

幌延深地層研究計画
令和 5 年度調査研究成果報告

令和 6 年 7 月

日本原子力研究開発機構
幌延深地層研究センター

目次

1. はじめに.....	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
3. 令和5年度の主な調査研究の成果.....	7
4. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認.....	15
4.1 人工バリア性能確認試験.....	15
4.2 物質移行試験.....	20
5. 処分概念オプションの実証.....	32
5.1 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.....	32
5.1.1 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.....	32
5.2 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.....	55
6. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証.....	59
6.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化.....	59
6.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握.....	59
6.1.2 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.....	63
7. 令和2年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得.....	68
8. 地下施設の建設・維持管理.....	81
9. 環境調査.....	86
9.1 排水量および水質調査結果.....	86
9.2 掘削土（ズリ）の土壌溶出量調査結果.....	96
9.3 研究所用地周辺の環境影響調査結果.....	97
10. 安全確保の取り組み.....	101
11. 開かれた研究.....	102
11.1 国内機関との研究協力.....	102
11.2 国外機関との研究協力.....	109
12. 用語集.....	113
参考資料.....	123
参考文献.....	132
付録.....	137

図目次

図 1	令和 2 年度以降に取り組むべき研究課題	5
図 2	令和 5 年度の地下施設における主な調査研究の実施場所	12
図 3	研究所用地における主な施設と観測装置の配置	13
図 4	ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所	13
図 5	地質断面図	14
図 6	人工バリア性能確認試験の概念図	16
図 7	緩衝材温度の出力点とその経時変化	16
図 8	試験坑道 7 の掘削	16
図 9	人工バリア性能確認試験の計測データの例	17
図 10	緩衝材中の飽和度変化	19
図 11	比抵抗トモグラフィ測定により算出された緩衝材中の飽和度分布の経時変化	19
図 12	EDZ を対象としたトレーサー試験のレイアウト	21
図 13	一次元の解析モデル	21
図 14	トレーサー試験の再現解析結果	22
図 15	試験 A：溶存有機物・微生物・コロイドを除去した場合の希土類元素の濃度変化	23
図 16	試験 B：溶存有機物・微生物・コロイドが存在する場合の希土類元素の濃度変化	24
図 17	希土類元素添加試験の装置概念図および試験手順	25
図 18	地下水に希土類元素を添加した原位置試験の結果	26
図 19	深度による溶存有機物の特徴と希土類元素 (Eu^{3+}) との親和性の違い	27
図 20	ボーリング孔レイアウト	28
図 21	透水試験時における間隙水圧観測区間	29
図 22	透水試験時の水圧変化量の例 (250-MIG1-4 孔)	29
図 23	孔間透水試験の解析結果	30
図 24	ブロックスケールを対象としたトレーサー試験結果の解析例	31
図 25	坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料の変質領域	34
図 26	中性化深さと経過時間の関係	34
図 27	坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料の空隙率分布	35
図 28	坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料における坑道側の SO_3 濃度分布 (坑道壁面：上側)	35
図 29	坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料の岩盤側の元素濃度分布 (坑道壁面：上側)	36
図 30	浸潤条件下で定置したコンクリート試験体の CaO 濃度	36
図 31	コンクリート試料の一軸圧縮強度の時間変化	37
図 32	異なる飽和度の岩石試料を用いて実施した載荷速度を様々に変えた一軸圧縮試験結果	39
図 33	「立坑・水平坑道が卓越した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	40
図 34	幌延泥岩 (掘削土 (ズリ)) の粉碎状況	41
図 35	MB 吸着量の測定結果	42
図 36	埋め戻し材の透水性と膨潤特性	42
図 37	上方膨潤率の経時変化	44

図 38	試験終了時の緩衝材の乾燥密度と飽和度の分布	45
図 39	EDZ シーリング試験の概要図	47
図 40	試験領域の透水係数の経時変化	47
図 41	坑道床面で実施した弾性波トモグラフィ調査の結果	48
図 42	ベントナイトブロックを用いた室内試験の模式図（断面図）	49
図 43	膨潤後のベントナイトブロックの状況	50
図 44	X線 CT 測定より作成した CT 画像（模擬地下水条件）	50
図 45	施工効率の向上が期待できる埋め戻し材の施工技術	52
図 46	静的締固め試験後の供試体の外観（成型圧力：20 MPa）	53
図 47	斜め転圧工法による要素試験	53
図 48	スクリュウ工法による埋め戻し材の充填後の外観	54
図 49	ケーブル TDR 法の計測限界長把握のための要素試験	55
図 50	緩衝材ブロックの積み上げ順	56
図 51	試験体の設置概略図	57
図 52	熱電対の計測結果（温度）	57
図 53	土圧計での計測結果	58
図 54	140°Cでの加熱および蒸留水浸潤過程での緩衝材試料の浸潤密度の変化	58
図 55	水みちのつながり方の次元の解析例	60
図 56	地下施設周辺の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	60
図 57	割れ目の水理学的連結性と DI の関係	60
図 58	人工バリア性能確認試験の試験孔周辺の透水試験の概念図と透水試験結果	61
図 59	割れ目に垂直に作用する有効応力と割れ目の開口幅の関係	62
図 60	断層に注水した際に生じた断層沿いのずれの方向	63
図 61	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	65
図 62	数十km四方の調査における二次元側線の MT 法電磁探査の結果の例	66
図 63	割れ目水と間隙水の水質の違いと地下水の ^{14}C 年代に基づき解釈した地下水流動概念	67
図 64	HDB-6 孔の水圧観測結果（平成 31 年 4 月～令和 6 年 3 月）	69
図 65	地下水の採取箇所	70
図 66	地下水の塩化物イオン濃度の経時変化の一例	70
図 67	試験坑道 2 および試験坑道 4 周辺における水圧・水質モニタリング実施箇所	72
図 68	C08 における水圧モニタリング結果	72
図 69	C08 の区間 2 における水質モニタリング結果	74
図 70	計測器設置位置図	75
図 71	光ファイバー式地中変位計による計測結果	76
図 72	鋼製支保工応力計の計測結果	76
図 73	立坑の掘削工程と傾斜量の比較	78
図 74	幌延深地層研究センター周辺で起きた地震の震央分布	79
図 75	幌延町宮園で震度 1 以上を観測した地震の震央図	80
図 76	地表および地下施設で観測された地震の波形の例	80
図 77	350m 調査坑道整備完了状況（試験坑道 6）	82
図 78	東立坑の掘削状況	82
図 79	地下施設の維持管理状況	83
図 80	二重遮水シートの構造	84

図 81	掘削土（ズリ）置場搬入用道路の造成工事の様子	84
図 82	排水処理設備	85
図 83	排水系統と各水質調査の採水地点	86
図 84	地下施設からの排水処理フローと水質調査の採水地点	88
図 85	天塩川の採水地点	90
図 86	天塩川での採水状況（令和5年4月5日）	90
図 87	掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水地点	92
図 88	掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水状況	92
図 89	清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水地点	94
図 90	清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水状況	94
図 91	環境調査実施場所	98
図 92	清水川からの採水状況（令和5年6月1日）	98
図 93	生息魚類調査（令和5年8月31日）	99
図 94	安全パトロールの状況（令和5年6月16日）	101
図 95	安全行事の実施（安全大会：令和5年7月3日）	101

表目次

表 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	6
表 2	緩衝材および埋め戻し材の設計要件の例	51
表 3	試験エリア（図 60）周辺で推定された地圧の状態	63
表 4	幌延町宮園で観測された震度1以上の地震	79
表 5	地下施設整備の実績工程表（令和5年度）	82
表 6	天塩川への排水量	87
表 7	地下施設からの排水に係る水質調査結果	89
表 8	天塩川の水質調査結果	91
表 9	掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果	93
表 10	清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の水質調査結果	95
表 11	浄化槽排水の水質調査結果	96
表 12	掘削土（ズリ）の土壌溶出量調査結果	97
表 13	清水川の水質調査結果	99
表 14	確認された重要種（魚類）	100
表 15	HIP 参加機関	110

