

平成 26 年度  
地層処分技術調査等事業  
TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発  
報 告 書  
(第 4 分冊)

—人工バリア材料長期挙動評価・  
人工バリア評価の初期条件の設定—

平成 27 年 3 月

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

本報告書は、経済産業省からの委託研究として、公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した平成26年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発のうち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の成果を取りまとめたものです。

## 報告書の構成

平成 26 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発は、以下の分冊により構成されている。

当該報告書	分冊名	報告書の標題
	第 1 分冊	平成 26 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上－
	第 2 分冊	平成 26 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－炭素 14 長期放出挙動評価－
	第 3 分冊	平成 26 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－ナチュラルアナログ調査－
◎	第 4 分冊	平成 26 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア評価の初期条件の設定－
	第 5 分冊	平成 26 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 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が改正により、地層処分の対象廃棄物に追加された。これに伴い、平成 20 年 3 月に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」及び「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」が改定され、併置処分の実施も念頭に、TRU 廃棄物と高レベル放射性廃棄物は地層処分事業という統合された計画の中で、最終処分の開始を平成 40 年代後半を目途に事業を進めるというスケジュールが示されている。また、同改正法は平成 20 年 4 月より施行され、NUMO が高レベル放射性廃棄物の地層処分に加え、TRU 廃棄物の地層処分の実施主体としての認可を受けた。これらの背景を踏まえて、TRU 廃棄物の処分に向けた技術開発については、TRU 廃棄物の地層処分に関する全体基本計画（以下、基盤研究開発計画）に示されるように、高レベル放射性廃棄物処分の技術開発との整合を図りつつ、併置処分の技術的成立性をより確実にするための検討を含め、地層処分事業のスケジュールを考慮して進める必要がある。そして、NUMO が目的とする技術開発等へ直接的に反映させるために、処分事業に先行して技術基盤の整備を進めることに加え、科学的知見の拡充による技術的信頼性や安全性の向上を図るために、国の基盤研究開発として実施することが期待されている。

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

したがって、TRU 廃棄物処分の技術開発において、TRU 廃棄物処分の重要核種であるヨウ素 129（グループ 1）および炭素 14（グループ 2）の影響を低減するための代替技術の開発として、10 万年以上のヨウ素閉じ込め性能を目標とした複数のヨウ素固化体開発に関して、その処理プロセスの成立性を見通しを示すとともに、長期評価のためのヨウ素放出の評価モデルを提案した。一方、炭素 14 対策としては、ソースタームの現実的な評価として、インベントリ設定方法の基本的な考え方を示すとともに、金属の腐食や炭素 14 浸出率のデータを一部取得して、長期予測のためのモデル化を検討した。さらに、炭素 14 の 10 半減期に相当する 6 万年間の閉じ込めのための容器を開発し、その実現性を示した。これらの成果により、環境条件に応じた評価・概念設計に対応できる基礎的な技術・手法を整備することができたが、それらを用いた長期安全性評価の信頼性を確保するためには、これまでに提案、構築した評価手法、評価モデルの信頼性を向上させるとともに、その説明の妥当性について十分な根拠を示すことが必要である。また、精密調査地区の選定時に、対象となる地質環境に応じた予備的安全評価や施設の概念設計を実現可能な現実的な条件で実施可能とするため、材料および地質環境の多様性に対応した、人工バリアの長期挙

動に係わるデータ取得ならびに評価モデルの開発が行われたが、さらにその精緻化、信頼性向上が必要である。

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

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

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
- (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 4 分冊）では、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に関する平成 26 年度の成果を取り纏めた。

## 目 次

第 1 章 事業概要.....	1-1
1.1 背景.....	1-1
1.2 目的及び検討概要.....	1-1
1.3 前フェーズ(平成 24 年度まで)の成果と課題.....	1-2
1.4 本フェーズ(平成 25 年度から)の全体計画とこれまでの成果.....	1-6
1.4.1 全体計画.....	1-6
1.4.2 平成 25 年度の成果概要.....	1-10
1.5 平成 26 年度の実施事項.....	1-15
1 章の参考文献.....	1-20
第 2 章 緩衝材の化学変質に関する試験.....	2-1
2.1 圧縮系でのモンモリロナイトの変質による二次鉱物生成挙動に関する試験.....	2-1
2.1.1 モンモリロナイトのアナルサイトへの変質観察試験.....	2-1
2.1.2 モンモリロナイトのクリノプチロライトへの変質を想定した観察試験.....	2-27
2.1.3 シリカリッチ相の成長観察試験.....	2-44
2.1.4 排出溶液の組成によるベントナイト変質の検討.....	2-52
2.1.5 圧縮系でのモンモリロナイトの変質による二次鉱物生成に関する試験のまとめ.....	2-54
2.2 モンモリロナイトの変質過程の挙動試験.....	2-55
2.2.1 モンモリロナイトのイオン交換過程の挙動試験.....	2-55
2.2.2 モンモリロナイトのゼオライト変質挙動試験.....	2-75
2.2.3 モンモリロナイトの変質過程の挙動試験のまとめ.....	2-100
2.3 長期挙動評価解析への影響因子の検討.....	2-101
2.3.1 試験方法.....	2-101
2.3.2 試験結果.....	2-109
2.3.3 長期挙動評価解析への影響因子の検討のまとめ.....	2-147
2.4 セメントーベントナイト接触試料の分析.....	2-148
2.4.1 セメントーベントナイト接触試料.....	2-148
2.4.2 試験方法.....	2-150
2.4.3 試験結果.....	2-152
2.4.4 セメントーベントナイト接触試料の分析のまとめ.....	2-173
2.5 緩衝材の化学変質に関する試験のまとめ.....	2-174
2 章の参考文献.....	2-175

第 3 章 緩衝材の連成解析モデルに関わる力学特性に関する試験.....	3-1
3.1 検討方法.....	3-1
3.2 力学・物質移動特性変化に関する試験.....	3-5
3.2.1 使用材料.....	3-5
3.2.2 物理試験.....	3-9
3.2.3 力学試験.....	3-12
3.2.4 水理特性.....	3-47
3.2.5 力学・物質移動特性変化に関する試験のまとめ.....	3-54
3.3 長期性能評価のための化学・力学連成モデル試験.....	3-59
3.3.1 試験の概要.....	3-59
3.3.2 Na 型ベントナイトの Ca 型化に伴う力学挙動変化に関する試験.....	3-61
3.3.3 Na 型ベントナイトの溶解に伴う力学挙動変化に関する試験.....	3-77
3.3.4 化学変質を伴う力学挙動試験試料の分析.....	3-90
3.3.5 化学変質を伴う力学挙動試験に関する地化学解析.....	3-146
3.3.6 長期性能評価のための化学・力学連成モデル試験のまとめ.....	3-166
3.4 緩衝材の連成解析モデルに関わる力学特性に関する試験のまとめ.....	3-168
3 章の参考文献.....	3-170
第 4 章 HMC 連成解析手法の検討.....	4-1
4.1 HMC 連成解析構築に向けた化学解析手法の検討.....	4-1
4.1.1 モンモリロナイト溶解変質モデルの検討.....	4-1
4.1.2 構築した溶解変質モデルによる地化学変質解析.....	4-30
4.1.3 モンモリロナイト変質に関わる熱力学データの整備.....	4-44
4.1.4 HMC 連成解析構築に向けた化学解析手法の検討のまとめ.....	4-49
4.2 セメント系材料の物質移行予測モデルの構築.....	4-51
4.2.1 実用的材料を対象とした物質移行予測モデルの構築.....	4-52
4.2.2 実用的材料の変質に伴う物質移行変化を予測する手法の検討.....	4-99
4.2.3 モルタル材料の変質を伴う物質移行変化を予測する手法の検討.....	4-133
4.2.4 セメント系材料の物質移行予測モデルの構築のまとめ.....	4-135
4.3 人工バリア材料長期挙動評価のための HMC 連成解析の高度化.....	4-136
4.3.1 処分場二次元断面に関する HMC 連成解析における化学解析.....	4-136
4.3.2 処分場二次元断面における HMC 連成解析に関する力学解析.....	4-211
4.4 HMC 連成解析手法の検討のまとめ.....	4-258
4 章の参考文献.....	4-260



第 5 章 人工バリア評価の初期条件の設定 .....	5-1
5.1 熱影響の初期値への影響に関する検討.....	5-1
5.1.1 定温度試験による結晶化条件の検討.....	5-2
5.1.2 経年コンクリートの分析による結晶化条件の検討 .....	5-60
5.1.3 熱影響が及ぼす特性値への影響および今後の課題 .....	5-76
5.1.4 熱影響の初期値への影響に関する検討のまとめ.....	5-86
5.2 部材寸法の初期値への影響に関する試験.....	5-87
5.2.1 実施概要 .....	5-88
5.2.2 室内試験による物性値への影響確認試験 .....	5-90
5.2.3 初期条件の設定方法に関する検討（まとめ） .....	5-135
5.3 非破壊検査技術に関する検討.....	5-140
5.3.1 平成 25 年度までの実施概要と平成 26 年度実施内容.....	5-140
5.3.2 TOFD 法計測の適用検討.....	5-144
5.3.3 1 探触子法に関する検討.....	5-149
5.3.4 非破壊検査技術に関する検討のまとめ .....	5-156
5.4 人工バリア評価の初期条件の設定のまとめ .....	5-158
5 章の参考文献.....	5-160
第 6 章 まとめ .....	6-1
6.1 人工バリア材料長期挙動評価.....	6-2
6.1.1 緩衝材の化学変質に関する試験（本報告書：第 2 章） .....	6-2
6.1.2 緩衝材の連成解析に関わる力学特性に関する試験（本報告書：第 3 章） .....	6-3
6.1.3 HMC 連成解析手法の検討（本報告書：第 4 章） .....	6-5
6.2 人工バリア評価の初期条件の設定（本報告書：第 5 章） .....	6-8

## 目 次

図 1.4.1-1	課題の抽出と研究内容の策定 .....	1-6
図 1.4.1-2	人工バリアの建設から閉鎖後の長期と本検討の関係及び検討概要 .....	1-8
図 1.4.1-3	本検討で考慮する化学変質と力学挙動の関係 .....	1-8
図 1.4.1-4	二次鉱物の生成と力学挙動への影響のイメージと検討課題 .....	1-9
図 1.4.1-5	5 ヶ年(平成 25~29 年度)の計画 .....	1-9
図 1.4.2-1	モンモリロナイトの変質時の体積変化 .....	1-10
図 1.4.2-2	セメント-ベントナイト接触試料 .....	1-11
図 1.4.2-3	緩衝材の力学挙動に関する試験結果 .....	1-11
図 1.4.2-4	二次元化学解析結果 .....	1-12
図 1.4.2-5	数学モデルによるモンモリロナイト実効反応表面積の算定手法の検討成 果 .....	1-12
図 1.4.2-6	セメント系材料の骨材を考慮した三次元モデル .....	1-13
図 1.4.2-7	力学解析モデルで考慮したベントナイトの変質に伴う体積変化挙動の模 式図 .....	1-13
図 1.4.2-8	C-S-H の定温度試験結果(XRD による結晶化の確認) .....	1-14
図 1.4.2-9	熱履歴を受けた経年コンクリートで確認した C-S-H の結晶化状況(SEM 観 察) .....	1-15
図 2.1.1-1	高温溶液反応のその場観察が可能な干渉計(垂直走査干渉計 VSI) .....	2-3
図 2.1.1-2	干渉計によるその場観察に用いた反応セル(自動圧縮セル) .....	2-3
図 2.1.1-3	自動圧縮セルの詳細図 .....	2-3
図 2.1.1-4	干渉計試験における圧力(a)と NaOH 濃度条件(b)の設定 .....	2-6
図 2.1.1-5	干渉計データの解析結果(0.1MPa, 0.5M NaOH) .....	2-7
図 2.1.1-6	各 AOI における溶解速度プロット(0.1MPa, 0.5M NaOH) .....	2-7
図 2.1.1-7	干渉計データの解析結果(0.1MPa, 2.0M NaOH) .....	2-8
図 2.1.1-8	各 AOI における溶解速度プロット(0.1MPa, 2.0M NaOH) .....	2-9
図 2.1.1-9	干渉計データの解析結果(0.5MPa, 0.5M NaOH) .....	2-10
図 2.1.1-10	各 AOI における溶解速度プロット(0.5MPa, 0.5M NaOH) .....	2-10
図 2.1.1-11	干渉計データの解析結果(0.5MPa, 2.0M NaOH) .....	2-11
図 2.1.1-12	各 AOI における溶解速度プロット(0.5MPa, 2.0M NaOH) .....	2-12
図 2.1.1-13	干渉計データの解析結果(1.0MPa, 0.5M NaOH) .....	2-13
図 2.1.1-14	各 AOI における溶解速度プロット(1.0MPa, 0.5M NaOH) .....	2-13
図 2.1.1-15	干渉計データの解析結果(1.0MPa, 2.0M NaOH) .....	2-14
図 2.1.1-16	各 AOI における溶解速度プロット(1.0MPa, 2.0M NaOH) .....	2-15

図 2.1.1-17	試験期間における溶解速度の変化.....	2-16
図 2.1.1-18	乾燥密度と溶解速度の関係.....	2-17
図 2.1.1-19	自動圧縮セル内の変質相の分布(a: 上流側; b: 下流側).....	2-17
図 2.1.1-20	干渉計測定試料 (モンモリロナイト) の $\mu$ -XRD パターン.....	2-18
図 2.1.1-21	出発試料の AFM 像.....	2-19
図 2.1.1-22	干渉計による 0.5M NaOH におけるモンモリロナイト変質試験後試料の AFM 観察.....	2-19
図 2.1.1-23	自動圧縮セルから回収された固相試料(粘土)の FESEM-EDS 観察分析.....	2-20
図 2.1.1-24	自動圧縮セルから回収された固相 (変質相) の FESEM-EDS 観察・分析.....	2-20
図 2.1.1-25	粒子状変質相の FESEM-EDS 分析結果.....	2-21
図 2.1.1-26	粒子状変質相周辺のサポナイトの FESEM-EDS 分析結果.....	2-22
図 2.1.1-27	クリソタイル組成を示すチューブ状変質相の FESEM-EDS 分析結果.....	2-22
図 2.1.1-28	排出溶液の化学組成変化(a: 溶液の NaOH 濃度設定; b: 圧縮圧力の設定; c: Si 濃度; d: Al 濃度).....	2-24
図 2.1.1-29	排出溶液の Al vs. Si プロット.....	2-25
図 2.1.1-30	溶液の組成と溶解速度の関係(a: Si vs. rate; b: Al vs. rate).....	2-26
図 2.1.2-1	天然クリノプチロライト鉱石標本.....	2-27
図 2.1.2-2	ベントナイト変質試験(P = 0.1 MPa)の明視野観察(a: Run3, t = 72.3h; b: Run3, t = 76.5h; c: Run5, t = 126.2h; d: Run5, t = 167.1h).....	2-29
図 2.1.2-3	ベントナイト変質試験(P = 0.5 MPa)の明視野観察(a: Run1, t = 0h; b: Run1, t = 100.0h; c: Run3, t = 103.7h; d: Run3, t = 117.8h).....	2-30
図 2.1.2-4	ベントナイト変質試験(P = 1.0 MPa)の明視野観察(a: Run1, t = 0h; b: Run1, t = 40.7h; c: Run2, t = 40.7h; d: Run2, t = 51.2h).....	2-31
図 2.1.2-5	ベントナイト変質試験後回収した試料の $\mu$ -XRD 測定結果.....	2-32
図 2.1.2-6	ベントナイト変質試験後回収した試料の AFM 観察結果.....	2-33
図 2.1.2-7	モンモリロナイトの観察結果(a: FESEM 画像; EDS ピーク; c: 化学組成).....	2-34
図 2.1.2-8	モンモリロナイトの観察結果(a: FESEM 画像; EDS ピーク; c: 化学組成).....	2-34
図 2.1.2-9	モンモリロナイトの観察結果(a: FESEM 画像; EDS ピーク; c: 化学組成).....	2-35
図 2.1.2-10	Ca に富む変質相の観察結果(a: FESEM 画像; EDS ピーク; c: 化学組成).....	2-35

☒ 2.1.2-11	Kunigel-V1+CLP 変質試験(P = 0.1 MPa)の明視野観察(a: Run2, t = 10.6h; b: Run2, t = 42.5h) .....	2-37
☒ 2.1.2-12	Kunigel-V1+CLP 変質試験(P = 0.5 MPa)の明視野観察(a: Run1, t = 0h; b: Run1, t = 16.1h; c: Run2, t = 16.1h; d: Run2, 69.1h; e: Run3, 69.1h; f: Run3, 92.7h) .....	2-38
☒ 2.1.2-13	Kunigel-V1+CLP 変質試験(P = 1.0 MPa)の明視野観察(a: Run1, t = 0h; b: Run1, t = 47.0h; c: Run2, t = 47.0h; d: Run2, 70.4h) .....	2-39
☒ 2.1.2-14	ベントナイト+CLP 変質試験後回収した試料の $\mu$ -XRD 測定結果 .....	2-40
☒ 2.1.2-15	ベントナイト+CLP 変質試験後回収した試料の AFM 観察結果 .....	2-41
☒ 2.1.2-16	ベントナイト+CLP 変質試験後試料の FESEM-EDS 観察分析結果 .....	2-42
☒ 2.1.2-17	溶解を示す添加したクリノプチロライト結晶 .....	2-43
☒ 2.1.3-1	変質モンモリロナイト試験の明視野観察(a: Run1, t = 0h; b: Run1, t = 7.8h, 2.0 MPa; c: Run2, t = 47.0h; d: Run2, 70.4h, 0.1 MPa) .....	2-47
☒ 2.1.3-2	変質モンモリロナイト試験(0.5 MPa)の明視野観察(a: Run1, t = 0h; b: Run1, t = 21.2h; c: Run2, t = 21.2h; d: Run2, 29.4h) .....	2-48
☒ 2.1.3-3	変質モンモリロナイト試験後回収した試料の $\mu$ -XRD 測定結果 .....	2-49
☒ 2.1.3-4	変質モンモリロナイト試験後回収した試料の AFM 観察結果 .....	2-50
☒ 2.1.3-5	FESEM-EDS 観察結果 .....	2-51
☒ 2.1.4-1	ベントナイト変質試験における圧力条件と溶液組成変化(a: 圧力変化; b: Si 濃度; c: Al 濃度) .....	2-53
☒ 2.1.4-2	ベントナイト変質試験における排出溶液の Al vs. Si プロット .....	2-54
☒ 2.2.1-1	Ca 濃度の温度依存性 .....	2-56
☒ 2.2.1-2	アクリル-PEEK シリンジと高圧容器を用いた変質試験装置の概念図 .....	2-57
☒ 2.2.1-3	イオン交換過程の挙動試験に用いたシリンジセルの概念図 .....	2-57
☒ 2.2.1-4	イオン交換過程の挙動試験に用いたシリンジセルの初期状態 .....	2-58
☒ 2.2.1-5	イオン交換過程の挙動試験における体積変化 .....	2-61
☒ 2.2.1-6	イオン交換過程の挙動試験におけるモンモリロナイトの XRD パターン .....	2-62
☒ 2.2.1-7	モンモリロナイト出発試料の AFM 観察 .....	2-63
☒ 2.2.1-8	EX1 の AFM 測定結果 .....	2-63
☒ 2.2.1-9	EX2 の AFM 測定結果 .....	2-64
☒ 2.2.1-10	EX3 の AFM 測定結果 .....	2-64
☒ 2.2.1-11	EX4 の AFM 測定結果 .....	2-65
☒ 2.2.1-12	EX5 の AFM 測定結果 .....	2-65
☒ 2.2.1-13	EX6 の AFM 測定結果 .....	2-66
☒ 2.2.1-14	Kunipia-F の FESEM-EDS 観察結果(a: FESEM 像; b: EDS チャート; c:	

