

平成 27 年度
地層処分技術調査等事業
TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発
報告書
(第 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 28 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27年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発のうちナチュラルアナログ調査の成果を取りまとめたものです。

報告書の構成

平成 27 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発は、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 27 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上－
	第 2 分冊	平成 27 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－炭素 14 長期放出挙動評価－
	第 3 分冊	平成 27 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－ナチュラルアナログ調査－
◎	第 4 分冊	平成 27 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－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 27 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－ガス移行連成挙動評価手法の開発－

はじめに

長半減期低発熱放射性廃棄物（以下、TRU 廃棄物という。）の処分方策については、原子力委員会での方針等（平成 6 年の原子力長期計画等）を受けて、「TRU 廃棄物処分概念検討書」（以下、第 1 次 TRU レポート）、「TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ」（以下、第 2 次 TRU レポート）によって、その地層処分の技術的成立性が示され、平成 19 年 6 月には最終処分法の一部の改正により、地層処分の対象廃棄物に追加された。これに伴い、平成 20 年 3 月に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」及び「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」が改定され、併置処分の実施も念頭に、TRU 廃棄物と高レベル放射性廃棄物は地層処分事業という統合された計画の中で、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。

平成 27 年 5 月には、平成 26 年 4 月に閣議決定されたエネルギー基本計画や、同年 5 月に公表された放射性廃棄物 WG の「中間とりまとめ」を踏まえ、最終処分法に基づく基本方針の改定（閣議決定）が行われた。改定のポイントは、①現世代の責任と将来世代の選択可能性、②全国的な国民理解、地域理解の醸成、③国が前面に立った取組、④事業に貢献する地域に対する支援、⑤推進体制の改善等であり、特に、③国が前面に立った取組として、科学的有望地が提示されることで、今後処分地の選定プロセスが進むことが予想され、TRU 廃棄物特有の問題が地層処分の安全評価において大きな障壁とならないよう、技術開発を着実に進める必要がある。

このような TRU 廃棄物特有の重要課題として、人工バリア材地質媒体への収着分配係数が小さく、レファレンスケースの被ばく線量評価では高レベル放射性廃棄物に比べ 2 桁以上高いことが示されている（第 2 次 TRU レポートのレファレンスケースでは最大線量が処分後 10,000 年で $2\mu\text{Sv/y}$ とされている）ヨウ素 129 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系材料を使用することや金属腐食等によるガス発生による人工バリアの長期挙動への影響があげられる。

これらの重要課題に対して、TRU 廃棄物処分の技術開発において、TRU 廃棄物処分の重要核種であるヨウ素 129（グループ 1）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 27 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.....	1-2
1.3 前フェーズ(平成19年度～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)の全体計画と検討概要.....	1-6
1.4.1 全体計画.....	1-6
1.4.2 5年間の検討内容と平成25年度からの成果概要.....	1-11
1.5 平成27年度の実施事項.....	1-20
1章の参考文献.....	1-23
第2章 人工バリア材料の化学変質挙動に関する試験とモデル化.....	2-1
2.1 ベントナイト系材料の変質によるゼオライト系二次鉱物の生成に関するモデル化.....	2-1
2.1.1 ベントナイト変質に関するその場観察試験.....	2-2
2.1.2 シリカの圧縮溶解試験.....	2-29
2.1.3 二次鉱物生成のシリンジ試験.....	2-33
2.1.4 ゼオライト系二次鉱物生成挙動のモデル化の検討.....	2-47
2.1.5 ベントナイト系材料の変質によるゼオライト系二次鉱物の生成に関する モデル化まとめ.....	2-66
2.2 セメントーベントナイト接触部の挙動に関する試験.....	2-67
2.2.1 セメントーベントナイト接触部の分析.....	2-67
2.2.2 BL15A1によるベントナイト試料測定の実用性(微小領域の測定適用性).....	2-97
2.2.3 セメントーベントナイト接触部の挙動に関する試験のまとめ.....	2-101
2.3 ベントナイト系材料の溶解モデルの高度化.....	2-103
2.3.1 モンモリロナイトの反応表面積評価に関する数学的アプローチによる検 討.....	2-103
2.3.2 ベントナイト系材料の溶解モデルの高度化まとめ.....	2-134
2.4 セメント系材料の化学的変質に伴う物質移行特性変化のモデル化.....	2-135
2.4.1 混合セメントの溶解現象の評価とモデル化.....	2-135
2.4.2 モルタルの溶解現象の評価とモデル化.....	2-188
2.4.3 セメント系材料の化学的変質に伴う物質移行特性変化のモデル化のま とめ.....	2-256
2.5 人工バリア材料の化学変質挙動に関する試験とモデル化のまとめ.....	2-257
2章の参考文献.....	2-258

第3章 緩衝材の化学変質を伴う力学挙動に関する試験とモデル化	3-1
3.1 力学挙動に関する試験とモデル化	3-1
3.1.1 概要	3-1
3.1.2 使用材料	3-5
3.1.3 物理試験	3-6
3.1.4 力学試験	3-8
3.1.5 力学挙動に関する試験とモデル化のまとめ	3-54
3.2 長期性能評価のための化学・力学連成モデル試験	3-56
3.2.1 概要	3-56
3.2.2 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	3-58
3.2.3 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	3-74
3.2.4 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	3-91
3.3 化学・力学連成モデル試験後の試料の分析	3-92
3.3.1 分析方法	3-92
3.3.2 試験結果	3-95
3.3.3 化学・力学連成モデル試験後の試料の分析のまとめ	3-162
3.4 緩衝材の化学変質を伴う力学挙動に関する試験とモデル化のまとめ	3-163
3章の参考文献	3-164
第4章 人工バリア評価の初期条件の設定	4-1
4.1 セメント系材料の熱影響による結晶化の条件に関する試験	4-1
4.1.1 合成C-S-Hの定温度試験	4-2
4.1.2 C-S(A)-Hの定温度試験	4-13
4.1.3 セメント系材料の定温度試験	4-29
4.1.4 セメント系材料の熱影響による結晶化の条件に関する試験のまとめ	4-48
4.2 セメント系材料の熱変質が初期条件へ及ぼす影響に関する検討	4-50
4.2.1 C-S-Hの結晶化が物性に及ぼす影響	4-50
4.2.2 C-S-Hの結晶化が核種移行に及ぼす影響の文献調査	4-66
4.2.3 セメント系材料の熱影響の初期条件への影響に関する検討のまとめ	4-91
4.3 人工バリア評価の初期条件の設定のまとめ	4-92
4章の参考文献	4-93
第5章 HMC連成解析手法の検討	5-1
5.1 HMC連成解析に関わる化学解析手法に関する検討	5-1
5.1.1 力学-化学連成解析に向けた二次元地球化学解析	5-1
5.1.2 化学・力学連成モデル試験の化学解析による検討	5-61

5.2 処分場 2 次元断面における力学-化学連成解析	5-77
5.2.1 モデル化学変質ケースによる長期力学挙動への施工条件影響の検討.....	5-77
5.2.2 化学力学弱連成解析による長期挙動の検討.....	5-105
5.3 HMC 連成解析手法の検討のまとめ.....	5-152
5 章の参考文献.....	5-154
第 6 章 まとめ	6-1
6.1 人工バリア材料の化学変質挙動に関する試験とモデル化（本報告書：第 2 章） ...	6-1
6.2 緩衝材の化学変質を伴う力学挙動に関する試験とモデル化（本報告書：第 3 章）	6-2
6.3 人工バリア評価の初期条件の設定（本報告書：第 4 章）	6-4
6.4 HMC 連成解析手法の検討（本報告書：第 5 章）	6-5

目 次

図 1.1.1-1	TRU 廃棄物処分場の人工バリアの処分概念 (グループ 12) の例と その 長期挙動に影響を与える事象	1-1
図 1.4.1-1	課題の抽出と研究内容の策定	1-7
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	1-9
図 1.4.1-3	本検討で考慮する人工バリア材料の化学変質、力学挙動及び水理挙動の 関係	1-9
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	各検討項目と化学変質挙動、水理挙動及び力学挙動の関連	1-11
図 1.4.2-1	ベントナイトの変質時の体積変化(温度 70°C)	1-12
図 1.4.2-2	圧密下のモンモリロナイト実効反応表面積の定式化	1-13
図 1.4.2-3	長期化学解析における本検討での定式化の効果	1-14
図 1.4.2-4	セメント系材料の拡散係数モデルの成果概要	1-15
図 1.4.2-5	緩衝材の力学挙動に関する試験結果	1-16
図 1.4.2-6	合成 C-S-H の定温度試験結果(XRD での結晶化確認)	1-17
図 1.4.2-7	2 次元 HMC 連成解析結果	1-19
図 2.1.1-1	ベントナイトの変質に伴うゼオライト生成に関する知見	2-1
図 2.1.1-2	ベントナイト(モンモリロナイト)の溶解に伴い生成するゼオライトの 変質	2-2
図 2.1.1-3	ベントナイト変質の観察を実施した干渉計試験装置	2-3
図 2.1.1-4	KV1-fine の FESEM-EDS 観察・分析	2-4
図 2.1.1-5	ALT-VSI0 試験試料の FESEM-EDS 分析結果(サニディン)	2-6
図 2.1.1-6	ALT-VSI0 試験試料の FESEM-EDS 分析結果(シリカ)	2-6
図 2.1.1-7	ALT-VSI1 試験試料の FESEM-EDS 分析結果(K-モンモリロナイト)	2-7
図 2.1.1-8	ALT-VSI1 試験試料の FESEM-EDS 分析結果(Ca-Al 相と K-モンモリ ロナイト)	2-8
図 2.1.1-9	ALT-VSI1 試験試料の FESEM-EDS 分析結果(初生的な Na 長石)	2-8
図 2.1.1-10	ALT-VSI1 試験試料の FESEM-EDS 分析結果 (エッチピットを有する 石英)	2-9
図 2.1.1-11	ALT-VSI2 試験試料の FESEM-EDS 分析結果 (a: K-モンモリロナイ ト; b: Na 長石)	2-10
図 2.1.1-12	KV1-fine の変質試験(ALT-VSI0, 1, 2)試料の μ -XRD パターン	2-11

図 2.1.1-13	KV1-fine の変質試験(ALT-VSI0, 1, 2)の溶液化学分析 (a: 通水過程の溶出挙動; b: Al vs. Si の関係)	2-13
図 2.1.1-14	圧縮圧力と Si, Al の溶脱の関係	2-13
図 2.1.1-15	4 MPa 圧縮時の変質の様子 (Run7-8 の間でゼオライト化が起きている)	2-15
図 2.1.1-16	随伴鉱物の溶解速度	2-16
図 2.1.1-17	ベントナイトのゼオライト変質	2-17
図 2.1.1-18	ゼオライト核形成のその場観察	2-17
図 2.1.1-19	ゼオライト核形成待ち時間と成長速度変化	2-19
図 2.1.1-20	ALT-VSI3 試料の FESEM-EDS 観察分析結果 (ゼオライト)	2-19
図 2.1.1-21	ALT-VSI3 試料の FESEM-EDS 観察分析結果 (ゼオライト)	2-20
図 2.1.1-22	ALT-VSI3 試料の FESEM-EDS 観察分析結果 (ゼオライト)	2-20
図 2.1.1-23	ALT-VSI3 試料の FESEM-EDS 観察分析結果 (ゼオライト)	2-21
図 2.1.1-24	ALT-VSI3 試料の FESEM-EDS 観察分析結果 (ゼオライト)	2-21
図 2.1.1-25	ALT-VSI3 試料の FESEM-EDS 観察分析結果 (石英)	2-22
図 2.1.1-26	ALT-VSI3 試料の FESEM-EDS 観察分析結果 (斜長石)	2-22
図 2.1.1-27	ALT-VSI3 試料の FESEM-EDS 観察分析結果(磁鉄鉱微粒子の凝集体)	2-23
図 2.1.1-28	ALT-VSI4 試料の FESEM-EDS 観察分析結果 (斜長石)	2-24
図 2.1.1-29	ALT-VSI4 試料の FESEM-EDS 観察分析結果 (斜長石と K-Ca モンモリロナイト)	2-24
図 2.1.1-30	ALT-VSI4 試料の FESEM-EDS 観察分析結果 (石英と K-Ca-モンモリロナイト)	2-25
図 2.1.1-31	KV1-fine+CLP 試験の反応生成物の μ -XRD 測定	2-26
図 2.1.1-32	KV1-fine-CLP の変質試験 (ALT-VSI2.5, 3, 4)の溶液化学分析(a: 通水過程の溶出挙動; b: Al vs. Si の関係)	2-28
図 2.1.1-33	圧縮圧力と Si, Al の溶脱の関係(KV1-CLP 試料)	2-28
図 2.1.2-1	KV1-finesilica 試料	2-30
図 2.1.2-2	加圧通水過程の排出溶液の化学組成 (a: Si, Al の経時変化、b: 圧縮圧力と Si, Al 溶出、c: Al vs. Si)	2-32
図 2.1.2-3	KV1-finesilica の試験後の状態	2-33
図 2.1.3-1	シリンジ試験の装置概念図	2-34
図 2.1.3-2	シリンジ反応容器 (反応前)	2-35
図 2.1.3-3	シリンジ内ベントナイトの体積と密度の経時変化	2-36
図 2.1.3-4	ALT13 試料の AFM 観察結果 (a: 高さ像; b: 微分像; c: 拡大した高さ像; d: その微分像)	2-37

図 2.1.3-5	ALT14 試料の AFM 観察結果 (a: 高さ像; b: 微分像; c: 拡大した高さ像; d: その微分像) ……………	2-38
図 2.1.3-6	ALT15 試料の AFM 観察結果 (a: 高さ像; b: 微分像; c: 拡大した高さ像; d: その微分像) ……………	2-38
図 2.1.3-7	ALT16 試料の AFM 観察結果 (a: 高さ像; b: 微分像; c: 拡大した高さ像; d: その微分像) ……………	2-39
図 2.1.3-8	ALT13 試料の FESEM 観察分析結果(モンモリロナイト) ……………	2-40
図 2.1.3-9	ALT13 試料の FESEM 観察分析結果(ゼオライト) ……………	2-40
図 2.1.3-10	ALT13 試料の FESEM 観察分析結果(ゼオライト、その 2) ……………	2-41
図 2.1.3-11	ALT14 試料の FESEM 観察分析結果(ゼオライト) ……………	2-41
図 2.1.3-12	ALT15 試料の FESEM 観察分析結果(モンモリロナイト) ……………	2-42
図 2.1.3-13	ALT15 試料の FESEM 観察分析結果(ゼオライト) ……………	2-42
図 2.1.3-14	ALT16 試料の FESEM 観察分析結果(シリカ) ……………	2-43
図 2.1.3-15	ALT16 試料の FESEM 観察分析結果(ゼオライト) ……………	2-43
図 2.1.3-16	モンモリロナイトとゼオライトの化学組成 (a: モンモリロナイトの K 含有量の圧力依存性; b: ゼオライトの化学組成) ……………	2-44
図 2.1.3-17	シリンジ試験試料の μ -XRD 分析 ……………	2-46
図 2.1.4-1	ベントナイトの変質に伴う二次鉱物生成に関するモデル化の検討 ……………	2-47
図 2.1.4-2	FESEM-EDS の観察結果(沈降成分) ……………	2-48
図 2.1.4-3	FESEM-EDS の観察結果(コロイド成分) ……………	2-49
図 2.1.4-4	μ -XRD 測定の結果 (KP2) ……………	2-49
図 2.1.4-5	試験系の概念図 ……………	2-50
図 2.1.4-6	平衡溶液における $\text{Log}k$ の温度依存性(a)と van't Hoff プロット(b) ……………	2-52
図 2.1.4-7	核形成に必要なエネルギーバランス (臨界核 r_c がもつエネルギー障壁を超える必要がある) ……………	2-53
図 2.1.4-8	懸液法による溶液の表面張力測定 ……………	2-54
図 2.1.4-9	結晶表面の濡れ性の評価 ……………	2-55
図 2.1.4-10	ゼオライト結晶界面の濡れ性の比較 (a: アナルサイム; b: フィリップサイト; c: クリノプチロライト; d: モスコバイト as reference) ……………	2-55
図 2.1.4-11	溶解度と界面自由エネルギーの関係 ……………	2-56
図 2.1.4-12	モンモリロナイトのアルカリ変質とゼオライト組成の関係 (PHI: フィリップサイト) ……………	2-58
図 2.1.4-13	シリンジ試験と自動圧縮セル試験の速度比較 ……………	2-59
図 2.1.4-14	各圧力におけるモンモリロナイトのアナルサイム変質反応の 平衡定数(a)と体積変化(b)の温度依存性 ……………	2-61

