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―

平成 26 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 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－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 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－ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上－
	第２分冊	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－炭素 14 長期放出挙動評価－
	第３分冊	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－ナチュラルアナログ調査－
	第４分冊	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－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 25 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、人工バリア材料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料を使用することや金属腐食等によるガス発生による人工バリアの長期挙動への影響があげられる。

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料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、以下の各開発を実施した。

ヨウ素・炭素移行挙動評価技術高度化開発

（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

人工バリア特性変化評価技術開発

（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 25 年度の成果を取り纏めた。

目　次

第 1 章 調査の概要 1-1
1.1 背景 1-1
1.2 目的 1-2
1.3 これまでの成果概要 1-5
1.3.1 全体概要 1-5
1.3.2 ガス移行に関する材料特性データの取得 1-6
1.3.3 モデル化・解析手法の高度化 1-18
1.3.4 ガス移行挙動評価手法の構築 1-37
1.3.5 抽出された課題と本検討への受け渡し 1-54
1.4 本事業の実施概要 1-54
1.4.1 全体概要 1-54
1.4.2 平成 25 年度の実施概要 1-57

第 2 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 2-1
2.1 目的 2-1
2.2 実施内容 2-1
2.2.1 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 2-1
2.2.2 ベントナイト緩衝材を用いた材料取得計画の策定 2-2
2.2.3 ガス移行挙動評価試験の準備（供試体の作成） 2-2
2.2.4 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 2-3
2.3 ベントナイト緩衝材におけるガス移行挙動評価に係る材料特性の課題の抽出 2-4
2.3.1 ガス発生速度を考慮したガス移行形態の把握に関する課題 2-4
2.3.2 人工バリア構造を考慮したガス移行形態の把握に関する課題 2-4
2.3.3 材料特性に応じたガス移行挙動の把握に関する課題 2-4
2.3.4 人工バリアの全体システムでのガス移行挙動の把握に関する課題 2-5
2.3.5 抽出された課題のまとめ 2-5
2.4 ベントナイト緩衝材を用いた材料データ取得計画の策定 2-10
2.4.1 ガス発生速度を考慮したガス移行形態の把握に係る検討 2-10
2.4.2 人工バリア構造を考慮したガス移行形態の把握に係る検討 2-12
2.4.3 材料特性に応じたガス移行挙動の把握に係る検討 2-15
2.4.4 ガス移行試験の複合システム化に係る検討 2-15
2.4.5 検討項目のとりまとめ 2-16
2.5 ガス移行挙動評価試験の準備（供試体の作成） 2-18
2.6 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 2-21
2.6.1 背景と目的 2-21

2.6.2 ベントナイト系砂混合材料の水分特性データの取得 2-21
2.6.3 実施手順 2-23
2.6.4 取得されたデータ 2-24
2.6.5 考察と課題 2-27
2.7 まとめと今後の課題 2-28

第 3 章 セメント系材料のガス移行挙動のデータ取得 3-1
3.1 背景と目的 3-1
3.2 実施内容 3-1
3.2.1 TRU 廃棄物処分概念におけるセメント系材料についての整理 3-1
3.2.2 セメント系材料の気液二相流パラメータの取得 3-1
3.2.3 セメント系材料によるガス移行取得データの評価 3-2
3.3 TRU 廃棄物処分概念におけるセメント系材料についての整理 3-3
3.3.1 セメント系材料の設定条件の整理 3-3
3.3.2 セメント系材料の設定条件に係る課題 3-5
3.4 セメント系材料の気液二相流パラメータの取得 3-7
3.4.1 試験の位置付け 3-8
3.4.2 実施手順 3-9
3.4.3 モルタルの気液二相流特性データの取得 3-21
3.5 二相流特性データ同定のための逆問題の設定 3-24
3.5.1 検討方針 3-24
3.5.2 目的関数の設定 3-27
3.5.3 順解析に用いる解析コード 3-27
3.5.4 与条件（流体物性、水理物性）と未知パラメータ 3-29
3.5.5 解析モデルと初期・境界条件 3-30
3.5.6 逆解析手法 3-32
3.6 二相流特性の同定結果 3-32
3.6.1 供試体 No.1 3-32
3.6.2 供試体 No.2 3-38
3.7 取得されたデータの評価 3-42
3.7.1 セメント系材料のガス移行挙動試験データの文献収集 3-42
3.7.2 収集文献中のデータ整理 3-42
3.7.3 本検討のデータ取得に係る諸条件の確認 3-42
3.8 まとめと今後の課題 3-47
3.8.1 モルタルの透水特性及びガス透気特性のデータ取得 3-47
3.8.2 モルタルの気液二相流特性データの取得 3-47
3.8.3 セメント系材料のガス移行挙動試験データの文献収集 3-48

第 4 章 ガス移行連成解析ツールの高度化 4-1
4.1 実施概要 4-1
4.1.1 本研究の背景と目的 4-1
4.1.2 実施項目 4-3
4.1.3 目標成果 4-3
4.1.4 実施内容 4-3
4.2 ガス移行挙動解析ツールの高度化に係る解析検討 4-6
4.2.1 試験データの入手・整理・分析 4-6
4.2.2 ガス移行試験データの再現解析 4-10
4.2.3 ガス移行挙動解析ツールの高度化に係る解析検討のまとめ 4-51
4.3 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 4-52
4.3.1 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 4-52
4.3.2 今後 5 年間の解析手法・モデル化高度化のための研究計画策定 4-54
4.4 TRU 廃棄物処分施設の概念モデルを用いた時系列解析 4-58
4.4.1 対象システムの設定 4-58
4.4.2 解析モデルの構築 4-59
4.5 時系列解析の実施 4-67
4.6 まとめおよび今後の課題 4-72
4.6.1 ガス移行挙動解析ツールの高度化に係る解析検討 4-72
4.6.2 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 4-73
4.6.3 TRU 廃棄物処分施設の概念モデルを用いた時系列解析 4-73

第 5 章 ガス移行シナリオの拡張に関する検討 5-1
5.1 検討の概要 5-1
5.1.1 検討目的 5-1
5.1.2 検討背景 5-1
5.2 検討項目と検討概要 5-1
5.2.1 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 5-1
5.2.2 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 5-2
5.3 検討結果 5-3
5.3.1 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 5-3
5.3.2 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 5-21
5.3.3 人工バリア材料とガス発生・移行メカニズムおよびプロセスに関する課題および研究の動向の検討・整理 5-21

5.3.4 海外の類似概念および試験等による知見の調査・整理.....5-22
5.4 まとめと今後の課題.....5-28
5.4.1 検討成果の取りまとめ.....5-28
5.4.2 今後の課題.....5-28
（参考資料）
参考資料-1　スウェーデン（SKB）における検討.....5-31
参考資料-2　スイス（Nagra）における検討.....5-47

第 6 章 平成 25 年度のまとめ.....6-1
6.1 目的.....6-1
6.2 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.....6-1
6.2.1 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.....6-1
6.2.2 ベントナイト緩衝材を用いた材料取得計画の策定.....6-2
6.2.3 ガス移行挙動評価試験の準備（供試体の作成）.....6-2
6.2.4 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.....6-2
6.3 セメント系材料のガス移行データ取得.....6-2
6.3.1 TRU 廃棄物処分概念におけるセメント系材料についての整理.....6-3
6.3.2 セメント系材料の気液二相流パラメータの取得.....6-3
6.3.3 セメント系材料によるガス移行取得データの評価.....6-3
6.4 ガス移行連成解析ツールの高度化.....6-4
6.4.1 ガス移行挙動解析ツールの高度化に係る解析検討.....6-4
6.4.2 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.....6-4
6.5 ガス移行評価シナリオの拡張.....6-5
6.5.1 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.....6-5
6.5.2 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.....6-6

図　目　次

図 1.1-1　ガス移行挙動解析に基づくガス影響評価の流れ 1-2
図 1.2-1　本調査研究において対象として想定する TRU 廃棄物処分の人工バリアの概念図 1-3
図 1.3-1　「ガス移行挙動の評価」検討実施項目の相関 1-5
図 1.3-2　ガス移行試験装置（設計図面） 1-6
図 1.3-3　供試体容器（設計図面） 1-7
図 1.3-4　ガス移行評価試験の手順（ケース 23-SG-②） 1-8
図 1.3-5　排水量（単位量）の経時変化（23-SG-②） 1-9
図 1.3-6　排気量の経時変化（23-SG-②） 1-9
図 1.3-7　破過挙動直前後の排水量の経時変化（23-SG-②） 1-9
図 1.3-8　破過挙動直前後の排気量の経時変化（23-SG-②） 1-10
図 1.3-9　大型供試体のガス移行試験終了後の解体調査より算定した含水比（左）、乾燥密度（中）および飽和度（右）プロファイル 1-10
図 1.3-10　破過圧と供試体寸法の関係 1-11
図 1.3-11　サクション制御オエドメータの概念 1-13
図 1.3-12　圧縮指数、膨潤指数のサクション依存性と BB モデルによるフィッティング 1-13
図 1.3-13　最終間隙比～サクション関係（$\sigma_{v\,net}$＝20kPa） 1-14
図 1.3-14　一面せん断試験における有効鉛直応力とせん断強度の関係（飽和試料） 1-15
図 1.3-15　応力経路と限界状態線 1-15
図 1.3-16　内部摩擦角とサクションとの関係 1-16
図 1.3-17　内部摩擦角を 13°一定とした場合の限界状態線 1-16
図 1.3-18　粘着力とサクションの関係（内部摩擦角を 13°一定とした場合） 1-17
図 1.3-19　取得された水分特性と van Genuchten モデル(左)および Narasimhan モデル(右)近似 1-18
図 1.3-20　解析モデルの基本諸元 1-20
図 1.3-21　累積排水量（左）と排気流量（右）に対する試験結果とステップ 1 の解析結果の比較（平成 22 年度 SG①試験） 1-20
図 1.3-22　ステップ 1 にて同定された 2 相流曲線（平成 22 年度 SG①試験） 1-21
図 1.3-23　ベントナイトの膨潤による非膨潤性間隙の閉塞 1-21
図 1.3-24　膨潤・収縮を考慮した 2 相流モデルにおける間隙率や毛細管圧力の変化イメージ 1-22
図 1.3-25　ステップ 2 での浸潤過程の再現解析における累積注水量の再現結果（左）および毛細管圧力の経路（右） 1-22
図 1.3-26　ステップ 2 での浸潤過程における水相（左）、ガス相（右）の相対浸透率の経路 1-22
図 1.3-27　Nagra が規定するガス移行形態 1-22
図 1.3-28　これまでの検討で逆解析から同定された水分特性曲線 1-24

図 1.3-29　解析モデル及び境界条件 1-25
図 1.3-30　解析から得られたガス移行過程の飽和度分布（変形倍率：5 倍） 1-26
図 1.3-31　平均有効応力分布（変形倍率：5 倍） 1-26
図 1.3-32　間隙率（乾燥密度）分布（変形倍率：5 倍） 1-27
図 1.3-33　想定ガス発生量とモデルに与えたガス発生量 1-28
図 1.3-34　解析モデルの対象とする処分システム概念 1-28
図 1.3-35　2 次元断面計算解析格子モデルと境界/初期条件 1-29
図 1.3-36　解析結果：施設内圧力、坑外排水量の比較 1-29
図 1.3-37　解析結果（地下水中の Na イオン濃度、Ca イオン濃度） 1-31
図 1.3-38　解析結果（固相中の Na 吸着量、Ca 型化率） 1-31
図 1.3-39　各モデルの最大ガス圧（左）、累積排水量（右）の不確実性の幅 1-33
図 1.3-40　2 次元解析により得られた最大ガス圧と累積排水量の不確実性の幅 1-34
図 1.3-41　廃棄体中央部の気相圧力（左）と坑外への累積押出し水量（右）の比較 1-35
図 1.3-42　評価点における気相圧力（左）および累積押出し水量（右）の時間変化 1-35
図 1.3-43　データライブラリの基本構成 1-36
図 1.3-44　データライブラリを用いた実行処理の流れ 1-36
図 1.3-45　ガス移行挙動高度化検討フローと既存の処分シナリオ開発フロー 1-39
図 1.3-46　根拠資料の全体構成 1-45
図 1.3-47　安全機能整理シート 1-46
図 1.3-48　統合 FEP 関連図 1-47
図 1.3-49　安全機能と状態変遷に着目したガス移行に係わるシナリオ整理シート 1-49
図 1.3-50　要素試験･工学規模システム試験・実規模スケール試験系の連携 1-53
図 1.4-1　ガス移行連成挙動評価手法の展開 1-55
図 1.4-2　本検討の実施内容および想定されるインプット/アウトプット 1-57

図 2.2-1　供試体の飽和過程の実施概念図 2-3
図 2.4-1　既往研究の主な実施内容と本検討における想定実施内容の概念 2-10
図 2.4-2　試験実施案１（膨潤圧付近まで比較的早く昇圧→一定圧を保持） 2-11
図 2.4-3　試験実施案２（膨潤圧付近までは比較的早く昇圧 → 一定圧を保持 → 一定速度で昇圧） 2-12
図 2.4-4　ベントナイト材料に係る界面を模擬したガス移行試験の概念 2-13
図 2.4-5　側面拘束機能の想定例 2-14
図 2.4-6　人工バリアで想定されるベントナイト系材料（底部緩衝材）の使用部位 2-15
図 2.4-7　TRU 廃棄物処分概念とそれに関連する「複合システム化」の概念図 2-16
図 2.5-1　緩衝材材料のガス移行挙動試験の実施状況イメージ 2-18
図 2.5-2　試験実施フロー図 2-19
図 2.5-3　試料とモールドの準備（左）および供試体の静的圧縮整形（右） 2-20
図 2.5-4　供試体モールド設置状況 2-20

図 2.6-1　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.....2-22
図 2.6-2　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.....2-23
図 2.6-3　鉛直応力載荷過程（loading stage）および飽和過程（saturation stage）における間隙比（e）の経時変化.....2-24
図 2.6-4　取得された水分特性と van Genuchten モデル近似.....2-25
図 2.6-5　取得された水分特性と van Genuchten モデル曲線（HLW2000 年レポートで同定されたモデルパラメータによる）との比較.....2-26
図 2.6-6　取得された水分特性と Narashimhan モデル近似の成果イメージ.....2-27

図 3.3-1　TRU 廃棄物処分概念及びセメント系材料の使用を想定している部位.....3-3
図 3.4-1　TRU 廃棄物処分概念における廃棄体パッケージの概念.....3-7
図 3.4-2　セメント系材料の気液二相流パラメータの取得手順.....3-9
図 3.4-3　細骨材粒度調整分布図.....3-10
図 3.4-4　モルタルの一軸圧縮強度測定結果.....3-12
図 3.4-5　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）.....3-13
図 3.4-6　モルタル供試体の透水試験（透気試験）実施概念.....3-14
図 3.4-7　モルタル供試体 No.1 の時間～透水量関係.....3-16
図 3.4-8　モルタル供試体 No.2 の時間～透水量関係.....3-16
図 3.4-9　モルタル供試体 No.1　時間～排水量関係.....3-18
図 3.4-10　モルタル供試体 No.1　時間～透気量関係.....3-18
図 3.4-11　モルタル供試体 No.1 の透気量（補正値）の定常区間（赤線）.....3-18
図 3.4-12　モルタル供試体 No.2　時間～排水量関係.....3-19
図 3.4-13　モルタル供試体 No.2　時間～透気量関係.....3-19
図 3.4-14　モルタル供試体 No.2 の透気量（補正値）の定常区間（赤線）.....3-19
図 3.4-15　ガス移行試験装置概要図.....3-21
図 3.4-16　累積排水排気量とみかけの累積排水量変化.....3-23
図 3.5-1　生成した累積排水量、累積排気量（供試体 No.1）.....3-25
図 3.5-2　生成した累積排水量、累積排気量（供試体 No.2）.....3-26
図 3.5-3　解析モデルの基本諸元.....3-31
図 3.5-4　GETFLOWS+UCODE_2005 による逆解析の流れ.....3-32
図 3.6-1　累積排水量と累積排気量の再現結果例（供試体 No.1、検討 1）.....3-33
図 3.6-2　実測値から推定されるガス透気試験時の絶対浸透率.....3-33
図 3.6-3　累積排水量と累積排気量の再現結果（供試体 No.1、検討 2a）.....3-34
図 3.6-4　累積排水量と累積排気量の再現結果（供試体 No.1、検討 2b）.....3-34
図 3.6-5　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 2a）.....3-35

図 3.6-6　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 2b）.....3-35
図 3.6-7　同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）（水相飽和率 0.9～1.0 の範囲を拡大表示、供試体 No.1、検討 2a）.....3-36
図 3.6-8　同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）（水相飽和率 0.9～1.0 の範囲を拡大表示、供試体 No.1、検討 2b）.....3-36
図 3.6-9　累積排水量と累積排気量の再現結果（供試体 No.1、検討 3）.....3-37
図 3.6-10　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）.....3-38
図 3.6-11　同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）（水相飽和率 0.9～1.0 の範囲を拡大表示、供試体 No.1、検討 3）.....3-38
図 3.6-12　累積排水量と累積排気量の再現結果（供試体 No.2：検討 1）.....3-39
図 3.6-13　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 1）.....3-39
図 3.6-14　同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）（水相飽和率 0.99～1.0 の範囲を拡大表示、供試体 No.2、検討 1）.....3-40
図 3.6-15　累積排水量と累積排気量の再現結果（供試体 No.2：参考）.....3-40
図 3.6-16　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 2(参考)）.....3-41

図 4.1-1　今後 5 年程度の解析・モデル化に係る実施計画の概念.....4-2
図 4.1-2　典型的な TRU 廃棄物処分システム概念.....4-4
図 4.1-3　解析格子モデルの例.....4-5
図 4.2-1　注水差圧と累積注水量の時間変化（再冠水フェーズ）.....4-7
図 4.2-2　注水差圧と全応力の時間変化（再冠水フェーズ）.....4-7
図 4.2-3　注入ガス差圧と累積排水量の時間変化（ガス注入フェーズ）.....4-8
図 4.2-4　注入ガス差圧と排気流量の時間変化（ガス注入フェーズ）.....4-8
図 4.2-5　注入ガス差圧と全応力の時間変化（ガス注入フェーズ）.....4-9
図 4.2-6　解体調査から得られた含水比と水飽和度.....4-9
図 4.2-7　平成 24 年度までの検討で同定された浸潤過程および排水過程における相対浸透率および毛細管圧力曲線.....4-13
図 4.2-8　流路拡幅前後の間隙率と絶対浸透率の変化イメージ.....4-15
図 4.2-9　解析モデルの基本諸元.....4-16
図 4.2-10　既往文献から設定した絶対浸透率とガス侵入圧の関係.....4-18
図 4.2-11　GETFLOWS+UCODE_2005 による逆解析の流れ.....4-19
図 4.2-12　累積注水量に対する試験結果と解析結果の比較.....4-20
図 4.2-13　同定された 2 相流曲線.....4-20
図 4.2-14　累積排水量に対する試験結果と解析結果の比較.....4-21
図 4.2-15　累積排水量に対する試験結果と解析結果の比較（絶対浸透率調整後）.....4-22
図 4.2-16　解体調査から推定されたガス侵入範囲と解析から得られたガス侵入範囲.....4-23
図 4.2-17　ガス注入時のガス圧、水飽和度、空隙損傷域の分布（2011 年度の SG①で同定されたパラメータを適用）.....4-24

図 4.2-18　ガス注入時のガス圧、水飽和度、空隙損傷域の分布（2012 年度の SG②で同定されたパラメータを適用）.....4-25
図 4.2-19　熱・力学（応力変形）、2 相流の相互影響.....4-27
図 4.2-20　不飽和多孔質体の概念.....4-28
図 4.2-21　間隙比と平均有効応力の関係.....4-30
図 4.2-22　（*p*, *q*）面、（*p*, s）面および（*p*, *q*, *s*）面での降伏曲面.....4-31
図 4.2-23　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.....4-32
図 4.2-24　解析モデルと境界条件図（左図：注水過程、右図：ガス注入過程）.....4-33
図 4.2-25　累積注水量の経時変化（実績値と解析解）.....4-38
図 4.2-26　飽和度分布の経時変化.....4-39
図 4.2-27　乾燥密度（間隙率）の経時変化.....4-39
図 4.2-28　平均有効応力分布の経時変化.....4-40
図 4.2-29　累積排水量の経時変化（実測値と解析値）.....4-41
図 4.2-30　飽和度分布の経時変化.....4-42
図 4.2-31　乾燥密度（間隙率）分布の経時変化.....4-43
図 4.2-32　平均有効応力分布の経時変化.....4-44
図 4.2-33　累積排水量の経時変化（実績値と解析解）.....4-46
図 4.2-34　飽和度分布の経時変化.....4-47
図 4.2-35　乾燥密度（間隙率）分布の経時変化.....4-48
図 4.2-36　平均有効応力分布の経時変化.....4-49
図 4.2-37　供試体排出側（モデル上面）における Stress Path と CSL の関係.....4-50
図 4.2-38　供試体排出側（モデル上面）における乾燥密度と絶対浸透率の経時変化.....4-50
図 4.2-39　供試体注入側（モデル下面）における鉛直変位量と全体積（間隙）変化量から想定した排水量の経時変化.....4-50
図 4.3-1　今後の研究計画と WP 内の各検討項目間の相互関係.....4-57
図 4.4-1　モデル化の対象とする処分システム.....4-58
図 4.4-2　解析モデル（施設周辺拡大、2013 年モデル）.....4-59
図 4.4-3　使用する 3 つの解析モデル.....4-60
図 4.4-4　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）....4-63
図 4.4-5　相対浸透率と毛細管圧力曲線（緩衝材）.....4-63
図 4.4-6　相対浸透率と毛細管圧力曲線（掘削影響域、岩盤）.....4-64
図 4.4-7　初期・境界条件.....4-64
図 4.4-8　ガス発生速度の時間変化（出典：安藤ら）.....4-65
図 4.4-9　評価点位置図.....4-66
図 4.5-1　評価点におけるガス相圧力と坑道からの累積押出し水量の比較.....4-68
図 4.5-2　ガス相圧力の比較.....4-69
図 4.5-3　水相飽和度の比較.....4-70
図 4.5-4　流路拡幅箇所の比較.....4-71

図 5.3-1　TRU 廃棄物のグループ分類と特徴（NUMO レポート）.....5-3
図 5.3-2　TRU 放射性廃棄物処分の人工バリア概念（NUMO レポート）.....5-4
図 5.3-3　グループ 1,2 における処分坑道標準断面（NUMO レポート）.....5-7
図 5.3-4　グループ 3,4 の処分坑道標準断面（NUMO レポート）.....5-7
図 5.3-5　堆積岩における TRU 処分場レイアウト例（NUMO レポート）.....5-8
図 5.3-6　ドラム缶収納の鋼製箱型容器：廃棄体パッケージ A（NUMO レポート）.....5-9
図 5.3-7　グループ 3 における堆積軟岩を対象とした処分坑道断面（NUMO レポートに加筆）.....5-9
図 5.3-8　グループ 3 の処分坑道内の構成.....5-11
図 5.3-9　処分坑道掘削段階での状態.....5-11
図 5.3-10　廃棄体パッケージ定置段階.....5-12
図 5.3-11　廃棄体での核種閉じ込め段階.....5-13
図 5.3-12　廃棄体から放射性核種が処分坑道内に放出される段階.....5-13
図 5.3-13　天然バリアによる放射性核種の移行抑制段階.....5-14
図 5.3-14　埋戻し後廃棄体パッケージが閉じ込め機能を維持している期間における FEP 関連図.....5-16
図 5.3-15　処分坑道内の部材と環境による核種の移行抑制期間における FEP 関連図.....5-17
図 5.3-16　グループ 3 のシナリオ整理シート作成例.....5-18
図 5.3-17　短寿命廃棄物処分概念（左）と長寿命廃棄物処分場（右）.....5-24
図 5.3-18　処分坑道とアクセス坑道間のプラグシステム概念（Nagra、2008）.....5-25
図 5.3-19　オパリナス粘土中のガス移行モード（Nagra, 2008）.....5-25
図 5.3-20　ガス移行モード変化（Nagra、2008）.....5-26

表　目　次

表 1.2-1　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スペックや要求機能 1-4
表 1.3-1　本検討のうち飽和供試体での試験にて取得された破過圧力データ一覧.....1-11
表 1.3-2　圧力依存透過特性解析の検討ステップ.....1-19
表 1.3-3　各移行過程におけるガス侵入圧と最小主応力の関係 1-23
表 1.3-4　解析対象のガス移行試験条件.....1-24
表 1.3-5　ベントナイト混合土の鉱物組成（左）および陽イオン交換容量（右）.....1-30
表 1.3-6　イオン交換反応の交換定数（左）およびセメント系材料が地下水に溶解した
場合の地下水組成計算結果（右）.....1-31
表 1.3-7　設定した中央値と標準偏差 1-32
表 1.3-8　抽出したパラメータの組合せ.....1-33
表 1.3-9　時系列状態変化表【廃棄体ｸﾞﾙｰﾌﾟ 2:堆積岩、処分深度 500m、淡水、還元状態】.....1-43
表 1.3-10　シナリオの区分 1-48
表 1.3-11　諸外国の安全評価書におけるガスの取扱い.....1-50
表 1.3-12　期間別評価手法とシナリオ個別評価手法の比較 1-52
表 1.3-13　現実性と保守性の連携（組合せ）.....1-53
表 1.4-1　「ガス移行連成挙動評価手法の開発」平成 25-29 年度の 5 年間展開案 1-56
表 1.4-2　「ガス移行連成挙動評価手法の開発」平成 25 年度　調査研究進捗表.....1-57

表 2.2-1　試験装置の構成および特徴 2-2
表 2.3-1　既往の検討と抽出された課題（ガス発生速度影響等に係るもの）.....2-6
表 2.3-2　既往の検討と抽出された課題（人工バリア構造／材料間界面影響等に係るもの）...2-7
表 2.3-3　既往の検討と抽出された課題（緩衝材材料／材料特性影響等に係るもの）.....2-8
表 2.3-4　既往の検討と抽出された課題（システム試験／人工バリア全体系を考慮した
試験系影響等）.....2-9
表 2.4-1　材料データ取得計画に際しての課題と検討内容 2-17
表 2.4-2　課題と検討内容に基づく材料データ取得計画案の概要.....2-17
表 2.5-1　各実施ケースで製作する供試体の仕様.....2-18
表 2.6-1　近似により同定された van Genuchten モデルパラメータ 2-25
表 2.6-2　HLW2000 年レポートで同定された van Genuchten モデルパラメータ 2-26
表 2.6-3　同定された Narashimhan モデルパラメータの成果イメージ 2-27

表 3.3-1　TRU2 次レポートにおける構造部位毎の要件の整理 3-4
表 3.3-2　TRU 放射性廃棄物処分の人工バリアの充填材、支保工、緩衝材の要件の整理 3-5
表 3.3-3　モルタル材料を用いて実施するガス移行試験（気液二相流パラメータ取得）の
展開案.....3-6

表 3.4-1　プレパックドコンクリート細骨材の粒度の標準（コンクリート標準示方書）.....3-8
表 3.4-2　セメント系材料の想定仕様（TRU2 次レポート（付録 3B））.....3-9
表 3.4-3　モルタル供試体の透水試験圧.....3-14
表 3.4-4　モルタル供試体の透気試験圧.....3-15
表 3.4-5　モルタル供試体　透水試験結果.....3-16
表 3.4-6　モルタル供試体　透水試験前後の重量比較.....3-17
表 3.4-7　モルタル供試体の透気試験結果.....3-17
表 3.4-8　モルタル供試体　透気試験前後の重量比較.....3-20
表 3.4-9　各供試体の寸法、試験条件および実測データの整理.....3-22
表 3.5-1　本検討で用いる 2 相流曲線を表現する構成モデル.....3-30
表 3.6-1　同定パラメータ（供試体 No.1、検討 2）.....3-37
表 3.6-2　同定パラメータ（供試体 No.1、検討 3）.....3-37
表 3.6-3　同定パラメータ（供試体 No.2：検討 1）.....3-39
表 3.6-4　同定パラメータ（供試体 No.2：検討 2(参考)）.....3-41
表 3.7-1　本検討と収集文献中の試験データ整理結果（1／4）.....3-43
表 3.7-2　本検討と収集文献中の試験データ整理結果（2／4）.....3-44
表 3.7-3　本検討と収集文献中の試験データ整理結果（3／4）.....3-45
表 3.7-4　本検討と収集文献中の試験データ整理結果（4／4）.....3-46

表 4.2-1　各試験フェーズにおける試験条件と計測データ.....4-6
表 4.2-2　これまでの検討の再現解析で対象とした試験の整理.....4-11
表 4.2-3　これまでの検討で同定された浸潤過程および排水過程における 2 相流パラメータ.4-12
表 4.2-4　再冠水フェーズで用いる相対浸透率や毛細管圧力を表現する構成モデル.....4-18
表 4.2-5　ガス注入フェーズで用いる相対浸透率や毛細管圧力を表現する構成モデル.....4-18
表 4.2-6　浸潤過程において同定されたパラメータ.....4-20
表 4.2-7　3.57cm^3 以上の累積排水量が確認された時刻と注ガス圧.....4-26
表 4.2-8　Code_Bright の主な適用プロジェクト.....4-27
表 4.2-9　力学物性値一覧.....4-34
表 4.2-10　2 相流特性値一覧（その 1：H22 年度成果）.....4-35
表 4.2-11　2 相流特性値一覧（その 2：H23 年度成果・本年度成果を元に同定）.....4-36
表 4.2-12　解析ケース一覧.....4-37
表 4.3-1　解析手法・モデル化に関する課題に対する本研究での現状と最新動向の整理.....4-53
表 4.3-2　3 つの Work Package と実施内容.....4-56
表 4.4-1　水理物性一覧.....4-62
表 4.4-2　相対浸透率曲線を表現する構成モデル.....4-63
表 4.4-3　毛細管圧力曲線を表現する構成モデル.....4-63

表 5.3-1　地層処分の対象となる低レベル放射性廃棄物の分類と発生推定量（NUMO

レポート） 5-4
表 5.3-2　人工バリア構成要素の機能の整理（NUMO レポート） 5-6
表 5.3-3　TRU 放射性廃棄物グループ 3 におけるガス発生源と種類 5-10
表 5.3-4　グループ 3 の状態変化表.....5-15
表 5.3-5　シナリオの区分例.....5-19

写真目次

写真 3.4-1　モルタル試料 3-11
写真 3.4-2　ミキサー攪伴状況 3-11
写真 3.4-3　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） 3-11
写真 3.4-4　端面研磨状況 3-11
写真 3.4-5　モルタルの一軸圧縮強度測定状況（n=3） 3-11
写真 3.4-6　一軸圧縮強度試験後のモルタル状況（n=3） 3-11
写真 3.4-7　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 3-12
写真 3.4-8　透水試験直前の供試体状況（n=2） 3-12
写真 3.4-9　モルタル供試体へのゴムジャケット装着状況 3-13
写真 3.4-10　試験装置へのモルタルセット完了状況（n=2） 3-13

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）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 に示す。

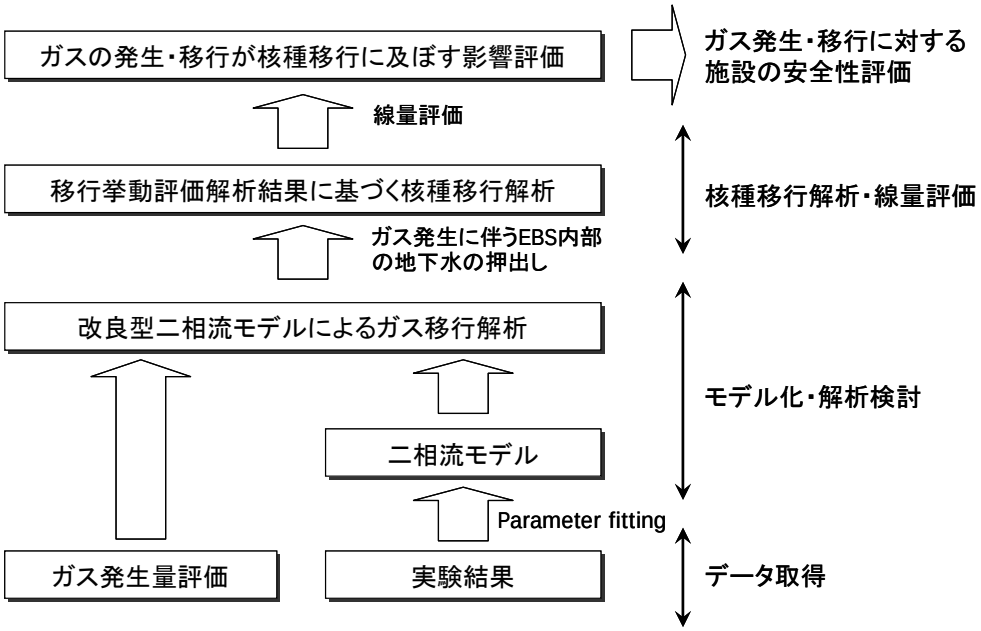


図 1.1-1　ガス移行挙動解析に基づくガス影響評価の流れ

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。

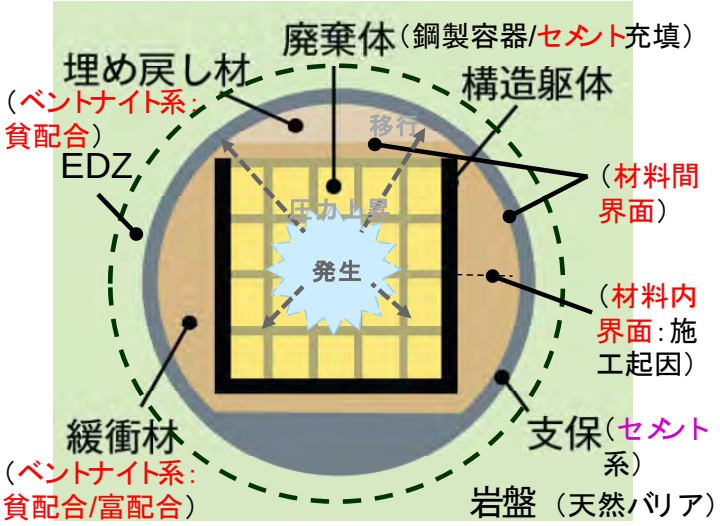
TRU 廃棄物処分施設内部で発生したガスが処分施設の長期安全性に及ぼす影響に関連して、このような不確実性を低減することは、より現実的なガス発生影響の評価を可能とし、処分施設の安全性評価の信頼性を向上すると同時に、施設概念や設計の合理化への貢献も期待することができる。

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」[4][5][6][7][8][9]の調査研究によって、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い。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 には、本調査研究において対象として想定する TRU 廃棄物処分の人工バリアの概念を、また表 1.2-1 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スペックや要求機能を、TRU2 次レポートや NUMO のレポートを参考に概念図および表に示した。なお、概念は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、何らかの修正がなされる可能性があるが、本調査研究の進捗において逐次修正、提示および年次報告書の反映等を行う。



（NUMO作成のTRUパンフレットにTRU2次レポートの概念を加筆）

図 1.2-1　本調査研究において対象として想定する TRU 廃棄物処分の人工バリアの概念図

表 1.2-1　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　これまでの成果概要

1.3.1　全体概要

平成 19-24 年度において実施された「ガス移行挙動の評価」における調査研究では、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おき、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 フェーズの研究開発期間として設定された。当該期間においては処分事業の進展を踏まえ、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、以下の事項を実施した。

- 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

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、適宜評価をしつつ検討を行い、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た。

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」はお互いに連携を取り合い進めていくものである。３つの検討実施項目の相互関係を図 1.3-1 に示す。次項より、3 つの項目について、それぞれ成果の概要を記すとともに、これまでの調査研究より本調査研究へ受け渡すべき事項を示す

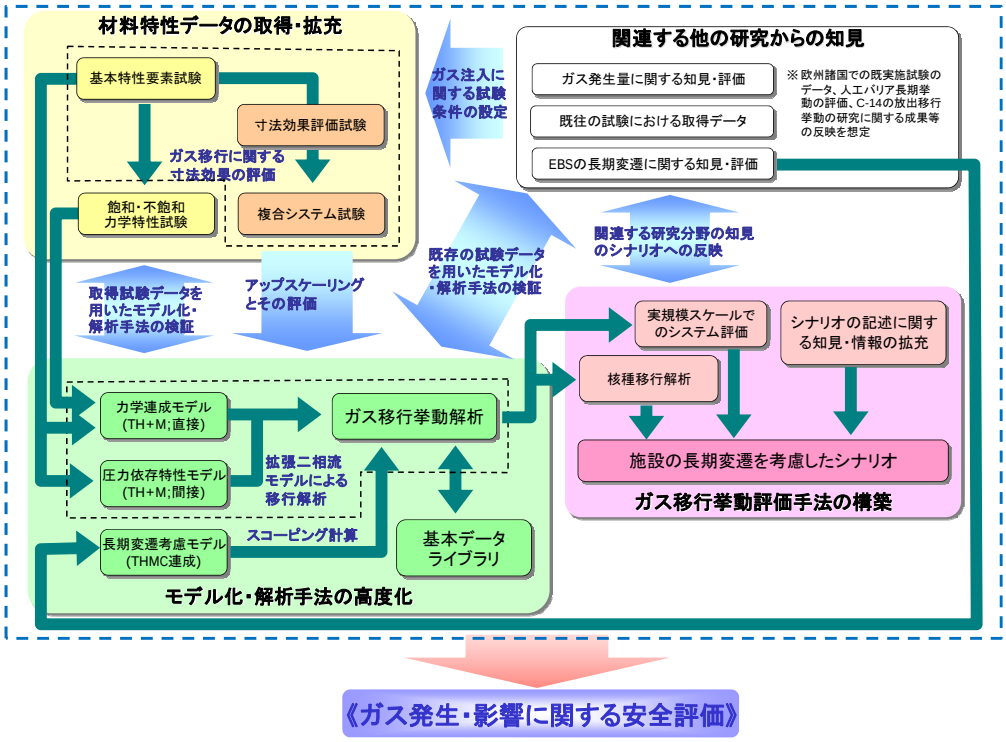


図 1.3-1　「ガス移行挙動の評価」検討実施項目の相関

1.3.2　ガス移行に関する材料特性データの取得

(1) ガス移行挙動評価試験装置の構築

まず初期段階の検討では、国内外の事例調査を参考にガス移行試験の手法を構築し、人工バリア構成材料の圧力依存透過性と力学連成挙動等の観点からの室内試験計画を策定した。このもとで、ガス発生・移行評価に必要な材料特性の取得に向けた検討を実施した。

具体的には、上記検討を受けて、図 1.3-2 に示すようなガス供給部、給水部、排水／気計測部、操作パネル、試験容器等にて構成されるガス移行挙動評価試験装置を構築した。図 1.3-3 は試験容器（カラム）の概念図で、容器は直径φが 60mm で、高さｈは 12.5,25,50mm および 200mm の 4 種類にて製作した。供試体は容器の中央に位置し、飽和（注水）およびガス注入は容器底面から供給され、注入によって容器上面へ排出された水およびガスを捕捉し計測するシステムを構築した。

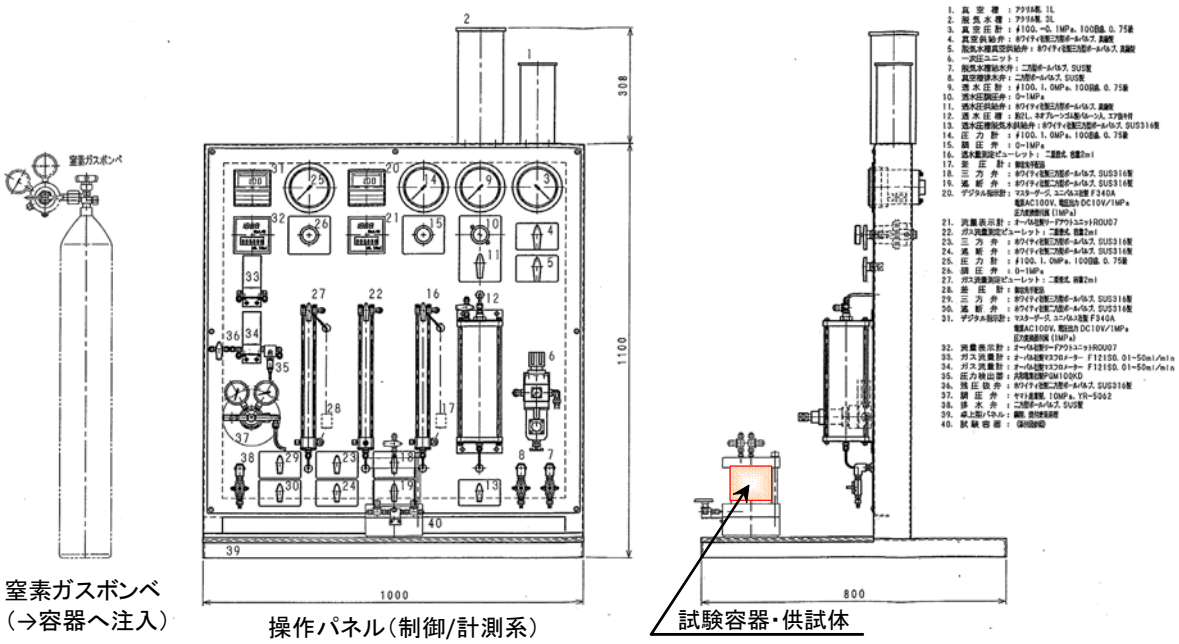
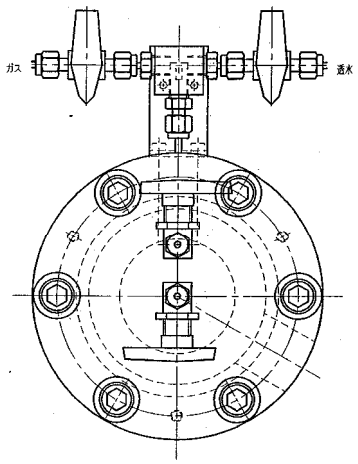
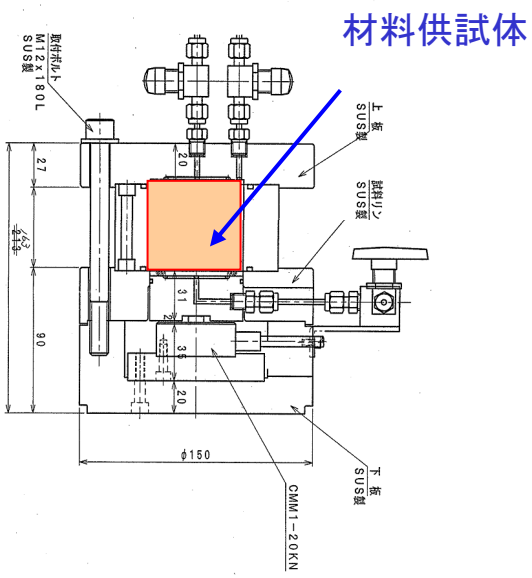


図 1.3-2　ガス移行試験装置（設計図面）



（平面図）



（立面図）

図 1.3-3　供試体容器（設計図面）

(2) 基本特性の評価（水・ガスの挙動および透過性）

1) ガス移行試験におけるガス移行および破過現象

代表的な試験事例を具体例として、ガス移行挙動評価試験の流れを示す。図 1.3-4 に飽和供試体を用いた試験（23-SG-②：平成 23 年度実施、供試体高さ 50mm）を例に手順を示す。全体の流れは、ベントナイト（クニゲル V1）を 100%配合にて用いて飽和度 90%にて作成した材料供試体を試験装置にセットし、初めに再冠水（注水飽和）試験を行い、供試体上面より排水が確認された後に上面に背圧を載荷し、供試体下部のガス圧を段階的に増加させてガスを注入し、破過が発生した段階でガス注入を終了した。

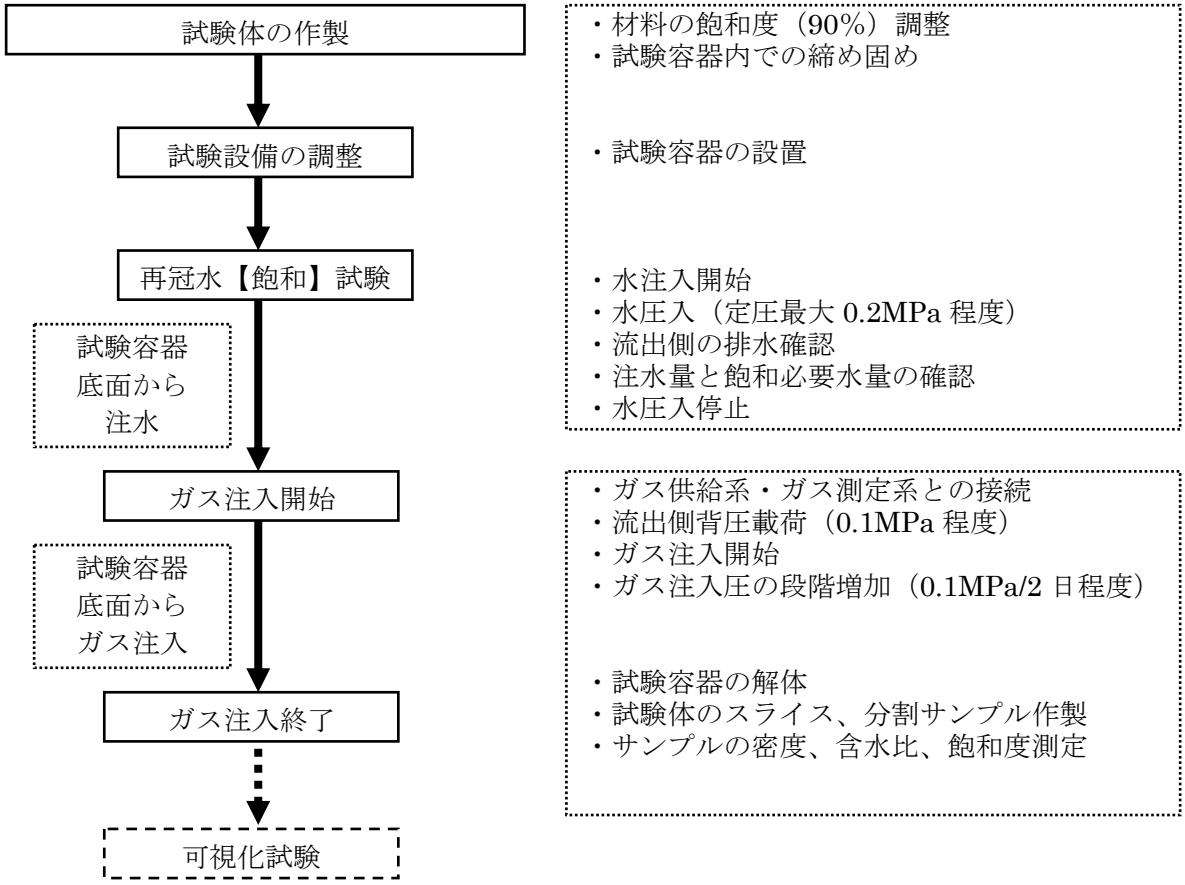


図 1.3-4　ガス移行評価試験の手順（ケース 23-SG-②）

以下、ガス移行試験の結果の例を示す。材料供試体の飽和を排水量の安定にて確認した後、注水系から窒素ガス注入系へ切り替え、2 日間隔で 0.1MPa 昇圧するステップにてガス注入を実施した。図 1.3-5　に、試験中の上面排水量の変化を示す。ガス注入開始後暫くにわたり供試体全面よりほぼ均質に排水が生じていたが、有効ガス圧 1.7MPa にて外周部の排水量が中央部の排水量に比べて急増に転じ、さらに有効ガス圧 1.8MPa の時点で、外周部の排水量がさらに増加して破過となった。なお、試験実施後の観察によって、この条件では破過は全て供試体の外周を経路として発生していることを確認している。図 1.3-6 は排気量の経時変化を示し、破過までは殆ど排気はみられず、破過が発生するとガス流量が急増した。図 1.3-7 は破過発生の前後の排水量の変化を示し、ガス流量の増加と同じタイミングで排水量も急増していることが確認できる。図 1.3-8 は破過発生前後のガス流量の変化を示し、ガス流量は、時間の経過にほぼ比例して増加し 30 分程度で 1000Nml/min まで達した状況が確認できた。

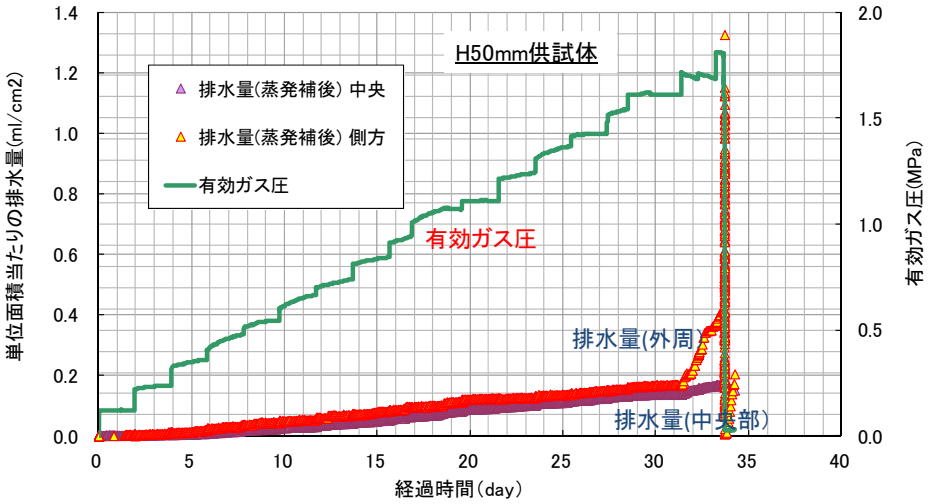


図 1.3-5　排水量（単位量）の経時変化（23-SG-②）

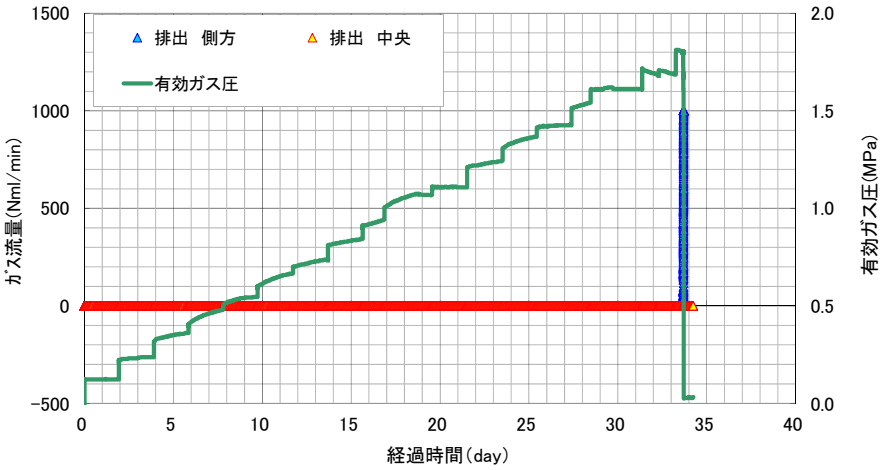


図 1.3-6　排気量の経時変化（23-SG-②）

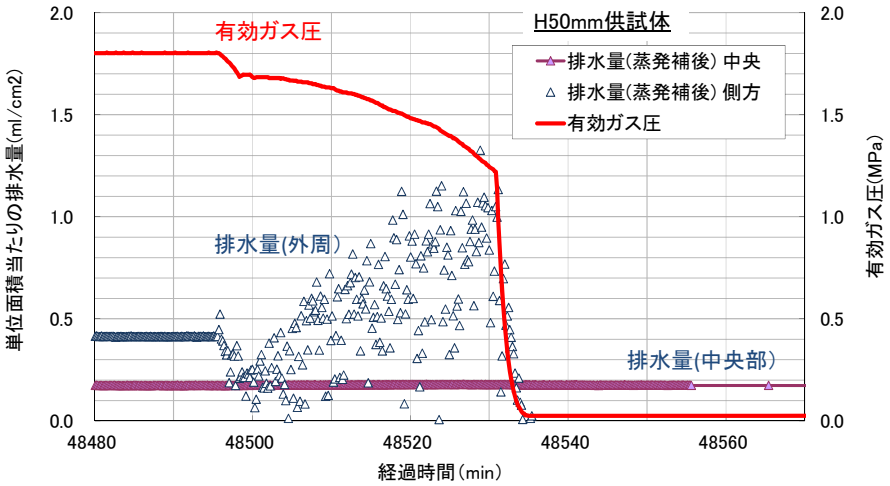


図 1.3-7　破過挙動直前後の排水量の経時変化（23-SG-②）

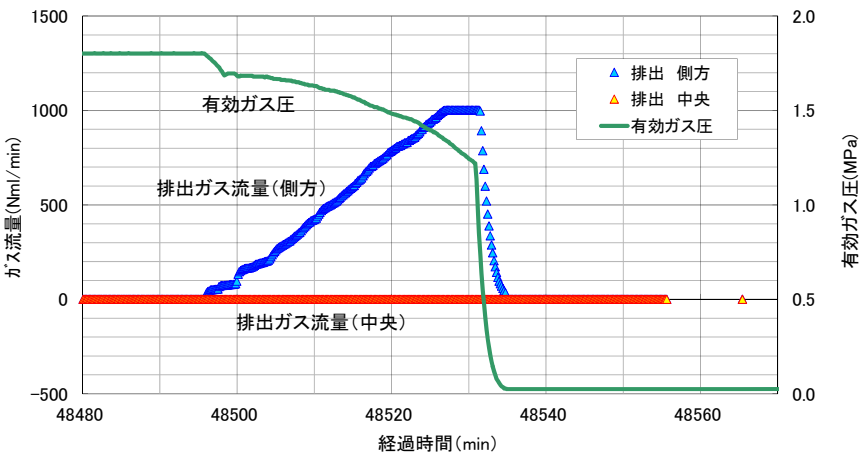


図 1.3-8　破過挙動直前後の排気量の経時変化（23-SG-②）

2）飽和供試体を用いたガス移行試験にて破過の見られなかった試験（200 ㎜供試体）

一方で、供試体のサイズの大小によるガス移行への影響（寸法効果）を評価するために、大型供試体（高さ 200 ㎜）を用いたガス移行試験を実施した。試験手法および諸条件は 50 ㎜以下の供試体におけるガス移行試験に準じ、ガス注入における昇圧ステップも同一であったが、試験装置の最大注入能力である 5.0MPa（有効ガス圧 4.9MPa）までの昇圧の間に破過を生じることは無かった。このため最大圧力のガス注入を 2 日維持させてから停止し、材料の密度測定と飽和度算定を実施した。図 1.3-9 には、密度・飽和度測定結果によって得られた含水比、乾燥密度および飽和度のプロファイルを示した。この結果より、底面より 30~40mm のガス透気範囲が確認され、破過には至らなかった試験においても、材料内部にガス注入の影響が生じることが確認された。

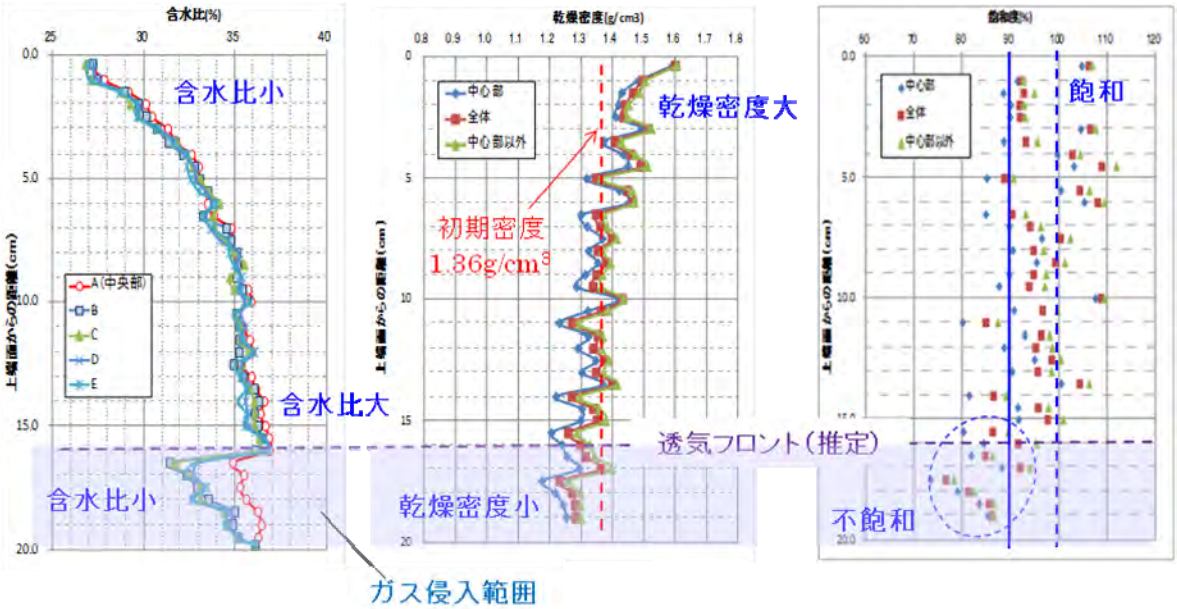


図 1.3-9　大型供試体のガス移行試験終了後の解体調査より算定した含水比（左）、乾燥密度（中）および飽和度（右）プロファイル

(3) 寸法効果の評価

検討項目として、供試体の規模（高さ）の違いによるガス移行への影響について、ガス移行挙動試験により得られた破過圧力に着目して評価した。表 1.3-1 に 2009-2012 年度[5][6][7][8]に行った同一条件における試験の供試体高さおよび破過圧の結果一覧を示し、これをもとに作成した供試体寸法と破過圧のグラフが図 1.3-10 である。50 ㎜以下の供試体の試験で得られた破過圧は一次直線を仮定することで相関が得られるが、これを 200mm へ延長した値より高い 5.0MPa まで注入圧力を上昇させても破過は発生しなかったため、一次直線での近似では説明できない可能性がある。また、本検討にて取得したデータは、条件の観点においても量的にまだ十分とはいえないため、データの集積も課題である。

表 1.3-1　本検討のうち飽和供試体での試験にて取得された破過圧力データ一覧

	破過圧（MPa）			
	12.5mm	25mm	50mm	200mm
2009	－	－	2.4	－
2010	－	1.52	2.0	－
2011	－	1.6	1.8	－
2012	1.3	1.3	－	(>4.90)
	1.2			

※破過圧は有効ガス圧（ガス注入圧と上面での背圧の差）を示す。

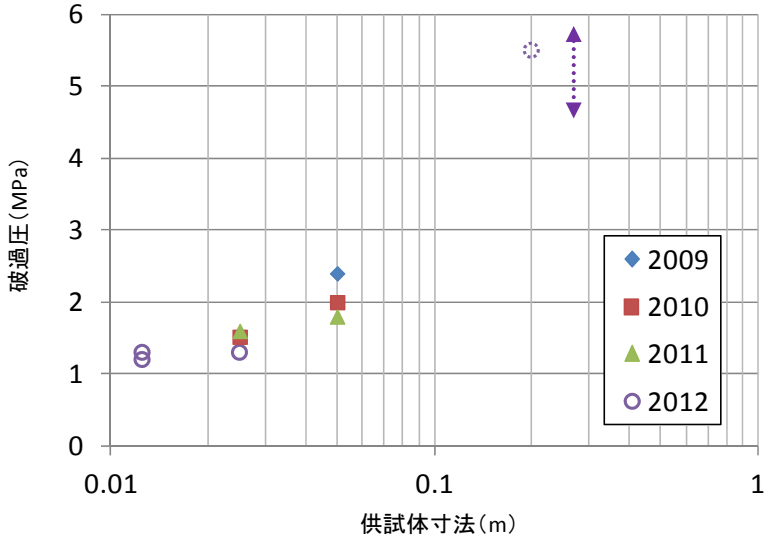


図 1.3-10　破過圧と供試体寸法の関係

(4) 飽和不飽和力学特性試験

本検討においては、力学と連成するガス移行挙動をモデル化して評価するために必要となる力学物性パラメータを取得するための室内要素試験を立案・実施した。取得すべき物性パラメータは解析で採用するモデル（構成則）あるいは解析コードによって異なるため、モデル化・解析手法の高度化に関わる検討において、対象として提示される解析モデル（構成則、コード）に必要となるパラメータの取得試験として実施した。適用対象モデルには力学連成モデルなどを想定し、スイス・グリムゼル岩盤試験場で行われたガス移行試験（以下、GMT と記す）[3]でその有効性が確認された CODE_BRIGHT[13]に用いられる構成則（BB モデル）を想定し、サクション制御が可能なオエドメータあるいは三軸試験装置を用いて最適化された一連の応力経路試験により下記の必要な物性パラメータの取得のための試験を実施した。

- 応力変化による膨潤・圧縮挙動を規定するパラメータ
- 飽和度（サクション圧）の変化による膨潤・圧縮挙動を規定するパラメータ
- 強度の飽和度依存性を規定するパラメータ

1) 応力（外力）の変化による圧縮、膨潤挙動（圧密）試験

サクション制御オエドメータを用いて異なるサクション下で圧密試験を行い、膨潤指数や圧縮指数のサクション依存性を検討できるデータを取得した。サクション制御オエドメータ試験装置の概念図を図 1.3-11 に示す。試料にはクニゲル V1 を用い、気乾状態（含水比 6%）の試料を圧縮容器内で締固めて乾燥密度 1.0Mg/m^3 とし、高さ 5ｍｍ、直径 60ｍｍの円盤型の供試体とした。試験は以下の通りに実施した。

・体積拘束膨潤過程 ：体積拘束およびサクション 80kPa、280kPa、480kPa の一定条件にて膨潤圧を測定。

・圧密過程 ：サクション一定条件で、排水状態での圧密載荷、除荷を行い、各水準での載荷応力 p は以下の通りとした。

(a) サクション 80kPa のケース；

p = 膨潤応力（70kPa）→90→130→210→370→690～370→70ｋＰａ

(b) サクション 280kPa のケース；

p =膨潤応力（28.5kPa）→68.5→148.5→328.5→508.5→328.5→28.5kPa

(c) サクション 480kPa のケース；

p =膨潤応力（20kPa）→40→80→160→320→160→80→20ｋＰａ

図 1.3-12 は、試験より得られた圧縮指数、膨潤指数とサクションの関係を示したもので、実線のように実験を BB（バルセロナ・ベーシック）モデルでフィティングでき、応力変化による膨潤・圧縮挙動を規定するパラメータの BB モデルへの適用が可能であることが示された。

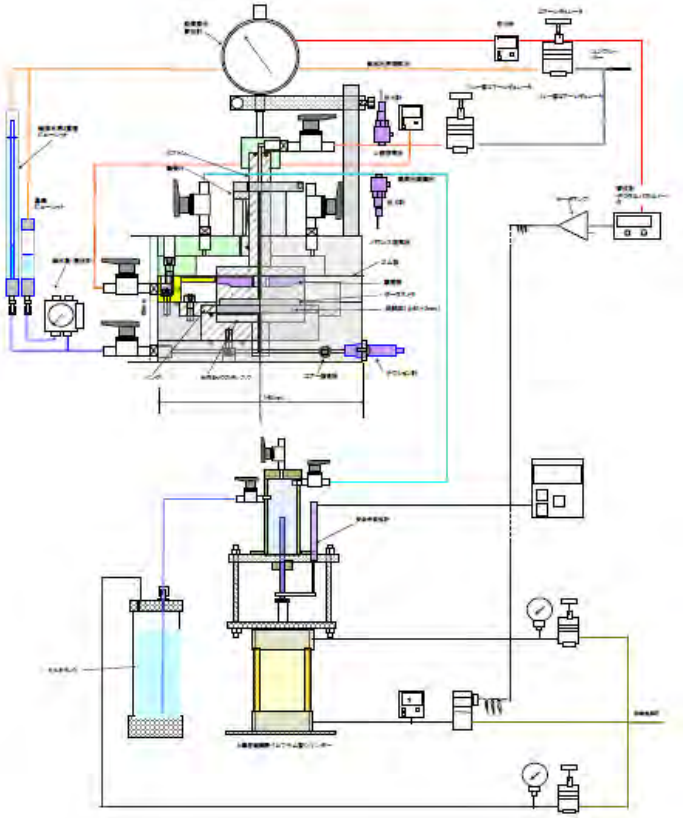


図 1.3-11　サクション制御オエドメータの概念

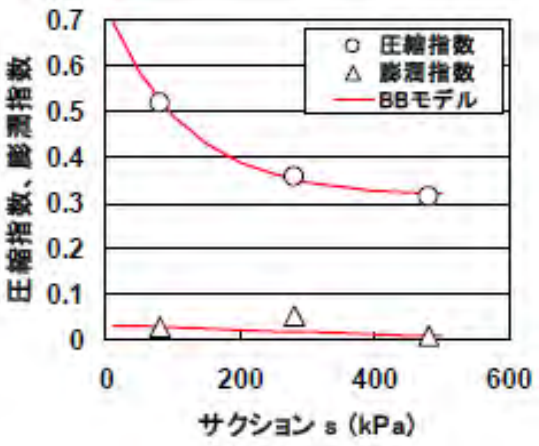


図 1.3-12　圧縮指数、膨潤指数のサクション依存性と BB モデルによるフィッティング

2) 飽和度の変化による膨潤、圧縮挙動試験

サクションの除荷・載荷過程に対する圧縮ベントナイトの変形特性を求めるために、ネット鉛直応力（$\sigma_{v\,net}$）一定条件でのサクション（s）の除荷・載荷試験を行った。s＝500kPa, $\sigma_{v\,net}$＝20kPa の初期状態から、$\sigma_{v\,net}$ 一定でサクション除荷・載荷を行い、その後、$\sigma_{v\,net}$ =100kPa、および 300kPa まで段階的に載荷して、それぞれの拘束圧下でサクション 500kPa から除荷・載荷過程を行った。図 3.2.5 6 は、試験の各段階の最終間隙比状態

と（サクション＋大気圧）の対数の関係を示したものである。図中の実線は、載荷過程に対する直線回帰式を示している。図 3.2.5 6 より、サクション除荷時とその後のサクション載荷時で関係が異なること、また、サクション載荷時は直線で近似できるがサクション除荷時は直線近似が適切ではないことがわかった。

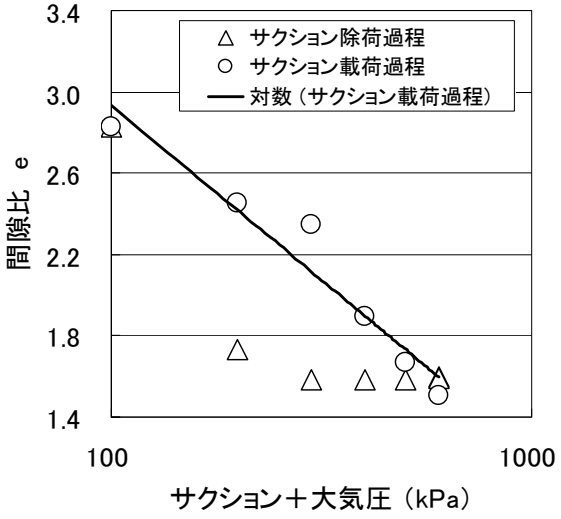


図 1.3-13　最終間隙比～サクション関係（$\sigma_{v\,net}$＝20kPa）

3) せん断強度のサクション依存性に関する試験

サクション制御可能な三軸圧縮試験装置を用いて、内部摩擦角および粘着力のサクション依存性を検討するための試験を実施した。まず、試験結果の妥当性を考察する目的で飽和試料および不飽和試料（サクション一定）の一面せん断試験を行い、引き続き飽和試料および不飽和試料の三軸試験を実施した。

a. 一面せん断試験

試料は、クニゲル V1 を含水比 35%、乾燥密度 1.36Mg/m^3 で締固めたものを用いた（飽和度 91%）。一面せん断試験の供試体寸法は直径 60mm 高さ 20mm とした。試験から得られた有効鉛直応力とせん断強度の関係を図 1.3-14 に示す。飽和試料の内部摩擦角 ϕ' 、粘着力 c’ を算定すると ϕ'=13.3°、c’=0kPa、一方、サクション 0.7MPa 一定の試料では ϕ'=12.2°、c’=62kPa となり、内部摩擦角 ϕ' はサクション依存性がほとんどないが、粘着力 c’ はサクションに依存する可能性が示された。

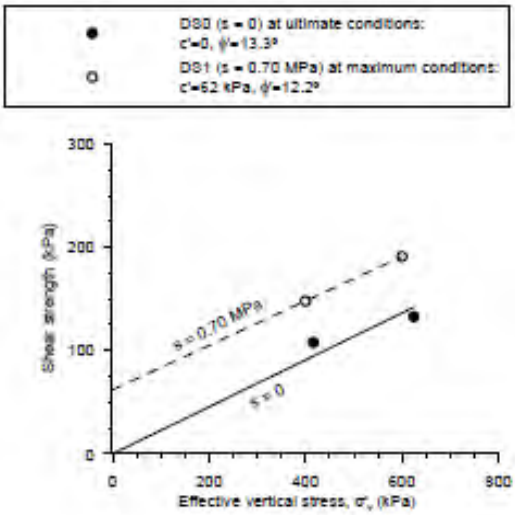


図 1.3-14　一面せん断試験における有効鉛直応力とせん断強度の関係（飽和試料）

b. 三軸圧縮試験

サクション制御可能な三軸圧縮試験装置を用いて、内部摩擦角および粘着力のサクション依存性を検討するためのせん断試験を以下の条件にて実施し、せん断強度のサクション依存性に関するデータを取得した。

- 供試体：ベントナイト（クニゲル V1）、初期乾燥密度 1.36Mg/m^3
- 供試体寸法：直径 38mm、高さ 40mm

試験結果を以下に示す。

(a) 応力経路

図 1.3-15 において、全ての試験の応力経路を p_{net}～q 面上に破線で、最大偏差応力点をプロットで、最大偏差応力点の最小二乗近似による限界状態線を実線でそれぞれ示した。

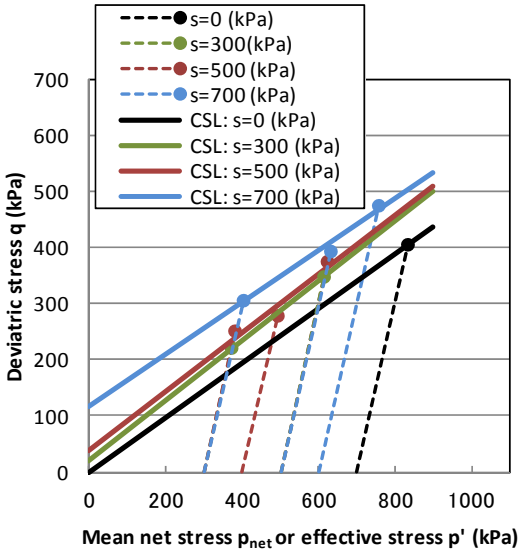


図 1.3-15　応力経路と限界状態線

(b) 内部摩擦角と粘着力（サクションとの関係）

図 1.3-16 は図 1.3-15 の最小二乗近似による限界状態線から得られた、内部摩擦角をサクションとの関係で、内部摩擦角はサクションに依存せず一定（13°）と見なせると判断した。これより図 1.3-17 のように限界状態線を描き直し、これに基づいて得られた粘着力とサクションとの関係を図 1.3-18 に示す。これらが概ね整合していることより、乾燥密度 1.36Mg/m^3 のクニゲル V1 ベントナイトの内部摩擦角はϕ'=13（°）（一定）、見かけの粘着力は c=0.069s（s：サクション）で近似できることがわかり、この結果が BB モデルと整合的であることを確認した。

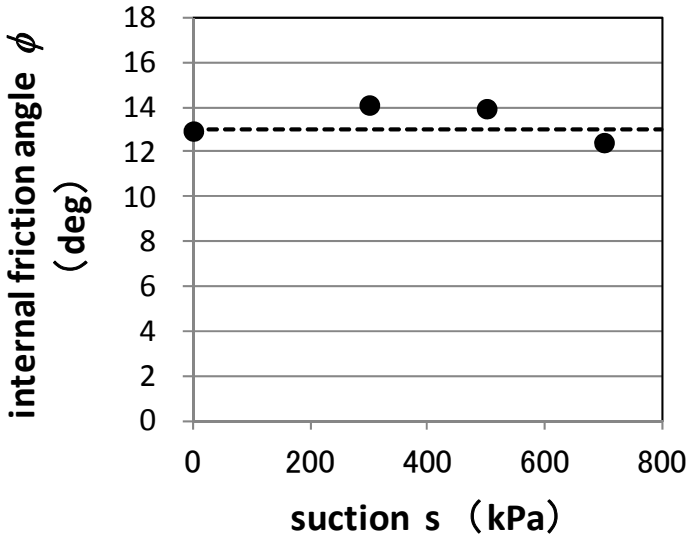


図 1.3-16　内部摩擦角とサクションとの関係

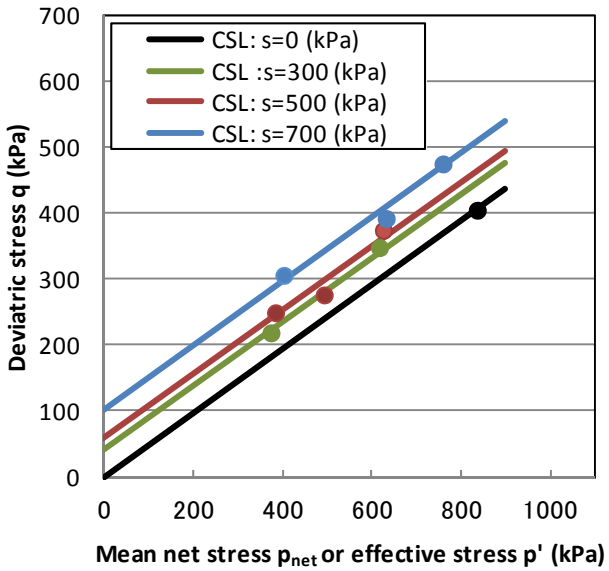


図 1.3-17　内部摩擦角を 13°一定とした場合の限界状態線

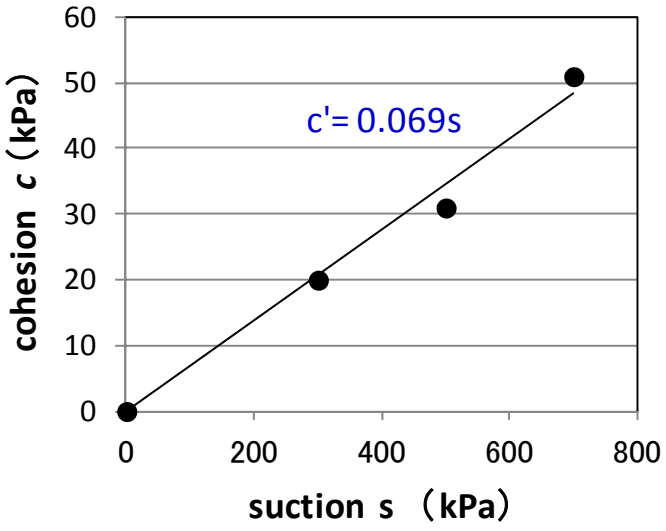


図 1.3-18　粘着力とサクションの関係（内部摩擦角を 13°一定とした場合）

4）水分特性試験

a. 試験方法

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水分特性（飽和度～サクションの関係）を取得した。

- 供試体：ベントナイト（クニゲル VI、初期乾燥密度 1.36Mg/m^3）
- 供試体寸法：直径 50mm、高さ 10mm
- 載荷サクション：0（飽和）～1.3MPa の範囲

b. 試験結果

図 1.3-19 に、初期状態（含水比 35%、飽和度 91%）からの湿潤過程の水分特性（△プロット）と飽和後の乾燥過程の水分特性（○プロット）を示す。左図の実線はそれぞれに対しての van Genuchten モデル[11]による近似曲線を示し、右図は Narasimhan モデル[12]による近似曲線とそのモデルパラメータを示す。実験結果は、湿潤過程と乾燥過程で明らかに異なる水分特性を示しており、両過程とも van Genuchten および Narasimhan モデルで近似可能であるが、同定したパラメータは飽和度の比較的高い限定された飽和度領域でのみ適用可能であることが示された。

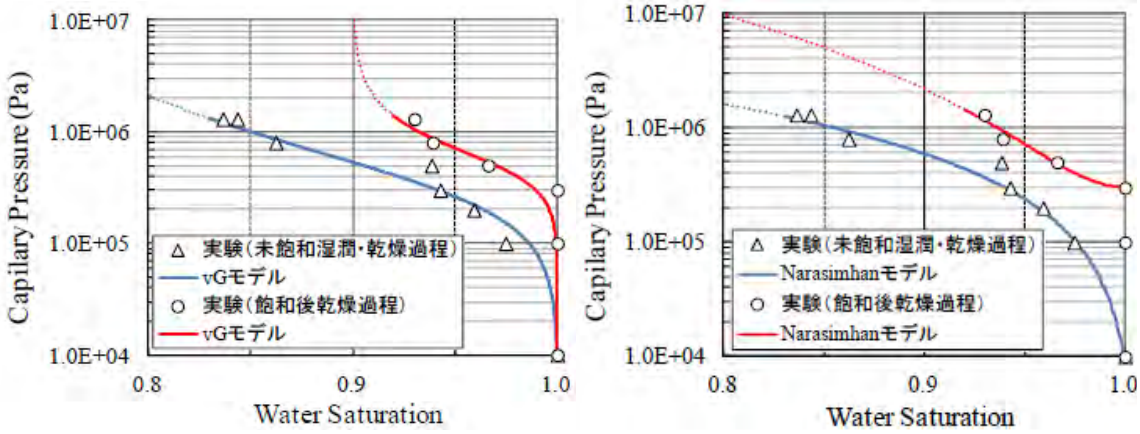


図 1.3-19　取得された水分特性と van Genuchten モデル(左)および Narasimhan モデル(右)近似

本項目における成果について総括すると、ガス移行試験の手法の整備やこれに係るプロセス（飽和やガス移行）に時間を要し、また実施が当初の想定を下回ったものの、国内外のガス移行概念を構成する現象を再現し、さらに供試体サイズによるガス移行への影響（寸法効果）の検討へ展開することができた。また、解析モデル化に係る緩衝材材料の飽和-不飽和力学特性パラメータの取得および解析に用いるモデルへの適合性が確認された。

1.3.3　モデル化・解析手法の高度化

当初は、国内外の動向調査をもとにモデル化・解析手法の高度化計画を策定し、これを踏まえガス移行挙動評価に係るモデル化や解析手法の高度化を行った。具体的には、材料特性を取得するために行われた室内試験の結果等を用い、ガスと THMC の連成を含む再現解析等を行うことにより、モデル化・解析手法の適用性向上、ガス移行に関する現象理解及び不確実性の低減に向けた検討や、解析パラメータの不確実性の定量化による施設の長期変遷を考慮したガス移行挙動のモデル化・解析手法を構築した。さらに、上記検討における入出力データおよびパラメータの蓄積の受け皿として、ガス移行挙動評価解析実施の際に種々のモデルや関連パラメータを共通に利用可能なデータライブラリを整備した。

本項目においては、第 2 次 TRU レポート等で提示されている地質環境や人工バリア構成におけるガス移行挙動に関して、現実的なモデル化・解析評価に資する、構成材料の界面のガス移行特性、圧力に依存する透過性、あるいは力学と連成するガス移行挙動の考慮が可能で、処分概念に係る複合システムに対応したモデル化・解析手法の構築および高度化を目的とした。検討は、以下の項目にて構成され、次項より実施概要を示す。

・モデル化・解析手法の材料試験データ等への適用性向上（確証研究）
・施設の長期変遷を考慮したモデル化・解析（スコーピング研究）
・ガス移行データライブラリの構築

(1) モデル化解析手法の適用性向上（確証研究）

1) 圧力依存透過特性解析

a. 実施の流れ

圧力依存透過特性解析コードを用いた確証計算について示す。表 1.3-2 に、検討を進めるうえでのステップとその作業を示した。

まずステップ 1 として、対象とする「材料特性試験データの取得に係る検討」にて実施された飽和供試体を用いたガス移行（注入）試験の再冠水フェーズおよびガス注入フェーズに対して通常の 2 相流モデルを用いてフェーズ毎に個別に再現解析を実施し、次にステップ 2 で、ステップ 1 で得られた知見をもとに同じ試験を対象とした再現解析を、膨潤・収縮を考慮した 2 相流モデルへ適用し、気液二相流パラメータを同定した。

表 1.3-2　圧力依存透過特性解析の検討ステップ

	検討概要	使用モデル
ステップ 1	ガス注入試験の再冠水過程を対象とした再現解析	一般的な 2 相流モデル
	ガス注入試験：ガス注入過程を対象とした再現解析	
ステップ 2	再冠水過程からガス注入過程までの一連の再現解析	膨潤・収縮を考慮した 2 相流モデル

b. 解析手法、解析モデルおよび初期、境界条件

順解析には、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)[15]を用いた。なお解析コードについての詳細は、過年度報告書（[7][8]）を参照されたい。解析モデルは供試体の寸法をもとに、断面積が等価な矩形断面とし、鉛直方向を 0.5mm 幅で等分割した 1 次元モデルとした。図 1.3-20 に解析モデルの基本諸元を示す。逆解析は、浸潤過程においては比較的高い水飽和度においてもガスが速やかに供試体外へ排出する機構が同定されていることからガス相の相対浸透率曲線を表現する近似モデルには Grant モデル[16]を適用し、同定するパラメータの値を既往検討から推定して範囲を限定して検討を行い、プログラム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[17]を用いた。

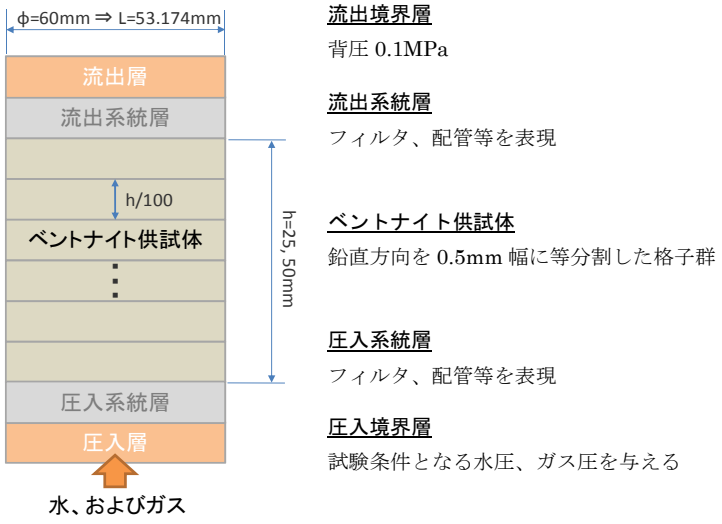


図 1.3-20　解析モデルの基本諸元

c. 解析結果例

①ステップ 1（膨潤・収縮を考慮しないモデル）

ここではステップ 1 の実施例を示す。再冠水の再現解析では、絶対浸透率の値を適正に設定することで、累積注水量を概ね再現することが可能で、次にガス注入フェーズを対象として再現解析を実施した。Pathway Dilation モデルを考慮し、逆解析によるパラメータ同定を行った。得られた累積排水量、排気流量と試験結果を比較したものを図 1.3-21 に示す。実測された累積排水量と排気流量の双方を良く再現する結果を得ることができているが、図 1.3-22　に示す同定された気液二相流曲線のように、点線の浸潤（再冠水）過程と排水（ガス移行）過程で全く異なる特性曲線が同定され、両者にヒステリシスが存在する結果となった。

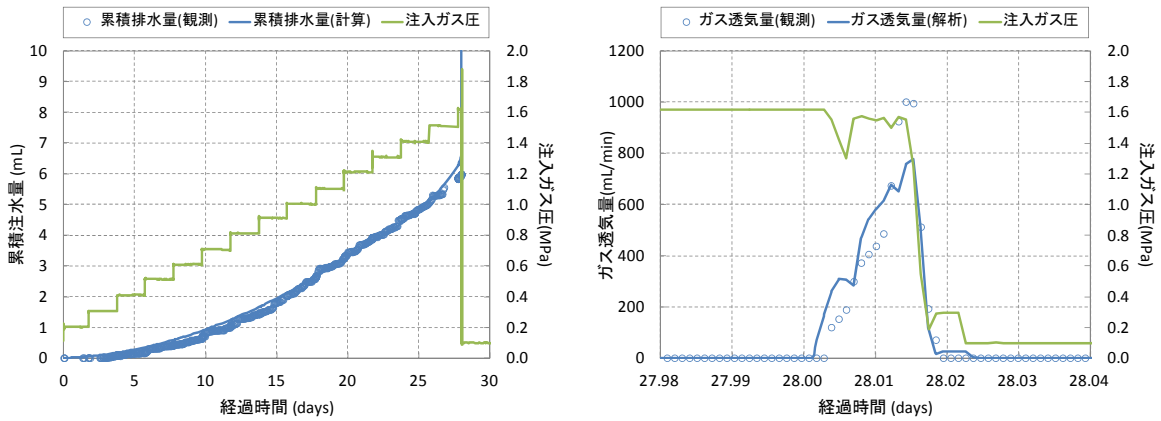


図 1.3-21　累積排水量（左）と排気流量（右）に対する試験結果とステップ 1 の解析結果の比較（平成 22 年度 SG①試験）

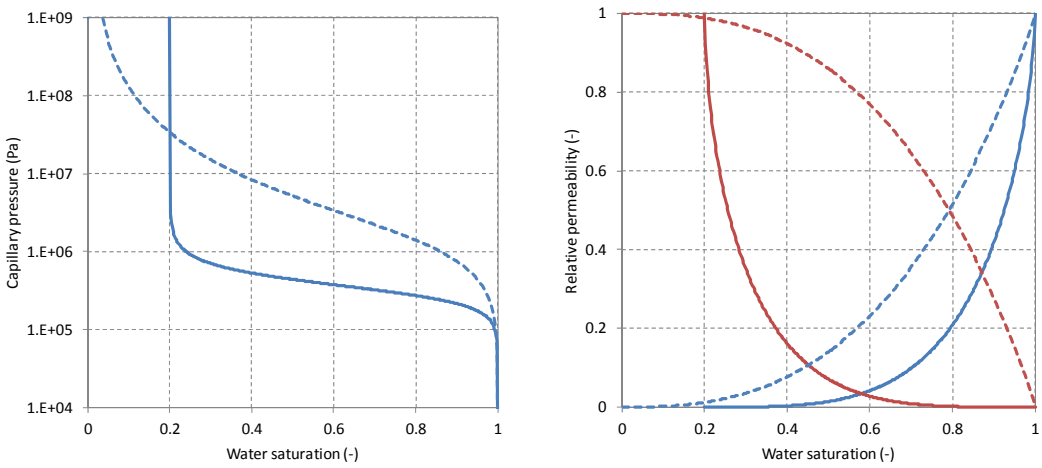


図 1.3-22　ステップ 1 にて同定された 2 相流曲線（平成 22 年度 SG①試験）

②ステップ 2（膨潤・収縮考慮モデル）

ステップ 1 での課題に基づき、膨潤・収縮を考慮した気液 2 相流モデルによって再冠水フェーズとガス注入フェーズの一貫した再現解析を実施した。膨潤・収縮を考慮した 2 相流モデルにおいてはベントナイトの間隙を、膨潤性を想定した「層間間隙」とそれ以外の「層間以外の間隙」とに分けて考慮することにより（図 1.3-23 の概念[18]参照）、吸水飽和の過程において層間に水が取り込まれることによって層間間隙の割合が増加し、その一方で層間以外の間隙が減少するような現象としてモデル化した。膨潤・収縮を考慮した 2 相流モデルにおける間隙率や毛細管圧力の変化イメージを図 1.3-24 に示す。

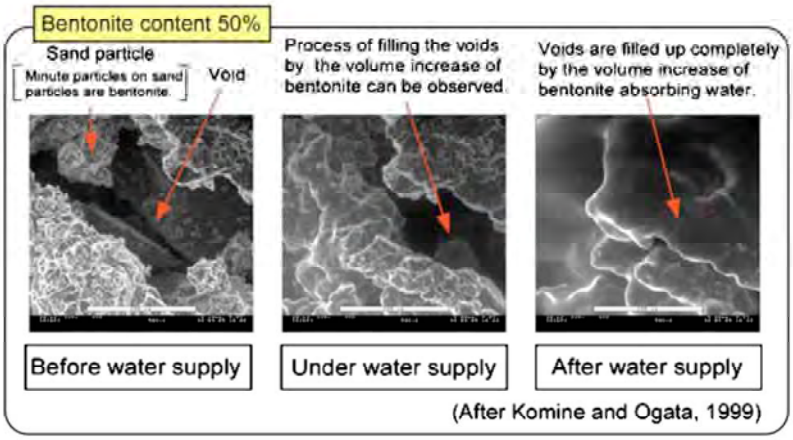


図 1.3-23　ベントナイトの膨潤による非膨潤性間隙の閉塞

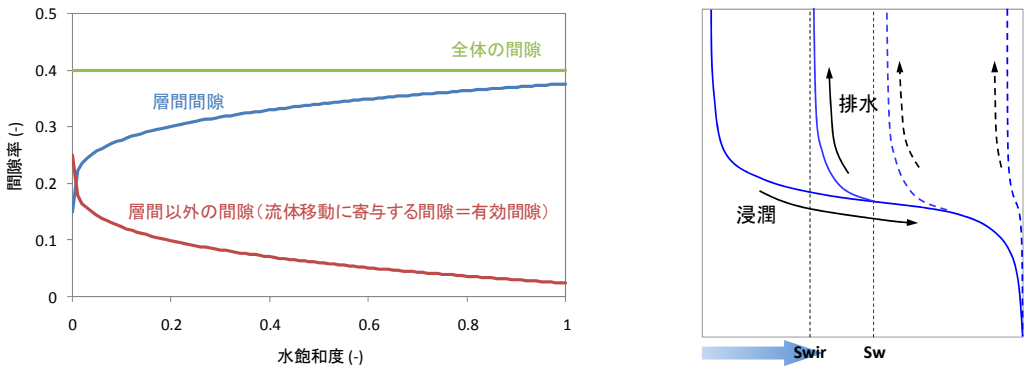


図 1.3-24　膨潤・収縮を考慮した 2 相流モデルにおける間隙率や毛細管圧力の変化イメージ

この膨潤・収縮を考慮した 2 相流モデルにより、再冠水からガス注入までの一連の試験データを対象とした再現解析を実施した。浸潤過程で Grant モデル、また飽和後の排水過程では van Genuchten モデル[11]に切り替える構成モデルによって、図 1.3-25 に示すように概ね試験データを再現することができ、図 1.3-26　に浸潤過程を示すようにこの一連の解析における毛細管圧力と相対浸透率が辿る経路がヒステリシスを作らずに求められた。

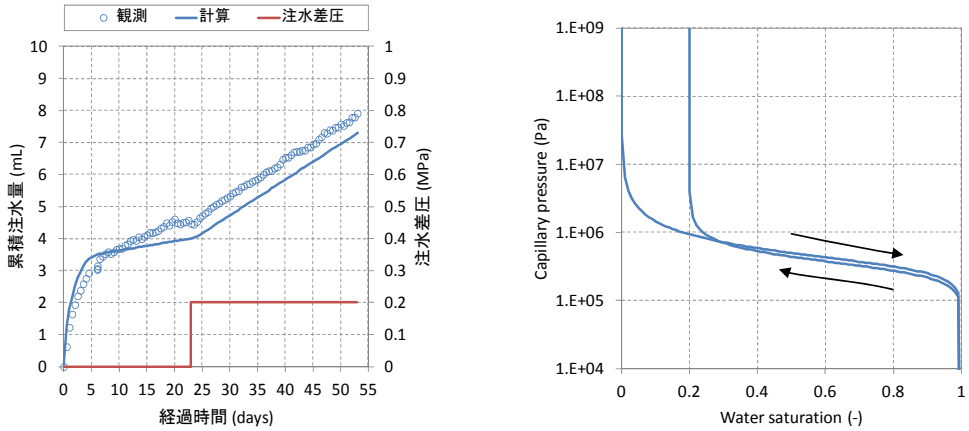


図 1.3-25　ステップ 2 での浸潤過程の再現解析における累積注水量の再現結果（左）および毛細管圧力の経路（右）

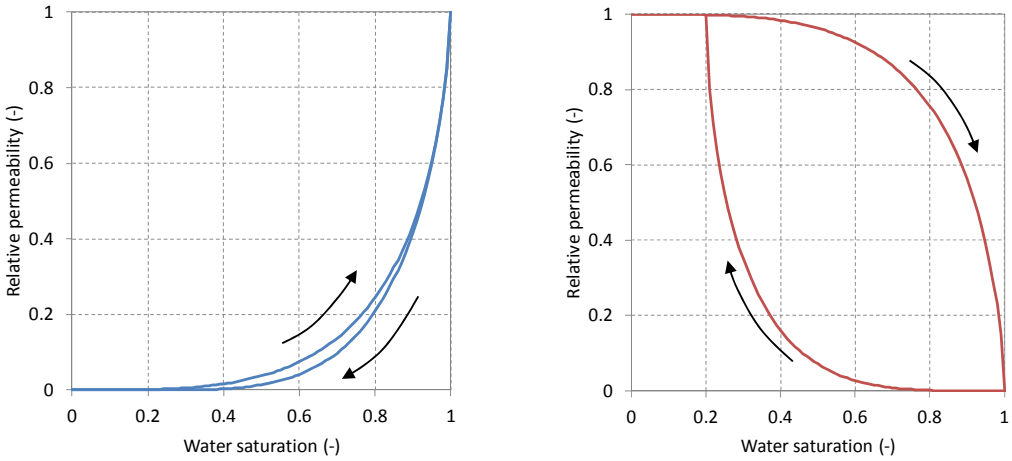


図 1.3-26　ステップ 2 での浸潤過程における水相（左）、ガス相（右）の相対浸透率の経路

2) 力学連成解析

ここでは 2 相流と力学を考慮できる力学連成解析コード CODE_BRIGHT[12]を用い、本検討にて実施されたガス移行試験結果を対象に、既往研究等から得られている 2 相流パラメータを用いて膨潤圧、注水量・排水量、飽和度分布及び間隙率分布等のパラメータの再現性を評価し、ガス移行挙動における力学影響について考察した例を示す。

a. ガス移行挙動評価試験結果の Nagra におけるガス移行形態の適用

NagraはOpalinus clayにおける処分概念を対象に、岩盤中のガス移行形態が次の4つの事象に分類している[10]（図 1.3-27参照）。また下記①－④の過程でのガス侵入圧と最小主応力の関係を表 1.3-3　に示す。

①間隙水中の溶解ガスによる移流・拡散

②古典的な 2 相流による移流

③微細なき裂生成に伴う流路形成

④岩盤の引張破壊に伴うき裂開口による卓越流路形成

一方、本検討対象のベントナイト（クニゲル V1）と Nagra が対象としている Opalinus clay では剛性が異なり（ベントナイトの方が軟らかい）、ガス圧が高くなるに伴い変形が生じやすいので、Nagra が規定するガス移行形態の適用性が課題である。

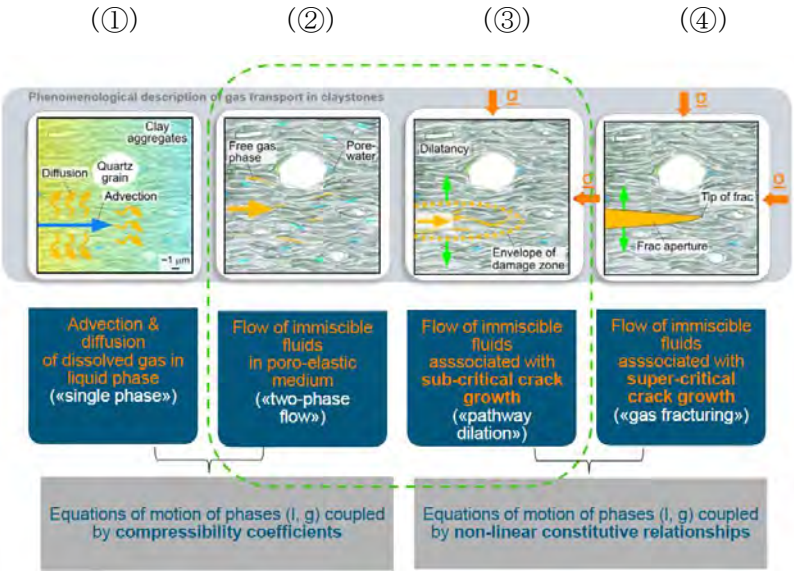


図 1.3-27　Nagra が規定するガス移行形態

表 1.3-3　各移行過程におけるガス侵入圧と最小主応力の関係

①移流拡散過程	②2 相流過程	③流路形成過程	④引張破壊過程
P_g	$P_{ae} < P_g < \sigma_3$	$P_g \approx \sigma_3$	$P_g > \sigma_3$

b. 検討を行う上での前提条件

寸法 φ60×h50、φ60×h25 のそれぞれ 2 つの寸法、合計 6 ケースのガス移行試験より解析対象を選定した。また仮定条件として、「ガス注入面に対し上部に配置されているポーラスメタルは完全飽和状態で、ガス注入によりポーラスメタル内の水の体積相当分 3.57 (cm^3)が排水されてからベントナイトにガスが侵入する」とした。水分特性曲線は、H23 年度に実施した水分特性試験結果におけるモデルにおいて、乾燥側の水分特性よりガス侵入圧が P_{ae}=0.3MPa と推定でき、このモデルパラメータを仮定した。一方、図 1.3-28 はこれまでの検討結果[8]で、逆解析によって同定された水分特性曲線で、上記の試験での水分特性曲線と概ね同程度の曲線が同定されている。

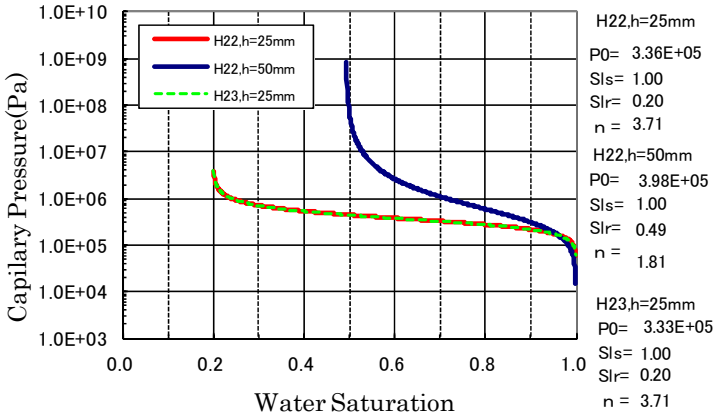


図 1.3-28　これまでの検討で逆解析から同定された水分特性曲線

c. 力学連成 2 相流解析による供試体内部の推定

(a) 検討条件

高さ 25mm の供試体でのガス移行試験[7]を対象に、供試体内部の応力・変形状態の推定、供試体への注水量のマスバランス評価、および 2 相流としてガスが移行した区間の推定を目的に実施した。対象としたガス移行試験条件を表 1.3-4 に示す。

表 1.3-4　解析対象のガス移行試験条件

実施年度	試験体寸法	排水量 3.57cm^3 を超える	
		ガス圧	日時
H22	h=25mm	1.11MPa	20.0 日

(b) モデル化対象、境界条件、物性値

解析モデル及び境界条件を図 1.3-29 に示す。解析は注水過程からガス移行過程までを再現し、ガス移行過程におけるガス圧載荷条件にはポーラスメタル内の残留水が全てベントナイトへ注水されたと仮定し、ガス注入開始後 20 日からガス圧を載荷した。解析における初期条件は、注水開始時の供試体内部の状態（初期飽和度 90%）で、間隙比は e=0.949(-)、初期応力は $\sigma_z=\sigma_r=$

