

幌延深地層研究計画
令和4年度調査研究成果報告

令和5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

本資料に関するお問い合わせは、下記へお願いいたします。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

核燃料・バックエンド研究開発部門

幌延深地層研究センター 総務・共生課

〒098-3224 北海道天塩郡幌延町字北進 432 番地 2

TEL : 01632-5-2022

FAX : 01632-5-2033

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4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	17
4.1 人工バリア性能確認試験	17
4.2 物質移行試験	26
5. 処分概念オプションの実証	38
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	38
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	79
6. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証	88
6.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化	88
6.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験	111
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	118
8. 地下施設の管理	137
9. 環境調査	140
9.1 排水量および水質調査結果	140
9.2 研究所用地周辺の環境影響調査結果	150
10. 安全確保の取り組み	153
11. 開かれた研究	154
11.1 国内機関との研究協力	154
11.2 国外機関との研究協力	162
参考資料	165
参考文献	174
付録	181

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 4 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	18
図 7	緩衝材温度の出力点とその経時変化	18
図 8	人工バリア性能確認試験の計測データの例（緩衝材温度、注水流量と注水圧力）	19
図 9	人工バリア性能確認試験の計測データの例（緩衝材の飽和度）	20
図 10	令和 3 年度に実施した温度勾配下における緩衝材中の水分移動特性に関する試験の概念図と試験条件	22
図 11	試験結果と解析結果の比較	22
図 12	人工バリア解体試験施工の概念図	24
図 13	人工バリア性能確認試験の解体調査におけるアクセス用の坑道（試験坑道 4-7 連絡坑道）のイメージ図	24
図 14	模擬 OP の一体取り出しの概念図	25
図 15	解体調査のサンプリング対象	26
図 16	掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験のレイアウト	27
図 17	トレーサー試験中の間隙水圧測定結果	28
図 18	幌延の地下水（深度 350 m）中のコロイド粒子に対する希土類元素の相互作用	29
図 19	希土類元素添加試験方法の概要図	30
図 20	幌延の地下水（深度 350 m）中における希土類元素のコロイド生成挙動に関する検討結果	31
図 21	ボーリング孔の配置とモデル化領域	32
図 22	FZ-01 孔と FZ-02 孔の試験区間	33
図 23	孔間透水試験結果の解析例	34
図 24	ダイヤモンド微粒子の研磨剤が付加された切削研磨機を用いた薄片試料の作製と観察画像	36
図 25	微小割れ目面および人工切断面の赤外吸収スペクトル	37
図 26	コンクリート試験体の定置状況	40
図 27	コンクリート試験体の変質領域	41
図 28	コンクリート試験体中の元素分布	41
図 29	コンクリート試験体中の空隙率分布	42
図 30	坑道開放期間の違いによる埋め戻し後の圧力回復挙動の比較	45
図 31	坑道開放期間の違いによる埋め戻し後の飽和度回復挙動の比較	46
図 32	膨潤解析結果	49
図 33	ESL モデルによる評価の例（「①支保工との相互作用により埋め戻し材の周囲は常時拡散場となる」場合）	51
図 34	流出試験装置	52
図 35	流出試験結果（ケース D-1）	53
図 36	流出試験結果（ケース S-1）	53

図 37	縮尺模型試験の概念図	54
図 38	縮尺模型試験のイメージ	55
図 39	上方膨潤率の経時変化	57
図 40	試験終了時の緩衝材の乾燥密度分布	57
図 41	EDZ シーリング試験の概要図	59
図 42	試験領域内の透水係数の経時変化	59
図 43	吹付け試験施工後の養生	60
図 44	吹付けベントナイトの試料採取位置	61
図 45	含水比と乾燥密度の関係	62
図 46	弾性波トモグラフィ調査のボーリング孔配置	63
図 47	グラウト前後における P 波速度分布	64
図 48	グラウト前後における S 波速度分布	64
図 49	吹付けコンクリートの影響を考慮した場合と考慮しない場合の解析結果の比較	65
図 50	タイムラプス解析による弾性波速度の経時変化	66
図 51	ボーリング孔閉塞の原位置試験の概念図	67
図 52	ボーリング孔閉塞試験の実施場所 (250m 調査坑道)	68
図 53	コア観察による割れ目の頻度分布	69
図 54	ベントナイトブロック定置用コンテナ	69
図 55	ベントナイトブロック設置作業の状況	71
図 56	膨潤状況の確認時のボーリング孔の状況	71
図 57	注水期間における流量および間隙水圧の経時変化	72
図 58	原位置での緩衝材流出試験の設備の概要 (ケイ砂充填ケース)	74
図 59	緩衝材流出試験結果	75
図 60	緩衝材ブロックの観察結果および含水比の計測位置 (5 段目 : 最下段)	76
図 61	流出量評価モデルの理想的な開発手順	77
図 62	室内試験における累積流出量のべき関数モデルによる予測結果と試験結果との比較 (ケイ砂充填ケース)	78
図 63	原位置試験における累積流出量のべき関数モデルによる予測結果と試験結果の比較 (ケイ砂充填ケース)	79
図 64	100°C以上の温度で加熱された緩衝材に発生したひび割れの例	81
図 65	原位置試験の概念図	82
図 66	原位置試験における、緩衝材ブロック外縁部の温度変化に関する熱解析結果	83
図 67	原位置試験実施予定の坑道周辺を想定した三次元熱解析の出力点の配置	83
図 68	三次元熱解析の結果	84
図 69	緩衝材内部の温度が 100°Cを超える場合の温度履歴の例	85
図 70	温度履歴および反応速度式の違いを考慮したスメクタイトのイライト化の経時変化	86
図 71	より高温域での温度履歴を考慮したスメクタイトのイライト化の経時変化	86
図 72	イオン濃度を考慮したスメクタイトのイライト化の経時変化	87

図 73	DI モデル（図中の実線と破線で示す近似曲線）と水圧擾乱試験結果の比較	89
図 74	様々な堆積岩および結晶質岩で認められる断層沿いの地下水の主要な水みち割れ目の透水性と DI の関係	89
図 75	稚内層中の DI 分布	91
図 76	地下施設建設時の地下施設周辺のボーリング孔（HDB-6 孔および PB-V01 孔）での水圧変化から数値解析により推定された各地層の数 m～数十 m 以上のスケールで見た場合の透水性	92
図 77	HDB-6 孔の水圧観測結果（平成 20 年 10 月 9 日以降の水圧変化量）と数値解析により推定される水圧変化量	93
図 78	割れ目水および間隙水の水質（同位体比）と地下水の流れの有無との関係	93
図 79	令和 2 年度の電磁探査で得られた比抵抗分布（99 測点、拘束なしの解析結果、HFB-1 孔および HDB-5 孔を通過する鉛直断面図）	95
図 80	令和 2 年度の電磁探査で得られた比抵抗分布（99 測点、拘束なしの解析結果、標高-275 m における水平断面図）	96
図 81	検層と電磁探査の三次元比抵抗分布に基づく比抵抗の深度分布	98
図 82	ボーリング調査から得られた塩化物イオン濃度、酸素同位体比の深度分布	98
図 83	天水と化石海水の分布に関する解釈と比抵抗分布（99 測点、拘束なしの解析結果、HFB-1 孔および HDB-5 孔を通過する鉛直断面図）	99
図 84	地球統計学的解析で使用したボーリング孔の位置図	101
図 85	フルモデルで得られた酸素同位体比の推定値と各ケースで得られた酸素同位体比の推定値との間の、深度ごとの RMSE	102
図 86	高比抵抗領域のボーリング孔を追加する前後での酸素同位体比の分布とフルモデルにより得られた分布との差	103
図 87	地球統計学的手法で得られた酸素同位体比の分布の例	104
図 88	解析領域と着目断面位置（A-A'）	106
図 89	100 万年前、33 万年前および現在の解析モデル	107
図 90	地形変化、海水準・涵養量変化を連続的に考慮した解析結果	108
図 91	解析結果と HDB-3 孔および HDB-6 孔の調査から得られた観測値との比較	109
図 92	解析結果と HDB-9 孔および HDB-11 孔の調査から得られた観測値との比較	110
図 93	試験坑道 3 および試験坑道 4 の掘削損傷領域の割れ目を対象に実施した注水試験区間	112
図 94	掘削損傷領域の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 95	注水試験結果と DI モデルの比較	113
図 96	樹脂注入後の掘削損傷領域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）	116
図 97	HDB-6 孔の水圧観測結果と地下施設からの湧水量の比較	119
図 98	地下水の採取箇所	121
図 99	地下水の塩化物イオン濃度の経時変化	122

図 100	地下水の酸素同位体比の経時変化	123
図 101	試験坑道 4 壁面からの浸出水の採取箇所	123
図 102	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	125
図 103	C05 における水圧モニタリング結果	125
図 104	C06 における水圧モニタリング結果	126
図 105	C07 における水圧モニタリング結果	126
図 106	C08 における水圧モニタリング結果	127
図 107	C09 における水圧モニタリング結果	127
図 108	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	128
図 109	C05 の区間 2 における水質モニタリング結果	129
図 110	地中変位計設置状況写真	131
図 111	鋼製支保工応力計設置例	131
図 112	計測器設置位置図	131
図 113	地中変位計の計測結果	132
図 114	鋼製支保工応力計の計測結果	132
図 115	PIN8 の傾斜量	133
図 116	PIN8 の傾斜方向	134
図 117	PIN10 の傾斜量	134
図 118	幌延町宮園で観測された震度 1 以上の地震のうち宗谷地方北部およ び上川地方北部で発生した地震の震央図	136
図 119	地表および地下施設で観測された地震の波形	136
図 120	地下施設の整備状況	137
図 121	設備の更新状況	137
図 122	掘削土（ズリ）置場	138
図 123	二重遮水シートの構造	138
図 124	排水処理設備	139
図 125	排水系統と各水質調査の採水地点	140
図 126	地下施設からの排水処理フローと水質調査の採水地点	142
図 127	天塩川の採水地点	144
図 128	天塩川での採水状況	144
図 129	掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水地点	146
図 130	掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水状況	146
図 131	清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水地点	148
図 132	清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水状況	148
図 133	環境調査実施場所	151
図 134	清水川の水質調査	151
図 135	清水川の水質調査	152
図 136	安全パトロールの状況	153
図 137	安全行事（安全大会：令和 4 年 7 月 1 日）の状況	153

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	解体調査で予定している主な取得情報	25
表 3	流出試験条件	52
表 4	縮尺模型試験の試験条件	55
表 5	緩衝材ブロックの乾燥密度の測定結果	76
表 6	幌延町宮園で観測された震度 1 以上の地震	135
表 7	天塩川への排水量	141
表 8	地下施設からの排水に係る水質調査結果	143
表 9	天塩川の水質調査結果	145
表 10	掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果	147
表 11	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	149
表 12	浄化槽排水の水質調査結果	150
表 13	清水川の水質調査結果	151
表 14	確認された重要種（魚類）	152
表 15	HIP 参加機関（令和 5 年 3 月 31 日現在）	164

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。

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^{*2}の適用性確認、処分概念オプション^{*3}の実証、地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力^{*4}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^{*5}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。

*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：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。

*3：処分概念オプションとは、高レベル放射性廃棄物を人工バリアでくるんで地下深くに定置するという、地層処分の概念を実現するための色々な方法のことです。例えば、廃棄体を縦置きにするのか横置きにするのか、緩衝材をブロックで積み上げるのか現場で固めるのか、といった処分方法についての選択肢のことを指します。

*4：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す。

*5：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。

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

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けた取組を進める」との考え方が示され、「国、NUMO^{*7}、JAEA^{*8}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）^{*9}」（以下、第4期中長期目標）が定められ、原子力機構は、この第4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）（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、さら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。

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することを検討します。

*7：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。

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

*9：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^{*10}）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^{*11}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^{*12}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^{*13}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。

*10：平成26年度に、それまでの研究成果を踏まえて「必須の課題」を設定し、これらの課題を解決すべく、研究に取り組んできました。これらの研究課題に関して令和元年度に研究成果の評価を行い、この「必須の課題」の中で引き続き研究が必要とされたものについて、令和10年度までを研究期間として研究に取り組んでいます。「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」では、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、地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証、の3つを研究課題として取り組むこととしており、これらを「令和2年度以降の必須の課題」と呼んでいます。

*11：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。

*12：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、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。

*13：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言い、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。

(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、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^{*14}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に対する温度の観点からの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、断層への地殻変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^{*15}を解析する手法を開発します。

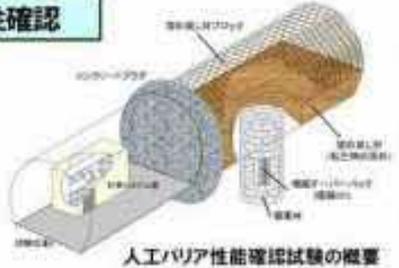
*14：ベントナイトやコンクリートなどが材料となって構成される、緩衝材や埋め戻し材が移動・膨出するのを防ぐため、あるいは掘削損傷領域の地下水の移動を抑制するために、処分坑道の両端やその周辺に設けられる構造物です。

*15：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。

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-水理-力学-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解体調査のイメージ

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
 - ・掘削・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（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。

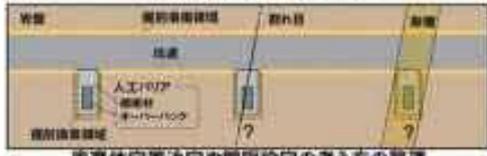


図 1 令和 2 年度以降に取り組むべき研究課題
(令和 2 年度以降の必須の課題)

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(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。

 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4年度の主な調査研究の成果

令和4年度は、「幌延深地層研究計画 令和4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。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において、令和2年度から開始した減熱試験として、廃棄体の発熱が収まった状態を模擬した条件での試験を継続しました。緩衝材の温度分布は地下環境の温度で一定であること、模擬オーバーパック周辺の緩衝材の飽和度は徐々に増加傾向にあることが確認できました。また、廃棄体の発熱が収まった状態における緩衝材中の温度・飽和度・応力分布の変化など、評価モデルを検証するためのデータが取得できました。熱－水理－力学－化学連成現象^{*16}に関する解析については、令和3年度に実施した温度勾配のある環境下での緩衝材中の水分移動特性に関する室内試験などを再現した解析を行い、水分移動特性に係るパラメータを拡充しました。国際共同研究 DECOVALEX^{*17}では、人工バリア性能確認試験を対象とした連成解析結果を比較検証するため、参加機関ごとに解析モデルの作成に着手しました。解体調査については、令和3年度に確認した個々のサンプリング手法を踏まえ、全体的な作業方針と施工手順、サンプリング対象と各種調査で主に取得する情報を決定しました。

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結果の解釈を行いました。その結果、トレーサー試験中の水圧変化はトレーサーを短時間（数十分程度）投入するパルス試験および連続的に投入する定常試験への切り替え時に水みちの貯留性が変化した可能性が

*16：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（Thermal）による変化、地下水の流れによる水理学的（Hydro）な変化、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による力学的（Mechanical）な変化、地下水と鉱物の反応などによる化学的（Chemical）な変化などが複合的に生じる現象です。それぞれの頭文字を取って、THMC連成現象とも呼ばれます。

*17：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）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ひとつである熱－水理－力学－化学連成挙動モデルの開発・検証を目的とした国際共同研究です。

考えられ、掘削損傷領域の物質移行の解析を行う上で考慮しなければならない事項が明らかになりました。また、350m 調査坑道において有機物・微生物・コロイド^{*18}の影響を考慮した原位置物質移行試験に着手し、原位置試験^{*19}に用いる地下水を対象に、有機物・微生物を含む地下水中の元素とコロイド粒子との相互作用を評価する試験を行いました。その結果、原位置試験結果と室内試験結果との比較検証を行う上で、有益な情報が取得できました。さらに、250m 調査坑道において声問層の割れ目を対象とした物質移行特性を評価するためのボーリング調査に着手し、割れ目の空間分布の評価に関わるデータを取得しました。また、令和 3 年度に稚内層深部の断層を対象に実施した孔間透水試験とトレーサー試験の結果を解析した結果、稚内層深部に分布する断層を介した物質の移行経路の水理学的連結性^{*20}は限定的であることが確認できました。

(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、回収可能性^{*21}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、大気条件下と湿潤条件下にコンクリート試験体を定置する試験を継続しました。約 1 年 9 か月経過した時点での経年劣化の程度を分析し、大気条件下の試験体では、令和 3 年度の結果に比べて劣化が進んでおり、その程度は大気条件下の試験体の方が大きいこと、大気条件下の試験体では湿潤条件下の試験体と比べてより大きな空隙の割合が増加していることなどが確認できました。また、坑道開放条件下における長期変化を評価するために、令和 3 年度までの解析に基づいて、坑道を埋め戻した後に、地下水の浸潤により埋め戻し材が飽和する過程の解析を実施しました。その結果、坑道の周辺岩盤では埋め戻し後の数十年以内にほぼ飽和状態に達することが分かりました。

*18：大きさが1 nm~1 μm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。

*19：試料を採取して行う室内試験に対して、実際の地下環境下で行う試験のことです。

*20：地下水の流れを評価する上で、断層や割れ目の中の隙間のつながり具合を水理学的連結性といいます。岩盤の中には、大小さまざまな断層や割れ目が存在し、これらは独立して存在していたり、他とつながって存在していたりします。岩盤の中での水みちは、断層や割れ目内の隙間が主なものですが、隙間が広くつながっており、水みちとして機能する場合には、水理学的連結性が高いと表現します。一方、断層や割れ目内の隙間が一部でしかつながっておらず、水みちとしては機能しない場合には、水理学的連結性が低いと表現します。

*21：地層処分において、処分坑道に放射性廃棄物を埋設した後においても、処分場の閉鎖までの間に何らかの理由でその取り出しが望まれた場合に、それを取り出し、搬出する一連の行為が実現可能であることを言います。

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、力学的な作用（地震動など）が埋め戻し材の変質に与える影響を評価する解析を行いました。その結果、坑道に使用されるコンクリートの溶出成分に起因した鉱物の沈殿などが埋め戻し材の変質を抑制する方向に作用することが示唆されました。埋め戻し材の設計評価に必要な緩衝材膨出^{*22}抑制機能の把握については、緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた室内試験を継続し、緩衝材と埋め戻し材の力学的な相互作用を考慮した膨潤^{*23}変形挙動の評価に必要なデータを整理しました。また、閉鎖後に水みちとなることが想定される、掘削損傷領域の連続性を遮断するための施工技術の実証として、令和3年度に坑道の切欠き部に吹付けたベントナイト^{*24}のサンプリング調査を実施し、ベントナイトの乾燥密度^{*25}などの施工品質が保たれていることを確認しました。掘削損傷領域の調査技術の高度化として、過年度に実施した弾性波^{*26}トモグラフィ^{*27}の調査結果に新たに開発した吹付けコンクリートの影響を考慮した解析手法を適用することにより、既存の解析では検出が困難であった掘削損傷領域を可視化することができました。さらに、ボーリング孔の閉塞技術の実証について、250m 調査坑道から掘削したボーリング孔を閉塞する原位置試験を実施し、ボーリング孔内にベントナイトブロックを設置できることを確認しました。

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^{*28}の構築に向けて、緩衝材ブロックと岩盤の間の隙間にケイ砂を充填する施工方法における緩衝材の流出挙動を確認するための試験を行い、緩衝材の流出量などを計測しました。また、緩衝材の流出量が、要求される品質を

*22：緩衝材と埋め戻し材に含まれるベントナイトの割合は、緩衝材の方が大きいため、緩衝材の方が地下水と接触した際に膨らむ力が大きくなります。そのため、緩衝材と埋め戻し材の境界面では、緩衝材が埋め戻し材側に膨らんでいくと考えられます。この現象を膨出と呼びます。緩衝材が埋め戻し材側に膨らんでいくことで、部分的に緩衝材の密度が小さくなり、人工バリアとして期待する性能が損なわれる可能性が指摘されています。

*23：ベントナイトは水と接触すると水を吸って膨らむ性質があり、その現象を膨潤と言います。膨潤しようとするベントナイトを膨らまないように拘束した時に発生する圧力を膨潤圧と言います。

*24：モンモリロナイトと呼ばれる鉱物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するとともに、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。

*25：乾燥密度とは、ある体積に含まれる土粒子のみの質量を考えた場合の密度のことを言います。

*26：ここでは、岩盤の中を伝わる振動のことを指します。地震など自然に発生する振動や、人工的に岩盤を叩くなどして人工的に与えた振動が伝わる速度を弾性波速度と呼び、岩盤の状態によって変化します。そのため、様々な場所での弾性波速度の分布を調べることで坑道周辺の岩盤の状態を知ることができます。

*27：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。

*28：地層処分における品質とは、人工バリアや埋め戻し材に要求される性能などを指します。これらの品質保証に関する事項を体系的に整理したものを品質保証体系と呼びます。

確保できる範囲となるかを推定する方法について、室内試験に基づいて流出量の評価モデルを検討し、緩衝材ブロックと岩盤の隙間からの緩衝材の流出挙動を評価するための基盤情報を整備することができました。

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として、令和3年度の調査で示唆された、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の概念について検討を行い、原位置試験計画を立案しました。また、スイス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（HotBENT^{*29}プロジェクト）について、模擬廃棄体（ヒーター）の加熱に伴う計測結果などに関する情報の入手を継続しました。

(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^{*30}に与える影響を把握することを目的に、令和3年度に再検証したダクティリティインデックス（以下、DI）^{*31}と水みち割れ目の透水性の関係を表したモデル（以下、DIモデル）と、令和2年度に実施した水圧擾乱試験^{*32}の結果との比較検証を行いました。その結果、DIモデル⁽²⁾と水圧擾乱試験中の断層の透水性の変化が整合することを確認できました。また、DIを用いた透水性評価手法の信頼性向上などを目的として、これまでに得られた地下施設建設時における地下施設周辺のボーリング孔での水圧観測データから、DIと断層/割れ目の水理学的連結性の関係を検討しました。その結果、稚内層浅部（DI<2の領域）から深部（DI≥2の領域）にかけて断層/割れ目の透水性を反映する値から、割れ目の無い健岩部の透水性を反映する値へと徐々に変化する様子を数値解析により再現することができました⁽³⁾。これにより、令和2年度概念モデル、すなわちDI<2の領域（断層/割れ目の水理学的連結性が高いと推定される領域）⁽⁴⁾とDI≥2の領域（断層/

*29：High Temperature Effects on Bentonite Buffers（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。グリムゼル試験場は花崗岩を対象としたジェネリックな地下研究施設です。

*30：岩盤の水の通しやすさのことです。透水性を表す指標として、透水係数が用いられます。透水係数 k は、以下の式で定義され、単位は長さ/時間（m/s）となります。 $Q = kAh/l$ ここで、 Q ：流量（m³/s）、 A ：断面積（m²）、 h ：水頭差（m）、 l ：長さ（m）を表します。

*31：岩石の強度・応力状態を示すために新たに定義した指標であり、この値が高いほど、岩石は見かけ上、やわらかくなります。岩盤にかかる平均有効応力（岩石に実際にかかる平均的な負荷応力）をその健岩部の引張強度（岩石の引っ張り破壊に対する強度）で除した値で定義されます。

*32：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。

割れ目の水理学的連結性が低いと推定される領域)⁽⁴⁾の間に断層/割れ目の水理学的連結性が遷移的に変化する領域が存在するモデルの妥当性が確認できました。

地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水^{*33}領域）を調査・評価する技術の高度化においては、令和3年度に引き続き、令和2年度の調査により推定した化石海水の三次元分布の推定結果およびその手法の妥当性を確認するためのボーリング調査を継続しました。その結果、化石海水の判断指標としている塩化物イオン濃度と酸素同位体比^{*34}および水素同位体比^{*35}の深度分布から、当初の計画どおり、化石海水の出現する深度が調査位置によって大きく異なるという情報を得ることができ、推定結果が妥当であることが確認できました。以上のことから、令和2年度に適用した電磁探査^{*36}が、化石海水領域の三次元分布の把握に有効な調査技術であることを実際のデータを基に示すことができました。

地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動の検討として、坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤が掘削損傷領域の透水性に与える影響の評価手法の構築を目的に、掘削損傷領域の割れ目を対象とした既往の注水試験（段階的に注水圧を増加させて実施）のデータ解析を行いました。その結果、掘削損傷領域の割れ目のDIを変化させた時の透水性の変化が、令和3年度に再検証したDIモデル⁽²⁾と整合的であることが確認できました⁽⁵⁾。これにより、坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤による掘削損傷領域の透水性の変化はDIモデルにより推定可能とした既報⁽⁶⁾の妥当性が確認できました。

上記の他、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工^{*37}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。

*33：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。

*34：酸素同位体比とは、質量数16の酸素に対する質量数18の酸素の割合を指します。

*35：水素同位体比とは、質量数1の水素に対する質量数2の水素の割合を指します。

*36：電磁波を利用して、対象となる岩盤などの電気的特性を観測し、その性質・状態を推定する調査手法です。

*37：地下空間の安定を保つために設ける、ロックボルト、鉄骨、コンクリートの壁などの構造物です。

令和4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。

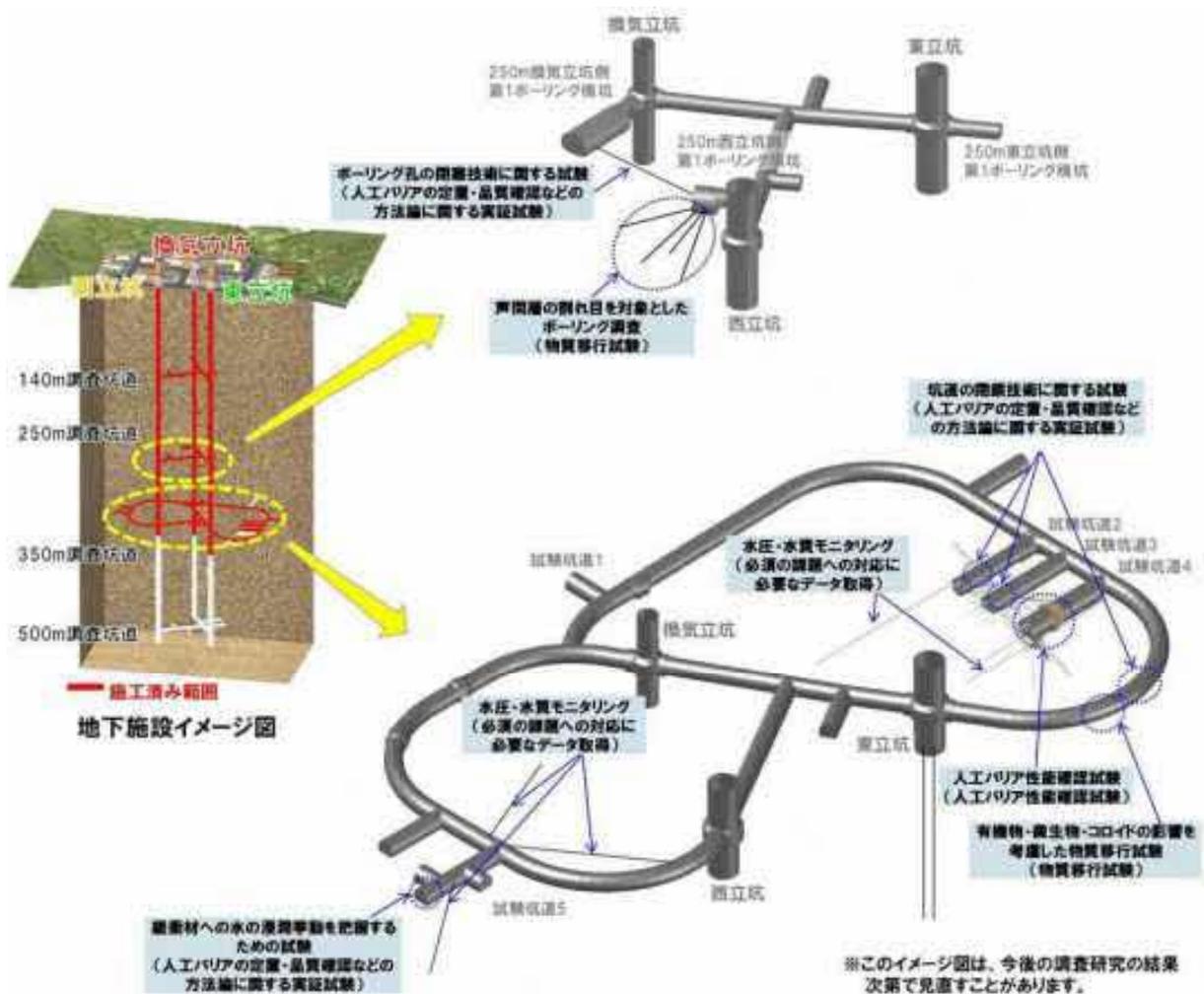


図2 令和4年度の地下施設における主な調査研究の実施場所

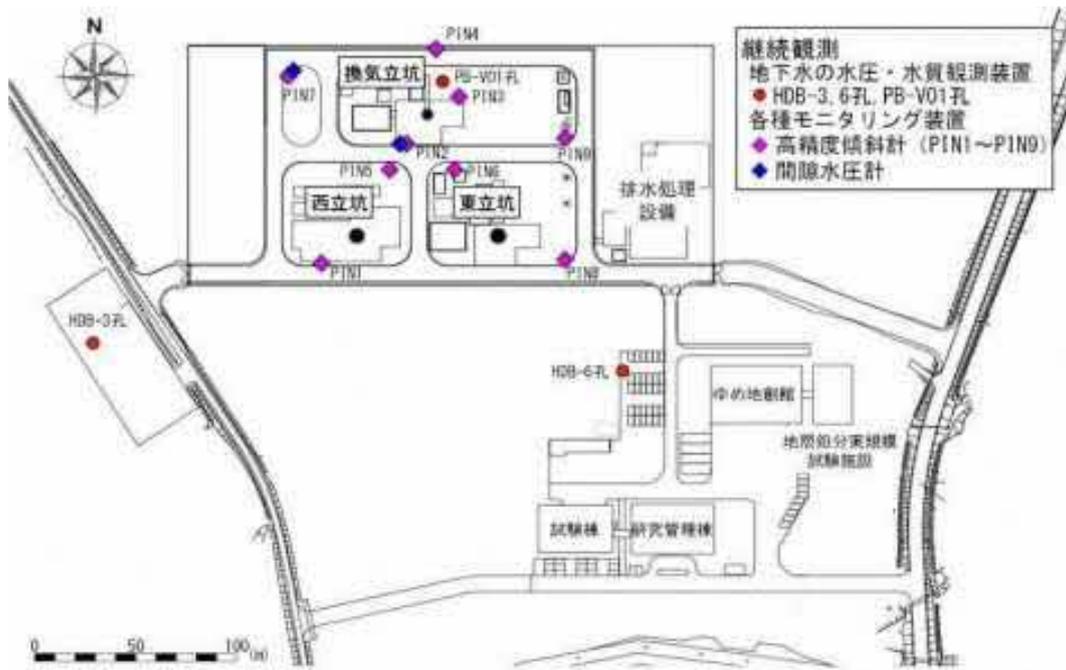


図 3 研究所用地における主な施設と観測装置の配置

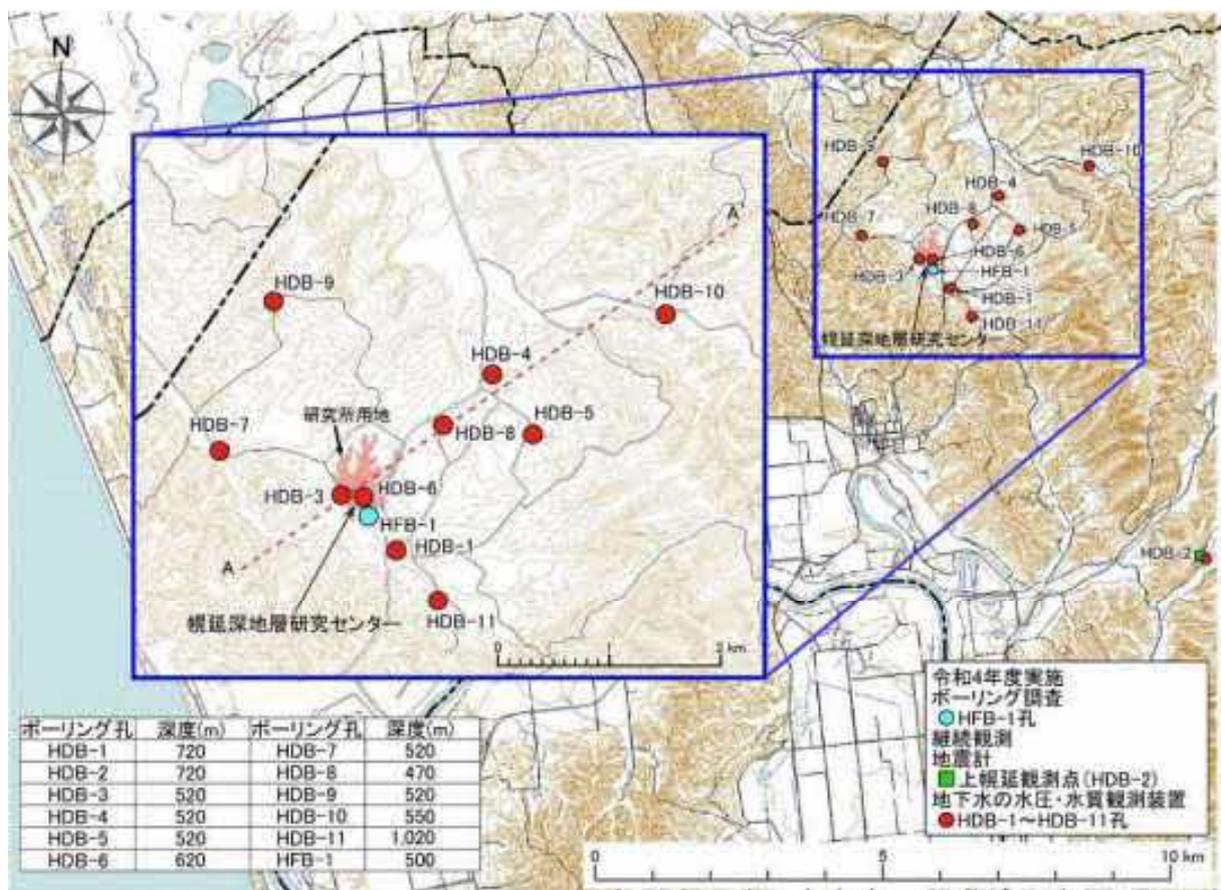
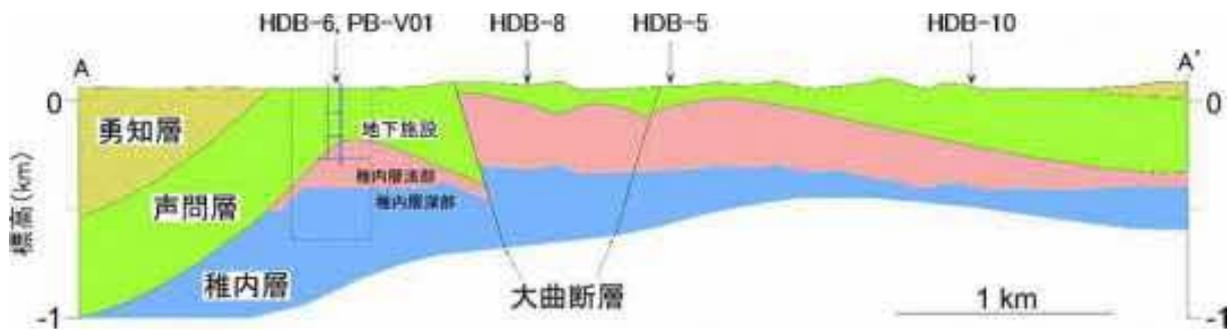
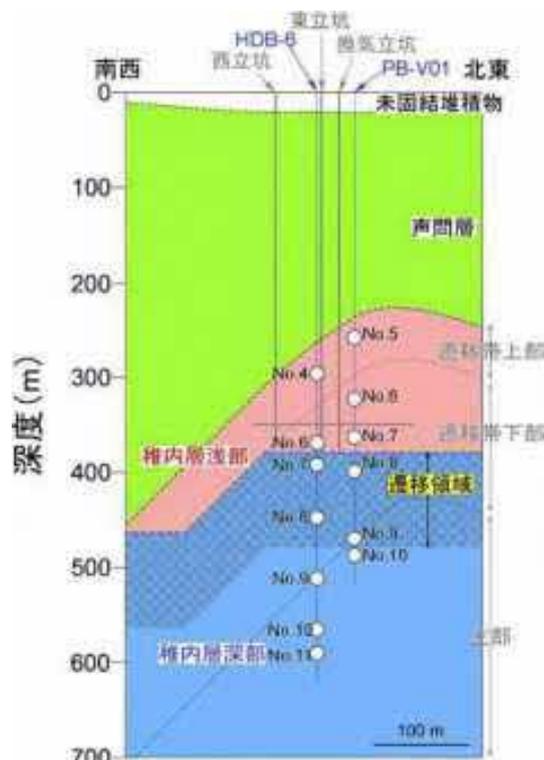