図 2.1.4-15	セメント浸出液によるベントナイトのゼオライト化の飽和指数(pH 依存性)	2-63
図 2.1.4-16	セメント浸出液によるベントナイトのゼオライト化の飽和指数(Ca 濃度依存性)	2-64
図 2.1.4-17	処分環境におけるベントナイト変質の化学的要因と力学挙動への影響	2-65
図 2.2.1-1	Box-core-3 の写真	2-68
図 2.2.1-2	コア切断状況	2-68
図 2.2.1-3	EPMA 用試料の採取状況	2-69
図 2.2.1-4	GMT サイロの写真	2-70
図 2.2.1-5	EPMA 試料の採取箇所写真	2-70
図 2.2.1-6	ベントナイト混合土 (ベントナイト側) の接触界面近傍の元素濃度分布	2-74
図 2.2.1-7	コンクリートの接触界面近傍の元素濃度分布 (図右側がセメントとの接触面、(カラーバー:wt.%))	2-75
図 2.2.1-8	元素濃度プロファイル(1)	2-76
図 2.2.1-9	元素濃度プロファイル(2)	2-77
図 2.2.1-10	ベントナイト側 XRD パターン	2-78
図 2.2.1-11	ベントナイト側 XRD パターン(拡大図)	2-79
図 2.2.1-12	エチレングリコール処理後のベントナイト側 XRD パターン	2-79
図 2.2.1-13	エチレングリコール処理後のベントナイト側 XRD パターン	2-80
図 2.2.1-14	セメント側 (コンクリート) の XRD パターン	2-80
図 2.2.1-15	層間陽イオンの溶出濃度	2-82
図 2.2.1-16	Box core-3 試料の XANES スペクトル (BG 除去、規格化後)	2-83
図 2.2.1-17	標準試料の XANES スペクトル (BG 除去、規格化後)	2-83
図 2.2.1-18	9-12mm 試料のフィッティング結果	2-84
図 2.2.1-19	ベントナイト(Box-core-3)の Ca 含む鉱物量	2-85
図 2.2.1-20	ベントナイト混合土 (ベントナイト側) の接触界面近傍の元素濃度分布	2-86
図 2.2.1-21	コンクリート (セメント側) の接触界面近傍の元素濃度分布	2-87
図 2.2.1-22	元素濃度プロファイル(1)	2-88
図 2.2.1-23	元素濃度プロファイル(2)	2-89
図 2.2.1-24	ベントナイト側の XRD パターン	2-90
図 2.2.1-25	ベントナイト側の XRD パターン(拡大図)	2-91
図 2.2.1-26	エチレングリコール処理後のベントナイト側の XRD パターン	2-91
図 2.2.1-27	エチレングリコール処理後のベントナイト側の XRD パターン(拡大図)	2-92
図 2.2.1-28	コンクリート (セメント側) の XRD パターン	2-92

図 2.2.1-29	層間陽イオンの溶出濃度	2-94
図 2.2.1-30	GMT サイロ試料の XANES スペクトル	2-95
図 2.2.1-31	ベントナイト(GMT サイロ)の Ca 含む鉍物量	2-96
図 2.2.2-1	BL15A1 の測定に用いたセメント-ベントナイト接触試料の Ca 濃度分布	2-98
図 2.2.2-2	薄片試料写真 (左側が接触面、赤線は測定位置)	2-99
図 2.2.2-3	0~1000 μm までの測定スペクトル	2-100
図 2.2.2-4	200~2000 μm までのスパイクデータ除去後のスペクトル	2-100
図 2.3.1-1	円盤状粒子の形状	2-105
図 2.3.1-2	2つの platelet の位置関係	2-106
図 2.3.1-3	無次元粒度分布 ($\ln\sigma_g=0.065$)	2-109
図 2.3.1-4	多分散粒子系の平衡構造 ($\ln\sigma_g=0.065$ 、無次元数密度 $N\sigma^3/V=100$)	2-109
図 2.3.1-5	円板状粒子の 3次元平衡構造 (無次元密度 $N\sigma^3/V=4.0$)	2-110
図 2.3.1-6	2次元粒子構造の抽出例 (粒子存在関数 $\rho(x, y)$ の分布)	2-110
図 2.3.1-7	局所平均化操作による粒子濃度場の計算例 (無次元密度: $N\sigma^3/V=4.0$)	2-111
図 2.3.1-8	エッジ追跡法の概要	2-112
図 2.3.1-9	シードフィル法による個別二値化の例	2-112
図 2.3.1-10	空隙領域の楕円近似の一例	2-113
図 2.3.1-11	初期配向角度の異なる条件における積層構造の変化 (無次元密度 $N\sigma^3/V=50$)	2-115
図 2.3.1-12	初期配向角度 $\cos \gamma=0.92$ の条件における積層構造の変化 (無次元密度 $N\sigma^3/V=50$)	2-116
図 2.3.1-13	初期配向角度 $\cos \gamma=0.97$ の条件における積層構造の変化 (無次元密度 $N\sigma^3/V=50$)	2-117
図 2.3.1-14	空隙の無次元断面数密度 $N_V\sigma^2/A$ の変化 (無次元密度 $N\sigma^3/V=50$)	2-118
図 2.3.1-15	初期配向角度の異なる条件における積層構造の変化 (無次元密度 $N\sigma^3/V=100$)	2-119
図 2.3.1-16	初期配向角度 $\cos \gamma=0.92$ の条件における積層構造の変化 (無次元密度 $N\sigma^3/V=100$)	2-120
図 2.3.1-17	初期配向角度 $\cos \gamma=0.95$ の条件における積層構造の変化 (無次元密度 $N\sigma^3/V=100$)	2-121
図 2.3.1-18	初期配向角度 $\cos \gamma=0.97$ の条件における積層構造の変化 (無次元密度 $N\sigma^3/V=100$)	2-122
図 2.3.1-19	空隙の無次元断面数密度 $N_V\sigma^2/A$ の変化 (無次元密度 $N\sigma^3/V=100$)	2-123
図 2.3.1-20	粒子断面積層構造の既往の研究との比較	2-124
図 2.3.1-21	単分散及び多分散粒子系の平衡構造	2-126

図 2.3.1-22	平衡構造における空隙の断面数密度	2-127
図 2.3.1-23	平衡構造における空隙の面積相当径	2-127
図 2.3.1-24	平衡構造における空隙のアスペクト比	2-128
図 2.3.1-25	平衡構造における空隙の配向角 (無次元密度 $N\sigma^3/V=50$)	2-129
図 2.3.1-26	平衡構造における空隙の配向角 (無次元密度 $N\sigma^3/V=100$)	2-129
図 2.3.1-27	単分散粒子系の実効比端面積	2-131
図 2.3.1-28	多分散粒子系の実効比端面積 ($\ln\sigma_g=0.065$)	2-131
図 2.3.1-29	多分散粒子系の実効比端面積 ($\ln\sigma_g=0.09$)	2-132
図 2.3.1-30	実効比端面積	2-133
図 2.3.1-31	圧密スメクタイトの実効露出端面積	2-133
図 2.4.1-1	NS 比と溶脱率の関係	2-140
図 2.4.1-2	NS 比と空隙率の関係	2-140
図 2.4.1-3	溶脱率と空隙率の関係	2-140
図 2.4.1-4	BFSC50 ペーストの空隙径分布	2-141
図 2.4.1-5	BFSC70 ペーストの空隙径分布	2-142
図 2.4.1-6	FAC15 ペーストの空隙径分布	2-143
図 2.4.1-7	FAC30 ペーストの空隙径分布	2-144
図 2.4.1-8	SC10 ペーストの空隙径分布	2-145
図 2.4.1-9	BFSC50 ペーストの溶脱に伴う鉱物相組成の変化	2-148
図 2.4.1-10	BFSC70 ペーストの溶脱に伴う鉱物相組成の変化	2-149
図 2.4.1-11	FAC15 ペーストの溶脱に伴う鉱物相組成の変化	2-150
図 2.4.1-12	FAC30 ペーストの溶脱に伴う鉱物相組成の変化	2-151
図 2.4.1-13	SC10 ペーストの溶脱に伴う鉱物相組成の変化	2-152
図 2.4.1-14	BFSC50 ペーストの反射電子像	2-153
図 2.4.1-15	BFSC70 ペーストの反射電子像	2-153
図 2.4.1-16	FAC15 ペーストの反射電子像	2-154
図 2.4.1-17	FAC30 ペーストの反射電子像	2-154
図 2.4.1-18	SC ペーストの反射電子像	2-155
図 2.4.1-19	溶解試験試料のマイクロ弾性係数測定結果	2-157
図 2.4.1-20	溶解に伴うマイクロ弾性係数の変化	2-157
図 2.4.1-21	BFSC50 ペーストのマイクロ弾性係数測定結果	2-158
図 2.4.1-22	BFSC70 ペーストのマイクロ弾性係数測定結果	2-158
図 2.4.1-23	FAC15 ペーストのマイクロ弾性係数測定結果	2-159
図 2.4.1-24	FAC30 ペーストのマイクロ弾性係数測定結果	2-159
図 2.4.1-25	SC10 ペーストのマイクロ弾性係数測定結果	2-160
図 2.4.1-26	BFSC50 ペーストの EPMA 測定結果	2-161

図 2.4.1-27	BFSC70 ペーストの EPMA 測定結果	2-162
図 2.4.1-28	FAC15 ペーストの EPMA 測定結果	2-163
図 2.4.1-29	FAC30 ペーストの EPMA 測定結果	2-164
図 2.4.1-30	SC10 ペーストの EPMA 測定結果	2-165
図 2.4.1-31	溶脱試料の C/S 比	2-166
図 2.4.1-32	溶解に伴う C/S 比の変化	2-167
図 2.4.1-33	空隙率と拡散係数の関係	2-170
図 2.4.1-34	反射電子像と輝度の分布	2-172
図 2.4.1-35	予察検討試料の反射電子像	2-172
図 2.4.1-36	自己相関関数 $S(r)$	2-173
図 2.4.1-37	BFSC50 ペーストの自己相関関数	2-176
図 2.4.1-38	BFSC70 ペーストの自己相関関数	2-176
図 2.4.1-39	FAC15 ペーストの自己相関関数	2-177
図 2.4.1-40	FAC30 ペーストの自己相関関数	2-177
図 2.4.1-41	SC10 ペーストの自己相関関数	2-178
図 2.4.1-42	BFSC50 ペーストの 3 次元イメージモデル	2-179
図 2.4.1-43	BFSC70 ペーストの 3 次元イメージモデル	2-180
図 2.4.1-44	FAC15 ペーストの 3 次元イメージモデル	2-181
図 2.4.1-45	FAC30 ペーストの 3 次元イメージモデル	2-182
図 2.4.1-46	SC10 ペーストの 3 次元イメージモデル	2-183
図 2.4.1-47	拡散係数の実測値と予測値の関係	2-184
図 2.4.1-48	OPC における CaO 溶脱率と C-S-H 部分の拡散係数の関係	2-185
図 2.4.1-49	CaO 溶脱率から C-S-H 部分の拡散係数を算出した際のペーストの拡散 係数予測	2-185
図 2.4.1-50	溶脱率と拡散係数の関係	2-186
図 2.4.1-51	セメント種ごとの溶脱率と拡散係数の関係	2-186
図 2.4.2-1	O-2 モルタルの空隙径分布	2-192
図 2.4.2-2	O-3 モルタルの空隙径分布	2-193
図 2.4.2-3	O-4 モルタルの空隙径分布	2-194
図 2.4.2-4	F-2 モルタルの空隙径分布	2-195
図 2.4.2-5	B-2 モルタルの空隙径分布	2-196
図 2.4.2-6	O-2 モルタルの溶脱に伴う鉱物相組成の変化	2-199
図 2.4.2-7	O-3 モルタルの溶脱に伴う鉱物相組成の変化	2-200
図 2.4.2-8	O-4 モルタルの溶脱に伴う鉱物相組成の変化	2-201
図 2.4.2-9	F-2 モルタルの溶脱に伴う鉱物相組成の変化	2-202
図 2.4.2-10	B-2 モルタルの溶脱に伴う鉱物相組成の変化	2-203

図 2.4.2-11	O-2 モルタルの反射電子像	2-204
図 2.4.2-12	O-3 モルタルの反射電子像	2-204
図 2.4.2-13	O-3 モルタルの反射電子像	2-205
図 2.4.2-14	F-2 モルタルの反射電子像	2-205
図 2.4.2-15	B-2 モルタルの反射電子像	2-206
図 2.4.2-16	モルタル試料のマイクロ弾性係数測定結果	2-208
図 2.4.2-17	溶解に伴うマイクロ弾性係数の変化	2-208
図 2.4.2-18	O-2 モルタルペースト部分のマイクロ弾性係数測定結果	2-209
図 2.4.2-19	O-3 モルタルペースト部分のマイクロ弾性係数測定結果	2-209
図 2.4.2-20	O-4 モルタルペースト部分のマイクロ弾性係数測定結果	2-210
図 2.4.2-21	B-2 モルタルペースト部分のマイクロ弾性係数測定結果	2-210
図 2.4.2-22	F-2 モルタルペースト部分のマイクロ弾性係数測定結果	2-211
図 2.4.2-23	O-2 試料の元素組成分布	2-213
図 2.4.2-24	O-2 初期試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-214
図 2.4.2-25	O-2-L 試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-215
図 2.4.2-26	O-2-M 試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-216
図 2.4.2-27	O-2-H 試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-217
図 2.4.2-28	O-3 試料の元素組成分布	2-218
図 2.4.2-29	O-3 初期試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-219
図 2.4.2-30	O-3-L 試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-220
図 2.4.2-31	O-3-M 試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-221
図 2.4.2-32	O-3-H 試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-222
図 2.4.2-33	O-4 試料の元素組成分布	2-223
図 2.4.2-34	O-4 初期試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-224
図 2.4.2-35	O-4-L 試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-225
図 2.4.2-36	O-4-M 試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-226
図 2.4.2-37	O-4-H 試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-227
図 2.4.2-38	F-2 試料の元素組成分布	2-228
図 2.4.2-39	F-2 試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-229
図 2.4.2-40	F-2-L 試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-230
図 2.4.2-41	F-2-M 試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-231
図 2.4.2-42	F-2-H 試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-232
図 2.4.2-43	B-2 試料の元素組成分布	2-233
図 2.4.2-44	B-2 試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-234
図 2.4.2-45	B-2-L 試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-235
図 2.4.2-46	B-2-M 試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-236

図 2.4.2-47	B-2-H 試料の元素組成分布 (骨材界面)	2-237
図 2.4.2-48	ペースト換算した NS 比と EPMA で求めた C/S 比の関係	2-238
図 2.4.2-49	空隙率と拡散係数の関係	2-240
図 2.4.2-50	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	2-242
図 2.4.2-51	O-2 モルタルペースト部分の自己相関関数	2-244
図 2.4.2-52	O-3 モルタルペースト部分の自己相関関数	2-244
図 2.4.2-53	O-4 モルタルペースト部分の自己相関関数	2-245
図 2.4.2-54	B-2 モルタルペースト部分の自己相関関数	2-245
図 2.4.2-55	F-2 モルタルペースト部分の自己相関関数	2-246
図 2.4.2-56	O-2 モルタルペースト部分の 3 次元イメージモデル	2-247
図 2.4.2-57	O-3 モルタルペースト部分の 3 次元イメージモデル	2-248
図 2.4.2-58	O-4 モルタルペースト部分の 3 次元イメージモデル	2-249
図 2.4.2-59	B-2 モルタルペースト部分の 3 次元イメージモデル	2-250
図 2.4.2-60	F-2 モルタルペースト部分の 3 次元イメージモデル	2-251
図 2.4.2-61	モルタルの拡散係数の実測値と予測値	2-253
図 2.4.2-62	OPC における CaO 溶脱率と C-S-H 部分の拡散係数の関係(再掲)	2-254
図 2.4.2-63	モルタルの拡散係数の実測値と予測値	2-254
図 2.4.2-64	セメント種ごとの溶脱率と拡散係数の関係(再掲)	2-255
図 2.4.2-65	モルタルの拡散係数の実測値と予測値	2-255
図 3.1.1-1	クニゲル V1 の鉱物組成 []	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 3.1.4-1	一次元排気圧縮試験の模式図	3-9
図 3.1.4-2	一次元排気圧縮試験結果の模式図	3-9
図 3.1.4-3	スマート三軸試験装置の全景	3-11
図 3.1.4-4	圧縮用アクチュエータの仕組み	3-11
図 3.1.4-5	CO ₂ パージ一次元排気圧縮試験状況	3-12
図 3.1.4-6	一次元圧縮試験の反映先と理論展開	3-14
図 3.1.4-7	一次元圧縮試験のモデル構築への反映イメージ	3-14
図 3.1.4-8	変質後人工ベントナイトの一次元圧縮試験結果	3-16
図 3.1.4-9	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 3.1.4-10	モンモリロナイト変質率と基準乾燥密度の関係	3-17