1. はじめに

国立研究開発法人^{*1}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、平成13年3月より、北海道の幌延町において幌延深地層研究計画（堆積岩を対象とした深地層の研究施設計画）を進めています。この計画は、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）を目的として、「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）」、「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実施してきています。地層処分のために地下を調査する施設には、最終処分場として使用しない施設で技術を磨く地下研究施設（ジェネリックな地下研究施設）と最終処分候補地の適性を見定める地下研究施設（サイトスペシフィックな地下研究施設）の2つの種類があります。このうち、幌延深地層研究センターの地下施設は、ジェネリックな地下研究施設に該当します。

幌延深地層研究センターでは、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」で示した研究課題である、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、地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力^{*}の検証について、令和2年度以降、第3期および第4期中長期目標期間^{*2}を目途に取り組むこととしました^{*3}。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します。

なお、令和3年10月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、引き続き、「高レベル放射性廃棄物については、国が前面に立って最終処分に向

^{*} このマークがついた用語は、用語集に説明を掲載しています。

^{*1}：独立行政法人通則法の改正（平成27年4月1日施行）により新たに設定された分類のひとつで、研究開発に係る業務を主要な業務として、中長期的（5～7年）な目標・計画に基づき行うことにより、我が国の科学技術の水準の向上を通じた国民経済の発展その他の公益に資するため研究開発の最大限の成果を確保することを目的とする法人に対する名称です。原子力機構は、平成27年4月1日に「独立行政法人日本原子力研究開発機構」から「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構」に名称変更しています。

^{*2}：第4期中長期目標の期間は、令和4年4月1日～令和11年3月31日の7年間です。

^{*3}：令和2年度以降の研究期間は9年間であり、その期間を通じて必要な成果を得て研究を終了できるように取り組むこととしています（https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/press/31/press_1206.html）。

けた取組を進める」との考え方が示され、「国、NUMO^{*4}、JAEA^{*5}等の関係機関が、全体を俯瞰して、総合的、計画的かつ効率的に技術開発を着実に進める。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。」ことが示されました。これを踏まえて、文部科学省、経済産業省および原子力規制委員会により「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）^{*6}」（以下、第4期中長期目標）が定められ、この第4期中長期目標を達成するために、原子力機構は、「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）（令和4年4月1日～令和11年3月31日）」（以下、第4期中長期計画）を策定しました。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500 m）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」こととしています。

幌延深地層研究センターは、「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」を、これまでと同様に、放射性廃棄物を持ち込むことや使用することなく、また最終処分場とはしないことを約束した「幌延町における深地層の研究に関する協定書」の遵守を大前提に、安全を最優先として研究を進めます。研究開発を進めるにあたっては、当初の計画の研究対象の範囲内において、国内外の関係機関の資金や人材を活用していきます。

*4：原子力発電環境整備機構（Nuclear Waste Management Organization of Japan）の略称です。NUMOは、原子力発電所で使い終えた原子燃料を再処理する過程で発生する高レベル放射性廃棄物および関連して発生する長半減期の低レベル放射性廃棄物の地層処分を行う実施主体です。

*5：原子力機構（Japan Atomic Energy Agency）の略称です。

*6：原子力機構は、原子力基本法第2条に規定する基本方針に基づき、原子力に関する基礎的および応用の研究並びに高レベル放射性廃棄物の処分等に関する技術の開発等を総合的、計画的かつ効率的に行うことを目的としています。中長期目標はこれを踏まえ、文部科学省、経済産業省および原子力規制委員会が、独立行政法人通則法第35条の4の規定に基づき定めた目標です。

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、必須の課題のうち、引き続き研究開発が必要と考えられる以下の課題（令和2年度以降の必須の課題※）に取り組んでいます（図1、表1、参考資料）。

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

令和元年度までの人工バリア性能確認試験では、実際の地下環境におけるヒーターの加熱過程のデータを取得しましたが、減熱過程※のデータが取得されていません。令和2年度以降は、注入する地下水の圧力や量を増加させ、緩衝材※に地下水を浸潤させた場合のデータを取得し、分析・評価します。その後、減熱時のデータを取得します。加えて、人工バリアの解体作業および緩衝材の飽和度※などの確認を実施します。

また、令和元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ました。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、閉じ込め効果を低下させる可能性が確認されており、令和2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します。

(2) 処分概念オプションの実証

令和元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）を把握しましたが、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ません。令和2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把握するとともに、埋め戻し方法（プラグ※の有無など）・回収方法※による埋め戻し材の品質の違いを実証試験で明らかにします。さらに、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行います。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℃超になった状態を想定した解析手法の開発を行うとともに、

人工バリアとその周辺岩盤の領域における上限温度設定の考え方を提示します。

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

令和元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ました。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りました。令和 2 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します。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します。

なお、令和 5 年度は、350m 調査坑道の拡張および 500m 調査坑道の整備に向け、東立坑および換気立坑の掘削を開始しました。立坑は各深度の調査坑道へのアクセスならびに地下施設の換気のための役割を担っています*7。500m 調査坑道では、坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化に関する試験を行う計画です。

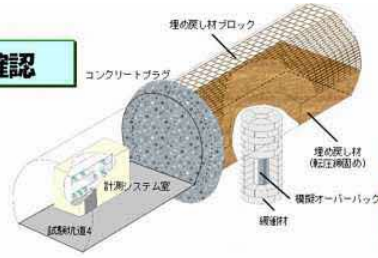
幌延深地層研究センターの地下施設で研究対象としている地層は、^{こえといそう}声問層と稚内層であり、声問層は稚内市声問付近、稚内層は稚内市の市街によく認められたことから、それぞれの地名が地層名として古くから与えられています。声問層（珪藻質泥岩）は、主に海底に降り積もった珪藻と呼ばれる植物プランクトンの遺骸から構成され、地下施設周辺の堆積年代は、約 400 万年前～200 万年前と推定されます^(1, 2, 3)。一方、稚内層は、声問層中の珪藻の遺骸が堆積の進行に伴ってより深くに埋没することで地温の影響などを受けて溶解し、新たな鉱物として再沈殿⁽²⁾してできた、声問層より硬い岩石（珪質泥岩）からなる地層です。地下施設周辺の稚内層の堆積年代は、約 700 万年前～400 万年前と推定されます^(1, 2, 3)。

*7：地下施設で火災が発生した際に、換気立坑から煙や有毒ガスなどを排気し、東立坑もしくは西立坑からの避難を可能とするため、立坑を3本掘削するレイアウトを採用しています。これは、幌延の地下水にはメタンガスが含まれているため、地下水から湧出するメタンガスの発火・爆発の可能性を考慮して、地上まで避難することを想定しているためです。

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
- 物質移行試験

[概要] 実際の地質環境において、人工バリアや周辺岩盤中での特に減熱時における熱-水-応力-化学連成挙動や、物質移行現象などを計測・評価する技術の高度化を行う。



人工バリア性能確認試験の概要

人工バリア性能確認試験の解体試験のイメージ

②処分概念オプションの実証

- 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
 - ・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
 - ・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
- 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

[概要] 位置・回収技術や閉鎖技術も含めた、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。廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報を整理する。

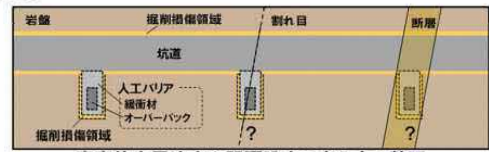


閉鎖技術オプションの整理

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
 - ・地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握
 - ・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
- 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