図 4 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所
 国土地理院の基盤地図情報（基本項目）を加工して作成



(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) 地下施設の管理・環境調査

地下施設の管理としては、令和 5 年度からの掘削の準備として、積込み機の整備、セメントサイロの設置などを行いました。また、地下施設の維持管理として、機械設備や電気設備の運転・保守および設備の更新を行いました。

地下施設からの排水および掘削土（ズリ）置場の浸出水は、これまでと同様に、排水処理設備において適切に処理した上で天塩川に放流しています。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。

(5) 開かれた研究・成果の発信

令和4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^{*38}、産業技術総合研究所^{*39}および電力中央研究所^{*40}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3年度に引き続き、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。また、令和2年度以降の必須の課題のうち、実際の地質環境における人工バリアの適用性確認および処分概念オプションの実証に関わるテーマを対象とした新たな国際プロジェクトとして、OECD/NEA^{*41}の協力のもと、幌延国際共同プロジェクト（Horonobe International Project：以下、HIP）を立ち上げるべく、複数回の準備会合を開催しました。準備会合では、HIPでの実施内容や分担などについて議論を行い、令和4年10月にHIPの協定書の内容について基本合意がなされました^{*42}。その後、令和5年2月8日に協定が発効し、令和10年度末までを限度^{*43}としてHIPを開始しました。なお、令和5年3月31日時点での参加機関は、連邦放射性廃棄物機関（BGE、ドイツ）^{*44}、英

*38：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。

*39：特定国立研究開発法人産業技術総合研究所は、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を行っている研究組織です。

*40：一般財団法人電力中央研究所は、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。

*41：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。

*42：協定書の内容について基本合意をした機関は、連邦放射性廃棄物機関（ドイツ）、英国地質調査所（英国）、電力中央研究所（日本）、オーストラリア連邦科学産業研究機構（オーストラリア）、工業技術研究院（台湾）、韓国原子力研究所（韓国）、原子力発電環境整備機構（日本）、原子力研究所（ルーマニア）、原子力環境整備促進・資金管理センター（日本）、国営放射性廃棄物会社（ブルガリア）です。

*43：HIPの協定書には、「本協定は、2025（令和7）年3月31日まで有効であり、管理委員会の全会一致の承認を得て、2029（令和11）年3月31日を限度として追加延長することができるものとする。」との記載があります。

*44：連邦放射性廃棄物機関：BGE（Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH）は、ドイツの連邦政府所有の組織であり、連邦政府の委託により放射性廃棄物の最終処分事業の実施主体として、高レベル放射性廃棄物処分場に係る三段階のサイト選定に加えて、建設および操業を行います。このほかに、コンラッドおよびモルスレーベンの非発熱性放射性廃棄物処分場やゴアレーベン鉱山に係る業務も実施しています。

国地質調査所（BGS、英国）^{*45}、工業技術研究院（ITRI、台湾）^{*46}、韓国原子力研究所（KAERI、韓国）^{*47}、原子力テクノロジー国営会社（RATEN、ルーマニア）^{*48}および原子力機構の6機関です。

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^{*49}。なお、令和4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4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。

*45：英国地質調査所：BGS (British Geological Survey) は、英国政府の研究機関で、公共の利益に焦点を当てつつ、地球上で生じる様々なプロセスなどに関する地球科学的研究に加え、客観的な地球科学的データや情報の社会への提供などの活動を行っています。

*46：工業技術研究院：ITRI (Industrial Technology Research Institute) は、台湾における応用研究と技術サービスを行う非営利の研究開発機関です。日本の様々な企業、大学と複数の国際共同研究などを行っています。

*47：韓国原子力研究所：KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) は、政府出資の韓国で唯一の原子力分野全般に係る研究機関で、学際的な原子力研究開発を通じて、原子力の学術的進歩、エネルギー開発・利用の推進を目指しています。この一環として、使用済燃料の直接処分を対象とした輸送・貯蔵に係る技術開発や地下研究坑道を利用した研究開発などを進めています。

*48：原子力テクノロジー国営会社：RATEN (Regia Autonomă Tehnologii pentru Energia Nucleară) は、ルーマニアの原子力エネルギー分野の研究開発の調整および原子力エネルギー計画の科学的・技術的支援を行う国有企業の研究機関で、放射性廃棄物管理を含む原子力分野の幅広い研究開発を行っています。なお、準備会合には原子力研究所（RATEN ICN）が参加していましたが、協定書にはRATENが署名しました。

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

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、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^{*50}（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。

(1) 浸潤時・減熱時のデータ取得、連成モデルの適用性確認

令和 4 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工程のひとつとして、廃棄体の発熱がおさ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）での試験を継続しました。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）⁽⁷⁾。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。

*50：人工バリアの構成要素のひとつです。ガラス固化体を包み込み、ガラス固化体に地下水が接触することを防止し、地圧などの外力からガラス固化体を保護する容器のことを言います。候補材料は炭素鋼などの金属です。

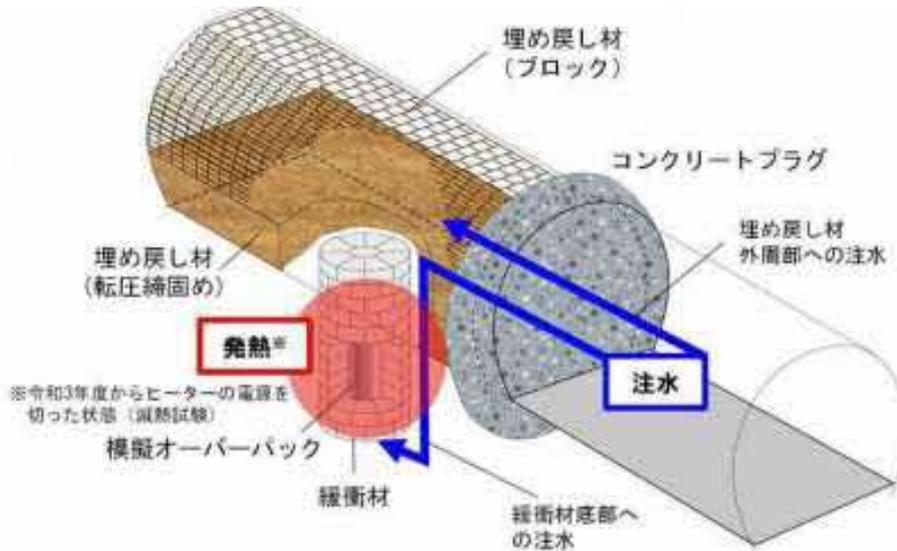
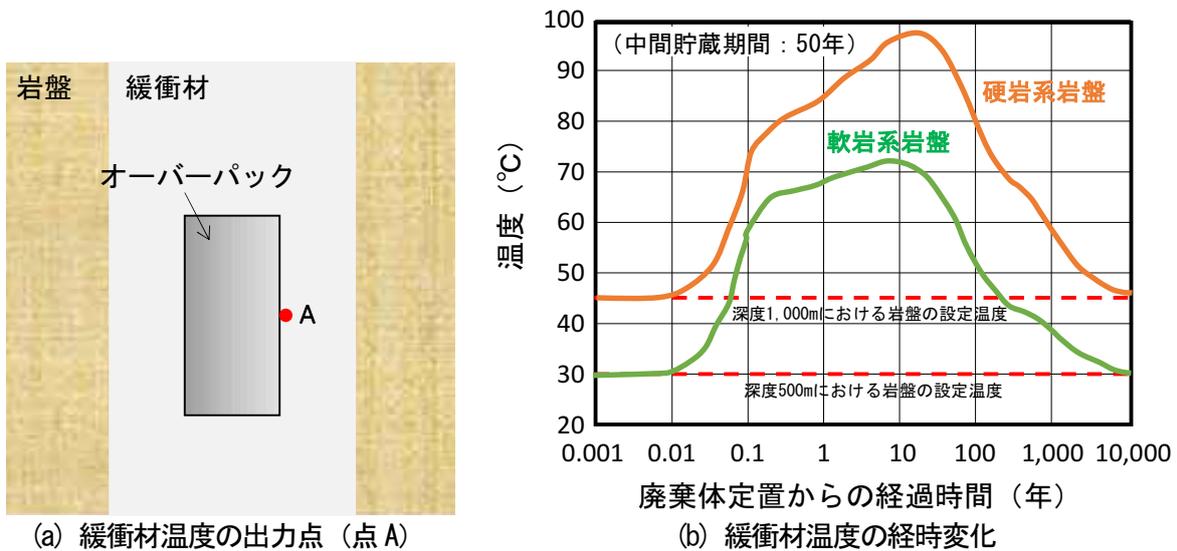


図 6 人工バリア性能確認試験の概念図

模擬オーバーパック、緩衝材、埋め戻し材などの詳細は参考文献(8)、(9)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の

図 8 および図 9 に人工バリア性能確認試験で計測したデータの一例を示します。緩衝材中の温度分布はヒーターの電源を切ったことにより、約 23°C で一定の状態であり、計測場所による温度の差がないことが確認できます (図 8(a))。注水流量については、埋め戻し材外周部からは約 300 mL/min、緩衝材底部からは約 400 mL/min で注水しています (図 8(b))。

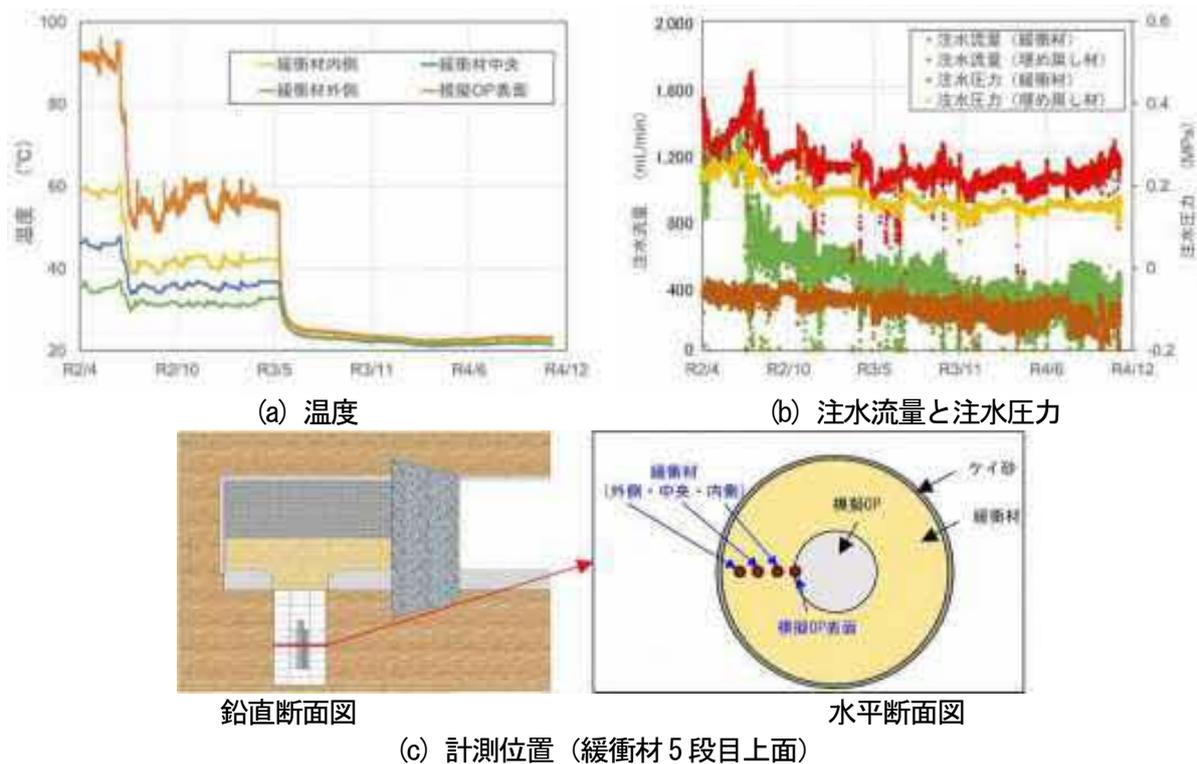
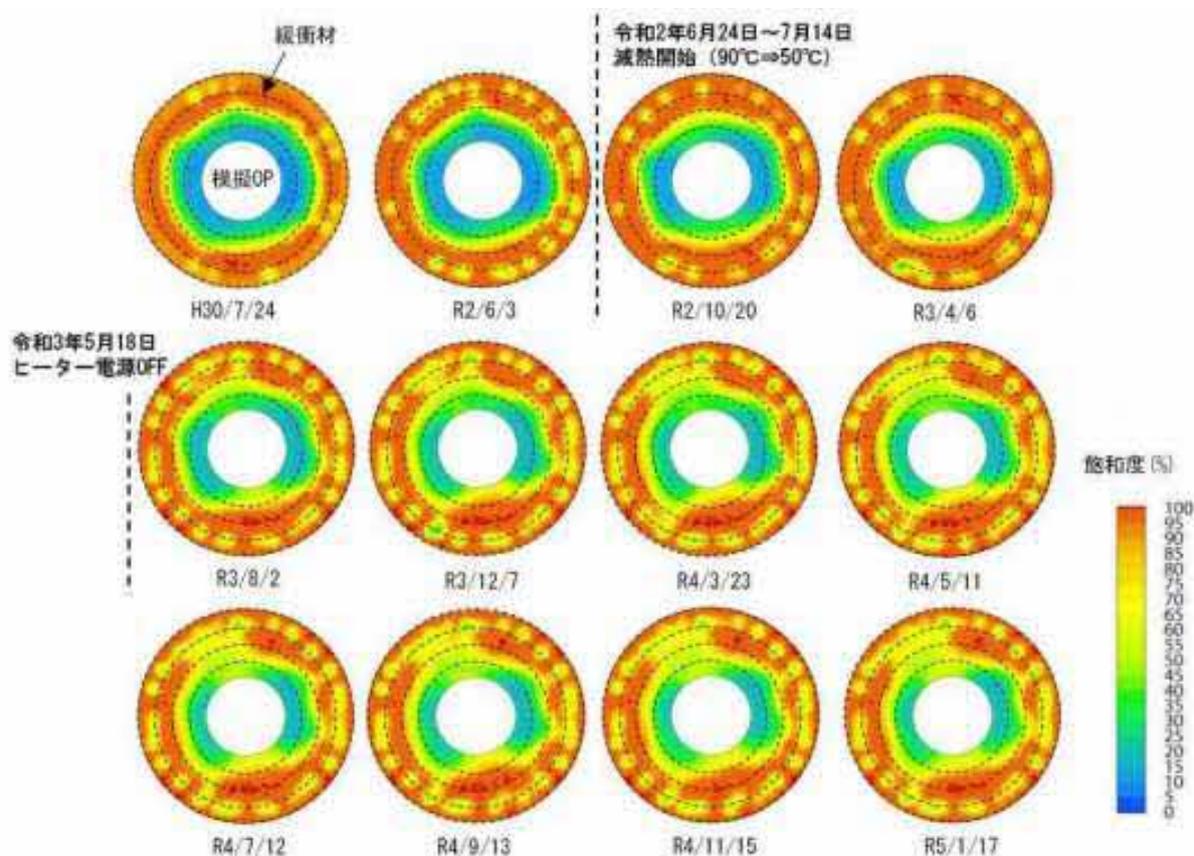


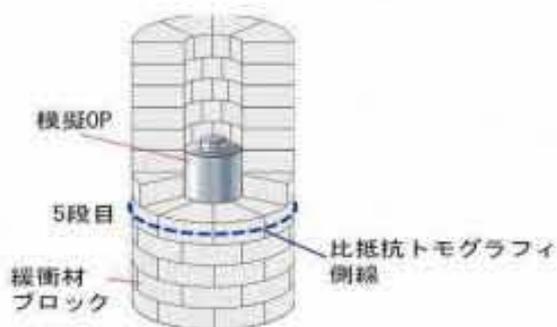
図 8 人工バリア性能確認試験の計測データの例（緩衝材温度、注水流量と注水圧力）

図 9(a)は比抵抗トモグラフィ測定により算出された緩衝材中の比抵抗分布を飽和度に換算した結果を示します。なお、人工バリア性能確認試験で設置した緩衝材の初期飽和度は 57.6%（初期含水比 10.5%）です。加熱試験中、模擬 OP に近い緩衝材内側の飽和度は、温度差によって生じる緩衝材外側方向への水分移動によって減少し、外周部に近い緩衝材外側の飽和度は内側からの水分移動と緩衝材外周部からの地下水浸潤によって増加しています。加熱試験中の平成 30 年 7 月 24 日と令和 2 年 6 月 3 日の結果を比較すると、模擬 OP 近傍の緩衝材内側の飽和度は、約 2 年間経過しても低いままですが、令和 2 年 6 月 24 日以降の減熱試験開始後は、緩衝材内側の飽和度が時間経過とともに増加している様子が確認できます。これは、緩衝材中の温度差によって生じる水分移動が、温度差がなくなることによって解消され、飽和度が高いところ（緩衝材外側）から低いところ（緩衝材内側）へ水分が移動した結果であると考えられます。このようなヒーターの温度低下に伴う緩衝材中の温度変化や緩衝材中の飽和度変化の傾向は、減熱試験開始前に実施した予察解析結果⁽¹⁰⁾と整合しています。また、緩衝材中の間隙圧や応力分布についても温度、注水流量、飽和度変化に応じた計測結果が得られました。このように、

減熱試験を実施することで、温度条件の変化に応じた温度、飽和度、応力などの計測結果が得られ、評価モデルを検証するためのデータが取得できました。



(a) 比抵抗トモグラフィ結果から算出した緩衝材の飽和度の経時変化



(b) 計測位置（緩衝材 5 段目の中央部・模擬 OP の中段）

図 9 人工バリア性能確認試験の計測データの例（緩衝材の飽和度）

数値解析によって緩衝材中の連成現象を予測するためには、解析に使用するパラメータの整備も重要になります。そこで、令和 4 年度は、令和 3 年度に実施した温度勾配環境下における緩衝材中の水分移動特性に関する室内試

験(図 10)を対象とした解析と、空気の移動やそれに伴う空気圧の上昇に着目した解析と解析結果を検証するための室内試験を実施しました。一例として、室内試験結果を再現する熱-水理連成解析^{*51}を行い、温度勾配水分拡散係数^{*52}のパラメータを求めた結果について示します。本検討では、温度勾配水分拡散係数に、Börgesson らのモデル⁽¹¹⁾に準じた(式 1)と温度依存性を考慮した(式 2)⁽⁷⁾を用いました。

$$\begin{aligned}
 D_T &= D_{Tb} & 30\% \leq S_r \leq 40\% \\
 D_T &= D_{Tb} \cdot \cos^a \left(\frac{S_r - 40}{60} \cdot \frac{\pi}{2} \right) & S_r \geq 40\% \\
 D_T &= D_{Tb} \cdot \sin^b \left(\frac{S_r}{30} \cdot \frac{\pi}{2} \right) & S_r \leq 30\%
 \end{aligned}
 \tag{式 1}$$

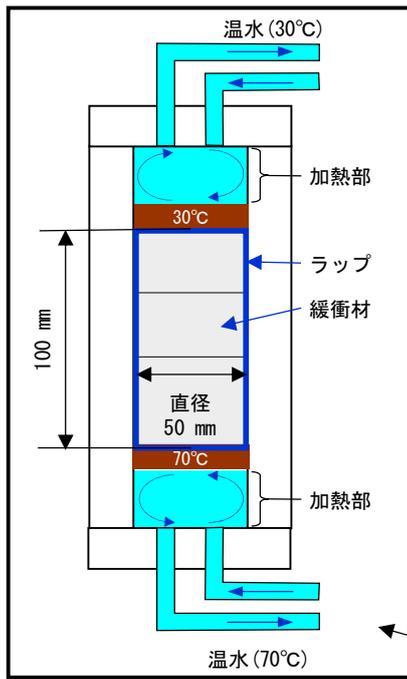
$$D_{Tb} = D_{T0} \times \exp(\alpha_T \times (T - T_0))
 \tag{式 2}$$

ここで、 D_T は温度勾配水分拡散係数、 D_{Tb} は基準となる係数、 S_r は飽和度、 T は現在温度、 T_0 は基準温度、 a 、 b は高い飽和度領域と低い飽和度領域で D_T の低下量を決定するパラメータ、 α_T は全体的な D_T の大きさを決定するパラメータです。

図 11 に室内試験結果と解析結果を示します。図に示すように室内試験を再現する解析を実施した結果、緩衝材の乾燥密度が 1.8 Mg/m^3 (人工バリア性能確認試験の緩衝材の初期乾燥密度) であるときの温度勾配水分拡散係数のパラメータは、 $D_{T0} = 3.50 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sK}$ 、 $a = 0.5$ 、 $b = 10$ 、 $\alpha_T = 0.02$ 、 $T_0 = 30^\circ\text{C}$ となりました。

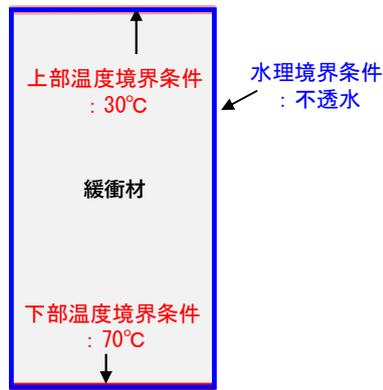
*51：緩衝材や岩盤で生じる、熱-水理-力学-化学連成現象(脚注*16)のうち、熱による変化、地下水の流れによる水理学的な変化に着目した解析のことです。

*52：水分拡散係数とは、岩盤や緩衝材などの中で水分が移動する際の速さを表す係数です。

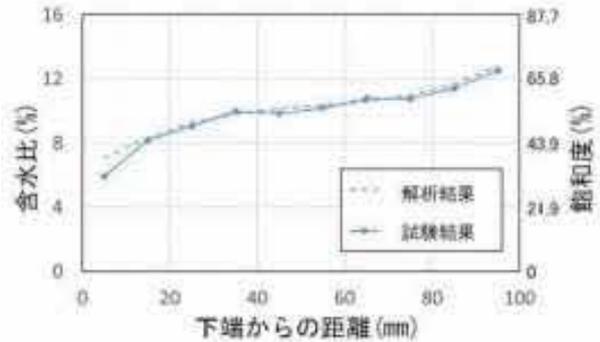


試験条件	
緩衝材	クニゲル V1 : 70% ケイ砂 : 30%
初期乾燥密度	1.8 Mg/m ³
初期含水比 (蒸留水)	10.5% (飽和度57.6%)
温度	上部 : 30°C 下部 : 70°C
試験期間	7、11、18 日

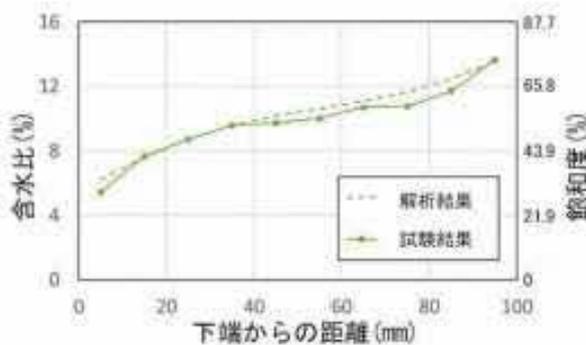
図 10 令和3年度に実施した温度勾配下における緩衝材中の水分移動特性に関する試験の概念図と試験条件



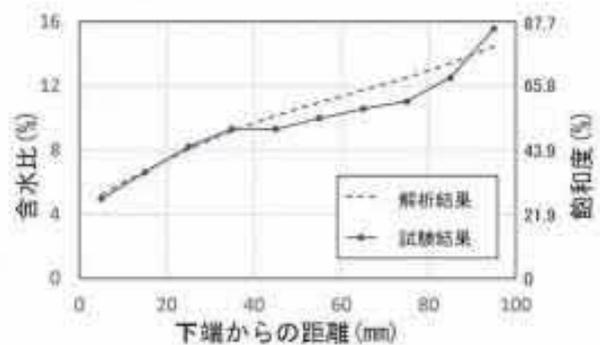
(a) 解析モデル



(b) 7日後



(c) 11日後



(d) 18日後

図 11 試験結果と解析結果の比較

(b)～(d)に示した飽和度は、蒸留水の密度を 1.0 Mg/m³で一定として計算した値です。

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を対象とした連成解析結果を比較検証するステップに進んでおり、参加機関ごとに解析モデルの作成に着手しました。今後は、各参加機関が作成する解析モデルや解析パラメータの違いが、緩衝材中の温度、飽和度、応力分布などの解析結果にどのような影響を及ぼすのかを確認します。さらに、人工バリア性能確認試験で取得したデータと比較することにより、人工バリア周辺での現象を再現するためには、どのような解析モデルが効果的かなどを検証します。

(2) 人工バリア解体試験

人工バリア性能確認試験の解体調査では、人工バリア周辺の熱－水理－力学－化学連成現象の、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各種分析を予定しています。分析試料の採取にあたっては、試料を乱さずに採取（サンプリング）することが重要になります。令和 4 年度は、令和 3 年度に試験坑道 1（図 2 参照）で行った人工バリア解体試験施工（図 12）で確認した個々のサンプリング手法を踏まえて、全体的な作業方針と施工手順、実際にサンプリングする対象と各種調査で主に取得する情報を決定しました。主な手順として、まずは人工バリア性能確認試験を実施している試験坑道 4 の隣に試験坑道 7 を掘削します。これは、解体作業中も可能な限り計測システムによるデータ計測を継続することで、各解体作業による影響を確認できるようにするためです。その後、試験坑道 7 から試験坑道 4 にアクセスするための坑道（試験坑道 4-7 連絡坑道）を掘削します（図 13）。試験坑道 4-7 連絡坑道は、図 14 に示す試験施工で確認した「模擬 OP の一体取り出し手法」が適用できるように整備する必要があります。試験坑道 4-7 連絡坑道を整備した後は、試験施工で確認した「無水で埋め戻し材をサンプリングする手法」や「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」を適用し、埋め戻し部のサンプリング、解体作業を行います。埋め戻し部の作業終了後は、試験孔部に設置した緩衝材を埋め戻し材と同様に無水でサンプリングし、模擬 OP と付近の緩衝材を一体で試験孔から取り出します。このように、人工バリア

性能確認試験の解体調査では、解体試験施工で確認した解体手法を適用することで、表 2 および図 15 に示すサンプルを採取し、人工バリア周辺の熱－水理－力学－化学連成現象に係るデータを取得する予定です。

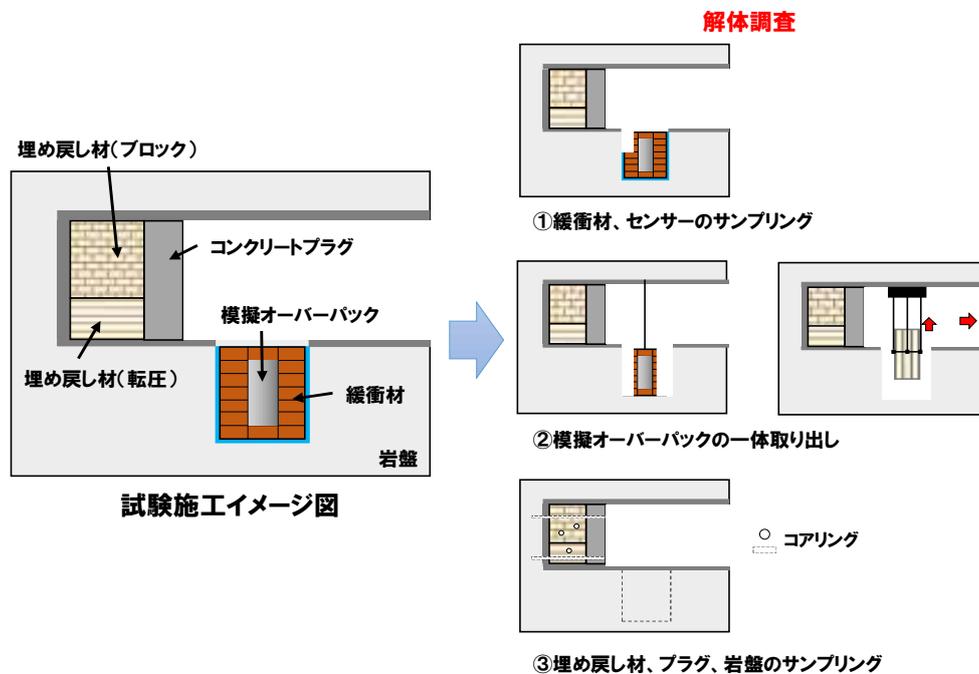
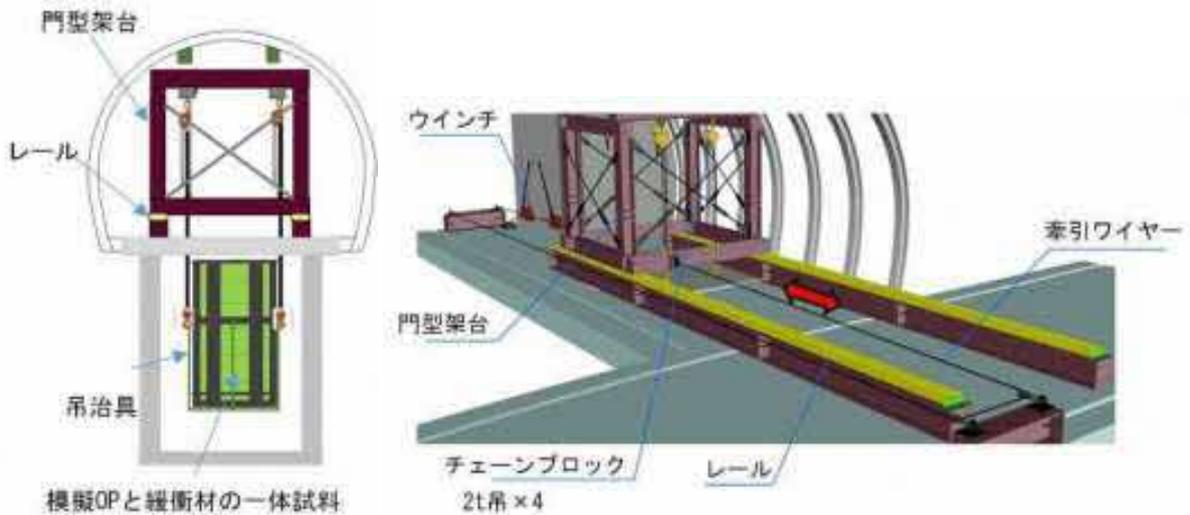


図 12 人工バリア解体試験施工の概念図



図 13 人工バリア性能確認試験の解体調査におけるアクセス用の坑道（試験坑道 4-7 連絡坑道）のイメージ図



(a) 一体取り出しイメージ (b) 坑道内移動イメージ

図 14 模擬 OP の一体取り出しの概念図

表 2 解体調査で予定している主な取得情報

サンプリング対象		主な取得情報
① 模擬 OP		最大腐食深さ、平均腐食深さ
		腐食生成物
		腐食状況
		模擬 OP の位置、傾き (設置時からのずれ)
② 緩衝材 埋め戻し材		外観
		水分量、乾燥密度
		間隙水組成
		鉱物組成
		熱伝導率、熱容量
③ 埋め戻し材 転圧締め部とブロックの接触面		接触面の状態
④ 埋め戻し材と吹付けコンクリートの接触面		施工時の隙間の充填状況 埋め戻し材とコンクリート相互作用
⑤ 緩衝材と埋め戻し材の接触面		緩衝材の膨出量
⑥ 土留め壁と埋め戻し材の接触面		土留め壁の腐食状況
⑦ コンクリートプラグ		コンクリートの強度
⑧ コンクリートプラグと岩盤の接触面		密着状況 コンクリートと岩盤の相互作用

