



JAEA-Research

2025-016

DOI:10.11484/jaea-research-2025-016

幌延深地層研究計画における地下施設での調査研究段階  
(第3段階: 令和2年度以降の必須の課題 2020–2024年度)  
研究成果報告書

Synthesis Report on the R&D for  
the Horonobe Underground Research Laboratory Project  
Carried Out Between Fiscal Years 2020-2024

中山 雅 石井 英一 青柳 和平 早野 明  
大野 宏和 尾崎 裕介 望月 陽人 武田 匡樹  
木村 駿

Masashi NAKAYAMA, Eiichi ISHII, Kazuhei AOYAGI, Akira HAYANO  
Hirokazu OHNO, Yusuke OZAKI, Akihito MOCHIZUKI, Masaki TAKEDA  
and Shun KIMURA

幌延深地層研究センター  
Horonobe Underground Research Center

March 2026

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課  
〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49  
E-mail: [ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section, Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: [ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

幌延深地層研究計画における地下施設での調査研究段階  
(第3段階：令和2年度以降の必須の課題 2020－2024年度)  
研究成果報告書

日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター

中山 雅，石井 英一，青柳 和平，早野 明，大野 宏和，尾崎 裕介，望月 陽人，  
武田 匡樹，木村 駿

(2025年12月1日受理)

幌延深地層研究計画は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が堆積岩を対象に北海道幌延町で実施している地層処分技術に関する研究開発の計画である。

幌延深地層研究計画は、「地上からの調査研究段階（第1段階）」、「坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階）」および「地下施設での調査研究段階（第3段階）」の3つの調査研究段階に分けて進めている。2020年度からは、北海道および幌延町により受け入れられた、「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」で示した令和2年度以降の必須の課題である、(1)実際の地質環境における人工バリアの適用性確認、(2)処分概念オプションの実証、(3)地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証について、第3期および第4期中長期目標期間を目途に取り組むこととしている。

本報告書では、上記の令和2年度以降の必須の課題のうち、2020年度から2024年度までに所期の目標を達成した課題について調査研究の成果を取りまとめた。今後これらの課題で得られた成果については、2024年度から実施している、「坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」において、坑道やピットの配置に係る考え方、人工バリア材料などの設置方法、それらの閉じ込め性能を評価する手法の体系的な整理に反映していく。

Synthesis Report on the R&D for the Horonobe Underground Research Laboratory Project  
Carried Out Between Fiscal Years 2020-2024

Masashi NAKAYAMA, Eiichi ISHII, Kazuhei AOYAGI, Akira HAYANO, Hirokazu OHNO,  
Yusuke OZAKI, Akihito MOCHIZUKI, Masaki TAKEDA and Shun KIMURA

Horonobe Underground Research Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received December 1, 2025)

The Horonobe Underground Research Laboratory (URL) Project is being pursued by the Japan Atomic Energy Agency (JAEA). The main aim of the project is to enhance the reliability of relevant technologies for the geological disposal of high-level radioactive waste by investigating the deep geological environment within the host sedimentary rocks at Horonobe in Hokkaido, northern Japan.

These investigations have been conducted in three phases: “Phase 1: Surface-based investigation”, “Phase 2: Construction” (investigation during tunnel excavation) and “Phase 3: Operation” (investigation in subsurface facilities). Since the fiscal year 2020, we have been conducting R&D based on the Horonobe Underground Research Plan for the Fiscal Year 2020 Onwards, which was approved by Hokkaido Prefecture and Horonobe Town. In particular, we are working on the following key tasks with the aim of completing JAEA’s 3rd and 4th Mid- and Long-Term Plans: “Study on near-field system performance in geological environments”, “Demonstration of repository design options” and “Understanding of buffering behaviour of sedimentary rocks to natural perturbations”.

This report summarizes the R&D activities on the three above-mentioned key tasks, the goals of which were achieved between fiscal years 2020 and 2024. The results obtained from these tasks will be systematically organized as part of the “Systematic integration of technologies towards EBS emplacement” which has been in progress since fiscal year 2024. This task includes concepts related to the layout of galleries and pits, installation methods for engineered barrier materials, and methods for evaluating their containment performance.

Keywords: Horonobe URL Project, High-level Radioactive Waste, Geological Disposal Technology, Sedimentary Rocks

目次

1. はじめに.....	1
1.1. 幌延深地層研究計画の位置付けとこれまでの経緯.....	1
1.2. 令和2年度以降の幌延深地層研究計画に示した研究課題.....	3
1.3. 地下施設周辺の地層および稚内層深部（深度500 m）での研究の実施に関する検討結果.....	6
1.4. 地下施設の整備.....	8
1.5. 幌延国際共同プロジェクト.....	10
1.6. 本報告書において取りまとめる成果.....	12
2. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認.....	13
2.1. 人工バリア性能確認試験.....	13
2.2. 物質移行試験.....	26
3. 処分概念オプションの実証.....	50
3.1. 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験.....	50
3.1.1. 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証.....	50
3.2. 高温度（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験.....	74
4. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証.....	89
4.1. 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化.....	89
4.1.1. 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握.....	89
4.1.2. 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化.....	100
4.2. 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験.....	111
5. まとめ.....	117
参考文献.....	121
付録.....	133

## Contents

1. Introduction .....	1
1.1. Context and current status of the Horonobe Underground Research Laboratory Project.....	1
1.2. Key R&D challenges in the Horonobe Underground Research Plan for fiscal year 2020 onwards .....	3
1.3. Results on the geological environmental investigation in deep part of the Wakkanai Formation (GL-500 m) .....	6
1.4. Construction of the subsurface facilities toward GL-500 m.....	8
1.5. The Horonobe International Project .....	10
1.6. Content and structure of this report .....	12
2. Study on near-field system performance in geological environments .....	13
2.1. Full-scale EBS performance in geological environments.....	13
2.2. Solute transport experiment with model testing .....	26
3. Demonstration of repository design options .....	50
3.1. Demonstration of engineering feasibility of repository technology .....	50
3.1.1. Development and testing of operation, retrieval and closure technologies .....	50
3.2. Evaluation of EBS behaviour over 100°C .....	74
4. Understanding of buffering behaviour of sedimentary rocks to natural perturbations ..	89
4.1. Evaluation of intrinsic buffering against endogenic and exogenic processes .....	89
4.1.1. Evaluation of hydro-mechanical responses of fault to water pressure changes ....	89
4.1.2. Improvement of techniques for characterizing groundwater stagnant domain ..	100
4.2. Development of techniques for evaluating EDZ self-sealing behaviour after backfilling.....	111
5. Summary.....	117
References .....	121
Appendix.....	133

図リスト

図 1-1	幌延深地層研究計画の全体スケジュール	3
図 1-2	研究課題の変遷（必須の課題～令和 2 年度以降の研究課題）	4
図 1-3	令和 2 年度以降に取り組むべき研究課題（令和 2 年度以降の必須の課題）	4
図 1-4	幌延 URL 周辺の地質断面図	7
図 1-5	幌延 URL イメージ図	9
図 1-6	調査坑道の平面図および主な原位置試験の実施場所	10
図 2-1	人工バリア性能確認試験の概念図	13
図 2-2	模擬 OP 表面の温度計測位置および計測データ	14
図 2-3	人工バリア性能確認試験の計測データの例	15
図 2-4	比抵抗トモグラフィにより算出した緩衝材中の飽和度変化	15
図 2-5	解析モデル	17
図 2-6	緩衝材中の温度観測位置および観測データと解析結果	17
図 2-7	緩衝材中の飽和度観測位置および観測データと解析結果	17
図 2-8	緩衝材中の全応力観測位置および観測データと解析結果	18
図 2-9	緩衝材中の変位観測位置および観測データと解析結果	18
図 2-10	ステップ 1：浸潤試験を対象とした解析結果の比較例	19
図 2-11	ステップ 2：緩衝材 5 段目の飽和度変化を対象とした解析結果の比較例	20
図 2-12	人工バリア解体試験施工の概念図	20
図 2-13	緩衝材サンプリングの概念図	21
図 2-14	緩衝材のサンプリング状況とサンプリング後の試料	22
図 2-15	含水比測定結果の一例（緩衝材ブロック：下から 5 段目）	22
図 2-16	模擬 OP 取り出しの概念図	23
図 2-17	模擬 OP 取り出し作業状況	24
図 2-18	事前樹脂注入サンプリングの概念図	24
図 2-19	事前樹脂注入サンプリングによる取得したサンプル	25
図 2-20	H4-1 孔、P 孔および D4-1 孔のレイアウト（350m 試験坑道 3 および 4）	27
図 2-21	H4-1 孔における割れ目分布、透水係数および間隙水圧（2021 年 11 月時点）	28
図 2-22	P 孔における割れ目分布、トレーサー試験前に実施した透水試験結果および間隙水圧（2021 年 11 月時点）	28
図 2-23	トレーサー濃度の観測地点（M1、M2、H4-1 孔および P 孔の区間 2）	29
図 2-24	定常注入試験時の H4-1 孔および P 孔の区間 2 におけるトレーサー濃度	30
図 2-25	ダイポール試験時の H4-1 孔の区間 1、区間 2 および P 孔の区間 2 における間隙水圧	30
図 2-26	移流分散解析におけるモデル概念	32
図 2-27	移流分散解析結果	32
図 2-28	縦方向分散長と評価スケールの関係性	34
図 2-29	本課題で対象とする各成分のサイズの関係性	35
図 2-30	室内試験のイメージ図	36
図 2-31	室内試験における希土類元素濃度の時間変化	37

図 2-32	350m 調査坑道に設置した物質移行試験装置	38
図 2-33	原位置試験の装置概念図および試験手順	39
図 2-34	2023 年度に実施した原位置試験における希土類元素濃度の時間変化	40
図 2-35	2024 年度に実施した原位置試験における希土類元素濃度の時間変化	41
図 2-36	深度による溶存有機物の特徴と希土類元素 ( $\text{Eu}^{3+}$ ) との親和性の違い	43
図 2-37	ブロックスケールにおける物質移行のイメージ	45
図 2-38	調査場所と調査対象とした断層	46
図 2-39	孔間水理試験時の水圧観測結果	46
図 2-40	トレーサー試験で観測された揚水孔のトレーサー濃度	46
図 2-41	孔間透水試験の解析結果	47
図 2-42	DI=2 の深度に対する相対深度と水みちのつながり方の次元の関係	47
図 2-43	物質移行モデルの概念図	48
図 2-44	ブロックスケールを対象としたトレーサー試験結果の再現解析	48
図 3-1	吹付けコンクリート試験体作製状況	51
図 3-2	坑道内における試験体の定置状況	51
図 3-3	坑道壁面からの HFSC 吹付けコンクリート採取の概念図	52
図 3-4	坑道壁面から採取した HFSC 吹付けコンクリート試料の変質領域	52
図 3-5	HFSC 吹付けコンクリート試料の中性化深さと経過時間の関係	53
図 3-6	大気条件下で定置した HFSC 吹付けコンクリート試料の元素濃度分布 (定置から約 1 年 9 か月経過、試料表面が上側)	53
図 3-7	坑道壁面から採取した HFSC 吹付けコンクリート試料の坑道側の元素濃度分布 (施工から約 10 年経過、坑道表面が上側)	54
図 3-8	中性化領域における HFSC 吹付けコンクリートの累積空隙径分布	54
図 3-9	坑道壁面から採取した HFSC 吹付けコンクリートの溶出領域 (岩盤との接触部) と非変質領域における累積空隙径分布	55
図 3-10	坑道壁面から採取した HFSC 吹付けコンクリート試料の岩盤側の元素濃度分布 (施工から 10 年経過、岩盤との接触部が上側)	55
図 3-11	地下水への浸潤条件下で定置した HFSC 吹付けコンクリート試料の元素濃度分布 (定置から約 1 年 9 か月経過、試料表面が上側)	56
図 3-12	HFSC 吹付けコンクリート試料の一軸圧縮強度	57
図 3-13	解析に使用した坑道周辺のモデルとメッシュ	58
図 3-14	クリープ変形による坑道周辺のヤング率の変化率	60
図 3-15	坑道開放後の坑道周辺の水圧の変化	60
図 3-16	坑道開放後の坑道周辺の飽和度の変化	60
図 3-17	坑道開放 50 年後に埋め戻した後の坑道周辺の水圧の変化	60
図 3-18	坑道開放 300 年後に埋め戻した後の坑道周辺の水圧の変化	61
図 3-19	坑道開放 50 年後に埋め戻した後の坑道周辺の飽和度の変化	61
図 3-20	坑道開放 300 年後に埋め戻した後の坑道周辺の飽和度の変化	61
図 3-21	縮尺模型の概念図	64
図 3-22	上方膨潤率の経時変化	64

図 3-23	試験終了時の緩衝材の乾燥密度分布	65
図 3-24	坑道底盤への粘土止水壁の施工状況	66
図 3-25	試験の概要図	66
図 3-26	EDZ シーリング試験の試験領域内の透水係数の経時変化	67
図 3-27	切り欠き部への吹付けの状況	68
図 3-28	吹付けコンクリートの影響を考慮しない既存の解析手法と改良手法による弾性波速度分布の推定結果	69
図 3-29	「立坑・水平坑道が選択的な核種の移行経路となる」シナリオを回避するための対策の整理	70
図 3-30	閉鎖技術に関する設計フロー	71
図 3-31	試験体の設置概略図	75
図 3-32	緩衝材ブロックの積み上げ順および定置方向	76
図 3-33	緩衝材ブロック内の計測センサーの配置図	76
図 3-34	温度の計測結果	78
図 3-35	全応力の計測結果	78
図 3-36	水圧の計測結果	79
図 3-37	比抵抗トモグラフィの解析結果	80
図 3-38	緩衝材ブロックの試験・分析項目と試料採取位置	81
図 3-39	緩衝材ブロック内側に認められた色調の変化（上から 10 段目の例）	82
図 3-40	緩衝材ブロック内側からの色調変化部分の距離	82
図 3-41	緩衝材ブロックのヒーター接触部に認められたひび割れ（上から 11 段目の例）	83
図 3-42	緩衝材ブロック内での含水比の分布	84
図 3-43	緩衝材ブロック内の乾燥密度と含水比の関係	84
図 3-44	緩衝材ブロック内の一軸圧縮強度と乾燥密度の関係	85
図 3-45	緩衝材ブロック内の透水係数と乾燥密度の関係	85
図 3-46	X線 CT を活用した緩衝材試料の湿潤に関する室内試験結果	86
図 3-47	スメクタイトのイライト化割合に関する経時変化の計算結果	87
図 4-1	国内外の 6 つの地層における地下水の主要な水みち割れ目の局所的な透水性と DI の関係	90
図 4-2	各地層で導出される主要な水みち割れ目の局所的な透水性と DI あるいは深度の関係とその比較	90
図 4-3	DI、割れ目内の隙間の開閉および割れ目の透水性の関係（割れ目のずれが一定の場合）	91
図 4-4	割れ目のずれ、かみ合わせおよび透水性の関係（DI が一定の場合）	92
図 4-5	割れ目のずれに伴う開口幅の変化に関するシミュレーション	92
図 4-6	断層の局所的な透水性の上限と DI の関係	93
図 4-7	稚内層で実施した水圧擾乱試験の結果	94
図 4-8	仮想の割れ目の透水試験により得られた割れ目内の水みちのつながり方の次元と割れ目内の主要な流路面積の割合の関係	95
図 4-9	割れ目内の隙間の開閉現象に関する理論的な計算により導出される割れ目内の主要	

な流路面積の割合と DI の関係.....	95
図 4-10 透水試験で観測される稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元と DI の関係...	95
図 4-11 稚内層中の断層の代表的な透水性と DI の関係.....	96
図 4-12 水圧擾乱試験および透水試験で認められた稚内層中の断層内の水みちのつながり 方の次元と DI の関係 .....	98
図 4-13 水圧擾乱試験で認められた稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元と断層 のずれの関係.....	98
図 4-14 水圧擾乱試験を行った断層.....	99
図 4-15 割れ目のせん断剛性と水圧の関係.....	99
図 4-16 せん断剛性の推定結果の例.....	100
図 4-17 化石海水の三次元分布を推定するための電磁探査およびボーリング調査の手順.....	103
図 4-18 数十 km 四方の調査における二次元測線の MT 法電磁探査の結果 .....	103
図 4-19 高密度電磁探査で得られた比抵抗分布（鉛直断面） .....	104
図 4-20 高密度電磁探査で得られた比抵抗分布（水平断面） .....	104
図 4-21 ボーリング孔における比抵抗、塩化物イオン濃度、酸素同位体比の深度分布 .....	105
図 4-22 地球統計学的手法で得られた酸素同位体比の分布 .....	106
図 4-23 ボーリング孔における岩石コアの間隙水の Cl 濃度と $\delta^{18}\text{O}$ の関係と解析結果 .....	107
図 4-24 割れ目水と間隙水の水質の違いと地下水の $^{14}\text{C}$ 年代に基づき解釈した地下水流動 概念 .....	108
図 4-25 HDB-5、HDB-6、HDB-9 孔付近の地下水移行時間の深度分布.....	109
図 4-26 地下水移行時間の解析結果の例 .....	110
図 4-27 350m 試験坑道 3 および 350m 試験坑道 4 の EDZ の割れ目を対象に実施した注水 試験区間.....	112
図 4-28 EDZ 割れ目を対象に実施した段階注水試験のデータ（H4-3 孔の例） .....	112
図 4-29 注水試験結果と DI モデルの比較.....	113
図 4-30 割れ目の開口幅とせん断変位の計測方法.....	115
図 4-31 樹脂注入後の EDZ の割れ目試料で観察された開口幅とせん断変位量の関係（赤丸） とシミュレーション結果（青線） .....	115

表リスト

表 1-1	幌延深地層研究計画の令和 2 年度以降のスケジュール.....	5
表 1-2	深度 500 m と深度 350 m の地質環境の特徴.....	8
表 1-3	幌延 URL 整備の実績.....	8
表 1-4	HIP 参加機関（フェーズ 1）.....	12
表 2-1	解析パラメータ.....	33
表 3-1	回収可能性の維持に関する技術検討の枠組み.....	50
表 3-2	埋め戻し工法の適用範囲および施工品質などに関する一覧.....	73
表 4-1	断層の閉塞/充填状況に応じた堆積岩の分類と断層の局所的な透水性の上限と DI の 相関性.....	93
表 4-2	断層の閉塞/充填状況と岩石の透水性に応じた堆積岩の分類と断層の代表的な透水性 と DI との相関性.....	97
表 5-1	実際の地質環境における人工バリアの適用性確認のまとめ.....	118
表 5-2	処分概念オプションの実証のまとめ.....	119
表 5-3	地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証のまとめ.....	120

This is a blank page.

## 1. はじめに

### 1.1. 幌延深地層研究計画の位置付けとこれまでの経緯

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）幌延深地層研究センターでは、原子力発電に伴って発生する高レベル放射性廃棄物を安全に地層処分するための基盤的な研究開発として、2001年3月より北海道幌延町において幌延深地層研究計画<sup>1)</sup>（堆積岩を対象とした深地層の研究施設計画）を進めている。幌延深地層研究計画は、実際の地層処分事業とは明確に区別することを前提に、堆積岩を対象とした深地層の科学的な研究（地層科学研究）および地層処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化に向けた研究開発（地層処分研究開発）を行うものである。また、幌延深地層研究計画では、「地上からの調査研究段階（第1段階）」、「坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階）」および「地下施設での調査研究段階（第3段階）」の3つの調査研究段階に分けて進めることとしており<sup>2)</sup>、現在は第3段階の調査研究を実施中である。

各段階における目標は以下のとおりである。

#### 第1段階：地上からの調査研究段階

- ・ 地上からの調査研究における地質環境モデルの構築および坑道掘削前の深部地質環境の状態の把握
- ・ 地下施設の詳細設計および施工計画の策定

#### 第2段階：坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階

- ・ 坑道の掘削（地下施設の建設）に伴う一連の深部地質環境の調査・解析・評価技術の整備
- ・ 深地層における工学的技術の基盤の整備
- ・ 地層処分技術に関する工学技術の有効性の確認
- ・ 安全評価手法の適用性の確認

#### 第3段階：地下施設での調査研究段階

- ・ 地質環境調査技術、坑道を対象とした工学的技術、地下施設とその周辺影響領域を包含する地質環境特性の長期変遷評価技術の開発
- ・ 処分場の設計・施工や操業・閉鎖に関わる処分技術開発
- ・ 安全評価手法などに関わる技術開発

これらの調査研究段階は、原子力発電環境整備機構（以下、NUMO）が法律に基づいて段階的に行う、処分地選定のための文献調査、概要調査、精密調査のうち、第1段階が概要調査、第2段階が精密調査の前半、第3段階が精密調査の後半に概ね対応する。これまで、原子力機構では、第1段階および第2段階における研究開発成果を取りまとめ、公表してきた<sup>3), 4), 5)</sup>。これらの成果はNUMOが進める処分事業および国が行う安全規制に必要な技術基盤の整備に資するものである。

また、研究開発を実施する中で、原子力機構は、2013年9月に改革計画を策定し、深地層の研究施設計画については、NUMOが行う「精密調査の前半」に資することを目的とした成果の取りまとめおよび「精密調査の後半」に資する残された必須の課題を明確にした今後の計画の策定を、2014年9月末までに行うこととした<sup>6)</sup>。これに基づき、瑞浪超深地層研究所（結晶質岩）および幌延深地層研究センター（堆積岩）の2つの深地層の研究施設において今後実施すべき必須の課題を検討した。幌延深地層研究計画において改革計画に基づき抽出した必須の課題を以下に示す<sup>7)</sup>。

- ① 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認（人工バリア性能確認試験、オーバーパック腐食試験、物質移行試験）
  - ・ 2014年度から深度350m調査坑道で実施している人工バリア性能確認試験、オーバーパック

腐食試験、物質移行試験を通して、実際の地質環境において、人工バリアや周辺岩盤中での熱-水-応力-化学連成挙動や物質移行現象などを計測・評価する技術の適用性を確認し、「精密調査後半」に必要となる実証試験の技術基盤を確立する。

- ② 処分概念オプションの実証（処分孔等の湧水対策・支保技術などの実証試験、人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験、高温（100℃以上）などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験）
  - ・ 人工バリア設置環境の深度依存性を考慮し、種々の処分概念オプションの工学的実現性を実証し、多様な地質環境条件に対して柔軟な処分場設計を行うことを支援する技術オプションを提供する。
- ③ 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証（水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化、地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験）
  - ・ 地震・断層活動等の地殻変動に対する力学的・水理学的な緩衝能力を定量的に検証し、堆積岩地域における立地選定や処分場の設計を、より科学的・合理的に行える技術と知見を整備する。

2015年度以降、文部科学省、経済産業省および原子力規制委員会が定めた「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が達成すべき業務運営に関する目標（中長期目標）」（以下、第3期中長期目標）の期間（2019年4月1日～2022年3月31日）において、上記①～③の必須の課題に重点を置いた研究開発を着実に進めてきた。また、第3期中長期目標を達成するために原子力機構が定めた「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の中長期目標を達成するための計画（中長期計画）（平成27年4月1日～令和4年3月31日）」において、「幌延深地層研究計画については、実際の地質環境における人工バリアの適用性確認、処分概念オプションの実証および地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証に重点的に取り組む、また、令和元年度末までに研究終了までの工程やその後の埋め戻しについて決定する。」としていたことから、2018年度には、研究開発成果の取りまとめに着手するとともに、研究開発の進捗状況などについて2015年度～2019年度の5か年で得られた成果に焦点を当てて外部専門家による評価を受けた。評価では、全体として概ね適切に研究が遂行され当該5か年の目標（各年度における研究開発目標）を達成できたと評価された一方、2020年度以降に取り組むことが期待される研究課題が示された。これらの研究課題、研究の進捗状況や国内外の状況を踏まえて検討した結果、さらなる研究が必要と判断した。この判断に基づき「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」を策定し、2019年8月2日に計画内容の変更を北海道および幌延町に申し入れ、2020年1月に受け入れられた<sup>8)</sup>。なお、受け入れにあたっては、2000年11月に北海道、幌延町および原子力機構（当時は核燃料サイクル開発機構）の三者が締結した「幌延町における深地層の研究に関する協定書」（以下、三者協定）に基づき、「幌延深地層研究の確認会議」が開催された。また、2020年度以降も毎年「幌延深地層研究の確認会議」は開催されており、計画の進捗状況および研究開発が三者協定に則って進められていることなどについて確認されている。図1-1に幌延深地層研究計画の全体スケジュールを示す。

「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」においては、実際の地質環境における人工バリアの適用性確認、処分概念オプションの実証および地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証について、2020年度以降、第3期中長期目標期間（2020年度～2021年度）および第4期中長期目標期間（2022年度～2028年度）を目途に取り組むこととした。その上で、国内外の技術動向を踏まえて、地層処分の技術基盤の整備の完了が確認できれば、地下施設の埋め戻しを行うことを具体的工程として示す

こととしている。

なお、第4期中長期目標を達成するために原子力機構が策定した第4期中長期計画では、幌延深地層研究計画について、「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」で示した3つの研究課題を進めること、「研究の実施に当たっては、稚内層深部（深度500m）に坑道を展開して研究に取り組むとともに、更なる国内外の連携を進め、研究開発成果の最大化を図る」こととしている。さらに、2025年2月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、高レベル放射性廃棄物については、「最終処分の実現に向け、特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針に基づき、国が前面に立ち取り組む。」との考え方が示され、「地層処分の技術的信頼性の更なる向上に向け、引き続き、国、NUMO、JAEA等の関係機関が、全体を俯瞰して技術開発を着実に進め、最新知見を定期的に反映するとともに、その専門的な評価が国民に十分に共有されることが重要である。この際、幌延の深地層研究施設等における研究成果を十分に活用していく。」ことが示された。



図 1-1 幌延深地層研究計画の全体スケジュール

## 1.2. 令和2年度以降の幌延深地層研究計画に示した研究課題

「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」では、2014年度に抽出した、深地層の研究施設で行うべき必須の課題<sup>7)</sup>のうち、引き続き研究開発が必要と考えられる以下の3つの課題（以下、令和2年度以降の必須の課題）に取り組んでいる（図1-2および図1-3）。なお、2015年度～2019年度までに得られた必須の課題に関する成果については、報告書として公開している<sup>9)</sup>。表1-1に幌延深地層研究計画の令和2年度以降のスケジュールを示すとともに、各課題の実施内容について以下に述べる。

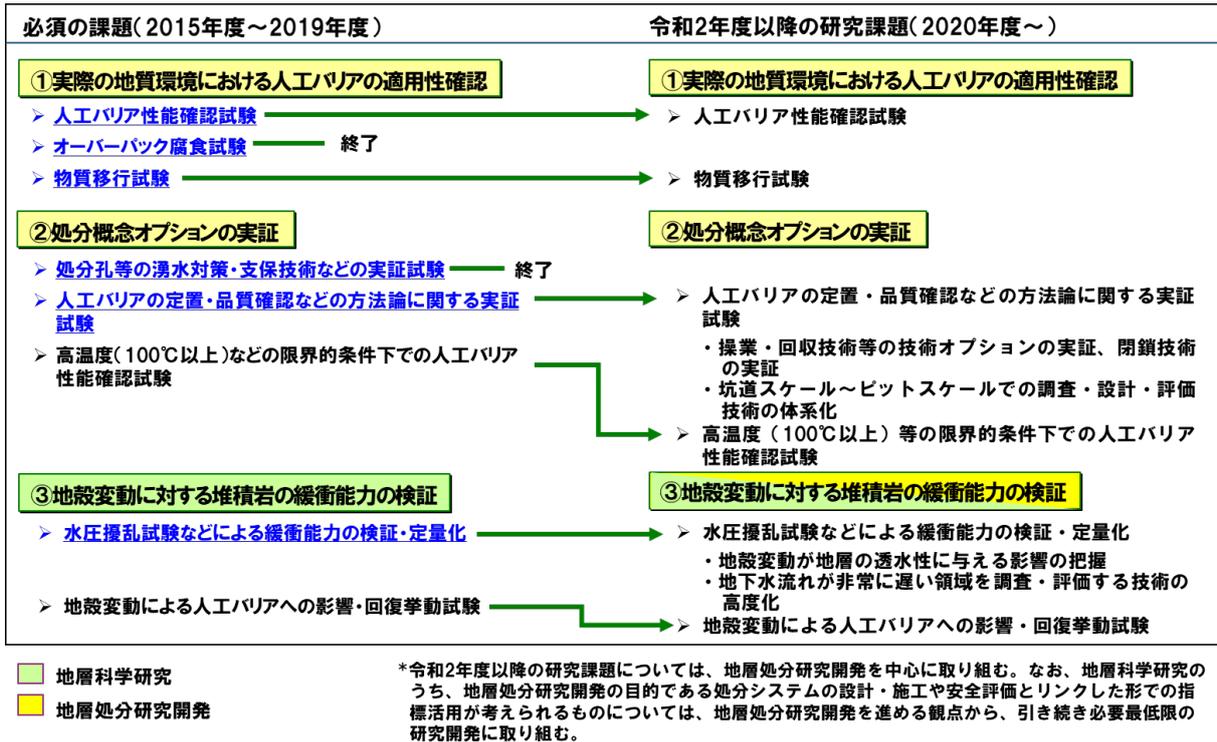


図 1-2 研究課題の変遷(必須の課題～令和2年度以降の研究課題)

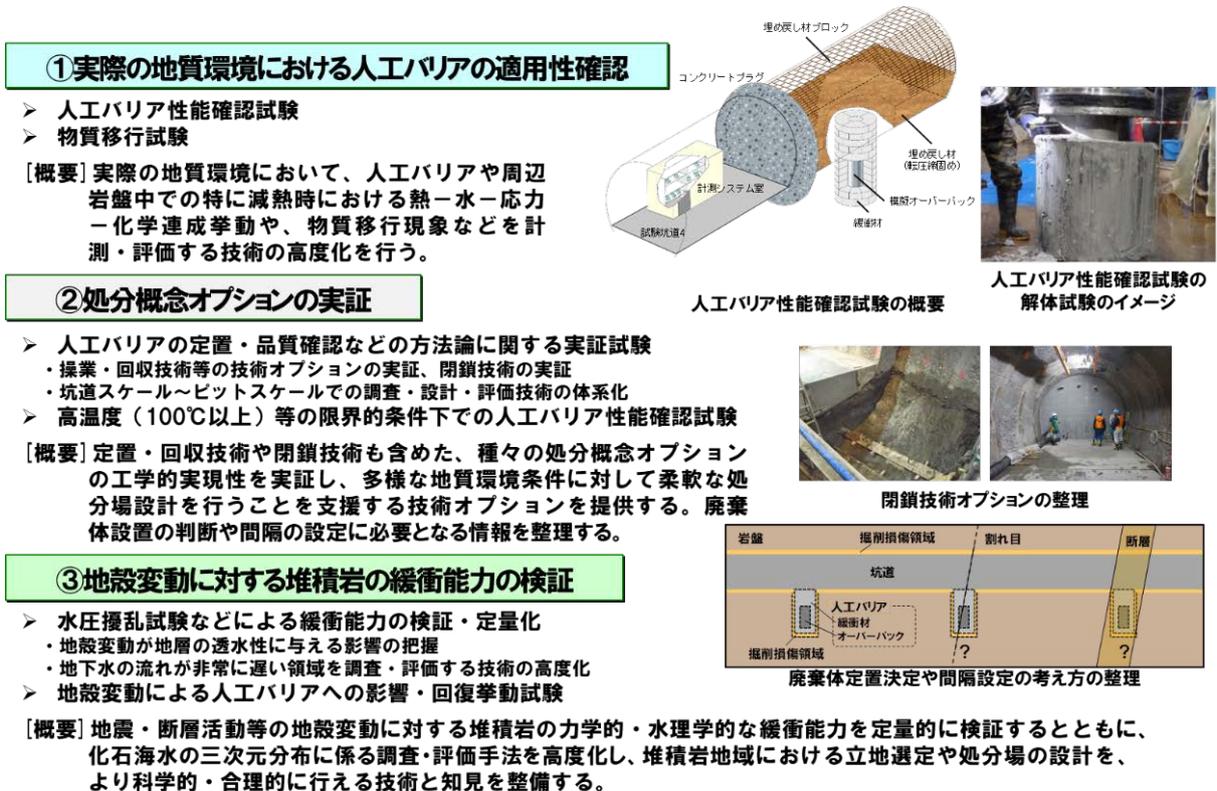


図 1-3 令和2年度以降に取り組むべき研究課題(令和2年度以降の必須の課題)

表 1-1 幌延深地層研究計画の令和 2 年度以降のスケジュール

	第3期			第4期中長期目標期間					
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認									
1.1 人工バリア性能確認試験									
1.2 物質移行試験									
2. 処分概念オプションの実証									
2.1 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験									
2.1.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証									
2.1.2 坑道スケール〜ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化									
2.2 高温度(100°C以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験									
3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証									
3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化									
3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握									
3.1.2 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化									
3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験									

本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題(2.12)に統合して実施する。

2.12を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

### (1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

2019年度までの人工バリア性能確認試験では、実際の地質環境におけるヒーターの加熱過程のデータを取得したが、減熱過程のデータが取得されていない。2020年度以降は、減熱時のデータを取得するとともに、人工バリア性能確認試験の解体試験の実施に向けた解体試験施工を実施する。

また、2019年度までの物質移行試験により、トレーサー試験手法を確立することができた。ただし、これまでの研究結果から、幌延の堆積岩において、有機物や微生物が、放射性物質の岩盤への吸着を妨げ、閉じ込め性能を低下させる可能性が確認されており、2020年度以降は、確立した試験手法を用いて掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得を実施するとともに、有機物や微生物の影響を確認するためのトレーサー試験を実施する。

### (2) 処分概念オプションの実証

2019年度までの試験では、実際の環境下において、坑道の埋め戻し方法の違い（締固め、ブロック方式など）による埋め戻し材の基本特性（密度や均一性）を把握したが、緩衝材の施工方法や坑道閉鎖に関する様々なオプションの検討には至っていない。2020年度以降は、人工バリア性能確認試験において、施工方法の違い（締固め、ブロック方式など）による緩衝材の品質の違いを実証試験で明らかにする。さらに人工バリアの品質を踏まえて、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための実証試験を行う。また、人工バリアシステムに対する安全裕度の検証に向けて、緩衝材が100°C超になった状態を想定した検討を実施する。

### (3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力

2019年度までの検討では、まずは小規模な断層（幅数 cm）に着目して試験を行い、断層のずれが断層沿いの地下水の流れに与える影響などを確認した。これまでの研究開発で手法の妥当性が確認できたため、この手法を使って、処分場の設計・施工や安全評価とリンクした形で研究を進めることが可能となった。2020年度以降は、より大型の断層において、断層のずれが断層内の地下水の流れに与える影響に関して、堆積岩の緩衝能力（自己治癒能力）の作用に係る実証試験を実施する。さらに、地下水の流れが非常に遅い領域を調査してモデル化する技術を実証するとともに、人工バリアのひび割れに対する自己治癒能力を解析する手法を開発する。

## 1.3. 地下施設周辺の地層および稚内層深部（深度 500 m）での研究の実施に関する検討結果

幌延深地層研究センターの地下施設（以下、幌延 URL）で研究対象としている地層は、声間層と稚内層であり、声間層は稚内市声間付近、稚内層は稚内市の市街によく認められたことから、それぞれの地名が地層名として古くから与えられている。声間層（珪藻質泥岩）は、主に海底に降り積もった珪藻と呼ばれる植物プランクトンの遺骸から構成され、幌延 URL 周辺の堆積年代は、約 400 万年前～200 万年前と推定される<sup>10), 11), 12)</sup>。一方、稚内層（珪質泥岩）は、声間層と同様の珪藻の遺骸が堆積の進行に伴ってより深くに埋没することで地温の影響などを受けて溶解し、再沈殿<sup>11)</sup>してできた鉱物を主成分としており、声間層より硬いのが特徴である。幌延 URL 周辺の稚内層の堆積年代は、約 700 万年前～400 万年前と推定される<sup>10), 11), 12)</sup>。図 1-4 に幌延 URL 周辺の地質断面図を示す。

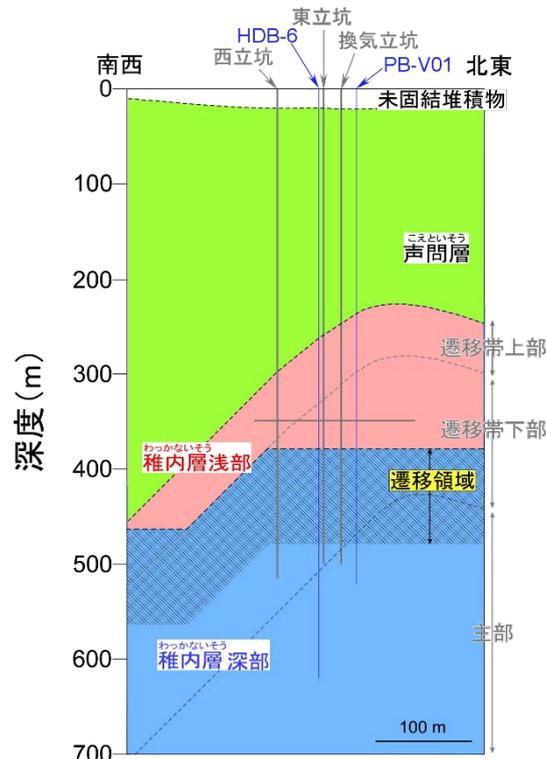


図 1-4 幌延 URL 周辺の地質断面図

稚内層深部（深度 500 m）での研究に関しては、「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」において、令和 2 年度以降の必須の課題の範囲内であることを前提として、研究成果を最大化するため、実施するかどうかについて判断材料を集めるため、研究内容の検討および設計を行うこととしていた。

深度 500 m の地質環境に関しては、2020 年度に新たに実施した 2019 年度までの水圧擾乱試験などのデータ解析の結果、深度 500 m 付近は水が流れにくい領域であると推定された（4.1.1 参照）。また、高密度電磁探査の結果、幌延 URL の深度 500 m 付近の化石海水の空間分布を詳細に把握することができ、地下水の流れが非常に遅い領域であることが示された（4.1.2 参照）。この結果、深度 500 m の地質環境は、深度 350 m と比較して、地下水や物質の動きが緩慢であることが確認された。なお、深度 500 m は深度 350 m に比べて土圧や地下水圧が高く、地下坑道の設計・施工に関わる難易度は高くなる。深度 500 m と深度 350 m の地質環境の特徴を表 1-2 に示す<sup>13)</sup>。

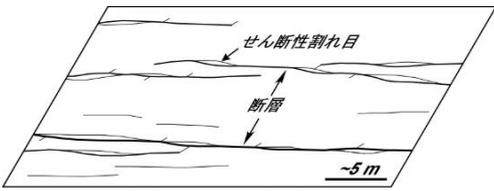
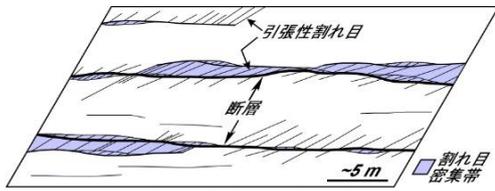
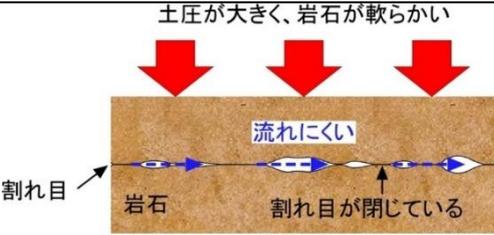
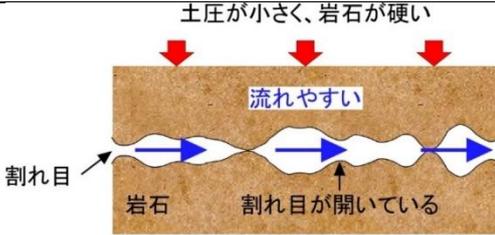
このような特徴を有する深度 500 m において「令和 2 年度以降の深地層研究計画」のうち、主として「坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」の研究を実施することで、主に以下の成果が得られ、令和 2 年度以降の研究成果の最大化を図ることができると考えられる。

- ・ 高い土圧がかかり、坑道の設計・施工上の難易度が高い地質条件下で、処分技術に関わる基盤技術の実証
- ・ 物質が動きにくい環境で岩盤が有する物質を閉じ込める性能が実証でき、人工バリアなどの技術仕様の精緻化の提案が可能
- ・ 水の流れに大きな影響を及ぼす掘削影響領域を含めた安全評価技術を体系的に実証可能

また、本課題では、これまで培ってきた技術を効果的に選択し組み合わせ、地質環境の調査・評価に基づく坑道の設計・施工、安全評価のための一連の技術を実証する。処分事業において想定される様々な地質環境に適用できる技術の体系を技術基盤として提示することができる。

以上のことから、技術基盤の整備に、より一層貢献できること、また、設計の結果から、深度 500 m で研究を行うために必要となる立坑および研究坑道の掘削期間は、対策工事を含めても 3 年程度と見込まれ、深度 500 m で研究を実施した場合でも令和 2 年度以降の研究期間を前提とした研究工程に収まることを確認したため、深度 500 m に坑道を展開して研究を実施することとした。なお、人工バリア性能確認試験の解体調査については、坑道掘削と試験用資機材の搬出入の工程重複を避け、両者を効率的に実施するため、2026 年度から 2027 年度に実施することとした<sup>13)</sup>。

表 1-2 深度 500 m と深度 350 m の地質環境の特徴<sup>13)</sup>

ポイント	深度 500 m	深度 350 m
土圧・地下 水圧	<ul style="list-style-type: none"> <li>・土圧が大きく、岩石が軟らかい</li> <li>・地下水圧が高い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・土圧が小さく、岩石が硬い</li> <li>・地下水圧が低い</li> </ul>
地質の状態 (分布する 割れ目の 特徴)	 <p>断層沿いに割れ目の発達が乏しく、断層内を水が流れにくい</p>	 <p>断層沿いに多数の割れ目が発達し、断層内を水が流れやすい</p>
割れ目の 開口状況	<p>土圧が大きく、岩石が軟らかい</p>  <p>割れ目が閉じており、水や物質が流れにくい</p>	<p>土圧が小さく、岩石が硬い</p>  <p>割れ目が開いており、水や物質が流れやすい</p>

#### 1.4. 地下施設の整備

1.3 の検討結果を受け、2022 年度から深度 500 m までの掘削の準備を進め、2023 年度から幌延 URL の整備を再開し、350m 調査坑道の拡張、立坑の掘削および 500m 調査坑道の掘削を実施した。2024 年度末の段階で、350m 調査坑道の拡張および換気・東立坑の深度 500 m までの掘削を終了し、西立坑および 500m 調査坑道の掘削を継続している。表 1-3 に 2022 年度から 2024 年度の幌延 URL の整備の実績を示す。なお、2025 年 9 月末現在、坑道の掘削は終了しており、2025 年度末までに幌延 URL の整備を完了する予定である。また、図 1-5 に幌延 URL のイメージ図を、図 1-6 に 250m 調査坑道、350m 調査坑道および 500m 調査坑道の平面図および主な原位置試験の実施場所を示す。

表 1-3 幌延 URL 整備の実績

坑道	2022 年度	2023 年度	2024 年度	
350m 調査坑道	掘削準備 ・積込機の整備 ・セメントサイロの設置 ・高圧受変電設備の増設 など	████████████████████		
換気立坑		████████████████████	████████████████████	
東立坑		████████████████████	████████████████████	
西立坑				████████████████████
500m 調査坑道				████████████████████

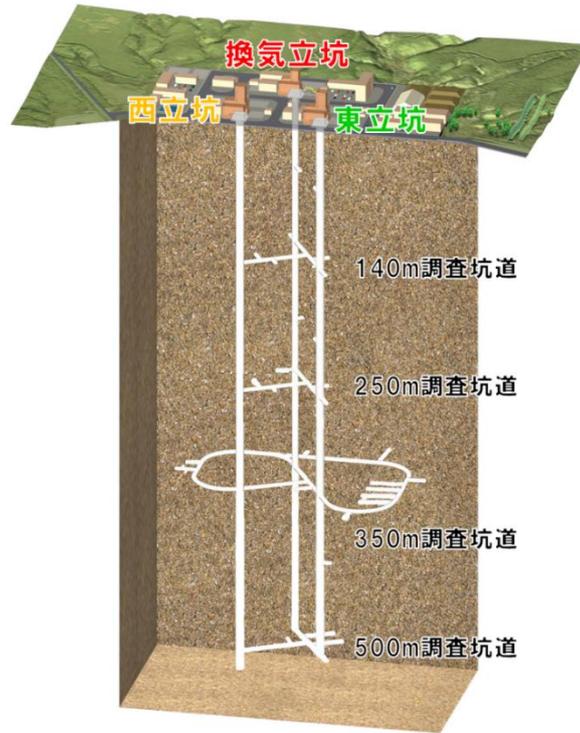


図 1-5 幌延 URL イメージ図

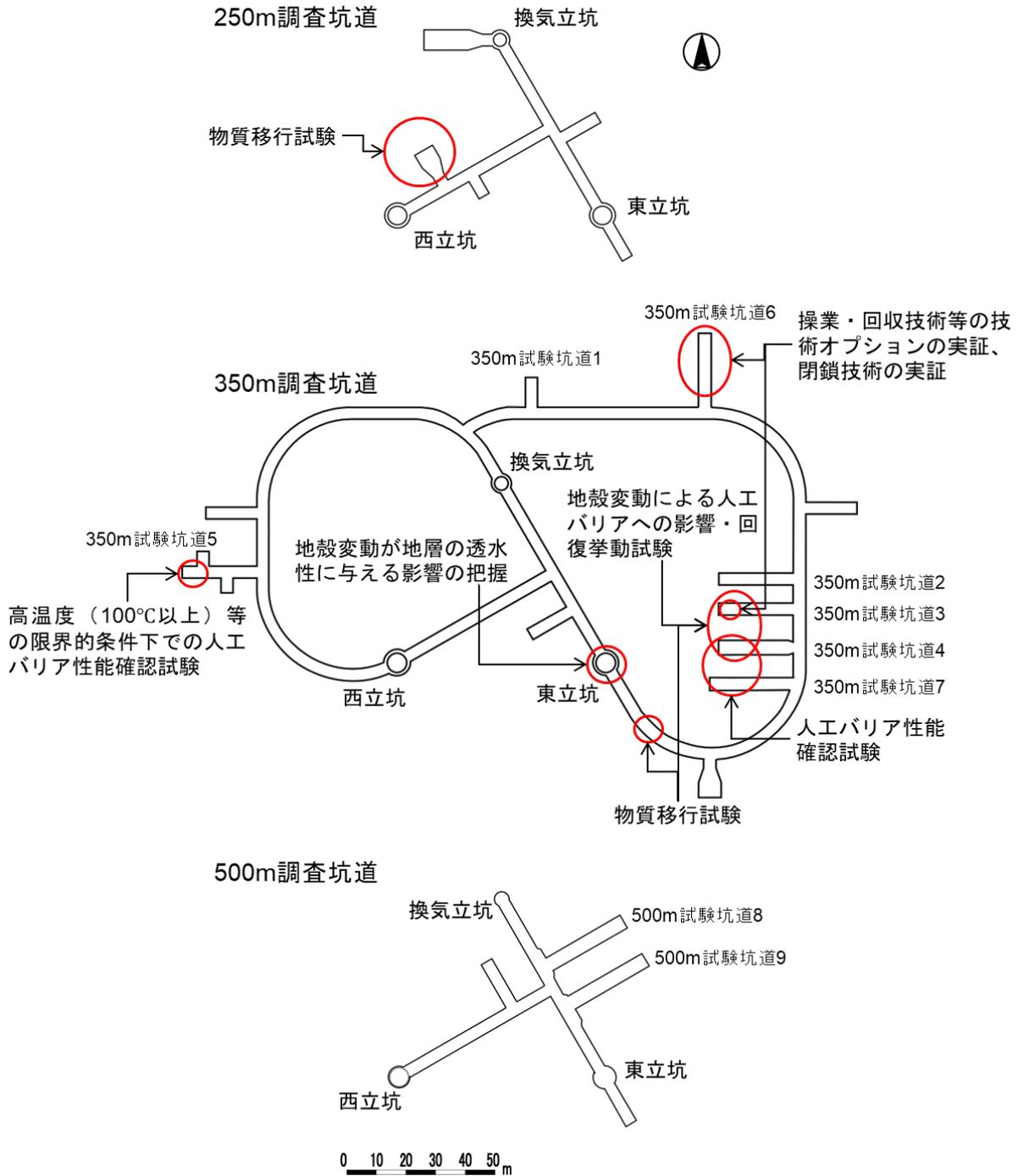


図 1-6 調査坑道の平面図および主な原位置試験の実施場所

### 1.5. 幌延国際共同プロジェクト

「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」における研究開発成果の最大化を図るため、OECD/NEA の協力を得て、幌延 URL を活用したプロジェクトを立ち上げるべく、2021 年度から 2022 年度にかけて準備会合を行い、2023 年 2 月に幌延国際共同プロジェクト (Horonobe International Project : 以下、HIP) を開始した。HIP はフェーズ 1 (2023 年 2 月～2025 年 3 月)、フェーズ 2 (2025 年 4 月～2029 年 3 月) に分けて研究開発を進めている。本プロジェクトは、「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」の一部として、2028 年度までを限度として、三者協定を遵守して

実施することとしている。

HIP は、アジア地域の地層処分に関わる国際研究開発拠点として、幌延 URL を利用した研究開発を国内外の機関で協力しながら推進し、我が国のみならず参加国における先進的な安全評価技術や工学技術に関わる研究開発の成果を最大化するとともに、それを通じて知識と経験を共有し、次世代を担う国内外の技術者や研究者を育成することを目的としている。

HIP では、「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」の課題のうち、国際的に関心の高い以下の項目を実施する。

- ・ タスク A：物質移行試験

実際の地下深部での物質移行試験に基づき、割れ目を有する堆積岩における物質移行モデルを開発・評価

- ・ タスク B：処分技術の実証と体系化

廃棄体設置や坑道・処分孔の配置の設定に必要となる情報を整理して処分技術を体系的に実証

- ・ タスク C：実規模の人工バリアシステム解体試験

人工バリア周辺の熱や地下水の流れ、緩衝材の膨潤による周辺の力の場の変化といった複合的かつ複雑な現象を人工バリア性能確認試験の解体によって理解

フェーズ 1 では、管理委員会やタスク会合において参加機関との議論を行い、原位置試験、室内試験や解析の実施計画を検討するとともに、研究の進捗状況について確認を行った。また、2024 年 6 月に合同タスク会合を幌延深地層研究センターで開催し、坑道の整備状況や試験の準備状況について確認した。さらに、各タスクの原位置試験の進捗に合わせて現地会合を実施し、現場を確認しながら今後の試験計画や成果取りまとめに関する議論を行った。

これまでに得られた成果は、国内外の学会や日本国内の学会誌で発表するとともに<sup>14), 15), 16), 17), 18), 19)</sup>、フェーズ 1 の報告書として取りまとめた<sup>20)</sup>。報告書では、プロジェクトの新規性や実施意義として、深度 250 m で実施する原位置試験により得られる成果と、これまで実施してきた深度 350 m および深度 500 m における成果を体系的に取りまとめることにより、割れ目発達状況や水みちの条件が異なる条件における物質移行モデルの検討、廃棄体設置や坑道・ピットの配置の設定に必要となる情報の整理など、処分技術を体系的に実証できることを示した。さらに、参加機関と連携して予測解析から原位置試験を経て、予測結果の検証を実施することにより、現象の理解を深め、構築したモデルの信頼性向上を効率的に実施できる点も実施意義が高いことを述べている。これらの特徴は、他国の地下研究施設を活用した国際共同プロジェクトにはない新規的かつ挑戦的な内容である。これらの内容に加え、各タスクの成果として原位置試験結果の詳細や、各参加機関が実施した数値解析や室内試験結果、各参加機関の研究開発状況を踏まえたプロジェクトに対する期待などについて取りまとめた。

表 1-4 にフェーズ 1 の参加機関および参加タスクを示す。なお、各タスクで原子力機構が実施した成果については、第 2 章および第 3 章の中で記載している。

表 1-4 HIP 参加機関（フェーズ 1）

参加機関	タスク A	タスク B	タスク C
連邦放射性廃棄物機関（BGE、ドイツ）	○	○	○
英国地質調査所（BGS、英国）	○	○	○
電力中央研究所（CRIEPI、日本）	○	—	○
オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO、オーストラリア）	○	○	○
工業技術研究院（ITRI、台湾）	○	—	—
日本原子力研究開発機構（JAEA、日本）	○	○	○
韓国原子力研究所（KAERI、韓国）	○	○	○
原子力発電環境整備機構（NUMO、日本）	○	○	○
原子力テクノロジー国営会社（RATEN、ルーマニア）	○	—	—
原子力環境整備促進・資金管理センター（RWMC、日本）	—	○	○
国営放射性廃棄物会社（SERAW、ブルガリア）	○	○	○

## 1.6. 本報告書において取りまとめる成果

令和 2 年度以降の必須の課題は、表 1-1 に示すように、多くの課題については、期間の前半である 2024 年度までに実施し、後半は人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験の中の坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化として取り組む課題に統合して実施することとしている。

本報告書においては、表 1-1 に示した令和 2 年度以降の必須の課題のうち、主に 2024 年度までに終了した課題に対して得られた成果について述べる。なお、「実際の地質環境における人工バリアの適用性確認」のうち「人工バリア性能確認試験」については、今後、2026 年度から 2027 年度に解体調査を実施する計画であるが、2024 年度までに解析などを通じて得られた成果について述べる。2024 年度までに終了した課題（表 1-1 参照）については、所期の目的を達成することができたため、今後は、表 1-1 に示すとおり、「坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」を実施する中で坑道やピットの配置に係る考え方、人工バリア材料などの設置方法、それらの閉じ込め性能を評価する手法を体系的に整理していく。

本報告書の構成は以下のとおりである。第 2 章に、「実際の地質環境における人工バリアの適用性確認」として「人工バリア性能確認試験」および「物質移行試験」、第 3 章に、「処分概念オプションの実証」として「操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証」および「高温（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験」、第 4 章に、「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」として「水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化」および「地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験」について述べる。

## 2. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

### 2.1. 人工バリア性能確認試験

#### (1) 目的と実施概要

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業では、人工バリア（ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材）を地下深くに設置した後に人工バリア周辺でどのような現象が起きるかを評価することが重要となる。特に緩衝材中が飽和に至るまでの過渡的な期間では、熱的作用、水理的作用、力学的作用および化学的作用が相互に影響を及ぼし合う連成現象（以下、THMC 連成現象）が生じる<sup>21)</sup>。このようなニアフィールドの過渡期状態変遷の評価は、安全評価における核種移行の初期状態の設定の妥当性やオーバーパック（以下、OP）の寿命評価に必要なニアフィールド環境条件の設定上重要となる。このようなニアフィールドにおける THMC 連成現象を予測するために、様々な室内実験および原位置試験が実施され、これらの実験データを用いて解析コードが開発・評価されており、特に大規模な原位置試験<sup>22), 23), 24)</sup>は、解析コードを評価するための重要なデータを提供している。

そのような背景のもと、幌延 URL では、緩衝材が不飽和から飽和に至るまでの過渡的な期間を対象とした人工バリア周辺の THMC 連成現象の理解や解析コードを検証するためのデータ取得を目的に、処分孔竖置き方式の実規模大の人工バリア性能確認試験を実施している<sup>25)</sup>（図 2-1）。人工バリア性能確認試験は、2015 年 1 月からガラス固化体の発熱と岩盤からの地下水浸潤を模擬した加熱・注水を開始し、設置したセンサーにより内部の人工バリアや埋め戻し材中の挙動をモニタリングしている<sup>9), 26)</sup>。

2020 年度以降は、ガラス固化体設置直後の廃棄体の発熱過程に加えて、減熱過程を模擬した原位置試験（減熱試験）を行い、異なる温度条件での THMC 連成現象に関わるデータを取得した。ニアフィールド領域における THMC 連成現象のモデル化においては、人工バリア性能確認試験で取得したデータを対象に連成解析を行い、弾性体モデルを適用した THM 連成解析コード THAMES<sup>27)</sup>や弾塑性体モデルを適用した力学解析コード MACBECE<sup>28)</sup>の適用性を検証した。減熱試験後はより詳細な情報を取得するために、人工バリア、埋め戻し材、コンクリート、周辺岩盤やそれらの境界面のサンプリングや分析を行う解体試験を計画しており、解体試験で適用する施工方法の検証を行うための解体試験施工を行った。

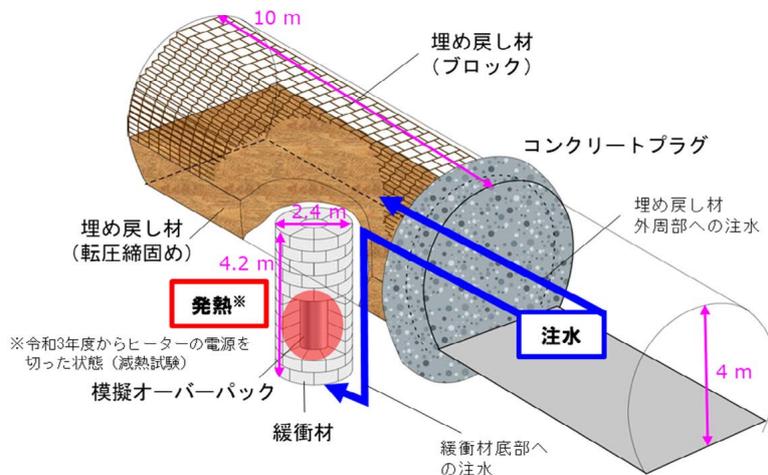


図 2-1 人工バリア性能確認試験の概念図

(2) 実施内容と成果

(i) 人工バリア性能確認試験のデータ計測

人工バリア性能確認試験では、加熱開始から数年間は加熱過程のデータを取得するために模擬 OP の表面温度を約 90°C に設定した。2020 年度からは異なる温度条件下でのデータを取得するために模擬 OP 表面温度を約 50°C に設定した後、2021 年度以降はヒーターの電源を切断した状態でデータ計測を継続している (図 2-2)。図 2-3 に緩衝材 5 段目で計測されたデータの一例を示す。図 2-3(b) に示す緩衝材中の温度は、加熱している模擬 OP 近傍ほど温度が高く、模擬 OP の温度を低下させるにつれて温度差は小さくなる。さらに、ヒーターの電源を切断した後は原位置岩盤中の温度である約 23°C で一定となり、緩衝材中の温度勾配は解消された状態になる。図 2-3(c) にサイクロメータの計測値を飽和度に換算した値を示す。緩衝材設置時の初期飽和度は約 60% であり、緩衝材外側から徐々に地下水が浸潤し、飽和度が上昇していることが確認できる。緩衝材中の飽和度が上昇すると緩衝材は膨潤するため、図 2-3(d) の緩衝材外側の土圧は、緩衝材の膨潤による膨潤圧力の増加を示している。一方、緩衝材内側では飽和度が増加していないため土圧計の計測値も外側ほど増加していない。図 2-4 に比抵抗トモグラフィにより算出した緩衝材中の飽和度変化を示す。緩衝材外側の飽和度は、図 2-3(c) で示した傾向と同様に試験開始から急激に上昇し、約 300 日後にはほぼ飽和に至っていることが確認できる。一方、模擬 OP 付近の緩衝材では加熱の影響によって飽和度が低下し、ヒーターの電源を切断し緩衝材中の温度勾配が解消された後は、水分が緩衝材内側へ移動していく傾向が確認できる。これらの計測データは、緩衝材中で温度、飽和度、応力が相互に影響する様子が確認できおり、THMC 連成解析モデルを検証するためのデータが取得できた。

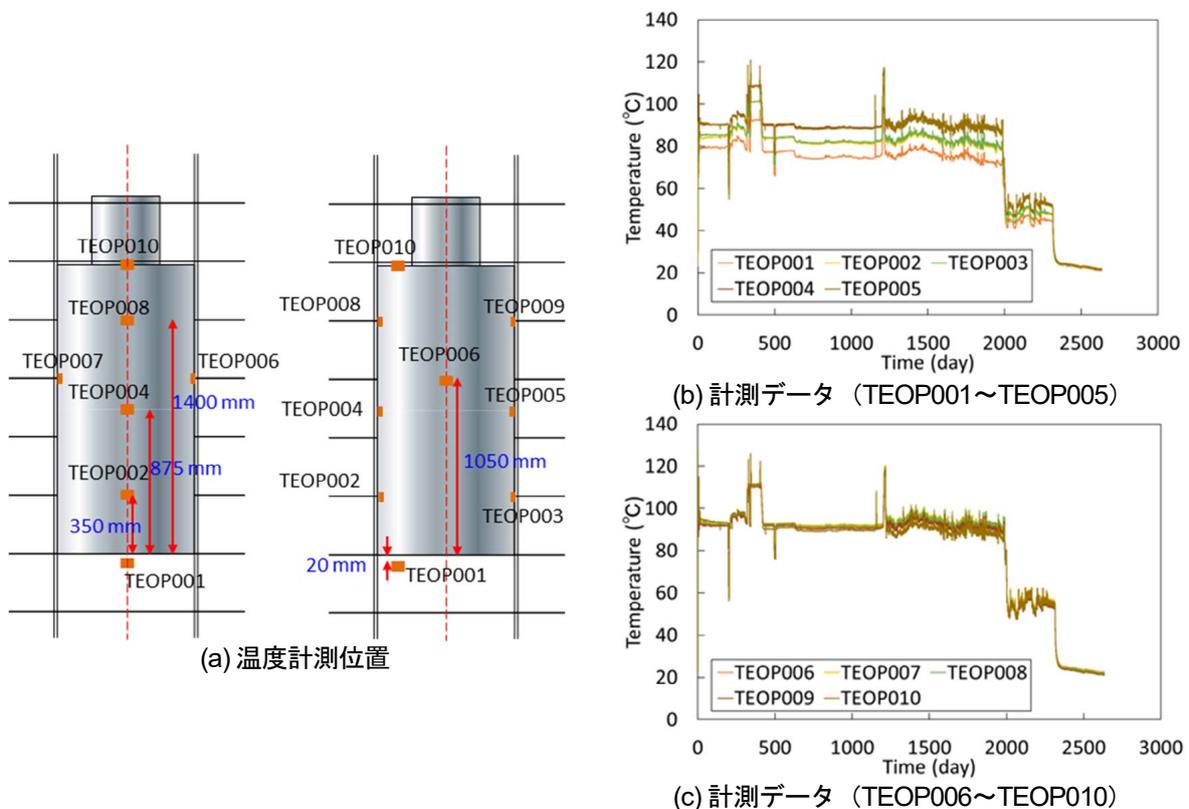


図 2-2 模擬 OP 表面の温度計測位置および計測データ<sup>29)</sup>

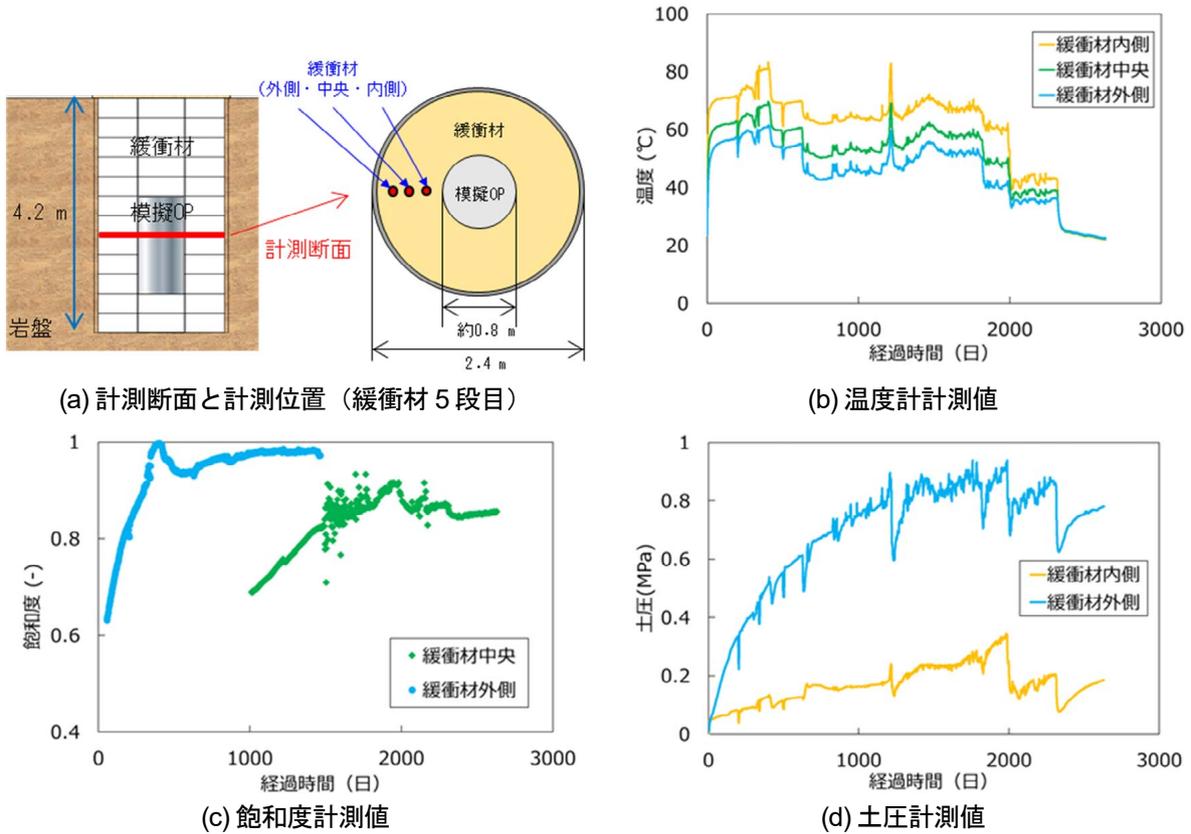


図 2-3 人工バリア性能確認試験の計測データの例

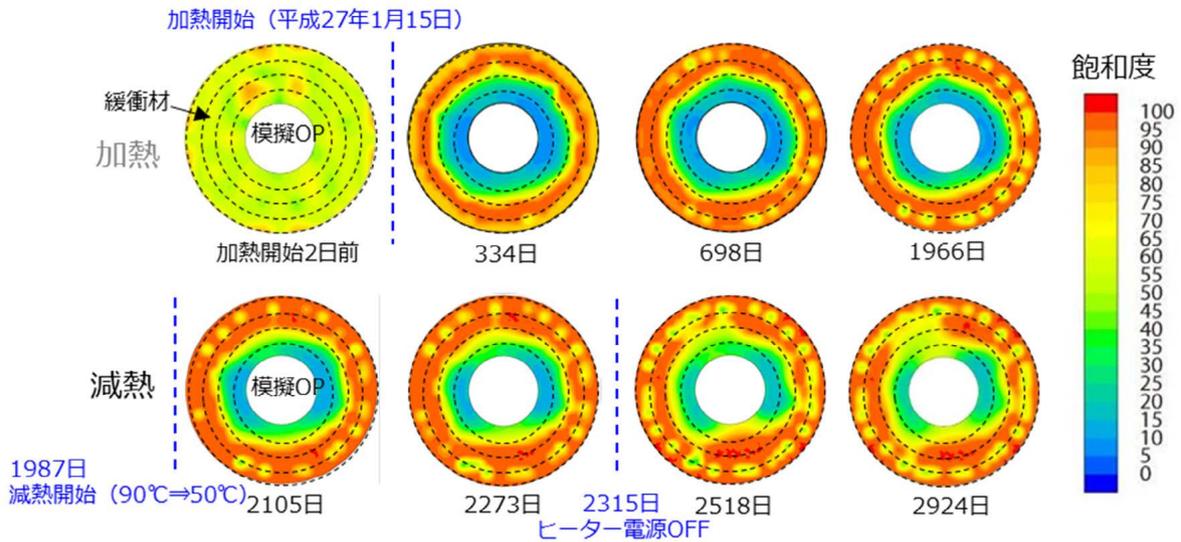


図 2-4 比抵抗トモグラフィにより算出した緩衝材中の飽和度変化

(ii) ニアフィールドにおける THMC 連成現象のモデル化

緩衝材を対象とした室内試験では、塩水環境の方が淡水環境よりも緩衝材中の透水性が高いことが報告されている<sup>30</sup>。そのため、基礎的な室内実験から導かれた経験式を用いた数値解析が、実物大の原位置試験で観測される THMC 連成現象を適切に表現できることを確認することが重要である。そこで、本研究では、人工バリア性能確認試験を対象とした数値解析において、幌延の塩水系地下水