[概要] 地震・断層活動等の地殻変動に対する堆積岩の力学的・水理学的な緩衝能力を定量的に検証するとともに、化石海水^{*}の三次元分布に係る調査・評価手法を高度化し、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。



廃棄体定置決定や間隔設定の考え方の整理

図 1 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 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					
		R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
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	浸潤時・減熱時のデータ取得、連成モデルの適用性確認 国際プロジェクトにおける解析コード間の比較検証、改良・高度化								
	1.2 物質移行試験	掘削影響領域での物質移行に関するデータ取得 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行試験、等								
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	搬送定置・回収技術、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					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 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理、等				
2.2	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	100℃超の際にニアフィールドにおいて発生する現象の整理 国際プロジェクト情報の収集・整理、等								
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	数十cmの幅の断層を対象とした水圧擾乱試験 断層の活動性評価手法の整備、等								
	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	地下水の流れが非常に遅い領域(化石海水領域)の調査・評価技術の検証、等								
3.2	地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験	人工バリアの緩衝材や坑道埋め戻し材が掘削影響領域の力学的・水理学的な緩衝能力に与える影響を把握する解析手法の開発								
【施設計画】										
坑道掘削			掘削準備	350m調査坑道	換気立坑 東立坑	西立坑	500m調査坑道			
【維持管理】										

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ていきます。
坑道掘削の工程は今後の施工計画策定や工事進捗に応じて見直していきます。

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)に統合して実施する。

2.1.2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. 令和5年度の主な調査研究の成果

令和5年度は、「幌延深地層研究計画 令和5年度調査研究計画」⁽⁴⁾にしたがって、令和2年度以降の必須の課題に関わる調査研究および地下施設の建設・維持管理などを実施しました。

調査研究では、令和2年度以降の必須の課題に重点的に取り組むとともに、必須の課題への対応に必要なデータ取得を継続しました。以下に調査研究の成果の概要を示します。

(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では、廃棄体の発熱が収まった状態を模擬した条件でのデータ取得を継続するとともに、解体試験に向けた準備として試験坑道7を掘削しました。試験坑道7の掘削による計測データへの影響はなく、これまでと同様、緩衝材内側の全応力が地下水の浸潤に伴って緩やかに増加していることが確認できました。国際共同研究 DECOVALEX^{*}では、人工バリア性能確認試験のデータを対象に熱－水理－力学－化学連成現象^{*}のうち、熱－水理－力学の連成現象を対象とした解析を実施し、室内試験および原位置試験^{*}を対象とした各機関の解析結果を比較しました。その結果、等温環境下での緩衝材への地下水浸潤挙動は計測結果と解析結果が良く一致する結果が得られました。一方、温度勾配環境下での地下水の浸潤挙動については計測結果と解析結果が異なる場合があることを確認しました。また、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解析を行った結果、力学モデルの違い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ました。

物質移行試験では、過年度に実施した掘削損傷領域の割れ目を対象としたトレーサー試験の解析評価を行いました。その結果、一次元の解析モデルを掘削損傷領域の割れ目に適用することにより、堆積岩（泥岩）中の掘削損傷領域の割れ目の移流^{*}分散^{*}効果を評価できることが確認できました。また、有機物・微生物・コロイド^{*}の影響を考慮した原位置物質移行試験を実施し、地下水に添加した希土類元素^{*}の濃度変化を観察しました。その結果、原位置環境下で「元素－有機物・微生物・コロイド」が共存する二元系と「元素－有機物・微生物・コロイド－岩盤」が共存する三元系とで希土類元素の濃

度変化に差異が生じることを確認することができました。さらに、ブロックスケール（数m～100m規模）を対象とした物質移行試験については、稚内層深部の断層を対象としたトレーサー試験の解析評価を行った結果、水理学的連結性*が限定的な場に対して、曲がりくねった非常に長いチューブ状の経路を仮定することによって、物質の移行経路を表現できることが分かりました。

(2) 処分概念オプションの実証

人工バリアの搬送定置・回収技術の実証に関しては、安全な回収作業の実施に向けて処分坑道内の空間の安定性を評価するために、350m調査坑道の壁面から低アルカリ性の吹付けコンクリートを採取して分析を行いました。その結果、坑道表面から厚さ数cm、岩盤との接触部から厚さ数mmにおいて中性化*が進行していることなどが分かり、低アルカリ性コンクリート支保工*の長期的な物性変化の評価に必要な知見を得て、調査手法を整備することができました。また、令和4年度までに実際の坑道周辺環境に即したモデルを作成し、解析を行ってきましたが、令和5年度は、これまで不足していた岩盤の長期的な変形挙動の飽和度依存性に関する検討を行いました。その結果、岩石の飽和度が低い方がクリープ*変形による破壊までの時間が長くなることが推察され、令和4年度までに実施してきた坑道周辺岩盤の飽和度が掘削直後の低い状態から変化しない条件での長期変形解析は、処分場の安全評価上は安全側の評価であることを示すことができました。

閉鎖技術の実証に関しては、埋め戻し材および止水プラグに関する室内試験などを実施するとともに、これまでに得られた試験結果から材料仕様の設定や施工方法の検討などの設計に対する考え方をまとめて設計フローとして整備しました。掘削損傷領域の調査技術の高度化について、令和4年度までの結果に基づき、弾性波*トモグラフィ*を用いた掘削損傷領域調査のための最適な観測点配置を検討し、令和5年度に掘削した試験坑道6において、その観測点配置を適用した弾性波トモグラフィおよび比抵抗*トモグラフィを実施しました。また、坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の実証については、令和4年度に実施した原位置試験の結果を整理するとともに、ベントナイト*ブロックが膨潤してボーリング孔を閉塞する過程を理解するための室内試験を実施し、ボーリング孔内で膨潤したベントナイトブロック

の乾燥密度^{*}の分布を確認しました。

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係る品質保証体系^{*}の構築における坑道の埋め戻しに関しては、施工効率の向上が期待できるスクリー工法^{*}などの要素試験を実施し、それぞれの工法に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ました。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光ファイバーセンサーの設置方法の検討などを行いました。

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に関しては、緩衝材の温度が 100℃を超えた場合に生じ得る現象のうち、主としてひび割れの発生が緩衝材の特性に与える影響を確認するための原位置試験を開始しました。令和 4 年度に構築した原位置試験概念に基づき、試験坑道 5 の既存孔にヒーター、緩衝材ブロックおよび温度や水分分布などを測定するセンサーからなる試験体を 2 組設置し、ヒーターでの加熱を開始しました。

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

ダクティリティインデックス (DI) ^{*}を用いた透水性^{*}評価手法の信頼性向上および隆起侵食の影響評価手法の整備を目的として、断層の水理学的連結性と DI の関係に関する解析を行いました。断層の水理学的連結性は断層内の水みちのつながり方の次元^{*}として数値化することができ、次元の値が小さいほど、水理学的連結性が低いことを表します。解析の結果、地下施設周辺の稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元と DI が相関していることが分かりました。このような情報は、断層/割れ目の水理学的連結性と DI の関係を定量的に理解する上で重要となります。また、水圧擾乱試験^{*}による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法の整備を目的として、水圧擾乱試験の結果から原位置の地圧の状態を推定する方法を検討しました。その結果、既往の地圧試験と整合する推定結果を得ることができ、水圧擾乱試験により原位置の地圧の状態を推定できることが分かりました。

地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）を調査・評価する技術の高度化においては、これまでに得られた成果を踏まえた調査手順の整理を行いました。また、これまでに取得したデータの一部を研究開発報告書として公表するとともに、地下水の水質や年代を利用した地下水流動の評価手法を