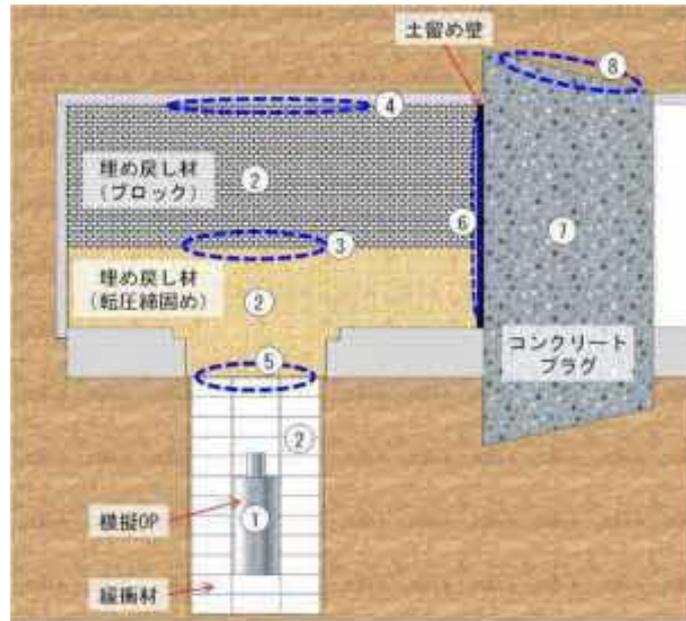


図 15 解体調査のサンプリング対象

図中の番号は表 2 のサンプリング対象の番号に対応しています。

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、以下の成果には、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（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）の成果を含みます。

(1) 掘削損傷領域を対象とした物質移行試験

掘削損傷領域を対象とした物質移行試験については、過年度に実施したト

レーザー試験結果の解析評価に先立ち、試験対象とする場の理解を含めた試験結果の解析を行いました。令和3年度に実施した物質移行試験は、H4-1孔をトレーサーの注入孔、P孔をトレーサーの回収孔とし（図16）、注水（注水流量：50 mL/min）および揚水（揚水流量：150 mL/min）を行いながら実施しました。この試験では、注入流量および揚水流量を一定としたパルス試験（短時間トレーサーを投入する方法）および定常試験（連続的にトレーサーを投入する方法）を実施しました。一連のトレーサー試験中の間隙水圧の挙動を見ると、パルス試験直後からH4-1孔の間隙水圧は直線的に上昇し、定常試験に切り替えた時点で瞬間的に間隙水圧の低下が生じ、その後は緩やかに間隙水圧が上昇していることが確認できます。一方、P孔の間隙水圧は、パルス試験中には有意な間隙水圧の上昇は確認できず、定常試験に切り替えた後に数kPa程度の間隙水圧の上昇が確認できます（図17）。パルス試験中のH4-1孔（注入孔）からの圧力伝搬がP孔（回収孔）で確認されない要因のひとつとして、パルス試験中はH4-1孔（注入孔）の近傍にメタンなどのガスが滞留することによって圧力伝搬を妨げる水理境界が形成され、近傍の貯留性が変化したことが考えられます。一方で、定常試験に切り替えた直後にH4-1孔の間隙水圧が低下しているのは、滞留したガスが解消されたことにより貯留性が高くなったことが要因と考えられます。このような場の解釈はトレーサー試験結果のモデル解析を行う際に水理境界条件を設定する上で重要な知見となります。

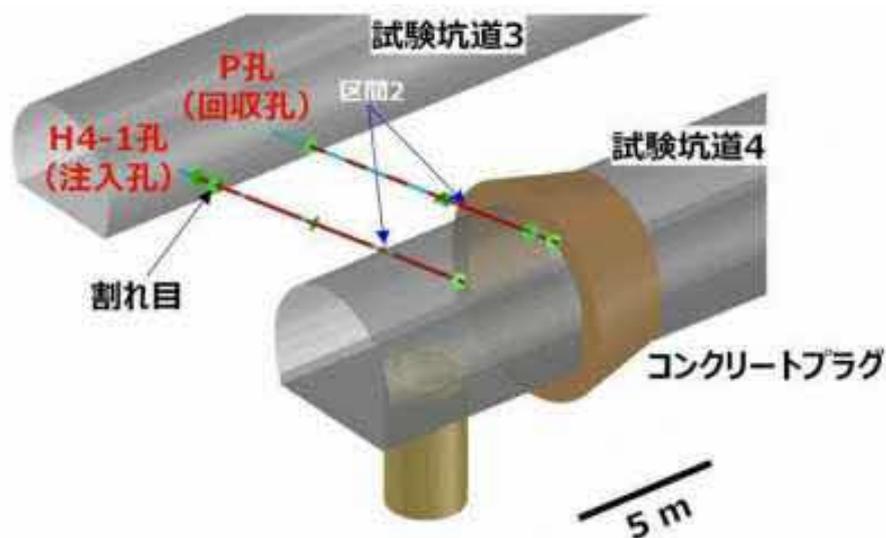


図 16 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験のレイアウト

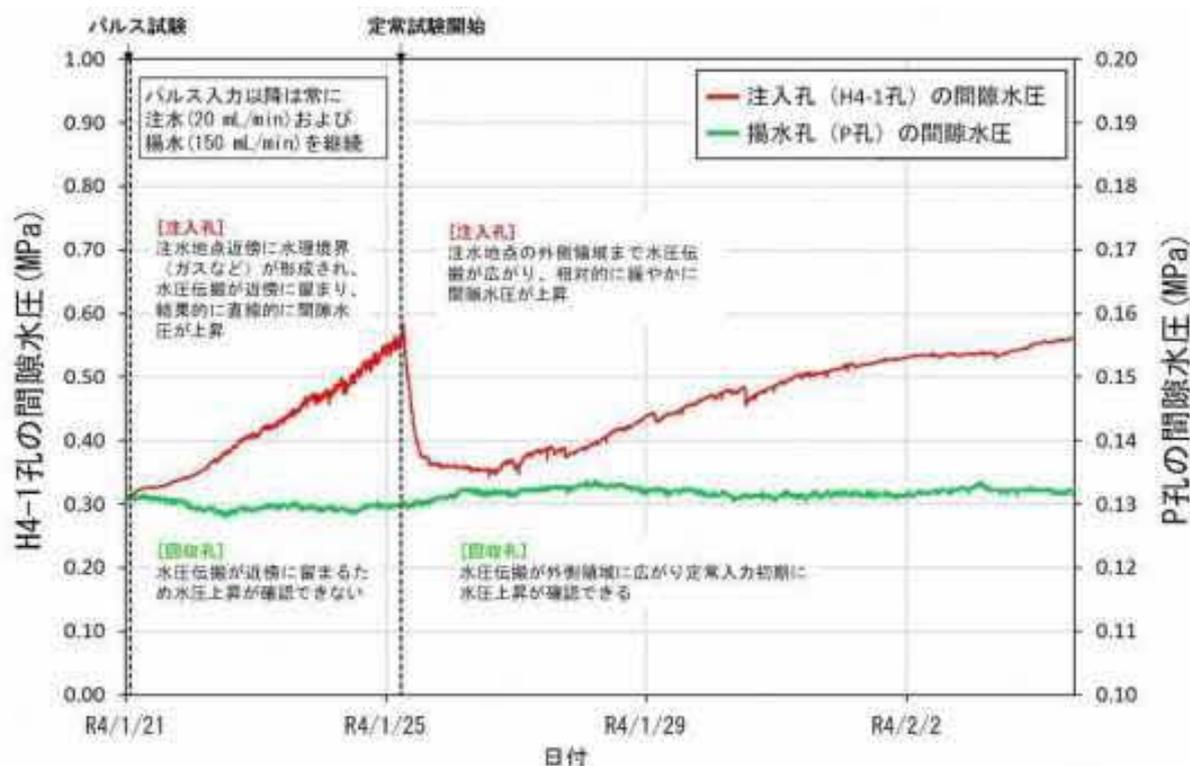


図 17 トレーサー試験中の間隙水圧測定結果

(2) 有機物・微生物・コロイドを対象とした物質移行試験

有機物・微生物・コロイドを対象とした物質移行試験では、地下水中に含まれる有機物・微生物・コロイドと元素との相互作用が、地下水中の元素の岩盤中への拡散挙動および岩盤への収着^{*53}挙動に与える影響を評価することを目的とした試験を実施します。試験には、高レベル放射性廃棄物に含まれるアクチノイド^{*54}のアナログ元素^{*55}であり、既往の研究⁽¹²⁾などから有機物や微生物との相互作用が示唆される希土類元素^{*56}などの元素を用います。令和3年度は、フミン酸^{*57}と反応することで希土類元素がコロイドとして存在し、その溶解度が上昇することを示唆する試験結果が得られました。

令和4年度は、原位置試験の一環として、350m 調査坑道のボーリング孔内から原位置での化学状態を保ったまま採取した地下水に希土類元素を添加し、

*53：地下水にある元素が、岩盤などに取り込まれる現象です。

*54：アクチノイドは、原子番号89のアクチニウム (Ac) から103のローレンシウム (Lr) までの15元素の総称です。

*55：高レベル放射性廃棄物に含まれる元素と類似した化学的性質を示す元素のことを言います。アナログ元素を使った調査や試験を行うことで、高レベル放射性廃棄物に含まれる元素の移行挙動などを知ることができます。

*56：希土類元素は、原子番号21のスカンジウム (Sc) と39のイットリウム (Y) に、原子番号57のランタン (La) から71のルテチウム (Lu) までの15元素を合わせた17元素の総称です。レアアースとも呼ばれます。希土類元素は、高レベル放射性廃棄物に含まれるウランなどと類似した化学的性質を示すことから、希土類元素を使用した試験を行うことで、高レベル放射性廃棄物に含まれる元素の移行挙動などを知ることができます。

*57：植物などが微生物により分解される最終生成物のうち、酸性である無定形高分子物質のことで、腐植酸とも呼ばれます。

0.2 μm フィルターにて粒子を分画した後、0.2 μm 以上のサイズのコロイド粒子として存在する希土類元素の割合を算出しました。この試験は、地下水中に存在する有機物・微生物を含むコロイド粒子と、添加した希土類元素との相互作用を評価し、地下水中のコロイドへの元素の収着分配係数^{*58}を算出することを目的としたものです。試験の結果、対象とした地下水では、軽希土類元素の方が重希土類元素よりも0.2 μm 以上のサイズの粒子になった割合が高く、時間の経過とともにその傾向が大きくなること示されました（図18）。

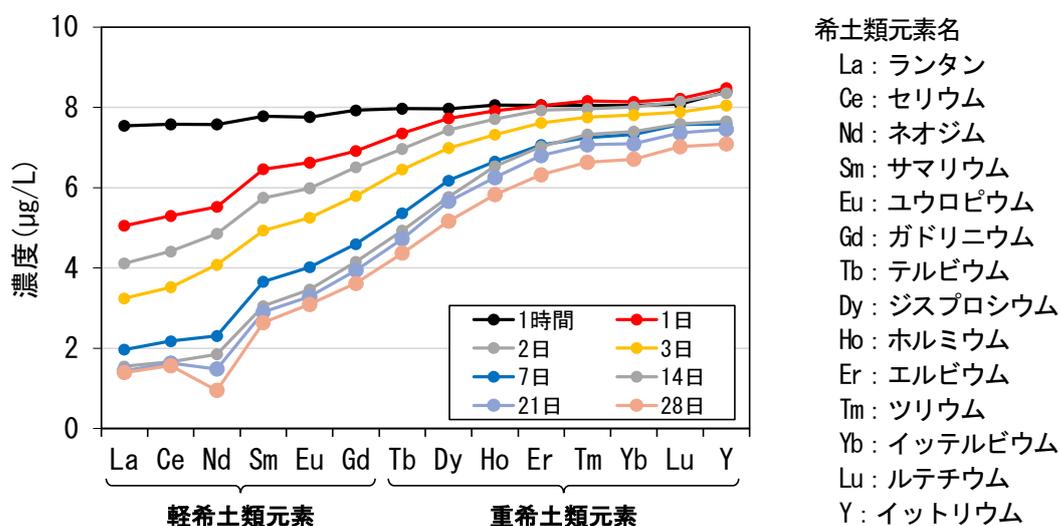


図18 幌延の地下水（深度350 m）中のコロイド粒子に対する希土類元素の相互作用

350m 調査坑道から採取した地下水に希土類元素を添加して、0.2 μm のフィルターでろ過した後の地下水に残った希土類元素の濃度を示しています。

一方、上記の試験では、添加した希土類元素の濃度が時間とともに減少した理由について、希土類元素が地下水中に存在していたコロイド粒子と反応したためか、希土類元素自体のコロイド粒子の形成や容器への吸着・沈殿が生じたためかを判別できませんでした。そこで、地下施設内のボーリング孔から採取した地下水を3 kDa^{*59}のフィルターで限外ろ過^{*60}して、地下水中に存

*58：岩盤中と地下水における元素の濃度比を表す係数で、元素の岩盤への取り込まれやすさを表す係数です。環境中における元素の移動の予測や放射性廃棄物の処分における安全評価などに使用される重要なパラメータのひとつです。

*59：Da（ダルトン）は質量を表す単位であり、質量数12の炭素原子の質量の1/12と定義されていますが、限外ろ過に用いられるフィルターサイズの指標としても用いられます。3 kDa（キロダルトン）のろ過フィルターサイズとは、3 kDa（3,000 Da）より小さな質量の分子が通ることのできる孔径（数 nm 程度）の指標を意味します。

*60：コロイド粒子などの、通常のろ過方法では分離できない微細な粒子をろ過する方法で、約1 kDa～1,000 kDaの分子を分離することができます。

在していたコロイド粒子を除去し、そこに希土類元素を添加した後に、0.2 μm のフィルターでろ過して、希土類元素添加後に生成したと考えられる粒子を除去しました (図 19 : 以下、0.2 μm ろ過試料)。また、0.2 μm ろ過試料の試料採取と同じタイミングで、ろ過しない試料 (以下、未ろ過試料) も採取しました (図 19)。その結果、いずれの試料も図 18 と同様に、時間経過とともに希土類元素の濃度が減少し、その程度は軽希土類元素の方が重希土類元素よりも大きいという結果が得られました (図 20)。このことは、図 18 の希土類元素のパターンにおいて、コロイド粒子への収着のみではなく希土類元素自体のコロイド粒子の形成や容器への吸着・沈殿も影響していることを示唆しています。また、軽希土類元素は未ろ過試料に比べて0.2 μm ろ過試料の方が1 $\mu\text{g/L}$ 程度濃度が低いのに対し、重希土類元素では両者の濃度がほとんど変わらないことも分かりました (図 20)。また、未ろ過試料と0.2 μm ろ過試料の濃度の差分は、粒径0.2 μm よりも大きい粒子として溶液中に存在する希土類元素の濃度を表します。本試験では、はじめに限外ろ過により地下水中の粒子を除去したため、この画分は主に、希土類元素自体が形成するコロイド粒子からなると考えられます。今回の試験の結果からは、希土類元素自体のコロイド粒子形成の影響は軽希土類元素でわずかに見られ、残りの濃度減少は主に吸着・沈殿によるものであることが示唆されました。なお、幌延の地下水に対する希土類元素の添加実験は過去にも実施されていますが^(13, 14)、本試験では、添加前の地下水を限外ろ過することにより、希土類元素自体によるコロイド粒子の形成の影響についても把握することができました。

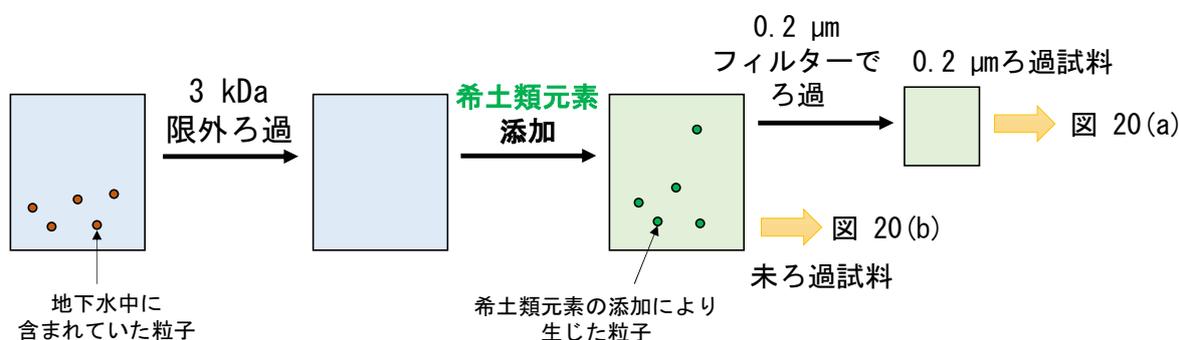
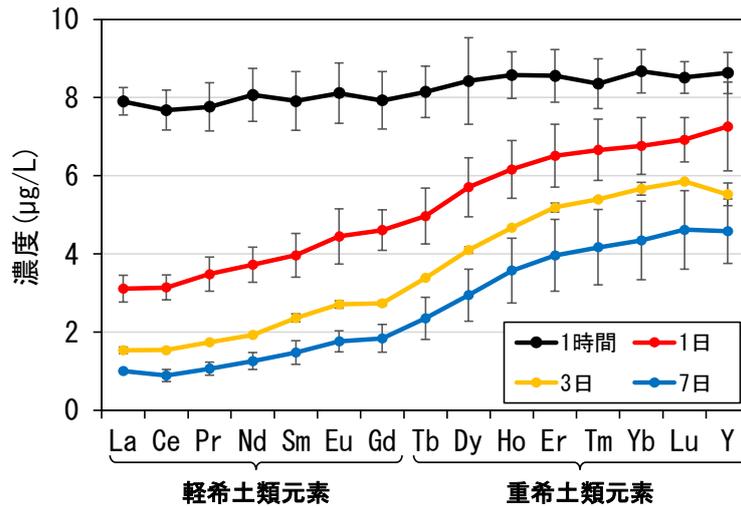
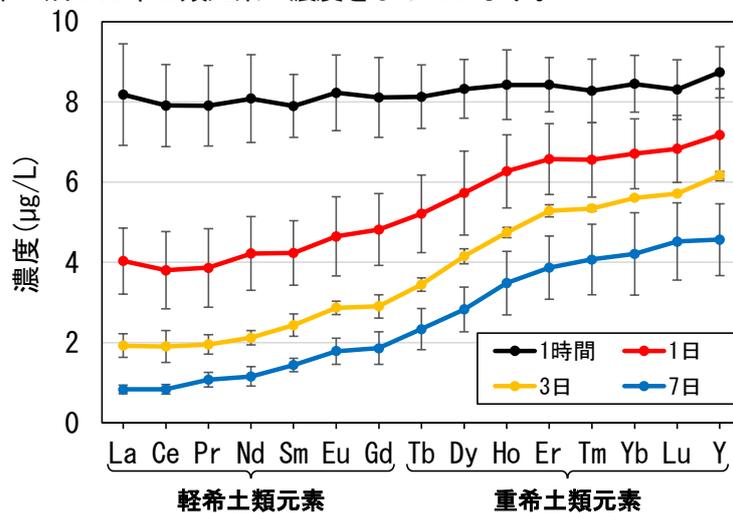


図 19 希土類元素添加試験方法の概要図



(a) 0.2 μm フィルターろ過試料

3 kDa のフィルターで限外ろ過した地下水に希土類元素を添加した溶液を、0.2 μm のフィルターでろ過した後の地下水中に残った希土類元素の濃度を示しています。



(b) 未ろ過試料

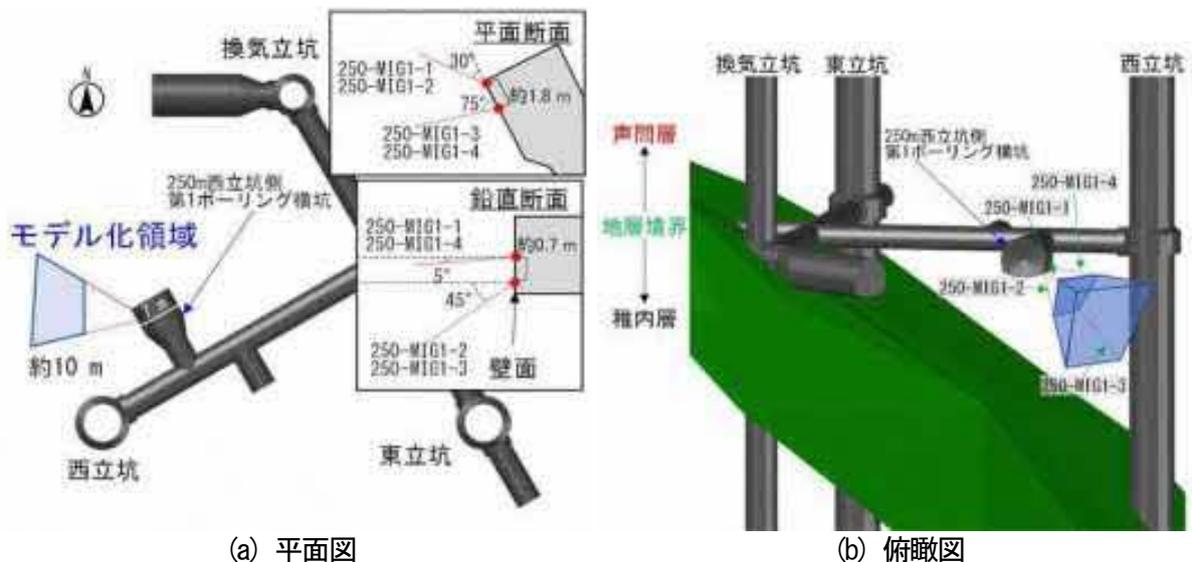
3 kDa のフィルターで限外ろ過した地下水に希土類元素を添加して、ろ過をせずに測定した希土類元素の濃度を示しています。

図 20 幌延の地下水（深度 350 m）中における希土類元素のコロイド生成挙動に関する検討結果

(3) ブロックスケールを対象とした物質移行試験

令和 4 年度は、声問層の割れ目を含む十数 m の岩盤ブロックの物質移行特性を評価するためのモデル化・解析手法を整備するために、250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑から 4 本のボーリング孔（掘削長各 21 m）を掘削し、モデル化・解析領域における地質構造分布の情報を取得しました。図 21 にボーリング孔配置とモデル化の対象領域を示します。4 本のボーリング孔は 250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑の西側壁面から斜め下向きに掘削しました。

掘削したボーリング孔のコア観察などの結果から、いずれのボーリング孔についても、引張割れ目や、引張割れ目とせん断割れ目の特徴を併せ持つハイブリッド割れ目は少なく、せん断^{*61}割れ目が多く発達しています（一次元での平均の割れ目頻度：2～6 本/m）。これは、地上からのボーリング調査や立坑の壁面観察などの結果と整合的です^(4, 15, 16, 17, 18)。



(a) 平面図

(b) 俯瞰図

図 21 ボーリング孔の配置とモデル化領域

稚内層深部に分布する断層を介した物質の移行経路の水理学的連結性を検証するために、令和3年度に実施したFZ-01孔とFZ-02孔での孔間透水試験とトレーサー試験（図 22）の結果を解析しました。これまで、水理学的連結性は限定的であることが推定されていましたが、孔間透水試験の結果を詳細に解析したところ（図 23）、FZ-01孔とFZ-02孔の試験区間をつなぐ流動経路の水理学的連結性は限定的で、ほぼ一次的につながった亀裂内の隙間である可能性が高いことが分かりました。その流動経路をチューブ状の経路と仮定すると直径は数百 μm ～数 mm、長さは数十 m～数百 m に達することが推定されます。この長さは試験区間の距離と比べると非常に長いことから、実際には流動経路が複雑に折れ曲がっていること、および流動経路の途中で水が非常に通りにくい場所が存在することなどが示唆されます。このような非常に長いチューブ状の経路を仮定してトレーサー試験で得られた結果（FZ-02孔に投入したトレーサーが4日後にFZ-01孔へ到達すること）⁽¹⁹⁾を解釈すると、ト

*61：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言います。

レーザーが移行した経路の直径は、孔間透水試験で推定された上記の流動経路の直径（数百 μm ～数 mm ）の数倍～数十倍であることが推定されました。これは透水試験から推定される流動経路の断面積とレーザー試験から推定される移行経路の断面積の計算上の違いとして一般的に指摘されている関係と整合します。

今回の解析結果から、孔間透水試験結果とレーザー試験結果の間に一定の整合性が認められること、および稚内層深部に分布する断層を介した物質の移行経路の水理的連結性が限定的であることが確認できました。また、上記のような非常に長いチューブ状の経路を仮定することによって、水理的連結性が限定的な物質の移行経路を表現できることも分かりました。

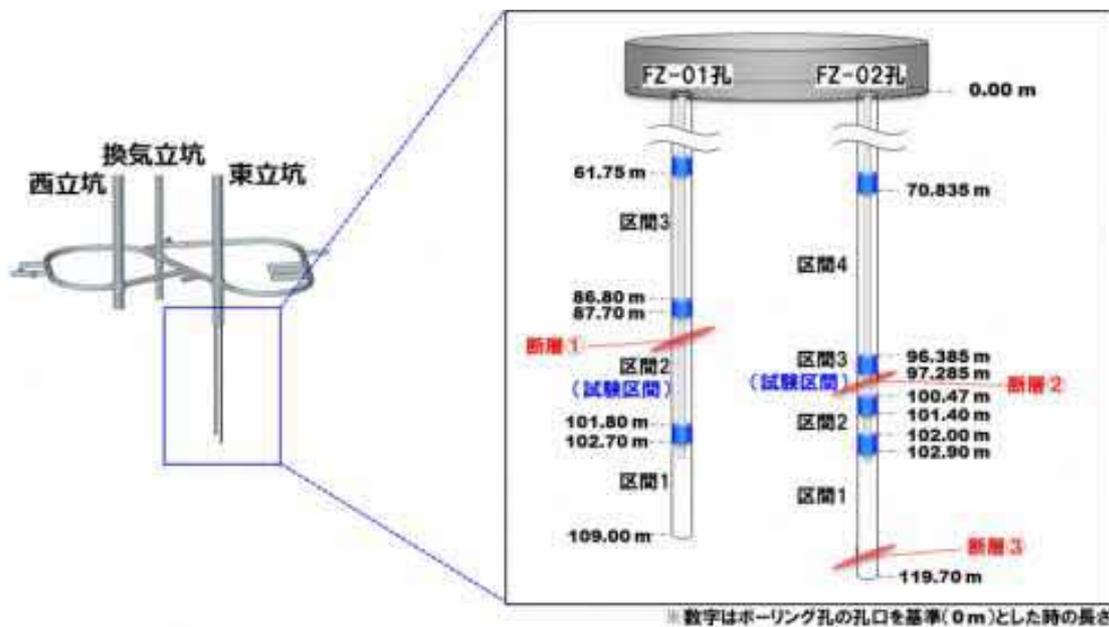


図 22 FZ-01 孔と FZ-02 孔の試験区間

孔間透水試験では FZ-01 孔の試験区間から一定流量で揚水し、その間の FZ-01 孔と FZ-02 孔の試験区間の水圧変化を調べました。レーザー試験では、Fz-01 孔の試験区間から一定流量で揚水しながら、FZ-02 孔の試験区間に一定流量・一定濃度でレーザーを注入し、FZ-01 孔の試験区間で回収したレーザーの濃度変化を調べました。

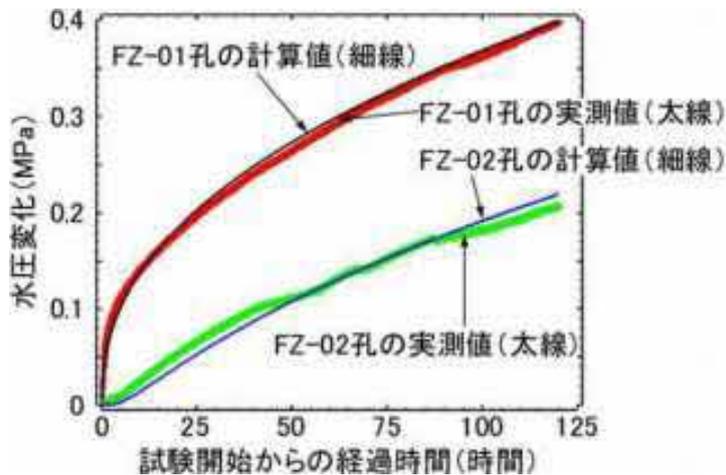


図 23 孔間透水試験結果の解析例

FZ-01 孔と FZ-02 孔の試験区間の距離やトレーサーが移行する流路の幾何形状や硬さをパラメータとして試験中の水圧変化を再現できる条件を検討しました。

(4) 物質移行試験に関わる基礎的な調査研究

堆積岩における主要な水みちは、岩盤中の割れ目であると考えられますが、非常にゆっくりとした地下水の流動を考えた場合には割れ目や変質の少ない健岩部も水みちとして重要になる可能性があります。健岩部における地下水の移動は、岩盤中の物質移行に対する遅延効果が大きいため、健岩部の寄与を評価する手法の開発が重要になります。声間層と稚内層の岩石中の間隙率と透水係数には相関性が見られる一方で⁽²⁰⁾、周囲の間隙水とは水質が明らかに異なる閉塞された間隙も存在することが分かっていることから⁽²¹⁾、地下水の流れに寄与する間隙は健岩部に含まれる全ての間隙ではないことが考えられます。地下水の流れに寄与しない閉塞された間隙中では微生物の活動に必要な栄養が枯渇する可能性が考えられることから、そこには微生物が存在しないことが予想されます。そこで、岩石中において生きた微生物が存在する箇所は、わずかながらも地下水を介した物質移行が進行する場所であると考えられることに着目し、微生物を指標とした岩盤中の水みちの評価手法の開発に取り組んでいます。

これまでに、稚内層の健岩部試料を用いて微生物細胞を染色した薄片試料を作製し、岩石中の微生物分布を取得してきました。自動で連続的に観察することが可能な蛍光顕微鏡を用いて薄片試料全体の微生物分布画像を取得するとともに、微生物細胞を識別可能な空間分解能^{*62}を有する分析システムを

*62：分解能とは、器械・装置などで物理量を識別できる能力のことを指します。顕微鏡では、見分けられる2点間の最小距離を指し、解像度に相当します。

用いて得られた赤外吸収スペクトル^{*63}から、染色された物質が微生物であるかを確認しました。その結果、微生物は均質に存在するのではなく、限られた微小間隙に存在することが分かりました。このことから、稚内層の健岩部における物質移行は、限られた微小間隙を介して行われることが推察されますが、試料数が限られるため観察事例の蓄積が必要でした。一方で、従来の切削研磨機を用いた微生物観察用の薄片試料の作製方法では、声間層などの脆く壊れやすい岩石試料から薄片試料を作製することが困難であり、観察可能な試料が限られていました。

令和 4 年度は、限られた試料から確実に薄片試料を作製するために、天体岩石試料などの限られた量の試料から薄片試料を作製する際に用いられてきた手法⁽²²⁾を適用しました。具体的には、ダイヤモンド微粒子の研磨剤が付加された切削研磨機を用いて岩石試料を研磨しながら切断し、声間層と稚内層の岩石試料から厚さ約 2 mm の薄片試料の作製を試みました。その結果、脆く壊れやすい岩石試料に対しても、微生物観察が可能な薄片試料を作製することができました。

例として HDB-11 孔の深度約 940 m から得られた稚内層深部の岩石試料を用いて作製した薄片試料の顕微鏡観察画像を図 24 に示します。図 24 では自動連続撮影により得られた薄片試料の全体画像のほかに、薄片試料に見られた強い蛍光発色を呈する天然の微小割れ目を含む箇所を部分的に切り出し、微小割れ目を分割した表面の画像と、比較のために蛍光発色の見られない箇所を人工的に切断した表面の画像を合わせて示しています。割れ目面と人工切断面の表面から削り出した試料の赤外吸収スペクトルを図 25 に示します。人工切断面試料の赤外吸収スペクトルには、ケイ素原子と酸素原子の結合に由来する吸収スペクトルが見られ、ケイ酸塩鉱物が多く含まれていることが分かります。一方で、炭素原子と水素原子の結合（炭化水素基）や炭素原子と窒素原子や酸素原子の結合や、窒素原子と水素原子の結合（アミド基）に特徴的な吸収スペクトルがあまり見られないことから、人工切断面から削り出した試料は主にケイ酸塩鉱物であることが分かります。割れ目面試料の赤外吸収スペクトルにもケイ酸塩鉱物の特徴が見られますが、炭化水素基やアミド基などの微生物に特徴的な吸収スペクトルも見られることから、割れ目面

*63：光や電磁波などが物質に当たったときに、その物質特有の波長の範囲が吸収されます。その強度を波長の順に並べた強度分布のことを、吸収スペクトルと言います。図 25 では、横軸を波長の逆数である波数で表しています。

から削り出した試料にはケイ酸塩鉱物のほかに微生物も多く含まれていることが分かります。

このように、ダイヤモンド微粒子の研磨剤が付加された切削研磨機を用いて微生物観察用の薄片試料を作製し、自動連続撮影機能を有した顕微鏡観察により高解像度の全体画像を取得することで、より詳細に観察を行う箇所を絞り込み、赤外顕微鏡により微生物の存在度を判定する一連の調査手法を整備することができました。今後は、観察事例を拡充し、岩盤の透水性と微生物を指標として抽出された微小割れ目との関係性について定量的な評価を目指します。なお、本研究は東京大学との共同研究として実施しています。

