

平成 28 年度
地層処分技術調査等事業
TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発
報 告 書
(第 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 29 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28年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発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 28 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発は、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 28 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上－
	第 2 分冊	平成 28 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－炭素 14 長期放出挙動評価－
	第 3 分冊	平成 28 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－ナチュラルアナログ調査－
◎	第 4 分冊	平成 28 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－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 28 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発－ガス移行連成挙動評価手法の開発－

はじめに

長半減期低発熱放射性廃棄物（以下、TRU 廃棄物という。）の処分方策については、原子力委員会での方針等（平成 6 年の原子力長期計画等）を受けて、「TRU 廃棄物処分概念検討書」（以下、第 1 次 TRU レポート）、「TRU 廃棄物処分技術検討書—第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—」（以下、第 2 次 TRU レポート）によって、その地層処分の技術的成立性が示され、平成 19 年 6 月には最終処分法の一部の改正により、地層処分の対象廃棄物に追加された。これに伴い、平成 20 年 3 月に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」及び「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」が改定され、併置処分の実施も念頭に、TRU 廃棄物と高レベル放射性廃棄物は地層処分事業という統合された計画の中で、平成 40 年代後半を目途に最終処分事業を開始するというスケジュールが示されている。また、同改正法は平成 20 年 4 月より施行され、NUMO が高レベル放射性廃棄物の地層処分に加え、TRU 廃棄物の地層処分の実施主体としての認可を受けた。これらの背景を踏まえて、TRU 廃棄物の処分に向けた技術開発については、TRU 廃棄物の地層処分に関する全体基本計画（以下、基盤研究開発計画）に示されるように、高レベル放射性廃棄物処分の技術開発との整合を図りつつ、併置処分の技術的成立性をより確実にするための検討を含め、地層処分事業のスケジュールを考慮して進める必要がある。そして、NUMO が必要な技術開発等へ直接的に反映させるために、処分事業に先行して技術基盤の整備を進めることに加え、科学的知見の拡充による技術的信頼性や安全性の向上を図るために、国の基盤研究開発として実施することが期待されている。

平成 27 年 5 月には、平成 26 年 4 月に閣議決定されたエネルギー基本計画や、同年 5 月に公表された放射性廃棄物 WG の「中間とりまとめ」を踏まえ、最終処分法に基づく基本方針の改定（閣議決定）が行われた。改定のポイントは、①現世代の責任と将来世代の選択可能性、②全国的な国民理解、地域理解の醸成、③国が前面に立った取組、④事業に貢献する地域に対する支援、⑤推進体制の改善等であり、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、人工バリア材および地質媒体への収着分配係数が小さく、レファレンスケースの被ばく線量評価では高レベル放射性廃棄物に比べ 2 桁以上高いことが示されている（第 2 次 TRU レポートのレファレンスケースでは最大線量が処分後 10,000 年で $2\mu\text{Sv/y}$ とされている）ヨウ素 129 および炭素 14 の低減対策に加え、多様な廃棄体が存在し、HLW のようなオーバーパックの機能がない坑道集積型の処分場概念する TRU 廃棄物の処分では、大量のセメント系材料を使用することや金属腐食等によるガス発生による人工バリアの長期挙動への影響があげられる。

これらの重要課題に対して、TRU 廃棄物処分の技術開発において、TRU 廃棄物処分の重要核種であるヨウ素 129（グループ 1）および炭素 14（グループ 2）の影響を低減するための代替技術の開発として、10 万年以上のヨウ素閉じ込め性能を目標とした複数のヨウ素固化体開発に関し

て、その処理プロセスの成立性の見通しを示すとともに、長期評価のためのヨウ素放出の評価モデルを提案した。一方、炭素 14 対策としては、ソースタームの現実的な評価として、インベントリ設定方法の基本的な考え方を示すとともに、金属の腐食や炭素 14 浸出率のデータを一部取得して、長期予測のためのモデル化を検討した。さらに、炭素 14 の 10 半減期に相当する 6 万年間の閉じ込めのための容器を開発し、その実現性を示した。これらの成果により、環境条件に応じた評価・概念設計に対応できる基礎的な技術・手法を整備することができたが、それらを用いた長期安全性評価の信頼性を確保するためには、これまでに提案、構築した評価手法、評価モデルの信頼性を向上させるとともに、その説明の妥当性について十分な根拠を示すことが必要である。

また、精密調査地区の選定時に、対象となる地質環境に応じた予備的安全評価や施設の概念設計を実現可能な現実的な条件で実施可能とするため、材料および地質環境の多様性に対応した、人工バリアの長期挙動に係わるデータ取得ならびに評価モデルの開発が行われたが、さらにその精緻化、信頼性向上が必要である。

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

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

- (1) ヨウ素 129 対策技術の信頼性向上
- (2) 炭素 14 長期放出挙動評価
- (3) ナチュラルアナログ調査
- (4) 人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア評価の初期条件の設定
- (5) ガス移行連成挙動評価手法の開発

本分冊（第 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 28 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	1-3
1.3 前フェーズ(平成 19 年度～24 年度) までの成果と課題	1-4
(1) セメント系材料の長期変質挙動の確証試験の成果.....	1-5
(2) セメントーベントナイト相互影響の確証試験の成果.....	1-6
(3) 人工バリア性能評価解析の高度化の成果	1-7
(4) 人工バリアの長期挙動の評価で抽出された主な課題.....	1-8
1.4 本フェーズ(平成 25 年度から)の全体計画.....	1-9
1.5 各項目の 5 年間の検討内容と平成 25 年度からの成果概要.....	1-14
(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.....	1-14
(2) 緩衝材の連成解析に関わる水理学特性に関する試験とモデル化.....	1-18
(3) 人工バリア評価の初期条件の設定	1-20
(4) HMC 連成解析手法の検討.....	1-22
1.6 平成 28 年度の実施事項.....	1-23
(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 (第 2 章)	1-23
(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 (第 3 章)	1-24
(3) 人工バリア評価の初期条件の設定 (第 4 章)	1-25
(4) HMC 連成解析手法の検討 (第 5 章)	1-25
1 章の参考文献	1-26
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 ベントナイトからのゼオライト生成その場観察試験.....	2-3
(1) 試験方法	2-4
(2) 干渉計による観察結果	2-6
(3) 溶液分析	2-18
(4) 変質相の観察と分析.....	2-22
(5) 過飽和度と核形成の待ち時間の関係	2-37
2.1.2 二次鉱物生成に関するシリンジ試験	2-38
(1) シリンジ試験方法.....	2-38
(2) シリンジ試験結果.....	2-39
(3) 変質相のマイクロ XRD 分析	2-43

(4) 変質相の FESEM-EDS 観察.....	2-44
(5) AFM 観察.....	2-51
(6) 間隙水の化学組成.....	2-53
(7) リートベルト解析を用いたシリンジ内ベントナイトの鉍物量比測定.....	2-57
2.1.3 二次鉍物生成挙動のモデル化に関する検討.....	2-63
(1) 均質核形成モデル.....	2-63
(2) 不均質核形成モデル.....	2-65
(3) ベントナイトのゼオライト化の核形成モデル.....	2-67
2.1.4 ベントナイト系材料の変質によるゼオライト系二次鉍物の生成に関する モデル化のまとめ.....	2-69
2.2 セメント-ベントナイト接触部の挙動把握.....	2-70
2.2.1 セメント-ベントナイト接触試料浸漬試験及び分析.....	2-70
(1) 分析試料.....	2-70
(2) 分析方法.....	2-72
(3) 分析結果.....	2-75
(4) セメント-ベントナイト接触試料浸漬試験及び分析のまとめ.....	2-94
2.2.2 セメント-ベントナイト接触供試体 (Nagra 試料) の分析.....	2-98
(1) 分析試料.....	2-99
(2) BL15A1 による XAFS 分析.....	2-100
(3) Box core1 の XAFS 分析結果.....	2-104
(4) セメント-ベントナイト接触供試体 (Nagra 試料) の分析のまとめ.....	2-109
2.2.3 セメント-ベントナイト接触部の挙動把握のまとめ.....	2-110
2.3 ベントナイト系材料の溶解モデルの高度化.....	2-111
2.3.1 低乾燥密度領域のモンモリロナイト溶解挙動の試験データ取得.....	2-111
(1) 試験方法.....	2-112
(2) 試験結果.....	2-113
2.3.2 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.....	2-114
(1) 緒論.....	2-114
(2) 解析方法.....	2-115
(3) 解析結果.....	2-124
2.3.3 ベントナイト系材料の溶解モデルの高度化まとめ.....	2-139
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.....	2-140
2.4.1 多様なセメント材料の物質移行特性のモデル化に関する課題の整理.....	2-140
(1) セメントペーストの拡散係数予測モデルの概要.....	2-141
(2) 拡散係数予測モデルの RegionIII と混合セメントへの適用拡大に関する	

これまでの成果と課題の検討	2-149
(3) 多様なセメント材料の物質移行特性のモデル化に関するまとめと課題の整理	2-156
2.4.2 モルタル材料への適用性に関する課題の整理.....	2-157
(1) モルタル材料の拡散係数予測モデル（マルチスケール拡散係数予測モデル）の概要.....	2-157
(2) マルチスケール拡散係数予測モデルによる予測結果と実測値の関係	2-160
(3) 溶脱後の遷移帯が物質移動に及ぼす影響についての調査.....	2-161
(4) モルタル材料への適用性に関するまとめと課題の整理	2-171
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	2-171
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まとめ	2-172
2章の参考文献	2-174
2章付録 セメント変質試験結果及び解析結果	2-177
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 概要	3-1
3.2 力学挙動に関する試験とモデル化.....	3-5
3.2.1 使用材料	3-5
(1) モンモリロナイト.....	3-5
(2) ケイ砂.....	3-6
(3) 人工ベントナイト.....	3-6
3.2.2 ベントナイト試料の物理試験	3-7
3.2.3 完全飽和線のモデル化（排気一次元圧縮試験）	3-8
(1) アムスラーを用いた試験手順	3-10
(2) 三軸試験装置を用いた試験手順.....	3-11
(3) 試験条件	3-14
(4) 試験結果	3-15
(5) モデル化検討（完全飽和線）	3-16
3.2.4 膨潤挙動取得試験（荷重制御膨潤量試験）	3-30
(1) これまでの成果	3-30
(2) 平成28年度の試験のねらい.....	3-36
(3) 試験結果	3-38
3.2.5 せん断挙動に関するモデル化	3-42
(1) これまでの成果	3-42
(2) せん断挙動に対する変質影響評価	3-54

(3) せん断挙動試験における供試体寸法の検討	3-60
3.2.6 力学挙動に関する試験とモデル化のまとめ	3-67
(1) 完全飽和線のモデル化（排気一次元圧縮試験）	3-67
(2) 膨潤挙動取得試験（荷重制御膨潤量試験）	3-68
(3) せん断挙動に関するモデル化	3-69
3.3 水理挙動に関するモデル化.....	3-71
3.3.1 これまでの成果	3-71
(1) Kozeny-Carman 則	3-71
(2) XRD を用いた膨潤性粘土鉱物の比表面積の取得	3-72
(3) 2層膨潤含水比と乾燥密度の関係.....	3-77
(4) 2層膨潤含水比を用いた Kozeny-Carman 則の適用	3-79
(5) 内間隙と外間隙の分離	3-80
(6) 内間隙と外間隙を考慮した Kozeny-Carman 則.....	3-82
3.3.2 Ca 型化を考慮した Kozeny-Carman 則.....	3-83
3.3.3 ベントナイト系人工バリアの Ca 形化の考慮方法の検討	3-84
3.3.4 水理挙動に関するモデル化のまとめ	3-92
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	3-93
3 章の参考文献	3-94
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変質条件の把握（C-S-H の結晶化条件）	4-1
4.1.1 合成 C-A-S-H による定温度試験	4-2
(1) 定温度試験の方法.....	4-2
(2) 分析方法	4-4
(3) 試験結果	4-8
(4) 合成 C-A-S-H による定温度試験のまとめ.....	4-26
4.1.2 合成 C-S-H のトバモライト含有量.....	4-27
(1) トバモライト含有量を測定した合成 C-S-H	4-28
(2) 合成 C-S-H におけるトバモライト含有量の解析方法.....	4-29
(3) 解析結果	4-30
(4) 合成 C-S-H のトバモライト含有量のまとめ	4-32
4.1.3 混合セメントの紛体試料による定温度試験	4-32
(1) 定温度試験の方法.....	4-32
(2) 分析方法	4-33
(3) 試験結果	4-34
(4) 混合セメント粉末の定温度試験のまとめ	4-42

4.1.4	セメント系材料の熱変質条件の把握 (C-S-H の結晶化条件) のまとめ	4-42
4.2	セメント系材料の熱変質 (C-S-H の結晶化) が材料物性値に及ぼす影響	4-43
4.2.1	定温度試験の方法	4-43
4.2.2	分析方法	4-44
(1)	ペースト硬化体の質量および長さ変化	4-44
(2)	XRD による鉱物の同定	4-44
(3)	Ca(OH) ₂ の定量	4-45
(4)	EPMA による Ca/Si モル比の測定	4-45
(5)	水銀圧入法による空隙径分布	4-46
(6)	窒素吸着法による空隙径分布	4-46
(7)	SEM による水和物の形態観察	4-46
(8)	モルタル供試体の質量	4-46
(9)	モルタル供試体の長さ変化	4-46
4.2.3	OPC 硬化体の定温度試験結果	4-47
(1)	OPC ペースト硬化体の質量および長さ変化	4-47
(2)	鉱物の同定	4-49
(3)	Ca(OH) ₂ の定量	4-51
(4)	EPMA による Ca/Si モル比	4-53
(5)	水銀圧入法による空隙径分布	4-57
(6)	窒素吸着法による空隙径分布	4-60
(7)	SEM による水和物の形態観察	4-63
(8)	モルタル供試体の質量	4-70
(9)	モルタル供試体の長さ変化	4-71
(10)	試験結果のまとめ	4-71
4.2.4	混合セメント硬化体の定温度試験結果	4-72
(1)	供試体の作製	4-72
(2)	ペースト硬化体の質量および長さ変化	4-73
(3)	鉱物の同定	4-73
(4)	Ca(OH) ₂ の定量	4-74
(5)	EPMA による Ca/Si モル比	4-76
(6)	水銀圧入法による空隙径分布	4-78
(7)	窒素吸着法による空隙径分布	4-80
(8)	SEM による水和物の形態観察	4-81
(9)	モルタル供試体質量	4-85
(10)	モルタル供試体の長さ変化	4-85
4.2.5	セメント系材料の熱変質 (C-S-H の結晶化) が材料物性値に及ぼす影響の	

まとめ	4-86
4.3 経年コンクリートの調査	4-87
4.3.1 経年コンクリート試料	4-87
(1) セメント工場キルン下のコンクリートコア	4-87
(2) 50年経過した FA コンクリート試験体	4-88
4.3.2 試料調製	4-89
(1) キルン下 50°C コア	4-89
(2) FA コンクリート試験体	4-90
4.3.3 分析項目	4-91
(1) コア断面の EPMA 分析	4-91
(2) 電子顕微鏡観察	4-91
(3) XRD/リートベルト解析による分析	4-92
(4) ペースト部分の化学組成	4-92
(5) 固体 NMR	4-93
4.3.4 セメント工場キルン下のコンクリートコア (キルン下 50°C コア) の試験 結果	4-93
(1) コア断面の EPMA 分析	4-93
(2) 電子顕微鏡観察	4-96
(3) XRD/リートベルト解析による分析	4-102
(4) ペースト部分の化学組成	4-103
(5) 固体 NMR	4-104
4.3.5 50年経過した FA コンクリートの試験結果	4-107
(1) 試験体断面の EPMA 分析	4-107
(2) 電子顕微鏡観察	4-110
(3) XRD/リートベルト解析による分析	4-117
(4) ペースト部分の化学組成	4-118
(5) 固体 NMR	4-119
4.3.6 経年コンクリートの調査のまとめ	4-122
(1) 熱による変質	4-122
(2) 水和反応	4-122
(3) C-S-H の組成	4-123
4.4 人工バリア評価の初期条件の設定のまとめ	4-124
4 章の参考文献	4-125
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	ベントナイト系材料の溶解変質モデルの検討	5-1
(1)	力学挙動試験を模擬した計算	5-2
(2)	人工バリア体系を模擬した計算	5-7
5.1.2	ベントナイト系材料の透水係数モデルに関する検討	5-32
(1)	Kozeny-Carman 則に基づいて整理した透水係数	5-32
(2)	計算方法	5-34
(3)	計算結果	5-37
5.1.3	化学-力学連成解析における連成手法に関する検討	5-40
(1)	本検討での連成解析手法における受け渡し条件	5-40
(2)	連成解析手法に関する事例の調査結果	5-42
(3)	化学-力学連成解析手法に関する検討	5-44
5.1.4	HMC 連成解析に関わる化学解析手法に関する検討のまとめ	5-45
5.2	HMC 連成解析に関わる力学解析手法に関する検討	5-46
5.2.1	化学変質の影響を考慮した力学構成モデル	5-46
(1)	力学解析方法の概要	5-46
(2)	化学変質の影響を考慮した構成モデル	5-50
5.2.2	初期条件に施工時の密度分布を考慮した閉鎖後長期の化学解析	5-56
(1)	計算ケース	5-56
(2)	計算条件	5-57
(3)	計算結果	5-63
5.2.3	初期条件に施工条件を考慮した閉鎖後長期の化学-力学連成解析	5-79
(1)	シミュレーション概要	5-79
(2)	解析条件	5-80
(3)	解析結果（初期乾燥密度：均一分布）	5-82
(4)	解析結果（初期乾燥密度：不均一分布）	5-98
(5)	10 万年後の透水係数分布	5-117
5.2.4	HMC 連成解析に関わる力学解析手法に関する検討のまとめ	5-118
5.3	HMC 連成解析手法の検討のまとめ	5-120
5 章	参考文献	5-121
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（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（第 3 章）	6-2
6.3	人工バリア評価の初期条件の設定（第 4 章）	6-2
6.4	HMC 連成解析手法の検討のまとめ（第 5 章）	6-3
6.5	平成 29 年度の 5 年間の取りまとめに向けて	6-3

