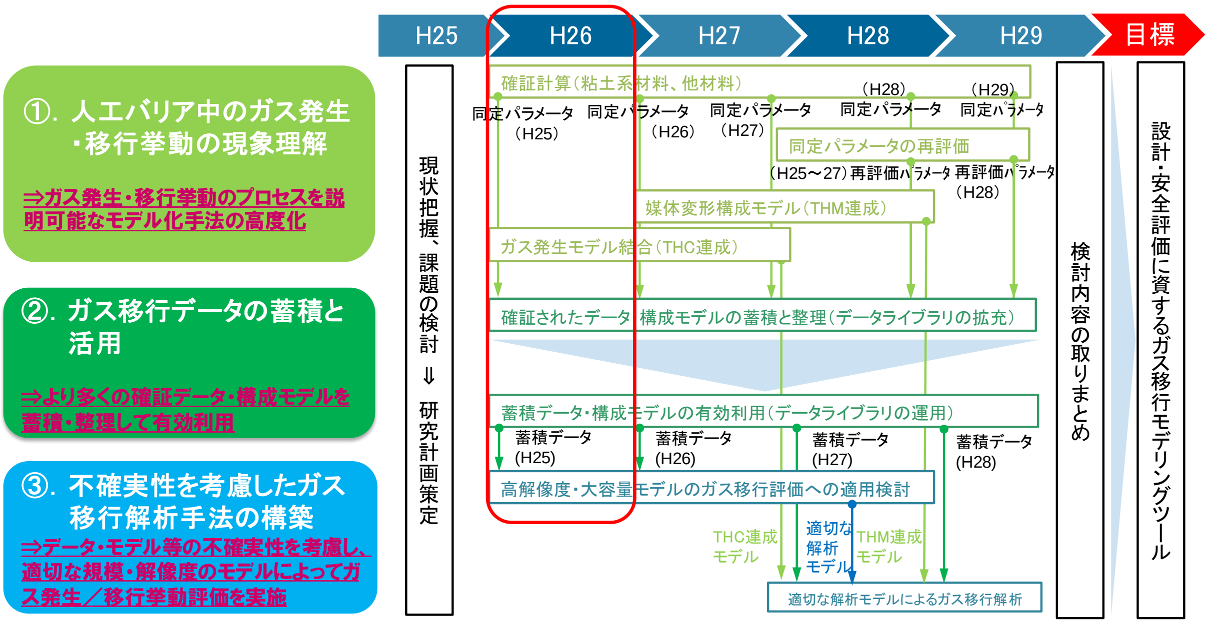


図 3.1.2-1　WP 各検討項目間の相互関係と実施スケジュール

なお、「(1) 人工バリア中のガス移行挙動の現象理解」においては、複数の解析コードを用いた検討を実施している。

表 3.1.2-2 に本検討で用いた解析コードとその特徴を示す。

GETFLOWS は汎用地圏流体シミュレータとして開発されてきた経緯があり油層工学分野など多相多成分流体解析において多くの実績を有してるコードである。このため、連続媒体中における気液二相流挙動の解析にも特に適しており、非線形問題のような複雑な系を解くために積分型有限差分法による離散化手法を取りつつも、独自開発されたソルバーと逐次陽化処理と呼ばれる効率的な格子収斂手法の採用によって、実用規模の TRU 廃棄物処分施設の格子モデル等も効率的に解くことが可能である。

よって、広義の（概略検討的な）ガス移行挙動評価では GETFLOWS を用いた解析評価を実施することが効率的ではあるものの、解析計算可能な物理量は人工バリア材中の飽和度や間隙圧であり、例えばベントナイト緩衝材に着目すると、当該バリアが大きなガス圧を受けた際にどのような影響が生じるかを評価するために必要な力学影響検討（有効応力解析）が出来ない、と言った欠点もある。そこで、力学連成気液二相流解析コードである Code_Bright（有限要素法で離散化）を用いることで上記の欠点を補うことができるが、当該コードは非線形性の強い問題や大規模な要素数から構成される解析モデルに対しては、計算の収束性が低下することからその適用性には課題がある。

このため、まずは GETFLOWS でガス移行解析を行い、その間隙ガス圧の分布や最大ガス圧等を把握したうえで、ベントナイト緩衝材内のガス圧が大きくなる可能性がある箇所等が特定できたならば、当該箇所の比較的簡易な解析モデル等を構築し、GETFLOWS から引き渡される境界条件を与えたうえで CODE_BRIGTH による有効応力解析を実施する、と言ったような「コードの使い分け」がガス移行挙動評価において有効であり、2 つのコードを用いた検討を行う理由でもある。平成 24 年度までの検討においては、その適用性や搭載される数学モデルの確証を図ってきた。

一方、TOUGHREACT は汎用多相流シミュレータである TOUGH2 をベースに開発された化学反応を考慮できる THC 連成解析コードである。TOUGHREACT は熱・流体流動計算と物質移行計算、地球化学計算から構成されており、鉄の金属腐食に伴うガス発生・移行解析が可能である。

本検討では、金属腐食以外も含めた処分施設内でのガス発生機構のモデル化を目標成果としているが、このガス発生現象に影響を及ぼすと思われる廃棄体周囲の処分環境（水分状態など）や廃棄体周囲で起こる THC 連成事象の現象理解や可視化も重要な視点の 1 つであると考えた。

上記目標に資するため、本検討では TRU 処分システムの 2 次元断面モデルによる THC 連成解析を実施し、廃棄体周辺での流体ダイナミクス（周囲からの水の移流、廃棄体からの熱発生に伴う温度変化、水蒸気発生・拡散・凝縮、ガス発生等）等を整理することを目的として、当該コードを用いることとした。

表 3.1.2-2　本検討で用いた解析コードとその特徴

解析コード	開発元	特徴 上段:長所●／下段:短所▲	THMC 連成系（考慮可:○）（一部考慮可:△） 熱（T）	水理（H）	力学（M）	化学（C）	適用事例/連成手法
・汎用多相流体シミュレータ GETFLOWS	Tosaka et al, 1996	● 大容量高速計算が可能 ● 浸透率/空隙率の圧力依存性 ● 非定常 ガス溶解の考慮 ● 数値解析的安定性に優れる ▲ 応力変形（力学影響）を考慮できない	○	○	△		・GMT ・TH は完全陰的連成 ・M は擬似（陽的）連成
・力学連成シミュレータ CODE_BRIGHT	Olivella et al, 1994	● 力学連成二相流解析（有効応力解析）が可能 ● 膨潤／収縮、圧密、空隙率による浸透率変化の考慮が可能 ▲ 計算に時間を要する ▲ 数値解析的安定性に劣る	○	○	○		・GMT、Mont Terri ・完全陰的連成
・TOUGH2 の派生シミュレータ TOUGHREACT	R.Senger, T.Xu, et al., 2007	● 化学平衡則による腐食ガス発生反応を考慮可能 ● ガス発生反応との連成が可能 ● 現実的なガス発生量と EBS 内の水分分布を評価 ▲ 応力変形（力学影響）を考慮できない	○	○		○	・TH は完全陰的連成 ・C は逐次陽的連成
（参考） ・汎用多相流体シミュレータ TOUGH2	Pruess et al, 1999	● 派生バージョン多い ● 浸透率の圧力依存性 ▲ 応力変形（力学影響）を考慮できない	○	○	△		・GMT、 LASGIT ほか ・TH は完全陰的連成 ・M は擬似（陽的）連成

3.1.3　実施内容

(1) 人工バリア中のガス移行挙動の現象理解

1) ガス移行試験の予察解析

「第 4 章 4.2.1 ベントナイト緩衝材におけるガス移行挙動評価に係るガス注入試験」の中で、ベントナイト供試体（乾燥密度 1.6Mg/m^3、クニゲル V1）を用いたガス注入試験が実施されている。この試験は、これまで実施してきたベントナイト供試体内での流路拡幅（大破過）を発生させ、破過を伴うガス移行挙動の現象理解を目的とした試験とは異なり、供試体中のガスが気液 2 相流れによって流動することを想定した低注入圧条件（ただし、ベントナイト供試体の平衡膨潤圧以下）によるガス透気を試みるもので、国内外の既往の検討においても例の少ない人工バリア中の破過を伴わないガス移行挙動の現象理解を目的とするものである。

ここでは、上記試験におけるガス透気時期の推定や、試験期間中のモニタリング結果との比較を目的として、ガス注入試験系を模擬した予察解析を実施する。予察解析で設定する 2 相流パラメータや力学パラメータは、既存研究成果の中で確証されたデータを用いる。なお、解析コードには、水・ガス 2 相流解析コード GETFLOWS と力学連成解析コード Code_Bright の 2 種類を適用する。予察解析結果を整理し、注入ガスの透気時期や供試体内部の圧力や水飽和度、応力状態等を可視化するとともに、確証データ・構成モデルの信頼性についても確認・考察を行う。

2) ガス発生モデリングの検討

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

ここでは、ガス発生速度の定量化に資するため、既存のガス発生モデルに関する調査を実施し、使用可能なコードが存在する場合は、2 相流解析コード（GETFLOWS、TOUGH2 等）との連成解析を試行することとした。この場合、簡易モデルを用いた検証解析を実施することとし、処分施設のガス発生量に依存したガス移行挙動の現象理解に資することを成果の反映先に設定した。

(2) ガス移行データライブラリの拡充

既に述べたように平成 24 年度までの検討においてガス移行解析手法の高度化を行ってきたが、これらの検討の中で解析結果の信頼性や精度向上を図っていくには、最新の研究・知見で得られた材料データや構成モデルを速やかにモデリング検討に反映し、効果的な試行錯誤を重ねていくことが不可欠であった。

このような背景の下、最新の知見で確証された構成モデルやパラメータ（データ）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。本データライブラリは、「解析ツール」としての機能も有し、データライブラリ内に実装された制御モジュール（解析サポートプログラム群）と解析コードが連携することで、新たな構成モデルの組み込みが効率的に行える仕様となっており、今後実施していくガス移行解析において運用していくことが有効である。

本年度は、ガス移行データライブラリを運用していくことを念頭に、昨年度（平成 25 年度）に実施した「ガス移行挙動解析ツールの高度化に係る検討」の確証解析で同定されたパラメータや、

他の研究機関等で確証されているデータを追加収集した上で、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）を行う。

(3) TRU 廃棄物処分システムの不確実性を考慮したガス移行解析の評価

「(1)2)　ガス発生モデリングの検討」で述べたように、今年度は水・ガス 2 相流解析モデルとガス発生モデルを連成させた解析を行い、今後 THM 連成に関連する構成モデルの高度化等、複数の解析モデルの高度化を進めていく。また、これまでの検討において、ベントナイト系材料の室内ガス移行試験データの再現解析を通じて 2 相流パラメータや力学パラメータを同定し、データの蓄積を行ってきている。さらに今後は、ベントナイト系材料だけでなく、セメント系材料等のガス移行試験も予定されており、他材料に関してもデータを蓄積していく予定である。

一方で、これらデータやモデルはガス移行試験結果の検証解析等を通じて確証を得ていくものの、処分施設の長期変遷を考慮する上では不確実性が残ることとなる。さらに、TRU 廃棄物処分施設を対象としたガス移行解析によるガス移行経路の評価を行う際、解析結果は解析格子の解像度や次元に影響を受ける場合がある。データ・モデルの不確実性や解析格子のモデル化に伴う結果の相違を考慮した上で、ガス移行経路や施設内最大圧力、押出し水量といった重要となる評価指標を評価することが重要となる。

最適な規模・解像度の解析格子を用いて、データやモデルの不確実性を考慮し、アンサンブル評価*によってガス移行経路や評価指標を幅で評価する手法を『次世代モデリング技術』と定義する。

昨年度に推進した次世代モデリング技術開発では、解析格子の解像度に着目し、解像度の異なる 3 パターンを用いて同一条件でガス移行解析を実施したが、いずれの場合でも、ガス透気経路や施設内最大圧力、押出し水量に大きな差は生じなかった。

今年度は解析格子の次元性に着目し、典型的な TRU 廃棄物処分施設を対象とし、3 次元の解析格子モデルを構築し、ガス移行解析を実施する。解析には水・ガス 2 相流解析コード GETFLOWS を用いる。

---

* 異なるモデルによって、ほぼ同一の境界条件の下でシミュレーションしたり、パラメータを不確実性の範囲内で様々な値に設定してシミュレーションを行うことで、モデルやパラメータの不確実性によって生じる「結果の幅」を評価すること

3.2 人工バリア中のガス移行挙動の現象理解

3.2.1 ガス移行試験の予察解析

本検討と並行して、「第 4 章 4.2.1 項『ベントナイト緩衝材におけるガス移行挙動評価に係るガス注入試験』」の中で、ベントナイト供試体（乾燥密度 1.6Mg/m^3、クニゲル V1）を用いたガス注入試験（供試体 No.1、No.2 の 2 ケース）が実施されている。この試験は、これまで実施してきたベントナイト供試体内での流路拡幅（大破過）を発生させ、破過を伴うガス移行挙動の現象理解を目的とした試験とは異なり、供試体中のガスが気液 2 相流れによって流動することを想定した低注入圧条件（但し、ベントナイト供試体の平衡膨潤圧以下）によるガス透気を試みるもので、国内外の既往の検討においても例の少ない人工バリア中の破過を伴わないガス移行挙動の現象理解を目的とするものである。

本予察解析では、上記試験におけるガス透気時期の推定や、試験期間中のモニタリング結果との比較を目的として、ガス注入試験系を模擬した予察解析を実施する。なお、解析コードには、水・ガス 2 相流解析コード GETFLOWS と力学連成解析コード Code_Bright の 2 種類を適用する。予察解析結果を整理し、注入ガスの透気時期や供試体内部の圧力や水飽和度、応力状態等を可視化するとともに、確証データ・構成モデルの信頼性についても確認・考察を行う。

(1) 水・ガス二相流解析コード（GETFLOWS）による予察解析

1) 検討方針

水・ガス二相流解析コード GETFLOWS を用いた予察解析では、既存研究の中で実施された複数の室内ガス透気試験の再現解析から同定された 2 相流パラメータを用いて、ガス透気時期や排水量に着目した検討を実施する。既存研究で実施された室内ガス透気試験の概要を表 3.2.1-1 に示す。これらの室内ガス透気試験の再現解析から同定された 2 相流パラメータおよび流路拡幅を表現する構成モデルパラメータを表 3.2.1-2 に示す。なお、既往検討での同定解析の際に、相対浸透率と毛細管圧力曲線を表現する構成モデルとして$van\ Genuchten\ (vG)$モデル[12]を用いている。vGモデルの構成式を表 3.2.1-3 に示す。また、ベントナイトの流路拡幅を表現する構成モデルに関しては(1)2) に示した。図 3.2.1-1、図 3.2.1-2 に用いる相対浸透率、毛細管圧力曲線を示す。

表 3.2.1-1　既存研究で実施された室内ガス透気試験の概要

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

表 3.2.1-2 既存検討で同定された 2 相流パラメータ

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

表 3.2.1-3　相対浸透率、毛細管圧力曲線を表現する構成モデル（vGモデル）

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

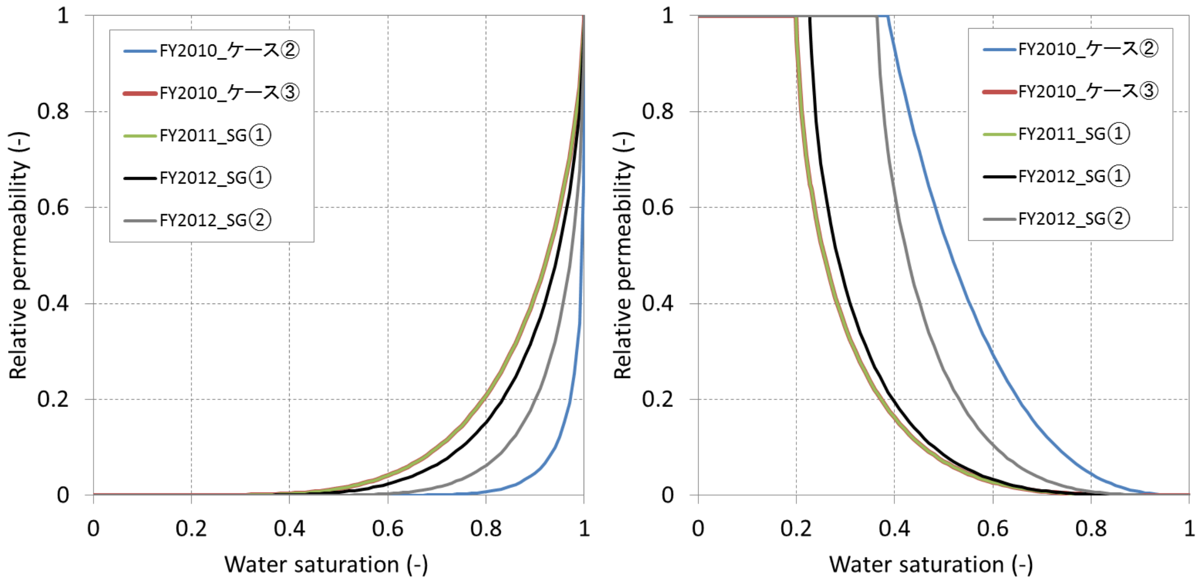


図 3.2.1-1　既往検討で同定された相対浸透率曲線（左：水相、右：ガス相）

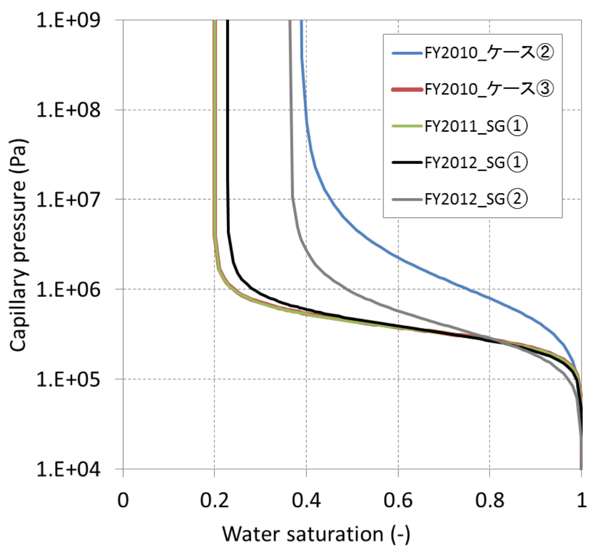


図 3.2.1-2　既往検討で同定された毛細管圧力曲線

2)　解析コード

解析には、多相多成分流体を対象とした汎用地圏流体シミュレータ GETFLOWS（General-purpose Terrestrial fluid-FLOW Simulator)[1]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。

$$\nabla\cdot\left(\rho_{wS}\frac{K_w k_{rw}}{\mu_w B_w}\nabla\Psi_w\right)-\rho_{wS}q_{wS}=\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho_{wS}\phi\frac{S_w}{B_w}\right) \tag{3.2-1}$$

$$\nabla\cdot\left(\rho_{gS}\frac{K_g k_{rg}}{\mu_g B_g}\nabla\Psi_g\right)-\rho_{gS}q_{gS}=\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho_{gS}\phi\frac{S_g}{B_g}\right) \tag{3.2-2}$$

式中の記号の説明は以下の通りである。

K_p	; 流体相$p(=w、g)$の絶対浸透率(m^2)
k_{rp}	; 流体相$p(=w、g)$の相対浸透率$(-)$
S_p	; 流体相$p(=w、g)$の飽和度$(-)$
P_p	; 流体相$p(=w、g)$の圧力(Pa)
μ_p	; 流体相$p(=w、g)$の粘性係数$(Pa\cdot \mathrm{s})$
ρ_{pS}	; 標準状態における流体相$p(=w、g)$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_{pS}	; 標準状態における流体相$p(=w、g)$の生成・消滅量$(1/s)$
B_p	; 流体相$p(=w、g)$の容積係数(m^3/m^3)
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。

$$\Psi_w=P_w-\rho_w gZ \tag{3.2-3}$$

$$\Psi_g=P_g-\rho_g gZ \tag{3.2-4}$$

ここに、Zは下方に測った距離（深度）、ρ_w、ρ_g、gはそれぞれ水相、ガス相の密度、重力加速度である。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。

$$P_c=P_c[S_w]=P_g-P_w \tag{3.2-5}$$

$$\phi=\phi[P_g]=\phi_0\left(1+C_r(P_g-P_0)\right) \tag{3.2-6}$$

$$k_{rp}=k_{rp}[S_w] \tag{3.2-7}$$

$$B_p=B_p[P_p] \tag{3.2-8}$$

$$\rho_p=\rho_p[P_p]=\rho_{pS}/B_p[P_p] \tag{3.2-9}$$

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

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

$$(P_g \leq P_w + P_s) \quad \begin{aligned} \phi &= \phi_0\big(1 + C_r(P - P_0)\big) \\ K &= K_0 \end{aligned} \tag{3.2-10}$$

$$(P_g > P_w + P_s) \quad \begin{aligned} \phi &= \phi_0\big(1 + C_r(P_s - P_0) + FC_r(P_s - P_0)\big) \\ K &= CK_0(\phi/\phi_0)^{n_{PD}} \end{aligned} \tag{3.2-11}$$

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

空隙損傷モデルは、ガス透気時の上流側のガス相圧力が、下流側の水相圧力と圧力閾値（膨潤圧）の和を超えた際に流路拡幅が起こり、間隙率と絶対浸透率が増加するものである。流路拡幅前後の間隙率と絶対浸透率の変化イメージを図 3.2.1-3 に示す。

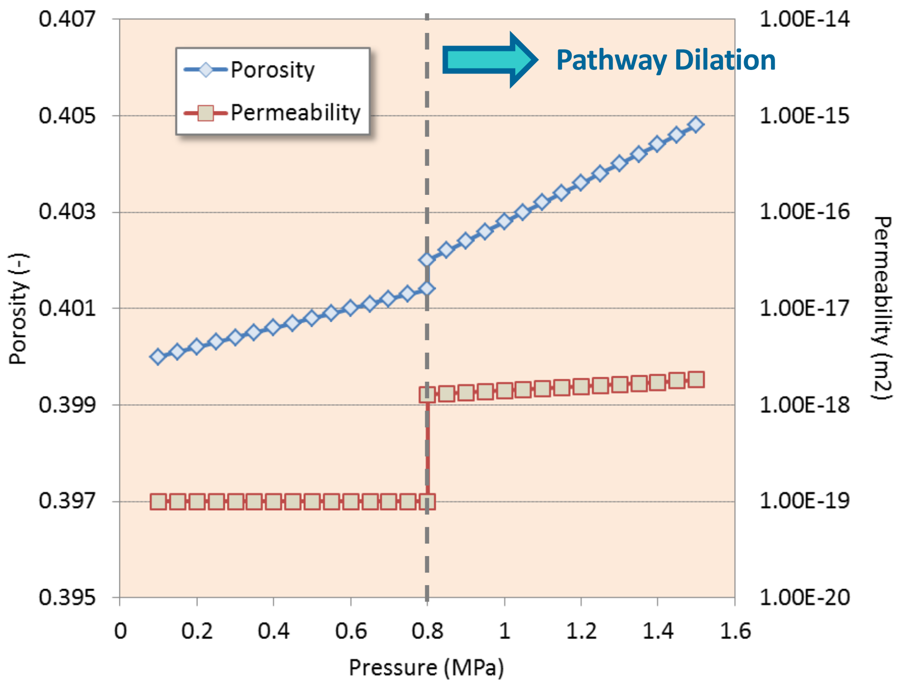


図 3.2.1-3　流路拡幅前後の間隙率と絶対浸透率の変化イメージ

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

$$\begin{aligned} &\nabla\cdot\left(\rho_{ws}\frac{K_w k_{rw} R_w}{\mu_w B_w}\nabla\Psi_w\right) + \nabla\cdot D_w\nabla\left(\rho_{ws}\frac{R_w}{B_w}\right) + m_{g\to w} - \rho_{ws}q_{ws}R_w \\ &= \frac{\partial}{\partial t}\left(\rho_{ws}\phi\frac{S_w R_w}{B_w}\right) \end{aligned} \tag{3.2-12}$$

式中の記号の説明は以下の通りである。

R_w　；水相中の溶存物質濃度(m^3/m^3)

D_w　；水相中の溶存物質の水力学的分散係数(m^2/s)

$m_{g\to w}$　；水相、気相間の溶解・遊離項$(kg/m^3/s)$

GETFLOWS における流体相間の相間物質移動（水相への空気の溶解など）の取扱いは非平衡

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

数値解法について以下に示す。

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。

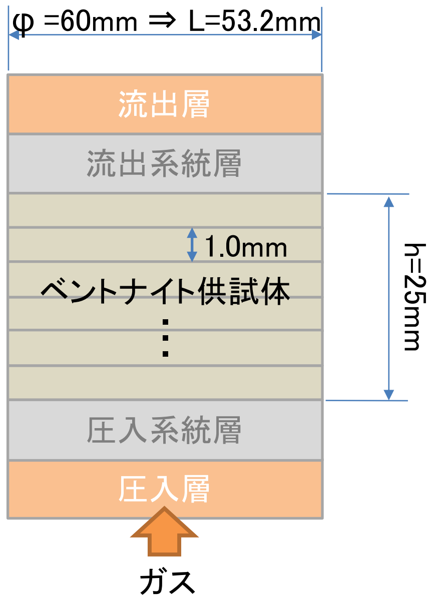
強い非線形性を有する三次元流体問題を解く必要性から、時間離散化には方程式系の完全陰的有限差分展開を行ったものに Newton-Raphson 法を適用し、各流体成分の方程式を反復的に解く手法を採用している。基本方程式を上記 IFDM によって空間離散化すると 7 重対角行列を係数行列とした連立方程式を得る。行列の各成分は解くべき変数であるガス相圧力P_g、水相飽和度S_wを未知数とした 2×2 小行列となり、システム全体の自由度は格子数 NBLK×未知数 NEQ(=2)となる。これを、Nested Factorization[10]と呼ばれる三次元構造格子の入れ子構造に着目した前処理を行い共役残差法で解く。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）[11]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)　ガス透気試験系のモデル化

本予察試験で対象とするガス透気試験系を図 3.2.1-4 に示す。供試体内の水・ガスの 1 次元的な流れを仮定し、解析モデルは供試体の寸法（φ60mm×h25mm）をもとに、断面積が等価な矩形断面（一辺約 53.2mm）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 3.57mL の圧入、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ガス圧（表 3.2.1-4）を与える境界格子を設けた。図 3.2.1-4 に解析モデルの基本諸元を示す。供試体は初期水飽和状態とし、初期圧力は背圧（0.2MPa）と同じ、温度は 25℃とした。試験中の温度変化は考慮しないものとした。

表 3.2.1-4　載荷圧力条件

経過時間	注入側圧力	排出側圧力	差圧
初期状態	0.2 (MPa)	0.2 (MPa)	0.0 (MPa)
0 日	0.3 (MPa)	0.2 (MPa)	0.1 (MPa)
2 日	0.4 (MPa)	0.2 (MPa)	0.2 (MPa)
4 日	0.5 (MPa)	0.2 (MPa)	0.3 (MPa)



流出境界層

背圧 0.2MPa

流出系統層

フィルタ、配管等（3.57mL）を表現

ベントナイト供試体

鉛直方向を 1mm 幅に等分割した格子群

- 圧力：0.2MPa（背圧と同じ）
- 水飽和度：100%
- 温度：25℃

圧入系統層

フィルタ、配管等（3.57mL）を表現

圧入境界層

試験条件となるガス圧を与える（表 3.2.1-4）

図 3.2.1-4　ガス透気試験系のモデル化と初期・境界条件

4)　解析条件

a.　流体物性

水、空気の流体物性を示す。本検討では等温状態（25℃）を仮定するため、流体物性を圧力に応じて変化させる。

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$0.890 \times 10^{-3}(Pa\,s)$とし、以下の式により水圧の関数として取り扱う。

$$\rho = \rho_0\left(1 + C_f(P_w - P_0)\right) \quad (3.2\text{-}13)$$

$$\mu = \mu_0\left(1 + C_\mu(P_w - P_0)\right) \quad (3.2\text{-}14)$$

ここに、ρ、μ、C_f、C_μ、P_w、P_0はそれぞれ、水の密度(kg/m^3)、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$0.45 \times 10^{-9}(1/Pa)$、粘性係数の増加率には$1.0 \times 10^{-10}(1/Pa)$、参照圧力には101、325$(Pa)$を設定した。

標準大気圧の空気の密度をそれぞれ1.184(kg/m^3)、粘性係数を$1.82 \times 10^{-5}(Pa\,s)$、とし、密度はガス相圧力に比例するものとし、粘性係数は変化しないものとした。

b.　水理物性

絶対浸透率は供試体 No.1、No.2 の飽和試験より算定した平均値$4.25 \times 10^{-20}(m^2)$を用いる。有効間隙率は土粒子密度2、700$(kg/m^3)$、乾燥密度1、360$(kg/m^3)$から算出した0.4963$(-)$を与えた。固相圧縮率は$1.0 \times 10^{-9}(1/Pa)$を仮定した。

c.　物質輸送関連物性

ガスの水相への溶解を考慮する場合、物質輸送に関連するパラメータを以下のように設定した。

- 分子拡散係数：$0.93 \times 10^{-9} (m^2/s)$
- 屈曲度：$1.0(-)$
- 縦分散長：$0.0025(m)$
- 飽和溶解度：$0.0178(cm^3/cm^3)$（25℃、ヘンリー則を適用し、圧力に比例するものとする）

5) ケース設定

表 3.2.1-5 に、本予察解析における検討ケースをまとめた。はじめに、表 3.2.1-5 に示した 5 つの試験データの再現解析から得られた 2 相流パラメータの組合せを用いたケースを実施する（ケース 1～ケース 5)。次に、これら 5 ケースの中で実測された累積排水量データを良く再現するケースに対し、ガスの水相への溶解を考慮した検討を実施した。実測データとの比較結果は後述するが、供試体 No.1、No.2 の累積排水量データの再現性が最も高いケースはそれぞれ、ケース 5（FY2012_SG②)、ケース 1（FY2010_ケース②）であった。溶解を考慮したケースでは、瞬時変更状態を仮定した場合と非平衡状態を仮定した場合の 2 ケース（それぞれ、ケース 1-a、1-b、ケース 5-a、5-b とする）を実施する。非平衡状態を仮定した場合の溶解速度は、田中ら（2009）[14]を参考に決定した。なお、初期には標準大気圧における飽和溶解量が溶解している状態を仮定した。

表 3.2.1-5 検討ケース一覧

ケース名		2 相流パラメータ同定の際に対象とした試験	ガス溶解
1	FY2010_ケース②	2010 年度の試験ケース②	考慮しない
2	FY2010_ケース③	2010 年度の試験ケース③	考慮しない
3	FY2011_SG①	2011 年度の試験ケース SG①	考慮しない
4	FY2012_SG①	2012 年度の試験ケース SG①	考慮しない
5	FY2012_SG②	2012 年度の試験ケース SG②	考慮しない
1-a	FY2010_ケース②_D1	2010 年度の試験ケース②	考慮する、瞬時平衡を仮定
1-b	FY2010_ケース②_D2	2010 年度の試験ケース②	考慮する、非平衡状態を仮定（溶解速度 3.0×10^{-11} (m^2/s))
5-a	FY2012_SG②_D1	2012 年度の試験ケース SG②	考慮する、瞬時平衡を仮定
5-b	FY2012_SG②_D2	2012 年度の試験ケース SG②	考慮する、非平衡状態を仮定（溶解速度 3.0×10^{-11} (m^2/s))

6) 解析結果

a. ケース 1～ケース 5

ケース 1～ケース 5 の供試体上面からのガス透気量の時間変化を図 3.2.1-5 に、累積排水量の時間変化を図 3.2.1-6 に示す。ベントナイト上端・中央・下端部におけるガス相圧力、水相圧力、水相飽和度を図 3.2.1-7 に示す。また、実測データのとの比較は後述するが、再現性が高い結果

が得れれたケース 1（FY2010_ケース②）、ケース 5（FY2012_SG②）に対して、複数の時間断面におけるガス相圧力、水相圧力、水相飽和度の分布を図 3.2.1-8 に示した。

この予察解析の結果から、2 相流パラメータの組合せの違いによって、対象としているガス透気試験のガス透気時期は、1 年～3 年程度の幅が生じ得ることが示唆された。次に、実測データを用いて、これらの解析結果との比較を試みた。

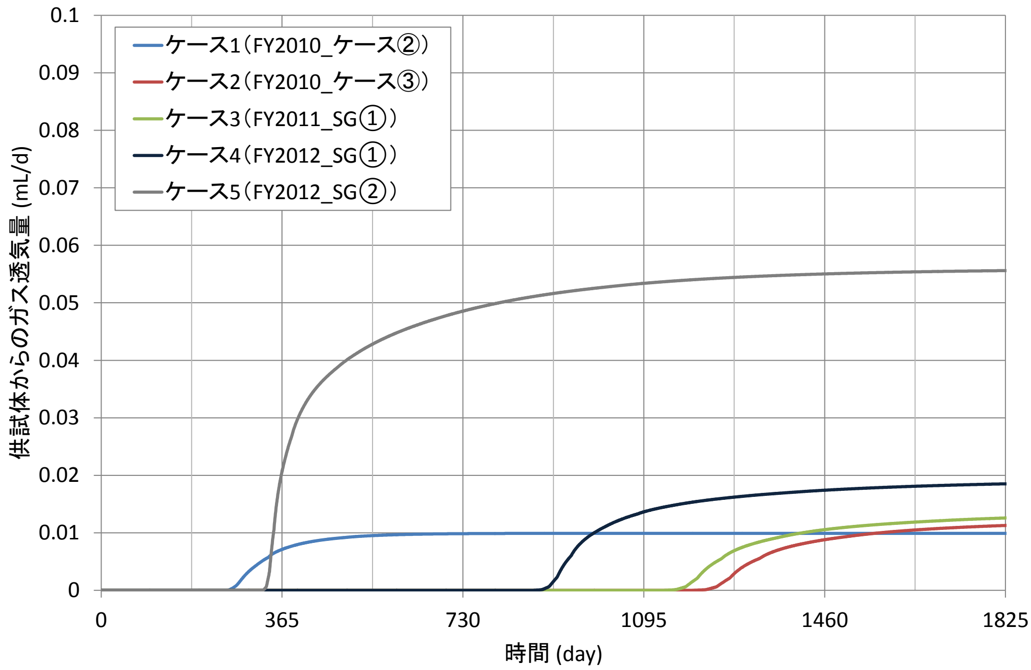


図 3.2.1-5　供試体上面からのガス透気量（ケース 1～ケース 5）

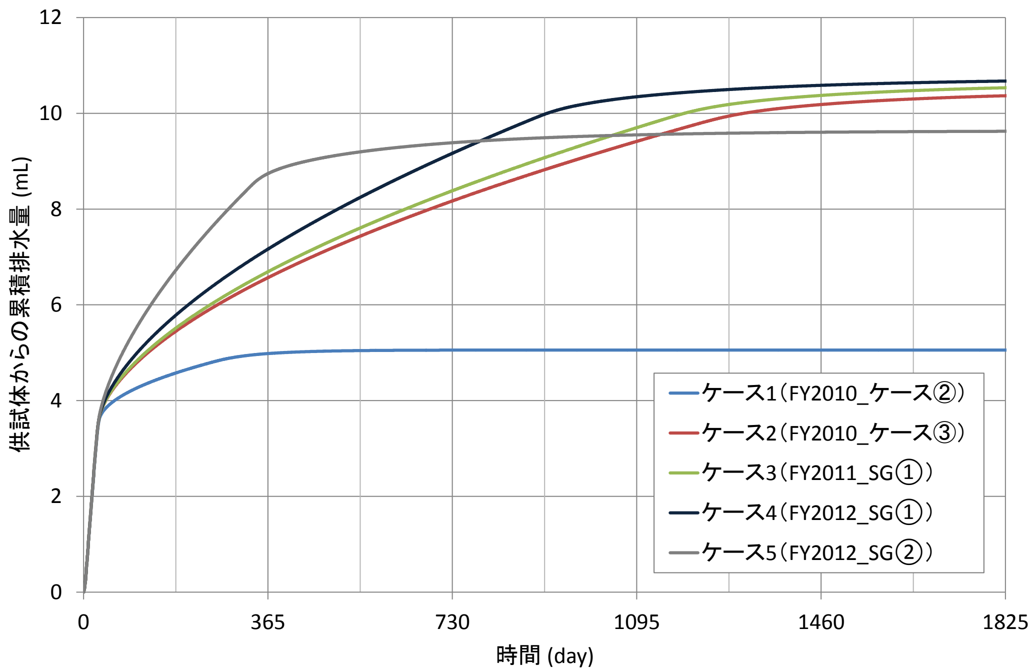


図 3.2.1-6　供試体上面からの累積排水量（ケース 1～ケース 5）

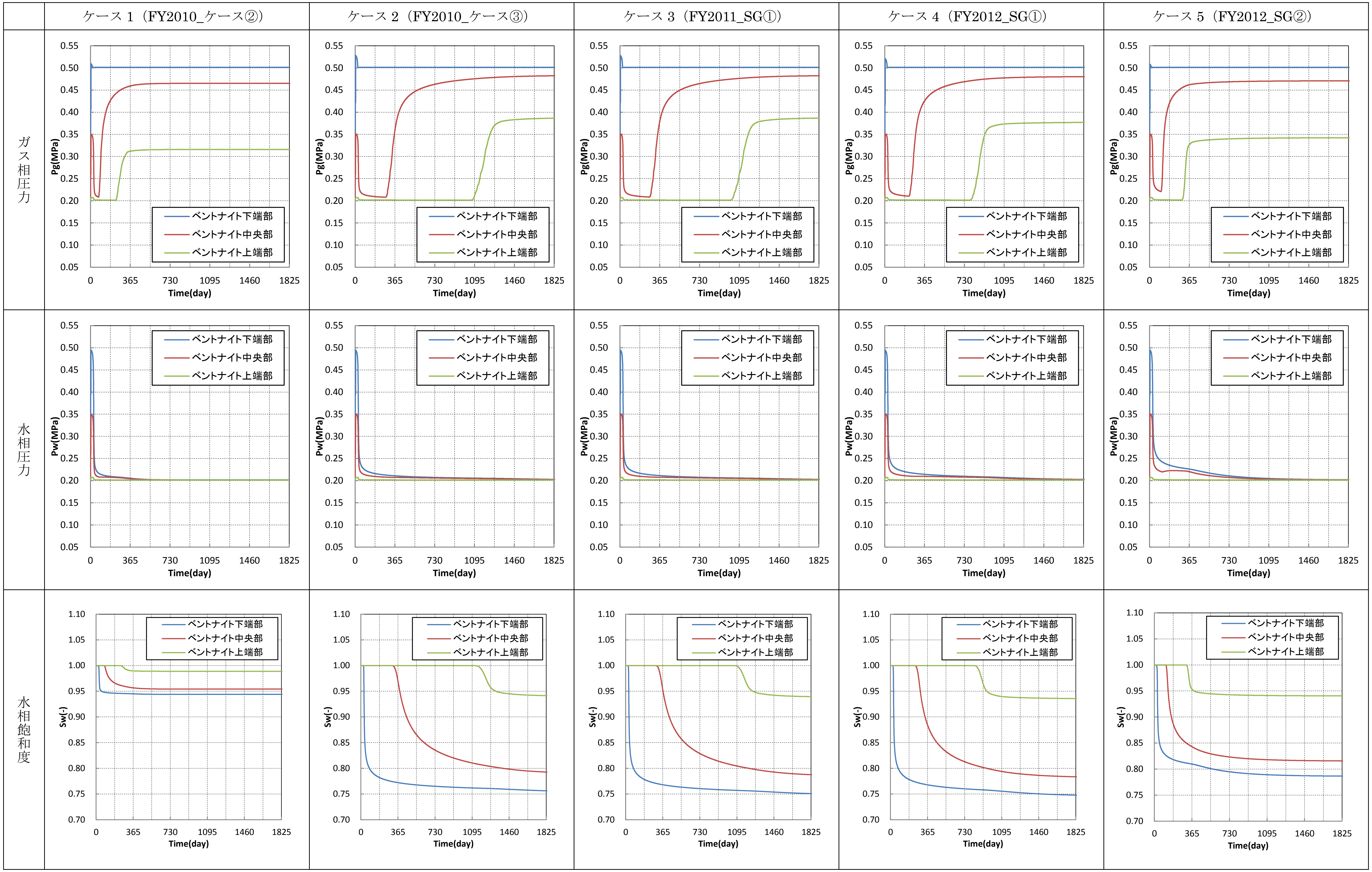
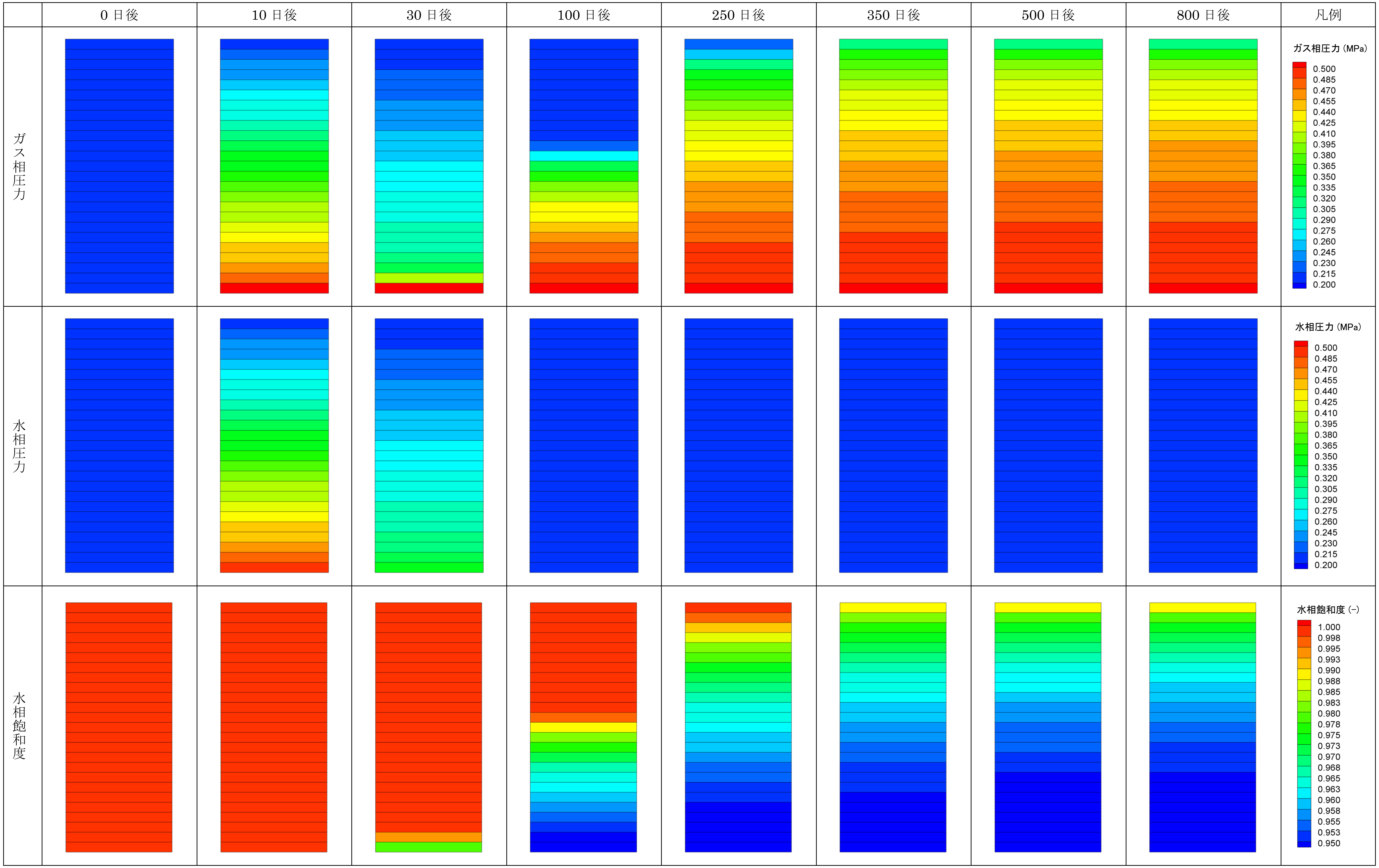
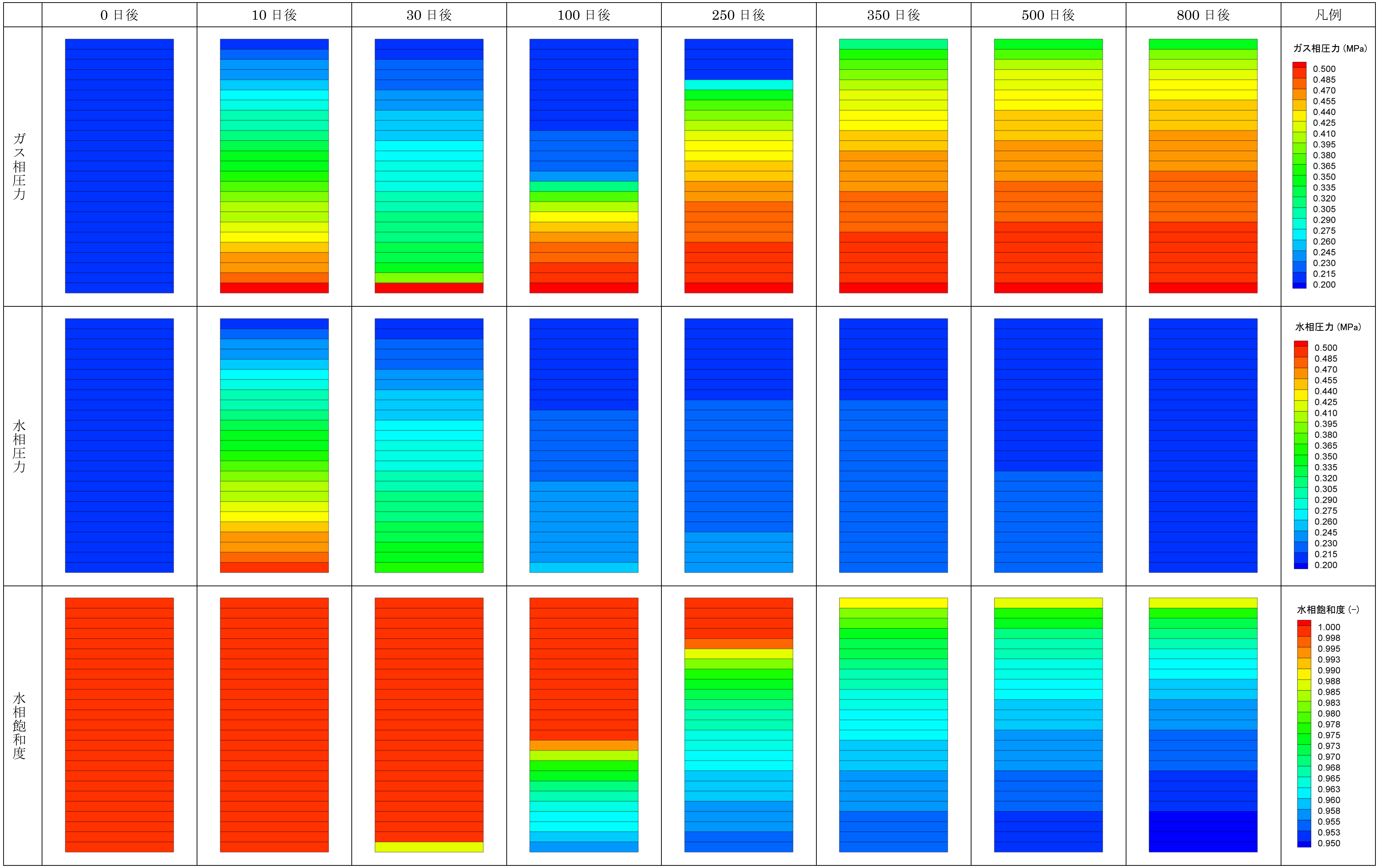


図 3.2.1-7　ベントナイト上端部・中央部・下端部におけるガス相圧力・水相圧力・水相飽和度の時系列変化



※供試体の縦横比を５：１で表示

図 3.2.1-8　ケース１（FY2010_ケース②）におけるガス相圧力・水相圧力・水相飽和度分布



※供試体の縦横比を 5：1 で表示

図 3.2.1-9　ケース 5（FY2012_SG②）におけるガス相圧力・水相圧力・水相飽和度分布

b.　実測データとの比較（ケース 1～ケース 5）

ケース 1～ケース 5 に対して、原環センターより提示頂いた実測データを用いて、解析結果との比較を行った。図 3.2.1-10 に供試体上面からの累積排水量に対して、解析結果と観測結果を比較したものを示す。これを見ると、供試体 No.1 の実測データはケース 5（FY2012_SG②）と整合しており、供試体 No.2 に関してはケース 1（FY2010_ケース②）との対応が最も良い結果となった。そこで、既にガス透気試験を終了し（排水がほぼ停止したため）、解体調査が行われている供試体 No.2 の水飽和度の深度プロファイルと、ケース 1（FY2010_ケース②）の解析結果を比較した。こちらの結果も概ね実測データと整合する結果が得られている。

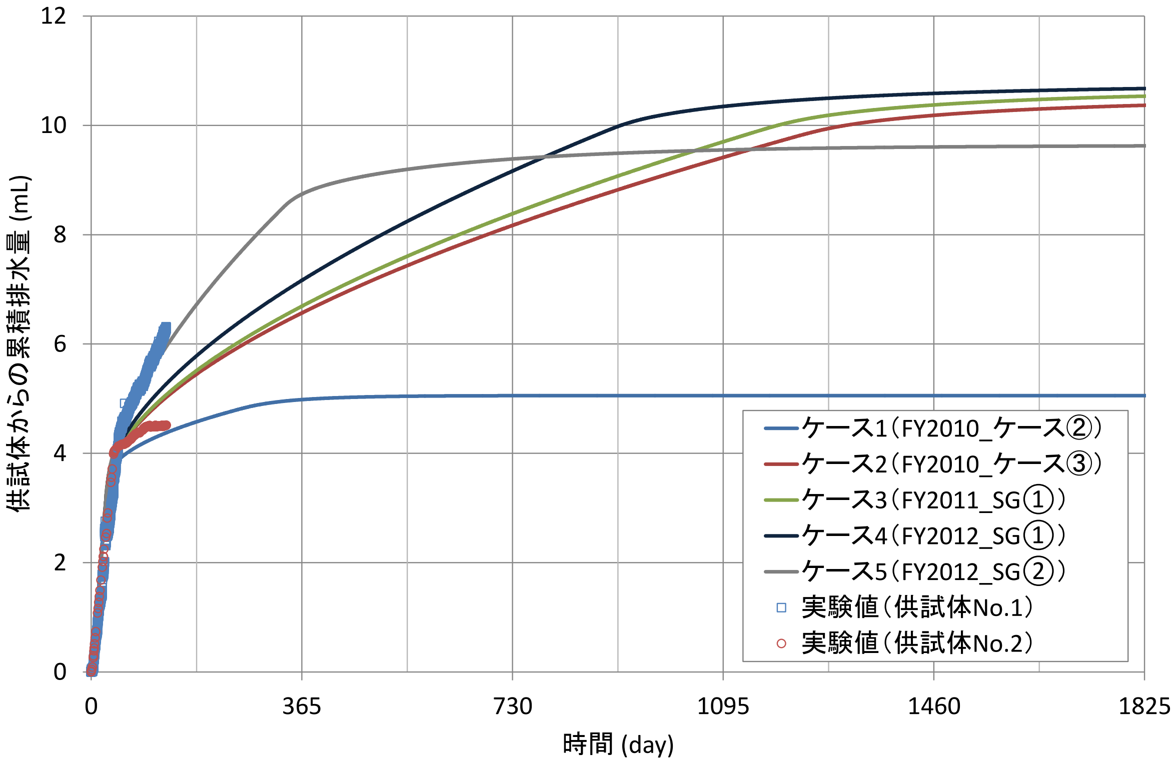


図 3.2.1-10　供試体上面からの累積排水量の比較

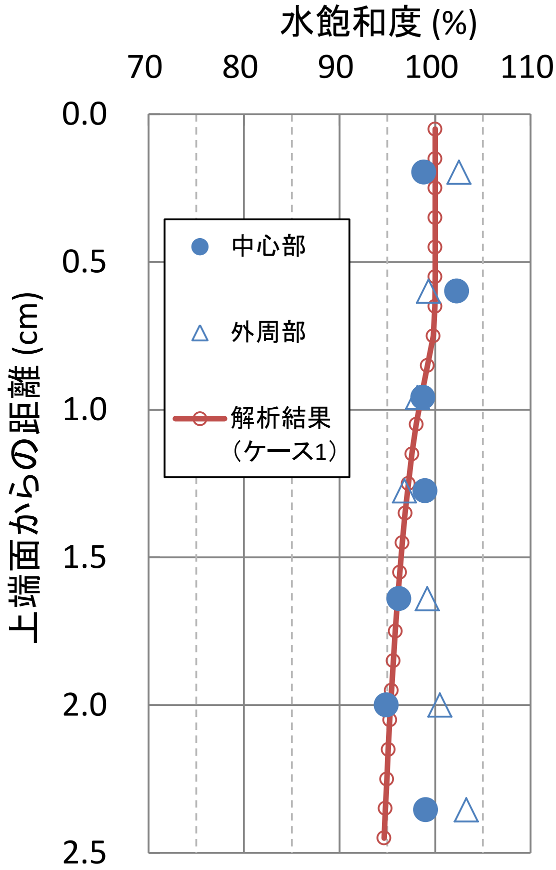


図 3.2.1-11　水飽和度の深度プロファイルの比較（ケース 1）

c.　　ケース 1-a、ケース 1-b

次に、ガスの水相への溶解の影響を把握するために、供試体 No.2 の累積排水量データを最も良く再現したケース 1（FY2010_ケース②）に対して、ガス溶解を考慮した解析を実施した。ケース 1-a はガス溶解の瞬時平衡状態を仮定したケース、ケース 1-b は非平衡状態を仮定したケースである。

図 3.2.1-12 に供試体上面からのガス透気量の時間変化を示す。また、図 3.2.1-13 に供試体上面からの累積排水量の時間変化を実測データと合わせて示した。瞬時平衡状態を仮定したケース 1-a では、供試体の下部で注入ガスの全量が水相に溶解し、濃度拡散のみで移行し、約 100 日以降は排水が停止し、ガスも透気しない結果となった。供試体 No.2 においても、排水が途中から停止する傾向が認められており、ガス溶解の影響であることが 1 つの要因として考えられる。一方、非平衡状態を仮定したケース 1-b では、ガス溶解を考慮しないケース 1 の結果とほぼ同じ結果となった。

水飽和度の深度プロファイルの比較結果を図 3.2.1-14 に示す。いずれのケースにおいても、概ね実測データと整合する結果が得られている。ベントナイト上端・中央・下端部におけるガス相圧力、水相圧力、水相飽和度を図 3.2.1-15 に示す。また、ケース 1-a、ケース 1-b に対して、複数の時間断面におけるガス相圧力、水相圧力、水相飽和度の分布をそれぞれ図 3.2.1-16、図 3.2.1-17 に示した。

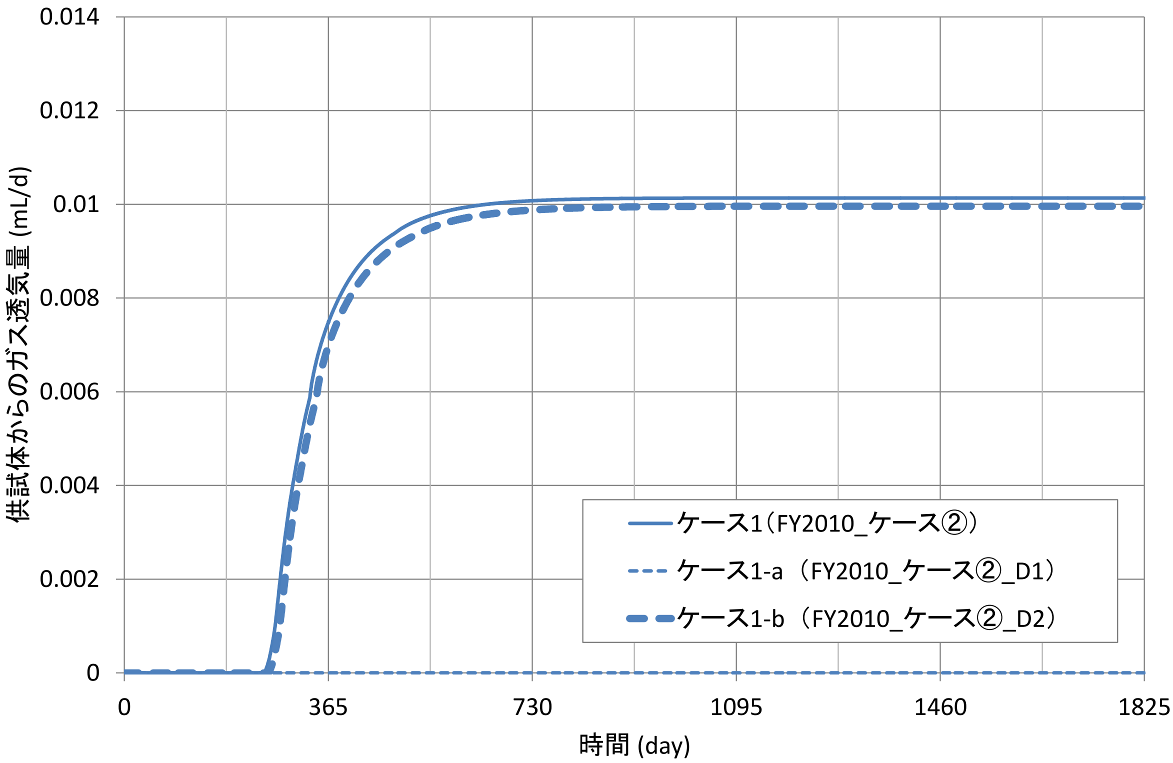


図 3.2.1-12　供試体上面からのガス透気量（ケース 1、ケース 1-a、ケース 1-b）

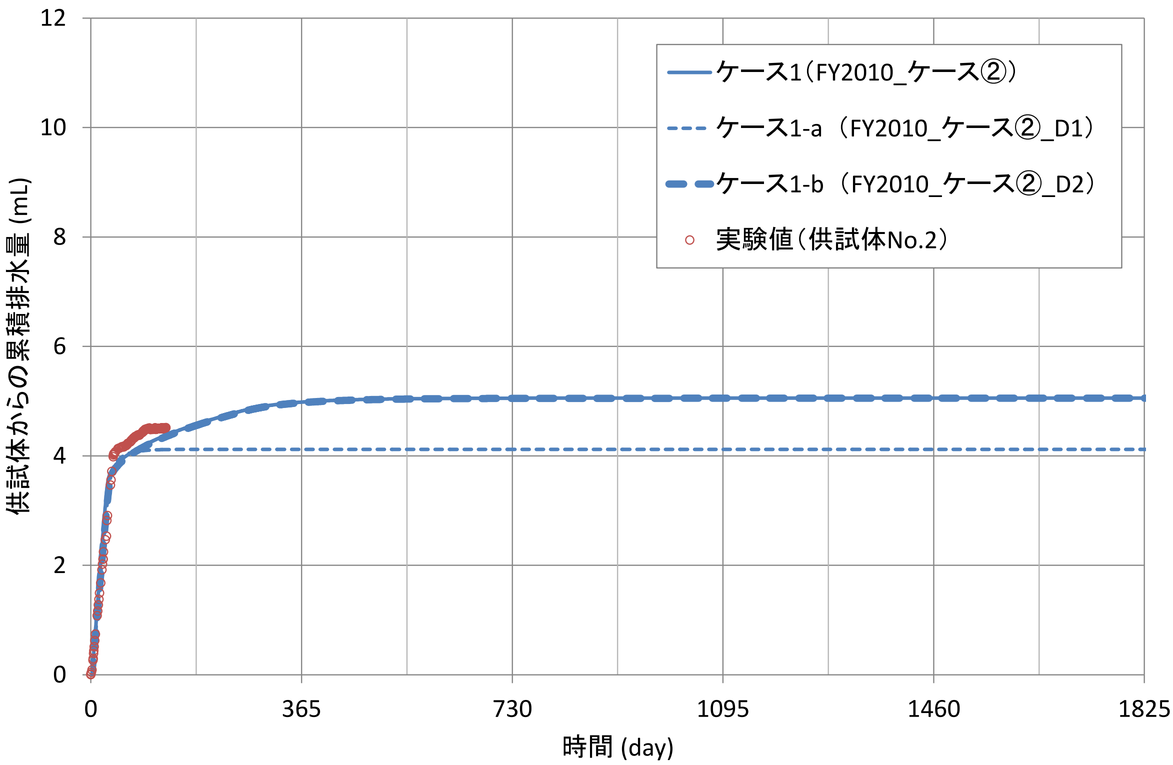
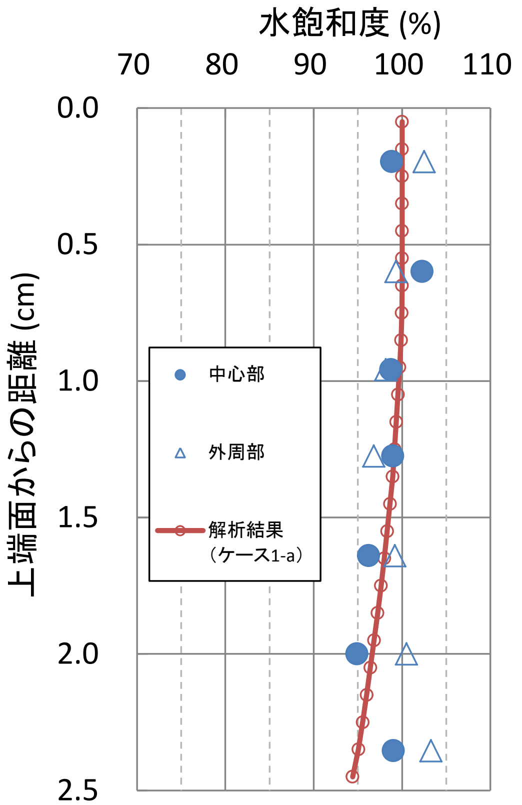


図 3.2.1-13　供試体上面からの累積排水量（ケース 1、ケース 1-a、ケース 1-b）



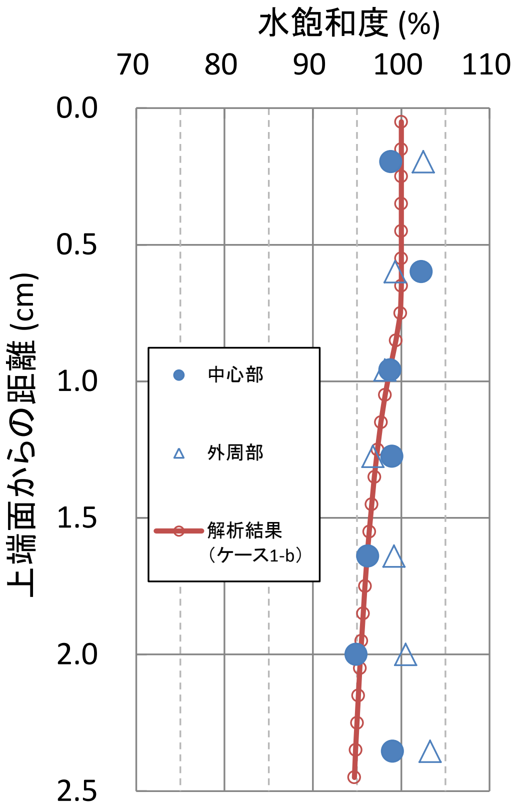


図 3.2.1-14 水飽和度の深度プロファイルの比較（ケース 1-a、ケース 1-b）

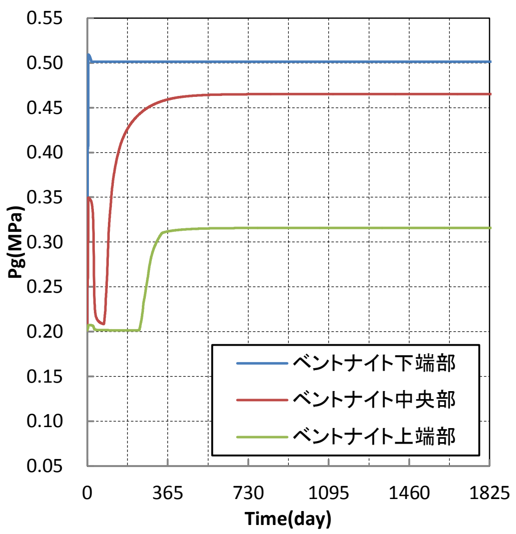
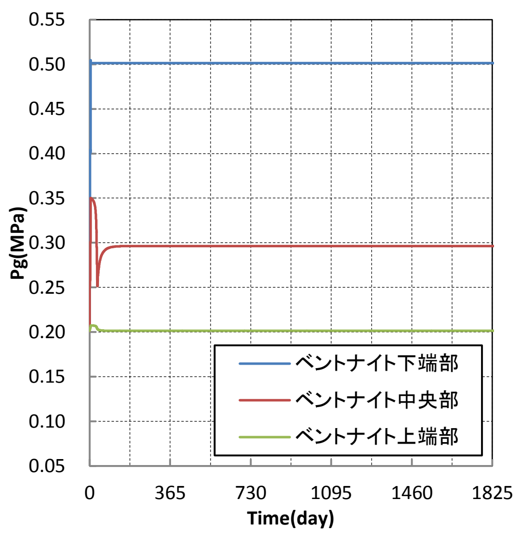
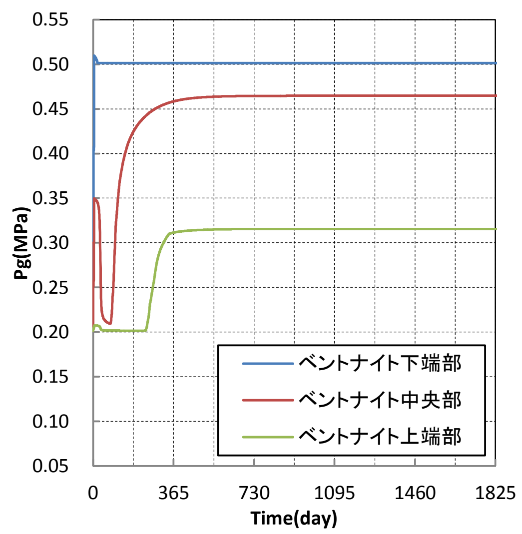
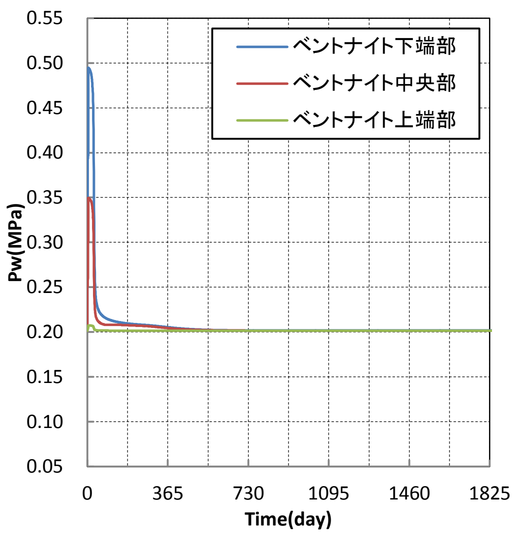
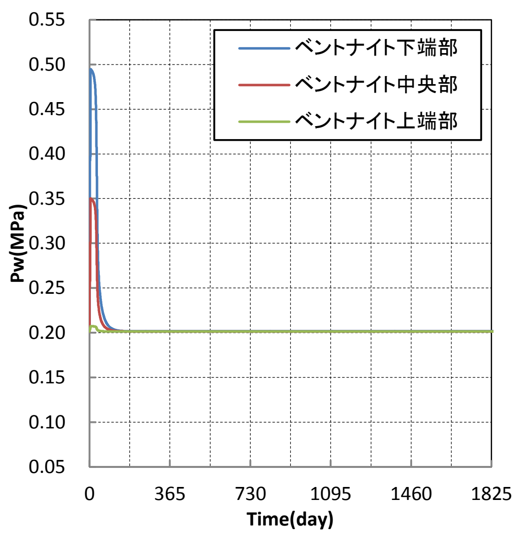
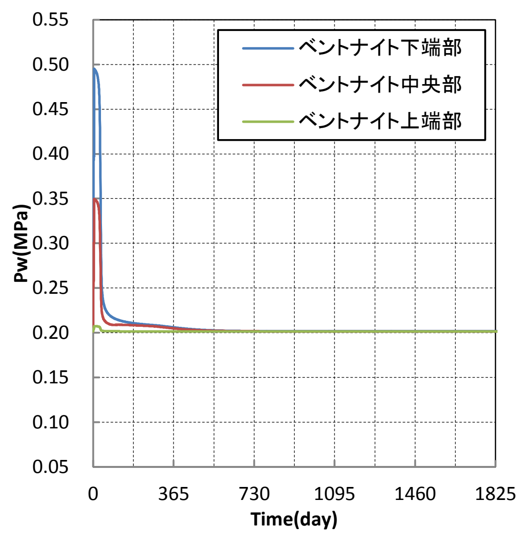
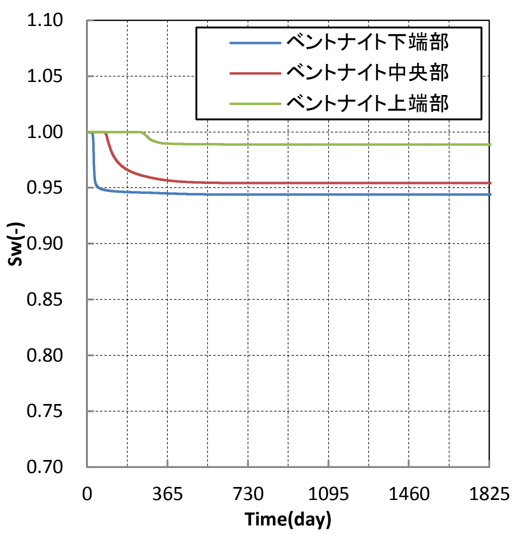
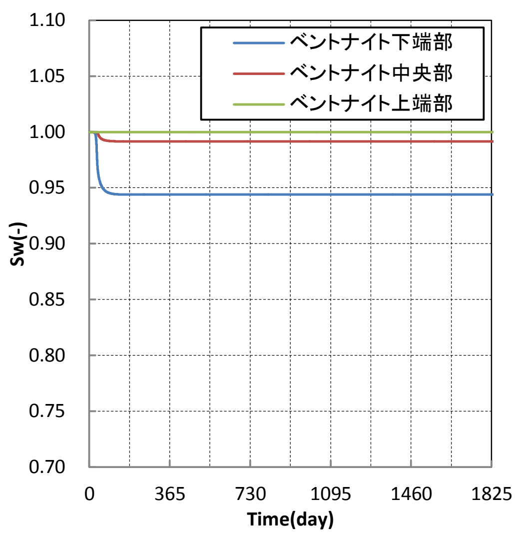
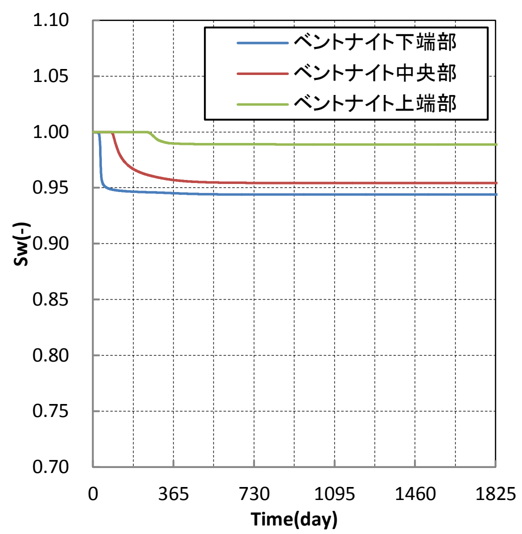
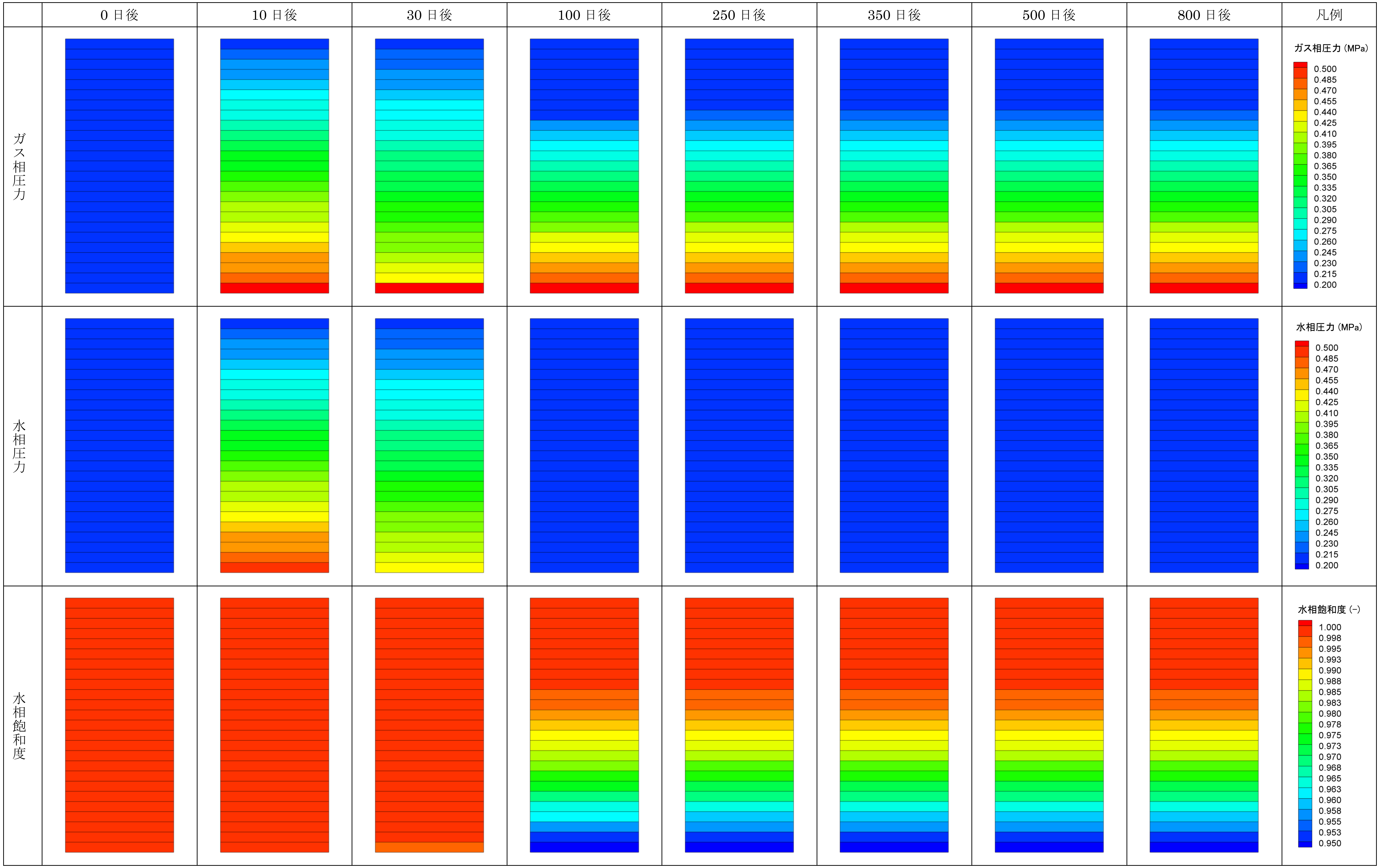
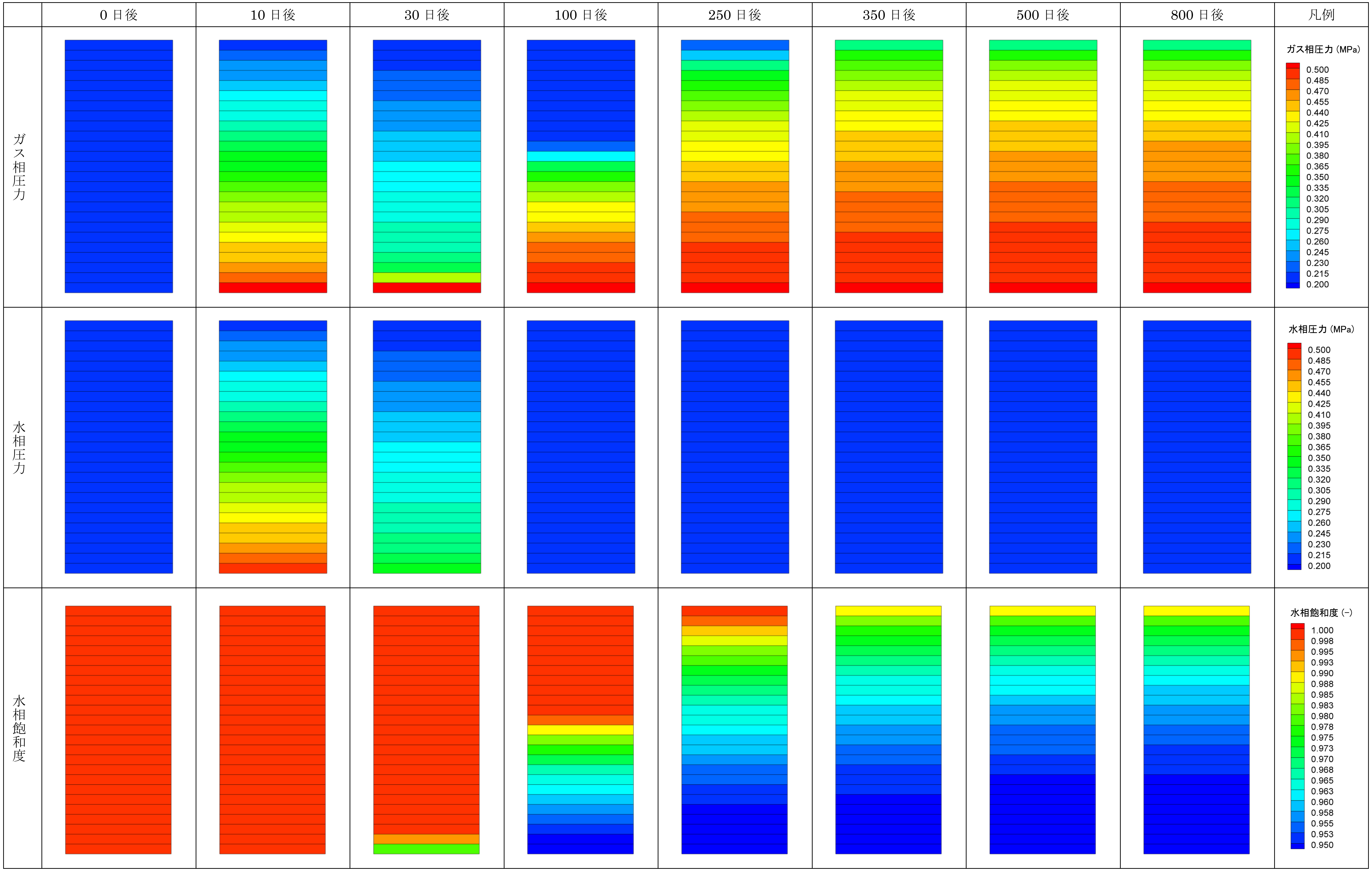
<table>
<tr><td></td><td>ケース 1</td><td>ケース 1-a</td><td>ケース 1-b</td></tr>
<tr><td>ガス相圧力</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td></tr>
<tr><td>水相圧力</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td></tr>
<tr><td>水相飽和度</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td></tr>
</table>

図 3.2.1-15　ベントナイト上端部・中央部・下端部におけるガス相圧力・水相圧力・水相飽和度の時間変化（ケース 1、ケース 1-a、ケース 1-b）



※供試体の縦横比を 5：1 で表示

図 3.2.1-16　ケース 1-a におけるガス相圧力・水相圧力・水相飽和度分布



※供試体の縦横比を 5：1 で表示

図 3.2.1-17　ケース 1-b におけるガス相圧力・水相圧力・水相飽和度分布

d. ケース 5-a、ケース 5-b

続いて、供試体 No.1 の累積排水量データを最も良く再現したケース 5（FY2012_SG②）に対して、ガス溶解を考慮した解析を実施した。ケース 5-a はガス溶解の瞬時平衡状態を仮定したケース、ケース 5-b は非平衡状態を仮定したケースである。

図 3.2.1-18 に供試体上面からのガス透気量の時間変化を示す。また、図 3.2.1-19 に供試体上面からの累積排水量の時間変化を実測データと合わせて示した。瞬時平衡状態を仮定したケース 5-a では、ケース 1-a と同様に供試体の下部で注入ガスの全量が水相に溶解し、ガスが透気することなく平衡状態に至る結果となった。2015 年 3 月 31 日時点で、供試体 No.1 は試験を継続中であるが、いずれ排水が停止し、供試体 No.2 と同様の傾向となる可能性が示唆された。非平衡状態を仮定したケース 5-b では、ガス溶解を考慮しないケース 5 の結果とほぼ同じ結果となった。ベントナイト上端・中央・下端部におけるガス相圧力、水相圧力、水相飽和度を図 3.2.1-20 に示す。また、ケース 5-a、ケース 5-b に対して、複数の時間断面におけるガス相圧力、水相圧力、水相飽和度の分布をそれぞれ図 3.2.1-21、図 3.2.1-22 に示す。

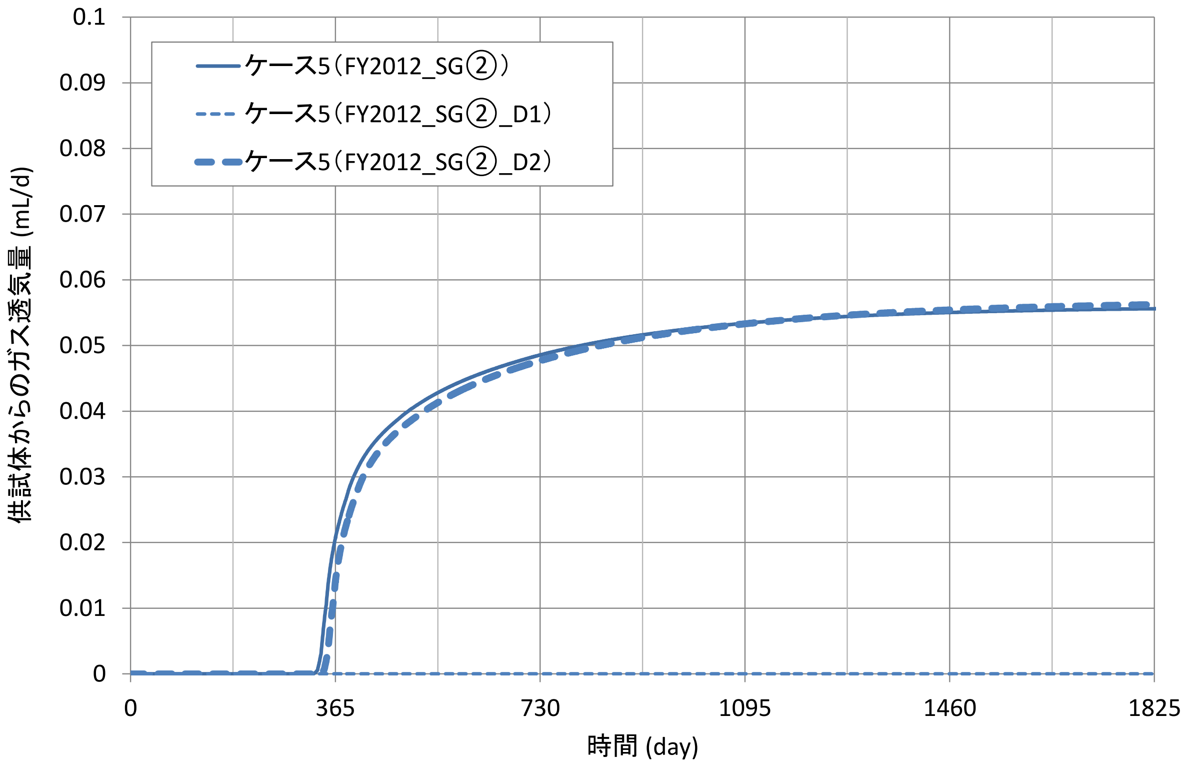


図 3.2.1-18　供試体上面からのガス透気量（ケース 5、ケース 5-a、ケース 5-b）

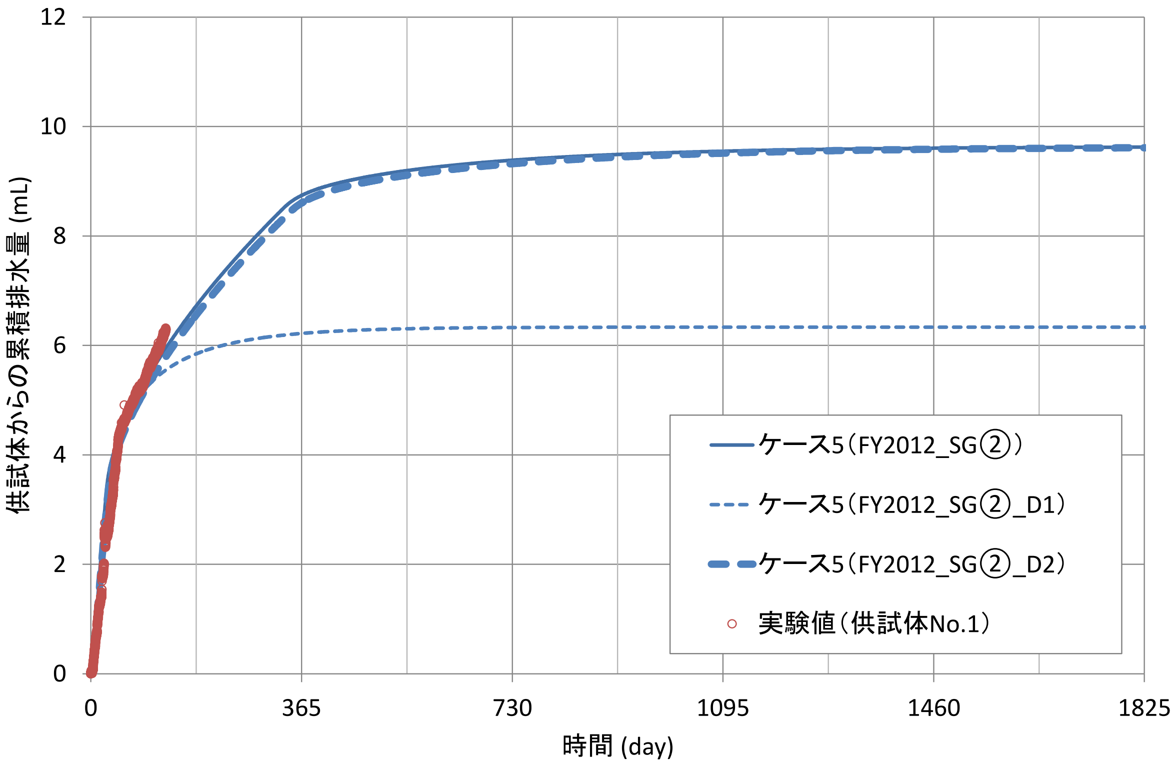


図 3.2.1-19　供試体上面からの累積排水量（ケース 5、ケース 5-a、ケース 5-b）

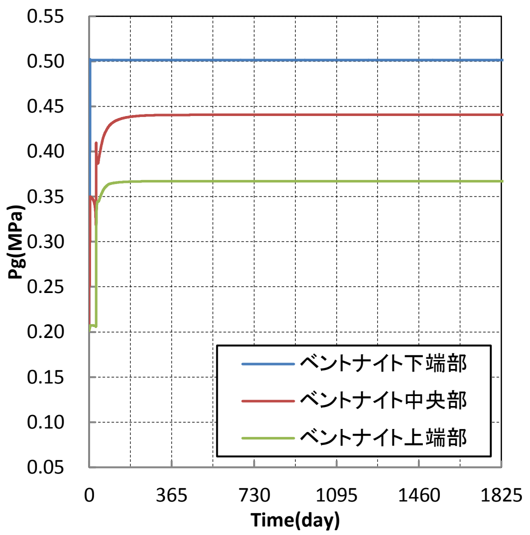
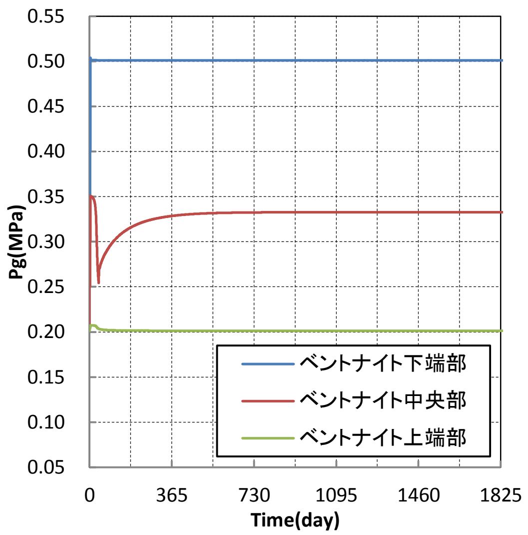
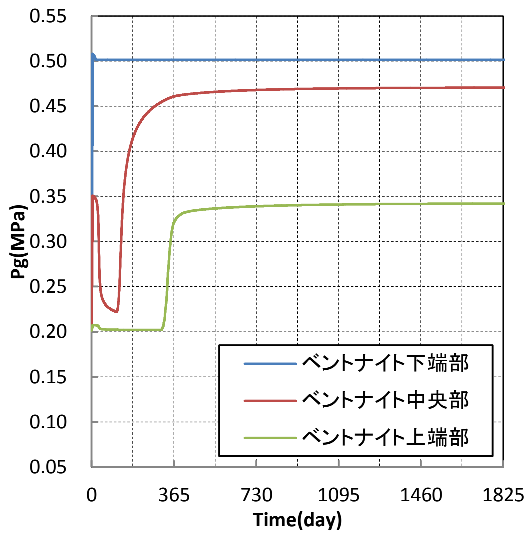
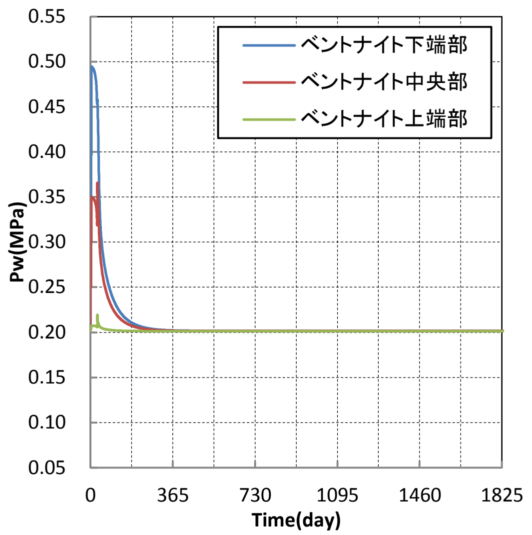
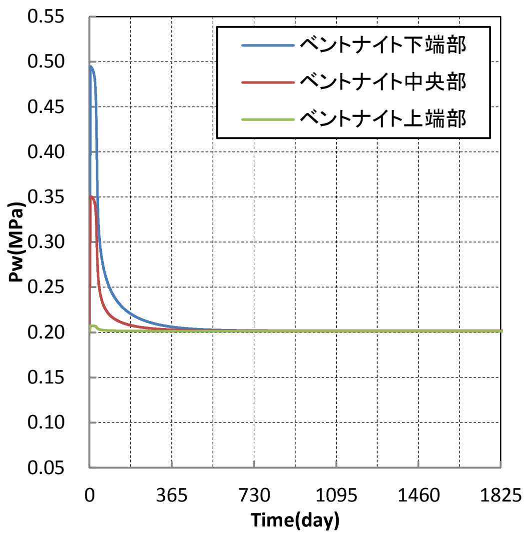
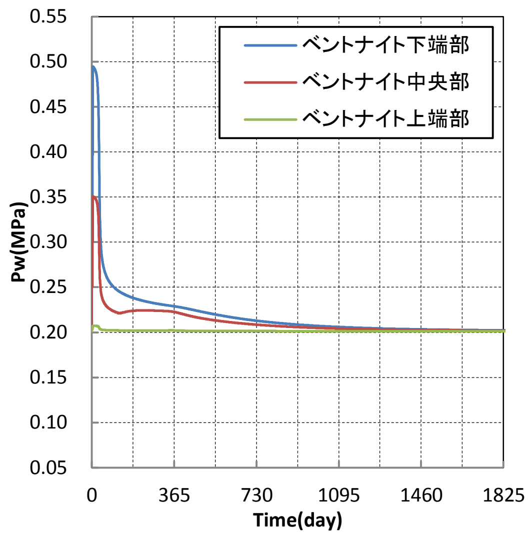
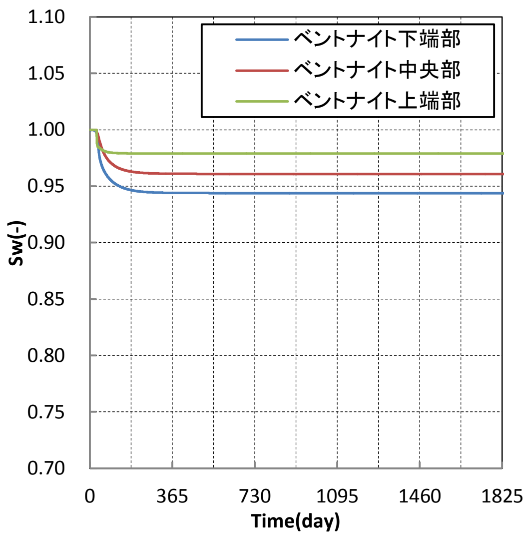
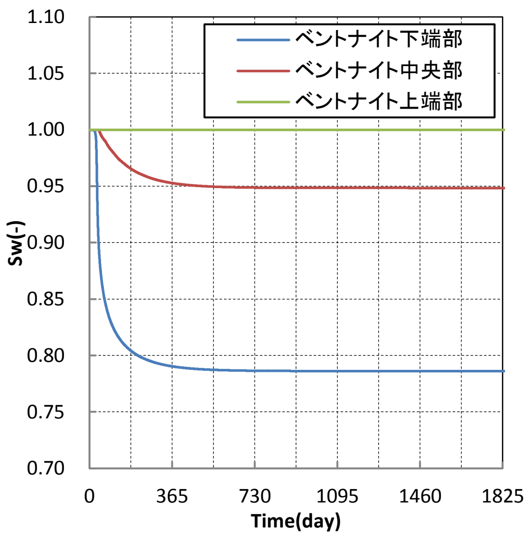
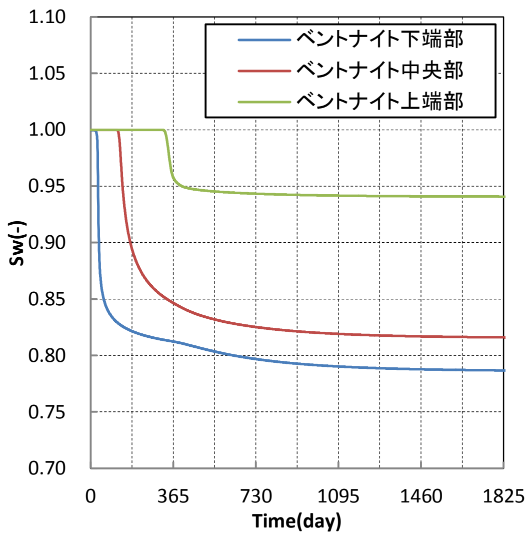
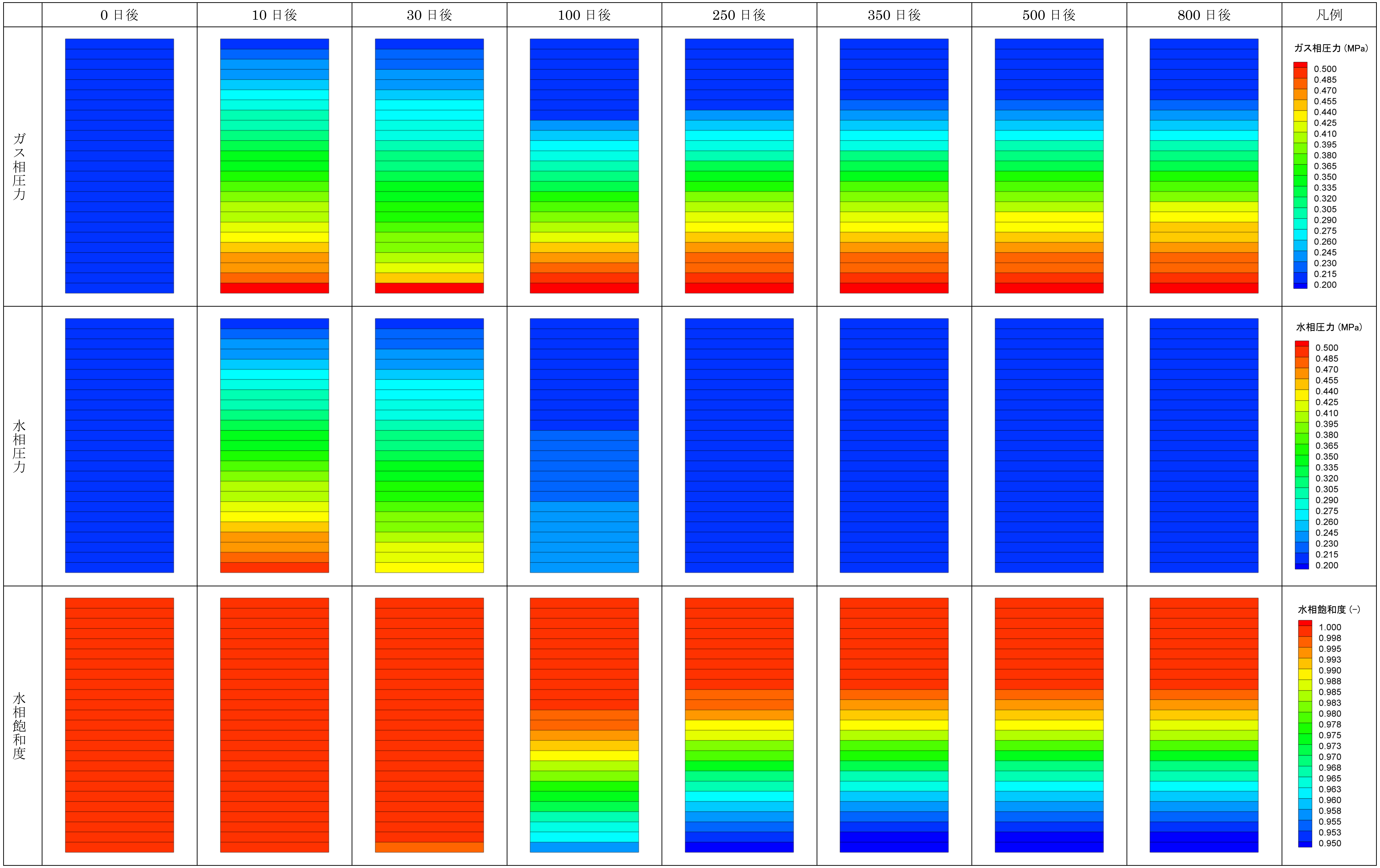
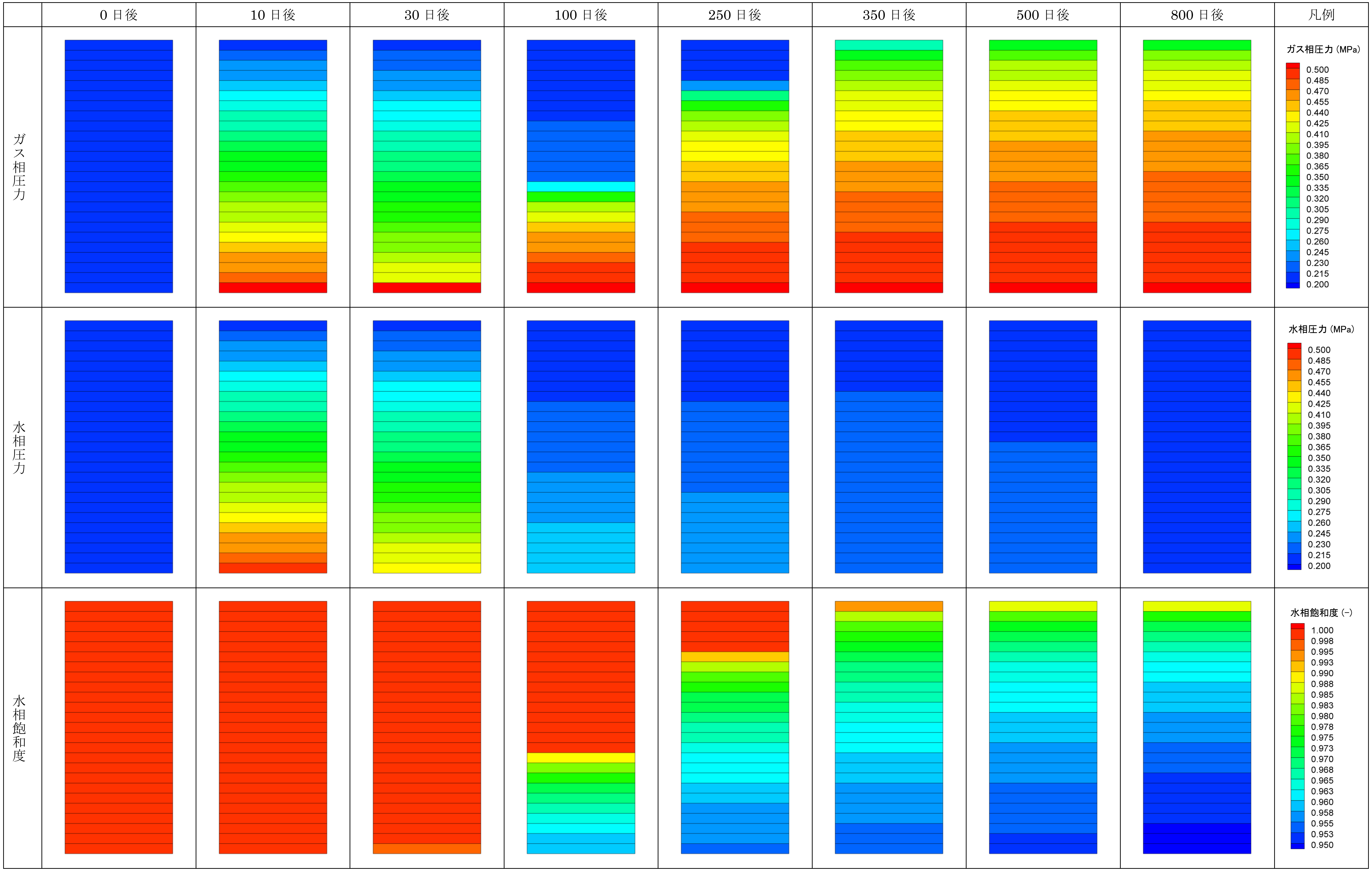
	ケース 5	ケース 5-a	ケース 5-b
ガス相圧力			
水相圧力			
水相飽和度			