組成分析値).....	2-66
☒ 2.2.1-15 Kunipia-Fに含まれるシリカ粒子(a: FESEM 像; b: EDS チャート; c: 組成分析値).....	2-67
☒ 2.2.1-16 EX1 試料のマクロ観察・分析結果 (モンモリロナイト部分) .....	2-67
☒ 2.2.1-17 EX2 試料のマクロ観察・分析結果 (モンモリロナイト部分) .....	2-68
☒ 2.2.1-18 EX2 試料の変質相の観察・分析結果 .....	2-68
☒ 2.2.1-19 EX3 試料のマクロ観察・分析結果 (モンモリロナイト部分) .....	2-69
☒ 2.2.1-20 EX3 試料の変質相の観察・分析結果 .....	2-69
☒ 2.2.1-21 EX4 試料のマクロ観察・分析結果 (モンモリロナイト部分) .....	2-70
☒ 2.2.1-22 EX4 試料の変質相の観察・分析結果 .....	2-70
☒ 2.2.1-23 EX5 試料のマクロ観察・分析結果 (モンモリロナイト部分) .....	2-71
☒ 2.2.1-24 EX5 試料の変質相の観察・分析結果 .....	2-71
☒ 2.2.1-25 EX6 試料のマクロ観察・分析結果 (モンモリロナイト部分) .....	2-72
☒ 2.2.1-26 EX6 試料の変質相の観察・分析結果 .....	2-72
☒ 2.2.1-27 溶液とモンモリロナイトの層間イオン組成の関係(a: Na; b: K).....	2-73
☒ 2.2.1-28 溶液と変質相の化学組成の関係(a: モンモリロナイトの Na; b: K)....	2-74
☒ 2.2.2-1 シリンジ変質試験に用いたシリンジセルの概念図.....	2-77
☒ 2.2.2-2 モンモリロナイトの変質過程の体積変化 .....	2-78
☒ 2.2.2-3 ベントナイトの変質過程の体積変化 .....	2-79
☒ 2.2.2-4 モンモリロナイト変質試験試料の XRD パターン .....	2-80
☒ 2.2.2-5 ベントナイト試料の XRD パターン .....	2-81
☒ 2.2.2-6 モンモリロナイトにおけるシリンジ試験試料(ALT1-8)の AFM 粒子解析結果.....	2-82
☒ 2.2.2-7 ベントナイトにおけるシリンジ試験試料(ALT9-12)の AFM 粒子解析結果 .....	2-83
☒ 2.2.2-8 シリンジ試験の反応後密度と溶解速度の関係.....	2-85
☒ 2.2.2-9 ALT1 試料のモンモリロナイトの観察・分析結果.....	2-86
☒ 2.2.2-10 ALT2 試料のモンモリロナイトの観察・分析結果.....	2-86
☒ 2.2.2-11 ALT3 試料のモンモリロナイトの観察・分析結果.....	2-87
☒ 2.2.2-12 ALT3 試料のアナルサイム変質相の観察・分析結果.....	2-87
☒ 2.2.2-13 ALT4 試料のモンモリロナイトの観察・分析結果.....	2-88
☒ 2.2.2-14 ALT4 試料のアナルサイムの観察・分析結果.....	2-88
☒ 2.2.2-15 ALT5 試料のモンモリロナイトの観察・分析結果.....	2-89
☒ 2.2.2-16 ALT5 試料のアナルサイムの観察・分析結果.....	2-89
☒ 2.2.2-17 ALT6 試料のモンモリロナイトの観察・分析結果.....	2-90
☒ 2.2.2-18 ALT6 試料のアナルサイムの観察・分析結果.....	2-90

☒ 2.2.2-19	ALT7 試料のモンモリロナイトの観察・分析結果.....	2-91
☒ 2.2.2-20	ALT7 試料のクリノプチロライトの観察・分析結果.....	2-91
☒ 2.2.2-21	ALT8 試料のモンモリロナイトの観察・分析結果.....	2-92
☒ 2.2.2-22	ALT8 試料のサニディンの観察・分析結果.....	2-92
☒ 2.2.2-23	ALT8 試料のアナルサイムの観察・分析結果.....	2-93
☒ 2.2.2-24	ALT9 試料のモンモリロナイトの観察・分析結果.....	2-93
☒ 2.2.2-25	ALT9 試料のサニディンの観察・分析結果.....	2-94
☒ 2.2.2-26	ALT9 試料の変質相の観察・分析結果.....	2-94
☒ 2.2.2-27	ALT10 試料のモンモリロナイトの観察・分析結果.....	2-95
☒ 2.2.2-28	ALT11 試料のモンモリロナイトの観察・分析結果.....	2-95
☒ 2.2.2-29	ALT11 試料のモンモリロナイトの観察・分析結果.....	2-96
☒ 2.2.2-30	ALT11 試料の Na 変質相の観察・分析結果.....	2-96
☒ 2.2.2-31	ALT11 試料のクリノプチロライトの観察・分析結果.....	2-97
☒ 2.2.2-32	ALT12 試料のモンモリロナイトの観察・分析結果.....	2-97
☒ 2.2.2-33	ALT12 試料の Na 変質相の観察・分析結果.....	2-98
☒ 2.2.2-34	溶液とモンモリロナイトの層間イオン組成の関係(a: Na; b: K).....	2-98
☒ 2.2.2-35	溶液と変質相の化学組成の関係(a: Na; b: K; c: Ca).....	2-99
☒ 2.2.2-36	モンモリロナイトの短期変質とベントナイトの長期変質過程の体積変化 .....	2-100
☒ 2.3.1-1	セメントーベントナイト接触試料の浸漬試験.....	2-101
☒ 2.3.1-2	試料の外観写真 EPMA 測定試料の調整.....	2-102
☒ 2.3.1-3	評価のための試料作成のイメージ.....	2-103
☒ 2.3.1-4	セメント硬化体の XRD 測定位置.....	2-104
☒ 2.3.1-5	ベントナイトの XRD 測定位置.....	2-106
☒ 2.3.1-6	$\mu$ -XRD 分析位置.....	2-107
☒ 2.3.1-7	試料 B04 $\mu$ -XRD 測定箇所.....	2-107
☒ 2.3.1-8	試料 B08 $\mu$ -XRD 測定箇所.....	2-108
☒ 2.3.1-9	試料 B15 $\mu$ -XRD 測定箇所.....	2-108
☒ 2.3.1-10	試料 B20 $\mu$ -XRD 測定箇所.....	2-109
☒ 2.3.2-1	EPMA 分析用試料 (1).....	2-109
☒ 2.3.2-2	EPMA 分析用試料 (2).....	2-110
☒ 2.3.2-3	試料 B04 元素濃度分布 (ライン分析).....	2-112
☒ 2.3.2-4	試料 B04 元素濃度分布 (マッピング分析).....	2-113
☒ 2.3.2-5	試料 B08 元素濃度分布 (ライン分析).....	2-114
☒ 2.3.2-6	試料 B08 元素濃度分布 (マッピング分析).....	2-115
☒ 2.3.2-7	試料 B15 元素濃度分布 (ライン分析).....	2-116

図 2.3.2-8	試料 B15 元素濃度分布 (マッピング分析)	2-117
図 2.3.2-9	試料 B20 元素濃度分布 (ライン分析)	2-118
図 2.3.2-10	試料 B20 元素濃度分布 (マッピング分析)	2-119
図 2.3.2-11	溶液中の沈殿	2-120
図 2.3.2-12	セメント相の XRD 分析結果 (試料 B04)	2-122
図 2.3.2-13	セメント相の XRD 分析結果 (試料 B08)	2-122
図 2.3.2-14	セメント相の XRD 分析結果 (試料 B15)	2-123
図 2.3.2-15	セメント相の XRD 分析結果 (試料 B20)	2-123
図 2.3.2-16	ベントナイト相の XRD 分析結果 (試料 B04)	2-125
図 2.3.2-17	ベントナイト相の XRD 分析結果 (試料 B08)	2-125
図 2.3.2-18	ベントナイト相の XRD 分析結果 (試料 B15)	2-126
図 2.3.2-19	ベントナイト相の XRD 分析結果 (試料 B20)	2-126
図 2.3.2-20	ベントナイト相の XRD 分析結果 (C-S-H の確認 : 試料 B04)	2-128
図 2.3.2-21	ベントナイト相の XRD 分析結果 (C-S-H の確認 : 試料 B08)	2-128
図 2.3.2-22	ベントナイト相の XRD 分析結果 (C-S-H の確認 : 試料 B15)	2-129
図 2.3.2-23	ベントナイト相の XRD 分析結果 (C-S-H の確認 : 試料 B20)	2-129
図 2.3.2-24	EPMA によるイオン型分析 (試料 B04)	2-131
図 2.3.2-25	PMA によるイオン型分析 (試料 B08)	2-131
図 2.3.2-26	EPMA によるイオン型分析 (試料 B15)	2-131
図 2.3.2-27	EPMA によるイオン型分析 (試料 B20)	2-132
図 2.3.2-28	試料 B04 ベントナイトの CCD 像 (a:B04_b1, b:B04_b6)	2-133
図 2.3.2-29	試料 B04 ベントナイトーセメント接触面の X 線回折	2-133
図 2.3.2-30	試料 B04 ベントナイトーセメント接触面の $\mu$ -XRD パターンフィッティング	2-134
図 2.3.2-31	試料 B04_b5 ベントナイト部 1.2mm 内側の X 線回折	2-134
図 2.3.2-32	試料 B04_b5 ベントナイト部 1.2mm の $\mu$ -XRD パターンフィッティング	2-135
図 2.3.2-33	試料 B04_b6 ベントナイト部 2mm 内側の X 線回折	2-135
図 2.3.2-34	試料 B04_b6 ベントナイト部 2mm の $\mu$ -XRD パターンフィッティング	2-136
図 2.3.2-35	試料 B04_ベントナイトの X 線回折の変化	2-136
図 2.3.2-36	試料 B04_セメントの CCD 像 (a:B04_c1, b:B04_c3)	2-137
図 2.3.2-37	試料 B04_c1 セメント部接触面の X 線回折	2-137
図 2.3.2-38	試料 B04_c1 セメント部接触面の $\mu$ -XRD パターンフィッティング	2-138
図 2.3.2-39	試料 B04_c2 セメント部 2mm 内側の X 線回折	2-138
図 2.3.2-40	試料 B04_c1 セメント部 2mm 内側の $\mu$ -XRD パターンフィッティング	

.....	2-139
☒ 2.3.2-41 試料 B04_c3 接液面から 2.5mm の X 線回折 .....	2-139
☒ 2.3.2-42 試料 B04_c3 接液面から 2.5mm の $\mu$ -XRD パターンフィッティング .....	2-140
.....	2-140
☒ 2.3.2-43 試料 B04_セメントの X 線回折の変化 (強度に差があるため、強度を 1/2 に、5 倍にして表示している) .....	2-140
☒ 2.3.2-44 試料 B08 ベントナイトの X 線回折 .....	2-141
☒ 2.3.2-45 試料 B08_b2 ベントナイトの $\mu$ -XRD パターンフィッティング .....	2-141
☒ 2.3.2-46 試料 B08 セメントの X 線回折 .....	2-142
☒ 2.3.2-47 試料 B08_c1 接液面の $\mu$ -XRD パターンフィッティング .....	2-142
☒ 2.3.2-48 試料 B15 ベントナイトの X 線回折 .....	2-143
☒ 2.3.2-49 試料 B15_b1 接液面の $\mu$ -XRD パターンフィッティング .....	2-143
☒ 2.3.2-50 試料 B15 セメントの X 線回折 .....	2-144
☒ 2.3.2-51 試料 B15_c1 接液面の $\mu$ -XRD パターンフィッティング .....	2-144
☒ 2.3.2-52 試料 B20 ベントナイトの X 線回折 .....	2-145
☒ 2.3.2-53 試料 B20_b1 接液面の $\mu$ -XRD パターンフィッティング .....	2-145
☒ 2.3.2-54 試料 B20_セメントの X 線回折 .....	2-146
☒ 2.3.2-55 試料 B20_c1 接液面の $\mu$ -XRD パターンフィッティング .....	2-146
☒ 2.4.1-1 Box-core-1 の写真 .....	2-149
☒ 2.4.1-2 コア切断状況 .....	2-149
☒ 2.4.1-3 EPMA 用試料の採取状況 .....	2-150
☒ 2.4.3-1 ベントナイト混合土の接触界面近傍の元素濃度分布 .....	2-153
☒ 2.4.3-2 コンクリートの接触界面近傍の元素濃度分布 .....	2-154
☒ 2.4.3-3 濃度プロファイル(1) .....	2-155
☒ 2.4.3-4 濃度プロファイル(2) .....	2-156
☒ 2.4.3-5 ベントナイト側の XRD 測定結果 (EG 処理前) .....	2-158
☒ 2.4.3-6 ベントナイト側の XRD 測定結果 (EG 処理後) .....	2-158
☒ 2.4.3-7 ベントナイト側の XRD 測定結果・2010 データ、拡大図 (EG 処理後) .....	2-159
.....	2-159
☒ 2.4.3-8 ベントナイト側の XRD 測定結果・2014 データ、拡大図 (EG 処理後) .....	2-159
.....	2-159
☒ 2.4.3-9 セメント側の XRD 測定結果 .....	2-160
☒ 2.4.3-10 過去のデータと比較 (鉍物カルサイトの XANES) .....	2-160
☒ 2.4.3-11 Box core-1 試料の XANES (BG 除去、規格化後) .....	2-161
☒ 2.4.3-12 Ca 中の鉍物割合 (Box-core-1) .....	2-162
☒ 2.4.3-13 試料の鉍物割合 (Box-core-1) .....	2-163



図 2.4.3-14	C-S-H 混合の模擬変質試料の XAFS (BG 除去、規格化後) .....	2-164
図 2.4.3-15	C-S-H 混合模擬試料の Ca 中の鉍物割合 .....	2-165
図 2.4.3-16	C-S-H 模擬試料の鉍物割合 .....	2-166
図 2.4.3-17	C-S-H 混合模擬試料の Ca 中の鉍物割合 (斜長石量固定) .....	2-166
図 2.4.3-18	C-S-H 模擬試料の鉍物割合 (斜長石量固定) .....	2-167
図 2.4.3-19	Box-core-1 の Ca 中の鉍物割合 (斜長石量固定) .....	2-168
図 2.4.3-20	Box-core-1 の鉍物割合 (斜長石量固定) .....	2-168
図 2.4.3-21	BL を基準とした際の希塩酸溶解鉍物の増加率 .....	2-171
図 2.4.3-22	BL を基準にした際の C-S-H の生成率 .....	2-172
図 2.4.3-23	層間中の陽イオンの分析結果 .....	2-173
図 3.1.1-1	クニゲル V1 の鉍物組成[2] .....	3-2
図 3.1.1-2	ベントナイトの膨潤による“応力履歴の亡失”と“比表面積の増大”のイメージ図 .....	3-2
図 3.1.1-3	本研究フェーズの全体計画のイメージ .....	3-3
図 3.1.1-4	力学試験のモデルへの反映イメージ .....	3-4
図 3.1.1-5	モデルの構築における本検討の位置付け .....	3-5
図 3.2.1-1	カナダ・ケベック産アナルサイムの X 線回折パターン .....	3-6
図 3.2.1-2	微粉碎アナルサイムの作成手順 .....	3-7
図 3.2.1-3	粉碎後のアナルサイムの X 線回折パターン .....	3-8
図 3.2.2-1	粉碎後のアナルサイムの粒度分布 .....	3-12
図 3.2.3-1	一次元排気圧縮試験の模式図 .....	3-13
図 3.2.3-2	一次元圧縮試験の反映先と理論展開 .....	3-14
図 3.2.3-3	一次元圧縮試験のモデル構築への反映イメージ .....	3-15
図 3.2.3-4	変質後人工ベントナイトの一次元圧縮試験結果 .....	3-16
図 3.2.3-5	変質後人工ベントナイトの完全飽和線と既往の結果の比較 .....	3-17
図 3.2.3-6	モンモリロナイト変質率と基準乾燥密度の関係 .....	3-17
図 3.2.3-7	変質前の基準乾燥密度とモンモリロナイト含有率の関係 .....	3-18
図 3.2.3-8	変質前の基準乾燥密度とモンモリロナイト含有率の関係 .....	3-20
図 3.2.3-9	変質後人工ベントナイトの $e \sim \ln p'$ 関係 .....	3-22
図 3.2.3-10	新しいパラメータを導入した完全飽和線 .....	3-23
図 3.2.3-11	新しいパラメータを導入した $e \sim \log P$ 関係 .....	3-23
図 3.2.3-12	新しいパラメータの効果 .....	3-24
図 3.2.3-13	新しいパラメータを導入した完全飽和線 .....	3-25
図 3.2.3-14	新しいパラメータを導入した完全飽和線 $e \sim \log P$ 関係 .....	3-25
図 3.2.3-15	新しいパラメータの効果 .....	3-26
図 3.2.3-16	モンモリロナイト含有率毎の膨潤量試験結果 .....	3-28

図 3.2.3-17	e-logP 平面における膨潤量試験結果	3-28
図 3.2.3-18	e-logP 平面における膨潤量試験結果と完全飽和線	3-29
図 3.2.3-19	随伴鉱物の土骨格構造と膨潤性鉱物の分離のイメージ	3-30
図 3.2.3-20	試験後のモンモリロナイト含有率の計測方法	3-31
図 3.2.3-21	解体用スライサー	3-31
図 3.2.3-22	モンモリロナイト含有率毎の膨潤量試験結果	3-32
図 3.2.3-23	e-logP 平面における膨潤量試験結果	3-32
図 3.2.3-24	膨潤量試験前後の供試体の乾燥密度とモンモリロナイト含有率の分布	3-35
図 3.2.3-25	膨潤によるのモンモリロナイト含有率の不均一化の影響調査のイメージ	3-35
図 3.2.3-26	随伴鉱物の影響評価とモデル化のイメージ	3-36
図 3.2.3-27	微粉碎モンモリロナイトの膨潤性能変化	3-37
図 3.2.3-28	XRD によるモンモリロナイトの粉碎によるアスペクト比の変化の確認結果	3-38
図 3.2.3-29	モンモリロナイトの粉碎によるアスペクト比の変化イメージ	3-38
図 3.2.3-30	せん断試験イメージ図	3-38
図 3.2.3-31	一面せん断試験機の全景	3-39
図 3.2.3-32	下せん断箱の凹凸を施したポーラスメタル	3-39
図 3.2.3-33	供試体作製時の鉛直応力と摩擦応力	3-40
図 3.2.3-34	せん断中の鉛直応力とせん断応力の経時変化	3-41
図 3.2.3-35	せん断試験中のストレスパス	3-41
図 3.2.3-36	せん断後の供試体とせん断面の状況	3-42
図 3.2.3-37	カオリンの等体積一面せん断試験中のストレスパス	3-43
図 3.2.3-38	初期鉛直応力で無次元化したせん断試験中のストレスパス	3-43
図 3.2.3-39	せん断試験結果のイメージ	3-44
図 3.2.3-40	一次元排気圧縮過程とせん断過程の乾燥密度と鉛直応力の関係と 間隙比と鉛直応力の関係	3-45
図 3.2.3-41	せん断変位とせん断応力の関係	3-47
図 3.2.3-42	ストレスパス	3-47
図 3.2.4-1	有効ベントナイト乾燥密度と透水係数の関係	3-49
図 3.2.4-2	モンモリロナイト含有率と透水係数の関係	3-49
図 3.2.4-3	モンモリロナイト含有率と透水係数の関係	3-50
図 3.2.4-4	乾燥密度と全間隙比・内間隙比・外間隙比の関係	3-50
図 3.2.4-5	2層膨潤計測用 XRD セル	3-51
図 3.2.4-6	含水比変化に伴う Na 型モンモリロナイトの XRD 回折パターンの推移	

.....	3-51
図 3.2.4-7 XRD パターンのピーク分離による 2 層膨潤含水比の判断 .....	3-52
図 3.2.4-8 Na 型モンモリロナイトの 2 層膨潤含水比、比表面積と乾燥密度の関係 .....	3-52
図 3.2.4-9 間隙比と透水係数の関係 .....	3-53
図 3.2.4-10 間隙比と透水係数の関係 (直列モデルのみ) .....	3-54
図 3.3.1-1 化学・力学連成モデル試験の意味 .....	3-60
図 3.3.1-2 超低ひずみ速度制御圧密試験機の概略図 .....	3-60
図 3.3.1-3 フローポンプ透水試験機の概略図 .....	3-60
図 3.3.1-4 化学・力学連成モデル試験用セルとフローポンプ透水試験機 .....	3-61
図 3.3.2-1 Ca 型化モデル試験イメージ図 .....	3-62
図 3.3.2-2 Na 型モンモリロナイトの Ca 型化に関する検討ケース .....	3-63
図 3.3.2-3 Na 型モンモリロナイトの蒸留水による飽和時の膨潤圧 .....	3-64
図 3.3.2-4 Ca 型モンモリロナイトの CaCl <sub>2</sub> 水溶液による飽和時の膨潤圧 .....	3-64
図 3.3.2-5 Na 型モンモリロナイトの通水圧と通水量 .....	3-65
図 3.3.2-6 Na 型モンモリロナイトの定ひずみ速度圧密試験時刻歴 .....	3-65
図 3.3.2-7 Na 型モンモリロナイト(蒸留水)と Ca 型モンモリロナイト(CaCl <sub>2</sub> )の e-lnP 関係 .....	3-66
図 3.3.2-8 CaCl <sub>2</sub> 水溶液を通水した場合の圧密圧力の変化 .....	3-67
図 3.3.2-9 ベントナイト系人工バリアの Ca 型化中の応力変化 .....	3-67
図 3.3.2-10 ベントナイト系人工バリアの Ca 型化中の応力変化と完全飽和線の比較 .....	3-68
図 3.3.2-11 Na 型モンモリロナイトへの給水状況 .....	3-70
図 3.3.2-12 Na 型モンモリロナイトの Ca 型化に伴う膨潤圧変化 (補正前、時間軸線形表示) .....	3-70
図 3.3.2-13 Na 型モンモリロナイトの Ca 型化に伴う膨潤圧変化 (補正前、時間軸対数表示) .....	3-71
図 3.3.2-14 Na 型モンモリロナイトの段階载荷による密度増加 .....	3-71
図 3.3.2-15 Na 型モンモリロナイトの Ca 型化に伴う膨潤圧変化 (補正後) .....	3-72
図 3.3.2-16 Na 型モンモリロナイトの Ca 型化に伴う種々の影響 .....	3-73
図 3.3.2-17 ベントナイト系人工バリアの Ca 型化中の応力変化 .....	3-74
図 3.3.2-18 Ca 型化試験の解体状況 .....	3-75
図 3.3.2-19 Ca 型化試験の湿潤密度分布 .....	3-76
図 3.3.3-1 モンモリロナイト溶解試験イメージ図 .....	3-78
図 3.3.3-2 Na 型モンモリロナイトの溶解に関する検討ケース .....	3-79
図 3.3.3-3 Na 型モンモリロナイトの NaOH 水溶液による飽和時の膨潤圧 .....	3-80