目 次

図 1.1.1-1 地層処分事業と技術分野の関連	1-1
図 1.1.1-2 TRU 廃棄物処分場の人工バリアの処分概念（グループ 1, 2）の例とその 閉鎖後長期の挙動に影響を与える事象.....	1-2
図 1.1.1-3 人工バリアの閉鎖後長期（化学変質）挙動と工学的な性能（透水(水理)力学 挙動）の関連.....	1-2
図 1.2.1-1 人工バリアの建設から閉鎖後長期の変遷過程と本検討の関係及び検討 概要	1-3
図 1.3.1-1 人工バリアの建設から閉鎖後長期の変遷のイメージ	1-4
図 1.3.1-2 人工バリアの化学変質挙動と力学、透水挙動の関連	1-5
図 1.4.1-1 課題の抽出と研究内容の策定	1-9
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 （再掲）	1-11
図 1.4.1-3 二次鉱物の生成の力学挙動への影響のイメージと検討課題.....	1-11
図 1.4.1-4 検討項目と関連.....	1-13
図 1.4.1-5 平成 25 年以降の検討項目の関連と成果目標.....	1-13
図 1.5.1-1 ベントナイトの変質に伴う二次鉱物の生成挙動に関する試験結果とモデル 化案の概要	1-15
図 1.5.1-2 セメント-ベントナイト接触部分の変質状態に関する XAFS 分析結果試料 （建設後 12 年経過の試料）	1-16
図 1.5.1-3 圧密下のモンモリロナイト実効反応表面積の定式化	1-17
図 1.5.1-4 長期化学解析における本検討での定式化の効果.....	1-17
図 1.5.1-5 セメント系材料の拡散係数モデルの成果概要	1-18
図 1.5.1-6 緩衝材の力学挙動に関する試験結果（圧密挙動）	1-19
図 1.5.1-7 ベントナイトの膨潤挙動の非可逆比による整理.....	1-19
図 1.5.1-8 粉末試料による定温度試験結果(XRD での結晶化確認)	1-21
図 1.5.1-9 人工バリアの化学変質を反映した長期力学挙動解析の結果 （体積ひずみ・10 万年後）	1-23
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 二次鉱物生成過程に関するモデル化案.....	2-3
図 2.1.1-1 ゼオライト生成その場観察の試験体系.....	2-4
図 2.1.1-2 クリノプチロライト添加物の FESEM-EDS 観察分析	2-6
図 2.1.1-3 ALT-VSI5 の核形成過程のその場観察結果(477.5 h 以降).....	2-7

図 2.1.1-4	ALT-VSI5 の核形成過程のその場観察結果 (AOI 拡大)	2-8
図 2.1.1-5	ALT-VSI6 の核形成過程のその場観察結果(261.3 h 以降)	2-10
図 2.1.1-6	ALT-VSI6 の核形成過程のその場観察結果 (AOI 拡大)	2-11
図 2.1.1-7	ALT-VSI7 の核形成過程のその場観察結果(400.6 h 以降)	2-13
図 2.1.1-8	ALT-VSI7 の核形成過程のその場観察結果 (AOI 拡大)	2-14
図 2.1.1-9	ALT-VSI8 の核形成過程のその場観察結果(203.2 h 以降)	2-16
図 2.1.1-10	ALT-VSI8 の核形成過程のその場観察結果 (AOI 拡大)	2-17
図 2.1.1-11	通水溶液の Si, Al 組成	2-21
図 2.1.1-12	圧縮圧力とポア内の推定流速と平衡状態を維持するための臨界流速	2-21
図 2.1.1-13	ALT-VSI5 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 1)	2-23
図 2.1.1-14	ALT-VSI5 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 2)	2-23
図 2.1.1-15	ALT-VSI5 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 3)	2-24
図 2.1.1-16	ALT-VSI5 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 4)	2-24
図 2.1.1-17	ALT-VSI5 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 5)	2-25
図 2.1.1-18	ALT-VSI5 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 6)	2-25
図 2.1.1-19	ALT-VSI6 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 1)	2-26
図 2.1.1-20	ALT-VSI6 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 2)	2-27
図 2.1.1-21	ALT-VSI6 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 3)	2-27
図 2.1.1-22	ALT-VSI7 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 1)	2-28
図 2.1.1-23	ALT-VSI7 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 2)	2-28
図 2.1.1-24	ALT-VSI7 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 3)	2-29
図 2.1.1-25	ALT-VSI7 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 4)	2-29
図 2.1.1-26	ALT-VSI7 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 5)	2-30
図 2.1.1-27	ALT-VSI7 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 6)	2-30
図 2.1.1-28	ALT-VSI8 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 1)	2-31
図 2.1.1-29	ALT-VSI8 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 2)	2-31
図 2.1.1-30	ALT-VSI8 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 3)	2-32
図 2.1.1-31	ALT-VSI8 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 4)	2-32
図 2.1.1-32	ALT-VSI8 変質相の FESEM-EDS 観察 (その 5)	2-33
図 2.1.1-33	干渉計試験後試料のマイクロ XRD 分析	2-34
図 2.1.1-34	ALT-VSI5 試料の AFM 観察	2-35
図 2.1.1-35	ALT-VSI7 試料の AFM 観察	2-36
図 2.1.1-36	ALT-VSI8 試料の AFM 観察	2-36
図 2.1.1-37	過飽和度と核形成待ち時間の関係	2-37
図 2.1.2-1	シリンジ試験の体系	2-39
図 2.1.2-2	シリンジ体積の時間変化	2-41

図 2.1.2-3	シリンジの試料乾燥密度の時間変化	2-42
図 2.1.2-4	随伴鉍物の再添加量とシリンジ内試料の成長速度(a)と待ち時間(b)の 関係	2-43
図 2.1.2-5	シリンジ試験試料のマイクロ XRD 測定結果.....	2-44
図 2.1.2-6	ALT17 試料の FESEM-EDS 観察分析 (その 1)	2-45
図 2.1.2-7	ALT17 試料の FESEM-EDS 観察分析 (その 2)	2-45
図 2.1.2-8	ALT17 試料の FESEM-EDS 観察分析 (その 3)	2-46
図 2.1.2-9	ALT17 試料の FESEM-EDS 観察分析 (その 4)	2-47
図 2.1.2-10	ALT18 試料の FESEM-EDS 観察分析 (その 1)	2-47
図 2.1.2-11	ALT18 試料の FESEM-EDS 観察分析 (その 2)	2-48
図 2.1.2-12	ALT18 試料の FESEM-EDS 観察分析 (その 3)	2-48
図 2.1.2-13	ALT19 試料の FESEM-EDS 観察分析 (その 1)	2-49
図 2.1.2-14	ALT19 試料の FESEM-EDS 観察分析 (その 2)	2-49
図 2.1.2-15	ALT20 試料の FESEM-EDS 観察分析	2-50
図 2.1.2-16	ALT21 試料の FESEM-EDS 観察分析	2-50
図 2.1.2-17	ALT17 試料の AFM 観察(a: 高さ像 ; b: 微分像).....	2-51
図 2.1.2-18	ALT18 試料の AFM 観察(a: 高さ像 ; b: 微分像).....	2-51
図 2.1.2-19	ALT19 試料の AFM 観察(a: 高さ像 ; b: 微分像).....	2-52
図 2.1.2-20	ALT20 試料の AFM 観察(a: 高さ像 ; b: 微分像).....	2-52
図 2.1.2-21	ALT21 試料の AFM 観察(a: 高さ像 ; b: 微分像).....	2-53
図 2.1.2-22	シリンジの随伴鉍物組成と間隙水のゼオライト過飽和度指数.....	2-55
図 2.1.2-23	フィリップサイトの過飽和度とシリンジの成長速度の関係.....	2-56
図 2.1.2-24	参照試料の XRD 測定とそのリートベルト解析結果.....	2-57
図 2.1.2-25	シリンジ試験試料 ALT17 の試験前後の XRD 測定とそのリートベルト 解析結果(a: 試験前; b: 試験後).....	2-58
図 2.1.2-26	シリンジ試験の反応前後の鉍物量比の比較	2-59
図 2.1.2-27	随伴鉍物添加量とクリノプチロライト増加量(mass%)	2-60
図 2.1.2-28	間隙水の過飽和度に対するリートベルト解析によるクリノプチロライト 成長速度の関係	2-61
図 2.1.2-29	シリンジの成長速度とリートベルト解析によるクリノプチロライト成長 速度の比較	2-61
図 2.1.2-30	シリンジ膨張速度とリートベルト解析による鉍物体積変化速度の比較 ..	2-62
図 2.1.3-1	核形成の待ち時間と過飽和度の関係	2-64
図 2.1.3-2	不均質核形成の模式図.....	2-65
図 2.1.3-3	過飽和度と核形成の待ち時間の関係	2-68
図 2.2.1-1	セメントーベントナイト接触試料①.....	2-71

図 2.2.1-2	セメント-ベントナイト接触試料の分析位置.....	2-72
図 2.2.1-3	セメント-ベントナイト接触試料①の薄片	2-75
図 2.2.1-4	セメント-ベントナイト接触試料の元素濃度分布(1).....	2-77
図 2.2.1-5	セメント-ベントナイト接触試料の元素濃度分布(2).....	2-78
図 2.2.1-6	セメント-ベントナイト接触試料の平均濃度分布(1).....	2-79
図 2.2.1-7	セメント-ベントナイト接触試料の平均濃度分布(2).....	2-80
図 2.2.1-8	セメント側の XRD 測定結果	2-81
図 2.2.1-9	ベントナイト側の XRD 測定結果 (未処理)	2-82
図 2.2.1-10	エチレングリコール処理後のベントナイト側の XRD 測定結果	2-82
図 2.2.1-11	エチレングリコール処理後のベントナイト側の XRD 測定結果 (拡大図)	2-83
図 2.2.1-12	希塩酸溶解鉍物量および C-S-H 量.....	2-84
図 2.2.1-13	層間陽イオン量.....	2-85
図 2.2.1-14	XANES スペクトル測定結果.....	2-86
図 2.2.1-15	XANES スペクトル測定結果 (拡大図)	2-86
図 2.2.1-16	標準試料の XANES スペクトル (BL9A)	2-87
図 2.2.1-17	3~4mm のパターンフィッティング結果.....	2-88
図 2.2.1-18	パターンフィッティングの結果 (Ca 中の鉍物割合)	2-88
図 2.2.1-19	試料①中の CaO を含む鉍物量 (CaO 換算)	2-89
図 2.2.1-20	試料①薄片の Ca マッピング位置.....	2-90
図 2.2.1-21	試料①薄片の Ca マッピング結果.....	2-90
図 2.2.1-22	試料①薄片 L1 の XANE スペクトル (接触界面から 12mm まで)	2-91
図 2.2.1-23	標準試料の XANES スペクトル (BL15A1)	2-92
図 2.2.1-24	接触界面から 1mm のパターンフィッティング結果	2-92
図 2.2.1-25	L1 のパターンフィッティング結果 (CaO 中の鉍物割合)	2-93
図 2.2.1-26	L2 のパターンフィッティング結果 (CaO 中の鉍物割合)	2-93
図 2.2.1-27	L1 の CaO を含む鉍物量 (CaO 換算)	2-94
図 2.2.1-28	L2 の CaO を含む鉍物量 (CaO 換算)	2-94
図 2.2.1-29	セメント-ベントナイト接触試料の Ca 濃度マッピング(1).....	2-96
図 2.2.1-30	セメント-ベントナイト接触試料の Ca 濃度マッピング(2).....	2-97
図 2.2.1-31	セメント-ベントナイト相互作用により生じるベントナイトの変質挙動の 概念図.....	2-98
図 2.2.2-1	コンクリート-ベントナイト混合土 Box core1 の研磨前写真.....	2-99
図 2.2.2-2	Box core1 の薄片	2-99
図 2.2.2-3	透過法および蛍光法による標準試料の XANES スペクトル	2-101
図 2.2.2-4	試料①L2 接触界面から 0.5mm の XANES スペクトル	2-101

図 2.2.2-5	試料①L2 接触界面から 0.9mm の XANES スペクトル	2-102
図 2.2.2-6	試料①L2 接触界面から 11.5mm の XANES スペクトル	2-102
図 2.2.2-7	透過法のスペクトルによる解析結果 (試料①L2)	2-103
図 2.2.2-8	蛍光法のスペクトルによる解析結果 (試料①L2)	2-104
図 2.2.2-9	Ca マッピング位置および Ca マッピング結果 (Nagra Box core1)	2-105
図 2.2.2-10	薄片の XAFS 測定位置 (Nagra Box core1)	2-105
図 2.2.2-11	Nagra Box core1 位置①の XANES スペクトル	2-106
図 2.2.2-12	Nagra Box core1 位置①のパターンフィッティング結果	2-106
図 2.2.2-13	Nagra Box core1 位置①の XANES スペクトル	2-107
図 2.2.2-14	Nagra Box core1 位置①および②のパターンフィッティング結果	2-108
図 2.2.2-15	Nagra Box core1 位置③および④のパターンフィッティング結果	2-108
図 2.2.2-16	Nagra Box core1 ①-0.12 と④-3.4 の XANES スペクトルの比較	2-109
図 2.3.1-1	低密度から高密度までのモンモリロナイト溶解速度試験結果	2-112
図 2.3.1-2	モンモリロナイトの溶解速度測定試料 (a: 乾燥密度 0.00017; b: 0.012; c: 0.051Mg/m ³)	2-112
図 2.3.1-3	低密度モンモリロナイトゲルの溶解速度の密度依存性(a: 乾燥密度 vs. 溶解速度実測値; b: 乾燥密度 vs. 規格化された端面面積比)	2-113
図 2.3.2-1	円板状粒子の形状	2-116
図 2.3.2-2	2つの platelet の位置関係	2-117
図 2.3.2-3	platelet の配置に関する変数の定義	2-118
図 2.3.2-4	相対距離および相対角度と無次元ポテンシャルとの関係 (配置角度 $\alpha =$ 90deg.)	2-119
図 2.3.2-5	配置角度および相対角度と無次元ポテンシャルとの関係 (距離 $l/\sigma =$ 1.2)	2-119
図 2.3.2-6	2つの platelet の位置関係	2-120
図 2.3.2-7	遮蔽パラメータ δ の定義	2-124
図 2.3.2-8	剛体ポテンシャルによるモンテカルロ解析結果	2-126
図 2.3.2-9	剛体ポテンシャルと四重極ポテンシャルによるモンテカルロ解析結果の 比較(無次元密度 $N\sigma^3/V=0.25$, 左: 鳥瞰図, 右: 側面図)	2-128
図 2.3.2-10	剛体ポテンシャルと四重極ポテンシャルによるモンテカルロ解析結果の 比較 (無次元密度 $N\sigma^3/V=3.0$, 左: 鳥瞰図, 右: 側面図)	2-129
図 2.3.2-11	剛体ポテンシャルと四重極ポテンシャルによるモンテカルロ解析結果の 比較 (無次元密度 $N\sigma^3/V=4.0$, 左: 鳥瞰図, 右: 側面図)	2-130
図 2.3.2-12	剛体ポテンシャルと四重極ポテンシャルによるモンテカルロ解析結果の 比較(無次元密度 $N\sigma^3/V=5.0$, 左: 鳥瞰図, 右: 側面図)	2-131
図 2.3.2-13	遮蔽領域の可視化 (無次元密度 $N\sigma^3/V=0.25$, 遮蔽パラメータ $\delta/\sigma =$	