図 3.2.1-20　ベントナイト上端部・中央部・下端部におけるガス相圧力・水相圧力・水相飽和度の時間変化（ケース 5、ケース 5-a、ケース 5-b）



※供試体の縦横比を 5：1 で表示

図 3.2.1-21　ケース 5-a におけるガス相圧力・水相圧力・水相飽和度分布



※供試体の縦横比を 5：1 で表示

図 3.2.1-22　ケース 5-b におけるガス相圧力・水相圧力・水相飽和度分布

(2) 力学連成二相流解析コードによる予察解析

1) 検討方針

本検討で対象とする試験は、供試体中のガスが気液二相流れによって流動することを想定した低注入圧条件の下でガス透気を試みるガス移行試験である。ここでは、力学連成二相流解析によって予察解析を実施し、ガス透気時期や供試体内の応力状態、体積変化の推定を行うことを目的とする。

再現解析の手順は、はじめに、注水過程の再現解析を実施する。注水過程の再現解析を実施する目的は、膨潤圧に関するモデルパラメータ、毛細管圧力に関するパラメータを同定することと、ガス移行時における初期状態を作成するためである。その後、ガス注入過程の予察解析を実施する。この時、注入側のポーラスメタル内の水が全量排水されてからガスが供試体へ注入されるものと仮定し、ガス注入後はポーラスメタル内の体積（3.57mL）が排水されてから底面に境界条件としてガスを与えると仮定した。

本検討では、上記に示した注水過程から同定された二相流パラメータによる予察解析に加えて、(1)の水・ガス二相流解析コードによる予察解析で実施されたケース 1（FY2010_ケース②）で用いられた解析パラメータを用いても検討を実施し、二相流パラメータの影響及び二相流解析コードとの相違について考察を加える。解析ケースを表 3.2.1-6 に示す。なお、二相流解析における検討（GETFLOWS）に基づき、本検討ではガスの溶解は考慮せずに計算を行った。本検討で用いる解析コードは熱・水・力学・ガス（THMG 連成）が連成可能な CODE_BRIGHT とする。

表 3.2.1-6 力学連成二相流解析ケース

	二相流パラメータ	力学パラメータ
ケース 1	注水過程から同定	既往の文献から設定
ケース 2	FY2010_ケース②	既往の文献から設定

2) 解析コード

a. 解析コード概要

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

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

これにより、再冠水時のベントナイトの吸水（不飽和から飽和）に伴う膨潤変形挙動が表現可能であり、ガス移行時の力学連成挙動が表現可能である。図 3.2.1-23 に熱、力学（応力・変形）、2 相流の相互影響関係を示す。

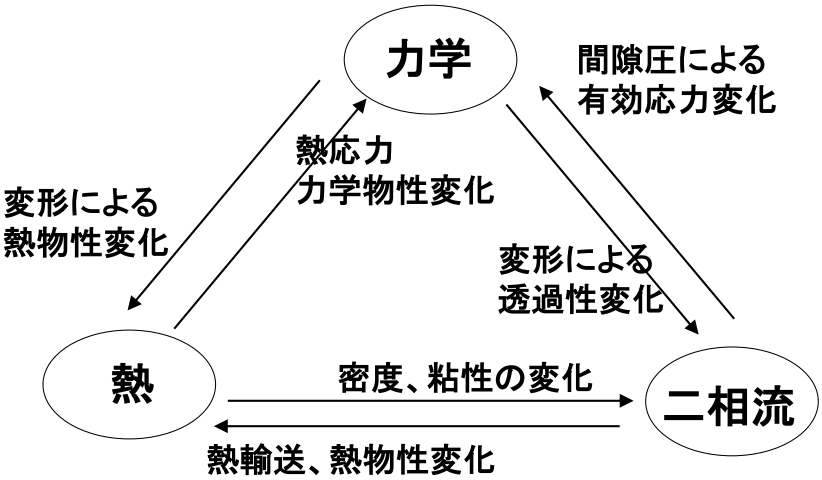


図 3.2.1-23　熱、力学（応力変形）、2 相流の相互影響

b.　支配方程式

多孔質体は、図 3.2.1-24 に示すように固体粒子、水、ガスで構成されたものとし、以下の 3 つの相と 3 つの物質が考慮される。

＜相＞

- 固相：鉱物
- 液相：水、溶解ガス
- 気相：乾燥ガス、水蒸気

＜物質成分＞

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

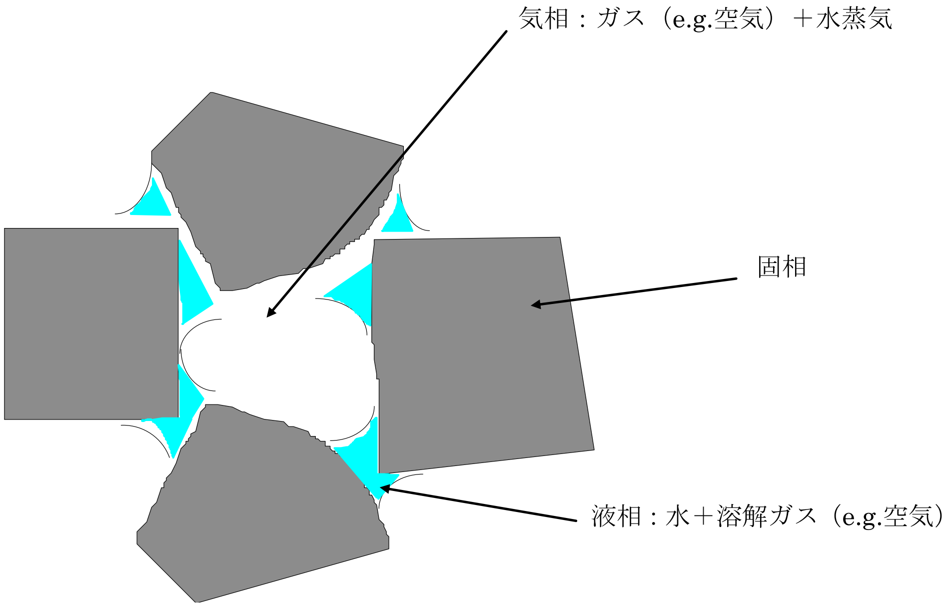


図 3.2.1-24　不飽和多孔質体の概念

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

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

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

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

なお、適用される構成則、平衡則は次のとおりである。

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

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

Code_Bright における平衡方程式を以下に示す。

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

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

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = \mathbf{0} \qquad (3.2\text{-}15)$$

水の質量保存則：未知数は水圧 P_l

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

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\theta_l^a S_l \phi + \theta_g^a S_g \phi\right) + \nabla \cdot \left(\mathbf{j}_l^a + \mathbf{j}_g^a\right) = f^a \tag{3.2-16}$$

ガスの質量保存側：未知数はガス圧 P_g

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

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\theta_l^a S_l \phi + \theta_g^a S_g \phi\right) + \nabla \cdot \left(\mathbf{j}_l^a + \mathbf{j}_g^a\right) = f^a \tag{3.2-17}$$

内部エネルギー保存側：未知数は温度 T

$$\frac{\partial}{\partial t}\begin{pmatrix} \text{int} ernal \quad energy \quad in \quad solid, \\ liquid \quad and \quad gas \quad phase \end{pmatrix} + divergence \begin{pmatrix} total \quad fluxes \\ of \quad energy \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} external \sup ply \\ of \quad heat \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(E_s \rho_s (1-\phi) + E_l \rho_l S_l \phi + E_g \rho_g S_g \phi\right) + \nabla \cdot \left(\mathbf{i}_c + \mathbf{j}_{Es} + \mathbf{j}_{El} + \mathbf{j}_{Eg}\right) = f^Q \tag{3.2-18}$$

固相の質量保存側：未知数は間隙率

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(mass \quad of \quad solid\right) + divergence \begin{pmatrix} total \quad fluxes \\ of \quad salt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} external \sup ply \\ of \quad salt \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\theta_s (1-\phi)\right) + \nabla \cdot \left(\mathbf{j}_s\right) = 0 \tag{3.2-19}$$

式中の記号の説明は以下の通りである。

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

上付きの w と a は水と空気をそれぞれ示す。下付きの s 、l 及び g は固相、液相及び気相をそれぞれ示す。なお、詳細については Code_Bright User's guide[15]あるいは Olivella et al.[16]を参照されたい。

3)　適用した構成則

Code_Bright に導入されている BB（Barcelona Basic）モデル[17]は、修正 Cam-Clay モデル[18]を不飽和粘土に拡張した弾塑性構成モデルであり、ベントナイトのような膨潤性粘土に対しても適用できるよう拡張されている。なお、飽和時の挙動は修正 Cam-Clay モデルと一致する。

BB モデルで考慮される不飽和粘土の一般的な力学特性を以下に示す。

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

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

a.　応力（外力）の変化による圧縮、膨潤挙動（圧密）

不飽和粘土においても飽和粘土と同様に、正規圧密状態の間隙比増分 de と平均有効応力増分 dp'は圧縮指数により(3.2-20)式で表される（図 3.2.1-25 参照）。$\lambda(s)$：サクション s に依存する圧縮指数（$s = p_g - p_l$、p_g：間隙ガス圧、p_l：間隙水圧）である。

$$de = -\lambda(s)\frac{dp'}{p'} \tag{3.2-20}$$

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

$$p' = p - \max(p_g, p_l) \tag{3.2-21}$$

(3.2-20)式を間隙比増分の代わりに体積ひずみ増分 $d\varepsilon_v$で書き直せば次式となる。

$$d\varepsilon_v = \frac{\lambda(s)}{1+e_0}\frac{dp'}{p'} \tag{3.2-22}$$

ここに、e_0：初期間隙比である

例えば、サクション s 一定（飽和率一定）条件下では$\lambda(s)$一定なので(3.2-23)式より次式が成り立つ。

$$e = e_0 - \lambda(s)\ln\frac{p'}{p_0{}'} \tag{3.2-23}$$

ここに、$p_0{}'$：初期平均有効応力である。

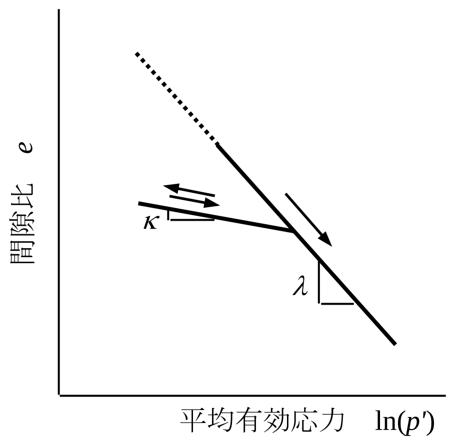


図 3.2.1-25　間隙比と平均有効応力の関係

同様に、過圧密状態あるいは除荷時の弾性的な間隙比増分 de と平均有効応力増分 dp' は膨潤指数により(3.2-24)式で表される。

$$de = -\kappa(s)\frac{dp'}{p'} \tag{3.2-24}$$

ここに、$\kappa(s)$：サクション s に依存する膨潤指数である。

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

$$d\varepsilon_v = \frac{\kappa(s)}{1+e_0}\frac{dp'}{p'} \tag{3.2-25}$$

例えば、サクション s 一定（飽和率一定）条件下では次式が成り立つ。

$$e = e_0 - \kappa(s)\ln\frac{p'}{p_0'} \tag{3.2-26}$$

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

$$\lambda(s) = \lambda_0\left[(1-\gamma)\exp(\beta\cdot s)+\gamma\right] \tag{3.2-27}$$

$$\kappa(s) = \kappa_0(1+\alpha\cdot s) \tag{3.2-28}$$

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

飽和､不飽和に係わらず間隙比と平均有効応力の関係は(3.2-20)式､(3.2-24)式および図 3.2.1-25 で示される関係に従うので、拘束圧（平均有効応力）が高くなれば間隙は小さくなって剛性は高くなる。例えば、過圧密状態での載荷時あるいは除荷時におけるヤング率 E と拘束圧（平均有効応力 p'）との関係は(3.2-25)式より次式のようになる。

$$E = 3(1-2\nu)\frac{dp'}{d\varepsilon_v} = 3(1-2\nu)\cdot(1+e_0)\cdot\frac{p'}{\kappa(s)} \tag{3.2-29}$$

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

b.　飽和率の変化による膨潤、圧縮挙動

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

るために、前記の応力変化による圧縮、膨潤挙動（圧密）と類似した下記の関係を導入している。圧密における圧密降伏応力の概念と同様に、過去に受けた最大のサクション（以下、降伏サクションと呼ぶ）を超えてサクションが増加（乾燥）する場合には次式で示される塑性的な体積減少が起こるとしている（図 3.2.1-26 参照）。

$$de = -\lambda_s \frac{ds}{s + p_{atm}} \tag{3.2-30}$$

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

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

$$de = -\kappa_s \frac{ds}{s + p_{atm}} \tag{3.2-31}$$

ここに、κ_s：湿潤による膨潤指数である。

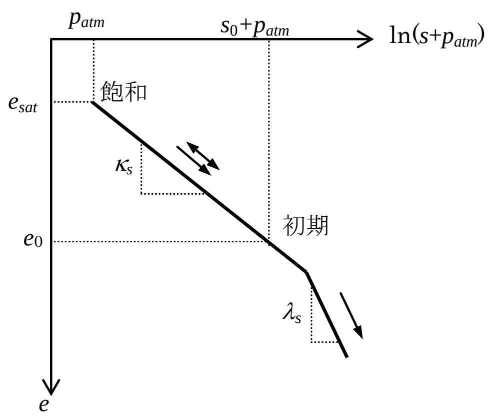


図 3.2.1-26 サクションと間隙比の関係

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

$$\kappa_s(p') = \kappa_{s0}\left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p'}{p'_{ref}}\right) \tag{3.2-32}$$

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

(3.2-32)式を用いれば、湿潤膨潤（サクションの減少）による体積ひずみ増分 $d\varepsilon_s$は次式で表される。

$$d\varepsilon_s = \frac{\kappa_s(p')}{1+e_0}\frac{ds}{s+p_{atm}} = \frac{1}{1+e_0}\kappa_{s0}\left(1+\alpha_{sp}\ln\frac{p'}{p'_{ref}}\right)\frac{ds}{s+p_{atm}} \tag{3.2-33}$$

従って、平均有効応力 p'一定の場合の体積ひずみは、

$$\varepsilon_s = \frac{1}{1+e_0}\kappa_{s0}\left(1+\alpha_{sp}\ln\frac{p'}{p'_{ref}}\right)\cdot\ln\frac{s+p_{atm}}{s_0+p_{atm}} \tag{3.2-34}$$

ここで、(3.2-34)式で s=0（飽和）とすれば、一定有効応力下で湿潤飽和させた時の飽和時の膨

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

$$\varepsilon_{s\max} = \frac{1}{1+e_0}\kappa_{s0}\left(1+\alpha_{sp}\ln\frac{p'}{p'_{ref}}\right)\ln\frac{p_{atm}}{s_0+p_{atm}} \tag{3.2-35}$$

c.　強度の飽和率依存性

不飽和の場合の圧密降伏応力 p_0 は飽和の場合より増大し、次式で定義される（図 3.2.1-27 参照）。

$$p_0 = p^c\left(\frac{p_0^*}{p^c}\right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa(0)}{\lambda(s)-\kappa(s)}} \tag{3.2-36}$$

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

(3.2-36)式で定義される降伏面は LC（Loading Collapse）降伏面と呼ばれている。一方、過去に受けた最大のサクション（降伏サクション）で規定される降伏面は SI（Suction Increase）降伏面と呼ばれている。

内部摩擦角ϕはサクションの影響受けず、従って、限界状態応力比パラメータ M（M=6sinϕ/(3−sinϕ)）も一定値をとるが、粘着力はサクションに比例して増大する。従って、引張り強度 p_s も比例的に増加し、次式で定義されている（図 3.2.1-27 参照）。

$$p_s = \kappa\cdot s \tag{3.2-37}$$

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

図 3.2.1-28 のようになる。

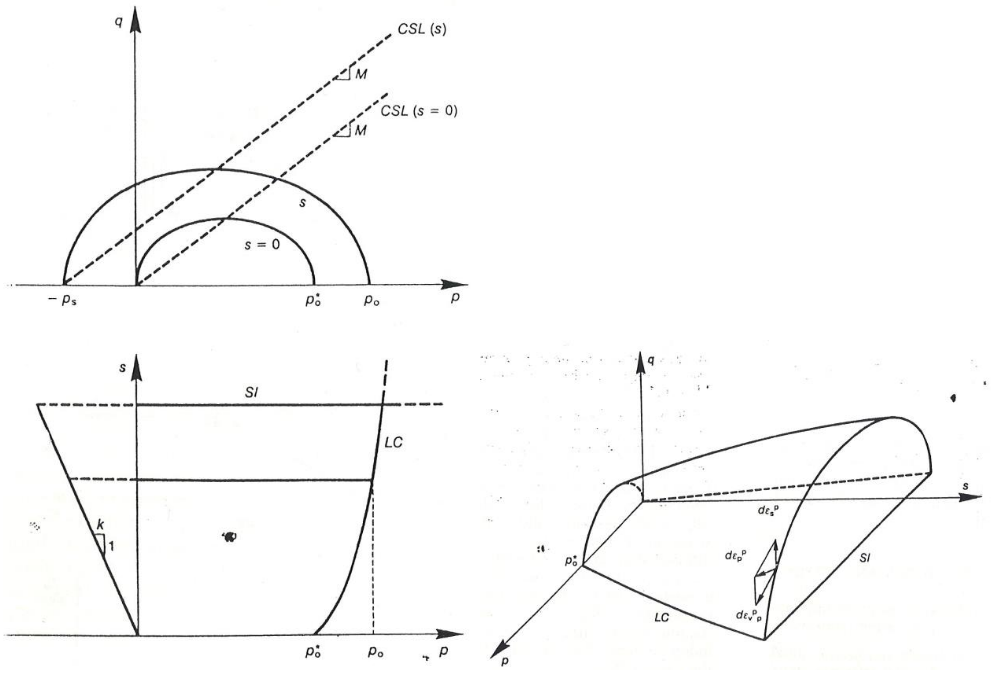


図 3.2.1-27　（p、 q）面、（p、 s）面および（p、 q、 s）面での降伏曲面

有効応力およびサクションの変化による体積ひずみ挙動を規定する線（$\lambda(s)$、$\kappa(s)$、λ_s、κ_s）と降伏曲面を（e、p'、s）空間で示すと
図 3.2.1-28 のようになる。

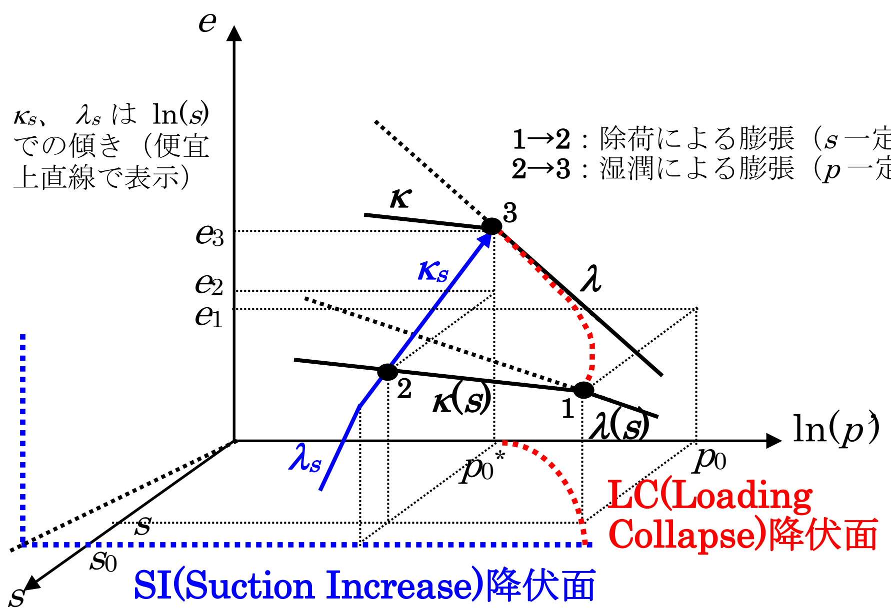


図 3.2.1-28 有効応力およびサクションの変化による体積ひずみ挙動と降伏曲面

4)　ガス透気試験系のモデル化

検討に用いた解析モデルを図 3.2.1-29 に示す。解析モデルは φ60mm×h25mm の供試体を軸対象モデルでモデル化する。メッシュ分割は 2mm×2mm で分割し要素数 195、節点数は 224 である。

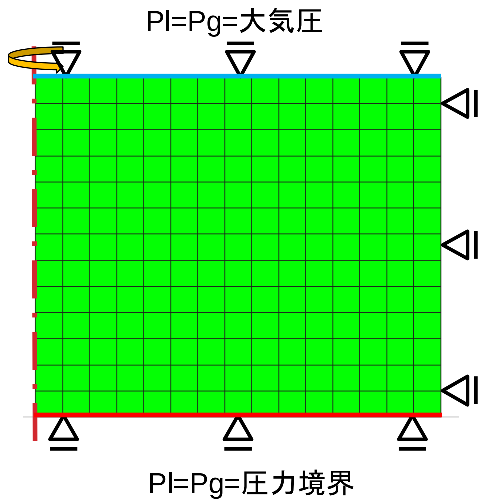


図 3.2.1-29　力学連成二相流解析における解析モデル

5)　解析条件

　a.　初期、境界条件

力学に関する境界条件は、法線方向固定、接線方向自由とした。流体に関する境界条件として、モデル上面と下面に水圧とガス圧を規定する必要がある。水及びガスの供給面である底面は試験状況に応じた水圧あるいはガス圧を規定する圧力境界とする。この時、注水時における水圧 P_l とガス圧 P_g は同値とする。ガス移行時については、ポーラスメタルの水が排水されてからはガス圧 P_g のみ規定する。上面の境界条件については大気圧固定とし、液相については排出境界とした（図 3.2.1-29 参照）。

解析モデルの初期条件としては、モデル全体に全方向に初期応力 $\sigma_x=\sigma_y=\sigma_z=0.11$MPa を考慮した。また、初期の間隙比は n=0.496 とし、初期飽和度は対象とした試験と同様に Sr=90%とした。

解析で用いたガス圧の載荷ステップは現在実施中のガス移行試験と同様とする。図 3.2.1-30 にガス圧載荷ステップを示す。なお、ガス注入は注入開始から 365 日間載荷し続けた。ここで示す圧力は絶対圧を示している。

解析では、供試体下部に設置されているポーラスメタルをモデル化していない。よって、上部からの累積排水量が下部のポーラスメタルの間隙体積 3.57ml の水が排水された時点からガスが注入されたと仮定した。そのため与えた境界条件は、モデル下面の境界条件をポーラスメタル間隙体積分の排水が確認されるまでは、注水過程と同様に注水条件として図 3.2.1-30 で示した圧力を規定し、所定の排水量 3.57ml が確認された時点からガス圧のみを境界に与えた。

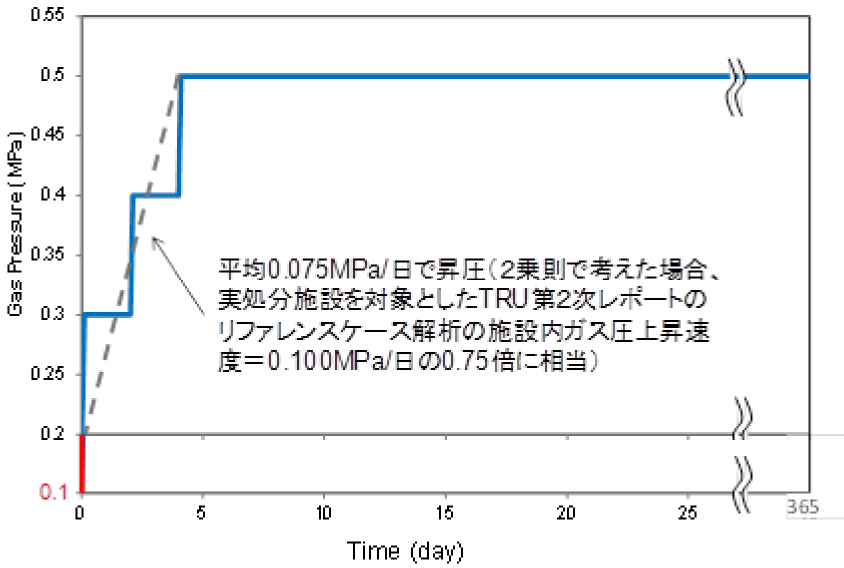


図 3.2.1-30　ガス圧載荷ステップ

　b.　力学物性

力学パラメータについては、平成 24 年度[7]の検討を基に設定する。表 3.2.1-7 に解析に用いた力学パラメータを示す。なお、膨潤に係る係数 κ_{s0}、α_{sp} については、注水試験から得られた膨潤圧を $P_{sw}=0.44$MPa と推定し、山本、小峯[19]の方法によって小峯の膨潤評価式から評価される膨潤圧を評価できるモデルパラメータとして設定した。

表 3.2.1-7　解析に用いた力学パラメータ

項目	記号	単位	設定値
初期乾燥密度	ρ_d	Mg/m^3	1.36
真密度	ρ_s	Mg/m^3	2.70
初期間隙比	e	―	0.985
ポアソン比	ν		0.44
膨潤指数（飽和時）	κ_0	―	0.176
圧縮指数（飽和時）	λ_0	―	0.252
サクション依存膨潤指数パラメータ	α	―	0.000
サクション依存圧縮指数パラメータ	β	MPa^{-1}	0.000
サクション依存圧縮指数パラメータ	γ	―	0.000
参照有効応力時の湿潤膨潤指数（飽和時）	κ_{s0}	―	0.5722
有効応力依存湿潤膨潤指数パラメータ	α_{sp}	―	-0.678
限界応力比	M		0.500
引張強度	P_{s0}	MPa	0.0
圧密先行応力（飽和時）	P_0^*	MPa	0.67

c.　ケース 1 で用いる二相流物性の同定

ケース 1 については二相流パラメータを同定する必要がある。そこで、注水過程の再現解析を実施した。再現解析では、力学パラメータは先に示した表 3.2.1-7 を用い、二相流パラメータは平成 24 年度に実施した検討[7]で用いたものを初期値とした。表 3.2.1-8、表 3.2.1-9 に初期値として設定した二相流パラメータを示し、図 3.2.1-31 に毛細管圧力曲線、図 3.2.1-32 に相対浸透率曲線を示す。ここで、毛細管圧力は注水過程、ガス移行過程ともに van Genuchten モデルを適用し、相対浸透率については、注水時は液相が van Genuchten モデル、気相が Grant モデルとし、ガス移行過程における液相は van Genuchten モデル、気相が CB Power Law モデルとした。なお、ガス注入時の相対浸透率については、既往の検討で同定されたものをそのまま用いるものとした。

表 3.2.1-8　ケース 1 のパラメータを同定する際の初期設定値（毛細管圧力）

項目	記号	単位	設定値
初期飽和度	S_r	%	90.0
毛管排除圧	P_0	MPa	1.00
間隙径分布パラメータ	n	―	1.51
残留間隙水飽和度	S_{lr}	―	0.0
完全間隙水飽和度	S_{ls}	―	1.0

表 3.2.1-9　ケース 1 のパラメータを同定する際の初期設定値（相対浸透率）

項目	記号	単位	設定値	
絶対透過係数	K	m^2	6.0E-20（注水時） 2.2E-20（ガス注入時）	
間隙径分布パラメータ（水相）	λ	―	注水時	0.924
			ガス注入時	0.653
間隙径分布パラメータ（気相）（ガス注入時）	n	―	5.0	
残留間隙水飽和度	S_{lr}	―	注水時	0.0
			ガス注入時	0.2
完全間隙水飽和度	S_{ls}	―	注水時	1.0
			ガス注入時	1.0

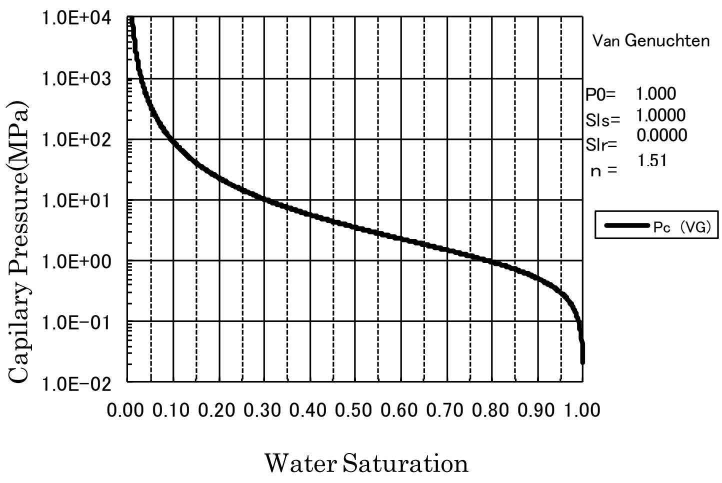


図 3.2.1-31　初期設定値に用いた毛細管圧力曲線

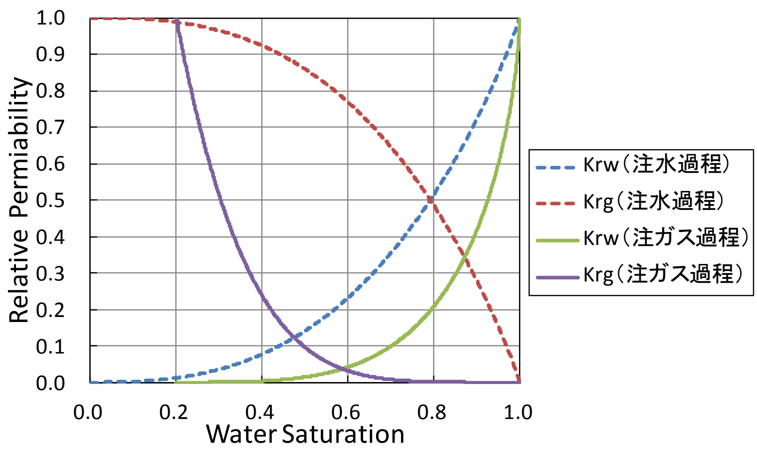


図 3.2.1-32　初期設定値に用いた相対浸透率曲線

パラメータの同定については、累積注水量と膨潤圧が表現できるパラメータを同定する。具体的には、累積注水量の再現性については、二相流パラメータを修正することによって再現性を向上させることとした。膨潤圧については、モデルパラメータのうちκ_{s0}、α_{sp}を設定した。

累積注水量については、毛細管圧力を定義する毛管排除圧 P_0 と間隙径分布パラメータ n を表3.2.1-10 のように変更することにより、図 3.2.1-33 に示したように実測された累積注水量を良く再現する結果を得ることができた。また、膨潤圧についても、表 3.2.1-7 に示したパラメータを用いることで実測データを再現することが可能であった（図 3.2.1-34)。

表 3.2.1-10　毛細管圧力の構成モデルパラメータの変更点

	P_0（MPa）	n
初期値	1.00	1.51
変更値	0.35	1.60

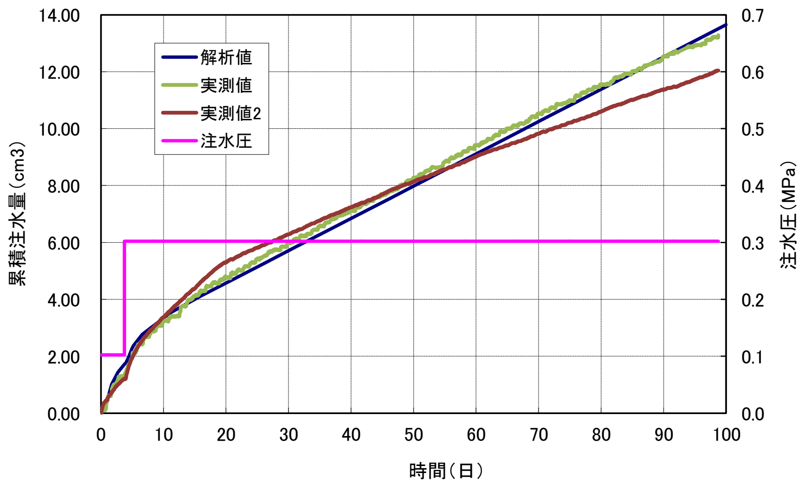


図 3.2.1-33　累積注水量の再現結果

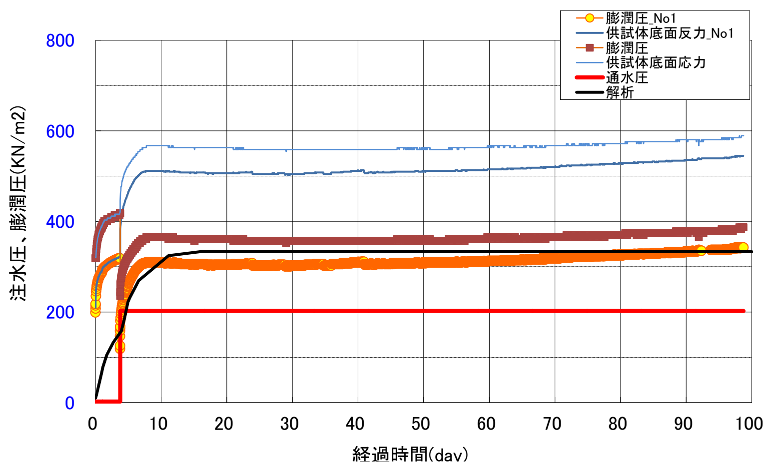


図 3.2.1-34　膨潤圧の再現結果

d.　二相流物性

先の検討により、ケース 1 で用いる二相流パラメータが同定された。表 3.2.1-11、表 3.2.1-12 に示す二相流パラメータを用いてガス注入過程の予察解析を実施する。ここで、毛細管圧力は注水過程、ガス移行過程ともに van Genuchten モデルを適用し、相対浸透率については、注水時は液相が van Genuchten モデル、気相が Grant モデルとし、ガス移行過程における液相は van Genuchten モデル、気相が CB Power Law モデルとした。また、図 3.2.1-35 に解析に用いた二相流曲線を示す。

表 3.2.1-11　検討に用いる初期飽和度及び毛細管圧力

<table>
<tr><th>項目</th><th>記号</th><th>単位</th><th>試験フェーズ</th><th>ケース 1</th><th>ケース 2</th></tr>
<tr><td rowspan="2">初期飽和度</td><td rowspan="2">S_r</td><td rowspan="2">%</td><td>注水時</td><td>90.0</td><td>90.0</td></tr>
<tr><td>ガス注入時</td><td>100.0</td><td>100.0</td></tr>
<tr><td rowspan="2">毛管排除圧</td><td rowspan="2">P_0</td><td rowspan="2">MPa</td><td>注水時</td><td>0.350</td><td>0.350</td></tr>
<tr><td>ガス注入時</td><td>0.350</td><td>0.661</td></tr>
<tr><td rowspan="2">間隙径分布パラメータ</td><td rowspan="2">n</td><td rowspan="2">—</td><td>注水時</td><td>1.600</td><td>1.600</td></tr>
<tr><td>ガス注入時</td><td>1.600</td><td>1.821</td></tr>
<tr><td rowspan="2">残留間隙水飽和度</td><td rowspan="2">S_{lr}</td><td rowspan="2">—</td><td>注水時</td><td>0.000</td><td>0.000</td></tr>
<tr><td>ガス注入時</td><td>0.000</td><td>0.387</td></tr>
<tr><td rowspan="2">完全間隙水飽和度</td><td rowspan="2">S_{ls}</td><td rowspan="2">—</td><td>注水時</td><td>1.000</td><td>1.000</td></tr>
<tr><td>ガス注入時</td><td>1.000</td><td>1.000</td></tr>
</table>

表 3.2.1-12　検討に用いる絶対浸透率及び相対浸透率

<table>
<tr><th>項目</th><th>記号</th><th>単位</th><th>試験フェーズ</th><th>ケース 1</th><th>ケース 2</th></tr>
<tr><td rowspan="2">絶対透過係数</td><td rowspan="2">K</td><td rowspan="2">m^2</td><td>注水時</td><td>6.0E-20</td><td>6.0E-20</td></tr>
<tr><td>ガス注入時</td><td>6.0E-20</td><td>4.5E-20</td></tr>
<tr><td rowspan="2">間隙分布パラメータ（水相）</td><td rowspan="2">λ</td><td rowspan="2">—</td><td>注水時</td><td>0.924</td><td>0.924</td></tr>
<tr><td>ガス注入時</td><td>0.653</td><td>0.310</td></tr>
<tr><td>間隙分布パラメータ（気相）</td><td>n</td><td>—</td><td>ガス注入時</td><td>5.000</td><td>2.730</td></tr>
<tr><td rowspan="2">残留間隙水飽和度</td><td rowspan="2">S_{lr}</td><td rowspan="2">—</td><td>注水時</td><td>0.000</td><td>0.000</td></tr>
<tr><td>ガス注入時</td><td>0.200</td><td>0.387</td></tr>
<tr><td rowspan="2">完全間隙水飽和度</td><td rowspan="2">S_{ls}</td><td rowspan="2">—</td><td>注水時</td><td>1.000</td><td>1.000</td></tr>
<tr><td>ガス注入時</td><td>1.000</td><td>1.000</td></tr>
</table>

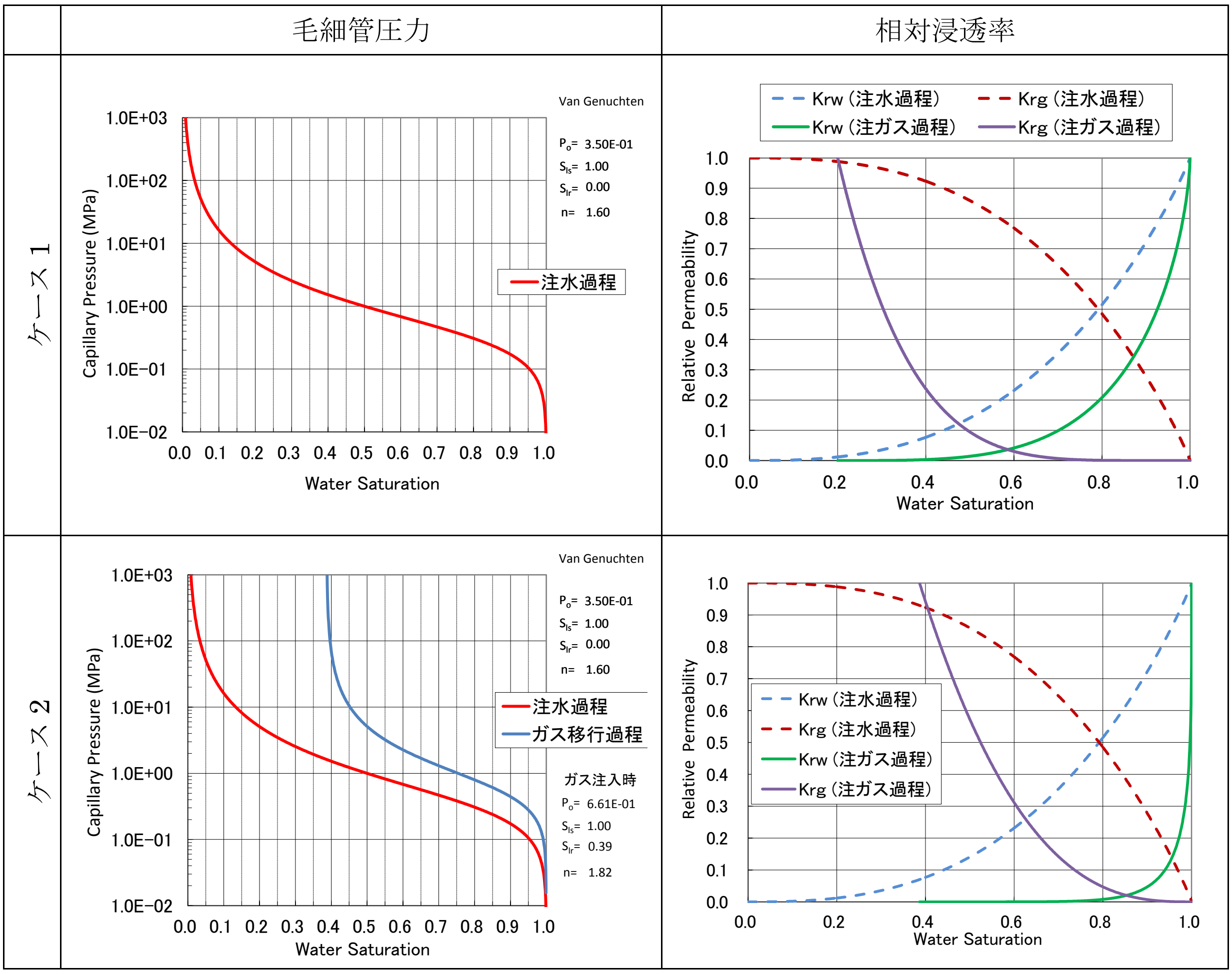


図 3.2.1-35　解析に用いた二相流曲線

6)　解析結果

a.　ケース１

注水過程の再現解析より同定された二相流パラメータを用いてガス移行試験の予察解析を実施した。ここで、ガス移行解析で適用した相対浸透率については、平成 24 年度の検討[7]の検討で同定された相対浸透率を適用した。注水過程の相対浸透率を用いなかった理由としては、注水時は気相と液相の相互干渉が弱いものと仮定し、反対にガス移行時は液相と気相の相互干渉が強い機構を想定したことによる。

検討結果として、累積排水量の比較を図 3.2.1-36 に示す。ここで、赤の実線が CODE_BRIGHT の解析結果を示し、破線が GETFLOWS の解析結果を示す。ポーラスメタル内の水がすべて排水されたと想定される時刻はガス注入開始から CODE_BRIGHT では 22.9 日目であるのに対し、GETFLOWS では 30 日目であった。その後の排水量については GETFLOWS における FY2010 ケース③、FY2011_SG①及び FY2012_SG①と同等の計算結果となった。CODE_BRIGHT における初めの排水量が多かったのは、注入側の体積増加によって排水側が圧密されたことによる排水量が加味された結果と解釈される。同様の結果が得られている GETFLOWS における毛細管圧力と CODE_BRIGHT の解析で適用した毛細管圧力は水飽和度 80%～100%付近で同程度となっている。よって、力学連成解析を実施する場合は、若干、毛細管圧力を修正するか、体積依存の

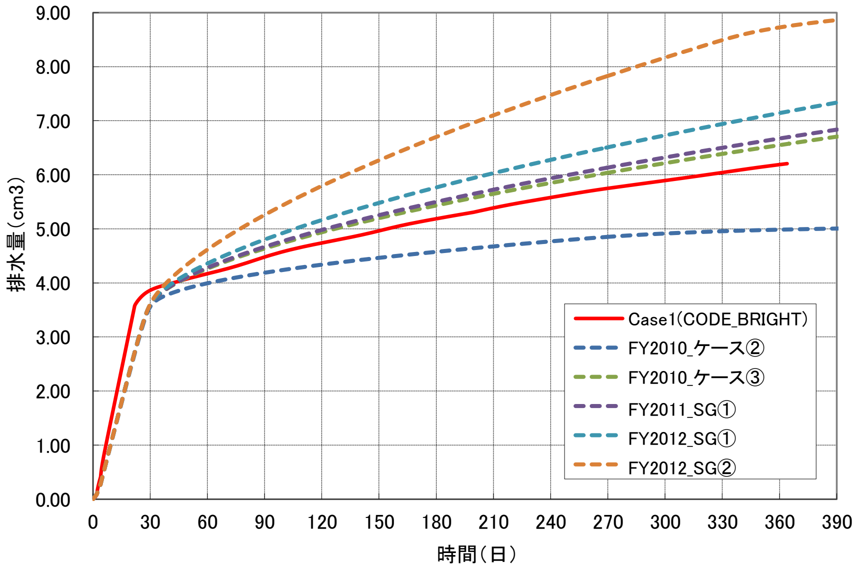


図 3.2.1-36　ケース 1 累積排水量の比較

透過性の影響の感度を上げる必要がある。

図 3.2.1-37 にケース 1 における飽和度分布を示す。力学連成二相流解析によれば、365 日後は最下端の要素で 81%まで低下する結果となった。GETFLOWS の解析結果では 95%程度までしか低下していない。また、GETFLOWS の解析では飽和度分布が下端から上端に向けて一定勾配で分布しているのに対し、CODE_BRIGHT では概ね供試体の半分までしか飽和度が低下していない結果となった。これは、ガス侵入側はガスの侵入に伴い体積膨張し、間隙が増加することから、飽和度は体積が一定である GETFLOWS に対し CODE_BRIGHT の方が低下する結果となったといえる。反対に、上部の方は下端からのガス侵入に伴い、体積圧縮されることから間隙が詰まり、飽和度が低下しにくい結果となっている。

また、間隙の増分による飽和度の変化のみならず、体積変化に依存した絶対透過係数の変化も考慮していることから、体積膨張している箇所は流体モビリティーが増加し、圧縮されている箇所は低下することも影響していると考えられる。なお、図中の各要素は変形を考慮して図化しており、ガス注入側の下面付近で若干の体積膨張が生じているのが示されている。

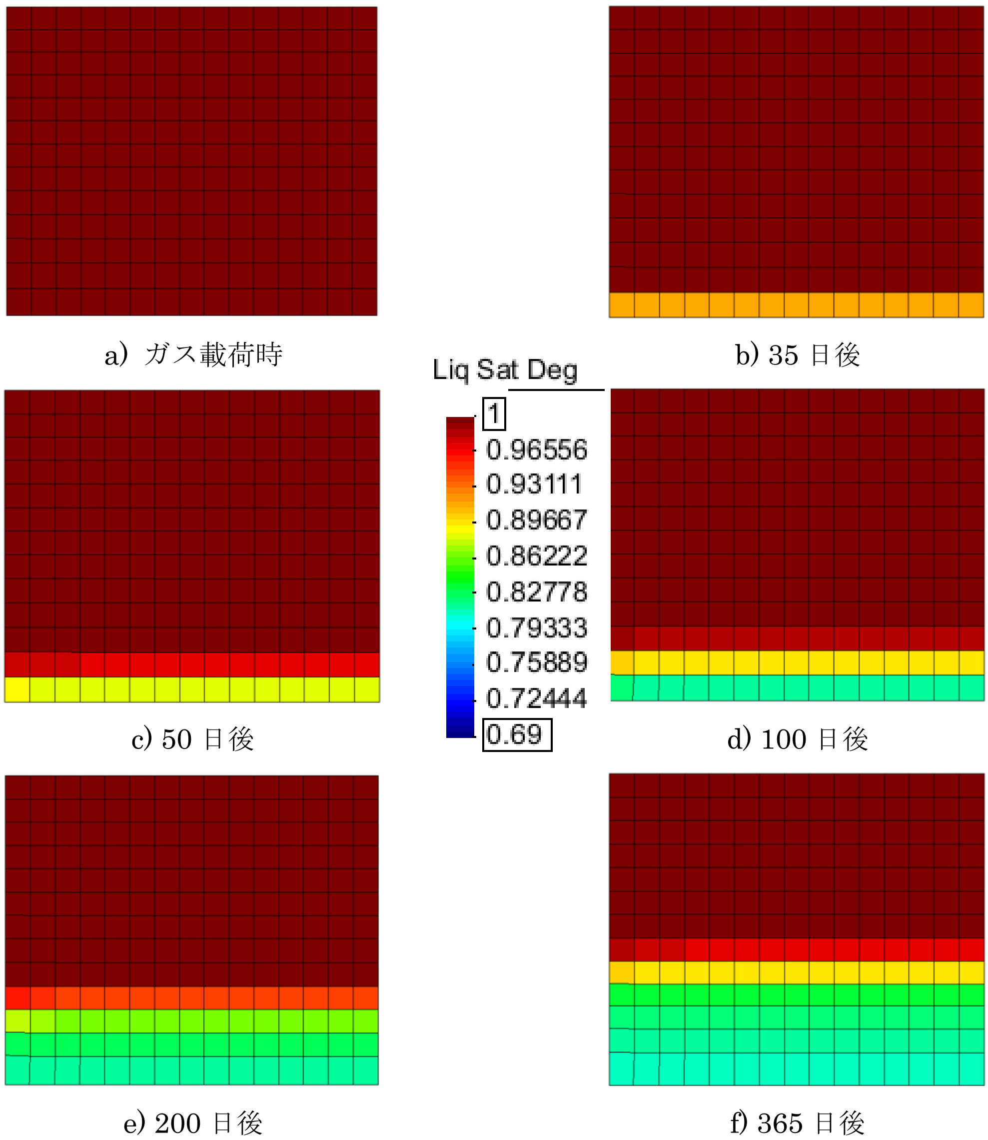


図 3.2.1-37　水飽和度分布（ケース 1、変形倍率：1.0 倍）

次に、平均有効応力の経時変化を図 3.2.1-38 に示す。また、図 3.2.1-39 に平均有効応力の分布図を示す。経時変化については、供試体のガス注入側を黒、供試体中央位置を赤、供試体の排水側を水色で示している。注入側については、始めはガス載荷によるポーラスメタル内の水圧の上昇によって有効応力が低下し、22.9 日以降はガスの侵入によって有効応力が低下する。そして注入開始から約 80 日で有効応力が 0.0MPa となる結果となった。中央部については、ポーラスメタル内の水を排水している時刻は若干有効応力が増加するものの、供試体にガスが侵入した時点からは有効応力が若干低下してその後は一定となった。上部については、供試体にガスが浸入するまでは下部の水圧上昇に伴い、有効応力が増加する。その後、ガス注入が開始され、底部の応力が低下すると上部の応力も低下し、中央部の平均有効応力と同等の応力値となる。

平均有効応力の分布（図 3.2.1-39）と図 3.2.1-37 の飽和度分布を比較すると、平均有効応力が低下している範囲の飽和度が低下していることが分かる。これは、ガス圧の上昇に伴って飽和度が低下すること、さらに間隙圧が上昇することによる有効応力の低下を意味している。

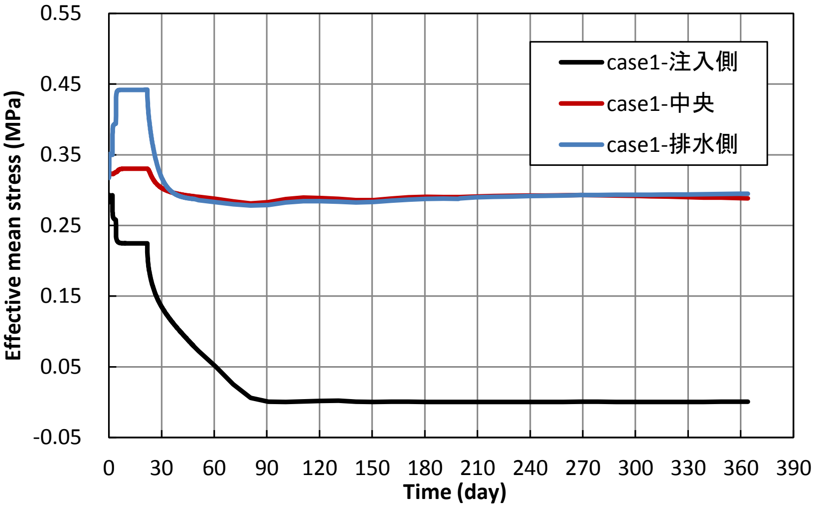


図 3.2.1-38　平均有効応力の経時変化（ケース 1）

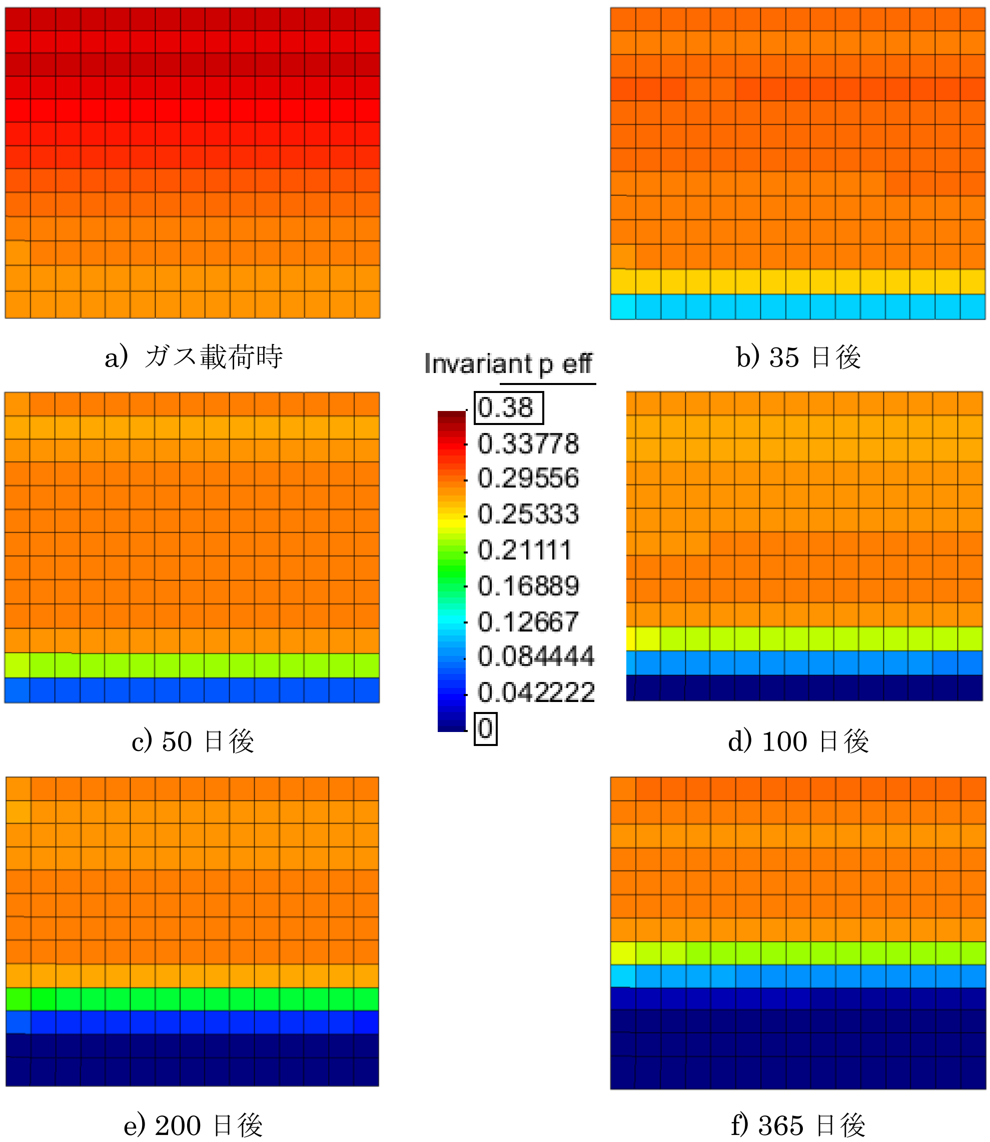


図 3.2.1-39　平均有効応力分布（ケース 1、変形倍率：1.0 倍）

次に、間隙率の経時変化を図 3.2.1-40 に示す。出力した位置は平均有効応力と同様にガス注入側、中央部、排水側の 3 点である。ここで、平均有効応力の変化と同様に、注入側については、水圧上昇に伴い、間隙率も上昇することになる。22.9 日以降はガスに変化し圧縮性流体であるため、体積圧縮を受ける。有効応力が 0.0MPa になるまではほぼ間隙率は一定であるが、80 日付近で有効応力が 0.0MPa になると、塑性ひずみが生じるため間隙率が増大する結果となった。中央部と注入部については、初期のポーラスメタル内の水の排水期間は若干変化するものの、その後は注入ガスの進展フロントが到達しておらず、有効応力も変化しないことから間隙率も変化しない結果となった。

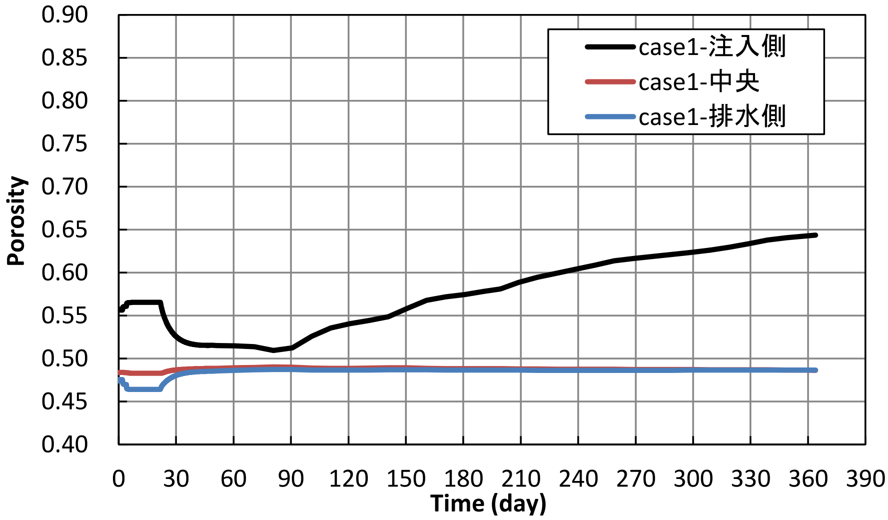


図 3.2.1-40　ケース 1 間隙率の経時変化

また、間隙率分布図を図 3.2.1-41 に示す。ここで、間隙率が相対的に大きく変化しているのは注入側の最下端の要素のみであり、5 要素程度までは若干の変化が生じているものの、それ以外はほとんど変化していない。よって、中央部から排出側にかけては飽和度、平均有効応力及び間隙率は変化しない結果が得られた。

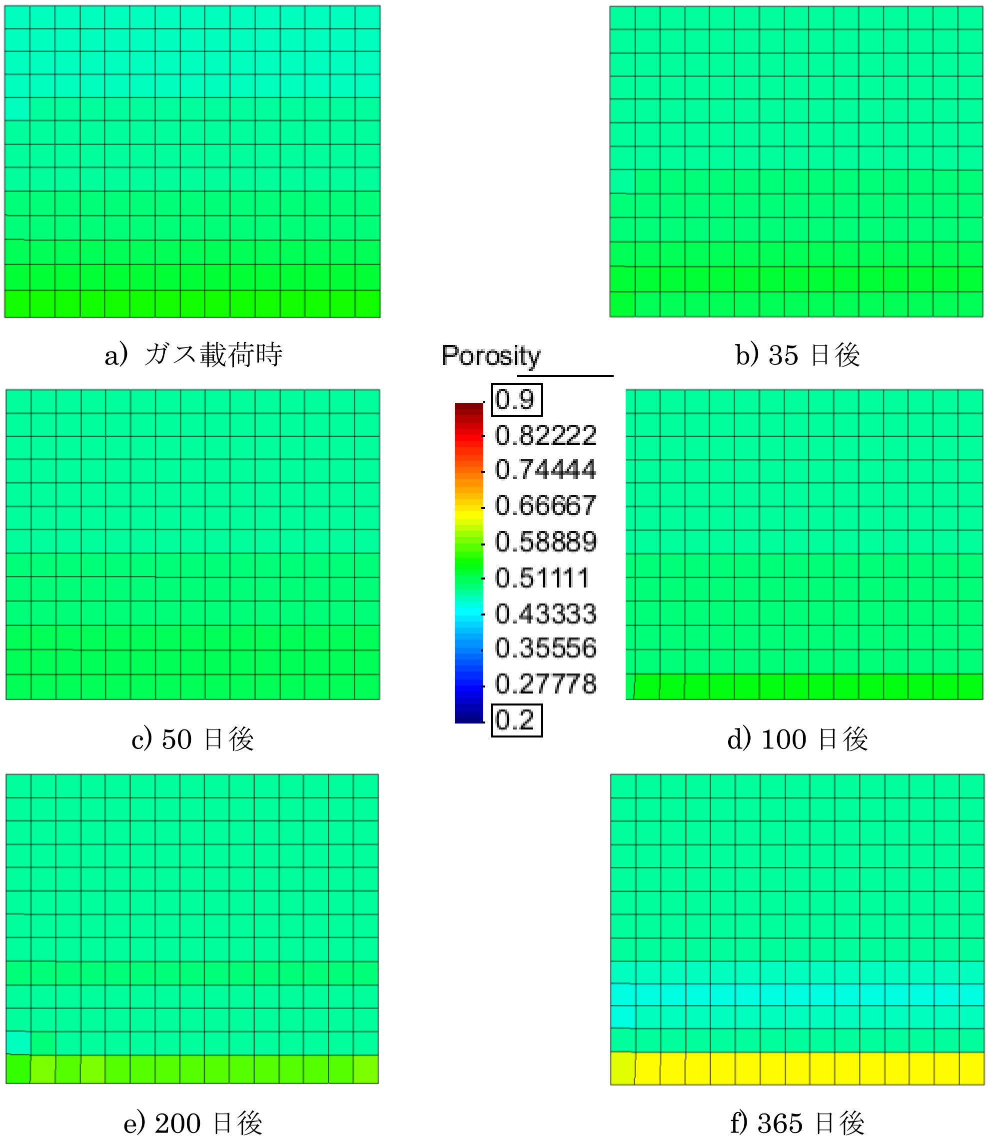


図 3.2.1-41　間隙率分布（ケース 1、変形倍率：1.0 倍）

b.　　ケース 2

GETFLOWS の検討で用いた FY2010_ケース②で用いた二相流パラメータである、絶対透過係数、毛細管圧力及び相対浸透率を用いてガス移行解析の予察解析を実施した。検討結果として図 3.2.1-42 に排出側からの累積排水量の経時変化を示す。ここで、青の実線が CODE_BRIGHT による結果であり、破線が GETFLOWS による解析結果である。

ここで、CODE_BRIGHT におけるポーラスメタル内の水が完全に排水される時刻は 30.5 日であり、ほぼ GETFLOWS と一致する結果となった。また、30 日から 60 日までの累積排水量を見ると一致しているのが分かる。しかし、60 日以降の CODE_BRIGHT の結果は急激に排水量が多くなり、注水開始から 240 日目で約 8.0ml の排水量に達する結果となり、その後は定常状態となった。60 日以降に状況が変化する原因は気相の相対浸透率が 90%程度まで低下すると、モビリティーが大きいことに加え、有効応力低下による塑性化が原因となっている。力学連成二相流解析では、間隙圧の増加によって体積変化が生じる。これに伴い、飽和度も低下することになる。飽和度が低下すると、気相の移行もしやすくなる。特に、ケース 2 で設定されている気相の相対浸

透率は、水飽和度 90%の時に、k_{rg}＝7.13E-03 となる。一方、ケース 1 では k_{rg}=3.05E-05 であり 230 倍強のモビリティーをもつことになる。そのため、ガスが移行しやすく、所定の気相の圧力になりやすいために有効応力が低下しやすい結果となった。これを検証するため、ケース 1 で用いた気相の相対浸透率を用いて解析を実施した。検討結果を図 3.2.1-42 の茶色の実線で示す。ケース 1 の気相の相対浸透率は水飽和度 70%程度まで値が小さいため、排水量が極端に小さい結果となった。後述するが、ガスのモビリティーが小さいことから有効応力の低下も非常に緩慢な結果となっている。

以上から、力学連成二相流解析では体積変化が生じるため、その影響によっても飽和度が変化することになる。よって、二相流解析で決定したパラメータを用いて力学連成二相流解析を実施する場合、力学変形に応じてパラメータの微調整を行う必要性が示唆された。

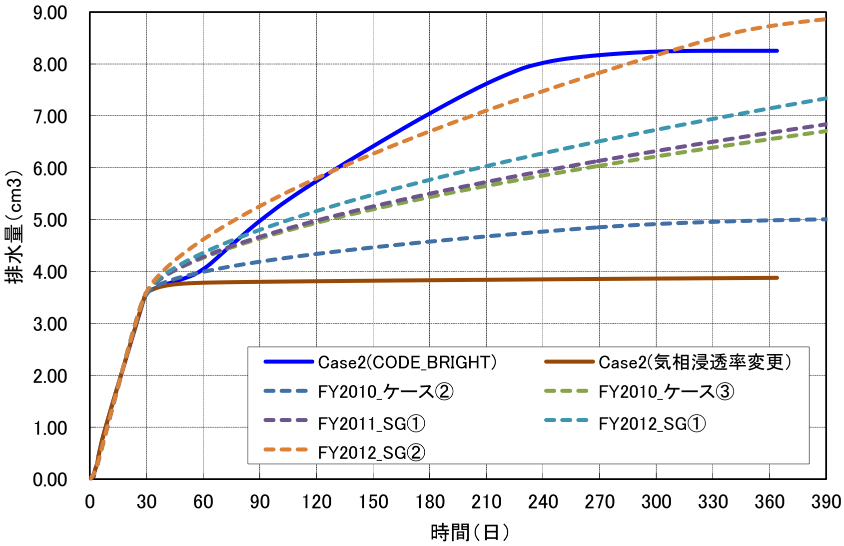


図 3.2.1-42　ケース 2 累積排水量の比較

ケース 2 における飽和度分布を図 3.2.1-43 に示す。ケース 2 については、ガス注入開始から 50 日目までは二相流解析とほぼ一致していることから、飽和度も 96%程度までしか低下しない。その後は排水が増加することから、底部の体積が増加するのとともに、飽和度も極端に低下する。365 日後には 70%弱まで低下する結果となっている。また、供試体中央部についても 365 日後には中央部でも 90%程度まで飽和度が低下する結果となった。排水量が増加するため供試体の飽和度も全体的に低下する結果となっている。

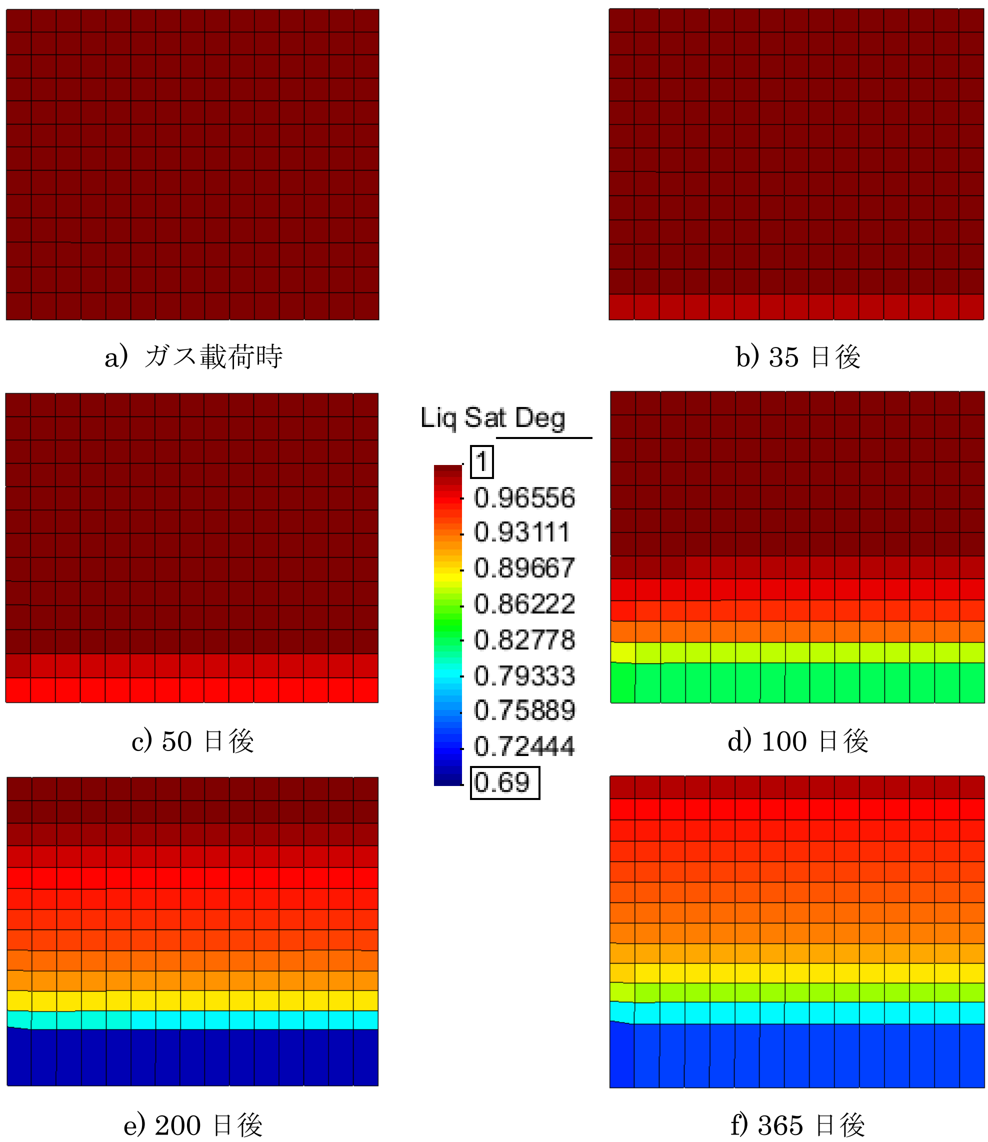


図 3.2.1-43　飽和度分布（ケース 2、変形倍率：1.0 倍）

次に、ケース 2 の気相の相対浸透率をケース 1 のものに変更した場合の飽和度分布を図 3.2.1-44 に示す。本ケースでは供試体内からの排水がほとんどないことから、365 日経過後であっても最下端の要素が 96%程度、その上の要素が 98%程度とわずかな飽和度低下であった。変形についても分布図と合わせて表現しているが、図 3.2.1-43 のケース 2 と比べてほとんど変形していないのが分かる。

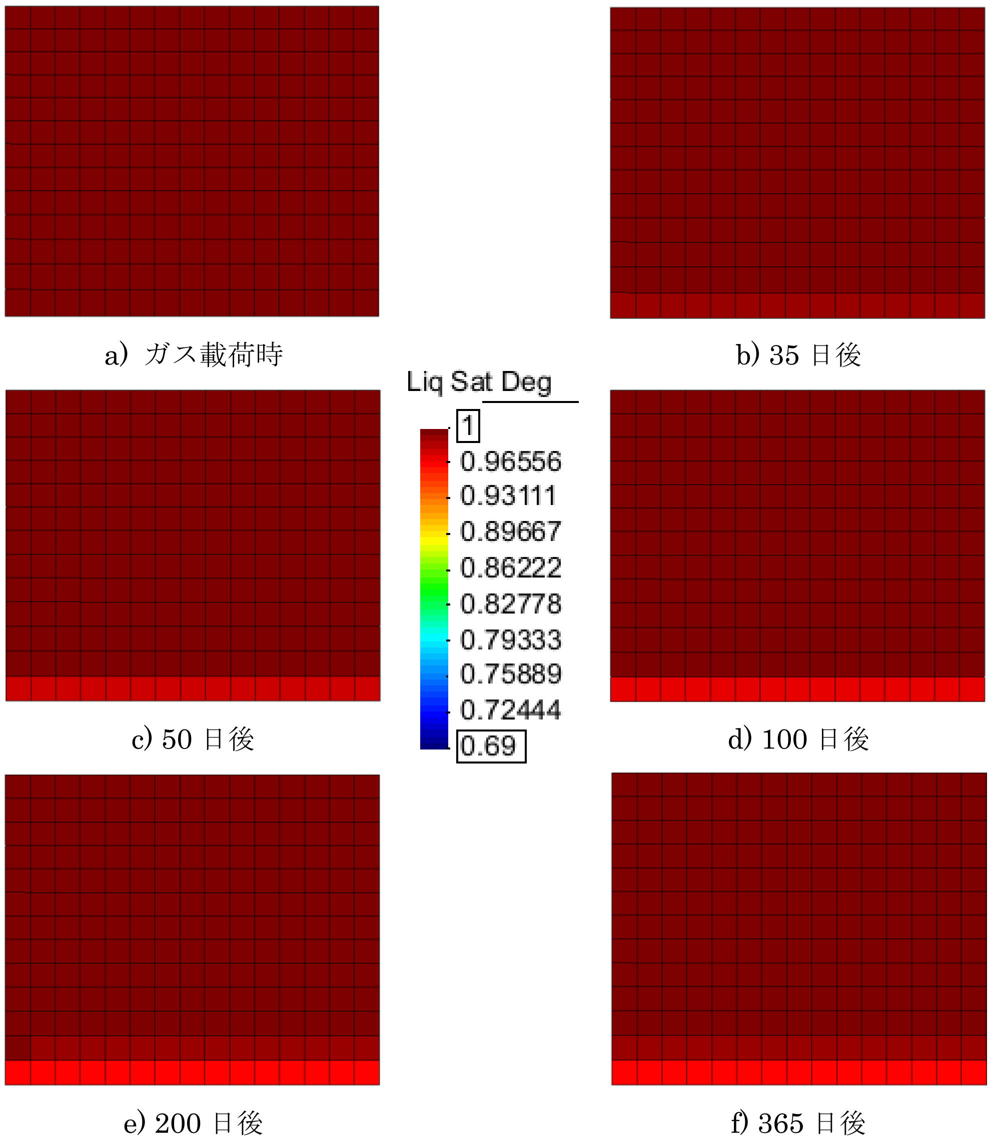


図 3.2.1-44　飽和度分布

（ケース 2 の気相の相対浸透率をケース 1 にした場合、変形倍率：1.0 倍）

ケース 2 の平均有効応力の経時変化を図 3.2.1-45 に示す。ここで、ガスが供試体へ侵入するガス注入開始から 30.5 日まではケース 1 と同様の応力変化が生じているが、その後は全く異なる傾向を示す。底部については、50 日程度で有効応力が 0.0MPa となる結果となり、中央部についても 90 日を過ぎたところで有効応力が低下し始め、210 日を超えたところで平均有効応力が 0.0MPa 程度まで低下する。排水側についてもガス注入開始から 210 日を超えたあたりで平均有効応力が低下し始める結果となった。これは、ケース 2 で用いた気相の相対浸透率が水飽和度の低下に伴い、気相の浸透率が増加しやすい設定となっているため、ガス圧が変化しやすく、それに伴い、有効応力が低下しやすいパラメータになっている。

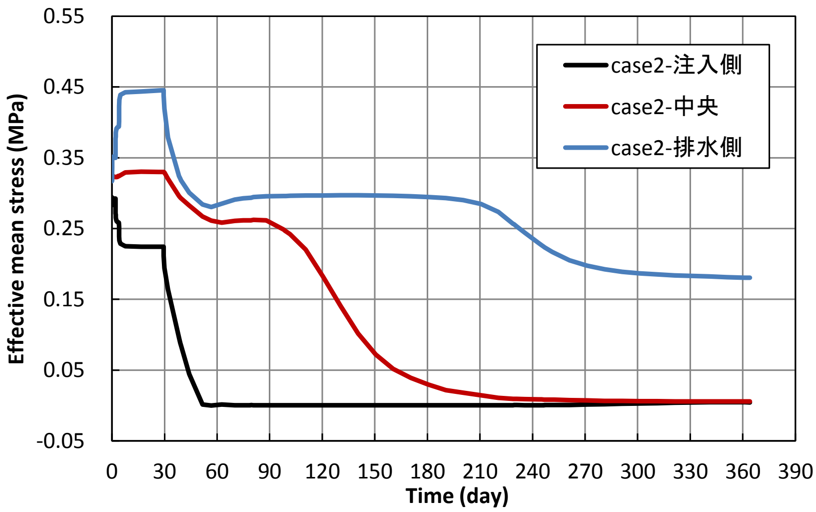


図 3.2.1-45　平均有効応力の経時変化（ケース 2）

一方、ケース 2 の気相の相対浸透率を比較的に気相のモビリティーの低いケース 1 に変化させた場合の有効応力の経時変化を図 3.2.1-46 に示す。ガスが供試体内へほとんど侵入していないことから、ガス圧も増加せず、有効応力の低下も緩慢になる。そのため、ガス注入開始から 365 日経過後でも平均有効応力は 0.0MPa にならない結果となった。以上から、ガス移行過程の場合、気相の相対浸透率の設定が供試体の平均有効応力に影響を及ぼすことが分かった。

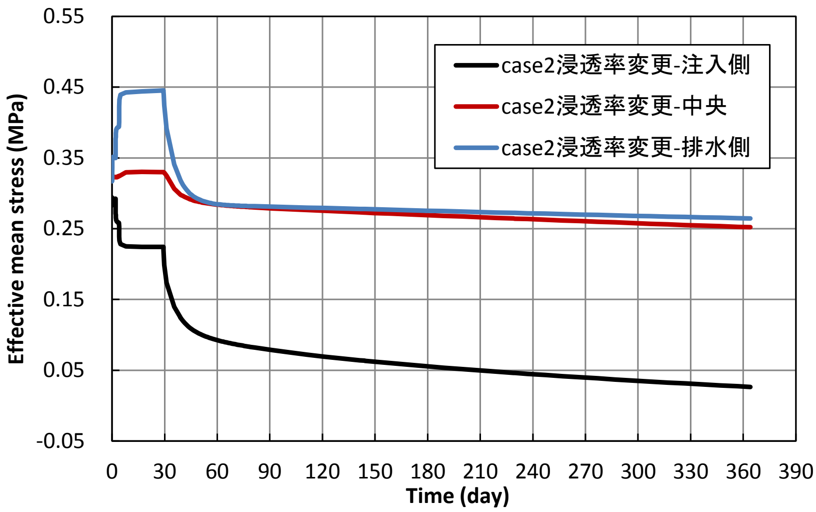


図 3.2.1-46　平均有効応力の経時変化（ケース 2 の気相の相対浸透率をケース 1 に変更した場合）

図 3.2.1-47 にケース 2 の平均有効応力の分布図を示す。ここで、50 日後では平均有効応力が 0.0MPa になっている箇所は下端の 1 要素のみであるが、それ以降は供試体内部の平均有効応力も低下していくことが分かる。

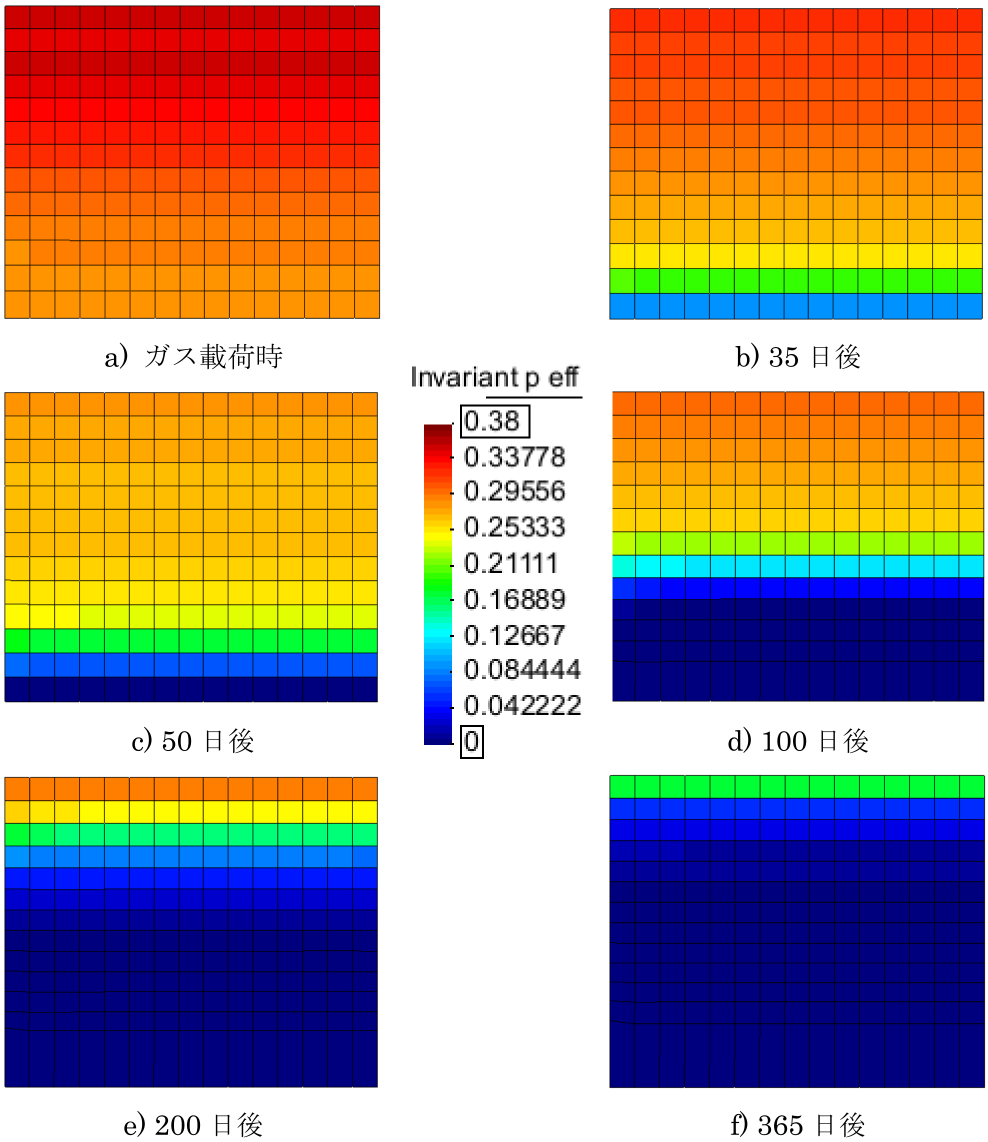
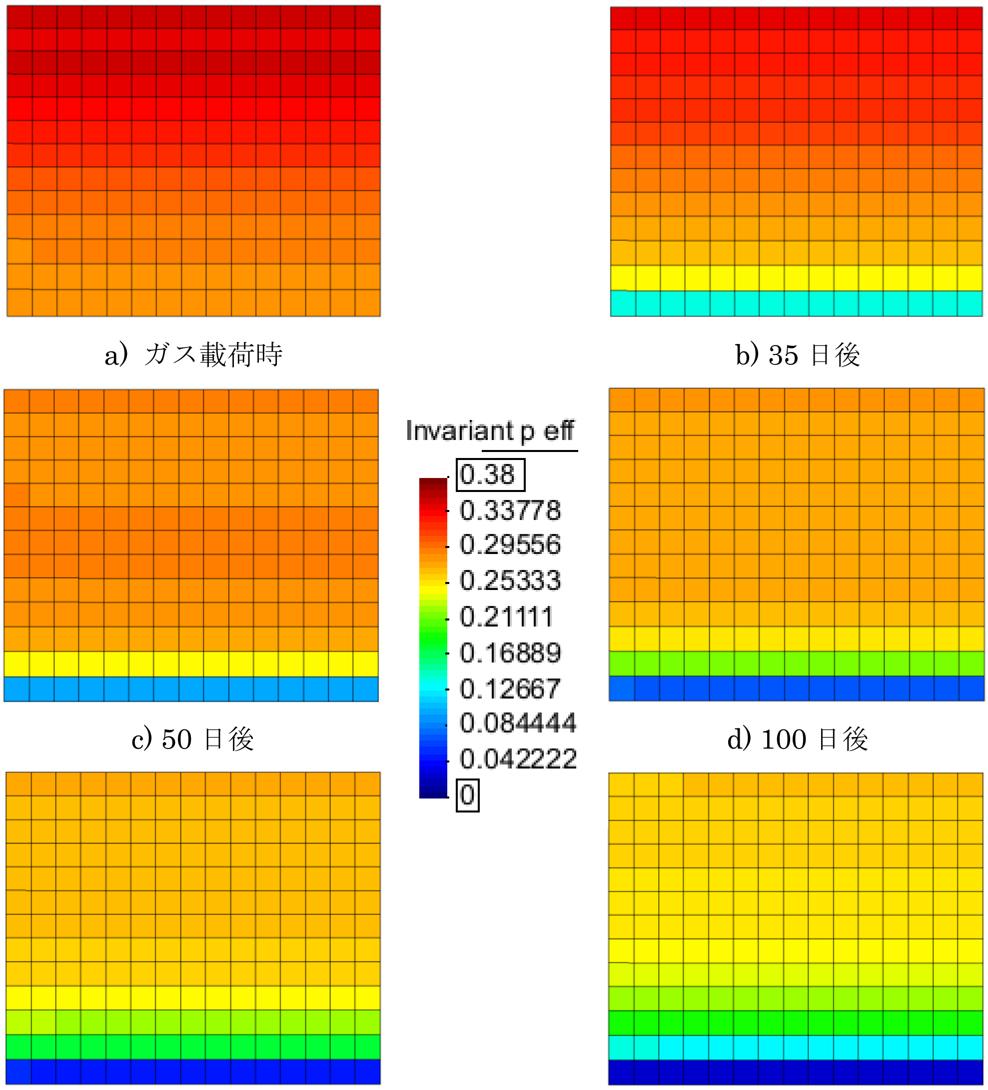


図 3.2.1-47　平均有効応力分布図（ケース 2、変形倍率：1.0 倍）

ケース 2 に対し、気相の相対浸透率をケース 1 に変更した場合の平均有効応力分布を図 3.2.1-48 に示す。ここで、ガス注入が開始される 35 日目以降の平均有効応力分布をみると、注入側の有効応力の低下が緩慢に生じているのが分かる。ガスが供試体内にほとんど侵入していないため、平均有効応力も低下しない状態になっている。よって、気相の相対浸透率のみを変化させるだけで図 3.2.1-47 と図 3.2.1-48 の平均有効応力分布の相違が生じる結果となる。



a) ガス載荷時　b) 35 日後　c) 50 日後　d) 100 日後　e) 200 日後　f) 365 日後

図 3.2.1-48　平均有効応力分布図
（ケース 2 の気相の相対浸透率をケース 1 に変更した場合、変形倍率：1.0）

図 3.2.1-49 にケース 2 における間隙率の経時変化を示す。抽出している位置はこれまでと同様に、ガス注入側、供試体中央、排水側の 3 点である。

間隙率分布をみると、ガスが侵入し、注入側の平均有効応力が 0.0MPa になる 50 日以降から注入側の間隙率も 0.9 まで上昇する結果となった。一方、そのほかの部分は注入側の極端な膨張によって圧密される結果となっている。現象としては、注入側の間隙が開き、排水側の間隙が圧縮されることから理解はできるが、極端に間隙が開き始める 60 日以降は塑性ひずみが増大していることから、計算精度に問題があるものと考えられる。

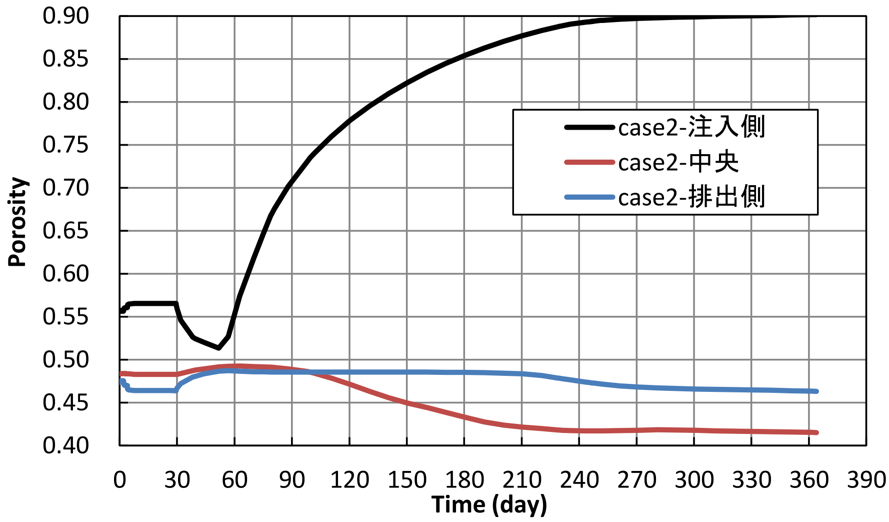


図 3.2.1-49　間隙率分布の経時変化（ケース 2）

ケース 2 の気相の相対浸透率をケース 1 のものに変更した場合の間隙率分布の経時変化を図 3.2.1-50 に示す。ガスが供試体内にほとんど侵入していないことから、体積変化が生じていないことが分かる。また、下部の要素が弾性状態であることから、剛性を有しているためガスが侵入し、有効応力が低下しても塑性するまで極端な体積増加が生じていない。

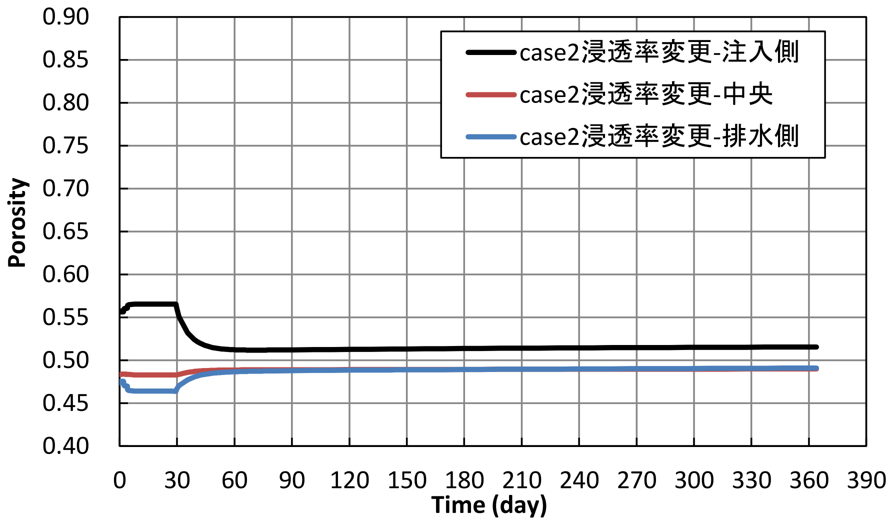


図 3.2.1-50　間隙率の経時変化（ケース 2 の気相の相対浸透率をケース 1 に変更した場合）

次に、ケース 2 における間隙率分布を図 3.2.1-51 に示す。ここで、変形倍率は 1.0 倍としているが、下端要素で極端な体積膨張が生じているのが分かる。また、それに伴い、その直上の要素の間隙率は圧縮される結果となっている。直上の要素は圧縮されるものの、ガス圧の上昇によって有効応力も低下していることから、ガス注入開始から 365 日目には塑性領域が供試体半分程度まで達していた。そのため、変形しやすい状況となっている。

ケース 2 の場合は力学パラメータが少なからず影響を及ぼしているものと考えられる。しかし、本検討で用いている力学パラメータは既往の検討から参照しているものであるため、少なくとも飽和時における三軸試験や圧密試験を実施してパラメータを取得してガス移行時の力学パラメー

タの影響を把握する必要がある。

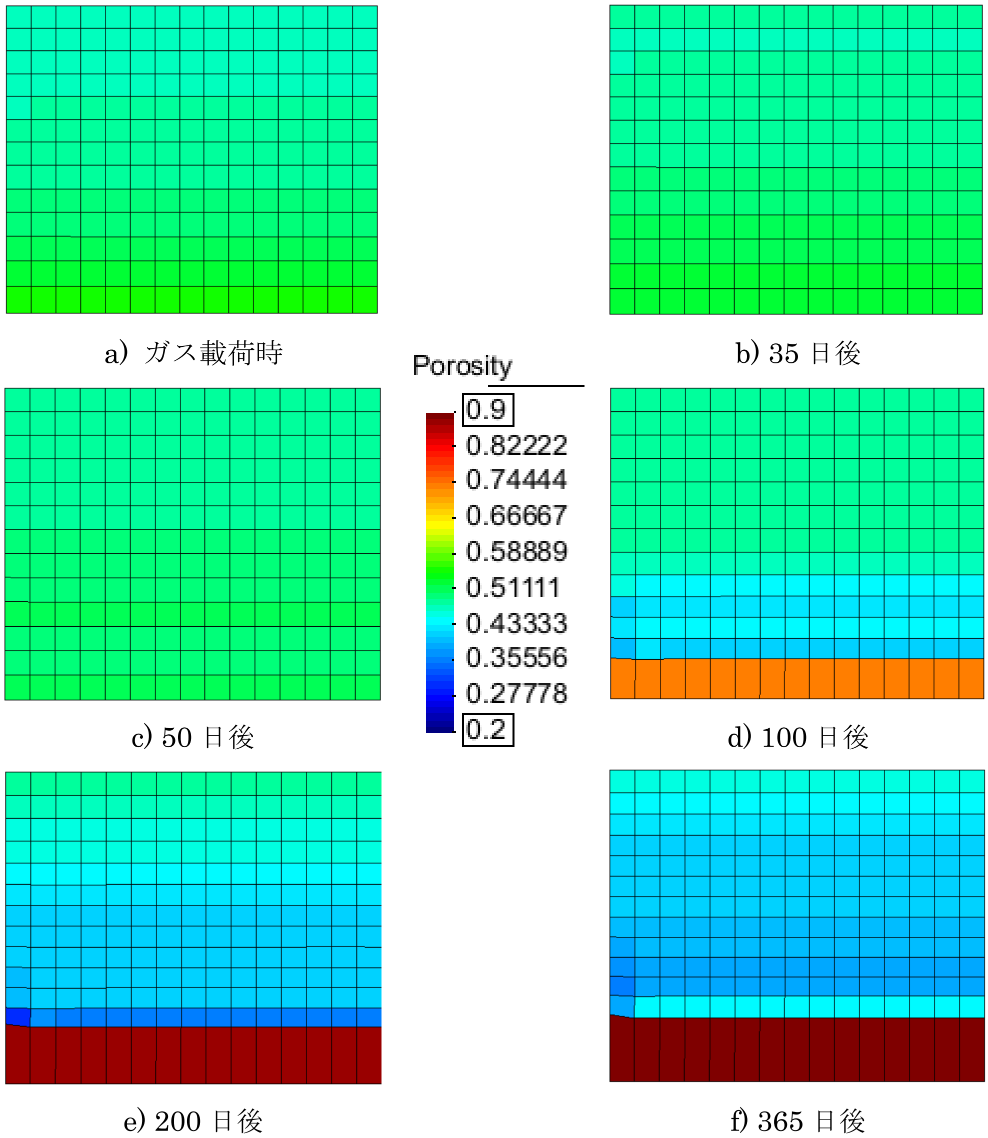


図 3.2.1-51　間隙率分布（ケース 2、変形倍率：1.0 倍）

図 3.2.1-52 にケース 2 の気相の相対浸透率をケース 1 に変更した場合の飽和度分布を示す。ここで、365 日後の間隙率分布の変化もごくわずかであることが分かる。本ケースでは供試体が弾性体であり、ガス圧も上昇しにくいため有効応力の低下も緩慢であることから、塑性化する領域はなく、そのため極端な体積膨張が生じない結果となった。

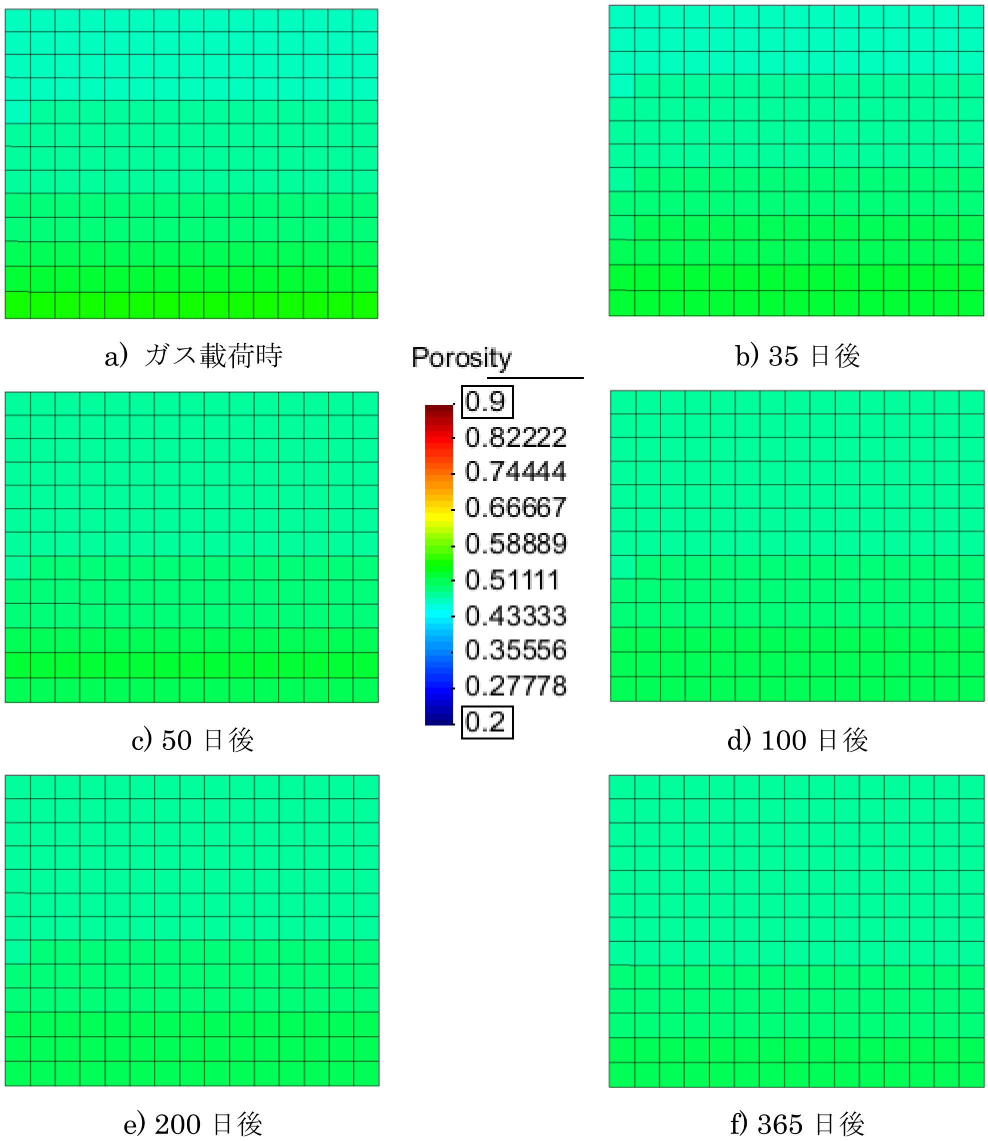


図 3.2.1-52　間隙率分布

（ケース 2 の気相の相対浸透率をケース 1 に変更した場合、変形倍率：1.0 倍）

c.　試験結果との比較

これまでの検討で、二相流解析で設定された二相流パラメータは力学の影響を含んだパラメータであることを示した。さらに、気相の相対浸透率の設定が力学に係る応力や体積変化へ影響を及ぼすことが分かった。

また、対象とした試験のうちの一つが、ガス注入開始から 144 日目で解体を行ったことから、実験結果との比較を実施してさらに力学パラメータの影響及び確からしさを検証する。

初めに累積排水量の比較を図 3.2.1-53 に示す。ここで、供試体 No.1 はケース 2 の結果と類似し、ケース 1 は供試体 No.2 の結果に類似する。ただし、ケース 2 の結果は 60 日以降の確からしさが不明であることから、ここでは供試体 No.2 とケース 1 について比較する。ケース 1 と供試体 No.2 はガス注入が開始される時刻は異なるものの、ガスが注入され始めてから 90 日付近までの累積排水量の勾配はほぼ一致する結果となっている。よって、力学を考慮した供試体マクロとしての透水特性は表現できている。

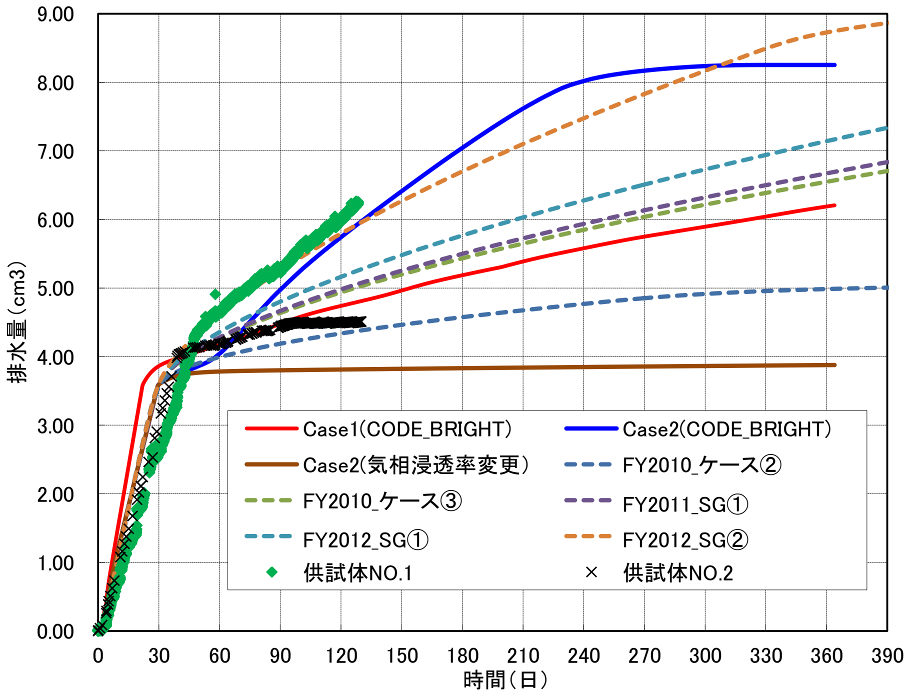


図 3.2.1-53　累積排水量の経時変化比較

次に、応力変化について比較を行う。図 3.2.1-54 に底面の有効応力の経時変化の比較を示す。ここで、実験における底面の有効圧力については土圧から有効ガス圧を引いた値を示し、解析結果については底面における有効鉛直応力の経時変化を示す。初期の土圧が異なることから出発点は異なるものの、ケース 2 の気相の相対浸透率を変化させたケースでは変化の傾向を良く表現できている。