図 3.1.4-11	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 3.1.4-12	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 3.1.4-13	変質後人工ベントナイトの $e \sim \ln p'$ 関係	3-22
図 3.1.4-14	新しいパラメータを導入した完全飽和線	3-23
図 3.1.4-15	新しいパラメータを導入した $e \sim \log P$ 関係	3-23
図 3.1.4-16	新しいパラメータの効果	3-24
図 3.1.4-17	新しいパラメータを導入した完全飽和線	3-25
図 3.1.4-18	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 3.1.4-19	新しいパラメータの効果	3-26
図 3.1.4-20	高含水比領域の一次元排気圧縮試験結果に対する CO_2 パージの影響 (ベントナイト：クニゲル V1)	3-27
図 3.1.4-21	高含水比領域の一次元排気圧縮試験結果 (CO_2 パージあり)	3-28
図 3.1.4-22	モンモリロナイト含有率毎の膨潤量試験結果	3-30
図 3.1.4-23	$e \sim \log P$ 平面における膨潤量試験結果	3-30
図 3.1.4-24	$e \sim \log P$ 平面における膨潤量試験結果と完全飽和線	3-31
図 3.1.4-25	随伴鉱物の土骨格構造と膨潤性鉱物の分離のイメージ	3-32
図 3.1.4-26	試験後のモンモリロナイト含有率の計測方法	3-33
図 3.1.4-27	解体用スライサー	3-33
図 3.1.4-28	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	3-34
図 3.1.4-29	随伴鉱物の影響のイメージ	3-34
図 3.1.4-30	地盤材料の非可逆比 (飯塚[]に加筆)	3-35
図 3.1.4-31	非可逆比を用いた随伴鉱物の影響のモデル化のイメージ	3-35
図 3.1.4-32	随伴鉱物による骨格構造の形成とモンモリロナイトの膨潤のイメージ	3-36
図 3.1.4-33	随伴鉱物の影響のモデル化のイメージ	3-37
図 3.1.4-34	一次元排気圧縮～吸水除荷 (膨潤) 試験時の乾燥密度 $-\log P$ 関係	3-38
図 3.1.4-35	段階除荷時の膨潤量の経時変化	3-38
図 3.1.4-36	C_K とモンモリロナイト含有率の関係	3-39
図 3.1.4-37	非可逆比 Λ とモンモリロナイト含有率の関係	3-39
図 3.1.4-38	限界状態理論における非可逆比 Λ の意味	3-40
図 3.1.4-39	微粉碎モンモリロナイトの膨潤性能変化	3-41
図 3.1.4-40	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	3-42
図 3.1.4-41	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	3-42
図 3.1.4-42	せん断試験イメージ図	3-42
図 3.1.4-43	一面せん断試験機の全景	3-43
図 3.1.4-44	下せん断箱の凹凸を施したポーラスメタル	3-43

図 3.1.4-45	カオリンの等体積一面せん断試験中のストレスパス	3-44
図 3.1.4-46	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	3-45
図 3.1.4-47	せん断試験結果のイメージ	3-46
図 3.1.4-48	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	3-47
図 3.1.4-49	せん断変位とせん断応力の関係	3-48
図 3.1.4-50	ストレスパス	3-48
図 3.1.4-51	せん断試験中の供試体内の変化イメージ図	3-49
図 3.1.4-52	せん断試験成果のイメージ図	3-50
図 3.1.4-53	せん断試験中の乾燥密度の経時変化	3-51
図 3.1.4-54	せん断中の応力ひずみ関係と有効応力経路	3-52
図 3.1.4-55	拘束圧で正規化した有効応力経路	3-52
図 3.1.4-56	p_a - $\log p$ 平面、及び e - $\log p$ 平面での全試験過程における応力経路	3-53
図 3.2.1-1	化学・力学連成モデル実験の意味	3-57
図 3.2.1-2	超低ひずみ速度制御圧密試験機の概略図	3-57
図 3.2.1-3	フローポンプ透水試験機の概略図	3-57
図 3.2.1-4	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	3-58
図 3.2.2-1	Ca 型化モデル試験イメージ図	3-59
図 3.2.2-2	Na 型モンモリロナイトの Ca 型化に関する検討ケース	3-60
図 3.2.2-3	Na 型モンモリロナイトの蒸留水による飽和時の膨潤圧	3-61
図 3.2.2-4	Ca 型モンモリロナイトの CaCl_2 水溶液による飽和時の膨潤圧	3-61
図 3.2.2-5	Na 型モンモリロナイトの通水圧と通水量	3-62
図 3.2.2-6	Na 型モンモリロナイトの定ひずみ速度圧密試験時刻歴	3-62
図 3.2.2-7	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_2)の e - $\ln P$ 関係	3-63
図 3.2.2-8	CaCl_2 水溶液を通水した場合の圧密圧力の変化	3-64
図 3.2.2-9	ベントナイト系人工バリアの Ca 型化中の応力変化	3-64
図 3.2.2-10	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	3-65
図 3.2.2-11	Na 型モンモリロナイトへの給水状況	3-67
図 3.2.2-12	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)	3-68
図 3.2.2-13	Na 型モンモリロナイトの段階載荷による密度増加	3-68
図 3.2.2-14	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)	3-69
図 3.2.2-15	Na 型モンモリロナイトの Ca 型化に伴う種々の影響	3-70
図 3.2.2-16	ベントナイト系人工バリアの Ca 型化中の応力変化	3-71
図 3.2.2-17	Ca 型化試験の解体状況	3-72

図 3.2.2-18	Ca 型化試験の湿潤密度分布	3-73
図 3.2.3-1	モンモリロナイト溶解試験イメージ図	3-75
図 3.2.3-2	Na 型モンモリロナイトの溶解に関する検討ケース	3-76
図 3.2.3-3	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 (KPDS2)	3-77
図 3.2.3-4	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 (KPDS1)	3-77
図 3.2.3-5	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	3-78
図 3.2.3-6	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 (KPDS2)	3-78
図 3.2.3-7	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 (KPDS2)	3-79
図 3.2.3-8	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	3-79
図 3.2.3-9	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	3-80
図 3.2.3-10	Na 型モンモリロナイトの NaOH 水溶液給水量の経時変化	3-82
図 3.2.3-11	Na 型モンモリロナイトの給水中の飽和度の経時変化	3-82
図 3.2.3-12	給水時の Na 型モンモリロナイトの膨潤圧の経時変化 (補正前)	3-83
図 3.2.3-13	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)	3-83
図 3.2.3-14	Na 型モンモリロナイトの溶解に伴う種々の影響	3-84
図 3.2.3-15	ベントナイト系人工バリアの Ca 型化中の応力変化	3-86
図 3.2.3-16	高アルカリ環境下におけるクリープ挙動の変化	3-86
図 3.2.3-17	KPDS-HP1,KPDS-HP2 の解体状況	3-87
図 3.2.3-18	KPDS-HP1,KPDS-HP2 の解体時の湿潤密度分布	3-88
図 3.2.3-19	KPDS-3,KPDS-H, KPDS-N01, KPDS-N1,KPDS-NO3 の解体結果	3-90
図 3.2.3-20	KPDS-2 の解体結果	3-91
図 3.3.1-1	TG によるモンモリロナイト含有量の検出(a: TG 曲線; b: DTG 曲線)	3-94
図 3.3.2-1	密度プロファイル(KPDS-2)	3-98
図 3.3.2-2	密度プロファイル(KPDS-3)	3-98
図 3.3.2-3	密度プロファイル(KPDS-H)	3-98
図 3.3.2-4	密度プロファイル(KPDS-N01)	3-99
図 3.3.2-5	密度プロファイル(KPDS-N1)	3-99
図 3.3.2-6	密度プロファイル(KPDS-NO3)	3-99
図 3.3.2-7	KPDS-2_7-1 の FESEM-EDS 観察・分析結果 (各エリアは EDS 分析領域)	3-100
図 3.3.2-8	KPDS-2_7-3 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-101
図 3.3.2-9	KPDS-2_7-5 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-101

☒ 3.3.2-10	KPDS-2_7-17 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-102
☒ 3.3.2-11	KPDS-2_7-25 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-102
☒ 3.3.2-12	KPDS-3_8-1 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-103
☒ 3.3.2-13	KPDS-3_8-3 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-103
☒ 3.3.2-14	KPDS-3_8-5 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-103
☒ 3.3.2-15	KPDS-3_8-7 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-104
☒ 3.3.2-16	KPDS-3_8-10 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-104
☒ 3.3.2-17	KPDS-H_11-1 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-105
☒ 3.3.2-18	KPDS-H_11-3 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-105
☒ 3.3.2-19	KPDS-H_11-5 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-105
☒ 3.3.2-20	KPDS-H_11-7 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-106
☒ 3.3.2-21	KPDS-H_11-9 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-106
☒ 3.3.2-22	KPDS-N01_12-1 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-106
☒ 3.3.2-23	KPDS-N01_12-3 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-107
☒ 3.3.2-24	KPDS-N01_12-5 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-107
☒ 3.3.2-25	KPDS-N1_13-1 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-107
☒ 3.3.2-26	KPDS-N1_13-2 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-108
☒ 3.3.2-27	KPDS-N1_13-3 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-108
☒ 3.3.2-28	KPDS-N1_13-5 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-108
☒ 3.3.2-29	KPDS-NO3_14-1 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-109
☒ 3.3.2-30	KPDS-NO3_14-3 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-109
☒ 3.3.2-31	KPDS-NO3_14-5 の FESEM-EDS 観察・分析結果	3-109
☒ 3.3.2-32	各試料におけるトータル層間陽イオンチャージ(apfu)のプロファイル	3-116
☒ 3.3.2-33	平成 26 年度の分析におけるトータル層間陽イオンチャージ(apfu)の プロファイル	3-117
☒ 3.3.2-34	モンモリロナイト含有量(a: 0.1M NaOH, 20 mm; b: 0.1M NaOH, 5 mm)	3-120
☒ 3.3.2-35	モンモリロナイト含有量(a: H ₂ O; b: 0.1M NaCl; c: 1.0M NaCl; d: 1M NaNO ₃)	3-121
☒ 3.3.2-36	乾燥密度とモンモリロナイト含有率の関係	3-122
☒ 3.3.2-37	AFM による単分子粒子の粒径、ESA 分布(KPDS-2)	3-123
☒ 3.3.2-38	AFM による単分子粒子の粒径、ESA 分布(KPDS-3)	3-124
☒ 3.3.2-39	AFM による単分子粒子の粒径、ESA 分布(KPDS-H)	3-125
☒ 3.3.2-40	AFM による単分子粒子の粒径、ESA 分布(KPDS-N01)	3-126
☒ 3.3.2-41	AFM による単分子粒子の粒径、ESA 分布(KPDS-N1)	3-127
☒ 3.3.2-42	AFM による単分子粒子の粒径、ESA 分布(KPDS-NO3)	3-127

図 3.3.2-43	AFM による Kunipia-F の粒径分布	3-128
図 3.3.2-44	溶解速度のプロファイル(KPDS-2)	3-131
図 3.3.2-45	溶解速度のプロファイル(KPDS-3)	3-131
図 3.3.2-46	溶解速度のプロファイル(KPDS-H)	3-132
図 3.3.2-47	溶解速度のプロファイル(KPDS-N01)	3-132
図 3.3.2-48	溶解速度のプロファイル(KPDS-N1)	3-132
図 3.3.2-49	溶解速度のプロファイル(KPDS-NO3)	3-133
図 3.3.2-50	密度と溶解速度の関係	3-134
図 3.3.2-51	乾燥密度と溶解速度の関係(Rate _{EG-AFM})	3-135
図 3.3.2-52	KPDS-2 の定方位 XRD パターン	3-136
図 3.3.2-53	KPDS-3 の定方位 XRD パターン	3-137
図 3.3.2-54	KPDS-H の定方位 XRD パターン	3-138
図 3.3.2-55	KPDS-N01 の定方位 XRD パターン	3-139
図 3.3.2-56	KPDS-N1 の定方位 XRD パターン	3-140
図 3.3.2-57	KPDS-NO3 の定方位 XRD パターン	3-141
図 3.3.2-58	KPDS-2 の EG 処理定方位 XRD パターン	3-142
図 3.3.2-59	KPDS-3 の EG 処理定方位 XRD パターン	3-143
図 3.3.2-60	KPDS-H の EG 処理定方位 XRD パターン	3-144
図 3.3.2-61	KPDS-N01 の EG 処理定方位 XRD パターン	3-145
図 3.3.2-62	KPDS-N1 の EG 処理定方位 XRD パターン	3-146
図 3.3.2-63	KPDS-NO3 の EG 処理定方位 XRD パターン	3-147
図 3.3.2-64	KPDS-2 の μ -XRD パターン	3-148
図 3.3.2-65	KPDS-3 の μ -XRD パターン	3-149
図 3.3.2-66	KPDS-H の μ -XRD パターン	3-150
図 3.3.2-67	KPDS-N01 の μ -XRD パターン	3-151
図 3.3.2-68	KPDS-N1 の μ -XRD パターン	3-152
図 3.3.2-69	KPDS-NO3 の μ -XRD パターン	3-153
図 3.3.2-70	KPDS-2 の間隙水化学組成プロファイル	3-158
図 3.3.2-71	KPDS-3 の間隙水化学組成プロファイル	3-158
図 3.3.2-72	KPDS-H の間隙水化学組成プロファイル	3-159
図 3.3.2-73	KPDS-N01 の間隙水化学組成プロファイル	3-159
図 3.3.2-74	KPDS-N1 の間隙水化学組成プロファイル	3-160
図 3.3.2-75	KPDS-NO3 の間隙水化学組成プロファイル	3-160
図 3.3.2-76	間隙水の Si 濃度と溶解速度の関係	3-161
図 4.1.1-1	定温度試験 初期試料 (合成 C-S-H) の XRD パターン	4-2

図 4.1.1-2	定温度試験のフロー図	4-3
図 4.1.1-3	C/S=0.83、50°C養生の C-S-H の XRD	4-5
図 4.1.1-4	C/S=0.83、70°C養生の C-S-H の XRD	4-5
図 4.1.1-5	C/S=0.83、80°C養生の C-S-H の XRD	4-6
図 4.1.1-6	C/S=0.83、90°C養生の C-S-H の XRD	4-6
図 4.1.1-7	結晶化ピークの比較	4-7
図 4.1.1-8	C-S-H (C/S=0.83) , $2\theta = 7.8^\circ$ (002)の XRD 測定結果	4-8
図 4.1.1-9	C-S-H (C/S=0.83) , $2\theta = 16.2^\circ$ (101)の XRD 測定結果	4-9
図 4.1.1-10	C-S-H (C/S=0.83) , $2\theta = 28.9^\circ$ (220)の XRD 測定結果	4-10
図 4.1.1-11	C-S-H (C/S=0.83) , $2\theta = 7.8^\circ$ (002)の結晶子径の経時変化	4-12
図 4.1.1-12	C/S=0.83, $2\theta = 16.2^\circ$ (101)の結晶子径の経時変化	4-12
図 4.1.1-13	C-S-H (C/S=0.83) , $2\theta = 28.9^\circ$ (220)の結晶子径の経時変化	4-12
図 4.1.2-1	定温度試験 初期試料 (合成 C-S(A)-H) の XRD パターン	4-14
図 4.1.2-2	A/C=0.05、50°Cの C-S(A)-H の XRD パターン	4-16
図 4.1.2-3	A/C=0.05、70°Cの C-S(A)-H の XRD パターン	4-16
図 4.1.2-4	A/C=0.05、80°Cの C-S(A)-H の XRD パターン	4-17
図 4.1.2-5	A/C=0.05、90°Cの C-S(A)-H の XRD パターン	4-17
図 4.1.2-6	A/C=0.2、50°Cの C-S(A)-H の XRD パターン	4-18
図 4.1.2-7	A/C=0.2、70°Cの C-S(A)-H の XRD パターン	4-18
図 4.1.2-8	A/C=0.2、80°Cの C-S(A)-H の XRD パターン	4-19
図 4.1.2-9	A/C=0.2、90°Cの C-S(A)-H の XRD パターン	4-19
図 4.1.2-10	C-S(A)-H (A/C=0.05) , $2\theta = 7.8^\circ$ (002)の XRD 測定結果	4-20
図 4.1.2-11	C-S(A)-H (A/C=0.05) , $2\theta = 16.2^\circ$ (101)の XRD 測定結果	4-21
図 4.1.2-12	C-S(A)-H (A/C=0.05) , $2\theta = 28.9^\circ$ (220)の XRD 測定結果	4-22
図 4.1.2-13	90°C養生の C-S-H 及び C-S(A)-H の結晶子径	4-24
図 4.1.2-14	80°C養生の C-S-H 及び C-S(A)-H の結晶子径	4-25
図 4.1.2-15	70°C養生の C-S-H 及び C-S(A)-H の結晶子径	4-26
図 4.1.2-16	トバモライトの結晶構造	4-27
図 4.1.2-17	各ピークから求めた結晶子径の関係	4-28
図 4.1.2-18	D(101)の経時変化	4-29
図 4.1.3-1	OPC+石英型 SiO ₂ 、50°Cの XRD 測定結果	4-32
図 4.1.3-2	OPC+石英型 SiO ₂ 、70°Cの XRD 測定結果	4-32
図 4.1.3-3	OPC+石英型 SiO ₂ 、80°Cの XRD 測定結果	4-33
図 4.1.3-4	OPC+石英型 SiO ₂ 、90°Cの XRD 測定結果	4-33
図 4.1.3-5	OPC+活性 SiO ₂ 、50°Cの XRD 測定結果	4-34
図 4.1.3-6	OPC+活性 SiO ₂ 、70°Cの XRD 測定結果	4-34