図 3.3.3-4	ケイ砂 30%混合 Na 型モンモリロナイトの NaOH 水溶液による飽和時の膨潤圧.....	3-81
図 3.3.3-5	Na 型モンモリロナイトの NaOH 水溶液による飽和時の通水圧と通水量.....	3-81
図 3.3.3-6	Na 型モンモリロナイトの NaOH 水溶液による飽和時の膨潤圧の変化.....	3-82
図 3.3.3-7	Na 型モンモリロナイトの NaOH 水溶液による飽和時の平衡膨潤圧..	3-82
図 3.3.3-8	本試験結果によるモンモリロナイト溶解のモデル化イメージ .....	3-83
図 3.3.3-9	Na 型モンモリロナイトの NaOH 水溶液給水量の経時変化.....	3-85
図 3.3.3-10	Na 型モンモリロナイトの給水中の飽和度の経時変化.....	3-85
図 3.3.3-11	給水時の Na 型モンモリロナイトの膨潤圧の経時変化 (補正前) ....	3-86
図 3.3.3-12	給水時の Na 型モンモリロナイトの膨潤圧の経時変化 (補正後) ....	3-86
図 3.3.3-13	Na 型モンモリロナイトの溶解に伴う種々の影響.....	3-87
図 3.3.3-14	高アルカリ環境下におけるクリープ挙動の変化.....	3-88
図 3.3.3-15	KPDS-HP1,KPDS-HP2 の解体状況 .....	3-88
図 3.3.3-16	KPDS-HP1,KPDS-HP2 の解体時の湿潤密度分布.....	3-89
図 3.3.4-1	TG によるモンモリロナイト含有率の検量線.....	3-93
図 3.3.4-2	クニピア・F、Na 型と Ca 型の比較 (DTG 曲線) .....	3-93
図 3.3.4-3	随伴鉱物の影響.....	3-94
図 3.3.4-4	No.2 IN と OUT の Ca, Na 濃度.....	3-98
図 3.3.4-5	No.2 IN と OUT の液相濃度 (K,Mg,Si,Al) .....	3-98
図 3.3.4-6	No.2 IN と OUT の液相濃度 (Cl,SO <sub>4</sub> ) .....	3-98
図 3.3.4-7	No.5 IN と OUT の液相濃度.....	3-99
図 3.3.4-8	No.5 試験中排水の液相濃度.....	3-99
図 3.3.4-9	No.3 IN とフィルター洗浄水の液相濃度.....	3-99
図 3.3.4-10	No.4 IN とフィルター洗浄水の液相濃度.....	3-99
図 3.3.4-11	No.9 IN と OUT の液相濃度.....	3-100
図 3.3.4-12	No.9 試験中排水の液相濃度.....	3-100
図 3.3.4-13	No.10 IN と OUT の液相濃度.....	3-100
図 3.3.4-14	No.10 試験中排水の液相濃度.....	3-100
図 3.3.4-15	密度分布(1).....	3-103
図 3.3.4-16	密度分布(2).....	3-103
図 3.3.4-17	塩濃度が高い試験系の乾燥密度 : (5mm まで) .....	3-104
図 3.3.4-18	蒸留水の試験系の乾燥密度 : (5mm まで) .....	3-104
図 3.3.4-19	モンモリロナイト含有率(1).....	3-106
図 3.3.4-20	モンモリロナイト含有率(2).....	3-107

図 3.3.4-21	TG 曲線の比較 .....	3-107
図 3.3.4-22	DTG 曲線の比較.....	3-107
図 3.3.4-23	乾燥密度とモンモリロナイト含有率の関係.....	3-108
図 3.3.4-24	AFM 測定画像(1) : Na 型クニピア-F (No.5) .....	3-109
図 3.3.4-25	AFM 測定画像(2) : Ca 型クニピア-F (No.4) .....	3-110
図 3.3.4-26	AFM 画像 : (No.9-7) .....	3-110
図 3.3.4-27	No.4 の AFM 像の例 .....	3-112
図 3.3.4-28	試料位置と溶解速度(AFM)の関係.....	3-113
図 3.3.4-29	乾燥密度と溶解速度 (AFM) の関係 .....	3-113
図 3.3.4-30	AFM による Kunipia-F の粒径分布.....	3-114
図 3.3.4-31	AFM による粒径分布(1) (No.3_H <sub>2</sub> O 通水) .....	3-114
図 3.3.4-32	AFM による粒径分布(2) (No.5_NaCl_0.3M 通水) .....	3-115
図 3.3.4-33	AFM による粒径分布(3) (No.9_NaOH 通水) .....	3-115
図 3.3.4-34	試料位置と溶解速度(TG)の関係 .....	3-119
図 3.3.4-35	乾燥密度と溶解速度 (TG) の関係 .....	3-119
図 3.3.4-36	AFM による溶解速度と TG による溶解速度の比較.....	3-119
図 3.3.4-37	No.2 KPCa の不定方位 X 線回折(1) .....	3-120
図 3.3.4-38	No.2 KPCa の不定方位 X 線回折(2) .....	3-121
図 3.3.4-39	No.2 KPCa の不定方位 X 線回折 (低角側) .....	3-121
図 3.3.4-40	No.2 KPCa の EG 処理不定方位 X 線回折(1).....	3-122
図 3.3.4-41	No.2 KPCa の EG 処理不定方位 X 線回折(2).....	3-122
図 3.3.4-42	No.3 KPCa-H の不定方位 X 線回折 .....	3-123
図 3.3.4-43	No.3 KPCa-H の EG 処理不定方位 X 線回折 .....	3-123
図 3.3.4-44	No.4 CKPCa-H の不定方位 X 線回折.....	3-124
図 3.3.4-45	No.4 CKPCa-H の EG 処理不定方位 X 線回折.....	3-124
図 3.3.4-46	No.5 KPCa-N の不定方位 X 線回折.....	3-125
図 3.3.4-47	No.5 KPCa-N の EG 処理不定方位 X 線回折 .....	3-125
図 3.3.4-48	No.9 KPDS-HP1 の不定方位 X 線回折.....	3-126
図 3.3.4-49	No.9 KPDS-HP1 の不定方位 X 線回折 (低角側) .....	3-126
図 3.3.4-50	No.9 KPDS-HP1 の EG 処理不定方位 X 線回折 .....	3-127
図 3.3.4-51	No.10 KPDS-HP2 の不定方位 X 線回折.....	3-127
図 3.3.4-52	KPDS-HP2 の EG 処理不定方位 X 線回折.....	3-128
図 3.3.4-53	No.3 の $\mu$ -XRD による X 線回折 .....	3-129
図 3.3.4-54	No.4 の $\mu$ -XRD による X 線回折 .....	3-130
図 3.3.4-55	測定した試料の CCD 画像とデバイシェラーリング .....	3-131
図 3.3.4-56	No.5 位置による回折データの比較.....	3-131

図 3.3.4-57	No.5-1 $\mu$ -XRD 定性分析結果	3-132
図 3.3.4-58	No.9 の $\mu$ -XRD による X 線回折	3-133
図 3.3.4-59	No.2-05-1 の CCD 画像とデバイシェラーリング	3-134
図 3.3.4-60	No.2 通水側の回折パターン	3-134
図 3.3.4-61	No.2-05-9 (通水側から 4.6mm) の $\mu$ -XRD 定性分析結果	3-135
図 3.3.4-62	No.2 出口側の回折パターン	3-136
図 3.3.4-63	No.2-05-01 SEM-EDS による元素分析結果 : モンモリロナイト部分 .....	3-138
図 3.3.4-64	No.2 試料位置と Ca/(Ca+Na) ; 平均値 a : 位置毎の全試料の平均, b:Si の値が 8 を超えるものを除く	3-139
図 3.3.4-65	No.2 KPCa の Ca/(Ca+Na) 比	3-140
図 3.3.4-66	No.2 モンモリロナイト以外の鉱物	3-140
図 3.3.4-67	No.3,4,5 の Ca/(Ca+Na) 比 a:全点、b:平均値	3-142
図 3.3.4-68	No.5-1 SEM-EDS による元素分析結果 : 粒子部分	3-142
図 3.3.4-69	No.9-3 SEM-EDS による元素分析結果 : 石英以外の鉱物	3-144
図 3.3.5-1	力学試験を模擬した体系概要図	3-147
図 3.3.5-2	解析体系図	3-148
図 3.3.5-3	液相・固相分布結果図 (KPCa)	3-149
図 3.3.5-4	上流端および下流端の固相濃度経時変化 (KPCa)	3-150
図 3.3.5-5	1000 日後の乾燥密度分布 (KPCa)	3-150
図 3.3.5-6	液相・固相分布結果図 (KPCa-H)	3-152
図 3.3.5-7	上流端および下流端の固相濃度経時変化 (KPCa-H)	3-153
図 3.3.5-8	1,000 日後の乾燥密度分布 (KPCa-H)	3-153
図 3.3.5-9	液相・固相分布結果図 (CKPCa-H)	3-155
図 3.3.5-10	上流端および下流端の固相濃度経時変化 (CKPCa-H)	3-156
図 3.3.5-11	1,000 日後の乾燥密度分布 (CKPCa-H)	3-156
図 3.3.5-12	液相・固相分布結果図 (KPCa-N)	3-158
図 3.3.5-13	上流端および下流端の固相濃度経時変化 (KPCa-N)	3-159
図 3.3.5-14	1,000 日後の乾燥密度分布 (KPCa-N)	3-159
図 3.3.5-15	液相・固相分布結果図 (KPDS-HP1)	3-161
図 3.3.5-16	上流端および下流端の固相濃度経時変化 (KPDS-HP1)	3-162
図 3.3.5-17	1,000 日後の乾燥密度分布 (KPDS-HP1)	3-162
図 3.3.5-18	液相・固相分布結果図 (KPDS-HP2)	3-164
図 3.3.5-19	上流端および下流端の固相濃度経時変化 (KPDS-HP2)	3-165
図 3.3.5-20	1,000 日後の乾燥密度分布 (KPDS-HP2)	3-165
図 3.3.5-21	1,000 日後のモンモリロナイト量分布 (KPDS-HP1)	3-166

☒ 4.1.1-1	円板状粒子の形状.....	4-3
☒ 4.1.1-2	四重極ポテンシャルを仮定した構造形成に関する解析結果（分散系） [3].....	4-5
☒ 4.1.1-3	剛体ポテンシャルを仮定した 構造形成に関する解析結果（圧密系） ..	4-5
☒ 4.1.1-4	2つの platelet の位置関係 .....	4-6
☒ 4.1.1-5	2つの platelet の位置関係 .....	4-8
☒ 4.1.1-6	遮蔽パラメータ $\delta$ の定義.....	4-11
☒ 4.1.1-7	遮蔽領域の抽出例（分散系） [3].....	4-12
☒ 4.1.1-8	遮蔽領域の抽出例（圧密系） .....	4-12
☒ 4.1.1-9	高密度条件下における積層構造（無次元密度 $N\sigma^3/V=50, 100$ ） .....	4-14
☒ 4.1.1-10	高密度条件下における積層構造（無次元密度 $N\sigma^3/V=170, 280$ ） .....	4-15
☒ 4.1.1-11	マスキング領域の抽出例（無次元密度 $N\sigma^3/\zeta=100$ ） .....	4-17
☒ 4.1.1-12	遮蔽領域の抽出（遮蔽パラメータ $\delta=0.02\sigma$ ） .....	4-18
☒ 4.1.1-13	遮蔽領域の抽出（遮蔽パラメータ $\delta=0.02\sigma$ ） .....	4-19
☒ 4.1.1-14	乾燥密度と実効比端面積の関係（モンモリロナイト換算） .....	4-20
☒ 4.1.1-15	乾燥密度と実効比端面積の関係（分散系と圧密系モデルの比較） .....	4-21
☒ 4.1.1-16	密度の異なるヘクトライトゲル .....	4-22
☒ 4.1.1-17	SWN ヘクトライトの単分子厚み測定.....	4-24
☒ 4.1.1-18	SWN の AFM 粒子測定結果.....	4-24
☒ 4.1.1-19	DLS による粒子サイズの測定.....	4-25
☒ 4.1.1-20	AFM によるヘクトライトの溶解速度測定 .....	4-25
☒ 4.1.1-21	AFM によるヘクトライトの粒径分布と ESA 分布測定 .....	4-26
☒ 4.1.1-22	SWN ヘクトライトの密度 0.20 試料( $\mu$ -XRD 測定試料) .....	4-27
☒ 4.1.1-23	SWN ヘクトライトの溶解試験前後の XRD パターン .....	4-27
☒ 4.1.1-24	溶解速度と溶液 Si 組成（左）、密度（右）の関係.....	4-28
☒ 4.1.1-25	密度と間隙水の Si 濃度の関係 .....	4-28
☒ 4.1.2-1	処分場体系解析モデル概念図.....	4-30
☒ 4.1.2-2	変質解析結果（1,000 年） .....	4-36
☒ 4.1.2-3	変質解析結果（1 万年） .....	4-37
☒ 4.1.2-4	変質解析結果（10 万年） .....	4-38
☒ 4.1.2-5	ベントナイト部分における経時変化結果 .....	4-39
☒ 4.1.2-6	変質解析結果（モンモリロナイト表面積更新ケース、1,000 年） .....	4-40
☒ 4.1.2-7	変質解析結果（モンモリロナイト表面積更新ケース、1 万年） .....	4-41
☒ 4.1.2-8	変質解析結果（モンモリロナイト表面積更新ケース、10 万年） .....	4-42
☒ 4.1.2-9	ベントナイト部分における経時変化結果（モンモリロナイト表面積更新ケ ース） .....	4-43

☒ 4.1.3-1	クニピア P 溶解溶液の化学両論係数と各化学種活量の関係.....	4-45
☒ 4.1.3-2	モンモリロナイトの比熱係数の温度依存性(a: クニピア P とその 4 水和物; b: Wyoming 産 Na-モンモリロナイト-4.5H <sub>2</sub> O).....	4-46
☒ 4.1.3-3	水和バイデライト(a)と無水和バイデライト(b)の logK 温度圧力依存性 .....	4-47
☒ 4.1.3-4	無水和バイデライト(a)と無水和模擬モンモリロナイト(b)の logK の温度圧 力依存性.....	4-48
☒ 4.1.3-5	石英(a)と白雲母(b)の logK 温度圧力依存性 .....	4-48
☒ 4.2.1-1	OPC モルタル (O-1) の空隙径分布 .....	4-57
☒ 4.2.1-2	OPC モルタル (O-2) の空隙径分布 .....	4-57
☒ 4.2.1-3	OPC モルタル (O-3) の空隙径分布 .....	4-57
☒ 4.2.1-4	OPC モルタル (O-4) の空隙径分布 .....	4-58
☒ 4.2.1-5	BFSC モルタル (B-1) の空隙径分布 .....	4-58
☒ 4.2.1-6	BFSC モルタル (B-2) の空隙径分布 .....	4-58
☒ 4.2.1-7	FAC モルタル (F-1) の空隙径分布 .....	4-59
☒ 4.2.1-8	FAC モルタル (F-2) の空隙径分布 .....	4-59
☒ 4.2.1-9	TG/DTA チャート (O-1) .....	4-60
☒ 4.2.1-10	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (O-1 ペースト部) .	4-62
☒ 4.2.1-11	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (O-2 ペースト部) .	4-62
☒ 4.2.1-12	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (O-3 ペースト部) .	4-63
☒ 4.2.1-13	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (O-4 ペースト部) .	4-63
☒ 4.2.1-14	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (B-1 ペースト部) .	4-64
☒ 4.2.1-15	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (B-2 ペースト部) .	4-64
☒ 4.2.1-16	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (F-1 ペースト部) .	4-65
☒ 4.2.1-17	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (F-2 ペースト部) .	4-65
☒ 4.2.1-18	弾性係数測定結果 (O-1) .....	4-66
☒ 4.2.1-19	弾性係数測定結果 (O-2) .....	4-66
☒ 4.2.1-20	弾性係数測定結果 (O-3) .....	4-67
☒ 4.2.1-21	弾性係数測定結果 (O-4) .....	4-67
☒ 4.2.1-22	弾性係数測定結果 (B-1) .....	4-67
☒ 4.2.1-23	弾性係数測定結果 (B-2) .....	4-68
☒ 4.2.1-24	弾性係数測定結果 (F-1) .....	4-68
☒ 4.2.1-25	弾性係数測定結果 (F-2) .....	4-68
☒ 4.2.1-26	ペースト部分の弾性係数測定結果のまとめ.....	4-69
☒ 4.2.1-27	断面の EPMA (O-1) .....	4-70
☒ 4.2.1-28	断面の EPMA (O-2) .....	4-71



図 4.2.1-29	断面の EPMA (O-3)	4-72
図 4.2.1-30	断面の EPMA (O-4)	4-73
図 4.2.1-31	骨材周辺の C/S 比の分布 (O-1)	4-74
図 4.2.1-32	骨材周辺の C/S 比の分布 (O-2)	4-75
図 4.2.1-33	骨材周辺の C/S 比の分布 (O-3)	4-76
図 4.2.1-34	骨材周辺の COMP の分布 (O-3)	4-77
図 4.2.1-35	骨材周辺の C/S 比の分布 (O-4)	4-78
図 4.2.1-36	断面の EPMA (B-1)	4-80
図 4.2.1-37	断面の EPMA (B-2)	4-81
図 4.2.1-38	断面の EPMA (F-1)	4-82
図 4.2.1-39	断面の EPMA (F-2)	4-83
図 4.2.1-40	骨材周辺の COMP の分布 (B-1)	4-84
図 4.2.1-41	骨材周辺の COMP 分布 (B-2)	4-85
図 4.2.1-42	骨材周辺の COMP 分布 (F-1)	4-86
図 4.2.1-43	骨材周辺の COMP 分布 (F-2)	4-87
図 4.2.1-44	二次側セルの塩化物イオン濃度測定結果 (OPC モルタル)	4-88
図 4.2.1-45	二次側セルの塩化物イオン濃度測定結果 (混合セメントモルタル)	4-89
図 4.2.1-46	モルタルの拡散現象を評価するためのマルチスケール空隙構造モデル .....	4-90
図 4.2.1-47	反射電子像と輝度の分布	4-92
図 4.2.1-48	自己相関関数 $S(r)$ の計算例	4-93
図 4.2.1-49	マイクロインデンテーション測定結果	4-94
図 4.2.1-50	C-S-H の弾性係数と空隙率の関係[25]	4-94
図 4.2.1-51	C-S-H の空隙率と拡散係数の関係[25]	4-95
図 4.2.1-52	Yang らが提案した遷移帯厚さと拡散係数値の関係	4-96
図 4.2.1-53	拡散係数のモデル計算結果と実測値の相関	4-97
図 4.2.1-54	空隙率と拡散係数の関係	4-98
図 4.2.2-1	FAC30 ペースト (FAC30-BL) の空隙径分布	4-103
図 4.2.2-2	溶脱試料 (FAC-100) の空隙径分布	4-103
図 4.2.2-3	溶脱試料 (FAC-150) の空隙径分布	4-103
図 4.2.2-4	溶脱試料 (FAC-250) の空隙径分布	4-104
図 4.2.2-5	溶脱試験前後の累積空隙量分布の比較 (FAC30 ペースト)	4-104
図 4.2.2-6	BFSC70 ペースト (BFSC70-BL) の空隙径分布	4-104
図 4.2.2-7	溶脱試料 (BFSC-100) の空隙径分布	4-105
図 4.2.2-8	溶脱試料 (BFSC-150) の空隙径分布	4-105
図 4.2.2-9	溶脱試料 (BFSC-250) の空隙径分布	4-105