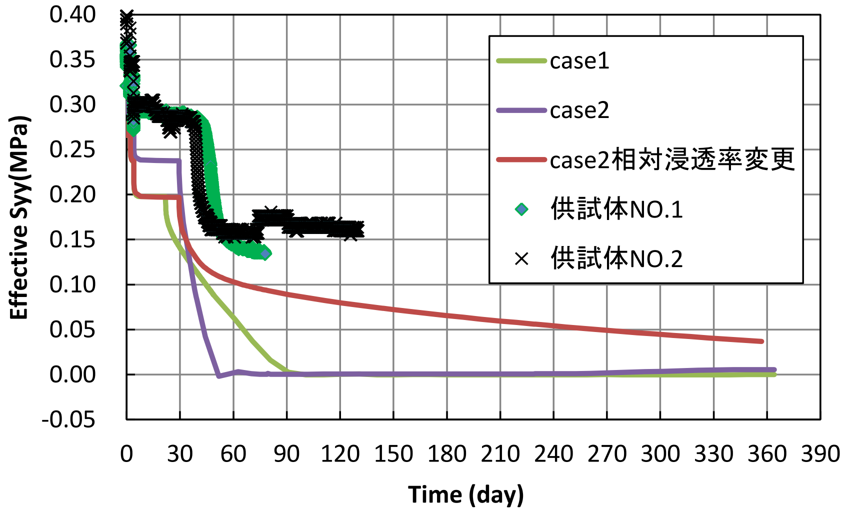
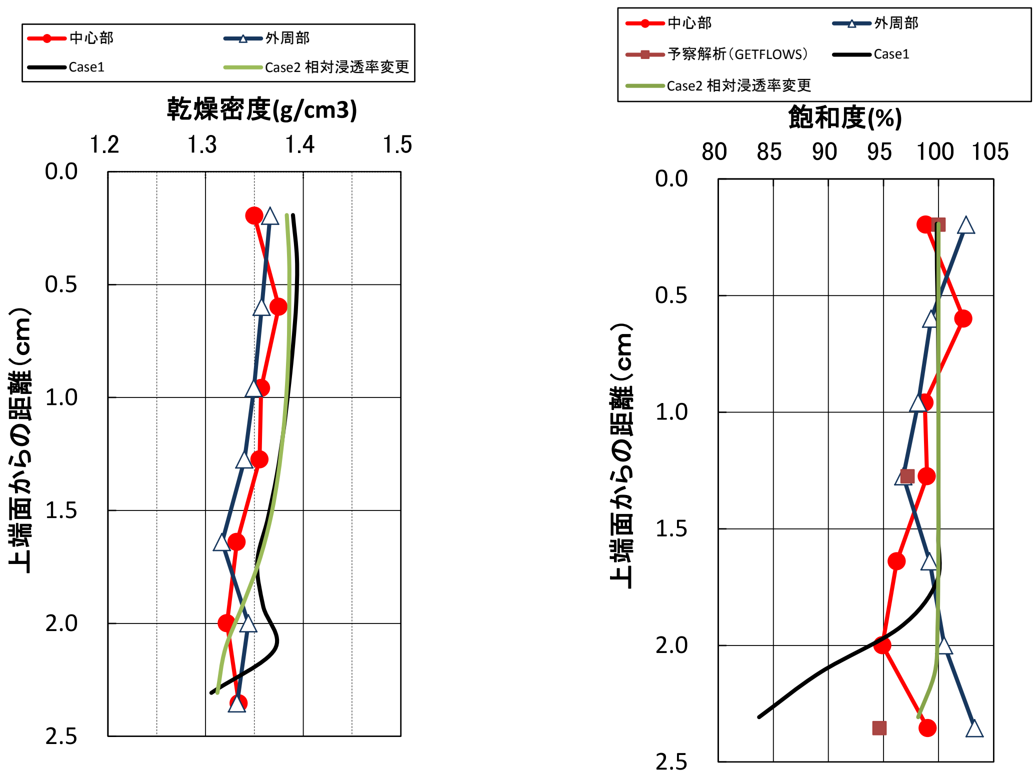


図 3.2.1-54　底面の有効応力の経時変化比較

最後に、ガス注入開始から 144 日目に解体した供試体 No.2 の乾燥密度及び飽和度分布と同時刻における解析から算出されたものを比較する。比較結果を図 3.2.1-55 に示す。なお、ケース 2 については 60 日以降の結果の妥当性が不明確であるため除外した。ケース 1 よりもケース 2 の

気相の相対浸透率をケース 1 に変更したケースの方が実験結果に良く一致している。



a）乾燥密度分布　　　　　　　　b）飽和度分布

図 3.2.1-55　解体調査結果と解析結果の比較（ガス注入開始から 144 日目）

3.2.2　ガス発生モデリングの検討

(1) 既存のガス発生モデルに関する調査

ガス発生モデリングの高度化検討に当たり、主に TRU 廃棄物処分施設内のガス発生に関する国内の既往知見の調査及び整理を実施した。放射性廃棄物処分施設内のガス発生に関する既往知見の調査結果を表 3.2.2-1、表 3.2.2-2 に示す。ガスの発生機構は、金属腐食、有機物の微生物分解、放射線分解、放射性崩壊によるものが想定される。さらに、国内外におけるガス発生モデルとその適用事例について整理したものを表 3.2.2-3、表 3.2.2-4 に示した。廃棄体からのガス発生に特化したモデル（T2GGM、SMOGG、MAGGAS）はいくつか存在するが、解析コードが公開されているものや、購入可能なものは現時点では存在しない。TOUGHREACT[20]は水・ガス 2 相流解析と物質移行解析を取り扱える TOUGH2 と地球化学計算を連成した解析コードであり、ソースコードも含めて購入可能である。PHREEQC もまた米国地質調査所（USGS）から公開されている地球化学計算コードであり、PHREEQC を用いてガス発生を計算し、ガス移行過程を解析するる場合は、他の水・ガス 2 相流解析コードや物質移行解析コードと連成する必要がある。

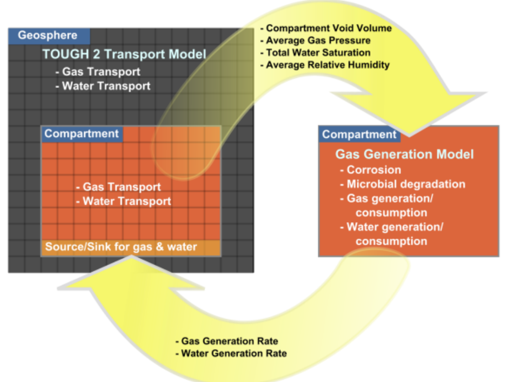
表 3.2.2-1　放射性廃棄物処分施設内のガス発生に関する既往知見の整理（1/2）

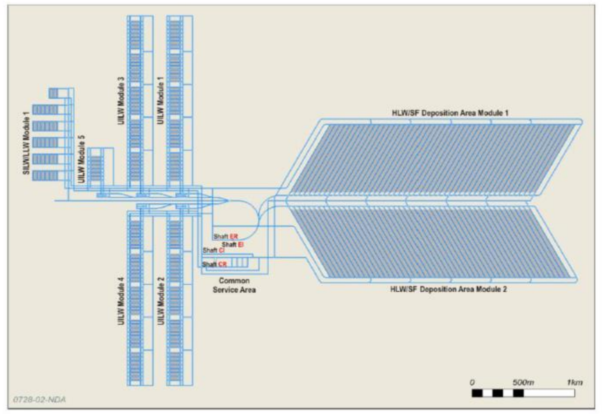
ガス発生機構	対象とする物質・ガスと発生プロセス	知見の整理	参考文献
1)　金属腐食によるガス発生	● 対象金属：鉄・ジルカロイ ● 発生ガス：水素 ● 反応式 ✓ 鉄（炭素鋼・ステンレス鋼）　$3Fe + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4H_2$ ✓ ジルカロイ　$Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$	● TRU 廃棄物処分上内の坑道に設置される構造物の金属腐食によるガス発生速度の算定を目的とした研究 ● 長期ガス発生試験（数百日以上）による試験結果から得られた H2 ガス発生等価腐食速度から、ガス発生量を算定（実験条件：セメント間隙水環境（高 pH)、かつ塩化物イオン共存下）	[21]
	● 対象金属：鉄 ● 発生ガス：水素 ● 反応式 ✓ 鉄（炭素鋼）　$Fe^{2+} + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 8H^+ + 2e^-$	● 地下処分環境に存在する地下水等により、好気性条件（酸素のある条件）及び嫌気性条件（酸素のない条件）のいずれも金属腐食が生じ、腐食反応によって水素ガスが発生する ● 処分施設の構造材（鉄筋材等）、金属廃棄物（炉内構造物等）、廃棄体の金属容器等の金属が対象	[22]
	● 対象金属：鉄・ジルカロイ ● 発生ガス：水素 ● 反応式 ✓ 鉄（炭素鋼・ステンレス鋼）　$3Fe + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4H_2$ ✓ ジルカロイ　$Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$	● 高レベル放射性廃棄物及び TRU 廃棄物の地層処分場における金属腐食を想定した実験における腐食速度の測定が実施されている ● 高アルカリ溶液中における腐食速度測定実験において、各金属で以下の長期的な等価腐食速度が得られている ✓ 炭素鋼とステンレス鋼：$2\times10^{-2}\mu$ m/y ✓ ジルカロイ：約 $5\times10^{-3}\mu$ m/y	[23]
2)　放射線分解によるガス発生	● 対象物質：水・有機物 ● 発生ガス：水素	● 有機物(RH)に放射線を照射すると、C-H 結合が切断され、ラジカル(H・、 R・)が生じ、水素ラジカル同市あるいは水素ラジカルと有機物が反応し、水素ガスを発生する $RH \rightarrow R\cdot + H\cdot$ $H\cdot + RH \rightarrow R\cdot + H_2$ $H\cdot + H\cdot \rightarrow H_2$ ● 水の放射線分解では、H・、OH・が生じる。また、放射線のエネルギーが高い場合には、水分子が電子を放出する。この電子は水分子に双極子モーメントを生じさせ、双極子モーメントが配列した電磁場で電子は安定化され、水和電子（e_aq）となる。水素の生成反応は活性の高い H・、OH・、e_aq によって生じる。 $e_{aq} + e_{aq} \rightarrow H_2 + 2OH\cdot$ $e_{aq} + H\cdot \rightarrow H_2 + OH^-$ $H\cdot + H\cdot \rightarrow H_2$	[21]

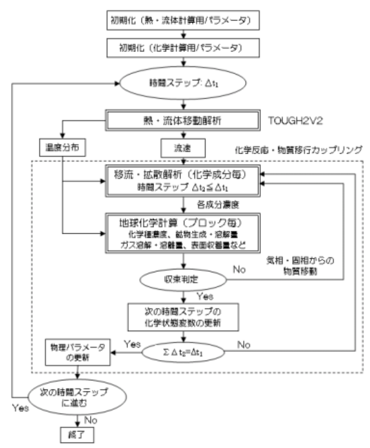
表 3.2.2-2　放射性廃棄物処分施設内のガス発生に関する既往知見の整理（2/2）

ガス発生機構	対象とする物質・ガスと発生プロセス	知見の整理	参考文献
3)　微生物分解によるガス発生	● 対象物質：セルロース・アスファルト ● 発生ガス：水素、二酸化炭素、メタン等 ● 反応式 ✓ 硝酸分解菌 $C_6H_{12}O_6 + 4.8NO_3 + 4.8H^+ \rightarrow 6CO_2 + 2.4N_2 + 8.4\,H_2O$ ✓ 酸生成菌 $C_6H_{12}O_6 + H_2O \rightarrow 2CO_2 + 2H_2 + C_2H_5OH + CH_3COOH$ ✓ 酢酸生成菌 $C_6H_{12}OH + H_2O \rightarrow CH_3COOH{+}2H_2$ ✓ 嫌気性アスファルト分解菌（脂肪族） $C_2H_4 + 3\,NO_3 + 6H^+ \rightarrow 2CO_2 + 1.5N_2 + 5H_2O$ $C_2H_4 + H_2O \rightarrow C_2H_5OH$ ✓ 嫌気性アスファルト分解菌（芳香族） $C_2H_4 + 6.8\,NO_3 + 12.8H^+ \rightarrow 6CO_2 + 3.4N_2 + 8.4H_2O$ $2C_6H_4 + 15H_2O \rightarrow 6CO_2 + 10H_{2+}3C_2H_5OH$ ✓ メタン生成菌 $CH_3COOH \rightarrow CO_2 + CH_4$ ✓ 硫酸塩還元菌 $CH_3COOH + 2H^+ + SO_4^{2-} \rightarrow H_2S + 2CO_2 + 2H_2O$ $4H_2 + 2H^+ + SO_4^{2-} \rightarrow H_2S + 4H_2O$	● 地層中で生息し得る微生物による有機物分解によるガス発生 ● 廃棄体に使用されているアスファルト固化剤や、パッキン等のゴム・プラスチック等が微生物によって分解され、水素、二酸化炭素、メタンが発生する ● セメント環境下における微生物分解によるガス発生速度に対するデータは極めて限定されるため、セルロース及びアスファルトとその他の有機物に分類し、その他の有機物についてはセルロースで代表させるとしている ● 硝酸塩の存在下では脱窒菌の硝酸イオンの還元による窒素ガスの発生が考えられるが、高 pH 領域では微生物の活性が急速に低下することとから､金属からのガス発生速度を大きく超えることはない	[21]
	● 対象物質：セルロース・硫酸塩・硝酸塩 ● 対象となる微生物：発酵微生物、メタン生成菌、脱窒素菌、硫酸塩還元菌 ● 発生ガス：水素、二酸化炭素、メタン等	● 対象となる微生物の内、廃棄物の中でガス発生源となるのは、セルロースであるとされており、分解によって発生するガスは水素、二酸化炭素、メタンである ● ただし、嫌気性条件での微生物作用は好気性条件に比べて活性が低く、嫌気性条件での微生物作用によるガス発生量は少ない傾向にあるとされている	[22]
4)　放射性崩壊に伴うガス発生	● 対象核種：U、Th 等のアクチノイド系核種 ● 発生ガス：He、Rn、Kr、I2	● TRU 廃棄物中に含まれる U、Th 等のアクチノイド系核種がα崩壊することにより、He ガスが発生する。その他、Rn、Kr、I2 等も発生するが、微量である。 ● 放射性崩壊により発生する He ガス量 V(He)は下式によって得られる $V(He) = \int^{t} A \times 3.5136 \times 10^{7} \times N_A \times dt$ V(He)　：He ガス発生量(mol) A　：時間 t におけるα放射能 N_A　：アボガドロ数 t　：時間（年）	[21]

表 3.2.2-3　ガス発生に関するモデル化事例（1/2）

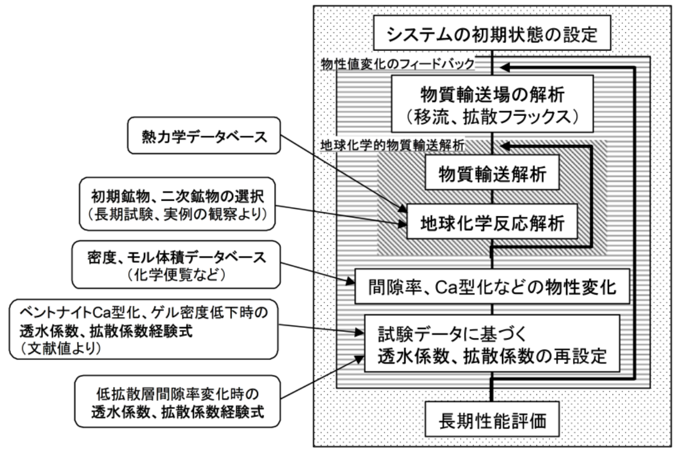
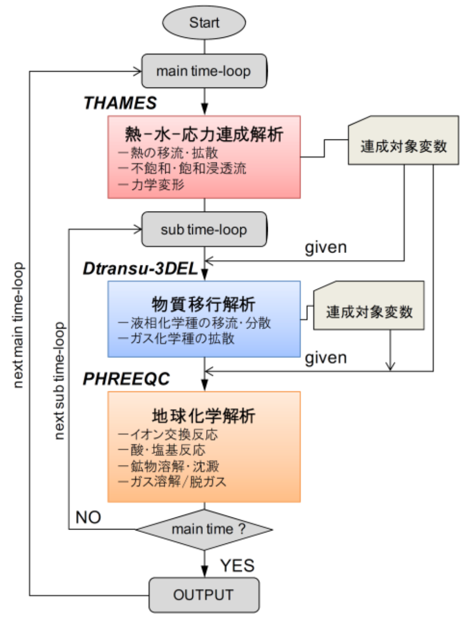
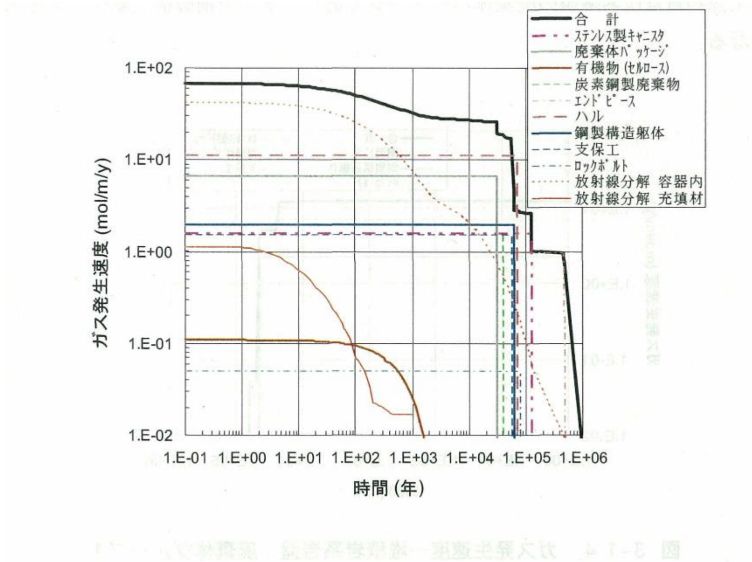
<table>
<tr><th>モデル</th><th>取り扱う事象</th><th>概要及び適用事例</th></tr>
<tr><td>1)　T2GGM[24]、
✓ カナダ核燃料廃棄物管理機関NWMOによる開発
✓ コード非公開
✓ 公開マニュアル有
✓ ガス発生モデルGGMと多相流解析コードTOUGH2との連成</td><td>● 好気性及び嫌気性条件下における鉄・合金の腐食に伴うガス発生
● 好気性及び嫌気性条件下における有機物分解に伴うガス発生
● 腐敗・再生による微生物生成量
● 廃棄体と地下環境間での水とガスの交換
● 水・ガス二相流</td><td>● 間隙容量、ガス相圧力、水相飽和度、相対湿度を TOUGH2 から引き渡し、GGM でガス・水の発生量を計算する（右図参照）
● V&V（検証と妥当性の確認）が報告されている
● 検証についてはマニュアルに記載
● 妥当性確認については、以下のプロジェクト等による適用事例がある
✓ スイス　モン・テリ岩盤研究所におけるガス経路に関する試験（HG-A 試験）
✓ スウェーデン Aspo の大規模気体注入試験
✓ 地下埋設施設におけるガス移行コードの比較
✓ FRAC3DVS との比較


[24]より引用</td></tr>
<tr><td>2)　SMOGG[25]
✓ イギリスSecro Assuaranceによる開発
✓ コード非公開</td><td>● 金属の腐食によるガス発生
● 有機物の分解
● 放射線分解によるガス発生</td><td>● SMOGG と MAGGAS の比較研究が実施されている[26]
● EC FORGE（処分場ガス挙動）プロジェクトの、中レベル廃棄物処分(ILW)のガス移行挙動シミュレーションにおける適用事例がある[27]。考慮している事象は以下の通り。
✓ 金属腐食（鉄）による水素ガス発生
✓ 微生物によるセルロース・高分子化合物の分解
✓ 微生物のガスの消費に H2、CO2 の消費とメタン発生
✓ この事例では放射線分解によるガス発生は考慮していない


[25]より引用</td></tr>
<tr><td>3)　MAGGAS[28]
✓ イギリス原子力規制庁及びNIREXによって開発
✓ コード非公開</td><td>● 金属（鉄・マグノックス）の腐食によるガス発生
● 有機物の分解
● 放射線分解によるガス発生</td><td>● エクセルスプレッドシートを使用した解析ツール
● セメント中のマグノックス燃料片のガス発生解析等における適用事例がある[27]</td></tr>
<tr><td>4)　TOUGHREACT[29]
✓ アメリカローレンスバークレー国立研究所によって
✓ コード公開（有料）
✓ マニュアル有
✓ 化学反応モデルと多層流解析コードTOUGH2との連成</td><td>● 化学反応
✓ 水溶性錯体
✓ 酸・塩基反応、酸化還元反応
✓ 鉱物の溶解・沈殿
✓ ガス溶解・脱ガス
✓ 陽イオン交換
● 熱・流体移動</td><td>● TOUGH2V2 で計算された流速。温度を地球化学計算コードに受け渡し、化学成分ごとに物質移行（移流・拡散）解析を行う。ここで求めた各成分濃度を、地球化学計算コードに引き渡し、水溶化学種の濃度、鉱物生成・溶解量、ガス溶解・遊離量、表面吸着量などを計算する。（右図参照）
● 主な適用事例
✓ 米国高レベル放射性廃棄物処分サイト評価
✓ CO2 地下貯留に関する解析
✓ 浅成銅鉱床の形成過程解析


[29]より引用</td></tr>
</table>

表 3.2.2-4　ガス発生に関するモデル化事例（2/2）

モデル	取り扱う事象	概要及び適用事例
5)　Phreeqc[30] ✓ USGSが開発 ✓ コード公開（無料） ✓ マニュアル有	● イオン交換反応 ● 酸・塩基反応 ● 鉱物溶解・沈澱 ● ガス溶解/脱ガス	● 二相流解析との連成コード「PHREEQC-TRANS」の開発事例がある（非公開、[31]の根拠資料集において検証を実施、連成の流れは右上図参照） ● 具体的な処分場建設段階における地下水環境の変化を考慮した地層処分システムを想定したニアフィールド環境の THMC 連成解析が実施されている[32]。THMC 連成解析の概要は右下図参照。 [31]の根拠資料集より引用 [32]より引用
6)　ガス発生速度の評価[21] ✓ 解析コードではなく、発生速度をモデルから算定した研究 ✓ 国内のTRU廃棄物処分性能評価に使用されている	● 金属腐食（ステンレス鋼、ジルカロイ）によるガス発生 ● 有機物の微生物分解による水素・二酸化炭素・窒素ガス発生 ● 放射線分解（有機物・水）による水素ガス発生	● 金属腐食によるガス発生速度の基本算定式は以下を使用 ● 有機物の微生物分解によるガス発生速度の基本算定式は以下を使用 ● 放射線分解によるガス発生量の評価では照射試験から求められた G 値と水または廃棄体の吸収線量から以下の式を使用している $R_{H_2 i} = A_{mi} C_{mi} \rho_{mi} \dfrac{r_{mi}}{M_{mi}/1000}$ R_{H2i}　：金属 i による H_2 ガス発生速度 [mol/y] A_{mi}　：金属 i の表面積 [m²] C_{mi}　：金属 i のガス発生等価腐食速度 [m/y] ρ_{mi}　：金属 i の密度 [kg/m³] M_{mi}　：金属 i の原子量 [g/mol] r_{mi}　：金属 i からの H_2 発生 mol 比（発生 H_2/腐食金属）[-] $R_{g_{ij}} = \sum_{i,j} m_{oi} C_{oij} \dfrac{10^6}{22.41}$ R_{gi}　：有機物 i の微生物 j によるガス発生量 [mol/y] m_{oi}　：有機物 i の存在量 [kg] C_{oij}　：有機物 i の微生物 j によるガス発生速度 [m³(STP)/g/y] $VM = G \times D \times M \times C$ VM　：ガス発生量(m³) G　：ガス発生に係る G 値(molecule/100eV) D　：吸収線量(Gy) M　：質量(kg) C　：定数(2.33×10^{-9}100eV·m³/Gy/kg/molecule) ● 上記から求めた各部材からのガス発生量算定例を右図に示す。約千年は、容器内からの放射線分解によるガス発生速度が最も多い結果となっている。 図 3-15　ガス発生速度—堆積岩系岩盤　廃棄体グループ2（キャニスタ）

(2) ガス発生モデリングの高度化検討

1) 方針検討

平成 23 年度、平成 24 年度の検討において、地球化学解析と水・ガス 2 相流解析および物質移行解析を組み合わせた解析コード TOUGHREACT を用いて、鉄の金属腐食に伴うガス発生・移行のモデリング検討を試行した。但し、材料内は完全に地下水で飽和した嫌気性雰囲気の状態を想定し、希薄溶液系を対象としたものであった。また、(1)で調査結果を示したように、廃棄体からのガス発生に特化したモデル開発が一部の機関で進められているが、すぐに利用可能なものは無いことが分かった。ガス発生モデリングは、ガスの発生機構自体のモデル化も重要であるが、それらは廃棄体周囲の処分環境（水分状態など）に強く影響を受けるため（図 3.2.2-1）、廃棄体周囲で起こる THC 連成事象の現象理解や可視化も重要な視点の 1 つとなる。そのため、本検討では廃棄体周辺での流体ダイナミクス（周囲からの水の移流、廃棄体からの熱発生に伴う温度変化、水蒸気発生・拡散・凝縮、ガス発生等）に着目し、典型的な人工バリア構造を模擬した 2 次元断面モデルによる THC 連成解析を実施する。

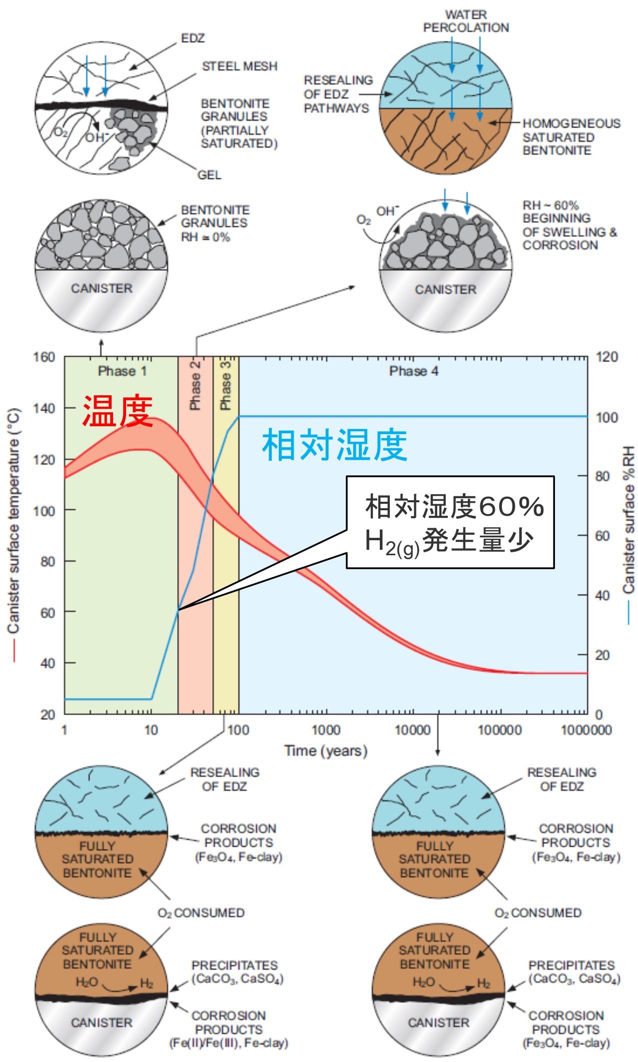


図 3.2.2-1　処分環境変化に伴うガス発生機構の概念[33]

2)　解析コード

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

- 温度：0℃～300℃（但し、熱力学データベースに依存）
- 圧力：1bar～数100bar（0.1MPa～数10MPa）
- イオン強度：塩水で最大6mol/kg H_2O

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

a.　熱・流体流動計算

本検討で対象とする流体系は、非等温状態の水、水素からなる 2 相流体系を基本とする。TOUGHREACTの熱･流体流動計算ではTOUGH2が用いられており､ここではTOUGH2 EOS5モジュールを使用する。本検討で考慮する流体、熱移動現象を表 3.2.2-5 に示した。なお、再冠水過程を取扱う場合、本来であれば初期不飽和状態の人工バリア内に水と空気が存在し、時間の経過とともに金属腐食ガスである水素が発生するが、現時点では空気と水素の双方を取扱うことができないため、初期に存在するガスは水素として検討を進める。

熱・流体流動計算（TOUGH2 EOS5モジュール）では、流体相間の相間物質移動（気相中への水蒸気生成や液相への水素ガス溶解）は温度、圧力に応じた熱力学的平衡状態（瞬時平衡分配）を前提とする。同様に、液相、固相(R)の間についても平衡熱交換を前提とする。このとき、非等温状態における水、水素2相2成分流体系の質量保存式は、流体相中pの各成分κに対する質量収支式に媒体（流体相＋固相）のエネルギー保存式を加えた(3.2-38)、(3.2-39)式により記述される。以下の式より求められる離散格子あたりの独立変数はP_g、S_lおよびTの3変数である。気相中の水蒸気濃度や水相中の溶存水素濃度は、圧力と温度から求められる従属変数として扱われる。

表 3.2.2-5　本検討で取り扱う流体・熱移動現象

相	成分	現象
液	● 水 ● 水素	● 移流 ● 拡散 ● 水素の溶解・遊離
気	● 水（水蒸気） ● 水素	● 移流 ● 拡散 ● 水蒸気生成（蒸発）・凝縮 ● 水素発生
熱エネルギー		● 熱移流（移流による熱移動） ● 固相、流体相の熱伝導

$$\nabla\cdot\left(\sum_p \rho_p \frac{Kk_{rp}X_p^\kappa}{\mu_p}\nabla\Psi_p\right)+\nabla\cdot\left(\sum_p \rho_p \overline{D}_p^\kappa \nabla X_p^\kappa\right)-\rho_p q_p = \frac{\partial}{\partial t}\left(\sum_p X_p^\kappa \phi S_p \rho_p\right) \tag{3.2-38}$$

$$\nabla\cdot\left(\sum_p \rho_p \frac{Kk_{rp}h_p}{\mu_p}\nabla\Psi_p\right)+\nabla\cdot(\lambda\nabla T)-\rho_p h_p q_p = \frac{\partial}{\partial t}\left[(1-\phi)\rho_R C_R T+\phi\sum_p S_p\rho_p u_p\right] \tag{3.2-39}$$

式中の記号の説明は以下のとおりである。

K ; 絶対浸透率(m^2)
k_{rp} ; 流体相$p(=l$、$g)$の相対浸透率$(-)$
S_p ; 流体相$p(=l$、$g)$の飽和度$(-)$
μ_p ; 流体相$p(=l$、$g)$の粘性係数$(Pa\cdot \mathrm{s})$
ρ_p ; 流体相$p(=l$、g、$R)$の密度(kg/m^3)
Ψ_p ; 流体相$p(=l$、$g)$のポテンシャル(Pa)
X_p^κ ; 流体相$p(=l$、$g)$の成分$\kappa(=l$、$g)$の質量分率$(-)$
ϕ ; 有効間隙率$(-)$
$\overline{D}_p^\kappa$; 流体相$p(=l$、$g)$の成分$\kappa(=l$、$g)$の水力学的分散係数(m^2/s)
h_p ; 流体相$p(=l$、$g)$の比エンタルピー(J/kg)
u_p ; 流体相$p(=l$、$g)$の比内部エネルギー(J/kg)
T ; 温度(℃)
λ ; 熱伝導率$(J/K/m/s)$
q_p ; 流体相$p(=l$、$g)$の生産・消滅量$(kg/m^3/s)$

b. 物質移行計算

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

$$\nabla\cdot\left(\frac{Kk_{rl}C_l^j}{\mu_l}\nabla\Psi_l\right)+\nabla\cdot\left(\overline{D}_l\nabla C_l^j\right)-\sum_p q_p^j=\frac{\partial}{\partial t}\left(C_l^j\phi S_l\right) \tag{3.2-40}$$

式中の記号の説明は以下のとおりである。

K ; 絶対浸透率(m^2)
k_{rl} ; 液相の相対浸透率$(-)$

S_l ; 液相の飽和度$(-)$

μ_l ; 液相の粘性係数$(Pa \cdot \mathrm{s})$

Ψ_l ; 液相のポテンシャル(Pa)

C_l^j ; 液相の成分jの濃度(kg/m^3)

ϕ ; 有効間隙率$(-)$

$\bar{D}_l$; 液相中の水力学的分散係数(m^2/s)

q_p^j ;流体相$p(= l、g、s)$の化学反応により生じる生産・消滅量$(kg/m^3/s)$

c. 地球化学計算

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

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

$$SI_m = \log_{10} \Omega_m = \log_{10} \frac{\prod_{j=1}^{N_c} c_j^{\nu_{mj}} \gamma_j^{\nu_{mj}}}{K_m} \tag{3.2-41}$$

式中の記号の説明は以下のとおりである。

c_j ; 成分jのモル濃度(mol/L)

γ_j ; 鉱物mの溶解/沈殿反応における成分jの活動度係数$(-)$

ν_{mj} ; 鉱物mの溶解/沈殿反応における成分jの化学量論係数$(-)$

K_m ; 鉱物mの溶解/沈殿反応における平衡定数

N_c ; 鉱物mの溶解/沈殿反応における成分数

反応速度$r_n (mol/s/kg\ H_2O)$は以下の式で表される。

$$r_n = \pm k_n A_n \left|1 - {\Omega_m}^{\theta}\right|^{\eta} \quad n = 1 \dots N_q \tag{3.2-42}$$

$$k_n = k_{25} \exp\left[\frac{-E_a}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right)\right] \tag{3.2-43}$$

式中の記号の説明は以下のとおりである。

k_n ; 反応速度定数$(mol/m^2/s)$

A_n ; 比反応表面積$(m^2/kg\ H_2O)$

θ、η ; 実験パラメータ$(-)$

N_q ; 反応速度を考慮する鉱物数

k_{25} ; 25℃における反応速度定数$(mol/m^2/s)$

E_a ; 活性化エネルギー(kJ/mol)

R ; 気体定数$(Pa \cdot L/mol/K)$

T ; 温度(K)

反応速度定数k_nは温度の関数となり、比反応表面積A_nは鉱物や間隙水の存在量の関数となる。

数値解法としては、化学成分毎の質量収支を考え Newton-Raphson 法により解く。

d.　処理フロー

TOUGHREACT の処理フローを図 3.2.2-2 に示す。まず、TOUGH2 EOS5 モジュールによる熱・流体流動計算によって温度場と流速場が計算される。これを用いて化学成分毎に物質移行計算が行われ、求められた各成分の濃度を地球化学計算に引き渡す。格子毎に化学種濃度や鉱物の生成・溶解量等が計算される。物質移行計算と地球化学計算を繰り返し、所定の収束条件に達した後に化学場の変化に伴い熱・水理パラメータが更新され、熱・流体流動計算に戻るという流れである。地球化学計算の中で発生した水素ガスは熱・流体流動計算の生産・圧入項に加えられる。

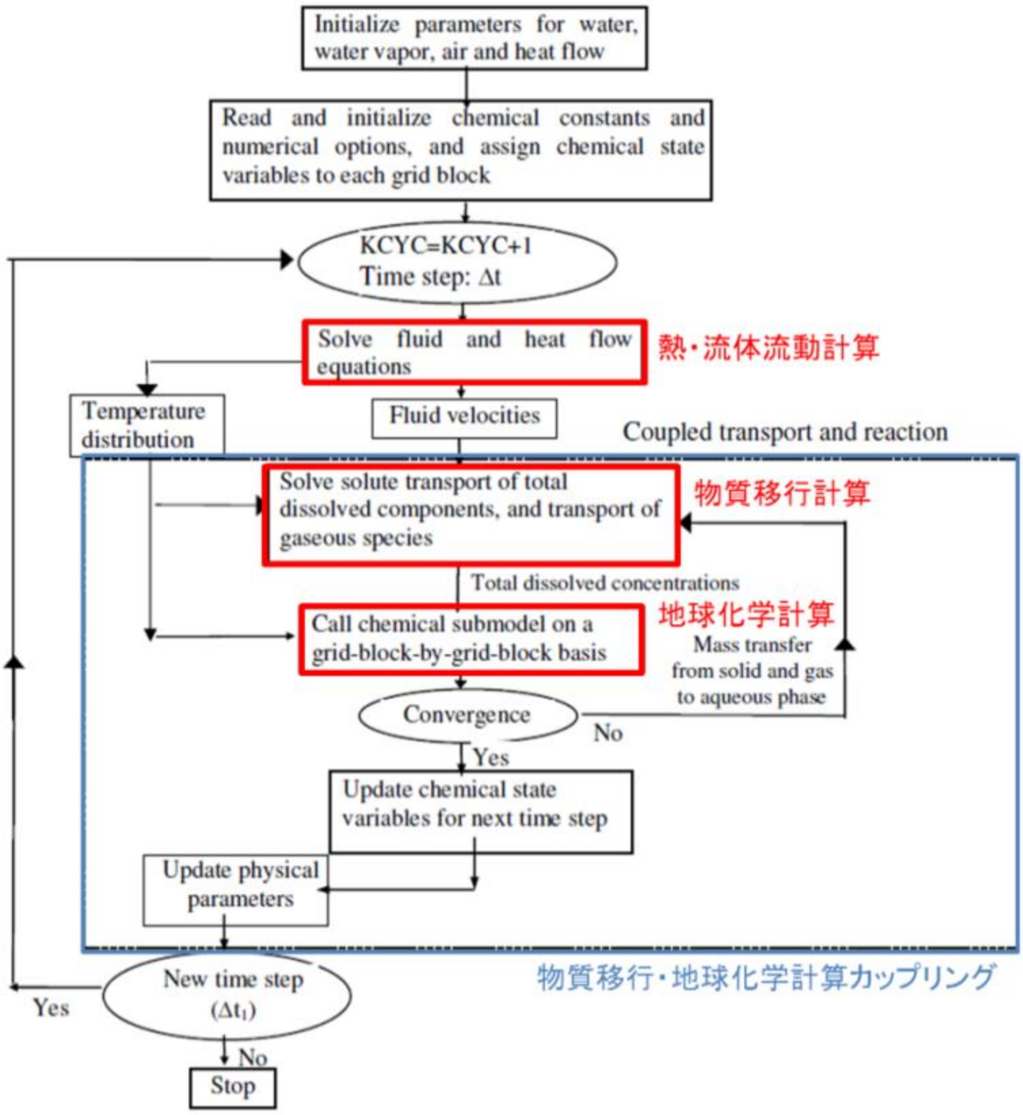


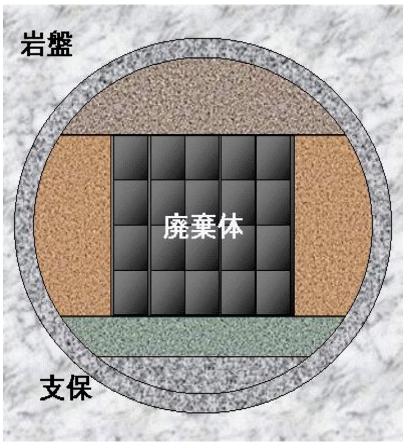
図 3.2.2-2　TOUGHREACT の処理フロー

3) 解析モデル

a. 対象とする処分システム概念

本検討では､第 2 次 TRU レポート[31]より廃棄体グループ 2(ハル･エンドピース圧縮収納体)、軟岩系岩盤（SR-C 準拠）を対象とする。対象とする処分システム概念を図 3.4.1-1 に示す。

対象廃棄体：グループ 2



【処分坑道断面】
処分坑道サイズ ：内径 11.4m
支保工厚 ：0.6m
廃棄体サイズ ：W1.2m×H1.6m（パッケージ）
鋼製構造躯体 ：t=5cm

【地質環境条件】
軟岩系岩盤 ：第 2 次 TRU レポート SR-C 準拠
処分深度 ：GL-500m

【人工バリア材料特性】
緩衝材 ：有効粘度密度 1.36Mg/m^3
珪砂含有率 0%

【セメント系材料】

項　目	吹付けコンクリート	二次覆工 インバート	廃棄体定置部 (廃棄体,充填材,構造躯体)
配合	W/C=45 % C=367 kg/m^3	W/C=45 % C=367 kg/m^3	W/C=55 % C=483 kg/m^3
(骨材容積割合)	67vol%	67vol%	54vol%
(空隙率)	13%	13%	19%
(真密度)	2.62g/cm^3	2.62g/cm^3	2.58g/cm^3
圧縮強度	43N/mm^2	43N/mm^2	35N/mm^2
単位体積重量	24.1kN/m^3	24.1kN/m^3	38.5kN/m^3

注 1：廃棄体定置部の物性は，固化媒体および充填材として用いられるモルタルの値とする。ただし，単位体積重量は廃棄体重量を加味した値とする。

注 2：インバートの物性は二次覆工の物性と同等とする。

図 3.2.2-3　モデル化の対象とする処分システム

b. 解析モデル

モデル化範囲は地表面（標高 0m）から深度 1、000m とし、処分坑道の半断面を対象とし、処分場の鏡面対称性を仮定して、坑道中心から 25.4m の範囲とした。第 2 次 TRU レポート[31]の廃棄体グループ 2 の坑道断面を対象とし構築した 2 次元モデルを図 3.2.2-4 に示す。考慮する材料区分は、廃棄体、緩衝材、インバート、支保工、EDZ（掘削影響域）、岩盤とした。なお、本検討では廃棄体周囲に存在する厚さ 5cm の構成構造躯体はモデル化しないものとした。

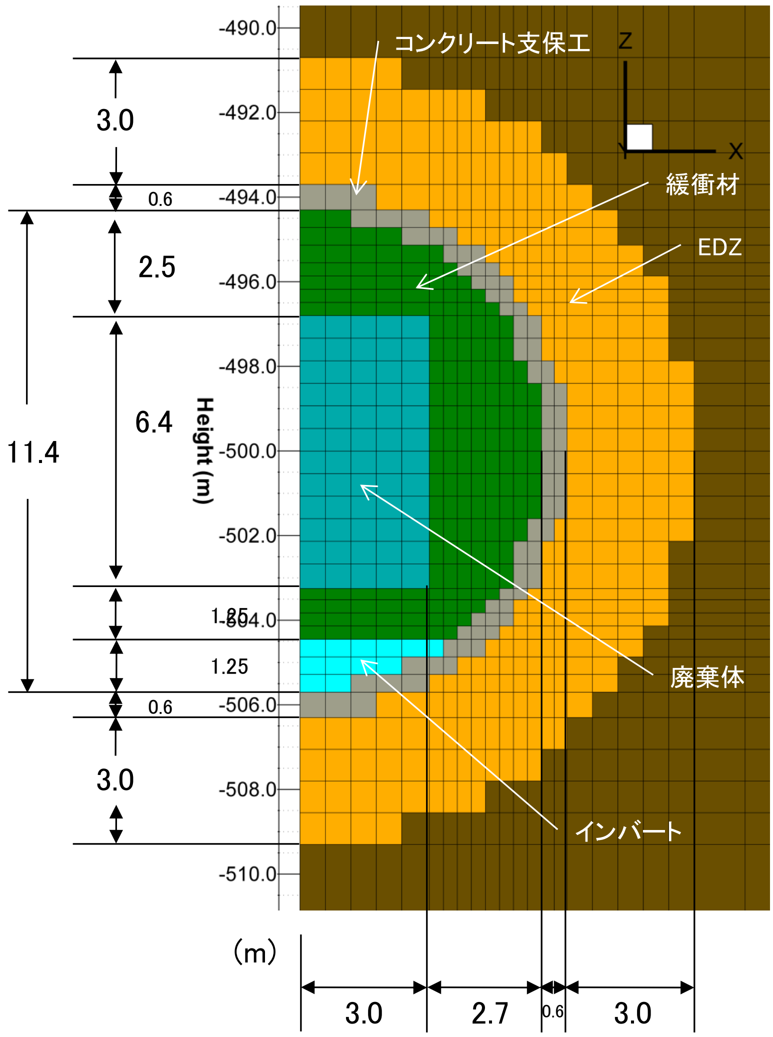


図 3.2.2-4　解析モデル（人工バリア周辺拡大）

4)　解析条件

a.　流体物性

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

b.　水理物性

各材料の水理物性は第 2 次 TRU レポート[31]に準拠する。各材料の水理物性を表 3.2.2-8 にまとめた。固相圧縮率はヤング率とポアソン比より体積弾性率を算出し、その逆数とした。表中の 2 相流曲線を表現する構成モデルの構成式を以下の表 3.2.2-6 に示した。なお、表中の記号の説明は以下の通りである。

S_p　　; 流体相$p(=l、g)$の飽和度$(-)$

S_{pe}　; 流体相$p(=l、g)$の有効飽和度$(-)$

S_{pr}　; 流体相$p(=l、g)$の残留飽和度$(-)$

k_{rp}　; 流体相$p(=l、g)$の相対浸透率$(-)$

P_c　; 水-ガス系の毛細管圧力(Pa)

m、n　; 間隙分布パラメータ

P_e　; ガス侵入圧(Pa)

P_0　; モデルパラメータ(Pa)

l、g　; それぞれ液相、気相を示す

表 3.2.2-6　2 相流曲線を表現する構成モデル

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

c.　熱物性

熱物性に関しても第 2 次 TRU レポート[31]に準拠する。各材料の熱物性を表 3.2.2-7 にまとめた。熱伝導率は固相媒体を含めた平均的な熱伝導率を絶乾状態と水飽和状態の値を入力する。本検討では表 3.2.2-7 の値を用いるものとし、水分依存性は考慮しない。

表 3.2.2-7　人工バリア構成材料の熱物性

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

表 3.2.2-8　人工バリア構成材料の水理物性

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

d.　化学反応に関する解析条件

以下に示す反応系（鉄の酸化腐食反応、嫌気腐食反応、腐食生成物の沈殿反応）における水素ガスの発生を考慮する。本検討で考慮するイオン反応式を表 3.2.2-9 にまとめた。

$$3Fe + 3O_2 \leftrightarrow 2Fe_2O_3$$
$$2Fe_2O_3 + Fe \leftrightarrow 3Fe_3O_4$$
$$4Fe + 3O_2 + 2H_2O \leftrightarrow 4FeOOH$$
$$2FeOOH + Fe + 2H_2O \leftrightarrow 3Fe(OH)_2$$
$$3Fe(OH)_2 \leftrightarrow Fe_3O_4 + 2H_2O + H_2$$
$$4Fe + 6H_2O + 3O_2 \leftrightarrow 4Fe(OH)_3$$
$$4Fe(OH)_3 + Fe + 2H_2O \leftrightarrow 2Fe_3O_4 + 5H_2$$
$$3Fe + 4H_2O \leftrightarrow Fe_3O_4 + 4H_2$$

表 3.2.2-9　考慮するイオン反応式

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

初期組成は、地下水で飽和した状態（岩盤、EDZ）と、標準大気圧の不飽和状態（人工バリア材料）の双方において希薄溶液系を想定し、以下の表 3.2.2-10 に示すものとした。

表 3.2.2-10　初期組成

廃棄体 緩衝材 支保工 インバート	液相	Fe^{2+}	：$1.0 \times 10^{-10}\ (mol/kg)$
		$H_2(aq)$	：$1.0 \times 10^{-10}\ (mol/kg)$
		$O_2(aq)$	：$0.1384 \times 10^{-2}\ (mol/kg)$ ※30℃、1atm における飽和溶解量
		pH	：7.0
	固相	$iron(Fe)$	：固相の 50%とする（溶解のみを考慮）
		$magnetite(Fe_3O_4)$	：存在しない（溶解・沈殿を考慮）
		$Hematite(Fe_2O_3)$	：存在しない（溶解・沈殿を考慮）
		$Goethite(FeOOH)$	：存在しない（溶解・沈殿を考慮）
	気相	$H_2(g)$	：$0.0\ (bar)$
		$O_2(g)$	：$0.2122\ (bar)$ ※空気中の酸素を体積比 20.95%とした場合の分圧
岩盤 EDZ	液相	Fe^{2+}	：$1.0 \times 10^{-10}\ (mol/kg)$
		$H_2(aq)$	：$1.0 \times 10^{-10}\ (mol/kg)$
		$O_2(aq)$	：$1.0 \times 10^{-10}\ (mol/kg)$
		pH	：7.0
	固相	$iron(Fe)$	：存在しない（溶解・沈殿を考慮）
		$magnetite(Fe_3O_4)$	：存在しない（溶解・沈殿を考慮）
		$Hematite(Fe_2O_3)$	：存在しない（溶解・沈殿を考慮）
		$Goethite(FeOOH)$	：存在しない（溶解・沈殿を考慮）
	気相	$H_2(g)$	：$0.0\ (bar)$
		$O_2(g)$	：$0.0\ (bar)$

反応速度を考慮した金属腐食に関するパラメータとして、(3.2-42)式、および、(3.2-43)式で示した25℃における反応速度定数k_{25}、活性化エネルギーE_a、比反応表面積A_n、実験パラメータθ、ηが挙げられる。本検討では、Xu、 T. (2009)[34]の検討に基づき、反応速度定数k_{25}を$1.0 \times 10^{-12}\ (mol/m^2/s)$とし、比反応表面積$A_n$を$121.8\ (cm^2/g\ mineral)$、実験パラメータ$\theta$、$\eta$をそれぞれ1.0に設定した。活性化エネルギー$E_a$は本田ら(1993)[35]の検討より$15.4\ (kJ/mol)$に設定した。本検討では鉄の腐食反応（溶解）にのみ反応速度を適用する。図 3.2.2-5 に温度に対する反応速度定数の変化を示す。

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

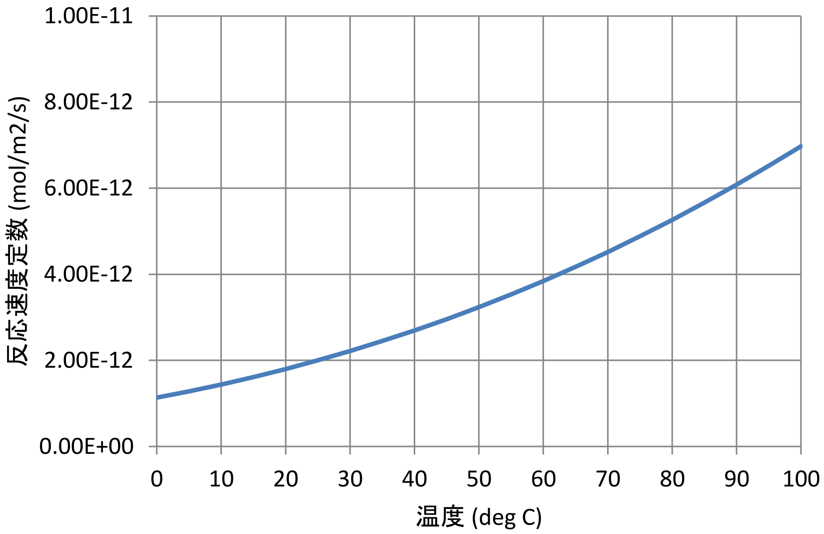


図 3.2.2-5　反応速度定数の温度依存性

e.　初期、境界条件

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

また、本検討では廃棄体からの発熱を考慮する。解析に用いる発熱条件は、TRU 廃棄物処分概念検討書[36]、第 2 次 TRU レポート[31]に基づき設定した。図 3.2.2-6 に発熱条件を示す。このうち民間処理操業ハル・エンドピースを用い、さらに冷却期間 25 年を考慮し、図中時間軸の 25 年を解析時間の起点として与えることとした。また、第 2 次 TRU レポートにおける取扱いと同様に、円形処分坑道に対する廃棄体パッケージ領域の断面積から図 3.2.2-6 に示す発熱量の 33.7% を廃棄体混合体の平均的な発熱率とした。

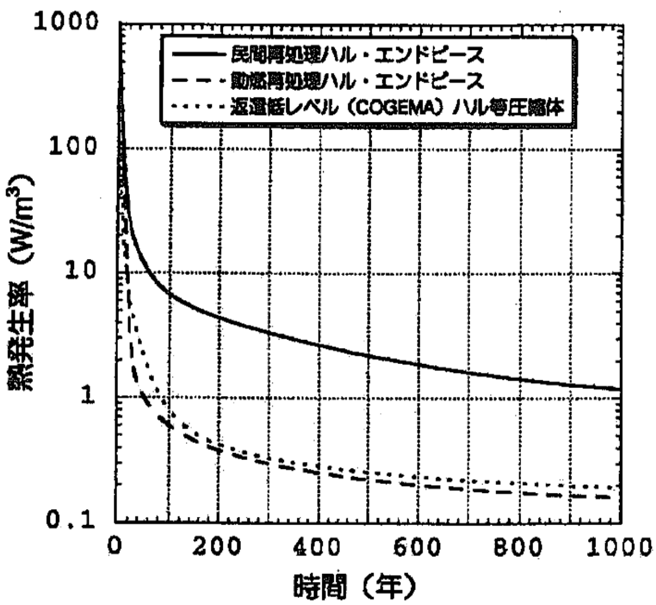


図 3.2.2-6　廃棄体発熱量[36]

5)　ガス発生に伴う廃棄体周辺の流体ダイナミクスの可視化

本検討では、4）で示した解析条件に基づく初期不飽和ケースと、比較のために初期完全飽和状態とした初期飽和ケースの 2 ケースを実施する。

初期不飽和ケースに対し、異なる時間断面におけるガス相圧力と水相飽和度、温度、水蒸気圧の分布を図 3.2.2-7～図 3.2.2-10 に示す。また、表 3.2.2-10 に示した主要化学種の異なる時間断面における濃度分布を図 3.2.2-11～図 3.2.2-15 に示す。図 3.2.2-16 は水素ガス発生量分布を示している。なお、図中の矢印はガス相の流動方向を示している。

初期段階では、周囲岩盤からの再冠水と廃棄体からの水素ガス発生によって、施設内部の圧力は上昇し、水飽和度も増加する。また、廃棄体からの発熱による温度上昇によって、水蒸気圧も上昇する。水相中の化学種に着目すれば、廃棄体に含まれる$iron(Fe)$が溶解し（Fe^{2+}濃度、$iron(Fe)$溶解量の上昇）、好気性腐食反応によって$O_2(aq)$が速やかに消費される。その後、嫌気性腐食反応が支配的となり、$iron(Fe)$の溶解（Fe^{2+}濃度、$iron(Fe)$溶解量の上昇）は継続され、腐食生成物である$magnetite(Fe_3O_4)$の沈殿量が増加していく。

初期飽和ケースに対しても同様に、異なる時間断面におけるガス相圧力と水相飽和度、温度、水蒸気圧の分布を図 3.2.2-17～図 3.2.2-20 に示した。また、表 3.2.2-10 に示した主要化学種の異なる時間断面における濃度分布、および、水素ガス発生量分布を図 3.2.2-21～図 3.2.2-26 に示す。

初期段階では、廃棄体からの水素ガス発生と、温度上昇によって施設内部の圧力は上昇し、水飽和度は低下していく。初期段階から嫌気性腐食反応（$iron(Fe)$の溶解、Fe^{2+}濃度、$iron(Fe)$溶解量、$magnetite(Fe_3O_4)$沈殿量の増加）が起こり、初期不飽和ケースよりも早い水素ガス発生速度となる。

次に、図 3.2.2-27　H_2 ガス発生量の時間変化（初期不飽和ケースと初期飽和ケースの比較）に水素ガス発生量の時間変化を示す。初期不飽和ケースと初期飽和ケースで比較したものを示している。既に述べたように、初期不飽和ケースでは、初期段階では好気性腐食反応が起こり、水分量も初期飽和ケースと比較して少なく、ガス発生量が小さくなる結果を示している。しかし、約 20 年後以降は、好気性腐食反応による$O_2(aq)$の消費と周囲岩盤からの再冠水による水分量の上昇によって、嫌気性腐食反応が支配的となり、初期飽和ケースとほぼ同じ発生量となる結果が得られている。

図 3.2.2-28　評価点位置図に示した評価点位置におけるガス相圧力と水相飽和度、温度、水蒸気圧の時間変化を図 3.2.2-29～図 3.2.2-32 示す。また、坑外への排気流量と累積押出し水量の時間変化を図 3.2.2-33 に示す。初期不飽和ケースのガス相圧力は、初期飽和ケースと比較して、ピーク値が 1.0MPa 程度低下しており、発生時期も 20 年程度遅れる結果を示した。しかし、約 50 年以降は、ほぼ同程度の圧力、飽和度変化となっていることが分かる。温度と水蒸気圧に関しては、初期不飽和ケースと初期飽和ケースでほぼ同じ変化を示す結果となった。