図 4.1.3-7	OPC+活性 SiO ₂ 、80°Cの XRD 測定結果	4-35
図 4.1.3-8	OPC+活性 SiO ₂ 、90°Cの XRD 測定結果	4-35
図 4.1.3-9	OPC+石英型 SiO ₂ 、2θ =7.8° (002)の XRD 測定結果	4-36
図 4.1.3-10	OPC+石英型 SiO ₂ 、2θ =16.2° (101)の XRD 測定結果	4-37
図 4.1.3-11	OPC+石英型 SiO ₂ 、2θ =28.9° (220)の XRD 測定結果	4-38
図 4.1.3-12	90°C養生の C-S-H 及び OPC+石英型 SiO ₂ の結晶子径	4-40
図 4.1.3-13	80°C養生の C-S-H 及び OPC+石英型 SiO ₂ の結晶子径	4-41
図 4.1.3-14	70°C養生の C-S-H 及び OPC+石英型 SiO ₂ の結晶子径	4-42
図 4.1.3-15	50°C養生の C-S-H 及び OPC+石英型 SiO ₂ の結晶子径	4-43
図 4.1.3-16	D(220)と D(002)の関係	4-44
図 4.1.3-17	液相 pH	4-46
図 4.1.3-18	液相 Ca 濃度	4-47
図 4.1.3-19	液相 Si 濃度	4-47
図 4.1.3-20	液相 S 濃度	4-47
図 4.1.3-21	液相 Na 濃度	4-48
図 4.1.3-22	液相 K 濃度	4-48
図 4.1.4-1	セメント系材料の熱変質(C-S-H の結晶化)に関わる条件のまとめ	4-49
図 4.2.1-1	定温度試験のフロー	4-51
図 4.2.1-2	長さ変化の測定方向	4-53
図 4.2.1-3	XRD 測定結果	4-55
図 4.2.1-4	TG-DTA 曲線	4-56
図 4.2.1-5	初期試料の EPMA 測定結果	4-58
図 4.2.1-6	20°C試料の EPMA 測定結果	4-58
図 4.2.1-7	50°C試料の EPMA 測定結果	4-59
図 4.2.1-8	70°C試料の EPMA 測定結果	4-59
図 4.2.1-9	80°C試料の EPMA 測定結果	4-60
図 4.2.1-10	90°C試料の EPMA 測定結果	4-60
図 4.2.1-11	空隙径と累積空隙率	4-61
図 4.2.1-12	空隙径と微分細孔容積	4-62
図 4.2.1-13	窒素吸着法による細孔径分布	4-63
図 4.2.1-14	累積空隙容積	4-64
図 4.2.2-1	Se-O-H の Eh-pH 相図	4-69
図 4.2.2-2	C の分配係数 (JAEA-SDB)	4-79
図 4.2.2-3	Cl の分配係数 (JAEA-SDB)	4-80
図 4.2.2-4	I の分配係数 (JAEA-SDB)	4-80
図 4.2.2-5	Se の分配係数 (JAEA-SDB)	4-81

図 4.2.2-6	Cs の分配係数 (JAEA-SDB)	4-82
図 4.2.2-7	Sr の分配係数 (JAEA-SDB)	4-83
図 4.2.2-8	Ra の分配係数 (JAEA-SDB)	4-83
図 4.2.2-9	Co の分配係数 (JAEA-SDB)	4-84
図 4.2.2-10	Ni の分配係数 (JAEA-SDB)	4-84
図 4.2.2-11	Zr の分配係数 (JAEA-SDB)	4-85
図 4.2.2-12	Sn の分配係数 (JAEA-SDB)	4-85
図 4.2.2-13	Nb の分配係数 (JAEA-SDB)	4-86
図 4.2.2-14	Mo の分配係数 (JAEA-SDB)	4-86
図 4.2.2-15	Tc の分配係数 (JAEA-SDB)	4-87
図 4.2.2-16	Pb の分配係数 (JAEA-SDB)	4-87
図 4.2.2-17	Am の分配係数 (JAEA-SDB)	4-88
図 4.2.2-18	Th の分配係数 (JAEA-SDB)	4-89
図 4.2.2-19	Pu の分配係数 (JAEA-SDB)	4-89
図 4.2.2-20	U の分配係数 (JAEA-SDB)	4-90
図 4.2.2-21	Np の分配係数 (JAEA-SDB)	4-90
図 5.1.1-1	力学解析と地化学解析における緩衝材の固相と間隙の取り扱い	5-2
図 5.1.1-2	地化学解析において考慮している濃度単位	5-3
図 5.1.1-3	2次元解析体系概念図	5-5
図 5.1.1-4	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)	5-14
図 5.1.1-5	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)	5-15
図 5.1.1-6	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)	5-16
図 5.1.1-7	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)	5-17
図 5.1.1-8	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)	5-18
図 5.1.1-9	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0)	5-19
図 5.1.1-10	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)	5-20
図 5.1.1-11	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0)	5-21

図 5.1.1-12	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0）	5-22
図 5.1.1-13	ケース1の1万年後、10万年後の計算結果（施設中心部を通る垂直断面）	5-23
図 5.1.1-14	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）	5-24
図 5.1.1-15	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）	5-25
図 5.1.1-16	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）	5-26
図 5.1.1-17	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1）	5-27
図 5.1.1-18	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1）	5-28
図 5.1.1-19	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）	5-29
図 5.1.1-20	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1）	5-30
図 5.1.1-21	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1）	5-31
図 5.1.1-22	ケース2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）	5-32
図 5.1.1-23	ケース2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）	5-33
図 5.1.1-24	ケース2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）	5-34
図 5.1.1-25	ケース2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）	5-35
図 5.1.1-26	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）	5-36
図 5.1.1-27	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）	5-37
図 5.1.1-28	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）	5-38
図 5.1.1-29	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）	5-39

図 5.1.1-30	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）	5-40
図 5.1.1-31	ケース3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）	5-41
図 5.1.1-32	ケース3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）	5-42
図 5.1.1-33	ケース3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）	5-43
図 5.1.1-34	ケース3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）	5-44
図 5.1.1-35	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3）	5-45
図 5.1.1-36	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3）	5-46
図 5.1.1-37	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3）	5-47
図 5.1.1-38	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3）	5-48
図 5.1.1-39	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3）	5-49
図 5.1.1-40	ケース4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）	5-51
図 5.1.1-41	ケース4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）	5-52
図 5.1.1-42	ケース4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）	5-53
図 5.1.1-43	ケース4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）	5-54
図 5.1.1-44	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4）	5-55
図 5.1.1-45	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4）	5-56
図 5.1.1-46	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4）	5-57
図 5.1.1-47	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4）	5-58

図 5.1.1-48	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4）	5-59
図 5.1.2-1	力学試験を模擬した体系概要図	5-61
図 5.1.2-2	解析体系図	5-62
図 5.1.2-3	液相・固相分布結果図（KPDS-3、反応表面積 7 m ² /g）	5-64
図 5.1.2-4	上流端及び下流端の固相濃度経時変化 （KPDS-3、反応表面積 7 m ² /g）	5-65
図 5.1.2-5	1,000 日後の乾燥密度分布（KPDS-3、反応表面積 7 m ² /g）	5-66
図 5.1.2-6	1,000 日後の液相組成分布（KPDS-3、反応表面積 7 m ² /g）	5-66
図 5.1.2-7	液相・固相分布結果図（KPDS-H、反応表面積 7 m ² /g）	5-67
図 5.1.2-8	上流端及び下流端の固相濃度経時変化 （KPDS-H、反応表面積 7 m ² /g）	5-68
図 5.1.2-9	1,000 日後の乾燥密度分布（KPDS-H、反応表面積 7 m ² /g）	5-68
図 5.1.2-10	1,000 日後の液相組成分布（KPDS-H、反応表面積 7 m ² /g）	5-69
図 5.1.2-11	液相・固相分布結果図（KPDS-N01、反応表面積 7 m ² /g）	5-70
図 5.1.2-12	上流端及び下流端の固相濃度経時変化（KPDS-N01、 反応表面積 7 m ² /g）	5-71
図 5.1.2-13	1,000 日後の乾燥密度分布（KPDS-N01、反応表面積 7 m ² /g）	5-71
図 5.1.2-14	1,000 日後の液相組成分布（KPDS-N01、反応表面積 7 m ² /g）	5-72
図 5.1.2-15	液相・固相分布結果図（KPDS-3；反応表面積は圧密状態を考慮）	5-73
図 5.1.2-16	上流端及び下流端の固相濃度経時変化（KPDS-3；反応表面積は圧密 状態を考慮）	5-74
図 5.1.2-17	1,000 日後の乾燥密度分布（KPDS-3；反応表面積は圧密状態を考慮）	5-74
図 5.1.2-18	1,000 日後の液相組成分布（KPDS-3；反応表面積は圧密状態を考慮）	5-75
図 5.1.2-19	1,000 日後のモンモリロナイト量分布（KPDS-3、 反応表面積 7 m ² /g）	5-76
図 5.1.2-20	1,000 日後のモンモリロナイト量分布（KPDS-3； 反応表面積は圧密状態を考慮）	5-76
図 5.2.1-1	一次元圧密試験	5-77
図 5.2.1-2	含有率と鉛直応力	5-77
図 5.2.1-3	等モンモリロナイト含有率圧縮線	5-78
図 5.2.1-4	体積変化の概念図	5-79
図 5.2.1-5	変質の概念図	5-80
図 5.2.1-6	アナルサイム化に関する諸定数	5-85
図 5.2.1-7	クリノプチロライト化に関する諸定数	5-86
図 5.2.1-8	ヒューランダイト化に関する諸定数	5-87

図 5.2.1-9	モンモリロナイトの溶解に関する諸定数	5-88
図 5.2.1-10	化学解析のメッシュ	5-89
図 5.2.1-11	処分施設の建設手順	5-91
図 5.2.1-12	乾燥密度の抽出要素	5-92
図 5.2.1-13	建設段階終了時の処分場の体積ひずみ	5-92
図 5.2.1-14	各要素の変質率	5-93
図 5.2.1-15	Case1 の各要素の固相体積変化率	5-93
図 5.2.1-16	Case2,3 の各要素の固相体積変化率	5-93
図 5.2.1-17	Case4,5 の各要素の固相体積変化率	5-93
図 5.2.1-18	Case1 における体積ひずみの経時変化	5-94
図 5.2.1-19	Case1 における水平変位の経時変化(m)	5-94
図 5.2.1-20	Case1 における鉛直変位の経時変化(m)	5-95
図 5.2.1-21	Case1 における平均有効応力の経時変化	5-95
図 5.2.1-22	抽出要素	5-96
図 5.2.1-23	Case2 における体積ひずみの経時変化	5-96
図 5.2.1-24	Case2 における水平変位の経時変化(m)	5-97
図 5.2.1-25	Case2 における鉛直変位の経時変化(m)	5-97
図 5.2.1-26	Case2 における平均有効応力の経時変化	5-98
図 5.2.1-27	Case3 における体積ひずみの経時変化	5-98
図 5.2.1-28	Case3 における水平変位の経時変化(m)	5-99
図 5.2.1-29	Case3 における鉛直変位の経時変化(m)	5-99
図 5.2.1-30	Case3 における平均有効応力の経時変化	5-100
図 5.2.1-31	Case4 における体積ひずみの経時変化	5-100
図 5.2.1-32	Case4 における水平変位の経時変化(m)	5-101
図 5.2.1-33	Case4 における鉛直変位の経時変化(m)	5-101
図 5.2.1-34	Case4 における平均有効応力の経時変化	5-102
図 5.2.1-35	Case5 における体積ひずみの経時変化	5-102
図 5.2.1-36	Case5 における水平変位の経時変化(m)	5-103
図 5.2.1-37	Case5 における鉛直変位の経時変化(m)	5-103
図 5.2.1-38	Case5 における平均有効応力の経時変化	5-104
図 5.2.2-1	化学変質解析初期における空隙率分布 (再冠水直後)	5-106
図 5.2.2-2	化学変質解析初期における空隙率分布 (力学考慮なしー参考)	5-106
図 5.2.2-3	化学変質解析初期における固相組成及び空隙率分布	5-108
図 5.2.2-4	1,000 年後、5,000 年後の計算結果 (施設中心部を通る垂直断面： ケース c)	5-109

図 5.2.2-5	1,000 年後、5,000 年後の計算結果（施設中心部を通る水平断面：ケース c）	5-110
図 5.2.2-6	1,000 年後、5,000 年後の計算結果（廃棄体モルタル最下端部水平断面：ケース c）	5-111
図 5.2.2-7	1,000 年後、5,000 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：ケース c）	5-112
図 5.2.2-8	5,000 年後の化学変質解析結果と力学解析結果を考慮した 固相組成及び空隙率分布（施設中心部を通る垂直断面：ケース c）	5-113
図 5.2.2-9	5,000 年後の化学変質解析結果と力学解析結果を考慮した 固相組成及び空隙率分布（施設中心部を通る水平断面：ケース c）	5-114
図 5.2.2-10	7,000 年後、1 万年後の計算結果（施設中心部を通る垂直断面：ケース c）	5-115
図 5.2.2-11	7,000 年後、1 万年後の計算結果（施設中心部を通る水平断面：ケース c）	5-116
図 5.2.2-12	7,000 年後、1 万年後の計算結果（廃棄体モルタル最下端部水平断面：ケース c）	5-117
図 5.2.2-13	7,000 年後、1 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：ケース c）	5-118
図 5.2.2-14	1 万年後の化学変質解析結果と力学解析結果を考慮した 固相組成及び空隙率分布（施設中心部を通る垂直断面：ケース c）	5-119
図 5.2.2-15	1 万年後の化学変質解析結果と、力学解析結果を考慮した 固相組成及び空隙率分布（施設中心部を通る水平断面：ケース c）	5-120
図 5.2.2-16	1.5 万年後、2 万年後の計算結果（施設中心部を通る垂直断面：ケース c）	5-121
図 5.2.2-17	1.5 万年後、2 万年後の計算結果（施設中心部を通る水平断面：ケース c）	5-122
図 5.2.2-18	1.5 万年後、2 万年後の計算結果（廃棄体モルタル最下端部水平断面：ケース c）	5-123
図 5.2.2-19	1.5 万年後、2 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：ケース c）	5-124
図 5.2.2-20	2 万年後の化学変質解析結果と、力学解析結果を考慮した 固相組成及び空隙率分布（施設中心部を通る垂直断面：ケース c）	5-125
図 5.2.2-21	2 万年後の化学変質解析結果と、力学解析結果を考慮した 固相組成及び空隙率分布（施設中心部を通る水平断面：ケース c）	5-126
図 5.2.2-22	3 万年後、5 万年後の計算結果（施設中心部を通る垂直断面：ケース c）	5-127