σ_0=0.11(MPa)とした。また力学連成 2 相流解析にて適用する、力学物性値と 2 相流物性値を設定した。

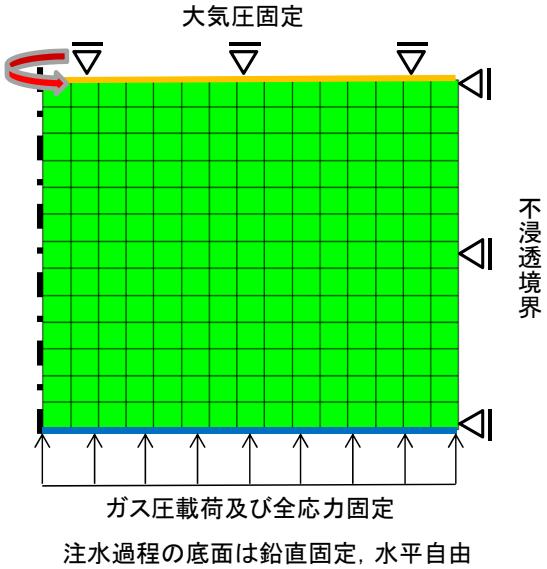


図 1.3-29　解析モデル及び境界条件

(c) 解析結果

・飽和過程とガス注入過程の再現

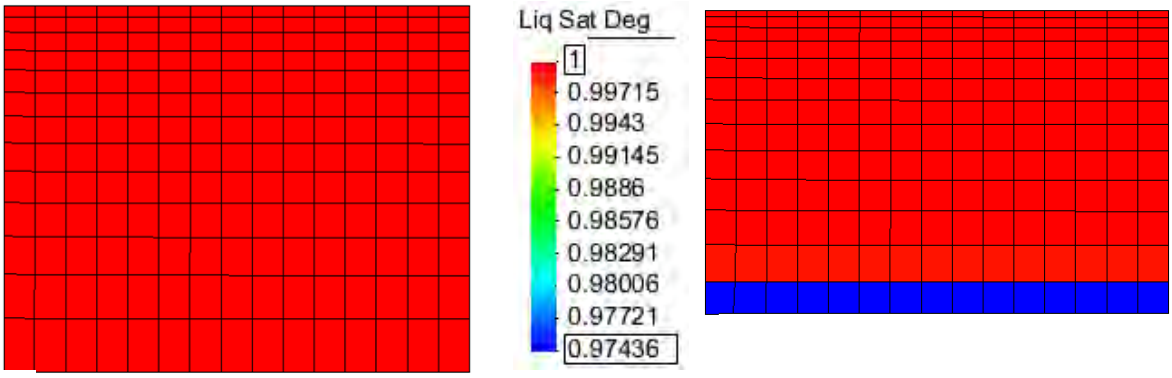
解析では注水過程の飽和膨潤過程を再現してガス移行時の供試体内部の状態の考察を行った。

飽和過程においては、累積注水量、全応力とも良好な再現がなされたのを確認し、次にガス注入過程の再現解析を行った。ガス移行過程において、ガス注入起因の圧密により排水される水量は、ガス侵入まで（20 日目後）までに 0.440cm^3、破過までに 1.707cm^3 となり、破過までの圧密による排水量は総排水量の 28%程（ガス置換分は 72%）と算定された。

・飽和度分布と実測値の比較

次に供試体内のガス移行形態（ガスフロントなど）の推察を行った。図 1.3-30 に解析から得られたガス移行過程の飽和度分布と解体調査結果による飽和度分布を示す。

ガス注入開始 20 日後より 27 日後の方がガス圧は高いため、供試体全体が圧縮されている。一方飽和度については、破過直前の状態でも最下層の要素が 97.4%まで低下しているにすぎない。実験と解析の水収支は良く一致しているため、ガスは底部から数㎜程度の範囲には 2 相流として供試体内に移行したが、その後のガス圧増加に伴って、微視的な流路拡幅もしくはフラクチャリングが生じ、破過に至ったものと解釈した。

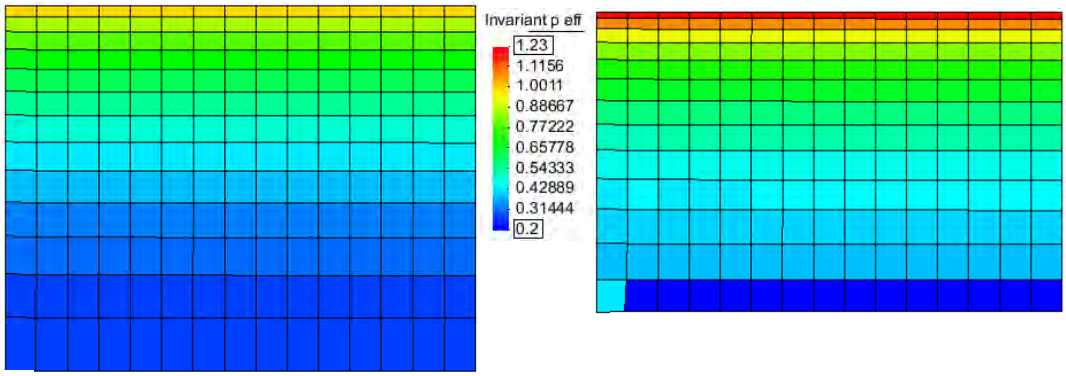


a）ガス注入開始 20 日後　　b）ガス注入開始 27 日後（破過直前）

図 1.3-30　解析から得られたガス移行過程の飽和度分布（変形倍率：5 倍）

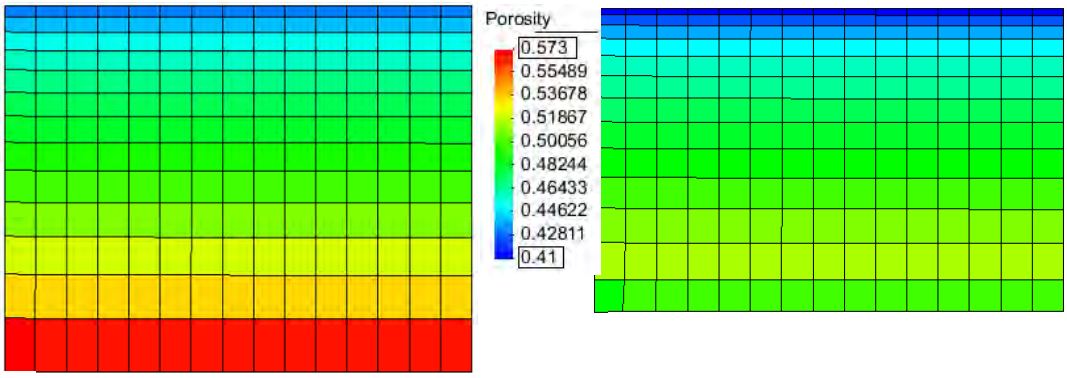
ガス侵入から破過までの平均有効応力分布と間隙率（乾燥密度）分布

解析結果から得られたガス移行時の平均有効応力分布を図 1.3-31 に、間隙率あるいは乾燥密度分布を図 1.3-32 に示す。供試体はガス圧により圧密され、底面付近ではガスの侵入により間隙圧が上昇して有効応力の低下と間隙の増大が起こる。さらに注入側の有効応力が低下し、ゼロになると微視的な流路拡幅もしくはフラクチャリングが生じ破過に至り、一方、排出側（上面）は注入側からの圧力によって圧密排水され間隙が狭まり、その結果有効応力が上昇したと解釈した。



a）ガス注入開始 20 日後　　b）ガス注入開始 27 日後（破過直前）

図 1.3-31　平均有効応力分布（変形倍率：5 倍）



a）ガス注入開始 20 日後　　b）ガス注入開始 27 日後（破過直前）

図 1.3-32　間隙率（乾燥密度）分布（変形倍率：5 倍）

(2) 施設の長期変遷を考慮したモデル化・解析手法（スコーピング研究）

本項目においては、不確実性評価手法を用いたガス移行挙動の熱-水-力学連成解析を行い、評価指標（施設内最大ガス圧、坑道外への押出し水量等）に対する不確実性の定量化を試みた。具体的には、まず THMC 連成挙動の影響度把握を目的としたスコーピング計算に着手し、次に熱影響の把握のための TH 連成解析を実施した。さらに化学的影響の代表的なものとして、ベントナイトの Ca 型化がガス移行挙動に与える影響把握を目的に、イオン交換平衡吸着モデルを用いた Ca 型化による浸透率増加を考慮したガス移行解析を実施した。また、考慮する現象（モデル）や使用するデータ（パラメータ）の不確実性を取り入れた解析手法を用い、モンテカルロシミュレーションを実施した。一方、金属腐食反応に伴う水素ガスの発生プロセスに着目し、この現象を考慮した解析を用いた不確実性の検討を実施した。以下に各検討について記す。

1）TH 連成計算

本検討では、TH 連成計算で用いる数値シミュレーション技術を、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）を用いて実施した。

はじめに 1 次元モデルによる数値実験として、第 2 次 TRU レポートより廃棄体グループ 2 の坑道断面形から人工バリアの一部を切り出した単純系を対象とし、モデルの全体を①岩盤、②ベントナイト、③廃棄体により構成した。人工バリア構成材料の熱及び水理パラメータは、第 2 次 TRU レポートに基づいた。1 次元モデルでは、このうちの廃棄体、ベントナイト、岩盤のみの数値を適用し、その他の材料物性は、後述の処分場スケール 2 次元モデルに用いた。発熱条件は、TRU 廃棄物処分概念検討書[19]、第 2 次 TRU レポート[1]に基づき設定し、円形処分坑道に対する廃棄体パッケージ領域の断面積に基づき発熱量の 33.7%を解析モデルへ与えた。またガス発生条件は第 2 次 TRU レポートを参考に設定し、図 1.3-33 の「合計」値を、第 2 次 TRU レポートにおいて示されている想定ガス発生量し、また初期ガス発生量を 10 万年間与えた。

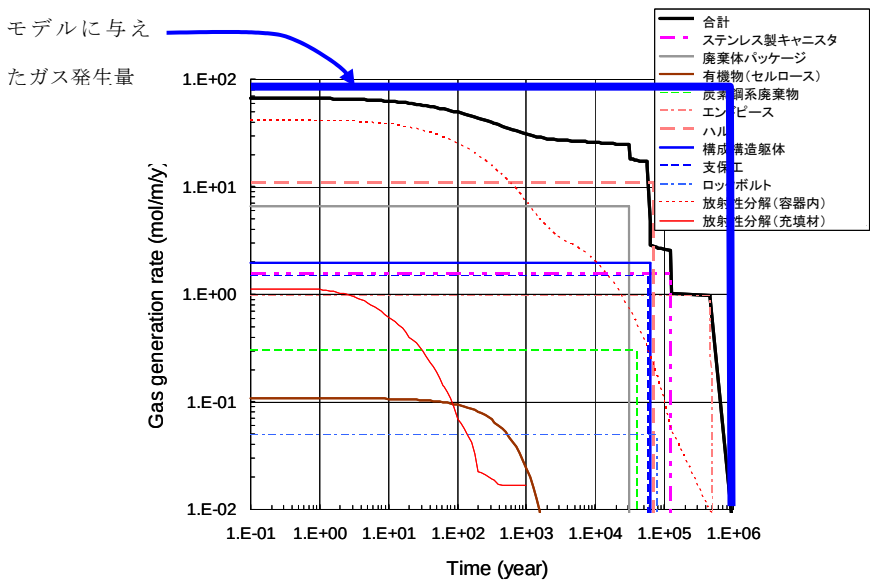


図 1.3-33　想定ガス発生量とモデルに与えたガス発生量

1 次元解析結果を踏まえ、図 1.3-34 に示す第 2 次 TRU レポートにおける廃棄体グループ 2（ハル・エンドピース圧縮収納体）、軟岩系岩盤（SR-C 準拠）を対象とした解析を実施した。図 1.3-35 に本解析に用いた格子システムの処分坑道付近の拡大図を示す。解析ケースには、①高温環境下での水蒸気生成・凝縮・移動と腐食ガスの発生・移行との相互干渉、②廃棄体内の水分状態変化とガス発生量の関係、③施設内における最大間隙圧力と累積排水量に対する温度環境の影響、に着目したケースを設定した。図 1.3-36 はケースの一例で、発熱条件を考慮したケース間で解析結果を比較したものであり、発熱条件を考慮しないケースと比較すると、温度上昇による間隙流体の体積変化が生じ、早い時期から間隙圧はやや大きく発生した。それに伴い坑道外へ向かう動水勾配が大きくなるため坑外排水が増し、特に完全飽和状態からのガス発生・移行を解析したケース（Q1W1G0）でその傾向がより顕著に現れるが、ガス発生速度の水分依存性による違いはほとんど認められなかった。

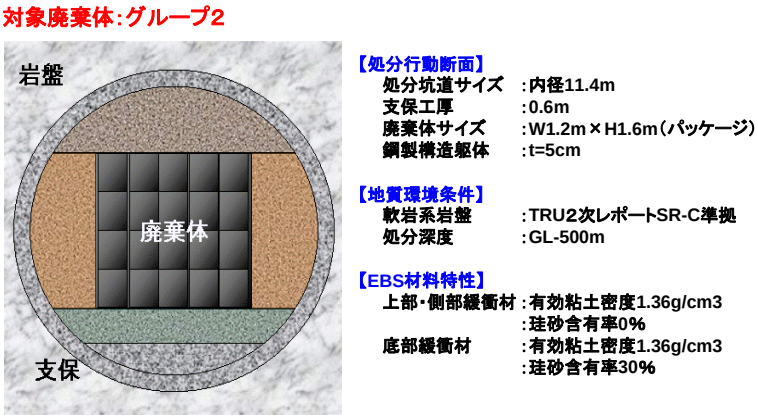


図 1.3-34　解析モデルの対象とする処分システム概念

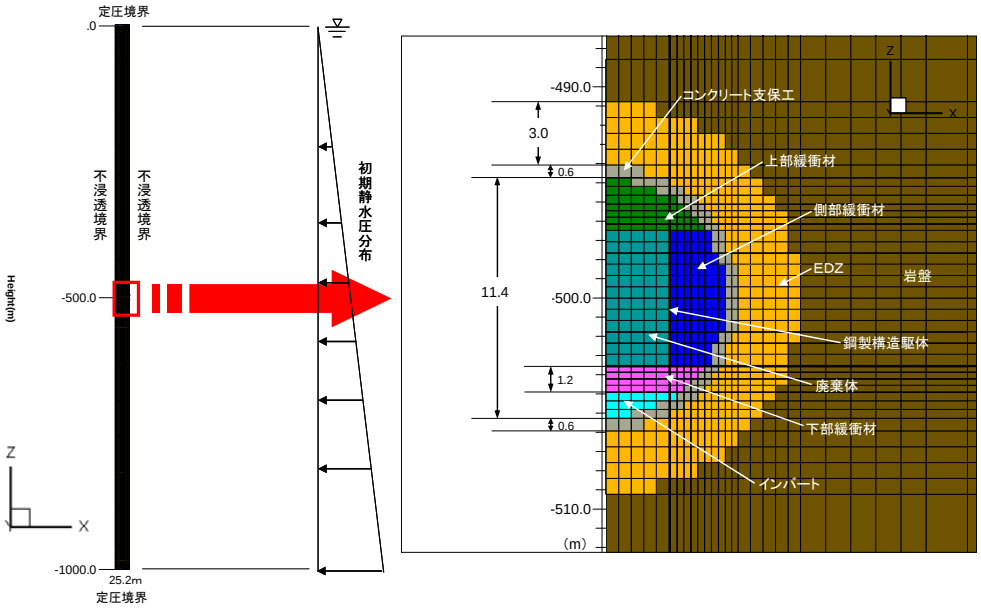
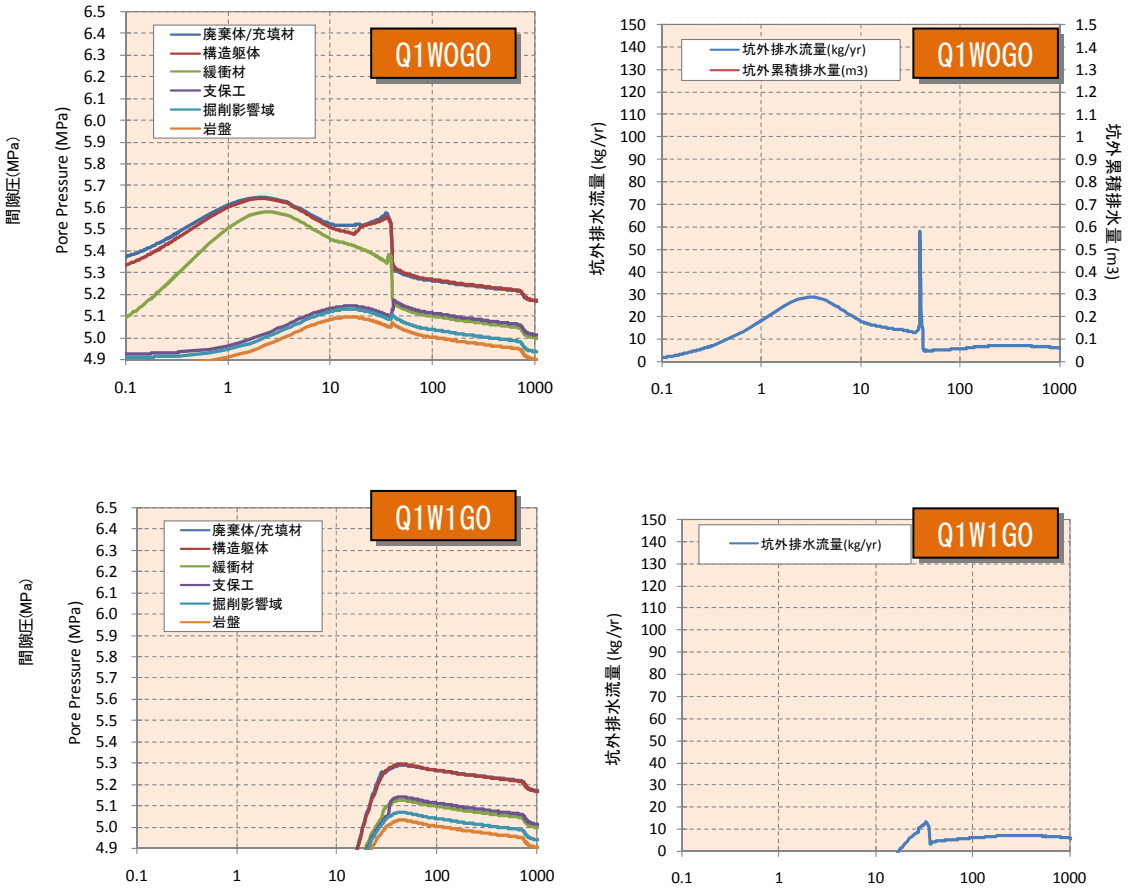


図 1.3-35　2 次元断面計算解析格子モデルと境界/初期条件



(a)間隙圧力　　(b)坑外排水量／累積坑外排水量

図 1.3-36　解析結果：施設内圧力、坑外排水量の比較

2) ベントナイトの長期変質（Ca 化）の影響検討

初めに、再冠水およびガス発生・移行へ与える影響の視点からセメント系材料の溶脱やベントナイト系材料の Ca 型化などの長期変質挙動に関しての調査を実施し、その結果より影響が大きいと考えられるベントナイト系材料の変質の一つの Ca 型化に対しモデル化を実施し、予察的な影響評価を実施した。

ベントナイト系材料の Ca 型化とそれに伴う水理パラメータの変化は、間隙中の水、空気 2 相流動系と地下水中に溶存した陽イオン Na^{+}及び Ca^{2+}の物質移行系の連成挙動により、またベントナイト中の交換性陽イオン（Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^{+}、Na^{+}）のうち、主要成分である Ca2+、Na+のイオン交換反応を考慮した。固相側の最大吸着能は交換性陽イオン容量 CEC によった。

水理パラメータとの関係は、イオン交換の進展度（Ca 型化率 CR）により、媒体の空隙率、浸透率の動的変化として定式化した。固液間の分配平衡は交換平衡定数により算定した。

解析対象とした系は、第 2 次 TRU レポートに準じ、Ca 型化による相間移動量の算出に用いるベントナイトの鉱物組成、陽イオン交換容量、交換平衡定数は、表 1.3-5 及び表 1.3-6 に示す諸数値を用い、Ca 濃度条件は 10^{-2}mol/L で一定とした。

表 1.3-5　ベントナイト混合土の鉱物組成（左）および陽イオン交換容量（右）

鉱物名*1	組成式	式量	設定値*1
モンモリロナイト*2	$Na_{0.33}Mg_{0.33}Al_{1.67}Si_4O_{10}(OH)_2$	369.0	48.0wt%
	$Ca_{0.165}Mg_{0.33}Al_{1.67}Si_4O_{10}(OH)_2$	368.0	
	$K_{0.33}Mg_{0.33}Al_{1.67}Si_4O_{10}(OH)_2$	374.3	
	$Mg_{0.165}Mg_{0.33}Al_{1.67}Si_4O_{10}(OH)_2$	365.4	
クオーツ	SiO_2	60.1	0.6wt%
カルセドニ	SiO_2	60.1	38.0wt%
プラジオクレース	$(Na, Ca)(Al, Si)_4O_8$	262.2	4.7wt%
カルサイト	$CaCO_3$	100.1	2.4wt%
ドロマイト	$MgCa(CO_3)_2$	184.4	2.4wt%
アナルサイム	$NaAlSi_2O_6H_2O$	238.2	3.3wt%
パイライト	FeS_2	120.0	0.6wt%

*1: 伊藤ほか(1993)の分析値に基づき設定

*2: Na 型, Ca 型, K 型, Mg 型の比は初期の交換性陽イオン組成の比とする

イオン交換サイト	meq/100g-bentonite
NaZ	51.4
CaZ_2	7.4
KZ	0.6
MgZ_2	0.7

表 1.3-6　イオン交換反応の交換定数（左）およびセメント系材料が地下水に溶解した場合の地下水組成計算結果（右）

イオン交換サイト	Log K
$Na^{+}+Z^{-}=NaZ$	0.00
$Ca^{2+}+Z2^{-}=CaZ_2$	0.69
$K^{+}+Z^{-}=KZ$	0.42
$Mg^{2+}+Z2^{-}=MgZ_2$	0.67
$H^{+}+Z^{-}=HZ$	1.88

成分(濃度；mol/l)	OPC	OPC/BFS=1/9
Ca	1.80×10^{-2}	1.02×10^{-2}
Mg	2.81×10^{-9}	6.80×10^{-9}
Na	5.54×10^{-1}	5.51×10^{-1}
Si	1.06×10^{-4}	4.11×10^{-4}
Al	5.95×10^{-5}	6.34×10^{-5}
Cl	5.50×10^{-1}	5.50×10^{-1}
C	1.88×10^{-5}	2.61×10^{-5}
$S(SO_4^{2-})$	1.81×10^{-5}	4.74×10^{-3}
K	3.35×10^{-3}	1.87×10^{-3}

図 1.3-37 は、緩衝材の内側と外側に評価点を加え、地下水中の Na イオン、Ca イオン濃度の時間変化を、図 1.3-38 は緩衝材の内側、中心、外側における固相中の Na 吸着量と Ca 型化率の時間変化をそれぞれ示しており、本検討における結果においては、Ca 型化による有意な影響は認められなかった。

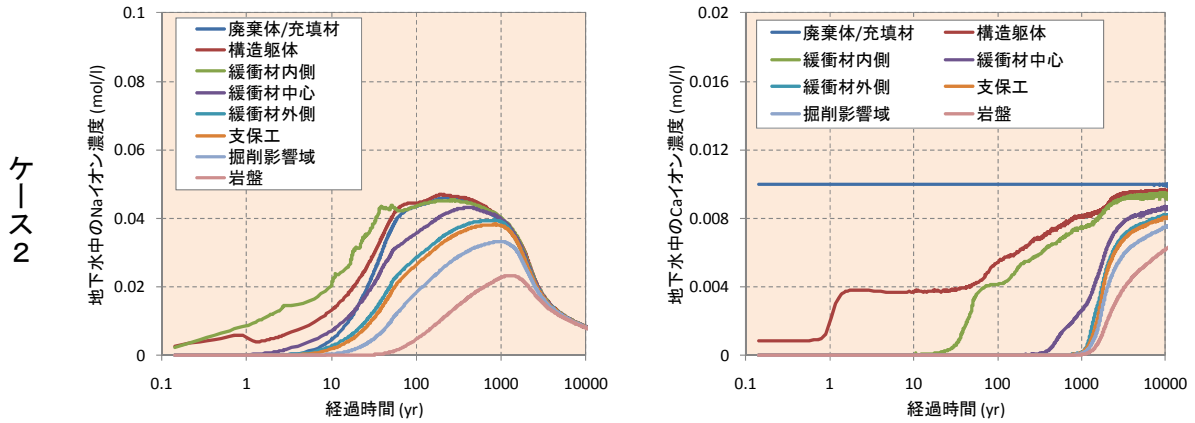


図 1.3-37　解析結果（地下水中の Na イオン濃度、Ca イオン濃度）

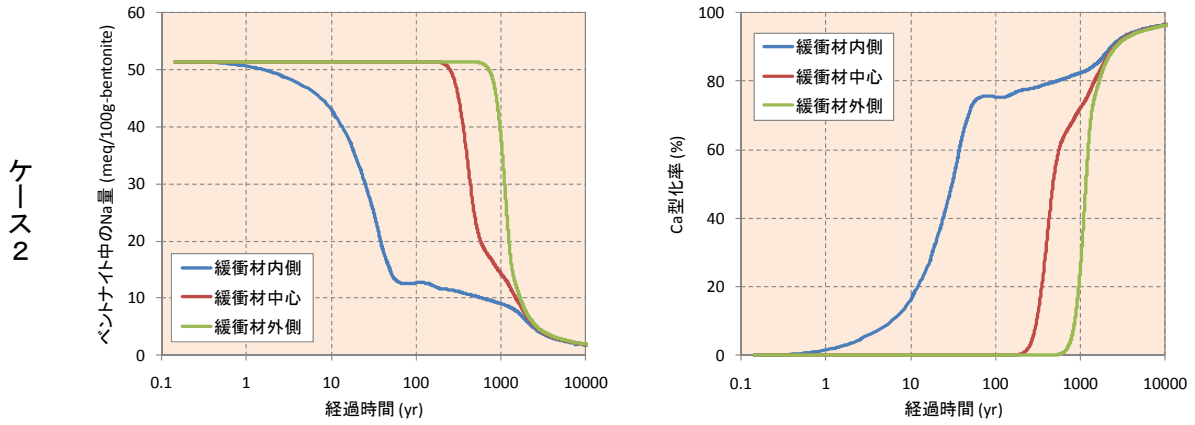


図 1.3-38　解析結果（固相中の Na 吸着量、Ca 型化率）

3) モンテカルロシミュレーションを用いた検討

本検討では考慮する現象（モデル）や使用するデータ（パラメータ）の不確実性を取り入れた解析手法を採用し、評価指標（施設内最大ガス圧、坑道外への押出し水量）に対する不確実性の定量化を試みた。

確率密度関数の設定は、選定した 4 つのデータ（浸透率、間隙率、膨潤圧、初期飽和度）に関して、そのばらつきが正規分布に従うと仮定し、既往研究の成果に基づき、中央値と標準偏差を決定し、確率密度関数として記述した。表 1.3-7 に上記の 4 つのパラメータにおいて設定した中央値と標準偏差を示す。

表 1.3-7　設定した中央値と標準偏差

	平均値	標準偏差
水相浸透率 (m^2)	5.17×10^{-20}	9.43×10^{-21}
間隙率 (-)	0.496	0.05
膨潤圧 (MPa)	0.40	0.06265
初期飽和度 (-)	0.55	0.15

初めに試解析を、第 2 次 TRU レポートより廃棄体グループ 2 の坑道断面形から EBS の中央 1m を地表面から深度 1,000m まで切り出した単純系を対象とした。また岩盤（掘削影響域 EDZ を含む）、支保工、インバート、ベントナイト、鋼製構造躯体、廃棄体により構成される 1 次元モデルにてまた各材料の物性値は第 2 次 TRU レポートに準拠（緩衝材の物性に関しては、ガス注入試験の再現解析で同定されたパラメータを適用）し、各材料の熱パラメータおよび水理パラメータも同様とした。解析コードには、3 次元汎用地圏流体シミュレータ GETFLOWS を用いて T、TH および THM モデルを用いた解析を実施して結果を比較した。

結果として、図 1.3-39 に全てのケースで明らかに坑道外へガスが透気していると考えられる 500 年までの最大ガス圧、及び 500 年時点での累積排水量を抽出し、そのばらつきを正規分布として確率密度関数として示した。95%信頼区間は、THM モデルでは、最大ガス圧が 6.48MPa～6.87MPa、累積排水量は 1.05～2.17Nm^3/m の範囲となり、H モデルと比較して、最大ガス圧が大きくなる傾向を示した。一方、累積排水量は THM モデルの方が TH モデルよりやや小さい値となる傾向が見られた。

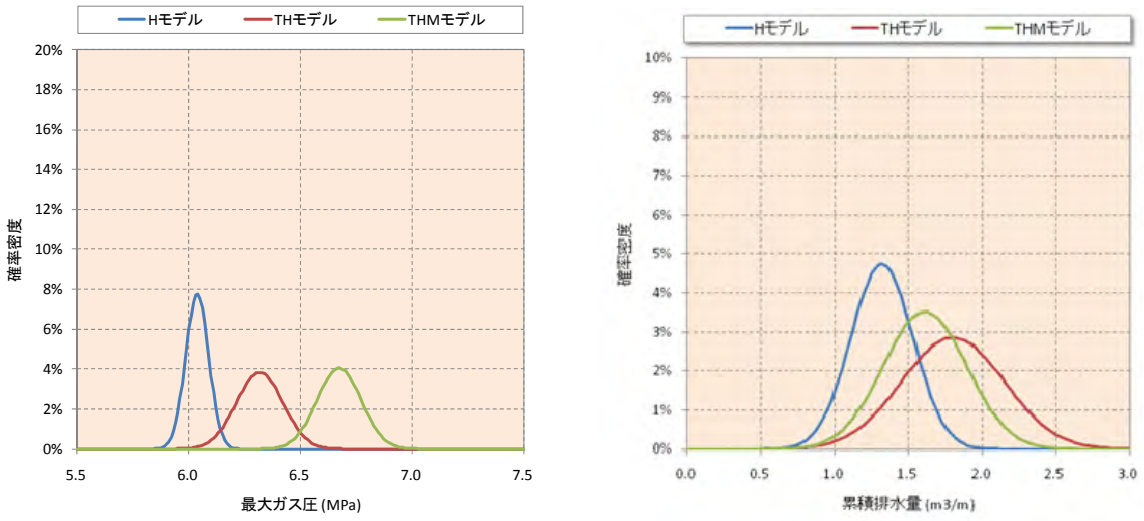


図 1.3-39　各モデルの最大ガス圧（左）、累積排水量（右）の不確実性の幅

次に、試解析における THM モデルを用いたモンテカルロシミュレーションの結果を用いて、2 次元断面モデルによるガス移行解析を実施するためのケース抽出を行い、表 1.3-8 に示すように評価指標に対して危険側、平均、安全側のパラメータの組合せケースを抽出した。

表 1.3-8　抽出したパラメータの組合せ

	浸透率 ($\times 10^{-20}m^2$)	間隙率 (-)	膨潤圧 (MPa)	初期飽和度 (-)	備考
ケース1	4.71	0.503	0.295	0.514	平均
ケース2	4.38	0.523	0.456	0.164	危険側
ケース3	6.05	0.545	0.375	0.723	安全側
	5.17 (2.95～7.87)	0.496 (0.367～0.625)	0.404 (0.229～0.551)	0.550 (0.164～0.936)	平均値 (幅)

2 次元解析モデルは前項同様、第 2 次 TRU レポートの条件設定に基づいた坑道深度断面とし、EDZ を含む岩盤の飽和状態やガス発生量などの諸条件は前項同様とし、熱パラメータや水理パラメータは 1 次元モデルによるモンテカルロシミュレーションで用いた値と同じとした。図 1.3-40 に廃棄体中央部のガス圧変化と、坑道外への累積押出し水量変化に対してケース 1～3（平均／危険側／安全側）を同一グラフ上にて比較したもの示す。結果として、最大ガス圧については各ケース間の差が非常に小さい結果を示し、累積排水量は 1 次元モデルを用いた検討での 3 倍程度を示す結果となった。

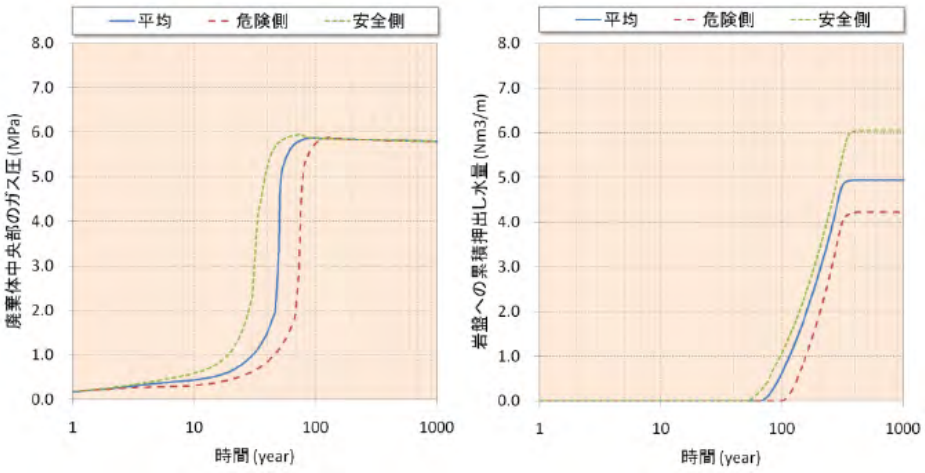


図 1.3-40　2 次元解析により得られた最大ガス圧と累積排水量の不確実性の幅

4）金属腐食による水素ガス発生の考慮

本検討では金属腐食による水素ガス発生を考慮した二相流解析による不確実性評価を実施した。ガス発生が重要となる評価指標（施設内最大ガス圧、押出し水量）に影響を与える時間スケールは 100 年程度と比較的短期スケールであり、またデータの不確実性を考慮した解析においても、ガス発生時の人工バリア内部状態が評価指標に大きく影響するといった結果が得られており、ガス発生プロセス（金属腐食反応による水素ガスの発生、間隙水の消費、鉄の容積減少など）の考慮は重要であるため、金属腐食反応に伴う水素ガスの発生プロセスを考慮した検討を実施した。

本検討では解析コード TOUGHREACT[20]（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、熱・流体流動計算と物質移行計算、地球科学計算で構成）を使用した。本検討では、前項までの検討同様、第 2 次 TRU レポート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）を対象とする一次元モデルを用い、TOUGHREACT の動作確認、金属腐食反応と気液 2 相流動場の連成現象理解、及び、感度解析によって評価指標（施設内最大圧力、坑外への押出し水量）に対する影響が大きい重要パラメータの抽出を行う目的で全 6 ケースを実施した。

図 1.3-41 に、全ケースについてガス発生時に施設内で最も圧力が高くなると考えられる廃棄体中央部の気相圧力および坑外への累積押出し水量を時系列にて比較したグラフを示した。ベントナイトの浸透率増加は気相圧力を 1.5MPa 程度低下させ、間隙率は押出し水量を 27%程度増加させる結果を示し、これまでの知見と同様に評価指標に対して影響が大きい結果となった。これより、金属腐食の反応速度パラメータは、押出し水量に対しての影響は大きくはないが、圧力について施設内部において大幅に上昇させる結果が得られた。

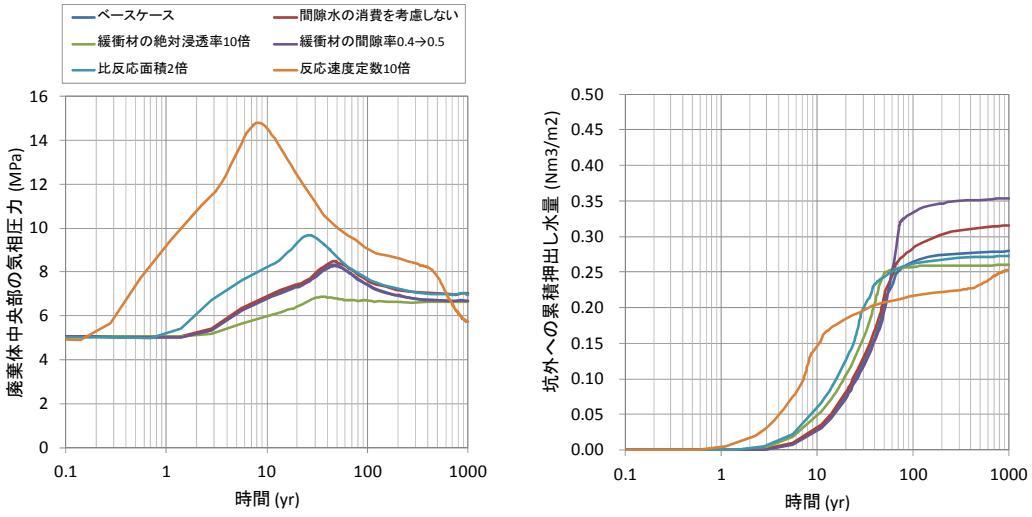


図 1.3-41　廃棄体中央部の気相圧力（左）と坑外への累積押出し水量（右）の比較

次に、同様の条件の 2 次元断面モデルにて金属腐食反応を考慮した THC 解析を 1 次元モデルによる検討のベースケース相当の条件にて実施した。図 1.3-42 は評価点における気相圧力及び坑外への累積押出し水量の時間変化で、約 1 年後までは各評価点の圧力に変動が見られず、これは発生したガスが間隙水中に溶解するためと考えた。また気相が形成され、追って圧力上昇、水飽和度低下が起こり、坑外へとガスが透気していく傾向がみられる。廃棄体中央部の最大気相圧力は約 7.2MPa、坑外への累積押出し水量は単位長さ当たり 2.5Nm^3 となった。

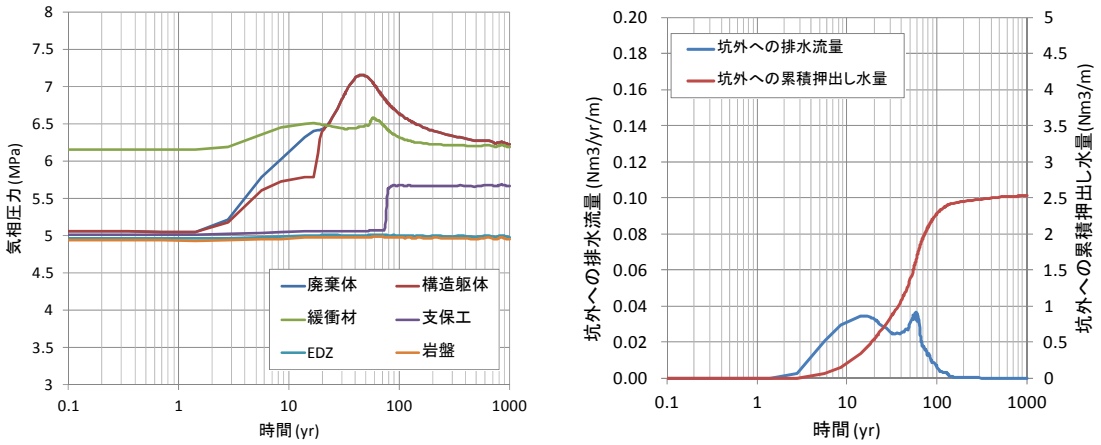


図 1.3-42　評価点における気相圧力（左）および累積押出し水量（右）の時間変化

(3) データライブラリの構築

本検討においては、まず初めにガス移行挙動評価の解析環境における問題抽出を行い、ガス移行挙動評価研究の進展とともに、品質が保証された構成モデル、パラメータを柔軟に取り込むことができる仕組みと手続きの導入が必要であるとの観点に基づいて、ガス移行データライブラリを構築した。具体的には、先ずデータライブラリのプロトタイプ（データライブラリ、及びデータライブラリにアクセスするためのインターフェースの設計）の作成を手始めに、データライブ

ラリ本体に登録されているパラメータ・構成モデルの閲覧及び登録の支援を目的として、ウィザード形式でデータの閲覧、登録（修正・削除）ができるデータ格納サポートシステムの設計、製作へ展開し、得られた基礎データ、構成モデル及びパラメータの蓄積、更新が容易に行えるように拡張した。このもとで、以下に示す機能の追加を実施した。

- 力学基本特性に関する構成モデル関連パラメータの新規登録
- 不確実性を有するデータのばらつき及びその組合せを考慮したパラメータ生成機能
- 登録されている構成モデル内部の評価諸量の出力

図 1.3-43 はデータライブラリの基本構成を示す。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。図 1.3-44 にデータライブラリを用いた実行処理の流れを示した。

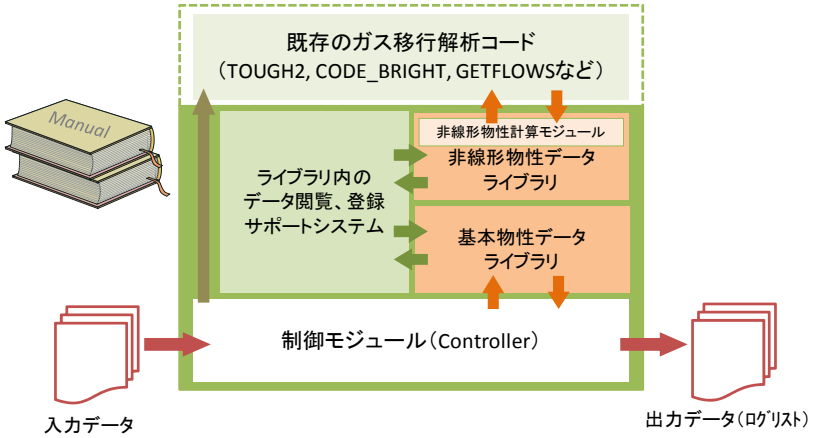


図 1.3-43　データライブラリの基本構成

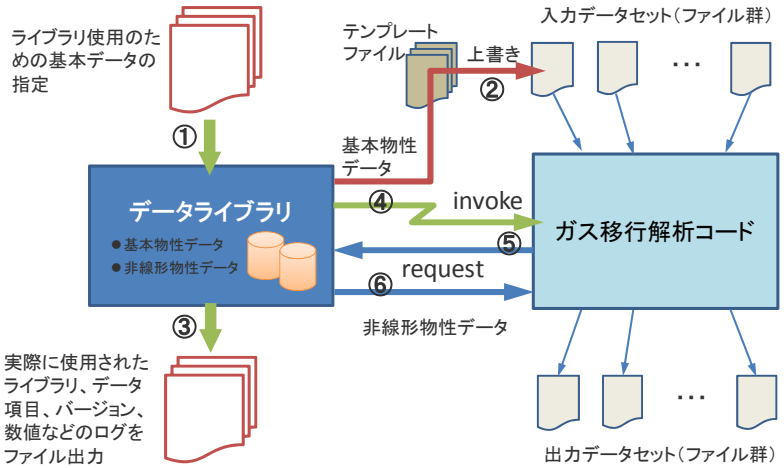


図 1.3-44　データライブラリを用いた実行処理の流れ

本項目における成果について総括すると、当初段階においては国内外での解析およびモデル化のための環境は必ずしも十分ではない状況にあったが、本検討においてベントナイトの膨潤収縮やガスと力学の連成を考慮した解析・モデル化手法の検討を進めた結果、データライブラリの構築を含めた手法の高度化がなされた。

1.3.4　ガス移行挙動評価手法の構築

ガス移行挙動評価手法の構築に係る検討（以下、本検討と称す）は、「第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ（以下、第 2 次 TRU レポートと称す）[1]」において示されている処分概念を対象に、ガス移行に関する材料特性やモデル化・解析手法に関する検討を通じて得られたデータや知見を踏まえ、ガス移行挙動評価手法を構築し、人工バリアの長期安定性の評価や性能評価におけるガス移行評価の信頼性向上を目指すものである。

ガス移行挙動評価手法の構築を進めるにあたっては、平成 19 年度に全体研究計画の策定を行うと共に、TRU 廃棄物処分や余裕深度処分のシナリオ開発の流れを整理・把握した上で進めた。これらのガスの発生・移行の影響に関する記述として、TRU 廃棄物処分では第 2 次 TRU レポートにおいて、処分システムの性能やそれに関連する特質（Features）・事象（Event）・プロセス（Process）（ 以下、FEP と称す）への記述、シナリオの構築、核種移行評価などが実施されている。ここでは、ある保守的と考えられる条件を想定した検討が行われているが、ガス単独の影響だけでなく、ガスによる人工バリアへの影響など包括的な検討についても今後の課題とされた。一方、余裕深度処分では「余裕深度処分の管理期間終了以降における安全評価に関する考え方（平成 22 年 4 月 1 日原子力安全委員会了承）[21]」において、ガス移行シナリオの安全評価上の取り扱いに関する考え方が記載されていた。

本検討では、ガス影響を考慮した核種移行挙動を包括的に検討していくため、これらの既往研究におけるシナリオ開発フローをもとに、図 1.3-45 に示す新たな検討フローを整理した上で、作業を進めた。従来の検討フローとの違いとしては、TRU の人工バリアシステムおよびその周辺岩盤の時系列的な状態変化を把握するために時系列状態変化表を作成し、それに基づき、ガス挙動に係わる FEP を抽出・統合した上で、状態変遷に伴う統合 FEP の関連図を作成し、FEP からシナリオ構築までの流れに追跡性を加味した点である。また、ガス挙動評価における現状の不確実性について分析を行い整理することで、根拠資料を通じて各要因の不確実性が何に起因しているのかも明示できている。これらの結果を踏まえ、ガス挙動と放射性核種移行を同時に記述するシナリオ整理シートを作成し、それぞれのシナリオに対応する評価ケースの設定までの流れも新たに構築した。

また、本検討を進める過程において、国内外の機関･各種プロジェクトにおける研究報告を対象として、ガス発生･移行挙動に関する考え方や性能評価における取扱いなどについて調査･整理を行い、その結果はシナリオ構築の基礎資料とした時系列状態変化表やその根拠資料などにとりまとめた。

調査対象とした機関･プロジェクトを以下にまとめる。

- SKB（スウェーデン核燃料･廃棄物管理会社）
- NAGRA（放射性廃棄物管理共同組合／スイス）
- ANDRA（放射性廃棄物管理機関／フランス）
- ONDRAF/NIRAS（ベルギー放射性廃棄物･濃縮核分裂性物質管理機関）
- SCK･CEN（ベルギー原子力研究センター）
- Posiva（ポシヴァ社／フィンランド）

・ガス挙動に関わる国際会議（FORGE など）
・低レベル放射性廃棄物（TRU 処分、余裕深度処分）
・高レベル放射性廃棄物（HLW）　など

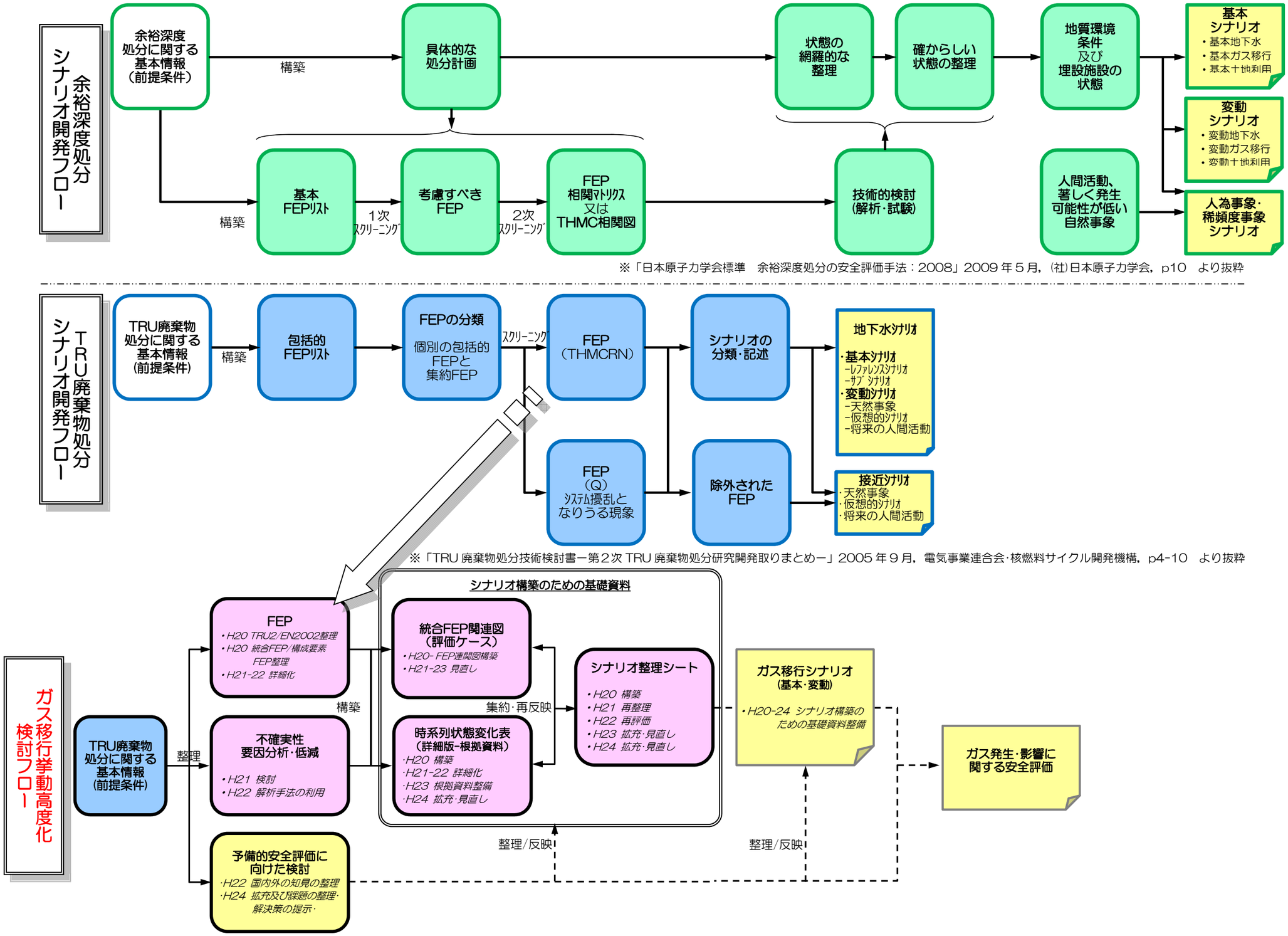


図 1.3-45　ガス移行挙動高度化検討フローと既存の処分シナリオ開発フロー

(1) ガス移行挙動評価手法に関する検討

1) 処分システムの変遷を考慮したシナリオの検討

初年度（平成 19 年度）は地層処分の対象となる TRU 廃棄物と余裕深度処分および HLW 地層処分の特徴を相互比較し、TRU 廃棄物地層処分におけるガス発生･移行に関する影響を体系的に整理すると共に、廃棄体の放射能レベルが比較的高く、人工バリアシステムが複雑である廃棄体グループ 2 を対象として、TRU 廃棄物処分施設における経時的変化とガス発生移行の相互影響に関して図表化したシナリオシートを作成した。このシートにおいては人工バリアの時間的変遷に伴うガス発生･移行現象と人工バリアシステム各部位の変遷状況および温度(T)-水理(H)-力学(M)-化学(C)-放射線分解(R)の連成挙動について、この時点での知見をもとに記述し、ガス移行挙動評価全般における現状と課題を俯瞰的に提示したが、記述の信頼性や精度の程度が異なる、あるいは記述の背景となる知見やデータ、評価手法などが示されていない、などの課題が存在していた。なお、上述のように廃棄体グループ 2 を対象とすることで、その他の 3 つのグループのガス挙動についても説明できると判断されたため、以降の検討ではこれを対象に進めた。

2) TRU 廃棄物処分施設の長期変遷過程を踏まえたガス発生・移行シナリオの整備

平成 19 年度の成果およびこれより得られた課題を踏まえ、平成 20 年度からガス発生・移行に関するシナリオ検討を開始した。

シナリオ検討では、前提条件や諸情報を整理した上で、地下処分施設の長期変遷過程に焦点をあて、処分施設の構成部材ごとに時間経過に伴って発生する事象を網羅的に記述した「時系列状態変化表（表 1.3-9 参照)」を構築した。ここでは国内外の検討事例を参照し、人工バリアだけでなく天然バリアの状況をも考慮した全体システムとして取りまとめている。また、ガスの影響に係わる FEP 群を人工バリアシステムを構成する部材ごとにまとめた統合 FEP を用いて、ガス発生･核種溶出の出発点となる廃棄体から掘削影響領域（EDZ）へ到達するまでの移行経路を整理した「統合 FEP 関連図（図 1.3-48 参照)」、並びに各人工バリアに期待する安全機能を明確にするために第 2 次 TRU レポートに記述された長期安全確保の考え方を人工バリアの状態遷移に基づき時系列的に整理した「安全機能整理シート（図 1.3-47)」を構築した。そして、これらを「シナリオ整理シート（図 1.3-49)」として集約した。

以下に各検討課程における概略および成果をまとめる。

a. シナリオ構築にあたっての前提条件・諸情報の調査・整理

時系列状態変化表、統合 FEP およびシナリオ整理シートの検討･構築にあたっては、第 2 次 TRU レポートや海外の知見などにおける条件や考え方などを基に、以下の項目について再整理した。

・TRU 処分概念とレイアウト･人工バリアシステム（EBS）概念

・廃棄体の種類と容器：

グループ 1～4 および廃棄体、廃棄体パッケージの区分

・人工バリアシステム（EBS）構成部位の設定

廃棄体、廃棄体パッケージ／充填材、構造躯体、ベントナイト緩衝材、処分空洞埋戻し材、処分空洞コンクリート支保工＋ロックボルト･吹付、掘削影響領域

・ガスの発生･移行に関わる事項

発生源と発生場所、ガスの発生メカニズム（発生するガスの種類と核種、ガス発生速度）、ガスおよび核種の移行メカニズム

・TRU 廃棄物処分システムにおける考慮事項と時間変遷に関する考察

b. 温度･水理・力学・化学・放射線・微生物の影響およびガスと核種の挙動

ガス移行挙動評価のためのシナリオ検討にあたっては、人工バリアシステム全体とその長期に亘る状態変遷を俯瞰的に把握することが重要と考え、HLW のストーリボードの考え方（若杉他, 原子力学会秋の大会, 2008 [22]）を用いて、TRU 人工バリアシステムを対象に、ガス発生／移行挙動に影響を及ぼすと考えられる温度(T)-水理(H)-力学(M)-化学(C)-放射線(R)-微生物(B)の各影響と、これに関連したガス発生／移行(G)および核種の移行(RN)について分析を行い、その結果を時系列状態変化表に取りまとめた。時系列状態変化表における評価対象とした期間および分析対象とした事象を以下に列記した、なお、同表では②の時間枠をより詳細に区分して記述し、人工バリアシステムの部材構成は前述した前提条件に基づき作成した。

【評価期間】

① 埋戻し～閉鎖

② 飽和～廃棄体容器が健全な期間（地下水の浸入に伴う再冠水が終了）

③ 容器損傷、廃棄体飽和

④ ベントナイト機能喪失まで（ベントナイトが機能を維持する期間）

⑤ ベントナイト機能喪失後（ベントナイトが変質し、人工バリアシステム全体が移流場に移行する期間）

【記述項目】

T　：熱影響に関する記述　⇒ガス移行挙動に影響

H　：水理学的影響に関する記述　⇒ガス発生量や移行速度に影響

M　：力学的影響に関する記述　⇒ガスの移行速度・経路に影響

C　：化学的影響に関する記述　⇒ガス発生速度に影響

R　：放射線影響に関する記述　⇒ガス発生量（放射線分解）に影響

B　：微生物影響に関する記述　⇒ガス発生量に影響を及ぼす

G　：ガスの発生／移行に関する記述

RN　：核種の移行に関する記述

上記の評価期間ごとに、ストーリボードの考え方に基づく T-H-M-C-R-B および G･RN の分析を行った。

c. 時系列状態変化表の構築

前述した HLW 処分安全評価シナリオ設定のために開発されたストーリボードの考え方[22]

に基づく検討結果をもとに、前年に作成したシナリオシートを改訂し、TRU 廃棄物処分施設における長期変遷を網羅的に提示する時系列状態変化表として整備した。なお、同表には網羅性・十分性の観点から、第 2 次 TRU レポートに示された FEP リストからガス発生･移行に関連した FEP について抽出･整理し、その結果も併せて反映した。第 2 次 TRU レポートにおける FEP リストのうち、ガス関連の FEP は 12 個で、その表現は“ガス発生と影響”、“ガス影響による核種移行”など、極めて簡略化された統合 FEP（スーパーFEP）となっており、具体的な特質・事象・プロセスは読み取れず、FEP 辞書にもこれらがどのように作成されてきたのか記載されていないのが現状であった。そのため、時系列状態変化表構築にあたっては、前述したストーリボードの考えた方を基に、ガス影響に関連する FEP を整理･設定しつつとりまとめた。

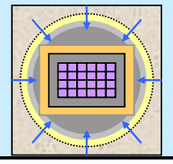
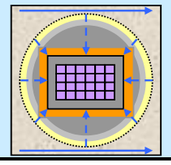
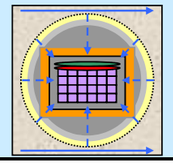
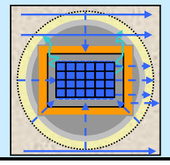
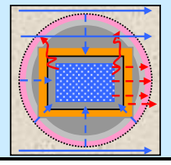
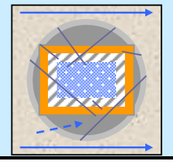
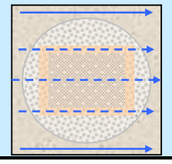
平成 21 年度以降は、構築した時系列状態変化表について、a.～b.に示すような手法を用いて、不確実性の低減を図ると共に、適宜最新の知見を拡充しつつ、現実的なシナリオ構築に向け再評価･見直しを実施した。構築した時系列状態変化表を表 1.3-9 に示す。

(a) 時系列状態変化表が有する不確実性の低減

地層処分の安全評価に寄与するには、根拠や論拠に基づく確からしいと考えられる処分システムの状態を設定することが重要となる。平成 21 年度には、これを踏まえて、既往文献よりガスの発生・移行に関わる不確実性の要因を抽出･整理し、その結果を時系列状態変化表に反映することで、同表が有する不確実性の低減策の検討を実施した。検討は、①人工バリアでのガス発生（量／速度）・移行の要因分析、②発生･移行するガスが及ぼす人工バリアへの影響の要因分析、の順で進めた。

検討対象とした要因は、網羅性を重視しつつ、不確実性を有するもの全てを対象としているが、現状では具体化できない処理方法や処理施設の設計に依存するインベントリなどについては、第 2 次 TRU レポートに記載された内容を基に対応した。また、ガス発生･移行に直接関連する核種発生源、放射線分解ガス発生源、境界条件･環境条件、ガス生成モデル、ガス移行モデルの各条件が人工バリアおよび EDZ 及ぼす影響に関する不確実性についても、同様に要因分析の手法を用いて検討した。

表 1.3-9　時系列状態変化表【廃棄体ｸﾞﾙｰﾌﾟ 2:堆積岩、処分深度 500m、淡水、還元状態】

	埋戻し～閉鎖	～緩衝材飽和	～充填材飽和	廃棄体容器が健全な期間	容器損傷、廃棄体飽和～	ベントナイト機能喪失まで	ベントナイト機能喪失後
EBS の状態変遷と 核種移行のプロセスイメージ							
廃棄体 （廃棄物+ﾄﾞﾗﾑ缶、ｽﾃﾝﾚｽ容器）	T :廃棄体の発熱による温度上昇 H :地下水からの隔離 M :初期設計応力状態 C :初期特性 R :廃棄物初期含水分の放射線分解 B : ―	T :廃棄体の発熱による温度上昇後低下 H :不飽和 M :初期設計応力状態 C :初期特性 R :廃棄物初期含水分の放射線分解 B : ―	T :温度の低下 H :不飽和 M :充填材の変形によるひずみ生起 C :初期特性 R :廃棄物初期含水分の放射線分解 B : ―	T :温度の緩やかな低下 H :不飽和 M :充填材の変形によるひずみ生起 C :初期特性 R :廃棄物初期含水分の放射線分解 B : ―	T :周辺岩盤温度 H :拡散場 M :充填材の変形による容器の破損 C :低 Eh･高 pH／核種溶出 R :間隙水の放射線分解 B : ―	T :周辺岩盤温度 H :拡散場 M :腐食膨張、ガス圧上昇 C :低 Eh･高 pH／核種溶出 R :間隙水の放射線分解 B : ―	T :周辺岩盤温度 H :移流場 M :周辺応力との調和 C :低 Eh･高 pH／― R : ― B : ―
	G <発生>放射線分解 　<移行> ― RN :廃棄体内	G <発生>放射線分解 　<移行> ― RN :廃棄体内	G <発生>放射線分解 　<移行> ― RN :廃棄体内	G <発生>放射線分解 　<移行> ― RN :廃棄体内	G <発生>腐食･有機反応 　<移行>溶存、二相流 RN :拡散、破過時移流	G <発生>腐食･有機反応 　<移行>溶存、二相流 RN :拡散、破過時移流	G <発生>― 　<移行>溶存、二相流 RN :移流
廃棄体パッケージ／充填材 （容器表面は鋼板）	T :充填材の発熱による温度上昇 H :地下水からの隔離 M :初期設置応力状態 C :初期特性 R :間隙水の放射線分解 B : ―	T :充填材の発熱による温度上昇後低下 H :不飽和 M :初期設置応力状態 C :初期特性 R :間隙水の放射線分解 B : ―	T :温度の低下 H :拡散場 M :構造躯体の変形によるひずみ生起 C :高 Eh･強ｱﾙｶﾘ pH／可溶性成分溶脱 R : ― B : ―	T :温度の緩やかな低下 H :拡散場 M :構造躯体の変形によるひずみ進展 C :高 Eh･高 pH／消石灰溶脱 R : ― B : ―	T :周辺岩盤温度 H :拡散場 M :構造躯体の変形によるひずみ進展 C :高 Eh･高 pH／消石灰溶脱 R : ― B : ―	T :周辺岩盤温度 H :拡散場 M :構造躯体の変形によるひずみ進展 C :低 Eh･高 pH／消石灰溶脱 R : ― B : ―	T :周辺岩盤温度 H :移流場 M : ― C :低 Eh･高 pH／CSH 溶脱 R : ― B : ―
	G <発生>放射線分解 　<移行>連続した気みち RN : ―	G <発生>放射線分解 　<移行>連続した気みち RN : ―	G <発生>放射線分解 　<移行>溶存、二相流、破過 RN : ―	G <発生>腐食反応 　<移行>溶存、二相流、破過 RN : ―	G <発生>腐食反応 　<移行>溶存、二相流、破過 RN :拡散、破過時移流	G <発生>腐食反応 　<移行>溶存、二相流、破過 RN :拡散、破過時移流	G <発生>― 　<移行>溶存、二相流 RN :移流
構造躯体 （鉄筋コンクリート）	T :構造躯体の発熱による温度上昇 H :地下水からの隔離 M :初期設置応力状態 C :初期特性 R :間隙水の放射線分解 B : ―	T :構造躯体の発熱による温度上昇後低下 H :不飽和 M :緩衝材膨潤応力によるひずみ生起 C :初期特性 R :間隙水の放射線分解 B : ―	T :温度の低下 H :拡散場 M :緩衝材膨潤応力によるひずみ進展 C :高 Eh･強ｱﾙｶﾘ pH／可溶性成分溶脱 R : ― B : ―	T :温度の緩やかな低下 H :拡散場 M :緩衝材膨潤応力によるひずみ進展 C :高 Eh･高 pH／消石灰溶脱 R : ― B : ―	T :周辺岩盤温度 H :拡散場 M :緩衝材膨潤応力によるひずみ進展 C :高 Eh･高 pH／消石灰溶脱 R : ― B : ―	T :周辺岩盤温度 H :拡散場 M :緩衝材膨潤応力によるひずみ進展 C :低 Eh･高 pH／消石灰溶脱 R : ― B : ―	T :周辺岩盤温度 H :移流場 M : ― C :低 Eh･高 pH／CSH 溶脱 R : ― B : ―
	G <発生>放射線分解 　<移行>連続した気みち RN : ―	G <発生>放射線分解 　<移行>連続した気みち RN : ―	G <発生>腐食反応、放射線分解 　<移行>溶存、二相流、破過 RN : ―	G <発生>腐食反応 　<移行>溶存、二相流、破過 RN : ―	G <発生>腐食反応 　<移行>溶存、二相流、破過 RN :拡散、破過時移流	G <発生>腐食反応 　<移行>溶存、二相流、破過 RN :拡散、破過時移流	G <発生> ― 　<移行>溶存、二相流 RN :移流
ベントナイト緩衝材 （配合率 ....70wt%：30wt% 密度 .....1.6Mg/m^3）	T :構造躯体の熱の流入による温度上昇 H :地下水からの隔離 M :初期設置応力状態 C :初期特性 R :間隙水の放射線分解 B : ―	T :構造躯体の熱の流入による温度上昇と維持 H :拡散場 M :地下水接触による膨潤応力発生 C :低 Eh･弱ｱﾙｶﾘ pH／可溶性成分溶脱 R :間隙水の放射線分解 B : ―	T :温度の緩やかな低下 H :拡散場 M :内外圧の作用による変形 C :低 Eh･弱ｱﾙｶﾘ pH／可溶性成分溶脱 R : ― B : ―	T :温度の緩やかな低下 H :拡散場 M :内外圧の作用による変形 C :低 Eh･弱ｱﾙｶﾘ pH／可溶性成分溶脱 R : ― B : ―	T :周辺岩盤温度 H :拡散場 M :内外圧の作用による変形 C :低 Eh･弱ｱﾙｶﾘ pH／可溶性成分溶脱 R : ― B : ―	T :周辺岩盤温度 H :拡散場 M :膨潤性低下、変質部の特性変化 C :低 Eh･弱ｱﾙｶﾘ pH／Ca 型･ｱﾙｶﾘ変質 R : ― B :嫌気性微生物の考慮	T :周辺岩盤温度 H :移流場 M :変質部拡大に伴う膨潤性喪失 C :低 Eh･高 pH／流出･膨潤性能喪失 R : ― B :嫌気性微生物の考慮
	G <発生>放射線分解 　<移行>連続した気みち RN : ―	G <発生>放射線分解 　<移行>溶存、二相流、破過 RN : ―	G <発生> ― 　<移行>溶存、二相流、破過 RN : ―	G <発生> ― 　<移行>溶存、二相流、破過 RN : ―	G <発生> ― 　<移行>溶存、二相流、破過 RN :拡散、破過時移流	G <発生>微生物反応 　<移行>溶存、二相流、破過 RN :拡散、破過時移流	G <発生>微生物反応 　<移行>溶存、二相流 RN :移流
処分空洞埋戻し材 （ベントナイト混合材料を想定）	T :緩衝材の熱の流入による温度上昇 H :地下水からの隔離 M :初期設置応力状態 C :初期特性 R : ― B : ―	T :緩衝材の熱の流入による温度上昇と維持 H :移流場 M :内外圧の作用による変形 C :低Eh･弱ｱﾙｶﾘ pH／可溶性成分溶脱･Ca 型 R : ― B :嫌気性微生物の考慮	T :温度の緩やかな低下 H :移流場 M :内外圧の作用による変形 C :低Eh･弱ｱﾙｶﾘ pH／可溶性成分溶脱･Ca 型 R : ― B :嫌気性微生物の考慮	T :温度の緩やかな低下 H :移流場 M :内外圧の作用による変形 C :低Eh･弱ｱﾙｶﾘ pH／可溶性成分溶脱･Ca 型 R : ― B :嫌気性微生物の考慮	T :周辺岩盤温度 H :移流場 M :内外圧の作用による変形 C :低 Eh･弱ｱﾙｶﾘ pH／Ca 型･ｱﾙｶﾘ変質 R : ― B :嫌気性微生物の考慮	T :周辺岩盤温度 H :移流場 M :膨潤性喪失、周辺応力 C :低 Eh･高 pH／流出･膨潤性能喪失 R : ― B :嫌気性微生物の考慮	T :周辺岩盤温度 H :移流場 M :膨潤性喪失、周辺応力 C :低 Eh･高 pH／流出･膨潤性能喪失 R : ― B :嫌気性微生物の考慮
	G <発生> ― 　<移行>連続した気みち RN : ―	G <発生>微生物反応 　<移行>溶存、二相流 RN : ―	G <発生>微生物反応 　<移行>溶存、二相流 RN : ―	G <発生>微生物反応 　<移行>溶存、二相流 RN : ―	G <発生>微生物反応 　<移行>溶存、二相流 RN :移流･分散	G <発生>微生物反応 　<移行>溶存、二相流 RN :移流	G <発生>微生物反応 　<移行>溶存、二相流 RN :移流
処分空洞コンクリート支保工 ＋ロックボルト、吹付	T :換気による除熱～温度上昇 H :不飽和移流場 M :初期設置応力状態 C :高 Eh･強ｱﾙｶﾘ pH／可溶性成分溶脱 R : ― B : ―	T :温度の上昇と維持 H :移流場 M :内外圧の作用によるひずみ生起 C :低 Eh･高 pH／消石灰溶脱 R : ― B : ―	T :温度の緩やかな低下 H :移流場 M :内外圧の作用によるひずみ進展 C :低 Eh･高 pH／CSH 溶脱 R : ― B : ―	T :温度の緩やかな低下 H :移流場 M :内外圧の作用によるひずみ進展 C :低 Eh･高 pH／CSH 溶脱 R : ― B : ―	T :周辺岩盤温度 H :移流場 M :内外圧の作用によるひずみ進展 C :低 Eh･高 pH／CSH 溶脱 R : ― B : ―	T :周辺岩盤温度 H :移流場 M :強度特性喪失、周辺応力場 C :低 Eh･高 pH／CSH 溶脱･腐食 R : ― B : ―	T :周辺岩盤温度 H :移流場 M :強度特性喪失、周辺応力場 C :低 Eh･中性～高pH／骨材のみ R : ― B :嫌気性微生物の考慮
	G <発生> ― 　<移行>連続した気みち RN : ―	G <発生>腐食反応 　<移行>溶存、二相流 RN : ―	G <発生>腐食反応 　<移行>溶存、二相流 RN : ―	G <発生>腐食反応 　<移行>溶存、二相流 RN : ―	G <発生>腐食反応 　<移行>溶存、二相流 RN :移流･分散	G <発生>腐食反応 　<移行>溶存、二相流 RN :移流	G <発生>微生物反応 　<移行>溶存、二相流 RN :移流
掘削影響領域 （EDZ）	T :換気による除熱～温度上昇 H :不飽和移流場 M :応力の復帰 C :高 Eh･強ｱﾙｶﾘ pH／酸化･ｱﾙｶﾘ変質 R : ― B :好気性微生物の考慮	T :温度の上昇と維持 H :移流場 M :応力の復帰 C :低 Eh･高 pH／二次鉱物生成 R : ― B :嫌気性微生物の考慮	T :温度の緩やかな低下 H :移流場 M :応力の復帰 C :低 Eh･高 pH／二次鉱物生成 R : ― B :嫌気性微生物の考慮	T :温度の緩やかな低下 H :移流場 M :応力の復帰 C :低 Eh･高 pH／二次鉱物生成 R : ― B :嫌気性微生物の考慮	T :周辺岩盤温度 H :移流場 M :応力の復帰 C :低 Eh･高 pH／二次鉱物生成 R : ― B :嫌気性微生物の考慮	T :周辺岩盤温度 H :移流場 M :周辺岩盤応力 C :低 Eh･高 pH／― R : ― B :嫌気性微生物の考慮	T :周辺岩盤温度 H :移流場 M :周辺岩盤応力 C :低 Eh･中性～高 pH／― R : ― B :嫌気性微生物の考慮
	G <発生>微生物反応 　<移行>連続した気みち RN : ―	G <発生>微生物反応 　<移行>溶存、二相流 RN ―	G <発生>微生物反応 　<移行>溶存、二相流 RN : ―	G <発生>微生物反応 　<移行>溶存、二相流 RN : ―	G <発生>微生物反応 　<移行>溶存、二相流 RN :移流･分散	G <発生>微生物反応 　<移行>溶存、二相流 RN :移流	G <発生>微生物反応 　<移行>溶存、二相流 RN :移流

これらの要因分析結果から、不確実性に関わる事項を抽出･整理し、モデルやパラメータの設定に際して必要となる情報について、不確実性の重要性とその取扱いを根拠となる情報と共に取り纏めた。

(b) 時系列状態変化表詳細版の作成

時系列状態変化表で示した各事象について、今後解析などにより不確実性低減を図る際に用いる情報として、①人工バリアの状態、②ガス移行シナリオ、③不確実性、④人工バリアの解析条件、の 4 つの観点から再整理し、時間枠毎に事象を具体化した時系列状態変化表詳細版を取り纏めた。

(c) 時系列状態変化表根拠資料の作成

時系列状態変化表および詳細版にて提示した考え方や情報については、その網羅性・説明性の観点からみると、シナリオ整理シートの基礎資料として利用していくには、根拠が十分に整備されていないという課題を残していた。この課題を解消して、シナリオ構築のための基礎資料としての信頼性･有用性を高めるために、時系列状態変化表にて提示した各事象について、設定にあたっての考え方や根拠情報を取りまとめた“時系列状態変化表－根拠資料”を作成した。

根拠資料のフォーマットおよび記載すべき内容は、時系列状態変化表にて設定した各事象の理解促進を主眼において整理し、共通事項（時系列状態変化表に記した内容）、状態設定に用いた資料・追加条件（文献名）、概略（根拠資料･追加条件の概略）、詳細（根拠資料の解説および判断根拠の詳細）、総括（状態設定に至る根拠や考え方の総括）、備考（不確実性やその他関連する知見など）の 6 項目と、添付資料として補足資料や各種図版で構成することとした。

根拠資料の全体構成を図 1.3-46 に示す。

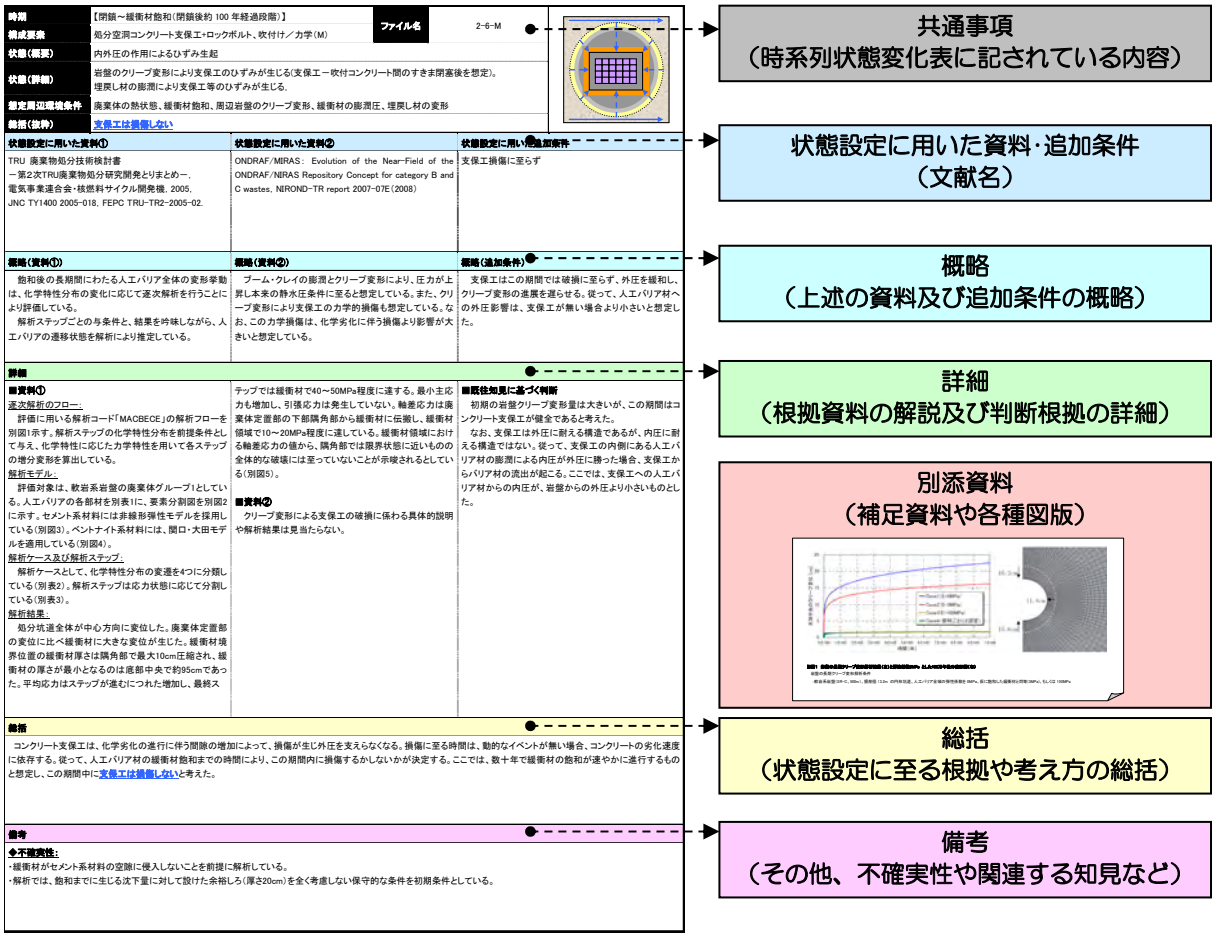


図 1.3-46　根拠資料の全体構成

d. 人工バリアシステムの構成要素に期待する安全機能の展開

シナリオ整理シートへの集約するにあたり、人工バリアの安全機能に着目し、その時系列的な変遷を整理するため、類似のシステム概念を有する余裕深度処分での評価期間の設定に着目した。ここでは、人工バリアと天然バリアの放射性核種の閉じ込め機能を考慮し、以下に示した分類がなされている[21]。

①過渡的な期間；

埋設施設および周辺地質環境の状態変化が安定的な状態で移行する期間

②多重バリア機能に期待する期間；

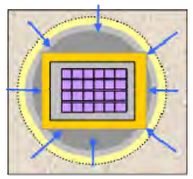
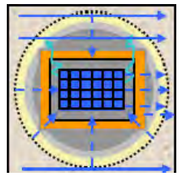
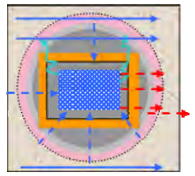
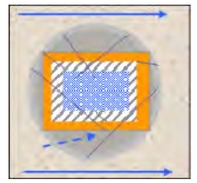
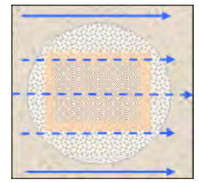
長期的に安定な地質環境のもと、埋設施設の状態変化が緩慢に変遷していく期間

③主に天然バリア機能に期待する期間；

埋設施設の状態変遷において、排除･低減することが困難な内的･外的要因による影響が顕在化する期間

安全機能の整理にあたっては、上述の分類を参照しつつ、第 2 次 TRU レポートに記述された長期安全確保の考え方、および人工バリアの状態遷移に基づき時系列的状態変化表で用いた時間軸で記述した。

取りまとめた安全機能整理シートを図 1.3-47 に示す。

評価の期間		埋戻～閉鎖	廃棄体容器が健全な期間	廃棄体容器の損傷・廃棄体飽和	ベントナイト緩衝材機能損失まで	ベントナイト緩衝材機能損失後
EBS の状態変遷とガス･核種移行のプロセスイメージ						
安全機能に着目した状態変遷プロセス		廃棄体定置完了後、坑道が埋戻され、施設が閉鎖される。坑道周辺の環境は回復に向かい、廃棄体からの熱が周囲へ伝播する。周囲から還元地下水が坑道内へ浸入を開始すると共に、緩衝材周辺部より還元水による飽和プロセスが開始する。	廃棄体からの発熱が減衰する。緩衝材飽和後、地下水と廃棄体パーケージの接触による腐食が開始し、これらに伴うガスが発生すると共に緩衝材中に蓄圧する。支保材の劣化に伴い高pH水とベントナイトとの反応が開始する。	腐食と外力により廃棄体容器に損傷が生じる。充填材・構造躯体の劣化による部材の力学的耐力の低下、廃棄体からのガスの継続的な発生、EDZ外への核種（ガス状・非ガス状）の放出が生じる。	高pHの影響等によりベントナイトの変質・劣化が進展する。セメント材による化学的な核種閉じ込め機能と、緩衝材の閉じ込め機能は維持される。	緩衝材が劣化し、密度低下あるいはモンモリロナイトの変質により核種の閉じ込め機能を喪失する。ニアフィールドの場は化学的な閉じ込め機能は残るものの物質移行の場としては移流場となる。
廃棄体	T:温度	（熱耐久性）				
	H:水理					
	M:力学					
	C:化学	（化学的緩衝性:化学変質への抵抗）				
	B:微生物					
	G:ガス					
	R:核種	（物理的閉じ込め性）				
廃棄体パッケージ／充填材	T:温度	（熱耐久性）				
	H:水理	（水密性）				
	M:力学	（外力への耐久性）				
	C:化学	（鉄の腐食等による還元性）				
	B:微生物					
	G:ガス					
	R:核種	（物理的閉じ込め性）		（化学的閉じ込め性:収着性）		
構造躯体（鉄筋コンクリート）	T:温度	（熱耐久性）				
	H:水理					
	M:力学	（外力への耐久性）				
	C:化学	（化学的緩衝性）				
	B:微生物					
	G:ガス	（透気性）				
	R:核種	（収着性）				
ベントナイト緩衝材	T:温度	（熱耐久性）				
	H:水理	（低透水性、コロイドフィルター性）				
	M:力学	（応力緩衝性）				
	C:化学	（化学的緩衝性）				
	B:微生物	（微生物活動緩衝性）				
	G:ガス	（透気性・破過後の自己修復性）				
	R:核種	(収着性)				
埋戻材	T:温度	（熱耐久性）				
	H:水理	（低透水性）				
	M:力学	（外力への耐久性・変形追随性）				
	C:化学	（化学的緩衝性）				
	B:微生物					
	G:ガス	（透気性）				
	R:核種	（収着性）				
支保材	T:温度	（熱耐久性）				
	H:水理					
	M:力学	（外力への抵抗性）	（応力緩衝性）			
	C:化学					
	B:微生物					
	G:ガス	（透気性）				
	R:核種					
EDZ	T:温度	（安定した温度）				
	H:水理	（安定した水量）				
	M:力学	（安定した応力場）				
	C:化学	（還元環境）				
	B:微生物					
	G:ガス	（透気性）				
	R:核種	（核種収着性）				

安全評価で用いられる機能　　EBS の各要素が本来有する機能

図 1.3-47　安全機能整理シート

3) 統合 FEP 関連図の構築

人工バリアシステム構成部材を対象にガス移行と核種移行に係る FEP について、着目する部材内での挙動に着目した統合 FEP として集約した後、それぞれの相互作用やその影響を記述した統合 FEP 関連図（図 1.3-48 参照）をとりまとめた。

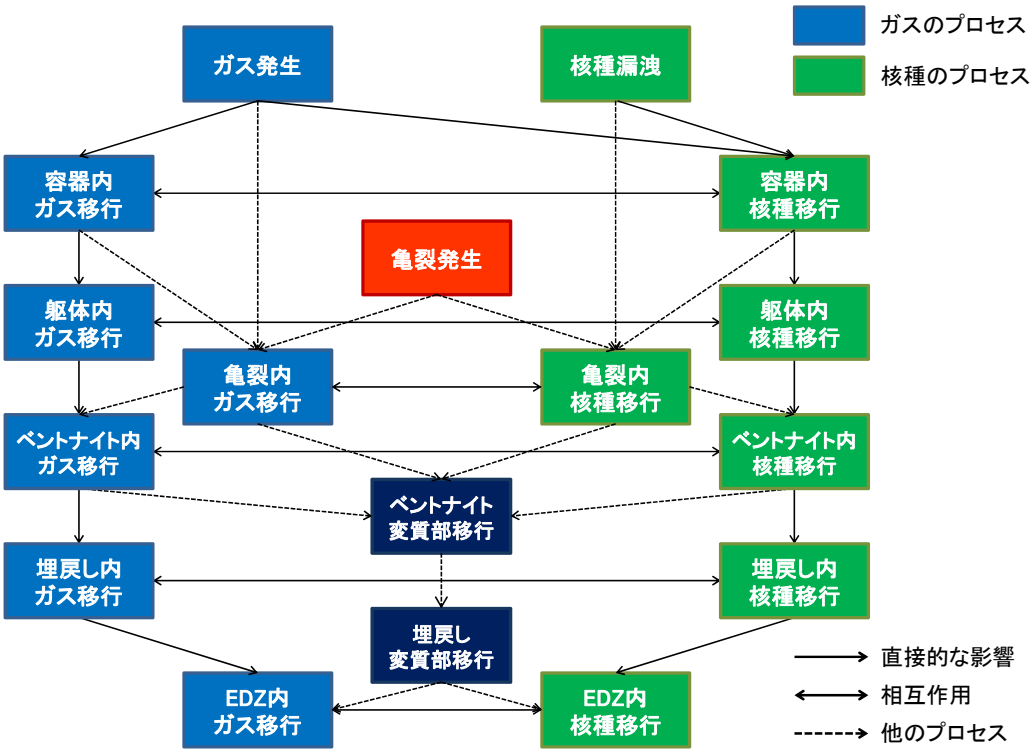


図 1.3-48　統合 FEP 関連図

この統合 FEP 関連図はシナリオを統合 FEP の連携を示したものであり、状態変化を含めた時間的な情報は含まれていない。一方、前述した時系列状態変化表と安全機能整理シートは、処分システムおける時間経過に伴う状態変遷を網羅的に取り纏めたものである。よって、これらと併せて統合 FEP 関連図の変化について検討することで、シナリオ設定に向けて必要となる各時間枠における統合 FEP 関連図を構築することができる。

なお、構築にあたっては、放射性核種を含むガスの移行は廃棄体容器の健全度に左右されるものと考え、この容器の健全性を軸に据えて、容器が健全な期間と損傷後に 2 分し、さらに容器損傷後は核種の閉じ込めを人工バリアに期待する期間と天然バリアに期待する期間のそれぞれについて検討を実施した。

4) シナリオ整理シートの構築

時系列状態変化表および安全機能の展開に基づいて区分した統合 FEP 関連図を用いて、安全評価の観点から、シナリオ整理シートにおける評価期間を次の 3 つに区分した（表 1.3-10 参照）。

① 多重バリアシステムによる核種閉じ込め期間 ≒ 廃棄体容器の健全性が確保されている期間

② 多重バリアシステムによる核種閉じ込め期間≒ ベントナイト緩衝材による核種閉じ込め期間

③ 天然バリアによる核種閉じ込め期間

上述した評価期間に基づき構築した TRU 廃棄物グループ 2 を対象としたシナリオ整理シートを図 1.3-49 に示す。シナリオ整理シートでは、上述の評価時間枠を基に時系列に沿って変遷する人工バリアの状態とそれに伴うガス移行と核種移行に関するシナリオについて記述を行った。また、有する不確実性への対応として、以下の 3 種類に分類･設定したシナリオを用意した。

・シナリオ①：基本シナリオに相当する。蓋然性の高い現実的なシナリオでガス発生速度不確実性については、その変動幅で対応。容器とベントナイトは設計通りの期間安全機能を維持すると想定。

・シナリオ②：変動シナリオに相当する。ガス発生速度が他の安全機能に影響を及ぼす程度まで増加。その結果モデル･パラメータが変動。廃棄体容器の過渡期で損傷、ガスの破過挙動、ベントナイトの自己修復性の喪失に関する不確実性に対応。

・シナリオ③：稀頻度シナリオに相当。例えば、想定以上にベントナイトの変質が進行し、自己修復機能喪失につながるような、予測の範囲以上に変動するシナリオ。

表 1.3-10　シナリオの区分

不確実事象	シナリオ①（基本）	シナリオ②　（変動）	シナリオ③（稀頻度）
ガス発生速度	ガス発生のメカニズムと発生源、発生するガスの種類、速度および量を推定 ＜蓋然性の高い移行挙動＞ ⇒廃棄体グループ B のガス発生速度は極めて遅い※ため、ベントナイト中のガス移行は拡散と二相流が支配的となる。 ※原環センター研究成果より	**ガス発生速度増加** ⇒ ベントナイト中でのガス蓄圧～破過 ⇒ 核種を含む汚染地下水の放出 ⇒ ベントナイトの自己ｼｰﾙ性による透気経路の修復（閉じ込め性の再維持）	
廃棄体容器の損傷	設計にて期待する期間、容器は健全性を確保 ＜健全性喪失後＞ ⇒ 放射性核種の移行（拡散･移流） ⇒ 容器内ガスの移行（拡散･二相流）	**初期欠陥等による健全性の損傷** ⇒ 放射性核種の早期移行 ⇒ 容器内ガスの早期移行 （発生速度が加速された場合は上記のシナリオに）	
ベントナイト変質速度	ベントナイトを変質させる物質を考慮した変質速度の推定	**ベントナイト変質速度の加速** ⇒ベントナイトの核種閉じ込め機能の喪失 ⇒核種の移流による早期放出	間隙水等の影響により、ベントナイトの変質速度が加速し、自己修復性が喪失 ⇒放射性核種がベントナイト中を移流で移行

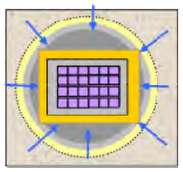
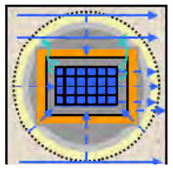
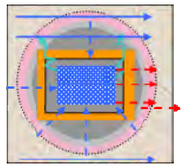
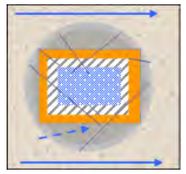
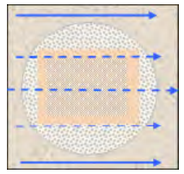
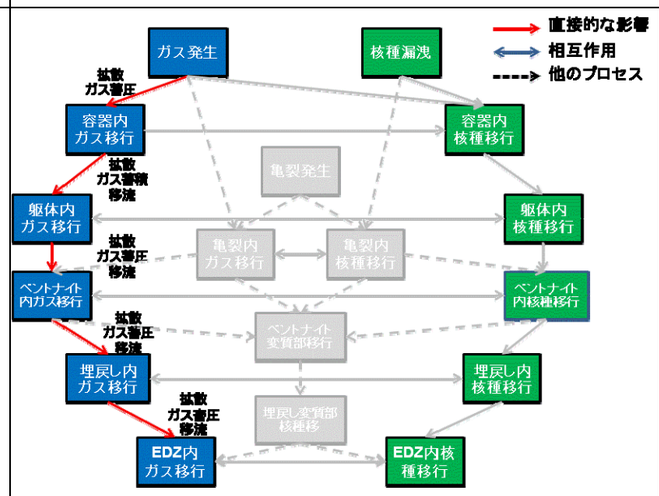
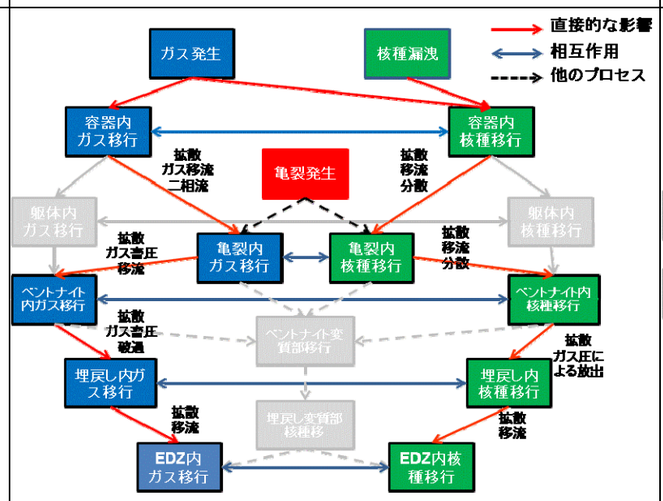
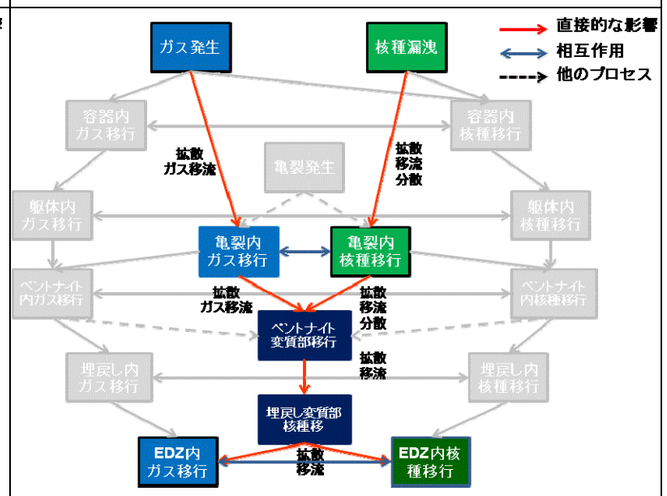
状態変遷の期間	埋戻～閉鎖	廃棄体容器が健全な期間	廃棄体容器の損傷・廃棄体飽和	ベントナイト緩衝材機能損失まで	ベントナイト緩衝材機能損失後
EBS の状態変遷と核種移行プロセスイメージ					
EBS 状態変遷の記述	・廃棄体の定置完了。 ・坑道埋戻し後、施設が閉鎖。 ・坑道周辺の環境回復。 ・廃棄体からの熱が周囲へ伝播。 ・還元地下水の坑道内への浸入。 ・緩衝材周辺部より還元水による飽和プロセス開始	・廃棄体からの発熱減衰。 ・緩衝材飽和後、地下水と廃棄体パッケージの接触による腐食開始 ・腐食等によるガス発生。緩衝材中ではガス蓄圧。 ・支保材の劣化と共に高 pH 水とベントナイトとの反応開始	・腐食と外力による廃棄体容器の損傷。 ・充填材や構造躯体の劣化に伴う力学的耐力の低下と損傷。 ・廃棄体からのガス発生継続。 ・EDZ 外への核種放出(ガス状・非ガス状)。	・高 pH の影響等によるベントナイトの変質・劣化進展。 ・セメント材の化学的緩衝・閉じ込め環境は維持。 ・ベントナイトは核種閉じ込め機能(所要密度)を維持。	・緩衝材は劣化による密度低下、あるいはモンモリロナイト変質により核種の閉じ込め機能を喪失。 ・ニアフィールドの場は化学的な閉じ込め機能は残るものの物質移行の場としては移流場となる。
安全機能の観点からの評価期間	多重バリアシステムとしての核種閉じ込め(廃棄体容器による閉じ込め)		多重バリアシステムによる核種閉じ込め(ベントナイト緩衝材による閉じ込め)		天然バリアによる核種閉じ込め
統合 FEP ガスの移行 核種の移行					
ガス基本シナリオ	地下水の EBS 内への浸入に伴い、放射線分解、微生物分解及び金属の腐食等によりガスが発生する。廃棄体パッケージが健全な期間については、放射性核種は物理的に閉じ込められている。非放射性ガスは、透気性を有す容器内及び躯体内を拡散あるいは移流で移動し、ベントナイト・埋戻内では蓄積されるか拡散あるいは二相流で移行した後、EDZ に放出される。EDZ 内では拡散あるいは二相流として移行する。		地下水の飽和により、放射線分解・微生物分解及び金属の腐食が促進され、ガスの発生が継続する。廃棄体容器の損傷に伴って、廃棄体内の腐食及び微生物等の分解に起因した放射性ガスが発生し、非放射性ガスと共に充填材や躯体内の亀裂へ放出される。ガスは亀裂内を拡散あるいは二相流で移動し、閉じ込め性を維持するベントナイトへ移行する。飽和ベントナイト内ではガスは拡散あるいは二相流で移行する一方、蓄圧される場合もある。蓄圧が膨潤圧・間隙水圧より大きくなった場合、破過が生じガスが放出されると共に地下水に溶存した放射性核種(汚染水)も放出される。ガスと汚染水放出後、ベントナイトは自己修復性により核種閉じ込め性を回復する。このプロセスはベントナイトが劣化変質し、自己修復性を喪失するまで繰り返し発生する。埋戻しあるいは EDZ に放出されたガスは、拡散あるいは二相流として移行する。		廃棄体の微生物分解や金属腐食によるガスの発生が継続する。発生したガスは亀裂内を拡散あるいは二相流として移行する。ベントナイトは高 pH 間隙水等により変質が進み、低透水性や膨潤性を喪失する。ガスと放射性核種はベントナイト及び埋戻材の変質部を拡散あるいは二相流により移行する。
基本シナリオに含まれる不確実性とその対応	・ガスの発生速度・量⇒基本シナリオの変動量として対応 ・廃棄体容器の健全性の期間の短縮(初期欠陥を含む)⇒変動シナリオとして対応		・ガスの発生速度・量の変化(放射性・非放射性ガス)⇒基本シナリオの変動量として対応 ・ガスの破過現象(処分場の深度、ベントナイト密度とガス発生速度・量に依存)⇒変動シナリオ ・ガス破過後のベントナイトの自己修復性の確保の期間の短縮⇒変動あるいは稀頻度モデル		・ベントナイト変質部の物性変化⇒基本シナリオの変動量
評価ケース　ガスシナリオ	・ガス発生 ・ガス移行(拡散・二相流) ・ガス蓄圧		・ガス発生 ・ガス移行(拡散、二相流) ・ガスの蓄圧・破過		・ガス発生 ・ガス移行(拡散、二相流)
評価ケース　核種移行シナリオ	(核種の漏洩なし)		・EBS 内での移流・拡散・分散による移行 ・破過時の放射性物質を含む汚染水の放出		・EBS 内での移流・拡散・分散による移行
評価モデル　ガス移行モデル	・ガス発生モデル ・二相流モデル(拡散・移流)		・ガス発生モデル ・亀裂ネットワークモデル＋二相流モデル ・圧力依存透過性モデル(二相流モデル)あるいは力学連成モデル(力学連成二相流モデル)		・ガス発生モデル ・亀裂ネットワークモデル ・二相流モデル(拡散・移流)
評価モデル　核種移行モデル			・ミキシングタンクモデル(核種溶解モデル) (・亀裂ネットワークモデル・・・モデルは存在するが EBS には適用していない) ・移流・拡散モデル (ガス放出に関してはガス圧を考慮して汚染水移動量を計算)		・ミキシングタンクモデル(核種溶解モデル) ・移流・拡散モデル

図 1.3-49　安全機能と状態変遷に着目したガス移行に係わるシナリオ整理シート

(2) 安全評価手法構築に向けた検討

ガス移行挙動に関する安全評価手法の構築に向け、関連する研究の動向・成果について調査・整理を行い、ガス移行挙動評価技術の現状と課題を整理した。検討にあたっては、既往の TRU 廃棄物処分場や諸外国の放射性廃棄物処分場の安全評価の記述内容から処分場に求められる安全機能を確認し、ガスの発生が安全機能に及ぼす影響に対する考え方に着目して検討を進めた。

1) 諸外国の安全評価におけるガス発生･移行挙動の取扱い

関連する研究の動向・成果について調査し、ガス移行挙動評価技術の現状と課題をと取り纏めた。各国の安全評価書（SKB[23]、POSIVA[24]、EN2002[25]、ANDRA[26]、SCK/CEN[27]）におけるガス発生･移行挙動の取扱いを表 1.3-11 のとおり整理した。

それぞれの国では、母岩の特性（低透水の堆積層、亀裂性の結晶質岩）により、着目しているガス挙動が異なっており、特に低透水性の堆積層を母岩とするスイス、フランス、ベルギーでは、ガス蓄圧による母岩の核種閉じ込め性性能の損傷を問題視している。わが国と比較すると、TRU を含む低・中レベル処分概念でベントナイトを用いている国はないことから、本検討で着目しているベントナイト中のガス移行やガス移行影響については、これらの国のアプローチを参照しつつ、独自に検討していく必要性を確認した。