0.04)	2-133
図 2.3.2-14 遮蔽領域の可視化 (無次元密度 $N\sigma^3/V=3.0$, 遮蔽パラメータ $\delta/\sigma=0.04$)	2-133
図 2.3.2-15 遮蔽領域の可視化 (無次元密度 $N\sigma^3/V=4.0$, 遮蔽パラメータ $\delta/\sigma=0.04$)	2-134
図 2.3.2-16 遮蔽領域の可視化 (無次元密度 $N\sigma^3/V=5.0$, 遮蔽パラメータ $\delta/\sigma=0.04$)	2-134
図 2.3.2-17 剛体ポテンシャル解析 (圧密モデル) と四重極ポテンシャル解析 (分散モデル) の実効比端面積の比較	2-136
図 2.3.2-18 希薄条件における剛体ポテンシャル解析 (圧密モデル) と四重極ポテンシャル解析 (分散モデル) の実効比端面積の比較	2-136
図 2.3.2-19 剛体ポテンシャル解析 (圧密モデル)、四重極ポテンシャル解析 (分散モデル) および溶解速度実験から得られた反応表面積比 ESA/ESA_0 の比較	2-138
図 2.3.2-20 希薄条件における剛体ポテンシャル解析 (圧密モデル)、四重極ポテンシャル解析 (分散モデル) および溶解速度実験から得られた反応表面積比 ESA/ESA_0 の比較	2-138
図 2.4.1-1 セメントペーストの累積浸出液量と pH の関係 (TRU2 次とりまとめより)	2-141
図 2.4.1-2 拡散係数予測モデルの構成	2-142
図 2.4.1-3 反射電子像と輝度の分布	2-143
図 2.4.1-4 セメントペースト硬化体の反射電子像	2-144
図 2.4.1-5 水セメント比の異なる OPC 硬化体の自己相関関数 $S(r)$	2-145
図 2.4.1-6 自己相関関数から構築した 3 次元イメージ	2-146
図 2.4.1-7 空隙率と拡散係数の関係(黒塗り : 健全試料、白抜き : 溶脱試料)	2-146
図 2.4.1-8 50nm 以上の空隙量と拡散係数の関係	2-147
図 2.4.1-9 C-S-H の弾性係数と空隙率の関係	2-150
図 2.4.1-10 C-S-H の空隙率と拡散係数の関係	2-150
図 2.4.1-11 拡散係数の実測値と従来モデル[3]解析 (MI 値から解析) によって算出した拡散係数	2-151
図 2.4.1-12 C-S-H からの CaO 溶脱率とマイクロインデンテーション値の関係	2-151
図 2.4.1-13 C-S-H の空隙率と C-S-H の拡散係数の関係	2-152
図 2.4.1-14 セメント種ごとの溶脱率と拡散係数の関係	2-154
図 2.4.1-15 CaO 溶脱率と実測値から逆算した C-S-H の拡散係数	2-155
図 2.4.1-16 拡散係数の予測値と実測値の相関	2-156
図 2.4.2-1 マルチスケール拡散係数予測モデルの概要	2-158
図 2.4.2-2 溶脱過程モデルの概要及び溶脱に伴うモルタルの拡散係数の予測	2-159

図 2.4.2-3	モルタルの拡散係数の実測値と予測値(溶脱試料).....	2-161
図 2.4.2-4	O-2 試料断面の SEM/EDS 観察結果.....	2-166
図 2.4.2-5	O-3 試料断面の SEM/EDS 観察結果.....	2-167
図 2.4.2-6	O-4 試料断面の SEM/EDS 観察結果.....	2-168
図 2.4.2-7	F-1 試料断面の SEM/EDS 観察結果.....	2-169
図 2.4.2-8	B-1 試料断面の SEM/EDS 観察結果.....	2-170
図 3.2.1-1	クニゲル V1 の鉱物組成[6].....	3-2
図 3.2.1-2	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 3.2.1-3	本フェーズの全体計画のイメージ.....	3-3
図 3.2.1-4	力学試験のモデルへの反映イメージ.....	3-4
図 3.2.1-5	モデルの構築における本検討の位置付け.....	3-5
図 3.2.3-1	一次元圧縮試験の反映先と理論展開.....	3-9
図 3.2.3-2	一次元圧縮試験のモデル構築への反映イメージ.....	3-9
図 3.2.3-3	一次元排気圧縮試験の模式図.....	3-11
図 3.2.3-4	一次元排気圧縮試験結果の模式図.....	3-11
図 3.2.3-5	スマート三軸試験装置の全景.....	3-12
図 3.2.3-6	圧縮用アクチュエータの仕組み.....	3-13
図 3.2.3-7	CO ₂ パージ一次元排気圧縮試験状況.....	3-14
図 3.2.3-8	様々な溶液を用いた一次元排気圧縮試験結果.....	3-16
図 3.2.3-9	変質後人工ベントナイトの一次元圧縮試験結果.....	3-17
図 3.2.3-10	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.....	3-18
図 3.2.3-11	モンモリロナイト変質率と基準乾燥密度の関係.....	3-18
図 3.2.3-12	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.....	3-19
図 3.2.3-13	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.....	3-21
図 3.2.3-14	変質後人工ベントナイトの $e \sim \ln p'$ 関係.....	3-23
図 3.2.3-15	新しいパラメータを導入した完全飽和線.....	3-24
図 3.2.3-16	新しいパラメータを導入した $e \sim \log P$ 関係.....	3-24
図 3.2.3-17	新しいパラメータの効果.....	3-25
図 3.2.3-18	新しいパラメータを導入した完全飽和線.....	3-26
図 3.2.3-19	新しいパラメータを導入した完全飽和線 $e \sim \log P$ 関係.....	3-26
図 3.2.3-20	新しいパラメータの効果.....	3-27
図 3.2.3-21	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).....	3-28
図 3.2.3-22	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).....	3-29
図 3.2.4-1	モンモリロナイト含有率毎の膨潤量試験結果.....	3-31

図 3.2.4-2	e-logP 平面における膨潤量試験結果.....	3-31
図 3.2.4-3	e-logP 平面における膨潤量試験結果と完全飽和線.....	3-32
図 3.2.4-4	随伴鉱物の土骨格構造と膨潤性鉱物の分離のイメージ.....	3-33
図 3.2.4-5	試験後のモンモリロナイト含有率の計測方法.....	3-34
図 3.2.4-6	解体用スライサー.....	3-34
図 3.2.4-7	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 3.2.4-8	随伴鉱物の影響のイメージ.....	3-35
図 3.2.4-9	地盤材料の非可逆比（飯塚[10]に加筆）.....	3-36
図 3.2.4-10	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.....	3-36
図 3.2.4-11	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...3-37	
図 3.2.4-12	随伴鉱物の影響のモデル化のイメージ.....	3-38
図 3.2.4-13	一次元排気圧縮～吸水除荷（膨潤）試験時の乾燥密度－logP 関係.....	3-39
図 3.2.4-14	段階除荷時の膨潤量の経時変化.....	3-40
図 3.2.4-15	C_K とモンモリロナイト含有率の関係.....	3-40
図 3.2.4-16	非可逆比 Λ とモンモリロナイト含有率の関係.....	3-41
図 3.2.4-17	限界状態理論における非可逆比 Λ の意味.....	3-42
図 3.2.5-1	微粉碎モンモリロナイトの膨潤性能変化.....	3-43
図 3.2.5-2	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.....	3-43
図 3.2.5-3	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.....	3-44
図 3.2.5-4	せん断試験イメージ図.....	3-44
図 3.2.5-5	一面せん断試験機の全景.....	3-44
図 3.2.5-6	下せん断箱の凹凸を施したポーラスメタル.....	3-45
図 3.2.5-7	カオリンの等体積一面せん断試験中のストレスパス.....	3-46
図 3.2.5-8	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.....	3-46
図 3.2.5-9	せん断試験結果のイメージ.....	3-47
図 3.2.5-10	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.....	3-48
図 3.2.5-11	せん断変位とせん断応力の関係.....	3-49
図 3.2.5-12	ストレスパス.....	3-50
図 3.2.5-13	せん断試験中の供試体内の変化イメージ図.....	3-50
図 3.2.5-14	せん断試験成果のイメージ図.....	3-51
図 3.2.5-15	せん断試験中の乾燥密度の経時変化.....	3-52
図 3.2.5-16	せん断中の応力ひずみ関係と有効応力経路.....	3-53
図 3.2.5-17	拘束圧で正規化した有効応力経路.....	3-53
図 3.2.5-18	p_a -logp 平面、及び e-logp 平面での全試験過程における応力経路.....	3-54

図 3.2.5-19	膨潤挙動に対する変質影響評価のイメージ図.....	3-55
図 3.2.5-20	せん断挙動に対する変質影響評価のイメージ図.....	3-55
図 3.2.5-21	せん断試験成果のイメージ図.....	3-56
図 3.2.5-22	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.....	3-57
図 3.2.5-23	液種の違いによるせん断挙動の違い.....	3-58
図 3.2.5-24	液種の違いによるせん断挙動の違い（正規化した有効応力経路）.....	3-58
図 3.2.5-25	液種の違いによる各種応力の経時変化の違い.....	3-59
図 3.2.5-26	側面摩擦の推移.....	3-59
図 3.2.5-27	側面摩擦から算出した K_o 値の推移.....	3-60
図 3.2.5-28	様々な供試体寸法の一軸圧縮試験結果（応力～ひずみ関係）.....	3-63
図 3.2.5-29	供試体寸法と一軸圧縮試験結果のまとめ.....	3-66
図 3.2.5-30	供試体作製時の撒出厚と強度・剛性の関係.....	3-66
図 3.2.5-31	供試体寸法ごとの作製精度.....	3-66
図 3.2.5-32	$\phi 20\text{mm} \times H40\text{mm}$ の供試体の一軸圧縮試験結果.....	3-67
図 3.3.1-1	カオリナイトとモンモリロナイトの透水係数の比較.....	3-71
図 3.3.1-2	2層膨潤状態の概念.....	3-73
図 3.3.1-3	XRD によるモンモリロナイトの2層膨潤状態の計測.....	3-74
図 3.3.1-4	2層膨潤含水比計測用 XRD セル.....	3-75
図 3.3.1-5	XRD 回折パターン.....	3-76
図 3.3.1-6	XRD 回折パターンのピーク分離例.....	3-77
図 3.3.1-7	2層膨潤含水比と有効ベントナイト乾燥密度の関係（Na 型モンモリロナイト）.....	3-79
図 3.3.1-8	透水係数の算出手順.....	3-80
図 3.3.1-9	2層膨潤含水比を用いた Kozeny-Carman 則と実験結果の比較.....	3-80
図 3.3.1-10	Na モンモリロナイトの内間隙と外間隙の分離.....	3-81
図 3.3.1-11	内間隙と外間隙を考慮した Kozeny-Carman 則と実験結果の比較.....	3-83
図 3.3.2-1	透水係数に Ca 型化が及ぼす影響と本検討で得られた知見の比較.....	3-83
図 3.3.3-1	様々な屈曲率モデル.....	3-86
図 3.3.3-2	様々な屈曲率モデルを導入した Kozeny-Carman 則と実験結果の比較図.....	3-87
図 3.3.3-3	屈曲率モデルを導入した Kozeny-Carman 則と実験結果の比較.....	3-88
図 3.3.3-4	Ca 型化率毎の乾燥密度と透水係数の関係.....	3-89
図 3.3.3-5	Ca 型化の影響の補正係数のパラメータの効果.....	3-90
図 3.3.3-6	Ca 型化率毎の Ca 型化の影響の補正係数.....	3-91
図 3.3.3-7	Ca 型化を考慮した形状係数を用いた Kozeny-Carman 則による Ca 型化ごとの透水係数.....	3-91
図 4.1.1-1	C-A-S-H の構造モデル.....	4-7

図 4.1.1-2	初期試料の XRD 測定結果.....	4-9
図 4.1.1-3	C-S-H(①C/S=0.83(A/C=0, C/(S+A)=0.83), 50°C)の XRD 測定結果	4-9
図 4.1.1-4	C-S-H(②C/S=0.75(A/C=0.05, C/(S+A)=0.72), 50°C)の XRD 測定 結果	4-10
図 4.1.1-5	C-S-H(③C/S=0.83(A/C=0.05, C/(S+A)=0.80), 50°C)の XRD 測定 結果	4-10
図 4.1.1-6	C-S-H(④C/S=0.9(A/C=0.05, C/(S+A)=0.86), 50°C)の XRD 測定結果 ..	4-11
図 4.1.1-7	C-S-H(⑤C/S=1.1(A/C=0.05, C/(S+A)=1.04), 50°C)の XRD 測定結果 ..	4-11
図 4.1.1-8	C-S-H(⑥C/S=0.83(A/C=0.2, C/(S+A)=0.71), 50°C)の XRD 測定結果 ..	4-12
図 4.1.1-9	C-S-H(⑦C/S=0.9(A/C=0.2, C/(S+A)=0.76), 50°C)の XRD 測定結果	4-12
図 4.1.1-10	C-S-H(⑧C/S=1.1(A/C=0.2, C/(S+A)=0.90), 50°C)の XRD 測定結果 ..	4-13
図 4.1.1-11	C-S-H(⑨C/S=1.2(A/C=0.2, C/(S+A)=0.97), 50°C)の XRD 測定結果...4-13	
図 4.1.1-12	C-S-H(①C/S=0.83(A/C=0), C/(S+A)=0.83, 80°C)の XRD 測定結果 ...4-14	
図 4.1.1-13	C-S-H(②C/S=0.75(A/C=0.05, C/(S+A)=0.72), 80°C)の XRD 測定 結果	4-14
図 4.1.1-14	C-S-H(③C/S=0.83(A/C=0.05, C/(S+A)=0.80), 80°C)の XRD 測定 結果	4-15
図 4.1.1-15	C-S-H(④C/S=0.9(A/C=0.05, C/(S+A)=0.86), 80°C)の XRD 測定 結果	4-15
図 4.1.1-16	C-S-H(⑤C/S=1.1(A/C=0.05, C/(S+A)=1.04), 80°C)の XRD 測定 結果	4-16
図 4.1.1-17	C-S-H(⑥C/S=0.83(A/C=0.2, C/(S+A)=0.71), 80°C)の XRD 測定 結果	4-16
図 4.1.1-18	C-S-H(⑦C/S=0.9(A/C=0.2, C/(S+A)=0.76), 80°C)の XRD 測定結果 ..	4-17
図 4.1.1-19	C-S-H(⑧C/S=1.1(A/C=0.2, C/(S+A)=0.90), 80°C)の XRD 測定結果 ..	4-17
図 4.1.1-20	C-S-H(⑨C/S=1.2(A/C=0.2, C/(S+A)=0.97), 80°C)の XRD 測定結果 ..	4-18
図 4.1.1-21	C-A-S-H の C/S と C/S(S+A)の関係.....	4-19
図 4.1.1-22	Al 量の異なる C/S=0.8 の XRD チャート(8w).....	4-20
図 4.1.1-23	Al 量の異なる C/S=1.1 の XRD チャート(4w).....	4-20
図 4.1.1-24	C/(S+A)と結晶子径の関係	4-22
図 4.1.1-25	NMR 測定試料の XRD パターン.....	4-23
図 4.1.1-26	試料① [C/S=0.83(A/C=0), 50°C, 4w] NMR スペクトル.....	4-24
図 4.1.1-27	試料② [C/S=0.9(A/C=0.05, C/(S+A)=0.86), 50°C, 4w] NMR スペク トル	4-25
図 4.1.1-28	試料③ [C/S=0.9(A/C=0.2, C/(S+A)=0.76), 50°C, 4w] NMR スペク トル	4-26

図 4.1.1-29	合成 C-S-H 及び合成 C-A-S-H の結晶化条件	4-27
図 4.1.2-1	50°C, C/S=0.83 の C-S-H の XRD.....	4-28
図 4.1.2-2	80°C, C/S=0.83 の C-S-H の XRD.....	4-28
図 4.1.2-3	合成トバモライトと C-S-H の XRD パターン	4-29
図 4.1.2-4	C-S-H とトバモライトの混合試料	4-30
図 4.1.2-5	C-S-H 50°C 27w 試料の解析結果	4-31
図 4.1.2-6	定温度試験試料のトバモライト量.....	4-31
図 4.1.3-1	FAC15 の XRD 測定結果.....	4-35
図 4.1.3-2	FAC30 の XRD 測定結果.....	4-35
図 4.1.3-3	SC10 の XRD 測定結果.....	4-36
図 4.1.3-4	FAC15 の TG-DTA 曲線	4-37
図 4.1.3-5	FAC30 の TG-DTA 曲線	4-37
図 4.1.3-6	SC10 の TG-DTA 曲線.....	4-37
図 4.1.3-7	FAC15 の XRD 測定結果.....	4-38
図 4.1.3-8	FAC30 の XRD 測定結果.....	4-39
図 4.1.3-9	SC10 の XRD 測定結果.....	4-39
図 4.1.3-10	液相分析結果.....	4-41
図 4.2.2-1	長さ変化の測定方向.....	4-47
図 4.2.3-1	ペースト硬化体の質量の経時変化.....	4-48
図 4.2.3-2	ペースト硬化体の長さ変化率	4-49
図 4.2.3-3	20°C 試料 XRD 測定結果	4-50
図 4.2.3-4	50°C 試料 XRD 測定結果	4-50
図 4.2.3-5	80°C 試料 XRD 測定結果	4-51
図 4.2.3-6	20°C 試料の TG-DTA 曲線.....	4-52
図 4.2.3-7	50°C 試料の TG-DTA 曲線.....	4-52
図 4.2.3-8	80°C 試料の TG-DTA 曲線.....	4-52
図 4.2.3-9	20°C 試料の C/S 測定結果.....	4-54
図 4.2.3-10	20°C 試料の C/S ヒストグラム	4-54
図 4.2.3-11	50°C 試料の C/S 測定結果.....	4-55
図 4.2.3-12	50°C 試料の C/S ヒストグラム	4-55
図 4.2.3-13	80°C 試料の C/S 測定結果	4-56
図 4.2.3-14	80°C 試料の C/S ヒストグラム	4-56
図 4.2.3-15	20°C 試料の空隙径分布.....	4-58
図 4.2.3-16	50°C 試料の空隙径分布.....	4-59
図 4.2.3-17	80°C 試料の空隙径分布.....	4-60
図 4.2.3-18	20°C 試料の窒素吸着法による空隙径分布	4-61