図 5.2.2-23	3 万年後、5 万年後の計算結果（施設中心部を通る水平断面：ケース c）	5-128
図 5.2.2-24	3 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：ケ ース c）.....	5-129
図 5.2.2-25	3 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：ケース c）.....	5-130
図 5.2.2-26	5 万年後の化学変質解析結果と、力学解析結果を考慮した 固相組成及 び空隙率分布（施設中心部を通る垂直断面：ケース c）.....	5-131
図 5.2.2-27	5 万年後の化学変質解析結果と、力学解析結果を考慮した 固相組成及 び空隙率分布（施設中心部を通る水平断面：ケース c）.....	5-132
図 5.2.2-28	7 万年後、10 万年後の計算結果（施設中心部を通る垂直断面：ケース c）	5-133
図 5.2.2-29	7 万年後、10 万年後の計算結果（施設中心部を通る水平断面：ケース c）	5-134
図 5.2.2-30	7 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： ケース c）.....	5-135
図 5.2.2-31	7 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：ケース c）.....	5-136
図 5.2.2-32	10 万年後の化学変質解析結果と、力学解析結果を考慮した 固相組成及 び空隙率分布（施設中心部を通る垂直断面：ケース c）.....	5-137
図 5.2.2-33	10 万年後の化学変質解析結果と、力学解析結果を考慮した 固相組成及 び空隙率分布（施設中心部を通る水平断面：ケース c）.....	5-138
図 5.2.2-34	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 b 及びケース c）	5-140
図 5.2.2-35	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 b 及び ケース c）.....	5-141
図 5.2.2-36	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 b 及びケース c）.....	5-142
図 5.2.2-37	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 b 及びケース c）.....	5-143
図 5.2.2-38	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 b 及びケース c）.....	5-144
図 5.2.2-39	ケース a の力学解析結果(体積ひずみ).....	5-146

図 5.2.2-40	ケース b の力学解析結果(体積ひずみ)	5-146
図 5.2.2-41	ケース c の力学解析結果(体積ひずみ)	5-147
図 5.2.2-42	ケース a の力学解析結果(水平変位)	5-147
図 5.2.2-43	ケース a の力学解析結果(鉛直変位)	5-148
図 5.2.2-44	ケース b の力学解析結果(水平変位)	5-148
図 5.2.2-45	ケース b の力学解析結果(鉛直変位)	5-149
図 5.2.2-46	ケース c の力学解析結果(水平変位)	5-149
図 5.2.2-47	ケース c の力学解析結果(鉛直変位)	5-150
図 5.2.2-48	乾燥密度の抽出要素	5-150
図 5.2.2-49	ケース a、b 及び c の力学解析の各要素における平均有効応力の経時変化の比較	5-151
図 5.2.2-50	ケース a、b 及び c の力学解析の各要素における間隙率の経時変化の比較	5-151

表 目 次

表 1.4.1-1	5 ヶ年(平成 25~29 年度)の計画	1-10
表 2.1.1-1	試験に用いたベントナイトの全岩化学組成	2-3
表 2.1.1-2	ゼオライトへの変質その場観察試験の条件	2-4
表 2.1.1-3	KV1-fine 試料の単独変質その場観察試験	2-5
表 2.1.1-4	KV1-fine 試料のによるその場観察試験の溶液化学組成	2-12
表 2.1.1-5	KV1-fine-CLP 試料の変質その場観察試験	2-14
表 2.1.1-6	随伴鉱物の溶解に伴うサイズ変化	2-16
表 2.1.1-7	ゼオライト核形成から成長過程のサイズ変化	2-18
表 2.1.1-8	KV1-fine-CLP 試料の変質その場観察試験の溶液化学組成	2-27
表 2.1.2-1	シリカの圧縮溶解速度測定試験の条件	2-30
表 2.1.2-2	シリカの圧縮溶解試験	2-31
表 2.1.2-3	シリカの圧縮溶解試験溶液の分析結果	2-31
表 2.1.3-1	シリンジ変質試験の条件	2-34
表 2.1.3-2	シリンジ試験のまとめ	2-36
表 2.1.3-3	シリンジ試験試料のモンモリロナイトとゼオライトの化学組成	2-44
表 2.1.4-1	平衡溶液の化学組成と Logk 計算結果	2-51
表 2.1.4-2	ゼオライトとセメント浸出溶液の間の界面自由エネルギー	2-56
表 2.1.4-3	アナルサイト変質反応系の各相の熱力学パラメータ	2-60
表 2.1.4-4	ローモンタイト変質反応系の各相の熱力学パラメータ	2-60
表 2.1.4-5	FRHP での RegionI から III の液相組成 (JNC TN8400 2005-027)	2-62
表 2.1.4-6	平衡後の液相組成	2-62
表 2.2.1-1	ボーリングコアの概要	2-67
表 2.2.1-2	Box-core-3 の分析試料採取位置及び試験項目の一覧表	2-69
表 2.2.1-3	Silo-block-1 の分析試料の採取位置と試験項目一覧表	2-70
表 2.2.1-4	試験項目の一覧表	2-71
表 2.2.1-5	二次鉱物の定量結果	2-81
表 2.2.1-6	層間陽イオンの定量結果	2-81
表 2.2.1-7	Box-core-3 のパターンフィッティング結果 (Ca 中の鉱物割合)	2-84
表 2.2.1-8	ベントナイト(Box-core-3)のパターンフィッティングによる鉱物定量 結果	2-84
表 2.2.1-9	二次鉱物の定量結果	2-93
表 2.2.1-10	層間陽イオンの定量結果	2-93

表 2.2.1-11	GMT サイロ試料のパターンフィッティング結果 (Ca 中の鉍物割合) …	2-95
表 2.2.1-12	ベントナイト(GMT サイロ)のパターンフィッティングによる鉍物定量 結果 ……………	2-95
表 2.4.1-1	各材料の化学組成 ……………	2-136
表 2.4.1-2	溶解試験条件 ……………	2-136
表 2.4.1-3	溶脱試料の質量減少率、密度、空隙率の測定結果 ……………	2-139
表 2.4.1-4	溶解試験後試料の熱分析結果 ……………	2-146
表 2.4.1-5	BFSC50 ペーストの鉍物相組成 (リートベルト) ……………	2-148
表 2.4.1-6	BFSC70 ペーストの鉍物相組成 (リートベルト) ……………	2-149
表 2.4.1-7	FAC15 ペーストの鉍物相組成 (リートベルト) ……………	2-150
表 2.4.1-8	FAC30 ペーストの鉍物相組成 (リートベルト) ……………	2-151
表 2.4.1-9	SC10 ペーストの鉍物相組成 (リートベルト) ……………	2-152
表 2.4.1-10	マイクロ弾性係数測定結果 ……………	2-156
表 2.4.1-11	EPMA の元素濃度測定結果から求めた CaO 溶脱率 ……………	2-168
表 2.4.1-12	塩素の拡散係数測定結果 ……………	2-169
表 2.4.1-13	反射電子像の輝度分布から算出した相組成 ……………	2-175
表 2.4.2-1	溶脱試験に供した試料 (網掛け) ……………	2-188
表 2.4.2-2	溶解試験条件と試料名 ……………	2-188
表 2.4.2-3	溶脱試料の質量減少率、密度、空隙率の測定結果 ……………	2-191
表 2.4.2-4	溶解試験後試料の熱分析結果 ……………	2-197
表 2.4.2-5	O-2 モルタルの鉍物相組成 (リートベルト) ……………	2-199
表 2.4.2-6	O-3 モルタルの鉍物相組成 (リートベルト) ……………	2-200
表 2.4.2-7	O-4 モルタルの鉍物相組成 (リートベルト) ……………	2-201
表 2.4.2-8	F-2 モルタルの鉍物相組成 (リートベルト) ……………	2-202
表 2.4.2-9	B-2 モルタルの鉍物相組成 (リートベルト) ……………	2-203
表 2.4.2-10	モルタル試料のマイクロ弾性係数 ……………	2-207
表 2.4.2-11	EPMA から算出した C/S 比 ……………	2-238
表 2.4.2-12	EPMA の測定結果から算出した CaO 溶脱率 ……………	2-239
表 2.4.2-13	溶脱試料の拡散係数測定結果 ……………	2-240
表 2.4.2-14	反射電子像から算出した相組成 ……………	2-243
表 2.4.2-15	既存のモデルから算出した拡散係数 ……………	2-252
表 2.4.2-16	設定した遷移帯厚さと遷移帯の移動度 ……………	2-253
表 3.1.2-1	クニピア F の土粒子密度 (2013 年度成果) ……………	3-5
表 3.1.2-2	ケイ砂の土粒子密度 (2013 年度成果) ……………	3-6
表 3.1.2-3	人工ベントナイト系材料の鉍物組成の変質前後のイメージ ……………	3-6

表 3.1.3-1	これまでに実施した土粒子密度試験一覧	3-7
表 3.1.3-2	変質前人工ベントナイトの土粒子密度	3-7
表 3.1.4-1	これまでの一次元排気圧縮試験一覧	3-8
表 3.1.4-2	装置の概略仕様	3-12
表 3.1.4-3	一次元圧縮試験数量	3-13
表 3.1.4-4	CO ₂ パージ有のケースの試験条件	3-13
表 3.1.4-5	各材料の完全飽和線のパラメータ	3-17
表 3.1.4-6	修正完全飽和線の特徴	3-26
表 3.1.4-7	修正完全飽和線のパラメータ	3-28
表 3.1.4-8	既往の荷重制御膨潤量試験数量	3-29
表 3.1.4-9	荷重制御膨潤量試験数量	3-36
表 3.1.4-10	荷重制御膨潤量試験結果イメージ	3-36
表 3.1.4-11	一次元排気圧縮～吸水除荷（膨潤）試験結果の一覧	3-38
表 3.1.4-12	せん断試験ケース	3-43
表 3.1.4-13	等体積一面せん断試験ケース	3-46
表 3.1.4-14	供試体諸元	3-46
表 3.1.4-15	膨潤圧の影響評価試験ケース	3-49
表 3.2.2-1	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	3-60
表 3.2.2-2	追加試験ケースの役割比較表	3-60
表 3.2.2-3	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	3-65
表 3.2.2-4	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[11]	3-66
表 3.2.2-5	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	3-66
表 3.2.2-6	KPCa の膨潤圧の補正要因と補正後の値	3-70
表 3.2.2-7	Ca 型化試験供試体の解体結果	3-73
表 3.2.3-1	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	3-75
表 3.2.3-2	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	3-76
表 3.2.3-3	ICP-質量分析計イオン分析結果	3-81
表 3.2.3-4	KPDS の膨潤圧の補正要因と補正後の値（その 1）	3-85
表 3.2.3-5	KPDS の膨潤圧の補正要因と補正後の値（その 2）	3-85
表 3.2.3-6	モンモリロナイト溶解試験の解体結果	3-87
表 3.2.3-7	モンモリロナイト溶解試験の解体結果	3-89
表 3.2.3-8	モンモリロナイト溶解試験の解体結果（続き）	3-90
表 3.3.1-1	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	3-93

表 3.3.2-1	密度の測定結果(KPDS-2)	3-96
表 3.3.2-2	密度の測定結果(KPDS-3)	3-96
表 3.3.2-3	密度の測定結果(KPDS-H)	3-97
表 3.3.2-4	密度の測定結果(KPDS-N01)	3-97
表 3.3.2-5	密度の測定結果(KPDS-N1)	3-97
表 3.3.2-6	密度の測定結果(KPDS-NO3)	3-97
表 3.3.2-7	KPDS-2 の EDS 分析による陽イオン組成	3-110
表 3.3.2-8	KPDS-3 の EDS 分析による陽イオン組成	3-111
表 3.3.2-9	KPDS-H の EDS 分析による陽イオン組成	3-112
表 3.3.2-10	KPDS-N01 の EDS 分析による陽イオン組成	3-113
表 3.3.2-11	KPDS-N1 の EDS 分析による陽イオン組成	3-114
表 3.3.2-12	KPDS-NO3 の EDS 分析による陽イオン組成	3-115
表 3.3.2-13	TG-DTA によるモンモリロナイト含有量分析(KPDS-2)	3-118
表 3.3.2-14	TG-DTA によるモンモリロナイト含有量分析(KPDS-3)	3-118
表 3.3.2-15	TG-DTA によるモンモリロナイト含有量分析(KPDS-H)	3-119
表 3.3.2-16	TG-DTA によるモンモリロナイト含有量分析(KPDS-N01)	3-119
表 3.3.2-17	TG-DTA によるモンモリロナイト含有量分析(KPDS-N1)	3-119
表 3.3.2-18	TG-DTA によるモンモリロナイト含有量分析(KPDS-NO3)	3-119
表 3.3.2-19	AFM による単分子粒子の BSA、ESA と溶解速度(KPDS-2)	3-129
表 3.3.2-20	AFM による単分子粒子の BSA、ESA と溶解速度(KPDS-3)	3-129
表 3.3.2-21	AFM による単分子粒子の BSA、ESA と溶解速度(KPDS-H)	3-130
表 3.3.2-22	AFM による単分子粒子の BSA、ESA と溶解速度(KPDS-N01)	3-130
表 3.3.2-23	AFM による単分子粒子の BSA、ESA と溶解速度(KPDS-N1)	3-130
表 3.3.2-24	AFM による単分子粒子の BSA、ESA と溶解速度(KPDS-NO3)	3-131
表 3.3.2-25	間隙水の化学組成(KPDS-2)	3-154
表 3.3.2-26	間隙水の化学組成(KPDS-3)	3-155
表 3.3.2-27	間隙水の化学組成(KPDS-H)	3-155
表 3.3.2-28	間隙水の化学組成(KPDS-N01)	3-156
表 3.3.2-29	間隙水の化学組成(KPDS-N1)	3-156
表 3.3.2-30	間隙水の化学組成(KPDS-NO3)	3-157
表 4.1.1-1	合成 C-S-H の作製条件	4-2
表 4.1.1-2	定温度試験の条件	4-3
表 4.1.1-3	評価試料の材齢一覧	4-3
表 4.1.1-4	C-S-H (C/S=0.83) の結晶子径及び結晶化度	4-11
表 4.1.2-1	合成条件	4-13

表 4.1.2-2	C-S(A)-H の定温度試験の試験条件	4-14
表 4.1.2-3	評価試料の材齢一覧	4-15
表 4.1.2-4	C-S(A)-H (A/C=0.05) の結晶子径及び結晶化度	4-23
表 4.1.3-1	定温度試験の配合	4-30
表 4.1.3-2	定温度試験の試料名一覧	4-30
表 4.1.3-3	定温度試験試験の材齢一覧	4-31
表 4.1.3-4	OPC+石英型 SiO ₂ の結晶子径及び結晶化度	4-39
表 4.1.3-5	定温度試験の液相分析結果(1)	4-45
表 4.1.3-6	定温度試験の液相分析結果(2)	4-46
表 4.2.1-1	硬化体の作製条件	4-50
表 4.2.1-2	硬化体の配合	4-51
表 4.2.1-3	ペースト硬化体の質量及び長さ測定結果	4-54
表 4.2.1-4	XRD による鉱物の同定結果	4-54
表 4.2.1-5	TG-DTA 測定結果	4-55
表 4.2.1-6	ポロシメータ測定結果	4-61
表 4.2.1-7	窒素吸着法による測定結果	4-62
表 4.2.1-8	質量測定結果	4-64
表 4.2.1-9	モルタル供試体の長さ変化	4-65
表 4.2.2-1	セメント影響を考慮した地下水組成[14]	4-67
表 4.2.2-2	地下水とトバモライトとの平衡液組成	4-68
表 4.2.2-3	使用された熱力学データベース[17]	4-70
表 4.2.2-4	核種の化学種の変化 (C、Cl、Co、Ni)	4-72
表 4.2.2-5	核種の化学種の変化 (Se、Sr、Zr、Nb、Mo)	4-73
表 4.2.2-6	核種の化学種の変化 (Tc、Pd、Sn、I)	4-74
表 4.2.2-7	核種の化学種の変化 (Cs、Cm、Pu、U)	4-75
表 4.2.2-8	核種の化学種の変化 (Th、Ra、Np、Am)	4-76
表 4.2.2-9	核種の化学種の変化 (Pb、Po、Pa、Ac)	4-77
表 5.1.1-1	計算ケース	5-4
表 5.1.1-2	地下水組成	5-7
表 5.1.1-3	解析に用いた地下水の組成	5-8
表 5.1.1-4	セメントの化学組成	5-8
表 5.1.1-5	セメント系材料の仕様	5-8
表 5.1.1-6	緩衝材の仕様	5-9
表 5.1.1-7	クニゲル V1 の鉱物組成	5-9
表 5.1.1-8	クニゲル V1 の交換性陽イオン組成	5-9