表 1.3-11 諸外国の安全評価書におけるガスの取扱い

対象国と安全評価書	スウェーデン SKB SR-Site (2011)	フィンランド POSIVA TR-2006-05 (2006)	スイス Nagra NTR 08-07 (2008b)	フランス ANDRA Dossier 2005 (2005)	ベルギー SCK/CEN PA for LLW/ILW (2004)
処分概念とバリアの安全機能	･使用済燃料処分 ･花崗岩 500m ･OP の長期閉じ込め性 ･ベントナイトによる核種閉じ込め性と OP の健全性確保	･使用済燃料処分 ･花崗岩 500m ･OP の長期閉じ込め性 ･ベントナイトによる核種閉じ込め性と OP の健全性確保	･使用済燃料、ガラス固化体併置処分 ･堆積岩(低透水性)の閉じ込め性と安定性 ･OP による閉じ込め性 ･ベントナイトによる閉じ込め性(コロイド)	･ガラス固化体処分 ･堆積岩(低透水性)の閉じ込め性と安定性 ･OP による閉じ込め性 ･ベントナイトによる閉じ込め性(コロイド)	･ガラス固化体、使用済燃料併置処分 ･堆積岩(低透水性)の閉じ込め性と安定性 ･OP による閉じ込め性
安全評価におけるガス移行の取り扱い	･ガス挙動についてはレポートで考察 (影響は小さいと判断) ･SR-Site では OP 内ガス破過による汚染水の放出のみを評価	･ガス状核種の移行は most provable シナリオ ･ガスによる汚染水の排除は unlikely シナリオ ･OP 内ガス破過による汚染水の放出(変動)	･放射性ガス移行が基本シナリオとして扱う ･母岩中のガス移行に着目	･放射性ガス移行が基本シナリオとして扱う ･ガス亀裂による汚染水の移流場形成 ･ガスによるシール損傷に伴う短絡経路形成	･放射性ガス移行が基本シナリオとして扱う ･ガス亀裂による汚染水の移流場形成 ･ガスによるシール損傷に伴う短絡経路形成
評価ケース	･OP のピンホール損傷時のガス圧で汚染水が放出されるケース	･拡散によるガス移行(放射性･非放射性) ･緩衝材の損傷モードに対応したガス移行	･ガスの母岩中での状態変遷に対応し４段階で評価	･ガス発生と移行媒体の時系列変遷を考慮して４段階で評価	･ガスの状態変遷に対応して４段階で評価
適用モデルとコード	･二相流モデル ･亀裂モデル ･力学連成モデル	･二相流モデル ･亀裂モデル ･力学連成モデル	･二相流モデル ･亀裂モデル	･二相流モデル ･不飽和での THM 連成モデル	･二相流モデル ･力学連成モデル
不確実性と課題	･室内要素試験結果の実規模への適用 ･ベントナイトの状態変遷とガス移行モデル	･人工バリアシステムの力学的状態変遷とガス移行モデル	･室内要素試験と実機での挙動との差 ･膨潤挙動とガス挙動特性	･不飽和状態でのガス挙動特性 ･有機物を含む廃棄体のガス発生速度	･力学的な挙動とガス移行モデル ･飽和･不飽和状態でのガス移行経路

HLW ：高レベル放射性廃棄物（High Level radioactive Waste）
LLW ：低レベル放射性廃棄物（Low Level radioactive Waste）
SF ：使用済燃料（Spent Fuel）
TRU ：TRU 廃棄物（Trasns-Uranium）

2) 時系列状態変化表に基づくシナリオ設定の妥当性に関する検証

安全評価に用いるシナリオとは、“処分システムの状態変遷に伴う安全機能の変化を考慮した放射性核種の移行挙動を記述したもの”と定義される[28]。本項ではこれを踏まえ、ガス移行挙動を評価したために構築してきたシナリオ設定の流れ、時系列状態変化表、統合 FEP 関連図、安全機能の時系列変遷などについて、その手法や考え方の妥当性について、以下に示す観点と方法により検証し、その結果、シナリオ構築までの流れ、構築の根拠や知見の整理、不確実性への対応方法など、説明性と追跡性を有した手法であることが確認できた。

① 検証の観点；

・シナリオ設定に至る流れの妥当性

・各段階での手法の妥当性

・不確実性への対応を踏まえた現実性と網羅性の担保

② 検証の方法；

・国内外のシナリオ設定手法との比較

・専門委員会での審議

3) 問題点・課題解決に向けた方策の検討

妥当性検証の過程で明らかとなった問題とその解決策を以下に取りまとめた。

a. シナリオの時系列変遷に対したモデル･パラメータの設定

ガス移行基本シナリオを実現象に着目して忠実に評価した場合､時系列的にガス挙動と核種移行を同時に扱うモデルおよびコードが必要となる。また、各期間の不確実性を考慮した変動シナリオの取扱いにあたっては、その影響が別の時間枠に伝播していく可能性があるため、新たなモデルチェーンを組立てる必要がある。これは、安全評価のモデルとプロセスモデルの連携方法に係わる問題点と言い換えることができる。この解決策として、以下のような二つの手法を提示した。

① 期間別評価手法：

評価期間ごとに取りまとめた統合 FEP 関連図に対応するプロセスモデルを基本として各統合 FEP を連携するモデルチェーンを構築し、それぞれの期間で核種移行を評価する手法。

② シナリオ個別評価手法：

評価期間全域を対象とした地下水移行シナリオとガス移行シナリオを別個に扱い、放射性ガスの影響は小さいと判断し、非放射性ガス挙動プロセスモデルの結果を放射性核種移行モデルに反映させる手法。

予備的安全評価（性能評価）に向けて、提言を取りまとめる観点から、上述した 2 つの手法について、類似施設に対する規制側の要件（余裕深度処分の安全評価の考え方)、海外や TRU レポートでの安全評価の状況、ガス移行挙動に関する最新の知見等を参照し、様々な角度から実現性について定性的に評価し、結果を表 1.3-12 にまとめた。

表 1.3-12　期間別評価手法とシナリオ個別評価手法の比較

	モデル化の容易さ	コードの開発状況	パラメータ取得の容易さ	不確実性への対応性	規制要求への対応性
①期間別評価手法	△ プロセス個別のモデルは存在。核種移行モデルとの統合化が必要	△ ガス移行と核種移行を同時に解析するコードの整備が必要	○	○	○
②シナリオ個別評価手法	○	○	△ 評価期間に対応した相互作用を考慮したパラメータの取得に工夫が必要	△ 各評価期間で想定される不確実性への対応に工夫が必要	△ 各評価期間での評価への対応が必要

この結果が示すとおり、モデル化の容易性やコードの開発等に課題を抱えるが、実情に即した現実的な評価を行うためには、ガス移行と核種移行を同時に扱うことができる①の期間別評価手法が望ましいと考えた。

b. 実規模スケールにおける移行媒体に起因したガス挙動の評価

実規模スケールでの状態変遷やこれに伴うガス挙動の評価を行うにあたっては境界条件･形状･寸法効果･バリア材の不均質性･異方性により増大する不確実性を考慮する必要があり、このような空間では､膨潤圧に代表される熱-水-応力-ガスの連成系の影響の重要性を確認した。これらを考慮し、現状の室内要素試験でのガス挙動把握やパラメータ設定によるモデルを用いて実規模スケールでのガス挙動を推定することには問題が多く、これらの不確実性を削減するには、安全機能に着目した現実的なシナリオに対応する試験系による現象理解とモデルの整備が必要であることを確認した。

以上を踏まえた本課題に対する解決策として、実際の処分場スケールでの境界条件・形状・寸法効果を考慮し、ガス移行シナリオを支配する熱-水-応力-化学環境を設定した上で、着目する評価期間において、システムとしてガス挙動を再現できる工学規模試験･原位置試験系を構築し、さらに試験系での予測挙動の確認、モデルによる挙動説明（検証に相当）を通じて、実規模スケールでの挙動を数値解析モデルでシミュレーションできる仕組みの構築や、この場合システム試験の回数は限定されることが想定され、数値モデルでのシミュレーション試験と対応する要素レベルでのパラメータ設定や特性データの取得を統合し、評価していくことが重要なことを提示した（図 1.3-50 参照)。

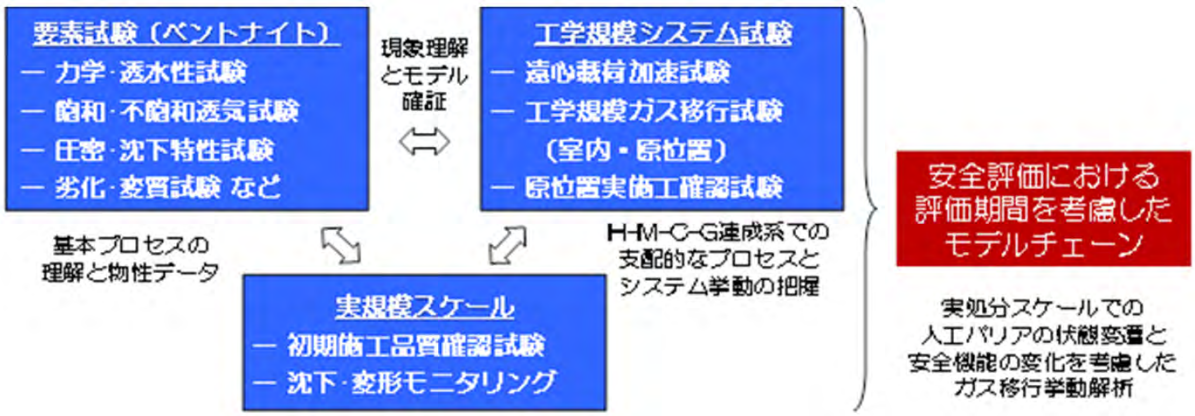


図 1.3-50　要素試験･工学規模システム試験・実規模スケール試験系の連携

c. 人工バリアの状態･安全機能が有する不確実性への対応

評価期間や対象のスケールに応じて不確実性は増大し、その対応として、i) 時系列状態変化表上で不確実性の振れ幅を考慮し、蓋然性（現実性）の大きさで複数のシナリオを設定する方法、ii) 不確実性を考慮し、安全機能に係わる重要な挙動のみをモデル化する方法、iii) 対応したパラメータやデータの設定において保守的な値を採用する方法、などを提示した。このようなシナリオとモデルおよびパラメータやデータの設定での扱いを表 1.3-13 に示すように分類した。この分類ではシナリオにおける事象の起こりやすさ（蓋然性）に着目し、ガス移行挙動モデルや関連パラメータを様々なスケール試験を通じて、現象理解に基づき設定する期間（現実性を重視した期間）と避けられない不確実性の存在により保守的に設定すべき期間（保守性を重視した期間）に分けて整理した。

表 1.3-13　現実性と保守性の連携（組合せ）

	現実性を重視した時間枠	保守性を導入した時間枠
シナリオ	最先端の知見とエビデンスに基づく状態設定をベースに安全機能の時系列的変遷と核種の挙動を記述→蓋然性の高い評価ケース	現実性を重視したシナリオと共に専門家の判断による保守的な判断での状態設定と安全機能喪失モードおよび核種挙動を記述→保守性を考慮した蓋然性の高い評価ケース
モデル	蓋然性の高い評価ケースに対応した確定論的なプロセスモデルの組み合わせ（安全指標の時系列変遷を考慮）	蓋然性の高い保守的な評価ケースに対応した様式化されたプロセスモデの組み合わせ（確定論的モデル、確率論的モデル）
パラメータ	試験結果、エビデンスの統計的な処理に基づくパラメータの設定（中央値を活用）	様式化に伴うパラメータの設定（エビデンスと専門家の判断による類型化作業で設定）

本項目における成果について総括すると、TRU2 次レポートにおいては十分ではなかった、ガス移行に係るシナリオ関連の記述に対して、周辺岩盤を含む人工バリアの時系列状態変遷とそれらが有する不確実性を考慮したガス挙動評価シナリオを国内外の根拠資料をもとに設定し、さらにシナリオ設定のための手法の整備や予備的な安全評価に際しての課題整理などへと踏み込んだ検討へと進めることができた。

1.3.5　抽出された課題と本検討への受け渡し

「ガス移行挙動の評価」の実施内容を取りまとめることにより、今後取り組むべきである TRU 廃棄物処分の安全評価に際してのガスの移行に係る課題が以下のように抽出された。

「材料試験データ取得」については、現段階においては緩衝材材料（ベントナイト）を対象にした評価がなされたにすぎず、セメント系など他の材料への展開の余地が存在する。また、評価手法における課題解決の観点から、ガス発生（注入）速度や量などのガス移行の条件の設定や、より具体的に懸念される事項を条件設定したシステム試験を実施する余地が存在する。

「ガス移行の解析・モデル化」については、ガスの発生条件や力学的な条件のモデル化をさらに高度化する余地、およびガス移行と長期的な変質挙動（化学／力学）との連成解析を用いた評価の検討の余地、さらにはガス移行連成挙動解析ツールの高度化の余地が存在する。

「安全評価のためのシナリオ構築」については、不飽和から飽和に移行する段階での現象理解や飽和後の人工バリアの状態変遷とガス移行挙動に係わる情報など、ガス挙動を評価する上で重要といえる知見がまだ不十分であるため、今後も研究動向に注意を払い、知見を拡充していく必要があり、TRU 廃棄体の他グループなどを対象としたシナリオの拡張の余地も存在している。また、予備的な安全評価に向けた検討から、システムとして現象を再現した試験や現象理解と挙動を概念として説明できるモデルの確立などの余地がある。

これら各項目の課題を反映させ、ガスの移行について、これまでより踏み込んだ力学などどの連成挙動としての評価手法をより高度化·精緻化し、安全評価における不確実性低減や施設設計への反映を図るための検討として調査を実施した。

1.4　本事業の実施概要

1.4.1　全体概要

図 1.4-1 には、これまでの実績および将来における想定として、TRU 廃棄物処分施設の安全評価に関連するガスの移行の連成挙動評価を対象とした調査研究の展開を概念図として示した。調査研究の根底には TRU レポート（1 次および 2 次）があり、これらの記述内容における課題を対象とした調査研究を展開してきた。また、過去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として、GMT プロジェクトが存在しており、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手法を参考とした。

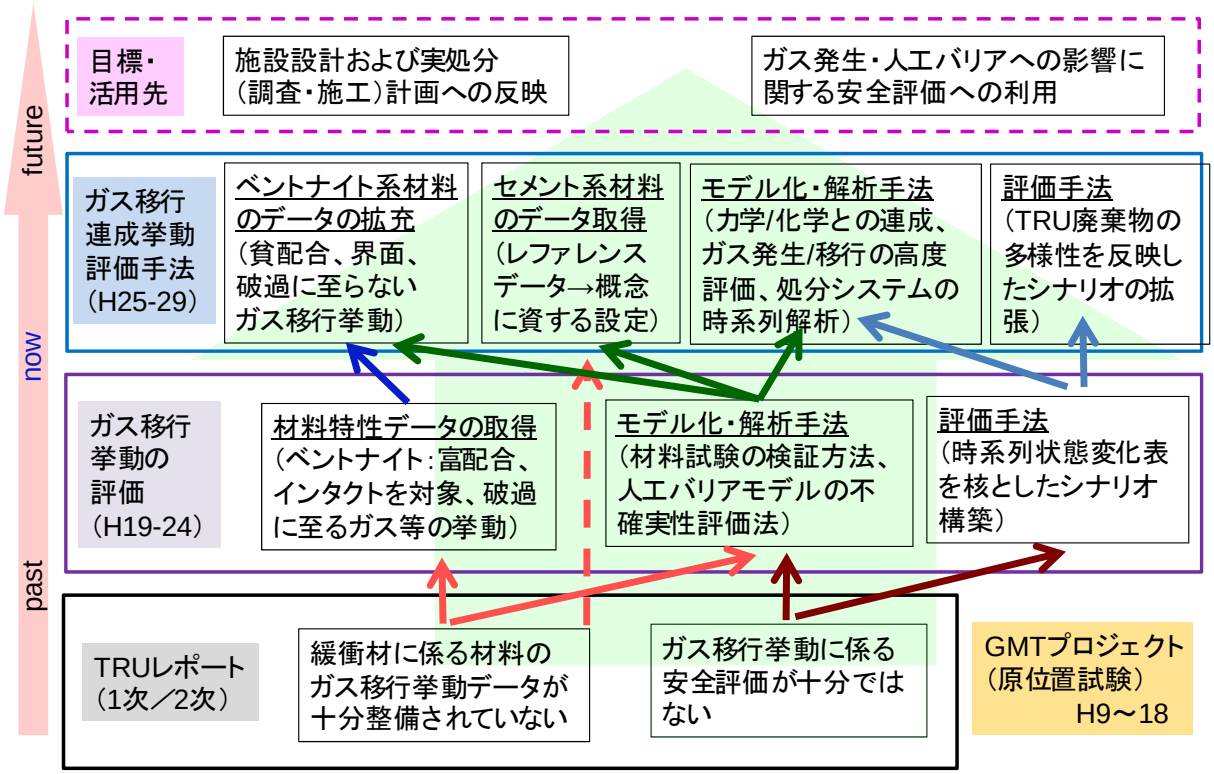


図 1.4-1　ガス移行連成挙動評価手法の展開

上記のような調査研究の展開として、このフェーズの検討は以下の項目を設定して実施することとした。具体的な内容とともに示す。

(1) ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充

・緩衝材におけるガス移行挙動に係る知見の整理をもとに抽出された課題（条件設定）を対象に材料試験の立案/実施。

・ベントナイト系材料のガス移行評価のための特性データの取得に係る検討を行い、データ取得を実施。

・取得されたデータを連成解析およびシナリオ構築に資する知見として取りまとめる。

・シナリオ構築等の観点にてガス移行試験の複合システム化について検討。

(2) セメント系材料のガス移行挙動データの取得

・セメント系バリアにおけるガス移行の考え方（排出/閉じ込め）に係る論点を整理し、そのうえで概念設計に資するレファレンスデータを提示。

・セメント系材料のガス移行挙動試験手法の構築を行い、透気特性その他のデータを取得する。

・取得されたデータを連成解析およびシナリオの高度化に資する知見として取りまとめる。

(3) ガス移行連成挙動解析ツールの高度化

・ベントナイトを対象に行っていた解析モデルを、セメント系材料を含む人工バリアシステムへ

拡張してガス移行試験の検証を実施。

・既存のガス移行データや新たに得られる試験結果データを反映し、ガス移行評価モデルを高度化し、人工バリアシステムでのガス移行挙動を評価。

・解析・モデル化手法の展開検討として、連成挙動評価、発生モデル、不確実性評価等の高度化等に係る課題の解決。

(4) ガス移行評価シナリオの拡張

・ガス移行挙動評価シナリオや構成する FEP 事象について、セメント系等の多様な材料や最新の概念を取り入れながら高度化を実施。

・「長期挙動評価」「炭素移行挙動評価（放射化金属の腐食試験）」にて得られた知見の反映による高度化を実施。

・国内外のガス発生に係る知見を随時導入。

表 1.4-1 に、本調査計画の平成 25-29 年度の 5 年間での展開案を示す。

表 1.4-1「ガス移行連成挙動評価手法の開発」平成 25-29 年度の 5 年間展開案

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. 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	・緩衝材におけるガス移行挙動に係る知見の整理と課題抽出 ・ベントナイト混合材料の特性データの取得に係る検討	・ベントナイト混合材料の特性データの取得に係る予備試験 ・界面挙動等を考慮したガス移行試験の検討 ・ガス移行試験の複合システム化に係る予備検討	・ベントナイト混合材料の特性データの取得に係る試験 ・界面挙動等を考慮したガス移行予備試験 ・ガス移行試験の複合システム化に係る検討	・ベントナイト混合材料の特性データの取得データの取りまとめ ・界面挙動等を考慮したガス移行試験 ・ガス移行試験の複合システムの概念設計	・緩衝材におけるガス移行挙動に係る知見のとりまとめ ・界面挙動等を考慮したガス移行試験のとりまとめ ・ガス移行試験の複合システムに係る取りまとめ	人工バリアの成立性の評価に資する「人工バリアの成立性の確認のためのガス移行評価」 ↓ 実処分施設の設計／施工に係る課題解決への反映
3. セメント系バリアのガス移行挙動基礎データの取得		・セメント系バリアのガス移行挙動に係る概念の整理 ・ガス移行リファレンスデータの取得に係る検討	・セメント系バリアのガス移行挙動予備試験 ・ガス移行リファレンスデータの取得	・セメント系バリアのガス移行挙動試験（基本概念）	・セメント系バリアのガス移行挙動試験（オプション概念）	・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	
4.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	・ガス移行解析・モデル化手法の展開検討（ガス移行試験の検証による連成挙動評価発生モデル、不確実性評価等の高度化、係る課題の抽出）	・ガス移行解析・モデル化手法の展開（ガス移行試験の連成挙動評価ツールの高度化）	・ガス移行解析・モデル化手法の展開（セメント系バリアモデルの構築）	・ガス移行解析・モデル化手法の展開（人工バリア複合モデルの構築および金属腐食ガスデータ（炭素14）の反映）	・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	
5.ガス移行評価シナリオの拡張に関する検討	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	・ガス移行挙動評価シナリオへの長期挙動評価等の知見の反映	・ガス移行挙動評価シナリオへのセメント系バリア等の知見の反映	・ガス移行挙動評価シナリオへの複合材料等への知見の反映	・ガス移行挙動評価シナリオの高度化に関してのとりまとめ	
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	

本調査開発の実施に際し、考慮すべきアウトプットおよび関連研究の成果より取り込めることができるインプットを確認しており、図 1.4-2 に、本検討に係る参照データ（インプット）、および成果の提示・反映先（アウトプット）およびそれらの具体的な内容を概念図として示した。今後の核関連研究の進捗によって、この図がより具体化できることが重要である。

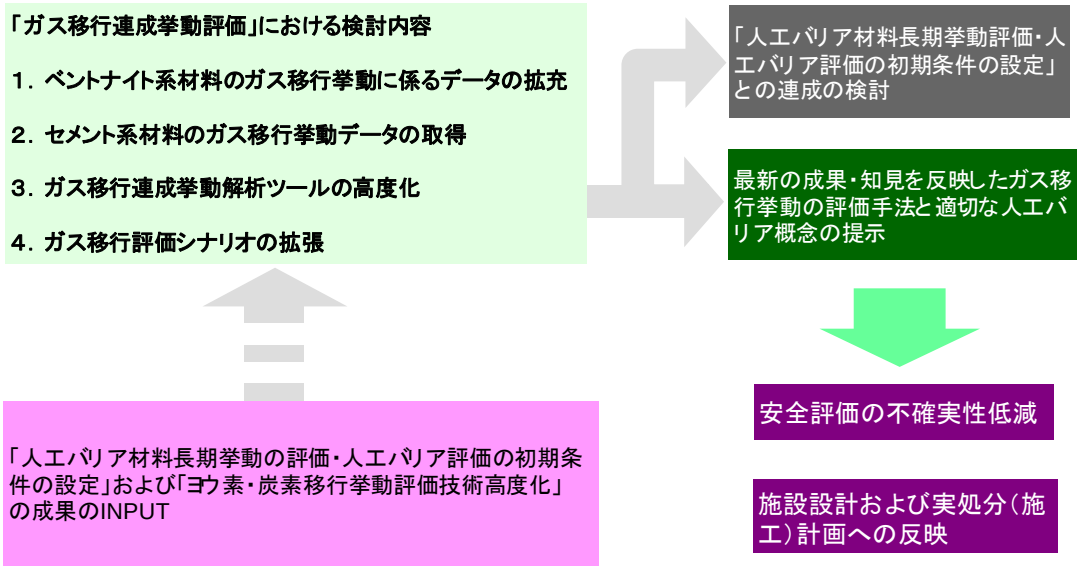


図 1.4-2　本検討の実施内容および想定されるインプット/アウトプット

1.4.2　平成 25 年度の実施概要

(1) 全体概要

本検討の初年度にあたる平成 25 年度においては、平成 24 年までの「ガス移行挙動の評価」の成果を含め、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 年度の 5 年の実施計画の作成を実施した。そして次の段階として、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た。表 1.4-2 には、今年度の調査研究進捗表を示す。

表 1.4-2「ガス移行連成挙動評価手法の開発」平成 25 年度　調査研究進捗表

実施項目	2013年 4	5	6	7	8	9	10	11	12	2014年 1	2	3
								委員会(1)▼			委員会(2)▼	▼合同委員会
①ベントナイト系材料のガス移行挙動に係るデータの拡充	関連情報の収集 検討準備					詳細計画の策定						
緩衝材におけるガス移行挙動のデータ拡充												
ベントナイト混合材料の特性データの取得												
成果のまとめと課題の抽出												
②セメント系バリアのガス移行挙動基礎データの取得												
セメント系バリアのガス移行挙動試験手法の構築												
ガス移行概念の整理とリファレンスデータの検討												
成果のまとめと課題の抽出												
③ガス移行連成挙動解析ツールの高度化												
ガス移行解析・モデル化手法の展開												
連成挙動および不確実性評価の高度化												
成果のまとめと課題の抽出												
④ガス移行挙動評価の高度化												
シナリオ構築およびFEP抽出展開上の課題検討												
成果のまとめと課題の抽出												
⑤研究成果総括および今後の検討												
⑥報告書作成										作成	修正	
評価									▲専門家のレビュー ・実施計画の妥当性 ・とりまとめ方針の確認		▲成果の最終評価 ・検討成果 ・取得データ ・達成度	▲全体計画の評価 ・全体の方向性の評価 ・課題確認

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。

(2) 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

緩衝材におけるガス移行挙動に係る知見の整理を実施し、課題の抽出を行い、これに基づいて５年間の全体実施内容を検討・決定し、これに係る優先度やコストなども併せて検討した。この検討成果を参考に、ベントナイト系材料の諸特性データの取得に係る準備検討を行い、そのうえで予備的な作業として以下の項目を実施した。

・ベントナイト緩衝材材料の供試体作成。

・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

(3) セメント系材料のガス移行データ取得

セメント系バリアのガス移行挙動に係る、TRU 廃棄物処分概念におけるガスの取扱い（人工バリアからガスを排出させる、もしくは人工バリア内に閉じ込める）についての論点の整理と課題抽出を行い、この検討において実施すべき内容の観点より検討計画を作成した。またこれに先行する形にてガス移行評価に係るリファレンスデータの位置付けで、モルタル材料の 2 相流パラメータの取得を実施した。

(4) ガス移行連成解析ツールの高度化

平成 24 年度に実施されたガス移行試験データ（高さ 200 ㎜供試体のガス移行試験）を用いた検証解析によって、破過に至らないようなガス移行の際ベントナイト材料に生じる諸現象の把握を行った。また、解析・モデル化手法の連成解析ツールに主眼をおいた展開検討に係る課題を抽出して 5 年間の実施計画を作成するとともに、人工バリアのガス移行挙動の長期解析を実施した。

(5) ガス移行評価シナリオの拡張

ガス移行挙動評価シナリオおよび 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基に実施し、TRU 廃棄物処分グループのグループ 3 のシナリオ構築に係る検討を行った。

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] 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).

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

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

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

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

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

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

[10] NAGRA : Effects of Post – disposal gas generation in a repository for spent fuel, high – level waste and long – lived intermediate level waste sited in Opalinus clay, Technical report 04 – 06, 2004.

[11] 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.

[12] 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

[13] CODE_BRIGHT user’s guide, May 2011.

[14] E. Alonso, A. Gens, A. Josa : A constitutive model for partially saturated soils, Géotechnique, 40, No.3. ,1990

[15] 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.
[16] Grant, M. A., 1982. Geothermal reservoir engineering, Academic Press, New York.
[17] 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.
[18] Komine, H., and Ogata, N., 2003. New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials. Canadian Geotechnical Journal, 40, No. 2, pp.460-475.
[19] 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
[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] 原子力安全委員会（2010）：余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方，平成 22 年 4 月 1 日
[22] 若杉圭一郎、石黒勝彦、操上広志、植田浩義、小山俊博、河村秀紀(2008)：地層処分システムの長期的変遷を考慮したシナリオ評価手法の検討、日本原子力学会「2008 年秋の大会」
[23] SKB：Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. Updated 2011-12
[24] POSIVA：Expected Evolution of a Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto, POSIVA 2006-05（2006）
[25] Nagra：Effects of post-disposal gas generation in a repository for low- and intermediate-level waste sited in the Opalinus Clay, TECHNICAL REPORT 08-07 (2008)
[26] ANDRA：Dossier 2005 Argile Tome Safety evaluation of a geological repository（2005）
[27] SCK／CEN：SAFIR 2 Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2（2001）
[28] 原子力発電環境整備機構（2011）：地層処分事業の安全確保（2010 年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－

第 2 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

2.1　目的

本検討の目的は、平成 19-24 年度の「ガス移行挙動の評価」[2][3][4][5][6][7]の中で行われた材料試験データの検討において得られた知見（再冠水試験、飽和および不飽和供試体を用いたガス移行（透気）試験におけるガス移行挙動および基本特性や寸法効果に対する評価）に基づいて、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 TRU 放射性廃棄物処分概念に係る知見について安全評価書等をもとに取りまとめ、その課題よりガス移行試験の実施計画を策定する。さらにその計画に基づき、ガス移行試験の準備作業（供試体作製）を実施することである。

2.2　実施内容

本検討においては、平成 19-24 年度にわたって上記「材料試験データの取得」の実施によって蓄積された知見を基盤に、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を行った。平成 25 年度は、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。さらにその計画の一部として、ガス移行試験の準備作業（供試体作製）およびベントナイト混合材料の水分特性データ取得を実施した。

2.2.1　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

上記「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、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が示唆されている。

本検討では上記検討において蓄積された知見を基盤として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抽出を行った。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を行った。

2.2.2　ベントナイト緩衝材を用いた材料取得計画の策定

前項にて抽出された課題をもとに、数年間オーダー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。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。

2.2.3　ガス移行挙動評価試験の準備（供試体の作成）

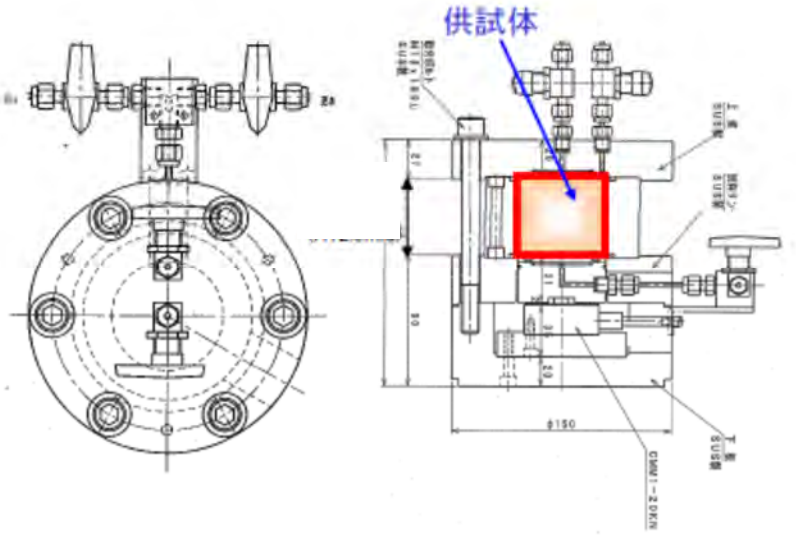
前項にて策定された実施計画に基づき、ガス移行試験の準備作業（供試体作製）を実施した。材料供試体の作成に係る作業を以下に示す。

- 材料の調達
- 供試体の作製
- ガス移行試験（ガス注入）の前段階としての供試体の飽和（再冠水）

供試体を飽和はガス移行評価試験装置を用いて実施し、これは平成 19-24 年度の検討に使用したものと同等の機能を有している。表 2.2-1 に試験装置の構成および特徴を、図 2.2-1 に供試体の飽和過程の実施概念図を示す。

表 2.2-1　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
再冠水装置	注水系統：2、　最大注水圧：0.5MPa 計測項目：注水圧力、注水量 備考：ガス注入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 2.2-1　供試体の飽和過程の実施概念図

2.2.4　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諸特性がある。これを受け、TRU2 次レポート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水分特性のデータを以下の手法により取得して上記解析に資する。

2.3　ベントナイト緩衝材におけるガス移行挙動評価に係る材料特性の課題の抽出

緩衝材におけるガス移行挙動に係わる国内外の知見を整理することによって、材料特性の課題を抽出していく必要があるが、課題抽出に当たっては以下の①～④に主眼をおいて実施した。

① ガス発生速度を考慮したガス移行形態の把握
② 人工バリア構造を考慮したガス移行形態の把握
③ 材料特性に応じたガス移行挙動の把握
④ 人工バリアの全体システムでのガス移行挙動の把握

2.3.1　ガス発生速度を考慮したガス移行形態の把握に関する課題

既往研究においては、破過に係る現象の確認が主体であった。これは、既存の知見においてガス注入（昇圧）速度の制約（試験時間など）の問題や破過発生前の現象把握の情報が十分取得されていなかったことによるものである。よって、既往の検討で得られなかった情報の把握に資するようなデータの取得が本検討の主な課題として抽出できる。

具体的には、遅い速度にて膨潤圧相当のガス圧に達するような試験はあまり実施されていないために現象が十分わかっておらず、これは過大な昇圧速度を与えて破過圧の極端な増加を助長して破過を目的とした試験が主流であったためである。これに対し、実施設に対応したガス発生速度を把握して、実施設に対応したガス発生速度にて合理的にガス移行挙動を評価していくことが必要と考えた。

2.3.2　人工バリア構造を考慮したガス移行形態の把握に関する課題

既往研究においては、人工バリア構造を考慮したガス移行形態の把握に関して、異なる材料間や同一材料の内部にて生じる界面が卓越したガス移行経路となることが懸念されている。しかしながら、これまで実際のデータ取得は殆ど行われなかった。このような点より、材料間の界面におけるガス移行挙動の把握に資するデータ取得が本検討の主な課題として抽出された。

具体的には、材料の界面（ベントナイト系、セメント系、および異なる材料間）を設定するにあたり、実処分施設での施工条件を考慮する必要があり、これに際して界面の粗度等を含め、想定される状態を模擬して試験を実施する必要が存在する。

2.3.3　材料特性に応じたガス移行挙動の把握に関する課題

本検討の主な課題としては、既往研究結果と比較することも視野に含め、材料試験全体構成の視点での計画策定や、様々なベントナイト系材料の配合を対象とした検討を逐次進めていくことが課題として抽出された。TRU2 次レポートの作成に先駆け、クニゲル V1 を 70%用いた混合材

料のガス移行に係る諸特性が取得されているため、今後の検討においては新たな観点など、実施の目的を明確に設定する必要があり、またオプションの材料配合についても検討余地が存在する。

2.3.4　人工バリアの全体システムでのガス移行挙動の把握に関する課題

既往研究における成果は、そのほとんどがカラム等を用いた小規模の要素試験によるデータであるため、人工バリア全体系を考慮したガス移行挙動に関する検討が乏しく、またその要求が存在している。よって、上記のような人工バリア全体系における材料の挙動の把握に資するような試験の計画策定が本検討の主な課題として抽出された。具体的には、実際に TRU 放射性廃棄物処分施設のシナリオとして想定されるようなガスや水の移行形態条件を具体的に設定する必要があることを踏まえ、処分システムの概念や時間的変遷を考慮した構成要素（材料・密度など）と環境条件（拘束圧・水圧・水質など）の設定や、処分システムにおける主要なガス移行経路をモデル化・模擬でき、かつ、システム挙動とガス移行をモニタリング、可視化できる装置の構築を検討する必要がある。

2.3.5　抽出された課題のまとめ

前項までに提示した現状や検討課題、およびこの検討に関して行った国内専門家との意見交換によって得た知見を反映して抽出した課題について、表 2.3-1～表 2.3-4 として取りまとめた。なお、表中に示した「抽出された課題」について、次項における試験条件の検討についての内容へ反映した。

表 2.3-1　既往の検討と抽出された課題（ガス発生速度影響等に係るもの）

No.	課題抽出に際しての懸念事項	既往の検討		有識者との意見交換によって得られたコメント	抽出された課題（案） （試験実施計画への反映事項）
		概要	参考文献		
1	ガス注入手法を考慮した試験の有無 （遅い注入/低い圧力の方針）	・該当無し（ガス注入手法の影響について評価を行った既往の検討は無い）		・遅い速度にて膨潤圧相当のガス圧に達するような試験はあまり実施されておらず、十分わかっていない。またこれに際し、現状のシナリオで重要とされていないことや、実施に際し設定の難しさや長時間を要すことが課題。	・ベントナイト系材料中の二相流挙動の存在の確認 ⇒ガス移行過程で飽和ベントナイト系材料中にも「不飽和部」が発生し、この不飽和部が透気経路となっている可能性があるため、飽和判定のための信頼性の高い計測法、およびこれに係る供試体の飽和度を確実とするための手法
2	ガス昇圧速度（ガス注入速度）を考慮した試験の有無	・様々なガス昇圧速度での実績が多数存在。 ⇒体積ひずみ拘束条件下において、ガス昇圧速度が大きいほど、ガス移行経路の拡張等によって生じた供試体内部の過剰間隙水圧が消散しきれず高圧を保持するため、結果として破過圧（破過に要するガス注入圧）の増大に至ると考察。 ⇒ガス注入方向に対して供試体寸法が大きくても（厚くても）同様にガス移行経路の拡張等によって生じた供試体内部の過剰間隙水圧が消散しきれず、破過圧の増加に至る。	[10][16][17][18]	・Graham ら[9]によって、昇圧速度影響の研究成果（カナダ Bearpaw 層産の 100%ベントナイトが対象）が示されている（文献内容を参照）⇒57.6 MPa/day という過大な昇圧速度によって破過圧の極端な増加を助長した結果となっている。	・実施設に対応したガス発生速度を把握して、実施設に対応したガス発生速度にて合理的にガス移行挙動を評価するための手法（スケール効果の相似則（≒2 乗則）の関係による条件設定） ・破過圧のガス移行経路長依存性の程度の確認 ・ガス注入によるガスおよび材料の力学連成挙動を把握するための手法（計測等）

表 2.3-2　既往の検討と抽出された課題（人工バリア構造／材料間界面影響等に係るもの）

No.	課題抽出に際しての懸念事項	既往の検討		有識者との意見交換によって得られたコメント	抽出された課題（案） （試験実施計画への反映事項）
		概要	参考文献		
1	破過に至る試験の実態	・該当無し（意図的に界面影響を考慮した既往の検討は無い）		・原環センターにおいて昨年までに実施したガス移行試験おいては、ガス注入に対して水圧が遅れて反応している現象と、これによって材料界面に生じた破壊の状況が把握されている。 ・また、このような試験は電中研/JAEA においても多数実施・確認され、得られたデータは解析で検証されている。 ・異種材料の界面（ベントナイト系／セメント系）を設定する際には、実処分施設での施工条件（界面の粗度等）を考慮する必要がある。	・供試体の体積ひずみが拘束されるか否かで破過特性が異なる可能性があり、特にベントナイト系材料の場合、不連続面（供試体と試験容器の界面等）においてガス移行経路を形成するのか否かを確認する ⇒実施設のガス移行挙動を評価する場合、異種材料の境界面の存在を考慮する必要があり、さらに周辺岩盤の変形の影響も考慮する余地がある。 ・異種材料界面を設定する場合は、実処分施設での施工条件を考慮して、考えられ得る状態を模擬する必要が存在。またオプションとして、ベントナイトの密度のバラツキの影響を検討する余地が存在（たとえば施工管理値±2σ程度で数パターンに条件を設定）。

表 2.3-3　既往の検討と抽出された課題（緩衝材材料／材料特性影響等に係るもの）

No.	課題抽出に際しての懸念事項	既往の検討		有識者との意見交換によって得られたコメント	抽出された課題（案） （試験実施計画への反映事項）
		概要	参考文献		
1	混合材料を考慮したガス移行および破過に至る試験の実態	・100%ベントナイト、およびベントナイト混合土（70%、15%）によるガス移行試験 ⇒100%ベントナイト[10]および 70%ベントナイト混合土飽和供試体[11]では、ハイドロリックフラクチャリングに基づくメカニズムで破過が生じている（ベントナイト 100%では気液二相流挙動は存在しないという知見が主流となっている） ⇒15%ベントナイト混合土飽和供試体[12]では、膨潤したベントナイトゲルが欠損した間隙が選択的気みちとなり、ガスが透気する	[10][11][12]	・TRU2 次レポートにおいて、既にクニゲル V1 を用いた 70%混合土の特性が取得されているため、新たな観点など実施目的を明確にしておき、オプション配合も対象の視野に入れる。	・供試体の材料配合に応じたガス移行メカニズム（ガス侵入圧、破過圧、ガス透気経路　等）を把握する ・材料配合の違い（100%と混合配合）における二相流挙動の発生形態を明らかにする ・実際の TRU 処分施設を対象とした緩衝材の配合条件設定に関する試験としての位置付けを明確にする

表 2.3-4　既往の検討と抽出された課題（システム試験／人工バリア全体系を考慮した試験系影響等）

No.	課題抽出に際しての懸念事項	既往の検討		有識者との意見交換によって得られたコメント	抽出された課題（案） （試験実施計画への反映事項）
		概要	参考文献		
1	大きな供試体を用いた試験の実態	・H=200 mm 供試体でのガス移行試験[8] ⇒破過は生じなかった ・φ800，H=1,600 供試体（100% BoomClay）でのガス移行試験（0.01 MPa/day）の例[13]があるが、試験条件や結果の詳細は不明 ・今後もシステム構築のための資料調査を継続。	[8][13]	・システム試験のようなものを将来考える上での参考データとして、10cm 程度の供試体の試験を実施するのが望ましい。	・寸法効果（破過圧と供試体厚さの相関性）の知見拡充を目的として、比較的規模の大きい供試体でのガス移行特性データをなるべく数多く取得しておくこと
2	システム供試体での試験の実態	・スイス・グリムゼルにて実施された原位置モデル施設によるガス移行評価試験（GMT）[1] ⇒複合的なパスを移行しながら、ガスが外部に透過 ・スウェーデン・Aspo HRL にて実施された HLW 処分概念の EBS 実規模ガス移行評価試験（Lasgit）[17] ⇒模擬キャニスター表面から、複数のベントナイトブロックで構成される緩衝材へ注入されたガスが、模擬キャニスター／緩衝材の界面より緩衝材の下方に移行した後、ベントナイトブロック界面を透過して外部に移行した	[1][17]	・実際に TRU 放射性廃棄物処分施設のシナリオとして想定されるようなガスや水の移行形態条件を具体的に設定しないと、試験規模を大きくする意味が無い。	以下に示す条件を網羅したシステム試験を実施すること ・シナリオ構築や連成解析に資するデータを取得する ・実際に想定されるガス発生量（ガス昇圧速度）を反映した条件設定 ・要素試験での制約（実処分システム規模への適用上の課題）解決のため、システム（の一部）を模擬したモックアップ試験によるガス移行試験の検討 ・処分システム概念と処分システムの時間的変遷を考慮した試験体の構成要素（材料・密度など）と環境条件（拘束圧・水圧・水質など）の設定 ・処分システムにおける主要なガス移行経路をモデル化・模擬でき、かつ、システム挙動とガス移行をモニタリング、可視化できる装置の構築 ・予備試験、試験体の作成、システムの飽和、ガス注入試験、解体調査までを一定時間内（数年オーダー）で完了できる試験体サイズ、試験法にて装置を構築

2.4　ベントナイト緩衝材を用いた材料データ取得計画の策定

ベントナイト緩衝材を用いた材料データ取得計画を対象に、「2.3　節」において抽出した課題について、計画的・総合的に検討しながら策定した。

具体的には、以降の「2.4.1　」～「2.4.4　」節に関する検討を行った。

2.4.1　ガス発生速度を考慮したガス移行形態の把握に係る検討

「2.3.1　節」において抽出した課題解決に資するため、破過に至らないようなガス移行挙動（シナリオ）における現象把握への展開を主眼に検討を進めた。

具体的には、既往の研究の主な実施内容は、材料の破過発生を前提とした破過前～破過後の状態把握に資するものであったのに対し、本検討では気液二相流としての材料内部のガス移行挙動や力学／水理状況の把握に資することを目的として、「低注入圧によるガス注入」や「比較的長期にわたるガス注入」等の検討を実施した。

図 2.4-1 に既往研究（平成 19-24 年度に実施した「ガス移行挙動評価に関する検討」における主な実施内容と本検討で計画立案したガス移行試験の想定実施内容との着眼点の違いを概念として示す。

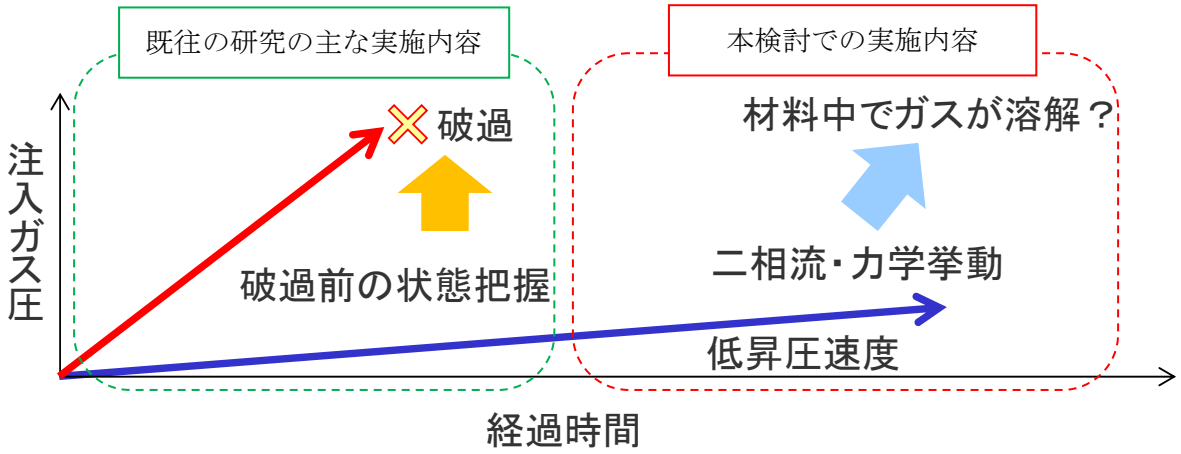


図 2.4-1　既往研究の主な実施内容と本検討における想定実施内容の概念

・

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、ガス注入速度を 0.1MPa／2 日を標準として一連の試験を進めた。一部の試験においては 0.1MPa／4 日と標準速度とした 1/2 の昇圧速度でガス注入を進め、ガス注入速度の影響評価を試みたが明確な差異は確認できなかった。既往の他の研究成果を参考に、ガス注入速度の範囲を拡大してその影響評価を実施していく場合、下記の課題が挙げられる。

・ガス注入速度の低昇圧速度のための、段階昇圧の再検討と試験装置の対応
（最大ガス注入圧を小さく設定した場合の調圧弁の選択と調圧精度の確認など）

・昇圧時間間隔の再検討（従来 2 日毎の昇圧間隔の長期化など）
・昇圧各過程でのガスフロントの確認
（ガス注入までの供試体飽和期間を考慮した場合に、複数供試体の同時試験準備などの工夫が必要、予備試験としての試験実施案の検討が必要。）
・膨潤圧の確認（これまでのデータの整理）
・試験工程の検討（具体的な実施時間をシミュレーションで予測）

以上の課題を踏まえ、次年度（平成 26 年度）における試験実施案を図 2.4-2～図 2.4-3 のように検討した。

図 2.4-2 に示す「試験実施案 1」は、ガス昇圧速度（有効ガス圧）を膨潤圧付近まで比較的早く設定し、移行は一定圧を保持して試験を継続する実施案である。

実施目的を以下に示す。

① 供試体内で生じている現象の確認（破過の有無によらず、一定期間毎に解体調査を実施）
② 異種材料間（ベントナイト 100%材料とベントナイト配合率 70%混合土）での相違の確認
③ 供試体高さでの相違の確認（寸法効果）

なお、「試験実施案 1」として、100%ベントナイト材料にて 3 体/セット、ベントナイト配合率 70%混合土で 3 体/セット製作し、1 セットずつ全 2 セットの試験を実施することとした。また、膨潤圧相当圧力の設定、および膨潤圧相当までの昇圧ステップや供試体解体の時間は実施の際に再度確認する必要がある。

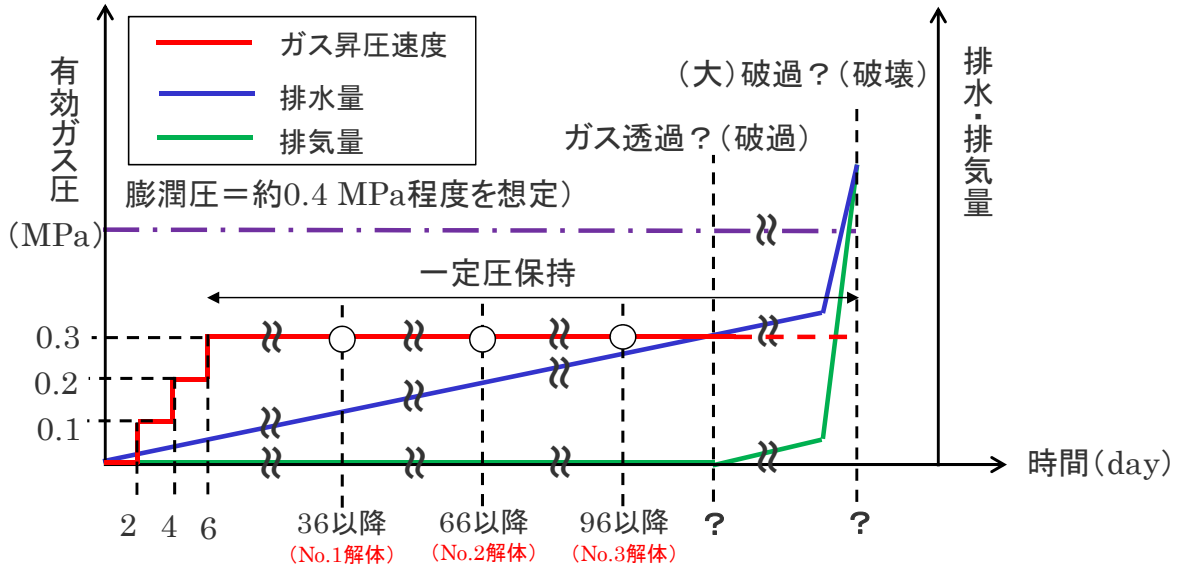


図 2.4-2 試験実施案 1（膨潤圧付近まで比較的早く昇圧→一定圧を保持）

図 2.4-3 に示す「試験実施案２」は、ガス昇圧速度（有効ガス圧）を膨潤圧付近まで比較的早く設定し、移行は一定圧を保持するところまでは「実施案１」と共通だが、一定圧保持ののち、ある時間から一定速度で昇圧させることで、破過に至るまで試験を行うオプション案である。

目的としては、以下の①～③とする。

① 破過後の供試体内で生じている現象の確認（破過後に解体調査を実施）
② 異種材料間（ベントナイト 100%材料とベントナイト配合率 70%混合土）での相違の確認
③ 供試体高さでの相違の確認（寸法効果）

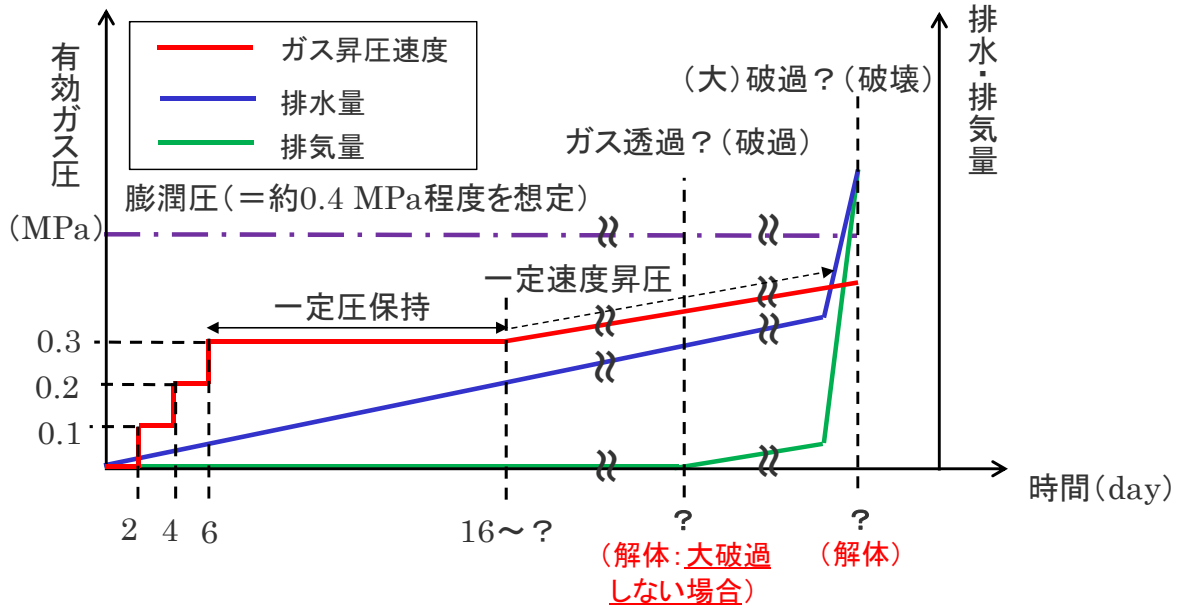


図 2.4-3 試験実施案２（膨潤圧付近までは比較的早く昇圧 → 一定圧を保持 → 一定速度で昇圧）

2.4.2 人工バリア構造を考慮したガス移行形態の把握に係る検討

「2.3.2 節」において抽出した課題解決に資するため、以下に示す項目についての検討を実施した。

- 界面挙動を考慮したガス移行試験の全体計画
- 界面挙動を考慮したガス移行試験の検討
- 界面挙動を考慮したガス移行予備試験の実施
- 界面挙動を考慮したガス移行試験の実施

具体的には、ベントナイト内の界面（施工継ぎ目）およびベントナイト／モルタルの界面を模擬した供試体を用いたガス移行試験の実施についての検討を行った。

図 2.4-4 にベントナイト材料に係る界面を模擬したガス移行試験の概念を示す。

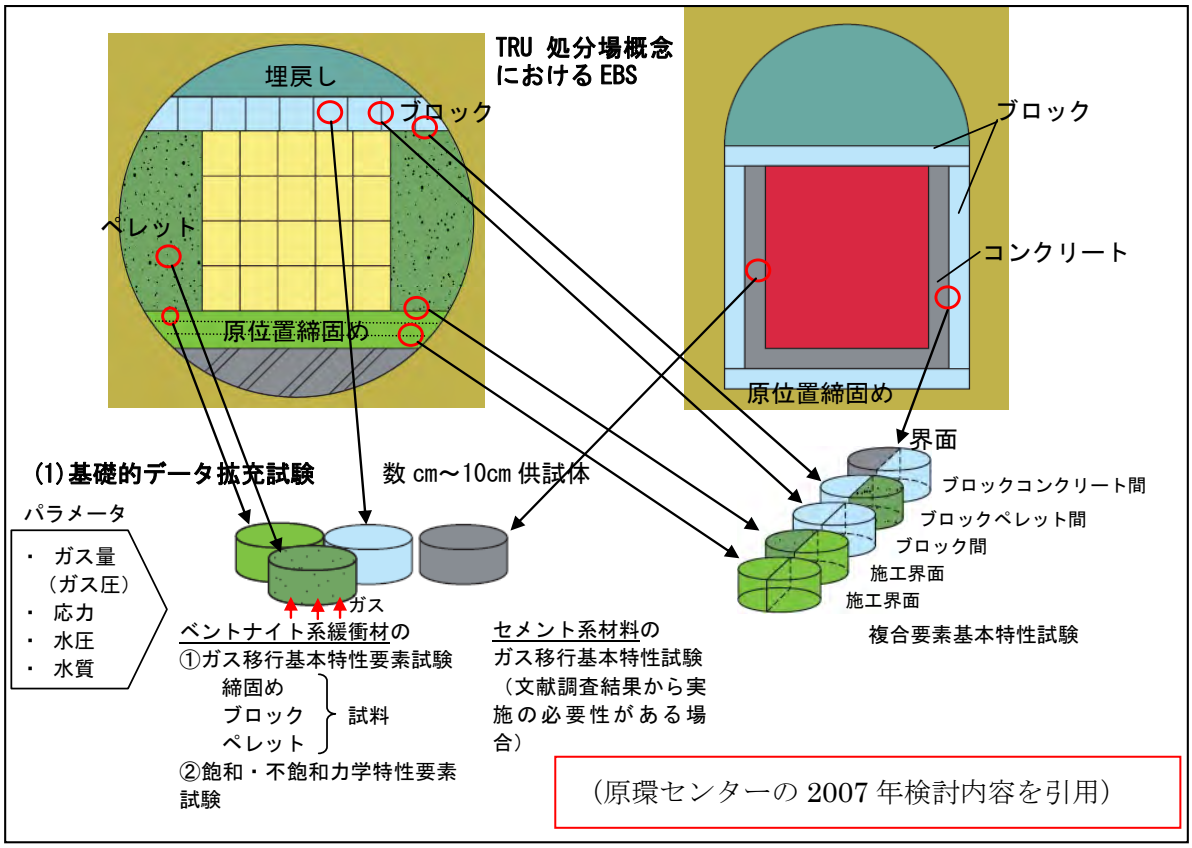


図 2.4-4　ベントナイト材料に係る界面を模擬したガス移行試験の概念

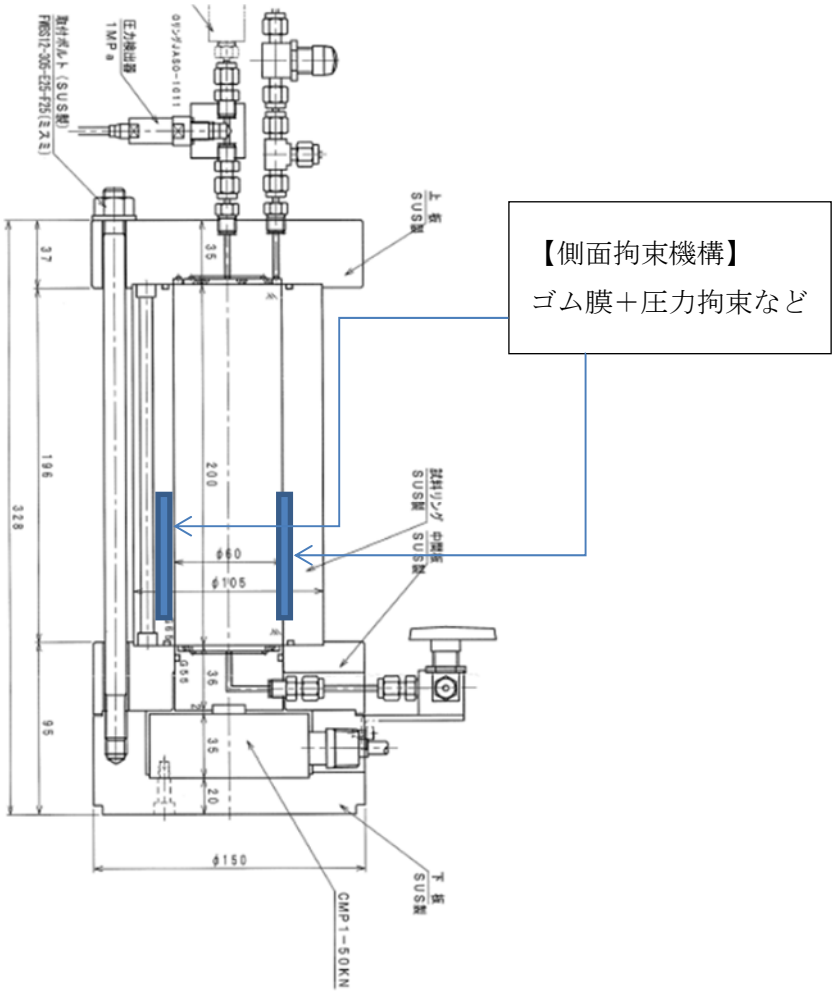
・

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、ステンレス製の鋼製モールドを使用し一連の試験を進めたとこと、大破過に対して供試体とモールドの境界で発生した。上記材料の境界面のガス移行特性を評価した場合に、同様に目的の材料境界面ではなく、モールドとの境界でガス移行が進行する可能性が十分考えられる。そのため、以下の条件の試験設定などが考えられる。

・大破過に至らないガス注入条件での試験進行（ガス昇圧速度、試験終了時期の検討など）

・モールド境界層における新しいアイデアと具体化

後者に対しては、たとえばモールド中間の一部を側面拘束機能を持たせ、境界面をガス侵入を防止するなどの機構の考案と確認試験などが考えられるが、長期間に及ぶことの多いガス注入試験においてガス侵入防止機構の材料選定として一般的な剪定材料となるゴム膜を利用した場合の長期間耐久性の確認なども大きな検討課題となる。（図 2.4-5 参照）



※H200mm モールドの場合

図 2.4-5　側面拘束機能の想定例

2.4.3　材料特性に応じたガス移行挙動の把握に係る検討

「2.3.3　節」において抽出した課題解決に資するため、以下に示す項目についての検討を行った。

- ベントナイト混合材料の特性データの取得に係る全体計画
- ベントナイト混合材料の特性データの取得に係る予備試験の実施
- ベントナイト混合材料の特性データの取得に係る試験の実施

具体的には、人工バリア全体系を対象とした材料試験の計画における試験条件（供試体寸法、注入圧力等；2.4.1　節での検討結果も反映）の検討や、材料配合に関する検討を実施した。

材料配合に関しては、TRU2 次レポートの人工バリア概念における「底部緩衝材」の想定材料である“ベントナイト貧配合材料（30%けい砂混合）”を主眼として検討した。

図 2.4-6 に本項の対象として想定されるベントナイト材料の使用部位を示す。

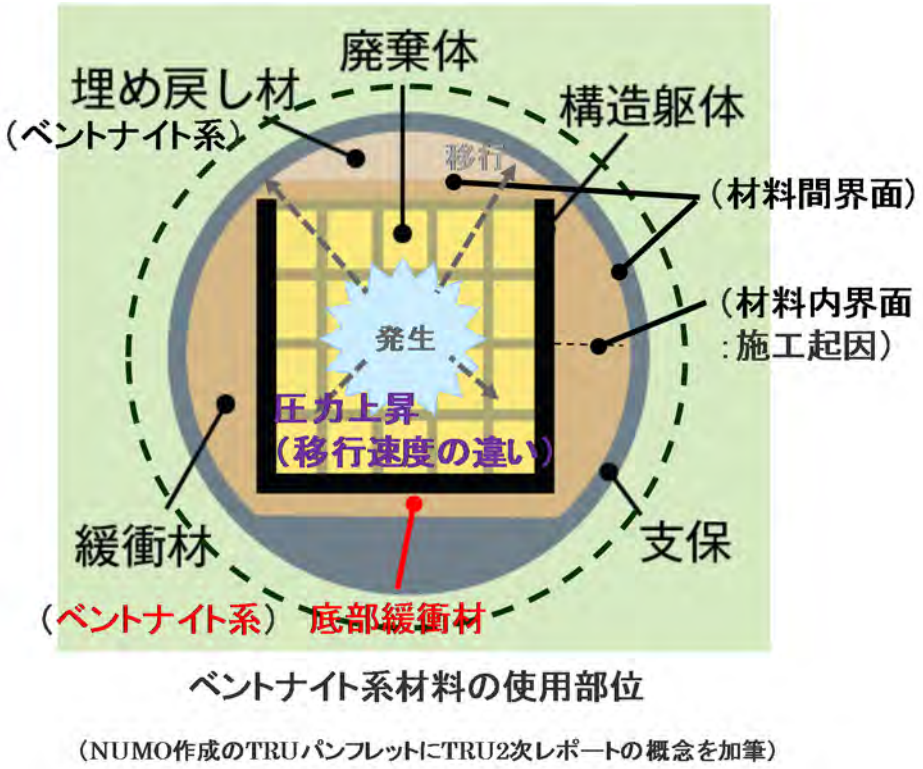


図 2.4-6　人工バリアで想定されるベントナイト系材料（底部緩衝材）の使用部位

2.4.4　ガス移行試験の複合システム化に係る検討

「2.3.4　節」において抽出した課題解決に資するため、今後、以下に示す項目についての検討を段階的に実施する。

・　ガス移行試験の複合システム化に係る全体計画
・　ガス移行試験の複合システム化に係る予備検討
・　ガス移行試験の複合システム化に係る検討
・　ガス移行試験の複合システムの概念検討

具体的には、既往の研究（主にカラム／要素試験）における制約（実規模モデルへの適用上の課題）解決に資する「複合システム化」に関する検討を進めた。

図 2.4-4 に TRU 廃棄物処分概念および関連する「人工バリアの複合システム化」の概念図を示す。

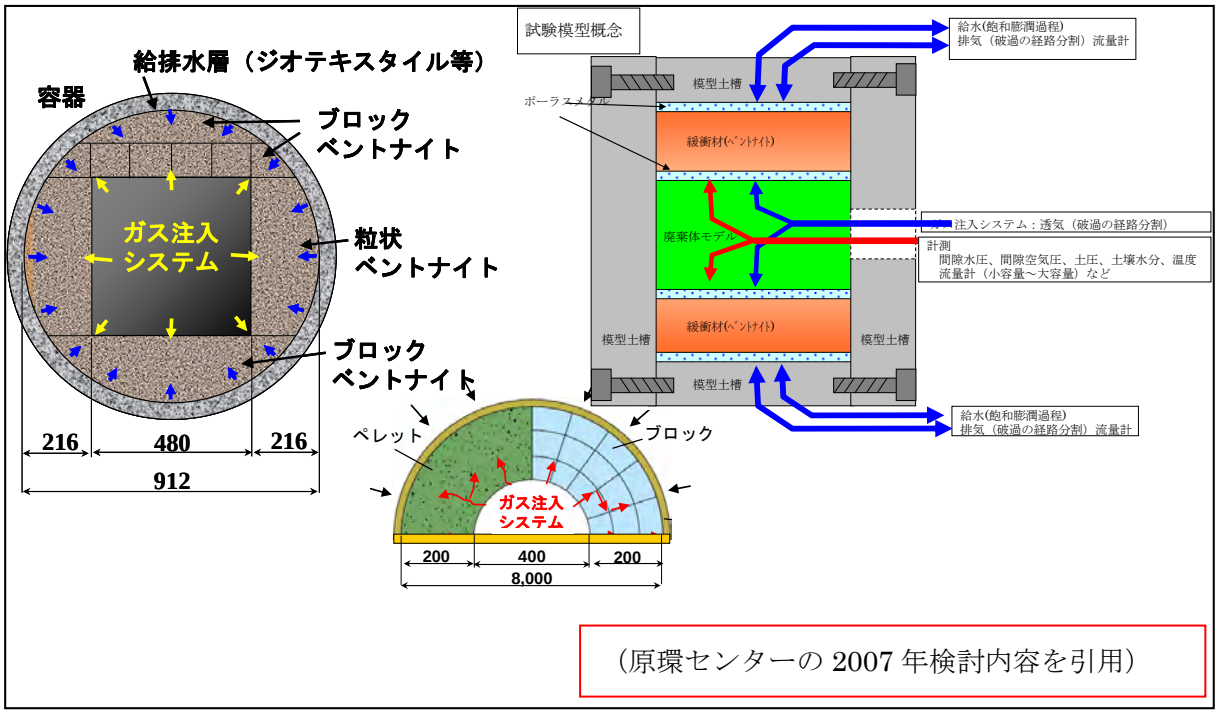


図 2.4-7　TRU 廃棄物処分概念とそれに関連する「複合システム化」の概念図

なお、ガス移行試験の複合システム化に際しては、シナリオ構築の観点も視野に含めて検討を行った。

2.4.5　検討項目のとりまとめ

「2.4.1　」～「2.4.4　」節において検討した項目を取りまとめ、ベントナイト緩衝材を用いた材料を対象として、ガス移行挙動評価に係るデータ取得計画を策定した。

材料データ取得計画に際しての課題と検討内容は表 2.4-1 のように整理した。一方で、結果の取りまとめに際しては同じく表 2.4-1 に示すような実施に際しての諸条件（優先度、コスト、専門家の要請、その他）を勘案し、現実的な計画策定を検討した。その一方で、計画策定を具体的に検討していくうえでは、幾つかのハードル（優先度）が設定できる。設定した優先度に基づき、

全体試験計画を今後数年間オーダーで実施する材料データ取得計画を表 2.4-2 のように策定した

表 2.4-1　材料データ取得計画に際しての課題と検討内容

項目	既往研究	検討課題	検討方法	実施上の課題	ハードル
（1） ガス発生 速度	カラム試験	ガス注入によるガスおよび材料の連成挙動 **・現実的なガス発生速度（ガス圧昇圧速度）の設定**	低注入圧/比較的長期にわたるガス移行 **・既存解析（実施設モデルでのシミュレーションを用いた最大ガス圧の到達時刻の予想）結果の参照**	試験システムの高度化および条件設定	やや高
（2） 人工バリア 構造	ベントナイト	材料内界面/ 材料間界面におけるガス移行 **・現実的な界面状態（緩衝材ブロック間の施工継目，およびセメント系材料との界面等）設定**	施工／材料界面模型供試体のガス移行試験	条件選定（概念の参照）	やや低
（3） 緩衝材材料	ベントナイト （100%／珪砂混合材料）	データの補完 **・混合材料の特性把握（ガス侵入圧，破過圧，不飽和力学特性等）**	TRU処分概念上の想定材料	既存データとの照合（課題選定）	やや低
（4） システム 試験	カラム試験主体	シナリオ構築や連成解析に資するデータ取得 **・システムの検討（ベントナイト／セメント系材料の構成や各種測定系の検討等）**	3次元/大型モデルを用いたガス移行試験	試験コスト 条件絞り込み	高

表 2.4-2　課題と検討内容に基づく材料データ取得計画案の概要

実施項目	試験装置	対象材料	材料仕様	試験仕様 （圧力条件他）	実施時期
（1） 供試体作成	・ガス移行挙動試験装置 （容器寸法 ϕ=60 mm， H=12.5,25,50， 200mmに対応） ※平成24年度までの検討にて使用	・100%ベントナイト ・ベントナイト／珪砂混合材料 （珪砂配合率30%）	・ベントナイト（クニゲルV1） ・珪砂（3/5号） ・有効粘土密度 1.36 Mg/m^3 ・含水比17%程度	・試験容器内で締固め作成	平成25年度
（2） 供試体飽和				・蒸留水使用（高pHや塩水系は今後の課題） ・注水圧 0.2～0.5 MPa程度（膨潤圧以下） ・背圧0.1 MPa	平成26年度
（3） ガス注入				・窒素ガス使用（N_2ガス以外は今後の課題） ・注気圧 0.2～2.0 MPa程度（低圧注入の継続，あるいは閾値付近圧での注入の継続）	平成26/27年度
（4） 解体調査				・密度測定 ・含水比測定	平成26/27年度

今年度の検討成果に従い、今後数年間オーダーわたって検討を進めることを想定している。最終年度に取りまとめる成果目標を以下に示す。

- ガス発生速度を考慮したガス移行形態の把握に係る検討結果の取りまとめ
- 人工バリア構造を考慮したガス移行形態の把握に係る検討結果の取りまとめ
- 緩衝材におけるガス移行挙動に係る検討結果の取りまとめ
- ガス移行試験の複合システム化に係る検討結果の取りまとめ

2.5　ガス移行挙動評価試験の準備（供試体の作成）

“ベントナイト緩衝材を用いた材料データ取得計画”に基づいた試験の実施（ガス移行挙動評価試験）のための準備として、供試体（飽和準備も含む）の作製を行った。

具体的には、前項にて示した諸条件におけるガス移行挙動評価試験に着手することを想定し、実施ケース①として「ベントナイト単体」供試体を、実施ケース②として「ベントナイト／珪砂混合材料」供試体を複数体製作することとした。なお、試験装置の構成上、同時に試験を実施できるのは最大 3 体までとなっている。

具体的な仕様を表 2.5-1 に、試験実施のイメージを図 2.5-1 に示す。

表 2.5-1　各実施ケースで製作する供試体の仕様

	実施ケース①	実施ケース②
供試体の大きさ	直径φ60.0mm×H25.0mm	
材料	ベントナイト(クニゲル V1)	ベントナイト(クニゲル V1)、珪砂（3 号/5 号＝1：1）
珪砂配合率	0 %	30 %
乾燥密度	1.36 Mg/m^3	1.60 Mg/m^3
有効ベントナイト密度	1.36 Mg/m^3	
初期含水比	35.0 %	17.0 %※
初期飽和度	90.0 %	64.7 %

※ケース①と②の密度（重量）を同一とする観点にて含水比を設定

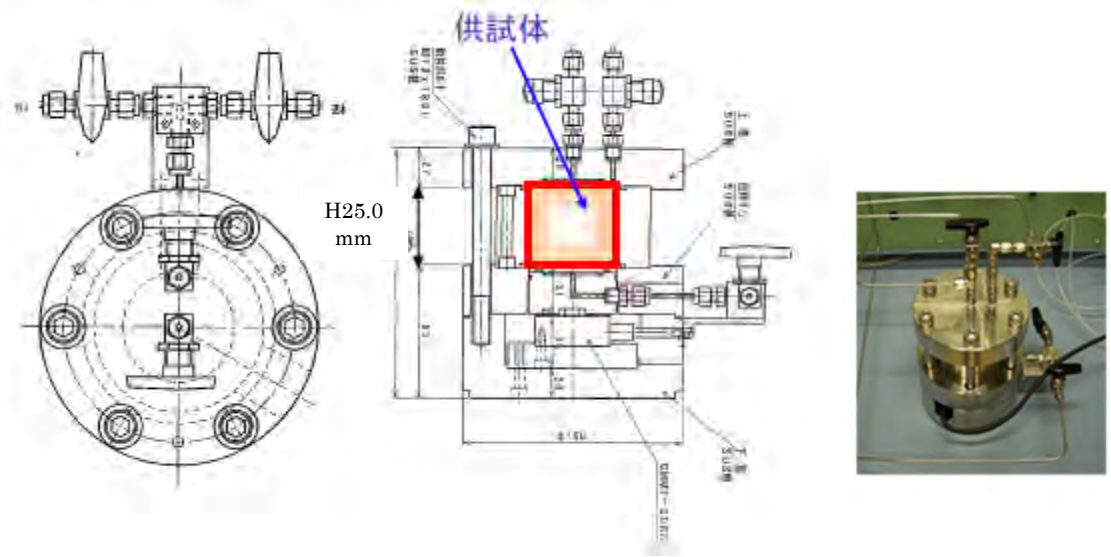


図 2.5-1　緩衝材材料のガス移行挙動試験の実施状況イメージ

図 2.5-2 に試験実施フロー図を示す。このうち本年度の実施内容としては、供試体を図 2.5-1 に示す条件にて作製した後、試験設備の調整等を経て、注水開始（供試体の飽和開始）まで実施した。図 2.5-3～図 2.5-4 に供試体の作製および設置状況を示す。各材料に対して所定の初期飽和度となるよう含水比調製した所定量のベントナイト材料を 2 層(2 回)に分けて目標密度まで載荷板を用いて静的圧縮整形した。

なお、完成した供試体は試験設備に接続後、初期圧力 0.1 MPa 程度にて注水を開始した。

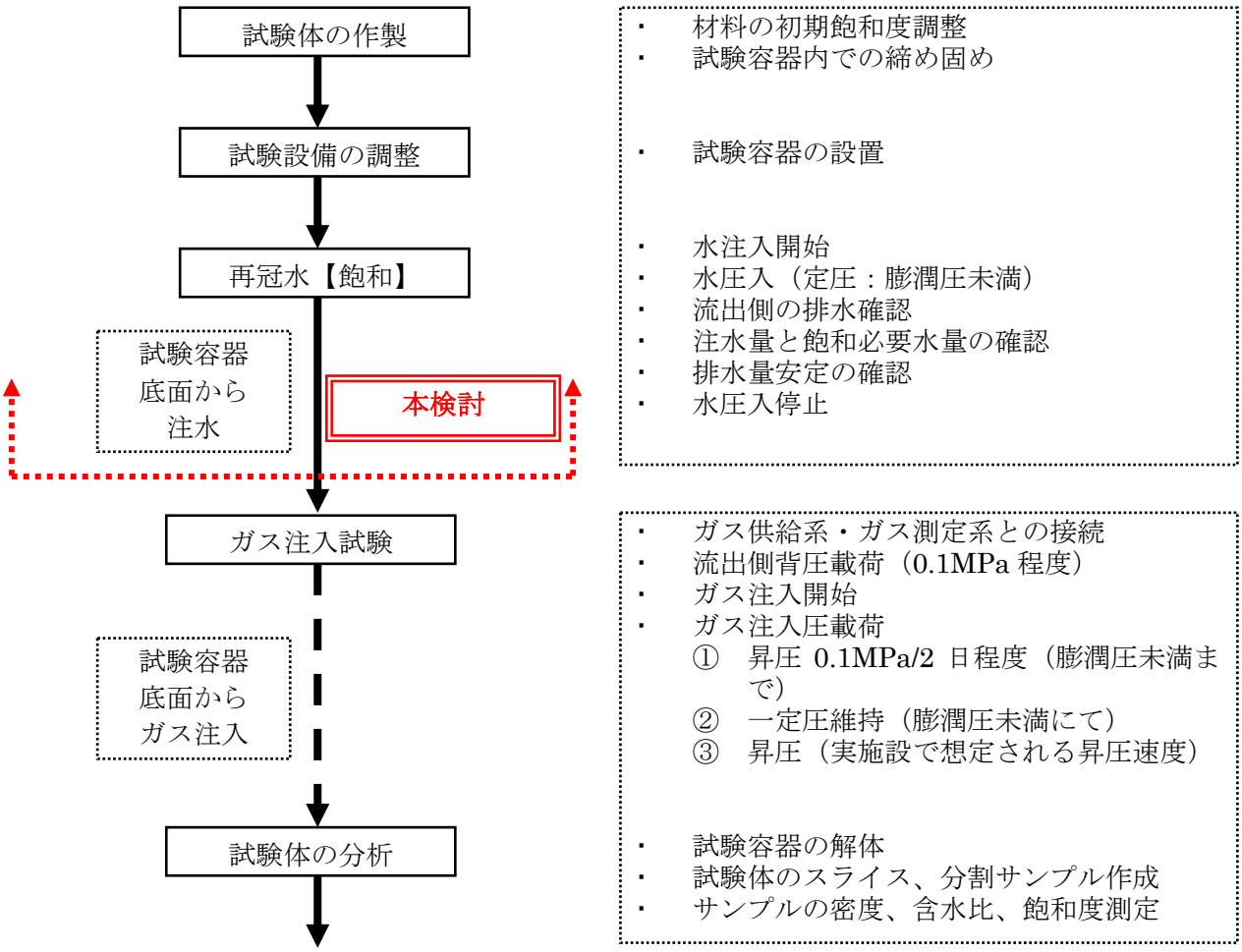


図 2.5-2　試験実施フロー図

図 2.5-3　　試料とモールドの準備（左）および供試体の静的圧縮整形（右）

図 2.5-4　　供試体モールド設置状況

2.6　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

2.6.1　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諸特性がある。本検討においては、TRU2 次レポートにおいて底部緩衝材の材料に想定されている、ベントナイト系材料（砂混合）を対象に水分特性（飽和度とサクションの関係）データを取得して上記解析に資する。
なお、本報告において、サクションを以下のように定義する。
　サクション s＝（間隙ガス圧）－（間隙水圧）
また、サクション除荷過程を吸水過程、サクション載荷過程を排水過程とも呼ぶ。

2.6.2　ベントナイト系砂混合材料の水分特性データの取得

本検討においては、以下の手法により水分特性データの取得を行った。

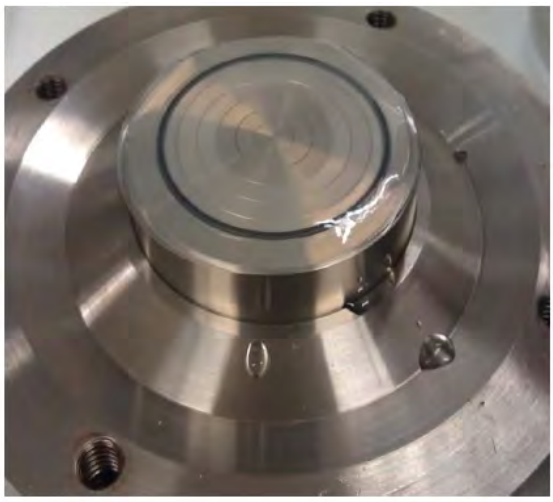
1）実施方法
　サクションを制御可能なオエドメータ試験装置を用いて、以下の試験条件のもとで湿潤過程および乾燥過程の水分特性（飽和度～サクションの関係）を取得した。

- 材料供試体
  以下の仕様にて調整した。
  ベントナイト・砂混合土（初期乾燥密度 1.6 Mg/m3、間隙比 0.725，真密度 2.76 Mg/m3，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 の円柱。
- 載荷サクション：0（飽和）～2.0 MPa の範囲（適切に 5 水準以上を目安）

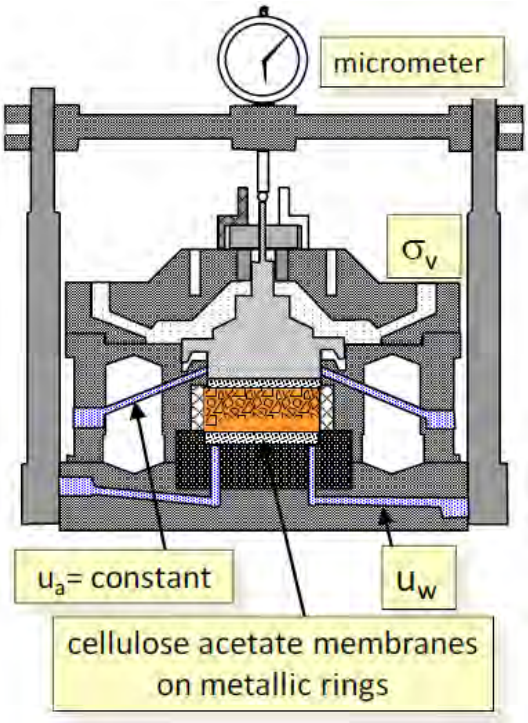
2）実施装置
　実施に供する装置は、サクションを制御可能なオエドメータ試験装置で、平成 23 年度における「ガス移行挙動の評価　ベントナイト材料の水分特性試験」にて使用された試験装置と同等の機能を持つ装置である。
用いたサクション制御可能なオエドメータ試験装置を図 2.6-1 に示す。
　上部および下部のペデスタルにはポーラスメタルがセットされており上部から空気圧（u_a）を、下部から水圧（u_w）を作用させることができる構造となっている。また、上部から作用させる空気圧が下部から抜けることなく保持されるよう、下部のポーラスメタルと供試体の間には空気侵

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 2.6-1　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

2.6.3　実施手順

(1) 試料と供試体作成

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 2.6-2 に静的圧縮成型時の間隙比と載荷応力の関係を示す。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。

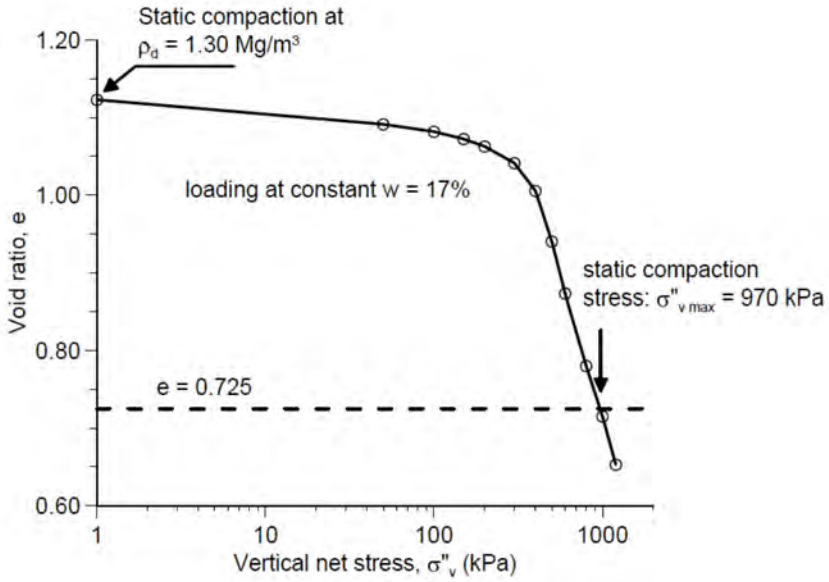


図 2.6-2　乾燥密度 1.6Mg/m³ へのベントナイト・砂混合土供試体作成時（静的圧縮による成型）の鉛直応力の経時変化

(2) 試験方法および試験条件

水分特性試験中のサクション変化による供試体の変形をなるべく小さく抑えるために、供試体の平衡膨潤圧に相当する鉛直応力を作用させ、一定鉛直応力条件下でサクションを載荷、除荷する方法で試験を行った。

まず、乾燥密度 1.6 Mg/m³ に締め固めた S/B 供試体の平衡膨潤圧の把握を目的として、100, 200 および 400 kPa の鉛直応力を載荷した状態での S/B 供試体の飽和試験（予備試験）を行った。図 2.6-3 に S/B 供試体への鉛直応力載荷過程（loading stage）および飽和過程（saturation stage）における間隙比（e）の経時変化を示す。予備試験では、S/B 供試体に一定の各鉛直応力を約 15 分間載荷し、間隙比の経時変化が一定になった時点（ここまでが loading stage）より、飽和過程（2 日間継続）に移行する手順とした。図より、鉛直応力が 400 kPa 未満で供試体を飽和させた場合、所定の乾燥密度である 1.36 Mg/m³ を下まわって（間隙比では 0.725 を上回って）膨潤が進展することが分かった。よって、S/B 供試体に載荷する鉛直応力は、所定密度を維持可能である 400 kPa に設定することとし、以下の全ての試験で共通とした。

水分特性試験は、初期状態（含水比 0.17、初期サクション 0～2.0MPa）から、湿潤過程の水分特性を取得するために、5 水準のサクション 1.3, 1.0, 0.5, 0.3, 0.1 MPa（および飽和時は

0 MPa）をそれぞれ別の供試体で作用させ、供試体内のサクションが平衡状態になったと考えられる時点で試験を終了し試料の含水比を測定して飽和度を求めた。

次に、飽和後の乾燥過程における水分特性試験を実施した。試料を飽和させた後（飽和時のサクションは 0 MPa）、5 水準のサクション 0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 1.3 MPa をそれぞれ別の供試体で作用させ、供試体内のサクションが平衡状態になったと考えられる時点で試験を終了し試料の含水比を測定して飽和度を求めた。

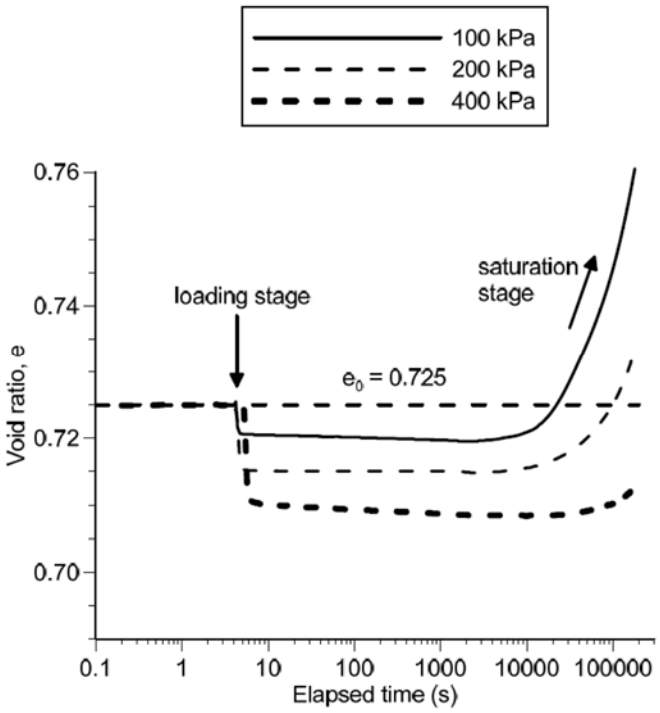


図 2.6-3　鉛直応力載荷過程（loading stage）および飽和過程（saturation stage）における間隙比（e）の経時変化

2.6.4　取得されたデータ

図 2.6-4 および図 2.6-6 に取得された水分特性とモデル近似結果を、表 2.6-1 および図 2.6-6 に同定されたモデルパラメータを示す。

van Genuchten モデル（以下、「vG モデル」と称す）および Narashimhan モデル（以下、「Na モデル」と称す）とも、実験結果を良好に近似できる結果となった。

また、参考として、既往の検討結果（ベントナイト緩衝材を対象とした水分特性試験、HLW2000 年レポート[18]）において示された vG モデルパラメータ（表 2.6-2）を示す。

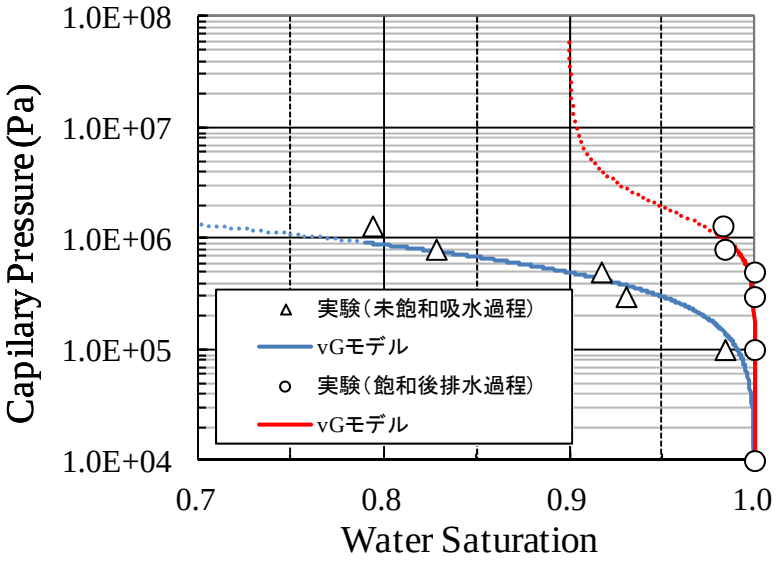


図 2.6-4　取得された水分特性と van Genuchten モデル近似

表 2.6-1　近似により同定された van Genuchten 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
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

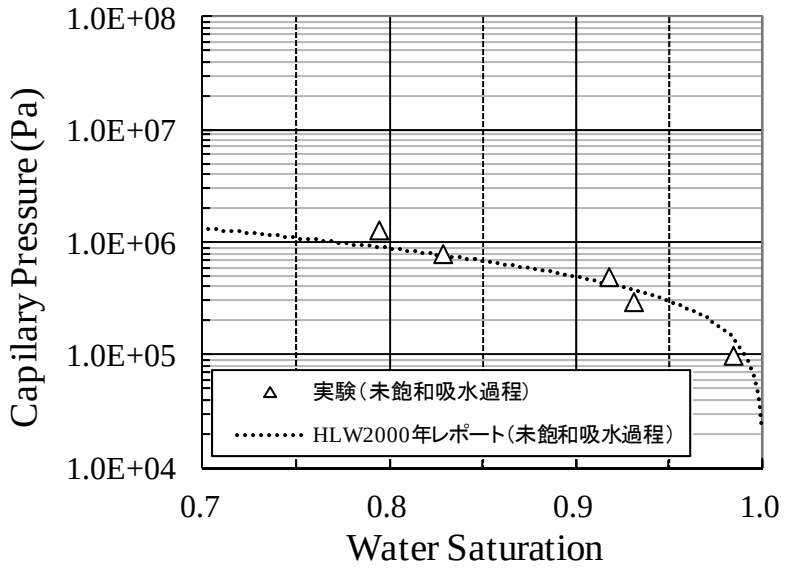


図 2.6-5　取得された水分特性と van Genuchten モデル曲線（HLW2000 年レポートで同定されたモデルパラメータによる）との比較

表 2.6-2　HLW2000 年レポートで同定された van Genuchten 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
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
	P_0（MPa）	1.00
	λ	1.60
	Slr	0.00
	Sls	1.00

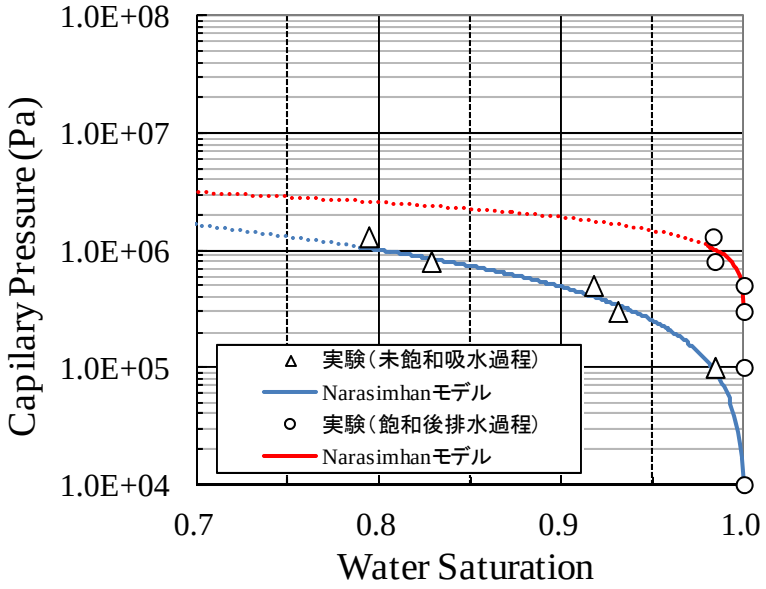


図 2.6-6　取得された水分特性と Narashimhan モデル近似の成果イメージ

表 2.6-3　同定された Narashimhan モデルパラメータの成果イメージ

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

2.6.5　考察と課題

図 2.6-4 において示した未飽和吸水過程の vG モデルによる近似結果は、既往の検討結果（ベントナイト緩衝材を対象とした水分特性試験、HLW2000 年レポート[18]）において示された vG モデルパラメータ（表 2.6-2）による近似結果（図 2.6-5）と一致している。

なお、実験（排水過程）より 0.5 MPa のガス侵入圧（Pe）が観測されているため、排水過程においては、Pe をパラメータとする Na モデルでの近似が vG モデルよりも実験結果に忠実であ

ると思われるが、数値解析に用いる場合、解の安定性や明瞭なガス侵入圧考慮の影響度合いによってはvGモデルを用いることも妥当であると思われる。
また、同定したモデルパラメータは、表 2.6-1 および表 2.6-3 上に示しているが、飽和度の比較的高い限定された飽和度領域でのみ適用可能であることに注意が必要であり（図 2.6-4 と図 2.6-6 では実線で示される飽和度の範囲）、この範囲外についてモデルの適用性を議論するには、さらなるデータ取得が必要である。

ベントナイト緩衝材のガス移行特性把握のためには、材料試験と併せて、水・ガスの二相流挙動と力学挙動を達成させた力学達成解析を進めていく必要がある。本年度は水分特性試験を実施したが、力学連成二相流解析に必要なベントナイトの物性パラメータの拡充に資するため、サクション制御による膨潤変形特性試験・圧密変形試験およびせん断強度特性試験等によってベントナイト緩衝材のパラメータ取得を実施していくことが今後の課題である

2.7　まとめと今後の課題

本検討においては、平成 19-24 年度にわたって上記「材料試験データの取得」の実施によって蓄積された知見を基盤に、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を行った。平成 25 年度は、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。さらにその計画の一部として、ガス移行試験の準備作業（供試体作製）およびベントナイト混合材料の水分特性データ取得を実施した。

今後は、TRU 放射性廃棄物処分システムに係る現実的なガス移行挙動把握のためのベントナイト材料のパラメータの取得に際する試験の検討や実施を効果的に進めること、およびガス移行挙動の評価に重要である力学連成二相流解析に必要なベントナイトの物性パラメータとして、サクションの変化に対するベントナイト緩衝材の各種力学パラメータ取得を迅速に進めることが課題である。

参考文献

[1] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 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).

[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：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)

[8] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等事業　TRU 廃棄物処分技術人工バリア長期性能評価技術開発　平成 19 年度～24 年度取りまとめ報告書(2013)

[9] Graham et.al.，A capillarity-advective model for gas break-through in clays，Engineering Geology 64，pp.273-286，(2002)

[10] 棚井憲治 他：圧縮ベントナイトの水素ガス移行特性評価，動燃技術資料，PNC TN8410 96-289，(1996)

[11] 山本幹彦 他：地層処分におけるガス移行影響評価 ―人工バリア内のガス移行解析手法とデータ取得―，原子力バックエンド研究，Vol.10，No.1，pp.31-45（2004）.

[12] 穂刈 他：ベントナイト混合土の透気特性における寸法効果について，放射性廃棄物研究，Vol3，No.2，pp.91-98，日本原子力学会放射線廃棄物部会（1997）.

[13] Rodwell，W.R.（ed）: Research into gas generation and migration in waste repository systems（Progress Project），nuclear science and technology，EUR 19133EN，pp.237-267（2000）.

[14] 棚井憲治 他：地層処分場におけるガスの拡散・移行に関する検討，核燃料サイクル開発機構研究報告，JNC TN8400 99-045（1999）.