図 4.2.3-19	50℃試料の窒素吸着法による空隙径分布	4-62
図 4.2.3-20	80℃試料の窒素吸着法による空隙径分布	4-63
図 4.2.3-21	20℃、6ヶ月試料の SEM 写真	4-64
図 4.2.3-22	20℃、1年試料の SEM 写真	4-65
図 4.2.3-23	50℃、6ヶ月試料の SEM 写真	4-66
図 4.2.3-24	50℃、1年試料の SEM 写真	4-67
図 4.2.3-25	80℃、6ヶ月試料の SEM 写真	4-68
図 4.2.3-26	80℃、1年試料の SEM 写真	4-69
図 4.2.3-27	モルタル供試体の質量の経時変化	4-70
図 4.2.3-28	モルタル供試体の長さ変化率	4-71
図 4.2.4-1	混合セメント硬化体の作製状況	4-73
図 4.2.4-2	XRD 測定結果	4-74
図 4.2.4-3	TG-DTA 曲線	4-75
図 4.2.4-4	FAC15 初期試料の EPMA 測定結果	4-76
図 4.2.4-5	FAC30 初期試料の EPMA 測定結果	4-77
図 4.2.4-6	SC10 初期試料の EPMA 測定結果	4-78
図 4.2.4-7	空隙径と累積空隙率	4-79
図 4.2.4-8	空隙径と微分細孔容積	4-79
図 4.2.4-9	初期試料の窒素吸着法による空隙径分布曲線	4-80
図 4.2.4-10	FAC15 初期試料の SEM 写真	4-82
図 4.2.4-11	FAC30 初期試料の SEM 写真	4-83
図 4.2.4-12	SC10 初期試料の SEM 写真	4-84
図 4.3.1-1	コア採取場所の模式図（セメント工場キルン第3支点のキルン下）	4-88
図 4.3.2-1	試料切断の概要：キルン下 50℃コア（未中性化部より試料を切り出した）	4-90
図 4.3.2-2	試料断面写真：キルン下 50℃コア	4-90
図 4.3.2-3	FA コンクリート試験体の外観写真	4-90
図 4.3.4-1	EPMA 面分析結果（キルン下 50℃コア 1）	4-94
図 4.3.4-2	EPMA 面分析結果（キルン下 50℃コア 2）	4-95
図 4.3.4-3	キルン下 50℃コア断面の反射電子像(1)	4-97
図 4.3.4-4	キルン下 50℃コア断面の反射電子像(2)	4-98
図 4.3.4-5	C-S-H の CaO/SiO ₂ モル比と Al ₂ O ₃ /SiO ₂ モル比の相関	4-100
図 4.3.4-6	Richardson のスラグセメントコンクリートの分析結果と キルン下 50℃コアの分析結果	4-100
図 4.3.4-7	キルン下 50℃コア破断面の二次電子像	4-101
図 4.3.4-8	XRD チャート(キルン下 50℃コア)	4-102

図 4.3.4-9	キルン下 50°C コアの固体 NMR スペクトル	4-105
図 4.3.4-10	キルン下 50°C コア骨材の固体 NMR スペクトル	4-106
図 4.3.5-1	EPMA 面分析結果 (FA コンクリート試験体 1)	4-108
図 4.3.5-2	EPMA 面分析結果 (FA コンクリート試験体 2)	4-109
図 4.3.5-3	FA コンクリート試験体断面の反射電子像(1)	4-111
図 4.3.5-4	FA コンクリート試験体断面の反射電子像(2)	4-112
図 4.3.5-5	反応厚さから推定されるフライアッシュの反応率(34 年コア)	4-113
図 4.3.5-6	反応厚さから推定されるフライアッシュの反応率(FA コンクリート 試験体)	4-113
図 4.3.5-7	C-S-H の CaO/SiO ₂ モル比と Al ₂ O ₃ /SiO ₂ モル比の相関	4-115
図 4.3.5-8	Richardson のスラグセメントコンクリートの分析結果と FA コンクリート 試験体の分析結果	4-115
図 4.3.5-9	FA コンクリート試験体破断面の二次電子像	4-116
図 4.3.5-10	FA コンクリート試験体の XRD チャート	4-117
図 4.3.5-11	FA コンクリート試験体の固体 NMR スペクトル	4-120
図 4.3.5-12	FA コンクリート試験体骨材の固体 NMR スペクトル	4-121
図 4.3.6-1	Richardson のスラグセメントコンクリートの分析結果と経年コンクリート の分析結果	4-123
図 5.1.1-1	臨界過飽和度を考慮した二次鉱物の生成遅れ計算フロー図	5-2
図 5.1.1-2	力学試験を模擬した体系概要図	5-3
図 5.1.1-3	解析体系図	5-3
図 5.1.1-4	液相・固相分布結果図 (計算ケース 0 ; 平成 27 年度の計算結果)	5-5
図 5.1.1-5	上流端の固相濃度経時変化 (ケース 0 ; 平成 27 年度の計算結果)	5-5
図 5.1.1-6	液相・固相分布結果図 (計算ケース 1 ; ハイドロタルサイト SI=2)	5-6
図 5.1.1-7	上流端の固相濃度経時変化 (計算ケース 1 ; ハイドロタルサイト SI=2)	5-6
図 5.1.1-8	処分施設を模擬した解析体系概要図	5-7
図 5.1.1-9	計算ケース 0 における変質解析結果 (1,000 年)	5-15
図 5.1.1-10	計算ケース 0 における変質解析結果 (1 万年)	5-16
図 5.1.1-11	計算ケース 0 における変質解析結果 (10 万年)	5-17
図 5.1.1-12	計算ケース 0 における緩衝材中の固相組成の経時変化結果	5-18
図 5.1.1-13	計算ケース 1 における変質解析結果 (1,000 年)	5-19
図 5.1.1-14	計算ケース 1 における変質解析結果 (1 万年)	5-20
図 5.1.1-15	計算ケース 1 における変質解析結果 (10 万年)	5-21
図 5.1.1-16	計算ケース 1 における緩衝材中の固相組成の経時変化結果	5-22
図 5.1.1-17	計算ケース 2 における変質解析結果 (1,000 年)	5-23
図 5.1.1-18	計算ケース 2 における変質解析結果 (1 万年)	5-24

図 5.1.1-19	計算ケース 2 における変質解析結果 (10 万年)	5-25
図 5.1.1-20	計算ケース 2 における緩衝材中の固相組成の経時変化結果	5-26
図 5.1.1-21	計算ケース 3 における変質解析結果 (1,000 年)	5-27
図 5.1.1-22	計算ケース 3 における変質解析結果 (1 万年)	5-28
図 5.1.1-23	計算ケース 3 における変質解析結果 (4.7 万年)	5-29
図 5.1.1-24	計算ケース 3 における緩衝材中の固相組成の経時変化結果	5-30
図 5.1.1-25	各計算ケースにおける緩衝材中のモンモリロナイト量の経時変化結果	5-31
図 5.1.1-26	各ケースの全モンモリロナイト量の経時変化	5-32
図 5.1.2-1	2次元解析体系概念図	5-35
図 5.1.2-2	ケース 4 (平成 27 年度) 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)	5-36
図 5.1.2-3	1 万年後、10 万年後の計算結果 (図 5.1.2-2 に追記)	5-38
図 5.1.2-4	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)	5-39
図 5.1.3-1	弱連成解析の方法	5-41
図 5.1.3-2	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	5-41
図 5.1.3-3	地化学解析において考慮している濃度単位	5-42
図 5.1.3-4	Gr1/2 についての連携ルール (JAEA の検討[12])	5-44
図 5.2.1-1	固相体積変化を伴う体積ひずみと間隙比の関係	5-47
図 5.2.1-2	モンモリロナイト含有率が異なるベントナイト試料に対する圧密試験結果	5-51
図 5.2.1-3	固相体積の変化を伴うベントナイト緩衝材の圧密特性	5-52
図 5.2.2-1	緩衝材の密度分布を想定した解析体系概念図	5-56
図 5.2.2-2	1,000 年後、1 万年後の計算結果 (計算ケース 1 ; 初期密度 1.8Mg/m ³ 部分)	5-65
図 5.2.2-3	5 万年後、10 万年後の計算結果 (計算ケース 1 ; 初期密度 1.8Mg/m ³ 部分)	5-66
図 5.2.2-4	1,000 年後、1 万年後の計算結果 (計算ケース 1 ; 初期密度 1.6Mg/m ³ 部分)	5-67
図 5.2.2-5	5 万年後、10 万年後の計算結果 (計算ケース 1 ; 初期密度 1.6Mg/m ³ 部分)	5-68
図 5.2.2-6	1,000 年後、1 万年後の計算結果 (計算ケース 1 ; 初期密度 1.4Mg/m ³ 部分)	5-69
図 5.2.2-7	5 万年後、10 万年後の計算結果 (計算ケース 1 ; 初期密度 1.4Mg/m ³ 部分)	5-70
図 5.2.2-8	ベントナイト部の密度の経時変化結果 (計算ケース 1)	5-71

図 5.2.2-9	ベントナイト部のモンモリロナイト量の経時変化結果（計算ケース 1）	5-72
図 5.2.2-10	ベントナイト部のモンモリロナイト含有率の経時変化結果（計算 ケース 1）	5-73
図 5.2.2-11	1,000 年後、1 万年後の計算結果（計算ケース 2；初期密度 1.6Mg/m ³ ）	5-74
図 5.2.2-12	5 万年後、10 万年後の計算結果（計算ケース 2；初期密度 1.6Mg/m ³ ）	5-75
図 5.2.2-13	ベントナイト部の密度の経時変化結果（計算ケース 2）	5-76
図 5.2.2-14	ベントナイト部のモンモリロナイト量の経時変化結果 （計算ケース 2）	5-77
図 5.2.2-15	ベントナイト部のモンモリロナイト含有率の経時変化結果 （計算ケース 2）	5-78
図 5.2.3-1	解析対象断面	5-80
図 5.2.3-2	力学解析結果（CASE_01：初期均一／弾性／直接反映／補正なし）	5-84
図 5.2.3-3	力学解析結果（CASE_01：初期均一／弾性／直接反映／補正あり）	5-84
図 5.2.3-4	同一高さにおける諸物理量分布の経時変化（CASE_01：初期均一／ 弾性／直接反映／補正なし）	5-85
図 5.2.3-5	同一高さにおける諸物理量分布の経時変化（CASE_01：初期均一／ 弾性／直接反映／補正あり）	5-85
図 5.2.3-6	力学解析結果（CASE_02：初期均一／弾塑性／直接反映／補正なし）	5-86
図 5.2.3-7	同一高さにおける諸物理量分布の経時変化（CASE_02：初期均一／ 弾塑性／直接反映／補正なし）	5-87
図 5.2.3-8	力学解析結果（CASE_03：初期均一／弾性／クリノプチロライト変質／ 補正なし）	5-89
図 5.2.3-9	力学解析結果（CASE_03：初期均一／弾性／クリノプチロライト変質／ 補正あり）	5-89
図 5.2.3-10	同一高さにおける諸物理量分布の経時変化（CASE_03：初期均一／ 弾性／クリノプチロライト変質／補正なし）	5-90
図 5.2.3-11	同一高さにおける諸物理量分布の経時変化（CASE_03：初期均一／ 弾性／クリノプチロライト変質／補正あり）	5-90
図 5.2.3-12	力学解析結果（CASE_04：初期均一／弾塑性／クリノプチロライト変質／ 補正なし）	5-91
図 5.2.3-13	同一高さにおける諸物理量分布の経時変化（CASE_04：初期均一／ 弾塑性／クリノプチロライト変質／補正なし）	5-92
図 5.2.3-14	力学解析結果（CASE_05：初期均一／弾性／モンモリロナイト溶解／ 補正なし）	5-94

図 5.2.3-15	力学解析結果 (CASE_05 : 初期均一 / 弾性 / モンモリロナイト溶解 / 補正あり)	5-94
図 5.2.3-16	同一高さにおける諸物理量分布の経時変化 (CASE_05 : 初期均一 / 弾性 / モンモリロナイト溶解 / 補正なし)	5-95
図 5.2.3-17	同一高さにおける諸物理量分布の経時変化 (CASE_05 : 初期均一 / 弾性 / モンモリロナイト溶解 / 補正あり)	5-95
図 5.2.3-18	力学解析結果 (CASE_06 : 初期均一 / 弾塑性 / モンモリロナイト溶解 / 補正なし)	5-96
図 5.2.3-19	同一高さにおける諸物理量分布の経時変化 (CASE_06 : 初期均一 / 弾塑性 / モンモリロナイト溶解 / 補正なし)	5-97
図 5.2.3-20	力学解析結果 (CASE_11 : 初期不均一 / 弾性 / 直接反映 / 補正なし)	5-100
図 5.2.3-21	力学解析結果 (CASE_11 : 初期不均一 / 弾性 / 直接反映 / 補正あり)	5-100
図 5.2.3-22	同一高さにおける諸物理量分布の経時変化 (CASE_11 : 初期不均一 / 弾性 / 直接反映 / 補正なし)	5-101
図 5.2.3-23	同一高さにおける諸物理量分布の経時変化 (CASE_11 : 初期不均一 / 弾性 / 直接反映 / 補正あり)	5-102
図 5.2.3-24	力学解析結果 (CASE_12 : 初期不均一 / 弾塑性 / 直接反映 / 補正なし)	5-103
図 5.2.3-25	同一高さにおける諸物理量分布の経時変化 (CASE_12 : 初期不均一 / 弾塑性 / 直接反映 / 補正あり)	5-104
図 5.2.3-26	力学解析結果 (CASE_13 : 初期不均一 / 弾性 / クリノプチロライト変質 / 補正なし)	5-106
図 5.2.3-27	力学解析結果 (CASE_13 : 初期不均一 / 弾性 / クリノプチロライト変質 / 補正あり)	5-106
図 5.2.3-28	同一高さにおける諸物理量分布の経時変化 (CASE_13 : 初期不均一 / 弾性 / クリノプチロライト変質 / 補正なし)	5-107
図 5.2.3-29	同一高さにおける諸物理量分布の経時変化 (CASE_13 : 初期不均一 / 弾性 / クリノプチロライト変質 / 補正あり)	5-108
図 5.2.3-30	解析結果 (CASE_14 : 初期不均一 / 弾塑性 / クリノプチロライト変質 / 補正なし)	5-109
図 5.2.3-31	同一高さにおける諸物理量分布の経時変化 (CASE_14 : 初期不均一 / 弾塑性 / クリノプチロライト変質 / 補正あり)	5-110
図 5.2.3-32	力学解析結果 (CASE_15 : 初期不均一 / 弾性 / モンモリロナイト溶解 / 補正なし)	5-112

図 5.2.3-33	力学解析結果 (CASE_15 : 初期不均一 / 弾性 / モンモリロナイト溶解 / 補正あり)	5-112
図 5.2.3-34	同一高さにおける諸物理量分布の経時変化 (CASE_15 : 初期不均一 / 弾性 / モンモリロナイト溶解 / 補正なし)	5-113
図 5.2.3-35	同一高さにおける諸物理量分布の経時変化 (CASE_15 : 初期不均一 / 弾性 / モンモリロナイト溶解 / 補正あり)	5-114
図 5.2.3-36	力学解析結果 (CASE_16 : 初期不均一 / 弾塑性 / モンモリロナイト溶解 / 補正なし)	5-115
図 5.2.3-37	同一高さにおける諸物理量分布の経時変化 (CASE_16 : 初期不均一 / 弾塑性 / モンモリロナイト溶解 / 補正あり)	5-116
図 5.2.3-38	10 万年後の透水係数分布 (弾塑性モデル)	5-118
図 6.5.1-1	平成 28 年度までの成果を受けた H-M-C の現象連携と解析手法、各現象モデルの統合のイメージ及び平成 29 年度の目標	6-4

