

幌延深地層研究計画
令和 3 年度調査研究成果報告

令和 4 年 6 月

日本原子力研究開発機構
幌延深地層研究センター

目 次

1. はじめに	1
2. 令和2年度以降の幌延深地層研究計画に基づく研究課題	3
3. 令和3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	16
4.1 人工バリア性能確認試験	16
4.2 物質移行試験	30
5. 処分概念オプションの実証	48
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	48
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	88
6. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証	99
6.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化	99
6.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験	122
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	126
8. 地下施設の管理	148
9. 環境調査	151
9.1 排水量および水質調査結果	151
9.2 研究所周辺の環境影響調査結果	162
10. 安全確保の取り組み	165
11. 開かれた研究	166
11.1 国内機関との研究協力	166
11.2 国外機関との研究協力	174
参考資料	176
参考文献	185
付録	193

図目次

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）	5
図 2	令和 3 年度の主な調査研究	7
図 3	ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所	13
図 4	研究所用地における主な施設と観測装置の配置	13
図 5	350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所	14
図 6	人工バリア性能確認試験の概念図	17
図 7	緩衝材温度の出力点とその経時変化	17
図 8	緩衝材 5 段目の計測データ	19
図 9	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	20
図 10	試験結果（試験期間 18 日）	21
図 11	気相の影響を確認するための試験装置の概念図	22
図 12	温度、相対湿度の測定結果	23
図 13	人工バリア解体試験施工の概念図	24
図 14	緩衝材サンプリングの概念図	26
図 15	緩衝材のサンプリングの状況とサンプリング後の試料	26
図 16	含水比測定結果の一例（緩衝材ブロック：下から 5 段目）	27
図 17	模擬 OP の一体取り出しの概念図	28
図 18	模擬 OP の一体取り出しの状況	28
図 19	サンプリングと事前樹脂注入の概念図	29
図 20	サンプリングした試料（樹脂充填）	30
図 21	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	31
図 22	トレーサー濃度変化（注水・揚水区間）	33
図 23	トレーサー濃度変化（壁面湧水など）	33
図 24	350m 調査坑道に設置した物質移行試験装置および概念図	36
図 25	21-350-TRA 孔の試験区間の間隙水圧の推移	36
図 26	21-350-TRA 孔の試験区間における水質の連続モニタリング結果	37
図 27	幌延の地下水（深度 350 m）に対する希土類元素およびフミン酸の添加試験	38
図 28	ブロックスケールを対象とした物質移行試験の概念図	39
図 29	トレーサー試験（定常②）結果	41
図 30	見かけの動水勾配に応じたトレーサーの到達時間	42
図 31	赤外吸収スペクトルによる微生物の識別	44
図 32	350m 調査坑道から得られた岩石試料（稚内層）中の微生物分布	44
図 33	μ -XRF 分析で取得されたセレン (Se)、鉄 (Fe)、硫黄 (S)、カルシウム (Ca) の元素マッピングの結果の例	46
図 34	セレンの濃集が確認された部分の μ -XAFS 測定結果	46
図 35	幌延の岩石試料でセレンの濃集が確認されたパイライトの反射電子像	47
図 36	コンクリート試験体の暴露試験	50
図 37	コンクリート試験体の変質領域	51
図 38	コンクリート試験体中の元素分布	51
図 39	コンクリート試験体中の空隙率分布	52
図 40	境界条件の影響による坑道周辺における飽和度分布の予測結果の比較	53

図 41	長期クリープ変形挙動解析による 1,000 年後のヤング率の初期状態からの変化率.....	54
図 42	長期クリープ変形挙動に伴う透水性の変化を考慮した場合の 1,000 年後の飽和度分布.....	55
図 43	コンクリートの溶脱成分に起因した埋め戻し材の変質に至る変遷.....	57
図 44	埋め戻し材中のモンモリロナイトの残存率および間隙率の変化.....	59
図 45	試験装置の概要.....	60
図 46	水みちの発生状況.....	61
図 47	流量と水頭差の時間変化.....	61
図 48	流出水中のベントナイト濃度の時間変化.....	62
図 49	縮尺模型試験の概念図.....	63
図 50	縮尺模型試験における緩衝材の膨潤変形率の経時変化.....	64
図 51	縮尺模型試験における膨潤圧力の経時変化.....	65
図 52	粘土止水壁周辺の概要図.....	66
図 53	試験領域内の透水係数の経時変化.....	66
図 54	予備試験における含水比と乾燥密度の関係.....	68
図 55	試験坑道 2 の切欠き部掘削の様子.....	69
図 56	切欠き部への吹付けの状況.....	70
図 57	吹付け後の含水比と乾燥密度の関係.....	71
図 58	350m 調査坑道底盤における試験孔の配置.....	73
図 59	割れ目位置と弾性波速度分布.....	73
図 60	W-1 孔の解析結果と弾性波速度分布 (P 波) および割れ目の位置の比較例.....	75
図 61	測定された弾性波速度と比抵抗の関係.....	76
図 62	アーチーの式による比抵抗の近似.....	77
図 63	ガスマン・ビオの式による弾性波速度の近似.....	77
図 64	ベントナイトブロックの膨潤状況.....	79
図 65	ベントナイトブロックの乾燥密度.....	80
図 66	ボーリング孔内へのベントナイトブロックの設置方法.....	81
図 67	ベントナイトブロックの設置手順の確認状況.....	82
図 68	室内試験の流出試験装置の概要.....	84
図 69	流量 10 mL/min、水位差 1 m の水準における室内試験の結果 (隙間未充填ケース).....	86
図 70	原位置での緩衝材流出試験設備の概要.....	87
図 71	試験体設置状況.....	87
図 72	高温におけるスメクタイトのイライト化の経時変化.....	94
図 73	MX-80 ベントナイトにおける加熱前後の膨潤圧および透水係数の変化 (シリカセメンテーションの有無による影響).....	95
図 74	MX-80 ベントナイトにおける加熱前後の膨潤圧および透水係数の変化 (水分状態の違いによる影響).....	95
図 75	MX-80 ベントナイトにおける加熱前後の膨潤圧および透水係数の変化と加熱時間との関係.....	96
図 76	110°C で乾燥させたベントナイト.....	97
図 77	高温の人工バリア性能確認試験 (海外での研究事例).....	97
図 78	緩衝材の温度が 100°C を超えた場合に人工バリア周辺に生じると想定さ	

	れる現象の概念図.....	98
図 79	国内外の 6 つの地層における地下水の主要な水みち割れ目の透水性と DI の関係.....	101
図 80	DI、割れ目内の隙間の開閉、および割れ目の透水性の関係（割れ目のずれが一定の場合）.....	101
図 81	割れ目のずれ、かみ合わせ、および透水性の関係（DI が一定の場合）..	102
図 82	割れ目のずれに伴う開口幅の変化に関するシミュレーション.....	102
図 83	国内外の地下研究施設で実施された水圧擾乱試験の結果.....	103
図 84	高圧注水の前後に実施した割れ目の水理学的連結性の変化を調べるための低圧注水試験結果.....	105
図 85	観測された割れ目の水理学的連結性の変化を再現するための割れ目モデル(a)～(c)と解析結果(d)～(f).....	106
図 86	DI と割れ目の水理学的連結性（隙間のつながり具合）の関係.....	107
図 87	幌延深地層研究センター周辺における標高-275 mにおける比抵抗分布..	110
図 88	ボーリング調査（HFB-1 孔）.....	111
図 89	ボーリング調査から得られた塩化物イオン濃度、酸素・水素同位体比の深度分布.....	111
図 90	ボーリング調査から得られた塩化物イオン濃度および酸素・水素同位体比の相関図.....	112
図 91	HFB-1 孔、HDB-3 孔および HDB-6 孔における比抵抗検層の結果.....	113
図 92	幌延深地層研究センター周辺における電磁探査の測点配置と地質・地質構造分布.....	114
図 93	各ケースの電磁探査解析結果の比較（水平断面）.....	117
図 94	各ケースの電磁探査解析結果の比較（鉛直断面）.....	118
図 95	解析領域と着目断面位置（A-A'）.....	120
図 96	解析モデル.....	121
図 97	隆起・侵食による古地形変化の影響についての感度解析の結果.....	121
図 98	海水準変動の影響についての感度解析の結果.....	122
図 99	樹脂注入後の EDZ の割れ目試料（ボーリングコア試料）の拡大写真.....	123
図 100	樹脂注入後の EDZ の割れ目試料で観察された開口幅とせん断変位量の関係（赤丸）とシミュレーション結果（青線）.....	124
図 101	EDZ の割れ目を対象に実施した既往の注水試験のデータの例.....	125
図 102	地下施設からの湧水量（上）と HDB-6 孔の稚内層における断層区間の水圧観測結果（下）.....	127
図 103	地下水の採取箇所.....	130
図 104	地下水の塩化物イオン濃度の経時変化.....	131
図 105	地下水の酸素同位体比の経時変化.....	132
図 106	試験坑道 4 壁面からの浸出水の採取箇所.....	133
図 107	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.....	134
図 108	C05 における水圧モニタリング結果.....	135
図 109	C06 における水圧モニタリング結果.....	135
図 110	C07 における水圧モニタリング結果.....	136
図 111	C08 における水圧モニタリング結果.....	136

図 112	C09 における水圧モニタリング結果	137
図 113	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	138
図 114	C05 の区間 2 における水質モニタリング結果	139
図 115	地中変位計設置状況写真	141
図 116	鋼製支保工応力計設置例	141
図 117	計測器設置位置図	141
図 118	地中変位計の計測結果	142
図 119	鋼製支保工応力計の計測結果	143
図 120	PIN8 の傾斜量および傾斜方向	144
図 121	PIN10 の傾斜量	145
図 122	幌延深地層研究センター周辺の震央分布	146
図 123	地表および地下施設で観測された地震の波形	147
図 124	地下施設の整備状況	148
図 125	設備の点検および更新状況	148
図 126	掘削土（ズリ）置場	149
図 127	二重遮水シートの構造	149
図 128	排水処理設備	150
図 129	排水系統と各水質調査の採水地点	151
図 130	地下施設からの排水処理フローと採水地点	153
図 131	天塩川の採水地点	155
図 132	天塩川での採水状況	155
図 133	掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水地点	157
図 134	掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水	157
図 135	清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水地点	159
図 136	清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水状況	159
図 137	環境調査実施場所	162
図 138	清水川の水質調査	163
図 139	生息魚類調査	164
図 140	安全パトロールの状況	165
図 141	安全行事（安全大会：令和 3 年 7 月 1 日）の状況	165

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	21-350-TRA 孔の試験区間から採取した地下水中の元素濃度	36
表 3	350m 調査坑道の 13-350-C05 孔における水質モニタリング結果の平均値(平成 29 年度～令和元年度)	37
表 4	トレーサー試験条件.....	40
表 5	セレンの結合状態(近傍元素、配位数、原子間距離)に関する解析結果...	47
表 6	コンクリートの溶脱成分に起因した埋め戻し材の変質に関わる状態の整理.	57
表 7	室内試験の結果(隙間未充填ケース)	85
表 8	100℃を超えた状態での緩衝材の変質に関する既往知見の整理.....	90
表 9	幌延町宮園で観測された震度 1 以上の地震.....	146
表 10	天塩川への排水量.....	152
表 11	地下施設からの排水に係る水質調査結果.....	154
表 12	天塩川の水質調査結果.....	156
表 13	掘削土(ズリ)置場周辺の地下水の水質調査結果.....	158
表 14	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.....	160
表 15	浄化槽排水の水質調査結果.....	161
表 16	清水川の水質調査結果.....	163
表 17	確認された重要種(魚類)	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

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

技術基盤の整備の完了が確認できれば、地下施設の埋め戻しを行うことを具体的工程として示します。

なお、令和 3 年 10 月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、引き続き、「高レベル放射性廃棄物については、国が前面に立って最終処分に向けた取組を進める」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）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^{*10}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^{*11}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^{*12}での物質移行に関するデータ取得を実施するとともに、有機物や微生物の影響を確認するためのトレーサー試験を実施します。

(2) 処分概念オプションの実証

令和元年度までの試験では、実際の環境下において、坑道の埋め戻し方

*10：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。

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

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

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^{*13}の有無など）・回収方法による埋め戻し材の品質の違いを実証試験で明らかにします。さらに、人工バリアの品質を踏まえて、廃棄体の設置方法（間隔など）などを確認するための実証試験を行います。また、人工バリアシステムの安全裕度の検証に向けて、緩衝材が 100℃超になった状態を想定した解析手法を開発します。

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

令和元年度までの検討では、まずは小規模な断層（幅数 cm）に着目して試験を行い、断層への地震動の影響などを確認しました。これまでの研究開発で手法の妥当性が確認できたため、この手法を使って、処分場の設計・施工や安全評価とリンクした形で研究を進めることが可能となりました。令和 2 年度以降は、より大型の断層において、地震動や坑道掘削に伴う割れ目中の地下水の流れの変化に関して、堆積岩の緩衝能力（自己治癒能力）の作用に係る実証試験を実施します。さらに、地下水が動いていない環境を調査してモデル化する技術を実証するとともに、人工バリアのひび割れに対する自己治癒能力^{*14}を解析する手法を開発します。

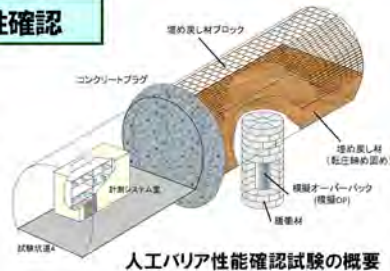
*13：ベントナイトやコンクリートなどが材料となって構成される、緩衝材や埋め戻し材が移動・膨出するのを防ぐため、あるいは掘削損傷領域の地下水の移動を抑制するために、処分坑道の両端やその周辺に設けられる構造物です。

*14：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-応力-化学連成挙動や、物質移行現象などを計測・評価する技術の高度化を行う。



人工バリア性能確認試験の概要



人工バリア性能確認試験の解体調査のイメージ

②処分概念オプションの実証

- 人工バリアの設置・品質確認などの方法論に関する実証試験
 - ・操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証
 - ・坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化
- 高温（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] 設置・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となる情報を整理する。



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。



廃棄体定置決定や間隔設定の考え方の整理

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

表 1 幌延深地層研究計画の令和 2 年度以降のスケジュール

		第3期		第4期中長期目標期間						
		R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
【必須の課題】										
1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認										
	1.1 人工バリア性能確認試験	浸潤時・減熱時のデータ取得、連成モデルの適用性確認 国際プロジェクトにおける解析コード間の比較検証、改良・高度化								
	1.2 物質移行試験	掘削影響領域での物質移行に関するデータ取得 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行試験、等								
2. 処分概念オプションの実証										
	2.1 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験									
	2.1.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証	搬送定置・回収技術、閉鎖技術の実証								
		2.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化			坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理、等					
	2.2 高温度（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験		100℃超の際にニアフィールドにおいて発生する現象の整理 国際プロジェクト情報の収集・整理、等							
3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証										
	3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化									
	3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握	数十cmの幅の断層を対象とした水圧擾乱試験 断層の活動性評価手法の整備、等								
		3.1.2 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化			地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）の調査・評価技術の検証、等					
	3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験		人工バリアの緩衝材や坑道埋め戻し材が掘削影響領域の力学的・水理学的な緩衝能力に与える影響を把握する解析手法の開発							
【施設計画】										
	坑道掘削	掘削準備								
		350m調査坑道 立坑（西、東、換気）								
		500m調査坑道								
【維持管理】										

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

- 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。

令和３年度は、「幌延深地層研究計画 令和３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。

埋め戻し材(ブロック)

コンクリートプラグ

模擬オーバーバック

埋め戻し材(転圧)

緩衝材

岩盤

解体調査

模擬オーバーバックの一体取り出し

人工バリア試験体取り出し試験施工

換気立坑

西立坑

東立坑

140m調査坑道

250m調査坑道

350m調査坑道

500m調査坑道

施工済み範囲

地下施設イメージ図

350m東周回坑道

グラウトコアサンプリング孔

ボーリングコア

グラウト注入

弾性波トモグラフィ波動経路

掘削損傷領域の連続性調査のイメージ

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

ボーリング孔での調査

化石海水の三次元分布の推定結果を確認

地盤

0 400 800 1000

1 5 10 15 20 25 30 Ω・m

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

7

国際共同研究 DECOVALEX^{*15}では、既存の室内試験結果を対象にした解析を実施し、各解析コードでの緩衝材の初期飽和度の取り扱いの違いで、膨潤圧や膨潤変形量の解析結果に違いが見られることが分かりました。また、空気の移動などを考慮した熱－水理－力学連成現象^{*16}を把握するために、ベントナイト^{*17}に温度勾配をかけた条件での室内試験を行い、連成解析コードを検証するためのデータを取得しました。人工バリアの試験体を取り出すための試験施工として、試験孔部に設置した人工バリアと埋め戻し部に設置したプラグや埋め戻し材の解体を行いました。その結果、緩衝材の飽和度により最適な解体手法が異なること、事前に樹脂を注入することで埋め戻し材、コンクリート、岩盤の境界面を乱さずに一体として採取できることなどを確認し、人工バリア性能確認試験の解体に際しても、同様の方法で試料の採取が可能である見通しが得られました。

物質移行試験では、掘削損傷領域（Excavation Damaged Zone;以下、EDZ）を対象とした物質移行試験を実施した結果、掘削損傷の割れ目と比べ、岩盤と支保工や支保工と埋め戻し材の境界に生じ得る移行経路の方が、相対的に選択的な移行経路となりやすい可能性が示唆されました。また、有機物・微生物・コロイド^{*18}を対象とした物質移行試験のためのボーリング孔を新たに掘削し、間隙水圧や物理化学パラメータの連続モニタリングを開始するとともに、有機物の存在が地下水中の元素の存在状態（有機物との結合によるコロイド化など）に与える影響を評価するための室内試験を実施しました。さらに、稚内層深部のブロックスケール（数m～100 m規模）を対象とした物質移行試験を実施した結果、稚内層深部の物質移行概念モデルを検討する上で有益な情報を得ました。なお、上記の物質移行試験に関わる基礎的な調査研究として、微生物を指標とした

*15：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1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。

*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、地下水の流れ、緩衝材が膨潤することによって発生する応力や岩盤に作用する応力などが複合的に生じる現象です。さらに地下水と鉱物の反応などによる化学的な変化を加えた、熱－水理－力学－化学連成現象が人工バリアの近傍で生じます。

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

*18：大きさが1 nm～1 μm（100 万分の1 mm～1000 分の1 mm）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。

岩盤中の水みちの評価手法の検討や微量元素の地下での存在形態の分析を進めました。

(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^{*19}が維持される期間における吹付けコンクリートの経年劣化の把握を目的にコンクリート試験体の暴露試験^{*20}を継続し、約 8 か月の暴露期間における大気条件下と湿潤条件下での中性化^{*21}の程度の違いなどを把握しました。その結果、大気条件下に比べ、湿潤条件下では中性化の領域がごくわずかであることが分かりました。また、坑道開放条件での坑道周辺岩盤における諸特性の長期変化を評価するために、長期クリープ^{*22}変形挙動解析と亀裂を含む岩石コアを用いた透水試験結果から坑道周辺の飽和度分布を予測しました。その結果、クリープ速度の違いによる透水性^{*23}の変化の違いの影響は大きくないことが推定されました。

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、コンクリートからの溶出成分に起因した埋め戻し材の変質挙動に関する解析の結果、埋め戻し材が変質する可能性は小さいことが示唆されました。また、埋め戻し材中のベントナイトの流出挙動に関する室内試験に着手するとともに、埋め戻し材の膨潤変形挙動に関する室内試験を継続し、膨潤変形挙動の評価に必要なデータを整理しました。閉鎖後に水みちとなることが想定される EDZ の連続性を遮断するための施工技術の実証として、坑道においてベントナイトの吹付け試験を実施し、吹付けの手順や吹付け材料の管理方法を確認するとともに、吹付け後の施工品質を把握しました。EDZ の調査技術の高度化として、岩盤中の連続性の高い

*19：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。

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

*21：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とが反応し、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。

*22：クリープは、一定の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）が進行する現象を指します。

*23：岩盤の水の通し易さのことです。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。

割れ目を検知するために開発した試験装置の適用性を確認するとともに、坑道周辺の EDZ の経時変化を理解するための解析コードを開発しました。さらに、ボーリング孔を閉塞する方法として、ベントナイトブロックを孔内に設置する方法の具体的な手順について検討し、その手順を室内の模擬ボーリング孔で確認しました。

人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築として、緩衝材の流出挙動に係る試験を継続しました。緩衝材ブロックと岩盤の間に隙間がある施工方法については、湧水量の多い条件を含めた幅広い条件での室内試験により、緩衝材の流出挙動を確認しました。その結果、湧水量が少ない場合を想定したケースでは緩衝材の膨潤により隙間が閉塞しましたが、湧水量が多い場合を想定したケースでは隙間が閉塞する場合と閉塞しない場合が見られ、湧水量との明確な関係は見られませんでした。また、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長期的な流出挙動を確認するための試験を開始し、緩衝材の流出量などの計測を実施しました。

高温（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験として、緩衝材の温度が 100℃を超えた状態で発生し得る現象に関する試験などの事例を調査しました。一例として、緩衝材中のスメクタイトのイライト化^{*24}については、およそ 130℃までは 1,000 年後の緩衝材の変質割合が小さいと推測されました。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^{*25}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を入手しました。

*24：スメクタイトおよびイライトはどちらも粘土鉱物の一種であり、スメクタイトは、一般に温度や圧力などの影響によってイライトに変化します。スメクタイトは人工バリアの 1 つである緩衝材の材料であるベントナイトに含まれており、スメクタイトがイライトに変化することで、ベントナイトの透水性や核種の収着性などの特性が変化します。

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

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握やダクティリティインデックス（以下、DI）^{*26}を用いた透水性評価手法の信頼性向上などを目的に、DI モデルを再検証するためのシミュレーションや既存の水圧擾乱試験^{*27}結果を用いた比較検証を行いました。その結果、これまで確認されていた地下水の主要な水みちとなる割れ目の透水性と DI の間の相関関係のメカニズムを明らかにするとともに、それに関わる新たな DI の経験式^{*28}を構築しました。また、既往の水圧擾乱試験で認められていた割れ目の水理学的連結性^{*29}に関する特異的な現象について、複数のケースを仮定したシミュレーションを行うことにより、一定の解釈を与えることができ、割れ目の水理学的連結性と DI の間に密接な関係があることを確認しました。

地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水^{*30}領域）を調査・評価する技術の高度化においては、令和 2 年度に実施した電磁探査により推定した化石海水の三次元分布の妥当性を確認するために、声問層を対象に深度 200 m までのボーリング調査を実施し、岩石コアの間隙に含まれる地下水の水質やボーリング孔周辺の比抵抗^{*31}などのデータを取得しました。また、令和 2 年度とそれ以前に取得した電磁探査データを用いて比抵抗分布の再解析を実施した結果、調査範囲の外側にある測点のデータを加えると、より深い深度での解析精度が向上することを確認し、これを解析の際の留意点として整理しました。

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

*26：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。

*27：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。

*28：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。

*29：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たり、他とつながって存在したりします。岩盤の中での地下水の流路は、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、流路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、地下水の流路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。

*30：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。

*31：岩石の電気が流れやすさを表すもので、一般的には、粘土、シルト岩などは比抵抗が低く（電気が流れやすく）、頁岩、泥岩などは特に低い比抵抗を示す傾向があります。また、砂・礫混じりの地層は比抵抗が高い（電気が流れにくい）傾向があります。

戻し後の EDZ の透水性を推定するための手法の整備に向け、過年度に実施した樹脂注入後の EDZ の割れ目試料の観察結果の妥当性を検証するためのシミュレーションを行いました。その結果、割れ目の開口幅とせん断^{*32}変位量（割れ目に沿ったずれ幅）の間にほとんど相関性が認められないという観察結果は、シミュレーションにおいて、割れ目面にかかる力として試料を採取した深度 350 m の EDZ に作用する圧力を想定すると、良く再現できることが分かり、観察結果が妥当であることが分かりました。また、実施した樹脂注入試験やシミュレーションが有効であることが確認できました。さらに、EDZ の割れ目を対象に実施した既往の注水試験のデータを検討した結果、緩衝材や埋め戻し材の膨潤圧が EDZ の透水性に与える影響を今後検討するのに有用なデータを得ることができました。

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。

幌延町内で実施している調査研究に関わる主要なボーリング調査や観測地点などの位置を図 3 に示します。また、研究所用地内の主な施設と観測装置の配置を図 4 に、350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所を図 5 に示します。

(4) 地下施設の管理・環境調査

地下施設の管理としては、試験坑道 1 において人工バリア性能確認試験の解体調査のための試験施工に関わる工事を行うとともに、施設内の機械設備や電気設備などの維持管理業務（設備運転や保守点検など）を引き続き実施しました。地下施設からの排水および掘削土（ズリ）置場の浸出水を、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。地下施設からの排水などの水質調査および研究

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

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ました。

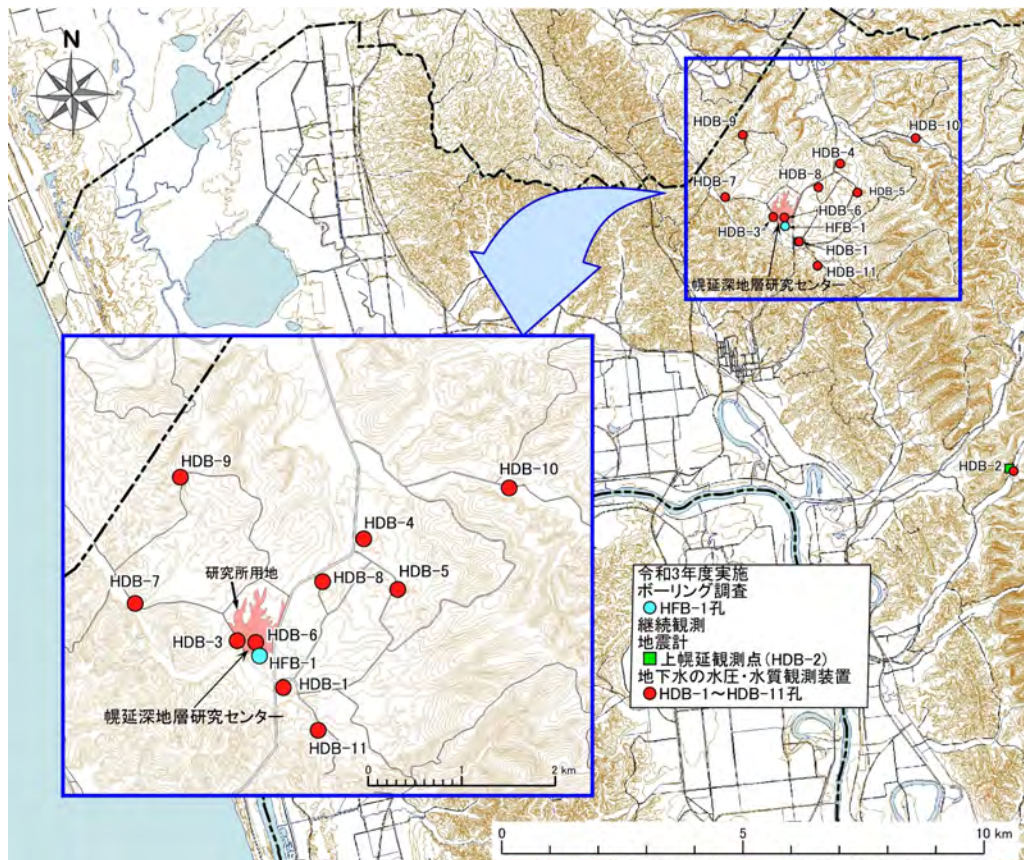


図 3 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所
国土地理院の基盤地図情報（基本項目）を加工して作成



図 4 研究所用地における主な施設と観測装置の配置

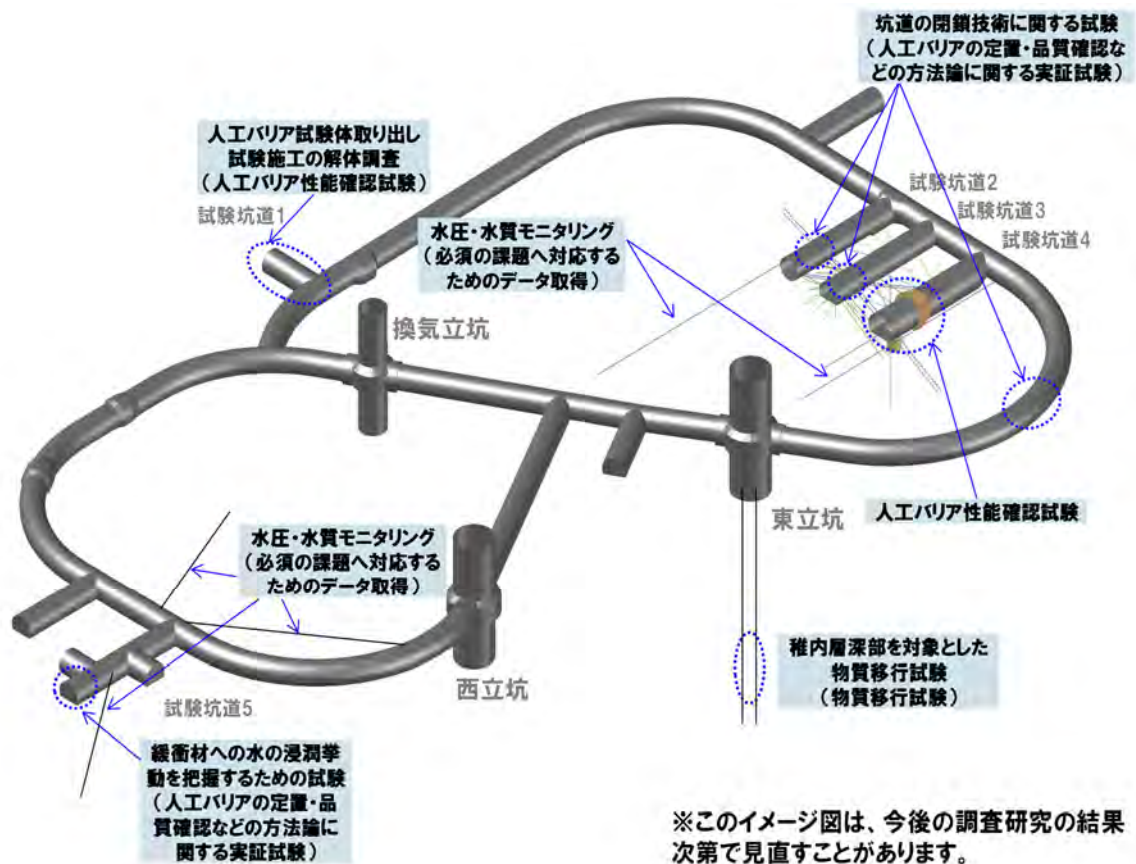


図 5 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

(5) 開かれた研究・成果の発信

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。そのため、令和 3 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。

国内機関との研究協力として、令和 3 年度は、東北大学や東京大学、京都大学などの大学、幌延地圏環境研究所^{*33}、産業技術総合研究所^{*34}および電力中央研究所^{*35}などの研究機関との共同研究を実施するとともに、研

^{*33}：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。

^{*34}：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行っている研究組織です。

^{*35}：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。

究を推進しました。国外機関との研究協力として、人工バリア性能確認試験をタスクの 1 つとする国際共同研究 DECOVALEX に参画し、情報共有を図りました。さらに、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^{*36}の協力のもと、幌延国際共同プロジェクト（Horonobe International Project : HIP）を立ち上げるべく、準備会合への参加機関を募集し、準備会合にて、共同研究の実施内容や分担などについて議論を行いました。第 1 回の準備会合には日本を含む 8 つの国と地域から 10 機関が参加しました。

研究開発業務の透明性・客観性を確保する観点から、研究計画から成果までの情報を国内外の学会や学術誌などを通じて広く公開するとともに、ホームページ^{*37}などを活用した情報発信を継続しました。令和 3 年度は、第 3 期中長期計画期間（平成 27 年度～令和 3 年度）の最終年度であったことから、この期間における研究開発成果をウェブ形式の報告書（CoolRepR4）として取りまとめ、公開しました^{*38}。なお、令和 3 年度に公開した論文や学会発表の実績については、これまで通り巻末に付録として掲載しました。

以上のように、令和 3 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。

*36：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。

*37：幌延深地層研究センターホームページ；<https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/>

*38：CoolRep ホームページ；<https://kms1.jaea.go.jp/CoolRep/index.html>

4. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

4.1 人工バリア性能確認試験

令和 2 年度以降は、ガラス固化体設置直後の廃棄体の発熱過程に加えて、減熱過程を模擬した原位置試験データや解体調査により得られる、より詳細なデータに基づく熱－水理－力学－化学（THMC）連成現象^{*39}の評価モデルの高度化が課題となります。そのため、人工バリア性能確認試験で設置しているヒーターの温度を下げた試験（減熱過程を模擬した原位置試験）を行い、THMC 連成現象に係るデータを取得します。また、減熱試験終了後は解体調査により、人工バリア、埋め戻し材、コンクリート、周辺岩盤やそれらの境界面のサンプリングや分析を行います。人工バリア性能確認試験の解体調査については、適用する施工方法の検証を行うために事前に試験施工を行います。設置したセンサーや解体調査により得られるデータを基に、THMC 連成解析を行い、評価モデルの高度化や適用性の確認を行います。このような人工バリア周辺で起こる現象の理解は、地層処分後の安全評価における初期状態の把握やオーバーパック^{*40}（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 3 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 1 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）での試験に移行しました。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）⁽²⁾。減熱過程は、この発熱量が低下していく過程を想定したものです。

*39：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）、地下水の流れ（Hydro）、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（Mechanical）、地下水と鉱物の反応などによる化学的な変化（Chemical）などが複合的に生じる現象です。

*40：人工バリアの構成要素の 1 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いいます。候補材料は炭素鋼などの金属です。

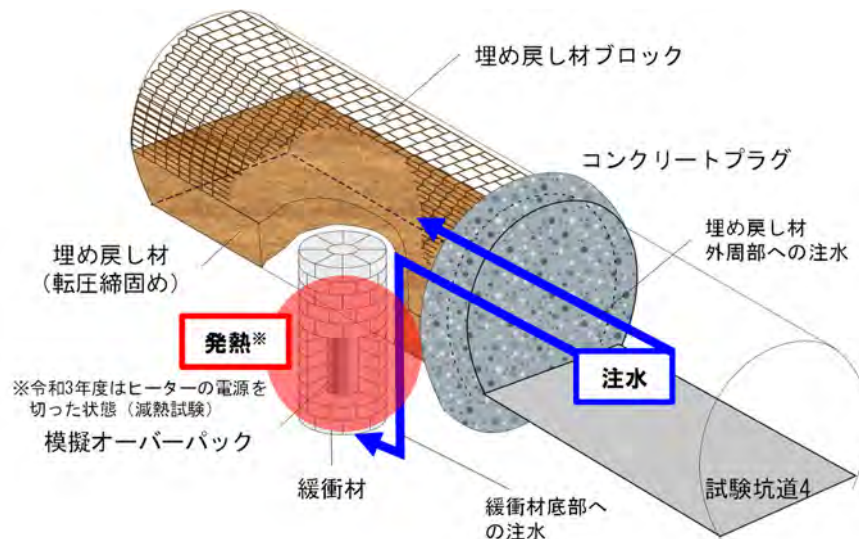
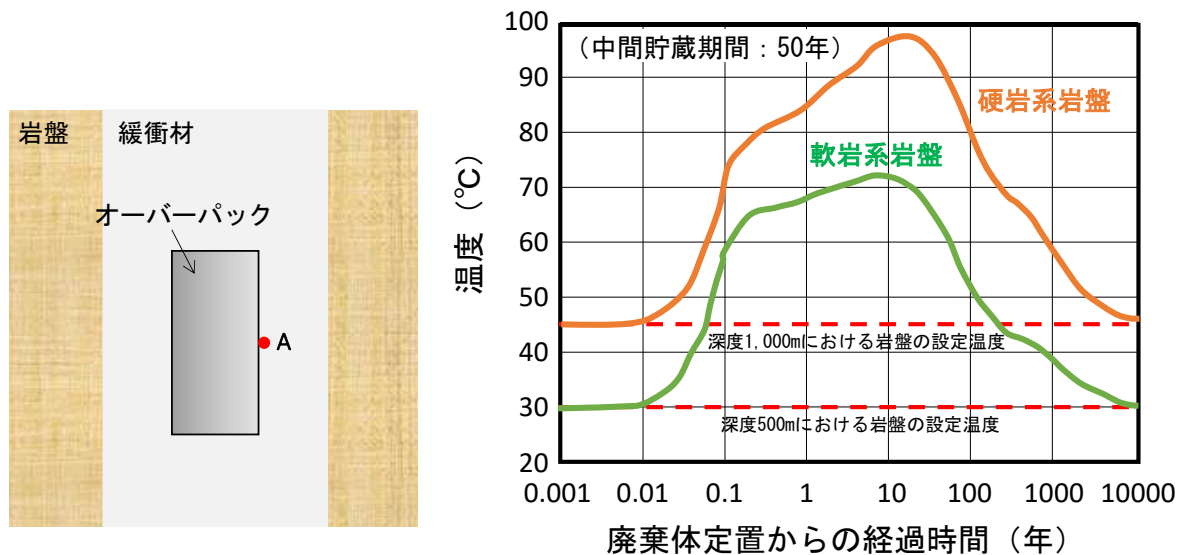


図 6 人工バリア性能確認試験の概念図

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(3)、(4)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⁽²⁾

図 8 に令和 2 年度から令和 3 年度に計測したデータの一例を示します。ヒーターの設定温度は令和 2 年 6 月 24 日から徐々に低下させ、同年 7 月 14 日に 50℃まで低下させ、令和 3 年 5 月 18 日にヒーターの電源を切りました。図 8(a) に示すように、模擬 OP の表面温度の低下に伴い緩衝材中の温度も低下する傾向が令和 2 年度と同様に確認され、最終的には原位置温度とほぼ同程度の 20℃付近でほぼ一定となることが確認されました。図 8(b) は緩衝材中の内側、外側と緩衝材外周部のケイ砂中の間隙圧

です。間隙圧の値も令和 2 年度と同様、温度低下とともに緩衝材中の気相の圧力が下がったことで、低下したと考えられます。図 8(c)の全応力には、緩衝材中の間隙圧、熱応力、膨潤応力などが含まれています。温度低下直後の全応力の低下は、温度低下によって間隙圧や熱応力が低下したことにより生じているものと考えられます。一方で、温度低下直後の変化を除くと、全応力は間隙圧の上昇とは無関係に緩やかな上昇傾向を示しており、緩衝材の膨潤による応力の増加を示している可能性があります。これらの現象については今後も継続して確認していきます。

人工バリア性能確認試験では、岩盤からの地下水浸潤を模擬するために、埋め戻し材外周部と緩衝材底部に注水管を設置し、付近のボーリング孔から採取した地下水を人工的に注水しています。図 8(d)は埋め戻し材への注水流量と緩衝材への注水流量と注水圧力を示します。埋め戻し材への注水流量は約 300 mL/min を維持しています。緩衝材部への注水流量は、令和 2 年度に急激に低下した以降も、緩やかに減少傾向を示していることが分かります。これは、ボーリング孔から得られる地下水の量が徐々に減少していることが原因であり、無理に注水流量を増加させると、注水管内に大量にガスが混じり、正確な注水流量を計測することが困難になります。そこで、安定した流量を注水することを優先し、現在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。

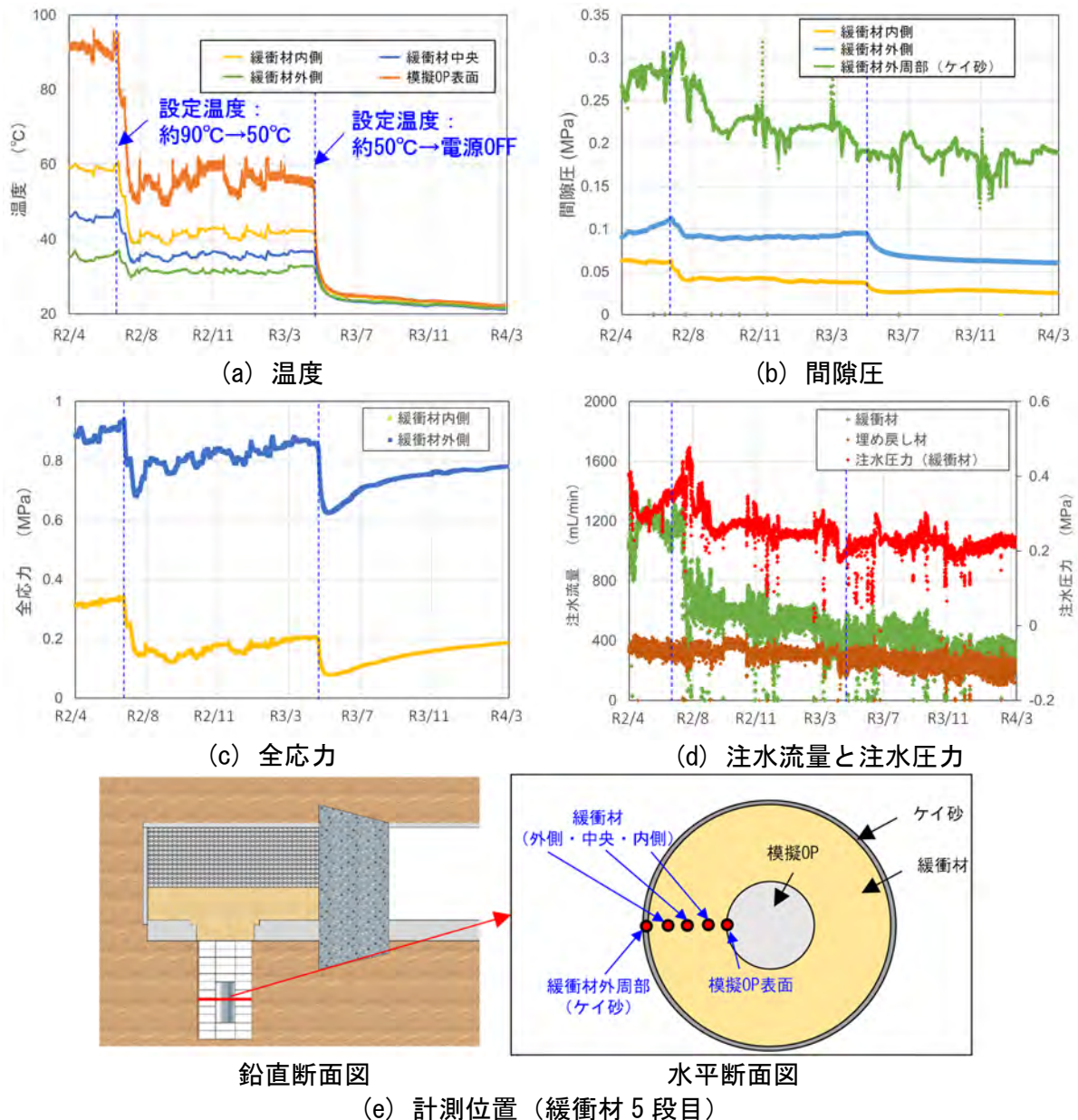


図 8 緩衝材 5 段目の計測データ

THMC 連成解析については、解析に使用する各種パラメータを取得する必要があります。令和 3 年度は、温度勾配下における緩衝材中の水分移動特性に係るパラメータを取得するために、緩衝材の乾燥密度^{*41}を 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）としたときの室内試験を開始しました。試験の概念図と試験条件を図 9 に示します。本試験は、緩衝材中の水分が温度勾配によって、緩衝材中をどのように移動するかに着目した試験であるため、温度上昇に伴う供試体からの水分

*41：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。

の蒸発などにより、外部へ水分が逃げないように供試体の周りはラップで覆っています。また、外部の温度影響を確認するため、30℃に制御した恒温槽内と室温（20～25℃）での試験を行いました。試験期間は 7、11、18 日とし、試験終了後に試験装置を解体し、小さくカットした供試体の水分を乾燥炉で蒸発させ、乾燥前後の重量を測定することにより、含水比分布を確認しました。図 10 に試験期間 18 日後の結果を示します。恒温槽内と室温での差は見られず、いずれのケースにおいても温度勾配による水分の移動傾向が確認できました。今後は、上下の温度を変化させた条件で試験を行い、それらの試験結果から温度勾配下における緩衝材中の水分移動特性に係るパラメータを解析検討により求める予定です。

国際共同研究 DECOVALEX では、緩衝材の浸潤試験、膨潤圧試験、膨潤変形試験などの既存の室内試験結果を対象に、令和 2 年度に設定した解析条件を基に解析を実施し、異なる解析コードによる解析結果の違いを比較しました。その結果、各解析コードでの力学モデル（弾性モデルと弾塑性モデルの違い）や膨潤応力式における初期飽和度の取り扱いにより、緩衝材の膨潤圧や膨潤変形量の解析結果に違いが見られることが分かりました。

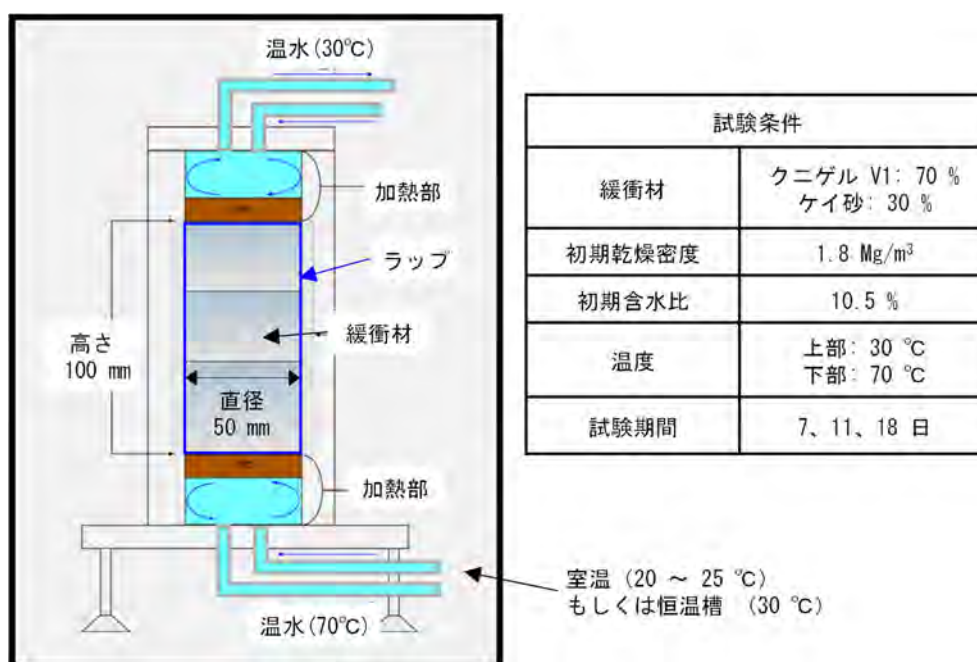


図 9 温度勾配下における緩衝材中の水分移動特性に関する試験の概念図と試験条件

外部条件	室温		恒温槽	
試験回数	1 回目	2 回目	1 回目	2 回目
供試体底部からの距離 (mm)	含水比 (%)			
95	17.1	13.9	16.5	14.8
85	13.4	11.1	13.2	12.3
75	11.4	10.9	11.1	10.8
65	10.9	10.2	10.5	10.6
55	10.4	9.6	10.2	9.8
45	9.6	9.2	9.2	9.3
35	9.4	9.0	9.9	9.0
25	8.2	7.9	8.7	8.0
15	6.5	6.4	6.9	6.7
5	4.9	4.8	5.1	5.1

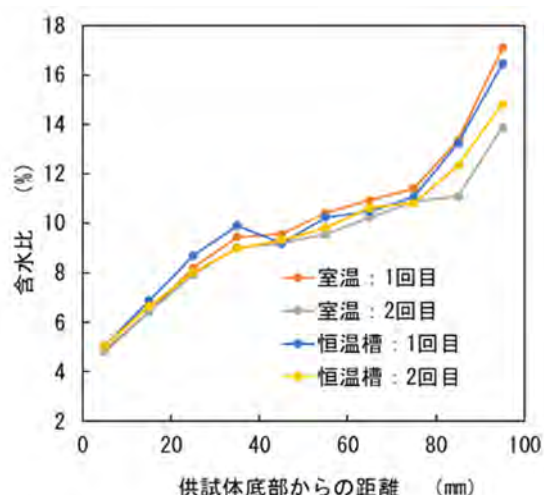


図 10 試験結果（試験期間 18 日）

THMC 連成現象の評価モデルの高度化のためには、緩衝材中に内包される空気やガラス固化体の発熱によって生じる水蒸気などの気相が、連成現象にどのような影響を及ぼすのかを整理する必要があります。これまでの解析検討では、発熱によって生じた水蒸気によって、発熱部近傍の緩衝材の水分量の低下を引き起こされるとともに、水蒸気発生に伴う間隙圧の増加により、力学現象へも影響を及ぼす可能性が示唆されています⁽⁵⁾。このような現象を正確に把握するためには、解析検討に加えて、室内試験によって実際の現象を確認する必要があります。令和 3 年度は、室内試験によって気相が熱－水理－力学連成現象に及ぼす影響を確認するためのデータを取得することを目的に、予備試験による室内試験装置の適用性確認と、連成試験によるデータ取得を開始しました。試験は岩盤から OP 間の緩衝材を一次元的に切り出した縮小モデルを考え、OP 側を想定した片方を加熱し、岩盤側を想定したもう片方から注水する試験系としました。

図 11 に試験装置の概念図を示します。本試験装置に設置する供試体の寸法は直径 150 mm、高さ 150 mm の円筒形とし、試験装置の上下に加熱と注水を行う機構を設けるとともに、温度、相対湿度、間隙圧を連続計測するためのセンサーを設置しました。試験装置の円筒セルと上板には、強度が高く、温度による変化が小さい特性を持つ樹脂（ポリエーテルエーテルケトン：PEEK）を採用しました。予備試験では、主に試験容器の密閉性確

認（試験容器から外部への空気漏れがないこと）、設定した空気圧（0.5 MPa）や温湿度条件（条件①：温度、相対湿度が制御されていない室内、温度 25℃、条件②：相対湿度 60%RH に制御された恒温・恒湿の試験室内、条件③：温度 20℃、相対湿度 90%RH に制御された養生室）で、間隙圧計や温湿度計がどの程度正確に測定できるか、設定温度 70℃で加熱した際、加熱面にどの程度温度のばらつきがあるかを確認しました。その結果、注入空気圧 0.5 MPa に対して間隙圧計の値も同程度の計測値である（空気漏れがない）こと、温度の計測値は全体で最大約 0.2℃、相対湿度の計測値は高い相対湿度のとき（条件③）約 5%RH の差が見られること、加熱面の表面温度は設定温度 70℃に対し、場所により 60℃～70℃の間でばらつくことを確認しました。計測値のばらつきについては、さらなる試験や解析検討により、原因や連成試験に及ぼす影響を確認する予定です。

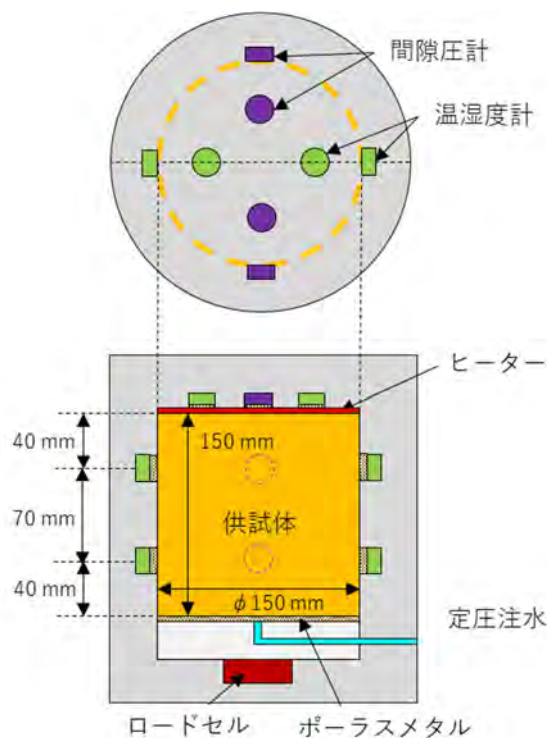


図 11 気相の影響を確認するための試験装置の概念図

連成試験に使用する供試体はクニゲル V1 を用い、初期乾燥密度は比較的早期に水分の移動が確認できること、解析のパラメータがある程度取得されていることを考慮し 1.2 Mg/m³ と設定しました。連成試験は、温度 25℃、湿度 60% に設定した恒温恒湿室内で実施し、ヒーターの加熱温度

はセンサーの温度適用範囲を考慮し 70℃に設定しました。図 12 に計測結果の一例として温湿度計で測定した温度と相対湿度の結果を示します。温度の計測結果は、加熱開始から数時間程度温度上昇が続き、その後ヒーター部は平均 62℃、側面上段は平均 37℃、側面下段は平均 28℃で一定となりました。同断面に設置したセンサーは、ほぼ同様の値を示すことから、上端部（ヒーター）から下端部にかけて供試体中にも温度勾配が形成されていると考えられます。また、ヒーター部の温度は設定温度 70℃に対して 8℃ほど低く、予備試験と同様の傾向が確認されました。相対湿度の計測結果は、ヒーター部付近では温度上昇に伴い相対湿度が低下し、最終的には 20%RH 付近に漸近しました。これは、加熱面近傍の水分が温度勾配によって下側へ移動した結果であると考えられます。側面下段の相対湿度は試験水の浸潤により上昇し、注水開始後約 40 日後には 100%RH となりました。また、側面上段の相対湿度は試験開始後初期に一時的に上昇した後、下降傾向を示し、その後緩やかに上昇傾向に転じることが確認されました。これは、温度勾配による水分の移動と浸潤面からの水分の移動の両者の影響を受けた結果であると考えられます。今後は、異なる条件での連成試験を行い、今回の試験結果との比較検証や解析検討により、連成現象のメカニズムの理解や連成解析コードの検証を進める予定です。

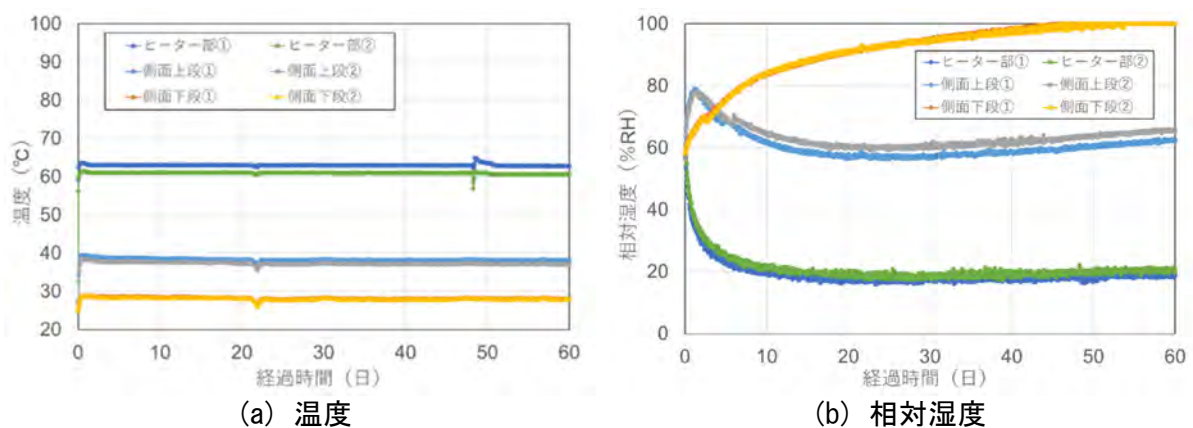


図 12 温度、相対湿度の測定結果

(2) 人工バリア解体試験施工

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 THMC 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、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、試料を乱さずにサンプリングすることが重要となります。そこで、350m 調査坑道の試験坑道 1 で（図 5 参照）解体調査に先立って実施した試験施工（図 13）では、令和 2 年度に設置した人工バリアやプラグ、埋め戻し部の解体工事を行い、解体サンプリング手法の検証を行いました。