が実規模スケールの緩衝材中の浸潤プロセスに与える影響について検討した。また、人工バリア性能確認試験で観測された浸潤に伴う緩衝材の膨潤変形挙動を対象に、非線形弾塑性体モデルを適用した THAMES と不飽和弾塑性体モデルを適用した MACBECE の解析結果を比較することにより、それぞれの力学モデルの適用性を調査した。

連成解析モデルの検証においては、他解析コードと比較することも信頼性向上において需要となる。そこで、THMC 連成モデルの開発と検証を目的とした国際共同研究プロジェクト「DECOVALEX (Development of Coupled models and their Validation against Experiments)」において、人工バリア性能確認試験のデータを対象としたベンチマークテストを行い、解析結果を比較した。

#### ① 幌延地下水が緩衝材中の浸潤挙動へ与える影響 (TH 連成解析)

ベントナイトを主成分とする緩衝材は、水質によって膨潤性や透水性が変化することが知られており、塩分を含んだ幌延地下水環境では淡水環境よりも膨潤性能が抑制され、それによって固有透過度が高くなる<sup>30)</sup>。ここでは、蒸留水条件と幌延地下水条件で実施したそれぞれの室内試験で得られた固有透過度の経験式<sup>30)</sup>を用いて TH 連成解析を実施し、人工バリア性能確認試験の計測データと比較した。解析では、模擬 OP、緩衝材、ケイ砂、埋め戻し材 (図 2-5) をモデル化し、THAMES を用いて緩衝材の温度、飽和度を求めた。温度境界条件は模擬 OP 表面およびケイ砂中の温度測定値に基づいて設定し、水理境界条件はケイ砂中の間隙水圧の測定値に基づいて設定した<sup>29)</sup>。

図 2-6 に緩衝材 5 段目の温度の測定値と解析結果を示す。黒線で示した計測値は、図 2-2 の模擬 OP 表面温度変化に従って変化し、模擬 OP に近いほど温度が高い。解析結果も同様の傾向を示しており、解析ケースによる差は確認されなかった<sup>29)</sup>。これは、熱伝導率や比熱は蒸留水や幌延地下水条件で変化しないことが室内試験<sup>30)</sup>から確認されており、解析に使用した経験式も同じためである。

図 2-7 に緩衝材 5 段目の飽和度の計測値と解析結果を示す。飽和度の解析結果はケース間で大きく異なった。まず、緩衝材外側境界に近い部分では、黒線で示したサイクロメータによる計測値 (PS006) に対して、両解析ケースとも同様の傾向を示したが、赤で示した幌延地下水条件での解析結果の方が再現性の高い結果が得られた。次に、緩衝材外側境界と模擬 OP の間の計測値 (PS005) は、おおそ両ケースの解析結果の間に位置する結果となった。両ケースの解析結果で一番開きが見られた模擬 OP 近傍については、サイクロメータによる計測結果 (PS004) が得られなかったため、図 2-4 に示す比抵抗トモグラフィによる飽和度推定結果と比較した。その結果、698 日後や 1966 日後の飽和度分布の推定結果は、青色で示した蒸留水条件の結果に近いことが確認できる。人工バリア性能確認試験と類似の原位置試験において、加熱部近傍の飽和度の低下は高温による水の蒸発によって引き起こされ、水蒸気が拡散して低温領域に向かって凝縮することが報告されている<sup>22), 23)</sup>。本試験においても緩衝材外側境界に近い部分では、ケイ砂からの幌延地下水の浸潤が飽和度の増加を引き起こしているのに対し、模擬 OP 近傍では緩衝材に含まれていた水 (圧縮成型時の水道水) の蒸発や水蒸気拡散が飽和度の低下を引き起こしていると考えられる<sup>29)</sup>。

図 2-7 に示した時点の飽和度分布は、加熱による飽和度の低下の影響が強いため、ケース 1 の蒸留水条件の解析結果でおおよその分布は再現できるが、今後、地下水が模擬 OP 近傍まで浸潤していくと、幌延地下水の影響で徐々に透水性は大きくなることが予想される。したがって、より長期的な挙動を評価する際は、時間経過に伴う間隙特性の変化に関する情報を解析に含めることが重要である。

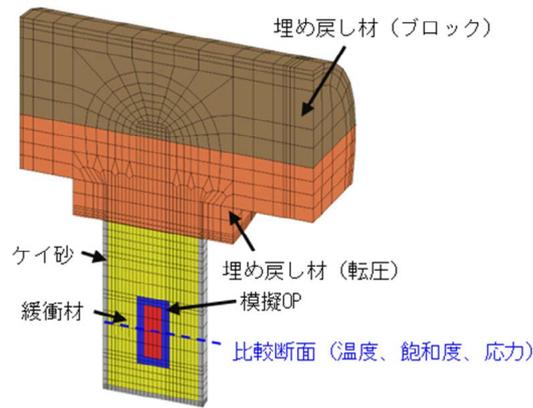
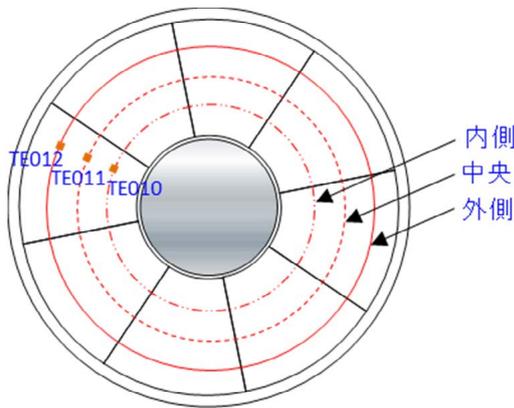
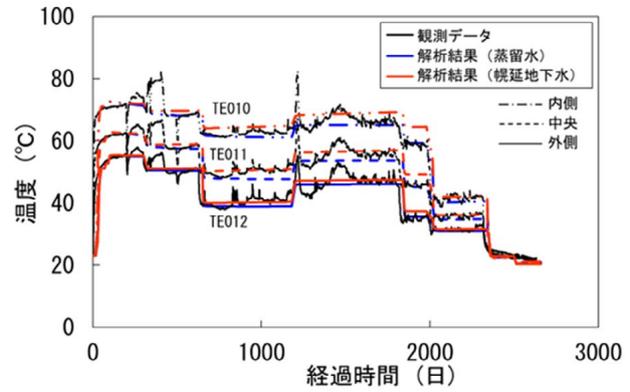


図 2-5 解析モデル<sup>30)</sup>

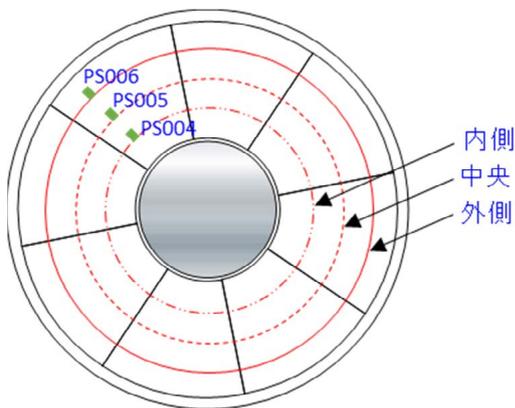


(a) 観測位置

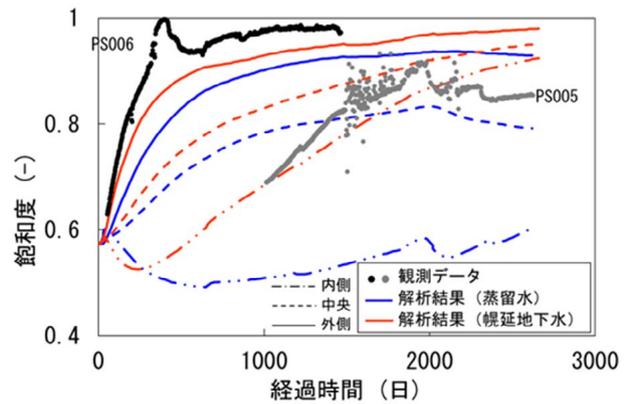


(b) 観測データと解析結果

図 2-6 緩衝材中の温度観測位置および観測データと解析結果<sup>30)</sup>



(a) 観測位置



(b) 観測データと解析結果

図 2-7 緩衝材中の飽和度観測位置および観測データと解析結果<sup>30)</sup>

② 緩衝材の膨潤および膨潤変形挙動解析 (THM 連成解析)

人工バリア性能確認試験の観測データと比較する前に原位置試験と同材料で作られた緩衝材を用いた膨潤応力試験および膨潤変形試験の室内試験結果を対象に、解析コードの検証およびパラメータの推定を実施した。なお、MACBECE は力学解析コードであるため、飽和度の計算には THAMES の解析結果を使用した。膨潤圧試験の再現解析では、THAMES および MACBECE ともおおよそ

の傾向を捉えることができたが、乾燥密度が高いほど誤差が大きくなる傾向が見られた<sup>29)</sup>。これは、緩衝材の乾燥密度が大きくなるほど膨潤応力の増加量も多くなるため、誤差も大きくなったと考えられる。THAMESを使用した膨潤変形試験の再現解析では、ほとんどの条件で試験データを過小評価しており、一軸圧縮試験から推定したヤング率を用いた非線形弾性体モデルでは、緩衝材の膨潤変形挙動をうまく再現できていない<sup>29)</sup>。これは、圧縮時と膨潤変形時で異なるヤング率を設定することで改善できる可能性がある。一方、MACBECEを使用した膨潤変形試験の再現解析では、緩衝材が時間の経過とともに膨潤する挙動を捉え、荷重圧力と乾燥密度が高くなると膨張変位が大きくなる傾向を再現した<sup>29)</sup>。

人工バリア性能確認試験における応力の変化は主に地下水の浸潤に伴う膨潤応力の増加に起因しており、両解析において緩衝材外側境界近傍の膨潤応力の増加を再現することができた(図2-8)。しかしながら、模擬OP近傍の緩衝材の解析結果は、観測データを過大評価する結果となり、この傾向はMACBECEの方が大きい。MACBECEでは2次元の平面ひずみ条件で解析を実施しており、水平方向で力の釣り合いが保たれるため、外側と内側の解析値が同等の値となったと考えられる<sup>29)</sup>。そのため、原位置の観測データを再現するには三次元モデルでの計算が必要であると考えられる。原位置試験における模擬OP下部の変位の再現解析(図2-9)は、膨潤変形試験の解析結果と同様の傾向を示しており、MACBECEでは室内試験結果に基づいて力学パラメータを設定することによって、原位置試験の観測データを再現できることを確認した<sup>29)</sup>。

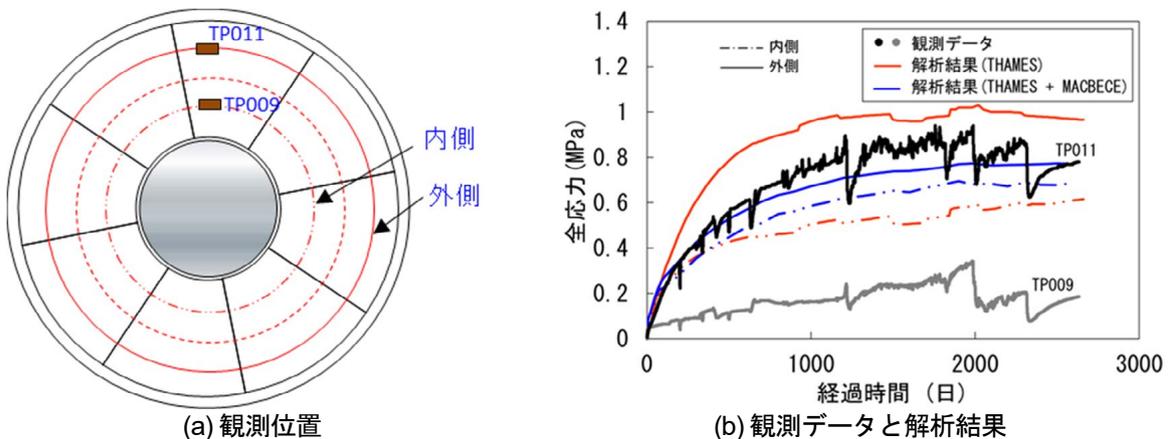


図2-8 緩衝材中の全応力観測位置および観測データと解析結果<sup>29)</sup>

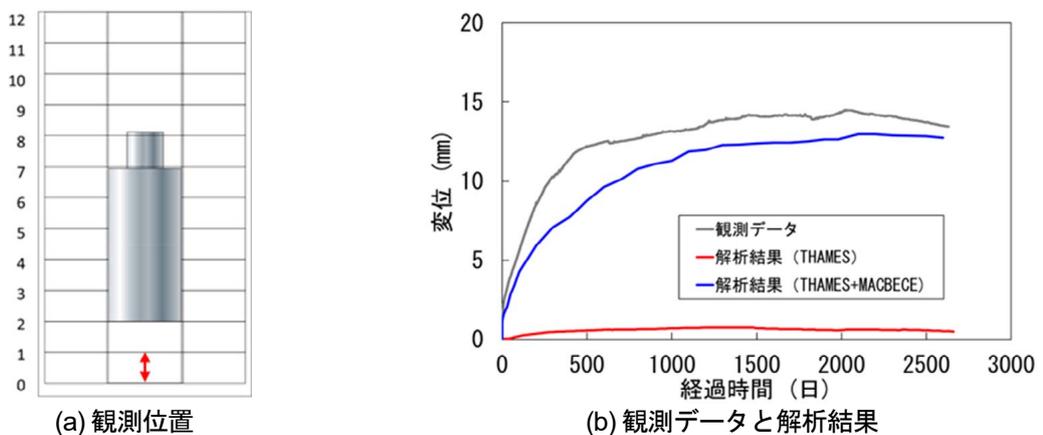


図2-9 緩衝材中の変位観測位置および観測データと解析結果<sup>29)</sup>

③ 国際共同プロジェクト DECOVALEX-2023

国際共同プロジェクト DECOVALEX-2023 の Task D<sup>31), 32), 33)</sup>では、大きく 2 つのステップで連成解析モデルの比較を実施した。ステップ 1 では、比較的単純な系での比較により解析コードの特徴を把握するとともに、各解析コード固有のパラメータをフィッティングにより求めることを目的に、緩衝材を用いた室内試験（膨潤圧試験、膨潤変形試験、浸潤試験、温度勾配水分拡散試験結果）を対象とした解析を実施した。ステップ 2 では、ステップ 1 で求められたパラメータを使用し、原位置での人工バリア性能確認試験の計測データ（温度、飽和度、全応力、変位）を対象とした解析を実施した。

緩衝材中の浸潤挙動を対象とした検討のうち室内試験結果を対象とした検討では、各機関の解析結果は良く一致し、室内試験結果を良好に再現する結果が得られた（図 2-10）<sup>31)</sup>。一方、人工バリア性能確認試験で取得した緩衝材中の飽和度分布を対象とした検討では、緩衝材外側の飽和度変化の解析結果は各機関とも計測値と一致したが<sup>31), 32)</sup>、ヒーター近傍の飽和度変化の解析結果は各機関で異なる場合があることを確認した（図 2-11）<sup>31)</sup>。ヒーターの加熱に伴う水蒸気拡散のモデル化方法が各機関で異なり、それぞれ解析で必要となるパラメータは室内試験結果を基に設定した。このパラメータは、温度勾配条件下の飽和度変化に与える影響が非常に大きく、本検討では限られた条件での室内試験結果を基にパラメータを同定したことが原因として考えられる。また、飽和度変化に伴う緩衝材の膨潤によって引き起こされる応力変化や変形などの力学挙動についても、室内試験結果や人工バリア性能確認試験の計測データを対象に解析を行った結果、力学モデルの違い（弾性体モデル、弾塑性体モデル）によって、緩衝材の変形挙動の解析結果が異なることを確認した<sup>31)</sup>。この傾向は図 2-9 の解析傾向と同様に、弾性体モデルでは緩衝材の膨潤変形挙動を過小評価する傾向に対し、弾塑性体モデルでは試験結果を良好に再現する傾向が見られた。弾塑性体モデルは解析に使用するパラメータが多いが、事前に膨潤圧試験、膨潤変形試験、圧密試験などの力学挙動に係わる室内試験を実施し、それらの結果から力学パラメータを推定することで原位置試験での現象を良好に再現できることを確認した<sup>31), 32)</sup>。

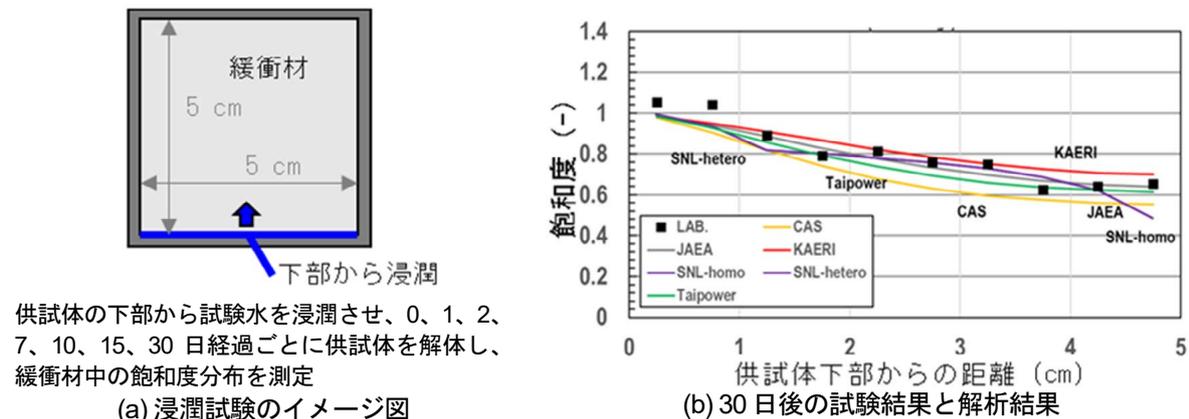
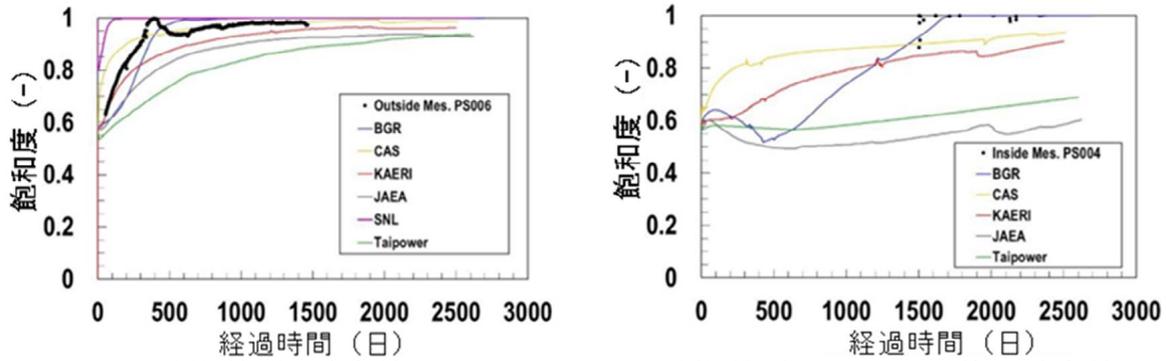


図 2-10 ステップ 1：浸潤試験を対象とした解析結果の比較例<sup>31)</sup>



(a) 緩衝材外側の解析結果 (b) 緩衝材内側（ヒーター近傍）の解析結果  
 図 2-11 ステップ 2：緩衝材 5 段目の飽和度変化を対象とした解析結果の比較例<sup>31), 32)</sup>

(iii) 人工バリア性能確認試験の解体試験に向けた解体試験施工

人工バリア性能確認試験の解体試験では、人工バリア周辺の THMC 連成現象に関わるより詳細なデータを取得するために、模擬 OP、緩衝材、埋め戻し材、コンクリートプラグ、吹付けコンクリート、周辺岩盤やそれらの接触面の試料の採取および分析を予定している。試料の採取にあたっては、可能な限り試料の状態を乱さずにサンプリングすることが重要になる。そこで、350m 試験坑道 1 において、人工バリア性能確認試験の一部を模擬した模擬試験施工を実施し、解体方法やサンプリング手法について検討した。図 2-12 に解体試験施工の概念図を示す。試験施工では、主に「無水で粘土材料をサンプリングする手法」、「重量物である模擬 OP と緩衝材を一体で取り出す手法」、「事前樹脂充填による埋め戻し材、コンクリート、岩盤境界部の接触状態を維持したままサンプリングする手法」について検討した。

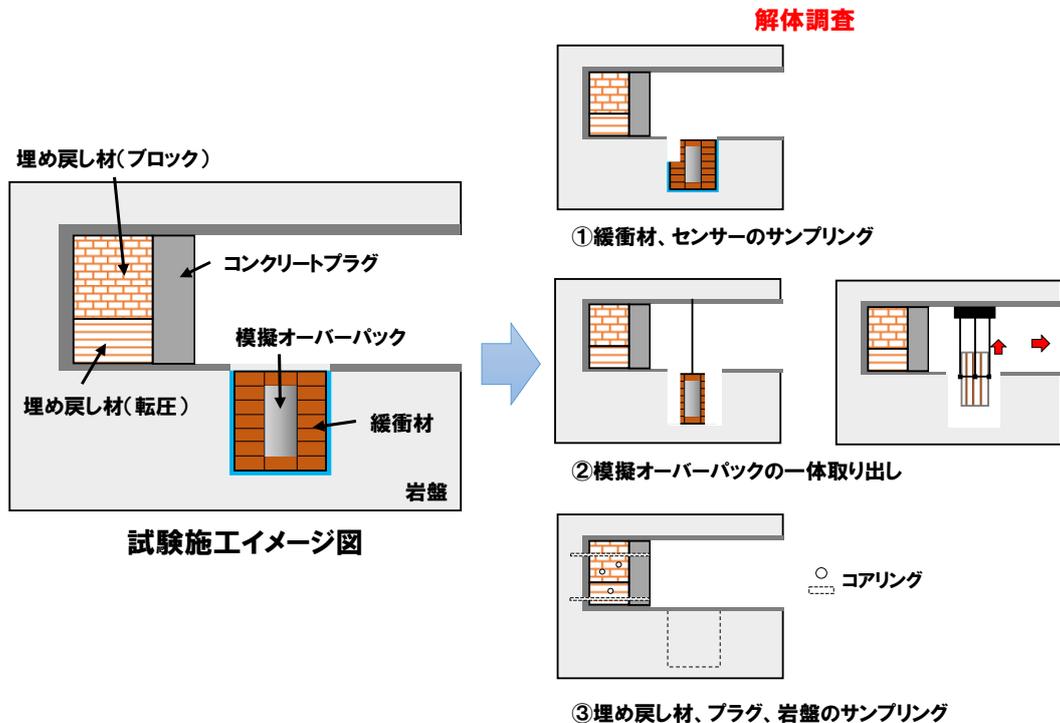


図 2-12 人工バリア解体試験施工の概念図

緩衝材や埋め戻し材などの粘土材料をボーリングマシンなどの機械でサンプリングする場合、試料を乱さないように削孔する際には水を使わないで行う（無水掘り）必要がある。しかし、無水掘りではコアビットと粘土材料の摩擦により試料が乱された報告事例<sup>34</sup>もあり、人工バリア性能確認試験で使用した材料が、どのような条件であれば試料を乱さずにサンプリングできるかを確認する必要がある。そこで、緩衝材ブロックと埋め戻し材を対象に、ボーリングマシンとハンドコアドリルによる無水掘りでのサンプリング性能の検証を行った。その際、コアビットと粘土材料の摩擦力は、粘土材料の含水比によって変わると考えられるため、含水比が異なると予測される複数の位置をサンプリングの対象とした。サンプリング後は、粘土材料の状態を確認し、含水比を測定した。図 2-13 に緩衝材のサンプリングの概念図を示す。図に示すように、ボーリングマシンでは緩衝材 7 段分を貫くように、ハンドコアドリルでは試験孔上部から緩衝材を 1 段撤去するごとに、各段からサンプリングを行った。図 2-14 にサンプリング作業の状況とサンプリング後の試料の一例を示す。採取した試料の大きさは、ハンドコアドリルの場合、直径 50 mm、長さ約 300 mm、ボーリングマシンの場合は直径 66 mm、長さ約 2.4 m（長さは試料 1 本あたりの合計）である。ボーリングマシンでは、打込み式と回転式の二種類のコアビットの適用性を、ハンドコアドリルでは回転式の適用性を確認した。図 2-15 にボーリングマシンで取得したサンプリング後の含水比測定結果の一例（緩衝材ブロックの下から 5 段目）を示す。緩衝材内側（含水比が低い部分）では、緩衝材は硬いため打込み式のコアビットは挿入できず、緩衝材外側（含水比が高い部分）では緩衝材の粘性が大きくなるため、回転式のコアビットでは緩衝材との摩擦により温度が上昇し、緩衝材が乾燥した状態（乱された状態）で採取された。これらの検討結果から、緩衝材ブロックが初期含水比からあまり変化のない硬い部分（15%以下の含水比）では回転式を、地下水が浸潤し柔らかくなった部分（20%を超える含水比）では打込み式を採用することで、試料を乱さずにサンプリングできることが分かった。そのため、人工バリア性能確認試験の解体試験では、事前に分析や解析などでおおよその含水比を把握した上で、サンプリング手法を適切に選択することが重要である。

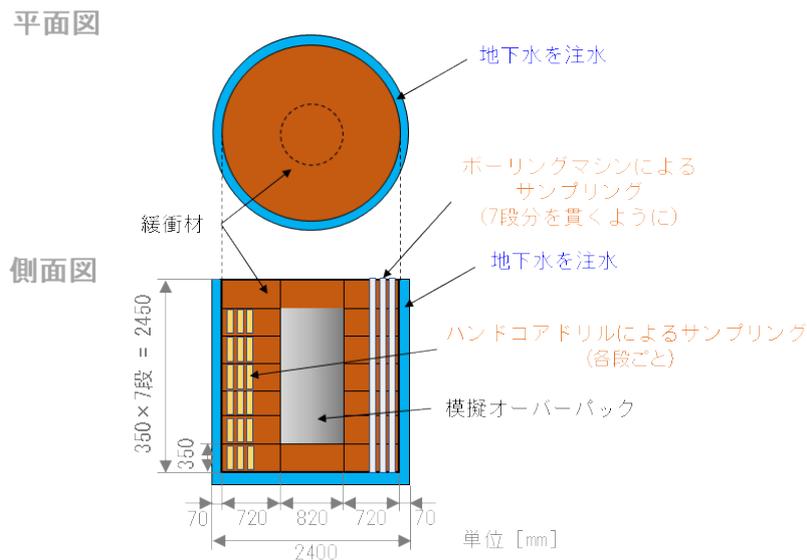


図 2-13 緩衝材サンプリングの概念図

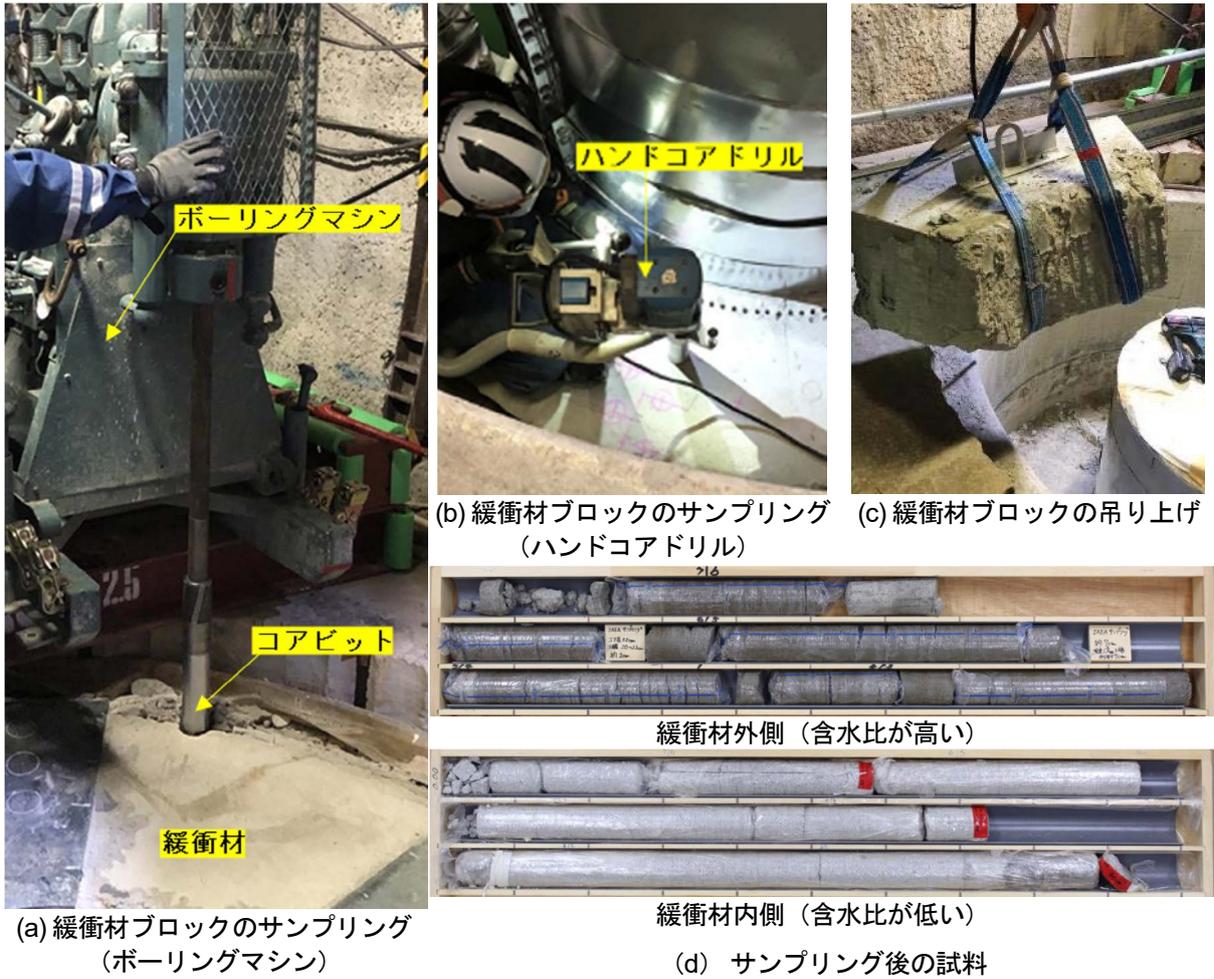


図 2-14 緩衝材のサンプリング状況とサンプリング後の試料

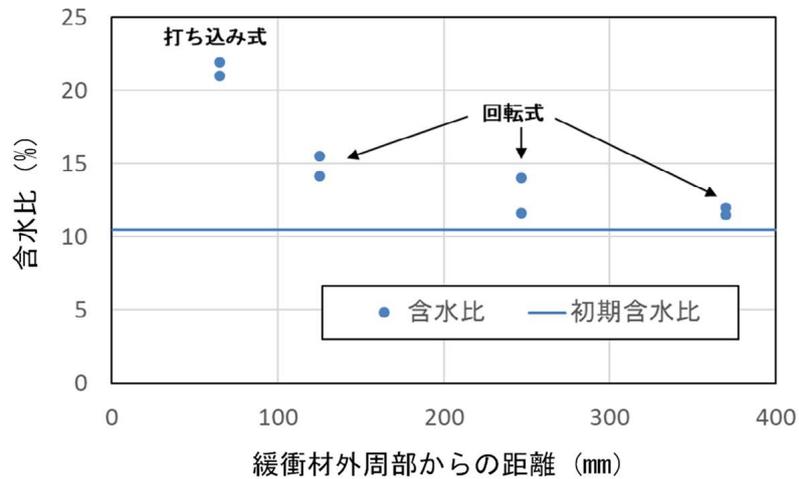


図 2-15 含水比測定結果の一例 (緩衝材ブロック : 下から 5 段目)

模擬 OP については、模擬 OP の腐食や緩衝材との相互作用に関する調査などを予定している。その調査のためには、模擬 OP 本体と付近の緩衝材の接触状態を維持したまま、試験孔から取り出すことが望ましい。模擬 OP と付近の緩衝材を一体で取り出す場合、その重量は約 4 t を超えることが想

定される。しかし、幌延 URL の楊重設備で引き上げ可能な重量は 2 t までであることから、取り出し方法を新たに検証する必要がある。そこで、試験施工では、模擬 OP 一体取出し用の楊重設備を設置し、試験孔からの取り出し方法の検証を行った。図 2-16 および図 2-17 に取り出しの概念図と作業状況を示す。まず、模擬 OP 付近以外の緩衝材を取り除きながら、模擬 OP と付近の緩衝材を乾燥防止のためのラップで覆い、一体取出し用のタガ締め具（鉄板）を緩衝材外側に設置した。その後、一体試料に取り出し用の治具を取り付け、門型架台に設置した 4 つのチェーンブロックにより試験孔から取り出した。取り出した一体試料は、ウインチで牽引ワイヤーを引っ張り、門型架台ごとレール上を滑らせるように周回坑道まで移動させた。取り出しや移動に伴う試料の乱れはなく、今回採用した手法で、模擬 OP と付近の緩衝材を一体で取り出せることを確認した。

埋め戻し部については、埋め戻し材と吹付けコンクリート、吹付けコンクリートと岩盤の相互作用に関する調査を予定している。そのためには、それらの接触面を維持した状態で、無水掘りでサンプリングする必要がある。そのようなサンプリング手法として、接触面を樹脂で固めた後にオーバーコアリングすることにより、コンクリートと粘土材料の境界部試料を取得した事例<sup>35)</sup>があり、本試験施工でも樹脂で接触面を固めた後に、埋め戻し材と吹付けコンクリート、吹付けコンクリートと岩盤の境界部の試料を一体で取得する手法を検討することとした。図 2-18 にサンプリングの概念図を示す。まず、樹脂を注入するための孔（直径 46 mm）を無水掘りで掘削し樹脂を充填した。その後、樹脂が硬化するまで 1 日ほど置き、樹脂充填孔よりも大きい径（直径 86 mm）で樹脂充填部分と重なるように無水掘りでサンプリングを実施した。図 2-19 にサンプリング後の試料の一例を示す。図に示すように、事前に樹脂で固めることで接触面が固着した状態でサンプリングできることを確認した。

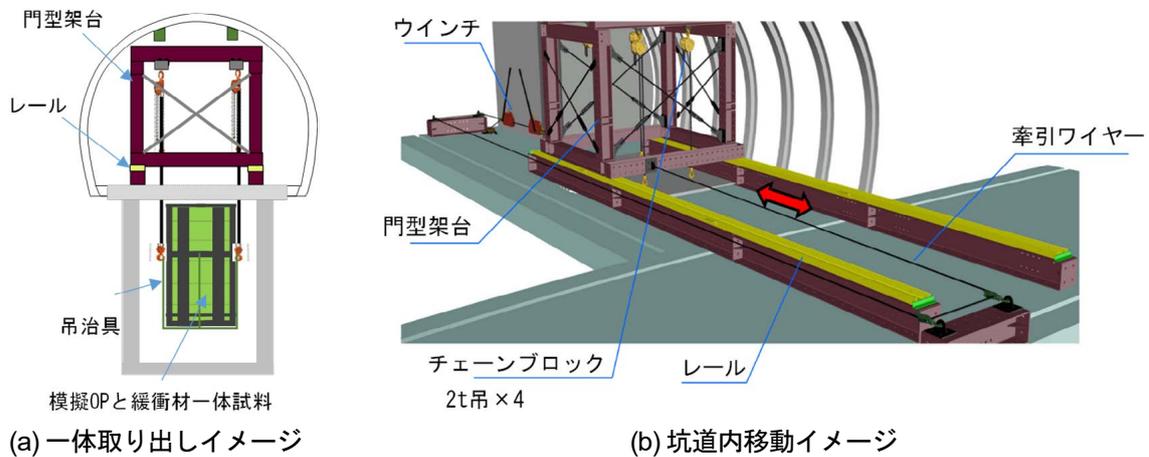


図 2-16 模擬 OP 取り出しの概念図

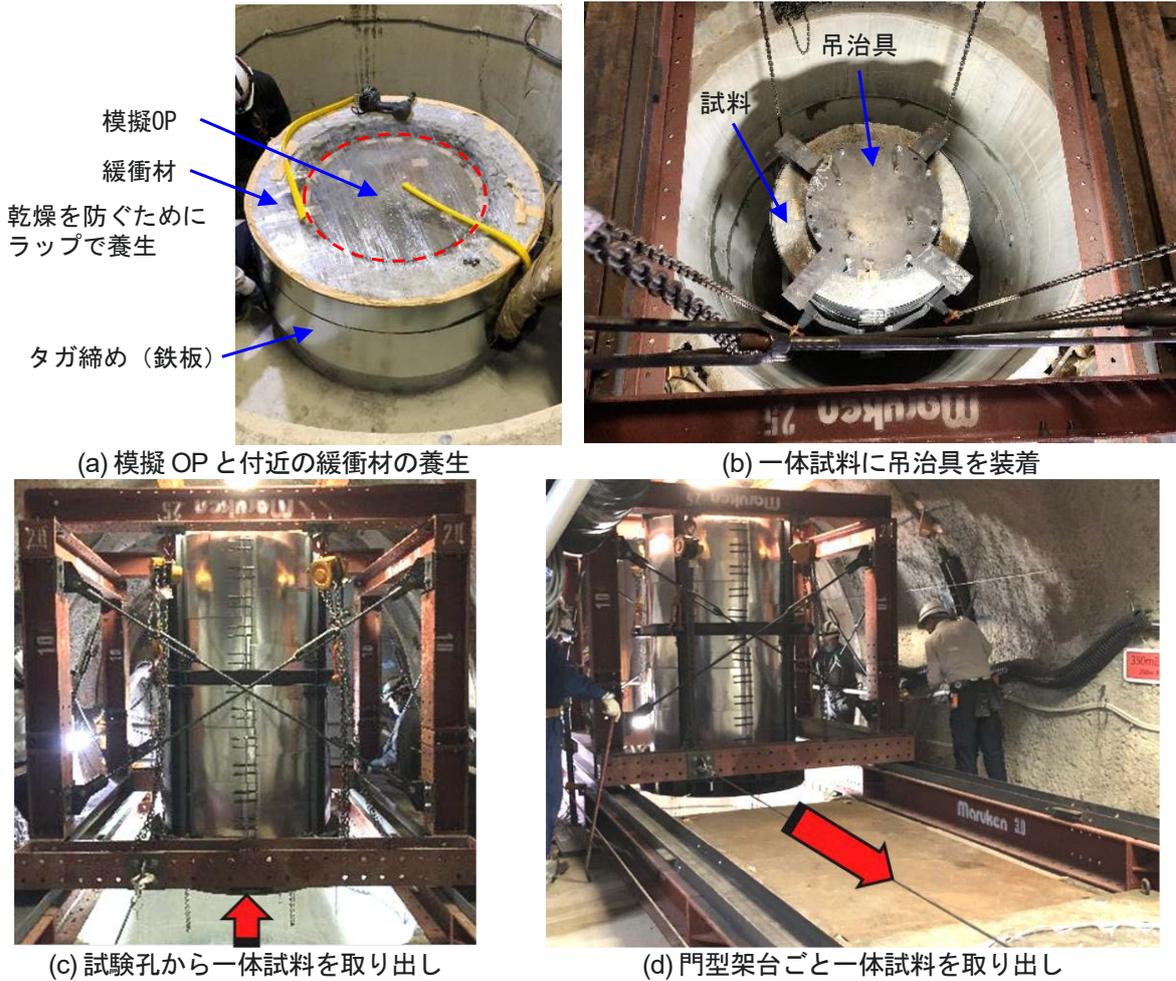


図 2-17 模擬 OP 取り出し作業状況

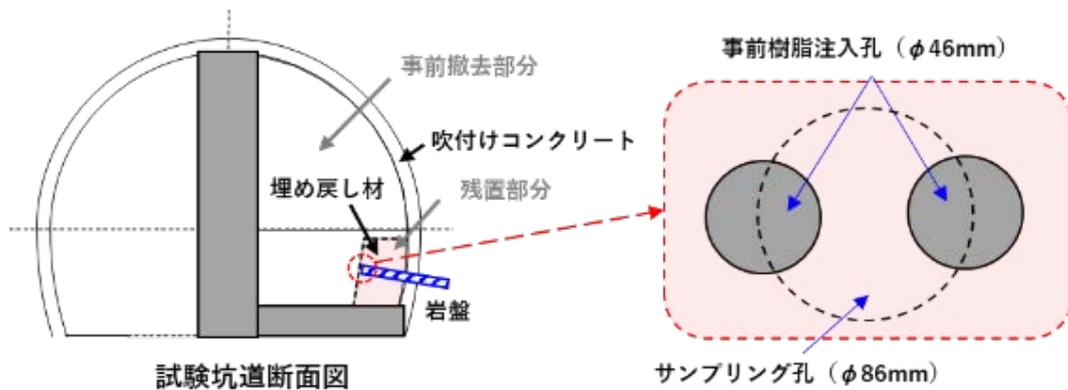


図 2-18 事前樹脂注入サンプリングの概念図

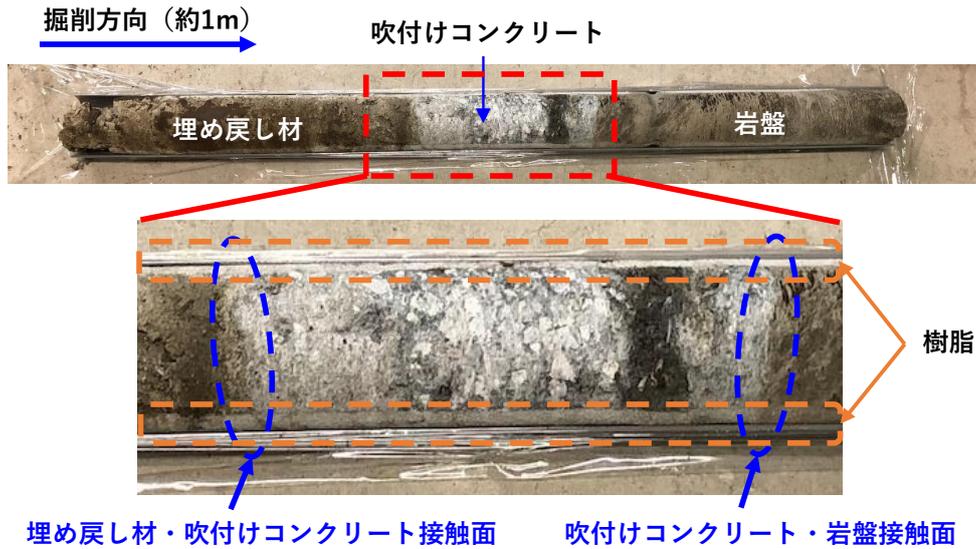


図 2-19 事前樹脂注入サンプリングによる取得したサンプル

(iv) HIP タスク C : 人工バリア性能確認試験の解体試験

HIP のタスク C は、人工バリア性能確認試験の解体試験を通して人工バリア周辺の THMC 連成現象の理解や解析コードの検証を国際共同プロジェクトとして実施するものである。主な実施内容としては、人工バリア性能確認試験の既設センサーによるデータ計測を継続しつつ、解体試験計画の策定、解体試験の実施および解体試験のデータを使用した解析コードの検証を予定している。

フェーズ 1 では、参加機関との議論や意見集約を通じ、解体方法、分析項目、サンプリング位置などの計画案について議論した。埋め戻し部については、水分量、乾燥密度、間隙水組成、鉱物組成などの特性の空間分布を調査するためのサンプルを取得・分析するほか、コンクリートと接している埋め戻し材や岩盤の界面でのセメント影響を調査する計画である。緩衝材については、埋め戻し材と同様に水分量などの空間分布を調査に加え、緩衝材と模擬 OP 界面における腐食による影響や緩衝材と埋め戻し材界面における膨潤変形挙動などを分析する計画である。また、参加機関が保有する解析コードの特徴を共有するとともに、個別の室内試験結果を使用したベンチマークテストを進めた。これらのフェーズ 1 の成果を基に、フェーズ 2 における解体試験や連成解析の比較などを効率的に進めていく計画である。

(3) まとめ

人工バリア性能確認試験は、新第三紀堆積岩・塩水系地下水が分布する幌延 URL の地質環境条件を一例とした、処分孔縦置き方式の実規模大の原位置試験である。本試験では、ガラス固化体設置直後の廃棄体の発熱過程に加えて、減熱過程を模擬した原位置試験（減熱試験）を行い、異なる温度条件での THMC 連成現象に関わるデータを取得した。また、国際共同研究 DECOVALEX を含むニアフィールド領域における連成解析モデルの検証では、原位置試験データとの比較によって原位置の現象を再現するために必要な解析モデルを明らかにした。また、解体試験の実施に向けた試験施工によって、個々のサンプリング手法の適用性を確認した。これらの人工バリア周辺で起こる現象の理解や連成解析コードの高度化は、地層処分後の安全評価における初期状態の把握やオーバーパックの寿命を評価する際の人工バリア周辺の環境条件の設定等に反映可能と考えられる。

今後実施する人工バリア性能確認試験の解体試験においては、緩衝材中の水質分布、乾燥密度分

布および変位に関する情報を取得することで、より詳細な連成解析モデルの検証が可能である。解体試験を含む原位置試験の解釈や解析コードの検証においては、様々な専門知識、技術が必要とされるため、HIP タスク C の参加機関が保有する専門知識やそれぞれの解析コードでの結果を組み合わせることで、より充実した成果が創出できると考えられる。

## 2.2. 物質移行試験

### (1) 掘削損傷領域を対象とした物質移行試験

#### (i) 目的と実施概要

地下深部に立坑やトンネルなどの構造物を建設する場合、これら構造物近傍の局所的な応力状態の変化によって、近傍の岩盤に割れ目が発達する領域が形成されることが知られている。このような領域は掘削損傷領域（Excavation Damaged Zone、以下、EDZ）と呼ばれ<sup>36)</sup>、岩盤基質部（以下、健岩部）と比べ有意に透水性が高いことが知られている。粘土質岩では、割れ目の“self-healing”あるいは“self-sealing”といった現象によって、透水性が元の状態に戻る可能性が指摘されているもの<sup>37)</sup>、このような現象が期待できない岩盤においては、坑道沿いの EDZ が水みちとして機能する可能性がある<sup>36), 37), 38), 39), 40), 41)</sup>。そのため、高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全評価では、EDZ における核種の移行特性を把握することが重要である。

EDZ の核種移行評価については、これまで、廃棄体から漏出した核種が EDZ 内を流れる地下水と瞬時に混合すると仮定して、EDZ の割れ目内の移流分散、割れ目表面への吸着、健岩部への拡散といった現象を考慮しない概念<sup>38), 41)</sup>や、EDZ 内の割れ目を平行平板と仮定して、上記のような割れ目内の移流分散などの現象を考慮する概念<sup>42)</sup>などが提案されている。割れ目表面への吸着や健岩部への拡散は実験室スケールで確認できる現象であり、室内実験によりその効果を評価することができる。一方、移流に伴う分散は核種の溶存濃度を低下させ得る現象として重要であるが<sup>43)</sup>、数メートル以上にわたって連結する EDZ の割れ目内の分散効果を室内実験で確認することは難しく、原位置試験により確認する必要がある。これまでに、天然の割れ目や健岩部を対象とした原位置トレーサー試験により、様々な空間スケールの移流に伴う分散長が評価されており、空間スケールに応じた分散長の経験式が提案されている<sup>44), 45)</sup>。しかしながら、堆積岩中の EDZ の割れ目を対象とした原位置トレーサー試験は著者らの知る限りこれまでに例がなく、天然の割れ目や健岩部で指摘されているような分散効果を EDZ でも想定可能かは確認できていない。検討事例がない理由として、EDZ は立坑や坑道のごく近傍に発達し、掘削後の時間経過とともに不飽和領域が進展しやすいため、トレーサー試験自体が困難であることが、その要因として考えられる。

令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画においては、前述の背景に基づき、EDZ の物質移行の評価手法の確立を目的に、EDZ での物質移行に関するデータ取得を行うこととしている。

本研究では、EDZ の物質移行特性のうち、移流分散効果を確認することを目的に、幌延 URL の坑道沿いに形成された EDZ の割れ目を対象に孔間トレーサー試験およびその解析評価を行い、物質移行特性のうち、移流分散に関わる特性の評価を行った。

#### (ii) 実施内容と成果

孔間トレーサー試験は、350m 試験坑道 3 の南側壁面から 350m 試験坑道 4 の上部に向かって掘削された 2 本のボーリング孔（H4-1 孔および P 孔）を使用した（図 2-20）。350m 試験坑道 4 は人工バリア性能確認試験<sup>29)</sup>の実施に伴い、コンクリートプラグから同試験坑道の西端（図 2-20）までの 7 m

区間が掘削土とベントナイトを混合した材料（埋め戻し材）により埋め戻されており、埋め戻し部中央の下位に設けた試験孔には模擬オーバーパックおよび緩衝材が埋設されている（図 2-20）。埋め戻された 7 m 区間および試験孔には原位置地下水の注水が継続的に行われており、坑道内およびその周辺岩盤の不飽和領域の形成が抑制されている。

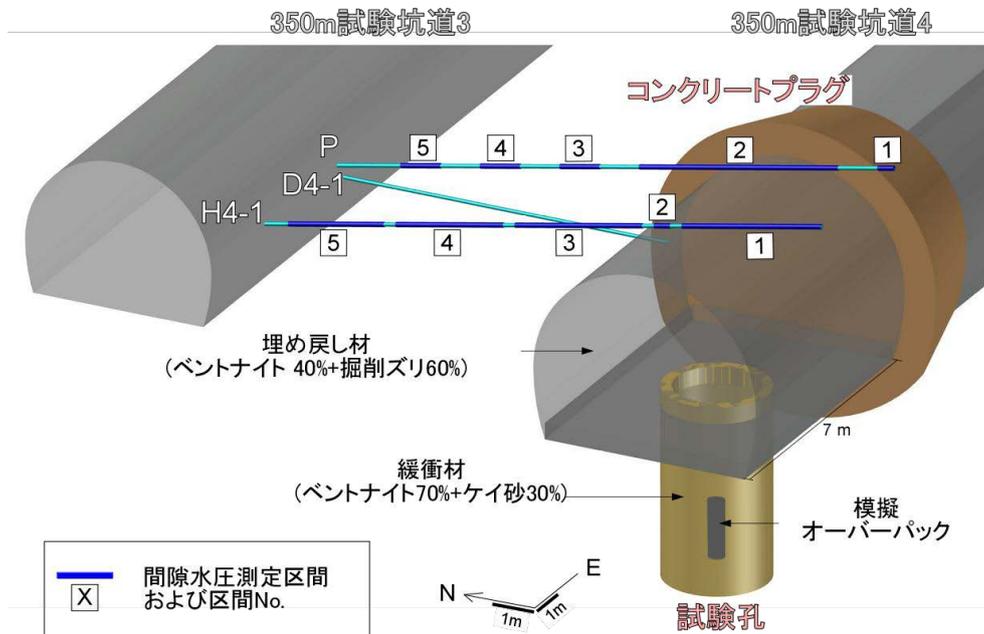


図 2-20 H4-1 孔、P 孔および D4-1 孔のレイアウト（350m 試験坑道 3 および 4）<sup>46)</sup>

H4-1 孔および P 孔の掘削時の調査において、H4-1 孔の孔口から 2.0 m までの範囲と 9.6 m～10.0 m の範囲には割れ目の密集部が確認でき（図 2-21(a)）、P 孔では 8.0 m～8.3 m の範囲と 12.6 m～13.4 m の範囲に割れ目の密集部が確認できた（図 2-22(a)）。これらの割れ目は、350m 試験坑道 3 および 350m 試験坑道 4 の掘削時の応力開放によって生じた引張割れ目（EDZ 割れ目）と評価した<sup>47), 48)</sup>。また、図 2-21(b)、(c)および図 2-22(b)、(c)から H4-1 孔の区間 1、区間 2 および P 孔の区間 2 の透水係数は  $10^{-7}$  m/s～ $10^{-9}$  m/s の範囲内にあり、他の区間の透水係数と比べて有意に高い値を示した（図 2-21(b)、図 2-22(b)）。H4-1 孔および P 孔の間隙水圧は、P 孔の区間 3 および区間 4 を除き、概ね 0.2 MPa 未満であり、そのうち EDZ の割れ目が存在すると判断される H4-1 孔の区間 1、区間 2 および P 孔の区間 2 の間隙水圧は概ね 0.1 MPa であった（図 2-21(c)、図 2-22(c)）。

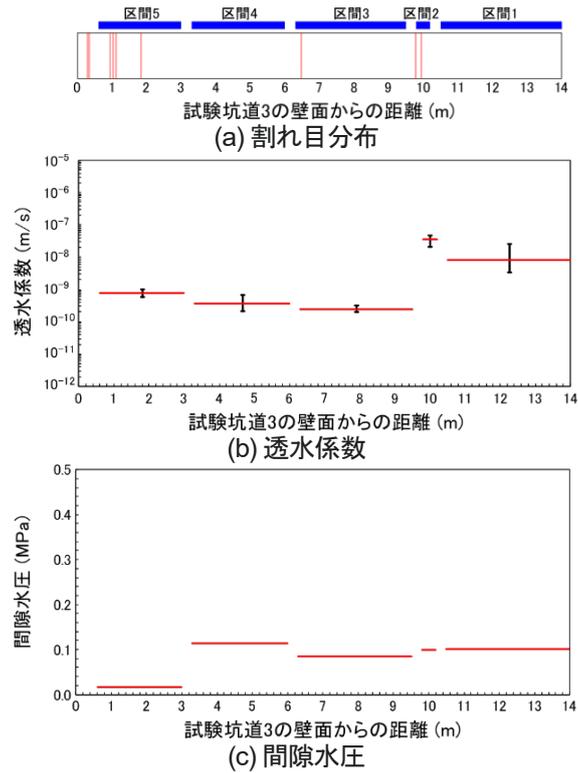


図 2-21 H4-1 孔における割れ目分布、透水係数および間隙水圧（2021 年 11 月時点）<sup>46)</sup>  
 (b)の透水係数は吉野ほか(2019)<sup>49)</sup>および佐俣・石井(2019)<sup>50)</sup>とトレーサー試験前に実施した透水試験結果の上下限値を示す。

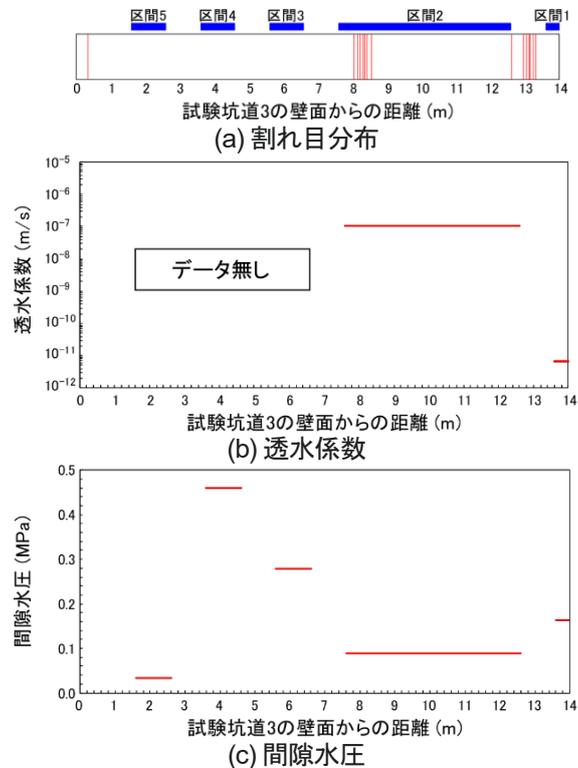


図 2-22 P 孔における割れ目分布、トレーサー試験前に実施した透水試験結果および間隙水圧（2021 年 11 月時点）<sup>46)</sup>

事前調査において定流量注水試験を行った結果、H4-1 孔の区間 1、区間 2 および P 孔の区間 2 には水理学的に互いに連結しあった EDZ の割れ目が存在すると判断した<sup>46)</sup>。なお、事前調査では幌延町内の浅層ボーリング孔から採取した地下水<sup>51)</sup> (工事用水) を使用した。H4-1 孔の区間 1 では、孔壁画像観察で割れ目が認められなかったものの、コア観察では割れ目が認められており、孔壁画像観察で視認できないような微細な割れ目が同区間に存在することが考えられる。

H4-1 孔と P 孔に設置した間隙水圧モニタリング装置を利用して孔間トレーサー試験を実施した。水理学的に互いに連結し合った明瞭な割れ目が存在する H4-1 孔の区間 2 と P 孔の区間 2 を試験対象とし、注水区間を H4-1 孔の区間 2、揚水区間を P 孔の区間 2 とした。トレーサーには蛍光染料として知られるウラニウムを用いた。トレーサーの注入は 2 種類の方法で実施し、パルス注入による孔間トレーサー試験を約 4 日実施した後に、定常注入による孔間トレーサー試験を実施した。これらの孔間トレーサー試験期間中は H4-1 孔の区間 2 への注水 (20 mL/min) と P 孔の区間 2 からの揚水 (150 mL/min) を継続して行い、パルス注入から定常注入への切り替え時もそれらを止めることなく継続した。パルス注入で用いた水は遊離したガスを多く含んだ原位置の地下水で、定常注入で用いた水はパルス注入時に用いた地下水と比べて遊離ガスの少ない工事用水とした。パルス注入時のトレーサーの注入時間と注入濃度はそれぞれ 20 分間および 500 mg/L で、定常注入時のそれらは約 14 日間および 500 mg/L であった。孔間トレーサー試験中は、350m 試験坑道 4 の埋め戻し部および試験孔へ、試験坑道周辺で得られた原位置の地下水を継続的に注水し、トレーサー試験区間周辺の EDZ を水に飽和した状態に保った<sup>46)</sup>。本稿では、定常注入時と比べパルス注入時に使用した原位置地下水の遊離ガスの影響が大きかったため、定常注入時における孔間トレーサー試験結果のみを取り扱うこととする。トレーサーの濃度の観測地点は図 2-23 に示すとおりである。

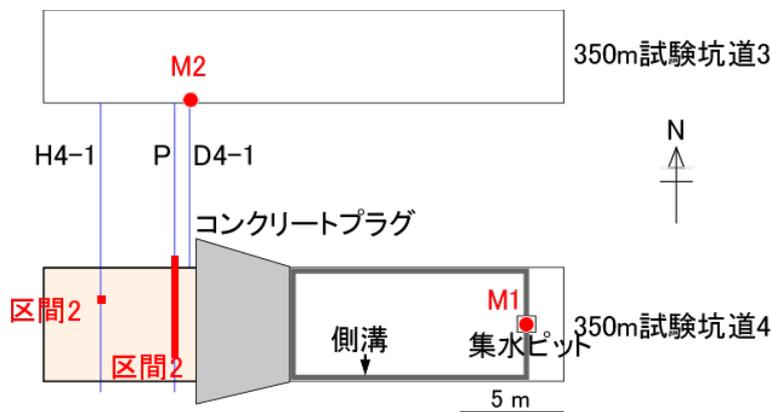


図 2-23 トレーサー濃度の観測地点 (M1、M2、H4-1 孔および P 孔の区間 2)

図 2-24 に H4-1 孔および P 孔の区間 2 におけるトレーサー濃度の経時変化を示す。トレーサーの注入を開始してから、8000 分～8500 分 (約 6 日) 後に P 孔の区間 2 で有意なトレーサー濃度の上昇が確認された。試験開始から約 20000 分 (約 14 日) 後にトレーサーの注入を停止しているが、その後も P 孔の区間 2 のトレーサー濃度は上昇し続けた。25000 分 (約 17 日) 後以降は、ばらつきが認められるものの、4 mg/L 程度で概ね濃度の安定が認められる。

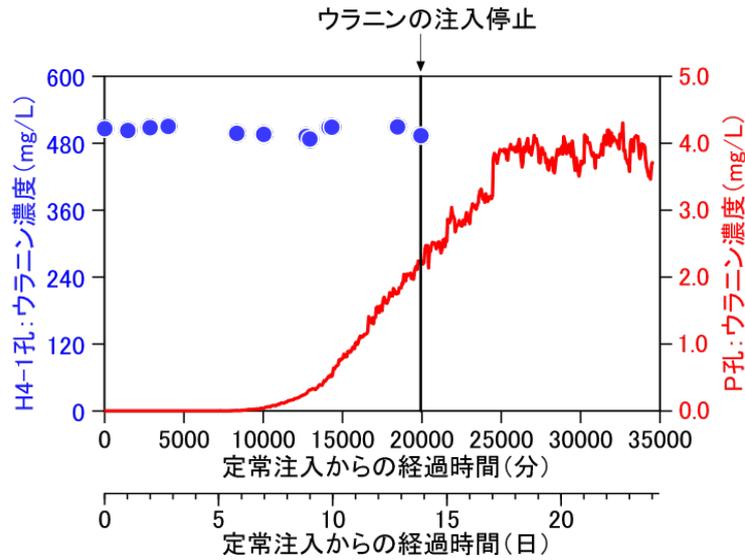


図 2-24 定常注入試験時の H4-1 孔および P 孔の区間 2 におけるトレーサー濃度<sup>46)</sup>

図 2-25 にトレーサー試験中の試験区間の水圧観測結果を示す。同図から、H4-1 孔の区間 1 および P 孔の区間 2 は概ね一定の間隙水圧であったことが確認できるが、H4-1 孔の区間 2 は、定常注入直後に間隙水圧が低下した(図 2-25)。この間隙水圧の一時的な低下の原因としては、以下のような可能性が考えられる。すなわち、パルス注入時に用いた地下水に含まれる遊離ガスが、H4-1 孔の区間 2 の周辺に滞留し続けることによって H4-1 孔の区間 2 近傍の透水性が低下し、パルス注入時に間隙水圧が比較的速く上昇した。その後、定常注入時において、パルス注入時に用いた原位置地下水と比べて混入している遊離ガスの量が少ない工事用水を使用したことにより、H4-1 孔の区間 2 の周辺に滞留していた遊離ガスの一部が H4-1 孔の区間 2 の周辺から押し流され、その結果、H4-1 孔の区間 2 近傍の透水性が増加(回復)し、間隙水圧が一時的に低下した可能性が考えられる。しかし、本検討ではこの遊離ガスの影響は H4-1 孔の区間 2 の近傍に限定的であり、これを除き、注水孔および揚水孔近傍の岩盤の間隙水圧は定常状態に達していたと考えた<sup>46)</sup>。本研究ではこれらの解釈に基づき、本トレーサー試験は定常注入によるトレーサー試験が疑似的に成立していたと仮定した。

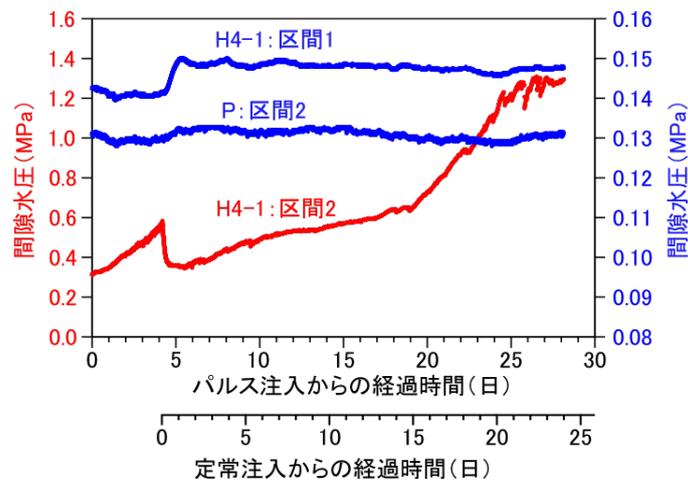


図 2-25 ダイポール試験時の H4-1 孔の区間 1、区間 2 および P 孔の区間 2 における間隙水圧<sup>46)</sup>

定常注入開始後 35000 分（約 24 日）までに P 孔の区間 2、M1 および M2 で回収されたトレーサーの量は、各観測地点で計測される流量（mL/min）とトレーサー濃度（mg/L）の経時変化に基づくと、それぞれ  $0.9 \times 10^4$  mg、 $3.6 \times 10^4$  mg および  $1.0 \times 10^4$  mg と算出される。これらの回収量は定常注入によって注入されたトレーサーの総量（ $2.0 \times 10^5$  mg）の 5%、18% および 5% にそれぞれ相当する（合計 28%）。残りの 72% については、350m 試験坑道 4 のコンクリートプラグ内側の埋め戻し部周辺の岩盤には、EDZ 以外の割れ目がほとんど確認されないことから<sup>52)</sup>、注入されたトレーサーが EDZ の外側の岩盤に移行する可能性は低く、コンクリートプラグ内側の坑道内に残留していたと考えられる<sup>46)</sup>。

本試験区間周辺の EDZ の幅は概ね 1 m 以内であることが先行研究により示されており<sup>47), 48)</sup>、坑道の半径方向の岩盤内への水の流れは限定される。したがって、注入区間に注入されたトレーサーは EDZ 内の坑道の円周方向の流れと坑道の掘削方向の流れを組み合わせた二次元的な流れによって移行することが考えられる。実際に注入されたトレーサーは P 孔の区間 2（トレーサーの回収量：5%）のみならず、M1（トレーサーの回収量：18%）でも回収されている。M1 で回収されたトレーサーの回収量が P 孔の区間 2 と比べて大きいことは、H4-1 孔の区間 2 から P 孔の区間 2 へは坑道の掘削方向の流れが卓越しているのに対し、H4-1 孔の区間 2 からコンクリートプラグ外側の壁面へは、坑道の掘削方向に加え、坑道の円周方向の流れも有意に発生している可能性を示唆する。本検討では、P 孔で回収されたトレーサーのみに着目することとした。具体的には、P 孔で回収されたトレーサーが注入区間から揚水区間まで 100% の回収率で移行したと仮定することにより、その移行経路内の流れを一次元の流れとして扱うこととした。解析では H4-1 孔の区間 2 から P 孔の区間 2 の間の移流分散現象を一次元の移流分散問題として取り扱い、汎用のシミュレーターである GoldSim<sup>53)</sup> を用いた。