表 目 次

表 1.4.1-1 5 ヶ年(平成 25～29 年度)の計画	1-12
表 2.1.1-1 その場観察試験の条件	2-4
表 2.1.1-2 出発試料の全岩分析値	2-5
表 2.1.1-3 視野内の鉱物の溶解と成長速度(ALT-VSI5)	2-9
表 2.1.1-4 ALT-VSI5 の試験条件と二次鉱物生成待ち時間のまとめ	2-9
表 2.1.1-5 視野内の鉱物の溶解と成長速度(ALT-VSI6)	2-12
表 2.1.1-6 ALT-VSI6 の試験条件と観察結果	2-12
表 2.1.1-7 視野内の鉱物の溶解と成長速度(ALT-VSI7)	2-15
表 2.1.1-8 Run ALT-VSI7 の試験条件と二次鉱物生成待ち時間のまとめ	2-15
表 2.1.1-9 視野内の鉱物の溶解と成長速度(ALT-VSI8)	2-18
表 2.1.1-10 Run ALT-VSI8 の試験条件と二次鉱物生成待ち時間のまとめ	2-18
表 2.1.1-11 ALT-VSI5 試験の排出溶液の化学組成	2-20
表 2.1.1-12 ALT-VSI6 試験の排出溶液の化学組成	2-20
表 2.1.1-13 ALT-VSI7 試験の排出溶液の化学組成	2-20
表 2.1.1-14 ALT-VSI8 試験の排出溶液の化学組成	2-20
表 2.1.1-15 随伴鉱物の溶解による間隙水組成の評価	2-22
表 2.1.2-1 シリンジ試験の条件	2-39
表 2.1.2-2 シリンジ試験の条件と測定結果	2-40
表 2.1.2-3 シリンジ試験における変質速度と待ち時間の組成依存性	2-42
表 2.1.2-4 間隙水の化学組成	2-54
表 2.1.2-5 シリンジ変質試験の過飽和度の計算結果	2-55
表 2.1.2-6 リートベルト解析によるゼオライト量測定結果とクリノプチロライト 成長速度およびシリンジ全体の体積変化とその速度	2-60
表 2.2.1-1 セメントーベントナイト接触試料浸漬試験の水準	2-71
表 2.2.1-2 分析項目の一覧表	2-72
表 2.2.1-3 EPMA の測定条件	2-73
表 2.2.1-4 XRD 測定条件	2-73
表 2.2.1-5 希塩酸溶解鉱物量および C-S-H の定量結果	2-84
表 2.2.1-6 層間陽イオンの定量結果	2-85
表 2.2.1-7 パターンフィッティングの結果	2-88
表 2.2.1-8 試料①中の CaO を含む鉱物量	2-89
表 2.2.2-1 ボーリングコアの概要	2-98
表 2.2.2-2 測定位置と接触界面からの距離 (Nagra Box core1)	2-108
表 2.3.1-1 AFM 粒子測定による低密度モンモリロナイトゲルの溶解速度	2-113

表 2.4.1-1	溶脱過程の段階と各構成要素の物質移行.....	2-148
表 2.4.2-1	モルタルの配合と試料の略称.....	2-163
表 2.4.2-2	溶脱試験条件と試料名.....	2-163
表 3.2.1-1	クニピア F の土粒子密度 (平成 25 年度成果).....	3-5
表 3.2.1-2	ケイ砂の土粒子密度 (平成 25 年度成果).....	3-6
表 3.2.1-3	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.....	3-6
表 3.2.2-1	これまでに実施した土粒子密度試験一覧.....	3-7
表 3.2.2-2	変質前人工ベントナイトの土粒子密度.....	3-8
表 3.2.3-1	これまでの一次元排気圧縮試験一覧.....	3-10
表 3.2.3-2	装置の概略仕様.....	3-13
表 3.2.3-3	一次元圧縮試験数量.....	3-15
表 3.2.3-4	各材料の完全飽和線のパラメータ.....	3-18
表 3.2.3-5	修正完全飽和線の特徴.....	3-27
表 3.2.3-6	修正完全飽和線のパラメータ.....	3-29
表 3.2.4-1	既往の荷重制御膨潤量試験数量.....	3-30
表 3.2.4-2	荷重制御膨潤量試験数量.....	3-37
表 3.2.4-3	荷重制御膨潤量試験結果イメージ.....	3-38
表 3.2.4-4	一次元排気圧縮～吸水除荷 (膨潤) 試験結果の一覧.....	3-40
表 3.2.5-1	せん断試験ケース.....	3-45
表 3.2.5-2	等体積一面せん断試験ケース.....	3-47
表 3.2.5-3	供試体諸元.....	3-48
表 3.2.5-4	膨潤圧の影響評価試験ケース.....	3-51
表 3.2.5-5	せん断挙動に対する変質影響評価試験ケース.....	3-55
表 3.2.5-6	せん断挙動に対する変質影響評価試験の供試体諸元.....	3-56
表 3.2.5-7	せん断挙動評価に対する供試体寸法の影響評価試験ケース.....	3-61
表 3.2.5-8	せん断挙動評価に対する供試体寸法の影響評価試験の供試体諸元および 試験結果.....	3-62
表 3.2.5-9	一軸圧縮試験後の供試体一覧.....	3-65
表 3.2.5-10	一軸圧縮試験における供試体寸法の影響評価.....	3-67
表 3.3.1-1	モンモリロナイトとカオリナイトの比表面積の比較.....	3-72
表 3.3.1-2	モンモリロナイト試料の BET 法および EGME 法による比表面積の 測定結果.....	3-72
表 3.3.1-3	有効ベントナイト乾燥密度と 2 層膨潤含水比の関係.....	3-78
表 4.1.1-1	合成 C-S-H 及び合成 C-A-S-H の定温度試験の一覧.....	4-2
表 4.1.1-2	作製条件.....	4-3
表 4.1.1-3	合成 C-S-H(C-A-S-H)の配合.....	4-3

表 4.1.1-4	合成 C-A-S-H (C-S-H) の配合および定温度試験条件	4-4
表 4.1.1-5	XRD 測定条件	4-4
表 4.1.1-6	XRD 測定条件	4-5
表 4.1.1-7	固体 NMR の測定条件	4-5
表 4.1.1-8	^{29}Si -NMR の化学シフトと帰属	4-7
表 4.1.1-9	^{27}Al -NMR の化学シフトと帰属	4-8
表 4.1.1-10	トバモライトの同定結果	4-19
表 4.1.1-11	結晶子径の測定結果	4-21
表 4.1.1-12	試料① [C/S=0.83(A/C=0), 50°C, 4w] のピーク面積比	4-24
表 4.1.1-13	試料② [C/S=0.9(A/C=0.05, C/(S+A)=0.86), 50°C, 4w] のピーク 面積比	4-25
表 4.1.1-14	試料③ [C/S=0.9(A/C=0.2, C/(S+A)=0.76), 50°C, 4w] のピーク 面積比	4-26
表 4.1.2-1	トバモライト含有量を測定した合成 C-S-H の水準	4-28
表 4.1.2-2	XRD 測定条件	4-29
表 4.1.2-3	混合試料の解析結果	4-30
表 4.1.2-4	定温度試験試料(C/S=0.83)の C-S-H とトバモライトの割合	4-31
表 4.1.3-1	OPC 及び混合セメントの定温度試験の一覧	4-32
表 4.1.3-2	定温度試験用試料の作製条件	4-33
表 4.1.3-3	定温度試験試料の一覧	4-33
表 4.1.3-4	XRD の測定条件	4-33
表 4.1.3-5	TG-DTA の測定条件	4-34
表 4.1.3-6	液相の測定条件	4-34
表 4.1.3-7	TG-DTA 測定結果	4-36
表 4.1.3-8	液相分析結果	4-40
表 4.2.1-1	OPC 硬化体の定温度試験試料の作製条件	4-43
表 4.2.1-2	混合セメントの定温度試験試料の作製条件	4-44
表 4.2.1-3	硬化体による分析試料の一覧	4-44
表 4.2.2-1	XRD 測定条件	4-45
表 4.2.2-2	TG-DTA の測定条件	4-45
表 4.2.2-3	EPMA 測定条件	4-45
表 4.2.2-4	水銀圧入式ポロシメータ測定条件	4-46
表 4.2.2-5	窒素吸着法による空隙径分布測定条件	4-46
表 4.2.2-6	SEM 観察条件	4-46
表 4.2.3-1	ペースト硬化体の質量測定結果	4-48
表 4.2.3-2	ペースト硬化体の長さ測定結果	4-49

表 4.2.3-3	TG-DTA 測定結果.....	4-51
表 4.2.3-4	ポロシメータ測定結果.....	4-57
表 4.2.3-5	窒素吸着法による比表面積、総空隙容積、平均空隙径.....	4-61
表 4.2.3-6	モルタルの供試体質量の測定結果.....	4-70
表 4.2.3-7	モルタルの長さ変化測定結果.....	4-71
表 4.2.4-1	供試体のペースト配合.....	4-72
表 4.2.4-2	供試体のモルタル配合.....	4-72
表 4.2.4-3	ペースト硬化体の質量および長さ測定結果.....	4-73
表 4.2.4-4	XRD による鉱物の同定結果.....	4-74
表 4.2.4-5	TG-DTA 測定結果.....	4-74
表 4.2.4-6	ポロメータ測定結果.....	4-78
表 4.2.4-7	窒素吸着法による比表面積、総空隙容積、平均空隙径.....	4-80
表 4.2.4-8	質量測定結果.....	4-85
表 4.2.4-9	モルタル供試体の長さ変化.....	4-85
表 4.3.1-1	コンクリートコアの詳細.....	4-88
表 4.3.1-2	配合推定値.....	4-88
表 4.3.1-3	FA コンクリート試験体の詳細.....	4-89
表 4.3.1-4	コンクリートの配合.....	4-89
表 4.3.3-1	EPMA 測定条件.....	4-91
表 4.3.3-2	EDS の測定条件.....	4-91
表 4.3.3-3	XRD 測定条件.....	4-92
表 4.3.3-4	固体 NMR の測定条件.....	4-93
表 4.3.4-1	C-S-H の定量結果：キルン下 50°C コア.....	4-99
表 4.3.4-2	球状部（空隙）内生成物の EDS 分析結果.....	4-102
表 4.3.4-3	リートベルト解析による定量結果（キルン下 50°C コア）.....	4-103
表 4.3.4-4	ペースト部分の化学組成の分析結果（キルン下 50°C コア）.....	4-103
表 4.3.4-5	²⁹ Si-NMR のピークの帰属と面積比（キルン下 50°C コア）.....	4-106
表 4.3.4-6	²⁷ Al-NMR のピークの帰属と面積比（キルン下 50°C コア）.....	4-107
表 4.3.5-1	C-S-H の定量結果：FA コンクリート試験体.....	4-114
表 4.3.5-2	球状部（フライアッシュ）生成物の SEM/EDS 分析結果.....	4-117
表 4.3.5-3	リートベルト解析による定量結果（FA コンクリート試験体）.....	4-118
表 4.3.5-4	ペースト部分の化学組成の分析結果（FA コンクリート試験体）.....	4-119
表 4.3.5-5	²⁹ Si-NMR のピークの帰属と面積比（FA コンクリート試験体）.....	4-121
表 4.3.5-6	²⁷ Al-NMR のピークの帰属と面積比（FA コンクリート試験体）.....	4-122
表 5.1.1-1	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.....	5-2

表 5.1.1-2	計算条件.....	5-3
表 5.1.1-3	計算ケース	5-4
表 5.1.1-4	地下水組成	5-8
表 5.1.1-5	解析に用いた地下水の組成.....	5-9
表 5.1.1-6	セメントの化学組成.....	5-9
表 5.1.1-7	セメント系材料の仕様.....	5-9
表 5.1.1-8	ベントナイト系緩衝材の仕様	5-10
表 5.1.1-9	クニゲル V1 の鉱物組成	5-10
表 5.1.1-10	クニゲル V1 の交換性陽イオン組成.....	5-10
表 5.1.1-11	初期鉱物濃度.....	5-11
表 5.1.1-12	考慮した二次鉱物	5-11
表 5.1.1-13	初期物性値	5-13
表 5.1.1-14	計算ケース	5-13
表 5.1.2-1	2層膨潤含水比と乾燥密度の関係.....	5-33
表 5.1.2-2	パラメータ	5-37
表 5.1.3-1	各プログラムに必要とされるパラメータ	5-40
表 5.1.3-2	連成解析相互パラメータ (JAEA の検討)	5-43
表 5.1.3-3	QPAC-MACBECE2014 間で授受をする情報リスト (JAEA の検討) ...	5-43
表 5.2.1-1	体積一定条件下での固相体積変化によって生じる現象.....	5-47
表 5.2.1-2	クリノプチロライト化に関する諸定数.....	5-49
表 5.2.2-1	計算ケース	5-57
表 5.2.2-2	地下水組成	5-58
表 5.2.2-3	解析に用いた地下水の組成.....	5-59
表 5.2.2-4	セメントの化学組成.....	5-59
表 5.2.2-5	セメント系材料の仕様.....	5-59
表 5.2.2-6	緩衝材の仕様.....	5-60
表 5.2.2-7	クニゲル V1 の鉱物組成	5-60
表 5.2.2-8	クニゲル V1 の交換性陽イオン組成.....	5-60
表 5.2.2-9	初期鉱物濃度.....	5-61
表 5.2.2-10	初期物性値	5-62
表 5.2.2-11	考慮した二次鉱物	5-62
表 5.2.3-1	解析条件.....	5-81
表 5.2.3-2	解析に用いた材料定数.....	5-81
表 5.2.3-3	解析に用いた初期値.....	5-82

第1章 事業概要

1.1 背景

本事業は、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。

図 1.1.1-1 地層処分事業と技術分野の関連に、地層処分事業と検討している技術分野の関連を示す。

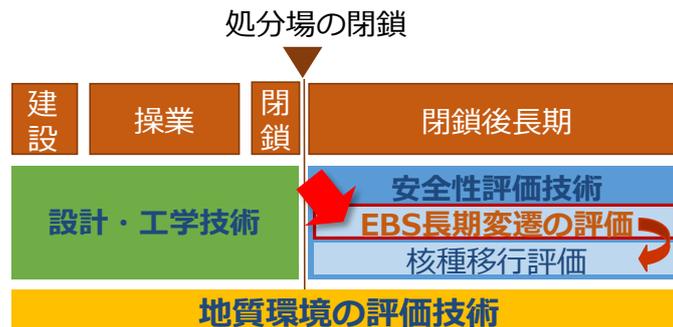


図 1.1.1-1 地層処分事業と技術分野の関連

こうした背景の中、TRU 廃棄物の処分に係わる人工バリア（EBS）の閉鎖後長期変遷の評価に関して、平成 24 年度のまでの課題をもとに調査することとした。第 2 次 TRU レポート[2]における閉鎖後長期の安全評価では(地下水シナリオ)、人工バリア内の緩衝材(ベントナイト)の乾燥密度を均一でかつ飽水状態等の仮定している。平成 24 年度までの検討成果を踏まえると、処分場閉鎖後長期の変遷の解析には以下の点を確認し、考慮していくことが必要である（図 1.1.1-2）。

- ・ 緩衝材の密度分布は、施工時の不均一な状態が閉鎖時点でも残る。また、セメント系材料は、閉鎖時までには熱変質が起こる懸念がある。なお、閉鎖時点の状態が長期解析の初期条件である。
- ・ 閉鎖後長期において、緩衝材はセメントからの影響による化学変質で膨潤性が変化し、沈下

することにより断面上部の密度が低下、人工バリアの核種移行抑制機能が低下する等の化学変質の人工バリアの性能への影響が懸念される。

- ・緩衝材の圧密状態での溶解とそれに伴い生成する二次鉱物の種類や生成条件、これらの化学変質の力学挙動及び透水係数モデルへの考慮が必要である。加えてセメント系材料も含めた多様な材料及び環境への対応は、人工バリア材料の長期評価に重要な事項である。

図 1.1.1-3 に示す様に人工バリアの工学技術と閉鎖時の性能、閉鎖後の長期変遷、各種現象が関連することから、閉鎖時の状態及び化学変質を考慮して力学挙動や透水性の変化を評価可能な水理・力学・化学(HMC)連成解析手法の構築し、閉鎖後長期の人工バリアの成立性について示していく必要がある。成立性の可否によっては、設計・工学的技術による対策での検討課題を示していくことも必要である。