図 4.2.2-10	溶脱試験前後の累積空隙量分布の比較 (BFSC70 ペースト) .....	4-106
図 4.2.2-11	FAC30 溶脱試料の EPMA 測定結果.....	4-109
図 4.2.2-12	FAC30 溶脱試料の C/S 比の分布 .....	4-110
図 4.2.2-13	BFSC70 溶脱試料の EPMA 測定結果.....	4-111
図 4.2.2-14	BFSC70 溶脱試料の C/S 比の分布 .....	4-112
図 4.2.2-15	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (FAC30 ペースト) .....	4-114
図 4.2.2-16	FAC30 溶脱試料 (F-100) の反射電子像.....	4-114
図 4.2.2-17	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (F-100 端部) ...	4-115
図 4.2.2-18	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (F-100 中心部)	4-115
図 4.2.2-19	FAC30 溶脱試料 (F-150) の反射電子像.....	4-116
図 4.2.2-20	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (F-150 端部) ...	4-116
図 4.2.2-21	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (F-150 中心部)	4-117
図 4.2.2-22	FAC30 溶脱試料 (F-250) の反射電子像.....	4-117
図 4.2.2-23	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (F-250) .....	4-118
図 4.2.2-24	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (BFSC70) .....	4-119
図 4.2.2-25	BFSC70 溶脱試料 (B-100) の反射電子像.....	4-119
図 4.2.2-26	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (B-100 端部) ...	4-120
図 4.2.2-27	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (B-100 端部から 500 $\mu$ m) .....	4-120
図 4.2.2-28	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (B-100 中心部)	4-121
図 4.2.2-29	BFSC70 溶脱試料 (B-150) の反射電子像.....	4-121
図 4.2.2-30	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (B-150 端部) ...	4-122
図 4.2.2-31	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (B-150 中心部)	4-122
図 4.2.2-32	BFSC70 溶脱試料 (B-250) の反射電子像.....	4-123
図 4.2.2-33	反射電子像と自己相関関数および三次元モデル (B-250) .....	4-123
図 4.2.2-34	FAC30 試料のマイクロ弾性係数測定結果.....	4-124
図 4.2.2-35	BFSC70 試料のマイクロ弾性係数測定結果 .....	4-124
図 4.2.2-36	二次側セルの塩化物イオン濃度測定結果 (FAC 溶脱試料) .....	4-125
図 4.2.2-37	二次側セルの塩化物イオン濃度測定結果 (BFSC 溶脱試料) .....	4-125
図 4.2.2-38	イオン交換水溶脱後試料の空隙径分布 (FAC-IEW) .....	4-127
図 4.2.2-39	溶脱試験前後の累積空隙量分布の比較 (FAC30 ペースト) .....	4-127
図 4.2.2-40	イオン交換水溶脱後試料の空隙径分布 (BFSC-IEW) .....	4-128
図 4.2.2-41	溶脱試験前後の累積空隙量分布の比較 (BFSC70 ペースト) .....	4-128
図 4.2.2-42	解析値と実測値の比較 (混合セメントペースト拡散係数) .....	4-132
図 4.2.3-1	実用的材料を対象とした物質移行特性の推定手法の構築の検討フローと	

課題	4-135
図 4.3.1-1 二次元解析体系概念図	4-137
図 4.3.1-2 第2次 TRU レポートにおける、水理解析の解析形状 (グループ2)	4-138
図 4.3.1-3 pH 分布結果 (ケース0 ; 拡散場)	4-146
図 4.3.1-4 ケース0の1万年後、10万年後の計算結果 (施設中心部を通る垂直断面)	4-147
図 4.3.1-5 ケース0の1万年後、10万年後の計算結果 (施設中心部を通る水平断面)	4-148
図 4.3.1-6 ケース0の1万年後、10万年後の計算結果 (廃棄体モルタル最下端部水平断面)	4-149
図 4.3.1-7 ケース0の1万年後、10万年後の計算結果 (底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面)	4-150
図 4.3.1-8 施設中心部を通る水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (A 地点 (3.25,-9.8)) の経時変化結果 (ケース0)	4-151
図 4.3.1-9 廃棄体モルタル最下端部水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (B 地点 (3.25,-12.15)) の経時変化結果 (ケース0)	4-152
図 4.3.1-10 底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面における底部緩衝材中心部 (C 地点 (0.25,-12.6)) の経時変化結果 (ケース0)	4-153
図 4.3.1-11 pH 分布結果 (ケース1 ; $K_w = 1e-5$ m/s)	4-155
図 4.3.1-12 ケース1の1万年後、10万年後の計算結果 (施設中心部を通る垂直断面)	4-156
図 4.3.1-13 ケース1の1万年後、10万年後の計算結果 (施設中心部を通る水平断面)	4-157
図 4.3.1-14 ケース1の1万年後、10万年後の計算結果 (廃棄体モルタル最下端部水平断面)	4-158
図 4.3.1-15 ケース1の1万年後、10万年後の計算結果 (底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面)	4-159
図 4.3.1-16 設中心部を通る水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (A 地点 (3.25,-9.8)) の経時変化結果 (ケース1)	4-160
図 4.3.1-17 廃棄体モルタル最下端部水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (B 地点 (3.25,-12.15)) の経時変化結果 (ケース1)	4-161
図 4.3.1-18 底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面における底部緩衝材中心部 (C 地点 (0.25,-12.6)) の経時変化結果 (ケース1)	4-162
図 4.3.1-19 pH 分布結果 (ケース2 ; $K_w = 1e-5$ m/s、石英)	4-165
図 4.3.1-20 透水係数分布結果 (ケース2 ; $K_w = 1e-5$ m/s、石英)	4-165

図 4.3.1-21	モンモリロナイトの陽イオン (Ca 型) 量分布結果 (ケース 2 ; Kw = 1e-5 m/s、石英) .....	4-165
図 4.3.1-22	ケース 2 の 1 万年後、5 万年後の計算結果 (施設中心部を通る垂直断面) .....	4-166
図 4.3.1-23	ケース 2 の 1 万年後、5 万年後の計算結果 (施設中心部を通る水平断面) .....	4-167
図 4.3.1-24	ケース 2 の 1 万年後、5 万年後の計算結果 (廃棄体モルタル最下端部水平断面) .....	4-168
図 4.3.1-25	ケース 2 の 1 万年後、5 万年後の計算結果 (底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面) .....	4-169
図 4.3.1-26	施設中心部を通る水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (A 地点 (3.25,-9.8)) の経時変化結果 (ケース 2) .....	4-170
図 4.3.1-27	廃棄体モルタル最下端水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (B 地点 (3.25,-12.15)) の経時変化結果 (ケース 2) .....	4-171
図 4.3.1-28	底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面における底部緩衝材中心部 (C 地点 (0.25,-12.6)) の経時変化結果 (ケース 2) .....	4-172
図 4.3.1-29	廃棄体モルタル中心部 (地点 (0.25,-8.6)) の経時変化結果 (ケース 2) .....	4-173
図 4.3.1-30	廃棄体モルタル部の最上端かつ側面 (地点 (2.75,-6.25)) の経時変化結果 (ケース 2) .....	4-174
図 4.3.1-31	地化学解析において考慮している濃度 .....	4-176
図 4.3.1-32	pH 分布結果 (連成解析ケース A) .....	4-178
図 4.3.1-33	透水係数分布結果 (連成解析ケース A) .....	4-178
図 4.3.1-34	モンモリロナイトの陽イオン (Ca 型) 量分布結果 (連成解析ケース A) .....	4-178
図 4.3.1-35	連成解析ケース A の 1,2,5,10 万年後の計算結果 (施設中心部を通る垂直断面) .....	4-179
図 4.3.1-36	連成解析ケース A の 1,2,5,10 万年後の計算結果 (施設中心部を通る水平断面) .....	4-180
図 4.3.1-37	連成解析ケース A の 1,2,5,10 万年後の計算結果 (廃棄体モルタル最下端部水平断面) .....	4-181
図 4.3.1-38	連成解析ケース A の 1,2,5,10 万年後の計算結果 (底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面) .....	4-182
図 4.3.1-39	施設中心部を通る水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (A 地点 (3.25,-9.8)) の経時変化結果 (連成解析ケース A) .....	4-183
図 4.3.1-40	廃棄体モルタル最下端水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部と	

	の境界部 (B 地点 (3.25,-12.15)) の経時変化結果 (連成解析ケース A) ....	4-184
図 4.3.1-41	底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面における底部緩衝材中心部 (C 地点 (0.25,-12.6)) の経時変化結果 (連成解析ケース A) .....	4-185
図 4.3.1-42	廃棄体モルタル中心部 (地点 (0.25,-8.6)) の経時変化結果 (連成解析ケース A) .....	4-186
図 4.3.1-43	廃棄体モルタル部の最上端かつ側面 (地点 (2.75,-6.25)) の経時変化結果 (連成解析ケース A) .....	4-187
図 4.3.1-44	pH 分布結果 (連成解析ケース B) .....	4-189
図 4.3.1-45	透水係数分布結果 (連成解析ケース B) .....	4-189
図 4.3.1-46	モンモリロナイトの陽イオン (Ca 型) 量分布結果 (連成解析ケース B) .....	4-189
図 4.3.1-47	連成解析ケース B の 1,2,3,5 万年後の計算結果 (施設中心部を通る垂直断面) .....	4-190
図 4.3.1-48	連成解析ケース B の 1,2,3,5 万年後の計算結果 (施設中心部を通る水平断面) .....	4-191
図 4.3.1-49	連成解析ケース B の 1,2,3,5 万年後の計算結果 (廃棄体モルタル最下端部水平断面) .....	4-192
図 4.3.1-50	連成解析ケース B の 1,2,3,5 万年後の計算結果 (底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面) .....	4-193
図 4.3.1-51	施設中心部を通る水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (A 地点 (3.25,-9.8)) の経時変化結果 (連成解析ケース B) .....	4-194
図 4.3.1-52	廃棄体モルタル最下端水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (B 地点 (3.25,-12.15)) の経時変化結果 (連成解析ケース B) ....	4-195
図 4.3.1-53	底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面における底部緩衝材中心部 (C 地点 (0.25,-12.6)) の経時変化結果 (連成解析ケース B) .....	4-196
図 4.3.1-54	廃棄体モルタル中心部 (地点 (0.25,-8.6)) の経時変化結果 (連成解析ケース B) .....	4-197
図 4.3.1-55	廃棄体モルタル部の最上端かつ側面 (地点 (2.75,-6.25)) の経時変化結果 (連成解析ケース B) .....	4-198
図 4.3.1-56	pH 分布結果 (連成解析ケース C) .....	4-200
図 4.3.1-57	透水係数分布結果 (連成解析ケース C) .....	4-200
図 4.3.1-58	モンモリロナイトの陽イオン (Ca 型) 量分布結果 (連成解析ケース C) .....	4-200
図 4.3.1-59	連成解析ケース C の 1,2,5,10 万年後の計算結果 (施設中心部を通る垂直断面) .....	4-201
図 4.3.1-60	連成解析ケース C の 1,2,5,10 万年後の計算結果 (施設中心部を通る水平	

断面)	4-202
図 4.3.1-61 連成解析ケース C の 1,2,5,10 万年後の計算結果 (廃棄体モルタル最下端部水平断面)	4-203
図 4.3.1-62 連成解析ケース C の 1,2,5,10 万年後の計算結果 (底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面)	4-204
図 4.3.1-63 施設中心部を通る水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (A 地点 (3.25,-9.8)) の経時変化結果 (連成解析ケース C)	4-205
図 4.3.1-64 廃棄体モルタル最下端水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (B 地点 (3.25,-12.15)) の経時変化結果 (連成解析ケース C)	4-206
図 4.3.1-65 底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面における底部緩衝材中心部 (C 地点 (0.25,-12.6)) の経時変化結果 (連成解析ケース C)	4-207
図 4.3.1-66 廃棄体モルタル中心部 (地点 (0.25,-8.6)) の経時変化結果 (連成解析ケース C)	4-208
図 4.3.1-67 廃棄体モルタル部の最上端かつ側面 (地点 (2.75,-6.25)) の経時変化結果 (連成解析ケース C)	4-209
図 4.3.2-1 相混合体	4-211
図 4.3.2-2 体積変化率の定義	4-213
図 4.3.2-3 一次元圧縮特性	4-216
図 4.3.2-4 モンモリロナイト含有率と鉛直応力	4-216
図 4.3.2-5 圧縮特性	4-217
図 4.3.2-6 $K_o$ 圧密試験結果	4-218
図 4.3.2-7 解析要素 1	4-230
図 4.3.2-8 解析要素 2	4-230
図 4.3.2-9 Case1 の理論関係	4-231
図 4.3.2-10 Case1 の応力解析解と理論解	4-232
図 4.3.2-11 Case1 の体積ひずみの解析解と理論解	4-232
図 4.3.2-12 Case2 の理論関係	4-233
図 4.3.2-13 Case2 の応力解析解と理論解	4-233
図 4.3.2-14 Case2 体積ひずみ解析解と理論解	4-234
図 4.3.2-15 Case3 の理論関係	4-234
図 4.3.2-16 Case3 応力解析解と理論解	4-235
図 4.3.2-17 Case4 の理論関係	4-236
図 4.3.2-18 Case4 応力解析値と理論値	4-236
図 4.3.2-19 解析領域	4-237
図 4.3.2-20 解析モデルと境界条件	4-237
図 4.3.2-21 $\beta$ - $\alpha$ 関係	4-238

図 4.3.2-22	$\beta$ - $\alpha$ 関係 .....	4-238
図 4.3.2-23	Case1 変質距離と応力の関係 .....	4-239
図 4.3.2-24	Case2 変質距離と応力の関係 .....	4-239
図 4.3.2-25	Case3 変質距離と応力の関係 .....	4-239
図 4.3.2-26	Case4 変質距離と応力の関係 .....	4-239
図 4.3.2-27	Case1 d-乾燥密度関係 .....	4-240
図 4.3.2-28	Case2 d-乾燥密度関係 .....	4-240
図 4.3.2-29	Case3 d-乾燥密度関係 .....	4-240
図 4.3.2-30	Case4 d-乾燥密度関係 .....	4-240
図 4.3.2-31	メッシュ図 .....	4-242
図 4.3.2-32	処分場の冠水に伴う間隙比の変化 .....	4-243
図 4.3.2-33	円形処分場における緩衝材の施工方法[2] .....	4-245
図 4.3.2-34	緩衝材の施工手順のモデル化 .....	4-245
図 4.3.2-35	弱連成におけるフローチャート（弱連成ケース A：5000 年毎の物理量の 受け渡し） .....	4-246
図 4.3.2-36	弱連成を行わないパターンの変位経時変化(5 千年、1 万年) 単位 (m) .....	4-247
図 4.3.2-37	弱連成を行わないパターンの変位経時変化(5 万年、10 万年) 単位 (m) .....	4-248
図 4.3.2-38	1 万年後の固相体積変化率 の分布(化学解析ケース 2) .....	4-249
図 4.3.2-39	弱連成を行わないパターンの体積ひずみの経時変化 .....	4-249
図 4.3.2-40	弱連成 A における体積ひずみ分布 .....	4-250
図 4.3.2-41	弱連成 B における体積ひずみ分布 .....	4-250
図 4.3.2-42	着目した要素 .....	4-251
図 4.3.2-43	平均有効応力の経時変化 .....	4-252
図 4.3.2-44	弱連成を行っていないパターンでの力学・化学解析の密度変化比の比較 .....	4-253
図 4.3.2-45	弱連成 A での力学・化学解析の密度変化比の比較 .....	4-254
図 4.3.2-46	弱連成 B での力学・化学解析の密度変化比の比較 .....	4-255
図 5.1.1-1	定温度試験初期 C-S-H の XRD パターン .....	5-3
図 5.1.1-2	定温度試験のフロー図 .....	5-3
図 5.1.1-3	C/S=0.83、50°C養生の C-S-H の XRD .....	5-5
図 5.1.1-4	C/S=0.83、70°C養生の C-S-H の XRD .....	5-6
図 5.1.1-5	C/S=0.83、80°C養生の C-S-H の XRD .....	5-6
図 5.1.1-6	C/S=0.83、90°C養生の C-S-H の XRD .....	5-7
図 5.1.1-7	C/S=1.1、50°C養生の C-S-H の XRD .....	5-7

図 5.1.1-8	C/S=1.1、70℃養生の C-S-H の XRD .....	5-8
図 5.1.1-9	C/S=1.1、80℃養生の C-S-H の XRD .....	5-8
図 5.1.1-10	C/S=1.1、90℃養生の C-S-H の XRD .....	5-9
図 5.1.1-11	C/S=1.4、50℃養生の C-S-H の XRD .....	5-9
図 5.1.1-12	C/S=1.4、70℃養生の C-S-H の XRD .....	5-10
図 5.1.1-13	C/S=1.4、80℃養生の C-S-H の XRD .....	5-10
図 5.1.1-14	C/S=1.4、90℃養生の C-S-H の XRD .....	5-11
図 5.1.1-15	結晶化ピークの比較 .....	5-12
図 5.1.1-16	C/S=0.83, $2\theta = 7.8^\circ$ (002)の XRD 測定結果 .....	5-13
図 5.1.1-17	C/S=0.83, $2\theta = 16.2^\circ$ (101)の XRD 測定結果 .....	5-14
図 5.1.1-18	C/S=0.83, $2\theta = 28.9^\circ$ (220)の XRD 測定結果 .....	5-15
図 5.1.1-19	C/S=0.83, $2\theta = 7.8^\circ$ (002)の結晶子径 .....	5-17
図 5.1.1-20	C/S=0.83, $2\theta = 16.2^\circ$ (101)の結晶子径 .....	5-17
図 5.1.1-21	C/S=0.83, $2\theta = 28.9^\circ$ (220)の結晶子径 .....	5-17
図 5.1.1-22	$2\theta = 16.2^\circ$ (1 0 1)の結晶子径と合成期間の関係 .....	5-18
図 5.1.1-23	$2\theta = 28.9^\circ$ (2 2 0)結晶子径と合成期間の関係 .....	5-18
図 5.1.1-24	結晶成長速度定数と温度の関係 .....	5-19
図 5.1.1-25	C/S=1.1, $2\theta = 8.4^\circ$ (0 0 1)の XRD 測定結果 .....	5-20
図 5.1.1-26	C/S=1.1, $2\theta = 13.7^\circ$ (1 0 1)の XRD 測定結果 .....	5-21
図 5.1.1-27	C/S=1.1, $2\theta = 25.7^\circ$ (3 -1 0)の XRD 測定結果 .....	5-22
図 5.1.1-28	C/S=1.4 の XRD 測定結果 .....	5-24
図 5.1.1-29	合成トバモライトの XRD パターン .....	5-27
図 5.1.1-30	合成 C-S(A)-H の XRD パターン .....	5-28
図 5.1.1-31	A/C=0.05、50℃の C-S(A)-H の XRD パターン .....	5-28
図 5.1.1-32	A/C=0.05、70℃の C-S(A)-H の XRD パターン .....	5-29
図 5.1.1-33	A/C=0.05、80℃の C-S(A)-H の XRD パターン .....	5-29
図 5.1.1-34	A/C=0.05、90℃の C-S(A)-H の XRD パターン .....	5-30
図 5.1.1-35	A/C=0.2、50℃の C-S(A)-H の XRD パターン .....	5-30
図 5.1.1-36	A/C=0.2、70℃の C-S(A)-H の XRD パターン .....	5-31
図 5.1.1-37	A/C=0.2、80℃の C-S(A)-H の XRD パターン .....	5-31
図 5.1.1-38	A/C=0.2、90℃の C-S(A)-H の XRD パターン .....	5-32
図 5.1.1-39	A/C=0.05、90℃の XRD 測定結果 .....	5-33
図 5.1.1-40	$2\theta = 7.8^\circ$ (002)の結晶子径 .....	5-34
図 5.1.1-41	$2\theta = 16.2^\circ$ (101)の結晶子径 .....	5-34
図 5.1.1-42	$2\theta = 28.9^\circ$ (220)の結晶子径 .....	5-35
図 5.1.1-43	OPC ペースト硬化体の XRD パターン .....	5-38