一次元の移流分散方程式は以下のように表現される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_L \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad \text{式 2-1}$$

ここで、 $t$ : 時間、 $c$ : トレーサー濃度、 $D_L$ : 縦方向（流れの方向）の分散係数、 $v$ : 平均流速である。この時、縦方向の分散係数は、以下のように表現される。

$$D_L = \alpha_L \cdot v \quad \text{式 2-2}$$

ここで、 $\alpha_L$  は縦方向（流れの方向）分散長である。

一次元の均一な流れを仮定した場合、移行経路の断面積（ $A$ ）を通過する流量（ $Q$ ）は以下のように表現される。

$$Q = v \cdot A \quad \text{式 2-3}$$

また、距離  $L$  の移行経路を単位時間に移行する際の流速は、平均流速として次式で算出される。

$$v = \frac{L}{t_e} \quad \text{式 2-4}$$

ここで、 $t_e$  は平均移行時間である。式 2-3 および式 2-4 より、移行経路の断面積（ $A$ ）は次式で表現される。

$$Q = \frac{L}{t_e} \cdot A \quad \text{式 2-5}$$

本解析では移行経路の距離（ $L$ ）を H4-1 孔の区間 2 と P 孔の区間 2 の直線距離（4.2 m）と仮定した。移行経路を流れる流量（ $Q$ ）は注水流量（20 mL/min）のうち、トレーサー回収率（図 2-26 の R）に応じた流量（図 2-26 の Q）のみが流れると仮定した。このトレーサー回収率は、図 2-24 の 25000

分（約 17 日）後以降に見られるトレーサー回収濃度の安定時のトレーサー回収レート（単位時間あたりの回収量）をトレーサー注入レート（単位時間あたりの注入量）で除した値で表せると考えた。具体的には、トレーサー回収レートをトレーサー回収濃度（3.9 mg/L）と揚水流量（150 mL/min）の積とし、トレーサー注入レートをトレーサー注入濃度（502 mg/L）と注水流量（20 mL/min）の積として、トレーサー回収率を 6% とした。したがって、1.2 mL/min の流量が一定の断面積の移行経路に流れると仮定した。移行経路を流れる流量については、揚水流量の 150 mL/min が流れる場合も考えられる。しかし、注水区間の H4-1 孔の区間 2 への注入流量は 20 mL/min であり、150 mL/min に比べて明らかに少ないことと、P 孔の区間 2 のトレーサー回収率（6%）が低いことが矛盾するため、仮定した移行経路内に注入区間から 150 mL/min の流量が流れるという設定は適切ではないと判断した。本解析では縦方向分散長（ $\alpha_L$ ）および移行経路の断面積（ $A$ ）を未知パラメータとし、最小二乗法によるフィッティングを行い、観測値と解析値との間の誤差が最小となるパラメータ値を導出した。

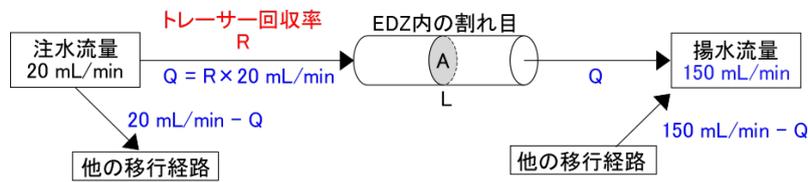


図 2-26 移流分散解析におけるモデル概念

図 2-27 に、移行経路の断面積（ $A$ ）と縦方向分散長（ $\alpha_L$ ）を未知パラメータとしてフィッティングにより求めたシミュレーション結果（図中の青色の破過曲線）を示す。また、本解析における縦方向分散長の感度を示すために、その縦方向分散長（ $\alpha_L$ ）の推定値を 0.5 倍もしくは 2 倍とした場合のシミュレーション結果も同図に示す（図 2-27 中の点線もしくは破線の破過曲線）。点線および破線の破過曲線と異なり、青色の破過曲線は観測値の破過曲線の立ち上がりから濃度が安定するまでの変化を良く再現できている（図 2-27）。移行経路の断面積（ $A$ ）は、 $5.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  と推定され、移行経路の平均流速（ $v$ ）は式 2-4 および式 2-5 より  $2.3 \times 10^{-4} \text{ m/min}$  と算出された（表 2-1）。また、推定された縦方向分散長（ $\alpha_L$ ）は 0.12 m（表 2-1）であり、仮定した移行経路長 4.2 m の 3% に相当する縦方向分散長が得られた。

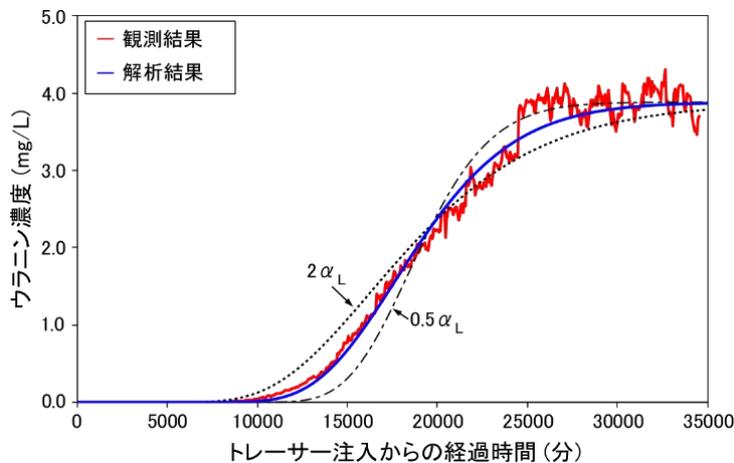


図 2-27 移流分散解析結果<sup>46)</sup>

点線と破線は解析結果（青線）から導出された  $\alpha_L$  を 0.5 倍もしくは 2 倍に設定した解析ケースを示す。青線と重なっている黒線は移行経路長を 2 倍に設定した解析ケースを示す。

表 2-1 解析パラメータ<sup>46)</sup>

パラメータ	標記	値	
移行経路長 (m)	$L$	4.2	8.4
流量 (mL/min)	$Q$	1.2	
断面積 (m <sup>2</sup> )	$A$	$5.2 \times 10^{-3}$	$2.6 \times 10^{-3}$
縦方向分散長 (m)	$\alpha_L$	0.12	0.24
平均移行時間 (min)	$t_e$	18261	
平均流速 (m/min)	$v$	$2.3 \times 10^{-4}$	$4.6 \times 10^{-4}$

推定された移行経路の断面積 ( $5.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ) の妥当性については以下のことが考えられる。本解析のように注水区間から揚水区間への移行経路を一次元の経路として仮定する場合、移行経路の断面積は少なくとも H4-1 孔の区間 2 (注水区間) の断面積 ( $0.13 \text{ m}^2$ ) よりも小さいと考えられる。したがって、本解析によって推定された移行経路の断面積 ( $5.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ) はこれと矛盾しない。一方、割れ目を含まない健岩部の透水係数は割れ目を含む区間の透水係数に比べて有意に小さい (図 2-21(b)、図 2-22(b))。したがって、EDZ の主たる移行経路は割れ目であると考えられる。しかし、推定された移行経路の断面積 ( $5.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ) は割れ目の断面積としては大きい可能性がある。この原因のひとつの可能性として、移行経路の屈曲度 (tortuosity ; 2 点間の移行距離をその直線距離で除した値) の影響が考えられる。すなわち、本解析では H4-1 孔の区間 2 と P 孔の区間 2 の直線距離 (4.2 m) を移行距離 ( $L$ ) と仮定したが、EDZ の割れ目がネットワークを形成し、割れ目内の移行経路の屈曲度が 1 より大きい可能性を考えると、実際の移行距離は 4.2 m よりも長い可能性がある。1 よりも大きい屈曲度として、2 を仮定した場合 (移行距離を 2 倍 ;  $L = 8.4 \text{ m}$ )、破過曲線のシミュレーション結果 (図 2-27 の黒色の破過曲線) は屈曲度を 1 とした場合のそれと変わらない (図 2-27 の青色の破過曲線と重なる)。しかし、移行経路の断面積は  $2.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  に半減する (表 2-1)。したがって、移行経路が屈曲している可能性を考慮すると、実際の移行経路の断面積はさらに小さい可能性が考えられる。移行距離を 2 倍にした場合、縦方向分散長の推定値は 0.24 m に倍増するが (表 2-1)、移行距離に対する縦方向分散長の割合は 3%と変わらない。推定された移行経路長と縦方向分散長の関係を、Gelhar et al. (1992)<sup>44)</sup>が示した、評価スケールと縦方向分散長の関係のグラフ上にプロットしたものを図 2-28 に示す。Gelhar et al. (1992)<sup>44)</sup>は天然の割れ目や健岩部を対象に行ったトレーサー試験の事例を整理し、トレーサー試験の評価スケール (仮定する移行経路長) とトレーサー試験結果から評価された縦方向分散長の関係をプロットしたところ、これらの間には相関性が認められ、縦方向分散長は評価スケールの 1/100 から 1/1 の回帰式の間プロットされることを示した。本稿において推定した EDZ の縦方向分散長は評価スケールの 1/100 から 1/10 の回帰式の間プロットされることが確認できる。前述のとおり、Gelhar et al. (1992)<sup>44)</sup>は天然の割れ目や健岩部を対象としたトレーサー試験のデータを整理したものであるが、EDZ の割れ目でも同程度の縦方向分散が生じていることが今回の試験により確認できる。また、稚内層における EDZ の割れ目以外の天然の割れ目や健岩部において評価された縦方向分散長と比較しても、今回評価された縦方向分散長は評価スケール (トレーサーの移行経路の長さ) の 1/10 から 1/10 の回帰式の間同様にプロットされることが確認できる。

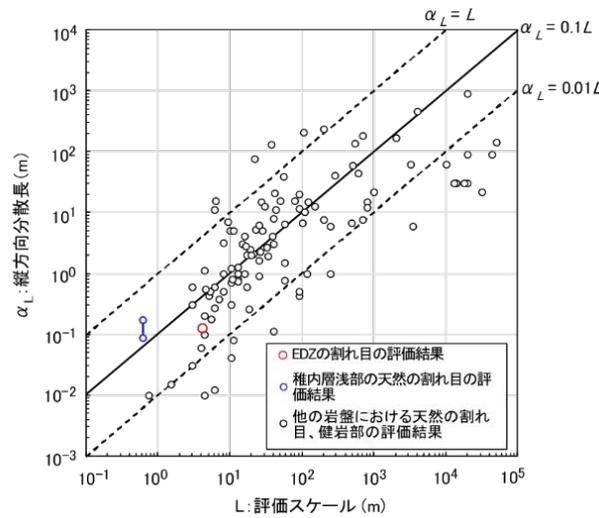


図 2-28 縦方向分散長と評価スケールの関係性 <sup>46)</sup>に加筆

○EDZの割れ目の評価結果、●は稚内層浅部（深度 350 m）の天然の割れ目の評価結果 <sup>44)</sup>、○は既存の天然の割れ目、健岩部での評価結果 <sup>44)</sup>を示す。

本研究では、堆積岩中に発達した EDZ の割れ目を対象に原位置トレーサー試験を実施し、一次元移流分散モデルの適用によって EDZ 割れ目内の縦方向分散長を評価した。本研究で得られた成果は以下のとおりである。

- EDZ を地下水で飽和させるためにコンクリートプラグを用いる場合、その止水性には限界があることと、溶存ガスが多い地下水環境の場合、揚水流量を上げて揚水区間の水圧を下げるのが困難であることから、これらの条件では揚水区間のトレーサー回収率を上げることが難しく、揚水区間以外の地点にもトレーサーが移行することが確認された。しかし、このような条件でもプラグ内に継続して注水を行い、EDZ の飽和を保った上で、既存の孔間トレーサー試験手法を適用することにより、EDZ 割れ目の縦方向分散長を評価できることが確認できた。
- 導出された縦方向分散長 ( $\alpha_L = 0.12 \text{ m}$ ) は天然の割れ目や健岩部から報告されている値と同程度であり、堆積岩中の EDZ においても、評価スケールの 1/100~1/10 に相当する分散効果に応じた濃度低下が期待できることが確認できた。

これらの成果は、地層処分の安全評価において EDZ における放射性核種の遅延性能を考慮した核種移行モデルを検討する上で有益な情報となり得る。

(iii) まとめ

EDZ の割れ目を対象にトレーサー試験を実施し、EDZ の物質移行特性を評価するためのデータを取得するとともに、これらの結果について解析評価を行ってきた。その結果、従来の試験・解析手法を適用することにより EDZ の割れ目中の縦方向分散長を適切に評価できることが確認できた。これにより、EDZ における物質移行のモデル化・解析手法を整備することができ、所期の目標を達成することができた。この成果は、地層処分の安全評価において EDZ における放射性核種の遅延性能を考慮した核種移行モデルを検討する上で有益な情報となり得る。

(2) 有機物・微生物・コロイドを対象とした物質移行試験

(i) 目的と実施概要

廃棄体から漏出した放射性核種が地下水中の微生物に取り込まれたり、有機物やコロイドと錯生成したりすることにより、核種の移行が促進される可能性が指摘されており、放射性核種の移行挙動評価にあたっては有機物・微生物・コロイドと核種との相互作用の影響を考慮する必要がある。幌延深地層研究計画では、このような評価に資する基礎データの取得を目的として、地下水中に存在する有機物・微生物・コロイドの特性評価やそのための手法の整備を進めてきた。第1段階では、地上から掘削されたボーリング孔を活用して地下水を採取し、有機物・微生物の存在量や組成に関する調査を実施したが、掘削時の汚染の影響が大きく高品質なデータの取得が困難であることが課題として挙げられた<sup>3)</sup>。そのため、コロイドの特性評価や評価手法の整備については、地上からのボーリング調査では実施できていない。第2段階および第3段階（2019年度まで）では、坑道から掘削したボーリング孔を活用することで、掘削によって生じたボーリング孔内の汚染を高被圧地下水の流出により除去することができ、地上からのボーリング調査と比較して汚染のほとんどない高品質な地下水を採取することが可能となった。このようにして採取した地下水を活用して、有機物・微生物・コロイドの特性に関するデータを継続的に取得してきた<sup>5), 9)</sup>。これらの調査研究を通じて、例えば微生物の存在量・群集組成<sup>54), 55), 56), 57), 58)</sup>、有機物の濃度・サイズ・錯形成能<sup>59), 60)</sup>、コロイドの濃度・サイズ・元素分布<sup>61), 62), 63), 64)</sup>などに関する知見を蓄積してきた。図2-29には、これらの知見に基づき、幌延の地下水中に存在する有機物・微生物・コロイドのおよそのサイズについて整理した。コロイドのサイズは一般的に1 nm～1 μmまたは1 nm～0.2 μmと考えられており<sup>65)</sup>、幌延の地下水中では数 nm～0.5 μm程度で最頻値が約120 nm<sup>64)</sup>、有機コロイドや主要な有機物である腐植物質のサイズは数 nm<sup>60), 63)</sup>である。微生物のサイズは一般的に0.2 μmよりも大きいと考えられており<sup>66)</sup>、本研究でもこの前提に従う。本研究では、3 kDa 限外ろ過でフィルターを通過する大きさの成分（数 nm 未満）を溶存態、1 μm 以下のサイズのフィルターを通過し溶存態より大きい成分をコロイドと定義する。10 kDa 限外ろ過フィルターを通過する大きさの成分は大部分が溶存態と想定されるが、幌延の地下水中では、腐植物質や有機コロイドを一部含むと考えられる。

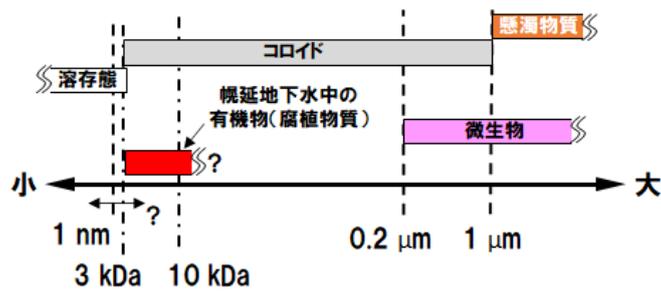


図 2-29 本課題で対象とする各成分のサイズの関係性

幌延深地層研究計画の第3段階のうち2015年度～2019年度に実施された必須の課題の中では、上記の特性評価やその手法整備に関する研究を推進するとともに、健岩部および割れ目を対象とした物質移行試験を実施し、溶存ガスの脱離が生じる地下環境下で非収着性および収着性のトレーサの移行挙動を評価するための試験方法を確立した<sup>9), 67)</sup>。しかしながら、有機物・微生物・コロイドが物質移行に及ぼす影響の把握については今後の課題とされていた<sup>9)</sup>。

本研究では、これまでの調査研究で取得・確立されてきた知見や手法を活用しながら、有機物・微生物・コロイドの影響に着目した物質移行データを取得することを目的とする。具体的には、高レベル放射性廃棄物に含まれるアクチノイドのアナログ元素であり、有機物や微生物との相互作用が示唆される希土類元素をトレーサーとした室内試験や原位置試験を実施した。加えて、地下水中に存在する有機物・微生物・コロイドの特性評価についても、特に核種との相互作用や移行挙動への影響の観点から、さらなる知見の拡充に取り組んだ。なお、本課題の一部は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業である、令和5年度および令和6年度「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]核種移行総合評価技術開発」を活用して実施した。

(ii) 実施内容と成果

① 有機物・微生物・コロイドと元素との相互作用を確認するための試験

(a) 室内試験

地下水中に存在する有機物・微生物・コロイドと希土類元素との相互作用を確認するための室内試験として、以下に示す試験Aおよび試験Bを実施した。試験フローを図2-30に示す。地下水の採取やろ過は、いずれも大気と接触しない状態で実施した。地下水を希土類元素と反応させた後、採取された各試料には0.1 mol/Lとなるように硝酸を添加し、希土類元素濃度をICP-MSにより測定した。

- ・ 試験A：350m試験坑道に位置するボーリング孔（13-350-C01孔）の地下水に含まれる有機物・微生物・コロイドを3 kDa フィルターでの限外ろ過により除去し、ステンレスタンクに採取した。この地下水に各希土類元素 10 μg/L を添加した。タンク内の地下水の一部を時間経過とともに採取し、その一部を0.2 μm フィルターでろ過して、0.2 μm ろ過試料とした。また、0.2 μm フィルターでろ過しなかった残りの試料を未ろ過試料とした。
- ・ 試験B：13-350-C01孔の地下水を、直接ステンレスタンクに採取した。この地下水に各希土類元素 10 μg/L を添加した。タンク内の地下水の一部を時間経過とともに採取し、その一部を0.2 μm フィルターでろ過して、0.2 μm ろ過試料とした。また、0.2 μm フィルターでろ過しなかった残りの試料を未ろ過試料とした。

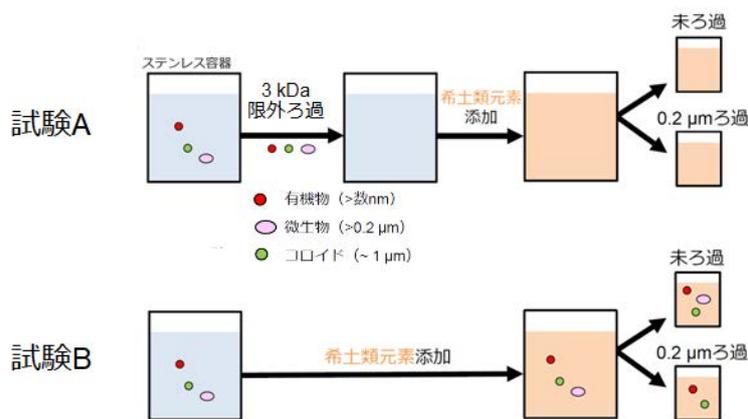


図 2-30 室内試験のイメージ図

試験Aと試験Bにおける、ランタン (La)、ユウロピウム (Eu) およびルテチウム (Lu) の濃度変化を図2-31に示す。各元素の濃度は時間経過とともに減少しており、この濃度減少の程度は、原子量の小さい希土類元素ほど大きかった (La>Eu>Lu)。これは、既往研究<sup>61), 68)</sup>と同様に、添加した

希土類元素の一部が地下水に含まれるリン酸イオンと錯体を形成して沈殿（または試験容器に吸着）し、溶液から除去されたためと考えられ、原子量の小さい希土類元素の方がリン酸イオンと結合しやすいこととも整合的である。3 kDa フィルターでの限外ろ過により地下水中に含まれる有機物・微生物・コロイドを除去してから希土類元素を添加した試験 A では、未ろ過試料と 0.2 μm ろ過試料の濃度がほぼ同じ値で推移していた。溶液中の希土類元素がほぼすべて<0.2 μm のサイズ（溶存態、または 0.2 μm よりも小さい真性コロイド）として存在していたと考えられる。一方、限外ろ過をせずに希土類元素を添加した試験 B では、0.2 μm ろ過試料よりも未ろ過試料の濃度が高かった。溶液中の希土類元素の一部が<0.2 μm（溶存態、0.2 μm よりも小さい真性コロイド、または 0.2 μm よりも小さい地下水コロイドへの収着）として、残りは>0.2 μm（0.2 μm よりも大きい地下水コロイドまたは懸濁物質への収着）として存在していたと考えられる。>0.2 μm の存在割合は原子量の小さい希土類元素ほど大きかった（La>Eu>Lu）ことから、有機物などや地下水コロイド表面の吸着サイトと希土類元素との錯形成が示唆される。また、未ろ過試料と 0.2 μm ろ過試料のいずれにおいても、最終的な希土類元素濃度は試験 B のほうが試験 A よりも 1 桁程度高かった。この結果は、地下水中に有機物・微生物・コロイドが含まれる場合、それらと希土類元素が相互作用することで、添加した希土類元素の沈殿量が少なくなり、より高い濃度で地下水中に存在するようになったことを示唆している。

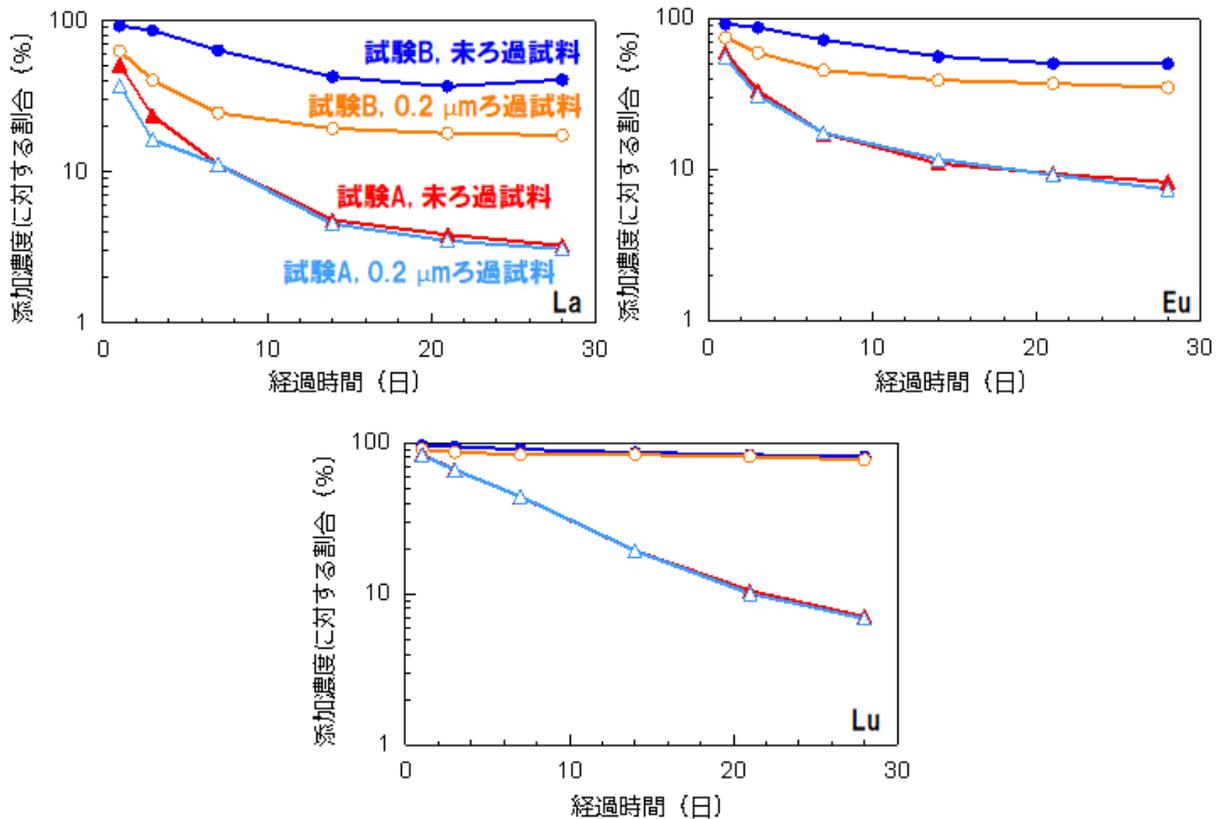


図 2-31 室内試験における希土類元素濃度の時間変化

試験 A：地下水を 3 kDa 限外ろ過後に希土類元素を添加。試験 B：地下水に直接希土類元素を添加。縦軸は、希土類元素を添加した直後の未ろ過試料中の濃度を 100%とし、その値に対する各試料の濃度の割合を示す。

また、岩盤が存在する系での物質移行評価に必要な基盤データとして、幌延地下水中の主要な天然有機物のひとつであるフミン酸の岩石への収着挙動を調べる室内試験を実施した。幌延地下水と同程度のイオン強度の塩化ナトリウム溶液中に、幌延地下水から抽出されたフミン酸と稚内層の岩石粉末を入れ、定期的に振とうした後、溶液中のフミン酸濃度を測定した。その結果、試験開始から 14 日後の稚内層岩石粉末に対するフミン酸の収着分配係数は、地下水と同じ中性の pH 領域において  $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} \sim 10^{-2} \text{ m}^3/\text{kg}$  程度であり、岩盤に対して弱い収着性を示すことが示唆された。

#### (b) 原位置試験

有機物・微生物・コロイドと希土類元素の 2 種類の要素ならびに有機物・微生物・コロイド、希土類元素および岩盤の 3 種類の要素が存在する条件下で希土類元素の挙動を確認するための原位置試験を実施した。試験に先立ち、350m 調査坑道の底盤より孔長約 3 m、孔径 76 mm のボーリング孔を掘削し、パッカーを拡張して孔底に長さ 250 mm の試験区間を設けた。また、流量計や間隙水圧計などを設置して、試験装置を構築した (図 2-32)。



図 2-32 350m 調査坑道に設置した物質移行試験装置

構築した装置を用いた原位置試験の方法を図 2-33 に示す。岩盤内の試験区間に存在する地下水量のみでは長期間の試験に必要な試料量が不足していたことから、13-350-C01 孔の地下水を大気と接触しない状態でステンレス製のボトルまたはタンクに採取し、地上でアルゴンガスにより 0.2 MPa～0.3 MPa 程度に加圧してから、坑道上の経路内に接続して試料量を追加した。岩盤内の試験区間と坑道上の経路との間で地下水を循環させ、水質を均質化した (図 2-33 の①)。循環を一旦停止し、坑道上の経路のみで循環するように経路を変換してから、坑道上の経路内の地下水に希土類元素 (2023 年度：各元素 50  $\mu\text{g}/\text{L}$ 、2024 年度：各元素 100  $\mu\text{g}/\text{L}$ ) を添加し、坑道上の経路のみで循環させて希土類元素と地下水を混合した (図 2-33 の②)。次に、坑道上の経路に設置したボトルの一部を経路から取り外して保管した (図 2-33 の③)。そして、岩盤内の試験区間を経由するように循環経路を変換して、希土類元素を混合した地下水を試験区間に循環させた (図 2-33 の④)。坑道上で保管したボトル (図 2-33 の③) と岩盤内の試験区間を循環している経路上のボトル (図 2-33 の④) の両方を時間経過とともに 1 本ずつ採取し、各ボトル内の地下水を 1  $\mu\text{m}$ 、0.2  $\mu\text{m}$  のフィルターでろ過ならびに 10 kDa のフィルターで限外ろ過した (1  $\mu\text{m}$  と 10 kDa でのろ過は 2024 年度のみ)。試験期間は、2023

年度は2週間、2024年度は約4か月間とした。各試料には0.1 mol/Lとなるように硝酸を添加し、希土類元素濃度をICP-MSにより測定した。

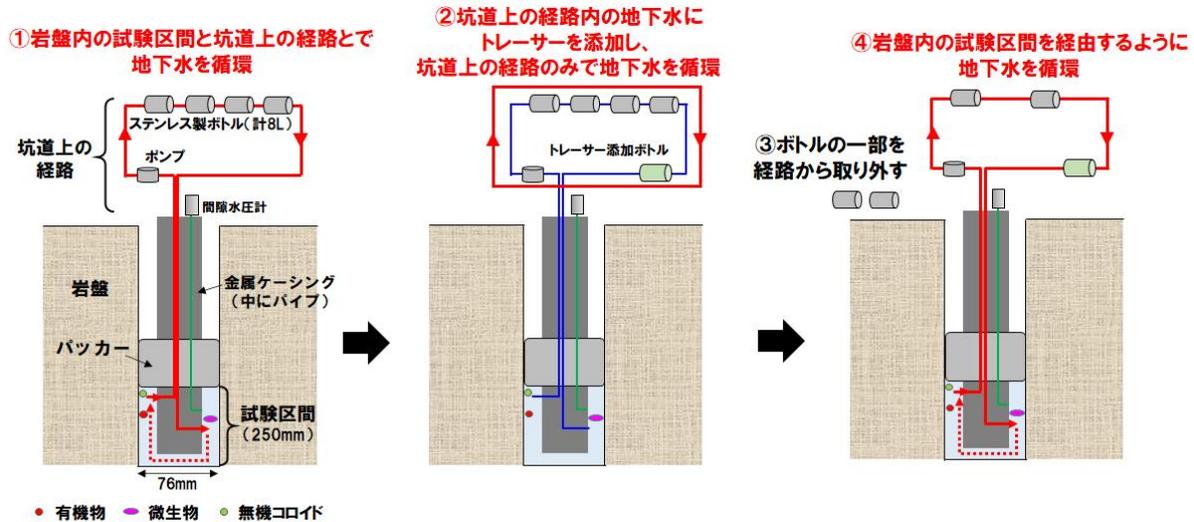


図 2-33 原位置試験の装置概念図および試験手順

2023年度に実施した、各希土類元素の添加濃度 50  $\mu\text{g/L}$ 、試験期間 2 週間の原位置試験の結果を図 2-34 に示す。室内試験と同様に、時間経過とともに各元素の濃度が減少しており、リン酸イオンとの錯形成の影響が示唆される。調査坑道上で保管した地下水 (図 2-33 の③) では、0.2  $\mu\text{m}$  ろ過試料よりも未ろ過試料の濃度が高かった。これは室内試験の試験 B と同様の結果であり、溶液中の希土類元素の一部が<0.2  $\mu\text{m}$  (溶存態、0.2  $\mu\text{m}$  よりも小さい真性コロイドまたは 0.2  $\mu\text{m}$  よりも小さい地下水コロイドへの収着) として、残りは>0.2  $\mu\text{m}$  (0.2  $\mu\text{m}$  よりも大きい地下水コロイドまたは懸濁物質への収着) として存在していたと考えられる。また、>0.2  $\mu\text{m}$  の存在割合は原子量の小さい希土類元素ほど大きく、室内試験の試験 B と同様に、希土類元素の錯形成の影響が示唆される。一方、岩盤内の試験区間を循環させた地下水 (図 2-33 の④) では、14 日目の試料を除いては未ろ過試料と 0.2  $\mu\text{m}$  ろ過試料の濃度がほぼ同じ値であり、室内試験の試験 A と同様に、溶液中の希土類元素がほぼすべて<0.2  $\mu\text{m}$  のサイズ (溶存態、0.2  $\mu\text{m}$  よりも小さい真性コロイドまたは 0.2  $\mu\text{m}$  よりも小さい地下水コロイドへの収着) として存在していたと考えられる。トレーサー添加前には試験区間を経由するように地下水を循環させており (図 2-33 の①)、調査坑道上で保管した地下水と岩盤内の試験区間を循環させた地下水に含まれる有機物・微生物・コロイドの濃度や組成には大きな差はないと考えられることから、主に 0.2  $\mu\text{m}$  よりも大きい粒子と結合した希土類元素が、試験区間を経由する過程で岩盤への収着などにより地下水から除去されたことが示唆される。この 0.2  $\mu\text{m}$  よりも大きい粒子は、後述する 2024 年度の試験結果から、コロイドよりも大きいサイズの懸濁物質などであると推測される。

上記の試験期間が 2 週間と短かったことや、14 日目の試料でそれまでとは異なるサイズ分布の結果が得られたことから、2024 年度は各希土類元素の添加濃度を 100  $\mu\text{g/L}$ 、試験期間を約 4 か月、ろ過サイズを 1  $\mu\text{m}$ 、0.2  $\mu\text{m}$ 、10 kDa の 3 種類として同様の原位置試験を実施した。結果を図 2-35 に示す。試験開始直後の推移に着目すると、調査坑道上で保管した地下水 (図 2-33 の③) の方が 0.2  $\mu\text{m}$  ろ過試料 (および 1  $\mu\text{m}$  ろ過試料) と未ろ過試料との濃度の差が大きく、また調査坑道上で保管

した地下水（図 2-33 の③）と岩盤内の試験区間を循環させた地下水（図 2-33 の④）とで、0.2 μm ろ過試料の濃度は同程度であった。これらの結果は 2023 年度の試験とも整合的であり、結果の再現性が確認できた。

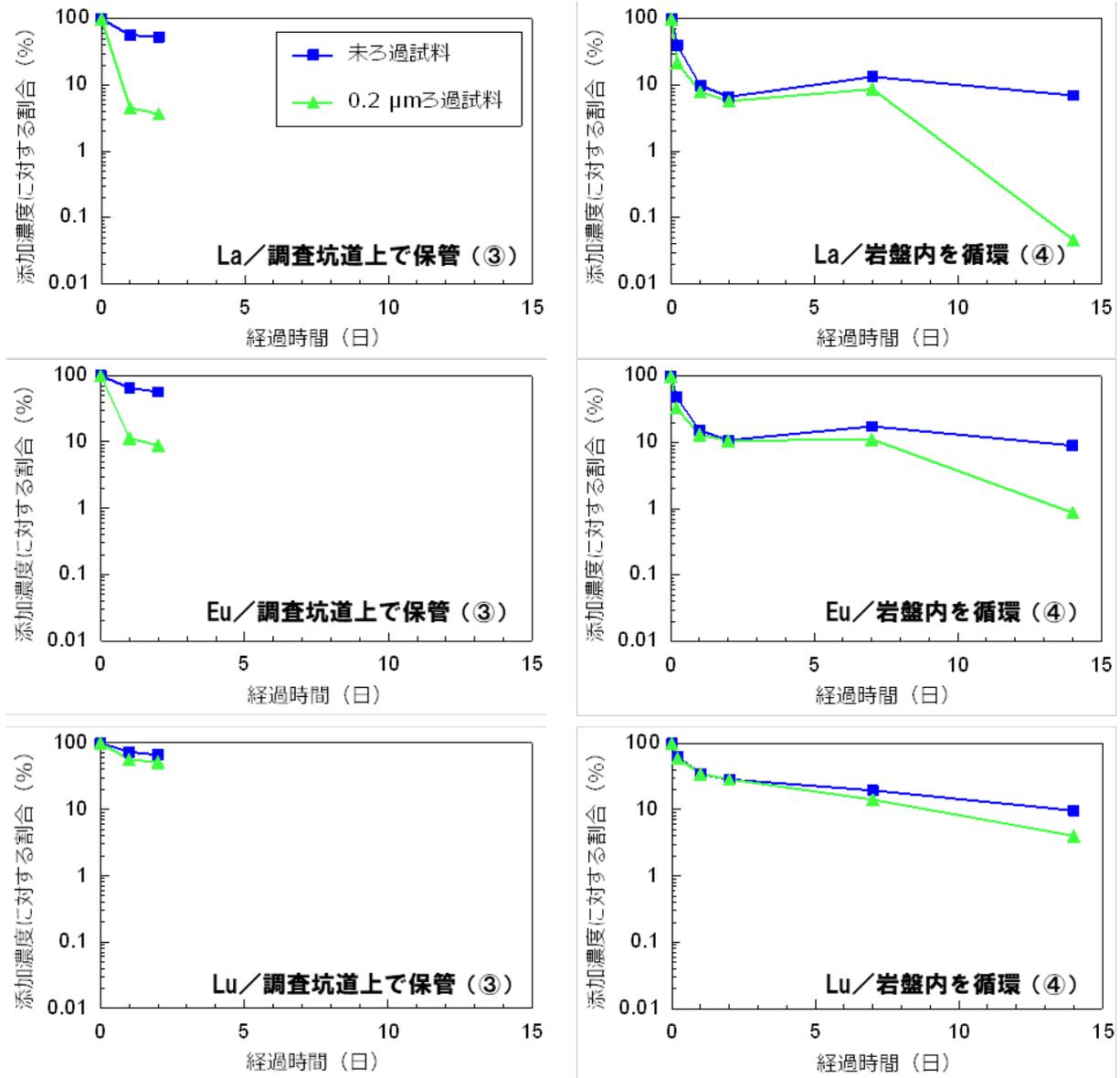


図 2-34 2023 年度に実施した原位置試験における希土類元素濃度の時間変化

図中の③、④は図 2-33 の試験手順に対応している。縦軸は、希土類元素を添加した直後の未ろ過試料中の濃度を 100%とし、その値に対する各試料の濃度の割合を示す。

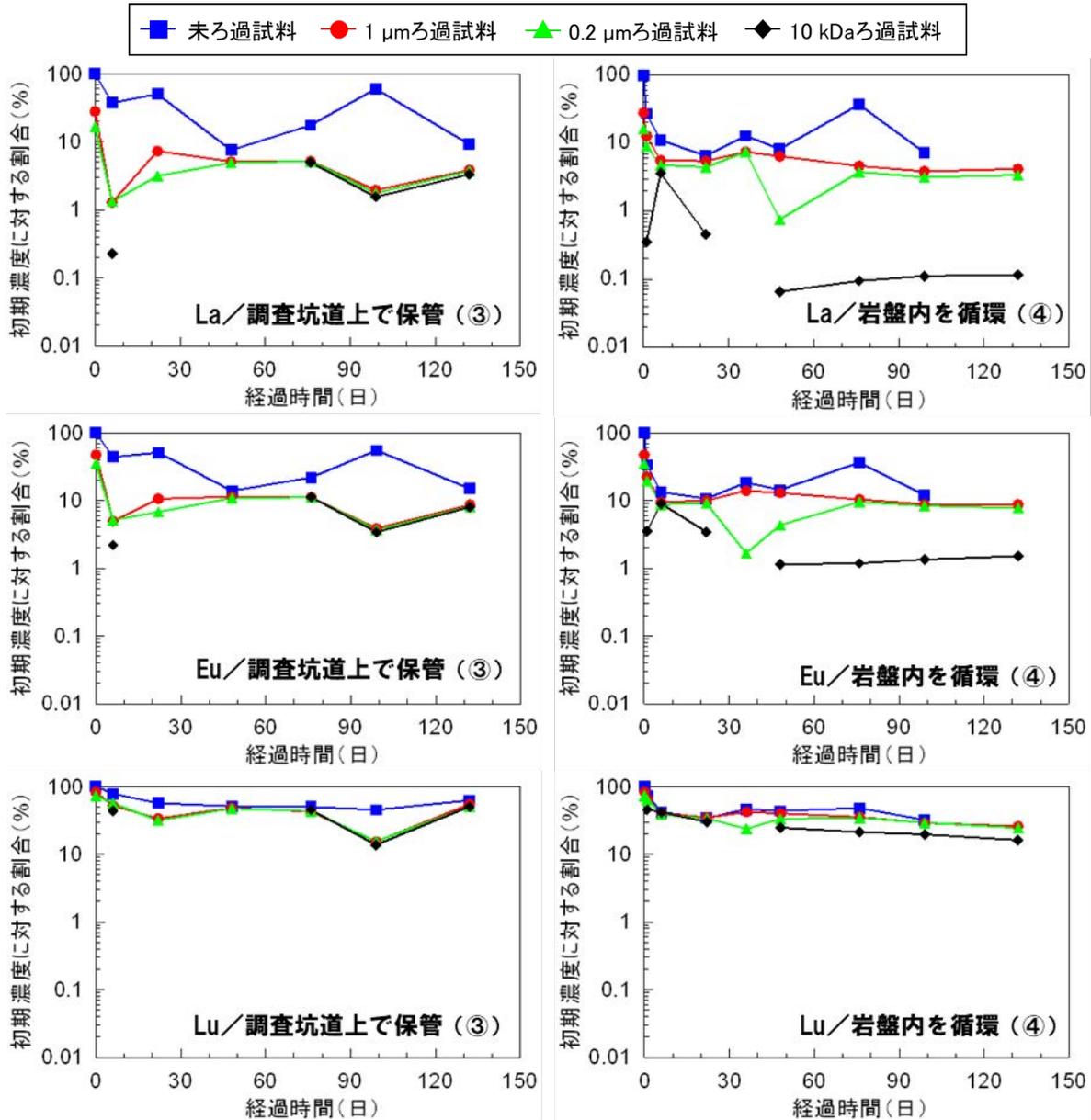


図 2-35 2024 年度に実施した原位置試験における希土類元素濃度の時間変化

図中の③、④は図 2-33 の試験手順に対応している。縦軸は、希土類元素を添加した直後の未ろ過試料中の濃度を 100% とし、その値に対する各試料の濃度の割合を示す。

岩盤内の試験区間を循環させずに調査坑道上で保管した地下水と、岩盤内の試験区間を循環させた地下水のいずれにおいても、希土類元素濃度は、未ろ過試料>1 μmろ過試料≒0.2 μmろ過試料の関係にあった。この結果から、添加した希土類元素の一部がコロイドよりも大きいサイズの粒子（懸濁物質など）に吸着（またはコロイドよりも大きいサイズの粒子を形成）していることおよび 0.2 μm～1 μm のサイズの地下水コロイドと希土類元素との相互作用は小さいことが示唆される。

0.2 μmろ過試料と 10 kDa 限外ろ過試料の希土類元素濃度に着目すると、希土類元素を添加して数十日が経過し濃度変化が落ち着いた時点で、調査坑道上で保管した地下水では 0.2 μmろ過試料≒10 kDa 限外ろ過試料の関係が認められた。一方、岩盤内の試験区間を循環させた地下水では 0.2 μmろ過試料>10 kDa 限外ろ過試料の関係が認められた。調査坑道上で保管した地下水では希土類元素が

10 kDa~0.2  $\mu\text{m}$  のサイズの地下水コロイドに吸着していないのに対し、岩盤内の試験区間を循環させた地下水中には、10 kDa~0.2  $\mu\text{m}$  のサイズの地下水コロイドに吸着していたことが示唆される。岩盤内の試験区間を循環させた地下水中で 10 kDa より小さいサイズに含まれる希土類元素濃度の割合が低いのは、地下水中の溶存態の希土類元素または希土類元素を収着した 10 kDa~0.2  $\mu\text{m}$  のサイズの溶存有機物が希土類元素を収着した状態で試験区間内の岩盤に収着されたことによると考えられる。後者の考えは、10 kDa より小さいサイズに含まれる溶存有機物（腐植物質）が幌延の岩石に対して弱い収着挙動を示すという上述の室内試験の結果とも整合する。以上の結果は、仮に元素が地下水水中のコロイドと相互作用したとしても（図 2-33）、実際の地下環境中ではその一部が岩盤に収着する可能性があることを示唆する。核種移行への影響評価においても、地下水コロイドと核種との相互作用に加えて、それらと岩盤との収着作用などについても考慮する必要がある。

## ② 有機物・微生物・コロイドの特性評価

幌延の地下水に含まれる有機物・微生物・コロイドを対象として、それらの特性評価や、評価手法の整備に関する研究に取り組んだ。

### (a) 有機物

地下水中の溶存有機物（以下、DOM）の大部分を占め、核種との相互作用の影響が大きい腐植物質の濃度を簡便に定量する方法として、炭素濃度にもとづく DAX-8 樹脂単離法を幌延の 140m 調査坑道~350m 調査坑道から採取した地下水に適用した<sup>69</sup>。幌延の地下水中の DOM 濃度は 13 mg-C/L~25 mg-C/L、腐植物質濃度は 8 mg-C/L~16 mg-C/L であり、DOM に占める腐植物質の割合は 61%~67%であった。また、新潟市の堆積岩層から採取した地下水に対しても同様の手法を適用し、異なるサイト間であっても、DOM に占める腐植物質の割合が同程度であることを確認した。この結果から、堆積岩中の地下水において DOM 濃度から腐植物質濃度を推定可能であることが示唆された。

有機物に対する希土類元素の収着挙動を規定する要因を明らかにするために、140m 調査坑道~350m 調査坑道から採取した地下水に Eu の 3 価の陽イオン ( $\text{Eu}^{3+}$ ) を添加し、地下水中の溶存有機物との親和性を調べるとともに、 $\text{Eu}^{3+}$ との結合による溶存有機物の蛍光強度の低下を調べ、地下水の水質や微生物群集の分析結果と合わせて多変量解析を実施した<sup>70</sup>。結果を図 2-36 に概略的に示す。図 2-36 の右のグラフは、横軸に励起波長（260 nm~500 nm）、縦軸に蛍光波長（320 nm~600 nm）をとった励起蛍光マトリクスであり、浅部地下水中の有機物は陸性腐植物質に、深部の化石海水中の有機物は海洋性腐植物質にそれぞれ類似したマトリクスを示す。また、 $\text{Eu}^{3+}$ との結合による溶存有機物の蛍光強度の低下から、浅部地下水中の陸性腐植物質は溶存有機物と高い親和性を示す一方で、深部の化石海水中の海洋性腐植物質とは低い親和性を示すことが示唆された。このことから、化石海水と天水との混合の程度や微生物による有機物分解の程度により、溶存有機物への希土類元素の収着挙動が影響を受けると考えられる。

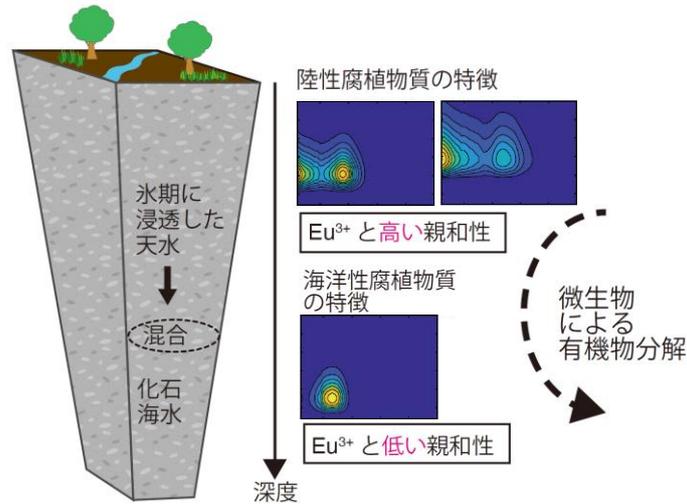


図 2-36 深度による溶存有機物の特徴と希土類元素 (Eu<sup>3+</sup>) との親和性の違い<sup>70)</sup>

(b) 微生物

地下研究施設の一部のボーリング孔では、嫌気的環境にも関わらずメタン酸化機能を持つ微生物の存在が明らかにされており、還元雰囲気において進行する酸化反応機構の解明を目的として、原位置の水質・水圧を模擬した条件でこの嫌気的メタン酸化微生物の培養を行った<sup>71)</sup>。非晶質の 3 価鉄と <sup>13</sup>C で標識したメタンを地下水に添加して 1.6 MPa の圧力で培養した結果、着目した微生物の濃度が高い地下水でのみ嫌気的メタン酸化反応が生じることが確認された。地下水中の懸濁物に含まれる非晶質鉄あるいは 2 八面体型スメクタイトに含まれる 3 価鉄が酸化剤として機能していることが示唆された。

坑道周辺の EDZ 割れ目に分布する微生物の組成やそれらの活動が地下水環境に与える影響を明らかにするために、350m 調査坑道において掘削されたボーリング孔と検層結果を用いて、EDZ 割れ目上の微生物バイオフィルムを調査した<sup>72)</sup>。顕微鏡観察と赤外分光分析により、EDZ の高透水性割れ目表面に微生物が密集してバイオフィルムを形成していることを確認した。16S rRNA 遺伝子配列分析の結果、微生物は好気性メタン酸化細菌が優占しており、活性酸素種から O<sub>2</sub> を、および NO から N<sub>2</sub> と O<sub>2</sub> を発生する可能性のある遺伝子を有することがゲノム解析により明らかとなった。これらの結果から、EDZ 割れ目においてバイオフィルムを形成する微生物の活動により O<sub>2</sub> が生成される可能性が示唆された。

地下に存在する微生物が物質移行に及ぼす影響を明らかにするために、調査坑道から掘削されたボーリング孔を用いて、深度 250 m までの地下水中の微生物群集組成とそれらの代謝機能について詳細な調査を行った<sup>73)</sup>。また、環境中のすべての遺伝子を網羅的に解析するメタゲノム解析手法によって、地下水中の微生物のモニタリングを行った。その結果、幌延の地下環境では、未知微生物も含めて、水素代謝、炭酸固定、メタン代謝、硫黄代謝反応などが主な微生物代謝反応であることが分かった。また、複数の深度において、ゲノムの約 1/3 が微生物の活発な増殖・代謝活動の指標となる変異を示さないことが確認された。後者の結果は、最終氷期に地下水とともに移動・分散した微生物やその代謝活動に用いられる物質の岩盤中での動きが、最終氷期から現在までの長期にわたって制限された可能性を示唆しており、幌延地域での最終氷期前後から現在までの地下水流動状態の変化に関する推定結果<sup>74), 75)</sup>とも整合的である。

## (c) コロイド

深部地下水における溶存成分と元素との相互作用を詳細に理解するために、幌延 URL の 250m および 350m 調査坑道のボーリング孔から採取した地下水に希土類元素 (La、Sm、Ho) および U を添加する試験を実施した<sup>68)</sup>。各元素を 10 µg/L または 100 µg/L の濃度となるように採取した地下水に添加した後、0.2 µm フィルターと 10 kDa フィルターで順次ろ過し、ろ液中のトレーサー濃度を ICP-MS で分析し、ろ紙に捕獲されたトレーサー濃度を TOF-SIMS で分析し、化学形態を XAFS により分析した。その結果、幌延の地下水中では、添加した希土類元素の 60%~80% が 0.2 µm よりも大きいサイズで存在し、それより小さいサイズのコロイドの寄与は小さいこと、このような希土類元素の除去がリン酸イオンとの錯形成によるものであることが分かった。高レベル放射性廃棄物から海成堆積層の地下水に溶出するマイナーアクチノイドの溶解度は、リン酸塩により規定されることが示唆された。

## (iii) まとめ

希土類元素をトレーサーとした室内試験および原位置試験により、地下水中の有機物・微生物・コロイドとの相互作用が希土類元素の挙動に与える影響を見積もることができた。室内試験からは、地下水中有機物・微生物・コロイドが含まれる場合、地下水に存在する希土類元素の濃度が 1 桁程度高くなることが示されるなど、有機物・微生物・コロイドと希土類元素との相互作用に関する定量的なデータを取得・拡充できた。また、原位置試験からは、10 kDa より小さいサイズ（溶存態または溶存有機物への吸着）で存在する希土類元素の一部が試験区間内の岩盤に吸着され、濃度が低下することなど、実際の地下環境での物質移行に関する現象論モデルの構築に資する試験データが取得できた。さらに、(ii)②で述べたように、地下水中の有機物・微生物・コロイドの特性に関する知見やその評価手法について、幌延を事例とした試験・分析により整備することができた。本研究において提示した室内・原位置試験の方法や、それらにより取得される地下水中の有機物・微生物・コロイドと希土類元素との相互作用に関する試験データは、実際の処分環境における有機物・微生物・コロイドの特性評価手法や放射性核種の移行への影響評価手法に反映可能と考えられる。

## (3) ブロックスケールを対象とした物質移行試験

## (i) 目的と実施概要

高レベル放射性廃物の地層処分場の安全評価においては、岩盤中の物質移行特性を把握することが重要である。低透水性の泥岩中の物質移行は、拡散が支配的であることから地層処分の母岩候補として注目されているが、珪質泥岩のような低膨潤性（自己シール性に乏しい）の泥岩中の断層は、放射性核種の選択的な移行経路になる可能性がある<sup>76)</sup>。しかし、断層の局所的な透水性が高くても、断層間の水みちのつながり具合（水理的連結性）が限定的な場合は、地層の透水性は低いことがある<sup>77), 78)</sup>。したがって、断層の水理的連結性が限定されているような場では、断層を介した放射性核種の移行を過大評価しないよう、核種移行解析において水理的連結性に関する情報を考慮する必要がある。

幌延 URL 周辺の稚内層深部（深度 400 m 以深）では、稚内層浅部とは異なり、断層同士の水理的連結性が乏しく、地層の透水性は低いことが報告されている<sup>79), 80), 81), 82)</sup>。図 2-37 にブロックスケールにおける物質移行のイメージを示す。稚内層浅部における物質移行は、断層沿いを流れる地下水の流れ（移流）によって物質が移行することが想定されるが、稚内層深部のような場合は、断層の水理

学的連結性の乏しさから移流が阻害され、物質の移行も限定的である可能性がある。既往研究<sup>83)</sup>では、移行経路の局所的な連結性がダクティリティインデックス（以下、DI）※に依存するとともに、岩盤の有効透水係数と密接に関連することが示されている。したがって、稚内層深部については、移行経路（断層）の連結性が乏しい領域が数 km 以上にわたって分布していると考えられる。一方で、原位置トレーサー試験等に基づき、このような岩盤特性を有する場の物質移行特性の評価や物質移行モデルの検討は十分に行われていない。このような背景から、令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画においては、ブロックスケールにおける移行経路のモデル化手法の整備を目的に、移行経路の連結性が乏しい稚内層深部の断層を対象とした孔間透水試験および原位置トレーサー試験を実施し、数値解析から水理特性および物質移行特性を評価した。

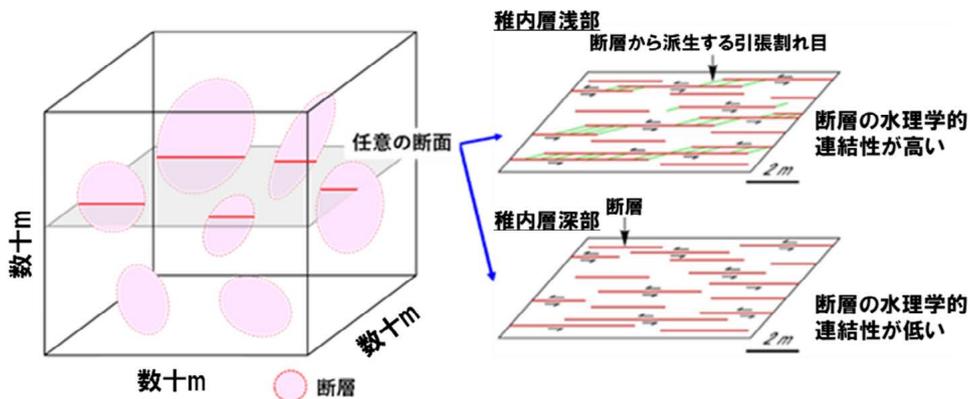


図 2-37 ブロックスケールにおける物質移行のイメージ<sup>84)</sup>

(ii) 実施内容と成果

原位置試験は、図 2-38 に示すように東立坑底盤（深度 380 m）から掘削した 2 本のボーリング（350-FZ-01 孔および 350-FZ-02 孔）で確認された断層（深度約 480 m）を対象に実施した。図 2-38 には、トレーサー試験を実施した断層の孔壁画像を示している。350-FZ-01 孔の断層は傾斜方向が 159°、傾斜角が 71°、350-FZ-02 孔の断層は傾斜方向が 181°、傾斜角が 71°であった。これらの断層の地質学的な連続性については不明であるが、その方向と位置関係を考慮すると、同一の連続断層である可能性は低いと考えられる。

試験区間の水理特性を把握するため、350-FZ-01 孔（深度 467.64 m～481.71 m）を揚水区間、350-FZ-02 孔（深度 477.12 m～480.25 m）を観測区間とした孔間透水試験を実施した。透水試験では、350-FZ-01 孔から一定流量（1 L/min）で揚水した時の揚水区間と観測区間の水圧変化を観測した。図 2-39 に水圧変化の観測結果を示す。揚水区間と観測区間の孔間距離は 4.5 m である。揚水孔の水圧は揚水開始とともに急激に低下し、5 日後には初期圧力に対して約 0.4 MPa 低下した。観測孔の水圧は揚水孔よりも緩やかではあるが、最終的には初期圧力に対して約 0.2 MPa 低下した。孔間透水試験後は、同断層の物質移行特性を調査するため、孔間トレーサー試験を実施した。トレーサー試験では 350-FZ-02 孔から 0.01 L/min でトレーサーを注入し、350-FZ-01 孔から 0.5 L/min で揚水した。トレーサーには濃度 100 mg/L のウラニウムを使用した。図 2-40 にトレーサー試験で観測された揚水孔のウラニウム濃度を示す。ウラニウム濃度は注入開始から約 3 日後に上昇を開始し、約 20 日後には 0.27

※ 岩石の強度・応力状態を示すために新たに定義した指標。この値が高いほど、岩石は見かけ上軟らかくなる。岩盤にかかる平均有効応力をその健岩部の引張強度で除した値で定義される。

mg/L で一定値に達した。本研究では、これらの観測結果を対象とした解析を行い、断層の水理学的連結性を考慮した物質移行モデルを検討した。

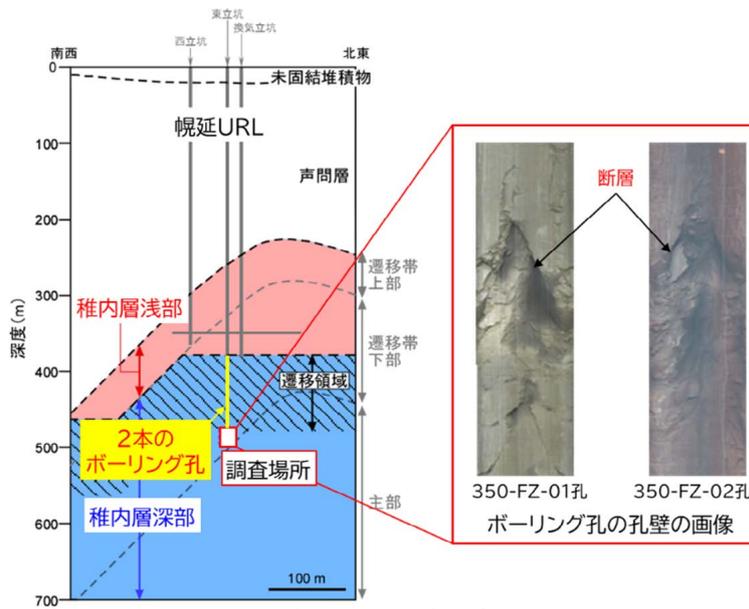


図 2-38 調査場所と調査対象とした断層

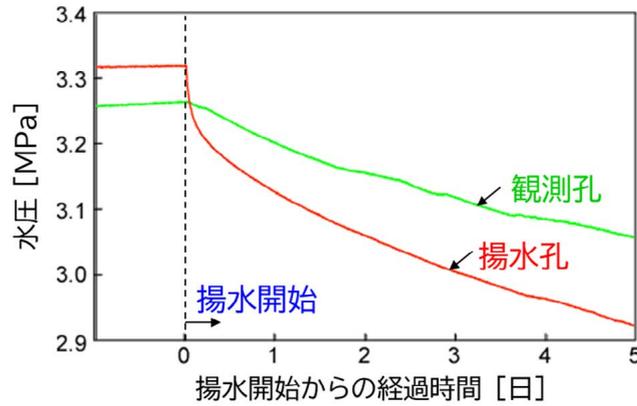


図 2-39 孔間水理試験時の水圧観測結果

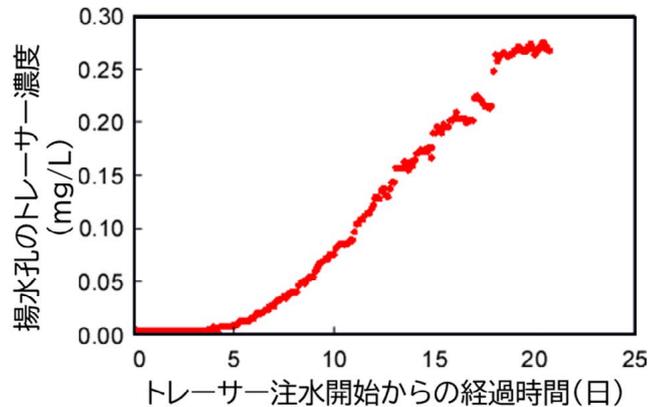


図 2-40 トレーサー試験で観測された揚水孔のトレーサー濃度

孔間透水試験結果を対象とした水理解析では、まず揚水孔の水圧変化を対象とした解析を行い、揚水孔の観測結果を再現する断層の水理的連結性の指標となる水みちのつながり方の次元を求めた。次に、揚水孔と観測孔の経路長を未知数とした解析を行い、観測孔の観測結果を再現する条件を検討した。図 2-41 に孔間水理試験時に観測された揚水孔と観測孔の水圧変化量と水理解析の結果を示す。解析により求められた水みちのつながり方の次元は 1 に近く、断層の水理的連結性は低いことが確認された。この結果は、既往研究<sup>80)</sup>により、本試験を実施した深度の水みちのつながり方の次元が 1 に近いことが推定されていることと整合する(図 2-42)。また、経路長を孔間距離(4.5m)よりも、長くした図 2-41(b)の解析の方が揚水孔および観測孔の観測結果の再現性が良いことが分かった。これらの結果は、断層内の水みちが一次元的かつ非常に長く曲がりくねって連続していると仮定した解析を行うことにより試験結果を再現できることを示している<sup>85)</sup>。

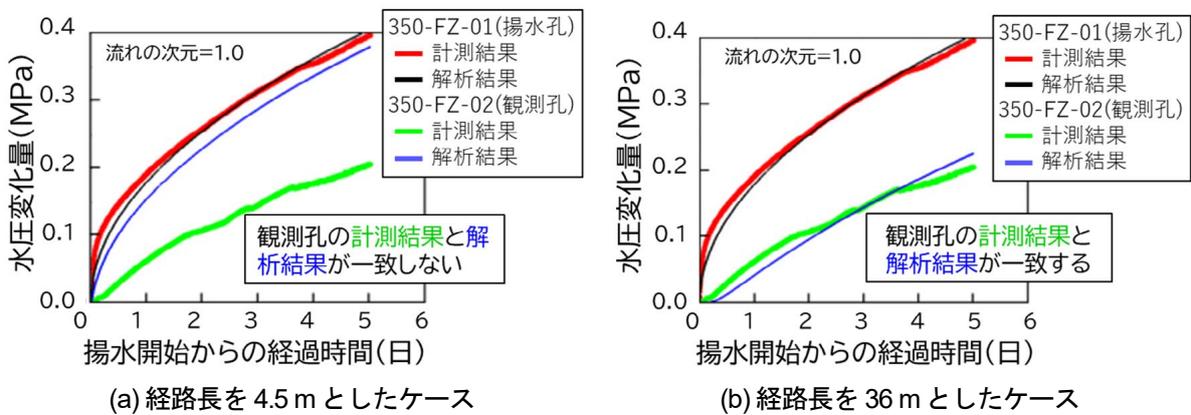


図 2-41 孔間透水試験の解析結果

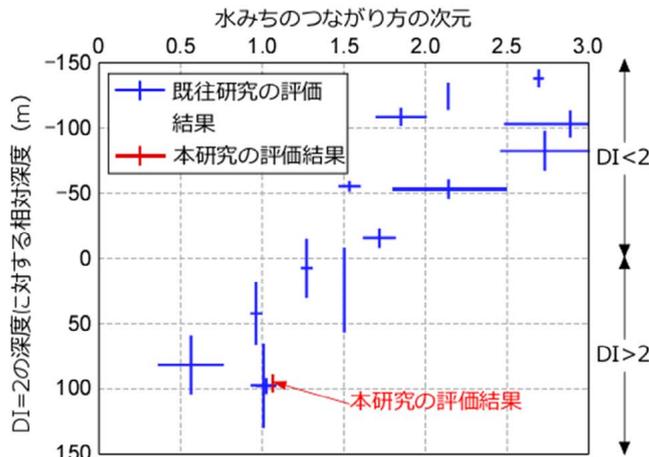


図 2-42 DI=2 の深度に対する相対深度と水みちのつながり方の次元の関係

孔間透水試験の水理解析の結果では、孔間距離(4.5 m)よりも非常に長い一次元の経路を仮定することで試験結果を再現可能であることが明らかになった。したがって物質移行解析においても、図 2-43 に示す一次元の移流分散モデルにおいて、移行距離  $L$  が非常に長いことを仮定してトレーサー試験結果の解析を行った。解析では、トレーサーが移行する経路の半径と縦方向分散長について、試験中の濃度変化を最も良く再現できる条件を観測値と解析値をフィッティングさせることにより検討した。図 2-44 にトレーサー試験の観測データに対し、試験開始から 16 日後まで(青線)、試験開始

から 18 日後まで（緑線）、試験開始から 21 日後まで（黒線）の観測データをフィッティング対象とした場合の解析結果を示す。解析結果の曲線は複数のケース間で差が見られたが、それぞれのケースでフィッティングにより推定された流動経路の半径や分散長はほとんど変化せず、孔間透水試験で推定された流動経路の半径（数百  $\mu\text{m}$ ）の数倍～数十倍（数  $\text{mm}$ ～数十  $\text{mm}$ ）、縦方向分散長は観測スケールの 1/9 から 1/20 であることが推定された。孔間透水試験とトレーサー試験から推定された半径の違いは、物質移行に寄与する亀裂開口幅は水理的亀裂開口幅よりも大きいと指摘されている関係と整合的であり、縦方向分散長も図 2-28 に示した既存研究の値を同程度であった。水理学的連結性が限定的な場に対して、一次元的かつ非常に長く曲がりくねって連続した経路を仮定することにより、物質の移行経路を表現できることが分かった<sup>85)</sup>。