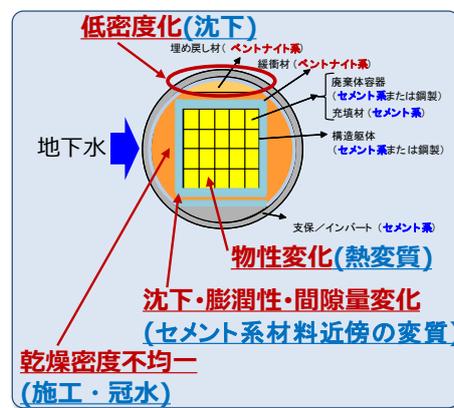


図 1.1.1-2 TRU 廃棄物処分場の人工バリアの処分概念（グループ 1, 2）の例とその閉鎖後長期の挙動に影響を与える事象

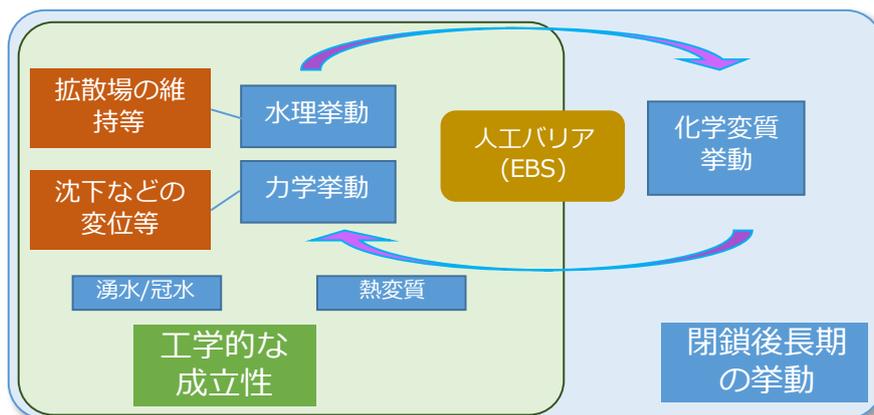


図 1.1.1-3 人工バリアの閉鎖後長期（化学変質）挙動と工学的な性能（透水(水理)力学挙動）の関連

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閉鎖後長期の変遷に関して、材料の化学的変質と性能の変化、それ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踏まえつつ、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と力学挙動の関連等を考慮した現象のモデル化や解析手法の検討等を実施する。それらの検討成果をもとに、人工バリアの長期予測手法を構築し、核種移行抑制、構造安定性等の性能の維持もしくは変遷を説明すると共に、長期的変遷のバリア性能への影響の評価を行ない、成立性を示していく。

平成 25 年度からの 5 カ年の事業として、図 1.2.1-1 に示す様に「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。

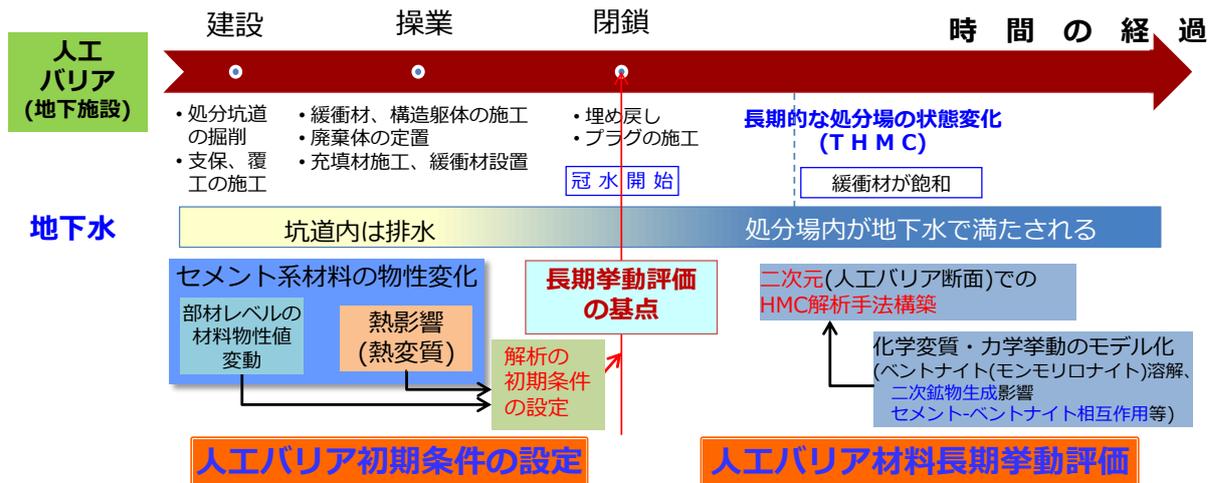


図 1.2.1-1 人工バリアの建設から閉鎖後長期の変遷過程と本検討の関係及び検討概要

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、図 1.3.1-1 に示す様に、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」[3]は、図 1.3.1-2 に示す様に人工バリアの長期変遷における現象の関連をとらえ、図中に赤枠で示した部分について、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として調査を行った。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。

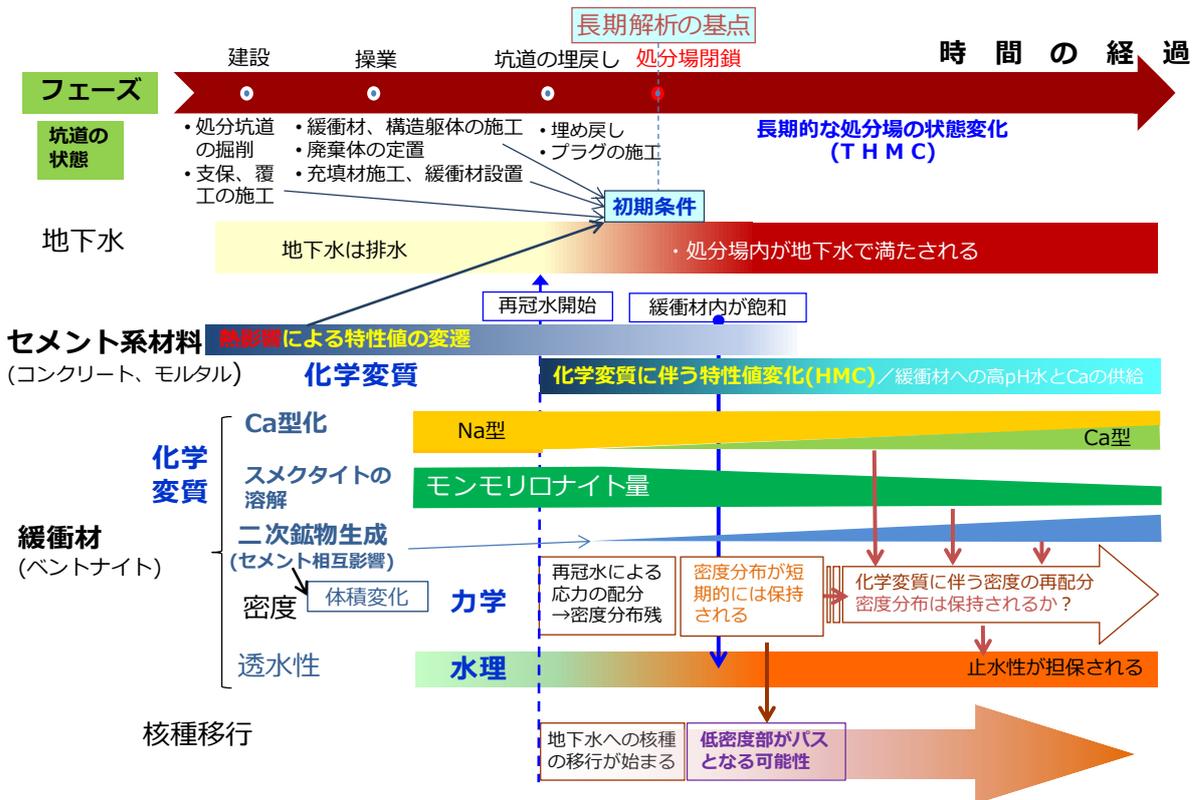


図 1.3.1-1 人工バリアの建設から閉鎖後長期の変遷のイメージ

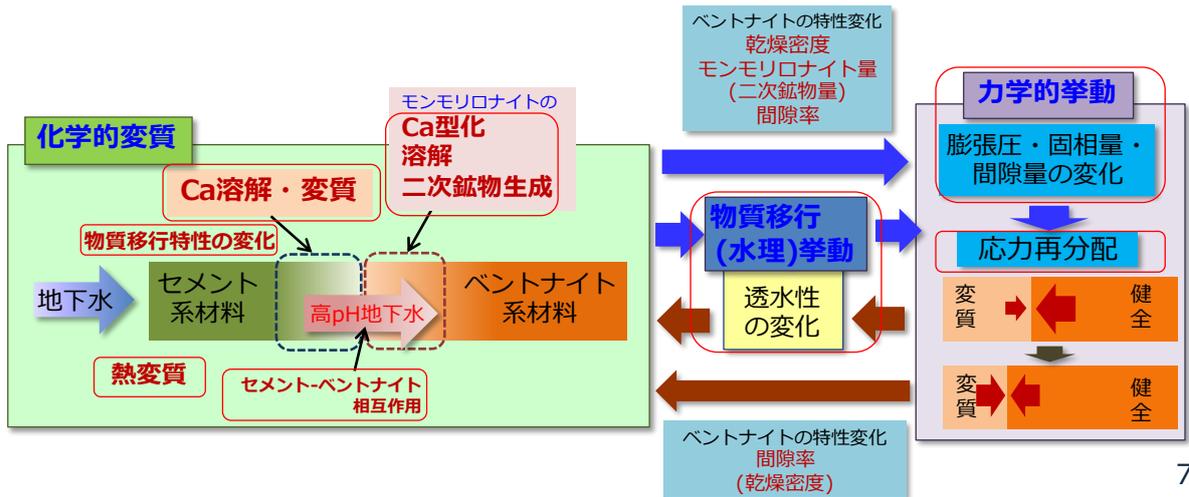


図 1.3.1-2 人工バリアの化学変質挙動と力学、透水挙動の関連

(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。空隙構造モデルは、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に関するものであり、モデルを構築し拡散係数を算定できる見通しを得た。普通ポルトランドセメント(OPC)硬化体のケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)が溶解する過程(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、混和材を使用したフライアッシュセメント(FAC)、高炉セメント(BFSC)及びシリカフェーム混合セメント(SC)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

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珪物及び二次珪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 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珪物設定を行い、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、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及び Ca(OH)₂ が検出されな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、Ca(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部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、セメントー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[4]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によりモンモリロナイトの2層膨潤状態における含水比(3.3.1(2)に詳述)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則による透水係数式[6]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内間隙と外間隙の調和平均に基づく透水係数式による予測値と既往の透水係数の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則による透水係数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

1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との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な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、2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）に比べ変化が小さいと共に、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第2次TRUレポート[2]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：2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

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ヵ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。

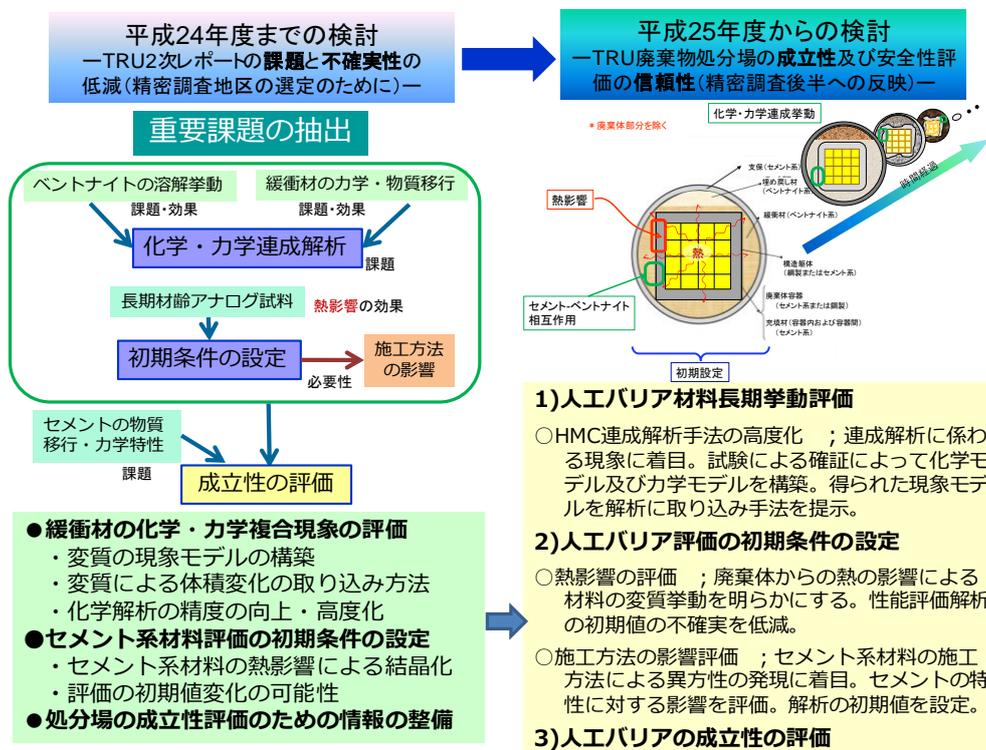


図 1.4.1-1 課題の抽出と研究内容の策定

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。

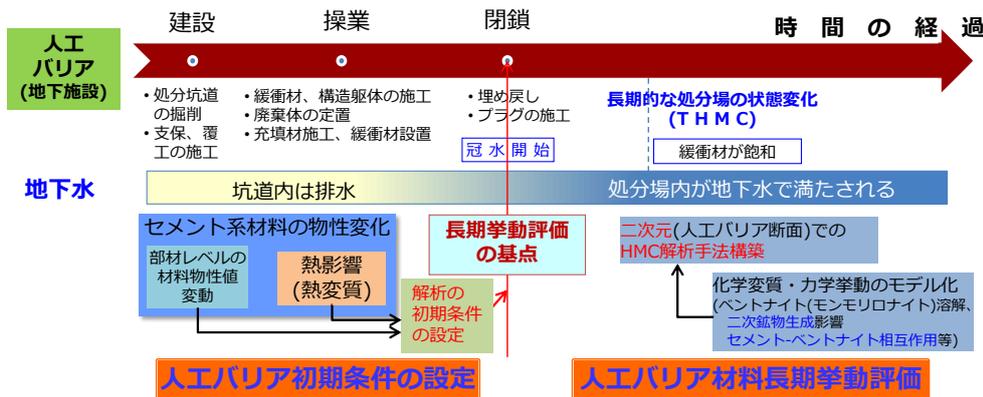


図 1.4.1-2 人工バリアの建設から閉鎖後の長期と本検討の関係及び検討概要（再掲）

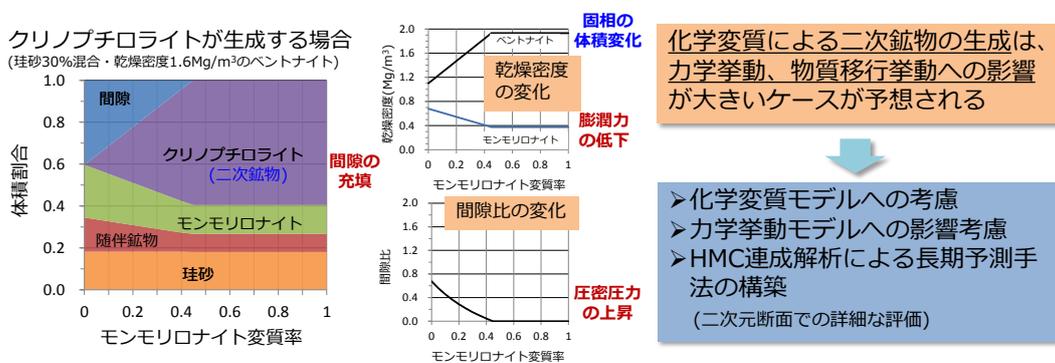


図 1.4.1-3 二次鉱物の生成の力学挙動への影響のイメージと検討課題

5 年間のスケジュールを表 1.4.1-1 に、HMC 連成解析とそれに考慮する化学変質挙動、水理挙動及び力学挙動の検討項目の関連を図 1.4.1-4 及び図 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」と連携しつつ、NUMO のが策定している計画[1]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) 化学変質に関する現象のモデル化						
1) 緩衝材の二次鉱物の生成挙動に関する試験・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の確認	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) モンモリロナイトの溶解速度式における実効反応表面積の定式化		数学モデルによる検討				溶解速度式への反映
4) セメント系材料の変質を伴う拡散係数のモデル化		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) 緩衝材の化学変質を伴う力学挙動のモデル化		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) 初期条件の設定に関する検討		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
➢ セメント系材料の熱変質に関する検討	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			セメント-緩衝材 変質、初期条件を 中心としたHMC 解析への知見の統 合と人工バリアの 閉鎖後長期の性能 維持の評価手法の 提案
➢ 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)				
(4) HMC連成解析手法の検討及び長期評価						
➢ 化学解析手法				二次元解析手法の構築		人工バリアの閉鎖 後長期にわたる成 立性の提示(安全 評価の設定反映)
➢ 力学解析手法				化学変質挙動/施工影響の反映		
➢ 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		