[15] 山本幹彦 他：ガス移行挙動モデルの検討，核燃料サイクル開発機構業務委託報告書，JNC

TN8440 2003-2004（2003）.
[16] 山本幹彦 他：人工バリアシステム中のガスの移動に関する研究（V）－2 相流モデルによる粘土系材料におけるガス影響評価結果の妥当性の検討－，核燃料サイクル機構研究委託報告，JNC TN8400 2000-032（2000）
[17] Sellin P (editor). Experiments and modelling on the behaviour of EBS. FORGE Report D3.38.426pp. （2014）
[18] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りまとめ－，分冊２「地層処分の工学技術」（2000）

第 3 章　セメント系材料のガス移行挙動のデータ取得

3.1　背景と目的

TRU 廃棄物処分場の計画に際しガス移行特性やガス発生の影響をより詳細に評価するためには、気液二相流解析や力学連成による二相流解析を行う必要があり、これらを行ううえでは処分施設の構成材料の気液二相流特性の設定が必須である。平成 19-24 年度の「ガス移行挙動の評価」[24][25][26][27][28][29]は、ベントナイト系材料のパラメータ取得に着目した検討となっており、また国内外においても、セメントバリアのガス移行挙動評価に係る知見は少ない。このため、人工バリアスケールでのガス移行挙動評価のいっそうの高度化を進めるためには、人工バリアの構成材料であるセメント系材料（モルタル/コンクリート）の気液二相流特性パラメータの取得を行う必要がある。

3.2　実施内容

本検討では、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、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の透水・透気試験を実施し、その結果を整理することによって上記解析に必要なモルタルの気液二相流特性パラメータを取得した。

3.2.1　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した。

・TRU レポート（1 次/2 次）
・NUMOTRU レポート（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」

3.2.2　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）試験による気液二相流パラメータの取得を実施した。本年度においては、今後の研究展開について検討するとともに、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の気液二相流特性を取得した。

3.2.3　セメント系材料によるガス移行取得データの評価

取得されたデータを評価するための参照資料として、国内外にて同等の条件にて行われたセメント系材料のガス移行試験データを収集し、本検討にて得られたデータの評価を以下の手順にて行った。

（1）セメント系材料のガス移行挙動試験データの文献収集

セメント系材料のガス移行特性を取得するために国内外で実施された試験事例の収集を文献調査にて行った。

（2）収集文献中のデータ整理

収集文献中のデータを以下の観点にて整理した。

・実施環境（飽和/不飽和の別など）
・供試体の材料構成とサイズ
・その他（データの信頼性等）

（3）本検討にて得られたデータの評価

(1)および(2)によって得られたによって得られたデータを、3.2.2 節にて得られたデータ（実施条件を含む）と比較して得られたデータの検証を行った。

3.3　TRU 廃棄物処分概念におけるセメント系材料についての整理

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した。

・TRU レポート（1 次/2 次）
・NUMOTRU レポート（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」

図 3.3-1 には、TRU 処分概念において、材料としてセメント系材料を用いる（オプションとして考慮しているものを含む）構造部位を示したものである。

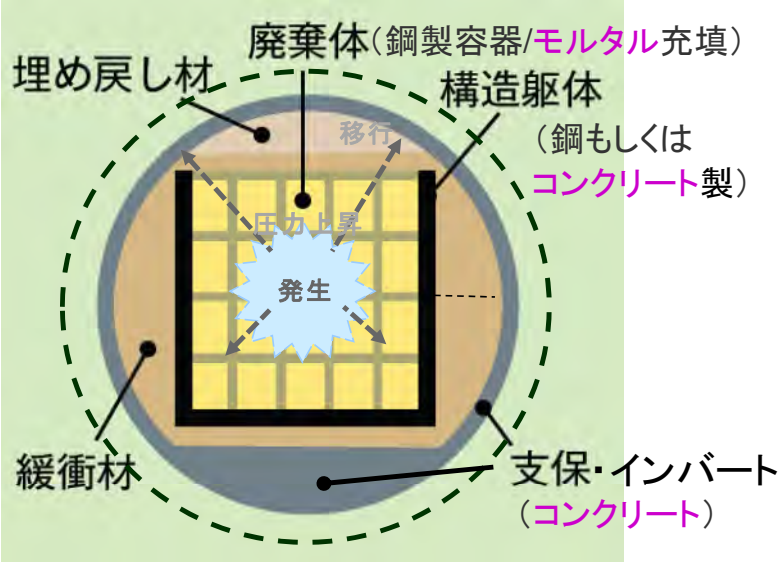


図 3.3-1　TRU 廃棄物処分概念及びセメント系材料の使用を想定している部位

次項より、国内および諸外国における TRU 廃棄物（およびガスの発生を考慮している放射性廃棄物）におけるセメント系材料の設定条件の整理、およびこれらより抽出された課題の整理について、結果の取りまとめを示す。

3.3.1　セメント系材料の設定条件の整理

TRU2 次レポート[22]においては、表 3.3-1 に示すように人工バリアの構成部位毎に要件の整理がなされており、それぞれの部位に「設計上考慮すべき機能」および「設計上は考慮せずに、設定された仕様によりその機能を確認する機能」の目安が定められている。

表 3.3-1　TRU2 次レポートにおける構造部位毎の要件の整理

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	③，⑦	空洞安定性	坑道の形状維持及び壁面剥離防止	—	—	—	—	—	—	●
		③，⑦	廃棄体の定置	廃棄体定置及び充填材施工の効率化	—	●	—	●	—	—	—
		③，⑦	廃棄体の強度	廃棄体の耐埋設荷重強度	○	○	●	—	—	—	—
		③，⑦	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	②	地下水移動の抑制	地下水浸入量の抑制	—	—	○	○	●	○	—
		②，⑥	放射性核種の溶出制限	放射性核種の物理的な閉じ込め	○	○	○	○	○	—	—
		②		化学的緩衝性	○	—	○	○	○	—	—
		②	放射性核種の収着	放射性核種の人工バリア材への収着	○	—	○	○	○	—	—
		②	自己シール性	発生空隙の充填	—	—	—	—	○	○	—
	力学的安定性	①	応力緩衝性	外力に対する緩衝性	—	—	—	—	○	○	○
		①	力学的支持性	廃棄体／構造躯体の支持	—	—	○	—	●	—	—
		①	坑道の安定性	処分坑道の力学的安定性	—	—	○	○	○	○	○
	化学的安定性	⑤	化学変質に対するﾊﾞﾘｱ機能維持	長期的変質の考慮	○	○	○	○	●	—	○
	その他	④	熱伝導性	廃棄体発熱の放散	○	○	○	○	○	○	—
		④	透気性	ガス透過性／自己修復性	—	○	○	○	○	○	—
		④	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

表 3.3-1 に挙げられた項目のうち、充填材（モルタル）、支保工（コンクリート）および緩衝材（ベントナイト）について抽出・整理したものを表 3.3-2 に示す。この表において、セメント系材料で構成される部材については、設計上考慮すべき機能は操業期間中のみであり、閉鎖後の機能が無いことがわかる。また効果を確認すべき機能については、充填材の構成材料であるモルタルには、ベントナイト緩衝材と同等な程度の項目があげられているが、支保工を構成するコンクリートについては、確認すべき機能が少ないことが明らかである。

表 3.3-2　TRU 放射性廃棄物処分の人工バリアの充填材、支保工、緩衝材の要件の整理

	充填材 （モルタル）	支保工 （コンクリート）	緩衝材 （ベントナイト）
設計上考慮すべき機能	・廃棄体の耐埋設荷重強度 ・放射性核種の漏出防止（透水性）	・坑道の形状維持及び壁面剥離防止	・地下水浸入量の抑制 ・廃棄体／構造躯体の支持 ・長期的変質の考慮
設計上は考慮せずに、設定された仕様によりその効果を確認する機能	・地下水浸入量の抑制 ・放射性核種の物理的な閉じ込め ・化学的緩衝性 ・放射性核種の人工バリア材への収着 ・廃棄体／構造躯体の支持 ・処分坑道の力学的安定性 ・長期的変質の考慮 ・廃棄体発熱の放散 ・ガス透過性／自己修復性	・外力に対する緩衝性 ・処分坑道の力学的安定性 ・長期的変質の考慮	・放射性核種の物理的な閉じ込め ・化学的緩衝性 ・放射性核種の人工バリア材への収着 ・発生空隙の充填 ・外力に対する緩衝性 ・廃棄体／構造躯体の支持 ・処分坑道の力学的安定性 ・長期的変質の考慮 ・廃棄体発熱の放散 ・ガス透過性／自己修復性

※下線部は操業期間中、その他は閉鎖後に考慮する機能

3.3.2　セメント系材料の設定条件に係る課題

モルタルおよびコンクリートについて、ガス移行挙動の評価に資する気液二相流パラメータの取得に際しての課題を以下にまとめた。

(1) モルタル

「設計上考慮すべき機能」として、操業期間（短期間）における荷重強度および透水性の２点が挙げられている。また、「設定された仕様により効果を確認する機能」としては、閉鎖後（長期間）における閉じ込め/化学緩衝/収着/力学安定およびガスの透過性が挙げられている。これより、パラメータ取得の優先度が高く、構成材料の粒子サイズより、これまでベントナイトを対象として実施した小規模の供試体による試験でパラメータ取得が可能と判断でき、今年度の試験対象として選定した。

また今後の展開については、長期変遷における状況変化（ひび割れおよび化学変質）を考慮する（条件に取り入れる）余地が存在している。これらの検討はシナリオに関する検討成果なども

参照しながら、その是非を判断したうえで進めることが必要である。

表 3.3-3 には、充填材（モルタル）を対象とした試験について、考えられるデータ取得の実施案を、取りまとめたものを、実施に係るハードルなどとともに示した。

表 3.3-3　モルタル材料を用いて実施するガス移行試験（気液二相流パラメータ取得）の展開案

材料	系（想定されるバリアの状態）	検討課題	試験実施内容	目的	ハードル（優先度）
OPC＋細骨材（粒度調整済）＋FA＋混和剤 ※TRU 実処分施設の充填材用に検討されている配合（プレパックドコンクリート用の注入モルタル）を再現 ※前項の要件に適した配合を目標とする	充填材の健全な状態	・健全部のガス移行特性・二相流特性の把握	充填材の健全な状態を模擬した（無垢な状態）供試体での透水・透気試験	実処分施設で想定される充填材の基本特性取得	低 (A)
	充填材のひび割れ	・ひび割れ部のモデル化 ・初期の飽和／不飽和時の挙動把握 ・ひび割れ部のガス移行特性の把握・二相流特性の把握	充填材に生じたひび割れを有する供試体での透水・透気試験	選択的なガス移行経路となる可能性のある「ひび割れ部」の特性取得	中 (A)
	充填材の打継部	・打継部のモデル化 ・初期の飽和／不飽和時の挙動把握 ・打継部のガス移行特性の把握・二相流特性の把握	充填材施工時に想定される打継部（施工継目）を有する供試体での透水・透気試験	選択的なガス移行経路となる可能性のある「打継部（施工継目）の特性取得	中 (B)
	コンクリートとの界面	・界面部のモデル化 ・初期の飽和／不飽和時の挙動把握 ・界面部のガス移行特性の把握・二相流特性の把握	コンクリート／充填材（共に健全な状態）の界面を有する複合試験体での透水・透気試験	選択的なガス移行経路となる可能性のある「界面」の特性取得	高 (C)
	廃棄体（鋼製）との界面	・同上	廃棄体／充填材（共に健全な状態）の界面を有する複合試験体での透水・透気試験	選択的なガス移行経路となる可能性のある「界面」の特性取得	中 (C)

(2) コンクリート

「設計上考慮すべき機能」として、操業期間（短期間）における空洞の安定性（形状維持/剥

離防止）が挙げられている。一方「設定された仕様により効果を確認する機能」として、閉鎖後（長期間）における応力緩衝/坑道安定および化学的安定が挙げられ、ガスの透過性は挙げられていない。このため、モルタルに比して二相流パラメータ取得の検討の優先度は低いと判断した。支保工は廃棄体グループ２においては、緩衝材および埋戻し材より外側に存在する部位である一方、グループ３では埋戻し材として想定されていることは今後考慮の余地がある。

また、骨材の粒径（構成含む）を考慮し、影響の無い程度の供試体サイズにて試験を実施する余地が存在している。今年度のモルタルを対象とした試験相当のサイズでの実施は困難と判断した。

シナリオ構築やベントナイト系材料での検討成果を参考にすると、想定される具体化の方向性として、インタクト（マトリックス）の透気性より、（ベントナイト等との）界面の透気性（メカニズム含む）の確認や、ガスベント（ガスが抜けるための構造：小孔など）の概念構築に資する実験（「参考」参照）への方向性も考えられる。以上の点を反映し、コンクリートにおけるガス透過性把握の重要性を検討しながら、試験条件を構築することが今後の検討課題である。

3.4　セメント系材料の気液二相流パラメータの取得

上記背景および前項の検討のもとで、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）試験による気液二相流パラメータの取得を実施した。今回の検討においては、今後の研究計画の立案に資するためのレファレンスデータの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の気液二相流特性を取得した。図 3.4-1 には、TRU 廃棄物処分概念における廃棄体パッケージの概念（NUMO パンフレットより）を示した。

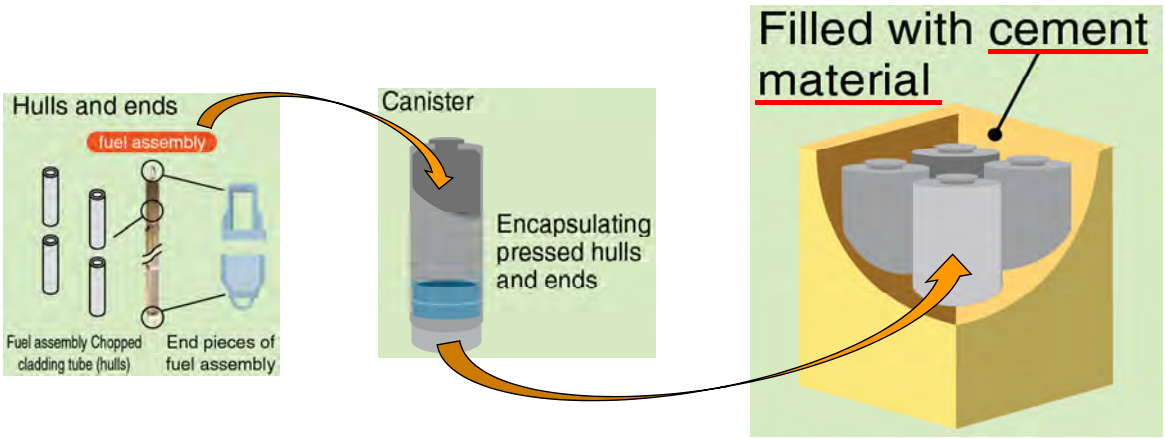


図 3.4-1　TRU 廃棄物処分概念における廃棄体パッケージの概念

3.4.1　試験の位置付け

本検討におけるモルタルは、TRU 放射性廃棄物処分施設における「充填材」を対象とする。ここでは、今回対象に選定したセメント系材料（モルタル）の位置付けについて、材料と配合の根拠の観点より示した。

(1) 材料選定

TRU2 次レポートの第 3 章 、3.2.1.3 節「充填材の設計」において、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、TRU2 次レポートにおいては、充填材の設計の考え方として、充填固化体用の固型化材料の設定値である 30N/mm2 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いる。(原子力環境整備促進・資金管理センター，1998)。プレパックドコンクリートとは、特定の粒度をもつ粗骨材を型枠に詰め、その空隙に特殊なモルタルを注入して造るコンクリートのことであり、特殊なモルタルとは、流動性が大きく、材料分離が少なく、かつ適度の膨張性を有するモルタルを示し、すなわちプレパックドコンクリートの注入モルタルは、粗骨材間の空隙を密実に充填できる良好な流動性と充填性を有する（コンクリート標準示方書 2002 年度制定、施工編、第 9 章プレパックドコンクリート)。

(2) 配合選定

プレパックドコンクリートの配合設計において、注入モルタルに関しては流動性と充てん性を考慮して、適切な粒度の細骨材を用いなければならないとされている（コンクリート標準示方書、2002 年度制定、施工編、第 9 章プレパックドコンクリート)。

本検討におけるセメント系材料については、TRU2 次レポート（付録 3B 解説　表 9.3.1　細骨材の粒度の標準）にて規定される粒度分布（表 3.4-1 参照）となるように粒度調整した細骨材を用いた。

表 3.4-1　プレパックドコンクリート細骨材の粒度の標準（コンクリート標準示方書）

ふるいの呼び寸法(mm)	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
ふるいを通るものの質量百分率(%)	100	90～100	60～80	20～50	5～30

また、TRU2 次レポート（付録 3B）において、セメント系材料の想定仕様が設定されており（表 3.4-2 参照)、本検討におけるセメント材料については、この TRU2 次レポートにて規定さ

れている単位セメント量、単位水量、細骨材量となるように配合設計されたモルタルを作製することとした。

表 3.4-2　セメント系材料の想定仕様（TRU2 次レポート（付録 3B））

	単位セメント量 （kg/m³）	単位水量 （kg/m³）	細骨材量 （kg/m³）
モルタル	483	266	1449

3.4.2　実施手順

図 3.4-2 にセメント系材料の気液二相流パラメータの取得の手順を示す。試験は大きく、「①試験準備」「②注水過程」「③注気過程」「④データ解析」にて構成される。次項以降にて各段階の概要を示す。

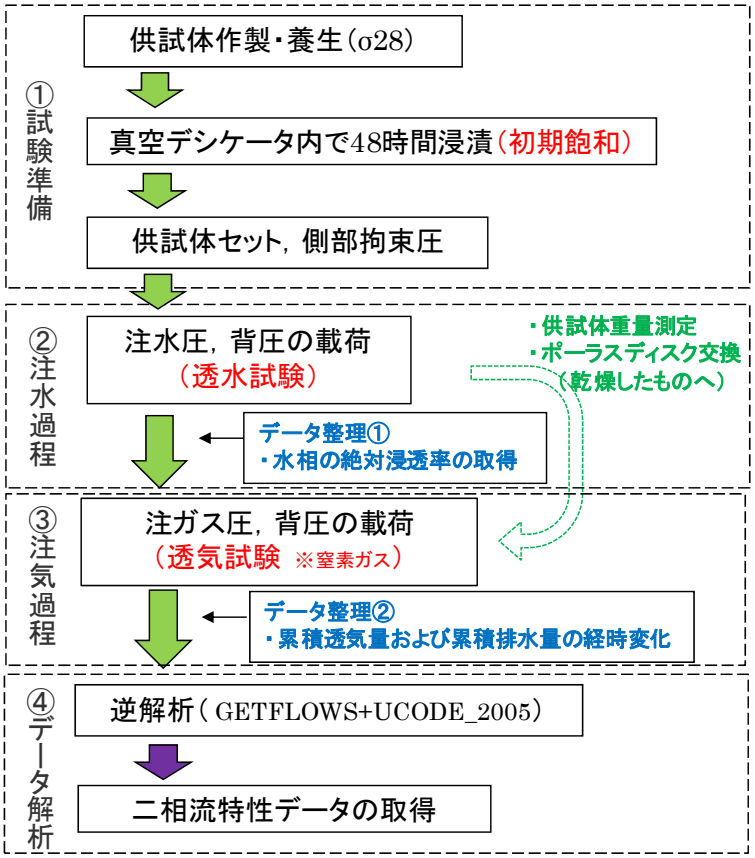


図 3.4-2　セメント系材料の気液二相流パラメータの取得手順

(1) 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

前項にて選定した配合にて、供試体を作成した。

図 3.4-3 に本試験における細骨材粒度調整分布図を示す。所用の規定値（表 3.4-2）の範囲内となっている。

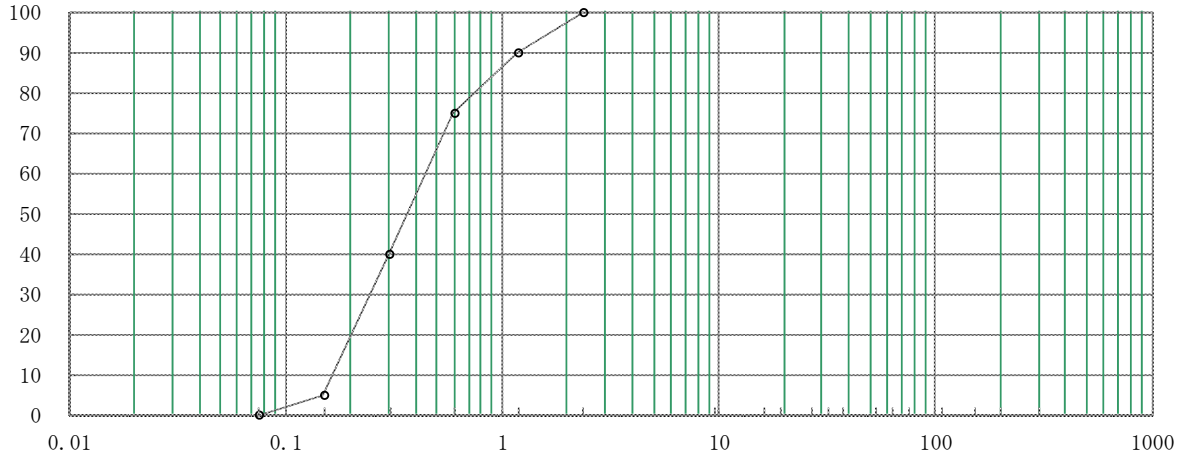


図 3.4-3　細骨材粒度調整分布図

また、モルタルの練混ぜは以下のように実施した。材料の練混ぜは以下のように実施した。

1. セメント＋細骨材を混ぜてミキサーにて 30 秒間空練り
2. 上記に蒸留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）

写真 3.4-1 にモルタル試料、写真 3.4-2 にミキサー攪伴状況、写真 3.4-3 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、写真 3.4-4 に端面研磨状況を示す。また、図 3.4-4 にモルタルの一軸圧縮強度測定結果（σ28）を示す。図より、供試体として規定値（TRU2 次レポートにおける、充填固化体用の固化材料の設定値である 30N/mm² の圧縮強度）を満足する強度が得られていることが分かる。

写真 3.4-1　モルタル試料

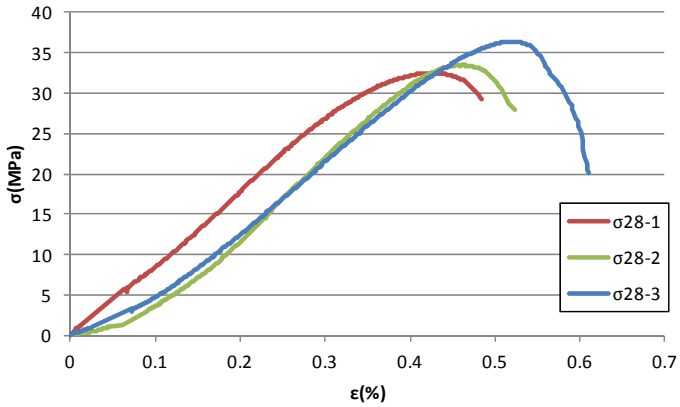
写真 3.4-2　ミキサー攪伴状況

写真 3.4-3　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 3.4-4　端面研磨状況

写真 3.4-5　モルタルの一軸圧縮強度測定状況（n=3）

写真 3.4-6　一軸圧縮強度試験後のモルタル状況（n=3）



σ28		
	σ(Mpa)	γ(gf/cm^3)
No.1	32.48	2.236
No.2	33.50	2.232
No.3	36.40	2.241
average	**34.13**	**2.236**

図 3.4-4　モルタルの一軸圧縮強度測定結果

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、浸水には蒸留水を用いた。

写真 3.4-7　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 3.4-8　透水試験直前の供試体状況（n=2）

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 3.4-5 に示すように H50mm 用ペディスタルを 50mm 設置している。

写真 3.4-9　モルタル供試体へのゴムジャケット装着状況

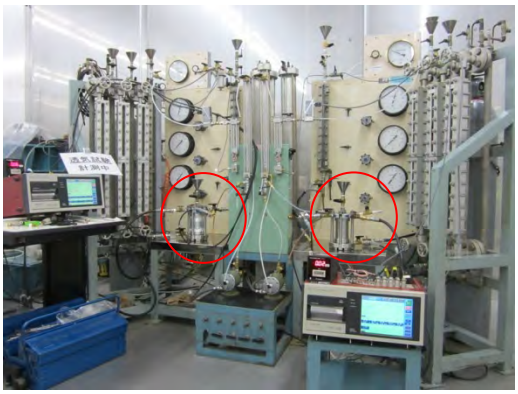


写真 3.4-10　試験装置へのモルタルセット完了状況（n=2）

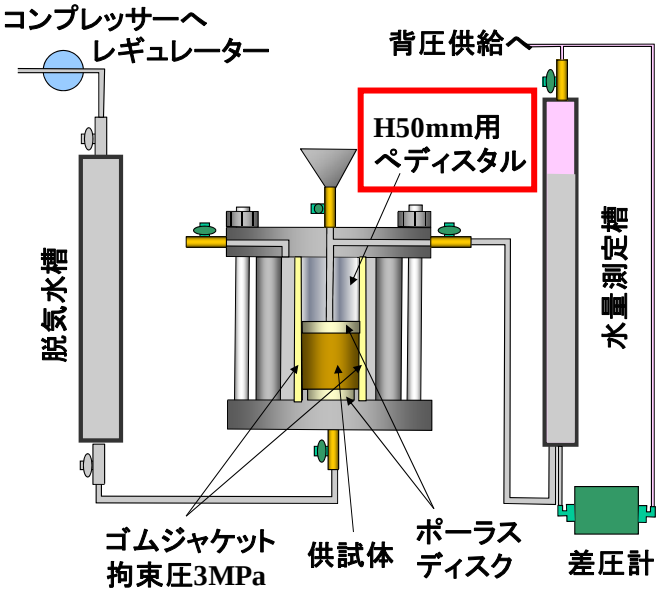
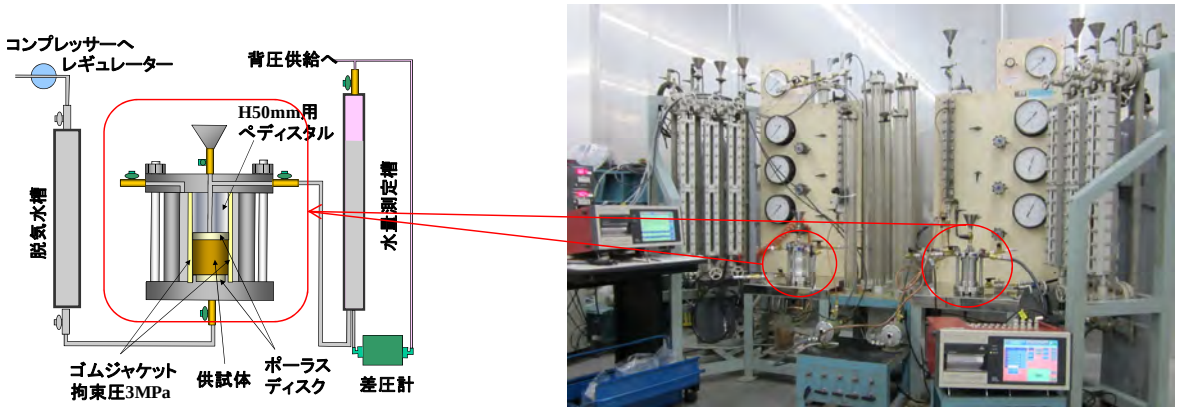


図 3.4-5　試験装置（透水・透気試験用）の概念図（透水試験実施の場合で例示）

(2) 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 3.4-6 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 3.4-6　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 3.4-3 の条件とした。

② 供試体に注入された水（蒸留水）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 3.4-3　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

(3) 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 3.4-4 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 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総排水量を算定した。

表 3.4-4　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	3.0	2.8	0.1	2.7
2	3.0	2.8	0.1	2.7

(4) 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 3.4-7、図 3.4-8 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 3.4-1[6]より透水係数を算定した。

$$k = \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} log_e \frac{h_1}{h_2} = \frac{2.303aL}{A(t_2 - t_1)} log_{10} \frac{h_1}{h_2} \qquad (3.4\text{-}1)$$

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 3.4-5 に示す。

表 3.4-5　モルタル供試体　透水試験結果

供試体 No.	拘束圧 (MPa)	透水圧 (MPa)	背圧 (MPa)	$t1$ (s)	$t2$ (s)	透水係数 (m/s)
1	3.0	2.8	0.1	130,020	225,360	1.48E-12
2	3.0	1.0	0.1	39,480	51,060	1.66E-11

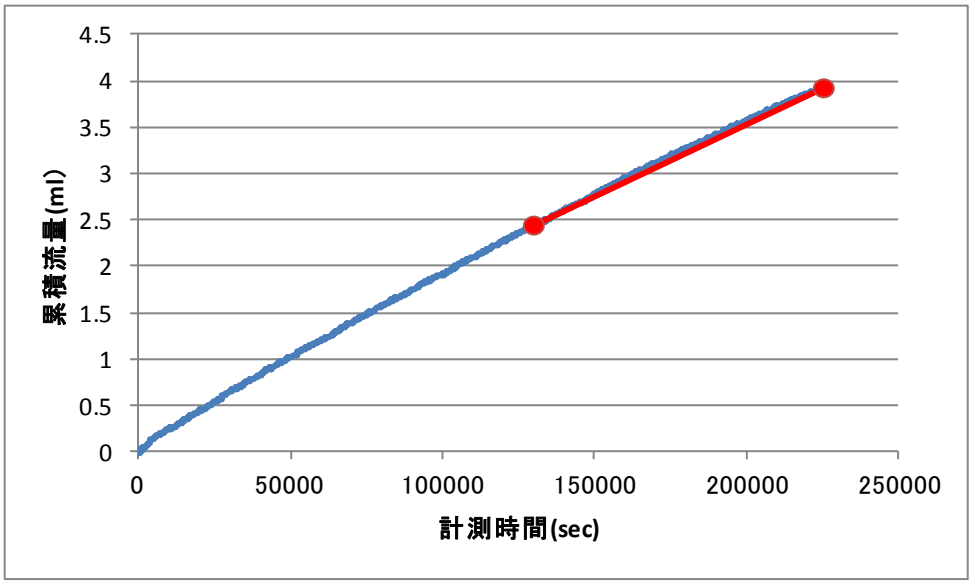


図 3.4-7　モルタル供試体 No.1 の時間～透水量関係

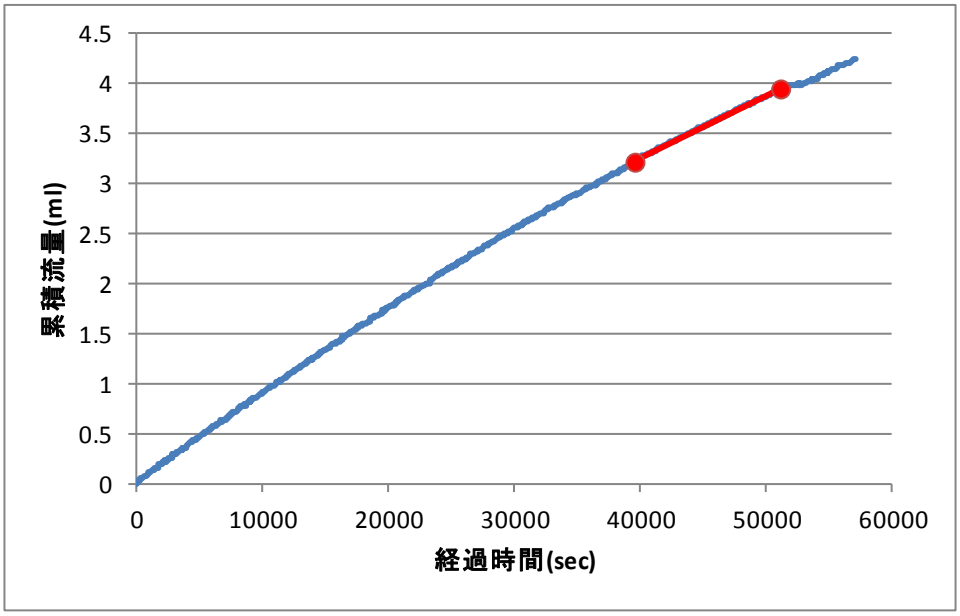


図 3.4-8　モルタル供試体 No.2 の時間～透水量関係

透水試験前後に供試体の重量を測定した結果を表 3.4-6 に示す。透水試験前の状態は、48 時間（2 日間）の脱気浸水後の重量であり、透水試験後には全ての供試体で増加した。これは浸水脱気のみでは飽和が完全ではないが、透水試験で定常状態に達する間に有効間隙（透水試験によって供試体内の動き得る水が存在する空隙）が完全飽和したものと考えられる。

表 3.4-6　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	228.41	229.87	1.46
2	224.93	225.28	0.35

(5) 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 3.4-9～図 3.4-14 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(3.4-2)により算定した[7]。

$$K = \frac{2Q\mu p_a}{A}\frac{L}{p_0^2 - p_L^2} \tag{3.4-2}$$

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、$1.76\times10^{-5}(Pa\cdot s)$）、$A$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 3.4-11 および図 3.4-14）から算定した透気係数の算定結果を表 3.4-7 に示す。なお、表中の「総排水量」については後述した。

表 3.4-7　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	3.0	2.8	0.1	1.11E-18	0.411
2	3.0	2.8	0.1	4.66E-19	0.022

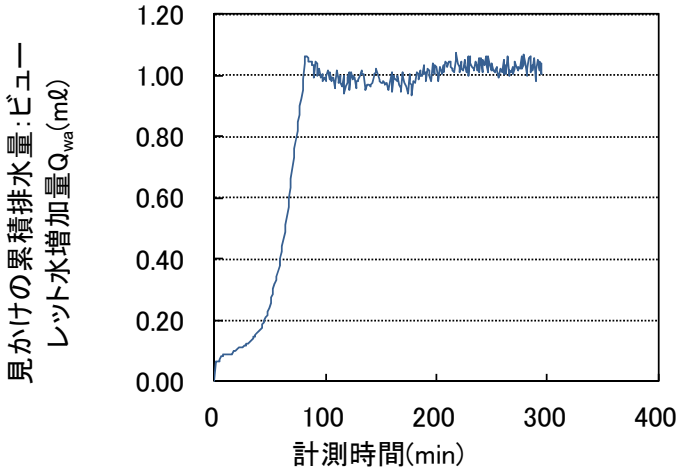


図 3.4-9　モルタル供試体 No.1　時間～排水量関係

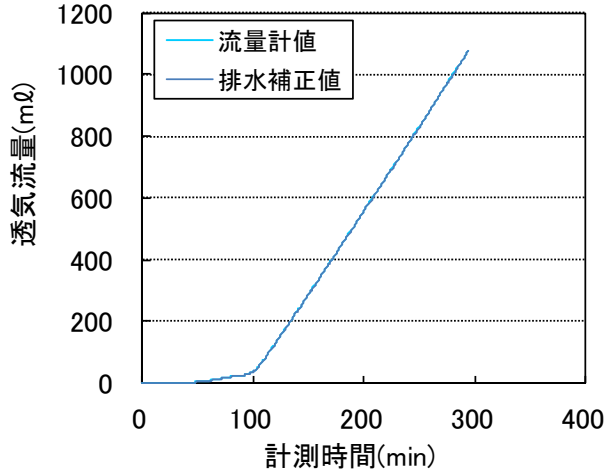


図 3.4-10　モルタル供試体 No.1　時間～透気量関係

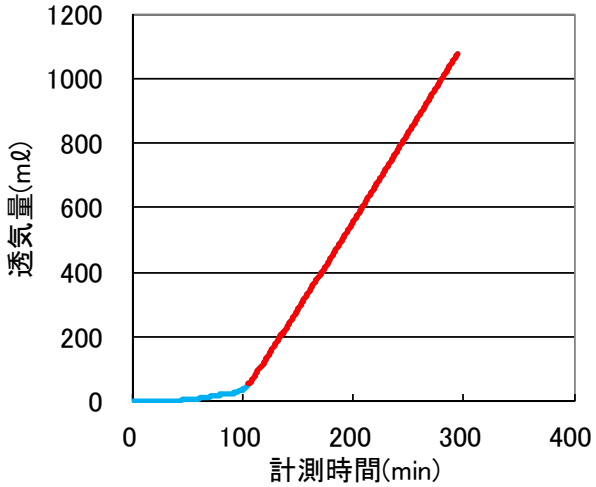


図 3.4-11　モルタル供試体 No.1 の透気量（補正値）の定常区間（赤線）

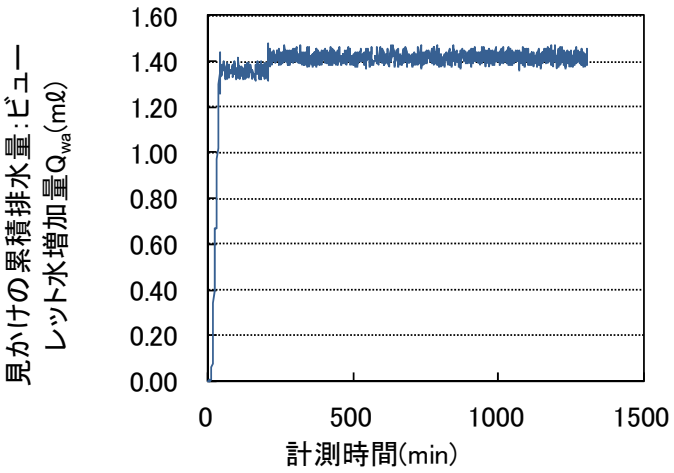


図 3.4-12　モルタル供試体 No.2　時間～排水量関係

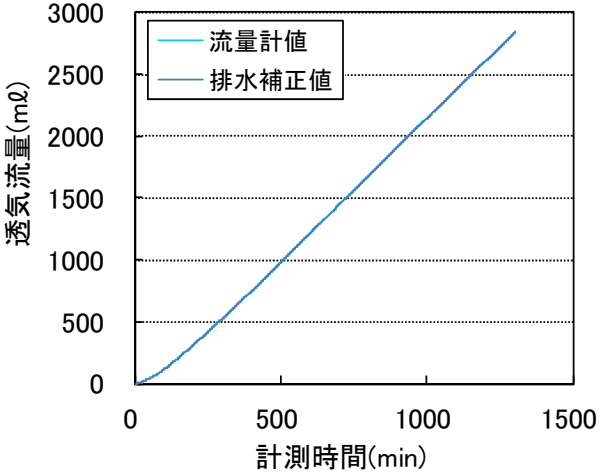


図 3.4-13　モルタル供試体 No.2　時間～透気量関係

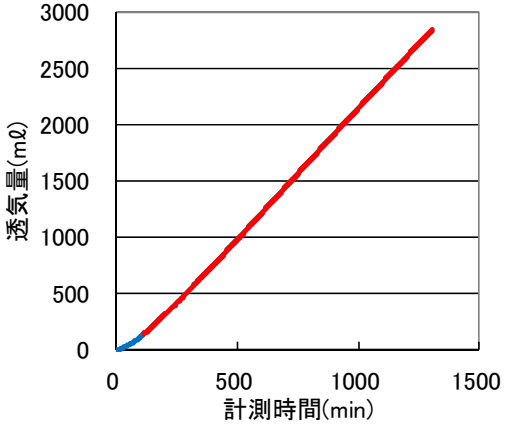


図 3.4-14　モルタル供試体 No.2 の透気量（補正値）の定常区間（赤線）

なお、透気試験前後の供試体の重量変化について表 3.4-8 にまとめた。表 3.4-8 に示した試験結果の総排水量は、ここで示した透気試験前後の減少分に相当した。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総排水量である。図 3.4-9、図 3.4-12 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 3.4-7 の総排水量（＝表 3.4-8）の総排水量を用いることが妥当である。

表 3.4-8　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)	総排水量 (g)
1	231.780	231.369	0.411
2	225.371	225.349	0.022

3.4.3　モルタルの気液二相流特性データの取得

(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 3.4-15 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し、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 3.4-15 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 3.4-15 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
- ガス透気が定常状態に至ったときの流量から算出されたガス相の有効浸透率

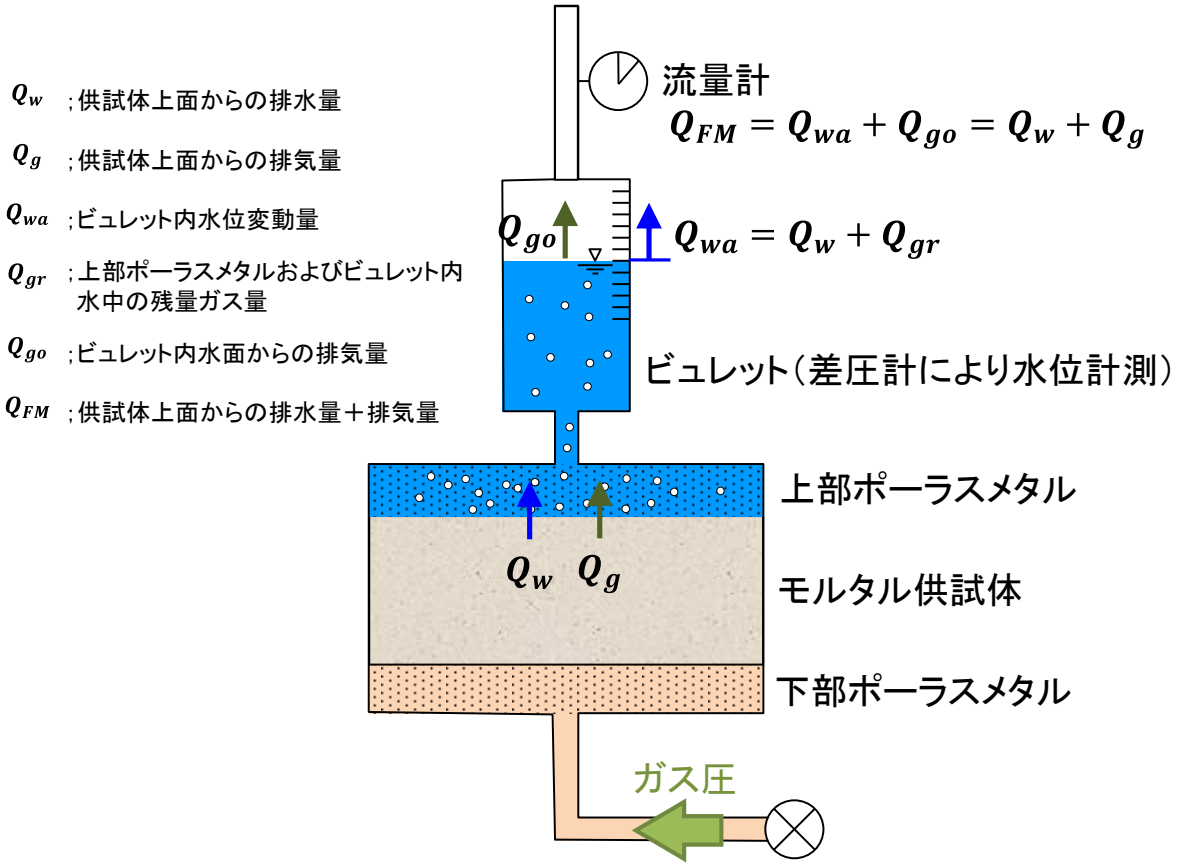


図 3.4-15　ガス移行試験装置概要図

表 3.4-9 に各試験の供試体寸法、載荷ガス圧、背圧、累積排水量、水相の絶対浸透率、ガス相の有効浸透率をまとめた。累積排水量と同列に、累積排水量と供試体体積から算出したみかけの間隙率を併記した。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り、絶乾状態の絶対浸透率とは異なる。また、図 3.4-16 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し（ほぼ一定の値となり）、その後、累積排水排気量が増加する傾向が認められる。

表 3.4-9　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) / 見かけの間隙率（-）	水相の絶対浸透率（m^2）	ガス相の有効浸透率（m^2）
No.1	φ4.998cm h5.145cm	2.876	0.203	0.411 0.00419	1.35×10^{-19}	1.11×10^{-18}
No.2	φ4.980cm h5.019cm	2.861	0.202	0.022 0.000224	1.51×10^{-18}	4.66×10^{-19}

※φ は直径、h は高さを示す

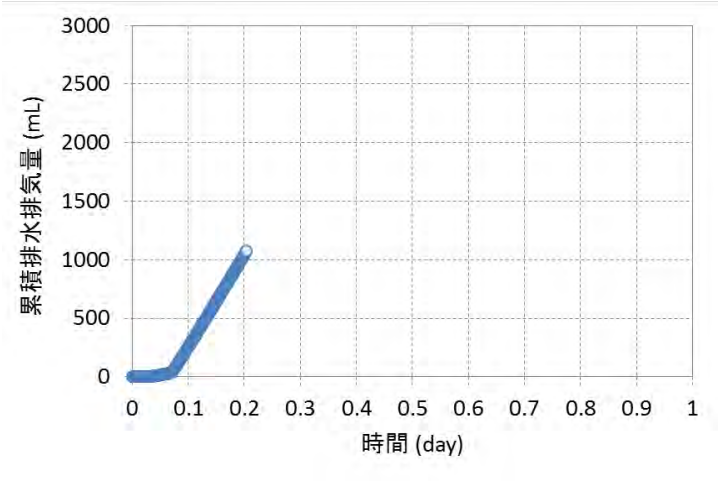
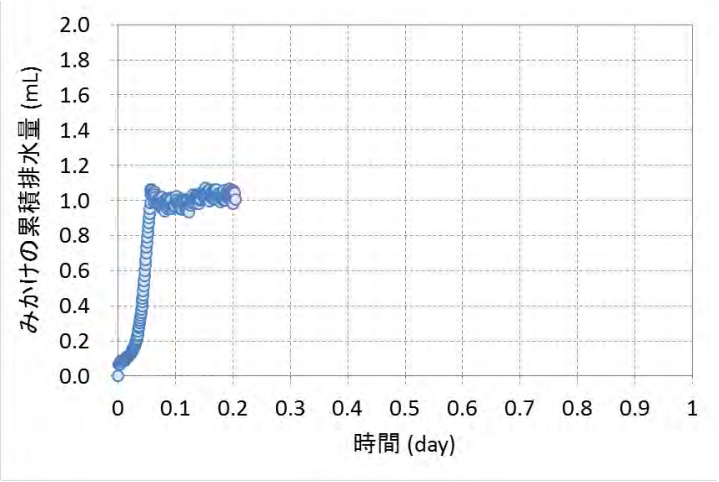
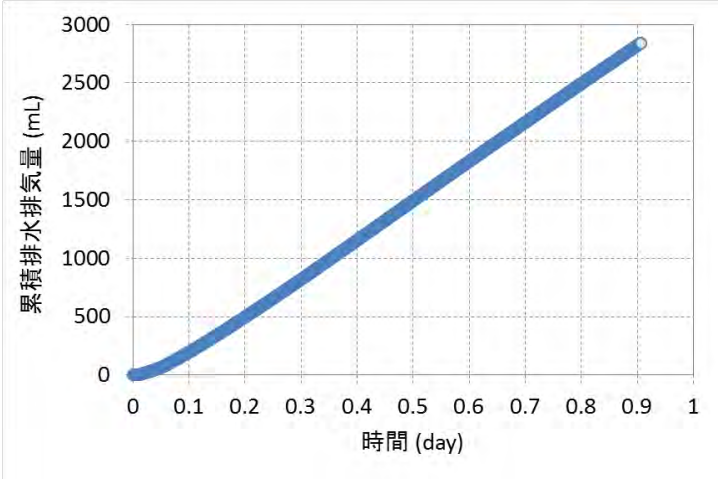
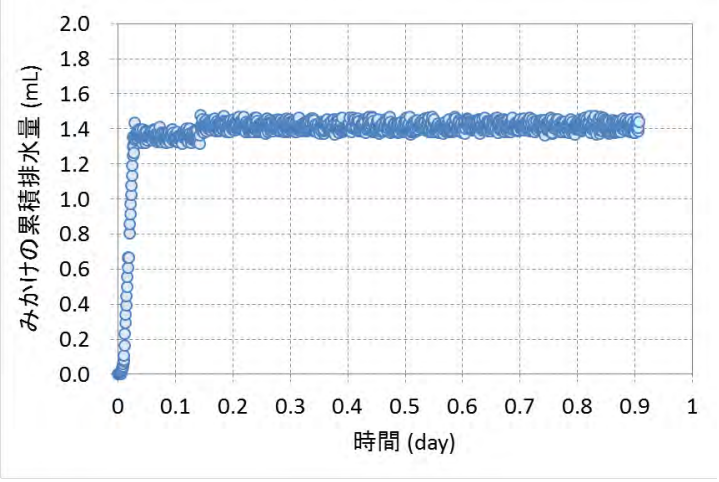
供試体	累積排水排気量Q_{FM}	みかけの累積排水量Q_{wa}
No.1		
No.2		

図 3.4-16　累積排水排気量とみかけの累積排水量変化

3.5　二相流特性データ同定のための逆問題の設定

3.5.1　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、二相流物性を同定した。

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生成した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した。

- 排水量はごく小さいため、流量計で測定された値Q_{FM}は供試体からの排気量Q_gに等しいした
- 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累積排水量変化Q_wとした

上記の前提条件に基づき生成した累積排水量Q_wと累積排気量Q_gの時間変化を図 3.5-1、図 3.5-2 に示す。累積排水量と累積排気量の時間変化を見ると、累積排水量が横ばいになる（排水が停止する）時間と、累積透気量が直線的に増加し始める時間がほぼ一致していることが分かる。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直接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。

水相の絶対浸透率には透水試験から算出された値を与条件として設定した。供試体 No.1 に関しては、ガス相の有効浸透率が水相の値よりも大きいため、空隙壁面での滑り等によってガス相の絶対浸透率が水相よりもやや高くなったと考え、ガス相の絶対浸透率も同定対象として検討を進めるものとした。供試体 No.2 のガス相の絶対浸透率は水相と同じとした。

間隙率に対しては、杉山他（2004）[21]の検討から、全間隙率の値 0.15 を与えた。なお、供試体 No.2 に関しては、初期値の間隙率として、見かけの間隙率相当の値を与え、同定パラメータに含めた検討も参考ケースとして実施した。この際に、各相の残留飽和率は 0 として検討した。

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ほぼ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）は水相の残留飽和率が 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。

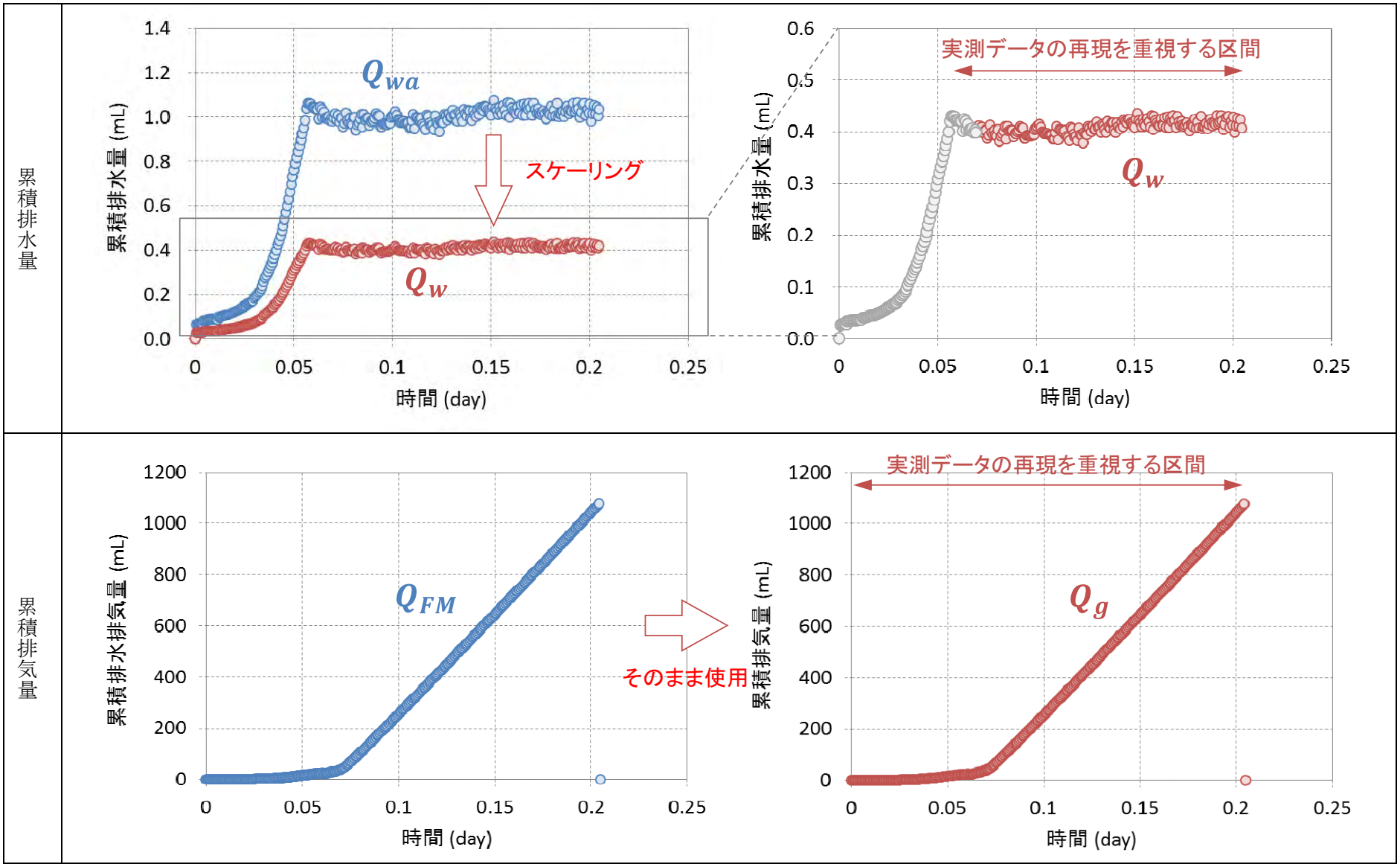


図 3.5-1　生成した累積排水量、累積排気量（供試体 No.1）

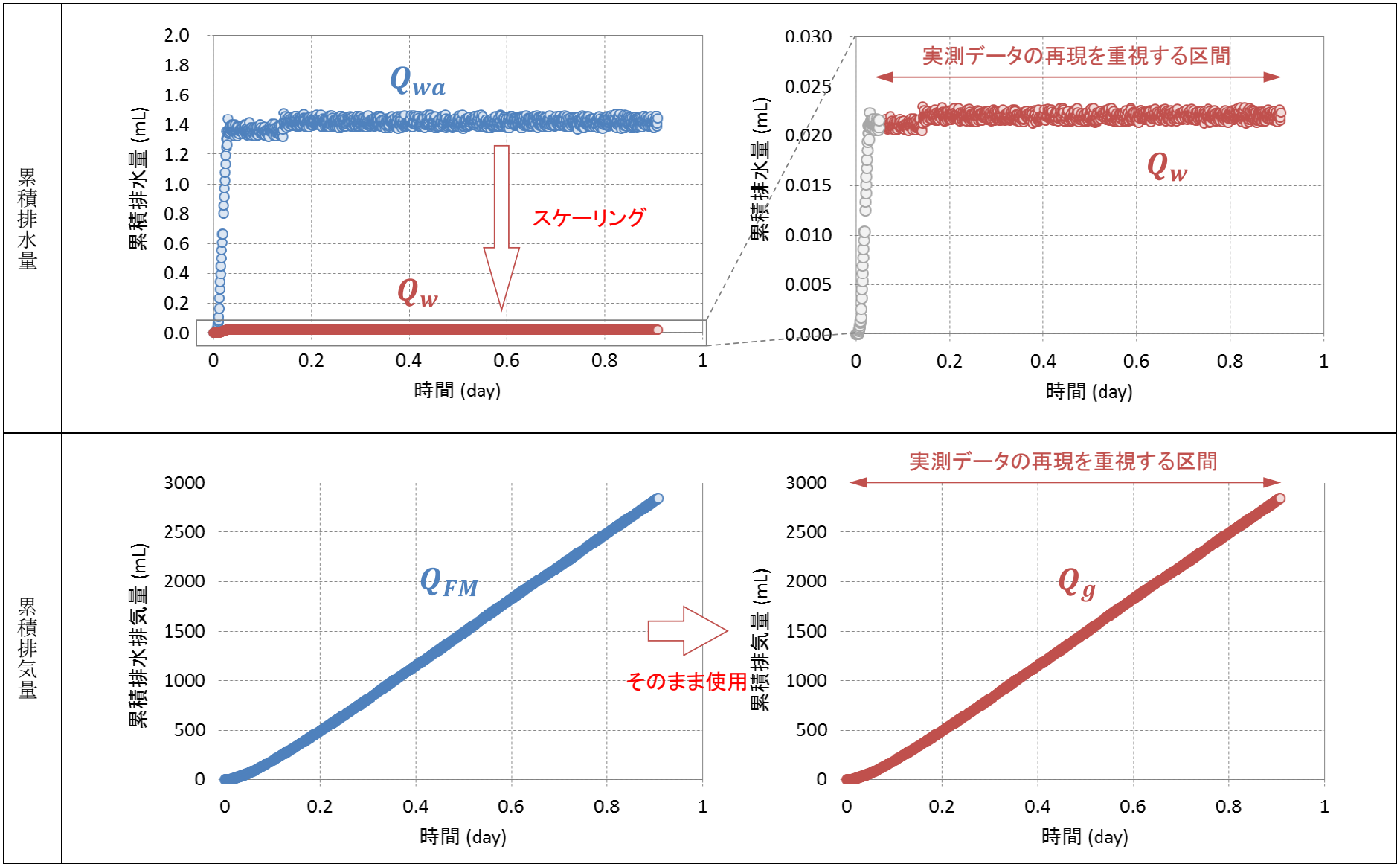


図 3.5-2　生成した累積排水量、累積排気量（供試体 No.2）

3.5.2　目的関数の設定

上記の前提に基づき生成した累積排水量、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、これらのデータは変動推移の傾向を失わない範囲でデータを平滑化した。目的関数fは以下の式で記述される。上述したように、図 3.5-1、図 3.5-2 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。

$$f = \sum_{i=1}^{n_{ow}} w_w(i)\left(Q_{w_obs}(i) - Q_{w_cal}(i)\right)^2 + \sum_{j=1}^{n_{og}} w_g(i)\left(Q_{g_obs}(j) - Q_{g_cal}(j)\right)^2 \qquad (3.5\text{-}1)$$

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

3.5.3　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)[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。

$$\nabla \cdot \left(\rho_{ws} \frac{K_w k_{rw}}{\mu_w B_w} \nabla \Psi_w\right) - \rho_{ws} q_{ws} = \frac{\partial}{\partial t}\left(\rho_{ws} \phi \frac{S_w}{B_w}\right) \qquad (3.5\text{-}2)$$

$$\nabla \cdot \left(\rho_{gs} \frac{K_g k_{rg}}{\mu_g B_g} \nabla \Psi_g\right) - \rho_{gs} q_{gs} = \frac{\partial}{\partial t}\left(\rho_{gs} \phi \frac{S_g}{B_g}\right) \qquad (3.5\text{-}3)$$

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$p(= w, g)$の飽和率$(-)$
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。

$$\Psi_w = P_w - \rho_w g Z \tag{3.5-4}$$

$$\Psi_g = P_g - \rho_g g Z \tag{3.5-5}$$

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。

$$P_c = P_c[S_w] = P_g - P_w \tag{3.5-6}$$

$$\phi = \phi[P_g] = \phi_0\big(1 + C_r(P_g - P_0)\big) \tag{3.5-7}$$

$$k_{rp} = k_{rp}[S_w] \tag{3.5-8}$$

$$B_p = B_p[P_p] \tag{3.5-9}$$

$$\rho_p = \rho_p[P_p] = \rho_{pS}/B_p[P_p] \tag{3.5-10}$$

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、水相飽和率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[2]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）[3]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。

3.5.4　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。

$$\rho_w=\rho_{w0}\left(1+C_f(P_w-P_0)\right) \tag{3-11}$$

$$\mu_w=\mu_{w0}\left(1+C_\mu(P_w-P_0)\right) \tag{3-12}$$

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。

$$\mu_{g0}=\mu_{20}\left(\frac{T_{20}+C}{T+C}\right)\left(\frac{T}{T_{20}}\right)^{3/2} \tag{3-13}$$

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（各試験の透水試験より算出）
- 間隙率：0.15（荻野ら（2000）[19]の検討を基に設定）
- 固相圧縮率：$3.863\times10^{-11}(Pa\,s)$（田中ら（2009）[4]の充填材（モルタル）の値を引用）

未知パラメータを以下に示す。

- 相対浸透率、毛細管圧力を表現する構成モデルパラメータ（表 3.5-1 中のn_w，n_g，P_0，n，S_{wr}）
- ガス相の絶対浸透率（供試体 No.2 のみ、供試体 No.1 に関しては水相の値と同じ）

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 3.5-1 に示す構成式（van Genuchten モデル、以下「vG モデル」と称する）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 3.5-1　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 ($van\ Genuchten$モデル)	毛細管圧力 ($van\ Genuchten$モデル)
$k_{rw} = \sqrt{S_{we}}\left(1-(1-{S_{we}}^{1/m_w})^{m_w}\right)^2$ $k_{rg} = \sqrt{S_{ge}}\left(1-(1-{S_{ge}}^{1/m_g})^{m_g}\right)^2$ $S_{we} = (S_w - S_{wr})/(1 - S_{wr} - S_{gr})$ $S_{ge} = (S_g - S_{gr})/(1 - S_{wr} - S_{gr})$ $m_w = 1 - 1/n_w \quad m_g = 1 - 1/n_g$	$P_c = P_0({S_{we}}^{-1/m} - 1)^{1/n}$ $S_{we} = (S_w - S_{wr})/(1 - S_{wr} - S_{gr})$ $m = 1 - 1/n$

3.5.5　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 3.5-3 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。

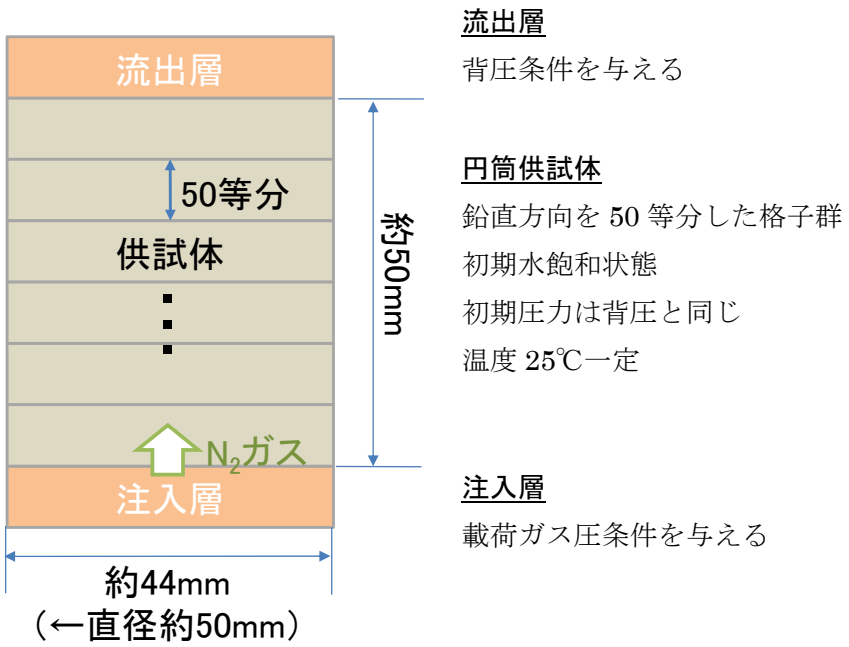


図 3.5-3　解析モデルの基本諸元

3.5.6　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[5]を用いる。UCODE_2005 は JUPITER API と呼ばれる逆解析、感度解析及び不確実性評価のための標準インターフェースを搭載し、解析コードのソースプログラムを一切変更することなく、入出力ファイルのみの操作により多数の試行計算を容易に自動化することが可能である。逆解析に必要な未知パラメータ、制約条件および目的関数の設定は任意に行うことができる。図 3.5-4 に GETFLOWS を例に UCODE_2005 を用いた自動逆解析の流れを示す。

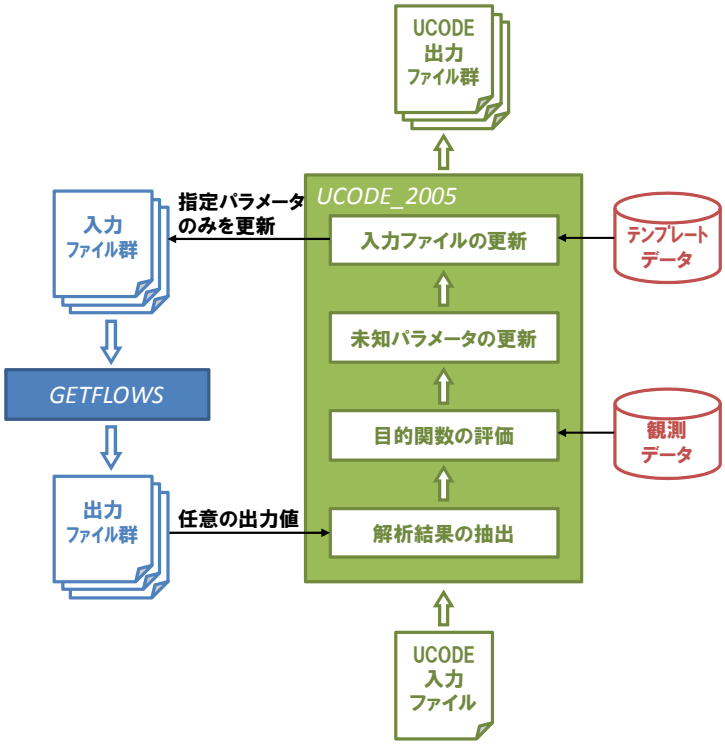


図 3.5-4　GETFLOWS+UCODE_2005 による逆解析の流れ

3.6　二相流特性の同定結果

3.6.1　供試体 No.1

(1) 検討 1：水相の絶対浸透率に実測値を用いた検討

まず、水相の絶対浸透率に透水試験結果から算出した値（1.35×10^{-19} (m^2)）を用いて、二相流物性の同定を試みた。再現解析結果を以下に示す。

図 3.6-1 に累積排水量および累積透気量の再現結果の一例を示した。水相の絶対浸透率に実測値を適用した場合、いずれの二相流パラメータの組合せを用いても、実測データを良好に再現することは困難であった。実測値と計算値の違いを解釈するために、図 3.6-2 に再現対象としている累積排水量の時間変化と、実測された絶対浸透率から飽和流れを仮定したときの排水量変化（黒実線）を比較した。実測された絶対浸透率を用いた場合、最もモビリティーが大きい飽和流

れによって排水されたとしても、実測された累積排水量を大幅に下回っており、再現することは困難であることが分かる。この考え方に基づくと、ガス透気試験時には、同図中の赤点線で示した排水速度から算出された 7.3×10^{-19} (m^2)程度の絶対浸透率であったことが推定される。そこで、次に水相の絶対浸透率も同定パラメータに含めた検討を行った。

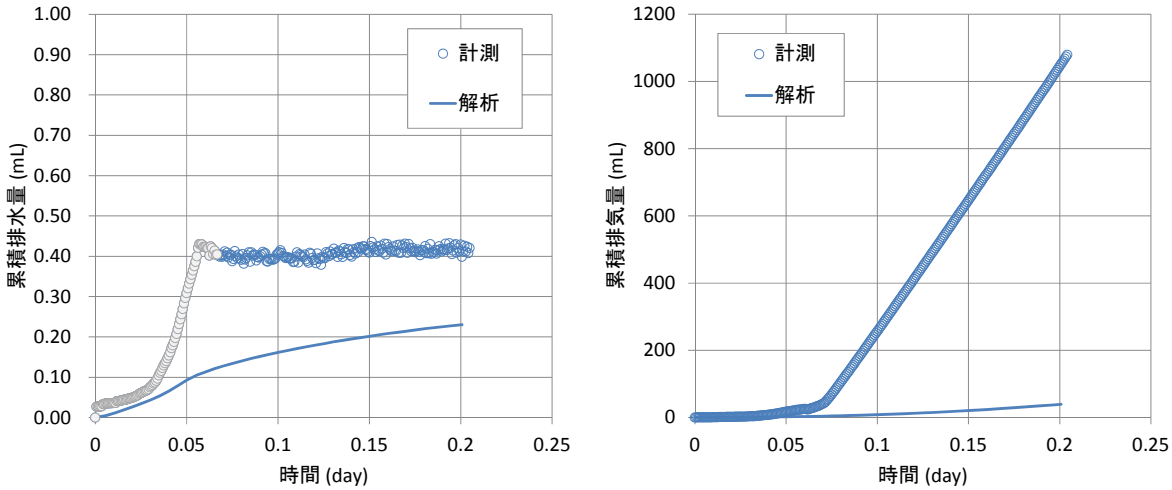


図 3.6-1　累積排水量と累積排気量の再現結果例（供試体 No.1、検討 1）

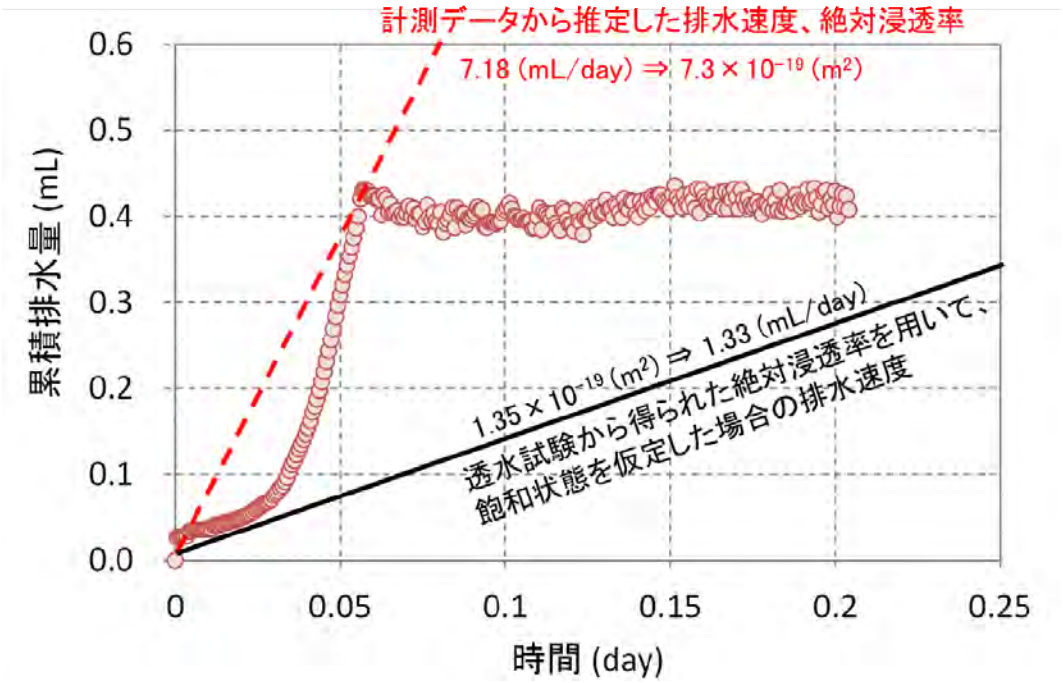


図 3.6-2　実測値から推定されるガス透気試験時の絶対浸透率

(2) 検討 2：水相の絶対浸透率を同定パラメータに含めた検討

水相の絶対浸透率を同定パラメータとし、逆解析によって二相流物性の同定を試みた。再現解析結果を以下に示す。

図 3.6-3～図 3.6-8 に、累積排水量と累積排気量の再現結果、および、同定された相対浸透率曲線と毛細管圧力曲線を 2 パターン示した。いずれの結果も概ね良好に実測データを再現している。同定されたパラメータを表 3.6-1 に示した。2 パターンの同定値を見ると、検討 2a では水相の絶対浸透率が検討 2b よりも小さく、毛細管圧力が小さいパラメータが同定されている。これは、水の易動性と、保水力の組合せで複数の解が同定され得ることを示している。そこで、図 3.6-2 に示したように、ガス透気試験時には、同図中の赤点線で示した排水速度から算出された 7.3×10^{-19} (m^2)程度の絶対浸透率であったと推定され、この値は供試体 No.2 の実測値（1.51×10^{-18} (m^2)）に近いことから、供試体 No.2 の実測された絶対浸透率を与条件として、検討を行うものとした。

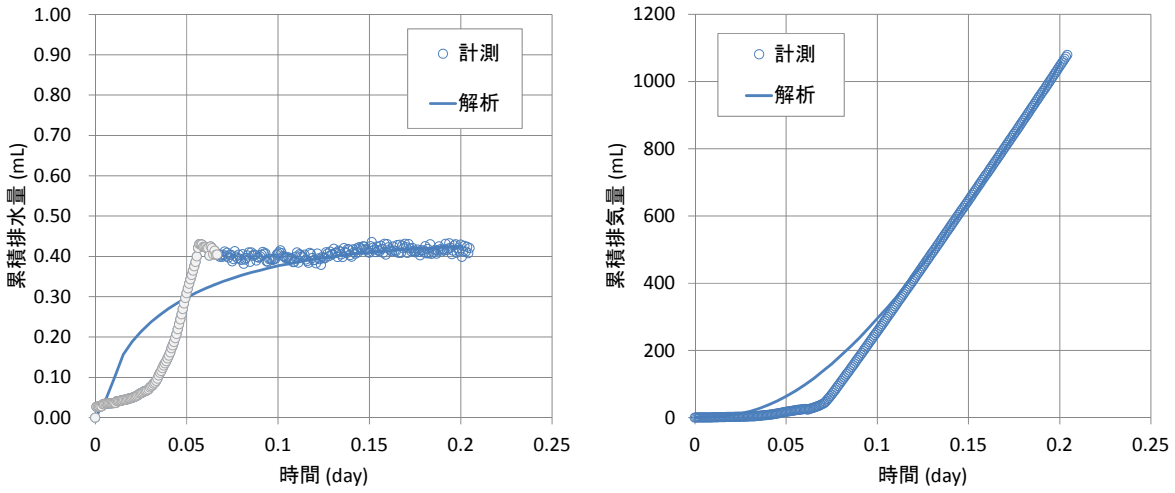


図 3.6-3　累積排水量と累積排気量の再現結果（供試体 No.1、検討 2a）

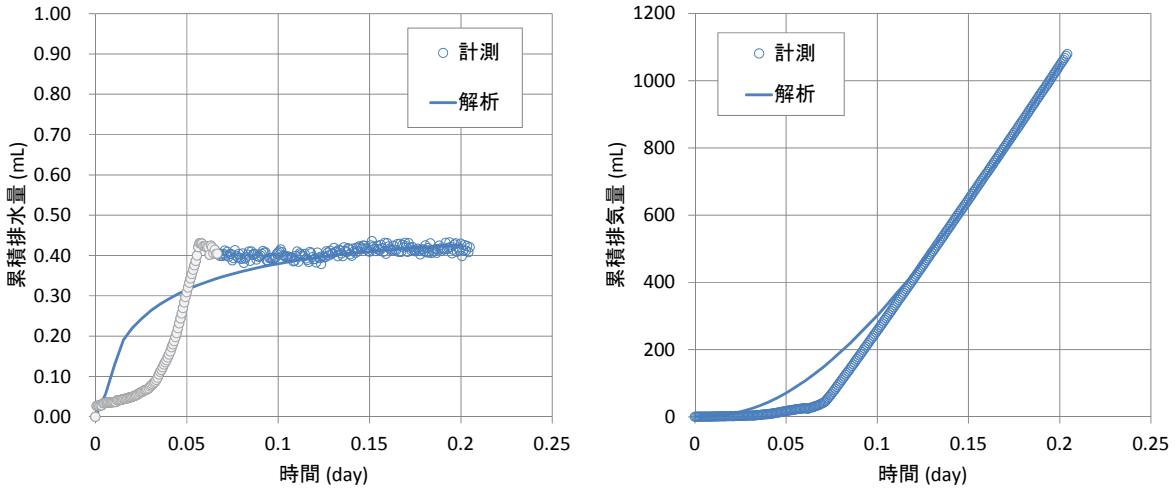


図 3.6-4　累積排水量と累積排気量の再現結果（供試体 No.1、検討 2b）

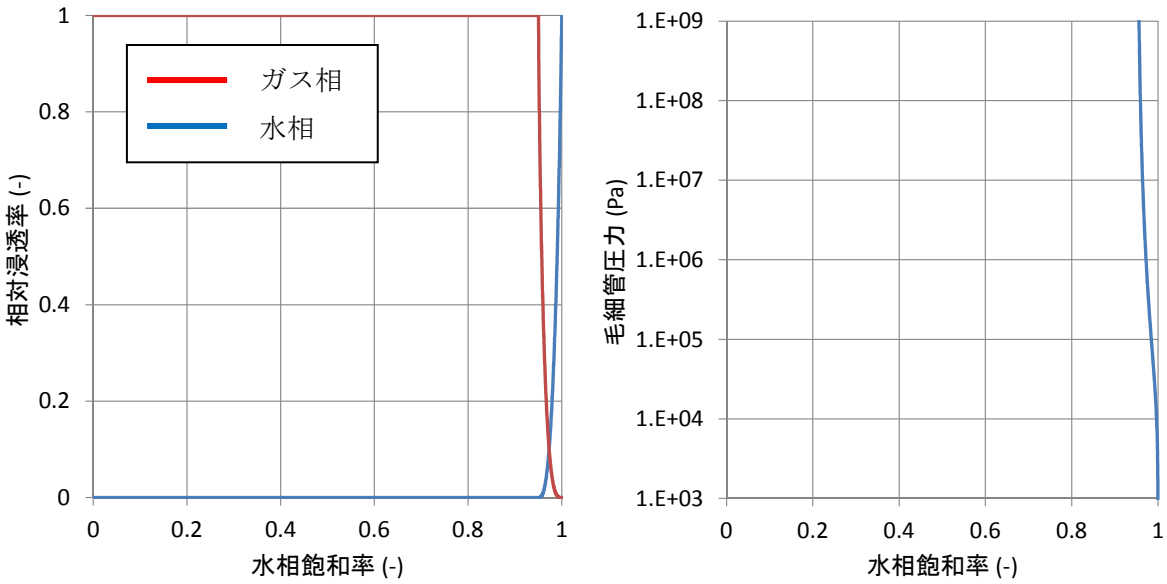


図 3.6-5　同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）（供試体 No.1、検討 2a）

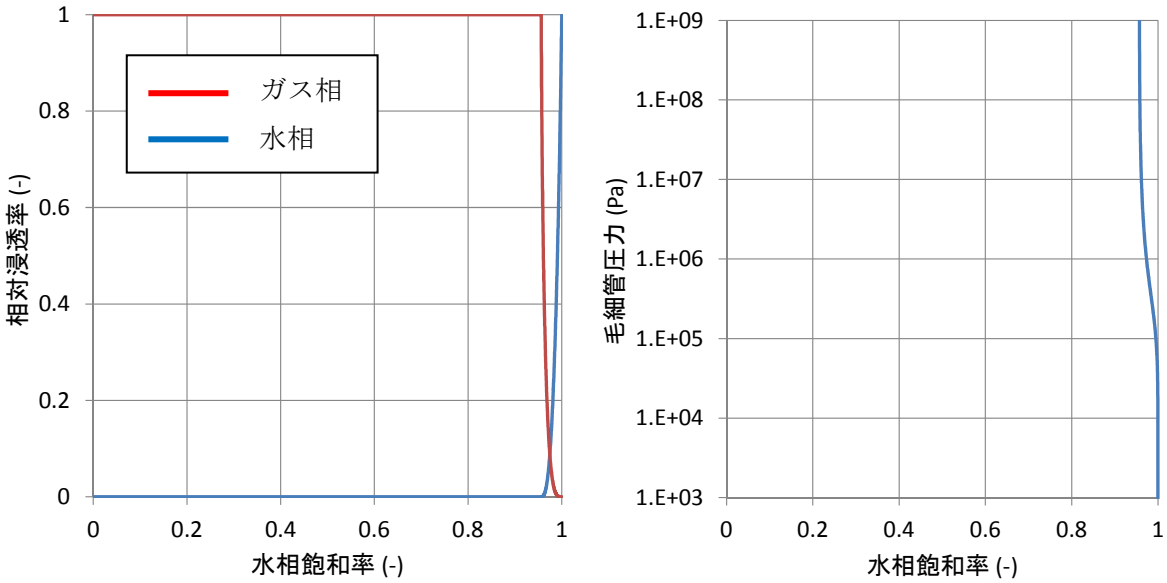


図 3.6-6　同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）（供試体 No.1、検討 2b）

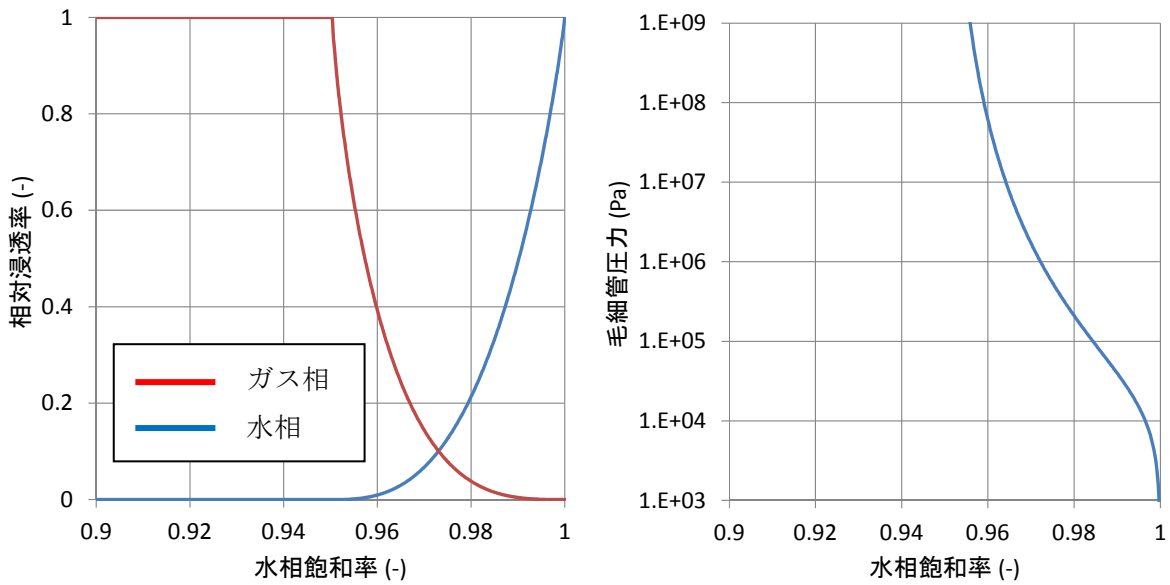


図 3.6-7　同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）
（水相飽和率 0.9～1.0 の範囲を拡大表示、供試体 No.1、検討 2a）

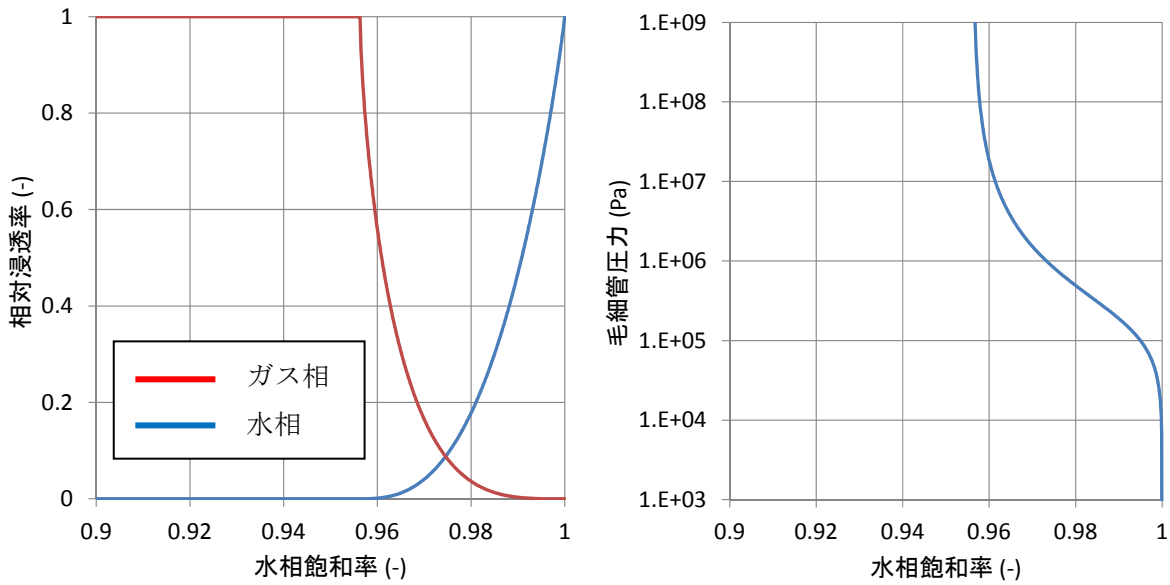


図 3.6-8　同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）
（水相飽和率 0.9～1.0 の範囲を拡大表示、供試体 No.1、検討 2b）

表 3.6-1　同定パラメータ（供試体 No.1、検討 2）

未知パラメータ		供試体 No.1、検討 2a	供試体 No.1、検討 2b
水相の絶対浸透率		7.55×10^{-19} (m²)	1.05×10^{-18} (m²)
ガス相の絶対浸透率		8.53×10^{-18} (m²)	7.80×10^{-18} (m²)
相対浸透率(vG)、毛細管圧力(vG)	S_{wr}	0.9504	0.9563
	n_w	9.9	13.94
	n_g	4.305	3.177
	P_0	1.651×10^{4} (Pa)	1.754×10^{5} (Pa)
	n	1.2	1.531

(3) 検討 3：水相の絶対浸透率に供試体 No.2 の値を用いた検討

水相の絶対浸透率に供試体 No.2 の値（1.51×10^{-18} (m²)）を与条件として与え、逆解析によって二相流物性の同定を行った。図 3.6-9 に累積排水量と累積排気量の再現結果を示した。いずれも概ね良好に実測データを再現することができている。同定されたパラメータを表 3.6-2 に、相対浸透率曲線および毛細管圧力曲線を図 3.6-10、図 3.6-11 に示す。非常に少ない排水量を表現するために、水相の残留飽和率が 0.9554 となり、極端な形状の二相流曲線が同定された。

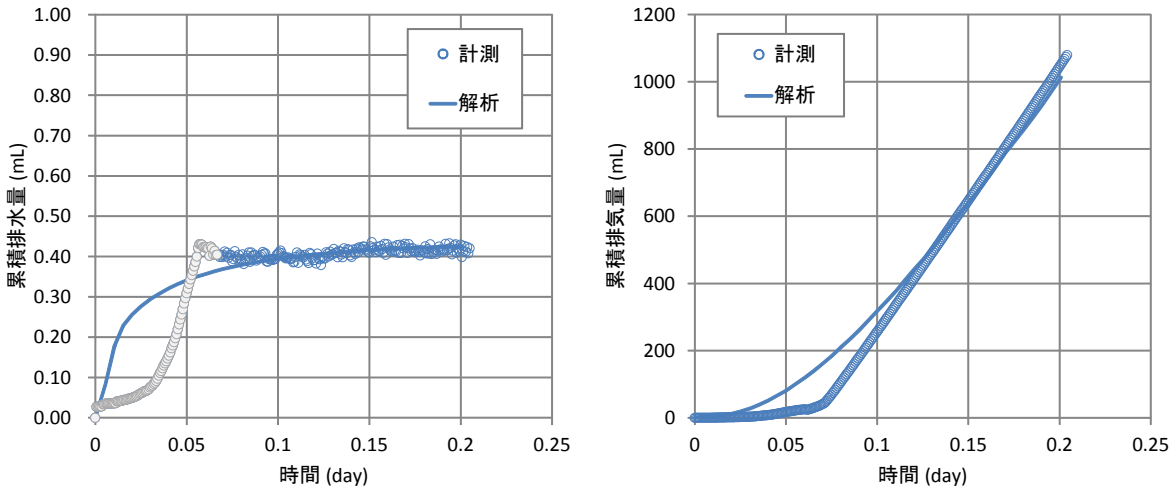


図 3.6-9　累積排水量と累積排気量の再現結果（供試体 No.1、検討 3）

表 3.6-2　同定パラメータ（供試体 No.1、検討 3）

未知パラメータ		供試体 No.1、検討 3
ガス相の絶対浸透率		1.05×10^{-17} (m²)
相対浸透率(vG)、毛細管圧力(vG)	S_{wr}	0.9554
	n_w	5.76
	n_g	2.583
	P_0	3.023×10^{4} (Pa)
	n	1.271

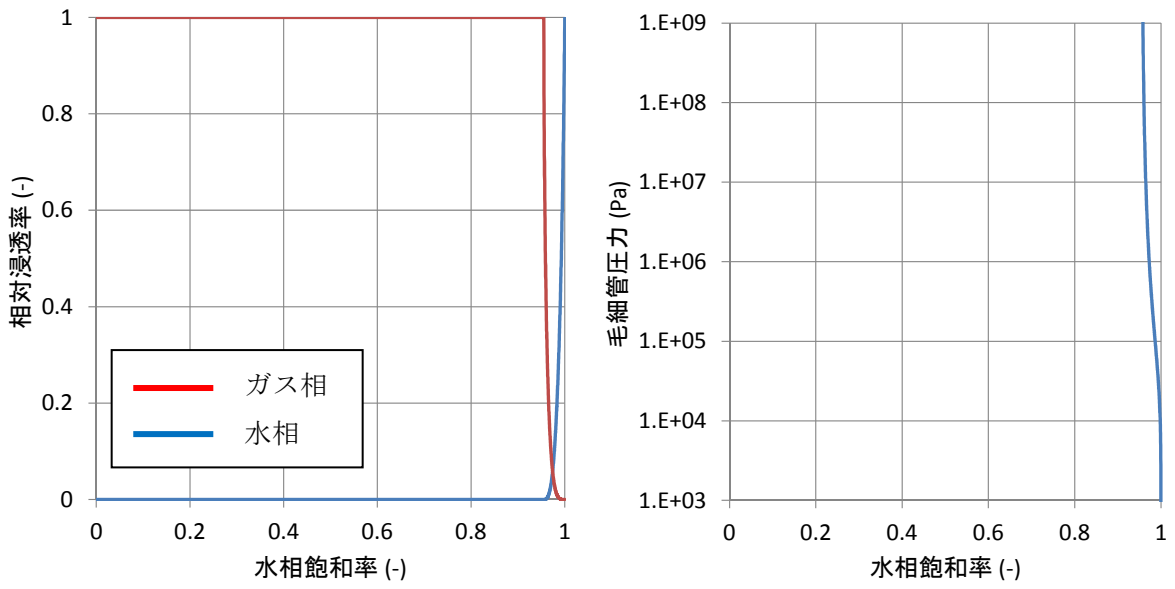


図 3.6-10　同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）（供試体 No.1、検討 3）

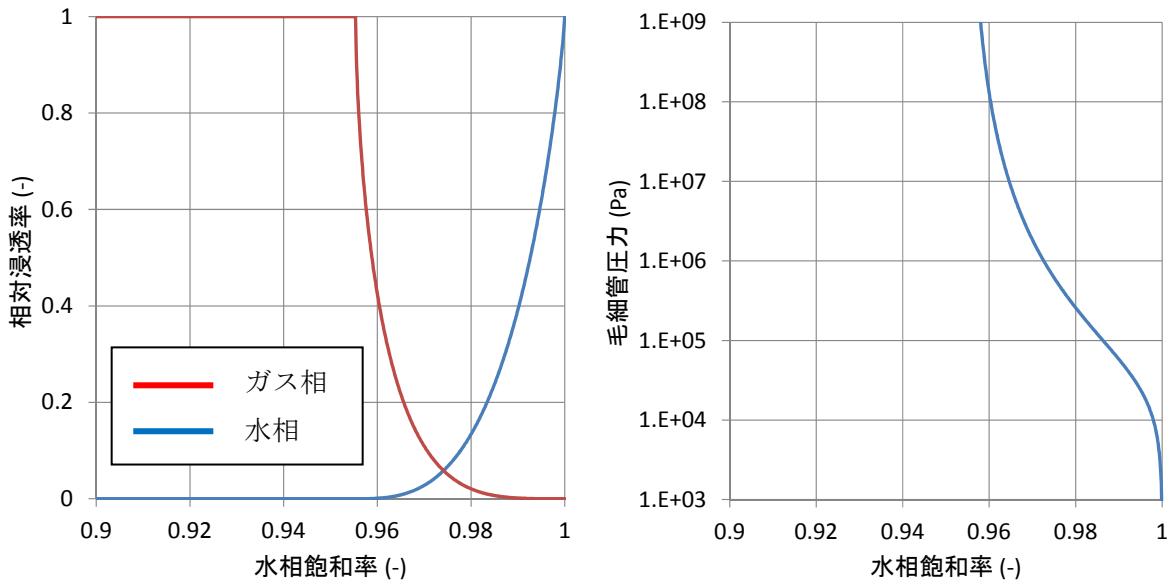


図 3.6-11　同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）
（水相飽和率 0.9～1.0 の範囲を拡大表示、供試体 No.1、検討 3）

3.6.2　供試体 No.2

(1) 検討 1：間隙率に全間隙率の値を用いた検討

3.5.4　に示した与条件の下、逆解析によって二相流物性の同定を試みた。図 3.6-12 に累積排水量と累積排気量の再現結果を示した。いずれのデータも良好に再現する結果を得ることができた。同定されたパラメータを表 3.6-3 に、相対浸透率曲線および毛細管圧力曲線を図 3.6-13、図 3.6-14 に示す。供試体 No.2 についても No.1 と同様に、非常に少ない排水量を表現するため

に、水相の残留飽和率が 0.9973 となり、極端な形状の二相流曲線が同定されている。

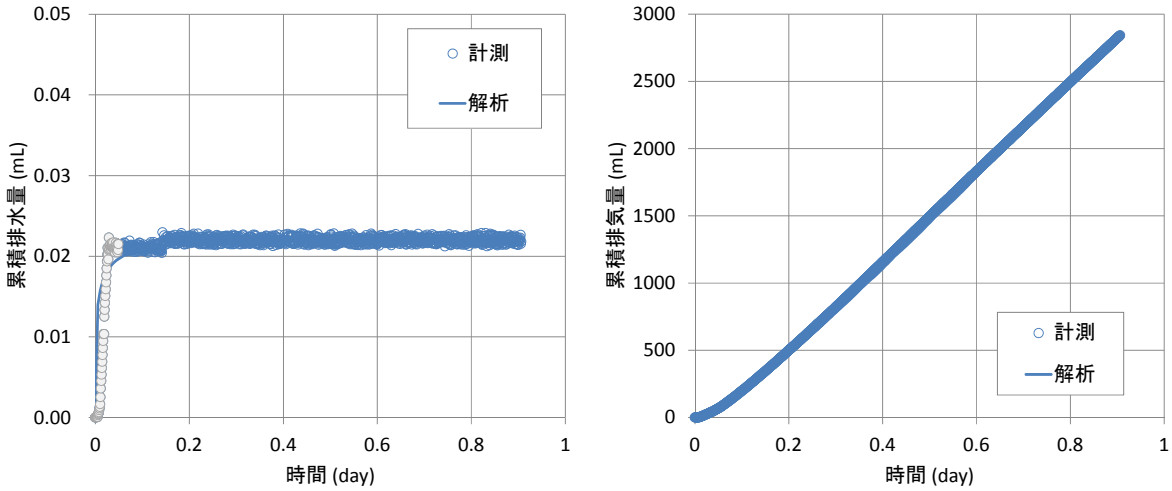


図 3.6-12　累積排水量と累積排気量の再現結果（供試体 No.2：検討 1）

表 3.6-3　同定パラメータ（供試体 No.2：検討 1）

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

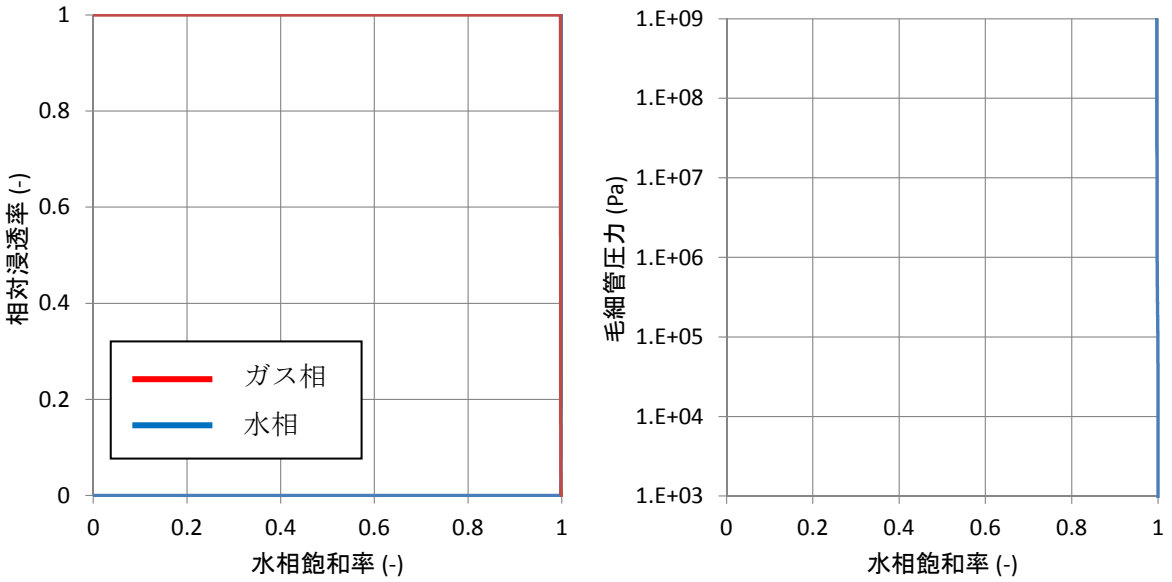


図 3.6-13　同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）（供試体 No.2：検討 1）

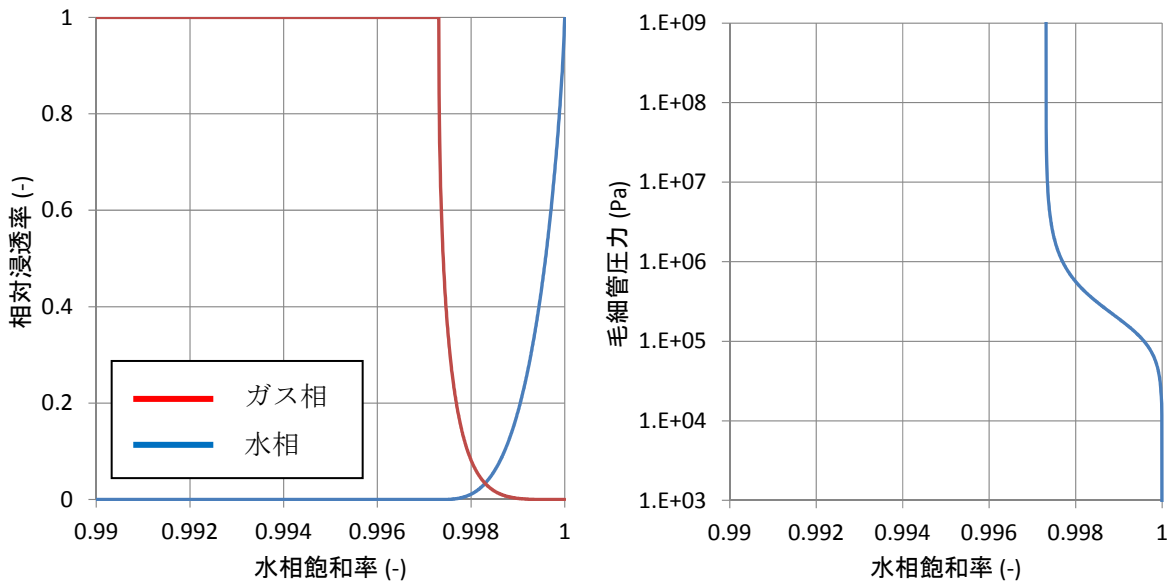


図 3.6-14　同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）
（水相飽和率 0.99～1.0 の範囲を拡大表示、供試体 No.2、検討 1）

(2) 検討 2（参考）：間隙率を同定パラメータに含めた検討

これまでの検討では、間隙率を全間隙率である 0.15 に設定し、与条件として検討を進めてきた。ここでは参考ケースとして、間隙中に強く捕捉された大部分の水を不動水（固相と同じ）として捉え、選択的な流動経路となっているごくわずかな間隙中のみの水・ガス置換挙動を対象とした検討を実施した。具体的には、表 3.4-9 で示した見かけの間隙率を初期設定値とし、間隙率も同定対象パラメータに加えた検討を行った。再現解析結果を以下に示す。

図 3.6-15 に累積排水量と累積排気量の再現結果を示した。いずれのデータも良好に再現する結果を得ることができた。同定されたパラメータを表 3.6-4 に、相対浸透率曲線および毛細管圧力曲線を図 3.6-16 に示す。本検討では、有効間隙率が 0.0002465 と非常に小さい値が同定される結果となった。

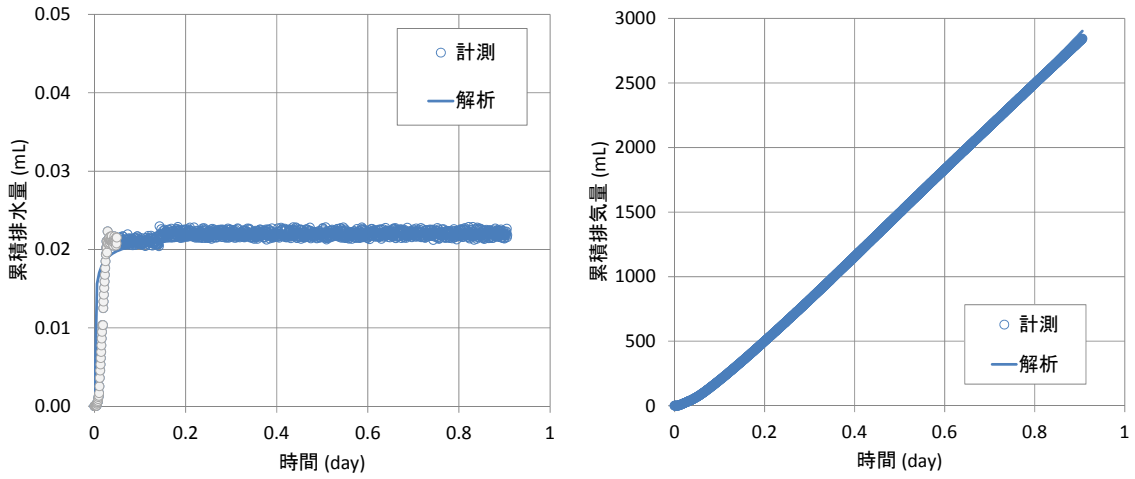


図 3.6-15　累積排水量と累積排気量の再現結果（供試体 No.2：参考）

表 3.6-4　同定パラメータ（供試体 No.2：検討 2(参考)）

未知パラメータ		No.2、検討 2(参考)
相対浸透率(vG)	n_w	3.514
	n_g	2.011
毛細管圧力(vG)	P_0	1.865×10⁵ (Pa)
	n	2.093
有効間隙率		0.0002465

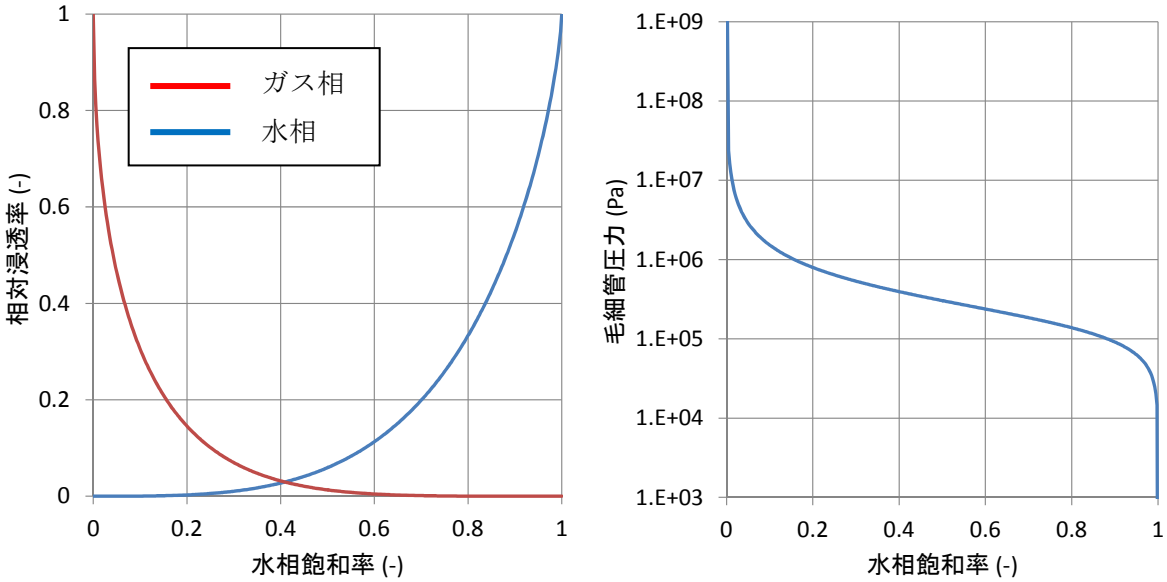


図 3.6-16　同定された相対浸透率（左）と毛細管圧力（右）（供試体 No.2、：検討 2(参考)）

3.7　取得されたデータの評価

ここでは、前項にて取得されたデータを評価することを目的に、参照資料として、国内外にて同等の条件にて行われたセメント系材料のガス移行試験データの収集を行い、これをもとに取得データの整合性等について検討した。