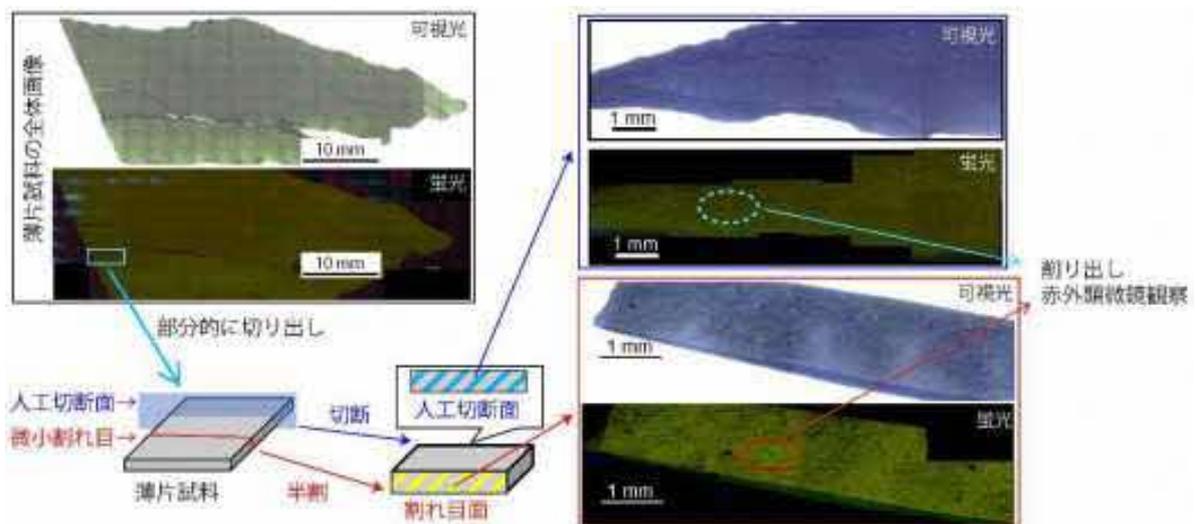


図 24 ダイヤモンド微粒子の研磨剤が付加された切削研磨機を用いた薄片試料の作製と観察画像

割れ目面と人工切断面の表面から削り出した試料の赤外顕微鏡観察結果が図 25 です。

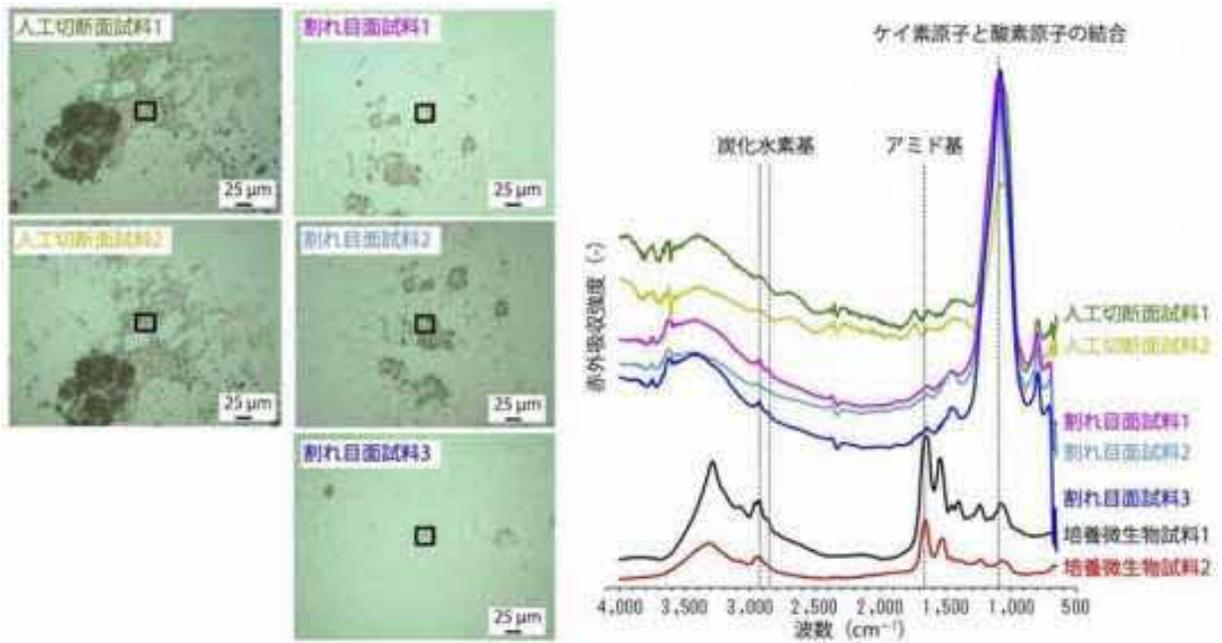


図 25 微小割れ目面および人工切断面の赤外吸収スペクトル
 可視光画像（左）に示される四角は、赤外吸収スペクトル（右）の測定箇所です。培養微生物試料の赤外吸収スペクトルは、比較のために別途取得したものです。

5. 処分概念オプションの実証

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

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

令和 2 年度以降は、操業・回収技術などの技術オプションの実証、閉鎖技術の実証が課題となります。そこで、具体的には以下の 3 つの項目に取り組んでいきます。

(1) 搬送定置・回収技術の実証

(2) 閉鎖技術の実証

(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

「搬送定置・回収技術の実証」としては、緩衝材や埋め戻し材の状態に応じたこれらの除去技術の技術オプションの整理、より合理的に人工バリアを回収するための手法の提示、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品質評価手法の提示を行います。

「閉鎖技術の実証」としては、将来の処分場閉鎖後に、坑道や掘削損傷領域が地上まで直結する移行経路となることを防ぐために、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・高度化を図ります。また、埋め戻し材やプラグなどの施工方法の原位置環境への適用性・実現性について確認します。具体的には、以下に示す 5 項目について室内試験や原位置試験、数値解析などを実施していきます。

① 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

② 埋め戻し材の設計評価に必要となる緩衝材膨出抑制機能の把握

③ 掘削損傷領域の連続性を遮断するための施工技術の実証

④ 掘削損傷領域の調査技術の高度化

⑤ 坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の実証

「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」については、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で得られる情報などに基づき、埋め戻し材の施工方法（締固め、ブロック方式など）に応じた緩衝材の品質の違いを把握します。また、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把握します。緩衝材への水の浸潤挙動を把握するための試験として、緩衝材流出試験を継続します。

これらの成果は、将来的に処分場を閉鎖する際に適用される閉鎖技術に求める性能を設定する際やその性能を担保するために必要となる設計・施工技術を選択する際の基盤情報となります。

(1) 搬送定置・回収技術の実証

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品質評価手法の提示については、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）を活用して、①実際の地下環境における支保部材の状態把握および②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・分析ならびに数値解析を実施しました。

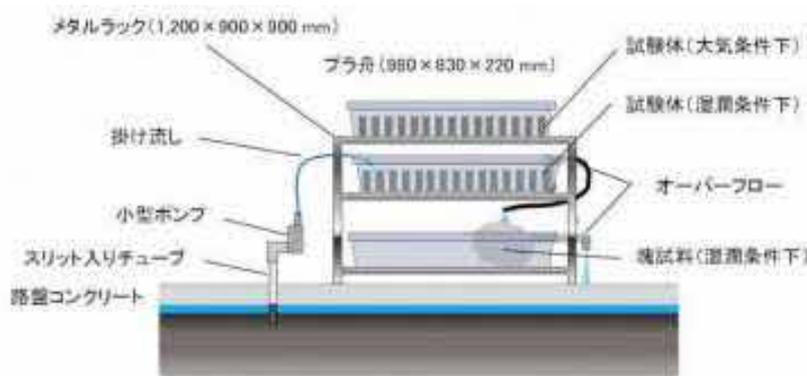
① 実際の地下環境における支保部材の状態把握

処分場に定置された廃棄体を安全に回収するためには、処分坑道内の空間が保たれていることが必要となります。この評価のために、処分坑道に施工される吹付けコンクリートの経年劣化の把握を目的とした試験を実施しています。具体的には、地下坑道の吹付けコンクリートと同様の成分および施工方法で作製したコンクリート試験体を、令和2年度より350m調査坑道における大気条件下および浸潤条件下に定置しています（図26）。令和4年度は、定置から約1年9か月が経過した時点で一部の試験体を回収し、物性や化学状態を把握するための試験・分析を行いました。

大気条件下に定置した試験体は表面から約6mmの深さまで中性化^{*64}しており、令和3年度の結果（約8か月経過時点：中性化深さ約3mm）⁽¹⁹⁾と比べて中性化が進行していることが分かりました（図27）。一方、湿潤条件下に定置した試験体では中性化の領域は1mm未満であり、令和3年度より進行しているものの、大気条件下に定置した試験体と比べてごくわずかであることが分かりました（図27）。試験体表面（大気条件下：約20mm、湿潤条件下：約4

*64：大気中の二酸化炭素とコンクリート中の水酸化カルシウムなどの成分が反応し、コンクリート中の細孔溶液のpHが低下する現象です。中性化が進むとコンクリート中の鉄筋が腐食しやすくなり、鉄筋が腐食することでコンクリートのひび割れなどが発生し、コンクリート構造物の劣化が進みます。

mm) の元素分布を電子プローブマイクロアナライザー^{*65}により観察すると、中性化領域での CaO および SO₃ 濃度の減少が確認されました (図 28)。また、試験体中の空隙率の分布を水銀圧入法により測定すると、大気条件下に定置した試験体の中性化が生じている領域では、中性化の生じていない領域に比べて空隙径 0.01 μm~0.1 μm の空隙の割合が増加していることが分かりました (図 29)。これらの結果は令和 3 年度と同様であり、大気条件下に定置した試験体の表面から約 6 mm までの深さで CaO や SO₃ を含むセメント水和物 (C-S-H^{*66}、エトリンガイト^{*67}など) が分解し、空隙径 0.01 μm~0.1 μm の空隙が増加していると考えられます。



(a) 定置装置の概念図



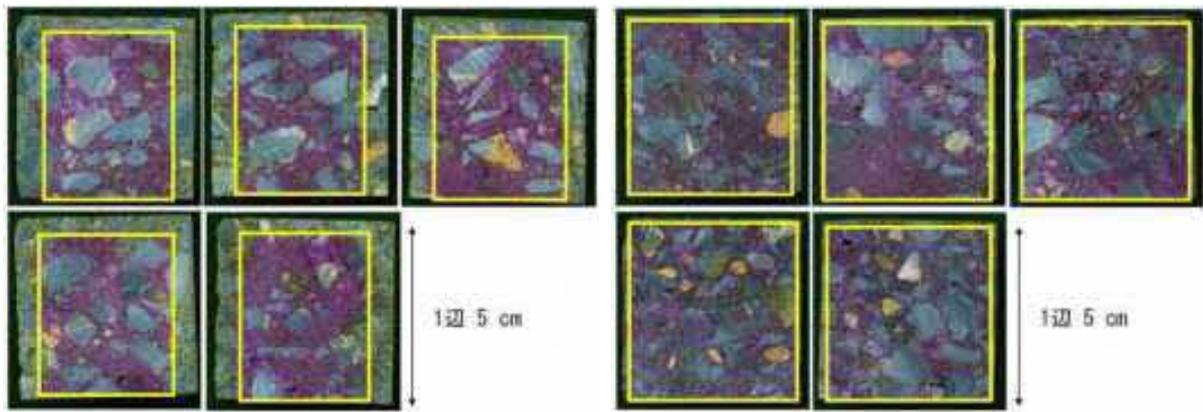
(b) 定置状況

図 26 コンクリート試験体の定置状況

*65 : 電子プローブマイクロアナライザー (Electron Probe Micro Analyzer : EPMA) は、電子ビームを測定対象に照射したときに、電子と対象を構成する元素の相互作用によって発生する元素に特有なX線 (特性X線) を検出することで、対象を構成する元素を分析する装置です。

*66 : ケイ酸カルシウム水和物 (Calcium Silicate Hydrate) とも呼ばれ、コンクリートに含まれる主要な水和物のひとつであり、カルシウムやシリカを含みます。含まれるカルシウムやシリカの物質量の比によって組成や性質が異なります。

*67 : セメント水和物のひとつで、化学式 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ で表される化合物の鉱物です。



(a) 大気条件下

呈色の見られない領域（黄色線の外側）

: 表面から約6 mm

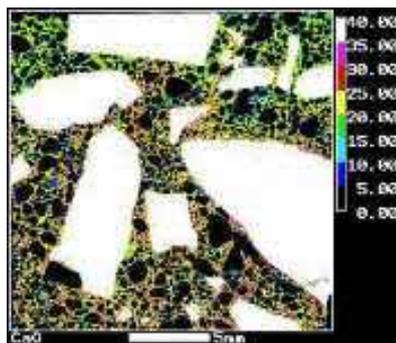
(b) 湿潤条件下

呈色の見られない領域（黄色線の外側）

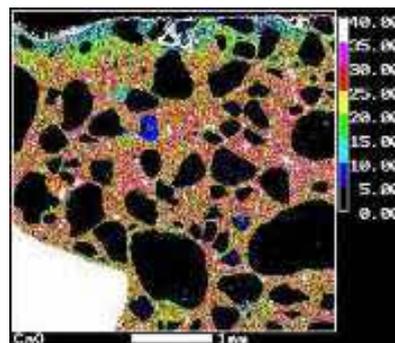
: 表面から1 mm未満

図 27 コンクリート試験体の変質領域

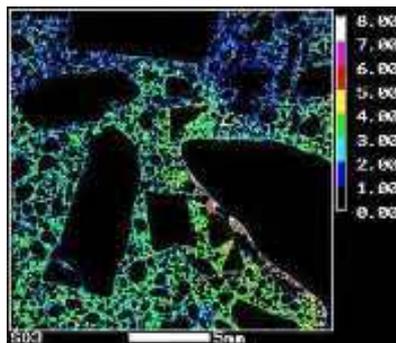
試験体（1辺5 cm）の半断面にフェノールフタレインを塗布し、色の変化が見やすいように色調を変化させた写真です。フェノールフタレインはpHがおよそ8~12の範囲で赤色を呈する試薬であり、中性化が進行してpHが低下した領域では、フェノールフタレインの呈色が見られなくなります。



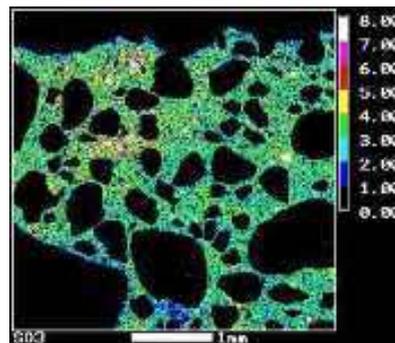
CaO



CaO



SO₃

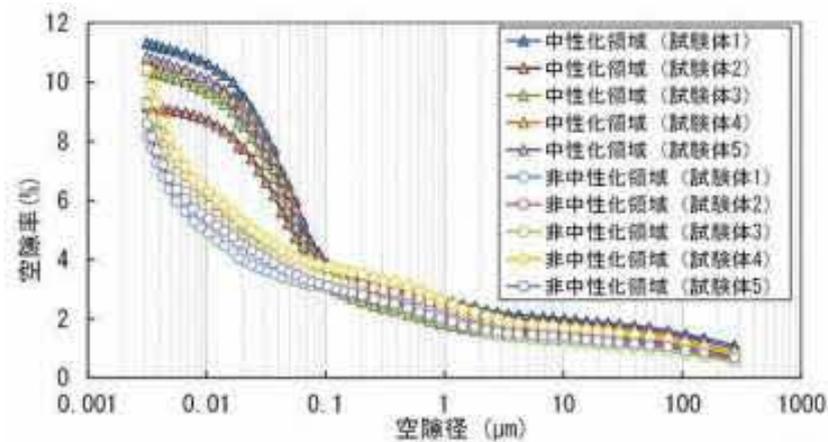


SO₃

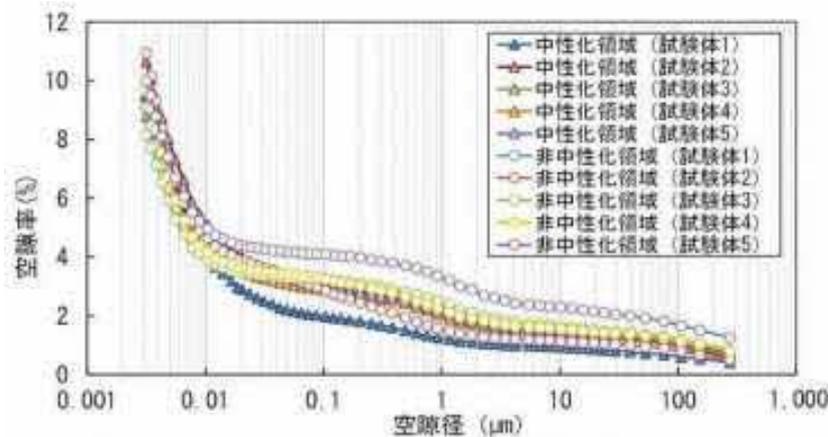
(a) 大気条件下

(b) 湿潤条件下

図 28 コンクリート試験体中の元素分布



(a) 大気条件下



(b) 湿潤条件下

図 29 コンクリート試験体中の空隙率分布

さらに、令和 4 年度は、コンクリート材料の透水性を測定しました。コンクリート材料の透水性は一般的に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アウトプット法により測定されますが、試験体の透水性が非常に低いことが令和 3 年度までの結果から分かっているため、低透水性の材料を対象として厳密に基準が定められた、地盤工学会で基準化された「低透水性地盤材料の透水試験法 (JGS 0312-2018)」を適用して、アウトプット法との結果の比較を試みました。試験では、300 kPa の圧力で試験体に注水し、試験体の飽和過程での注水量と排水量および透水試験時の透水係数の値が、それぞれの平均値の差分 50%以内に収まることを確認しながら行いました。その結果、大気条件下に定置した試験体では水が完全に通過し、 10^{-12} m/s オーダーの透水係数が得られました。この値は、アウトプット法により得られた透水係数と同程度のオーダーであり、両測定法で同程度の結果が得られることが示唆されました。一方、湿潤条件下に定置した試験体では水の通過が

確認されませんでした。透水係数として、計算上は 10^{-14} m/s オーダーの値が得られましたが、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ことが示唆されました。試験体の化学状態、空隙構造および透水性の関係は、以下のように整理されます。湿潤条件下に定置した試験体では、セメントの水和反応がより速く進行したと推測され、空隙径 $0.01 \mu\text{m}$ 未満の非常に緻密な空隙の割合が大きくなり、より低い透水係数を示したと考えられます。一方、大気条件下に定置した試験体では、表面から約 6 mm まで中性化が進行し、セメント水和物が分解するとともに、空隙径 $0.01 \mu\text{m}$ ～ $0.1 \mu\text{m}$ の空隙が増加していると考えられます。このことや、水和反応の進行が相対的に遅いことにより、湿潤条件に比べて高い透水係数を示したと考えられます。以上のことは、令和 3 年度までの結果とも整合的です。

② 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、長期間にわたり坑道が大気開放条件下に置かれることが想定されます。処分坑道内の空間の長期間の安全性を地質環境の観点から評価することや、長期にわたって坑道が大気に開放されることが坑道周辺の地質環境へ及ぼす影響、また、坑道の大気への開放期間が坑道閉鎖後の坑道周辺の地質環境回復過程に及ぼす影響を評価することを目的として、数値解析を実施しました。具体的には、力学的な長期地質環境の変化の観点では、クリープ^{*68}変形挙動を伴う長期変形挙動の予測解析を、水理学的な観点では、地下水中に含まれる二酸化炭素やメタンおよび坑道内の大気に存在する酸素や窒素の影響を考慮した地下水やガスの流動解析である多相流解析^{*69}を実施しています。令和 2 年度および令和 3 年度は、解析に必要なデータを取得するとともに、計算精度の向上を目的とした境界条件や初期条件の設定手法を検討し、実際の状況に則したモデルを作成してきました。

令和 4 年度は、坑道の掘削および坑道の大気開放による地質環境の変化に加え、坑道の埋め戻し後の挙動に関しても解析を実施しました。坑道の開放

*68：クリープとは、一定加重または応力が作用している状態で時間の経過とともに材料の変形（ひずみ）が進行する現象のことです。

*69：岩盤中を流れる流体の流動シミュレーションにおいて、水の流れだけでなく、空気や蒸気などの気相の流動も考慮した解析のことです。

期間中は、クリープ変形挙動を考慮した力学解析を実施し、その結果を反映させた浸透率や貯留係数などのパラメータを多相流解析に入力する解析を実施しました。これらの解析における岩盤の物性値は、幌延深地層研究センターの深度 350 m における値を参考に設定しました。埋め戻し材に相当する物性値を坑道部に入力することで坑道の埋め戻しを模擬し、坑道埋め戻し後は坑道の変形が坑道開放時よりも小さくなることが想定されるため埋め戻し材や坑道周辺岩盤の物性値を固定した多相流解析を実施しました。坑道の掘削から埋め戻しまでの大気開放期間を、50 年、100 年、200 年、300 年と変化させ、坑道の大気開放期間と埋め戻し後の期間の合計期間が 1,000 年になるまで計算を行いました。

図 30 は、各解析ケースにおける間隙流体の圧力の分布になります。大気開放条件下における 50 年、100 年、200 年、300 年後の結果を埋め戻し直後の初期条件として 1 行目に、埋め戻し後 100 年および、大気開放期間および埋め戻し期間の合計が 1,000 年となった結果を、各々、2 行目および 3 行目に示しています。埋め戻しまでの開放期間が長くなるにつれて坑道周辺の圧力が低下する範囲が広くなり、その結果、坑道埋め戻し後 100 年には坑道開放期間が短いほど回復が早くなっています。また、坑道掘削から 1,000 年後には、坑道の開放期間が 50 年の場合は概ね坑道掘削前まで圧力は回復しましたが、100 年以上開放した場合には、坑道周辺で水圧が低下した領域が若干残っています。

また、図 31 に飽和度の時間変化を示します。飽和度の変化も、水圧の変化と同様に坑道開放期間が短い方が初期状態における飽和度が低下した領域が狭く、またその後の回復速度も早くなる結果となりました。坑道掘削から 1,000 年後においては、坑道開放期間が 50 年の場合には完全に飽和状態に回復するものの、開放期間が 100 年以上の場合には開放期間に応じた範囲の不飽和領域が坑道周辺に残ることが分かりました。

このように、坑道開放期間を変化させた埋め戻し後の多相流解析により、回収可能性の維持期間としての坑道の開放期間が、埋め戻し後の地質環境の回復過程に及ぼす影響を解析的に評価することができました。

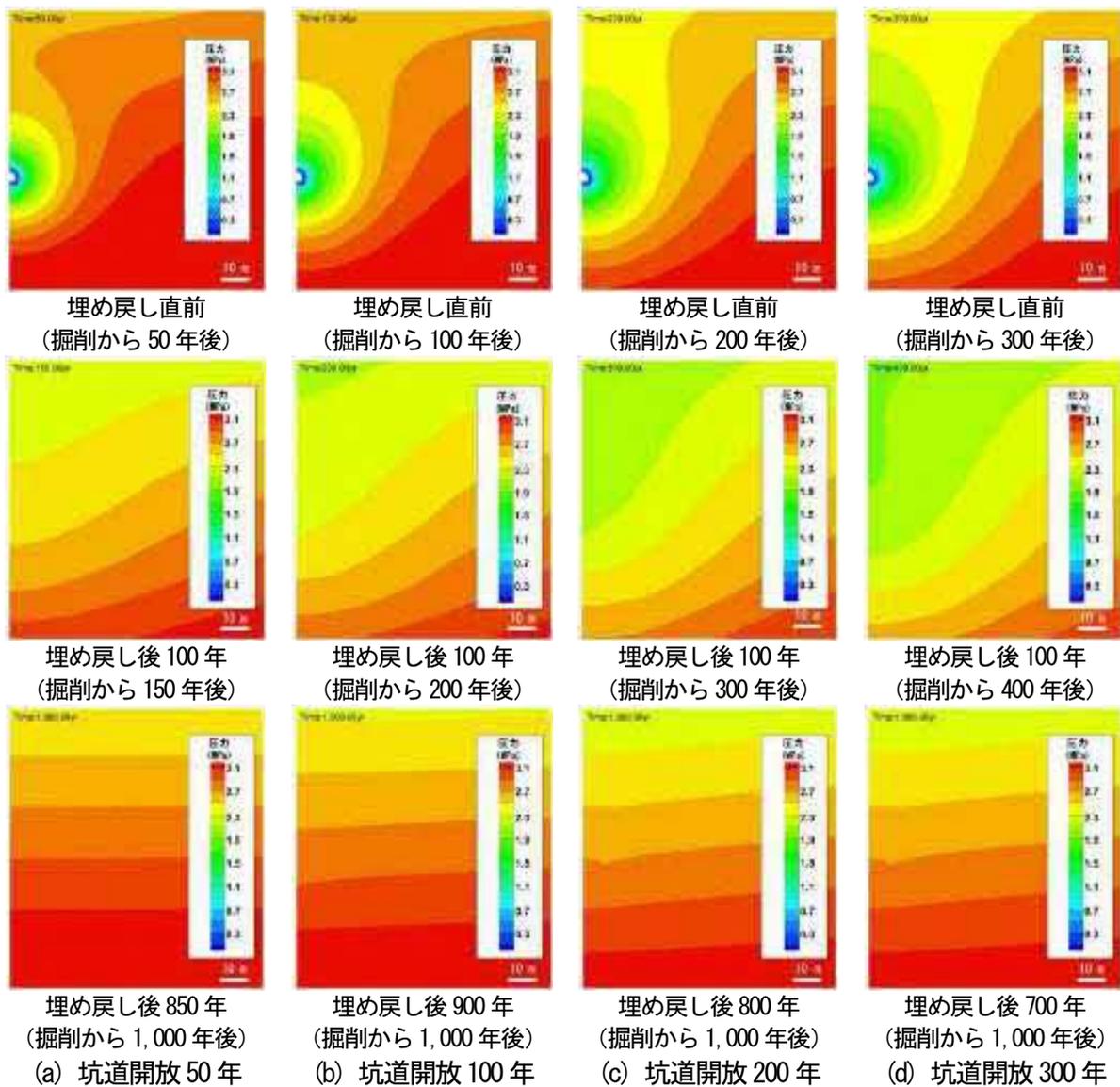


図 30 坑道開放期間の違いによる埋め戻し後の圧力回復挙動の比較

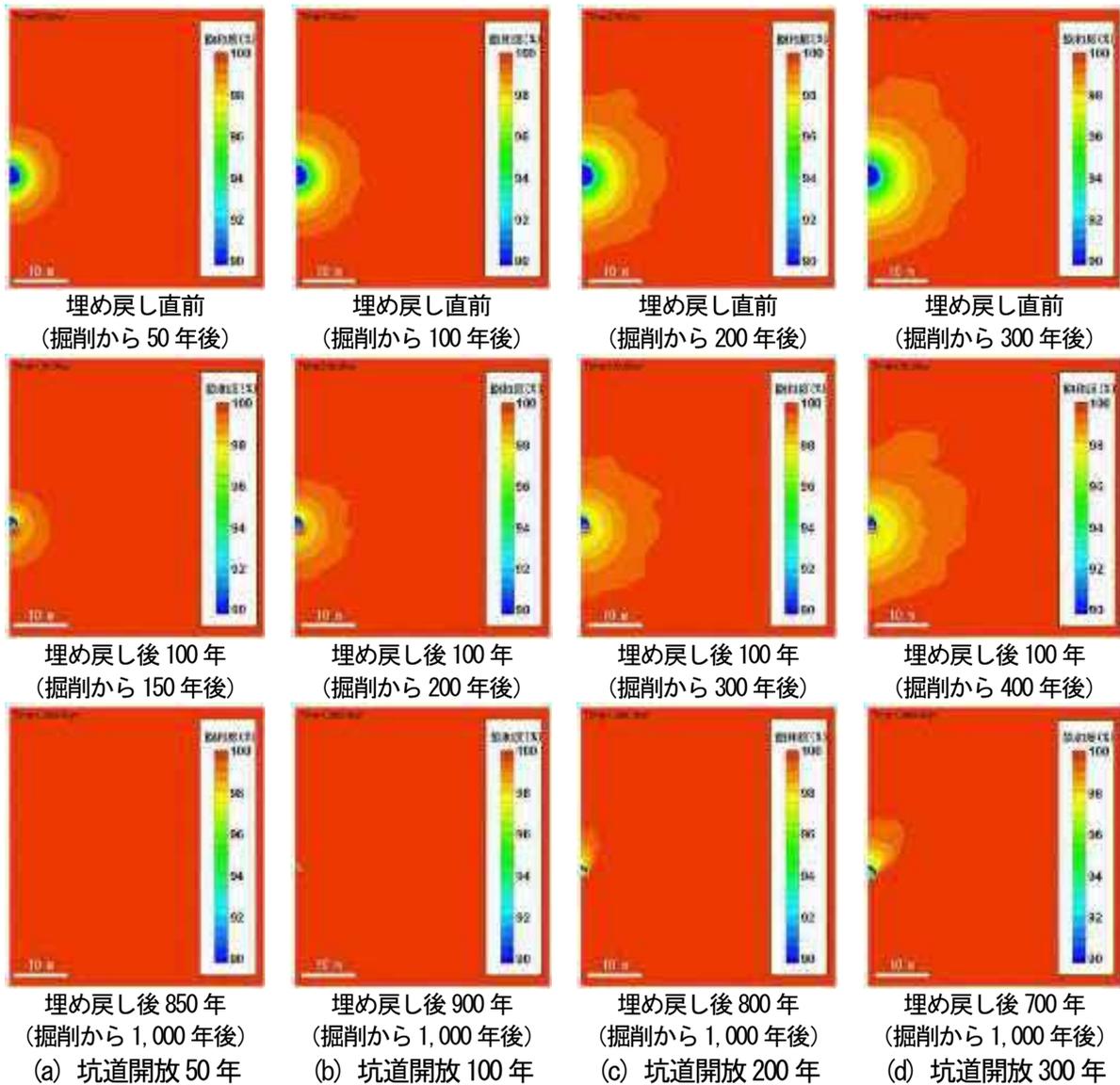


図 31 坑道開放期間の違いによる埋め戻し後の飽和度回復挙動の比較

(2) 閉鎖技術の実証

閉鎖技術の実証としては、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（令和 4 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に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）を活用して、シーリングシステム^{*70}の成立性の確認を目的に、先に示した 5 項目（①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、②埋め戻し材の設計評価に必要な緩衝材膨出抑制機能の把握、③掘削損傷領域の連続性を遮断するための施工技術の実証、④掘削損傷領域の調査技術の高度化、⑤坑道内から掘削され

*70：将来の地層処分場を閉鎖した際に、坑道や掘削影響領域が地下水の移行経路とならないようにするための対策のことです。

たボーリング孔の閉塞技術の実証) についての室内試験や原位置試験、数値解析などを実施しました。以下に各項目についての成果を示します。

① 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

処分場閉鎖後は埋め戻し材やプラグが、長期にわたって岩盤や地下水、あるいは支保工やグラウト^{*71}といったコンクリート系材料と相互作用することで変質し、結果として期待する性能（核種の移行の遅延や止水性能）が変化する可能性が考えられます。一方で、このような埋め戻し材やプラグが変質するシナリオが生じる要因としては、岩盤、支保工、埋め戻し材の状態変遷や、これらの材料間で生じる連成現象などが考えられます。このような背景から、令和 3 年度までに検討してきたコンクリート系材料と地下水との水理・化学的な相互作用に加え、力学的な相互作用を含めて埋め戻し材の変質がどのような状態、プロセスを経て生じ得るかを網羅的に整理し、埋め戻し材やプラグの変質によって立坑や坑道が地上への核種の移行の短絡経路となるようなシナリオを検討しました。また、埋め戻し材と支保工の境界部の初期状態に影響を及ぼし得る埋め戻し材の施工初期のベントナイトの流出現象に着目し、流出現象が発生し得る条件を確認するための室内試験を継続しました。

令和 3 年度は、埋め戻し材、支保工およびこれらの界面の状態変遷を整理した上で支保工から溶脱したコンクリート系材料の溶脱成分が埋め戻し材と接触し、埋め戻し材中のモンモリロナイト^{*72}がどの程度変質するかを水理－化学連成解析によって評価しました。その結果、坑道上部に自重沈下などによる空隙（もしくは密度低下に伴った高透水性領域）が形成されることで、モンモリロナイトの変質が進展するものの、この進展は少なくとも解析初期から 1,000 年においては埋め戻し材に地下水が流入する箇所近傍に限定される可能性が示唆されました⁽¹⁹⁾。

令和 4 年度は、初期状態として仮定した空隙（もしくは密度低下に伴った高透水性領域）が埋め戻し材の膨潤変形によって閉塞し得るかを膨潤解析に

*71：水みちとなる岩盤の割れ目の中にセメントなどの固化材を圧入し、充填することにより、湧水を止める技術のことです。

*72：ベントナイトの主成分である粘土鉱物で、ノートのようなシート状の結晶構造を持っています。通常、それらが折り重なった状態（重層体や積層体などと呼ばれています）で存在しています。それらシート状の粘土鉱物の間を層間と言い、モンモリロナイトの場合、層間が負に帯電しているため、それを埋めるために陽イオンが存在しています。この陽イオンは層間陽イオンや交換性陽イオンなどと呼ばれています。

よって評価しました。膨潤解析は埋め戻し材を弾粘塑性体と仮定し、図 32 に示すように 5 m×5 m のモデルを構築しました。この解析では、坑道上部方向への膨潤変位を評価するため、モデル両端および下端を固定端として解析を実施しました。埋め戻し材はベントナイト 15%、ケイ砂 85%の混合比を想定し、NUMO が緩衝材の長期健全性評価における埋め戻し材に適用したパラメータ⁽²³⁾を参照しました。なお、膨潤解析には力学挙動解析コードである MACBECE⁽²⁴⁾を使用しています。図 32 に、膨潤解析結果を示します。モデル中央部の変位が最も大きく、最大変位は 2.3 mm でした。既往の研究では、空洞内充填材の施工試験を、ベントナイトであるクニゲル V1 と砂を乾燥質量比 15:85 で混合したベントナイト混合土を吹付けた後にベントナイト混合土の沈下量の計測を行い、約 3 年で最大 6 mm の沈下が生じたことが示されています⁽²⁵⁾。この沈下量の計測は埋め戻し材の膨潤開始前であり、少なくとも吹付け工法によって埋め戻し材を施工し、完全飽和に至るまでの期間で数 mm 程度の空隙が生じることが想定されますが、図 32 の膨潤解析結果からは、埋め戻し材の膨潤によって空隙がある程度小さくなる可能性が示唆されます。過年度の水理－化学連成解析からも坑道上部の空隙（埋め戻し材と支保工界面）が C-S-H（ケイ酸カルシウム水和物）の沈殿により、1 cm 程度の空隙が閉塞することが示されており⁽²⁶⁾、このような空隙は、埋め戻し材の膨潤や支保工由来のコンクリート系材料の溶脱成分に起因した二次鉱物の沈殿によって閉塞する傾向にあることが推定されます。このような力学的あるいは化学的なプロセスは、令和 3 年度において示した、埋め戻し材の変質を進展させる要因となる坑道上部の空隙が残存しにくい方向に作用する、すなわちコンクリート系材料の溶脱成分に起因した埋め戻し材の変質はより小さく、限定的であることを示唆しています。

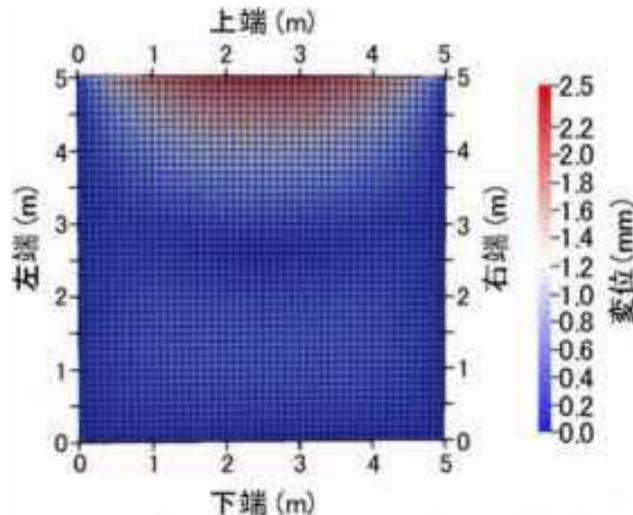


図 32 膨潤解析結果⁽²⁷⁾に追記

左右端および下端を固定端、上端を開放端としており、解析初期から 100 年時点の変位を示しています。図中の赤色の部分で 2.0 mm~2.5 mm の変位が生じています。

