

幌延深地層研究計画
令和2年度調査研究成果報告

令和3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基づく研究課題.....	3
3. 令和2年度の主な調査研究の成果.....	5
3.1 主な調査研究の成果	5
3.2 稚内層深部（深度500 m）での研究の実施に関する検討結果	11
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.....	29
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	29
5.2 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	69
6. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証.....	74
6.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化	74
6.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験	89
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.....	92
8. 地下施設の管理.....	119
8.1 地下施設の整備	119
8.2 地下施設の維持管理	119
8.3 掘削土（ズリ）の管理	120
8.4 排水の管理	121
9. 環境調査.....	122
9.1 排水量および水質調査結果	122
9.2 研究所用地周辺の環境影響調査結果	133
10. 安全確保の取り組み.....	136
11. 開かれた研究.....	137
11.1 国内機関との研究協力	137
11.2 国外機関との研究協力	142
引用文献.....	144
参考資料.....	147
付録.....	151

図目次

図 1	令和 2 年度の主な調査研究	5
図 2	研究所用地における主な施設と観測装置の配置	9
図 3	ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所	9
図 4	350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所	10
図 5	人工バリア性能確認試験の概念図	17
図 6	人工バリア性能確認試験で取得した計測データの一例（緩衝材 5 段目）	17
図 7	比抵抗トモグラフィによる緩衝材中の飽和度の算出結果	18
図 8	試験施工の概要図（鉛直断面図）	19
図 9	施工の様子	19
図 10	EDZ を対象としたトレーサー試験のレイアウト（鳥瞰図）	21
図 11	EDZ を対象としたトレーサー試験結果	22
図 12	微生物・有機物・コロイドを対象とした物質移行試験のイメージ図	24
図 13	140m 調査坑道から採取した地下水および地表水中の溶存有機物のサイズ分布	25
図 14	ブロックスケールを対象としたトレーサー試験	27
図 15	水圧擾乱試験時の間隙水圧観測結果	28
図 16	吹付けコンクリート試験体作製状況	31
図 17	試験体の一軸圧縮強度の確認	32
図 18	坑道内における試験体の定置状況	32
図 19	坑道周辺の地質環境に関する力学的概念モデル	33
図 20	坑道周辺の地質環境に関する水理的概念モデル	34
図 21	透水係数の増加率（Case1）	35
図 22	圧力分布の時間変化	35
図 23	飽和度の時間変化	36
図 24	物質移行解析におけるモデルの概要	39
図 25	解析条件における間隙水圧分布	39
図 26	埋め戻し材の変質の程度に応じた核種移行の挙動の違い（粒子発生位置：処分孔①）	40
図 27	埋め戻し材の変質の程度に応じた核種移行の挙動の違い（粒子発生位置：処分孔⑥）	41
図 28	縮尺模型試験の概念図	43
図 29	縮尺模型試験における膨潤変形率の経時変化	44
図 30	縮尺模型試験における注水量の経時変化	45
図 31	縮尺模型試験における膨潤圧力の経時変化	45
図 32	粘土止水壁周辺の概要図	46
図 33	ベントナイトの吹付けによる施工方法の予備試験実施状況	48
図 34	乾燥密度の平均値および最大値、最小値	48
図 35	含水比と乾燥密度の関係	49
図 36	模擬型枠の形状	50
図 37	吹付け試験の試験状況と出来形の様子	51
図 38	吹付け試験のサンプリング位置	51
図 39	含水比と乾燥密度の関係	52
図 40	乾燥密度の平均値および最大値、最小値	52

図 41	試験の概念図	53
図 42	弾性波の振幅評価と比抵抗分布図	54
図 43	トモグラフィ調査の測点図	55
図 44	トモグラフィ結果図	56
図 45	弾性波速度分布の深度スライス断面図	57
図 46	数値シミュレーションによる調査時の弾性波の通過経路の比較例	59
図 47	調査により取得された弾性波の到達時間と EdZ が 1 m であると仮定した場合に数値計算により推定される到達時間の比較	59
図 48	原位置での緩衝材流出試験設備の概要	65
図 49	緩衝材流出試験における水位と排水量の変化	66
図 50	緩衝材流出試験における緩衝材の総流出量と排水中のベントナイト濃度の経時変化	67
図 51	緩衝材流出試験後に回収した試験体	68
図 52	蒸発による水分移動特性を評価するための室内試験および解析手法のイメージ	70
図 53	高温度における人工バリア性能確認試験の施工状況ならびに計測機器の配置断面図（海外での研究事例）	73
図 54	HDB-6 孔および PB-V01 孔における長期水圧観測結果	75
図 55	HDB-6 孔および PB-V01 孔における水圧低下量を流量で除した値と時間を距離の二乗で除した値の関係	76
図 56	FZ-01 孔の深度 96.8 m の断層部へ注水を行った際の FZ-02 孔の深度 99.5 m（観測点 1）および深度 117.8 m（観測点 2）の断層部での水圧応答	77
図 57	稚内層中の割れ目の水理的連結性に関する DI を指標とした領域区分とボーリング孔で得られた水理学的情報との比較	77
図 58	ボーリング孔における (a) 稚内層の割れ目を対象とした透水試験時の水圧変化と (b) 地下水の水圧と水質の深度分布	78
図 59	水圧上昇による断層内の開口部と水理的連結性の増加	79
図 60	断層間の離間距離と断層の水理的連結性に関する解析結果	80
図 61	水圧擾乱試験を行った幅数十 cm の断層部のコア写真、孔壁画像および推定形状	81
図 62	水圧擾乱試験結果	82
図 63	電磁探査および反射法地震探査の測点・測線の配置	84
図 64	電磁探査により得られた三次元比抵抗分布の水平断面図	86
図 65	(a) 既存の地上からのボーリング調査において比抵抗検層により得られた比抵抗値と水質分析により得られた酸素同位体比の関係、(b) 既存の地上からのボーリング調査の比抵抗検層により得られた比抵抗値の累積頻度分布	86
図 66	反射法地震探査の重合前深度マイグレーション (PSDM) 解析結果と電磁探査で得られた比抵抗分布の重ね合わせ	88
図 67	樹脂注入試験の概要	89
図 68	樹脂注入後に採取したコアの例	90
図 69	割れ目の開口幅とせん断変位量の計測方法	90
図 70	EDZ の割れ目で計測された開口幅とせん断変位量の関係	91
図 71	地下水の採取箇所（集水リング）	94

図 72	地下水の採取箇所（ボーリング孔）	95
図 73	地下水の Cl ⁻ 濃度の経時変化	96
図 74	試験坑道 4 壁面からの浸出水の採取箇所	97
図 75	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	98
図 76	C05 における水圧モニタリング結果	99
図 77	C06 における水圧モニタリング結果	99
図 78	C07 における水圧モニタリング結果	100
図 79	C08 における水圧モニタリング結果	100
図 80	C09 における水圧モニタリング結果	101
図 81	試験坑道 2 および試験坑道 4 周辺における水質モニタリング継続可能区間	102
図 82	C05 の区間 2 における水質モニタリング結果	103
図 83	解析領域と解析条件	105
図 84	350m 調査坑道を模擬した感度解析による岩盤中への酸素の侵入量と侵入深度の関係性	105
図 85	140m 調査坑道から得られた岩石試料（声問層）中の微生物分布	106
図 86	350m 調査坑道から得られた岩石試料（稚内層）中の微生物分布	107
図 87	遺伝子解析結果に基づく各採水区間における地下水中の微生物種の存在割合	108
図 88	微小領域におけるセレン (Se)、鉄 (Fe)、硫黄 (S) のマッピング分析結果	110
図 89	セレン濃集部に対するセレン (Se) および鉄 (Fe) の化学形態に関する分析結果	110
図 90	各抽出ステップにて抽出されたセレン (Se) の量	111
図 91	地中変位計設置状況	112
図 92	鋼製支保工応力計設置例	112
図 93	計測器設置位置図	113
図 94	光ファイバー式地中変位計の計測結果	113
図 95	電気式地中変位計の計測結果	114
図 96	鋼製支保工応力計の計測結果	114
図 97	傾斜計データの一例	116
図 98	幌延深地層研究センター一周辺の震央分布	117
図 99	地下施設の地震観測記録の例（令和 3 年 2 月 6 日午前 4 時 10 分ごろ発生した地震）	118
図 100	地下施設の整備状況	119
図 101	設備の点検および更新状況	119
図 102	掘削土（ズリ）置場	120
図 103	二重遮水シートの構造	120
図 104	排水処理設備	121
図 105	排水系統と各水質調査の採水地点	122
図 106	地下施設からの排水処理フローと採水地点	124
図 107	天塩川の採水地点	126
図 108	天塩川の採水状況	126
図 109	掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水地点	128

図 110	掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水状況（A1～A4）	128
図 111	清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水地点	130
図 112	清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水状況	130
図 113	環境調査実施場所	133
図 114	清水川の水質調査	134
図 115	生息魚類調査	135
図 116	安全パトロールの状況	136
図 117	安全行事の状況（安全大会）	136