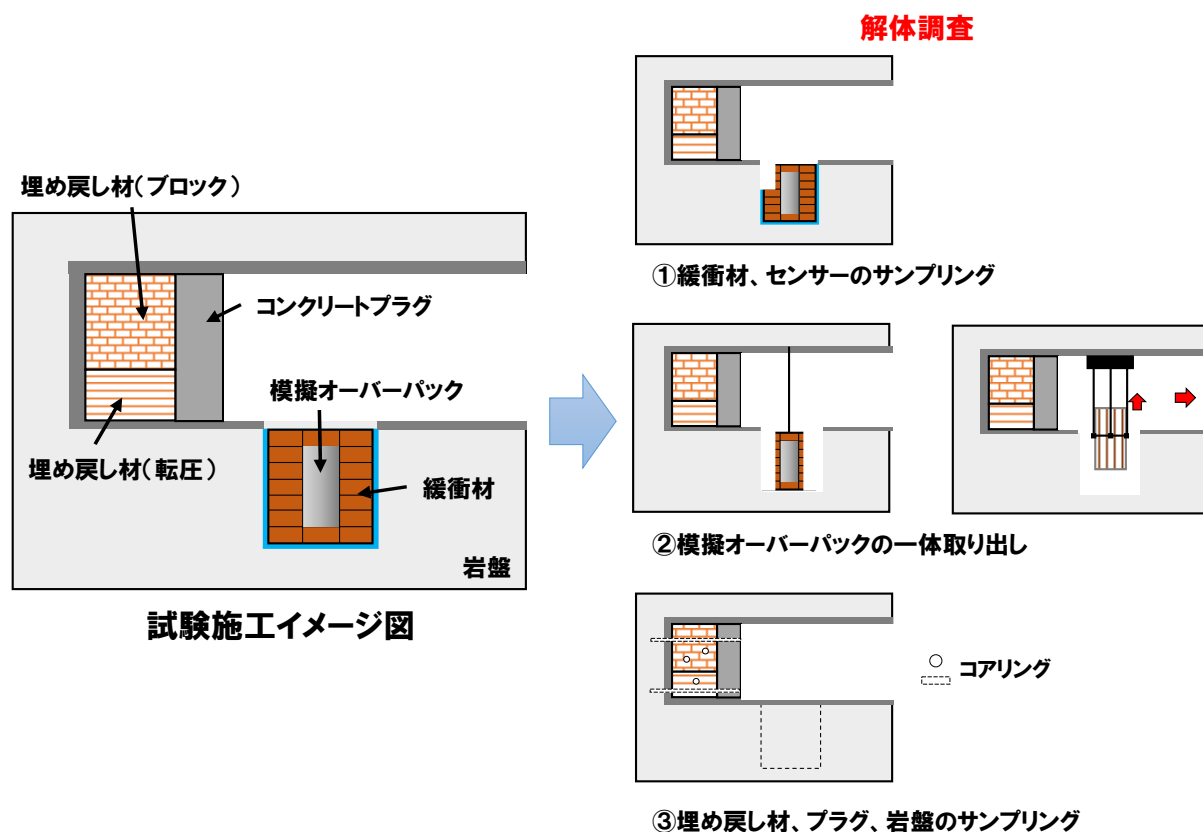


図 13 人工バリア解体試験施工の概念図

緩衝材や埋め戻し材などの粘土材料をボーリングマシンなどの機械でサンプリングする場合、試料を乱さないように削孔するには水を使わないで行う（無水掘り）必要があります。しかし、無水掘りではコアビットと粘土材料の摩擦により試料が乱された報告事例⁽⁶⁾もあり、人工バリア性能確認試験で使用した材料が、どのような条件であれば試料を乱さずにサンプリングできるかを確認する必要があります。そこで、緩衝材ブロックと埋め戻し材を対象に、ボーリングマシンとハンドコアドリルによる無水掘りでのサンプリング性能の検証を行いました。その際、コアビ

ットと粘土材料の摩擦力は、粘土材料の含水比によって変わると考えられるため、含水比が異なると予測される複数の位置をサンプリングの対象としました。サンプリング後は、粘土材料の状態を確認し、含水比を測定しました。図 14 に緩衝材のサンプリングの概念図を示します。図に示すように、ボーリングマシンでは緩衝材 7 段分を貫くように、ハンドコアドリルでは試験孔上部から緩衝材を 1 段撤去するごとに、各段からサンプリングを行いました。緩衝材の周りは注水した地下水で満たされており、緩衝材の外側ほど含水比が高いことが想定されます。図 15 にサンプリング作業の状況とサンプリング後の試料の一例を示します。採取した試料の大きさは、ハンドコアドリルの場合、直径 50 mm、長さ約 300 mm、ボーリングマシンの場合は直径 66 mm、長さ約 2.4 m（長さは試料 1 本あたりの合計）です。ボーリングマシンでは、打込み式と回転式の二種類のコアビットの適用性を、ハンドコアドリルでは回転式の適用性を確認しました。図 16 にボーリングマシンで取得したサンプリング後の含水比測定結果の一例（緩衝材ブロックの下から 5 段目）を示します。緩衝材内側（含水比が低い部分）では、緩衝材は硬いため打ち込み式のコアビットは挿入できず、緩衝材外側（含水比が高い部分）では緩衝材の粘性が大きくなるため、回転式のコアビットでは緩衝材との摩擦により温度が上昇し、緩衝材が乾燥した状態（乱された状態）で採取されました。これらの検討結果から、緩衝材ブロックが初期含水比からあまり変化のない硬い部分（15%以下の含水比）では回転式を、地下水が浸潤し柔らかくなった部分（20%を超える含水比）では打込み式を採用することで、試料を乱さずにサンプリングできることが分かりました。そのため、人工バリア性能確認試験の解体調査では、事前に分析や解析などでおおよその含水比を把握した上で、サンプリング手法を適切に選択することが重要であると考えられます。

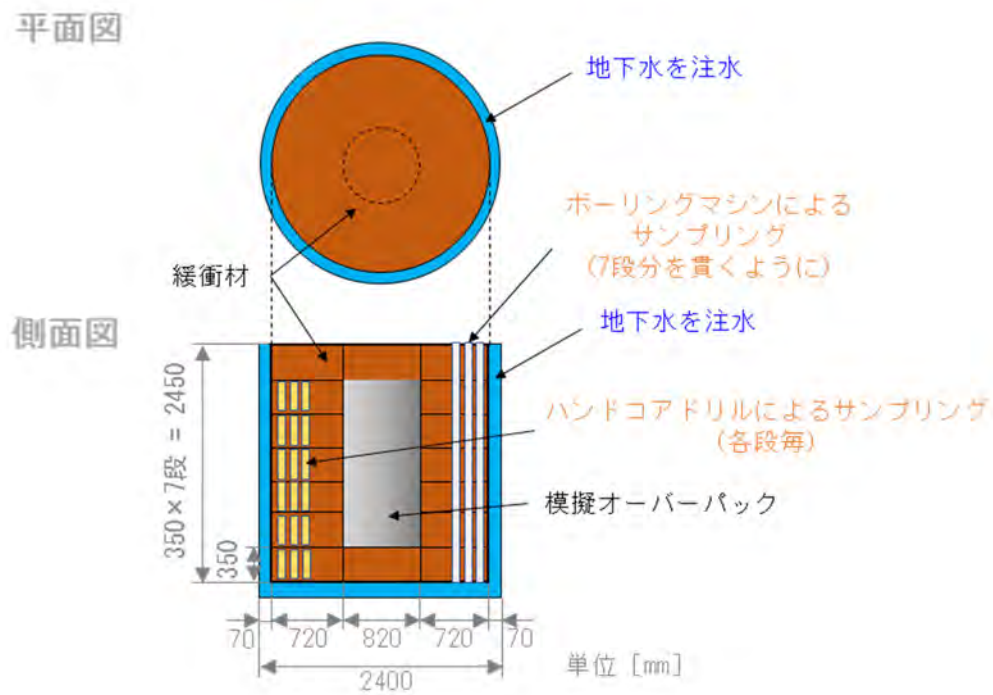


図 14 緩衝材サンプリングの概念図

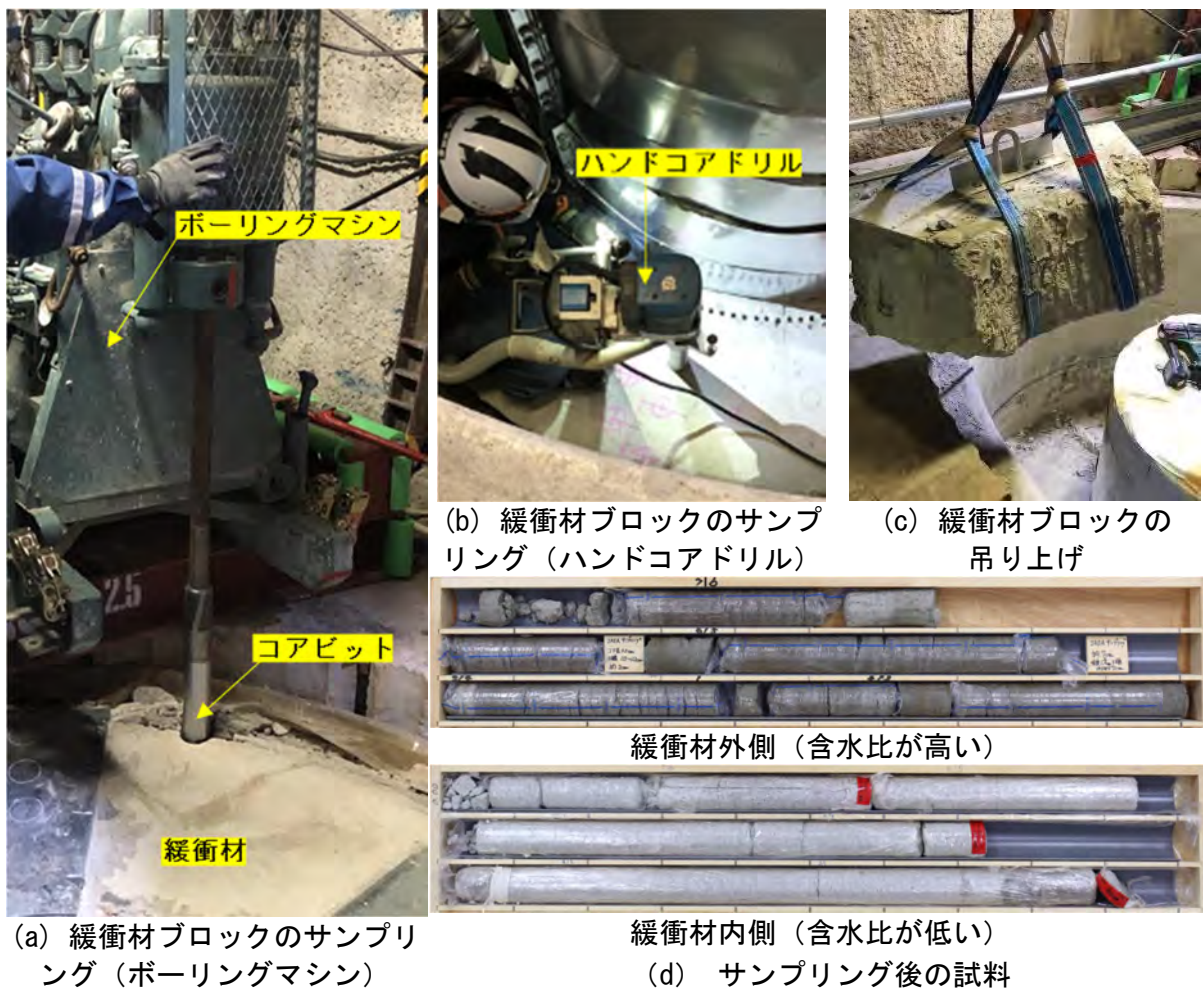


図 15 緩衝材のサンプリングの状況とサンプリング後の試料

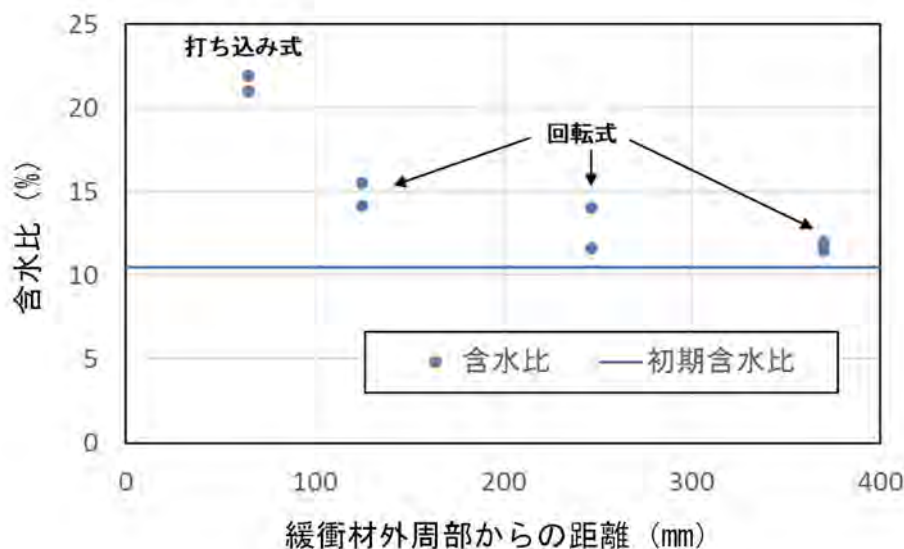
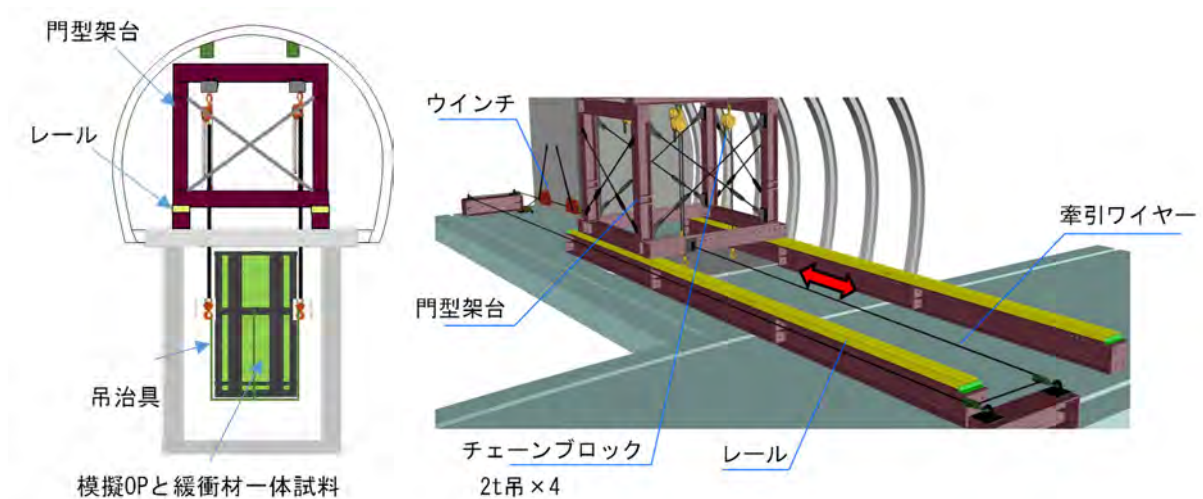


図 16 含水比測定結果の一例（緩衝材ブロック：下から 5 段目）

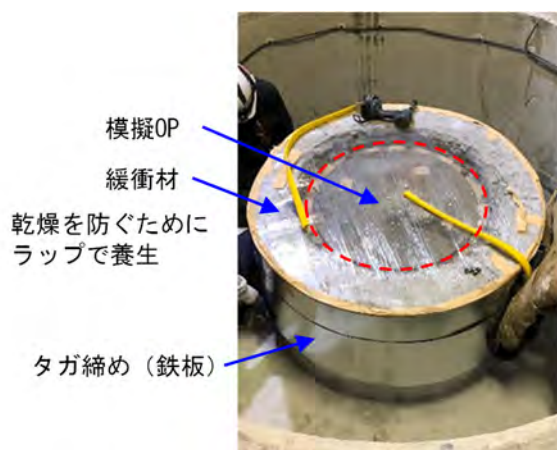
模擬 OP については、腐食や緩衝材との相互作用に関する調査などを予定しています。それらの調査のためには、模擬 OP 本体と付近の緩衝材の接触状態を維持したまま、試験孔から取り出す必要があります。模擬 OP と付近の緩衝材を一体で取り出す場合、その重量は約 4 t を超えることが想定されます。しかし、地下施設の楊重設備で引き上げ可能な重量は 2 t までであるため、取り出し方法を新たに検証する必要があります。そこで、本試験施工では、模擬 OP 一体取出し用の楊重設備を設置し、試験孔からの取り出し方法の検証を行いました。図 17 に取り出しの概念図を、図 18 に作業状況を示します。まず、模擬 OP 付近以外の緩衝材を取り除きます。その際、試料の乾燥を防ぐために模擬 OP と付近の緩衝材をラップで覆い、一体取出し用のタガ締め具（鉄板）を緩衝材外側に設置しました。その後、一体試料に取り出し用の治具を取り付け、門型架台に設置した 4 つのチェンブロックにより試験孔から取り出しました。本試験施工で使用した取り出し用の治具は、事前に 5 t まで楊重可能なことを確認しています。取り出した一体試料は、ウインチで牽引ワイヤーを引っ張り、門型架台ごとレール上を滑らせるように周回坑道まで移動させました。取り出しや移動に伴う試料の乱れはなく、今回採用した手法で、模擬 OP と付近の緩衝材を一体で取り出せることが確認されました。



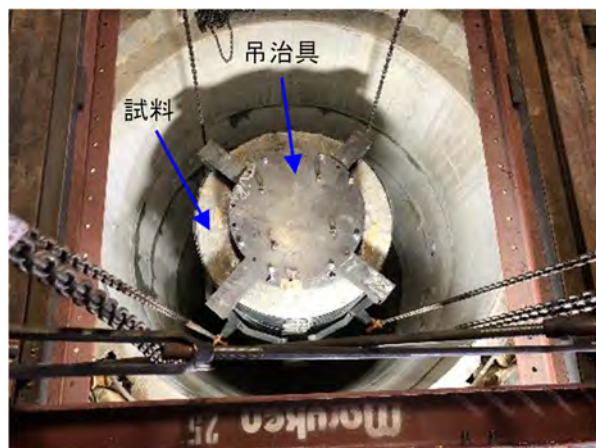
(a) 一体取り出しイメージ

(b) 坑道内移動イメージ

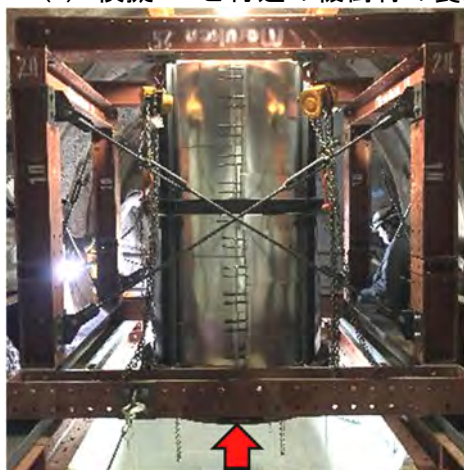
図 17 模擬 OP の一体取り出しの概念図



(a) 模擬 OP と付近の緩衝材の養生



(b) 一体試料に吊治具を装着



(c) 試験孔から一体試料を取り出し



(d) 門型架台ごと一体試料を取り出し

図 18 模擬 OP の一体取り出しの状況

埋め戻し部については、埋め戻し材と吹付けコンクリート、吹付けコンクリートと岩盤の相互作用に関する調査を予定しています。そのためには、それらの接触面を維持した状態で、無水掘りでサンプリングする必要があります。そのようなサンプリング手法として、接触面を樹脂で固めた後にオーバーコアリング^{*42}することにより、コンクリートと粘土材料の境界部試料を取得した事例⁽⁷⁾があり、本試験施工でも樹脂で接触面を固めた後に、埋め戻し材とコンクリート、コンクリートと岩盤の境界部の試料を一体で取得することとしました。図 19 にサンプリングの概念図を示します。まず、樹脂を注入するための孔（直径 46 mm）を無水掘りで掘削し樹脂を充填しました。その後、樹脂が硬化するまで 1 日ほど置き、樹脂充填孔よりも大きい径（直径 86 mm）で樹脂充填部分と重なるように無水掘りでサンプリングしました。図 20 にサンプリング後の試料の一例を示します。図に示すように、事前に樹脂で固めることで接触面が固着した状態でサンプリングできることを確認しました。

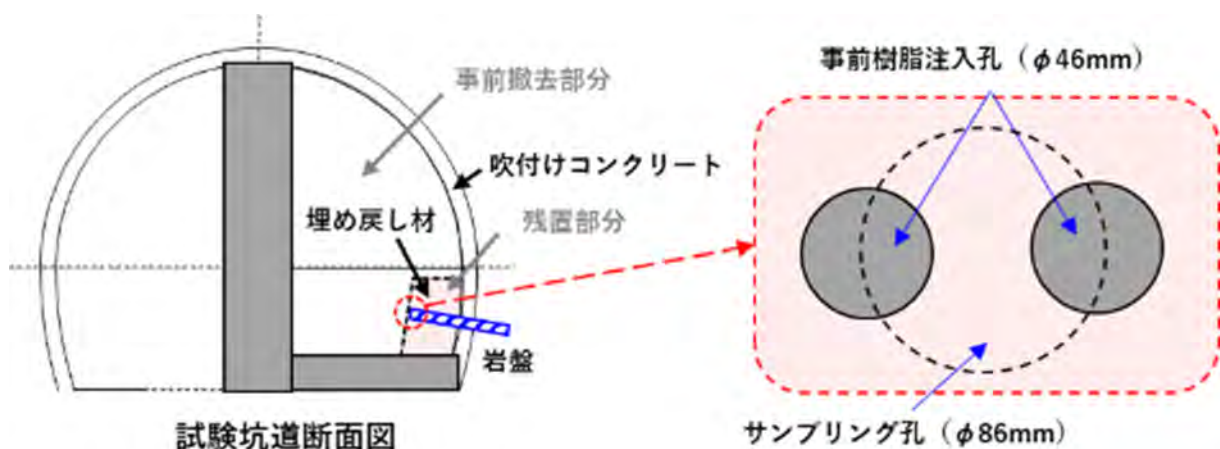


図 19 サンプリングと事前樹脂注入の概念図

*42：掘削したボーリング孔に樹脂などを充填した後に、そのボーリング孔を含むように再度ボーリング孔を掘削して、試料を採取することです。

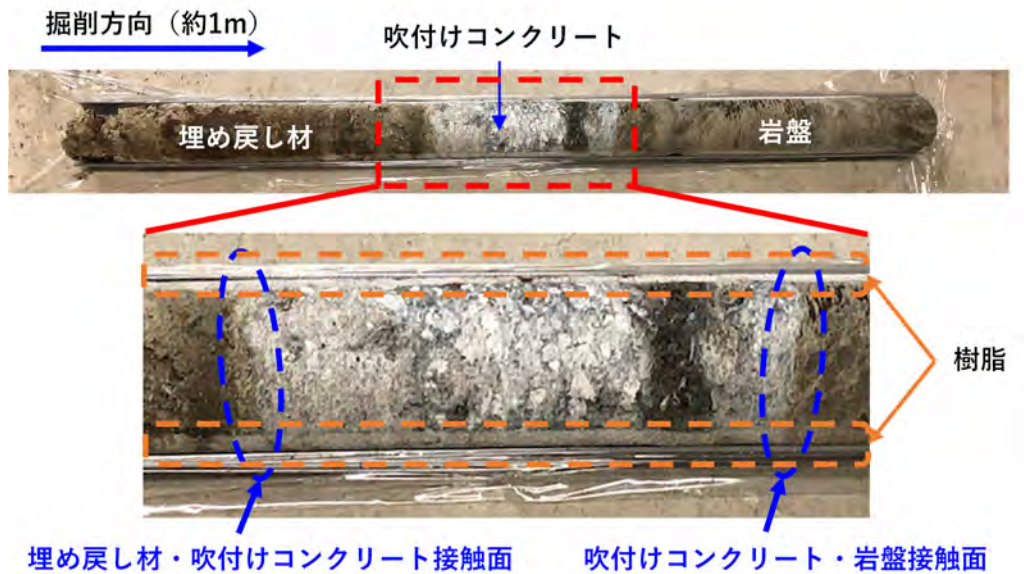


図 20 サンプリングした試料（樹脂充填）

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 3 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 [JPJ007597]：ニアフィールドシステム評価確証技術開発）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

令和3年度は、試験坑道3の既存孔（H4-1孔およびP孔）において掘削損傷領域を対象としたトレーサー（非収着性^{*43}）試験⁽⁸⁾を令和2年度に引き続き実施し、試験坑道4の周辺岩盤に分布する掘削損傷による割れ目の連続性に関する情報を取得しました。トレーサー試験は試験坑道3から斜め上向きに掘削されたH4-1孔の区間②およびP孔の区間②を使用して行いました（図21）。

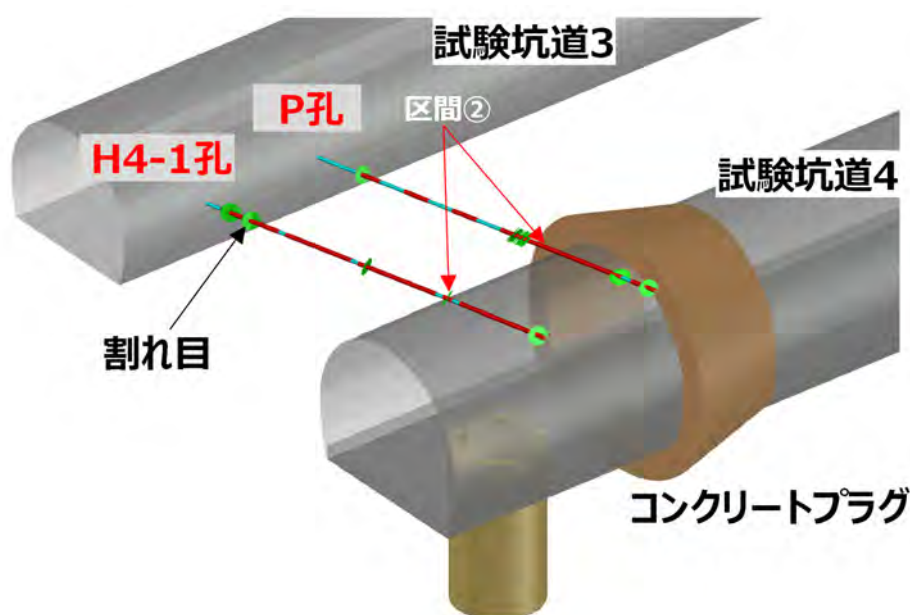


図 21 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験のレイアウト

トレーサー試験前に実施した透水試験から、両区間の区間透水係数は 1.3×10^{-6} m/s であるとともに、H4-1孔の区間②へ複数回の注水を行い、P孔の区間②の水圧応答を観測した結果、間隙水圧の変化量はわずかであるものの、水圧応答は瞬時であることから、両区間は水理学的に連続していることが確認できました。上記の区間で孔間のトレーサー試験が可能かを事前に把握するため、揚水区間の間隙水圧が著しく低下し、揚水中に地下水から脱ガスが生じない条件の確認を行いました。その結果、トレーサー注水区間をH4-1孔の区間②、揚水区間をP孔の区間②とし、注水流量を50 mL/min、揚水流量を150 mL/minとしました。後述するように、

^{*43}：固体や液体などの表面に物質がくっつく現象（吸着）と、固体や液面の内部に取り込まれる現象（吸収）の両方を合わせて収着と言い、収着を起こしにくいトレーサーを非収着性トレーサーと呼びます。

トレーサー試験中に注水区間の間隙水圧の上昇を低減するために、試験の途中で注水流量を 20 mL/min に変更しています。トレーサーには非放射性のトレーサーであるウラニン^{*44}を用いました。トレーサーの投入は試験初期にパルス^{*45}入力条件で行い、その後定常入力条件で注入しました。本トレーサー試験は試験坑道 4 の力学プラグの奥側で実施していますが、力学プラグの手前側から湧水が確認されていることを踏まえると、注入したトレーサーが力学プラグを迂回して移行していることが想定されました。したがって、トレーサーの濃度観測は揚水区間だけではなく、試験坑道 4 の壁面や底盤の側溝を流れる湧水も採取して行うこととしました。図 22 に揚水区間のトレーサー濃度、図 23 に壁面湧水などのトレーサー濃度の観測結果を示します。トレーサーの定常入力開始から 5 日程度で P 孔の区間にトレーサーが到達し、トレーサーの注入を停止（パルス入力から 18 日後）した後も 20 日程度まで上昇し続けました。22 日以降はトレーサー濃度にばらつきがみられるものの、おおむね一定の濃度が観測されました。一方、壁面湧水などについては、分析を始めた 10 日後の時点で最大 7 mg/L 程度（図 23 中の s5）のトレーサー濃度が観測されているとともに、定常入力を停止（18 日後）した後、壁面湧水などのトレーサー濃度は少なくとも 20 日後よりも早い段階で濃度低下が生じていることから、トレーサーが s4 の壁面に到達したのは P 孔への到達よりも早かった可能性が考えられます。

*44：黄緑色の蛍光染料で、フルオレセインナトリウムともいいます。化学式は $C_{20}H_{10}Na_2O_5$ であらわされます。トレーサー試薬としての利用の他、入浴剤の着色料などとしても利用されています。

*45：トレーサーの投入方法の 1 つで、一定濃度のトレーサーを瞬間的に投入する方法です。

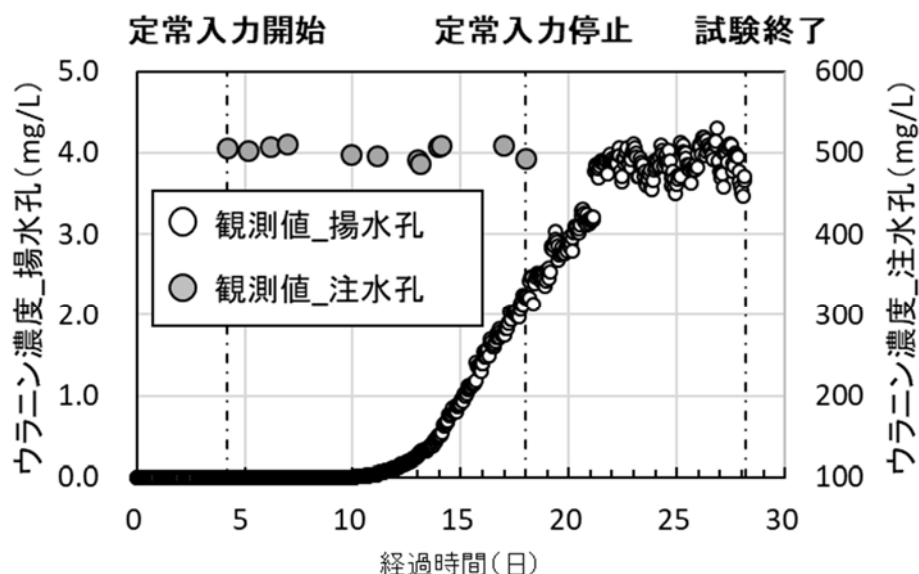


図 22 トレーサー濃度変化（注水・揚水区間）

経過時間はパルス入力（500 mg/L のウランを 20 分間注入）した時点から起算しています。

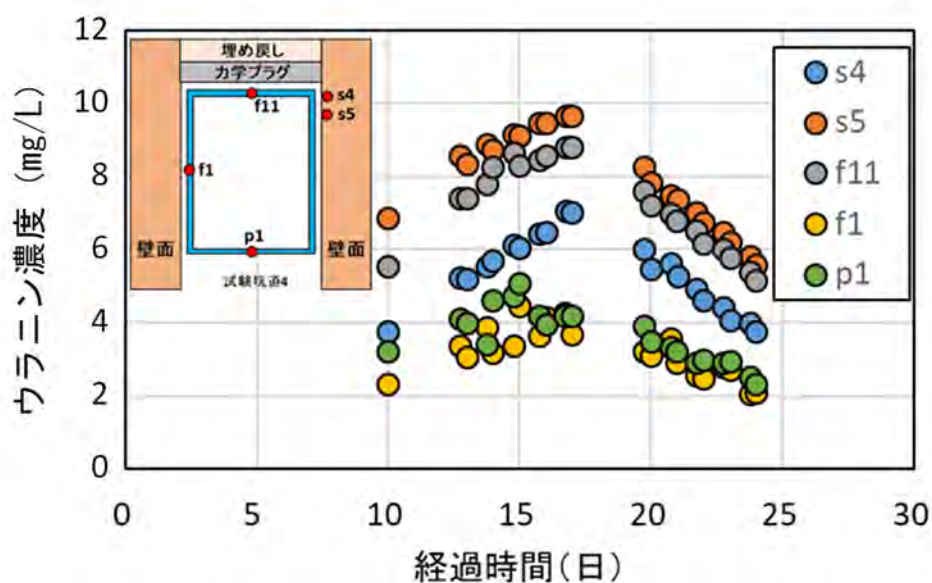


図 23 トレーサー濃度変化（壁面湧水など）

経過時間はパルス入力（500 mg/L のウランを 20 分間注入）した時点から起算しています。

また、図 23 中の s4 および s5 の壁面湧水から有意なトレーサー濃度が観測され、10 日経過時の濃度が揚水区間である P 孔の区間②のトレーサー濃度と比べて優位に高いことが分かります。注水区間である H4-1 孔の区間②から、s4 および s5 の間には力学プラグが設置されていることを踏まえると、注入したトレーサーは力学プラグを迂回して力学プラグの手前側に到達したと推定されます。力学プラグ奥の移行経路としては、(A)

掘削損傷の割れ目を移行、(B)掘削損傷の割れ目から岩盤と支保工（もしくは支保工と埋め戻し材）の境界部を介して移行、(C)掘削損傷の割れ目から岩盤と支保工（もしくは支保工と埋め戻し材）の境界部を介して坑道底盤の方へ移行し、底盤コンクリートと岩盤境界部を介して移行、の3つが考えられます。このうち(A)の経路で移行したと考えられる H4-1 孔の区間②から P 孔の区間②に到達するウラニンの濃度が相対的に低い上に、移行距離としては長いにも関わらず力学プラグの手前側へより早くトレーサーが到達していることから、掘削損傷の割れ目と比べ、岩盤と支保工や支保工と埋め戻し材の境界に生じ得る移行経路の方が相対的に選択的な移行経路となりやすい可能性を示唆しています。これは、掘削損傷の割れ目を遮断するためのプラグや埋め戻し材の施工において、材料境界部の適切な処置をすることが、坑道やプラグを介した核種移行を低減する観点では非常に重要であることを示唆しています。

今後は、令和 3 年度に取得したトレーサー試験結果などのデータに基づき、より定量的に移行経路の分析を図るとともに、その分析結果に基づき、掘削損傷領域における物質移行特性パラメータの算出を試行する予定です。

(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挙動に与える影響を評価することを目的に、物質移行試験を実施します。令和 3 年度は、350m 調査坑道において新規にボーリング孔を掘削し、掘削直後の地下水中の化学成分の分析、間隙水圧や物理化学パラメータ（pH、酸化還元電位^{*46}（以下、Eh）、電気伝導度^{*47}（以下、EC）、溶存酸素濃度（以下、DO））の連続モニタリングを開始しました。

350m 調査坑道の底盤より、鉛直下向きに長さ約 3 m のボーリング孔を

*46：地下水の酸化還元状態を表します。酸化還元電位が低い地下水ほど、含まれる酸素が少なく還元状態であることを表します。

*47：電気の通しやすさを表す値で、電気伝導度が高い（電気を通しやすい）ほど地下水に溶けているイオンの量が多いことを表します。

2 本 (21-350-TRA 孔および 21-350-TRB 孔) 掘削し、パッカー^{*48}や流量計、間隙水圧計などの物質移行試験装置を設置しました (図 24)。ここでは、21-350-TRA 孔の結果を示します。21-350-TRA 孔において、パッカーによって区切られた試験区間 (区間長 250 mm) の水圧を継続的にモニタリングしました。その結果、採水などに伴う試験区間の開放により水圧は低下するものの速やかに回復し、最大でも 2 週間程度で安定することを確認しました (図 25)。また、パッカー設置から約 3 か月後に試験区間から採取した地下水中の元素濃度を分析し、350m 調査坑道の他のボーリング孔から採取した地下水と同様にナトリウムイオン (Na^+) と塩化物イオン (Cl^-) がそれぞれ主要な陽イオンおよび陰イオンであることを確認しました (表 2)。さらに、試験区間内の地下水の物理化学パラメータを連続観測し、掘削による水質への影響の程度や原位置の地下水水質への回復挙動を確認しました (図 26)。pH、EC および DO は、これまでに 350m 調査坑道のボーリング孔で得られた測定値 (表 3) とおおむね同程度の値を示しました。Eh が時間経過とともに徐々に低下しており、ボーリング孔掘削時の掘削水による酸化の影響が低減されていると考えられます。今後は、21-350-TRA 孔および 21-350-TRB 孔において物理化学パラメータの観測を継続し、Eh などのパラメータの傾向や値を確認します。その上で、高レベル放射性廃棄物に含まれるアクチノイド^{*49}のアナログ元素^{*50}であり、既往の研究⁽⁹⁾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^{*51}などの非放射性トレーサーをタンクに添加し、経路内を循環させ (図 24 の循環経路)、物質移行試験を開始する予定です。

*48: ボーリング孔の中を試験区間あるいは地下水やガスの採取区間として区切るために設置する装置の 1 つです。ゴム製のものが用いられることが多く、水や空気などで膨らませてボーリング孔壁に密着させることで区間を区切ります。複数のパッカーを使うことでボーリング孔内に複数の試験区間・採取区間を作ることができます。

*49: 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。

*50: 高レベル放射性廃棄物に含まれる元素と同様の化学的性質を示す元素のことをいいます。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。

*51: 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。

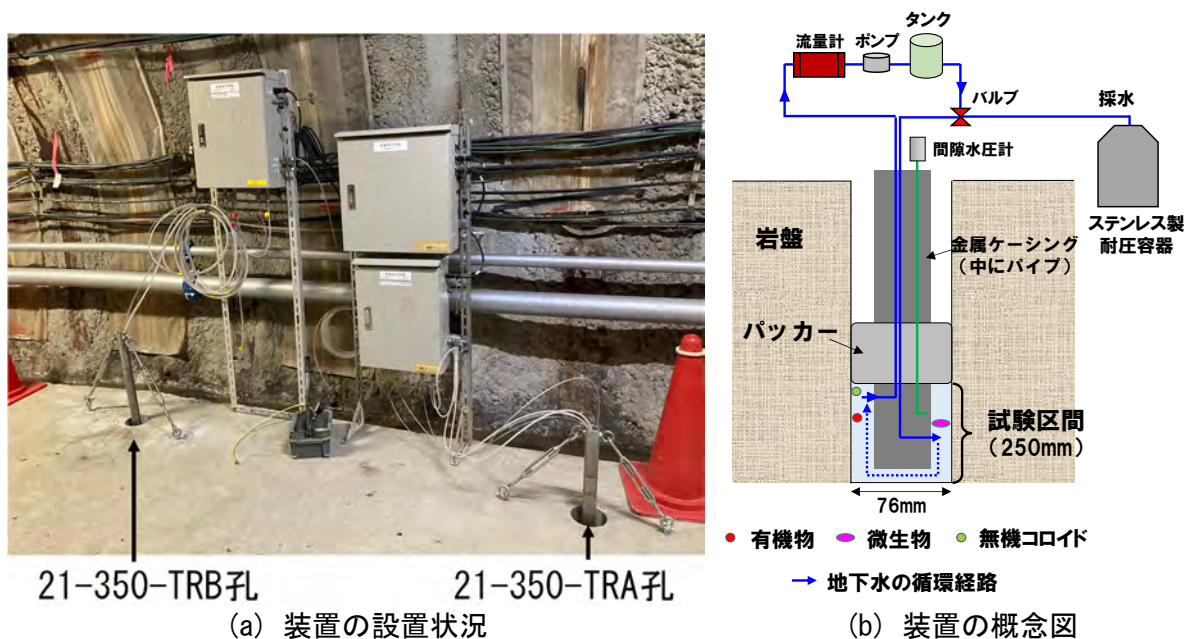


図 24 350m 調査坑道に設置した物質移行試験装置および概念図

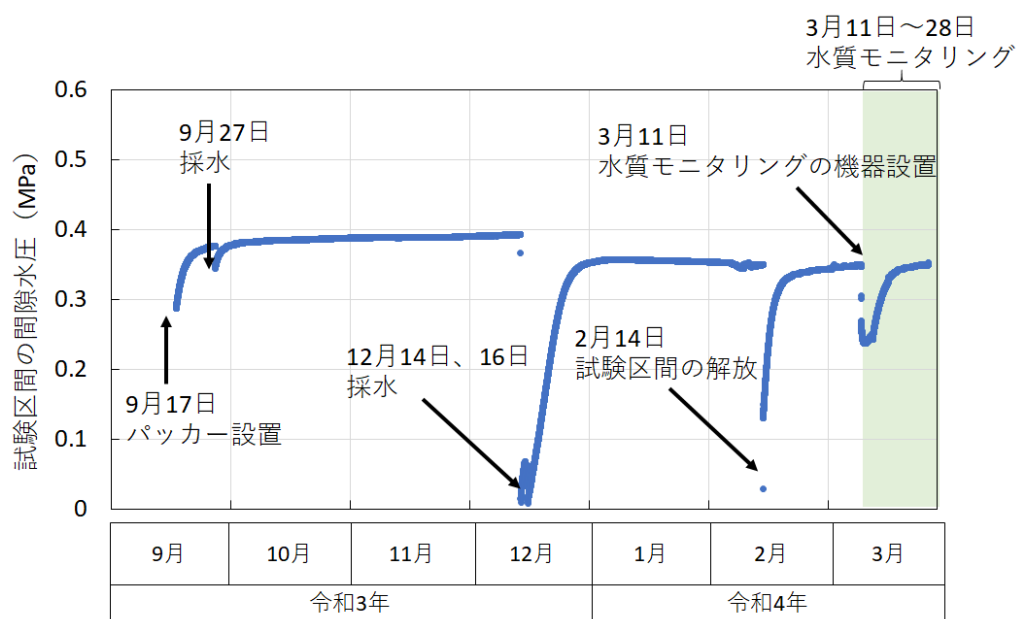


図 25 21-350-TRA 孔の試験区間の間隙水圧の推移

表 2 21-350-TRA 孔の試験区間から採取した地下水中の元素濃度

元素	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	全無機炭素	全有機炭素
濃度 (mg/L)	2,810	68.0	56.8	151	5,030	33.4	413	16

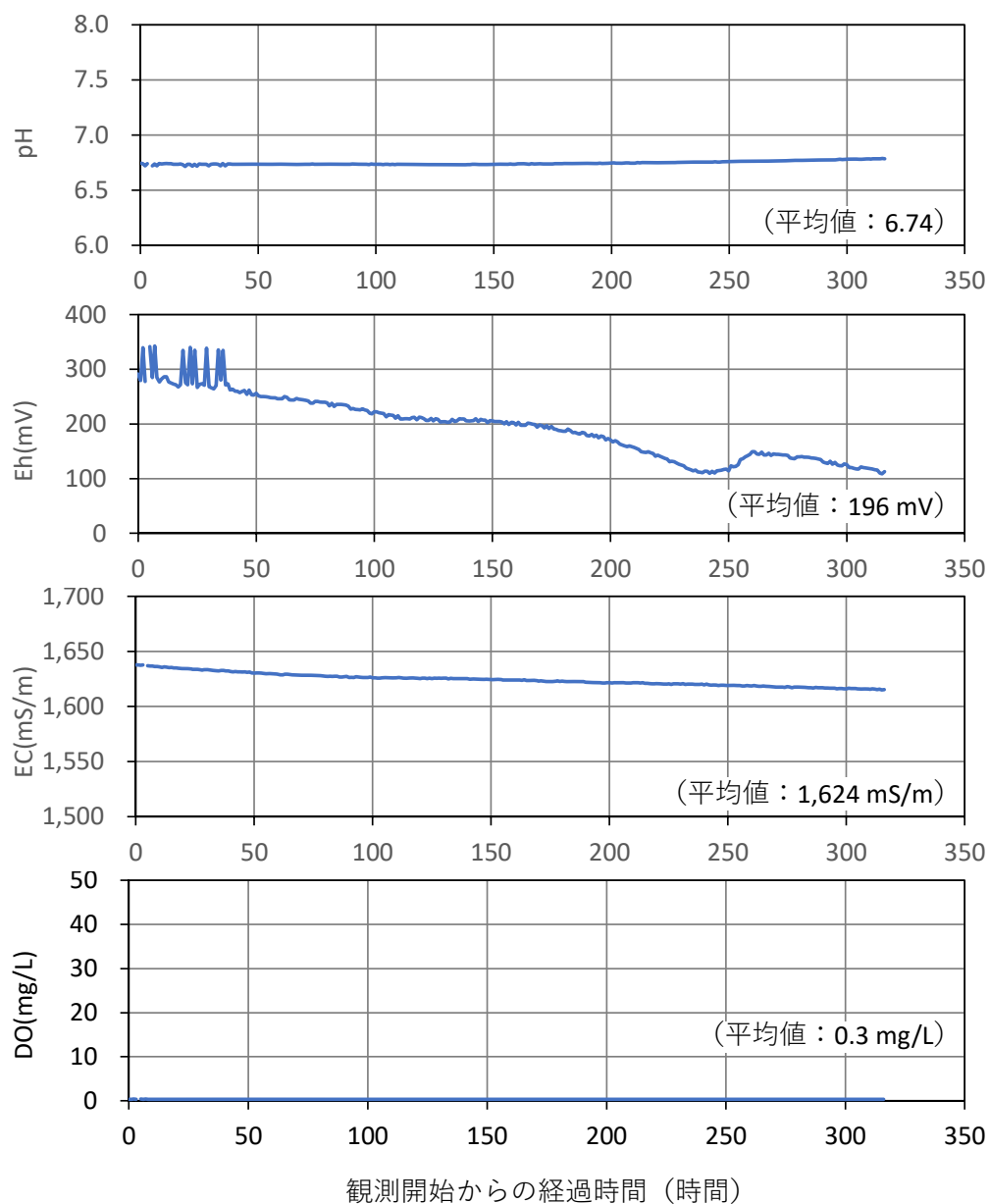


図 26 21-350-TRA 孔の試験区間における水質の連続モニタリング結果

表 3 350m 調査坑道の 13-350-C05 孔における水質モニタリング結果の
平均値⁽¹⁰⁾（平成 29 年度～令和元年度）

	単位	平均値 （平成 29 年度～令和元年度）
pH	—	6.9
酸化還元電位（Eh）	mV	-246
電気伝導度（EC）	mS/m	1,605
溶存酸素濃度（DO）	mg/L	0.45

※13-350-C05 孔の位置は図 107 を参照。

また、堆積岩の地下水中に一般的に存在する有機物（特に、元素と結合しやすいと考えられるフミン酸^{*52}）の存在が地下水中の元素の存在状態に与える影響を評価するための室内試験を、原位置の試料を利用して実施しました。350m 調査坑道から採取した地下水に複数の非放射性の希土類元素（セリウム（Ce）、ネオジム（Nd）、ユウロピウム（Eu）およびホルミウム（Ho））を添加し、その後、異なるサイズ（0.2 μm 、10 kDa^{*53}、3 kDa）のフィルターで限外ろ過^{*54}を行いました。希土類元素のみを添加した場合と、希土類元素に加えて地下水から抽出したフミン酸を 10 mg/L 添加（試験区間の地下水中の全有機炭素濃度は 16 mg/L：表 2）した場合を比較したところ、10 kDa のろ過サイズまでは、フミン酸を添加した場合の方がろ過後の希土類元素濃度が高くなりました（図 27）。この結果から、希土類元素は地下水に添加したフミン酸と結合して 3 kDa のろ過サイズよりも大きなコロイドを形成し、地下水中により存在しやすい状態となったことが示唆されます。物質移行を検討する上で、有機物およびそのコロイドと元素との結合状態が重要であることが確認できました。

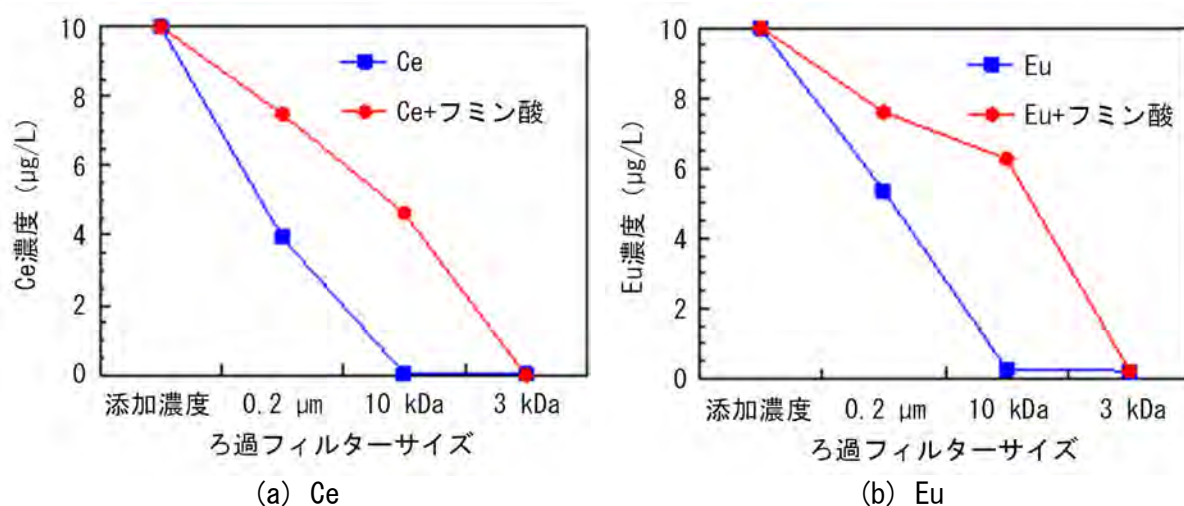


図 27 幌延の地下水（深度 350 m）に対する希土類元素およびフミン酸の添加試験

*52：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。

*53：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。10 kDa（キロダルトン）のろ過フィルターサイズとは、10 kDa（10,000 Da）より小さな質量の分子が通ることのできる孔径の指標を意味します。

*54：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。

(3) ブロックスケールを対象とした物質移行試験

令和3年度は、東立坑底盤（深度 380 m）から掘削した2本のボーリング孔（FZ-01 孔および FZ-02 孔⁽⁸⁾）を利用し、孔間のトレーサー試験を実施しました（図 28）。トレーサー試験は揚水区間となる FZ-01 孔の区間2のトレーサー濃度の観測状況を見ながら、注水/揚水流量、トレーサー濃度およびトレーサー注入濃度を変えながら実施しました。表 4 に一連のトレーサー試験の試験条件を示します。トレーサー試験（パルス）およびトレーサー試験（定常①）では揚水区間でトレーサーが確認されなかったため、添加するウラニン濃度を高くして再度トレーサー試験（定常②）を実施しています。

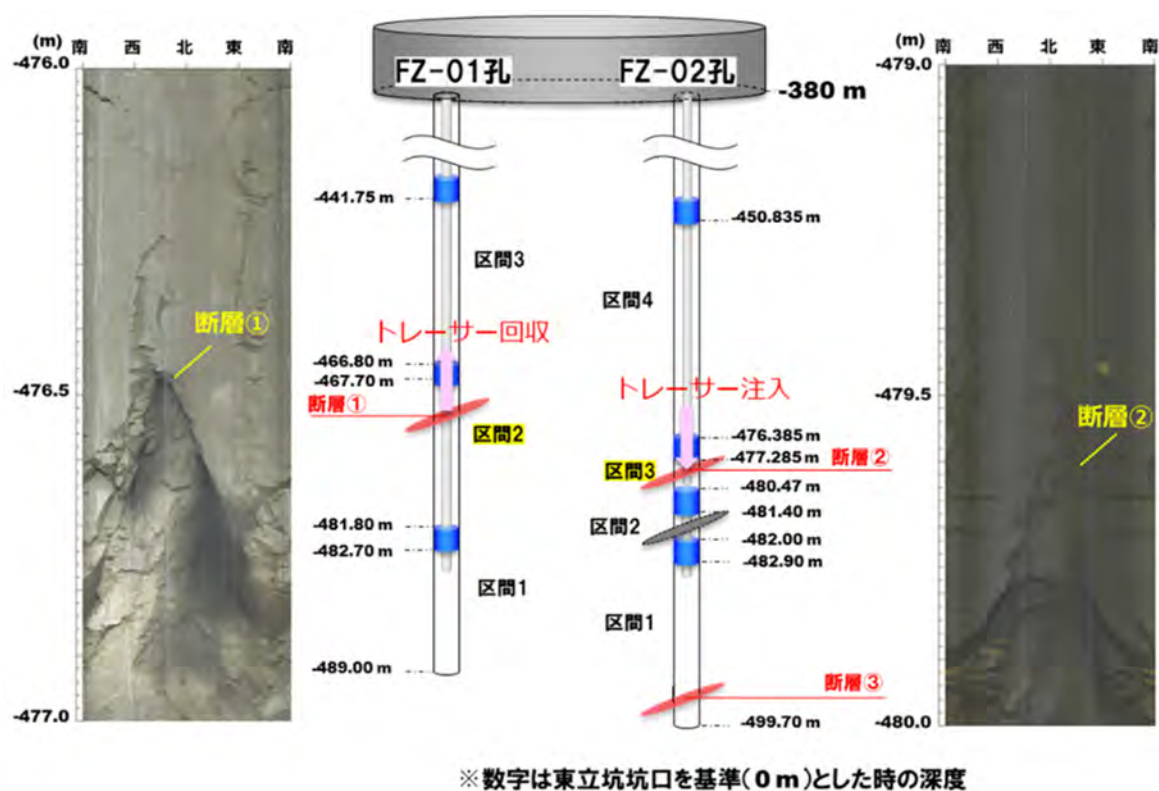


図 28 ブロックスケールを対象とした物質移行試験の概念図

表 4 トレーサー試験条件

時間	イベント	試験条件			
		トレーサー		揚水流量 (mL/min)	注水流量 (mL/min)
		種類	濃度 (mg/L)		
R3/11/1	トレーサー試験 (パルス) 開始	ウラニン	100	200	10
R3/11/6	トレーサー試験 (定常①) 開始	ウラニン	10	200	100
		ヨウ化ナトリウム	1,000		
		塩化モリブデン	30		
R3/11/12	揚水流量変更	—	—	500	10
R3/11/12	トレーサー注入停止	—	—	500	10
R3/11/15	トレーサー試験 (定常②) 開始	ウラニン	100	500	10
		ヨウ化ナトリウム	1,000		
R3/12/6	トレーサー試験 (定常) 終了	—	—	—	—

図 29 にトレーサー試験（定常②）のウラニンについての試験結果を示します。ウラニンの注入から約 3 日程度で揚水区間へのウラニンの到達が確認できました。その後、18 日程度までウラニン濃度が上昇を続け、18 日以降に約 0.27 mg/L 程度で落ち着く結果となりました。一方で、注入したウラニンの量に対する揚水孔で回収したウラニンの量の比（累積回収率）は非常に小さく、試験終了時点での累積回収率は約 0.004%でした。なお、トレーサー試験（パルス）およびトレーサー試験（定常①）で投入したウラニンの量はトレーサー試験（定常②）と比べ無視できるほど少ないため、累積回収率の計算からは除外しています。

一連のトレーサー試験において、揚水および注水は常に継続しているため、トレーサー試験（定常②）の開始から 4 日後に到達したウラニンはトレーサー試験（定常①）までに投入したウラニンが揚水流量を変更（200 mL/min→500 mL/min）したことにより、孔間の地下水の流れが変わり、それまで非常に遅い流速で流れる移行経路もしくは新たに形成された移行経路を介して到達した可能性が考えられます。揚水流量を変更した時点から起算した場合、揚水区間に到達するまでの時間は約 6 日程度となります。

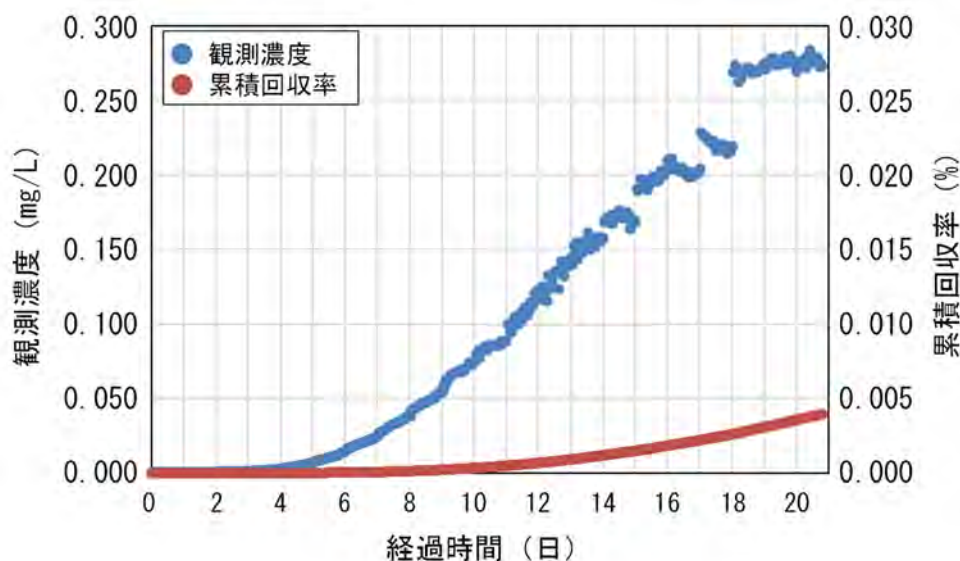


図 29 トレーサー試験（定常②）結果
経過時間はトレーサー試験（定常②）の開始時間から起算しています。

図 30 に示すように、見かけの動水勾配^{*55}とトレーサー回収点にトレーサーが到達した時間との関係について、割れ目や断層間の水理学的連続性が良い稚内層浅部で実施した、ウラニンをトレーサーとした試験結果と比較しました。図 30 のプロットの基となるトレーサー試験は、使用したボーリング孔孔間の距離や試験中の注水区間および揚水区間の間隙水圧がそれぞれ異なり、トレーサーを注入してから回収されるまでの時間（割れ目などにおける物質の移行のしやすさ）は単純に比較することができないため、注水区間と揚水区間の間の移行経路が1経路のみであり、ウラニンの移行挙動が動水勾配のみに支配されることを仮定（見かけの動水勾配）し、この時のトレーサーの到達時間との比較を行いました。稚内層浅部においては見かけの動水勾配によらず、0.1 日以内にトレーサーが到達する傾向にある一方で、今回のトレーサー試験はトレーサーの到達時間が非常に遅い傾向が確認できます。