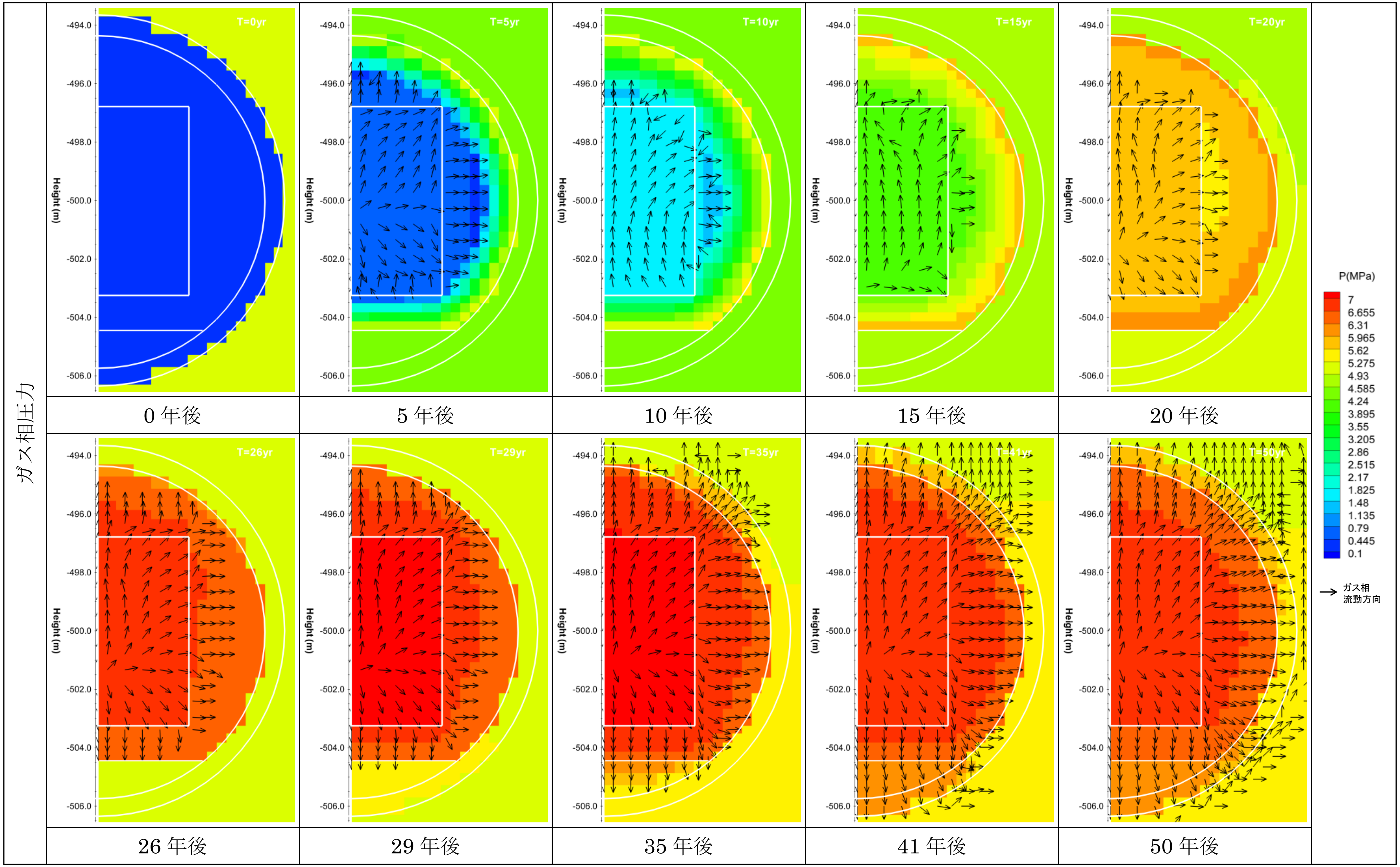


図 3.2.2-7　ガス相圧力分布（初期不飽和ケース）

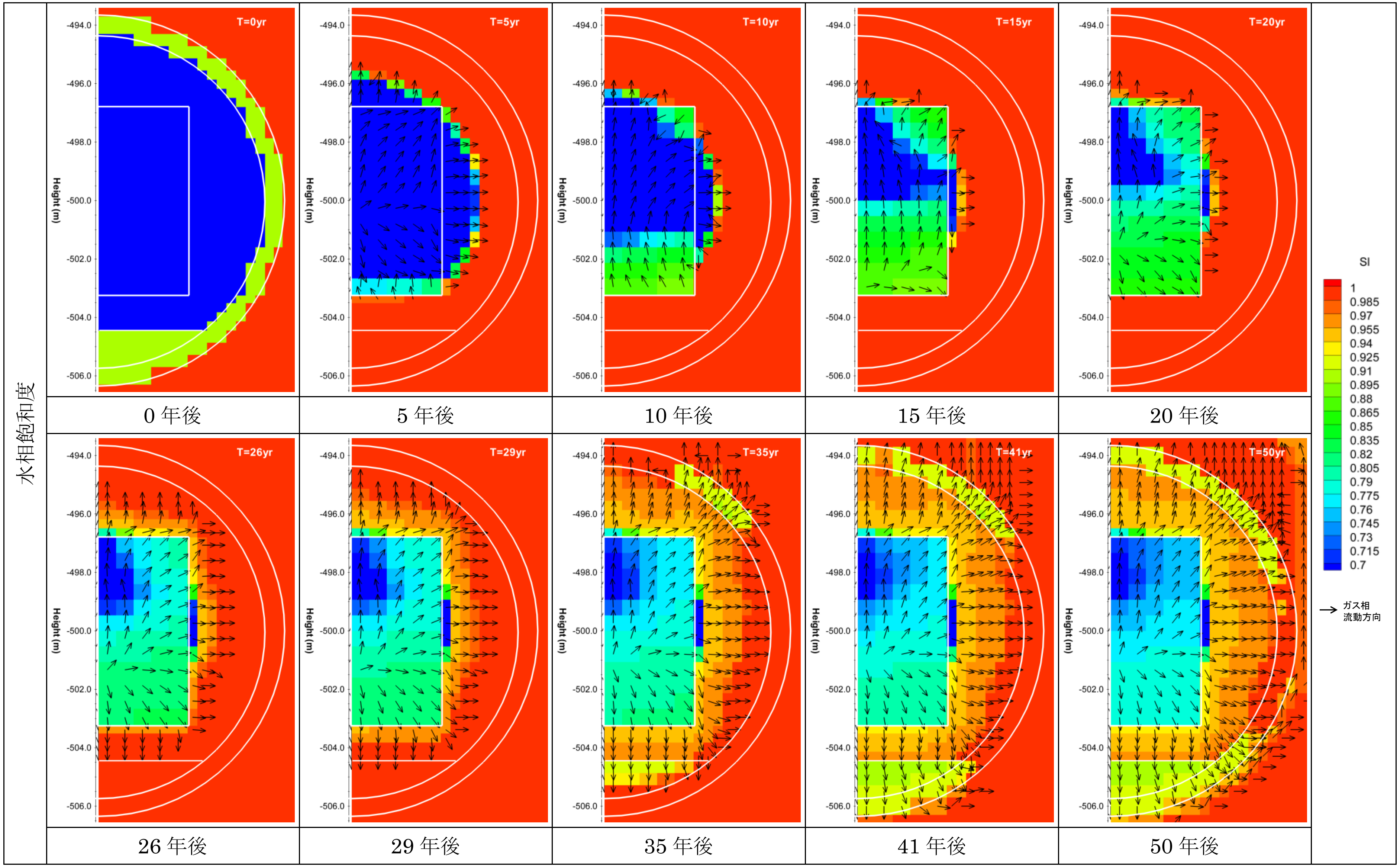


図 3.2.2-8　水相飽和度分布（初期不飽和ケース）

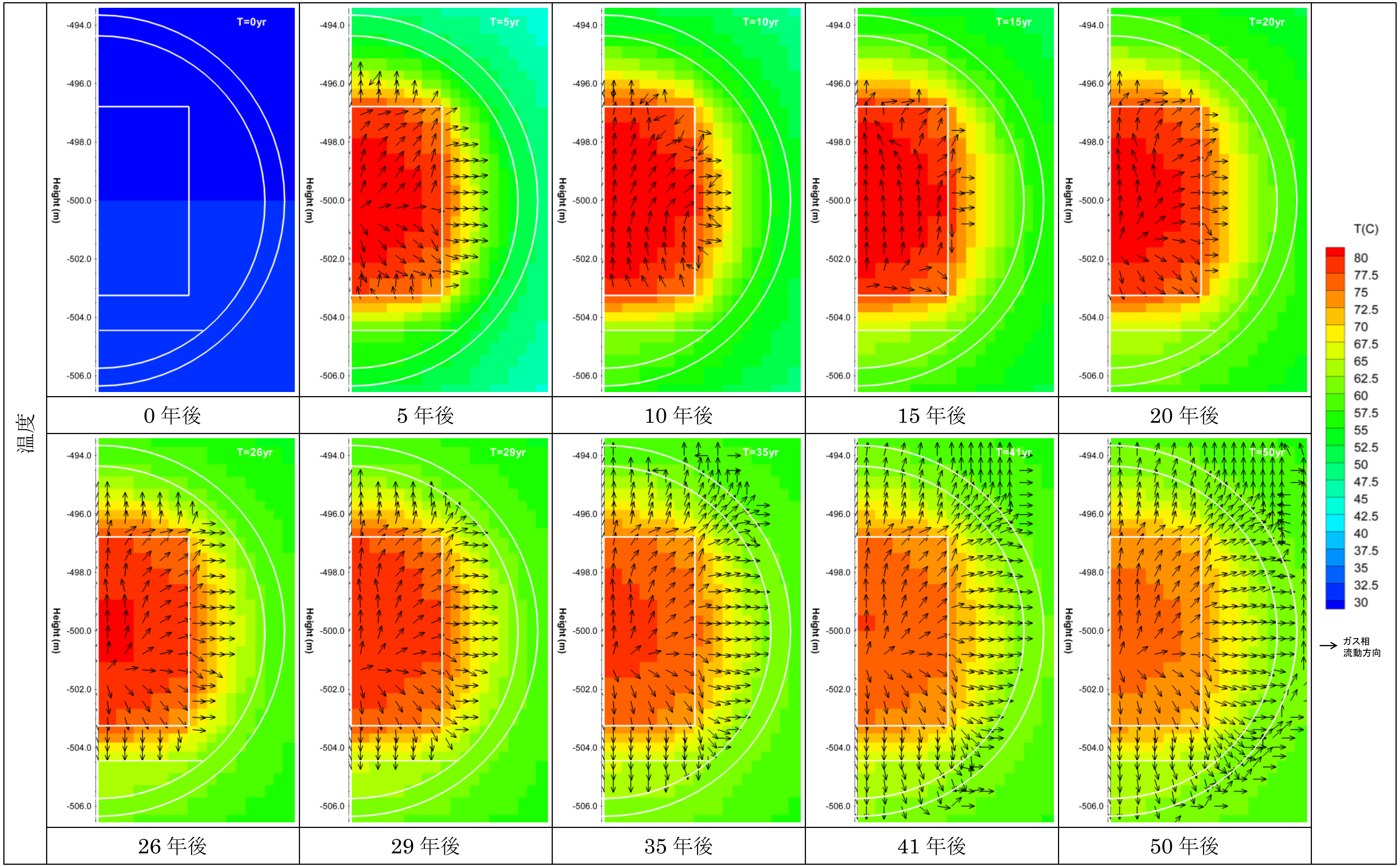


図 3.2.2-9　温度分布（初期不飽和ケース）

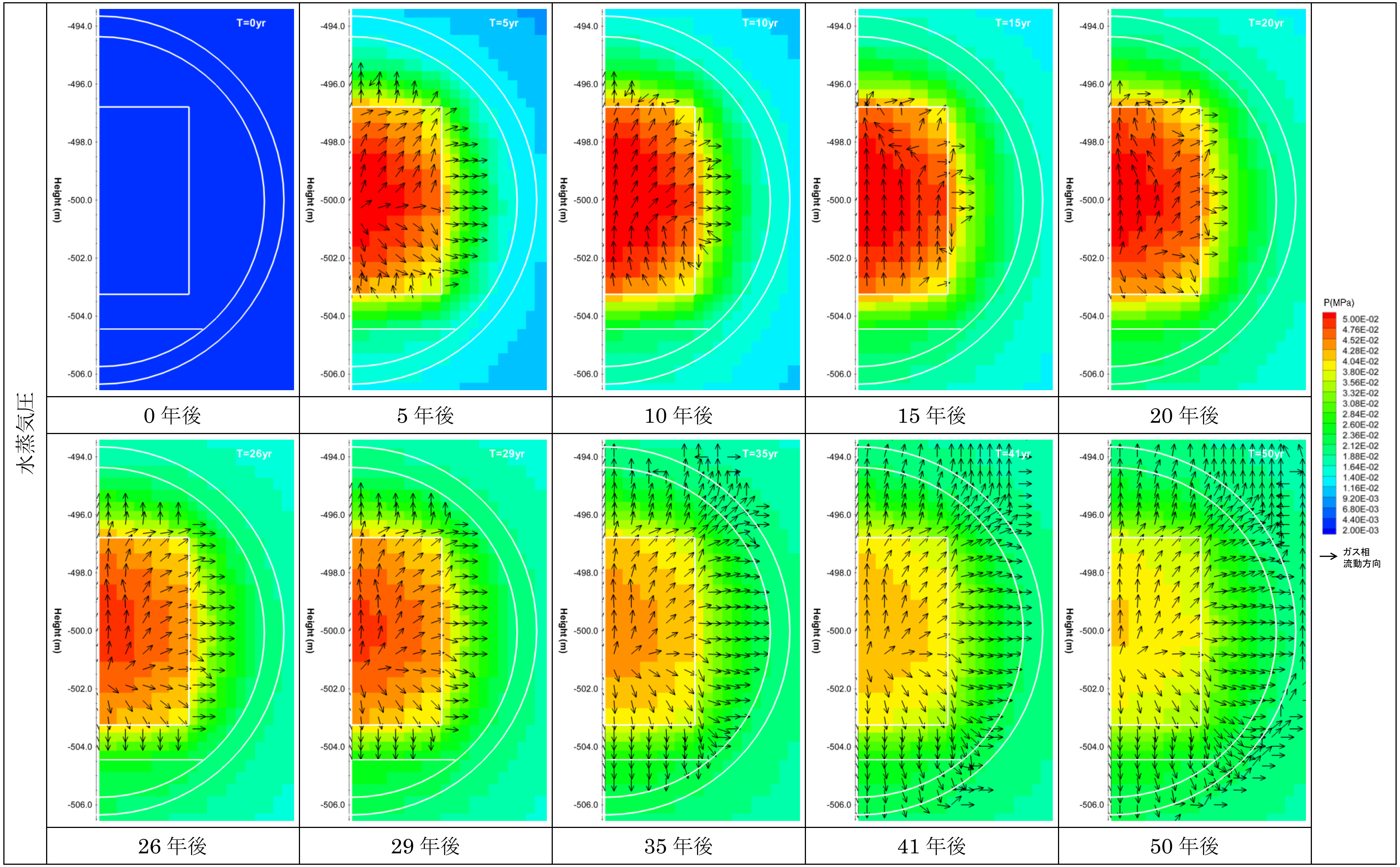


図 3.2.2-10　水蒸気圧分布（初期不飽和ケース）

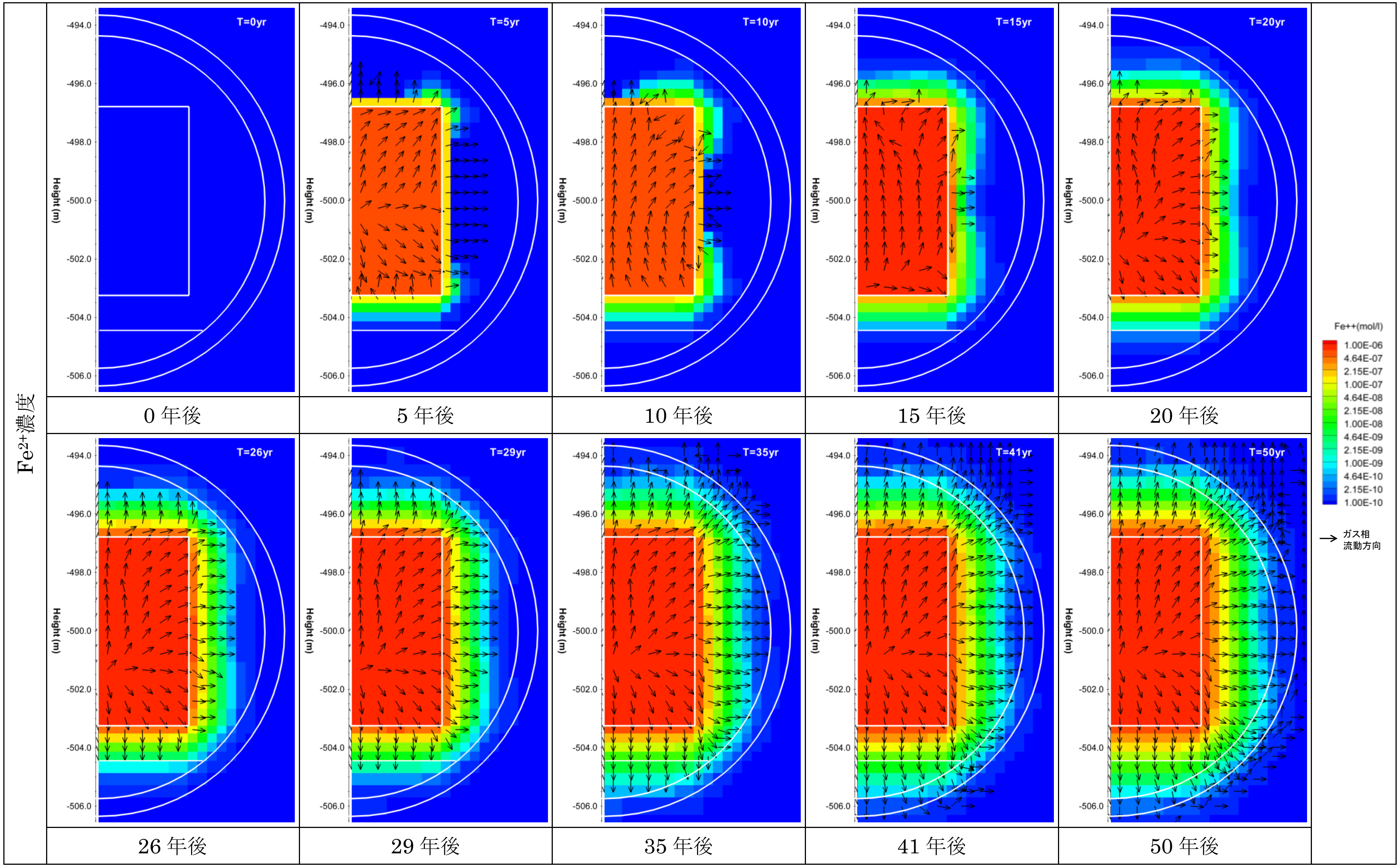


図 3.2.2-11　Fe^{2+}濃度分布（初期不飽和ケース）

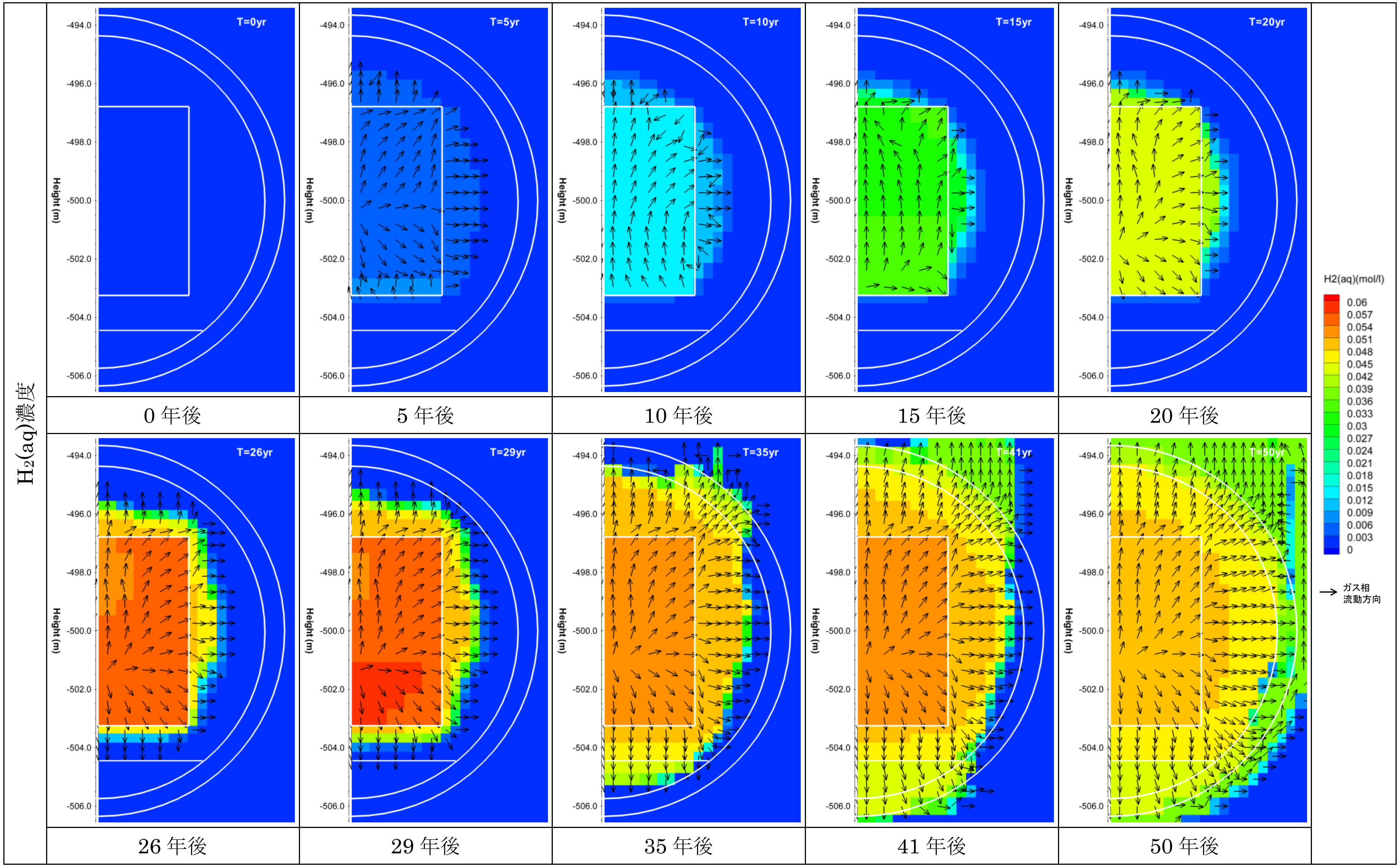


図 3.2.2-12　$H_2(aq)$濃度分布（初期不飽和ケース）

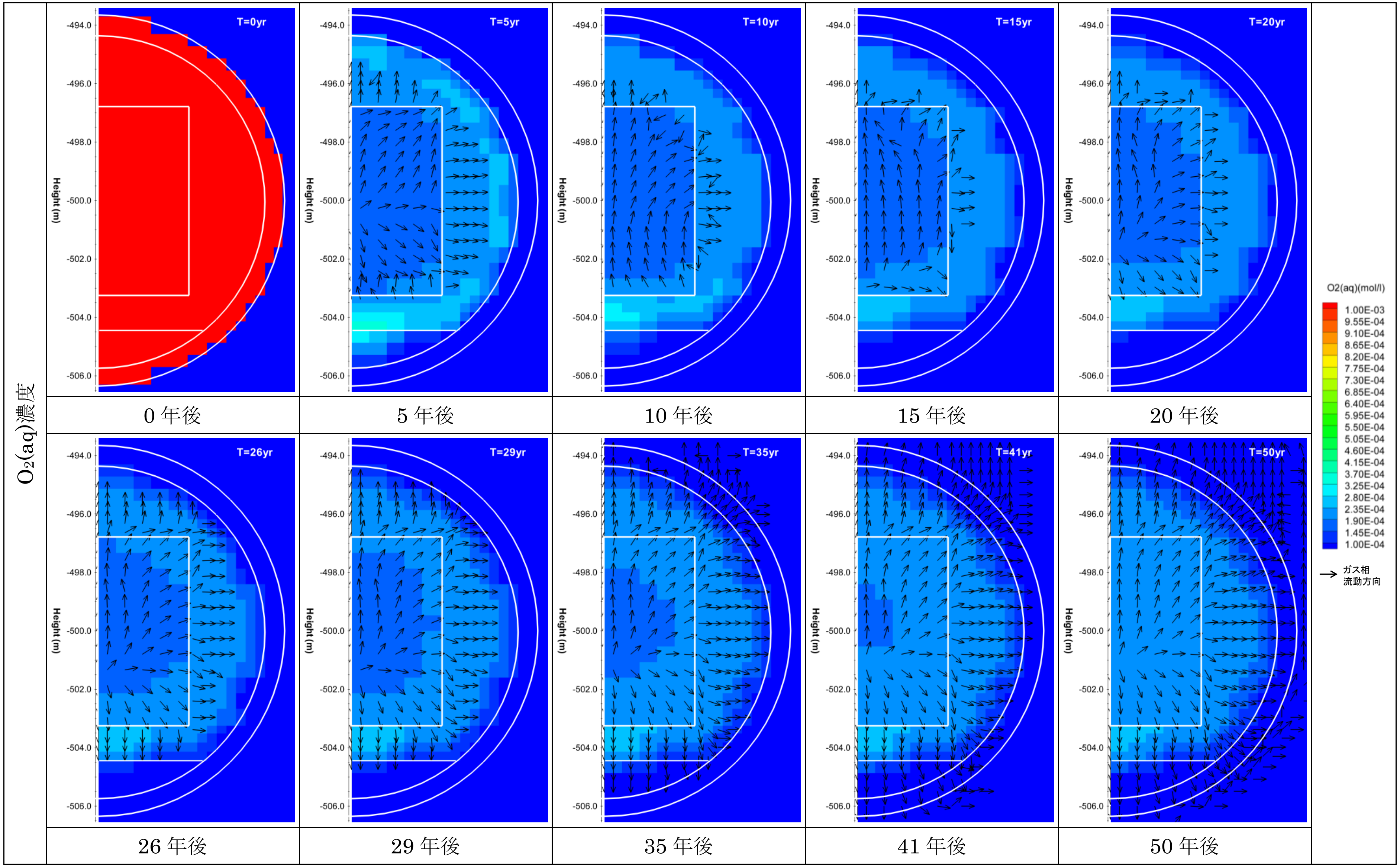


図 3.2.2-13　O_2(aq)濃度分布（初期不飽和ケース）

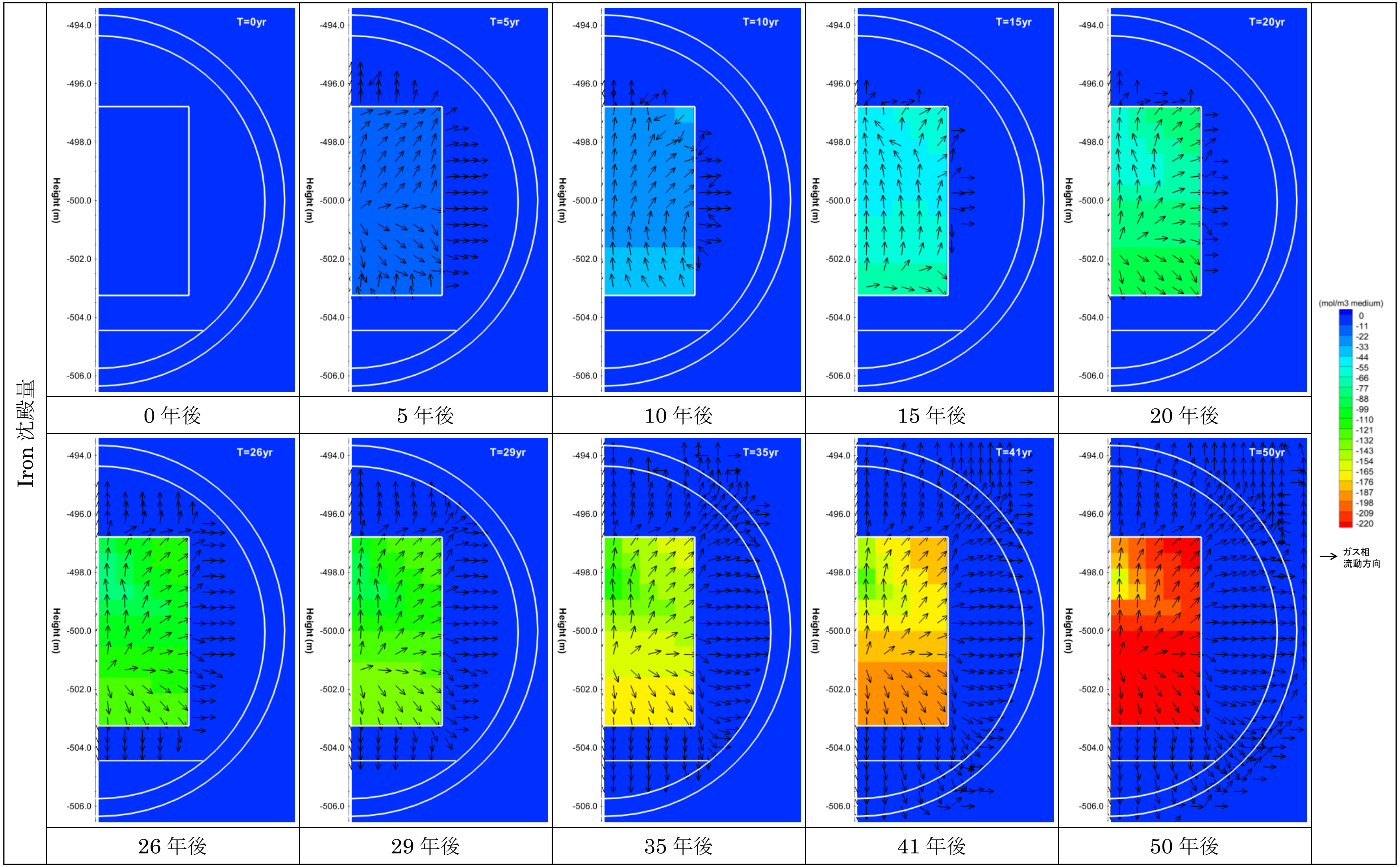


図 3.2.2-14　Iron 沈殿量分布（正値が沈殿量、負値が溶解量）（初期不飽和ケース）

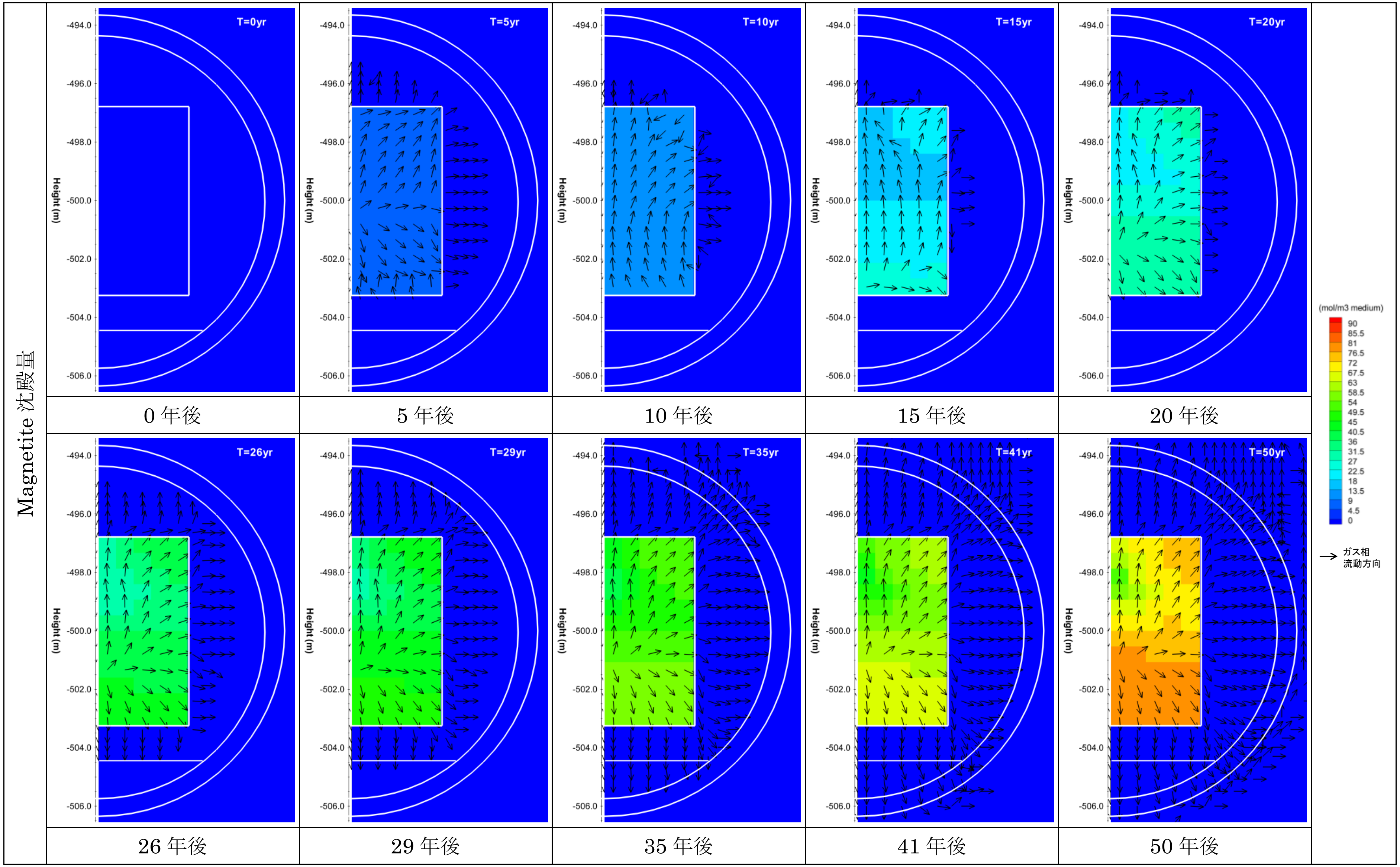


図 3.2.2-15　Magnetite 沈殿量分布（正値が沈殿量、負値が溶解量）（初期不飽和ケース）

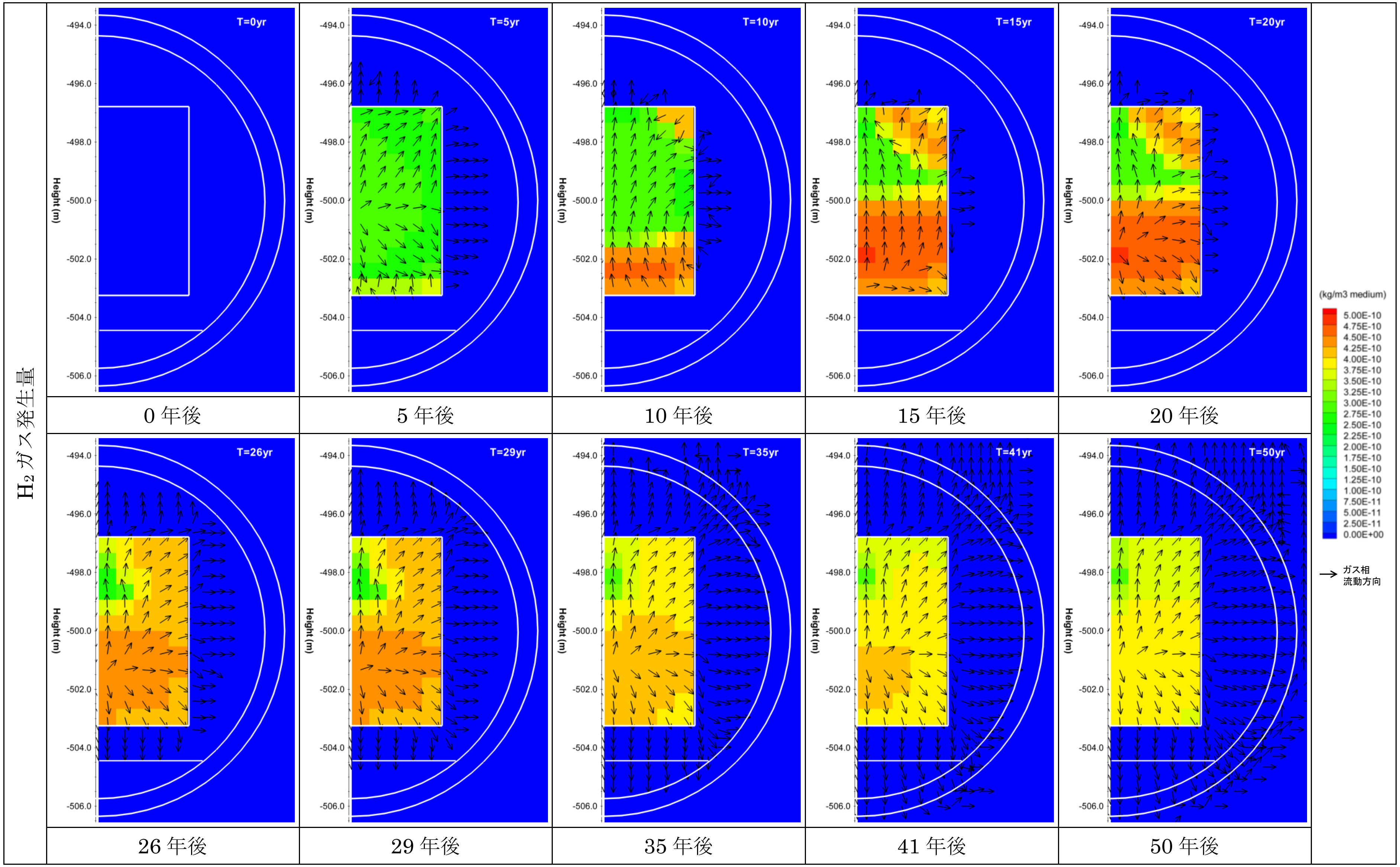


図 3.2.2-16 H_2 ガス発生量分布（初期不飽和ケース）

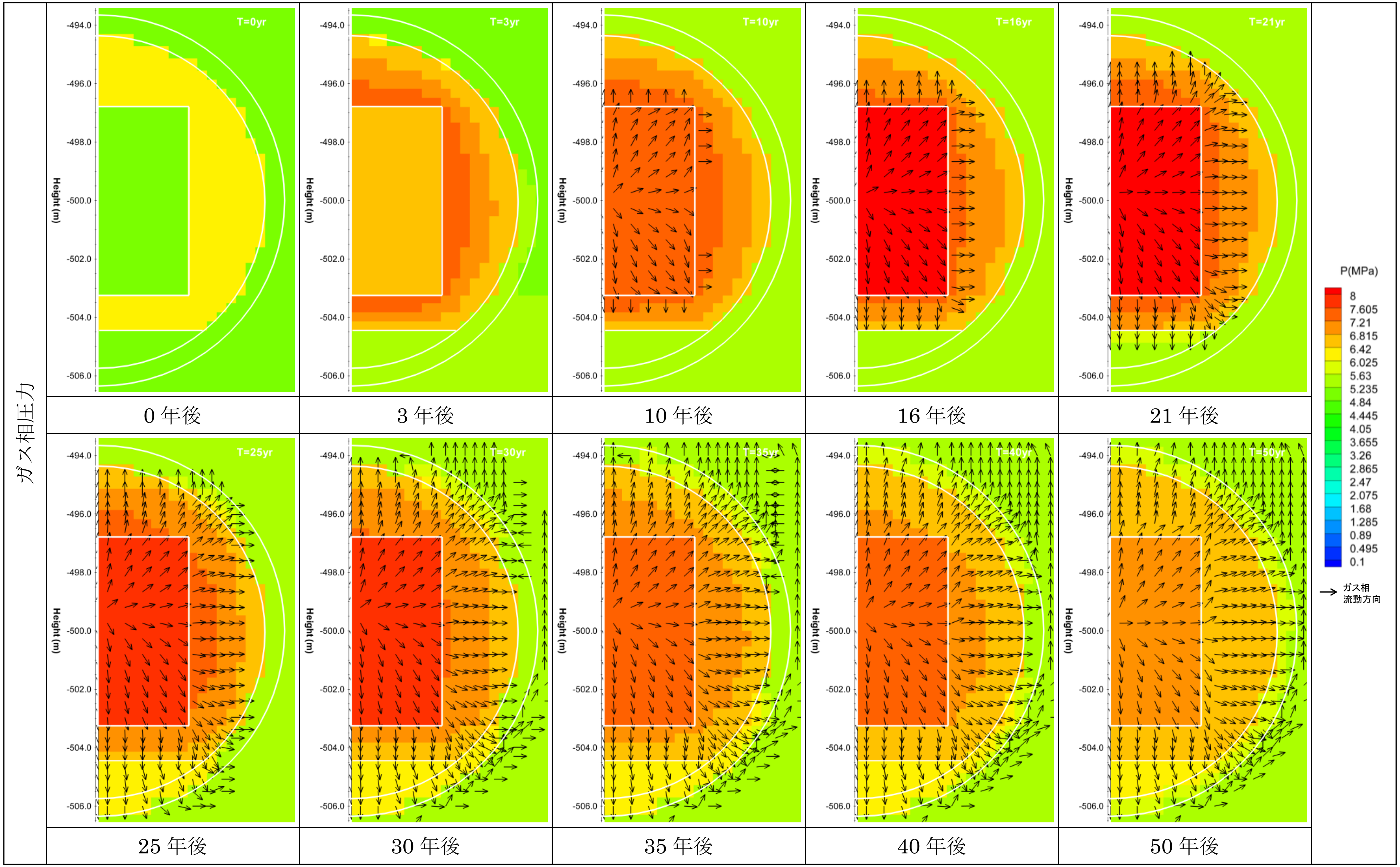


図 3.2.2-17　ガス相圧力分布（初期飽和ケース）

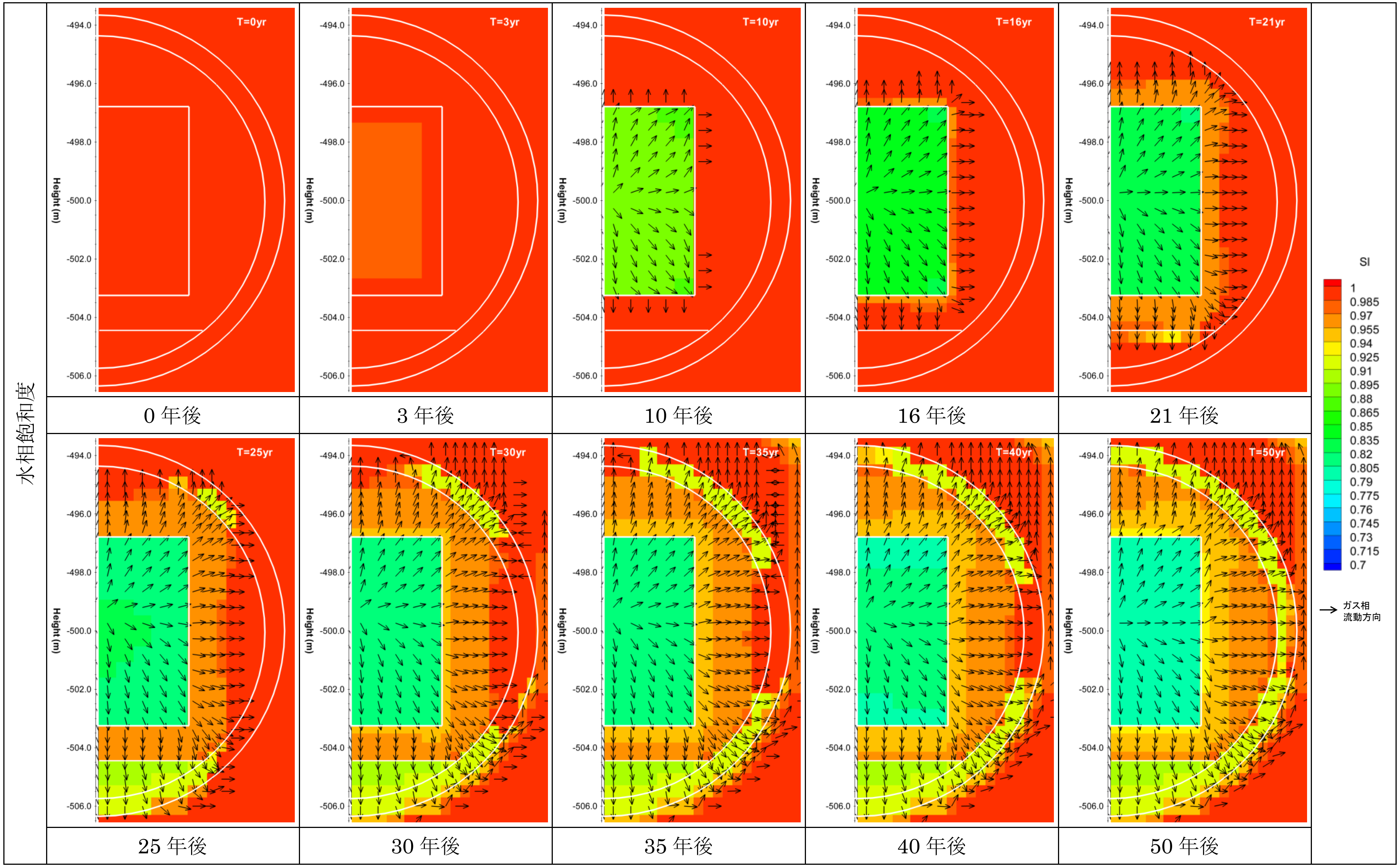


図 3.2.2-18　水相飽和度分布（初期飽和ケース）

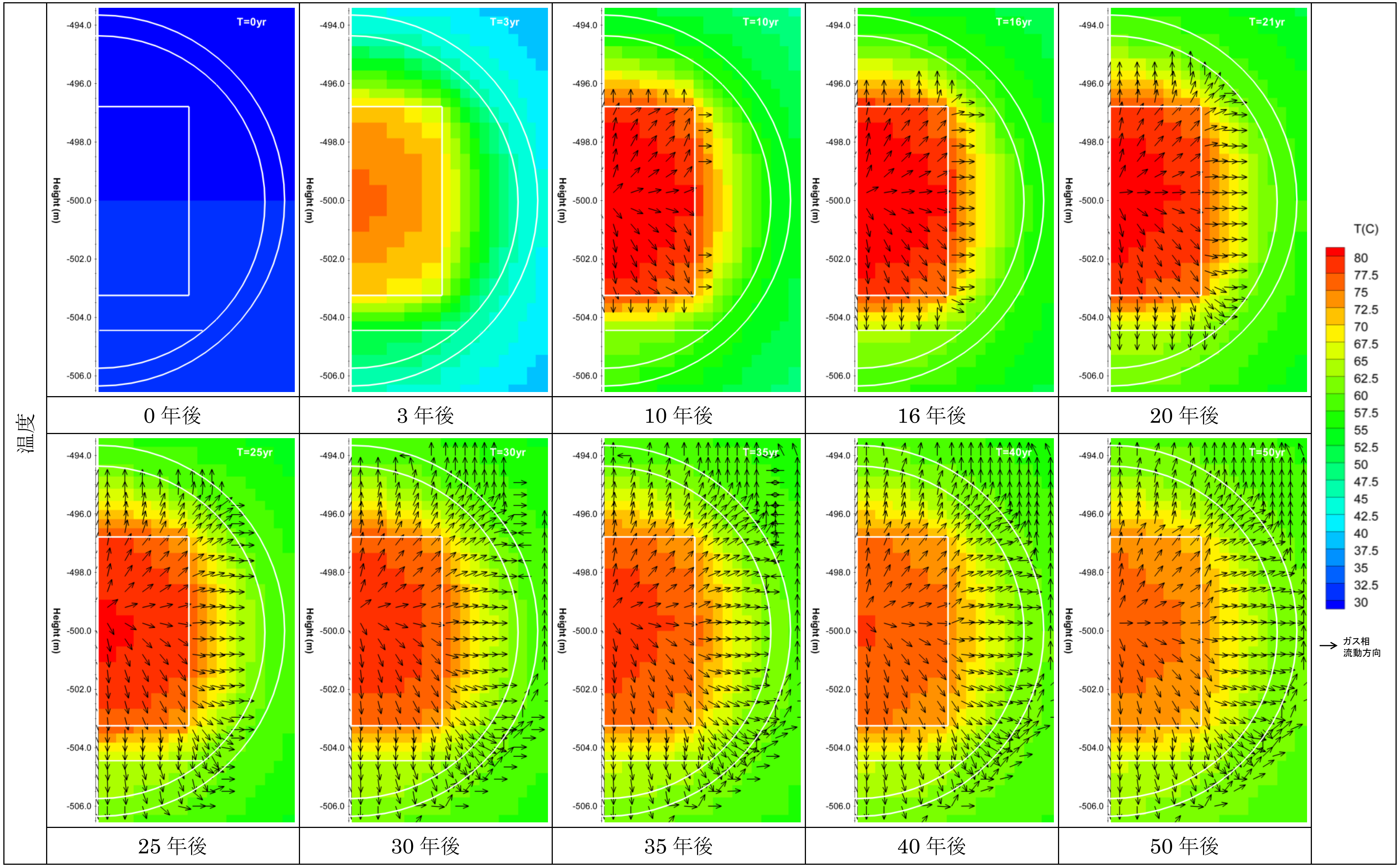


図 3.2.2-19　温度分布（初期飽和ケース）

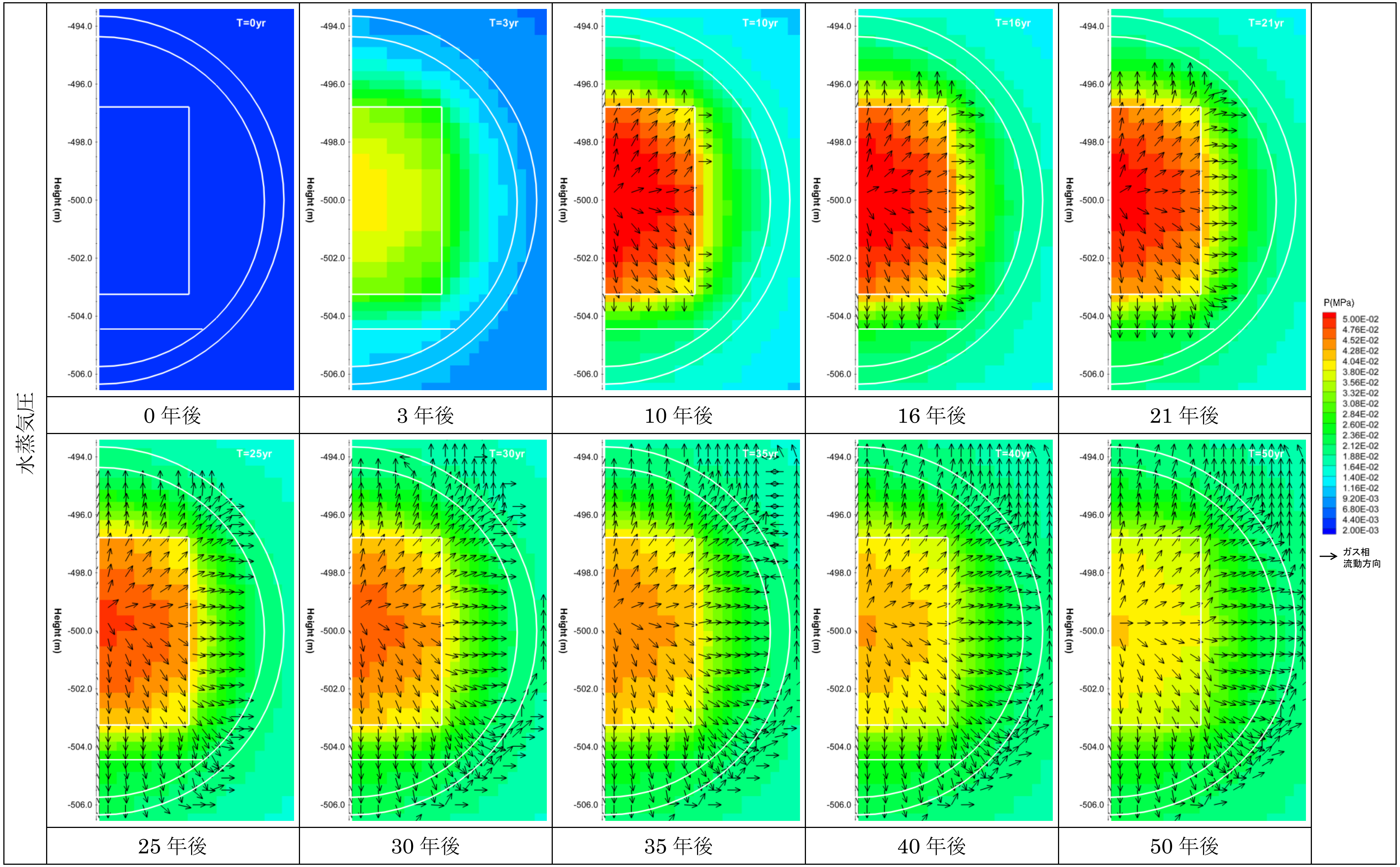


図 3.2.2-20　水蒸気圧分布（初期飽和ケース）

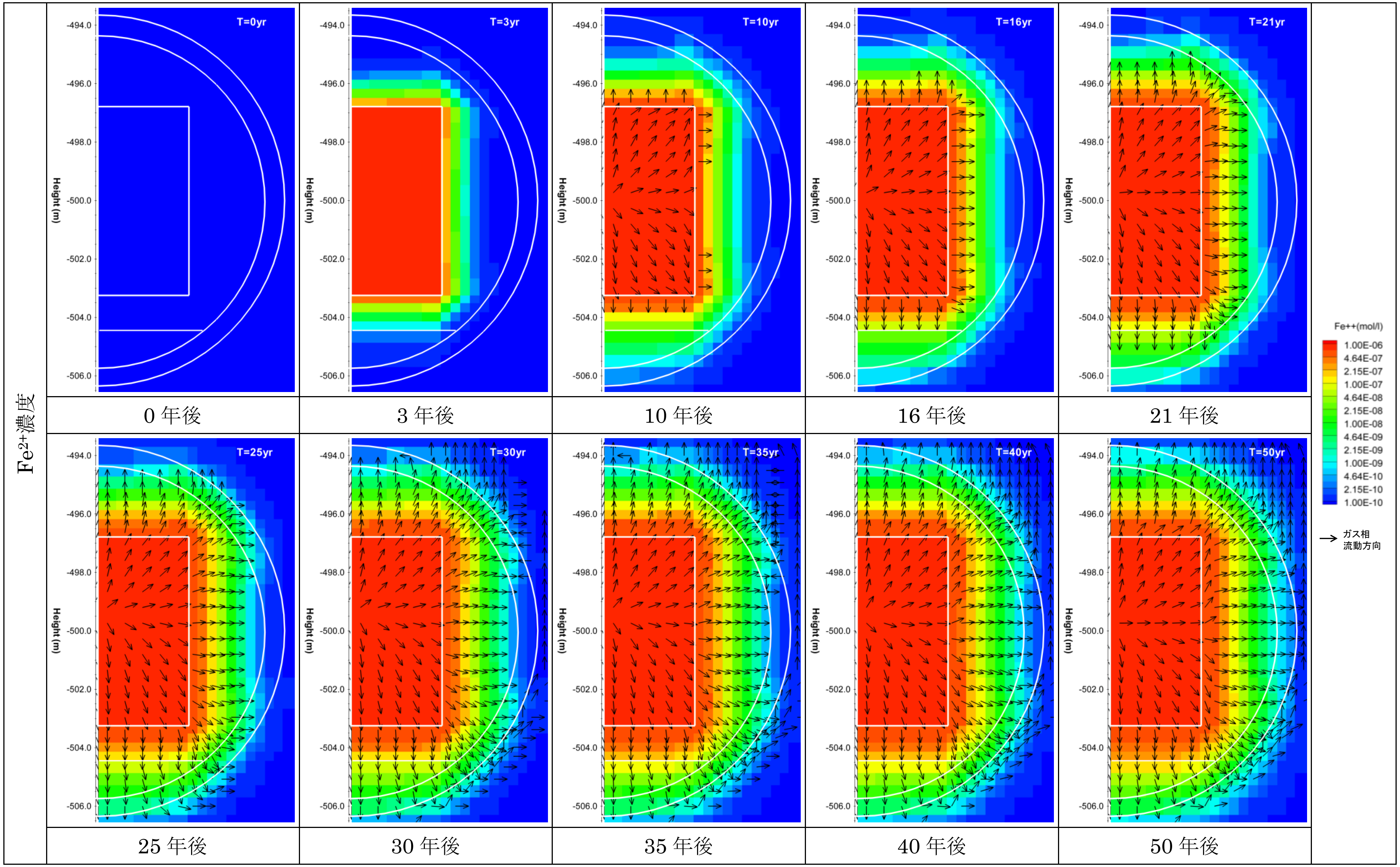


図 3.2.2-21　Fe^{2+}濃度分布（初期飽和ケース）

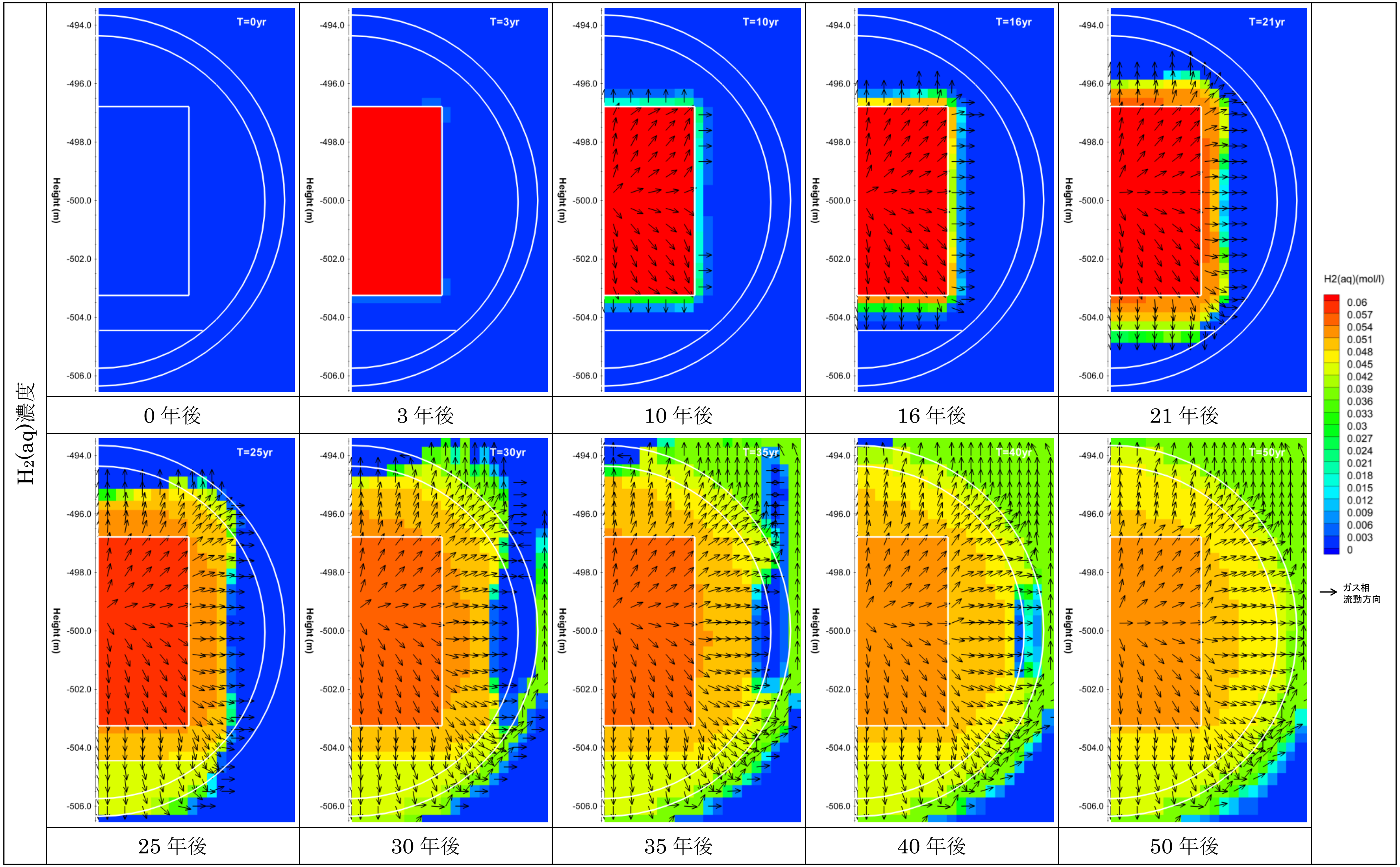


図 3.2.2-22　H_2(aq)濃度分布（初期飽和ケース）

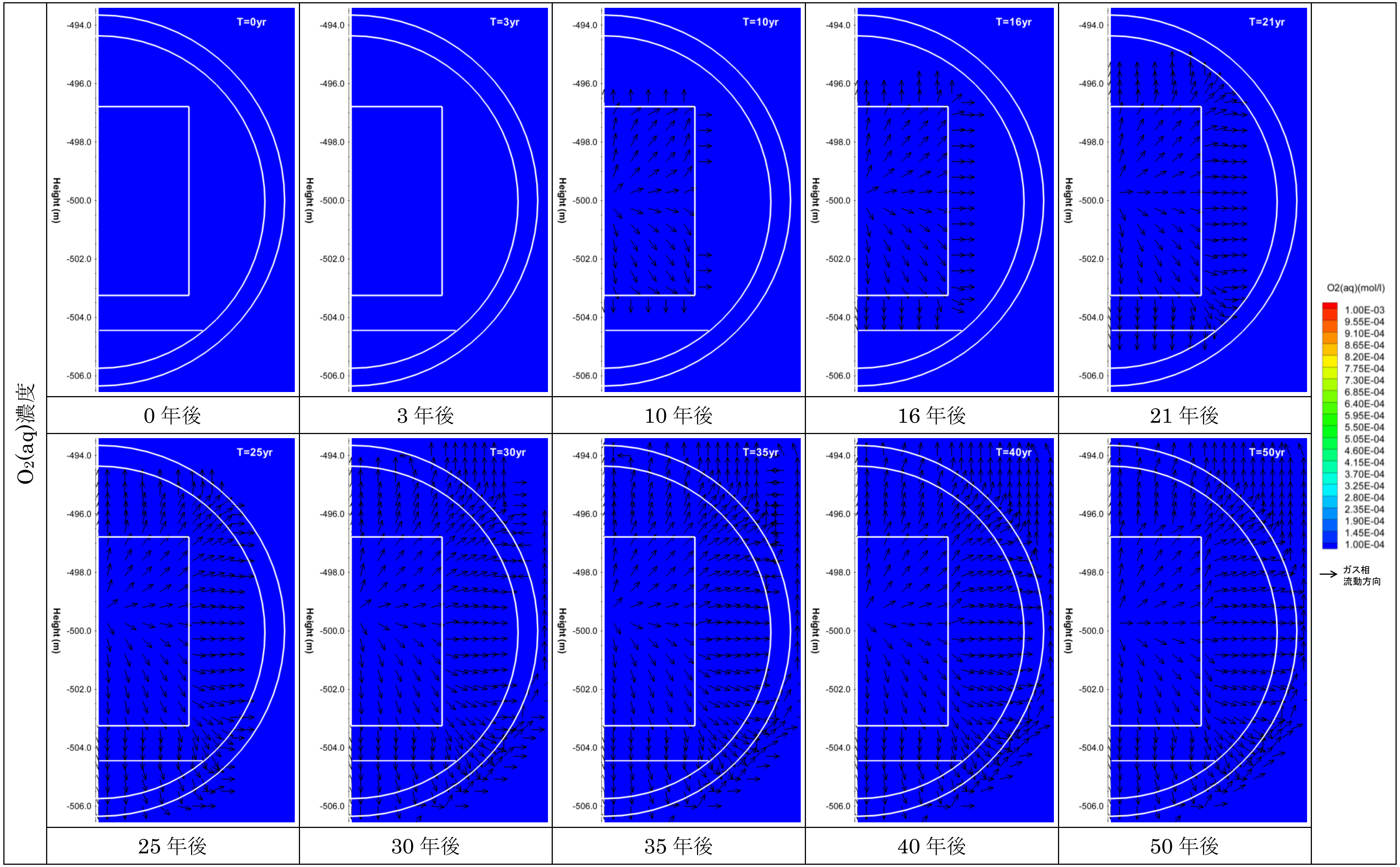


図 3.2.2-23　O_2(aq)濃度分布（初期飽和ケース）

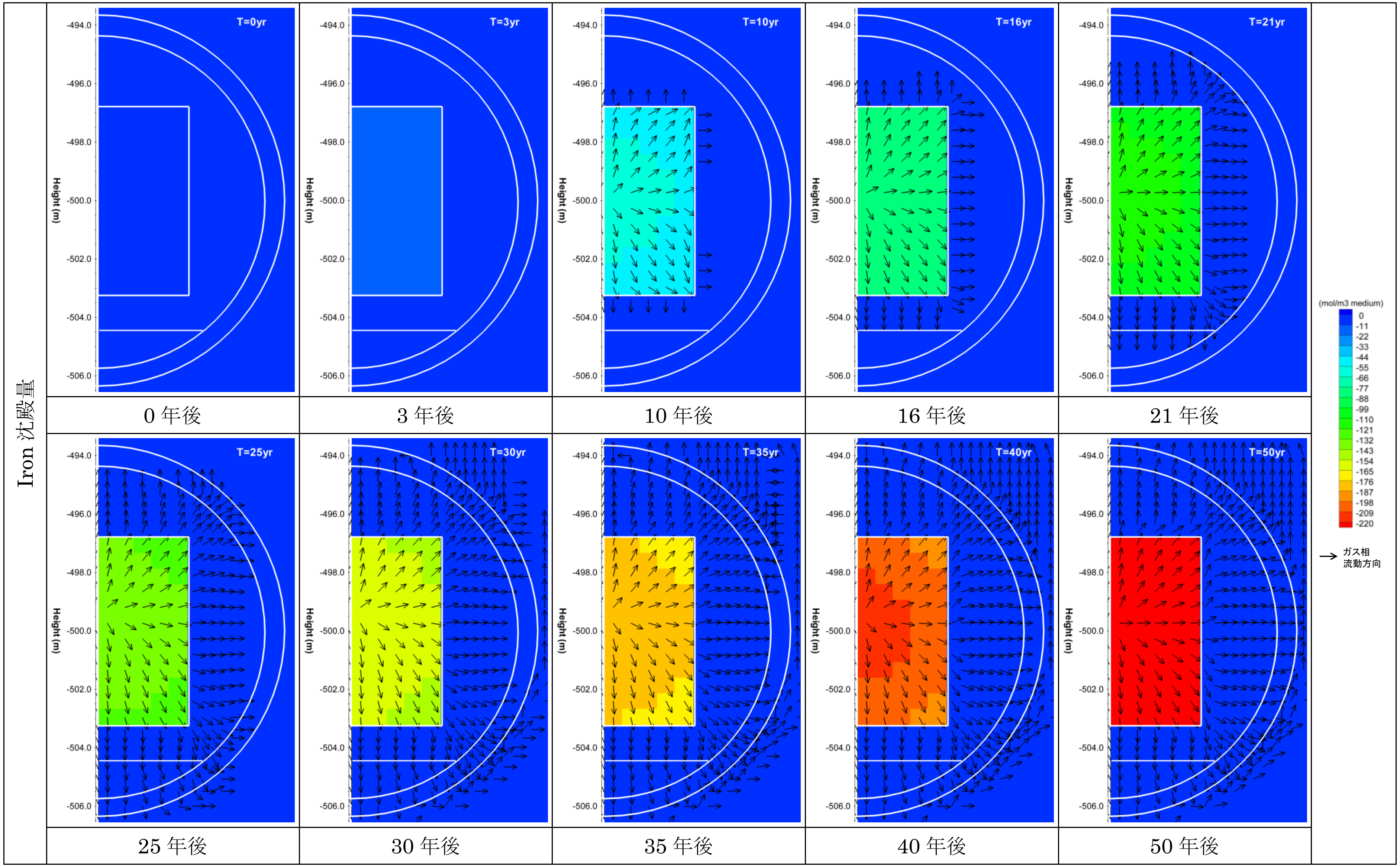


図 3.2.2-24 Iron 沈殿量分布（正値が沈殿量、負値が溶解量）（初期飽和ケース）

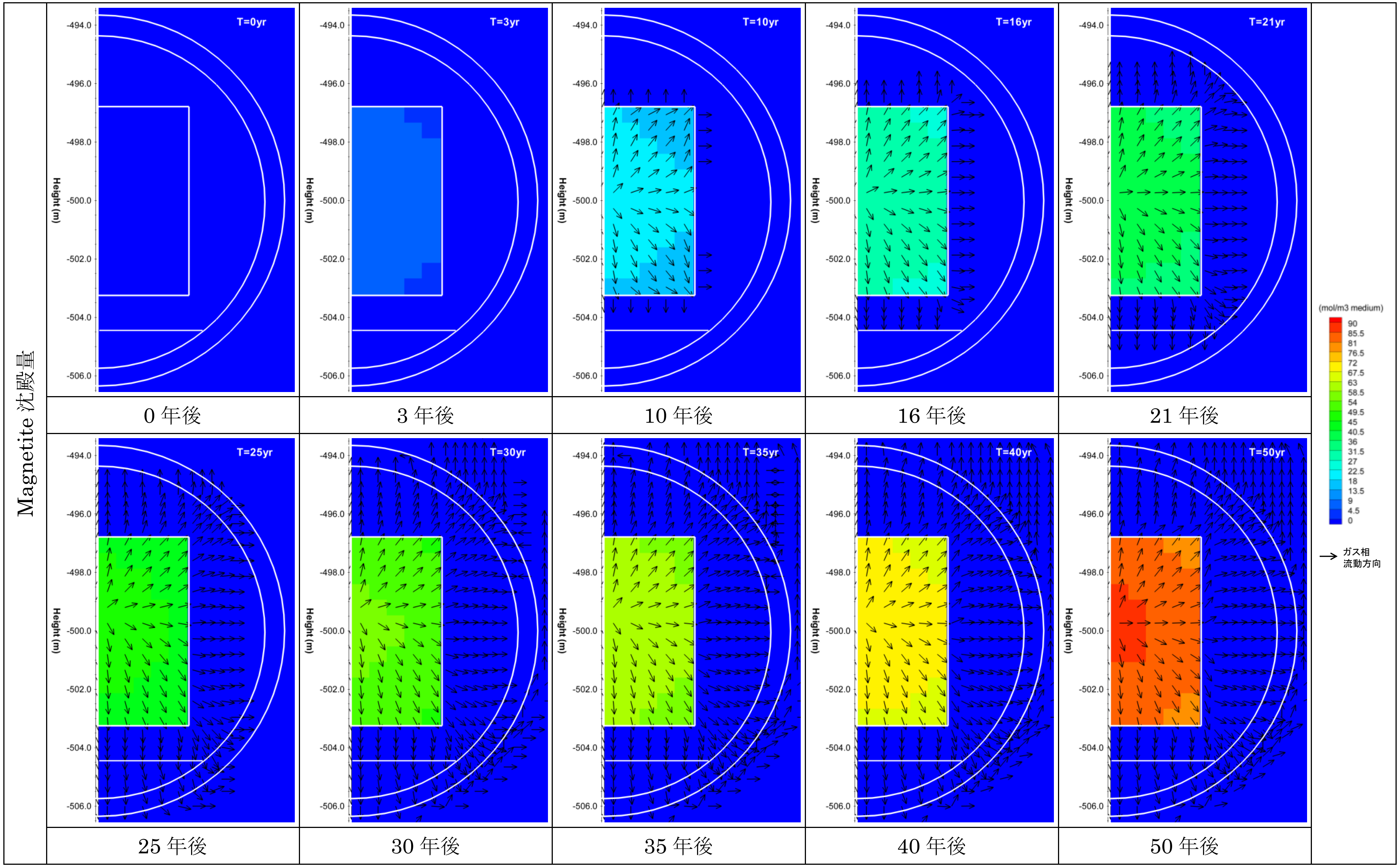


図 3.2.2-25　Magnetite 沈殿量分布（正値が沈殿量、負値が溶解量）（初期飽和ケース）

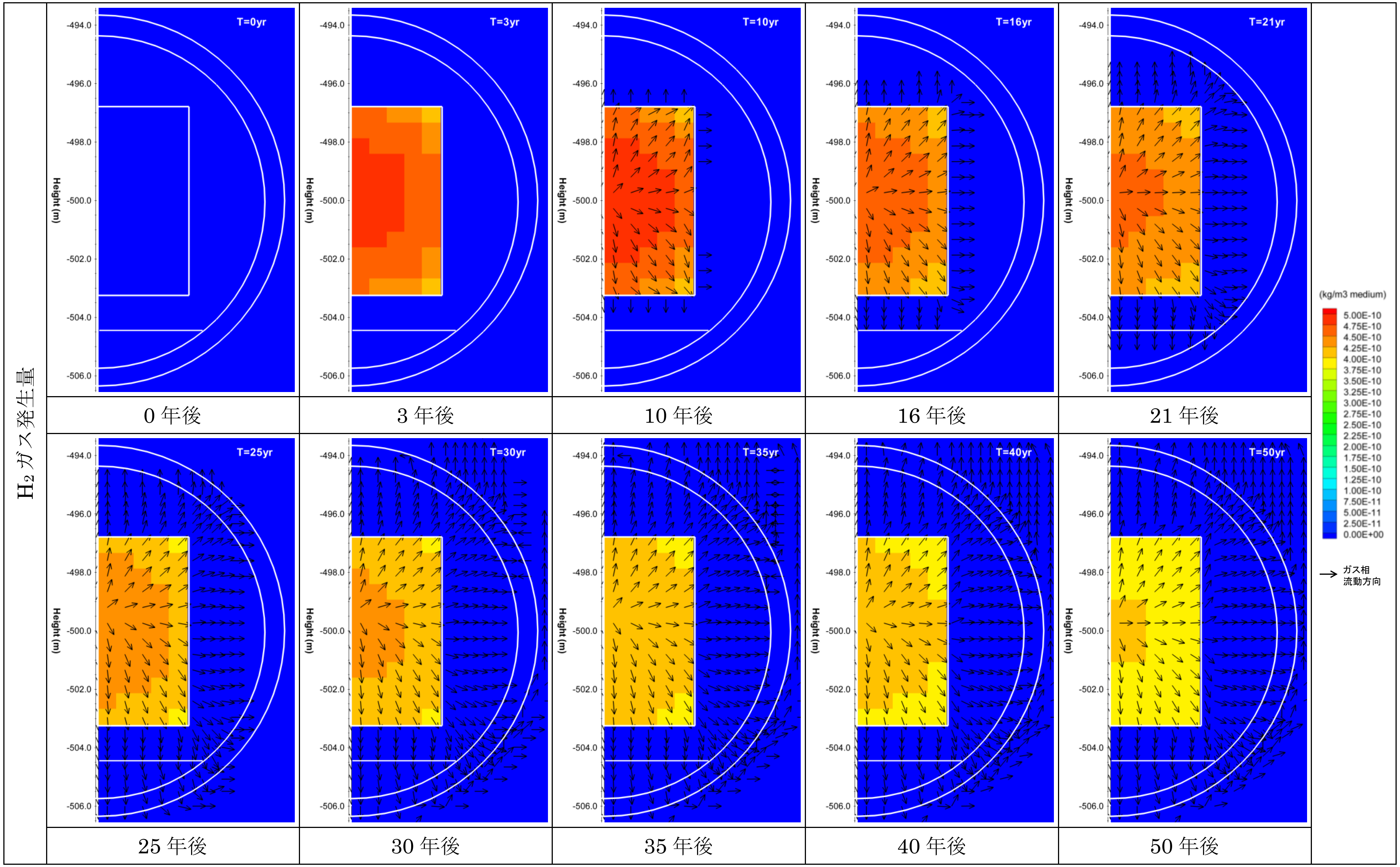


図 3.2.2-26　H_2 ガス発生量分布（初期飽和ケース）

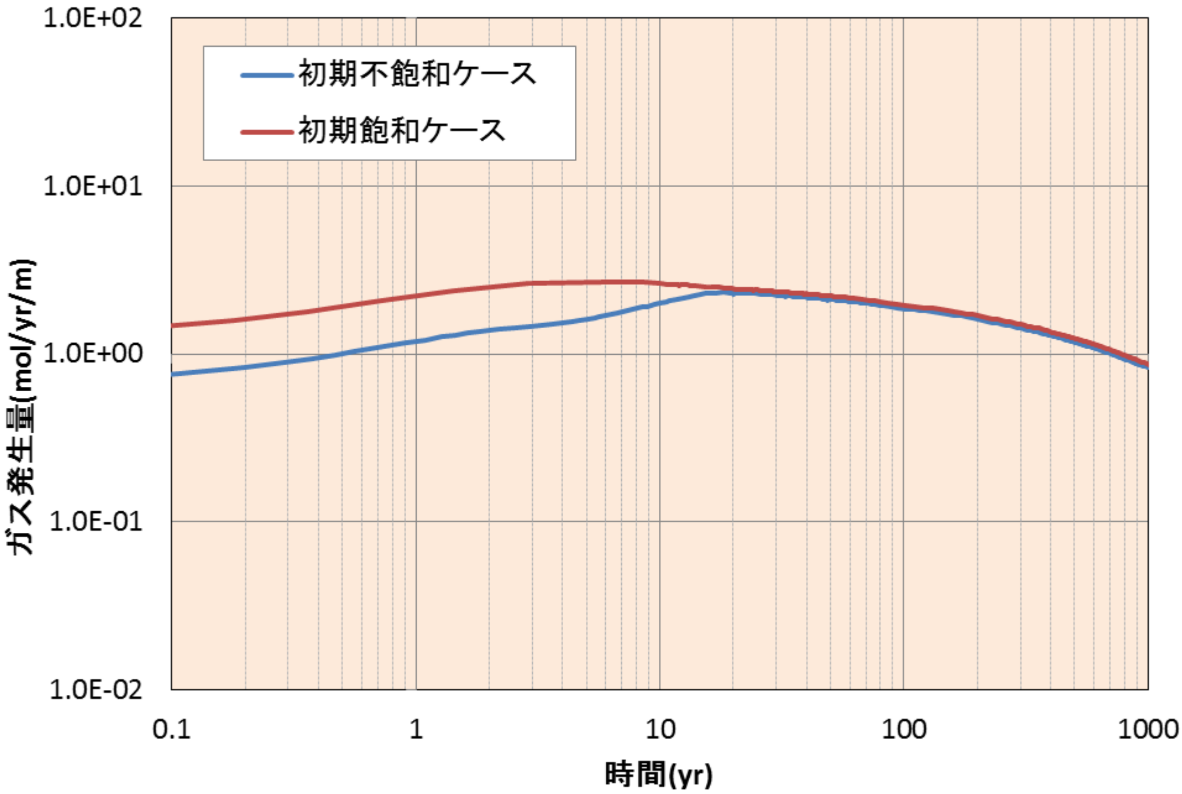


図 3.2.2-27　H_2 ガス発生量の時間変化（初期不飽和ケースと初期飽和ケースの比較）

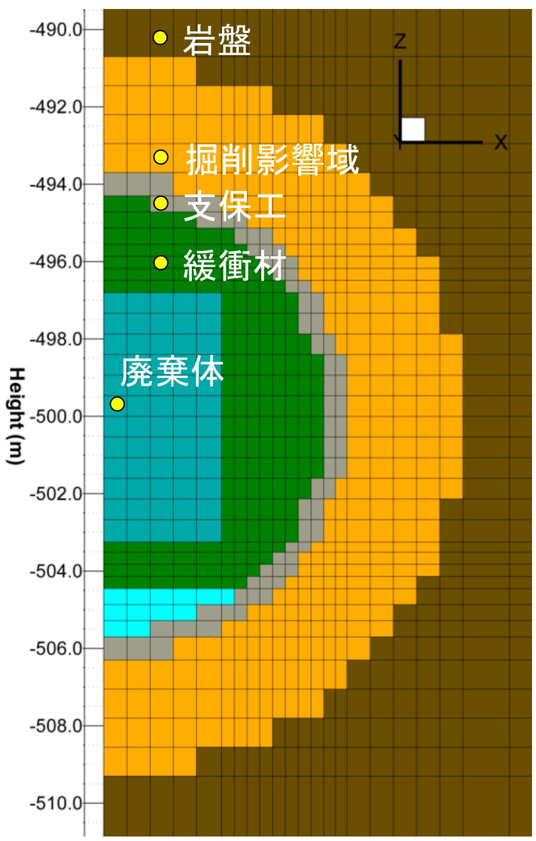
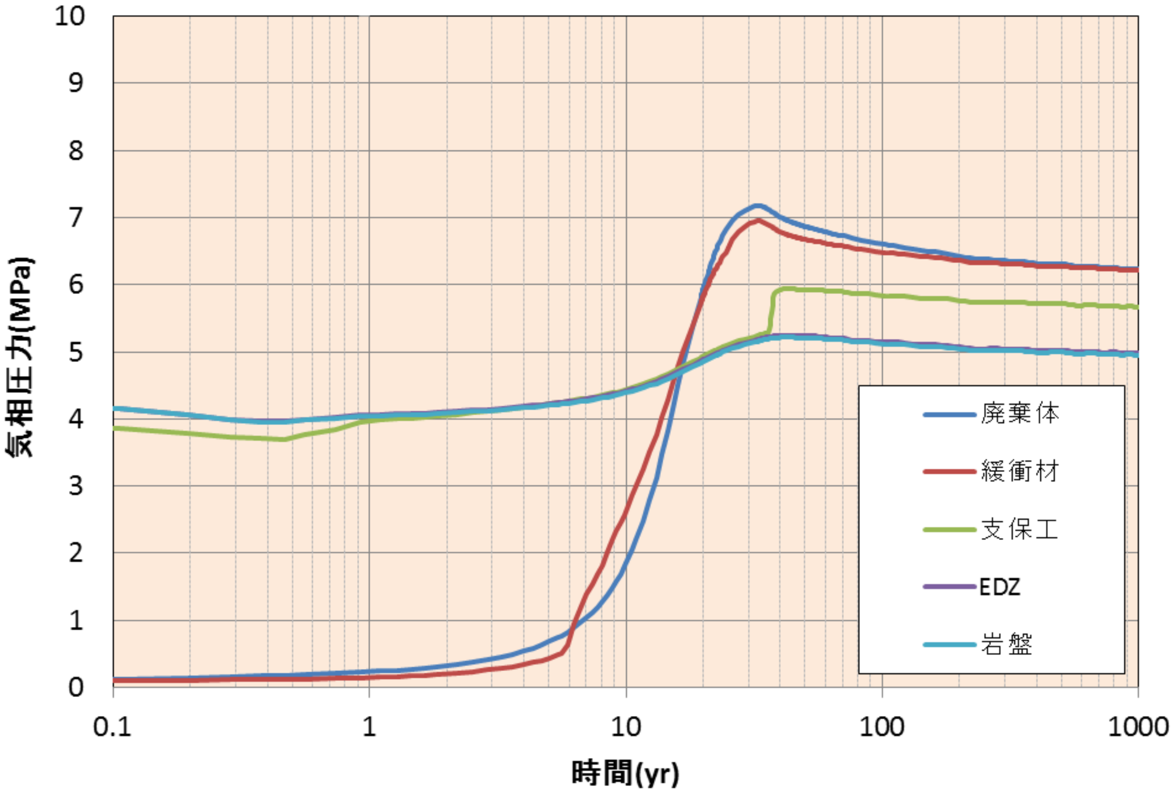


図 3.2.2-28　評価点位置図



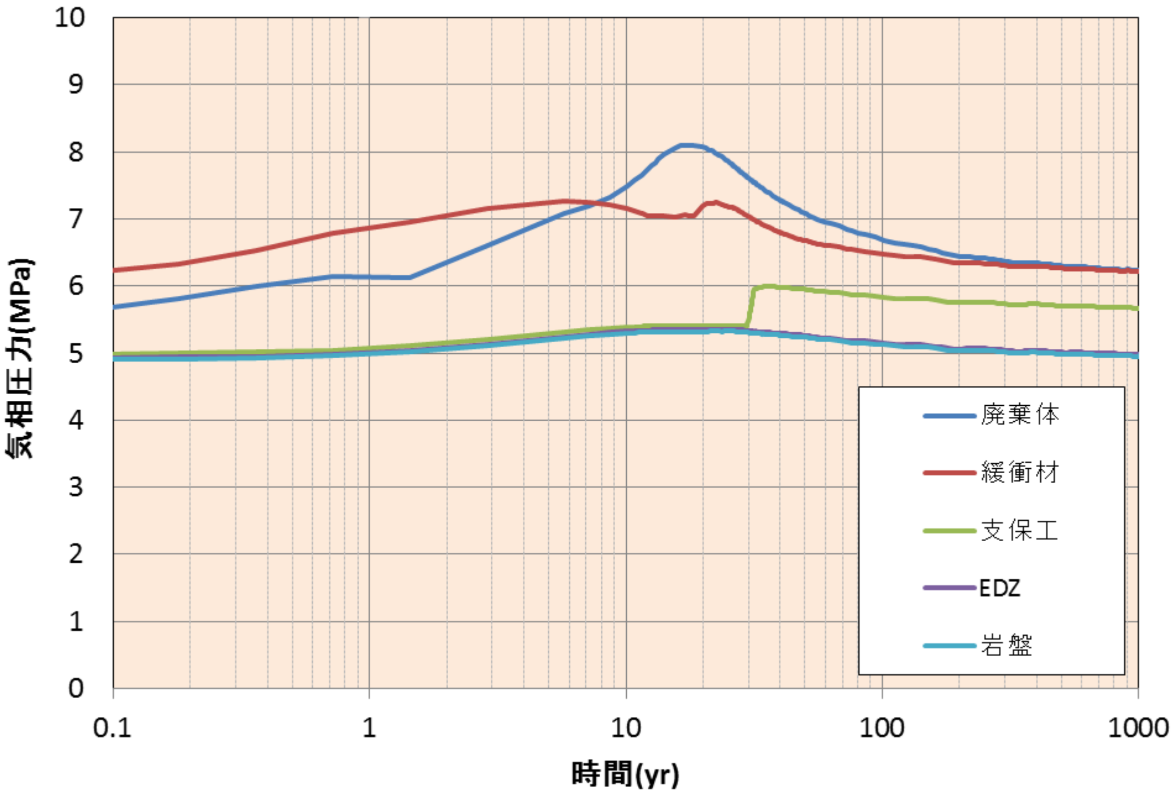


図 3.2.2-29　評価点でのガス相圧力の時間変化

（上段：初期不飽和ケース、下段：初期飽和ケース）

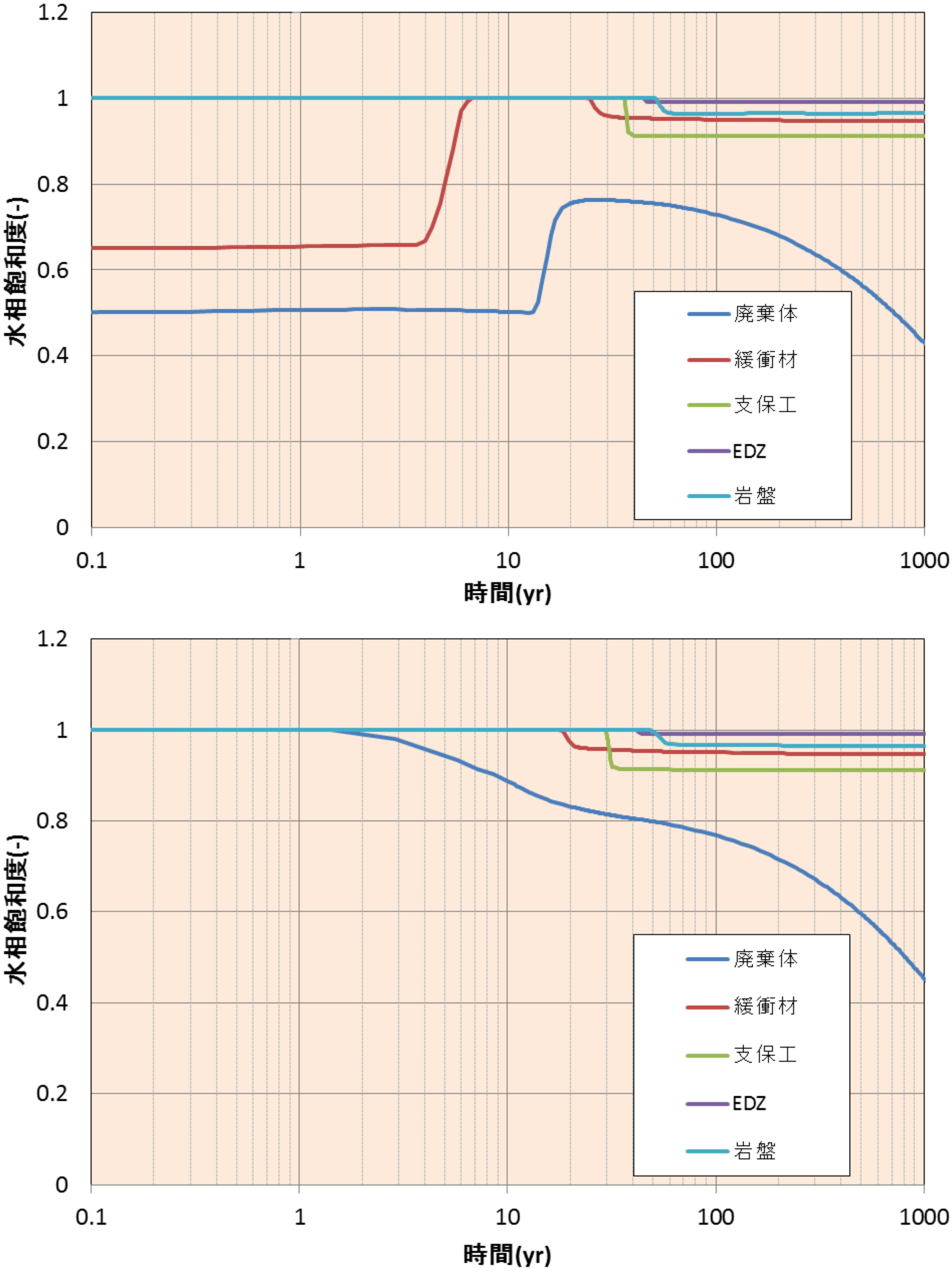
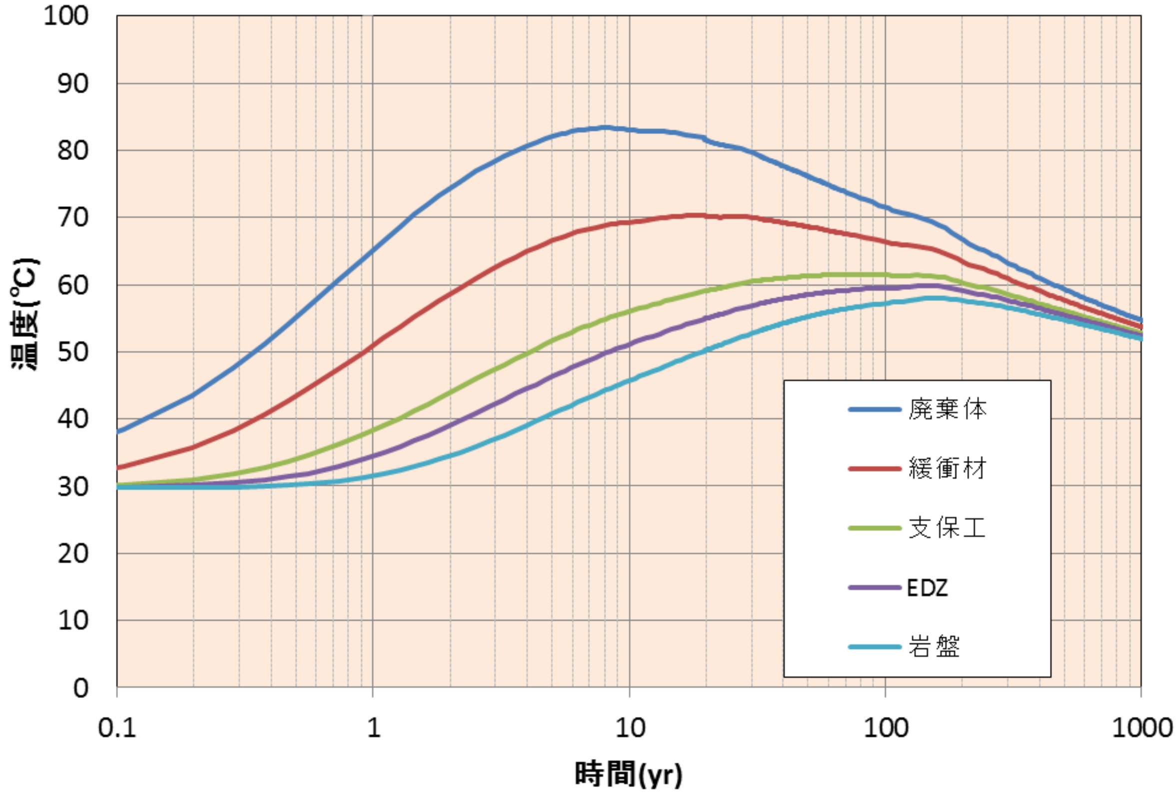


図 3.2.2-30　評価点での水相飽和度の時間変化
（上段：初期不飽和ケース、下段：初期飽和ケース）



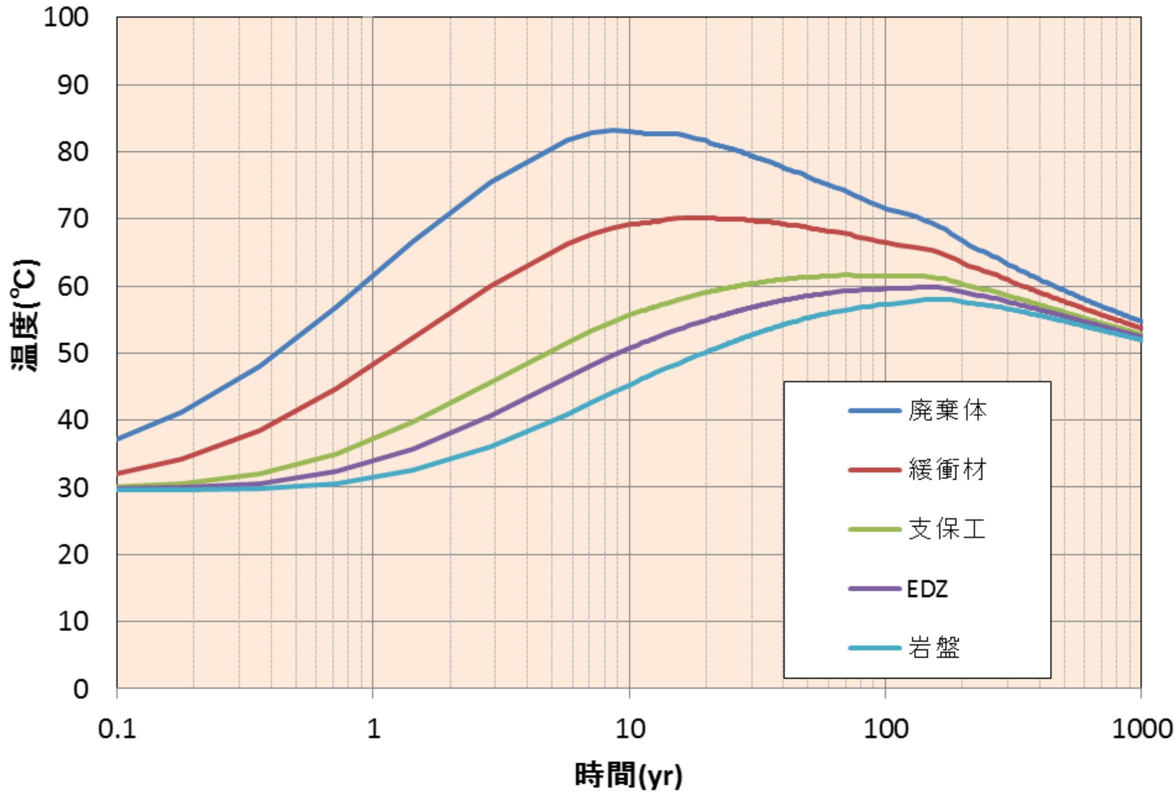
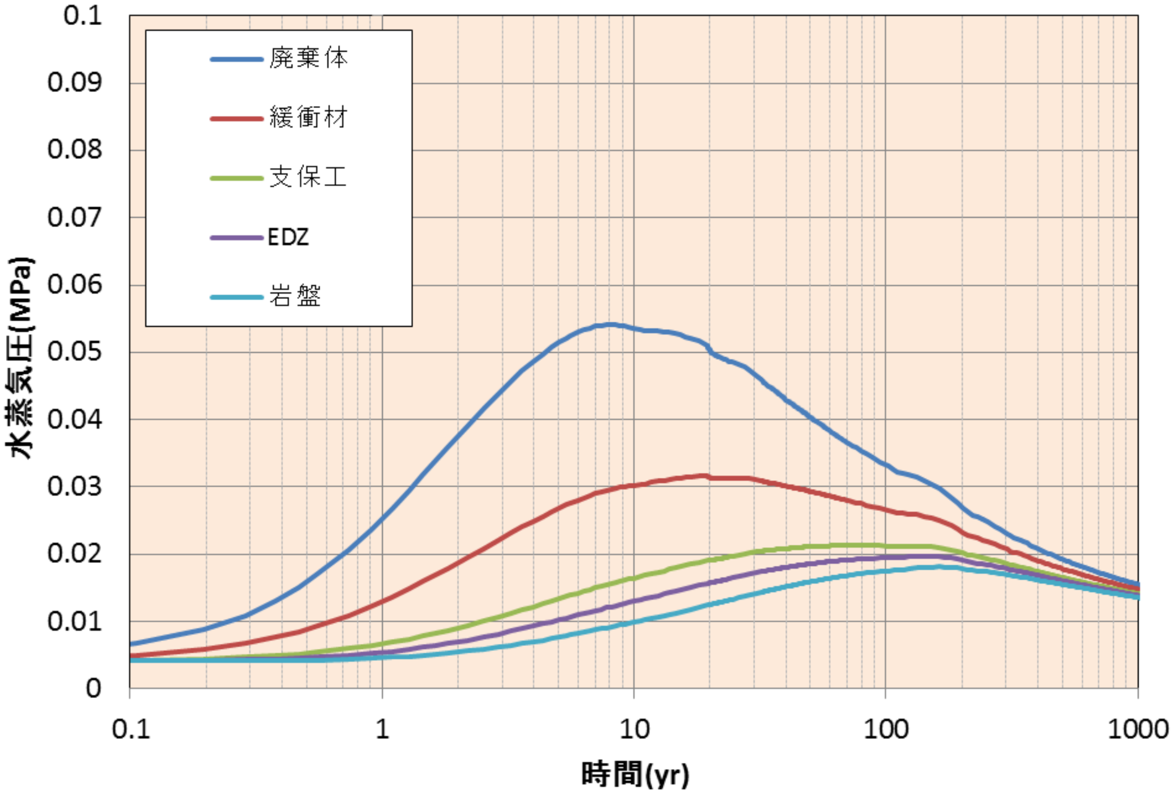


図 3.2.2-31　評価点での温度の時間変化

（上段：初期不飽和ケース、下段：初期飽和ケース）



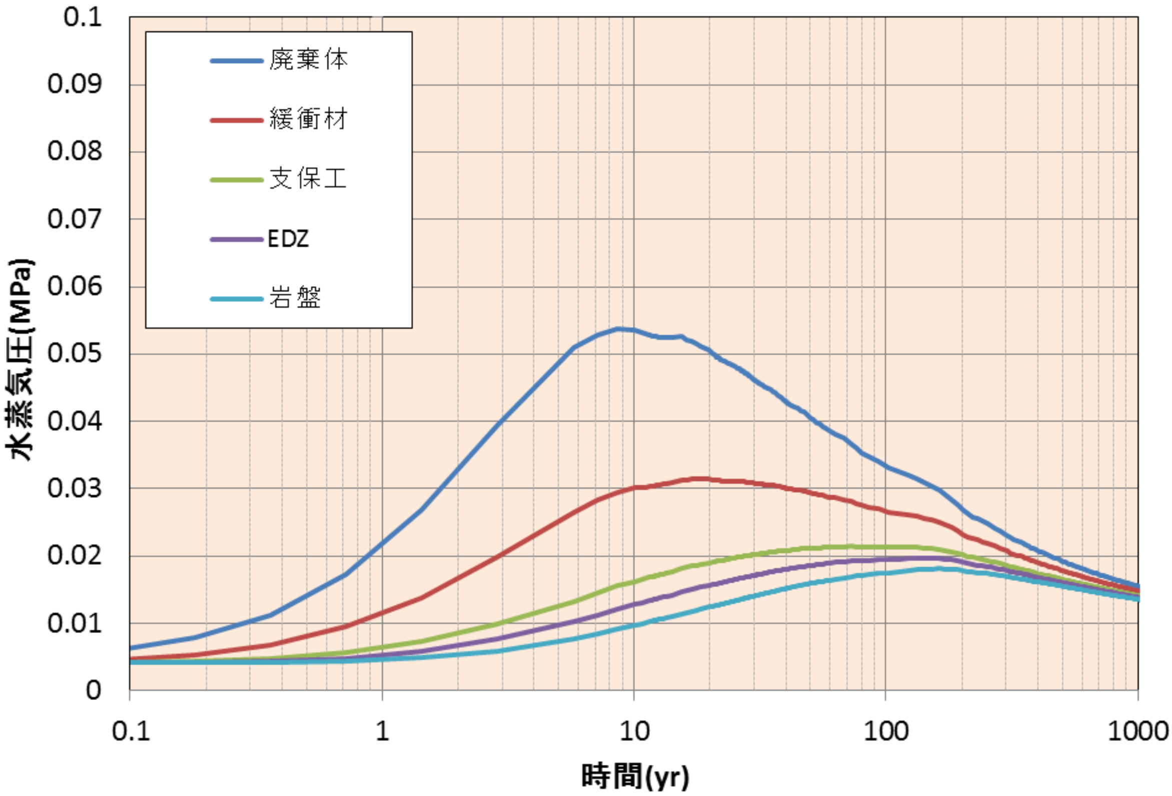


図 3.2.2-32　評価点での水蒸気圧の時間変化

（上段：初期不飽和ケース、下段：初期飽和ケース）

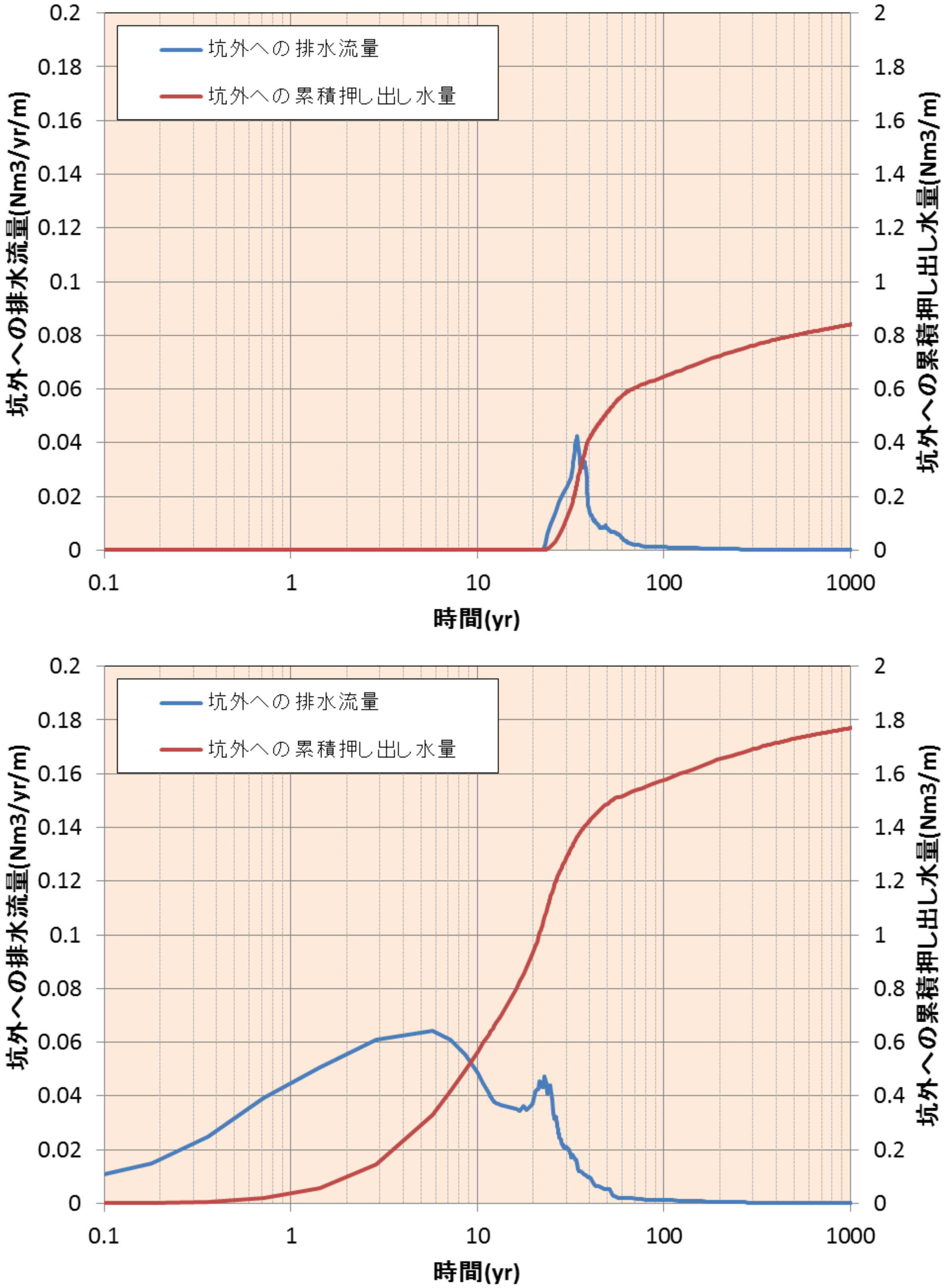


図 3.2.2-33　坑外への排水流量と累積押出し水量の時間変化

（上段：初期不飽和ケース、下段：初期飽和ケース）

3.3　ガス移行データライブラリの拡充

ここでは、平成 25 年度に実施した「ガス移行連成解析ツールの高度化」の確証解析で同定されたパラメータの追加登録を実施する。平成 25 年度の確証解析で対象とした試験の概要を表 3.3-1 に示す。試験は、乾燥密度 1.36Mg/m^3 の 100%クニゲル V1 を用いた直径 60mm、高さ 200mm の大型供試体を対象とし、再冠水、ガス注入、解体調査の 3 つのフェーズから成る。累積抽出量や排水量、排気流量等が実測されている。

表 3.3-1　平成 25 年度の確証解析で対象とした試験の概要

試験フェーズ	試験条件	実測データ
再冠水	初期飽和度 90%から、差圧 0.2 MPa⇒0.4MPa で注水	注水圧 累積注水量 全応力
ガス注入	再冠水試験後、差圧 0.1MPa/2 日の段階昇圧ガス注入	注入ガス圧 累積排水量（中央部、外周部） 排気流量（中央部、外周部） 全応力
解体調査	厚さ約 5mm で分割	寸法 湿潤重量　（→含水比、水飽和度） 乾燥重量

現在のデータライブラリの基本構成を図 3.3-1 に示す。データライブラリは 6 つのモジュールとマニュアルで構成されている。データライブラリを用いた実行処理の流れを図 3.3-2 に示す。また、各モジュールの要求機能を表 3.3-2 に、開発環境を表 3.3-3 に示した。

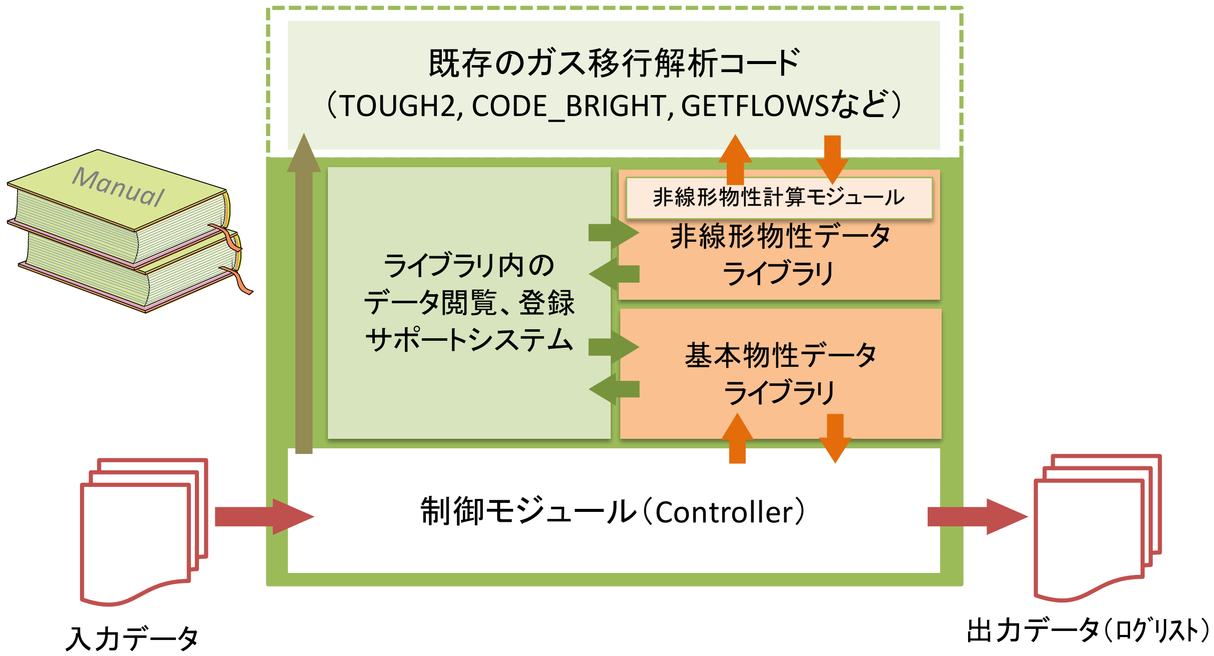


図 3.3-1　データライブラリの基本構成

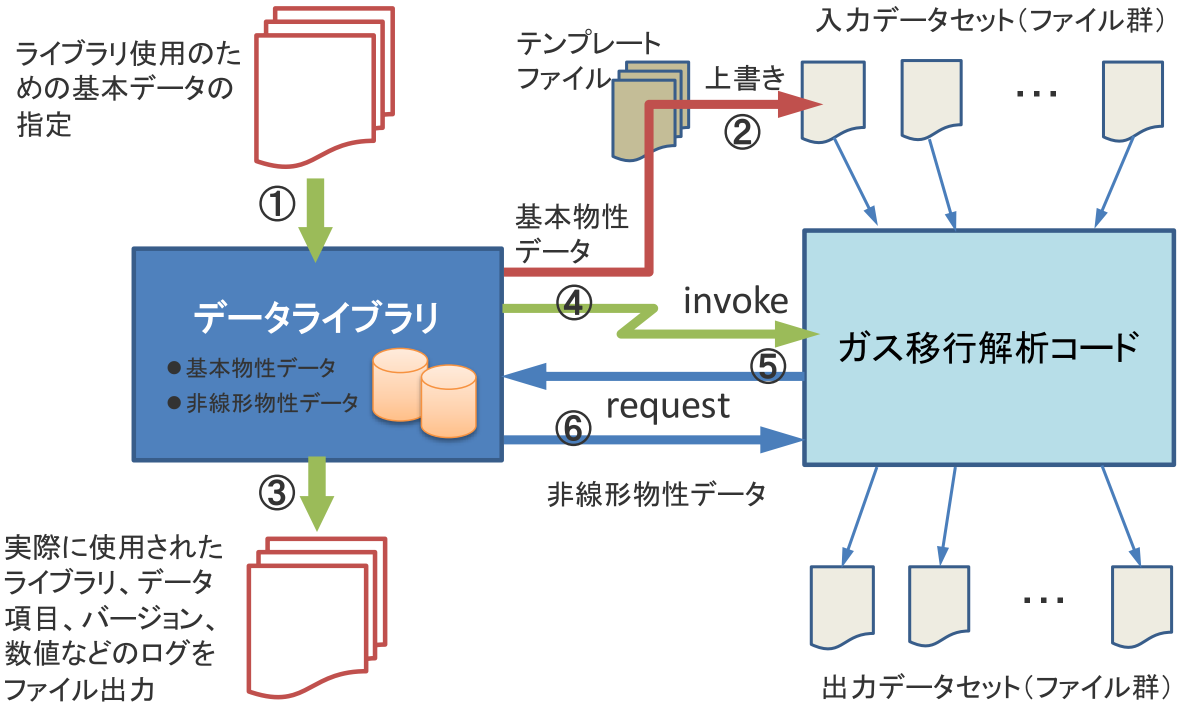


図 3.3-2　データライブラリを用いた実行処理の流れ

表 3.3-2　各モジュールの要求機能

<table>
<tr><th colspan="2">構成要素</th><th>機能</th><th>備考</th></tr>
<tr><td colspan="2">制御モジュール</td><td>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</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">データ
ライブラリ</td><td>基本物性
データ
ライブラリ</td><td>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</td><td>構造化されたテキストファイル</td></tr>
<tr><td>非線形物性
データ
ライブラリ</td><td>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</td><td>構造化されたテキストファイル</td></tr>
<tr><td colspan="2">非線形物性計算
モジュール</td><td>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</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">解析コード</td><td>① ライブラリのリンク
② 関数の呼び出し、戻り値取得</td><td>既存コードに改良が必要</td></tr>
<tr><td colspan="2">データ格納
サポートシステム</td><td>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</td><td></td></tr>
</table>

表 3.3-3　開発環境

<table>
<tr><th>構成要素</th><th>プログラム言語</th><th>コンパイラ</th><th>OS</th></tr>
<tr><td>制御モジュール</td><td>Perl 5.8
Perl 5.10</td><td></td><td rowspan="4">Microsoft Windows 7、LINUX Fedora Core 6</td></tr>
<tr><td>データライブラリ</td><td>テキスト形式</td><td></td></tr>
<tr><td>非線形物性計算モジュール</td><td>Fortran (77/90/95/2003)</td><td>Intel Fortran Compiler 、 GNU gFortran</td></tr>
<tr><td>データ格納サポートシステム</td><td>Visual Basic</td><td>Microsoft visual Basic 2010</td></tr>
</table>

平成 25 年度の確証計算では、再冠水フェーズに対してのみ、2 相流パラメータの同定解析を実施している。そこで得られた 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 3.3-4 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 3.3-5～表 3.3-7 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 3.3-4　同定された基本物性一覧

ケース	水相浸透率 (m²)	ガス相浸透率 (m²)	間隙率 (-)	固相圧縮率 (1/Pa)	流動形態変化の閾値(MPa)
大型供試体	4.00×10^{-20}	4.00×10^{-20}	0.4963	1.0×10^{-9}	—

表 3.3-5　同定された非線形物性一覧（毛細管圧力）

ケース	モデル	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$P_0(MPa)$	$n(-)$
飽和ガス注入試験 SG①	$van\ Genuchten$	0.0	0.0	1.74	1.5

表 3.3-6　同定された非線形物性一覧（相対浸透率）

ケース		モデル	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n(-)$
飽和ガス注入試験 SG①	水	$van\ Genuchten$	0.0	0.0	3.324
	ガス	$Grant$			—

相対浸透率や毛細管圧力を表現する構成モデルは表 3.3-7 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　；間隙分布パラメータ

P_0　；ガス侵入圧(Pa)

$w、g$　；それぞれ水相、気相を示す

表 3.3-7　本検討で用いた2相流曲線を表現する近似モデル

相対浸透率 $(van\ Genuchten/Grant$モデル$)$	毛細管圧力 $(van\ Genuchten$モデル$)$
$k_{rw} = \sqrt{S_{we}}\left(1-(1-{S_{we}}^{1/m})^m\right)^2$ $k_{rg} = 1 - k_{rw}$ $S_{we} = (S_w - S_{wr})/(1 - S_{wr} - S_{gr})$ $m = 1 - 1/n$	$P_c = P_0({S_{we}}^{-1/m} - 1)^{1/n}$ $S_{we} = (S_w - S_{wr})/(1 - S_{wr} - S_{gr})$ $m = 1 - 1/n$

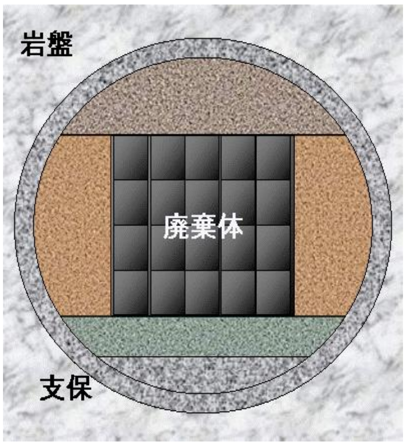
3.4 TRU 処分システムの不確実性を考慮したガス移行解析手法の構築

3.4.1 対象とする処分システム

これまでのガス移行解析では、典型的な TRU 廃棄物処分施設を対象とし、鉛直方向の 2 次元断面モデルによって、施設内最大圧力や累積押出し水量などの評価を実施してきた。今年度は解析格子の次元性に着目し、3 次元の解析格子モデルを構築し、施設内最大圧力や累積押出し水量ならびに、ガス透気経路に対し、従来の 2 次元断面モデルとの比較検討を行う。廃棄体からのガス発生を考慮し、ベントナイト（緩衝材）の流路拡幅を考慮した水・ガスの 2 相流れを解析する。廃棄体からの発熱は考慮せず、等温状態を前提とする。

モデル化範囲の設定を行う。これまでと同様に、本検討で対象とする廃棄体は、第 2 次 TRU レポート[31]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 準拠）、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 3.4.1-1 に示す。処分坑道の内径は 11.4m、支保工の厚さは 0.6m、廃棄体サイズは幅 6.0m、高さ 6.4m、鋼製構造躯体の厚さは 0.05m である。

対象廃棄体：グループ 2



【処分坑道断面】
処分坑道サイズ ：内径 11.4m
支保工厚さ ：0.6m
廃棄体サイズ ：W6.0m×H6.4m
鋼製構造躯体厚さ ：0.05m

【地質環境条件】
軟岩系岩盤 ：第 2 次 TRU レポート SR-C 準拠
処分深度 ：GL-500m

【人工バリア材料特性】
緩衝材 ：有効粘度密度 1.36Mg/m^3
珪砂含有率 0%

セメント系材料

項　目	吹付けコンクリート	二次覆工 インバート	廃棄体定置部 (廃棄体, 充填材, 構造躯体)
配合	W/C=45 % C=367 kg/m^3	W/C=45 % C=367 kg/m^3	W/C=55 % C=483 kg/m^3
(骨材容積割合)	67vol%	67vol%	54vol%
(空隙率)	13%	13%	19%
(真密度)	2.62g/cm^3	2.62g/cm^3	2.58g/cm^3
圧縮強度	43N/mm^2	43N/mm^2	35N/mm^2
単位体積重量	24.1kN/m^3	24.1kN/m^3	38.5kN/m^3

注 1：廃棄体定置部の物性は，固化媒体および充填材として用いられるモルタルの値とする。ただし，単位体積重量は廃棄体重量を加味した値とする。

注 2：インバートの物性は二次覆工の物性と同等とする。

図 3.4.1-1 モデル化の対象とする処分システム（再掲）

TRU 廃棄物処分施設の全体レイアウトを図 3.4.1-2 に示す。対象とするのは、図中のグループ 2：キャニスタに該当する部分となる。モデル化範囲を図 3.4.1-3 に示す。坑道の横断方向（図中の上下方向）には、鏡面対称性を前提とし、坑道中央から坑道離間距離の半分の距離までをモデ

ル化範囲に設定した。縦断方向（図中の左右方向）は、廃棄体から十分に離れた距離として、処分坑道の端部までを設定した。鉛直方向は、地表面から深度 1、000m までとした。坑道の縦断方向の各人工バリア材料のモデル化には図 3.4.1-4 に示した処分坑道長に係る諸元を用いた。

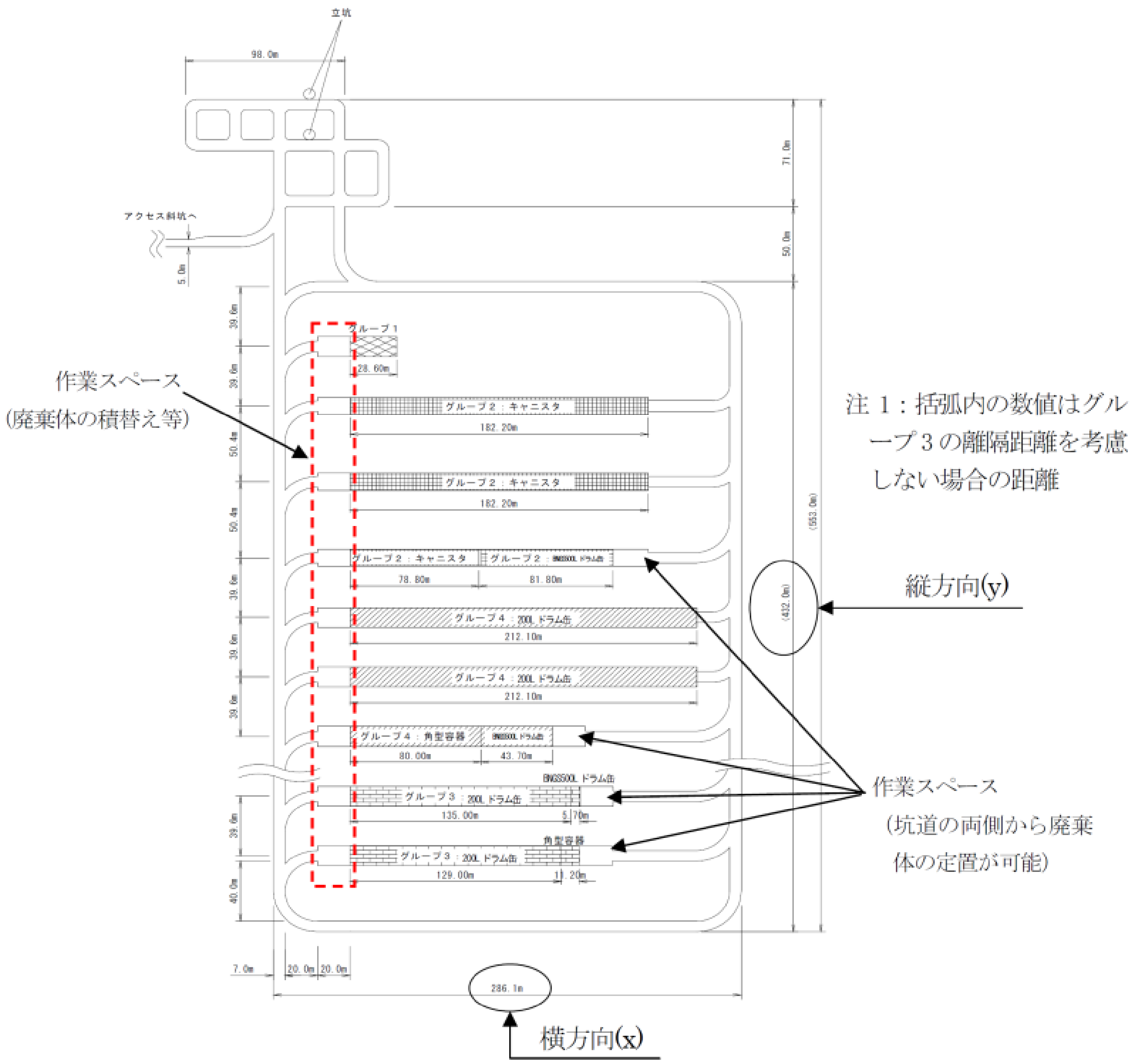


図-1　全体レイアウトの設定

図 3.4.1-2　TRU 廃棄物処分施設の全体レイアウト[31]

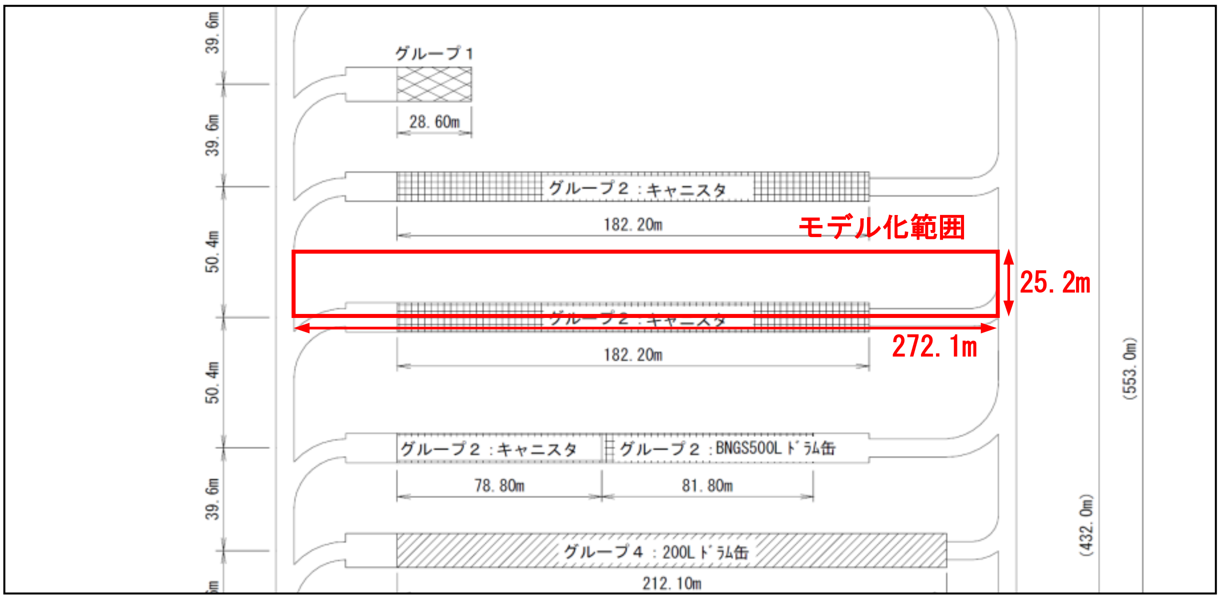


図 3.4.1-3　3 次元解析モデルのモデル化範囲[31]

表-1　処分坑道長に係る諸元（円形処分坑道）

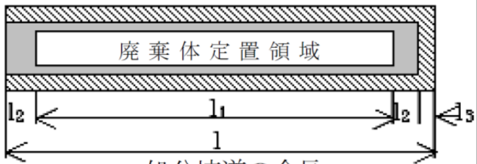
		グループ1	グループ2	グループ3	グループ4	処分坑道概略図
廃棄体定置領域	l_1(m)	任意 (廃棄体パッケージ幅×定置列数)				左側から廃棄体を搬送・定置  処分坑道の全長
緩衝材厚	l_2(m)	2.0		0.0		
端部支保工厚	l_3(m)	(軟岩系岩盤) 0.6 (硬岩系岩盤) 0.0				
処分坑道全長	l(m)	$l=l_1+l_2\times2+l_3$				

図 3.4.1-4　処分坑道長に係る諸元[31]

3.4.2　解析モデル

構築した解析モデルを図 3.4.2-1 に示す。人工バリア内の格子解像度は 0.5m～1.0m 程度とし、総格子数は 579、700 となった。考慮する材料は、廃棄体、鋼製構造躯体（底部と側部を区別）、緩衝材、インバート、支保工、掘削影響域（EDZ）、岩盤、埋戻し材である。坑道縦断方向の断面図と深度 500m における平面図を図 3.4.2-2 に示す。

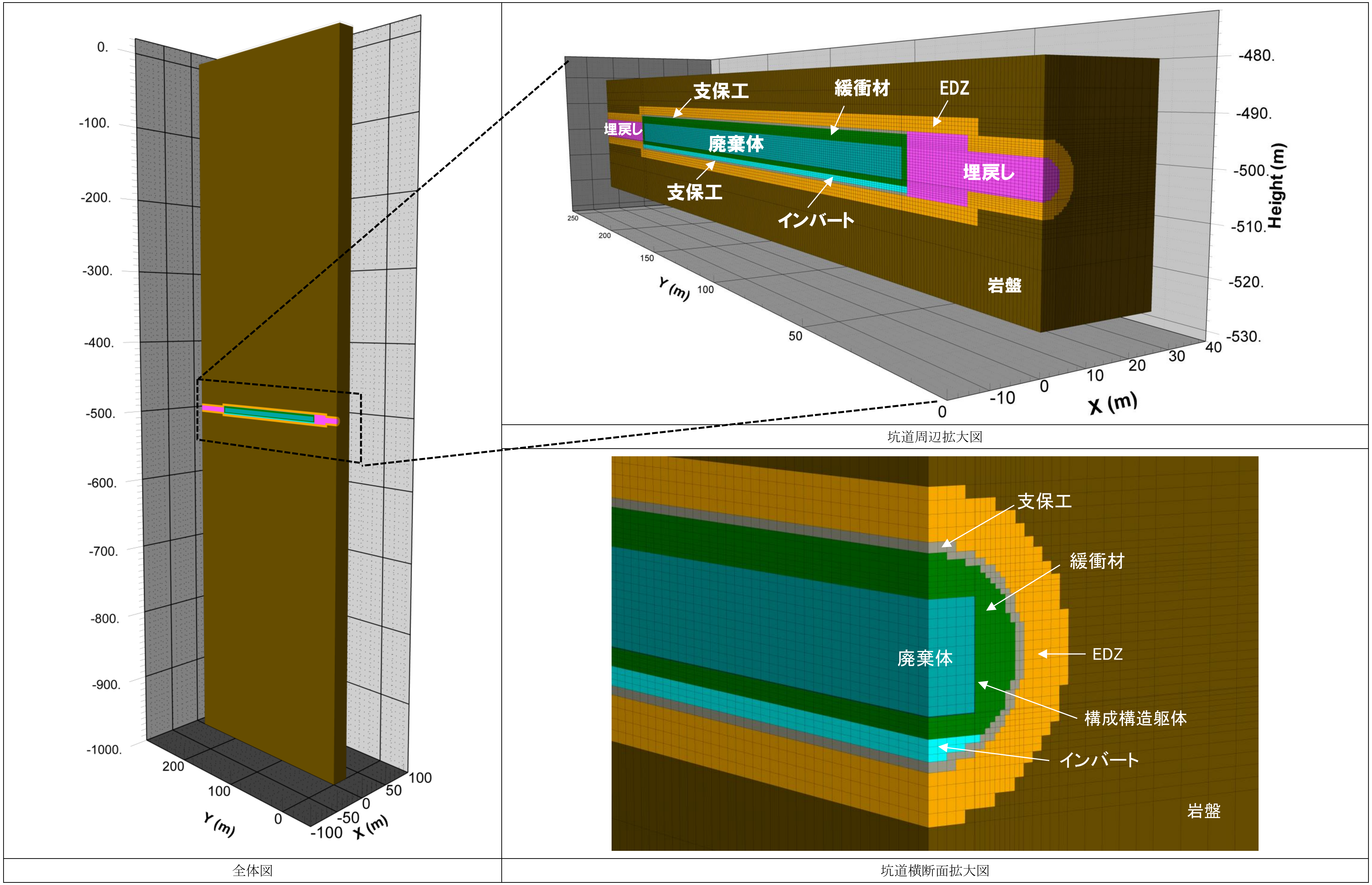
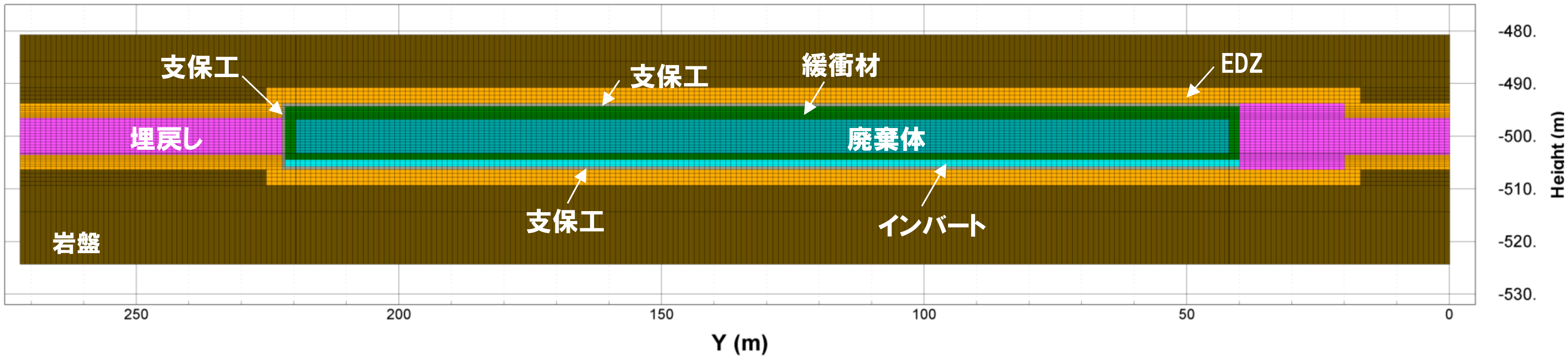


図 3.4.2-1　3 次元解析モデル



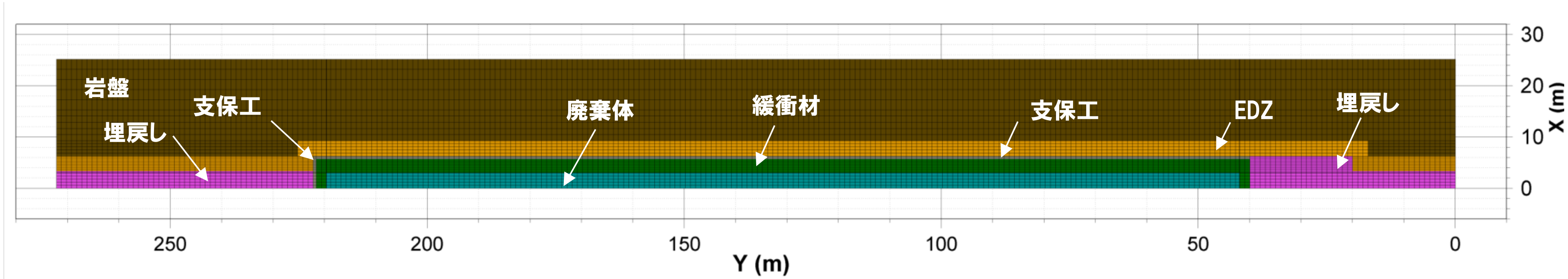


図 3.4.2-2　坑道縦断方向の断面図（上）と深度 500m における平面図（下）

3.4.3　解析条件

(1)　流体物性

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

理科年表より30(℃)における標準大気圧101、325(Pa)での水の密度ρ_{w0}を995.65(kg/m^3)、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。

$$\rho_w = \rho_{w0}\left(1 + C_f(P_w - P_0)\right) \tag{3.4-1}$$

$$\mu_w = \mu_{w0}\left(1 + C_\mu(P_w - P_0)\right) \tag{3.4-2}$$

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

$$\mu_{g0} = \mu_{20}\left(\frac{T_{20} + C}{T + C}\right)\left(\frac{T}{T_{20}}\right)^{3/2} \tag{3.4-3}$$

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(℃)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。

(2)　水理物性

材料毎の水理物性の一覧を表 3.4.3-1 にまとめた。緩衝材に関しては、排水過程の実測データを再現するものとして第一期検討で同定されたパラメータのうち、2012 年度 SG①を適用した。流路拡幅モデルに関するパラメータは既往検討で同定された値（$P_s = 0.33(MPa)$、$F = 1.154$ (−)、$C = 4.999 \times 10^4$(−)、、$n_{PD} = 0.8346$(−)）を用いた。埋戻し材は千々松ら（1999）[37]に示された値を、その他の材料に関しては、安藤ら（2005）[21]に示された値を用いた。相対浸透率および、毛細管圧力を表現する構成モデルを表 3.4.3-2、表 3.4.3-3 に示した。各材料の相対浸透率曲線および、毛細管圧力曲線を図 3.4.3-1～図 3.4.3-4 に示す。

表 3.4.3-1　水理物性一覧

<table>
<tr><th rowspan="2">部材</th><th rowspan="2" colspan="2">絶対浸透率
$K_p(m^2)$</th><th colspan="5">相対浸透率k_r $(-)$</th><th colspan="5">毛細管圧力P_c (Pa)</th><th rowspan="2">有効
間隙率
$\phi(-)$</th><th rowspan="2">固相
圧縮率
$C_r(1/Pa)$</th></tr>
<tr><th>モデル</th><th>残留水相
飽和度
$S_{wr}(-)$</th><th>残留ガス
相飽和度
$S_{gr}(-)$</th><th>係数
$m(-)$</th><th>係数
$n(-)$</th><th>モデル</th><th>残留水相
飽和度
$S_{wr}(-)$</th><th>ガス
侵入圧
$P_e(Pa)$</th><th>係数
$P_0(Pa)$</th><th>間隙分
布係数
$n(-)$</th></tr>
<tr><td rowspan="2">廃棄体
(グループ 2)</td><td>水</td><td>4.10E-18</td><td rowspan="2">$Corey$</td><td rowspan="2">0.15</td><td rowspan="2">0.075</td><td rowspan="2">25</td><td rowspan="2">2.3</td><td rowspan="2">Na</td><td rowspan="2">0.15</td><td rowspan="2">6.9E+4</td><td rowspan="2">5.0E+6</td><td rowspan="2">1.05</td><td rowspan="2">0.19</td><td rowspan="2">1.03E-10</td></tr>
<tr><td>ガス</td><td>3.00E-15</td></tr>
<tr><td rowspan="2">構造躯体</td><td>水</td><td>4.10E-18</td><td rowspan="2">$Corey$</td><td rowspan="2">0.15</td><td rowspan="2">0.075</td><td rowspan="2">25</td><td rowspan="2">2.3</td><td rowspan="2">Na</td><td rowspan="2">0.15</td><td rowspan="2">6.9E+4</td><td rowspan="2">5.0E+6</td><td rowspan="2">1.05</td><td rowspan="2">0.42※</td><td rowspan="2">1.03E-10</td></tr>
<tr><td>ガス</td><td>3.00E-15</td></tr>
<tr><td rowspan="2">緩衝材</td><td>水</td><td>4.49E-20</td><td rowspan="2">vG</td><td rowspan="2">0.228</td><td rowspan="2">0</td><td rowspan="2">—</td><td>2.455</td><td rowspan="2">vG</td><td rowspan="2">0.228</td><td rowspan="2">—</td><td rowspan="2">3.24E+5</td><td rowspan="2">3.297</td><td rowspan="2">0.497</td><td rowspan="2">1.00E-9</td></tr>
<tr><td>ガス</td><td>4.49E-19</td><td>2.474</td></tr>
<tr><td rowspan="2">支保工</td><td>水</td><td>4.10E-18</td><td rowspan="2">$Corey$</td><td rowspan="2">0.15</td><td rowspan="2">0.075</td><td rowspan="2">25</td><td rowspan="2">2.3</td><td rowspan="2">Na</td><td rowspan="2">0.15</td><td rowspan="2">6.9E+4</td><td rowspan="2">5.0E+6</td><td rowspan="2">1.05</td><td rowspan="2">0.13</td><td rowspan="2">5.92E-10</td></tr>
<tr><td>ガス</td><td>3.00E-15</td></tr>
<tr><td rowspan="2">インバート</td><td>水</td><td>4.10E-18</td><td rowspan="2">$Corey$</td><td rowspan="2">0.15</td><td rowspan="2">0.075</td><td rowspan="2">25</td><td rowspan="2">2.3</td><td rowspan="2">Na</td><td rowspan="2">0.15</td><td rowspan="2">6.9E+4</td><td rowspan="2">5.0E+6</td><td rowspan="2">1.05</td><td rowspan="2">0.13</td><td rowspan="2">5.92E-10</td></tr>
<tr><td>ガス</td><td>3.00E-15</td></tr>
<tr><td rowspan="2">埋戻し材</td><td>水</td><td>6.00E-19</td><td>vG</td><td>0.0</td><td>0.0</td><td>—</td><td>3.</td><td rowspan="2">vG</td><td rowspan="2">0.0</td><td rowspan="2">—</td><td rowspan="2">6.54E+5</td><td rowspan="2">3.</td><td rowspan="2">0.333</td><td rowspan="2">2.00E-7</td></tr>
<tr><td>ガス</td><td>9.50E-16</td><td>$Corey$</td><td>0.997</td><td>0.0</td><td>4.</td><td>2.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">掘削影響域
(EDZ)</td><td>水</td><td>8.20E-15</td><td rowspan="2">$Corey$</td><td rowspan="2">0.6</td><td rowspan="2">0</td><td rowspan="2">4</td><td rowspan="2">3</td><td rowspan="2">Na</td><td rowspan="2">0</td><td rowspan="2">3.4E+4</td><td rowspan="2">8.0E+5</td><td rowspan="2">0.35</td><td rowspan="2">0.3</td><td rowspan="2">3.43E-10</td></tr>
<tr><td>ガス</td><td>7.80E-14</td></tr>
<tr><td rowspan="2">岩盤
(SR-C)</td><td>水</td><td>8.20E-17</td><td rowspan="2">$Corey$</td><td rowspan="2">0.6</td><td rowspan="2">0</td><td rowspan="2">4</td><td rowspan="2">3</td><td rowspan="2">Na</td><td rowspan="2">0</td><td rowspan="2">3.4E+4</td><td rowspan="2">8.0E+5</td><td rowspan="2">0.35</td><td rowspan="2">0.3</td><td rowspan="2">3.43E-10</td></tr>
<tr><td>ガス</td><td>7.80E-16</td></tr>
</table>

※鋼製構造躯体の側部の有効間隙率は 0.50 とした

表 3.4.3-2　相対浸透率曲線を表現する構成モデル

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

表 3.4.3-3　毛細管圧力曲線を表現する構成モデル

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

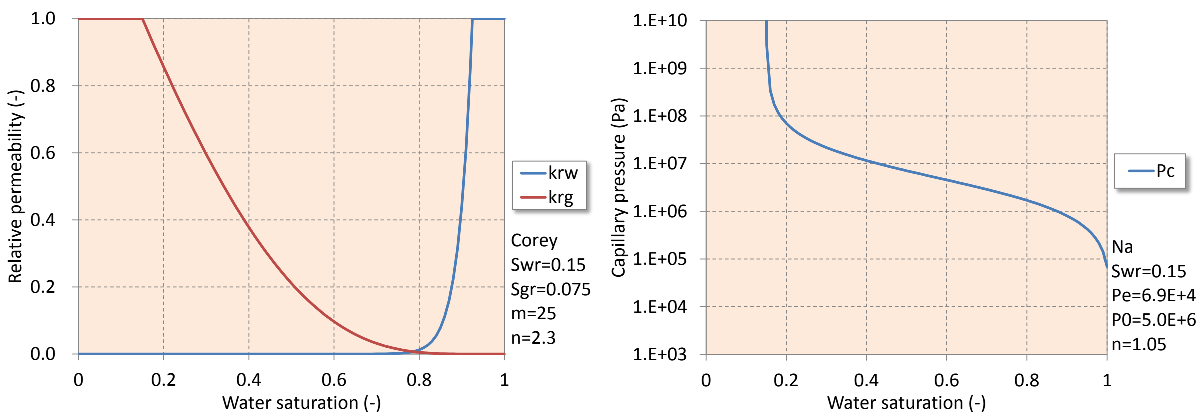


図 3.4.3-1　相対浸透率と毛細管圧力曲線（廃棄体、鋼製構造躯体、支保工、インバート）

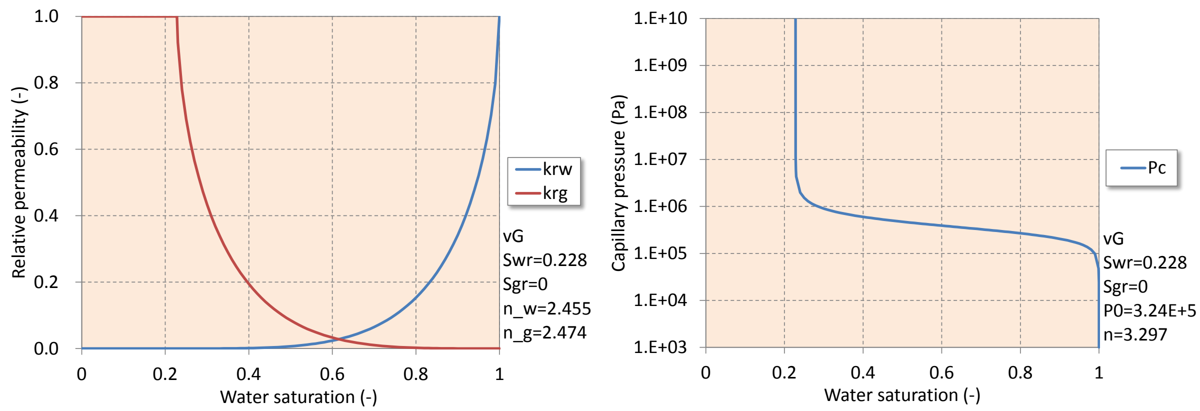


図 3.4.3-2　相対浸透率と毛細管圧力曲線（緩衝材）

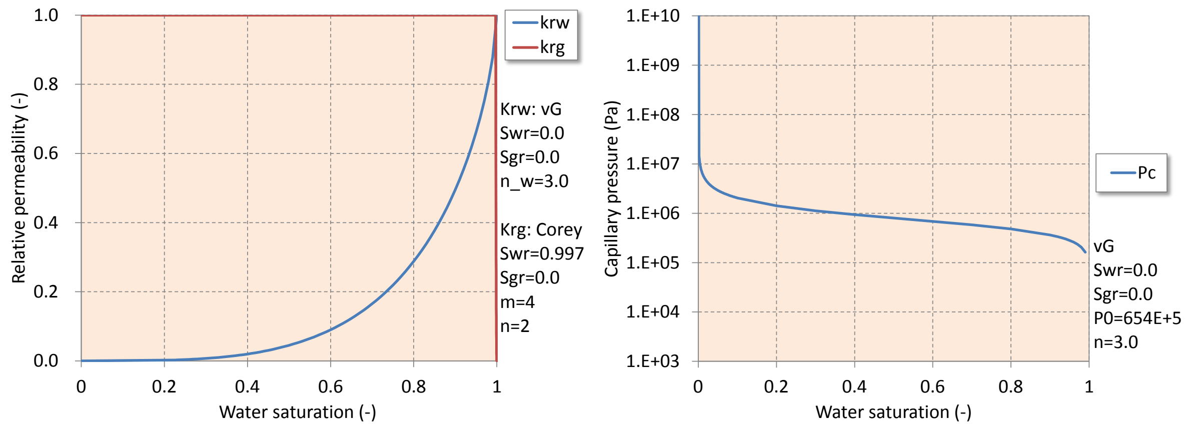


図 3.4.3-3　相対浸透率と毛細管圧力曲線（埋戻し材）

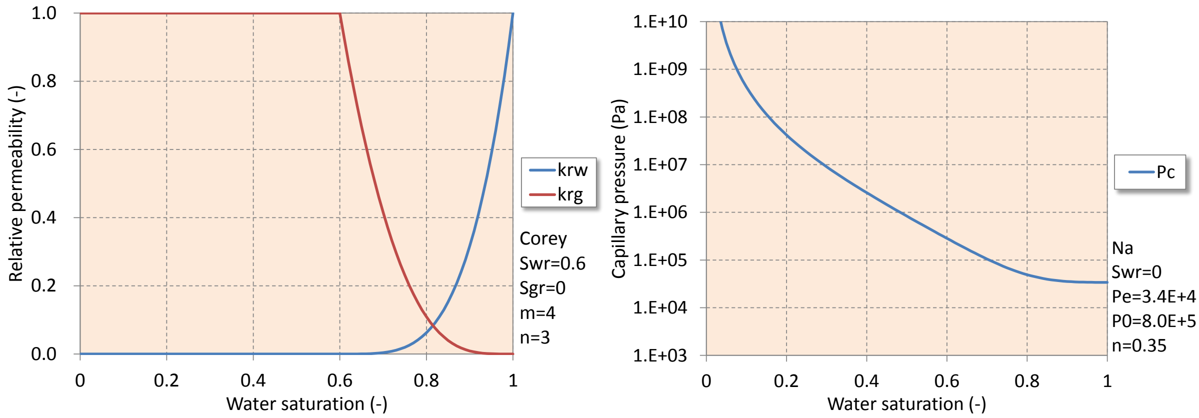


図 3.4.3-4　相対浸透率と毛細管圧力曲線（掘削影響域、岩盤）

3.4.4　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とし、完全に水で飽和した状態とした。上面、底面は定圧境界、側面は不透水境界に設定した。