構築し、論文として取りまとめました。産業技術総合研究所^{*8}との共同研究として、これまで把握が困難であった浅海域の地下構造を対象に海上から物理探査を行った結果、探査に用いる音波（弾性波）の発振源を調整することで、より詳細な構造を把握できることが確認できました。また、既存の調査孔を用いた地下温度測定を実施した結果から、当該地域の地下深部の地下水の流れが非常に遅いことを確認することができました。この結果は地下水流動解析の結果と整合しています。

(4) 令和2年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得

必須の課題に関わる調査研究における基礎情報として、既存のボーリング孔などにおける地下水の圧力や水質の観測、地下施設での調査研究で使用するための調査技術や調査機器の開発を継続し、地質環境を推定するための手法について、信頼性の向上を図りました。

(5) 地下施設の建設・維持管理、環境調査

令和5年度は、地下施設整備を再開し、350m調査坑道の拡張（総延長66 m）および立坑の掘削を実施しました。なお、換気立坑で実施した先行ボーリング調査の結果から、湧水抑制対策の改良範囲を拡充することとし、全体工程の更新を行いました（令和5年8月公表）。立坑の掘削順序の変更や施工方法などの見直しを行うことで、今後の工程への影響が最小限となるようにし、施設整備の完了時期に影響は生じない予定です。

また、地下施設からの排水などの水質調査および研究所用地周辺の環境影響調査を行い、排水基準や協定値を超える排水がないことを確認しています。

(6) 開かれた研究・成果の発信

令和5年度も国内外の研究機関との連携を図るとともに、大学などの専門家の協力を得ながら、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業なども活用して、本計画を着実かつ効率的に進めました。幌延深地層研究計画の成果は、原子力機構の核燃料サイクル工学研究所などの成果と合わせて、一連の地層処分技術として、NUMOが行う処分事業や、原子力規制委員会の安全規制に適

^{*8}：特定国立研究開発法人産業技術総合研究所：AIST（National Institute of Advanced Industrial Science and Technology）は、産業技術の広い分野における様々な技術開発を総合的に行っている研究組織です。

宜反映していきます。

国内機関との研究協力として、北海道科学大学や東京大学、京都大学などの大学、幌延地圏環境研究所^{*9}、産業技術総合研究所および電力中央研究所^{*10}などの研究機関との共同研究を行い、研究を推進しました。

国外機関との研究協力として、令和4年度から、OECD/NEA^{*11}の協力のもと、幌延国際共同プロジェクト（Horonobe International Project：以下、HIP）^{*12}を開始しています。令和5年度は、管理委員会やタスク会合を通じて参加機関との議論を行い、原位置試験や解析など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、議論しました。なお、協定書の内容に基本合意していた国内外の11機関^{*13}全ての署名が令和5年7月21日に確認されました。また、これまでに引き続き、人工バリア性能確認試験をタスクのひとつとする国際共同研究 DECOVALEX などに参加し、情報共有を図りました。

研究開発業務の透明性・客観性を確保する観点から、研究計画から成果までの情報を国内外の学会や学術誌などを通じて広く公開するとともに、ホームページやSNSなどを活用した情報発信を継続しました^{*14}。なお、令和5年度に公開した論文や学会発表の実績については、巻末に付録として掲載しています。

以上のように、令和5年度は計画していた調査研究を進めて、想定していた成果を得ることができました。

令和5年度に地下施設で実施した主な調査研究の位置を図2に示します。また、研究所用地内の主な施設と観測装置の配置を図3に、幌延町内で実施

*9：幌延地圏環境研究所は、公益財団法人北海道科学技術総合振興センターが設置した研究所であり、国の補助を受けて、幌延深地層研究センターの施設や設備を活用した地下空間利用を中心とする研究を実施しています。

*10：一般財団法人電力中央研究所：CRIEPI（Central Research Institute of Electric Power Industry）は、電力技術の専門研究機関として設立されました。電力技術の研究として、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発を実施しています。

*11：OECD/NEA（経済協力開発機構/原子力機関）は、安全かつ環境的にも受け入れられる経済的なエネルギー資源としての原子力エネルギーの発展に貢献することを目的として、原子力政策、技術に関する情報・意見交換、行政上・規制上の問題の検討、各国法の調査および経済的側面の研究などを実施しています。

*12：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、幌延深地層研究センターの地下施設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ことを目的としています。（https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/status/hip/project_hip.html）

*13：HIPの参加機関は、原子力機構の他、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）、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（RMMC、日本）、国営放射性廃棄物会社（SERAW、ブルガリア）です。

*14：幌延深地層研究センターホームページ；<https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/>、原子力機構X（旧ツイッター）；https://x.com/jaea_japan

した調査研究に関わる主要なボーリング調査や観測地点などの位置を図 4 に、それぞれ示します。さらに、図 4 に示した A-A' 断面および地下施設近傍の地質断面図を図 5 に示します。