これまでに検討してきた、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するシナリオが成立する可能性について、ESL（証拠に基づく意思決定支援理論）を用いて評価しました。ESL は対象とする事項の確からしさや真偽の程度を評価する階層分析手法のひとつであり、命題の形式で設定した評価の対象事項をその論拠となる命題に細分して「論理の階層構造」を構築し、下位階層の命題の確からしさに基づいて評価の対象事項である最上位の命題（主命題）の確からしさを評価する手法です^(28, 29, 30)。本検討では、「コンクリート溶脱成分に起因して埋め戻し材が変質する」シナリオに対して、「コンクリート溶脱成分の影響を考慮しても坑道埋め戻し材の止水性は長期（10 万年以上）にわたって期待できる」を主命題とし、第二階層の下位命題として以下の 3 つを設定し、それぞれに対して ESL モデルを構築しました⁽²⁶⁾。

- ① 支保工との相互作用により埋め戻し材の周囲は常時拡散場となる
- ② 拡散場において埋め戻し材の変質が顕著とならない
- ③ 移流^{*73}場において埋め戻し材の変質が顕著とならない

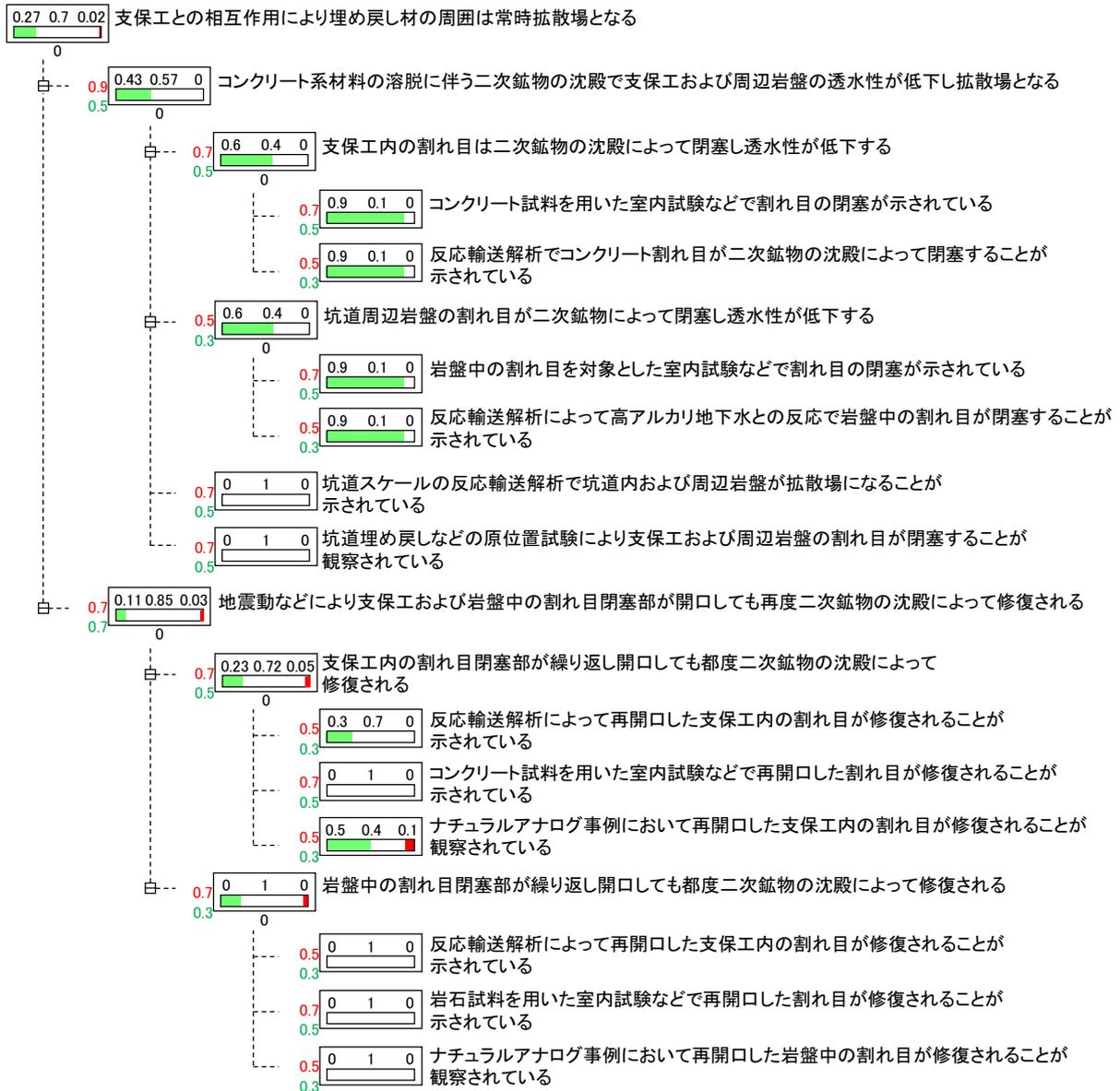
図 33 に「①支保工との相互作用により埋め戻し材の周囲は常時拡散場となる」を第二階層の命題とした場合の ESL モデルを示します。第三階層以降の命題を指示あるいは否定するためのデータが十分ではないものの、支保工と

*73：移流とは、岩盤などの中を地下水の流れに乗って、物質が移動していく現象のことです。

の相互作用により埋め戻し材の周囲は常時拡散場となること（評価値：0.27）は、これを否定する評価値（評価値：0.02）よりも高く、現時点では命題①を支持することは現時点では確からしいと評価できると判断できました。命題②、③についても、同様に確からしいと判断できることから⁽²⁶⁾、最終的に主命題を支持することは、確からしいと評価できます。ただし、図 33 に示す命題のうち、「坑道スケールの反応輸送解析で坑道内および周辺岩盤が拡散場になることが示されている」や、「岩盤中の割れ目閉塞部が繰り返し開口しても都度二次鉱物の沈殿によって修復される」など、不確実性が大きい命題が残されています。そのため、将来的にこれらの命題を支持あるいは否定の判断が可能な証拠を充足させることにより、本検討で設定したシナリオが成立することに対して、より蓋然性の高い評価が可能であると考えられます。また、このような一連の評価は埋め戻し材の仕様や埋め戻し材の施工方法を決定するための留意事項として活用され得ると考えられます。

埋め戻し材のベントナイトの流出現象に着目した室内試験では、埋め戻し材の施工初期において生じ得るベントナイトの流出に影響を及ぼす条件を把握することを目的に、令和 3 年度に設定した試験条件のうち、水質、注水位置に着目し、比較的長時間（最大 7 日程度）の通水試験を実施しました。試験条件を表 3 に、試験装置の概要を図 34 に示します。試験セル内にはベントナイト（クニゲル V1）を含水比 12%に調整した上で造粒したベントナイトペレット（粒径：15 mm）を充填しました。造粒したベントナイトペレットの含水比の平均値は 11.6%、乾燥密度の平均値は 1.96 Mg/m³でした。オーバーフロータンク内の水位と端部流入口の水頭^{*74}差を一定に保ちながら注水を行い、試験セルを介して流出口から流出した流量（流出流量）およびベントナイト濃度を測定しました。ベントナイト濃度は流出した水の濁度から算出しています。

*74：水の持つエネルギーを基準面からの水柱の高さに置き換えたものです。水の流れる速度が非常に遅い地下水では、運動エネルギーは無視できるほど小さいため、水が持つエネルギーは圧力エネルギーと位置エネルギーを考えれば良く、これらを水柱の高さに置き換えたものを、それぞれ圧力水頭、位置水頭と呼びます。圧力水頭と位置水頭を合わせたものを全水頭あるいは水頭と呼び、全水頭は長さの単位であるメートルで表します。



- p, p_1, p_2 上位命題もしくは下位命題が支持される評価値
- q, q_1, q_2 上位命題もしくは下位命題が否定される評価値
- u, u_1, u_2 上位命題もしくは下位命題が支持、否定のいずれでもないとする評価値
- D_{12} 下位命題の重複性を示す値(従属:0, 独立:1)
- w_{1a}, w_{2a} 上位命題の支持に対する下位命題の支持の十分性
- w_{1b}, w_{2b} 上位命題の支持に対する下位命題の支持の十分性

左の各命題の階層構造の場合、上位命題の評価値(p, q, u)はそれぞれ以下の式で算出される。

$$p = w_{1a}p_1 + w_{2a}p_2 - \rho_{12} \text{Min}(w_{1a}p_1, w_{2a}p_2)$$

$$q = w_{1b}p_1 + w_{2b}p_2 - \rho_{12} \text{Min}(w_{1b}p_1, w_{2b}p_2)$$

$$u = 1 - p - q$$

ここで、 ρ_{12a} および ρ_{12b} は以下の式で表現される。

$$\rho_{12a} = \frac{(1 - D_{12})(w_{1a}w_{2a}p_2)}{\text{Min}(w_{1a}p_1, w_{2a}p_2) + D_{12}}$$

$$\rho_{12b} = \frac{(1 - D_{12})(w_{1b}w_{2b}p_2)}{\text{Min}(w_{1b}p_1, w_{2b}p_2) + D_{12}}$$

図 33 ESL モデルによる評価の例 (「①支保工との相互作用により埋め戻し材の周囲は常時拡散場となる」場合) (26)

表 3 流出試験条件

ケース	D-1	S-1
試験用水	イオン交換水	人工海水 (マリンアート SF-1)
注水位置	端部	端部
水頭差 (cm)	10	10

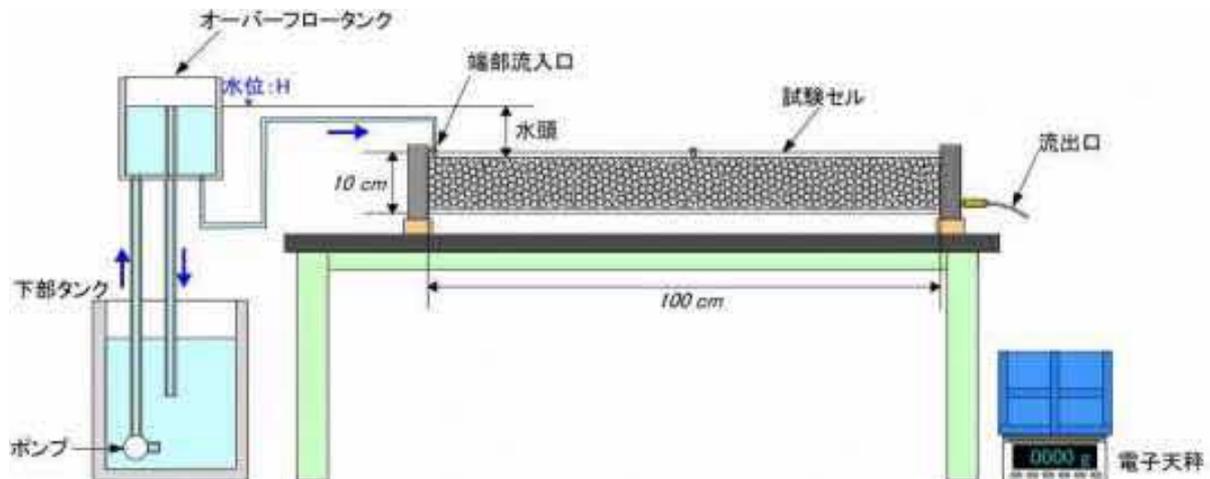
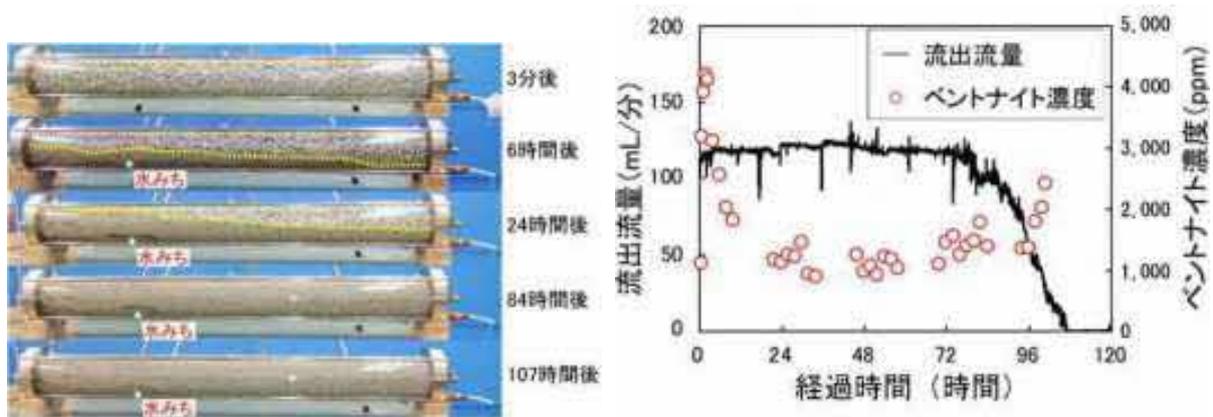


図 34 流出試験装置

青の矢印は試験用水の流れを示します。下部タンクのポンプによってオーバーフロータンクに水を供給し続けることで、オーバーフロータンク内の水位は一定に保たれ、結果、一定の水頭差で試験セルに水を流すことが可能となります。

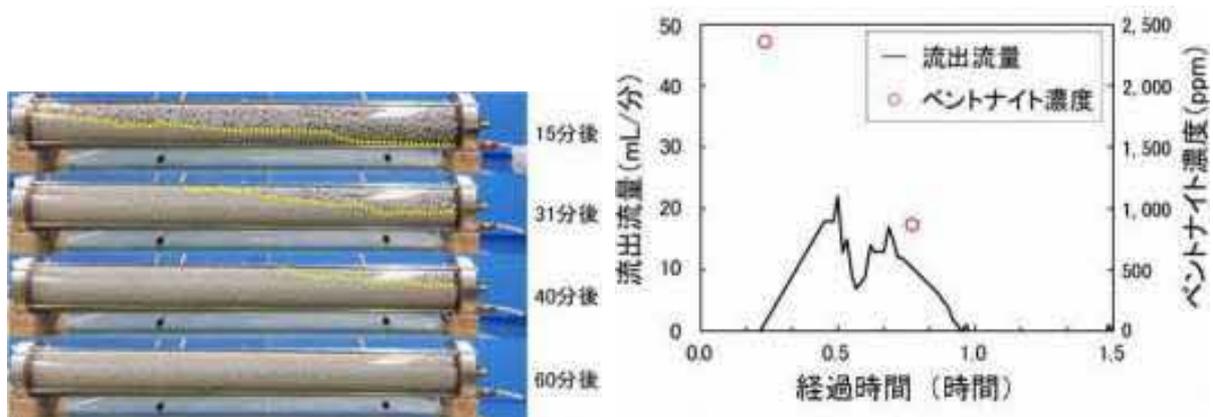
図 35 および図 36 にケース D-1 およびケース S-1 の流出試験結果を示します。流出が停止する（流出流量が 0 mL/min となる）までの時間が両試験条件で異なり、S-1 の方が早期に停止しています。これは各ケースでは注水する水の塩濃度が異なることによりベントナイトの挙動が異なることに起因していると考えられます。塩濃度が低い場合は、主にベントナイトの膨潤によって徐々に隙間が埋まっていく一方で、塩濃度が高い場合は膨潤が抑制されるものの、ベントナイトペレット表面からはがれた塊状のベントナイトが堆積することによって隙間が埋まっており、このプロセスに要する時間が膨潤によって隙間が埋まる速度よりも速いと推定されます。ただし、塊状のベントナイトは流速が大きい（水頭差が大きい）場合、隙間を埋めることなく下流側（本試験では流出口）まで輸送される可能性も考えられます。また、水頭差や塩濃度のみならず、注水位置による隙間が埋まるまでの時間や埋め戻し材の流出の程度は異なると考えられます。したがって、今後は複数の条件あるいは組み合わせた条件における試験結果⁽³¹⁾の評価も含め、埋め戻し材の流出に影響を及ぼす条件整理や影響度の評価を継続します。



(a) 試験中のセル内の浸潤の様子
黄色破線は推定される浸潤面で、時間の経過に伴い試験セル下部の水みちが拡大していることが確認できます。

(b) 流出流量とベントナイト濃度の経時変化

図 35 流出試験結果 (ケース D-1)



(a) 試験状況
黄色破線は推定される浸潤面です。

(b) 流出流量とベントナイト濃度の経時変化

図 36 流出試験結果 (ケース S-1)

② 埋め戻し材の設計評価に必要な緩衝材膨出抑制機能の把握

人工バリア定置の概念のひとつである処分孔竖置き方式においては、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します。この緩衝材と埋め戻し材の境界面では、緩衝材の膨潤圧と処分孔直上の埋め戻し材の自重相当の荷重が相互に作用しており、緩衝材の膨潤挙動はこれらの力学的な相互作用の影響を受けています (図 37(a))。

これまで、埋め戻し材の持つ緩衝材膨出抑制機能を評価するためのデータ取得を目的として、緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた縮尺模型試験を実施しています。図 37(b)に試験装置の概要を示します。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用いています。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、注水量は差圧計により計測しました。また、試験装置上部に設置した載荷板を介して埋め戻し材の上部から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 MPa の荷重を作用させました。緩衝材の吸水膨潤により生じる上部への変形量は試験装置頂部に設置した変位計により計測しました。さらに、試験容器側面に設置した土圧計や底部に設置した荷重計により膨潤圧を計測し、緩衝材の膨出挙動の把握を試みています。

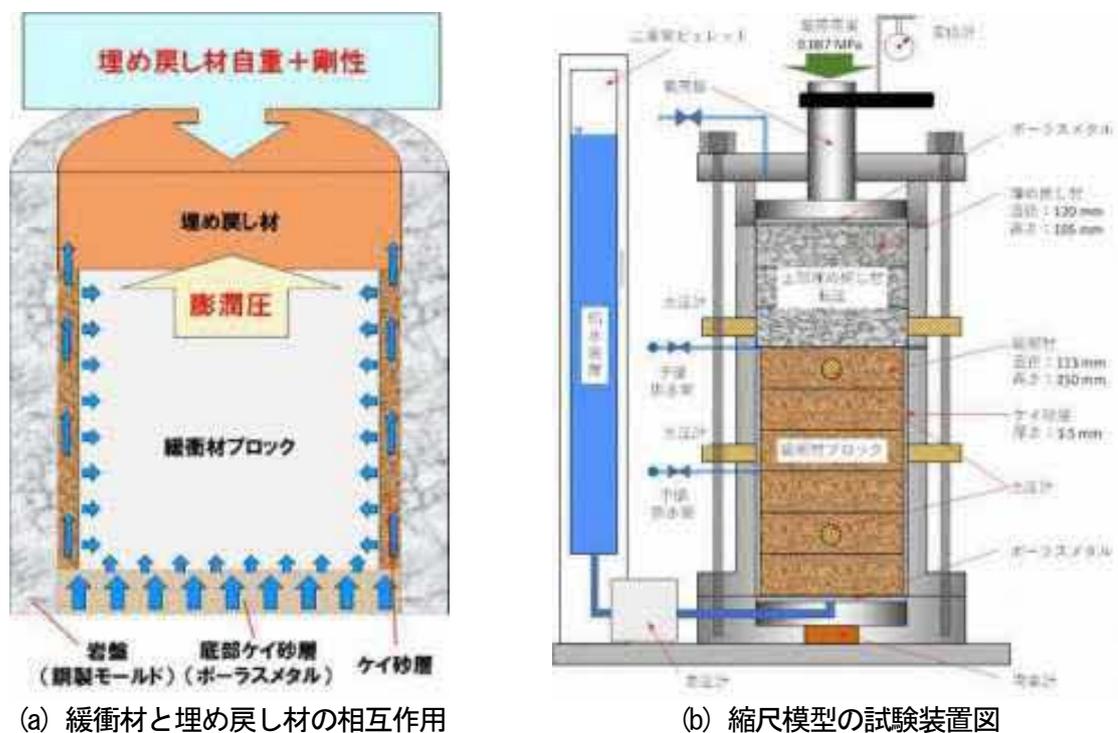


図 37 縮尺模型試験の概念図

令和 4 年度は、埋め戻し材の設置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ました（表 4）。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で作製しました。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 Mg/m^3 となるように締固めることにより作製し、ケース D-2 では乾燥密度 1.40 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料を充填しました。また、ケース D-3 では埋め戻し材を設置しませんでした (図 38)。

表 4 縮尺模型試験の試験条件

ケース	D-1	D-2	D-3
緩衝材	クニゲル V1 : 70%、ケイ砂 : 30%、乾燥密度 : 1.80 Mg/m ³		
埋め戻し材	締固め方式 クニゲル V1 : 40% 掘削土 (ズリ) : 60% (20 mm以下) 乾燥密度 : 1.40 Mg/m ³	ブロック方式 クニゲル V1 : 40% 掘削土 (ズリ) : 60% (20 mm以下) 乾燥密度 : 1.40 Mg/m ³	なし
上載荷重	0.087 MPa		なし

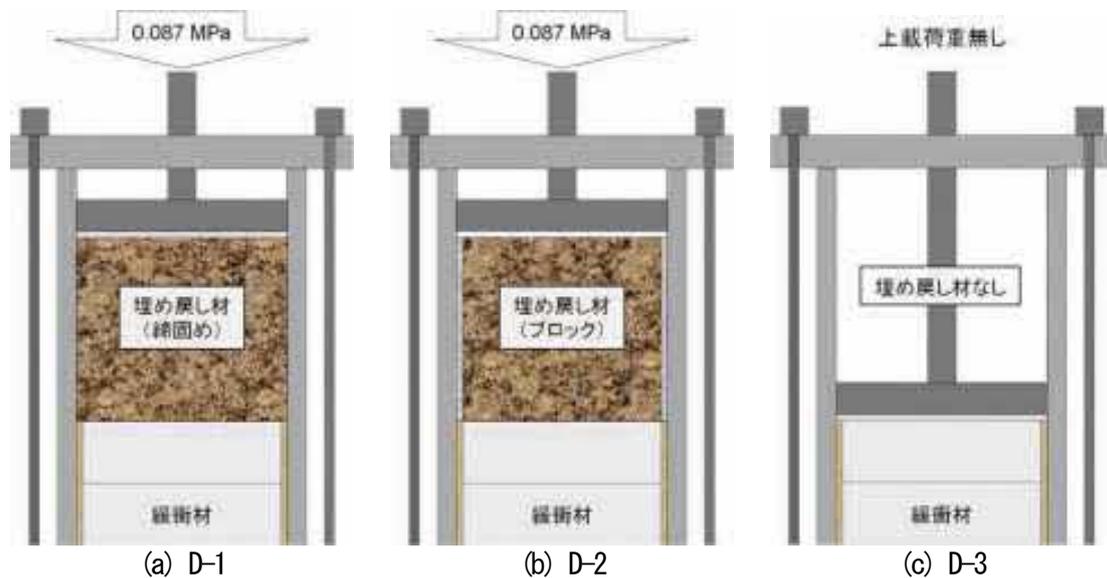


図 38 縮尺模型試験のイメージ

D-2 の埋め戻し材 (ブロック) と容器壁面との隙間 (3.5 mm) には、埋め戻し材 (クニゲル V1:掘削土 (ズリ) (0.85 mm 以下) =40%:60%、乾燥密度 : 0.8 Mg/m³、含水比 : 2.99%) を充填しています。

試験で計測した結果の例として、図 39 に緩衝材の上方への膨潤率の経時変化を示します。埋め戻し材の膨潤による変形がないものと仮定して、変位計で計測した変形量を緩衝材の縮尺模型の初期の高さで除して、緩衝材の上方膨潤率としました。埋め戻し材を設置した D-1 と D-2 では 30 日を経過するころまで上方膨潤率が緩やかに増加する傾向を示し、試験終了時の上方膨潤率の最大値は D-1 で 2.23%、D-2 で 5.98%となりました。D-2 の上方膨潤率が大きくなった理由としては、埋め戻し材ブロックと試験容器の間に粉末状の埋め戻し材料を充填しているため、締固めにより埋め戻し材を作製した D-1 よりも試験容器に近い部分の乾燥密度が低くなっていることが考えられます。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%でした。この結果より、乾燥密度 1.40 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ました。

また、図40に試験終了後の緩衝材の密度分布を示します。D-1とD-2では緩衝材の中心部分で乾燥密度が 1.50 Mg/m^3 程度となっています。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ます。D-1とD-2ともに不均一な乾燥密度分布を有していますが、2つの結果を比較すると、上方膨潤率の大きい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ました。一方、埋め戻し材を設置していないD-3では緩衝材の底部、側部および上部の乾燥密度が 1.00 Mg/m^3 程度と初期の 1.80 Mg/m^3 より顕著に低下している一方で、中心部分の乾燥密度は 1.40 Mg/m^3 程度を示し緩衝材の外側ほど乾燥密度が低くなる傾向を示しました。

以上の結果より、埋め戻し材を設置することで緩衝材の上方への膨潤が抑制され、その結果、膨潤後の緩衝材の乾燥密度の分布が埋め戻し材を設置しない場合と大きく異なることが確認できました。今後は、このような乾燥密度の分布となる原因について、これまでの室内試験の結果を整理し、埋め戻し材が緩衝材の膨潤挙動にどのような影響を及ぼすかについて、さらなる検討を実施します。

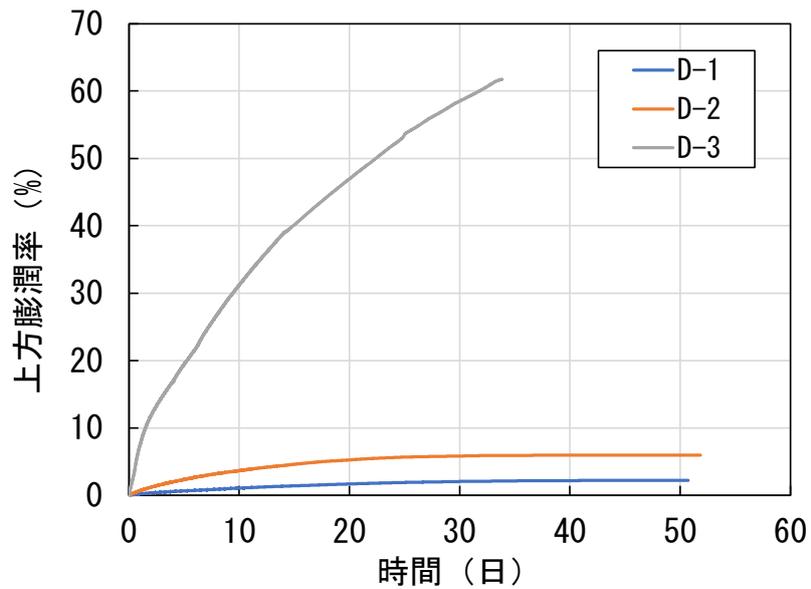


図 39 上方膨潤率の経時変化

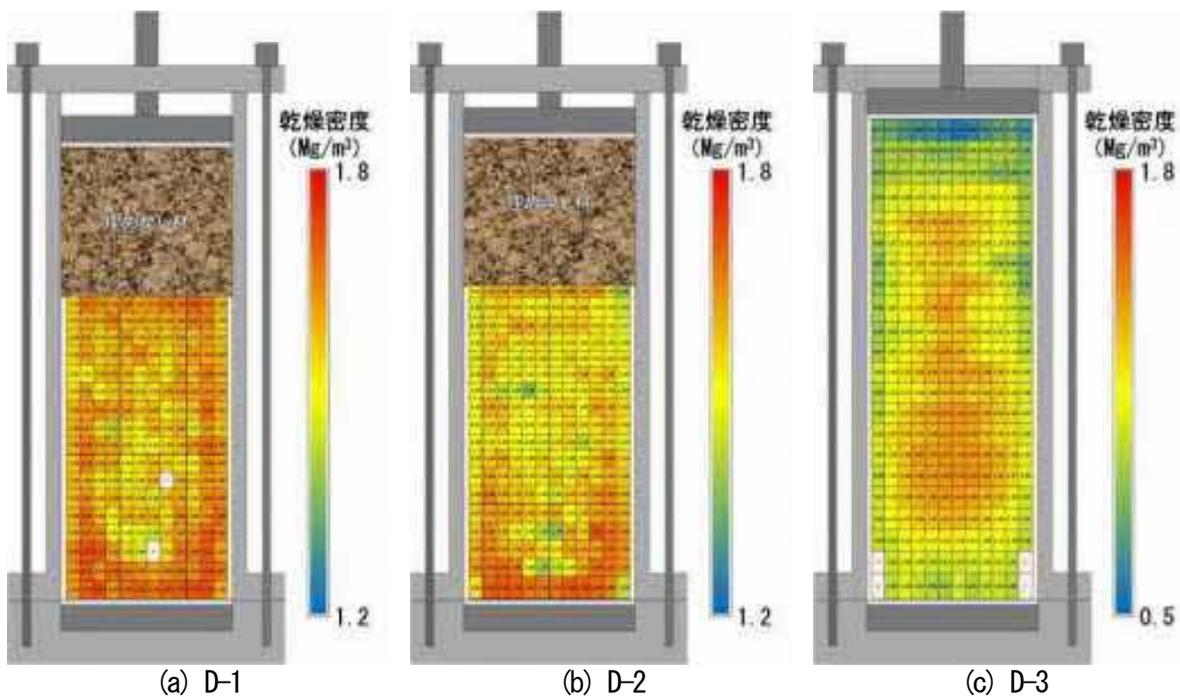


図 40 試験終了時の緩衝材の乾燥密度分布

③ 掘削損傷領域の連続性を遮断するための施工技術の実証

坑道の掘削で生じた掘削損傷領域（以下、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ます。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ます。ベントナイト系材料

を用いた止水プラグがどの程度の地下水移行抑制機能を持つかについて、試験坑道 3（図 2 参照）に止水プラグの切欠き部分を縮小して模擬した粘土止水壁を構築して EDZ シーリング試験を行っており、透水係数を指標として地下水移行抑制機能を評価しています。

令和 4 年度は、令和 3 年度に引き続き、止水プラグの切欠き部を模擬した粘土止水壁を対象とした透水試験を実施し、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ました。図 41 に EDZ シーリング試験の概要図を示します。令和元年度に試験坑道 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、ベントナイトのペレットを充填して粘土止水壁を構築しています。令和 4 年度は、粘土止水壁を構築して約 3 年が経過した時点で透水試験を実施しました。透水試験では、EDZ の領域を含むように設定した EDZ-1 孔の深度 0.22 m～1.61 m の区間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ました。図 42 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します。これまで透水試験で得られたデータは定常解析（Hvorslev の式⁽³²⁾）で評価していましたが、定常解析の結果の妥当性について確認するために、粘土止水壁設置後のデータについて、非定常解析（Jacob and Lohman の方法⁽³³⁾）による評価も実施しました。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 2×10^{-6} m/s の値を、構築後の透水係数は約 3×10^{-9} m/s の値を示し、粘土止水壁を構築することで試験領域内の透水性が低下することを確認しています。令和 4 年度の透水試験の結果、試験領域の透水係数は約 2×10^{-9} m/s の値を示しました。また、これらの透水係数の値は定常解析と非定常解析の両方で同じオーダーの値を示すことを確認しました。さらに、EDZ の領域よりも深いところにある健岩部を対象とした試験を EDZ-1 孔の深度 2.16 m～2.80 m の区間で実施しました。その結果、健岩部を対象とした試験領域の透水係数は約 7×10^{-9} m/s の値を示しました。

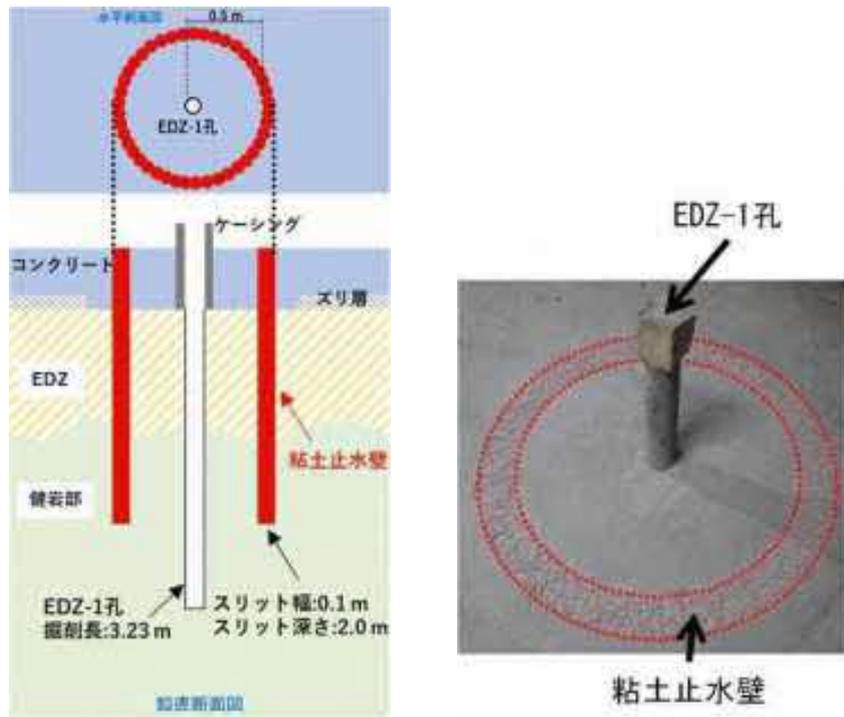


図 41 EDZ シーリング試験の概要図

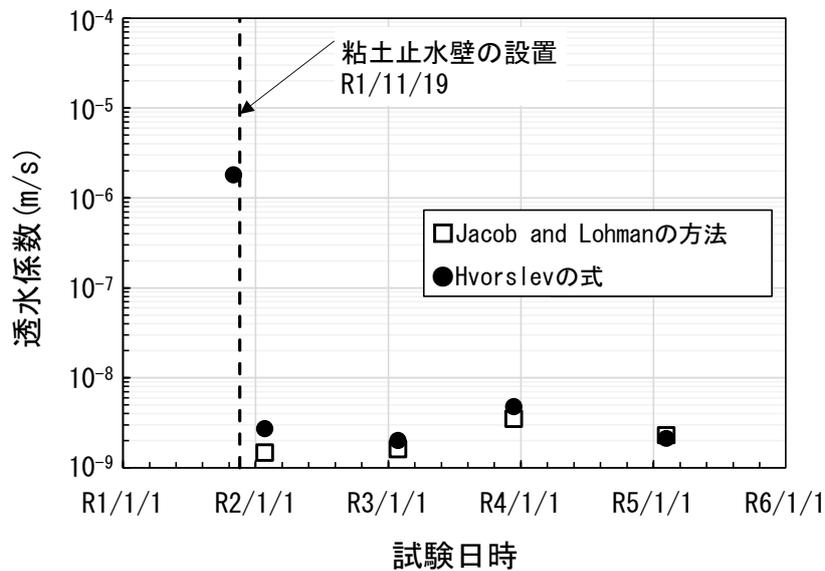


図 42 試験領域内の透水係数の経時変化

これらの結果より、粘土止水壁の施工により EDZ を含む領域の透水係数が健岩部と同程度まで低くなることが分かりました。加えて、粘土止水壁を構築して約 3 年が経過した時点においても、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ました。