以上のことから、稚内層深部の断層は水理学的連続性が限定的であるとともに、物質移行の観点からもその移行経路は限定的であることが示唆されました。

今後は、ヨウ化ナトリウムや塩化モリブデンの試験結果の分析を進め

*55：地下水の動きを決める要因の1つで、地下水が流れる方向の単位距離当たりの水圧の差を言います。地下水は、水圧の高い方から低い方へ移動します。

るとともに、解析などにより稚内層深部の断層の移行経路としての特性を評価する予定です。

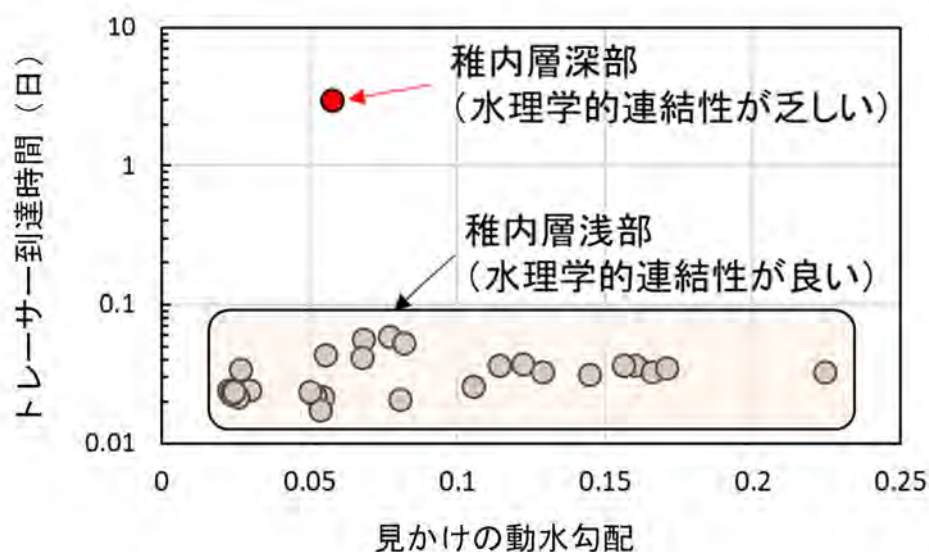


図 30 見かけの動水勾配に応じたトレーサーの到達時間

(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流動系では割れ目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して大きな遅延効果をもたらすため、健岩部の寄与を評価する手法の開発が重要になります。声問層と稚内層の岩石中の空隙率と透水係数には相関性が見られる一方で⁽¹¹⁾、周囲の間隙水とは水質が明らかに異なる閉塞された空隙も存在することが分かっています⁽¹²⁾。地下水の流れに寄与しない閉塞された空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。本研究では、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。

令和2年度は、地下施設の350m調査坑道から得られた岩石試料を用いて薄片試料を作成し、微生物の細胞を染色することで岩石中の微生物分布を取得しました。350m調査坑道から得られた岩石試料は珪質泥岩の稚

内層であり、そこでは微生物は観察領域内において均質に存在するのではなく、微小空隙の中に密集して存在することが分かりました。一方で、蛍光顕微鏡による観察領域が限られていたため、岩石試料全体に占める微生物の存在箇所の割合が不明でした。また、微生物の密度が低い場合、染色剤による微生物細胞からの発色が岩石中に含まれる微生物以外の有機物などからの発色と区別することが難しくなるという課題がありました。

令和 3 年度は、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岩石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^{*56}を有するナノ赤外分光分析システムを用いて、染色された物質が微生物であるか確認しました。個別の赤外吸収スペクトル^{*57}の例として図 31 に、微生物細胞とベントナイト、蛍光染色剤、樹脂の分析結果を示します。微生物細胞の分析結果には、アミド基（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）などのアミノ酸に特徴的な吸収スペクトルが見られ、ケイ酸塩鉱物（ベントナイト）や蛍光染色剤、樹脂と区別できることが分かります。また、ベントナイトの分析結果には、ケイ酸塩に特徴的な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、有機物と鉱物とを区別することができます。これらの特徴に着目した薄片試料の赤外吸収画像を図 32 に示します。蛍光の発色が強い箇所において波数 $1,530\text{ cm}^{-1}$ における比較的強い赤外吸収が見られることから、微生物の存在を確認することができます。また、微生物は、健岩部全体に均質に存在するのではなく、限られた微小空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、岩石全体において均質に進行するのではなく、限られた微小空隙を介して行われることが推察されます。

今後は、稚内層深部や稚内層と比較して空隙構造の異なる声間層も含めた観察事例を拡充するとともに、微生物の存在する微小空隙と存在しない箇所における鉱物などの元素組成の違いを調べる予定です。なお、本

*56：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。

*57：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、吸収スペクトルといいます。図 31 では、横軸を波長の逆数である波数で表しています。

研究は、東京大学との共同研究として実施しています。

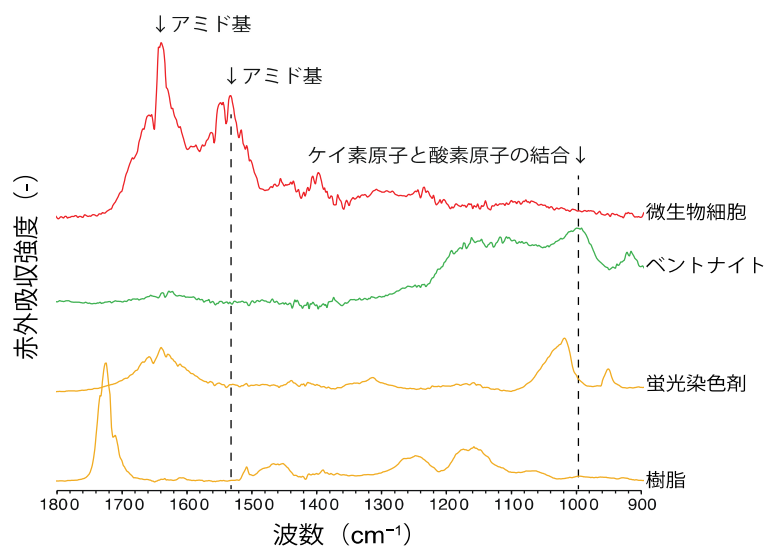


図 31 赤外吸収スペクトルによる微生物の識別

ベントナイトは、ボーリング掘削時に孔壁を保護するために添加しています。蛍光染色剤は、微生物細胞を染色して識別しやすくするためのものです。樹脂は、岩石試料から薄片を作成する際に試料を固定するためのものです。

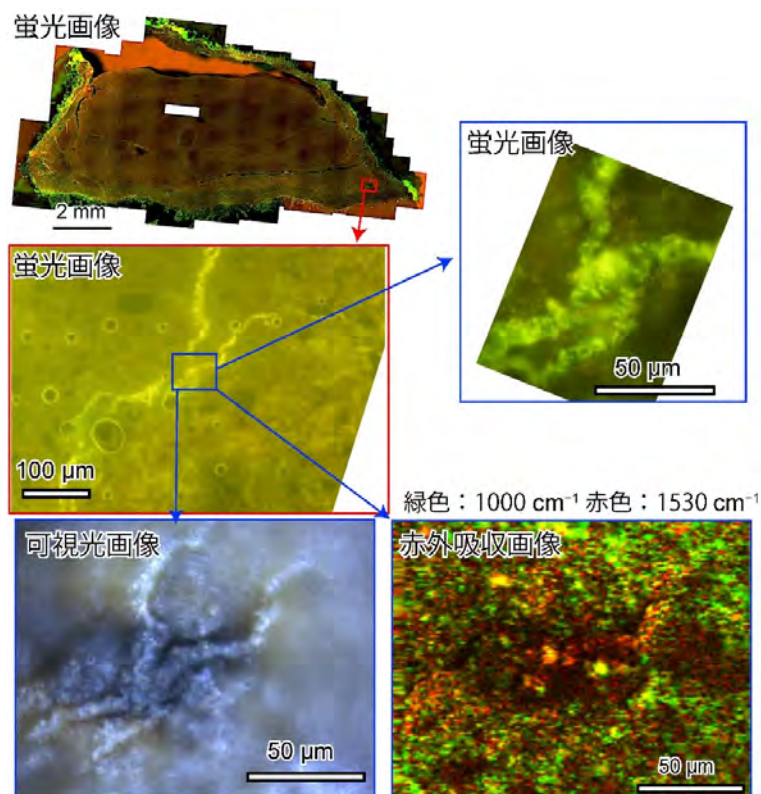


図 32 350m 調査坑道から得られた岩石試料（稚内層）中の微生物分布
 蛍光画像における濃い黄緑色の箇所は、微生物細胞（有機物）を示しています。赤外吸収画像の緑色と赤色はそれぞれ、鉱物と微生物細胞の指標になり、図 31 の波数 $1,000\text{ cm}^{-1}$ と波数 $1,530\text{ cm}^{-1}$ における吸収強度に相当します。

物質移行特性評価手法の高度化のためには、溶存形態が複雑な元素の収着特性を考慮した物質移行解析が必要になります。これらの元素の収着特性については、個別の反応を考慮した室内試験が多数実施されており、今後は、深部地下環境における複雑な反応系の中で、どのような収着反応が支配的であるか評価し、原位置における物質移行試験のデータ解釈に活用していく必要があります。

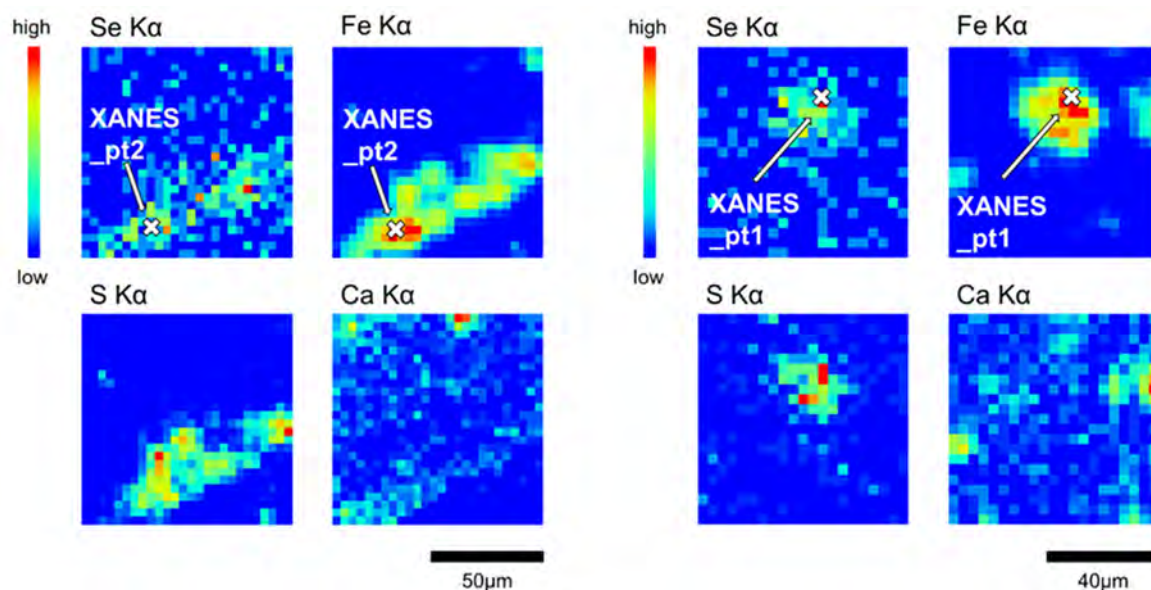
そのため、溶存形態が複雑な元素の深部地下環境中における岩盤への収着特性を明らかにすることを目的として、堆積岩中の微量元素の化学形態や濃集挙動に関する分析を実施しました。令和 2 年度に引き続き、令和 3 年度は、室内試験が多数実施されているセレン (Se) に着目した分析を実施しました。令和 3 年度は、岩層の違いによる存在形態の違いを明らかにするために水理特性が異なる声問層および稚内層の 2 つの岩層を対象としてセレンの存在固相・収着形態に着目した分析を実施しました。

堆積岩試料を薄片加工し、数十 μm スケールにて $\mu\text{-XRF}$ 法^{*58}による元素のマッピング分析および $\mu\text{-XAFS}$ 法^{*59}によるセレンの化学形態分析を行った結果、セレンは岩層の違いによらず、鉄 (Fe) や硫黄 (S) のカウントが高い部分にスポット的に存在し、パイライト (FeS_2) に濃集していることが明らかになりました (図 33)。また、声問層および稚内層のどちらの岩層においても、セレン濃集部におけるセレンの化学形態 (価数) は、0 価または -I 価であり、動きにくい化学形態として保持されていることが明らかになりました (図 34)。セレンが濃集している状態について、局所的な構造を明らかにするため、結晶構造が既知の鉱物のデータを用いて解析を実施しました。その結果、セレンはパイライトの中の硫黄と一部置換した結合状態で存在し、セレンがパイライトの結晶構造に取り込まれていることが明らかになりました (表 5)。また、解析の対象としたパイライトは、微生物反応によって生成すると考えられているフランボイダル (木苺) 状 (図 35) であり、セレンの収着において微生物反応が重要な役割を担う可能性が示唆されました。今後、硫黄の同位体分析などを行

*58：ビーム径が数 μm の X 線を分析試料に照射し、発生する蛍光 X 線をエネルギーによって分光することで、分析点に含有されている元素の種類を調べる分析手法です。

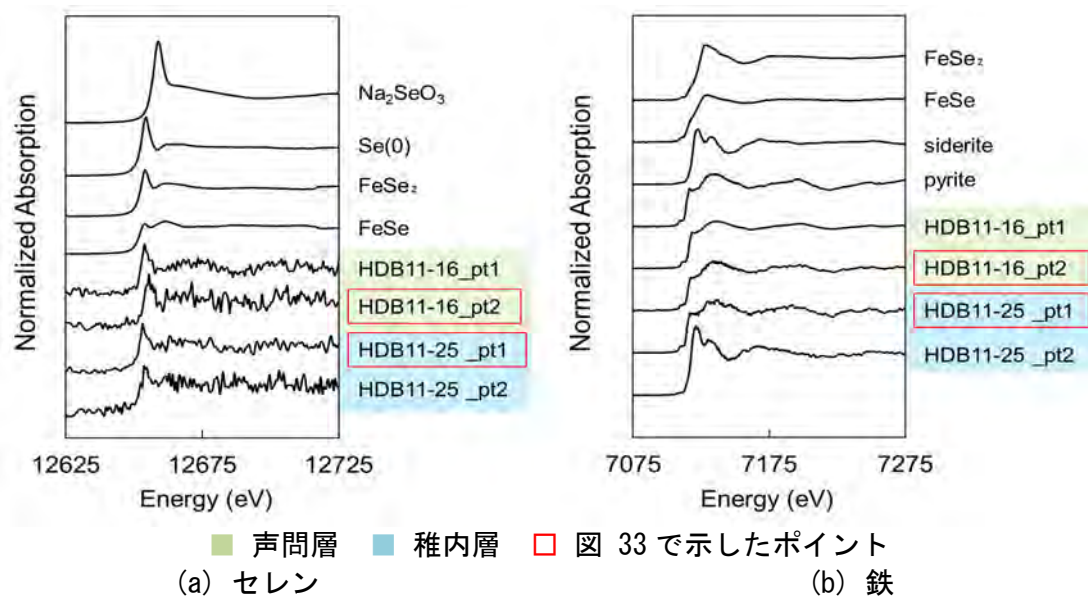
*59：ビーム径が数 μm の X 線を分析試料に照射し、X 線が吸収されたスペクトルを解析することで、元素の化学形態や結合状態について明らかにする分析手法です。

うことで、セレンの収着における微生物反応の関与の有無を評価していきます。



(a) 声問層の試料（試料番号：HDB-11-16） (b) 稚内層の試料（試料番号：HDB-11-25）

図 33 μ-XRF 分析で取得されたセレン (Se)、鉄 (Fe)、硫黄 (S)、カルシウム (Ca) の元素マッピングの結果の例



(a) セレン (b) 鉄

図 34 セレンの濃集が確認された部分の μ-XAFS 測定結果

表 5 セレンの結合状態（近傍元素、配位数、原子間距離）に関する解析結果

(a) パイライトの結晶構造中の硫黄を一部セレンに置換した場合の結合状態

セレンの 近接原子	配位数	原子間距離 (nm)
Se-S	1	0.2156
Se-Fe	3	0.2264
Se-S	6	0.3078
Se-S	6	0.3321
Se-Fe	3	0.3445

(b) 幌延の岩石中のセレンの結合状態

セレンの 近接原子	配位数	原子間距離 (nm)
Se-S	1	0.223±0.002
Se-Fe	3	0.229±0.001
Se-S	6	0.306±0.001
Se-S	6	0.332±0.002
Se-Fe	3	0.347±0.002

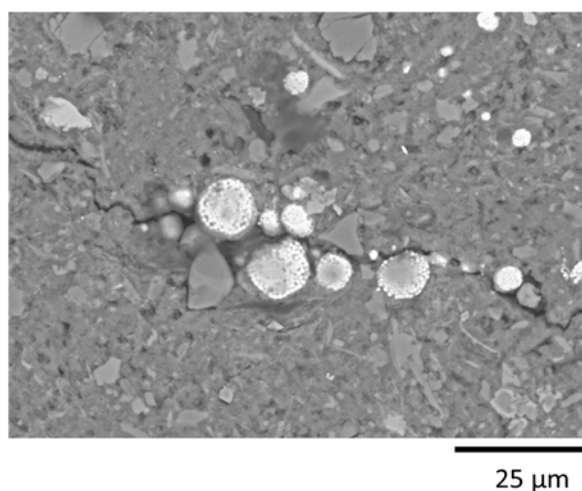


図 35 幌延の岩石試料でセレンの濃集が確認されたパイライトの反射電子像

このような微量元素の化学形態や収着メカニズムに関する詳細な分析手法については、セレンと化学的特性の類似した元素のみならず、他の溶存形態が複雑な収着特性を持つ元素（ニッケル（Ni）、コバルト（Co）、ユウロピウム（Eu）など）にも適応することができるため、これまでの物質移行試験において得られた結果を評価する際に有用な手法です。物質移行特性評価手法の高度化のため、今後も継続して溶存形態が複雑な元素の収着特性に関する評価手法の開発を進めていく予定です。

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。

- ・ 搬送定置・回収技術の実証
- ・ 閉鎖技術の実証
- ・ 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3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 [JPJ007597]：回収可能性技術高度化開発）の一環として、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

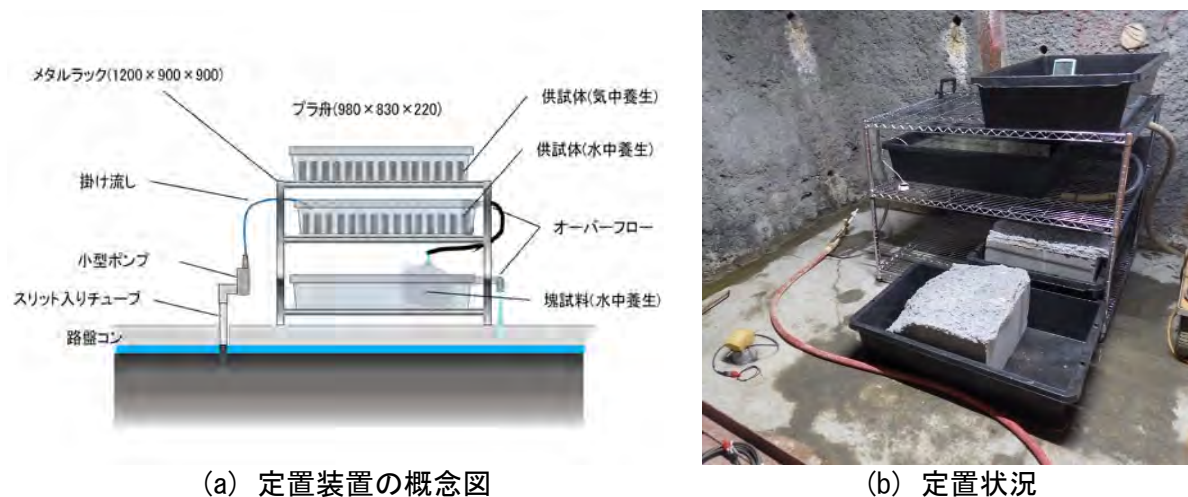
安全に回収作業を行うためには、処分坑道内の空間が保たれていることが必要となります。この評価のために、処分坑道に施工される吹付けコンクリートの経年劣化の把握を目的としたコンクリート試験体の暴露試験を実施しています。具体的には、地下坑道の吹付けコンクリートと同様の成分および施工方法で作製したコンクリート試験体を、令和2年度より坑道内における大気条件下および浸潤条件下に定置しています（図36）。令和3年度は、定置から約8か月が経過した時点で一部の試験体を回収し、物性や化学状態を把握するための試験・分析に供しました。

大気条件下に定置した試験体は表面から約3mmの深さまで中性化が進んでいるのに対し、湿潤条件下に定置した試験体では中性化の領域がごくわずかであることが分かりました（図37）。試験体の表面から約4mmまでの深さを対象として電子プローブマイクロアナライザー^{*60}により元素分布を観察すると、中性化が生じている領域ではCaOおよびSO₃の濃度が減少していることが確認できました（図38）。また、試験体中の空隙率

^{*60}：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。

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 $0.01\ \mu\text{m}$ ～ $0.1\ \mu\text{m}$ の空隙の割合が増加していることが分かりました (図 39)。これらの結果から、大気条件下に定置した試験体の表面から約 3 mm までの深さで CaO や SO_3 を含むセメント生成物 (C-S-H^{*61} 、エトリンガイト^{*62}など) が分解し、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。一方、湿潤条件下に定置した試験体における空隙径 $0.01\ \mu\text{m}$ ～ $0.1\ \mu\text{m}$ の空隙の割合は大気条件下に定置した試験体と比べて低く、中性化が生じていない領域でより低いことが分かりました (図 39)。湿潤条件下で定置した場合の方が間隙により多くの水が含まれ、セメントの水和反応がより速く進行したために、緻密な構造が形成されたと考えられます。

以上のように、大気条件と浸潤条件下での約 1 年間の定置によって試験体に生じた物性や化学状態の変化を観測することができました。令和 4 年度も、コンクリート試験体の暴露試験を継続するとともに、定期的に試験体の分析を行い、地下環境でのコンクリートの劣化挙動に係るデータの取得を進めます。



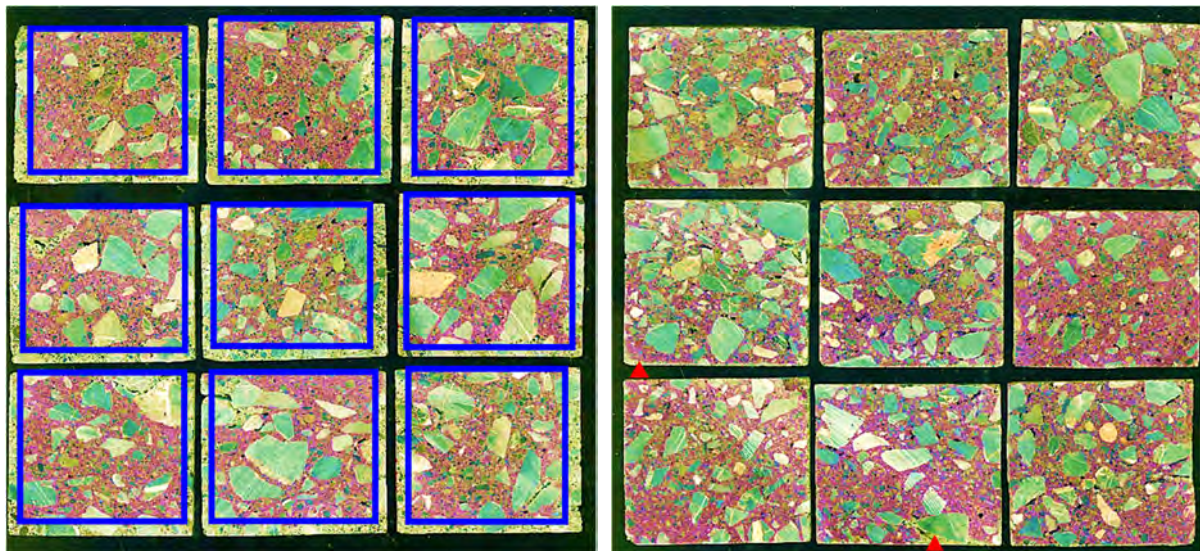
(a) 定置装置の概念図

(b) 定置状況

図 36 コンクリート試験体の暴露試験

*61：ケイ酸カルシウム水和物 (Calcium Silicate Hydrate) と呼ばれ、コンクリートに含まれる主要な水和物の 1 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。

*62：セメント水和物の 1 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。

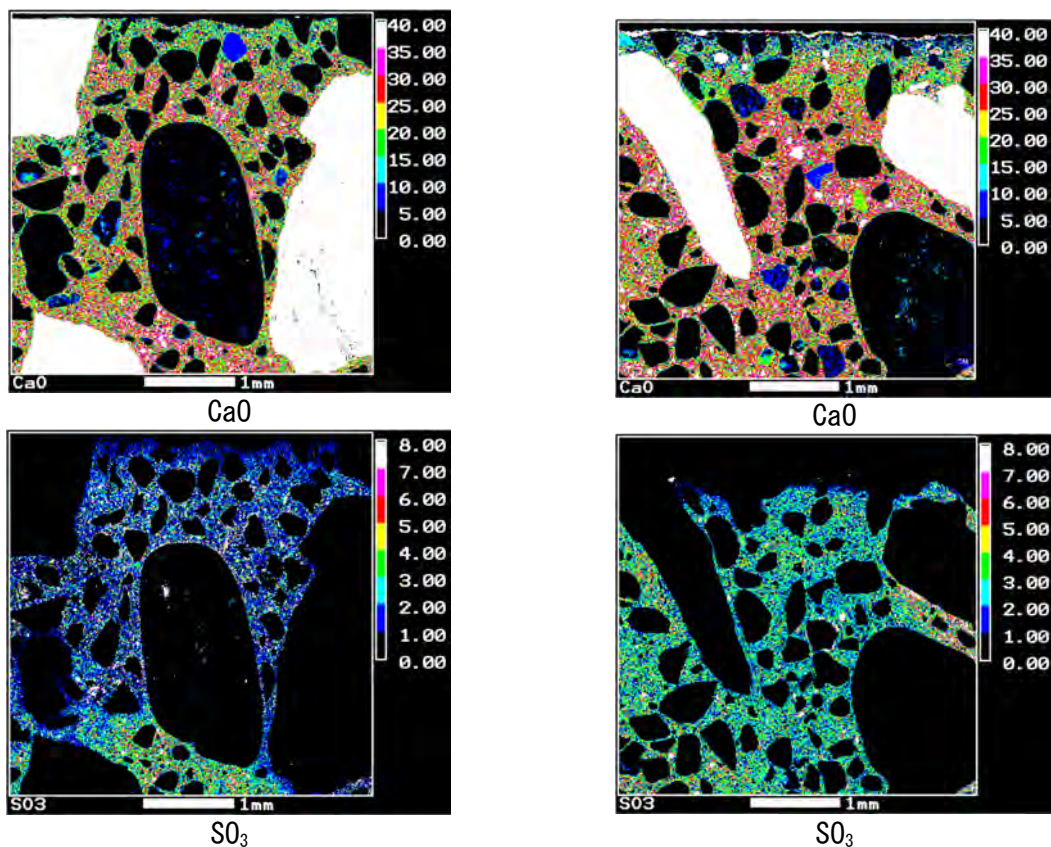


(a) 大気条件下
呈色のみられない領域（青色線の外側）
：表面から約 3 mm

(b) 湿潤条件下
呈色のみられない領域（▲）
：ごく一部に限定

図 37 コンクリート試験体の変質領域

試験体（1 辺 5 cm）の半割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。



(a) 大気条件下

(b) 湿潤条件下

図 38 コンクリート試験体中の元素分布

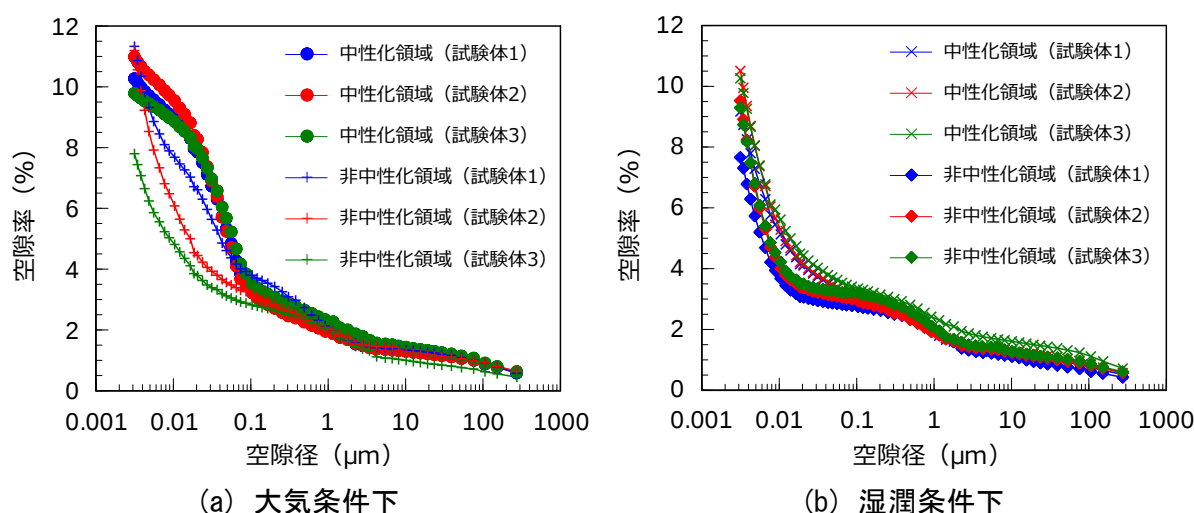


図 39 コンクリート試験体中の空隙率分布

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、長期にわたる坑道の大気への暴露が坑道閉塞後の地質環境の回復過程に及ぼす影響を評価することを目的として、解析に必要なデータを室内試験などにより取得しています。具体的には、令和 2 年度から力学的な観点でクリープ変形挙動を伴う長期変形挙動の予測解析を、水理学的な観点で大気や地下水中に含まれる二酸化炭素やメタン、酸素の影響を考慮した地下水流動である多相流解析^{*63}を実施しています。令和 3 年度は、精度の向上を目的とした解析や実際の現場での状況により則した解析を実施するために必要なデータを取得しました。

長期に及ぶ解析を実施する場合、解析する現象が伝わる領域が広がることが想定されます。したがって、十分な解析領域を設定し解析領域の境界からの影響を低減する必要があります。図 40 は、令和 2 年度に実施した多相流解析結果と令和 3 年度に解析領域を広くして解析をした結果を比較したもので、坑道掘削から 1,000 年後の坑道周辺の飽和度分布を示しています。令和 2 年度の結果では、解析領域が十分な広さを有して

^{*63} 岩盤中を流れる流体の流動シミュレーションにおいて、水の流れだけではなく、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。

おらず、解析領域の境界の影響により 1,000 年後の坑道周辺の飽和度が過大評価されている傾向が見られましたが、令和 3 年度の解析では適切な設定により影響が低減しました。

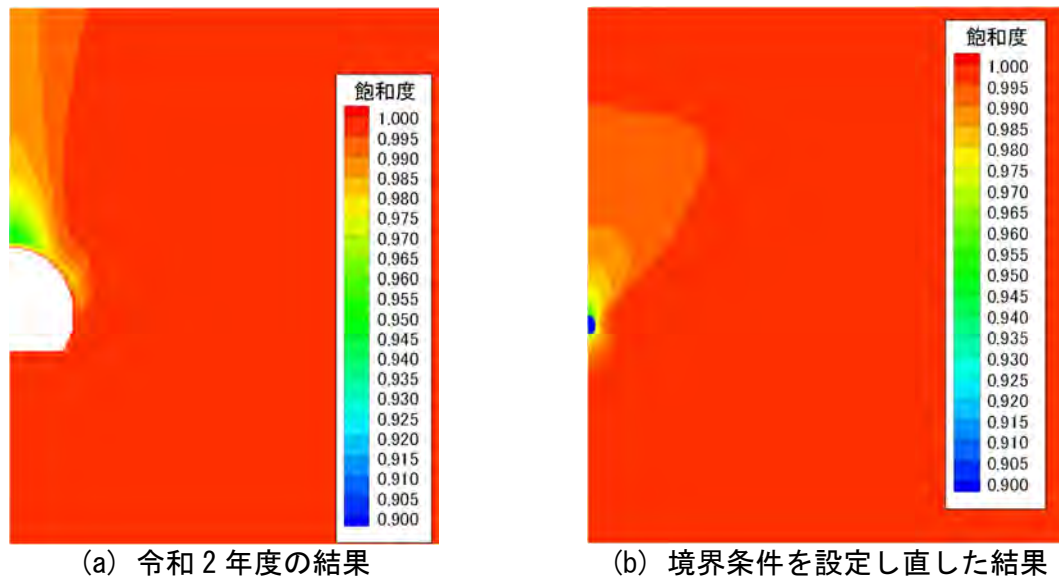
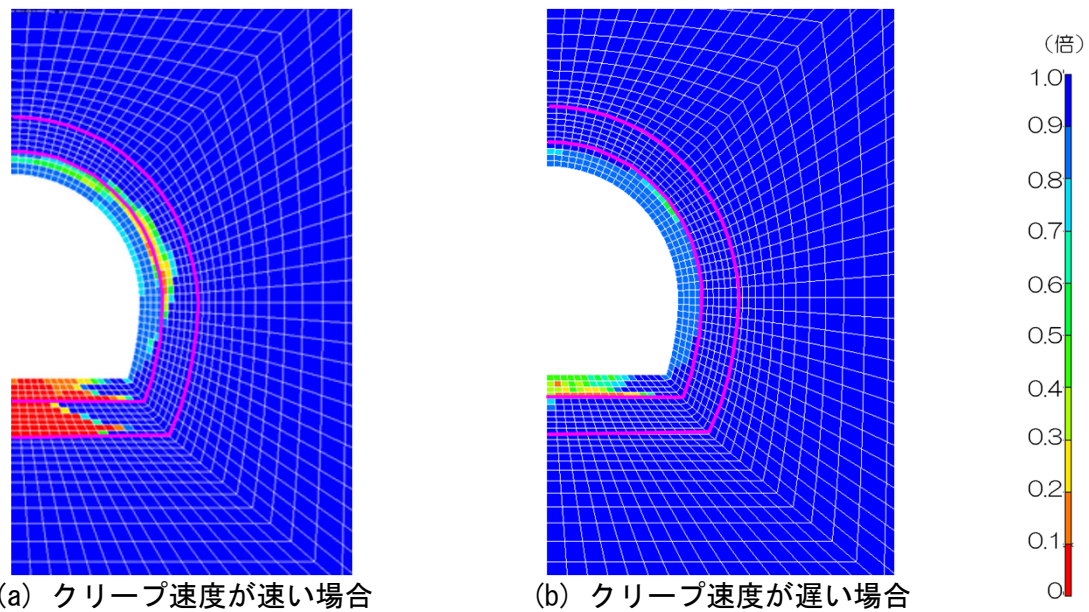


図 40 境界条件の影響による坑道周辺における飽和度分布の予測結果の比較

長期クリープ変形挙動解析では、過去のクリープ試験の結果に基づき、クリープ速度が速い場合と遅い場合の坑道周辺の長期変形挙動解析を実施しました。弾性波速度分布の結果を参考に掘削直後に発生した掘削損傷領域（EDZ）と健岩部から構成されるモデルを初期モデルとして解析を実施しました。解析の結果、変形量はクリープ速度が速い場合も遅い場合も、天端部および側壁部で mm オーダーの変位量が発生しました。図 41 は、解析により推定された坑道開放 1,000 年後のヤング率^{*64}の掘削直後からの変化率になります。クリープ速度が速い場合には、クリープ速度が遅い場合と比較してヤング率が低下する範囲が広がるものの、その影響は EDZ 内に限定され、坑道壁面から 1 m 程度の範囲に限られる結果が得られました。

*64：ヤング率とは、縦弾性係数ともいい、一方向に引っ張ったり圧縮したときの伸びと力の関係から求められる定数です。ヤング率の大きいほど硬い物質であるといえます。応力（単位面積あたりの力）とひずみ（伸び）の関係は、「応力＝ヤング率×ひずみ」です。



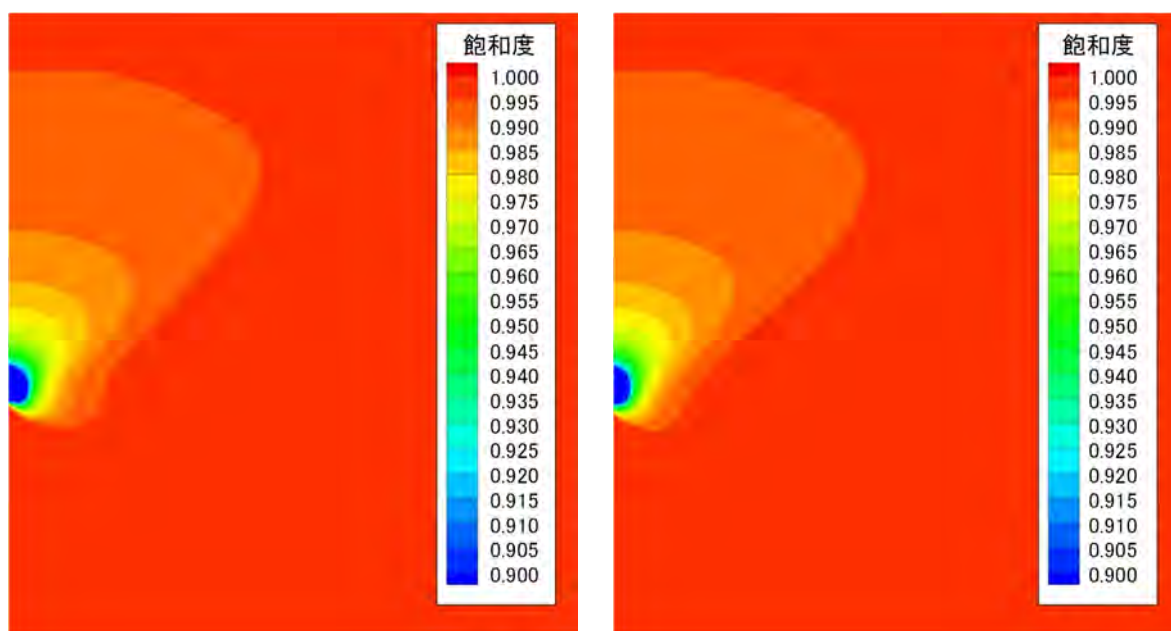
(a) クリープ速度が速い場合 (b) クリープ速度が遅い場合

図 41 長期クリープ変形挙動解析による 1,000 年後のヤング率の初期状態からの変化率

図中の赤線は、解析に際して、掘削直後に発生した EDZ として健岩部とは異なる物性値を与えた領域です。

図 42 は、長期クリープ変形挙動解析および令和 3 年度に実施した亀裂を含む岩石コアを用いた透水試験結果から、長期クリープ変形に伴う坑道周辺の透水性の変化を考慮した場合の坑道周辺の 1,000 年後の飽和度分布の予測結果になります。飽和度は、坑道周辺で低下する領域が広がるものの、1,000 年後も飽和度は 90%以上であり、クリープ速度の違いによる透水性の変化の違いの影響は大きいことが推定されました。

令和 4 年度は、今回得られた結果を初期条件として、埋め戻し後の坑道周辺の地質環境の変化の数値解析を実施する予定です。



(a) クリープ速度が速い場合 (b) クリープ速度が遅い場合
 図 42 長期クリープ変形挙動に伴う透水性の変化を考慮した場合の
 1,000 年後の飽和度分布

(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 3 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]：地層処分施設閉鎖技術確証試験）の一環として、シーリングシステム^{*65}の成立性の確認を目的に、先に示した 5 項目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といったコンクリート系材料との相互作用を受けることで、埋め戻し材やプラグが変質し、結果として期待する性能（核種の遅延や止水性能）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起する要因として、岩盤、支保工、埋め戻し材の個々の状態や、個々の状態に起因したプロセスが連続的に生じることが条件になると考えられます。このような背景から、令和 2 年度の検討に加えて、岩盤と支保工との間で生じる現象も考慮し、コンクリート系材

^{*65}：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。

料と地下水の接触に起因した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、本シナリオが生起する条件の詳細化を図りました。また、本シナリオの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流出現象に着目し、同現象が発生し得る条件を確認するための室内試験に着手しました。

令和 2 年度の検討から、埋め戻し材が変質する要因の 1 つとして支保工と埋め戻し材の境界部の地下水流れが移流支配である条件が挙げられました。移流支配であるには境界部に間隙が生じるなどして透水性が高くなる必要があります。一方、岩盤も考慮した場合、地下水は岩盤→支保工→埋め戻し材の順に流れることが想定されるため、岩盤と支保工境界の高 pH 地下水中でカルシウムイオンなどの過飽和によって再沈殿が生じ、岩盤と支保工の境界あるいは支保工内の間隙が閉塞する可能性があります。その場合、結果として支保工と埋め戻し材の境界への流れが抑制され、埋め戻し材の変質への影響も低減されることが想定されます。しかしながら、一度閉塞した間隙が地震動などの力学的な作用によって再度開口することも想定され、このような場合は、支保工と埋め戻し材の境界への地下水流入が抑制されない可能性が考えられます。上記を踏まえると、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が生じるまでの変遷は図 43 および表 6 のように整理されます。なお、状態 1-A は坑道が埋め戻された初期状態を示していますが、埋め戻し材の自重沈下などによって上部の埋め戻し材の密度が低下するあるいは、間隙が生じることも想定されます。このような状態を初期状態として考えた場合は、埋め戻し材の施工初期から間隙もしくは密度低下によって透水性が相対的に高い部分に地下水が流れることで、状態 1-A から状態 2-A に遷移することも考えられます。

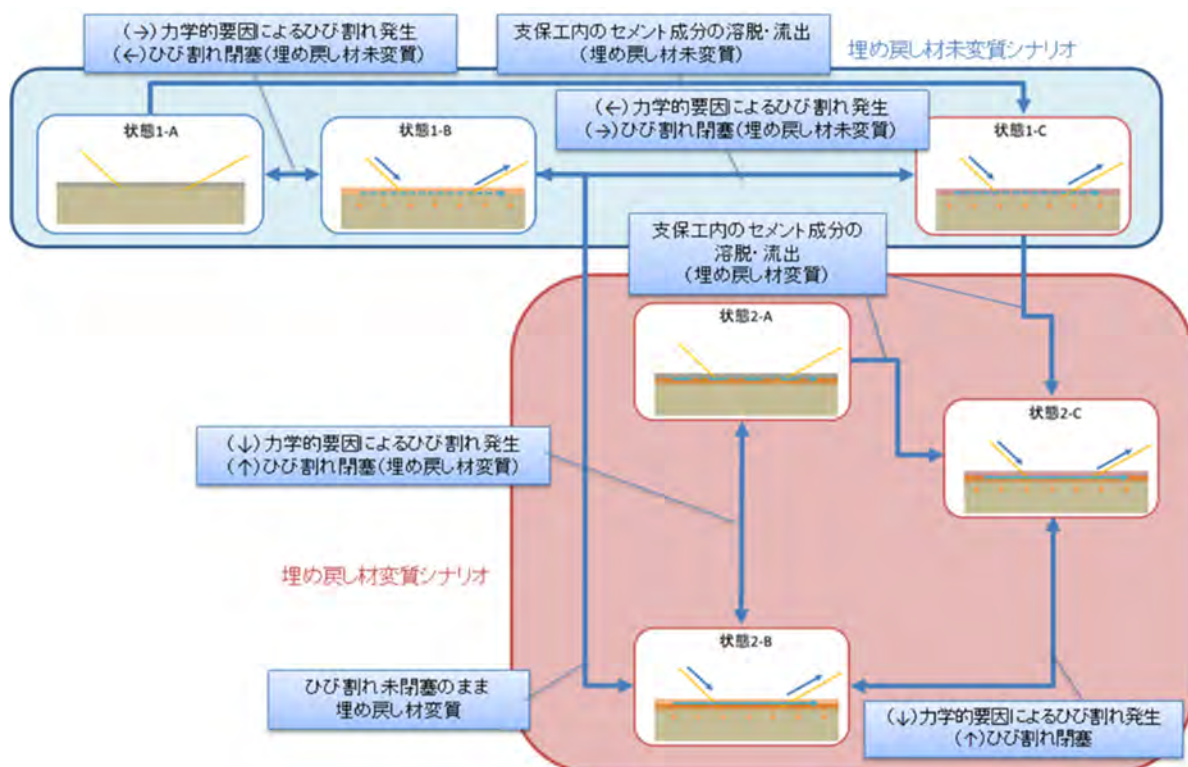


図 43 コンクリートの溶脱成分に起因した埋め戻し材の変質に至る変遷⁽¹³⁾

表 6 コンクリートの溶脱成分に起因した埋め戻し材の変質に関わる状態の整理

シナリオ	状態	
埋め戻し材 未変質	1-A	坑道が埋め戻された初期状態
	1-B	支保工内に生じた割れ目などの間隙を介して地下水が流入し、コンクリート系材料と反応した地下水が埋め戻し材と接触する状態
	1-C	埋め戻し材は変質せずに、鉱物の沈殿により支保工内に生じた割れ目などの間隙が閉塞した状態
埋め戻し材 変質	2-A	埋め戻し材の上部が変質するものの、鉱物の沈殿により間隙が閉塞した状態
	2-B	支保工および埋め戻し材の境界に間隙が生じ、この間隙を介して地下水が流入する状態
	2-C	支保工内のコンクリート系材料がすべて溶脱し、支保工と埋め戻し材の境界部に残された間隙に地下水が流入する状態

次に、図 43 に示す変遷のうち、状態 1-B から状態 2-B への遷移の可能性あるいは、状態 2-B から状態 2-A ないし状態 2-C への遷移の可能性があるかについて解析的な検討を行いました。岩盤、支保工および埋め戻し材をモデル化し一度に解析を行うのは計算負荷の観点で現実的ではない

ため、①岩盤と支保工間における水理－化学プロセスを解析し、主に境界部での間隙の閉塞の有無を評価した後に、解析結果を②支保工と埋め戻し材における水理－化学プロセスを解析する際の入力情報として解析を行うこととしました。①の解析の結果、岩盤と支保工境界は解析初期に主に C-S-H (ケイ酸カルシウム水和物) の沈殿によって間隙が閉塞することが分かりました。したがって、②の解析は参考文献(13)で示された解析モデルに基づき、支保工と埋め戻し材の境界の透水性が低い条件、すなわち、境界部の地下水流速が遅い条件 (1.0×10^{-9} m/s) を模擬した解析を行いました。

図 44 に支保工と埋め戻し材における水理－化学連成解析結果を示します。1,000 年後の埋め戻し材と支保工境界部の間隙率の変化は地下水の流入箇所の近傍 1 m 程度にとどまり、これよりも下流側では間隙率が高くなることはありませんでした。一方、埋め戻し材中のモンモリロナイトの残存率は地下水流入箇所の近傍と下流側で低下する傾向が確認されました。下流側でモンモリロナイトの残存率が変化したのは、本解析条件では保守的に埋め戻し材と支保工境界を流れる地下水は支保工内のコンクリートと反応後、平衡状態となった組成の地下水が常に流れることを仮定しているため、このような高 pH の地下水が埋め戻し材と反応することにより徐々に埋め戻し材中のモンモリロナイトが溶出したためと考えられます。

以上の結果から、埋め戻し材と支保工境界に一定の地下水流速で地下水が流れる状態であっても、埋め戻し材の変質は限定的であることが示唆されました。すなわち、図 43 中における状態 1-B から状態 2-B への遷移あるいは、状態 2-B から状態 2-A ないし状態 2-C への遷移は限定的であり、埋め戻し材の性能への影響は少ない可能性が示唆されました。

今後は支保工内の間隙が閉塞されたのち、地震動などの力学的な作用によって再開口するプロセスが継続的に生じ、結果として岩盤から埋め戻し材への地下水の流れが断続的に生じた場合、このようなプロセスが埋め戻し材の変質に与える影響を評価することで、コンクリート溶脱成分に起因した埋め戻し材の変質というシナリオが、埋め戻し材の長期性能に対して重要なシナリオとなり得るかを検討する予定です。

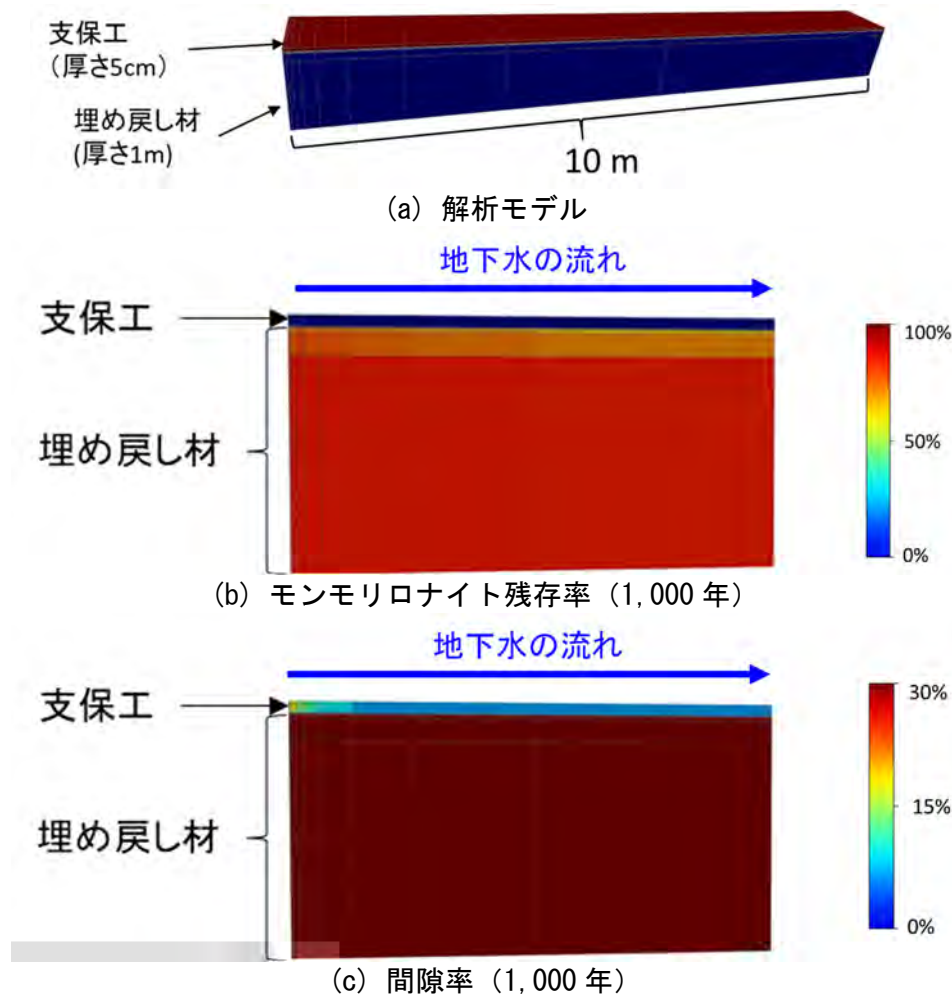


図 44 埋め戻し材中のモンモリロナイトの残存率および間隙率の変化
参考文献(13)に一部追記しています。

埋め戻し材と支保工境界の初期状態に影響を及ぼし得るベントナイトの流出現象の発生条件を確認するための室内試験を実施しました。具体的には、既往の研究⁽¹⁴⁾を基に、流出現象の発生条件として重要となる埋め戻し材中の間隙状態、水圧、水質を変化させた試験を実施しました。また、地下水の流入の仕方についても条件を変えて試験を実施しました。

図 45 に試験装置を示します。図 45 中のアクリルチューブに粒径の異なるベントナイトペレット（粒状に成形したベントナイト）もしくはベントナイトブロックを挿入してベントナイト供試体内の間隙状態を変化させました。また、注水タンク内に塩濃度の異なる水を準備し、水質を変化させるとともに、注水タンク内の水位を変化させることで、供試体に負荷する水圧を変えた条件で試験を行いました。水の注水箇所として 2 系統

構築し、アクリルチューブに面的に注水する場合と、アクリルチューブの頂部から点で注入（地下深部に分布する割れ目からの地下水流入の状態を模擬）可能な装置としました。試験中のアクリルチューブ内のベントナイトの膨潤の様子を目視観察するとともに、アクリルチューブ前後で流量を計測し、最下流側に排水される水に含まれるベントナイト濃度を分析することで、各条件に応じた、ベントナイトの流出の有無や程度を評価しました。

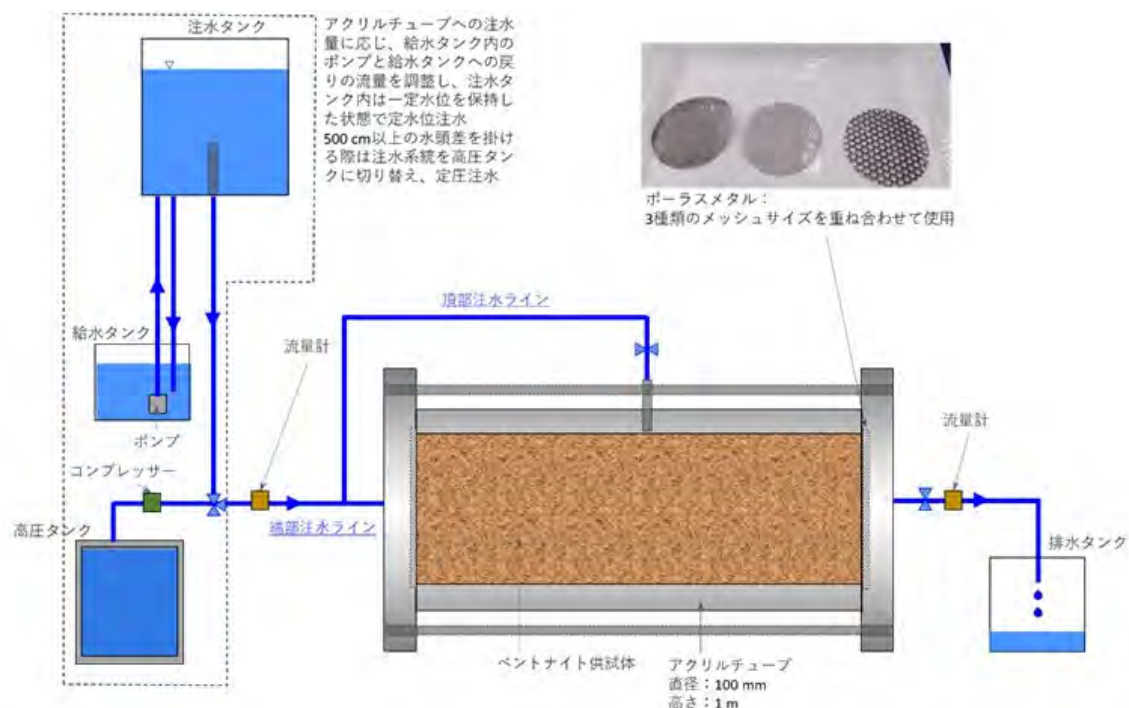


図 45 試験装置の概要⁽¹³⁾

図 46 に試験ケースの一例を示します。本ケースはベントナイト供試体として粒径 15 mm のペレット、水質は人工地下水、注水方法は頂部注水という条件で実施しました。図 46 に示すように 50 cm 水頭差を負荷した後に、注水箇所から下流側に向かって、選択的な流路が形成されたことが確認できました。また、この流路形成に伴い、下流側に流出する流量が一時的に上昇し（図 47）、流出水中のベントナイト濃度も高くなることが確認されました（図 48）。その後、試験終了まで流路が閉塞することはなく、水頭差を 500 cm に上昇させた時点で、急激に流出水の流量が増加し、これに対応してベントナイト濃度が上昇しました。

以上の結果から、本ケースの試験条件においては、選択的な流路を通じてベントナイトの流出が生じることが確認されました。一方で、50 cm 水頭を1時間継続した後、水の流出が止まっているのに加え、500 cm 水頭差までは流出が再開することはなかったことから、埋め戻し材に負荷する水圧の条件によっては、時間に応じて流路の端部もしくは途中が閉塞し、水の流れが止まることで埋め戻し材の膨潤が進行し、結果として形成された流路が閉塞する可能性が示唆されました。

このような可能性を検証するために、今後は条件を絞った試験により、流路の閉塞の有無や閉塞しない場合の条件を整理するとともに、ベントナイト流出量との比較を通じ、仮に埋め戻し材の流出現象が生じた場合に、埋め戻し材の性能に及ぼす影響を評価する予定です。