表目次

表 1	深度 500 m と深度 350 m の地質環境の特徴	13
表 2	稚内層深部での調査研究の実施を踏まえた研究工程	14
表 3	予察的解析の解析ケース	34
表 4	主な透水係数の設定値	40
表 5	処分孔から発した粒子の下流側立坑地表面への到達割合	42
表 6	ベントナイトを用いたボーリング孔の閉塞方法の検討結果	62
表 7	緩衝材の変質に関する既往知見の整理	71
表 8	幌延町宮園で観測された震度 1 以上の地震	118
表 9	天塩川への排水量	123
表 10	地下施設からの排水に係る水質調査結果	125
表 11	天塩川の水質調査結果	127
表 12	掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果	129
表 13	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	131
表 14	浄化槽排水の水質調査結果	132
表 15	清水川の水質調査結果	134
表 16	確認された重要種（魚類）	135

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ました。地層処分に関わる地下研究施設には、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。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です。

平成26年4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の問題の解決に向け、国が前面に立って取り組む必要がある」との考え方が示され、そのために「地層処分の技術的信頼性について最新の科学的知見を定期的かつ継続的に評価・反映する」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）^{*2}」（以下、第3期中長期目標^{*3}）が定められ、この第3期中長期目標を達成するために、「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

*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一つで、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、わ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：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及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。

*3：第3期中長期目標の期間は、平成27年4月1日～令和4年3月31日の7年間です。

27年4月1日～令和4年3月31日)」(以下、第3期中長期計画)を策定しました。

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ました、「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*4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*5の検証について、令和2年度以降、第3期および第4期中長期目標期間を目途に取り組むこととしました*6。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2年度以降の幌延深地層研究計画では、これまでと同様に、放射性廃棄物を持ちこ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することを検討します。

*4：ガラス固化体、オーバーパックおよび緩衝材からなる地層処分システムの構成要素のことで、高レベル放射性廃棄物が人間の生活環境に影響を及ぼさないようにする障壁として、人工的に形成するものです。

*5：地殻変動(隆起侵食)や地震動の影響により擾乱を受けた地質環境が一定の範囲に留まろうとする能力、あるいは時間経過とともに元の状態に戻ろうとする能力のことで。

*6：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おります (https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/press/31/press_1206.html)。

2. 令和2年度以降の幌延深地層研究計画に基づく研究課題

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。

(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^{*7}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を行い、緩衝材の飽和度などの確認を行います。

また、令和元年度までの物質移行試験により、トレーサー^{*8}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、微生物や有機物が、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^{*9}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

*7: 人工バリアを構成するガラス固化体は、処分孔に設置した当初は発熱しており、時間の経過とともに発熱量が低下し、温度が下がっていきます。緩衝材の外側は、地下水の浸潤に伴って飽和度が上昇しますが、緩衝材の内側は発熱の影響により飽和度は低下します。温度が下がれば、地下水が緩衝材に入りやすくなり、時間の経過とともに緩衝材の内側まで地下水が浸潤します。このような熱と地下水の浸潤という同時並行的に生じる現象を原位置試験で再現するために、人工バリア性能確認試験では加熱過程、減熱過程の試験を行っています。

*8: 地下水の流れの方向や流れる時間などを調べるために、地下水に目印として混ぜる染料やその他の薬品を指します。塩化ナトリウム（食塩の主原料）が代表的なトレーサーとなりますが、その他にもヨウ化カリウムなど多種のトレーサーがあります。なお、幌延深地層研究計画では放射性トレーサーを利用したトレーサー試験を行うことはありません。

*9: 岩盤が掘削により損傷し、初期の性質から変化する領域のことです。具体的には、地下空洞掘削時の周辺岩盤に生じる応力集中の影響で坑道周辺岩盤に割れ目が発達することにより、岩盤の変形特性の変化や透水性の増大が予想されます。また、空気の侵入により地下水の酸化還元電位などの化学的な変化が生じることが想定されます。なお、掘削損傷領域を含むより広い領域で坑道への地下水排水などにより地下水圧が低下する領域のことを掘削擾乱領域といい、掘削擾乱領域では坑道埋め戻し後、低下した地下水圧が元の状態に回復することが想定されます。掘削損傷領域と掘削擾乱領域は、広義に掘削影響領域と表現されます。

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、注入する地下水の圧力や量を増加させ、緩衝材に十分に水を浸潤させた状態を確保して施工方法(締固め、ブロック方式など)の違い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、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)などを確認するための実証試験を行います。また、人工バリアシステムの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を開発します。

(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、断層への地震動の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、地震動や坑道掘削に伴う割れ目中の地下水の流れの変化に関して、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、地下水が動いていない環境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^{*10}を解析する手法を開発します。

*10: 人工バリアのひび割れに対する自己治癒能力とは、坑道を掘削した際に圧力が解放されて岩盤にひび割れが発生した場合でも、坑道を埋め戻した後に人工バリアが膨潤することでひび割れに起こる作用を指します。

3. 令和2年度の主な調査研究の成果

3.1 主な調査研究の成果

令和2年度は、「幌延深地層研究計画 令和2年度調査研究計画」⁽¹⁾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管理などを実施しました。

調査研究では、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（図 1）。以下に調査研究の概要を示します。

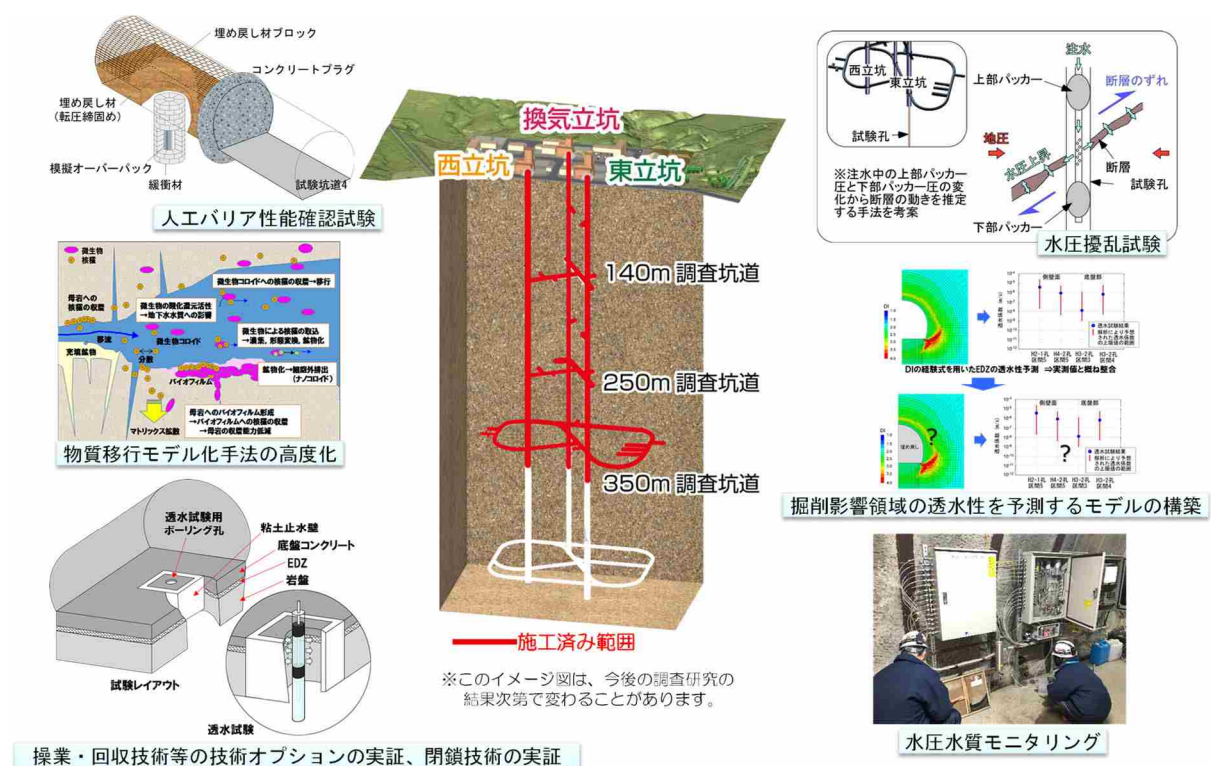


図 1 令和2年度の主な調査研究

(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において、廃棄体の減熱過程を模擬した試験を開始したことにより、緩衝材中の温度や間隙圧（隙間の空気と水の圧力の和）が低下し、緩衝材の内側への地下水浸潤が進んだことを試験孔内に設置したセンサーにより確認しました。加えて、模擬オーバーパック、緩

衝材および岩盤の間で発生する熱－水理－力学－化学連成現象^{*11}に関する解析について、国際共同研究DECOVALEX^{*12}に参画し、室内試験結果を対象に、共同解析を行うための解析モデルや解析条件を設定するとともに、各国間の解析コードの違いを確認しました。また、空気の移動などを考慮した熱－水理－力学連成現象に関する室内試験については、事前の解析結果を基に浸潤挙動や膨潤挙動に及ぼす空気の影響を確認し、試験条件の設定を行いました。