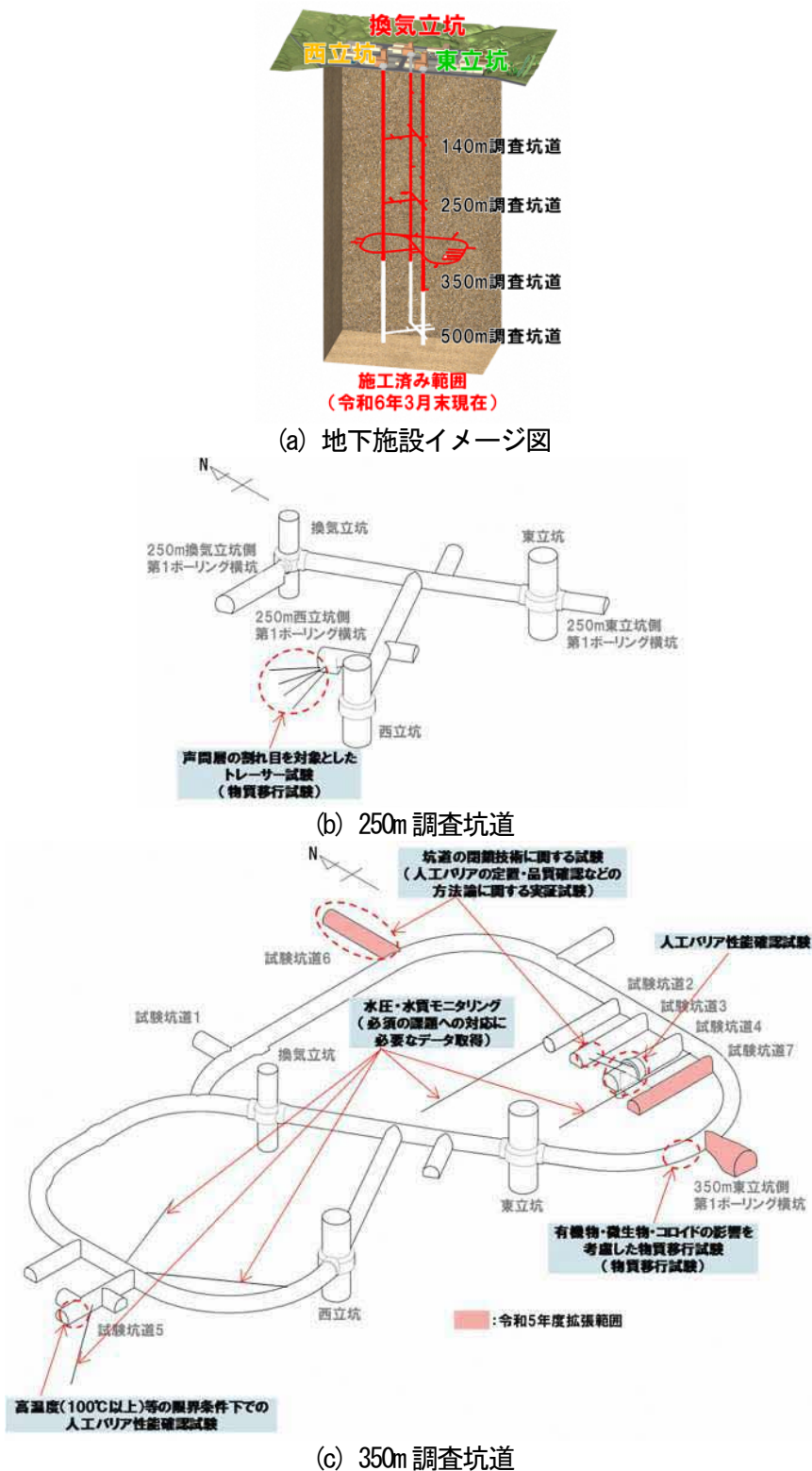


図 2 令和 5 年度の地下施設における主な調査研究の実実施場所



図 3 研究所用地における主な施設と観測装置の配置

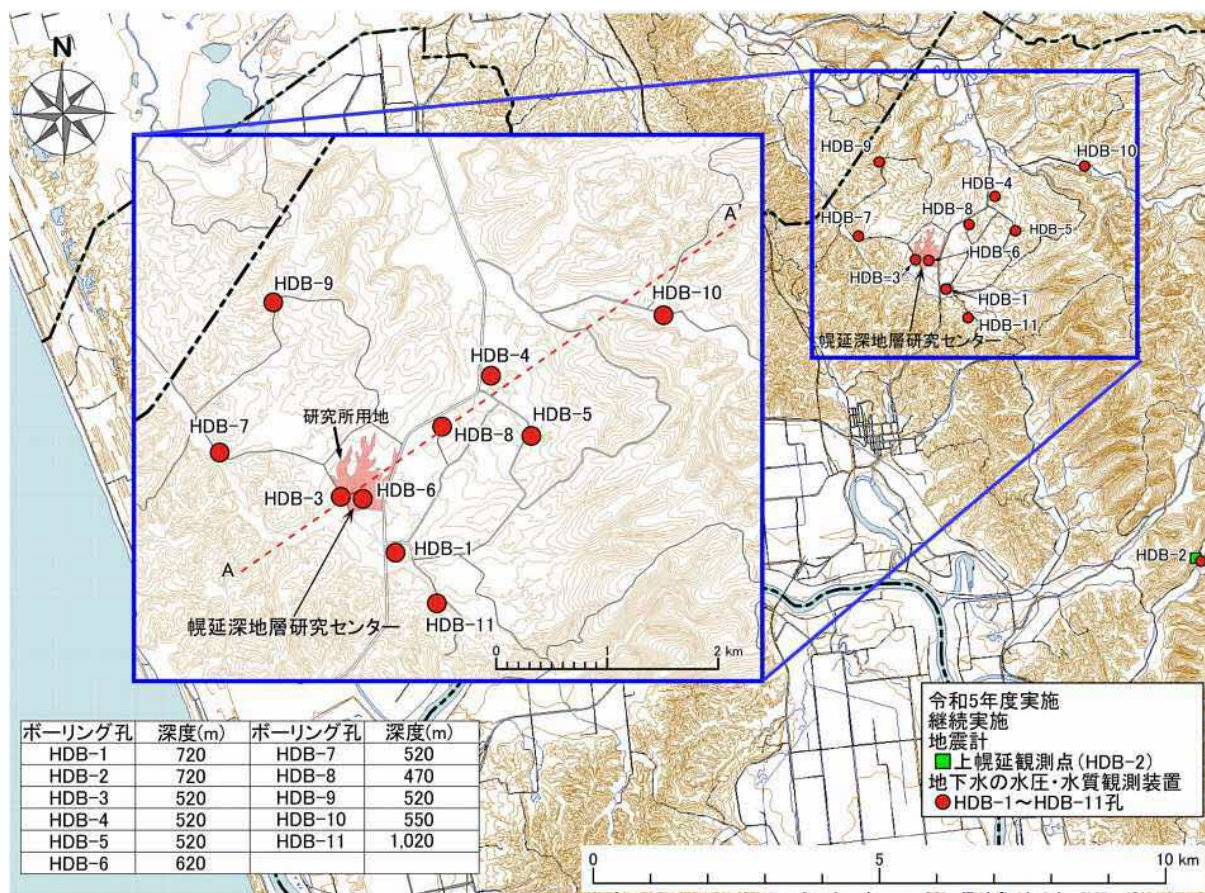
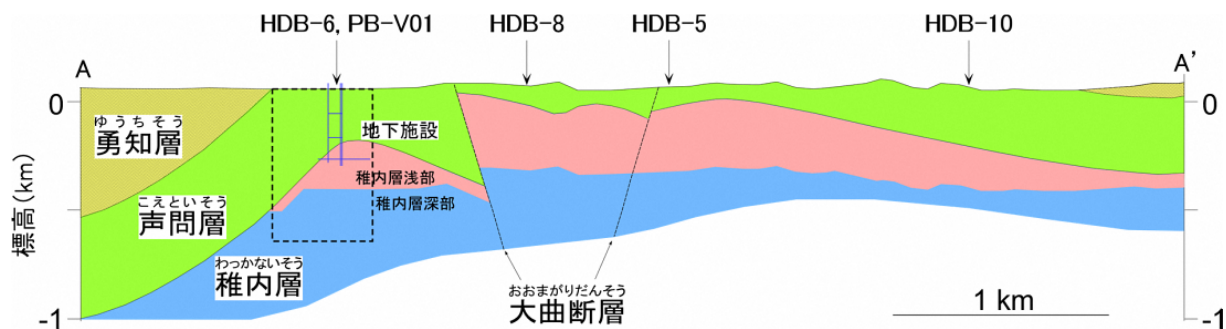
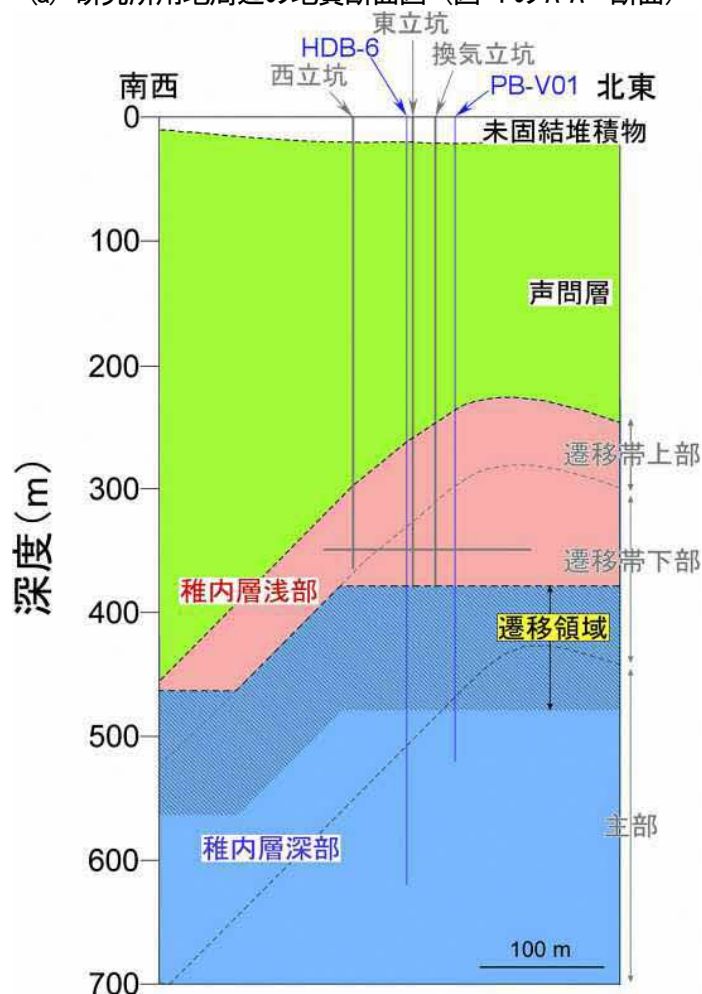