図 46 水みちの発生状況⁽¹³⁾

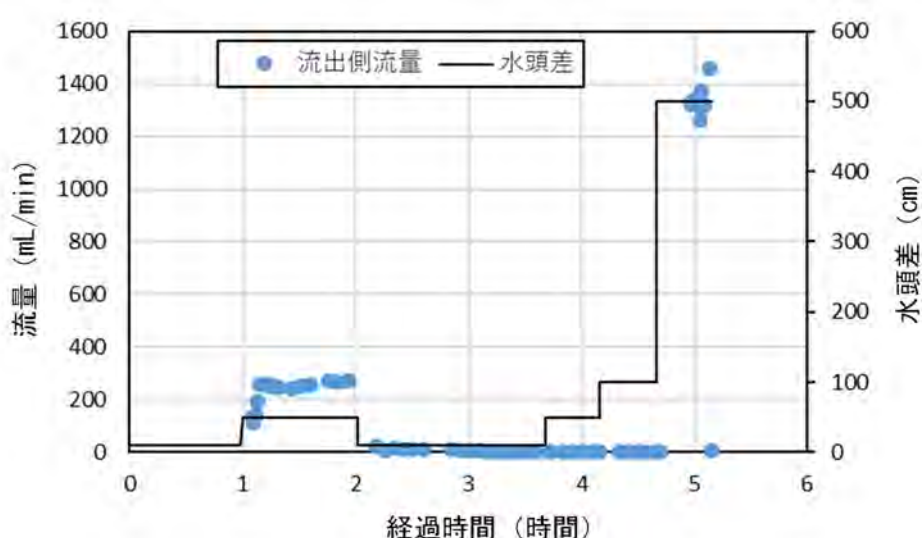


図 47 流量と水頭差の時間変化⁽¹³⁾

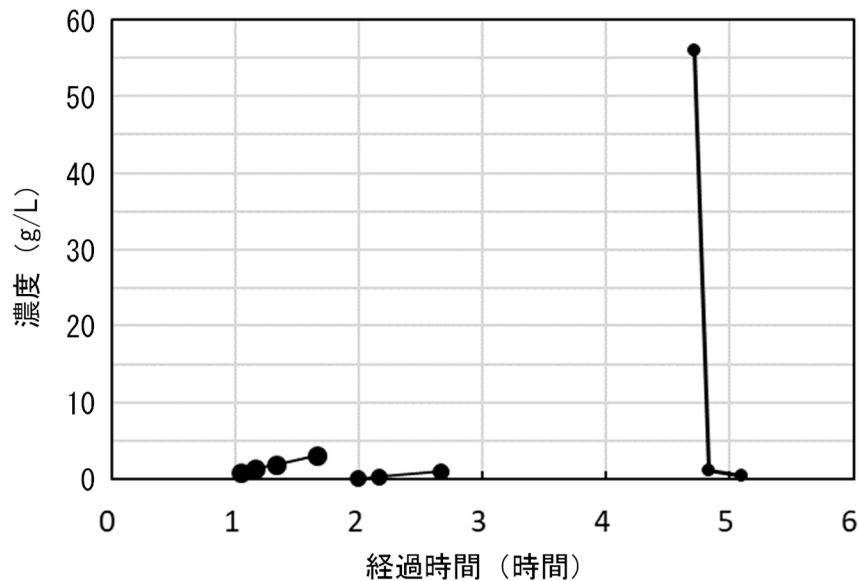


図 48 流出水中のベントナイト濃度の時間変化⁽¹³⁾

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

人工バリア定置の概念の 1 つである処分孔縦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 49(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 49(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。

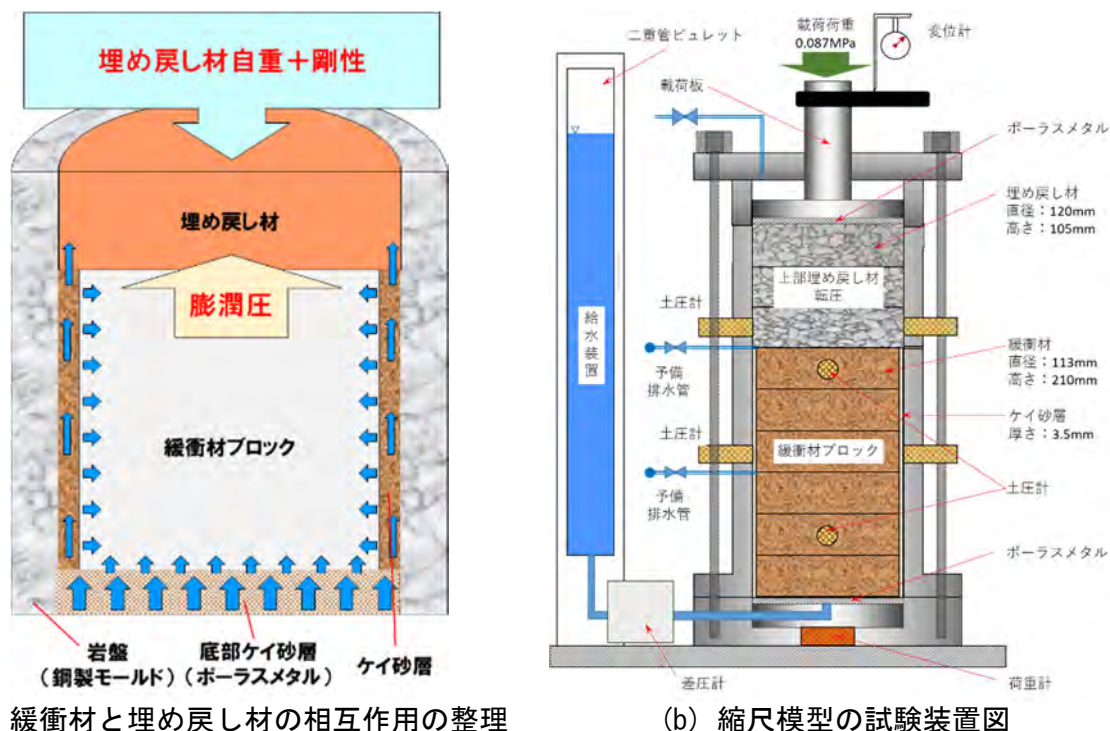


図 49 縮尺模型試験の概念図

(a) は人工バリア性能確認試験の状況と緩衝材と埋め戻し材の相互作用を整理した図、(b) は整理した相互作用を模した縮尺模型の試験装置図

令和 3 年度は、試験用水の水質の違いが緩衝材と埋め戻し材の膨潤挙動に及ぼす影響を把握するために、試験用水として塩濃度が異なるイオン交換水と 0.2 mol/L の NaCl 水溶液（以下、0.2M-NaCl）を用いた場合の 2 条件で試験を実施しました。

変位計で計測した変形量は緩衝材の縮尺模型全体の高さで除して、緩衝材の膨潤変形率として整理しました。図 50 に緩衝材の膨潤変形率の経時変化を示します。試験開始後、9 日を経過するまではイオン交換水と 0.2M-NaCl で同じような膨潤変形率の増加の傾向を示しました。その後、0.2M-NaCl ではその増加が緩やかになる傾向を示し、30 日を経過したところから膨潤変形率は一定の値へと収束しました。一方、イオン交換水では 9 日を過ぎた後も膨潤変形率は増加しており、試験を終了した試験開始後 35 日経過の時点でも膨潤変形率は増加の傾向を示していました。試験終了時点での膨潤変形率の値はイオン交換水で 7.32%、0.2M-NaCl で 4.59% となり、イオン交換水で変形が大きい結果となりました。また、膨潤圧の

計測例として、図 51 に緩衝材の下段に設置した土圧計 1 と土圧計 2 および上段に設置した土圧計 5 と土圧計 6 で計測した圧力の経時変化を示します。試験開始直後に急激に圧力が増加した後、1 日～2 日を経過したところにピークを示し、減少傾向に転じました。その後は、0.2M-NaCl の土圧計 1 と土圧計 2 では 10 日を経過するころまで減少傾向を示してから緩やかな増加傾向に転じ、最終的に一定の値に収束する傾向を示しました。下段の土圧計 1 と土圧計 2 のピーク時の圧力は、イオン交換水で 0.71 MPa と 0.92 MPa、0.2M-NaCl で 1.19 MPa と 1.00 MPa でした。上段の土圧計 5 と土圧計 6 では、イオン交換水で 0.46 MPa と 0.44 MPa、0.2M-NaCl で 0.63 MPa と 0.53 MPa でした。いずれもイオン交換水の方が土圧が低い値を示しています。また、試験装置の同じ高さに設置してある土圧計 1 と土圧計 2 では、計測される土圧が最大で 0.2 MPa 程度異なっています。この理由としては、試験容器内に設置した緩衝材の位置や土圧計周辺のケイ砂の充填状況の違いにより、緩衝材が膨潤して土圧計に接触するまでの時間が異なることが理由の 1 つとして考えられます。

以上の結果より、イオン交換水と 0.2M-NaCl の緩衝材の膨潤挙動を比較すると、イオン交換水で、緩衝材の膨潤による変形が大きく、その場合に発生する圧力は低くなることが確認できました。今後も、引き続き縮尺模型試験を実施し、埋め戻し材の緩衝材膨出抑制機能を評価するためのデータの拡充を図るとともに、埋め戻し材の設計評価に資するデータとしての取りまとめを行います。

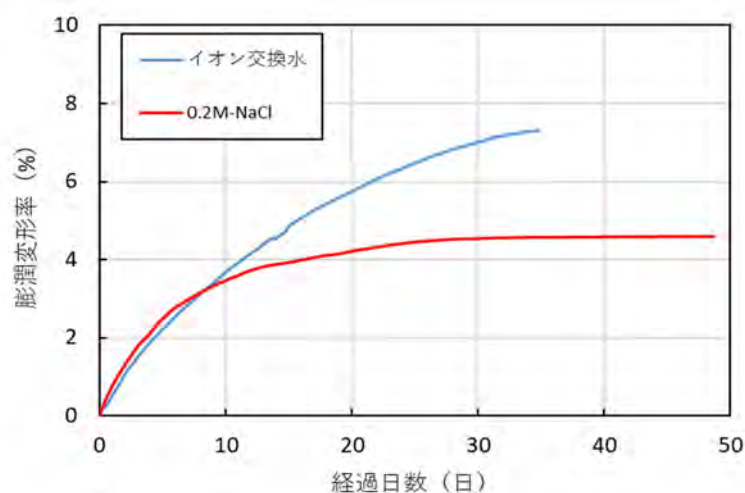
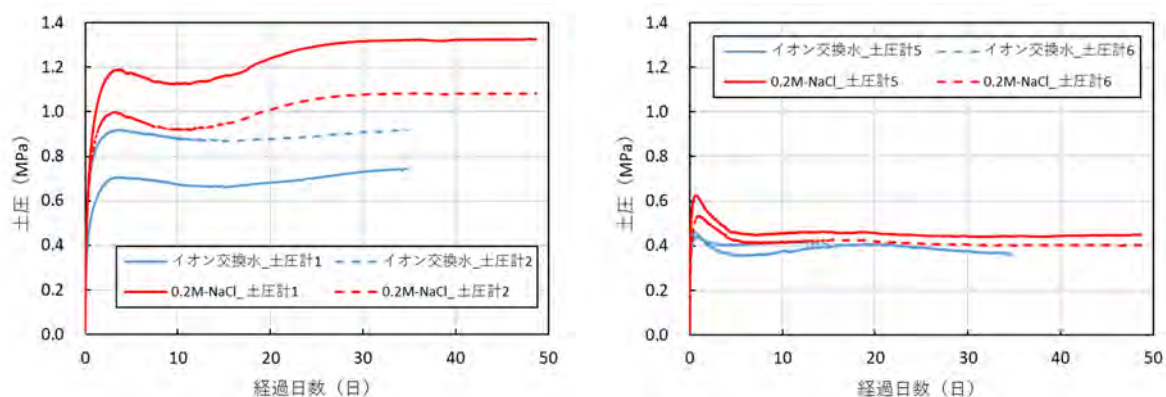


図 50 縮尺模型試験における緩衝材の膨潤変形率の経時変化



(a) 緩衝材下段（土圧計 1 および土圧計 2） (b) 緩衝材上段（土圧計 5 および土圧計 6）

図 51 縮尺模型試験における膨潤圧力の経時変化

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（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、透水係数を指標の 1 つとして評価することを目的として、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試験坑道 3 に構築し、EDZ シーリング試験を行っています。

令和 3 年度は、令和 2 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 52 に試験を実施した場所の概要を示します。試験坑道 3 の底盤から鉛直下向きにボーリング孔（以下、EDZ-1 孔）を掘削しています。この 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 のスリットを掘削し、ベントナイトのペレットを充填することで粘土止水壁を構築しています。令和 3 年度は、粘土止水壁を構築して約 2 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 0.31 m～1.70 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 53 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。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 3 年度の透水試験の結果、試験領域の透水係数は約 5×10^{-9} m/s の値を示しました。この結果より、粘土止水壁を構築して 2 年が経過した時点においても、試験領域の透水係数を構築直後と同等に低く保っていることを確認しました。

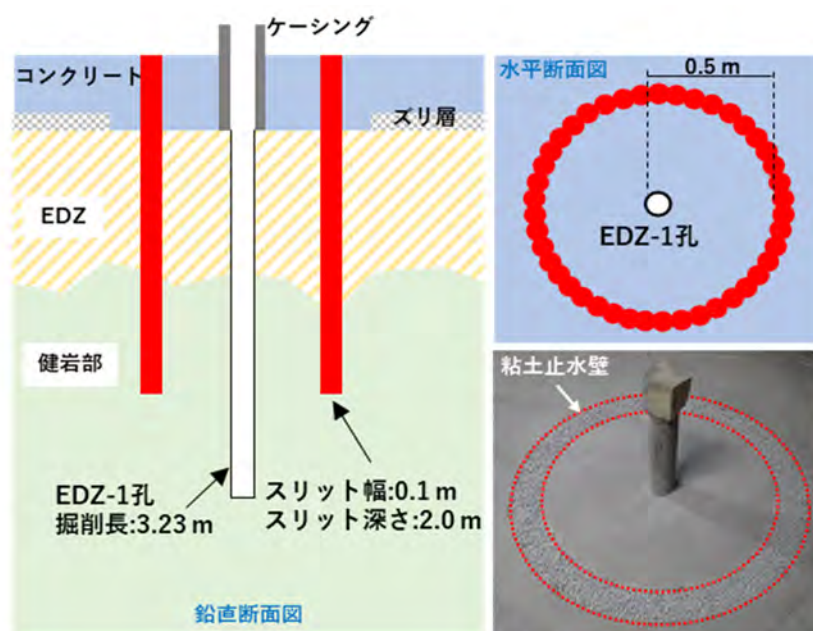


図 52 粘土止水壁周辺の概要図

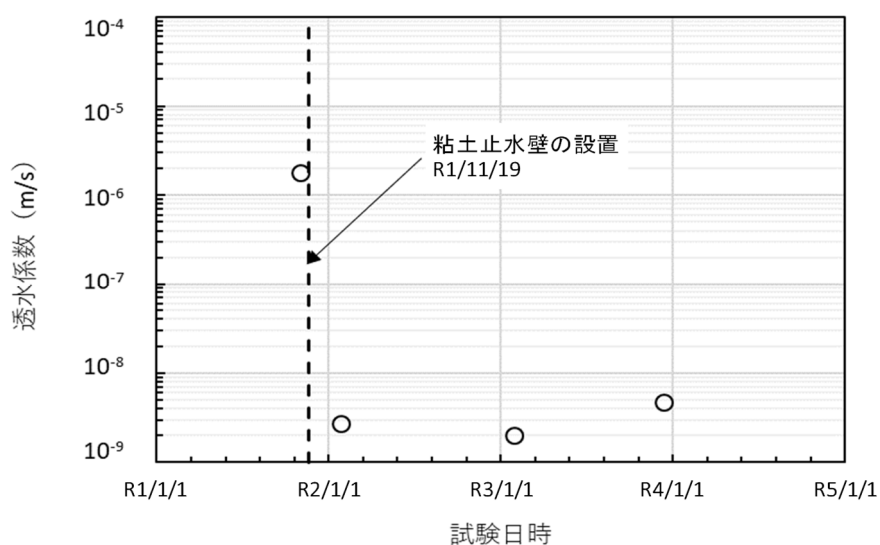


図 53 試験領域内の透水係数の経時変化

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、要求する性能を発揮できる品質（例えば、乾燥密度など）を確保して施工できる方法が必要となります。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。この止水プラグの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しています。

令和 3 年度は、令和 2 年度に切欠き部を模擬した型枠を対象に実施した地上での吹付け試験（以下、地上試験）の結果を踏まえて、試験坑道 2 の側壁部の岩盤を掘削して設けた切欠き部に対するベントナイトの吹付け工法の適用性を確認するための工学規模試験を実施しました。地上試験では、吹付け材料に粉末ベントナイトを用いた場合に吹付け後の乾燥密度が目標乾燥密度を下回ったことが課題でした。

そこで、工学規模試験の実施に先立って吹付けの手順と吹付け後の品質を確認するための予備試験を実施しました。ベントナイトに粉末ベントナイト（クニゲル V1）を用いて、吹付け材料としてクニゲル V1 とケイ砂を 70:30 の割合で混合した材料（以下、混合材料）を作製しました。混合材料の製作時に加える水の量は、事前の締固め試験の結果から最も乾燥密度が大きくなる時の値を設定しました。また、混合材料の品質のばらつきを少なくするために、混合前のクニゲル V1 とケイ砂の含水比を測定して混合する際に加える水の量を管理するとともに、練り混ぜを行う時間を一定にしました。

予備試験では、口径が 30 mm のノズルを用いて幅 1 m、高さ 50 cm、奥行き 50 cm の木製型枠に対して混合材料の吹付けを行いました。混合材料の吹付けによる乾燥密度の目標値は、有効粘土密度^{*66}が 1.20 Mg/m^3 を確保できる値として 1.43 Mg/m^3 に設定しました。吹付け後には 9 箇所ですamplingを行い、含水比と乾燥密度を測定しました。図 54 に 2 度の予備試験を実施してそれぞれで測定した含水比と乾燥密度の関係を示します。図 54 には、含水比と乾燥密度から求められる混合材料の飽和度 (S_r) が 70%~100%のときの曲線も示しています。また、加える水の量を

*66: 緩衝材や埋め戻し材中に含まれるケイ砂の体積を除いた、ベントナイトのみの乾燥密度を計算したものです。

決めるために実施した締固め試験のうち、 $2E_c$ (約 $1,100 \text{ kJ/m}^3$) のエネルギーで締固めたときの含水比と乾燥密度の関係も示しています。1度目に実施した V1-70_A では、目標乾燥密度である 1.43 Mg/m^3 を下回るサンプリング箇所もあったものの、9箇所の平均乾燥密度は 1.45 Mg/m^3 と目標値を上回る値となりました。また、含水比は $20.6\% \sim 26.3\%$ の値を示しました。2度目に実施した V1-70_B では、全てのサンプリング箇所乾燥密度の値は目標乾燥密度である 1.43 Mg/m^3 を上回り、9箇所の平均乾燥密度は 1.51 Mg/m^3 と目標値を上回りました。含水比は $21.4\% \sim 23.7\%$ とばらつきが少なく、その平均値は 21.7% でした。飽和度も $70\% \sim 80\%$ の範囲におさまっており、ほとんど同じ状態で吹付けられていると考えられます。これらの予備試験の結果より、粉末ベントナイトであるクニゲル V1 を用いた吹付け材料でも目標乾燥密度を上回る乾燥密度で吹付けられることを確認し、試験坑道 2 で実施する工学規模試験においても同じ材料を用いることとしました。

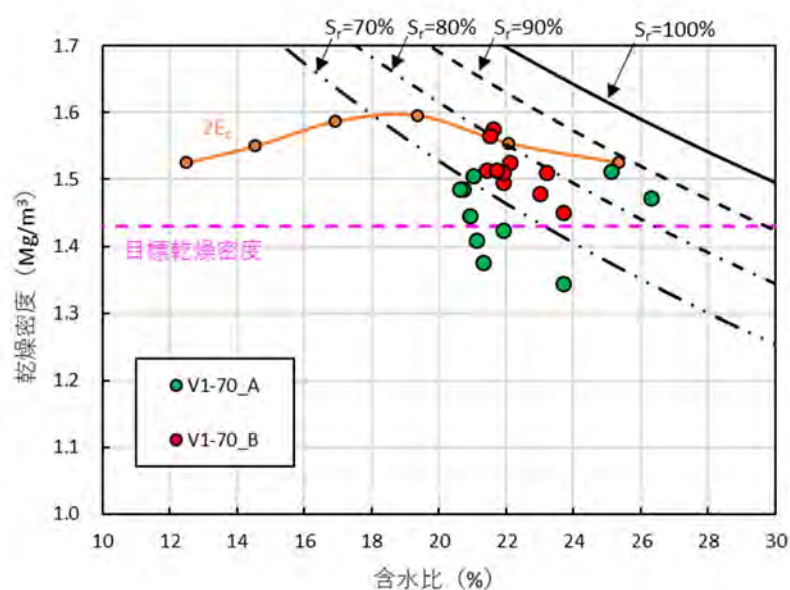


図 54 予備試験における含水比と乾燥密度の関係

工学規模試験では、試験坑道 2 の側壁面に切欠き部を掘削しました。試験坑道 2 の切欠き部掘削の様子を図 55 に示します。図 55(a) に示すように、試験坑道 2 は直径約 4.0 m の円形断面を有しており、坑道壁面は鋼製支保工が約 1.5 m 間隔で設置されるとともに、表面は吹付けコン

クリートで覆われています。切欠き部は、試験坑道 2 の鋼製支保工の間の側壁部分（図 55(a)）を電動バックホウに取り付けたブレーカ（削岩機）により掘削しました（図 55(b)）。掘削した切欠き部（図 55(c)）の寸法は、幅が約 1.3 m、奥行きが最大で約 1.3 m、高さが約 3.0 m でした。

吹付け材料は、予備試験と同様にクニゲル V1 とケイ砂を 70:30 の割合で作製した混合材料を用いました。吹付け後の乾燥密度の目標値は、有効粘土密度が 1.20 Mg/m^3 を確保できる値として 1.43 Mg/m^3 に設定しました。

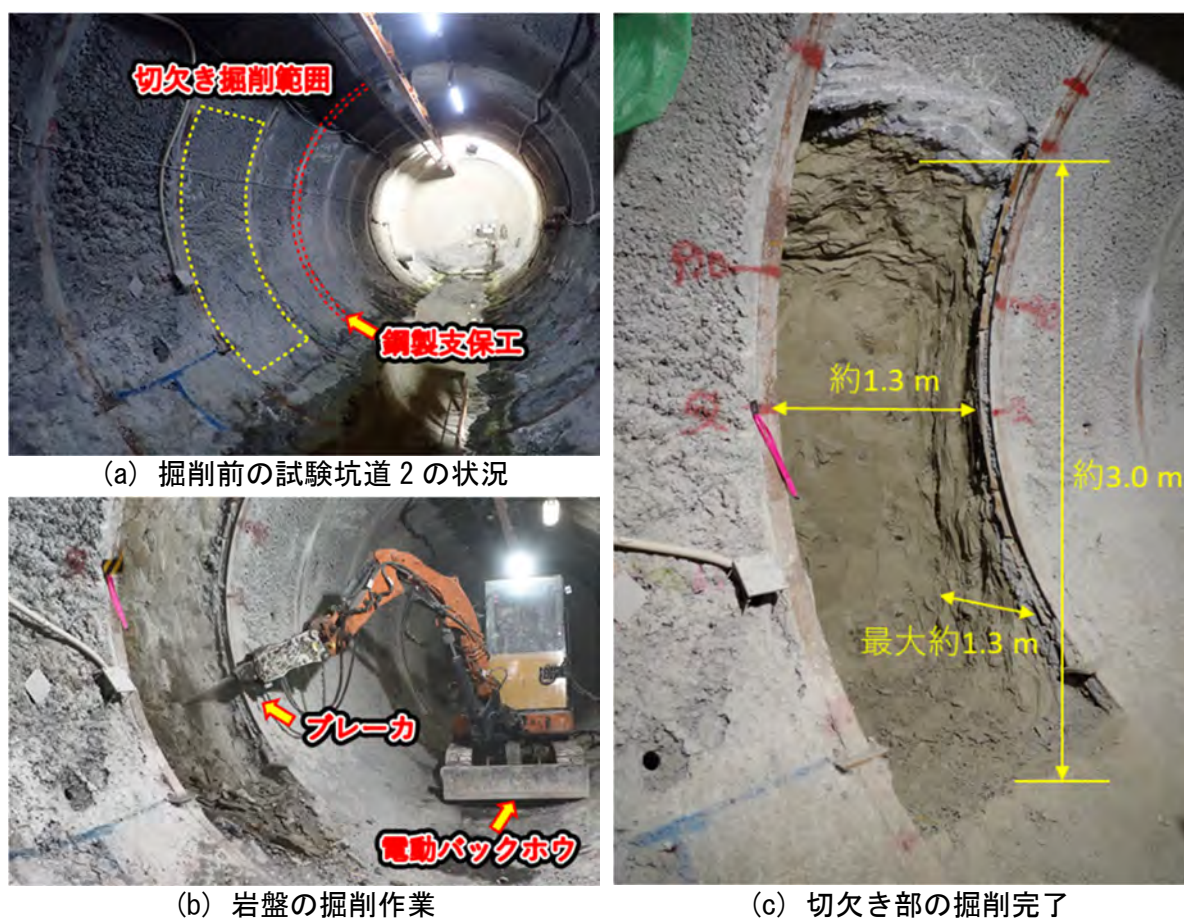


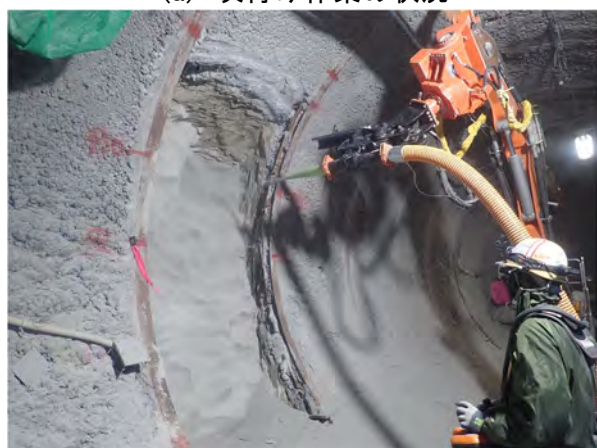
図 55 試験坑道 2 の切欠き部掘削の様子

切欠き部への吹付けの状況を図 56 に示します。吹付け作業では、口径 30 mm のノズルを取り付けた吹付け機械をオペレータが操作して行いました（図 56(a)）。オペレータは吹付けノズルを一定の距離を保ちながら吹付け面に対して直角となるように、吹付けの状況を目視で確認しながら吹付け機械を操作しました。実際の試験における吹付け手順としては、切欠き部の下部から上部に向かって吹付けを形成していき（図 56(b)）、

切欠き部の奥行方向の深さ約 1.3 m の半分程度まで吹付けを行いました。その時点で、含水比と乾燥密度を測定するためのサンプリングを 9 箇所で行いました。その後、坑道壁面の吹付けコンクリート付近まで吹付けを完了し（図 56(c)）、再び含水比と乾燥密度を測定するためのサンプリングを 9 箇所で行いました。



(a) 吹付け作業の状況



(b) 切欠き部への吹付け状況



(c) 切欠き部の吹付け完了

図 56 切欠き部への吹付けの状況

図 57 に工学規模試験における含水比と乾燥密度の関係を示します。図 57 には、混合材料の飽和度 (S_r) が 70%~100%のときと、 $2E_c$ のエネルギーで締固めたときの試験結果に加えて、令和 2 年度に実施した地上試験の結果も示しています。地上試験では、サンプリング試料全体の乾燥密度の平均値が 1.41 Mg/m^3 と目標乾燥密度を下回っており、含水比も 19.3%~29.6%の範囲でばらついていました。工学規模試験では、目標乾燥密度である 1.43 Mg/m^3 を下回ったサンプリング試料は 1 試料のみで、サンプ

リング試料全体の乾燥密度の平均値は 1.55 Mg/m^3 となり、地上試験に比べて高い乾燥密度で吹付けができました。また、含水比は 17.4%～23.5% の範囲にありその平均値は 20.5% でした。

工学規模試験で高い乾燥密度で吹付けができた理由としては、比較的低い含水比の材料を用いたこと、吹付け機に投入する材料の量を令和2年度の地上試験の約 60 kg/min から約 30 kg/min へと減らしたことが考えられます。

これらの結果から、実際の岩盤を掘削して設けた切欠き部に対して、粉末ベントナイトを用いた吹付け材料を目標乾燥密度よりも高く吹付けられることを確認しました。

今後は、工学規模試験で坑道側面の切欠き部に吹付けたベントナイトのサンプリング調査を実施し、吹付けベントナイトの乾燥密度や含水比のばらつきなどの施工品質をより詳細に確認します。

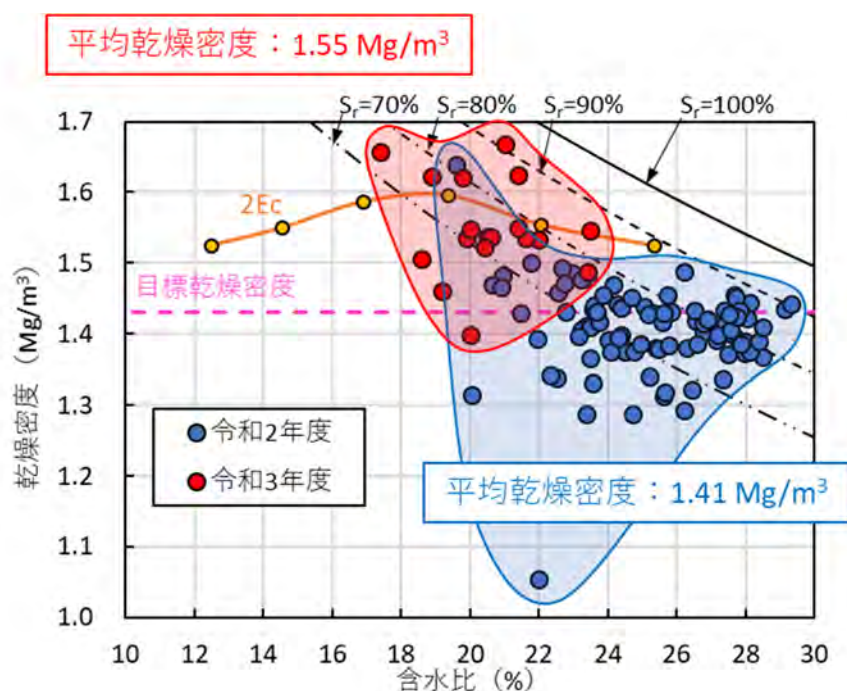


図 57 吹付け後の含水比と乾燥密度の関係

④ 掘削損傷領域の調査技術の高度化

処分場の閉鎖後に坑道周辺の掘削損傷領域（EDZ）が、地上と地下を結ぶ水みちとなることを防ぐためのプラグや埋め戻しといった坑道シーリングにおいては、実際の処分場の設計や安全性評価の基盤情報となる、EDZ の特性および空間的な分布を定量的に把握する調査技術が重要となります。

令和 3 年度は、350m 調査坑道において、EDZ に伴う岩盤中の連続性の高い割れ目の検知を目的として、ボーリングによるコア採取および検層、水理試験などを実施し、グラウト注入を行うとともに、令和 2 年度に製作した弾性波・比抵抗試験装置のプロトタイプを用いたデータ取得により、高精度な物理探査^{*67}技術の適用性を検討しました。また、EDZ の経時変化を考慮した、弾性波と比抵抗トモグラフィ^{*68}の同時逆解析のためのプログラム開発に向け、採取したコアを用いた室内試験により、飽和度と物性値のデータを取得しました。

試験では、ボーリング孔から EDZ に伴う割れ目へ超微粒子のセメント系グラウト材を注入し、その前後の弾性波速度や比抵抗の微小な変化領域を観察します。令和 2 年度は、グラウト注入前の試験として、弾性波速度と比抵抗の初期値となるデータを取得しました。

令和 3 年度は、岩盤中の連続性の高い割れ目の検知を目的とした、ボーリング調査および水理試験、検層を行いました。試験孔の位置を図 58 に、ボーリング調査で判別した割れ目と初期値の弾性波速度の分布を図 59 に示します。

*67：人工的に発生させた地震波や電磁波などを利用して、空中、地上、水上などから地下の状況を間接的に調査する方法のことです。

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

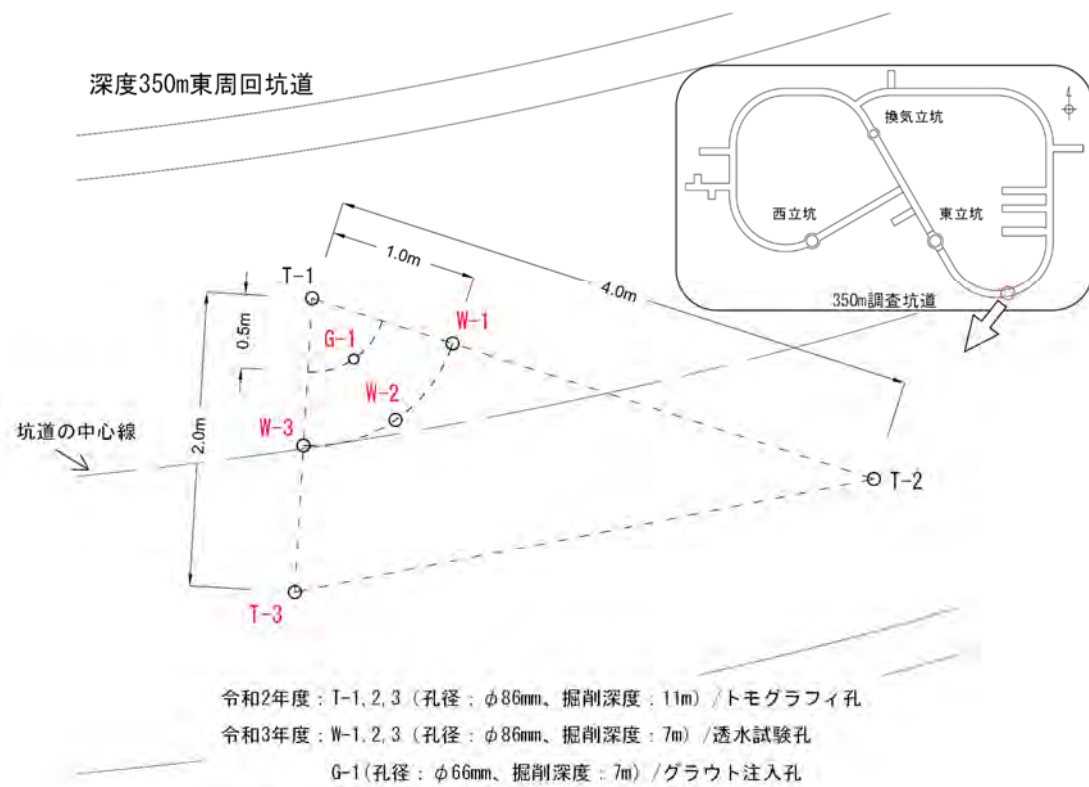


図 58 350m 調査坑道底盤における試験孔の配置

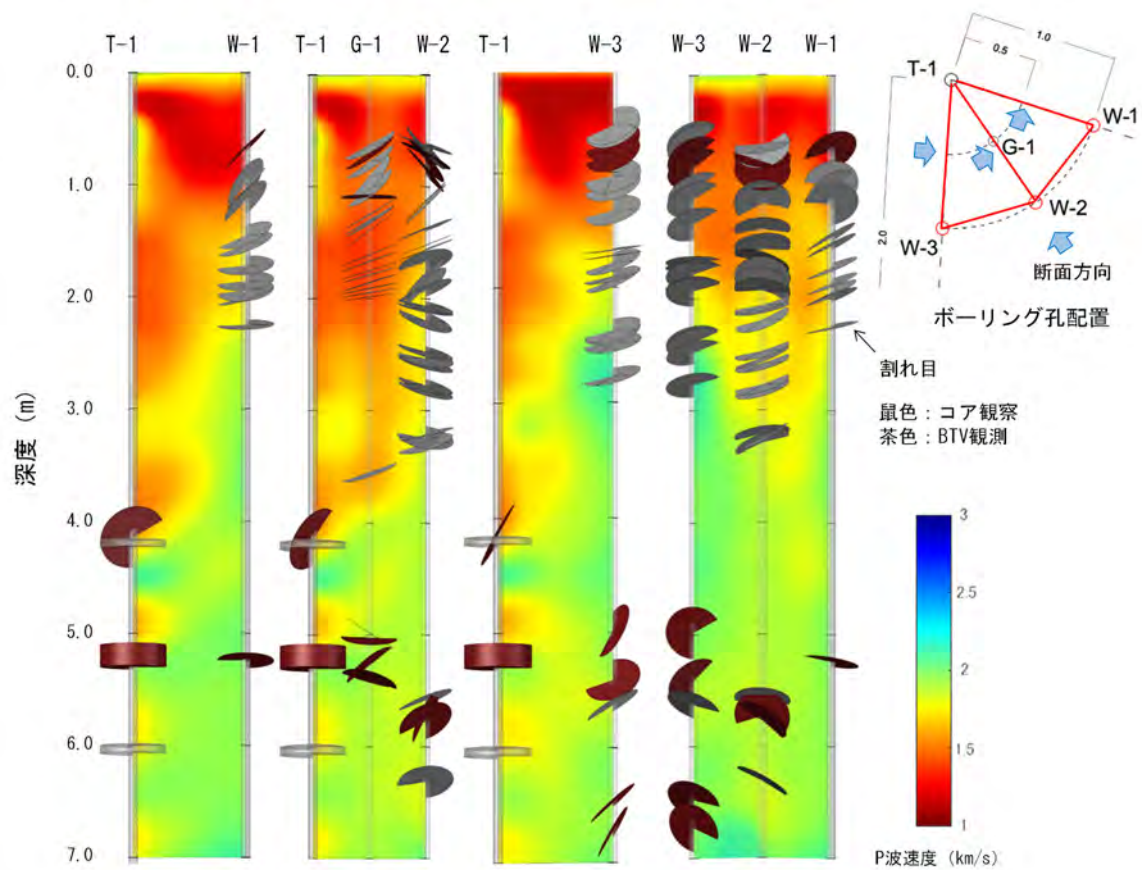


図 59 割れ目位置と弾性波速度分布

図 59 の各試験孔の深度 3 m 付近までの割れ目と、トモグラフィ調査による弾性波の低速度が分布する範囲（赤色部分）はおおむね整合しています。また、ボーリング中の水圧変化から、試験孔間で連結する割れ目を推定してグラウト注入を行い、グラウト注入による透水性の低減効果を透水試験により確認しています。今後は、グラウト注入後のトモグラフィ調査を行い、注入により弾性波速度や比抵抗などの物性が変化した領域を可視化します。

プロトタイプの試験装置を用いた試験は、EDZ の弾性波動と比抵抗の物性データにより、弾性波は屈折法および反射法地震探査の手法、比抵抗は二次元比抵抗法により解析を行い適用性を検討しました。W-1 孔の解析結果断面とトモグラフィの弾性波速度分布（P 波）および割れ目の位置の比較例を図 60 に示します。反射法解析では、地下の地層境界（割れ目）で反射した弾性波（地震波）を捉えて可視化します。反射法断面に連続する反射面がないことから、対応する割れ目が存在しないと考えられます。また、屈折法では、弾性波トモグラフィと同様に弾性波の初動の時間差から速度分布が得られます。今回は、波動の S/N 比（信号/雑音比）が低いことから、初動走時のグラフに屈曲点を捉えていません。初動走時の時間差を正確に捉え、走時曲線の屈曲点や傾きを解析することにより割れ目の検知が期待できます。図 60 の比抵抗分布の断面は、深度 2.3 m までの高比抵抗部分（黄色～緑）は割れ目と整合しますが、それ以深は整合しません。幌延の堆積岩の比抵抗は、地下の間隙水や岩盤中の粘土鉱物などの環境条件に影響されることから、これらを考慮した計測や解析手法の検討を行います。

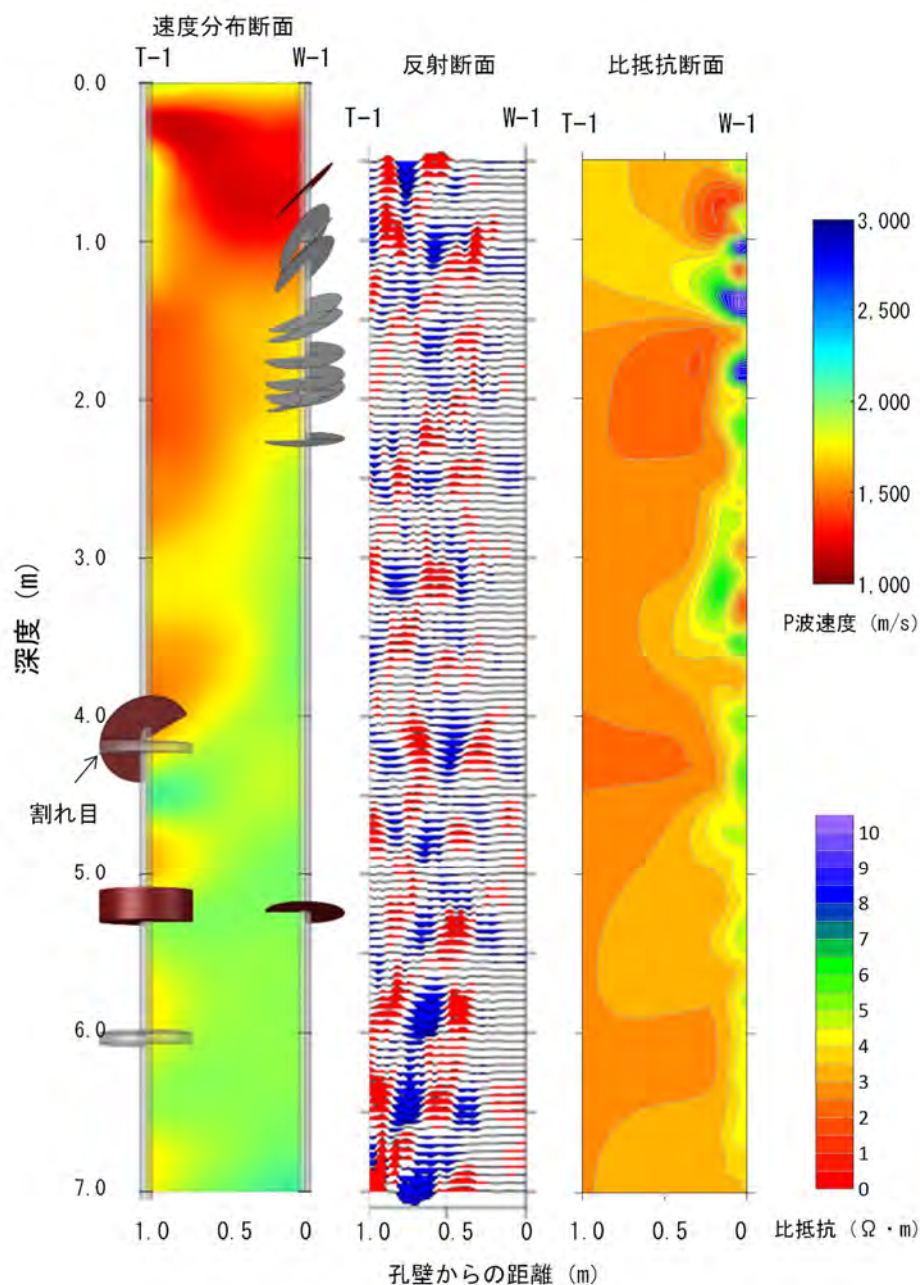


図 60 W-1 孔の解析結果と弾性波速度分布（P 波）および割れ目の位置の比較例

物理探査で取得される結果の解釈や解析の高度化に使用するデータの取得を目的として、深度 350 m で採取した岩石試料の物性値計測を実施しました。EDZ を対象とした物理探査では、比抵抗トモグラフィおよび弾性波トモグラフィが継続的に実施されていることから、岩石の比抵抗および弾性波速度計測を実施しました。健岩部における比抵抗および弾性波速度の関係を把握するため、岩石試料の飽和度を変化させながら比抵抗と弾性波速度を測定しました。図 61 は、測定した弾性波速度と比抵抗

の関係を飽和度も併せて表示しています。岩石の飽和度が 80%から 100%までの範囲では比抵抗があまり変化しない一方で弾性波速度は急激に変化しますが、飽和度が 80%以下の範囲では弾性波速度はあまり変化しない一方で比抵抗が著しく変化します。図 60 の右図に示すとおり、深度 350 m において坑道壁面や底盤を対象とした比抵抗探査では、比抵抗の値は平均的に $3 \Omega \cdot \text{m} \sim 4 \Omega \cdot \text{m}$ であり、 $10 \Omega \cdot \text{m}$ を超えることはありませんでした。一方で、図 60 の左図に示すとおり、P 波速度では、1,500 m/s を下回る領域が孔壁側に現れています。健岩部で、なおかつ比抵抗が $10 \Omega \cdot \text{m}$ を下回る場合、図 61 に示すように P 波速度は 1,800 m/s を下回ることはありません。P 波速度は、岩石の硬さや亀裂の数に影響され、変形しやすい方が遅くなる性質があります。このことから、深度 350 m の坑道壁面周辺の弾性波速度が 1,800 m/s を下回るような領域では亀裂が発達していると考えられます。

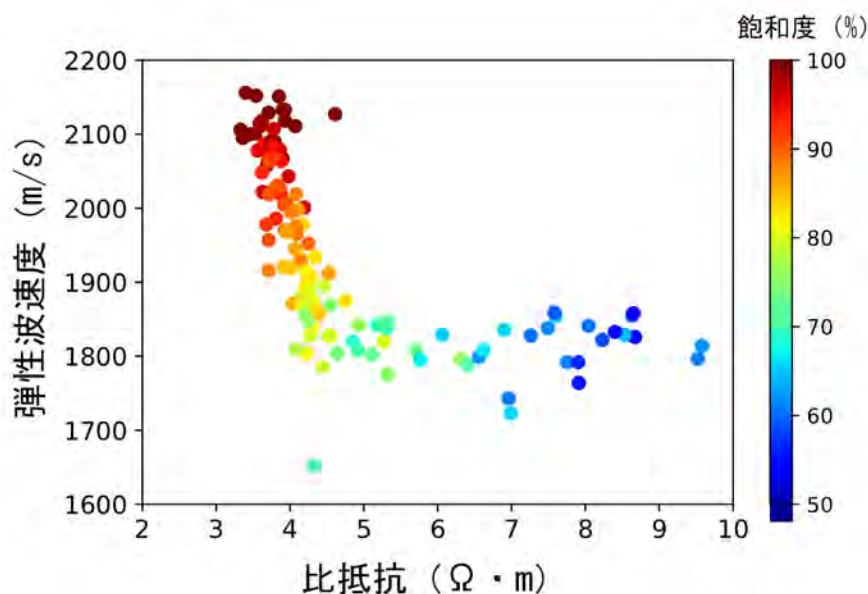


図 61 測定された弾性波速度と比抵抗の関係

取得された比抵抗および弾性波速度の関係を今後解析に取り込むことを目的として、比抵抗と飽和度および弾性波速度と飽和度の関係を岩石モデルを用いて近似しました。図 62 はアーチーの式⁽¹⁵⁾を用いて比抵抗を近似した結果で、図 63 はガスマン・ビオのモデル^(16, 17)を用いて弾性波速度を近似した結果になります。弾性波速度に関しては、岩盤の中で飽

和している部分と乾燥している部分が疎らに存在しているような仮定をしたモデル化により適切に近似することが出来ました。

これらの測定により取得された比抵抗と弾性波速度の関係は、2つの異なる物理探査手法を統合して解析するジョイントインバージョン^{*69}に使用することができます。ジョイントインバージョンにより、異なる物理探査手法を個別に解析するよりも解析精度の向上や推定結果の不確実性を低減することが期待できます。

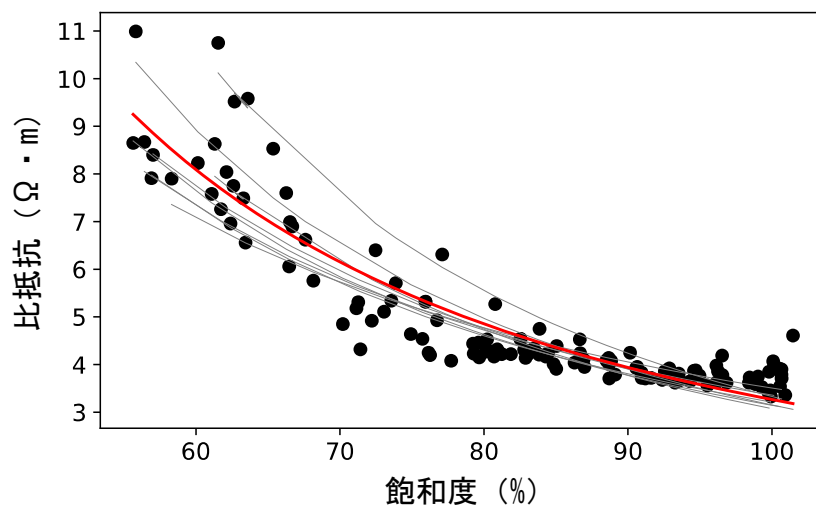


図 62 アーチの式による比抵抗の近似

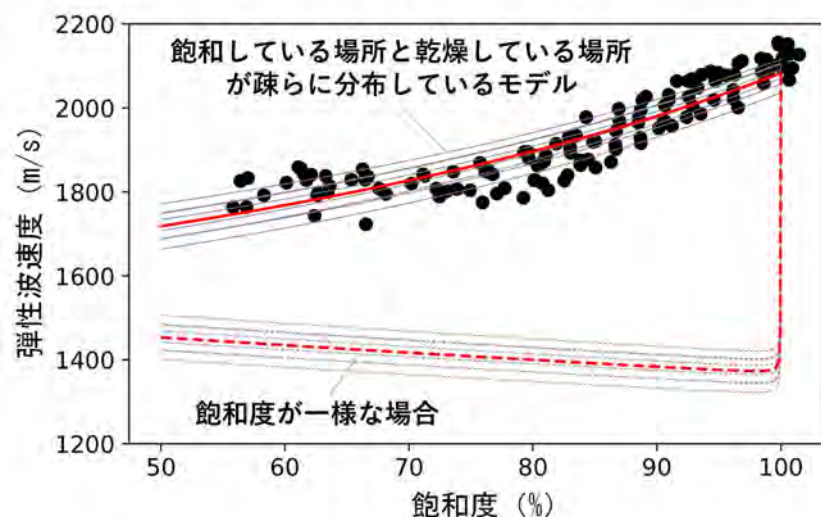


図 63 ガスマン・ビオの式による弾性波速度の近似

*69：異なる物理探査手法で取得された調査結果に関して、地下の構造や岩石の物性値に関連性を与え、解析を行うことです。

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

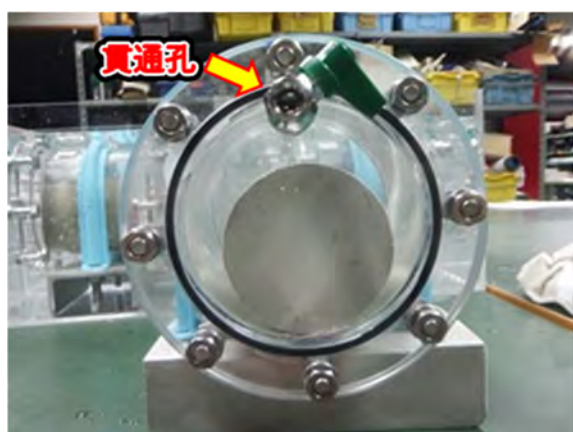
地下施設の建設のために地上から掘削される調査ボーリング孔は地上へと直結する卓越した水みちにならないよう適切な方法で閉塞することが求められています。また、地下施設の建設時には坑道内からボーリング孔が掘削される場合もあり、これらのボーリング孔が割れ目などと連結する短絡経路となることや地層処分システムの長期安全性に影響を及ぼさないようにボーリング孔を適切な方法で閉塞することが求められています。

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、日本のように豊富に地下水が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。

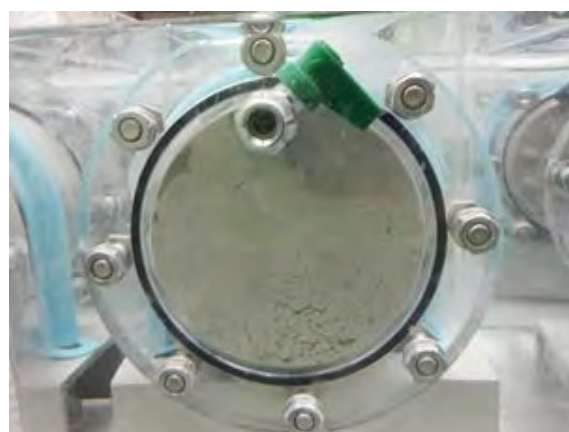
そこで、本検討では、坑道内から水平に近い向きに掘削されたボーリング孔を対象に、地下深部の地質環境条件を考慮した上で閉塞する材料の仕様を決定する考え方を整理するとともに、施工方法の適用性を検討します。令和 3 年度は、ボーリング孔にベントナイトブロックを設置する方法を対象に、ボーリング孔の閉塞に係るブロックの特性として膨潤状況や閉塞後の透水性を把握するための室内試験を実施しました。また、ボーリング孔内にベントナイトブロックを設置する具体的な手順を室内の模擬ボーリング孔で確認しました。

室内試験では、ベントナイトブロックの膨潤状況の確認と膨潤後密度を測定して閉塞後の透水性を把握するために必要なデータ取得を行いました。膨潤状況は目視で確認し、その状況を写真により記録しました。図 64 にベントナイトブロックの膨潤状況を示します。ベントナイトブロックは、クニゲル V1 を直径 75 mm、高さ 100 mm、乾燥密度が 1.6 Mg/m^3 となるように締固めて作製しました。内径 100 mm、長さ 100 mm 程度のアクリル製試験装置内にベントナイトブロックを設置し（図 64(a)）、その試験装置を幌延の地下水の水質を模擬した試験用水に浸水させました。浸

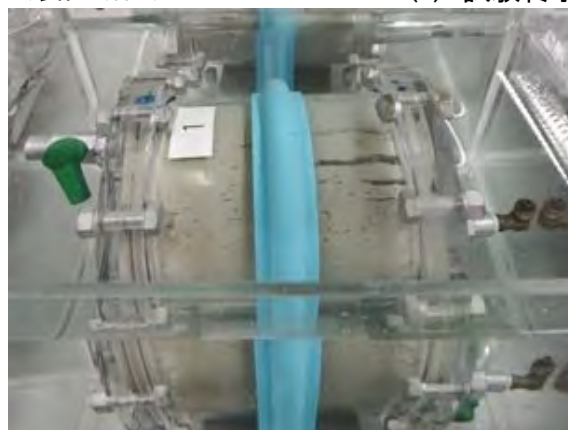
水させたベントナイトブロックは、試験開始直後から徐々に膨潤し、装置の断面方向から見ると、試験終了時には断面全体を塞ぐようにブロックが膨潤している様子（図 64(b)）が確認されました。一方で、上面方向から見ると、ブロックと試験装置の内壁との間に一部隙間が残っている様子（図 64(c)）が確認されました。隙間が残った理由としては、室内試験に用いた試験装置の両端にある注水用の貫通孔周辺までベントナイトブロックが膨潤すると、貫通孔が塞がれることにより装置内部への水の供給がなくなり、隙間付近のベントナイトの膨潤が進まなくなるためと考えられます。



(a) 試験開始時（装置断面）



(b) 試験終了時（装置断面）



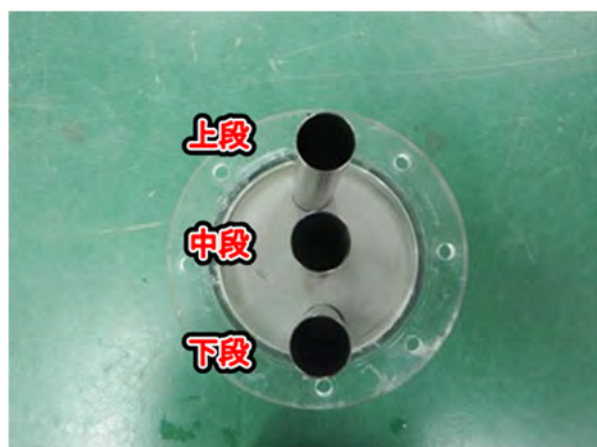
(c) 試験終了時（装置上面）

図 64 ベントナイトブロックの膨潤状況

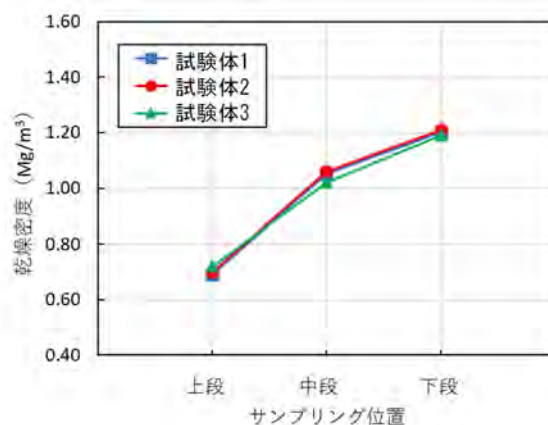
膨潤後の密度測定では、膨潤状況の確認と同様の試験装置を用いてベントナイトブロックを膨潤させたのちに、図 65(a)に示すように上段、中段、下段の 3 箇所からサンプリングを行い乾燥密度の測定を行いました。密度測定のために 3 つのベントナイトブロックを準備しました。乾