図 5.1.1-44	OPC ペースト硬化体の TG-DTA 測定結果 .....	5-38
図 5.1.1-45	OPC+石英型 SiO <sub>2</sub> 、50°Cの XRD 測定結果.....	5-39
図 5.1.1-46	OPC+石英型 SiO <sub>2</sub> 、70°Cの XRD 測定結果.....	5-40
図 5.1.1-47	OPC+石英型 SiO <sub>2</sub> 、80°Cの XRD 測定結果.....	5-40
図 5.1.1-48	OPC+石英型 SiO <sub>2</sub> 、90°Cの XRD 測定結果.....	5-41
図 5.1.1-49	OPC+活性 SiO <sub>2</sub> 、50°Cの XRD 測定結果 .....	5-41
図 5.1.1-50	OPC+活性 SiO <sub>2</sub> 、70°Cの XRD 測定結果 .....	5-42
図 5.1.1-51	OPC+活性 SiO <sub>2</sub> 、80°Cの XRD 測定結果 .....	5-42
図 5.1.1-52	OPC+活性 SiO <sub>2</sub> 、90°Cの XRD 測定結果 .....	5-43
図 5.1.1-53	OPC+石英型 SiO <sub>2</sub> 、 $2\theta = 7.8^\circ$ (002)の XRD 測定結果 .....	5-44
図 5.1.1-54	OPC+石英型 SiO <sub>2</sub> 、 $2\theta = 16.2^\circ$ (101)の XRD 測定結果 .....	5-45
図 5.1.1-55	OPC+石英型 SiO <sub>2</sub> 、 $2\theta = 28.9^\circ$ (220)の XRD 測定結果 .....	5-46
図 5.1.1-56	OPC+石英型 SiO <sub>2</sub> 、50°Cの TG-DTA 測定結果(1w, 4w, 8w, 13w).....	5-47
図 5.1.1-57	OPC+石英型 SiO <sub>2</sub> 、70°Cの TG-DTA 測定結果(1w, 4w, 8w, 13w).....	5-48
図 5.1.1-58	OPC+石英型 SiO <sub>2</sub> 、80°Cの TG-DTA 測定結果(1w, 4w, 8w, 13w).....	5-49
図 5.1.1-59	OPC+石英型 SiO <sub>2</sub> 、90°Cの TG-DTA 測定結果(1w, 4w, 8w, 13w).....	5-50
図 5.1.1-60	OPC+活性 SiO <sub>2</sub> 、50°Cの TG-DTA 測定結果(1w, 4w, 8w, 13w).....	5-51
図 5.1.1-61	OPC+活性 SiO <sub>2</sub> 、70°Cの TG-DTA 測定結果(1w, 4w, 8w, 13w).....	5-52
図 5.1.1-62	OPC+活性 SiO <sub>2</sub> 、80°Cの TG-DTA 測定結果(1w, 4w, 8w, 13w).....	5-53
図 5.1.1-63	OPC+活性 SiO <sub>2</sub> 、90°Cの TG-DTA 測定結果(1w, 4w, 8w, 13w).....	5-54
図 5.1.1-64	液相 pH .....	5-57
図 5.1.1-65	液相 Ca 濃度.....	5-57
図 5.1.1-66	液相 Si 濃度.....	5-57
図 5.1.1-67	液相 S 濃度.....	5-58
図 5.1.1-68	液相 Na 濃度 .....	5-58
図 5.1.1-69	液相 K 濃度.....	5-58
図 5.1.2-1	33年熱ありのコンクリートの COMP 像および定量分析結果(視野 1).5-62	
図 5.1.2-2	33年熱ありのコンクリートの COMP 像および定量分析結果(視野 2).5-62	
図 5.1.2-3	33年熱ありコンクリートの COMP 像および定量分析結果(視野 3) ....5-63	
図 5.1.2-4	33年熱なしのコンクリートの COMP 像および定量分析結果(視野 1).5-64	
図 5.1.2-5	33年熱なしのコンクリートの COMP 像および定量分析結果(視野 2).5-64	
図 5.1.2-6	33年熱なしのコンクリートの COMP 像および定量分析結果(視野 3).5-65	
図 5.1.2-7	33年熱ありのコンクリートの元素濃度分布 .....	5-67
図 5.1.2-8	33年熱なしのコンクリートの元素濃度分布 .....	5-68
図 5.1.2-9	60年熱ありのコンクリートの COMP 像および定量分析結果(視野 1).5-70	
図 5.1.2-10	60年熱ありのコンクリートの COMP 像および定量分析結果(視野 2)	

.....	5-70
図 5.1.2-11 60年熱ありのコンクリートの COMP 像および定量分析結果(視野 3)	5-71
.....	5-72
図 5.1.2-12 60年熱なしのコンクリートの COMP 像および定量分析結果(視野 1)	5-72
.....	5-72
図 5.1.2-13 60年熱なしのコンクリートの COMP 像および定量分析結果(視野 2)	5-72
.....	5-72
図 5.1.2-14 60年熱なしのコンクリートの COMP 像および定量分析結果(視野 3)	5-73
.....	5-73
図 5.1.2-15 60年熱ありのコンクリートの元素濃度分布	5-74
図 5.1.2-16 60年熱なしのコンクリートの元素濃度分布	5-75
図 5.1.3-1 経年コンクリート中に生成したトバモライトの SEM 写真	5-79
図 5.1.3-2 経年コンクリートのペースト部における C/S の分布	5-81
図 5.1.3-3 1933年施工の熱影響を受けたコンクリートの骨材界面周辺	5-82
図 5.1.3-4 1933年施工の熱影響を受けたコンクリートの浸漬試験の液相 pH	5-83
図 5.1.3-5 1933年施工の熱影響を受けたコンクリートの浸漬試験の液相成分	5-84
図 5.1.3-6 Si 平均鎖長	5-85
図 5.1.4-1 C-S-H の結晶化条件の整理	5-86
図 5.2.1-1 平成 29 年度までの取り組みの概要	5-87
図 5.2.2-1 細孔径分布 (OPC)	5-94
図 5.2.2-2 細孔径分布 (FAC)	5-95
図 5.2.2-3 細孔径分布 (BFSC)	5-96
図 5.2.2-4 硝酸銀噴霧後の試料外観	5-97
図 5.2.2-5 EPMA 分析結果 (Cl イオン濃度)	5-99
図 5.2.2-6 単位質量あたりの Cl イオン濃度分布	5-100
図 5.2.2-7 硝酸銀噴霧による塩素イオン浸透深さ測定結果と 50nm-2 $\mu$ m の細孔容積 の関係	5-102
図 5.2.2-8 塩素イオンの見掛けの拡散係数と 50nm-2 $\mu$ m の細孔容積の関係	5-102
図 5.2.2-9 見掛けの拡散係数の比較 (モルタル)	5-103
図 5.2.2-10 高流動コンクリートの品質と流動距離の関係	5-105
図 5.2.2-11 試験体寸法およびコンクリートの打設方法の概要	5-106
図 5.2.2-12 コンクリートの練混ぜ方法	5-107
図 5.2.2-13 水平方向打設試験体の打設概要	5-108
図 5.2.2-14 フレッシュ性状測定	5-109
図 5.2.2-15 コンクリート打設 1 日経過後の試験体上面の外観	5-110
図 5.2.2-16 試験体の打設方向、コアの採取位置および採取本数	5-111

図 5.2.2-17	水平方向打設試験体より採取したコアの外観写真.....	5-112
図 5.2.2-18	垂直方向打設試験体より採取したコアの外観写真.....	5-112
図 5.2.2-19	採取試料の加工要領.....	5-113
図 5.2.2-20	スキャン画像と処理後の画像の一例.....	5-115
図 5.2.2-21	粒径別の構成比率（水平方向打設試験体）.....	5-119
図 5.2.2-22	粒径別の構成比率（垂直方向打設試験体およびテストピース）.....	5-120
図 5.2.2-23	硝酸銀噴霧後の試料外観（テストピース）.....	5-122
図 5.2.2-24	硝酸銀噴霧後の試料外観（水平方向打設試験体）.....	5-123
図 5.2.2-25	硝酸銀噴霧後の試料外観（垂直方向打設試験体）.....	5-124
図 5.2.2-26	EPMA 分析結果（テストピース）.....	5-125
図 5.2.2-27	EPMA 分析結果（水平方向打設試験体、上部）.....	5-126
図 5.2.2-28	EPMA 分析結果（水平方向打設試験体、下部）.....	5-127
図 5.2.2-29	EPMA 分析結果（垂直方向打設試験体）.....	5-128
図 5.2.2-30	塩素イオンの濃度分布（水平方向打設試験体、流動先端）.....	5-129
図 5.2.2-31	塩素イオンの濃度分布（水平方向打設試験体、先端から 2.2m）.....	5-129
図 5.2.2-32	塩素イオンの濃度分布（水平方向打設試験体、先端から 4.2m）.....	5-130
図 5.2.2-33	塩素イオンの濃度分布（垂直方向打設試験体）.....	5-130
図 5.2.2-34	推定骨材量と空隙量の関係.....	5-132
図 5.2.2-35	見掛けの拡散係数と空隙率の関係.....	5-132
図 5.2.2-36	見掛けの拡散係数と推定骨材量の関係.....	5-133
図 5.2.2-37	見掛けの拡散係数と推定空隙量に関する測定結果と文献値の比較.....	5-134
図 5.3.1-1	超音波パルサーの励振波形と発生する超音波の周波数特性.....	5-141
図 5.3.2-1	横波斜角法を用いた端部エコー法模式図.....	5-145
図 5.3.2-2	TOFD 法の原理と深さの異なる平底穴計測 D スキャン画像の例.....	5-146
図 5.3.2-3	TOFD 法計測用のくさびの設計と試作.....	5-146
図 5.3.2-4	TOFD 法によるコンクリート試験体計測の外観写真と 上面からの送受信 くさび配置.....	5-147
図 5.3.2-5	高強度高緻密コンクリート試験体の TOFD 計測受信波形例.....	5-147
図 5.3.2-6	TOFD 計測波形と D スキャン画像計測による貫通き裂の計測例.....	5-148
図 5.3.2-7	高緻密高強度コンクリート自然き裂の探傷波形とフィルタリング処理 .....	5-149
図 5.3.3-1	端部同定のための端部エコー振幅挙動の計測結果(自然き裂).....	5-149
図 5.3.3-2	端部同定のための端部エコー振幅挙動の計測結果(スリット).....	5-150
図 5.3.3-3	音場改善のために提案する新しい斜角フォーカスくさび.....	5-151
図 5.3.3-4	フォーカスくさびの設計図と試作したくさびの外観写真.....	5-151
図 5.3.3-5	試作フォーカスくさびの指向性向上の確認手順.....	5-152

図 5.3.3-6	フォーカスくさびを用いた指向性向上の確認実験.....	5-152
図 5.3.3-7	フォーカスくさびを用いた高強度高緻密コンクリートの Slit 探傷波形例 .....	5-153
図 5.3.3-8	高強度高緻密コンクリートの Slit 端部エコーとコーナーエコーの同定の 確認.....	5-153
図 5.3.3-9	フォーカスくさびを用いた高強度高緻密コンクリートの自然き裂探傷波 形例.....	5-154
図 5.3.3-10	高強度高緻密コンクリートのき裂端部エコーとコーナーエコーの同定の 確認.....	5-154
図 5.3.3-11	フォーカスくさびを用いた高強度コンクリートの自然き裂探傷波形例 .....	5-154
図 5.3.3-12	高強度高緻密コンクリートの自然き裂探傷波形の励振電圧依存性..	5-156

## 表 目 次

表 1.5.1-1	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の検討の流れと平成 26 年度実施事項 .....	1-16
表 2.1.1-1	モンモリロナイトのアナルサイム変質観察試験の条件 .....	2-2
表 2.1.1-2	干渉計測定に用いた溶液の屈折率 .....	2-4
表 2.1.1-3	干渉計試験結果：アナルサイム変質（太字は速度測定を行った期間） .....	2-5
表 2.1.1-4	モンモリロナイトの干渉計測定結果 .....	2-16
表 2.1.1-5	モンモリロナイトを用いた干渉計試験における排出溶液の化学組成 .....	2-23
表 2.1.2-1	クリノプチロライトへの変質観察試験の条件 .....	2-28
表 2.1.2-2	干渉計試験結果（クリノプチロライト生成：試料(1)） .....	2-28
表 2.1.2-3	ベントナイトの変質観察試験の排出溶液の化学組成 .....	2-36
表 2.1.2-4	干渉計試験結果（クリノプチロライト生成：試料(2)） .....	2-36
表 2.1.2-5	クリノプチロライト添加ベントナイトの変質試験の排出溶液の化学組成 .....	2-43
表 2.1.3-1	カラム透水試験のケース（平成 25 年度） .....	2-44
表 2.1.3-2	カラム透水試験試料の詳細（平成 25 年度） .....	2-45
表 2.1.3-3	シリカリッチ相の成長観察の試験条件一覧 .....	2-45
表 2.1.3-4	干渉計試験結果（シリカリッチ相） .....	2-46
表 2.1.3-5	変質モンモリロナイトによる試験の排出溶液の化学組成 .....	2-51
表 2.2.1-1	イオン交換過程の挙動試験の条件 .....	2-56
表 2.2.1-2	OPC 平衡溶液の化学組成推定 .....	2-56
表 2.2.1-3	イオン交換過程の挙動試験の条件と測定結果 .....	2-60
表 2.2.1-4	試験条件とモンモリロナイト層間イオンと変質相の化学組成 .....	2-73
表 2.2.1-5	変質相の化学組成 .....	2-74
表 2.2.2-1	シリンジ変質試験の条件 .....	2-76
表 2.2.2-2	AFM 粒子解析結果のまとめ .....	2-84
表 2.2.2-3	AFM 粒子解析結果から求めた溶解速度 .....	2-84
表 2.3.1-1	分析試料一覧（赤枠が分析対象） .....	2-102
表 2.3.1-2	XRD 分析試料の分割位置一覧 .....	2-105
表 2.3.2-1	浸漬液の組成分析結果 .....	2-120
表 2.3.2-2	セメント相の鉱物同定結果 .....	2-121
表 2.3.2-3	ベントナイト相の鉱物同定結果 .....	2-124
表 2.3.2-4	ベントナイト相の C-S-H 生成の有無の確認結果 .....	2-127
表 2.4.1-1	ポーリングコアの概要 .....	2-148

表 2.4.2-1	試験項目の一覧表.....	2-150
表 2.4.3-1	セメント-ベントナイト接触試料の条件比較.....	2-156
表 2.4.3-2	パターンフィッティング結果 (Ca 中の鉱物割合 ) .....	2-162
表 2.4.3-3	各試料の Ca 量.....	2-163
表 2.4.3-4	試料中の鉱物組成.....	2-163
表 2.4.3-5	模擬変質試料の配合および Ca 量.....	2-164
表 2.4.3-6	C-S-H 混合模擬試料のパターンフィッティング結果 (Ca 中の鉱物割合) .....	2-165
表 2.4.3-7	C-S-H 混合模擬試料の鉱物組成.....	2-166
表 2.4.3-8	C-S-H 混合模擬試料の鉱物組成 (斜長石量固定) .....	2-167
表 2.4.3-9	Box-core-1 の鉱物組成 (斜長石量固定) .....	2-168
表 2.4.3-10	標準試料および採取試料の化学組成.....	2-170
表 2.4.3-11	希塩酸溶解成分の増加率と C-S-H 生成率.....	2-171
表 2.4.3-12	層間中の陽イオンの分析結果.....	2-172
表 3.2.1-1	クニピア F の土粒子密度.....	3-6
表 3.2.1-2	ケイ砂の土粒子密度.....	3-6
表 3.2.1-3	変質前人工ベントナイトの土粒子密度.....	3-8
表 3.2.1-4	人工ベントナイト系材料の鉱物組成の変質前後のイメージ.....	3-9
表 3.2.2-1	前フェーズの土粒子密度試験一覧.....	3-10
表 3.2.2-2	土粒子密度試験ケース.....	3-10
表 3.2.2-3	微粉碎アナルサイムと変質後人工ベントナイトの土粒子密度試験結果 .....	3-11
表 3.2.3-1	前フェーズの一次元排気圧縮試験一覧.....	3-13
表 3.2.3-2	一次元排気圧縮試験ケース.....	3-13
表 3.2.3-3	各材料の完全飽和線のパラメータ.....	3-17
表 3.2.3-4	各材料の完全飽和線のパラメータ.....	3-26
表 3.2.3-5	既往の荷重制御膨潤量試験数量.....	3-27
表 3.2.3-6	荷重制御膨潤量試験数量.....	3-31
表 3.2.3-7	荷重制御膨潤量試験結果.....	3-34
表 3.2.3-8	せん断試験ケース.....	3-39
表 3.2.3-9	微粉碎の影響評価試験ケース.....	3-42
表 3.2.3-10	等体積一面せん断試験ケース.....	3-44
表 3.2.3-11	供試体諸元.....	3-45
表 3.2.4-1	透水試験供試体の配合.....	3-48
表 3.2.4-2	透水試験ケース.....	3-48
表 3.2.4-3	2層膨潤含水比と乾燥密度の関係.....	3-52

表 3.3.2-1	Na 型ベントナイトの Ca 型化に伴う力学挙動変化の取得試験ケース	3-63
表 3.3.2-2	追加試験ケースの役割比較表	3-63
表 3.3.2-3	Na 型モンモリロナイトからの排水を用いたイオン分析結果	3-68
表 3.3.2-4	本検討で使用している Na 型モンモリロナイトのからの排水を用いたイオン分析結果 [5]	3-69
表 3.3.2-5	本検討で使用している Na 型モンモリロナイトのからの排水中の Na イオン	3-69
表 3.3.2-6	KPCa の膨潤圧の補正要因と補正後の値	3-73
表 3.3.2-7	Ca 型化試験供試体の解体結果	3-76
表 3.3.3-1	Na 型ベントナイトの溶解に伴う力学挙動変化の取得試験ケース	3-78
表 3.3.3-2	Na 型ベントナイトの溶解に伴う力学挙動変化の取得試験ケースの役割比較表	3-79
表 3.3.3-3	ICP-質量分析計イオン分析結果	3-84
表 3.3.3-4	モンモリロナイト溶解試験の解体結果	3-89
表 3.3.4-1	変質固相分析試料	3-90
表 3.3.4-2	Na 型ベントナイトの溶解に伴う力学挙動変化の取得試験ケース	3-91
表 3.3.4-3	Na 型ベントナイトの溶解に伴う力学挙動変化の取得試験ケース	3-91
表 3.3.4-4	モンモリロナイトの定量法の検討	3-94
表 3.3.4-5	試験液の組成	3-97
表 3.3.4-6	密度の測定結果	3-102
表 3.3.4-7	AFM 測定から得られた溶解速度	3-111
表 3.3.4-8	モンモリロナイト含有量から算出した溶解速度	3-118
表 3.3.4-9	No.2 の EDS 分析によるカチオン数	3-139
表 3.3.4-10	No.3,4,5 の EDS 分析によるカチオン数	3-141
表 3.3.4-11	No.9,10 の EDS 分析によるカチオン数	3-143
表 3.3.5-1	Na 型ベントナイトの Ca 型化に伴う力学挙動変化の取得試験ケース	3-146
表 3.3.5-2	Na 型ベントナイトの溶解に伴う力学挙動変化の取得試験ケース	3-146
表 3.3.5-3	計算条件	3-147
表 4.1.1-1	試験の条件	4-23
表 4.1.1-2	ヘクトライトの溶解速度測定及び液相分析結果	4-26
表 4.1.2-1	地下水組成	4-32
表 4.1.2-2	解析に用いた地下水の組成	4-33
表 4.1.2-3	セメントの化学組成	4-33
表 4.1.2-4	セメント系材料の仕様	4-33
表 4.1.2-5	緩衝材の仕様	4-34

表 4.1.2-6	ベントナイトの鉱物組成 .....	4-34
表 4.1.2-7	ベントナイトの交換性陽イオン組成 .....	4-34
表 4.1.3-1	クニピア P 溶解試験の溶液化学データ .....	4-45
表 4.1.3-2	MPRONS 熱力学データベースに追加した鉱物データ .....	4-47
表 4.2.1-1	モルタル試料の作製条件と試料の略称 .....	4-52
表 4.2.1-2	モルタルの配合とフレッシュ性状 .....	4-55
表 4.2.1-3	各材料の密度 .....	4-55
表 4.2.1-4	使用した骨材の性状 .....	4-56
表 4.2.1-5	密度、空隙率の測定結果 .....	4-56
表 4.2.1-6	重量減少率と $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , $\text{CaCO}_3$ 定量結果 .....	4-60
表 4.2.1-7	モルタル試料 (ペースト部分) のリートベルト法による鉱物相の定量結果 .....	4-61
表 4.2.1-8	OPC モルタルの遷移帯厚さ測定結果 .....	4-79
表 4.2.1-9	混合セメントモルタルの遷移帯厚さ測定結果 .....	4-88
表 4.2.1-10	OPC モルタルの実効拡散係数 .....	4-89
表 4.2.1-11	混合セメントモルタルの実効拡散係数 .....	4-89
表 4.2.1-12	拡散係数の解析結果 .....	4-96
表 4.2.2-1	硝酸アンモニウム溶脱試料の密度、空隙率測定結果 .....	4-102
表 4.2.2-2	硝酸アンモニウム溶脱試料の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , $\text{CaCO}_3$ の定量結果 .....	4-106
表 4.2.2-3	FAC30 ペースト試料 (溶脱試験前後) のリートベルトによる鉱物相の定量結果 .....	4-107
表 4.2.2-4	BFSC70 ペースト試料 (溶脱試験前後) のリートベルトによる鉱物相の定量結果 .....	4-108
表 4.2.2-5	C/S 比の平均値 .....	4-108
表 4.2.2-6	FAC30 溶脱試料の $\text{CaO}$ 溶脱率算出結果 .....	4-112
表 4.2.2-7	BFSC70 溶脱試料の $\text{CaO}$ 溶脱率算出結果 .....	4-113
表 4.2.2-8	FAC 溶脱試料の拡散係数測定結果 .....	4-125
表 4.2.2-9	BFSC 溶脱試料の拡散係数測定結果 .....	4-126
表 4.2.2-10	イオン交換水溶脱後試料の密度、空隙率の測定結果 .....	4-127
表 4.2.2-11	イオン交換水溶脱試料の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , $\text{CaCO}_3$ の定量結果 .....	4-129
表 4.2.2-12	FAC30 ペースト試料 (溶脱試験前後) のリートベルトによる鉱物相の定量結果 .....	4-130
表 4.2.2-13	BFSC70 ペースト試料 (溶脱試験前後) のリートベルトによる鉱物相の定量結果 .....	4-130
表 4.2.2-14	空隙構造モデルによる拡散係数算出結果 (FAC30 溶脱試料) .....	4-132
表 4.2.2-15	空隙構造モデルによる拡散係数算出結果 (BFSC70 溶脱試料) .....	4-132