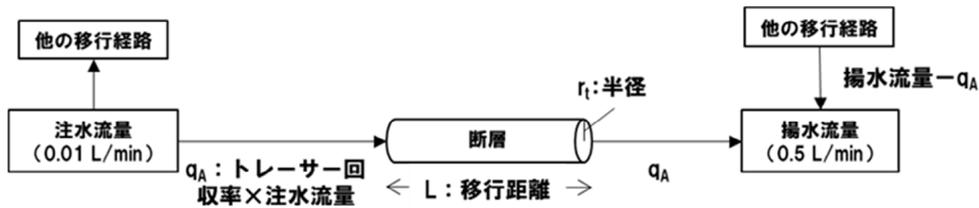


図 2-43 物質移行モデルの概念図

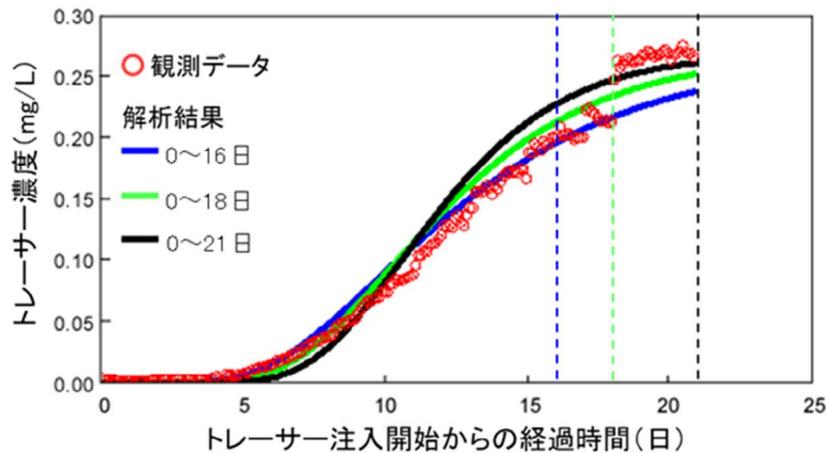


図 2-44 ブロックスケールを対象としたトレーサー試験結果の再現解析

トレーサーが移行する経路の半径などについて、試験中の濃度変化を最も良く再現できる条件を観測値と解析値をフィッティングさせることにより検討した。図中○は観測データを示し、解析結果はそれぞれ、試験開始から 16 日後まで（青線）、試験開始から 18 日後まで（緑線）、試験開始から 21 日後まで（黒線）の観測データを対象とした場合の解析結果を示す。

(iii) まとめ

本研究では、断層間の水理学的連結性が限定的である稚内層深部の断層を対象とした孔間透水試験およびトレーサー試験を実施し、それらの結果を基にした物質移行モデルの検討を行った。その結果、低膨潤性の泥岩中の断層での物質移行経路のモデル化において、断層間の水理学的連結性が限定的である場合には、水理解析結果に基づいた非常に長い一次元流路を仮定することにより、モデル化できることを確認した。それらの検討を通じて、ブロックスケールにおける割れ目中の物質移行特性として、断層間の水理学的連結性に応じた物質の移行経路をモデル化するための手法を整備することができ、所期の目標を達成することができた。また、本成果は、地層処分安全評価において割れ目

を有する泥岩中における放射性核種の核種移行モデルを検討する上で有益な情報となり得る。

本研究項目については、幌延深地層研究計画における 2024 年度～2028 年度の研究課題「坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」を進める中で、異なる地質環境条件における堆積岩中の物質移行特性の体系化を目的に深度 250 m の声問層を対象とした物質移行特性試験に取り組んでいる。これらの原位置試験で得られた試料やデータを、タスク A の参加機関が保有する手法で一斉に分析・解析することにより、効率的な研究の遂行および異なる解析・分析結果の比較による信頼性向上が期待できる。

### 3. 処分概念オプションの実証

#### 3.1. 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験

##### 3.1.1. 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証

##### 3.1.1.1. 搬送定置・回収技術の実証

###### (1) 目的と実施概要

我が国で有望な定置方式とされている処分孔縦置き方式、処分坑道横置き・PEM方式の施工技術について、要素技術の検討や実規模スケールの試験を通して、技術の成立性や検討課題の抽出・整理が進められてきた<sup>86)</sup>。幌延深地層研究計画の第3段階のうち2015年度～2019年度に実施された必須の課題の中では、幌延URLを利用して処分孔横置き・PEM方式の搬送・定置・回収技術に関する実証試験を実施し、一連の操業技術に関する実現性を見通しを得るとともに、地下での実証試験に先立って地上で実施する予備試験の方法論を整理した<sup>9)</sup>。一方、地層処分の可逆性・回収可能性に関する「技術検討の枠組み」として、今後の技術課題ならびに定量化が必要な情報が表3-1のとおり整理されている<sup>87)</sup>。

表 3-1 回収可能性の維持に関する技術検討の枠組み<sup>87)</sup>

定量化すべき情報	内容
1. 安全性への影響	(1) 操業期間中の安全性への影響
	①回収可能性維持期間中の開放坑道の安全性への影響
	②回収作業時の安全性への影響（回収を実施する場合）
	(2) 閉鎖後長期の安全性への影響
	①人工バリアに期待する閉鎖後長期の安全機能への影響 ②天然バリア（母岩）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響
2. 回収の容易性 （回収作業時間）	(1) 単位領域当たりの回収時間（例：廃棄体1本、処分坑道1本、など）
	(2) 全ての廃棄体回収にかかる全体作業時間
3. 維持期間	最終閉鎖せずに回収可能性を維持できる期間
4. 費用	回収可能性に係わる費用

本研究では、表3-1のうち「(1) 操業期間中の安全性への影響」の「①回収可能性維持期間中の開放坑道の安全性への影響」ならびに「(2) 閉鎖後長期の安全機能への影響」の「②天然バリア（母岩）に期待する閉鎖後長期の安全機能への影響」を対象とし、実際の地下環境で生じる現象の理解や実験によるデータの拡充を通じて、回収可能性を維持した場合の処分場の安全性への影響に関する物性値の取得や品質評価手法の提示を行う。本研究の成果は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業である令和2年度～令和4年度「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]回収可能性技術高度化開発」（以下、回収可能性技術高度化開発事業<sup>88)</sup>）ならびに令和5年度「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]地層処分安全評価確証技術開発ニアフィールド長期環境変遷評価技術開発<sup>89)</sup>」の実施内容を含んでいる。なお、表3-1の残りの項目に関連する、緩衝材や埋め戻し材の状態に応じた除去技術オプションの整理や合理的に人工バリアを回収するための手法の提示についても、回収可能性技術高度化開発事業を通じて、過去に実施した技術開発の整備や高度化、回収・除去の作業時間に関する試算方法の整備とその短縮に資する技術的方策の提示などが行われている<sup>88)</sup>。

(2) 実施内容と成果

(i) 実際の地下環境における支保部材の状態把握

回収可能性を考慮することにより処分場の坑道が長期的に開放されることによる支保部材等の変質ならびにそれが操業期間中の安全性に与える影響を評価する必要がある。このような評価に資するために、2020年度より、幌延 URL の坑道に施工されている吹付けコンクリートと同様の低アルカリ性セメント（Highly Fly-ash contained Silica fume Cement、以下、HFSC）を材料としたコンクリートの試験体を作製し、坑道内における大気条件下および浸潤条件下に定置した。2020年度に実施した試験体の作製状況に関する写真を図 3-1 に、坑道内における試験体の定置状況の写真を図 3-2 にそれぞれ示す。図 3-2(c)で試験体を浸潤させている地下水は、設置場所である試験坑道 3 の底盤に掘削したボーリング孔より揚水したものである。また、2023年度には、施工後約 10 年が経過した HFSC 吹付けコンクリートを坑道壁面から採取した（図 3-3）。地下水との接触状態において両極端な条件にある定置試験体の定期的な分析と、実際の坑道壁面から採取した試料の分析を通じて、地下環境で生じるコンクリート特性の経時的な変化に関する評価を試みた。



(a) 吹付けコンクリート施工状況

(b) コアサンプリング

図 3-1 吹付けコンクリート試験体作製状況



(a) 定置装置全体

(b) 大気条件下での定置試料

(c) 浸潤条件下での定置試料

図 3-2 坑道内における試験体の定置状況

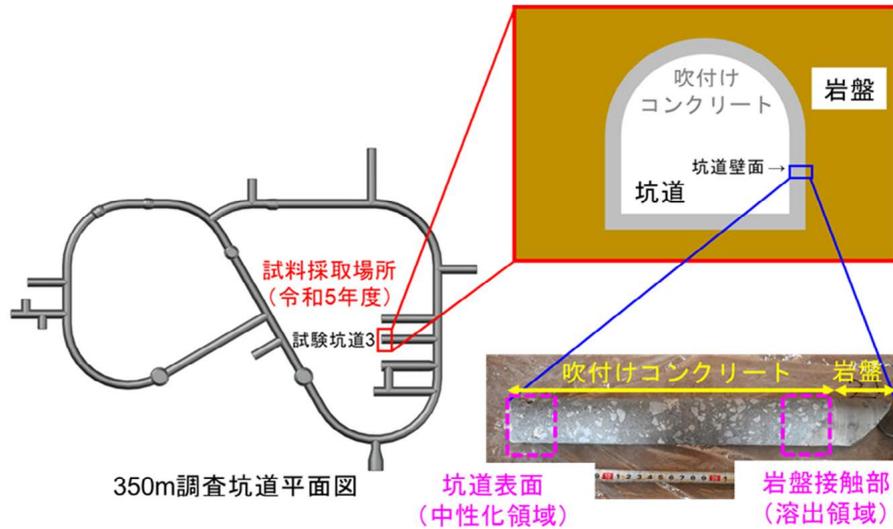


図 3-3 坑道壁面からの HFSC 吹付けコンクリート採取の概念図

以上の試料に対して、フェノールフタレインの噴霧による変質深さの測定、電子プローブマイクロアナライザー (Electron Probe Micro Analyzer、以下、EPMA) による元素分布の観察、水銀圧入法による空隙率および空隙径分布の測定、アウトプット法ならびに地盤工学会の基準に基づく変水位法<sup>90)</sup>による透水係数の測定ならびに一軸圧縮強度の測定を、2020 年度から 2023 年度まで継続的に行った<sup>88), 89)</sup>。2024 年度には、これらの結果ならびに過去に実施された HFSC および普通ポルトランドセメント (Ordinary Portland Cement、以下、OPC) を用いた吹付けコンクリートの分析結果<sup>90)</sup>を踏まえて、坑道表面での大気との接触および岩盤境界面での地下水との接触により生じている吹付けコンクリートの経時的な変質を評価した<sup>92)</sup>。

定置試験体と坑道壁面から採取した試料のいずれにおいても、大気との接触部においては、フェノールフタレインを噴霧した際に呈色が認められなかった (図 3-4)。このことは、大気中の二酸化炭素が拡散によりコンクリート内に侵入する中性化によるものと考えられ、中性化の深さは、その進行に関する一般的な関係式 (式 3-1) と概ね整合する形で、時間経過とともに増加した (図 3-5)。

$$x = At^{0.5} \quad \text{式 3-1}$$

ここで、 $x$ : 中性化深さ (mm)、 $A$ : 定数 (mm/年<sup>0.5</sup>)、 $t$ : 経過時間 (年) である。

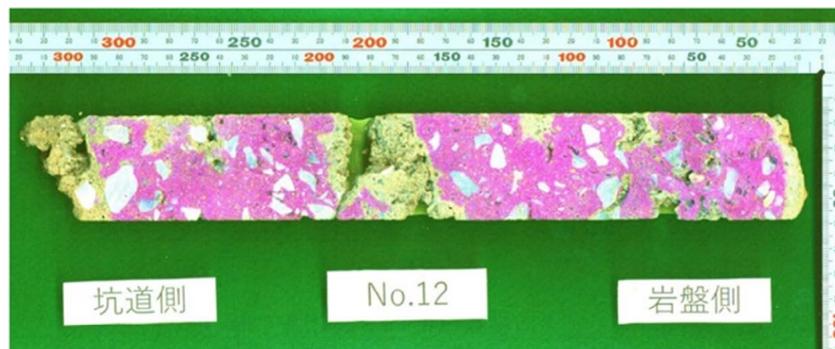


図 3-4 坑道壁面から採取した HFSC 吹付けコンクリート試料の変質領域

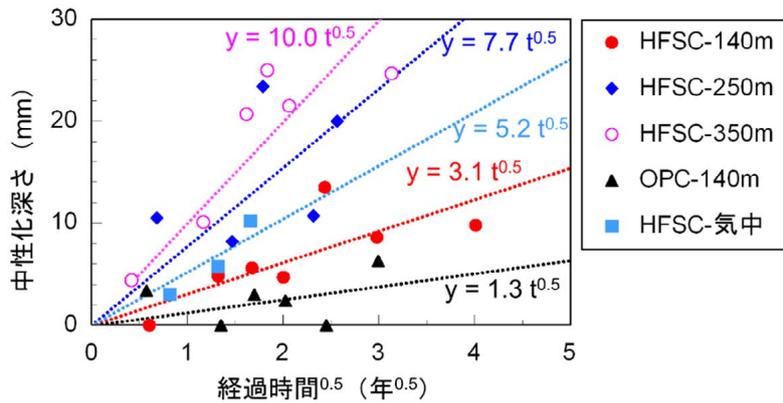
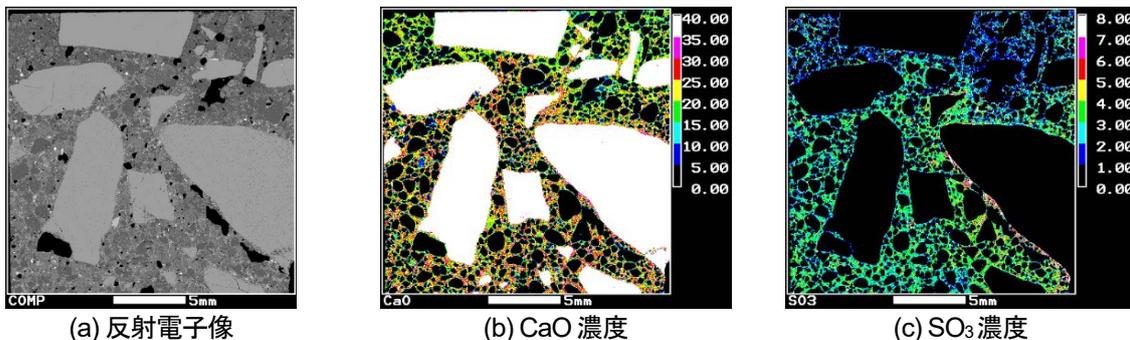


図 3-5 HFSC 吹付けコンクリート試料の中性化深さと経過時間の関係<sup>92)</sup>  
式 3-1 と同様、 $x$ : 中性化深さ、 $t$ : 経過時間 (年) である。

図 3-5 に基づくと、坑道表面の吹付けコンクリートの中性化は、OPC よりも HFSC の方が速く進行していた。この違いは、セメント水和物（ケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H)、エトリンガイトなど）の組成が OPC と HFSC とで異なることによるものと考えられる。すなわち、OPC が中性化した場合には主に水酸化カルシウムが分解され、より径の大きな炭酸カルシウムに変化するために、空隙率が減少<sup>93)</sup>して空隙構造が密になる。これに対し、HFSC は水酸化カルシウムがほぼ含まれていないために中性化により C-S-H が分解され、空隙構造が粗くなり<sup>93)</sup>、二酸化炭素がコンクリート内に侵入しやすくなると考えられる。また、HFSC 間で比較すると、140m 調査坑道に施工した HFSC よりも 250m および 350m 調査坑道に施工した HFSC の方が、中性化が速く進行していることが分かる（図 3-5）。水/セメント比 (W/C) の大きいセメントの方が一般的に中性化が進行しやすいことが知られており<sup>94,95)</sup>、250m および 350m 調査坑道の HFSC の W/C (0.35) が 140m 調査坑道 (0.30) よりも大きいことに関係していると考えられる。

HFSC の中性化領域とより深部の中性化していない領域とを比べると、定置試験体の中性化領域ではカルシウムや硫黄の濃度が低下しており（図 3-6）、坑道壁面から採取した試料ではアルミニウムや硫黄の濃度が低下していた（図 3-7）。また、定置試験体の中性化領域では直径 0.1  $\mu\text{m}$  以下、坑道壁面から採取した試料では直径 0.2  $\mu\text{m}$  以下の空隙の割合が、中性化していない領域よりも増加していた（図 3-8）。以上の結果は、大気中の二酸化炭素との反応により、カルシウム、アルミニウム、硫黄を含むセメント水和物 (C-S-H、エトリンガイトなど) が分解し、空隙径が大きくなったことによると解釈される。



(a) 反射電子像 (b) CaO 濃度 (c) SO<sub>2</sub> 濃度  
図 3-6 大気条件下で定置した HFSC 吹付けコンクリート試料の元素濃度分布（定置から約 1 年 9 か月経過、試料表面が上側）<sup>96)</sup>

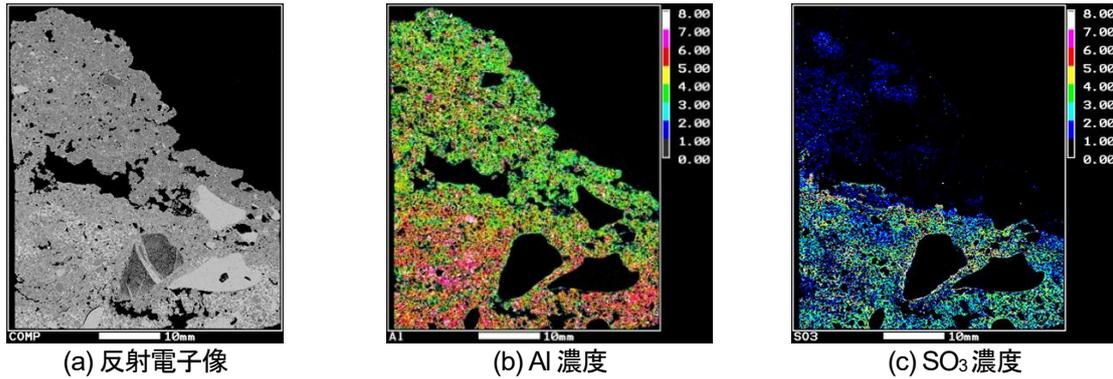


図 3-7 坑道壁面から採取した HFSC 吹付けコンクリート試料の坑道側の元素濃度分布（施工から約 10 年経過、坑道表面が上側）<sup>97)</sup>

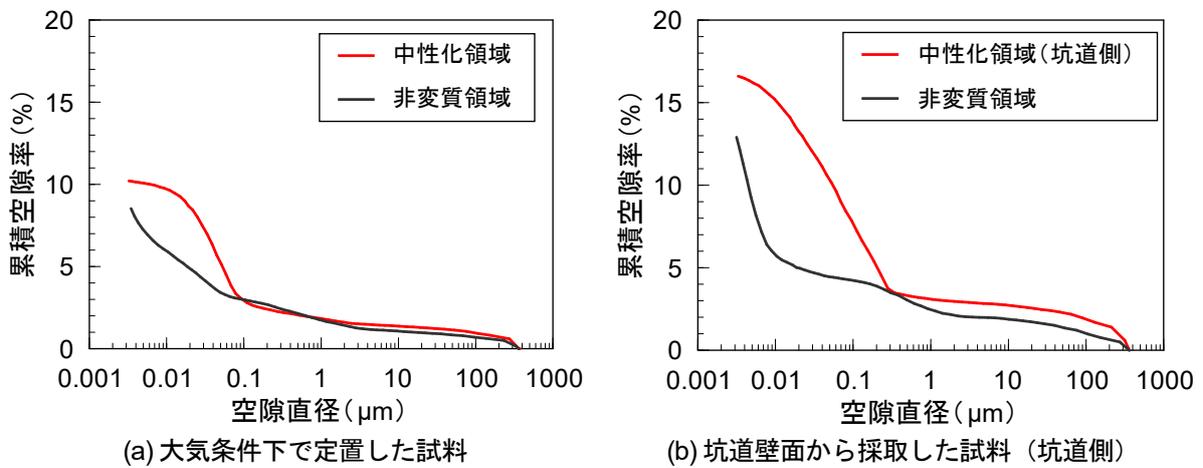


図 3-8 中性化領域における HFSC 吹付けコンクリートの累積空隙径分布<sup>96), 97)</sup>

坑道壁面から採取した試料では、岩盤との境界部から約 6 mm の領域においてもフェノールフタレインの呈色が認められなかった（図 3-4）。同領域では非変質領域と比べて直径  $0.07 \mu\text{m}$  以下の空隙の割合が増加しており（図 3-9）、カルシウム・硫黄濃度の減少ならびにナトリウム・マグネシウム濃度の増加が認められた（図 3-10）。岩盤から供給された地下水により C-S-H やエトリンガイトなどのセメント水和物が溶解して空隙径が増加するとともに、地下水中に高濃度で含まれるナトリウムやマグネシウムの濃度が増加していると解釈される。地下水中で定置していた試験体でも同様の元素濃度の変化が認められたものの、その範囲は 1 mm 未満と小さく、試料表面にカルシウム濃度の高い部分が層状に形成されていた（図 3-11）。定置試験体では、地下水との接触により溶脱したカルシウムイオンと地下水中の炭酸イオンから炭酸カルシウムが形成されていると考えられる。

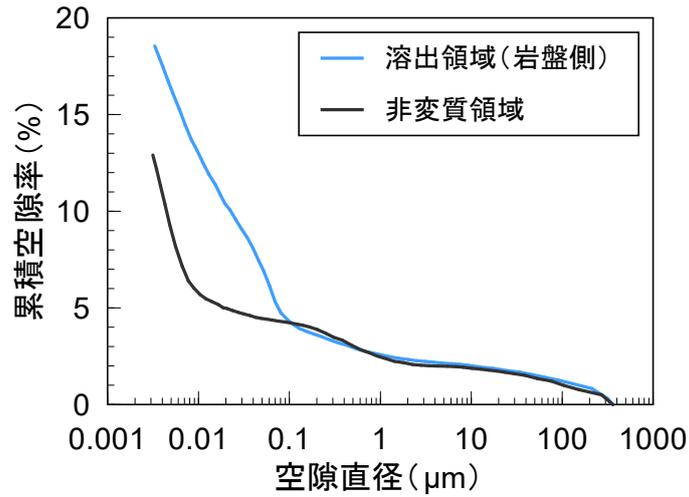


図 3-9 坑道壁面から採取した HFSC 吹付けコンクリートの溶出領域（岩盤との接触部）と非変質領域における累積空隙径分布<sup>97)</sup>

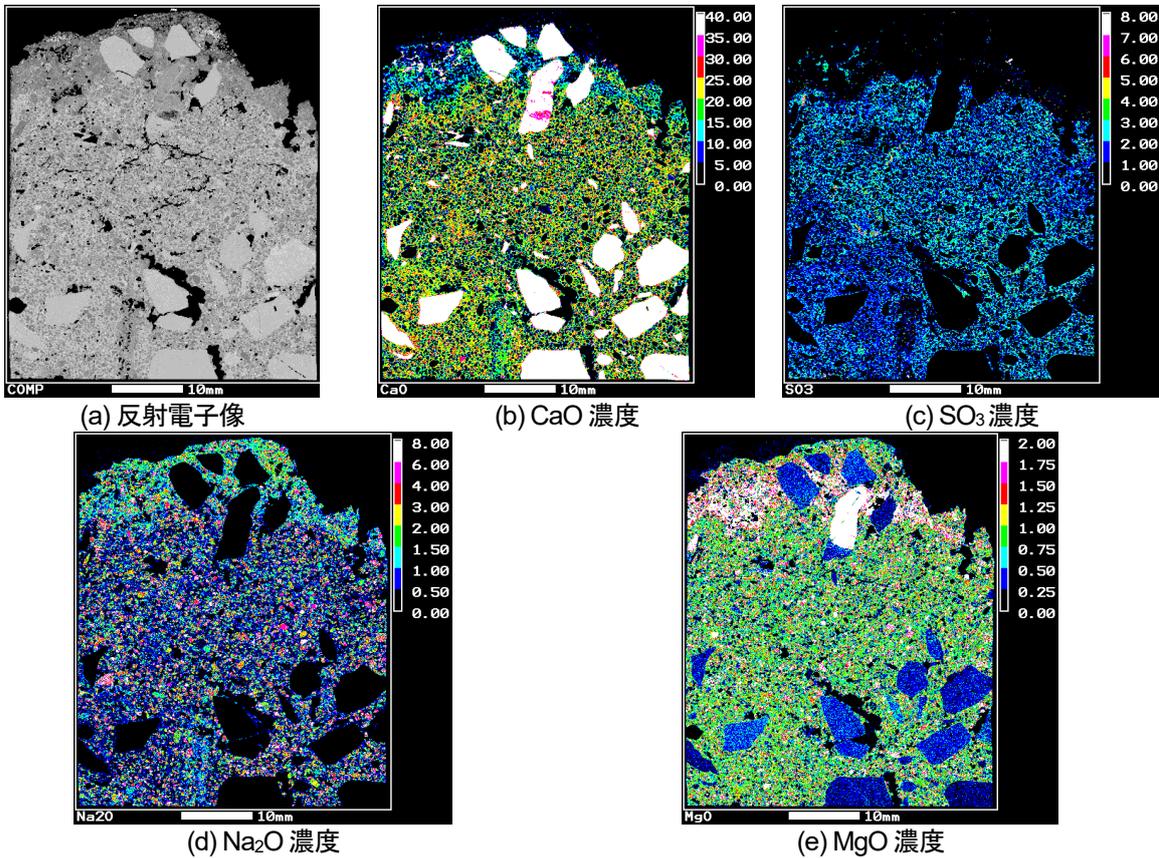


図 3-10 坑道壁面から採取した HFSC 吹付けコンクリート試料の岩盤側の元素濃度分布（施工から 10 年経過、岩盤との接触部が上側）<sup>97)</sup>

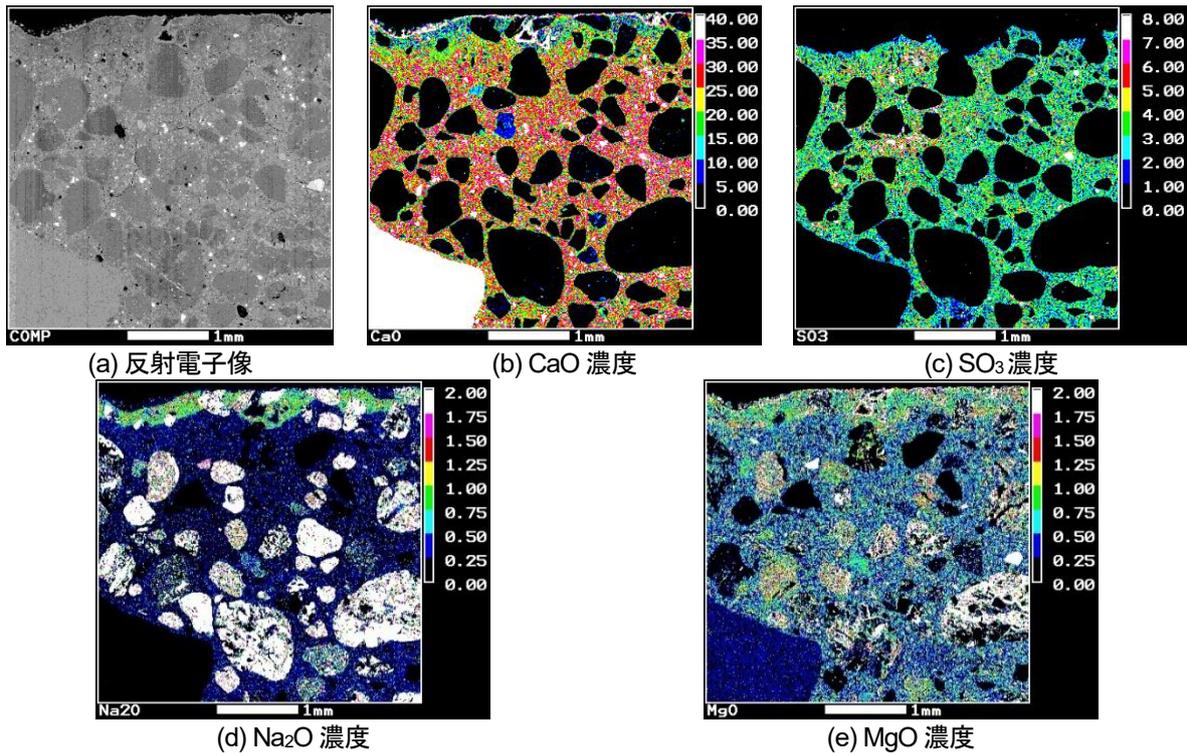


図 3-11 地下水への浸潤条件下で定置した HFSC 吹付けコンクリート試料の元素濃度分布（定置から約 1 年 9 か月経過、試料表面が上側）<sup>96)</sup>

中性化や地下水との接触による空隙構造の変化が透水性に与える影響を確認するため、これら変質部を含む試料に対する透水試験を行った。試験体の透水性が非常に低いことが予備試験から推定されたため、一般的にコンクリート材料の透水性の測定に用いられるアウトプット法（試験体に水を圧入し、通過した水の量から透水係数を求める方法）に加えて、低透水性の材料を対象として地盤工学会により基準化された「低透水性材料の透水試験方法」<sup>90)</sup>（以下、JGS 法）を適用し、両者の結果の比較を試みた<sup>98)</sup>。その結果、大気条件下に定置した試験体ではいずれの方法でも  $10^{-12}$  m/s オーダーの透水係数が得られた。一方、浸潤条件下に定置した試験体では水の通過が確認されずアウトプット法の適用が不可能であった。JGS 法では、計算上は  $10^{-14}$  m/s オーダーの透水係数が得られたが、本試験法が適用可能である透水係数の範囲（約  $10^{-9}$  m/s～ $10^{-13}$  m/s）を下回っているため、現実的な試験時間内に信頼性の高い透水係数の値を得ることは困難であると考えられた。このように低い透水性は、同試験体の表面に形成されている炭酸カルシウムに起因する可能性がある。また、坑道壁面から採取した試料に対しても上記の 2 種類の方法で透水係数を測定したところ、中性化領域を含む坑道側ではいずれの方法でも  $10^{-13}$  m/s～ $10^{-11}$  m/s オーダー、溶出領域を含む岩盤側では変水位法で  $10^{-13}$  m/s～ $10^{-12}$  m/s オーダーの透水係数が得られた。いずれの値も中性化の進行していない定置試験体の透水係数の範囲（ $10^{-13}$  m/s～ $10^{-11}$  m/s<sup>92)</sup>）と同程度であり、これら変質によるコンクリートの透水性の増加は生じていないことが示唆された。

空隙構造の変化が強度に与える影響についても、変質部を含む試料に対する一軸圧縮試験により確認した（図 3-12）。坑道壁面から採取した試料では、ばらつきが大きいものの、施工後約 10 年が経過しても一軸圧縮強度に顕著な変化は認められなかった。一方、坑道に定置した試験体では、実際に施工した試料よりも一軸圧縮強度が大きかった。吹付け施工からコア試料を採取するまでの時間や

養生環境の違いに由来するものと考えられる。また、定置後約2年後から、浸潤条件下に定置した試験体で値が有意に高かった。セメントの水和反応の進行や炭酸カルシウムの沈殿による構造の緻密化の影響が考えられる。

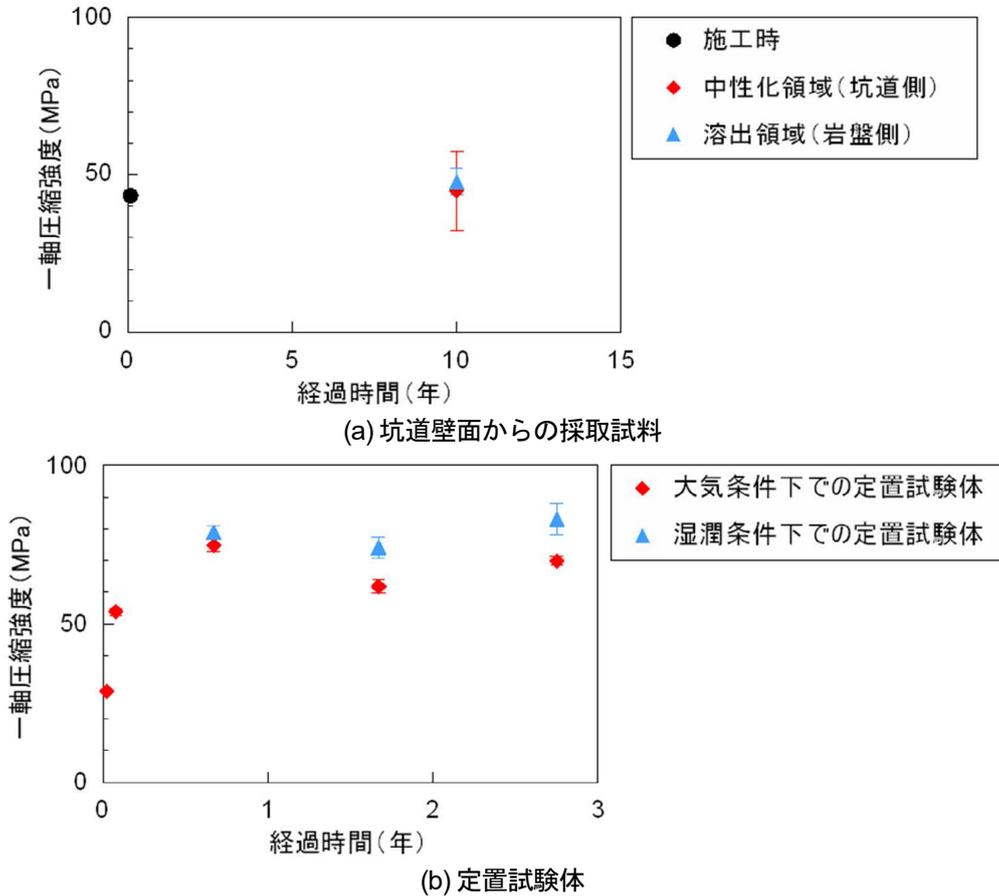


図 3-12 HFSC 吹付けコンクリート試料の一軸圧縮強度

(ii) 実際の地下深部の坑道で生じる事象の整理に関する試験・分析、数値解析

回収可能性を考慮した場合、地下坑道は長期にわたって施工後の状態（以下、開放状態と定義する）で存置される可能性が考えられる。地下坑道の周辺では、坑道掘削から埋め戻しにかけて、坑道周辺岩盤における地下水流動や岩盤の飽和度が大きく変化する。また、坑道掘削後には坑道周辺の応力再配分により坑道周辺に EDZ が形成されるが、回収可能性の条件として坑道の安全性を考慮した場合、坑道の力学的安定性の観点からその長期的な変化に関する検討が重要となる。

これらの観点から、本研究では数値解析により坑道の開放期間が坑道周辺岩盤の水理的特性や力学的特性にどのように影響するか検討した。また、坑道埋め戻し後の数値解析も実施し、坑道の開放期間が坑道埋め戻し後の坑道周辺の再飽和過程に及ぼす影響も検討した。解析では、幌延深地層研究センターの 350m 試験坑道 3（図 3-3）を対象事例として解析を実施した。

幌延深地層研究センター周辺の地下水には多量の二酸化炭素やメタンガスが含まれており、坑道掘削による水圧の減少に伴う脱ガス現象が発生する<sup>99)</sup>。長期浸透流解析では、地下水の坑道への蒸発に加え、この脱ガス現象および坑道内の酸素や窒素の岩盤内への侵入を考慮した解析を実施し、坑道周辺の地下水流動ならびに飽和度の変化をシミュレーションした。また、長期的な力学特性に関して、

これまでに幌延深地層研究センターの岩石を用いた室内クリープ試験が実施されており、クリープ挙動に関するパラメータが取得されている<sup>100)</sup>。これらの試験結果から、力学的安定性に影響を与える要因のひとつとして、岩盤のクリープ変形が挙げられる。そこで長期の力学解析ではクリープ変形を考慮した解析を実施した。岩盤の力学状態の変化は岩盤の透水性に影響することから、室内試験による結果を参考に、応力状態の変化による透水性の変化を考慮する弱連成解析を実施した。これら解析を通して、回収可能性を考慮した場合に、その維持期間が坑道周辺の地質環境や坑道の安全性に与える影響に関する数値解析の例を示した。

解析結果の例示に先立ち、本研究で実施した計算の手順を示す。幌延深地層研究センターでは、坑道掘削による坑道周辺の地質環境の変化に関する解析について、例えば水理・力学連成によるEDZの発生予測等の解析が行われてきた<sup>47)</sup>。一方で、本研究では坑道掘削後における坑道周辺の地質環境の変化に着目した解析であることから、既存の研究結果を基に坑道掘削後のEDZの範囲をモデル化して解析を実施した。図3-13に力学解析と浸透流解析に用いた坑道周辺のモデルとメッシュを示す。EDZの発生範囲は、床面や壁面等場所によって異なることが示されているが<sup>47)</sup>、本研究では簡単のため、場所に関らず一様の厚さに設定した。また、水理試験結果や弾性波トモグラフィ調査から、深度に応じてEDZの透水性<sup>47)</sup>や弾性波速度<sup>101)</sup>が変化することが確認されていることから、坑壁に近く損傷が著しい領域としてEDZ1を、母岩とEDZ1の間の領域をEDZ2としてモデル化した。なお、実際の解析では、力学解析では鉛直方向と水平方向に約40mの領域で解析している。また、浸透流解析では、境界条件の影響を評価する解析を実施し、鉛直方向には地表面までを含む約1500m、水平方向に1000mの領域で解析を実施している<sup>88)</sup>。

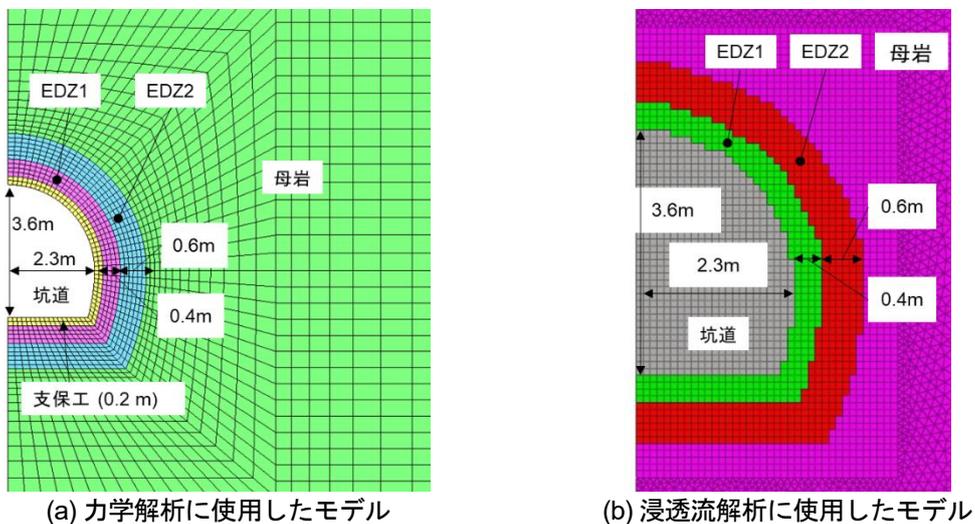


図 3-13 解析に使用した坑道周辺のモデルとメッシュ

長期力学解析による坑道開放期間の解析では、コンプライアンスを変化させることでクリープ変形を再現する大久保モデルを用いた解析を実施した<sup>102)</sup>。大久保モデルにおけるクリープ速度に関するパラメータは、井上ほか(2004)<sup>100)</sup>を参考に、室内試験で得られた最もクリープ速度が速い場合の値と、平均的な値を使用し解析した。その他の力学パラメータに関しては、P波速度の比<sup>101)</sup>と健岩部の値<sup>103)</sup>を参考に算出した値をEDZ1およびEDZ2に割り当てた。また、鋼製支保については線形弾性体でモデル化し簡単のため劣化等は考慮せずに解析を実施している。応力状態の境界条件は、

Aoyagi and Ishii(2019)<sup>47)</sup>を参考に設定した。解析は、クリープ変形を組み込んだ有限要素法により行った<sup>104)</sup>。なお、坑道埋め戻し後の力学解析では、埋め戻し材の膨潤圧が低い場合を想定して、坑道開放期間と同様に坑道壁面を自由境界として設定し、クリープ変形が継続する条件で計算した<sup>88)</sup>。

坑道開放期間における浸透流解析では、地下水に含まれるメタンおよび二酸化炭素の脱ガスと、坑道への蒸発および坑道内の空気に含まれる酸素と窒素の岩盤への侵入を考慮した解析を実施した。モデルの透水係数として、EDZ1では母岩部より5オーダー高い透水性を、EDZ2では2オーダー高い透水性を設定した。また、貯留係数に関しては力学パラメータより算出した値を用いて解析した。なお、透水性および貯留係数は岩盤の力学状態に影響されることから、長期力学解析から計算される応力値やコンプライアンスを用いて計算し、その値を浸透流解析に利用する弱連成解析を実施した。応力変化による透水性の変化は、幌延深地層研究センターの深度350mの場合、Barton-Bandisモデル<sup>105)</sup>により再現できることが確認されているものの<sup>106)</sup>、本研究では室内試験を実施し、その室内試験で得られる応力と透水性の関係を関数で近似したものを利用した。なお、浸透流解析では計算の収束性の問題から支保はモデル化せずに解析を行った。また、力学解析と浸透流解析で使用するメッシュが異なることや(図3-13)計算の収束性の問題から、長期力学解析で計算されるコンプライアンスの値に基づいて坑道周辺の領域を複数の領域に分割し、その領域ごとに透水性や貯留係数を更新する解析を実施した。また、簡単のため、透水性や貯留性の時間変化に関しても、その変化率に応じてステップ状に時間変化させて解析した。なお、坑道埋め戻し後の解析に関しては、坑道開放状態において計算された値を初期値として使用し、実際に想定される埋め戻し材の透水性および含水比や酸素および窒素のモル分率を坑道部に与えて再現した。解析にはTOUGH3のTMVOCモジュールを使用した。

図3-14に長期力学解析による、クリープ速度が速い場合のパラメータを使用した場合の坑道周辺の50年、100年、200年、300年後のヤング率の変化率を示す。今回使用したモデルの場合、特に坑道床面付近で顕著なヤング率の変化が計算された。また、クリープ変形によりヤング率が低下した場所はEDZの領域内に限定されており、母岩部において変化は確認されなかった。ヤング率の時間変化に関して、坑道開放後10年以降は大きな変化は認められなかった。

図3-15に坑道開放後の坑道周辺の50年、100年、200年、300年後の水圧変化を示す。今回使用したモデルでは、坑道周辺の水圧はこの開放期間中において低下し続ける傾向となった。また、図3-16は坑道開放後の坑道周辺の50年、100年、200年、300年後の飽和度変化を示す。この期間において水圧は減少し続けているものの、坑道開放から50年以降は坑道周辺の飽和度分布に顕著な変化は認められなかった。

図3-17に坑道開放期間を50年とし、その後坑道を埋め戻した直後と、埋め戻し後50年、100年、300年後の水圧分布の計算結果を示す。また、図3-18に坑道開放期間を300年とし、その後坑道を埋め戻した直後と、埋め戻し後50年、100年、300年後の水圧分布の計算結果を示す。どちらの場合も、坑道への排水による坑道周辺の水圧が低下した領域が埋め戻し後に徐々に回復しており、埋め戻し後300年後には概ね静水圧分布に近い状態まで回復する結果となった。ただし、図3-15に示すように、坑道の開放期間が長いほど坑道周辺の水圧は低下することから、埋め戻し後に同じ時間が経過した時点では、坑道開放期間が長かった場合の方が、全体的な水圧は低くなっている。

図3-19および図3-20に、坑道開放期間が50年および300年の場合の、坑道を埋め戻した直後と、埋め戻し後50年、100年、300年後の坑道周辺の飽和度分布の計算結果を示す。どちらの場合も、埋め戻しから50年後には、健岩部においては完全に再飽和する結果となった。一方で、300年経過

した後も坑道内部や EDZ では一部が飽和しない結果となった。本研究では、坑道開放期間と埋め戻し後の合計 1000 年間の解析を実施したが、開放期間が 50 年の場合かつ坑道埋め戻し後 950 年の場合のみ、完全に再飽和する結果が得られた。

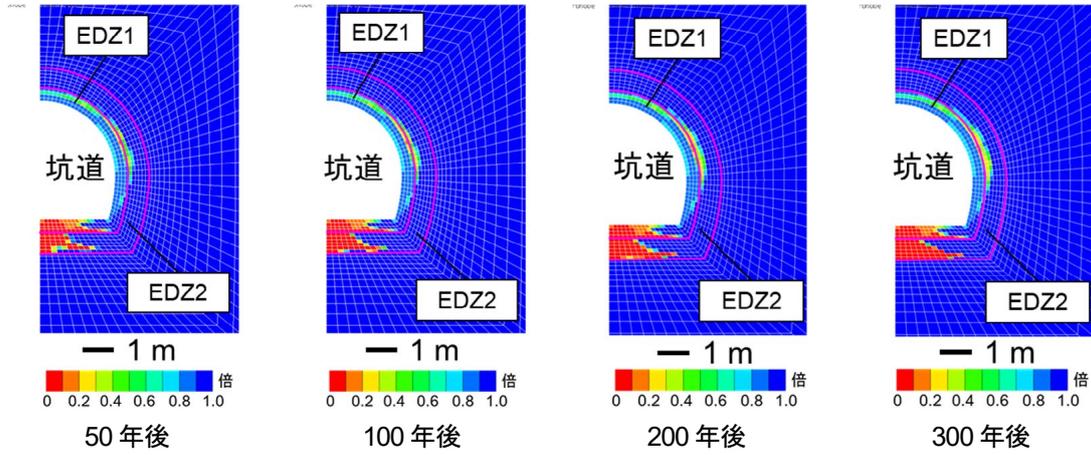


図 3-14 クリープ変形による坑道周辺のヤング率の変化率

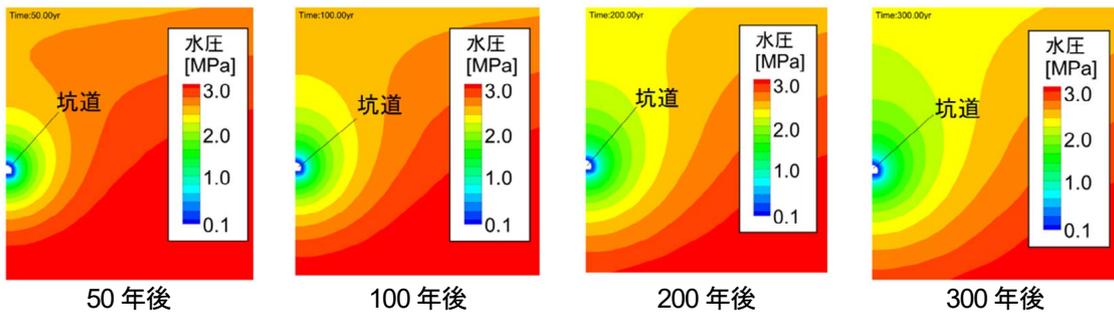


図 3-15 坑道開放後の坑道周辺の水圧の変化

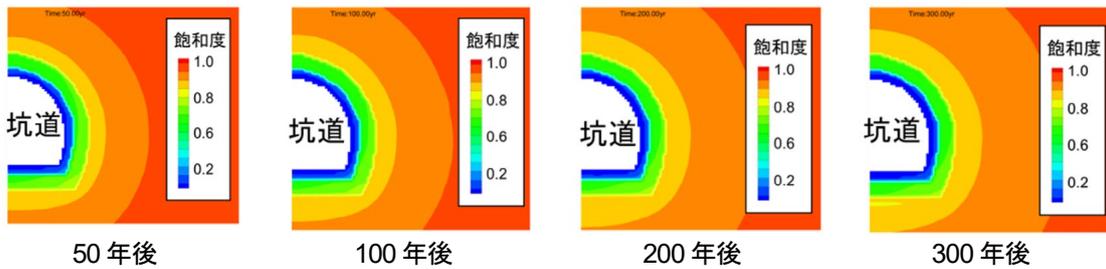


図 3-16 坑道開放後の坑道周辺の飽和度の変化

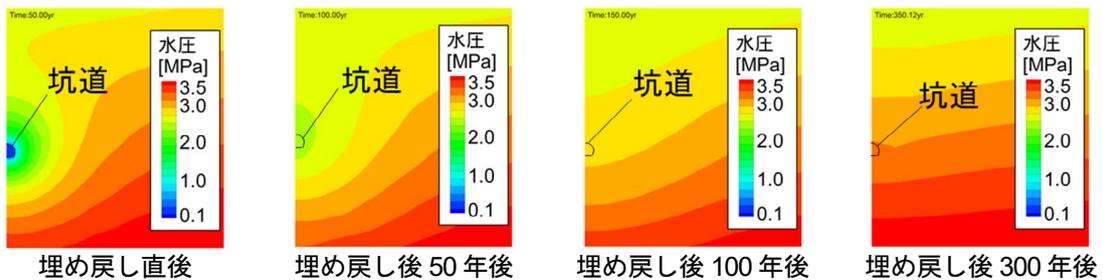
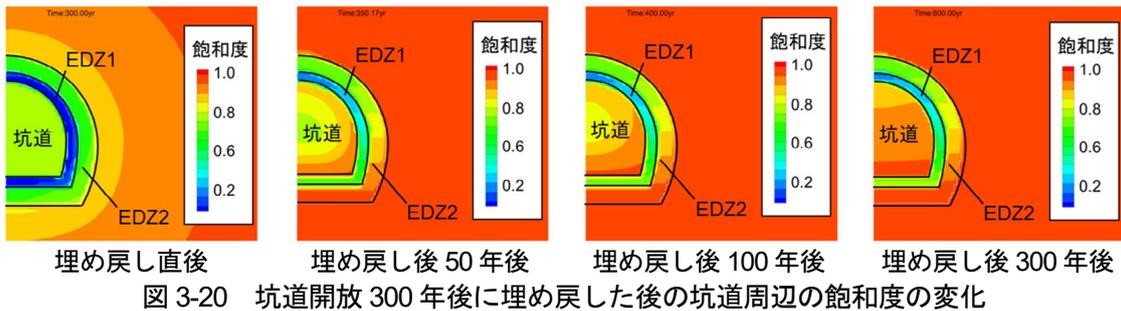
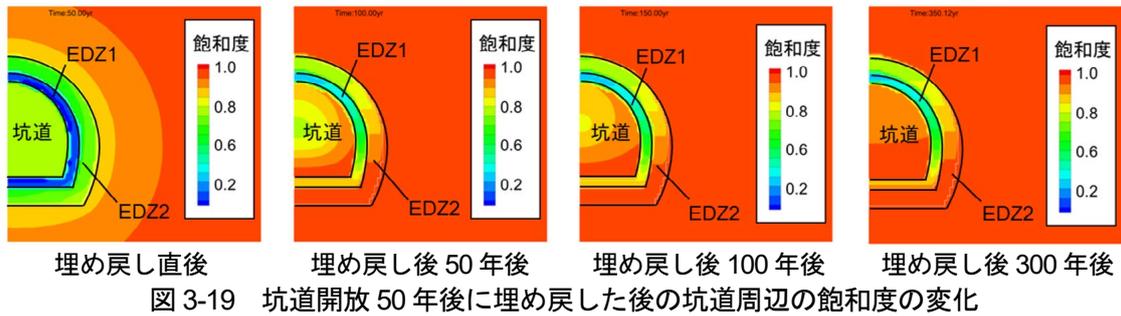
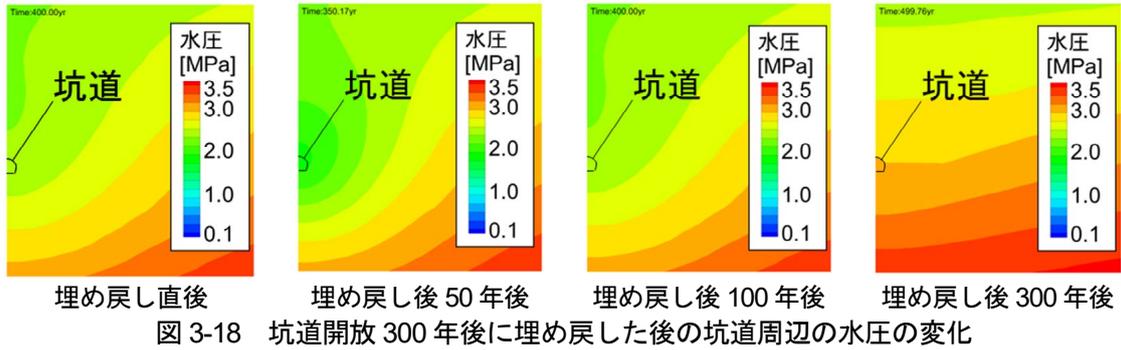


図 3-17 坑道開放 50 年後に埋め戻した後の坑道周辺の水圧の変化



(3) まとめ

坑道内での HFSC コンクリート試験体の定置養生と坑道壁面から採取した吹付けコンクリートの分析の両面から、坑道壁面の大気接触条件と、岩盤との接触界面の湿潤条件での挙動を整合的に把握できた。HFSC 吹付けコンクリートは、OPC 吹付けコンクリートに比べて中性化がより速く進行し（図 3-5）、中性化および地下水による溶出が生じた領域ではセメント水和物の分解により空隙構造が粗くなる（図 3-8 および図 3-9）。しかしながら、約 10 年間の坑道開放期間では、中性化に起因するコンクリートの透水性の増加や強度の低下は生じていないことが示唆された。さらに、中性化の進行速度は HFSC においても OPC と同様に中性化深さと経過時間との一般的な関係（式 3-1、図 3-5）から予測可能であり、このような関係式から長期的な変質の影響範囲を見積もることが可能であると考えられる。以上を通じて、回収可能性を考慮することにより処分坑道内の空間が長期間にわたって開放された場合に生じ得る、吹付けコンクリート支保の化学状態や空隙構造の変化、およびそれらに伴う長期的な物性変化の評価に必要な知見と調査手法を整備できた。

また、坑道周辺における地質環境変化に関する解析では、長期力学挙動としてクリープ変化を、また長期の浸透流解析では蒸発や脱ガス等の影響を考慮した二相流解析を実施した。力学状態の透水性や貯留係数への影響を考慮するために、力学解析結果からこれらパラメータを計算し浸透流解析に

利用する弱連成解析を実施した。数値解析では、坑道開放期間が坑道周辺の力学状態や水理状態に及ぼす影響や、その後の埋め戻し後の回復過程に及ぼす影響に関する解析を実施した。これら一連の数値解析を通して、回収可能性の検討を目的とした坑道周辺の地質環境変化に関する数値解析事例を提示した。

本研究により取得された物性値データや、本研究を通じて提示した解析手法とその結果は、実際の処分事業において回収可能性を考慮した場合の、開放坑道の長期安全性や閉鎖後長期の安全性に関する評価手法に反映可能と考えられる。

### 3.1.1.2. 閉鎖技術の実証

#### (1) 目的と実施概要

将来の処分場閉鎖後に、坑道や EDZ が地上まで直結する移行経路となることを防ぐための技術（閉鎖技術）に関する概念検討が進められてきている。本研究では、閉鎖技術について、地下施設および周辺岩盤の長期的な変遷を考慮しつつ、埋め戻し材やプラグなどに期待される性能の具体化や設計評価技術の改良・高度化を目的とした室内試験や原位置試験、数値解析などを実施してきた。埋め戻し材については、埋め戻し材に求められる「緩衝材および止水プラグの膨出抑制」の評価に関連して、緩衝材と埋め戻し材の力学的相互作用を把握するための室内試験を実施した。止水プラグについては、その材料として使用することが検討されているベントナイト系材料の持つ地下水移行抑制機能を評価するための要素試験として原位置試験を実施してきた。また、止水プラグが要求される性能を発揮できる品質で施工できるかを確認するために、吹付け工法を対象とした原位置施工試験を実施した。さらに、止水プラグを設計する際には、止水プラグを設置する坑道周辺の EDZ の広がりやを把握することが必要となることから、EDZ の特性および空間的な分布を定量的に把握する調査技術の高度化を実施した。加えて、埋め戻し材やプラグといった閉鎖技術の構成要素の長期的な性能について、評価シナリオを設定して解析的な評価を実施してきた。最後に、これらの成果より埋め戻し材やプラグに関する個別に実施してきた技術開発で得られた成果を閉鎖技術に関する設計フローとして取りまとめた。

なお、本研究の成果は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業である令和2年度～令和4年度の「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]閉鎖技術確証試験」の内容を含む。

#### (2) 実施内容と成果

##### (i) 緩衝材と埋め戻し材の力学的相互作用の把握

人工バリア定置の概念のひとつである処分孔縦置き方式では、処分孔に定置した緩衝材が坑道側へ膨出し、乾燥密度が低下することを防ぐために埋め戻し材を坑道に充填することが考えられている。埋め戻し材の要求性能の設定や材料仕様の検討のために、設置される人工バリアと埋め戻し材との相互作用の影響の把握を目的とした緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた縮尺模型試験（図 3-21）を実施した。縮尺模型試験では、人工バリア性能確認試験の試験レイアウトを基に、実際の 1/20 スケールの緩衝材と埋め戻し材を作製した。緩衝材の底部に設置したポーラスメタル（多孔質金属）からイオン交換水を注水し、ケイ砂層を通じて緩衝材の外周から浸潤する構造とし、緩衝材の吸水膨潤により生じる上方への変形量や発生する膨潤圧を計測することで緩衝材の膨出挙動の把握を試みた。

埋め戻し材の設置の有無により緩衝材の膨潤挙動がどのように変化するかを把握するために、埋

め戻し材を設置した条件と埋め戻し材を設置しない条件で試験を実施した<sup>96)</sup>。緩衝材は、ベントナイト（クニゲル V1）を 70%、ケイ砂を 30%の割合で混合した材料を用いて、乾燥密度が  $1.8 \text{ Mg/m}^3$  となるようにブロック状に作製した。また、埋め戻し材は、掘削土（ズリ）を 60%、ベントナイト（クニゲル V1）を 40%の割合で混合した材料として、ケース D-1 では試験容器内で埋め戻し材を乾燥密度  $1.40 \text{ Mg/m}^3$  となるように締め固めることにより作製した。ケース D-2 では乾燥密度  $1.40 \text{ Mg/m}^3$  で作製した埋め戻し材ブロックを設置した後、埋め戻し材ブロックと試験容器の隙間に粉末状の埋め戻し材を充填した。ケース D-3 では埋め戻し材を設置しなかった。埋め戻し材を設置した条件（D-1 および D-2）では試験装置上部に設置した載荷板を介して人工バリア性能確認試験における埋め戻し材の自重に相当する  $0.087 \text{ MPa}$  の荷重を埋め戻し材の上部から作用させた。

図 3-22 に緩衝材の上方膨潤率の経時変化を、図 3-23 に試験終了時の緩衝材の密度分布を示す。図 3-22 の結果より、埋め戻し材を設置した条件（D-1 および D-2）では試験終了時に上方膨潤率がほぼ一定の値に収束しており、その値は D-1 で 2.23%、D-2 で 5.98%となった。一方、埋め戻し材を設置していない D-3 では試験を終了した 34 日を経過した時点においても上方膨潤率は増加の傾向を示しており、試験終了時点での上方膨潤率は 61.74%であった。この結果より、乾燥密度  $1.40 \text{ Mg/m}^3$  の埋め戻し材を設置した場合には設置しない場合と比較して、緩衝材の上方への変形が 1/10 以下に抑制されていることが確認できた。また、図 3-23 に示す試験終了後の乾燥密度分布の結果より、D-1 と D-2 では緩衝材の中心部分で乾燥密度が  $1.50 \text{ Mg/m}^3$  程度となっている。D-1 では埋め戻し材に近い緩衝材の頂部と緩衝材の底部で、D-2 では緩衝材の底部で乾燥密度が  $1.60 \text{ Mg/m}^3 \sim 1.70 \text{ Mg/m}^3$  と中心に比べて高い値を示している。D-1 と D-2 ともに不均一な乾燥密度分布を有しているが、2 つの結果を比較すると、上方膨潤率が大きい D-2 では緩衝材上部の乾燥密度が低くなっており、膨潤による変形が埋め戻し材に近い緩衝材の上部で生じている可能性が示唆された。

さらに、イオン交換水と  $0.2 \text{ mol/L}$  の NaCl 水溶液（以下、 $0.2\text{M}\cdot\text{NaCl}$ ）の 2 種類の塩濃度の異なる試験水を用いて試験を実施し、試験水の水質の違いが膨潤挙動に及ぼす影響について整理を行った<sup>97), 107), 108)</sup>。その結果、塩濃度が小さいイオン交換水で緩衝材の上方膨潤率が大きいことが確認できた<sup>97), 109)</sup>。また、試験終了後の乾燥密度の分布は、上方膨潤率が小さい  $0.2\text{M}\cdot\text{NaCl}$  では、初期の乾燥密度の  $1.80 \text{ Mg/m}^3$  に対して緩衝材の上部は  $1.00 \text{ Mg/m}^3$  程度まで低下している一方で、緩衝材の中部から底部にかけては  $1.50 \text{ Mg/m}^3 \sim 1.60 \text{ Mg/m}^3$  であり、緩衝材の上部の一部分しか膨潤しておらず膨潤による変形が不均一に生じることが確認できた。

以上のことから、埋め戻し材を設置した際の緩衝材の膨潤による乾燥密度の不均一な分布や緩衝材の膨潤量に対する試験水の水質の影響など、埋め戻し材の要求性能の設定にあたり解析検討を行う上で考慮すべき緩衝材と埋め戻し材の相互作用に関する知見を整理することができた。

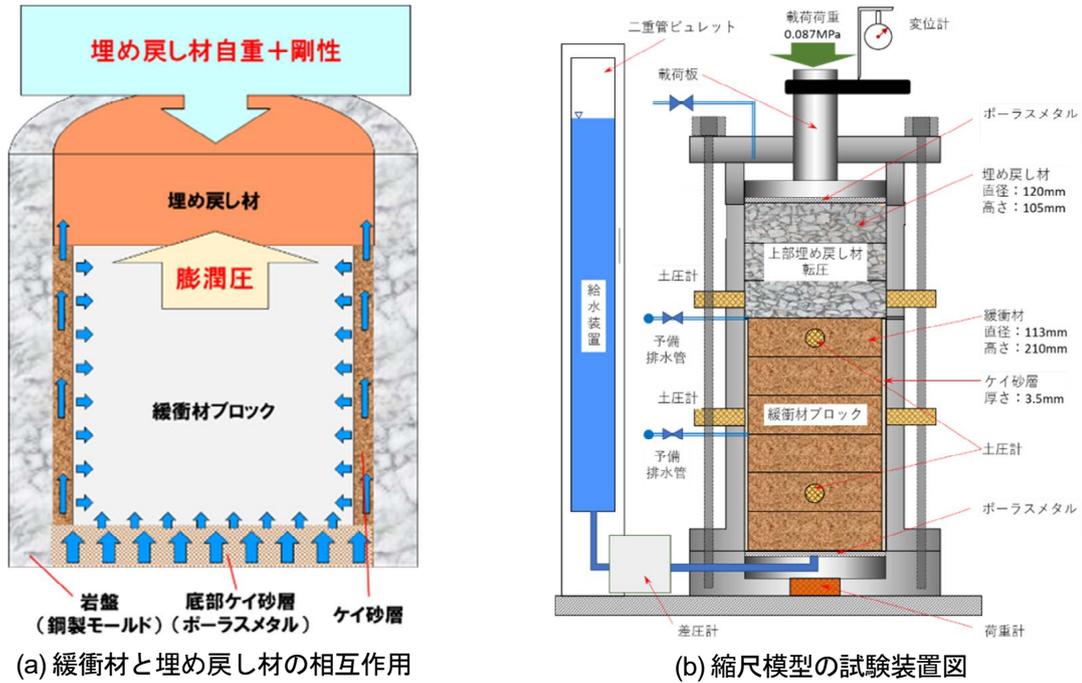


図 3-21 縮尺模型の概念図

(a)は処分孔縦置き方式における緩衝材と埋め戻し材の相互作用について人工バリア性能確認試験の状況を基に整理した図、(b)は整理した相互作用を模した縮尺模型試験装置図

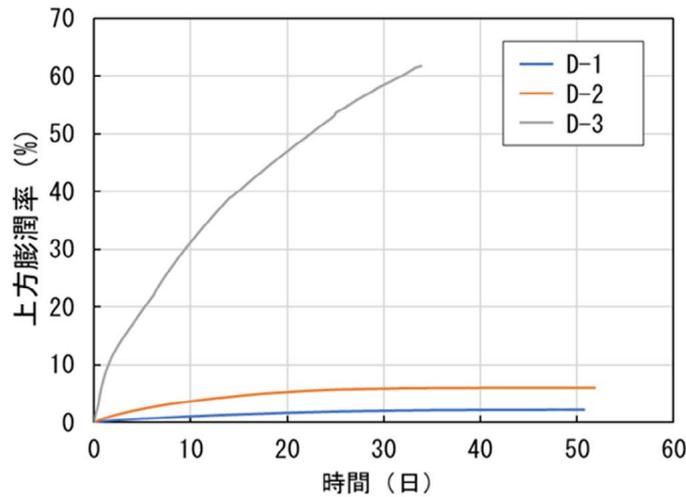


図 3-22 上方膨潤率の経時変化<sup>96)</sup>

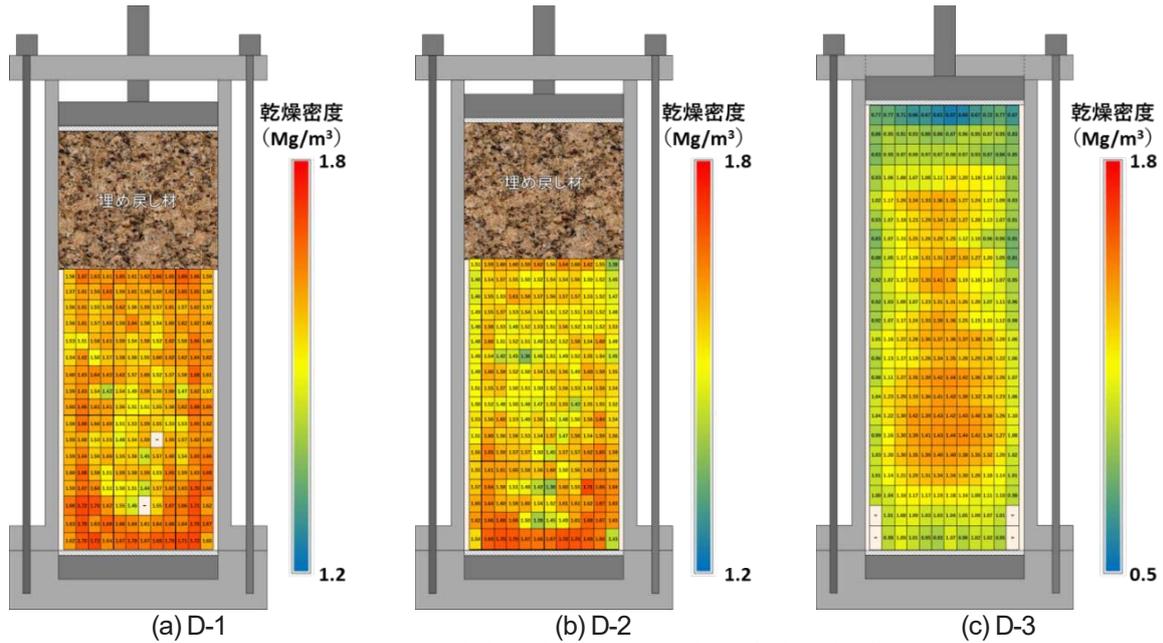


図 3-23 試験終了時の緩衝材の乾燥密度分布<sup>96)</sup>

(ii) 止水プラグの材料を対象とした地下水移行抑制機能の把握

坑道の掘削で生じた EDZ においては、割れ目の発達に伴い透水性が増大することにより卓越した物質移行経路となることが想定されている。EDZ の連続性を遮断し卓越した移行経路となることを回避するための手法として、低透水性の材料であるベントナイト系材料を用いた止水プラグを設置する考え方が国内外で示されている。そこで、止水プラグに要求する性能を検討するために止水プラグの切り欠き部分を縮小して模擬した粘土止水壁を坑道の底盤に構築し、透水試験により取得した透水係数を指標として地下水移行抑制機能を評価してきた<sup>108)</sup>。