乾燥密度の測定結果を図 65(b)に示します。ブロックが均一に膨潤した場合の乾燥密度は約 0.9 Mg/m^3 となりますが、実際の測定では、いずれのブロックも上段で 0.7 Mg/m^3 程度、中段で 1.0 Mg/m^3 、下段で 1.2 Mg/m^3 であり、ブロック内で乾燥密度が不均一な状態であることが分かりました。

ベントナイトブロックを設置する手順については、令和 2 年度に抽出・整理した技術的な課題に基づいて、既往の調査⁽¹⁸⁾を基にコンテナを用いる方法を検討しました。図 66 にコンテナを用いたベントナイトブロックの設置方法の概念を示します。コンテナによるベントナイトブロックの設置手順は、まず、(a)ベントナイトブロックを収納しフタにより密閉したコンテナをボーリング孔内に挿入します。(b)設置箇所までコンテナが到達した後に、コンテナへ注水することにより、コンテナが移動してフタとともにベントナイトブロックがボーリング孔内へと排出されます。(c)コンテナをボーリング孔から抜きとったのち、ベントナイトブロックがボーリング孔内の地下水により膨潤し隙間を埋めることでボーリング孔が閉塞します。



(a) サンプル位置



(b) 乾燥密度測定結果

図 65 ベントナイトブロックの乾燥密度

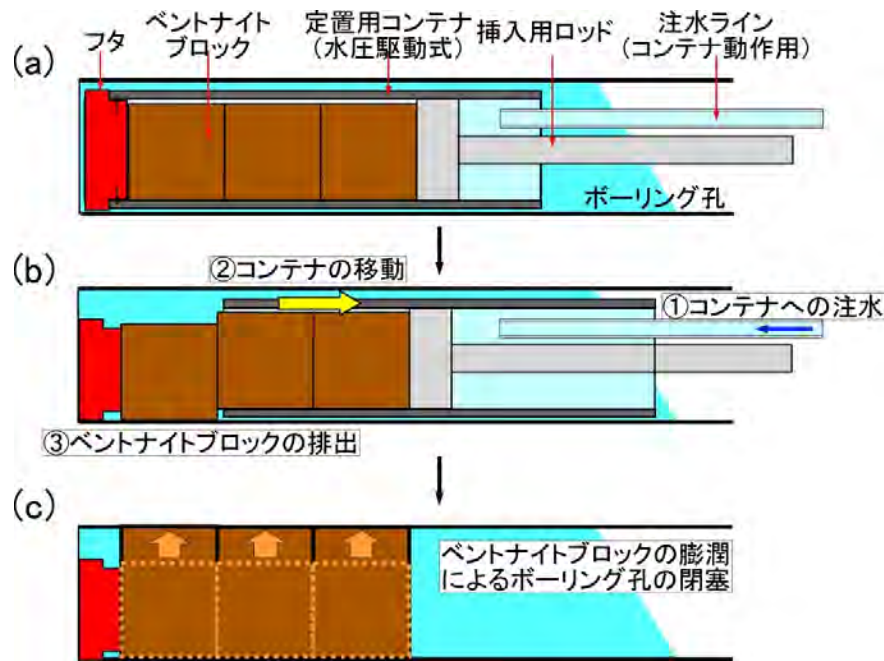


図 66 ボーリング孔内へのベントナイトブロックの設置方法

上記のコンテナによる設置手順を試験室内に構築した模擬ボーリング孔を用いて確認しました。模擬ボーリング孔の大きさは内径 100 mm、長さ 4 m とし、ベントナイトブロックの設置状況を確認するために透明塩化ビニル管を用いました。設置手順の確認のために準備したコンテナは、直径 75 mm、長さ 100 mm のベントナイトブロックを 10 個収納することができ、1 回の作業で 1 m 分のブロックを設置できます。この確認では、3 回の作業を行い 3 m 分のベントナイトブロックを模擬ボーリング孔内に設置しました。図 67 にベントナイトブロックの設置手順の確認状況を示します。ボーリング孔へ地下水が流入する状況を再現するために模擬ボーリング孔の孔底から試験用水を注水し、その状態でベントナイトブロックの設置作業を行いました。図 67(a) に示すように、コンテナに注水するとガラスフタが外れてベントナイトブロックが模擬ボーリング孔内に排出されました。コンテナからの排出中には、ベントナイトブロックが注水した試験用水と触れましたが、破損や膨潤が生じることなく排出することができました。また、2 回目以降の設置作業では、その前の作業で設置したベントナイトブロックの上にガラスフタとベントナイトブロックを排出することになりますが、図 67(b) に示すように隙間が生じることなく設置することができました。

今後は、令和 3 年度に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を対象として、地下施設に掘削したボーリング孔を閉塞する原位置試験を実施し、閉塞方法の適用性評価を行います。

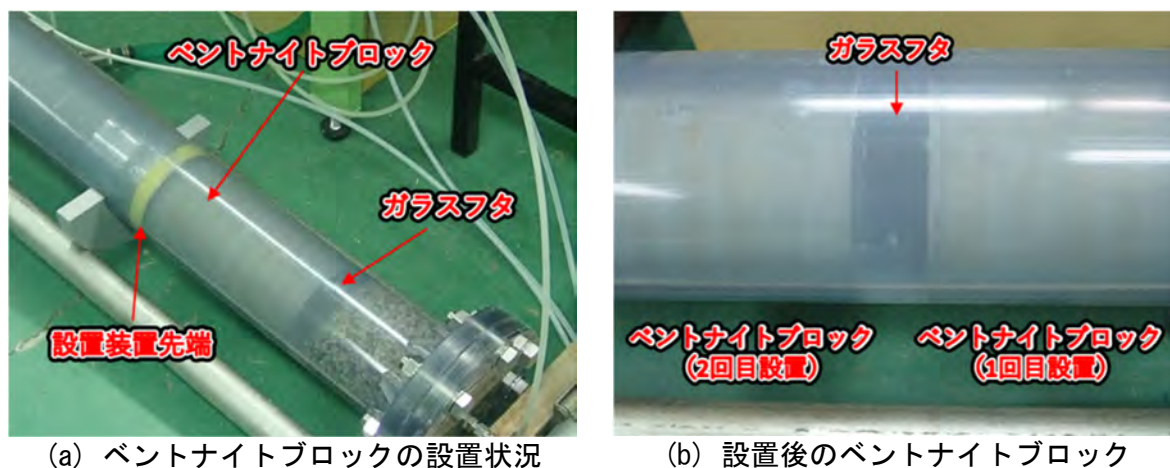


図 67 ベントナイトブロックの設置手順の確認状況

(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 3 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]：ニアフィールドシステム評価確証技術開発）の一環として、原子力環境整備促進・資金管理センター^{*70}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 1 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。我が国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。緩衝材の主な成分はベントナイトであり、地下水が浸み込むことにより膨潤し、岩盤やオーバーパックと緩衝材の間の隙間を埋めること（自己

^{*70}：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。

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湧水の流れによるせん断応力が作用し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外に排出される可能性が懸念されています。

これまでに、350m 調査坑道の試験坑道 5 (図 5 参照)における試験孔において流出試験(以下、原位置試験)を実施し、隙間に何も充填しない「隙間未充填ケース」に関する 4 か月間の試験では、自然湧水環境(湧水量: 0.4 L/min 程度)では初期に緩衝材の流出が見られたものの、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。また、隙間にケイ砂を充填する「ケイ砂充填ケース」に関しては、予備試験(1 か月間の流出試験)により、流出濃度が低く維持されることが分かりました。

令和 3 年度は、隙間未充填ケースに関して、湧水量の比較的多い条件(約 1.0 L/min)での原位置試験を想定していましたが、自然の地下水位の低下により試験孔で十分な湧水量を確保することが難しくなりました。そこで、湧水量の多い条件を含めて、幅広い条件を想定した室内試験データを取得し、湧水量(流量)による緩衝材の流出挙動への影響を確認しました。また、ケイ砂充填ケースに関して、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の把握のため、数か月に及ぶ長期的な緩衝材の流出試験を開始しました。

隙間未充填ケースの室内試験は、緩衝材の自己シール性が発揮されて流出現象(排水)が止まる条件と流出挙動に及ぼす流量の影響に関して、着目する期間中に水位差がおおむね一定である原位置の環境を考慮して、水位差を一定とした条件による流出試験を実施しました。流出試験装置の概要を図 68 に示します。緩衝材にはベントナイトとケイ砂を 70 : 30 の重量比で混合して乾燥密度 1.9 Mg/m^3 に圧縮成形したものをを用い、緩衝材周囲の隙間幅は原位置試験と同様に 20 mm としました。表 7 に示すように、試験パラメータとなる初期の通水流量は、1 mL/min、10 mL/min お

の集積がない領域(もしくはわずかな部分)が1箇所以上ありました([×]もしくは[△])。そのため、流路(水みち)にケイ砂の集積領域が連続して残存しなければ、閉塞して流出が止まる可能性があると考えられます。なお、ケイ砂の集積が連続していないにも係わらず閉塞しない水準(流量10 mL/min、水位0.5 m)もあるため、ケイ砂の集積と閉塞の関係についてはさらに詳細な挙動の確認が必要です。また、本試験では、隙間の向きを水平にしていますが、原位置試験の垂直方向の隙間ではケイ砂が試験孔の下部へと落下して水みちに集積(残存)しない可能性もあります。今後は、ケイ砂の集積に関する隙間の向きによる影響を確認しつつ、流量や水位の影響を把握していくことが必要と考えられます。

表 7 室内試験の結果(隙間未充填ケース)

	流量 (mL/min)	水位差 (m)			原位置試験に 換算した流量 (mL/min)
		0.5	1	2	
閉塞状況 ^{※1}	1	○	○	○	90
ケイ砂の集積 ^{※2}		[×][×][○]	[×][×][○]	[○][○][×]	
閉塞状況	10	△	△	○	880
ケイ砂の集積		[×][×][△]	[○][○][○]	[×][×][×]	
閉塞状況	20	△	○	×	1,760
ケイ砂の集積		[○][○][○]	[×][×][×]	[○][○][○]	

※1：○：閉塞、△：閉塞せず(排水量が減少して一定値になり流出量は検出下限値以下)、
×：閉塞せず(排水量が減少して一定値になり流出あり)

※2：[]内は、左から順に上流、中流および下流に分割して観察した結果、水みち内のケイ砂が、×：なし、△：わずか、○：多い

図 69 に、流量10 mL/min、水位1 mの水準における膨潤圧、排水の流量、流出濃度および積算流出量の経時変化を示します。排水の流量は徐々に低下して一定値になりました。膨潤圧の発現した時期は、緩衝材が膨らんで隙間が充填された時期に対応すると考えられ、また、この時期の前後で流出量が変わっています(以下、この時点を変曲点とします)。変曲点より前は隙間が充填される前で、緩衝材の表面全体から流出が起こり、比較的流出量が多い時期です。変曲点より後は、隙間が充填されて残存する水みちを介して緩衝材が流出する時期であり、比較的流出量が少ない時期であることが図 69 から確認できます。そのため、これまで変曲点の前後を区別せずに流出量の評価方法の検討をしてきましたが、変曲点の前

後に分けて流出量の評価方法を検討することで、より確からしく評価できる可能性があると考えられます。今後は、隙間未充填ケースについて、室内試験において隙間の方向（水平と垂直）の影響や水質の影響などの把握を行い、原位置試験の結果と比較して、閉塞条件に関する検討や変曲点の前後のそれぞれの流出挙動に着目した流出量予測方法に関する検討を進める予定です。

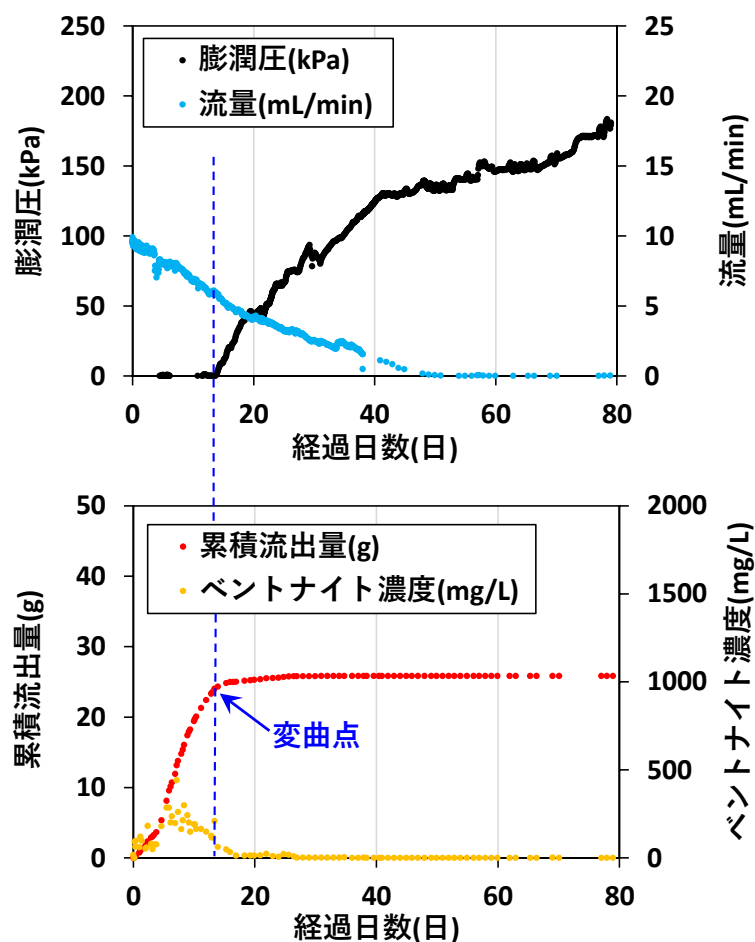


図 69 流量 10 mL/min、水位差 1 m の水準における室内試験の結果
(隙間未充填ケース)

ケイ砂充填ケースに対して数か月に及ぶ長期的な流出試験（原位置試験）を試験坑道 5 で開始し、排水中の緩衝材の量、緩衝材に地下水が浸潤して発生する膨潤圧、試験孔にかかる水圧などの計測に着手しました。試験設備（約 1/4 スケールの縮尺モデル）の概要を図 70 に、試験体の設置状況を図 71 に示します。令和 4 年度も計測を継続して流出量の経時的な挙動を確認し、孔内湧水量に対して、緩衝材流出量が要求される品質を確

保できる範囲となるかを評価する方法を検討していきます。これらの検討結果を基に、隙間未充填ケースとケイ砂充填ケースについて、緩衝材の流出特性に係る評価指標などの整理を進め、処分孔の環境（水頭差と湧水量）に応じた緩衝材の施工オプションとして整備する予定です。

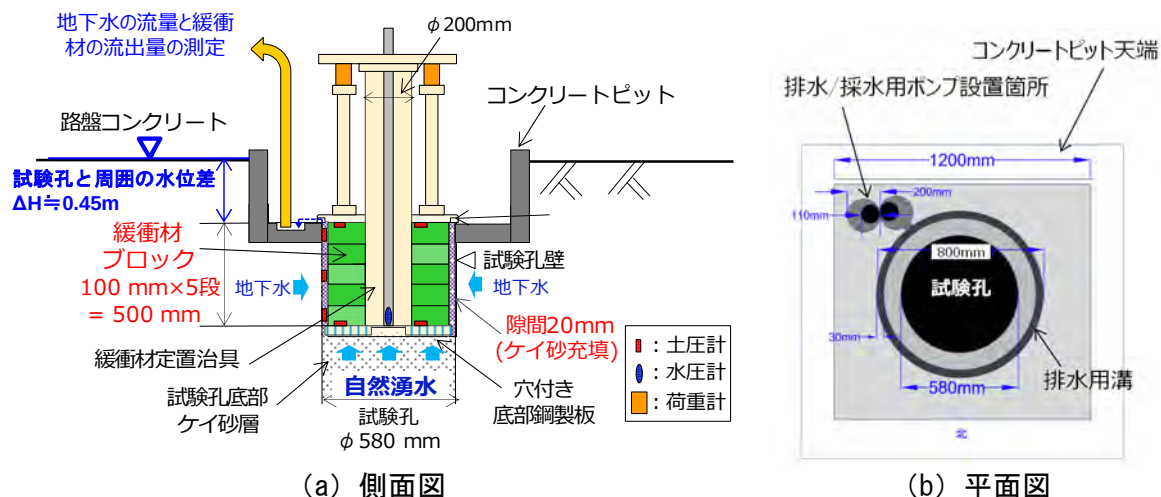


図 70 原位置での緩衝材流出試験設備の概要

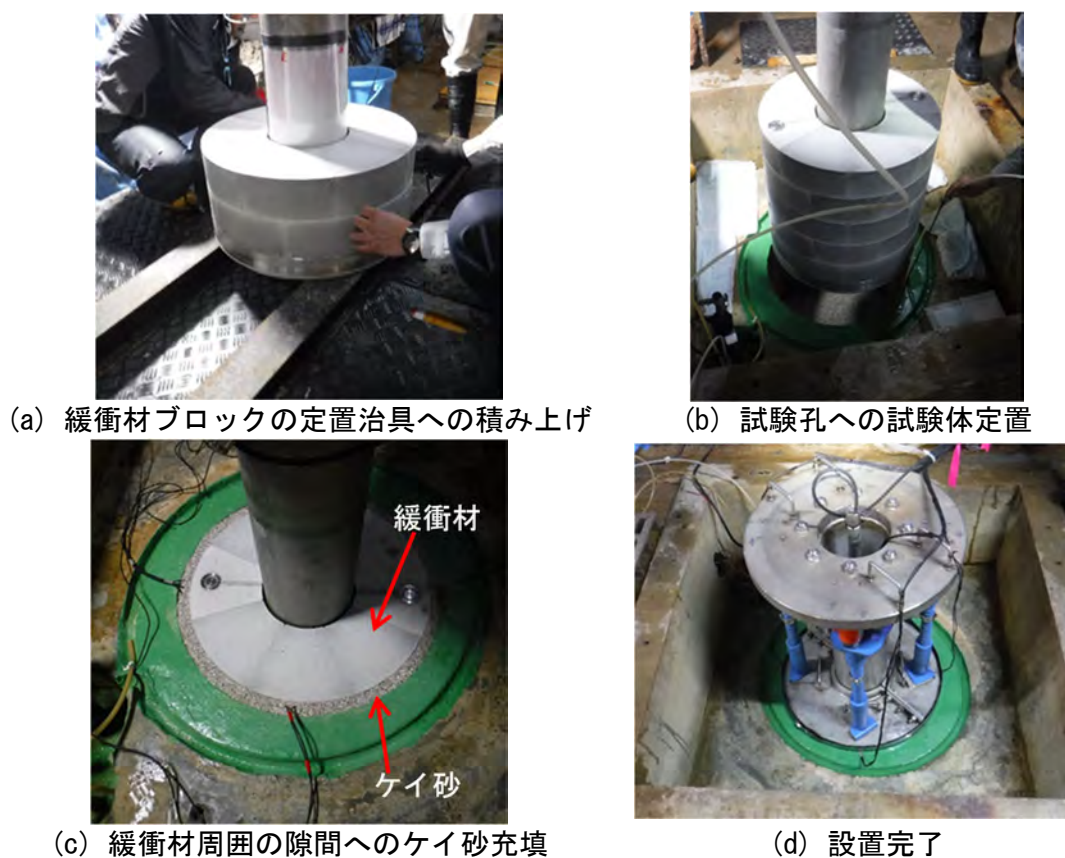


図 71 試験体設置状況

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

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℃以下の温度条件下において熱－水理－力学－化学（THMC）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℃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3年度は、緩衝材の最高温度が100℃を超えた状態で発生し得る現象に関する事例調査を進めました。我が国の処分概念や設計オプションを想定した形で整理するため、包括的技術報告書⁽¹⁹⁾において100℃以下の温度条件を想定して検討されている「緩衝材の機能低下や喪失につながる可能性がある事象（影響要因）」のうち、100℃を超えた場合に変化し得るものを抽出する形としました。その結果、100℃を超えた状態では以下の影響要因に変化が生じ、それにより緩衝材の膨潤性低下や透水性上昇による機能の低下、オーバーパックの腐食の促進などが生じ得ると考えられました。

- ・ イライト（雲母鉱物）化
- ・ 熱履歴
- ・ 塩濃縮
- ・ 微生物影響
- ・ ガスの発生
- ・ 鉄/ベントナイト相互作用
- ・ 高 pH および高 Ca 濃度地下水による影響

・ シリカセメンテーション^{*71}

表 8 には、各種要因について、100℃未満での想定事象と、100℃を超えた状態になった場合を想定した調査研究事例を整理しました。

上記の影響要因のうち、比較的多数の研究事例があるスメクタイトのイライト化については、温度、時間、間隙水のカリウムイオン (K^+) 濃度、圧力、スメクタイトの化学組成などが主要なパラメータであり、イライト化反応が進行するためには K^+ の継続的な供給が必要であると報告されています⁽²⁰⁾。間隙水中の K^+ 濃度が幌延の深度 350 m における地下水と同程度の場合を想定して、100℃以上の温度におけるスメクタイトのイライト化割合を計算すると、1,000 年後のイライト化の割合は、130℃までは約 5% 以下、140℃では約 10% にとどまることが示されました (図 72)。緩衝材の温度が 100℃を超えた状態が 1,000 年以上継続するとは考えにくいこと、反応に必要な K^+ は拡散によって比較的ゆっくりと供給されることが考えられること、ならびにイライト化反応の活性化エネルギーはより大きい値を取り得る (反応速度がより小さくなる) こと^{(20) (21)} から、実際に生じるイライト化の割合はさらに小さいと想定されます。一方、このような計算においては、緩衝材や母岩中に含まれるカリウムに富む鉱物 (カリ長石など) の溶解による K^+ の供給^{(22) (23)} などについては考慮されていない点に留意する必要があります。

*71：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。

表 8 100℃を超えた状態での緩衝材の変質に関する既往知見の整理 (1/4)

(包括的技術報告書⁽¹⁹⁾を踏まえて作成)

影響要因	内容	100℃未満での想定事象、対応策など	100℃を超えた状態に関する主な研究事例
イライト化	地下施設周辺の地温およびガラス固化体の発熱によって緩衝材がイライトに変質し、膨潤性の低下および透水性の上昇が生じて、緩衝材の性能が低下することが懸念される。	緩衝材の温度が 100℃を超えない状態であれば影響は小さいと考えられる。	ナチュラルアナログ^{*72}： ・ マグマの貫入により 100℃～140℃で数百年間加熱されたスメクタイトは、その 40%～65%がイライト化している⁽²¹⁾。膨潤圧は、イライト化を受けていないスメクタイトに比べて最大 20%程度まで低下したが、イライト化に伴って生じたシリカセメンテーションによるものと考えられる⁽²⁴⁾。 ・ さまざまなナチュラルアナログを対象とした研究から、イライト化反応の活性化エネルギーが推定されている⁽²⁵⁾など。 ・ カリウム (K⁺) 濃度が低くアモルファスシリカ^{*73}が存在する環境下では、200℃～300℃までイライトが生成しないと考えられる⁽²⁶⁾。 室内試験： ・ 室内試験では、イライト化が生じる場合と生じない場合の両方の結果が得られている^{(27) (28) (29)}など。125℃～130℃、1 年間の加熱でわずかなイライト化が認められるという報告もあるが⁽²⁸⁾、おおむね 300℃前後かつ K⁺が存在する条件下でイライト化が生じる⁽²⁹⁾など。 ・ K⁺を含まない条件であれば 300℃でもイライト化は生じないが、その場合でもシリカセメンテーションは観測される⁽³⁰⁾。 原位置試験： ・ 100℃以上で数年間加熱した緩衝材において、明瞭なイライト化の痕跡は観測されていない⁽³¹⁾など。 解析： ・ 室内試験と同様に、温度と K⁺濃度が影響の大きいパラメータである^{(22) (23)}。また、ナトリウム濃度が高い場合には、K⁺濃度が高くてもイライト化が抑制されると考えられる⁽²²⁾。 ・ 一方、ペントナイトや岩石中に含まれるカリウムを含む鉱物（カリ長石など）の溶解を想定すると、イライト化の割合がより高いという解析結果が得られている^{(22) (23)}。

*72：地層処分後の放射性核種の挙動や、人工バリアの腐食・変質など、地層処分システムにおいて考えられる現象と類似した、自然界で過去に起こった長期的変化に関する現象のことです。火山ガラス、遺跡などから発掘された銅鐸などは人工バリアの候補材料であるガラスや金属に類似しているため、これらの地下での長期的な変化を調べることで、人工バリアで生じる現象を確認したり、評価方法の妥当性をチェックすることができます。

*73：非晶質シリカとも呼ばれ、シリカゲルや珪藻土に含まれる珪藻の殻などの結晶構造を持たない二酸化ケイ素 (SiO₂) を含む物質を指します。

表 8 100℃を超えた状態での緩衝材の変質に関する既往知見の整理 (2/4)

影響要因	内容	100℃未満での想定事象、対応策など	100℃を超えた状態に関する主な研究事例
熱履歴	高温環境下で緩衝材の熱履歴が生じ、緩衝材の密度が低下することが懸念される。	90℃以下であれば室温条件とほぼ同等の膨潤圧であると報告されている。	室内試験： ・飽和状態のベントナイトを加熱した試験⁽³²⁾⁽³³⁾⁽³⁴⁾、ベントナイト粉末を加熱・成型後に膨潤圧を測定した試験⁽³⁵⁾、高温蒸気とベントナイトを接触させた試験⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾などに大別される。3点目の高温蒸気との反応に関しては、「ガスの発生」で後述する。 ・飽和状態のベントナイトを加熱した試験では、最大 150℃・30 日間の加熱で透水係数が約 1 桁増加するという報告⁽³²⁾がある。一方、150℃までの加熱⁽³³⁾や 110℃・30 日間の加熱⁽³⁴⁾でベントナイトの膨潤圧および透水性に顕著な変化は認められないとの報告もある。 ・高温下で透水性が増加する主な理由として水の粘度の変化が考えられ、その他に鉱物の表面電荷や表面積、吸着している陽イオンの組成などの変化も影響する可能性がある⁽³⁹⁾。 ・ベントナイト粉末を最高 130℃、最長 120 日で加熱しても、膨潤圧特性に対する影響は小さい。ただし、最大膨潤率は低下する傾向にあり、鉛直圧やベントナイトのイオン型の影響が大きいと考えられる⁽³⁵⁾。 原位置試験： ・最高温度 155℃で 6 年間加熱した緩衝材において、膨潤圧が 10%程度減少、透水係数が 30%程度増加した⁽⁴⁰⁾。 ・最高温度 140℃で 1 年～5 年間加熱した緩衝材において、膨潤圧および透水性に顕著な変化は生じなかった⁽⁴¹⁾など。 ・最高温度 130℃で 1 年間加熱した緩衝材において、加熱部に近いほど膨潤圧は減少する傾向にあり、また一部の緩衝材 (Deponit Can、Asha 505) の膨潤圧が最大で 1/3 程度に減少した⁽⁴²⁾など。 解析： ・原子レベルでのシミュレーションでは、300℃超までの温度上昇で膨潤圧が増加するという結果が得られており、水分子の熱運動が増加するためと考えられている⁽⁴³⁾。
塩濃縮	再冠水期に廃棄体の発熱による温度勾配によって塩濃縮が発生し、緩衝材中の鉱物組成が局所的に変化することが懸念される。	緩衝材が地下水で飽和された後には、蓄積された塩は溶解し、拡散によって散逸すると考えられるため、長期安全性の評価において、その影響は無視することが可能とされている。	原位置試験： ・海外の原位置試験では、ヒーター加熱部近傍での炭酸塩・硫酸塩鉱物の溶解および周辺の低温領域での（無水）セッコウの沈殿⁽³¹⁾、ケイ酸塩鉱物の溶解⁽⁴³⁾などが報告されている。これらは基本的に緩衝材中の鉱物が高温により溶解したものであり、地下水中の成分の濃縮によるものではないと考えられる。 ・仮に濃縮が生じたとしても、基本的には 100℃未満の場合と同様に、緩衝材が地下水で飽和された後の影響は小さいと考えられる。 ・一方、ヒーター近傍で地下水中の塩濃度が高くなると、オーバーパックの腐食を促進する可能性がある⁽⁴⁴⁾。

表 8 100℃を超えた状態での緩衝材の変質に関する既往知見の整理 (3/4)

影響要因	内容	100℃未満での想定事象、対応策など	100℃を超えた状態に関する主な研究事例
微生物影響	緩衝材中に存在する微生物の活動により、オーバーパックスの腐食が促進されることが懸念される。	オーバーパックスの腐食に影響を与える緩衝材中の微生物活動を抑制するように、材料や緩衝材の密度が設定される。	・高温状態により緩衝材の密度が低下すると、緩衝材中で微生物活動が活発となり、オーバーパックスの腐食を促進する可能性がある。一方、微生物活動に必要な硫酸塩や硫化物の緩衝材への供給は限定的であるとも考えられる ⁽⁴⁴⁾ 。
ガスの発生	オーバーパックスの腐食、水の放射線分解ガスにより生成されるガスが人工バリア内で発生して蓄積し、破過することで水みちを形成することが懸念される。	ガス発生による亀裂が緩衝材に発生したとしても閉塞できるように、材料や緩衝材の密度が設定される。	・100℃未満で想定されているガス発生の事象に加えて、100℃を超える状態が埋め戻しおよび再冠水の前に生じた場合には、水が沸騰し高温蒸気が発生し得る。 室内試験： ・乾燥状態や、液体の水が常に存在する状態でベントナイトを100℃以上に加熱した場合に比べて、高温蒸気と反応させた場合に膨潤能力はより大きく低下する ⁽³⁶⁾ ⁽⁴⁵⁾ 。 ・高温蒸気との反応によりベントナイトの比容量は減少し、その程度は温度(110℃～210℃)が高いほど、また反応時間(1日～21日)が長いほど大きい ⁽³⁶⁾ 。 ・90～100℃の高温蒸気と30日間接触したベントナイトでは、未処理のベントナイトと比べて透水係数が10倍以上増加、膨潤圧が数分の1に減少した ⁽³⁷⁾ 。圧縮したベントナイトペレットにおいても、高温蒸気と30日間接触させたところ、120℃までは顕著な変化はなかったが、150℃で膨潤圧が減少した ⁽³⁸⁾ 。
鉄/ベントナイト相互作用	オーバーパックスの腐食に伴い放出される鉄との反応により、緩衝材中のスメクタイトの溶解と二次鉱物の沈殿、スメクタイトの層間陽イオンのイオン交換が発生する。これにより膨潤性や透水性が変化することが懸念される。	化学的な変質は間隙閉塞により影響範囲が限定されるため、緩衝材の大半が初期の鉱物組成で維持され、変化は小さいと予想される。	ナチュラルアナログ： ・高温環境で鉄と反応したスメクタイトは、鉄スメクタイトやパーチェリンなどの中間生成物を経て、緑泥石へと変質する傾向にあると考えられる ⁽⁴⁶⁾ 。 ・熱水との反応により緑泥石への変質が生じる最低温度は200℃と想定される。ただし、堆積物の続成作用では40℃～60℃でパーチェリンから緑泥石への変質が生じ得る ⁽⁴⁷⁾ 。 室内試験： ・およそ150℃以上の温度でパーチェリンや緑泥石などへの変質が生じる報告例が多い。ただし、300℃でも変質が生じない例や、100℃以下で変質する例、サボナイトが生成する例もある ⁽⁴⁸⁾ ⁽⁴⁹⁾ ⁽⁵⁰⁾ など。 ・鉄共存下でのベントナイトの変質に影響を与える主要因として、温度、溶液条件、鉄/粘土比、スメクタイトの組成が挙げられている ⁽⁵¹⁾ 。 原位置試験： ・130℃～150℃で最長6年間加熱した緩衝材において、ヒーターとの接触部(ヒーターから最大1cm程度)で鉄濃度の増加が確認されている。ただし、ベントナイトの変質ではなく、鉄水和酸化物やシデライトなどの鉱物沈殿によるものと考えられている ⁽⁴³⁾ ⁽⁵²⁾ ⁽⁵³⁾ など。 ・最高温度130℃で1年間加熱し、ヒーターとの接触部でNa型からFe型に変化したベントナイトについて、膨潤圧や透水係数の大きな変化は認められない ⁽⁵⁴⁾ 。

表 8 100℃を超えた状態での緩衝材の変質に関する既往知見の整理 (4/4)

影響要因	内容	100℃未満での想定事象、対応策など	100℃を超えた状態に関する主な研究事例
高 pH および高 Ca 濃度地下水による影響	地下水に Ca イオンが含まれている場合や処分坑道内のコンクリート製残置物などからセメントの溶脱に伴って生成する高 pH、高 Ca 濃度の地下水との反応により、緩衝材表面のベントナイトが他鉱物に変質または Ca 化され、膨潤性が低下することが懸念される。	解析から、緩衝材とセメント系材料の反応が生じて、10 万年間の間、緩衝材中のモンモリロナイトが安定に存在することが示されている。ベントナイトの Ca 型化についても、変化が生じることを想定して緩衝材の密度や厚さが設計される。	室内試験： ・スメクタイトを普通ポルトランドセメントや $\text{Ca}(\text{OH})_2$ などのセメント成分と接触させ、120℃で 1 週間～1 年間加熱すると、トバモライトを中心とした C-S-H や Mg サポナイトなどが生成する ⁽⁵⁵⁾ 。 ・セメント系材料から生じる高アルカリ性溶液 (NaOH、KOH) とスメクタイトを 150℃で 2 か月間反応させた場合、NaOH 溶液ではスメクタイト組成などに変化は生じない。一方、KOH (および $\text{KCl} \cdot \text{K}_2\text{CO}_3$) 溶液との反応では、スメクタイトの溶解、スメクタイトのイオン型変化 (Na/Ca 型から K 型へ)、二次鉱物 (石英、長石、ゼオライト、C-S-H) の沈殿が生じる ⁽⁵⁶⁾ 。
シリカセメンテーション	高温環境下において、緩衝材中のスメクタイトあるいは随伴鉱物の溶解に伴い、アモルファスシリカなどの二次鉱物が沈殿し、セメンテーションが発生することで、膨潤性や透水性が変化することが懸念される。	緩衝材の温度が 100℃を超えない状態であれば影響は小さいと考えられる。	ナチュラルアナログ： ・100℃～140℃で数百年間加熱されたスメクタイトの膨潤圧は、熱履歴を経ていないスメクタイトの 20%程度にまで低下した。このようなスメクタイトの表面にはシリカ粒子が生成しており、超音波処理により膨潤圧が回復したことから、シリカセメンテーションの形成が膨潤圧を低下させたと考えられる ⁽²⁴⁾ 。 ・スメクタイトから溶解したシリカによるセメンテーションは 70℃以上から生じ得るものの、数百万年オーダーのタイムスケールの反応と考えられる ⁽²⁶⁾ 。 室内試験： ・110℃・30 日間および 130℃・1 年間の加熱でベントナイトの膨潤圧や透水性に顕著な変化は認められなかったが、シリカセメンテーションが確認されている ^{(34) (57)} 。 120℃・約 2 年間の加熱でベントナイトの膨潤圧が 75%に減少しており、シリカセメンテーションに起因する可能性が指摘されている ⁽⁵⁸⁾ 。 ・「ガスの発生」において述べた、90℃以上の高温蒸気と接触したベントナイトにおいても、シリカセメンテーションが確認されている ^{(37) (38)} 。 ・先行研究を総括すると、シリカセメンテーションによる緩衝材性能の低下は 110℃までは顕著ではなく、130℃でわずかに生じ、150℃で顕著となる ⁽²⁰⁾ 。 原位置試験： ・ヒーターとの接触部においてベントナイト中のケイ酸塩鉱物が加熱により溶解し、ベントナイトとヒーターの接触面を移動して再沈殿する可能性が指摘されている。この現象によるベントナイトの性能への影響は言及されていない ⁽⁴³⁾ 。

※表 8 中の、バーチェリン、サポナイトは粘土鉱物の一種、シデライトは菱鉄鉱とも呼ばれる炭酸塩鉱物、トバモライトはケイ酸カルシウム水和物の一種です。

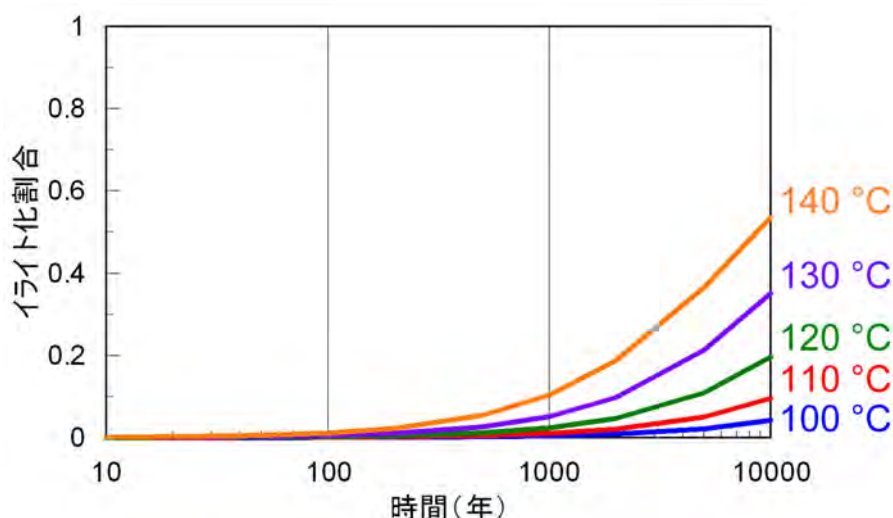


図 72 高温度におけるスメクタイトのイライト化の経時変化

参考文献(25)を参考とし、イライト化反応の活性化エネルギーは報告されている範囲(25 kcal/mol~28 kcal/mol⁽²⁰⁾)の最小値である 25 kcal/mol、間隙水中の K⁺濃度は幌延の深度 350 m の地下水と同程度の 75 mg/L として計算しています。

表 8 で整理したように、高温条件下での緩衝材特性の変化に関しては、緩衝材の鉱物学的な変質、熱履歴、高温蒸気との反応など複数の要因が考えられます。緩衝材の加熱温度と、加熱に伴う膨潤圧および透水係数の変化との関係を提示した研究事例はありますが⁽²⁰⁾、このような要因の違いは考慮されていませんでした。そこで、加熱による緩衝材の膨潤圧および透水係数の変化について、シリカセメンテーションの有無および水分状態の違い(飽和/高温蒸気)に着目して先行研究の結果を整理しました。なお、ベントナイトの種類の違いによる影響を除外するため、ここでは同一のベントナイト(MX-80)を用いた試験結果のみを対象としています。図 73 に示すように、シリカセメンテーションが生じている試料の一部では、加熱前と比べて膨潤圧が半分以下に減少、および透水係数が 1 桁以上増加していますが、シリカセメンテーションが生じていない試料と同程度の値を示す試料も認められます。一方、図 74 に示すように、高温蒸気と反応した試料については、膨潤圧が加熱前の試料よりも低くなっており、また透水係数もすべての試料で 1 桁以上増加しています。膨潤圧に関しては加熱温度が高いほどより低くなる傾向が認められるものの、透水係数については加熱温度との関係は認められませんでした。また、加熱時間(70℃~170℃)と特性変化との関係は認められませんでした(図 75)。以上のことから、現状での調査結果に基づけば、高温条件下での緩

衝材特性の変化については、高温蒸気との反応の影響が大きいことが示唆されます。

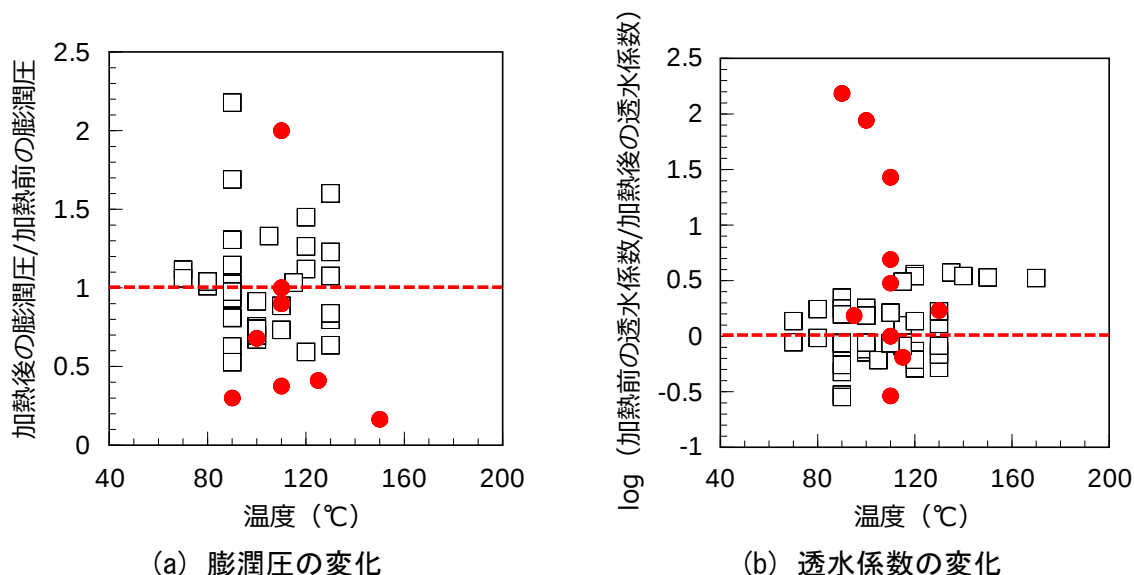


図 73 MX-80 ベントナイトにおける加熱前後の膨潤圧および透水係数の変化（シリカセメンテーションの有無による影響）

赤丸と白四角はそれぞれ、セメンテーションの生じている試料と生じていない試料を意味します。(a)と(b)の縦軸はそれぞれ、加熱前後で膨潤圧の値が何倍になったか、透水係数の桁数が何桁変化したかを意味しており、赤点線上に位置する点は、加熱前後で値が変わっていないことを意味します。参考文献：(27) (31) (33) (34) (37) (38) (40) (57) (59) (60)

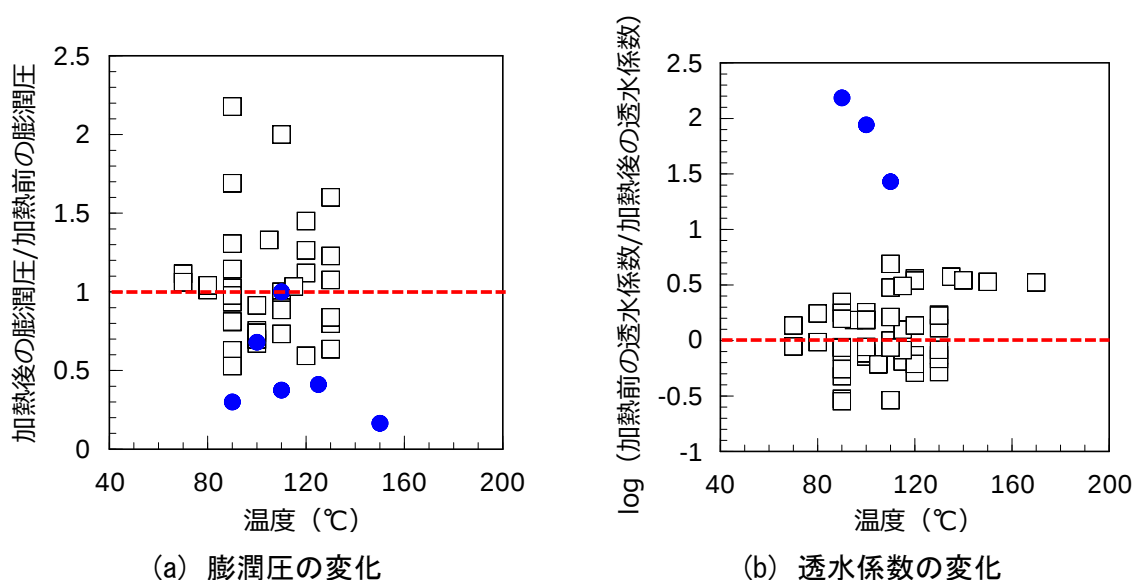


図 74 MX-80 ベントナイトにおける加熱前後の膨潤圧および透水係数の変化（水分状態の違いによる影響）

青丸と白四角はそれぞれ、高温蒸気と反応した試料と飽和状態で加熱した試料を意味します。縦軸や赤点線の意味、参照とした文献は図 73 と同様です。

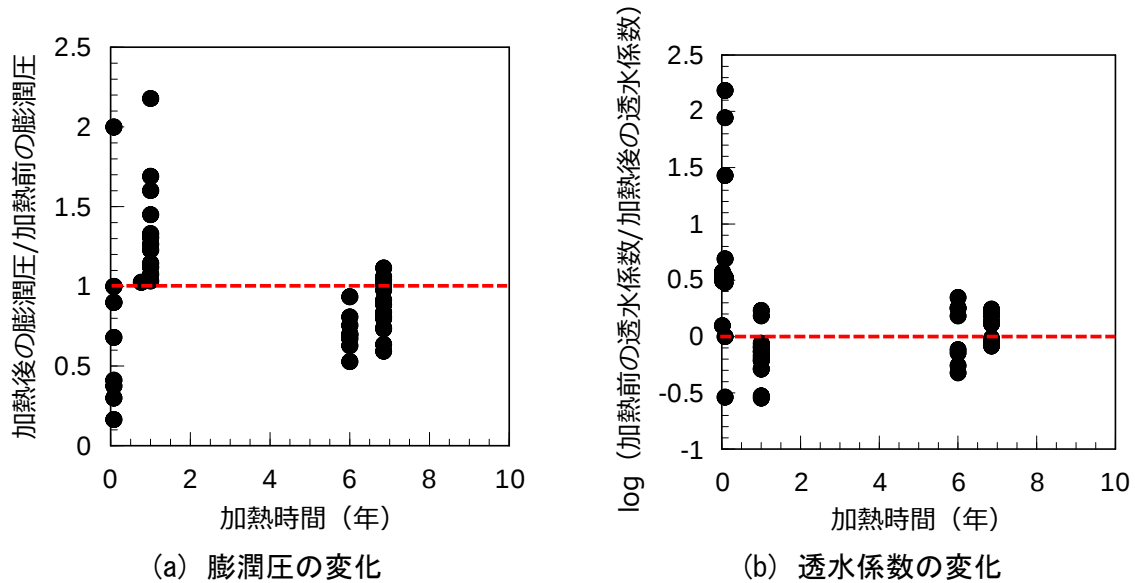


図 75 MX-80 ベントナイトにおける加熱前後の膨潤圧および透水係数の変化と加熱時間との関係

縦軸や赤点線の意味、参照とした文献は図 73 と同様です。

廃棄体埋設後に緩衝材の最高温度が 100°C を超える状態となった際に、人工バリア周辺が静水圧相当となるまでに時間を要する場合には、飽和水蒸気圧が間隙水圧を上回ることにより水が沸騰し、高温蒸気が発生すると考えられます。その場合、上述のように、高温蒸気との反応による緩衝材特性の変化が生じたり、初期飽和度によっては緩衝材にひび割れが生じたりする（図 76）と想定されます。このような現象と、それに伴う緩衝材特性の変化の理解は、 100°C を超える条件における過渡期の状態変遷を考慮する上で重要であると考えられ、今後、室内試験や原位置試験で重点的に知見を取得していく必要があると考えられます。

さらに、スイスのグリムゼル試験場では、地下施設を使用して、緩衝材の温度を最高 200°C 程度まで上昇させることを想定した人工バリア試験が実施されています（HotBENT プロジェクト）。令和 3 年度は、試験坑道内へのヒーター・緩衝材・センサーなどの設置が完了し、9 月よりヒーターの段階的な加熱が開始されました（図 77）。令和 4 年度には、ヒーターの温度が 100°C を超えた状態での、ベントナイトの内部および岩盤との接触部における温度、間隙水圧などのデータが取得される予定です。

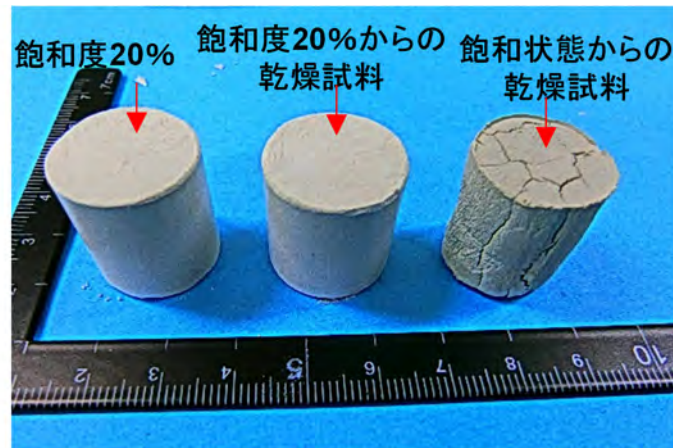
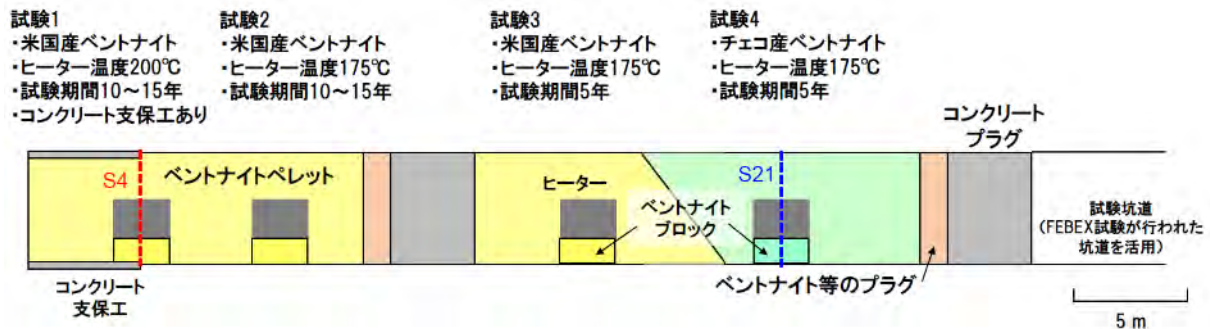
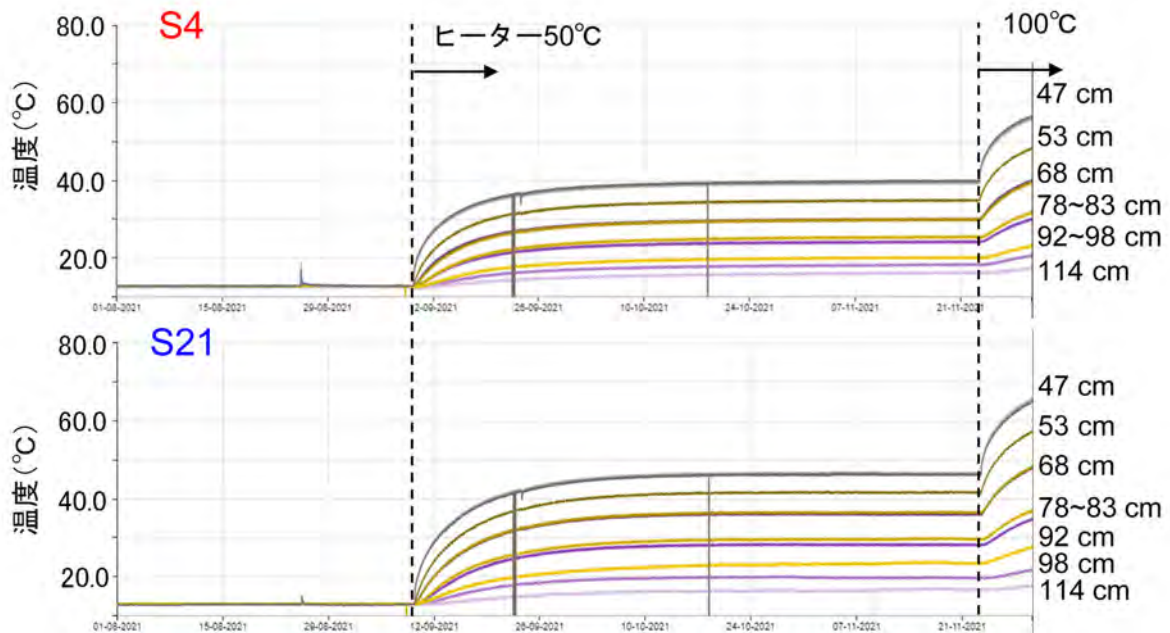


図 76 110℃で乾燥させたベントナイト

令和3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 [JPJ007597]: ニアフィールドシステム評価確証技術開発⁽⁶¹⁾にて作製された試料。飽和状態から乾燥により亀裂が生じているのが確認できます。



(a) 試験の概念図



(b) 温度の観測結果

グラフ右側の数字は、各温度センサー設置場所のヒーターからの距離を意味します。

図 77 高温の人工バリア性能確認試験 (海外での研究事例)

令和4年度は、令和3年度までに実施した先行研究の事例調査を基に、100℃を超えた状態で生じ得る現象などのシナリオを整理していきます（図78）。また、重点的な調査が必要と考えられる現象に関する室内あるいは原位置試験の計画を策定し、準備を進めます。海外での原位置試験の情報も引き続き入手し、試験計画に反映するとともに、これらの情報と原位置試験で得られるデータを用いてより精度の高いシナリオの構築を目指します。

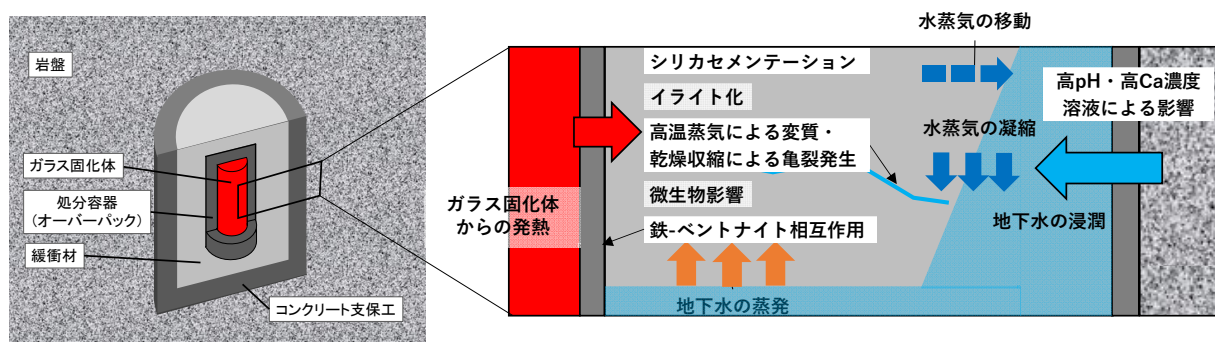


図 78 緩衝材の温度が 100℃を超えた場合に人工バリア周辺に生じると想定される現象の概念図
令和3年度の調査結果に基づき更新しています。

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 3 年度は、DI を用いた透水性評価手法の信頼性向上に向け、既存の室内試験結果や水圧擾乱試験結果を用いて DI モデル⁽⁶²⁾を再検証しました。これまで、DI と地下水の主要な水みちとなる割れ目の透水性は相関することが国内外の 6 つの地層のデータから経験的に分かっていましたが⁽⁶²⁾（図 79 の○）、その相関関係をより正確に表す経験式を構築するために、Kuang and Jiao の近似法⁽⁶³⁾を適用して図 79 に示すような新たな経験式（図 79 の近似曲線）を構築しました。また、この近似曲線の物理的な意味を理解するためにシミュレーションを行った結果、図 79 の近似曲線が表す DI と割れ目の透水性の関係は、凹凸のある割れ目内の隙間の開閉現象（図 80）で説明できることが分かりました（図 79 の近似曲線のカーブの形が図 80 に基づくシミュレーション（図 79 の水色線）により、よく再現できています）⁽⁶⁴⁾。さらに、割れ目の透水性が図 79 の近似曲線の値であるために必要な条件をシミュレーション（計 88 パターン）した結果、0.05 mm～2.00 mm 程度のわずかな割れ目のずれにより割れ目のかみ合わせが悪くなることによって、割れ目内の隙間が増える（図 81 上図）必要があることが分かりました（図 82）⁽⁶⁴⁾。一般に、数百 μm ～数 mm 程度までのずれは割れ目内に多くの隙間をもたらしますが、それ以上割れ目がずれてもかみ合わせの悪さは変わらず、割れ目内の隙間があま

り増えなくなります（図 81 下図）。これらのことから、図 79 の近似曲線が示す透水性の値（誤差範囲を含む）は、ある DI 条件において、割れ目のかみ合わせが悪くなることにより増加し得る透水性の上限値を表していると理解することができました⁽⁶⁴⁾。