表 4.2.3-1	モルタル試料	4-133
表 4.2.3-2	溶脱試験条件	4-134
表 4.3.1-1	地下水組成	4-140
表 4.3.1-2	解析に用いた地下水の組成	4-141
表 4.3.1-3	セメントの化学組成	4-141
表 4.3.1-4	セメント系材料の仕様	4-141
表 4.3.1-5	緩衝材の仕様	4-142
表 4.3.1-6	ベントナイトの鉱物組成	4-142
表 4.3.1-7	ベントナイトの交換性陽イオン組成	4-142
表 4.3.1-8	初期鉱物濃度	4-143
表 4.3.1-9	初期物性値	4-144
表 4.3.1-10	計算ケース	4-144
表 4.3.1-11	HMC 連成解析における計算ケース	4-176
表 4.3.2-1	解析に用いた材料パラメータ	4-231
表 4.3.2-2	解析に用いた入力パラメータ	4-238
表 4.3.2-3	材料定数	4-242
表 4.3.2-4	冠水後の推定間隙比	4-244
表 4.3.2-5	化学解析と力学解析との3パターンの解析での代表位置における決定係数 $R^2$	4-256
表 5.1.1-1	定温度試験の条件	5-2
表 5.1.1-2	評価試料の材齢一覧	5-4
表 5.1.1-3	C/S=0.83 の結晶子径および結晶化度	5-16
表 5.1.1-4	C/S=1.1 の結晶子径および結晶化度	5-23
表 5.1.1-5	C/S=1.4 の結晶子径および結晶化度	5-24
表 5.1.1-6	合成条件	5-25
表 5.1.1-7	C-S(A)-H の定温度試験の試験条件	5-26
表 5.1.1-8	C-S(A)-H の結晶子径および結晶化度	5-33
表 5.1.1-9	合成 C-S-H の定温度試験の結晶化度	5-35
表 5.1.1-10	定温度試験の配合	5-37
表 5.1.1-11	定温度試験の試料名一覧	5-37
表 5.1.1-12	OPC ペースト硬化体の化学組成	5-38
表 5.1.1-13	OPC+石英型 $\text{SiO}_2$ の結晶子径および結晶化度	5-43
表 5.1.1-14	定温度試験の液相分析結果	5-56
表 5.1.2-1	経年コンクリートの EPMA 分析結果の C/S 分割条件	5-61
表 5.1.3-1	経年コンクリートの一覧	5-78
表 5.1.3-2	1933 年製造のコンクリート試料の水和物定量結果	5-79

表 5.1.3-3	EPMA より求めた C-S-H の C/S .....	5-80
表 5.2.2-1	モルタルの使用材料 .....	5-90
表 5.2.2-2	モルタルの配合 .....	5-91
表 5.2.2-3	養生条件 .....	5-91
表 5.2.2-4	試料の浸漬条件 .....	5-92
表 5.2.2-5	測定項目、使用機器および測定条件 .....	5-92
表 5.2.2-6	空隙率および平均細孔直径.....	5-93
表 5.2.2-7	硝酸銀噴霧による浸透深さの測定結果.....	5-97
表 5.2.2-8	EPMA による浸透深さの測定結果 (モルタル) .....	5-98
表 5.2.2-9	見掛けの拡散係数 (モルタル) .....	5-101
表 5.2.2-10	コンクリートの使用材料 .....	5-107
表 5.2.2-11	コンクリートの配合 .....	5-107
表 5.2.2-12	塩素イオン浸透深さの測定条件 (コンクリート) .....	5-117
表 5.2.2-13	骨材量の推定結果 (水平方向打設試験体) .....	5-117
表 5.2.2-14	骨材量の推定結果 (垂直方向打設試験体、テストピース) .....	5-118
表 5.2.2-15	空隙量の推定結果.....	5-120
表 5.2.2-16	圧縮強度測定結果.....	5-121
表 5.2.2-17	硝酸銀噴霧による塩素イオン浸透深さ測定結果 (水平方向打設試験体) .....	5-121
表 5.2.2-18	硝酸銀噴霧による塩素イオン浸透深さ測定結果 (垂直方向打設試験体) .....	5-122
表 5.2.2-19	硝酸銀噴霧による塩素イオン浸透深さ測定結果 (テストピース) ..	5-122
表 5.2.2-20	EPMA による浸透深さの測定結果 (コンクリート) .....	5-125
表 5.2.2-21	見掛けの拡散係数 (コンクリート) .....	5-131
表 6.1.1-1	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の検討の 流れと平成 26 年度実施事項 .....	6-1
表 6.1.1-2	緩衝材の化学変質に関する試験 (第 2 章) のまとめ .....	6-1
表 6.1.2-1	緩衝材の連成解析に関わる力学特性に関する試験 (第 3 章) のまとめ	6-4
表 6.1.3-1	HMC 連成解析手法の検討 (第 4 章) のまとめ .....	6-6
表 6.2.1-1	人工バリア評価の初期条件の設定 (第 5 章) のまとめ .....	6-9

# 第1章 事業概要

## 1.1 背景

本調査が対象としているのは、再処理工場から発生する超ウラン元素を含む放射性廃棄物（以下、TRU 廃棄物という）であり、地層処分が想定されている。「はじめに」にもあるとおり、「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、TRU 廃棄物は高レベル廃棄物との併置処分の実施も念頭に、地層処分事業という統合された計画とすることが決められ、同改正法は平成 20 年 4 月より施行されている。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掲げられ、現在、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なり、事業を行うための検討がなされている[1]。

TRU 廃棄物の地層処分に向けた検討課題は、各研究開発機関等を中心とした「地層処分基盤研究開発調整会議」によって取りまとめられ、緊喫に調査を実施すべき課題として挙げられている。こうした背景の中、TRU 廃棄物の処分に係わる人工バリアの長期性能評価に関する課題のうち、本調査では、人工バリア材料の長期挙動評価と評価のための初期設定の設定についての課題を取り上げ、これを調査することとした。

人工バリア材料の長期挙動に関しては、平成 24 年度までに、セメント系材料については、80 年程度経過したコンクリート試料（経年コンクリート）の分析評価、混合セメントに関するデータ取得、及びモデル確証・評価、ベントナイト系材料については、化学挙動と力学挙動を相互に考慮した緩衝材の長期挙動評価の必要性が示された。現実的評価に基づいて施設設計の合理化に資するためには、これらの課題を解決し、処分環境及び材料の多様性に起因する評価の不確実性を低減させると共に、人工バリア長期性能評価の信頼性を向上させることが重要である。また、実際の処分場でこれらの材料を採用した場合の成立性についても議論すべきである。

## 1.2 目的及び検討概要

本事業は、TRU 廃棄物の地層処分における人工バリアの長期挙動に関し、長期的な変化（現象とその順序と時間）とその長期的変化による影響の評価を目的とし、平成 24 年度までに本事業において抽出された課題を解決するために、必要なデータを取得し、試験によって得られたデータを活用した現象のモデルや解析手法の検討等を実施する。人工バリアの主な構成材料であるセメント及びベントナイトの化学変質を考慮して、核種移行抑制、構造安定性等の性能の維持を説明できる長期予測手法を構築し長期的変化のバリア性能への影響の評価を行う。

今後 5 カ年の事業として、「人工バリア材料長期挙動評価」では、主に緩衝材を対象に、水理力学化学（HMC）連成挙動および解析による長期挙動評価の信頼性を高めるために、確証試験と解析への適応を検討する。一方、「人工バリア初期条件の設定」では、セメント系材料を主として、

長期挙動評価への初期条件の設定および影響に着目し、解析精度の向上のために作業中の熱の影響、施工による初期設定への影響等を検討する。

### 1.3 前フェーズ(平成 24 年度まで)の成果と課題

人工バリアに使用される材料であるベントナイト系材料(緩衝材)及びセメント系材料は、人工バリアに使用される化学的な変質は力学的な人工バリアの状態に影響を及ぼし、これらは相互に影響を及ぼし合う。ベントナイトは、セメント成分が溶解することにより高 pH になった地下水が接触し長期的に変質が起こり、工バリアの特性に変化をもたらす可能性がある。そのため、これらの材料の地下環境での長期的変化の人工バリアの性能への影響を評価し、人工バリアの成立性の説明や設計、施工への反映をすることが必要である。

平成 24 年度までの「人工バリアの長期挙動の評価」[2]は、①多様なセメント系材料の長期変質挙動の確証試験、②セメントーベントナイト相互影響の確証試験、及び③人工バリア性能評価解析の高度化について調査を行った。これにより、地下環境条件に対応した人工バリア材料の多様性を考慮したセメント系材料及びベントナイト系材料の変質データを取得した。また、変質に伴う物質移行特性及び力学特性の変化に関するデータを取得し、得られたデータを元に人工バリアの長期性能評価手法の構築及び高度化を目標として実施した。

以下に、項目毎の主な成果を(1)~(3)に、抽出された課題を(4)にそれぞれ示す。

#### (1) セメント系材料の長期変質挙動の確証試験の成果

##### 1) セメント系材料の物質移行・力学特性変化に関する計算手法の高度化

多様な材料への対応のために、統一的な特性値の評価モデルとして、空隙構造モデル及び表面電荷モデルについて検討した。構築した空隙構造モデルにより、試料の物性値により拡散係数を算定でき、健全な試料の物性値から変質に伴った拡散係数を算定できる見通しを得た。また、Region3 の拡散係数を変質試料で取得し、拡散係数の信頼性を高めた。なお、混和材を使用した FAC(フライアッシュセメント)、BFSC(高炉セメント)及び SC(シリカフェーム混合セメント)の硬化体も主要な水和物と溶解過程は OPC と同様であるため、C-S-H 部分の拡散係数について検討を行えば、本モデルを適用できる。

表面電荷モデルは、水和物の細孔表面電荷を考慮した物質移行特性を解析するモデルであり、多様なセメントの拡散係数を統一的に算定するためのキーとなる手法を提示した。

力学特性値に関しては空隙率との関係により算定できるものと判断した。

##### 2) セメント系材料の溶解変質モデルの構築に係わる試験

溶解変質試験により、BFSC や SC の変質において、これまでに OPC や FAC の変質で確認されている初期鉱物及び二次鉱物とほぼ同様であるという結果を得た。BFSC、SC 及び FAC における変質過程は、主に OPC 硬化体の C-S-H が溶解する過程(Region3)での変質挙動であると考えられる。以上の点から、多様なセメント系材料の溶解変質解析は、OPC の変

質解析に適切な鉱物設定を行い、変質の進行速度を考慮することで対応が可能と考えられる。

### 3) 経年コンクリート(アナログ試料)の分析

40～90年程度経過した経年コンクリートの分析より、変質解析の基点のコンクリートの状態や経年コンクリートの溶解試験により変質過程の妥当性の検証を行い、変質解析への反映事項や今後の検討課題を抽出した。変質解析の鉱物設定及び変質過程はこれまでの変質解析と大きく変わらないが、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が検出されない点及び熱影響によるC-S-Hの結晶化の進行が一部で起こり、溶解しにくい点が異なっていた。コンクリートの熱影響の温度推定値は70～100℃であった。今後、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消失及び熱影響によるC-S-Hの結晶化について、配合(骨材の影響)や温度の条件の把握が必要であり、TRU処分概念で制限温度としている80℃以下でC-S-Hの結晶化が進行する場合は、変質解析の初期設定、物質移行の拡散係数及び分配係数等の物性値の設定への影響を検討する必要がある。

## (2) セメントーベントナイト相互影響の確証試験の成果

### 1) セメントーベントナイト接触供試体の界面近傍の分析

ベントナイトの接触面から深さ方向への変質状況(二次鉱物の生成等)を得るために、クニゲルV1の組成等を考慮し、パターンフィット法でCa鉱物の分離定量を実施した。全Ca量に対し、10%以上のCaが含まれている鉱物種に関してはある程度の精度を持った定量値が得られた。C-S-Hについては、Ca/Si比を特定する分析について詳細に検討した結果、XAFS分析では分離ができないことが明らかになった。

また、薄片試料に直接ビームを照射する原位置測定に、空間分解能の高いフォトダイオード1次元検出器を使用することによって、0.05mm間隔の高分解能なXAFS分析が可能になった。

### 2) 圧縮系でのベントナイトの溶解速度に関する試験

圧縮条件下で、アルカリ溶液中でのモンモリロナイトの溶解速度をin-situで測定した。その結果、圧縮系での溶解速度は分散系より1桁以上遅くなることを確認した。これにより、これまで使われてきた分散系での溶解速度が安全側であるということが確認できたと言える。

溶解速度式を定式化するにあたり、式中に取り込まれる要素としては、化学的要因( $\Delta G$ の変化)の寄与はわずかであり、物理的要因(反応比表面積の変化の効果)が大きいことがわかった。

### 3) 粘土系材料の変質に関する天然事例の調査

Caが含まれ、アルカリ性である温泉水の賦存する地域でのナチュラルアナログの調査を行った。スメクタイトがゼオライトに変質、あるいはその逆の経路での変質の痕跡が観察された。変質にかかる時間については明確にできなかったため、地化学解析を行って評価した。PHREEQCを用いて500万年間のその場の岩石と水が反応したケースを設定して計算した

結果、変質鉱物の組成は Na 型及び Ca 型モンモリロナイト、サポナイト、Ca ゼオライトが共存することが示された。この結果は、安全評価におけるスメクタイトの変質が十分に保守的であることの傍証であると考えられる。

#### 4) 力学・物質移動特性変化に関する試験

圧縮したベントナイト系材料の変質に伴う力学特性と水理特性の取得を、各種の材料について行った。完全飽和線、膨潤線、XRD による 2 層膨潤状態含水比等のデータを取得した結果、力学特性としては、①Ca 型化による力学特性変化の取得、②モンモリロナイト含有率の変化と力学特性変化の関係式を提示した。また、水理特性としては、①Kozeny-Carman 式を導入し、比表面積と Ca 型化率、モンモリロナイト含有率の関係式を提示し、②内間隙、外間隙の調和平均形式透水係数と既往の透水係数実測値で整合することを示した。

化学・力学連成モデル試験に関しては試験を継続しているが、液種によるイオン影響とレラクゼーション影響が見られる。この現象の把握と、化学/力学平衡状態の遷移状況を示していくことが必要である。

### (3) 人工バリア性能評価解析の高度化の成果

#### 1) セメント系材料の変質解析手法の高度化

セメント系材料の初期鉱物設定を実際に得られている鉱物を基に変更した結果、Al 濃度の解析結果が再現されるようになった。また、二次鉱物についても改善し、現実的なセメント二次鉱物の設定を提案することができた。

物質移行に関する設定に関しては、拡散係数の検討及び(1)項で検討した拡散係数を採用した結果、限定的ではあるが、Ca の移行の再現性が向上した。

#### 2) ベントナイト系材料の変質解析手法の高度化

ベントナイト系材料の解析は、試験より解析の変質速度が非常に速いことが課題であった。速度に関しては、(2) 2)項で得られたモンモリロナイトの溶解速度を用いることにより、不確実性が低減された。また、(2) 4)項で検討した Kozeny-Carman 式の導入による透水係数の低減によっても、変質速度が遅く見積もられたが、液相濃度の影響が考慮されていないことが影響している可能性がある。

#### 3) ベントナイト系材料の化学・力学連成モデル構築

一次元の解析体系を採用し、化学・力学とも同じメッシュで、一定時間経過後にデータを受け渡す弱連成解析を行い、連成解析の効果を検討した。受け渡したパラメータは、化学解析からはモンモリロナイト含有率とモンモリロナイトの Ca 型化の割合であり、力学解析からはモンモリロナイトの圧密変化による乾燥密度分布の変化である。

変質は、時間の経過と共に廃棄体接触部分で進行するが、Ca 型化率を除いてほとんどが一層目のみにとどまる。化学解析では変質によって体積が減り、密度が低くなるが、力学解析

による挙動を反映させることにより、内側からの応力がかかって、その密度が再分布される。これにより、変質の幅は狭められるが、その分健全なベントナイト部分の密度は低くなると考えられる。透水係数の変化は、連成の有無でわずかではあるが差があり、連成無しの場合には廃棄体に接する部分で透水係数が低くなる部分が見られるが、弱連成をした場合には変化がほとんどなく、連成により化学変質の進行が抑えられる効果があることが示された。

しかし、二次元解析で同じ傾向になるとは限らず、また、力学解析で固相の変化を考慮した解析方法についてもさらに検討する必要がある。

#### 4) 人工バリアの変質解析（総合評価）

##### ①地化学解析による評価

前項までに示したモデルを採用した地化学的変質解析を行った。その結果は、透水係数は最内層の変化が大きく異なっており、基本ケース（これまでのモデルを使用したケース）に比べ変化が少ないと共に、基本ケースで見られた3万年付近の変曲点も見られない。これは、採用した透水係数式が液相濃度（イオン強度）に依存しない関数であったことも原因と考えられ、今後検討する必要がある。

##### ②核種移行計算による評価

①の設定に従って、人工バリアの不確実性低減を目的とし、核種移行計算を行った。人工バリアに関する効果を見ることを計算の目的としたため、主に、「人工バリアからの移行率」で結果を考察した。ほとんどのケースで人工バリアからの移行率はTRU2次レポートの結果よりも低くなっており、より実際に近い設定での評価により、これまでの評価が尤度を持っており、安全側での評価であったことを示すことができた。

#### (4) 人工バリアの長期挙動の評価で抽出された主な課題

##### 1) セメント系材料の長期変質挙動の確証試験

- ▶ セメント系材料の物質移行・力学特性変化に関する計算手法：多様なセメント種類、骨材を含むモルタル・コンクリート等の現実的な材料への対応
- ▶ 経年コンクリート(アナログ試料)の分析：熱影響を受けた経年コンクリートで確認した、C-S-H のトバモライトへ結晶化する熱変質の、制限温度 80℃以下での発生の可能性とその人工バリアの長期挙動への影響

##### 2) セメントーベントナイト相互影響の確証試験

- ▶ 圧縮条件下におけるアルカリ溶液中でのモンモリロナイトの溶解速度：定式化とシミュレーション等による現象モデルの信頼性向上
- ▶ 化学・力学連成モデル試験：力学挙動でのレラクゼーション影響が見られるため、試験の継続による挙動確認、化学/力学平衡状態の遷移状況の確認

3) 人工バリア性能評価解析の高度化

- ▶ ベントナイト系材料の化学・力学連成モデル構築：二次元での解析手法の構築と長期評価、力学解析における固相の体積変化の考慮

1.4 本フェーズ(平成 25 年度から)の全体計画とこれまでの成果

1.4.1 全体計画

前項で示した昨年度までに、平成 19 年度から平成 24 年度の成果をもとに、課題が残っているテーマ、および人工バリアの長期挙動評価に対しての効果が高いために優先的に研究を進めるべきテーマについてまとめた。今後 5 ヶ年の全体計画をたてるにあたり、抽出された内容をもとに、研究内容を策定した。図 1.4.1-1 にその全体概要を示す。