人工バリア性能確認試験の解体調査のための試験施工では、埋め戻し材の設置、プラグの施工、試験孔の掘削を行うとともに、模擬オーバーパックおよび緩衝材を設置しました。

物質移行試験では、掘削損傷領域を対象とした物質移行試験を行い、掘削損傷領域の水理・物質移行特性を評価するためのデータが取得できました。また、微生物・有機物・コロイド^{*13}を対象とした物質移行試験に先立ち、既存孔を利用した予察的な原位置試験の計画立案を行うとともに、地表水および地下水中の溶存有機炭素濃度、有機物の分子サイズ分布データなどを取得しました。さらに、稚内層深部のブロックスケール（数m～100 m規模）を対象とした物質移行試験の準備作業を完了しました。

(2) 処分概念オプションの実証

搬送定置・回収技術の実証として、人工バリア性能確認試験などのデータを利用して、人工バリアの堅置きブロック方式における回収作業において考慮すべき条件の整理を行いました。また、回収可能性が維持される期間における吹付けコンクリートの経年劣化の把握を目的に、コンクリート試験体の暴露試験^{*14}の準備を行うとともに、坑道開放条件下において岩盤内部で生じうる事象の整理などを行いました。

*11：地下環境に設置された廃棄体の周辺の緩衝材や岩盤で、廃棄体からの熱、地下水の流れ、緩衝材が膨潤することによって発生する応力や岩盤に作用する応力、地下水と鉱物の反応などによる化学的な変化などが複合的に生じる現象です。

*12：DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments（連成モデルの開発とその実験結果との検証に関する国際共同研究）の略称で、地層処分システムの性能評価において重要な課題の一つである熱－水理－力学－化学連成挙動モデルの開発・確証を目的とした国際共同研究です。

*13：大きさが1nm～1μmの粒子が水などの液体中に浮遊し、容易に沈まない状態を指します。コロイドが地層中の放射性核種の移行に影響を及ぼすことが分かっています。

*14：材料および製品を特定の環境に暴露し、その環境における材料や製品の化学的性質・物理的性質および性能の変化を調査する試験です。

閉鎖技術の実証として、埋め戻し材の長期的な性能に関わる現象について、埋め戻し材の変質挙動に関する解析やベントナイト^{*15}の流出挙動に関する室内試験計画の立案などを行うとともに、埋め戻し材の設計に必要な膨潤変形挙動に関するデータを取得し整理しました。また、閉鎖後に水みちとなることが想定される掘削損傷領域での地下水の流れを遮断するための施工技術の構築や高度化に向けて、ベントナイトの吹付け施工試験を行い、材料の種類や配合の違いによる吹付けベントナイトの品質の違いを把握するとともに、掘削損傷領域の損傷状態や性状を高精度に探査する試験装置の開発と掘削損傷領域の連続性を評価する上で必要となる物性値を取得しました。さらに、ボーリング孔を閉塞する際の方法や閉塞方法に関する技術的な課題などを整理しました。

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として、緩衝材の流出挙動に係る試験を継続し、自然湧水が0.4 L/minの環境（試験孔寸法は直径0.58 m×深さ約1.60 m）では緩衝材が膨潤し、隙間が埋まるにしたがって排水される水の量は減少し、緩衝材が流出しなくなることを確認しました。スケール効果を検討し、実際の緩衝材の施工方法の適用範囲を明らかにすることによって、緩衝材の施工方法を選択することができると考えられます。

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として、緩衝材の最高温度が100℃を超えた状態で発生しうる現象の検討に着手するとともに、海外で実施されている緩衝材の最高温度が100℃を超えた状態を模擬する原位置試験（スイスのHotBENT^{*16}プロジェクト）について、試験条件、試験手法、計測機器の選定・配置などに関する情報を入手しました。

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握として、過年度に実施し

*15：モンモリロナイトを主成分とする粘土の一種です。放射性廃棄物の地層処分では、緩衝材や処分坑道の埋め戻し材の原料として用いられ、ベントナイトの膨潤により緩衝材の透水性が低下し、放射性核種が緩衝材に吸着され、移行を抑制する効果があります。

*16：High Temperature effects on BENTonite（ベントナイトへの高温の影響）の略称で、150℃を超える高温がベントナイトの緩衝材としての機能に与える影響を評価するための原位置人工バリア試験です。スイスのグリムゼル試験場で実施されています。

た水圧擾乱試験^{*17}のデータの解析や、稚内層における割れ目の水理的連結性に関する既存の知見やデータの見直しを実施し、稚内層の水理特性分布に関わる統一的な説明が可能となりました。さらに、幅数十cmのより大型の断層を対象とした水圧擾乱試験を実施しました。

地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水^{*18}領域）を調査・評価する技術の高度化においては、物理探査および地質構造との関係性の検討を実施するとともに、既存の解析結果に基づき、地質環境中における過去から現在までの地下水の流動の移り変わりに関する考慮事項が水理・物質移動解析における地下水移行時間に与える影響の整理を行いました。

地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動を検討するための基礎的な知見として、まずは岩盤を対象として、原位置で樹脂を注入後に採取した掘削損傷領域の割れ目試料の詳細な観察を行い、せん断^{*19}変位量（割れ目に沿ったずれ幅）と割れ目の開口幅との相関が小さいことを確認しました。

上記のほか、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。さらに、坑道を掘削した後の岩盤と支保の長期挙動の把握や地下施設の耐震安定性に関する評価を行い、地下施設設計の妥当性の検証を継続しました。

研究所用地内の主な施設と観測装置の配置を図 2に示します。また、幌延町内で実施している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 3に、350m調査坑道における主な調査研究の実施場所を図 4に示します。

*17：注水により断層内の水圧を上昇させ断層をずらす試験のことです。試験の前後で断層の水理特性に与える影響を確認します。

*18：地層の堆積時に地層中に取り込まれた海水が地質学的な長い時間をかけて変質した古海水のことです。化石海水が存在する場所は、地下水の流れが非常に遅いと考えられ、物質の移動が非常に遅く地層処分に適した場所と考えられます。