3.7.1　セメント系材料のガス移行挙動試験データの文献収集

セメント系材料のガス移行特性を取得するために、国内外で実施された試験事例の収集を文献調査にて行った。

3.7.2　収集文献中のデータ整理

ここでは、収集文献中のデータを以下の観点にて表に整理した。

- 実施環境（飽和/不飽和の別など）
- 供試体の材料構成とサイズ
- その他（データの信頼性等）

整理結果を表 3.7-1～表 3.7-4 に示す。

3.7.3　本検討のデータ取得に係る諸条件の確認

前項にて作成された本検討および収集文献の諸条件の整合性について、
・実施環境（飽和条件他）
・供試体の諸元（サイズ等）
・その他（試験状況からみた信頼性等）
・取得パラメータ（オーダーやバラツキ他）
の観点からとりまとめを行い、今後の課題を抽出した。

表 3.7-1　本検討と収集文献中の試験データ整理結果（1／4）

参考文献 番号	実施環境 （飽和／不飽和の別など） 透水試験	実施環境 （飽和／不飽和の別など） 透気試験	供試体の材料構成 とサイズ 材料構成および条件	供試体の材料構成 とサイズ サイズ	その他 （試験結果の概要や信頼性等）	備考 （取得データ）
－ （本検討にて取得されたデータ）	・ 試験装置タイプ：三軸拘束型 ・ 背圧：0.1 MPa ・ 拘束圧：3.0 MPa ・ 飽和／不飽和の別：飽和 ・ 使用流体：蒸留水 ・ 供試体の初期飽和と飽和確認：真空浸漬（48 時間） ・ 通水過程：1 週間以上の長期間に亘って注水し、排水量の定常化を確認 ・ 注水圧：定圧（1.0 および 2.8 MPa）	・ 飽和／不飽和の別：飽和（透水試験直後の供試体を用いて実施） ・ 使用ガス種：窒素 ・ 注気圧：定圧（2.8 MPa）	・ 供試体材料：モルタル（OPC 使用）、粒度調整済の細骨材を使用 ・ W/C：0.55、C/B：0.33 ・ 材齢：28 日以上 ・ 一軸圧縮強度：30N/mm² 以上	【透水・透気試験】 H50 mm ×φ50 mm	・ 透水試験の着手に際し、初期飽和度を高めるために供試体を 48 時間に亘って真空浸漬しており、また透水係数評価のために、供試体への注水量および排水量が定常となる区間となるまで経過観察しているため、供試体の飽和度は極めて高いと思われる。 ・ 供試体と試験容器との界面にゴムジャケットを装着・加圧することで、界面における透水・透気の防止措置を施しており、透水・透気試験データの信頼性は高いと思われる。	・ 水相絶対浸透率 ＝1.35 E-19(m²)：供試体 No.1 ＝1.51 E-18(m²)：供試体 No.2 ・ ガス相有効浸透率 ＝1.11 E-18(m²)：供試体 No.1 ＝4.66 E-19(m²)：供試体 No.2 【逆解析による同定値】 ・ ガス相絶対浸透率 ＝精査中：供試体 No.1 ＝1.51 E-18(m²)：供試体 No.2
[8] （山本他、2004）	・ 試験装置タイプ：三軸拘束型 ・ 拘束圧：注水・注気圧＋3.5 MPa（ただし一軸圧縮強度以下） ・ 飽和／不飽和の別：飽和 ・ 使用流体：蒸留水 **【モルタル供試体】** ・ 供試体の初期飽和と飽和確認：供試体上面より真空引き（3 時間）後、供試体の上・下面より 5.0 MPa にて注水（4 時間）。さらに、透水試験時において排出側圧力（背圧）を固定のうえ、上流側を昇圧し、排水量の定常化を確認 ・ 注水圧：ステップ状（5.0→9.9 MPa）、9.9 MPa に昇圧後、定圧注水を 240 時間継続 ・ 背圧：5.0 MPa	【透水試験後】 ・ 飽和／不飽和の別：飽和（透水試験後の供試体を用いて実施） ・ 使用ガス種：窒素 ・ 注気圧：一定ステップ状 0.05 MPa/h（5.0 → 12.5 MPa） ・ 背圧：5.0 MPa 【試料乾燥後（絶乾状態）】 ・ 飽和／不飽和の別：不飽和（透気験後の試料を 110℃で 20 時間以上乾燥して絶乾状態とした） ・ 使用ガス：窒素 ・ 注気圧：一定（ただし 0.3～0.9 MPa の間）	・ 供試体材料：JIS モルタル（OPC 使用） ・ W/C：0.50、C/B：0.33 ・ 材齢：28 日以上 ・ 一軸圧縮強度：42.0 N/mm²	【透水試験】 H50 mm ×φ76.2 mm 【透気試験（絶乾状態）】 H47.8mm ×φH77.2 mm	・ 飽和供試体へのガス侵入圧：6.6 MPa（試験開始より 0.05 MPa/h で昇圧した結果） ・ 飽和供試体からのガス透気圧：12.5 MPa（昇圧開始より 215 時間後、装置排出側からのガス検知は 233 時間後） ・ 飽和供試体（透水試験後）へのガス注入時、供試体は不飽和であった可能性を示唆している。（試験前後の供試体重量測定結果などによる）	・ 水相絶対浸透率 ＝1.22 E-20(m²) ・ ガス相絶対浸透率 ＝5.01 E-18(m²) ・ 水分特性曲線 ・ 間隙率 ・ 間隙径分布

表 3.7-2　本検討と収集文献中の試験データ整理結果（2／4）

参考文献 番号	実施環境 （飽和／不飽和の別など） 透水試験	透気試験	供試体の材料構成 とサイズ 材料構成および条件	サイズ	その他 （試験結果の概要や信頼性等）	備考 （取得データ）
[10][12] （Mayer et.al., 1992,1998）	・　試験装置タイプ：不明（一軸拘束型？） ・　飽和／不飽和の別：不飽和 ・　使用流体：不明（蒸留水？）	・　飽和／不飽和の別：不飽和 ・　使用ガス種：不明（窒素？）	・　供試体試料：コンクリート（セメント種不明、OPC？） ・　W/C：0.4～0.7 ・　材齢：91 日以上 ・　一軸圧縮強度：不明	【透水・透気試験】 H60 mm ×φ150 mm	・　水セメント比および飽和度を変えたコンクリートのガス浸透率を計測しておいるが、コンクリート供試体のガス浸透率は水セメント比の影響よりも飽和度の影響の方が大きいとしている。 ・　水銀圧入法により間隙径分布測定から毛管圧と間隙径の関係式を介して供試体の毛管圧曲線を評価し、試験結果から得られた水・ガスの有効浸透率曲線と併せて二相流解析コード（TOUGH）への適用を試みている ・　検討の結果、コンクリート供試体の飽和度が 84%と仮定した場合、供試体のガス流量の経時変化を TOUGH によって良好に現象を再現できたと報告している	【再現解析による同定値】 ・　水相絶対浸透率 ＝1.0 E-16(m²) ・　ガス相絶対浸透率 ＝1.2 E-18(m²)
[15] 平井、廣永ら	・　試験装置タイプ：不明（一軸拘束型？） ・　飽和／不飽和の別：飽和 ・　使用流体：不明（蒸留水？） ・　28 日間、6 ヶ月、1 年の標準水中養生後、アウトプット法による透水試験を実施して排水量の定常化をもって飽和を確認	・　飽和不飽和の別：飽和 ・　使用ガス種：不明（窒素？） ・　飽和確認完了後、ただちに透気試験を実施 ・　注入ガス圧：0.01 MPa/step（0.2 MPa まで）、0.05 MPa/step（0.2 より 0.5 MPa まで） ・　1step の載荷時間は最長 2 時間	・　供試体試料：モルタル（セメント種不明、OPC？） ・　W/C：1.5～3.0 ・　材齢：28 日間、6 ヶ月、1 年 ・　一軸圧縮強度：不明	【透水・透気試験】 H50 mm ×φ150 mm	・　飽和セメント系材料にガスが侵入する場合、水で満たされた細孔のうち比較的径の大きな部分からガス圧による水の押し出しが始まり、上流から下流まで連続した気みちが形成された時点で破過が生じるとしている ・　その後、より径の小さな細孔でも同様の現象が進むとしている ・　飽和セメント系材料で破過が生じるためには、水が押し出され得る細孔（有効間隙）が存在し、ある一定以上の細孔径の大きさと空隙量が必要であるとしている	・　水相絶対浸透率（不明） ・　ガス相有効浸透率 ＝1.0E-24 ～1.0E-20(m²)

表 3.7-3　本検討と収集文献中の試験データ整理結果（3／4）

参考文献 番号	実施環境 （飽和／不飽和の別など） 透水試験	実施環境 （飽和／不飽和の別など） 透気試験	供試体の材料構成 とサイズ 材料構成および条件	供試体の材料構成 とサイズ サイズ	その他 （試験結果の概要や信頼性等）	備考 （取得データ）
[17] （Iriya et.al., 1991	・ 試験装置タイプ：不明（一軸拘束型？） ・ 飽和／不飽和の別：飽和 ・ 使用流体：不明（蒸留水？） ・ 91 日以上の標準水中養生をもって飽和と判断 ・ 注水圧：不明	・ 飽和／不飽和の別：飽和 ・ 使用ガス種：不明（窒素？） ・ 91 日以上の標準水中養生をもって飽和と判断 ・ 載荷ガス圧：不明	・ 供試体試料：コンクリート（セメント種不明、OPC？） ・ W/C：不明 ・ 材齢：91 日以上 ・ 一軸圧縮強度：不明	【透水・透気試験】 H60 mm ×φ150 mm	・ 多孔質媒体中の移行経路が水で満たされている状態ではガスが侵入できないとしている ・ 移行経路の（間隙の大きな部分）から水を排出させるのに十分な大きさのガス圧が載荷された状態となって初めてガスが流れ始めるが、ガスの流れは不安定でありガス圧と時間の増加に伴って流量が増加するとしている ・ 以降は、ダルシー則にしたがって、上下流の差圧に応じてガスが流れていくとしている	・ 水相浸透率（不明） ・ ガス相浸透率（不明） ・ W/C や間隙率とガス侵入圧との関係
[18] （荻野他、2000）	・ 試験装置タイプ：一軸拘束型 ・ 飽和／不飽和の別：不飽和 ・ 使用流体：不明（蒸留水？） ・ 割裂試験の前日までの水中養生 ・ 割裂試験の翌日に透水試験実施 ・ 注入ガス圧：0.02～0.1 MPa（0.02 MPa/step）	・ 飽和不飽和の別：不飽和 ・ 使用ガス種：不明（窒素？） ・ 割裂試験の翌日に透気実施 ・ 注入ガス圧：0.02～0.1 MPa（0.02 MPa/step）	・ 供試体試料：コンクリート（セメント種不明、OPC？） ・ W/C：0.4、粗骨材最大寸法：20mm ・ 材齢：不明 ・ 一軸圧縮強度：不明 ・ 透水・透気試験前に、割裂試験機により「模擬ひび割れ」部を作製	【透水・透気試験】 H100 mm ×φ150 mm	・ ひび割れからの透気量の評価について、ひび割れを平行平板とみなし、その中の流れに Poiseille（ポアソイユ）の法則を適用して得られる式を提案している ・ ひび割れ幅と水・ガス浸透率の関係（透水・透気量をひび割れ幅とひび割れ長さで除したもの）を取得しており、圧力依存性があることを示している	【※ひび割れ部の透気・透水特性】 ・ 水相絶対浸透率 ＝1.0 E-7～1.0 E-3 (m^2) ・ ガス相有効浸透率 ＝1.0 E-5～1.0 E-2 (m^2) ※ひび割れ幅：0.01～0.16 (mm) ※注水・注ガス圧：0.02～0.1 (MPa)

表 3.7-4　本検討と収集文献中の試験データ整理結果（4／4）

参考文献 番号	実施環境 （飽和／不飽和の別など） 透水試験	透気試験	供試体の材料構成 とサイズ 材料構成および条件	サイズ	その他 （試験結果の概要や信頼性等）	備考 （取得データ）
[19] （氏家他、1999）	・　試験装置タイプ：一軸拘束型 ・　実施せず	・　飽和／不飽和の別：不飽和 ・　使用ガス種：不明（窒素？） ・　試験直前まで期中養生 ・　載荷ガス圧：0.2 MPa ・　供試体に引張り応力（静的・持続・繰り返し）を載荷	・　供試体試料：コンクリート（OPC 使用） ・　W/C：0.35～0.60 ・　材齢：21 日以上 ・　一軸圧縮強度：不明 ・　表面に打継処理を施した既設コンクリート供試体に新コンクリートを打継ぎ、打継面を有する透気試験供試体を作製 ・　透気方向以外の部位には気密（不透気）処理を施している	【透気試験】 H300 mm × W150mm× D100 mm （透気部断面積：約 0.15cm²） ※角柱型	・　打継処理深さと透気係数の関係を取得しており、打継目の処理方法によって透気係数が異なることを示している（処理方法によって処理深さが異なるため） ・　引張り応力と透気係数の関係を取得しており、打継面に引っ張り応力が作用する場合に透気係数が増大することを示している（透気経路が拡幅されるため）	【※ひび割れ部の透気・透水特性】 ・　ガス相有効浸透率 ＝1.0～3.0 E-7 (m²) ※打継面処理深さ：1～4(mm) ・　ガス相有効浸透率 ＝1.0～3.0 E-7 (m²) ※引張応力比：0～75(%)
[20] （河野他、1999）	・　試験装置タイプ：一軸拘束型 ・　実施せず	・　飽和不飽和の別：不飽和 ・　使用ガス種：不明（窒素？） ・　透気試験直前までの 28 日間水中養生しているが、飽和確認には言及せず ・　載荷ガス圧：0.2 MPa	・　供試体試料：モルタル（OPC 使用） ・　W/C：0.5～1.6 ・　角柱型供試体の透気面以外の部位には気密（不透気）処理を施している ・　透気試験に際して、50℃で炉乾燥し絶乾に近い状態としているが、確認については言及していない	【透気試験】 H150 mm × W150mm× D150 mm （透気部断面積：約 225cm²） ※角柱型	・　空隙率と透気係数の関係を取得しており、空隙率が増大するほど透気係数が増大することを示している ・　水セメント比と透気係数の関係を取得しており、水セメント比が増大するほど透気係数が増大することを示している	・　ガス相有効浸透率 ＝1.0 E-11～1.0 E-7 (m²) ※空隙率：2～20(%) ※水セメント比：50～160(%)

3.8　まとめと今後の課題

3.8.1　モルタルの透水特性及びガス透気特性のデータ取得

モルタル供試体を作製し、透水・透気試験を実施した結果を以下の通りまとめる。

- ✓ 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
- ✓ ゴムスリーブに載荷する側圧は、モルタル供試体への流体注入圧に対して 0.2 MPa 以上を載荷することで、供試体と試験容器間の界面に流体が侵入しないようにした
- ✓ 初期飽和を実施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を取得した
- ✓ 透水試験前後の供試体重量を測定した結果、試験後の重量増加が認められたことから、透水試験期間を以て供試体が飽和したことを確認し、得られた透水係数が「飽和透水係数」であると評価して水相絶対浸透率を算定した
- ✓ 透水試験後、直ちに透気試験を実施して透気特性データ（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）を取得した
- ✓ ガス注入時の累積排水量は、ガス注入試験前後の供試体重量差より算定した

3.8.2　モルタルの気液二相流特性データの取得

モルタル供試体の透水・透気試験データを元に取得した結果を以下の通りまとめる。

- ✓ 透気試験の実測データから、供試体からの累積排水量および累積排気量データを生成した
- ✓ 逆解析手法を適用し、生成した累積排水量、排気量データの再現解析を行うことで、気液二相流物性の同定を試みた
- ✓ 再現解析の結果、累積排水量と累積排気量の双方のデータを概ね良好に再現する二相流物性を同定することが可能であった
- ✓ 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他の試験系に適用する際には注意が必要である

3.8.3　セメント系材料のガス移行挙動試験データの文献収集

セメント系材料のガス移行挙動試験とあわせて実施した、本検討と類似条件による試験を対象とした文献整理によって収集された文献より示唆された要点について、以下の通りにまとめた。

- ✓ 不飽和なセメント系材料のガス移行特性は、材料の空隙構造と強い相関があると言われており、空隙構造に影響する水セメント比・養生条件・セメントの種類などに依存する[9]。
- ✓ 飽和したセメント系材料のガス移行特性は、不飽和試料と同様、細孔径の量や分布に大きく影響され、緻密な材料ほどガス侵入圧・破過圧が大きくなる[11][13][14][16]。
- ✓ 実施設のガス移行特性を評価するには、使用する材料・配合のみならず、施工法・養生環境条件など、室内と現場の条件の違いによって発揮される細孔構造の違いに十分留意する必要がある[13][14]。

参考文献

[1] 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.

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

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 日本工業規格，土の透水試験方法 JIS A 1218：1998

[7] 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

[8] 山本幹彦他，地層処分におけるガス移行影響評価―人工バリア内のガス移行解析手法とデータ取得―，原子力バックエンド研究, Vol.10, No.1, pp.31-45, 2004.

[9] 田中亨二他，水分を含む状態でのセメントモルタルの透気性，日本建築学会構造系論文集, 第 469 号, pp.9-55, 1995.

[10] Mayer, et al., 1992. Experimental determination and numerical simulation of the permea bility of cementitious materials, Nuclear Engineering and Design, vol.138(2), pp.171- 177..

[11] Rodwell, et al., 1999. Gas migration and two-phase flow through engineered and geological barriers for a deep repository for radioactive waste, A joint EC/NEA States Report, EUR 19122 EN.

[12] Mayer, G., Moetsch, H. A. and Wittmann, F. H., 1998. Large-scale experiment for water and gas transport in cementitious backfill materials, NTB 98-03, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste.

[13] 氏家勲，1994. コンクリートの透気係数の定量的検討と密実性評価への適用に関する研究, 学位論文.

[14] 平井光之他，2000. 飽和モルタル試験体の透気特性―破過の定義―，第 55 回土木学会年次学術講演会概要集, pp.300-301.

[15] 廣永道彦他，2000. 飽和モルタル試験体の透気係数と細孔径分布との関係に関する考察，第 55 回土木学会年次講演会概要集, pp.298-299.

[16] 氏家勲他，1999. 飽水状態のモルタルにおける破過圧に関する実験的研究，第 54 回土木学会年次学術講演会概要集, pp.180-181, 1999.

[17] Iriya et.al, Cementitious backfill materials for a L/ILW repository - Investigations of

gas transport properties, Nuclear Engineering and Design, vol.129, pp.49-55, 1991.
[18] 荻野和彦他, 2000. ひび割れ部の透水性および透気性に影響を及ぼす要因に関する研究, コンクリート工学年次論文報告, Vol.22, No.2.
[19] 氏家勲他, 1999. 持続引張応力下および繰返し引張応力下の新旧コンクリート打継目の透気性状に関する研究, 土木学会論文集 No.620/V-43, 233-243.
[20] 河野俊一他, 1999. 乾燥によるコンクリートの透気係数の変化に関する研究, コンクリート工学年次論文報告, Vol.21, No.2.
[21] 杉山隆文他, 2004. 電気泳動法を用いたモルタル硬化体の空隙構造の定量化とその考察, 土木学会論文集 No.767/V-64, 227-238.
[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とりまとめ－(2005).
[23] 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).
[24] 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).
[25] 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).
[26] 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)
[27] 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)
[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 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)
[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 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)

第 4 章　ガス移行連成解析ツールの高度化

4.1　実施概要

4.1.1　本研究の背景と目的

原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、原環センター）は、平成 19 年度から 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た[3][4][5][6][7][8]。本調査検討は、これを受けてこれまでに構築されたガス移行挙動評価解析手法のさらなる高度化を目的に、連成解析ツールに主眼をおいて行うものである。

平成 24 年までの検討では、以下に示す 3 つを目的として研究が進められ、ベントナイト中での水・ガス流動機構の同定や、それに基づく構成モデルの開発、ガス移行挙動と THMC（温度/水理/力学/化学）連成事象の関連ならびにその影響度の把握、ガス移行解析に用いる基礎データを蓄積し利用するためのデータライブラリの構築等に取り組んできた。

① ベントナイト中のガス移行挙動の現象理解（実測データを用いた確証計算）
② TRU 廃棄物処分施設内でのガス移行に関連するガス移行に係る THMC 連成事象の影響度把握（スコーピング検討）
③ ガス移行解析に用いるデータの蓄積・利用（ガス移行データライブラリの構築）

これらの検討を通じて得られた主な課題には、次のようなものが挙げられる。

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

これらの課題を踏まえて、本研究では、今後 5 年程度を見据え、以下に示す目標達成を目指す。図 4.1-1 に今後 5 年程度の全体計画の概念を示す。

① マルチスケール系（材料/領域）を対象としたガス移行に係る THMC 連成現象の解明促進 ② 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 ③ TRU 廃棄物処分におけるガス移行挙動評価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

上記①では、これまでの検討を通じてガス移行挙動との関連性が示唆された変形場、化学場との連成事象（THM、THC）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。具体的には、THM 連成では既に開発した媒体変形と水・ガス 2 相流挙動を関連付ける構成モデルの適用

性評価を、THC 連成では水素ガス発生モデルとの結合解析等を行う。

また、上記②では、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具体的な利用・再評価を進めるとともに、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した。

以上を踏まえると、短期から長期、局所から広域にわたる連成現象とその不確実性のモデル化が不可欠であり、計算の大規模・大容量化が避けられない。ニアフィールドからファーフィールドを含む長期状態変遷（Long-term Evolution）の評価はその一例である。上記③では、これらの検討を支える次世代のモデリング・コンピューティング技術の導入について検討する。具体的な実施対象としては、GPGPU（General-Purpose computing on Graphics Processing Units)[1] による高速演算処理技術の導入や、各種の設計解析や安全評価解析を効率的に行うことができるサローゲートモデリング（Surrogate Modeling)[2] のガス移行に係る解析への適用について検討する。

本年度は、国内外の最新の研究成果を踏まえ、今後 5 年程度で達成すべき到達点の設定と具体的な研究計画の策定を目的とした。

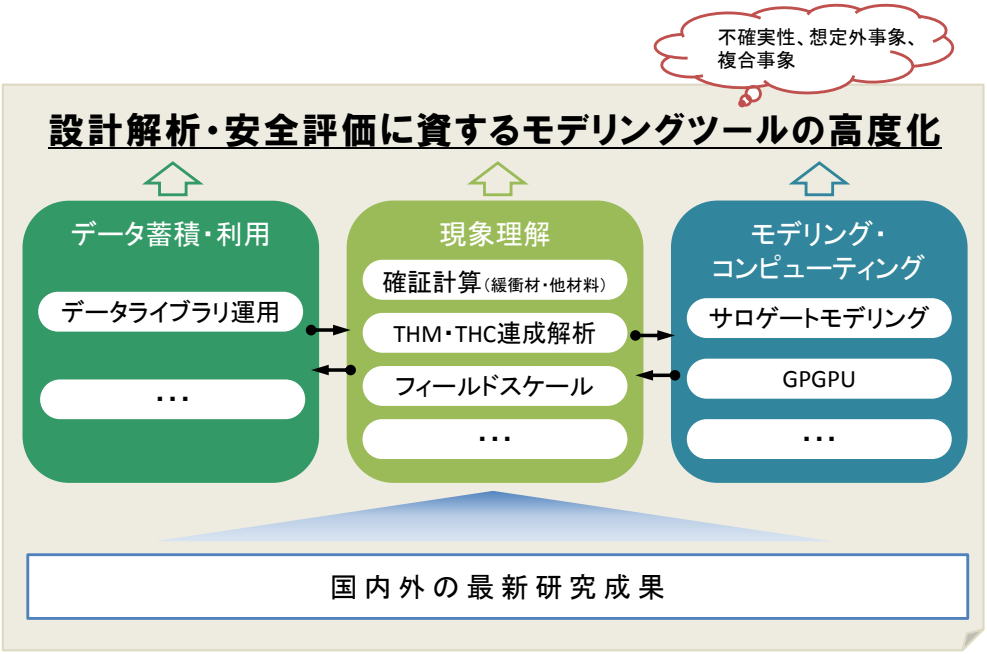


図 4.1-1　今後 5 年程度の解析・モデル化に係る実施計画の概念

[1] GPGPU：元来は画像処理用の GPU (Graphics Processing Unit) の演算性能を、本来の画像処理以外の用途のために汎用的に利用する概念、技術のこと（IT 用語辞典）。

[2] サローゲートモデリング：大規模な詳細モデルにより得られたデータから、その入出力関連を抽出（学習）すること。サローゲートモデルを用いて、設計や安全評価に必要な指標を即時に求めることができる。応答局面やニューラルネットワークなどが用いられ、メタモデリング（Meta- Modeling）とも呼ばれる。

4.1.2　実施項目

本年度の検討項目を以下に示す。

(1) ガス移行挙動解析ツールの高度化に係る解析検討
- 試験データの入手・整理・分析
- ガス移行試験データの再現解析（圧力依存性モデル、力学連成モデル）

(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
- 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
- 今後 5 年間の解析手法・モデル化高度化のための研究計画策定

(3) TRU 廃棄物処分施設の概念モデルを用いた時系列解析
- 対象システムの設定
- 解析モデルの構築
- 時系列解析の実施

(4) データ整理と成果取りまとめ、課題抽出

4.1.3　目標成果

前項にて示した実施項目の諸検討を通じ、下記成果の達成を目標とした。

① ベントナイト材料の大型供試体を対象としたガス移行挙動の把握
② ガス移行連成挙動評価手法の高度化に向けた全体計画の策定
③ 今後の調査研究に際しての課題抽出

4.1.4　実施内容

(1) ガス移行挙動解析ツールの高度化に係る解析検討

「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―」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の入手・整理を行い、試験データの再現解析を見据えたデータの分析を行った。

(2) ガス移行試験データの再現解析

上記検討にて整理したガス移行試験データの再現解析を、以下の 2 つの解析モデル（コード）を適用して実施した。

- 圧力依存透過特性モデル（GETFLOWS）
- 力学連成解析モデル（CODE_BRIGHT）

なお、本再現解析では自動逆解析手法等を用いてパラメータ同定を行い、大型供試体内でのガ

ス移行挙動の把握を行った。

(3) 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

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

2) 今後 5 年間の解析手法・モデル化高度化のための研究計画策定

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。

(4) TRU 廃棄物処分施設の概念モデルを用いた時系列解析

1) 対象システムの設定

前項にて整理された課題をもとに、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設定した。図 4.1-2 にこれまでの検討で用いてきた TRU 廃棄物処分システムの概念を示す。

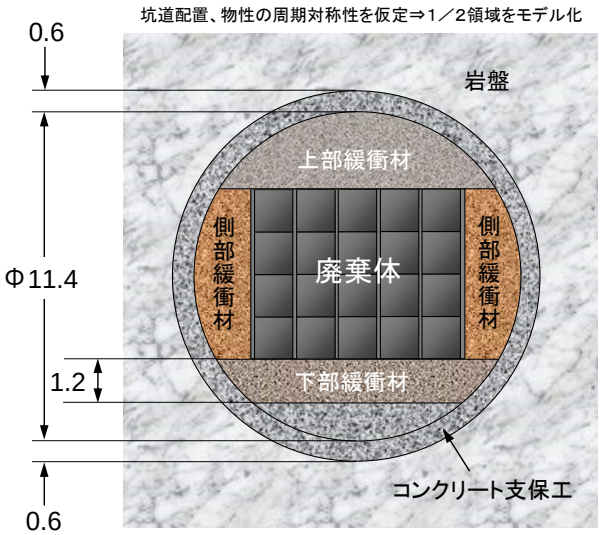


図 4.1-2　典型的な TRU 廃棄物処分システム概念

2) 解析モデルの構築

前項にて設定した処分システムを対象とし、解析モデルを構築した。各材料の物性等の与条件は、第 2 次 TRU レポート[1]やこれまでに得られたパラメータを参考に決定した。解析モデルの一例を図 4.1-3 に示す。

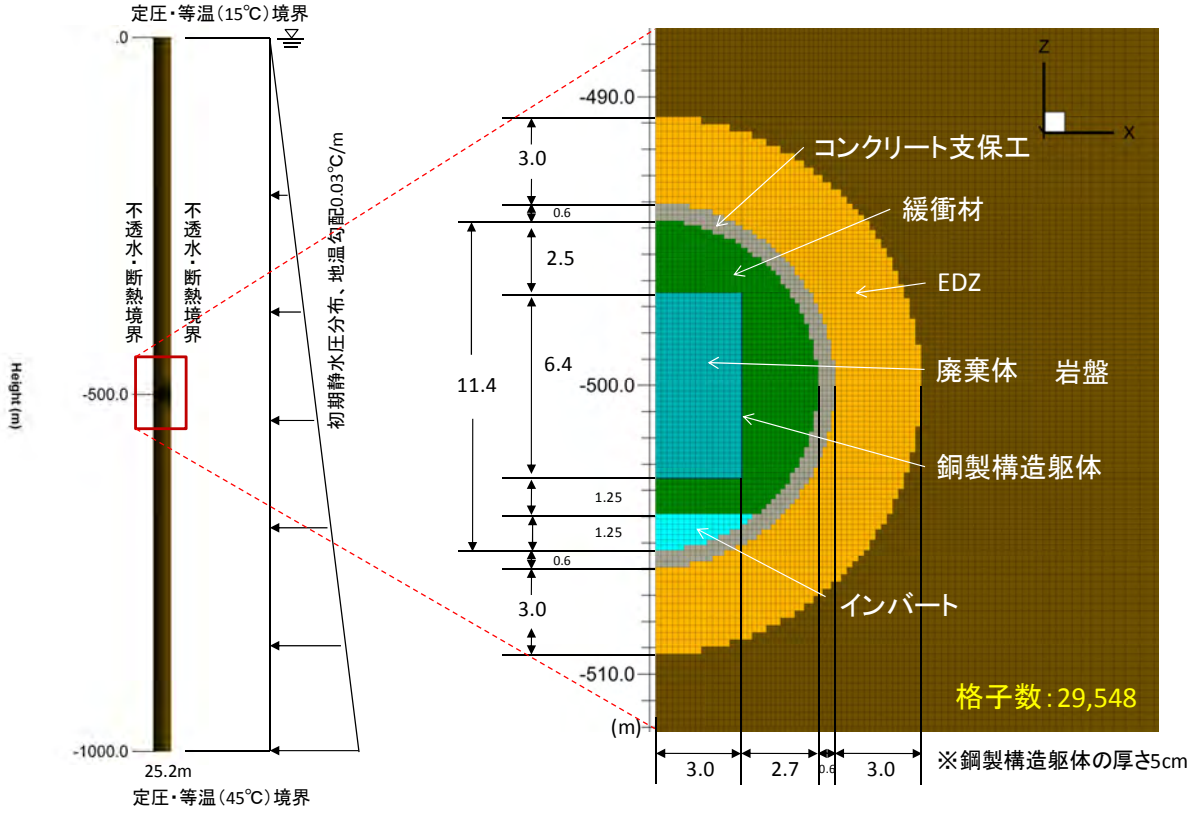


図 4.1-3　解析格子モデルの例

3) 時系列解析の実施

上記で作成した解析モデルを用いたガス移行解析を実施した。解析結果は施設内のガス圧および押出し水量等の設計指標を中心に取りまとめる。また、ガス圧や飽和度、温度等の時間・空間分布を整理し、ガス透気経路を分かりやすく可視化した。

(5) データ整理と成果取りまとめ

以上の成果を取りまとめ、得られた成果及び課題について明確に整理し、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、今後の課題を抽出した。

4.2　ガス移行挙動解析ツールの高度化に係る解析検討

4.2.1　試験データの入手・整理・分析

第 2 次 TRU レポート[1]での円形処分坑道概念における上部および側部の基本緩衝材とされる乾燥密度 1.36Mg/m^3 の 100%クニゲル V1（供試体直径 60mm、高さ 200mm）を用い、ガス移行試験が実施されている[7]。ガス移行試験は 3 つの試験フェーズ（再冠水試験、ガス注入試験、解体調査）から成る。各試験フェーズでの試験条件及び実測データを表 4.2-1 にまとめた。図 4.2-1、図 4.2-2 に再冠水フェーズにおいて実測された累積注水量と全応力の時間変化を注水差圧と合わせて示した。累積注水量に関しては、供試体下面から流入した量と、供試体上部から蒸発した量を差し引いた正味の累積排水量の 2 つを示した。また、図 4.2-3～図 4.2-5 にガス注入フェーズにおいて実測された累積排水量と排気流量、全応力の時間変化を注入ガス圧と合わせて示した。さらに、解体調査から得られた含水比、水飽和度の平均値プロファイルを図 4.2-6 に示す。

表 4.2-1　各試験フェーズにおける試験条件と計測データ

試験フェーズ	試験条件	実測データ
再冠水	初期飽和度 90%から、差圧 0.2 MPa⇒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（飽和・定常流確認）後、差圧 0.1MPa/2 日の段階昇圧ガス注入（最大注入圧 5.0MPa）	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 単位で分割後、中央・外周を全 5 分割	寸法 湿潤重量　（→含水比、水飽和度） 乾燥重量

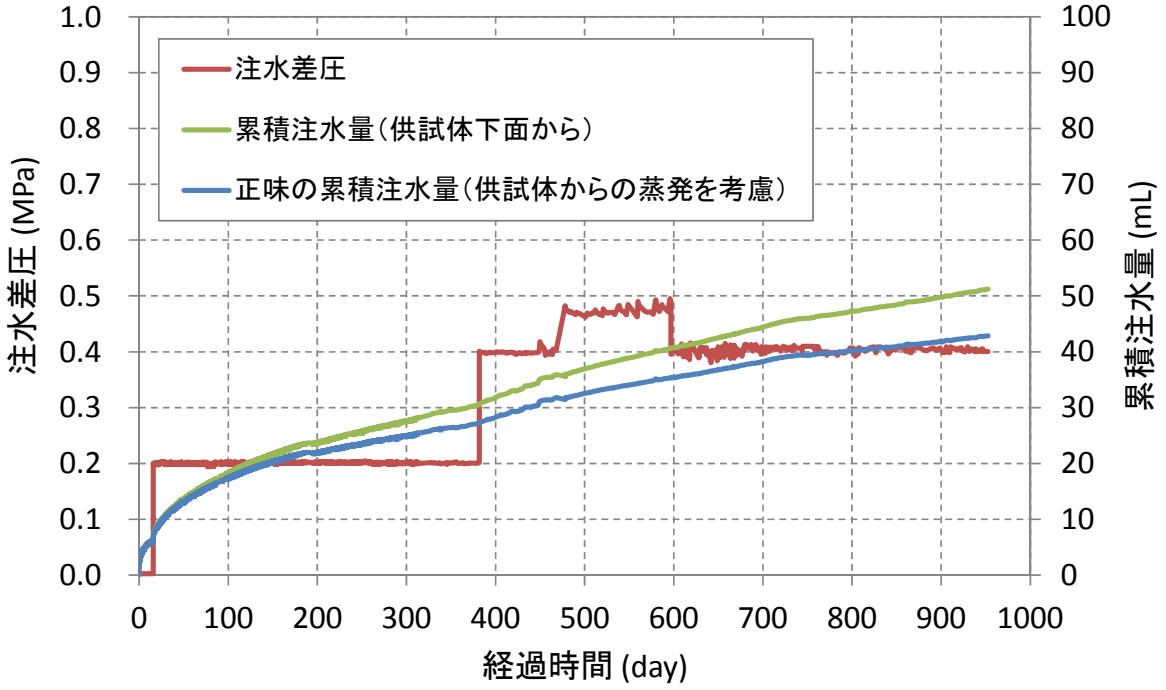


図 4.2-1　注水差圧と累積注水量の時間変化（再冠水フェーズ）

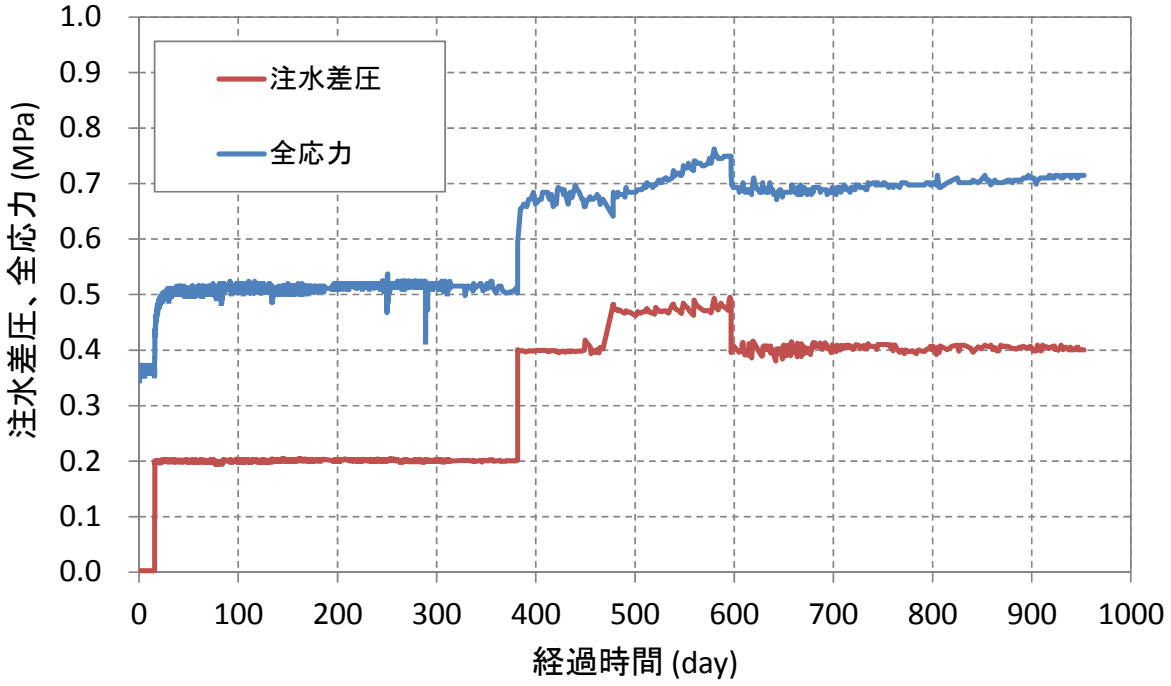


図 4.2-2　注水差圧と全応力の時間変化（再冠水フェーズ）

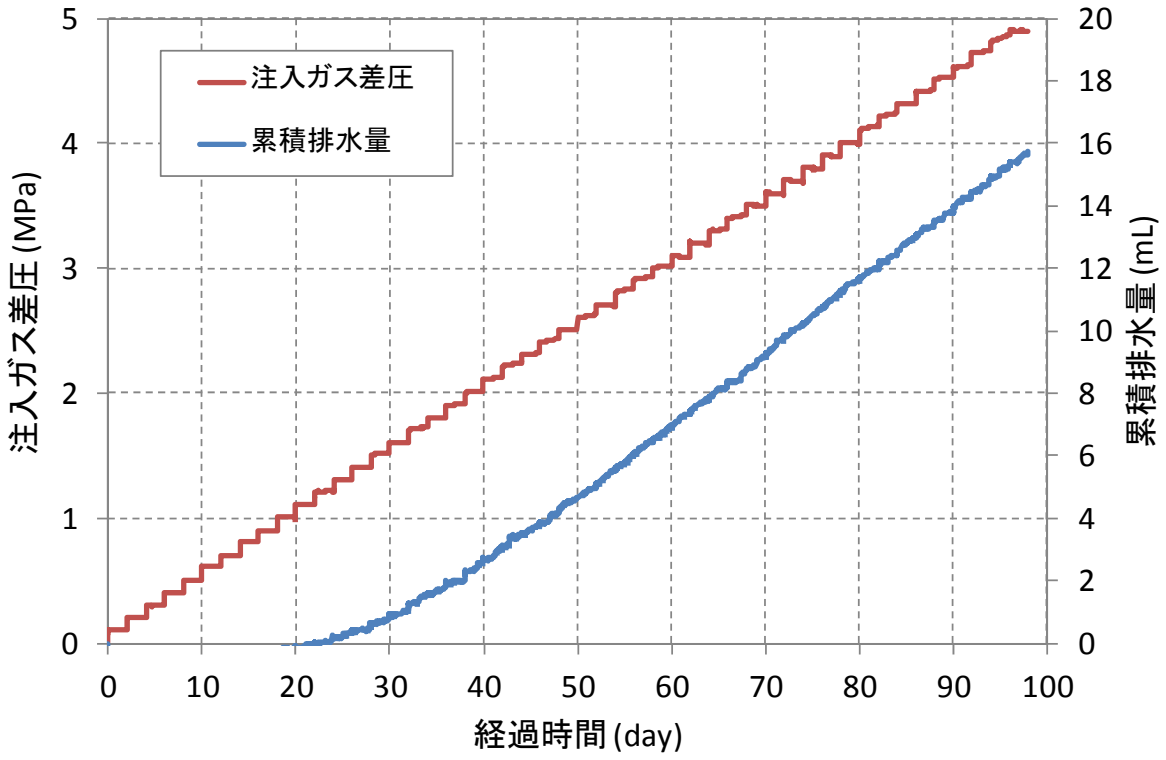


図 4.2-3　注入ガス差圧と累積排水量の時間変化（ガス注入フェーズ）

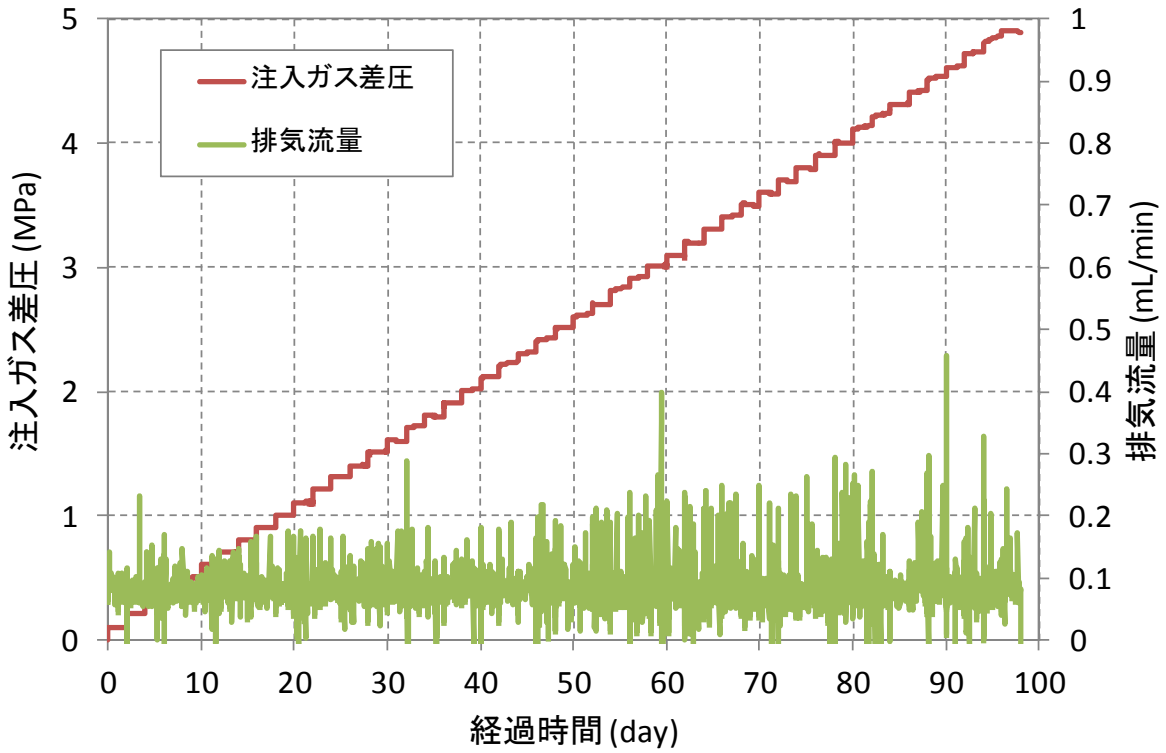


図 4.2-4　注入ガス差圧と排気流量の時間変化（ガス注入フェーズ）

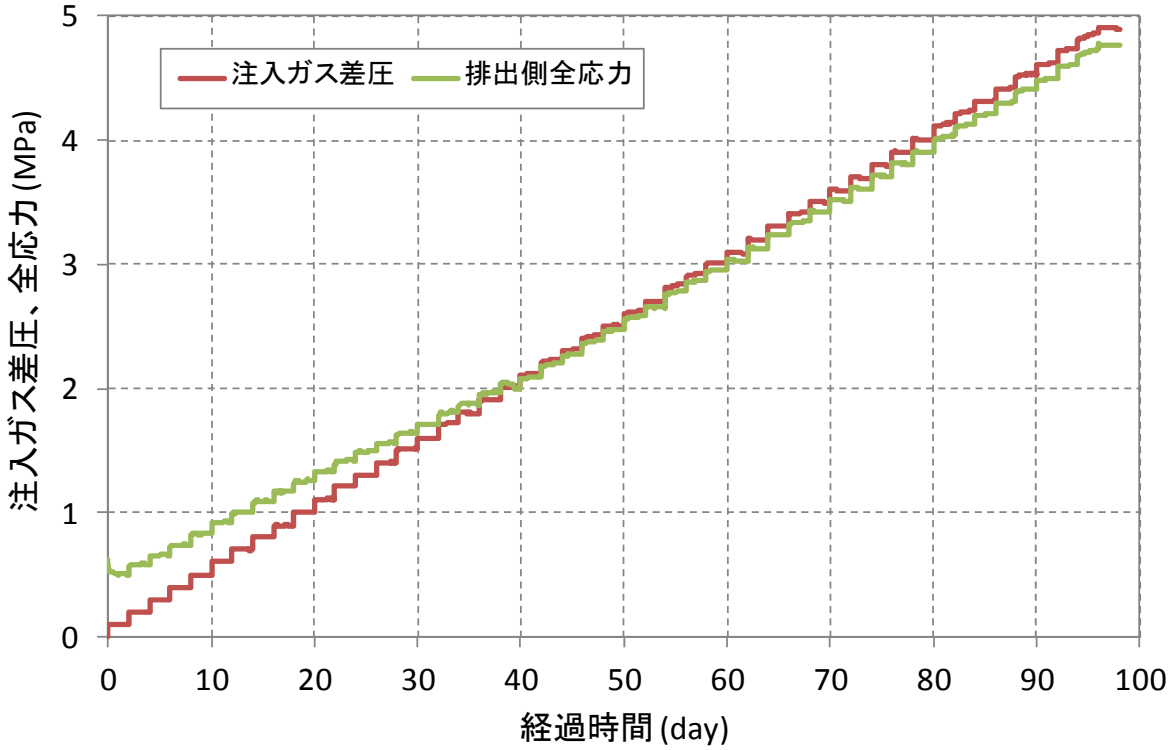


図 4.2-5　注入ガス差圧と全応力の時間変化（ガス注入フェーズ）

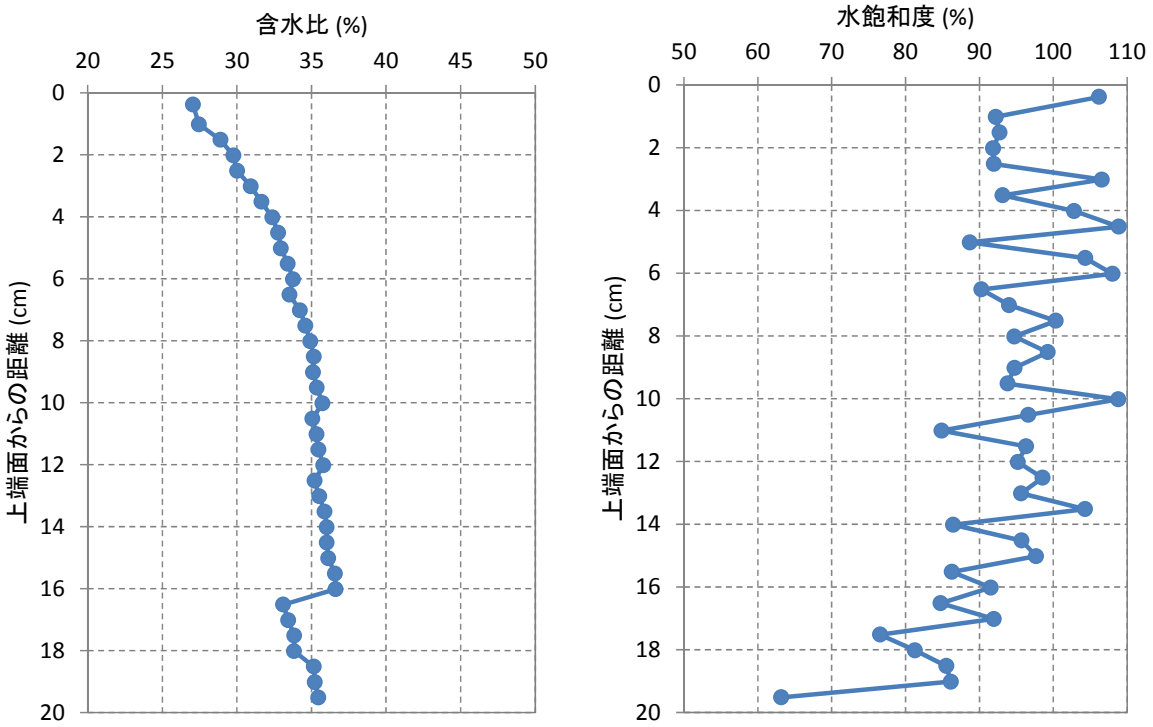


図 4.2-6　解体調査から得られた含水比と水飽和度

4.2.2　ガス移行試験データの再現解析

(1) 圧力依存透過特性モデル（GETFLOWS）による検討

1）検討方針

再冠水フェーズを対象とした再現解析では、平成 24 年度までに行った検討と同様に逆解析による 2 相流パラメータの同定を実施した。

4.2.1　項にて示したガス注入フェーズの試験データを見ると、注入したガスが排出側まで到達しておらず、排水のみが起こった結果となっている。そのため、ガス注入フェーズの試験データを対象とした再現解析では、逆解析による 2 相流パラメータ同定は行わず、これまでに同定されたパラメータを用いて、いくつかのガス移行解析を実施し、実測された排水量や試験後の水飽和度分布等と比較することで、ガス移行挙動に対して考察を与える。平成 24 年度までの検討の再現解析で対象とした試験を表 4.2-2 に整理した。また、平成 24 年度までの検討で同定された 2 相流パラメータを表 4.2-3 に、相対浸透率曲線（水相、ガス相）および毛細管圧力曲線を図 4.2-7 に示した。具体的には、流路拡幅の圧力閾値（表 4.2-3 の Ps）が最も大きい 2011 年度の SG①と、最も小さい 2012 年度の SG②の 2 パターンの同定パラメータ（それぞれ、FY2011_SG①、FY2012_SG②とした）を用いて検討を行った。

表 4.2-2　これまでの検討の再現解析で対象とした試験の整理

年度	ケース名	寸法	初期飽和度	再冠水試験条件	ガス注入試験条件
2010	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	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	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 4.2-3　これまでの検討で同定された浸潤過程および排水過程における 2 相流パラメータ

浸潤過程（再冠水過程）						
年度	ケース名	$S_{wr}(-)$	$S_{gr}(-)$	$n_w(-)$	$P_0(MPa)$	$n_c(-)$
2010	ケース①	0.282	0.0	4.092	1.690	2.156
	ケース②	0.0	0.0	3.182	1.726	1.674
	ケース③	0.0	0.0	15.1	1.116	1.981
2011	SG①	0.0	0.0	13.19	1.471	1.513
2012	SG①	0.0	0.0	2.0	1.24	1.79
	SG②	0.0	0.0	2.11	0.176	1.13

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

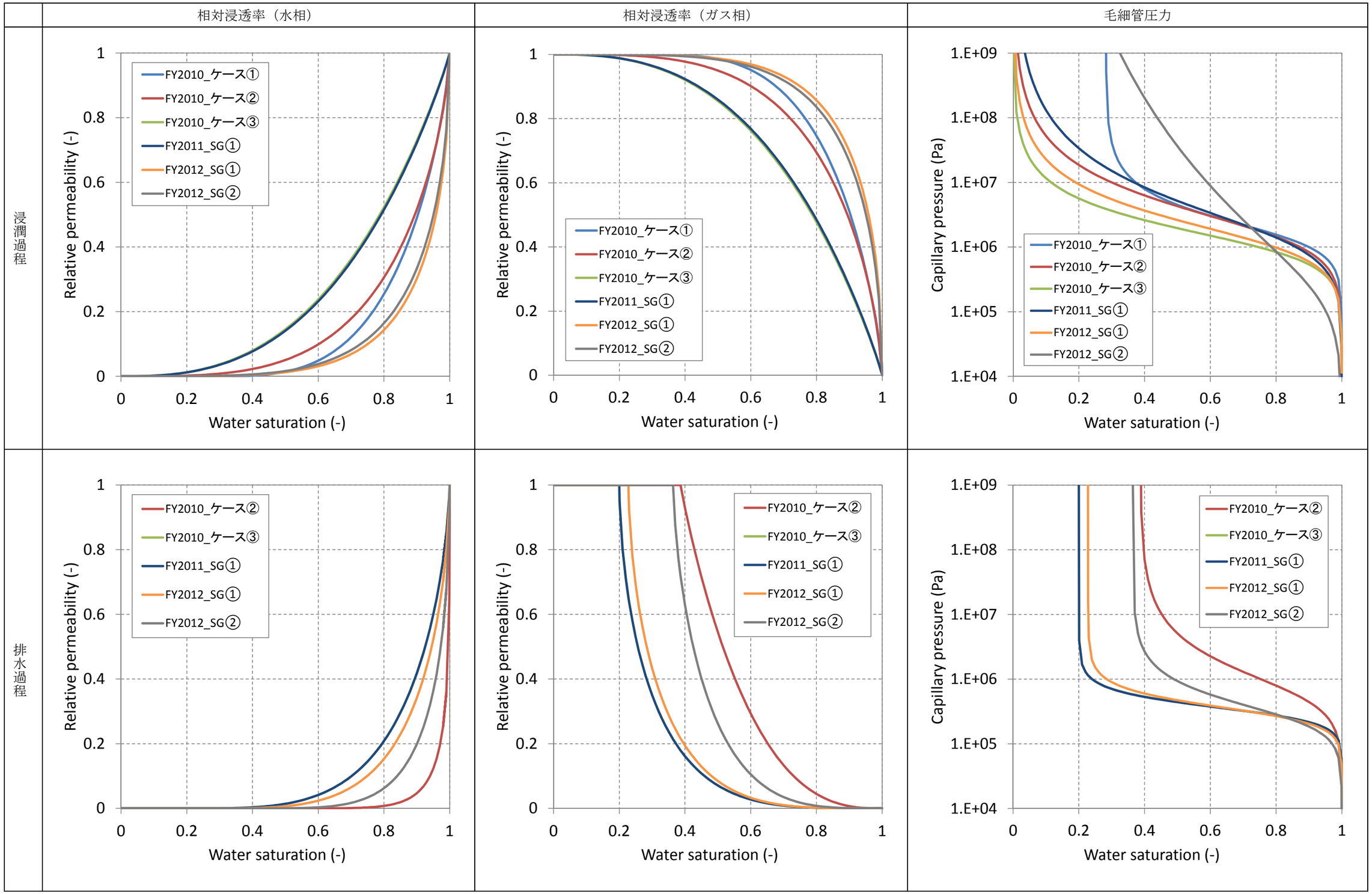


図 4.2-7　平成 24 年度までの検討で同定された浸潤過程および排水過程における相対浸透率および毛細管圧力曲線

(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)[9]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。

$$\nabla \cdot \left(\rho_{ws} \frac{K_w k_{rw}}{\mu_w B_w} \nabla \Psi_w \right) - \rho_{ws} q_{ws} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_{ws} \phi \frac{S_w}{B_w} \right) \tag{4.2-1}$$

$$\nabla \cdot \left(\rho_{gs} \frac{K_g k_{rg}}{\mu_g B_g} \nabla \Psi_g \right) - \rho_{gs} q_{gs} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_{gs} \phi \frac{S_g}{B_g} \right) \tag{4.2-2}$$

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。

$$\Psi_w = P_w - \rho_w g Z \tag{4.2-3}$$

$$\Psi_g = P_g - \rho_g g Z \tag{4.2-4}$$

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。

$$P_c = P_c[S_w] = P_g - P_w \tag{4.2-5}$$

$$\phi = \phi[P_g] = \phi_0 \left(1 + C_r (P_g - P_0)\right) \tag{4.2-6}$$

$$k_{rp} = k_{rp}[S_w] \tag{4.2-7}$$

$$B_p = B_p[P_p] \tag{4.2-8}$$

$$\rho_p = \rho_p[P_p] = \rho_{ps}/B_p[P_p] \tag{4.2-9}$$

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。

$$(P_g \leq P_w + P_s) \quad \begin{aligned} \phi &= \phi_0\left(1 + C_r(P - P_0)\right) \\ K &= K_0 \end{aligned} \tag{4.2-10}$$

$$(P_g > P_w + P_s) \quad \begin{aligned} \phi &= \phi_0\left(1 + C_r(P_s - P_0) + FC_r(P_s - P_0)\right) \\ K &= CK_0(\phi/\phi_0)^{n_{PD}} \end{aligned} \tag{4.2-11}$$

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 4.2-8 に示す。

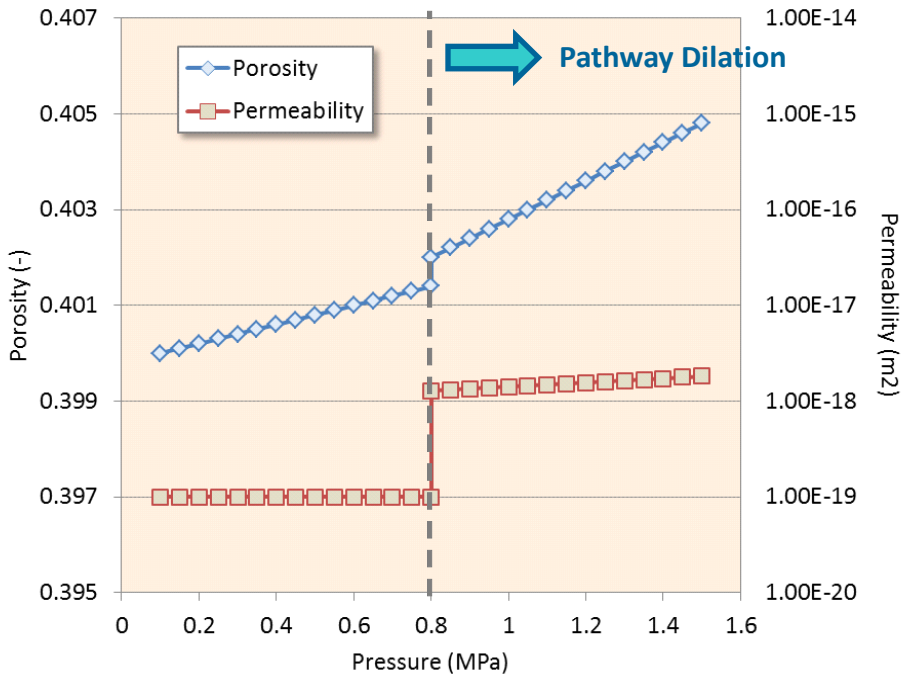


図 4.2-8　流路拡幅前後の間隙率と絶対浸透率の変化イメージ

数値解法について以下に示す。

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。

1）解析モデル

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×h200mm）をもとに、断面積が等価な矩形断面とし、鉛直方向を 1mm 幅で等分割した 1 次元モデルとした。供試体端部には、フィルタや配管等を表す圧入、流出系統層を付加し、さらにその両端に背圧及び試験条件となる水圧、ガス圧を与える境界格子を設けた。図 4.2-9 に解析モデルの基本諸元を示す。供試体の初期水飽和度（90%）を与え、初期圧力は背圧（0.1MPa）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。また、初期状態において供試体内には空気が存在し、ガス注入試験では窒素が注入されるが、双方とも近い物性を持つことから簡略化のためガスは空気として取扱うものとした。

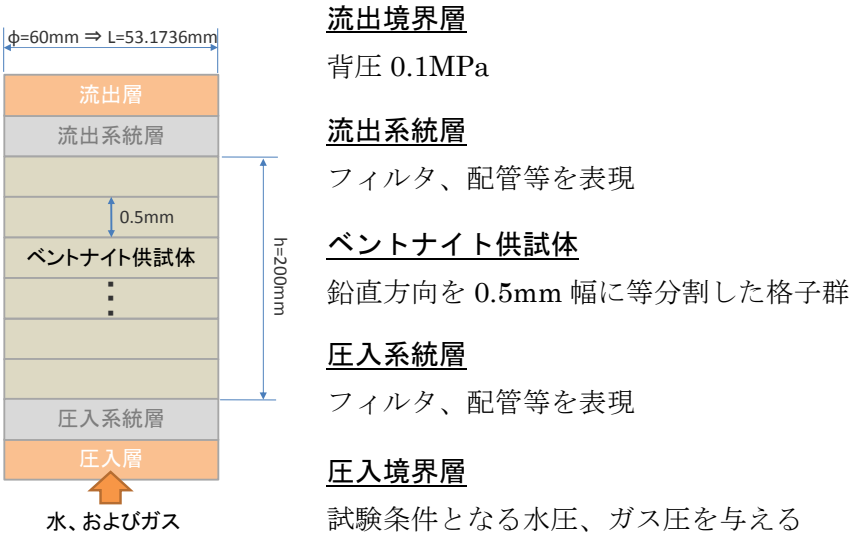


図 4.2-9　解析モデルの基本諸元

2）解析条件（流体物性、水理物性）

本検討で取扱う流体（水、空気）の物性を示す。本検討では等温状態（25℃）を仮定し、流体物性を圧力によってのみ変化させる。

標準大気圧$101{,}325(Pa)$での水の密度ρ_0を$997.04(kg/m^3)$、粘性係数μ_0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。

$$\rho=\rho_0\left(1+C_f(P_w-P_0)\right) \tag{4.2-12}$$

$$\mu=\mu_0\left(1+C_\mu(P_w-P_0)\right) \tag{4.2-13}$$

ここに、ρ、μ、C_f、C_μ、P_wはそれぞれ、水の密度(kg/m^3)、粘性係数$(Pa\ s)$、圧縮率$(1/Pa)$、粘性係数の増加率$(1/Pa)$、水圧(Pa)であり、圧縮率には$0.45\times10^{-9}(1/Pa)$、粘性係数の増加率には$1.0\times10^{-10}(1/Pa)$を設定した。

標準大気圧の空気の密度を$1.184(kg/m^3)$、粘性係数を$18.2\times10^{-6}(Pa\ s)$とし、密度はガス圧に比例するものとし、粘性係数は変化しないものとした。

水理物性に関して、事前に測定された以下のパラメータは与条件として扱う。

- 土粒子密度：$2{,}700(kg/m^3)$
- 乾燥密度：$1{,}360(kg/m^3)$
- 間隙率：$0.4963(-)$（土粒子密度と乾燥密度より算出）
- 固相圧縮率：$1.0\times10^{-9}(1/Pa)$（仮定値）

再冠水フェーズの試験データの再現には逆解析を用いる。その際の未知パラメータを以下に示す。

- 絶対浸透率（水相と気相は同じ、注水速度と注水差圧より算出した値$4.5\times10^{-20}(m^2)$を初期値として使用）
- 相対浸透率曲線を表現する構成モデルパラメータ（後述）
- 毛細管圧力曲線を表現する構成モデルパラメータ（後述）

水・空気の相互作用を表現するための相対浸透率、毛細管圧力には表 4.2-4、表 4.2-5 に示す構成モデル式を採用した。それぞれの構成モデル式は、再冠水フェーズ、ガス注入フェーズに適用した。なお、表中の記号の説明は以下の通りである。

S_p ；流体相$p(=w,g)$の飽和度$(-)$

S_{pe} ；流体相$p(=w,g)$の有効飽和度$(-)$

S_{pr} ；流体相$p(=w,g)$の残留飽和度$(-)$

k_{rp} ；流体相$p(=w,g)$の相対浸透率$(-)$

P_c ；水-空気系の毛細管圧力(Pa)

n_w ；モデルパラメータ（間隙分布パラメータ、水相相対浸透率）

n_g ；モデルパラメータ（間隙分布パラメータ、気相相対浸透率）

n_c ；モデルパラメータ（間隙分布パラメータ、毛細管圧力）

P_0 ；モデルパラメータ(Pa)（毛細管圧力）

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

表 4.2-4　再冠水フェーズで用いる相対浸透率や毛細管圧力を表現する構成モデル

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

表 4.2-5　ガス注入フェーズで用いる相対浸透率や毛細管圧力を表現する構成モデル

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

平成 24 年度までの検討の中で、逆解析から得られる解の一意性が問題となったことから、2 相流曲線を表現する構成モデルパラメータの範囲を限定して検討を行う。相対浸透率と毛細管圧力曲線における各流体相の残留飽和度は同じとした。また、再冠水試験の結果より供試体はほぼ飽和状態に至ることから、気相の残留飽和度は 0 とし、水相の残留飽和度も 0 に設定した。毛細管圧力を表現する構成モデルに用いるパラメータのうちP_0に関しては、図 4.2-10 に示した絶対浸透率とガス侵入圧P_eとの関係式$P_e = 8.934 \times 10^{-13} \times K^{-0.6389}$より、4.5×10^{-20} (m^2)のとき約 2.0 (MPa)となるため、±1.0 (MPa)の幅を考慮して 1.0～3.0 (MPa)に設定した。モデルパラメータP_0とガス侵入圧P_eは異なるが、両者とも毛細管圧力の大きさを決めるパラメータあることから同程度の意味を持つとした。毛細管圧力曲線の間隙分布パラメータn_cに関しても、既往成果[5]より乾燥密度 1.0～1.8 (Mg/m^3)のクニゲル V1 に対して 1.49～2.08 の幅で得られていることから、本検討では 1.5～2.0 の範囲に限定した。

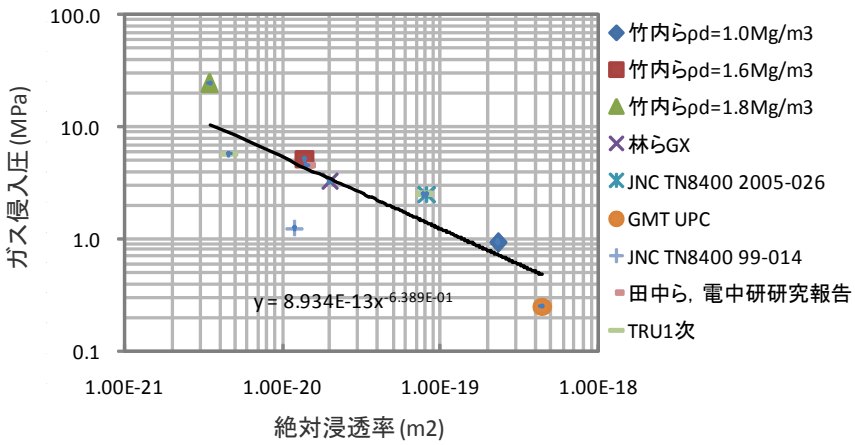


図 4.2-10　既往文献から設定した絶対浸透率とガス侵入圧の関係[7]

ガス注入フェーズでは、これまでの検討で同定されている 2 相流パラメータを用いて、順解析のみを行い、ベントナイト中のガス移行挙動に対して考察を与える。2 相流パラメータには、空隙損傷モデル適用の圧力閾値であるP_cが最も大きい 2011 年度の SG①と、最も小さい 2012 年度の SG②で同定されたパラメータを適用した（4.2.2 (1) 1）参照)。

3) 逆解析手法

再冠水フェーズの試験データを用いた再現解析では、逆解析による 2 相流パラメータ同定を実施した。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[11]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 4.2-11 に GETFLOWS を例に UCODE_2005[12]を用いた自動逆解析の流れを示す。

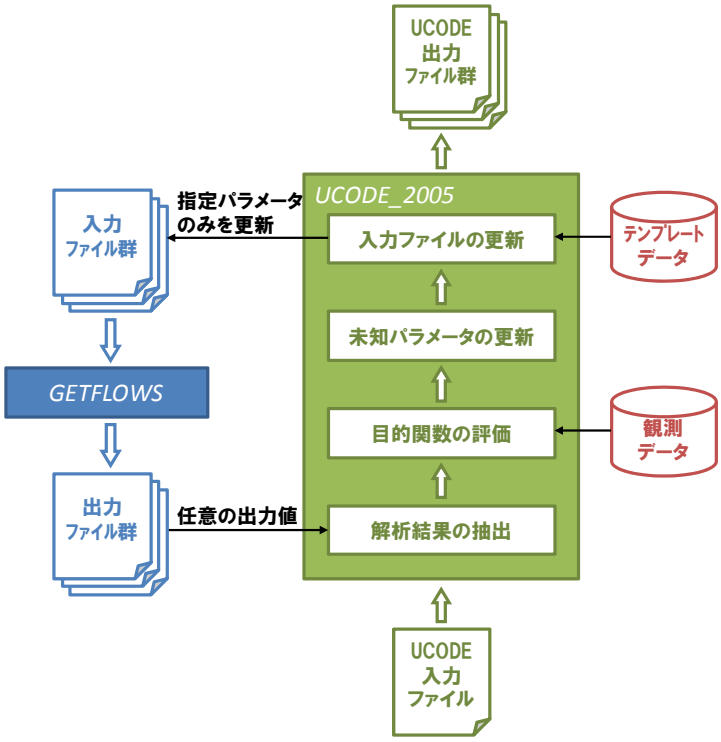


図 4.2-11　GETFLOWS+UCODE_2005 による逆解析の流れ

4) 再現解析結果

再冠水フェーズの試験データを用いて逆解析による再現解析を実施した。図 4.2-12 に、累積注水量に対して試験結果と解析結果を比較したものを示した。再現解析の結果、観測データを良好に再現するパラメータを同定することが可能であった。同定されたパラメータを表 4.2-6 に示した。また、同定された相対浸透率曲線および、毛細管圧力曲線を図 4.2-13 に示した。

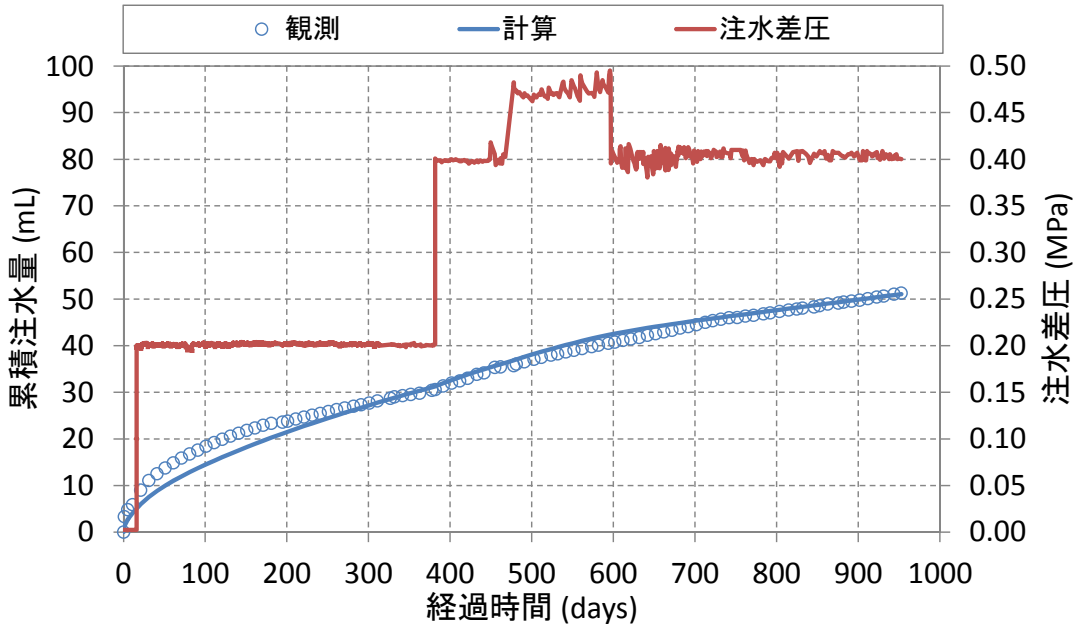


図 4.2-12　累積注水量に対する試験結果と解析結果の比較

表 4.2-6　浸潤過程において同定されたパラメータ

パラメータ	値
絶対浸透率	$K = 4.000 \times 10^{-20} (m^2)$
相対浸透率 ($van\ Genuchten/Grant$モデル)	$n_w = 3.324(-)$
毛細管圧力 ($van\ Genuchten$モデル)	$n_c = 1.500(-)$ $P_0 = 1.740 \times 10^6 (Pa)$

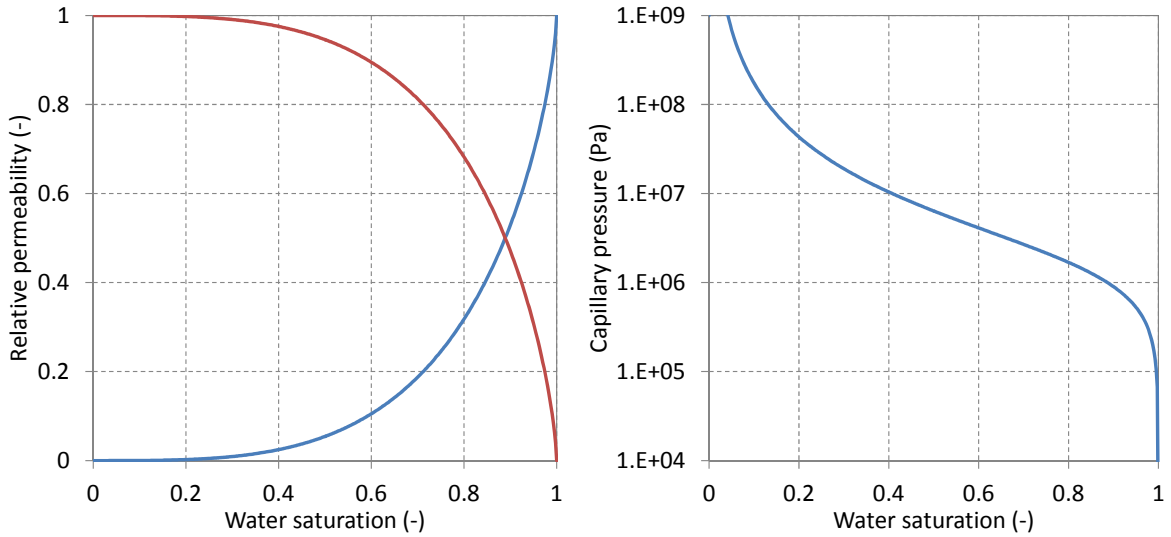


図 4.2-13　同定された 2 相流曲線

次に、平成 24 年度までの検討で排水過程のパラメータとして同定された 2 パターンの 2 相流パラメータ（FY2011_SG①、FY2012_SG②）を用いて、ガス移行解析を実施した。図 4.2-15 に、累積排水量に対して試験結果と解析結果を比較したものを示した。再冠水フェーズで同定された絶対浸透率を用いた場合、解析によって得られた累積排水量が実測データよりも小さい結果となった。これは再冠水フェーズの飽和透水時と、ガス注入フェーズ時の透過性（絶対浸透率）が異なることを示唆している。0.4MPa 程度の圧力がかかった状態の再冠水フェーズからガス注入フェーズに移行する際に、徐々に圧力を低下させていき、背圧（大気圧）と同程度の圧力状態になってから、ガス注入に切り替えている。再冠水フェーズ時に圧密され、透過性が小さくなったものが、この減圧過程の中で、圧密状態が弱まり、透過性がやや上昇した等の要因が考えられる。

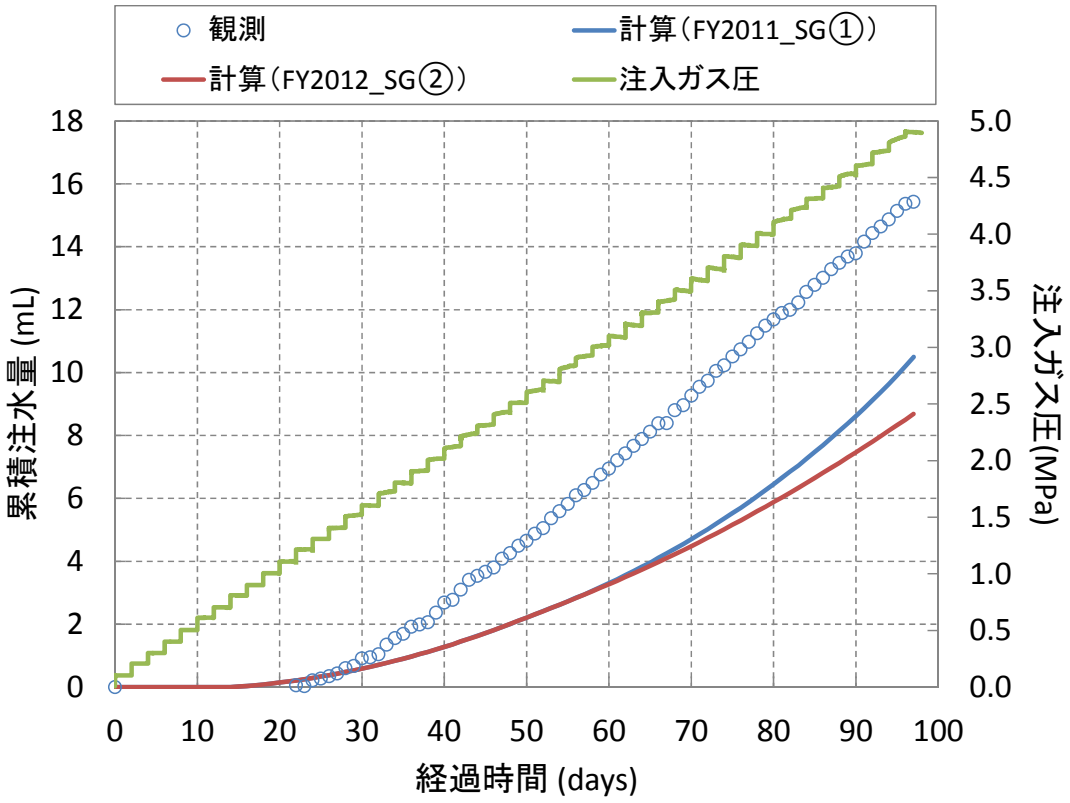


図 4.2-14　累積排水量に対する試験結果と解析結果の比較

そこで、何らかの要因によってガス注入過程では絶対浸透率が増加したと仮定し、累積排水量が実測データと整合するように絶対浸透率を調整し、再現を試みた。

絶対浸透率を再冠水フェーズで同定された値の約 1.6 倍となる$6.48 \times 10^{-20}(m^2)$とした場合に、累積排水量に対して試験結果と解析結果を比較したものを図 4.2-15 に示した。図 4.2-16 にガス侵入範囲に対して、解体調査から推定されたものと解析から得られたものを比較した。

また、図 4.2-17、図 4.2-18 にそれぞれのケースでの、初期状態、約 25 日後、約 50 日後、約 75 日後、約 100 日後のガス圧、水飽和度、空隙損傷域の分布を示した。

FY2011_SG①を適用したケースでは、ガス注入試験時に流路拡幅が発生し、供試体内のほとんどの水が排水される結果となり、実測データと大きく異なるものとなった。FY2011_SG①のパラメータを適用した場合には、流路拡幅が発生しやすく、絶対浸透率を変更するのみでは実測された累積排水量を良く表現することは困難であった。

一方、FY2012_SG②を適用したケースでは、流路拡幅は発生せず、ガス侵入範囲も実測データから推定されるものと概ね整合する結果となった。

これらの検討から、昨年度の大型供試体を用いたガス注入試験の実施中において、ベントナイト材料中では流路拡幅による明確なガス透気経路は形成されておらず、水・ガスの気液 2 相流に支配されていたことが示唆される結果が得られた。

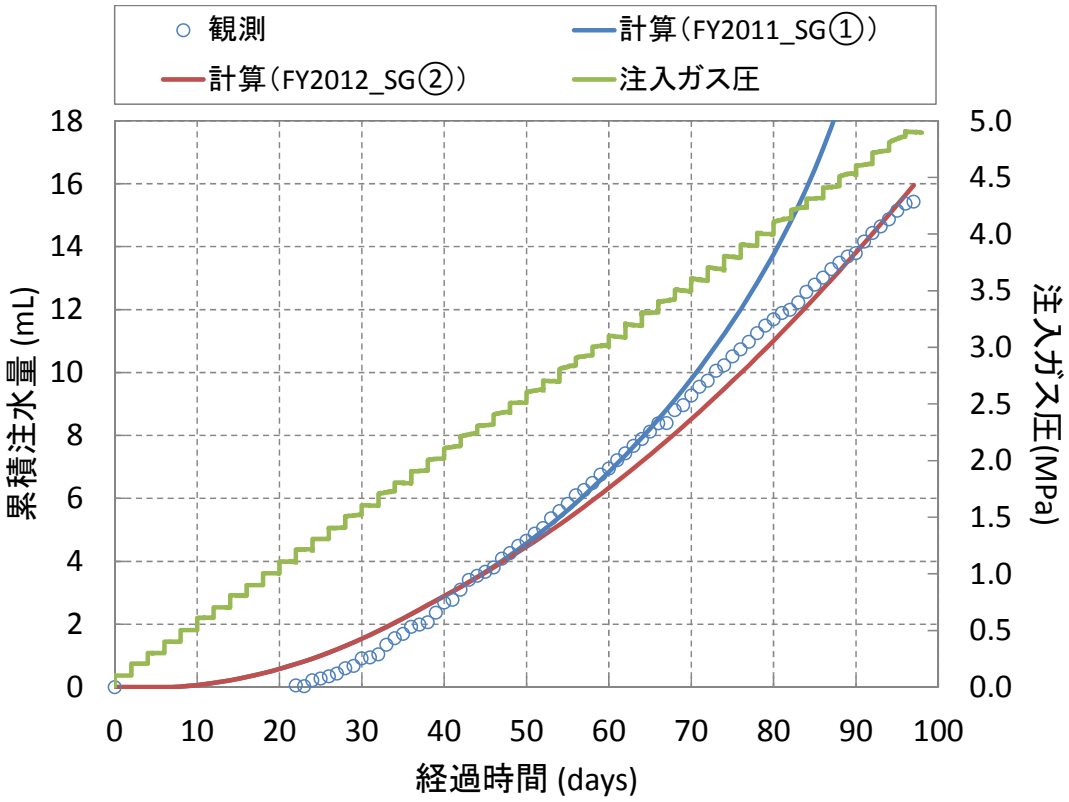


図 4.2-15　累積排水量に対する試験結果と解析結果の比較（絶対浸透率調整後）

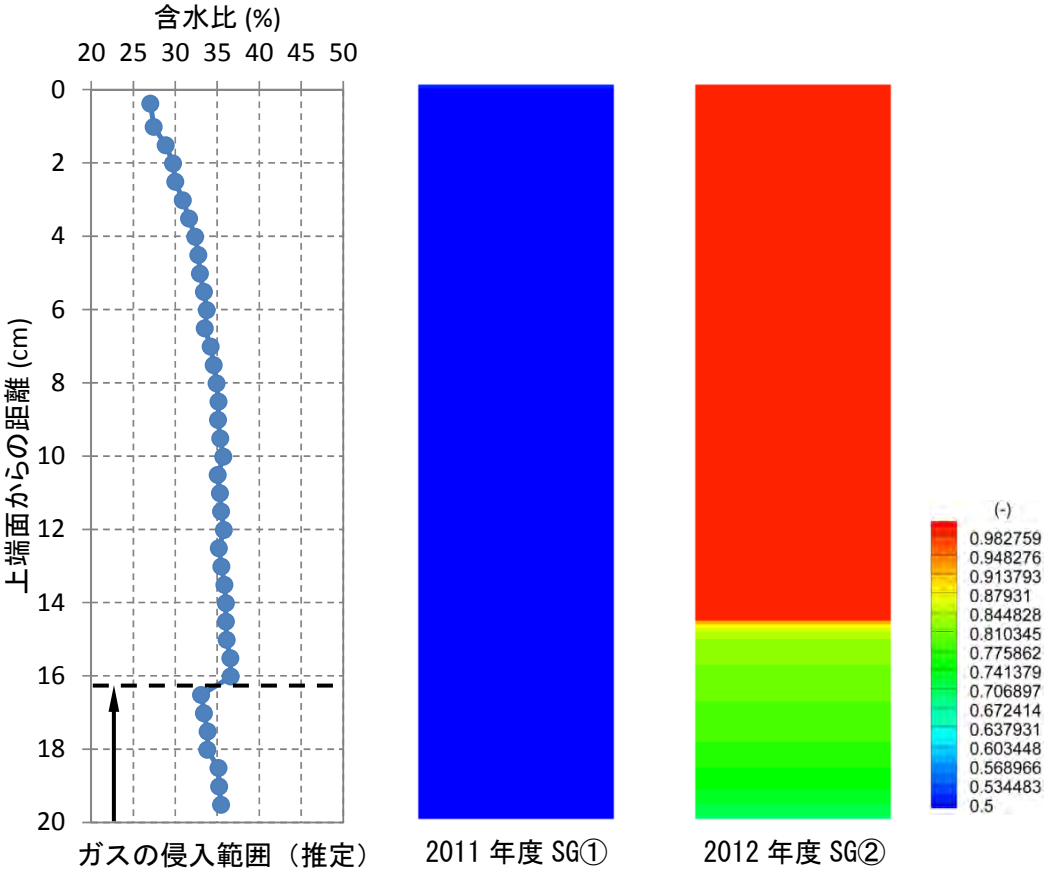


図 4.2-16　解体調査から推定されたガス侵入範囲と解析から得られたガス侵入範囲

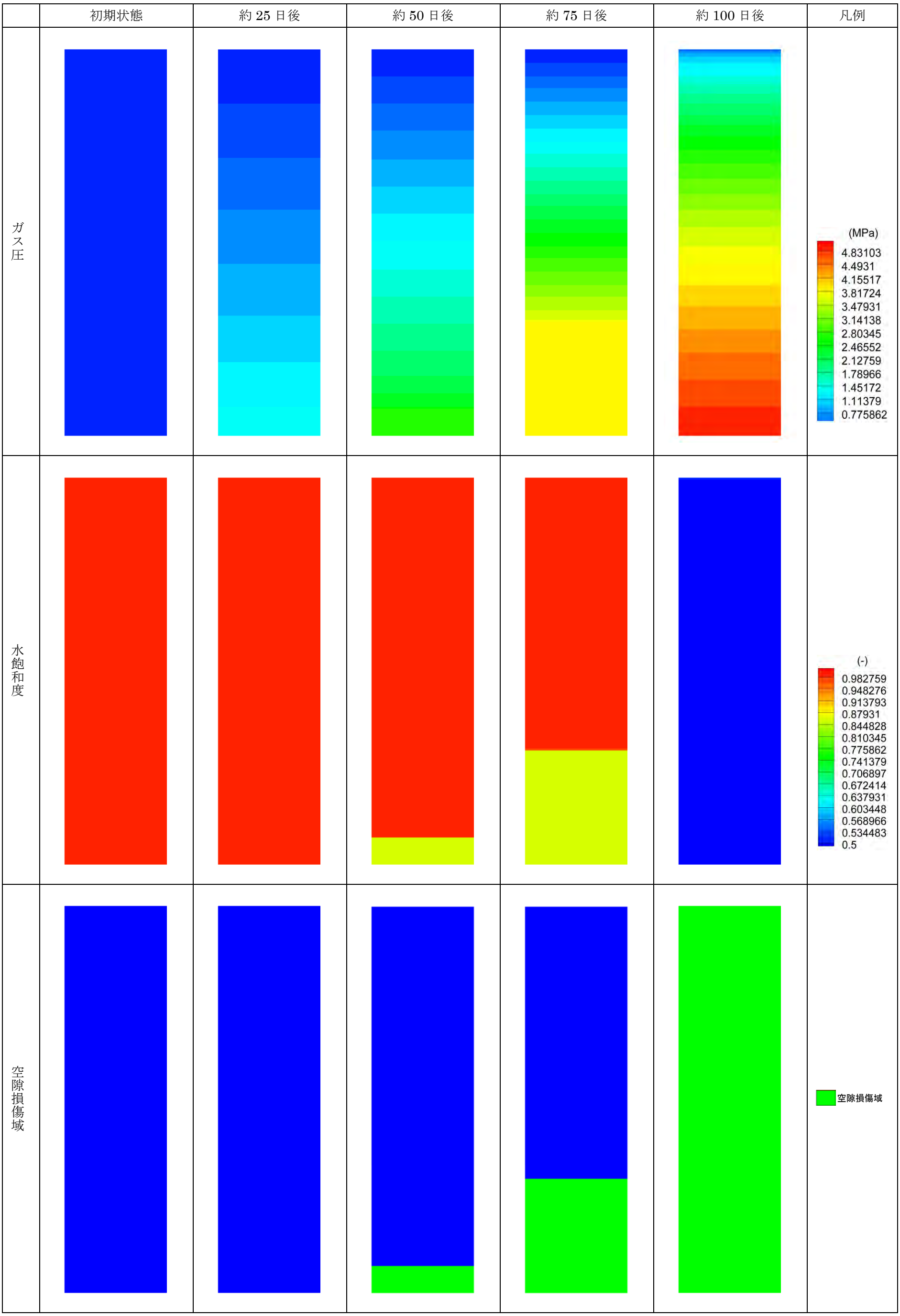


図 4.2-17　ガス注入時のガス圧、水飽和度、空隙損傷域の分布（2011 年度の SG①で同定されたパラメータを適用）

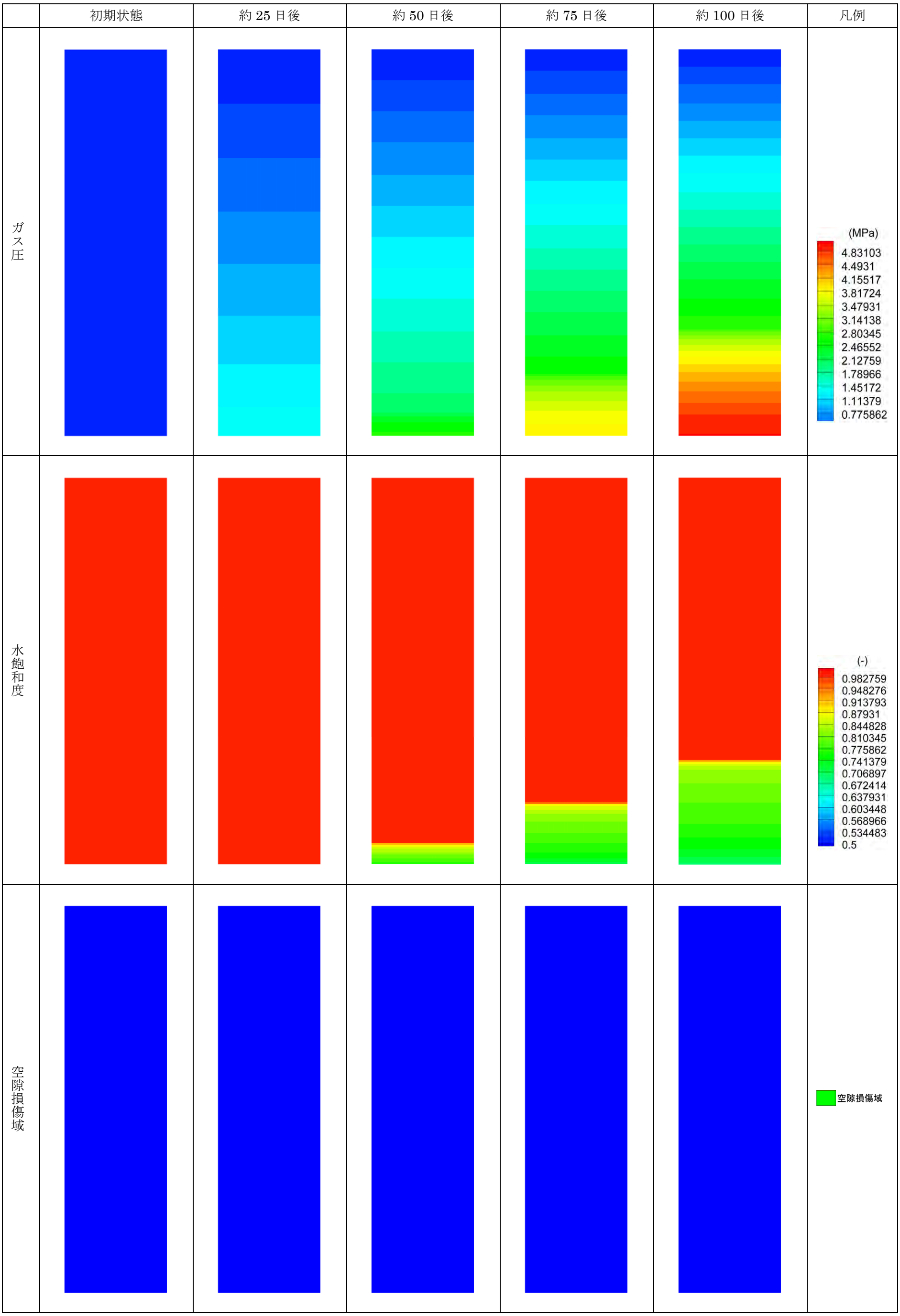


図 4.2-18　ガス注入時のガス圧、水飽和度、空隙損傷域の分布（2012 年度の SG②で同定されたパラメータを適用）

(3) 力学連成解析モデル（CODE_BRIGHT）による検討

1) 検討概要

力学連成 2 相流解析の特徴を生かし、ガス移行試験における供試体（h=200mm 供試体）内部の力学状態を推定し、ガス移行形態に寄与する力学現象の影響について考察を行った。

解析における着目点は供試体内部の応力・変形状態を推定することである。また、供試体への注水量のマスバランスと、解析から得られた浸潤前線より 2 相流でガスが移行した区間を推定した。なお、対象とするガス移行試験概要で得られた累積排水量と土圧及び有効ガス圧については、図 4.2-3 および図 4.2-5 にそれぞれ整理した。

ここで、ガス注入開始時点においては、注ガス側のポーラスメタル内の間隙は全て水で満たされた状態であったと想定した。よって、ガス注入開始以後に供試体内へガスが侵入する条件としては、注ガス側のポーラスメタル内の間隙水（間隙体積＝3.57 cm^3）が全てベントナイトへ注水された後（供試体からの累積排水量が 3.57 cm^3 以上となった時刻） であったと考えられる。

表 4.2-7 に供試体からの累積排水量が 3.57 cm^3 以上となった時刻（試験経過日数）と注ガス圧を示す。

表 4.2-7　3.57cm^3 以上の累積排水量が確認された時刻と注ガス圧

試験経過日数 （日）	ガス圧 （MPa）
44.7	2.3

2) 解析コード

a. Code_Bright における力学連成 2 相流挙動の取扱い

解析検討には、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（FEM、 2～3 次元）である Code_Bright を用いる。

Code_Bright は、表 4.2-8 に示すように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われている。国内では、原子力安全基盤機構等が余裕深度処分施設の再冠水やガス移行などの閉鎖後の挙動評価のための解析に適用している。

Code_Bright は他の同類のコードと比較して以下の 2 点に特徴があり、これが広く地層処分分野に適用されている理由である。

① 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

② 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解析コードである

①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、①、②によりガス移行時の力学連成挙動が表現可能である。このとき、熱対流や湿潤・乾燥による熱特性の変化も考慮される。図 4.2-19 に熱、力学（応力・変形）、2 相流の相互影響関係を示す。

表 4.2-8　Code_Bright の主な適用プロジェクト

略称	実施場所／国	対象	概要
FEBEX (Full-scale Engineered Barriers Experiment)	Grimsel／スペイン	スペインのHLW処分概念の実物大EBSモデル（100%セラタ）	周辺岩盤を含むベントナイトのTHM連成挙動の評価
GMT (Gas Migration Test)	Grimsel／日本	サイロ型処分施設概念（20%クニゲルV1）	人工バリア、周辺岩盤の力学連成ガス移行挙動評価
TBT（Temperature Buffer Test）	Äspo／スウェーデン	スウェーデンHLW処分概念の実物大EBSモデル（100% MX80）	周辺岩盤を含むベントナイトのTHM連成挙動の評価
Backfill & Plug Test	Äspo／スウェーデン	処分坑道の埋戻し、プラグ（30% MX80）	ベントナイト混合埋戻し材の周辺岩盤を含むHM連成挙動の評価
PRACLAY	Mol／ベルギー	ベルギー処分概念の実物大モデル（100% FoCa clay）	周辺岩盤を含むベントナイトのTHM連成挙動の評価
EB (Engineered Barrier test)	Mt Terri／EU	スイスHLW処分概念の実物大EBSモデル（100%セラタ）	ベントナイト飽和過程の周辺岩盤を含むHM連成挙動評価
DST (Drift Scale Test)	Yucca Mountain／米国	処分坑道、岩盤	処分坑道と岩盤のTHM連成挙動評価

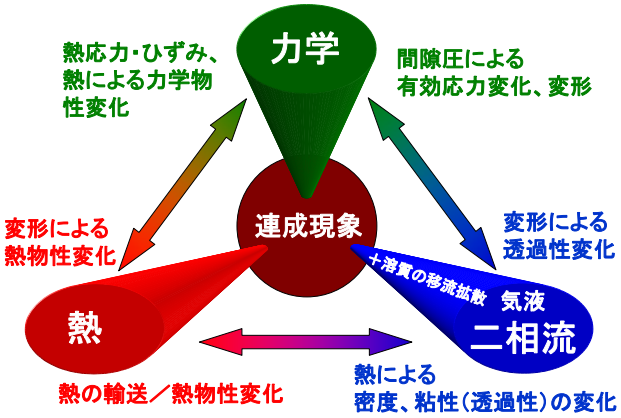


図 4.2-19　熱・力学（応力変形）、2 相流の相互影響

b. 基本的な考え方

多孔質体は、図 4.2-20 に示すように固体粒子、水、ガスで構成されものとし、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＋溶解したガス（例えば溶解空気）

気相：乾燥ガス（例えば空気）＋水蒸気

＜物質＞

固体：鉱物

水：液体として、あるいは気相内に蒸発した水蒸気として

ガス（空気）：乾燥ガス　気体として、あるいは液相に溶解した状態として

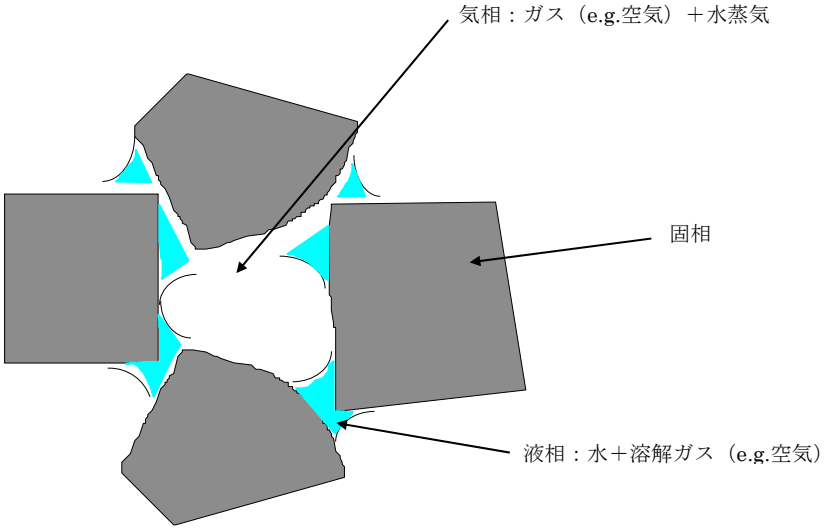


図 4.2-20　不飽和多孔質体の概念

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。
- 微少ひずみ、微少ひずみ速度が仮定される。
- 溶解ガスおよび液相の運動量の釣り合いは、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、流体の粘性は温度に強く依存する）。

c. 支配方程式

Code_Bright では以下に関する支配方程式が、適用された構成則と平衡則を満たすよう解かれる。

- 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、平衡則は次の通りである。

- Darcy 則：水、ガスの移流（流束は圧力勾配に比例する）
- Fick 則：水蒸気、ガスの拡散（拡散束は濃度勾配に比例する）
- Fourier 則：熱伝導（熱流束は温度勾配に比例する）
- 水分特性：飽和率とサクションの関係（種々のモデル）
- BB（Balcerona Basic）モデル：応力～ひずみ（後述）