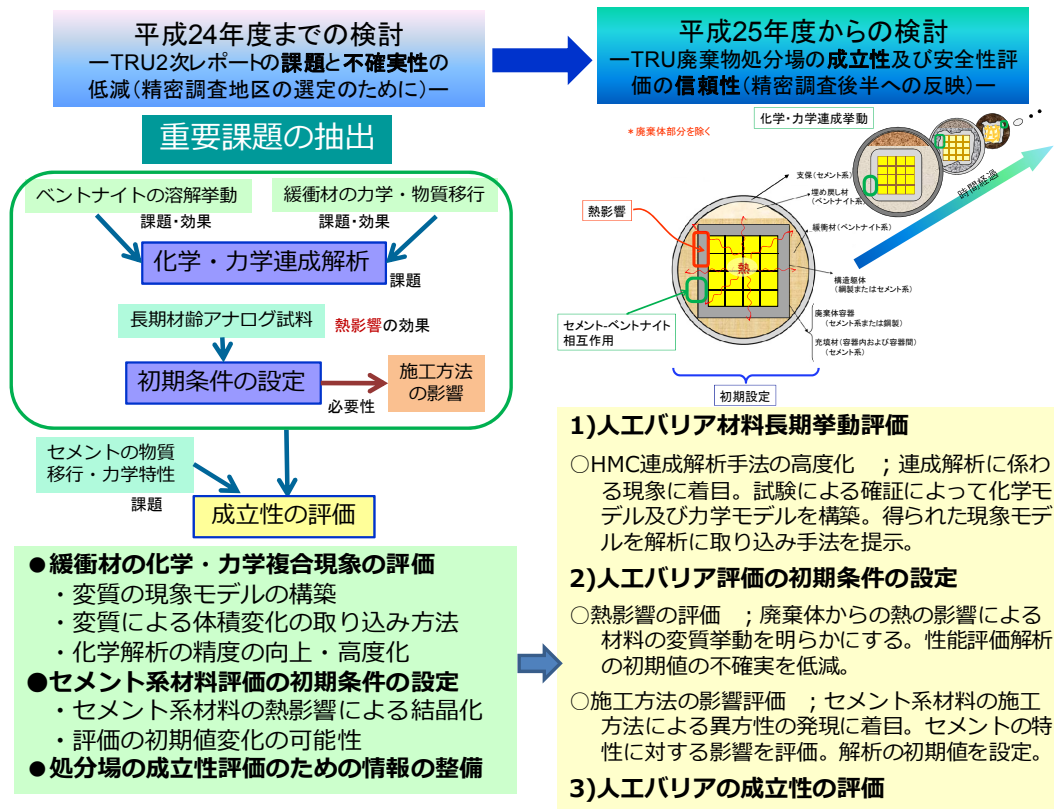


図 1.4.1-1 課題の抽出と研究内容の策定

平成 24 年度までの研究で、特に重要な課題であるとして抽出されたのは、図中にも示した通り、各項目での課題の中で、緩衝材の「化学・力学連成解析」に関わる内容と、セメント系材料の「初期条件の設定」に関わるものであった。また、これまでは材料の多様性に適用できるデータ取得をする、という目的を持って進めていたが、研究してきた材料を使用して処分場が成立することを示していくことが今後取り組むべきテーマであると考えた。そのために、今後取り組むべ



き研究項目として、以下に示すものを抽出した。

- 緩衝材の化学・力学複合現象の評価
  - ・ 変質の現象モデルの構築
  - ・ 変質による体積変化の取り込み方法
  - ・ 化学解析の精度の向上・高度化
- セメント系材料評価の初期条件の設定
  - ・ セメント系材料の熱影響による結晶化
  - ・ 評価の初期値変化の可能性
- 処分場の成立性評価のための情報の整備

この内容をもとに、平成 25 年度以降の研究は、「人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア評価の初初期条件の設定」として、以下のような視点を持って技術開発を実施することとした。

- ▶ 人工バリアの長期挙動を評価するためのツールとして数値解析によるシミュレーションは必要不可欠である。評価の精度向上のために、解析手法の高度化が重要であり、**水理力学化学 (HMC) 連成解析**が注目されている。平成 24 年度までの検討により、化学変質が力学挙動に大きな影響をもたらす可能性が大きいことが明らかとなり、この影響の評価のためには、長期試験を含む実試験による現象のモデル化、そのモデルを取り込むための解析の高度化が必要であることがわかった。こうした課題を解決するために、試験による**現象モデル**（化学モデル及び力学モデル）の構築及びそのモデルの解析による検証を行う。
- ▶ 精密調査後半の処分事業への反映に対しては、**人工バリアの成立性を評価**し、その仕様に対する情報を蓄積することが必要である。人工バリアの成立性の評価を行うためには、長期挙動の評価解析のための、より**現実的な材料及び系でのデータ取得**、及び**基礎データの精度**を高めることが必要である。また、施工方法の影響を考慮した、**初期値の設定**は解析評価の重要である。具体的には、性能評価の初期値の精度を高めるために、施工方法による特性への影響、操業中の熱の影響を試験により検討する。また、ベントナイトの仕様決定のためにより現実的な特性の測定を行う。
- ▶ 人工バリアの長期挙動評価、材料の施工とその仕様に関しては処分場の設計のための重要な研究課題であり、国内の関係機関及び国際的にも各国で取り組まれているため、国内外の関係機関や大学等との間で**研究協力**、及び**情報交換**を実施し、研究効率の向上をはかると共に、成果の普及に努める。

以上の観点より、3 項目の内容について行うことにした。図 1.4.1-2 に本事業での人工バリアの建設から閉鎖後の長期と本検討の関係と検討概要を、図 1.4.1-3 に本検討で考慮する化学変質と力学挙動の関係、図 1.4.1-4 に本検討で取り組む二次鉱物の生成と力学挙動への影響のイメージと検討課題を示す。

1)人工バリア材料長期挙動評価

HMC 連成解析手法の高度化：連成解析に係わる現象に着目し、試験による確証を得ながら、化学モデル及び力学モデルを構築する。この現象モデルを取り込んだ解析手法を検討し、提示する。

2)人工バリア評価の初期条件の設定

熱影響の評価：処分場操業中から起こる廃棄体からの熱の影響による材料の変質に関する試験を行い、その挙動を明らかにする。これによって、性能評価解析の初期値が現状と変わる可能性があり、評価の不確実を低減する。

施工方法の影響評価：特にセメント系材料の施工方法による異方性等の発現に着目し、セメントの特性に対する影響を評価し、解析の初期値の設定方法を明らかにする。

3)人工バリアの成立性の評価

上記の内容を踏まえ、高度化された性能評価手法をもとに、精密調査後半で行われる、人工バリアの仕様の決定のために人工バリアの成立性を視点として、成果をまとめる。

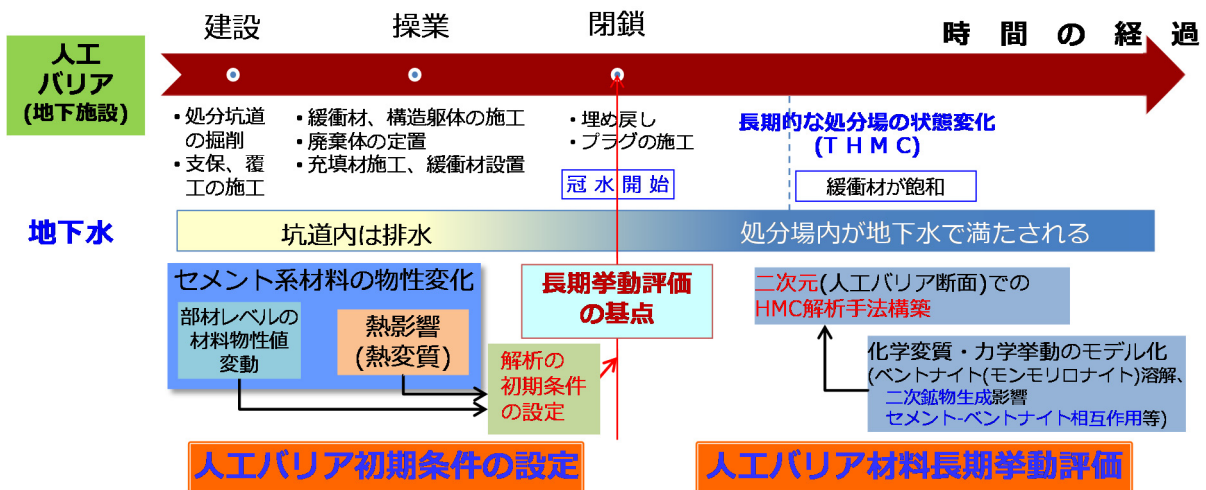


図 1.4.1-2 人工バリアの建設から閉鎖後の長期と本検討の関係及び検討概要

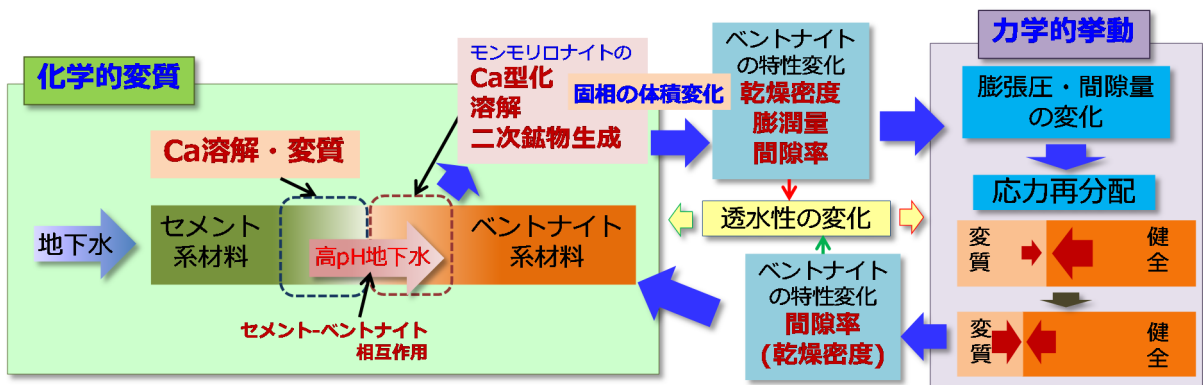


図 1.4.1-3 本検討で考慮する化学変質と力学挙動の関係

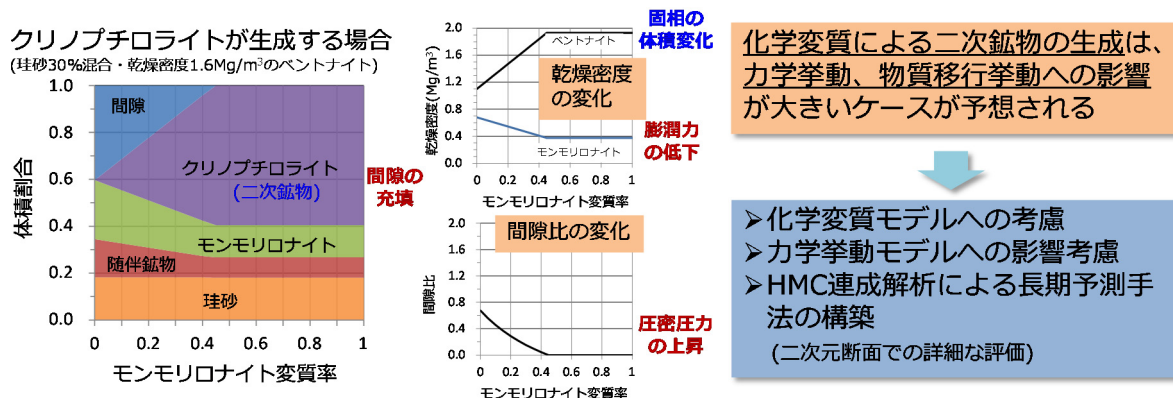


図 1.4.1-4 二次鉱物の生成と力学挙動への影響のイメージと検討課題

5 年間のスケジュールを図 1.4.1-5 に示す。

平成 25 年度は、全体計画の策定とそれに資する文献の調査、試験方法の確認と試験の条件設定のための予備試験を主に行った。平成 26 年度からは試験によるデータ取得を行い、また、平成 26 年度には中間評価を予定しており、方向性を見極めて後半 3 年間は、大型部材の試験等を行う計画である。5 年間の終わりには、性能評価解析等も行って成果をまとめ、人工バリアの成立性、安全性評価に対するの反映を図ることを目的とする。この検討は、「ナチュラルアナログ調査」及び「ガス移行連成挙動評価手法の開発」との連携しつつ、NUMO が策定している計画にのっとり、精密調査後半へ反映することを念頭に行う

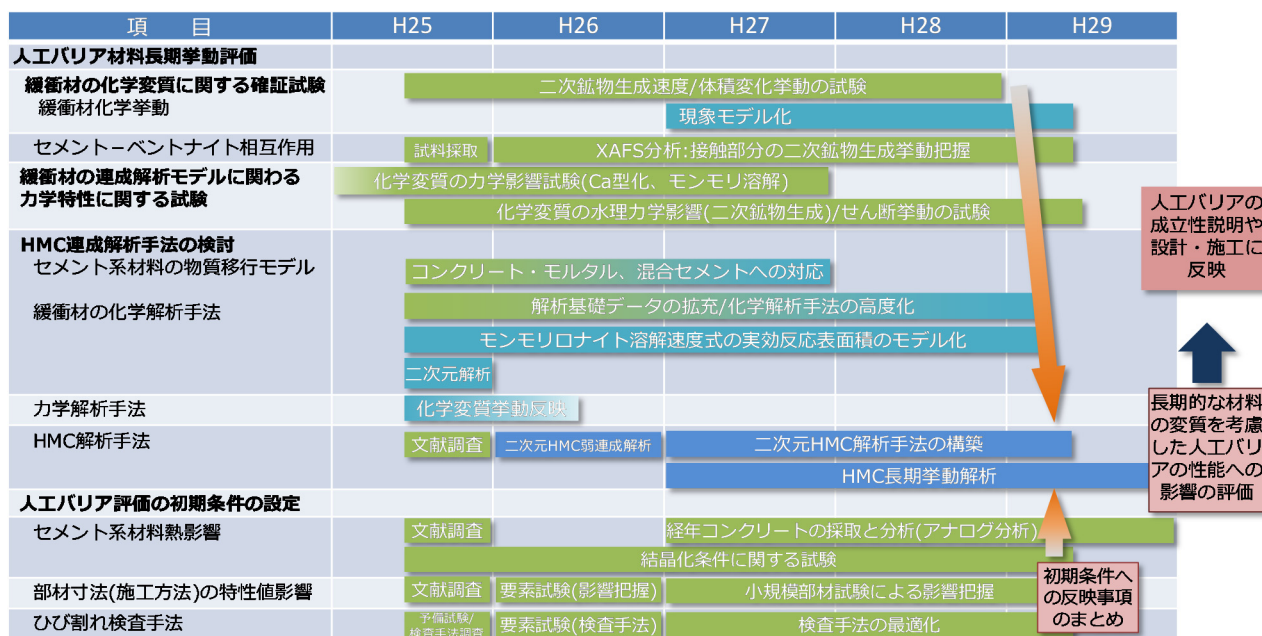


図 1.4.1-5 5 年(平成 25~29 年度)の計画

## 1.4.2 平成 25 年度の成果概要

平成 25 年度の検討の成果[3]を以下に示す

### (1) 人工バリア材料長期挙動評価

人工バリア材料長期挙動評価では、①緩衝材(ベントナイト)の化学変質に関する試験、②緩衝材の力学特性に関する試験及び③HMC 連成解析手法の検討を実施した。

#### 1) 緩衝材の化学変質に関する試験

緩衝材の化学変質に関する試験では、モンモリロナイトの溶解と二次鉱物の生成による体積変化を直接測定するための予備試験とそれによる二次鉱物としてアナルサイムが生成する場合の体積変化挙動の把握を行った。シリンジ中で試料を変質させ体積変化を測定する手法を適用し、図 1.4.2-1 に示す様に、時間の経過と共にモンモリロナイトの溶解による現象とアナルサイム等二次鉱物の生成による体積減少を確認した。また、干渉計を使用した二次鉱物の生成速度の試験を実施した。今後、その他の二次鉱物についても生成時の挙動を確認し、現象をモデル化していく必要がある。

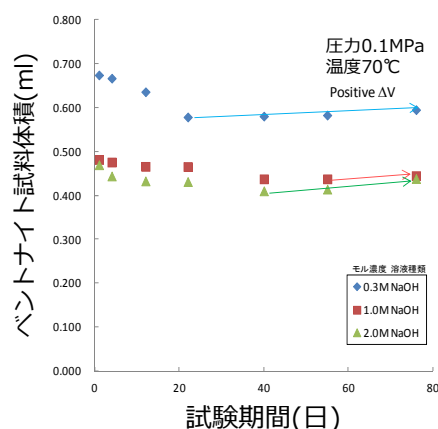


図 1.4.2-1 モンモリロナイトの変質時の体積変化

セメントとベントナイトが長期に接触した試料は少なく、この部分で変質により生成する珪酸カルシウム水和物(C-S-H)等の二次鉱物の挙動について分析による把握、解析の検証が必要のため、スイス Nagra の GTS(グリムゼル試験場: Grimsel Test Site) の構造物から、建設後 12 年間の経過した試料を採取した(図 1.4.2-2)。加えて、化学変質挙動について、カラムによる現実的な条件での試験、化学変質解析の信頼性向上のための基礎データの整備として、国内産モンモリロナイトの熱力学データを拡充するための特性データを取得した。

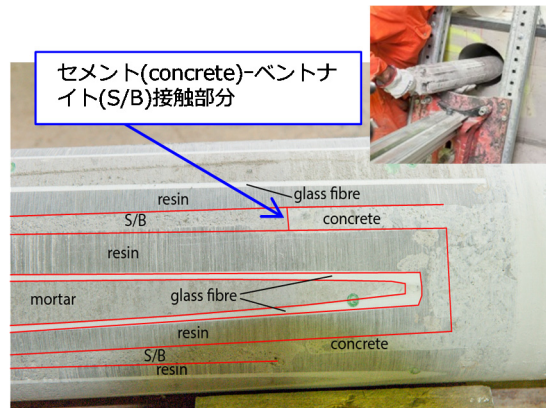


図 1.4.2-2 セメント-ベントナイト接触試料

## 2) 緩衝材の連成解析に関わる力学特性に関する試験

緩衝材の力学特性に関する試験では、粉末のアナルサイムをベントナイト試料に混合して、変質で二次鉱物が生成した状態を模擬した試料を作製し、力学水理挙動を確認した。その結果、アナルサイム生成での力学挙動は、これまでの化学変質(モンモリロナイトの減少)による完全飽和線の移動で評価できる(図 1.4.2-3)。水理挙動(透水係数)は、モンモリロナイト含有量で推定可能なことを確認した。なお、排気圧縮試験(負荷)と吸水膨潤(除荷)で挙動が異なることを確認しており、今後データを拡充し、これらの挙動について詳細に確認を進める必要がある。その他、緩衝材のせん断変形挙動に関する試験、化学変質に伴う長期力学挙動試験を実施し、長期挙動解析の高度化に有益な知見を取得した。

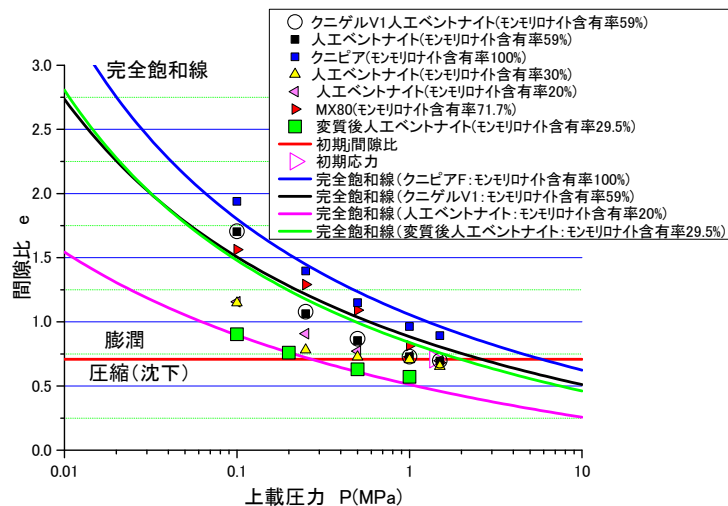


図 1.4.2-3 緩衝材の力学挙動に関する試験結果

## 3) HMC 連成解析手法の検討

HMC 連成解析手法の検討では、化学的な挙動の解析手法について検討し、処分場坑道を想定した二次元での長期解析が可能となった(図 1.4.2-4)。加えて、モンモリロナイトの溶解速度の定式化で重要な実効反応図面積を数学的な手法でのモデル化に取り組んだ。モンテカルロシミュレーションを用い、円盤状粒子の積層の平衡状態を計算し、その状態の実効反応表

面積を算出する。低密度(乾燥密度  $0.05\text{Mg}/\text{m}^3$  以下)の積層状態での試験の再現が可能となり(図 1.4.2-5)、今後実用的な乾燥密度(モンモリロナイト換算  $1.2\text{Mg}/\text{m}^3$ )での再現を目標に解析手法を検討していく必要がある。