DI、割れ目のかみ合わせおよび割れ目の透水性の関係は以下の数式で表すことができます⁽⁶⁴⁾。

$$e = E^2 / JRC_0^{2.5} \quad (e \text{ と } E \text{ の単位は } \mu\text{m}、e > E \text{ となる場合は } e = E \text{ とします})$$

$$E = E_0(1 + bDI/0.2899)^{-1}$$

ここで、 e は割れ目の水理的開口幅（割れ目の透水性）、 E は割れ目の力学的開口幅（割れ目内の物理的な隙間の大きさ）、 JRC_0 は 10 cm スケールでの割れ目表面の粗さを表す数値（通常は 0～20 の範囲の値をとり、値が大きいほど面が粗いことを示します）、 E_0 は初期開口幅（割れ目面にかかる力がサンプルの自重相当に小さい場合の割れ目の力学的開口幅）、 b は割れ目の方向性に依存する係数（通常は 0.5～1.5 の範囲の値）を表しています。DI 以外のパラメータで e を支配するのは JRC_0 、 b 、 E_0 となりますが、 b はそれほど e に影響を与えないことが既往の検討により分かっています⁽⁶⁴⁾。一方、 E_0 は e に大きな影響を与えるパラメータで、割れ目表面がずれて割れ目のかみ合わせが悪くなることにより増加するパラメータです。この時の E_0 の増加量は、 JRC_0 が大きい（割れ目面が粗い）ほど、大きくなります。この E_0 の大きさは「割れ目のかみ合わせ」の程度と密接に関連することから、この E_0 の大きさを「割れ目のかみ合わせ」の程度を表す指標としてここでは扱っています。

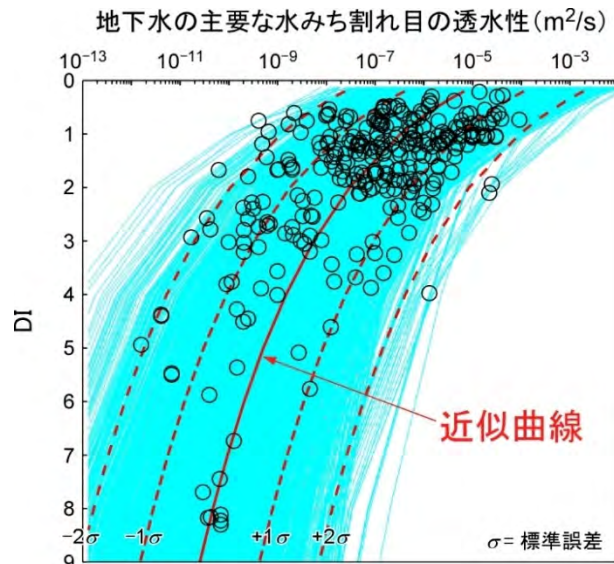


図 79 国内外の 6 つの地層における地下水の主要な水みち割れ目の透水性と DI の関係⁽⁶⁴⁾

6 つの地層は、幌延、スイス、スウェーデン、フィンランド、イギリスの地層です。赤色曲線/破線はデータ（図中の○）から Kuang and Jiao の近似法⁽⁶³⁾を適用することにより得られる近似曲線を示し、水色の曲線は図 80 に示すモデルに基づくシミュレーション結果を示します。

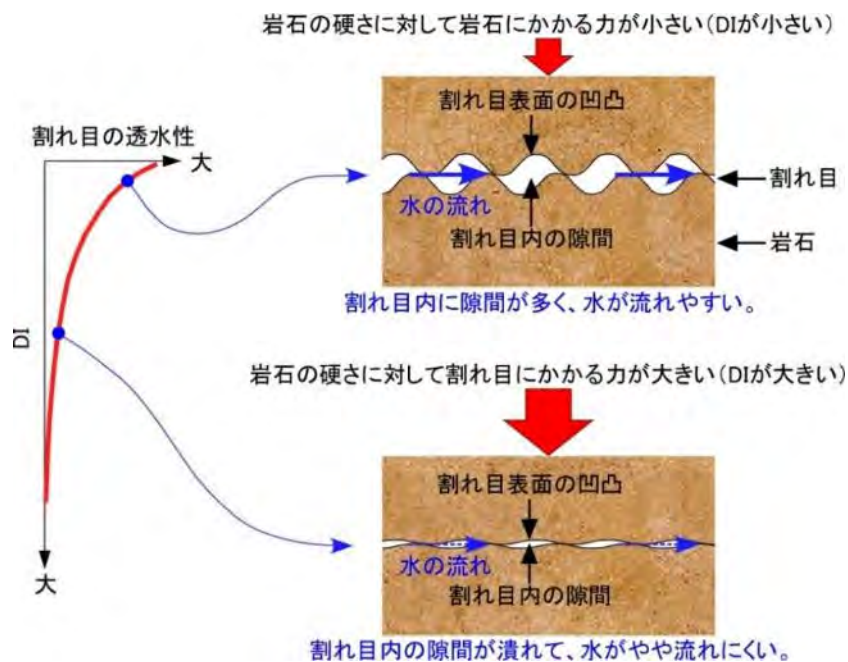


図 80 DI、割れ目内の隙間の開閉、および割れ目の透水性の関係（割れ目のずれが一定の場合）

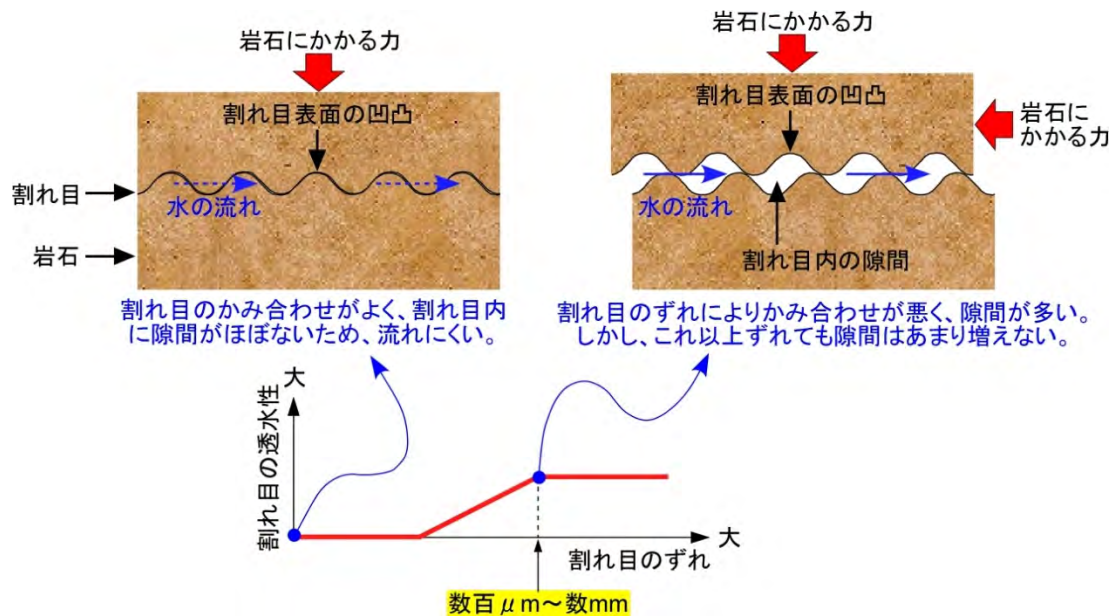


図 81 割れ目のずれ、かみ合わせ、および透水性の関係 (DI が一定の場合)

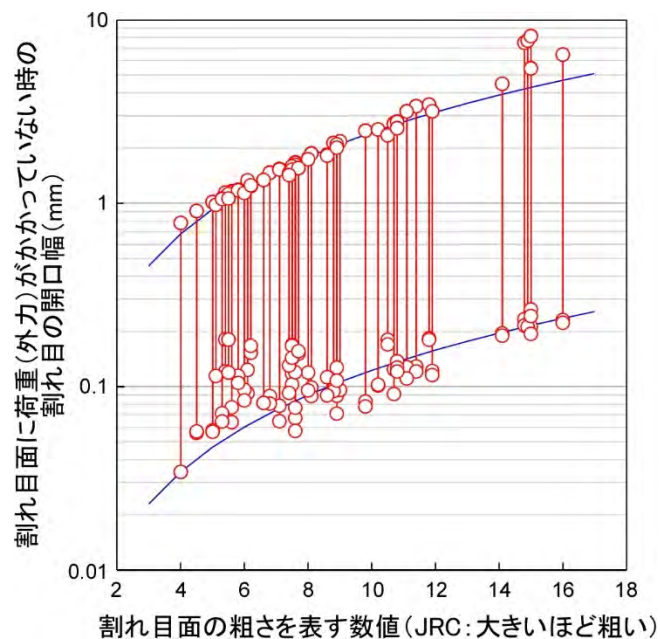


図 82 割れ目のずれに伴う開口幅の変化に関するシミュレーション⁽⁶⁴⁾

割れ目の透水性が図 79 に示す地下水の主要な水みち割れ目の透水性に達するためには、本図に示す縦軸の値が図中の 2 本の青曲線で挟まれた範囲に達する必要があります⁽⁶⁴⁾。Bandis の実験データ⁽⁶⁵⁾を用いて、様々な割れ目面の粗さを持つ割れ目がずれた場合の縦軸の値の変化をシミュレーションした結果、0.05 mm~2.00 mm ずれると青曲線で挟まれた範囲に縦軸の値が達することが分かりました(図中の上の赤丸が 2.00 mm ずれた場合、下の赤丸が 0.05 mm ずれた場合を示します)。

上記の結果に基づくと、DI に対する透水性が既に図 79 の近似曲線の値の誤差範囲に達している割れ目は、割れ目がずれてもそれ以上、透水性

が上昇しにくく（図 81）、DI が変化する場合のみ、それに応じた透水性の変化（図 80）が生じることが予想されます。このことを確認するために、国内外の地下研究施設において実施された水圧擾乱試験の結果との比較検証を行いました。その結果、幌延の地下施設では、透水性が既に近似曲線の誤差範囲に達している割れ目がずれても DI の減少量に応じた分の透水性の上昇しか発生しないことが確認できました（図 83(a)）。またスイスでは、透水性が既に近似曲線の誤差の範囲に達している割れ目がずれても透水性の変化が 1 オーダー以内に留まるのに対し（図 83(b)）、透水性が近似曲線の誤差の範囲に達していない割れ目がずれた場合は透水性が数オーダー増加し、近似曲線の範囲に透水性が達することが確認できました（図 83(c)）。これらの結果は、図 79 の近似曲線が隆起侵食により DI が低下した場合や、地震などにより断層が再活動した場合の割れ目の透水性の変化量の上限を見積もるのに有用であることを示しています⁽⁶⁴⁾。今後は、今回得られた結果を基に、令和 2 年度に実施した水圧擾乱試験の結果⁽⁸⁾との比較検証も行う予定です。

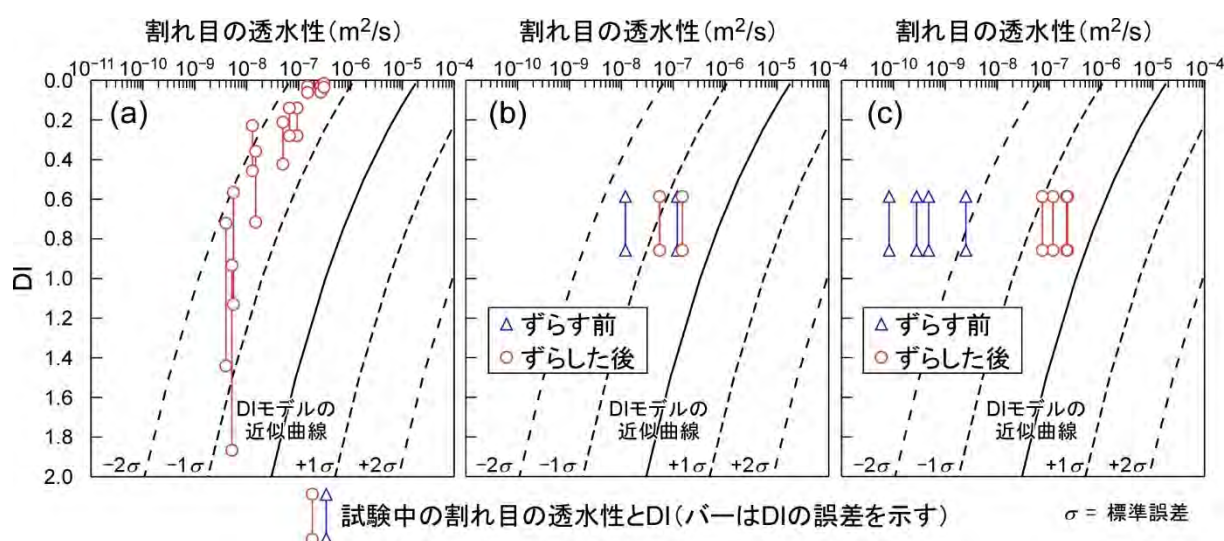


図 83 国内外の地下研究施設で実施された水圧擾乱試験の結果⁽⁶⁴⁾

(a) 幌延の例。割れ目をずらす前から DI モデルの近似曲線（経験式）の誤差（ $\pm 2\sigma$ ）の範囲に割れ目の透水性が達しており、試験中、DI の低下とともに割れ目の透水性が近似曲線に沿って増加（試験中の割れ目のずれ幅は最大数 cm に到達）しています。(b) スイスの例。割れ目をずらす前から DI モデルの近似曲線の誤差（ $\pm 2\sigma$ ）の範囲に割れ目の透水性が達しており、割れ目をずらした後の透水性の変化は 1 オーダー以内（試験中の割れ目のずれ幅は最大 1 mm）です。(c) スイスの例。割れ目をずらす前は DI モデルの近似曲線の誤差（ $\pm 2\sigma$ ）の範囲に割れ目の透水性が達していませんが、割れ目をずらした後、透水性が数オーダー上昇し、近似曲線の範囲に割れ目の透水性が到達しています（試験中の割れ目のずれ幅は最大 1 mm）。

地層の透水性は、図 79 や図 83 に示すような割れ目内の局所的な透水性（割れ目内の隙間の大きさ）のみならず、割れ目の水理学的連結性（割れ目内の隙間のつながり具合）にも大きく支配されます。令和 3 年度は、図 83 (a) に示す水圧擾乱試験で観測された割れ目の水理学的連結性に関する以下の現象についても検討を行いました。水圧擾乱試験では、高圧注水によって割れ目の水理学的連結性が上昇した後、水圧低下後も数日間、水理学的連結性が高い状態が保持され、その後に元の水理学的連結性が低い状態に戻りました（図 84）。この現象を再現するために、割れ目の透水性や幾何形状について複数のケースを想定したシミュレーションを行いました。その結果、(1) 観測された割れ目の水理学的連結性の可逆的な変化（元に戻る現象）は、水圧変化に応じた割れ目内の開口部の面積割合の変化により再現できること（図 85 (a)、(c)、(d)、(f)）、(2) 水圧低下後も数日間、割れ目の高い水理学的連結性が保持される現象は、ボーリング孔の試験区間（注水点）の水圧が低下した後も試験区間から 2 m 以上離れた割れ目内では高い水圧が保持されることにより再現できることが分かりました（図 85 (b)、(e)）⁽⁶⁶⁾。後者(2)の他の理由として、割れ目表面の微小な凹凸の側面に働く摩擦力が水圧低下後も一時的に割れ目内の隙間を保持した可能性も考えられますが⁽⁶⁶⁾、いずれの場合においても、割れ目の水理学的連結性は、水圧の変化、すなわち DI の変化に応じて可逆的に変化する可能性が高いことが分かりました（図 86）。今後は DI と割れ目の水理学的連結性の関係についてさらに検討を進めていく予定です。

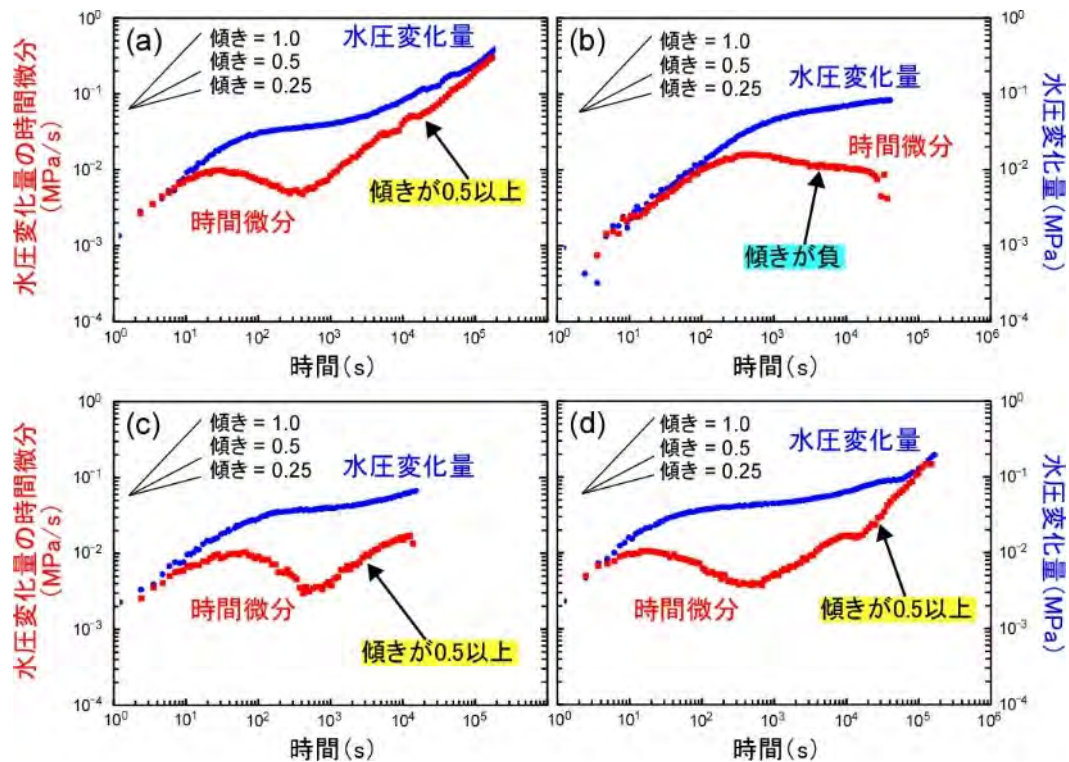


図 84 高圧注水の前後に実施した割れ目の水理学的連結性の変化を調べるための低圧注水試験結果⁽⁶⁶⁾

高圧注水の(a)直前、(b)8日後、(c)44日後、(d)72日後に実施。試験の後半の時間帯における水圧変化量の時間微分の傾きが0.5以上の場合は割れ目の水理学的連結性が低く、傾きが0か負の場合は割れ目の水理学的連結性が高いことが水圧の拡散に係る方程式より推定できます⁽⁶⁷⁾。高圧注水の8日後に実施した低圧注水試験(b)では高い水理学的連結性が推定されますが(時間微分の傾きが負)、44日後以降に実施した同試験(c)、(d)では、高圧注水の直前に実施した試験(a)と同様に低い水理学的連結性が推定されます(時間微分の傾きが0.5以上)。

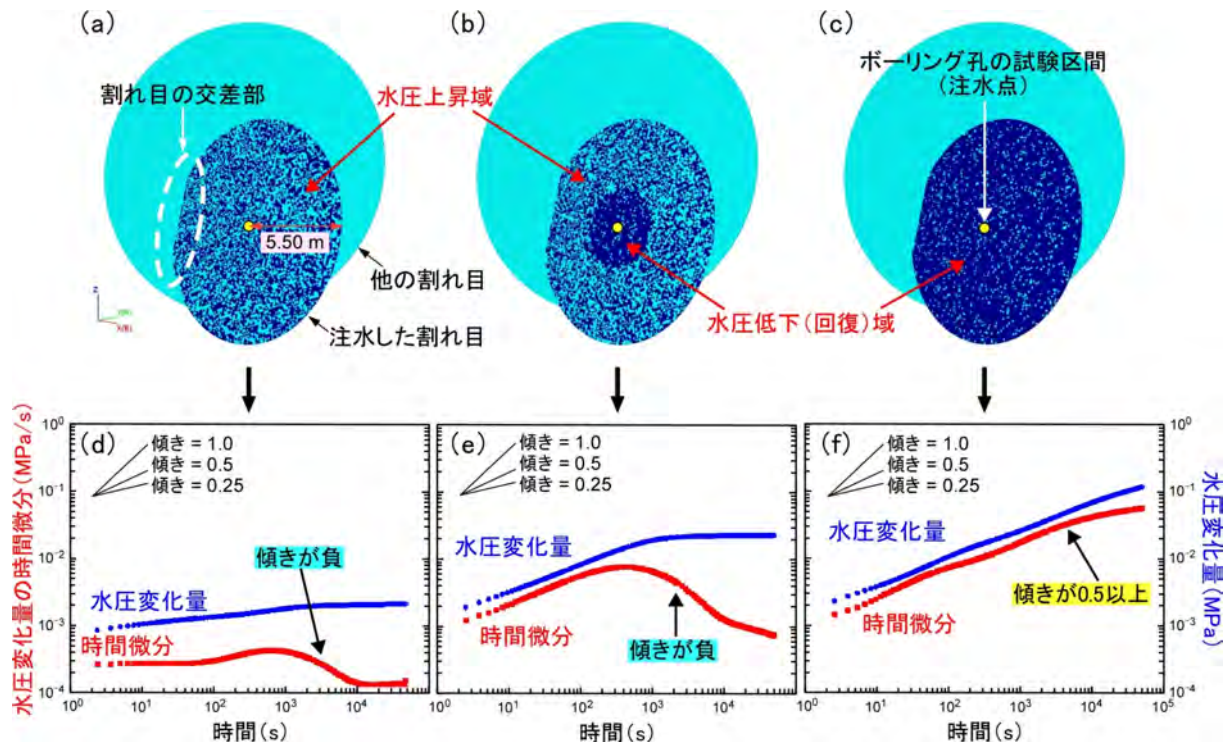


図 85 観測された割れ目の水理学的連結性の変化を再現するための割れ目モデル(a)～(c)と解析結果(d)～(f) ⁽⁶⁶⁾

(a) 高圧注水中の割れ目内の開口状態を想定したモデルです。高圧注水により注水した割れ目内の水圧が上昇しているため、注水した割れ目内の開口部（水色の斑点部分）の割合が比較的多く、割れ目内の閉口部（青色の斑点部分）と同じくらい存在すると仮定しています。注水した割れ目は他の割れ目（高透水性の割れ目）と交差して連結しています。(b) 高圧注水を終了してから数日後の注水した割れ目内の開口状態を想定したモデルです。注水点から 2 m の範囲内は水圧が既に低下（回復）しているため、閉口部の割合が多くなっていると仮定しています（青色の斑点部分の割合が多い）。この外側の領域はまだ水圧が高い状態が保持されており、開口部と閉口部の割合が同じくらいの状態が保たれていると仮定しています。(c) 高圧注水を終了してから数十日後の注水した割れ目内の開口状態を想定したモデルです。割れ目内の水圧は十分に低下（回復）しているため、高圧注水前の開口状態に戻っていると仮定しています（大部分が閉口しており、青色の斑点部分の割合が多い）。(d)～(f) は上記の各モデルで注水点から低圧注水を行った場合の注水点の水圧変化量とその時間微分を示します。(d) と (e) では後半の時間帯で水圧変化量の時間微分が 0 もしくは負の傾きを示し、(f) では傾きが 0.5 以上の時間微分を示します。

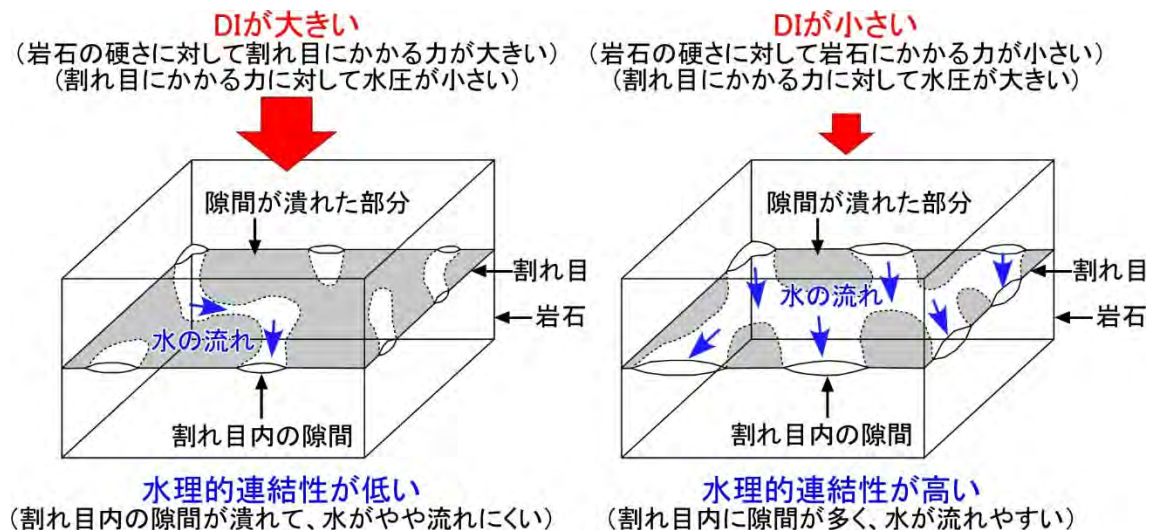


図 86 DI と割れ目の水理学的連結性（隙間のつながり具合）の関係

割れ目がずれる際には、割れ目が容易にずれるかどうかという観点も、断層の活動性評価の観点からは重要です。図 83(c)に示すスイスの水圧擾乱試験では、透水性が上昇する際に、割れ目内に破壊が生じたことを示唆する水圧低下が観測される一方で、図 83(b)の透水性が有意に上昇しない試験ではそのような割れ目内の破壊を示唆するような水圧低下は観測されませんでした⁽⁶⁸⁾。原位置の割れ目の充填状況も考慮すると、前者のケースでは石英などの鉱物によってシーリングされていた割れ目がずれることにより割れ目内のシーリングが破壊されたことが考えられる一方で、後者のケースでは、シーリングされていない、あるいは過去の割れ目の再活動によって既に割れ目内のシーリングが破壊された状態の割れ目が試験中にずれたことが考えられます⁽⁶⁴⁾。図 83(a)に示す幌延の水圧擾乱試験では、割れ目がずれる際に破壊を示唆するような水圧低下が観測される一方で⁽⁶⁹⁾、令和 2 年度に幌延で実施した水圧擾乱試験ではそのような水圧低下は観測されませんでした⁽⁸⁾。割れ目がずれる際に生じる割れ目内の破壊現象の有無は、断層のずれにくさと密接に関連していると考えられます（ずれにくい場合は破壊が起きやすい）。今後はこのような観点も踏まえて、水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の検討を進めていきます。

6.1.2 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化

令和 2 年度以降は、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が課題であり、このような領域を調査してモデル化する技術の実証を行います。処分事業のサイト選定において、地層処分における閉鎖後長期の地質環境に求められる要件は、水理場の観点では、「地下水流動に伴う放射性物質の移行時間を増大させ、その間の放射性崩壊により移行率を低減させるため、動水勾配が小さいまたは岩盤の透水性が低いことにより「地下水流動が緩慢である」こと」とされており⁽¹⁹⁾、この研究課題で整備される技術は、これを評価する際に役立ちます。本研究課題においては、化石海水が存在するような地下水の動きが非常に遅い環境を調査してモデル化する技術を実証するため、具体的には、以下を実施します。

- ① 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
- ② 化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証
- ③ 広域スケール（十数 km×十数 km）を対象とした水理・物質移動評価手法の検証（地下水滞留時間評価）のための水理解析および塩濃度分布評価のための水理・物質移動解析

ここでいう化石海水とは、堆積時の海水が埋没続成過程で変化し、その後、長期にわたり地表からの天水の浸透の影響を受けていない地下水のことを指します。化石海水の存在は、地下水流動が非常に遅く、最も遅い物質輸送現象である拡散が支配的であることを示す証拠となります。

①では、地上からの主要な調査である物理探査とボーリング調査を対象に、化石海水領域を把握するための調査技術としての適用性やより効率的に把握するための調査仕様や手順などを検証します。②では、幌延地域において取得されたデータを用いて化石海水の三次元分布を推定し、化石海水を指標として地下水の流れが非常に遅い領域を推定するための一連の手法を整理します。③では、古水理地質学的変遷^{*74}が、化石海水の三次元分布に及ぼす影響について解析を通じた検討を行うとともに、化石海水領域の三次元分布の評価結果を踏まえた広域スケールの解析手法

*74：地質環境中における過去から現在までの地下水の流動や化学的状態などの移り変わりのことです。

について検討します。

令和 3 年度も令和 2 年度に引き続いて、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（令和 3 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]：岩盤中地下水流動評価技術高度化開発）の一環として、上記の課題に取り組みました。

① 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

令和 2 年度の電磁探査により推定した化石海水の三次元分布の妥当性を確認するために、ボーリング調査を実施しました。化石海水の存在を確認するための指標は、それが海水に由来していることから、地下水の塩濃度と酸素・水素同位体比^{*75}です。このうち、幌延地域の地質環境では、地下水の塩濃度が地下の比抵抗（電気の流れやすさ）と相関することが分かっており⁽⁷⁰⁾、塩濃度が高い場合は比抵抗値が低く（電気が流れやすく）、塩濃度が低い場合は比抵抗値が高く（電気が流れにくく）なります。このことから、広範囲にわたり地下深部の化石海水分布を把握する際には、地下の比抵抗分布を推定できる電磁探査を適用することが効果的であると考えられ、令和 2 年度に幌延深地層研究センターを含む約 3 km 四方を調査範囲とした電磁探査を実施し、三次元比抵抗分布を取得しました。その結果を図 87 に示します。

調査範囲の南西側は、深度約 100 m より深い領域において比抵抗が低く、北東側では深度約 400 m より深い領域から比抵抗が低い傾向が認められました。このことから調査範囲の南西側で比較的浅い深度に化石海水領域が分布すると推定されます。この広がりを経高-275 m（幌延深地層研究センターの地表：標高 60 m を基準とした場合、深度 335 m）の比抵抗の水平断面から推定すると、比抵抗の等値線は湾曲しているものの、センター付近を通る北西-南東方向のラインを境界とする範囲まで広がっていると推定されます（図 87）。そこで、令和 3 年度においては、この推定結果の妥当性の確認として、電磁探査によって化石海水領域の広がり、すなわち、その境界を捉えることができていたのか確認するために、浅部

*75：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。幌延地域では、地表水で -10‰前後、深部地下水で 0‰前後の値を示すことが分かっています。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。水素同位体比は $\delta^2\text{H}$ または δD と表記されます。単位の‰（パーミル）は千分率で、1‰は 0.1%に相当します。

から比抵抗が低くなっている領域の縁辺部においてボーリング調査を実施しました。

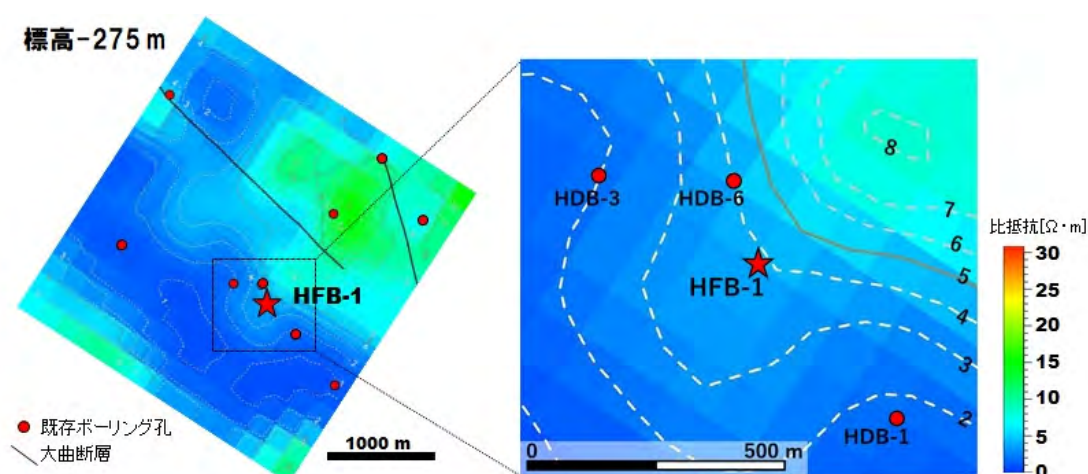


図 87 幌延深地層研究センター周辺における標高-275 mにおける比抵抗分布

この三次元比抵抗分布は令和 2 年度に実施した電磁探査の解析結果に基づきます。右図は左図の点線に囲まれた範囲の拡大です。なお、標高-275 m は、幌延深地層研究センターでは深度 335 m に相当します。

具体的には、幌延深地層研究センターから南側に数十 m 離れた地点を選定し、このボーリング調査により掘削されるボーリング孔を「HFB-1 孔」と名付けました（図 88）。この地点では声間層と稚内層の地層境界は深度約 310 m に出現すると予想されます。令和 3 年度は声間層を対象として深度 200 m まで岩石コアを採取するボーリング掘削を行いました。具体的には、採取した岩石コアを対象に割れ目観察を行うとともに、化石海水の存在を確認するために岩石コアの間隙に含まれる地下水の水質・同位体データを分析するための試料を採取し、化学分析を行いました。

図 89 に HFB-1 孔において取得された塩化物イオン濃度、酸素・水素同位体比の深度方向の分布を示します。また、図 90 に塩化物イオン濃度および酸素・水素同位体比の相関図を示します。これらの図には、HFB-1 孔の近傍で掘削された地上からのボーリング孔として、HDB-3 孔および HDB-6 孔の調査結果⁽⁷¹⁾ もあわせて示します。ただし、HDB-3 孔および HDB-6 孔の分析結果は、コア試料から圧縮抽出により得られた間隙水のものであり、本報告書で示す分析結果とは分析手法が異なることに留意する必要があります。

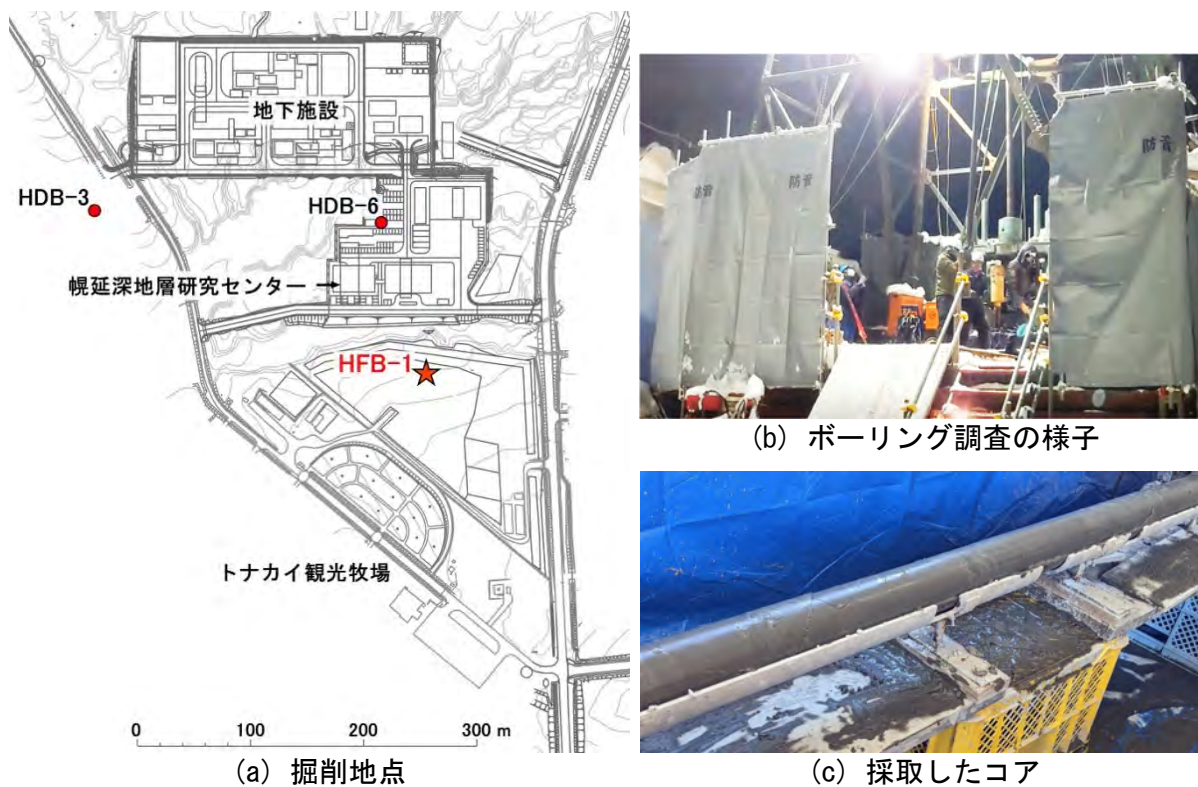


図 88 ボーリング調査 (HFB-1 孔)

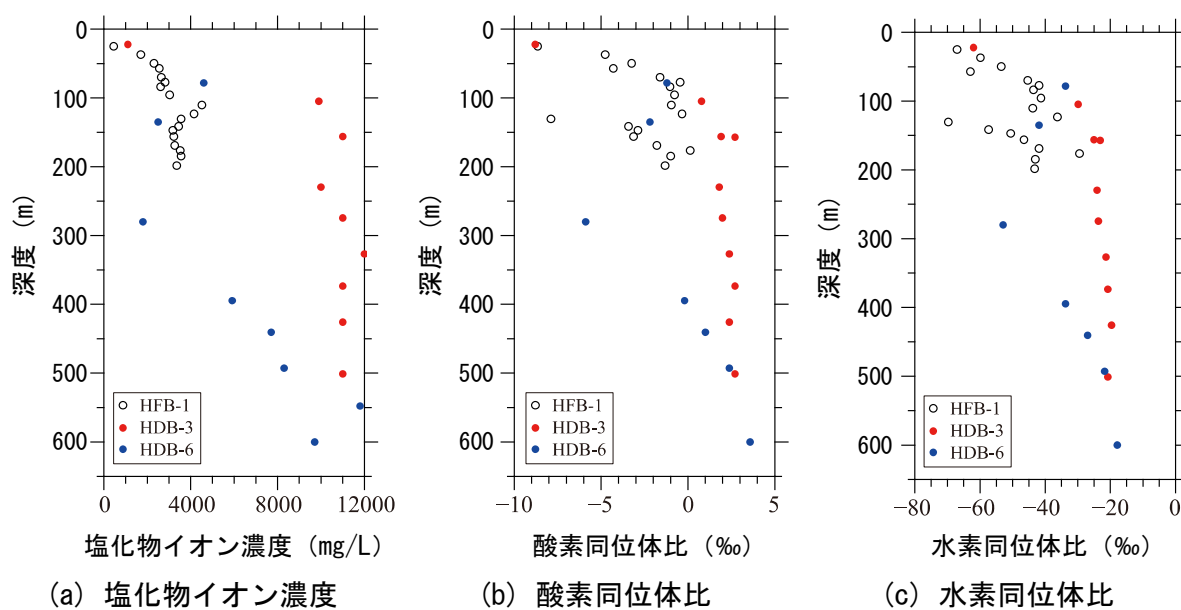


図 89 ボーリング調査から得られた塩化物イオン濃度、酸素・水素同位体比の深度分布

HFB-1 孔、HDB-3 孔、HDB-6 孔の結果を示します。令和 3 年度は、HFB-1 孔を深度 200 m まで掘削しました。

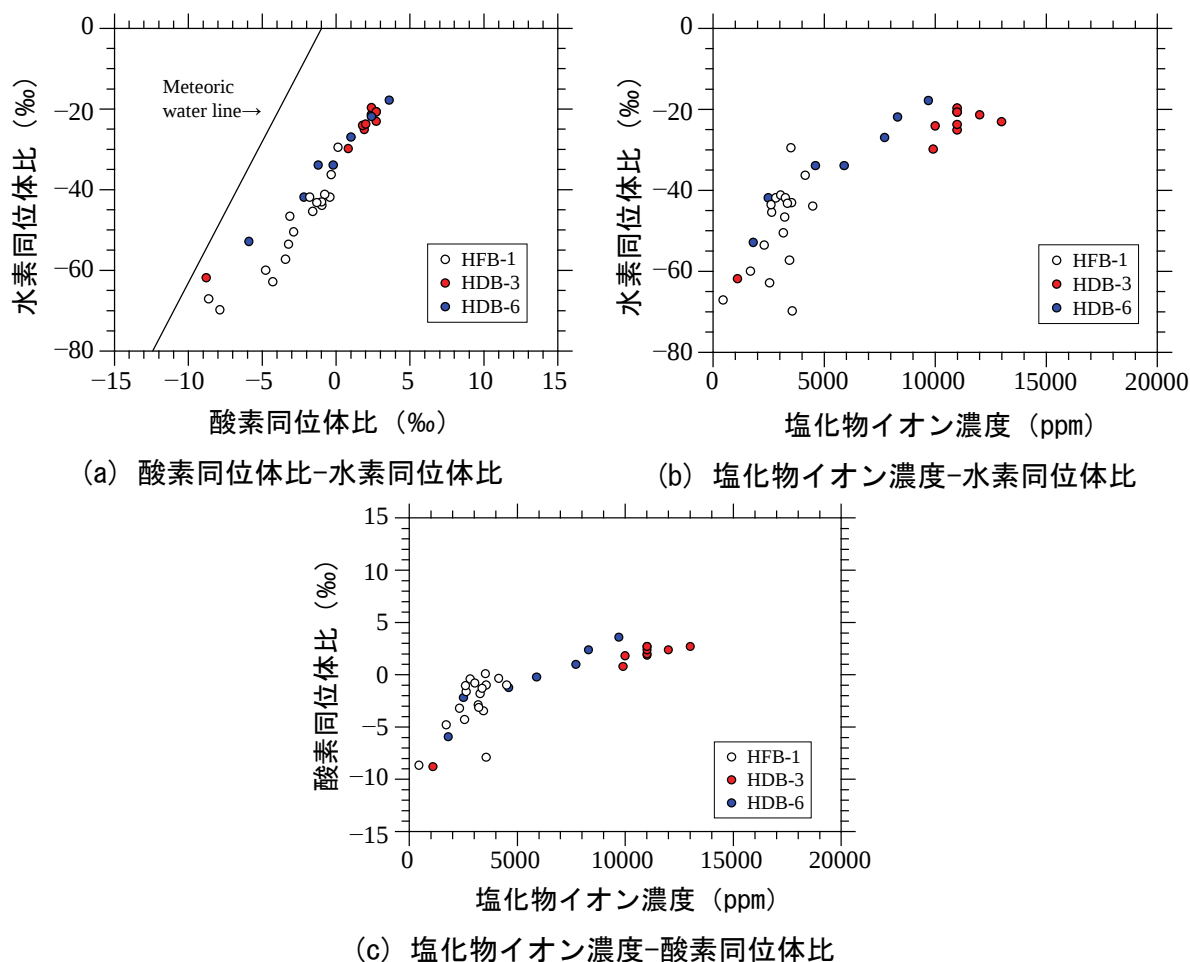


図 90 ボーリング調査から得られた塩化物イオン濃度および酸素・水素同位体比の相関図

HFB-1 孔の塩化物イオン濃度は、深度の増加に伴い徐々に上昇し、深度約 95 m では約 3,000 mg/L となりますが、深度約 95 m から 110 m の間において約 3,000 mg/L から約 4,500 mg/L へと急な値の変化があり、その後、深度 146 m 辺りから元の傾向に戻ることが分かりました(図 89(a))。一方、酸素・水素同位体比は、塩化物イオン濃度と比較してばらつきが大きい傾向があり、塩化物イオン濃度と同様に急な値の変化が認められる箇所がありますが、その深度は約 123 m から約 130 m にかけてであり、塩化物イオン濃度の急な変化が認められる深度とは異なっています(図 89(b)、(c))。図 90 に示す塩化物イオン濃度および酸素・水素同位体比の相関図を見ると、HFB-1 孔の結果は HDB-3 孔や HDB-6 孔の傾向よりばらつきが大きいですが、それから大きく逸脱することがないことが分かります。つまり、HFB-1 孔の深度 200 m までの範囲における地下水は、これ

までの解釈と違いがなく化石海水と天水との混合により形成されたと考えられます。

また、HFB-1 孔の孔壁周辺の地層の比抵抗を計測する物理検層を実施しました。図 91 に、その結果である比抵抗の深度方向の分布を、HDB-3 孔と HDB-6 孔の既存データと併せて示します。HDB-3 孔は 3 つのボーリング孔の中で最も比抵抗の低い傾向を示し、深度約 100 m 以深の声間層から化石海水に相当する地下水が確認されています。一方、HDB-6 孔では、声間層と稚内層の地層境界付近において比抵抗がわずかに高くなる傾向があり、化石海水に相当する地下水は地層境界より下の深度約 400 m 以深の稚内層から確認されています。この違いは、水理学的連結性を有する断層が分布する稚内層浅部の層厚が関係していると考えており、HDB-3 孔、HFB-1 孔、HDB-6 孔の順で層厚が厚く、その順で天水浸透の影響が大きいと考えています。

今後は、HFB-1 孔を深度 200 m から延長し、稚内層を対象に化石海水の存在を確認するための調査を継続するとともに、令和 3 年度の実施区間も含めコア試料からの間隙水の圧縮抽出による化学分析のデータを取得する予定です。その際、深度約 300 m に分布すると予測されている地層境界付近において塩化物イオン、酸素・水素同位体比および比抵抗の変化に着目することが重要になります。これらのデータを整えた後、電磁探査により推定した化石海水領域の分布の妥当性を評価します。

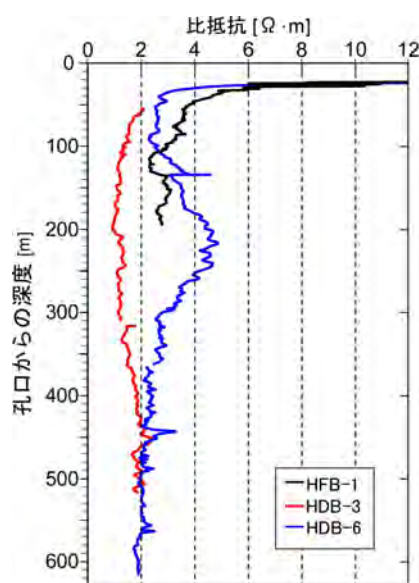


図 91 HFB-1 孔、HDB-3 孔および HDB-6 孔における比抵抗検層の結果

② 化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証

令和 2 年度に取得した電磁探査データを用いて、三次元比抵抗分布を解析する際の留意点を検討しました。図 92 に、令和 2 年度を含むこれまでに幌延深地層研究センター周辺において実施された電磁探査の測点の分布を示します。令和 2 年度は、幌延深地層研究センター周辺において約 3 km 四方の範囲（図 92 に示す四角の範囲）において高密度電磁探査を実施し、60 測点のデータを取得しました。そして、既存の 39 測点のデータと併せて合計で 99 測点のデータを用いて三次元比抵抗分布を推定するための解析を実施しました。その結果を図 93 および図 94 に示します。

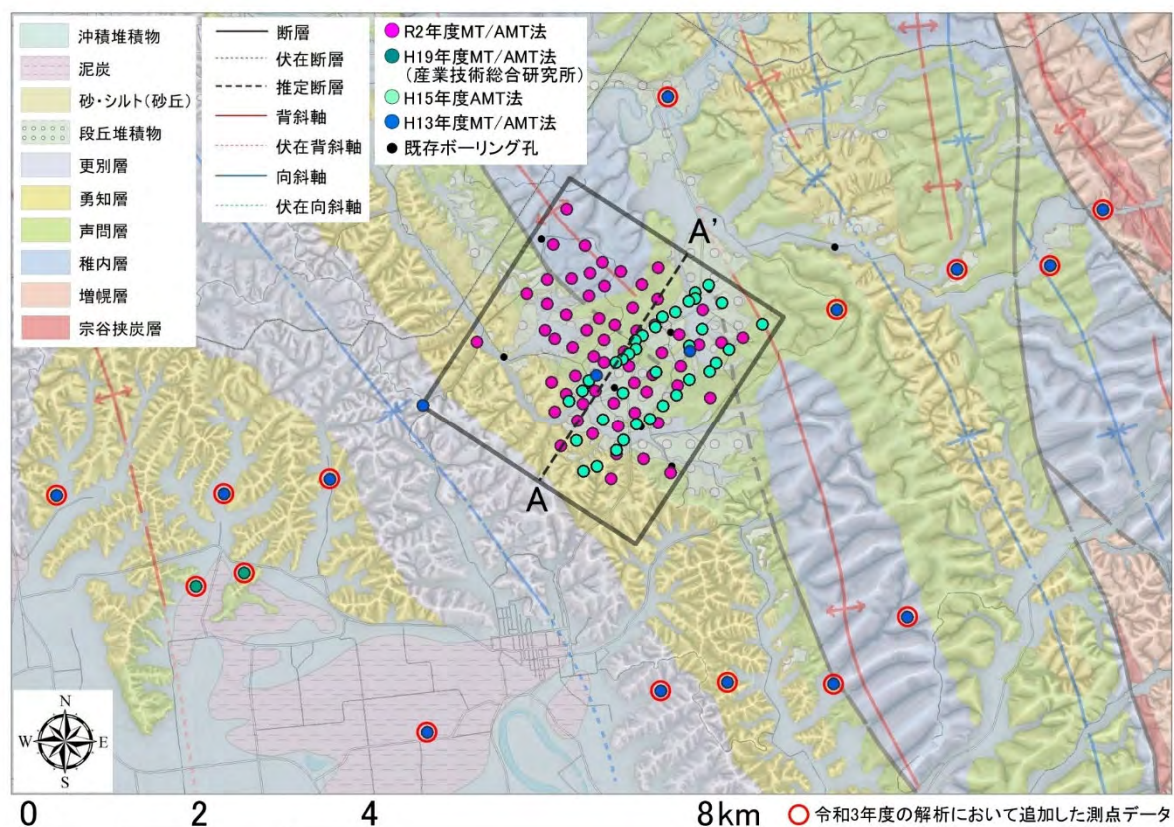


図 92 幌延深地層研究センター周辺における電磁探査の測点配置と地質・地質構造分布

過年度のデータは参考文献（72、73、74、75、76）に、地質図は参考文献（77）に基づいています。

地表付近の比抵抗はおおむね $10 \Omega \cdot \text{m}$ 以上と高く、標高約 0 m ～ -850 m の比抵抗は、深度の増加とともに $1 \Omega \cdot \text{m}$ ～ $5 \Omega \cdot \text{m}$ の低い比抵抗の範囲が広がる傾向が認められます。一方、標高 -850 m より深くなると徐々

に比抵抗が高くなる傾向が認められました。また、令和 2 年度には、測点数を 30 測点に減らした場合の解析を行い、三次元比抵抗分布の推定結果に与える影響を確認しました。その結果、全体的な比抵抗の高低の傾向は 99 測点の場合と同様でしたが、全体的に比抵抗が高くなり、低比抵抗領域と評価できる範囲のボリュームが小さくなる傾向が認められました（図 93 および図 94）。このように測点数によって全体的な比抵抗の高低が変化する要因として、電磁探査やその解析の手法が、本来的には比抵抗値とボリューム（あるいは厚さ）の関係を一義的に決定することを得意としていないことに起因しています。

以上を踏まえて、令和 3 年度の解析では、三次元比抵抗分布の解析精度を向上させるための留意点を確認するために、2 つの観点の解析を実施することにしました。1 つは調査範囲外の測点のデータを解析に追加することの効果の確認、もう 1 つは解析の際に「地層の層厚」と「地表付近の高比抵抗構造」に関する拘束条件を与えることの効果の確認です。前者については、令和 2 年度の解析に用いた 99 測点のデータに、調査領域外側の約 3 km 以内にある既存の 15 測点のデータを加え、合計 114 測点のデータを使用しました（図 92）。一方、後者の拘束条件の追加のうち、「地層の層厚」については、令和 2 年度の反射法地震探査の解釈結果や既存の地質構造モデル⁽⁷⁸⁾に基づき、解析モデルに声問層/稚内層の境界面および稚内層/増幌層の境界面を設け、地層の層厚を拘束しました。また、「地表付近の高比抵抗構造」については、既存の空中電磁探査データ⁽⁷⁹⁾を用いて、表層の比抵抗を固定しました。図 93 および図 94 に、令和 2 年度に実施した解析結果（99 測点拘束なし、30 測点拘束なし）と併せて、令和 3 年度の結果として、114 測点拘束なし、114 点拘束あり、30 測点拘束ありの計 5 ケースの解析結果を示します。

それぞれの解析結果から上述の効果を確認するために、幌延深地層研究センター周辺の既存のボーリング孔における比抵抗検層の観測値と各ケースの解析値の差の二乗平均平方根誤差（Root Mean Square Error：以下、RMSE）を深度別に算出し、比較しました（図 93）。ただし、深度 710 m および深度 1,160 m については、その深度まで掘削している既存ボーリング孔がほとんどないため RMSE を算出することはできません。114 測点

拘束なしの結果は 99 測点と比較して、調査範囲の南西側に広がる低比抵抗領域の下面が浅くなり、その領域が狭くなっていますが、北東側の比較的深い領域に分布する低比抵抗領域は、上面がより浅くなったことで低比抵抗領域が広がっています。RMSE を比較すると 114 測点拘束なしの方が小さい値を示します。このことは、調査範囲の外側に測点を設けることで推定精度が向上することを意味しています。99 測点拘束なしと 30 点拘束なしの RMSE を比較すると、30 測点拘束なしの方が RMSE が大きく、推定精度が低下していることが分かります。30 測点拘束なしと 30 測点拘束ありを比較すると、30 測点拘束ありの方が RMSE が小さく、拘束条件を設けることにより推定精度が向上していることが分かります。一方、114 点拘束ありのケースは、114 点拘束なしのケースと比較して、RMSE が大きく、拘束条件を設けることで逆に推定精度が低下しています。

この結果は、拘束条件を設けることで、測点数が少ない場合に全体的な比抵抗値が高くなる傾向を抑制することができたものの、測点数が多い場合には、地層境界を比抵抗構造の境界として拘束することが逆効果になることを意味しています。既存ボーリング孔における比抵抗検層の結果において、少なくとも声問層と稚内層の地層境界が比抵抗構造の境界になっている事実は認められないため、適切な拘束条件にならなかったと考えられます。

以上の結果から、電磁探査データを用いて三次元比抵抗分布を解析する際の留意点として、①調査範囲の外側に測点を設けることが推定精度の向上につながることに、②比抵抗構造の厚さないしボリュームを仮定することにより、測点数が少ない場合の推定精度低下の対策になることに、③拘束条件を与えるときはその根拠となる情報を整えることが肝要であることを示すことができました。今後は、HFB-1 孔の結果を追加し、電磁探査データを用いて三次元比抵抗分布を解析する際の留意点の検討を継続します。