- Henry 則：ガス溶解度（ガス溶解度は圧力に比例する）
- サイクロメトリック則：水蒸気量（湿度）（水蒸気量（湿度）はサクションと温度により規定される（相対湿度とサクションの log が比例する））

d. ベントナイトの力学モデル

Code_Bright に導入されている BB（Balcerona Basic）モデルは、修正カム・クレイモデル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カム・クレイモデルと一致する。

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カム・クレイ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した。

e. 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'は圧縮指数により式(4.2-14)で表される（図 4.2-21 参照）。

$$de = -\lambda(s)\frac{dp'}{p'} \tag{4.2-14}$$

ここに、e：間隙比、p'：平均有効応力、$\lambda(s)$：サクション s に依存する圧縮指数である。平均有効応力は、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。

$$p' = p - \max(p_g, p_l) \tag{4.2-15}$$

式(4.2-14)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。

$$d\varepsilon_v = \frac{\lambda(s)}{1+e_0}\frac{dp'}{p'} \tag{4.2-16}$$

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$\lambda(s)$一定なので式(4.2-14)より次式が成り立つ。

$$e = e_0 - \lambda(s)\ln\frac{p'}{p'_0} \tag{4.2-17}$$

ここに、p_0'は初期平均有効応力である。

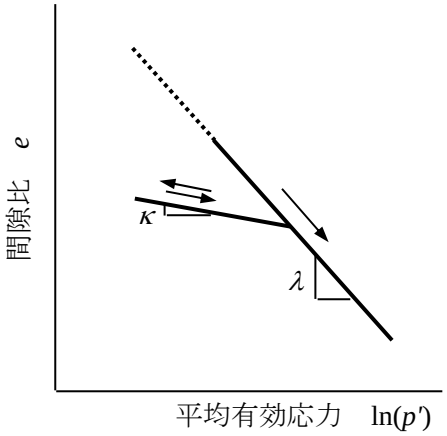


図 4.2-21　間隙比と平均有効応力の関係

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'は膨潤指数により式(4.2-18)で表される。

$$de = -\kappa(s)\frac{dp'}{p'} \tag{4.2-18}$$

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。

$$d\varepsilon_v = \frac{\kappa(s)}{1+e_0}\frac{dp'}{p'} \tag{4.2-19}$$

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。

$$e = e_0 - \kappa(s)\ln\frac{p'}{p'_0} \tag{4.2-20}$$

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。

$$\lambda(s) = \lambda_0\left[(1-r)\exp(\beta\cdot s)+r\right] \tag{4.2-21}$$

$$\kappa(s) = \kappa_0(1+\alpha\cdot s) \tag{4.2-22}$$

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式(4.2-14)、式(4.2-18)および図 4.2-21 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'）との関係は式(4.2-20)より次式のようになる。

$$E = 3(1-2\nu)\frac{dp'}{d\varepsilon_v} = 3(1-2\nu)\cdot(1+e_0)\cdot\frac{p'}{\kappa(s)} \tag{4.2-23}$$

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κ (s)に反比例することがわかる。

f. 強度の飽和度依存性

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 4.2-22 参照）。

$$p_0 = p^c\left(\frac{p_0^*}{p^c}\right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa(0)}{\lambda(s)-\kappa(0)}} \tag{4.2-24}$$

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。

式(4.2-24)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を受けないため、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 4.2-22 参照）。

$$p_s = k\cdot s \tag{4.2-25}$$

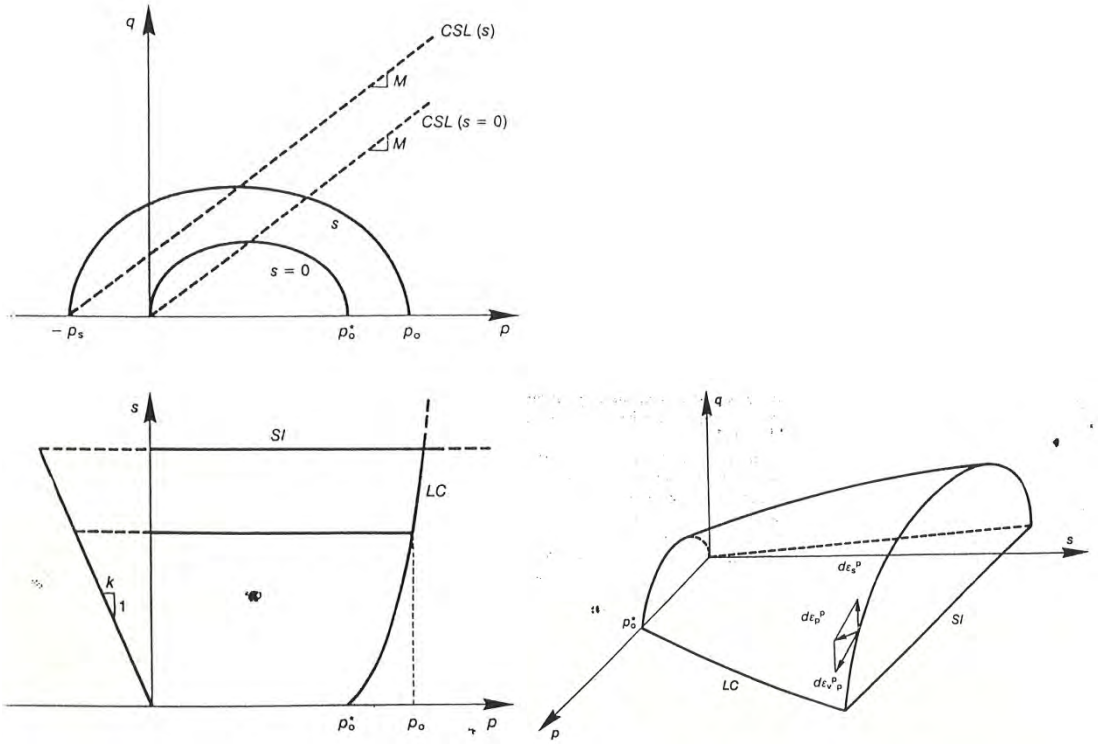


図 4.2-22　（p, q）面、（p, s）面および（p, q, s）面での降伏曲面

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 4.2-23 のようになる。

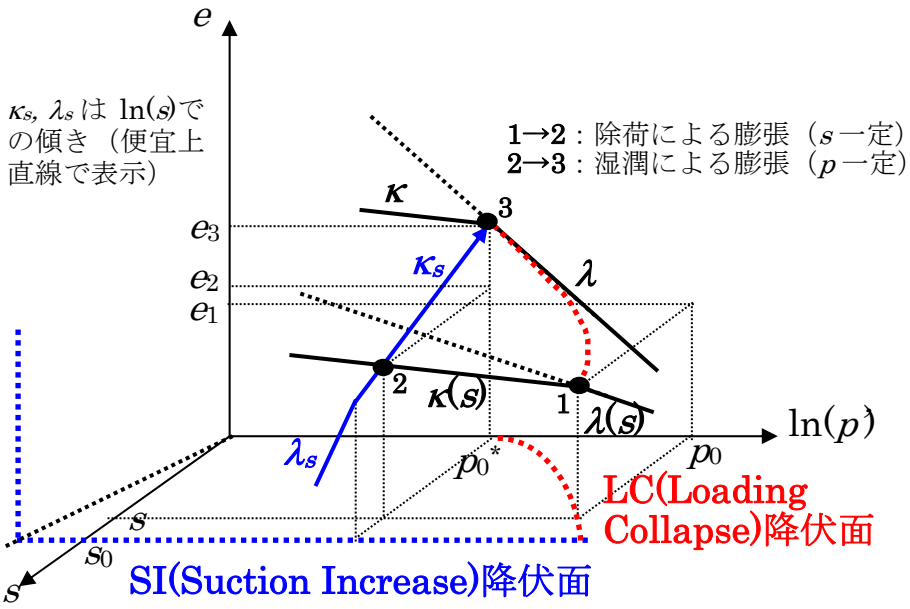


図 4.2-23　有効応力およびサクションの変化による体積ひずみ挙動と降伏曲面

g. 透気・透水性の変形依存性

透気・透水性は変形（体積変化＝間隙率の変化）の影響を受ける。Code_Bright では、次式に示す Kozeny モデルにより絶対浸透率の間隙率（n）依存性を考慮することで、透気・透水性の変形依存性が表現される。

$$k = k_0 \frac{n^3}{(1-n)^2} \frac{(1-n_0)^2}{n_0^3} \tag{4.2-26}$$

ここに、k_0：間隙率が n_0（例えば初期間隙率）のときの絶対浸透率、n_0：参照間隙率（通常、初期間隙率）である。

3）解析モデルと境界条件

解析モデル及び境界条件を図 4.2-24に示す。ここで、メッシュ（要素）分割は概ね2mm×4mm 程度になるように分割し、要素数750 の軸対称モデルを用いた。載荷するガス圧は底面から載荷し、上面は注水過程では大気圧解放、またガス注入（移行）過程は背圧載荷条件とした。ガス注入時の底面の力学境界条件は全応力固定とし、注水飽和過程は体積固定条件、すなわち、鉛直固定、水平自由とした。側面の境界条件は流体に関しては不浸透境界、力学は法線方向固定、接線方向自由とした。

解析は先ず注水過程について行い（ガス注入過程の初期状態を再現することが目的）、ガス移行過程まで再現した。

なお、ガス移行過程におけるガス圧載荷条件はポーラスメタル内の残留水が全て供試体へ注水

されたと仮定し、ガス注入開始後44.7 日後からガス圧を載荷した。よって、ガス移行過程にあってもガス注入開始から44.6 日までは飽和条件で流体圧を載荷した。

解析における初期条件は、注水開始時の供試体内部の状態であることから、初期飽和度は90%で、間隙比は e=0.949(-)、初期応力は $\sigma_z=\sigma_r=\sigma_\theta=0.11$(MPa)とした。

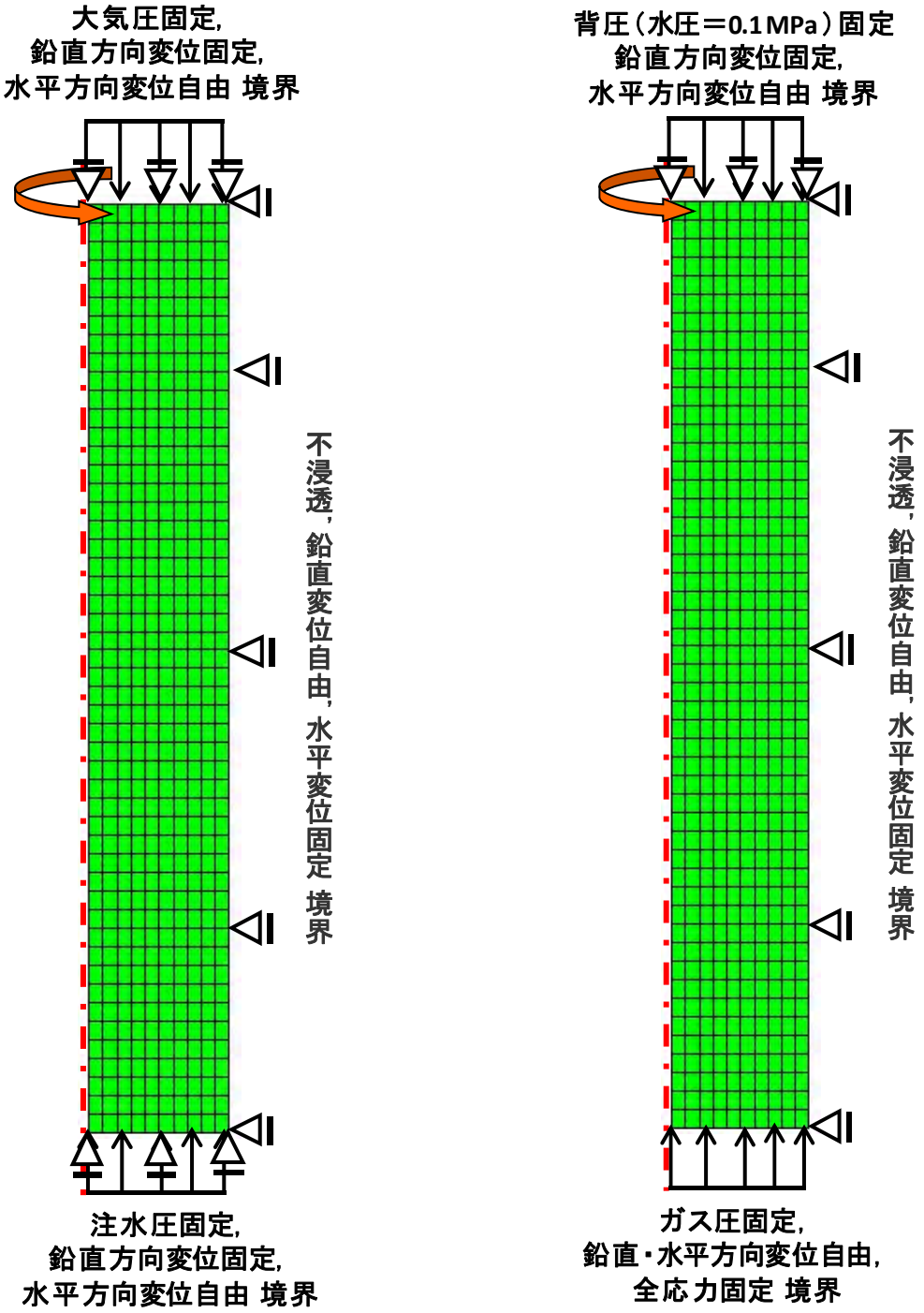


図 4.2-24　解析モデルと境界条件図（左図：注水過程、右図：ガス注入過程）

4）解析条件

力学連成 2 相流解析を実施することから、力学物性と 2 相流物性を設定する必要がある。

各々の物性値の設定は以下によった。

表 4.2-9 に力学物性値一覧を示す。力学物性値の設定は、H22 年度の研究成果（本検討で対象としている H=200mm 供試体の注水過程の再現解析で設定された物性値）で設定された物性値を用いた。

表 4.2-9　力学物性値一覧

項目	記号	単位	設定値	設定根拠
初期乾燥密度	ρ_d	Mg/m^3	1.36	
真密度	ρ_s	Mg/m^3	2.65	
初期間隙比	e	－	0.949	
ポアソン比	ν		0.44	
膨潤指数（飽和時）	κ_0	－	0.061	[13]
圧縮指数（飽和時）	λ_0	－	0.252	[13]
サクション依存膨潤指数パラメータ	α	－	-0.015	[5]
サクション依存圧縮指数パラメータ	β	MPa^{-1}	0.0085	[5]
	γ	－	0.43	[5]
参照有効応力時の湿潤膨潤指数（飽和時）	κ_{s0}	－	0.335	
有効応力依存湿潤膨潤指数パラメータ	α_{sp}	－	-0.646	
限界応力比	M		0.500	[13]
引張強度	P_{s0}	MPa	0.0	
圧密先行応力（飽和時）	P_0^*	MPa	0.960	

次に、表 4.2-10～表 4.2-11 に 2 相流物性値一覧を示す。2 相流物性値設定は、H22 年度の確証研究成果（本検討で対象としている H=200mm 供試体の注水過程の再現解析で設定された物性値）を基本として、後述の解析ケース毎に設定値を与えた。また、注水過程と注ガス過程とで各々個別の設定値を与えた。

表 4.2-10　2 相流特性値一覧（その 1：H22 年度成果[6]）

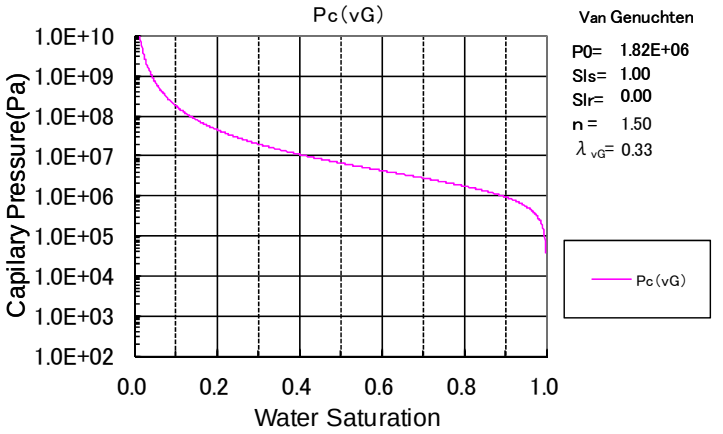
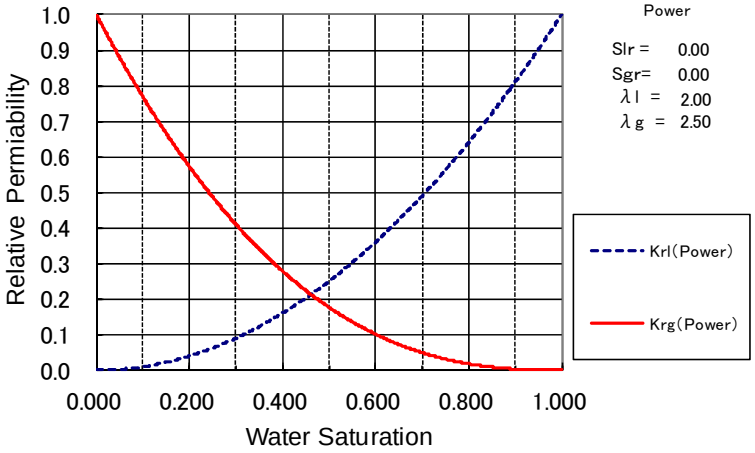
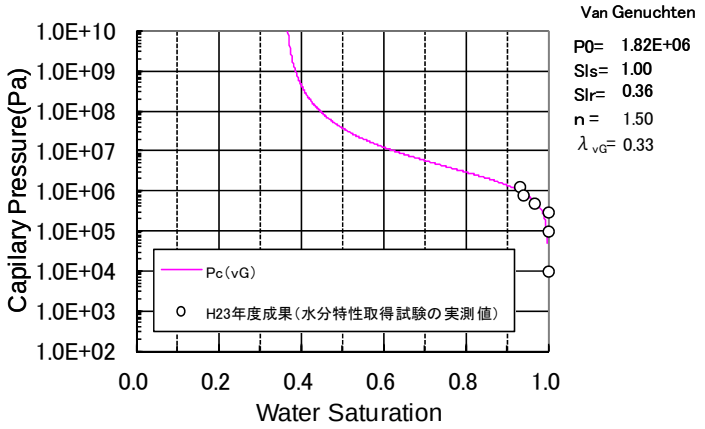
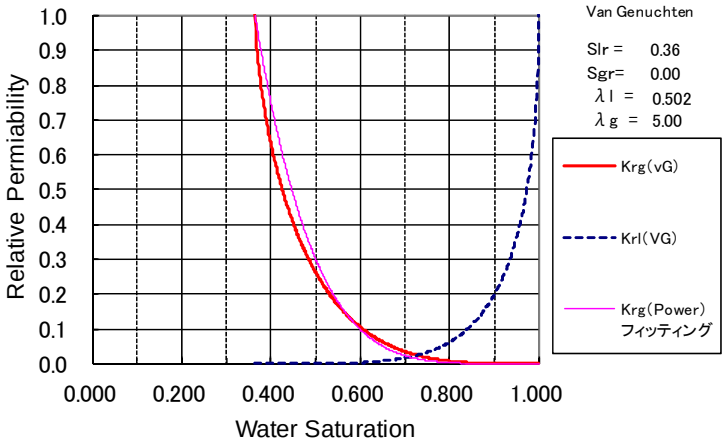
絶対浸透率（水・ガス相）	5.43×10^{-20} (m^2)
水分特性曲線 Pc （van Genuchten モデル） $P_c = P_0\left(S_e^{\,n/(1-n)} - 1\right)^{1/n}$ $n = \dfrac{1}{1-\lambda}$	
相対浸透率曲線 （水相 k_{rl}・ガス相 k_{rg}： CODE_Bright Original Power モデル） $k_{rl} = A \cdot S_e^{\lambda_l}$ $k_{rg} = A \cdot S_{eg}^{\lambda_g}$ ※A=1.0	

表 4.2-11　2 相流特性値一覧（その 2：H23 年度成果[7]・本年度成果を元に同定）

絶対浸透率（水・ガス相）	1.91×10^{-20} (m^2)
水分特性曲線 Pc （van Genuchten モデル） $P_c = P_0\left(S_e^{n/(1-n)}-1\right)^{1/n}$ $n = \dfrac{1}{1-\lambda}$	
相対浸透率曲線 （水相 k_{rl}：van Genuchten モデル） $k_{rl} = S_e^{1/2}\left[1-\left(1-S_e^{n/(n-1)}\right)^{(1-1/n)}\right]^2$ $n = \dfrac{1}{1-\lambda}$ （ガス相 k_{rg}：van Genuchten モデルを CODE_Bright Original Power モデルでフィッティング） $k_{rg} = A \cdot S_{eg}^{\lambda_g}$ ※A=1.0	

5）解析ケース

表 4.2-12 に解析ケース一覧を示す。

再現解析の実施に際し、まずは基本ケースとして H=200 mm 供試体の再冠水挙動（累積注水量の経時変化）が良好に再現できた平成 22 年度の検討における成果（力学・2 相流パラメータの同定値）を反映したケースを設定した。なお、検討ケースにおける 2 相流特性値を設定するに至った経緯と理由については、後述とした。

表 4.2-12　解析ケース一覧

<table>
<tr><th rowspan="2">ケース
名称</th><th rowspan="2">力学
物性値</th><th colspan="3">2 相流特性値
（上段：注水過程）
（下段：注ガス過程）</th><th rowspan="2">備考</th></tr>
<tr><th>絶対浸透率</th><th>相対浸透率
曲線</th><th>水分特性
曲線</th></tr>
<tr><td rowspan="2">基本
ケース</td><td rowspan="2">H22 年度
成果より</td><td colspan="3">H22 年度
成果の同定値
（表 4.2-10 参照）</td><td rowspan="4">※1
同定された
絶対浸透率
の値を 1/2
倍とした検
討

※2
残留飽和度
（Slr）の値
を本年度成
果の同定値
と等価とし
た検討</td></tr>
<tr><td colspan="3">H22 年度
成果の同定値
（表 4.2-10 参照）</td></tr>
<tr><td rowspan="2">検討
ケース</td><td rowspan="2">H22 年度
成果より</td><td colspan="3">H22 年度
成果の同定値
（表 4.2-10 参照）</td></tr>
<tr><td>本年度
成果を元に検討
した同定値※1
（表 4.2-11 参
照）</td><td>本年度
成果の同定値

（表 4.2-11 参
照）</td><td>H22 年度
成果を元に検討
した同定値※2
（表 4.2-11 参
照）</td></tr>
</table>

6）再現解析結果（注水過程）

ここでは、注水過程における以下の項目を評価し、ガス注入過程前の初期状態（基本ケース・検討ケースともに共通）として、供試体内がどのような状態になっていたかを把握した。

- 累積注水量の経時変化（実測値と解析解）
- 飽和度分布
- 乾燥密度（間隙率）分布
- 平均有効応力分布

図 4.2-25 に累積注水量の経時変化（実測値と解析解）を示す。図より、H22 年度において同定された力学・2 相流パラメータを用いた力学連成解析により、供試体の再冠水挙動を良好に表現できる結果となっている。

図 4.2-26 に再冠水過程の飽和度分布の経時変化を示す。図より、注水開始後 203 日後には飽和に到達し、注水終了（953 日後）まで定常状態を維持していることが分かる。

図 4.2-27 に再冠水過程の間隙率（乾燥密度）の経時変化を示す。図より、注水開始以降より流体の侵入と供試体の膨潤挙動に起因して注入側（モデル下面）の間隙率が増加（乾燥密度が減少）する一方で、排出側（モデル上面）は減少（増加）しており、注水終了時点（約 953 日後）まで同様な傾向が継続している。

図 4.2-28 に再冠水過程の平均有効応力分布の経時変化を示す。図より、注水開始以降は供試体の膨潤に起因して全体の平均有効応力が比較的一様に増加していくが、概ね飽和に至る 203 日以降は、流体が侵入することに起因して注入側（モデル下面）に向かって低く（引張り応力場側に移行しており、土質材料として力学的には不安定側であり、間隙に作用する流体圧の影響が大きい状態）、排出側（モデル上面）に向かって高く（圧縮応力場側に移行しており、土質材料として力学的には安定側であり、間隙に作用する流体圧の影響が小さい状態）分布する傾向を示しており、注水終了時点（953 日後）においては、平均有効応力の分布が顕著になっている。

以上の結果から、再冠水過程における供試体内部の挙動としては、供試体が概ね飽和に到達して以降は、注入面（モデル下面）に作用する流体圧で注入側より排出側に向けての圧密が進展しながら透水していく傾向になるものと推察された。

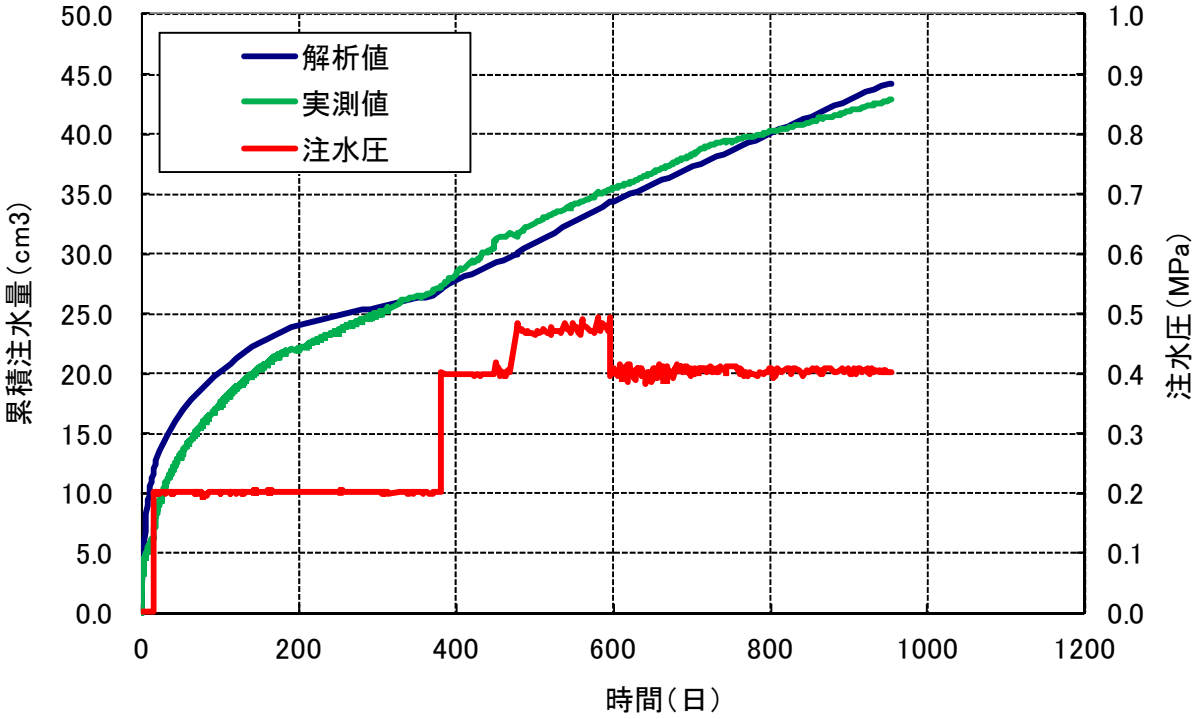
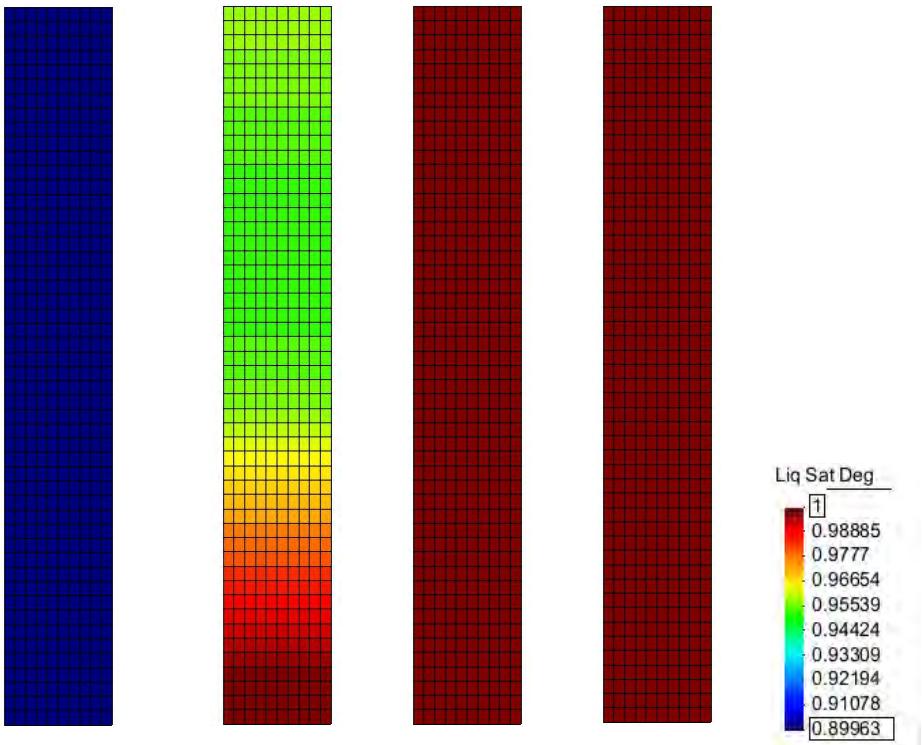
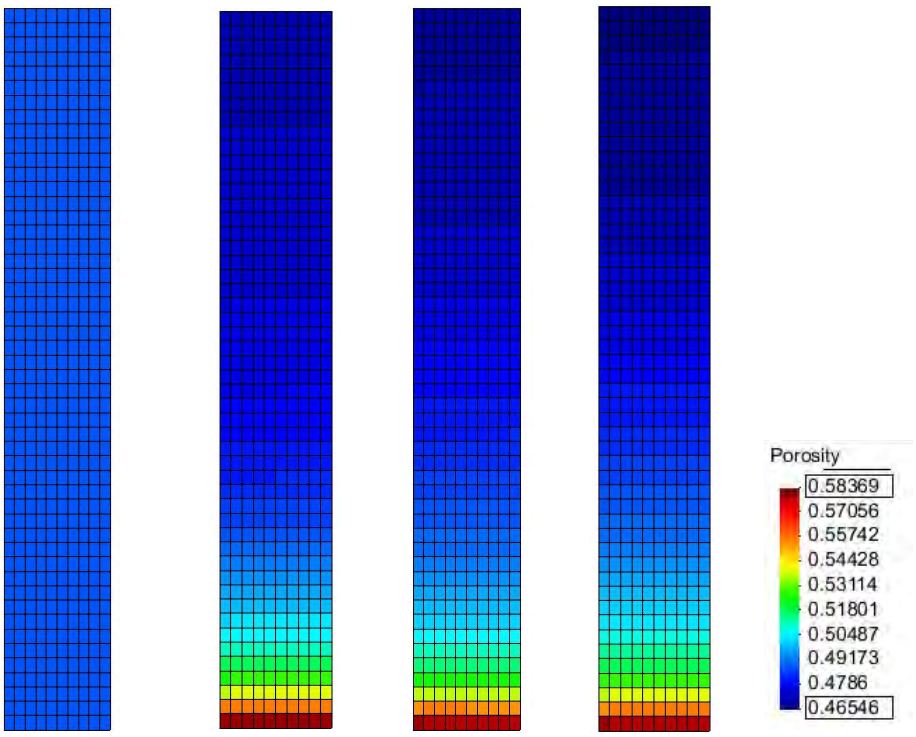


図 4.2-25　累積注水量の経時変化（実績値と解析解）



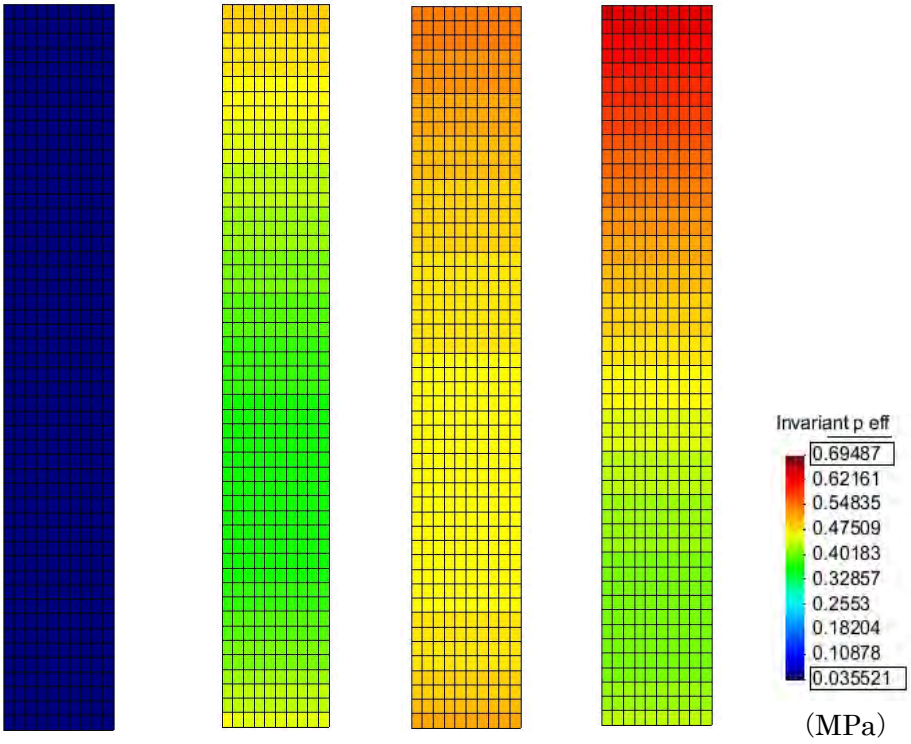
注水開始直後　注水開始 43 日後　注水開始 203 日後　試験開始 953 日後

図 4.2-26　飽和度分布の経時変化



注水開始直後　注水開始 43 日後　注水開始 203 日後　試験開始 953 日後

図 4.2-27　乾燥密度（間隙率）の経時変化



注水開始直後　注水開始 43 日後　注水開始 203 日後　試験開始 953 日後

図 4.2-28　平均有効応力分布の経時変化

7）再現解析結果（ガス注入過程）

ガス注入過程においては以下の項目を評価し、ガス注入過程における供試体内部の状態がどのようになっていたかを詳細に把握した。また、破過が生じなかった理由と、可能性のある要因を考察した。

- 累積注水量の経時変化（実測値と解析値）
- 飽和度分布
- 乾燥密度（間隙率）分布
- 平均有効応力分布

a. 基本ケース

図 4.2-29 に累積注水量の経時変化（実測値と解析解）を示す。図より、実測値と解析解とで乖離しており、ガス注入試験終了時点（約 97 日後）では、実測値と比較して解析解の方が約 17mL 多く排水された結果となった。

図 4.2-30 に飽和度分布を示す。図より、ガス侵入を想定した境界条件に設定して以降（44.7 日以降）も飽和度の低下が殆ど見られず（ガス侵入が殆ど確認されず）、ガス注入終了時点（約 97 日後）においても 0.1%程度の低下に留まっている。

図 4.2-30 に乾燥密度（間隙率）分布を示す。図より、ガス注入開始以降より流体の侵入に伴って注入側（モデル下面）の乾燥密度が減少する一方で、排出側（モデル上面）は増加しており、

ガス注入終了時点（約 97 日後）まで同様な傾向が継続している。

図 4.2-31 に平均有効応力分布を示す。図より、ガス注入開始以降よりガス注入側（モデル下面）の平均有効応力は流体の侵入によって徐々に減少する（引張り応力場側に移行しており、土質材料として力学的には不安定側であり、間隙に作用する流体圧の影響が大きい状態）一方で、排出側（モデル上面）の平均有効応力は徐々に増加しており（圧縮応力場側に移行しており、土質材料として力学的には安定側であり、間隙に作用する流体圧の影響が小さい状態）、ガス注入終了時点（約 97 日後）まで同様な傾向が継続している。

以上の結果から、供試体内部の挙動としては、ガス注入開始以降より注入面（モデル下面）に作用する流体圧で注入側より排出側に向けて圧密される状態となったが、ガスが侵入する境界条件とした 44.7 日以降もガスは供試体内に殆ど侵入することなく、注入面近傍において供試体が排出側方向に圧密されるのみであったと考えられる。

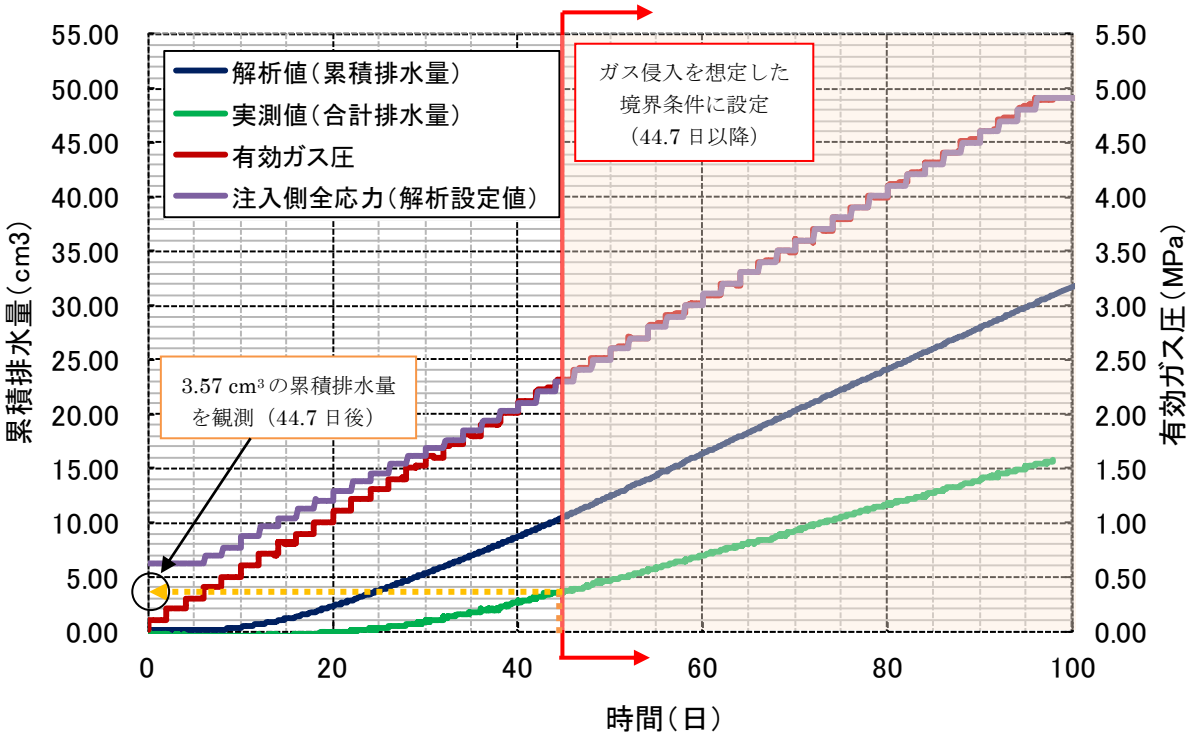
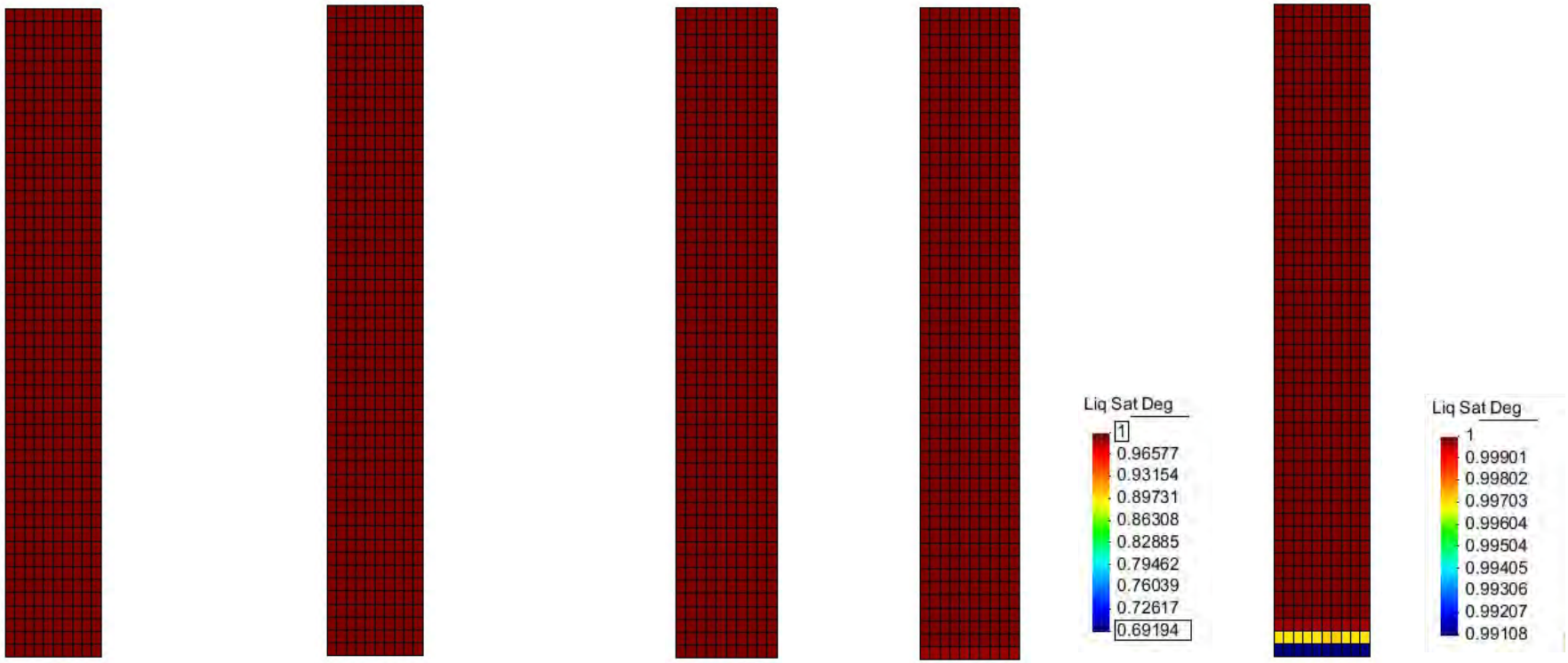


図 4.2-29　累積排水量の経時変化（実測値と解析値）



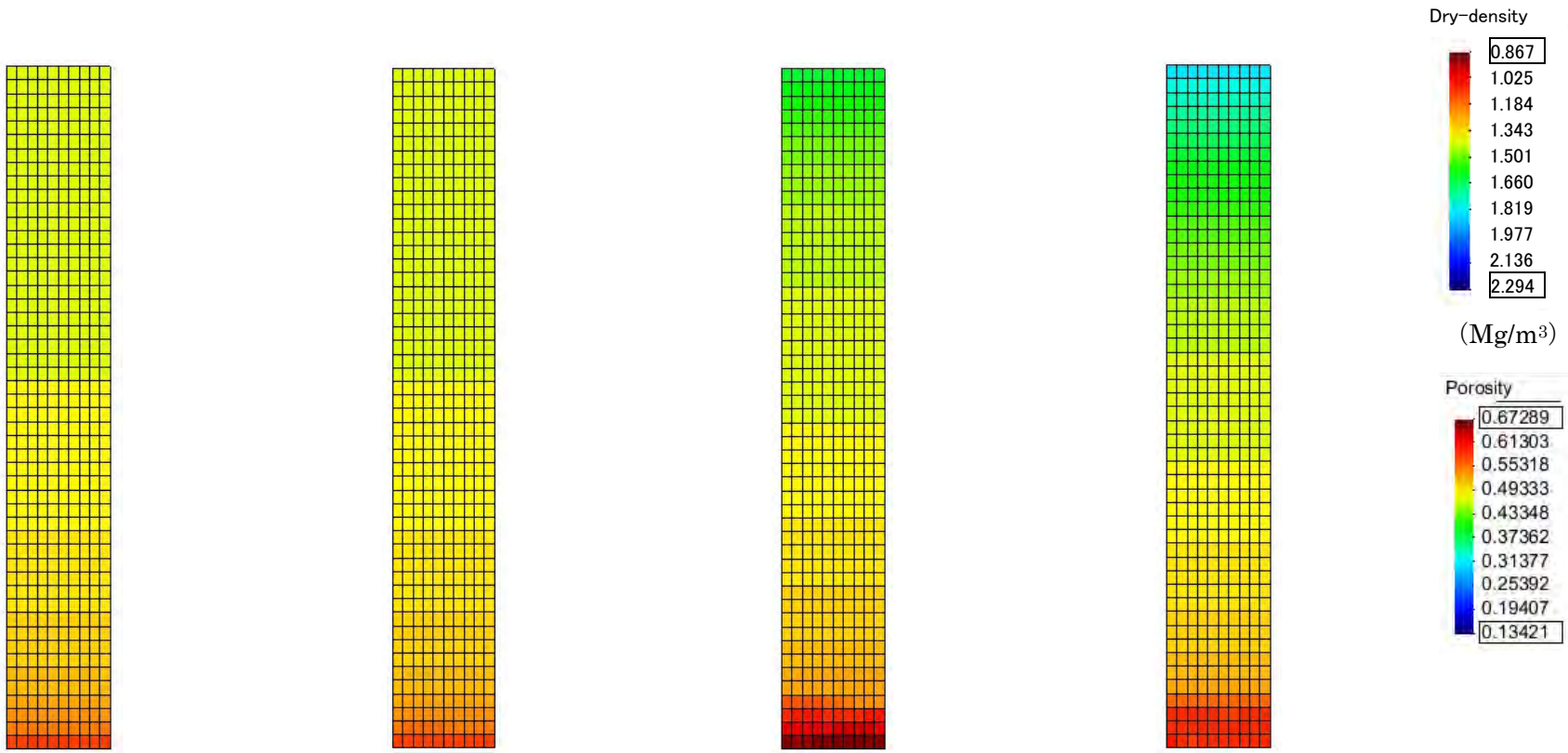
ガス圧載荷開始
直前（0 日後）
※注入側（モデル下端）を
大気圧解放境界に設定

ガス圧載荷開始
直後（10^{-6} 日後）
※注入側（モデル下端）を
注ガス圧（水・ガス浸透）境界に設定

ガス圧載荷開始
44.7 日後
※注入側（モデル下端）を
ガス侵入（水不浸透）境界に設定

ガス圧載荷開始　97 日後（ガス注入試験終了時点）

図 4.2-30　飽和度分布の経時変化



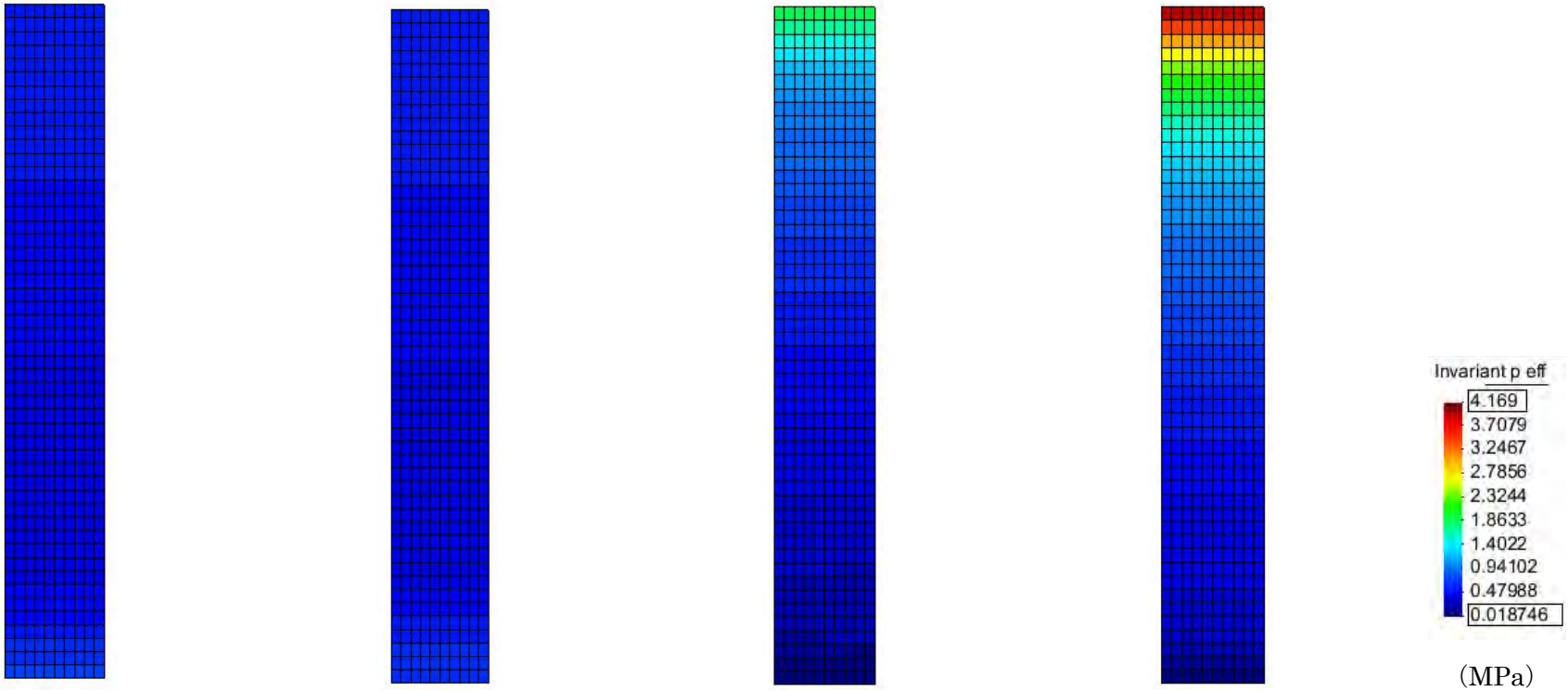
ガス圧載荷開始直前
(0 日後)
※注入・排出側（モデル上・下端）を
大気圧解放境界に設定

ガス圧載荷開始直後
(10^{-6} 日後)
※注入側（モデル下端）を
注ガス圧（水・ガス浸透）境界に設定

ガス圧載荷開始
44.7 日後
※注入側（モデル下端）を
ガス侵入（水不浸透）境界に設定

ガス圧載荷開始
97 日後
(ガス注入試験終了時点)

図 4.2-31　乾燥密度（間隙率）分布の経時変化



(MPa)

ガス圧載荷開始直前
(0 日後)
※注入・排出側（モデル上・下端）を
大気圧解放境界に設定

ガス圧載荷開始直後
(10^{-6} 日後)
※注入側（モデル下端）を
注ガス圧（水・ガス浸透）境界に設定

ガス圧載荷開始
44.7 日後
※注入側（モデル下端）を
ガス侵入（水不浸透）境界に設定

ガス圧載荷開始
97 日後
(ガス注入試験終了時点)

図 4.2-32　平均有効応力分布の経時変化

b. 検討ケース

前項「基本ケース」のガス注入過程の検討において、累積排水量の経時変化における実測値と解析解とで乖離が生じることが判明した。そこで、基本ケースに対する「検討ケース」として、実測値と解析解のマスバランスの整合を取る観点から、前述の GETFLOWS による検討において、ガス注入過程を良好に再現可能となった「2012SG②」の同定パラメータ（図 4.2-7 参照）を採用することし、絶対浸透率は供試体の排出側（モデル上面）が圧密され、間隙率が減少傾向となることに起因した透過性の低下を考慮して、同定された値（$=6.48\times10^{-20}$ (m^2)）の約 1/3 倍相当の想定値（$=1.91\times10^{-20}$ (m^2)）を設定した。

図 4.2-33 に累積注水量の経時変化（実測値と解析解）を示す。図より、実測値と解析解はほぼ整合する形となった。

図 4.2-34 に飽和度分布を示す。図より、ガスが侵入する境界条件に設定して以降（44.7 日以降）も飽和度の低下が殆ど見られず（ガス侵入が殆ど確認されず)、ガス注入終了時点（約 97 日後）においても 0.1%以下程度の低下に留まっている。

図 4.2-35 に乾燥密度（間隙率）分布を示す。図より、ガス注入開始以降より流体の侵入に伴って注入側（モデル下面）の乾燥密度が減少する一方で、排出側（モデル上面）は増加しており、ガス注入終了時点（約 97 日後）まで同様な傾向が継続している。

図 4.2-36 に平均有効応力分布を示す。図より、ガス注入開始以降よりガス注入側（モデル下面）の平均有効応力は流体の侵入によって徐々に減少する（引張り応力場側に移行しており、土質材料として力学的には不安定側であり、間隙に作用する流体圧の影響が大きい状態）一方で、排出側（モデル上面）の平均有効応力は徐々に増加しており（圧縮応力場側に移行しており、土質材料として力学的には安定側であり、間隙に作用する流体圧の影響が小さい状態)、ガス注入終了時点（約 97 日後）まで同様な傾向が継続している。

以上の結果から、供試体内部の挙動としては、ガス注入開始以降より注入面（モデル下面）に作用する流体圧で注入側より排出側に向けて圧密される状態となったが、ガスが侵入する境界条件とした 44.7 日以降もガスは供試体内に殆ど侵入することなく、注入面近傍において供試体を排出側方向に圧縮するのみの挙動であったと考えられる。

また、図 4.2-37 に供試体の排出側（モデル上面）における応力経路（Stress Path、p：平均有効主応力、q：偏差応力）と限界状態線（CSL）の関係を示す。図より、ガス注入期間中の Stress Path は CSL を常に下回っていることから、流体圧に起因した圧密によって平均有効応力が増加するのみであり、せん断破壊は生じていない。よって、破過が生じなかった主な要因は図 4.2-37 から解釈される供試体内の応力状態に起因する可能性がある。

図 4.2-38 に供試体排出側（モデル上面）における乾燥密度と絶対浸透率の経時変化を示す（絶対浸透率は間隙率依存性が考慮された「Kozeny 則」に従うものとした)。図より、ガス注入開始以降の注入側からの流体圧により供試体の排出側が圧密されることで、乾燥密度の増加（間隙率の減少）とともに絶対浸透率が低下しながら排水が継続するものと考えられる。

図 4.2-39 に供試体注入側（モデル下面）における鉛直変位量と鉛直変位量から算定した全体積変化（間隙体積変化）に伴う排水量の経時変化を示す。図より、供試体の鉛直変位量は最大約 5mm 程度、鉛直変位（圧密）による排水量は約 7cm^3 程度と推定され、全排水量（=約 16 cm^3）のうち約 5 割を占めており、このうち供試体へのガス侵入条件とした 44.7 日以降の排水

量は約 6.2 cm³ であった（44.7 日までは約 0.8 cm³）。

以上より、ガス注入過程における主な試験挙動としては、試験開始後 44.7 日まではポーラスメタル内の水が供試体に侵入するため、透水と供試体の圧密が併行した排水挙動を示したと考えられるが（図 4.2-33 より 44.7 日までの全排水量は解析解で約 6 cm³ であり、そのうち透水分が 5.2cm³、圧密排水分が 0.8cm³ であると推定）、排水が完了してガス圧載荷のみとなった（ガス侵入開始が想定された）44.7 日以降は、ガスは供試体内に殆ど侵入することなく注入面近傍において供試体を排出側方向に圧縮したのみであり、ガス圧により圧密された供試体からの排水挙動が支配的であった（図 4.2-33 より 44.7 日以降の全排水量は解析解で約 10 cm³ であり、そのうち圧密排水分は 6.2 cm³ であるとすると、ガス侵入による置換分は約 3.8 cm³ であったと推定）と考えられる。

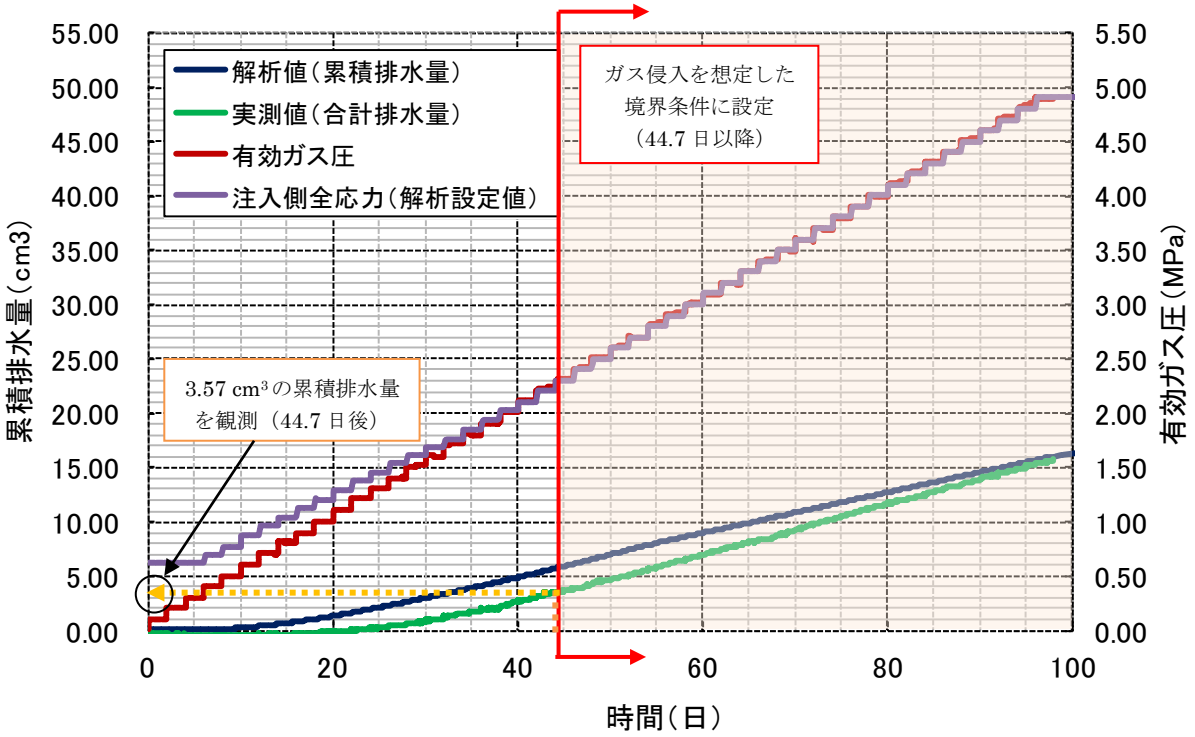
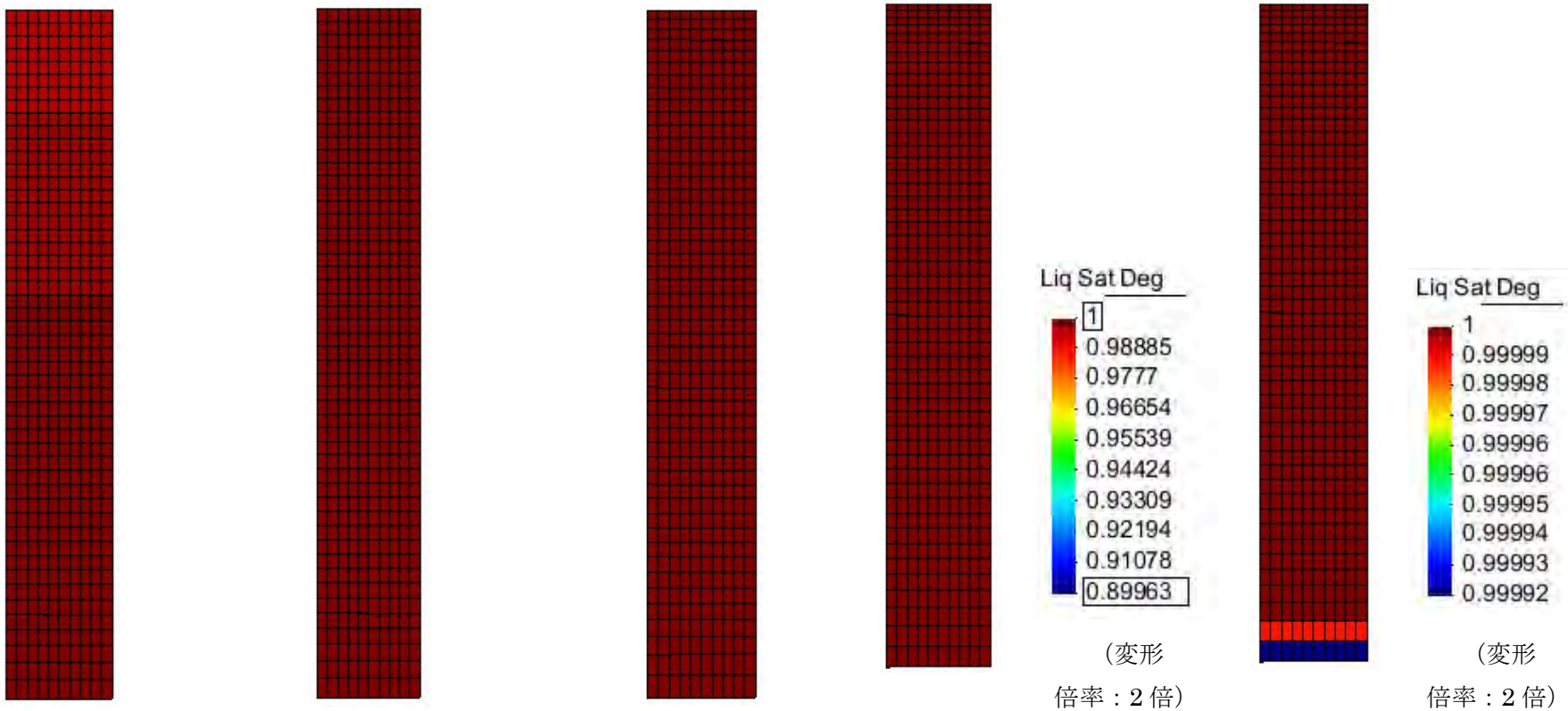


図 4.2-33　累積排水量の経時変化（実績値と解析解）



ガス圧載荷開始
直前（0 日後）
※注入側（モデル下端）を
大気圧解放境界に設定

ガス圧載荷開始
直後（10^{-6} 日後）
※注入側（モデル下端）を
注ガス圧（水・ガス浸透）境界に設定

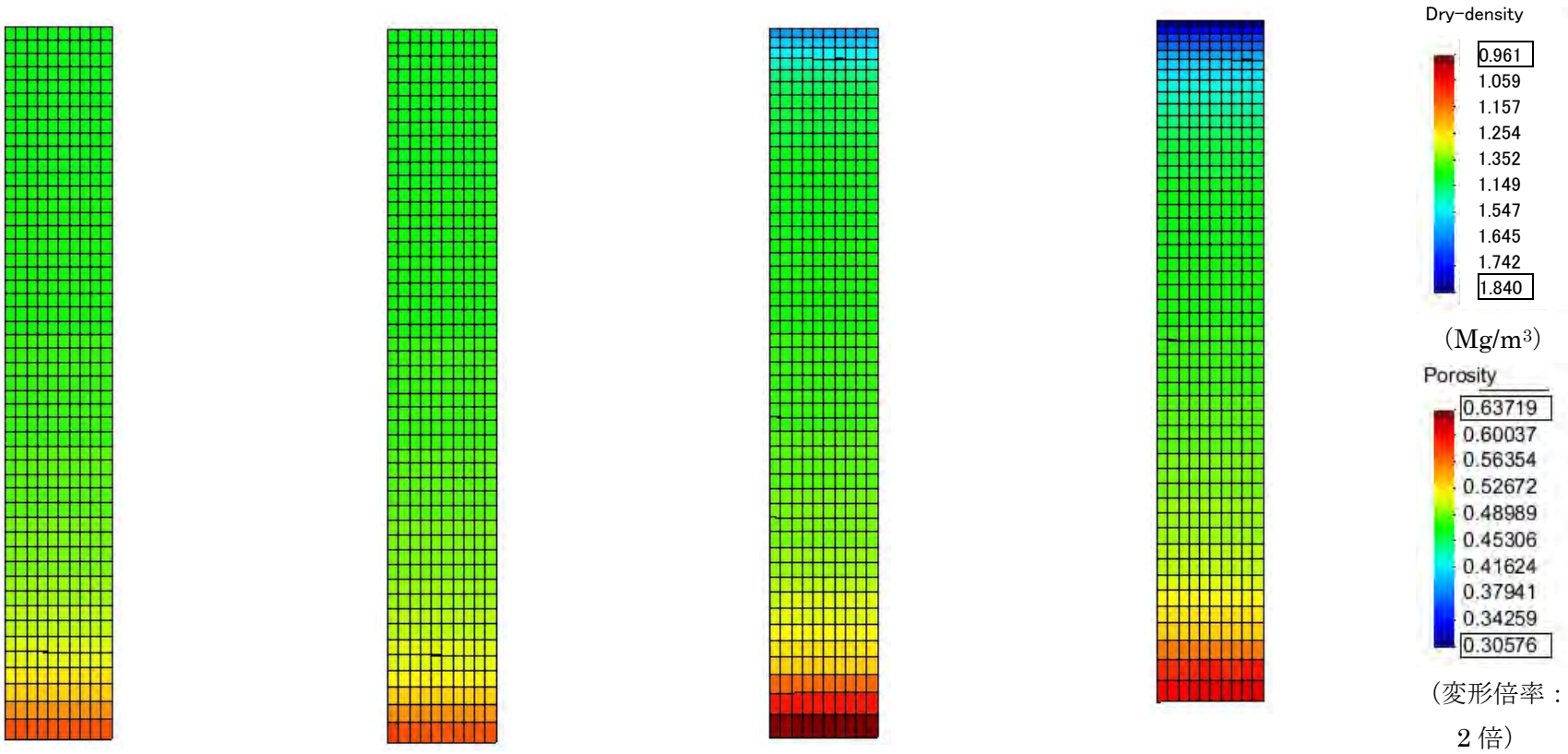
ガス圧載荷開始
44.7 日後
※注入側（モデル下端）を
ガス侵入（水不浸透）境界に設定

（変形
倍率：2 倍）

（変形
倍率：2 倍）

ガス圧載荷開始　97 日後（ガス注入試験終了時点）

図 4.2-34　飽和度分布の経時変化



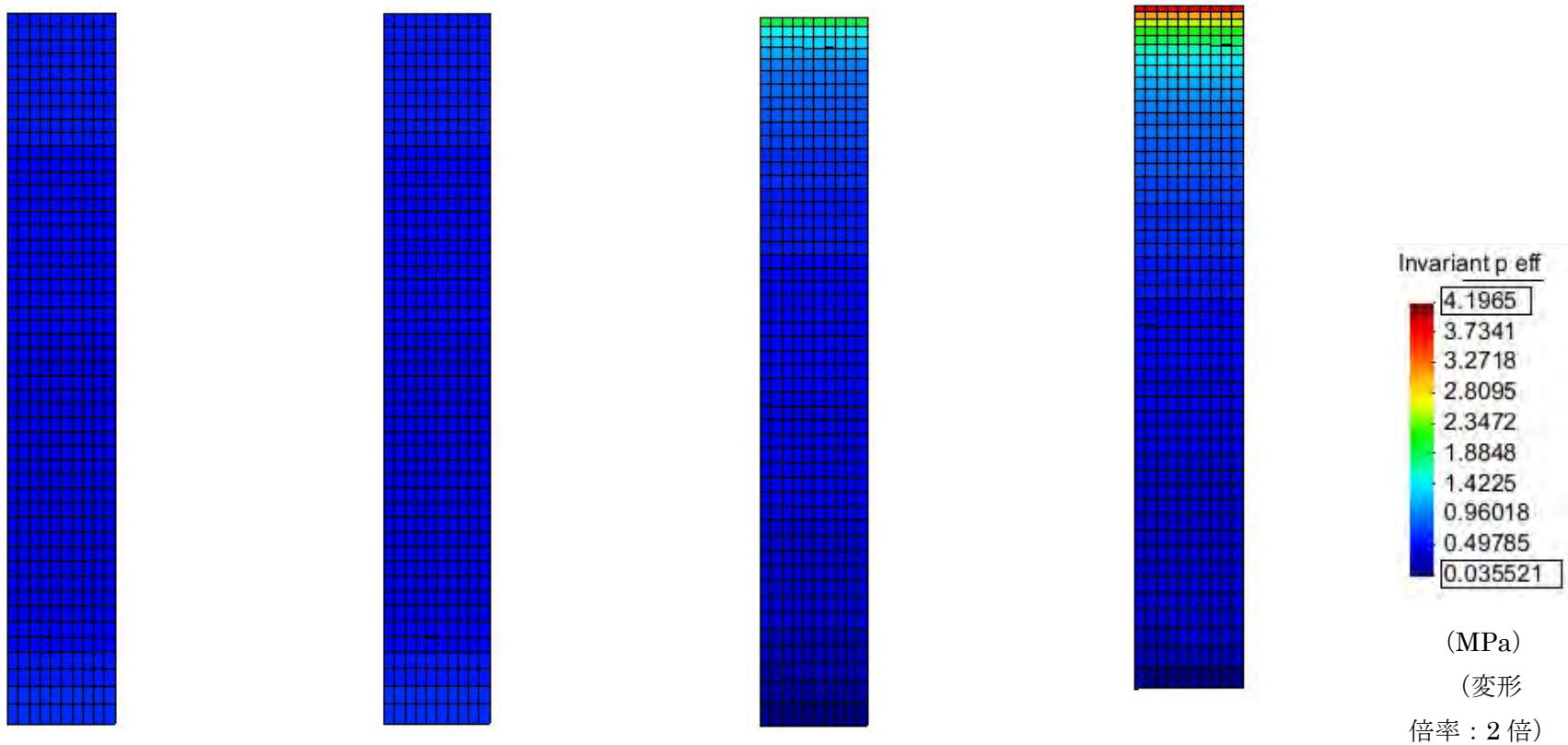
ガス圧載荷開始直前
(0 日後)
※注入・排出側（モデル上・下端）を
大気圧解放境界に設定

ガス圧載荷開始直後
(10^{-6} 日後)
※注入側（モデル下端）を
注ガス圧（水・ガス浸透）境界に設定

ガス圧載荷開始
44.7 日後
※注入側（モデル下端）を
ガス侵入（水不浸透）境界に設定

ガス圧載荷開始
97 日後
(ガス注入
試験終了時点)

図 4.2-35　乾燥密度（間隙率）分布の経時変化



ガス圧載荷開始直前
（0 日後）
※注入・排出側（モデル上・下端）を
大気圧解放境界に設定

ガス圧載荷開始直後
（10^{-6} 日後）
※注入側（モデル下端）を
注ガス圧（水・ガス浸透）境界に設定

ガス圧載荷開始
44.7 日後
※注入側（モデル下端）を
ガス侵入（水不浸透）境界に設定

ガス圧載荷開始
97 日後
（ガス注入
試験終了時点）

（MPa）
（変形
倍率：2 倍）

図 4.2-36　平均有効応力分布の経時変化

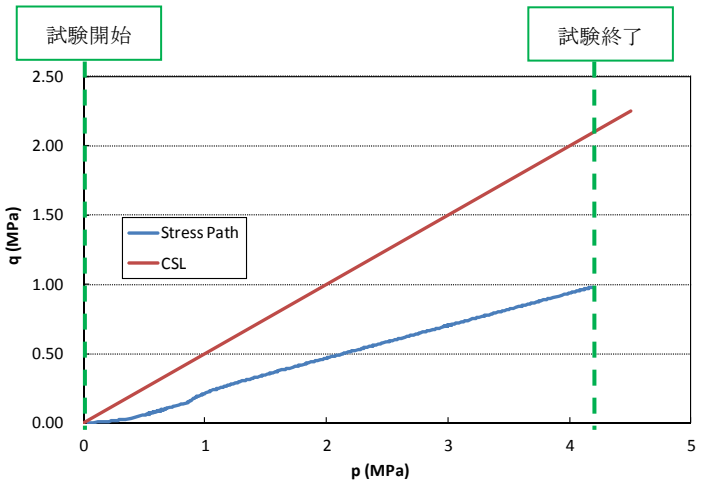


図 4.2-37　供試体排出側（モデル上面）における Stress Path と CSL の関係

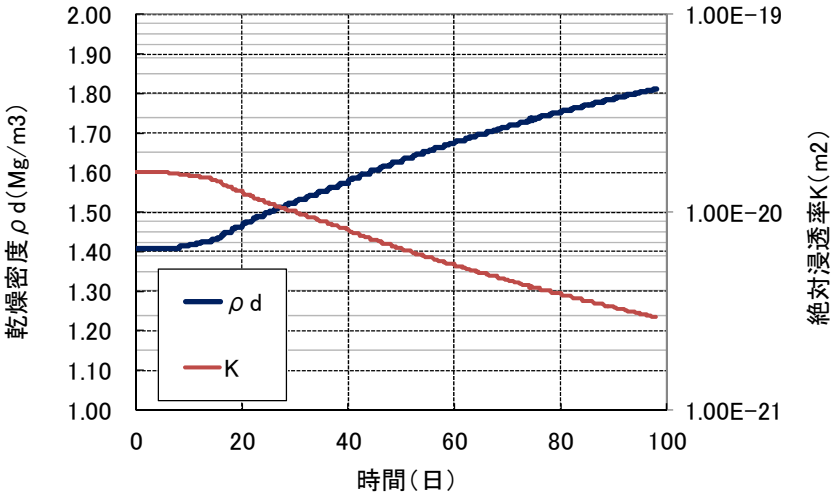


図 4.2-38　供試体排出側（モデル上面）における乾燥密度と絶対浸透率の経時変化

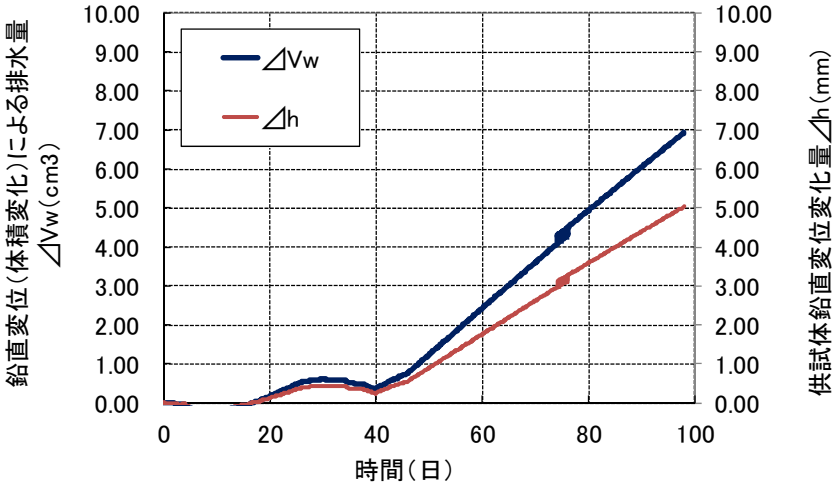


図 4.2-39　供試体注入側（モデル下面）における鉛直変位量と全体積（間隙）変化量から想定した排水量の経時変化

4.2.3　ガス移行挙動解析ツールの高度化に係る解析検討のまとめ

(1) 圧力依存透過特性モデルによる検討

「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―」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対象として、再現解析による 2 相流パラメータの同定を実施した。再冠水フェーズを対象とした再現解析では、自動逆解析手法を適用し、実測データを良好に再現可能なパラメータを同定することができた。ガス注入フェーズを対象とした再現解析では、これまでに同定されている 2 パターンの 2 相流パラメータを用いて再現解析を実施した。その結果、再冠水フェーズで同定された絶対浸透率を適用した場合、実測された累積排水量を再現することは困難であった。これは再冠水フェーズからガス注入フェーズに移行する際の減圧過程によって供試体内部が影響を受け、透過性が上昇した等の要因によると考えられ、再冠水フェーズで同定された絶対浸透率の約 1.6 倍の値を用いて再現解析を行ったところ、流路拡幅が起こらない場合に、実測データを良く再現することができた。この結果から、大型供試体を用いたガス注入試験時には、流路拡幅によって明確なガス透気経路は形成されておらず、通常の水・ガス 2 相流れによる移行形態であったことが示唆された。

(2) 力学連成解析モデルによる検討

(1)の対象と同じガス移行試験データの再現解析を、既往の検討成果（平成 22 年度における H=200mm 供試体の再冠水過程の再現解析）において得られた 2 相流物性パラメータを用いて実施したところ、ガス注入過程の累積排水量経時変化の実測値と解析値が乖離する結果となった。このため、ガス注入過程における累積排水量経時変化の実測値と解析値とのマスバランスの整合を取る観点から、本年度の圧力依存性モデル（GETFLOWS）解析（ガス注入過程を良好に再現）で採用された 2 相流特性値等のパラメータを用いガス移行試験の再現解析を実施し（検討ケース）、実測値と解析解とが概ね一致する結果が得られた。解析で得られたガス注入過程のデータにおいては、乾燥密度や平均有効応力は供試体注入側から排出側に向かって高い分布に、また間隙率は供試体注入側から排出側に向かって低い分布となっているので、ガスの注入によって、注入側から排出側に向かってベントナイトが圧密されることで排出側の絶対浸透率が減少しつつ、圧密に伴う供試体内部の間隙水が排出される挙動を示しているものと考えられた。また、ガス注入過程における供試体排出側（モデル上面）の応力経路（Stress Path）と限界状態線（CSL）の関係を精査すると、応力経路はガス注入期間中を通して常に限界状態線を下回っていることから、供試体内の応力状態としては注入側からの流体圧に起因した平均有効応力が増加するのみであり、せん断破壊等は生じず力学的に安定な状態を維持することから、ガスが侵入せずに破過が生じなかった要因と考えた。

4.3　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

4.3.1　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

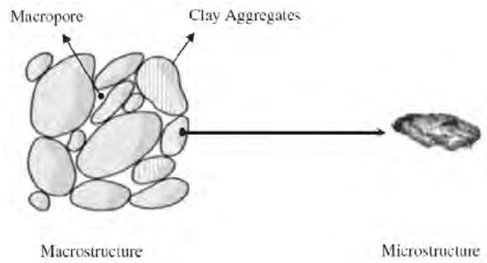
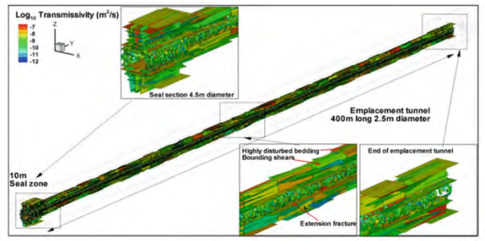
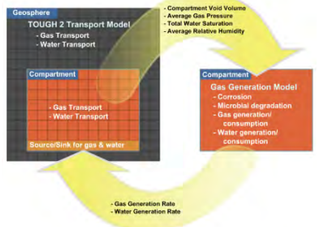
これまでの検討を通じて以下に示す 5 つの課題が得られた。

- 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
- 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
- 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）
- 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

今後 5 箇年の研究計画策定のために、各課題に対して、本研究における現状と、国内外の最新動向の調査を実施し、その結果を表 4.3-1 にまとめた。最新動向の整理の際に参考とした主な文献やガス移行関連研究プロジェクトを以下に挙げる。

- The 7th Framework Program of the European Commission: FORGE (Fate Of Repository Gases)
- Dossier 2005 (ANDRA, France)
- SR-Can main report (SKB, Sweden)
- The 6th Framework Program of the European Commission: PAMINA (Performance Assessment Methodologies IN Application)
- Carlos F. Jove Colon, et al., 2013. EBS Model Development and Evaluation Report, U. S. Department of Energy, Used Fuel Disposition Campaign, FCRD-UFD-2013-000312, SAND2013-8512P.
- G. W. Lanyon, R. Senger, 2011. A Structured Approach to the Derivation of Effective Properties for Combined Water and Gas Flow in the EDZ, Transp Porous Med 90:95-112.
- Salomon J. Wettstein, et al., 2012. From invasion percolation to flow in rock fracture networks, Physica A 391, 264-277.
- P. Suckling, et al., 2012. T2GGM Version 3.1: Gas Generation and Transport Code, NWMO TR-2012-23
- 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性に関する研究―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 研究報告：N09003.

表 4.3-1　解析手法・モデル化に関する課題に対する本研究での現状と最新動向の整理

課　題	現　状	最新動向の整理
1)　水分状態と関連付けた2相流パラメータ（浸透率や毛管圧曲線）の動的変化と実測データによる検証	● ベントナイト中の間隙を Micropore と Macropore に分け、それらの変化によって生じる相対浸透率、毛細管圧力曲線のヒステリシスを考慮 ● 室内実験データを用いた逆解析による推定 ● 実測された 2 相流パラメータによる直接的な検証は未実施	● ベントナイト中の間隙を Micropore と Macropore に分けて取扱う構成モデルを TOUGHREACT- FLAC に導入した事例（右図：Carlos F. Jove Colon, et al., 2013） ● ベントナイト空隙の 2 重構造のモデル化は実施されているが、2 相流パラメータの変化に着目した事例は少ない 
2)　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	● 粘土系材料のみ ● 材料界面に沿った流体移動は圧力依存モデル ● セメント系材料、岩盤材料などを含めたガス移行挙動の実態解明は未着手	● コンクリートに関しては、力学変形は影響が小さいと考えられ、2 相流れを主要な移行形態として取扱っている（FORGE） ● EDZ 中の水・ガスの流れを、DFN モデル（CONNE CTFLOW）→不均質 CPM モデル（TOUGH2）→簡略化 CPM モデルの 3 つのレベルのモデルによって取扱った事例（右図：G. W. Lanyon, et al., 2011）  Fig. 3 Realization of one variant of EDZ DFN model. Fractures colored by LOG_{10} transmissivity (m^2/s)
3)　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)	● 水分状態変化に伴う膨潤・収縮変形と 2 相流パラメータの関係をモデル化（GETFLOWS） ● BB モデルによる力学連成解析（Code_Bright）	● 流路拡幅モデルの導入事例 ・水・ガス 2 相流れに加えて、ある圧力閾値を超えた際に、絶対浸透率、間隙率および毛細管圧力を変化 ・Nicola Calder (2013)、Pierre Gerard (2013)、など ● 力学連成モデルによる検討事例 ・水・ガス 2 相流れと応力場の連成解析（力学連成モデル：OGS、Code_Bright、Lagamine、TOUGH-FLAC、など） ・Arnedo, et al. (2013)、Gerard, et al. (2013)、Olivella, et al. (2013)、Shao, et al. (2013)、 Yamamoto, et al. (2013)、など ● 上記 2 モデルを組み合わせた事例は無い
4)　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）	● TOUGHREACT を用いた金属腐食に伴うガス発生のみをモデル化 ● V&V（検証と妥当性確認）未実施	● ガス発生モデル ・T2GGM v3.1（NWMO）：水・ガス 2 相流コード TOUGH2-MP とガス発生モデル GGM との連成モデル（右図：P. Suckling, et al., 2012） ・GRM（LLWR） ・GAMMON/SMOGG（UK NIREX/ND A） ● 有機物の微生物分解、微生物によるメタン生成（水素消費）、金属腐食等の考慮  Figure 1-1: Coupling Gas Generation and Transport in T2GGM
5)　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	● 室内試験データの再現解析から同定された 2 相流パラメータを実機スケールに適用して検討 ● 多数の透気試験データを用いて同定された 2 相流パラメータのフィールドスケールへの適用性検証はできていない（アップスケーリング）	● 室内試験データの再現解析から同定された 2 相流パラメータを処分施設を模擬としたモデルに適用して評価 ・田中ら（2009）、など ● 同定されたパラメータの次元性や不均質性に着目した検討事例は少ない。

「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」に関して、現状では、ベントナイト中の間隙を Micropore と Macropore に分け、それらの変化によって生じる相対浸透率、毛細管圧力曲線のヒステリシスを考慮し、室内実験データを用いた逆解析によって 2 相流パラメータを推定（排水量等の実測データを再現する 2 相流パラメータを同定）している。しかし、実測された 2 相流パラメータによる直接的な検証は未実施である。本研究以外での検討事例としては、ベントナイト中の間隙を同様に Micropore と Macropore に分けて取扱う構成モデルを TOUGHREACT-FLAC に導入した事例など、ベントナイト空隙の 2 重構造のモデル化は実施されているが、2 相流パラメータの変化に着目した事例は少ない。

「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」に関して、これまでの検討では、粘土系材料のみに着目しており、セメント系材料、岩盤材料などを含めたガス移行挙動の実態解明は未着手である。海外の研究機関やプロジェクトでは、コンクリートや EDZ など、粘土系材料以外のガス移行挙動に着目したモデリング事例が検討されている。

「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）」に関して、これまでの検討では力学連成事象に着目した解析として、ベントナイトの膨潤・収縮に伴う 2 相流パラメータの動的変化を従来の 2 相流モデルに組み込んだ手法や流路拡幅モデル（GETFLOWS）、BB モデルによる力学連成モデル（CODE_BRIGHT）を適用してきた。その他の検討事例でも、本研究と同様に、流路拡幅モデルの導入事例や力学連成モデルを用いた検討事例が多く見られたが、これら 2 モデルを組み合わせた事例は無かった。

「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）」に関して、これまでの検討では、THC 連成解析コード TOUGHREACT を用いて、ガス発生に着目した解析を実施している。但し、希薄溶液系における鉄の腐食反応のみを取扱う単純系を対象としたものであった。本研究以外での検討では、多くの適用事例を持つガス発生モデルがいくらか存在し、その中では、有機物の微生物分解、微生物によるメタン生成（水素消費）や金属腐食等を考慮したより高度なものであった。

「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」に関して、現状では、室内試験データの再現解析から同定された 2 相流パラメータを実機スケールにそのまま適用して評価を行っているが、その適用性の検証は未実施である。また、確証された 2 相流パラメータもこれまでの「ガス移行に係る解析・モデル化の高度化」の検討を通じて得られたものであり、多数存在するわけではない。その他の検討でも同様に、室内試験データの再現解析から同定された 2 相流パラメータを、処分施設を模擬したモデルに適用した事例があるが、同定されたパラメータの次元性や不均質性に着目した検討事例は限定的である。

4.3.2　今後 5 年間の解析手法・モデル化高度化のための研究計画策定

前項にて整理した本研究の現状と、国内外の最新動向を踏まえ、今後 5 箇年程度を想定した研究展開内容として、以下に示す 3 つの Work Package（WP）を設定した。

- WP1：人工バリア中のガス移行挙動の現象理解
- WP2：ガス移行データライブラリの運用
- WP3：次世代モデリング技術開発

WP1 では、ガス発生・移行挙動を説明可能なモデル化手法の高度化を目標成果とする。ここでは、これまで実施してきているガス透気試験系の確証計算を通じて、パラメータの同定を引き続き継続する。粘土系材料だけでなく、他材料を用いた試験データが利用可能な場合には、それらのパラメータに関しても検討対象とする。また、これまでに同定してきたパラメータの再評価を実施する。評価に際しては、次元性や不均質性などに着目した検討を行う。また、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（THM 連成解析）やガス発生モデルとの結合（THC 連成解析）を行う。

WP2 では、より多くの確証データ・構成モデルを蓄積し、有効利用することを目標成果とする。ここでは、確証されたデータ・構成モデルの蓄積を行い、それらを利用し、ガス移行データライブラリの運用を進める。

今後、確証データが充実し、複数のモデルによって検討を実施する際に、それらの不確実性を考慮することが重要となる。また、これまでより長期・広域スケールを対象とした検討が必要になってくると予想される。そこで、WP3 では、データ・モデル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を目標成果とする。この中では、高解像度・大容量モデルによるガス移行経路の評価を行う。この際に、データ・モデルの不確実性を考慮し、確率論的な取扱いを検討する。さらには、各種の設計解析や安全評価解析を効率的に行うことができるサローゲートモデリング（Surrogate Modeling）の導入を試行する。

3 つの Work Package とその検討内容を表 4.3-2 にまとめた。

表 4.3-2　3 つの Work Package と実施内容

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）

平成 26～29 年の 5 年間を仮定し、提示した WP 内の各検討項目の実施予定期間と項目間の相互関係を図 4.3-1 に示す。各年度における具体的な実施予定案は以下の通りである。

平成 26 年度は、粘土系材料や他材料の試験データを対象とした確証計算によるパラメータ同定を実施する。得られたパラメータはガス移行データライブラリに蓄積する。また、ガス発生モデルとの結合および、高解像度・大容量モデルによるガス移行経路の評価に着手する。

平成 27 年度は、平成 26 年度と同様に試験データを用いた確証計算によるパラメータ同定および、ガス移行データライブラリへのデータ蓄積を引き続き継続する。また、ガス発生モデルとの結合を行い、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にも着手する。

平成 28 年度においても、引き続きパラメータ同定、ガス移行データライブラリへのデータ蓄積および、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を継続する。ここまでに得られてきたパラメータの再評価を実施し、ガス移行データライブラリへ得られた知見を反映する。平成 27 年度のガス発生モデルと結合した手法を用いて、モデルの相違によって生じる解析結果の幅を評価する。

平成 29 年度には、パラメータの同定および、同定パラメータの再評価を継続して行い、ガス移行データライブラリへ得られた知見を反映する。平成 28 年度に導入した媒体変形と水-ガス 2 相流の挙動を関連付ける構成モデルを加え、モデルの不確実性を評価する。また、各種の設計解析や安全評価解析を効率的に行うことができるサローゲートモデリング（Surro gate Modeling）の導入を試行する。最後に 5 箇年の検討内容の取りまとめを実施する。

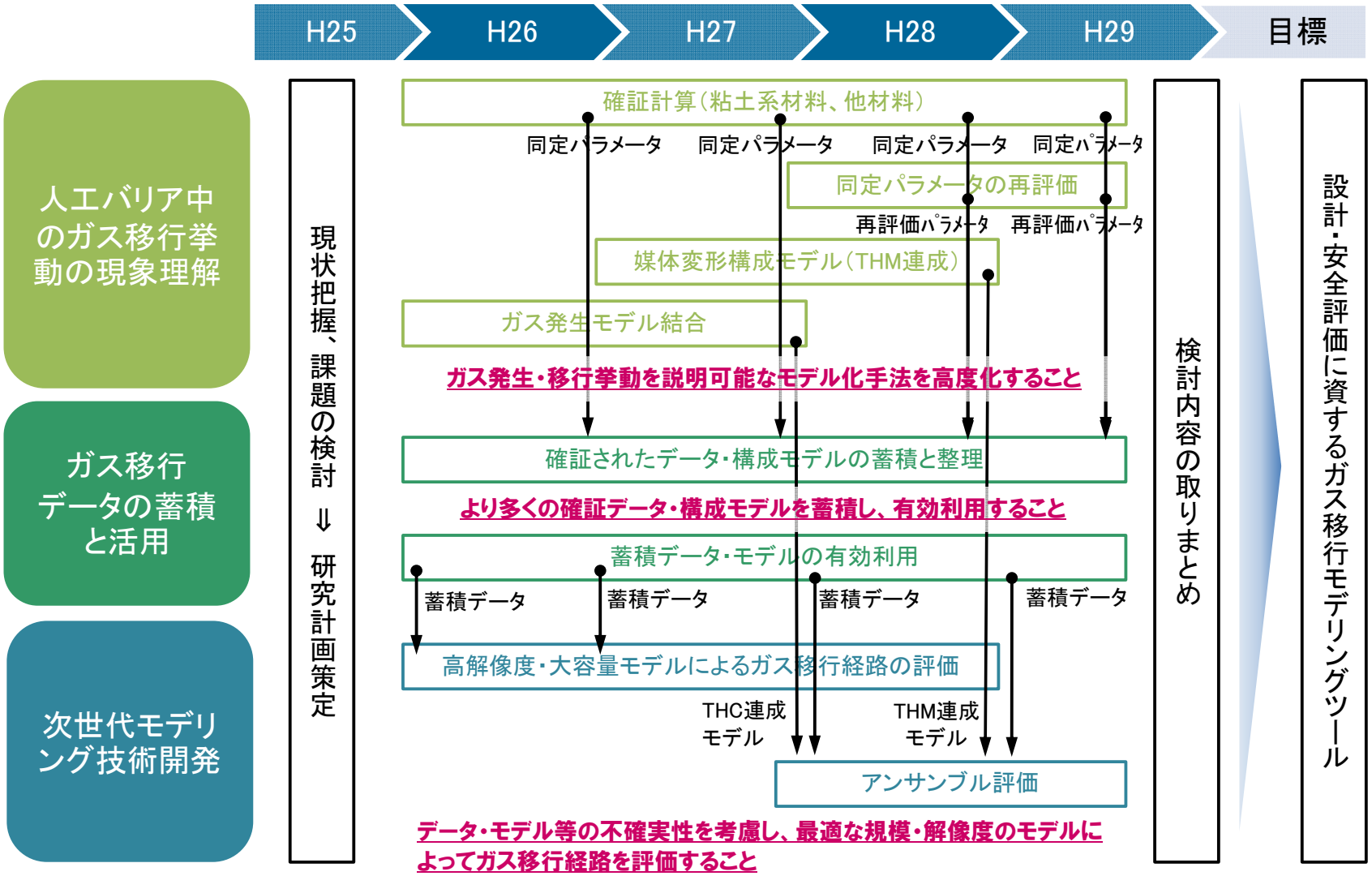


図 4.3-1　今後の研究計画と WP 内の各検討項目間の相互関係

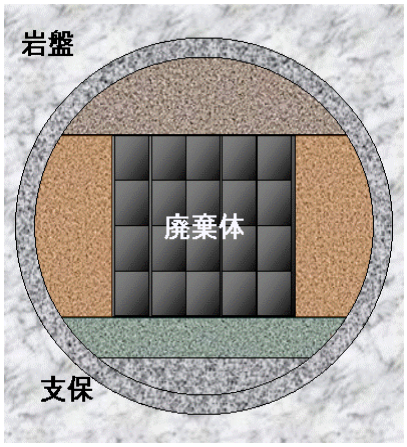
4.4　TRU 廃棄物処分施設の概念モデルを用いた時系列解析

4.4.1　対象システムの設定

前項「今後の解析手法・モデル化高度化のための研究計画策定」の中で挙げた 3 つの Work Package のうち、「WP3：次世代モデリング技術開発」で検討予定の「高解像度・大容量モデルによるガス移行経路の評価」の事前検討として、ここでは、これまでの検討で用いてきた第 2 次 TRU レポートの概念に準拠した廃棄物処分システムを対象とし、より精緻な高解像度 2 次元モデルによる検討を実施する。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。これまでの検討で構築してきた 2 つのモデル（2007 年度、2010 年度）による解析も実施し、施設内圧力や累積押出し水量、ガス透気経路等の比較を行う。

本検討で対象とする廃棄体は、第 2 次 TRU レポート[1]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 4.4-1 に示す。ここでは、処分坑道を深度方向に輪切りにした 2 次元断面として取扱う。処分坑道の内径は 11.4m、支保工の厚さは 0.6m、廃棄体サイズは幅 6.0m、高さ 6.4m、鋼製構造躯体の厚さは 0.05m である。

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 4.4-1　モデル化の対象とする処分システム

4.4.2　解析モデルの構築

(1) 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)[9]を用いた。

支配方程式や数値解法は 4.2.2　(1) にて示した通りである。

(2) 解析モデル

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

構築した解析モデル（2013 年モデルとする）を図 4.4-2 に示す。また、これまでの検討にて構築した 2 つのモデル（2007 年モデル、2010 年モデルとする）と比較したものを図 4.4-3 に示す。2007 年、2010 年、2013 年モデルの総格子数はそれぞれ、2,139、29,548、144,504 となり、施設内の格子解像度はそれぞれ、約 60cm、約 20cm、5cm 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）、岩盤である。

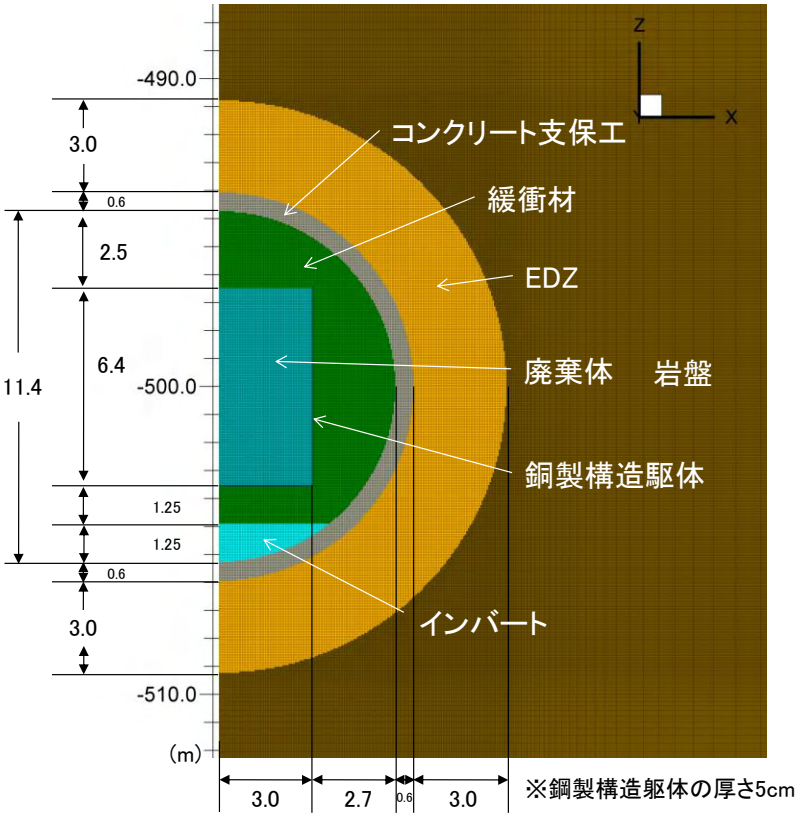


図 4.4-2　解析モデル（施設周辺拡大、2013 年モデル）

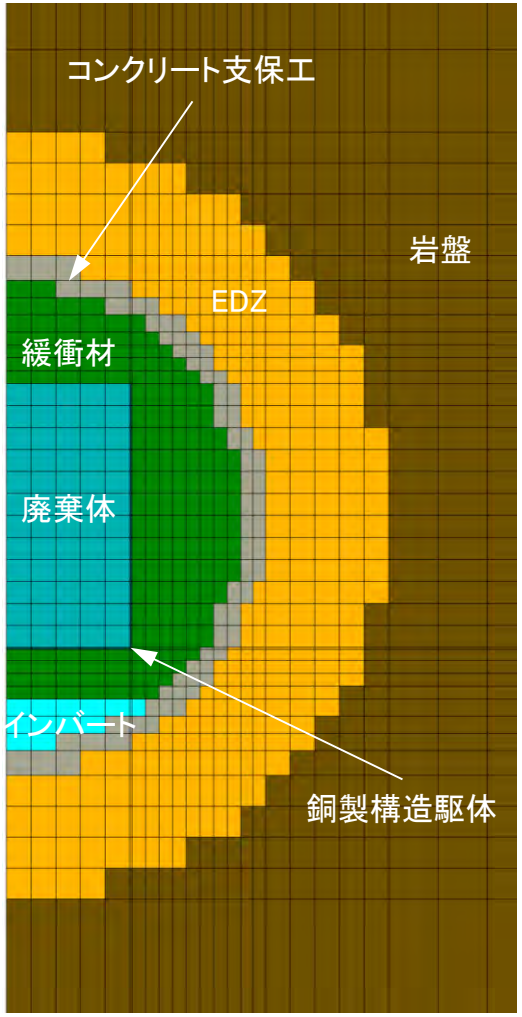
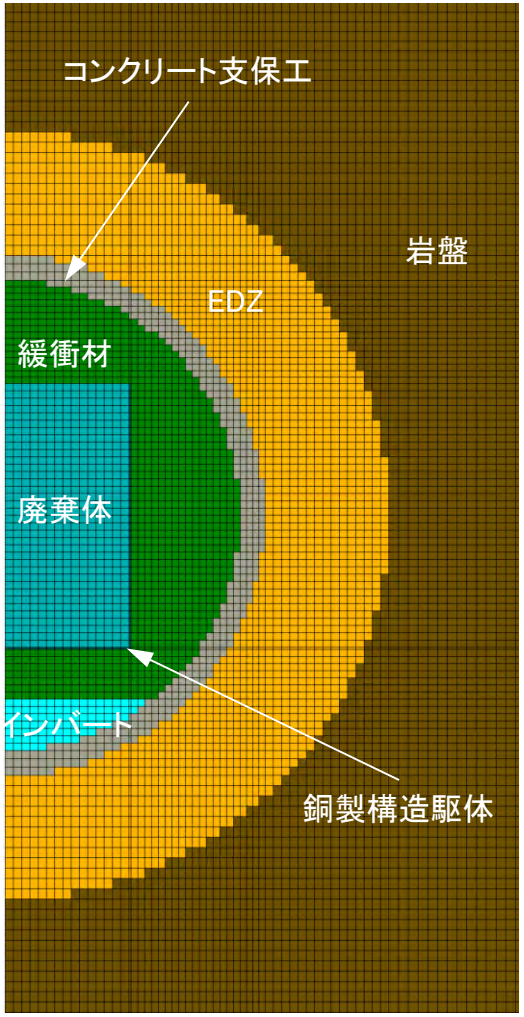
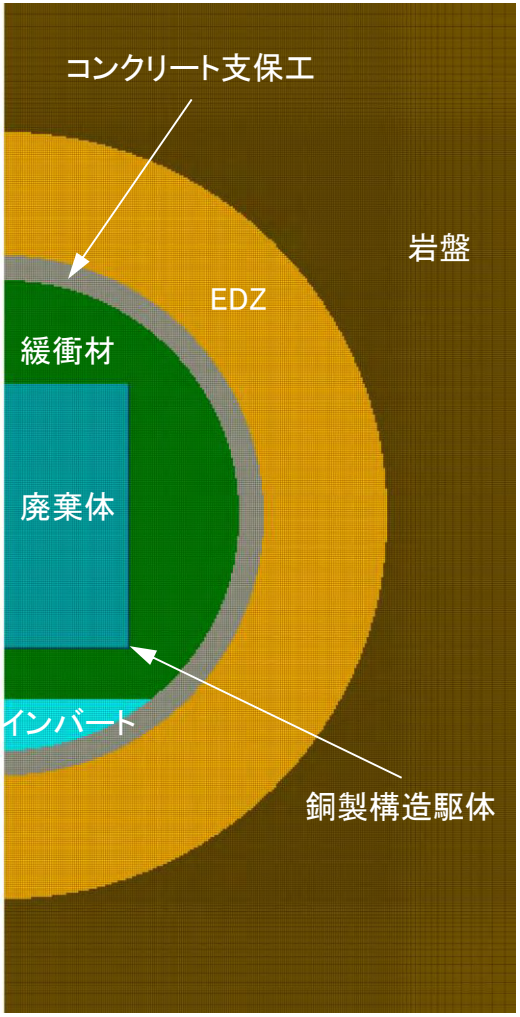
2007 年モデル	2010 年モデル	2013 年モデル
		