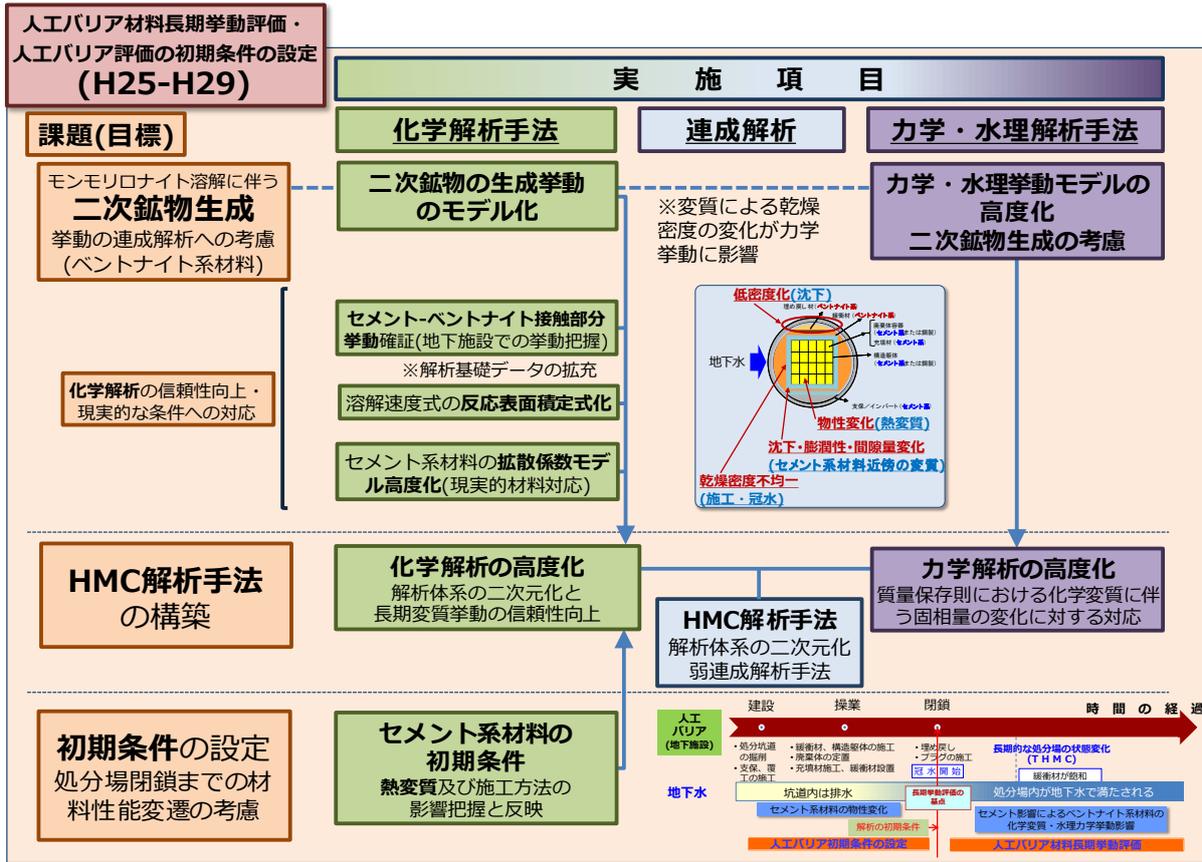


図 1.4.1-4 検討項目と関連

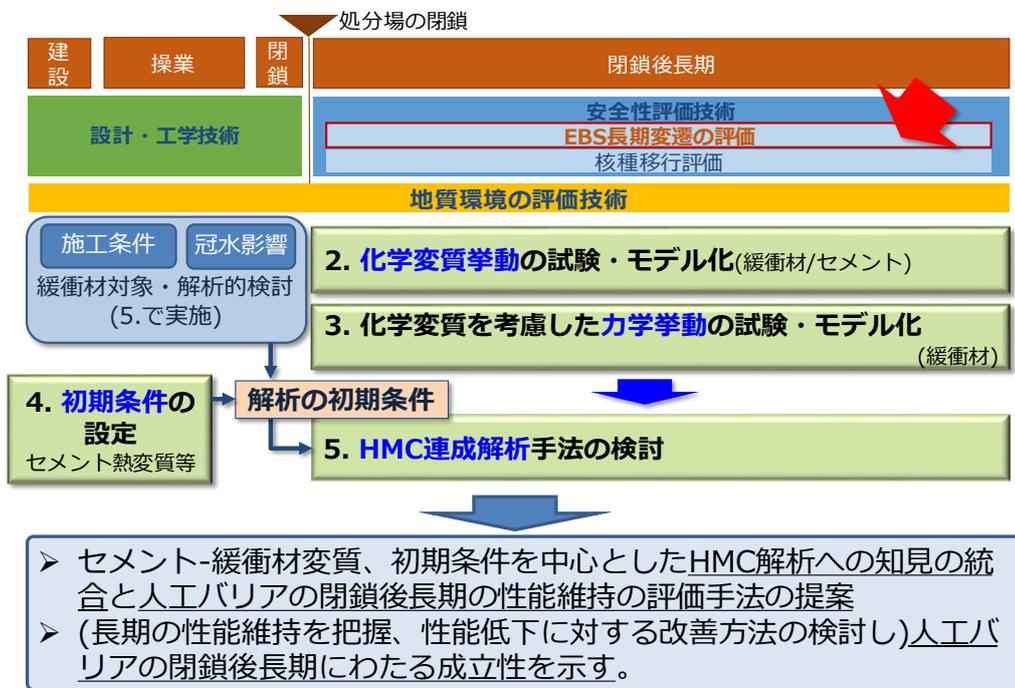


図 1.4.1-5 平成 25 年以降の検討項目の関連と成果目標

1.5 各項目の5年間の検討内容と平成25年度からの成果概要

前節1.4の表1.4.1-1に示した平成25年度からの全体計画の各項目について、5年間の検討内容とこれまでの成果[5][6][7]の概要を以下に示す。

(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

ここでは、HMC連成解析手法に関わる、人工バリア材料であるベントナイト系材料の化学変質挙動について、HMC連成に必要なベントナイト系材料の二次鉱物の生成に関するモデル化、化学解析の信頼性や不確実性の低減するための各種挙動のモデル化に関して検討を行う。

1) ベントナイト系材料の変質による二次鉱物生成に関するモデル化

ベントナイト系材料は、セメント影響によりモンモリロナイトの溶解や、ゼオライト化等による二次鉱物の生成によって、乾燥密度が変化する。この化学的な変質挙動に伴ない力学的特性も変化する。ここでは、人工バリアの長期挙動をHMC連成解析により予測するにあたり、ベントナイト系材料の化学的変質による二次鉱物生成挙動を試験により把握しモデル化を行う。

これまでに、緩衝材の化学変質に関する試験では、セメント浸出水のアルカリによるモンモリロナイトの溶解に伴い二次鉱物として生成するゼオライトの生成の条件や挙動を試験により把握し、モデル化案を策定、また、力学挙動に影響する二次鉱物生成による体積変化挙動を把握するために試験を行った。平成27年度までに試験で確認した、ゼオライトであるアナルサイム、クリノプチロライト及びフィリップサイトの生成挙動について、これらの比較によりベントナイトに含まれるカルセドニ(SiO_2)及び長石の溶解がゼオライトの生成条件に関連することなどがわかった。

これらの知見を元に二次鉱物のモデル化案を策定し(図1.5.1-1)、長期挙動評価へ反映するための検証等を進めていく計画である。

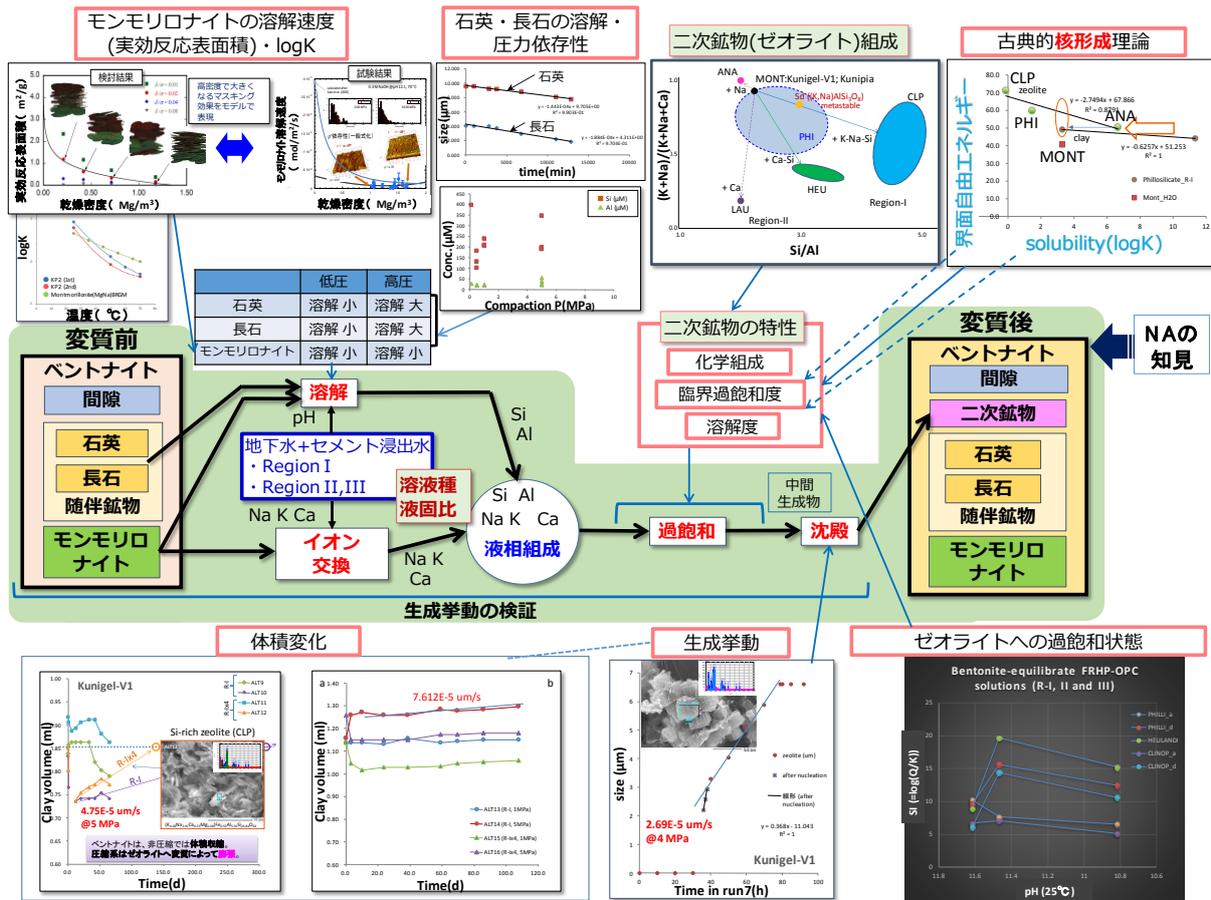


図 1.5.1-1 ベントナイトの変質に伴う二次鉱物の生成挙動に関する試験結果とモデル化案の概要

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年度までにも試験室で浸漬した試料を(共)高エネルギー加速器研究機構(KEK)の放射光施設のX線吸収構造(XAFS)分析システムを使用してその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、分析してC-S-Hの生成挙動を確認した。試料を3mm間隔に粉末化して確認した結果、セメントと接触したベントナイト部分は変質が進んでおらず、XAFS分析による定量ではC-S-Hの量は少なかった(図1.5.1-2)。C-S-Hは、接触部のごく近傍で生成している可能性があるため、より高分解能なXAFS分析等による確認が必要である。また、7年間60℃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し、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。

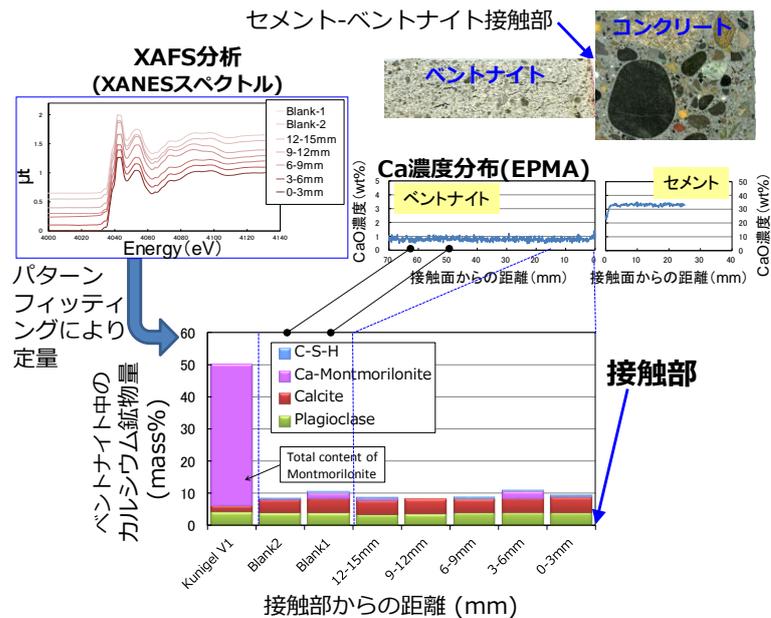


図 1.5.1-2 セメント-ベントナイト接触部分の変質状態に関する XAFS 分析結果試料
(建設後 12 年経過の試料)

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。これまでに、乾燥密度 0.05Mg/m^3 以下での分散状態での積層状態の再現（四重極ポテンシャルを考慮）に加え、 1.2Mg/m^3 程度までの現実的な圧密系の乾燥密度での再現（剛体ポテンシャル）ができ、実効反応表面積の定式化をした(図 1.5.1-3)。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 1.5.1-4)。実効反応表面積の定式化の信頼性を高めるために、モンテカルロシミュレーションにより平衡の積層状態を計算する際の初期状態の影響や円盤状粒子の粒子径の影響について検討した。その結果、初期の円盤状粒子の積層状態によって平衡状態までは至らない準安定状態があることがわかった。また、粒子径の影響は少ないことを確認した。加えて、積層構造中の間隙の状態についても把握することができる様になり、緩衝材の長期変遷の評価に有益な技術が得られた。

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。

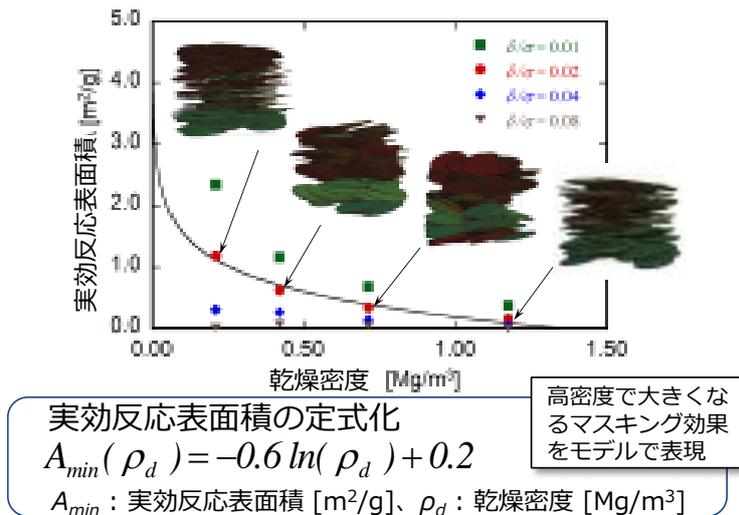


図 1.5.1-3 圧密下のモンモリロナイト実効反応表面積の定式化

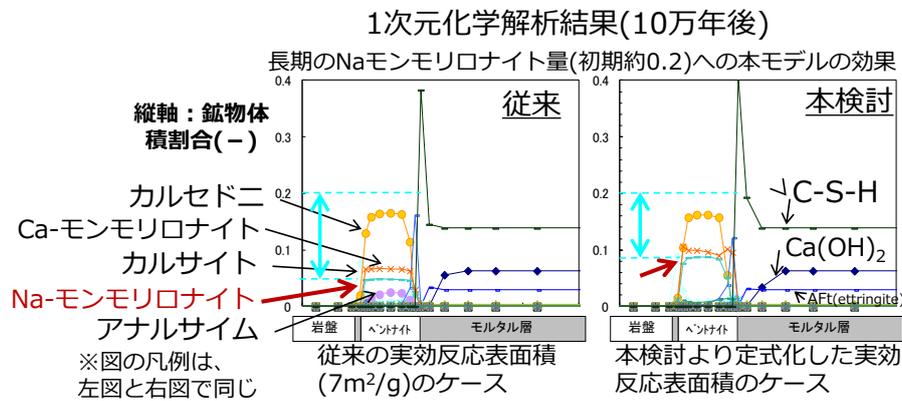


図 1.5.1-4 長期化学解析における本検討での定式化の効果

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なとされる、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。第2次 TRU レポート[2]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 1.5.1-5 に示す様に、構成要素と各々の変質挙動を考慮した空隙構造モデル(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算定モデル)が