図 4 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所
国土地理院の基盤地図情報（基本項目）を加工して作成



(a) 研究所用地周辺の地質断面図 (図 4 の A-A' 断面)



(b) 地下施設周辺の地質断面図 ((a) の点線枠部分の拡大)

図 5 地質断面図

4. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

4.1 人工バリア性能確認試験

令和2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データや解体試験により得られる、より詳細なデータに基づく熱－水理－力学－化学連成現象の評価モデルの高度化が課題となります。そのため、人工バリア性能確認試験で設置しているヒーターの温度を下げた試験（減熱過程を模擬した原位置試験）を行い、熱－水理－力学－化学連成現象に係るデータを取得します。また、減熱試験終了後は解体試験により、模擬オーバーパック^{*}、緩衝材、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います。人工バリア性能確認試験の解体試験については、適用する施工方法の検証を行うために事前に試験施工を行います。設置したセンサーや解体試験により得られるデータを基に、熱－水理－力学－化学連成解析を行い、評価モデルの高度化や適用性の確認を行います。このような人工バリア周辺で起こる現象の理解は、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（以下、OP）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に役立ちます。

令和5年度は、人工バリア性能確認試験（図6）について、令和2年度から開始した減熱過程を模擬した試験のうち、廃棄体の発熱が収まった状態を模擬した条件（ヒーターの電源を切ることにより再現）における既設の自動計測機器でのデータ取得を継続しました。処分場において、温度が下がる速さは周囲の環境条件により異なりますが、人工バリアや周辺岩盤の温度は埋設後数十年程度で最も高くなり、その後、数千年かけて徐々に低下していくことが予測されています（図7）⁽⁵⁾。減熱過程は、このような人工バリアや周辺岩盤の温度が低下していく過程を想定したものです。また、解体試験に向けた準備として、試験坑道4の隣に試験坑道7を掘削しました（図8）。取得データの一例として、緩衝材5段目上面（図9(a)）での温度および全応力の結果を示します（図9(b)、(c)）。緩衝材中の計測データは、試験坑道7の掘削による影響はなく、温度分布は地下環境下の温度（約23℃）で一定であり、緩衝材内側の全応力は地下水の浸潤に伴い緩衝材が膨潤し、緩やかに増加していることが確認できました（図9(b)、(c)）。

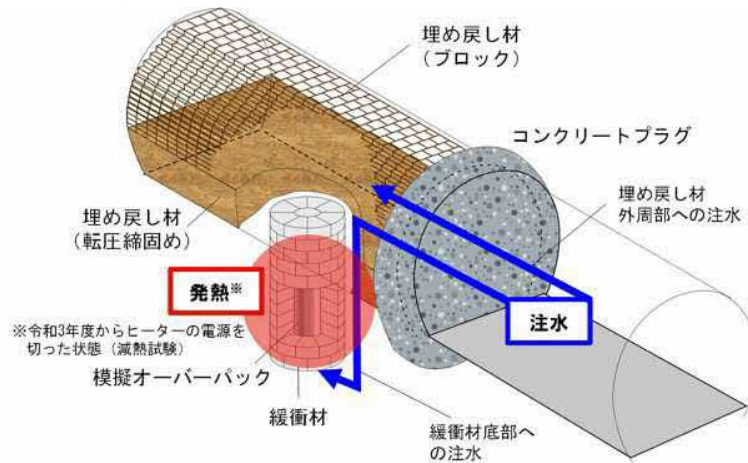
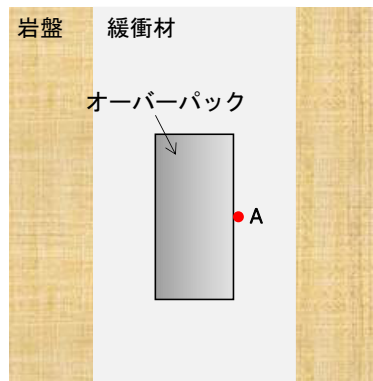
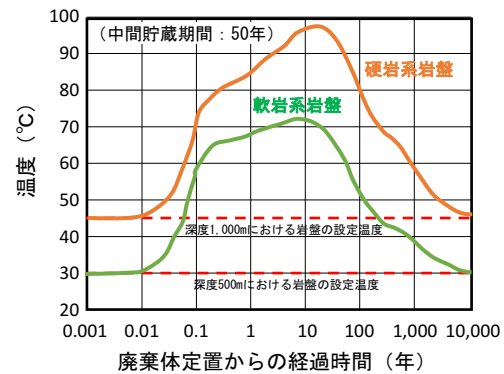


図 6 人工バリア性能確認試験の概念図

模擬オーバーバック、緩衝材、埋め戻し材などの詳細は参考文献(6)、(7)で公開しています。



(a) 緩衝材温度の出力点 (点A)



(b) 緩衝材温度の経時変化

図 7 緩衝材温度の出力点とその経時変化⁽⁵⁾



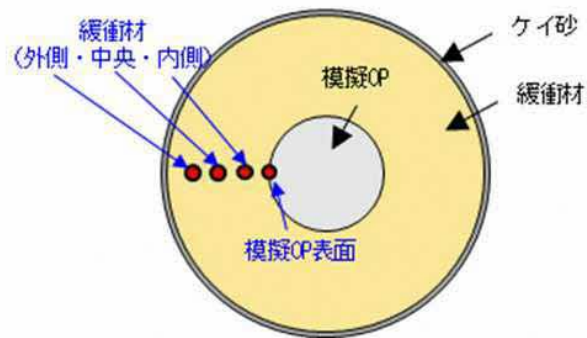
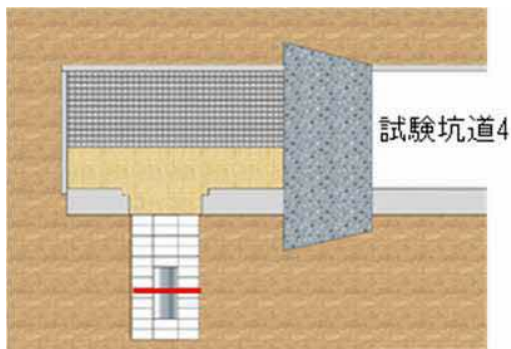
(a) 坑道掘削のイメージ



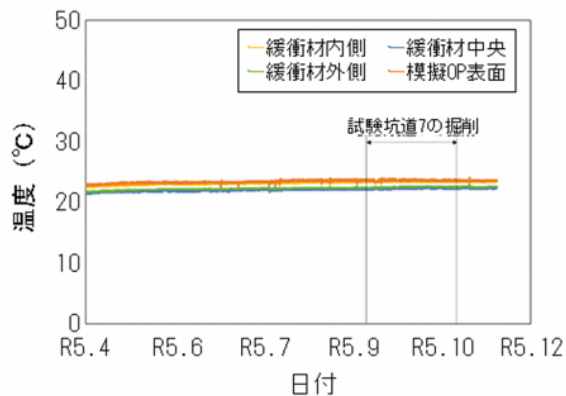
(b) 掘削の様子

図 8 試験坑道 7 の掘削

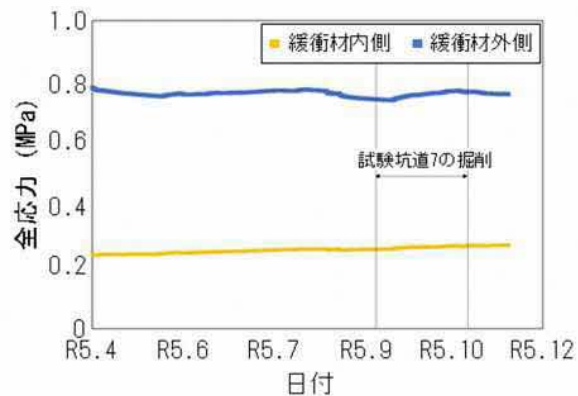
試験坑道 7 は人工バリア性能確認試験の試験孔部や埋め戻し部に設置した材料を解体試験で取り出すために使用します。なお、試験坑道 4-7 連絡坑道は解体試験直前に掘削する予定です。