本検討では、廃棄体からのガス発生を考慮する。ガス発生速度は安藤ら（2005）[21]に示されたものを設定した（図 3.4.5-1）

3.4.5　解析コード

解析には、多相多成分流体を対象とした汎用地圏流体シミュレータ GETFLOWS（General-purpose Terrestrial fluid-FLOW Simulator)[1]を用いた。支配方程式や数値解法は(1)2）に示した通りである。

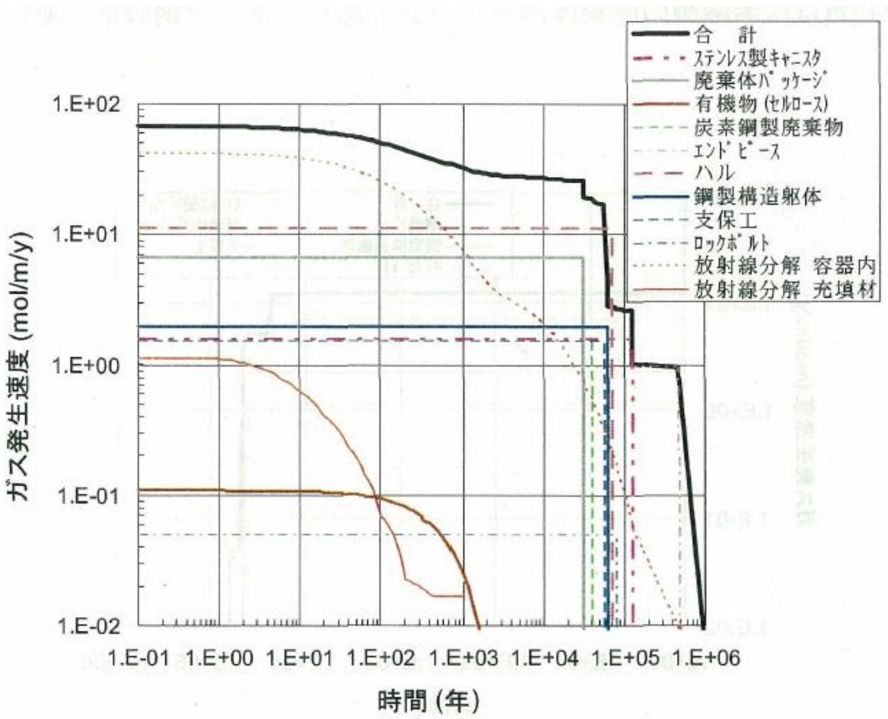


図 3.4.5-1 ガス発生速度の時間変化（出典：安藤ら、 2005[21]）

3.4.6 解析結果

典型的なTRU廃棄物処分場を模擬した3次元モデルによるガス移行解析結果を以下に示す。

図 3.4.6-1 に廃棄体中央部におけるガス相圧力の時間変化を示す。既往検討[7]で得られた2次元断面モデルによる解析結果も比較のために合わせて示している。3 次元モデルに対しては、坑道奥行き方向に対して廃棄体のほぼ中央に位置する地点（Y=122.3m）の結果を出力した。また、図 3.4.6-2 に坑外への累積押出し水量の時間変化を示した。2次元モデルの値は、得られた押出し水量に廃棄体の奥行長さ（182.2m）を掛けたものである。

廃棄体から発生したガスによって、廃棄体中央部のガス相圧力は上昇し、押出し水量も増加する。圧力の上昇によって約30年後に緩衝材内部で流路拡幅が起こり、圧力は急激に低下する。これ以降、圧力は徐々に低下していき、約 3、000 年以降は定常状態に至っている。一方、押出し水量は、流路拡幅による圧力低下以降も徐々に増加していく傾向が見られる。後述するが、これは主要なガス移行経路が形成された後も、ガスは人工バリア内に徐々に侵入していくためである。

廃棄体中央部におけるガス相圧力は、2 次元モデルと 3 次元モデルでほぼ同じ結果を示している。一方、坑外への累積押出し水量は2次元モデルと3次元モデルで、流路拡幅による圧力低下が起こる約30年後以降、徐々に差異が大きくなっていく結果が得られている。これは、廃棄体から発生したガスが、図 3.4.2-1 に示した坑道周辺拡大図における手前側の埋戻し層へ移行し、岩盤へガスが透気することで、2 次元断面による解析とは異なるガス移行経路となり、押出し水量が異なる結果になったと解釈される。主要なガス移行経路が、2 次元断面モデルでは表現困難となる場合は、2 次元断面モデルで計算された押出し水量の取扱いに注意が必要であることが分かった。

図 3.4.6-3 にガス発生から約100年後、約140年後、約2、000年後におけるガス相圧力と水

相飽和度の三次元的な分布を示した。図 3.4.2-1 に示した坑道周辺拡大図における手前側の埋戻し層と廃棄体層の境界付近における坑道横断方向の断面図である。これらの結果からも既に示したように、手前側からのみガスが坑外へ移行している結果が示されている。

図 3.4.6-4 に示す断面位置において、坑道横断方向のガス相圧力と水相飽和度の二次元断面分布を図 3.4.6-6～図 3.4.6-9 に示した。材料区分も合わせて示している。断面 F と G においてのみ、約 130 年後の分布図から坑外へガスが透気していることが示されており、図 3.4.2-1 に示した坑道周辺拡大図における手前側の埋戻し層へ移行し、これが主要なガス移行経路となっていることが分かる。流路拡幅が発生し、急激に圧力が低下した約 30 年後以降も、人工バリア内に徐々にガスは侵入しており、累積排水量が徐々に増加していく要因となっているが示されている。

次に、坑道縦断方向に対して、廃棄体両端部とその内側の 3 つの位置において、人工バリア材料毎のガス相圧力と水相飽和度の時間変化を図 3.4.6-10 に示した。評価点は図 3.4.6-5 に示した位置に設定した。

廃棄体と鋼製構造躯体に関しては、両端部のガス相圧力が他の地点よりもわずかに小さい結果となっている。水相飽和度の変化はどの地点もほぼ同じ結果となった。緩衝材では流路拡幅が起こる約 30 年後までは、廃棄体と鋼製構造躯体と同様に、両端部のガス相圧力が他の地点よりもわずかに小さい結果となっている。しかし、それ以降は、Y=42.4m、92.3m において他の地点の傾向とは異なる結果が得られている。これは、手前側の埋戻し層から坑道外への主要なガス移行経路が形成され、Y=92.3 の位置まで人工バリア内でのガスの進展フロントの挙動が影響を受けたものと解釈される。支保工でも同様に、Y=42.4m、92.3m において、流路拡幅発生以降の挙動が他の地点と異なる結果となっている。掘削影響領域に関しては、どの地点においても初期状態とほぼ変わらない結果を示した。

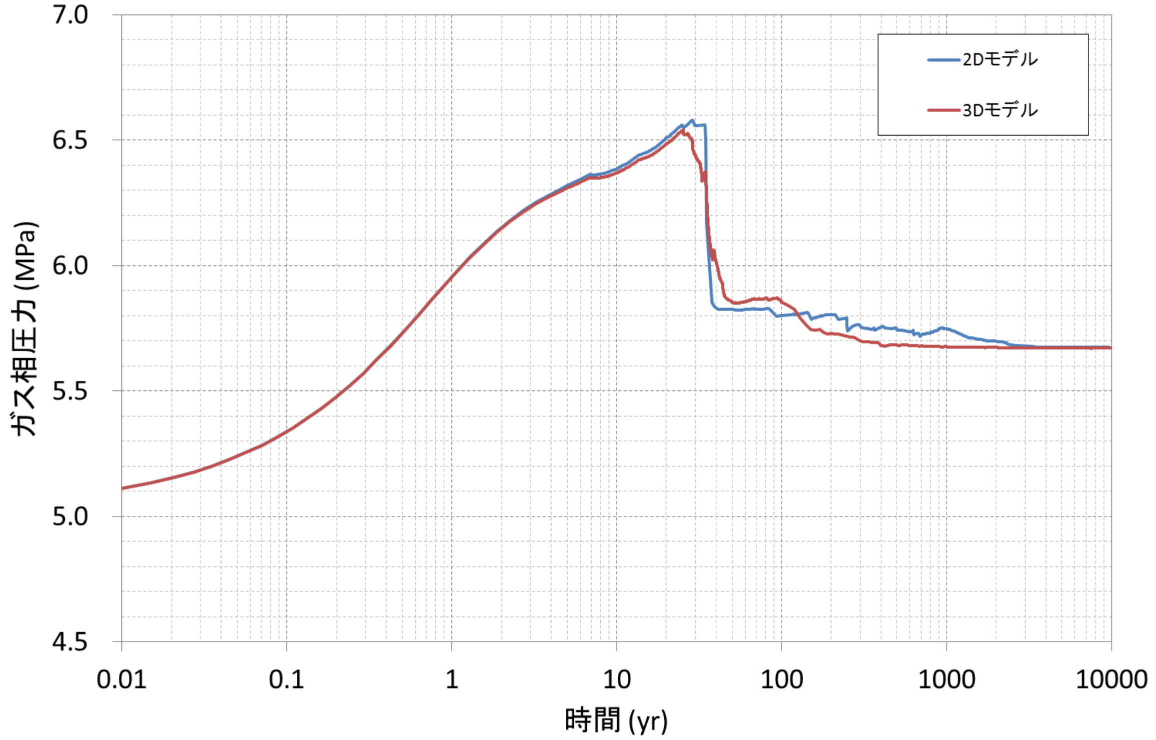


図 3.4.6-1　廃棄体中央部におけるガス相圧力の時間変化（2 次元モデルと 3 次元モデルの比較）

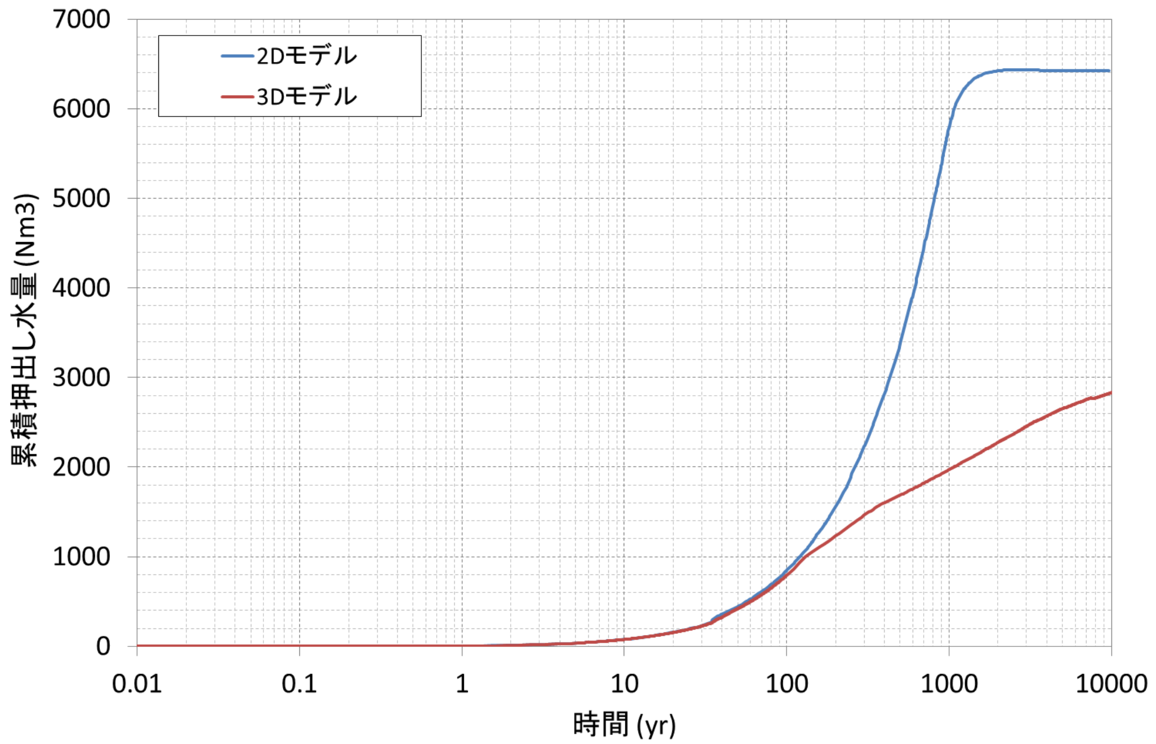


図 3.4.6-2　坑外への累積押し出し水量の時間変化（2 次元モデルと 3 次元モデルの比較）

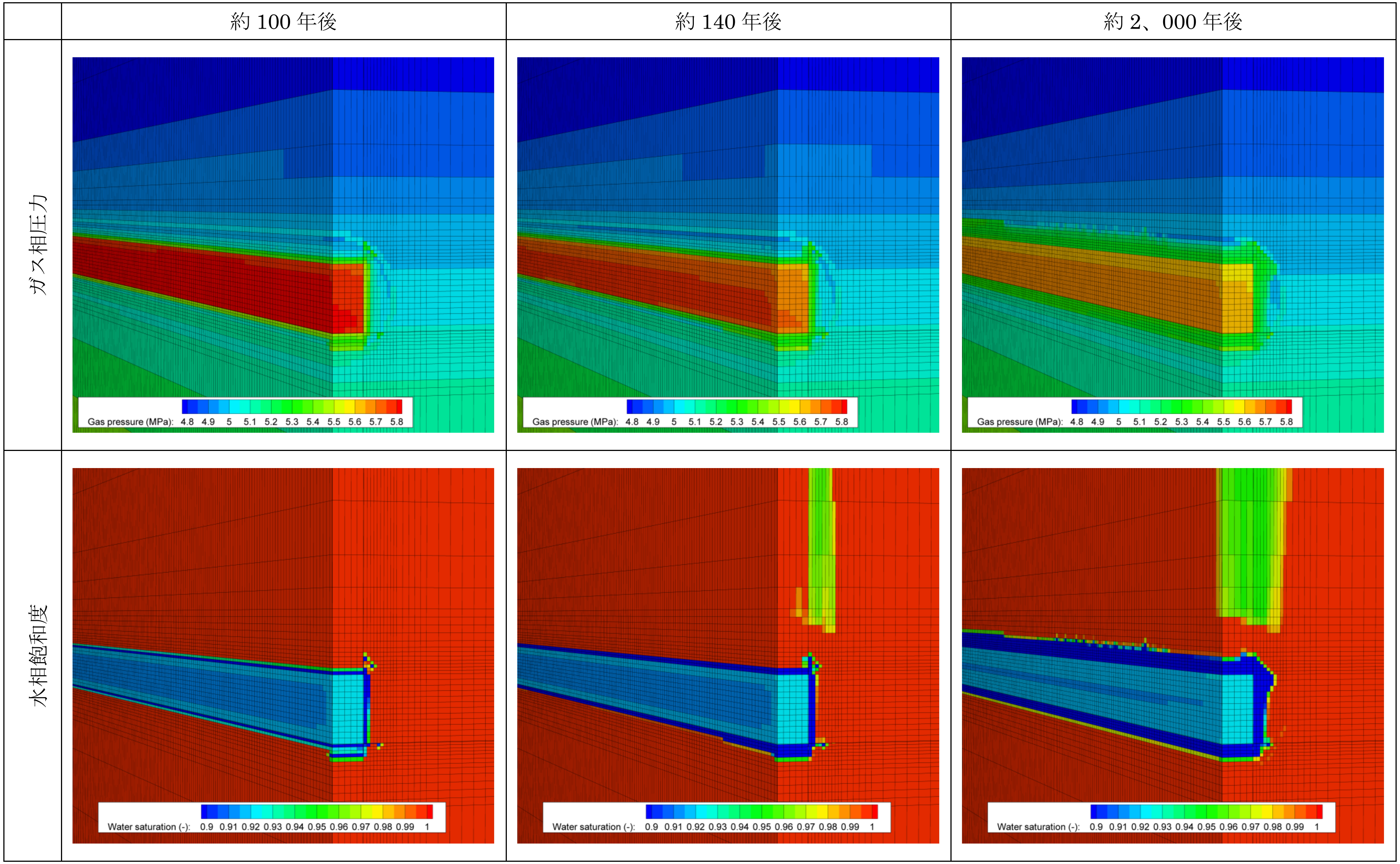


図 3.4.6-3　ガス相圧力と水相飽和度の分布

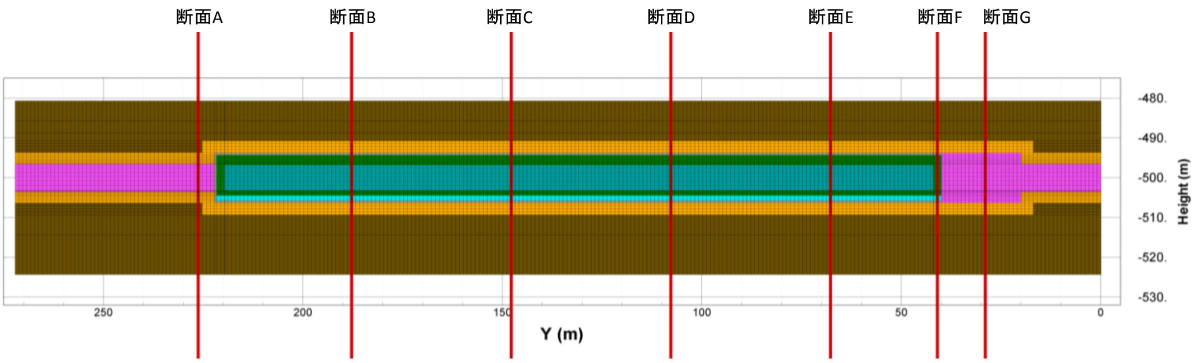


図 3.4.6-4　ガス相圧力と水相飽和度の分布を出力する断面位置図

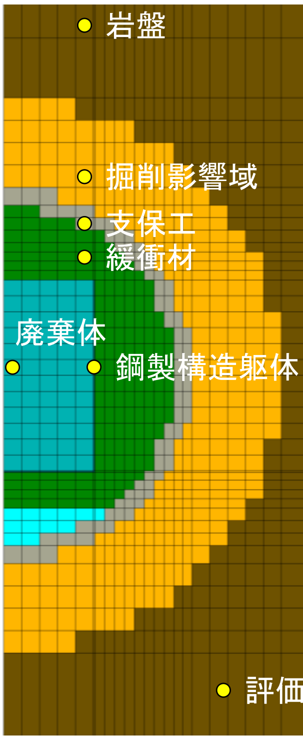


図 3.4.6-5　人工バリア材料毎のガス相圧力と水相飽和度の時間変化を出力する評価点位置図

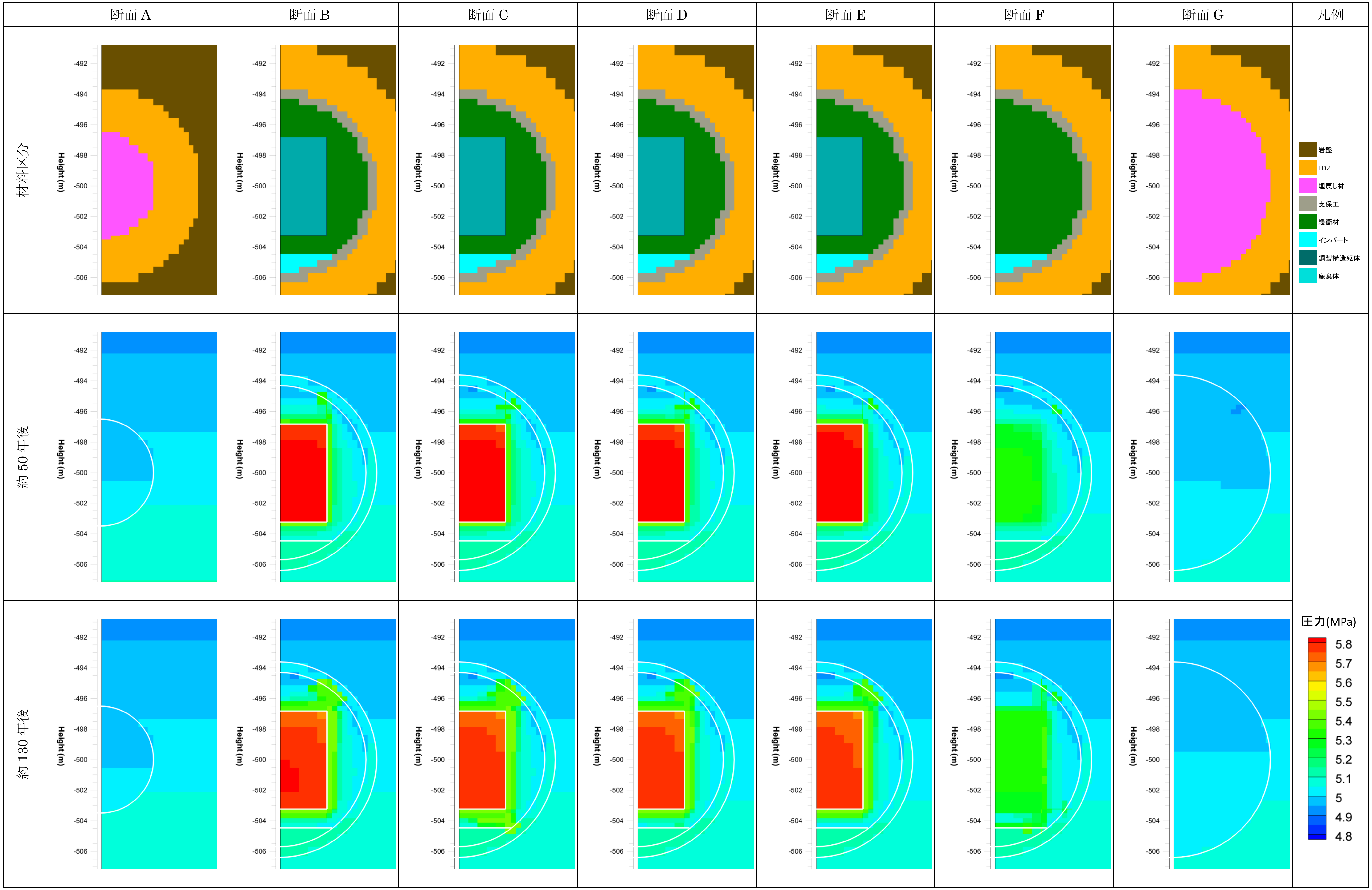


図 3.4.6-6　各断面位置におけるガス相圧力分布（1/2）

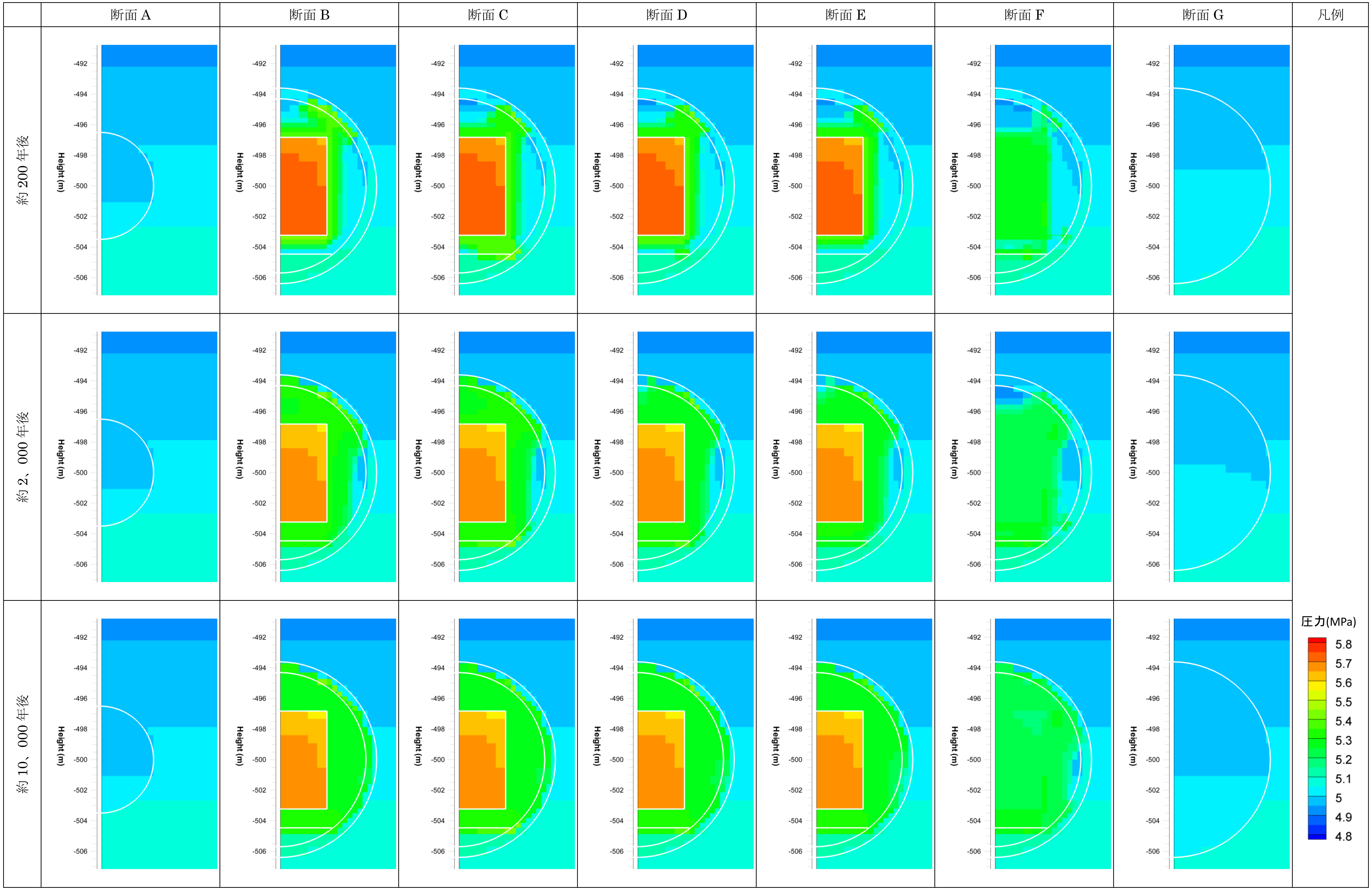


図 3.4.6-7　各断面位置におけるガス相圧力分布（2/2）

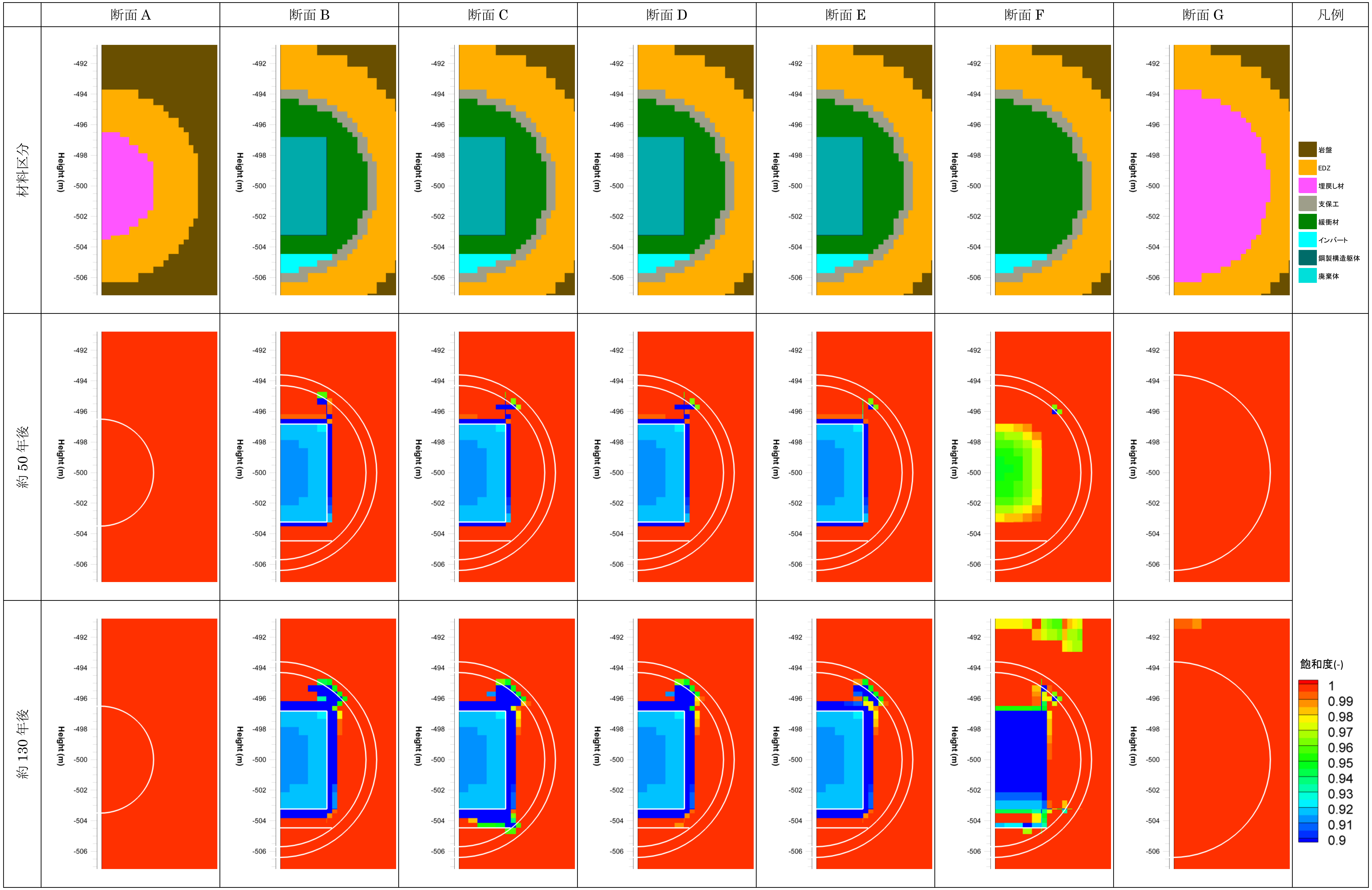


図 3.4.6-8　各断面位置における水相飽和度分布（1/2）

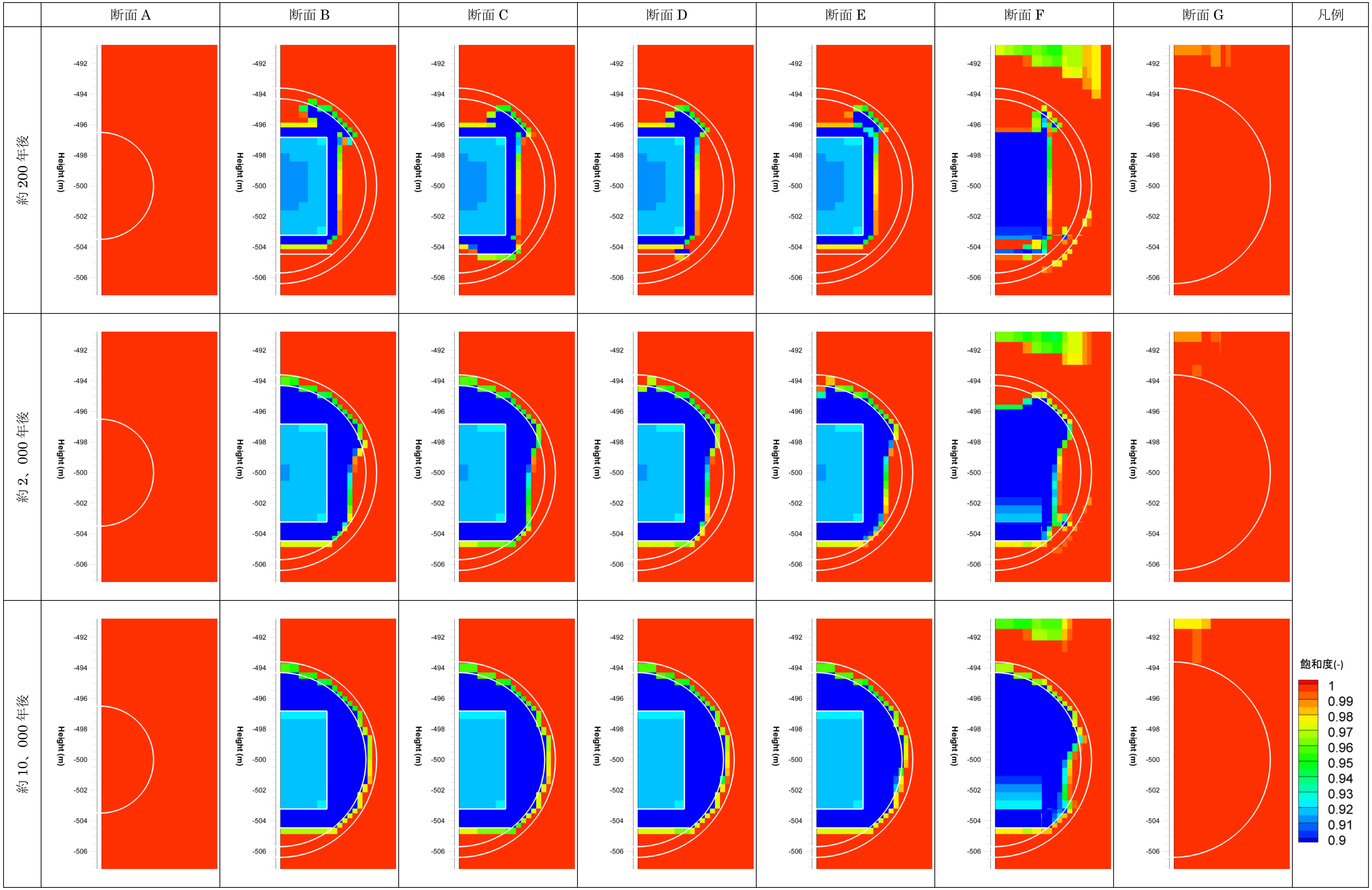


図 3.4.6-9　各断面位置における水相飽和度分布図（2/2）

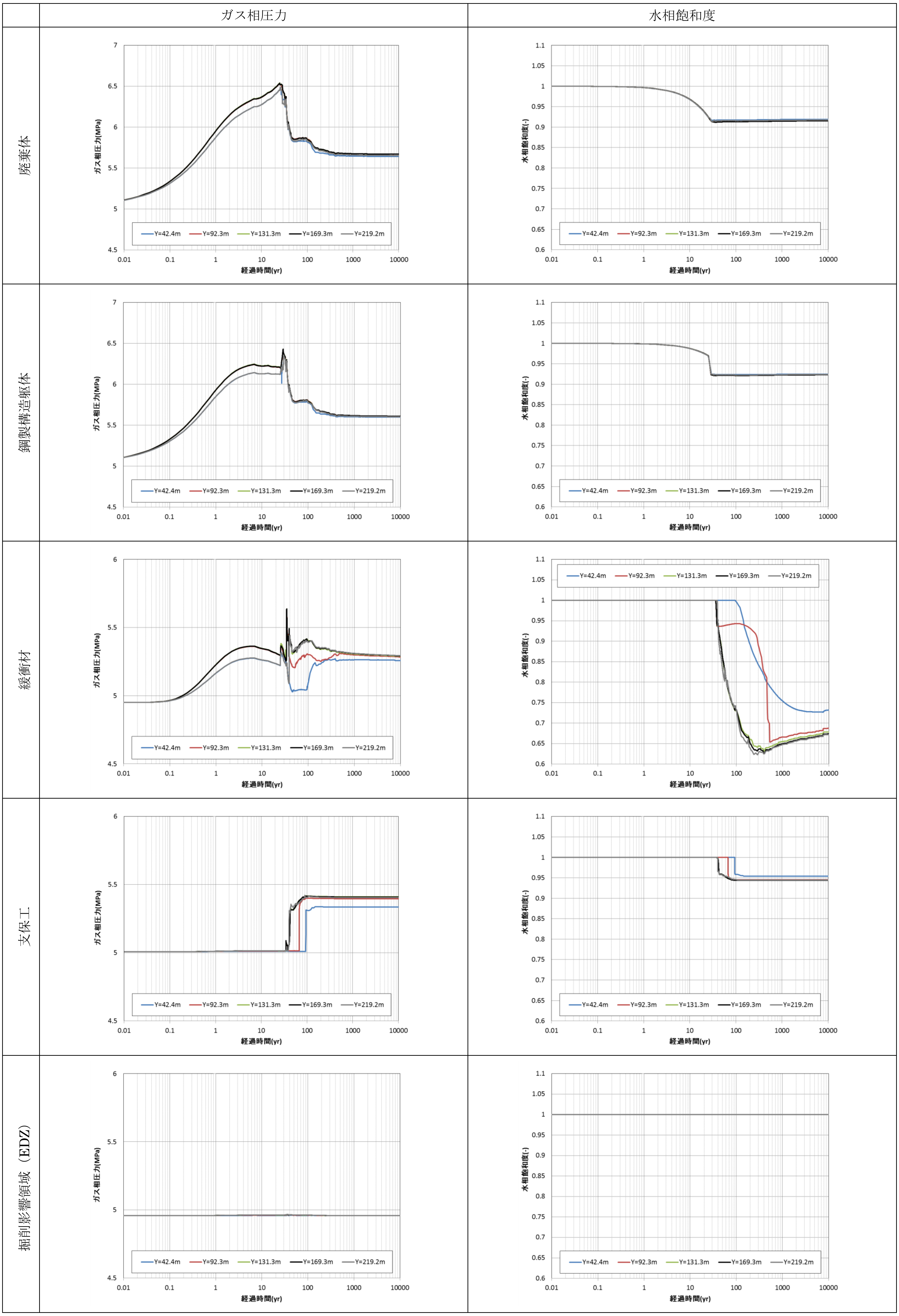


図 3.4.6-10　各部材内におけるガス相圧力及び水相飽和度の時間変化

3.5　まとめ

TRU 廃棄物処分施設の成立性・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て、平成 26 年度はこれまで（平成 19-25 年度の検討[1][3][4][5][6][7][8]）に整備したガス移行モデルの確証やデータベースの更新を行うとともに、高度化を図った解析ツールによるガス移行解析（ガス移行試験の予察解析等）を実施し、TRU 廃棄物処分システムの不確実性を考慮（解析格子モデルの次元性に着目）したガス移行挙動の評価を行った。

3.5.1　人工バリア中のガス移行挙動の現象理解

(1) ガス移行試験の予察解析

<u>水・ガス二相流解析コード（GETFLOWS）による検討</u>

- 「第 4 章　ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充」の中で実施した本年度のガス透気試験系を対象とし、ガス透気時期や排水量に着目した予察解析を実施した。
- 二相流パラメータには、既往検討で同定された 5 パターンの組合せを適用し、累積排水量やガス透気量の時間変化を予測した。
- 実測データ（累積排水量）を良く再現する予察解析結果に基づき、3 つの供試体で同時進行しているガス透気試験のうち、解体調査が行われている供試体 No.2（累積排水量の経時変化が定常化に至る傾向を示した供試体）の水飽和度の深度プロファイルと比較したところ、実測データは概ね予測されたデータと整合する結果となり、予察解析に用いたモデルの妥当性を示すことができた。
- 一方で、ガスの水相への溶解の影響を把握するために、ガス溶解を考慮した解析を別途実施し、①「ガス溶解の瞬時平衡状態を仮定したケース」、②「非平衡状態（ガスの水への溶解速度を考慮）を仮定したケース」の 2 パターンを実施した。
- 瞬時平衡状態を仮定したケースでは、供試体の下部で注入ガスの全量が水相に溶解し、濃度拡散のみで移行し、約 100 日以降は排水が停止、ガスも透気しない結果となった。上記の解体した供試体において、排水が途中から停止する傾向が認められた要因として、ガス溶解の影響である可能性を示唆された。
- さらに、ガス溶解を考慮した場合、二相流パラメータの違いによっても、排水が停止する時期は異なり、結果の取りまとめ時点（2015 年 3 月 31 日時点）でも排水が確認されている供試体 No.1 においても、今後排水が停止し、ガスが透気しない試験結果となる可能性が示唆された。

<u>力学連成解析コード（Code_Bright）による検討</u>

- 「第 4 章　ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充」の中で実施した本年度のガス透気試験系を対象とし、GETFLOWS では表現できないベントナイトの不飽和力学特性を考慮した予察解析を実施し、ガス移行特性のより詳細な把握を目的として GETFLOWS の予察解析結果との比較検討を行った。
- Code_Bright によるガス移行挙動の予察解析に際し、まず最初に注水飽和過程の再現解析

を実施しており、当該過程で同定された二相流パラメータをガス移行試験の予察解析に供した。

- 上記で同定したパラメータを用いた（ケース 1）ガス移行解析の予察解析を実施し、GETFLOWS の解析結果と比較した。GETFLOWS ではガス注入開始から 30 日後にポーラスメタル内の水が排水されると推定されたが、Code_Bright ではそれよりも早い 22.5 日後と算定された。これは、Code_Bright の予察解析ではポーラスメタルの体積に値する排水量が上部から排水された時点と仮定したため、供試体が圧密されることによる排水も含まれた結果となった。よって、両コードでの解析結果を比較解釈するためには、Code_Bright 解析結果における圧密による排水量を排除して考える必要性が示唆された。なお、ガス注入後の累積排水量の変化は GETFLOWS における FY2010 ケース③、FY2011_SG①及び FY2012_SG①と同等の計算結果となることが分かった。
- 一方で、ガス移行過程の二相流パラメータを GETFLOWS における FY2010 ケース②（供試体 No.2 の実験結果を比較的良く予察できたパラメータ）と同値とした予察解析（ケース 2）を別途実施した。
- 底面付近の平均有効応力が 0MPa になる時刻（供試体内にガスが浸入し、飽和度の低下と間隙圧の上昇にともなって、供試体である飽和圧縮ベントナイトが力学的に不安定と成り始め得る時刻）としては、ケース 1 が 80 日程度、ケース 2 が 50 日程度と算定することが出来た。
- 気相の相対浸透率が力学現象にどのような影響を与えるかを把握するため、ケース 2 の相対浸透率をケース 1 のものに変更して解析を実施した。その結果、底部の平均有効応力の低下は緩慢になる傾向を示した。よって、ガス移行時には気相の相対浸透率の設定が応力変化に影響を及ぼすことが示唆された。
- ケース 2 の解析結果において、ガス注入開始から 60 日後の解析結果の信頼性に問題が生じた。これは、上記の相対浸透率の影響もあるが、塑性化を定義する力学パラメータの設定も影響を及ぼしていると考えられる。そこで、力学パラメータの不確実性をできるだけ排除するため、対象とする材料の力学パラメータを取得する必要性が示唆された。なお、実施する試験は飽和ベントナイトの三軸試験と膨潤および圧密試験を対象とする。ただし、不飽和における力学パラメータについては別途実施している既往の実験結果（(平成 19-25 年度の検討成果[1][3][4][5][6][7][8]）を参照する。
- 実験結果との比較を行った結果、累積排水量の再現性、解体調査時の間隙率分布及び飽和度分布についてはケース 1 の解析結果が概ね実験を再現できていた。しかし、底面の応力についてはケース 2 の気相の相対浸透率をケース 1 に変更したケースが比較的に同様な応力変化の傾向を示すことが分かった。
- ケース 2 は GETFLOWS と同様の二相流パラメータを用いた予察解析であるが、累積排水量の経時変化は、60 日以降、ケース 1 とは異なる傾向を示した。これは、Code_Bright 二相流解析は力学影響も含めたパラメータセットとなっているが、GETFLOWS の二相流パラメータは力学影響が非考慮のものであるため、力学連成二相流解析に用いる場合はこれをそのままインプットして解析するのは不適切であり、修正が必要であることが分かった。また、高度な予察を行うためには、二相流パラメータが及ぼす力学影響（相関関係）を明

確にする必要性が示唆された。ただし、二相流パラメータの検証においては、実測データのフィッティング（実測挙動の再現）のみならず、ある程度の物理現象（力学的なメカニズム）と対比させて検討を進める必要があることが分かった。

(2) ガス発生モデリングの検討

- TRU 廃棄物処分施設内のガス発生に関する国内の既往知見の調査及び整理を実施した。
- 廃棄体からのガス発生に特化したモデル（T2GGM、SMOGG、MAGGAS）はいくつか存在するが、解析コードが公開されているものや、購入可能なものは現時点では存在しないことが分かった。
- 廃棄体周辺での流体ダイナミクス（周囲からの水の移流、廃棄体からの熱発生に伴う温度変化、水蒸気発生・拡散・凝縮、相対湿度変化、ガス発生等）に着目し、TRU 廃棄物処分のリファレンス概念のうち廃棄物グループ 2 の概念を対象とした 2 次元断面モデルによる THC 連成解析を実施した。
- 検討は希薄溶液系を前提とし、初期不飽和状態と飽和状態の 2 つを対象とし、廃棄体周辺のガス相圧力や水相飽和度、温度、水蒸気圧や各化学種濃度、ガスの流動方向の可視化を行った。
- 実際の処分場で想定される環境と同じ不飽和状態を仮定した場合には、初期段階において廃棄体に含まれる鉄の好気性腐食反応が起こり、水分量も飽和状態を想定した場合と比較して少なく、ガス発生量が小さくなる結果が得られた。しかし、約 20 年後以降は、好気性腐食反応による溶存酸素の消費と周囲岩盤からの再冠水による水分量の上昇によって、嫌気性腐食反応が支配的となり、飽和状態を想定した場合とほぼ同じガス発生量となる結果となることが分かった。
- 一連の検討の結果、今後の課題として、他の溶液系を考えた場合のガス発生挙動や他のガス発生機構の考慮が必要であることが分かった。

3.5.2 ガス移行データライブラリの拡充

- 平成 25 年度「ガス移行挙動解析ツールの高度化に係る検討」において、乾燥密度 1.36Mg/m^3 の 100%クニゲル V1 を用いた直径 60mm、高さ 200mm の大型供試体を対象とし、再冠水の確証解析で同定されたパラメータを追加登録してデータの拡充を図った。

3.5.3 TRU 廃棄物処分システムの不確実性を考慮したガス移行解析の評価

- TRU 廃棄物処分のリファレンス概念のうち廃棄物グループ 2 の概念を対象とした 3 次元モデルを構築し、次元性に着目したガス移行解析を実施した。
- モデル化範囲は、坑道の横断方向（図中の上下方向）には、鏡面対称性を前提とし、坑道中央から坑道離間距離の半分の距離までを設定し、縦断方向（図中の左右方向）は、廃棄体から十分に離れた距離として、処分坑道の端部までを設定した。深度方向は、地表面から深度 1000m までとした。

- 考慮する材料は、廃棄体、鋼製構造躯体（底部と側部を区別）、緩衝材、インバート、支保工、掘削影響域（EDZ）、岩盤、埋戻し材とし、人工バリア内を格子解像度 0.5m～1.0m 程度で表現し、総格子数は 579,700 となった。
- 廃棄体中央部におけるガス相圧力は、本検討の範囲内では 2 次元モデルと 3 次元モデルでほぼ同じ結果を示すことが分かった。
- 一方、坑外への累積押出し水量は 2 次元モデルと 3 次元モデルで、流路拡幅による圧力低下が起こる約 30 年後以降、徐々に差異が大きくなっていく現象は、主要なガス移行経路が 2 次元断面による解析とは異なるためであることが分かった。
- 対象とする処分システムを坑道横断方向の 2 次元断面モデルによってガス移行解析を行うことで、多くの場合問題ないと考えられるが、主要なガス移行経路が、2 次元断面モデルでは表現困難となる場合、その解析結果の取扱いには注意が必要となる。

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 11 年度～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 (2000 ～2007).

[2] 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).

[3] 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).

[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 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)

[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 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)

[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 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)

[7] 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― .

[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 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 ）

[9] 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.

[10] J. R. Appleyard 、 I. M. Cheshire and R. K. Pollard 、 1981. Special Techniques for Fully-Implicit Simulators、 Enhanced oil recovery、 pp.395-408.

[11] 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.

[12] van Genuchten, M.Th. ： A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44:892-898, 1980.

[13] 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.

[14] 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.
[15] UPC (Technical University of Catalonia) 、 CODE_BRIGHT User's Guide.
[16] S. Olivella、 A. Gens 、 J. Carrera and E. E. Alonso 、 1996. Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media 、 Engineering Computations 、 Vol.13 、 No.7 、 pp.87-112.
[17] E. E. Alonso 、 A. Gens and A. Josa 、 1990. A Constitutive model for partially saturated soils、 Géotechnique、 40 、 No.3.
[18] Roscoe, K. H. and Burland, J. B., 1998. On the Generalized Stress – Strain Behavior of „ Wet‟ Clay, Engineering Plasticity, Cambridge University Press, pp.535-609.
[19] 山本修一、 小峯秀雄、 2008. THM連成解析におけるベントナイトの膨潤特性の構成モデルに関する一考察、 第 63 回土木学会年次学術講演概要集、 pp.205-206.
[20] 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.
[21] 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.
[22] 金子昌章、 三浦律彦、 藤原愛、 山本正史、 2004.還元性環境での金属腐食に起因するガス発生量評価、 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター技術報告書 .
[23] 西村務、 和田隆太郎、 藤原和雄、 2003.地層処分場における金属腐食に伴う水素ガス発生量評価、 神戸製鋼技報、 Vol. 53 No. 3.
[24] P. Suckling 、 J. Avis 、 N. Calder、 P. Humphreys 、 F. King and、 R. Walsh 、 2012. T2GGM Version 3.1: Gas Generation and Transport Code 、 NWMO TR-2012-23.
[25] A. R. Hoch、 N. R. Smart 、 J. D. Wilson and B. Reddy 、 A Survey of Reactive Metal Corrosion Data for Use in the SMOGG Gas Generation Model 、 2010. Report to the NDA RWMD 、 Secro Assuarance 、 2010.
[26] A. R. Hoch、 S. Norris 、 B. T. Swift and eM.M. Askarieh、 2007. Comparison of Result from the MAGGAS and SMOGG Gas Generation Models 、 Report to the United Kingdom Nirex Ltd. 、 Secro Assuarance.
[27] G. Towler 、 A. Bond 、 2010. Investigation of Gas Generation and Resaturation Issues: Input to EC FORGE Project 、 NDA RWMD Report、 Quintessa.
[28] R. E. Streatfield 、 D. J. Hebditch 、 B. T. Swift 、 A. R. Hoch 、 M. Constable 、 2006. GasGeneration in Radioactive Wastes – MAGGAS Predictive Life Cycle Model 、 WM '06 Conference.
[29] 山本肇、 2005. 地下水－岩石反応を考慮した水理・物質移行解析―解析コード TOUGHREACT と CO2 地下貯留への適用―、 大成建設技術センター報 第 38 号 .
[30] David L. Parkhurst and C.A.J. Appelo 、 2013. Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3 、 U.S. Geological Survey.

[31] 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― .
[32] 鈴木英明、 中間茂雄、 藤田朝雄、 今井久、 九石正美、 2012. 熱－水－応力－化学連成解析による緩衝材の地球化学環境の変遷に着目したニアフィールド長期挙動評価の一例、原子力バックエンド研究、 Vol.19 No.2.
[33] D. Landolt、 A. Davenport 、 J. Payer 、 D. Shoesmith 、 2009. A Review of Materials and Corrosion Issues Regarding Canisters for Disposal of Spent Fuel and High-level Waste in Opalinus Clay、 Technical Report 09-02 、 National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste.
[34] Xu 、 T. 、 2009. Corrosion-induced gas generation in a nuclear waste repository: Reactive geochemistry and multiphase flow effects 、 LBNL Paper.
[35] 本田明、 井上邦博、 小畑政道、 1993. 腐食メカニズムに基づく炭素鋼オーバーパックの腐食モデルの開発 (1) 、 PNC TN8410 93-299.
[36] 核燃料サイクル開発機構、 電気事業連合会、 2000. TRU 廃棄物処分概念検討書 .
[37] 千々松正和、谷口航、熱・水・応力連成モデルを用いたニアフィールド解析評価（研究報告）、 JNC TN8400 00-014.

第 4 章　ベントナイト系材料のガス移行挙動に係る

データの拡充

4.1　目的

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

4.2　実施内容

平成 25 年度においては、同年度より新たに着手した「ガス移行連成挙動評価手法の開発」の検討の中で 5 カ年間（平成 25-29 年度）に亘る実施計画を策定しており、平成 26 年度は策定した実施計画に基づき、ガス移行挙動評価における課題解決に資するベントナイト系緩衝材材料の飽和供試体を用いた試験を実施することとした。

具体的には、飽和供試体の膨潤圧以下（ガスの大破過に至らない条件下）でのガス注入試験によって気液二相流特性データ（ガス有効浸透率等）を取得し、大破過を伴わない場合のベントナイト緩衝材材料のガス移行特性（二相流挙動に注視）を把握するとともに、底部緩衝材の候補とされている砂混合材料について、サクション制御可能な膨潤試験装置を用い、材料の飽和過程における膨潤変形特性を把握することを目的とする。一方で、処分施設内の異なる材料間や同一材料の内部にて生じる界面について、当該箇所が卓越したガス移行経路になることが想定されている。このような界面のガス移行特性の把握を目的として、模擬供試体によるガス移行試験計画を策定するとともに、界面を含む TRU 処分システムの構造を模擬したシステム試験の予備検討を実施した。

次項より、具体的な実施内容を示す。

4.2.1　ベントナイト緩衝材におけるガス移行挙動評価に係るガス注入試験

平成 19-24 年度の「ガス移行挙動の評価　材料試験データの取得」においては、ベントナイト緩衝材中のガス移行に係る特性評価を目的とした試験を行い、小型供試体（圧縮ベントナイト）を用いて実施した試験においては、圧縮ベントナイト（クニゲル V1）中における水とガスの透過性および力学特性に係るデータを取得した他、ダイレタンシーの作用による破過現象を確

※ 『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.

認し、大破過を伴うガス移行現象理解において一定の知見が得られた。

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

以上のようなガス移行試験で得られた知見を基盤に、平成 25 年度においては特にベントナイト緩衝材材料中の、大破過を伴わないガス移行現象の理解に資する試験計画及び試験準備を行った。

平成 26 年度は、昨年度に立てた試験計画に基づいたガス移行試験を実施した。

具体的には、供試体中に気液二相流のみが生じることを想定した低注入圧条件（ベントナイト供試体の平衡膨潤圧以下のガス注入圧）によるガス注入試験を実施し、表 4.2.1-1 に示すデータを取得・整理のうえ、取得目的の観点からガス移行挙動の評価を行うこととした。

図 4.2.1-1 に飽和供試体作製（注水試験）～ガス注入試験（ガス移行試験）の実施フローを示す。

表 4.2.1-1　ガス移行試験装置の構成および特徴

	項　目	取得データ	目　的	備　考
①	試験中のデータ取得	ガス注入圧の経時変化	ガス侵入圧・破過圧（生じた場合）の把握	二相流特性の把握
		ガス注入量の経時変化	透気特性の把握	
		水の排出量の経時変化	透水特性の把握	
②	試験終了後のデータ取得	供試体内の含水比分布（水分分布プロファイル）	水の押し出しによって進展したガス移行フロントの把握	供試体の解体調査により実施

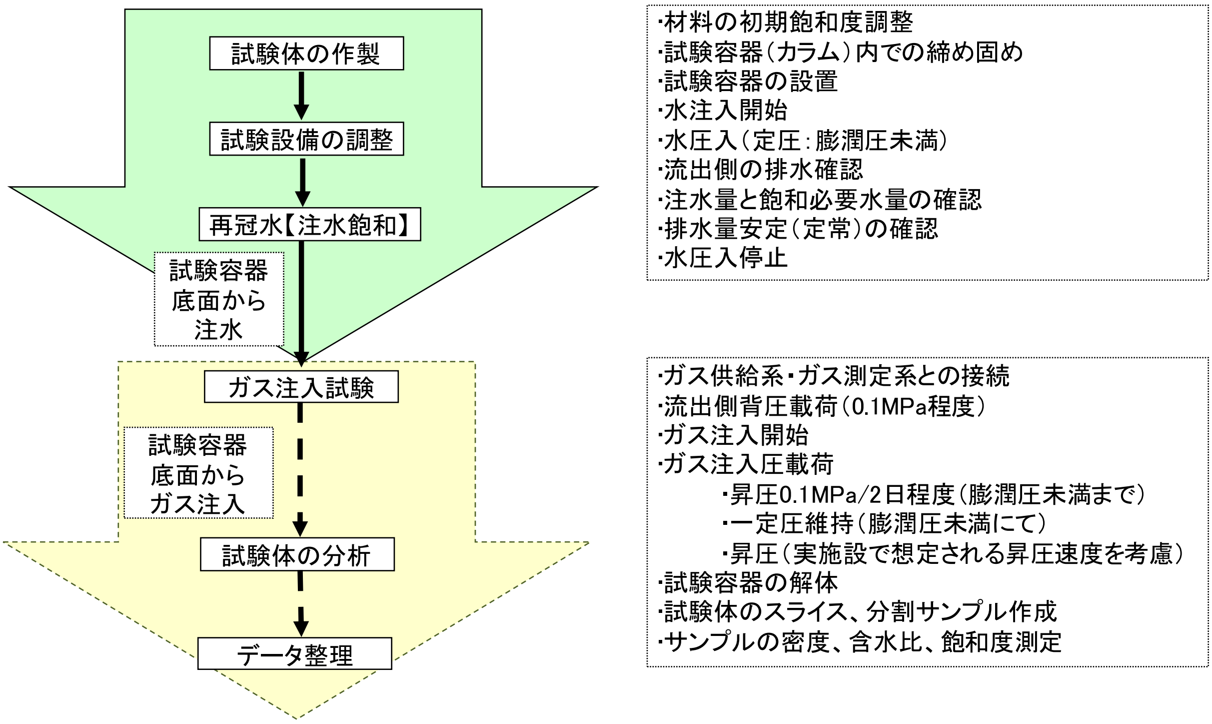


図 4.2.1-1　本検討の実施フロー

なお、試験の実施に際しては以下の点に着目し、適正に対処することとした。

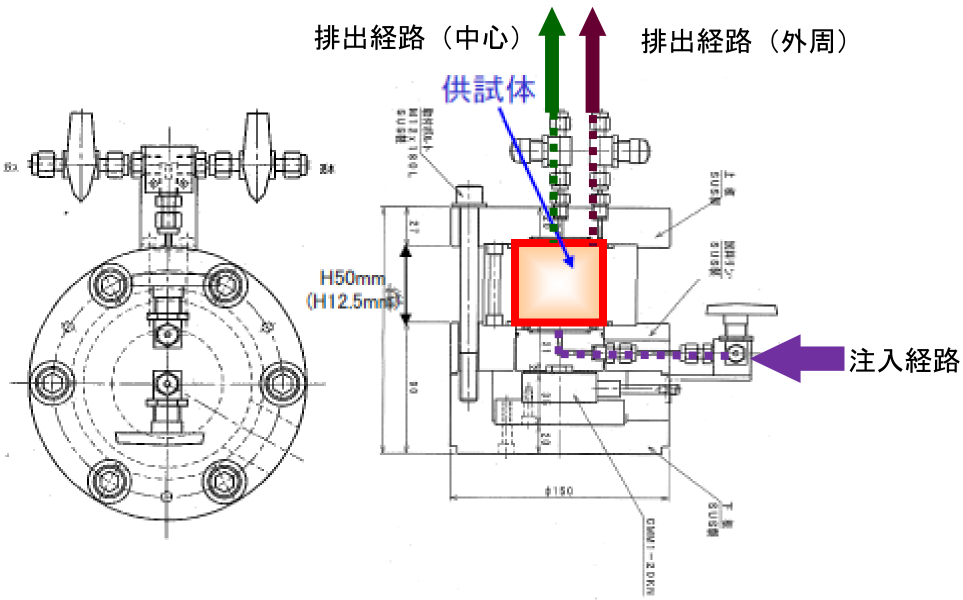
- ベントナイト供試体材料の配合（砂混合を考慮）
- 試験装置の注水経路からガス注入経路への切り替え時における適切な処置
- 注入圧の設定

試験装置は、平成 19-24 年度の検討に使用したガス移行挙動評価試験装置を用いる。表 4.2.1-2 に試験装置の構成および特徴を、図 4.2.1-2 に試験システムの概念図を示す。

さらに、当該試験においては、ベントナイト緩衝材材料の「気液二相流の発生によるガス移行現象」や「ガス移行フロントの存在確認」を目的とするが、試験終了時期や供試体の解体による内部の水分分布プロファイルの取得方法および時期については、試験状況を勘案しながら決定することとした。また、供試体内部の状況の確認が可能な状態に至らないと想定される場合は、実施内容を一部変更（解体の延期等）する計画とした。

表 4.2.1-2　試験装置の構成および特徴

構　成	特　徴
カラム試験容器	容器寸法: φ60mm、高さは最大 200mm まで対応可能 容器概要:体積ひずみ拘束型 材質:ステンレス(SUS316 他) 計測項目:全応力、ガス圧 補助装置:上端(排気、排水)側にて多孔質板をリングで仕切り、中央部と外周部との排気(ガス)、排水量の分離計測が可能
ガス注入装置	注入系統：2 最大注入圧：5.0MPa 計測項目：注入圧力、注入ガス量 備考:再冠水(注水)装置と機能が分離され、再冠水試験とガス移行試験を個別・同時に実施可能



（平面）　　　　（断面）

図 4.2.1-2　ベントナイト材料供試体を用いた試験システムの概念図

4.2.2　ガス移行挙動評価に係るシステム試験の実現に向けた検討

TRU 処分概念における人工バリアのガス移行挙動においては、ベントナイト緩衝材中に生じる気液二相流のほか、施工に起因して生じる界面や、構成材料との間に生じる界面が卓越したガス移行経路になることが懸念されている。

ここでは、界面も含めた人工バリア全体（複合構成材料中）のガス移行挙動の理解を目的とし、実規模人工バリアの 1/10～1/5 程度の模型を用いて行うガス移行挙動評価試験（システム試験）の実現に向けた検討を実施することとした。

(1) システム試験の策定に資する検討

上記システム試験の実施に際しては、詳細な試験計画の策定が必要である。

ここでは、システム試験計画の策定に資するため、これまでに実施された模型を用いたガス移行試験の実施事例のとりまとめを行うこととした。

なお、とりまとめの対象としては、以下のプロジェクト事例を想定した。

・GMT（NAGRA、GRIMSEL テストサイト）
・FEBEX（Full-scale Engineered Barriers Experiment：ENRESSA）
・国内における検討（処分システムを模擬したガス移行試験）
・その他（最近の事例/アジア諸国の動向他）

また、とりまとめ上の着目事項は以下の通りとした。

・試験の目的（HLW,　LLW,　TRU の種別など）
・設定した目的に対する達成度（システム試験の実施方針策定の参考の観点で）
・解析による検証/予測の実施状況
・TRU 処分システム概念（ガス移行シナリオ）との連関

(2) ベントナイト緩衝材内部及び他構成材料との界面におけるガス移行挙動評価試験の検討

システム試験の実施においては、TRU 処分概念の人工バリアにおいて懸念されるベントナイト緩衝材の施工/他構成材料界面を模擬した構造も検討する必要がある他、当該箇所のガス移行挙動を明らかとしておくことが重要である。

本検討では、システム試験に反映すべき施工/他構成材料界面におけるガス移行挙動の解明に資することを目的として、界面におけるガス移行問題・課題等について整理し、そのうえで供試体レベルにて実施する界面間のガス移行挙動評価に係る試験計画を立案することとした。

4.2.3　ベントナイト混合材料を用いた膨潤変形特性データの取得

TRU 廃棄物処分場のガス発生影響評価において、発生したガスの人工バリア中の移行挙動

を詳細に把握・理解するためには、処分システムの「気液二相流析」や「力学挙動を連成させた二相流解析」を行う必要があるが、ガス移行挙動（解析解）は人工バリアの材料特性（飽和・吸水過程の膨潤特性やガス移行・排水時の収縮特性）に大きく依存するため、解析に際しては高品質な材料特性データを取得しておくことが重要である。

本検討においては、力学連成二相流解析に際して必須であり、かつ第 2 次 TRU レポートにおいて人工バリアの底部緩衝材に想定されている、ベントナイト系材料（砂混合材料）の特性のうち、飽和・吸水過程、及びガス移行・排水過程における膨潤変形特性のサクション依存性に関するデータをサクション制御可能な膨潤試験装置を用いて取得し、上記の解析に資することとした。

4.3　検討結果

4.3.1　ベントナイト緩衝材におけるガス移行挙動評価に係るガス注入試験

(1) 供試体作製（再冠水試験結果）

1）試験条件

供試体概要を表 4.3.1-1 に示す。対象とする材料は、これまでの検討を踏襲してベントナイト（クニゲル V1）100%とした。

このうちベントナイト 100%供試体の条件を表 4.3.1-2 に示す。なお、TRU 処分施設の底部緩衝材の材料として想定される砂混合材料（ベントナイト+けい砂(30%)）についても、そのガス移行特性の把握が必要であることから実施計画のうちオプション案として設定したが、試験実施の是非については、ベントナイト 100%材料を対象とした試験の実施後に検討することとした。

表 4.3.1-1　供試体概要

供試体材料	供試体諸元
ベントナイト（クニゲル V1）　１００％	飽和供試体数：３（供試体 No.1～3）
ベントナイト+けい砂(30%)	上記試験後に、実施の是非について検討予定

表 4.3.1-2　ベントナイト 100%供試体の条件

試料の状態	乱した	土粒子の密度　ρ_s　g/cm^3	2.700
供試体の作製	密度調整	作製圧縮速度	1mm/min
平均直径	D　cm	6.00	
平均高さ	H　cm	2.50	
断面積	A　cm^2	28.27	
体積	V　cm^3	70.69	
含水比	w　%	32.86	
質量	m　g	127.72	
湿潤密度	ρ_t　g/cm^3	1.807	
乾燥密度	ρ_d　g/cm^3	1.360	
間隙比（間隙率）	e（n）	0.985（0.503）	
飽和度	Sr　%	90.0	
飽和含水比	w_{sat}　%	36.49	
飽和密度	ρ_{sat}　g/cm^3	1.856	

2）供試体の圧縮成形結果

図 4.3.1-1～図 4.3.1-3 に、作製した供試体（No.1～No.3）の圧縮成形結果について示す。

供試体 No.1～No.3(共にφ6cm×h2.5cm)は、事前に含水比調製したベントナイト材料を用い、表 4.3.1-2 に示す通り初期乾燥密度 1.36 Mg/m^3、初期飽和度 90%となるよう、２層に分け、圧縮成形によって作製した。

圧縮成形時の圧縮速度は 1mm/min であり、310~420kN/m^2 の圧縮荷重で目標密度(ρ=1.36g/cm^3)に達した。

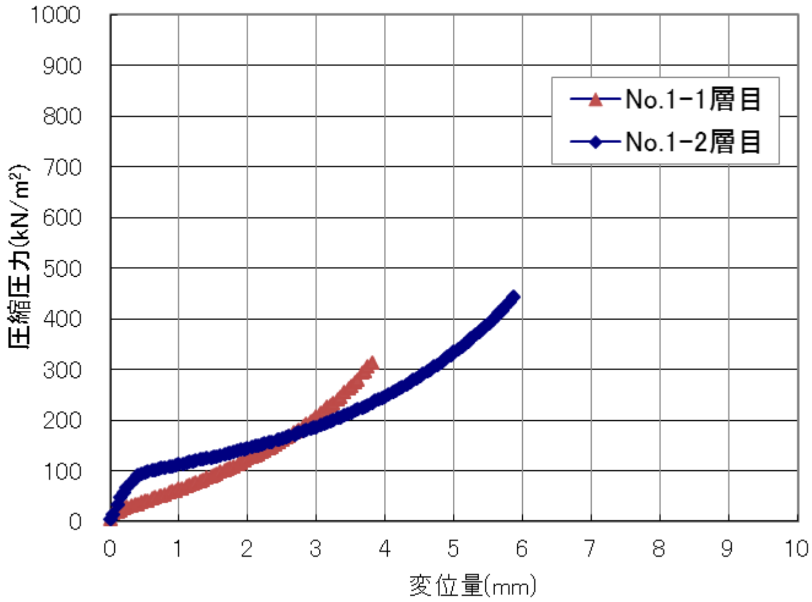


図 4.3.1-1　供試体 No.1 の圧縮成形応力

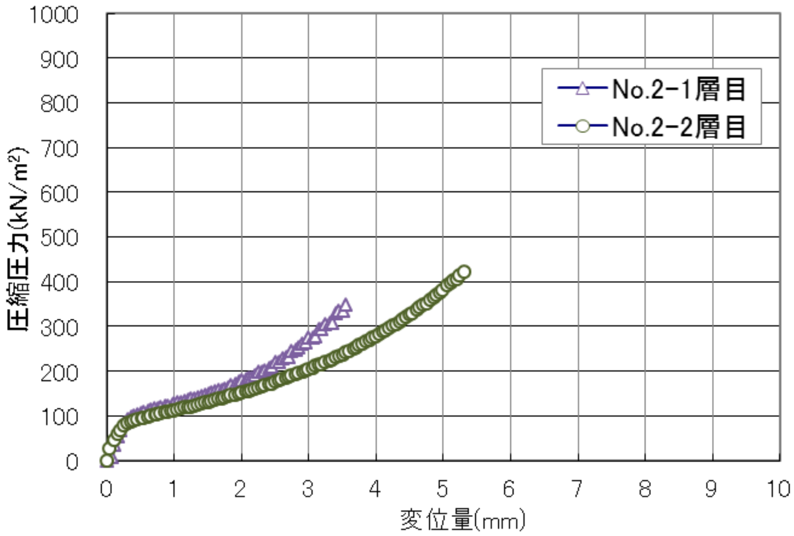


図 4.3.1-2　供試体 No.2 の圧縮整形応力

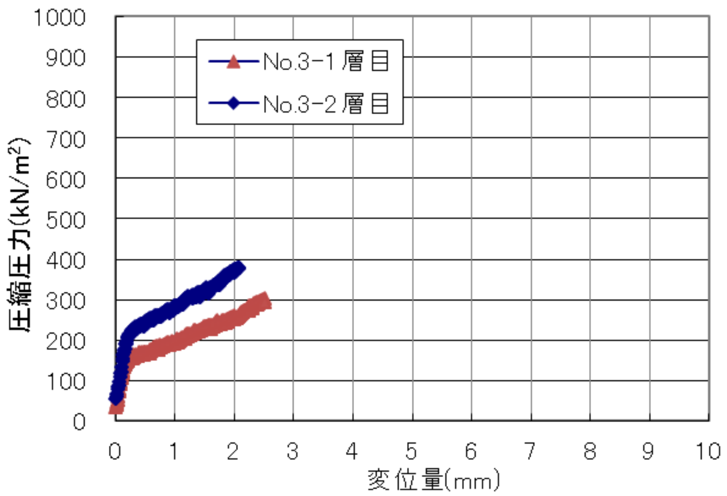


図 4.3.1-3　供試体 No.3 の圧縮整形応力

3）試験概要

作製した供試体（No.1～No.3）の試験過程の概要を表 4.3.1-3 に示す。

なお、供試体 No.3 については注水飽和を継続中（2015.3.31 時点）であるが、次年度以降に供試体の飽和完了が確認出来次第、ガス注入フェーズに移行する予定である。

表 4.3.1-3　試験過程の概要

供試体 No.		No.1	No.2	No.3
注水飽和	注水開始	2014 年 5 月 20 日		2014 年 9 月 2 日
	排水確認	2014 年 6 月 30 日(注水 41 日目)		2014 年 10 月 10 日 (注水 38 日目)
	排水量計測開始	2014 年 7 月 1 日(注水 42 日目)		2014 年 11 月 26 日
	飽和完了	2014 年 8 月 27 日 (注水 99 日目)		継続中
ガス注入	ﾊﾞｯｸﾌﾟﾚｯｼｬｰ載荷	同　上		
	ガス注入開始	2014 年 8 月 28 日		
	有効ガス圧 0.3MPa	2014 年 9 月 1 日（ガス注入開始 4 日目）		
	ガス注入状況	継続中	2015 年 1 月 19 日停止（ガス注入 144 日間）	
解体	供試体解体		2015 年 1 月 19 日	

4）供試体の注水飽和過程

作製した供試体（No.1～No.3）の注水飽和過程の結果について示す。

注水圧は、既往に試験方法に準じて膨潤圧より小さい 200kN/m^2 とした。

図 4.3.1-6 に、注水圧と膨潤圧の経時変化を示す。膨潤圧は、供試体底面で計測している底面反力より求めた底面応力より注水圧を減じて求めた。膨潤圧は、飽和終了時には、342kN/m^2、387kN/m^2 であった。

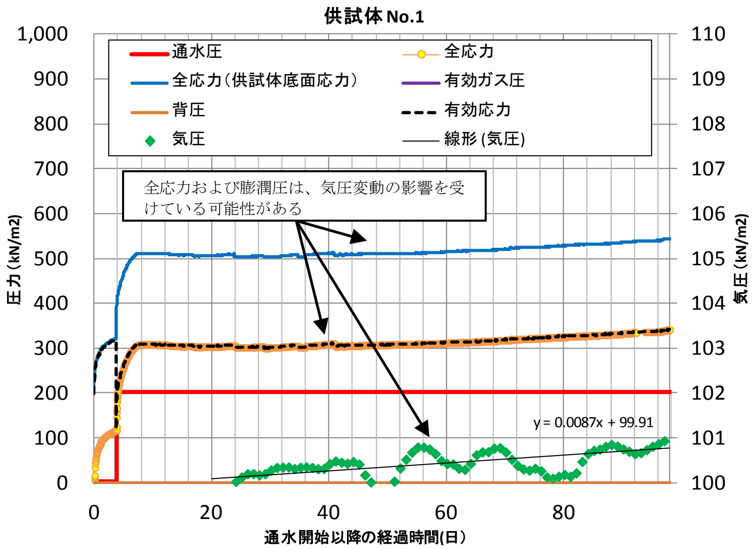


図 4.3.1-4　注水圧と膨潤圧の経時変化（供試体 No.1）

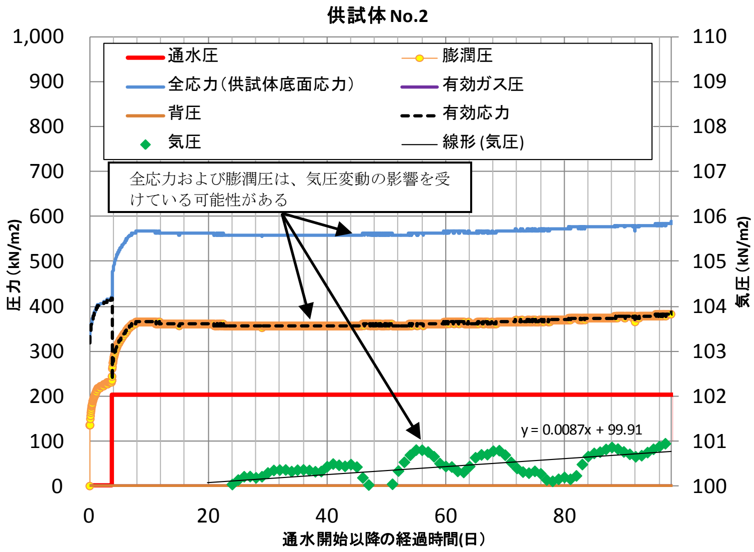


図 4.3.1-5　注水圧と膨潤圧の経時変化（供試体 No.2）

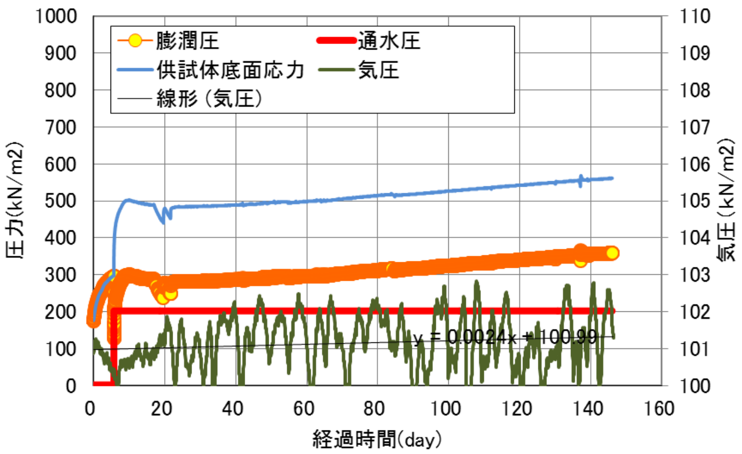


図 4.3.1-6　注水圧と膨潤圧の経時変化（供試体 No.3）

図 4.3.1-8 に、注水量の経時変化を示した。供試体 No.1～No.3 ともほぼ同様の注水量変化を示している。注水開始後 8 日から 12 日程度で計算上の供試体飽和に必要な注水量に達し、各々注水開始後 41、41、38 日日目には排水側ポーラスメタル上面での排水を確認した。

- 供試体体積　　　　　　　：70.69 cm^3
- 供試体飽和に必要な水量：　3.49 cm^3
- ポーラスメタル間隙量　：　3.57 cm^3
- ポーラスメタル上面で排水が確認できるための水量：3.49＋3.57＝7.06 cm^3

排水側ポーラスメタル上面での排水確認後（42 日後）、排水経路を水で満たし、排水量の経時変化を計測し、注水量と排水量の確認を行った。図 4.3.1-11 には注水量・排水量増分の経時変化を示しているが、排水確認以降は注水量≒排水量となっており、供試体の飽和が間接的に確認できる。表 4.3.1-4 には注水量速度から求めた透水係数を示した。透水係数の計算結果は 5.5×10^{-13}、4.3×10^{-13} で m/sec で、既往の透水係数の値とほぼ合致している。なお、注水飽和過程は注水圧一定のため、「定水位透水試験」と同等の条件として注水量速度から透水係数を計算している。

注水過程を 99 日目にて注水を終了し、引き続きガス注入過程を開始した。

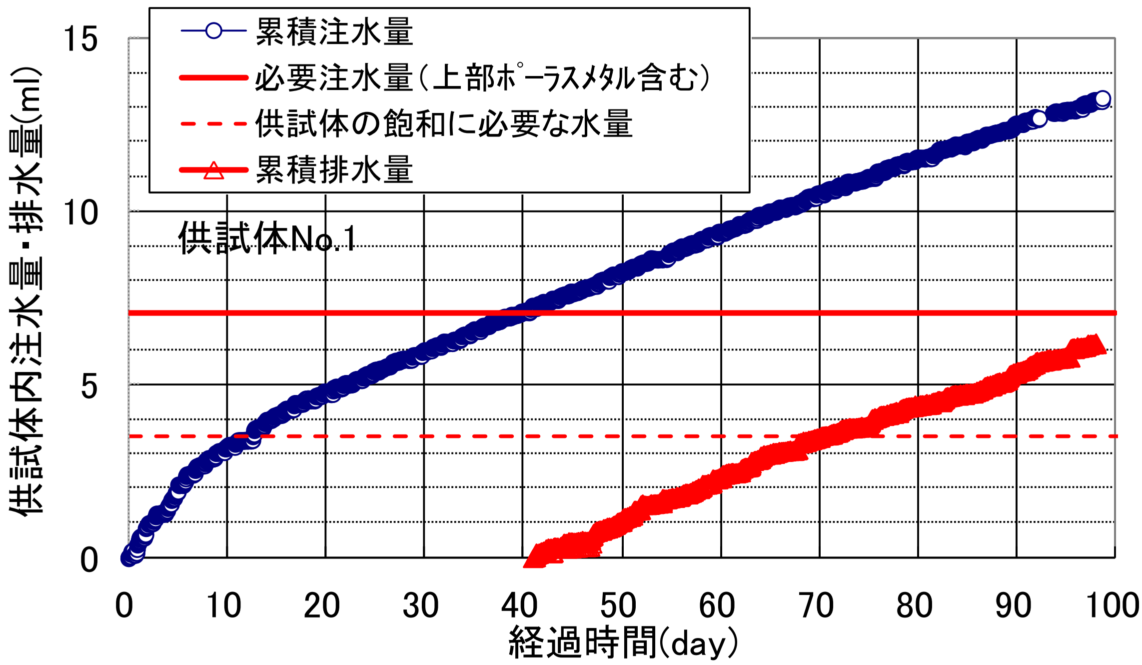


図 4.3.1-7　注水量の経時変化（供試体 No.1）

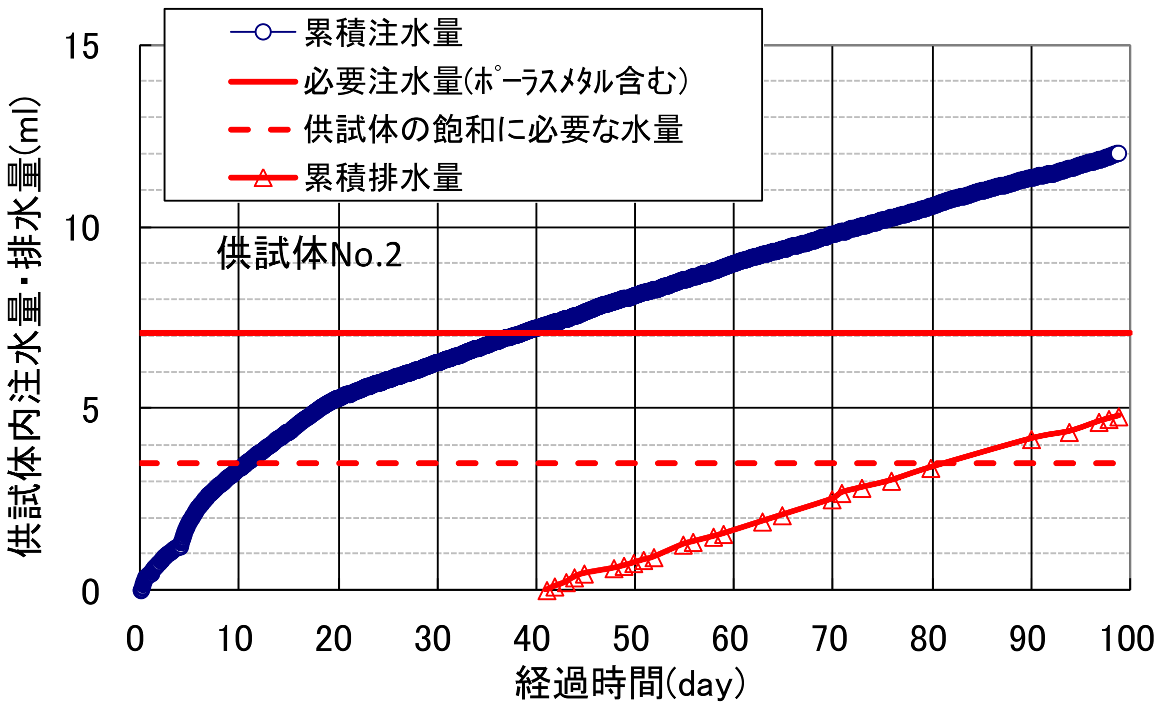


図 4.3.1-8　注水量の経時変化（供試体 No.2）

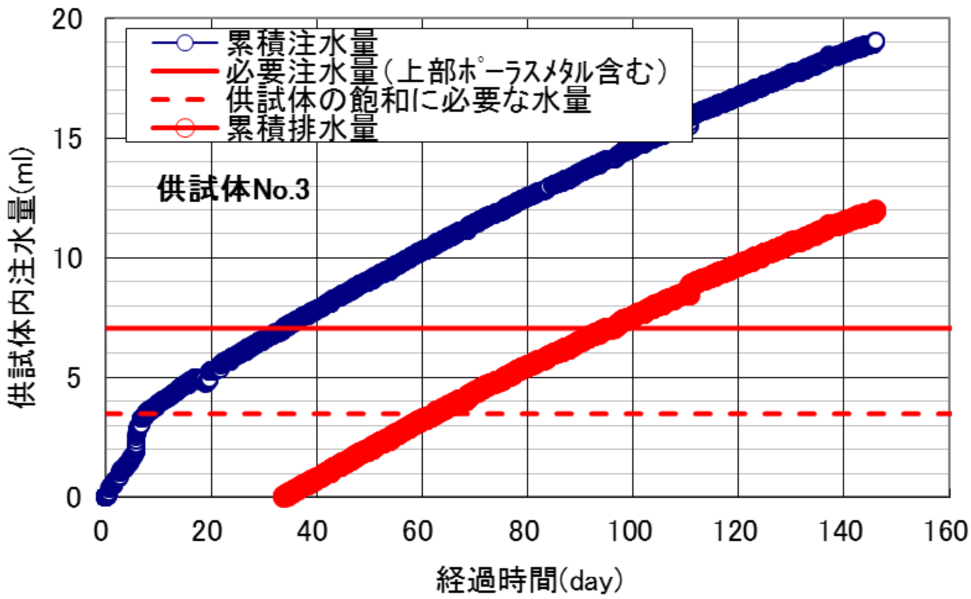


図 4.3.1-9 注水量の経時変化（供試体 No.3）

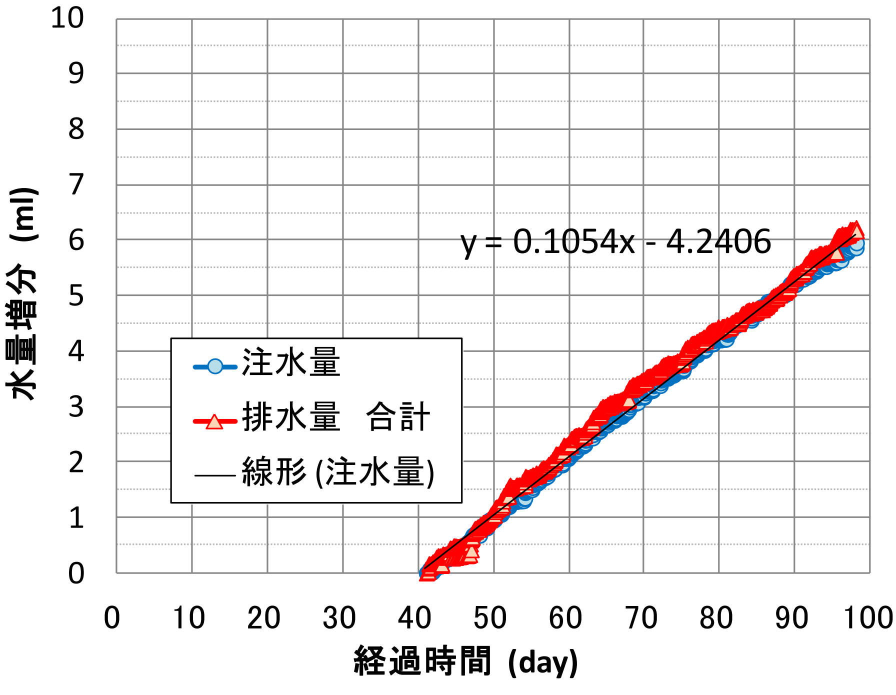


図 4.3.1-10 注水量、排水量の比較（供試体 No.1）

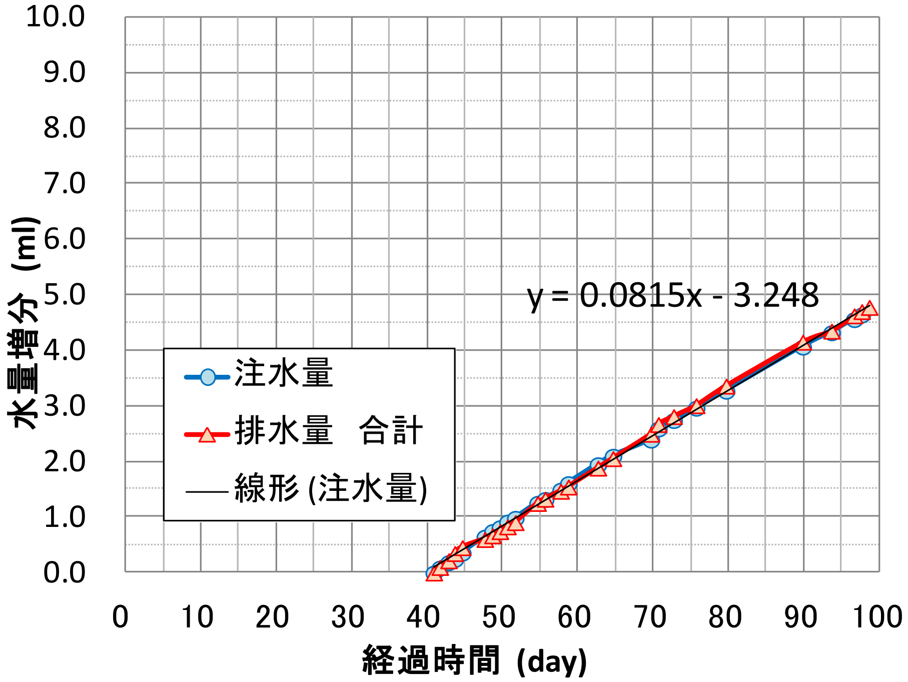


図 4.3.1-11　注水量、排水量の比較（供試体 No.2）

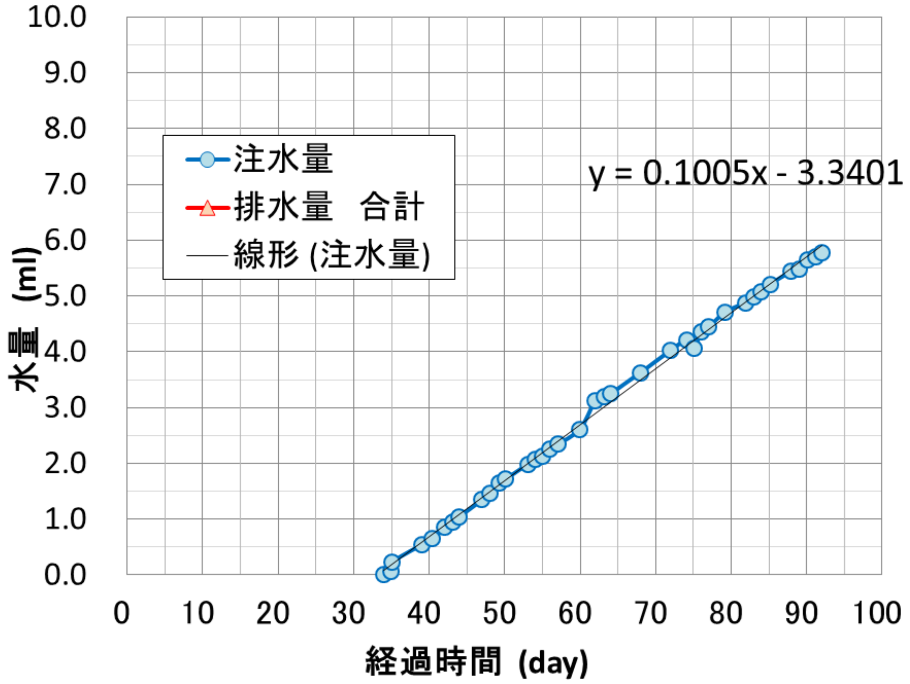


図 4.3.1-12　注水量（供試体 No.3）

表 4.3.1-4　飽和後定常状態における注水量から求めた透水係数

供試体 No.		No.1	No.2	No.3
断面積	cm^2	28.27	28.27	28.27
供試体厚さ	cm	2.5	2.5	2.5
注水圧	MPa	0.2	0.2	0.2
透水量	cm^3/day	0.1054	0.0815	0.1005
透水係数	m/sec	5.5×10^{-13}	4.3×10^{-13}	5.2×10^{-13}
		平均値＝5.0×10^{-13}		
絶対浸透率（透水係数の平均値より）	m^2	4.3×10^{-20}		
膨潤圧	kN/m^2	約 300（気圧変動考慮無） 約 350（気圧変動考慮有）	約 350（気圧変動考慮無） 約 400（気圧影響考慮有）	

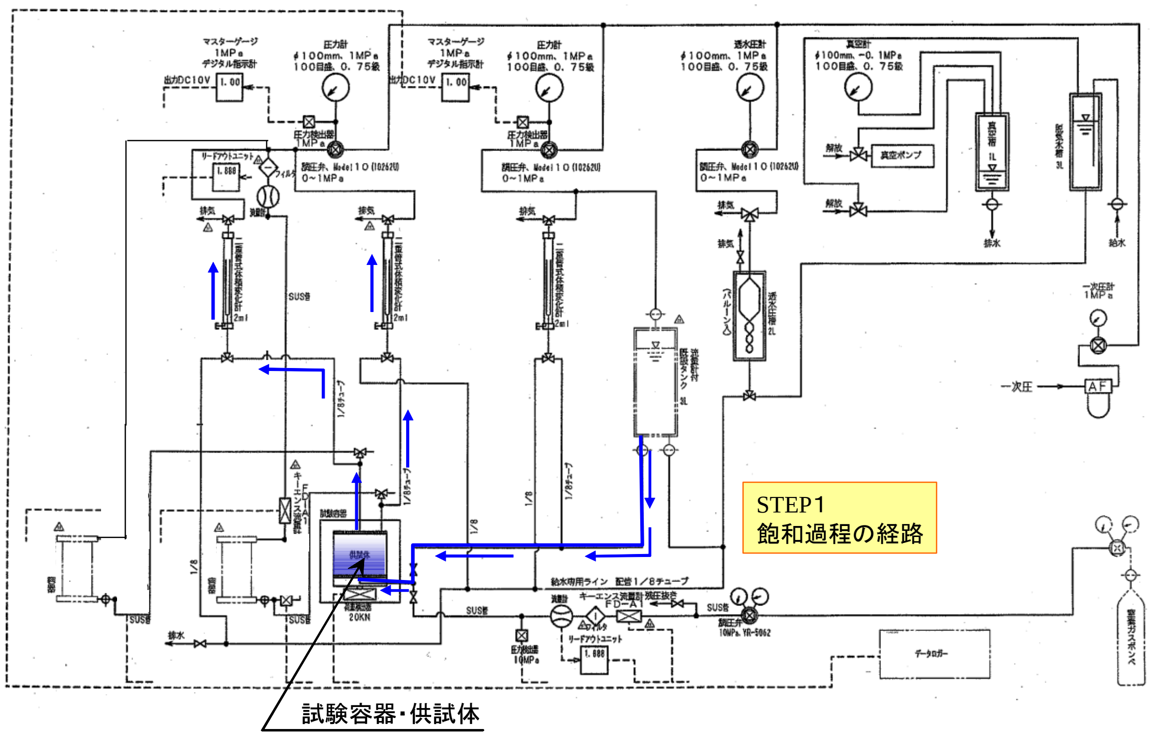


図 4.3.1-13　注水飽和過程の試験装置全体系統図

(2) ガス移行試験結果

1) 試験計画

ガス移行試験計画の概要を図 4.3.1-14 に示す。

本検討では、飽和供試体の膨潤圧以下（ガスの大破過に至らない条件下）でのガス注入試験によって気液二相流特性データ（ガス有効浸透率等）を取得し、大破過を伴わない場合のベントナイト緩衝材材料のガス移行特性（二相流挙動に注視）を把握することを目的としている。

また、表 4.3.1-5 には本検討で取得するデータと取得目的を示す。

具体的には、一定ガス圧条件下でのガス注入試験を一定期間継続し、当該条件下でガス移行がある程度進展したと思われる時期（全 3 回の観測ポイント）を取得データの解釈によって判断する。

各観測ポイントでは、全 3 体の供試体から 1 体を選定のうえガス注入試験を終了し、解体調査（供試体の含水比分布調査）と取得データの解釈によって各観測ポイントでのガス移行状況を推測する。

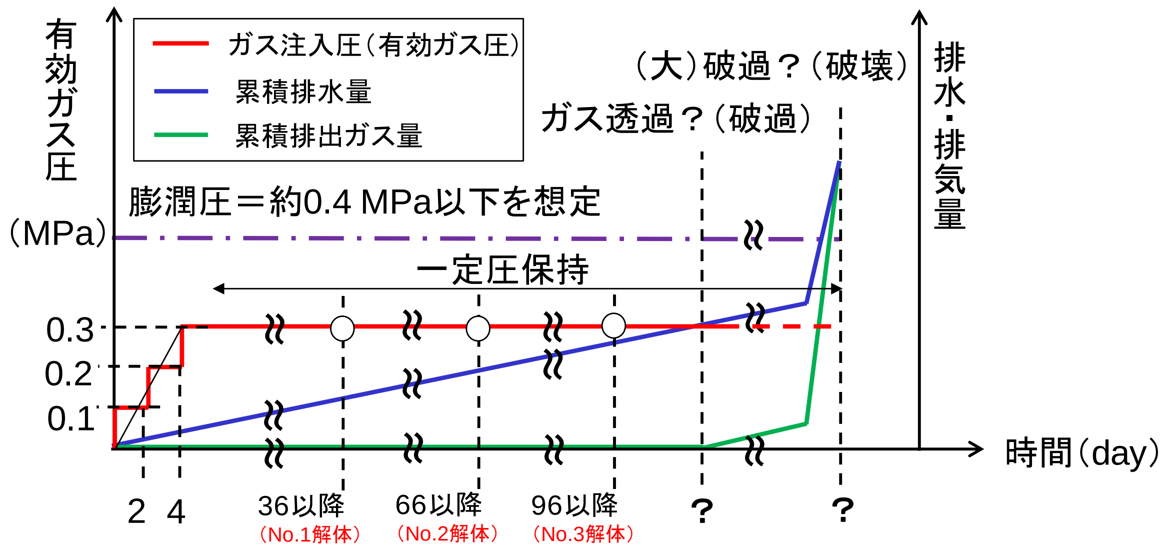


図 4.3.1-14　ガス注入試験および解体調査計画の概要

表 4.3.1-5　ガス移行試験で取得するデータと取得目的

	項　目	取得データ	目　的	備　考
①	試験中のデータ取得	ガス注入圧の経時変化	ガス侵入圧・破過圧（生じた場合）の把握	二相流特性の把握
		ガス注入量の経時変化	透気特性の把握	
		水の排出量の経時変化	透水特性の把握	
②	試験終了後のデータ取得	供試体内の含水比分布（水分分布プロファイル）	水の押し出しによって進展したガス移行フロントの把握	供試体の解体調査により実施
		供試体内の乾燥密度分布	ガス移行に伴う、変形挙動（力学的影響）の把握	

2) 試験概況

３体作製した供試体のうち、No.1 および No.2 の試験過程の概要を表 4.3.1-6 に示す。
また、表 4.3.1-7 にガス注入開始時の主な作業工程を示す。

表 4.3.1-6 試験概要

<table>
<tr><th colspan="2">供試体 No.</th><th>No.1</th><th>No.2</th><th>No.3</th></tr>
<tr><td rowspan="4">注 水
飽和</td><td>注水開始</td><td colspan="2">2014 年 5 月 20 日</td><td>2014 年 9 月 2 日</td></tr>
<tr><td>排水確認</td><td colspan="2">2014 年 6 月 30 日(注水 41 日目)</td><td>2014 年 10 月 10 日
(注水 38 日目)</td></tr>
<tr><td>排水量計測開始</td><td colspan="2">2014 年 7 月 1 日(注水 42 日目)</td><td>2014 年 11 月 26 日</td></tr>
<tr><td>飽和完了</td><td colspan="2">2014 年 8 月 27 日(注水 99 日目)</td><td>継続中</td></tr>
<tr><td rowspan="3">ガ ス
注入</td><td>ﾊﾞｯｸﾌﾟﾚｯｼｬｰ載荷</td><td colspan="2">同 上</td><td></td></tr>
<tr><td>ガス注入開始</td><td colspan="2">2014 年 8 月 28 日(ガス中入開始)
順次昇圧
2014 年 9 月 1 日（有効ガス圧 0.3MPa、ガス注入開始 4 日目）</td><td></td></tr>
<tr><td>ガス注入状況</td><td>継続中</td><td>2015 年 1 月 19 日停止（ガス注入 144 日間）</td><td></td></tr>
<tr><td>解体</td><td>供試体解体</td><td></td><td>2015 年 1 月 19 日</td><td></td></tr>
</table>

表 4.3.1-7 ガス注入過程の詳細

<table>
<tr><th>日時</th><th>作業詳細</th></tr>
<tr><td>2014/8/27 9:00
2014/8/27 10:00
2014/8/27 10:30</td><td>通水圧を 0.2MPa から 0.1MPa に低下させる
排水側から 0.1MPa のバックプレッシャーをかける
注入側のバルブを閉じて 24 時間放置</td></tr>
<tr><td>2014/8/28 9:00
2014/8/28 9:30</td><td>注入ガス圧を 0.2MPa に設定してスタンバイ(バルブ閉じている)
注入側のバルブを開けて透気開始</td></tr>
<tr><td>2014/8/30 9:30</td><td>注入ガス圧を 0.3MPa（有効ガス圧 0.2MPa)に上昇させる</td></tr>
<tr><td>2014/9/1 9:30</td><td>注入ガス圧を 0.4MPa(有効ガス圧 0.3MPa)に上昇させる</td></tr>
</table>