混合セメントの変質にも対応できる見通しを得た。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及び変質過程での拡散係数の算定について検討した。

混合セメントのC-S-H部分の拡散係数の設定及び変質したモルタル材料の遷移帯の状態の変遷などの拡散係数の算定モデルの不確実な点について検討を行い、信頼性を向上させる必要がある。

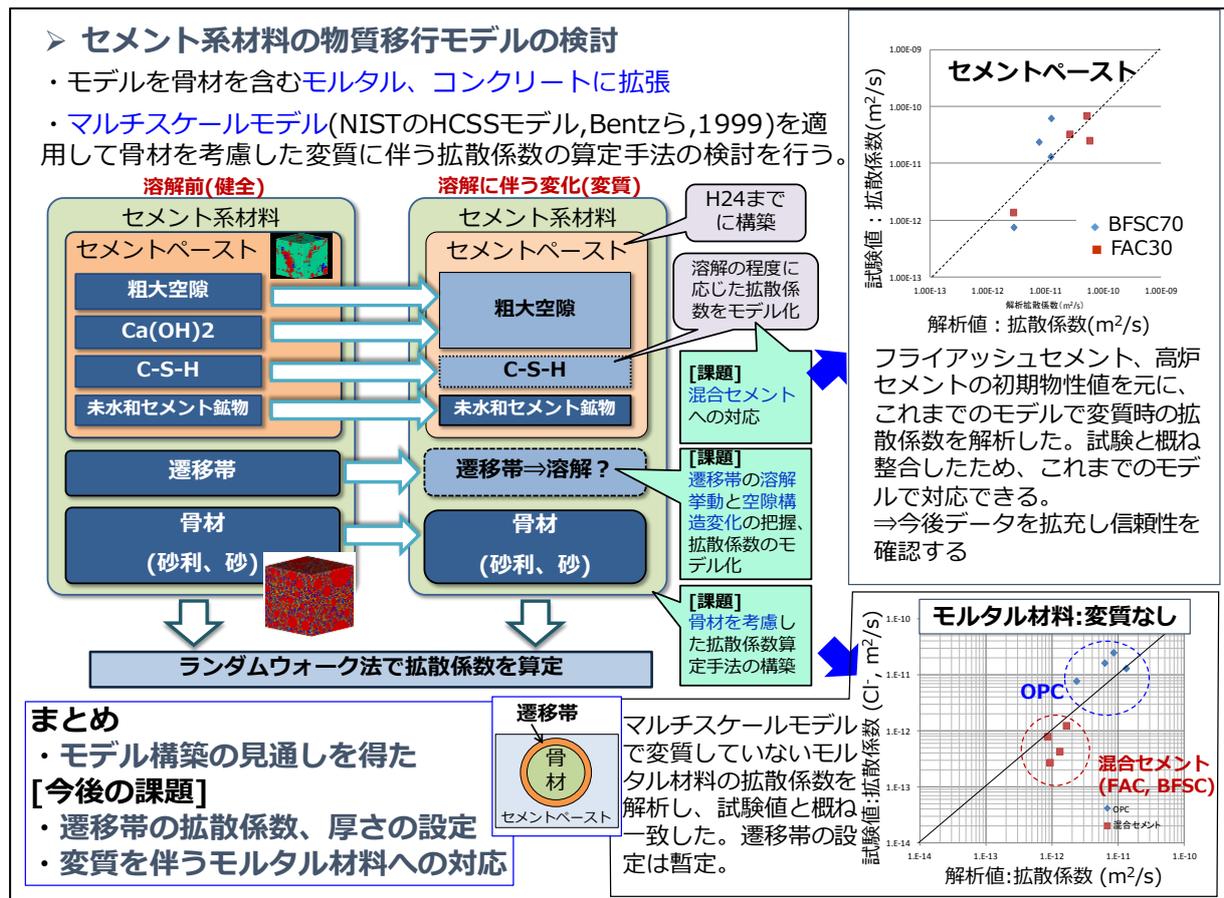


図 1.5.1-5 セメント系材料の拡散係数モデルの成果概要

(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に変化し、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（アナサイト）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、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、これまで試験が難しかった完全飽和線の低応力部分についてもデータを取得して高度化した。

膨張挙動に関しては、変質が進行すると完全飽和線まで膨張しないため、非可逆比により整理することによりその現象のモデル化を検討し、今後データを拡充していく必要がある(図 1.5.1-7)。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。加えて、せん断挙動について、等体積一面せん断試験を行い、これまで知見が少なかったベントナイトの限界状態線に関する知見の拡充を進めている。

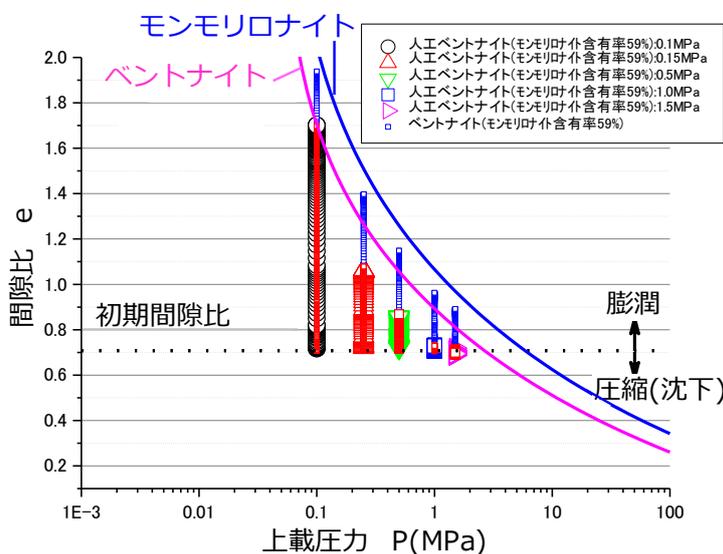


図 1.5.1-6 緩衝材の力学挙動に関する試験結果（圧密挙動）

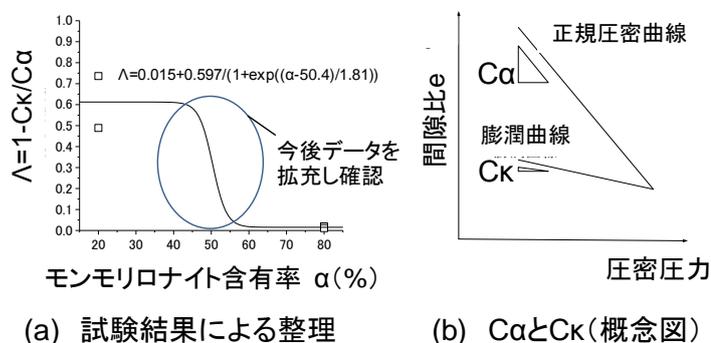


図 1.5.1-7 ベントナイトの膨潤挙動の非可逆比による整理

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した。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を伴う力学挙動について把握した。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し、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 1.1.1-2 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、粉末の合成 C-S-H を一定温度の水中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、先ず、結晶化条件を明らかにする必要がある。合成 C-S-H 及び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の定温度試験により、温度が 50°C 以上にて、C-S-H の Ca/Si モル比(C/S)が石英からの Si の供給によりトバモライトの組成の 0.83 程度に低下し、結晶化する可能性があることを把握した(図 1.5.1-8)。加えて、混合セメントでの結晶化の可能性を合成 C-A-S-H による試験から確認した。

結晶化の材料特性値への影響は少ないとされるが、80℃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把握する長期試験を開始し、今後影響を確認していく。

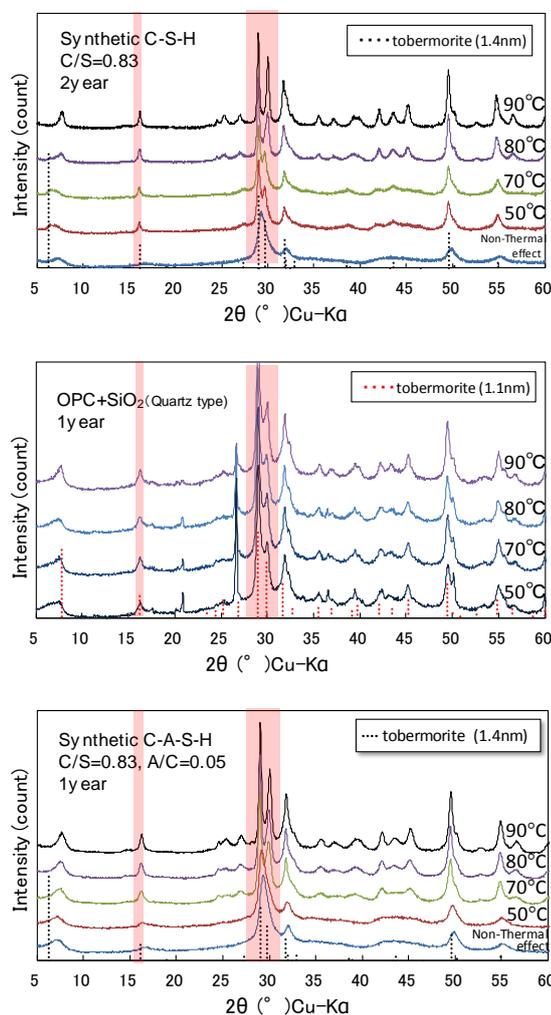


図 1.5.1-8 粉末試料による定温度試験結果(XRD での結晶化確認)

- 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に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の関する検討は、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 Time of Flight Difference (TOFD) 法とその画像化技術による手法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閉鎖後長期の挙動を評価し、その成立性の確認、設計、施工方法への反映等のための 2 次元の HMC 連成解析手法を検討する。(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[8])。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 次元有限要素法(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[9])。

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検討した。化学解析の解析条件の検討、ベントナイトの密度分布に施工の条件を考慮する手法の検討、化学変質を考慮した際の長期の力学挙動の解析による評価など、連成解析に関する検討を実施し、これにより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。化学変質を考慮した力学挙動は、モンモリロナイトの溶解に加え二次鉱物の生成を考慮して長期の解析をすると二次鉱物の生成を考慮しない場合に比べて変形が少ないことや生成する二次鉱物の種類によって力学挙動が異なること等、より現実的な長期解析が可能となった(図-12)。

今後は、検討を進めている各種現象モデルの反映、施工条件や冠水挙動の考慮及び連成の手法の検討を行い、信頼性の高い長期挙動解析手法の構築を進めていく。

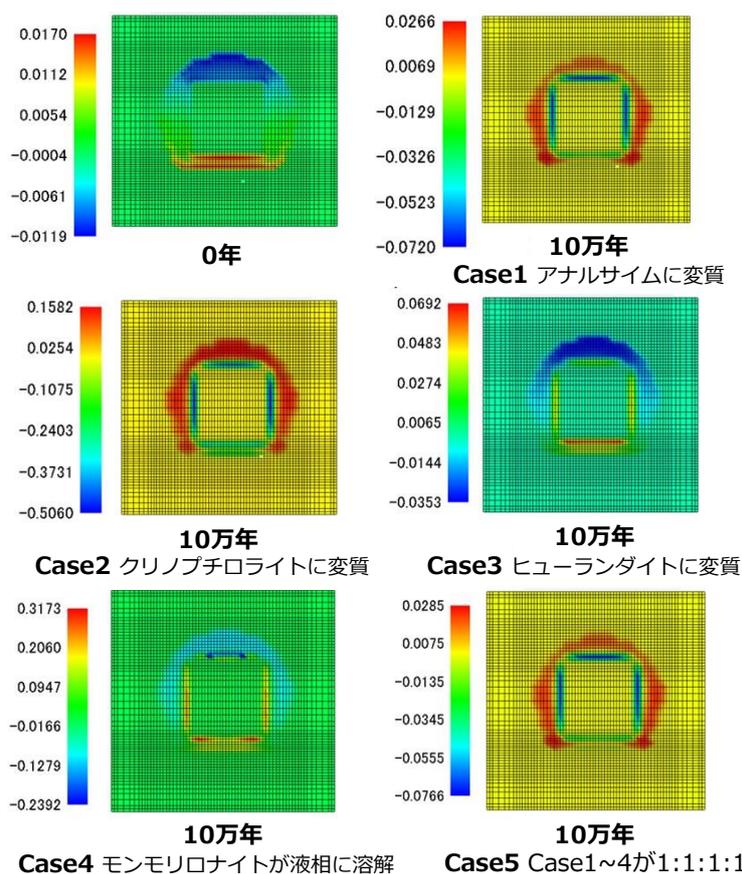


図 1.5.1-9 人工バリアの化学変質を反映した長期力学挙動解析の結果
(体積ひずみ・10万年後)

1.6 平成 28 年度の実施事項

1.4 及び 1.5 に示した 5 年間の全体計画及び平成 27 年度までの成果を踏まえた、平成 28 年度の各項目における実施内容を以下に示す。なお、平成 28 年度は個別の内容に加え、平成 29 年度の 5 年間の取りまとめに向けた進め方についても検討することとした。

(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 (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(2.1 項)
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検討

した二次鉱物の生成のモデル化案について、試験データを拡充して検証により信頼性の向上を行った。加えて化学解析手法への反映方法について具体化した。

2) セメントーベントナイト接触部の挙動把握 (2.2 項)

セメントーベントナイト接触試料の分析を実施し、これまでの結果と併せて、セメント側からベントナイト側への Ca 移行、ベントナイト側での二次鉱物である C-S-H の生成、及び、モンモリロナイトの Ca 型化に関する知見をまとめた。また、平成 27 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高分解能な XAFS 分析等を適用して取得する目途を得た。

3) ベントナイト系材料の溶解モデルの高度化 (2.3 項)

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して、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、圧密状態での粒子間ポテンシャルの設定(剛体ポテンシャルのみ)が暫定であるため、分散系(四重極ポテンシャル)との整合について検討をした。

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 (2.4 項)

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 C-S-H 部分の拡散係数の設定及びモルタル材料への対応のための遷移帯の変質挙動の拡散係数予測モデルでの取り扱いを中心に検討した。

(2) 緩衝材の化学変質に伴う力学挙動に関する試験とモデル化 (第 3 章)

1) 力学挙動に関する試験とモデル化 (3.2 項)

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)に伴う力学挙動のモデルを高度化し信頼性を向上させた。圧密挙動を表す完全飽和線のモデルは、セメント影響を受けた間隙水を考慮するための検討をした。膨潤挙動に関して、モンモリロナイト含有量が減少する程一致しない点の、非可逆比によるモデル化を、試験データを拡充し検討した。さらに、これまで知見が少なく力学挙動の解析に重要なため、せん断試験で確認してきたベントナイトの限界状態線について、カルシウム型化などセメント影響による変質の影響を試験により確認し、拡充した。

2) 透水挙動に関するモデル化 (3.3 項)

これまでに構築してきた Kozeny-Carman 則による化学変質を考慮した緩衝材の透水係数式について、Ca 型化の影響など実測値との整合性を高める検討をした。

(3) 人工バリア評価の初期条件の設定（第4章）

1) セメント系材料の熱変質条件の把握（C-S-Hの結晶化条件）（4.1項）

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すると共に、混合セメントの結晶化についての試験を開始し確認を進め、これまで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（C-S-Hの結晶化）が材料物性値に及ぼす影響（4.2項）

人工バリアの制限温度 80°C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、結晶化の物性値への影響に関して、バルク試料の定温度試験を継続して確認を進めた。

3) 経年コンクリートの調査（4.3項）

1)のセメント系材料の熱変質に関連して、熱履歴を長期間受けた構造物から採取したコンクリート（経年コンクリート）を分析して、熱変質条件に関する信頼性を高めた。加えて、長期間経過したフライアッシュセメントを使用のコンクリートを分析し、初期条件の鉱物設定に関連する知見を得た。

(4) HMC 連成解析手法の検討（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（5.1項）

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、二次鉱物の生成挙動のモデル化の検討を受け、モデルの解析への反映手法の具体化、透水係数式の見直し（空隙率の長期変遷との関連の不整合の改善）等を実施し、改良、高度化を進めた。化学及び力学の挙動の連成においては、受け渡しの手法が長期解析結果に影響することから、これまでの連成解析に関する検討結果等を踏まえ、化学解析側での収受等を中心に受け渡しの手法について検討をした。

2) HMC 連成解析に関わる力学解析手法に関する検討（5.2項）

力学解析における、化学変質を考慮した力学構成モデルに、弾塑性の構成モデルを導入しその適用性を検討した。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。緩衝材の転圧の際に発生する乾燥密度の不均一の影響について HMC 解析を実施して長期変遷を確認した。これにより施工時の乾燥密度の不均一の HMC 解析での条件設定等の取り扱いについて検討した。

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] 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)
- [3] (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)
- [4] Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J.: User's guide to PHREEQC (version 2)—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259 (1999)
- [5] (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)
- [6] (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)
- [7] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 (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)
- [8] 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)
- [9] (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)