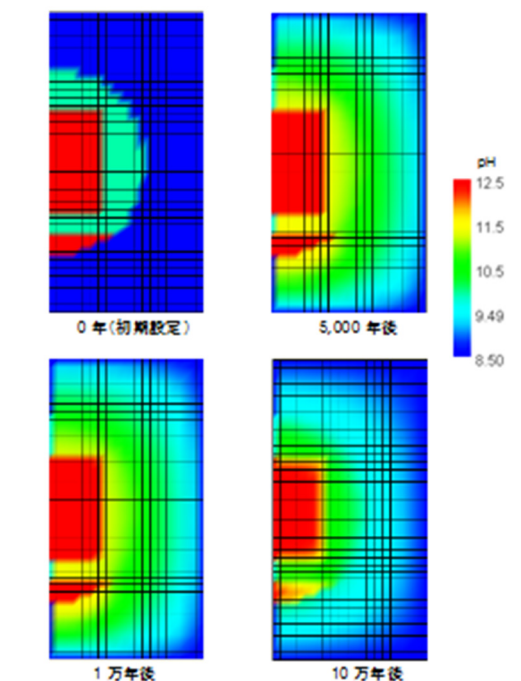


図 1.4.2-4 二次元化学解析結果

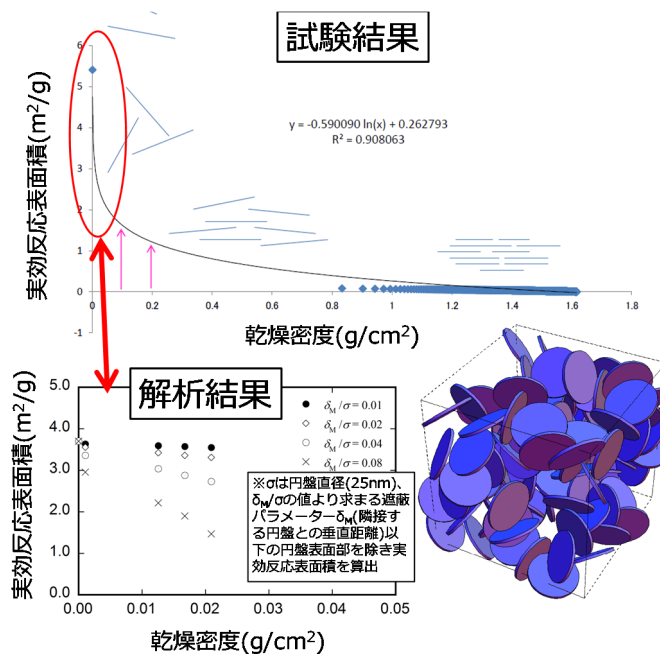


図 1.4.2-5 数学モデルによるモンモリロナイト実効反応表面積の算定手法の検討成果

セメント系材料の物質移行(拡散係数)モデルについては、平成 24 年度までにセメントペースト(水とセメントから成る、以下ペーストとする)の三次元モデルにてランダムウォーク法で拡散係数を計算する手法を構築した。このモデルをコンクリート、モルタル(ペーストと骨材)へ対応させるために、ペースト、骨材及びこれらの界面の遷移帯を考慮したマルチスケールモデル(図 1.4.2-6)を適用し、ランダムウォーク法で拡散係数を計算する方法について検討を進めるとした。今後、計算結果を試験結果で検証し、モデルを構築する計画を策定した。加えて、フライアッシュ等の混合セメントへの対応をするために、OPC と混合セメントで異なる C-S-H 部分の拡散係数について、試験結果に基づいてモデル化を行う計画を策定した。

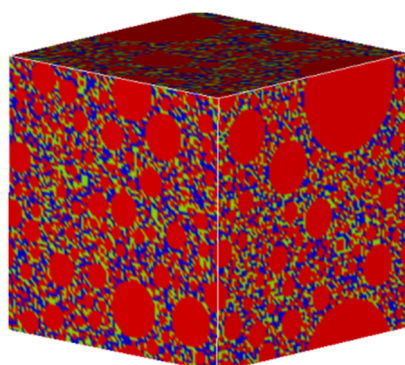


図 1.4.2-6 セメント系材料の骨材を考慮した三次元モデル  
(青：骨材、赤：ペースト、黄緑：遷移帯)

力学挙動に関する解析では、これまでに質量保存の点から考慮が難しかった緩衝材の変質を反映した構成モデルを構築した。この構築した構成モデルは、モンモリロナイトの溶解減少による、膨潤圧の減少等の水理力学挙動への影響だけでなく、アナルサイム等(二次鉱物)の生成による固相(緩衝材)体積の増加(図 1.4.2-7)が水理力学挙動への影響を考慮することが出来る。今後、この構成モデルを反映した二次元 FEM 解析を構築し、二次元化学解析との連成手法の検討を進めることで、より実現象に近い人工バリアの長期挙動解析が可能になると考えられる。

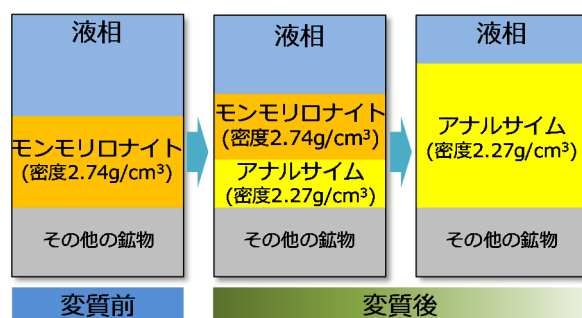


図 1.4.2-7 力学解析モデルで考慮したベントナイトの変質に伴う体積変化挙動の模式図

## (2) 人工バリア評価の初期条件の設定

人工バリアの長期挙動評価の解析の起点は、処分場が建設、操業を経て閉鎖された時点であり、また、解析の起点における材料特性値等の初期条件は、長期の解析結果に影響を及ぼすため、より正確であることが必要である。セメント系材料の材料特性値(拡散係数、力学特性等の物性値)は、処分場の建設から閉鎖までの期間に放射性廃棄物からの熱による変質を受けること、人工バリアの構造部材の大きさでは、部位の違いによる特性値の変動があることが予想される。そのため、解析の初期条件は、従来用いられてきた材料自体の特性に関する情報に加え、建設や閉鎖までの影響を考慮する必要がある。本検討では、セメント系材料の初期条件の設定への反映を目的とし、先に述べた、熱影響と部材寸法の影響について検討を行う。加えて、人工バリアの長期性能への影響、初期条件への反映が考えられるセメント系材料のひび割れについての検査手法の検討を行った。

### 1) 熱影響の初期値への影響に関する試験

セメント系材料への熱影響に関しては、平成 24 年度までの検討により、製造後 80 年程度の熱履歴を受けたコンクリート(経年コンクリート)では、TRU 処分坑道の制限温度の 80°C より低い温度で、主なセメント水和物である C-S-H が結晶化(トバモライト化)することがわかっている。これによる初期条件の鉱物設定や特性値への影響が懸念される。そこで、まず、C-S-H の結晶化の条件が明確ではないことから、文献調査及び試験により調査をした。文献調査の結果、結晶化条件として、温度、経過時間、混合セメントに含まれる Al の存在及び C-S-H の Ca/Si モル(C/S)比を抽出した。合成 C-S-H を一定温度に保管し、結晶化状態を X 線回折(XRD)分析した結果、70°C 以上の条件で結晶化の開始を確認した(図 1.4.2-8)。今後試験を継続して結晶化条件を確認していく必要がある。経年コンクリートの分析によれば、C/S が通常のセメント系材料の 1.8 より低下しているコンクリートで結晶化を確認した(図 1.4.2-9)。今後、経年コンクリートを詳細に分析することで、C/S 低下原因等の結晶化条件に関わる情報を得ることが出来るものと考えられる。

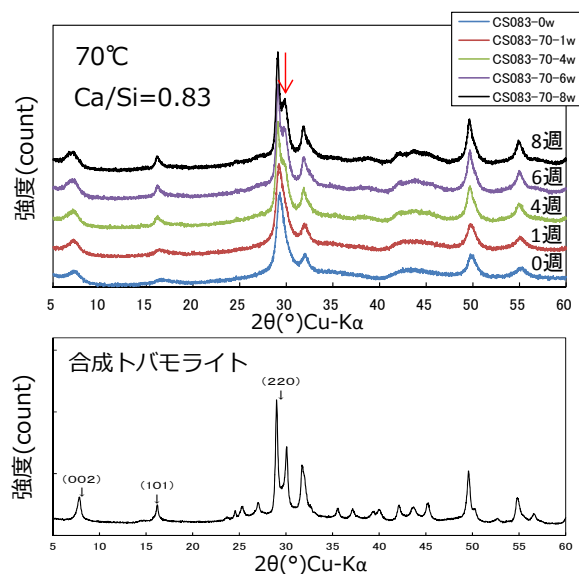


図 1.4.2-8 C-S-H の定温度試験結果(XRD による結晶化の確認)



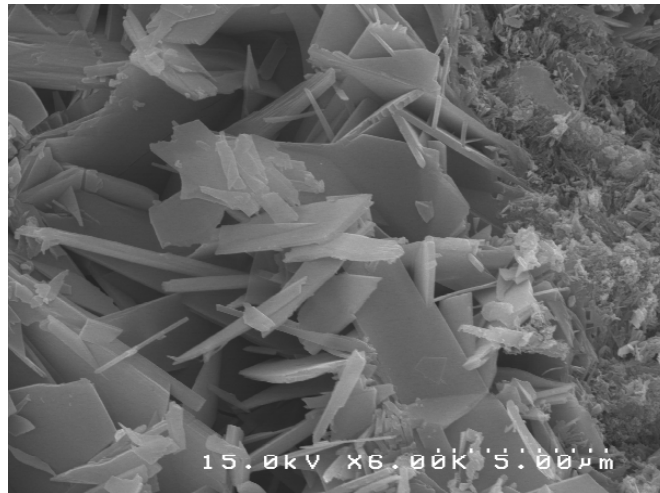


図 1.4.2-9 熱履歴を受けた経年コンクリートで確認した C-S-H の結晶化状況(SEM 観察)

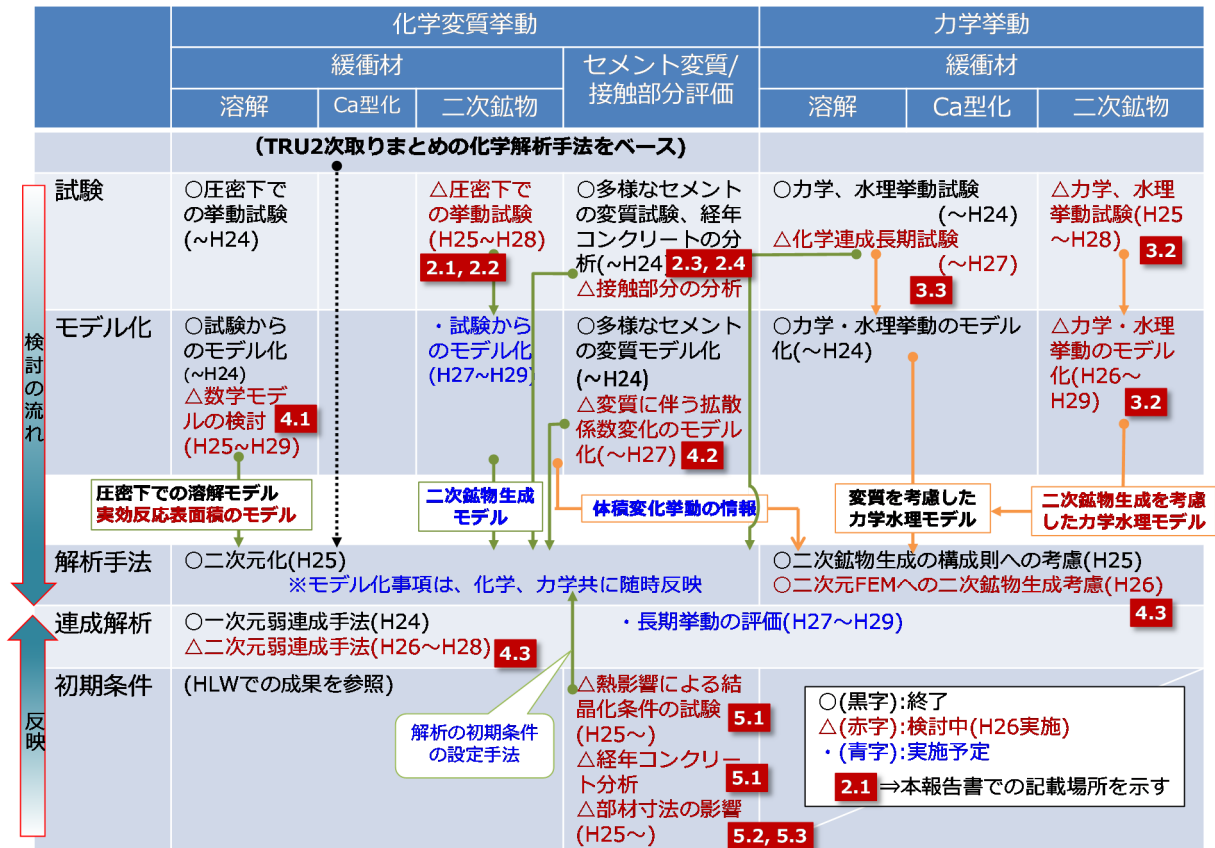
## 2) 施工方法の初期値への影響に関する検討

人工バリアの構造部材の大きさにおける特性値への影響について文献調査を行った。調査の結果、人工バリアでセメント系材料が使用される構造躯体では、コンクリートの打設方法(1回の打設高さ、締固め方法等)による部位毎の特性値の違い、打ち継ぎ、打ち重ね部分が地下水の選択的流路になる可能性、乾燥を受けた場合など養生方法により特性値への影響が抽出された。今後、これらの影響について要素試験等により確認していく必要がある。ひび割れの検査方法について、平成 24 年度までに、視覚的に検査が難しい部材の裏面側及び内在するひび割れを超音波法により検査する手法を検討してきた[4]。これまで超音波の減衰により検査の難しかったセメント系材料におけるステップ型パルサ(広帯域周波数)の有効性を確認している。平成 25 年度は、検査精度の改善手法を調査し、超音波の集束によるひび割れ検出精度改善、広範囲の概略検査のための TOFD 法(画像化技術)の適用等の有効な技術を抽出した。今後これらの技術の適用性について検討が必要である。

## 1.5 平成 26 年度の実施事項

平成 26 年度の実施項目を以下に示す。表 1.5.1-1 にこれまでの成果を含む検討の流れと平成 26 年度の実施事項を示す。

表 1.5.1-1 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の検討の流れと  
平成 26 年度実施事項



(1) 人工バリア材料長期挙動評価

1) 緩衝材の化学変質に関する試験 (本報告書：第 2 章)

HMC 連成解析手法の構築に関わる緩衝材の化学変質挙動としてより現実的な系 (セメント溶脱水、圧縮条件) での二次鉱物の生成、それに伴う体積変化挙動について、試験により現象を把握しモデル化手法を検討した。化学解析への反映を目的として、浸漬試験及び 12 年程度経過した人工構造物から採取した、セメントーベントナイト接触試料の分析を行った。

➤ 圧縮系でのモンモリロナイトの変質による二次鉱物生成に関する試験 (本報告書：2.1)

モンモリロナイトの変質過程での体積変化に関わる事項として、より現実的な系 (セメント溶脱水、圧縮条件) でのアナルサイム、クリノプチロライト等の二次鉱物生成を想定し、これらの生成速度を把握する試験を実施した。

➤ モンモリロナイトの変質過程の挙動試験(本報告書：2.2)

平成 25 年度の予備試験で手法を検討したシリンジを使用した試験方法で、より現実的な系 (セメント溶脱水、圧縮条件) でのモンモリロナイトの変質に伴う溶解、アナルサイム、クリノプチロライト等の二次鉱物生成による体積変化の挙動を把握する試験を実施した。

➤ 長期挙動評価解析への影響因子の検討(本報告書：2.3)

平成 25 年度に実施したカラム試験で把握したモンモリロナイトの K 型化が処分上の環境で起こりうるか、また、二次鉱物の生成について、現実的な系に近いセメント影響の条件であるセメントーベントナイト接触試料の分析で確認を行った。

➤ セメントーベントナイト接触試料の分析(本報告書：2.4)

平成 25 年度に Nagra で採取した、処分場環境に近い条件で 12 年経過したセメントーベントナイト接触試料について XAFS により分析し、長期挙動評価に重要な情報となる C-S-H 等の二次鉱物の生成等の緩衝材の変質挙動に関するデータを取得した。

2) 緩衝材の連成解析に関わる力学特性に関する試験（本報告書：第 3 章）

緩衝材の力学挙動に影響の考えられる化学変質による二次鉱物生成、Ca 型化、溶解等を力学解析へ反映するために、力学挙動に関する試験を行い、モデル化手法を検討した。

➤ 力学・物質移動特性変化に関する試験(本報告書：3.2)

緩衝材の化学変質に伴う二次鉱物生成による体積変化の水理力学特性への影響を試験により確認し、モデル化手法を検討した。力学解析の不確実性低減のために、緩衝材の圧密変形のモデル化に加えて、せん断変形についてもデータを取得して、解析への反映手法を検討した。

➤ 長期性能評価のための化学・力学連成モデル試験(本報告書：3.3)

化学変質によって変化する力学挙動をモデル化するために、前フェーズから行っている力学試験を継続し、挙動を確認した。モデル化への反映、化学解析への反映を目的として、Na 型モンモリロナイトの Ca 型化及び溶解の一部の試験体の試験を終了し、化学変質の状況を分析により把握した。化学分析を実施した試験体を対象に地化学解析を行い、解析手法の反映事項等の知見を抽出した。

3) HMC 連成解析手法の検討（本報告書：第 4 章）

本章では、1)の緩衝材の化学変質挙動に関する試験および 2)の緩衝材の力学特性に関する試験で進めている現象のモデル化を反映するための HMC 連成解析手法の検討をした。連成解析構築に向けた化学解析手法についてのモンモリロナイトの溶解に関する数学モデルの構築、モンモリロナイト変質に関わる熱力学データの整備、セメント系材料の拡散係数予測モデルの構築、HMC 連成解析手法について二次元の力学解析手法の構築と二次元弱連成に関わるデータの受け渡し等の手法の構築と課題の抽出を行った。

➤ HMC 連成解析構築に向けた化学解析手法の検討(本報告書：4.1)

現実的な圧力系での化学解析手法の構築を目的として、モンモリロナイトの溶解速度の定式化で重要な実効反応表面積を数学的な手法でのモデル化および温度圧力条件での熱力学データの整備に取り組んだ。平成 25 年度にモンテカルロシミュレーションによる円

盤状粒子の積層の平衡状態計算とその状態の実効反応表面積を算出する手法を検討し、低密度(乾燥密度  $0.05\text{Mg/m}^3$  以下)の積層状態が再現可能になったことから、実用的な乾燥密度(モンモリロナイト換算  $1.2\text{Mg/m}^3$ )での再現を目標に解析手法を検討した。加えて、本検討結果を反映した溶解モデルによる化学解析の不確実性の低減効果について検討した。モンモリロナイト変質に関わる熱力学データの整備は、平成 25 年度に試験結果を基にベントナイトに変質に関わる鉱物の  $\log K$  の温度圧力依存性を計算し、解析およびモデル化のための試験に資するデータを整備した。

➤ セメント系材料の物質移行予測モデルの構築(本報告書：4.2)

セメント系材料の物質移行(拡散係数)モデルについて、平成 25 年度にコンクリート、モルタル(ペーストと骨材)へ対応させるために検討したマルチスケールモデルを使用した手法を、試験データを取得して検討した。加えて、フライアッシュ等の混合セメントへの対応についても検討した。これらの検討により、変質を伴うモルタル、コンクリート材料における拡散係数の算定手法の検討課題を抽出した。

➤ 人工バリア材料長期挙動評価のための HMC 連成解析の高度化(本報告書：4.3)

化学及び力学の挙動を連成させた HMC 連成解析手法を検討した。平成 26 年度は、連成解析のための化学解析による長期評価、力学解析について二次元の力学解析手法の構築を行い、化学と力学の二次元での弱連成によりデータの受け渡し等の手法の構築と課題の抽出を行った。

(2) 人工バリア評価の初期条件の設定 (本報告書：第 5 章)

長期挙動評価の初期条件の設定について、セメント系材料の熱変質、部材寸法の影響について平成 25 年度に文献調査等により計画した試験により検討を行った。

1) 熱影響の初期値への影響に関する試験 (本報告書：5.1)

人工バリアの制限温度である  $80^\circ\text{C}$  以下でのセメント系材料の熱変質である C-S-H の結晶化について、結晶化条件を把握する試験を実施する。平成 25 年度に開始した合成 C-S-H での定温度試験に加え、フライアッシュセメント等の混合セメントに含まれる Al の結晶化への影響、現実的な OPC での結晶化に関する定温度試験、経年コンクリートの分析を行った。

2) 部材寸法の初期値への影響に関する試験 (本報告書：5.2)

人工バリア内のセメント系材料の部材について、平成 25 年度に文献調査により把握した長期評価で使用する特性値の変動の影響となることが考えられる、セメント系材料打設方法及び養生方法について、要素試験によりその影響を把握し、初期条件の設定に関する検討を行った。

3) 非破壊検査技術に関する検討 (本報告書：5.3)

人工バリアの長期挙動に影響を与えるセメント系材料を使用する部材に発生するひび割れの検査手法として、減衰の大きい材料に有効なステップパルサーを使用した超音波による非

破壊検査手法の適用性を検討した。平成 25 年度にこれまでの課題を踏まえ抽出した、人工バリアのセメント系材料へ適用する方策や検討課題への有効性について試験を行い、本検査手法の適用性を検討した。

## 1 章の参考文献

- [1] 原子力発電環境整備機構、「地層処分事業の技術開発計画－概要調査段階および精密調査段階に向けた技術開発－」、NUMO-TR-13-02、(2013) など
- [2] (公財) 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)
- [3] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 25 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 (第 4 分冊) －人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア初期条件の設定－(2014)
- [4] (公財) 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 ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発 平成 19 年度～平成 24 年度の取りまとめ報告書 (2013)