止水プラグに要求する透水性の考え方として、掘削前の岩盤と同程度以下となる低透水の領域を設けることが示されている<sup>4)</sup>。本試験では粘土止水壁の透水係数として、深度 350 m の割れ目の無い岩盤の平均的な透水係数である  $10^{-10}$  m/s 以下とすることを目標とし、実際には施工時のばらつきを考慮して 1 オーダー低い  $10^{-11}$  m/s を透水係数の設定値とし、この透水係数の値を達成する有効粘土密度として  $1.20 \text{ Mg/m}^3$  を設定した。

粘土止水壁は、350m 試験坑道 3 の底盤から鉛直下向きに掘削したボーリング孔 (EDZ-1 孔) を中心とした半径 0.5 m の円周上に幅 0.1 m、深さ 2.0 m のスリットを設け、ベントナイトペレット (クニゲル V1 を 100%) を充填して構築した (図 3-24 および図 3-25)。スリットの体積とベントナイトペレットの投入量から粘土止水壁の有効粘土密度を算出し、目標値であった  $1.2 \text{ Mg/m}^3$  をほぼ達成していることを確認した。

試験では、粘土止水壁に囲まれた領域の中心に掘削した EDZ-1 孔を対象として単孔式の透水試験により透水係数を評価した。粘土止水壁の構築前後に EDZ-1 孔を用いた透水試験を実施して、EDZ を含むように設定した試験領域の透水係数が粘土止水壁の構築によりどのように変化するかを評価した。また、粘土止水壁の構築後 5 年間が経過するまで繰り返し透水試験を実施し、粘土止水壁の構築後に試験領域の透水係数が時間の経過とともにどのように変化するか調査した。図 3-26 にこれまでの試験で得られた試験領域内の透水係数を示す。粘土止水壁の構築前後に実施した同じ注水区間における透水試験において、構築前の透水係数は約  $2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  の値を、構築後の透水係数は約  $3 \times 10^{-9}$

m/s の値を示し、低透水性を持つように設計した粘土止水壁を構築することで EDZ を含む試験領域内の透水係数が低下することを確認した。また、粘土止水壁を構築して5年が経過した時点においても EDZ を含む試験領域の透水係数は  $10^{-9}$  m/s 以下の値を示し、この試験領域の透水係数は構築直後と同等に低く保たれていることを確認した。



図 3-24 坑道底盤への粘土止水壁の施工状況

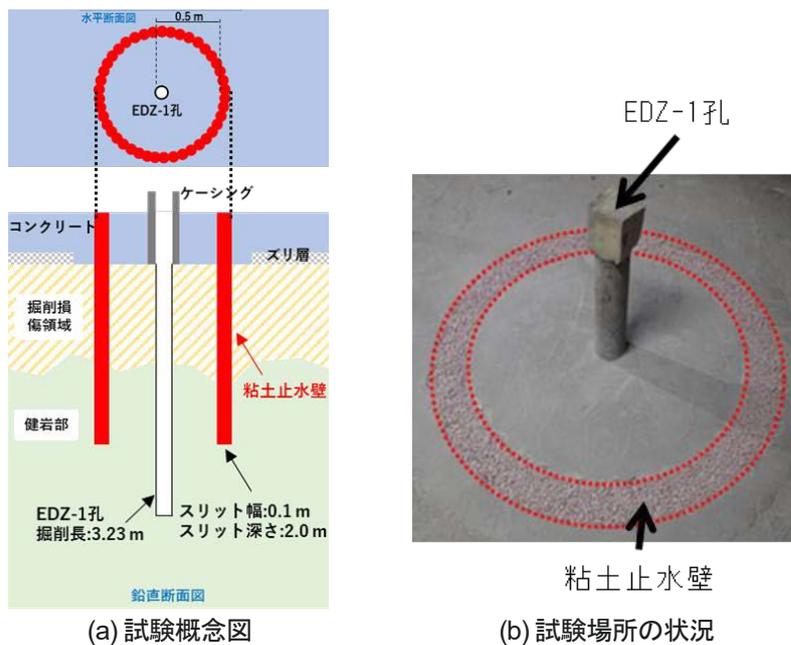


図 3-25 試験の概要図

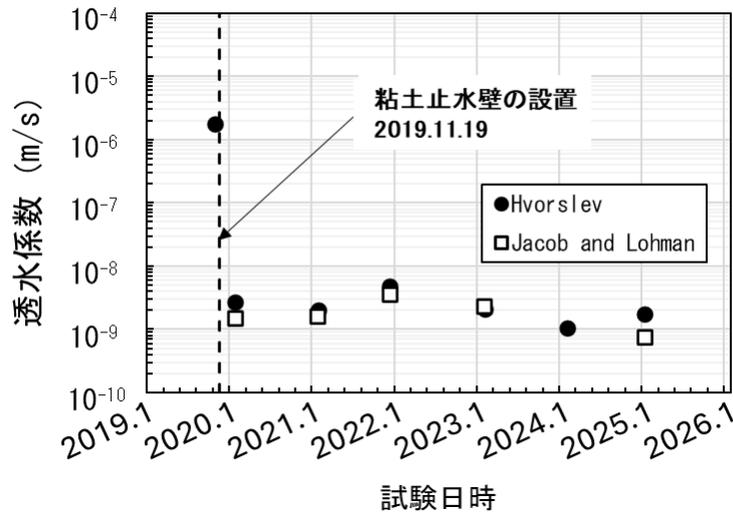


図 3-26 EDZ シーリング試験の試験領域内の透水係数の経時変化

透水試験では、EDZ を含むように設定した EDZ-1 孔の区間（2021 年度まで：深度 0.31 m～深度 1.70 m、2022 年度以降：深度 0.22 m～深度 1.61 m）から注水して粘土止水壁で区切られた内側の領域を対象とした。透水試験で得られたデータは定常解析（Hvorslev の式<sup>110)</sup> と非定常解析（Jacob and Lohman の方法<sup>111)</sup>）により評価した。

(iii) 止水プラグを対象としたベントナイト系材料の施工方法の適用性確認

止水プラグが EDZ の連続性を遮断する構造物として成立するためには、要求性能を発揮できる品質（乾燥密度など）で施工できる技術が必要となる。例えば、締固め工法で施工する場合、坑道の側壁部や天端部の切り欠き部では岩盤と止水プラグの境界面の近くは十分に締め固められずに乾燥密度が低下する可能性がある。そこで、切り欠き部のように狭隘な空間を有する構造物に対して、ベントナイト系の材料を施工できる技術として吹付け工法に着目してその適用性を確認するための試験を実施した。試験では、ベントナイトの材料の種類や配合に応じた施工特性データを取得するための地上吹付け試験と坑道の側壁の一部を掘削した切り欠き部を対象とした地下での工学規模の吹付け施工試験（以下、工学規模試験）を実施した。地上吹付け試験の結果を踏まえて、工学規模試験におけるベントナイト系の吹付け材料としてベントナイト（クニゲル V1）を 70%、ケイ砂を 30%の割合で混合した材料を用いた。吹付け施工の目標を有効粘土密度が 1.20 Mg/m<sup>3</sup> を確保できる値として乾燥密度を 1.43 Mg/m<sup>3</sup> に設定した。工学規模試験では、試験坑道の側壁面に掘削した幅が約 1.3 m、奥行きが最大で約 1.3 m、高さが約 3.0 m の切り欠き部に対して吹付けを実施した<sup>109)</sup>。吹付けの施工時と施工後から約 1 年が経過した時点でそれぞれ吹付けたベントナイトの試料採取を行い、乾燥密度や含水比のばらつきや時間の経過による変化を評価した（図 3-27）<sup>96), 109)</sup>。施工時に採取した試料の評価より、目標とする乾燥密度である 1.43 Mg/m<sup>3</sup> を上回る平均乾燥密度 1.55 Mg/m<sup>3</sup> で施工できたことを確認した。さらに、吹付け施工後 1 年程度が経過した時点で採取した試料でも、吹付け全体で目標とする乾燥密度を上回る施工ができていることが確認できた。吹付けから 1 年程度が経過した時点では、吹付けの表面では乾燥により施工時よりも含水比が低下していたが、吹付けの表面から 50 cm 内側では施工時と同程度の含水比が維持されていることが明らかになった。このことから、乾燥による含水比の変化は表面のごく一部にとどまっておらず、ベントナイトが有する低い透水性が発揮されていると考えられる。

これらのことから、ベントナイトのような低透水性を有する材料によって、EDZ を含む領域の透

水性がどの程度低下するかを把握することができた。また、止水プラグを施工する際に、吹付け工法により目的とする乾燥密度が確保できることを確認するとともに、作業上留意すべき点などについても整理することができた。これらの情報は、止水プラグを設計して、施工方法を選択する際に必要な情報となる。

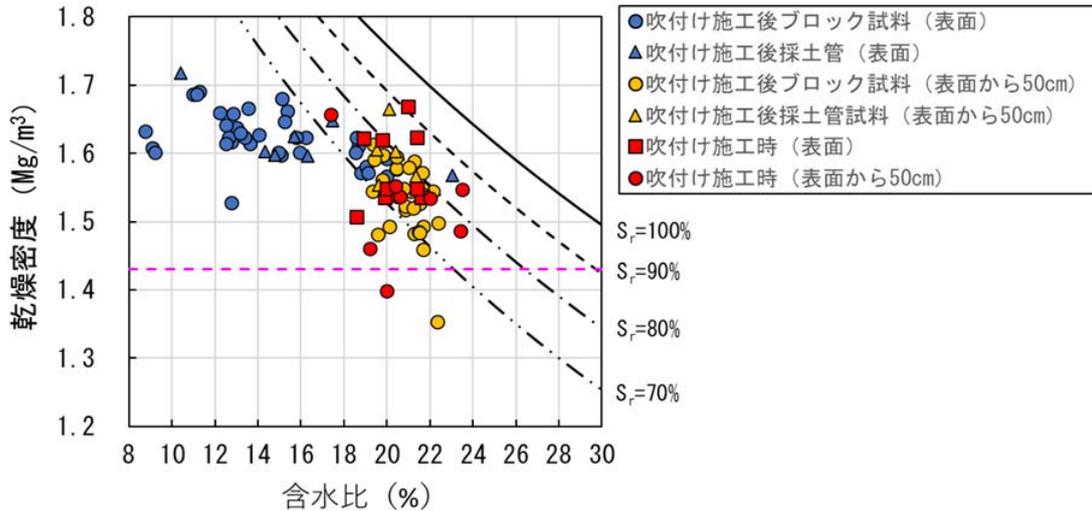


図 3-27 切り欠き部への吹付けの状況

図中の  $S_r$  は飽和度を示す。吹付け施工時に採取した試料の結果から、吹付け直後の飽和度はおよそ 70% ~ 80% の範囲にあることが分かる。また、坑道の換気の影響を受けていないと考えられる、表面から 50 cm 内側の採取試料の飽和度も同様の範囲に含まれていることが分かる。

(iv) EDZ の調査技術の高度化

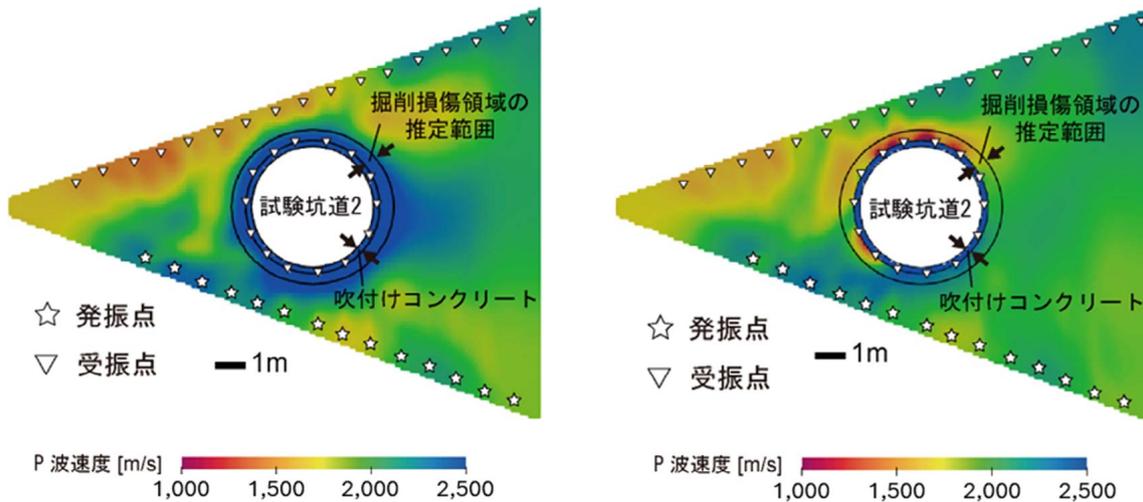
止水プラグの構造を設計する上では、坑道周辺の EDZ の広がり把握することが必要となる。EDZ の調査するための調査手法や解析技術の開発を目的として、350m 東周回坑道、350m 試験坑道 2 および 350m 試験坑道 4 周辺で弾性波トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィ調査を実施するとともに解析手法の改良を行った<sup>108), 112), 113)</sup>。

坑道内で弾性波トモグラフィによる弾性波速度の測定を実施し、既存の手法を適用して解析した場合、泥岩のように弾性波速度が遅い岩盤では、弾性波速度の速い坑道壁面や底盤のコンクリートによる弾性波の屈折の影響により、岩盤の物性値を適切に推定できない場合がある。この問題を解決するために、吹付けコンクリートの存在を設定条件として入力できる解析コードを開発し、吹付けコンクリートによる影響が顕著に認められる場合においても岩盤の弾性波速度の分布を適切に推定が可能になった<sup>112)</sup>。図 3-28 に 350m 試験坑道 2 で実施した弾性波トモグラフィの解析結果を示す。図 3-28(a) に示すとおり、従来の解析手法を使用して坑道周辺の岩盤の弾性波速度分布を推定しようとした場合には、坑道壁面に吹付けられたコンクリートによる影響で弾性波速度が速い領域が坑道周辺に広く推定される。一方で、図 3-28(b) に示す開発した手法では、吹付けコンクリートの存在を考慮することで、坑道周辺の EDZ の存在が想定される領域に弾性波速度が遅い領域を検出することができた。

また、比抵抗トモグラフィを坑道内で適用する場合には、適切な比抵抗分布を推定するために坑道の形状を空洞として適切にモデル化する必要がある。既存の解析手法では地表面からの調査が想定されているために坑道の形状をモデル化することができず坑内での測定結果を適切に解析することが

できなかった。そこで比抵抗トモグラフィの解析手法に関しても、坑道の形状を考慮できるように解析手法を改良した<sup>112)</sup>。

さらに、弾性波トモグラフィや比抵抗トモグラフィは、同じ場所で繰り返し測定することでモニタリング手法として利用することも可能で、解析時に時系列情報を付与するタイムラプス解析は物性値の時間変化の追跡に有効な手法である。弾性波トモグラフィや比抵抗トモグラフィの解析手法に関して、モニタリング手法としても利用できるようにタイムラプス解析が可能となるように解析手法を拡張した<sup>113)</sup>。



(a) 吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合 (b) 吹付けコンクリートの影響を考慮した場合  
 図 3-28 吹付けコンクリートの影響を考慮しない既存の解析手法と改良手法による弾性波速度分布の推定結果

(v) 埋め戻し材やプラグなどの長期的な性能の考え方の提示

埋め戻し材やプラグなどの長期的な性能の考え方の提示について、コンクリート系材料の溶脱成分に起因して埋め戻し材が変質し、水平坑道や立坑が放射性物質の主要な移行経路となるシナリオ（以下、本シナリオ）に関し、想定されるプロセスが将来的に生じる可能性や、仮に生じた場合の安全機能への影響を評価してきた<sup>107), 114)</sup>。その結果、コンクリート成分が溶脱した地下水が埋め戻し材に流れることで、埋め戻し材中のモンモリロナイトが変質し一定程度、透水性が低下する可能性が示された<sup>114), 115)</sup>。しかし、先行研究<sup>107)</sup>において実施された数値解析に示されているように、坑道や立坑の埋め戻し材や止水プラグといった構造の透水性を高くした場合においても、これらの構造を選択的に物質が移行する結果となっていないことから、このような透水性の低下によって核種の閉じ込め性能に及ぼす影響は限定的であるとともに<sup>108)</sup>、現時点で取得可能な情報に基づく ESL（証拠に基づく意思決定支援理論）の評価においては、本シナリオは想定しにくいシナリオであると評価できる。一方で、今後の処分事業の進捗に応じて、本シナリオが生じない、あるいは考慮する必要がないことを示す必要が生じることも考えられ、このとき、本シナリオで着目すべきプロセスやその評価項目あるいは、設計・工学技術の観点で取り得る対策などを整理（図 3-29）<sup>96), 114)</sup>することは、将来的な地層処分の長期的な安全性を確保する観点で有効に活用され得ると考えられる。

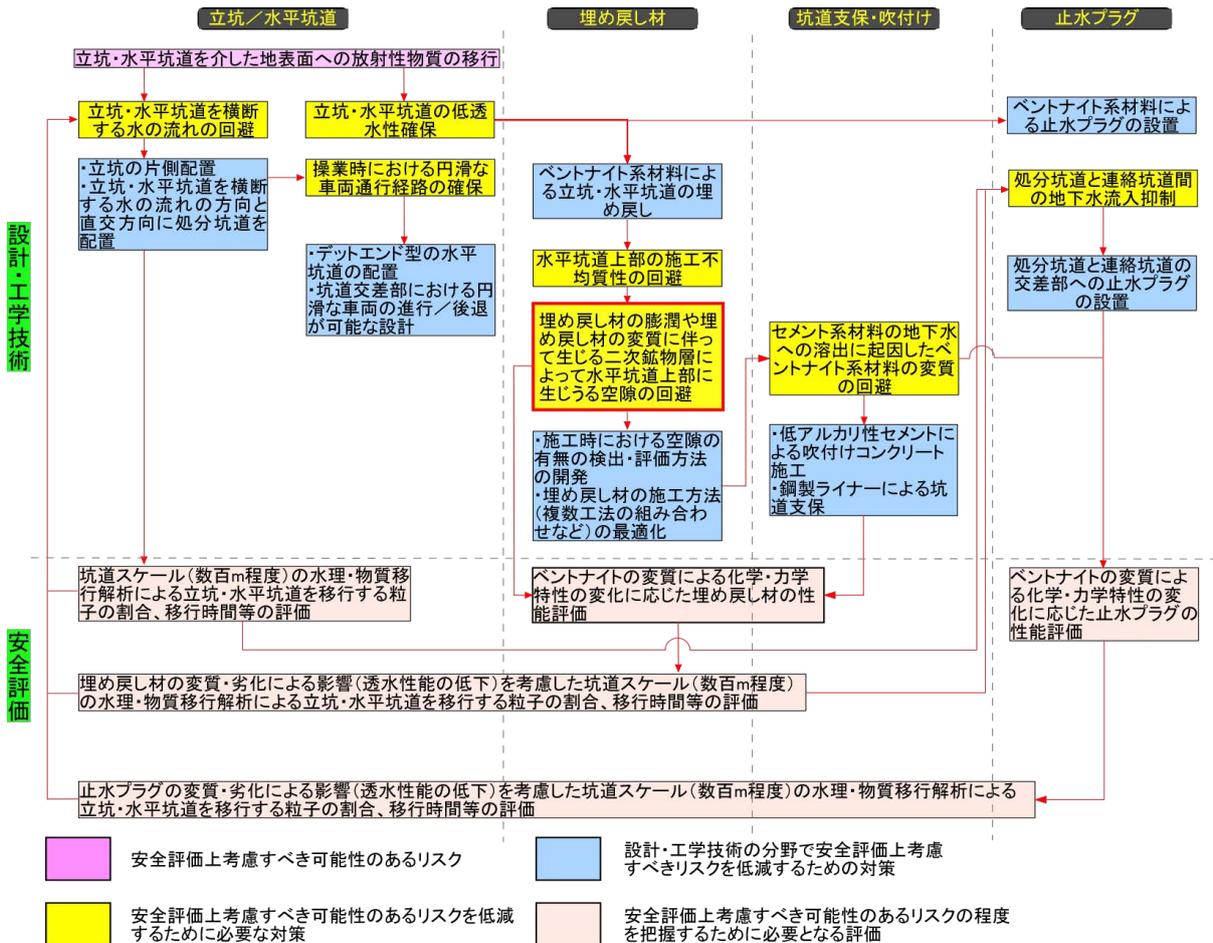


図 3-29 「立坑・水平坑道が選択的な核種の移行経路となる」シナリオを回避するための対策の整理

(vi) 個別の要素技術開発の成果の整理と設計フローへの反映

上述の埋め戻し材と止水プラグに関する個別要素の技術開発で得られた成果を整理して図 3-30 に示す設計フローへ反映した。また、埋め戻し材の要求性能を設定する上で「設置される人工バリアと埋め戻し材との相互作用の影響」を考慮する必要があることや移行抑制に効果的な止水プラグの形状検討を行う上で必要となる「EDZ の範囲や物性（経時変化も含む）」の調査手法として適用可能な技術など設計項目とそれに関連する情報についても整理した<sup>108)</sup>。

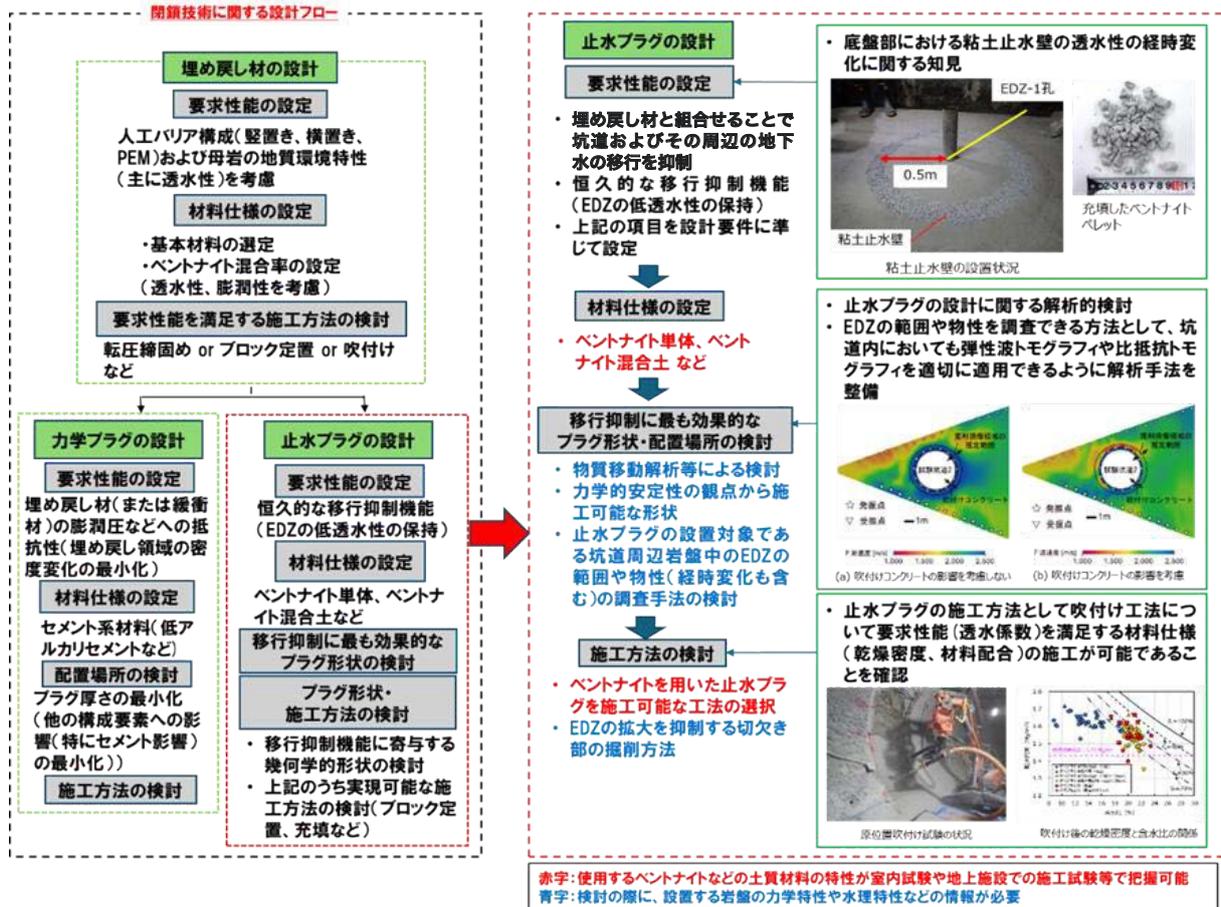


図 3-30 閉鎖技術に関する設計フロー

(3) まとめ

「閉鎖技術の実証」として、埋め戻し材や止水プラグについて、期待される性能の具体化や設計評価技術の改良・高度化を目的とした数値解析や室内試験、原位置での実証的な試験を通じて、埋め戻し材や止水プラグの施工方法の原位置環境への適用性・実現性を確認するとともに、個別要素の技術開発で得られた成果を実際の設計・検討に活用できる設計フローとして提示することができ、「埋め戻し材やプラグなどに期待される性能の具体化や設計評価技術の改良・高度化」という所期の目標を達成することができた。

本研究で得られた成果やそれらの成果を反映した設計フローについては、実際の処分事業において、処分場を閉鎖するために設置される埋め戻し材や止水プラグなどの設計へ反映可能であるとともに、設計時に必要となる情報を取得するための方法を検討するための基礎情報として活用可能であると考えられる。

さらに、ここで得られたベントナイト系材料の特性に関する情報や高度化した掘削損傷領域の調査技術については、HIP のタスク B の中で坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化の一環として実施する実規模スケールの坑道埋め戻し・止水プラグの原位置施工試験へと反映し、その適用性の確認を実施する予定である。

3.1.1.3. 人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いによる品質保証体系の構築

人工バリアのひとつである緩衝材の定置方法として、圧縮成形したブロックを廃棄体の周りに定

置する施工方法が考えられている。この方法では、処分孔の孔壁と緩衝材の間に数 cm の隙間が生じる。豊富に地下水が存在する環境では、緩衝材の定置完了後に岩盤から処分孔に向かって流れ込む地下水（孔内湧水）が想定される。孔内湧水を坑道の底盤から配する場合の影響としては、緩衝材と処分孔の孔壁の間の隙間を流れる孔内湧水によって緩衝材が侵食されることにより、処分孔から坑道へ緩衝材の一部が流出して密度の低下については人工バリアの機能が低下する可能性が懸念されている。そのため、将来の処分事業において処分孔の利用の可否や孔内湧水に対する適切な対策を選択するために必要となる緩衝材の流出量を評価するモデルの開発や開発手法の枠組みの構築を目的とした検討を進めてきた。経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]ニアフィールドシステム評価確証技術開発）を活用して、原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、原環センター）と協力して緩衝材流出試験を実施した。2020年度から2022年度にかけて350m試験坑道5における試験孔において緩衝材流出試験設備（約1/4スケールの縮尺モデル）を用いた流出試験を実施した<sup>13), 96), 109)</sup>。その結果より、堅置き処分孔に設置した緩衝材の「隙間未充填」と「ケイ砂充填」の施工方法の違う2つの技術オプションについて、原位置で把握が可能なパラメータ（試験孔内外水頭差、試験孔内湧水量）を評価項目とした判断指標の考え方を整理して緩衝材の総流出量を評価できるベースモデルを整備することで、より現実的に総流出量が評価できる見通しが得られた<sup>116), 117)</sup>。

また、廃棄体を定置した後の処分坑道や処分場の閉鎖段階におけるアクセス坑道や連絡坑道は、適切な材料で埋め戻される。埋め戻し材には掘削土を用いることが合理的であり、低透水性を確保するために掘削土にベントナイトを混合した混合土を用いることが検討されている<sup>4)</sup>。処分場の地層ごとに透水性が異なる場合には、その透水性に応じて埋め戻し材の仕様が設定されることになる。また、埋め戻し材の仕様などに応じて異なる施工方法を用いることも考えられる。埋め戻し材の品質を保証するためには、埋め戻した坑道内が選択的な地下水の流動経路にならないように、適切な乾燥密度で埋め戻されていることを確認する必要がある。埋め戻し材の施工方法としては、これまで主に撒き出し・転圧工法と吹付け工法について、実寸法の模擬坑道を活用した実証的な試験などを実施して、施工技術としての成立性を確認してきた<sup>108)</sup>。また、埋め戻し材の施工品質を確認するための計測技術についての研究開発にも取り組んでおり、埋め戻し材の乾燥密度と熱伝導率の相関関係を利用した加熱式光ファイバーによる乾燥密度の分布測定技術やケーブル TDR 法による埋め戻し材と坑道壁面の間に生じる隙間の検知技術の適用性も確認されている<sup>108)</sup>。

埋め戻し材の施工方法については、既存の施工機械を用いた撒き出し・転圧工法や吹付け工法では、施工に時間がかかるという課題がある。そこで、2023年度から原環センターと共同で実施している、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]地層処分施設施工・操業技術確証試験）において、埋め戻し材の施工効率の向上が期待できるブロック工法、斜め転圧工法およびスクリー工法について地上の研究施設などを利用した要素試験などを実施して適用可能な材料の配合の範囲や施工品質などに関するデータを取得した。また、施工品質を確認するための計測技術について、加熱式光ファイバーによる乾燥密度分布やケーブル TDR 法による埋め戻し材への水の浸潤状況の把握方法についての検討を進めた。

要素試験および施工試験の結果より、ブロック工法、斜め転圧工法およびスクリー工法について、各工法の埋め戻しの施工方法としての見込みを示すことができた。また、転圧工法と吹付け工法の実証試験<sup>108)</sup>で得られたデータと併せて埋め戻しの施工方法として5工法の適用範囲および施工品質などに関する情報を表3-2のように整理することができた。

表 3-2 埋め戻し工法の適用範囲および施工品質などに関する一覧

項目	埋め戻し工法			
	転圧工法	斜め転圧工法	吹付け工法	スクリー工法
施工範囲	坑道下半部 (坑道上半部は別工法の施工が必要)	坑道全断面 (天端、側壁近傍の施工については要確認)	坑道全断面	坑道全断面
施工管理	原位置での施工管理が重要 (撒き出し厚さ、転圧回数など)	原位置での施工管理が重要 (撒き出し角度・厚さ、転圧時間など)	原位置での施工管理が重要 (材料供給量、吹付け圧力など)	原位置での施工管理が軽微 (ブロック設置) ブロックの製造品質は地上 施設で管理可能
施工品質 (乾燥密度)	1.8 Mg/m <sup>3</sup> ~2.1 Mg/m <sup>3</sup>	1.8 Mg/m <sup>3</sup> ~2.1 Mg/m <sup>3</sup>	1.9 Mg/m <sup>3</sup> ~2.0 Mg/m <sup>3</sup>	1.8 Mg/m <sup>3</sup> ~2.2 Mg/m <sup>3</sup> ※成形圧力 5 MPa~20 MPa
施工速度	1.04 m <sup>3</sup> /h (3D 計測による品質管理) 品質管理方法、施工長さによって よっては長くなる	約 0.30 m <sup>3</sup> /h 材料の撒き出し方法や転圧 位置・角度の設定を高度化 すれば速くなる	0.40 m <sup>3</sup> /h (3D 計測による品質管理) リバウンド回収方法によっ て速くなる	約 12 m <sup>3</sup> /h (ブロックサイズ: 350 mm×600 mm×500 mm) ブロックの寸法によっては 速くなる
材料範囲 (最大粒径)	模擬掘削土の最大粒径 20 mm 以下	模擬掘削土の最大粒径 20 mm 以下	模擬掘削土の最大粒径 5 mm 以下 (リバウンドを考慮)	模擬掘削土の最大粒径 20 mm 以下
材料範囲 (含水比)	材料含水比の施工品質への 影響は小さい	材料含水比の施工品質への 影響は小さい	材料含水比の施工品質への 影響が大きい	含水比の施工品質への影響 が大きい (地上施設で管理)
施工環境	振動・騒音	振動・騒音	騒音・粉塵	施工による坑内環境への 影響は小さい
課題	撒き出し方法の最適化 坑道上半部の施工方法の 検討	撒き出し方法などの自動化 坑道天端部、側壁部の施工 方法の検討	隅角部の施工方法の改善 リバウンド材の回収方法の 検討	実寸大ブロックの製造 および施工の確認 ブロックと坑道との隙間対 策
備考	施工品質 (乾燥密度) : 模擬掘削土に玄武岩の碎石 (最大粒径 20 mm) ・ 砕砂 (最大粒径 5 mm) 、 ベントナイトにクニゲル V1 を使用しベントナイト混合率を 15% とした場合の値。転圧工法、吹付け工法については地上模擬坑道を活用した実証試験の結果より整理、スクリー工法、ブロック工法、斜め転圧工法については要素試験および小規模施工試験の結果より推定した。			

### 3.2. 高温度（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

#### (1) 目的と実施概要

我が国における処分概念のうち、地下施設の設置深度に係る設計要件や処分坑道などのレイアウトに関する考え方の中で、緩衝材中の最高温度が 100℃を超えないことが条件のひとつとして挙げられている<sup>41)</sup>。この制限温度は、120℃の条件での膨潤圧のわずかな低下<sup>118)</sup>や 100℃を超える温度条件下におけるスメクタイトのイライト化影響<sup>119)</sup>などの既往の知見を踏まえて設定されたものである<sup>41)</sup>。このような背景のもと、これまで幌延深地層研究計画の中で実施されてきた人工バリア性能確認試験やオーバーパック腐食試験では、ヒーターの最高温度が 100℃未満に設定されてきた<sup>9)</sup>。

しかしながら、想定外の要因によってオーバーパックや緩衝材が 100℃を超えた状態になることなどを想定して、人工バリアシステムの安全裕度を検証する必要性が高まっている。諸外国では、高温度条件下での現象理解ならびにモデルの構築を目的とした原位置試験が展開されており、例えば、スウェーデンの Äspo の地下研究施設では、緩衝材中の最高温度を約 140℃まで上昇させた Long-term Test of Buffer Material (LOT)<sup>120), 121), 122)</sup>や約 170℃まで上昇させた Temperature Buffer Test (TBT)<sup>123)</sup>、スイスの Mont Terri の地下研究施設では、廃棄体の発熱を模擬したヒーターの表面温度をそれぞれ 130℃～150℃、140℃まで上昇させた Full-scale Emplacement experiment<sup>124)</sup>や HE-E experiment<sup>125)</sup>が実施されている。また、スイスの Grimsel の地下研究施設では、廃棄体の発熱を模擬したヒーターの表面温度を最高 200℃にして最大 20 年間程度加熱することを計画した High Temperature Effects on Bentonite Buffers (HotBENT) experiment に 2019 年より着手しており、2022 年からはヒーターの加熱が開始されている<sup>126)</sup>。これに対して、我が国において 100℃を超える温度での加熱が行われた原位置試験は、深度 50 m の地下空洞内で周辺岩盤に生じる力学的な変化のみを検証した事例<sup>127)</sup>に限られ、実際の放射性廃棄物の地層処分深度で行われた原位置試験の廃棄体の発熱を模擬したヒーター表面温度は、最高でも約 100℃に留まる<sup>128), 129), 130)</sup>。この原位置試験では、100℃で加熱していたヒーターと接していた孔底部の緩衝材にひび割れが認められた<sup>130)</sup>。また、近年実施された室内試験でも、飽和状態のベントナイト供試体に 110℃の熱履歴を与えたところひび割れの発生が確認された<sup>131)</sup>。このようなひび割れの発生を含む高温度条件下での緩衝材の特性変化に関して、知見を取得する必要がある。

本研究では、人工バリアの構成要素である緩衝材の最高温度が 100℃を超えた状態でニアフィールドにおいて発生する現象の整理、人工バリア性能に係る試験データの整備、ならびにニアフィールドにおける上限温度設定の考え方の提示を目的として、幌延 URL を活用した技術開発を行う。具体的には、幌延 URL において人工バリアを模擬した工学的規模の原位置試験を実施するとともに、緩衝材を使用した室内試験やイライト化の影響範囲に関する解析的検討を行う。なお、本課題の一部は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業である、令和 5 年度および令和 6 年度「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業[JPJ007597]ニアフィールド長期環境変遷評価技術開発」を活用して実施した。

#### (2) 実施内容と成果

##### (i) 原位置試験

###### ① 試験概要

幌延 URL 内で実施する工学的規模の原位置試験について、2022 年度に計画の策定<sup>96)</sup>、2023 年度に緩衝材ブロック、ヒーターおよび計測センサーからなる試験体の設置と加熱の開始<sup>89), 97)</sup>、2024 年

度に加熱の停止と一組の試験体の解体を行った。図 3-31 に概略図を示す試験体を、350m 調査坑道の試験坑道 5 における 2 つの既存孔（試験孔 1 および試験孔 2）に 2024 年 1 月に設置し、同年 2 月にヒーター温度 140°C での加熱を開始した<sup>89)</sup>。加熱開始直前より、設置した計測センサーによって緩衝材ブロックの温度・水圧・全応力の分布を計測した。2024 年 9 月に加熱を停止し、試験孔 2 に設置した試験体を解体した。なお、残りの一組の試験体については、幌延深地層研究計画の令和 2 年度以降の必須の課題のうち人工バリア性能確認試験において、熱-水理-力学-化学連成現象の評価のための参考情報として既設の計測センサーを用いたデータ取得を継続する予定である。

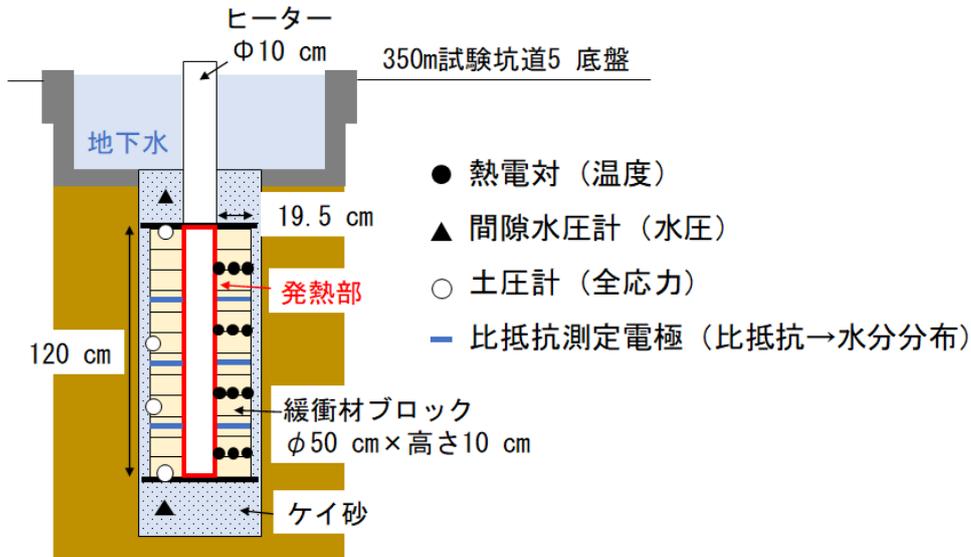


図 3-31 試験体の設置概略図

## ② 試験体の製作

試験体は緩衝材ブロック、ヒーター、計測センサーと、それらを拘束する治具からなる。緩衝材ブロックは、Na 型ベントナイトであるクニゲル V1 とケイ砂（3 号と 5 号を 1 : 1 で混合したもの）を 7 : 3 の割合で混合し、外径 50 cm、内径 11 cm、厚さ 10 cm、目標乾燥密度 1.8 Mg/m<sup>3</sup>（膨潤時の密度約 1.6 Mg/m<sup>3</sup>）で加圧成型した。この際、初期含水比（10.5%および 15%）および形状（ドーナツ型および半割扇形）を変化させて緩衝材ブロックを作製し、ひとつの試験体における 12 段の緩衝材ブロックが①初期含水比 10.5%・ドーナツ型、②初期含水比 10.5%・半割扇形、③初期含水比 15%・ドーナツ型、④初期含水比 15%・半割扇形の 4 条件で 3 段ずつとなるようにした（図 3-32）。初期含水比は、人工バリア性能確認試験における緩衝材ブロックの初期含水比である 10.5%を基本とし、緩衝材ブロックの圧縮成型が現実的に可能な範囲でより高い値として 15%を選択した。また、緩衝材ブロックに対する応力や地下水浸潤挙動に影響する可能性を考慮して形状を変化させた。

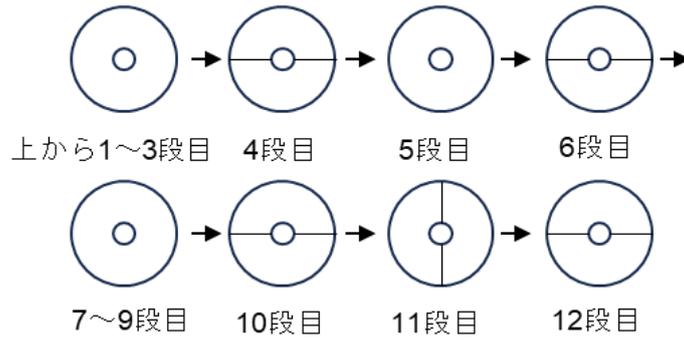


図 3-32 緩衝材ブロックの積み上げ順および定置方向

ヒーターは、炭素鋼製の円筒（本体チューブ）の中にカートリッジヒーターと温度管理用の熱電対を設置し、 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ で制御可能な仕様とした。ヒーター加熱部分の設置位置は緩衝材ブロックの積み上げ部分と同じ高さになるようにし、炭素鋼製の本体チューブを通じて緩衝材ブロックの積み上げ高さ 120 cm 分を加熱できる構造とした。緩衝材ブロックの鉛直方向の膨潤による試験体の浮き上がりを抑制するために、本体チューブの底盤と中間に設置した蓋状の構造物で緩衝材ブロックを上下から挟んでボルトで固定する設計とした。本体チューブと上下の蓋との接続部分は、隙間からの地下水の浸潤を抑制するために止水対策を施した。また、本体チューブ、緩衝材定置治具およびボルトのうち緩衝材と接触しない部分には、電気絶縁塗料を塗布した。

試験体のスケールが比較的小さいことから、設置する計測センサーは試験に大きな影響を及ぼさないと考えられる程度の種類および数量とした。計測センサーのうち温度計および土圧計の設置位置を図 3-33 に示す。これに加えて、水圧計を 2 つの試験孔の試験体下部および上部のケイ砂充填部にそれぞれ埋没させる形で設置した。また、比抵抗トモグラフィの電極を試験孔 1 の上から 4、7、10 段目の緩衝材ブロックの側面に  $10^{\circ}$  につき 1 点ずつ設置した。

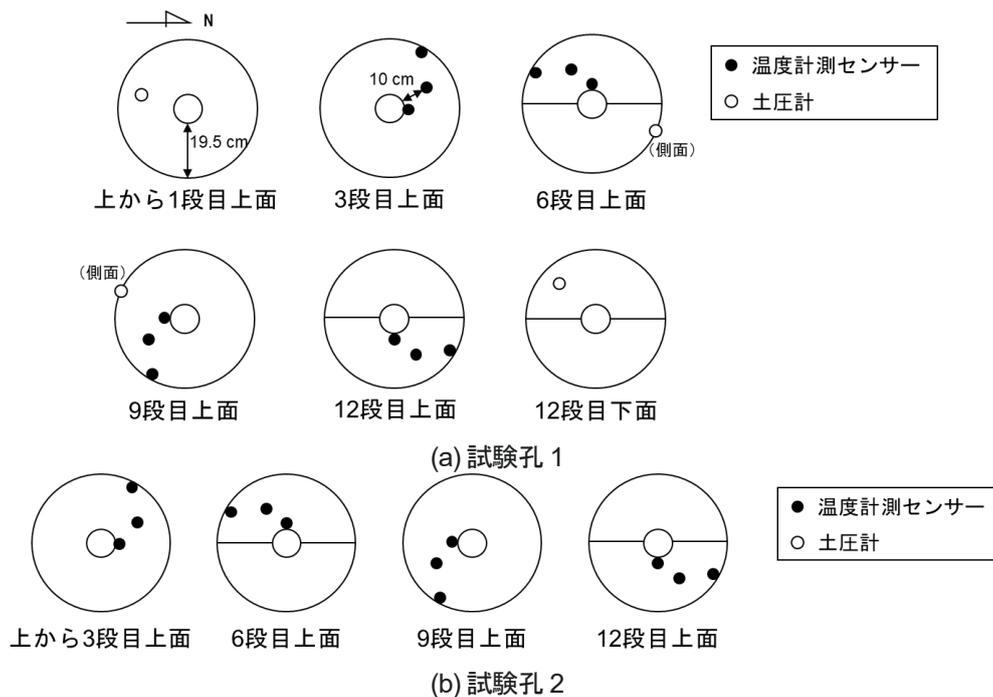


図 3-33 緩衝材ブロック内の計測センサーの配置図

試験孔の底部にケイ砂を充填し、水圧計を埋没設置させた後、組み立てた試験体を孔内に設置した。その後に、試験体と試験孔壁面の間および試験体上部をケイ砂で充填した。(c)に示す計測を開始し、数日後にヒーター温度 140°Cでの加熱を開始した<sup>89)</sup>。この温度は、オーバーパックスの耐食性への影響に関する室内試験データ<sup>132)</sup>や、③で述べる幌延の地下水水質を踏まえたスメクタイトのイライト化に関する計算の結果<sup>109)</sup>に基づき決定した。

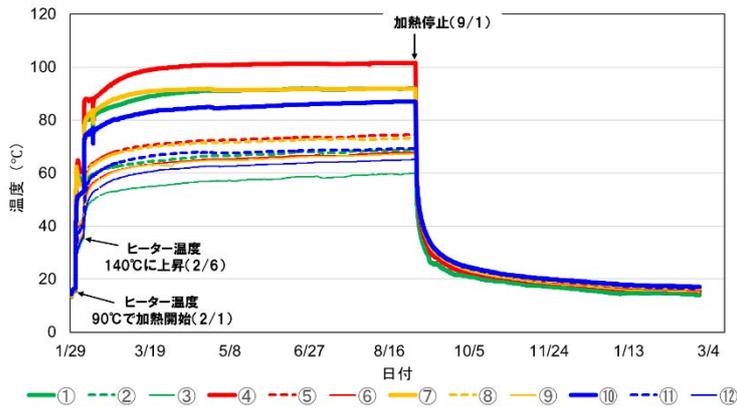
### ③ 計測

加熱開始直前より、設置した計測センサーによって2つの試験体における温度および水圧の分布を計測した。また、試験孔1ではこれに加えて全応力の分布を計測するとともに、比抵抗トモグラフィ測定を定期的に行い、得られたデータの解析により緩衝材ブロック内の飽和度分布を推定した。

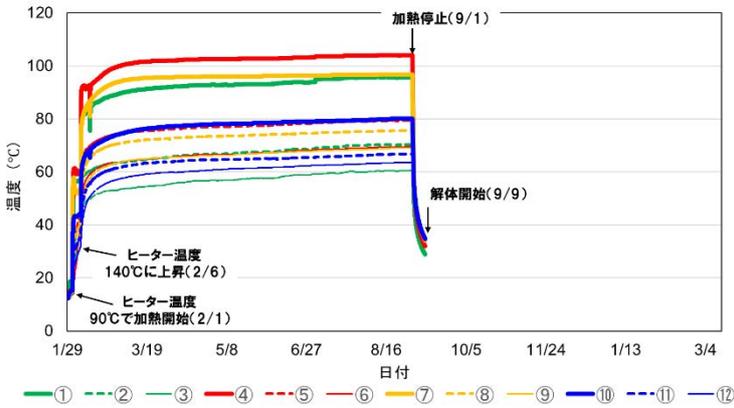
加熱開始時から2025年2月末まで(試験孔1)および試験体解体時まで(試験孔2)の温度、全応力および水圧の計測結果を、それぞれ図3-34、図3-35および図3-36に示す。温度計測値は加熱開始から約2か月後にほぼ定常状態となった(図3-34)。試験体の上下方向で中央に近い場所ほど相対的に高い温度を示しており、上下方向の変形を拘束するために設置した鉄製の蓋から伝わる温度の影響を受けにくかったことによると考えられる。

土圧計による全応力の計測値(図3-35)は数か月間で徐々に上昇し、加熱停止直前にはほぼ定常値となった。加熱直後の上昇は熱膨張による緩衝材ブロックの応力増加、それ以降の緩やかな上昇は地下水の浸潤による膨潤応力の増加によるものと考えられる。また、加熱停止直後に各センサーでの全応力の計測値が約0.2MPa低下した。これは、主には緩衝材とセンサーの金属の線膨張係数の違いによって密着状態が変化したこと、あるいは温度低下による熱応力や間隙圧の減少によるものと考えられ、同様の現象は人工バリア性能確認試験でも確認されている<sup>109)</sup>。その後、全応力の計測値は再度上昇し始めており、加熱の影響がないことから、地下水の浸潤による緩衝材ブロックの膨潤応力の増加によるものと考えられる。

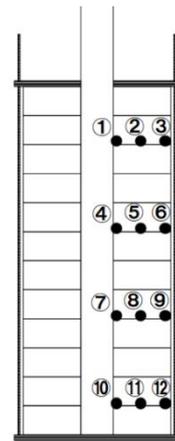
水圧計の計測値(図3-36)は期間全体を通じて全応力の計測値よりも小さく、大きな値の変化も認められなかったことから、緩衝材周囲の水理条件は一定であったと推測される。2024年9月頃の値の減少は、解体調査で試験孔2の排水を行った影響で水圧が一時的に低下したのと考えられる。



(a) 試験孔 1 での温度変化

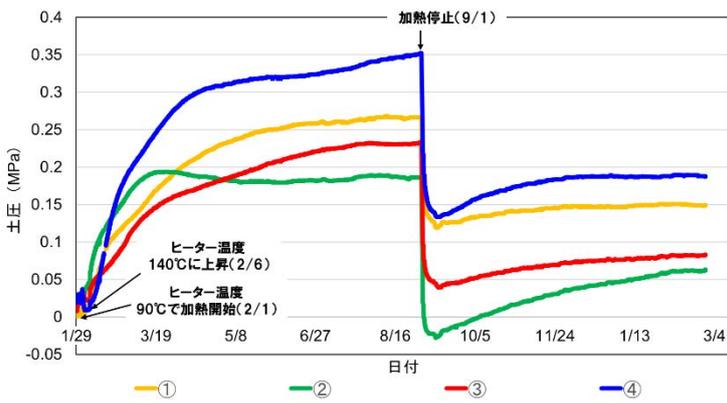


(b) 試験孔 2 での温度変化

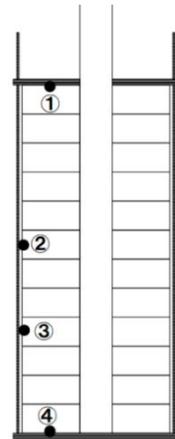


(c) センサー設置位置の概略図 (2孔共通)

図 3-34 温度の計測結果

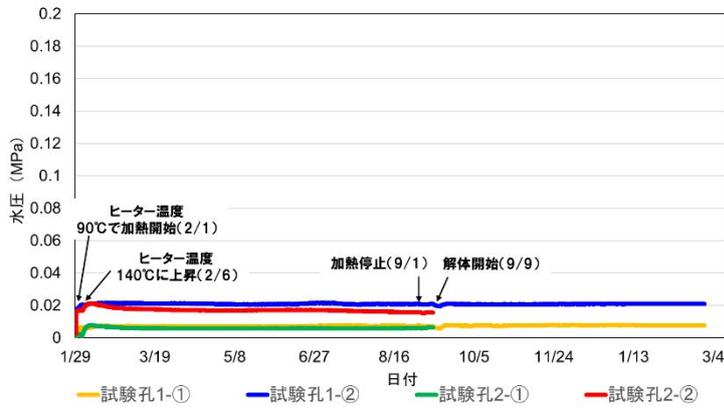


(a) 試験孔 1 での全応力変化

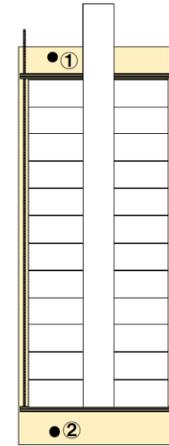


(b) センサー設置位置の概略図

図 3-35 全応力の計測結果



(a) 試験孔 1 および 2 での水圧変化



(b) センサー設置位置の概略図  
(2 孔共通)

着色部分はケイ砂充填部を意味する。

図 3-36 水圧の計測結果

試験孔 1 の上から 7 段目の緩衝材ブロックにおける比抵抗分布の解析結果ならびに比抵抗分布から換算した飽和度分布を図 3-37 に示す。加熱開始後より、ヒーター接触部から 10 cm～15 cm 程度までの領域の比抵抗が相対的に高くなっており、これに対応するように同領域の飽和度換算値が低くなっていた。ヒーターによる加熱に伴う緩衝材内側の乾燥過程を反映していると考えられ、後述する緩衝材内側の色調変化や水分量分布の結果とも整合的である。

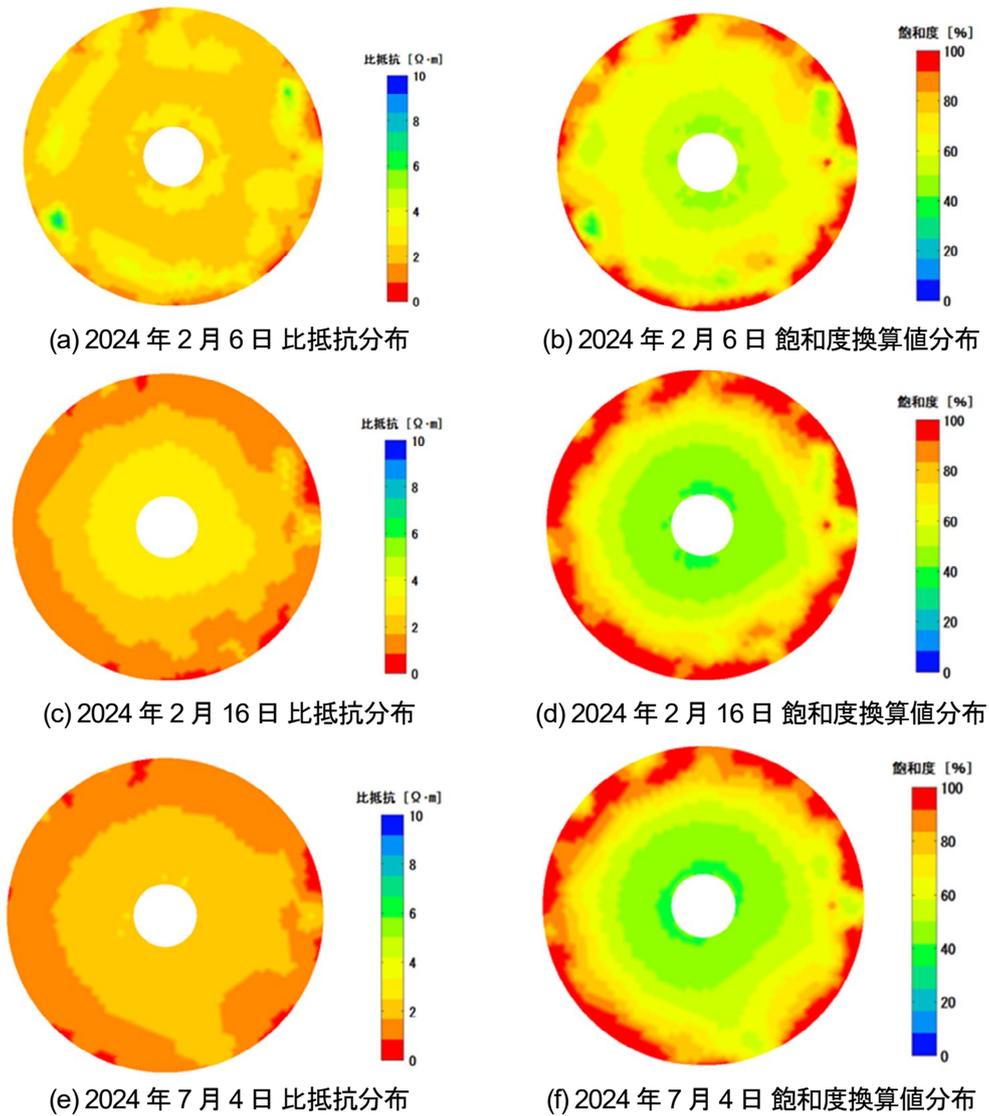


図 3-37 比抵抗トモグラフィの解析結果

④ 解体調査と分析

2024年9月に試験体の加熱を停止し、緩衝材中の温度低下を確認した後、試験孔2に設置した試験体の取り出しおよび解体作業を開始した。各段の緩衝材ブロックを切断し、試験や分析に供する試料を採取した。各段の試料採取位置を図3-38に示す。また、各試験・分析の参照試料として、試験に供していない含水比10.5%および15%の緩衝材ブロックからも試料を採取し、試験・分析に供した(以下、「10.5%リファレンス」、「15%リファレンス」と記載)。

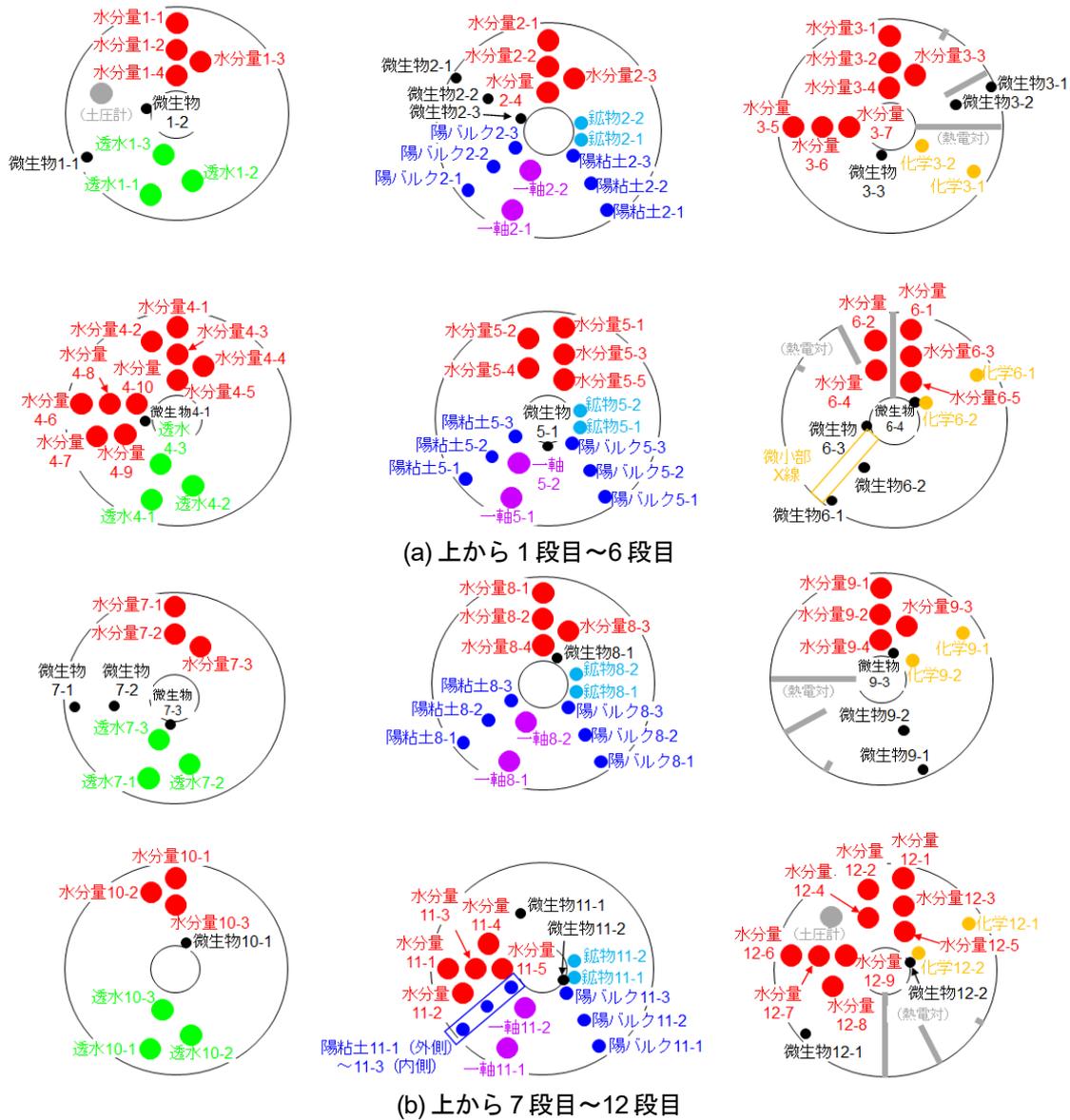


図 3-38 緩衝材ブロックの試験・分析項目と試料採取位置

水分量：水分量等、透水：透水係数、陽バルク：陽イオン交換容量（バルク）、陽粘土：陽イオン交換容量（粘土）、鉱物：鉱物組成、一軸：一軸圧縮強度、化学：化学組成。各図の右側が北である。

解体時に試験体を観察した結果、上から2段目以深の緩衝材ブロックでは、ヒーター接触部から8 cm 程度までの部分の色調が外側よりも白くなっていた（図 3-39）。これは、加熱に伴う緩衝材ブロック中心部の乾燥によるものと考えられる。各段につき1～4方向で、この色調変化部分の緩衝材内側からの距離を測定した結果を、図 3-40 に示す。上から1段目には色調の変化が認められず、2段目および12段目は他の段よりもやや色調変化の範囲が小さかった。また、上から3段目～12段目のヒーター接触部において、厚さ1 cm 程度のひび割れが認められた（図 3-41）。加熱に伴う衝材の乾燥収縮によるものと考えられる。



図 3-39 緩衝材ブロック内側に認められた色調の変化（上から 10 段目の例）

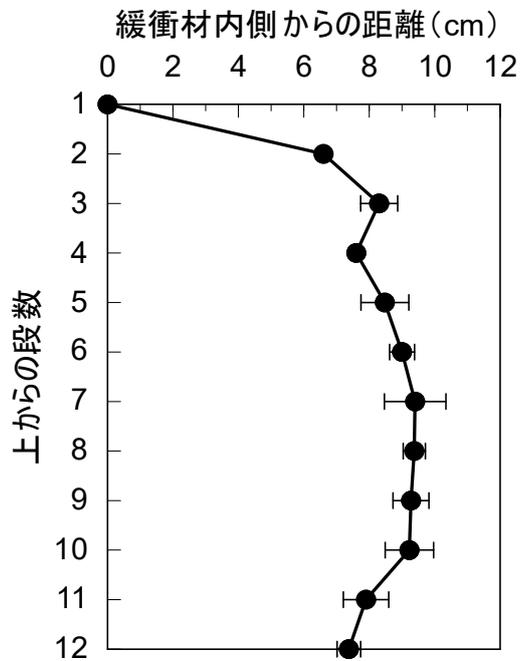


図 3-40 緩衝材ブロック内側からの色調変化部分の距離

1 段目は測定をしていないが、解体調査時の写真から色調変化がないと判断した。2・4 段目は 1 方向、3 段目は 2 方向の測定結果であり、5 段目以深は 4 方向の測定平均値と標準偏差を示した。



図 3-41 緩衝材ブロックのヒーター接触部に認められたひび割れ（上から 11 段目の例）

#### ⑤ 採取試料の試験・分析結果

ここでは、解体により採取した緩衝材ブロックに対して実施した図 3-38 の試験・分析項目のうち、含水比・乾燥密度、一軸圧縮強度および透水係数の結果を示す。それ以外の結果については、原子力機構・原子力環境整備促進・資金管理センター・電力中央研究所(2024)<sup>89)</sup>を参照されたい。

含水比は、ヒーター接触部から中心位置までの距離が 2 cm の試料で約 5%～10%であり、それより外側に向かうにつれて増加し、接触部から 13 cm～17 cm で 20%前後の値を示した（図 3-42）。この結果は、色調変化の観察結果（図 3-40）とも整合的であり、緩衝材外側からの地下水の浸潤とヒーターの加熱による水分の移動により、緩衝材内側の水分量が相対的に低くなったことによると考えられる。また、各採取試料の乾燥密度と含水比をプロットすると、含水比が高い緩衝材外側ほど乾燥密度が小さい傾向が認められた（図 3-43）。初期含水比 15%で製作した上から 1 段目～6 段目の緩衝材ブロックでは、14 点の試料が 15%リファレンスよりも低い含水比を示し、うち 12 点が緩衝材ブロックの初期乾燥密度である  $1.8 \text{ Mg/m}^3$  より高い乾燥密度を示した。これらの試料は、1 点を除いてヒーター接触部から中心位置までの距離が 4 cm～8 cm と、相対的にヒーターに近い試料であった。一方、初期含水比 10.5%で製作した上から 7 段目～12 段目の緩衝材ブロックでは、10.5%リファレンスより低い含水比を示す試料も、乾燥密度が初期値の  $1.8 \text{ Mg/m}^3$  を上回る試料も、相対的に少ない傾向にあった。以上の結果から、加熱により緩衝材ブロックの内側から外側へ水分が移動して含水比が変化するとともに、緩衝材の内側の収縮および外側の膨潤により乾燥密度も変化したと考えられ、初期含水比の大きい上から 1 段目～6 段目の方が、このような水分の移動に伴う影響が大きかったと考えられる。