表 5.1.1-9	初期鉍物濃度	5-10
表 5.1.1-10	初期物性値	5-11
表 5.1.1-11	ケース4において考慮した二次鉍物 [6]	5-11
表 5.1.2-1	Na 型ベントナイトのアルカリ変質に伴う力学挙動変化の取得試験ケース	5-61
表 5.1.2-2	イオン強度と陰イオン種の違いに伴う力学挙動変化の取得試験ケース	5-61
表 5.1.2-3	計算条件	5-62
表 5.2.1-1	各パラメータの説明	5-90
表 5.2.1-2	底部緩衝材	5-90
表 5.2.1-3	上部緩衝材	5-90
表 5.2.1-4	インバートコンクリート	5-90
表 5.2.1-5	廃棄体	5-90
表 5.2.1-6	岩盤	5-90
表 5.2.1-7	クニゲル V1 の鉍物組成	5-90
表 5.2.1-8	施工段階前の冠水前後における緩衝材の乾燥密度	5-92
表 5.2.1-9	施工段階終了後の緩衝材の乾燥密度	5-92
表 5.2.2-1	化学力学連成解析の方法	5-105

第1章 事業概要

1.1 背景

本調査は、再処理工場から及び MOX 燃料加工施設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）のうち地層処分が想定されているものを対象としている。「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」が平成 20 年 3 月に改定され、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する課題は、平成 24 年度までの検討により示され、セメント系材料は、制限温度 80℃以下での熱変質とその影響についての確認、混合セメントに関するデータ取得、及びモデル確証・評価が、ベントナイト系材料は、セメント影響による変質による二次鉱物の生成挙動及び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それぞれ挙げられた。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。

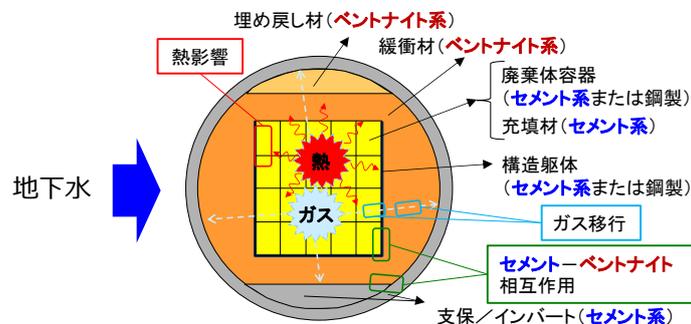


図 1.1.1-1 TRU 廃棄物処分場の人工バリアの処分概念（グループ 12）の例とその長期挙動に影響を与える事象

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て、長期的な材料の性能の変化（現象とその順序と時間）とその長期的変化による人工バリアの性能への影響の評価を目的とする。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化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系材料及びベントナイト系材料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。

平成 25 年度からの 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）連成挙動の評価及び解析による長期挙動評価の信頼性を高めるために、確証試験とその成果の解析への反映を検討する。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、長期挙動評価の初期条件の設定及び初期条件の違いが評価結果に及ぼす影響に着目し、解析精度の向上のために操業中の熱の影響、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 19 年度～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、化学的な変遷(組成の変化)と力学的な変遷とは相互に影響を及ぼす。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ベントナイト系材料の変質が起こり、その結果人工バリアが持つ様々な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が人工バリアの性能へ及ぼす影響を評価し、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、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

人工バリアの長期の化学解析で必要となるセメント系材料の物質移行特性及び力学特性の多様な材料への対応のための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、健全なセメント系材料の物

性値から変質過程の拡散係数を算定できる見通しを得た。また、Region III の拡散係数を変質試料で取得し、拡散係数の予測の信頼性を高めた。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(普通ポルトランドセメント)と同様であるため、C-S-H(ケイ酸カルシウム水和物)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

化学解析における多様なセメント系材料への対応のために、混合セメントを考慮した溶解変質モデルを検討した。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(Region III)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により長期の化学解析の基点のセメント系材料の状態、及び経年コンクリートの溶解試験によりその変質過程について、それぞれ妥当性の検証を行い、化学解析への反映事項や今後の検討課題を抽出した。化学解析の鉱物設定及び変質過程はこれまでの化学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(温度推定値 70~100°C)による C-S-H の結晶化の進行が一部で起こり、変質による溶解がしにくい点が異なっていた。TRU 処分概念で制限温度としている 80°C 以下で C-S-H の結晶化が進行する場合は、化学解析の初期設定、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。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

セメントーベントナイト接触部では、セメント影響によるベントナイトの変質により C-S-H 等の二次鉱物が生成する可能性がある。この現象を確証するために、ベントナイトの接触面から深さ方向への変質状況 (C-S-H 等の二次鉱物の生成) に関して XAFS 分析を行い、クニゲル V1 の組成等を考慮し、パターンフィット法で Ca 鉱物を分離定量した。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。これにより、セメント-ベントナイト接触部における変質に伴う C-S-H の生成やその分布が把握できた。

2) 圧縮系でのベントナイトの溶解速度に関する試験

人工バリアの現実的な条件におけるセメント影響によるベントナイト系材料の変質挙動を化学解析に反映していくために、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 (ΔG 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

人工バリアのセメント影響に伴うベントナイト系材料の変質挙動に関して、長期挙動評価の信頼性を向上させるために、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

ベントナイト系材料の人工バリアにおける長期の力学・水理挙動に関し、化学的な変質の影響を考慮するために、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、力学特性については、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の提示をした。また、水理特性については、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

化学解析におけるセメント系材料の初期鉱物設定を試験により得られた鉱物組成を基に変更した結果、Al 濃度の解析による再現が向上した。また、化学解析における二次鉱物の生成挙動の再現についても改善し、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。

化学解析における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化学解析では、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。

ベントナイト系材料の化学的な変質は、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°C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)の全体計画と検討概要

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、及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。

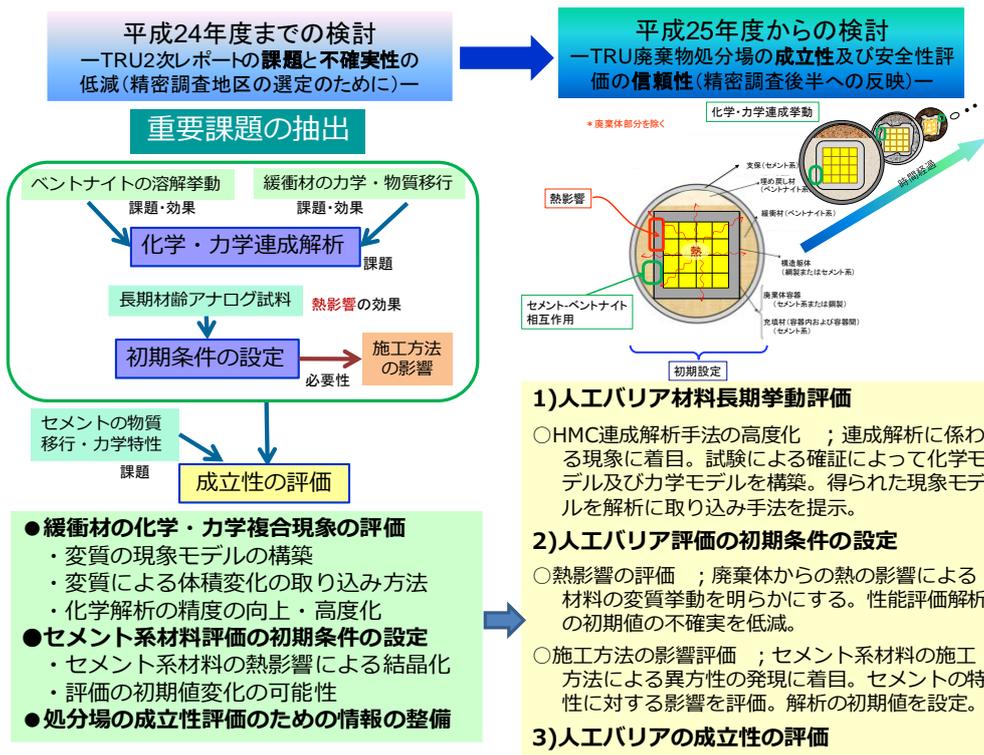


図 1.4.1-1 課題の抽出と研究内容の策定

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
 - ・ 評価の初期条件変化の可能性
- 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、**初期条件の設定**は解析評価に重要である。具体的には、性能評価の初期条件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。そのため、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、2 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条件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、解析の初期条件の設定方法を明らかにする。

上記の内容について、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も踏まえ、成果をまとめることとした。

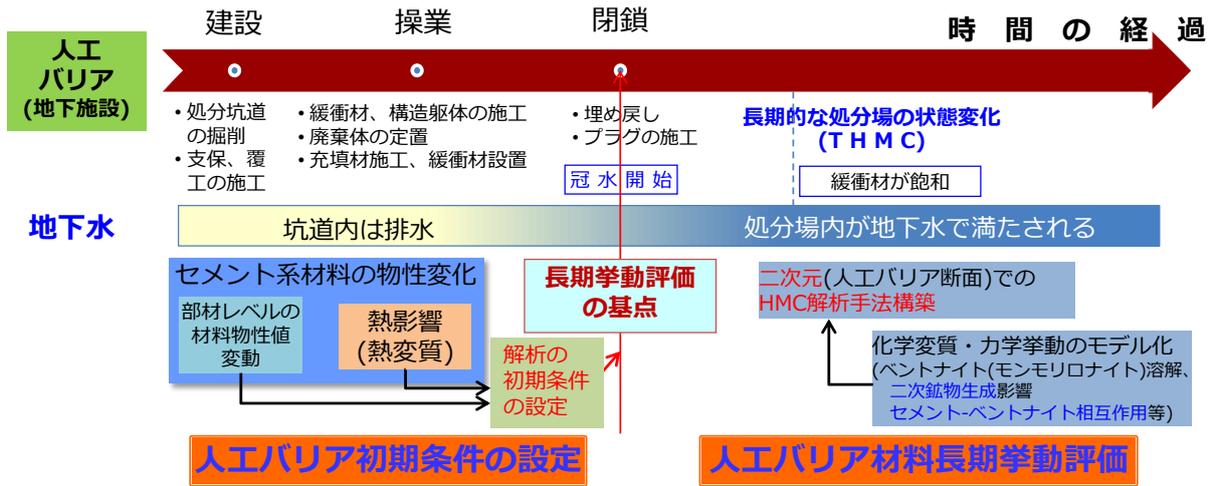


図 1.4.1-2 人工バリアの建設から閉鎖後の長期と本検討の関係及び検討概要

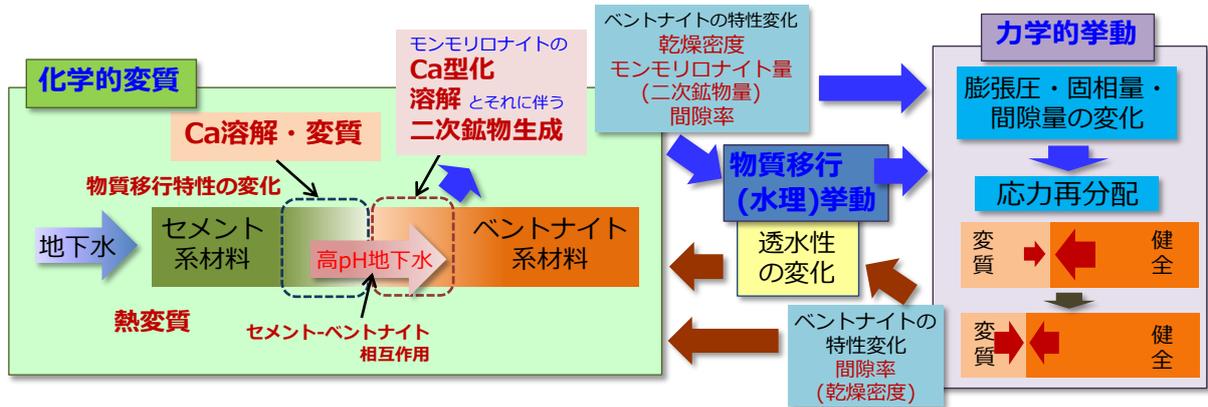


図 1.4.1-3 本検討で考慮する人工バリア材料の化学変質、力学挙動及び水理挙動の関係

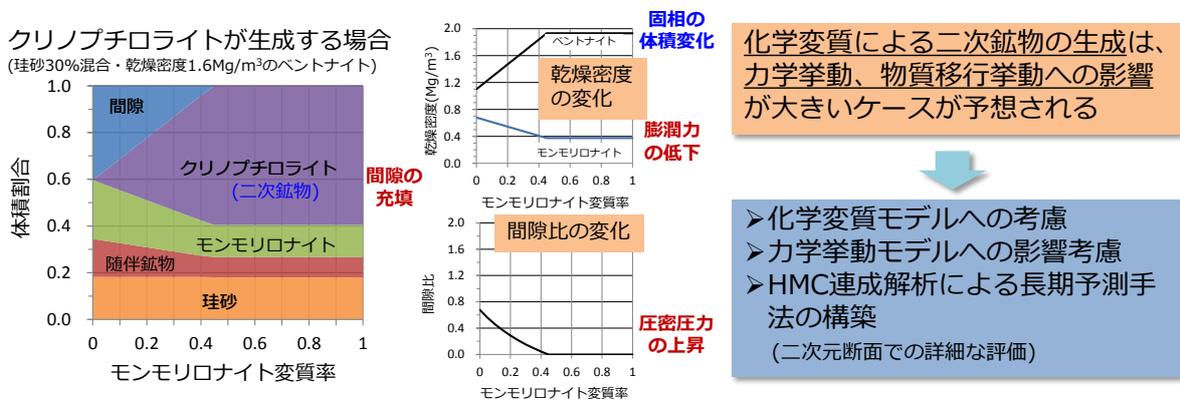


図 1.4.1-4 二次鉱物の生成と力学挙動への影響のイメージと検討課題

5 年間のスケジュールを表 1.4.1-1 に、各検討項目と HMC 連成解析に考慮する化学変質挙動、水理挙動及び力学挙動の関連を図 1.4.1-5 に示す。

平成 25 年度は、主に、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行った。平成 26 年度からは試験によりデータ取得し、化学的な材料の変質挙動やそれに伴う特性に関するモデル化、初期条件の設定に関する検討を行う。並行して、化学変質の解析手法、力学挙動の解析手法及び HMC 連成解析について手法の検討を行い、前述のモデル等を反映すると共に人工バリアの閉鎖後長期の挙動評価をする。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、安全性評価に対して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、精密調査後半へ人工バリアの長期挙動の評価の技術及び知見を反映することを念頭に行う。

表 1.4.1-1 5 年(平成 25～29 年度)の計画

項目	H25	H26	H27	H28	H29	成果目標
(1)人工バリア材料の化学変質に関する現象のモデル化						
1)ベントナイト系材料の二次鉱物の生成挙動に関するモデル化		二次鉱物生成試験 (解析基礎データの拡充)	二次鉱物生成モデル化			化学解析反映方法
2)セメント-ベントナイト接触部の挙動に関する試験	試料採取	接触部分の観察：二次鉱物生成挙動把握				知見の拡充 解析反映手法
3)ベントナイト系材料の溶解モデルの高度化		数学モデルによる検討				溶解速度式への反映
4)セメント系材料の化学変質を伴う物質移行特性変化のモデル化		混合セメント・モルタルへの対応(試験・モデル化)				化学解析への成果反映
(2) 緩衝材の連成解析に関わる水理力学特性に関する試験とモデル化		化学変質の水理・力学影響(二次鉱物生成)試験	現象モデル化			水理力学挙動モデル
		化学連成力学試験				
(3) 人工バリア評価の初期条件の設定		結晶化条件に関する試験				熱変質条件、 解析初期条件への反映
1)セメント系材料の熱変質	文献調査	経年コンクリートの分析(アナログ分析)	物性値への影響			
2)部材寸法の特性値影響	文献調査	要素試験(影響把握)		初期条件への反映検討		
ひび割れ検査手法	予備試験/ 検査手法調査	要素試験(検査手法)				長期的な材料の変質を考慮した人工バリアの評価手法の提示・成立性説明
(4) HMC連成解析手法の検討及び長期評価						
1)化学解析手法		二次元解析手法の構築				
力学解析手法		化学変質挙動/施工影響の反映				
2)HMC連成解析手法		二次元HMC解析手法の構築	HMC長期挙動解析			人工バリアの施工と長期挙動関連の評価手法