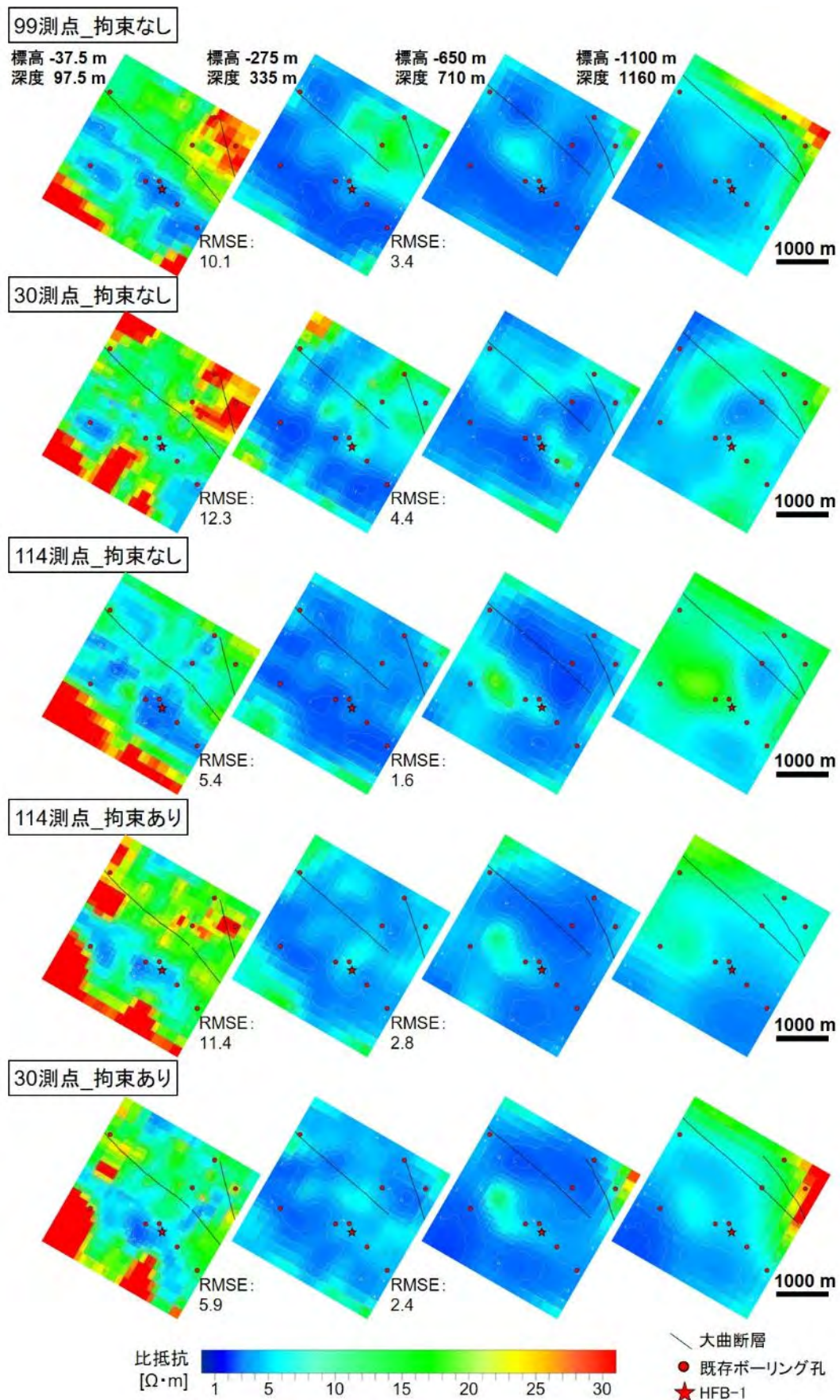


図 93 各ケースの電磁探査解析結果の比較（水平断面）
 深度は幌延深地層研究センター地下施設を基準としています。

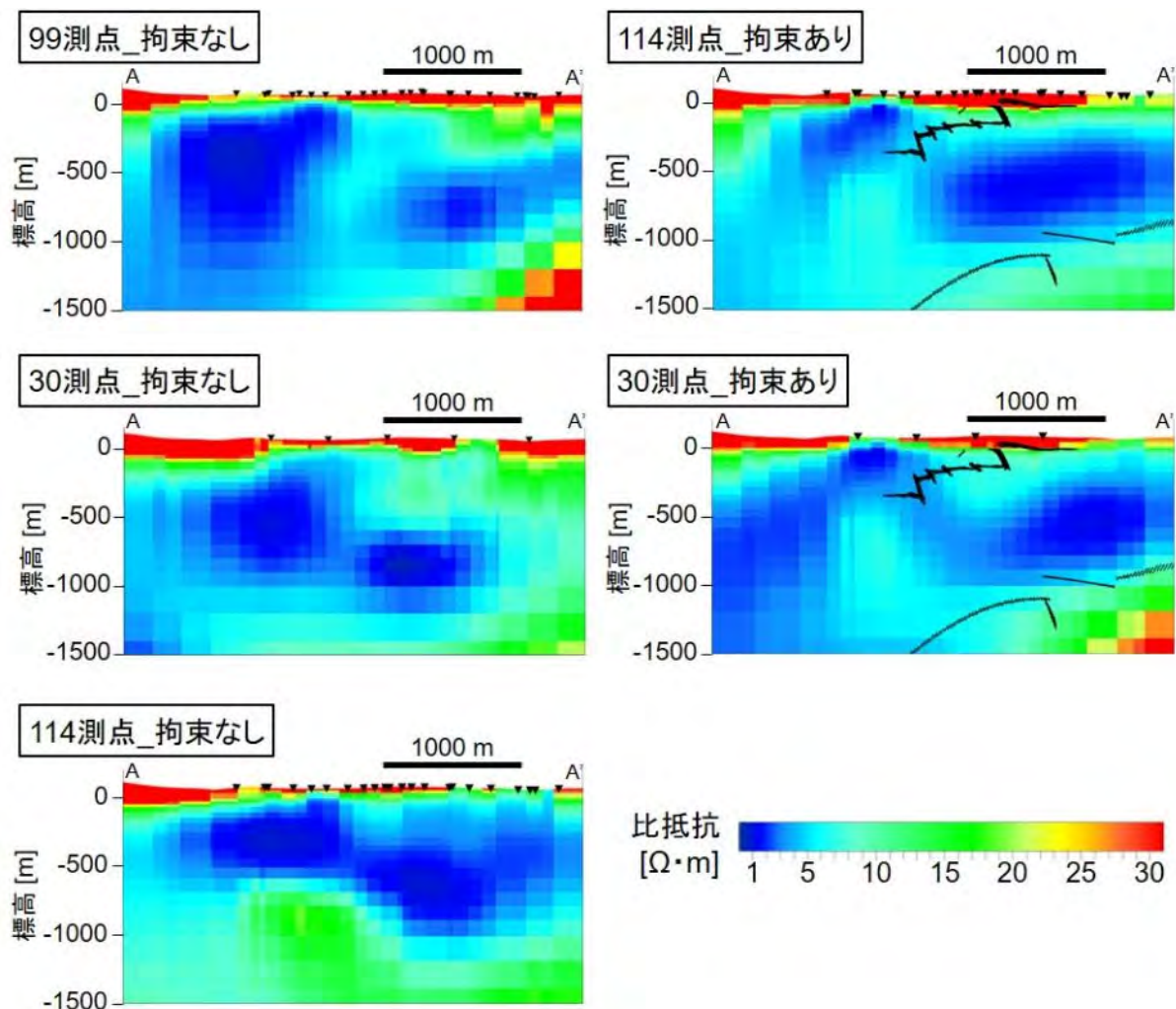


図 94 各ケースの電磁探査解析結果の比較（鉛直断面）

③ 広域スケール（十数 km×十数 km）を対象とした水理・物質移動評価手法の検証（地下水滞留時間評価）のための水理解析および塩濃度分布評価のための水理・物質移動解析

広域スケールの地下水流動解析を実施する上で考慮すべき化石海水領域に影響する古水理地質学的変遷に関する因子を抽出するために、地形や海水準（陸地に対する海面の相対的な高さ）、涵養量（降水や地表水が地下に浸透して地下水として加わる水の量）などの長期的時間変化を考慮した感度解析を実施しました。令和 3 年度の数値解析において対象とした解析領域を図 95 に示します。令和 3 年度は、図 95 の黄色枠で示される領域を数値解析の対象とし、さらに、内陸部の地下深部における地下水流動に着目する観点から、解析結果の着目範囲は、図 95 に示される幌延深地層研究センター近傍を通る A-A' 断面としました。地下水流動解析

には、三次元地下水解析コード「オイリアン・ラグランジアン飽和・不飽和浸透流－移流・分散解析プログラム (Dtransu3D・EL)」を使用しました。Dtransu3D・EL は、三次元モデルにおける密度勾配を考慮した飽和・不飽和浸透流解析および移流・分散問題を対象とした有限要素法^{*76}を用いた解析コードです。本解析に使用した解析モデルを図 96 に示します。本解析では、100 万年前、33 万年前および現在、の 3 つの時間のモデルを構築し、これらを使用しました。

図 97 に隆起・侵食による古地形変化の影響についての感度解析の結果として、幌延深地層研究センター近傍を通る A-A' 断面 (図 95) における動水勾配および地下水年代の分布を示します。100 万年前の地形モデルを用いた解析結果は、33 万年前および現在の地形モデルと比較して明らかに動水勾配が小さく、地表部まで地下水年代が大きい値を示すことから、着目範囲全体が流出域になっている可能性が分かります。一方で、33 万年前および現在の地形モデルを用いた場合、表層部に局所的に涵養域が形成されていることが分かります。また、33 万年前と現在の地形モデルを用いた解析結果を比較すると、現在の地形モデルの方が、おおよそ稚内層深部以深において明らかに動水勾配が小さく、地下水年代が大きいことが分かります。これらの解析結果は、非常にゆっくりとした超長期的な地下水流動においても地形の影響は大きく、現在の地形は地下深部において浅部と比較して地下水が動きにくいことを示しています。図 98 に海水準変動の影響についての感度解析の結果を示します。海水準が標高 0 m の場合の結果 (図 98(a)) と海水準が標高-120 m の場合の結果 (図 98(b)) を比較すると、100 万年前の地形モデルを用いた場合、動水勾配については全体的に大きくなり、地下水年代については大曲断層西側において小さくなっていることが分かります。一方、33 万年前と現在の地形モデルを用いた場合では、海水準が標高 0 m の場合の結果と比較して動水勾配と地下水年代ともに大きな違いは認められません。これらの解析結果は、地形が比較的なだらかな 100 万年前の地形モデルでは海水準の低下の影響が内陸部の地下水流動に影響を及ぼす可能性があるものの、33 万年以降の地形モデルについては海水準の低下の影響が無いことを示していま

^{*76}：数値解析手法の 1 つで、対象を微小で単純な要素の集合体とみなして、それぞれの要素に分割して解析を行い、全体の挙動を求める方法です。

す。

今後は、既存のボーリング調査などから得られた塩濃度分布あるいは酸素水素同位体比分布と比較することにより、解析手法の妥当性の確認を行うことで、地上からの物理探査やボーリング調査により得られた情報を基に、化石海水を指標とした地下水の流れが非常に遅い領域の分布の推定に対し、水理解析の面からアプローチを図る際の技術の高度化を図ります。

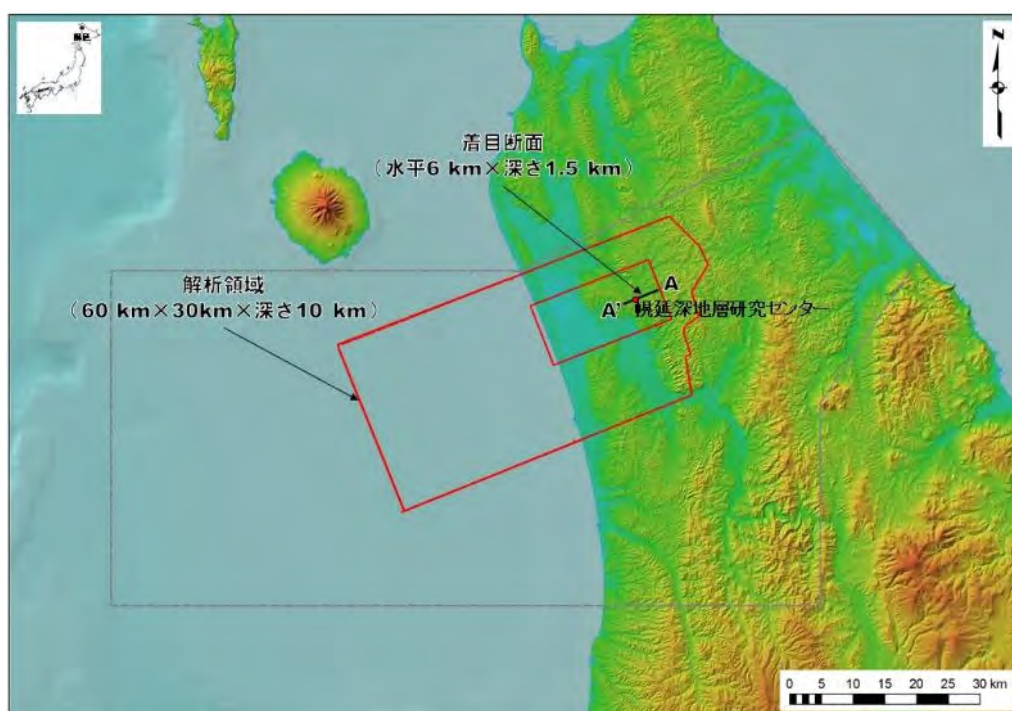


図 95 解析領域と着目断面位置 (A-A')

国土地理院地図 (<https://maps.gsi.go.jp/>) を加工し、解析領域などを追記

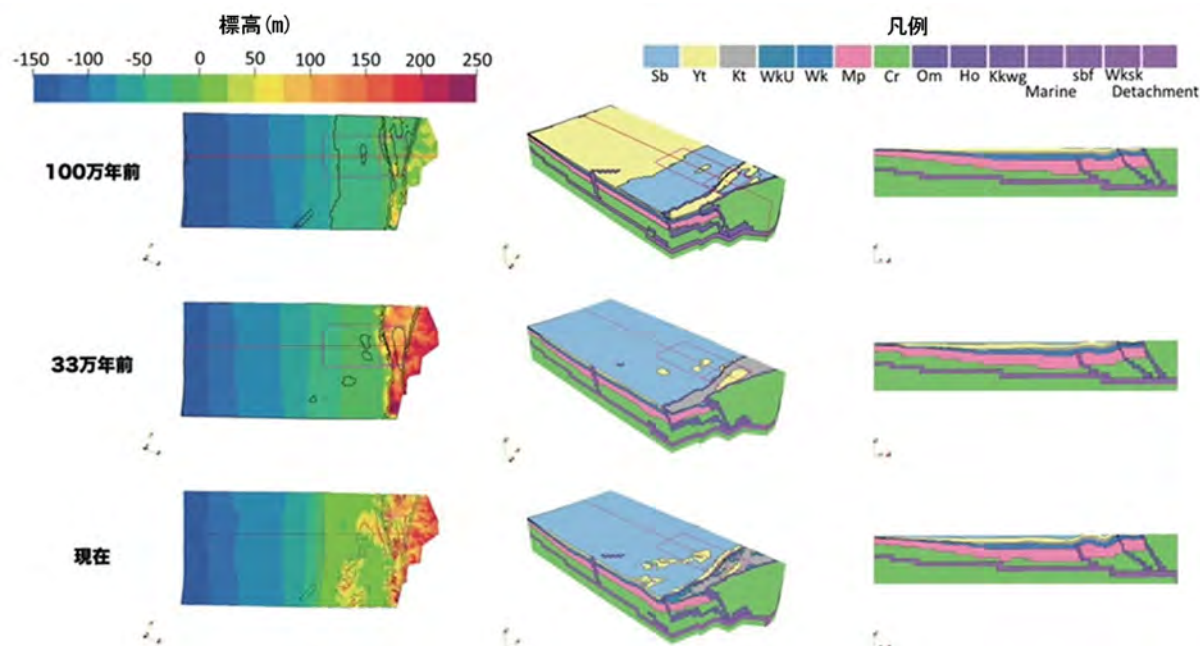


図 96 解析モデル

左は地形、右は水理地質区分を示します。地層名などの略称は次の通りです。Sb: 更別層、Yt: 勇知層、Kt: 声問層、WkU: 稚内層浅部、Wk: 稚内層深部、Mp: 増幌層～古第三系、Cr: 白亜系、Om: 大曲断層、Ho: 幌延断層、Kkwg: 北川口断層、Marine: 海岸断層、sbf: サロベツ断層、Wksk: 稚内断層、Detachment: デタッチメント

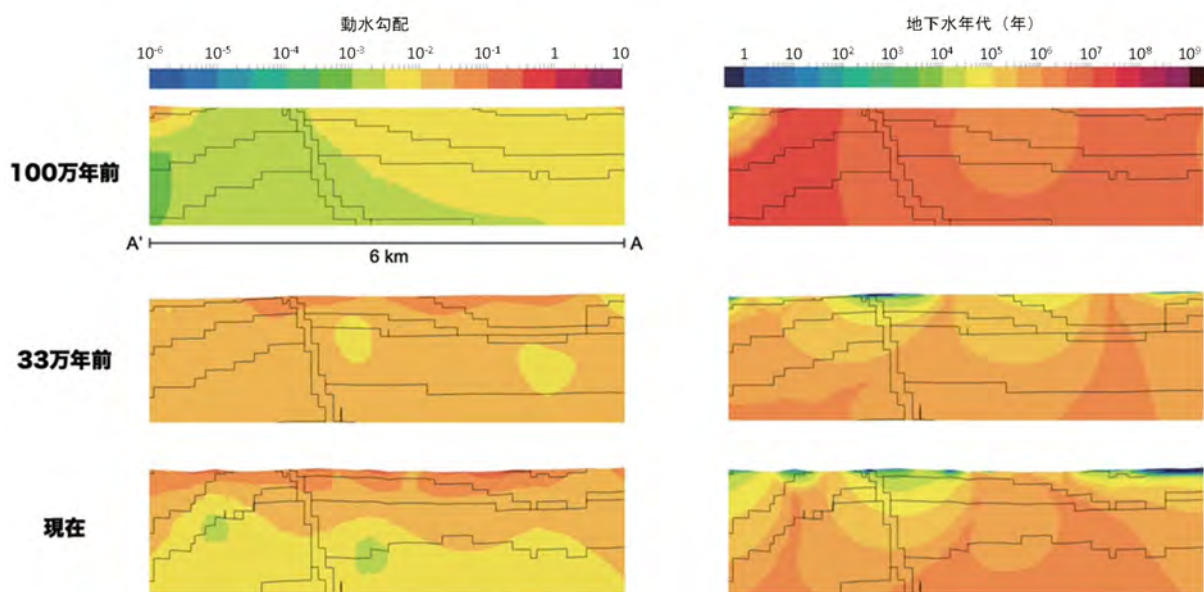


図 97 隆起・侵食による古地形変化の影響についての感度解析の結果

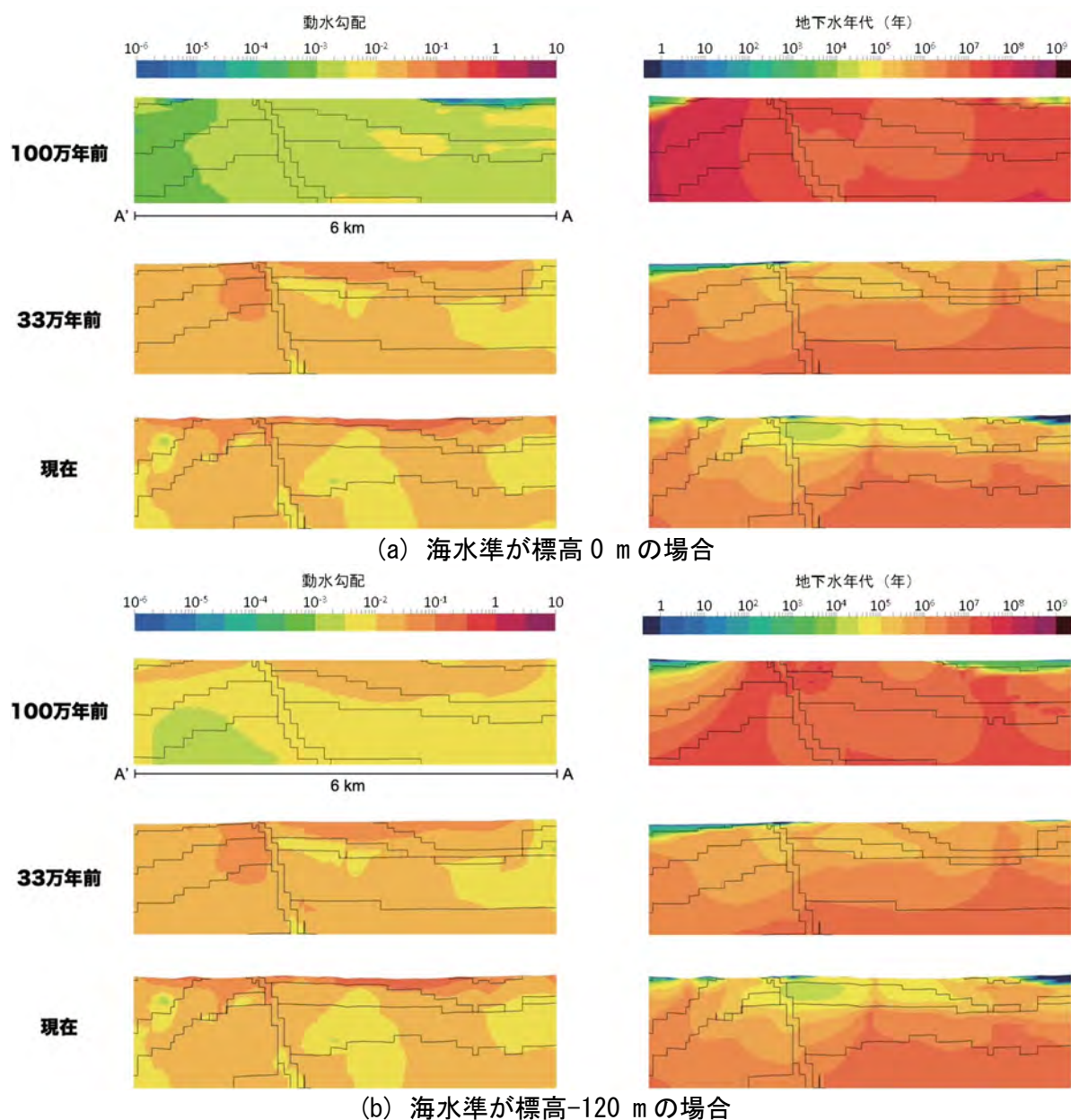


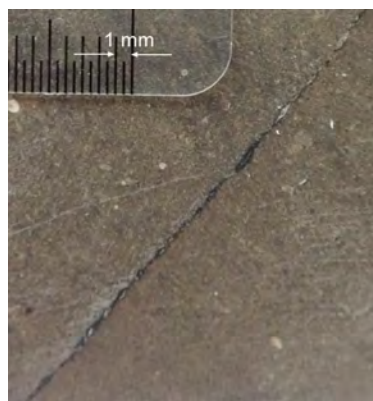
図 98 海水準変動の影響についての感度解析の結果

6.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

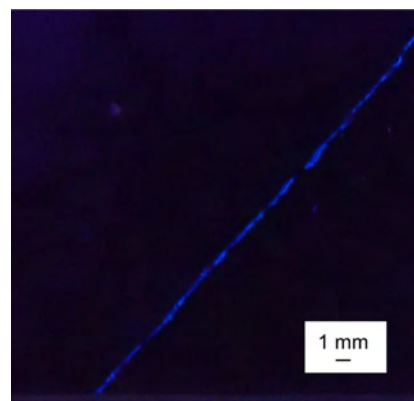
令和 2 年度以降は、地殻変動による緩衝材や埋め戻し材の掘削損傷領域 (EDZ) への自己治癒能力の実証が課題となります。そのため、EDZ のひび割れに対する自己治癒能力の実証を行います。具体的には、緩衝材や埋め戻し材が EDZ の力学的・水理学的な緩衝能力 (自己治癒能力) に与える影響を把握する解析手法の開発を行います。本課題においては、6.1.1 で述べたダクティリティインデックス (DI) などを活用して検討します。

令和 3 年度は、令和 2 年度に実施した樹脂注入後の EDZ の割れ目試料

(図 99) の観察により得られた開口幅とせん断変位の関係性について、その妥当性を確認するためにシミュレーションを行いました。令和 2 年度の観察により、割れ目の開口幅とせん断変位量には相関性がほとんどないことが確認されました(図 100 の●)が、割れ目面にかかる力を 3.2 MPa (試料を採取した深度 350 m の EDZ に作用する圧力に基づく) として割れ目の開口幅とせん断変位量の関係を Asadollahi and Tonon のモデル⁽⁸⁰⁾を用いてシミュレーションすると、上記の観察結果(開口幅とせん断変位量がほとんど相関しない結果)を良く再現できることが分かりました(図 100(f))。一方、割れ目面にかかる力を原位置相当の圧力の 1/4 ～1/32 と見積もってシミュレーションを行うと、上記の観察結果をよく再現できない(開口幅とせん断変位量がよく相関する)ことが分かりました(図 100(a)～(d))。これらの結果から、地下の原位置相当の圧力条件では、EDZ の割れ目が緩衝材や埋め戻し材の膨潤などの影響によって坑道閉鎖後にずれたとしても、圧力が大きく(1/4 程度まで)低下しない限り^{*77}、EDZ の割れ目の開口幅(透水性)はほとんど増加しないことが分かりました。また、行った樹脂注入試験とシミュレーションの結果が整合的であることから、樹脂注入試験やシミュレーションが有効であることが確認できました⁽⁸¹⁾。



(a) 自然光下



(b) 紫外線照射下(樹脂が青色に発光)

図 99 樹脂注入後の EDZ の割れ目試料(ボーリングコア試料)の拡大写真

*77: EDZ 割れ目にかかる力が地表でゼロで、深度の減少とともに一定の割合で線形的に低下すると仮定した場合、今回の結果からは、深度が 1/4 程度まで減少する(上昇する)と、観察結果をうまく再現できなくなる(割れ目がずれると開口幅が大きく増加するようになる)ことが分かります。仮想的に、侵食速度を高め 0.5 mm/年、初期深度を 300 m 以深として、今回の結果を用いて計算すると、10 万年後に深度が 1/4 程度まで減少(上昇)することはないため(隆起・侵食量は 50 m)、この程度の隆起・侵食量であれば、EDZ 割れ目のせん断変位と開口幅の関係に顕著な変化は生じないことが考えられます。

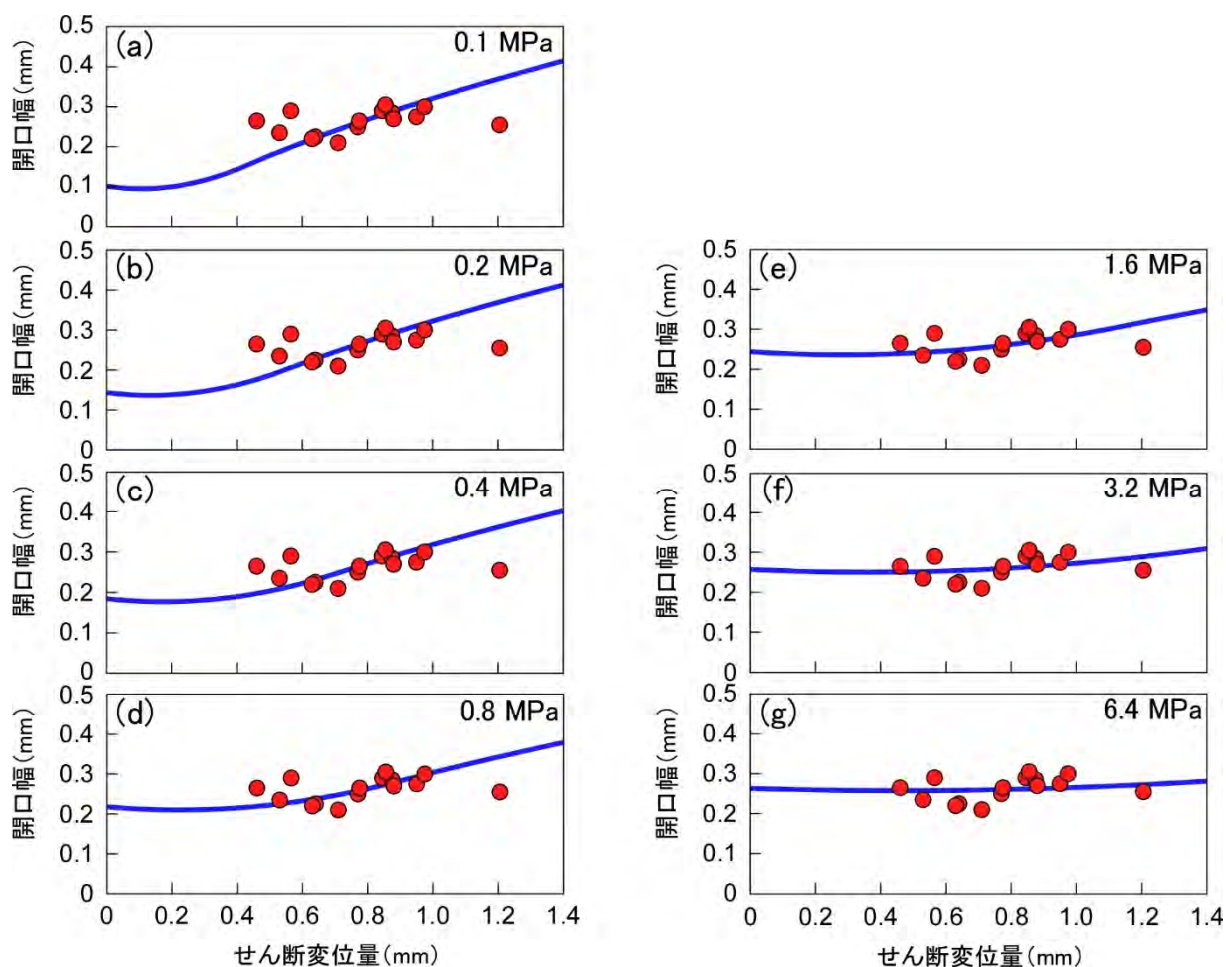


図 100 樹脂注入後の EDZ の割れ目試料で観察された開口幅とせん断変位量の関係（赤丸）とシミュレーション結果（青線）⁽⁸¹⁾

各グラフの右上の数値は、各シミュレーションで想定した割れ目面にかかる力の大きさを示しています。シミュレーションでは、Asadollahi and Tonon のモデル⁽⁸⁰⁾を用いて、せん断変位量に応じた開口幅の変化を計算しています。

令和 3 年度はさらに、EDZ の割れ目を対象に実施した既往の注水試験のデータについて、以下のような検討を行いました。同試験では段階的に注水圧（試験区間の水圧）を増加させ、そのときの注入流量の変化を計測しました（図 101(a)はその結果の例）。試験中の試験区間の水圧と注入流量の関係を調べると、試験区間の水圧の増加に伴う注入流量の増加量は、試験区間の水圧の増加とともに徐々に大きくなることが分かりました（図 101(b)）。これは一般的な水理学・岩盤力学の知見に基づくと、水圧の増加に伴って割れ目の開口幅が増加していることを示唆しており、このようなデータは割れ目面にかかる力に応じて割れ目の開口幅がどのように変化するかを調べるのに有用な情報を提供します。今後、令和 3 年

度に再検証した DI モデル（6.1.1 を参照）も活用して詳細な解析を行うとともに、先述した樹脂注入試験の検討結果と合わせて、緩衝材や埋め戻し材の膨潤が EDZ の割れ目の開口幅（透水性）に与える影響の評価手法を取りまとめる予定です。

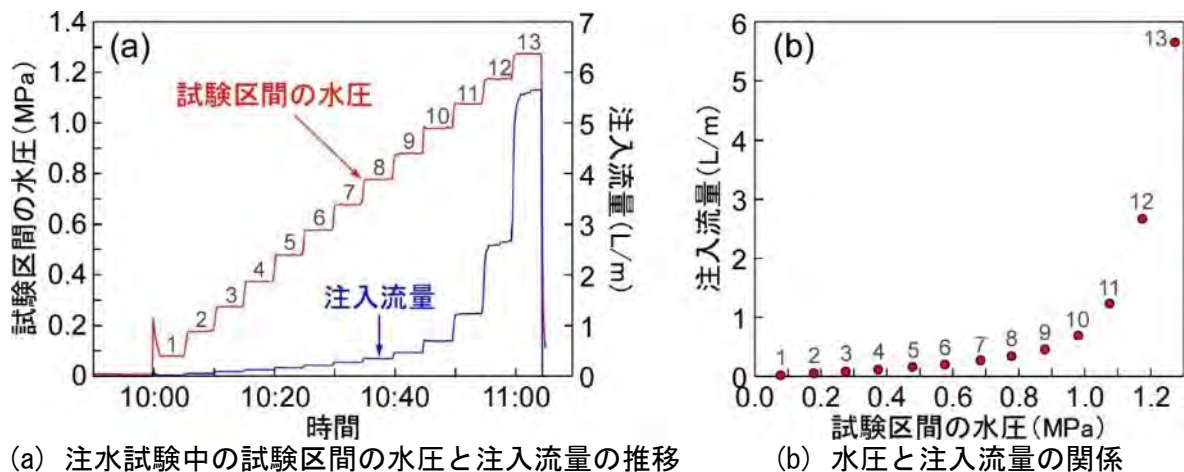


図 101 EDZ の割れ目を対象に実施した既往の注水試験のデータの例
図中の 1～13 の番号は試験中のステップの番号を表します。

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

令和 2 年度以降、人工バリア性能確認試験や物質移行試験などの処分システムの設計・施工や安全評価に関わる基礎情報、例えば、岩盤の水の流れやすさや岩石の鉱物組成や化学組成、地下水の pH や酸化還元電位、化学組成などのデータの取得などについては、令和 2 年度以降の必須の課題への対応に必要なことから、引き続き必要最低限のデータを取得し、処分システムの設計・施工や安全評価に関する研究を行う試験場所の地質環境特性を明確にし、それらの手法の評価に用いることとなります。なお、処分システムの設計・施工手法や安全評価手法の信頼性を確認するために必要となるデータが取得できているかを含めて評価することが必要であるため、計測手法の妥当性を確認し、必要に応じて調査技術・機器の改良を行います。

(1) 岩盤の水理

岩盤の水理に関しては、坑道掘削後の地質環境の変化を把握するため、地上から掘削された既存のボーリング孔での水圧観測を行っています。令和 3 年度は、令和 3 年 4 月 27 日以降にセンサー不良のため水圧が計測できていなかった HDB-6 孔のセンサーを交換しました（図 102 の▼）。その後、正常にデータを取得できるようになりました。また、令和元年 12 月 12 日の宗谷地方北部を震源とする地震に伴い上昇した HDB-6 孔の深度 369 m の水圧（図 102 の▲）は、2 年以上が経過した令和 4 年 3 月 30 日時点で、ほぼ元の水圧に戻っていることが確認できました。このような一時的な水圧上昇は、大規模な地下水の排水を行っている地下施設の近傍に位置する HDB-6 孔（東立坑から 92 m）のみで認められることも考慮すると、以下のような発生原因が考えられます。すなわち、地震の揺れに伴い地下水中のメタンガスの脱ガス・気泡の発生や目詰まりが地下施設近傍の割れ目内で生じ、それにより地下水が一時的に流れにくくなる領域が地下施設と HDB-6 孔の間に発生したことが考えられます（発生した気泡や目詰まりは時間の経過とともに消滅）。同孔の深度 369 m より深い深度ではこのような水圧上昇が認められませんが、その理由として、これらの深い深度は深度 369 m 周辺と異なり、地下施設へ向かう地下水の流れ

がそもそも発生していないことが考えられます。このようなコントラストは、6章において検討している地下施設周辺の稚内層における割れ目の水理的連結性の深度変化（深度 400 m 以浅は割れ目の水理的連結性が高く、深度 500 m 以深は低い）⁽⁸⁾と整合的と言えます。

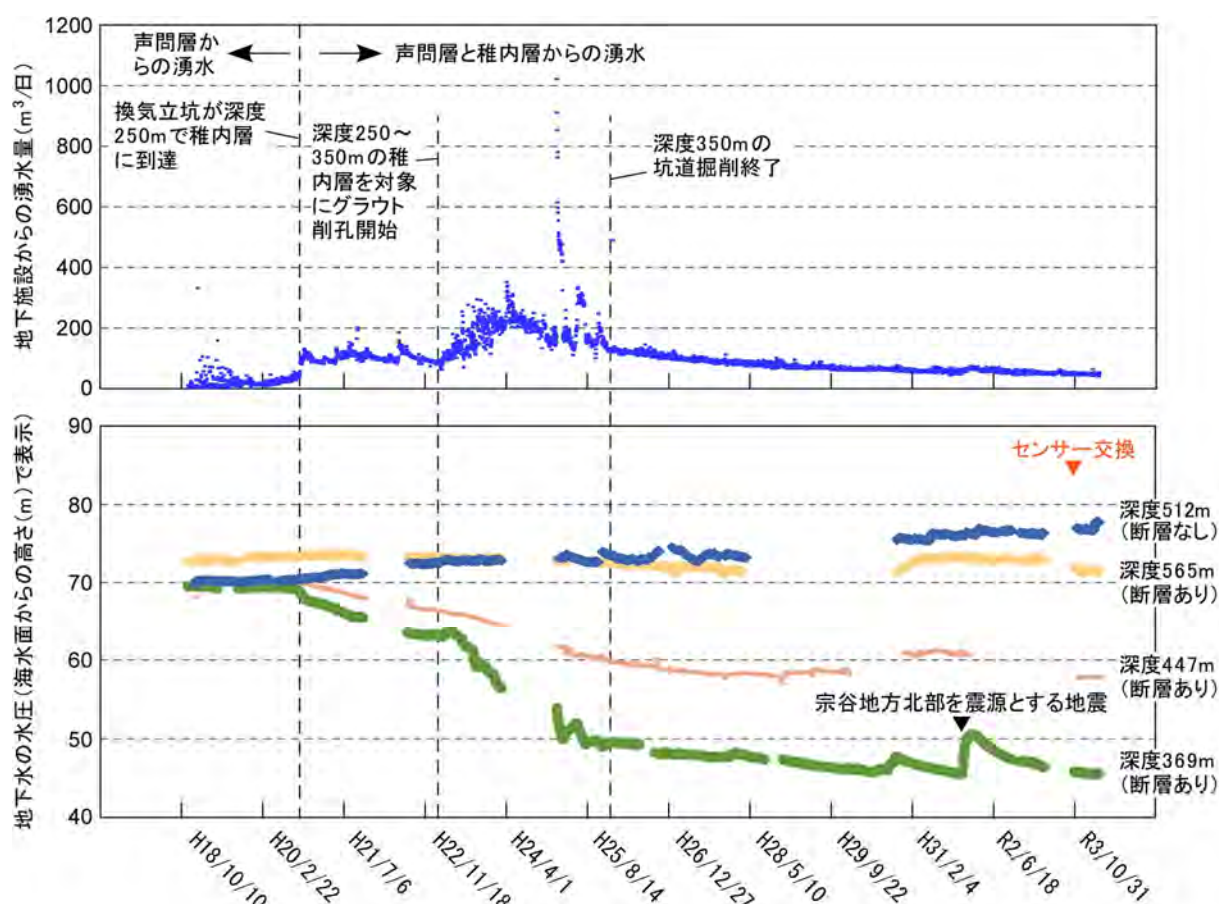


図 102 地下施設からの湧水量（上）と HDB-6 孔の稚内層における断層区間の水圧観測結果（下）

（平成 18 年 11 月 19 日～令和 4 年 3 月 30 日のデータ）

令和元年 12 月 12 日の宗谷地方北部を震源とする地震の際には、地震の揺れに伴い地下水が一時的に流れにくくなる領域が地下施設と HDB-6 孔の間に発生し、それにより HDB-6 孔の水圧が上昇したことが考えられます（水が流れにくい領域が発生すると、その上流側の水圧は増加します）。水が流れにくくなる領域が発生した原因としては、揺れに伴って割れ目内に生じた瞬間的な減圧が地下水中のメタンガスの脱ガス・気泡を発生させた可能性や、揺れに伴って何らかの目詰まりが割れ目内に発生した可能性が考えられます（割れ目内に気泡や目詰まりが発生すると水が流れにくくなります）。地下施設近傍で水の流れにくい領域が発生したとすれば、地下施設からの湧水量がその分、減少するはずですが、そのようなことを示唆する有意な減少は認められませんでした。したがって、一時的に水が流れにくくなった箇所の発生領域は HDB-6 孔近傍などのごく限られた範囲であったと考えられます。

(2) 地下水と岩石の地球化学

地下施設の建設に伴う坑道周辺の地下水の水質の時間的な変化を把握することを目的として、坑道内で採取した地下水の pH や電気伝導度、酸化還元電位などの物理化学パラメータを測定するとともに、採取した地下水の水質を分析し、その変化をモニタリングしています。令和 3 年度は、令和 2 年度に引き続き、地下施設の 3 本の立坑に設置された集水リング^{*78}や 140m、250m および 350m 調査坑道から掘削されたボーリング孔などから 54 試料の地下水を採取し、水質を分析しました⁽⁸²⁾。図 103 に集水リングとボーリング孔の位置を示します。塩化物イオン濃度の分析結果を図 104 に、酸素同位体比の分析結果を図 105 に示します。集水リングから得られた地下水の塩化物イオン濃度および酸素同位体比（図 104(a)～(c)、図 105(a)～(c)）は、坑道内から掘削されたボーリング孔から得られた地下水の塩化物イオン濃度および酸素同位体比（図 104(d)～(f)、図 105(a)～(c)）と比べると変化が大きいことが分かります。これは、主に集水リングとボーリング孔とでの地下水の採取方法の違いによるものと考えられます。塩化物イオンは反応性に乏しいため、塩化物イオン濃度の変化は異なる水質の地下水の混合が生じたことを示していると考えられます。集水リングの試料に見られる変化は、塩化物イオン濃度の異なる地下水が立坑を通じて下方に移動し、混合した結果と考えられます。令和 3 年度は集水リングから採取された地下水試料中にわずかにトリチウム^{*79}が検出されました（ $<0.04 \text{ Bq/L} \sim 0.2 \text{ Bq/L}$ ）⁽⁸²⁾。一方で、ボーリング孔から採取された地下水試料中には、トリチウムは検出されませんでした。このことから、集水リングの試料に見られる変化は、異なる深度の地下水の混合であるとともに、現在の天水などの地表水が立坑を通じて地下に浸透した結果であることが考えられます。

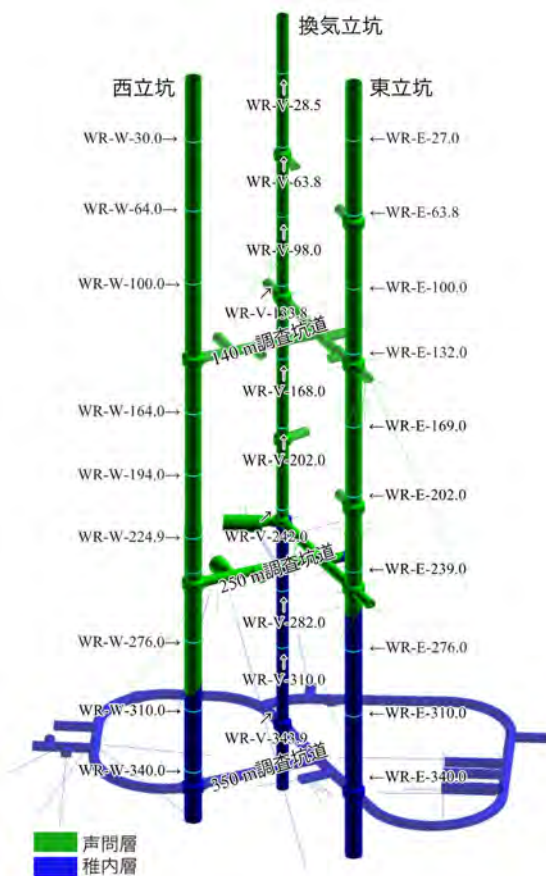
人工バリア性能確認試験が実施されている 350m 調査坑道の試験坑道 4（図 5 参照）は、平成 25 年度に掘削され、平成 26 年度に人工バリアを定置し、坑道の一部を埋め戻したのちに試験が開始されています。平成 28

*78：立坑内で、坑壁から染み出した地下水を採取するために、立坑壁面に 30 m～40 m ごとに設置されている設備です。

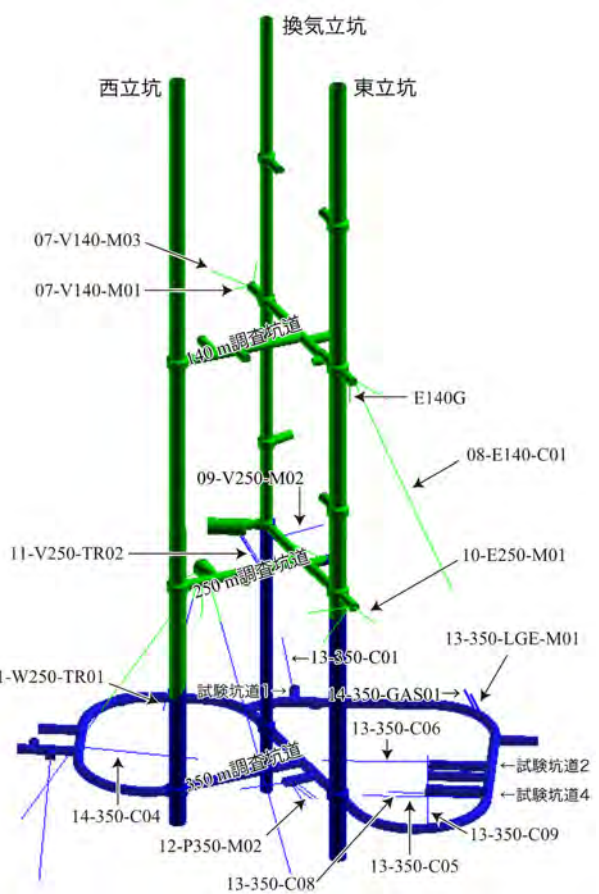
*79：質量数が 3 である水素の放射性同位体（半減期：12.3 年）で、三重水素とも呼ばれます。地球上で実施された過去の核実験の影響などにより環境中に微量に存在しますが、幌延地域の地下深部の地下水のような古い地下水には含まれていません。

年度より試験箇所に対する注水量が増加され、令和元年度は試験坑道 4 周辺にグラウトが実施されました。しかしながら、試験箇所周辺のボーリング孔（13-350-C05 孔、13-350-C08 孔および 13-350-C09 孔）から得られた地下水の塩化物イオン濃度については、目立った変化は見られていません（図 104(f)）。令和 3 年度は、試験箇所への注水試料と試験坑道 4 の壁面からわずかに染み出している地下水（図 106）の水質を分析した結果、塩化物イオン濃度はそれぞれ約 4,100 mg/L と約 4,000 mg/L、酸素同位体比は両試料とも-3.1‰となり、ほぼ同じ水質でした⁽⁸²⁾。これらの注入水と浸み出している地下水の塩化物イオン濃度は、試験箇所周辺の地下水とほぼ同じですが、酸素同位体比がわずかに異なりました（図 104(f)、図 105(f)）。このことから、試験坑道 4 の壁面からわずかに浸み出している地下水は、試験箇所周辺のボーリング孔で観察されるような地下水ではなく、試験箇所に注入した注入水が主な成分であると考えられます。

350m 調査坑道の試験坑道 1（図 5 参照）では人工バリアの試験体を取り出すための試験施工の解体調査を実施しました。試験坑道 1 に位置する 13-350-C01 孔の地下水の塩化物イオン濃度は、令和 3 年度に低下していることから（図 104(f)）、試験施工および解体調査による何らかの影響が考えられます。一方で、350m 調査坑道の他のボーリング孔（12-P350-M02 孔、13-350LGE-M01 孔、13-350-C06 孔、14-350-C04 孔および 14-350-GAS01 孔）に関しては、令和 3 年度まで塩化物イオン濃度の大きな変化は認められていません（図 104(f)）。



(a) 集水リング



(b) ボーリング孔

図 103 地下水の採取箇所

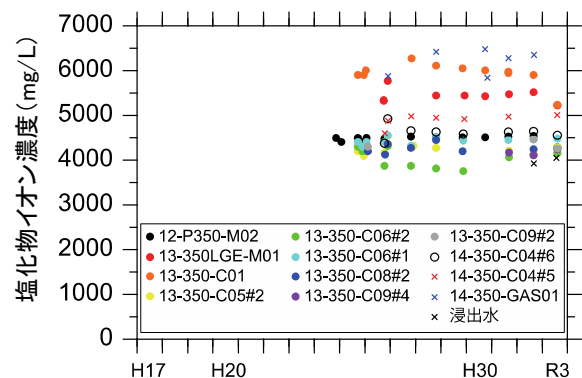
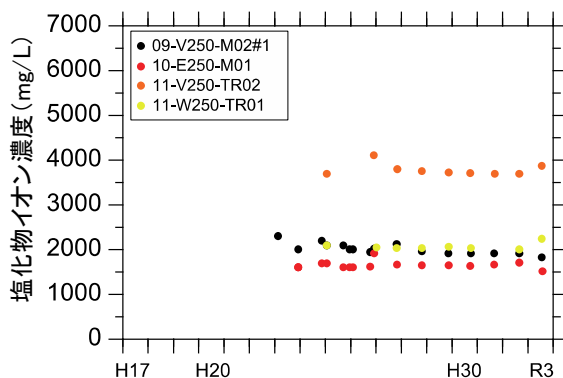
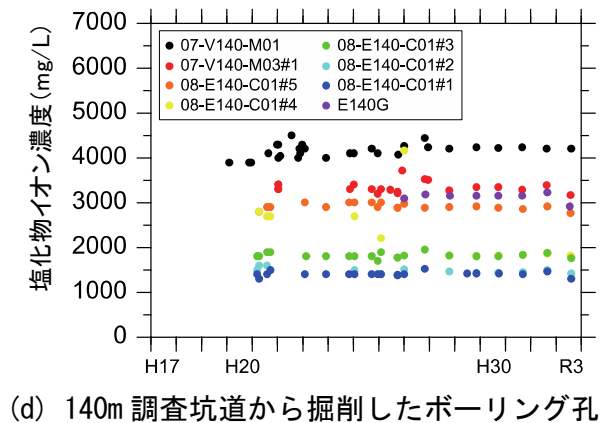
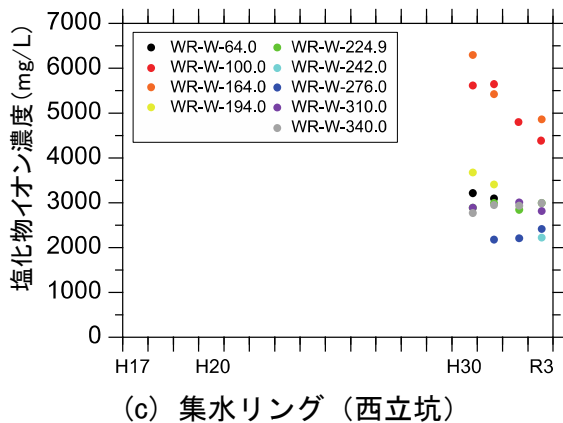
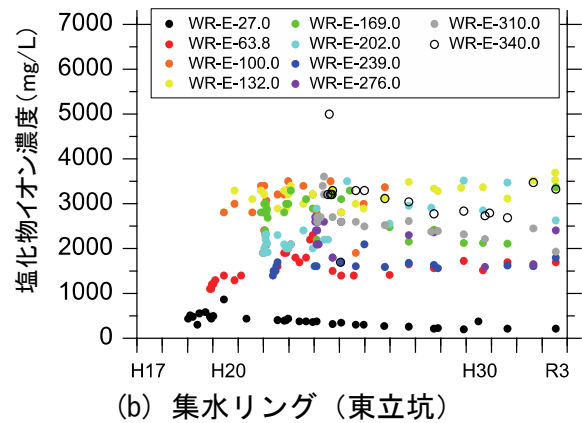
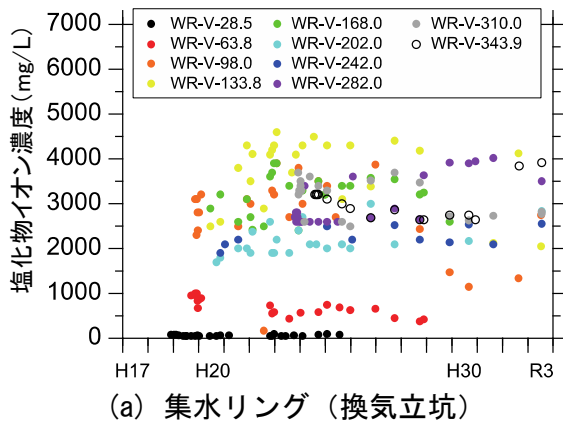
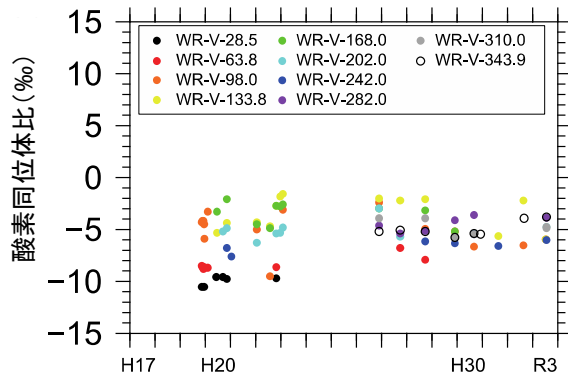
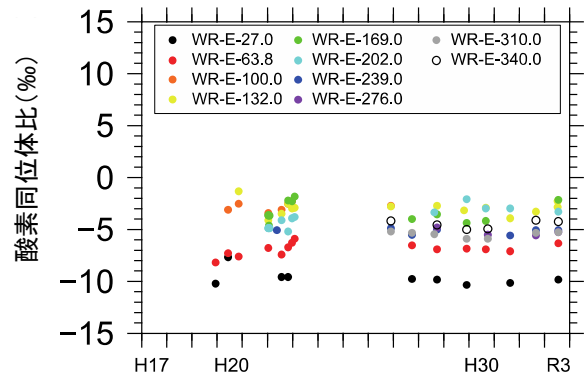


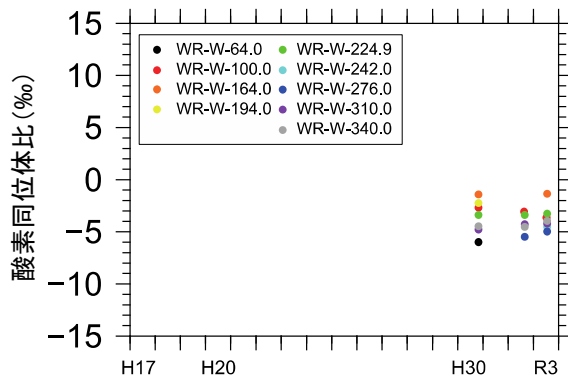
図 104 地下水の塩化物イオン濃度の経時変化



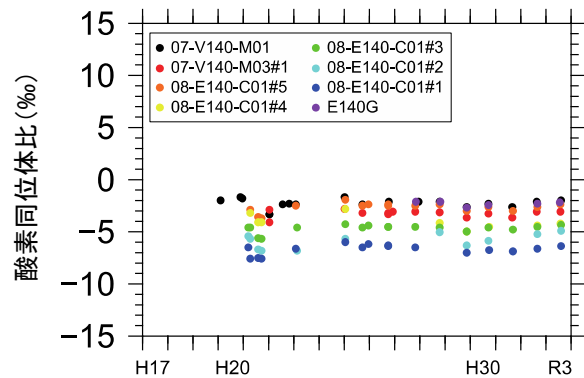
(a) 集水リング（換気立坑）



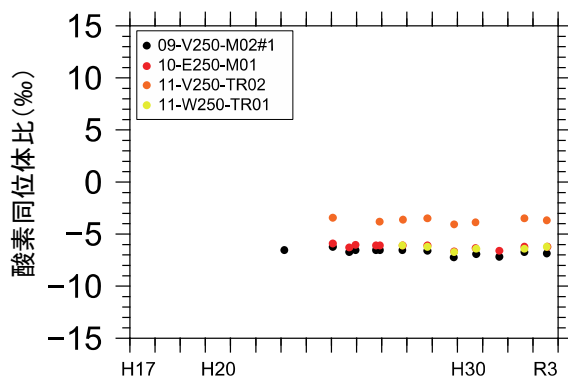
(b) 集水リング（東立坑）



(c) 集水リング（西立坑）



(d) 140m 調査坑道から掘削したボーリング孔



(e) 250m 調査坑道から掘削したボーリング孔 (f) 350m 調査坑道から掘削したボーリング孔

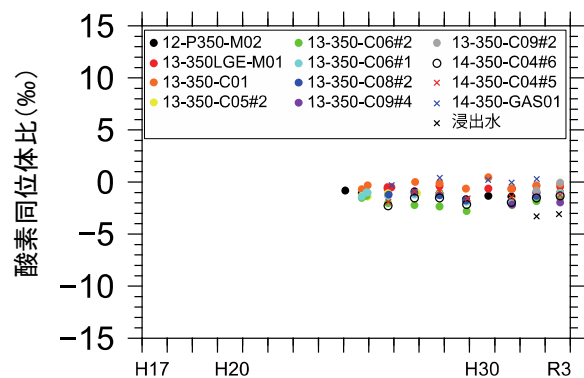


図 105 地下水の酸素同位体比の経時変化



図 106 試験坑道 4 壁面からの浸出水の採取箇所

試験坑道 4 の入り口から奥を見て撮影した写真。写真の奥に見えるのは、人工バリア性能確認試験のコンクリートプラグです。

平成 26 年度までに 350m 調査坑道に設置した水圧・水質モニタリング装置を用い、令和 3 年度もモニタリングを継続しました。装置の設置箇所を図 107 に示します。令和 2 年度に引き続き、令和 3 年度も試験坑道掘削後の経時変化の把握や観測装置の長期的な性能確認の一環として 13-350-C05 孔、13-350-C06 孔、13-350-C07 孔、13-350-C08 孔および 13-350-C09 孔（以下、C05、C06、C07、C08 および C09）の 5 孔を用い、水圧・水質モニタリングを継続しました。C05、C06、C07、C08 および C09 における水圧モニタリングの結果を図 108、図 109、図 110、図 111 および図 112 にそれぞれ示します。図中での急激な水圧の低下は、採水やメンテナンスの際に孔内のガスや地下水が放出されたことによるものです。試験坑道 4 では、平成 26 年度に人工バリア性能確認試験における坑道の一部埋め戻しが行われ、平成 27 年度に同坑道においてコンクリートプラグ外周の地山に放射状にグラウト注入を行うコンタクトグラウト注入作業が実施されました。坑道の埋め戻し部分を冠水させるため、平成 27 年 1 月から人工バリア内への注水が行われており、急激な注水による緩衝材の流出現象などを避けるために、段階的に注水量を増加させています。これに伴い、埋め戻し範囲に位置する C07、C08 および C09 のうち、C08（水平孔）および C09（鉛直下方孔）の最浅部である区間 4 において水圧が上

昇する傾向が確認されています（図 111 および図 112）。特に、注水量を大幅に増加させた平成 28 年 11 月と令和元年 12 月には、0.05 MPa 程度の水圧の上昇が確認されています。一方で、令和 2 年 7 月に、注水量を減少させた際には、同区間において、0.05 MPa 程度の水圧の減少が確認されています。令和 3 年度は、人工バリアへの注水量が一定であり、C08 および C09 の区間 4 の水圧は緩やかな上昇傾向にあります。