また、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）になるよう施工する必要があります。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固められずに乾燥密度が低下する可能性があります。切欠き部のように狭隘な空間に対するベントナイト系材料の施工方法として、吹付け工法の適用性を確認するために、令和3年度には試験坑道2（図2参照）の側壁部において原位置吹付け施工試験を実施しました。原位置試験では、クニゲルV1とケイ砂を70:30の割合で作製した混合材料を乾燥密度 1.43 Mg/m^3 を目標に吹付けました。吹付け完了後には、吹付けたベントナイトの膨潤や崩落などを防止する目的でゴムマットと木板を設置して表面を養生しました（図43）。

令和4年度は、原位置吹付け施工試験から約1年が経過した時点で吹付けたベントナイトの試料採取を行い、吹付けベントナイトの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ました。

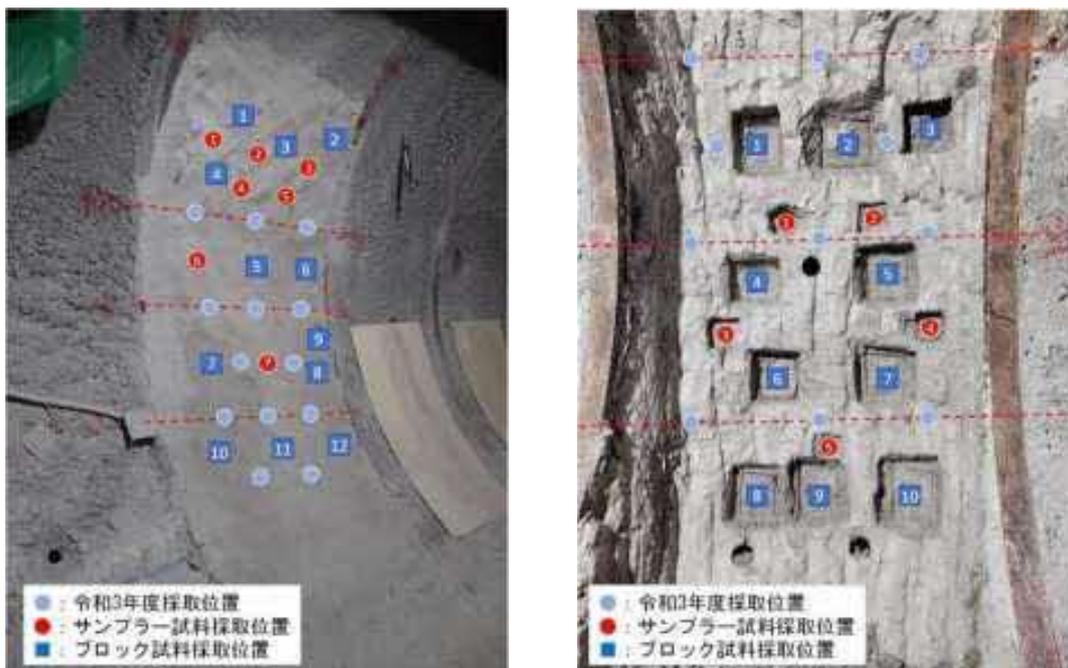


図 43 吹付け試験施工後の養生

試料採取は、吹付け表面および表面から50 cm程度内側（以下、内面）の2つの断面で実施しました。採取方法は、容積が 50 cm^3 のステンレス製の円筒形サンプラーを用いる方法と1辺が10 cm程度のブロック状に試料を切り出す方法の2種類とし、以下、それぞれの方法で採取した試料を、サンプラー試料およびブロック試料と呼びます。サンプラー試料は表面で7か所、内面で5か所を採取し、ブロック試料は表面で12か所、内面で10か所を採取し

ました。図 44 に、吹付け施工時に試料を採取した場所と合わせて、それぞれのサンプリング位置を示します。ひとつのサンプラー試料から 1 試料、ひとつのブロック試料から 3 試料を採取して、乾燥密度および含水比の測定を実施しました。乾燥密度の算出には、サンプラー試料では試料の寸法を測る方法（ノギス法）を、ブロック試料ではパラフィンと呼ばれるロウで試料の表面を覆って水中で体積を測る方法（パラフィン法）を用いました。

図 45 に採取した試料の含水比と乾燥密度の関係を示します。表面から採取した試料の含水比はサンプラー試料で 10.41%～23.04%の範囲にありその平均値が 16.01%、ブロック試料で 8.77%～20.43%の範囲にありその平均値は 14.62%を示しました。一方、令和 3 年度採取した試料の含水比の平均値は 20.46%でした。試料採取時にゴムマットと木板の養生を取り外した際に、吹付けたベントナイトの表面部分にひび割れが観察された場所があったことから、坑道内の換気による乾燥の影響により含水比が低下したと考えられます。乾燥密度については、サンプラー試料で 1.544 Mg/m³～1.717 Mg/m³の範囲にあり平均値が 1.622 Mg/m³、ブロック試料で 1.528 Mg/m³～1.691 Mg/m³の範囲にあり平均値が 1.622 Mg/m³でした。令和 3 年度の乾燥密度の平均値は 1.579 Mg/m³であり、表面部分では吹付けベントナイトが乾燥した時に収縮することで乾燥密度が増加した可能性が考えられます。



(a) 表面の試料採取位置

(b) 内面の試料採取位置

図 44 吹付けベントナイトの試料採取位置

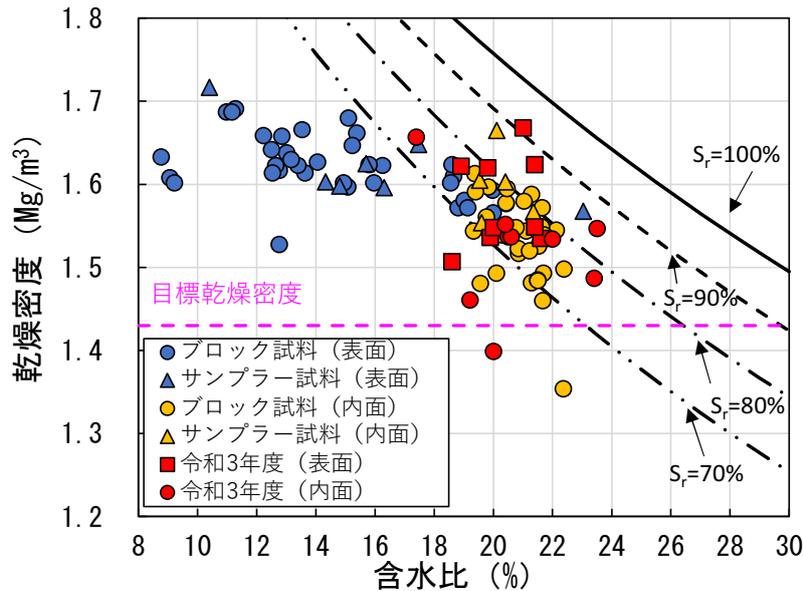


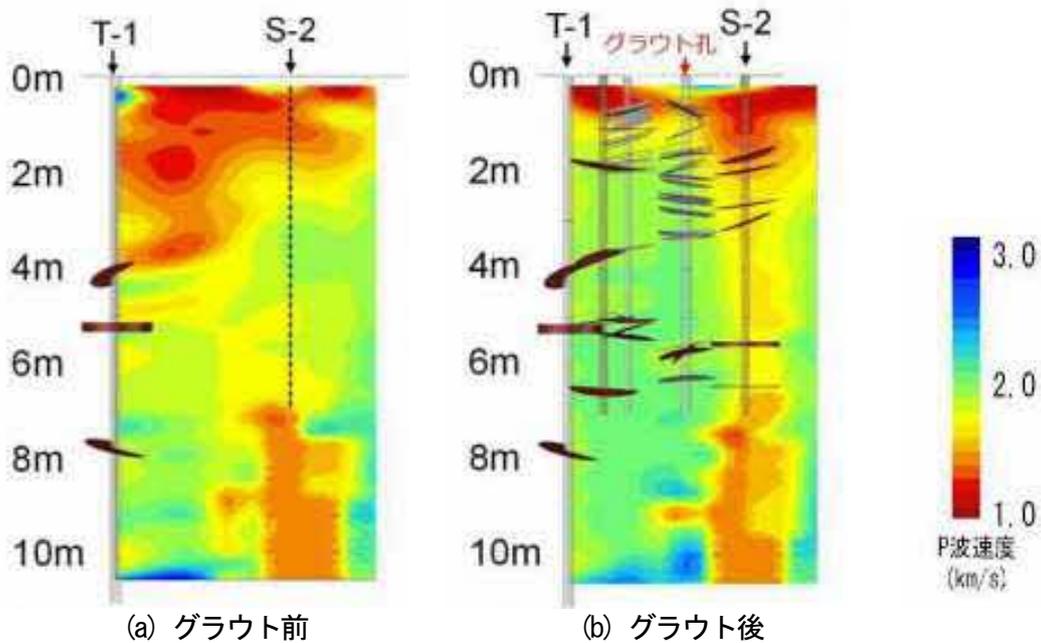
図 45 含水比と乾燥密度の関係

図中の S_r は飽和度を表しています。令和 3 年度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ります。また、坑道の換気の影響を受けていないと考えられる、内面から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ります。

一方、内面部分の含水比は、サンプラー試料で 19.53%~21.35%の範囲にあり平均値が 20.20%、ブロック試料で 19.33%~22.38%の範囲にあり平均値は 20.91%でした。令和 3 年度に採取した試料の含水比の平均値は 20.78%であり、表面部分とは異なり時間経過による含水比の変化は確認できませんでした。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り、ベントナイトが有する低い透水性能が発揮されていると考えられます。乾燥密度については、サンプラー試料で 1.554 Mg/m^3 ~ 1.665 Mg/m^3 の範囲にあり平均値が 1.599 Mg/m^3 、ブロック試料で 1.354 Mg/m^3 ~ 1.613 Mg/m^3 の範囲にあり平均値が 1.531 Mg/m^3 でした。令和 4 年度の乾燥密度の平均値は、令和 3 年度の乾燥密度の平均値である 1.523 Mg/m^3 よりも大きな値を示しましたが、含水比がほとんど変化していないことから、施工時のばらつきによる差であると考えられます。

以上に示したように令和 4 年度は広い範囲から試料を採取し、吹付け全体で目標とする乾燥密度 1.43 Mg/m^3 を達成していることを確認しました。

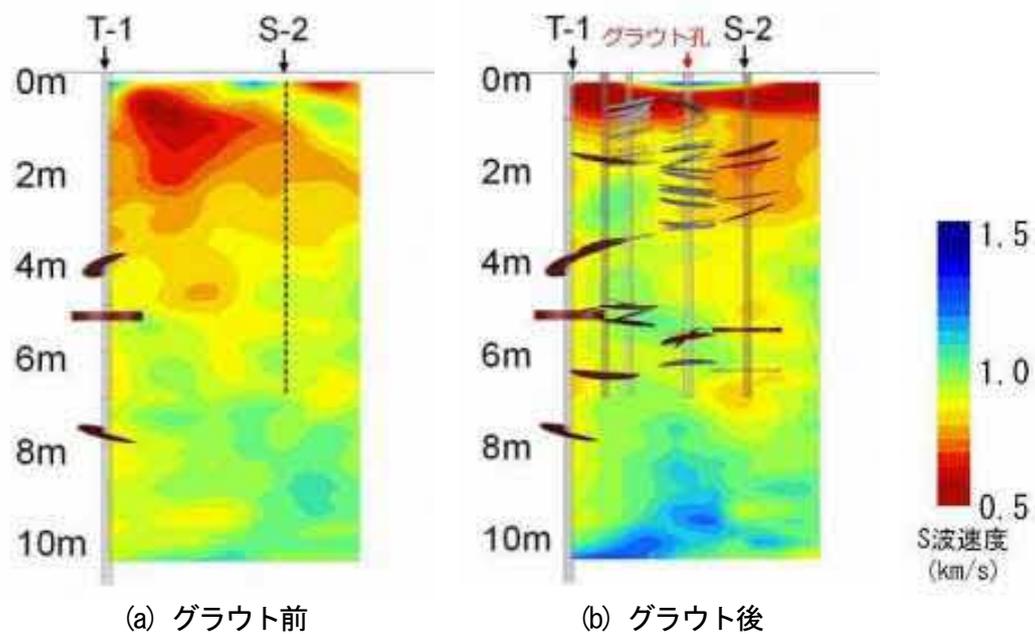
今後は、試験坑道 3 の底盤部で実施してきた透水試験を継続します。また、止水プラグの設計に対する考え方を提示することを目的として、坑道周辺岩盤の透水係数や力学的性質などから実際に施工可能な止水プラグの形状や材



(a) グラウト前

(b) グラウト後

図 47 グラウト前後における P 波速度分布



(a) グラウト前

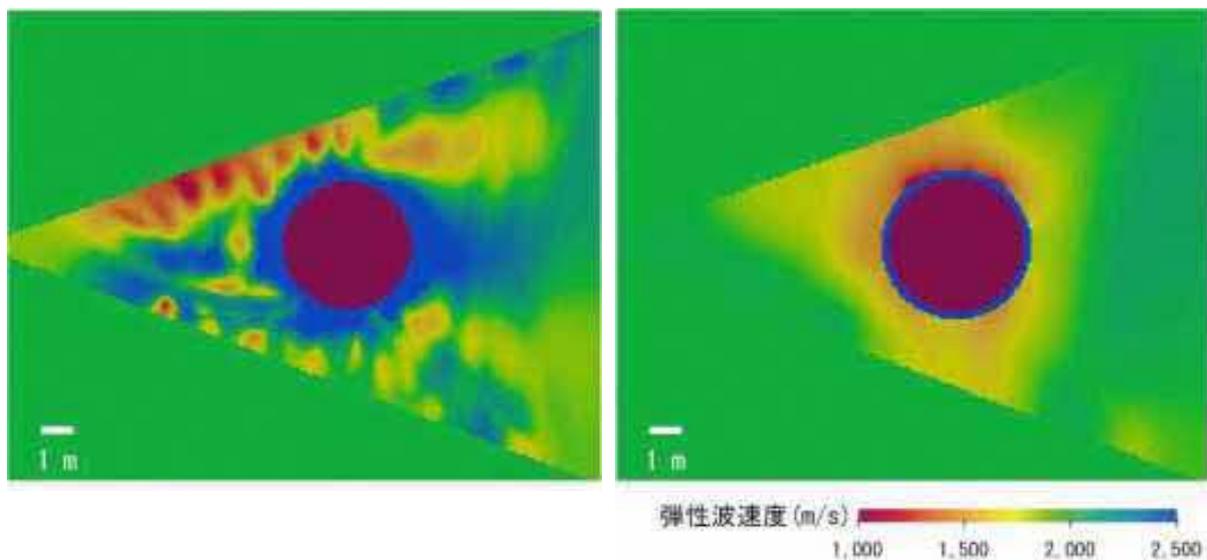
(b) グラウト後

図 48 グラウト前後における S 波速度分布

P 波速度は岩盤の強度および岩石の間隙に含まれる流体の影響を、S 波速度は岩石の強度を強く反映することが知られています。したがって、P 波および S 波の上昇は、岩石の強度が改善していることを反映しており、これらの結果より弾性波トモグラフィによりグラウトの効果を評価できることを確認しました。

解析手法の改良では、EDZ を対象とした坑道周辺における物理探査手法の

高度化を目的として、吹付けコンクリートの影響や支保部材の影響を考慮した弾性波トモグラフィの解析手法を開発しました。坑道壁面周辺に施工された吹付けコンクリートなどの支保は、その素材の剛性の高さから物理探査で使用する弾性波を歪めてしまうため、支保の存在を考慮しない既存の解析手法では、坑道壁面周辺に分布すると予測される弾性波速度の低い EDZ を検出することができませんでした。そこで、支保の情報を解析時に事前に与えることにより、その影響を解析的に除去する弾性波トモグラフィの解析手法を開発しました。図 49 はその手法を用いた結果の一例で、350m 調査坑道の試験坑道 2 における調査結果です。吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合（図 49(a)）には、坑道周辺では吹付けコンクリート自体を検出してしまいうため、高速度領域（青色）のみが検出されていましたが、吹付けコンクリートの影響を考慮した場合（図 49(b)）には、EDZ に該当する低速度領域（赤色）を検出することができました。



(a) 吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合の結果 (b) 吹付けコンクリートの影響を考慮した場合の結果

図 49 吹付けコンクリートの影響を考慮した場合と考慮しない場合の解析結果の比較

また、既存の弾性波トモグラフィの調査結果を対象として、経時変化の評価を目的としたタイムラプス解析を実施しました。タイムラプス解析では、推定する弾性波速度の時間変化を考慮しつつ、過去に繰り返し取得されたデータを同時に解析することで、より精確に弾性波速度の経時変化を捉えるこ

とができます。図 50 は試験坑道 2（図 2 参照）における既存の調査結果に対してタイムラプス解析を行った結果です。これらの結果からは、坑道掘削直後に坑道周辺に EDZ に該当する低速度領域（赤色）が出現するものの、その後は、弾性波速度に大きな変化はなく、該当期間中において EDZ の拡大は認められませんでした。

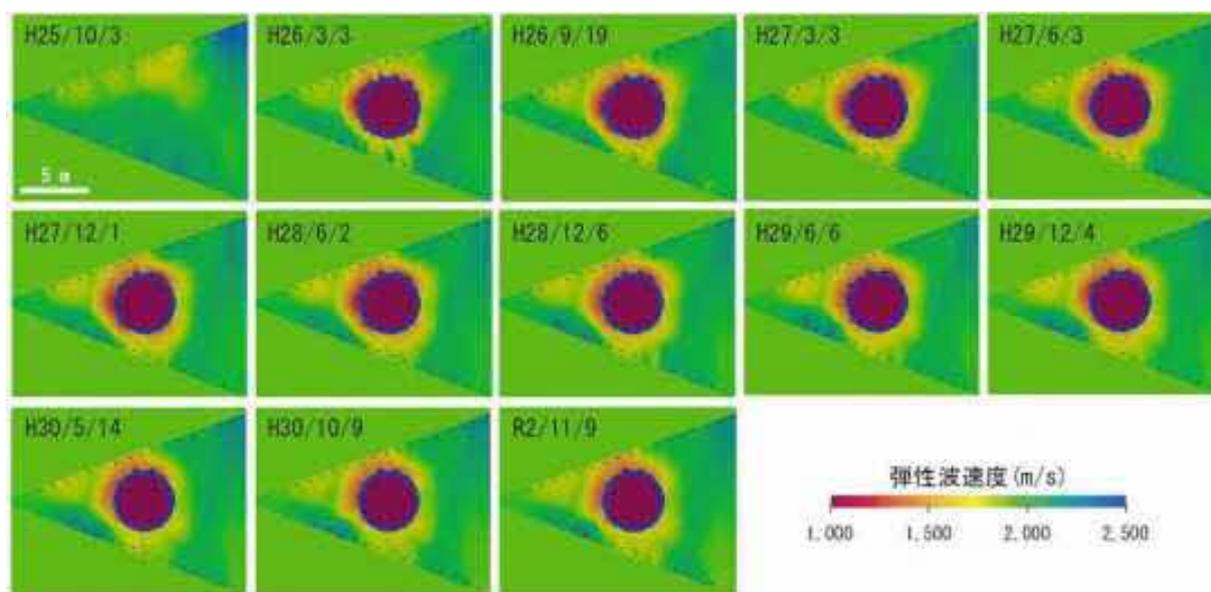


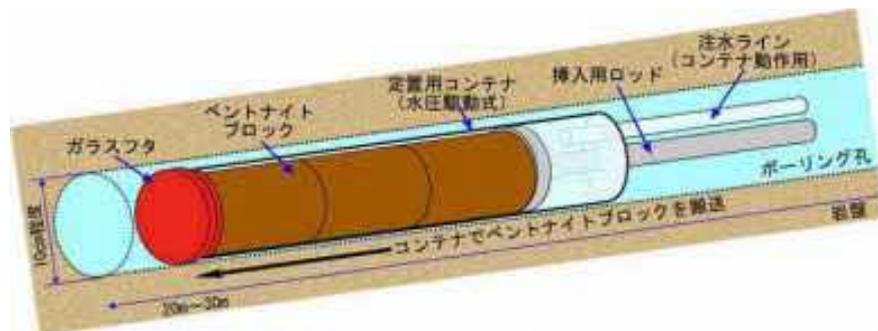
図 50 タイムラプス解析による弾性波速度の経時変化

⑤ 坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の実証

処分場を埋め戻す際には、地下施設の建設のために地上から掘削される調査ボーリング孔が地上へ直結する卓越した水みちにならないよう適切な方法で閉塞することが求められています。また、地下施設の建設時には坑道内からボーリング孔が掘削される場合もあり、これらのボーリング孔が割れ目などと連結して放射性物質の移行の短絡経路となることや、地層処分システムの長期安全性に影響を及ぼすことのないように、適切な方法で閉塞することが求められています。

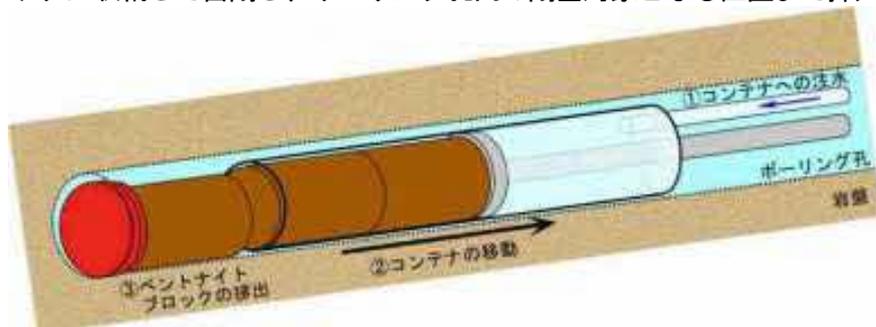
坑道内から掘削された水平に近いボーリング孔では、閉塞作業の際に重力以外の駆動力によって目的の閉塞位置まで閉塞材料を輸送することが必要となります。また、日本のように地下水が豊富に存在する地質環境では、地下空間へ向かう方向にかかる動水勾配が大きい地下環境において、ボーリング孔への地下水流入量が比較的多い中での作業が想定されるため、高水圧、高湧水量条件下でボーリング孔を閉塞可能な技術が必要となります。

そこで、坑道内から水平に近い向きに掘削されたボーリング孔を対象に、地下深部の地質環境条件を考慮した上で閉塞する材料仕様の考え方を整理し、ボーリング孔にベントナイトブロックを設置する方法（図 51）を検討しています。令和 4 年度は、ボーリング孔内にベントナイトブロックを設置する具体的な手順と設置したベントナイトブロックの膨潤の状況を、地下施設に掘削した水平ボーリング孔を用いた原位置試験により確認しました。



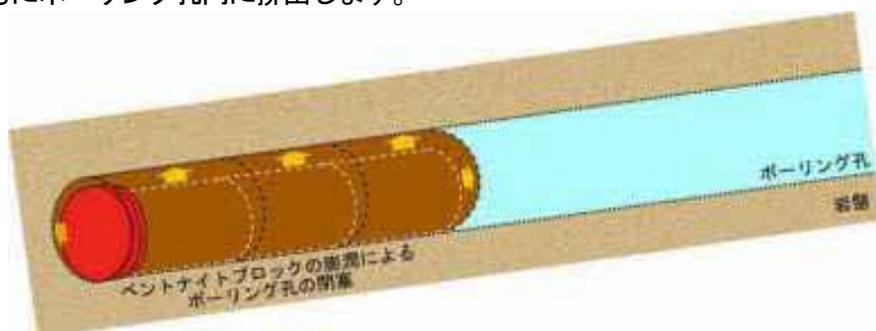
(a) ベントナイトブロックの搬送

設置作業中にベントナイトブロックが地下水と接触することを防ぐために、ベントナイトブロックを定置用コンテナに収納して密閉し、ボーリング孔内の閉塞対象となる位置まで挿入します。



(b) ベントナイトブロックの排出

注水ラインを通じてコンテナへ注水することでコンテナを移動させ、ベントナイトブロックをガラスフタとともにボーリング孔内に排出します。



(c) 膨潤によるボーリング孔の閉塞

ボーリング孔内に排出されたベントナイトが地下水と接触して膨潤することで、ボーリング孔が閉塞します。

図 51 ボーリング孔閉塞の原位置試験の概念図

原位置試験を実施するためのボーリング孔は孔径を約 100 mm として、250m 調査坑道の西立坑側第 1 ボーリング横坑から北側に向かって掘削し、換気立坑側第 1 ボーリング横坑に貫通させました (図 52)。ボーリング孔の掘削後にはコア観察と孔壁画像の観察により割れ目の頻度を調査してベントナイトブロックの設置区間を検討しました。コア観察の結果から判断した割れ目の頻度分布を図 53 に示します。単位長さ (1 m) 当たりのせん断割れ目と引張割れ目の本数の合計は 0~11 本/m の範囲となり、平均は 6 本/m でした。また、これらの観察結果より西立坑側第 1 ボーリング横坑から 22 m~29 m の区間で割れ目の頻度が低い区間が連続していることが分かりました。ボーリング孔の閉塞の観点ではベントナイトを割れ目が少ない健岩部に定置する考え方が示されていることから⁽³⁴⁾、本試験では割れ目の頻度が低い区間のうち、西立坑側第 1 ボーリング横坑から 22 m~26 m をベントナイトブロックの設置区間としました。

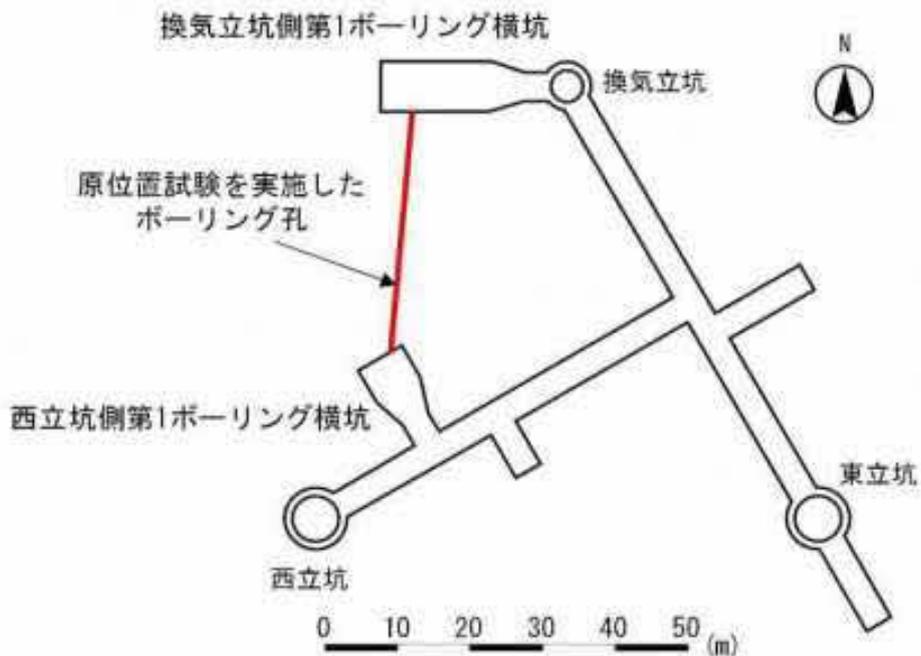


図 52 ボーリング孔閉塞試験の実施場所 (250m 調査坑道)

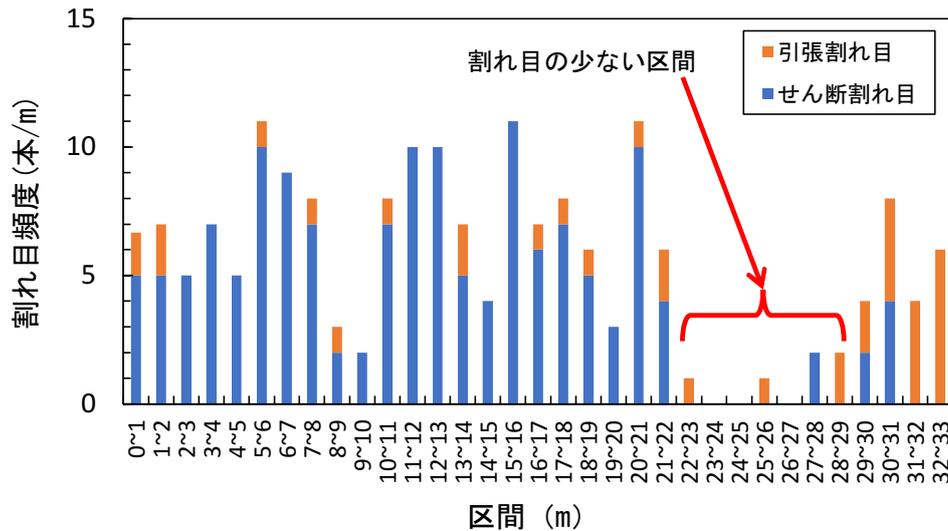
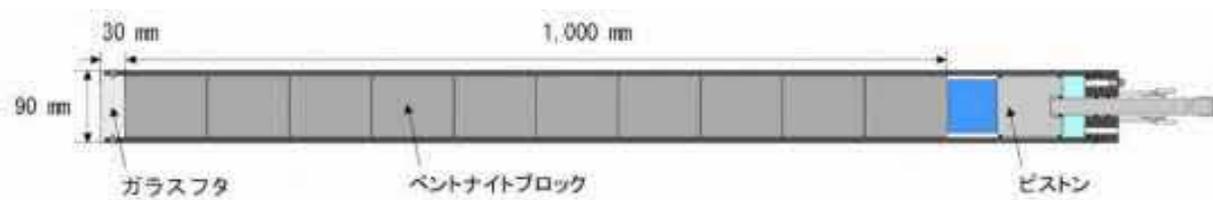


図 53 コア観察による割れ目の頻度分布

ベントナイトブロックの設置に用いる定置用コンテナは、直径 75 mm、長さ 100 mm のベントナイトブロックを 10 個収納できる構造としました (図 54)。ベントナイトブロックの設置区間周辺の岩盤の透水係数を把握する透水試験を実施し、ベントナイトブロックの透水係数を設定しました。透水試験の結果、設置区間の周辺の割れ目の少ない健岩部の透水係数は 10^{-10} m/s のオーダーであったため、ベントナイトブロックの透水係数の値を健岩部と同程度である 10^{-10} m/s のオーダーと設定して、その値を確保できるようにベントナイトブロック作製時の乾燥密度を 1.60 Mg/m^3 としました。



(a) 定置用コンテナの概略図



(b) ガラスフタ



(c) 定置用コンテナの外観

図 54 ベントナイトブロック定置用コンテナ

ベントナイトブロックの設置は西立坑側第1ボーリング横坑から22 m～26 mの4 mの区間を対象とし、設置作業を4回実施することとしました。設置作業中の状況を図55に示します。このとき、ボーリング孔への地下水流入量が比較的多い状況を模擬するため、ボーリング孔内に流量100 mL/minで模擬地下水を注入しながら設置作業を実施しました。1回の設置作業は、以下の手順で行いました。まず、ベントナイトブロックを収納した定置用コンテナに挿入用ロッドを接続して、孔内に挿入します。挿入は電動ウインチを用いて行い、挿入用ロッドを順次継ぎ足してボーリング孔内の所定の位置まで押し込みます。挿入位置は接続したロッドの長さの合計から確認しました。その後、定置用コンテナに注水ラインから注水してベントナイトブロックを排出し、挿入用ロッドが1 m孔口から押し戻されたことを確認することで、ブロックの排出が完了したと判断しました。その後に電動ウインチを用いて定置用コンテナを回収しました。この作業を4回繰り返し4 m分のベントナイトブロックを定置しました。1回の設置作業に要した時間は約40分～60分であり、4回の設置作業が終了した結果、設置区間は西立坑側第1ボーリング横坑から21.76 m～26.0 mとなり所定の区間へベントナイトブロックが設置できていることを確認しました。

以上の結果より、実際の岩盤中に掘削した水平に近いボーリング孔に対して、孔口から20 m以上奥の位置にベントナイトブロックを設置できることが示され、検討を進めてきたコンテナを用いた設置方法の原位置での適用性を確認しました。

ベントナイトブロックの設置後には、ブロックの膨潤状況を確認するために模擬地下水を継続して注水を行い、注水に伴う間隙水圧の経時変化などを計測しました。膨潤状況を確認した際のボーリング孔の状況を図56に示します。ベントナイトブロックが膨潤して注水ラインに干渉することを防ぐために、20.67 mから21.76 mの区間にはケイ砂を充填しています。西立坑側第1ボーリング横坑側から100 mL/minの流量で模擬地下水の注水を40日間行いました。模擬地下水の注水期間中は、換気立坑側第1ボーリング横坑側からチューブ（内径4 mm）を通して排水できる構造として、注水流量、排水流量、ケイ砂充填区間（以下、西側）の間隙水圧およびベントナイトブロック端部と250m換気立坑側第1ボーリング横坑側のパッカー間（以下、北側）の間隙

水圧を測定しました。

注水期間中の測定結果を図 57 に示します。試験開始初期には排水にボーリング孔内の遊離ガスが混ざっていた影響で排水流量の計測値が大きく乱れていました。気液分離管を設置して計測値が安定した 15 日目以降の排水流量は 120 mL/min となり、ボーリング孔内への地下水の湧水の影響で排水流量が注水流量より多くなっていることを確認しました。



(a) 挿入用ロッド



(b) 1 m 分のベントナイトブロック (10個)