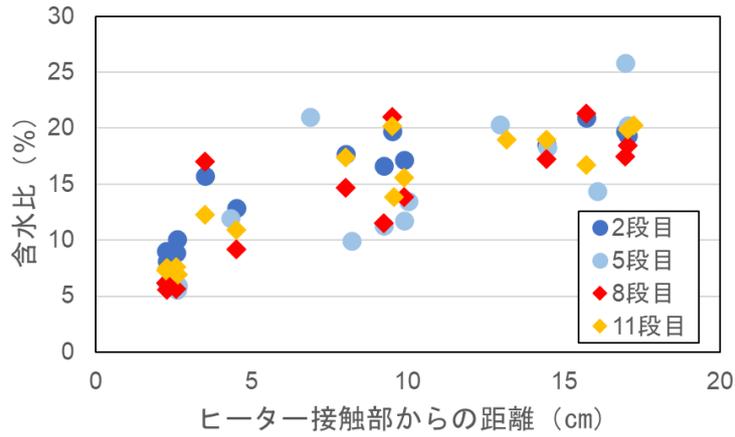


図 3-42 緩衝材ブロック内での含水比の分布

緩衝材ブロックから採取した直径 3 cm~5 cm の円柱状の試料を使用して飽和度を測定した。図の各点は採取した試料の中心を示す。

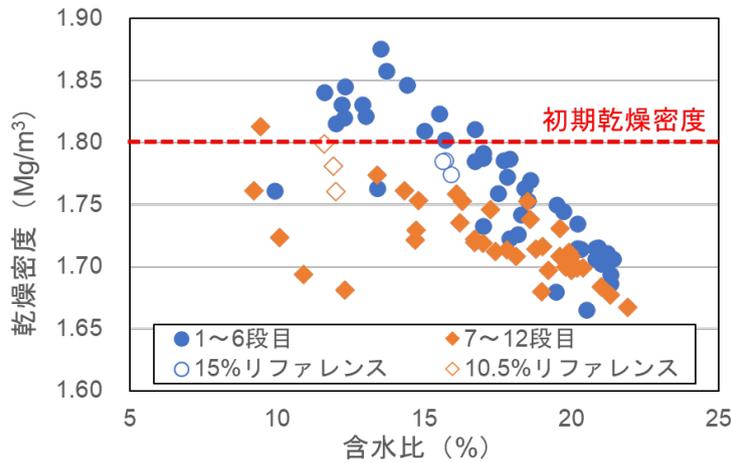


図 3-43 緩衝材ブロック内の乾燥密度と含水比の関係

ヒーター接触部から中心位置までの距離が 5 cm~8 cm で採取した試料の一部は、同じ飽和度（約 50%）と乾燥密度（1.7 Mg/m<sup>3</sup>~1.8 Mg/m<sup>3</sup>）で温度履歴を受けていない緩衝材と比べて一軸圧縮強度が半分程度に低下していた（図 3-44）。また、約 4 cm~6 cm の位置で採取した試料の一部は、同じ乾燥密度で温度履歴を受けていない緩衝材と比べて透水係数が 1 桁程度高かった（図 3-45）。

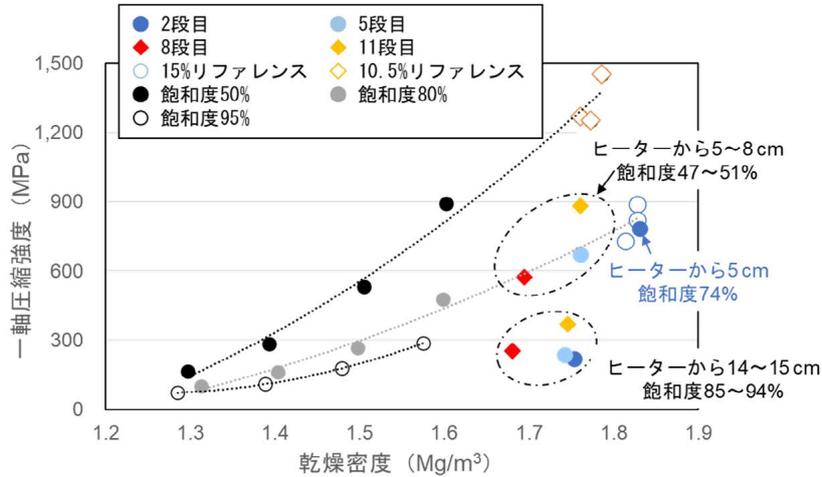


図 3-44 緩衝材ブロック内の一軸圧縮強度と乾燥密度の関係

「飽和度 50%」、「飽和度 80%」および「飽和度 95%」の各データは、原位置試験と同配合の緩衝材を用いて実施された室内試験の結果<sup>133)</sup>に基づく。

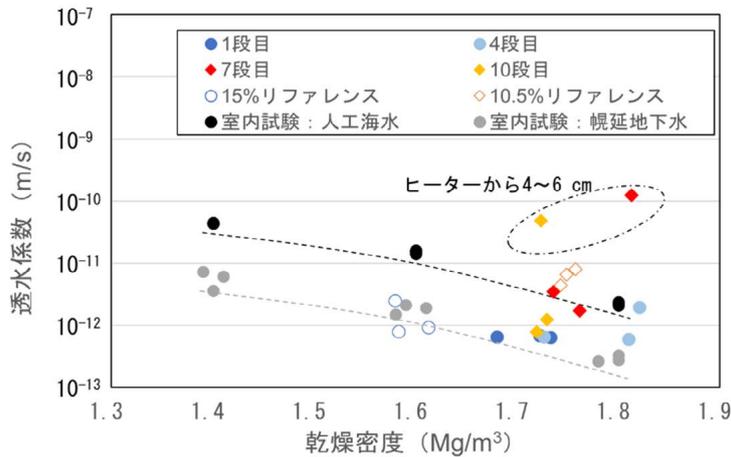


図 3-45 緩衝材ブロック内の透水係数と乾燥密度の関係

「室内試験：人工海水」および「室内試験：幌延地下水」の各データは、原位置試験と同配合の緩衝材を用いて実施された室内試験の結果<sup>30), 134)</sup>に基づく。

(ii) 室内試験

高温条件下での緩衝材の挙動、特にひび割れの発生と閉塞挙動を確認するための室内試験を実施した<sup>89)</sup>。乾燥密度 1.4 Mg/m<sup>3</sup>、直径および高さ各 5 cm の円柱形で、2種類の初期含水比（7%、23%）となるようにクニゲル V1 を加圧成型し、X 線 CT 撮影を行った。その後、緩衝材を 140°C で加熱して水分を散逸させ、蒸留水または 1.5% の NaCl 溶液（幌延の深度 350 m の地下水と同程度の塩濃度）を下端から浸潤させ、一定時間ごとに X 線 CT 撮影を行った。

加圧成型したベントナイト試料に対する X 線 CT 撮影の結果を図 3-46 に示す<sup>89)</sup>。初期含水比が 7% の場合には、140°C で加熱しても試料に明瞭なひび割れは認められず、その後の蒸留水の浸潤により下端から浸潤が進行した（図 3-46(a)）。初期含水比が 23% の場合、140°C での加熱により試料にひび割れが認められたが、蒸留水と 1.5% NaCl 溶液のいずれを浸潤させた場合も、ひび割れが優先的な水みちとなるような挙動は観察されず、下端から浸潤が進行した（図 3-46(b), (c)）。また、生じたひび割れが蒸留水と 1.5% NaCl 溶液のいずれを浸潤させた場合にも最終的に閉塞することが確認された。

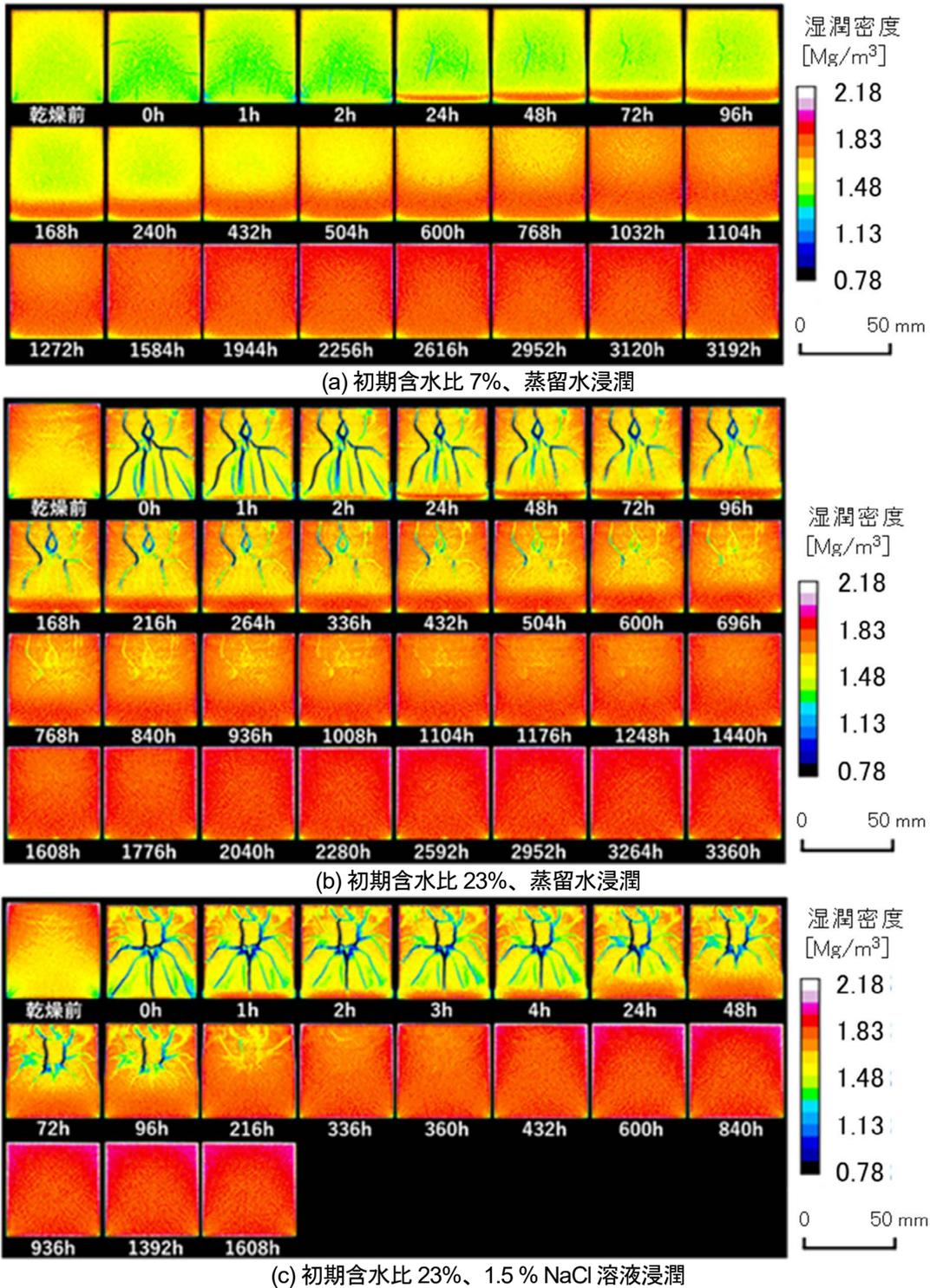


図 3-46 X線 CT を活用した緩衝材試料の湿潤に関する室内試験結果<sup>89)</sup>

(iii) 解析的検討

高温条件下で発生し得る緩衝材の特性変化のうちスメクタイトのイライト化について、100°C以上の一定の温度が1万年間継続すると仮定した場合のイライト化割合の時間変化を計算した<sup>96), 109)</sup>。計算は Huang et al.(1993)<sup>135)</sup>の式(式 3-2)を基本とし、反応の活性化エネルギーは Wersin et al.(2007)<sup>136)</sup>で報告されている範囲のうちの最小値である 25 kcal/mol をそれぞれ用い、カリウムイオ

ン (K<sup>+</sup>) 濃度は幌延の深度 350 m における地下水と同程度である 75 mg/L とした。また、より現実的な温度履歴として、包括的技術報告に記載されている緩衝材内部の温度が 100°C を超える場合の温度履歴 (深成岩類中に横向き PEM 方式で廃棄体を定置し、25 年後に緩衝材内部で最高温度 104.5°C に到達、その後減熱<sup>41)</sup>) を適用した場合、イライト化反応のメカニズムや速度式が異なる複数の反応式<sup>137), 138)</sup>を適用した場合ならびに反応に関与する地下水中のイオン濃度を変化させた場合についても考慮した<sup>96)</sup>。

$$-\frac{dS}{dt} = A \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \cdot [K^+] \cdot S^2 \quad \text{式 3-2}$$

ここで、 $S$ : イライト化せずに残ったスメクタイトの割合 (スメクタイト残存率)、 $t$ : 時間 (year)、 $A$ : 頻度係数、 $Ea$ : 活性化エネルギー (cal/mol)、 $R$ : 気体定数 (cal/(K · mol))、 $T$ : 温度 (K)、 $[K^+]$ : K<sup>+</sup>の濃度 (mol/L)。 $A$  は報告値 ( $2.5481 \times 10^{12}$  L/(year · mol)<sup>135)</sup>) を、 $Ea$  は保守的な観点から、報告値の中でより低い 25 kcal/mol<sup>139)</sup>を用いた。 $[K^+]$ は幌延の深度 350 m 地下水の値を用いた。

幌延の深度 350 m における地下水と同程度の K<sup>+</sup>濃度を想定して、式 3-2 にもとづきスメクタイトのイライト化割合を計算した (図 3-47)。継続的に K<sup>+</sup>が供給される条件において、140°C の温度が 1000 年間継続した場合であっても、イライト化の割合は 20%程度であった。緩衝材の温度が 100°C を超えた状態が 1000 年以上継続するとは考えにくく、より現実的な温度履歴 (図 3-47 「NUMO-SC」; 深成岩類中に横向き PEM 方式で廃棄体を定置した場合<sup>41)</sup>) では、イライト化はほとんど認められなかった。イライト化の進行については考慮するメカニズムの不確かさが大きく、適用する反応式によっては、100°C を超える一定の温度が継続する場合に速やかにイライト化が進むという結果が得られた<sup>96)</sup>。しかしながら、少なくとも包括的技術報告の温度履歴と同様の、100°C を数度上回る状態が数十年程度継続するような場合には、緩衝材中のスメクタイトの顕著なイライト化は生じないことが示唆された。

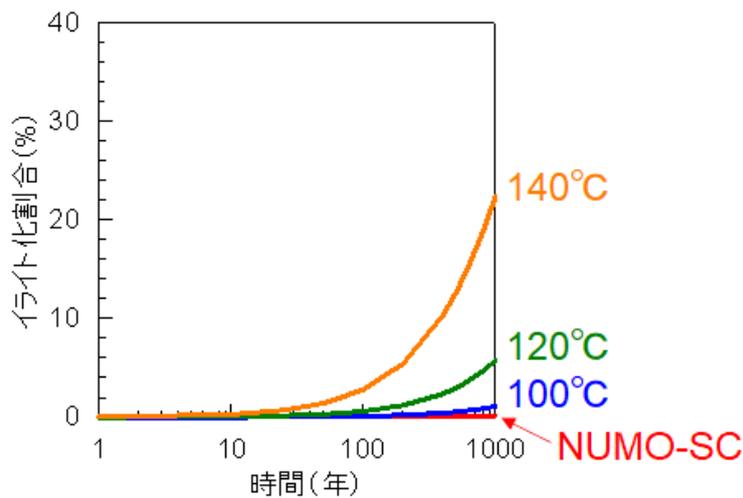


図 3-47 スメクタイトのイライト化割合に関する経時変化の計算結果

「NUMO-SC」は包括的技術報告<sup>41)</sup>の温度履歴に基づいて算出した結果であり、図中に温度が記載されている線は、記載の温度が一定で継続する場合の結果を意味する。

①の原位置試験では、図 3-47に示した計算結果、ならびにオーバーパックの局部腐食が概ね140℃以上で顕在化するという既往の室内試験データ<sup>132)</sup>にもとづき、ヒーターでの加熱温度を140℃に設定した。150℃程度までの温度であれば緩衝材の安全性に係る特性に顕著な変化は生じないという報告もある<sup>136), 140)</sup>。実際の上限温度設定の考え方としては、諸外国も含めたこのような知見を踏まえつつ、本研究で実施したように、実際の処分環境で想定される温度履歴ならびにそれに対するイライト化等の緩衝材変質を、不確かさも考慮しつつ計算・解析することになると考えられる。

### (3) まとめ

高温条件において人工バリア周辺で生じる現象の整理や試験データの整備を目的とした室内試験ならびに原位置試験を実施した。原位置試験の解体調査の結果から、加熱による水分移動や乾燥収縮により緩衝材ブロックの含水比および乾燥密度が変化し、100℃を超える温度での加熱により緩衝材ブロックのヒーター接触部ではひび割れが生じることが確認された。ヒーター接触部近傍の緩衝材では、温度履歴を受けていない緩衝材と比べて一軸圧縮強度が低く透水係数が高い傾向が確認された。一方、室内試験の結果から、高温での加熱により緩衝材にひび割れが生じてもそれらが優先的な水みちとなるような浸潤挙動は確認されず、また生じたひび割れは、蒸留水と塩水を浸潤させた場合のいずれにおいても閉塞することが確認された。これらにより、実際の岩盤中で、短期的に100℃を超えた場合に緩衝材に生じる変質や人工バリアおよびその周辺に発生する現象を把握することができた。さらに、人工バリア周辺における上限温度設定の考え方の整備としては比較的長期間で緩衝材特性に影響を及ぼし得ると考えられるスメクタイトのイライト化に関して解析的検討を行い、緩衝材に許容される上限温度について、地下水水質などの実際のサイト条件を考慮して見積もることができた。この方法により見積もられた上限温度を、上記の原位置試験の温度設定に反映するとともに、より現実的な温度履歴や反応速度式などの不確かさの影響についても把握することができた。以上の成果は、人工バリアシステムの温度に関する安全裕度や上限温度の検証・設定に資するものと考えられる。

## 4. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

### 4.1. 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

#### 4.1.1. 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

##### (1) 目的と実施概要

岩盤中には大小様々な断層が存在するが、小規模なものいくつかは処分場に取り込まざるを得ない可能性がある。それらの断層が地震や隆起などの地殻変動の影響を受けた場合に、その透水性がどの程度まで上昇し得るかを検討しておく必要がある。また、断層の透水性は断層の変形様式に大きく依存する。脆性的な変形が起こると断層の透水性は有意に上昇しやすいが、延性的な変形の場合は透水性が上昇しにくい。生じる変形が脆性的か延性的かは、変形時の岩石強度、応力などに依存する。

本研究では、地殻変動に対する緩衝能力が潜在的に高いことから堆積岩に重点を置き、断層の変形様式を支配する岩石の強度・応力状態を計測でき、かつマッピング（空間的な分布図を示すこと）が可能なパラメータで指標化することを試みる。そのようなパラメータと断層の透水性の潜在的な上限を関係付けることができれば処分場閉鎖後の断層の透水性について現実的な状態設定が可能となる。

そこで、本研究項目では、地殻変動が地層の透水性に与える影響を把握するための手法整備を目的として、DI と水圧擾乱試験を用いた透水性評価手法の整備を行った。また、水圧擾乱試験を用いた断層の力学的な安定性の評価手法の整備についても併せて行った。

##### (2) 実施内容と成果

DI と水圧擾乱試験を用いた透水性評価手法の整備のために、岩盤の透水性を評価する上で重要となる断層の局所的な透水性と水理学的連結性を検討した。ここで言う「局所的な透水性」とは、通常の単孔試験で評価が可能な孔近傍の限られた範囲の透水性を意味する。断層の局所的な透水性について、まず、既存の DI の経験式<sup>141)</sup>を再検討した。これまで、DI と主要な水みちとなる断層の局所的な透水性は相関することが国内外の 6 つの地層のデータから経験的に分かっていたが<sup>141)</sup> (図 4-1 の○)、この相関関係をより正確に表す経験式を構築するために、Kuang and Jiao の近似法<sup>142)</sup>を適用した。これにより、図 4-1 に示すような経験式 (図 4-1 の近似曲線) が新たに得られた。この近似法により各地層で得られる経験式は互いによく一致し (図 4-2 上図)、深度と局所的な透水性の関係と比べるとその一致の度合いの高さが分かる (図 4-2)。

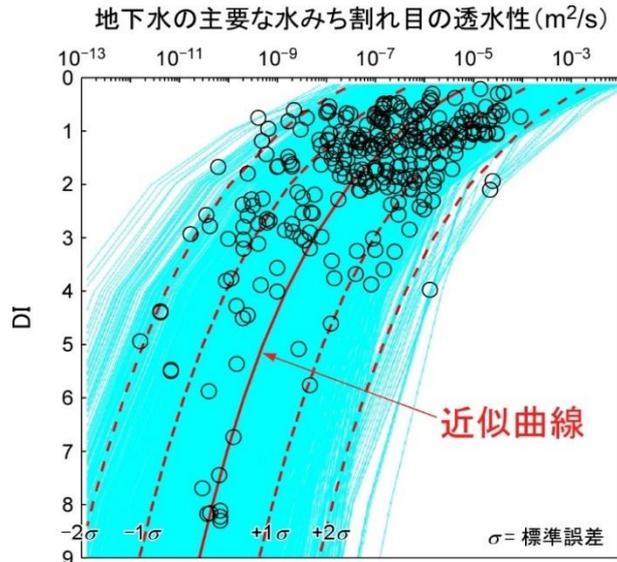


図 4-1 国内外の 6 つの地層における地下水の主要な水みち割れ目の局所的な透水性と DI の関係 <sup>76)</sup>  
 6 つの地層は、幌延、スイス、スウェーデン、フィンランド、イギリスの地層を指す。赤色曲線/破線はデータ（図中の○）から Kuang and Jiao の近似法 <sup>142)</sup>を適用することにより得られる近似曲線を示し、水色の曲線は図 4-3 に示すモデルに基づくシミュレーション結果を示す。

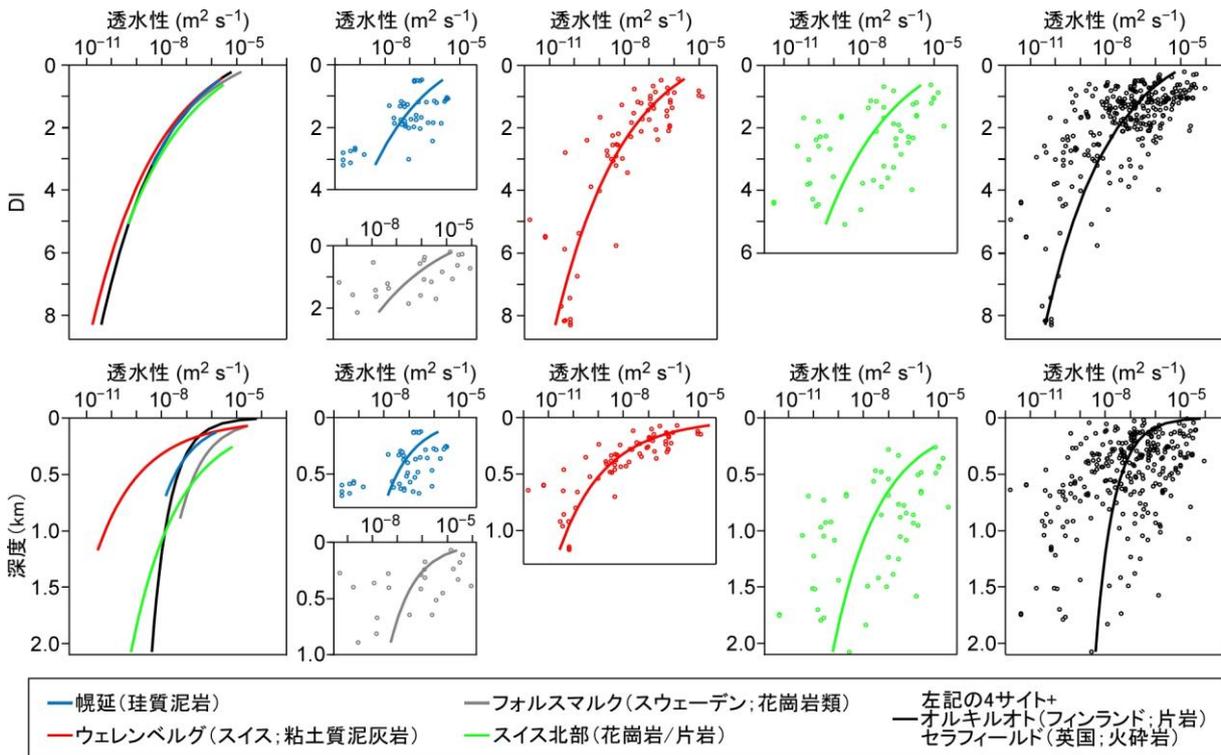


図 4-2 各地層で導出される主要な水みち割れ目の局所的な透水性と DI あるいは深度の関係とその比較 <sup>83)</sup>

曲線はデータ（図中の小さな○）から Kuang and Jiao の近似法 <sup>142)</sup>を適用することにより得られる近似曲線を示す。

図 4-1 の近似曲線の物理的な意味を理解するためにシミュレーションを行った。シミュレーションでは、断層は割れ目の集合体であると水理的に捉えることができ、断層の局所的な透水性は断層を構成する割れ目の中の最も透水性の高い割れ目に支配されると仮定した <sup>76)</sup>。シミュレーションの結

果、図 4-1 の近似曲線が表す断層の局所的な透水性と DI の関係は、凹凸のある割れ目内の隙間の開閉現象（図 4-3）で説明できることが分かった（図 4-1 の近似曲線のカーブの形が図 4-3 に基づくシミュレーション（図 4-1 の水色線）により、よく再現できている）<sup>76)</sup>。また、断層の局所的な透水性が図 4-1 の近似曲線の値であるために必要な条件をシミュレーションで求めた結果、0.05 mm～2.00 mm 程度のわずかな割れ目のずれにより割れ目のかみ合わせが悪くなることによって、割れ目内の隙間が増える（図 4-4 上図）必要があることが分かった（図 4-5）<sup>76)</sup>。一般に、数百 μm～数 mm 程度までのずれは割れ目内に多くの隙間をもたらすが、それ以上割れ目がずれてもかみ合わせの悪さは変わらず、割れ目内の隙間があまり増えない（図 4-4 下図）。これらのことから、図 4-1 の近似曲線が示す透水性の値（誤差範囲を含む）は、ある DI 条件において、割れ目のかみ合わせが悪くなることにより増加し得る透水性の上限値を表していると理解することができた<sup>76)</sup>。

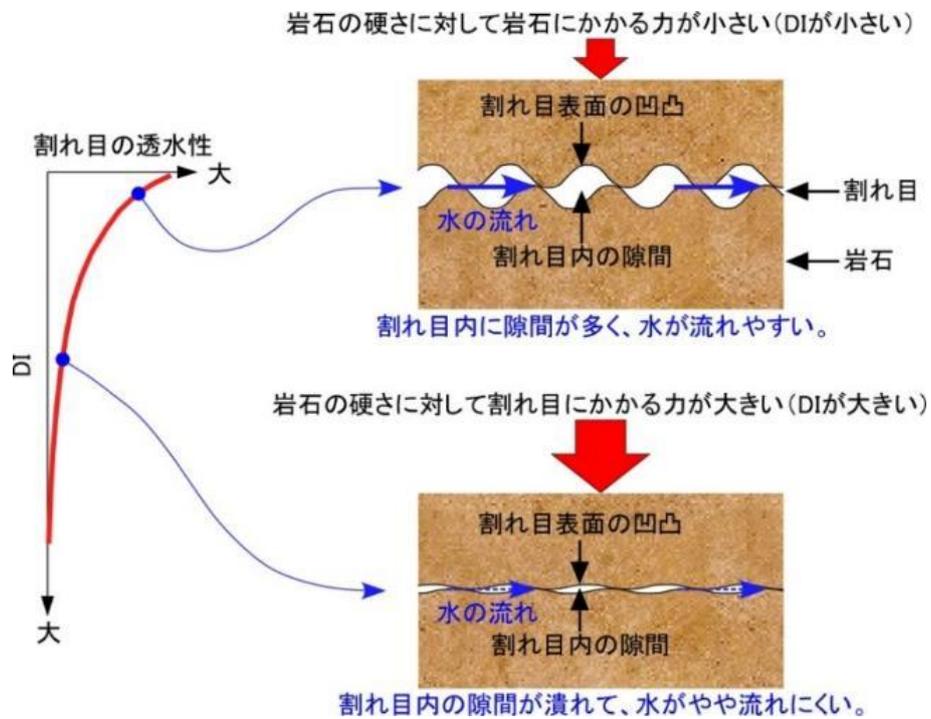


図 4-3 DI、割れ目内の隙間の開閉および割れ目の透水性の関係（割れ目のずれが一定の場合）

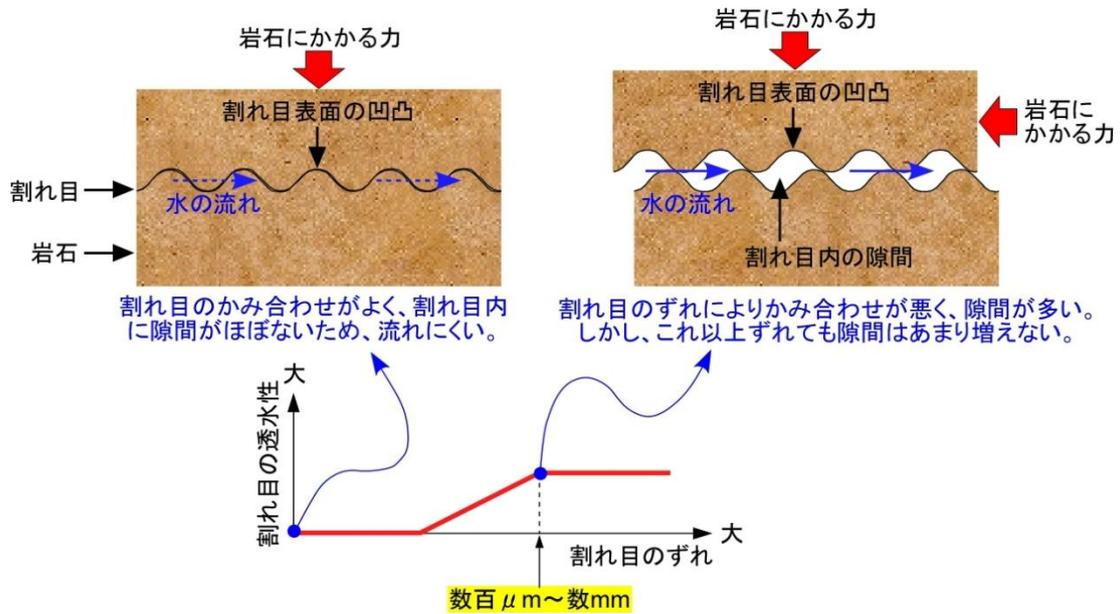


図 4-4 割れ目のずれ、かみ合わせおよび透水性の関係 (DI が一定の場合)

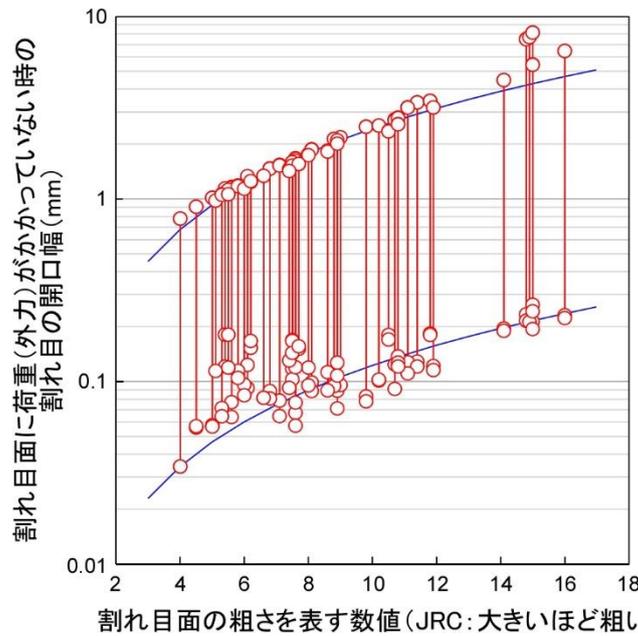


図 4-5 割れ目のずれに伴う開口幅の変化に関するシミュレーション<sup>76)</sup>

割れ目の透水性が図 4-1 に示す地下水の主要な水みち割れ目の透水性に達するためには、本図に示す縦軸の値が図中の 2 本の青曲線で挟まれた範囲に達する必要がある<sup>76)</sup>。Bandis の実験データ<sup>143)</sup>を用いて、様々な割れ目面の粗さを持つ割れ目がずれた場合の縦軸の値の変化をシミュレーションした結果、0.05 mm ~ 2.00 mm ずれると青曲線で挟まれた範囲に縦軸の値が達することが分かった (図中の上の赤丸が 2.00 mm ずれた場合、下の赤丸が 0.05 mm ずれた場合を示す)。

図 4-1 に示すような断層の局所的な透水性と DI の関係が適用できるケースを検討するために表 4-1 のような整理を行った。堆積岩中に存在する断層の局所的な透水性は、岩石中に含まれている粘土鉱物の膨潤による断層の自己閉塞、鉱物充填による断層の自己閉塞および断層に充填された鉱物の溶解に影響を受ける<sup>76), 141)</sup>。これらの自己閉塞や溶解の情報に基づいて堆積岩を I~IV の 4 つに分類した (表 4-1)。図 4-6 に示す様に、断層の自己閉塞や充填鉱物の溶解がほとんど認められない分類 I は図

4-1 に示す断層の局所的な透水性と DI の関係が適用できるが、割れ目の自己閉塞や充填鉱物の溶解が多く認められる分類 II~IV は適用が難しいことが分かる。

表 4-1 断層の閉塞/充填状況に応じた堆積岩の分類と断層の局所的な透水性の上限と DI の相関性 <sup>76), 141)</sup>

分類	粘土鉱物の膨潤による断層の自己閉塞	鉱物充填による断層の自己閉塞	断層充填鉱物の溶解	地層例	断層の局所的な透水性の上限と DI との相関性
I	限定的	限定的	限定的	稚内層 <sup>a</sup> (珪質泥岩/新第三紀堆積岩類; 幌延)、声間層 <sup>b</sup> (珪藻質泥岩/新第三紀堆積岩類; 幌延)、パルfris層 <sup>c</sup> (石灰質泥岩/先新第三紀堆積岩類; スイスウェレンベルグ)	強い <sup>g</sup>
II			強い	セントビーズ砂岩層 <sup>d</sup> (砂岩/先新第三紀堆積岩類; 英セラフィールド)	
III	強い	—	—	トアキアーンドメリアン頁岩層 <sup>e</sup> (石灰質泥岩/先新第三紀堆積岩類; 仏トゥルヌミール)	弱い
IV				—	

a : 参考文献 47), 48), 106), 76), 144), 145), 146)に基づく

b : 参考文献 146), 147)に基づく

c : 参考文献 76), 148), 149), 150)に基づく

d : 参考文献 141), 151), 152), 153)に基づく

e : 参考文献 154), 155), 156), 157), 158), 159), 160), 161)に基づく

f : 参考文献 157), 159), 162), 163), 164), 165)に基づく

g : 断層の透水性の上限と DI が一定の関係で相関し、その関係を Barton-Bandis のモデル <sup>105)</sup>で再現可能

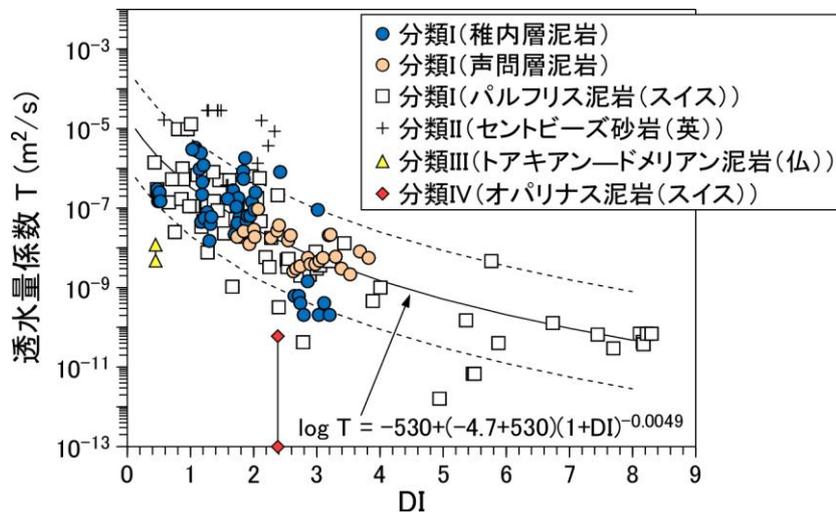


図 4-6 断層の局所的な透水性の上限と DI の関係 <sup>76), 147)</sup>

図中の黒色の曲線は分類 I の堆積岩に適用可能な DI の経験式を示しており、実線が推定値、破線がその誤差 (常用対数で±1.22) を表す。分類 II~IV の堆積岩は経験式の推定値から大きく外れる。

表 4-1 の分類 I の堆積岩において、断層の局所的な透水性の上限と DI の相関性の高さを実際に水圧擾乱試験で確かめることも可能である。分類 I において、DI に対する局所的な透水性が既に図 4-1 の近似曲線の値の誤差範囲に達している断層は、断層がずれてもそれ以上、透水性が上昇しにくく (図 4-4)、DI が変化する場合のみ、それに応じた透水性の変化 (図 4-3) が生じることが予想され

る。稚内層において実施した水圧擾乱試験の結果に基づくと、局所的な透水性が既に近似曲線の誤差範囲に達している断層がずれても DI の減少量に応じた分の透水性の上昇しか発生しないことが確認できる（図 4-7）。

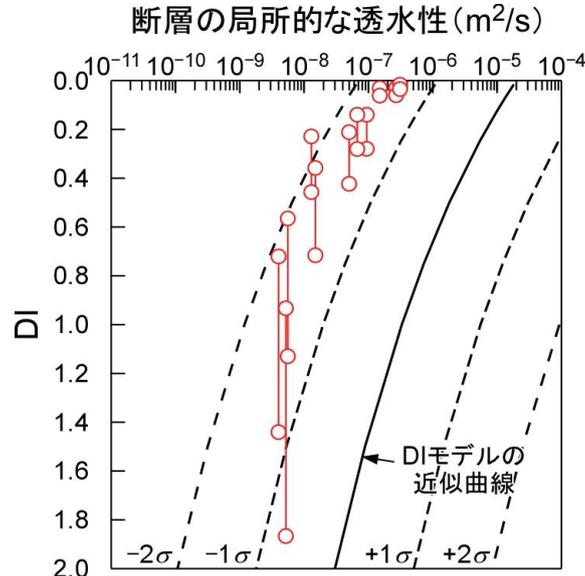


図 4-7 稚内層で実施した水圧擾乱試験の結果<sup>76)</sup>

断層をずらす前から DI モデルの近似曲線（経験式）の誤差 ( $\pm 2\sigma$ ) の範囲に断層の局所的な透水性が達しており、試験中、DI の低下とともに透水性が近似曲線に沿って増加（試験中の断層のずれ幅は数 cm に到達）。

断層の水理学的連結性について、水理学的連結性の指標となる水みちのつながり方の次元と DI の関係を理解するための数値シミュレーションと理論的な計算を行った。水みちのつながり方の次元は水みちのつながりの多さを表しており、値が大きいほど、断層の水理学的連結性が高いことを意味する<sup>83)</sup>。数値シミュレーションでは、断層内の最も透水性の高い割れ目を仮定した一枚の円盤状の割れ目をコンピュータ上で作成し、割れ目内の流路面積の割合を変化させて仮定の透水試験を行い、割れ目内の流路面積の変化が水みちのつながり方の次元に与える影響を調べた。その結果、割れ目内の主要な流路面積の割合が 0.2 未満の場合、水みちのつながり方の次元が 1.5 以下になることが分かった（図 4-8）。また、割れ目内の主要な流路面積の割合と DI の関係を割れ目内の隙間の開閉現象と関連付けて理論的な計算を行った結果、DI が 2 より大きいと割れ目内の隙間の閉口現象により主要な流路面積の割合が 0.2 未満になることが分かった（図 4-9）。この結果は、稚内層で観測される関係、すなわち DI が 2 より大きくなると断層内の水みちのつながり方の次元が概ね 1.5 以下になる関係（図 4-10）と整合するものであった。このことは、稚内層で観測される水みちのつながり方の次元と DI の関係が DI の変化に伴う割れ目内の隙間の開閉（流路面積の変化）により説明できることを意味する<sup>83)</sup>。

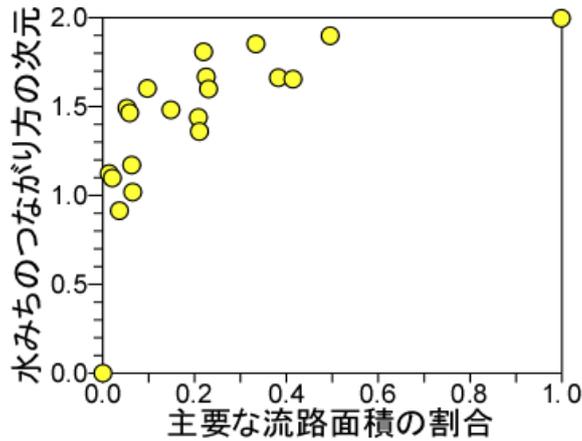


図 4-8 仮想の割れ目の透水試験により得られた割れ目内の水みちのつながり方の次元と割れ目内の主要な流路面積の割合の関係<sup>83)</sup>

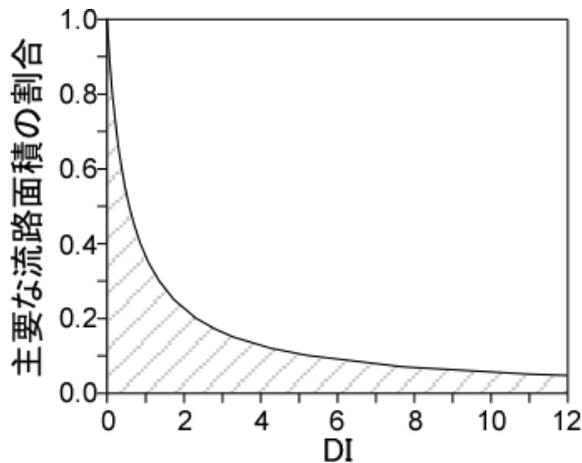


図 4-9 割れ目内の隙間の開閉現象に関する理論的な計算により導出される割れ目内の主要な流路面積の割合と DI の関係<sup>83)</sup>

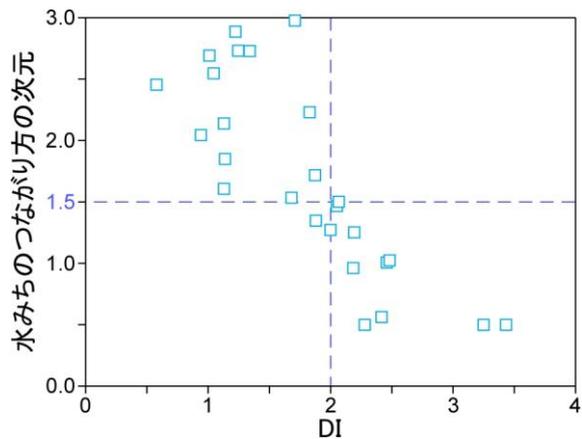


図 4-10 透水試験で観測される稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元と DI の関係<sup>83)</sup>

DI と断層の局所的な透水性および水理学的連結性の関係が分かれば、岩盤の透水性を支配する断層の代表的な透水性を DI から Matheron の式による計算で見積もることができる<sup>82)</sup>。この時、DI と断層の局所的な透水性の関係について、調査対象の地層の原位置試験データに基づく関係を用いることが望ましいが、原位置試験データが不足する場合は、既存の DI の経験式を用いることも可能であ

る。図 4-11(a)の曲線は稚内層で得られた原位置試験データに基づく DI と断層の局所的な透水性の関係を用いて理論的な計算により断層の代表的な透水性を見積もった例である。同曲線の DI に対する透水性の変化傾向は、別のデータから推定される地層の代表的な透水性の変化傾向とよく一致することが分かる (図 4-11(a))。図 4-11(b)は既存の DI の経験式を用いて断層の代表的な透水性を見積もった例である。同曲線の DI に対する透水性の変化傾向も、別のデータから推定される地層の代表的な透水性の変化傾向と大きく異なることが分かる (図 4-11(b))。このことから、断層の代表的な透水性や、隆起侵食などの地殻変動に伴う透水性の変化量は、図 4-11 の曲線で表されるような透水性と DI の関係を用いて推定できることが分かった<sup>76),82),83)</sup>。推定した断層の代表的な透水性は、地下水の水圧や水質、年代、あるいは坑道掘削時における坑道周辺の水圧の変化により検証することも可能である<sup>74), 75), 79), 81), 149), 166), 167), 168)</sup>。

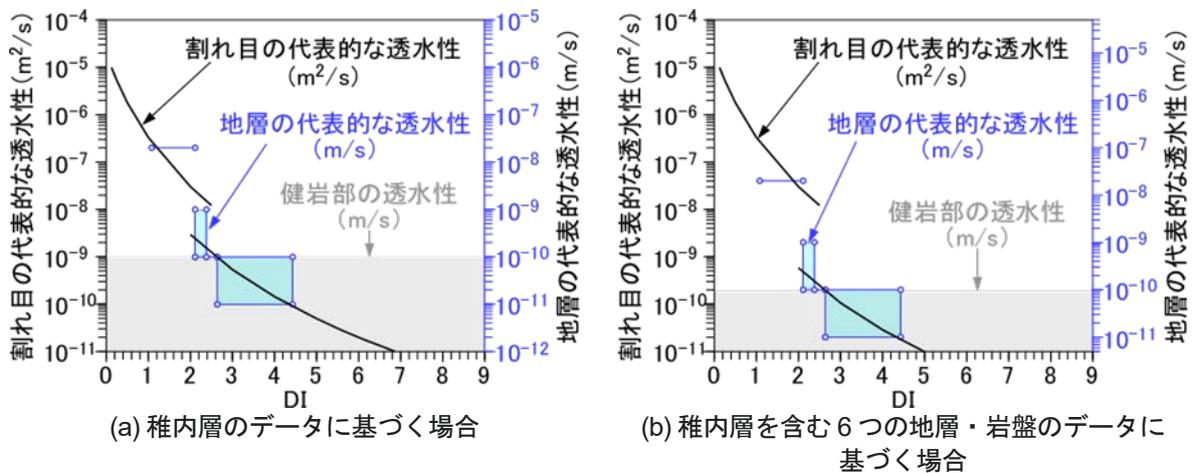


図 4-11 稚内層中の断層の代表的な透水性と DI の関係<sup>76), 82), 83)</sup>

断層の代表的な透水性を表す曲線は、断層の局所的な透水性と DI の関係<sup>76)</sup>、断層の水理的連結性と DI の関係<sup>81), 83)</sup>、断層の局所的な透水性と水理的連結性および代表的な透水性の関係<sup>82)</sup>から導出している。同曲線の DI に対する透水性の変化傾向は、別のデータから推定される実際の地層の代表的な透水性<sup>82), 150)</sup>の変化傾向とよく一致することから、同曲線の信頼性は高いと考えられる。DI が 2 よりも大きくなると、地層の透水性は健岩部相当の透水性 ( $10^{-11}$  m/s 以下) まで低下する。

図 4-11 の曲線に示すような断層の代表的な透水性の推定が可能なケースを検討するために表 4-2 のような整理を行った。堆積岩中に存在する断層の代表的な透水性は、断層の局所的な透水性と水理的連結性に依存し、断層の局所的な透水性は表 4-1 と同じ 3 つの要素に、断層の水理的連結性は健岩部の透水性に影響を受ける<sup>76), 82), 83)</sup>。これらの 4 つの要素に基づいて、堆積岩を I-a~IV の 5 つに分類した (表 4-2)。図 4-11 の曲線に示すような断層の代表的な透水性の推定は、分類 I-a の場合に可能であると考えられる。

表 4-2 に示すとおり、分類 I-a の堆積岩は、断層の局所的な透水性の上限と DI の相関性および断層の水理的連結性と DI の相関性が高いことから、図 4-11 の曲線に示すような断層の代表的な透水性の推定が可能と考えられるが、実際に断層の局所的な透水性の上限と DI の相関性の高さを水圧擾乱試験により検証できることは前述したとおりである (図 4-7)。分類 I-a の断層の水理的連結性と DI の相関性の高さを水圧擾乱試験により検証することも可能であり、これは水圧擾乱試験中の断層内の水みちのつながり方の次元と DI の変化を調べることで分かる。稚内層中の断層の水圧擾乱試験データを調べた結果、水みちのつながり方の次元が DI と連動して変化し、その両者の変化が透水試験に

より地層中に広く認められる水みちのつながり方の次元と DI の関係と良く一致することが分かった (図 4-12 の水圧擾乱試験 B)。DI が変化しない状態で断層のずれが水みちのつながり方の次元に与える影響についても調べた結果 (図 4-12 の水圧擾乱試験 A)、断層のずれは水みちのつながり方の次元にほとんど影響を与えないことが確認できた (図 4-13)。これらのことから、地殻変動によって断層にかかる力が変化したり断層がずれたりしても、断層の水理学的連結性の変化は常に DI との関係により推定することができ、その関係は水圧擾乱試験により検証できることが確認できた<sup>83), 170)</sup>。

表 4-2 断層の閉塞/充填状況と岩石の透水性に応じた堆積岩の分類と断層の代表的な透水性と DI との相関性<sup>76), 82), 83), 141)</sup>

分類	粘土鉱物の膨潤による断層の自己閉塞	鉱物充填による断層の自己閉塞	断層充填鉱物の溶解	岩石 (健岩部) の透水性	地層例	断層の局所的な透水性の上限と DI との相関性	断層の水理学的連結性と DI との相関性	断層の代表的な透水性と DI の相関性
I-a	限定的	限定的	限定的	小	稚内層 <sup>b</sup> (珪質泥岩/新第三紀堆積岩類; 幌延)、 パルfris層 <sup>c</sup> (石灰質泥岩/先新第三紀堆積岩類; スイスウェレンベルグ)	強い <sup>h</sup>	強い <sup>i</sup>	強い
I-b				大 <sup>a</sup>	声間層 <sup>d</sup> (珪藻質泥岩/新第三紀堆積岩類; 幌延)			
II			強い	セントビーズ砂岩層 <sup>e</sup> (砂岩/先新第三紀堆積岩類; 英セラフィールド)	弱い	弱い	弱い	
III			強い	トアキアノドメリアン頁岩層 <sup>f</sup> (石灰質泥岩/先新第三紀堆積岩類; 仏トゥルヌミール)				
IV	強い	—	—	オパリナス粘土層 <sup>g</sup> (粘土質泥岩/先新第三紀堆積岩類; スイスモンテリ)				

a : 原位置透水試験において割れ目を含む区間と健岩部の透水性の差が 3 桁未満<sup>169)</sup>

b : 参考文献 74), 75), 76), 79), 82), 81), 83), 146), 166), 170) に基づく

c : 参考文献 76), 79), 148), 149), 150), 168), 170), 171) に基づく

d : 参考文献 79), 80), 81), 82), 83), 146), 147), 166), 169), 172), 173), 174) に基づく

e : 参考文献 141), 151), 152), 153), 175), 176) に基づく

f : 参考文献 74), 75), 154), 155), 156), 157), 160), 161), 177), 178) に基づく

g : 参考文献 157), 159), 162), 163), 164), 165), 179), 180), 181) に基づく

h : 断層の透水性の上限と DI が一定の関係で相関し、その関係を Barton-Bandis のモデル<sup>105)</sup>で再現可能

i : DI < 2.0 の領域で水理学的連結性が高く (水みちのつながり方の次元が 1.5 以上、動水勾配が相対的に小さい)、DI > 2.0 の領域で水理学的連結性が低い (水みちのつながり方の次元が 1.5 未満、動水勾配が相対的に大きい、若い外部由来の地下水がない)<sup>79), 83)</sup>

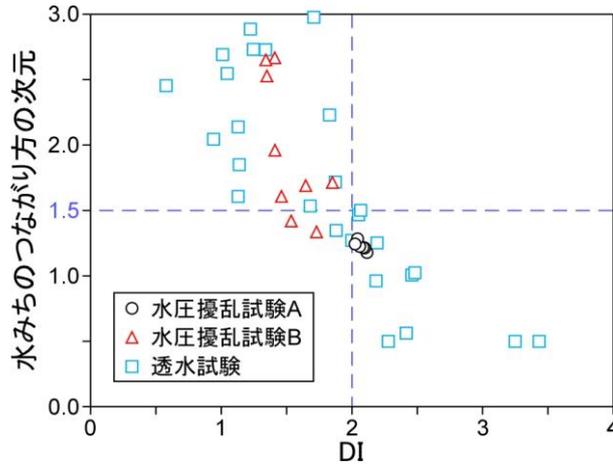


図 4-12 水圧擾乱試験および透水試験で認められた稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元と DI の関係<sup>83)</sup>

水圧擾乱試験 A と B はそれぞれ断層岩の厚さが数 cm および数 mm 以下の断層の試験結果を、透水試験は様々な規模の断層の試験結果を示している。

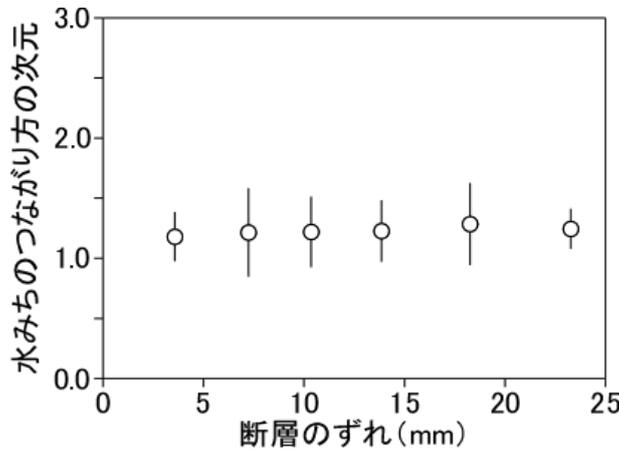


図 4-13 水圧擾乱試験で認められた稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元と断層のずれの関係<sup>83)</sup>

図 4-12 の水圧擾乱試験 A の結果を示している。

水圧擾乱試験を用いた断層の力学的な安定性の評価手法の整備を目的として、水圧擾乱試験の結果の解析を行った。その結果、断層の力学的な安定性を表す指標のひとつであるせん断剛性（せん断変形のしにくさ）が比較的規模の大きな断層（断層岩の厚さが数 cm：図 4-14 の断層 A）では  $10^{-1}$  MPa/mm 以下の低い値が算出されるのに対し、小規模な断層（断層岩の厚さが数 mm 以下：図 4-14 の断層 B）では  $10^0$  MPa/mm 以上の高い値が算出された<sup>182)</sup>（図 4-15 および図 4-16）。断層 A のせん断剛性は既往の室内実験で示される断層や割れ目のせん断剛性（ $10^{-3}$  MPa/mm～ $10^{-1}$  MPa/mm）と同程度で、断層 B は断層内の一部が固結した状態にあったことが確認されている。したがって、いずれのせん断剛性も妥当な値と考えられる。これらのことから、水圧擾乱試験により断層のせん断剛性を原位置で適切に評価できることが確認できた<sup>182)</sup>。

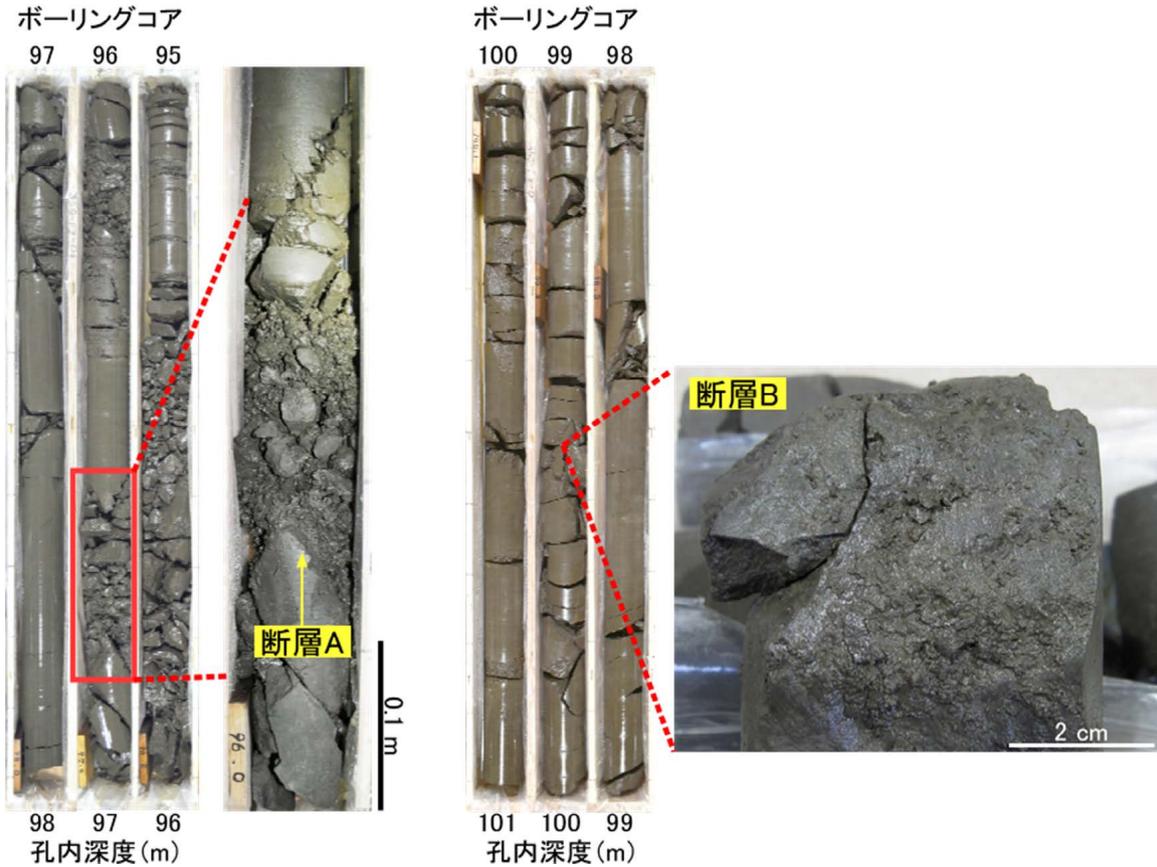


図 4-14 水圧擾乱試験を行った断層<sup>182)</sup>

断層 A はダメージゾーン幅が数十 cm 程度で、厚さ数 cm の断層角礫を伴います。断層 B はダメージゾーン幅が数 cm 程度で、厚さ数 mm 以下の断層角礫を伴う。左図と右図のボーリングコアはそれぞれ図 2-38 の 350-FZ-01 孔および 350-FZ-02 孔から採取したものである。

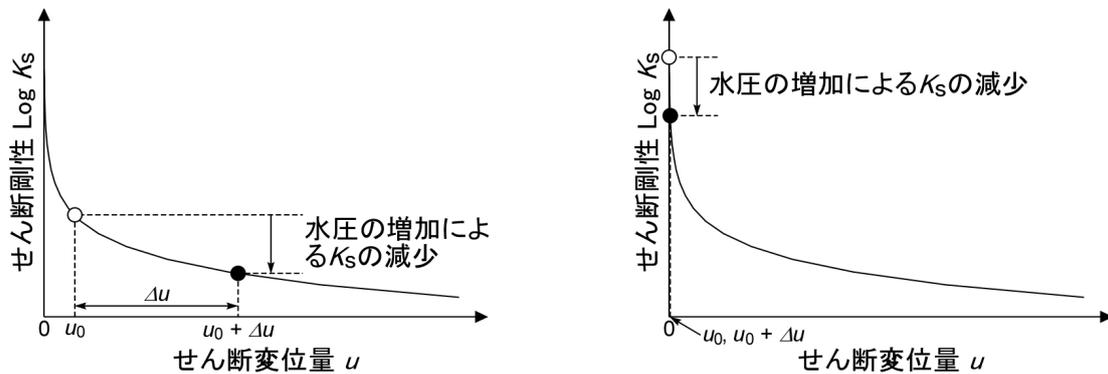


図 4-15 割れ目のせん断剛性と水圧の関係<sup>182)</sup>

せん断剛性が小さいと水圧増加に伴って発生する弾性的なせん断変位は大きい(左図)、せん断剛性が大きいと水圧増加に伴って発生する弾性的なせん断変位は非常に小さい(右図)。

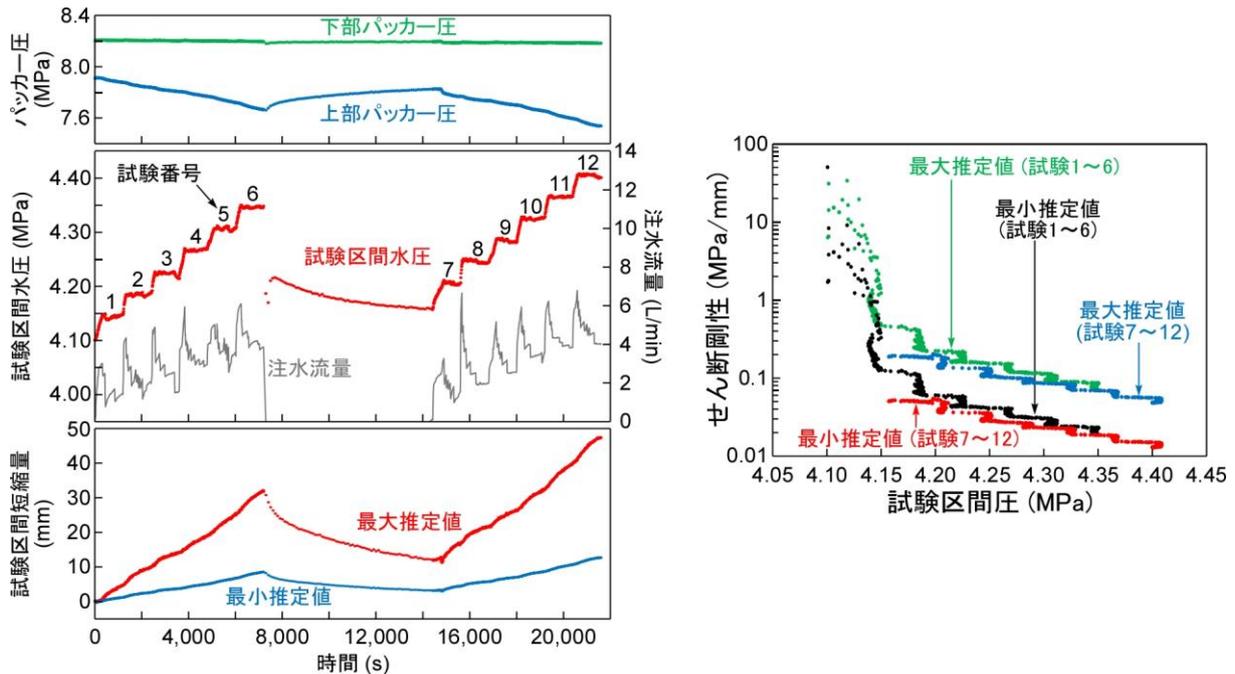


図 4-16 せん断剛性の推定結果の例<sup>182)</sup>

左図は断層 A を対象に実施した水圧擾乱試験で得られた計測値を、右図は得られた計測値から推定される断層 A のせん断剛性を示す。

(3) まとめ

2020 年度から 5 年間にわたり、①DI と水圧擾乱試験を用いた透水性評価手法の整備および②水圧擾乱試験を用いた断層の力学的な安定性の評価手法の整備を目的に、断層の水圧擾乱試験などを行った。その結果、①については、稚内層と類似する地層（表 4-2 の分類 I-a）の場合、断層や割れ目の代表的な透水性と DI の関係（図 4-11 の曲線）や水圧擾乱試験を適用することにより、地殻変動の影響を考慮した地層の長期的な透水性を評価できることが分かった<sup>76), 82), 83), 145), 170)</sup>。②については、断層の力学的な安定性を表す指標のひとつであるせん断剛性を水圧擾乱試験により原位置で適切に評価できることが確認できた<sup>182)</sup>。これらの成果は、実際の地質環境を対象に、地殻変動の影響を考慮した地層の長期的な透水性や断層の力学的な安定性を、原位置で評価する手法に反映可能と考えられる。今後は、坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化を実施する中で、得られた成果を反映して、ピット周辺の割れ目からの湧水量や EDZ の広がりなどの調査評価手法の整理を進める予定である。

4.1.2. 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化

(1) 目的と実施概要

処分事業における処分場選定では、地質環境に求められる要件のひとつとして、「放射性物質の移行を抑制する緩慢な地下水流動の水理場であること」が挙げられており<sup>41)</sup>、この観点から、地下水の流れが非常に遅い領域を調査・解析・評価する手法の確立が必要である。幌延地域に分布する新第三期堆積岩類からなる地層の地下深部には、化石海水と呼ばれる古い海水を起源とし、非常に古い年代を示す塩水系地下水が分布する領域が存在する<sup>183)</sup>。このような領域は、淡水である地表水が割れ目に沿って流れた履歴を有する地下浅部の領域<sup>74), 75)</sup>と比べて、地下水の流れが非常に遅いと考えられ、幌延地域においては、地下水の塩水の濃淡が地下水の流動性を推定するための基礎情報となる。

本研究では、この化石海水を地下水の流れが非常に遅い領域を示す指標として活用することを念頭に、幌延地域を対象として、電磁探査とボーリング調査を組み合わせた化石海水領域の三次元分布を把握する調査手法の実証、化石海水の水質形成機構および地下水の流れが非常に遅いことを示す指標としての妥当性の検証を目的とした数値解析ならびに広域スケール（十数 km×十数 km）を対象とした地下水移行時間評価における水理学的有効間隙率の与え方の妥当性の検証を実施した。

## (2) 実施内容と成果

電磁探査とボーリング調査を組み合わせた化石海水領域の三次元分布を把握する調査手法の実証では、幌延地域の地質環境を対象に、電磁探査とボーリング調査の結果を基に、地下水の流れが非常に遅い領域の三次元分布を推定する手順を検討した（図 4-17）<sup>184, 185</sup>。地下水の塩濃度は、地下の比抵抗と相関することが知られており<sup>186</sup>、塩濃度が高い場合は比抵抗が低く、塩濃度が低い場合は比抵抗が高くなる。このため、地下の比抵抗分布を推定できる電磁探査は、広範囲の地下空間における塩水分布の調査に有効な手法である。さらに、実際の塩水の濃淡については、ボーリング調査によって地下水を直接採取し、水質分析によって確認する必要がある。

調査手順については、地層処分事業において想定される段階的なサイト調査を踏まえ、数十 km 四方の調査範囲から調査を開始し、その結果に基づいて数 km 四方に調査範囲を絞り込み、その範囲内の低流動域の三次元分布を推定する手順とした。図 4-17 の手順②に示す数十 km 四方の調査では、空中電磁探査により調査範囲全域の三次元比抵抗分布を取得する。幌延地域では、幌延深地層研究計画の第 1 段階において、数十 km 四方を対象とした空中電磁探査が実施されている。この探査結果によれば、探査深度は約 150 m と比較的浅いものの、褶曲構造が発達する地表付近において、上位の地層である勇知層や更別層が分布する向斜付近よりも、下位の地層である声間層や稚内層が分布する背斜付近の方が比抵抗が低い様子が捉えられている<sup>3)</sup>。さらに手順②では、二次元測線における MT（magnetotelluric）法電磁探査によって、より深部の比抵抗分布（二次元断面）を取得する。既往の電磁探査<sup>3), 187), 188)</sup>のデータを用い、日本海海岸付近から幌延深地層研究センター付近までの東西約 20 km を 1 本の測線として、二次元比抵抗分布を推定した。その結果、空中電磁探査の結果と同様の傾向が見られ、声間層や稚内層が分布する背斜付近の一部の領域において、より浅い深度に塩水が分布する可能性が示された。この結果に基づき、幌延深地層研究センター周辺の数 km 四方の領域を、より浅い領域に塩水が分布する可能性が高い調査範囲として絞り込むことが可能である（図 4-18）<sup>97), 184)</sup>。