総格子数：2,139、施設内解像度：約 60cm	総格子数：29,548、施設内解像度：約 20cm	総格子数：144,504、施設内解像度：5cm

図 4.4-3　使用する 3 つの解析モデル

(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$0.797\times10^{-3}(Pa\ s)$とし、以下の式により水圧の関数として取り扱う。

$$\rho_w = \rho_{w0}\left(1 + C_f(P_w - P_0)\right) \tag{4.4-1}$$

$$\mu_w = \mu_{w0}\left(1 + C_\mu(P_w - P_0)\right) \tag{4.4-2}$$

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$0.45\times10^{-9}(1/Pa)$、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$8.097\times10^{-2}(kg/m^3)$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$9.007\times10^{-6}(Pa\ s)$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。

$$\mu_{g0} = \mu_{20}\left(\frac{T_{20}+C}{T+C}\right)\left(\frac{T}{T_{20}}\right)^{3/2} \tag{4.4-3}$$

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。$\mu_{20}=8.8\times10^{-6}(Pa\ s)$、$T_{20}=293.15(K)$、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 4.4-1 にまとめた。緩衝材に関しては、表 4.2-6 に示した、排水過程の実測データを再現するものとしてこれまでの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。その他の材料に関しては、安藤ら[14]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 4.4-2、表 4.4-3 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 4.4-4～図 4.4-6 に示す。

表 4.4-1　水理物性一覧

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

※鋼製構造躯体の側部の有効間隙率は 0.50 とした

表 4.4-2　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 4.4-3　毛細管圧力曲線を表現する構成モデル

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

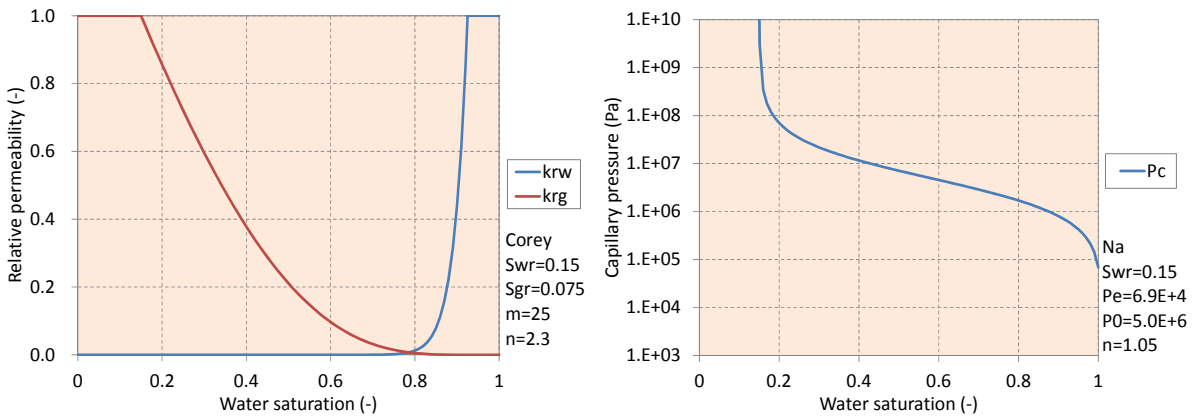


図 4.4-4　相対浸透率と毛細管圧力曲線（廃棄体、鋼製構造躯体、支保工、インバート）

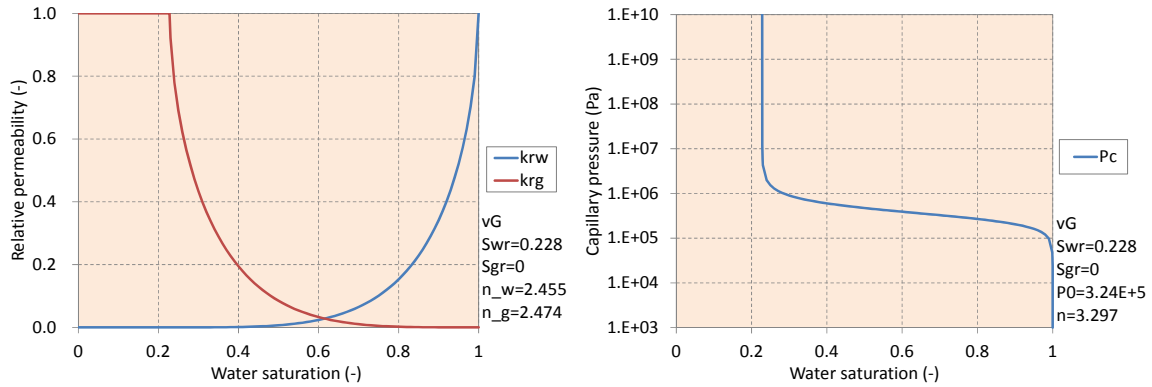


図 4.4-5　相対浸透率と毛細管圧力曲線（緩衝材）

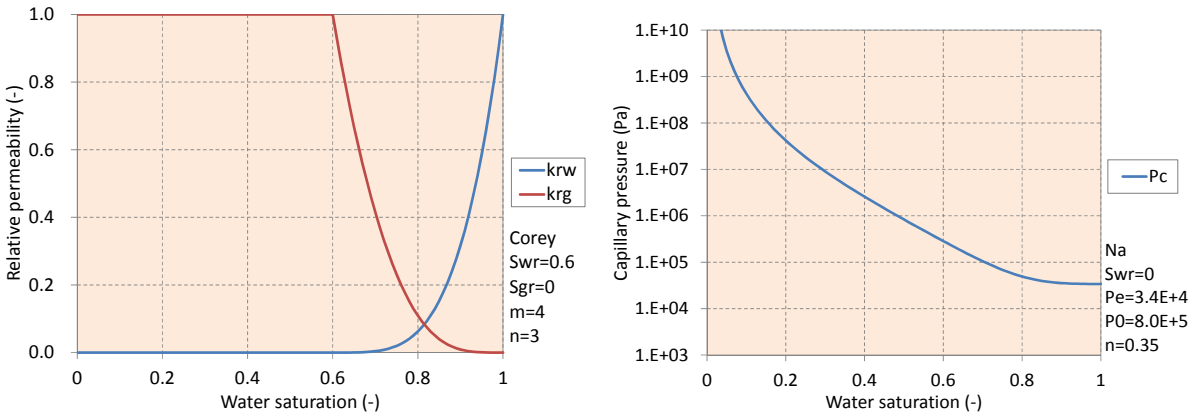


図 4.4-6　相対浸透率と毛細管圧力曲線（掘削影響域、岩盤）

3）初期・境界条件

初期状態はモデル全域において地表面に水位があるとした静水圧とし、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）に示されたものを設定した（図 4.4-8）

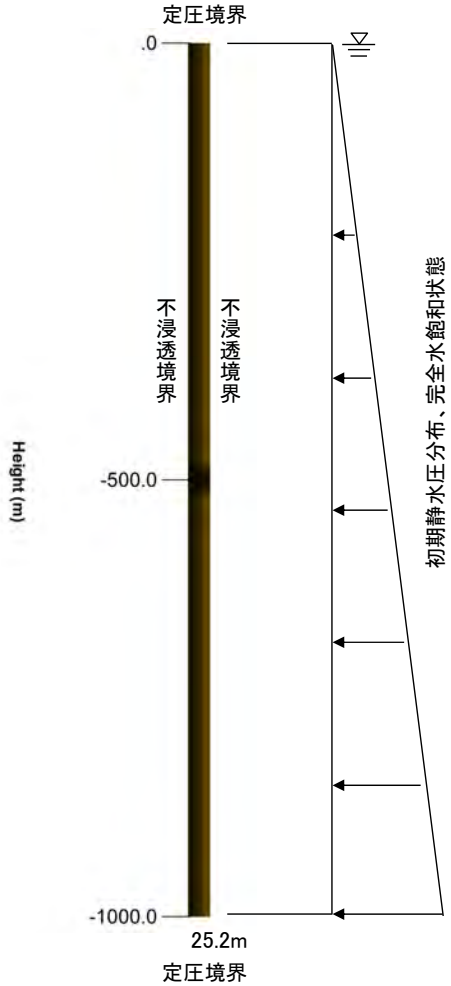


図 4.4-7　初期・境界条件

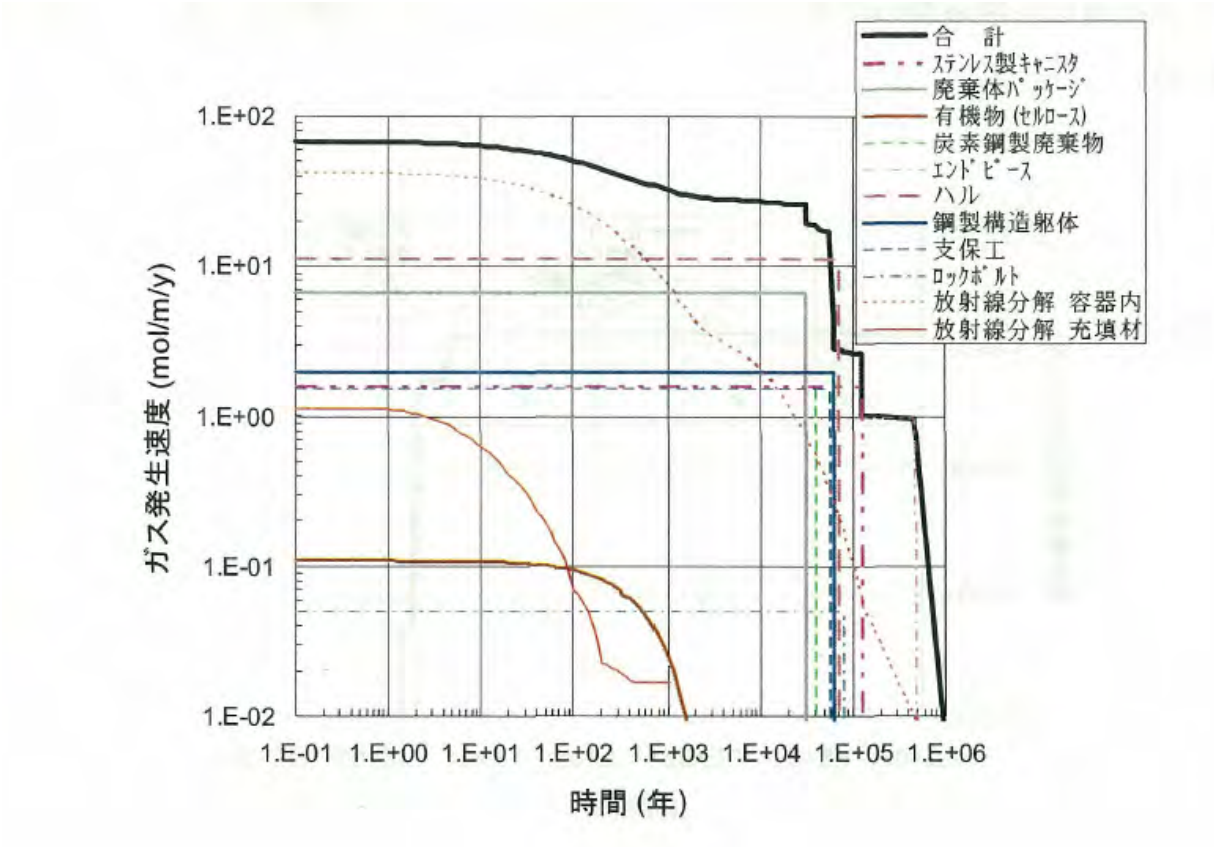


図 4.4-8　ガス発生速度の時間変化（出典：安藤ら [14]）

(4) 出力諸量

出力諸量は以下の通りとなる。

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

なお、評価点は図 4.4-9 に示す位置とした。評価点の位置は 2007 年/2010 年/2013 年の 3 つのモデルでほぼ同じ位置に設定した。

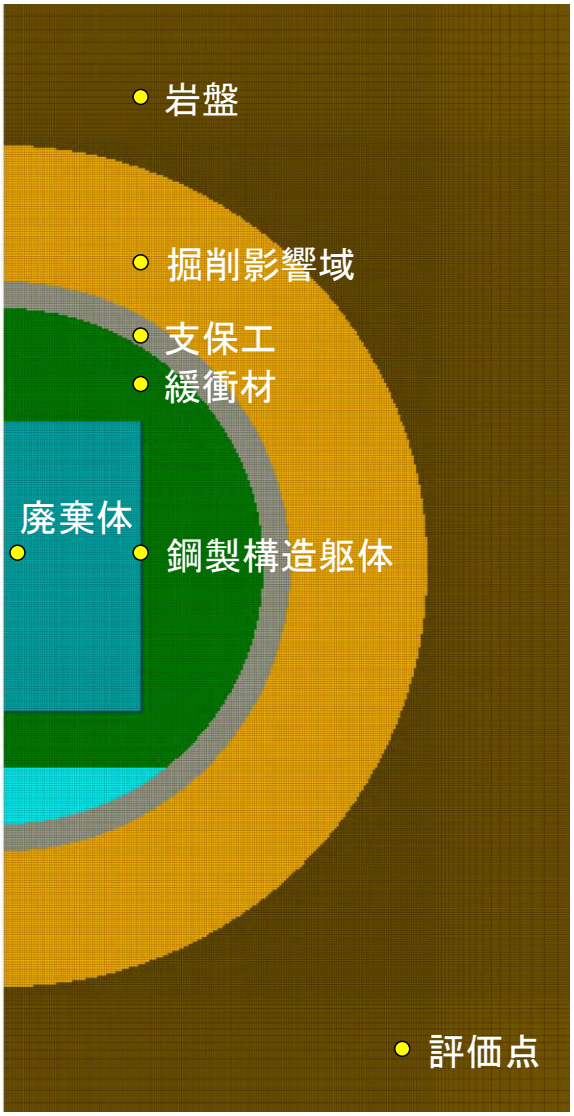


図 4.4-9　評価点位置図

4.5　時系列解析の実施

評価点におけるガス相圧力の時間変化および、坑道からの累積排水量の時間変化を図 4.5-1 に示す。比較のために 3 つの解析モデルの結果を同図中に示した。坑道からの累積排水量は、単位奥行長さ当たりの排水量を示している。また、ガス相圧力、水相飽和度および、流路拡幅箇所に対して、約 10 年後、30 年後、50 年後、100 年後、250 年後、500 年後、750 年後、1,000 年後における分布を 3 つの解析モデルで比較したものをそれぞれ図 4.5-2～図 4.5-4 に示した。

計算開始と同時に廃棄体内部からガスが発生し、それに伴い施設内の圧力上昇および、押出し排水量の増加が起こる。いずれのモデルでも、約 35～40 年後において廃棄体と構造躯体の圧力が急激に低下している。これは廃棄体右上隅角部の緩衝材において、2007 年、2010 年モデルでは上方向に、2013 年モデルでは上方向と右方向に流路拡幅が短期間で連続して発生したためと考えられる。その後、緩衝材内の流路拡幅範囲が徐々に拡大していき、緩衝材内のほぼ全域で流路拡幅が生じた後、約 1,000 年前後で坑道外へガスが透気する結果となっている。2007 年モデルでは約 34 年後に流路拡幅に伴う圧力低下が始まり、2010 年モデルでは約 35 年後、2013 年モデルでは約 39 年後となっている。これは、格子解像度が高くなるに従い、圧力低下が遅れる、つまり、流路拡幅発生が遅れることを示している。空隙損傷モデルでは、ガス移行時の上流側格子のガス相圧力が、下流側格子の水相圧力と圧力閾値の和を超えた時に流路拡幅が発生するとしている。通常、格子解像度が低ければ、格子間の差圧は大きくなり、空隙損傷モデルのスケール依存性が要因の一つとして考えられる。また、2007 年モデルと 2010 年モデルでは、約 35 年後以降から約 1,000 年後までにガス相圧力の短周期の変動成分が見られる。緩衝材内で流路拡幅が起こった際に、一時的に圧力低下が起こる。廃棄体内からガスは常に発生しているため、その後圧力が回復し、別の場所で流路拡幅が起こり、再度圧力低下を引き起こす。この現象を繰り返すために圧力の変動が起こっていると考えられる。2013 年モデルは格子解像度が高いため、各格子の流路拡幅時の圧力低下に対する影響が、他の 2 つのモデルと比較して相対的に小さくなるため、圧力の変動成分が見えていないと解釈される。細かい点では 3 つのモデルで結果の違いがあるものの、本検討の範囲内では、いずれの出力諸量に対しても、大きな傾向の相違は無いと言える。約 35～40 年後に発生した廃棄体右上隅角部の流路拡幅範囲は、2007 年・2010 年モデルと、2013 年モデルで異なっている。仮に、この流路拡幅発生時に支保工の透過性が高く、坑道外へ透気するような材料であった場合には、解像度の違いでガス移行経路が異なってくることが予想される。今後はパラメータの不確実性を考慮し、ガス移行経路の評価行っていく必要があると考えられる。

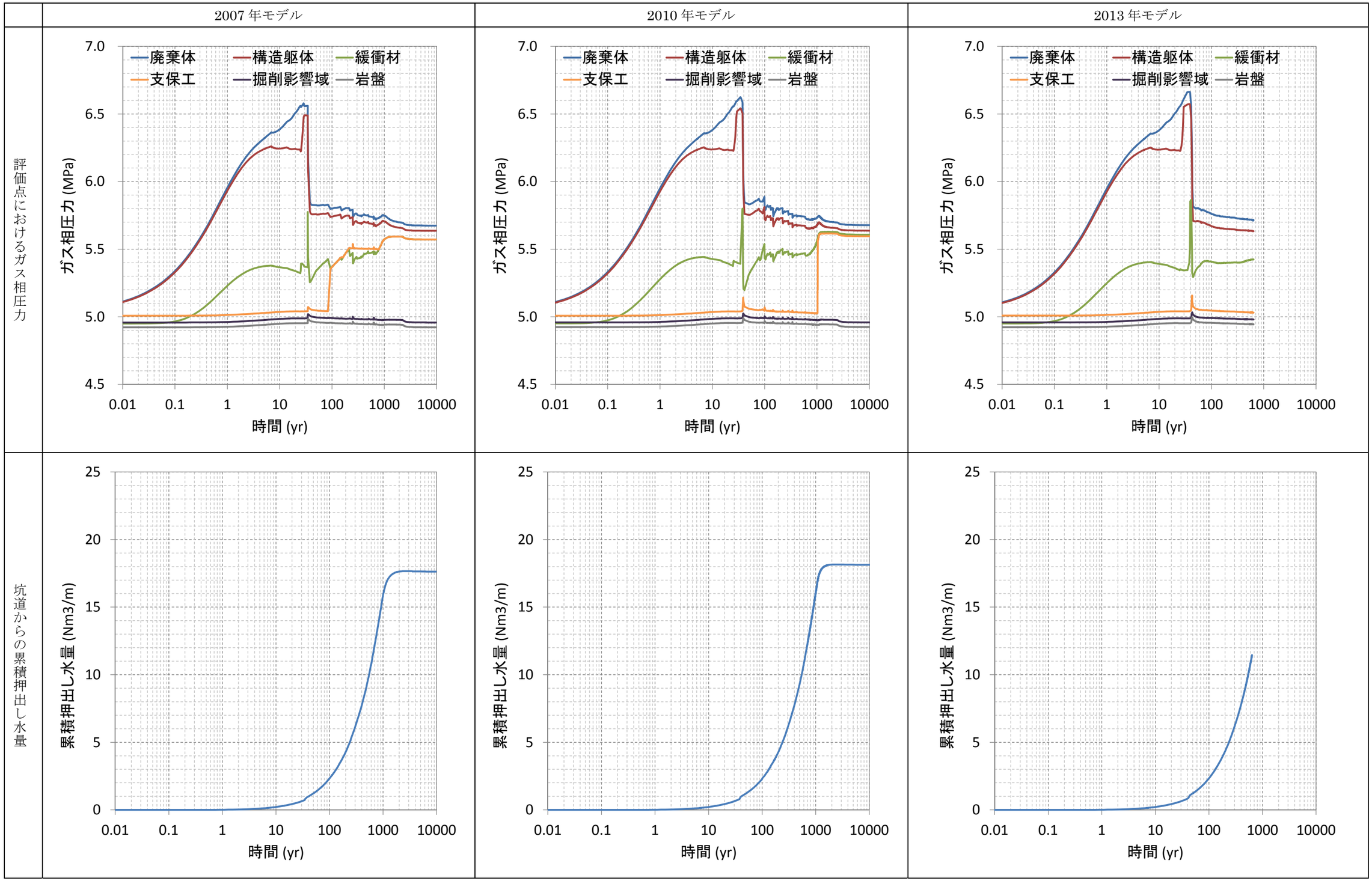


図 4.5-1　評価点におけるガス相圧力と坑道からの累積押出し水量の比較

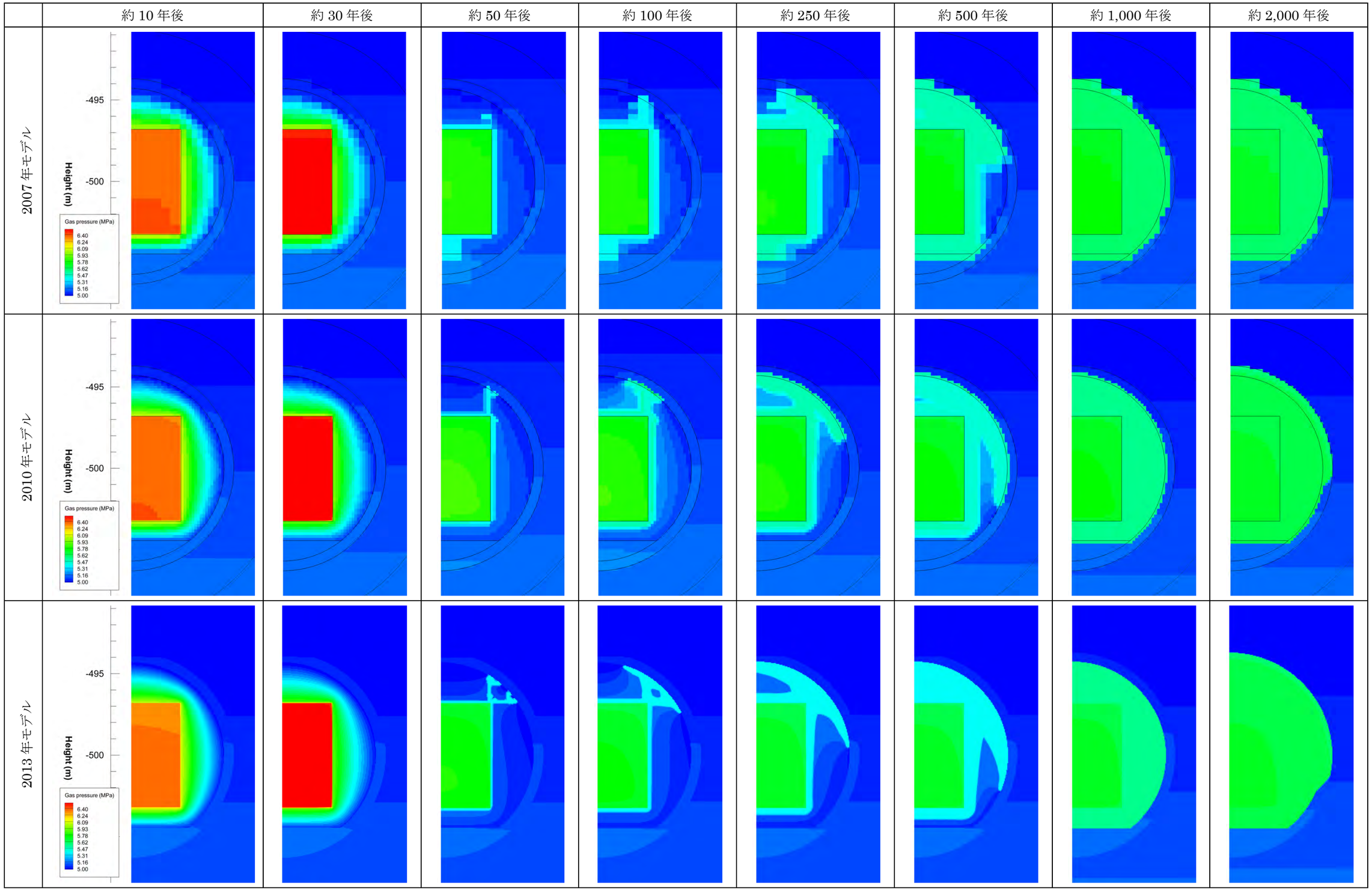


図 4.5-2　ガス相圧力の比較

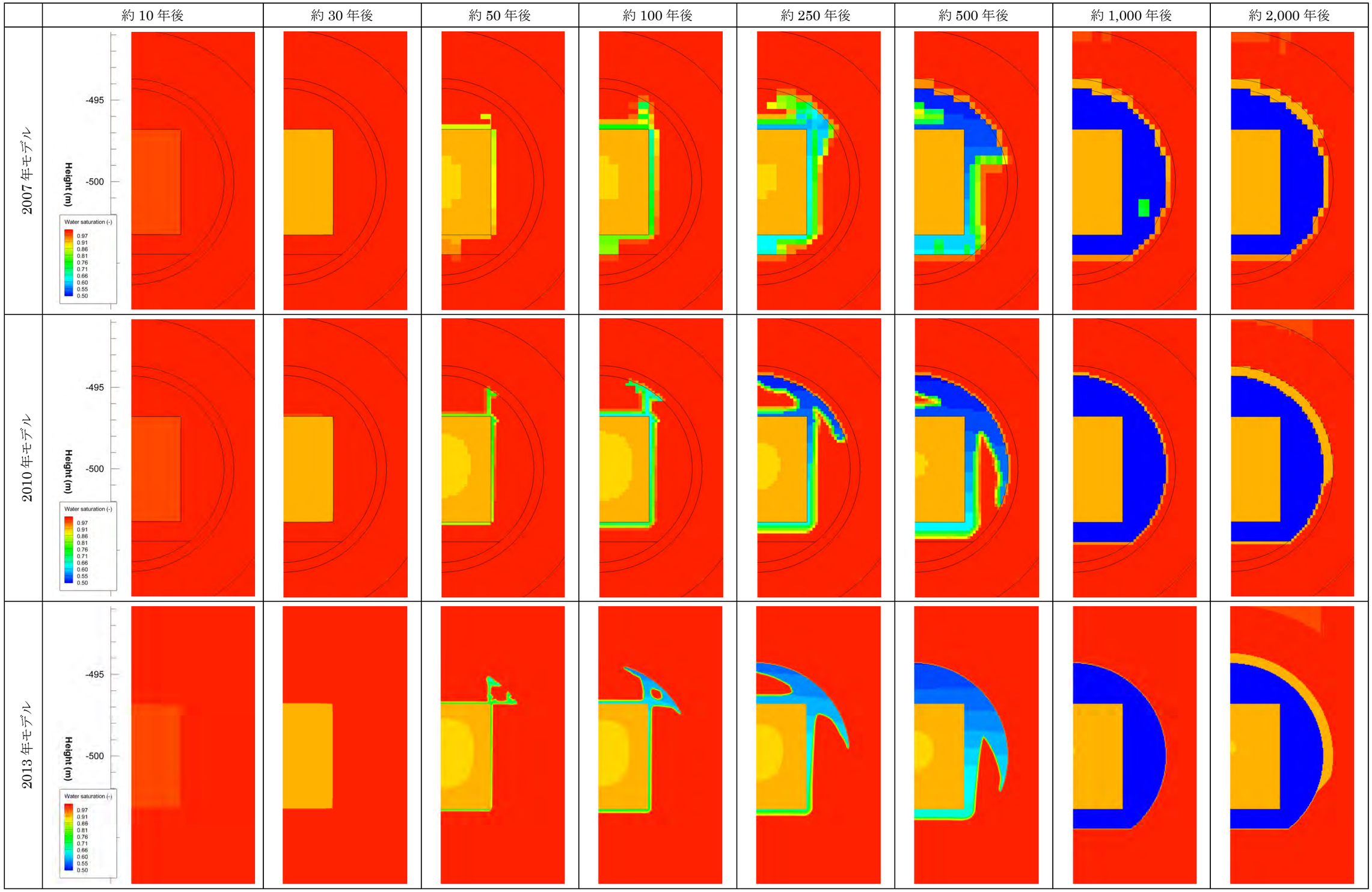


図 4.5-3　水相飽和度の比較

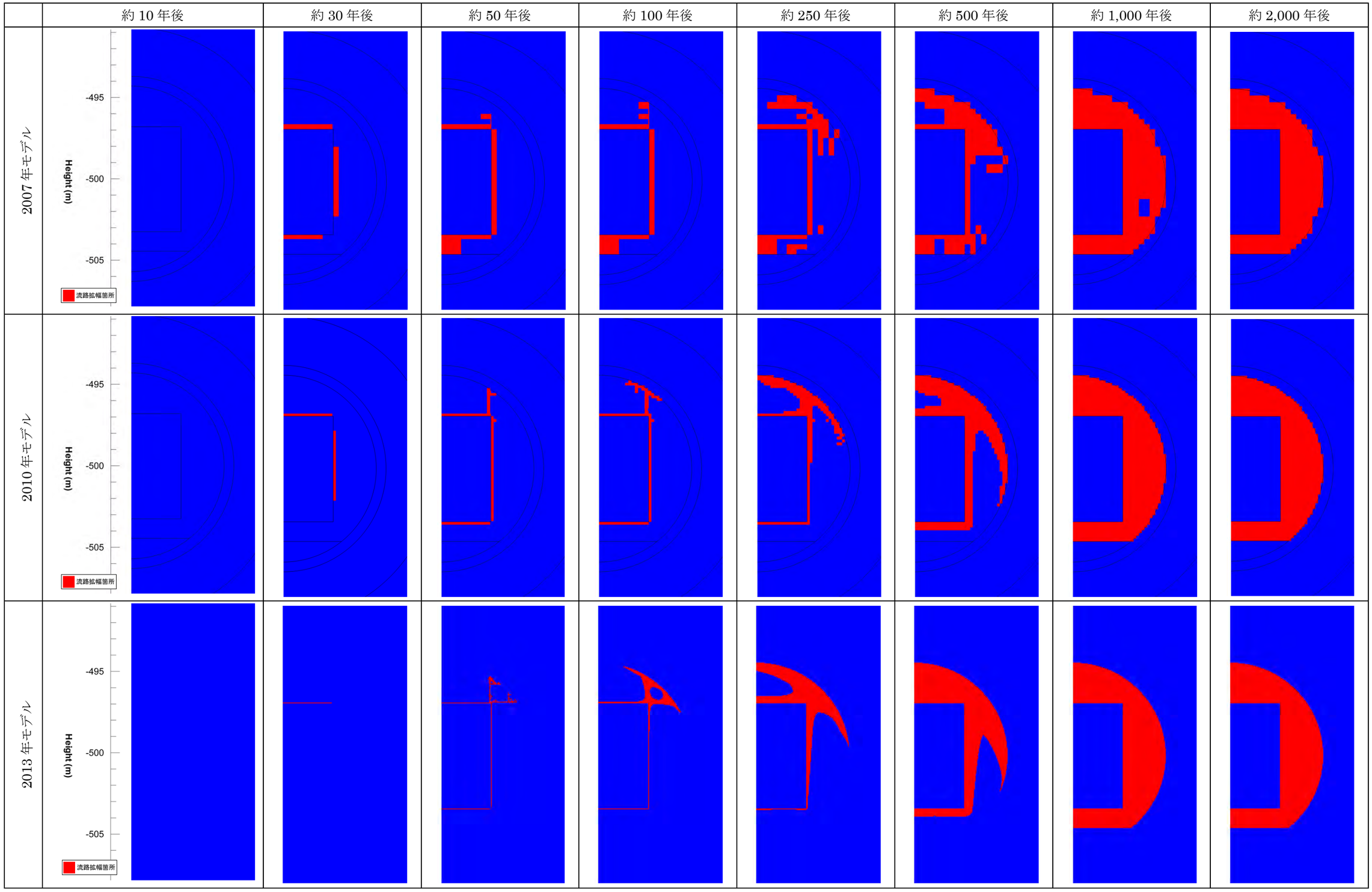


図 4.5-4　流路拡幅箇所の比較

4.6　まとめおよび今後の課題

4.6.1　ガス移行挙動解析ツールの高度化に係る解析検討

<u>圧力依存透過特性モデルによる検討</u>

- ✓ 「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―」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対象として、再現解析による 2 相流パラメータの同定を実施した。
- ✓ 再冠水フェーズを対象とした再現解析では、自動逆解析手法を適用し、実測データを良好に再現可能なパラメータを同定することができた。
- ✓ ガス注入フェーズを対象とした再現解析では、これまでに同定されている 2 パターンの 2 相流パラメータを用いて再現解析を実施した。その結果、再冠水フェーズで同定された絶対浸透率を適用した場合、実測された累積排水量を再現することは困難であった。再冠水フェーズからガス注入フェーズに移行する際の減圧過程によって供試体内部が影響を受け、透過性が上昇した等の要因が考えられた。
- ✓ そこで、再冠水フェーズで同定された絶対浸透率の約 1.6 倍の値を用いて再現解析を行った所、流路拡幅が起こらない場合に、実測データを良く再現することができた。この結果から、大型供試体を用いたガス注入試験時には、流路拡幅によって明確なガス透気経路は形成されておらず、通常の水・ガス 2 相流れによる移行形態であったことが示唆された。

<u>力学連成解析モデルによる検討</u>

- ✓ 既往の検討成果（平成 22 年度、H=200mm 供試体の再冠水過程の再現解析）において得られた 2 相流物性を用いたガス移行試験の再現解析（基本ケース）を実施したところ、ガス注入過程の累積排水量経時変化の実測値と解析値が乖離する結果となった。
- ✓ ガス注入過程における累積排水量経時変化の実測値と解析値とのマスバランスの整合を取る観点から、本年度の GETFLOWS 解析（ガス注入過程を良好に再現）で採用された 2 相流特性値等を用いたガス移行試験の再現解析（検討ケース）したところ、実測値と解析解とが概ね一致する結果となった。
- ✓ 基本ケースおよび検討ケースのガス注入過程においては、乾燥密度（間隙率）や平均有効応力が供試体注入側から排出側に向かって高い分布になっていることから（間隙率は供試体注入側から排出側に向かって低い分布となる）、注入側から排出側に向かって圧密されることで排出側の絶対浸透率が減少しつつ、圧密に伴う供試体内部の間隙水が排出される挙動を示しているものと考えられた。
- ✓ 検討ケースのガス注入過程における供試体排出側（モデル上面）Stress Path と CSL の関係を精査したところ、Stress Path はガス注入期間中を通して常に CSL を下回っているこ

とから、供試体内の応力状態としては注入側からの流体圧に起因した平均有効応力が増加するのみであり、せん断破壊等は生じず力学的に安定な状態を維持することから、ガスが侵入せずに破過が生じなかった要因として挙げられる。

- ✓ 本検討における力学連成モデルにおけるガス注入過程の再現解析では、供試体の変形と圧密による排水が支配的になる結果となったが、この要因として飽和時の供試体が比較的変形し易い力学パラメータを採用したことによると考えられる。
- ✓ 圧力依存透過特性モデルの検討結果で見られたようなガス侵入による排水挙動（供試体内の水・ガス二相流れによる移行形態）の再現に寄与するため、飽和時の変形に係わる力学パラメータ（P_0^*、κ_0、λ_0 等）を文献値では無く適切に見直す（あるいは試験によって取得する）ことで、ガス注入時の供試体の力学的挙動とガス移行挙動を再評価していくことが今後の課題として挙げられる。

4.6.2 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

- ✓ 平成 19-24 年度に実施した検討を通じて得られた 5 つの課題に対して、本研究における現状と国内外の最新動向の調査を実施した。
- ✓ 本調査結果をもとに、今後 5 箇年の研究内容として以下に示す 3 つの Work Package（WP）を設定した。
  - ➢ WP1：人工バリア中のガス移行挙動の現象理解
  - ➢ WP2：ガス移行データライブラリの運用
  - ➢ WP3：次世代モデリング技術開発
- ✓ 各 WP に対して目標成果と実施内容を示し、実施予定期間を提示し、それらの相互関係を明確にした。

4.6.3 TRU 廃棄物処分施設の概念モデルを用いた時系列解析

- ✓ 第 2 次 TRU レポートに示された典型的な TRU 廃棄物処分施設（廃棄体グループ 2、軟岩系岩盤（SR-C 準拠）、処分施設深度 500m）を対象とし、従来より精緻な高解像度 2 次元モデルを用いてガス移行解析を実施し、解像度の違いによる、施設内圧力や累積押出し水量および、ガス透気経路の相違を把握した。
- ✓ 解析モデルはこれまでの検討で構築した 2 つのモデル（2007 年モデル、2010 年モデル）と、本検討で構築した高解像度モデル（2013 年モデル）の 3 つを用いた。
- ✓ 本検討の範囲内では格子解像度の違いによって、流路拡幅による施設内圧力の低下時期や、

流路拡幅時の圧力の変化挙動等に多少の違いが見られたものの、いずれの出力諸量に対しても大きな傾向の相違は確認されなかった。

- ✓ 本検討において、処分施設材料のパラメータによっては、ガス透気経路が解像度の違いで変わってくる可能性が考えられ、今後はパラメータの不確実性を考慮し、ガス移行経路の評価行っていく必要があると考えられる。

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

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

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

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

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

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

[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] 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

[13] 山田淳夫, 足立有史, 千々松正和, 雨宮清, 金子岳夫, 伊藤裕紀, 庭瀬一仁, 2009. ベントナイトクニゲル GX の基本特性試験（その 4）静的力学特性に関する検討, 土木学会第 64 回年次学術講演会, pp.237-238.

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

第 5 章　ガス移行シナリオの拡張に関する検討

5.1　検討の概要

5.1.1　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した。

5.1.2　検討背景

本検討は、平成 19-24 年度にわたり実施した「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―」[3][4][5][6][7][8]の成果をもとに、より安全評価へ資するシナリオ構築を展開することを目的として行うものである。

平成 24 年度までの「ガス移行挙動の評価」の検討では、TRU 廃棄物処分に係わるガス移行挙動評価手法の構築として、周辺岩盤を含む人工バリアの時系列状態変遷とそれらが有する不確実性を考慮したガス挙動評価シナリオを設定すると共に、安全評価シナリオ設定のための手法を併せて整備した。シナリオ構築の前提となる時系列状態変化表に記述した内容については、第 2 次 TRU レポート[1]を用いた FEP リストを基本に最新の知見を集約し、根拠資料や統合 FEP 関連図として取りまとめ、さらに今後の方針を探るための指標となる資料を作成した。また、予備的な安全評価に至るまでの課題とその対応策について取りまとめた。時間的・空間的に増大する不確実性には、シナリオ・モデル・パラメータを組み合わせ、必要に応じ保守性を担保しながら対応する方策が考えられ、さらには要素試験と工学規模システム試験を実処分スケールでの境界条件・形状・寸法効果などを考慮して組合せることや、それらの結果を再現するモデルの整備が必要であることを示した。なお、昨年度の成果内容については報告書 にて参照できる。

平成 25 年度の検討では、24 年度までの検討成果を受け、「ガス移行挙動の評価」 5 ヵ年計画の初年度として、以下の検討項目を実施した。

5.2　検討項目と検討概要

本検討では、以下の項目を実施した。

5.2.1　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

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。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

本検討では、TRU2 次レポートおよび NUMO の地層処分低レベル廃棄物の処分概念を対象に、対象とする廃棄物分類、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。その結果よりグループ 3 を選定し、状態変化表、安全機能の展開表、統合 FEP の関連図を作成した。

(2) シナリオ整理シートの作成

本検討では、(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、シナリオ整理シートを作成した。

(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

本検討では、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。

5.2.2 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した。なおその際、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(スイス Nagra の GAST プロジェクトなどの成果)も参考とした。

5.3　検討結果

5.3.1　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) TRU 廃棄体の分類と処分場レイアウト

現状での TRU 廃棄体の分類と関連する処分場レイアウトについては、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」）「TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物書ブロック研究開発取りまとめー、2005 年 7 月（以下「TRU 第 2 次レポート」と称す）および原子力発電環境整備機構（以下、「原環機構」と称す）「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」、2011 年 1 月（以下、「NUMO レポート」と称す）に共通の概念が提示されている。NUMO レポートの分類および処分場概念は、「TRU 第 2 次レポート」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。

NUMO レポート[2]に記述された TRU 廃棄物のグループ分類と特徴を図 5.3-1 示す。グループ 1,2 については全量地層処分を、グループ 3,4 については一部を地層処分することとされている。

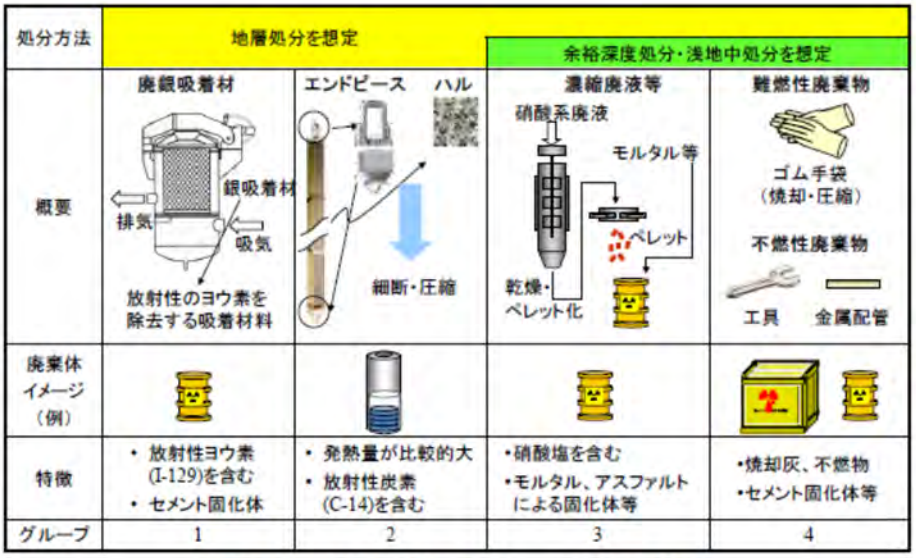


図 5.3-1 TRU 廃棄物のグループ分類と特徴（NUMO レポート）

最終処分計画（経産省,2008）においては、表 5.3-1　に示すように、現在の再処理施設など

の操業計画から勘案して見込まれた廃棄物の物量（約 18,100m³）を対象とし、熱発生、放射能濃度等の観点から対象廃棄物を以下の４グループに分類している。これらの物量は、「NUMO レポート」に引用されている。

表 5.3-1　地層処分の対象となる低レベル放射性廃棄物の分類と発生推定量（NUMO レポート）

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	

2）各グループの人工バリア概念

ぞれぞれのグループに対する人工バリア概念は、図 5.3-2 に示されている。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 はセメント系の充填材が設置される。

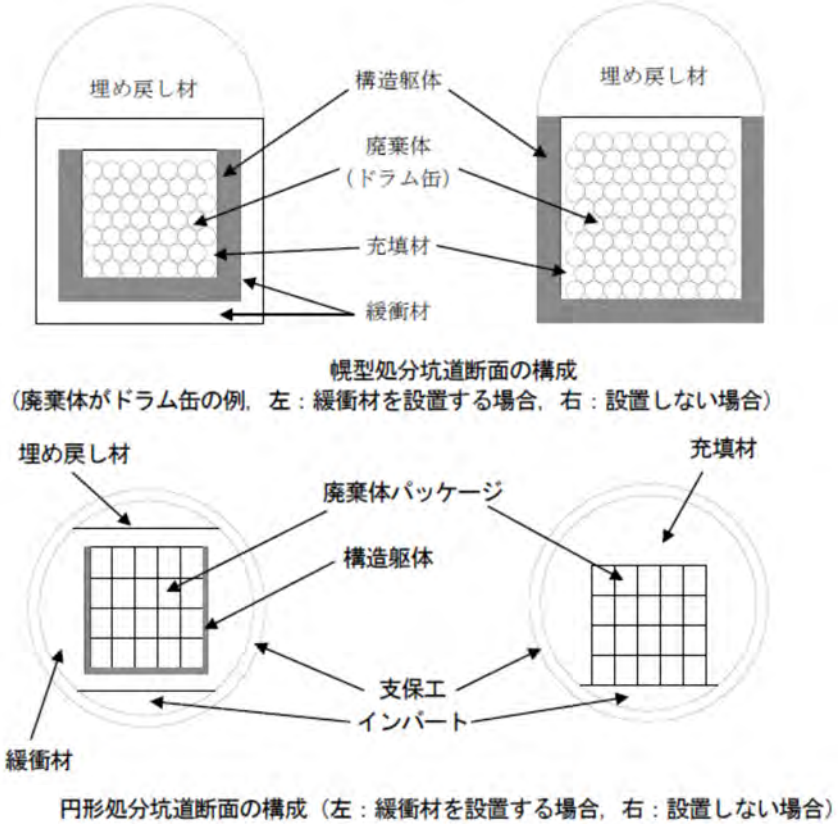


図 5.3-2 TRU 放射性廃棄物処分の人工バリア概念（NUMO レポート）

図 5.3-2 の人工バリア構成部材について、上記 NUMO レポートにおいて以下のように定義さ

れている。

- 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 5.3-2 のように記述されている。閉鎖後の長期安全性に関しては、グループ 1,2 に適用するベントナイト緩衝材が安全機能上の設計を行うことになっているが、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、峡部に浸透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を期待しているが、設計上はそのための考慮をしないとしている。

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、結果的に核種の溶出を抑える機能を果たしている。

表 5.3-2 人工バリア構成要素の機能の整理（NUMO レポート）

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	容器ﾊﾟｯｹｰｼﾞ					
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

3) 処分場概念

TRU 放射性廃棄物処分場の概念として、グループ別に軟岩と硬岩を対象に想定されている処分坑道断面を、グループ 1 および 2 を図 5.3-3、グループ 3 および 4 を図 5.3-4 に示す。

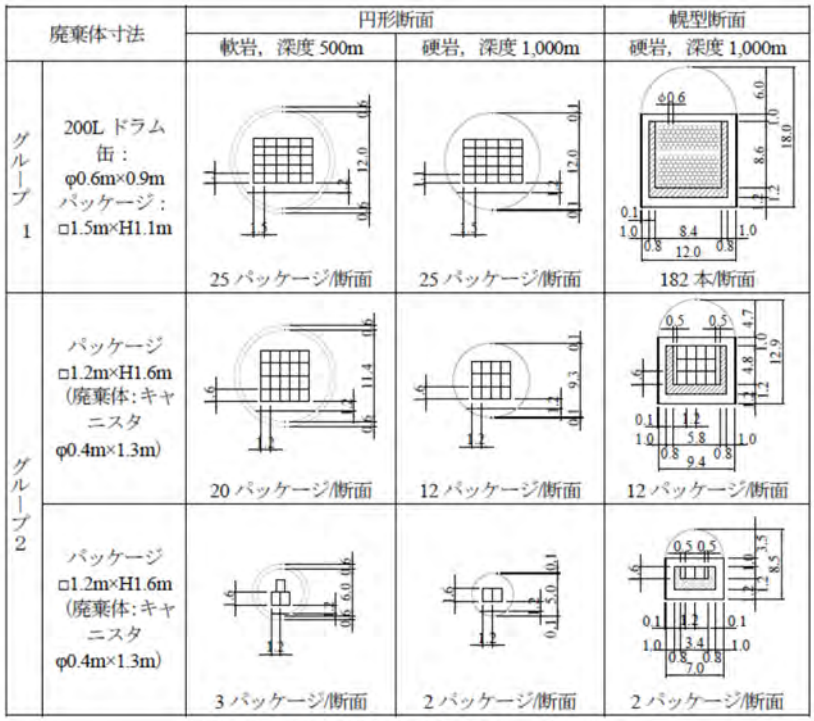


図 5.3-3 グループ 1,2 における処分坑道標準断面（NUMO レポート）

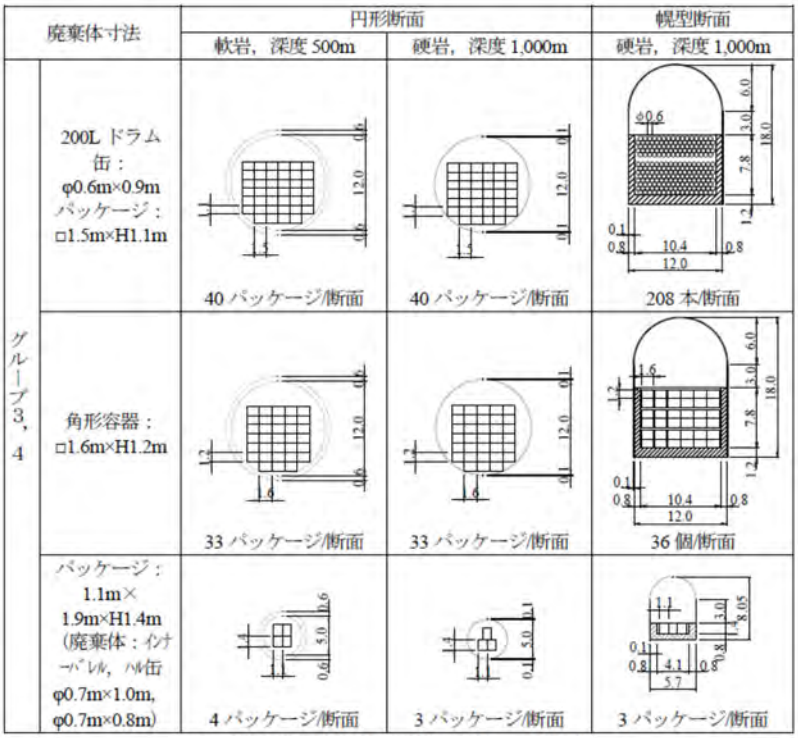


図 5.3-4 グループ 3,4 の処分坑道標準断面（NUMO レポート）

それぞれの処分坑道断面の施工時安定性と人工バリア構成および廃棄体の熱発生の影響を考慮

し、各グループ別にレイアウトした処分場概念の一例を図 5.3-5 に示す。

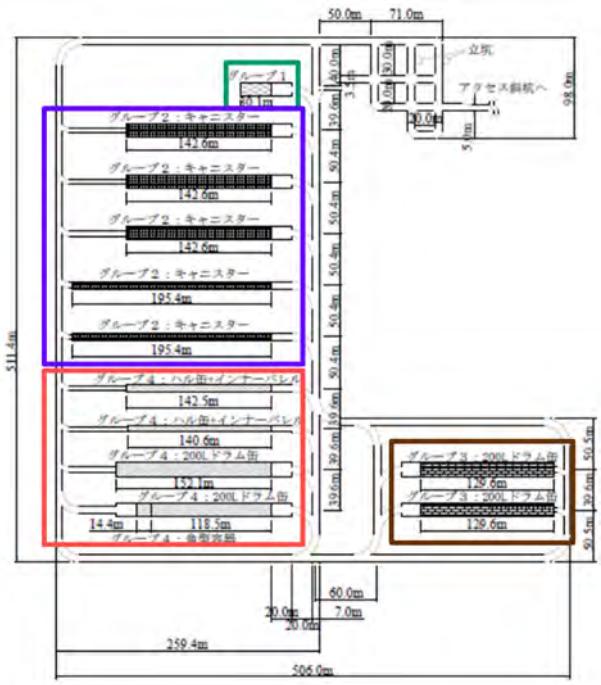


図 5.3-5　堆積岩における TRU 処分場レイアウト例（NUMO レポート）

4）検討の対象の選定

昨年度までのグループ 2 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、今年度からは、セメント系材料を主に使用するグループ 3 および 4 に着目し検討を展開した。

本年度はそのうち、以下の理由でグループ 3 を選定することとした。

- グループ 3 および 4 は、これまで検討を進めてきたグループ 2 とは異なりベントナイト緩衝材を用いない概念である
- モルタルおよびコンクリートを主要な充填材として計画している。
- ガス移行挙動については TRU 第 2 次レポート、NUMO レポートでも検討されていない
- 廃棄体の形状が鋼製の 200L ドラム缶が主であるため、水素ガス発生が多く見込まれる
- 廃棄物には多くの有機物が含まれることから、有機物の分解等により多くのガス発生が見込まれる

a. グループ 3 における人工バリア概念

グループ 3 については、軟岩と硬岩を対象に図 5.3-4 に示す 3 種類の処分坑道概念が提示されている。本検討では、グループ 2 での検討と対比することも考慮し、堆積軟岩での円形断面を検討ケースとして採用することとした。

定置される廃棄体は、図 5.3-6 に示すように、200L ドラム缶を 4 体収納した鋼製パッケージであり、これを図 5.3-7 に示すように 1 断面あたり 40 パッケージ定置される。

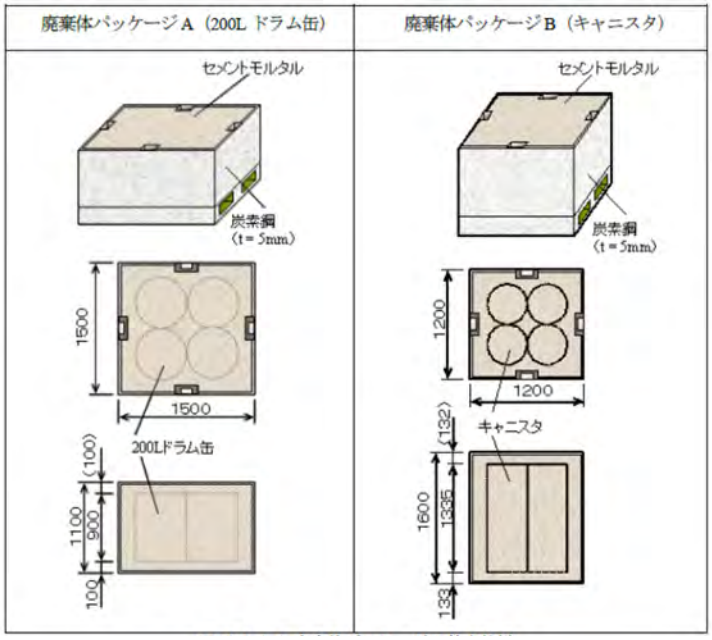


図 5.3-6 ドラム缶収納の鋼製箱型容器：廃棄体パッケージA（NUMO レポート）

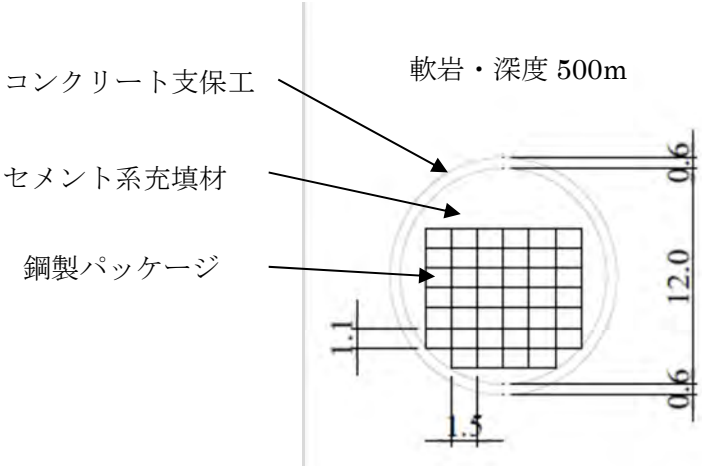


図 5.3-7　グループ 3 における堆積軟岩を対象とした処分坑道断面（NUMO レポートに加筆）

b. ガス発生源

グループ 3 でのガス発生源と種類は、表 5.3-3 に示すとおりであり、「廃棄体」、「ドラム缶（鋼製）」、「炭素鋼廃棄体パッケージ」、「コンクリート支保工（鉄筋）」より、放射性および非放射性ガスの発生が予測される。これらの発生速度および発生量については、別途検討が必要となる。

表 5.3-3　TRU 放射性廃棄物グループ 3 におけるガス発生源と種類

発生源	ガスの種類	発生様式
廃棄体	CH_4, ^{14}C,CO_2 など （放射性／非放射性）	アスファルト、プラスティック、レジン等の有機物の分解
ドラム缶	H_2	鉄の腐食
炭素鋼廃棄体パッケージ	H_2	炭素鋼の腐食
コンクリート支保工	H_2	鉄筋の腐食

(2) シナリオ整理シートの作成

シナリオ整理シートは、昨年度までの検討プロセスを反映し、以下の手順で作成した。

① グループ 3 を対象に人工バリア構成要素の状態変化表を作成。

② 状態変遷表の中で、ガス発生とガス移行媒体の状態に着目し、関連する FEP を統合 FEP として整理。

③ ガス挙動に係る統合 FEP の着目する時間枠で結合し、関連図を作成。

④ 統合 FEP 関連図を用い、時系列的な変遷を考慮してシナリオ整理シートを作成。

1) グループ 3 を対象とした状態変化表の作成

グループ 3 の特徴を考慮し、ニアフィールドの状態変化について、以下の仮定を設定した。

・処分場は、支保工の影響を加味するために、堆積岩中地下 500m に設置されると仮定。

・処分坑道内のシステムを図 5.3-8 に示す。またそれぞれに期待される安全機能については人工バリア構成要素の機能の整理表（表 5.3-2）を参照し、以下に設定した。

－コンクリート支保工：埋戻しまでの岩盤安定性確保、外周に設置するドレーンシステム、止水シートによる地下水の処分坑道内浸透防止

－下部・側部・上部の埋戻し（コンクリート）：廃棄体パッケージと支保の間の空間の充填と廃棄体パッケージの保持、熱伝達、応力伝達

－廃棄体パーケージ間の充填モルタル：応力緩衝性、熱伝導性、低透水性、核種移行抑制

－炭素鋼製廃棄体パッケージ：強度・変形特性、核種閉じ込め性、水密性、熱伝導性

－200 リットルドラム缶：強度・変形特性、核種閉じ込め性、水密性、熱伝導性

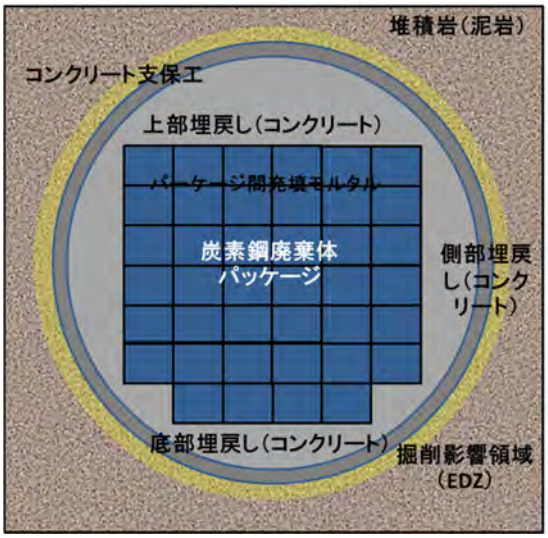


図 5.3-8 グループ 3 の処分坑道内の構成

・状態変化を考慮する段階として、上記の構成要素の機能や役割を考慮し以下の 5 段階を設定した。

① 処分坑道の建設段階
② 廃棄体パッケージ設置・埋戻し段階
③ 廃棄体での核種閉じ込め段階
④ 廃棄体から核種放出開始段階
⑤ 天然バリアによる核種移行抑制段階

a. 処分坑道の建設段階（①）

地下 500m の堆積岩中に、直径約 18m の処分坑道を掘削した段階での状態を図 5.3-9 に示す。この段階での重要なことは、廃棄体パッケージを定置する環境への地下水浸入を防護することとなる。堆積岩（泥岩を仮定）であることから、基本的に低透水性であり、周辺の地下水流量は小さいと想定されるが、支保工外周に設置するドレーンシステムと止水シートを用いて内部への地下水浸透を防ぐ仕組みを導入している。

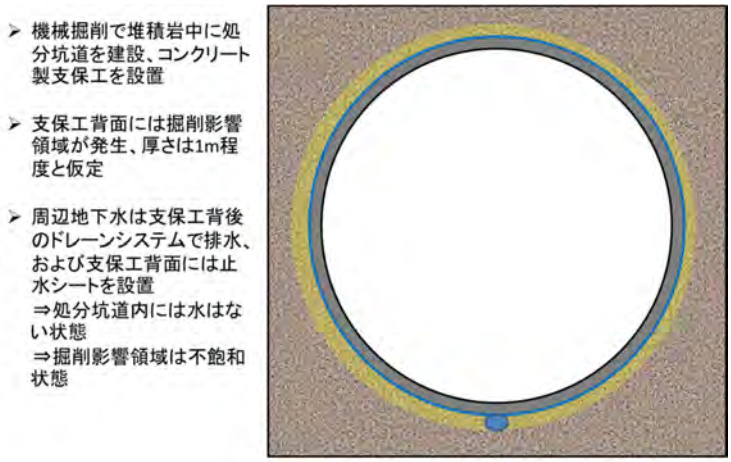


図 5.3-9 処分坑道掘削段階での状態

b. 廃棄体パッケージ定置段階（②）

処分坑道の建設終了後、坑道内には、底部と側部に廃棄体パッケージ定置のための埋戻しコンクリートが打設される。このコンクリートには、自立性とともに、廃棄体パッケージを保持する強度特性が必要となる。この段階での状態を図 5.3-10 に示す。処分坑道内への地下水の浸透は防御されているが、コンクリート打設等による水の浸出など、処分坑道内は高湿度環境におかれる可能性があり、炭素鋼廃棄体パッケージの表面では部分的に腐食が始まる。坑道内は酸化状態であり、腐食による水素ガスの発生はない。廃棄体とともに地表から多くの微生物が持ち込まれる。

廃棄体パッケージの定置後、それぞれの空隙には流動性の高いモルタルが充填される。上部の空隙はコンクリートが打設される。これら一連の作業により、処分坑道はモラリスとしての状態に仕上げられ、基本的には間隙はなくなる。埋戻し作業に伴い、ドレーンシステムは停止され、下部のドレーンは埋め戻される。このことで、周辺から処分坑道内への還元性地下水の浸透が開始する。

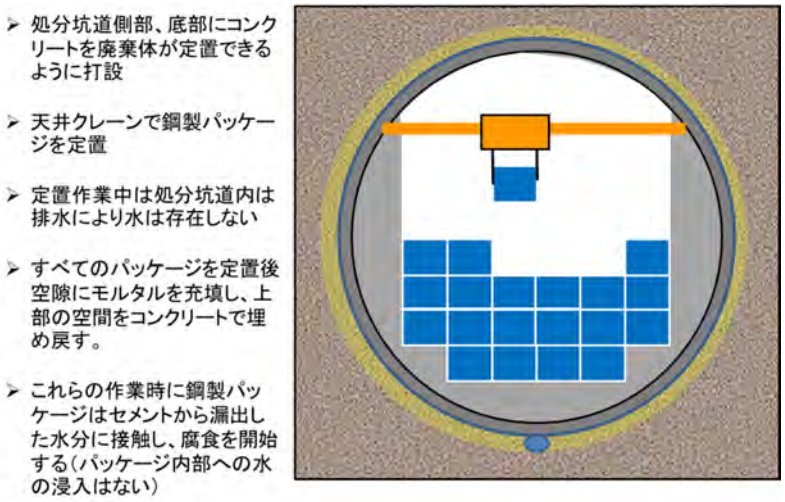


図 5.3-10 廃棄体パッケージ定置段階

c. 廃棄体での核種閉じ込め段階（③）

処分坑道が閉鎖され、ドレーンシステムが停止した段階から処分坑道内に周辺岩盤から還元性の地下水の浸透が開始される。浸透した還元性地下水は低透水性の充填モルタルを通過し、炭素鋼廃棄体パッケージと接触する。この地下水は、セメント材料から溶出した Ca イオンを多く含み、高 pH 環境が形成されている。炭素鋼表面では全面腐食が始まり、水素ガスが発生するが、還元性と高 pH 環境下での腐食速度は抑制される。NUMO の TRU レポートによれば、廃棄体パッケージの厚さは 50mm と計画されており、還元雰囲気化での腐食速度を 40μ/年とすると、約 100 年で閉じ込め機能を喪失することになり、パッケージ内部に地下水が浸透し、ドラム缶の腐食が開始する。この間、金属の腐食膨張で充填モルタルおよび埋戻しコンクリートには亀裂が発生すると推定される。図 5.3-11 にこの段階での状態を示す。

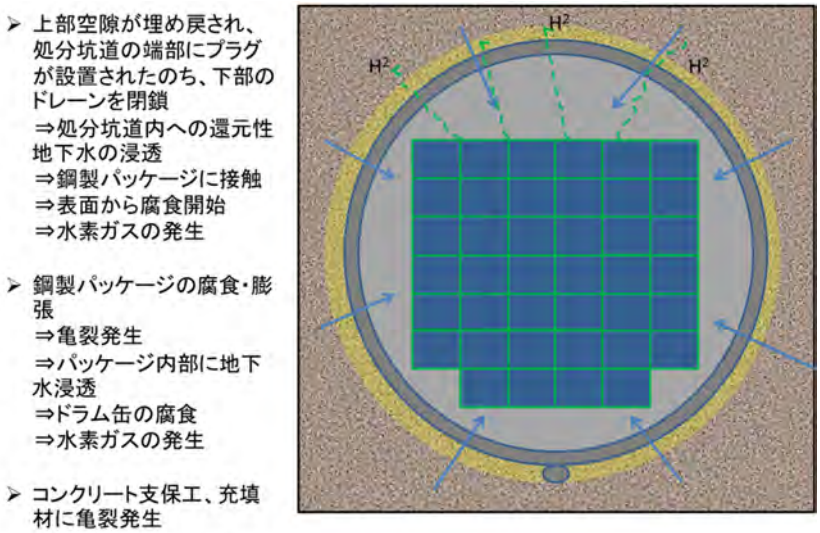


図 5.3-11 廃棄体での核種閉じ込め段階

d. 廃棄体からの核種放出段階（④）

TRU 廃棄物を格納しているドラム缶が腐食により、その閉じ込め性を喪失したのち、内部の放射性核種が浸透地下水に溶出する。図 5.3-12 にこの段階での状態を示す。

ドラム缶周辺の水理環境は、支保工、埋戻しコンクリートには亀裂が発生し、周辺岩盤と同様な移流場となっている。また、廃棄体周辺の充填モルタルも廃棄体の腐食膨張により亀裂が発生するが、腐食生成物の侵入により、亀裂幅は小さく、低透水性は維持される可能性もあるが、本状態設定では、周辺のコンクリートと同様、移流場と想定する。放射性核種は、処分坑道内を移流・拡散・分散で移行する。鉄の腐食により発生する水素ガス、および有機物の分解等による放射性ガス（^{14}C, CH_4）は、地下水に溶存する、あるいは周辺の亀裂に侵入しガス状で移動する可能性がある。この場合、ガスは媒体中の不飽和空間に蓄積される、あるいは処分坑道に沿って存在する比較的高い透水性の領域をガス状あるいは二相流で移行する可能性がある。

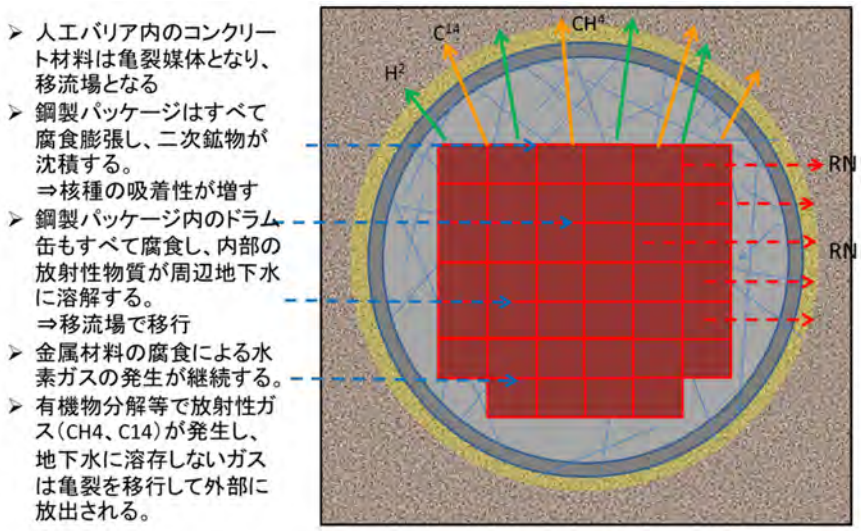


図 5.3-12 廃棄体から放射性核種が処分坑道内に放出される段階

e. 天然バリアでの放射性核種の移行抑制段階（⑤）

前段階で処分坑道内での放射性核種を閉じ込める機能は喪失したと仮定し（実際は、コンクリート材料が生み出す化学環境、鉄の腐食生成物による核種の吸着などが継続すると想定される）、放射性核種の大部分は移流により天然バリアに放出され、天然バリアが核種移行を抑制する段階に移行する。この段階での処分坑道内の状態を図 5.3-13 に示す。この段階においても、鉄成分が残り、量は少なくなるものの、ガスは発生すると推定される。

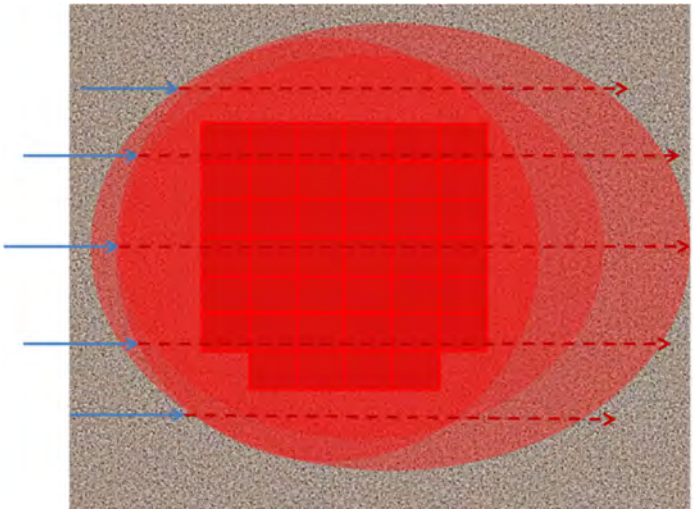
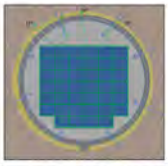
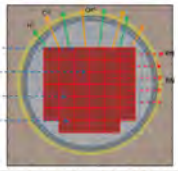
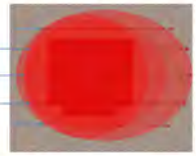


図 5.3-13 天然バリアによる放射性核種の移行抑制段階

上記 5 段階での状態変化段階を検討・整理した結果を表 5.3-4 に示す。本表では、横軸に状態変遷の時間軸、縦軸に処分坑道内の構成要素を配した。時間枠については、グループ 2 と異なり、廃棄体パッケージおよびドラム缶の初期の閉じ込め性は期待されているが、ベントナイト緩衝材がないこともあり、放射性核種の移行抑制への期待は、セメント系材料がもたらす化学的な核種移行抑制作用（高 pH 環境と腐食生成物による核種の吸着）のみとなる。これらの作用を時間軸としてどの程度期待するのかは明確ではないため、本検討では、数万年程度を仮定して状態変遷を考慮した。

表 5.3-4 グループ 3 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					
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 ℓ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

2) 統合ＦＥＰの関連図の作成

処分坑道の構成部材を対象にガス移行と核種移行に係る FEP を対象に、着目する部材内での挙動に着目して統合 FEP として集約し、ガス移行と核種移行の関連を考慮して統合 FEP 連関図としてとりまとめた。グループ 3 では、放射性核移行抑制に関わる基本的な機能として、廃棄体パッケージ周辺に充填する低透水モルタル、炭素鋼廃棄体パッケージによる物理的閉じ込め、ドラム缶での物理的閉じ込め、核種や放射性ガスがドラム缶から放出されたのちの化学的な環境、腐食生成物による核種吸着性が想定される。

シナリオ整理シートの再評価を行うにあたり、安全評価で考慮する、

① 廃棄体パッケージ及びドラム缶での核種閉じ込め機能

② 処分坑道内の構成物での放射性核種移行抑制機能

の 2 つの機能に着目して統合 FEP の関連図を作成した。

a. 廃棄体パッケージの核種閉じ込め期間

図 5.3-14 に閉鎖後から廃棄体パッケージが物理的に健全な期間の FEP 連関図を示す。閉鎖後から廃棄体容器が健全な期間とは、表面では還元地下水との接触により腐食に伴う水素ガスが発生するものの、放射性核種の物理的閉じ込め性を維持する期間とする。埋戻し後、処分坑道に残存した空気は、浸入した地下水に溶解していく。還元腐食で発生したガスは、量が少ない段階では、処分坑道部材内の間隙水に溶解し、間隙水の動きに伴い拡散・移流で移動する。支保工の一部には亀裂が発生し、鉄筋が腐食することで水素ガスが発生する。ガスは亀裂内をガス状で移行する。

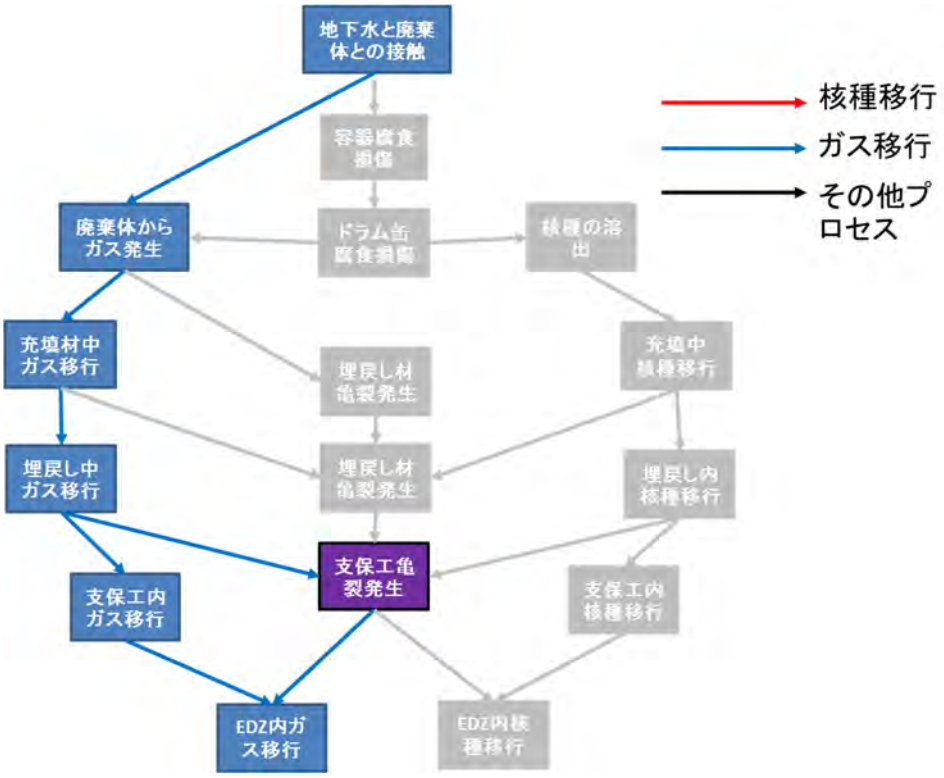


図 5.3-14 埋戻し後廃棄体パッケージが閉じ込め機能を維持している期間における FEP 関連図

b. 処分坑道内の部材による放射性核種の移行抑制の期間

廃棄体パッケージおよびその中に格納されている鋼製ドラム缶が腐食により、放射性核種の閉じ込め機能を損傷したのち、ドラム缶内に還元でかつ高 pH の地下水が浸入し、廃棄物と接触することで、放射性核種の溶出、有機物の分解による ^{14}C や CH_4 のような放射性ガスが発生する。地下水に溶出した放射性核種は、処分坑道内のさまざまな媒体中を移流として移動していく。一方放射性ガスは、腐食により発生した水素ガスとともに媒体中の亀裂部に存在する不飽和領域に蓄積し、ガス圧の増加とともに不飽和亀裂内を外部に向けてガス状で移行すると推定される。処分坑道内の地下水の動きは移流場であるが極めて遅くなっている（岩盤は多孔質媒体であり、処分坑道内は亀裂媒体となることから実流束は極めて小さい）。

放射性核種の移行の観点からすると、地下水に溶存した核種の移行は極めて遅く、また腐食生成物に吸着されたりすることで、処分坑道内に多くはとどまる可能性がある。一方、ガス（放射性、非放射性）は、媒体中の不飽和亀裂を地下水より早く移動し、停滞することは少ないものと推定される。これらの FEP の関連を図 5.3-15 に整理して示す。

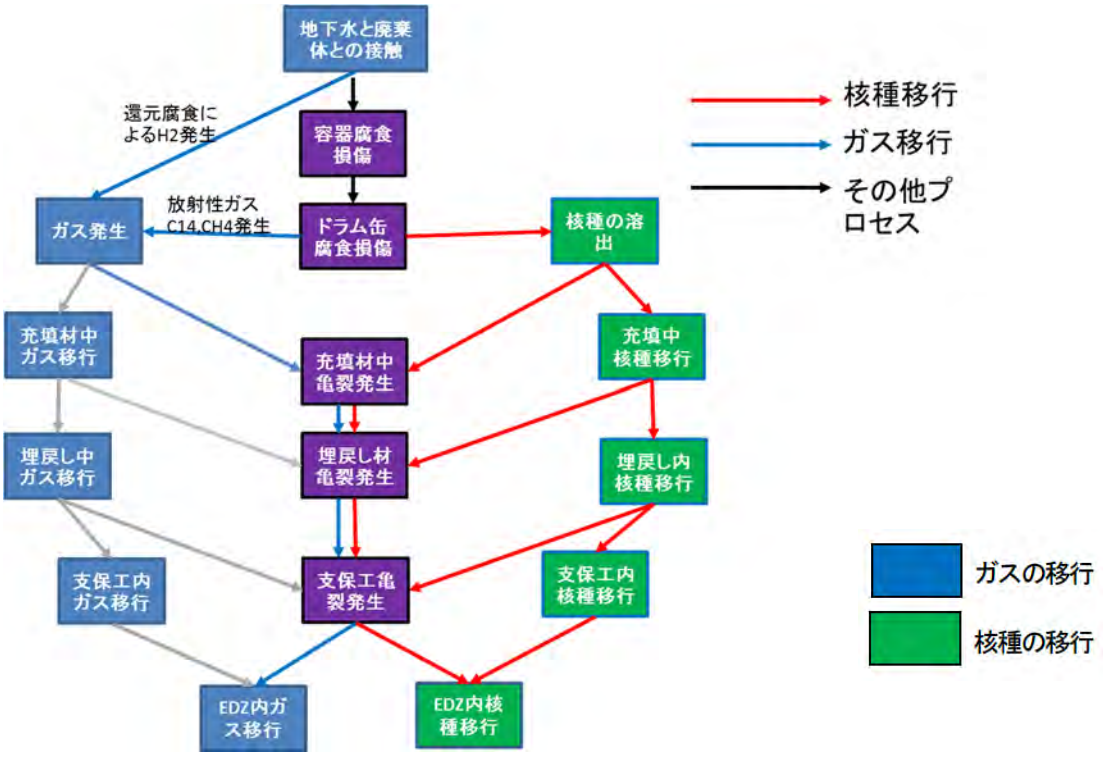


図 5.3-15 処分坑道内の部材と環境による核種の移行抑制期間における FEP 関連図

3) シナリオ整理シートの見直し

時系列状態変化表および安全機能の展開に基づいて再区分した統合 FEP 関連図を用いて、安全評価の観点から、シナリオ整理シートにおける評価期間を次の 2 つに区分した。

① 廃棄体パッケージ、ドラム缶による放射性核種の閉じ込め期間

② 処分坑道内の構成部材による核種の移行遅延期間

上述した評価期間に基づき見直しを行ったシナリオ整理シートを図 5.3-16 示す。

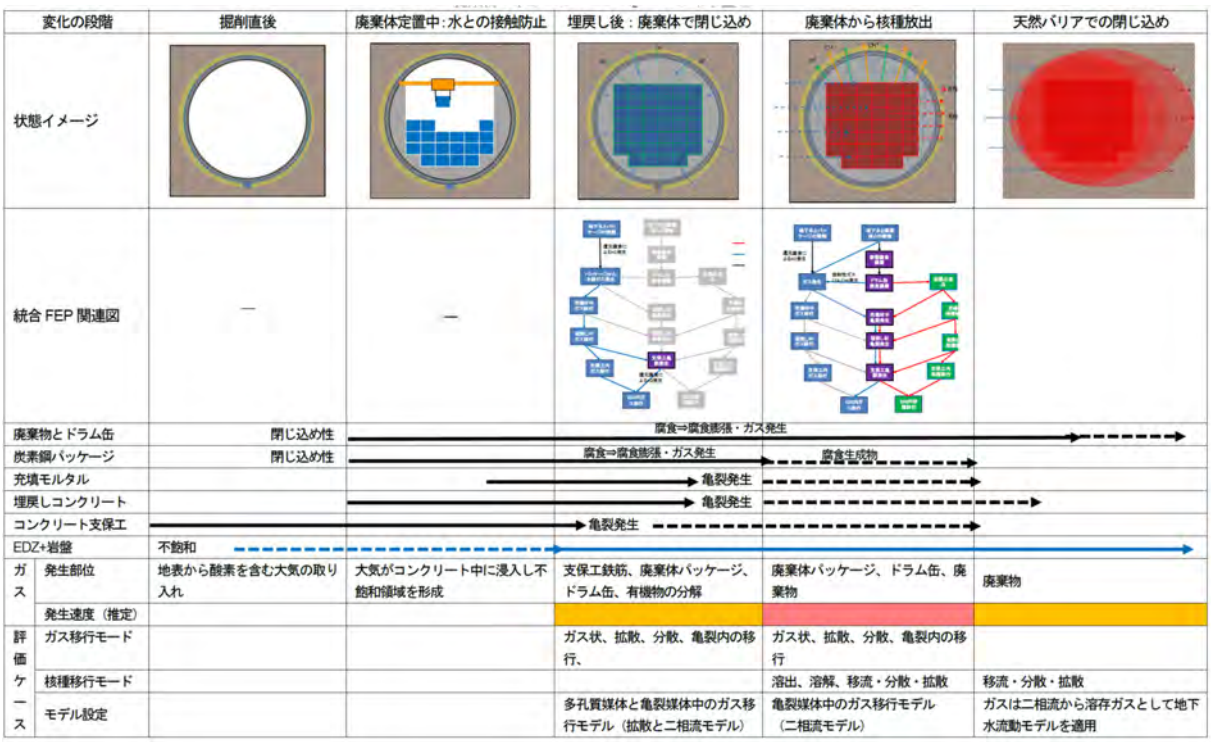


図 5.3-16 グループ 3 のシナリオ整理シート作成例

4) 処分坑道内のガス移行シナリオの設定

表 5.3-1 に示すシナリオ区分例では、廃棄体パッケージや構成部材の安全機能に着目した評価期間の枠を基に、時系列に沿って変遷する人工バリアの状態とそれに伴うガス移行と核種移行に関するシナリオについて、不確実性に着目して記述した。グループ 2 と大きく異なる点は、低透水・低透気のベントナイトバリアが存在しない点である。そのため、発生したさまざまなガスは、移行媒体の特性にも依存するが、基本的に多孔質媒体の連続した間隙、亀裂媒体の亀裂内をガス状、あるいは二相流として移行する。移行形態は、移流・拡散・分散のいずれも発生する可能性がある。ガスは、処分坑道内の不飽和領域を優先的に移行していく。

・シナリオ①：蓋然性の高い現実的なシナリオ。ガス発生の変動幅に関する不確実性と媒体中の特性に対応し、ガス状、二相流、溶存状態で移行する。

・シナリオ②：モデル･パラメータが変動するシナリオ。廃棄体パッケージ等の閉じ込め機能の早期健全性損傷による、放射性ガスの早期放出シナリオで、シナリオ①の変動として扱う。

グループ 2 に係る状態変化の予測は、これまでの TRU 第二次レポート、NUMO レポートを見ても、十分検討されていない。また、ガス発生速度および量に関しては、グループ 2 に比較して腐食もとになる炭素鋼廃棄体パッケージの量が多く、地下水の浸入速度に対応して、発生速度・量とも大きく増加する可能性がある。

また、腐食対象物が多いことから、腐食生成物も多くなり、それらが周辺の充填モルタルや埋戻しコンクリート内の亀裂部分に沈着し、デッドエンド・ポアと呼ばれる空隙を形成することでガスが停滞し、蓄圧され、ガス移行の挙動として、破過の現象が発生する可能性ある。この場合、

放射性ガスと汚染水が処分坑道外に大量に放出されることになる。

ガス移行のシナリオを設定する場合、これまでは、処分坑道内での挙動に着目してきたが、ガスの発生量の増加に伴う移行量が多くなった場合、処分坑道周辺の EDZ および支保工等セメント材料の劣化に伴い形成される高透水ゾーンでのガス移行挙動を考慮する必要がある。溶存したガスや二相流に支配される流れは、地下水の動きに着目していればいいが、周辺の地下水流動速度が遅い場合、ガスは不飽和の空隙を容易に移行し、地表への短経路を新たに形成する可能性がでてくる。これらは、周辺岩盤の特性にも依存する。

表 5.3-5 シナリオの区分例

不確実事象	シナリオ①（基本）	シナリオ②　（変動）	シナリオ③（稀頻度）
ガス発生速度・量	発生した非放射性・放射性ガスは、周辺地下水への溶存状態、二相流、ガス状態に変化しつつ処分坑道内を移流・拡散・分散で移行し、周辺岩盤に放出される。ガスは処分坑道内部で停滞し、蓄圧されることはない。	**ガス発生速度・量が増加**することで、ガス状の移行モードが卓越し、処分坑道内に存在する空隙に蓄圧され、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。	
廃棄体パッケージの損傷時期	設計にて期待する期間、容器は健全性を確保。閉じ込め性を損傷したのちは、ガス移行の基本シナリオとなる。	**初期欠陥等による健全性の早期損傷** （事象としては変動になるが放射性物質・放射性ガス放出のシナリオからすると基本シナリオのパラメータの変動として扱われる）	
処分坑道内の要素	埋戻しコンクリート（無筋）はひび割れを発生し、水理学的には亀裂媒体となる。充填モルタルは初期には低透水の拡散バリアとなるが、炭素鋼廃棄体パッケージの腐食膨張に伴いひび割れを発生し、水理学的には多孔質媒体となる。汚染水とガスはこれらの媒体中を移流・拡散・分散で移行する。	**腐食生成物が亀裂内に沈着**し移行媒体中にデッドエンドの空間を形成することで、ガスが蓄圧し、脈動的に放射性ガス、汚染水を放出するメカニズムが形成される。	

(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

グループ 3 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、対応と技術課題を取りまとめた。

・ ガスの発生速度と量については、インプットデータをパラメータとして取り扱う。
【課題】セメント材料が大量に存在し、還元性の地下水と接する炭素鋼の腐食によるガス発生速度と量を確かめるための実験データが必要となる。
【課題】同上の環境での有機物による廃棄物の分解ガス（放射性ガス）の発生速度と発生量を把握するための実験データが必要となる。

・ 廃棄体パッケージの早期機能喪失については、放射性核種の早期放出モデル、放射性ガスの早期発生・放出モデルとして扱う。モデル上では、パラメータでの扱いになる。
【課題】上記の炭素鋼腐食速度を推定するため実験データが必要となる。廃棄物はドラム缶に格納されており、それらが炭素鋼廃棄体パッケージに格納され、隙間をモルタルで充填されている環境で、早期のパッケージの損傷がどのような状況を及ぼすかについての詳細な検討が必要である。周辺は Ca リッチな間隙水であり、充填モルタルが簡単に変質・劣化することは考えられない。むしろ、腐食膨張による応力破壊による放射性物質固定システムの損傷が考えられる。

・ 坑道内の媒体の扱いについては、状態設定のモデルで取り扱う。埋戻しコンクリートの初期の段階は多孔質媒体、その後亀裂媒体、Ca イオンの流出後は多孔質媒体として取り扱う。これらのモデルの切り替えについては、各媒体の劣化・変質メカニズムの設定とそれに伴う物理特性を把握する必要がある。炭素鋼廃棄体の腐食による腐食生成物の扱いについては、基本シナリオでは知見が十分でないこともあり無視している。変動シナリオでは、溶存核種やガス移行媒体に影響を与える要素として、マイナス面では、ガスが蓄圧する空間を設定するモデル、プラス面では、放射性核種を吸着するモデルとして取り扱う。
【課題】腐食生成物の影響を定量的に評価するための知見の収集が必要である。また、腐食生成物が、高い pH 環境および還元雰囲気の中で、どのように変化していくのかについての知見も必要となる。

5.3.2　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

わが国では、発生が予測される TRU 廃棄物について、それぞれの特性から 4 種類にグループ化し、それぞれについてのバリアシステムおよび処分概念が検討されている。諸外国での検討と比較して特徴的なことは、グループ 1 や 2 において、ベントナイトがバリア材として導入されている点である。これらは、わが国で想定される母岩の透水性が高いことを考慮していることにある（NUMO、TR-10-04）。グループ 3 および 4 については、初期段階での容器による核種閉じ込めを期待し、容器損傷後は、周辺母岩と坑道内の媒体の特性を考慮した評価が実施されている（JAEA/電事連：第 2 次 TRU レポート、NUMO レポート）。

5.3.3　人工バリア材料とガス発生・移行メカニズムおよびプロセスに関する課題および研究の動向の検討・整理

本節では、ガス挙動と評価の現状について、海外の状況と国内の状況について調査した結果をまとめて示す。海外の状況については、EU が主催し、2013 年に終了した FORGE プロジェクト（Fate of Repository Gases Project）での議論を、国内については、上記の TRU レポートや余裕深度処分での扱いの状況について調査し、現状の知見として取りまとめた。

1）FORGE で提示された主要な課題

EU の共同研究として実施された「FORGE プロジェクト」の 2013 年 2 月に開催された総括シンポジウムでの議論[9]を中心に、ガスの発生や移行挙動に係る論点など課題を以下に取りまとめた。

- 要素試験の結果に基づき設定するモデル・パラメータを用いて、実機スケールの解析に適用する場合の境界条件の違い、寸法効果、現象の再現性への対応が不十分であるとの認識されている。
- バリア物性の劣化変質に伴う安全機能に係わる特性や幾何学形状変化に伴うガス挙動モデルが十分追随できていない。
- ガスの発生速度・発生量に関わる把握・・・セメント系バリア材の高 pH 環境下での鉄の腐食速度、有機物の分解によるガス発生量の把握が十分でない。
- ベントナイトバリア内のガス移行プロセスにおいて異なる移行モードへの変遷をシミュレーションするには、ベントナイトの状態との力学連成モデルが必要である。
- ガス移行メカニズムをミクロに追いかけることができるモデルはまだ整備されていない。

・ ⇒わが国の TRU 処分のように大規模空洞処分においてベントナイトバリアを導入している国はない。

・ ⇒わが国におけるガス発生・移行挙動に関する安全評価書での取り組みは、10 年前の知見に基づく解析結果がそのまま踏襲されており、FORGE においてヨーロッパ各国間で議論されている内容は取り上げられていない。

2）国内の検討状況の整理

・ 第 2 次 TRU レポートでのガスの扱いは、廃棄物全体のガスの発生量予測量と蓄圧により放

出される汚染水の量を推定がなされているだけで、人工バリア中でのガス発生・移行挙動メカニズムやプロセスは言及されていない。

- ガス発生・移行挙動メカニズムに関する要素試験は、その後多くなされているが、それらを用いての実機レベルでのガス移行挙動に関する安全評価書は報告されていない。
- TRU 処分のガス発生量に対し、有機物分解によるガス、廃棄体の表面積や分布の状況も考慮されたガス発生メカニズムに関する報告書は公表されていない。
- 類似施設（余裕深度処分）でのガス挙動は、要素試験に基づくガス挙動に関わるデータが取得されているが、実スケールでの挙動予測に用いるモデルとデータの検証はなされていない。これらの結果は断片的に報告されており、包括的な評価書としては公表されていない。
- 最新の知見として NUMO が公表した TRU 放射性廃棄物処分に関連する報告書においても、ガス移行挙動プロセス関しては、TRU2 次レポートと比べて追加した検討がなされていない。

以上のとりまとめから、ガス発生・移行メカニズムおよびプロセスに関しては、まだ解決すべき多くの検討課題があることを確認した。

5.3.4 海外の類似概念および試験等による知見の調査・整理

1) スウェーデンの最新の知見

スウェーデンに関するガスの取り扱い（平成 24 年度「ガス移行挙動評価」報告書[8]より）の概念を以下に示す。

許認可申請のベースとなるSR-Siteの安全評価では、放射性ガスと核種移行と同時に取り扱われている。岩盤からガスの放出については、氷河期の水圧に対するガス蓄圧を解析的に求め、間氷期でのガス放出を自然界のバックグランドとの比較で実施している。

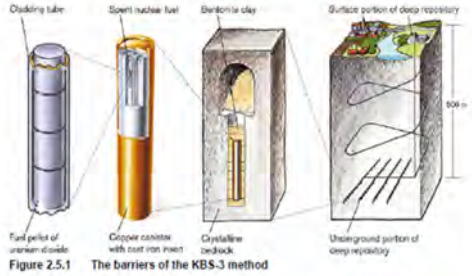


Figure 2.5.1 The barriers of the KBS-3 method

Table 2.5.1 Calculated annual mean life time risk from pulse releases /SKB 2006ab/

放射性ガスの移行による生物圏を含めた影響評価結果⇒影響は小さい

Pathway	C-14 (10 GBq)	Rn-222 (25 GBq)
ingestion	0.036 mSv/y	-
Inhalation (outdoor)	$4.4 \cdot 10^{-6}$ mSv/y	0.22 mSv/y
Inhalation (indoor)	0.0028 mSv/y	7.2 mSv/y

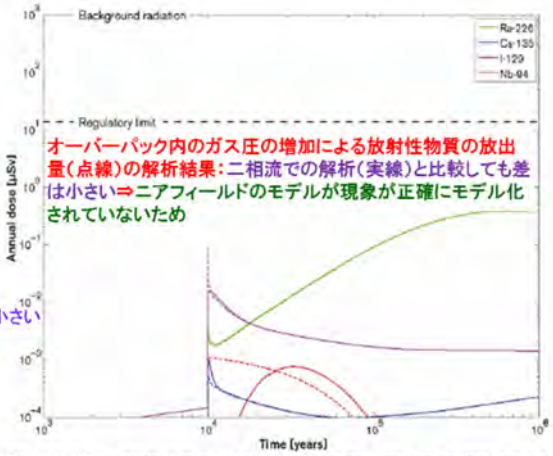


Figure 2.5.6 Comparison of near-field releases for the gas case (dashed lines) and the deterministic base case (solid lines). Deterministic calculation, numerical model.