*19：岩盤などの内部の任意の面に対して平行方向に力が作用してずれが生じることをいいます。

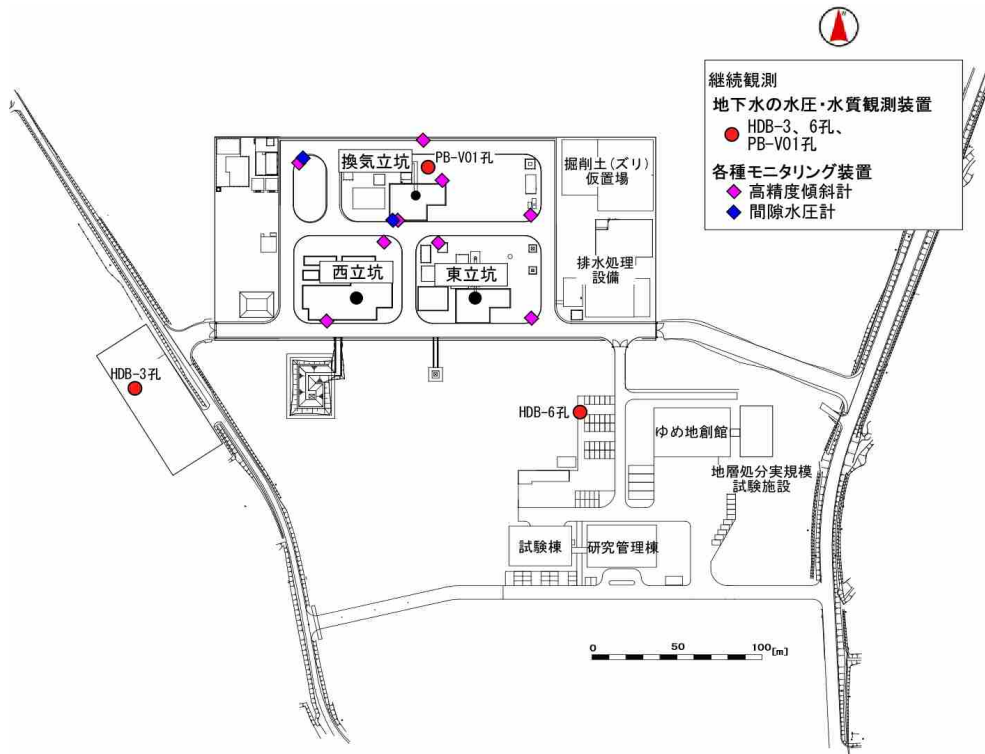


図 2 研究所用地における主な施設と観測装置の配置

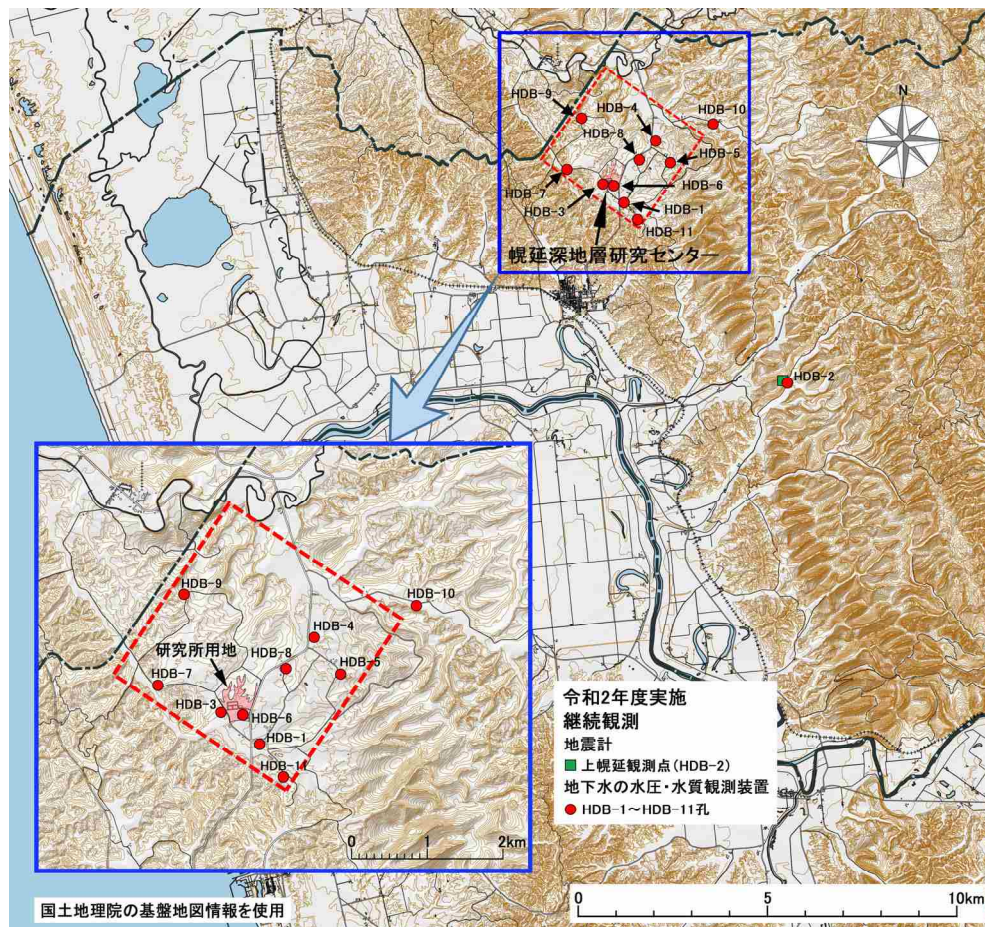


図 3 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所

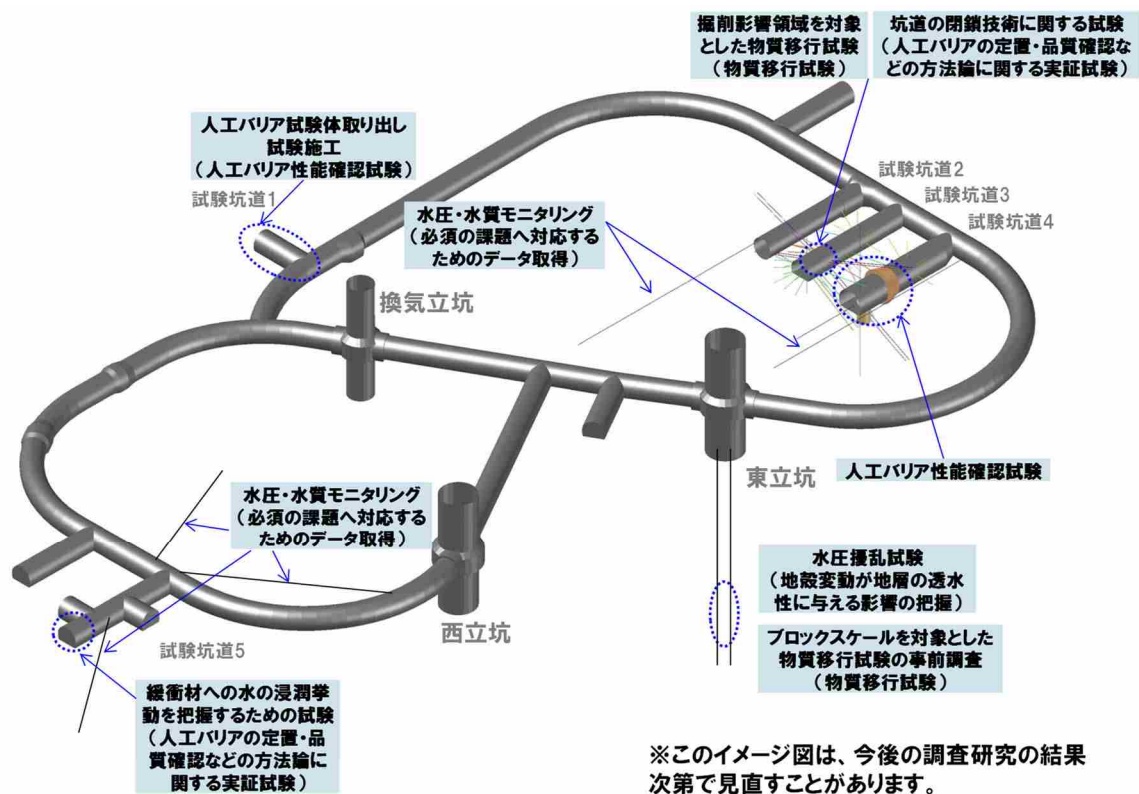


図 4 350m調査坑道における主な調査研究の実施場所

地下施設の管理としては、試験坑道1において人工バリア性能確認試験の解体調査のための試験施工に関わる工事を行うとともに、施設内の機械設備や電気設備などの維持管理業務（設備運転や保守点検など）を引き続き実施しました。地下施設からの排水および掘削土（ズリ）置場の浸出水を、排水処理設備において適切に処理したうえで天塩川に放流しています。

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、処分事業や安全規制に適宜反映していきます。そのため、令和2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、本計画を着実かつ効率的に進めました。また、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^{*20}などを活用した情報発信を継続しました。参考資料として、巻末に令和2年度の外部発表実績

*20 : <https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/>

を掲載しました。

また、国内外の資金や人材を活用することについては、令和2年度から人工バリア性能確認試験をタスクの一つとする国際共同研究DECOVALEXに参画するとともに、環太平洋地域における国々で地下研究施設を活用した国際協力^{*21}の憲章を締結し、国際研究拠点化を推進しました。

3.2 稚内層深部（深度 500 m）での研究の実施に関する検討結果

令和2年度の「幌延深地層研究の確認会議」では、「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」の必須の研究課題の範囲内であることを前提として、令和2年度以降の研究成果を最大化するため、稚内層深部（深度500 m）での研究を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ました。

深度500 mの地質環境に関しては、令和2年度に新たに実施した令和元年度までの水圧擾乱試験などのデータの解析の結果、深度500 m付近は水が流れにくい領域であると推定されました（6.1.1にて詳述：図 57参照）。また、高密度電磁探査の結果、地下施設の深度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、地下水が長期的に滞留状態にあることが分かりました（6.1.2にて詳述：図 64参照）。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極めて緩慢であることが確認されました。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ります。深度500 mと深度350 mの地質環境の特徴を表 1に示します。

このような特徴を有する深度500 mにおいて「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」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ます。

- ・ 高い地圧がかかり、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

*21：環太平洋地域における地下研究所（URL）を活用した国際協力に関する枠組みで、以下の研究機関が参加しています。日本原子力研究開発機構（JAEA）、韓国原子力研究所（KAERI）、米国サンディア国立研究所（SNL）、オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO）、台湾工業技術研究院（ITRI）。

- ・ 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します。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ます。

以上のことから、技術基盤の整備に、より一層貢献できるため、必要と判断しました。

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年程度を見込んでおり、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ました（表 2）。

これらの結果を踏まえ、深度500 mに坑道を展開して研究を実施する方針としました。

なお、研究期間の前半で行う予定であった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材の搬出入の工程重複などを避け、両者を効率的に実施するため、工程の見直しを行いました（表 2）。