3) 供試体へのガス注入過程

図 4.3.1-15 に、供試体へのガス注入過程における試験装置の全体系統図を示す。

供試体からの排出流体については、供試体中央（青→）および供試体側方（赤→）の２系統からの検知・流量等の測定であり、各排出部位に対応できる構成としている。

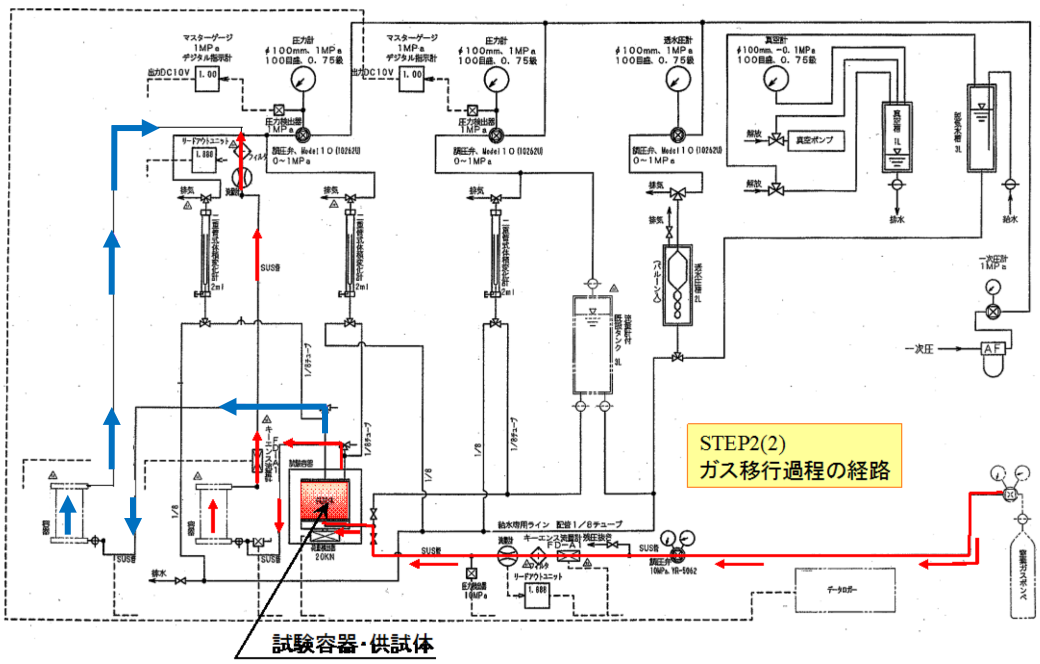


図 4.3.1-15　ガス注入過程の試験装置全体系統図

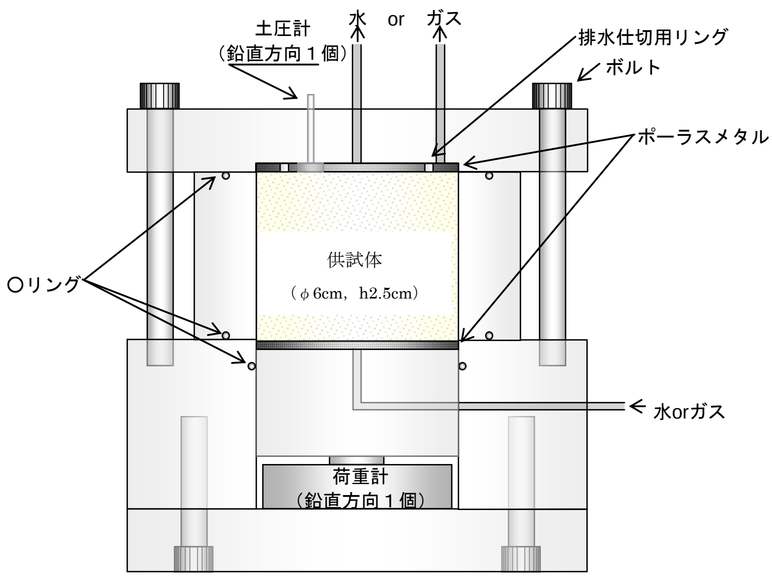


図 4.3.1-16　供試体容器・供試体部の拡大図（概念図）

３体作製した供試体のうち、ガス注入フェーズに移行している No.1 および No.2 の状況について図 4.3.1-17 および図 4.3.1-18 に示す。

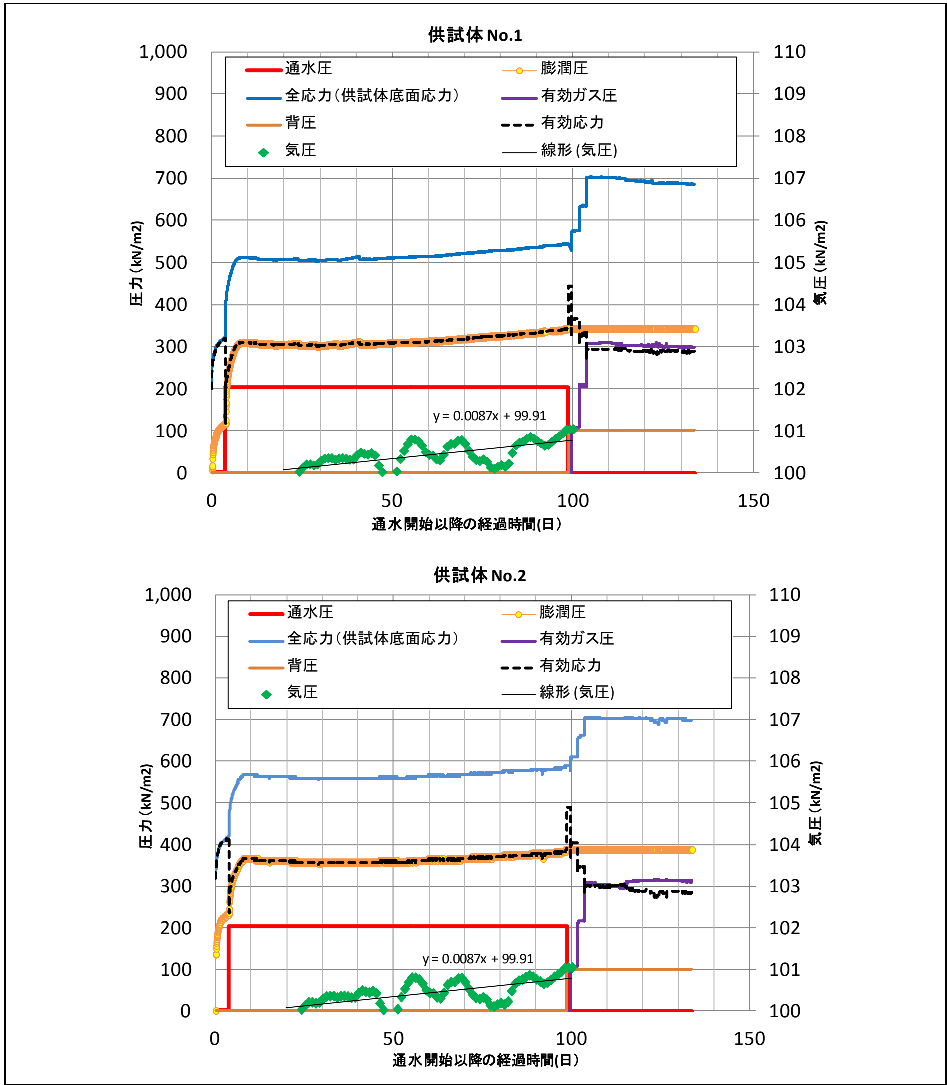


図 4.3.1-17　供試体 No.1 および No.2 の概況（試験開始以降）

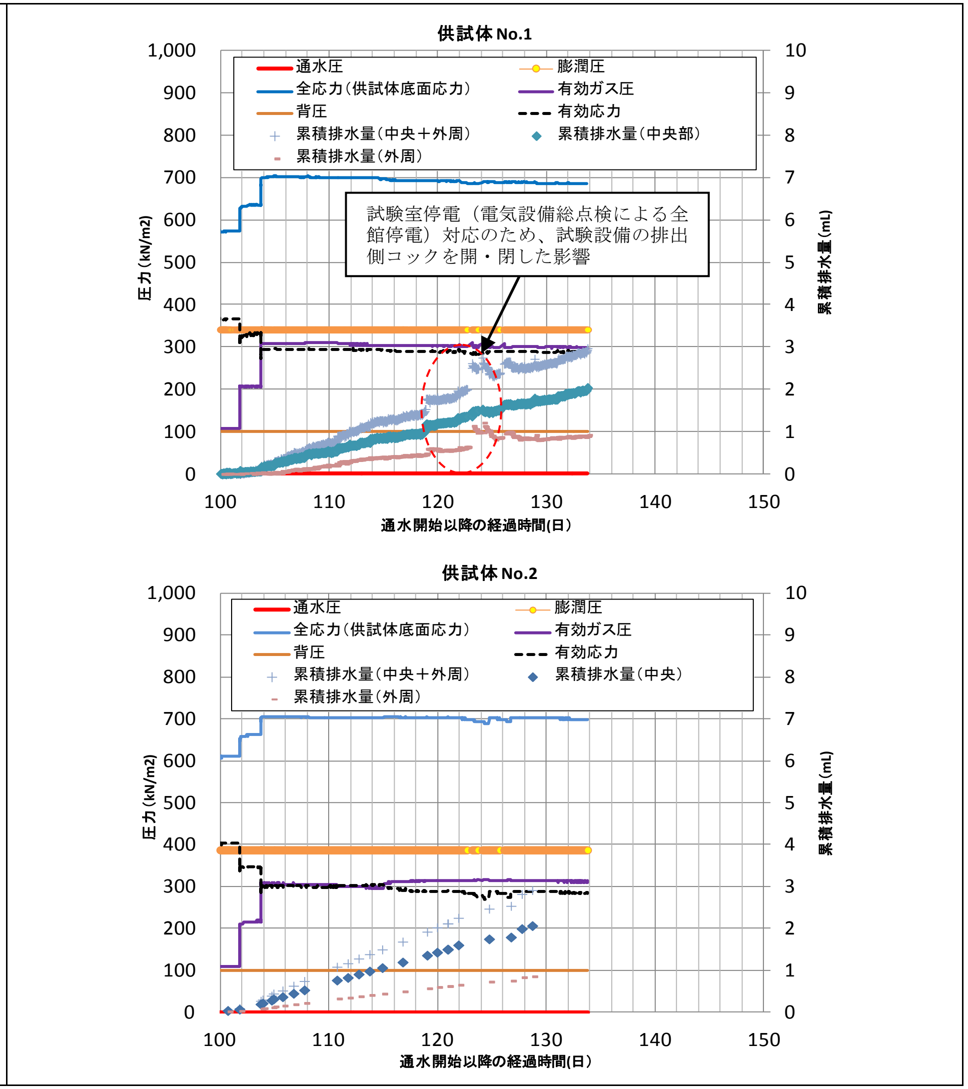
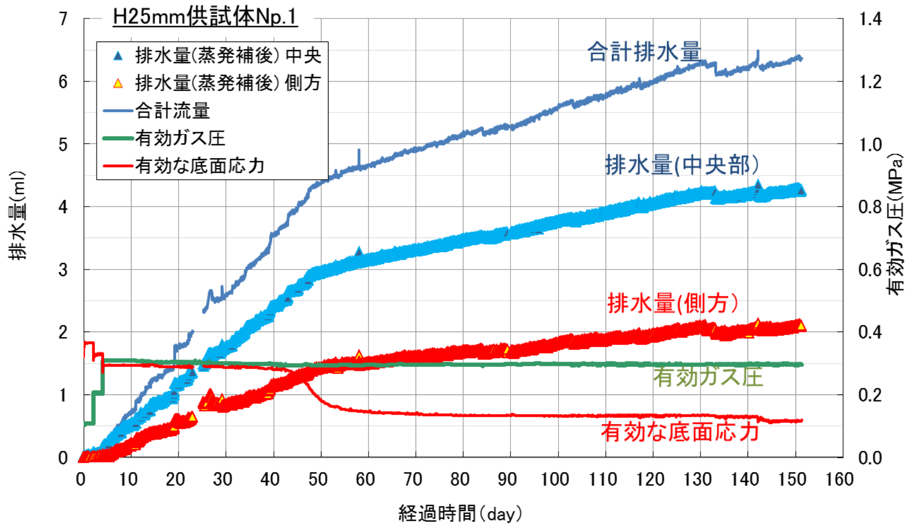


図 4.3.1-18　供試体 No.1 および No.2 の概況（ガス注入開始以降）

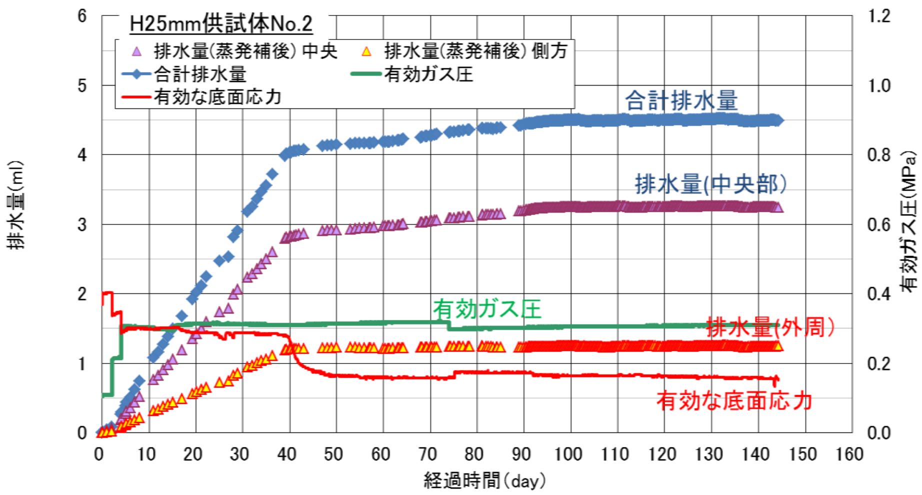
図 4.3.1-19 にガス注入開始後の排水量の経時変化を示す。図中には、集水範囲（中央部および側方）ごとの排水量と両者を合算した排水量を記入している。

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

供試体 No.2 においても、そのタイミングは供試体 No.1 と若干異なるものの、ほぼ同様の時期に排水速度の変化が確認できた。



(1)　供試体 No.1



(2)　供試体 No.2

図 4.3.1-19　ガス注入に伴う排水量の経時変化

(※経過日数はガス注入開始日が起点)

表 4.3.1-8 に排水速度の変化時期の状況を示した。排水量が 4.0、4.3cm3 で排水速度に変化が生じている。この排水量は、ガス注入開始時期には飽和になっている注入側ポーラスメタルの間隙量 3.57 cm^3 および切り替え弁からの排水管の合計体積分(約 4cm^3)に相当する排水であることから、上記排水量の変化時期は、注入ガスが供試体に到達した時期と考えられ、そのため、排水速度の変化以前は、透水挙動、それ以降はガス注入状況になっていると考えらえる。

ここで、ガス移行試験においては一定ガス圧（有効ガス圧＝0.3 MPa）で試験が推移しているが、図 4.3.1-20 に示すように、ベントナイト供試体における飽和度／サクション（排水過程では注入ガス圧に等しい）の関係[4]を見ると、注入ガス圧時における飽和度は 0.989 であることが分かる。

これは、飽和供試体に注入ガス圧として 0.3 MPa のサクション（毛管排除圧）が作用すると、飽和度が 0.989 まで低下し、この飽和度低下分に相当する間隙水が排出されることを意味している。以降、圧力勾配やガス相・水相の相対浸透率に応じた気液二相流的なガス移行が進展し、ガスが到達した部位はそこに作用する毛管排除圧に応じた量の水が供試体から排出されていく（飽和度が低下していく）こととなる。

上記のような考察のもと、供試体へのガス注入状況（供試体からの累積排水量の経時変化）から、ガスの侵入位置を推定したものが表 4.3.1-9 である。

表は、ガスが供試体へ到達して以降の累積排水量から算定した推定値ではあるが、各供試体毎のガス移行フロントの大凡の進展状況を見積もることが出来た。

表 4.3.1-8　ガス注入開始以降の排水速度の変化の状態

	供試体 No.1	供試体 No.2
排水速度の変化時期	48 日目	39 日目
排水速度の変化時の総排水量	4.3cm^3	4.0cm^3（144 日目）
有効な底面応力の低下開始時期 (その時の排水量)	42 日目 （3.9cm^3）	40 日目 （4.0cm^3）
有効な底面応力の低下が定常化 （その時の排水量）	56 日目 （4.6cm^3）	45 日目 （4.1cm^3）

表 4.3.1-9　ガス注入開始以降のガス侵入位置の推定

	供試体 No. 1	供試体 No.2
現在の総排水量	6.3 cm^3（151 日目）	4.5 cm^3（144 日目）
排水速度の変化時の総排水量 ※ガスが供試体に到達するまでに要した総排水量	4.3 cm^3	4.0 cm^3
供試体への注入ガス量(推定)	2.0 cm^3	0.5 cm^3
ガスの侵入位置(推定) ※供試体下端からの距離	1.42 mm	0.35 mm

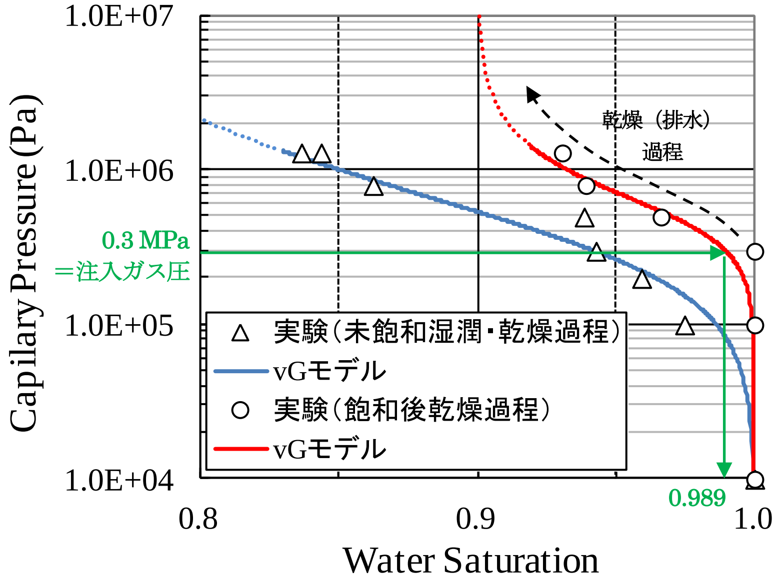
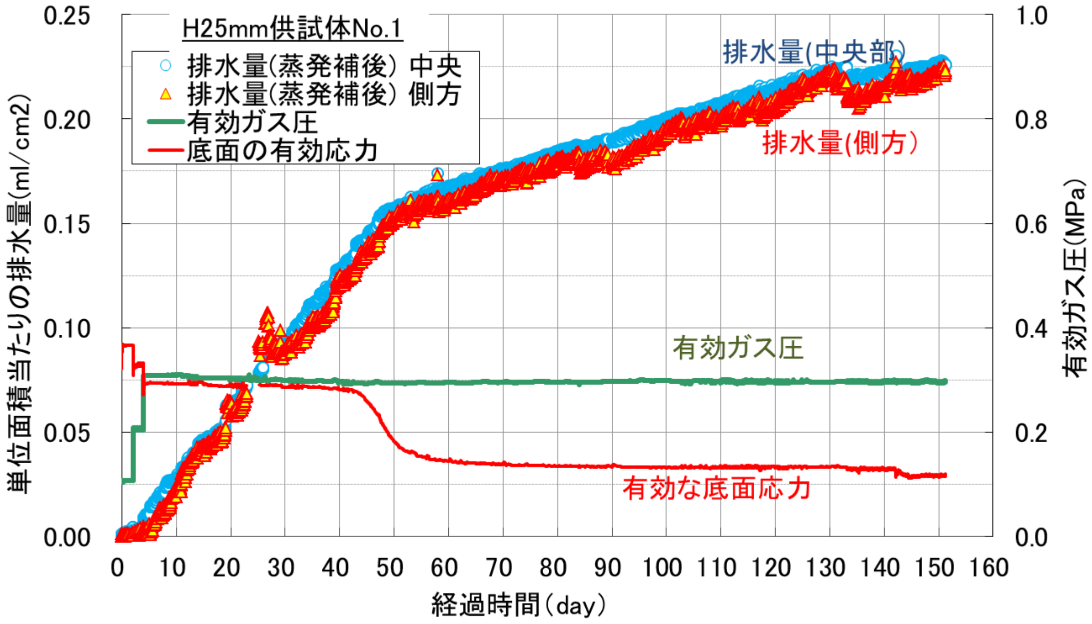
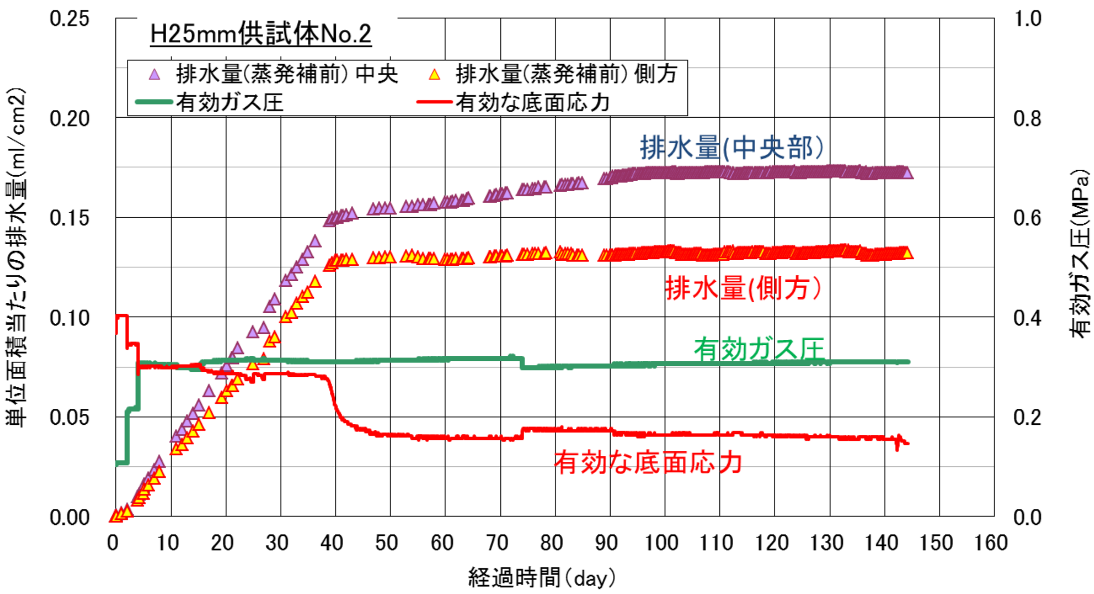


図 4.3.1-20　ベントナイト供試体の水分特性曲線（飽和度／サクションの関係）[4]

図 4.3.1-21 には、中央部、外周部各々の単位面積あたりの排水量を示す。中央部、外周部ともほぼ同程度の排水量で推移している状況が確認できる。



(1)　供試体 No.1

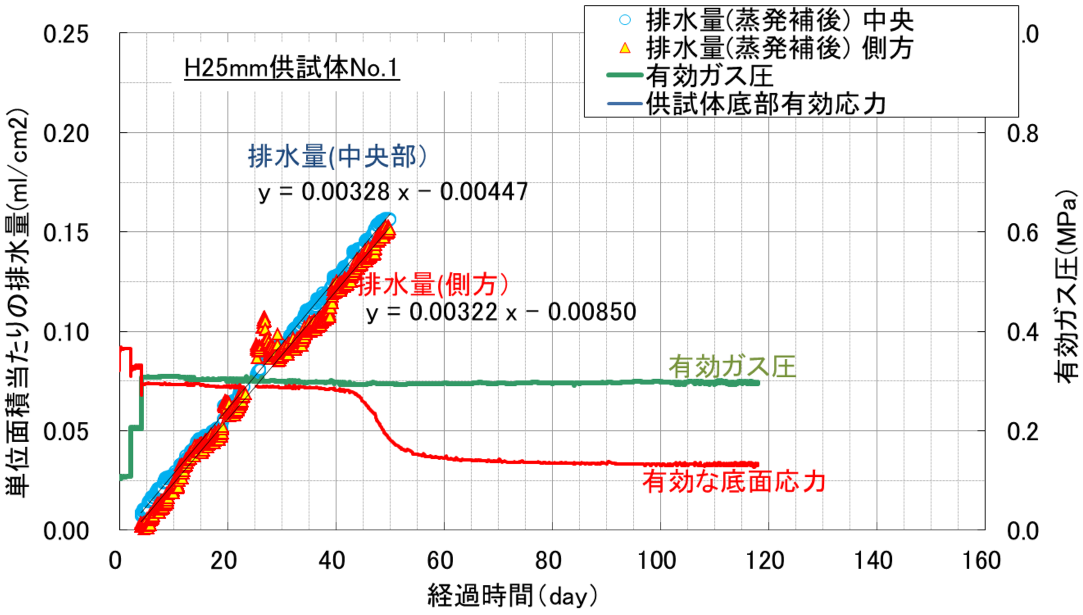


(2)　供試体 No.2

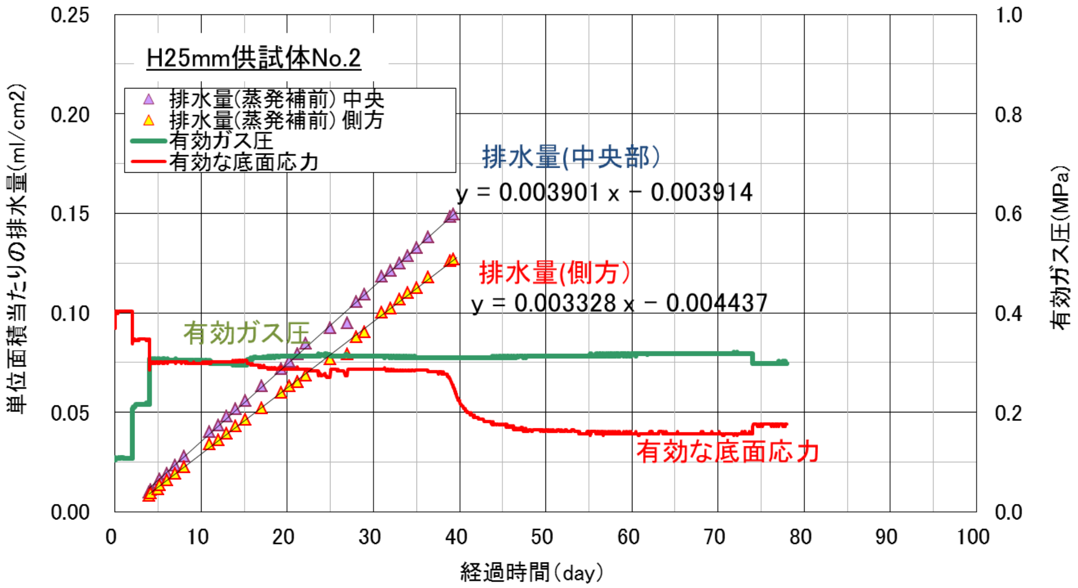
図 4.3.1-21　ガス注入に伴う単位面積当たりの排水量の経時変化

(※経過日数はガス注入開始日が起点)

図 4.3.1-22 は、有効ガス圧を 0.3MPa まで昇圧したのち排水速度が変化するまでの排水量の計測結果から、直線近似で排水速度を求めた結果である。排水計測位置、供試体に関わらずほぼ同様の排水速度を示している。



(1)　供試体 No.1

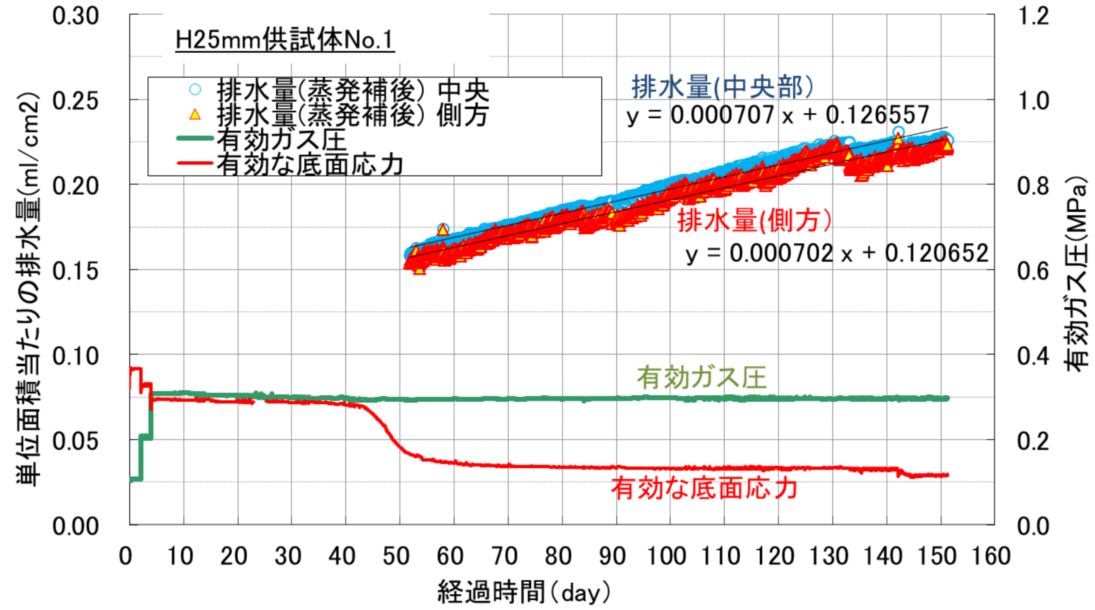


(2)　供試体 No.2

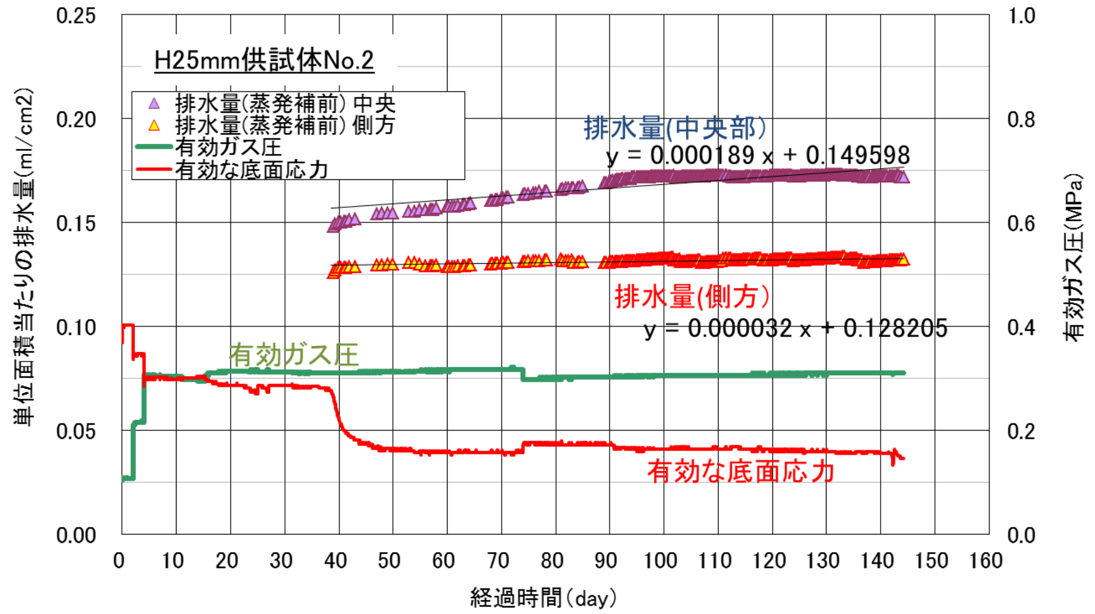
図 4.3.1-22　ガス注入に伴う単位面積当たりの排水速度（ガス注入開始直後）

(※経過日数はガス注入開始日が起点)

図 4.3.1-23 は、排水速度が変化した後の排水量の計測結果である。排水量はほぼ一定の勾配で増加していることから、図 4.3.1-22 と同様に直線近似で排水速度を求めた。供試体 No.1 の排水速度は、中央部、側方ともほぼ同様の排水速度を示している。これに対して供試体 No.2 の排水速度は供試体の外周部では特に小さく、100 日を経過するあたりから排水速度が著しく低下している。



(1) 供試体 No.1



(2) 供試体 No.2

図 4.3.1-23　ガス注入に伴う単位面積当たりの排水速度（ガス注入開始直後）

(※経過日数はガス注入開始日が起点)

表 4.3.1-10 および表 4.3.1-11 は、先に示した排水速度から求めた透水係数である。表 4.3.1-10 で示したガス注入開始後の換算透水係数は、供試体飽和中に得られた透水係数とほぼ同様の値を示し、注入したガスがまだ供試体に到達せず、飽和供試体の透水試験状態であったことがわかる。一方、表 4.3.1-11 に示した排水速度変化後の換算透水係数は、表 4.3.1-10 の値に比べて供試体 No.1 では 1/4 程度、供試体 No.2 では 1/10 から 1/40 とその定価程度は非常に大きくなっている。この差については、供試体ごとのバラつきの範囲、あるいはガス侵入圧の差など考えられる。

表 4.3.1-10　排水速度から求めた透水係数（ガス注入開始直後）

	排水量	有効ガス圧	換算透水係数
	ml/cm^2 /日	MPa	m/sec
No.1 中央	0.00328	0.3	3.1×10^{-13}
No.1 側方	0.00338	0.3	3.2×10^{-13}
No.2 中央	0.00390	0.3	3.7×10^{-13}
No.2 側方	0.00332	0.3	3.1×10^{-13}

表 4.3.1-11　排水速度から求めた透水係数（排水速度変化後）

	排水量	有効ガス圧	換算透水係数
	ml/cm^2 /日	MPa	m/sec
No.1 中央	0.000707	0.3	6.7×10^{-14}
No.1 側方	0.000702	0.3	6.6×10^{-14}
No.2 中央	0.000189	0.3	1.8×10^{-14}
No.2 側方	0.000032	0.3	3.0×10^{-15}

(3) ガス注入停止と供試体の解体調査

1) 供試体解体調査実施の判断

前節で示したように、供試体 No.2 においてはガス注入に伴う排水量の増加が著しく低下して、ほぼ定常状態になった。

この挙動は、図 4.3.1-24 に示す GETFLOWS（破線）、CODE_BRIGHT（実線）による予察解析結果（前述の第 3 章 3.2 節 3.2.1 項「ガス移行の予察解析」を参照、以下、「解析検討の成果」と称する）との比較（主に供試体 No.2 と CODE_BRIGHT Case1 との比較）から概ね想定されるものであった。

よって、以下の項目に資する参考資料とするため、供試体 No.2 については、ガス注入を停止して供試体の解体調査を行うこととした。なお、排水量の増加傾向が継続している No.1 供試体のガス注入については継続することとした。

① 本業務によるガス注入後の供試体内部の飽和度分布（含水比分布）と解析検討との整合性の確認

② 飽和圧縮ベントナイト中の二相流移行挙動の把握のための試験方法・評価手法の妥当性の確認

③ 他の供試体の試験期間中の挙動の想定

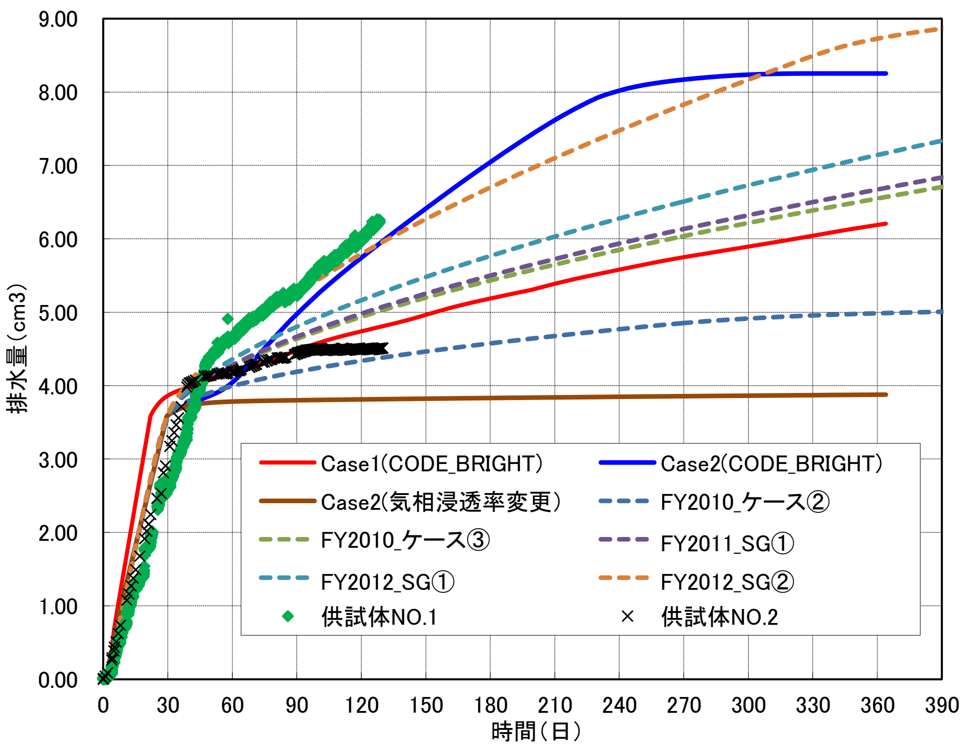


図 4.3.1-24　排水量の実測値と予察解析結果との比較

2）解体調査結果

写真 4.3.1-1 から写真 4.3.1-6 に供試体の解体状況を示す。高さ 25mm の供試体を深さ方向に 7 分割、1 層ごとに中心部と周辺部 2 分割の合計 3 分割して、各々採取厚さ、湿潤重量、乾燥重量を計測し、密度、含水比を算出した。表 4.3.1-12 に供試体の解体後の含水比計測結果を示す。

写真 4.3.1-1　供試体解体前

写真 4.3.1-2　供試体解体表面(排水側)

写真 4.3.1-3　供試体解体表面(排水側)

写真 4.3.1-4　供試体の押し出し

写真 4.3.1-5　分割した供試体

写真 4.3.1-6　各層で 3 分割した供試体

表 4.3.1-12　供試体の含水比計測結果

試料 No.	含水比(%) A（中央部）	B(外周部）	C(外周部）	厚さ(cm)	上端面からの距離(cm)
1	36.61	36.80	37.33	0.392	0.20
2	36.50	36.30	36.47	0.414	0.60
3	36.20	36.41	36.36	0.306	0.96
4	36.36	36.14	36.67	0.325	1.27
5	36.60	36.29	36.10	0.406	1.64
6	36.65	36.63	36.73	0.313	2.00
7	37.55	37.33	38.08	0.398	2.36

図 4.3.1-25 に供試体の厚さ方向に対する含水比の分布を示す。初期乾燥密度 1.36g/cm^3 に対する飽和含水比は 36.5%であった。得られた含水比は中心部、外周部ともほぼ同程度の含水比を示し、注水量と排水量の比較検討（図 4.3.1-11 参照）では、ほぼ同程度の勾配となり供試体が飽和状態であることが示されたが、ガス注入試験後の解体調査結果の傾向としては注水側の方が１％程度大きな状態を示している。この傾向は、注水飽和過程で注水圧により供試体が排水側に浸透力として圧密される一方で注水側（供試体下部）で膨潤が発生し、その分緩くなったものと考えられ、本事業でこれまでに実施してきたガス移行試験結果と同様の傾向を示した。

図 4.3.1-26 は各サンプリングの厚さを用いて乾燥密度を計算し、供試体の厚さ方向に対する分布を示したものである。先の含水比の考察同様に注水側が膨潤の影響で若干小さな乾燥密度を示している。

図 4.3.1-27 は、飽和度の厚さ方向の分布を示した。外周部では飽和度が深度に関わらずほぼ100%近くを示しているが、供試体中央部ではガス注入側の飽和度が若干低下している状況が認められる。

解体調査の結果より、データにばらつきはあるものの、下面より約 1.0cm の範囲において、何らかの形でガス侵入の影響が表れていることが示唆された。

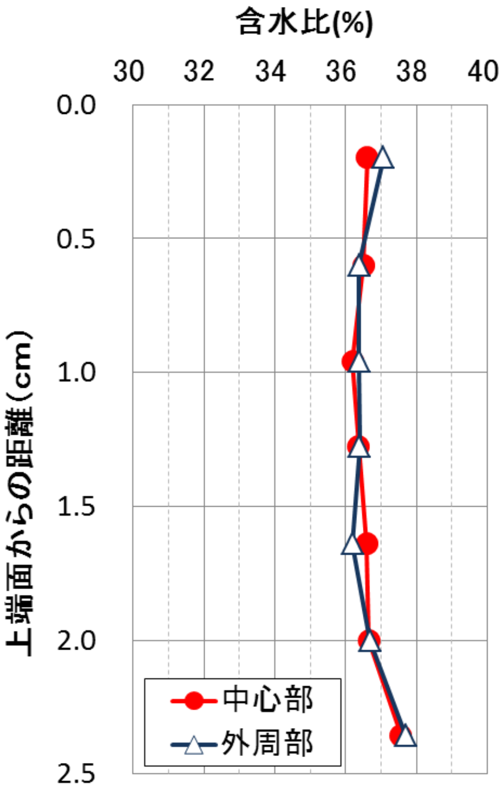


図 4.3.1-25　供試体の厚み方向に対する含水比分布

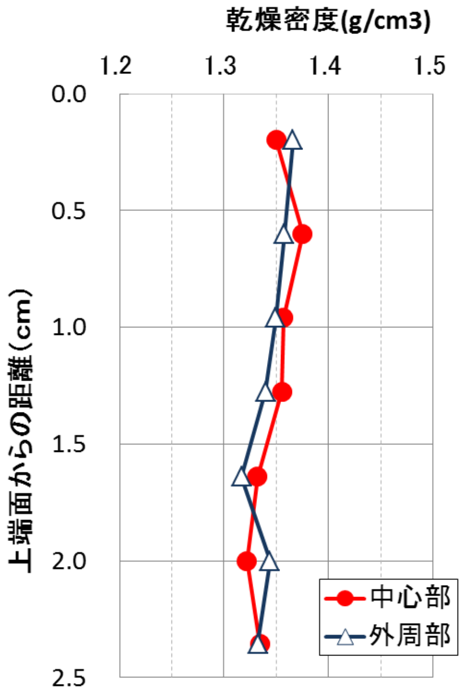


図 4.3.1-26　供試体の厚み方向に対する乾燥密度分布

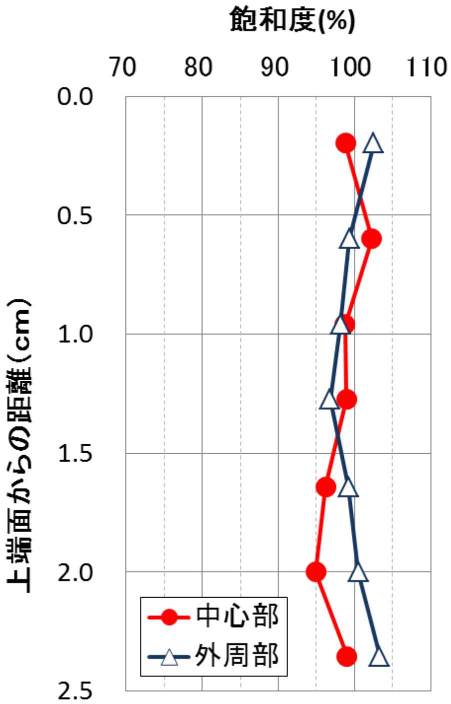


図 4.3.1-27　供試体の厚み方向に対する飽和度分布

4.3.2 ガス移行挙動評価に係るシステム試験の実現に向けた検討

(1) 目的

TRU 処分概念における人工バリアのガス移行挙動においては、ベントナイト緩衝材中に生じる気液二相流のほか、施工に起因して生じる界面や、構成材料との間に生じる界面が卓越したガス移行経路になることが懸念されている。

ここでは、界面も含めた人工バリア全体（複合構成材料中）のガス移行挙動の理解を目的とし、実規模人工バリアの 1/10～1/5 程度の模型を用いて行うガス移行挙動評価試験（システム試験）の実現に向けた検討を実施した。

(2) システム試験の策定に資する検討

システム試験の実施に際しては、詳細な試験計画の策定が必要である。

ここでは、システム試験計画の策定に資するため、これまでに実施された模型を用いたガス移行試験の実施事例のとりまとめを行った。

1) 調査文献の概要

研究については、ベントナイト中の水の浸潤とガス移行挙動に関する実規模試験を含むものとし、海外の事例を主体として調査を行った。

以下に、対象とした文献を示す。

a. ベントナイトや砂・ベントナイト混合物中の水の浸潤やガスの移行の把握を目的とした実規模試験の事例

- The Grimsel Test Site – Going into the fourth decade of applied RD&D, 14th International High-Level radioactive waste management conference, 2013, (GAST: 砂・ベントナイト混合物, FEBEX: ベントナイト).
- Large scale gas injection test (Lasgit) performed at the Aspo Hard Rock Laboratory, SKB Technical Report, TR-10-38, February 2010, （ベントナイト).

b. 砂・ベントナイト混合物中の水の浸潤やガス移行の把握を目的とした要素試験およびモックアップ試験の事例

- FORGE Report D3.34, Final Laboratory Report, May 2013.

c. ベントナイト、界面や粘土岩中の水の浸潤やガスの移行の把握を目的とした要素試験の事例

- FORGE Report D3.33, Key Gas Migration Processes in Compact Bentonite, 2014, (ベントナイト).
- FORGE Report D3.36, Results from interface laboratory experiments, June 2013, (界面).
- Cuss R, Harrington J, Giot R and Auvray, C, Experimental observations of mechanical

dilation at the onset of gas flow in Callovo-Oxfordian claystone, Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement, 400, 507-519, May 2014, (粘土岩).

選定した文献と記載されている技術の概要、選定理由について整理した結果を表 4.3.2-1 に示す。

表 4.3.2-1　調査対象とする文献と選定理由

No.	文献名	技術名	技術概要	選定理由	備考
1	FORGE (Fate of Repository Gases) Final Laboratory Report, D3.34 - Final, 2013.5	FORGE（処分施設ガスの長期挙動）ファイナル実験レポート	スイスの L/ILW 処分施設で行われた、人工バリアの長期的挙動を確認する目的で実施され。室内試験に提供する「境界条件の影響」を理解することを目的とした実験である。	本検討と同様のガス移行試験を実施した研究であり選定した。	
2	The Grimsel Test Site - Going into the fourth decade of applied RD&D, 2013	グリムゼル試験サイト - RD&D の適用から 40 年経ってー	大規模（フルスケール）でのガス移行試験を実施したものであり、人工バリア定置、放射性核種輸送、トンネル効果、材料腐食に言及する技術レポートである。	大規模（フルスケール）でのガス移行試験を実施したものであり選定した。	14th International High-Level radioactive waste management conference, 2013
3	Large scale gas injection test (Lasgit) performed at the Aspo Hard Rock Laboratory, 2010	Aspo ハードロック研究所で行われた大規模なガス注入試験（Lasgit）	実験的な境界条件へのガス移行プロセスの感度と測定された反応の現実的なスケール依存が不確かなため、それらを確認する目的で、大規模なガス注入試験（Lasgit）を実施した実験である。	本検討と同様のガス移行試験を実施した研究である。スケール依存にも言及したものであり選定した。	SKB Technical Report, TR-10-38,2 月 2010 年
4	Results from interface laboratory experiments, FORGE Report D3.36, 2013	界面研究実験の結果	ガスの注入時の界面に注目し、ベントナイトブロック同士の界面の水理力学的特性、ベントナイトブロックとコンクリートさらに母岩（花崗岩）への力学的接点を確認した実験である。	本検討で予定されている今後の実験で使用するベントナイト材料や母岩の種類は文献とは異なる。しかし、実験における条件設定や界面に着目した実験結果への考え方は共通するものとし選定した。	総括版：「FORGE D.3.38 レポート」(P.346-349、369-382)
5	Key Gas Migration Processes in Compact Bentonite, FORGE Report D3.33, 2014	コンパクトベントナイトにおける主要なガス移行プロセス	MX80 ベントナイトを用いたガス移行試験の室内試験であり、水文条件、圧力条件、密度条件（界面における二種密度ベントナイト）を考慮し、ガス移行試験を実施した実験である。	本検討で行う実験に際し、条件（均一性・水文地質条件やスケール効果）の設定の参考資料になり得ること、また使用予定のベントナイト材料が類似していることから選定した。	総括版：「FORGE D.3.38 レポート」(P.233-255)
6	Experimental observations of mechanical dilation at the onset of gas flow in Callovo-Oxfordian claystone, 2014	Callovo-Oxfordian 粘土岩内のガス流の発生時力学的な拡張の実験観察	母岩中のガスの移動は（i）間隙水としての拡散および/または溶解（ii）内部構造の元の間隙率での粘弾性毛細管（または二相流）流れ、(iii) 局所的なダイラタント経路（微細亀裂）に沿った流れ、(iv) 岩のガスフラクチャリングの主要な現象論的モデルで定義される。この研究では、ガスの移動を制御するメカニズムを調べるために、Callovo-Oxfordian 粘土岩（COx）を使用し特殊三軸セルを用いたステップ実験である。	TRU 処分場の母岩として想定されているうちの一つである堆積岩と類似した粘土岩を用いた三軸セル内ガス移行試験が行われているため選定対象とした。	Cuss R, Harrington J, Giot R and Auvray, C, 2014. Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement, 400, 507-519

2) 調査結果

a. 調査文献の整理

対象文献の調査結果は、以下の情報を含めた調査文献整理シートの形で整理した。

・文献名（著者、発行年）
・技術概要
・技術名
・選定理由
・目的と概要
・調査結果
・試験評価適用性（一般性、留意点、課題等）

表 4.3.2-2～表 4.3.2-7 に文献ごとの調査文献整理シートを示すが、以下にガス移行挙動評価試験（システム試験）に向けた、試験計画を構築する際の留意点をまとめた。

b. 調査結果のまとめ

(a) 試験の一般性

・ 試験を行う際には、同一の要素試験、モックアップ試験、実規模試験などにあたり、同じ種類の材料を使用することが重要である。
・ 実規模試験で材料を配置する際には、実際の施工作業と同様の手順で行う必要がある。
・ モニタリングや測定機器は、校正を行い、予想される最大圧力と季節変化の下でも良好に機能する容量を確保する必要がある。

(b) 試験の適用性

・ Febex 試験では、ベントナイトは完全飽和に至っていない。Lasgit 試験ではフィルタマットが使用され飽和を促進したが、それでも完全飽和に至っていない。これらは、試験結果にも影響を与えており、試験材料の準備には十分な時間をかけ、または飽和促進の一助を考慮する必要がある。
・ 計画されている TRU に使用するベントナイトは、Febex 試験、Lasgit 試験に用いた材料と比較として、飽和期間は長くとる必要がある。よって、試験計画の策定にあたっては、この点に留意した計画とする必要がある。

c. 留意点及び課題

・ 実験結果に影響を与えるため、要素試験やモックアップ試験で使われる材料（同じ種類の材料）及び試験条件（同じ種類の水を注入など）を実際のフィールド条件と同様に維持することが重要である。
・ モックアップや実規模試験は長期的な試験である。したがって、監視装置のそれに対応する適性を確認する必要がある。また、試験中に装置を変更する必要がある際に緊急対応についての計画も行っておく必要がある。

- 試験中に温度変化の影響がある場合、試験そのものに問題が発生したのか、または監視装置の機能に起因する問題であるか、特定する必要がある。
- ガス注入を開始する前に、試料が完全飽和条件に達した事を確認する必要がある。したがって、完全飽和を確実にするために、フィルタマットなど飽和促進材料などを検討・配置する必要がある。
- 母岩として堆積岩が使用される場合、実験情報（軸方向応力、拘束圧等）や実験結果に影響を与える条件（試料調製法、試料のマイクロまたはマクロ亀裂、試料の初期状態等）は天然の岩盤であるため、選定には留意すべきである。
- 調査手法の適用においては、個々の技術の有する課題の解決と適用性、データの精度の確認を適切に決定することが必要である。

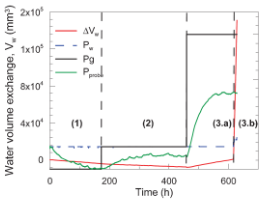
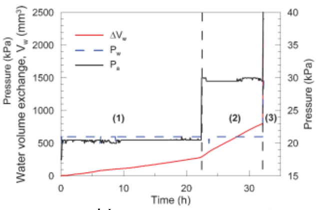
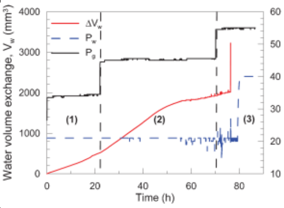
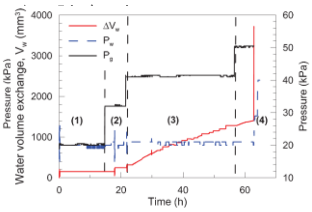
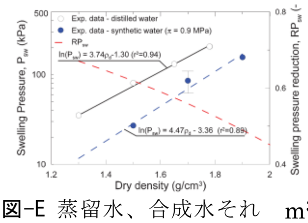
d. まとめ

ガス移行プロセスは、実験的での境界条件と測定されるスケールに依存する。（例えば要素試験と実規模試験の結果を比べ、定性的には一致するが、定量的には不一致であること）

したがって、TRU 処分施設のガス移行の挙動特性を詳細に確認する場合には、実規模試験を実施することが望ましい。

実規模試験では、材料の飽和条件が最も重要な課題となる。文献調査では、適用される飽和ステップを抽出することができている。しかし、使用する材料の種類が TRU と異なっているため、文献情報を適用する際には留意が必要である。また、試験のスケジュールについては実試験と比較し、材料の飽和処理に最も時間が必要であることに十分考慮が必要となる。

表 4.3.2-2　調査文献整理シート　（1/6）

文献名	FORGE (Fate of Repository Gases) Final Laboratory Report, D3.34 – Final, 2013.5
技術概要	スイスの L/ ILW 処分施設で行われた、人工バリアの長期的挙動を確認する目的で実施される室内実験に提供する「境界条件の影響」理解することを目的とした実験結果である。
技術名	FORGE（処分施設ガスの長期挙動）ファイナル実験レポート
選定理由	本検討と同様のガス移行試験を実施したレポートであるため選定
目的と概要	調査内容と目的は、異なる境界条件と低／中レベルの放射性廃棄物処分システムの長期的な性能への影響であり、以下の５カテゴリに区分される。 ①　二相流パラメータを決定するカラム実験の手順の構築 ②　実験での現象からガス移行の概念モデルを開発 ③　S / B の二相流パラメータを決定する実験およびデータ ④　コンクリートと S/ B の界面での水理化学プロセスのシミュレーションを目的としたパラメトリックモデルをサポートする検証データの収集 ⑤　中間規模検証実験のプロセスの理解を検証
査結果	①　<u>二相流パラメータを決定するカラム実験の手順の構築</u> 実験用のセットアップ:Oedometer セル（試料直径 79mmx 高さ 15mm)、透水性セル（試料直径 51mmx 高さ 20mm)、三軸セル（試料直径 50mmx 高さ 15mm)、モジュラーカラム（一つのモジュル直径 101mmx 高さ 62mm)、マイクロケージ、水銀圧入式（MIP)、陽電子放射断層撮影（Positron Emission Tomography : PET）実験（試料直径 55mmx 高さ 110mm、注入ガス：ヘリウム)、モックアップ実験（試料直径 600mmx 高さ 900mm、注入ガス：N_2）  図-A モジュラーカラムにおけるガス注入試験  図-B 三軸セルにおけるガス <u>境界条件</u>：モジュラーカラムと三軸セルで行ったガス透過試験では、ガス注入を開始する前に、入口ダクトにおいては、ポーラスストーンから水を排出するために、10kPa よりも低い圧力でガスを流した。モジュラーカラム試験ではセル飽和後、底板への水圧を最初に 50kPa に設定し、  図-C 三軸セルにおけるガス注入試験、封圧 300kPa  図-D 三軸セルにおけるガス注入試験、封圧 300kPa、サイクル２ 圧力流量制御装置によって一定に保った。ガス（乾燥空気）は供試体上部から 40kPa で注入を開始した（図-A)。次に、ガス圧を 40kPa から 50kPa に、続いて、50kPa から 100kPa まで昇圧し実験を行った。三軸試験では試料は上部と下部から水を注入することによって飽和させ、飽和後上部の水圧は圧力流量作業装置を一定に維持しながら、ガスを試料の底部から注入した。最初の試験では、100kPa の封圧を適用し、ガスは 20kPa から注入を行った。(図-B)。２回目の試験は、300kPa の封圧を受けた試料で行い、ガス圧は、34kPa に設定した（図-C)。３回目の試験では、2 回目の試験で使用した試料を試験後に再飽和しガス注入のサイクル 2 が、55ｋPa でのブレークスルーの再現性を確認するために行った（図-D)。 **<u>完全飽和に関連する現象</u>:** 単位流量と動水勾配の間で指数関数的な相関が確認された。  図-E 蒸留水、合成水それぞれを用いた場合の膨潤圧の比較 **<u>溶質輸送に関連した現象</u>:** <u>PET 実験</u>:飽和後の推定透水特性は 4E-19m² だった。全体的な水流は、S/ B 内部では非常に均質である。 **<u>異なる水理化学的状態での膨潤実験</u>:**膨潤圧は、初期の段階では非常に高速に上昇する（両方の蒸留水と塩水ケース)。水体積より高い乾燥密度とともに減少する。測定された水流入で 2.98e-9 m³/s,食塩水によるベントナイトの膨潤能力の抑制を確認した。膨潤圧の減少係数傾向は、乾燥密度の増加によって部分的に補償する事ができることを示した（図-E)。膨潤試験に要する時間が、合成水と接触した混合物の膨潤容量の低下により著しく減少した。 **<u>ガスの侵入/収縮に関連した現象</u>:** **<u>水分保持曲線</u>**：ある飽和度で、測定された全ての試験体の

	毛管圧のうち 1.8g/cm^3 で締め固められた試験体の方が高い結果となった。これは、乾燥密度の増加とサクションの毛管構成要素の増加によって、マクロ間隙の減少に起因している。Van Genuchten パラメータは同定されている。 **PET 実験:**わずか 7 時間後にガス破過を確認した。カラムのほとんどで平衡相違であるのに対して活動は、ガス入口に向かって減少するような挙動を示す。 **ガス透過性試験:**流出の増加に伴い、ガスの破過では膨潤圧と間隙水圧の和よりもはるかに低い、数 10ｋPa のガス圧で発生した。 　以上の結果から、S/B 材料内の主流プロセスは**粘弾性の毛管流束**となることが示唆された。純粋ベントナイトの場合、ガス破過圧は膨潤圧と水圧との和に等しいかそれよりも高い。 **複合プロセス:** 実験結果は、到達した最大膨潤圧蒸留水の場合に比べて生理食塩水の場合がより高速であることを示す。しかし、到達した平衡膨潤圧が生理食塩水条件下のみでは低くなっていることも示す。拘束圧を増加させると、ガス破過圧力には少しであるが影響が確認されているが、破過後のガス流に有意な影響は認められていない。ガス流が一定のマクロ間隙空間内のベントナイト材料によって支配されている間では、外部応力に抵抗する砂のマトリックスによる堅いグリッドで説明できる可能性がある。 **スケール効果:**モックアップ実験における圧力の発生の予備的解釈は、定義されたターゲット透水性の大規模な実験を設計し、据え付けることが可能であり、小規模実験は、密度および透水率との間の必要な関係を提供するのに十分である。 **材料の影響：**本実験では、材料の影響に起因する違いもある。それは、砂の種類をレマンから FORGE 砂に変えたため、本実験では透水率が低下している。その結果 FORGE モックアップ実験は、設計値（当初計画）と比較すると、飽和完了までに多くの時間を要することとなった。
験評価適用性	緩衝材としてグレー石英砂と MX-80 ベントナイトの混合体が使用されており、これは TRU 処分への適用が検討されている材料をは異なる。 　しかし本文献におけるガス移行試験の条件設定（循環水や材料の影響）の基本的な考え方は、参照・整理した上で役立てることが可能と評価する。
備考	

表 4.3.2-3　調査文献整理シート　（2/6）

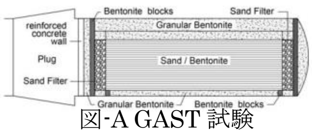
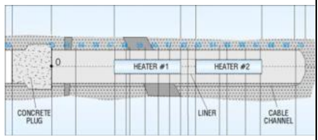
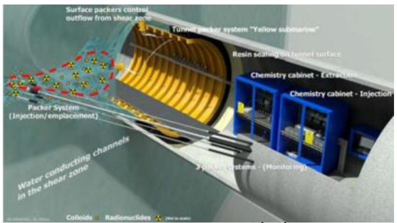
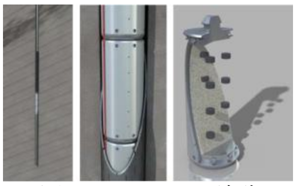
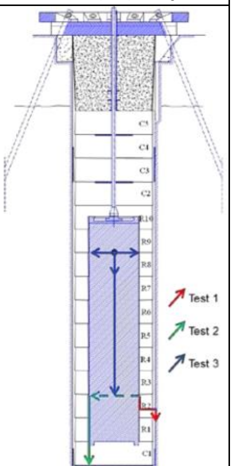
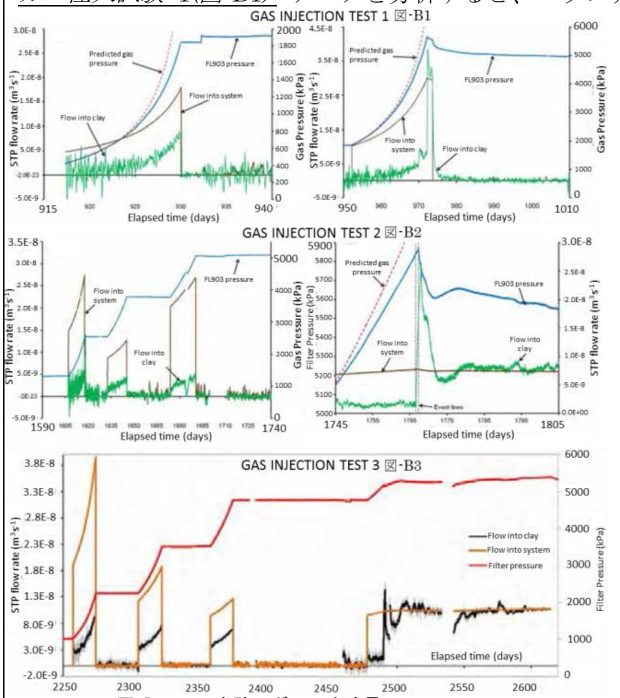
文献名	The Grimsel Test Site – Going into the fourth decade of applied RD&D
技術概要	大規模（フルスケール）でのガス移行試験を実施したものであり、人工バリア定置、放射性核種輸送、トンネル効果、材料腐食に言及する技術レポートである。
技術名	グリムゼル試験サイト –RD&D の適用から 40 年経って–
選定理由	大規模（フルスケール）でのガス移行試験を実施したものであり選定した。
目的と概要	統合されたプロジェクトとして、以下の２項目を目的として実験が行われた。 ①　現実的な条件（大規模、長期的、現実的な地質条件など）にできるだけ近い環境でのフィールド実験を行うこと ②　地層処分（工学的実現可能性、運用面、閉鎖、監視、母岩を考慮した処分場構築の可能性への影響）の実態に取り組むプロジェクト
調査結果	**GAST:** 長さ 8m の S/ B シールは、TBM で掘削された花崗岩のトンネル内に、両面に水とガスの注入を可能にする多孔質材料を用いて定置された（図-A、トンネル直径 3.5m）。厚さ 2m のコンクリートプラグは最後に構築された。最高水圧 50bars にて試験設計および機器選定を行った。最終定置乾燥密度は 1.7g/cm³（S/B）および 1.4g/cm³（粒状ベントナイト）であった。注入速度は 6mL/min で開始し、3mL/min で継続した。飽和は 2012 年 7 月 11 日に開始し、飽和プロセスは、モデリング計算によると水がトンネルの両端から注入された場合、飽和が次の 2-3 年以内に到達できることを確認している。  図-A GAST 試験 **FEBEX:** FEBEX 試験は発熱を生じる HLW の処分の検討を行うサイトにおけるフルスケールの人工バリアシステムの試験である。TBM で掘削されたトンネルに、圧縮ベントナイトブロックに 2 つのヒーターを定置した。（図-B、トンネル直径 2.28 m）。加熱の 5 年後、ヒータ 1 は 2002 年に除去された。ヒーター2 は 2015 年まで 100℃での動作のまま継続している。ヒーターの開始後最初の年で急激な温度上昇の後、ベントナイトバッファ内の温度は比較的安定している。しかし、2012 年を境に、わずかな増加が観察される。これは、ベントナイトの水和（飽和プロセス）はベントナイトのサクションではなく、岩石中の水によって引き起こされたことを示唆し、2012 年を境に、ヒータに近い緩衝材内の含水量は徐々に増加し続けている。緩衝材内と母岩における間隙水圧はほぼ安定している。発熱体と接触している圧力が記録されないベントナイトリングの例外を除いて、一般に全応力は増加し続けている。較正された複雑なモデルによる数値解析は、温度が 100℃で一定に保持される限り、完全飽和に必要な時間が、数十年のオーダーでなければならない事を示した。  図-B FEBEX 試験  図-C CFM 試験 **CFM&LTD:** リポジトリニアフィールドや周辺の母岩における放射性核種の長期挙動の研究に焦点を当てた CFM（図-C）および LTD プロジェクトは、GTS で実行されていた。 **新しい実験:** **LASMO:** 大規模モニタリング（LASMO）プロジェクトは、油圧および歪みモニタリングシステムと地球物理学的モニタリング技術と組み合わせ、トンネル工事の効果をモニターするために計画された。注意はデータの使用をさらに最適化することである。例えば：(i) データのどのタイプが擾乱について詳細な効果/感受性を持っているか？(ii) データのどの種類が画像化のために使用することができるか？（iii）最適な空間と時間分解能データが何であるか？  図-D MACOTE 試験 **MACOTE:** 材料腐食試験（MACOTE）は、2012 年 11 月に長期実験として開始された。ベントナイト内部で長さ 15m の垂直試錐孔に埋め込まれた鋼試料（図-D）の腐食速度は、減量法によって決定され、界面での鉱物の変質は、利用可能な分析方法を用いて分析される。実験の第一段階は 5～6 年必要である。
試験評価 適用性	GAST はまだ飽和の段階ではあるが、シールが S/B で形成され、長期実規模実験であり実際の状態や人工バリアシステムの挙動を現実的にモデル化できる。また、この実験で得た結果は TRU にも用いることが可能と思われる。
備考	14th International High-Level radioactive waste management conference, 2013

表 4.3.2-4　調査文献整理シート　(3/6)

文献名	Large scale gas injection test (Lasgit) performed at the Aspo Hard Rock Laboratory
技術概要	実験的な境界条件へのガス移行プロセスの感度と測定された反応の現実的なスケール依存が不確かなため、それらを確認する目的で、大規模なガス注入試験（Lasgit）を実施した実験である。
技術名	Aspo ハードロック研究所で行われた大規模なガス注入試験（Lasgit）
選定理由	本検討と同様のガス移行試験を実施した研究である。スケール依存にも言及したものであり選定した。
目的と概要	①　KBS-3 処分場の設計コンセプトに基づいた大規模ガス注入試験を実施し解釈する、 ②　アップスケーリングに関連する問題やガス移行挙動に及ぼす影響を調べる ③　ガス移行のプロセスに関する追加情報を提供する ④　モデリングのアプローチを試行・検証するために高品質の試験データを提供する。
調査結果	処分坑道の長さは 8.5m であり、直径は 1.75m である。ガス注入のための点源を提供するためのフルスケールの 13 の円形フィルターを有する KBS3 キャニスターを用いた。フィルターマットは、注水を行うためにバッファと母岩の壁内の十分に検討された場所に配置した。キャニスターは、初期飽和度 95%以上の圧縮ベントナイトブロックによって囲った。境界条件は、再注水の間にバッファ内で自然に蓄積される圧力によって決められた。キャニスターの蓋は、埋め戻しによって発生する力を受け持たせるために 1300kN までプレストレストされた。注入ガスにはヘリウムを用いた。  図-A 三つの実験のガス移行パス **実験概要：**(1)フィルターマットの人工加水（0-2890 日）、(2)人工加水フェーズ 1（0-843 日）、(3) FL903 フィルタにおけるガス試験 1（813-1110 日、ガス注入 917-1110 日）、(4)人工加水フェーズ 2（1110-1430 日）、(5) FL903 フィルタにおけるガス試験 2（1430-2064 日、ガス注入 1577-1964 日）、(6) FU912 フィルターにおけるガス試験 3（2019-2072 日、ガス注入の状態が悪く試験中止）、(7) FU910 フィルターにおけるガス試験 3（2072-2725 日、ガス注入 2257-2673 日）、(8) FL903 フィルタにおけるガス試験 4（Day2726 日-2014 年 2 月予定（当時））。 *<u>ガス注入試験 1(図-B1):</u>* データを分析すると、バッファへのガスの流れは飽和した損傷のないベントナイトで予想されるガス圧よりもはるかに低く、約 0.65MPa で起こったことを示唆している。ガスによる加圧を 930 日で停止し、圧力を一定に保持した場合、粘土への流れが 1.5%程度に激減し、その際の主なガスの経路の伝播は殆ど停止することが示された。ガス加圧を 952 日目に再開した際、ガス圧の測定値と予測値とのズレは即座に継続し、これはガス経路の以前のネットワークが圧力の増加に伴って即座に拡張し続けたことを示す。ガス圧がピークに達したのち、半径方向応力の顕著な増加は、処分孔の底面全体周囲で、注入ポイントの下の鉛直平面での最も高い増加により発生した。これは、おそらくガスがキャニスターとバッファとの界面に沿って優先的に下方に移行したことを示唆している（図-A、赤い矢印）。  図-B 三つの実験のガス圧を流量 *<u>ガス注入試験 2(図-B2):</u>* ガス試験は 1.3MPa で始め、4 段階の昇圧と破過後のガス注入延長へと継続した。第 1 段階は 9 日間で圧力を 2.55MPa まで上昇させ、15 日間一定に保った。圧力が一定に保たれると、粘土へのガスの流れは試験 1 と同様の反応で、減少した。第 2 段階は 9 日間で圧力を 3.8Mpa まで上昇させ、28.6 日間一定に保った。第 3 段階は 16 日間で圧力を 5.05MPa まで上昇させ、52 日間一定に保った。これまでの観察と同様に、昇圧段階から定圧注入にスイッチすると流束は低下した。要約すると、2.55MPa、3.8MPa、5.05MPa の各定圧注入段階でそれぞれ $2.5x10^{-10}$、$7.2x10^{-11}$ と $1x10^{-12}$

の流束が観察された。定圧注入への移行時のガスフローの大きな減少は、バッファのガス透過性の低下を示唆している。第 4 段階では圧力を 5.87MPa まで上昇させた。破過は、第 4 段階の昇圧を開始し 142 日間の定圧注入後に発生し、22 日間続いた。結果は、ガスはキャニスターの周囲 180° を FL901 フィルタまで伝播し、そこから処分孔の底部に向かって下方に伝播したことを示す。(図-A、緑の矢印)。

<u>ガス注入試験 3(図-B3):</u> ガス試験は、1 MPa から開始した。この試験は、4 段階の昇圧と長期間の最終段階で計画された。第 1 段階は 17 日間で圧力を 2.25MPa まで上昇させ、31 日間一定に保った。データ分析は、ガスのエントリー圧が約 1MPa であることを示した。第 2 段階では 17 日間で圧力を 3.5MPa まで上昇させ、36 日間一定に保った。第段階では 16 日間で圧力を 4.75MPa まで上昇させ、100 日間一定に保った。これまでの観察と同様に、昇圧段階から定圧注入へスイッチすると流束は低下した。また、試験 2 に反して、各定圧注入段階でのガス流束は設定した注入圧力の上昇に伴い増加した。要約すると、2.25MPa、3.5MPa、4.75MPa 各定圧注入段階でそれぞれ 2.1×10^{-11}、1.1×10^{-10} と 1.7×10^{-10} の流束が観察された。第 4 段階では、5,190kPa で観察のピーク圧が 5,147kPa に降下し、その 12 日後に初期の破過より高い 5300kPa の第 2 ピークまで回復した。試験 3 のガス移行経路は図-A の青い矢印で示す。

Lasgit のデータを Mx80-10、Mx80-13 および Mx80-14 を使用した実験データと比較すると（図-C)、明らかにガスの動きが局所的な応力状態によって強く制御されることが認められる。しかし、破過圧の大きさを予測する事は、Lasgit 内の応力と注入フィルターの圧力センサー近傍に見られる異方性から困難と思われる。

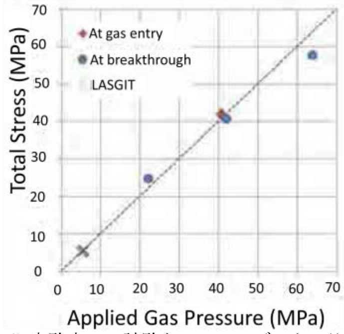


図-C 実験室での試験と Lasgit データの比

透過係数の変化（表-A）は、バッファが「成熟」し続け、水理平衡に達していない事を示した。透過係数は約 $6.0 \times 10^{-21} m^2$ で安定したように認められるが、この値は実験室で得た係数 ($4.7 \times 10^{-21} m^2$)より大きい。粘土の水和の進展における最大値は、キャニスター上部の大型フィルターマットの近くで行われ、一方で最低値はキャニスターの直下で発生した。粘土の継続的な水和を確認する全実験期間中で、サクションの減少傾向が確認された。

表-A 試験中の透過係数

	Filter	Day	Permeability (m^2)	Specific storage (m^{-1})
Pre gas test 1	FL903	880	7.7×10^{-21}	2.5×10^{-5}
Post gas test 1	FL903	1060	7.0×10^{-21}	4.0×10^{-5}
Pre gas test 2	FL903	1525	6.0×10^{-21}	2.0×10^{-5}
Post gas test 2	FL903	1990	6.0×10^{-21}	4.5×10^{-5}
Pre gas test 3	FU910	2110	7.5×10^{-21}	2.0×10^{-5}
Post gas test 3	FU910	2700	7.0×10^{-21}	1.2×10^{-5}
Pre gas test 4	FL903	2750	6.3×10^{-21}	2.0×10^{-5}

主な結論: (1) フルスケール試験は、実験室での結果と定性的に類似した挙動（(2)に記載）を示している、(2) 明確に定義された圧力ピーク、自発的な負の過渡、動的挙動と不安定なガス経路の証拠、ストレス近傍の漸近線、 (3) ガス試験 3 は、破過において 2 つのピーク圧によりわずかに異なる挙動を示した、(4) 研究室で見られた高いガス圧は Lasgit では、バッファーの不完全な水和のためはるかに低い応力状態であり確認されていない。(5) 粘土の水和は順調にであるが、ベントナイトのセクションではサクション状態かつ水理不平衡状態となる。(6) 主要なガスエントリー圧前後の流れの、ガス圧、応力や間隙水圧間の関連性は経路伝播と優勢なダイラタンシーメカニズムを示唆している、(7) Lasgit はバリアーの間の界面が、システムの重要な部分である事を示した、(8) ガス試験 2 においてガスは処分孔から出たが、ガス試験 3 中では出ておらず、キャニスターとバッファの界面に沿って移動し続けたとまとめられている。

試験評価適用性

このプロジェクトでは TRU に類似したベントナイトブロックが使用されている。
また、スケール実験の影響にも言及している。スケール実験で得た結果と室内試験で得た結果は定量的にではないが、定性的には整合するものであった。よってこのレポートは TRU の実験条件を決める際に役立つものと判断した。

備考

SKB Technical Report, TR-10-38, 2 月２０１０年

表 4.3.2-5　調査文献整理シート　（4/6）

文献名	Results from interface laboratory experiments, FORGE Report D3.36, 2013
技術概要	ガスの注入時の界面に注目し、ベントナイトブロック同士の界面の水理力学的特性、ベントナイトブロックとコンクリートさらに母岩（花崗岩）への力学的接点を確認した実験である。
技術名	界面研究実験の結果
選定理由	本検討で予定されている今後の実験で使用するベントナイト材料や母岩の種類は文献とは異なる。しかし、実験における条件設定や界面に着目した実験結果への考え方は共通するものとし選定した。
目的と概要	実験室での試験の目的は、以下の２項目を確認することである。 ①　ベントナイトブロック同士の界面の水理力学的特性 ②　ベントナイトブロックとコンクリートさらに様々な母岩（花崗岩等）の力学的接点

調査結果

正しく制御された応力と膨潤状態において異なるサンプルの組み合わせ(ブリック/ブリック&ブリック/母岩)によって新たに設計されたオエドメータセル(直径 90mm x 高さ 120mm)の長期注水試験(数ヶ月から２年までの期間)は、以下のデータを提供するために行われた。

(1)長期的な圧縮と注水による流体注入中の時間依存的な界面の透過係数の変化（すなわちシーリング）,(2)ガス注入時の圧力依存的なガスエントリー圧とガス相対透過係数の変化。

また、せん断試験は、剪断力又は変位の下で力学的界面特性を定量化するために行われた。

表-A ガス注入試験の例（他の試験結果：４０、４５参照）

試験名	備考	σ ax-ini (MPa)	p_i (MPa)
ガス注入試験 1 ベントナイト/ベントナイト	一定荷重での飽和 σ_{ax}=2.0MPa(中央注入)	2.0	1.8
			2.7-2.9 ブレークスルー
ガス注入試験 1 ベントナイト/花崗岩	一定荷重での飽和 σ_{ax}=1.5MPa(中央注入)	1.2	1
		1.5	1.5 ブレークスルー

実験結果に基づき、以下の結論が導かれた：

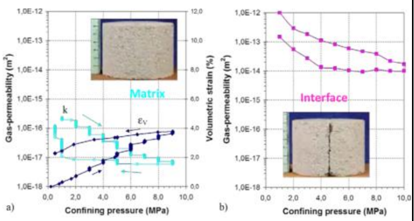
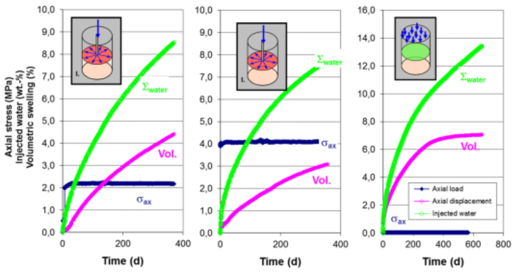


図-A　透過係数 a)ベントナイトマトリックス b) 界面ありベントナイト

- ✓ 乾燥状態での界面に沿ったガス流（例えば $10^{-12}m^2$)は、マトリックスを通る際（例えば $10^{-16}m^2$)よりも少なくとも 4 オーダー以上大きい。封圧の増加が顕著にガス流量を低下させる（10 MPa で 1 オーダー以上)、しかし影響は界面に対してより顕著である⇒少なくとも部分的なクラックシーリングは実証された（図-A)。
- ✓ ベントナイトブロックの集合体、すなわち共通の界面を持つブロックの飽和は封圧の作用によってのみごく小さく影響され、界面によっては影響されない（図-B)。しかし、粘着力の増加によって証明されるようにベントナイト/ベントナイト界面の飽和システムはシールの役割だけでなく、修復されることが実証された（図-C)。したがって、飽和ベントナイトブロックはガスにとって優先経路はならないと結論づけられる。さらに、修復された界面のガス圧による再開口は観察されなかった。



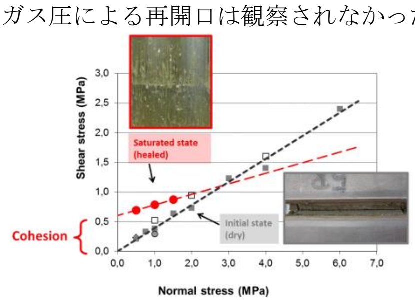


図-B　ベントナイト/ベントナイトの前飽和　図-C　乾式と飽和ベントナイト/ベントナイトのせん断試験

- ✓ 飽和ベントナイトマトリックスに対し、体積一定の条件で測定されたガス圧（ガス閾値）が、膨潤圧と外部から加えられた間隙水圧の合計を著しく超える。膨潤ベントナイトブロックの集合体は均質なマトリックスのように、すなわち全く界面特性がないような挙動を示す（図-D)。
- ✓ ガスのブレークスルーは定常流れをもたらす、しかし、局所的なガスの流れによる全応力への有意な影響は測定されていない。
- ✓ バッファの飽和にもかかわらず、ガスは、一般的に、粘土と他の材料（例えば掘削影響領域を持つ母岩）との間の界面に沿って移動する。接触領域におけるガスエントリー

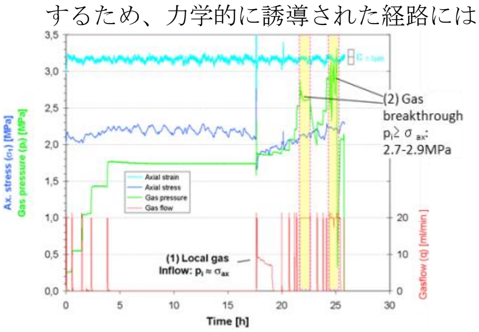
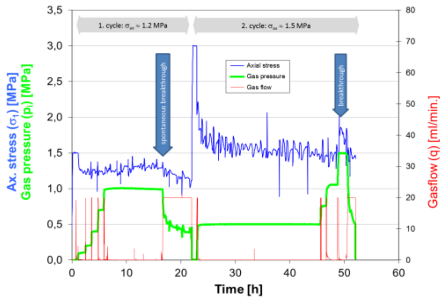
	圧が界面に作用する圧力よりも低いため、プラグ自体の飽和が顕著にガス移行のメカニズムに影響を与えないようである（図-E）。 ✓　　プラグの加圧による接触ゾーンのせん断変位は、飽和ベントナイトが塑性的に作用するため、力学的に誘導された経路にはなっていない。  図-D　ガス注入試験 1 ベントナイト/ベントナイト　　　図-E　ガス注入試験 1 ベントナイト/花崗岩
試験評価適用性	緩衝材として石英砂と Cali gel ベントナイトの混合体や花崗岩が使用されており、これは TRU 処分に用いようとされているものとは異なる。しかし、本文献におけるガス移行試験の条件設定の基本的な考え方や界面による影響は、整理した上で役立てることができると思われる。
備考	総括版：「FORGE D.3.38 レポート」（ページ 346-349 と 369-382）

表 4.3.2-6　調査文献整理シート　（5/6）

<table>
<tr><td>文献名</td><td>Key Gas Migration Processes in Compact Bentonite, FORGE Report D3.33, 2014</td></tr>
<tr><td>技術概要</td><td>MX80 ベントナイトを用いたガス移行試験の室内試験であり、水文条件、圧力条件、密度条件（界面における二種密度ベントナイト）を考慮し、ガス移行試験を実施した実験である。</td></tr>
<tr><td>技術名</td><td>コンパクトベントナイトにおける主要なガス移行プロセス</td></tr>
<tr><td>選定理由</td><td>本検討で行う実験に際し、条件（均一性・水文地質条件やスケール効果）の設定の参考資料になり得ること、また使用予定のベントナイト材料が類似していることから選定した。</td></tr>
<tr><td>目的と概要</td><td>①　予想される静水圧条件からの偏位に着目して、ベントナイトで全応力、間隙水圧と膨潤圧との関係を調べ、定量的データを提供する。
②　移流ガスの流れの機構メカニズムの理解の向上と、これが起こる可能性がある条件に関するさらなる根拠を提供する
③　ベントナイトのガス移行特性に対し、予想される静水圧力学条件と間隙圧サイクルからの偏差の影響についての理解を向上させる
④　粘土の水和、膨潤及び移行特性に対し、ベントナイト界面における低密度ゾーンの影響を調べる。</td></tr>
<tr><td>調査結果</td><td>

直径 60mm、長さ 120mm の円筒状試料を用いて、体積一定及び半径流装置を使用して試験を行った。

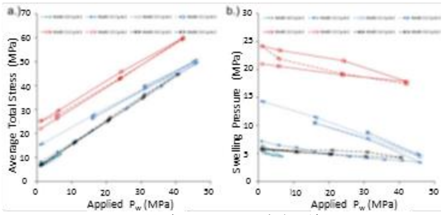


図-A 間隙圧サイクル試験の結果

<u>**間隙圧サイクル試験:**</u> 間隙圧サイクル試験を実施し、膨潤圧は p_w の増加とともに減少することが観察された。この関係の形式は非線形であり、膨潤圧値は増加するとますます加えた水圧に対して鈍感になる（図-A）。

<u>**予想される水理地質条件下でのベントナイトのガス移行：**</u>飽和 MX80 ベントナイトの主要なガス移行モードは、形成のダイラタント経路近傍にある。この結論に至る観察結果を以下に示す。（i）粘土へのガスエントリーから生じた水との置換の証拠は確認されていない。（ii）試料の応力状態とガスが粘土に進入するために必要とされる圧力には非常に明確な関連性が認められる。（iii）ガス破過の発生後に σ、Π および p_p の間に非常に明確な関連性が認められる。（iv）ガス移行に関連する σ、Π と p_p のローカライズ変化が認められる。（v）特徴的ではないガス破過中の局所的な流出が認められる。（vi）不安定な流れによって証明される時間とガス経路の空間的な進展が認められる。（vii）ガスは粘土の大部分を通過していなかったことを示しており、あらゆる試料（ポストガス試験）中で測定可能な不飽和化は認められなかった。

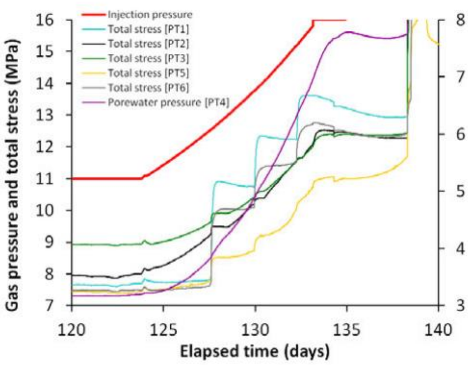


図-B 主要なガスのブレークスルーは監視応力と間隙水圧の顕著な変化と伴っている。監視対象応力の明確なステップ状の応答は、異なる経路伝搬イベントとして解釈される障害に近づいている間に観察された。

<u>**間隙水増加条件下でのベントナイトのガス移行（図-C):**</u>

2 つの実験(MX80-13 & MX80-14)によって、両方の試料は、間隙圧力サイクルのフェーズを採取し、その後ガス注入を開始する前に間隙水圧増加状態に戻った（MX80-13 の試験は 42MPa のガス圧と水圧で開始し、最終的なガス圧と水圧は、それぞれ 57MPa 及び 32MPa であった、 実験ステップの詳細は、報告書の P18-29 を参照のこと）。実験結果の観察によると、ガス流入挙動は、低い印加水圧で実施した試験のものと著しく類似している。印加ガス圧が、材料の圧縮残留応力に近似するか、またはそれよりも大きい場合にのみ、ガスは粘土に進入する。ガスは粘土に入ると、移行は非常に局所化され、本質的に不安定となる；ある伝達路から他の経路へ切り替える。これらの観察は、二相流の標準的な粘弾性毛細管概念では説明で

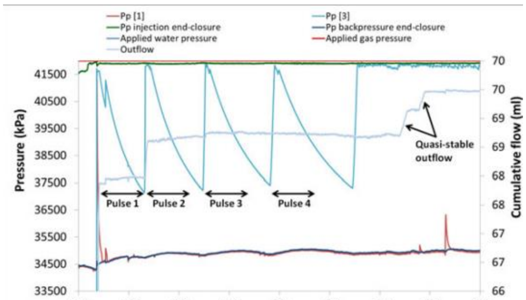


図-B 図-C　Mx80-14 試験における初期ガスブレークスルーイベント。システムは、明らかに非摂動だった一方で、過渡流出が自発的なやり方で、約 413.8 日で発生しました。しかし、粘土はほとんどすぐに自己シールを始め、そして流出が停止した。これは、関連する過渡的な流出およびその後のセルフシールとの圧力サイクルの位相が続いた。このフェーズ中に観察されたガス移行が、非常にエピソード的で、極端な周期性を表示し、サイクル間の時間間隔が増加し、そして加圧及び脱圧の速度は徐々に変化するにつれて継続的な時間発展と組み合わせだった。

</td></tr>
</table>

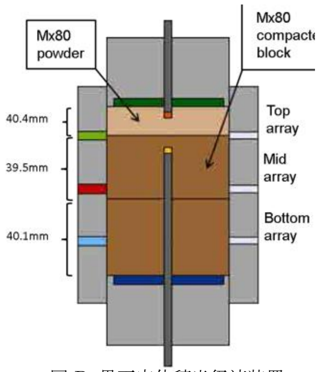
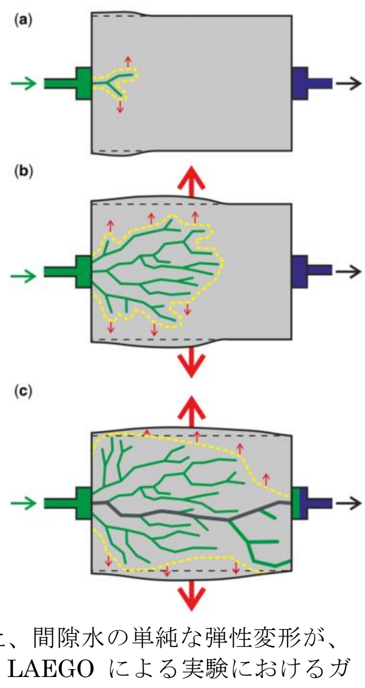
	きないが、移行の主なモードとしてダイラタント経路の構造と一致する傾向が強い。両試験の観察結果からは、ベントナイトは長期間にわたり、非常に大きな応力勾配を維持することが可能であることを示唆している。Mx80-14 の試験では、ガスの流れは、ある状態から別の状態に自然に切り替わることから、偶発的で不安定であることが観察された。結果は、システムが稼働状態である間は、ガスはシンクをを追い続けることを示唆している。このように、ガスが出る（すなわち破過時の）ための経路は非常に予測不可能であり、潜在的に特有な状態であることが考えられる。 <u>**二種密度界面での試験（図-D）：**</u> 単純な二種密度ベントナイトの膨潤および流体の流れの挙動の影響が調査された。最初の試験は、Lasgit 試験において観察された同様の特徴を有する飽和プロセス（徐々に、互い違いに）の複雑さを実証した。ベントナイトは、長期間にわたってかなりの圧力勾配を維持することと、粘土を介して顕著に変化することなく持続される応力場の不均質性を維持することが示された。注入試験中、非常に低いガス流入圧力(~3-3.5MPa)が観察されたことを除き、粘土の低い密度部分のガスのエントリー圧は、無処理の圧縮ベントナイトブロックによるこれまでの試験で見られたものと同様の挙動を示した。  図-D 界面定体積半径流装置
試験評価 適用性	本報告書は、ガス移行中の異なる条件（予想する水文地質条件、高間隙水条件とデュアル密度）の効果に対し、ピュアベントナイトの挙動を明確に説明している。本文献は TRU を対象とした実験条件（均一性、水文地質条件やスケール効果のような）の設定のための参考資料となりうること、また本文献で要約されている試験で使用された材料は TRU での使用が想定されている材料（純粋なベントナイト）と類似していることから、TRU への適用性が高いと判断した
備考	総括版が「FORGE D.3.38 レポート」（P.233-255）

表 4.3.2-7　調査文献整理シート　（6/6）

<table>
<tr><td>文献名</td><td>Experimental observations of mechanical dilation at the onset of gas flow in Callovo-Oxfordian claystone</td></tr>
<tr><td>技術概要</td><td>特殊な三軸セルで行われたガス移行試験</td></tr>
<tr><td>技術名</td><td>Callovo-Oxfordian 粘土岩内のガス流の発症時力学的な拡張の実験観察</td></tr>
<tr><td>選定理由</td><td>TRU 処分場の母岩として想定されているうちの一つである堆積岩と類似した粘土岩を用いた三軸セル内ガス移行試験が行われているため選定対象とした。</td></tr>
<tr><td>目的と概要</td><td>粘土系地層処分施設（GDF）では、ガスの流れは 4 つの主要な現象論的モデルで定義される。:（i）間隙水としての拡散および/または溶解（ii）内部構造の元の間隙率での粘弾性毛細管（または二相流）流れ、（iii）局所的なダイラタント経路（微細亀裂）に沿った流れ、（iv）岩のガスフラクチャリング。
　以上を踏まえて、ガスの移動を制御するメカニズムを調べるために、Callovo-Oxfordian 粘土岩（COx）を使用し、英国地質調査所（BGS）と LAEGO-ENSG Nancy（LAEGO）で実験的研究が実施された。</td></tr>
<tr><td>調査結果</td><td>BGS で行った実験のステップおよび説明、軸方向応力と拘束圧のまとめを以下の表に示す。
<table>
<tr><th>ステップ</th><th>説明</th><th>軸方向応力 (MPa)</th><th>拘束圧 (MPa)</th><th>注入間隙水圧 (MPa)</th><th>試験開始時 (日)</th><th>段の長さ (日)</th></tr>
<tr><td>1</td><td>飽和と膨潤</td><td>12.5</td><td>11.5</td><td>4.5</td><td>0.1</td><td>21.7</td></tr>
<tr><td>2</td><td>平衡化</td><td>13</td><td>12.5</td><td>4.5</td><td>21.8</td><td>26.1</td></tr>
<tr><td>3a</td><td>水理試験</td><td>13</td><td>12.5</td><td>8.5</td><td>47.9</td><td>50.1</td></tr>
<tr><td>3b</td><td>水理試験</td><td>13</td><td>12.5</td><td>4.5</td><td>98</td><td>29</td></tr>
<tr><td>4a</td><td>ガス注入ランプ(一定の流れ)</td><td>13</td><td>12.5</td><td>4.5-9.5</td><td>127</td><td>35.3</td></tr>
<tr><td>4b</td><td>一定の圧力でガス注入</td><td>13</td><td>12.5</td><td>9.5</td><td>162.3</td><td>25.5</td></tr>
<tr><td>4c</td><td>ガス注入ランプ(一定の流れ)</td><td>13</td><td>12.5</td><td>9.5-10</td><td>187.8</td><td>22.2</td></tr>
<tr><td>4d</td><td>一定の圧力でガス注入</td><td>13</td><td>12.5</td><td>10</td><td>210</td><td>26.1</td></tr>
<tr><td>4e</td><td>ガス注入ランプ(一定の流れ)</td><td>13</td><td>12.5</td><td>10-10.5</td><td>236.1</td><td>18.9</td></tr>
<tr><td>4f</td><td>一定の圧力でガス注入</td><td>13</td><td>12.5</td><td>10.5</td><td>255</td><td>320</td></tr>
</table>
　上記のステップは、実験結果を説明することを目的とし、設定した。
　ステップ 1 では、ガスは、おそらく流路の樹状パターンで、ガスエントリー圧によって試料に進入することが分かった。ガスの伝播は、材料内部の間隙ネットワークに形成されたダイラタント経路に沿い、またその経路は、間隙ネットワークの「断裂」として視覚化することができる。各経路の周囲では内部構造が圧縮し、局所的な経路から離れた水の動きとなる可能性がある。
　ステップ 2 では、樹状流路ネットワークは、放射状ひずみの加速をもたらし、試料の中央平面に到達する。この段階で、試料からの流体の排出も進展する。
　ステップ 3 では、ガスは試料の背圧載荷面にまで達しており、ガスの自由な移動は、試料の端から端まで発生する。 試料が膨張し続けることは、ガス経路が増加していることを示唆している可能性がある。
　2 つの実験的な研究は共に、試料の微妙な横方向のひずみを示しており、それはガスの流れが微細亀裂に沿ってではなく、大きな伝導特性（すなわち、引張破断）で発生することを示唆している。
　ステップ 4 は、COx のガス破砕を表し、唯一 LAEGO により行った実験でのみ認められた。試料の破壊の原因になる顕著な引張破断が発生する結果となっている。


　観察された変形は考慮すべき水・応力連成を示した。また、間隙水の単純な弾性変形が、試料で見られる変形を完全に説明することは不可能であり、LAEGO による実験におけるガスフラクチャリングは、ガスの流れがダイラタント経路の形成により発生したことを明らかに示している。
　2 つの実験によって測定されたガスエントリー圧は、著しく異なる(BGS, 10.5 MPa; LAEGO 6 MPa)ことが示されており、これは、試料作製方法の違いに起因する可能性も示唆される。</td></tr>
<tr><td>試験評価適用性</td><td>本論文で示された実験の対象母岩は堆積岩であり、TRU 処分施設周辺の母岩として想定されているうちの一つと同様である。本論文では岩盤におけるガス移行システムについて、概略的な把握するための実験結果と、その実験結果に影響を与える条件（軸方向応力、拘束圧歴史履歴、試料調製法、COx の微細または大きな亀裂、試料の初期状態等）などが述べられて</td></tr>
</table>

	いる。よって、母岩におけるガス移行システムについての実験計画の参考となると思われる。
備考	Cuss R, Harrington J, Giot R and Auvray, C, 2014. Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement, 400, 507-519

(3) ベントナイト緩衝材内部及び他構成材料との界面におけるガス移行挙動評価試験の検討

システム試験の実施においては、TRU 処分概念の人工バリアにおいて懸念されるベントナイト緩衝材の施工/他構成材料界面を模擬した構造も検討する必要がある他、当該箇所のガス移行挙動を明らかとしておくことが重要である。

ここでは、システム試験に反映すべき施工/他構成材料界面（異種材料界面）におけるガス移行挙動の解明に資することを目的として、界面におけるガス移行問題・課題等について整理し、そのうえで供試体レベルにて実施する界面のガス移行挙動評価に係る要素試験計画を立案した。

なお、前項（「(2) システム試験の策定に資する検討」）での検討において、既往のシステム試験の調査結果より、本検討で留意すべき点が以下のように抽出されている。

- 対象とする処分施設概念の構造や形状効果を考慮したガス移行試験計画の策定
- 対象とするガス移行現象を捉えるためのモックアップ供試体の作製
- 対象とするガス現象を捉えるために必要なモックアップ供試体内での計測機器の配置計画

本検討では、上記の留意点のうち主に「ガス移行現象を捉えるためのモックアップ供試体の作製」を念頭においた概略の試験計画を策定することとした。

1) 供試体の作製と試験容器の検討

界面のガス移行挙動を評価するために対象とする供試体概要と仕様について、表 4.3.2-8 のように想定した。なお、供試体については TRU 廃棄物処分概念（図 4.3.2-1）でガス移行経路となり得る界面を想定したうえで概要を検討した。

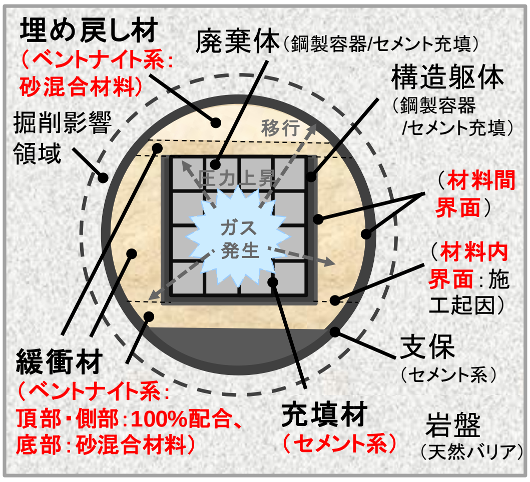


図 4.3.2-1　TRU 廃棄物処分概念図（廃棄体グループ 2 の処分概念例）

表 4.3.2-8　本件検討で対象とする供試体概要と仕様

TRU 処分概念で生じ得る 界面の概要	供試体概要	仕様
・　緩衝材施工時に生じる得る界面 ①　底部緩衝材施工時の各層間に生じる界面（水平継ぎ目） ②　側部緩衝材施工時の各層間に生じる界面（水平継ぎ目） ③　頂部緩衝材施工時の各層間に生じる界面（水平継ぎ目） ④　底部／側部緩衝材間に生じる施工界面（水平継ぎ目） ⑤　側部／頂部緩衝材間に生じる施工界面（水平継ぎ目） ⑥　底部緩衝材／構造躯体底部間に生じる界面（水平界面）	・　ベントナイト系材料／ベントナイト系材料の界面を有する供試体	・　底部緩衝材を想定した供試体（30%砂混合ベントナイト系材料）のベントナイト乾燥密度 ρ_d＝1.36 Mg/m^3 ・　底部以外の緩衝材を想定した供試体（ベントナイト系材料単体）のベントナイト乾燥密度 ρ_d＝1.36 Mg/m^3
⑦　側部緩衝材／構造躯体側部間に生じる界面（鉛直界面） ⑧　側部緩衝材／支保工間に生じる界面（弯曲界面）	・　ベントナイト系材料／セメント系材料（あるいは鋼製材料）の界面を有する供試体	・　構造躯体の模擬材料には、炭素鋼あるいはステンレス鋼等の使用を想定 ・　支保工（セメント系材料）の模擬材料には、普通コンクリート（OPC）等の使用を想定
・　埋め戻し材施工時に生じる得る界面 ⑨　埋め戻し材施工時の各層間に生じる界面（水平継ぎ目） ⑩　埋め戻し材／頂部緩衝材間に生じる施工界面（水平継ぎ目）	・　ベントナイト系材料／ベントナイト系材料の界面を有する供試体	・　埋め戻し材を想定した供試体（30%砂混合ベントナイト系材料）のベントナイト乾燥密度 ρ_d＝1.36 Mg/m^3
⑪　埋め戻し材／支保工間に生じる界面（弯曲界面）	・　ベントナイト系材料／セメント系材料（あるいは鋼製材料）の界面を有する供試体	・　支保工（セメント系材料）の模擬材料には、普通コンクリート（OPC）等の使用を想定

また、各々の供試体の試験容器は界面のガス移行特性が把握できる構成とする。

具体的には、供試体における水／ガス流量の測定および全応力の測定が可能となるような計測機器の配置を検討し、特に水／ガスの流量測定においては健全部と界面部とを区別して計測可能となるように留意した。

表 4.3.2-9 に試験中に計測する項目一覧を示す。

表 4.3.2-9　試験中に計測する項目一覧

対象部位＼計測項目		全応力	透水量	透気量
健全部	緩衝材模擬部	○	○	○
	構造躯体模擬部	×	○	○
界面部（母材部）	緩衝材／緩衝材模擬部	○	○	○
	緩衝材／構造躯体模擬部	×	○	○

a. 緩衝材施工時に生じる得る界面を模擬した供試体の作製と試験容器の検討

緩衝材施工時に生じる得る界面を模擬した供試体として、ベントナイト系材料／ベントナイト系材料の界面、およびベントナイト系材料／セメント系材料（あるいは鋼製材料）の界面を有する供試体を作製する。