注) 項目の 1.、2.及び 4.が「人工バリア材料長期挙動評価」、項目 3.が「人工バリア評価の初期条件の設定」の内容である。

動について検討した。実環境を考慮して、ベントナイトの圧密状態、温度、圧力の影響に着目し、図 1.4.2-1 の模式図に示すようにシリンジ中でベントナイト試料を変質させ体積変化を測定した。セメント浸出水を想定した Region I 模擬溶液とした試験では、圧力の作用した高圧条件(5MPa)において、試験開始後初期の体積減少とその後の時間の経過に伴う体積増加を確認した。また、試験後のベントナイト試料にはクリノプチロライトの生成が認められた(図 1.4.2-1)。一方、モンモリロナイト試料の試験では、体積増加が認められなかった。これらの違いより、二次鉱物生成へのベントナイトに含まれる石英の溶解の影響が考えられる。これらの現象を体系的に把握してモデル化し、化学解析へ反映する必要があることがわかっている。上記のシリンジによる試験に加え、干渉計による二次鉱物生成のその場観察による検討もしており、生成条件や生成までの待ち時間など、モデル化に必要な生成の挙動及び条件の把握を進めている。

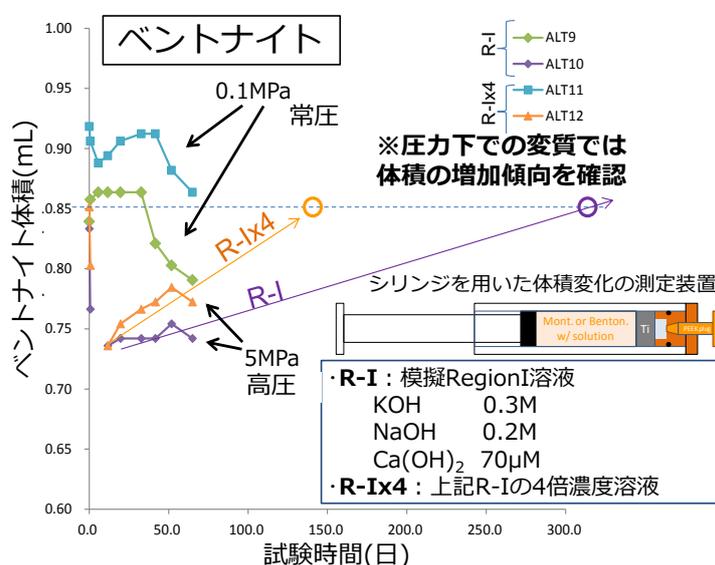


図 1.4.2-1 ベントナイトの変質時の体積変化(温度 70°C)

2) セメントーベントナイト接触部の挙動に関する試験

人工バリアのセメントとベントナイトの接触部分で生成が想定される二次鉱物のうち、珪酸カルシウム水和物(C-S-H)は、ベントナイトの変質を抑制する可能性がある。これに関して平成 24 年度までも試験室で浸漬した試料を XAFS 分析して挙動を把握してきた。ここでは、より現実的な条件での挙動の把握と化学解析の検証を目的とし、放射性廃棄物管理協同組合(Nagra、スイス)の グリムゼル試験場 (Grimsel Test Site: GTS) の構造物から採取した、建設後 12 年間を経過した試料、及び室内試験の試料の分析を実施する。

これまでに、Nagra の構造物の試料について、一部を分析して C-S-H の生成挙動を確認した。また、7 年間 60°C で浸漬したセメントーベントナイト接触試料の分析より、モンモリロナイトのイオン型は長期的にはカリウム型化よりもカルシウム型化が卓越し、これまでの化

学解析結果との整合を確認した。今後もデータの拡充を進め、セメントーベントナイト接触部の挙動の確認を進める計画である。

3) ベントナイト系材料の溶解モデルの高度化

人工バリアの長期挙動の化学解析におけるモンモリロナイトの溶解速度式の高度化を目的とし、圧密状態での実効反応表面積についてモデル化を行う。1.3(2) 2) 圧縮系でのベントナイトの溶解速度に関する試験で把握した、圧密状態でのモンモリロナイトの粒子端面のマスクングによる溶解速度の低下について、モンモリロナイトの溶解速度式の実効反応表面積を試験結果に基づく数学モデルにすることにより信頼性を向上させる。

モンテカルロシミュレーションで円盤状粒子の積層の平衡状態を計算し、円盤端面が他の円盤状粒子によりマスクングされることを考慮して実効反応表面積を算出した。平成 25 年度の検討による乾燥密度 0.05Mg/m^3 以下での積層状態の再現に加え、平成 26 年度に、 1.2Mg/m^3 程度までの現実的な乾燥密度での再現ができ、実効反応表面積の定式化をした(図 1.4.2-2)。この定式化の結果を用いた長期の化学解析結果は、従来の実効反応表面積($7\text{m}^2/\text{g}$)のケースと比較してモンモリロナイトの溶解量が減り、長期評価の不確実性を低減した(図 1.4.2-3)。ただし、粒子間のポテンシャルの設定には、仮定があるためポテンシャルの設定等のモデルの理論的な根拠等は明確にしていく必要がある。

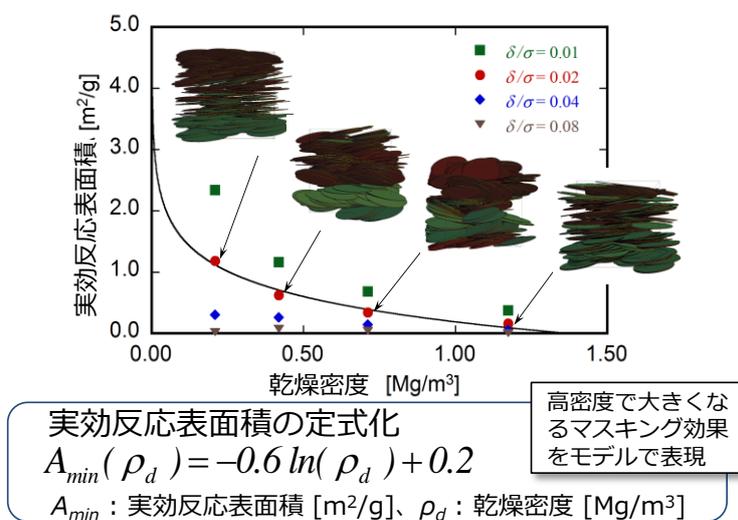


図 1.4.2-2 圧密下のモンモリロナイト実効反応表面積の定式化

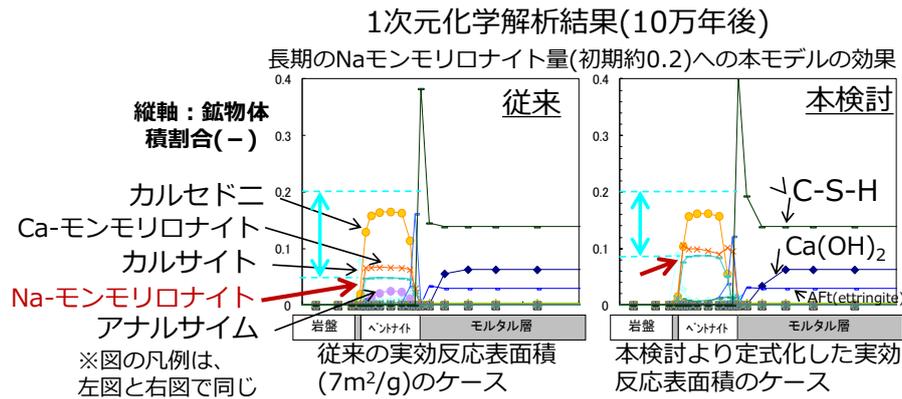


図 1.4.2-3 長期化学解析における本検討での定式化の効果

4) セメント系材料の化学的変質に伴う物質移行特性変化のモデル化

人工バリアの長期挙動の化学解析に必要とされる、セメント系材料の物質移行特性(拡散係数)は、地下水による溶解変質により変化する。TRU2次取りまとめ[5]では、拡散係数は空隙率との関数とし、配合や材料毎、変質段階毎に試験により拡散係数を測定しているために多大な時間と労力がかかっていた。本モデルは、セメント系材料の初期状態の物性値情報があれば、変質(地下水による溶解)の程度によって変わる拡散係数が予測できることをコンセプトとして検討している。平成24年度までに、OPCのセメントペーストの溶解に伴い変化する拡散係数をモデル化した。平成25年度から平成29年度までの本フェーズでは、より現実的なセメント系材料の拡散係数の算定を可能とするために、混合セメントの使用及び骨材を含むコンクリート、モルタル等の材料へ対応するためのモデルの高度化を課題として検討している。

これまで、図1.4.2-4に示す様に、構成要素と各々の変質挙動を考慮した3次元モデルとランダムウォーク法によるセメントペーストの拡散係数のモデルを混合セメントに対応できることを確認した。また、骨材を含む材料への対応は、マルチスケールモデル等の適用によりモデルの拡張について検討し、健全な(変質していない)モルタル材料でモデル化の見通しを得た。今後、混合セメントへの対応及び変質したモルタル材料への対応について、試験データを拡充した検証及びモデルの高度化を行う必要がある。

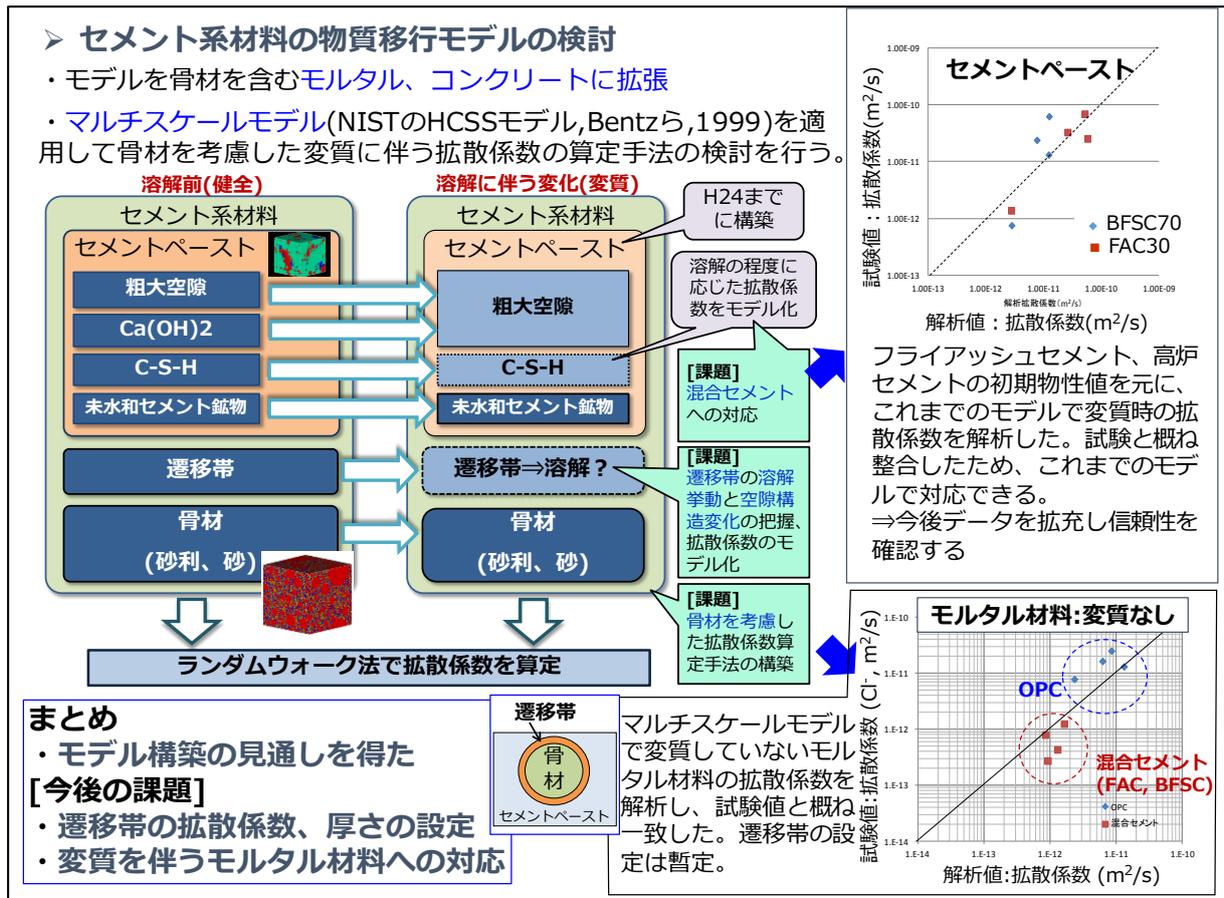


図 1.4.2-4 セメント系材料の拡散係数モデルの成果概要

(2) 緩衝材の連成解析に関わる水理力学特性に関する試験とモデル化

ここでは、HMC 連成解析手法に関わる、ベントナイト系材料の水理力学挙動のモデルに化学変質挙動を考慮するための検討を行う。ベントナイトの化学変質に伴う二次鉱物の生成は、膨張圧の減少と固相体積の増減により間隙量が変化し、有効応力の増減へ影響する。平成 24 年度までに検討したモンモリロナイトの溶解を考慮した水理挙動及び力学挙動モデルを、平成 25 年度からは二次鉱物の生成を考慮したモデルへ拡張するとともに、圧密膨潤の力学挙動に加えせん断挙動のモデル化、さらにセメントの影響を考慮したベントナイト中のモンモリロナイトの溶解、Ca 型化及び液相のイオン強度の力学挙動への影響に関して、長期試験による検討を行う。

1) 力学挙動に関する試験とモデル化

緩衝材の連成解析に関わる力学特性に関する試験では、ベントナイトの圧密変形(完全飽和線)に関して、二次鉱物としてアナルサイムが生成した場合の力学挙動に関する試験データを拡充してモデル化の検討を行った。図 1.4.2-5 に示す様にベントナイトが変質してアナルサイムが生成する場合においても、平成 24 年度までのモデルと同様に圧密変形の挙動は完全飽和線(正規圧密曲線)の移動で説明できると考えられた。また、二次鉱物生成は間隙を充填す

るため、完全飽和線の移動は少ないと考えられた。これらの結果より二次鉱物生成を土粒子密度の変化ととらえ、平成 24 年度までに構築した力学挙動のモデルを拡張し、試験データとの整合を確認した。今後、試験データを拡充してモデルを検証し、信頼性を高める必要がある。ベントナイトの膨潤特性及びせん断変形の特徴について、試験による把握を進めた。

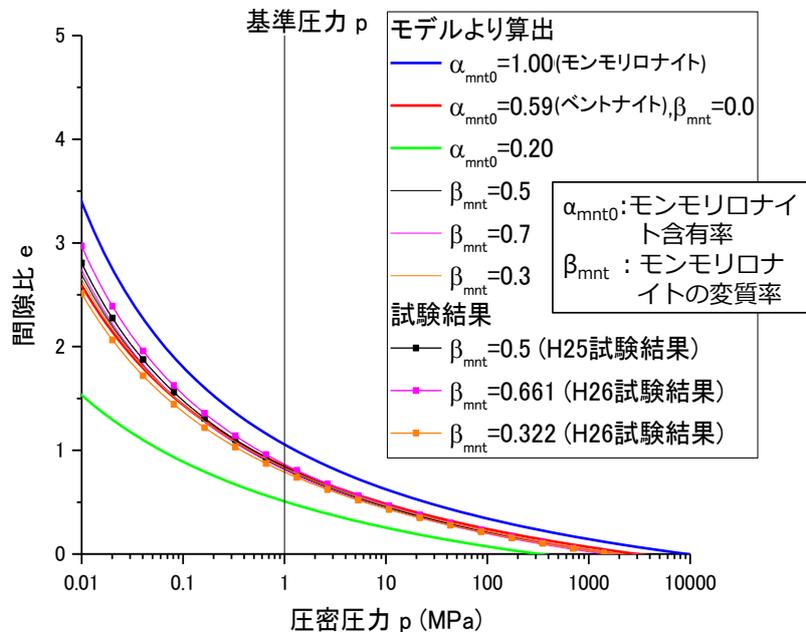


図 1.4.2-5 緩衝材の力学挙動に関する試験結果

2) 長期性能評価のための化学・力学連成モデル試験

セメント浸出水を含む地下水によるモンモリロナイトの Ca 型化、溶解及び液相のイオン強度の影響をベントナイト系材料が受ける場合の力学挙動の把握を目的に長期試験を実施する。