表 1 深度500 mと深度350 mの地質環境の特徴

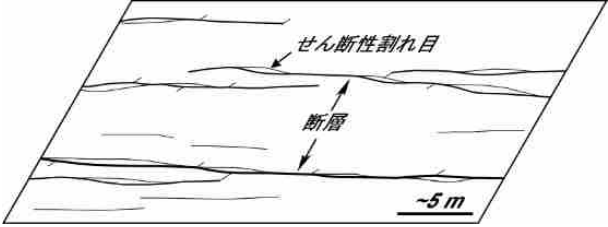
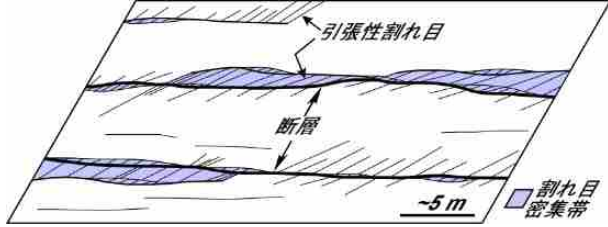
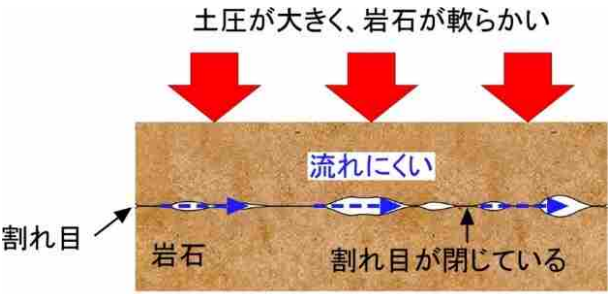
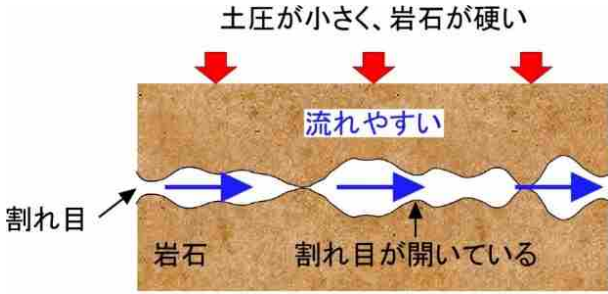


ポイント	深度500 m	深度350 m
土圧・地下水圧	<ul style="list-style-type: none"> ・土圧が大きく、岩石が軟らかい ・地下水圧が高い 	<ul style="list-style-type: none"> ・土圧が小さく、岩石が硬い ・地下水圧が低い
地質の状態 (分布する割れ目の特徴)	 <p>断層沿いに割れ目の発達が乏しく、断層内を水が流れにくい</p>	 <p>断層沿いに多数の割れ目が発達し、断層内を水が流れやすい</p>
割れ目の開口状況	<p>土圧が大きく、岩石が軟らかい</p>  <p>流れにくい</p> <p>割れ目 岩石 割れ目が閉じ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

表 2 稚内層深部での調査研究の実施を踏まえた研究工程

		R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
		第3期			第4期中長期目標期間					
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、達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となる情報の整理、等				
2.2	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	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	立坑(西、東、換気)	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。

※ 人工バリア性能確認試験については、材料の水分量や密度、腐食の度合いなど詳細なデータ取得するための解体調査を当初令和5、6年度に予定していましたが、500m掘削中(令和5～7年度)は、安全管理上、作業が2箇所(2切羽)までに限定され、規模の大きな作業が困難になるため、令和8、9年度に実施することとしました。

 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。

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調査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 (THMC) 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、THMC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調査により、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います。人工バリア性能確認試験の解体調査については、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調査により得られるデータを基に、THMC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2年度は、試験坑道4で実施している人工バリア性能確認試験 (図 5) のヒーターの設定温度を約90℃から50℃に変更し、廃棄体の減熱過程を模擬した試験を開始しました。図 6に令和2年度に計測したデータの一例を示します。

ヒーターの設定温度は6月24日から徐々に低下させ、7月14日に50℃まで低下させました。図 6(a)に示すように、模擬OPの表面温度の低下に伴い緩衝材中の温度も低下することが確認できます。図 6(b)は緩衝材中の内側、外側と緩衝材外周部のケイ砂中の間隙圧を示しています。緩衝材内側と外側の値は、温度低下とともに低下していることが分かります。これは、温度が低下することにより、緩衝材中の気相の圧力が下がったことが要因として考えられます。ケイ砂中については、温度変化はほとんどなく温度低下の影響は受けず、図 6(d)の注水圧力と同様の傾向を示しています。図 6(c)の全応力には、緩衝材中の間隙圧、熱応力、膨潤応力などが含まれています。そのため、温度低下によって間隙圧や熱応力が低下し、全応力が低下しているものと考えられます。

人工バリア性能確認試験では、岩盤からの地下水浸潤を模擬するために、埋め戻し材外周部と緩衝材底部に注水管を設置し、人工的に地下水を注水しています。図 6(d)は埋め戻し材への注水流量と緩衝材への注水流量と注水圧力を示します。埋め戻し材への注水流量は約300 mL/minを維持しています。一方で、緩衝材部は1,200 mL/minで注水を継続していたところ、設定流量を変更していないにもかかわらず、7月14日ころから急激に低下しました。この時、注水管内にはガスが多く含まれていたことから、注水流量や注水圧力の大きな振れはガスによって正確に計測されていないことが原因と考えられます。その後、設定流量を約600 mL/minまで低下させることにより、流量と圧力が安定しました。なお、これらの注水流量の変化は、緩衝材中の温度や圧力変化に大きな影響を与えませんでした(図 6(a)、(b)、(c))。

図 7に比抵抗トモグラフィ^{*22}により緩衝材中の飽和度を算出した結果を示します。減熱試験前の令和2年1月24日と6月3日の結果を比較すると、緩衝材内側の飽和度は大きく変化していないことが確認できます。一方で、令和2年10月20日と令和3年3月25日の計測結果では、緩衝材内側の飽和度が高くなっていることが分かります。これは、温度差が小さくなることによって、緩衝材中の温度差によって生じる緩衝材外側方向への水分移動が小さくなり、緩衝材内側への水分の移動が促進されたことによるものと考えられます。これらのデータはTHMC連成解析コードを検証するために使われます。また、連成解析に必要な温度勾配環境下における水分移動に関わるパラメータを取得するための室内試験を開始しました。今後は、取得したパラメータを用いて連成解析を行い、温度や飽和度などの原位置データとの比較を行い、解析コードの検証を行います。