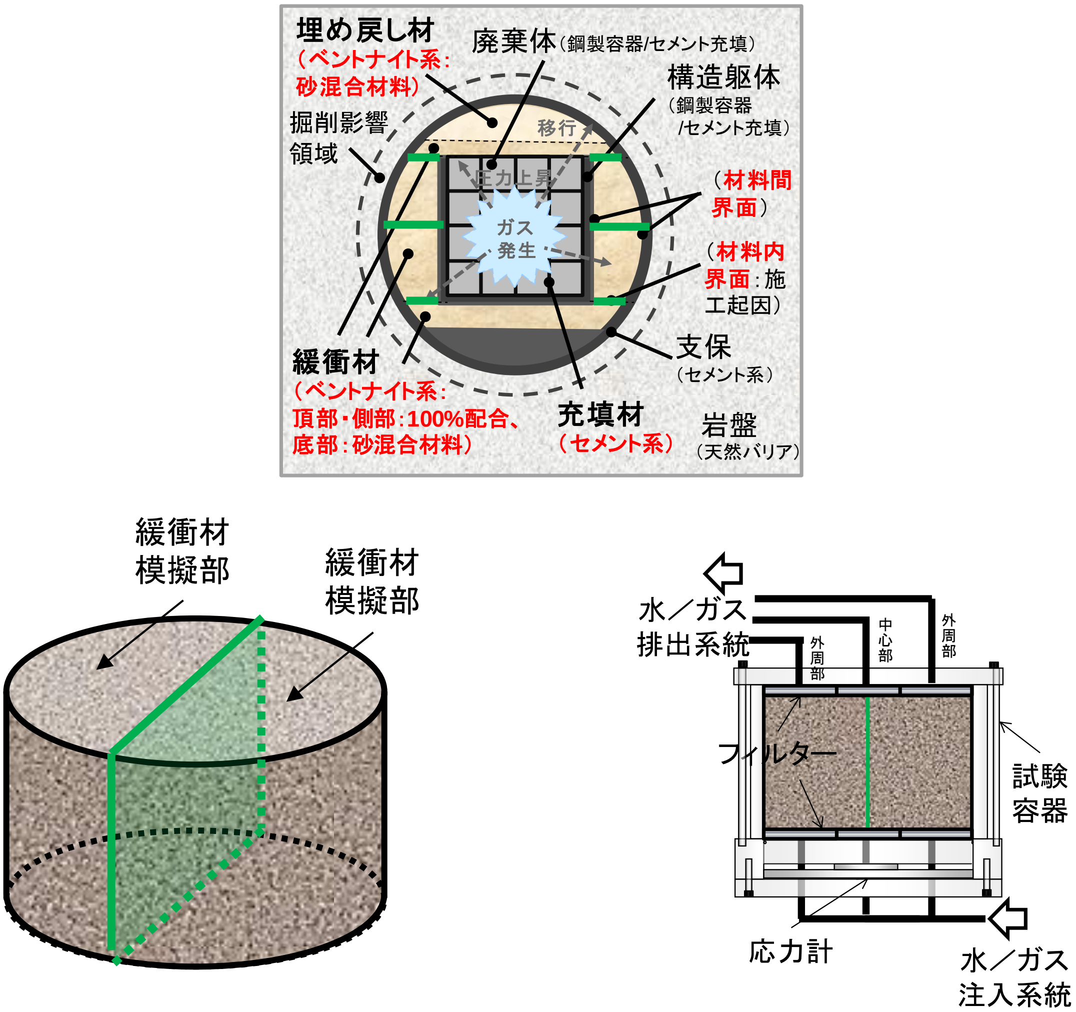
なお、処分概念の形状を考慮し、水平界面、鉛直界面および弯曲界面を有する供試体を各々作製する。

また、各々の供試体の試験容器は表 4.3.2-9 に示したような界面のガス移行特性が把握できる構成とした。

(a) 水平界面を模擬した供試体と試験容器

処分概念において水平界面（あるいは水平継ぎ目）が生じる部位は、表 4.3.2-8 に示した通りである。

図 4.3.2-2 に水平界面を模擬した供試体の作製概念を示す。供試体の作製に際しては、現実的に想定される構築手順に沿うものとする。



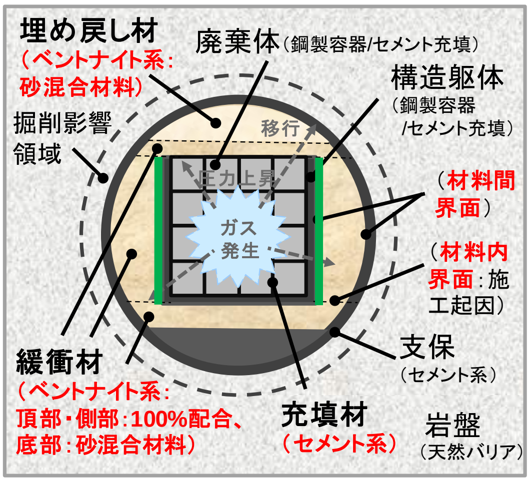
- 水／ガス排出系統に流量計を設置して透水／透気量を計測
- 供試体下端に全応力計を設置して母材部／界面部の膨潤圧を計測

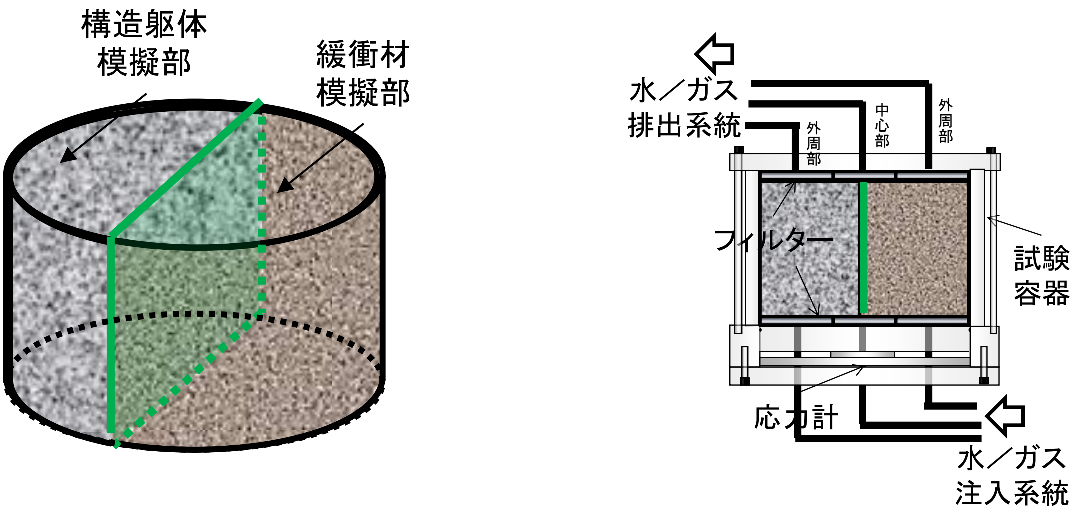
図 4.3.2-2　想定する人工バリアの水平界面部位（緑線）を考慮した供試体の作製概念および試験容器の概念

(b) 鉛直界面を模擬した供試体と試験容器

処分概念において鉛直界面が生じる部位は、表 4.3.2-8 に示した通りである。

図 4.3.2-3 に鉛直界面を模擬した供試体の作製概念を示す。供試体の作製に際しては、現実的に想定される構築手順に沿うものとする。





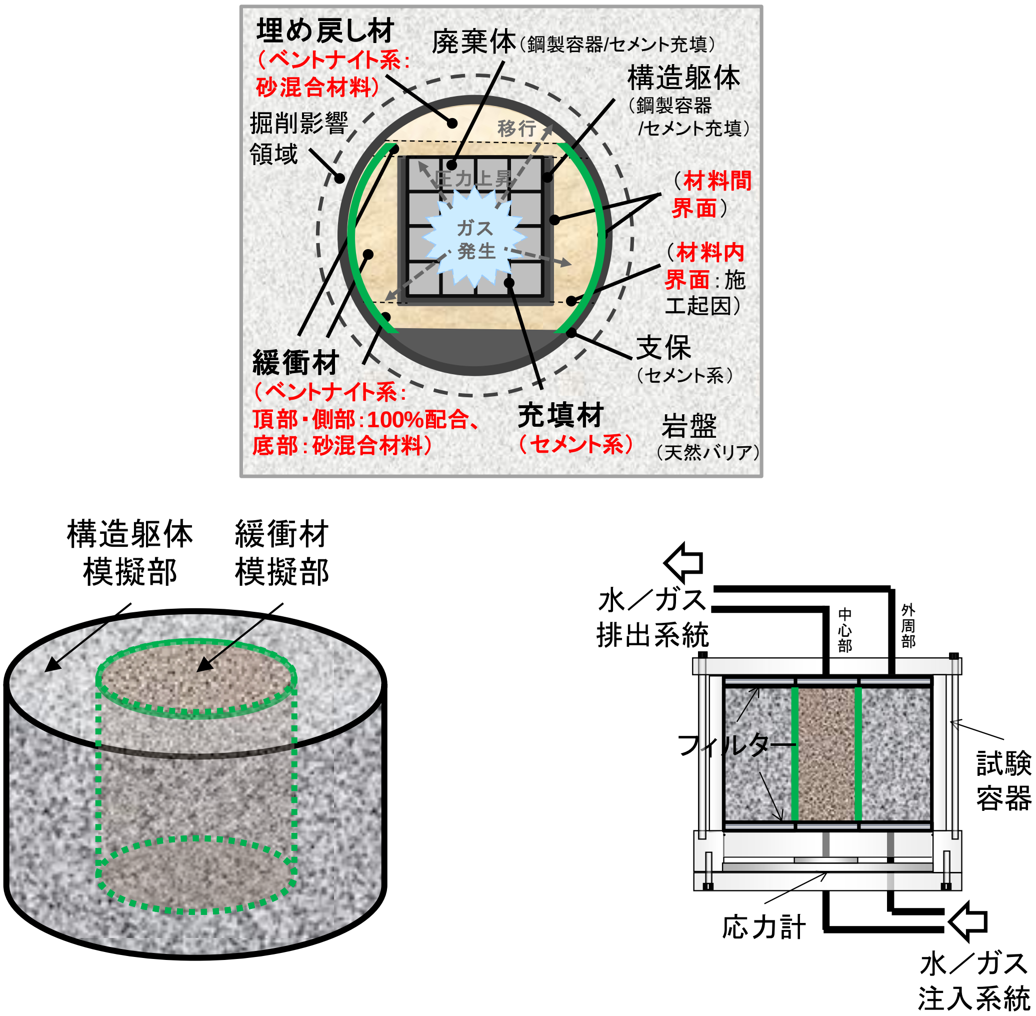
- 水／ガス排出系統に流量計を設置して透水／透気量を計測
- 供試体下端に全応力計を設置して母材部／界面部の膨潤圧を計測

図 4.3.2-3　想定する人工バリアの鉛直界面部位（緑線）を考慮した供試体の作製概念および試験容器の概念

(c) 弯曲界面を模擬した供試体と試験容器

処分概念において弯曲界面が生じる部位は、表 4.3.2-8 に示した通りである。

図 4.3.2-4 に弯曲界面を模擬した供試体の作製概念を示す。供試体の作製に際しては、現実的に想定される構築手順に沿うものとする。



- 水／ガス排出系統に流量計を設置して透水／透気量を計測
- 供試体下端に全応力計を設置して母材部／界面部の膨潤圧を計測

図 4.3.2-4 想定する人工バリアの鉛直界面部位（緑線）を考慮した供試体の作製概念
および試験容器の概念

b. 埋め戻し材施工時に生じる得る界面を模擬した供試体の作製と試験容器の検討

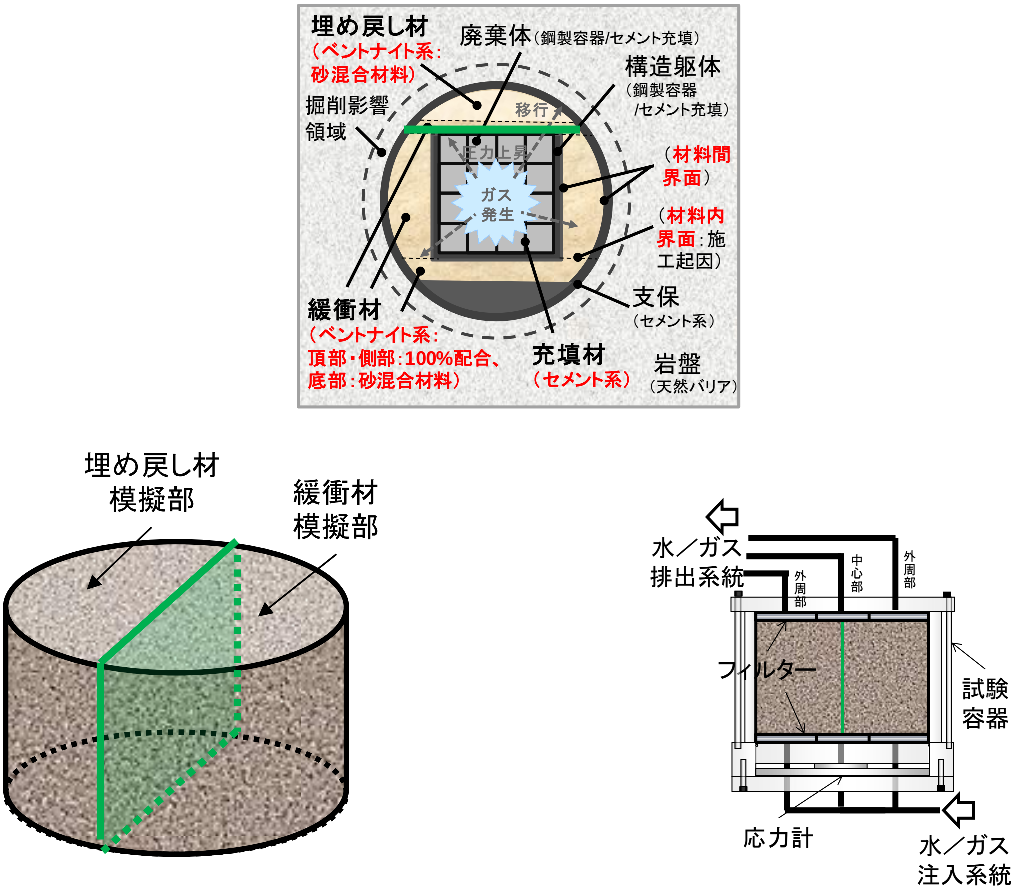
埋め戻し材施工時に生じる得る界面を模擬した供試体として、ベントナイト系材料／ベントナイト系材料の界面、およびベントナイト系材料／セメント系材料の界面を有する供試体を作製する。

また、処分概念の形状を考慮し、水平界面および弯曲界面を有する供試体を各々作製する。

(a) 水平界面を模擬した供試体と試験容器

処分概念において水平界面（あるいは水平継ぎ目）が生じる部位は、表 4.3.2-8 に示した通りである。

図 4.3.2-5 に水平界面を模擬した供試体の作製手順を示す。供試体の作製に際しては、現実的に想定される構築手順に沿うものとする。



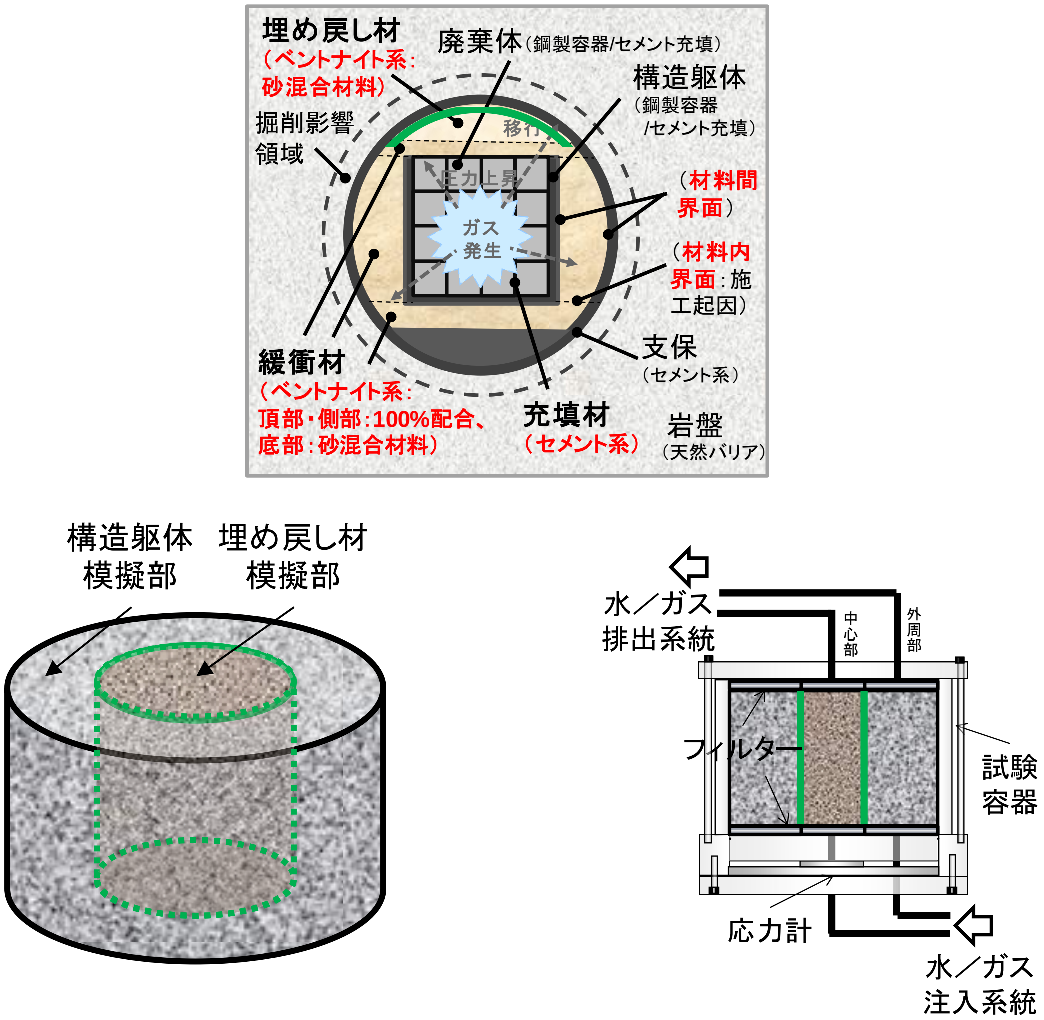
- 水／ガス排出系統に流量計を設置して透水／透気量を計測
- 供試体下端に全応力計を設置して母材部／界面部の膨潤圧を計測

図 4.3.2-5 想定する人工バリアの水平界面部位（緑線）を考慮した供試体の作製概念および試験容器の概念

(b) 弯曲界面を模擬した供試体と試験容器

処分概念において弯曲界面が生じる部位は、表 4.3.2-8 に示した通りである。

図 4.3.2-4 に弯曲界面を模擬した供試体の作製手順を示す。供試体の作製に際しては、現実的に想定される構築手順に沿うものとする。



- 水／ガス排出系統に流量計を設置して透水／透気量を計測
- 供試体下端に全応力計を設置して母材部／界面部の膨潤圧を計測

図 4.3.2-6　想定する人工バリアの鉛直界面部位（緑線）を考慮した供試体の作製概念および試験容器の概念

2) 供試体への注水飽和と計測項目の検討

実処分施設のガス発生時期については諸説あるが[6]、ここでは施設の再冠水が完了し、全ての人工バリア材料が地下水によって完全飽和した時期のガス移行挙動を評価することを目的とする。

なお、飽和完了の判断としては、表 4.3.2-9 に示す計測項目のうち全応力の測定によって平衡膨潤圧が発揮できていること、透水量の測定によって飽和透水係数が測定出来ること、等がある。

図 4.3.2-7～図 4.3.2-9 に、作製した供試体を飽和させるための注水過程の概要を示す。

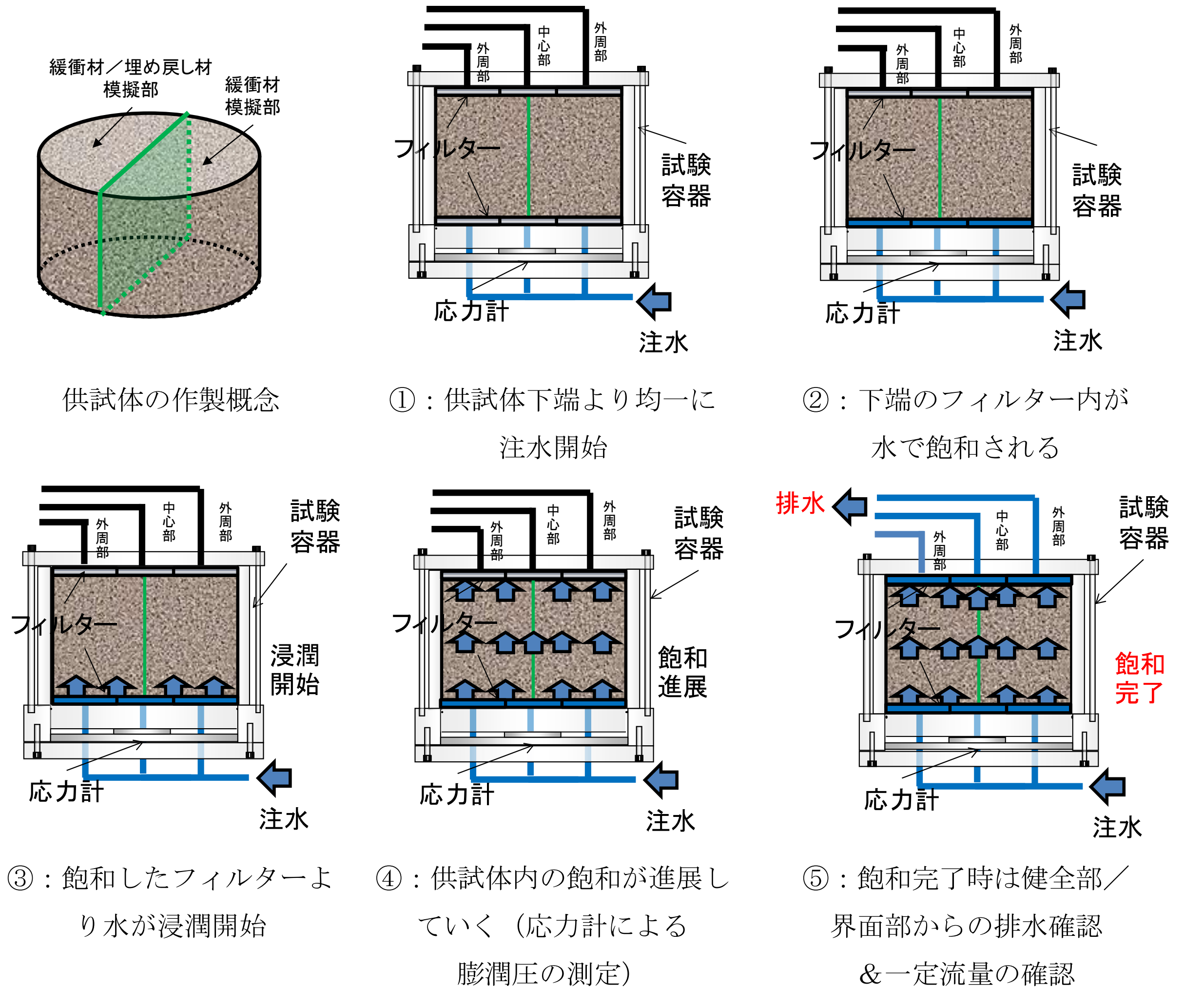
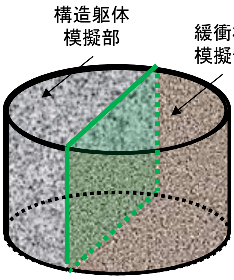
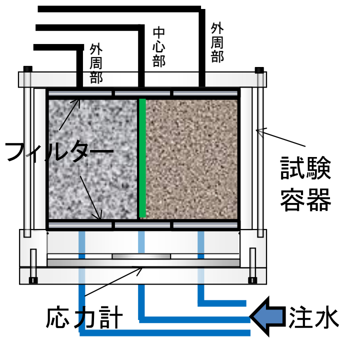


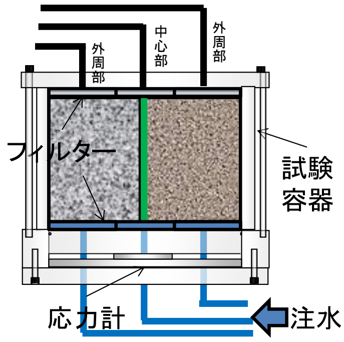
図 4.3.2-7　水平界面（緑線）を模擬した供試体への注水飽和過程の概要



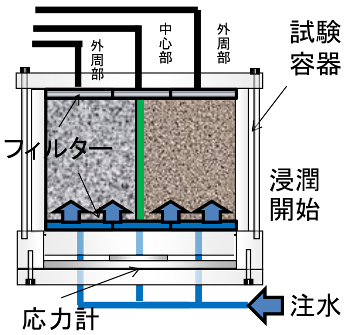
供試体の作製概念



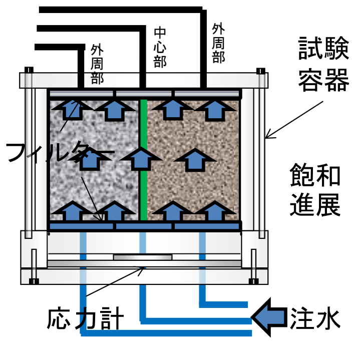
①：供試体下端より健全部／
界面部の系統別に注水開始



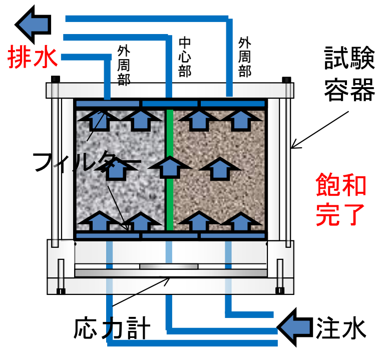
②：下端のフィルター内が
水で飽和される



③：飽和したフィルターより
水が浸潤開始

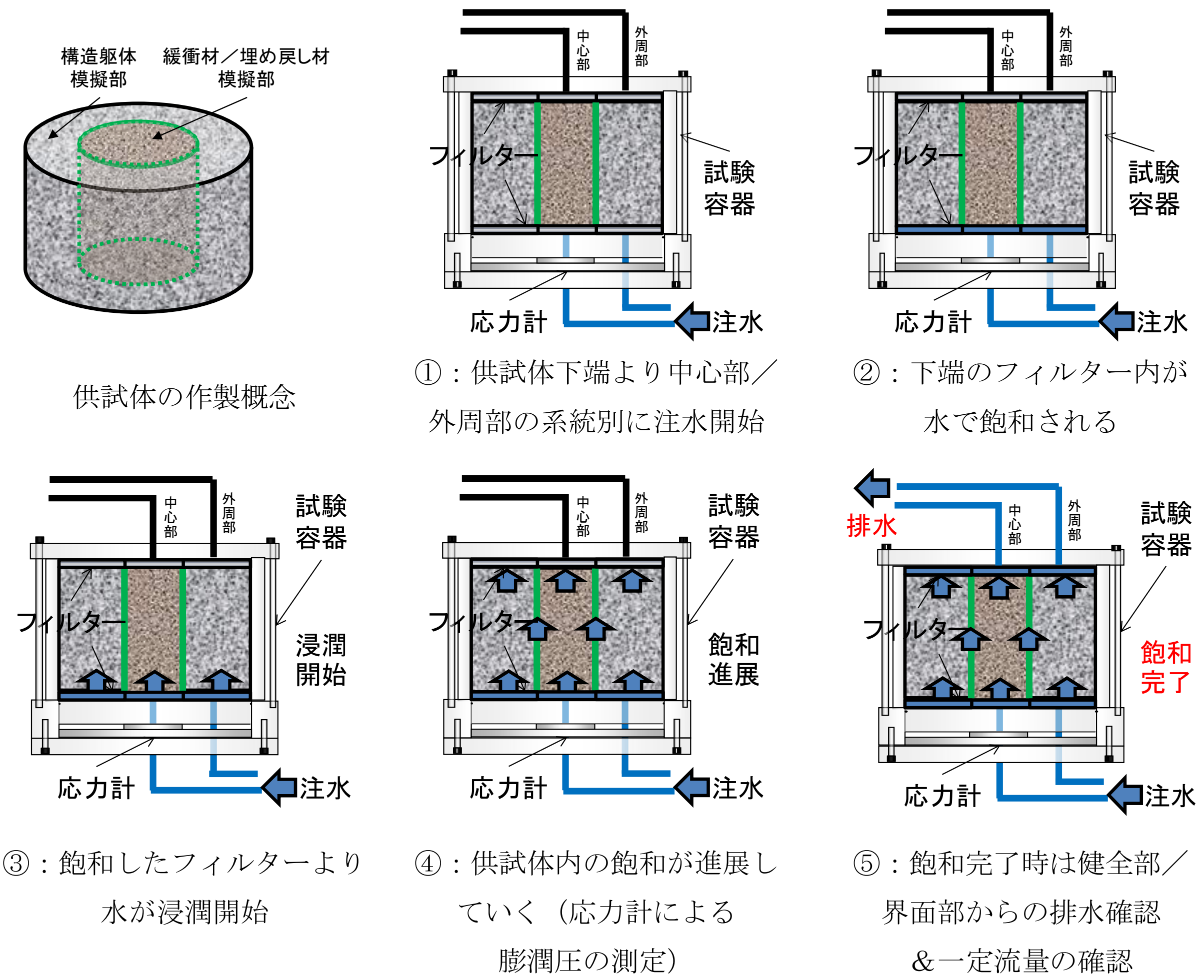


④：供試体内の飽和が進展し
ていく（応力計による
膨潤圧の測定）



⑤：飽和完了時は健全部／
界面部からの排水確認
＆一定流量の確認

図 4.3.2-8　鉛直界面（緑線）を模擬した供試体への注水過程の概要



供試体の作製概念

①：供試体下端より中心部／外周部の系統別に注水開始

②：下端のフィルター内が水で飽和される

③：飽和したフィルターより水が浸潤開始

④：供試体内の飽和が進展していく（応力計による膨潤圧の測定）

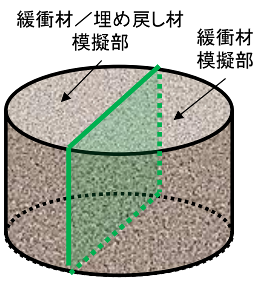
⑤：飽和完了時は健全部／界面部からの排水確認＆一定流量の確認

図 4.3.2-9　弯曲界面（緑線）を模擬した供試体への注水過程の概要

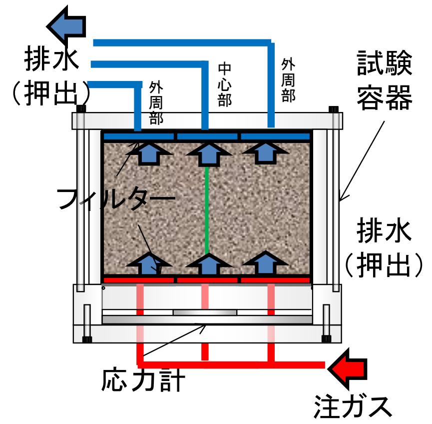
3) 供試体へのガス注入と計測項目の検討

人工バリア材料が地下水によって完全飽和した時期の界面におけるガス移行挙動を評価することを目的として、ここでは現実的に想定される飽和した人工バリア界面へのガス浸入経路を考慮した、供試体へのガス注入計画を策定した。

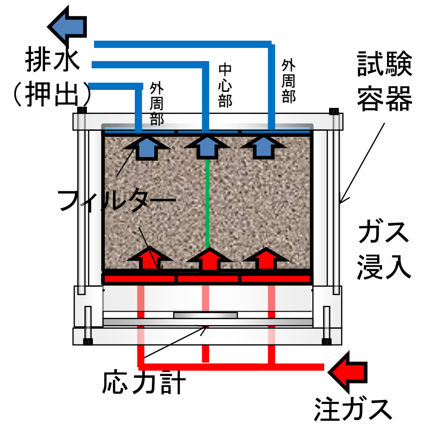
図 4.3.2-10～図 4.3.2-12 に、作製した飽和供試体へのガス注入過程の概要を示す。



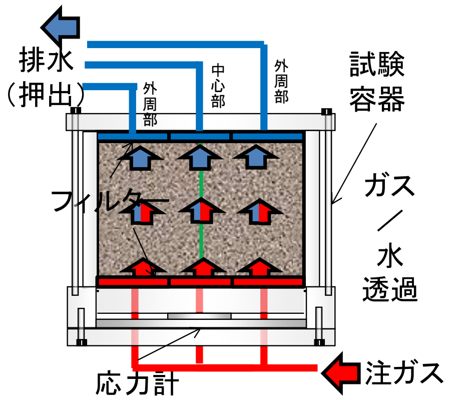
供試体の作製概念



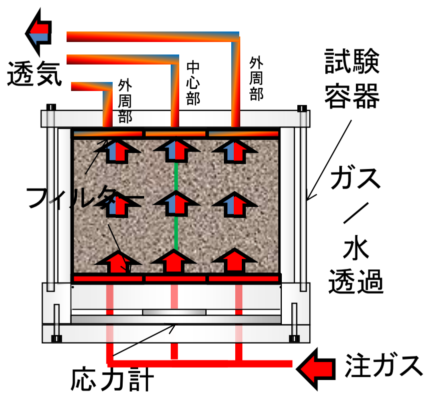
①：供試体下端より均一にガス注入開始（注入ガスによって下端フィルター内の水が押し出される）



②：下端のフィルター内よりガスが浸入し、供試体からの排水が促進される

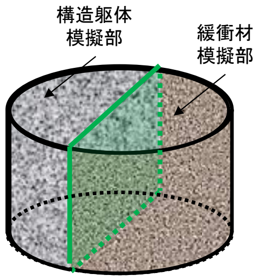


③：ガス浸入が継続し、供試体からの排水が継続するとともに、気液二相流による
ガス移行が進展する

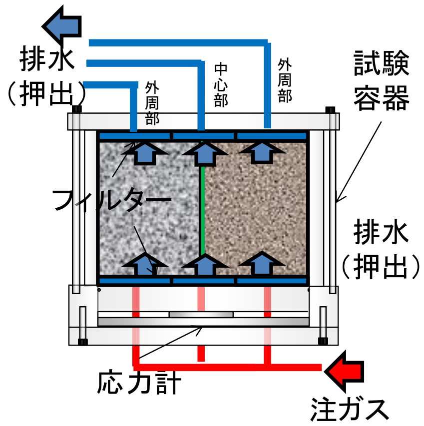


④：気液二相流によるガス移行が進展し、ガスが供試体上端に到達することで透気が確認
（流量計による水／ガスの流量の確認）

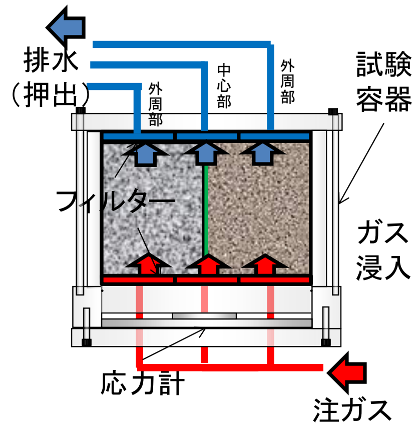
図 4.3.2-10　水平界面（緑線）を模擬した供試体へのガス注入過程の概要



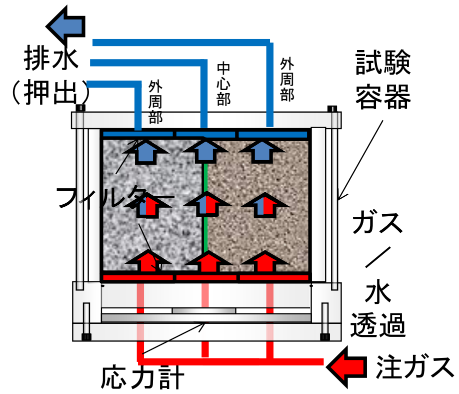
供試体の作製概念



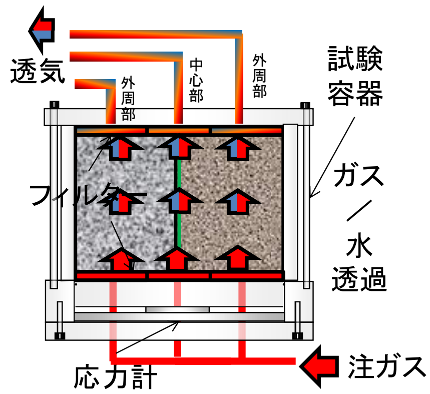
①：供試体下端より健全部／界面部系統毎にガス注入開始（注入ガスによって下端フィルター内の水が押し出される）



②：下端のフィルター内よりガスが浸入し、供試体からの排水が促進される

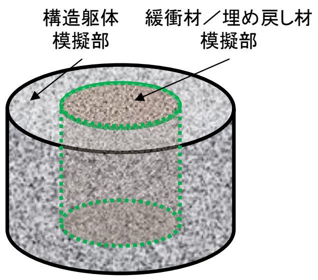


③：ガス浸入が継続し、供試体からの排水が継続するとともに、気液二相流によるガス移行が進展する

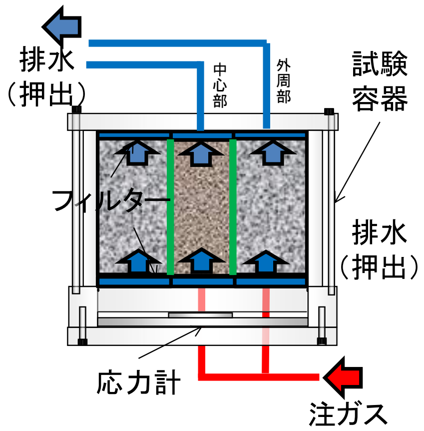


④：気液二相流によるガス移行が進展し、ガスが供試体上端に到達することで透気が確認（流量計によるう水／ガスの流量の確認）

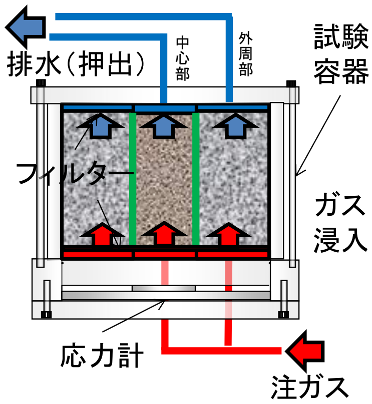
図 4.3.2-11　鉛直界面（緑線）を模擬した供試体へのガス注入過程の概要



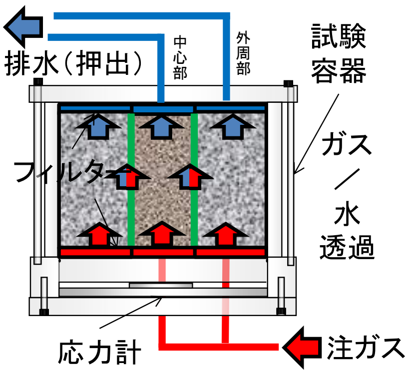
供試体の作製概念



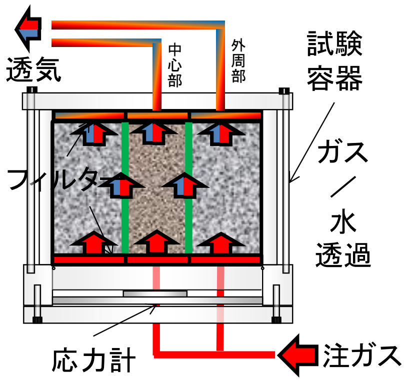
①：供試体下端より健全部／界面部系統毎にガス注入開始（注入ガスによって下端フィルター内の水が押し出される）



②：下端のフィルター内よりガスが浸入し、供試体からの排水が促進される



③：ガス浸入が継続し、供試体からの排水が継続するとともに、気液二相流によるガス移行が進展する



④：気液二相流によるガス移行が進展し、ガスが供試体上端に到達することで透気が確認（流量計によう る水／ガスの流量の確認）

図 4.3.2-12　弯曲界面（緑線）を模擬した供試体へのガス注入過程の概要

4) ガス移行試験の実施ケース

ここでは、作製する供試体で毎に区分したガス移行試験の実施ケースを表 4.3.2-10 のように取り纏めた。

なお、どのケース No.を選択するかは、難易度や優先度を考慮し、詳細計画を別途策定のうえ、決定するものとする。

表 4.3.2-10　試験ケース一覧

ケース No.	試験で再現する界面の概要 （TRU 処分概念で生じ得る界面の概要）	供試体タイプ	着目点	（確認方法）
緩衝材施工時に生じる得る界面				
①	①　底部緩衝材施工時の各層間に生じる界面（水平継ぎ目）	・　水平界面模擬タイプ	・　施工継ぎ目のシール性／自己修復性	・　試験中の膨潤圧測定 ・　解体後の密度測定
			・　施工継ぎ目のガス移行特性	・　試験中の水／ガスの圧力および排出流量
②	②　側部緩衝材施工時の各層間に生じる界面（水平継ぎ目）	・　水平界面模擬タイプ	・　施工継ぎ目のシール性／自己修復性	・　試験中の膨潤圧測定 ・　解体後の密度測定
			・　施工継ぎ目のガス移行特性	・　試験中の水／ガスの圧力および排出流量
③	③　頂部緩衝材施工時の各層間に生じる界面（水平継ぎ目）	・　水平界面模擬タイプ	・　施工継ぎ目のシール性／自己修復性	・　試験中の膨潤圧測定 ・　解体後の密度測定
			・　施工継ぎ目のガス移行特性	・　試験中の水／ガスの圧力および排出流量
④	④　底部／側部緩衝材間に生じる施工界面（水平継ぎ目）	・　水平界面模擬タイプ	・　異種材料界面のシール性／自己修復性	・　試験中の膨潤圧測定 ・　解体後の密度測定
			・　異種材料界面のガス移行特性	・　試験中の水／ガスの圧力および排出流量

ケース No.	試験で再現する界面の概要（TRU 処分概念で生じ得る界面の概要）	供試体タイプ	着目点	（確認方法）
⑤	⑤ 側部／頂部緩衝材間に生じる施工界面（水平継ぎ目）	・ 水平界面模擬タイプ	・ 異種材料界面のシール性／自己修復性	・ 試験中の膨潤圧測定 ・ 解体後の密度測定
			・ 異種材料界面のガス移行特性	・ 試験中の水／ガスの圧力および排出流量
⑥	⑥ 底部緩衝材／構造躯体底部間に生じる界面（水平界面）	・ 水平界面模擬タイプ	・ 異種材料界面のシール性／自己修復性	・ 試験中の膨潤圧測定 ・ 解体後の密度測定
			・ 異種材料界面のガス移行特性	・ 試験中の水／ガスの圧力および排出流量
⑦	⑦ 側部緩衝材／構造躯体側部間に生じる界面（鉛直界面）	・ 鉛直界面模擬タイプ	・ 異種材料界面のシール性／自己修復性	・ 試験中の膨潤圧測定 ・ 解体後の密度測定
			・ 異種材料界面のガス移行特性	・ 試験中の水／ガスの圧力および排出流量
⑧	⑧ 側部緩衝材／支保工間に生じる界面（弯曲界面）	・ 弯曲界面模擬タイプ	・ 異種材料界面のシール性／自己修復性	・ 試験中の膨潤圧測定 ・ 解体後の密度測定
			・ 異種材料界面のガス移行特性 ・ ガス移行特性の界面形状依存性	・ 試験中の水／ガスの圧力および排出流量

ケース No.	試験で再現する界面の概要 （TRU 処分概念で生じ得る界面の概要）	供試体 タイプ	着目点	（確認方法）
埋め戻し材施工時に生じる得る界面				
⑨	⑨ 埋め戻し材施工時の各層間に生じる界面（水平継ぎ目）	・ 水平界面模擬タイプ	・ 施工継ぎ目のシール性／自己修復性	・ 試験中の膨潤圧測定 ・ 解体後の密度測定
			・ 施工継ぎ目のガス移行特性	・ 試験中の水／ガスの圧力および排出流量
⑩	⑩ 埋め戻し材／頂部緩衝材間に生じる施工界面（水平継ぎ目）	・ 鉛直界面模擬タイプ	・ 異種材料界面のシール性／自己修復性	・ 試験中の膨潤圧測定 ・ 解体後の密度測定
			・ 異種材料界面のガス移行特性	・ 試験中の水／ガスの圧力および排出流量
⑪	⑪ 埋め戻し材／支保工間に生じる界面（弯曲界面）	・ 弯曲界面模擬タイプ	・ 異種材料界面のシール性／自己修復性	・ 試験中の膨潤圧測定 ・ 解体後の密度測定
			・ 異種材料界面のガス移行特性 ・ ガス移行特性の界面形状依存性	・ 試験中の水／ガスの圧力および排出流量

5）概略工程

ここでは、供試体作製・飽和～ガス注入試験完了までの概略工程について検討した。

検討期間は 2015 年度（平成 27 年度）より概ね 2 カ年程度とするが、試験の実施状況に応じて工程延伸の可能性がある。

表 4.3.2-11　概略工程

時期 / 項目	2015 年度（平成 27 年度）				2016 年度（平成 28 年度）				2017 年度（平成 29 年度）
	第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期	第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期	
詳細計画									
試験準備									
供試体作製									
注水飽和									
ガス注入								（状況に応じて工程延伸）	
解体調査								（状況に応じて工程延伸）	

4.3.3　ベントナイト混合材料を用いた膨潤変形特性データの取得

TRU 廃棄物処分場のガス移行特性やガス発生影響を詳細に把握するためには、気液二相流解析や力学を連成させた二相流解析を行う必要がある。これらの解析に必須で、かつ、ガス移行挙動に大きな影響を及ぼす材料特性の一つにベントナイト緩衝材の膨潤変形特性がある。

これを受け、本検討では第 2 次 TRU レポート[6]において底部緩衝材の材料に想定されている砂混合ベントナイトを対象に、サクション制御式のオエドメータ試験を実施することで膨潤変形特性のサクション依存性に関するデータを取得するとともに、取得データを用いて力学連成解析に必要なモデルパラメータを同定した。

(1) 実施方法

サクション制御可能なオエドメータ試験装置を用いて、以下の試験条件のもとで膨潤変形特性

のサクション依存性に関するデータ（膨潤変形量～サクションの関係）を取得した。

- 供試体：下記のベントナイトと砂の混合土（初期乾燥密度 1.6 Mg/m^3、間隙比 0.725, 真密度 2.76 Mg/m^3，初期飽和度 64.7%（初期含水比 17.0%），ベントナイト・砂の乾燥重量比 7：3）
  ① ベントナイト：クニゲル V1（クニミネ工業製）
  ② 砂：3 号および 5 号ケイ砂を混合（重量比で 1:1）
- 供試体寸法：直径 50mm、高さ 10mm
- 載荷サクション：0（飽和）～1.3 MPa の範囲

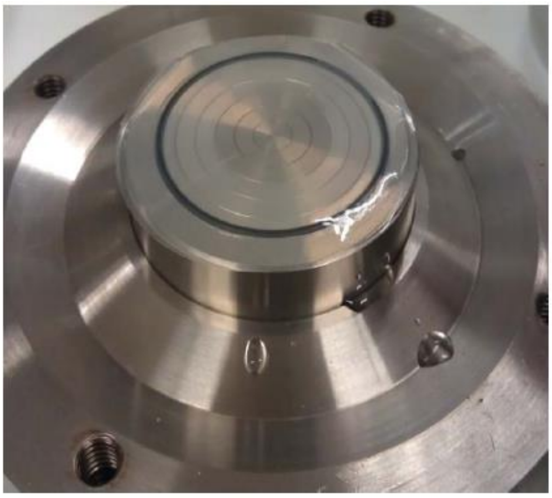
(2) 実施装置

実施に供する装置は、サクションを制御可能なオエドメータ試験装置で、平成 23 年度における「ガス移行挙動の評価　ベントナイト材料の水分特性試験」にて使用された試験装置と同等の機能を持つ装置である。

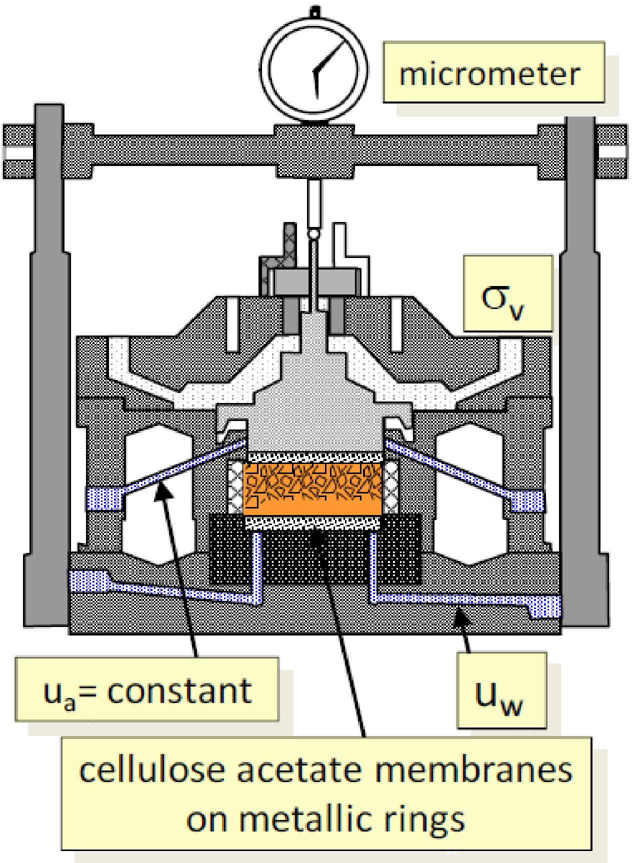
用いたサクション制御可能なオエドメータ試験装置を図 4.3.3-1 に示す。

上部および下部のペデスタルにはポーラスメタルがセットされており上部から空気圧（u_a）を、下部から水圧（u_w）を作用させせることができる構造となっている。また、上部から作用させる空気圧が下部から抜けることなく保持されるよう、下部のポーラスメタルと供試体の間には空気侵入圧の高い飽和したアセチルセルロース膜（Spectra/Pro membrane MWCO:6-8000）が敷いてある。これにより上部からの空気圧（u_a）を一定に保った状態で下部からの水圧（u_w）を $u_w < u_a$ の範囲で制御することで、供試体のサクション（$u_a - u_w$）を制御することができる。なお、上載圧も同時に載荷できる機構となっている。

(a)



(b)



(c)

図 4.3.3-1　サクション制御可能なオエドメータ試験装置　(a)試験セル；(b)下部ポーラスメタル上部にセットされた飽和アセチルセルロース膜；(c)試験装置の断面模式図

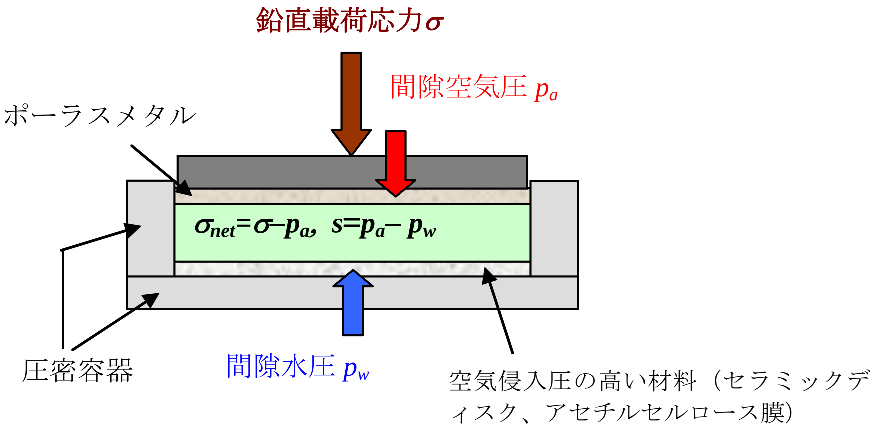


図 4.3.3-2　サクション制御試験装置の概念

(3) 試験手順

1) 試料と供試体作製

試料はベントナイト/砂混合土（含水比 0.17）を用い、供試体（以下、「S/B 供試体」と称する）は試料を乾燥密度 1.60Mg/m³ に静的に締固めたもの（飽和度 64.7%,）を用いた。S/B 供試体寸法は直径 50mm、高さ 10mm である。図 4.3.3-3 に静的圧縮成型時の間隙比と載荷応力の関係を例示する。含水比 0.17 で乾燥密度 1.60Mg/m³（=間隙比で 0.725 相当）まで静的に締固めるのに 970 kPa（＝0.97 MPa）前後の載荷鉛直応力が必要であった。

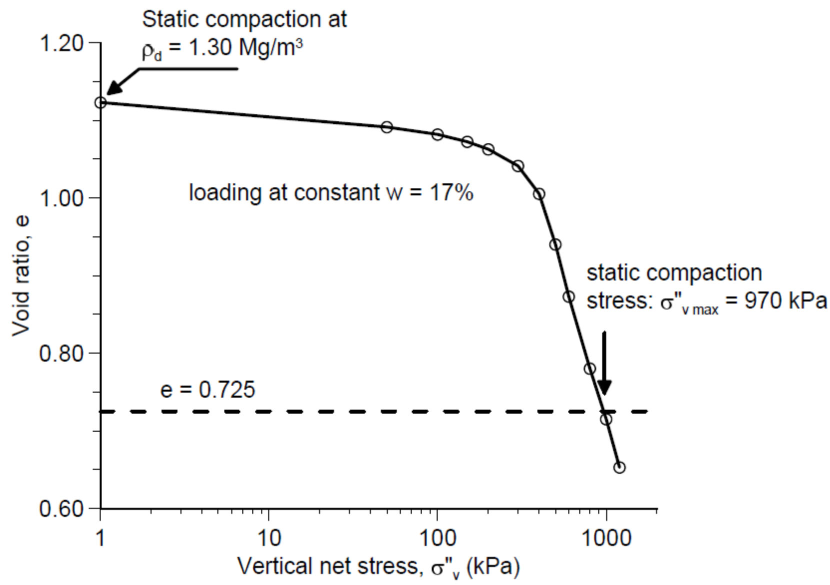


図 4.3.3-3 乾燥密度 1.6Mg/m³ へのベントナイト・砂混合土供試体作成時（静的圧縮による成型）の鉛直応力の経時変化（例）

2) 試験方法および試験条件

サクションを減少させる吸水膨潤過程の試験とサクションを増加させる排水収縮試験を行った。吸水過程の試験では、鉛直方向の拘束ネット応力を 200kPa および 400kPa 一定でサクションを

1,300 kPa⇒800 kPa⇒500 kPa⇒300 kPa⇒100 kPa⇒10 kPa（≒飽和）の順に段階的に変化させ、その間の鉛直変位を計測して供試体の間隙比の変化を評価した。

一方、排水過程については、まず、鉛直方向の拘束ネット応力を 200kPa および 400kPa 一定下でサクションを 10 kPa まで下げることで試料を飽和させた後に、サクションを 10 kPa⇒100 kPa⇒300 kPa⇒500 kPa⇒800 k⇒Pa1,300 kPa の順に変化させ、その間の間隙比の変化を評価した。なお、各サクション作用段階では試料の変形が収束するまで一定サクションを維持した後、次段階のサクションを作用させる方法を採った。また、試験中の作用間隙空気圧は 1.4MPa 一定として間隙水圧を制御することでサクションを制御した。

(4) 試験結果

鉛直方向の拘束ネット応力 200kPa および 400kPa の場合について、吸水過程および排水過程におけるサクションと間隙比の関係をそれぞれ図 4.3.3-4、図 4.3.3-5 に示す。ここに、横軸はサクション s に大気圧 p_{atm} を加えたもの（$s + p_{atm}$）を対数軸で示している。図中の直線は最小二乗近似直線を示している。

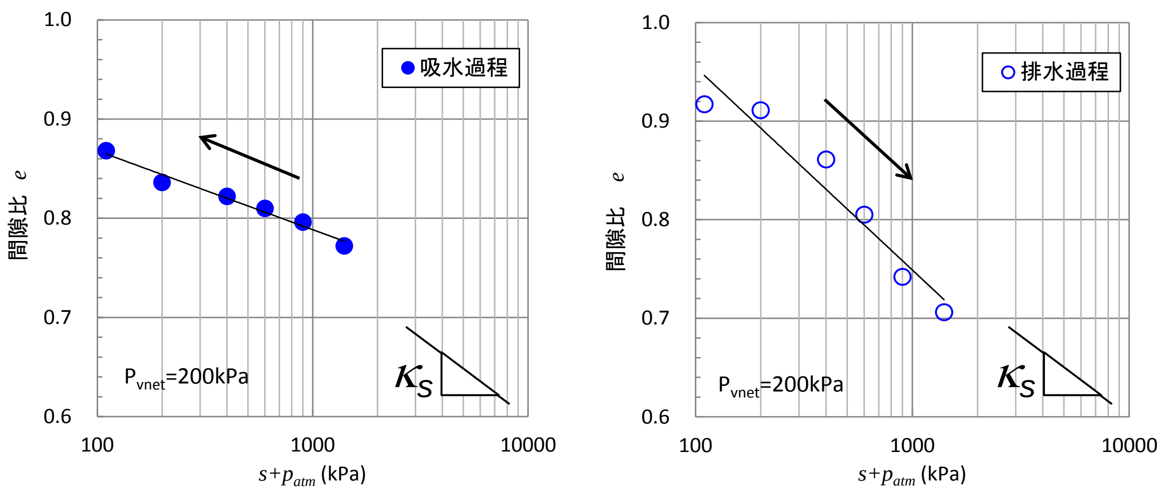
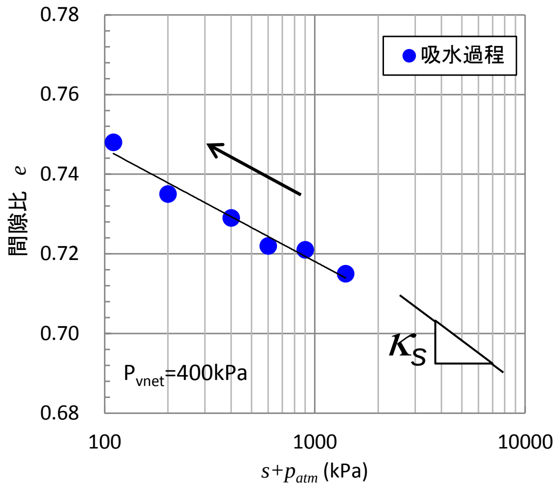


図 4.3.3-4　鉛直方向の拘束ネット応力 200kPa 一定化でのサクションの変化に伴う間隙比の変化：(a) サクション減少に伴う吸水膨潤過程および(b)サクション増加に伴う排水収縮過程



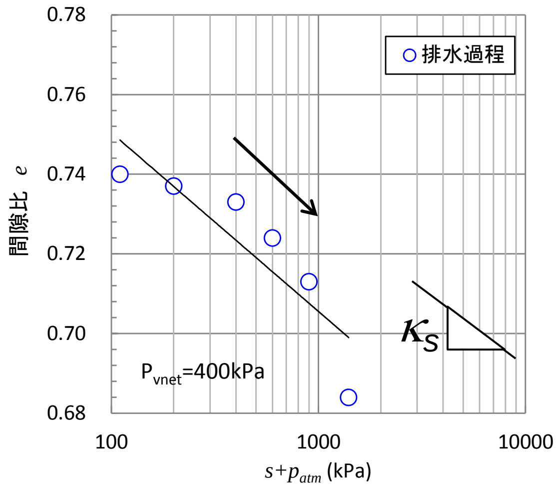


図 4.3.3-5　鉛直方向の拘束ネット応力 400kPa 一定化でのサクションの変化に伴う
間隙比の変化：(a) サクション減少に伴う吸水膨潤過程
および(b)サクション増加に伴う排水収縮過程

次に、上記の実験結果から飽和・不飽和弾塑性構成モデル Barcelona Basic Model（BB モデル、Alonso et al. , 1990）[8]の吸水膨潤変形および排水収縮変形に関するパラメータを求める。BB モデルではサクションの変化に伴う間隙比の変化を次式で表している．これは、飽和過程（サクション減少過程）においてはいわゆる膨潤変形を表す。

$$de = -\kappa_s \frac{ds}{s + p_{atm}} \tag{1}$$

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

ここに、e は間隙比、s はサクション、p は平均ネット応力，p_{atm} は大気圧(100kPa)，κ_{s0}, α_{sp}, α_{ss}, p_{ref}（参照応力、通常 100kPa）は材料パラメータである．なお，κ_s のサクション依存性が無視できる場合には α_{ss} =0 としては次式で表すことができる。

$$\kappa_s = \kappa_{s0}\left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p}{p_{ref}}\right) \tag{3}$$

式(1)の κ_s は図 4.3.3-4、図 4.3.3-5 の e～ln(s + p_{atm})関係の傾きを表していることから、最小二乗近似によりこれらの傾きを求めることで各試験における κ_s を求めることができる。山本ら[9]は圧縮ベントナイトで同様の試験を行い e～ln(s + p_{atm})関係が直線近似できることを示しており、本実験結果（図 4.3.3-4、図 4.3.3-5）でも同様の結果が見られる。

表 4.3.3-1 に e～ln(s + p_{atm})を線形とした場合の各試験の κ_s（傾き）を平均ネット応力 p と共に示す。ここに、平均ネット応力 p は式(4)で表されるが、水平方向のネット応力 p_h は Jaky 式[10]（式(5)）に基づいてを求めた。

$$p = (p_v + 2p_h)/3 \tag{4}$$

$$p_h = (1 - \sin\phi')p_v \tag{5}$$

ここに、ϕ'は有効内部摩擦角であり文献[11]
の値（16.6°）を用いた。

参照応力 p_{ref} =100kPa とすると、式(2)の未知パラメータはκ_{s0}, α_{sp}の２つであるが、２水準の平均ネット応力 p に対してκ_s既知なので連立方程式を解いてこれらのパラメータ値を求めた。結果を表 4.3.3-2 に示す。

表 4.3.3-1　各試験結果における e～$\ln(s + p_{atm})$関係の傾き

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

表 4.3.3-2　吸水膨潤変形および排水収縮変形に関する BB モデルパラメータ

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

4.4　まとめ

これまで（平成 19-25 年度）の検討[1][1][2][3][4][12]で抽出されたベントナイト系材料のガス移行挙動に係る課題の解決に向け、平成 25 年度の検討で策定した今後 5 カ年間（平成 25-29 年度）の実施計画[12]に基づき、平成 26 年度はベントナイト系緩衝材材料の飽和および不飽和供試体を用いた試験を実施した。

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

4.4.1　ベントナイト緩衝材におけるガス移行挙動評価に係るガス注入試験

- これまでに一定の知見が得られている、大破過を伴うものとは異なるガス移行現象・挙動の把握を目的としたガス注入試験を実施した。
- 具体的には、供試体中に大破過を伴わず気液二相流のみが生じることを想定した低注入圧条件（ベントナイト供試体の平衡膨潤圧以下のガス注入圧）によるガス注入試験を実施した。
- なお、ガス注入試験は取得データの信頼性や再現性向上の観点にて、同一条件下の 3 つの供試体（同一ガス圧・同一材料）で同時進行する形式とした。
- ガス移行試験中に取得される累積排水量の経時変化を精査したところ、観測される排水挙動はガス・水の二相流によって供試体内の間隙水の排出メカニズムに依るものである可能性が示唆され、予め予測された挙動（「第 3 章　3.2.1 ガス移行試験の予察解析」の成果）が観察されていることが分かった。
- また、供試体中の二相流挙動の変遷（過渡的な挙動・状態）を把握に資するため、3 つの供試体にて同時進行しているもののうち、1 体を解体することによって供試体内の水分分布データを精査したところ、初期状態（飽和状態）と比較して水分が低下している箇所が確認された。この水分の低下は、上記で観測されたガス浸入（間隙水の押し出し）に依る現象を捉えている可能性が高いと示唆された。

4.4.2　ガス移行挙動評価に係るシステム試験の実現に向けた検討

(1) システム試験の策定に資する検討
- TRU 処分システムを模擬したシステム試験の実現に資する情報を収集・整理するため、既往のガス移行試験事例（界面を模擬した試験および工学規模のシステム試験事例等）を調査した。
- 既往のガス移行試験事例を精査することにより、TRU 処分システムを模擬したシステム試験を検討するに際しての留意点等を抽出した。

- 特に、ガス移行挙動評価の観点では、どの事例においても「飽和した材料」を対象として、詳細なガス移行メカニズムを把握するための検討を行っている点や着目点（解決すべきと思っているポイント）は、本検討のコンセプトと一致するものであった。
- また、システム試験でのガス移行挙動を把握するためには、可能な限り「実施工条件」に近い手順で供試体を作製する必要があること、また、システム試験の規模によってはモニタリングが長期に及ぶことも想定し、使用する測定機器は校正が容易で、かつ想定される最大圧力に対して季節変動幅の影響を受けないレンジを持つものを採用すべきとされていた。
- さらに、目的の現象（システムとしてのガス移行挙動）を捉えるため、供試体内の測定機器の数・設置方法・配置計画には十分留意する必要があるとされていたことから、この点に配慮しつつ、TRU 処分概念を対象としたシステム試験計画策定において考慮すべき重要なポイントを整理することが出来た。

(2) ベントナイト緩衝材内部及び他構成材料との界面におけるガス移行挙動評価試験の検討

- TRU 処分施設内のガス移行挙動を把握するためのシステム試験に際し、人工バリア間に生じる界面のガス移行挙動を把握に必要な要素試験の検討を行った。
- TRU 処分施設内の人工バリア間に生じ得る界面位置や構造を整理することで、これらを模擬する供試体の概念を提示した。
- また、界面で生じ得るガス・水の移行挙動を整理することで、着目すべき現象を把握するための試験方法（注水方法やガス注入方法）を検討し、具体的な計測方法（ガス・水の注入／排出流量やベントナイトの膨潤圧を計測するための試験容器の概念）を提示した。
- さらに、着目すべき現象を網羅的に把握するための試験ケースを設定した。

4.4.3 ベントナイト緩衝材における膨潤変形特性取得試験

- TRU 処分概念の人工バリアのうち、底部緩衝材材料として想定されている砂混合材料（ベントナイト・砂の乾燥重量比 7：3）の特性のうち、施設の再冠水（飽和・吸水）過程における膨潤挙動や、ガス移行（排水）過程における収縮挙動といった「膨潤変形特性」に関して、そのサクション（飽和度と相関）依存性（膨潤変形量～サクションの関係）をサクション制御式のオエドメータ試験 により取得した。
- 具体的には砂混合材料の供試体に対してサクションを減少・増加させ、サクション減少過程（吸水過程）とサクション増加過程（排水過程）について、吸水膨潤変形特性と排水収縮変形特性を把握することが出来た。
- 取得された膨潤変形量～サクション（飽和度と相関）の関係を整理したところ、その挙動はほぼ線形近似で解釈可能であることが分かった。
- また、線形近似された挙動は Barcelona Basic Model（処分施設のガス移行挙動評価に必須である力学連成二相流解析の構成則・数学モデル）で再現可能であることが分かり、実験結果をモデルでフィッティングすることにより、当該モデルのパラメータを同定・取得することが出来た。

参考文献

[1] 財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 19 年度地層処分技術調査等委託費　TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発　報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2008).

[2] 財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 20 年度地層処分技術調査等委託費　TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発　報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2009).

[3] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 21 年度地層処分技術調査等委託費　TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発　報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2010).

[4] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 22 年度地層処分技術調査等委託費　TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発　報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2011).

[5] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度地層処分技術調査等事業　TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発　報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2012).

[6] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等事業　TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発　報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2013).

[7] 電気事業連合会　核燃料サイクル開発機構：TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発とりまとめ－(2005).

[8] 資源エネルギー庁　日本原子力研究開発機構：TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画(2006).

[9] E. Alonso, A. Gens, A. Josa (1990) : A constitutive model for partially saturated soils, Géotechnique, 40, No.3.

[10] 山本，佐藤、西村(2014)：サクション制御変形試験に基づく圧縮ベントナイトの膨潤・収縮モデル，土木学会第 69 回年次学術講演会, CS9-19, pp.37-38.

[11] Jaky, J. (1944): Talajmechanika (Soil mechanics in Hungarian), J.Hungarian Arch. & Eng., Budapest, pp. 355-358.

[12] 核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性; 地層処分研究開発第 2 次取りまとめ，分冊 2，地層処分の工学技術 pp.IV-98.

[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 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）.

第5章　セメント系材料のガス移行データ取得

5.1　背景と目的

TRU廃棄物処分場のガス移行特性やガス発生影響を詳細に把握するためには、気液二相流解析や力学を連成させた二相流解析を行う必要がある。

これらの解析には、処分施設の構成材料の気液二相流特性データ（透水・透気係数、モデルパラメータ等）の取得が必須である。

本検討においては、これらのパラメータ取得･評価法の確立に向けた基礎データ取得を目的に、次項以下に示す手法で、人工バリアの構成材料である廃棄体パッケージの充填材として想定されているモルタル材料の特にガス移行過程（排水過程）の詳細な挙動把握に主眼を置いた気液二相流特性データ取得試験およびパラメータ同定逆解析を実施し、その結果を整理した。

5.2　実施項目

(1) モルタルの透水特性およびガス透気特性のデータ取得
(2) モルタルの水分特性データの取得
(3) モルタルの気液二相流特性パラメータの取得

5.3　実施項目の詳細

5.3.1　モルタルの透水特性及びガス透気特性のデータ取得

(1) 実施内容

モルタルの透水特性及びガス透気特性のデータを、透水・透気試験装置を用いて取得した。

なお、同一条件で2試料でのデータ取得を行う。

ただし、モルタルの配合は透過性を有する供試体が作製可能な設計とした。

① 透水特性データ取得
② 透気特性データ取得

- 材料

  モルタル（普通ポルトランドセメント使用、材齢28日）

- 供試体寸法

  直径50mm、高さ50mm

- 試験装置

  上記供試体を用いた下記のデータ取得が可能な試験装置を用いることとした。そのために、下記条件を満足する試験装置を用いることとした。

- 側圧を載荷可能な三軸タイプの試験装置で、ガス透気試験において、拘束圧（側圧）を 3MPa 以上載荷でき、ガス圧として 3MPa 以上の載荷が可能
- ガス透気試験において、排水量と排気量を分離して計測評価が可能

- 透水特性データ取得

  上記試験装置により供試体に適切な動水勾配を与え、透水量と動水勾配から算定される透水特性値の経時変化を計測し、透水特性値が一定となったときの値を飽和透水係数（水相絶対浸透率）として取得した。
- 透気特性データ取得

  透水特性データ取得後の飽和状態の供試体の一端から一定ガス圧を載荷し（ただし載荷ガス圧の上限は 3MPa 程度とする）、排水量及び排気量の経時変化を計測しつつ、排気量と圧力勾配から算定される透気特性値の経時変化を計測した。なお、ガス圧が所定の圧に到達し、透気特性値が一定となったときの値を有効透気係数（ガス相有効浸透率）として取得する。なお、載荷ガス圧値は、複数水準の載荷ガス圧を用いた予備試験に基づき試験期間や試験装置特性（計測精度や載荷能力など）を考慮して適切に決定した。

  また、透気試験終了後に供試体を炉乾燥して絶乾状態とし、透気試験を実施してガス相絶対浸透率を取得した。

(2) 実施手順

以下の手順により実施した。

① モルタル試料を浸水真空脱気したのち、透水試験装置にセット
② 適当な動水勾配を与え、透水量（排水量）を計測し、透水量と動水勾配から算定される透水特性値の経時変化を計測
③ 透水特性値が一定値となった時点で透水試験を終了
④ 注入側を注水経路よりガス注入経路に切り替え、所定のガス圧を載荷し、排水量及び排気量の経時変化を計測
⑤ 排水量及び排気量が定常状態となった時点で試験を終了
⑥ 透気試験前後の供試体重量から総排水量を算定
⑦ 供試体を炉乾燥して絶乾状態とし、透気試験を実施し透気流量を計測しガス相絶対浸透率を算定

5.3.2 モルタルの水分特性データの取得

(1) 実施内容

透水・透水試験に用いるものと同一配合、養生のモルタルを用いて、以下の条件により水分特性評価のためのデータを取得する。なお、同一条件で 2 試料でのデータ取得を行った。

・ 細孔径分布密度法などによる水分特性評価のため、水銀圧入法により細孔径分布を取得
・ 加圧法、遠心法、サイクロメーター法などから、特に高飽和領域の排水過程の特性取得に有効な手法を選択し、水分特性データ（飽和度～毛管圧力の関係）を取得

(2) 実施手順

実施手順は地盤工学会基準（JGS0151-2009）等に準拠する。

5.3.3 モルタルの気液二相流パラメータ（モデルパラメータ）の取得

(1) 実施内容

上記試験結果を気液二相流解析によって矛盾なく説明できるような気液二相流特性パラメータ（モデルパラメータ）を、透気試験結果データの二相流モデルでのフィッティングによって同定・取得した。

(2) 評価方法

透水特性データ取得にて得られた飽和透水係数（水相絶対浸透率)、透気特性データ取得にて得られた絶乾試料の透気係数（ガス相絶対浸透率)、水分特性試験で得られた水分特性を既知特性として、透気試験結果の二相流モデルによるフィッティング（逆解析的手法による）を行い、最適な相対浸透率曲線およびモデルパラメータを同定・取得した。

(3) 解析コード

気液二相流特性の同定については、統合型水循環シミュレーションシステム（二相流解析コード)「GETFLOWS」及び汎用逆解析コード「UCODE_2005」を用いて実施した。

5.4　モルタルの透水特性及びガス透気特性のデータ取得

5.4.1　材料選定

本検討におけるモルタルは、TRU 処分施設における「充填材」を対象とした。

第 2 次 TRU レポートの第 3 章、3.2.1.3 節「充填材の設計」によれば、充填材は操業期間中廃棄体と構造躯体とを一体化させ、安定化させるとともに、閉鎖後には、核種の収着による移行抑制効果が期待されている。充填材には、施工の容易性、施工後の安定性、強度等の観点から、土木建築分野で広く使用され、充填用途にも多く用いられているセメント系材料の使用が考えられている。また、第 2 次 TRU レポートにおいては、充填材の設計の考え方として、充填固化体用の固化材料の設定値である 30N/mm^2 の圧縮強度が目安とされており、この仕様をみたす充填材に用いる材料として、流動性が大きく材料分離が少ないとされるプレパックドコンクリート用の注入モルタルに使用する材料と同等なものを用いることが有効と考えられており（原子力環境整備促進・資金管理センター、1998)、昨年度は、プレパックドコンクリート用のモルタルを用いた透気・透水特性データの取得を行った。

今年度の試験に供するモルタルの配合は、過年度までに実施した二相流特性評価試験の手法の妥当性の確認やセメント系材料の二相流特性を評価するための方法論の構築に資するデータを取得することに主眼をおき、TRU 処分場に用いると想定されている配合には拘らず、現実的な時間範囲で有効な結果を得るため、試験に適した高い透過性を有する設計とすることとした。

5.4.2　材料配合

モルタル材料の透水係数に関しては、砂セメント費などが固定の場合、水セメント比を変更しても大きな変化は望めない（[1]JCI 編 ： コンクリートの要点　図 3.46 より)。

また、全体占める砂の割合を固定し、セメント硬化体部分の W/C を大きくすると W/C が 50%から 65%に変更になると 5 倍程度に増すことが報告されている。すなわち、セメントペースト部分のポーラス度合が透水係数に大きく影響することを示すと考えた。

今回、透水係数を大きくしたモルタルを作製するには、1)W/C を大きくする、2)セメント硬化体部分の容積を増やすことが必要と考えた。しかし、W/C=60%以上ではブリージングが顕著に表れると推定されるので、増粘剤の使用が必要であること、粘性の増加に伴う気泡径の増加を抑えるために、消泡剤の併用が必要であると結論づけた。

以上より、配合決定のための予備試験を実施した結果、試験に用いるモルタルの配合を、表 5.4.2-1 に示すとおり選定した。

表 5.4.2-1　供試体モルタルの配合

W/C(%)	S/C(-)	単位重量(kg/m³)					計測値
		W	C	S	増粘剤（×1000）	消泡剤（×5）	エア量(%)
65	1.5	407	626	938	5.2	2.1	9.5

5.4.3　モルタルの透水・透気試験の実施

(1)　実施フロー

図 5.4.3-1　モルタルの透水･透気試験の実施フローにモルタルの透水･透気試験の実施フロー。試験は大きく、「①試験準備」「②注水過程」「③注気過程」にて構成される。なお、試験終了後は、データ整理のうえ後述の「モルタルの気液二相流特性データの取得（5.6 項）」に引き継ぐ流れとなる。

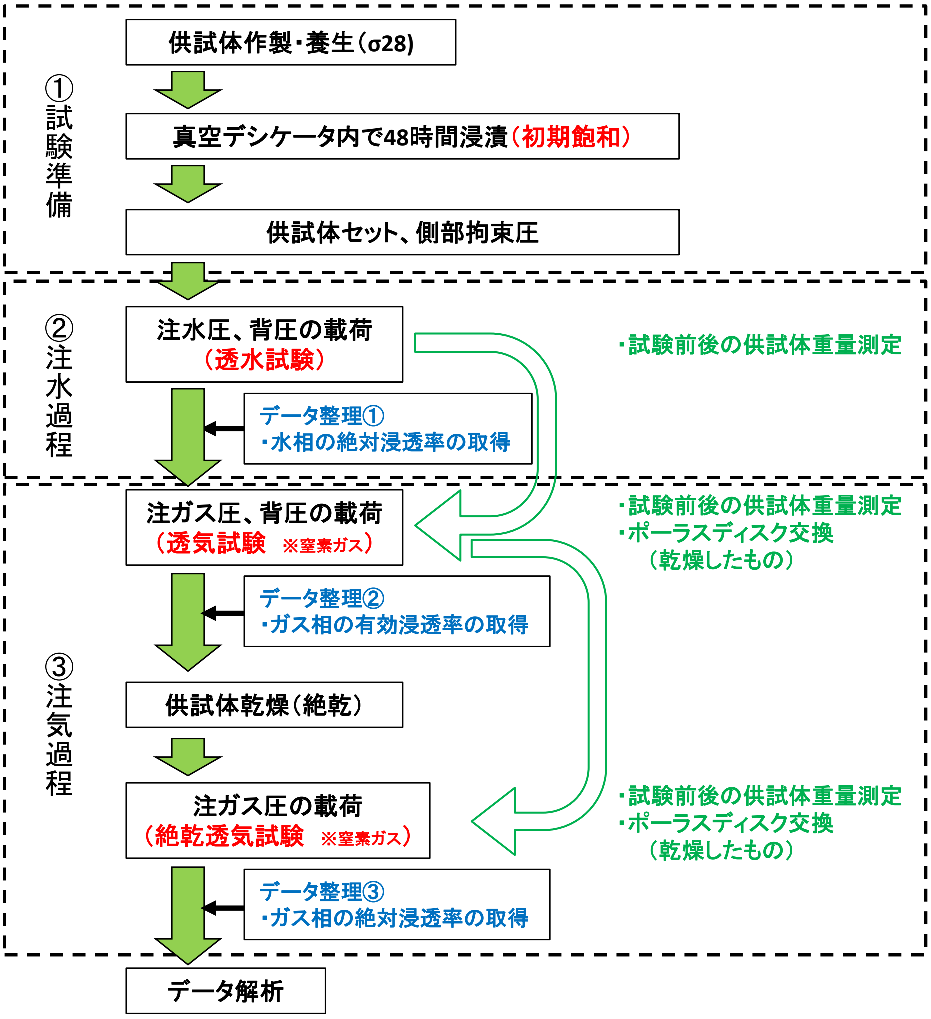


図 5.4.3-1　モルタルの透水・透気試験の実施フロー

(2) 試験準備

試験準備は、供試体の作成および養生、初期飽和、及び供試体のセットからなる。

1) 供試体作成および養生

「5.4.2 節　材料配合」にて選定した配合にて、供試体を作成した。

また、モルタルの練混ぜは以下のように実施した。

① セメント＋細骨材を混ぜてミキサーにて 30 秒間空練り
② 上記に水を混ぜてミキサーにて 1 分間本練り
③ ミキサーを止め容器の底や周囲に付いたモルタルをかき落とす
④ 再度 1 分間混練り
⑤ 供試体用鋼製モールドに打設し、恒温室（室温 25℃、湿度 90%）で 1 週間養生
⑥ 恒温室内での養生完了後、脱型して恒温恒湿の養生室（室温 25℃、湿度 90%）にて水中養生
⑦ 材齢 28 日の数日前に、端面を研磨して高さ 50mm になるように成形（透水・透気試験用）
⑧ 材齢 28 日後に一軸圧縮強度を測定（一軸圧縮強度試験用）
⑨ 材齢 90 日後に一軸圧縮強度を測定（一軸圧縮強度試験用）および試験開始

写真 5.4-1 にモルタル試料、写真 5.4-2 にミキサー攪拌状況、写真 5.4-3 にエアー量確認試験を、写真 5.4-4 に供試体の水中養生状況（透水・透気試験用、および一軸圧縮強度確認用）を示す。また、図 5.4.3-2 にモルタルの一軸圧縮強度測定結果（σ28）を、図 5.4.3-4 にモルタルの一軸圧縮強度測定結果（σ91）示す。図より、今回、透水および透気試験に用いた供試体の圧縮強度は平均 17N/mm^2 となった。

写真 5.4-1　モルタル試料

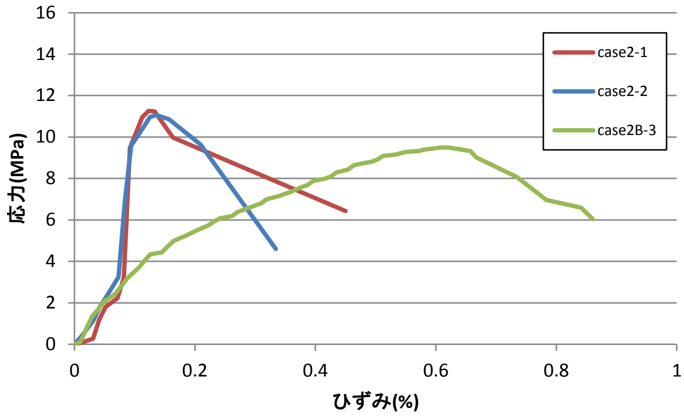
写真 5.4-2　ミキサー攪拌状況

写真 5.4-3　エアー量確認試験

写真 5.4-4　供試体の水中養生状況（透水・透気試験用、および一軸圧縮強度確認用）

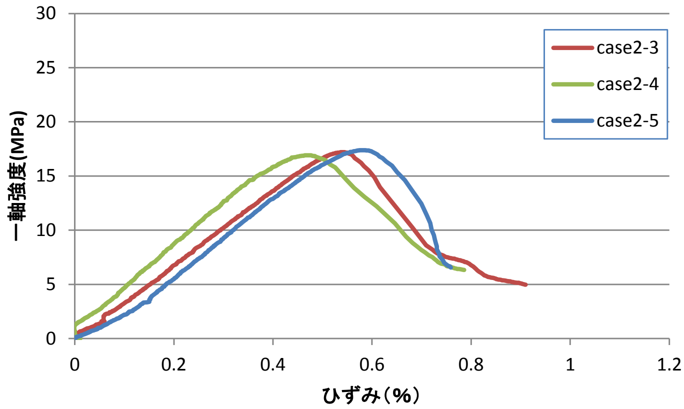
写真 5.4-5　モルタルの一軸圧縮強度測定状況（n=3）

写真 5.4-6　一軸圧縮強度試験後のモルタル状況（n=3）



σ 28	一軸圧縮強度	単位体積重量
	MPa	gf/cm^3
case2−1	11.28	1.748
case2−2	11.08	1.657
case2B−3	9.37	1.630
average	**10.58**	**1.679**

図 5.4.3-2　モルタルの一軸圧縮強度測定結果（材令 28 日）



σ 91	一軸圧縮強度	単位体積重量
	MPa	gf/cm^3
case2−3	17.20	1.666
case2−4	16.91	1.678
case2−5	17.39	1.654
average	**17.16**	**1.666**

図 5.4.3-3　モルタルの一軸圧縮強度測定結果（材令 91 日）

2)　供試体の初期飽和

後述の透水試験の実施に先立ち、モルタルの初期飽和の手段として真空槽を用いた脱気浸水法を用いた。なお、モルタルの十分な初期飽和のため、脱気浸水時間は 48 時間とした。

写真 5.4-7　真空槽を用いた脱気浸水法によるモルタルの初期飽和状況

写真 5.4-8　透水試験直前の供試体状況(n=2)

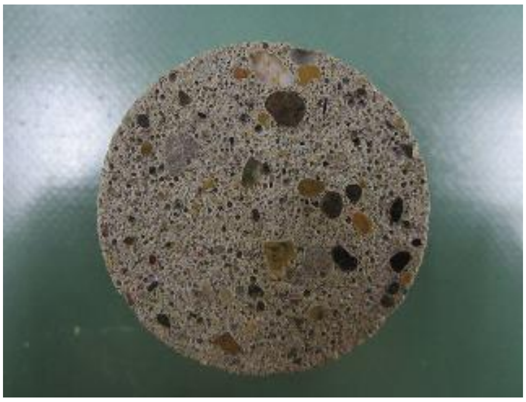


写真 5-9　端面の状態

3)　試験装置（透水・透気試験用）への供試体のセット

試験装置への供試体のセットは以下の通りとした。

① 直径 50mm×高さ 50mm の供試体にゴムジャケットを被せ、試験装置にセットした。ここで、側部から供試体への水の浸透を防ぐためにネオプレーンスリーブの厚さ 0.45mm の不透水メンブレンと厚さ 1.0mm の通常のメンブレンを二重にし、間には信越化学㈱製の信越シリコーン KF 96 を塗布し、さらにメンブレンの上から 1.0mm の針金で固定し止水した。これより、供試体とゴムジャケットとの間の漏水を防止した。

② ゴムジャケットと供試体の間の通水防止のため、透水圧と側部拘束圧とは 0.2MPa 以上の差圧を負荷することとした。

なお、当該試験装置の供試体セット位置寸法とモルタル供試体サイズ（H=50mm）とがフィットするように、図 5.4.3-4 に示すように H50mm 用ペディスタルを 50mm 設置している。

写真 5.4-9　モルタル供試体へのゴムジャケット装着状況

写真 5.4-10　試験装置へのモルタルセット完了状況（n=2）

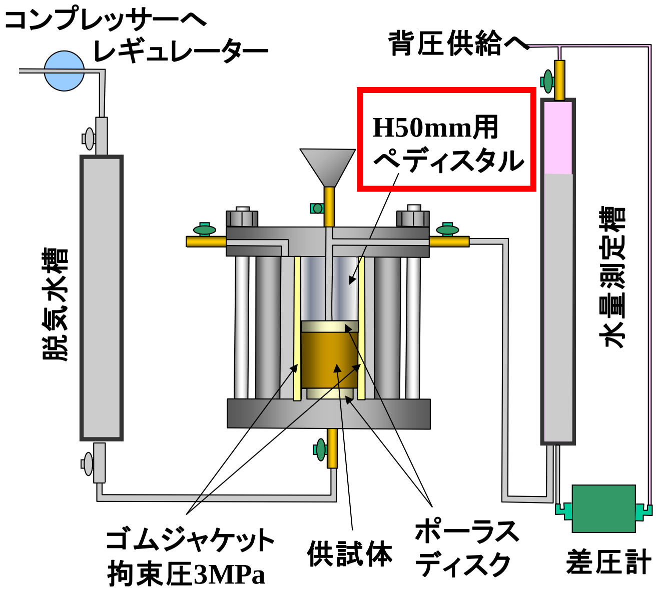
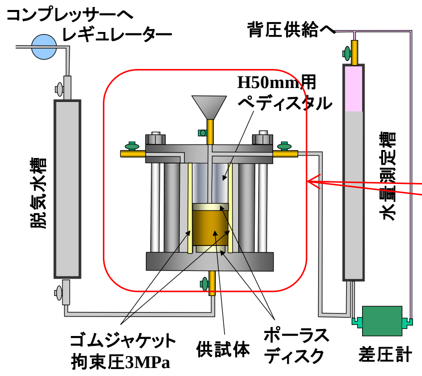


図 5.4.3-4　試験装置（透水・透気試験用）の概念図（透水試験実施の場合で例示）

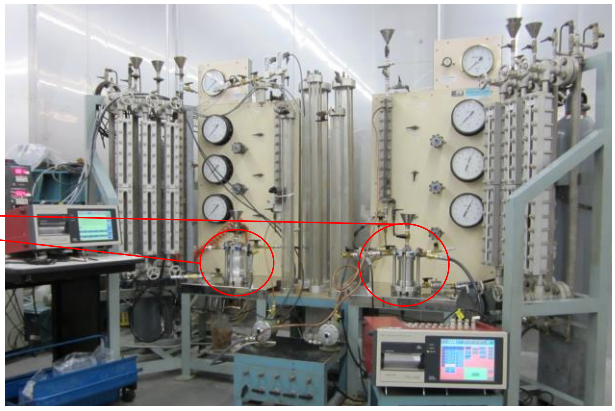
(3)　透水試験の実施

透水試験の試験条件は、注水圧（最大 3 MPa 程度）及び拘束圧（最大 3 MPa 程度）および背圧（0.1 MPa 程度）とした。なお、後述する透気試験においても当該試験装置を透気試験用に切り替え、連続的に試験を実施している。

図 5.4.3-5 に、透水試験（透気試験）の実施概念を示す。注水過程においては、十分な時間を掛けて注水を行い、排水量の時間推移を測定することとした。得られたデータより水の絶対浸透率が算定されるが、この過程では、排水過程の「定常状態」を確認してから次の透気試験へ移行することが重要であり、本試験においてもこの点に留意した。



（試験概念図）



（試験装置写真）

図 5.4.3-5　モルタル供試体の透水試験（透気試験）実施概念

なお、モルタル供試体（n=2）の試験装置へのセット完了後、以下の手順にて透水試験を実施していくこととした。

① モルタル供試体への透水圧は、試験期間と透水量の計測レンジが所定の範囲に入るよう、予備透水を行い、最終的に表 5.4.3-1 の条件とした。
② 供試体に注入された水は供試体上部より排水され、水量測定槽（ビューレット）に流れ込む。この透水量（排水量）の経時変化を差圧計により計測した。差圧計は PD-100GA（共和電業製）を用いた。
③ 試験は排水量が定常となるまで継続し、定常時の時間～排水量関係より、透水係数を求めた。

表 5.4.3-1　モルタル供試体の透水試験圧

供試体 No.	拘束圧 (MPa)	透水圧 (MPa)	背圧 (MPa)	有効透水圧 (MPa)
1	3.0	2.8	0.1	2.7
2	3.0	1.0	0.1	0.9

(4) 透気試験の実施

透気試験は、試験手順は以下の通りとした。

① 透水試験終了後に試験容器を一旦解体し供試体重量を計測した後に再度供試体にゴムスリーブを被せ、試験装置にセットした。このとき注入側（下部）のポーラスメタルおよび注入管は乾燥したものに置き換えた。

② 供試体の側部拘束圧、透気圧、背圧、有効透気圧（透気圧－背圧）は、試験期間と透水量の計測レンジが所定の範囲に入るよう、透水試験から透気試験までの一連の予備試験を繰り返し行い、最終的に表 5.4.3-2 に示す条件で実施した。側部拘束圧を作用させた後、一定のガス圧と背圧（水圧）を作用させ、有効透気圧を作用させ透気させた。用いた気体は窒素である。

③ 透水試験の場合と同様に、ゴムスリーブと供試体の間をガスが透気しないよう、注入ガス圧より 0.2 MPa 以上大きい側圧を作用させた状態でガス注入試験を行った。

④ 供試体上部からの排水量を差圧計で計測し、排気量を流量計で計測した。排気量はオーバル社製の MASS FLOW METER 流量計 5ml/min および 10ml/min で計測した。

⑤ 昇圧は透気流量が定常となった場合および 48 時間で透気しない場合に行い、3.0MPa を最大透気圧として、試験後供試体を取り出し重量を計測し、試験前後の重量変化より前段階の総排水量を算定した。

表 5.4.3-2 モルタル供試体の透気試験圧

試験体 No.	拘束圧 (MPa)	透気圧 (MPa)	背圧 (MPa)	有効透気圧 (MPa)
1	3.2	0.5 から 0.5 刻みに 3.0 まで段階的に増圧	0.1	透気圧－背圧
2				

(5) 透水試験結果

モルタル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 5.4.3-6、図 5.4.3-7 に示す。時間～流量関係が線形となった状態の赤線で示す区間から式(5.4-1)より透水係数を算定した[7]。

$$k = \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} log_e \frac{h_1}{h_2} = \frac{2.303aL}{A(t_2 - t_1)} log_{10} \frac{h_1}{h_2} \qquad (5.4\text{-}1)$$

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)、$h1$と$h2$はそれぞれ時刻$t1(s)$と$t2(s)$の時の水頭(m)である。透水係数の算定結果を表 5.4.3-3 に示す。

表 5.4.3-3　モルタル供試体　透水試験結果

供試体 No.	拘束圧 (MPa)	透水圧 (MPa)	背圧 (MPa)	$t1$ (s)	$t2$ (s)	透水係数 (m/s)
1	1.5	1.3	0.1	30、000	81、900	1.35E-11
2	1.5	1.3	0.1	21、600	53、520	1.66E-11

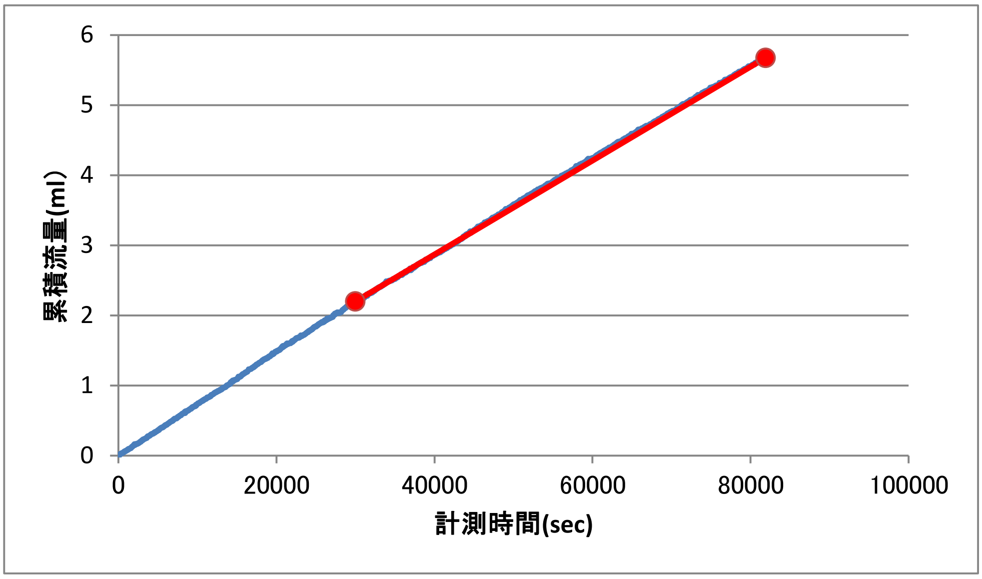


図 5.4.3-6　モルタル供試体 No.1 の時間～透水量関係

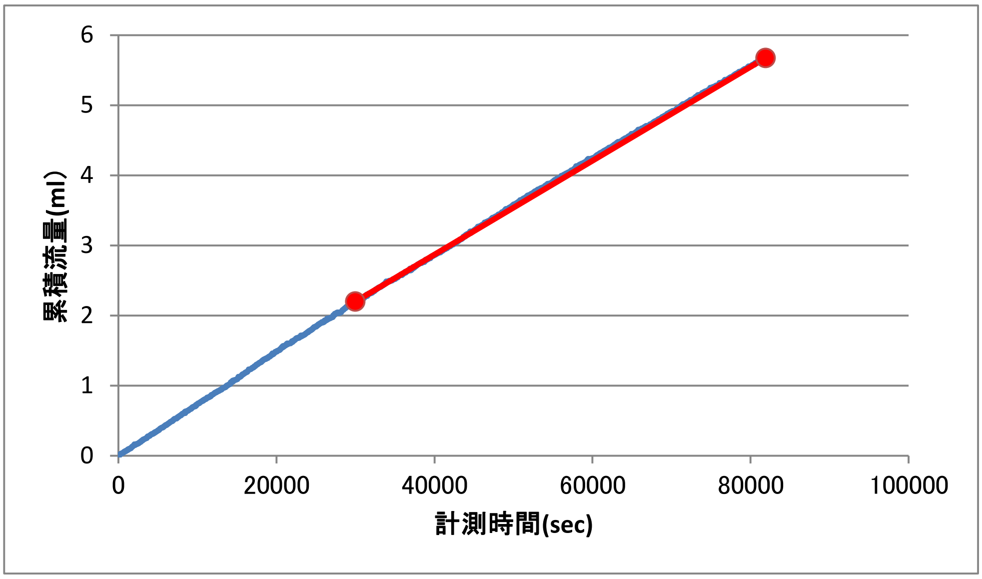


図 5.4.3-7　モルタル供試体 No.2 の時間～透水量関係

透水試験前後に供試体の重量を測定した結果を表 5.4.3-4 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 5.4.3-4　モルタル供試体　透水試験前後の重量比較

供試体 No.	透水試験前 (g)	透水試験後 (g)	増分 (g)
1	160.571	166.903	6.332
2	161.357	162.804	1.447

(6)　透気試験結果

モルタル供試体の透気試験における時間～排水量関係と時間～透気量関係を供試体毎に図 5.4.3-8～図 5.4.3-13 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(5.4-2)により算定した[8]。

$$K = \frac{2Q\mu p_a}{A}\frac{L}{p_0^2 - p_L^2} \tag{5.4-2}$$

ここで、K : ガス有効浸透率(m^2)、Qは大気圧下における透気体積(m^3)、μは気体の粘性係数（ここでは窒素を用いたので、$1.76 \times 10^{-5} (Pa \cdot s)$）、$A$は供試体断面積$(m^2)$、$L$は供試体の長さ$(m)$、$p_a$は大気圧$(Pa)$、$p_0$と$p_L$はそれぞれ供試体の気体入口と出口の境界圧力$(Pa)$である。各図の透気量は、ガス透気直後の瞬時的な供試体より排水量（＝表中の「総排水量」）を差し引いた「補正値」も併せて示しており、この補正値の黒線区間（図 5.4.3-10 および図 5.4.3-13）から算定した透気係数の算定結果を表 5.4.3-5 に示す。なお、表中の「総排水量」については後述する。

表 5.4.3-5　モルタル供試体の透気試験結果

試験体 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)
1	3.21	2.96	0.10	1.14E-19	0.076
2	3.20	2.94	0.10	1.63E-19	0.718

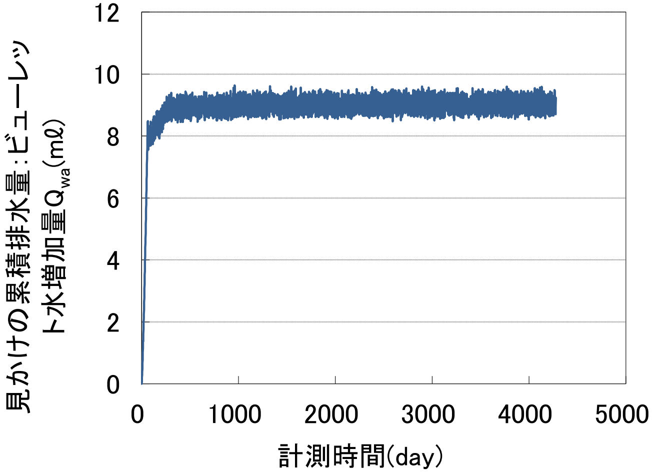


図 5.4.3-8　モルタル供試体 No.1　時間～排水量関係

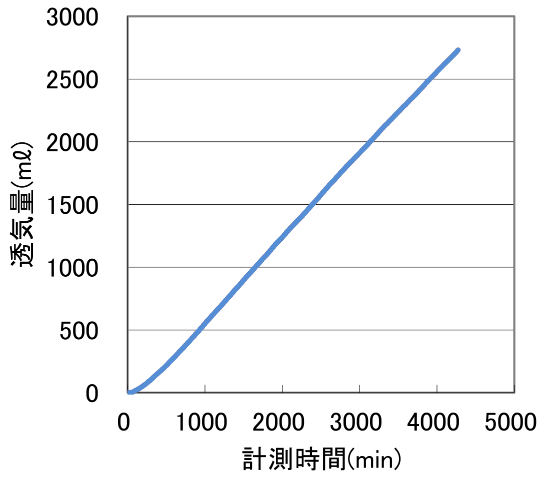


図 5.4.3-9　モルタル供試体 No.1　時間～透気量関係

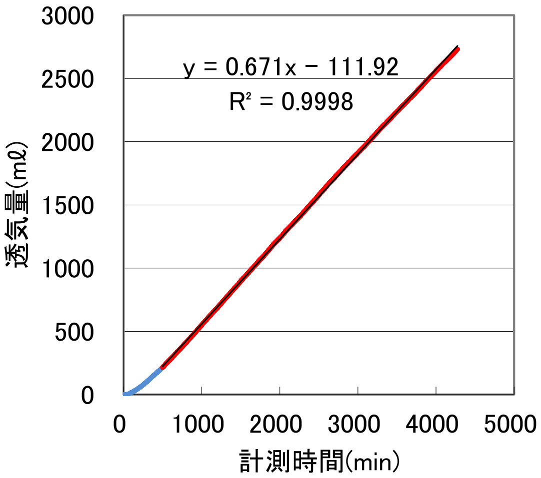


図 5.4.3-10　モルタル供試体 No.1 の透気量（補正値）の定常区間（赤線）

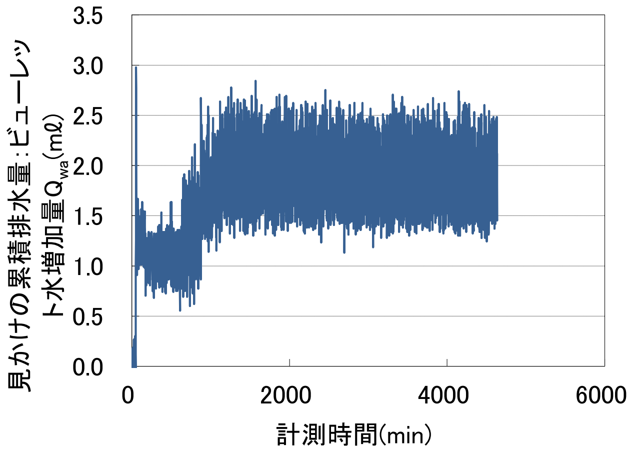


図 5.4.3-11　モルタル供試体 No.2　時間～排水量関係

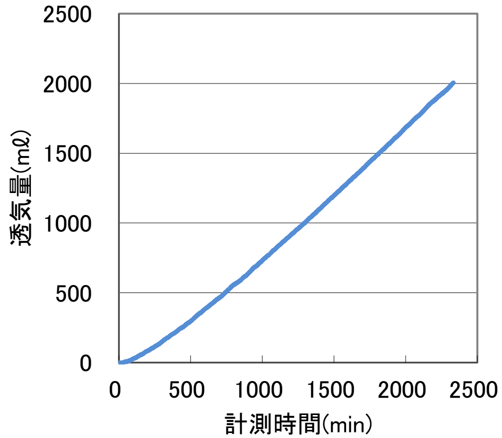


図 5.4.3-12　モルタル供試体 No.2　時間～透気量関係

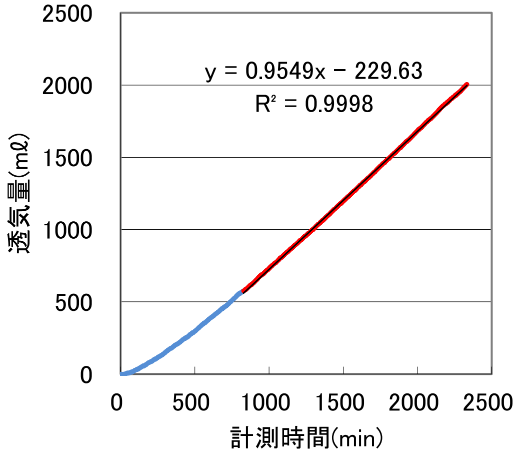


図 5.4.3-13　モルタル供試体 No.2 の透気量（補正値）の定常区間（赤線）

なお、透気試験前後の供試体の重量変化について表 5.4.3-6 にまとめる。表 5.4.3-6 に示した試験結果の試験後排水量は、ここで示した透気試験前後の減少分に相当する。透気試験前の重量は、透気試験前に行った透水試験終了時の重量で供試体が飽和したものである。これに窒素ガスを圧入してガスが透気する気みちができ定常状態に至るまでに排水された水量が試験後排水量である。図 5.4.3-8 と図 5.4.3-11 にそれぞれ時間～排水量関係を示したが、それらの累積排水量と比べると流量計で計測された排水量は 1 桁から 2 桁多い。これは、供試体から流量計までの配管中の水をガスが押し上げたもの、ガス気泡が配管中の水で形成され、流量計の水位境界で破裂して排水量に加算されたりしたものと考えられる。これらのことから、ガスの侵入により供試体から排出された水の量は、表 5.4.3-5 の総排水量（＝表 5.4.3-6）のそう試験後排水量を用いることが妥当である。

また、表中の総間隙水量は、透気試験終了から 45℃の乾燥炉にて 10 日以上乾燥させて間隙水を除去した乾燥後重量と透気試験前重量の差である。

表 5.4.3-6　モルタル供試体　透気試験前後の重量比較

供試体 No.	透気試験前 (g)	透気試験後 (g)	試験後排水量 (g)	乾燥後 (g)	総間隙水量 (g)
1	166.903	166.827	0.076	135.90	31.00
2	163.084	162.366	0.718	133.31	29.77

45℃10 日後乾燥状態において、水相飽和度 0 を仮定して乾燥状態の透気試験を実施した。

時間～透気量関係を図 5.4.3-14 と図 5.4.3-15 に、それぞれから得られた透気係数を表 5.4.3-7 に示す。

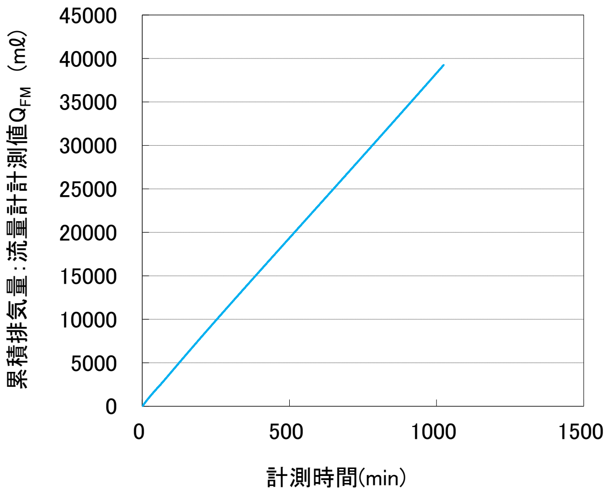


図 5.4.3-14　モルタル供試体 No.1　時間～透気量関係

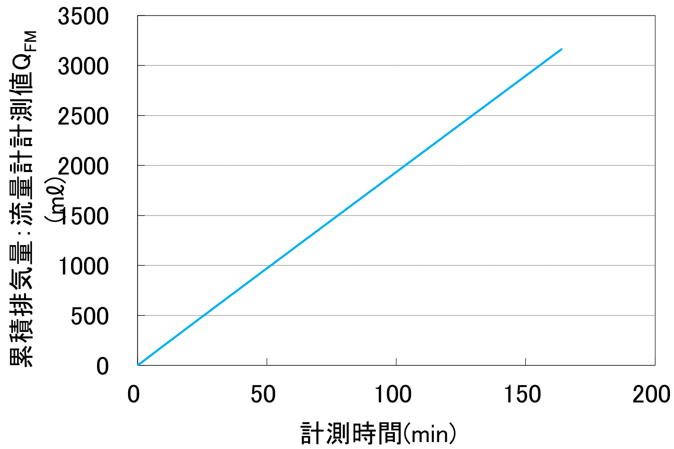


図 5.4.3-15　モルタル供試体 No.2　時間～透気量関係

表 5.4.3-7　モルタル供試体水相飽和度 0 時の透気試験結果

試験体 No.	拘束圧 (MPa)	ガス圧 (MPa)	背圧 (MPa)	ガス 有効浸透率 (m^2)
1	3.0	0.50	0.1	1.38E-15
2	3.0	0.23	0.1	4.27E-15

注：両者でガス圧が異なるのは、ガス流量計の計測範囲で透気ガス流量を計測するためにガス圧を調整したことによる

表 5.4.3-8　モルタル供試体　水相飽和度 0 透気試験前後の重量比較

供試体 No.	透気試験前 (g)	透気試験後 (g)	試験後排水量 (g)
1	135.900	135.824	0.076
2	163.084	162.366	0.718

5.5　水分特性試験の実施

水分特性試験は、加圧チャンバー法とサイクロンメータ法により実施した。

5.5.1　水分特性試験の方法

(1)　加圧チャンバー法

加圧法の試験装置を図 5.5.1-1 に示す。ディスク供試体による試験は、供試体に拘束圧を付加しない状態での保水特性を把握するものである。

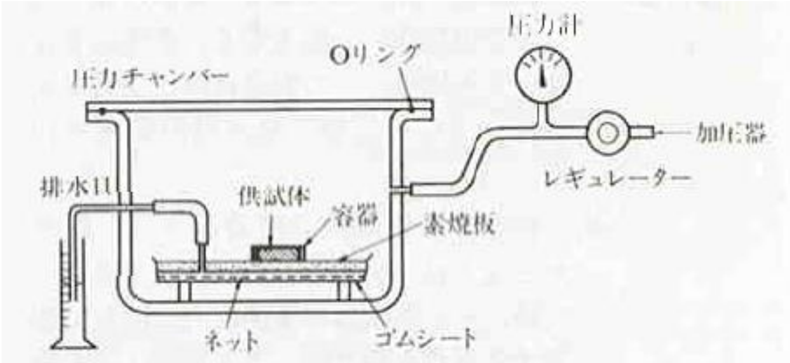


図 5.5.1-1 加圧法試験装置の例

加圧法試験は、以下の手順で行う。

① 高さ 10 cmの円柱供試体を 2cm 程度の厚さの円盤に切断し、1 試料とした。

② (飽和試料作製)試料を水中に沈め、真空ポンプにより脱気させることで飽和試料を作成した。

③ 加圧板表面に 2cm 程度湛水し一昼夜十分に水分飽和させる。一時排水した加圧板に飽和試料をのせる。

④ 耐圧チューブ等の接続を確認する。

⑤ 所要のpF値に相当する圧力に圧力計を見ながら設定する。

⑥ 所定の圧力で排水が完了するまで水量をメスシリンダーなどで測定する。

⑥ 排水がなくなったらレギュレーターと加圧チャンバーとの間にあるバルブを閉じた後に、チャンバー内の開放弁を開けて内部の圧力を大気圧にもどす。

⑦ 試料容器とともに取り出し、質量を測定する。

⑧ 圧力を高くしながら順次③～⑦を繰り返し、測定を行う。

⑨予定した最終圧力の測定終了後、試料を 105℃で炉乾燥して炉乾燥試料の質量、含水比を算出する。

(2) サイクロンメーター法

水ポテンシャルメーター法は、水ポテンシャルをチャンバー内で平衡させ熱電対で検知する露点式である。装置の写真を写真 5.5-1 に示す。採用した測定装置 WP4-T (Decagon device、Inc.製) は、測定がスタートすると試料を入れたカップは密閉され、内部のファンが作動し、試料を入れた密閉容器内の平衡状態に達するのを早めるものである。ちなみに露点からは、ａｗ（水分活性)、相対湿度、飽和水蒸気圧を求めることができる。

測定手順

① 透水試験、透気試験に用いた No.2 試料を 5cm の切断した残りのモルタルを粉砕した。

② 炉乾燥した粉砕試料に水を加え、所定の含水比条件(約 5～20%)に調整する。

③ 水ポテンシャル測定装置に試料をセットし、水ポテンシャルを測定する。

写真 5.5-1　水ポテンシャル測定装置 WP4-T (Decagon device、 Inc.)