図 4-17 の手順③および④に示す数 km 四方の調査では、AMT（audio-frequency magnetotelluric）法および MT 法を併用した高密度電磁探査<sup>13), 184)</sup>により三次元比抵抗分布を推定する。さらに、ボーリング調査による地下水の採水と水質分析によって、地下水の塩水の濃淡や起源を評価するための水質データを取得する。2020 年度には、幌延深地層研究センターを含む約 3 km 四方を調査範囲として高密度電磁探査を実施し、三次元比抵抗分布を取得した（図 4-19 および図 4-20）。その結果、調査範囲内の比抵抗の大半は  $0.1 \Omega \cdot \text{m} \sim 30 \Omega \cdot \text{m}$  の範囲にあり、その中で比較的高い比抵抗を示す領域の深さは、HDB-6 孔付近を境に南西側が浅く、北東側が深くなっていることが明らかとなり、ここを境に塩水の分布する深度が大きく異なっていると予想された。この予想を検証するため、2021 年度～2022 年度にかけてボーリング調査（HFB-1 孔）を実施した。図 4-19 および図 4-20 に示すように、比抵抗が大きく変化する範囲から調査地点を選定し、比抵抗検層を含む各種検層とともに、深度 500 m まで岩石コアを採取し、その間隙水について塩化物イオン濃度（Cl<sup>-</sup>濃度）および酸素同位体比

( $\delta^{18}\text{O}$ ) を取得した<sup>189)</sup>。比抵抗検層の結果からは、高密度電磁探査により推定された HFB-1 孔付近の比抵抗の深度分布が、精度良く推定できていたことが確認された (図 4-21(a))。また、比抵抗検層においては、地表から深度約 100 m までは比抵抗が急激に約  $3 \Omega \cdot \text{m}$  まで低下し、さらに深度 400 m 以深では約  $2 \Omega \cdot \text{m}$  まで緩やかに低下する傾向が見られた (図 4-21(a))。これに対して  $\text{Cl}^-$  濃度は反比例する形で、地表から深度約 100 m までは約 4000 mg/L まで増加し、さらに深度約 340 m 以深では約 10000 mg/L まで増加した (図 4-21(b))。  $\delta^{18}\text{O}$  も  $\text{Cl}^-$  濃度と整合する変化を示した (図 4-21(c))。  $\delta^{18}\text{O}$  の値が負である場合は地表水が流入した履歴を持つ領域、正である場合は化石海水が分布する領域と解釈し、その解釈を HDB-3 孔、HFB-1 孔、HDB-6 孔および HDB-5 孔の近傍を通る鉛直断面上の比抵抗分布に示した (図 4-19)。既存孔である HDB-3 孔および HDB-5 孔における地表水の影響領域は、それぞれ深度約 100 m 以浅、深度約 400 m 以浅と解釈される。HFB-1 孔においても、地表水の影響領域は深度約 400 m 以浅と解釈されるが、地表から深度の増加に伴い  $\text{Cl}^-$  濃度と  $\delta^{18}\text{O}$  が増加したことから、HFB-1 孔の調査地点が、南西側の深度 100 m 以深に広がる化石海水が分布する領域の縁の付近に位置すると解釈できる (図 4-19)。以上より、高密度電磁探査に基づく予測のとおり、HFB-1 孔付近は塩水が分布する深度が大きく変化する領域に位置していることが明らかとなった。

HFB-1 孔でも深度約 400 m 以浅が地表水の影響域であったが、深度の増加に伴って  $\text{Cl}^-$  濃度と  $\delta^{18}\text{O}$  が上昇した。以上の結果から、高密度電磁探査による予測どおり、HFB-1 孔付近は南西側で深度 100 m 以深に広がる化石海水分布域の縁に位置することが確認された。これにより、AMT・MT 法を併用した高密度電磁探査が、化石海水の分布深度を推定する上で有効であることが示された。

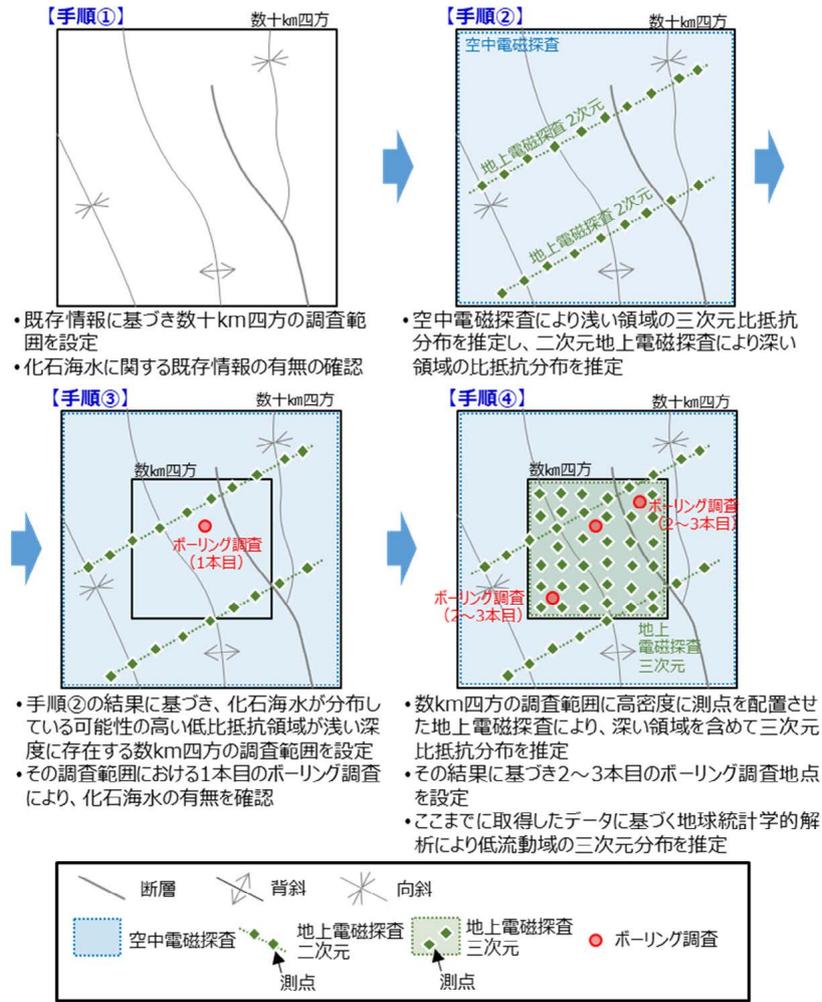


図 4-17 化石海水の三次元分布を推定するための電磁探査およびボーリング調査の手順 <sup>184), 185)</sup>

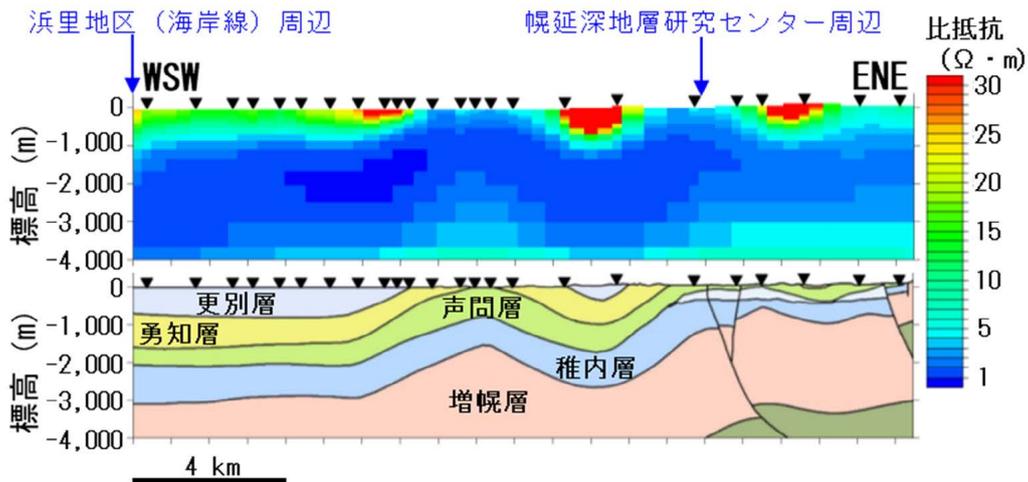


図 4-18 数十 km 四方の調査における二次元測線の MT 法電磁探査の結果

浜里地区と幌延深地層研究センター周辺を通過する西南西-東北東方向の二次元断面における比抵抗分布（上）および地質断面（下）を示している。二次元比抵抗分布の解析には、既存のデータ <sup>187), 188)</sup>を使用した。図中の黒三角は測点の位置を示している。低比抵抗の領域を、地下水の流動が非常に遅い「低流動域」である可能性が高い領域として読み取ることで、声間層や稚内層が地表付近に分布する褶曲構造の背斜周辺を、数 km 四方の調査範囲として効果的に絞り込むことが可能である。

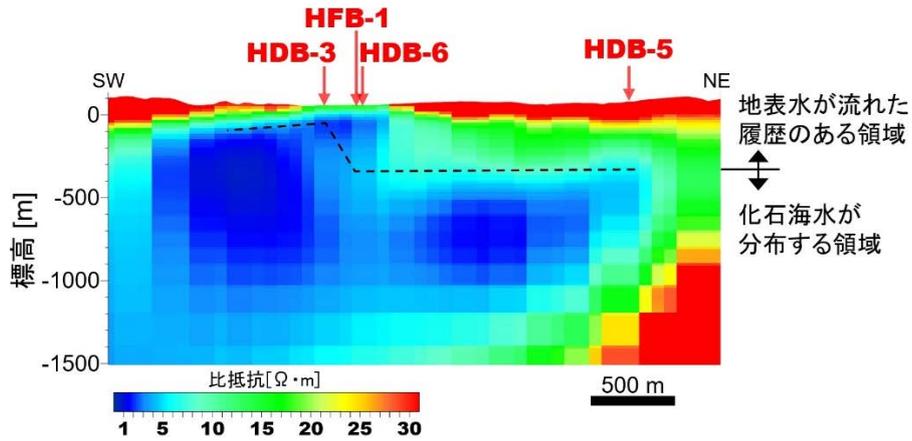


図 4-19 高密度電磁探査で得られた比抵抗分布（鉛直断面）

幌延深地層研究センターを含む約 3 km 四方を調査範囲として、探査深度の浅い AMT 法と探査深度の深い MT 法を併用した高密度電磁探査を実施し、60 測点のデータを取得した。さらに、三次元比抵抗分布を推定する解析においては、3 測点分の既往の MT/AMT 法データおよび 36 測点分の既往の AMT 法データを追加し、合計 99 測点のデータを使用した。本図は、これらのデータに基づく解析により求められた三次元比抵抗分布から、HFB-1 孔および HDB-5 孔を通過する鉛直断面の比抵抗分布を示したものである。加えて、HDB-3 孔、HDB-6 孔、HDB-5 孔および HFB-1 孔における  $\delta^{18}\text{O}$  の分析結果に基づき、地表水が流れた履歴のある領域を解釈した結果も併せて示している。

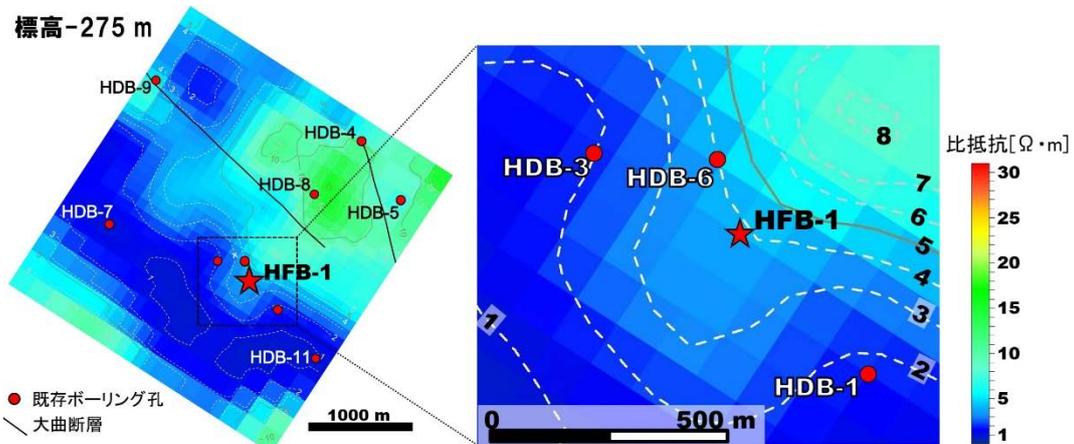
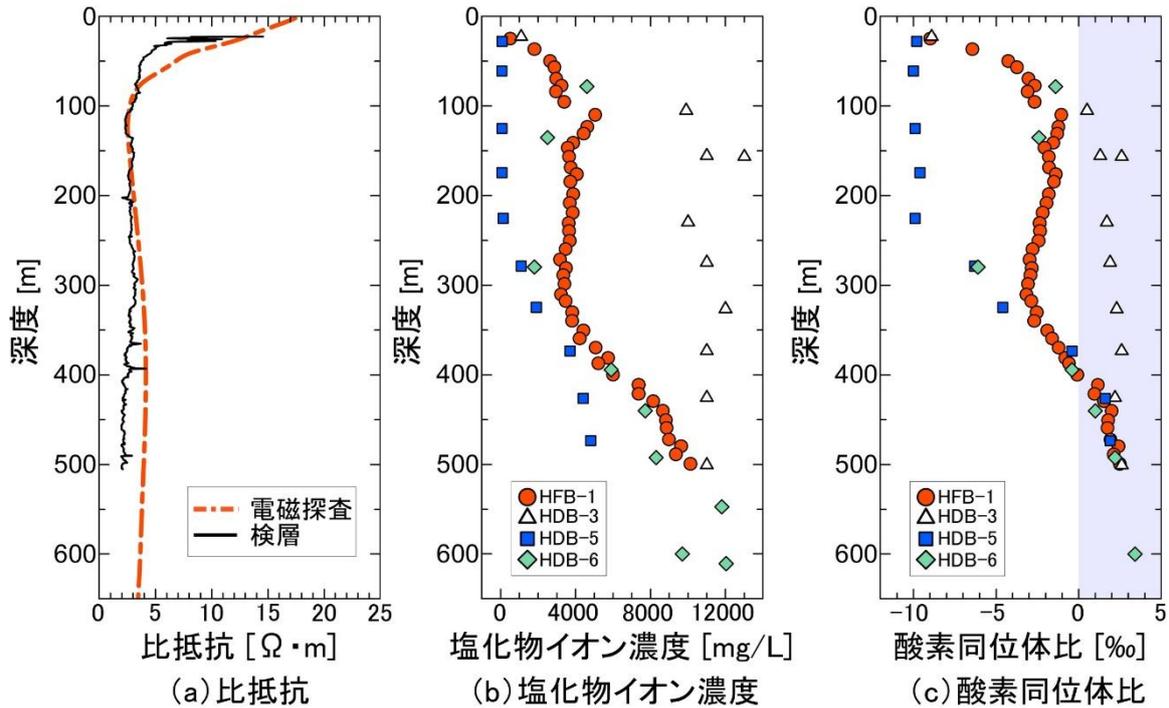


図 4-20 高密度電磁探査で得られた比抵抗分布（水平断面）

本図は、図 4-19 と同じ三次元比抵抗分布に基づき、標高-275 m における水平断面の比抵抗分布を示している。右図において、点線は比抵抗が  $1 \Omega \cdot \text{m}$  ごとの等値線、実線は  $5 \Omega \cdot \text{m}$  ごとの等値線である。



(a) 比抵抗 (b) 塩化物イオン濃度 (c) 酸素同位体比  
 図 4-21 ボーリング孔における比抵抗、塩化物イオン濃度、酸素同位体比の深度分布  
 (a)はHFB-1孔における電磁探査と比抵抗検層により得られたHFB-1孔の比抵抗の深度分布を示している。  
 (b)と(c)は岩石コアからの圧縮抽出水の分析結果を示しており、(b)は塩化物イオン濃度、(c)は酸素同位体比の深度分布を示している。酸素同位体比の水色の領域は、化石海水の目安となる範囲を示している。

これらの電磁探査およびボーリング調査のデータを用いれば、地球統計学的手法（クリギング）によって、Cl<sup>-</sup>濃度だけでなく、水の安定同位体比など他の指標についても三次元分布を推定できる。本検討では、HFB-1孔を含む地上からのボーリング調査（全11孔）のデータを一次データ、高密度電磁探査により取得した三次元比抵抗分布を二次データとしたコロケートド・コクリギングを適用した。対象範囲は調査エリアおよびその周辺とし、この手法によりCl<sup>-</sup>濃度およびδ<sup>18</sup>Oの三次元分布を推定した。そして、図4-17の手順③および④において実施する最適なボーリング調査地点の位置と本数について検討した<sup>96), 184)</sup>。その結果、電磁探査の結果を参考に、比抵抗の高低が異なる領域を幅広くカバーする地点を選んだ場合、最低2地点のボーリングデータでも、全11孔を用いた場合と類似した三次元分布の推定結果が得られることが分かった（図4-22）。具体的には、まず化石海水の有無を確認するために、比較的浅い深度から低比抵抗領域が分布するHDB-1孔やHDB-3孔で1孔目を掘削し、その後、低比抵抗領域の広がりを確認するためにHFB-1孔で2孔目を掘削した場合でも、全11孔を用いた場合と同様の傾向が得られた。この結果は、化石海水の分布を把握する上で、電磁探査の結果に基づき適切なボーリング調査地点を選定することが、調査の効率性と精度の両立に極めて有効であることを示している。

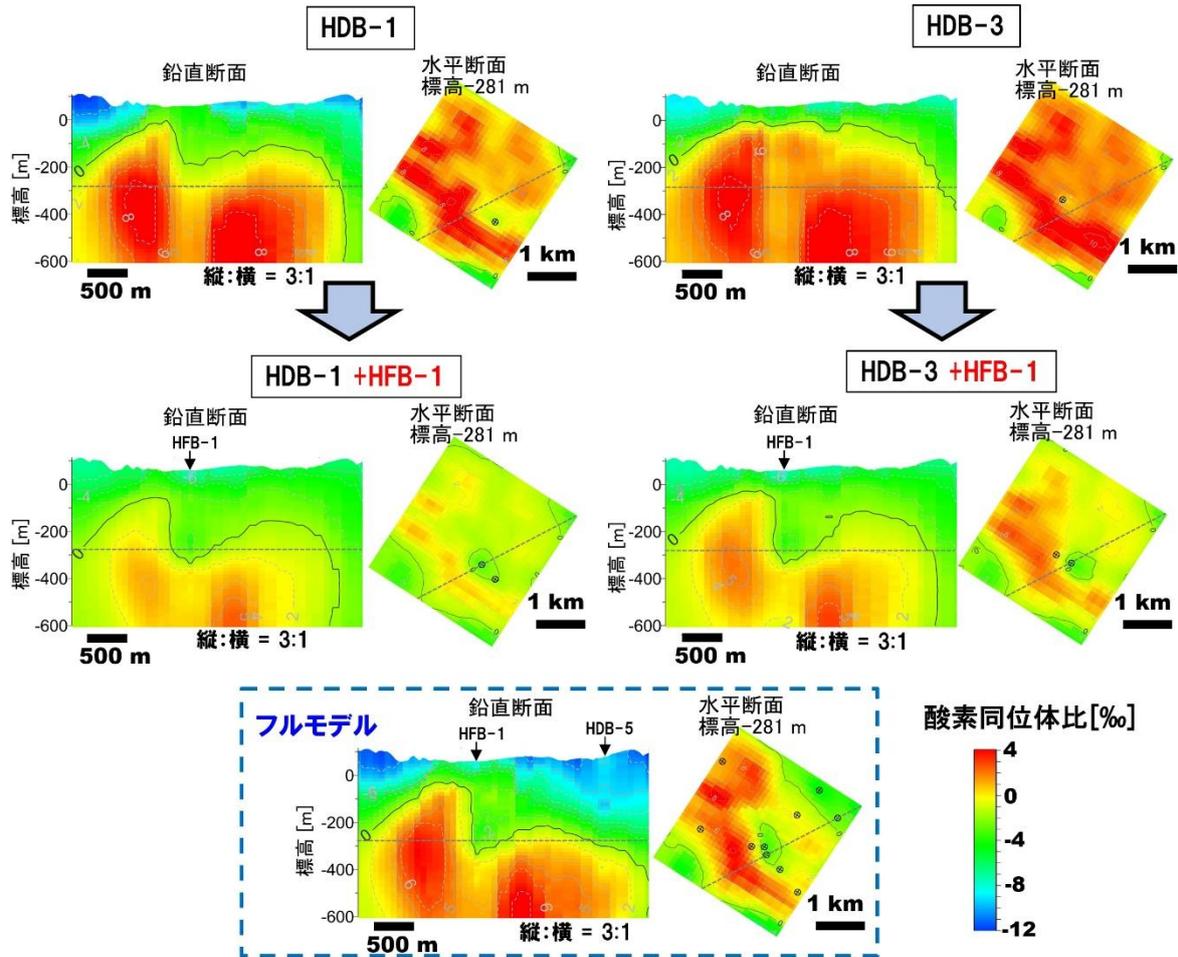


図 4-22 地球統計学的手法で得られた酸素同位体比の分布

上段は HDB-1 孔および HDB-3 孔のそれぞれ 1 孔のみを使用したケース、中段はそれらに HFB-1 孔を追加したケース、下段はフルモデルのケースを示している。鉛直断面に示された点線は標高-281 m を示し、水平断面の点線は鉛直断面の位置を示している。黒線は酸素同位体比が 0‰となる等値線を示しており、この線を境に酸素同位体比が高い（赤色で示された）範囲は、化石海水が存在すると推定される。

次に、幌延地域に分布する化石海水の水質形成機構を明らかにし、化石海水を地下水の流れが非常に遅いことを示す指標として用いることの有効性を確認するための数値解析を実施した<sup>190)</sup>。化石海水は、地層の堆積当時に間隙中に取り込まれた海水が、埋没続成作用を経て現在まで長期間にわたり残存している塩水系地下水である。幌延地域の化石海水の Cl<sup>-</sup>濃度は、海水と比べて最大で約 80% 低い値を示すことが報告されている<sup>183), 191)</sup>。このような水質は、堆積時に取り込まれた海水が、埋没続成作用に伴う鋳物反応および脱水などの影響を受けて変質した結果であると考えられる。数値解析モデルでは、地層の埋没続成過程に伴う間隙率の減少による上昇流と、生物起源シリカおよび粘土鋳物の相変化に伴う脱水を考慮した。解析の結果、地表水との混合を仮定しなくても、海水と比較して最大で約 80%低い Cl<sup>-</sup>濃度をもつ地下水が形成され得ること、さらにその地下水の安定同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ ) が幌延地域の化石海水と整合することが示された (図 4-23)。すなわち、幌延地域の化石海水に見られる Cl<sup>-</sup>濃度の低下は、現在の地質環境下における地表水との混合による希釈ではなく、100 万年オーダーの長期にわたって進行した埋没続成作用による変質の結果であると解釈できる。このように海水期限の地下水が長期間にわたり地表水とほとんど混合せずに保持されているという事実は、当該地域における地下水の流れが極めて限定的であることを示唆しており、化石海水の分布が地

下水の流れが非常に遅い地域を推定する上で有効な指標となり得ることが確認できた。

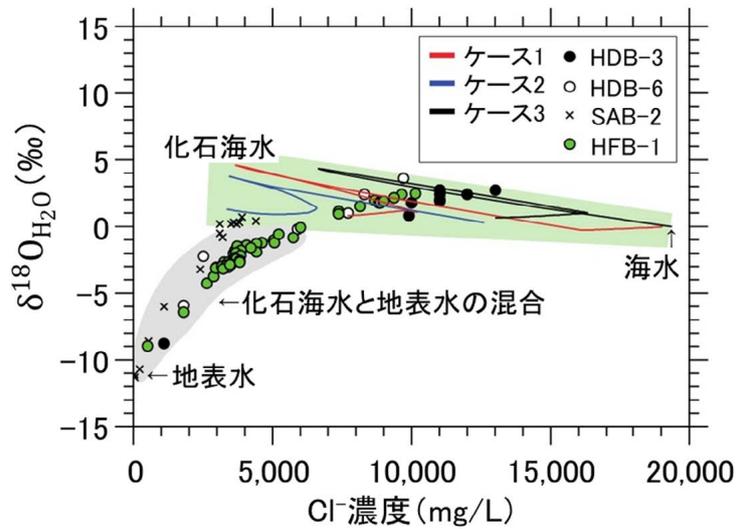


図 4-23 ポーリング孔における岩石コアの間隙水の Cl 濃度と  $\delta^{18}\text{O}$  の関係と解析結果<sup>41), 191)</sup>  
 HDB-3、HDB-6、SAB-2 および HFB-1 における岩石コアの間隙水の Cl 濃度と  $\delta^{18}\text{O}$  の関係をプロットしている。緑色の領域は化石海水の範囲を示し、灰色の領域は地表水と化石海水が混合している範囲を示している。3 つの実線は、水質形成機構の数値解析<sup>184), 190)</sup>において求められた 3 つのケースの Cl 濃度と  $\delta^{18}\text{O}$  の範囲を示している。これら 3 つのケースは、スメクタイトからイライトへの相変化が開始される温度およびスメクタイトの含水率の違いを考慮して設定された。具体的には、ケース 1 は 40°C および含水率 10wt%、ケース 2 は 40°C および含水率 15wt%、ケース 3 は 104°C および含水率 10wt% の条件で設定された。

地下水の流れが非常に遅い領域の三次元分布を調査するにあたっては、電磁探査とポーリング調査を組み合わせる調査が有効であるとともに、ポーリング調査において地下水の水質や年代に基づく地球化学的な評価を行うことも重要である。割れ目と岩石間隙中の地下水の水質の違いから地下水の流れの有無を評価し<sup>74)</sup>、さらに地下水の放射性炭素 ( $^{14}\text{C}$ ) 年代から得られる情報を組み合わせることで、地下水の流動状態の長期的な変遷を推定する手法を構築した<sup>75)</sup>。その結果、地表水が浸透した領域のうち、浅部では最終氷期以降（後氷期：約 1 万年前以降）に浸透した地表水が流動していること、深部では最終氷期に浸透した地表水が現在も滞留していることが明らかとなった。これらの流動状態の違いは、最終氷期と後氷期における鉛直方向の動水勾配（地下水を動かす駆動力）の違いに起因すると考えられる（図 4-24）。

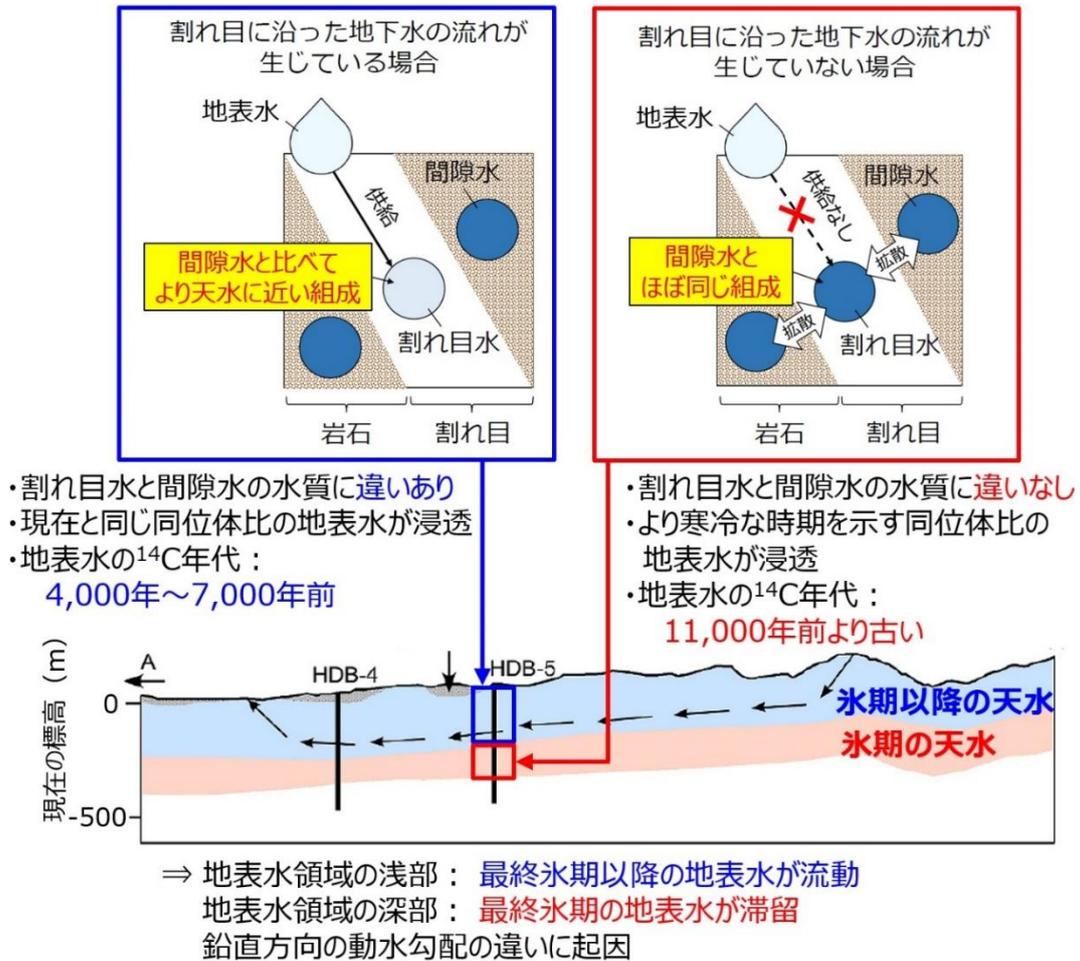


図 4-24 割れ目水と間隙水の水質の違いと地下水の <sup>14</sup>C 年代に基づき解釈した地下水流動概念 <sup>75)</sup>

図 4-24 に示すような地下水の流れの概念は、数値解析によって定量的に検証することも重要である。広域スケール（十数 km×十数 km）を対象とした水理・物質移行解析（地下水移行時間解析）手法を検証することを目的として、地下水移行時間に対して感度の高いパラメータである岩盤の水理学的有効間隙率の与え方に着目した水理解析を実施した <sup>166)</sup>。解析では、幌延深地層研究センター周辺の陸域から日本海の海域にかけて、約 60 km（東西）×30 km（南北）×10 km（深さ）の広域スケールを対象とし、定常浸透流解析を行った。そして、得られた地下水移行時間と、環境トレーサー（地下水中の <sup>14</sup>C やトリチウム）から推定される地下水移行時間との比較を行った。その結果、図 4-24 に示すような地表水が主に割れ目を介して流れている地下浅部の領域においては、健全部の間隙率（声間層 0.5、稚内層 0.4）をそのまま有効間隙率として与えた場合（図 4-25 のケース 1）には環境トレーサーから推定される移行時間を十分に再現できず、割れ目の開口幅に対応する有効間隙率 0.0001～0.01 を与えることで、両者の移行時間が整合することが確認された（図 4-25）。一方で、稚内層深部では、化石海水中の <sup>36</sup>Cl や <sup>4</sup>He を用いた地下水年代評価により、130 万～100 万年前から始まった地層の隆起・侵食以降、地下水が停滞状態にあることが示唆されている <sup>185)</sup>。また、前述の化石海水の水質形成機構解明のための数値解析の結果が示すとおり、稚内層深部における地表水の関与は限定的である。本解析ではダルシー則に従った地下水の流れを仮定しており、形式的には稚内層深部に地表水が到達するまでの地下水移行時間を計算しているが、図 4-26 に示すとおり、稚内層深部における地下水移行時間は 100 万年以上と非常に長くなる結果が得られた。この結果は、地下水年代

評価に基づき推定されている地下水の停滞状態を否定するものではない。これらの結果から、すなわち割れ目が発達し移流による地下水流動が支配的な堆積岩（例えば、割れ目内の地下水と健岩部の間隙水の水質に差異が見られる領域）において、従来、広域スケールを対象とした解析で用いられてきた健岩部の間隙率をそのまま水理学的有効間隙率として与えるのではなく、割れ目の開口幅に基づいて算出した有効間隙率を設定することが、地下水移行時間を評価する上で妥当であることが示された。

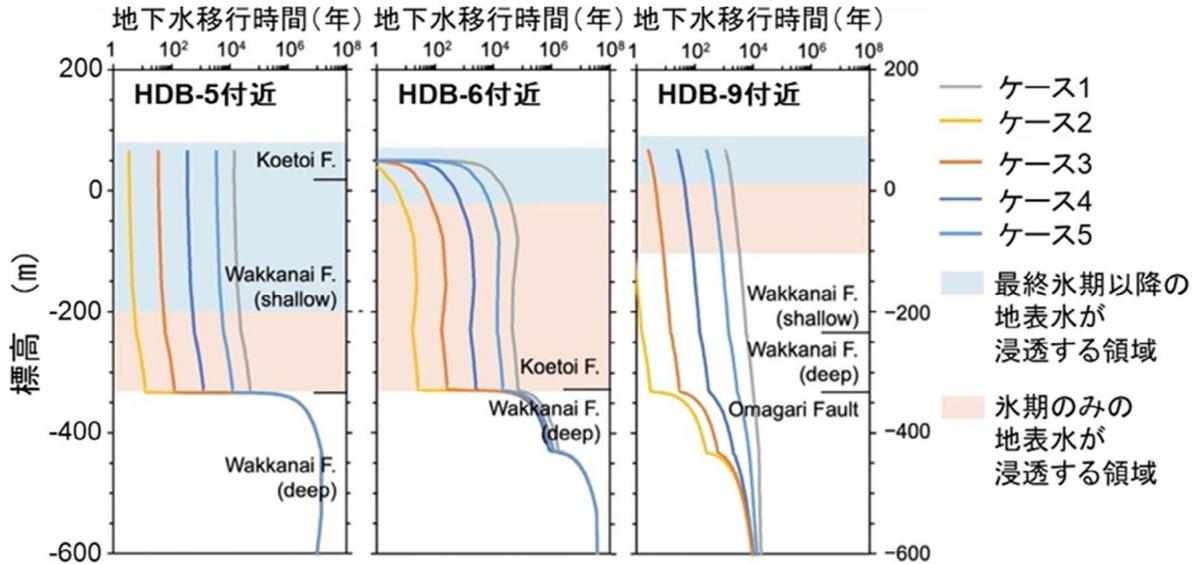


図 4-25 HDB-5、HDB-6、HDB-9 孔付近の地下水移行時間の深度分布

ケース 1 では、健岩部の間隙率（声間層 0.5、稚内層 0.4）、ケース 2～ケース 5 は稚内層浅部の間隙率のみを変えて、割れ目の開口幅に対応する有効間隙率（それぞれ 0.0001、0.001、0.01、0.1）を用いた解析を実施した。図中の地表水が浸透する領域の深度は、参考文献 74)に基づいており、最終氷期以降の地表水が浸透する領域（図中の水色領域）が現在、割れ目に沿って地下水が流動していると推定される領域に対応する。HDB-5 孔の同領域の割れ目水では、約 6,500 年前～約 4,400 年前の  $^{14}\text{C}$  年代が得られており<sup>75)</sup>、HDB-9 孔の同領域の割れ目水では、10 年未満の地下水移行時間を示唆するトリチウム濃度と電気伝導度が得られている<sup>191)</sup>。これらの年代と解析結果を比較すると、HDB-5 孔付近の同領域における地下水移行時間の解析結果は、数百年～数万年のケース 1、4、5 が  $^{14}\text{C}$  年代と整合的である。HDB-9 孔付近の同領域における地下水移行時間の解析結果は、数十年以下のケース 2、3、4 がトリチウム年代と整合的である。HDB-5 孔の解析結果は別途行った水圧の再現性検討より不確実性が大きいことが示唆されるため、HDB-9 孔付近での解析結果を重視すると有効間隙率の与え方としてはケース 2、3、4 が適切であり、HDB-5 孔近傍の結果も考慮するとケース 4 が適切であったと考えられる。

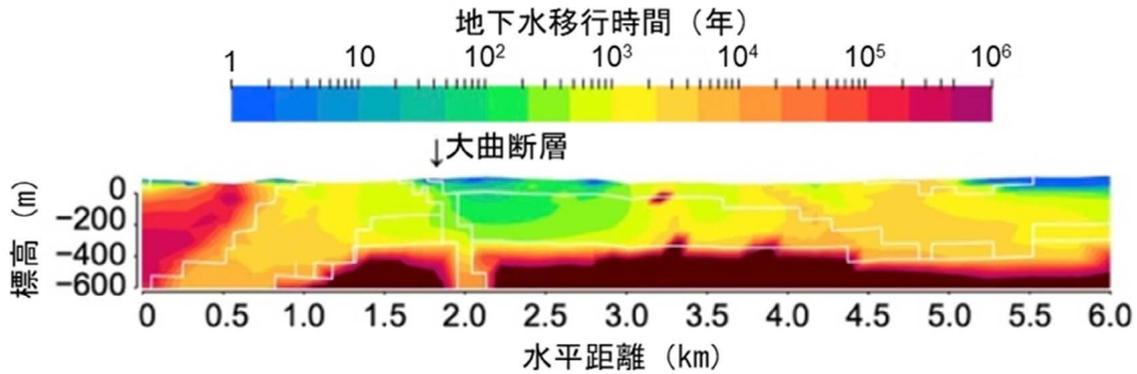


図 4-26 地下水移行時間の解析結果の例

幌延深地層研究センター周辺の陸域から日本海の海域にかけての約 60 km (東西) × 30 km (南北) × 10 km (深さ) の広域スケールを対象に実施した定常浸透流解析の結果に基づき、幌延深地層研究センター周辺の 6 km (水平) × 600 m (深さ) の鉛直断面に着目して地下水移行時間を求めた。断面上の白線は水理地質構造区分の境界を示す。ここでは、環境トレーサー (地下水中の  $^{14}\text{C}$  やトリチウム) から推定される地下水移行時間と整合する結果として、稚内層浅部の有効間隙率を割れ目の開口幅に対応する 0.01 とした場合の結果を示す。

### (3) まとめ

本研究では、処分事業の処分場選定で求められる「放射性物質の移行を抑制する緩慢な地下水流動の水理場」の評価に資する技術の高度化を念頭に、幌延地域の新第三紀堆積岩類を対象として、地下水の流れが非常に遅い領域を調査・解析・評価する手法の実証と、その妥当性の検証を行った。

まず、地層処分事業における段階的なサイト調査の考え方を参考に、数十 km 四方の調査範囲を対象に調査を開始し、その結果を基に数 km 四方の範囲へ調査エリアを絞り込んだ上で、当該範囲における地下水の流れが非常に遅い領域の三次元分布を推定する手法を構築した。その具体化として、幌延深地層研究センター周辺において新たに高密度電磁探査とボーリング調査を組み合わせた調査を実施し、比抵抗構造と地下水の塩濃度・安定同位体比との関係を整理することで、化石海水が分布する領域を三次元的に推定できることを確認した。さらに、電磁探査とボーリング調査 (既存ボーリングを含む) のデータを用いた地球統計学的解析により、電磁探査結果を踏まえてボーリング調査地点を選定することで、限られたボーリング数でも化石海水分布の特徴を把握できることを示し、効率的な調査手順を実証した<sup>184)</sup>。

次に、化石海水の水質形成機構に関する数値解析により、幌延地域の化石海水に見られる塩濃度や安定同位体比の特徴が、現在の地質環境下における地表水との混合ではなく、埋没続成作用に伴う鉱物反応や脱水による長期的な変質の結果として説明できることを示した<sup>190)</sup>。これは、海水起源の地下水が長期にわたり地表水とほとんど混合せず保持されてきたことを意味しており、化石海水を地下水流動が極めて限定された領域を示す指標として用いることの妥当性を検証する結果となった。

また、割れ目と健岩部の間隙中の水質の違いおよび放射性炭素年代などの地球科学データを用いて、割れ目に沿った地下水の流れの有無を判別する手法を構築し<sup>74), 75)</sup>、最終氷期と後氷期における地下水流動状態の違いを整理した。その結果、浅部では後氷期に浸透した地表水が流動し、深部では最終氷期に浸透した地表水や化石海水が現在も滞留しているという概念モデルを提示した。さらに、広域スケールを対象とした水理・物質移行解析では、このような割れ目が発達し地表水が流動する地下浅部では、健岩部の間隙率をそのまま用いる従来の設定では環境トレーサーから推定される地下水移行時間を再現できず、割れ目開口幅に基づく小さな有効間隙率を用いることで解析結果が観測値と

整合することを示した<sup>166)</sup>。

これら一連の取り組みにより、電磁探査・ボーリング調査・地球化学評価および数値解析を組み合わせた本研究の枠組みは、段階的なサイト調査の考え方に基づいて地下水の流れが非常に遅い領域の三次元分布とその形成・維持メカニズムを合理的に把握する上で有効であることを示すことができた。これらの成果は、地層処分に適した地質環境の選定プロセスにおいて、水理場の条件を調査・評価する手法として反映可能であり、地上からの主要な調査である物理探査とボーリング調査を対象とした技術整備であるため、概要調査に反映し得ると考えられる。今後は、坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化を進める中で、これらの成果を閉じ込め性能を評価するための物質移行解析に反映していく予定である。

## 4.2. 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

### (1) 目的と実施概要

EDZ 割れ目の透水量係数の評価にあたっては、DI を用いた経験式によって評価できることを示してきた。これにより、掘削直後の EDZ 割れ目の透水性の予測手法を構築したが、一方で、EDZ の透水量係数の予測の観点では、地殻変動による緩衝材や埋め戻し材の EDZ への自己治癒能力の実証が課題となった。そこで、過去の研究で実証した DI を用いた経験式を EDZ 割れ目の透水量係数の将来予測へ展開することを目的として、緩衝材や埋め戻し材が EDZ の力学的・水理学的な緩衝能力（自己治癒能力）に与える影響を把握する解析手法の開発を行った。

坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤が EDZ の透水性に与える影響の評価手法の構築を目的として、幌延深地層研究センターの深度 350 m の調査坑道のうち、試験坑道 3 および 4 の周辺に到達した EDZ を対象として、緩衝材や坑道埋め戻し材の膨潤圧が EDZ 割れ目の透水性や開口幅の変化に与える影響について検討した。具体的に実施した内容は下記のとおりである。

- ・ EDZ 割れ目への段階注水試験
- ・ 樹脂注入試験

### (2) 実施内容と成果

#### (i) EDZ 割れ目への段階注水試験

##### ① EDZ 割れ目の透水性と DI の関係の検討

坑道埋め戻し後の緩衝材や坑道埋め戻し材の膨潤が EDZ の透水性に与える影響の評価手法の構築を目的に、350m 試験坑道 4 の天端部分に発生した EDZ 割れ目を対象として、段階的に注水圧を増加させ、そのときの注入流量の変化を計測して透水量係数を求める試験（段階注水試験）を実施した<sup>48)</sup>。段階注水試験では、注水圧の変化を基に DI の値を変え、DI と透水量係数の関係を求めた。なお、試験は、350m 試験坑道 3 から 350m 試験坑道 4 の天端に向かって掘削した 2 孔のボーリング孔 H4-1 孔および H4-3 孔の区間 2（図 4-27 に赤文字で示す区間）で実施した。

図 4-28 に段階注水試験により得られたデータを示す。なお、図中の数字は、試験中に注水圧を段階的に上げていった際の段階の番号を示している。このデータを解析して DI と透水量係数の関係を整理した。その結果、図 4-29 の赤色プロットに示すように透水量係数と DI の相関性を確認した<sup>48)</sup>。なお、図 4-29 の黒実線で示す予測値の曲線<sup>79)</sup>は、国内外の様々な堆積岩や結晶質岩中のボーリング孔の断層交差部で確認された地下水の主要な水みち割れ目の透水性と DI の関係を表しているが、図 4-29 に赤色プロットで示す段階注水試験中の割れ目の透水量係数は、概ね図 4-29 の黒実線で示す予

測値の曲線に沿って変化することが分かった。また、同試験で行ったシミュレーション結果を図 4-29 に赤曲線で示すが、概ね予測値の曲線に沿って透水性が変化することを確認した。さらに、図 4-27 に青文字で示す区間で実施した通常の注水試験により得られた透水量係数と DI の関係を図 4-29 の青色プロットで示すが<sup>47)</sup>、これらは図 4-29 に波線で示す予測値の範囲 ( $\pm 2\sigma$ ) 内に収まることを確認した。

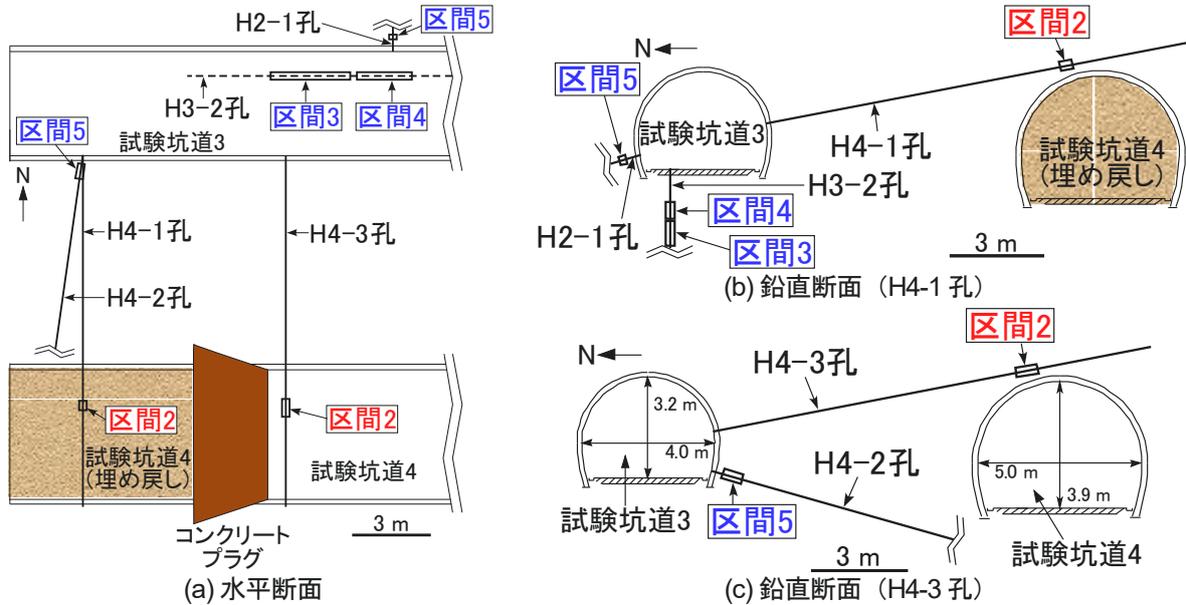


図 4-27 350m 試験坑道 3 および 350m 試験坑道 4 の EDZ の割れ目を対象に実施した注水試験区間

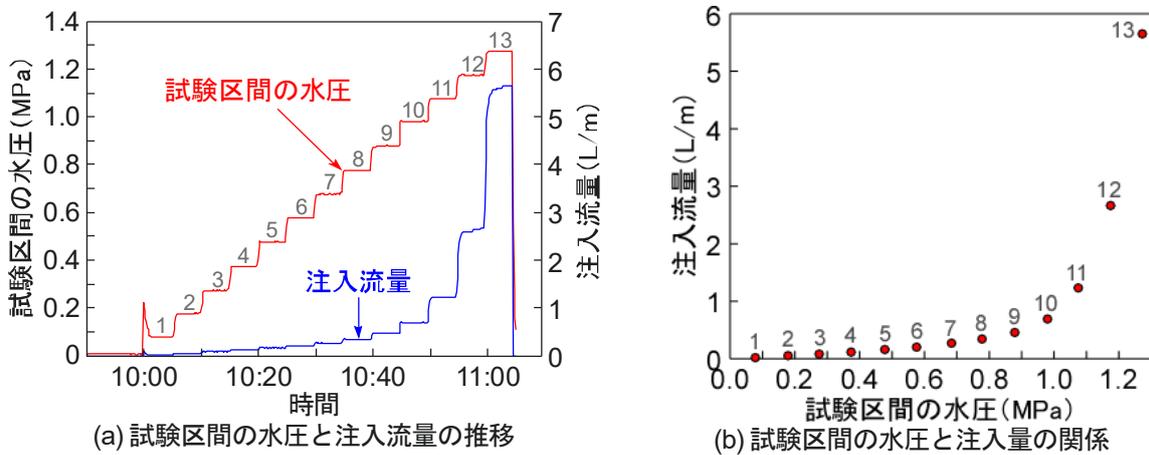


図 4-28 EDZ 割れ目を対象に実施した段階注水試験のデータ (H4-3 孔の例)

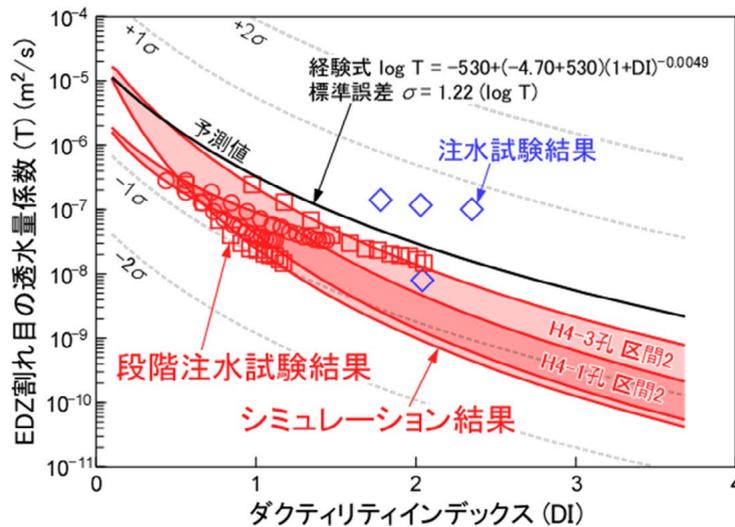


図 4-29 注水試験結果と DI モデルの比較

② EDZ 割れ目の透水量係数予測への反映

図 4-29 の黒実線で示す予測値の曲線は、断層や既存割れ目といった天然の割れ目のみならず、EDZ 割れ目の透水量係数の予測にも適用できると考えられる<sup>47)</sup>。地層中の天然の割れ目と EDZ 割れ目はそれぞれ形成過程が異なるが、いずれの場合も、割れ目が充填物などによって閉塞されていない限り、その透水性は岩石に作用する応力、岩石の強度、そして割れ目のかみ合わせの程度を表す Joint Roughness Coefficient (JRC) によって決まると考えられる<sup>76)</sup>。岩石に作用する応力と岩石の硬さは地層中の天然の割れ目も EDZ 割れ目も DI により表現することが可能である。JRC は割れ目の初期開口幅、すなわち割れ目面に垂直にかかる力が無視できるほど小さい時の開口幅で数値化することが可能である。なお、EDZ 割れ目の初期開口幅は天然割れ目の初期開口幅の範囲内に収まることが分かっていることから<sup>144)</sup>、図 4-29 の予測値の曲線は EDZ 割れ目の透水性の予測にも適用可能であると考えられる。

③ EDZ 割れ目の透水量係数の変化の推定手法の構築

図 4-29 に示すとおり、予測値の曲線と今回実施した段階注水試験の結果は整合する結果が得られた。これは、予測値の曲線が緩衝材や埋め戻し材の膨潤に伴う EDZ の透水量係数の変化の推定に適用可能であることを示唆している。

実際の人工バリア性能確認試験では、緩衝材で最大 0.9 MPa の膨潤圧が発生した<sup>109)</sup>。これが直接 EDZ に作用すると仮定する。このとき、岩石の引張強度が 1.8 MPa で、処分孔もしくは坑道の延長方向に平行な力が最も大きいと仮定すると、緩衝材や埋め戻し材に最も近い場所の EDZ の DI が最大で 0.3 増加する。膨潤が発生する前の DI が 0.1~1.5 の範囲の値である場合、DI の曲線の傾き（図 4-29）により、DI が 0.3 増加するとその場所の割れ目の透水性は 1/4~1/2 まで低下する。緩衝材や埋め戻し材の近傍は、EDZ の中で最も割れ目の開口幅が大きく<sup>144)</sup>、割れ目の本数も多い場所に相当することから<sup>47)</sup>、EDZ の透水性を実質的に支配していると考えられる。したがって、この場所の透水性が 1/4~1/2 まで低下することは EDZ の透水性も同程度低下することを意味する。緩衝材や埋め戻し材の膨潤による EDZ の透水性の変化は、このように DI の変化と図 4-29 の予測値の曲線から見積もることができ、予測値の曲線の信頼性あるいは適用性は今回実施したような EDZ 割れ目を対象と

した段階注水試験を行うことで確認することができた。

図 4-29 に黒実線で示す予測値の曲線は、膨大な試験データとシミュレーション結果から導き出される透水量係数と DI の間の平均的な関係を表すものであるため、図 4-29 の予測値の曲線に基づく透水性の変化の推定は、その変化の幅の期待値を推定することになる。個々の EDZ 割れ目について、その位置や諸特性が特定できる場合は、式 4-2 を個々の EDZ 割れ目に適用することにより、EDZ の透水性の変化を具体的に推定することが可能である<sup>76)</sup>。

$$e = E^2 / JRC_0^{2.5} \quad (e > E \text{ となる場合は } e = E) \quad \text{式 4-1}$$

$$E = E_0(1 + bDI/0.2899)^{-1} \quad \text{式 4-2}$$

なお、 $e$  は割れ目の水理的開口幅 ( $\mu\text{m}$ )、 $E$  は割れ目の力学的開口幅 ( $\mu\text{m}$ )、 $JRC_0$  は 10 cm スケールでの割れ目表面の粗さ (通常は 0~20 の範囲の値をとり、値が大きいほど面が粗いことを示す)、 $E_0$  は初期開口幅、 $b$  は割れ目の方向性に依存する係数 (通常は 0.5~1.5 の範囲の値) を表す。これらの諸特性は段階注水試験やボーリングコア観察、孔壁観察を行うことにより推定可能であり<sup>48), 76)</sup>、個々の割れ目の透水性の変化量は図 4-29 のシミュレーション結果に示すように推定することができる。

以上の結果から、DI と透水量係数の関係から得られる個々の割れ目の透水性の変化量を足し合わせることで、EDZ の透水性の変化量を求めることができることを示した。

## (ii) 樹脂注入試験

坑道埋め戻し後の EDZ の透水性は、EDZ の割れ目がずれることにより増加する可能性がある。図 4-29 の予測値はこのような可能性を既に考慮した値となっており、割れ目のずれによって図 4-29 の予測値を有意に上回る可能性は低いと考えられるが<sup>76)</sup>、割れ目のずれが透水性に与える影響を原位置で確かめるために、EDZ 割れ目を対象とした樹脂注入試験を実施した。

樹脂注入試験<sup>144), 192), 193), 194)</sup>は 350m 試験坑道 3 で実施した。350m 試験坑道 3 の側壁面から約 1 m のボーリング孔を掘削し、その孔内に粘性が水の 7 倍程度の低粘性の樹脂を注入し、EDZ 割れ目に擾乱を与えないように 0.1 MPa 程度の低圧で樹脂を割れ目に注入した。樹脂が固化した後に岩石試料を採取して詳細な観察を行い、図 4-30 に示すように紫外線照射下で撮影した画像を解析することにより、割れ目の開口幅とせん断変位を計測した。割れ目の開口幅とせん断変位の関係を分析した結果、図 4-31 の赤色のプロットで示すように、割れ目のずれ幅の増加に伴う開口幅の変化はほとんど確認されなかった。

次に、Asadollahi and Tonon<sup>195)</sup>のモデルを用いたシミュレーションにより、割れ目表面に垂直に作用する応力を様々に変えて、せん断変位の増大と開口幅の増大の関係を確認した (図 4-31)。試験坑道 3 周辺の割れ目表面に作用する応力は数値解析により 約 3.2 MPa と見積もられたが、このように高い応力が割れ目表面に作用している場合は、実際の計測結果同様、せん断変位の増大に伴う開口幅の増大は発生しない結果となった (図 4-31(f))。これらの結果を踏まえると、深度 350 m の応力状態の下では、今後、EDZ 割れ目がずれたとしても開口幅 (透水性) は増加しないと推定した<sup>144)</sup>。

以上のことから、EDZ 割れ目のずれが開口幅 (透水性) に与える影響は、EDZ 割れ目を対象とした樹脂注入試験を行うことにより評価することが可能であることが分かった。

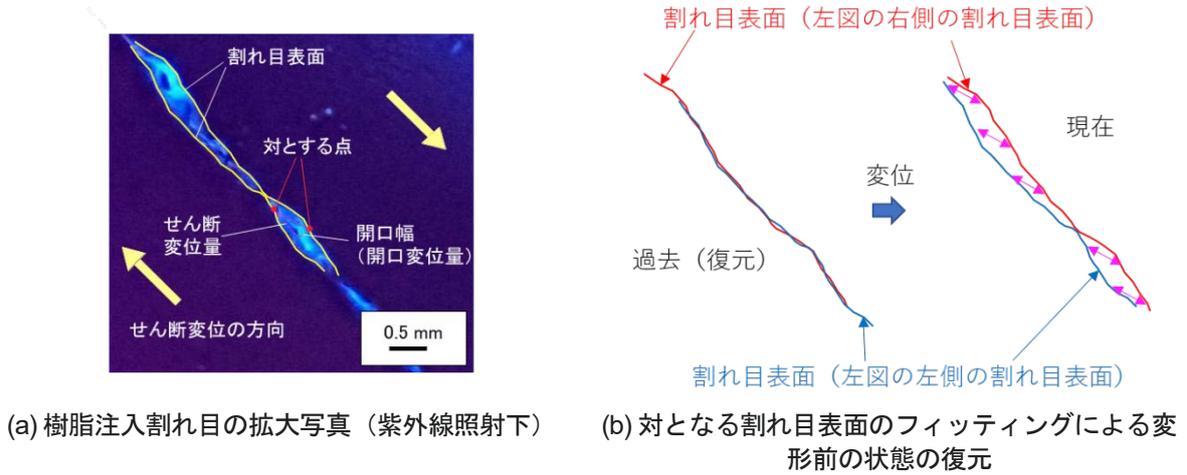


図 4-30 割れ目の開口幅とせん断変位の計測方法

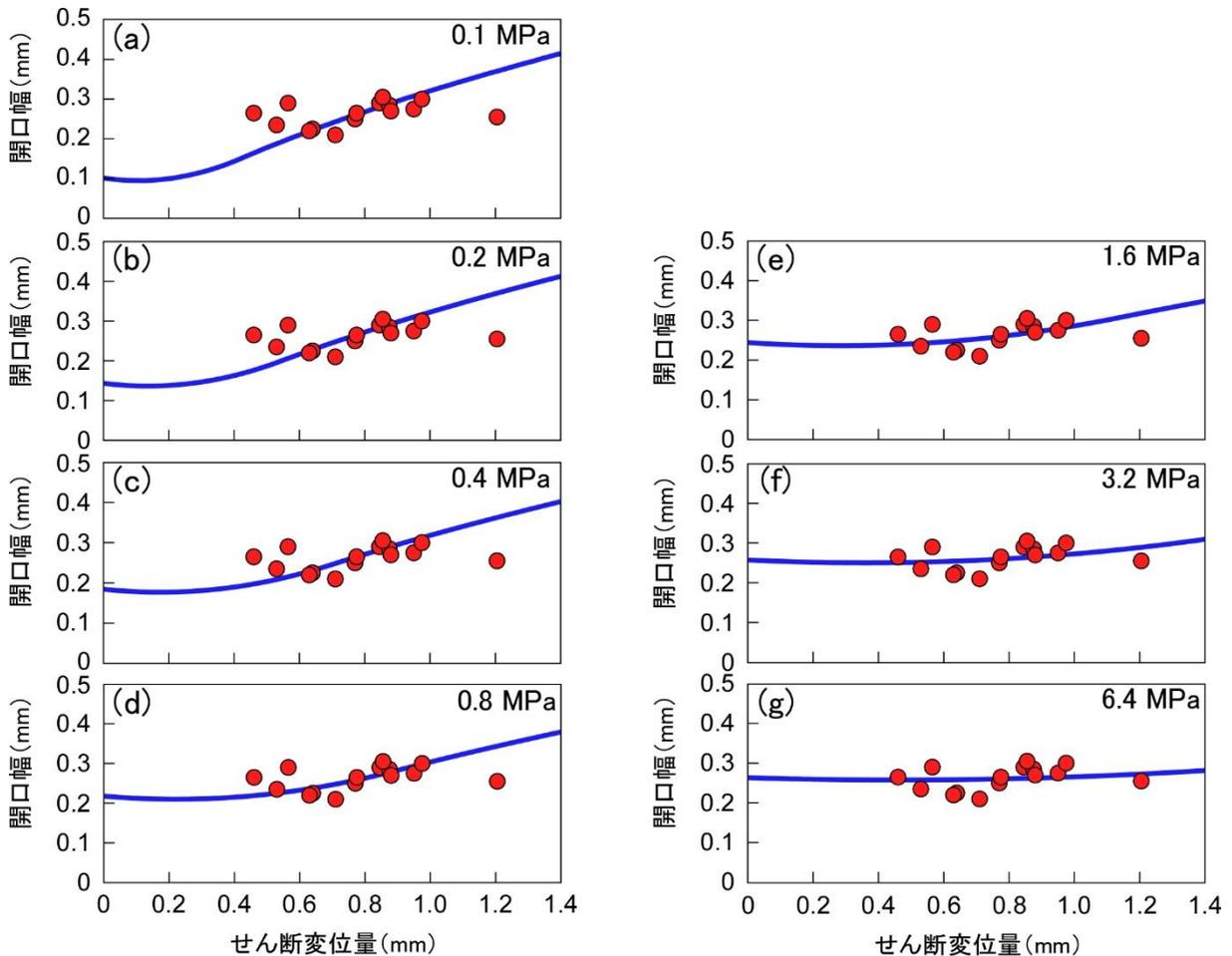


図 4-31 樹脂注入後の EDZ の割れ目試料で観察された開口幅とせん断変位量の関係（赤丸）とシミュレーション結果（青線）

グラフ右上の数字は、割れ目に垂直に作用する応力の値を示す。

(3) まとめ

坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤が EDZ の透水性に与える影響の評価手法を構築するために、EDZ 割れ目を対象とした段階注水試験や樹脂注入試験結果の分析を行った。その結果、坑

道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤による EDZ の透水量係数の変化は、推定される DI の変化と予測値の曲線から見積もることができ、この曲線の信頼性あるいは適用性は EDZ 割れ目を対象とした段階注水試験や樹脂注入試験を行うことにより確認できることが分かった。EDZ の透水性の変化は、個々の割れ目の透水性の変化量を既存の経験式に基づくシミュレーションにより評価し、それらを足し合わせるにより推定することが可能であることが分かった。これらにより、坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤が EDZ の透水性に与える影響を評価する手法を整備することができ、所期の目標を達成することができた。この知見は、地層処分施設の埋め戻し後の EDZ の透水性の将来予測に活用していくことが可能である。これらの成果は、地層処分施設の埋め戻し後の EDZ の透水性の将来予測に活用していくことが可能であり、掘削に伴う岩盤の力学的および水理特性の変化や影響領域の評価技術の信頼性の向上に資すると考えられる。今後は、坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化の研究の中で、ピット周辺の割れ目の開きにくさなどの調査・評価手法の整備において、この知見を反映していく予定である、

## 5. まとめ

幌延深地層研究計画で得られた成果は、NUMO が進める地層処分事業ならびに国が行う安全規制・監督に必要な技術基盤を整備するために重要なものである。そのため、これまで各段階において、以下のように成果の取りまとめを行い、知識基盤の整備を行ってきた。

### 第1段階

幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第1段階）研究成果報告書

分冊「深地層の科学的研究」（JAEA-Research 2007-044）<sup>3)</sup>

分冊「地層処分研究開発」（JAEA-Research 2007-045）<sup>4)</sup>

### 第2段階

幌延深地層研究計画における坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階：深度350mまで）研究成果報告書（JAEA-Research 2016-025）<sup>5)</sup>

### 第3段階

幌延深地層研究計画における地下施設での調査研究段階（第3段階：必須の課題 2015-2019年度）研究成果報告書（JAEA-Research 2019-013）<sup>9)</sup>

本報告書は、これらの一連の報告書に続くものであり、第3段階の調査研究における、令和2年度以降の必須の課題のうち、2024年度までに実施するとしていた課題の成果を取りまとめたものである。表5-1～表5-3に、本報告書の2章から4章に記述した内容を要約して示した。各章で述べたとおり、それぞれの課題について所期の目標を達成した。今後は、2024年度から実施している「坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」の課題についてHIPなどを活用して成果の最大化を図りつつ2028年度末までを目途に取り組み、その成果を報告書として取りまとめる予定である。

幌延深地層研究計画においては、研究開発業務の透明性や客観性を確保するために、研究計画の策定から成果までの情報を積極的に公表し、さらに研究成果については、国内外の学会や学術論文を通じて広く公開していく。また、施設の公開、国内外の関係機関や大学などとの研究協力などを通じて、我が国の地層処分計画を長期にわたって支えていくための技術の継承や研究者の育成、国民の地層処分に対する理解の増進に努める。

本報告書で示した研究成果は、幌延町ならびに北海道、国内外の数多くの研究者や研究機関などのご理解ご協力を頂いた上で得られたものである。関係者の方々に感謝の意を表するとともに、今後ともより一層のご支援とご指導をお願い申し上げる次第である。

表 5-1 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認のまとめ

令和2年度以降の必須の課題	目標・課題	実施内容	成果
2.1 人工バリア性能確認試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・浸潤時・減熱時のデータを含め、ガラス固化体設置以降の加熱・注水時から浸潤時・減熱時を全て模擬したデータに基づき熱-水-応力-化学連成現象のモデルの高度化</li> <li>・浸潤時の緩衝材の飽和度などの確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・減熱過程の試験データの取得</li> <li>・国際共同研究 (DECOVALEX) において、取得データに基づく連成解析結果を比較、検証</li> <li>・人工バリア解体試験施工の結果 (緩衝材、埋め戻し材、コンクリート、岩盤および境界面の採取手法に関わる知見) を基に、人工バリア性能確認試験場所の解体調査計画を検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・発熱がおさまった条件で緩衝材の飽和度などのデータを取得し、国際共同研究を通じて比較解析によって連成解析結果の妥当性を確認</li> <li>・解体調査の方針および施工手順・方法の決定</li> </ul>
2.2 物質移行試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・EDZの物質移行の評価手法の整備</li> <li>・有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行モデル化手法の高度化</li> <li>・割れ目を有する堆積岩でのブロックスケールの物質移行特性の評価手法の整備</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・EDZにおける物質移行：モデル化・解析手法の検討</li> <li>・有機物・微生物・コロイドの影響評価：室内試験および原位置試験の結果の整理、影響評価手法の検討</li> <li>・ブロックスケールを対象とした物質移行試験：モデル化・解析手法の検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・EDZの物質移行特性を把握するための原位置でのデータ取得とモデル化の手法を提示</li> <li>・地下水中の有機物・微生物・コロイドが物質移行に与える影響を定量的に評価する手法を整備</li> <li>・ブロックスケールの物質移行特性を把握するための一連のデータの取得とモデル化手法を提示</li> </ul>