長期試験は前フェーズより継続し、これまでに上記に述べた化学的な変質の力学挙動について把握している。一部の試験体を解体して分析することにより、現実的な圧密状態における溶解速度のこれまでの検討との整合性があること等の成果を得ている。試験体の解体と分析は、残りの試験体に関しても進め、ベントナイトの力学と化学の挙動の関連について把握を行う。加えて、本試験と同条件で化学解析を実施し解析手法の検証も進めている。

(3) 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、図 1.4.1-1 に示す様に処分場が建設、操業を経て閉鎖された時点である。この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、より正確な設定が必要である。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。

ここでは、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)に対する、処分場の閉鎖までの放射性廃棄物の熱による変質の影響及び、人工バリアのセメント系材料の部材の大きさでの部位の違いによる特性値の変動について検討し、長期の解析の初期条件の設定に考慮すべき事項を提示する。加えて、人工バリアの長期性能、初期条件等への影響が考えられるセメント系材料のひび割れに関する非破壊検査手法について検討する。

1) セメント系材料の熱影響による結晶化条件に関する試験

セメント系材料の熱変質は、熱履歴による C-S-H の結晶化(トバモライト化)によるもので、平成 24 年度までに建設後 80 年程度の熱履歴(推定温度 70~100°C)を受けたコンクリート(経年コンクリート)試料により確認し、TRU 廃棄物処分における人工バリアの制限温度の 80°C 以下での結晶化が懸念される。この結晶化により、セメント浸出水の pH の低下が期待される一方、材料特性値の変化が懸念される。そこで、本フェーズでは、人工バリアでのセメント系材料の結晶化条件を確認し、制限温度の 80°C 以下での結晶化が起こる可能性がある場合は、材料特性値への影響を確認し、化学解析手法等の対策を講じる必要がある事項を明らかにするための検討を行う。

これまでに、合成 C-S-H を一定温度に保管する定温度試験で、制限温度の 80°C より低い温度で C-S-H の結晶化を確認した。そのため、まず、結晶化条件を明らかにする必要がある。合成 C-S-H の定温度試験によれば、C-S-H の Ca/Si モル比(C/S)がトバモライトの組成の 0.83 程度、温度が 50°C 以上等の結晶化条件を把握した(図 1.4.2-6)。加えて、より現実的な普通ポルトランドセメント(OPC)を水和後に石英型 SiO₂(骨材を模擬)と共に粉末化した試料で定温度試験を開始し、C-S-H の結晶化の傾向を確認した。今後、定温度試験を継続して確認する必要があるが、熱の影響により骨材等から溶解した Si が C-S-H へ供給されて C/S が 0.83 程度に低下し、結晶(トバモライト)化したと考えられる。なお、結晶化の材料特性値への影響は少ないとされるが、80°C 以下では結晶化が起こらないとして制限温度を設定したため、セメント系材料の結晶化による材料特性値の変化について検討し、初期条件の設定方法の提示に加え、人工バリアの性能への影響を明らかにし、必要に応じ対策等を検討する必要がある。

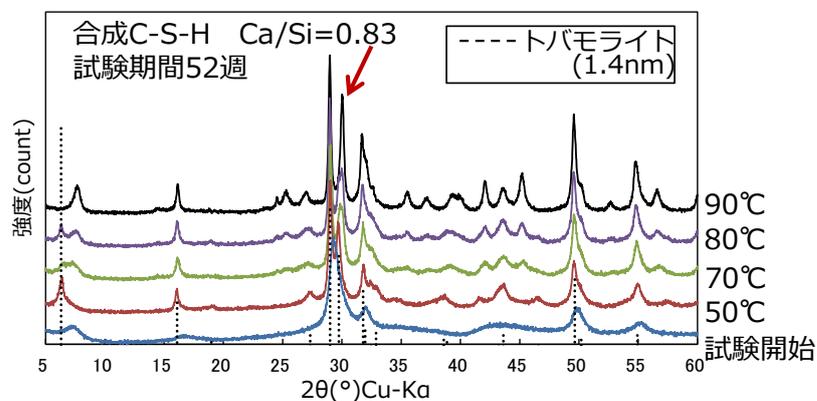


図 1.4.2-6 合成 C-S-H の定温度試験結果(XRD での結晶化確認)

2) セメント系材料の部材寸法の特性値への影響に関する検討及びひび割れの非破壊検査手法
人工バリアのセメント系材料の部材は、位置による特性値の変動が懸念され、長期挙動評価の結果にも影響を及ぼすことが考えられる。そこで、コンクリート部材における特性値の変動に関して把握することを目的に検討を行う。

これまでに、文献調査により、コンクリートの打設方法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となる場合及び乾燥を受けた場合等の養生状態と関連があることがわかっている。このうち打設方法及び養生方法の影響について、それぞれ要素試験で検討した。打設方法に関して高流動コンクリートを用いた水平部材(長さ 6m)及び垂直部材(高さ 1m)の施工試験で空隙率、拡散係数及び圧縮強度の変動は少ないこと、また、養生状態で拡散係数が変動するがそれと相関のある空隙特性で変動を把握できることを確認し、初期条件、施工等への反映事項が得られた。

セメント系材料のひび割れの非破壊検査手法に関する検討は、視覚的な検査が難しい部材の内部及び裏面側のひび割れを超音波法により検査する手法に関するもので、平成 24 年度までに圧縮強度 200MPa の高強度高緻密コンクリートで検討してきた技術を高度化すると共に、人工バリアのセメント系材料への適用可能性を検討することを目的としたものである。

これまでに、セメント系材料の様に超音波が減衰しやすい材料に有効なステップ型パルサ(広帯域周波数)を適用し、緻密で超音波が伝播しやすい高強度高緻密コンクリート(圧縮強度 200MPa)でその有効性を確認し、加えて、検査手法の構築のために必要な要素技術とその課題を抽出した。抽出した要素技術のうち、ひび割れ検出精度を高める超音波集束技術及び広範囲の検査のための TOFD 法(画像化技術)の有効性を確認した。なお、人工バリアのセメント系材料のうち超音波伝播特性が比較的良好な高強度コンクリート(圧縮強度 60MPa)において、本手法を用いても超音波伝播時の減衰が大きく、検査に支障があるため、減衰を改善する方策に大きな課題がある。

(4) HMC 連成解析手法の検討

ここでは、多様な条件での人工バリアの長期挙動を評価し、設計、施工方法と長期挙動との関連について評価するための 2 次元の HMC 連成解析手法を検討する。1.4.2(1)、(2)及び(3)で検討した化学変質挙動、化学変質を考慮した力学挙動及び水理挙動に関するそれぞれのモデル、初期条件等の成果の反映も行う。

1) HMC 連成解析に関わる化学解析手法及び力学解析手法に関する検討

ここでは、化学解析、及び力学解析の個別の手法について、本検討で考慮する化学変質挙動と力学挙動関連を考慮した HMC 連成解析の構築を目的とした検討を実施する。

これまでに、化学解析に関しては、平成 24 年度までの課題として挙げた、解析体系の 2 次元化を行った(地球化学・物質移動連成解析コード PHREEQC-TRANS[6])。力学解析に関しては、これまで構成モデルが化学変質による固相量や鉱物種の変化による体積変化が質量保存則により考慮できなかった点を改良し、2 次元 FEM 化することで化学解析との連成が可能

となった(土/水連成有限要素プログラム DACSAR-BA[7])。

2) 処分場 2次元断面における力学-化学連成解析

HMC 連成解析手法に関する検討では、2次元での力学解析と化学解析の弱連成手法の構築し、加えて施工から長期挙動までの一連の人工バリアの評価の手法を検討することで、現実的な人工バリアの長期挙動の評価、長期挙動を考慮した設計及び施工計画を可能とすることを目標とする。

これまでに、1)で得られた、解析手法を使用した HMC の弱連成解析による人工バリアの円形坑道断面の長期解析を実施した。その結果、図 1.4.2-7 の長期解析結果に示す様に、底部緩衝材はセメントの影響による化学変質を受けやすく、それにより圧縮方向の体積ひずみが発生する点等の緩衝材の長期力学挙動の評価への化学変質の影響の考慮が可能になった。今後、化学解析と力学解析の弱連成のためのデータ受け渡し手法の検討及び化学変質及び力学挙動のモデル化の成果の反映を行ない、長期解析手法を構築し、これを用いた人工バリアの長期挙動評価により、その成立性や設計・施工への反映事項を抽出していく計画である。

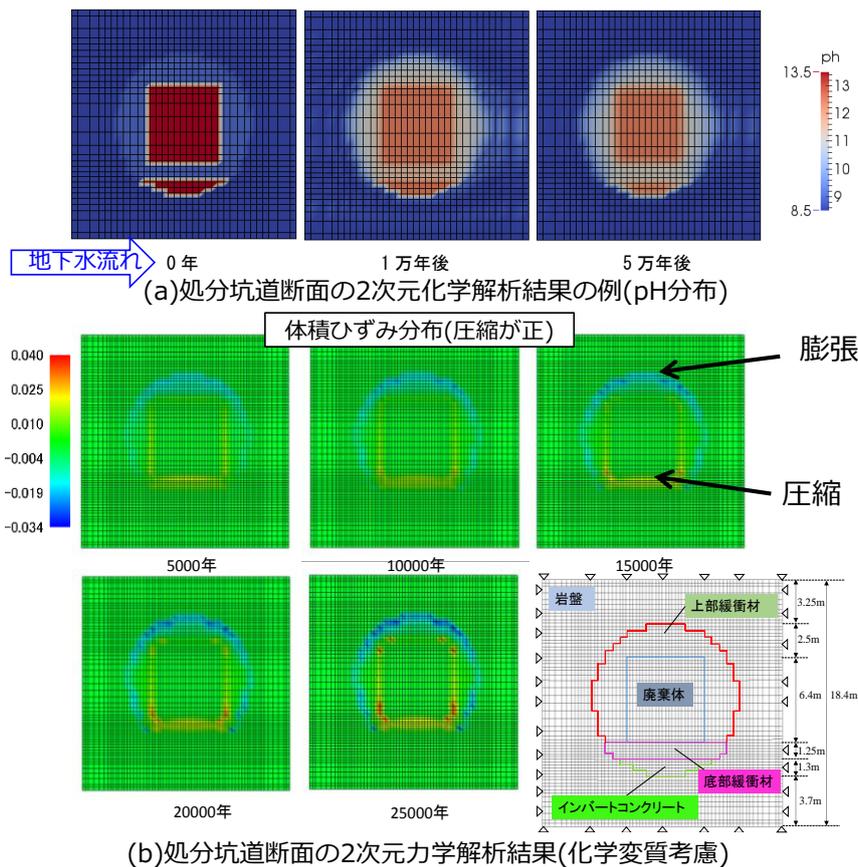


図 1.4.2-7 2次元 HMC 連成解析結果

1.5 平成 27 年度の実施事項

1.4 に示した 5 年間の全体計画及び平成 26 年度までの成果を踏まえた、平成 27 年度の各項目における実施内容を以下に示す。

(1) 人工バリア材料の化学変質挙動に関する試験とモデル化（本報告書：第 2 章）

1) ベントナイト系材料の変質によるゼオライト系二次鉱物の生成に関するモデル化(本報告書：2.1)

これまでのベントナイトの化学変質に伴う二次鉱物生成挙動に関する試験成果を受け、二次鉱物の生成のモデル化案策定をすると共に、モデル化に必要な二次鉱物生成挙動の把握に関する試験を実施した。

2) セメントーベントナイト接触部の挙動に関する試験(本報告書：2.2)

平成 26 年度に引き続き Nagra で採取した試料の分析を、XAFS 分析等を使用して実施し、セメントーベントナイト接触部の C-S-H の生成等の挙動に関するデータを拡充して把握すると共に、より有益なデータ得るための高分解能な XAFS 分析等の新たな分析手法の適用について検討した。

3) ベントナイト系材料の溶解モデルの高度化（本報告書：2.3）

これまでに進めてきた、モンモリロナイトの実効反応表面積のモデル化に関する、円盤状粒子のモンテカルロシミュレーションによる手法の信頼性向上のために積層構造の再現性等を検討し、実効反応表面積の定式化に反映した。

4) セメント系材料の化学的変質に伴う物質移行特性変化のモデル化(本報告書：2.4)

これまでに現実的なセメント系材料への対応の検討を進めてきた、物質移行特性(拡散係数)のモデル化に関する、混合セメントへの対応のための様々な混合セメントでの試験データの取得とそれによるモデルの高度化を行った。加えて、モルタル材料への対応のための変質した混合セメントを使用したモルタルで試験データを取得し、モデルの高度化及び残された課題を抽出した。

(2) 緩衝材の化学変質を伴う力学挙動に関する試験とモデル化（本報告書：第 3 章）

1) 力学挙動に関する試験とモデル化(本報告書：3.1)

これまでに試験結果に基づいてモデル化を進めてきた、ベントナイトの化学変質(溶解と二次鉱物生成)を伴う力学挙動のモデルを高度化し信頼性を向上させる。まず、圧密挙動を表す完全飽和線のモデルに関して、これまでに構築した二次鉱物生成を考慮した完全飽和線の低応力部分について試験により確認しモデルに反映した。加えて、これまで平衡膨潤量と完全飽和線は一致するとしたモデル化に関し、平成 26 年度に試験で確認したモンモリロナイト

含有量が減少する程一致しない点が二次鉱物生成ケースでも影響が懸念されることから、膨潤量試験により圧密過程と膨潤過程の乾燥密度-応力関係の勾配より、非可逆比とモンモリロナイト量の関係でモデル化の検討をした。さらに、せん断挙動に関して等体積一面せん断試験に基づきモデル化し、ベントナイトの限界状態線が e - $\log P$ 平面で限界状態線は曲線となる傾向があることを確認した成果について、試験データが鉛直応力の違いによりストレスパスが異なったことから、鉛直応力(拘束圧)の影響を把握しモデル化検討に反映した。

2) 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：3.2 及び 3.3)

化学・力学連成モデル試験(長期試験)について、平成 26 年度の Ca 型化の変質ケースの検討と同様に、Na 型モンモリロナイトの溶解ケースに関して、化学的挙動を連成した長期力学挙動データを取得、試験体を解体して変質状況を分析した。長期評価へ反映事項をとりまとめた。

(3) 人工バリア評価の初期条件の設定 (本報告書：第 4 章)

1) セメント系材料の熱影響による結晶化の条件に関する試験 (本報告書：4.1)

これまでに結晶化条件を確認するために実施してきた定温度試験に関して、試験水準によっては結晶化が進行中であることから、試験を継続してデータを取得し、これまでに暫定的に整理した結晶化条件の信頼性を向上させた。

2) セメント系材料の熱変質が初期条件へ及ぼす影響に関する検討 (本報告書：4.2)

人工バリアの制限温度 80℃以下でセメント系材料の C-S-H の結晶化がこれまでの試験結果より懸念されることから、結晶化による物性値への影響について検討した。検討項目は、試験による物性値影響の確認を進めるにあたり、試験体作製等の試験方法の検討、及び、結晶化により接触する液相の pH が低下することから核種の溶解度、分配係数への影響に関する文献調査によりその影響等を調査した。

(4) HMC 連成解析手法の検討 (本報告書：第 5 章)

1) HMC 連成解析に関わる化学解析手法に関する検討(本報告書：5.1)

これまでの HMC 連成解析手法に関する検討での化学解析結果において、力学解析との連成の有無で解析結果に差があったため、化学解析手法やデータの受渡し方法について検証し適正な方法を確認した。3.3 の長期性能評価のための化学・力学連成モデル試験の条件で化学解析を実施し、分析結果と比較することで化学解析手法の課題を検討した。

2) 処分場 2 次元断面における力学-化学連成解析(本報告書：5.2)

HMC 連成解析の初期条件のうち処分場断面における緩衝材の乾燥密度は、断面で均一ではなく、現実的には施工方法による乾燥密度の不均一があることが考えられる。そのため、施工条件の影響を考慮した力学解析を実施し、処分場断面の緩衝材の乾燥密度分布を検討した。

これらの初期条件を考慮した処分場閉鎖後の HMC 連成解析を行ない、人工バリアの施工条件、化学変質及び長期力学挙動の関連について検討した。

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)
- [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 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 (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－(2015)
- [5] 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－JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, (2005)
- [6] 電気事業連合，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取りまとめ－，JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 根拠資料集 4-2 (2005)
- [7] (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 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 1 分冊) －人工バリアの長期挙動の評価－，pp.7-28~7-34 (2013)