*22：トモグラフィ調査は、調査対象の範囲内の物性値（速度、比抵抗など）の分布を断面として可視化する物理探査手法です。

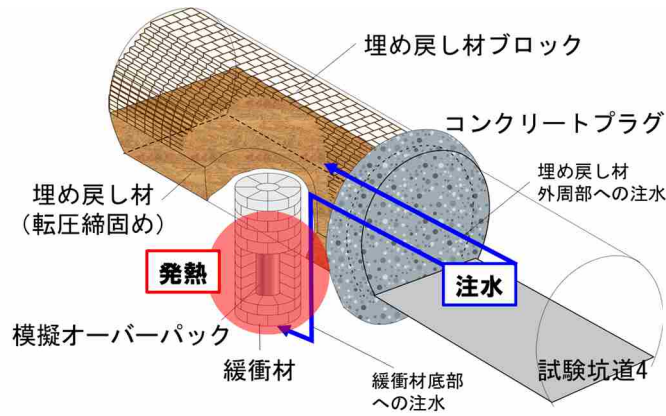


図 5 人工バリア性能確認試験の概念図

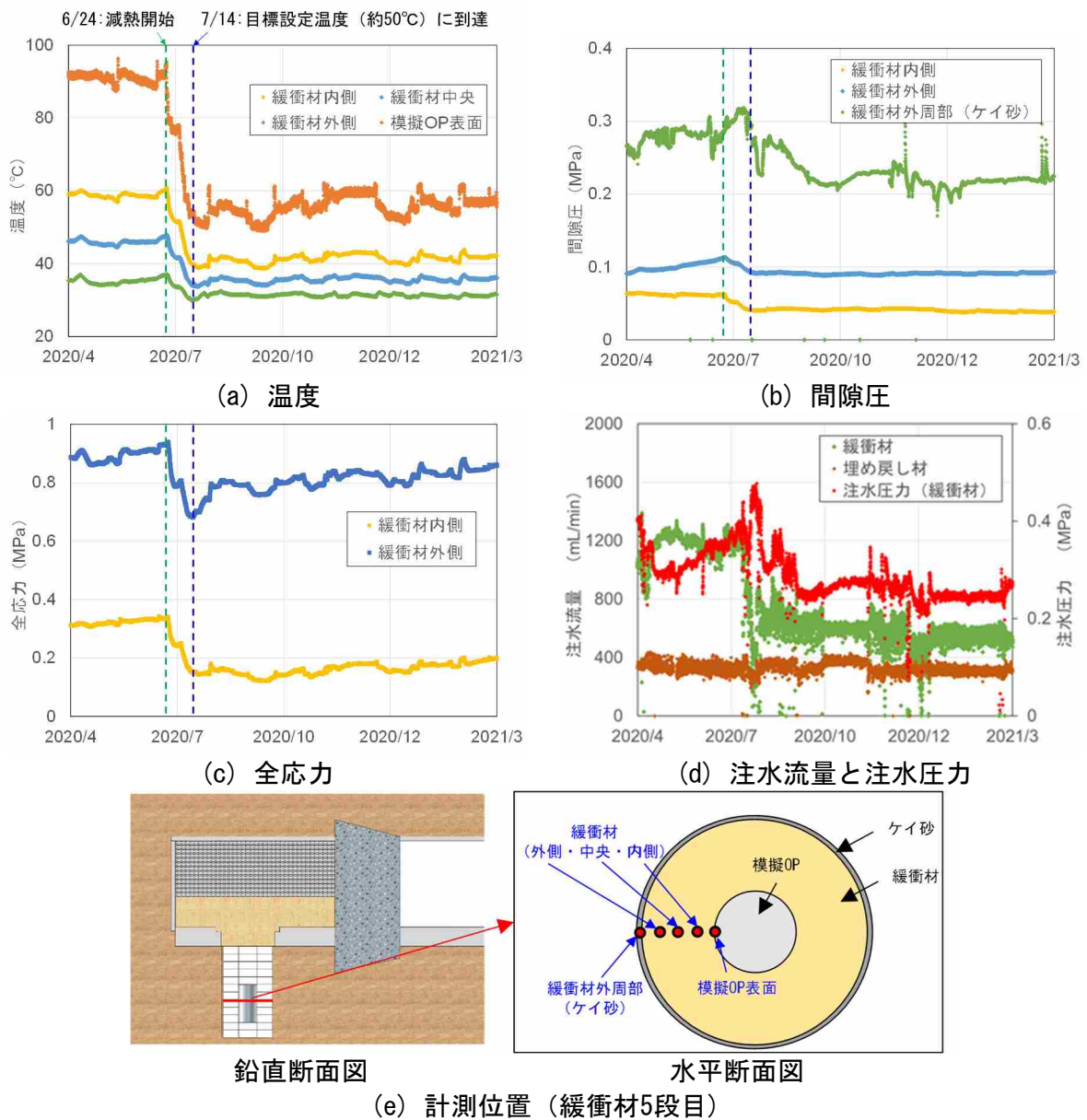


図 6 人工バリア性能確認試験で取得した計測データの一部 (緩衝材5段目)

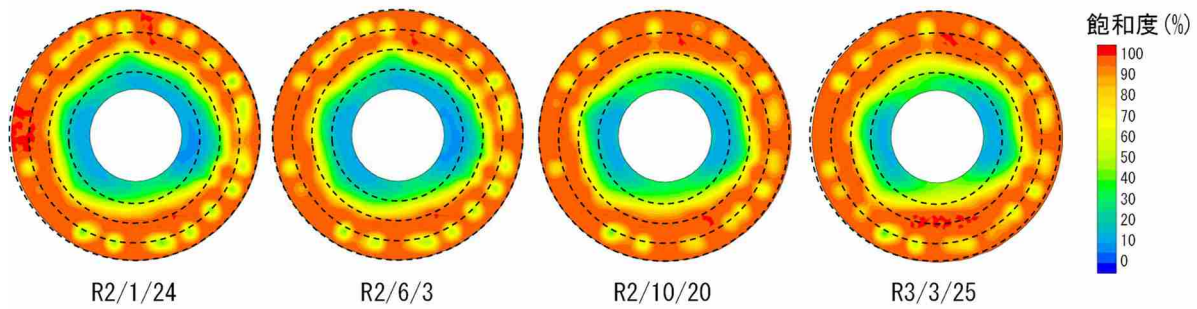


図 7 比抵抗トモグラフィによる緩衝材中の飽和度の算出結果

国際共同研究DECOVALEXでは、室内試験結果を対象に、共同解析を行うための解析モデルや解析条件を設定するとともに、各国間の解析コードの違いを確認しました。また、今後予定している空気の移動などを考慮した熱－水理－力学連成挙動に関する室内試験については、事前の解析結果を基に浸潤挙動や膨潤挙動に及ぼす空気の影響を確認し、粘土材料の乾燥密度、設定温度、センサー（温度、水分量、応力、間隙圧）の設置位置、試験期間などの試験条件の設定を行いました。

人工バリア性能確認試験の解体調査のための試験施工（図 8）については、試験坑道4で実施している人工バリア性能確認試験の一部を模擬した埋め戻し部と試験孔部の施工を行いました。埋め戻し部は、試験坑道1の奥側の側面と底盤にコンクリートを打設し、人工バリア性能確認試験と同材料の埋め戻し材を、下部は電動ランマーにより転圧締固め、上部にはブロックを設置することにより埋め戻しました。埋め戻し材設置後は、コンクリートプラグを打設し、埋め戻し部内部への注水を開始しました。人工バリアを設置するための試験孔（孔径は約2.4 m、深さは約3 m）は、ブレイカーと小型の削岩機により掘削を行いました。掘削中は孔壁が崩れる懸念があったため、約1 mごとに掘削、型枠の設置、外周部コンクリートの打設（厚さ150 mm）、型枠の解体を行いました。掘削終了後は底盤にコンクリートを打設し、底部にケイ砂を敷設した後、人工バリア性能確認試験と同サイズの模擬OPと緩衝材ブロックを7段（人工バリア性能確認試験は12段）設置しました。最後に、緩衝材にかかる埋め戻し材の重量を模擬するためのおもりを緩衝材上部に設置し、埋め戻し部と同様に注水を開始しました。施工状況を図 9に示します。今後は、人工バリア性能確認試験の解体調査時に適用する施工方法を検証するための解体作業を行

います。

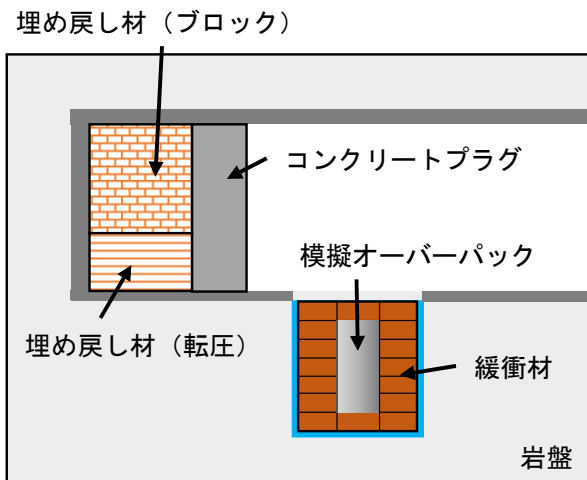


図 8 試験施工の概要図（鉛直断面図）



図 9 施工の様子

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、微生物・有機物・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、微生物・有機物・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、微生物・有機物・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。

(1) 掘削損傷領域を対象とした物質移行試験

令和2年度は試験坑道3の既存孔(H4-1孔、H4-2孔およびP孔)において掘削損傷領域(Excavation Damaged Zone: 以下、EDZ)を対象としたトレーサー(非収着性^{*23})試験を行い、EDZの物質移行特性を評価するためのモデル化/解析手法を検討するためのデータ取得を行いました(図10)。H4-2孔は試験坑道3の壁面から試験坑道4に向かって斜め下向きに掘削されたボーリング孔であり、区間①、②および③に試験坑道4の底盤および人工バリア性能確認試験の試験孔(ピット)周辺に発達するEDZの割れ目が含まれています(図10)。H4-1孔およびP孔は試験坑道4に向かって斜め上向きに掘削されたボーリング孔であり、両孔のそれぞれ区間①および区間②に試験坑道4の上部に発達するEDZの割れ目が含まれています(図10)。まずはEDZの割れ目を包含している区間を対象に、孔間の透水試験を行いました。透水試験は、H4-1孔の区間②とH4-2孔の区間②をそれぞれ注水区間として行いました。その結果、いずれの孔間においても透水量係数が 10^{-7} m²/sオーダーであり、EDZの割れ目を介した水理的連結性は、比較的良いことが分かりました。次に、トレーサーを使わずに、水のみを

^{*23}: 固体や液体などの表面に物質がくっつく現象(吸着)と、固体や液面の内部に取り込まれる現象(吸収)の両方を合わせて収着と言い、収着を起こしにくいトレーサーを非収着性トレーサーと呼びます。

注水/揚水を行う予備試験を行い、トレーサー試験期間中に継続して注水/揚水が行える期間およびその際に設定すべき注水量および揚水量の確認を行いました。その結果、地下水からの脱ガスによる影響が小さく、注水および揚水時の間隙水圧も比較的安定した区間として、H4-1孔の区間①を注水孔、P孔の区間②'を揚水孔として選定し、トレーサー試験を行うこととしました。H4-1孔の区間②では、揚水直後に地下水からの脱ガスが生じるために、継続して揚水することができませんでした。