(a) 測定断面



(b) 温度



(c) 全応力

図 9 人工バリア性能確認試験の計測データの例

熱-水理-力学-化学連成現象に関する解析について、国際共同研究 DECOVALEX では、室内試験などから求められたパラメータを使用し、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）を対象とした熱-水理-力学連成解析を実施しました。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ました。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ましたが、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ました。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ました。例えば、弾性体モデルでは緩衝材の膨潤変形挙動を過小に評価する傾向がありましたが、弾塑性体モデルでは試験結果を良好

に再現することが出来ました。しかし、弾塑性体モデルでは、解析に使用するパラメータが多いため、室内試験結果から適切なパラメータを設定することが重要となります。

ここでは、ヒーター近傍の飽和度変化に大きな影響を与えていると想定される温度勾配水分拡散係数に着目した検討の一例を示します。室内試験から推定された温度勾配水分拡散係数が人工バリア性能確認試験における緩衝材中の飽和度の解析結果にどの程度影響を及ぼすかを確認するために、基準となる係数 D_{T_0} を変化させた解析を行いました。解析では、基本ケースとして室内試験結果から推定された値を用い、基本ケースを2倍、0.5倍したケースを比較対象としました。図 10 の水分計計測値と解析結果は、図 9(a)の計測位置と同じ位置を示します。緩衝材外側の解析結果は、どのケースにおいても大きな差は見られず、水分計計測値とほぼ一致しました(図 10(a))。また、緩衝材中央の解析結果も、 D_{T_0} が大きいケースで少し開きが見られますが、水分計計測値と同様な傾向を示すことが確認できました(図 10(b))。これらの結果は、加熱している模擬 OP から距離が離れるほど温度変化が小さくなるため、温度勾配水分拡散係数のパラメータを変化させても飽和度変化へ与える影響は小さいことを示しています。しかし、緩衝材内側の解析結果は、外側や中央と傾向が大きく異なり、加熱開始とともに飽和度が低下する結果となり、 D_{T_0} の大きさによって飽和度の低下量が大きく異なることが確認できます(図 10(c))。緩衝材内側の水分計の計測値は得られていませんが、比抵抗トモグラフィ測定により算出された緩衝材中の飽和度分布は、緩衝材外側の飽和度は高い一方で、模擬 OP 近傍の緩衝材内側の飽和度は低いことが示されており⁹⁾、解析結果の傾向と整合することが確認できます(図 11)。これらの結果から、温度が高い模擬 OP 近傍では、温度勾配による水分移動の影響が大きく、温度勾配水分拡散係数などのパラメータの設定などが重要であることが確認できました。

温度勾配による緩衝材中の水分移動については、温度、初期飽和度、試験期間などの条件を変えた室内試験によって検証データを拡充し、温度勾配水分拡散係数のパラメータ検討を実施することが必要であると考えられます。また、力学挙動の検証については、人工バリア性能確認試験において緩衝材中のセンサーで計測されたデータ(膨潤に伴う応力変化や局所的な変位)に

加えて、解体試験で取得する予定である緩衝材の乾燥密度分布や緩衝材全体の変形挙動などのデータを含めた解析を実施することで、力学モデルのより詳細な検証が可能となります。