(c) 定置用コンテナの挿入作業



(d) 挿入用ロッドの長さの確認

図 55 ベントナイトブロック設置作業の状況

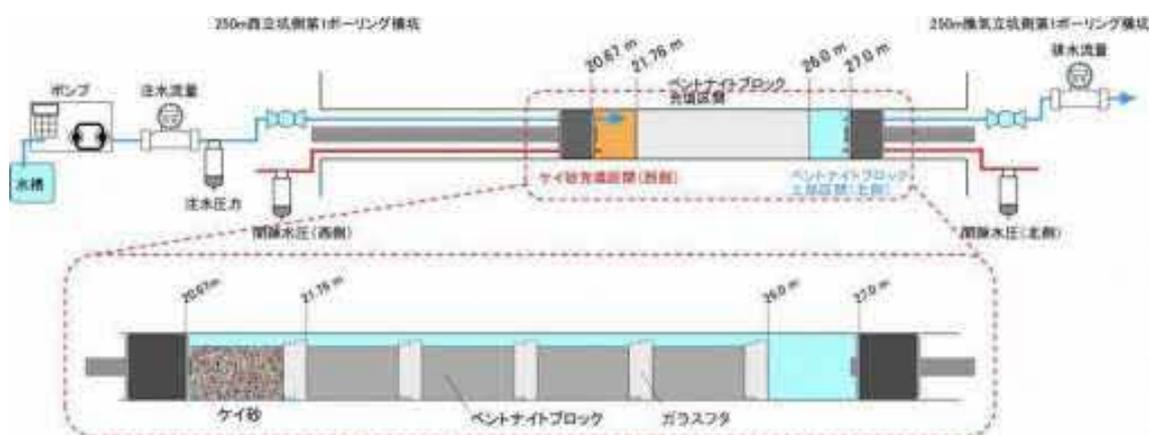


図 56 膨潤状況の確認時のボーリング孔の状況

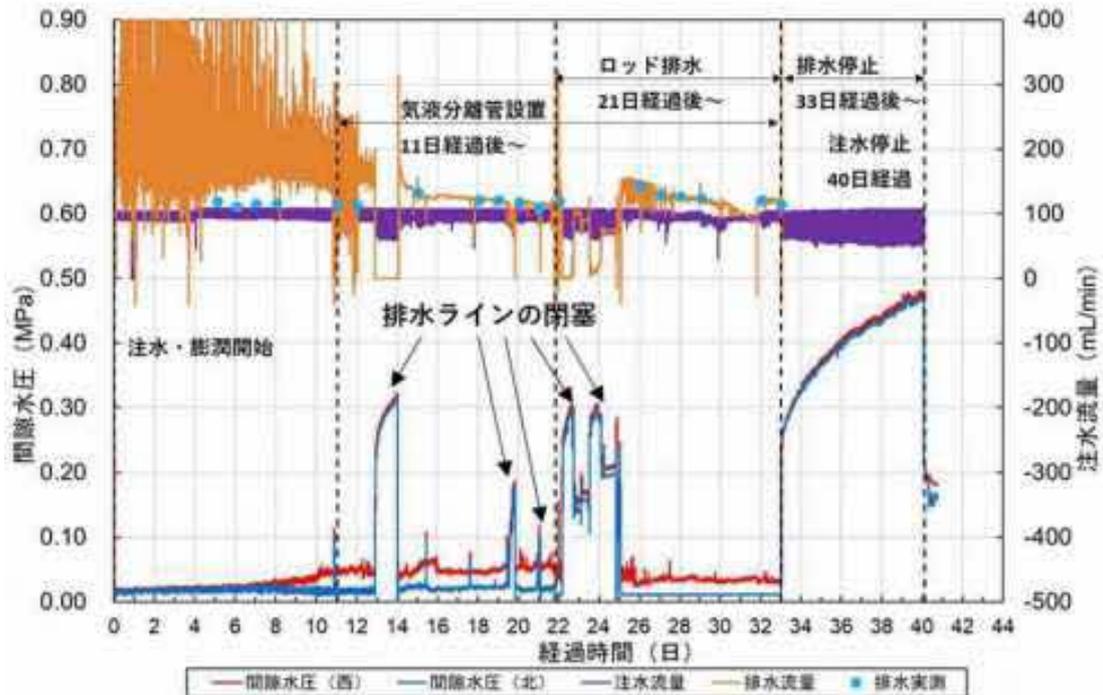


図 57 注水期間における流量および間隙水圧の経時変化

西側の間隙水圧は試験開始後 8 日目ごろから上昇し、11 日目以降は北側よりも間隙水圧が約 0.04 MPa 高い状態が維持されました。西側と北側で水圧差が生じた理由は、ベントナイトブロックが膨潤することによりボーリング孔とベントナイトブロックの隙間が狭くなり、西側から北側への水の流れに圧力損失が生じたことが考えられます。その後もベントナイトブロックの膨潤が進行することで西側と北側の圧力差が大きくなることが想定されましたが、13 日目ごろから模擬地下水の流れにより流出したベントナイトが排水ラインを閉塞して、急激に間隙水圧が上昇する事象が度々見られました。その後、22 日目ころに排水ラインをパッカーのロッド（内径 36 mm）に変えることで、25 日目以降には排水ラインの閉塞は解消されましたが、西側と北側の水圧差は約 0.04 MPa のまま変化は見られませんでした。33 日目以降は排水ラインを閉じた状態で注水を継続して、ベントナイトブロックの膨潤を促進させることを試みましたが、西側と北側の間隙水圧はおおむね同一の挙動を示し、さらなるボーリング孔の閉塞の兆候は確認できませんでした。今回のように 100 mL/min の一定流量で模擬地下水が流れ続ける試験条件において、40 日間ではベントナイトブロックからベントナイトが流出することにより膨潤が進まなかったため、注水期間中にボーリング孔の閉塞には至らなかったと考え

られます。つまり、ボーリング孔へ流入する地下水の流量がある程度多い場合には、設置したベントナイトブロックを短期間で膨潤させる工夫が必要となることが課題として挙げられました。

今後は、これまでに原位置試験などで具体的な手順などを確認したベントナイトブロックを設置する方法について、試験で得られたデータを整理して、その適用性や技術的な課題点について取りまとめを行う予定です。

(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

経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（令和 4 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^{*75}と協力して緩衝材流出試験を実施しました。

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ます。この方法では、処分孔の孔壁と緩衝材の間に数 cm の隙間ができます。日本で一般的に想定され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地下水が流れ込むこと（孔内湧水）が想定されます。地下の周囲の水位が処分孔の上端よりも高い状態であれば、流れ込んだ地下水は隙間を満たした後も、上向きの流れが継続する可能性があります。緩衝材の主成分であるベントナイトは、地下水が浸み込むことにより膨潤し、岩盤と緩衝材の間や緩衝材とオーバーパックの間の隙間を埋めること（自己シール性）が期待されています。しかし、自己シール性が発揮されるまでの膨潤過程では、表面付近の密度の低下やゲル化する部分に孔内湧水の流れによって緩衝材が削り取られる可能性や、残された水みちを介して削り取られた緩衝材が処分孔から外に排出される可能性があり、その結果、緩衝材に期待している自己シール性が十分に発揮されないことが懸念されています。

令和 3 年度までに、試験坑道 5（図 2 参照）の試験孔において、原位置での緩衝材流出試験として、岩盤と緩衝材の隙間に何も充填しない「隙間未充

*75：公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターは、放射性廃棄物処理処分の専門研究機関として設立されました。現在は、原子力発電環境整備機構を通して積み立てられる最終処分積立金の管理などを行う資金管理業務も実施しています。

「ケイ砂充填ケース」について 4 か月間の試験を行いました。その結果、湧水量が 0.4 L/min 程度の自然湧水環境では初期に緩衝材の流出が見られるものの、緩衝材が膨潤し隙間が埋まるにしたがって上部に排水される水の量は減少し、約 40 日後には完全に閉塞して緩衝材が上部に流出しなくなることを確認しました⁽¹⁹⁾。

令和 4 年度は、岩盤と緩衝材の間の隙間にケイ砂を充填する「ケイ砂充填ケース」に対して、5 か月間の緩衝材流出試験を行い、緩衝材の流出濃度が少ない状態が維持される流出挙動の長期的な継続性の確認、および孔内湧水量と緩衝材流出量の関係を把握しました。また、「ケイ砂充填ケース」に関する室内試験を実施し、原位置試験の結果と合わせて流出量の評価方法を検討しました。

緩衝材流出試験は、これまでと同様に試験坑道 5 の試験孔で実施しました。試験孔からの排水中の緩衝材の流出量（ベントナイト濃度）、緩衝材に地下水が浸潤して発生する膨潤圧、試験孔からの湧水量などを計測しました。図 58 に緩衝材流出試験設備（約 1/4 スケールの縮尺モデル）の概要を示します。

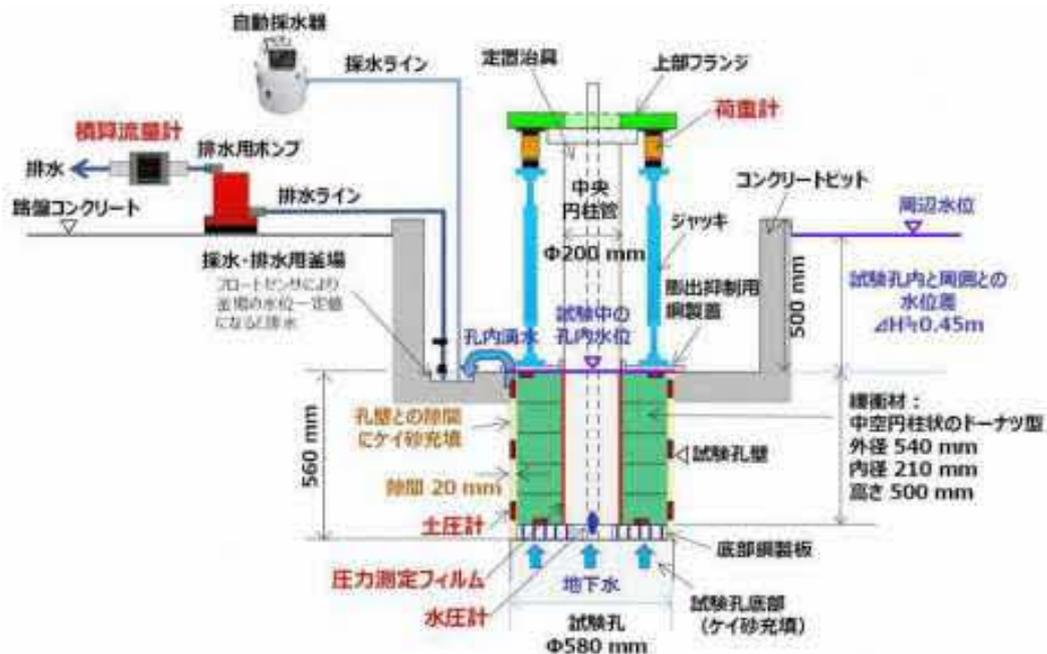


図 58 原位置での緩衝材流出試験の設備の概要（ケイ砂充填ケース）

図 59(a) に緩衝材の流出量の計測結果を、図 59(b) に流量および膨潤圧の測定結果を「隙間未充填ケース」の結果と合わせて示します。地下水はケイ砂

充填領域内の隙間を流れ、その流量は緩衝材の膨潤圧が試験孔の壁面にかかることによって岩盤中の亀裂が開くことの影響や、地震の影響により増加を続けました。しかしながら、緩衝材の流出量（ベントナイト濃度）は、「隙間未充填ケース」に比べて低い状態で維持されることを確認しました。

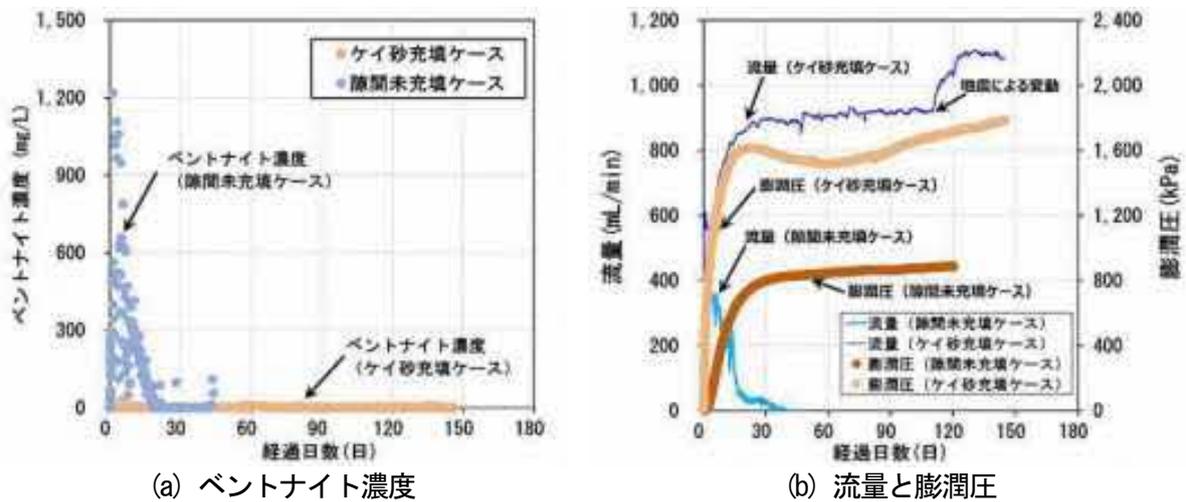


図 59 緩衝材流出試験結果

緩衝材流出試験が終了した後、試験孔から緩衝材ブロックを回収し、外観の観察や乾燥密度などの測定を行いました。その結果、緩衝材ブロックの外縁部から内部に深さ 30 mm から 50 mm 程度まで地下水が均等に浸潤していることが観察による色調の変化や含水比の測定結果から確認できました (図 60)。また、緩衝材ブロックの乾燥密度の測定結果から、初期乾燥密度 1.92 Mg/m^3 に対してブロック外縁部で低下したことが確認されましたが、令和 2 年度に実施した「隙間未充填ケース」と比べて乾燥密度の低下は小さく、均質であることが確認されました (表 5)。

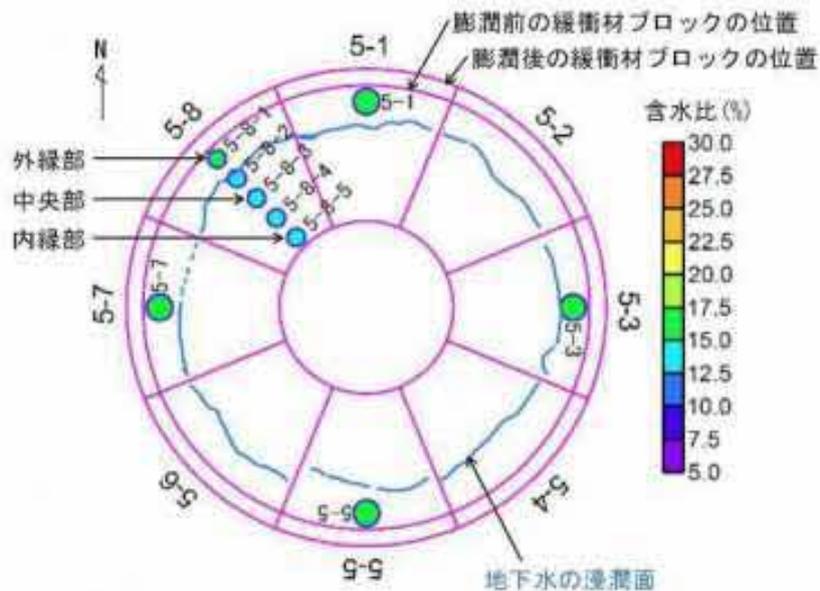


図 60 緩衝材ブロックの観察結果および含水比の計測位置
(5 段目：最下段)

5-1～5-8 は緩衝材ブロック番号を、○は含水比測定のための試料採取位置を示します。

表 5 緩衝材ブロックの乾燥密度の測定結果

測定位置	ケイ砂充填ケース (令和 4 年度)	隙間未充填ケース (令和 2 年度)
外縁部の平均	1.716 Mg/m ³	1.452 Mg/m ³
中央部の平均	1.783 Mg/m ³	1.749 Mg/m ³
内縁部の平均	1.730 Mg/m ³	1.684 Mg/m ³

図 60 に示した位置の 1、3、5 段目で採取した試料の測定結果の平均値を示します。

これらの結果は、隙間にケイ砂を充填したことによって緩衝材ブロックの体積が変化しにくいことや、ケイ砂部分の空隙を地下水の優先的かつ均一化された一様な流路とすることで緩衝材の流出の要因のひとつである地下水の流速が局所的に速くなる領域の発生が抑制されたことを示すものです。

また、緩衝材の流出量が、要求される品質を確保できる範囲となるかを推定する方法に関する、緩衝材の流出量の評価方法の段階的な開発手順（方法論）について、地下施設での試験を例題として検討した結果を図 61 に示します。実環境を踏まえた流出量の評価方法は地層処分の研究段階において、Step 1 の室内試験で流出挙動の主な要因（流量や水位差）をパラメータとした予測手法（以下ベースモデルとします）を検討し、Step 2 から Step 5 でスケールや地下水の水質の流出量への影響を考慮したベースモデルの補正（拡

張) 方法を検討し (Step 4 では Step 3 の水質の補正をクロスチェックします)、さらに Step 6 で実規模試験によりスケールの影響の補正を検討します。研究段階でこのような各 Step の評価方法や補正方法を検討しておくことで、将来に地層処分を実施する場所の環境などが明確になれば、室内試験の結果から実環境における実規模の緩衝材の流出量を予測することが可能になると考えられます。本研究では、この研究段階の開発手順のうち、Step 1、3 および 5 について、室内試験と原位置試験の結果を用いて緩衝材の流出量評価手法の開発を試行し、開発手順の方法論としての適用性を確認しました。

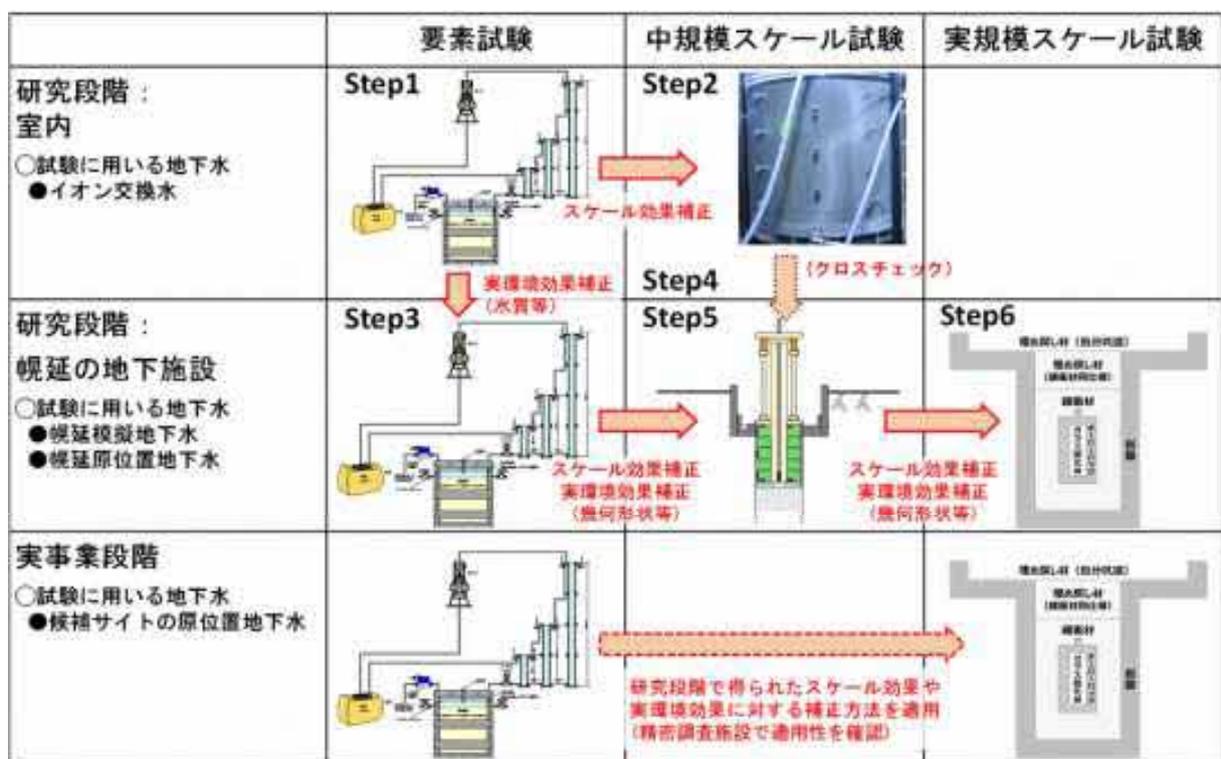


図 61 流出量評価モデルの理想的な開発手順

ケイ砂充填ケースを例に試行の結果を以下に述べます。Step 1 の室内試験結果をもとに構築したベースモデルによる累積流出量の予測結果を図 62 に示します。本研究の室内試験に基づく予測式は、(式 3) と (式 4) のとおりで、累積流出量の経時的な増加量が途中で変化するため、変化の前後で (式 3) と (式 4) に分け、累積流出量への流量の影響を考慮しています。

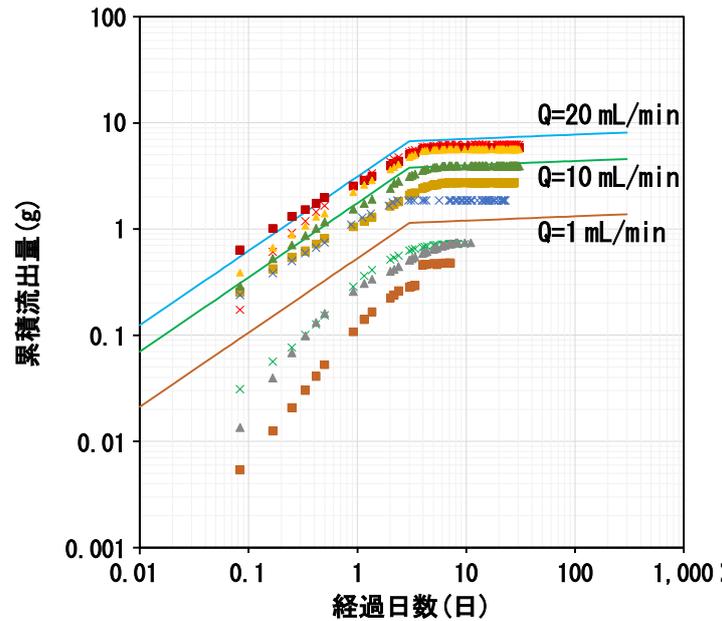


図 62 室内試験における累積流出量のべき関数モデルによる予測結果と試験結果との比較（ケイ砂充填ケース）

- ・評価時間が 0 から T_a まで

$$M_{BENT_BASE}(t, Q) = (0.136Q + 0.393)t^{0.7} \quad (\text{式 3})$$

- ・評価時間が T_a 以降

$$M_{BENT_BASE}(t, Q) = \frac{(0.136Q + 0.393)T_a^{0.7}}{T_a^{0.04}} t^{0.04} \quad (\text{式 4})$$

ここで、 $M_{BENT_BASE}(t, Q)$ は累積流出量(g)、 T_a は二つの関数の折れ点（変曲点の時間）、 t は経過時間(日)、 Q は流量(mL/min)を示します。

図 63 に Step 3 と Step 5 の試行に関する原位置試験における累積流出量のべき乗関数モデルによる予測結果と試験結果を示します。べき関数モデルによる予測結果は、室内試験に基づくベースモデルから得られた累積流出量を原位置試験と室内試験の緩衝材が水に接する面積の比率に基づき 212 倍しました。予測結果と試験結果の評価期間は包括的技術報告⁽³⁵⁾に示される新第三紀堆積岩類における処分坑道の埋め戻しまでの期間を参考に 284 日と設定しました。試験結果に基づく 284 日までの累積流出量は回帰直線により推定しました。べき関数モデルによる予測結果は、原位置試験の結果よりも試験開始時の累積流出量が多い傾向がありますが、その後の累積流出量が漸増する傾向は類似しています。また、284 日までの累積流出量の予測結果は試験結

果やその推定結果よりも多い傾向がありますが、これは室内試験において、模擬地下水の場合にはベントナイトの粒子が凝集により流出量が計測できなかったため、ベースモデルをイオン交換水の場合とした影響（ベントナイト粒子の凝集が模擬地下水より少なく流出量が多い影響）があります。これらのベースモデルの初期の傾向や水質の影響の考慮については改善が必要ですが、これまでの原位置試験などの研究を通して流出量評価手法の開発方法についての見通しが得られ、緩衝材ブロックと岩盤の隙間からの緩衝材の流出量の評価モデルを構築するための基盤情報を整備することができました。

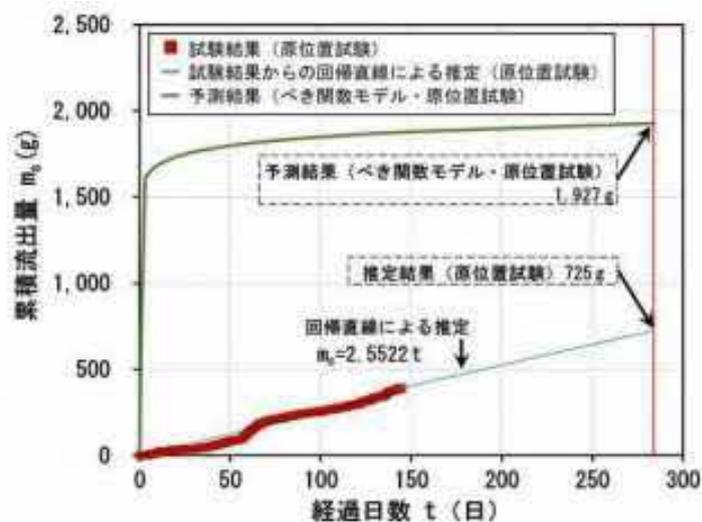


図 63 原位置試験における累積流出量のべき関数モデルによる予測結果と試験結果の比較（ケイ砂充填ケース）

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

令和2年度以降は、人工バリアの構成要素である緩衝材の最高温度が100℃を超えた状態での人工バリアとその周辺岩盤の領域（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、解析手法の開発を行うとともに、ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示します。これらの目標が達成されることにより、地層処分場において想定外の要因により緩衝材の温度が100℃を超えた状態となった場合の人工バリアの挙動を検討できるとともに、高温条件下での人工バリアの安全裕度を評価できます。本課題は、4.1 人工バリア性能確認試験と関連する課題です。人工バリア性能確認試験では、100℃以下での温度条件下において熱－水理－

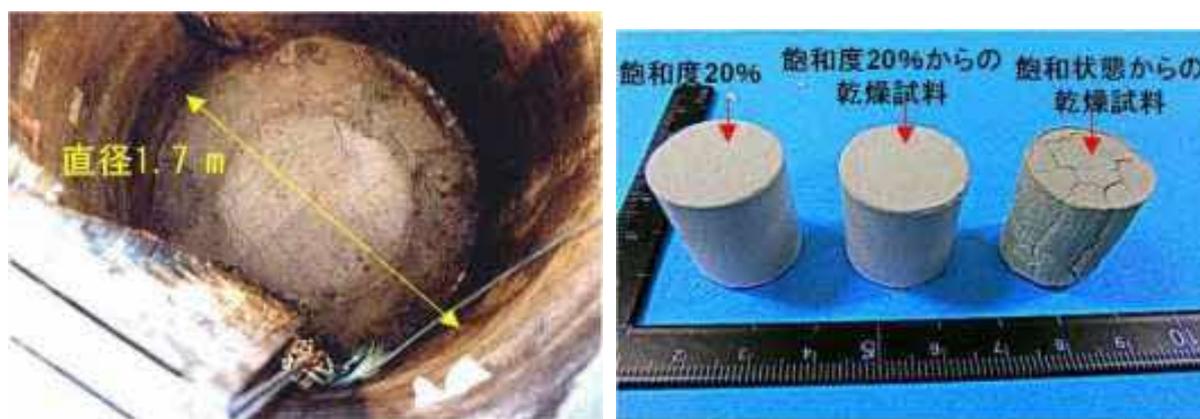
力学－化学連成現象に係るデータを取得していますが、本課題においては、100°C超になった際に、これらの連成現象の熱に関わる部分においてどのような現象が生じるかを把握することになります。

令和4年度は、令和3年度に実施した、緩衝材の温度が100°Cを超えた状態で発生し得る現象に関する先行研究の事例調査を基に、重点的な調査が必要と考えられる現象に関する原位置試験の計画を策定しました。令和3年度の調査では、緩衝材の温度が100°Cを超えた場合に変化が生じ得る影響要因として、イライト（雲母鉱物）化、熱履歴、塩濃縮、微生物活動、ガスの発生、鉄/ベントナイト相互作用、高pHおよび高カルシウム濃度地下水による影響、シリカセメンテーション*76が抽出され、また、高温蒸気との反応ならびに緩衝材のひび割れも影響し得ることが示唆されました。このうち、イライト化や高pHおよび高カルシウム濃度地下水による影響などに起因する緩衝材の変質については、令和3年度の調査研究成果報告⁽¹⁹⁾で整理したように室内試験を中心として知見が得られており、またスイスのグリムゼル試験場で実施されている、緩衝材の温度を最高200°C程度まで上昇させる原位置人工バリア試験（HotBENTプロジェクト）でも重点的に考慮すべき項目として挙げられています。一方、緩衝材のひび割れや熱履歴については、原子力機構のこれまでの室内・原位置試験でも観測されており（図64）^(12, 36)、海外の室内試験では最大2桁程度の透水係数の増加（ 10^{-13} m/s から 10^{-11} m/s）が報告されていますが⁽³⁷⁾、工学規模（数m程度）以上のスケールで緩衝材の特性に与える影響については明らかになっていません。そこで、緩衝材のひび割れの発生を主とした100°C以上の熱履歴や、塩濃縮、ガス（水蒸気）の発生など比較的短時間で生じ得ると考えられる現象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の概念について検討を行いました。

原位置試験は、令和5年度中に350m調査坑道の試験坑道5にヒーターと緩衝材を設置し、100°Cを超える温度での加熱を開始します。令和6年度には加熱を停止し、緩衝材を回収・分析して、100°Cを超える温度での加熱が緩衝材の特性に与える影響を確認するとともに、100°Cを超える温度履歴を経た緩衝材に対する地下水の浸潤挙動を確認します。

*76：シリカ含有鉱物が高温環境などで溶解し、別のシリカ鉱物として再沈殿する現象のことです。シリカセメンテーションが生じた緩衝材では、可塑性（固体に力を加えて変形させた後、力を取り去っても元に戻らない性質）や膨潤性の低下などが認められることがあります。

原位置試験の概念図を図 65 に示します。試験坑道 5 (図 2 参照) の既存の試験孔 (深さ約 1.7 m、直径約 0.6 m) を用い、孔の中心に鉄製の外筒で囲んだヒーター、その周囲に緩衝材を設置し、緩衝材と岩盤の間にはケイ砂を充填します。緩衝材の乾燥密度と含水比はそれぞれ、人工バリア性能確認試験と同程度の値 (乾燥密度 1.8 Mg/m^3 、含水比 10.5%) を基本ケースとし、ひび割れへの影響が大きいと考えられる含水比については、いくつかの異なる値で作製したものも使用します。また、緩衝材の施工方法として、人工バリア性能確認試験と同様の扇形のブロックに加え、円柱の真ん中をくり抜いたドーナツ形のものも使用する予定です。扇形のブロックでは高温での乾燥時の収縮によりブロック間の継ぎ目が広がり、一方でドーナツ形では乾燥収縮時に亀裂が入る可能性が予想されます。これらの継ぎ目や亀裂の発生挙動の違いや、それらを通じた地下水の浸潤挙動について、重点的に観測する予定です。



(a) 釜石鉱山での原位置試験 (b) 110°C で乾燥させた緩衝材ブロック
図 64 100°C 以上の温度で加熱された緩衝材に発生したひび割れの例

(a) 釜石鉱山にて実施された人工バリアの原位置試験 (ヒーターを 100°C で 257 日間加熱) における、試験後の孔内の写真です⁽³⁶⁾。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ます。(b) 異なる飽和度で成形した緩衝材ブロックについて、一部を 110°C で加熱して乾燥させたものです⁽¹²⁾。飽和状態から乾燥させた試料のみ、ひび割れが認められます。

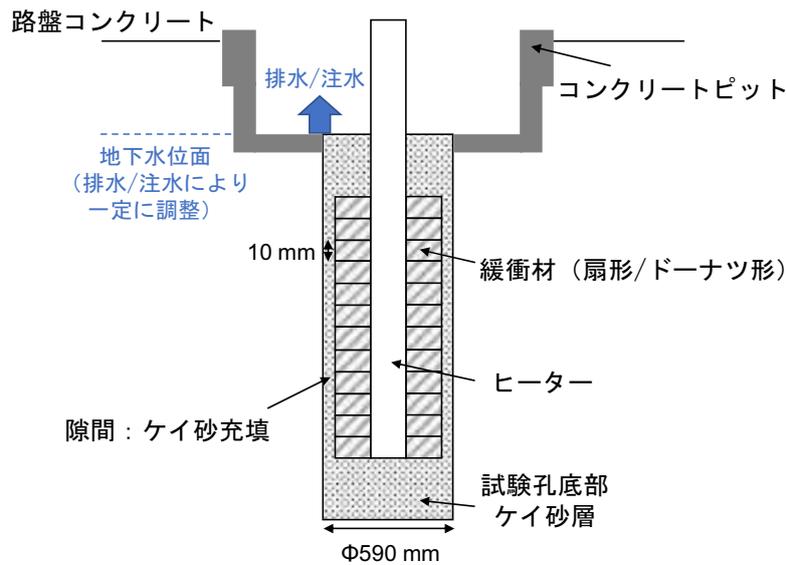


図 65 原位置試験の概念図

加熱温度については、オーバーパックの耐食性への影響に関する室内実験データ⁽³⁸⁾や令和 3 年度に実施した緩衝材の変質に関する研究事例の調査結果に基づき、人工バリア材料の高温による変質や劣化が顕在化しないと考えられる 140°C程度を最高温度の目安とします。一次元熱解析の結果から、ヒーターを 120°Cおよび 140°Cで加熱した場合に、厚さ 0.3 m の緩衝材ブロックの外縁部が 100°Cを超えるまでの期間は、それぞれ 11 日、5 日と計算され (図 66)、比較的短期間で緩衝材全体が 100°Cを超えた状態に達すると推定されました。また、より現実に近い状態として、試験実施予定の坑道周辺を想定した三次元熱解析の結果から、中心間距離 2.5 m で隣接する 2 孔にヒーターと緩衝材を設置し、140°Cで 1 年間加熱、その後加熱を停止する場合を考えました。この場合、加熱期間がおおよそ 10 日を超えた時点で、各孔の緩衝材の半分程度の厚さ (図 67 の点 2 と点 3 の間) まで 100°Cを超えた状態に達すると推定されました (図 68(a))。解析条件の違いにより、100°Cを超える範囲は一次元熱解析 (図 66) と三次元熱解析 (図 68) でやや異なりますが、少なくともヒーター接触面から数 cm 以上の範囲は 100°Cを超える状態となり、試験の目的を満足すると考えられます。さらに、図 68(b)に示した解析では、加熱した孔から 2.5 m の距離に位置する加熱していない孔において、周辺岩盤内部 (図 67 の点 8) の温度上昇は最大でも 8°C程度にとどまること、またすべての点において、加熱停止後おおよそ 50 日で加熱前と同程度の温度に戻ることを示す結果が得られました。これらの結果から、100°Cを超えた温度での加