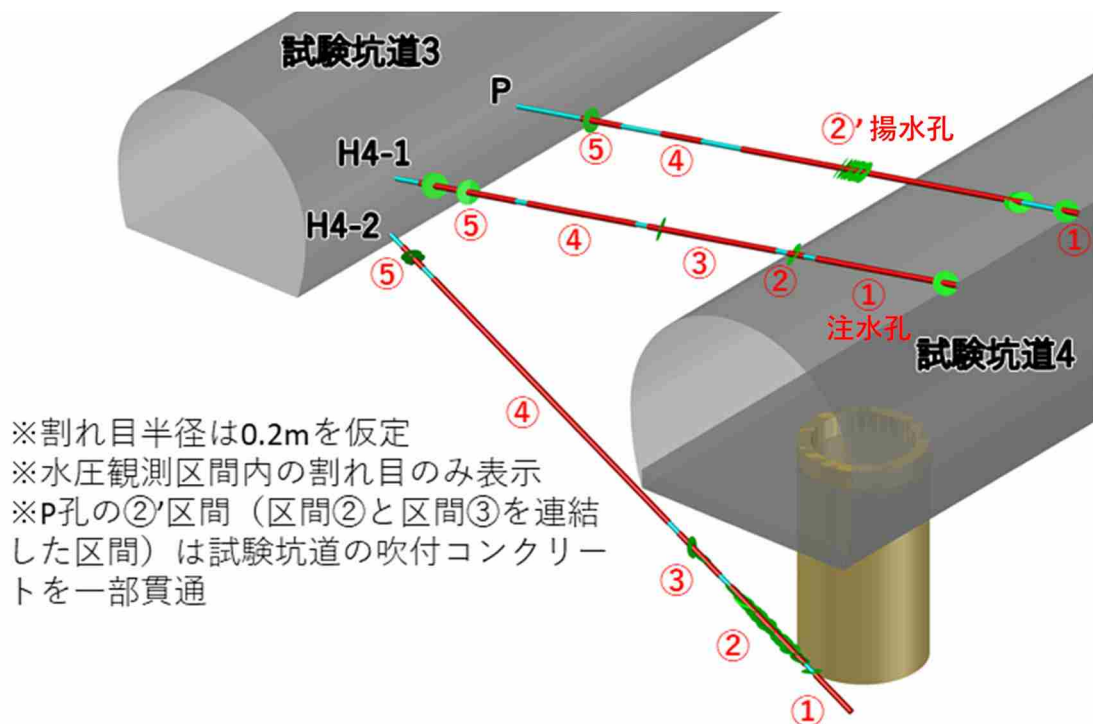


図 10 EDZを対象としたトレーサー試験のレイアウト（鳥瞰図）

赤字で示した番号は各孔の間隙水圧観測区間を示します。このうちトレーサー試験で使用した区間はH4-1孔の区間①（注水孔）とP孔の区間②'（揚水孔）になります。

今回の試験では、非収着性トレーサーとして、非放射性のヨウ素とウランを使用しました。前述した予備試験結果を踏まえ、安定的に注水および揚水が行える条件として、注水流量を30 mL/min、揚水流量を60 mL/minに設定し、24時間継続しました。注水には350m調査坑道から掘削したボーリング孔から得た地下水を利用し、試験開始から7時間まではウラン（10 ppm）およびヨウ素（1,000 ppm）を混合した地下水を注入しました。ウランのトレーサー試験結果を図 11に示します。試験は累計24時間継続しましたが、揚水孔であるP孔の区間②'において有意なトレーサー濃

度の変化は見られず、トレーサーの到達は確認できませんでした。このことから、移行経路の容積に対してトレーサーの注入濃度をより高く設定する必要があると判断されました。トレーサー回収率をより正確に算出するために、トレーサー濃度を5秒間隔で連続モニタリングしましたが、今後は測定間隔を長くとり、より高濃度で注入したトレーサー濃度を一旦希釈して測定する方法で試験を実施することが必要であると考えられます。

今後は、ウラニンの濃度や注入期間がトレーサーの移行挙動に及ぼす影響について、数値解析などによる評価を行い、今回のトレーサー試験結果の検証を行う予定です。

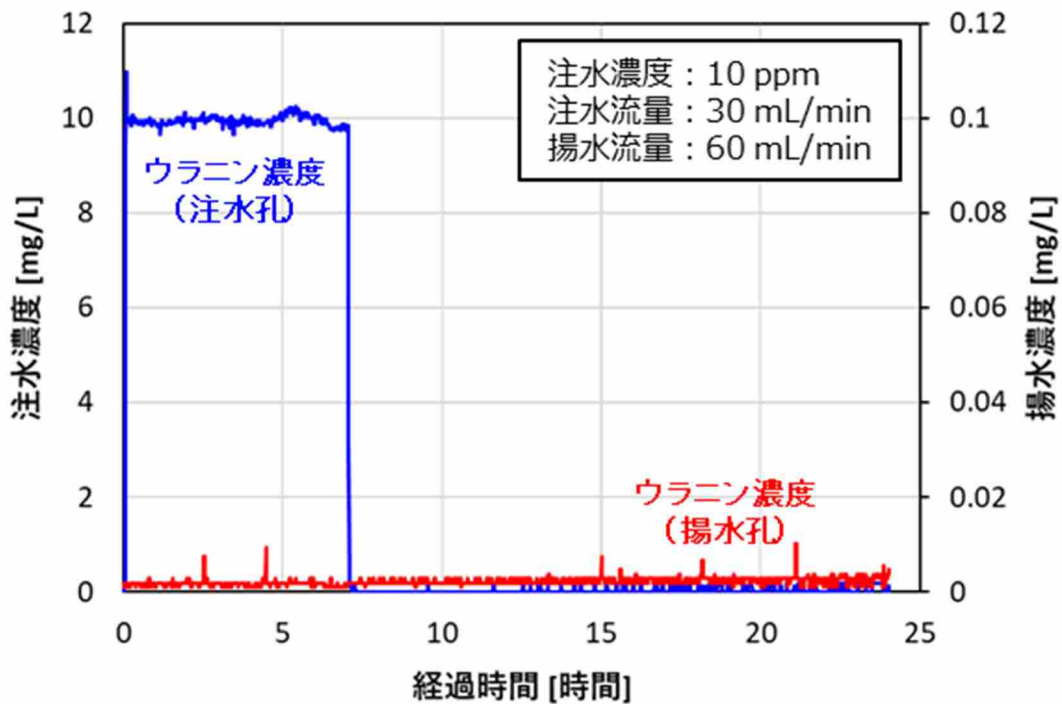


図 11 EDZを対象としたトレーサー試験結果

(2) 微生物・有機物・コロイドを対象とした物質移行試験

令和2年度は、微生物・有機物・コロイドを対象とした物質移行試験に先立ち、令和3年度に行う既存孔を利用した予察的な原位置試験計画の検討を行いました(図 12)。原位置試験は、これまでに実施してきた原位置拡散試験^{*24}と同様に、地下施設内のボーリング孔内の試験区間にトレーサーを循環させる方法で行います。地下水中のトレーサー濃度に加えて、微生物の密度・種組成、有機物の濃度・サイズ・特性、コロイドの濃度・サイズ・元素組成なども定期的に分析し、トレーサーの濃度および存在形態の時間変化に関する情報を取得します。これにより、微生物・有機物・コロイドの存在が物質移行挙動に与える影響を評価できると考えられます。

試料採取にあたっては、孔径が異なる複数のフィルターで地下水をろ過することにより微生物・有機物・コロイドをサイズに応じて分類し、それぞれのろ過地下水に含まれる微生物の密度や種組成、有機物やコロイドの濃度・特性などに関する情報を取得します。フィルター上に捕捉された固相についても、粒子の形態観察や微生物相の分析などを行います。さらに、ろ過地下水およびフィルター上の固相におけるトレーサーの濃度も分析することにより、微生物・有機物・コロイドとの反応に伴うトレーサー元素の存在形態の変化についても評価が可能と考えられます。これらの情報と、トレーサー濃度の時間変化に関するデータとを組み合わせることにより、試験区間における微生物・有機物・コロイドとの反応がトレーサー元素の物質移行挙動に与える影響を評価できると考えられます。

*24：拡散とは、物質の濃度の違いによって物質が散らばり広がる現象を言います。拡散試験はトレーサー試験の一種で、物質(トレーサー)の濃度変化から岩盤の拡散係数などのパラメータを調べる試験です。