令和2年度以降の必須の課題の番号は、本報告書における記載箇所（章・項・節）に対応している。

表 5-2 処分概念オプションの実証のまとめ

令和2年度以降の必須の課題	目標・課題	実施内容	成果
<p>3.1.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>搬送定置・回収技術の整備：支保部材の経年変化等の整理</li> <li>閉鎖技術の実証：埋め戻し材や止水プラグ等の性能の考え方の整理、EDZの調査技術の有効性の整理、技術課題の整理</li> <li>緩衝材と埋め戻し材の施工上の品質保証体系の構築：品質保証の仕組みや考え方の体系的な整理</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>搬送定置・回収技術の整備：支保部材の経年変化などの整理</li> <li>閉鎖技術の実証：埋め戻し材や止水プラグなどの性能の考え方やEDZの調査技術などの有効性や技術的な課題を検討</li> <li>緩衝材と埋め戻し材の施工上の品質保証体系の構築：品質保証の仕組みや考え方の調査・検討と体系的な整理</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>回収可能性を考慮して坑道開放期間が長期化することに伴う影響の調査評価手法の整備</li> <li>止水プラグ等の施工要素技術の原位置環境への適用性・実現性を確認、設計プロセスの提示</li> <li>緩衝材の充填時の流出量評価モデルを整備、埋め戻し材の施工方法の有効性を提示</li> </ul>
<p>3.2 高温（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高温条件下での原位置試験（350m試験坑道5）の継続（孔内の温度や水分分布などのモニタリング）</li> <li>試験系の解体・100℃を超える熱履歴を経た緩衝材の特性を確認する試験・分析</li> <li>緩衝材に浸潤させる水の組成等を変えた室内試験</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>350m試験坑道5における高温条件下での原位置試験（試験体の設置、加熱開始、孔内の温度や水分分布などのモニタリング）</li> <li>ひと組の試験系の解体、100℃を超える熱履歴を経た緩衝材の特性を確認する試験・分析の実施</li> <li>加熱による緩衝材のひび割れと水の浸潤による閉塞挙動を確認する室内試験の実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>加熱で生じる現象（ヒーター接触部のひび割れ等）や緩衝材特性の変化を、解体調査結果を基に整理</li> <li>解析により緩衝材の温度分布の影響事象を整理</li> <li>加熱による緩衝材のひび割れ・水の浸潤による閉塞挙動に関する室内試験結果を整理</li> </ul>

令和2年度以降の必須の課題の番号は、本報告書における記載箇所（章・項・節）に対応している。

表 5-3 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証のまとめ

令和2年度以降の必須の課題	目標・課題	実施内容	成果
4.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握として、断層/割れ目の水理学的連続性とダクティリティインデックス(DI)の関係や断層の力学的安定性の把握</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水圧擾乱試験を用いた断層/割れ目の水理学的連続性とDIの関係に関する検討</li> <li>水圧擾乱試験を用いた断層の力学的な安定性の評価手法の検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水圧擾乱試験により地殻変動の影響を含めた透水性評価手法を整備</li> <li>断層の力学的な安定性を表す指標であるせん断剛性の原位置での評価手法を提示</li> </ul>
4.1.2 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化を目的として、化石海水が存在するような地下水の流れが非常に遅い領域(低流動域)の三次元分布を調査・評価する手法の検証および広域スケールを対象とした水理・物質移行評価手法の検証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>電磁探査とボーリング調査の結果を基に、地下水の流れが非常に遅い領域の三次元分布を推定する手順を検討</li> <li>広域スケールを対象とした水理・物質移行評価手法を検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水の流れが非常に遅い領域の三次元分布を推定する手法を構築</li> <li>地下水年代等による安定な水理場・化学環境の確認手法、広域スケールでの地下水移行時間の評価手法を構築</li> </ul>
4.2 地殻変動による人工バリアアへの影響・回復挙動試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>地殻変動による人工バリアの緩衝材や埋め戻し材がEDZの力学的・水理学的な緩衝能力(自己治癒能力)に与える影響の解析手法を構築</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>EDZの段階注水試験結果や、樹脂注入試験により得られる割れ目のせん断変位と開口幅の関係性を分析</li> <li>坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤による応力変化による割れ目の開閉が、EDZの透水性に与える影響を検討するとともに、その予測モデルを構築</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>DIを用いたEDZの透水性を予測する既存モデルの再検証</li> <li>坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデルの構築</li> </ul>

令和2年度以降の必須の課題の番号は、本報告書における記載箇所(章・項・節)に対応している。

## 参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：深地層研究所（仮称）計画，JNC TN1410 98-002，1998，14p.
- 2) 核燃料サイクル開発機構：深地層研究所（仮称）計画 地表から行う調査研究（第1段階）計画，JNC TN1410 2001-001，2001，30p.
- 3) 太田久仁雄，阿部寛信，山口雄大，國丸貴紀，石井英一，操上広志，戸村豪治，柴野一則，濱克宏，松井裕哉，新里忠史，高橋一晴，丹生屋純夫，大原英史，浅森浩一，森岡宏之，舟木泰智，茂田直孝，福島龍朗：幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第1段階）研究成果報告書分冊「深地層の科学的研究」，JAEA-Research 2007-044，2007，434p.
- 4) 藤田朝雄，谷口直樹，松井裕哉，棚井憲治，西村繭果，小林保之，平本正行，前川恵輔，澤田淳，牧野仁史，笹本広，吉川英樹，柴田雅博，若杉圭一郎，濱克宏，操上広志，國丸貴紀，石井英一，竹内竜史，中野勝志，太田久仁雄，瀬尾俊弘，宮原要，内藤守正，油井三和：幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第1段階）研究成果報告書一分冊「地層処分研究開発」，JAEA-Research 2007-045，2007，140p.
- 5) 佐藤稔紀，笹本広，石井英一，松岡稔幸，早野明，宮川和也，藤田朝雄，棚井憲治，中山雅，武田匡樹，横田秀晴，青柳和平，大野宏和，茂田直孝，花室孝広，伊藤洋昭：幌延深地層研究計画における坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階：深度350mまで）研究成果報告書，JAEA-Research 2016-025，2017，313p.
- 6) 日本原子力研究開発機構：日本原子力研究開発機構の改革計画 自己改革－「新生」へのみち－（平成25年9月26日），2013，69p.
- 7) 日本原子力研究開発機構：日本原子力研究開発機構の改革計画に基づく「地層処分技術に関する研究開発」報告書－今後の研究課題について－（平成26年9月30日），2014，24p.
- 8) 日本原子力研究開発機構：令和2年度以降の幌延深地層研究計画，2020，6p.  
[https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/press/31/press\\_0129.html](https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/press/31/press_0129.html)，（参照：2025年11月14日）.
- 9) 中山雅，雑賀敦，木村駿，望月陽人，青柳和平，大野宏和，宮川和也，武田匡樹，早野明，松岡稔幸，櫻井彰孝，宮良信勝，石井英一，杉田裕，笹本広，棚井憲治，佐藤稔紀，大澤英昭，北山彩水，谷口直樹：幌延深地層研究計画における地下施設での調査研究段階（第3段階：必須の課題2015-2019年度）研究報告書，JAEA-Research 2019-013，2019，276p.
- 10) 石井英一，安江健一：幌延町における鮮新世～前期更新世のテフラ層序とFT年代，JNC TN5400 2005-006，2005，52p.
- 11) Ishii, E., Sanada, H., Iwatsuki, T., Sugita, Y. and Kurikami, H.: Mechanical strength of the transition zone at the boundary between opal-A and opal-CT zones in siliceous rocks. *Engineering Geology*, vol.122, 2011, pp.215-221.
- 12) 石井英一，安江健一，大平寛人，古澤明，長谷川健，中川光弘：北海道北部，大曲断層近傍の背斜成長の開始時期，*地質学雑誌*，vol.114, no.6, 2008, pp.286-299.
- 13) 中山雅（編）：幌延深地層研究計画 令和2年度調査研究成果報告，JAEA-Review 2021-053，2021，133p.
- 14) Aoyagi, K.: Overview of the Horonobe International Project (HIP), Seventh International Conference on Geological Repositories (ICGR-7); Empowering Progress in Developing Deep Geological Repositories, 2024.
- 15) Sato, N., Murakami, H., Aoyagi, K., Tamura, T. and Hayano, A.: Prediction of geological characteristics around the experimental galleries at a depth of 500 m in the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan; Overview of a part of Horonobe International Project, Seventh International Conference on Geological Repositories (ICGR-7); Empowering Progress in Developing Deep Geological Repositories, 2024.
- 16) 青柳和平，館幸男：幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開（1）幌延深地層研究計画における国際共同プロジェクトの重要性，*原子力バックエンド研究*，vol.31, no.2, 2024, pp.124-127.
- 17) 尾崎裕介：講演再録 幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開（2）タスクA：物質移行試

- 験, 原子力バックエンド研究, vol.31, no.2, 2024, pp.128-133.
- 18) 早野明：幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開 (3) タスク B：処分技術の実証と体系化, 原子力バックエンド研究, vol.31, no.2, 2024, pp.134-139.
  - 19) 大野宏和：幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開 (4) タスク C：実規模の人工バリアンシステムの解体試験, 原子力バックエンド研究, vol.31, no.2, 2024, pp.140-143.
  - 20) NEA: NEA Horonobe International Project (HIP): Interim Report for Phase 1 (February 2023 - March 2025), OECD Publishing, Paris, 2025, 118p.
  - 21) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ— 分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999, 703p.
  - 22) Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, SA. (ENRESA): FEBEX Project: full-scale engineered barriers experiment for a deep geological repository for high-level radioactive waste in crystalline host rock. Final report, Enresa Report 1/2000, Enresa, Madrid, Spain. Enresa, 2000, 354p.
  - 23) Chijimatsu M, Fujita T, Sugita Y, Amemiya K, Kobayashi A.: Field experiment, results and THM behavior in the Kamaishi mine experiment. *Int J Rock Mech Min Sci.*, 2001, vol.38, no.1, pp.67-78.
  - 24) Mayor, J. C., García-Siñeriz, J. L., Alonso E. E., Alheid H. J. and Blümling, P.: Engineered barrier emplacement experiment in Opalinus Clay for the disposal of radioactive waste in underground repositories. Final Report. Publicacion técnica ENRESA 02/05: 2005.
  - 25) 中山雅, 大野宏和：幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験—350m 調査坑道における人工バリアの設置および坑道の埋め戻し—, JAEA-Research 2019-007, 2019, 132p.
  - 26) 中山雅, 大野宏和, 中山真理子, 小林正人：幌延深地層研究センターにおける人工バリア性能確認試験 計測データ集 (平成 29 年度), JAEA-Data/Code 2019-003, 2019, 57p.
  - 27) Ohnishi, Y., Shibata, H, and Kobayashi, A.: Development of finite element code for the analysis of coupled thermo-hydro-mechanical behaviors of a saturated-unsaturated medium, *Proc. of Int. Symp. on Coupled Process Affecting the Performance of a Nuclear Waste Repository*, Berkeley, 1985, pp.263-268.
  - 28) 伊藤真司, 清水浩之, 大野進太郎, 高山裕介：幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験を対象とした再冠水時の熱的/水理的状态変遷を反映した弾塑性力学解析, 土木学会論文集, vol.80, no.8, 2024, 24-00030.
  - 29) Ohno, H. and Takayama, Y.: Modeling of coupled processes in full-scale engineered barrier system performance experiment at Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, *Geomech Energy Environ*, vol.41, 2025, 100636.
  - 30) 菊池広人, 棚井憲治：幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験, JNC TN8430 2004-005, 2005, 96p.
  - 31) Sugita, Y., Beese, S., Maßmann, J., Pan, P., Kim, M., Lee, C., Ohno, H., Ozaki, Y., Jové Colón, C., Lopez, C. M. and Liang, S.-Y.: DECOVALEX-2023 Task D Final Report, DECOVALEX-2023, 2025, 193p.
  - 32) Sugita, Y., Ohno, H., Beese, S., Pan, P., Kim, M., Lee, C., Jové-Colón, C., Lopez, C. M. and Liang, S.-Y.: Numerical simulation of coupled THM behaviour of full-scale EBS in backfilled experimental gallery in the Horonobe URL, *Geomechanics for Energy and the Environment*, vol.42, 2025, 100668.
  - 33) Kim, M., Lee, C., Sugita, Y., Kim, J.-S. and Jeon, M.-K.: Comparative analysis of primary variables selection in modeling non-isothermal two-phase flow: Insights from EBS experiment at Horonobe URL, *Geomechanics for Energy and the Environment*, vol 41, 2025, 100628.
  - 34) Mayor, J.-C.: ENRESA, Manuel Velasco/GOLDER: EB dismantling Synthesis report, (DELIVERABLE-N° D2.1-8), Long-term Performance of Engineered Barrier Systems PEBS, Contract (grant agreement) number: FP7 249681, 2014.
  - 35) Mäder, U., Detzner, K., Kober, F., Abplanalp, H., Baer, T. and Cloet, V.: FEBEX-DP - Plug Overcoring and Concrete-Bentonite Interface Sampling prior to Dismantling, 2016, Nagra NAB 16-10.

- 36) Tsang, C. F., Bernier, C. and Davies, C.: Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays – in the context of radioactive waste disposal, *Int J Rock Mech Min Sci*, vol.42, 2005, pp.109-125.
- 37) Bock, H. Dehandschutter, B. Martin, C. D. Mazurek, M. de Haller, A. Skoczylas, F. and Davy, C.: Self-sealing of fractures in argillaceous formations in the context of geological disposal of radioactive waste, *Review and Synthesis Report*. OECD NEA 6184, ISBN 978-92-64-99095-1, 2010.
- 38) 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊3 地層処分システムの安全評価. JNC TN1400 99-023, 1999, 529p.
- 39) Andra: Dossier 2005 Argile Tome Safety evaluation of a geological repository, France. 2005.
- 40) Nuclear Waste Management Organization of Japan: Safety of the Geological Disposal Project 2010– Safe Geological Disposal Based on Reliable Technologies, NUMO-TR-13-05, 2013, 148p.
- 41) 原子力発電環境整備機構: 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—, NUMO-TR-20-03, 2021, 807p.
- 42) Poller, A., Smith, P., Mayer, G. and Hayek M.: Modelling of radionuclide transport along the underground access structures of deep geological repositories. Nagra Technical Report 14-10, 2014, 166p.
- 43) NEA: International Features, Events and Processes (IFEP) List for the deep geological disposal of radioactive waste, NEA/RWM/R (2019), 2019.
- 44) Gelhar, L. W., Welty, C. and Rehfeldt, K. R.: A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifers, *Water Resources Research*, vol.28, no.7, 1992, pp.1995-1974.
- 45) Neuman, S. P.: On advective transport in fractal permeability and velocity fields, *Water Resources Research*, vol.31, no.6, 1995, pp.1455-1460.
- 46) 武田匡樹, 石井英一: 原位置トレーサー試験による堆積岩中の掘削損傷領域内の移流分散評価, *原子力バックエンド研究*, vol.31, no. 1, 2024, pp.3-10.
- 47) Aoyagi, K. and Ishii, E.: A method for estimating the highest potential hydraulic conductivity in the excavation damaged zone in mudstone, *Rock Mech. Rock Eng.*, vol.52, 2019, pp.385-401.
- 48) Ishii, E.: Constant-head step injection tests to quantify the stress dependence of fracture transmissivity in an excavation damaged zone: A case study from the Horonobe Underground Research Laboratory, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol.159, 2022, 105229.
- 49) 吉野浩光, 佐俣洋一, 丹生屋純夫, 石井英一: 幌延深地層研究計画における 350m 試験坑道掘削影響領域を対象とした透水試験 (その1), *JAEA-Data/Code* 2018-015, 2019, 169p.
- 50) 佐俣洋一, 石井英一: 幌延深地層研究計画における 350m 試験坑道掘削影響領域を対象とした透水試験 (その2), *JAEA-Data/Code* 2019-020, 2019, 69p.
- 51) Miyakawa, K. and Nakata, K.: Data of groundwater chemistry obtained in the Horonobe Underground Research Laboratory Project (FY2022), *JAEA-Data/Code* 2022-013, 2023, 19p.
- 52) 青柳和平, 川手訓: 幌延深地層研究計画 平成 25 年度地下施設計測データ集, *JAEA-Data/Code* 2015-017, 2015, 118p.
- 53) GoldSim Technology Group: GoldSim Contaminant Transport Module, User's Guide, Version 14.0. 2021.
- 54) Katsuyama, C., Nashimoto, H., Nagaosa, K., Ishibashi, T., Furuta, K., Kinoshita, T., Yoshikawa, H., Aoki, K., Asano, T., Sasaki, Y., Sohrin, R., Komatsu, D. D., Tsunogai, U., Kimura, H., Suwa, Y. and Kato, K.: Occurrence and potential activity of denitrifiers and methanogens in groundwater at 140 m depth in Pliocene diatomaceous mudstone of northern Japan, *FEMS Microbiology Ecology*, vol.86, no.3, 2013, pp.532-543.
- 55) Hensdorf, A. W., Amano, Y., Miyakawa, K., Ise, K., Suzuki, Y., Anantharaman, K., Probst, A., Burstein, D., Thomas, B. C, and Banfield, J. F.: Potential for microbial H<sub>2</sub> and metal transformations associated with novel bacteria and archaea in deep terrestrial subsurface sediments, *The ISME Journal*, vol.11, no.8, 2017, pp.1915-1929.
- 56) Hug, L. A., Baker, B. J., Anantharaman, K., Brown, C. T., Probst, A. J., Castelle, C. J., Butterfield,

- C. N., HERNSDORF, A. W., AMANO, Y., ISE, K., SUZUKI, Y., DUDEK, N., RELMAN, D. A., FINSTAD, K. M., AMUNDSON, R., THOMAS, B. C. and BANFIELD, J. F.: A new view of the tree of life, *Nature Microbiology*, vol.1, 2016, 16048.
- 57) Ino, K., HERNSDORF, A.W., KONNO, U., KOUDEKA, M., YANAGAWA, K., KATO, S., SUNAMURA, M., HIROTA, A., TOGO, Y. S., ITO, K., FUKUDA, A., IWATSUKI, T., MIZUNO, T., KOMATSU, D. D., TSUNOGAI, U., ISHIMURA, T., AMANO, Y., THOMAS, B. C., BANFIELD, J. F. and SUZUKI, Y.: Ecological and genomic profiling of anaerobic methane-oxidizing archaea in a deep granitic environment, *The ISME J.*, vol.12, no.1, 2018, pp.31-47.
- 58) Ise, K., Sasaki, Y., Amano, Y., Iwatsuki, T., Nanjo, I., Asano, T., and Yoshikawa, H.: The succession of bacterial community structure in groundwater from a 250-m gallery in the Horonobe Underground Research Laboratory, *Geomicrobiology Journal*, vol.34, no.6, 2017, pp.489-499.
- 59) Terashima, M., Nagao, S., Iwatsuki, T., Fujitake, N., Seida, Y., Iijima, K. and Yoshikawa, H.: Europium-binding abilities of dissolved humic substances isolated from deep groundwater in Horonobe area, Hokkaido, Japan, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol.49, no.8, 2012, pp.804-815.
- 60) Kimuro, S., Kirishima, A., Nagao, S., Saito, T., Amano, Y., Miyakawa, K., Akiyama, D. and Sato, N.: Characterization and thermodynamic study of humic acid in deep groundwater at Horonobe, Hokkaido, Japan, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol.55, no.5, 2018, pp.503-515.
- 61) Kirishima, A., Kuno, A., Amamiya, H., Kubota, T., Kimuro, S., Amano, Y., Miyakawa, K., Iwatsuki, T., Mizuno, T., Sasaki, T. and Sato, N.: Interaction of rare earth elements and components of the Horonobe deep groundwater, *Chemosphere*, vol.168, 2017, pp.798-806.
- 62) Kozai, N., Ohnuki, T. and Iwatsuki, T.: Characterization of saline groundwater at Horonobe, Hokkaido, Japan by SEC-UV-ICP-MS: Speciation of uranium and iodine, *Water Research*, vol.47, no.4, 2013, pp.1570-1584.
- 63) Saito, T., Hamamoto, T., Mizuno, T., Iwatsuki, T. and Tanaka, S.: Comparative study of granitic and sedimentary groundwater colloids by flow-field flow fractionation coupled with ICP-MS, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol.30, no.6, 2015, pp.1229-1236.
- 64) Sasamoto, H. and Onda, S.: Preliminary results for natural groundwater colloids in sedimentary rocks of the Horonobe Underground Research Laboratory, Hokkaido, Japan, *Geological Society, London, Special Publications*, vol.482, 2018, pp.191-203.
- 65) Stumm, W. and Morgan, J. J.: *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*, Third Edition, Wiley, 1996.
- 66) Knoll, A.: Overview, In Space Studies Board (ed.), *Size Limits of Very Small Microorganisms: Proceedings of a Workshop*. National Academy Press, Washington, D.C., 1999, pp.1-3.
- 67) 武田匡樹, 石井英一, 大野宏和, 川手訓: ガスが溶存した地下水を含む泥岩中の割れ目を対象とした原位置トレーサー試験条件の設定に関する検討, *原子力バックエンド研究*, vol.25, no.1, 2018, pp.3-14.
- 68) Kirishima, A., Terasaki, M., Miyakawa, K., Okamoto, Y. and Akiyama, D.: Deep groundwater physicochemical components affecting actinide migration, *Chemosphere*, vol.289, 2022, 133181.
- 69) Terashima, M., Endo, T. and Miyakawa, K.: Determination of humic substances in deep groundwater from sedimentary formations by the carbon concentration-based DAX-8 resin isolation technique, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol.57, no.4, 2020, pp.380-387.
- 70) Saito, T., Nishi, S., Amano, Y., Beppu, H. and Miyakawa, K.: Origin of dissolved organic matter in deep groundwater of marine deposits and its implication for metal binding, *ES&T Water*, vol.3, no.12, 2023, pp.4103-4112.
- 71) Nishimura, H., Kouduka, M., Fukuda, A., Ishimura, T., Amano, Y., Beppu, H., Miyakawa, K. and Suzuki, Y.: Anaerobic methane-oxidizing activity in a deep underground borehole dominantly colonized by *Ca*. Methanoperedenaceae, *Environmental Microbiology Reports*, vol.15, no.3, 2023, pp.197-205.
- 72) Hirota, A., Kouduka, M., Fukuda, A., Miyakawa, K., Sakuma, K., Ozaki, Y., Ishii, E. and Suzuki, Y.: Biofilm formation on excavation damaged zone fractures in deep neogene sedimentary rock,

- Microbial Ecology, vol.87, 2024, 132.
- 73) Amano, Y., Sachdeva, R., Gittins, D., Anantharaman, K., Lei, S., Valentin-Alvarado, L. E., Diamond, S., Beppu, H., Iwatsuki, T., Mochizuki, A., Miyakawa, K., Ishii, E., Murakami, H., Jaffe, A. L., Castelle, C., Lavy, A., Suzuki, Y. and Banfield, J. F.: Diverse microbiome functions, limited temporal variation and substantial genomic conservation within sedimentary and granite rock deep underground research laboratories, *Environmental Microbiome*, vol.19, 2024, 105.
- 74) Mochizuki, A. and Ishii, E.: Assessment of the level of activity of advective transport through fractures and faults in marine deposits by comparison between stable isotope compositions of fracture and pore waters, *Hydrogeology Journal*, vol.30, 2022, pp.813-827.
- 75) Mochizuki, A. and Ishii, E.: Paleohydrogeology of the Horonobe area, Northern Hokkaido, Japan: groundwater flow conditions during glacial and postglacial periods estimated from chemical and isotopic data for fracture and pore water, *Applied Geochemistry*, vol.155, 2023, 105737.
- 76) Ishii, E.: The highest potential transmissivities of fractures in fault zones: Reference values based on laboratory and in situ hydro-mechanical experimental data, *Engineering Geology*, vol.294, 2021, 106369.
- 77) Mazurek, M., Lanyon, G. W., Vomvoris, S. and Gautschi, A.: Derivation and application of a geologic dataset for flow modelling by discrete fracture networks in low-permeability argillaceous rocks, *Journal of Contaminant Hydrology*, vol.35, 1998, pp.1-17.
- 78) Bossart, P., Meier, P. M., Moeri, A., Trick, T. and Mayor, J. C.: Geological and hydraulic characterization of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory, *Engineering Geology*, vol.66, 2002, pp.19-38.
- 79) Ishii, E.: Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single-borehole investigations, *Water Resources Research*, vol.54, 2018, pp.3335-3356.
- 80) Ishii, E.: Effects of flow dimension in faulted or fractured rock on natural reductions of inflow during excavation: a case study of the Horonobe Underground Research Laboratory site, Japan, *Hydrogeology Journal*, vol.31, 2023, pp.893-911.
- 81) Ozaki, Y., Ishii, E. and Sugawara, K.: Variation in fault hydraulic connectivity with depth in mudstone: an analysis of poroelastic hydraulic response to excavation in the Horonobe URL. *Geomechanics for Energy and the Environment*, vol.31, 2022, 100311.
- 82) Ozaki, Y. and Ishii, E.: Relationship between fault transmissivity, flow dimensions and effective hydraulic conductivity in siliceous mudstone of the Wakkanai Formation around the Horonobe Underground Research Laboratory in Japan, *Geoenergy*, vol.2, 2024, geoenergy2023-056.
- 83) Ishii, E., Ozaki, Y., Aoyagi, K. and Sugawara, K.: Rock strength and stress dependence of local flow-path connectivity within faults or fractures: a preliminary overview of virtual and in-situ hydraulic tests, *Hydrogeology Journal*, vol.33, 2025, pp.63-85.
- 84) 中山雅, 石井英一, 青柳和平, 早野明, 村上裕晃, 大野宏和, 武田匡樹, 深津勇太, 望月陽人, 尾崎裕介, 木村駿, 出井俊太郎, 佐久間圭佑, 田村友識, 岩井亮, 加藤祥成, 藤枝大吾: 幌延深地層研究計画 令和6年度調査研究成果報告, *JAEA-Review 2025-042*, 2025, 136p.
- 85) Ohno, H., Ishii, E. and Takeda, M.: Modelling transport pathways of faults with low hydraulic connectivity in mudstones with low swelling capacity, *Geoenergy*, vol.2, no.1, 2024, geoenergy2023-047.
- 86) 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 高レベル放射性廃棄物関連: 処分システム工学要素技術高度化開発 遠隔操作技術高度化開発 人工バリア品質評価技術の開発 モニタリング技術の開発 平成19年度~平成24年度の取りまとめ報告書, 2013, 222p.
- 87) 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発報告書(第3分冊) 可逆性・回収可能性の意義及び確保のあり方の整理/回収可能性の維持についての検討, 2018, 441p.
- 88) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 日本原子力研究開発機構: 令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]回収可能性技術高度化開発3ヵ年取りまとめ報告書, 2023, 107p.
- 89) 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所: 令和5年

- 度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]地層処分安全評価確証技術開発ニアフィールド長期環境変遷評価技術開発報告書, 2024.
- 90) 地盤工学会：新規制定地盤工学会基準・同解説 低透水性材料の透水試験方法, JGS0312-2018, 2018, 30p.
- 91) 中山雅：幌延 URL における低アルカリ性セメント系材料の劣化および周辺環境への影響調査, JAEA-Data/Code 2020-009, 2020, 98p.
- 92) Mochizuki, A., Matsui, H., Nakayama, M., Sakamoto, R., Shibata, M., Motoshima, T. and Jo. M.: Long-term changes in the chemical, microstructural, and transport properties of a low-pH cement shotcrete during operation of the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, *Case Studies in Construction Materials*, vol.22, 2025, e04648.
- 93) Ngala, V. T. and Page, C. L.: Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes, *Cement and Concrete Research*, vol.27, no.7, 1997, pp.995-1007.
- 94) Leeman, A., Nygaard, P., Kaufmann, J. and Loser, R.: Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete, *Cement and Concrete Composites*, vol.62, 2015, pp.33-43.
- 95) von Greve-Dierfeld, S. and Gehlen, C.: Performance-based durability design, carbonation part 2 – Classification of concrete, *Structural Concrete*, vol.17, 2016, pp.523-532.
- 96) 中山雅（編）：幌延深地層研究計画 令和 4 年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2023-032, 2024, 159p.
- 97) 中山雅（編）：幌延深地層研究計画 令和 5 年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2024-042, 2024, 111p.
- 98) 松井裕哉, 本島貴之, 柴田真仁, 坂本亮, 望月陽人：地盤工学会基準に基づく HFSC 吹付けコンクリート供試体の透水試験, 令和 5 年度土木工学会全国大会第 78 回年次学術講演会, 2023.
- 99) Miyakawa, K., Aoyagi, K., Akaki, T. and Yamamoto, H.: The effect of dissolved gas on rock desaturation in artificial openings in geological formations, *Proceedings of 5th ISRM YSRM2019 & REIF2019*, Okinawa, 2019, pp.834-839.
- 100) 井上博之, 吉野尚人, 宮野前俊一, 水谷和彦, 野田兼司：軟岩の長期力学的変形挙動研究 (II), JNC TJ8400 2004-005, 2004, 161p.
- 101) Tsusaka, K., Inagaki, D., Niunoya, S. and Jo, M.: An investigation on mechanical properties of in-situ rock mass at the Horonobe Underground Research Laboratory, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 2014, pp.591-599.
- 102) 大久保誠介, 金豊年：非線形粘弾性モデルによる円形坑道周辺岩盤挙動のシミュレーション, *資源と素材*, vol.109, no.3, 1993, pp.209-214.
- 103) 青柳和平, 石井英一, 石田毅：幌延深地層研究センターの 350m 調査坑道における掘削損傷領域の破壊様式の検討, *Journal of MMIJ*, vol.133, no.2, 2017, pp.25-33.
- 104) 市川康明, 亀村勝美：有限要素法による数値解析入門 4.地盤の変形解析, *土と基礎*, vol.36, no.9, 1998, pp.81-88.
- 105) Barton, N., Bandis, S. and Bakhtar, K.: Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol.22, 1985, pp.121-140.
- 106) Aoyagi, K. and Ishii, E.: Evaluation of temporal changes in fracture transmissivity in an excavation damaged zone after backfilling a gallery excavated in mudstone, *Environ Earth Sci.*, vol.83, no.98, 2024, s12665-023-11416-x.
- 107) 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター：令和 4 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]地層処分施設閉鎖技術確証試験報告書, 2023.
- 108) 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター：令和 4 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]地層処分施設閉鎖技術確証試験 5 ヶ年取りまとめ報告書, 2023.

- 109) 中山雅 (編) : 幌延深地層研究計画 令和 3 年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2022-025, 2022, 164p.
- 110) Hvorslev, M. T.: Time lag and soil permeability in ground-water observations, U.S. Army Waterways Experiment Station, Bull no.36, 1951, 50p.
- 111) Jacob, C. J. and Lohman, S. W.: Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer, Trans. American geophysical Union, vol.33, no.4, 1952, pp.559-569.
- 112) Ozaki, Y.: First-arrival traveltime tomography for monitoring the excavation damaged zone in the Horonobe Underground Research Laboratory, Rock Mechanics Bulletin, vol.2, no.3, 2023, 100057.
- 113) Ozaki, Y., Aoyagi, K., Ohno, H. and Kimura, S.: Variation of electrical resistivity distribution around the opened and backfilled tunnel in the Horonobe Underground Research Laboratory, Proceedings of CouFrac2024, - The 4th International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media: Observation, Modeling, and Application, 2024.
- 114) 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター: 令和 2 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]地層処分施設閉鎖技術確証試験報告書, 2021.
- 115) 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター: 令和 3 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]地層処分施設閉鎖技術確証試験報告書, 2022.
- 116) 菊池広人, 宇田俊秋, 林大介, 江守稔, 木村駿: 縦置き・ブロック方式における緩衝材の流出量評価手法の検討, 原子力バックエンド研究, vol.31, no.1, 2024, pp.11-20.
- 117) 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター: 令和 4 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書, 2023.
- 118) 横山信吾, 田中幸久: イオン交換水で飽和したベントナイト系材料の透水性と膨潤特性に及ぼす熱影響に関する実験的検討, 電力中央研究所報告 N11021, 2012, 32p.
- 119) 石川博久, 柴田雅博, 藤田朝雄: 放射性廃棄物地層処分における緩衝材のイライト化変質シミュレーション, 粘土化学, vol.34, 1994, pp.149-156.
- 120) Karmland, O., Sandén, T., Johannesson, L. E., Eriksen, T. E., Jansson, M., Wold, S., Pedersen, K., Motamedi, M. and Rosborg, B.: Long term test of buffer material: Final report on the pilot parcels, SKB Technical Report TR-00-22, 2000, 131p.
- 121) Karmland, O., Olsson, S., Dueck, A., Birgesson, M., Nilsson, U., Hernan-Håkansson, T., Pedersen, K., Nilsson, S., Eriksen, T. E. and Rosborg, B.: Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project: Final report on the A2 test parcel, SKB Technical Report TR-09-29, 2009, 296p.
- 122) Karmland, O., Olsson, S., Sandén, T., Fäith, B., Jansson, M., Eriksen, T.E., Svärdström, K., Rosborg, B. and Muurinen, A.: Long term test of buffer material at the Äspö HRL, LOT project: Final report on the A0 test parcel, SKB Technical Report TR-09-31, 2011, 123p.
- 123) Åkesson, M.: Temperature buffer test: Final report, SKB Technical Report TR-12-04, 2012, 50p.
- 124) Müller, H. R., Garitte, B., Vogt, T., Köhler, S., Sasaki, T., Weber, H., Spillmann, T., Hertrich, M., Becker, J. K., Giroud, N., Cloet, V., Diomidis, N. and Vietor, T.: Implementation of the full-scale emplacement (FE) experiment at the Mont Terri rock laboratory, Swiss Journal of Geosciences, vol. 110, 2017, pp. 287-306.
- 125) Gaus, I., Garitte, B., Senger, R., Gens, A., Vasconcelos, R., Galcia-Sineriz, J. L., Trick, T., Wiczorek, K., Czaikowski, O., Schster, K., Mayor, J. C., Velasco, M., Kuhlmann, U. and Villar, M. V.: The HE-E experiment: Lay-out, interpretation and THM modelling, Nagra Arbeitsbericht NAB 14-53, 2014, 140p.
- 126) Kober, F., Schneeberger, R., Vomvoris, S., Finsterle, S. and Lanyon, B.: The HotBENT Experiment: objectives, design, emplacement and early transient evolution, Geoenergy, vol.1, geoenergy2023-021, 2023.
- 127) 高倉望, 岡田哲実, 池野谷尚史, 澤田昌孝, 平野公平, 谷和夫: 堆積軟岩の原位置加熱実験計

- 画 (フェーズ III・IV), 第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 講演番号 47, 2011. pp. 266-269.
- 128) Chijimatsu, M., Fujita, T., Sugita, Y. and Taniguchi, W.: Evaluation of coupled thermo-hydro-mechanical phenomena in the near field for geological disposal of high-level radioactive waste, JNC TN8400 2000-008, 2000, 339p.
- 129) 茂呂吉司, Oanh, T. D. P., 雨宮清: 釜石鉱山における粘土充填・熱負荷試験 (II), PNC TJ1412 97-001, 1997, 632p.
- 130) 炭山守男: 土壌埋設鋼材の長期腐食挙動に関する研究(XI), JNC TJ8400 99-042, 1999, 203p.
- 131) 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター: 令和 3 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書, 2022.
- 132) 日本原子力研究開発機構: 平成 24 年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム化学影響評価高度化開発-6 ヶ年研究成果の取りまとめ-, 2013.
- 133) 鈴木英明, 高山裕介: ニアフィールドにおける過渡期の熱-水-応力連成挙動に及ぼす緩衝材の密度変化の影響評価(受託研究), JAEA-Research 2020-015, 2020, 52p.
- 134) 菊池広人, 棚井憲治, 松本一浩, 上野健一, 佐藤治夫, 鐵剛志: 緩衝材の飽和透水特性-II; 一海水性地下水が緩衝材の透水性に及ぼす影響一, JNC TN 8430 2003-002, 2003, 47p.
- 135) Huang, W. L., Longo, J. M. and Pevear, D. R.: An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer, *Clays and Clay Minerals*, vol.41, 1993, pp.162-177.
- 136) Wersin, P., Johnson, L. H. and McKinley, I. G.: Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100°C: A critical review, *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 32, 2007, pp. 780-788.
- 137) Cho, W. J. and Kim, G. Y.: Reconsideration of thermal criteria for Korean spent fuel repository, *Annals of Nuclear Energy*, vol.88, 2016, pp.73-82.
- 138) Pytte, A. M. and Reynolds, R. C.: The thermal transformation of smectite to illite, In: Naeser, N. D. and McCulloh, T. H.: *Thermal history of sedimentary basins*, Springer-Verlag, 1989, pp.133-140.
- 139) Pusch, P. and Madsen, F. T.: Aspects on the illitization of the Kinnekulle bentonites, *Clays and Clay Minerals*, vol.43, 1995, pp.261-270.
- 140) Johnson, L., Gaus, I., Wiczorek, K., Mayor, J. C., Sellin, P., Villar, M.-V., Samper, J., Cuevas, J. A., Gens, M., Velasco, M., Turrero, M. J., Montenegro, L., Martin P.-L. and Armand G: Integration of the short-term evolution of the Engineered Barrier System (EBS) with the long-term safety perspective (Deliverable D4.1 of the PEBS Project), *Nagra Arbeitsbericht NAB 14-79*, 2014, 85p.
- 141) Ishii, E.: Predictions of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones from rock rheology: Preliminary results, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.120, 2015, pp.2220-2241.
- 142) Kuang, X. and Jiao, J. J.: An integrated permeability-depth model for Earth's crust, *Geophysical Research Letters*, vol.41, 2014, pp.7539-7545.
- 143) Bandis, S. C.: Experimental studies of scale effects on shear strength and deformation of rock joints, Ph.D. thesis, University of Leeds, 1980.
- 144) Aoyagi, K., Ishii, E., Chen, Y. and Ishida, T.: Resin-injection testing and measurement of the shear displacement and aperture of excavation-damaged-zone fractures: a case study of mudstone at the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol.55, 2022, pp.1855-1869.
- 145) Ishii, E.: A conventional straddle-sliding-packer system as a borehole extensometer: Monitoring shear displacement of a fault during an injection test, *Engineering Geology*, vol.275, 2020, 105748.
- 146) 山本卓也, 下茂道人, 藤原靖, 服部弘通, 田所照夫, 岩間彦衛, 名合牧人, 熊本創: 幌延深地層研究センターにおける試錐調査 (HDB-1 孔), JNC TJ1400 2002-010, 2002, 921p.
- 147) Ishii, E.: Estimation of the highest potential transmissivity of discrete shear fractures using the ductility index, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol.100, 2017, pp.10-

- 22.
- 148) Mazurek, M.: Evolution of gas and aqueous fluid in low-permeability argillaceous rocks during uplift and exhumation of the central Swiss Alps, *Applied Geochemistry*, vol.15, 1999, pp.211-234.
- 149) Mazurek, M., Lanyon, G. W., Vomvoris, S. and Gautschi, A.: Derivation and application of a geologic dataset for flow modeling by discrete fracture networks in low-permeability argillaceous rocks, *Journal of Contaminant Hydrology*, vol.35, 1998, pp.1-17.
- 150) NAGRA: Geosynthese Wellenberg 1996 – Ergebnisse der Untersuchungsphasen I und II, Nagra NTB 96-01, 1997, 511p.
- 151) Gutmanis, J. C., Lanyon, G. W., Wynn, T. J. and Watson, C. R.: Fluid flow in faults: a study of fault hydrogeology in Triassic sandstone and Ordovician volcanoclastic rocks at Sellafield, north-west England, *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, vol.52, 1998, pp.159-175.
- 152) Medici, G., West, L. J., Mountney, N. P. and Welch, M.: Permeability of rock discontinuities and faults in the Triassic Sherwood Sandstone Group (UK): insights for management of fluvio-aeolian aquifers worldwide, *Hydrogeology Journal*, vol.27, 2019, pp.2835-2855.
- 153) Milodowski, A. E., Gillespie, M. R., Naden, J., Fortey, N. J., Shepherd, T. J., Pearce, J. M. and Metcalfe, R.: The petrology and paragenesis of fracture mineralization in the Sellafield area, west Cumbria, *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, vol.52, 1998, pp.215-241.
- 154) Boisson, J.-Y., Bertrand, L., Heitz, J.-F. and Golvan, Y. M.-L.: In situ and laboratory investigations of fluid flow through an argillaceous formation at different scales of space and time, Tournemire tunnel, southern France, *Hydrogeology Journal*, vol.9, 2001, pp.108-123.
- 155) Donzé, F.-V., Tsopela, A., Guglielmi, Y., Henry, P. and Gout, C.: Fluid migration in faulted shale rocks: channeling below active faulting threshold, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol.27, 2023, pp.2587-2601.
- 156) Guglielmi, Y., Elsworth, D., Cappa, F., Henry, P., Gout, C., Dick, P. and Durand, J.: In situ observations on the coupling between hydraulic diffusivity and displacements during fault reactivation in shales, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.120, 2015, pp.7729-7748.
- 157) Guglielmi, Y., Nussbaum, C., Cappa, F., De Barros, L., Rutqvist, J. and Birkholzer, J.: Field-scale fault reactivation experiments by fluid injection highlight aseismic leakage in caprock analogs: implications for CO<sub>2</sub> sequestration, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol.111, 2021, 103471.
- 158) Lefèvre, M., Guglielmi, Y., Henry, P., Dick, P. and Gout, C.: Calcite veins as an indicator of fracture dilatancy and connectivity during strike-slip faulting in Toarcian shale (Tournemire tunnel, Southern France), *Journal of Structural Geology*, vol.83, 2016, pp.73-84.
- 159) OECD/NEA: Clay club catalogue of characteristics of argillaceous rocks: 2022 update, NEA No. 7249, 2022, 242p.
- 160) Savoye, S., Cabrera, J. and Matray, J.-M.: Different hydraulic properties of single fractures in argillaceous medium: the case of the IRSN Tournemire site (France), *Proceedings of the IAH Conference of Groundwaters in Fractured Rocks*, 2003, pp.383-384.
- 161) Su, X., Nguyen, S., Haghighat, E., Pietruszczak, S., Labrie, D., Barnichon, J.-D. and Abdi, H.: Characterizing the mechanical behaviour of the Tournemire argillite, *Geological Society, London, Special Publications*, vol.443, 2017, pp.97-113.
- 162) Gautschi, A.: Safety-relevant hydrogeological properties of the claystone barrier of a Swiss radioactive waste repository: An evaluation using multiple lines of evidence, *Grundwasser*, vol.22, 2017, pp.221-233.
- 163) Giger, S. and Marschall, P.: Geomechanical properties, rock models and in-situ stress conditions for Opalinus Clay in Northern Switzerland, Nagra NAB 14-01, 2014, 86p.
- 164) Guglielmi, Y., Nussbaum, C., Rutqvist, J., Cappa, F., Jeanne, P. and Birkholzer, J.: Estimating perturbed stress from 3-D borehole displacements induced by fluid injection in fractured or faulted shales, *Geophysical Journal International*, vol.221, 2020, pp.1684-1695.
- 165) Jeanne, P., Guglielmi, Y., Rutqvist, J., Nussbaum, C. and Birkholzer, J.: Permeability variations associated with fault reactivation in a claystone formation investigated by field experiments and numerical simulations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.123, 2018, pp.1694-1710.

- 166) 宮川和也, 石井英一, 今井久, 平井哲, 大野宏和, 中田弘太郎, 長谷川琢磨: 亀裂性堆積岩を対象とした地下水流動解析における有効間隙率の与え方: 北海道幌延に分布する声間層と稚内層浅部の事例, 原子力バックエンド研究, vol.31, no.2, 2024, pp.82-95.
- 167) Mazurek, M.: Geological, hydrogeological and hydrochemical field evidence for fault sealing in marls from Wellenberg, Switzerland, Proceedings of the self-healing topical session of the IGSC working group on measurement and physical understanding of groundwater flow through argillaceous media (Clay Club), OECD/NEA, 2001, pp.31-34.
- 168) Vomvoris, S., Scholtis, A., Waber, H. N., Pearson, F. J., Voborny, O., Schindler, S. and Vinard, P.: Lessons learned from the use of hydrochemical data for the evaluation of groundwater-flow models developed within the Swiss L/ILW programme, Use of hydrogeochemical information in testing groundwater flow models, OECD/NEA, 1999, pp.107-117.
- 169) Ishii, E., Sanada, H., Funaki, H., Sugita, Y., and Kurikami, H.: The relationships among brittleness, deformation behavior, and transport properties in mudstones: an example from the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, Journal of Geophysical Research, vol.116, 2011, B09206.
- 170) Ohno, H. and Ishii, E.: Effect of fault activation on the hydraulic connectivity of faults in mudstone, Geomechanics for Energy and the Environment, vol.31, 2022, 100317.
- 171) Neuzil, C. E.: Interpreting fluid pressure anomalies in shallow intraplate argillaceous formations, Geophysical Research Letters, vol.42, 2015, pp.4801-4808.
- 172) Arthur, R., Sasamoto, H., Alt-Epping, P. and Tachi, Y.: Paleoclimatic controls on natural tracer profiles in biogenic sedimentary formations of the Horonobe area, Japan, Applied Geochemistry, vol.155, 2023, 105707.
- 173) Kurikami, H., Takeuchi, R. and Yabuuchi, S.: Scale effect and heterogeneity of hydraulic conductivity of sedimentary rocks at Horonobe URL site, Physics and Chemistry of the Earth vol.33, 2008, pp.S37-S44.
- 174) Miyakawa, K., Nohara, T., Tokiwa, T. and Yamazaki, M.: Seven-year history of vertical hydraulic diffusivity related to excavation around an underground facility, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol.70, 2014, pp.332-342.
- 175) Nirex: Sellafield geological and hydrogeological investigations: the derivation of freshwater and environmental heads, hydraulic conductivity and borehole chloride values with uncertainty limits for use in Nirex 97 groundwater modelling, Nirex report SA/97/065, 1997.
- 176) Streetly, M. J., Heathcote, J. A. and Degnan, P. J.: Estimation of vertical diffusivity from seasonal fluctuations in groundwater pressures in deep boreholes near Sellafield, NW England, Geological Society Special Publication, vol.263, 2006, pp.155-167.
- 177) Savoye, S., Michelot, J.-L., Bensenouci, F., Matray, J.-M. and Cabrera, J.: Transfers through argillaceous rocks over large space and time scales: Insights given by water stable isotopes, Physics and Chemistry of the Earth, vol.33, 2008, pp.S67-S74.
- 178) Tremosa, J., Gonçalves, J. and Matray, J.-M.: Natural conditions for more limited osmotic abnormal fluid pressures in sedimentary basins, Water Resources Research, vol.48, 2012, W04530.
- 179) Gonçalves, J., Matray, J.-M. and Yu, C. J.: Assessing relevant transport processes in Opalinus Clay at the Mont Terri rock laboratory using excess-pressure, concentration and temperature profiles, Applied Clay Science, vol.242, 2023, 107016.
- 180) Mazurek, M., Alt-Epping, P., Bath, A., Gimmi, T., Waber, H. N., Buschaert, S., De Cannière, P., De Craen, M., Gautschi, A., Savoye, S., Vinsot, A., Wemaere, I. and Wouters, L.: Natural tracer profiles across argillaceous formations, Applied Geochemistry, vol.26, 2011, pp.1035-1064.
- 181) Yu, C., Matray, J.-M., Gonçalves, J., Jaeggi, D., Gräsele, W., Wiczorek, K., Vogt, T. and Sykes, E.: Comparative study of methods to estimate hydraulic parameters in the hydraulically undisturbed Opalinus Clay (Switzerland), Swiss Journal of Geosciences, vol.110, 2017, pp.85-104.
- 182) Ishii, E.: Constant-head step-injection tests using a conventional straddle-sliding-packer system for investigating the shear capabilities of minor faults, Rock Mechanics and Rock Engineering, vol.57, 2024, pp.8861-8878.

- 183) Nakata, K., Hasegawa, T., Oyama, T., Ishii, E., Miyakawa, K. and Sasamoto, H.: An evaluation of the long-term stagnancy of porewater in the Neogene sedimentary rocks in northern Japan. *Geofluids* 2018, 2018, 7823195.
- 184) 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所: 令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007587]岩盤中地下水流動評価技術高度化開発報告書, 2023, 417p.
- 185) 早野明, 佐藤菜央美: 地下水の流れが非常に遅い領域の分布を推定するための調査手順の検討, 日本原子力学会北海道支部第41回研究発表会, 2024.
- 186) 水野崇, 岩月輝希, 松崎達二: ボーリング孔を利用した比抵抗検層結果に基づく地下水水質の推定方法に関する検討, 応用地質, vol.58, no.3, 2017, pp.178-187.
- 187) 岸本宗丸, 高山純一, 横井浩一: 電磁法による地上物理探査, JNC TJ1420 2001-036, 2001, 177p.
- 188) 産業技術総合研究所: 沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発成果報告書 平成19年度, 2008, 256p.
- 189) 宮川和也, 早野明, 佐藤菜央美, 中田弘太郎, 長谷川琢磨: HFB-1 孔調査データ集, JAEA-Data/Code 2023-009, 2023, 103p.
- 190) Miyakawa, K., Kashiwaya, K., Komura, Y., and Nakata, K.: Evolution of porewater in a Neogene sedimentary formation in the Horonobe area, Hokkaido, Japan: Modeling of burial diagenesis, *GEOCHEMICAL JOURNAL*, vol.57, 2023, pp.155-175.
- 191) 天野由記, 山本陽一, 南條 功, 村上裕晃, 横田秀晴, 山崎雅則, 國丸貴紀, 大山隆弘, 岩月輝希: 幌延深地層研究計画における地下水, 河川水および降水の水質データ (2001~2010 年度), JAEA-Data/Code 2011-023, 2012, 312p.
- 192) 青柳和平, 陳友晴, 櫻井彰孝, 石井英一, 石田毅: 幌延深地層研究センターにおける掘削損傷領域の可視化手法の検討, JAEA-Research 2017-014, 2018, 49p.
- 193) 青柳和平, 陳友晴, 石井英一, 櫻井彰孝, 宮良信勝, 石田毅: 幌延深地層研究センターにおける掘削損傷領域の可視化手法の検討 (その 2) (共同研究), JAEA-Research 2019-011, 2020, 50p.
- 194) Aoyagi, K., Chen, Y., Ishii, E., Sakurai, A. and Ishida, T.: Visualization of fractures induced around the gallery wall in Horonobe Underground Research Laboratory, *Proceedings of 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future (YSRM 2019 and REIF 2019) (USB Flash Drive)*, 2019, 6p.
- 195) Asadollahi, P. and Tonon, F.: Constitutive model for rock fractures: Revisiting Barton's empirical model, *Engineering Geology*, vol.113, 2010, pp.11-32.

This is a blank page.

付録

令和 2 年度以降の研究工程

This is a blank page.

### 1.1 人工バリア性能確認試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R6の実施内容	研究期間								
					前半	後半							
<p>・実際の地質環境下における処分孔設置方式を対象とした熱-水-応力-化学連成現象(からス固化体設置以降の加熱・注浸潤時・減熱時を模擬した現象)に関する試験をとおして、設計や連成挙動評価手法の適用性の確認(人工バリアの解体試験および緩衝材の飽和度の確認を含む)、ならびに施工方法などの工学的実現性の明示等を行い、設計・施工および評価に関する基礎情報を整備する</p> <p>・これらをとおして、廃棄体埋設後における、廃棄体周辺で起こる現象の理解を深め、安全評価面において前提としている環境条件が達成されること、その予期技術を確認すること、人工バリアの設計に反映する</p>	<p>③④ 熱-水-化学連成現象(からス固化体設置以降の加熱・注浸潤時・減熱時)から加熱時(③)から浸潤時・減熱時を模擬した現象(④)を模擬した現象)の評価手法(モデル化・解析手法)の確立</p>	<p>④浸潤時・減熱時のデータを含め、からス固化体設置以降の加熱・注浸潤時・減熱時を全て模擬したデータに基づく熱-水-化学連成現象のモデルの高度化、及び浸潤時の実際の飽和度などの確認(解体試験による)</p>	<p>R2以降の実施内容</p> <p>④-1 注入する地下水の圧力や量を増加させ緩衝材に地下水を浸透させた場合のデータ(浸潤時・減熱時)を取得、連成モデルの適用性確認</p>	<p>R6の実施内容</p> <p>R6は実施しない</p>	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
					<p>前半の5程度で実施</p> <p>体系化して取り組み概念オプシヨンの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験)で実施</p>	<p>④-1 浸潤時・減熱時のデータ取得・連成モデルの適用性確認</p> <p>緩衝材中の温度の低下や緩衝材の間隙圧の低下を確認</p> <p>発熱がおきた条件での緩衝材の圧縮率を確認</p> <p>国際プロジェクトでの解析コード間の比較検証、改良・高度化</p>	<p>④-2 人工バリアの解体作業、緩衝材の飽和度の確認</p> <p>試験施工の埋め戻し材、プラグ、試験材の設置、注水開始</p> <p>解体施工の計画案(解体作業の順序・サンプリング方法)の決定</p> <p>解体作業の開始</p>	<p>前半</p> <p>R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10</p>	<p>後半</p> <p>R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10</p>				
<p>④-1 注入する地下水の圧力や量を増加させ緩衝材に地下水を浸透させた場合のデータ(浸潤時・減熱時)を取得、連成モデルの適用性確認</p>	<p>R2以降の実施内容</p> <p>④-1 注入する地下水の圧力や量を増加させ緩衝材に地下水を浸透させた場合のデータ(浸潤時・減熱時)を取得、連成モデルの適用性確認</p>	<p>R6の実施内容</p> <p>R6は実施しない</p>	<p>R6の実施内容</p> <p>R6は実施しない</p>	<p>前半</p> <p>R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10</p>	<p>後半</p> <p>R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10</p>								
<p>④-2 人工バリアの解体作業および緩衝材の飽和度の確認を実施する</p>	<p>R2以降の実施内容</p> <p>④-2 人工バリアの解体作業および緩衝材の飽和度の確認を実施する</p>	<p>R6の実施内容</p> <p>R6は実施しない</p>	<p>R6の実施内容</p> <p>R6は実施しない</p>	<p>前半</p> <p>R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10</p>	<p>後半</p> <p>R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10</p>								

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

## 1.2 物質移行試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R6の実施内容	研究期間	
					前半	後半
<p>・ 賦存量に分布する泥岩は断層等の構造性の割れ目が分布する基質部(=健岩部)における放射状および割れ目(掘削損傷領域)などの人為的な割れ目を含む)を介した経路・分散が主要な移行経路や形態として考えられる。</p> <p>・ 有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に影響を及ぼすことが考えられる。</p> <p>・ したがって、割れ目を有する堆積岩での物質移行経路や形態と物質移行に与える要因(有機物・微生物・コロイド等)を総合的に評価することが必要。</p> <p>・ そのため、賦延の泥岩を事例として、岩盤基質部(=健岩部)および割れ目の双方を対象とした原位置トレーサー試験等を実施し、それぞれの構造の物質移行特性評価手法を構築すること。</p> <p>・ 世界的にも事例が少ない泥岩中の割れ目を対象としたトレーサー試験手法を確立することも重要。</p> <p>・ あわせて、有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に及ぼす影響を把握することが重要。</p>	<p>① 岩盤基質部(=健岩部)を対象とした物質移行特性(物質の移動速度や岩盤へのくつきやすさ等)の評価手法の検証</p> <p>② 割れ目を対象とした物質移行特性(物質の移動速度や岩盤へのくつきやすさ等)の評価手法の検証</p> <p>③ 泥岩中の割れ目を対象としたトレーサー試験手法の検証</p> <p>④ 掘削損傷領域などの人為的な割れ目を対象とした物質移行特性(物質の移動速度や岩盤へのくつきやすさ等)の評価手法の検証</p> <p>⑤ 有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行モデルの高度化</p> <p>⑥ 声間層におけるトレーサー試験装置の適用性の確認および堆積岩層深部におけるトレーサー試験装置の適用性の確認</p> <p>⑦ 堆積岩層深部におけるトレーサー試験装置の適用性の確認</p> <p>⑧ 堆積岩層深部におけるトレーサー試験装置の適用性の確認</p>	<p>④ 掘削損傷領域の物質移行のモデル化/解析評価手法の取りまとめ</p> <p>⑤ 有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行モデルの高度化</p> <p>⑥ 声間層におけるトレーサー試験装置の適用性の確認および堆積岩層深部におけるトレーサー試験装置の適用性の確認</p>	<p>④ 掘削損傷領域におけるモデル化/解析評価手法の取りまとめ</p> <p>⑤ 有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行モデルの高度化</p> <p>⑥ 声間層におけるトレーサー試験装置の適用性の確認および堆積岩層深部におけるトレーサー試験装置の適用性の確認</p>	<p>前半の5年程度で実施</p> <p>④ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>⑤ 有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行モデルの高度化</p> <p>⑥ プロセススケール(数m~100m規模)における遅延性能評価手法の整備</p>	<p>後半</p> <p>体系化して取り組む課題(⑦)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験)で実施</p> <p>体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施</p> <p>令和6年度までに得られる成果</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 原位置試験データ(非吸着性/吸着性トレーサー)の取得</li> <li>○ EDZにおけるモデル化/解析評価手法の提示</li> </ul> <p>体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施</p> <p>令和6年度までに得られる成果</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 室内試験データ(非吸着性/吸着性を考慮した物質移行モデル)の提示</li> </ul> <p>体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施</p> <p>令和6年度までに得られる成果</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 原位置試験データ(非吸着性/吸着性トレーサー)の取得</li> <li>○ 賦延を事例としたプロセススケールの評価手法の提示</li> </ul>	
						<p>④ 確立したトレーサー試験手法を用いた掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得</p> <p>⑤ 有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行試験</p> <p>⑥ 割れ目を有する堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むプロセススケール(数m~100m規模)における遅延性能評価手法の整備</p> <p>⑦ 堆積岩層深部におけるトレーサー試験装置の適用性の確認</p> <p>⑧ 堆積岩層深部におけるトレーサー試験装置の適用性の確認</p>

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。



## 2.2 高温度(100℃超)などの限界条件下での人工バリア性能確認試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R6の実施内容	研究期間								
					前半	後半							
・人工バリア設置環境の深度依存性を考慮し、種々の処分概念オプションの工学的実用性を検証し、多様な地質環境条件に対して柔軟な処分設計を行うことを支援する技術オプションを提示する ・実際の処分事業では、オーバーバックが100℃以下になってから処分することが基本であるが、想定外の要因によって100℃を超えた状態になることを想定して、人工バリアシステムの安全裕度を検証する	① 100℃超の高温での限界環境が人工バリアに与える影響と上温度設定の検証のための検討	①高温(100℃以上)などの限界条件下での人工バリア性能確認試験による検証 ②100℃超の高温での限界環境が人工バリアに与える影響と上温度設定の検証のための検討	人工バリアシステムの安全裕度の検証に向けて、継ぎ目材が100℃超になった状態を想定した解析手法を開発するため以下を実施 ①-1 高温(100℃以上)などの限界条件下での人工バリア性能確認試験	①-1 高温条件での人工バリアの挙動に関する原位置試験の計画および実施	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
					前半の5年程度で実施 体系化して取り組む課題(②)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの位置・品質確認などの方法論に関する実証試験)で実施	海外での原位置試験の調査結果を基に、継ぎ目材の挙動に関する原位置試験の計画、実施、結果の抽出、抽出手法などを検討・計画策定	高温条件での人工バリアの挙動に関する原位置試験の開始	モニタリング継続、試験体の解析、結果の取りまとめ	体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施	令和6年度までに得られる成果 ○高温度(100℃以上)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験データの収集			
	①-2 100℃超になった際にニアフィールド(人工バリアとその周辺岩盤の領域)において発生する現象の整理	①-2 100℃超になった際にニアフィールド(人工バリアとその周辺岩盤の領域)において発生する現象の整理	①-2 シナリオ整理の継続、ニアフィールド構成材料を対象とした試験、分析	①-2 シナリオ整理の継続、ニアフィールド構成材料を対象とした試験、分析	①-1	①-2	①-3	①-4	①-5	①-6	①-7	①-8	①-9
					シナリオの整理、シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理	シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理	シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理	シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理	シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理	シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理	シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理	シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理	シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理
	①-3 ニアフィールドにおける上温度設定の考え方を提示(国際プロジェクト情報を収集し、発生する現象を整理)	①-3 ニアフィールドにおける上温度設定の考え方を提示(国際プロジェクト情報を収集し、発生する現象を整理)	①-3 海外の原位置試験に関する情報ならびに高温条件下で生じ得る現象をふまえた温度設定の考え方の提示	①-3 海外の原位置試験に関する情報ならびに高温条件下で生じ得る現象をふまえた温度設定の考え方の提示	①-1	①-2	①-3	①-4	①-5	①-6	①-7	①-8	①-9
					シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理	シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理	シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理	シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理	シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理	シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理	シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理	シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理	シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理、シナリオ整理

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。  
 ※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

### 3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

#### 3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

目的・背景・必要性・意義		課題		R2以降の課題		R2以降の実施内容		R6の実施内容		研究期間									
				R2以降の課題		R2以降の実施内容		R6の実施内容		前半					後半				
<p>・岩盤中には大小様々な断層が存在するが、小規模なものはいくつかは処分場に取り込まざるを得ない可能性がある。それらの断層が地震や隆起などの地殻変動の影響を受ける場合、その透水性がどの程度まで上昇し得るかを検討しておく必要がある。</p> <p>・断層の透水性は断層の変形モードに大きく依存する。脆性的な変形が起ると断層の透水性は有意に上昇しやすいが、延性的な変形の場合は透水性が断層的に上昇し、変形時の岩石強度、応力などに依存する。</p> <p>・本研究では、地殻変動に対する緩衝能力が潜在的に高いことから堆積岩に重点を置き、断層の強度・応力状態を計測できかつマップピング（空間的な分布図を示すこと）が可能なパラメータで指標化することを試みる。その潜在的なパラメータと断層の透水性の間には何らかの相関関係があることが期待される。</p> <p>・断層の透水性について現実的な状態設定が可能となる。断層は動いたとしても、その透水性は、地層の力学的な緩衝能力が働くことにより、一定の値を超えない。この現象を定量的に示したい。</p>		<p>①地殻変動に対する緩衝能力を表現するパラメータ（指標）の提案</p> <p>②水圧擾乱試験によるパラメータの有効性の検証</p>		<p>② 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握</p>		<p>断層の幅が数十 cm の断層における断層のずれが断層内の地下水の流れに与える影響に関して、堆積岩の緩衝能力（自己治癒能力）を定量的に評価する。</p> <p>②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握（ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験）</p>		<p>②-1 既往の水圧擾乱試験の結果の解析と取りまとめ</p>		<p>前半の5年程度で実施</p> <p>R2 R3 R4 R5 R6</p>					<p>後半</p> <p>R7 R8 R9 R10</p>				
		<p>体系化して取り組む課題（②）処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施</p>										<p>体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施</p>							
<p>より大型の水圧擾乱試験やシミュレーションの結果と改良を導き出す</p> <p>②-1 大型の水圧擾乱試験やシミュレーションの結果と改良を導き出す</p> <p>②-2 DI を用いた透水性評価の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備</p>										<p>令和6年度までに得られる成果</p> <p>○ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験データの取得</p>									
<p>②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法の整備</p>										<p>令和6年度までに得られる成果</p> <p>ODIを用いた透水性評価手法の高度化</p>									
<p>②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法の整備</p>										<p>令和6年度までに得られる成果</p> <p>○水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法の整備</p>									

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し直ししていく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

個別の要業技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「2.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」）に統合して実施する。

「2.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。



### 3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R6の実施内容	研究期間				
					後半				
<p>地震・断層活動等の地殻変動に 対する堆積岩の力学的・水理学 的な挙動能力(自己治癒能力)を 定量的に検証し、堆積岩領域に おける立地選定や処分場の設計 を、より科学的・合理的に行える 技術と知見を整備する</p> <p>① 人工バリアの 自己治癒能力(ひ び割れの修復)を 実証</p> <p>② 人工バリアの 自己治癒能力(ひ び割れの修復)を 実証</p>	<p>① 人工バリアの 自己治癒能力(ひ び割れの修復)を 実証</p> <p>② 人工バリアの 自己治癒能力(ひ び割れの修復)を 実証</p>	<p>② 地殻変動によ る人工バリアの 挙動能力(自己治癒 能力)を評価する手 法の確立</p> <p>② 人工バリアの 自己治癒能力(ひ び割れの修復)を 実証</p>	<p>人工バリアのひび割れに 対する自己治癒能力を実証 するため以下の机上検討を 実施</p> <p>② 人工バリアの繊維材や 坑道埋め戻し材が掘削損傷 領域(EDZ)の力学的・水理学 的な挙動能力(自己治癒能 力)に与える影響を把握す る解析手法の開発 ✓DIを用いたEDZの透水性 を予測する既存モデルの 再検証</p>	<p>R6は実施しない</p>	<p>前半</p> <p>前半の5年程度で実施</p> <p>R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10</p> <p>②-1 DIを用いたEDZの透水性を予測する既存モデルの再検証</p> <p>体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、 解析を実施</p>				
					<p>体系化して取り組む課題(②)処分概念オプシヨンの 実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論 に関する実証試験)で実施</p>				
			<p>坑道観察に 基づき、EDZ の割れ目開 口の状況を定 量的に把握 を改良</p>	<p>R6は実施しない</p>	<p>後半</p> <p>令和4年度までに得られる成果 ○DIを用いたEDZの透水性を予測す る既存モデルの再検証</p>				
					<p>②-2 坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデルの構築</p> <p>体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、 解析を実施</p>				
			<p>坑道埋め戻し後のEDZの 透水性を予測するモデル の構築</p>	<p>R6は実施しない</p>	<p>後半</p> <p>令和4年度までに得られる成果 ○坑道埋め戻し後のEDZの透水性を 予測するモデルの構築</p>				
					<p>②-2 坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデルの構築</p> <p>体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、 解析を実施</p>				
<p>個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題(「2.1.2 坑道スケール〜ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」)に統合して実施する。 「2.1.2 坑道スケール〜ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」を実施する中で、情報の不足等があっ た場合に追加で試験や解析を実施する。</p>									

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

This is a blank page.