熱やその履歴が周辺岩盤に与える影響は限定的であると考えられます。

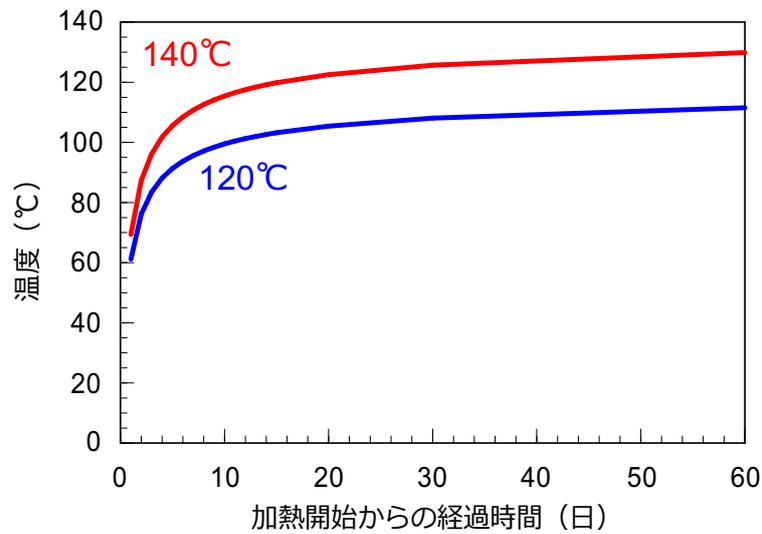


図 66 原位置試験における、緩衝材ブロック外縁部の温度変化に関する熱解析結果

緩衝材ブロックの厚さを 0.3 m とし、100°C を超える温度で中心部のヒーターを加熱した場合に緩衝材ブロックの外側で生じる温度変化を解析により予測したものです。解析に用いた緩衝材および岩盤（軟岩）の物性値は、第 2 次取りまとめ^⑦の値に基づいたものです。

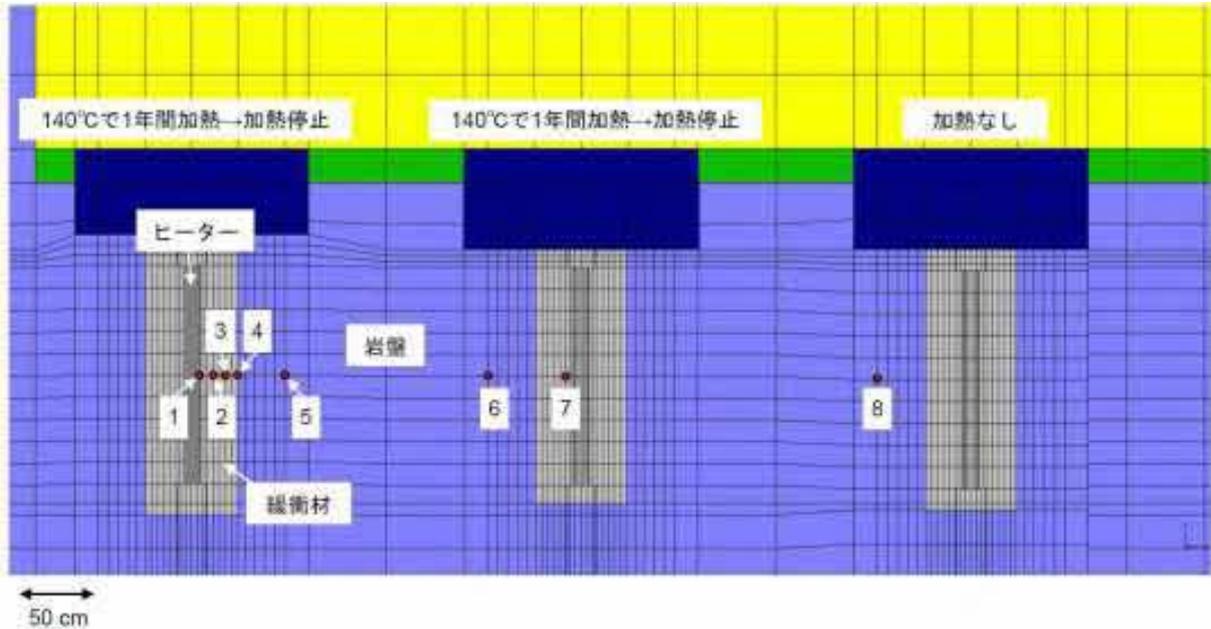


図 67 原位置試験実施予定の坑道周辺を想定した三次元熱解析の出力点の配置

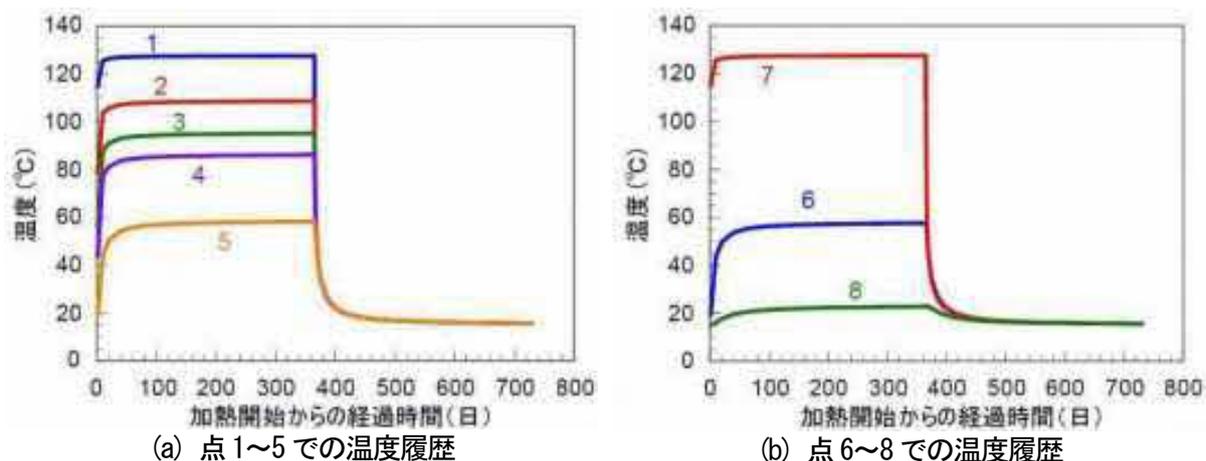


図 68 三次元熱解析の結果

各孔の中心に設置したヒーターを 140°C で 1 年間加熱し、その後加熱を停止した場合に生じ得る温度変化を解析により予測したものです。グラフ中の数字は図 67 に示した点を表します。

比較的長期間で緩衝材特性に影響を及ぼしうると考えられるイライト化については、令和 3 年度に実施したスメクタイトのイライト化に関する経時変化の計算に対して、以下の 3 点を実施することにより見直しを図りました。

- ① より現実的な温度履歴の設定
- ② 複数のイライト化反応速度式の適用
- ③ 間隙水中のイオン濃度の影響の評価を実施

①について、令和 3 年度は廃棄体の定置から 1 万年後まで 100°C 以上の一定の温度が継続する場合を想定しましたが、令和 4 年度は、包括的技術報告⁽³⁹⁾に記載されている、深成岩類中に横向き PEM 方式で廃棄体を定置した場合の温度履歴（定置から 25 年後に、緩衝材内部で最高温度 104.5°C に到達し、その後減熱：図 69）を想定しました（以下、「包括的技術報告の温度履歴」と記載）。②について、令和 3 年度は反応速度式として、(式 5)⁽⁴⁰⁾を用いましたが、イライト化反応のメカニズムや速度式には不明な点が多いことも鑑み、令和 4 年度は反応速度の次数（スメクタイトの残存率のべき乗数）や考慮するイオンが異なる反応速度式として (式 6)⁽⁴¹⁾および (式 7)⁽⁴²⁾も適用しました。

$$-\frac{dS}{dt} = A \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \cdot [K^+] \cdot S^2 \quad (\text{式 5})$$

$$-\frac{dS}{dt} = A \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \cdot S \quad (\text{式 6})$$

$$-\frac{dS}{dt} = A \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \cdot \left[\frac{K^+}{Na^+}\right]^m \cdot S^n \quad (\text{式 7})$$

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)、 $[K^+]$ および $[Na^+]$: K^+ および Na^+ の濃度 (mol/L)、 m および n : 定数を意味します。

A は報告値 (式 5 では 2.5481×10^{12} L/(year・mol)⁽⁴⁰⁾、式 6 では 4.7038×10^7 year⁻¹⁽⁴³⁾、式 7 では 1.7660×10^{15} year⁻¹⁽⁴²⁾) を、 Ea は保守的な観点から、複数の報告値の中でより低い値 (式 5 では 25 kcal/mol⁽⁴⁴⁾、式 6 では 19.6 kcal/mol⁽⁴¹⁾、式 7 では 29.96 kcal/mol^(43, 45)) を用いました。 $[K^+]$ および $[Na^+]$ は地下施設の深度 350 m の地下水の値を用い、式 7 の定数 m および n は、参考文献(42)と同様に $m=1$ 、 $n=5$ としました。

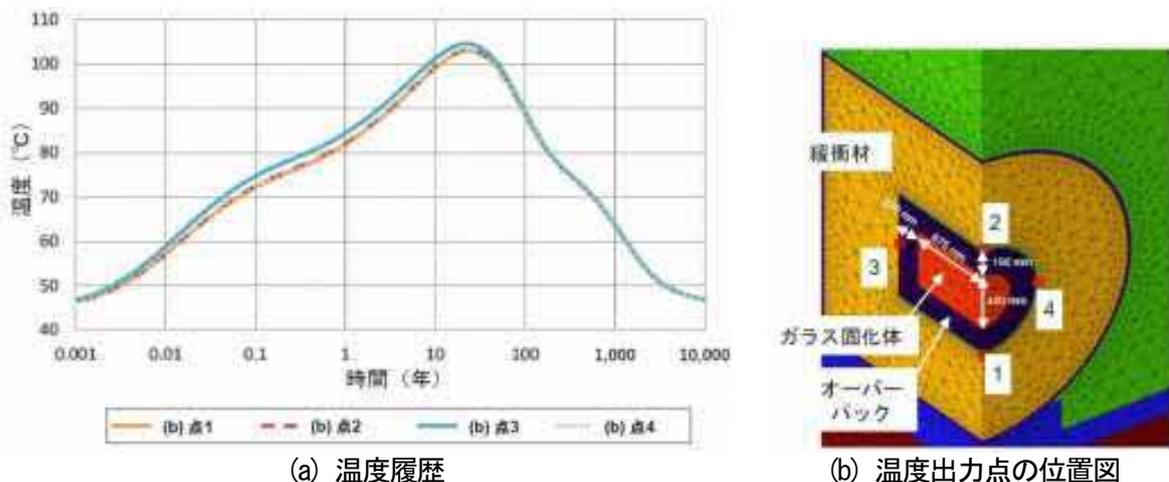


図 69 緩衝材内部の温度が 100°C を超える場合の温度履歴の例

包括的技術報告⁽³⁹⁾に記載の、深成岩類中に横向き PEM 方式で廃棄体を定置した場合の温度履歴の解析結果です。ここでは、(b) の点 3 における温度履歴 (水色線) を適用して計算しています。(a) は、元図から凡例などを変更し、(b) は元図にスケールなどを追記しています。

①および②を踏まえた計算結果を図 70 に示します。いずれの反応速度式を適用した場合においても、包括的技術報告の温度履歴によって生じるイライト化の割合は、100°C 以上の一定の温度が継続する場合と比べて小さく、もっともイライト化の割合が大きい式 6 のケースでも 1,000 年間で 3% 程度であることが分かります。また、最高温度がより高く、100°C を超えた温度の継続期間がより長い場合を想定し、包括的技術報告の温度履歴よりも全期間を通じて 20°C、30°C および 40°C 高く設定したケースを検討しました。この場合、100°C を超える期間はそれぞれ約 180 年、約 540 年、約 1,200 年となります。結果を図 71 に示します。式 6 の反応速度式を適用した場合、温度が 40°C 高

いケースでは比較的顕著なイライト化が生じると見積もられますが、それ以外のケースおよび反応速度式では、イライト化の割合は最大でも 20%程度にとどまります。特に、包括的技術報告の温度履歴よりも 20°C高い場合には、いずれの反応速度式においてもイライト化の割合は最大 10%程度にとどまります。

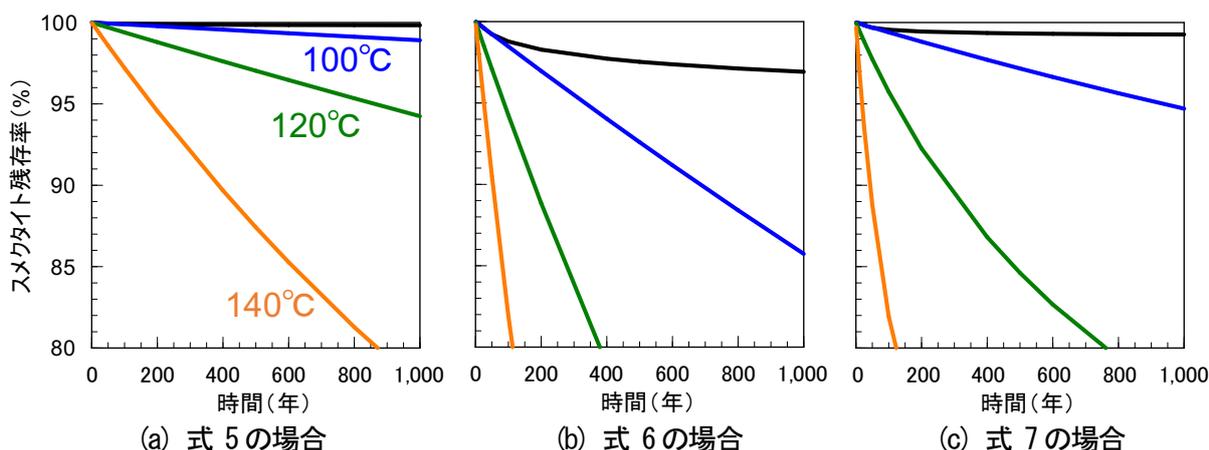


図 70 温度履歴および反応速度式の違いを考慮したスメクタイトのイライト化の経時変化

黒線は包括的技術報告の温度履歴にもと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です

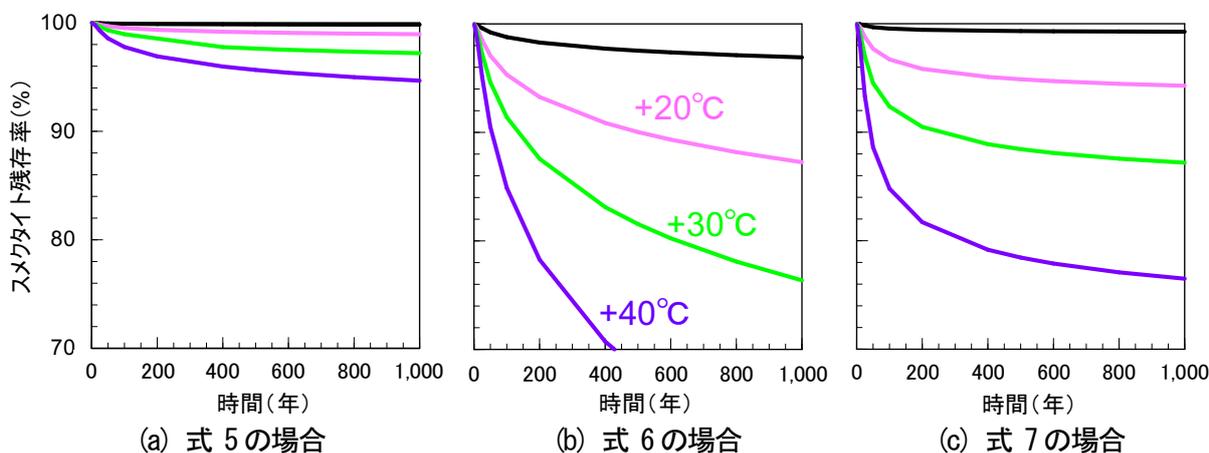


図 71 より高温域での温度履歴を考慮したスメクタイトのイライト化の経時変化

黒線は包括的技術報告の温度履歴にもと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、包括的技術報告の温度履歴よりも全期間を通じて記載の温度だけ高く設定した場合の結果です。

③については、幌延の地下水中よりも各イオンの濃度が高い場合を想定し、式 5 および式 7 について、海水中の K^+ 濃度および Na^+ 濃度を適用したケースを計算しました。図 72 に示すとおり、包括的技術報告の温度履歴における幌延地下水中のイオン濃度を想定した計算結果（黒線：図 70 の黒線と同じ）と比べてスメクタイトの残存率はほとんど減少せず、包括的技術報告の温度履歴においてはイオン濃度の影響は小さいことが分かりました。ここまでに示した計算結果の解釈には、どの程度のイライト化の進行が緩衝材の特性に影響を及ぼし得るかを考慮する必要がありますが、少なくとも包括的技術報告の温度履歴と同様の、 $100^{\circ}C$ 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と考えられます。

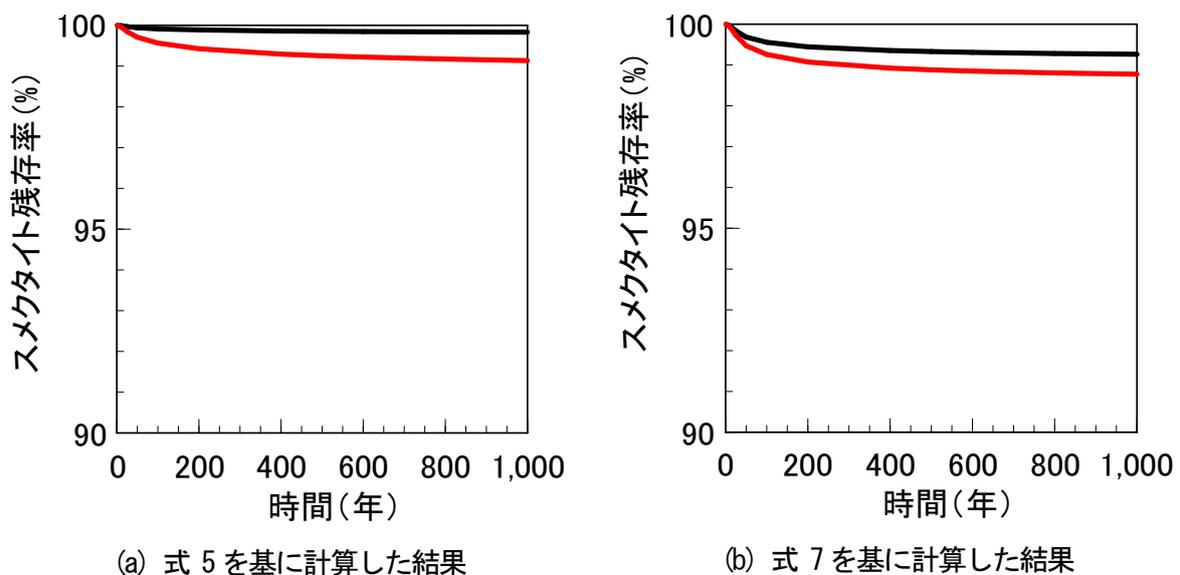


図 72 イオン濃度を考慮したスメクタイトのイライト化の経時変化

いずれも包括的技術報告の温度履歴にもとづいて算出した結果であり、赤線は海水中のイオン濃度、黒線は地下施設の深度 350 m における地下水中のイオン濃度を適用した場合の結果（黒線は図 70 の黒線と同じもの）です。

6. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

6.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

6.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

令和 2 年度以降は、地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握が課題となります。そのため、断層沿いに亀裂の発達する幅が数十 cm 程度のより大型の断層における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）の評価手法の確認を行います。具体的には、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）、ダクティリティインデックス（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、水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備を行います。本課題は、割れ目や断層の中での地下水や物質の移動を把握するので、4.2 物質移行試験と関連があります。

令和 4 年度は、地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握を目的として、令和 3 年度に再検証した DI モデルと令和 2 年度に実施した水圧擾乱試験結果の比較検証を行いました。令和 3 年度に再検証した DI モデルは図 73 の近似曲線（経験式^{*77}）として表され、この経験式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 の関係を表します（図 74）。これらの割れ目はいずれも主要な水みち割れ目であることから、ある DI を持つ断層の透水性は、断層がずれたとしてもこの経験式の誤差範囲（ $\pm 2\sigma$ ）を有意に超えないことが経験的に推定されます。この経験式と令和 2 年度に実施した水圧擾乱試験の結果を比較した結果、次のことが分かりました。水圧擾乱試験では、幅数十 cm の断層内の水圧を 6 段階にわたって増加させ、最終的に数 mm 以上の断層のずれを発生させましたが⁽⁴⁶⁾、各段階において算出した断層の透水性はほぼ変わらないことが今回の解析により分かりました（図 73 の△）。これらの結果は経験式の誤差範囲の最大値付近（図 73 の $+2\sigma$ と表記した破線付近）に相当します。このように、経験式の誤差範囲の透水性を持つ断層は、断層がずれたとしてもその透水性が有意に増加しないことが今回の試験により確認できました。同様なことは、既に幅数 cm 程度の小規模な断層を対象とした水圧擾乱試験により確認できていましたが⁽⁴⁷⁾、今回の試験により、より大規模な断層でも上

*77：理論的根拠は明らかではないが、実験や観測などによる実測値から導かれた関係を数式で表したものです。

記の考えを適用できることが確認できました。

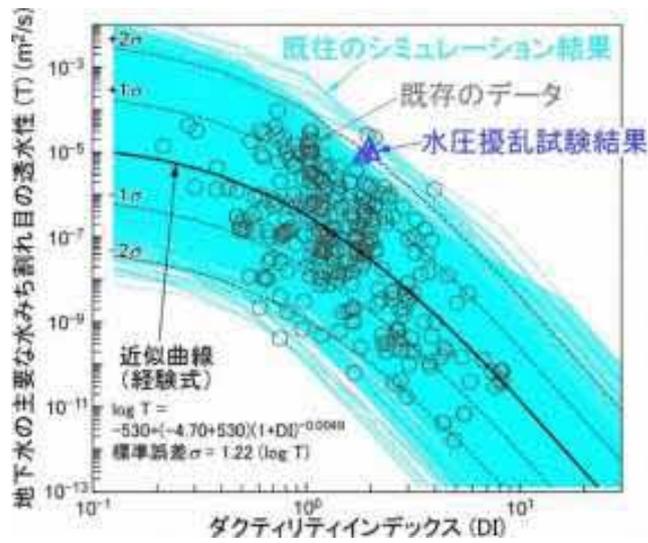


図 73 DI モデル（図中の実線と破線で示す近似曲線）と水圧擾乱試験結果の比較

図中の○は幌延、スイス、スウェーデン、フィンランド、英国の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 を表します⁽⁴⁸⁾。近似曲線は、これらのデータから既報の近似法により導出したもので、実線で示す曲線が代表的な推定値（データの対数平均値）を表し、破線で示す曲線はその推定誤差を表します⁽²⁾。水色の曲線は、室内実験結果に基づくシミュレーション結果を示しており、近似曲線と同様な変化傾向を示すことから、近似曲線が妥当であることが示唆されます⁽²⁾。△は今回解析した水圧擾乱試験の結果を表しており、6段階にわたって水圧を上昇させ、断層をずらした際の各段階の透水性と DI を表します。

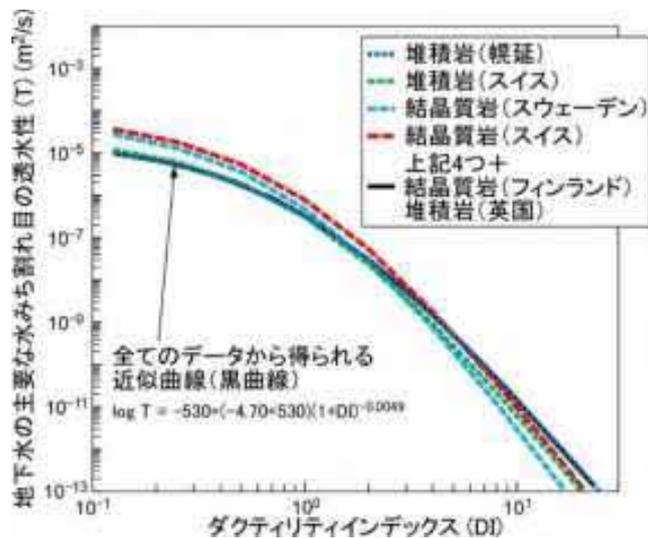


図 74 様々な堆積岩および結晶質岩で認められる断層沿いの地下水の主要な水みち割れ目の透水性と DI の関係⁽²⁾

図中の破線で示す曲線は個々の地層のデータから得られる近似曲線を表しており、実線で示す黒の曲線は 6 つの地層のデータから得られる近似曲線を表しています。地層によらず、主要な水みち割れ目の透水性と DI に一定の関係が認められます。

今回の試験結果とこれまでの検討結果を考え合わせると、断層のずれが透水性に与える影響に関して、以下のことが指摘できます。すなわち、断層沿いの地下水の主要な水みち割れ目の透水性は、以下の 4 つのパラメータに大きく支配されます⁽²⁾。

- ① 割れ目表面の粗さ
- ② 割れ目の方向と地圧のかかり方との関係
- ③ 割れ目の初期開口幅（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割れ目内の物理的な隙間の大きさ）
- ④ 割れ目の DI

しかし、①～③のパラメータは、断層のずれによりどの程度変化するかを予測するのが困難なパラメータです（特に③割れ目の初期開口幅）。一方で、④の割れ目の DI は比較的決定が容易で、断層がずれても変化しにくいパラメータです。さらに、DI と透水性の間には地層によらず図 73 の経験式に示すような一定の関係が認められます（図 74）。また、DI は図 75 に示すように、その空間的な分布も推定可能なパラメータです。したがって、地層中の個々の断層に対して上記 4 つのパラメータを個別に評価して断層のずれが透水性に与える影響を推定する方法とは別に、DI の経験式と DI の分布を用いて、断層がずれた場合に透水性がどの程度まで増加し得るかを広範囲にわたって効率的に推定する方法も有効であると考えられます。このような方法の有効性あるいは信頼性は、水圧擾乱試験により確認することができ^(2, 47)、同方法は地殻変動が地層の透水性に与える影響を評価する上で役立つと考えられます。今後は断層や割れ目の水理学的連結性についても詳しく検討する必要があります。

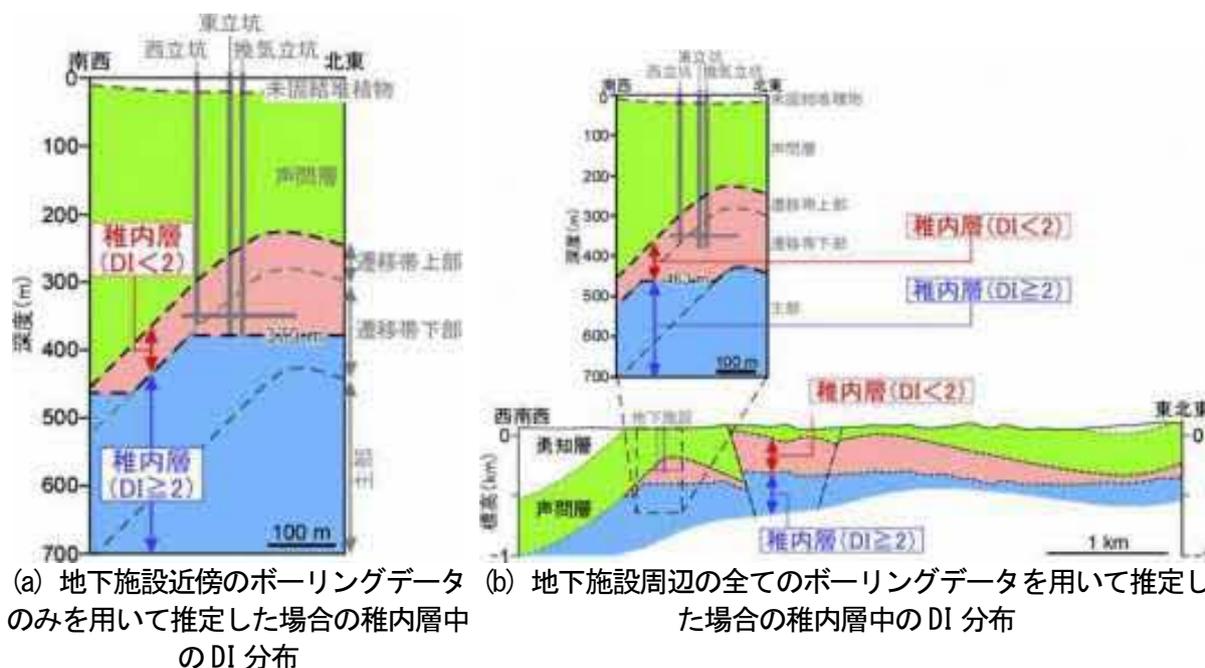


図 75 稚内層中のDI分布^(2, 3)

DI の分布は地圧と深度の関係と地層の分布に基づく岩石強度の分布から推定することができます。ただし、地圧と深度の関係は評価する領域によって異なるため⁽⁶⁾、例えば地下施設近傍の HDB-1、3 および 6 孔の地圧データのみを用いて推定する場合と地下施設から比較的離れた場所のボーリング孔の地圧データも含めて推定する場合とでは DI の推定分布が異なります。どの地圧データを用いるかは、その DI 分布の用途に応じて決定します。

DI を用いた透水性評価手法の信頼性向上などを目的に、これまでに得られた地下施設建設時における地下施設周辺のボーリング孔（HDB-6 孔および PB-V01 孔、図 76 参照）での水圧観測データを用いて、DI と断層/割れ目の水理学的連結性の関係に関する解析を行いました。HDB-6 孔および PB-V01 孔では、これまで孔内の複数の観測点で地下施設周辺の水圧を継続して観測しており、HDB-6 孔では稚内層で地下施設の建設に伴って数百 kPa の水圧低下あるいは数十 kPa の水圧上昇が観測されています。解析では、これらの水圧低下あるいは水圧上昇が地下施設の湧水量増加とともに顕著に生じ始めた、平成 20 年 10 月 9 日から 1 年間の水圧変化に着目し、その水圧変化を再現できるような地層の透水性を水理・力学的な数値解析により検討しました。その結果、図 76 に示すような地層の透水性が求められ⁽³⁾、稚内層浅部（DI が 2 未満の領域）の透水性（約 2×10^{-8} m/s）は割れ目の無い健岩部の透水性（ 1×10^{-11} m/s 程度）よりも有意に高い透水性であることが推定されました。一方で、稚内層深部（DI が 2 以上の領域）では上位の浅部との境界から 100 m 程度の領域において 1×10^{-10} m/s ~ 1×10^{-9} m/s、それ以深の領域では健岩部の透水性に相当する

$1 \times 10^{-11} \text{ m/s} \sim 1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ の透水性が推定されました。これらの透水性の深度変化は、DI が 2 未満の領域（断層/割れ目の水理学的連結性が高い領域）から DI が 2 以上の領域（断層/割れ目の水理学的連結性が低い領域）⁽⁴⁾ にかけて断層/割れ目の水理学的連結性が遷移的に変化する様子を表すものと考えられ⁽³⁾、令和 2 年度に推定した断層/割れ目の水理学的連結性が遷移的に変化する領域（図 76 の遷移領域）の存在を裏付けています。図 75 に示す地層の透水性の妥当性は、平成 20 年 10 月 9 日から 10 年以上にわたる水圧変化の検討結果からも確認でき（図 77）、この結果に基づけば、今後、深度 500 m まで掘削を行ったとしても、その掘削領域（稚内層遷移領域と深部領域）の断層/割れ目の水理学的連結性が低いために、地下施設周辺のボーリング孔の水圧はほとんど変化しないことが予想されます⁽⁴⁹⁾。湧水量も一時的な増加は予想されますが、定常的な増加が発生する可能性は低いと考えられます⁽⁴⁹⁾。

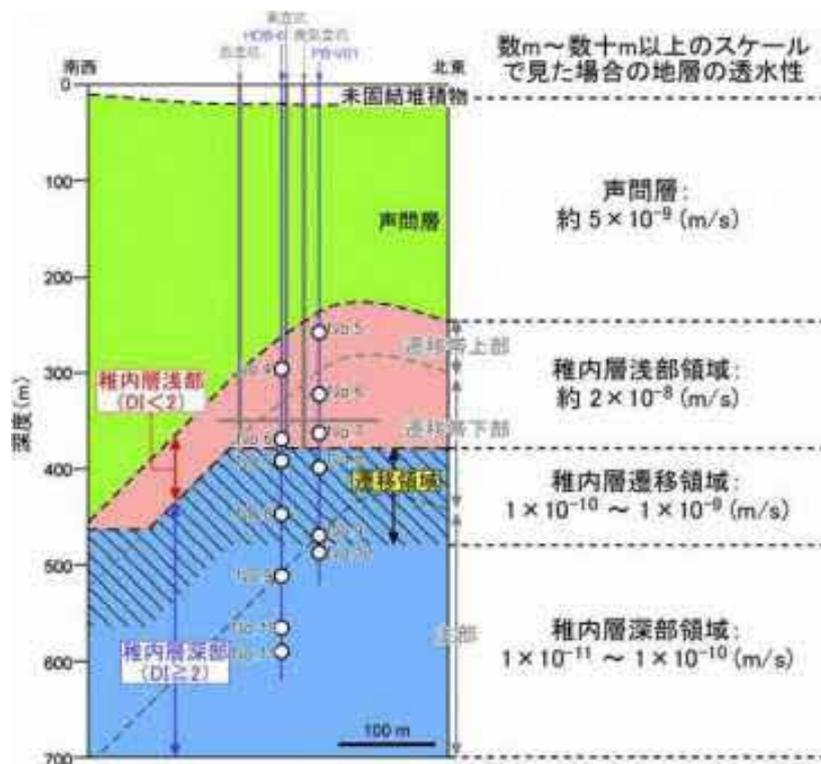


図 76 地下施設建設時の地下施設周辺のボーリング孔（HDB-6 孔および PB-V01 孔）での水圧変化から数値解析により推定された各地層の数 m ～数十 m 以上のスケールで見た場合の透水性

図中の No. は HDB-6 孔および PB-V01 孔の稚内層における長期水圧観測点を示します。HDB-6 孔は本断面図上から 164 m 離れた場所に位置していますが、本断面図上に垂直投影しています。斜線で示す遷移領域は浅部の断層/割れ目の水理学的連結性が高い領域から深部の低い領域にかけて遷移的に変化する領域を表します。遷移帯上部、遷移帯下部および主部と表記した領域は岩石の鉱物組成や硬さに基づく地質学的な領域区分を表します。