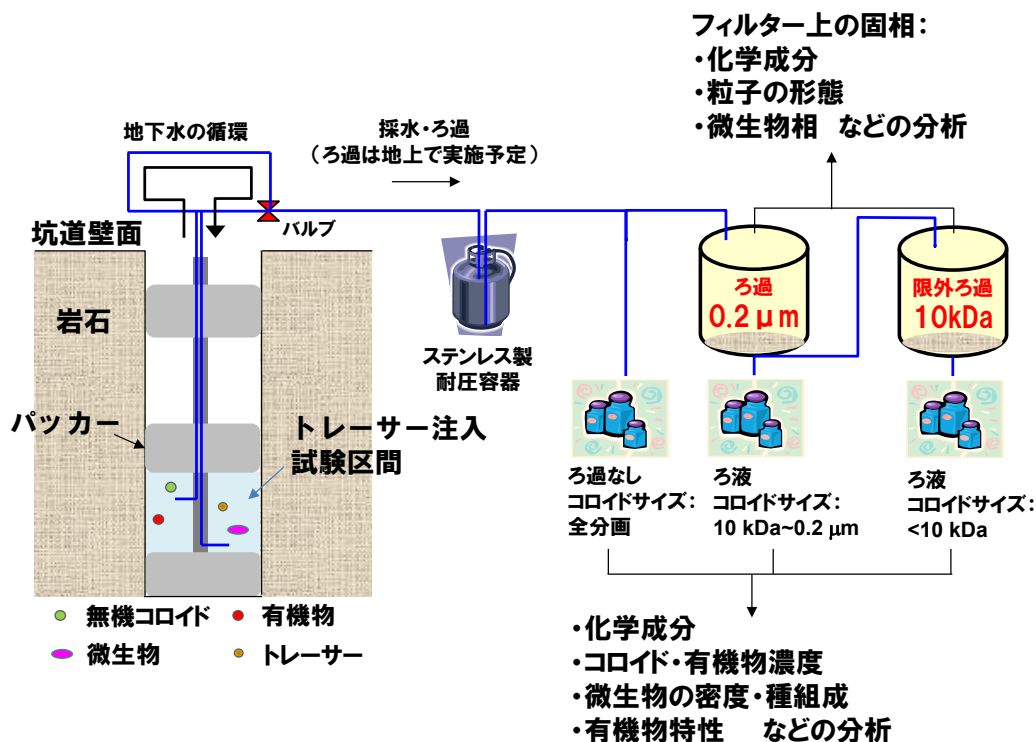


図 12 微生物・有機物・コロイドを対象とした物質移行試験のイメージ図

また、微生物・有機物・コロイドが核種移行に及ぼす影響に関する室内試験などによる現象理解の一環として、地下水中の溶存有機物をその構造や化学特性に応じて複数の物質群（画分）に分けるとともに、各画分の溶存有機炭素（Dissolved Organic Carbon: 以下、DOC）濃度の測定や、サイズ排除クロマトグラフィー^{*25}による分子サイズ分布の測定などを行いました。その結果、幌延の地下水中の溶存有機物は主に腐植物質^{*26}（DOC濃度の約60%）と親水性物質^{*27}（約35%）からなることが分かりました。地下水中の腐植物質と親水性物質の分子サイズ分布について、ピーク的位置は未分画の溶存有機物と類似していますが、2つのピークの大小関係は画分によって異なることも分かりました（図 13）。各画分のDOC濃度とピーク面積割合を基に各ピークに対応するDOC濃度を計算すると、親水性物質は腐植物質に比べて相対的に分子サイズが小さい有機物を多く含むこ

*25：サイズ排除クロマトグラフィーは、分子サイズの違いによりカラムへの保持時間が異なる性質を利用して、溶液中の物質群の分子サイズ分布を推定する手法です。

*26：ある条件下で樹脂に吸着した物質のうち、アルカリ性溶液で溶出される物質群です。特定の化学構造を持ちません。

*27：ある条件下で樹脂に吸着しなかった物質群です。多糖類、タンパク質などを含まれます。

とが示唆されました。物質移行特性の評価にあたっては、元素と有機物との結合に関する評価のほか、このような有機物のサイズ分布が移行挙動に与える影響も考慮する必要があると考えられます。さらに、幌延の地下水中の腐植物質は地表の腐植物質と比べて相対的に分子サイズの小さいものが多いことが報告されていますが⁽²⁾、本研究においても地下水と地表水とで溶存有機物の分子サイズ分布が異なり、地表水に認められる分子サイズの大きい有機物由来のピークが地下水中には認められないなど（図 13）、両者の特性が異なることが確認されました。これらの成果は、国立環境研究所^{*28}との共同研究により得られたものです。

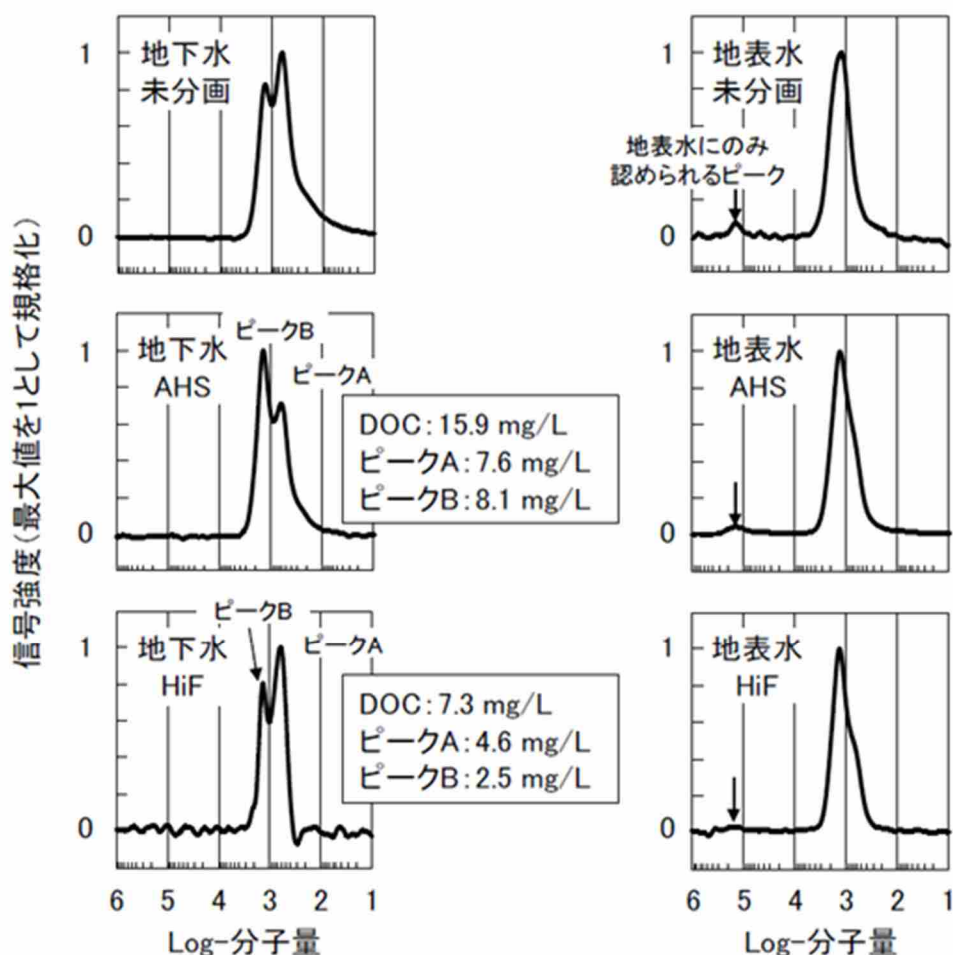


図 13 140m調査坑道から採取した地下水および地表水中の溶存有機物のサイズ分布
AHS：腐植物質、HiF：親水性物質

*28：国立研究開発法人国立環境研究所は、国内外の環境問題に関するさまざまな研究開発を実施している研究組織です。

(3) ブロックスケールを対象とした物質移行試験

令和2年度は、令和3年度に実施するトレーサー試験に先立ち、東立坑底盤 (GL-380 m) から掘削した2本のボーリング孔 (FZ-01孔およびFZ-02孔、図 14) に物質移行試験装置を挿入し、別途実施した水圧擾乱試験 (FZ-01孔) 時の水圧応答などから、対象とする断層の水理的連結性の確認を行いました。図 15に、水圧擾乱試験 (2回目) 時のFZ-02孔の間隙水圧の観測結果を示します。区間1については、水圧擾乱試験時の有意な水圧応答が認められなかったため、FZ-01孔の断層と区間1に含まれる断層との水理的連結性は乏しいあるいは限定的であると考えられます。一方、区間2と区間3については、1回目と2回目の水圧擾乱試験で異なる水圧応答が確認されました。1回目の水圧擾乱試験時は区間2と区間3を独立して区画していましたが、2回目の水圧擾乱試験時は区間2と区間3を連結しています。これまでに実施した孔壁画像検層の結果から、101.6 m～101.7 mの区間に割れ目が確認されており、この割れ目をその上部に位置する断層と区画するために、パッカーの位置を設定しましたが、孔壁画像検層の深度は使用するケーブルの伸長などにより若干の誤差が生じる可能性があり、結果として1回目の水圧擾乱試験時はこの割れ目がパッカーでふさがれていた可能性が考えられます。区間2と区間3を連結した後に明瞭な水圧応答が確認できたことから、101.6 m～101.7 mに位置する割れ目がFZ-01孔の断層と水理的に連結している可能性が示唆されます。今後はFZ-01孔およびFZ-02孔の孔間の水理的連結性の評価結果を踏まえ、FZ-01孔の区間2を注水区間とし、FZ-02孔の区間2もしくは区間3 (101.6 m～101.7 m に出現する割れ目を試験区間内に配置するために、装置全体の設置位置を若干調整する予定です。) を揚水区間としたトレーサー試験を実施する予定です。