5.5.2　　水分特性試験結果

ディスク供試体の水分特性曲線の全測定データを表 5.5.2-1 に示した。

表 5.5.2-1　水分特性曲線の全測定データ

圧力チャンバー法		
サクション MPa	体積含水率 cm^3/cm^3	飽和度
0.01	0.29	0.98
0.02	0.30	0.99
0.05	0.30	0.99
0.1	0.30	1.00
0.2	0.31	1.03
0.3	0.29	0.95
0.5	0.28	0.93
1	0.30	0.99
1.5	0.27	0.91

サイクロメーター法		
サクション MPa	体積含水率 cm^3/cm^3	飽和度
0.51	0.29	0.95
0.62	0.27	0.88
2.35	0.22	0.73
8.45	0.20	0.68
12.3	0.13	0.44
37	0.08	0.26
n.d.	0.07	0.22

水分特性曲線を図 5.5.2-1 に示した。体積含水率θ（飽和度 S_r）は pF の増加とともに減少し、風乾状態ではほぼ 0 の値を示した。

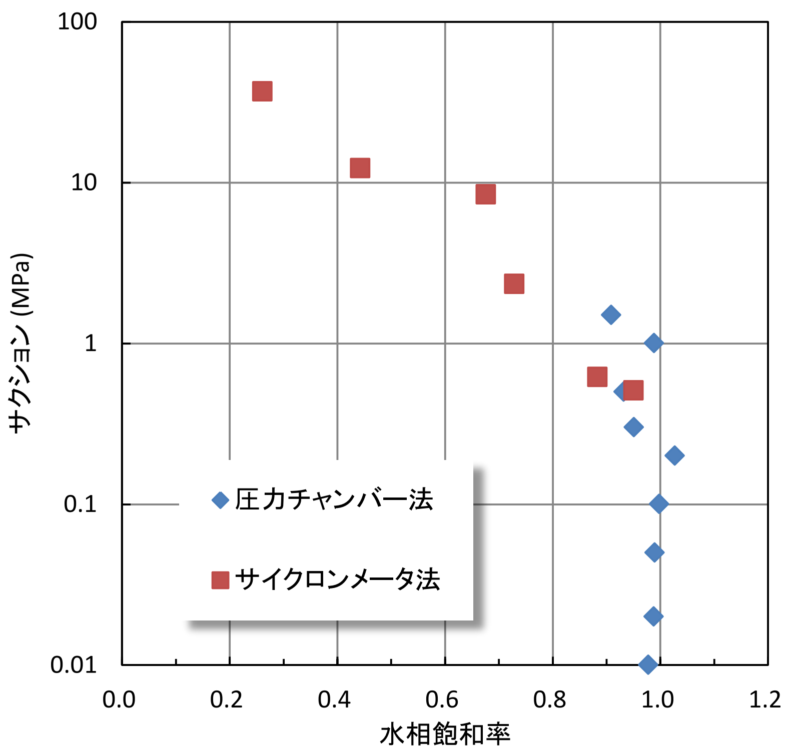


図 5.5.2-1　水分特性試験結果

水分特性曲線の解析にあたり、測定データを次に示す、van Genuchten (1980)式（以下、VG 式）で回帰した。

VG 式：

$$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)\left[\frac{1}{1+(\alpha|\psi|)^n}\right]^m \qquad [5.5\text{-}1]$$

ここで、θ_s：飽和体積含水率($cm^3\ cm^{-3}$)、θ_r：残留体積含水率($cm^3\ cm^{-3}$)、α、 n、 m (=1-1/n)：フィッティングパラメータである。

VG 式による回帰を図 5.5.2-2 に示した。

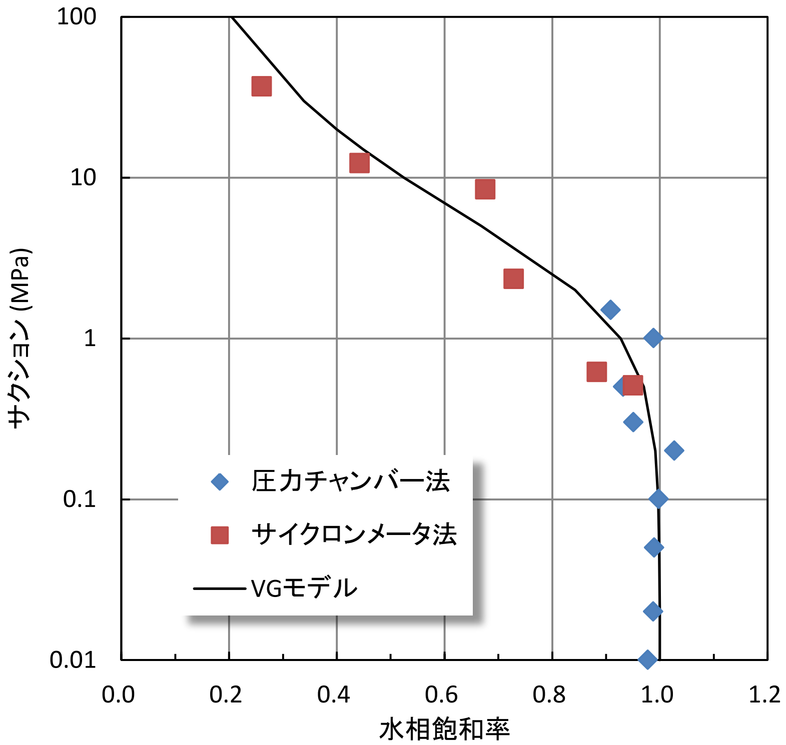


図 5.5.2-2　水分特性曲線（VG モデル近似）

水分特性は、間隙が毛管であるとした場合の直径の分布が推定される。間隙径 D（等価毛細管直径）は注入圧力 P と流体の表面張力 σ と接触角 θ の間で Washburn の法則が成立する。すなわち

$$PD = -4\sigma\cos\theta \qquad [5.5\text{-}2]$$

である。

間隙径分布をオートポアⅣ9500 によって計測した。オートポアⅣ9500 の状況と仕様を図 5.5.2-3 と図 5.5.2-4 に示す。計測用の試料は、透水・透気試験を行った供試体#1 を高さ 5cm に切断したものの余りの部分を粉末状にしたものである。

間隙径分布測定結果を図 5.5.2-5 と図 5.5.2-6 に示す。水の表面張力を 72.75mN/m 接触角を 60℃と仮定した場合に間隙径分布測定結果 1 より推定した水分特性曲線を図 5.5.2-7 に示す。図では、計測された 100μm まで全ての間隙を考慮したものと、10μm 以下のより微細な間隙だけを考慮した場合の飽和度と毛管圧の関係を示した。水分特性試験から得られた水分特性曲線（

図 5.5.2-2）と間隙径分布から推定した水分特性曲線を比較するため図 5.5.2-8 に両者を併記したものを示した。これより、間隙径分布からは、毛管圧は低めに推定される。計測した結果からは、10μm や 100μm の間隙が存在するが、それらは流体の移動にはほとんど寄与せず、流体移動に関してはより微細な間隙が関係しているものと推察される。

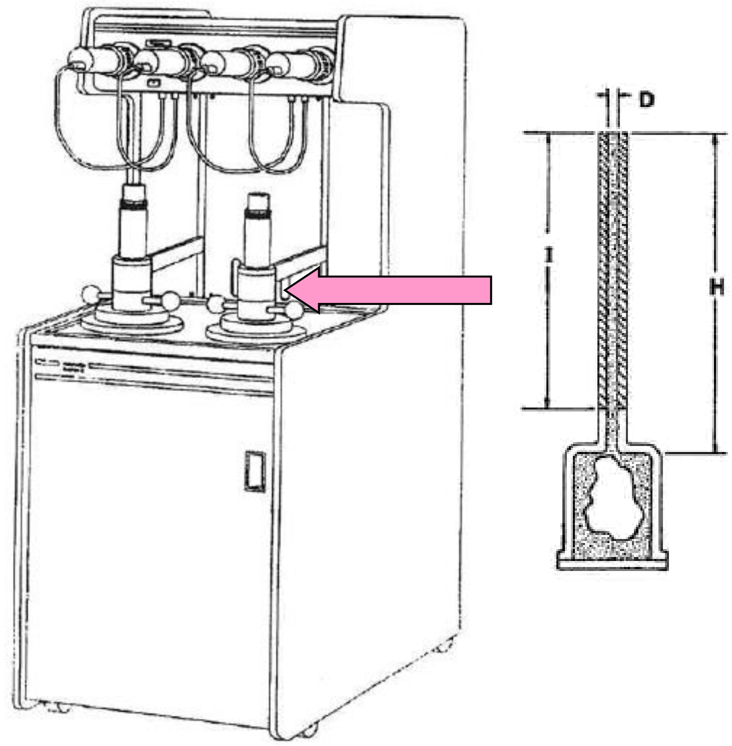


図 5.5.2-3 オートポアⅣ9500 の状況

項目		仕様
低圧測定部		
測定範囲	:	0〜50psia (345kPa)
分解能	:	0.01psi (69Pa)
細孔直径	:	500〜3.6μm
圧力変換器精度	:	フルスケールの±1% (圧力変換器メーカの仕様)
高圧測定部		
測定範囲	:	
9520/9510形		大気圧〜60,000psia(414 MPa)
9505/9500形		大気圧〜33,000psia(228 MPa)
分解能	:	
9520/9510形		5,000psia(34MPa)〜60,000(414MPa)まで0.3psi(2,070 Pa) 大気圧〜5,000psia(34MPa)まで0.1psi(689Pa)
9505/9500形		3,000psia(21MPa)〜33,000psia(228MPa)まで 0.2psi(1,400Pa) 大気圧〜3,000psia(21MPa)まで0.1psi(689Pa)
細孔直径	:	
9520/9510形		6〜0.003μm
9505/9500形		6〜0.0055μm
圧力変換器の精度	:	フルスケールの±0.1% (圧力変換器メーカの仕様)
圧入量		
分解能	:	0.1 μL以下
精　度	:	ステム最大容積の±1%
セル		
ステム容積	:	0.38、1.1、1.7、3.1、3.9cm³の 5 種類
試料寸法	:	最大：直径2.5cm×長さ2.5cm の円筒形試料

図 5.5.2-4　オートポアⅣ9500 の仕様

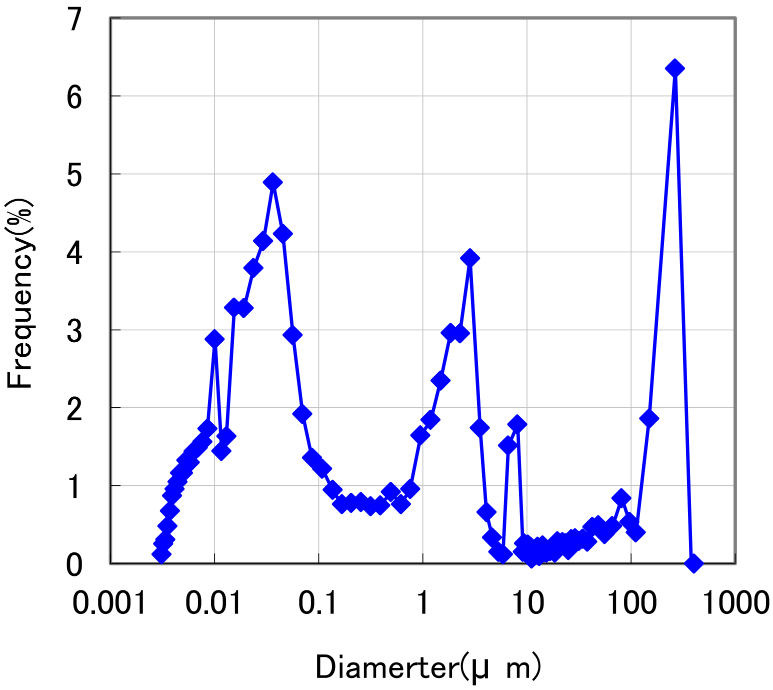


図 5.5.2-5　間隙径分布測定結果 1

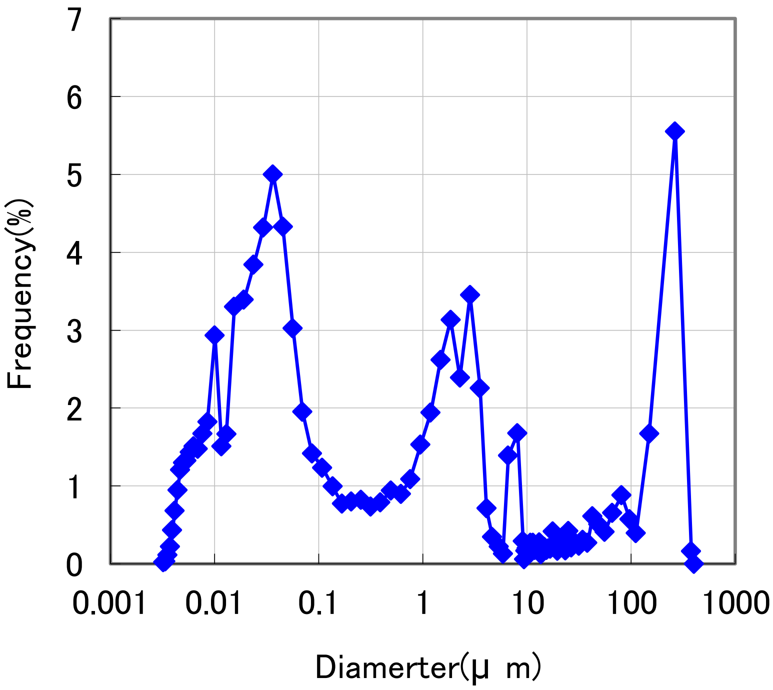


図 5.5.2-6　間隙径分布測定結果 2

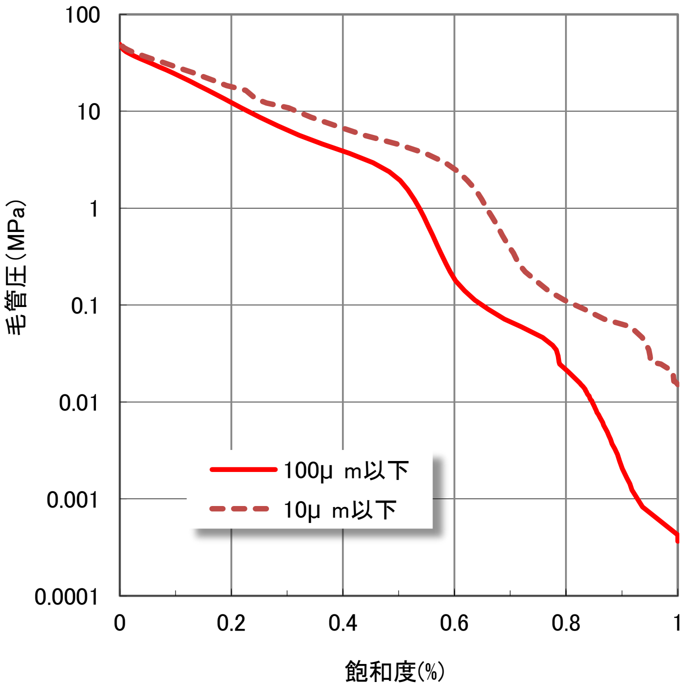


図 5.5.2-7　間隙径分布測定結果 1 より推定した水分特性曲線

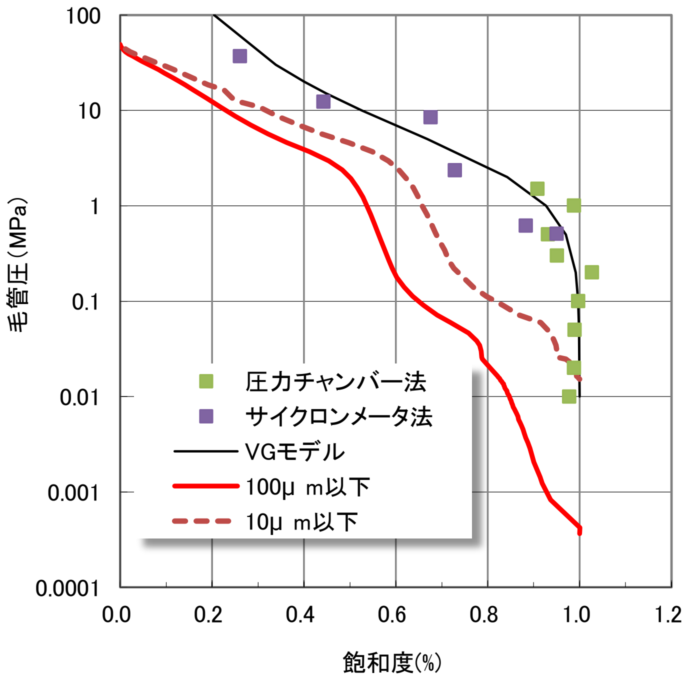


図 5.5.2-8　間隙径分布測定結果 1 より推定した水分特性曲線と水分特性試験より得られた水分特性

5.6　モルタルの気液二相流特性データの取得

5.6.1　透水試験、ガス透気試験データの整理

前述のモルタル供試体 No.1、No.2 を対象としたガス透気試験（試験装置概要図を図 5.6.1-1 に示す）の実測データを用いて再現解析を行い、二相流物性データを同定する。二相流物性データ同定の際に利用可能な試験データを整理した。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 5.6.1-1 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変化）（図 5.6.1-1 のQ_{wa}）
- 重量差から得られた累積排水量
- 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
- 水分特性試験から得られた水飽和度－毛細管圧力
- 細孔径分布
- 間隙率

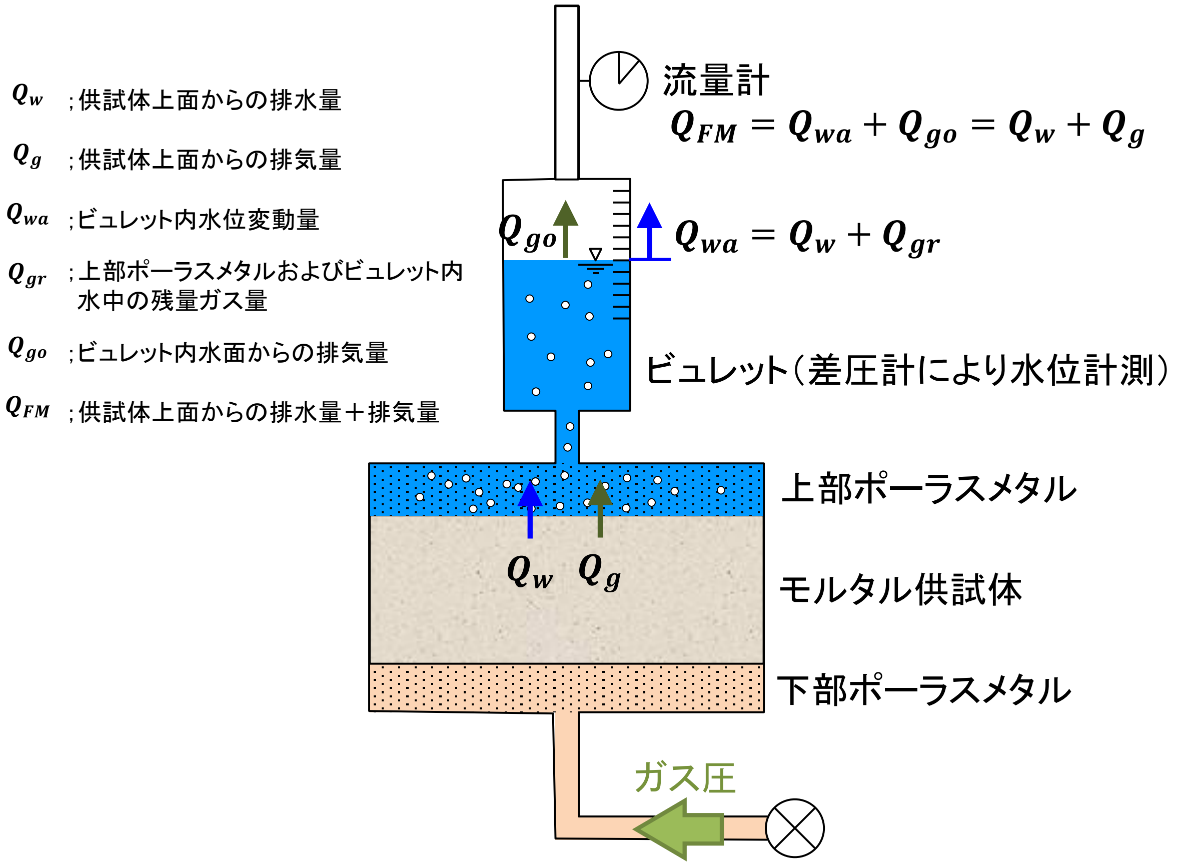


図 5.6.1-1　ガス移行試験装置概要図

表 5.6.1-1 に各試験の供試体寸法、載荷ガス圧、背圧、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 5.6.1-2 に水分特性試験から得られた水相飽和度と毛細管圧力の関係を示す。また、図 5.6.1-3 に各試験で実測された累積排水排気量Q_{FM}および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 5.6.1-1　各供試体の寸法、試験条件および実測データの整理

供試体	寸法※	載荷ガス圧 (MPa)	背圧 (MPa)	累積排水量 (mL) / みかけの間隙率 (-)	水相の絶対浸透率（m²）	ガス相の絶対浸透率（m²） / ガス相の有効浸透率（m²）
No.1	Φ5.001cm h4.893cm	2.959	0.101	0.076	1.23×10^{-18}	1.38×10^{-15}
				0.00791		1.14×10^{-19}
No.2	Φ5.002cm H4.846cm	2.937	0.101	0.718	2.22×10^{-18}	4.27×10^{-15}
				0.00754		1.63×10^{-19}

※Φは直径、H は高さを示す

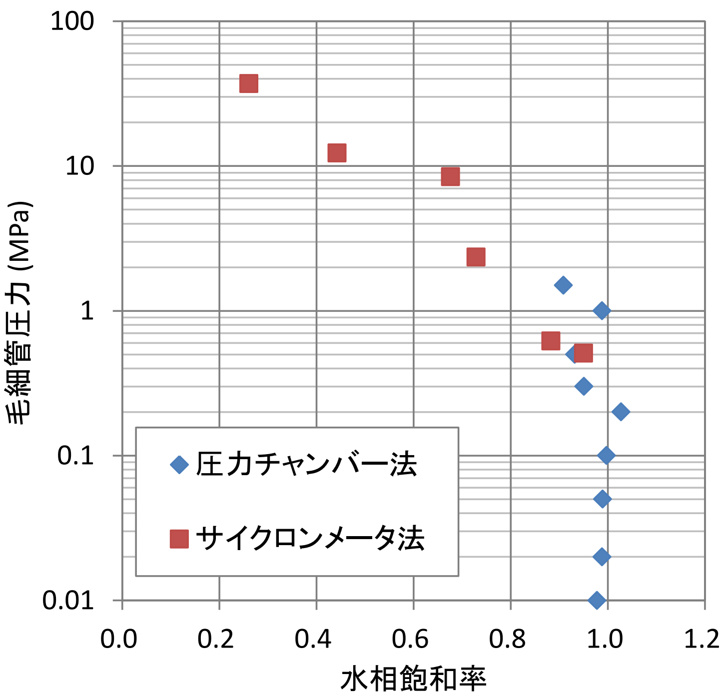


図 5.6.1-2　水分特性試験から得られた水相飽和度と毛細管圧力の関係

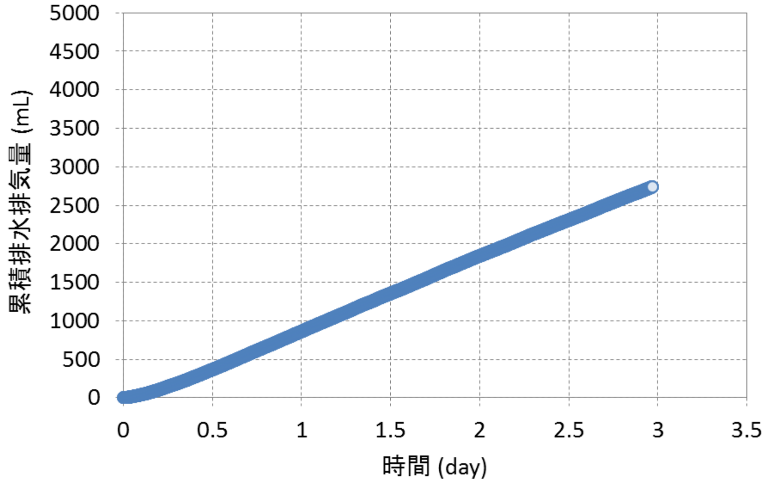
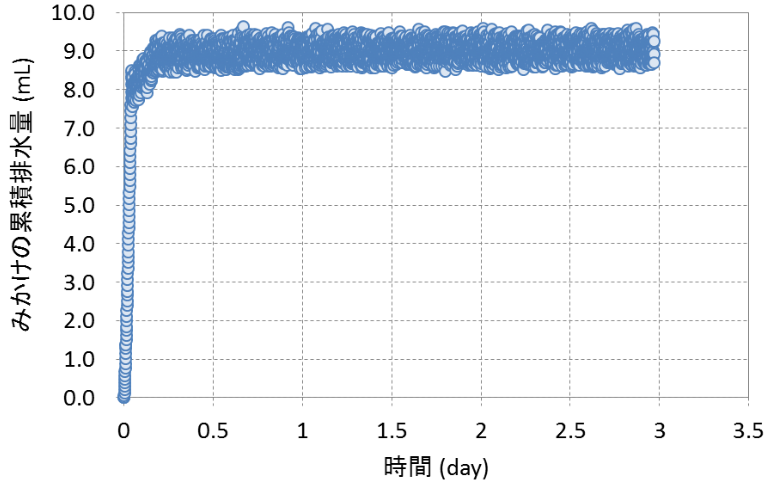
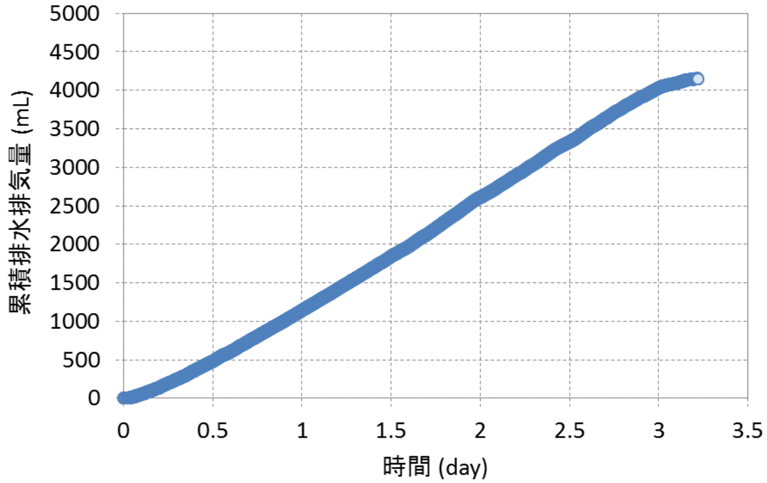
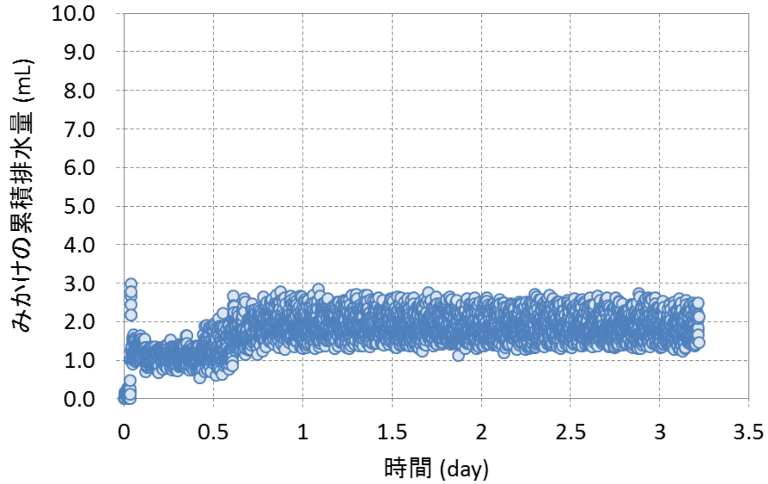
<table>
<tr><th>供試体</th><th>累積排水排気量Q_{FM}</th><th>みかけの累積排水量Q_{wa}</th></tr>
<tr><td>No.1</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>No.2</td><td></td><td></td></tr>
</table>

図 5.6.1-3　累積排水排気量とみかけの累積排水量変化

5.6.2　二相流特性データ同定のための逆問題の設定

(1)　検討方針

本検討では、逆解析手法を適用して実測データの再現を試み、二相流物性を同定する。

対象とする試験では、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、より信頼性の高い二相流物性デ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、本検討における二相流物性データ同定解析では、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

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 5.6.2-1、図 5.6.2-2 に示す。累積排水量と累積排気量の時間変化を見ると、供試体 No.1 では約 0.3 日以降、供試体 No.2 では約 0.8 日以降、累積排水量が横ばいになり（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が低くなる。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。

解析モデルは、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、毛細管圧力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。同定される二相流物性（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。

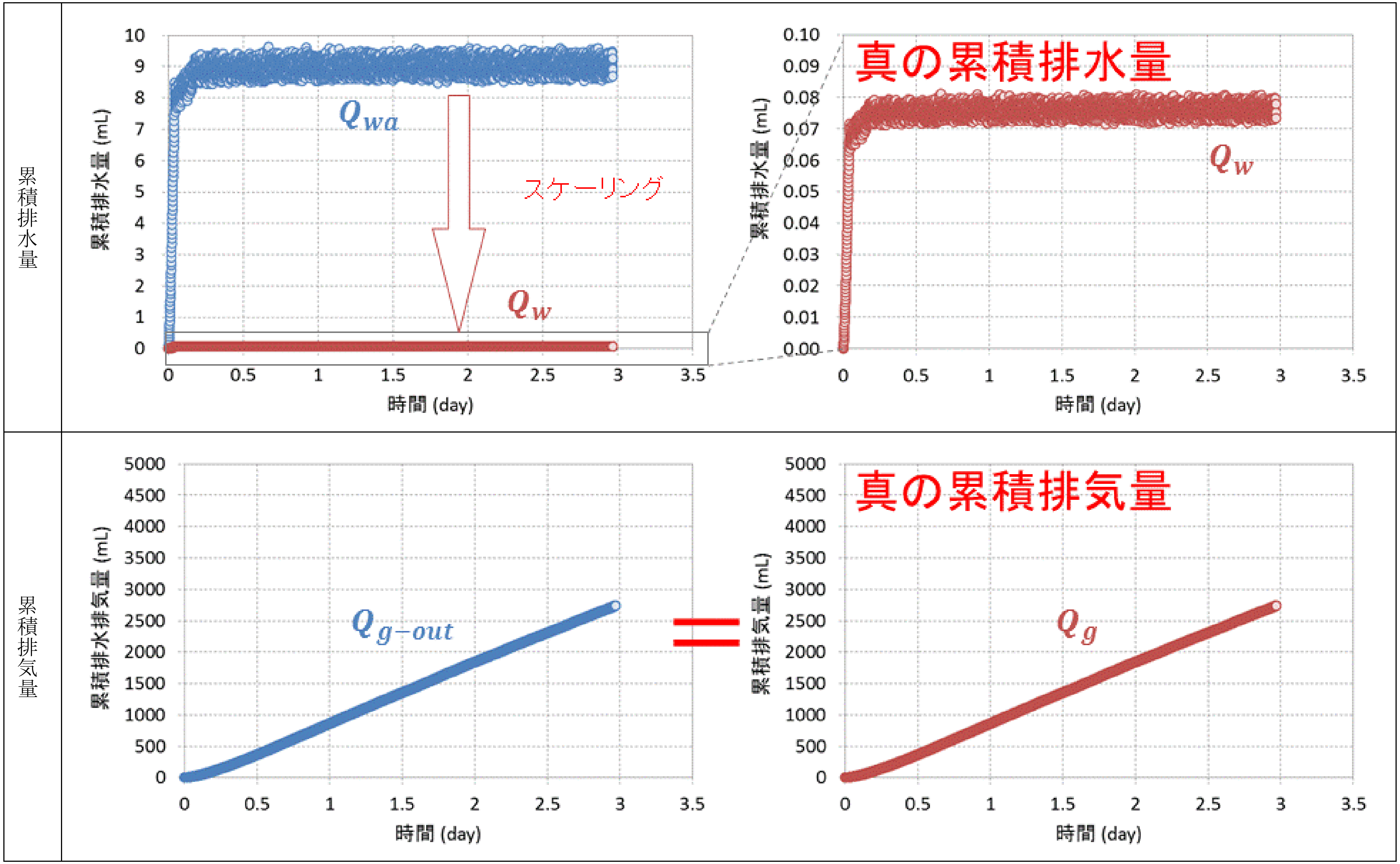


図 5.6.2-1　推定した真の累積排水量、累積排気量（供試体 No.1）

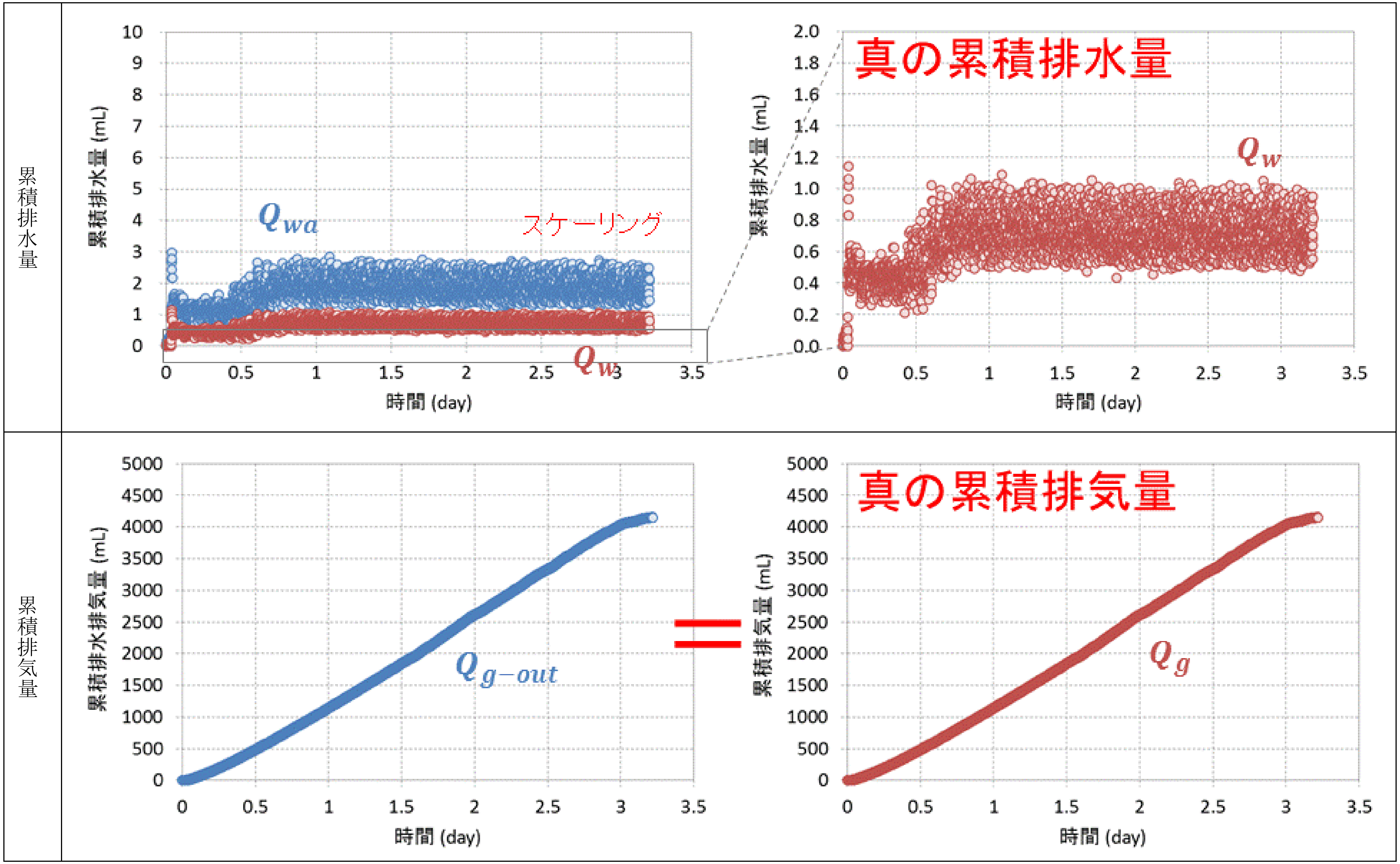


図 5.6.2-2　推定した真の累積排水量、累積排気量（供試体 No.2）

(2) 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間引き、平滑化を行った。目的関数に用いる累積排水量と累積排気量データを図 5.6.2-3 に示す。目的関数fは以下の式で記述される。図 5.6.2-3 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。

$$f = \sum_{i=1}^{n_{ow}} w_w(i)\left(Q_{w\_obs}(i) - Q_{w\_cal}(i)\right)^2 + \sum_{j=1}^{n_{og}} w_g(i)\left(Q_{g\_obs}(j) - Q_{g\_cal}(j)\right)^2 \qquad (5.6\text{-}1)$$

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

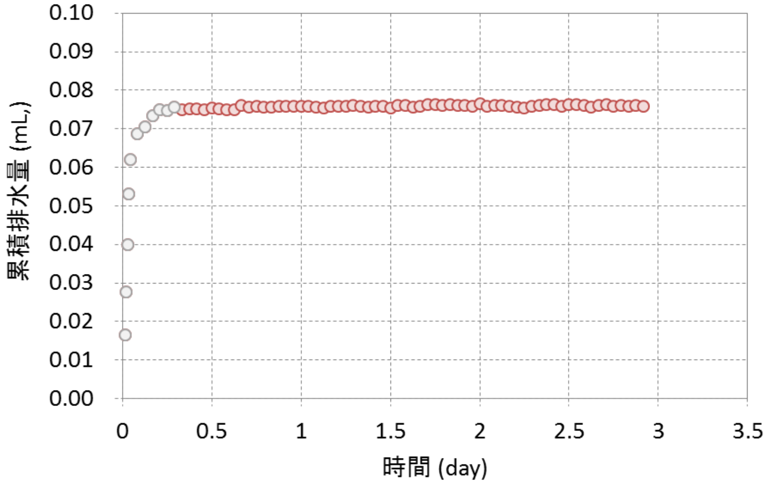
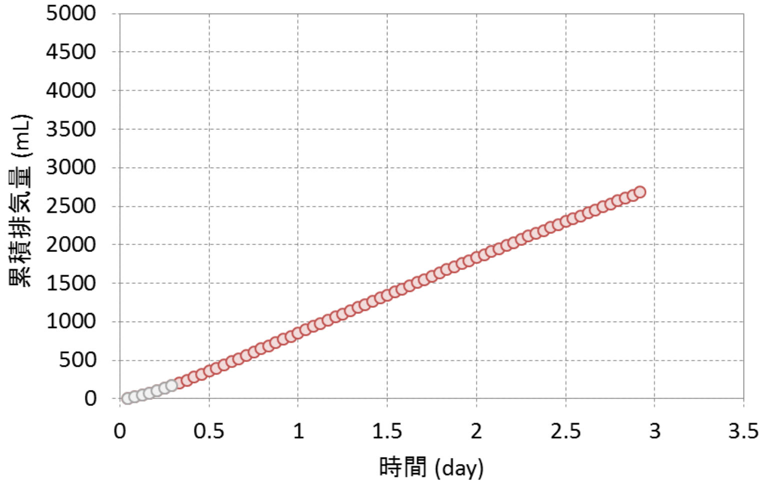
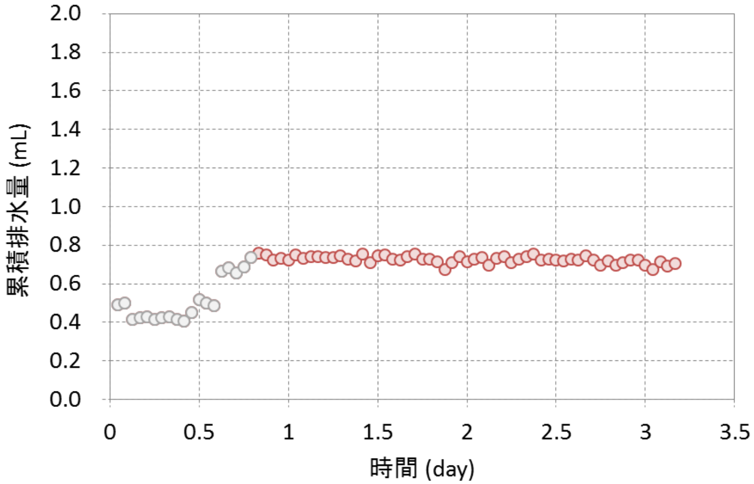
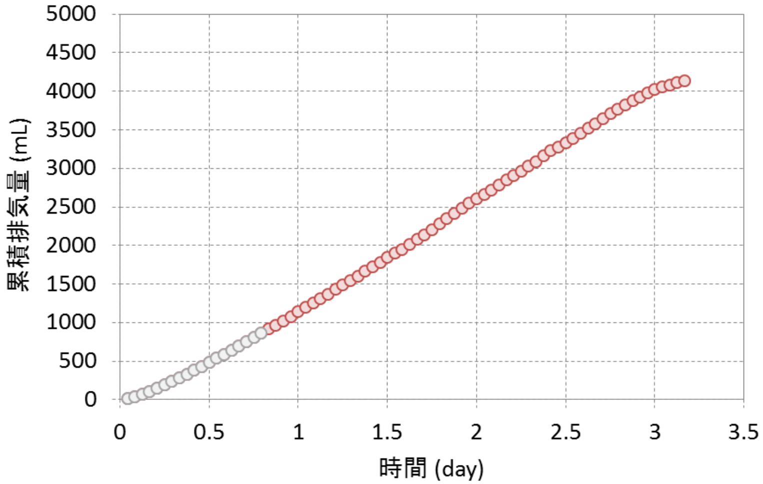
供試体	累積排水量	累積排気量
No.1		
No.2		

図 5.6.2-3　目的関数に用いる累積排水量、累積排気量データ

(3) 順解析に用いる解析コード

解析には、多相多成分流体を対象とした汎用地圏流体シミュレータ GETFLOWS（General-purpose Terrestrial fluid-FLOW Simulator）[2]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。

$$\nabla \cdot \left(\rho_{wS} \frac{K_w k_{rw}}{\mu_w B_w} \nabla \Psi_w \right) - \rho_{wS} q_{wS} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_{wS} \phi \frac{S_w}{B_w} \right) \tag{5.6-2}$$

$$\nabla \cdot \left(\rho_{gS} \frac{K_g k_{rg}}{\mu_g B_g} \nabla \Psi_g \right) - \rho_{gS} q_{gS} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_{gS} \phi \frac{S_g}{B_g} \right) \tag{5.6-3}$$

式中の記号の説明は以下の通りである。

K_p ；流体相$p(= w$、$g)$の絶対浸透率(m^2)

k_{rp} ；流体相$p(= w$、$g)$の相対浸透率$(-)$

S_p ；流体相$p(= w$、$g)$の飽和度$(-)$

P_p ；流体相$p(= w$、$g)$の圧力(Pa)

μ_p ；流体相$p(= w$、$g)$の粘性係数$(Pa \cdot \mathrm{s})$

ρ_{pS} ；標準状態における流体相$p(= w$、$g)$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_{pS} ；標準状態における流体相$p(= w$、$g)$の生産・消滅量$(1/s)$

B_p ；流体相$p(= w$、$g)$の容積係数(m^3/m^3)

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。

$$\Psi_w = P_w - \rho_w g Z \tag{5.6-4}$$

$$\Psi_g = P_g - \rho_g g Z \tag{5.6-5}$$

ここに、Zは下方に測った距離（深度）、ρ_w、ρ_g、gはそれぞれ水相、ガス相の密度、重力加速度である。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。

$$P_c = P_c[S_w] = P_g - P_w \tag{5.6-6}$$

$$\phi = \phi[P_g] = \phi_0 \left(1 + C_r (P_g - P_0) \right) \tag{5.6-7}$$

$$k_{rp} = k_{rp}[S_w] \tag{5.6-8}$$

$$B_p = B_p[P_p] \tag{5.6-9}$$

$$\rho_p = \rho_p[P_p] = \rho_{pS}/B_p[P_p] \tag{5.6-10}$$

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。

次に数値解法について以下に示す。

支配法的式を積分型有限差分法（Integral Finite Difference Method: IFDM）によって空間的に離散化する。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。時間離散化には完全陰解法を適用する。

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×未知数 NEQ(=2)となる。これを、Nested Factorization[3]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）[4]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。

(4) 与条件（流体物性、水理物性）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。本検討では等温状態（25℃）を仮定するため、流体物性は圧力によってのみ変化する。

理科年表より$25(℃)$における標準大気圧$101、325(Pa)$での水の密度ρ_{w0}を$997.04(kg/m^3)$、粘性係数μ_{w0}を$0.890\times10^{-3}(Pa\,s)$とし、以下の式により水圧の関数として取り扱う。

$$\rho_w = \rho_{w0}\big(1 + C_f(P_w - P_0)\big) \tag{5-11}$$

$$\mu_w = \mu_{w0}\big(1 + C_\mu(P_w - P_0)\big) \tag{5-12}$$

ここに、ρ_w、μ_w、C_f、C_μ、P_w、P_0はそれぞれ、水の密度(kg/m^3)、粘性係数$(Pa\,s)$、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$0.45\times10^{-9}(1/Pa)$、粘性係数の増加率には$1.0\times10^{-10}(1/Pa)$、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$25(℃)$における標準大気圧$101、325(Pa)$での空気の密度$1.184\times10^{-3}(kg/m^3)$と、窒素の空気に対する比重$0.967(-)$から、標準大気圧での窒素の密度$\rho_{g0}$を$1.145\times10^{-3}(kg/m^3)$とした。また、粘性係数$\mu_{g0}$は理科年表に記載された以下の式より$17.8\times10^{-6}(Pa\,s)$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。

$$\mu_{g0} = \mu_{20}\left(\frac{T_{20}+C}{T+C}\right)\left(\frac{T}{T_{20}}\right)^{3/2} \tag{5-13}$$

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$101、325(Pa)$、$20(℃)$における値を示す。$\mu_{20} = 17.6\times10^{-6}(Pa\,s)$、$T_{20} = 293.15(K)$、窒素のサザランド定数には$C = 104(-)$を設定した。

水理物性に関して、以下のパラメータは与条件として扱う。

- 水相の絶対浸透率（供試体 No.1：$1.23\times10^{-18}(m^2)$、供試体 No.2：$2.22\times10^{-18}(m^2)$）
- ガス相の絶対浸透率（供試体 No.1：$1.38\times10^{-15}(m^2)$、供試体 No.2：$4.27\times10^{-15}(m^2)$）
- 間隙率（供試体 No.1：0.323、供試体 No.1：0.313）

- 固相圧縮率：$3.863 \times 10^{-11}(Pa\,s)$（田中ら（2009）[5]の充填材（モルタル）の値を引用）
- 毛細管圧力：$van\ Genuchten$モデル、モデルパラメータ$P_0 = 2.387(MPa)$、$n = 1.425(-)$、$S_{wr} = 0.0(-)$、$S_{gr} = 0.0(-)$（表 5.6.2-1 を参照）

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n_w、n_g、S_{wr}（表 5.6.2-1 を参照）

但し、与条件となる毛細管圧力曲線では水相の残留飽和度S_{wr}が0.0であるため、まずは、相対浸透率曲線のおいても、水相の残留飽和度S_{wr}を0.0として検討を進める。水・ガス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 5.6.2-1 に示す構成式（$van\ Genuchten$モデル、以下「vGモデル」とする）を採用した。なお、表中の記号の説明は以下の通りである。本検討ではガス相の残留飽和度を 0 とした。

S_p ；流体相$p(= w$、$g)$の飽和度$(-)$
S_{pe} ；流体相$p(= w$、$g)$の有効飽和度$(-)$
S_{pr} ；流体相$p(= w$、$g)$の残留飽和度$(-)$
k_{rp} ；流体相$p(= w$、$g)$の相対浸透率$(-)$
P_c ；水-ガス系の毛細管圧力(Pa)
n ；間隙分布パラメータ$(-)$
P_0 ；ガス侵入圧(Pa)
w、g ；流体相を識別する（それぞれ水相、ガス相）記号を示す

表 5.6.2-1　本検討で用いる 2 相流曲線を表現する構成モデル

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

(5) 解析モデルと初期・境界条件

解析モデルは供試体の寸法（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載荷ガス圧条件を与える境界格子を設けた。図 5.6.2-4 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℃一定とした。

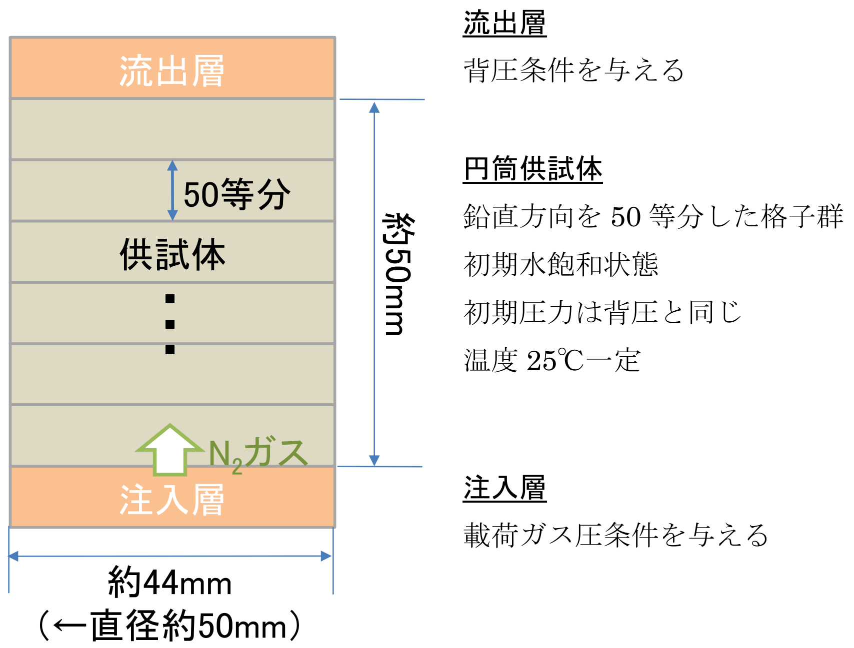


図 5.6.2-4　解析モデルの基本諸元

(6) 逆解析手法

本検討における逆解析には、米地質調査所により公開されている汎用逆解析プログラム UCODE_2005[6]を用いる。UCODE_2005 は JUPITER API と呼ばれる逆解析、感度解析及び不確実性評価のための標準インターフェースを搭載し、解析コードのソースプログラムを一切変更することなく、入出力ファイルのみの操作により多数の試行計算を容易に自動化することが可能である。逆解析に必要な未知パラメータ、制約条件および目的関数の設定は任意に行うことができる。図 5.6.2-5 に GETFLOWS を例に UCODE_2005 を用いた自動逆解析の流れを示す。

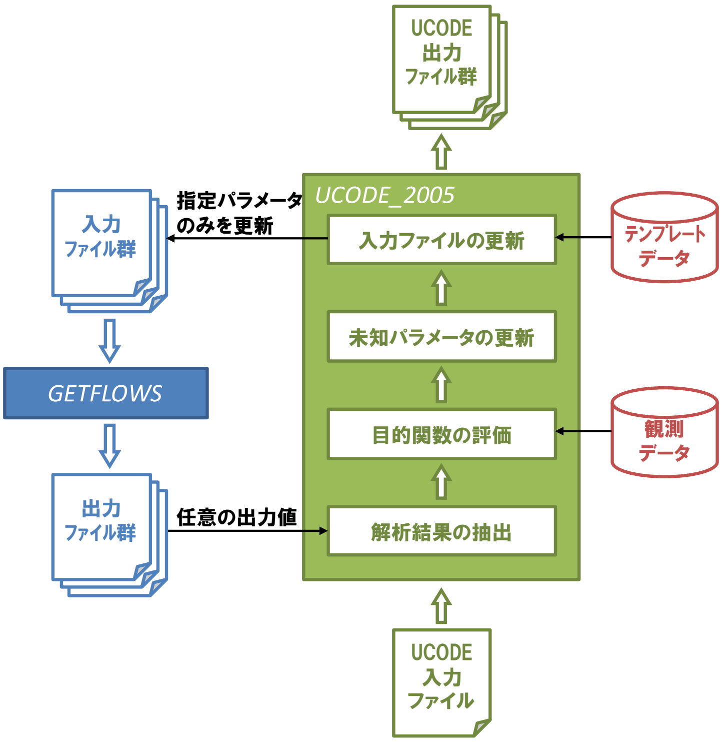


図 5.6.2-5　GETFLOWS+UCODE_2005 による逆解析の流れ

5.6.3　二相流特性の同定結果

(1)　供試体 No.1

1)　検討 1：相対浸透率のみを同定パラメータとした検討（水相の残留飽和度は 0）

(4)に示した与条件で相対浸透率のみを同定パラメータとした検討を実施した。但し、相対浸透率の水相の残留飽和度は、毛細管圧力と合わせ 0.0 とした。再現解析結果を以下に示す。

図 5.6.3-1 に累積排水量と累積排気量の再現結果の一例を示した。この解析に用いた相対浸透率を図 5.6.3-2 に示す。本検討では、供試体に含まれる初期の間隙水量に対して非常に少ない累積排水量を表現するために、水相の相対浸透率を極端に小さく設定しても、実測データを良好に再現するパラメータを見出すことは困難であった。そこで、次に相対浸透率の水相の残留飽和度を同定パラメータに加えた検討を実施した。

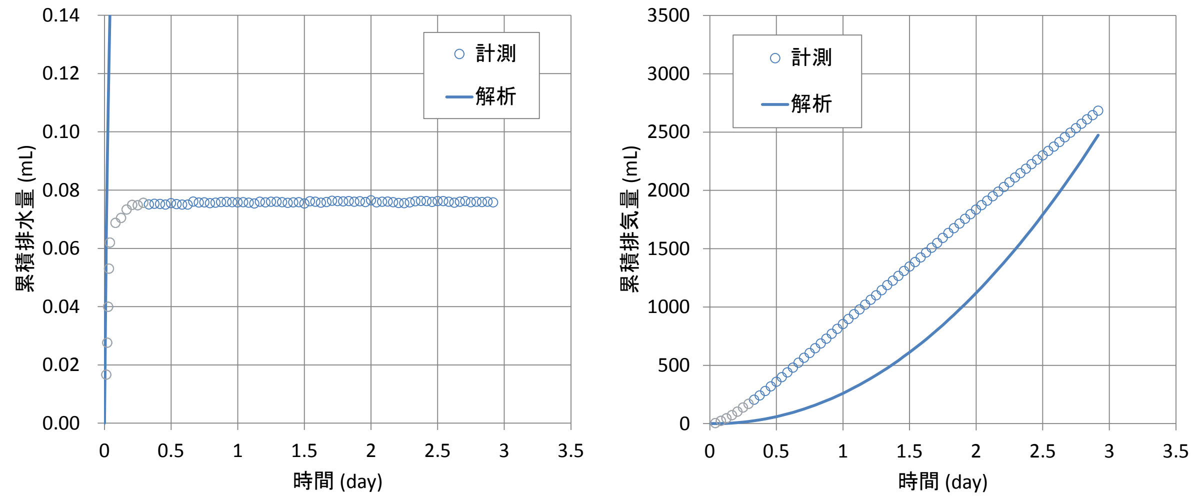


図 5.6.3-1　累積排水量と累積排気量の再現結果の一例（供試体 No.1：検討 1）

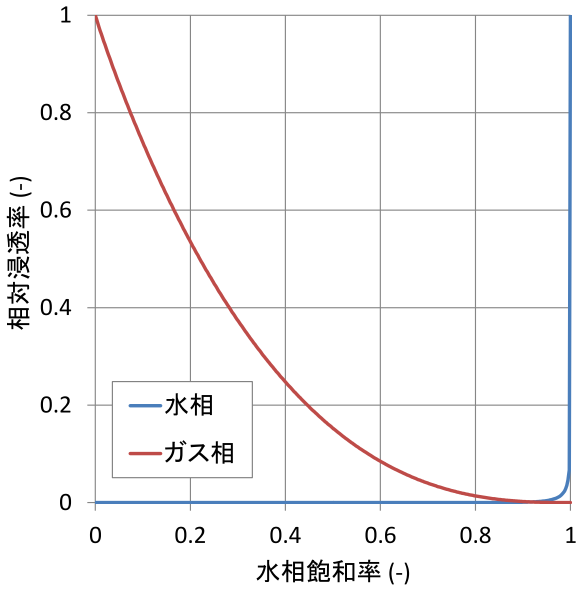


図 5.6.3-2　用いた相対浸透率（$n_w = 1.093$、$n_g = 19.98$）（供試体 No.1：検討 1）

2)　検討 2：相対浸透率および水相の残留飽和度を同定パラメータとした検討

検討 1 に対し、水相の残留飽和度を同定パラメータに加えた検討を実施した。累積排水量と累積排気量の再現結果を図 5.6.3-3 に示す。また、同定された相対浸透率曲線を図 5.6.3-4 に、同定パラメータを表 5.6.3-1 に示した。本検討においても、実測データを良好に再現するパラメータを見出すことは困難であった。そこで、毛細管圧力も同定対象に加えた検討を実施した。

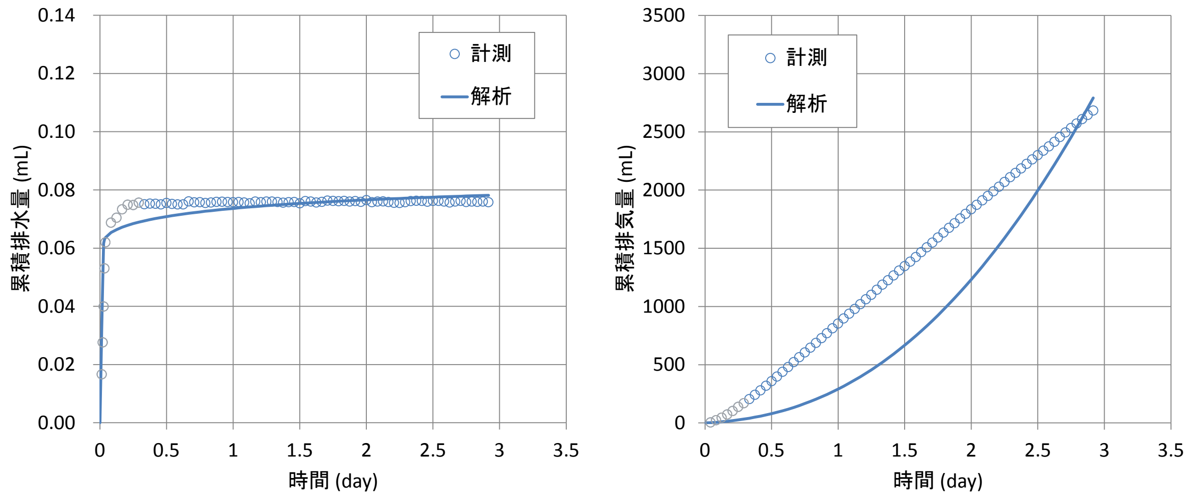


図 5.6.3-3　累積排水量と累積排気量の再現結果（供試体 No.1：検討 2）

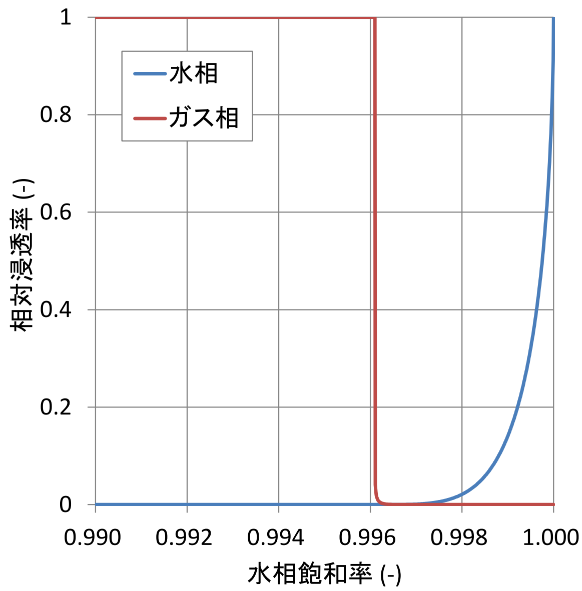


図 5.6.3-4　同定された相対浸透率（供試体 No.1：検討 2）

表 5.6.3-1　同定パラメータ（供試体 No.1：検討 2）

未知パラメータ		値
相対浸透率	S_{wr}	0.9961
	n_w	2.332
	n_g	1.074

3)　検討 3：相対浸透率と毛細管圧力を同定パラメータとした検討

本検討は、相対浸透率と毛細管圧力を同定パラメータとして、実測データの再現を試みた。再現した累積排水量と累積排気量の結果を図 5.6.3-5 に示す。いずれも良好に実測データを再現することができている。同定された相対浸透率と毛細管圧力を図 5.6.3-6 に同定パラメータを表 5.6.3-2 に示した。供試体に含まれる初期の間隙水量に対して非常に少ない累積排水量を表現するために、水相の残留飽和度として 0.9939 が同定され、極端な形状の 2 相流曲線が同定された。

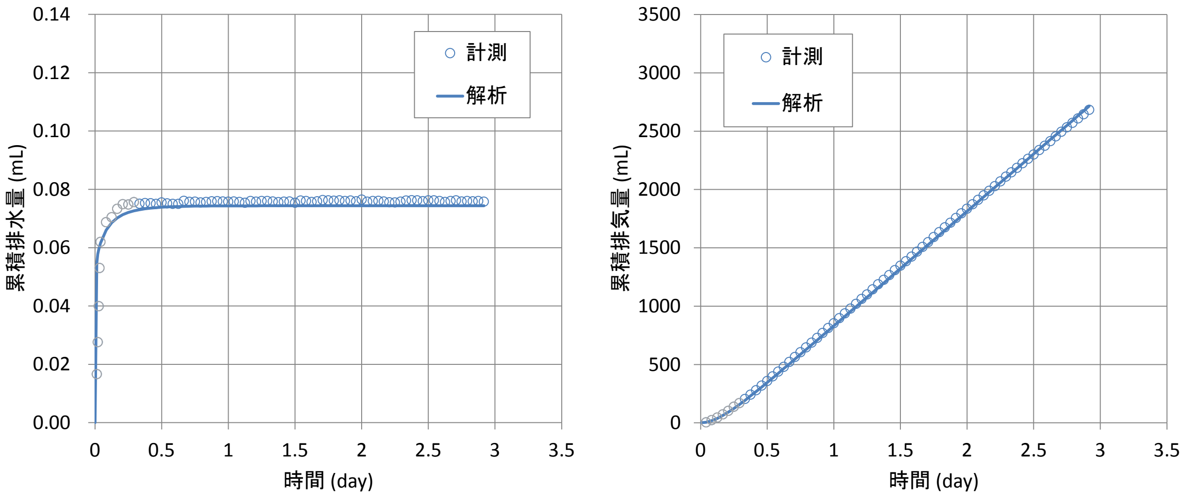


図 5.6.3-5　累積排水量と累積排気量の再現結果（供試体 No.1：検討 3）

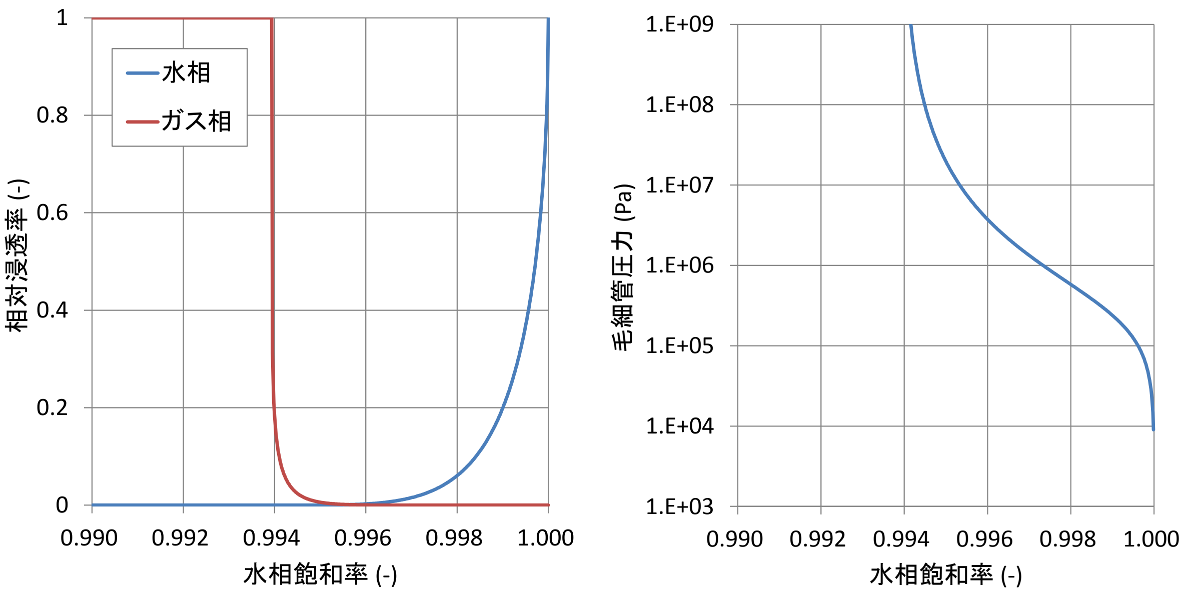


図 5.6.3-6　同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）（供試体 No.1：検討 3）

表 5.6.3-2　同定パラメータ（供試体 No.1：検討 3）

未知パラメータ		値
相対浸透率	S_{wr}	0.9939
	n_w	2.063
	n_g	1.234
毛細管圧力	S_{wr}	0.9939
	P_0	2.636×10^5 (Pa)
	n	1.404

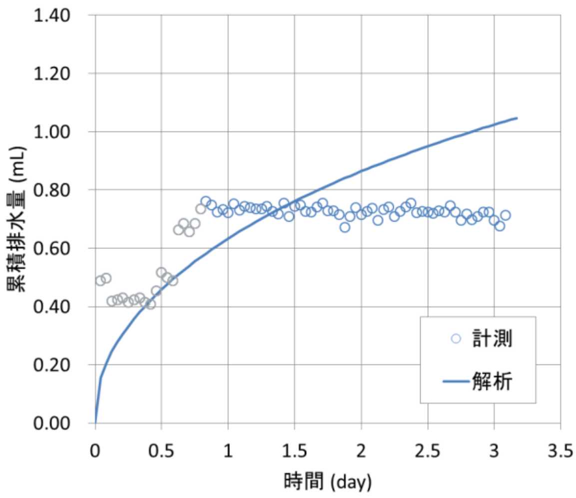
(2)　供試体 No.2

供試体 No.2 では、供試体 No.1 に対して実施したものと同じ検討ステップを適用し、パラメータの同定を試みた。

1)　検討 1：相対浸透率のみを同定パラメータとした検討（水相の残留飽和度は 0）

供試体 No.1 と同様に(4)に示した与条件で相対浸透率のみを同定パラメータとした検討を実施した。但し、相対浸透率の水相の残留飽和度は、毛細管圧力と合わせ 0.0 とした。再現解析結果を以下に示す。

図 5.6.3-7 に累積排水量と累積排気量の再現結果の一例を示した。この解析に用いた相対浸透率を図 5.6.3-8 に示す。供試体 No.1 と同様に、本検討でも、供試体に含まれる初期の間隙水量に対して非常に少ない累積排水量を表現するために、水相の相対浸透率を極端に小さく設定しても、実測データを良好に再現するパラメータを見出すことは困難であった。そこで、次に相対浸透率の水相の残留飽和度を同定パラメータに加えた検討を実施した。



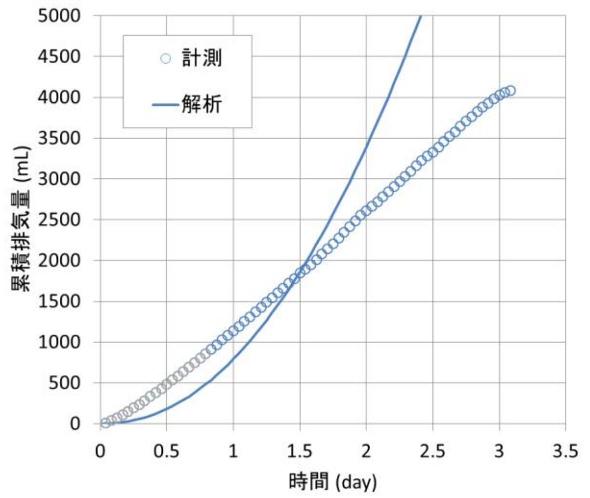


図 5.6.3-7　累積排水量と累積排気量の再現結果の一例（供試体 No.2：検討 1）

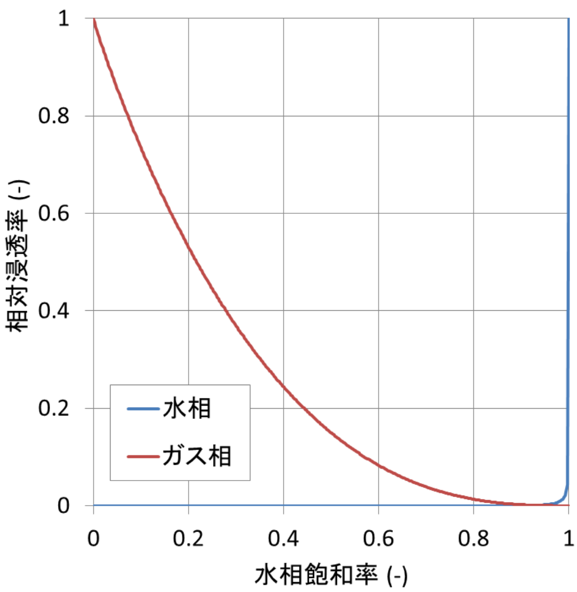


図 5.6.3-8　用いた相対浸透率（$n_w = 1.075$、$n_g = 18.08$）（供試体 No.2：検討 1）

2)　検討 2：相対浸透率のみを同定パラメータとした検討

検討 1 に対し、水相の残留飽和度を同定パラメータに加えた検討を実施した。累積排水量と累積排気量の再現結果を図 5.6.3-9 に示す。また、同定された相対浸透率曲線を図 5.6.3-10 に、同定パラメータを表 5.6.3-3 に示した。本検討においても、実測データを良好に再現するパラメータを見出すことは困難であった。そこで、毛細管圧力も同定対象に加えた検討を実施した。

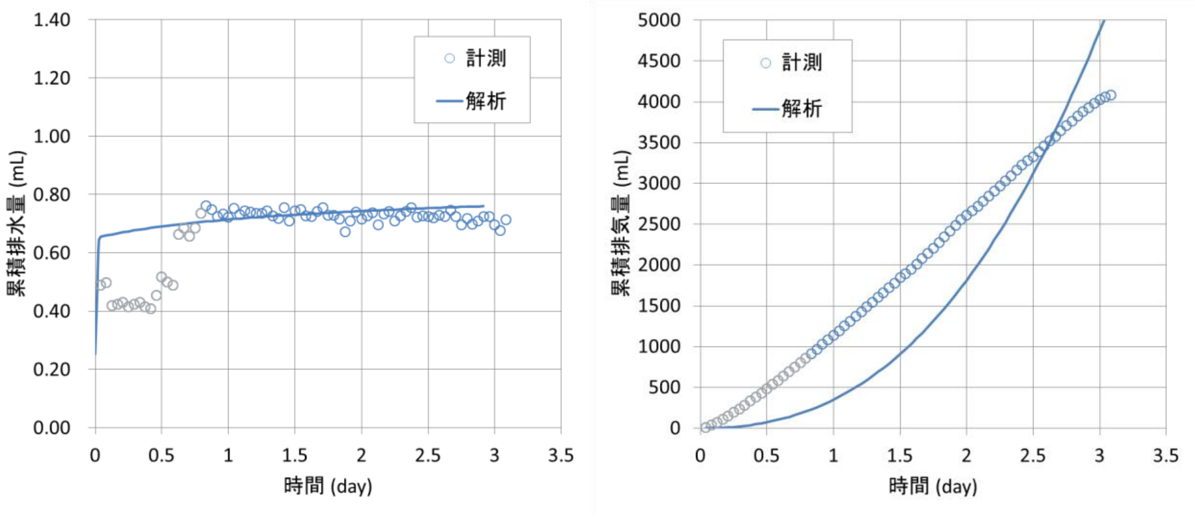


図 5.6.3-9　累積排水量と累積排気量の再現結果（供試体 No.2：検討 2）

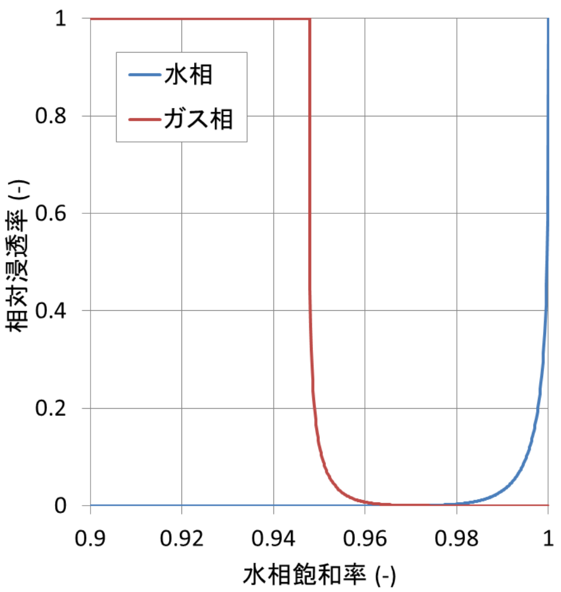


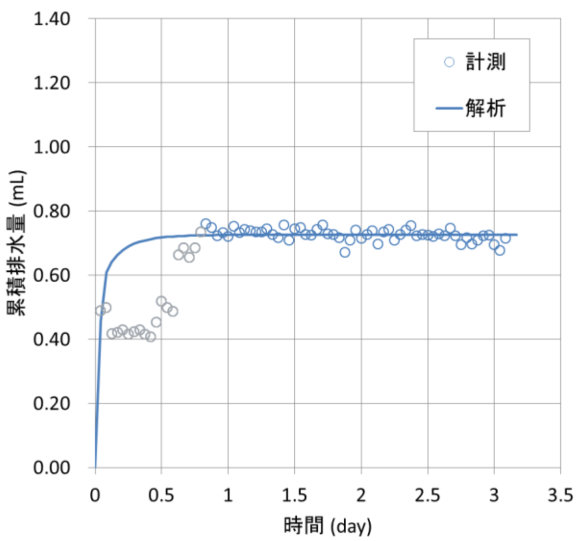
図 5.6.3-10　同定された相対浸透率（供試体 No.2：検討 2）

表 5.6.3-3　同定パラメータ（供試体 No.2：検討 2）

未知パラメータ		値
相対浸透率	S_{wr}	0.9479
	n_w	1.432
	n_g	1.317

3)　検討 3：相対浸透率と毛細管圧力を同定パラメータとした検討

本検討は、相対浸透率と毛細管圧力を同定パラメータとして、実測データの再現を試みた。再現した累積排水量と累積排気量の結果を図 5.6.3-11 に示す。いずれも良好に実測データを再現することができている。同定された相対浸透率と毛細管圧力を図 5.6.3-12 に同定パラメータを表 5.6.3-4 に示した。供試体 No.2 においても、No.1 と同様に、供試体に含まれる初期の間隙水量に対して非常に少ない累積排水量を表現するために、水相の残留飽和度として 0.9432 が同定され、極端な形状の 2 相流曲線が同定された。



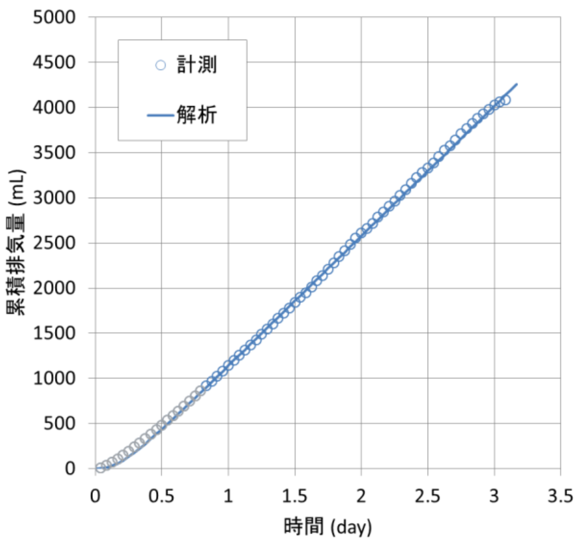
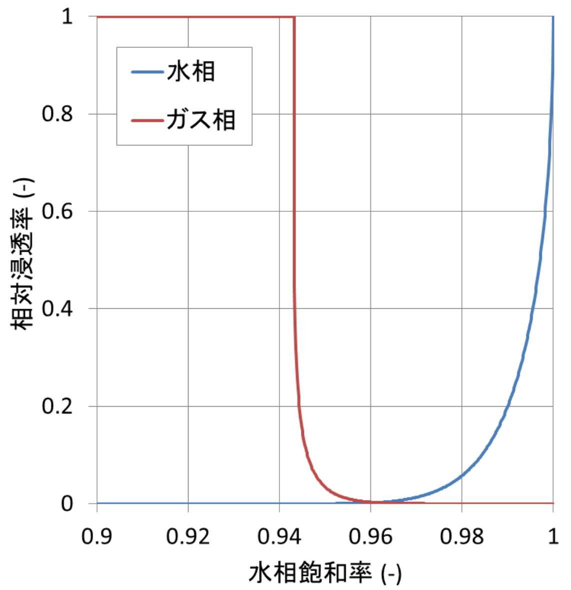


図 5.6.3-11　累積排水量と累積排気量の再現結果（供試体 No.2：検討 3）



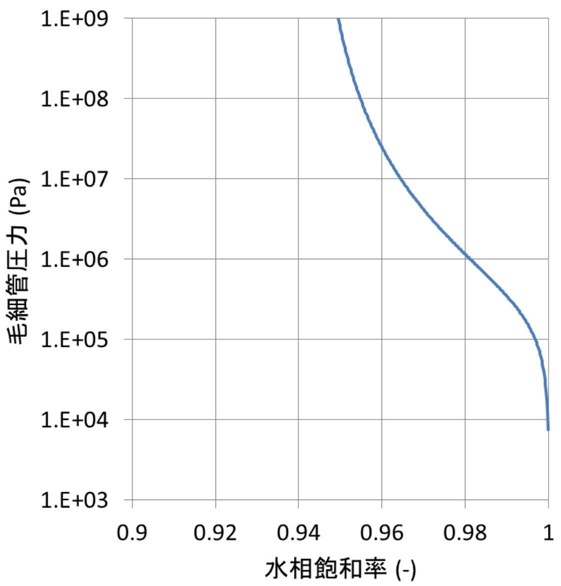


図 5.6.3-12　同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）（供試体 No.2：検討 3）

表 5.6.3-4　同定パラメータ（供試体 No.2：検討 3）

未知パラメータ		値
相対浸透率	S_{wr}	0.9432
	n_w	2.140
	n_g	1.316
毛細管圧力	S_{wr}	0.9432
	P_0	2.484×10^5 (Pa)
	n	1.264

5.7　まとめ

平成 25 年度の検討で策定した今後 5 カ年間（平成 25-29 年度）の実施計画[9]に基づき、平成 26 年度はセメント系材料の気液二相流特性データ（透水・透気係数、モデルパラメータ等）の取得・評価法の確立に向けた基礎データ取得を目的として、特にガス移行過程（排水過程）の詳細な挙動把握に主眼を置いた気液二相流特性データ取得試験およびモデルパラメータの同定逆解析を実施した。

5.7.1　モルタルの透水特性及びガス透気特性のデータ取得

- ✓ セメント系材料に共通する特徴として、その緻密な構造に起因して水／ガスの透過性が非常に小さいことがあり、特に飽和したセメント系材料の二相流特性の把握が困難となる。そこで本検討では上記課題の解決のため、モルタルの配合設計を検討することで、比較的高い強度を保ちつつも透過性の高いモルタル供試体を作製し、試験に供した。
- ✓ 供試体の透水・透気特性データを精度良く取得するために、供試体と試験容器の界面をシールできる（ゴムスリーブにより側圧を載荷できる）三軸型の透水・透気試験を用いて試験を実施した。
- ✓ 飽和したモルタル供試体（n=2）に対して透水試験を実施し、累積排水量の経時変化が一定となった区間を選定したうえで透水係数（水相の絶対浸透率）を取得することが出来た。
- ✓ 透水試験後に直ちに透気試験を実施することで、飽和したモルタルの透気特性データ（ガス注入時の累積排水・排気量が定常に至るまでの経時変化とガス相の有効浸透率）を取得することが出来た。
- ✓ さらに、絶乾状態の供試体（透気試験後の供試体を炉乾燥したもの）を用いた透気試験により、ガス相の絶対浸透率を取得することが出来た。

5.7.2　モルタルの水分特性データの取得

- ✓ 加圧チャンバー法（主に高飽和度領域の詳細な挙動を評価対象とする試験方法）とサイクロンメータ法（高飽和度～低飽和度に至る幅広い挙動を網羅的に把握する試験方法）を実施することで、モルタル材料の水分特性曲線（A）を取得することが出来た。
- ✓ 一方で、上記で取得した水分特性曲線の妥当性確認を目的に、別途実施した間隙径分布測定結果から求められる水分特性曲線（B）を取得して上記結果と比較したところ、後者（B）の方が低いサクションを示す傾向になることが分かった。これは、モルタル材料には比較的大きな径の間隙が分布していることに起因するためと思われるが、実現象から考察すると大径の間隙は流体の移動には殆ど寄与せず、微細な間隙のみが関与しているためと推察されるため、水分特性曲線（B）の方が妥当であることが分かった。

5.7.3　モルタルの気液二相流特性データの取得

- ✓ 透気試験の実測データを整理し、供試体からの累積排水量および累積排気量データを推測・整理した。
- ✓ 逆解析手法を適用し、整理した累積排水量、排気量データの再現解析を行うことで、実測データを良好に再現できる気液二相流物性を同定した。
- ✓ ただし、透気試験時の供試体からの排水量が非常に少ないことから、供試体内の水分移動が限定的な挙動を表現する二相流パラメータとなり、極端な形状を示す曲線が同定された。
- ✓ そのため、同定された二相流物性をそのまま他の試験系に適用する際には注意が必要であることが示唆された。

参考文献

[1] JCI 編：コンクリートの要点

[2] 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.

[3] J. R. Appleyard、 I. M. Cheshire and R. K. Pollard、 1981. Special Techniques for Fully-Implicit Simulators、 Enhanced oil recovery、 pp.395-408.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 日本工業規格、土の透水試験方法 JIS A 1218：1998

[8] 動力炉・核燃料開発事業団、圧縮ベントナイトの水素ガス移行特性評価、1996.7

[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）

第6章　まとめ

6.1　平成26年度の実施成果のまとめ

本事業においては、TRU 放射性廃棄物処分場で想定されるような、廃棄物に含まれる金属の還元腐食その他による水素などのガス発生による施設への様々な影響（施設内でのガス圧上昇により破過が生じた場合、その時に緩衝材中等に生じた破過経路が核種の移行経路になったり、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ている[1][2][3][4][5][6][7]。

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 年度においては、本事業の最終目標成果である「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」に資する検討を進めた。

具体的は、まず前フェーズ（平成 19-24 年度）の調査研究成果より抽出され顕在化した重要度の高い課題があるが、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 25 年度の成果を踏まえ）、①『ガス移行評価シナリオの拡張』によってガス移行シナリオの構築と根拠の拡充を図り、②『ガス移行挙動解析ツールの高度化』によって連成現象メカニズムのモデル化と解析的検討を進め、③『ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充およびセメント系材料のガス移行データ取得』によってガス移行連成現象のメカニズム（素過程）の解明を図った。

さらに、図 6.1.1－1 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 26 年度においては、図 6.1.1－2 に示すような成果が得られた。

具体的には、①『ガス移行評価シナリオの拡張』の検討により、本事業の目標成果でもある「ガス移行挙動評価手法の整備」に必要な施設全体のガス移行シナリオの作成・整備を進め、平成 25 年度までの成果も統合しつつ、TRU 廃棄物処分概念のグループ 1 およびグループ 4 のガス移行シナリオを新たに構築することができた。また、ガス移行シナリオの不確実性低減を目的に、ガス移行シナリオ作成や評価手法の整備に必要なエビデンスを拡充するため、ガス発生に係る最新の知見（2014 年度時点）を取り纏めることができた。

②『ガス移行挙動解析ツールの高度化』の検討では、同じくガス移行シナリオ作成や評価手法の整備に必要な、ガス移行モデルの構築や解析手法の整備を進めた。その成果として、ガス移行シナリオで想定（特に基本シナリオで蓋然性の高い現象として想定）するような“ベントナイト緩衝材中やセメント系材料中において気液二相流が主体となる（特に緩衝材中で大破過等が生じない）ガス移行挙動”を模擬した試験によって取得されたデータ（③『ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充およびセメント系材料のガス移行データ取得』で取り纏め）が、予め実施した予察解析結果と概ね整合することが確認できている。

なお、予察解析においては本事業でこれまでに確証してきた古典気液二相流および力学連成二相流モデルを用いているが、試験データ（処分場で想定される現象）を概ね再現可能であることが提示できたことで、モデルの信頼性や妥当性についても示すことができた。

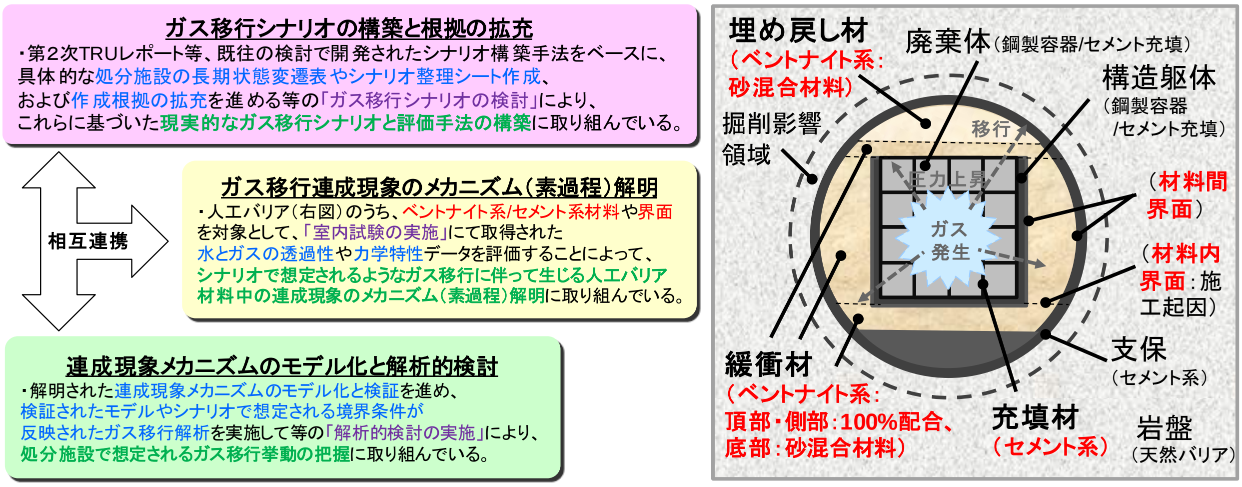


図 6.1.1－1　平成 26 年度に取り組んだ各検討項目の相関

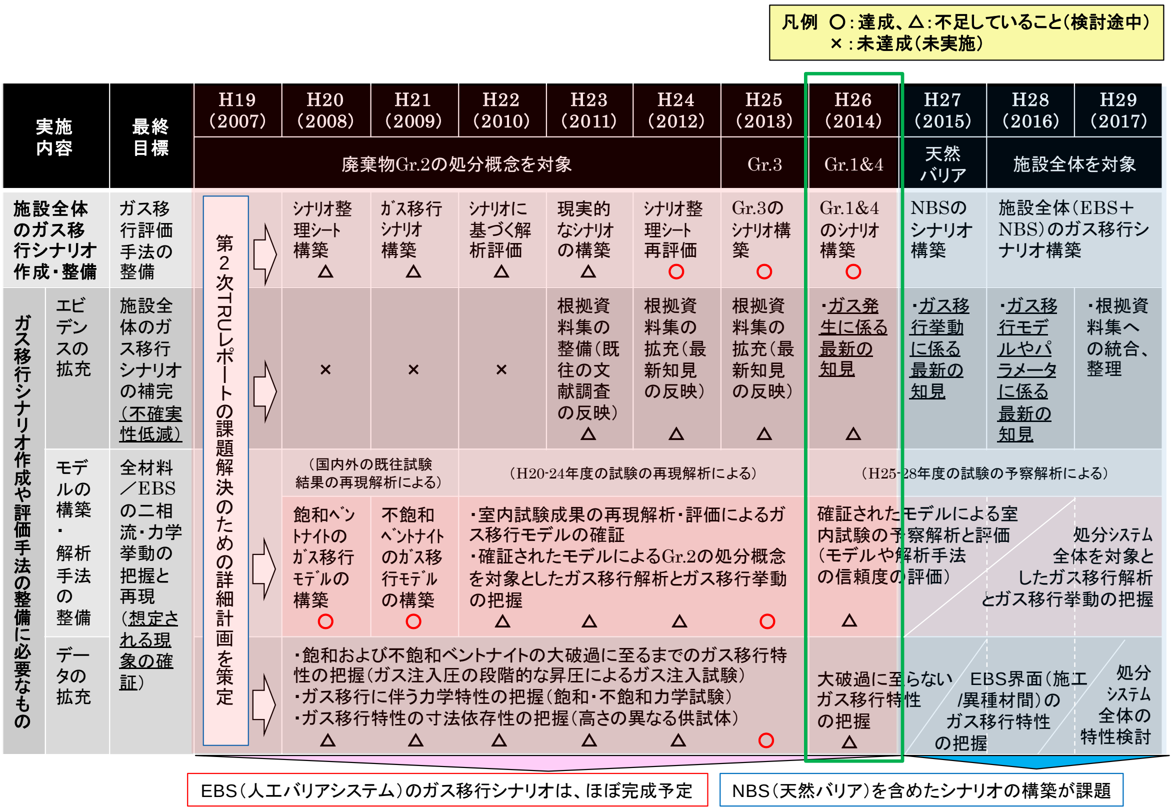


図 6.1.1－2　これまでの検討で得られた成果と進捗状況の整理

6.2　今後の課題

これまでの成果は図 6.1.1－2 に示した通りであり、目標成果に向けた検討項目のうち、人工バリアシステムに関するガス移行シナリオは概ね完成しつつある。

しかしながら、設定したシナリオについては多くの不確実性が含まれるため、その低減に資するべく、引き続き最新の知見等を取り入れながらシナリオの根拠の拡充を図っていく必要がある。

その不確実性の一例として、人工バリアのガス移行シナリオのうち、ガスの“移行挙動”に係る不確実性があり、具体的には人工バリア内の「界面（同種／異種材料間)」が卓越したガス移行経路と成り得る可能性が懸念されている。したがって、当該部分のガス移行挙動の理解・把握も重要であり、その移行挙動のモデル化も含め、シナリオのエビデンスとして拡充していくことが今後の課題である。

さらに、人工バリアのみならずニアフィールドを含めた TRU 処分システム全体のガス移行シナリオを考慮する場合、人工バリア中を透過したガスが天然バリアへ到達した後の影響評価も重要となってくるため、これに関連したガス移行シナリオの構築が必要である。

一方で、シナリオで想定されるような現象（ガスの“発生”と“移行”）のモデル化と確証を引き続き進めていく必要があるとともに、確証された数学モデルを搭載した解析コードと TRU 処分システムの人工バリアを対象とした解析モデルにより、処分システムの時系列的な影響評価解析（ガス移行解析）を引き続き進め、これらも含めてシナリオのエビデンスとして拡充していくことが必要である。

参考文献

[1] 財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 19 年度地層処分技術調査等委託費　TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発　報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2008).

[2] 財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 20 年度地層処分技術調査等委託費　TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発　報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2009).

[3] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 21 年度地層処分技術調査等委託費　TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発　報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2010)

[4] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 22 年度地層処分技術調査等委託費　TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発　報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2011)

[5] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度地層処分技術調査等事業　TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発　報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2012)

[6] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等事業　TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発　報告書（第 2 分冊）－ガス移行挙動の評価－(2013)

[7] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 25 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発報告書（第 5 分冊）―ガス移行連成挙動評価手法の開発―（2014）