FORGE Report 2010[11]では、安全評価書（SKB (2006) SR-Can[10]）に記載された上記の取り扱いに対する詳細な記述が以下のように提示されている。

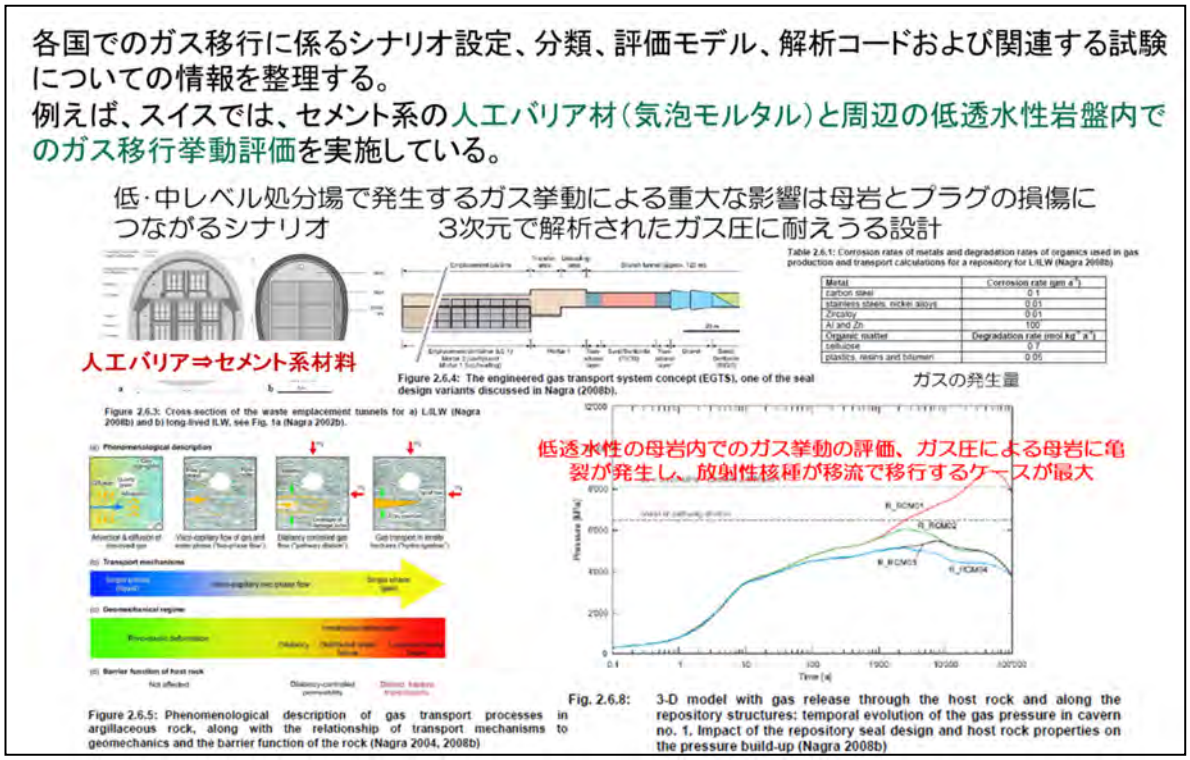
- 人工バリア中のガス挙動は、外部から取り込まれる空気の挙動、放射線分解により発生するガス、オーバーパック（SKB ではキャニスタと呼ぶ）の内部にある鋳鉄の腐食により発生する水素ガスの挙動に分けて挙動を記述する。

- ガス移行の状態については、ガスの発生速度と量に依存して変化するとし、ガス移行媒体として高圧縮ベントナイトに着目する。
- ガスの発生量が少ない場合は、ガスは間隙水に溶け込み拡散で移行する。
- ガスの発生量が多い場合は、溶解し拡散するモードとガス状で移行するモードを設定し、ガス圧の上昇によりベントナイト中にガスの透過経路が形成される。この時の圧力を破過圧とし、ベントナイトの飽和状態、膨潤圧、外部の水圧等の境界条件に依存して決定される。
- 主要なガス発生源となるオーバーパック内部の鋳鉄の腐食については、①ベントナイトの飽和過程においてオーバーパックが初期欠陥で損傷し、オーバーパック内部からガスがベントナイト中に放出される場合、②ベントナイト飽和後、オーバーパックが損傷し、間隙水が内部に浸透して鋳鉄の腐食によるガスが発生し、ベントナイト中に放出される場合を設定する。
- ガスのベントナイト中の移行状態（モード）については、溶存状態での拡散、ガス状での拡散、ガスの移行経路を形成しての移行を考慮する。
- ガス移行経路形成については、破過圧に達したのち連続した経路が形成されるとし、経路形成後の挙動については、以下の状態を設定する。
  ① ガス発生が継続したとしても、破過後のガス圧は通常レベルまで低下する。ガス発生が終了するか少なくなるに従い、経路は閉塞される。この段階を「閉塞圧力：Shut-inn pressure」と呼ぶ。この時期はもちろんベントナイトの膨潤圧にも依存する。閉塞圧力以下になればガスは拡散で移行する。
  ② 初期のガス経路形成時の移行経路の透気係数に比較してガス発生速度が遅くなり、ガス圧が低下した場合、経路は縮小する。その後ガスの発生が継続した場合は同様な経路が再度形成されるが、ガス圧が上がらない場合、経路の隙間は閉じられていく。
- これらの状態は、ガスのベントナイトへの浸入、破過、透気量のピーク、定常状態は、ベントナイトの特性と周辺の環境条件に依存する。その中で最も重要な因子はベントナイトの膨潤特性で、ベントナイトの力学特性（応力―ひずみ特性）と連成したガス移行挙動状態を設定する必要がある。
- 処分坑道周辺の EDZ 内でのガス挙動についても把握しておく必要がある。EDZ 内では、周辺母岩より間隙や亀裂が卓越することがあり、放出されたガスの圧力が減少し、量が増大する。そしてその移行では、ベントナイト中よりも小さい圧力で移動する。不飽和の亀裂等があればさらに容易に移動する。

本記述に用いた資料を、参考資料-1 として巻末に提示した

2) スイスにおける実験的アプローチ：スイス　Nagra　GAST Project の概要

スイスでのガス挙動に関わる取り扱い（平成 24 年度「ガス移行挙動評価」報告書[8]より）の概念を以下に示す。



スイスの低・中レベル処分概念は、図 5.3-17 に示すように短寿命の放射性廃棄物と長寿命の放射性廃棄物に分類している。このうち、短寿命の廃棄物の処分場と長寿命の廃棄物の処分場はそれぞれ別のサイトが計画され、長寿命の廃棄物は高レベル廃棄物との併置処分が計画されている。

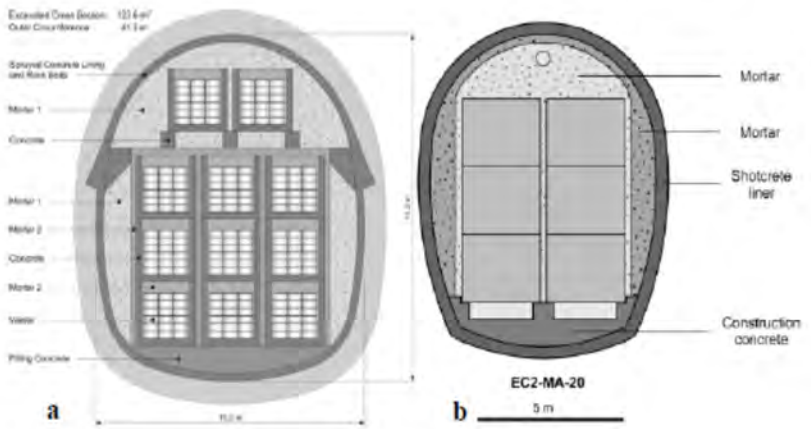


図 5.3-17 短寿命廃棄物処分概念（左）と長寿命廃棄物処分場（右）

どちらの概念も候補母岩として Opalinus 粘土（粘板岩）が計画されている。この母岩は極めて低い透水性（10^{-12}～10^{-13}m/sec 程度）で、地下水は拡散支配で移行している。このため、処分坑道から放出されたガスは、坑道に沿った比較的透気性の高い岩盤内を移行し、アクセス坑道を経て地表に直接放出されるシナリオが懸念されている。

このようなシナリオの不確実性を低減するために、Nagra では、図 5.3-18 に示すプラグシステムを処分坑道とアクセス坑道の間に設置する計画を示した（Nagra、2008[13]）。処分坑道から発生したガスは、坑道に沿ってガス状で拡散移行し、プラグシステムでトラップすることで、アクセス坑道を通じた地表への放出シナリオを基本や変動シナリオから除外することを想定している。

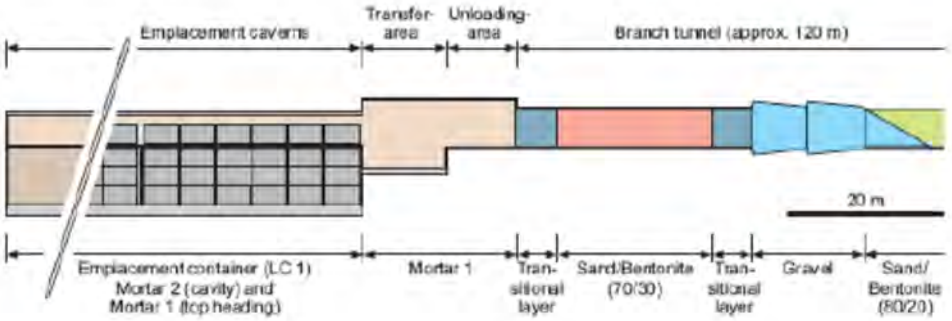


図 5.3-18 処分坑道とアクセス坑道間のプラグシステム概念（Nagra、2008）

スイスの概念では、処分坑道から放出したガスは周辺岩盤に浸透し（Entry Pressure として）、母岩中を移行するとしている。その時の移行形態として、図 5.3-19 に示す 4 つの状態（モード）を設定している。

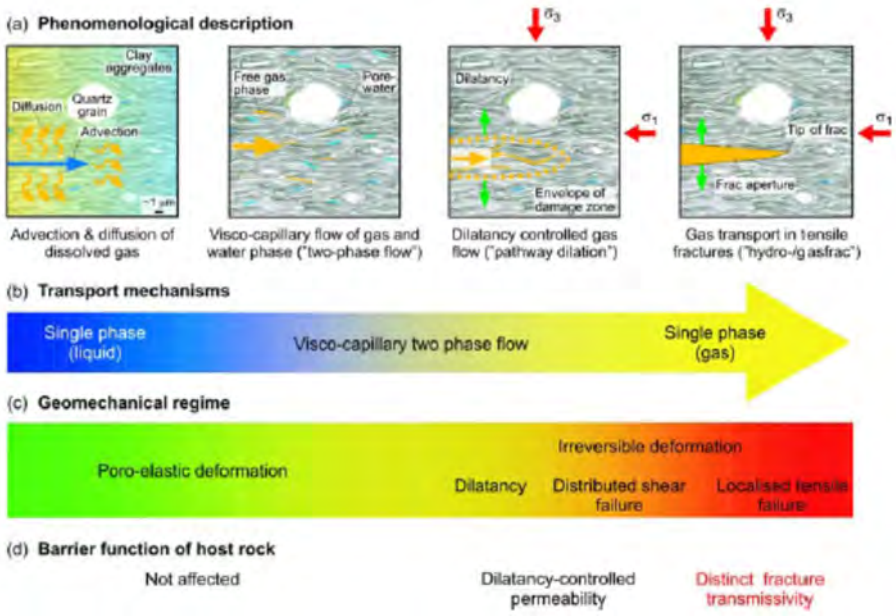


図 5.3-19 オパリナス粘土中のガス移行モード（Nagra, 2008）

図 5.3-19 における 4 つの段階について、ガスの浸透量と圧力の状態により、左から右へ以下のようにモードを設定している。

・ガスは母岩の間隙中を水に溶解した状態で移流・拡散によって移行
・ガスは母岩の間隙中を気液二相流状態で移行（毛管現象でのガス移行と溶存状態で移行）
・母岩のダイラタンシー特性を起因として、母岩中に気みちを形成してガス状で移行
・母岩中に連続した亀裂を形成してガス状で移行

これらのモードがガス発生の継続時間とガス圧の増加によりどのように移行していくかについて、図 5.3-20 に示すように解析モデルでシミュレーションがなされている。

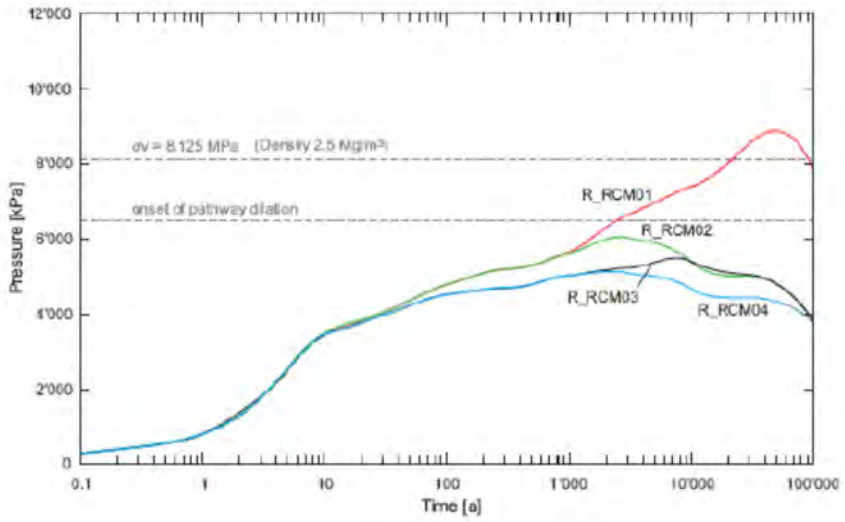


図 5.3-20 ガス移行モード変化（Nagra、2008）

低・中レベル放射性廃棄物処分概念を対象としたガス移行に関わる解析的検討（Nagra, 2008）の中で、ガス移行に伴う影響について以下に考察されている。

- 現状でのガス発生速度と処分坑道の規模、および埋戻し材の設計を考慮すると、ガス圧はダイラタンシーを起こす圧力の 80%程度であり、二相流で母岩内を移行すると推定され、母岩のバリア機能を損ねることはないと考えられる（基本シナリオ）。一方、母岩の透気係数が極めて低い、あるいはガス発生速度が増す可能性がある場合であっても、母岩の自己修復機能のため、ガスの気道が閉じることを期待している。坑道に沿ったガスの流れについては、前述したプラグシステムでのガスの蓄積と移行防止で対応する。
- 処分坑道内の埋戻しには、発生ガスを蓄積するために間隙多いモルタルを設置する。プラグシステムにはベントナイト 20～30%の混合材の使用を予定している。このように地下施設内にガスを蓄積するシステムを設計することで、ガスによる影響（ここでは特にガスによるバリア機能の損傷）を削減することが可能となっている。
- 処分坑道内でガス圧が上昇し、気道が形成されることがあったとしても、飽和環境にあるベントナイトプラグでは自己修復性が期待できる。不飽和の場合は、別途検討する必要がある。

これらのガス評価を通じて、不確実性があり課題としている事項が以下にまとめられている。

- 処分坑道内のセメント系埋戻し材とプラグシステムのベントナイト混合材との間での水理・化学的な相互作用（間隙水に溶解した化学物質の沈着などの影響）がガスの浸入速度に影響を及ぼす可能性がある。このような相互作用の規模がどの程度発生するのかは明確ではない。
- 現状の解析的なアプローチの知見は、小規模の要素試験や原位置試験から得られている。このような規模での知見や試験データを実規模の処分坑道のスケールでのガス挙動評価に用いることの正当性は示されていない。母岩を含む処分坑道全体でのガスの挙動は、多様な状態となっており、このような状態を推定するには、間隙レベル（ナノメータ、マイクロメータ）でのプロセスとメータスケールとそれとの関連性を示す適切なモデルが必要となる。従来のモデルは、間隙構造とフロー・メカニズムに対して、経験的にパラメトリックなアプローチで対応しているにすぎず、間隙スケールでの力学挙動や物理・化学的な相互作用を忠実に解析できているわけでない。
- 実スケールでの挙動は、ガスの発生の不確実性を含めて、これらの作用が異方性のある媒体の中で発生しており（多様化した流れ）、実挙動を支配する微視的な挙動の理解とそれを再現する規模での試験が必要となる。
- ダイレタンシーに支配されるガス移行挙動については、母岩のマイクロ亀裂を有する媒体の力学的な変形に依存する。ガス圧が上昇するとマクロ亀裂が変形し、ダイレタンシーとして気道が形成され、ガス圧が減少すると元のマイクロ亀裂に戻ることが多くの試験で理解されている（Nagra, 2002[12]）。ダイレタンシーとしての移行挙動により、ガスの破過によるガス亀裂が発生する現象が抑えられ、母岩のバリアとしての安全機能が担保されている。しかしながら、このような現象については、小規模な要素試験で確かめられているだけで、実規模のスケールの多様な環境で確認されているわけでない。大規模な験を通じて、ガスの多様な挙動の把握と自己修復の機能を確認すべきである。

FORGE における Nagra の報告の資料を参考資料-2 に示した。

5.4　まとめと今後の課題

5.4.1　検討成果の取りまとめ

今年度の検討成果を以下に取りまとめる。

- TRU 廃棄物として分類されているグループ 3 を対象に、昨年度までに構築してきた手法を用いて、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表を作成した。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段階と地下水が廃棄物に接触し、処分坑道外に放出される 2 つの期間を対象に作成した。
- シナリオ整理表に基づき、想定される①ガス発生に関わる不確実性、②炭素鋼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、2 つのシナリオグループを構築した。
- 予備的安全評価におけるこれらの不確実性の取り扱いについての検討と技術課題を抽出した結果、グループ 3 に関連する試験はこれまでほとんど実施されておらず、検討も十分なされていないことが分かった。
- わが国の TRU 処分概念に関連した知見を整理した結果、グループ 2 のベントナイトバリアを対象とする要素試験の結果を用いた評価が中心であり、システムとしての多様なガス挙動については、検討されておらず、上記の不確実性に関わる課題に関連する知見がない。
- 海外での検討は、FORGE を中心に進められており、本年度はそのうち、スウェーデンでの使用済燃料燃料直接処分でのガス挙動、スイスでの低・中レベル処分概念でのガス挙動に関する評価上の取り扱い、不確実性について知見を整理した。いずれの検討も課題が残されていることが認識されている。

5.4.2　今後の課題

これまでの検討の結果についても含め、本検討における今後の課題を以下に取りまとめた。

- グループ 3 のガス移行挙動に関する検討は、定性的な議論としては一部存在するが、日本においては十分実施されてきていない。コンクリートのガス移行試験の実施事例があるが、母岩を含めた全体の系での評価がなされた事例が存在しない。グループ 3 あるいは 4 では、炭素鋼容器を含め、多くの有機物が廃棄物として含まれる点からも、ガスの発生速度や発生量に対する定量的な評価を実施する必要がある。
- 炭素鋼容器の健全性の評価に際しては、処分環境を想定した腐食試験の実施、および腐食生成物の特性についての知見を得ることが必要である。
- ガス移行挙動については、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媒体としてのガスの移行特性が変化していく。このため周辺母岩を含めたニアフィールド全体の系でのガスの移行挙動を評価する試験が必要となる。
- 微視的なスケールでのガス移行挙動（特にベントナイトなどの粘土材料）のプロセスの理解

に基づいたモデル化がなされているかについて、評価検討方法の吟味が必要である。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評価手法を構築・確立するのが望ましい。

・ 日本におけるグループ 2 に概念に近いスイスの知見を参考とすると、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明らかである。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については検討に値する。

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] 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).

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

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

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

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

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

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

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

[10] SKB SR-Can, Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. SKB TR-06-09, 2006

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

[12] Nagra (2002), 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

[13] Nagra (2008), 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

2.5 Sweden

2.5.1 Overview

The SR-Can/SKB 2006a/ project was a preparatory stage for the SR-Site assessment, the report that will be used in support of SKB's application for a final repository. The purposes of the safety assessment SR-Can were the following:

1. To make a first assessment of the safety of potential KBS-3 (Figure 2.5.1) repositories at Forsmark and Laxemar to dispose of canisters as specified in the application for the encapsulation plant.
2. To provide feedback to design development, to SKB's R&D programme, to further site investigations and to future safety assessment projects.
3. To foster a dialogue with the authorities that oversee SKB's activities of applicable regulations, as a preparation for the SR-Site project.

The assessment relates to the KBS-3 disposal concept in which copper canisters with a cast iron insert containing spent nuclear fuel are surrounded by bentonite clay and deposited at approximately 500 m depth in saturated, granitic rock, see Figure 2.5.1. Preliminary data from the Forsmark and Laxemar sites, that was being investigated by SKB as candidates for a KBS-3 repository are used in the assessment.

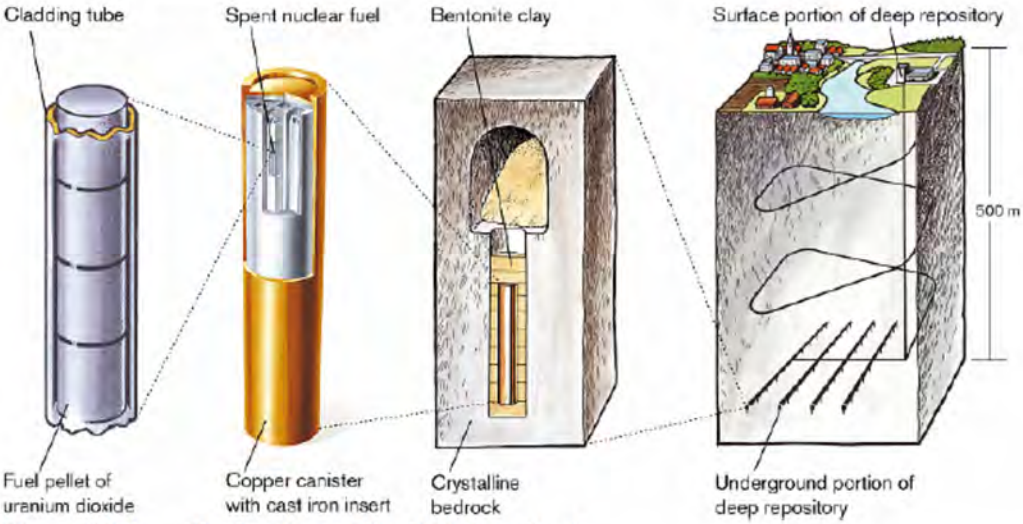


Figure 2.5.1　The barriers of the KBS-3 method

This section describes how gas migration issues were treated in the SR-Can assessment. At this stage, the plan is to treat the gas issue in the SR-Site assessment.

2.5.2 Methodology

The repository system, broadly defined as the deposited spent nuclear fuel, the engineered barriers surrounding it, the host rock and the biosphere in the proximity of the repository, will evolve over time. Future states of the system will depend on:

- the initial state of the system,
- a number of radiation-related, thermal, hydraulic, mechanical, chemical and biological processes acting internally in the repository system over time and,
- external influences acting on the system.

A methodology in ten steps was developed for SR-Can, as summarised in Figure 2.5.2. The steps are carried out partly concurrently and partly consecutively.

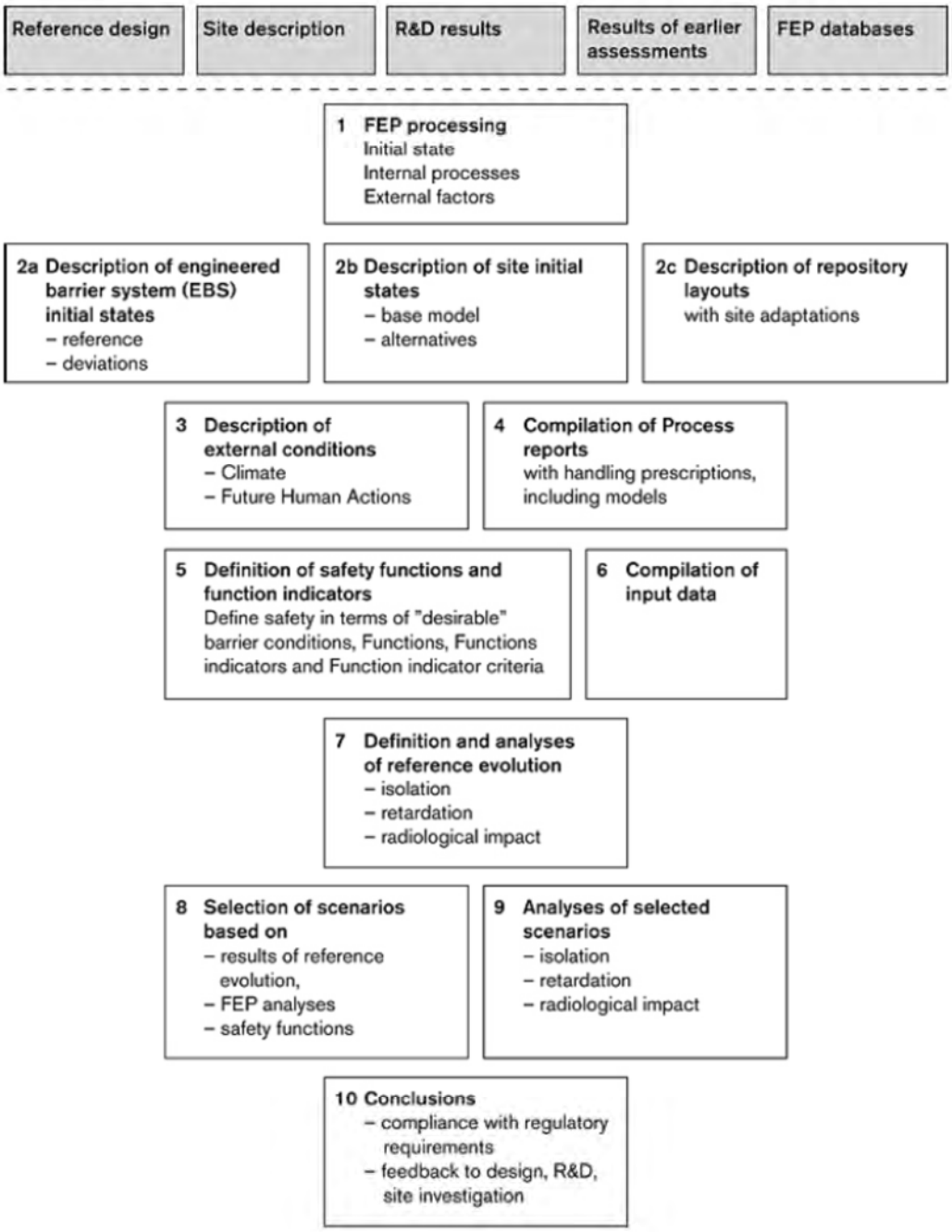


Figure 2.5.2 Outline of the ten main steps of the SR-Can safety assessment. The boxes at the top above the dashed line are inputs to the assessment.

Of main concern for the discussion of gas and the treatment of gas issues in the assessment is step 4 and 7. Step 4 is the identification of processes. The identification of relevant processes is based on earlier assessments and FEP screening. All identified processes within the system boundary relevant to the long-term evolution of the system are described in dedicated **Process reports**. For each process, its general characteristics, the time frame in which it is important, the other processes to which it is coupled and how the process is handled in the safety assessment are documented. The process documentation for the "Gas transport/dissolution process is presented in 0. In step 7 the reference evolution is defined and analysed. A reference evolution, providing a description of a plausible evolution of the repository system, is defined and analysed. The isolating potential of the system over time is analysed in a first step, yielding a description of the general system evolution and an evaluation of the safety function indicators. If the evolution indicates breaching of isolation, the retarding potential of the repository and its environs is analysed and dose consequences are calculated for the long-term conditions identified in the first step. Also some canister failure modes not resulting from the reference evolution are analysed in order to further elucidate the retarding properties of the system. Each process is handled in accordance with the plans outlined in the process reports.

In practice the gas issues were indirectly treated in step 8 as well. The defined main scenario is closely related to the reference evolution defined in step 7 and for the gas issues the treatment was identical. No additional scenarios concerning gas was defined in the SR-Can assessment.

2.5.3 The gas transport/dissolution process in the buffer and backfill process report

This section contains a shortened version the text from the process description of the gas transport/dissolution process in the buffer, backfill and other system parts process report for the SR-Site safety assessment /SKB 2010/. The purpose of the process reports is to document the scientific knowledge of the processes to a level required for an adequate treatment of the processes in the safety assessment. The documentation is not exhaustive from a scientific point of view, since such a treatment is neither necessary for the purposes of the safety assessment nor possible within the scope of an assessment.

However, it must be sufficiently detailed to motivate, by arguments founded on scientific understanding, the treatment of each process in the safety assessment. The purpose is further to determine how to handle each process in the safety assessment at an appropriate degree of detail, and to demonstrate how uncertainties are taken care of, given the suggested handling.

Overview/general description

Transport of gas in the buffer can occur in two phases of the repository's evolution:

- When the repository is sealed, air will be trapped in the buffer. As the buffer becomes saturated with water, the air must escape.
- If a canister should be defective such that water could penetrate through the copper shell, the cast iron insert is expected to corrode, resulting in hydrogen gas formation. If more hydrogen is produced than can be dissolved in the water resident in the canister and surrounding buffer, a gas phase will form.

Gas which is trapped in or by the buffer can escape by two principal mechanisms:

- If the production rate is low or the gas quantity small, the gas can be dissolved in the pore water and be removed by diffusion.
- If the production rate is higher or the gas quantity is larger than can be removed via dissolution and diffusive processes, a gas phase will form, the pressure will rise, and a flow path is expected to be formed through the buffer at a critical pressure.

Water saturation phase: During the wetting of the buffer, all gas originally present in the buffer is expected to be dissolved in the buffer's pore water and transported by diffusion.

Gas transport from failed canister before saturation: Before the buffer is saturated, water is only expected to be able to get into an assumed damaged canister via vapour-phase diffusion. Hydrogen production from corrosion will therefore be limited and the gas that is formed is expected to be able to leave the buffer via diffusive transport. The gas transport resistance in an unsaturated buffer is also considerably lower than in a saturated one (Canister damages at this early stage are very unlikely and so this process is considered to be very unlikely).

Gas from defective canister after saturation:
After saturation no gas is expected to be present in the buffer unless there is a penetration defect in the canister and water can get into contact with the cast iron insert. The following section only the situation of a breached canister.

Diffusion: Hydrogen gas formed by corrosion of the cast iron insert can dissolve in the pore water and migrate from the canister by diffusion. The maximum transport capacity for different conditions has been estimated by /Wikramaratna et al. 1993/.

The results of the calculations show that the diffusive transport capacity is considerably lower than the hydrogen gas production from corrosion, if it is assumed that the entire surface of the cast iron insert is accessible for corrosion and the water supply does not limit corrosion. Under such conditions it is probable that a gas phase will be formed inside the canister and that the gas must escape by gas-phase flow.

Gas flow: The following picture of the subsequent course of events is an interpretation of the results of theoretical and experimental studies: At a critical pressure (entry pressure), the buffer is expected to allow the gas to pass through. When the pressure reaches this value, a transport pathway is formed through the buffer and gas is released. After the pathway is formed, two different evolutions are possible:

1. If gas production is maintained, the pressure will fall to a steady-state pressure. When the production ceases the pressure falls, and if the gas production is low enough, the transport pathway is expected to close. This takes place at a so-called "shut-in pressure", which is believed to be dependent on the swelling pressure. At pressures lower than the shut-in pressure, gas migrates solely by diffusion.
2. If the gas production rate is small compared to the permeability of the initial flow path(s), as gas pressure declines, the permeability of the pathways will decline. If gas production is unable to produce sufficient gas to maintain an adequate supply then the aperture of the pathways will decrease (and may well close), potentially resulting in an episodic type response.

Gas entry, breakthrough, peak and steady-state gas pressures in the buffer are dependent on the properties of the buffer and the nature of the boundary conditions. The most important parameters seem to be the swelling pressure, the mechanical properties of the buffer including the stress-strain properties of the clay and host rock and the number, location and geometry of sinks (i.e. host rock fractures) which can accommodate the gas once its moved through the clay.

Boundary conditions

The essential boundary conditions for this process are the geometries of the conducting features at the buffer interfaces to the canister, the backill and the rock around the deposition hole, the pressure and volume of gas trapped inside the inner interface (the rate/evolution of these components will also influence the gas migration process), and the

material properties of the buffer and host rock. The geometric aspects of these boundaries include the nature of the opening in a defective canister, the number, location and geometry of fractures intersecting the deposition hole and the excavation damaged zones around the deposition hole and in the floor of the deposition tunnel.

When the gas has reached the excavation-disturbed zone (EDZ) in the near-field rock, the pressure required to get it to migrate further is much lower than in the buffer. This will result in an expansion of the gas volume and the displacement of porewater around the deposition hole and gallery opening. It must exceed the sum of the water pressure and the capillary tensions in the fine fractures in the EDZ or in channels in fractures that intersect the deposition holes, which together gives a pressure of 5–10 MPa.

Model studies/experimental studies

Gas dissolution: No specific studies have been conducted for the purpose of studying how gas dissolves in the pore water in the bentonite. However, experience from water saturation tests shows that highly-compacted bentonite normally achieves complete water-saturation and that no trapped gas remains. The mechanistic interpretation is that the suction of the bentonite compresses trapped gas (significantly reducing its volume), which is then dissolved in the pore water and this gas is ultimately transported away by diffusion.

Gas transport: A number of gas migration experiments in compacted clays, with different materials, geometries and boundary conditions, have been performed over the last 20 years. Several of these are summarized in /Harrington and Horseman 2003/.

/Harrington and Horseman 2003/ presents the most recent gas migration experiments within the SKB programme. In the test geometry, the specimen was volumetrically constrained, preventing dilation of the clay in any direction. Figure 2.5.3 shows the actual test set up. All bentonite specimens were fully hydrated before gas testing by backpressuring with de-aired and distilled water. This procedure gave initial degrees of saturation that were demonstrably close to 100%.

Figure 2.5.3 shows a gas injection history from /Harrington and Horseman 2003/ for a laboratory-scale experiment performed on compact bentonite. The test clearly shows the interaction between gas pressure, total stress and porewater pressure during a gas injection history. It should be noted that the measured peak pressures in these constant volume test are substantially higher than the ones measured in the earlier constant stress experiments.

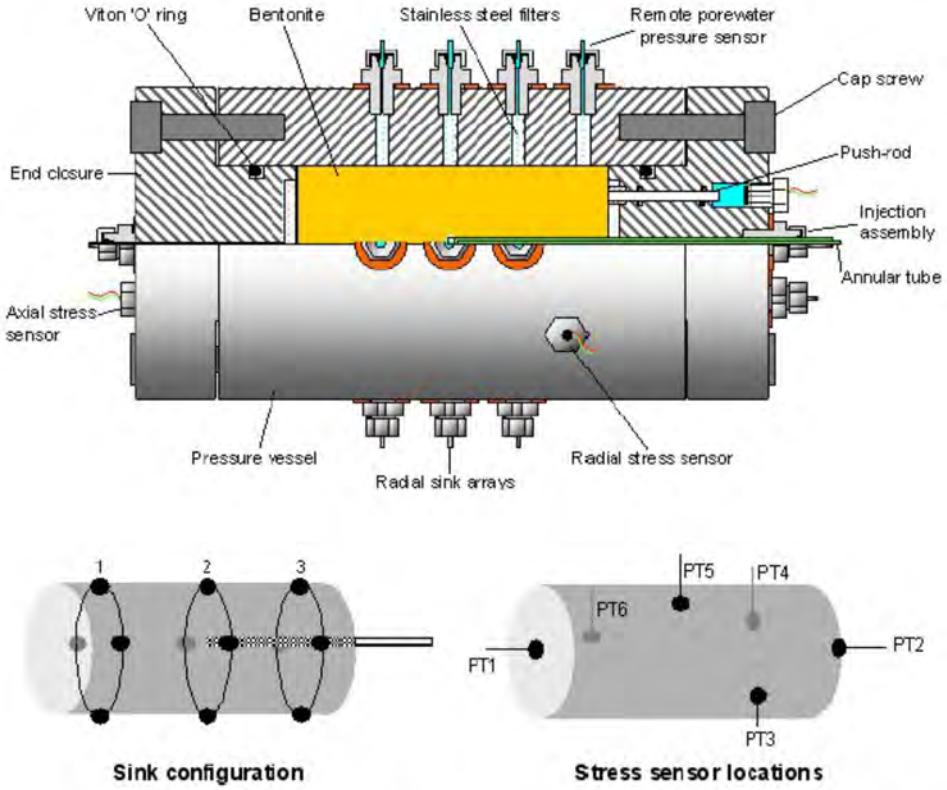


Figure 2.5.3 Cut-away diagram of the constant volume and radial flow (CVRF) gas migration apparatus. [1], [2] and [3] indicates the radial sink arrays. Sensors are as follows: [PT1] – axial total stress on the backpressure end-closure, [PT2] – axial total stress on the injection end-closure, [PT3] – radial total stress close to the injection end-closure, [PT4] – porewater pressure close to the injection end-closure, [PT5] – radial total stress at the mid-plane, and [PT6] – radial total stress close to the backpressure end-closure.

There is strong evidence that gas flows through a network of pressure-induced pathways. Very little, if any, displacement of water occurs during gas movement. The crack-like pathways are propped open by the elevated gas pressure. When gas pressure falls, individual pathways can snap shut leading to a reduction in overall gas permeability. What is absolutely clear from these gas injection experiments is that it is possible to pass up to 60 litres (STP) of helium through specimens of buffer clay (at gas pressures of over 8.0 MP for times in excess of 5 months) without any measurable desaturation occurring. This strongly reinforces the observations made by others on the lack of desaturation occurring during gas flow through fully hydrated bentonite /Pusch and Forsberg 1983/.

There is no evidence from these tests that the development of pressure-induced gas pathways in any way compromises the sealing capacity of the bentonite barrier. Gas pathways are ephemeral features of the buffer that tend to close up when gas pressure falls. Breaks in slope of monitored pressure transients can be interpreted as discrete pathway 'sealing' events that coincide with decreases in the rate of discharge of gas to the sinks. More importantly, a history of gas movement through the buffer has been shown to have no detectable effect on permeability to water.

A consortium of radioactive waste disposal agencies, the GAMBIT Club, has been supporting efforts to develop an appropriate model of gas migration through bentonite, with the objectives that the model (a) should adequately represent the principal features observed in experiments of gas migration through compacted bentonite, (b) can be used to analyse and interpret experimental results, and (c) will provide the basis of a model that can be used to assess pressure build up and escape of hydrogen gas through bentonite around waste canisters in a repository /Rodwell et al. 2003/. From that study a number of conclusions can be drawn: A model in which gas migration in highly compacted bentonite occurs by fissure propagation is able to account qualitatively for the behaviour seen, although heuristic arguments are required to explain the dependence of the gas permeability on gas pressure after breakthrough, and the model is limited in the range of phenomena it portrays.

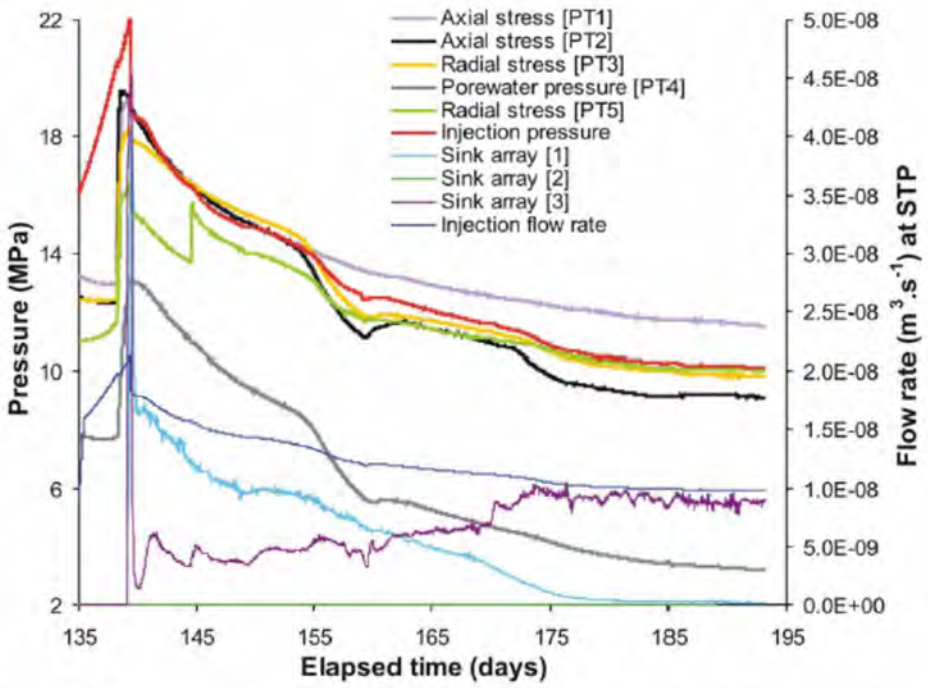


Figure 2.5.4 Gas injection pressure versus time for the first breakthrough and shut-in stages of test Mx80-10, showing axial and radial total stresses, porewater pressure and flow rate from different sink arrays.

a) In order to explain the observed experimental results based on the assumption that gas displaces water from capillary-like pathways, with the threshold for gas entry controlled by the capillary entry pressure, requires that the capillary radii (or pore throats) be very small. This gives rise to the large threshold entry pressures reported for highly compacted bentonite. However, a large number of pathways must also then become gas filled to give rise to the observed gas permeability. While such circumstances may be possible, it is difficult to conceive how they would develop in practice.
b) The continuum model of gas pathway propagation with deformation of the clay describes a range of observed phenomena, including pathway resealing and hysteresis through changes in the water content of the clay, although the agreement

obtained with experimental data is only of comparable quality to that obtained with the other models.

c) A model that extends a formulation analogous to that referred to in the previous paragraph (b), to include a proper treatment of the interaction of stresses and strains in the clay with gas migration gives comparable agreement in simulations of the same experiment. Work to simulate gas propagation in samples of different geometrical configurations is ongoing.

Experimental data on the mechanism of gas migration in bentonite that allows confirmation of which of the preceding choices of modelling approach is/are most appropriate is currently lacking.

A summary of a major part of the experimental evidence around gas transport in bentonite buffers can be found in /Rodwell 2005/. Results from experiments and modelling from several groups are presented and some conlusions are drawn:

- A threshold pressure for gas entry is observed in many experiments (exception: long term Canadian experiments). The gas entry pressure could be related to the swelling pressure.
- Only small volumes of water (if any) are displaced, though a case can be made for some degree of dewatering by internal consolidation of the clay at elevated gas pressures.
- After breakthrough, gas flows at pressures below the threshold, but flow ceases at pressures above back pressure.
- Porewater pressure changes in response to applied gas pressure.
- Evidence for macroscopic fracturing in radial flow experiments. The lab results also indicate that gas migration processes are sensitive to the nature of the boundary conditions (i.e. test geometry). The reasons for this remain unclear.

Although there remains uncertainty in the mechanisms of gas migration in bentonite, it is believed that the research into the subject undertaken in a number of laboratories has satisfactorily addressed the key issues with relevance to the effect of gas generation on the safety performance of bentonite buffers in radioactive waste repositories. However, while significant improvements in our understanding of the mechanisms governing gas migration in buffer bentonite have taken place, the paucity of laboratory data available for further model development and calibration (both conceptual and numerical) is a major issue in relation to the quantitative treatment of gas in performance assessment. As an aid to process understanding and model development additional laboratory tests are required. Uncertainty associated with up-scaling is addressed through the Lasgit international collaborative project /Cuss and Harrington 2009/. Results from the initial gas injection test in Lasgit shows a maximum pressure which is very close to the total stress in the experiment. However, no firm conclusions can be drawn from Lasgit at this stage since the buffer has not reached full maturity.

Natural analogues/observations in nature

/Tissot and Pelet 1971/ discuss oil and gas movements in clay shale: "The extraction of oil or gas from a finely structured clay matrix runs contrary to the capillary laws and is in principle impossible. However, the barrier can be broken in one way. The pressure in the fluids that is formed in the pores in the clay increases when kerogen is formed. When this pressure exceeds the mechanical strength of the clay, microchannels will form which are orders of magnitude larger than the natural pores and will thereby allow an oil or gas phase to pass, until the pressure falls below a threshold value and the channels fill again and a new cycle begins." These observations are consistent with the preceding discussions on mechanisms from the gas transport experiments in bentonite.

In the context of gas migration in shallow marine sediments, Judd and Sim (1998) go so far as to declare "Preliminary modelling suggests that, at shallow subsea depths, gas migration will be initiated by fracture failure rather than capillary migration for all sediment types except coarse sands". Clayton and Hay (1992) extend the debate to argillaceous rocks, suggesting that shaly caprocks at current depths of burial less than 500 m are always breached by fracturing, the fracture network providing the main route for leakage of liquid and gaseous hydrocarbons across the cap-rock.

Time perspective

Gas transport can occur when water is in contact with the cast iron insert in a damaged or breeched (corroded) canister. Unless damaged prior to installation or as the result of some other post-emplacement mechanism, it is unlikely that gas will be generated during the first 10,000 years of the repository lifetime.

Handling in the safety assessment SR-Site

Unsaturated conditions: The gas/air quantity in a deposition hole is approximately six percent of the whole volume at atmospheric pressure. When the hydrostatic pressure has been built up, this gas volume will have declined by a factor of 50, at an assumed 5 MPa hydrostatic head.

Saturated conditions: The bentonite buffer is an important barrier in the KBS-3 system. The key purpose of the buffer is to serve as a diffusional barrier between the canister and the groundwater in the rock. An important performance requirement on the buffer material is to not cause any harm to the other barriers. Gas build-up from corrosion of the iron insert could potentially affect the buffer performance in three ways:

1. Permanent pathways in the buffer could form at gas break-through. This could potentially lead to a loss of the diffusional barrier.
2. If the buffer does not let the gas through, the pressure could lead to mechanical damage of the other barriers. The main concern is damages to the near field rock.
3. The gas could dewater the buffer.
4. A gas phase could push water with radionuclides through the buffer along gas-generated pathways.
5. Some radionuclides may be transported in a gaseous phase.

The process of gas transport within the buffer is neglected except for deposition holes containing a defective canister. For that case, results of model and experimental studies of gas build-up and transport must be considered in an integrated assessment of the internal evolution of a damaged canister, including corrosion of the cast iron insert and water transport in the canister. The coupling between gas, porewater pressure and stress within the deposition hole and near field must also be considered.

- *Model:* The consequences of gas generation are estimated based on the experimental evidence mentioned above.
- *Boundary conditions:* Gas is generated inside the canister and will be released to the rock through the buffer. Increased total pressure (and porewater pressure) may occur anywhere in the system.
- *Handling of variables influencing this process:* The global rate of corrosion of the insert determines if the hydrogen gas produced can escape by diffusion or if a separate gas phase will be formed. Therefore the corrosion rate primarily determines the rate of pressure increase. This pressure may be transferred to the near-field rock and the backfill. At a certain gas pressure, it is assumed that the buffer will open and let the gas through. This maximum pressure is (probably) dependent on the swelling pressure of the buffer. However, while the swelling pressure (in constant volume) is a

very important parameter which should be approximately equal to the minimum pressure that gas remains mobile in the buffer, the maximum gas pressure is strongly associated with the ease at which gas can escape from the deposition hole, i.e. the number, location and geometry of available sinks. If the gas fails to find a sink, the pressure continues to rise. It is also influenced by the hydrostatic pressure and therefore the effect of a glacial overburden, leading to increased pressures, needs special consideration. The gas pathway in the buffer will stay open as long as the gas production rate is sufficiently high.

The integrated assessment of the internal evolution of a damaged canister will be carried out in the SR-Site Main Report.

After repository closure, the only direct flammability hazard to man that could arise is from the release of hydrogen at the surface. This has been assessed and found to be extremely unlikely to present any hazard (the calculation was for release into a building /Baker et al. 1997/). The flammability hazard will not be analyzed in SR-Site.

Adequacy of references supporting the suggested handling in the safety assessment SR-site

The handling in SR-Site is based on the experimental results by /Harrington and Horseman 2003/. That is a SKB Technical Report and has not been submitted to a formal peer review. However, the report has been cited by a number of external organisations. The handling of the gas migration in SR-Site is only based on empirical data from the experimental observations by /Harrington and Horseman 2003/. The suggested model in the report is not used in the treatment of the process.

Uncertainties

Uncertainties in mechanistic understanding

Gas transport: A remaining uncertainty in the understanding of gas transport in the buffer material concerns the number, size and spatial arrangement of the gas-bearing features and the volume (stress-strain) behaviour of the clay during gas injection. As mentioned in the Experiments/Models section above, the observed gas transport through bentonite can be interpreted in a number of different ways.

One critical uncertainty is the break-through pressure, i.e. the pressure when the buffer opens and lets the gas through. This determines the maximum pressure that can be created within the nearfield of the repository. Another uncertainty is the closure pressure, the pressure where the pathways in the bentonite do close. A further uncertainly relates to the volume of water displaced during gas flow. Potential dewatering of the clay may affect the engineering performance of the buffer.

These uncertainties will be considered in the integrated assessment mentioned above.

Model simplification uncertainties for the above handling in SR-Site

The evolution of the gas pressure and the gas transport in bentonite in SR-Site is still entirely based on values obtained from experimental results. The complexity of the flow processes and the uncertainties regarding the interpretation of the experiments make predictive modelling difficult at this stage (see above). The paucity of laboratory data available for further model development and calibration (both conceptual and numerical) is a major issue in relation to the quantitative treatment of gas in performance assessment.

Input data and data uncertainties for the above handling in SR-Site

The maximum gas pressure in the near-field is determined by the break-through pressure in the bentonite. In some experiments, this pressure has been found to be above 20 MPa for a bentonite with a swelling pressure of ~ 6 MPa. The high pressure may be an effect of the small experimental specimen, but since no data from large-scale experiments are available, high breakthrough pressures cannot be ruled out. This aspect of the gas migration process is explored through the Lasgit international collaborative project.

The gas production (corrosion) rate, which determines the timescale of the gas evolution history, is uncertain, as well as the effect of the rate of pressure increase on the process itself.
These data uncertainties will be considered in the integrated assessment mentioned above.

2.5.4 Treatment of gas in the near field in the SR-Can assessment

In a KBS-3 type repository, gas is only an issue if there is a failure of the copper canister and water can get into contact with the cast iron insert. In the SR-Can assessment four failure modes were defined (Figure 2.5.5)

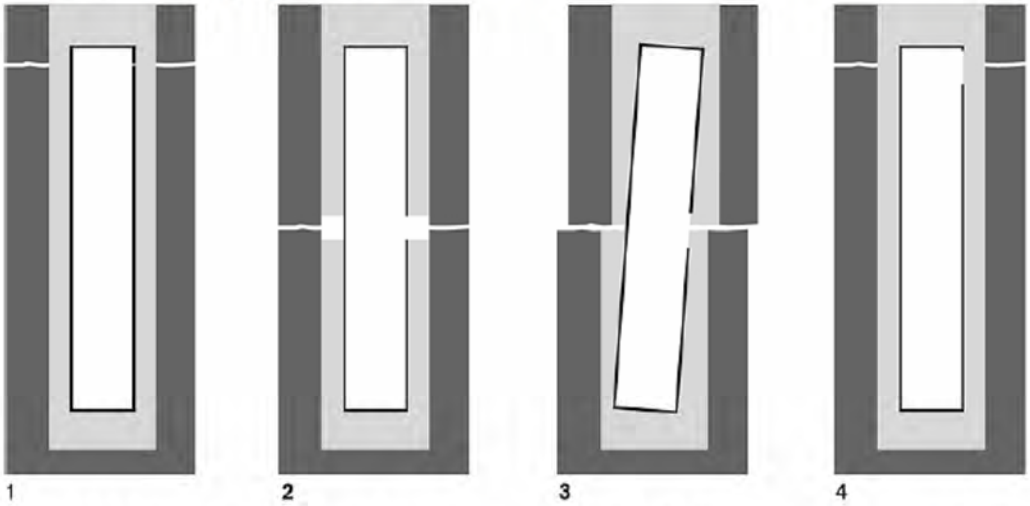


Figure 2.5.5 The four failure modes considered in SR-Can: 1 The growing pinhole failure, 2 The advection/corrosion failure, 3 The shear movement failure and 4 The isostatic load failure.

Gas transport through the buffer

The corrosion of the insert will generate hydrogen according to:

$$3Fe + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4H_2$$

A corrosion rate of 0.1 µm/year will generate 0.42 litres (STP) of hydrogen per m2 of iron surface per year.

A gas pressure build-up is expected within the canister, since the surrounding water-saturated bentonite is impermeable to gas flow. Transport by diffusion of hydrogen dissolved in the buffer pore water for different conditions has been estimated by /Wikramaratna et al. 1993/.

The formation of a gas phase is not possible in failure mode 2 (advection/corrosion failure, see section 10.1), since there is no buffer that can contain the gas in that case. It should be noted that a similar situation may occur also for failure mode 3 (shear movement failure) and failure mode 4 (isostatic load failure). The following description is thus valid also for these failure modes.

A small defect in the copper would give a capacity for diffusive transport which is much lower than the expected production rate, meaning that the gas pressure in the canister will increase.

The understanding of the mechanisms behind gas migration through a water-saturated bentonite is incomplete. The treatment of the process in SR-Can is essentially based on experimental observations (0). At a certain pressure, a pathway (most likely one or several fractures) in the bentonite will open and allow gas to pass through. In the SR 97 assessment, this pressure was assumed to be the sum of the swelling pressure and the hydrostatic pressure. However, recent experiments have shown that the entry pressure for gas into bentonite can be substantially higher than this. /Harrington and Horseman 2003/ has measured breakthrough pressures of up to 22.1 MPa. Maximum gas pressures in the range of 20–25 MPa can, therefore, not be ruled out. A build-up of such pressures would take at least 14,000 years with a corrosion rate of 0.1 µm/year, even if the entire surface of the insert were available for corrosion.

The fractures generated by the gas are expected to stay open as long as there is gas production within the canister. Experiments show that gas transport leads to no or very little desaturation of the bentonite. The buffer is, therefore, expected to retain its properties throughout the gas-transport period. When gas production ceases, the fractures are likely to close and seal.

The gas transport is, therefore, not expected to lead to an increased hydraulic conductivity of the buffer. The formation of a gas phase could push water out of the canister. However, this is only possible for water located above the defect. Based on current understanding, the hydrogen gas from corrosion is expected to have no negative effects on the performance of the buffer. However, high pressures can be expected in the near-field, although limited by the breakthrough pressure when the gas can be transported into the rock. The pressure increase would decrease the tangential stress in the deposition hole wall, but this would only be a problem in a strongly anisotropic stress field and if the deposition tunnels had been perpendicular to the main principal stress. Such a layout would not be considered Gas penetrating the fractures would decrease the normal stress, potentially leading to opening or even propagation of such fractures. However, the gas pressure will decrease rapidly along such fractures and the effect would only be very local around the deposition hole. Also, contaminated water may be pushed out by the gas under certain conditions, which is discussed below. If the gas pressure is built up during a period of glaciation, the hydrostatic pressure from the ice has to be added to the gas breakthrough pressure. This may lead to internal pressures of ~ 50 MPa inside the canister.

Effect of gas in canister interior pushing out contaminated water

As discussed in connection with gas generation in the canister interior following canister failure, the gas could act to push out contaminated water from the canister interior to the buffer. The sequence of events in this case is assumed to be:

- There is a penetrating defect in the lower part of the canister and water can enter and fill the entire canister void (~ 1 m3).
- Corrosion of the iron insert will generate hydrogen gas.
- The gas will accumulate in the top of the canister void.

- As the gas pressure increases, the water in the void will be pushed out through the defect.
- With a corrosion rate of ~ 0.1 μm/year it will take thousands of years to expel all the water in the void. However, in this calculation, no credit is taken for this delay.

The effects of such a situation are illustrated by a case where the inventory of radionuclides dissolved in the interior of the canister is redistributed to the buffer surrounding the canister. Hence the IRF inventory is released instantaneously to a buffer compartment with a water volume of ~ 1 m^3(corresponding to 1.5 m height of hollow cylinder shaped buffer surrounding the canister). Figure 2.5.6shows releases from the near field translated to doses using the LDF factors for a deterministic calculation case. The comparison to the deterministic base case in the figure shows that the effect of gas pushing contaminated water out of the canister is limited. In fact, by redistributing highly sorbing radionuclides like Nb-94 and to some extent Ra-226 further away from a fracture in the wall of the deposition hole, the annual doses from these are less than in the deterministic base case. The relatively sharp peak associated with I-129 is, in part, due to an inadequate discretisation of the near-field model. Also, the geosphere would act to disperse this pulse in time.

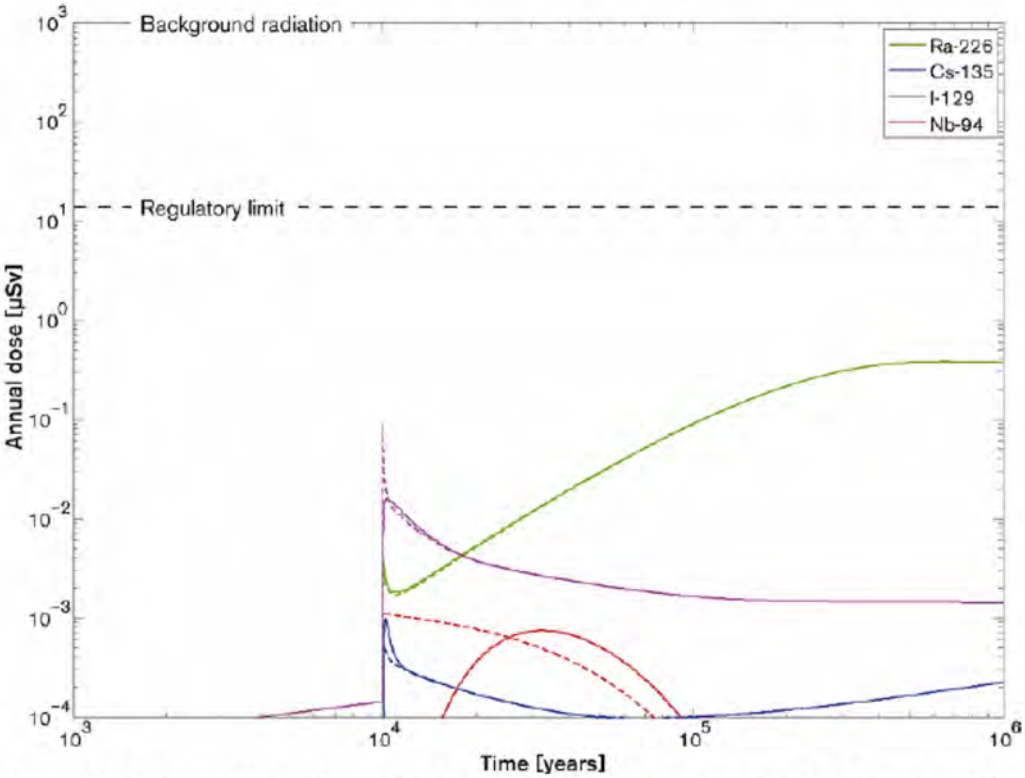


Figure 2.5.6 Comparison of near-field releases for the gas case (dashed lines) and the deterministic base case (solid lines). Deterministic calculation, numerical model.

2.5.5 Radionuclide transport in the gas phase

Gas transport through the buffer is described in the previous section as part of the treatment of failure mode 1. The formation of a gas phase is not possible in failure mode 2, since there is no buffer that can contain the gas in that case. The following description is valid for failure modes 1, 3 and 4.

The sealing properties of the buffer make it possible for a gas pressure to build up and a pulse of hydrogen gas to be released from a defective canister due to corrosion of the iron insert. Some radionuclides could potentially enter the gas phase and thereby be transported to the surface much more rapidly than would be the case for the aqueous pathway. In practice, only C-14 and Rn-222 are likely to enter the gas phase to any significant extent.

It is assumed that if gas production exceeds the ability of the surrounding groundwater to take it into solution and transport it away from the container that a pressure will build up within and adjacent to the container. Based on experimental evidence /Harrington and Horseman 2003/, the bentonite is assumed to ultimately open by fracturing and release gas when the internal pressure exceeds 20 MPa. A rapid outflow would be expected until the pressure fell to values below ~ 10 MPa when the buffer would seal and further gas transport would be by diffusion (however, see also below). This means that half of the gas inside the canister would be released instantaneously together with the radionuclides contained in that amount of gas. Neither the buffer nor the geosphere is expected to significantly delay the transport to the biosphere. After the initial breakthrough pulse, the pathway is expected to stay open as long a there is a gas production in the canister. After the breakthrough pulse, the gas is expected to be released at the same rate as it is produced by corrosion. The buffer will only close if the gas production falls to levels where the gas can dissolve and diffuse away.

Due to the uncertainties of the chemical form of carbon in the spent fuel, it is pessimistically assumed that the entire inventory of C-14 can enter the gaseous phase. The full inventory of Rn-222 is also assumed to be in the gaseous phase.

The time for gas breakthrough is determined by the failure time of the copper shell and the corrosion rate of the canister insert. At that time, half of the inventory of C-14 and Rn-222 is taken to be released immediately to the biosphere. The remaining gaseous inventory (and the Rn-222 that is produced) is then taken to be released together with the gas that is produced continuously. However, this release is neglected, since it will be insignificant in comparison with the pulse release. If the release occurs in the first 10,000 years (unlikely) the release of C-14 would be ~ 10 GBq. A release of Rn-222 would be about 25 GBq if the release occurred after 100,000 years. In /SKB 2006hi/ the calculated exposures from pulse releases of C-14 and Rn-222 are presented. C-14 may be released as methane (CH4) or carbon dioxide (CO2). It is assumed that if C-14 is released as methane from the repository, it will be oxidised to carbon dioxide by soil organisms. Radon is a noble gas and will not undergo chemical transformations. Two exposure cases are considered, one outdoors where radionuclides can be inhaled or consumed via uptake in plants in an area of 10,000 m2, subject to a wind speed of 2 m/s and a mixing height of 20 m, the other inhalation of radionuclides indoors in a house with a volume of 1,000 m3 and a ventilation rate of 2 h^{-1}. For C-14, exposure may occur via inhalation or ingestion, for Rn-222 only inhalation of Rn-222 and its radioactive daughter products needs to be taken into account.

Table 2.5.1 Calculated annual mean life time risk from pulse releases /SKB 2006ab/

Pathway	C-14 (10 GBq)	Rn-222 (25 GBq)
Ingestion	0.036 mSv/y	-
Inhalation (outdoor)	$4.4 \cdot 10^{-5}$ mSv/y	0.22 mSv/y
Inhalation (indoor)	0.0028 mSv/y	7.2 mSv/y

If the gas pressure is built up during a period of glaciation, the hydrostatic pressure from the ice has to be added to the gas breakthrough pressure. This may lead to internal pressures of ~50 MPa inside the canister. If the retreat of the ice is rapid, this could lead to pressure drops of around 40 MPa and consequently 80% of the gaseous inventory would be instantly released. The highest dose from a gas pulse of Rn-222 occurs in buildings. It is below the regulatory limits for an annual average life time risk for a repository, and it is considerably lower than the consequences of today limits of 200 Bq/m3 for radon in buildings in Sweden, which gives about 2 mSv/y.

REFERENCES

Baker A J, Lever D A, Rees J H, Thorne M C, Tweed C J, Wikramaratna R S, 1997. Nirex 97: An Assessment of the Post-closure Performance of a Deep Waste Repository at Sellafield. Volume 4: The Gas Pathway, Nirex Science Report S/97/012.

Cuss R, Harrington J F, 2009. "Lasgit project report". SKB TR-09-xx, Svensk Kärnbränslehantering AB. (in preparation)

Harrington J F, Horseman S T, 2003. Gas migration in KBS-3 buffer bentonite. Sensitivity of test parameters to experimental boundary conditions. SKB TR-03-02. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Pusch R, Forsberg T, 1983. Gas migration through bentonite clay. SKBF/KBS TR 83-71, Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.

Rodwell W, Hoch A, Swift B, 2003. The modelling of gas migration through compacted bentonite buffers in radioactive waste repositories: the work of the GAMBIT club. Materials Research Society 2003 Conference Proceedings: Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Kalmar, 2003.

Rodwell WR, 2005. Summary of a GAMBIT Club workshop on gas migration in bentonite, Madrid 29–30 October, 2003. SKB TR-05-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2006a. Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation Main Report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2006b. The biosphere at Forsmark. Data, assumptions and models used in the SR-Can assessment. SKB R-06-82, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2006c. The biosphere at Laxemar. Data, assumptions and models used in the SR-Can assessment. SKB R□06-83, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010. Buffer, Backfill and Other System Parts Process Report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-xx, Svensk Kärnbränslehantering AB. (in preparation)

Tissot B, Pelet R, 1971. Nouvelles donnees sur les mechanimes de genese et de migration du petrole simulation mathematique et application a la prospection. In: 8th World Petroleum Congress, Moscow, Russia. 35–46.

Wikramaratna R S, Goodfield M, Rodwell W R, Nash P J, Agg P J, 1993. A preliminary assessment of gas migration from the copper/steel canister. SKB TR 93-31, Svensk Kärnbränslehantering AB

2.6 Switzerland

2.6.1 Introduction

Nagra presented a concept for a repository for SF/HLW and long-lived ILW in Opalinus Clay in 2002. The study included a comprehensive analysis of gas production, transport and potential impacts of gas in performance assessment Nagra (2002a,b). In 2008, Nagra proposed a number of potential siting regions in Northern Switzerland for repositories for both SF/HLW/ILW and L/ILW (Nagra 2008a). For the SF/HLW repository, Opalinus Clay remains the proposed host rock, while for L/ILW the possibilities include marl, shale (Effingen beds) and claystones (Opalinus Clay or Brauner Dogger). Comprehensive analyses of the details of gas transport through Opalinus Clay are available for both a SF/HLW/ILW repository (Nagra 2002a,b, 2004) and for a L/ILW repository (2008b). The engineered barrier system and waste emplacement concepts for long-lived ILW and L/ILW are very similar and the repository concepts and gas production, build-up and transport aspects are thus discussed below together.

2.6.2 Repository concept for SF/HLW and long-lived ILW

The repository concept in Opalinus Clay envisions an array of long (~ 800 m) parallel tunnels at a depth of 600 to 900 m containing SF or HLW canisters, with the region around the canisters filled with bentonite, as shown in Fig. 2.6.1 (Nagra 2002b). Canisters are assumed to be fabricated from carbon steel (an alternative of a copper canister with iron insert is considered) with a wall thickness of 13 - 15 cm. No tunnel liner is envisioned, although steel rock bolts and mesh would be used as tunnel support, along with rails for transport of the emplacement wagons. Steel materials other than the canister contribute to gas production for only a few thousand years and make a small contribution to the total gas production. At an assumed disposal depth of 650 m, the vertical stress is 15.9 MPa, the maximum principal stress is 22.6 MPa and the minimum stress is 15.1 MPa. Opalinus Clay has a low hydraulic conductivity (< 10^{-13} m s^{-1}) and a porosity of ~ 0.12 (Nagra 2002b). The design and waste emplacement concept for ILW is discussed below along with the L/ILW repository concept.

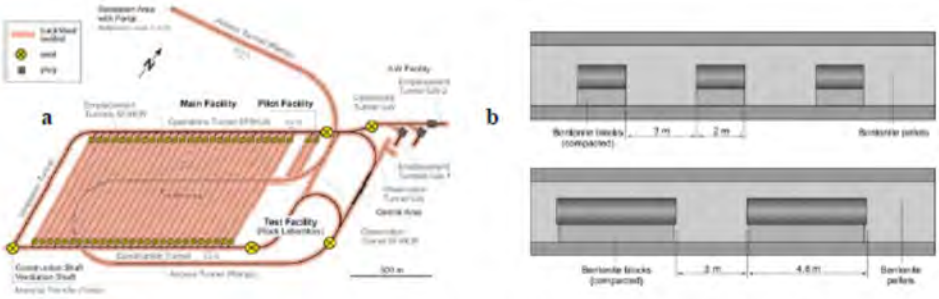


Figure 2.6.1: a) Plan view of SF/HLW/ILW repository in Opalinus Clay and b) longitudinal section of emplacement tunnels for HLW (top) and SF (bottom) in Opalinus Clay (Nagra 2002b).

2.6.2.1 Gas source term for SF/HLW

Corrosion

For a repository for SF and HLW, anaerobic corrosion of steel is the most significant source of gas production. The long-term steady-state corrosion rate of 1 μm/a for carbon steel used by Nagra in safety assessment is based on studies summarised by Johnson and King (2002). The duration of corrosion and thus of H_2 generation is estimated to be 100,000 to 200,000 years, assuming a canister wall thickness of 13-15 cm.

Radiolysis

The rate of production of hydrogen gas by radiolysis for the case of disposal of HLW and SF is assumed to be a small fraction of that from corrosion of steels, principally because of the substantial wall thickness of the canisters and the relatively rapid decay of the gamma intensity. As a result, the production rate of gas due to radiolysis has not been incorporated into calculations of gas build-up and dissipation.

Other sources of gas

Gases other than hydrogen may be released from waste or barrier materials present in a SF/HLW repository. These include fission gases and helium from spent fuel, the quantities of which are negligible relative to production of hydrogen from metal corrosion. Organic materials that might decompose to form organics are not present in significant amounts.

2.6.3 Repository concept for L/ILW

A plan view of the L/ILW repository in Opalinus Clay is shown in Figure 2.6.2 (Nagra 2008b). The assumed depth of such a repository is 300-400m. It is noted that Opalinus Clay is the least permeable of the host rocks under consideration for disposal of L/ILW, both from the hydraulic and gas transport perspectives, and the evaluation in Nagra (2008b) is intended to show that, despite this, it is expected to be feasible to utilize this rock for disposal of such waste, which has a significant gas-production potential. The potential allocation of the majority of the L/ILW to a repository in a more gas permeable rock (e.g. Effingen beds), with only the much smaller quantity of long-lived intermediate level waste disposed of in Opalinus Clay, remains an option.

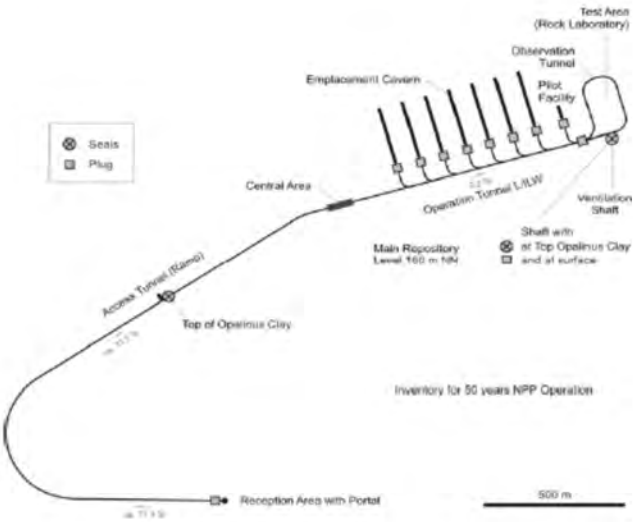


Figure 2.6.2: Plan view of the repository for L/ILW in Opalinus Clay (Nagra 2008b)

The estimates of the gas generation rates for the L/ILW repository are based on a waste inventory accounting for the existing nuclear power plants, with an assumed operation period of 50 years, and for wastes from medicine, industry and research with a collection period up to the year 2050. This inventory includes a total mass of approximately 40'000 tons of steel and other metals and about 2'200 tons of organic matter. The waste drums are placed into prefabricated reinforced concrete disposal containers and the void spaces within and between the containers are filled with viscous cementitious mortar (Figure 2.6.3a). The concept is similar for long-lived ILW (Fig. 2.6.3b), the main difference being the larger cross-

section of the L/ILW caverns, although the total waste inventory is much smaller (about 1000 tons of metals and organic matter (Nagra 2002b)).

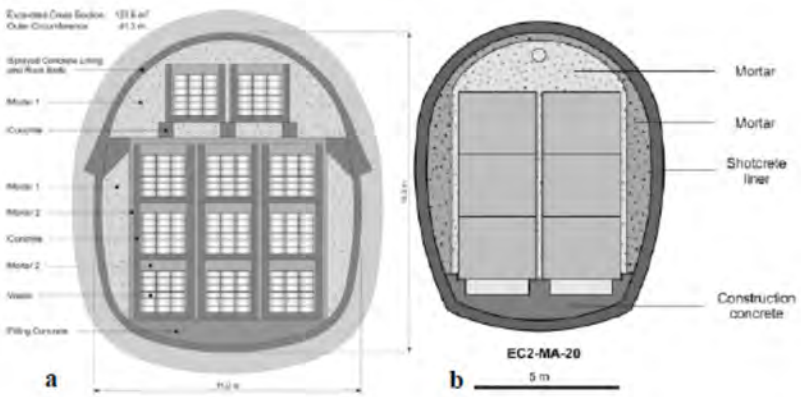


Figure 2.6.3: Cross-section of the waste emplacement tunnels for a) L/ILW (Nagra 2008b) and b) long-lived ILW, see Fig. 1a (Nagra 2002b).

In the study of effects of gas generation for a repository for L/ILW (Nagra 2008b), the use of very low permeability seals was studied, as well as a design option in which, by an appropriate choice of backfill and sealing materials, the gas can escape along the access ramp into the overlying rock formations without creating undue gas overpressures (Figure 2.6.4).

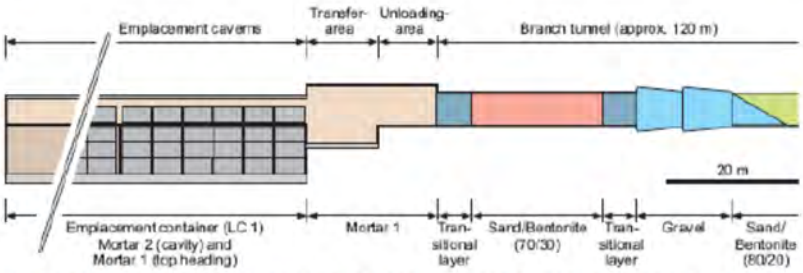


Figure 2.6.4: The engineered gas transport system concept (EGTS), one of the seal design variants discussed in Nagra (2008b).

2.6.3.1 Gas source term for L/ILW

The corrosion rates of metals and the degradation rates of organics used in calculations of gas production and transport for repositories for long-lived ILW and L/ILW are summarized in Table 2.6.1. References for the proposed rates are given in Nagra (2008b).

Table 2.6.1: Corrosion rates of metals and degradation rates of organics used in gas production and transport calculations for a repository for L/ILW (Nagra 2008b)

Metal	Corrosion rate (μm a^{-1})
carbon steel	0.1
stainless steels, nickel alloys	0.01
Zircaloy	0.01
Al and Zn	100*
Organic matter	**Degradation rate (mol kg^{-1} a^{-1})**
cellulose	0.7
plastics, resins and bitumen	0.05

*In Nagra 2002a, a value of 1 mm a^{-1} was used

2.6.4 Gas transport in Opalinus Clay

The transport mechanisms in clay host rock are illustrated in Figure 2.6.5. The basis for the phenomenology involves a range of field and laboratory investigations on Opalinus Clay and on similar clay-rich rocks (see Nagra (2004, 2008b)).

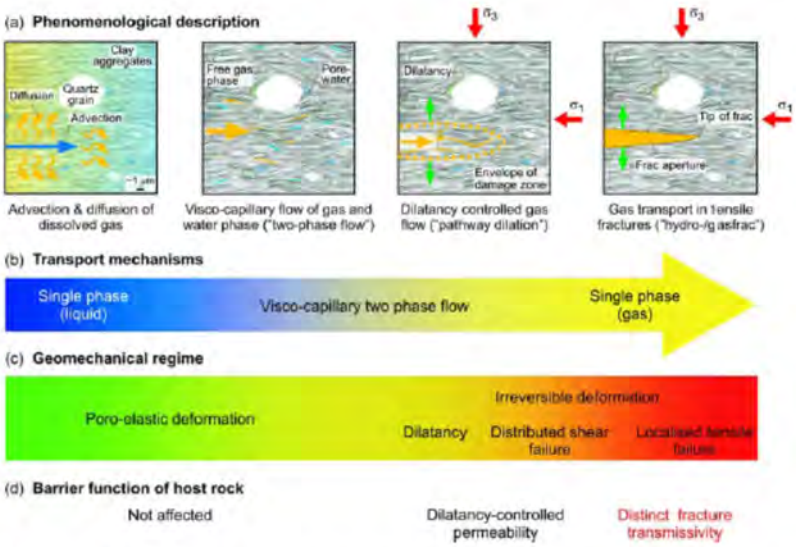


Figure 2.6.5: Phenomenological description of gas transport processes in argillaceous rock, along with the relationship of transport mechanisms to geomechanics and the barrier function of the rock (Nagra 2004, 2008b)

2.6.5 Gas production and transport in a repository for SF/HLW in Opalinus Clay

As noted in Nagra (2004), the solubility of hydrogen in porewater in the near field at repository hydrostatic pressure is expected to be exceeded within about 1,000 years as a result of corrosion of steel and slow diffusive transport through the Opalinus Clay. Visco-capillary two-phase flow would start when the gas pressure in the disposal area exceeds the sum of the in-situ porewater pressure and gas entry pressure (i.e. gas pressure > 11.5 MPa, assuming a gas entry pressure of 5 MPa and hydrostatic conditions at the repository level of 650 m bg). At a gas pressure of 15 MPa, corresponding to the magnitude of minimum principal stress, the specific flow is about 2 – 6 × 10 m^3 m^{-2} a^{-1} (STP), which is more than 3

orders of magnitude higher than the gas transport capacity of advection and diffusion (Figure 2.6.6)[4]. For the expected steel corrosion rate of 1 μm a^{-1}, equivalent to the realistic production rate for SF/HLW in Fig. 2.6.6, calculations suggest that gas transport by two-phase flow would be sufficient to prevent dilatant pathway formation, depending on the actual value of the gas permeability of the rock. Implicit in the calculations associated with Fig. 2.6.6 is the conservative assumption that the gas will dissipate directly into the host rock and will not flow along the EDZ, which would otherwise reduce the gas pressure.

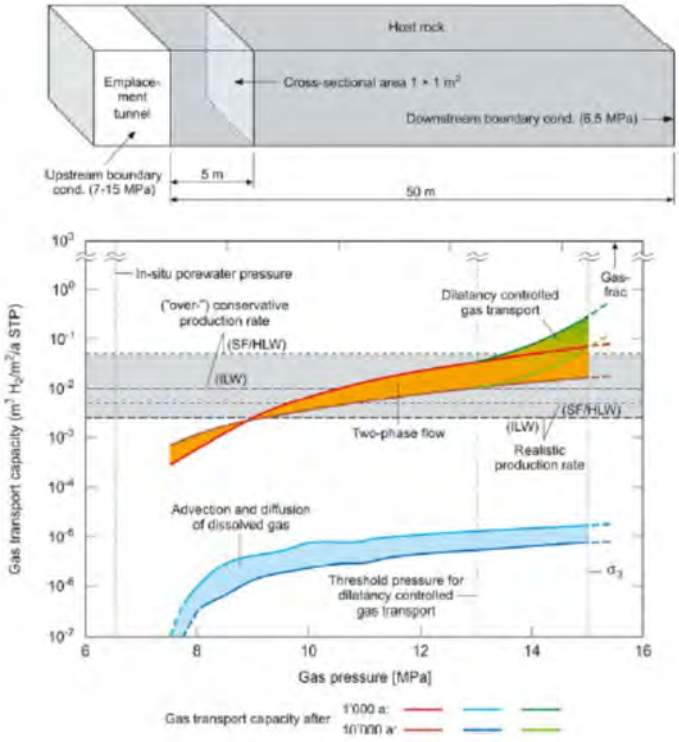


Fig. 2.6.6: Gas transport capacity of Opalinus Clay calculated using TOUGH2 (Pruess 1999). Upper – schematic of the model, consisting of a waste emplacement area and gas path through the host rock (length 50 m); Lower – specific gas flows through the cross-section located 5 m from the emplacement area, at times of 1,000a and 10,000 a (Nagra 2004).

The increased permeability and reduced strength of the EDZ is expected to lead to reduced gas entry pressure and an increase in pore space for gas storage. Gases are thus expected to migrate axially along the EDZ of the SF/HLW tunnels and then within the EDZ around the plugs. Access tunnels and the ramp are backfilled with 30:70 bentonite:sand mixture, which will have a low gas entry pressure and a significant gas storage capacity. Irrespective of the capacity of the tunnel pathway and EDZ to store and dissipate gas, the overlying host rock is judged to be capable of effectively dissipating the gas at the expected production rate. Results of field and laboratory studies of gas migration in Opalinus Clay in particular and in claystones in general suggest that both two-phase flow and horizontal pathway dilation along

[4] Note that the geometry is linear rather than radial, which leads to an underestimate of gas flow in the early gas release phase.

bedding planes will contribute to gas transport. Together these mechanisms can transport gas through the Opalinus Clay at gas pressures of 10 to 15 MPa, at rates significantly higher than the expected gas production rates. The slow rate of gas pressure buildup and the capacity of the rock to deform and conduct gas via horizontal dilatant pathways mean that tensile fracturing of the rock by gas pressure buildup will not occur. Dilatant pathways are expected to be limited to a horizontal region with a thickness of 5 – 10 m immediately around the repository tunnels, thus the majority of the Opalinus Clay host rock will be unaffected. Furthermore, the plasticity of Opalinus Clay will result in pathway sealing once gas flow stops.

2.6.6 Gas production and transport in a repository for L/ILW in Opalinus Clay

Gas production and repository design aspects

Complete corrosion / degradation of all gas-generating materials in the L/ILW repository yields a gas volume of approximately 20 to 30 million cubic meters (STP) (Nagra 2008b). The highest gas generation rates are expected in the early post-closure period up to several hundreds of years, followed by a steady decline. Corrosion of metals produces about ten times more gas than produced via the decomposition of organics. The expected total duration of the gas generation phase is in the order of 200'000 years. The total pore volume in the backfilled repository is in the order of 58'000 m^3 for the assumed waste inventory. If the total amount of corrosion and degradation gases were enclosed hermetically in this pore volume, a high gas pressure would result.[5] In the real system, however, at least a part of the gas will be released through the host rock, resulting in much lower pressures. In order to keep the gas pressure low even in the case of a very low host rock permeability and / or an increased gas production, specially designed backfill and sealing materials could be used, such as high porosity mortars as backfill materials for the emplacement caverns and sand/bentonite mixtures with a bentonite content of 20 – 30 % for backfilling other underground structures and for the seals (EGTS, see Fig. 2.6.4). The objective is to increase the gas transport capacity of the backfilled underground structures and thus prevent high pressure being reached in the caverns, without compromising the radionuclide retention capacity of the engineered barrier system.

Simulations of resaturation and gas transport

Modelling has been used to examine a wide range of cases, including sensitivity analyses related to host rock and seal permeability and the presence of a transmissive fracture zone. The results show that the time scales of repository resaturation for expected hydraulic conditions without gas generation are in the order of several 10'000s of years. Even for unexpected scenarios, such as poor performance of the plugs and seals, the resaturation times of the emplacement caverns are more than 5'000 years. Consequently, during the critical early phase characterized by high gas generation rates, the gas storage capacity of the emplacement caverns is high.

The combined gas/water transport in and around the backfilled underground structures and in the host rock was simulated with a two-phase flow simulator (TOUGH2), with which complex transport and exchange processes can be represented in detail. The model geometry is shown in Fig. 2.6.7. The finite difference grid consists of about 300,000 cells.

[5] This conclusion is different for the case of the much smaller inventory of wastes for emplacement tunnels for a repository for long-lived ILW. In this case the entire gas volume generated by the ILW can be stored at moderate pressure in the caverns (Nagra 2004).

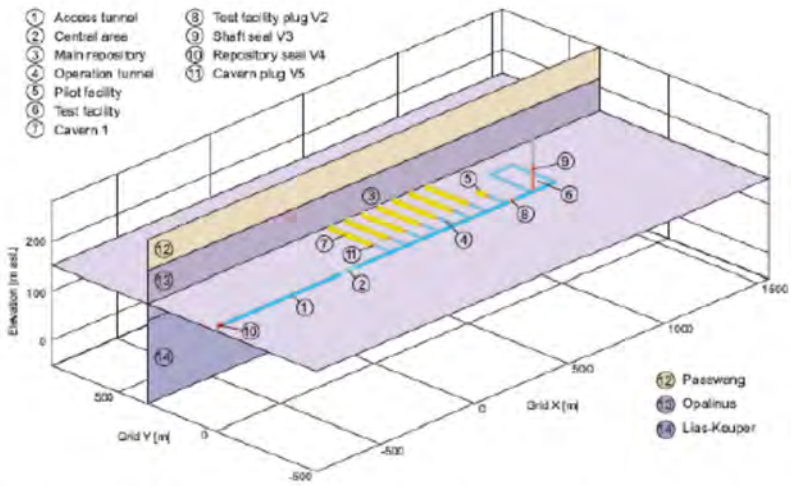


Figure 2.6.7: 3-D variant of the L/ILW cavern near-field model (Nagra 2008b)

Some example results of the evolution of gas pressures in the caverns for a number of cases from the suite of calculations presented in Nagra (2008b) are shown in Fig. 2.6.8. The cases illustrated include:

1) R_RCM01 – low rock permeability ($k_h = 1 \times 10^{-20}$ m^2, $k_v = 2 \times 10^{-21}$ m^2) and low permeability of the cavern plug V5 ($k_{V5} = 1 \times 10^{-18}$ m^2) and repository seal V4 ($k_{V4} = 1 \times 10^{-19}$ m^2).
2) R_RCM02 – the permeability of the seal V4 is increased by a factor of ten.
3) R_RCM03 – the host rock permeability is increased by a factor of five, with the permeability of seal V4 the same as case R_RCM02.
4) R_RCM04 - the capillary strength was reduced from 18 MPa to 5 MPa and the residual water saturation was increased from 0 to 0.5, with the permeability of seal V4 the same as case R_RCM02.

The results illustrate that only in the event of the permeability of the rock being low and the seal being tight does the pressure reach a value indicating the onset of pathway dilation.

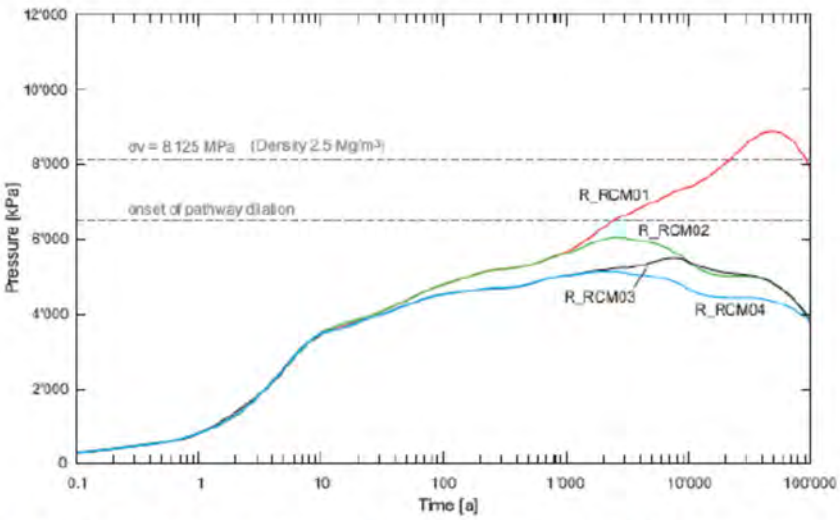


Fig. 2.6.8: 3-D model with gas release through the host rock and along the repository structures: temporal evolution of the gas pressure in cavern no. 1. Impact of the repository seal design and host rock properties on the pressure build-up (Nagra 2008b)

The overall conclusions from a large number of simulations of resaturation and gas pressure evolution are that, for the expected gas generation rate, the planned repository layout and a typical gas permeability of the host rock, the gas pressure in the emplacement caverns remains below the threshold pressure for the onset of pathway dilation (approximately 6.5 MPa or 80% of the lithostatic pressure for the assumed site conditions). For such conditions, no additional design measures are needed to mitigate gas impacts. For the case of conservative gas generation rates or a very low gas permeability of the rock ($k \leq 10^{-21}$ m^2), the gas pressure could rise above the critical threshold pressure of the onset of pathway dilation. Consequently, the use of appropriate backfill and sealing materials that ensure a release of a part of the gas along the access ramp would be a suitable design measure to limit gas pressure. Calculations indicate that such an approach could limit pressures in the emplacement caverns so that even in the case of a very low permeability host rock, overpressures above hydrostatic pressure would remain within a range of 3 – 4 MPa.

2.6.7 Gas impacts in performance assessment

2.6.7.1 Repository for SF/HLW/ILW

The theoretical understanding of and experimental evidence for gas transport mechanisms in the bentonite and Opalinus Clay demonstrate that diffusion and advection of dissolved gases will make no significant contribution to release of gas from the waste emplacement tunnels. The compacted bentonite in SF/HLW emplacement tunnels is expected to transport gas from the canisters to the rock via discrete pathways, with no impacts expected on the performance of the bentonite as a diffusive barrier for solutes, because very little of the porosity is available for gas storage. Furthermore, the plasticity of bentonite will result in pathway sealing once gas flow stops.

Irrespective of the capacity of the tunnel pathway and EDZ to store and dissipate gas, the overlying host rock is judged to be capable of effectively dissipating the gas at the expected production rate. Results of field and laboratory studies of gas migration in Opalinus Clay in particular and in claystones in general suggest that both two-phase flow and horizontal pathway dilation along bedding planes will contribute to gas transport. Together these

mechanisms can transport gas through the Opalinus Clay at gas pressures of 10 to 15 MPa, at rates significantly higher than the expected gas production rates. Furthermore, at the expected corrosion rate of 1-2 µm/a for carbon steel, calculations suggest that two-phase flow can transport gas effectively and that the associated gas production rate is 5-10 times below the pressure for dilatant pathway formation in the undisturbed rock (Landolt et al. 2009). The rate of gas pressure buildup is slow and horizontal dilatant pathways will form in the EDZ, where the entry pressure is lower. Dilatant pathway formation would be limited to a domain with a thickness of 5 – 10 m immediately around the repository tunnels, thus the majority of the Opalinus Clay host rock would be unaffected. Furthermore, the plasticity of Opalinus Clay will result in pathway sealing once gas flow stops.

Based on the understanding developed on gas production in the emplacement tunnels and gas transport mechanisms and capacities in the EBS and host rock, a simplified model of gas pressure evolution and gas migration in the disposal system has been developed. This model suggests that, for a repository in the Zürcher Weinland, gas transported through the host rock and tunnel system will slowly accumulate in the overlying Wedelsandstein formation, from which it will be released gradually to the overlying Malm aquifer by diffusion. This model has been applied to calculations of the transport and release of potentially volatile ^{14}C, assumed to be carried with the principal non-radioactive gases, hydrogen and methane. These calculations indicate that doses in such a case would be at least three orders of magnitude below the regulatory dose limit.

The possible displacement of some porewater from the near field into the surrounding rock and/or through the ramp/shaft system due to gas pressure build-up has been evaluated in an additional assessment model. In this case, calculations are performed for all safety-relevant radionuclides. This scenario is most relevant for ILW, where there is a significant quantity of porewater that may be displaced from the cementitious near field, and for SF, where there is the possibility of isplacement of some porewater that would contain the instant release fraction. In these cases, the calculated doses are more than three orders of magnitude below the dose limit. Several "what if?" calculations related to the impacts of gas production on releases from the repository have also been considered. These include calculations of porewater displacement through the ramp/shaft only (i.e. the model assumes no concurrent porewater displacement into the rock) and calculations for the assumption of unretarded transport of volatile ^{14}C through the host rock to the Wedelsandstein formation followed by diffusional release to the overlying Malm aquifer. Even in these cases, doses are calculated to be at least two orders of magnitude below the dose limit.

2.6.7.2 Repository for L/ILW

The modelling studies reported in Nagra (2008b) represent an improvement relative to the prior studies (Nagra 2002a,b, 2004) in basic understanding of gas transport processes, in the detailed modelling of coupled hydraulic and gas transport processes and in providing an improved basis for making decisions regarding host rock and design characteristics for a repository for L/ILW. The lessons learned from the performance assessment perspective include the following:

1) For the expected gas generation rate, cavern volume and design, and typical gas permeability of the host rock, the gas pressure is expected to stay below the critical threshold pressure for pathway dilation which is considered to be 80% of the lithostatic pressure. For such conditions, no additional design measures are needed to mitigate gas impacts. For the case of conservative gas generation rates, or the case of a very low gas permeability of the rock of $\leq 10^{-21}$ m^2, the gas pressure could rise above this value. Although pathway dilation is not considered to be very critical for host rock barrier performance due to the excellent self-sealing properties of the Opalinus Clay, as a precautionary principle it is nevertheless investigated if and how much the gas pressure can be kept below this critical threshold value. As a result, the placement of gas-

permeable plugs at the exit of each cavern would be a prudent design measure. Calculations indicate that such an approach could keep pressures in the range of 3 – 4 MPa above hydrostatic pressure even in the case of very low permeability rock. The time for peak pressure to be reached is in the order of several thousands to several tens of thousands of years.

2) High porosity mortars should be selected as backfill materials for the emplacement caverns in order to increase the gas storage capacity. Sand/bentonite mixtures with a bentonite content of 20 – 30 % could be used in the EGTS. With this approach, the gas transport capacity of the backfilled underground structures can be increased significantly without significant negative impact on the radionuclide retention function of the system.
3) The assessment of the possibility of gas overpressures includes an evaluation of possible deviations from the expected behaviour of the repository system after closure. Self-sealing along the saturated part of the engineered gas path due to hydrochemical interactions between the sand/bentonite of the cavern plug and cementitious backfill material could reduce gas flow, thus increasing pressure in the emplacement caverns. Such self-sealing is not expected in regions that remain unsaturated.

As a result of the elevated gas pressures in the caverns, porewater containing dissolved radionuclides will be displaced into the geosphere. Calculations with the conservative assumption of a steady-state specific water flux of 10^{-11} m s^{-1} indicate that the dose would be a factor of ten below the dose limit of 0.1 mSv a^{-1} (see Figure A5.2-1, Nagra 2008c). Consequently, an even lower dose rate would be expected for the case of a transient flow field. It can thus be concluded that gas effects on the movement of contaminants from a L/ILW repository in Opalinus Clay will not compromise safety.

2.6.7.3 Uncertainties in the present treatment of gas production and transport

The laboratory and field studies of gas production and transport and their synthesis in safety assessment studies provide a basis for identifying the uncertainties in data and models and their significance. In the area of gas production, the long-term anaerobic corrosion rates of metals are quite well known in particular under the alkaline repository conditions. The rates have not been measured under partially saturated conditions, for which lower rates might be expected. The production rates of gases from decomposition of organics in a L/ILW repository are expected to be overestimated, as laboratory studies normally produce lower yields than values given in Table 1, but the lack of detailed information on evolution of conditions, e.g. microbial viability under alkaline conditions, makes it difficult to use the existing experimental data directly in models.

In the area of gas transport for a L/ILW repository, hydrochemical interactions at the interface between cementitious backfill and sand/bentonite seals may play an important role in influencing gas entry pressures of these materials. The extent to which these occur under saturated conditions is not well understood and may influence gas release. Nonetheless, unsaturated conditions are expected to be sustained within upper regions of L/ILW emplacement caverns and seals. Under such conditions, such sealing processes are not likely to occur as gas pressures will keep pores open, hindering precipitation processes.

The scale dependence of transport properties and the extension of existing data bases on gas-related parameters of Opalinus Clay and EBS materials remain important areas of study. Gas transport in the host rock formation and the backfilled underground structures of a geological repository is a multiphase flow problem. Reliable predictions of multiphase flow depend on the understanding of the physical processes that take place at the pore scale (nm to µm), and on the ability of accurately representing their effects at the field scale (m – hectometer) by means of appropriate conceptual models. Conventional multiphase models are based on an incomplete empirical parameterisation of pore structure and flow mechanisms, because they cannot resolve the deformation mechanisms and physico-chemical phenomena on the pore scale. Pore-scale models can represent even complex

transport phenomena, such as hydro-mechanical and hydro-chemical interactions of the fluid and solid phases. Here the key challenge is to provide the necessary microstructural information with sufficient spatial resolution, which is needed for an adequate representation of the pore-scale phenomena.

Dilatancy controlled gas flow is associated with rock deformation, leading to a temporary enhancement of porosity and permeability by micro-fracturing in the time period when gas pressure exceeds the threshold pressure for dilatant flow. Diverse experimental evidence has been gained, that recompaction of the dilated claystone will occur at elevated effective stress ("geomechanical self-sealing"), as soon as the gas pressure decreases (Nagra 2002a). Thus, pathway dilation is a process which reduces the risk of extended gas fracs, which could impair the long-term barrier function of the host rock. Nonetheless, the complexity of dilatancy controlled processes, the necessity of obtaining a much larger body of experimental evidence and the need to invoke self-sealing, makes the safety arguments for this transport mechanism more challenging. Therefore, in the context of generic safety assessment studies it is presently the strategy to investigate the possibility of preventing the development of the dilatancy regime in the rock barrier.

2.6.8 Planned research activities

In order to further improve understanding of gas-related processes and to reduce associated uncertainties, research in a number of areas is being pursued, as discussed in Nagra (2008d), including:

- Gas production in L/ILW caverns:
  - exploring waste conditioning options for L/ILW that may result in lower gas releases rates and/or lower total gas releases
  - further evaluating gas release rates from L/ILW materials under relevant conditions
- Gas transport in and release from L/ILW caverns:
  - Impacts of evolution of the near field on gas transport from caverns, including changes in porosity and pore structure in the host rock near the boundary of excavations
  - Assessment of sealing concepts for L/ILW caverns, including the behaviour of sand/bentonite mixtures as gas permeable seals
- Further investigation of gas transport properties of bentonite-based buffer for SF/HLW emplacement tunnels
- Further studies of gas transport through the EDZ of SF/HLW emplacement tunnels
- Laboratory and field studies of gas transport through Opalinus Clay, including
  - Importance of the heterogeneity of the rock on its gas transport characteristics
  - Impact of gas pressure and gas release on the transport characteristics of the rock.
- Model development including upscaling of gas transport processes, interpretation of data from gas-related experiments and integrated system modelling as input for safety assessment

REFERENCES

Johnson, L.H. & King, F. (2003): Canister options for the direct disposal of spent fuel. Nagra Technical Report NTB 02-11. Nagra, Wettingen, Switzerland.

Landolt, D., A. Davenport, A., J. Payer, J. & D.W. Shoesmith., D.W. (2009.): A review of materials and corrosion issues regarding canisters for disposal of spent fuel and high-level waste in Opalinus Clay. Nagra Tech. Report NTB 09-02. Nagra , Wettingen, Switzerland.

Nagra (2002a): Projekt Opalinuston – Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Tech. Rep. NTB 02-03. Nagra, Wettingen, Switzerland.

Nagra (2002b): Project Opalinus Clay: Safety report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Tech. Rep. NTB 02-05. Nagra, Wettingen, Switzerland.

Nagra (2004): Effects of post-disposal gas generation in a repository for spent fuel, high-level waste and long-lived intermediate level waste sited in Opalinus Clay. Nagra Technical Report NTB 04-06, Nagra, Wettingen, Switzerland.

Nagra (2008a): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager / Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse (Hauptbericht). Nagra Tech. Rep. NTB 08-03. Nagra, Wettingen, Switzerland. Nagra, Wettingen, Switzerland.

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 Technical Report 08-07.

Nagra (2008c): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie / Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit. Nagra Tech. Rep. NTB 08-05. Nagra, Wettingen, Switzerland.

Nagra (2008d): Bericht zum Umgang mit den Empfehlungen in den Gutachten und Stellungnahmen zum Entsorgungsnachweis, Nagra Tech. Report NTB 08-02. Nagra, Wettingen, Switzerland.

Pruess, K., Oldenburg, C. & Moridis, G. (1999): TOUGH2 user's guide, Version 2. Lawrence Berkeley Laboratories, Report LBL-43134, Berkeley, CA.

第 6 章　平成 25 年度のまとめ

6.1　目的

本調査は、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」[2][3][4][5][6][7]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／高度化が図られたが、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い状況を背景として、材料試験によるガス移行挙動を把握し、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得られる解析手法（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した。

平成 25 年度においては、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 年度の 5 年の実施計画の作成を実施した。そして次の段階として、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た。

6.2　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

本検討においては、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」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した。平成 25 年度は、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。さらにその計画の一部として、ガス移行試験の準備作業（供試体作製）を実施した。

6.2.1　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が示唆されている。

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抽出を行った。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を行った。

6.2.2　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、数年間オーダー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。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。

6.2.3　ガス移行挙動評価試験の準備（供試体の作成）

前項にて策定された実施計画に基づき、ガス移行試験の準備作業（供試体作製）を実施した。材料供試体の作成に係る以下の作業を実施した。

- 材料の調達
- 材料供試体の作製
- ガス移行試験（ガス注入）の前段階としての材料供試体の飽和（再冠水）

6.2.4　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諸特性がある。これを受け、TRU2次レポート[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水分特性のデータをガス移行評価のための連成解析に資するものとして取得した。

6.3　セメント系材料のガス移行データ取得

本検討では、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、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上記解析に必要なモルタルの物性パラメータを取得した。

6.3.1　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した。

・TRU レポート（1 次/2 次）
・NUMOTRU レポート（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」

6.3.2　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）試験による気液二相流パラメータの取得を実施する。本年度においては、今後の研究展開について検討するとともに、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の気液二相流特性を取得した。

6.3.3　セメント系材料によるガス移行取得データの評価

取得されたデータを評価するための参照資料として、国内外にて同等の条件にて行われたセメント系材料のガス移行試験データを収集し、本検討にて得られたデータの評価を以下の手順にて行った。

（1）セメント系材料のガス移行挙動試験データの文献収集

セメント系材料のガス移行特性を取得するために国内外で実施された試験事例の収集を文献調査にて行った。

（2）収集文献中のデータ整理

収集文献中のデータを以下の観点にて整理した。

・実施環境（飽和/不飽和の別など）
・供試体の材料構成とサイズ
・その他（データの信頼性等）

（3）本検討にて得られたデータの評価

本検討によって得られたデータを、前項にて得られたデータ（実施条件を含む）と比較して得られたデータの検証を行った。

6.4　ガス移行連成解析ツールの高度化

本研究では、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、化学場との連成事象（THM、THC）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。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具体的な利用・再評価を進めるとともに、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具体的な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。

6.4.1　ガス移行挙動解析ツールの高度化に係る解析検討

「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―」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の入手・整理を行い、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を評価することができた。なお、これらの検証については、パラメータの設定などに追加検討の余地が存在している。

6.4.2　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

次に、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する。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。

(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設定し、TRU 処分システムを対象とし、解析モデルを構築して時系列のガス移行解析を実施し、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た。

6.5 ガス移行評価シナリオの拡張

本検討では、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」にて構築した手法をもとに、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。平成 25 年度は、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。

6.5.1 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、技術課題を抽出した。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
本検討では、TRU 二次レポートおよび NUMO の地層処分低レベル廃棄物の処分概念を対象に、対象とする廃棄物分類、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、安全機能の展開表、統合 FEP の関連図を作成した。

(2) シナリオ整理シートの作成
本検討では、(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、シナリオ整理シートを作成した。

(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

本検討では、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。

6.5.2 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した。なおその際、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)を参考とした。

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とりまとめ－(2005).

[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：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)