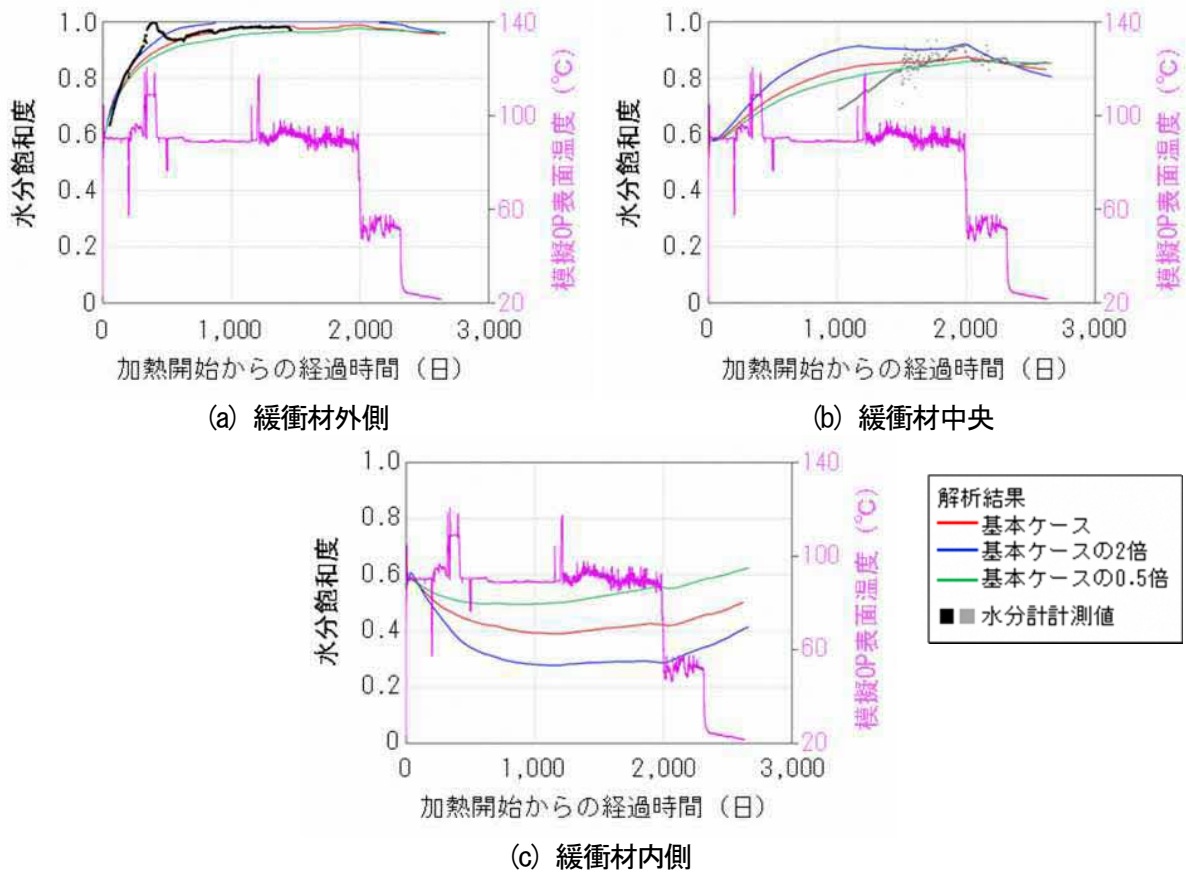


図 10 緩衝材中の飽和度変化

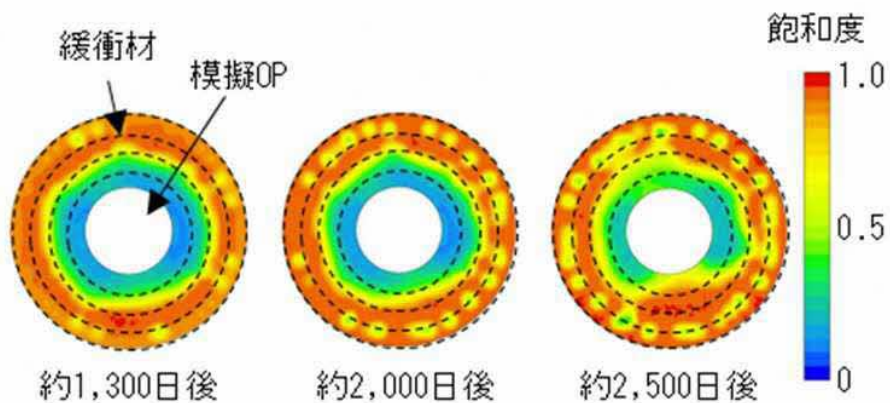


図 11 比抵抗トモグラフィ測定により算出された緩衝材中の飽和度分布の経時変化

4.2 物質移行試験

令和 2 年度以降は、掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立、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、割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立が課題となります。そのため、これまでに確立した物質移行特性評価手法の適用/高度化を図りつつ、掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得を行うとともに、有機物・微生物・コロイドが物質移行に与える影響を評価します。また、掘削損傷領域の物質移行特性に加え、有機物・微生物・コロイドの物質移行特性に与える影響を考慮した上で、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ブロックスケール（数 m～100 m 規模）における遅延性能評価手法の整備を行います。これらの成果は、処分事業で堆積岩を対象とする場合に、核種移行モデルを構築する際の基盤情報となるものです。

なお、本課題については、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（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]：核種移行総合評価技術開発」）を一部活用しました。

(1) 掘削損傷領域を対象とした物質移行試験

令和 3 年度に 350m 調査坑道の試験坑道 4（図 2 参照）の掘削損傷領域（Excavation Damaged Zone、以下 EDZ）を対象に実施したトレーサー試験^(8, 9)（図 12）に基づき、EDZ の割れ目の分散効果を解析により評価しました。解析モデルは、EDZ の割れ目を介したトレーサー（非収着^{*}性のウラニウム^{*}）の移動経路を一次元のチューブ（長さ：L=4.2 m）で表現し（図 13）、EDZ の割れ目内の移流および分散のみを考慮しました。本解析モデルでは境界条件として、トレーサー試験時の注水流量（20 mL/min）のうち、トレーサー回収率^{*}に応じた流量のみが H4-1 孔の区間 2 から P 孔の区間 2 につながる EDZ の割れ目内の流路を流れるという設定をしました。また、トレーサー試験時の注水流量（20 mL/min）と流量（図 13 の Q）の差分は他の EDZ の割れ目に流れるとともに、揚水流量（150 mL/min）と Q の差分は他の EDZ の割れ目から P 孔の区間 2 に流れることを仮定しています。解析モデルに入力するパラメータのうち、縦方向分散長^{*}（ α_L ）と断面積（A）については未知パラメータとし、最小二乗法により解析結果と観測結果との誤差が最小となる値を探索して設定

しました。解析コードはGoldSim⁽¹⁰⁾を使用しました。解析結果を図 14 に示します。図 14 には解析結果に対する縦方向分散長の感度を示すために、観測結果の再現性が最も良い縦方向分散長 (α_L) の値を 0.5 倍、2 倍とした場合の解析結果も同時に示しています。解析結果 (図 14 中の青線) は観測結果を良く再現できることが確認できました。なお、推定された縦方向分散長は 0.12 m であり、移行経路 (4.2 m) に対して約 3%の縦方向分散が生じていることが分かりました。

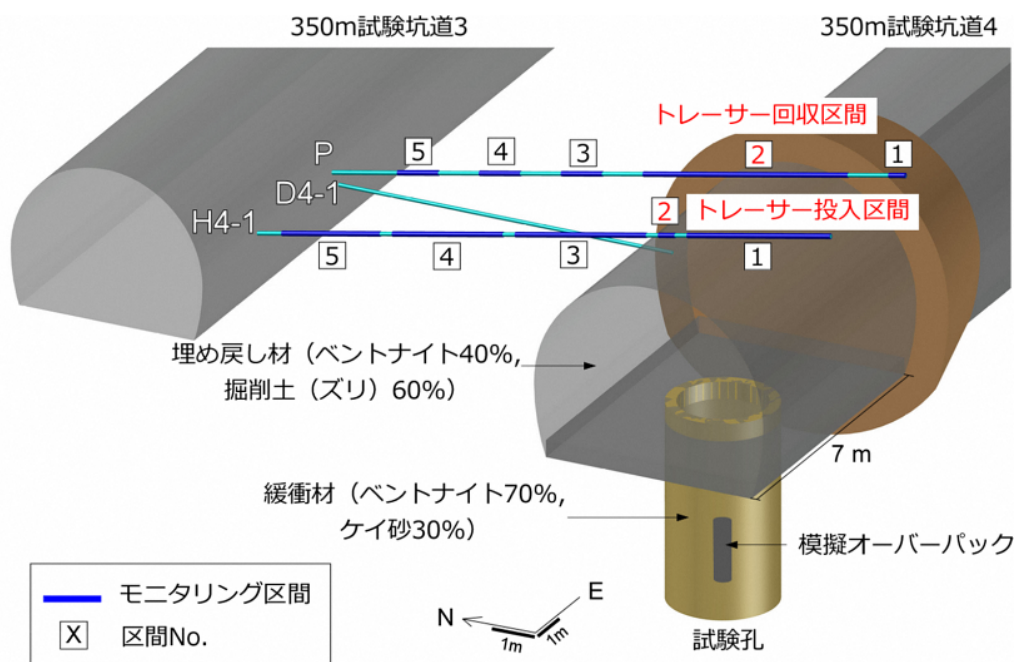


図 12 EDZ を対象としたトレーサー試験のレイアウト

H4-1 孔と P 孔は試験坑道 3 の南側壁面から試験坑道 4 に向かって斜め上向きに掘削されています。H4-1 孔の区間 2 をトレーサー投入区間、P 孔の区間 2 をトレーサー回収区間としています。

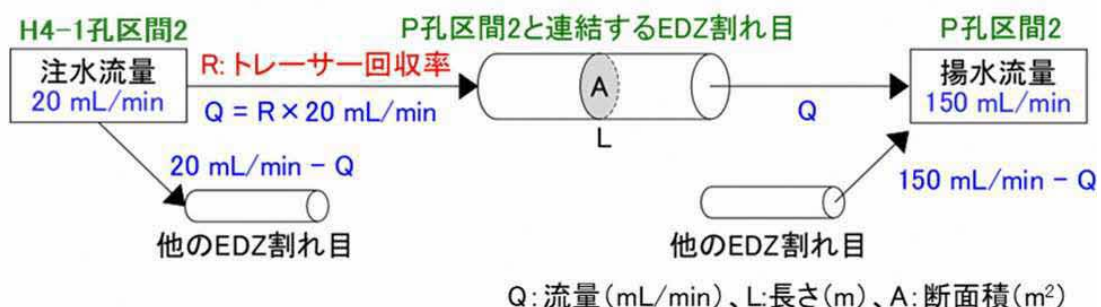


図 13 一次元の解析モデル

H4-1 孔の区間 2 から P 孔の区間 2 につながる EDZ の割れ目内の流路を一次元のチューブで仮定しています。解析モデルでは H4-1 孔の区間 2 の中心と P 孔の区間 2 の中心の直線距離 (4.2 m) をチューブの長さ (L) と仮定しています。