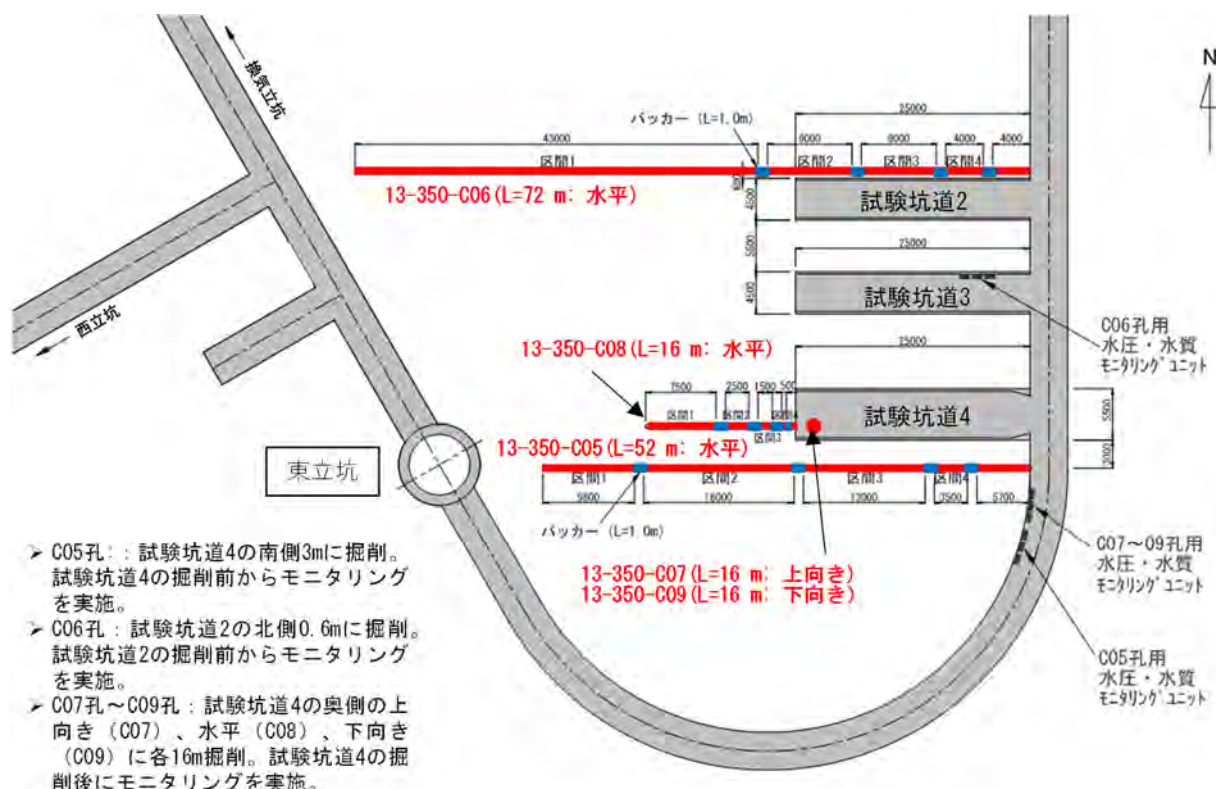


図 107 試験坑道 2 および試験坑道 4 周辺における水圧・水質モニタリング実施箇所

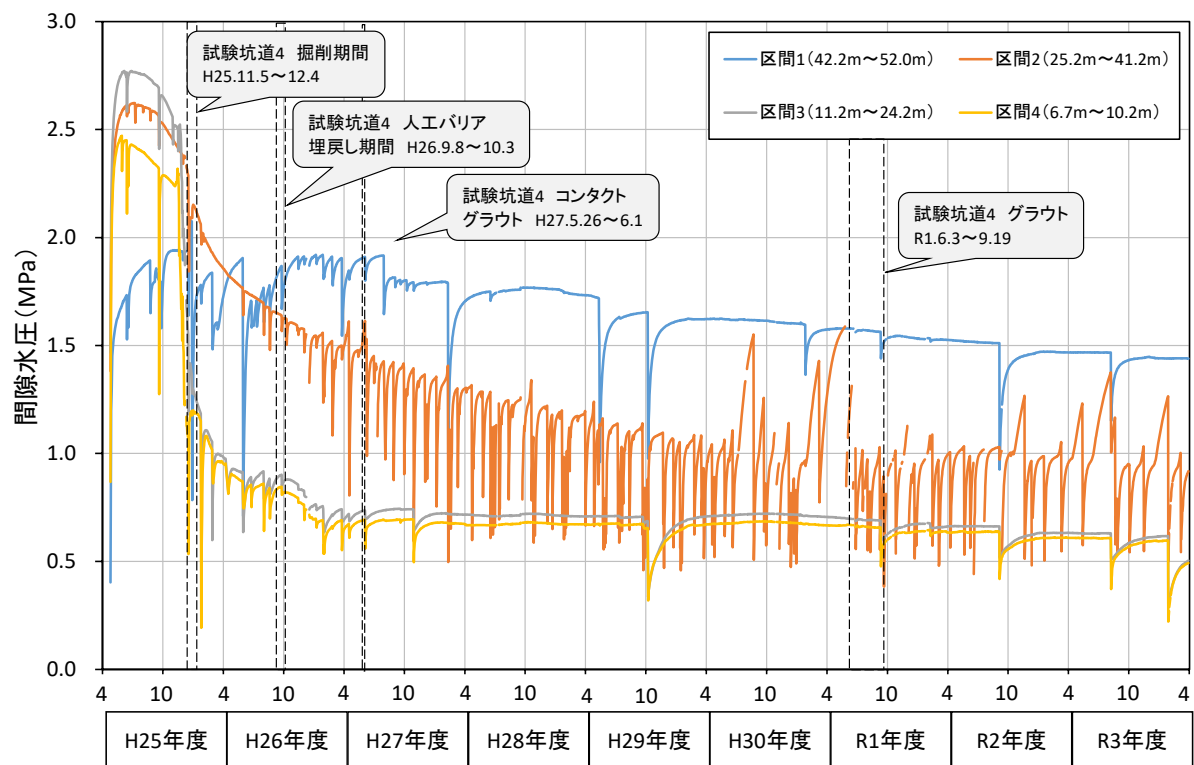


図 108 C05 における水圧モニタリング結果
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

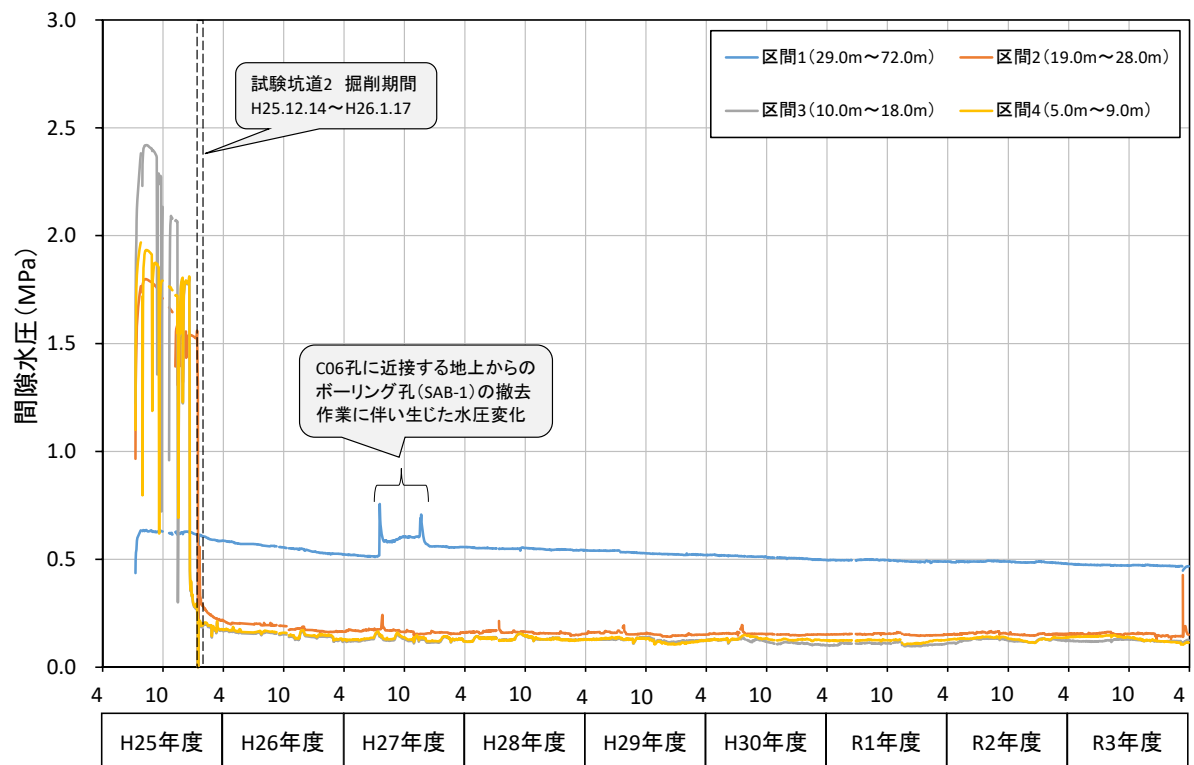


図 109 C06 における水圧モニタリング結果
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

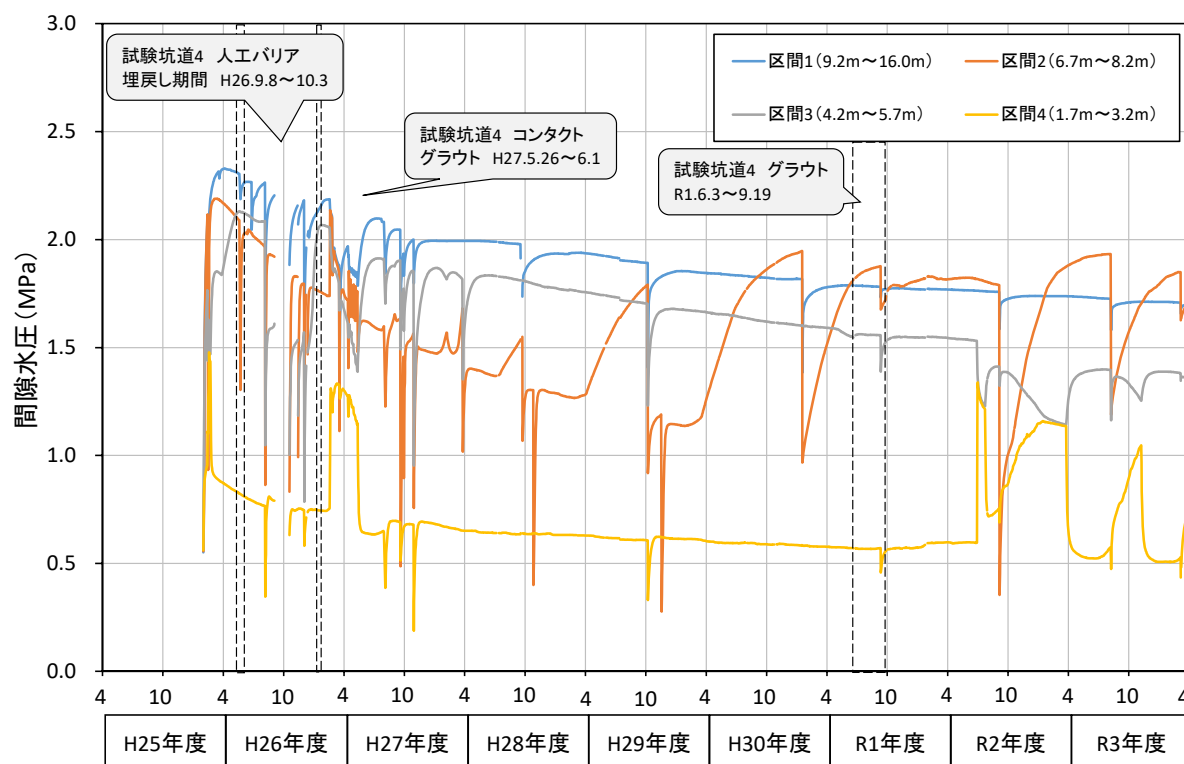


図 110 C07 における水圧モニタリング結果
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

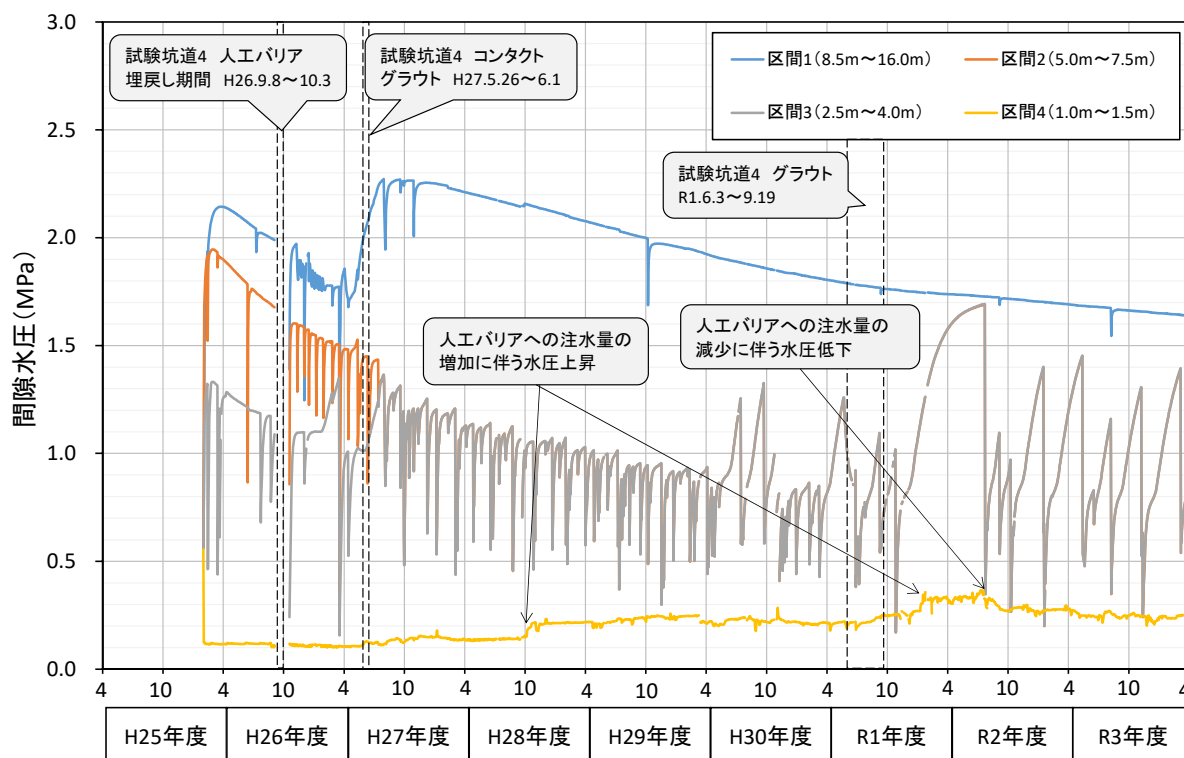


図 111 C08 における水圧モニタリング結果
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

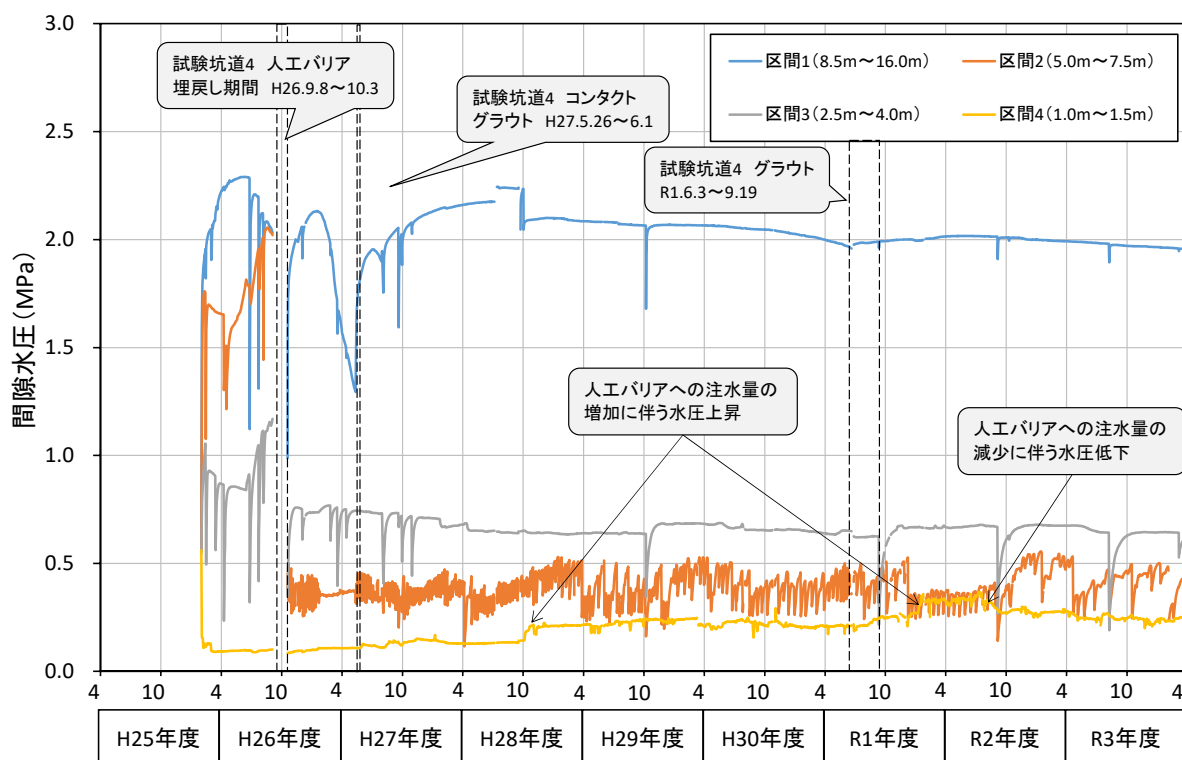


図 112 C09 における水圧モニタリング結果
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

試験坑道の掘削後、水圧の低下に伴い地下水中の溶存ガスが遊離した影響により、水質モニタリングの継続可能な箇所は限定されつつあります（図 113）。図 114 には一例として、C05 の区間 2 における電気伝導度（EC）、pH、酸化還元電位（Eh）の観測結果を示します。C05 では、地下水の EC は 1,600 mS/m 程度、pH は 7 程度、Eh は -140 mV ~ -300 mV 程度でした。これらの結果は令和 2 年度までの測定値とおおむね同様の傾向を示しており⁽¹⁰⁾、試験坑道周辺に分布する地下水の EC や pH には顕著な変化は生じていません。なお、Eh のモニタリング結果においては、一部のデータで電極の劣化や表面への汚れ・気泡の付着、遊離ガスによる地下水循環の停止などの影響が示唆されました。これらのデータは、「信頼性が劣る可能性のあるデータ」として示しています。信頼性の高いデータを取得するために必要な観測装置の定期的なメンテナンス（月 1 回程度のセンサーの異常有無の確認）も継続して行いました。

以上得られたデータは、令和 2 年度以降の必須の課題「人工バリア性能確認試験」における熱－水理－力学－化学（THMC）連成挙動の解析にお

いて、人工バリアの外側境界条件となる周辺岩盤中の水圧や水質条件の設定にも反映されます。今後も水圧・水質モニタリングを継続し、地下水の水質分布や水質の時間的な変化を評価していきます。

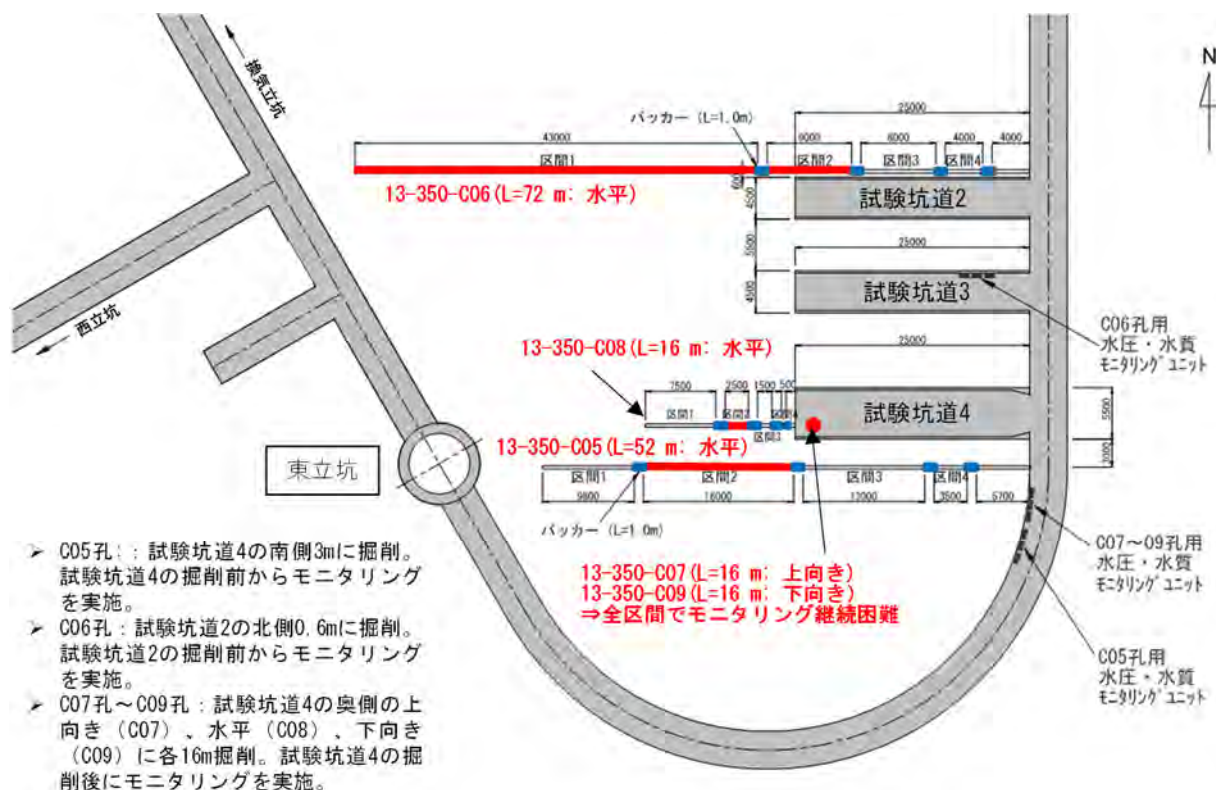


図 113 試験坑道 2 および試験坑道 4 周辺における水質モニタリング継続可能区間

各ボーリング孔のうち、水質モニタリングが継続可能な区間のみを赤色で示しています。

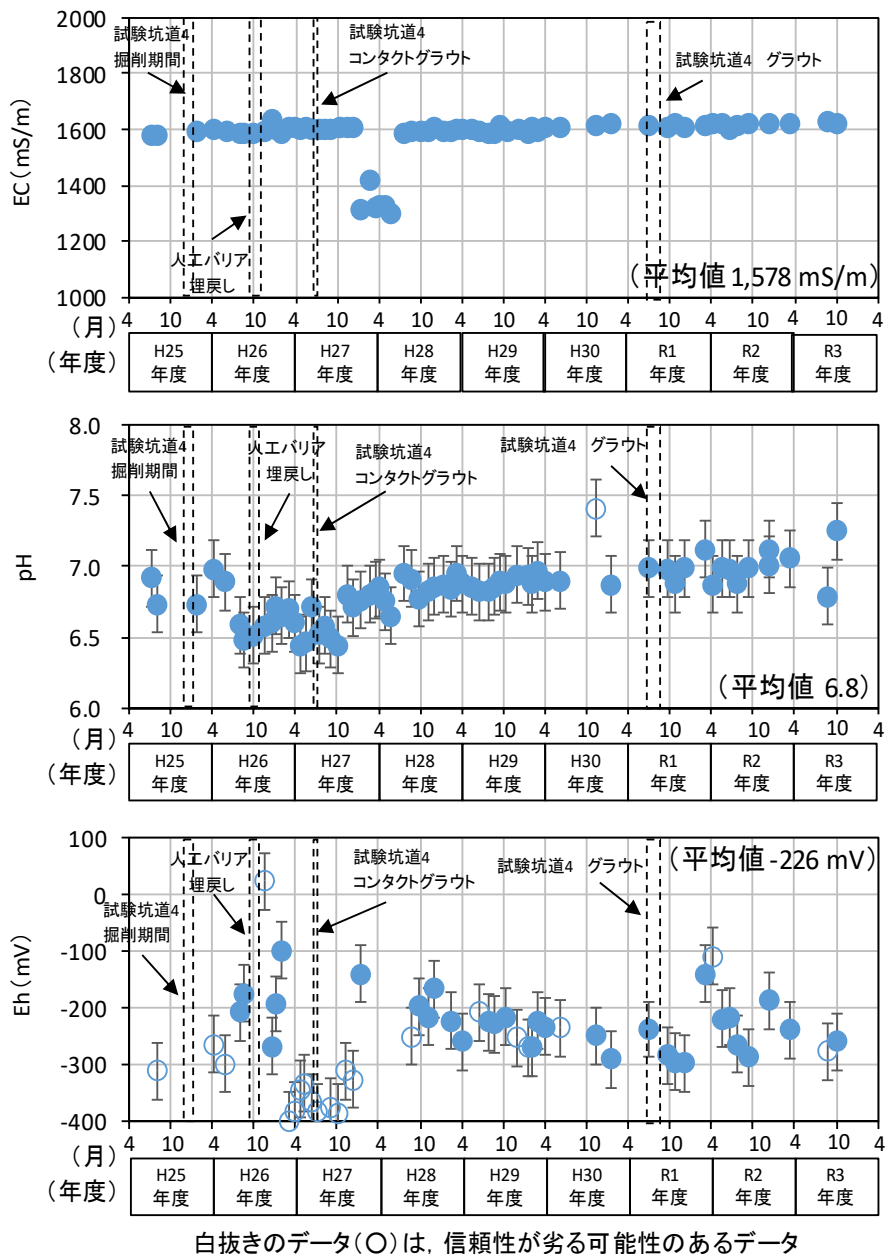


図 114 C05 の区間 2 における水質モニタリング結果

(3) 岩盤力学

平成 21 年度に東立坑の深度 160 m に設置した光ファイバー式地中変位計を用いて、岩盤変位の長期モニタリング性能を検証しています。計測結果の妥当性を検証するため、隣接する位置に、既に技術が確立されている電気式地中変位計を設置しています (図 115)。また、同時に支保工の安定性も確認するため、電気式の鋼製支保工応力計を設置しています (図 116)。地中変位計および鋼製支保工応力計の設置位置を図 117 に示します。

地中変位計測結果を図 118 に示します。光ファイバー式変位計は、計測値が逸脱せず、安定した計測値が得られていますが、電気式変位計は設置後 3 年程度で計測値が乱れはじめ、現時点では正常な計測ができなくなっています。これは、岩盤中の地下水がセンサー部に浸透することにより絶縁抵抗不良を起こすためと考えられます。次に、鋼製支保工応力計の計測結果を参照すると、季節変動と考えられる 10 MPa 程度の応力変化が計測されているものの、大きな計測値の逸脱はなく、安定した計測データが得られています（図 119）。このことから、長期的に岩盤や支保工のモニタリングを行う上では、地中の計測では光ファイバー式に優位性がありますが、鋼製支保工など、地下水が浸潤しないような構造物内では、電気式でも問題ないことが分かります。

掘削後約13年間の変位は、地中変位計で立坑壁面に最も近い区間No. 1で約4.9 mm縮む挙動を示しており、他区間に比べ変位量が多いことが分かります。また、他区間においても、No. 3を除き変位量は小さいが縮む挙動を示しており、平成27年度以降の変位は収束傾向にあることが分かります。このことから、立坑掘削後は、約5年間かけて徐々に圧縮方向に岩盤が1 mm程度変形し、その後変形が収束していくことが分かります。鋼製支保工応力計では、北側に位置するSS1において約155 MPaの応力を示しており、他の計測点に比べ応力が多いことが分かります。しかしながら、特段対策を施すほどの応力状態には達していないことが確認されています。また、掘削後もSS2の計測点を除き、全計測点で応力が増大傾向にあります。

今後もデータの蓄積を進め、立坑掘削による周辺岩盤および支保工の長期的な変形挙動をモニタリングするとともに、装置の健全性の確認を継続し、計測手法の信頼性を高めていく予定です。

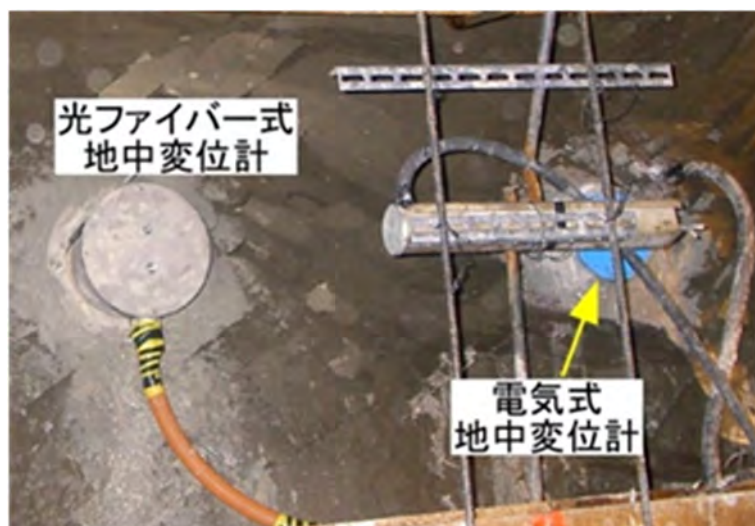


図 115 地中変位計設置状況写真



図 116 鋼製支保工応力計設置例

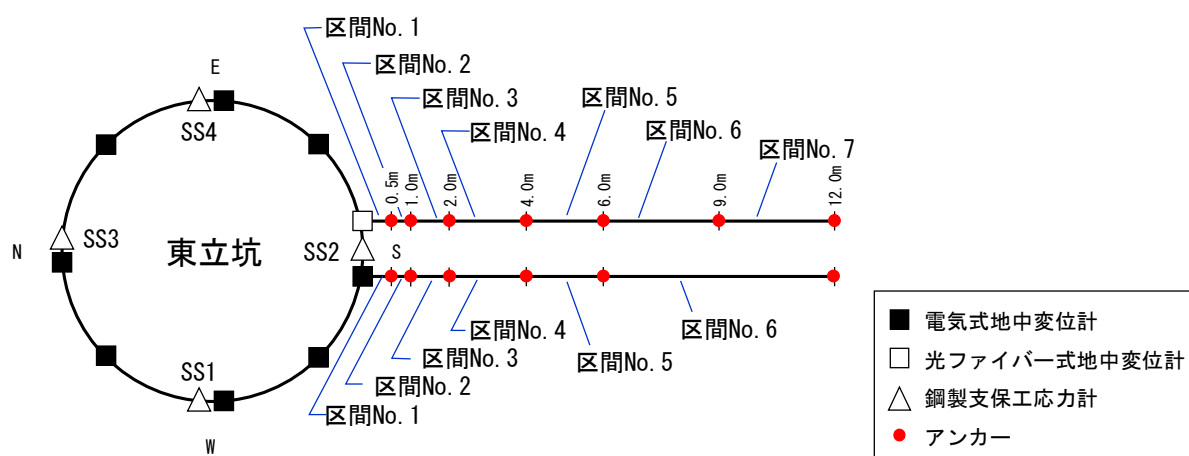
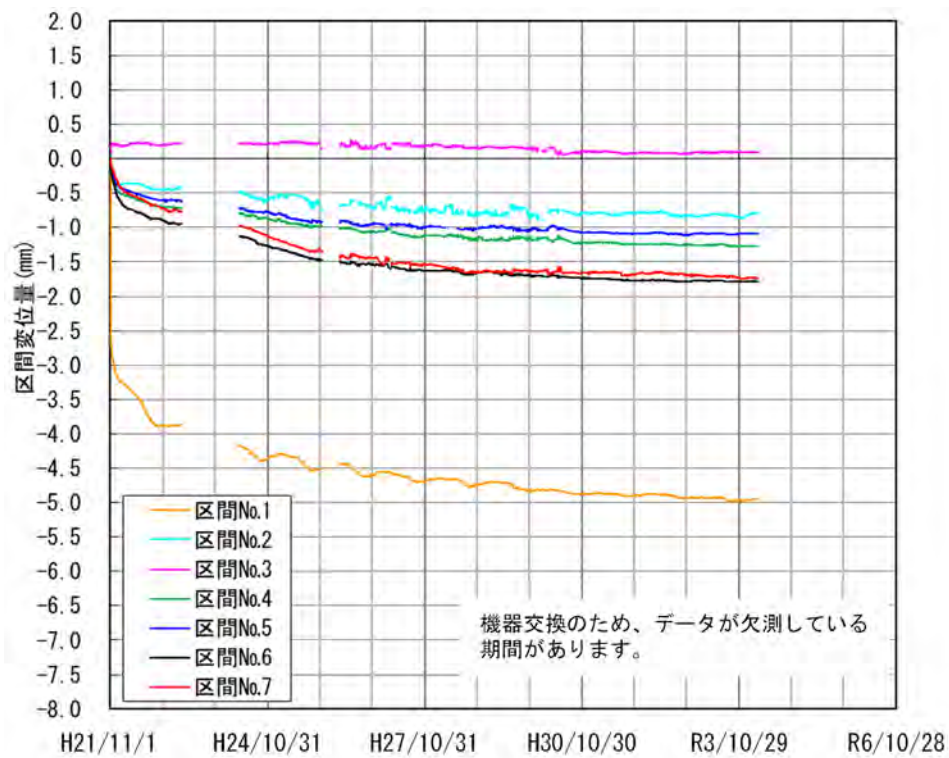
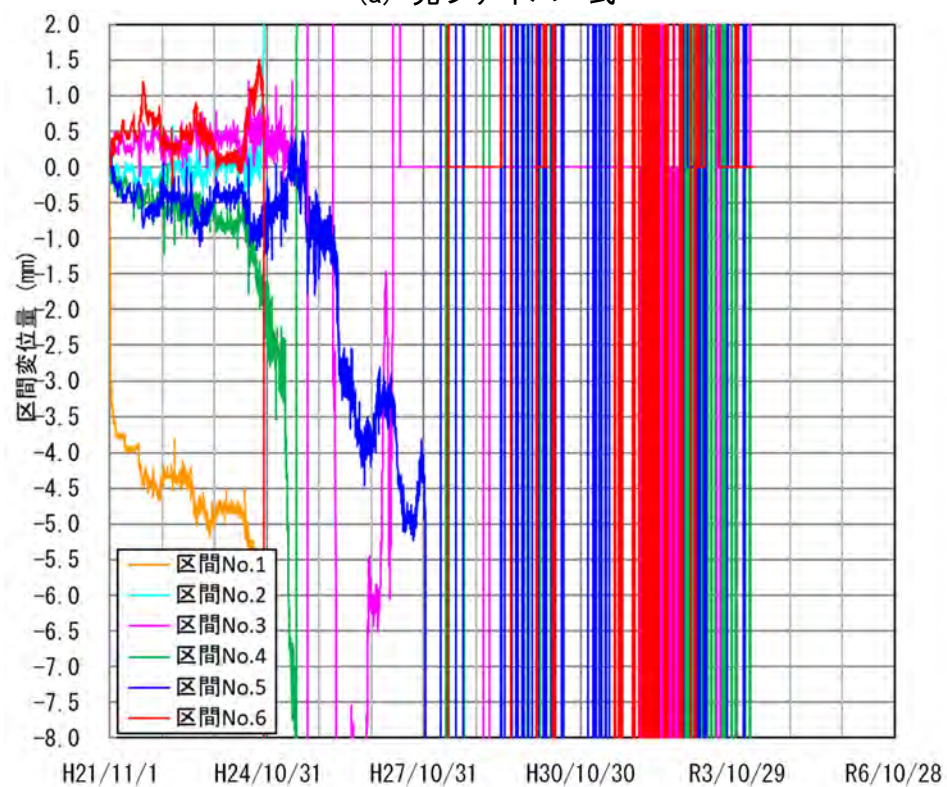


図 117 計測器設置位置図



(a) 光ファイバー式



(b) 電気式

図 118 地中変位計の計測結果

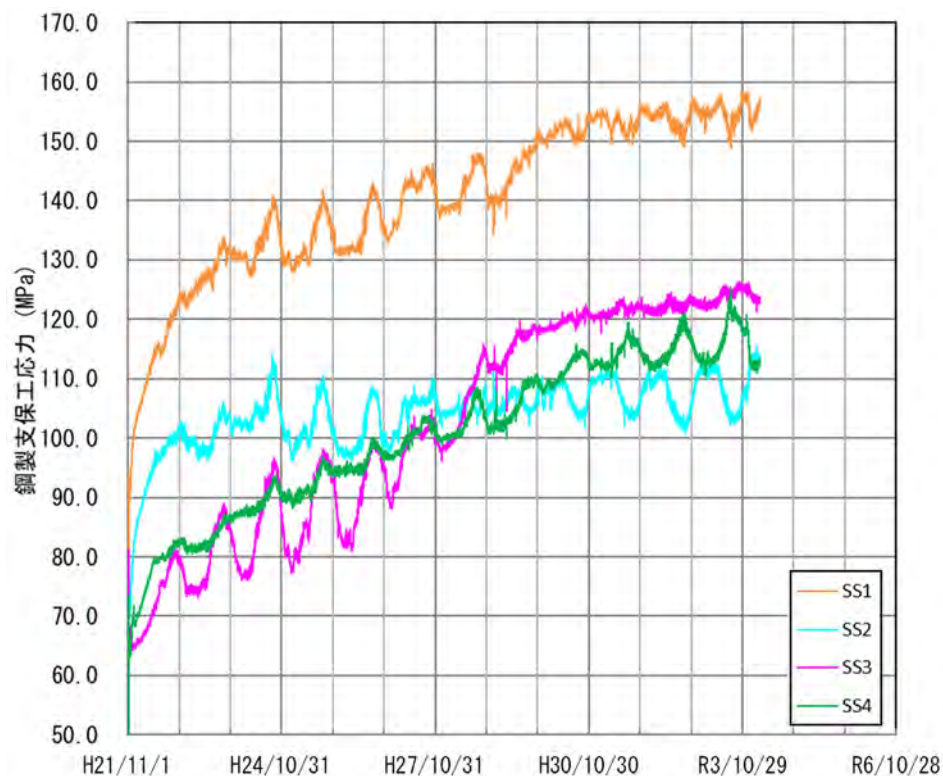


図 119 鋼製支保工応力計の計測結果

(4) 坑道掘削の影響に関する調査技術の開発

地表面から坑道掘削時の地下深部の岩盤や地下水の挙動をモニタリングする技術を確立することを目的として、立坑の周辺（換気立坑から半径 100 m 以内）に 9 台、東立坑の深度 140 m の接続部付近に 1 台、立坑周辺から 1 km 程度離れた HDB-8 孔近傍に 1 台の高精度傾斜計^{*80}を配置し、坑道掘削に伴う地表付近における岩盤の傾斜の変化を計測しています。令和 3 年度も、過年度までと同様の方法⁽⁸³⁾で計測データ（直交する 2 方向での傾斜角度の時系列データ）に含まれるノイズ成分を除去した後、計測した傾斜データと坑道掘削時の工程との対比を行いました。令和 3 年度は坑道掘削工事がなかったことから、得られた傾斜データの全体的な傾向として、傾斜量の変化は少ないことが確認されました。坑道掘削の影響を示すため、東立坑近傍にある PIN8 の傾斜量と傾斜方向および西立坑から北東方向へ約 1 km 離れた HDB-8 孔近傍の PIN10 の傾斜量を図 120 および図 121 に示します。傾斜方向は、掘削を実施した東立坑および西立坑

*80：通常の傾斜計が計測できる角度は約 3,600 分の 1 度であるのに対し、約 1 億分の 6 度の傾斜量を計測することができる非常に計測精度の高い傾斜計です。

の方向でした。また、掘削が終了した後は、傾斜変化はほぼありませんでした（図 120）。一方、PIN10（図 121）では、坑道掘削中および掘削終了後も、地表の傾斜はほとんど観測されませんでした。

これまでの計測データにより、高精度傾斜計によって地下深部の坑道の掘削に伴う地表付近での微小な傾斜量やその傾斜方向が検知できることを確認しました。今後も引き続き傾斜量および傾斜方向のモニタリングを継続するとともに、地下深部の岩盤の挙動との関係性を検討していきます。

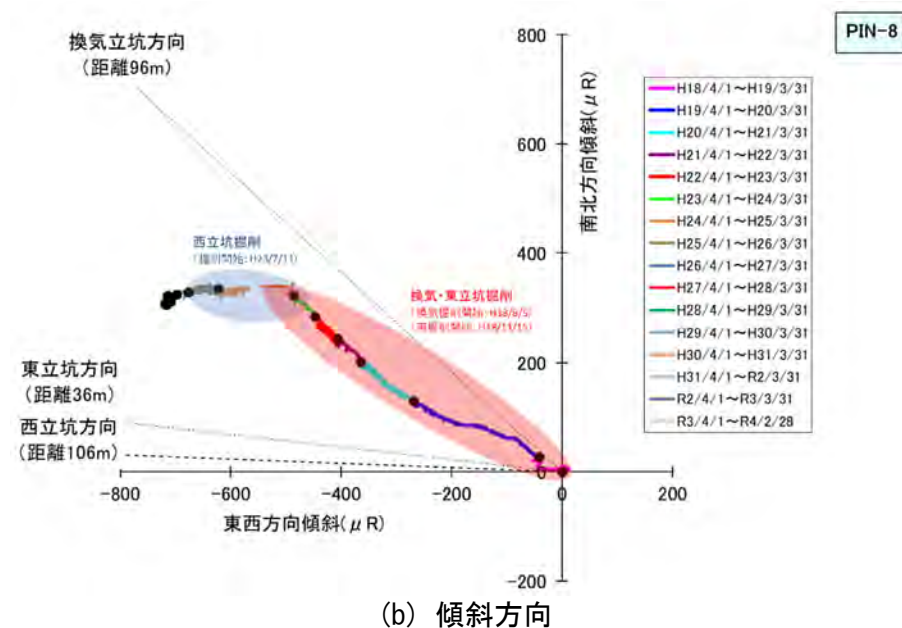
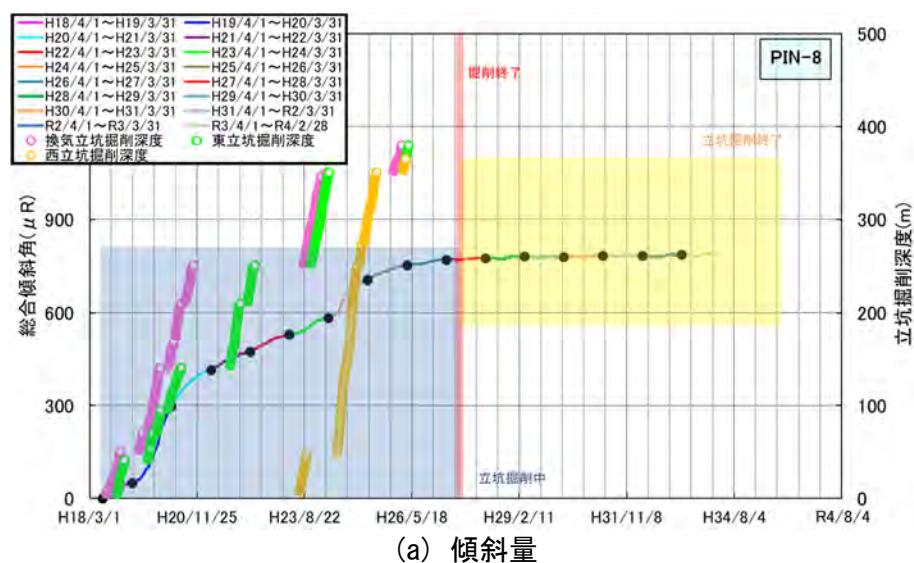


図 120 PIN8 の傾斜量および傾斜方向

グラフの縦軸の単位 μR (マイクロラジアン) は角度の単位で、1,000 μR が約 0.06° に相当します。

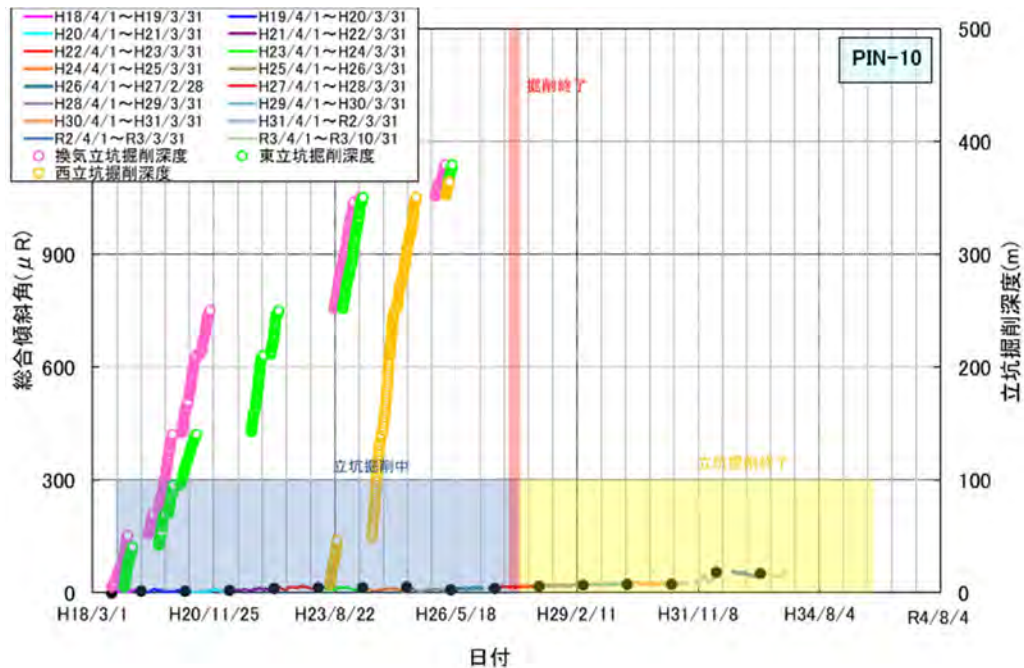


図 121 PIN10 の傾斜量

(5) 地震観測

施設設計の妥当性検証の一環として、地下施設内の 4 台の地震計と地表の 1 台の地震計で地震観測を実施しています。気象庁一元化震源データより作成した令和 3 年 4 月 1 日から令和 4 年 3 月 31 日までの幌延深地層研究センター周辺の震央分布を図 122 に示します。この期間中、気象庁の発表では、幌延町宮園で震度 1 以上の地震は 2 回発生しました（表 9）。これらの地震の地表および地下施設における観測波形を図 123 に示します。地下施設での揺れは地表に比べて小さいことが分かります。

地震に伴う地質環境特性の変化に関わるデータ取得のため、上幌延観測点（HDB-2）と地下施設での地震観測を継続します。

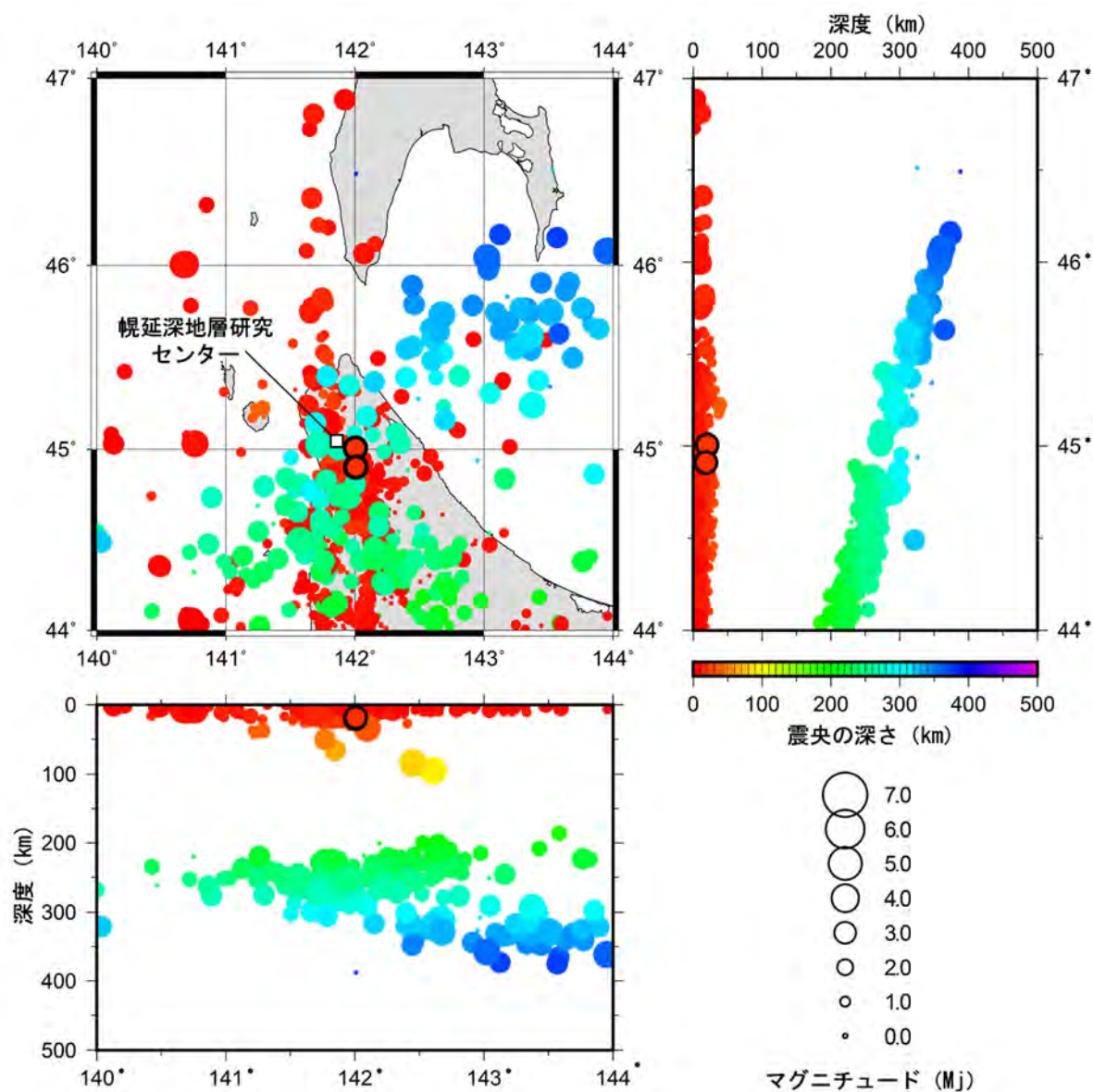


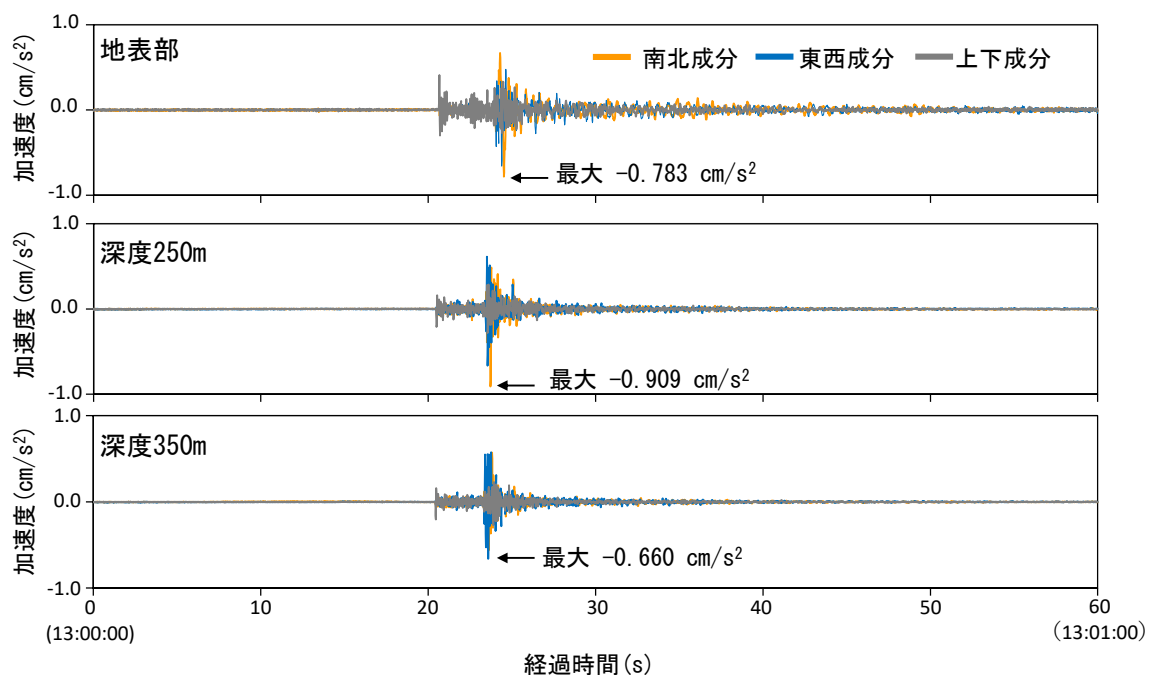
図 122 幌延深地層研究センター周辺の震央分布

表 9 幌延町宮園で観測された震度 1 以上の地震

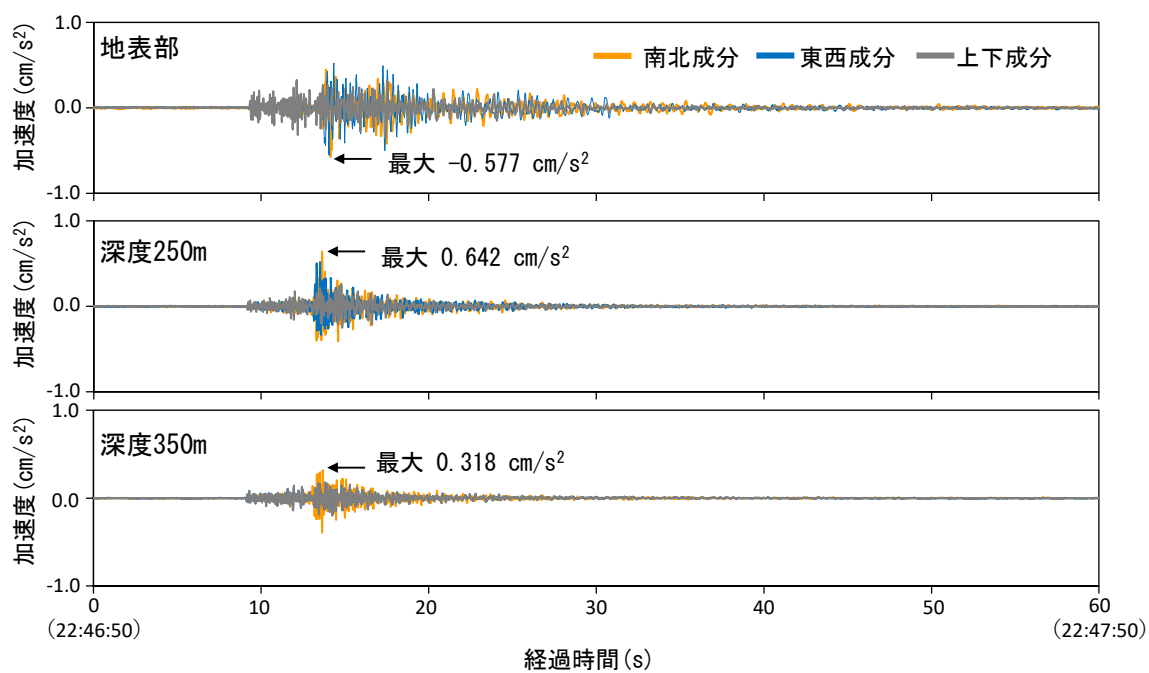
地震の発生日時	震央地名	緯度	経度	深さ	Mj ^{*81}	震度	
						幌延町 宮園	最大 震度
令和 4 年 1 月 25 日 13:00:17	宗谷地方 北部	45° 00.4′ N	142° 00.3′ E	20 km	2.6	1	1
令和 3 年 6 月 4 日 22:46:55	留萌地方 中北部	44° 54.0′ N	142° 00.4′ E	19 km	2.8	1	1

これらの地震の震央は図 122 に黒丸で示しています。

*81：気象庁マグニチュード（地震の規模を表す数値）です。



(a) 令和4年1月25日13:00:00から60秒間の観測波形



(b) 令和3年6月4日22:46:50から60秒間の観測波形

図 123 地表および地下施設で観測された地震の波形

8. 地下施設の管理

(1) 地下施設の整備

令和 3 年度は、試験坑道 1（図 5 参照）において、人工バリア性能確認試験の解体調査のための試験施工（4.1 参照）として、令和 2 年度に設置した試験体の取り出しおよびプラグの解体、撤去を行いました（図 124）。



(a) 試験体の取り出し



(b) プラグの解体・撤去

図 124 地下施設の整備状況

(2) 地下施設の維持管理

令和 2 年度に引き続き、維持管理業務として、地下施設の機械設備や電気設備の運転、保守および設備の更新（櫓設備、換気設備など）を行い、地下施設の安全確保に努めました（図 125）。



(a) 坑内換気設備の更新



(b) 東立坑スカフォードの更新

図 125 設備の点検および更新状況

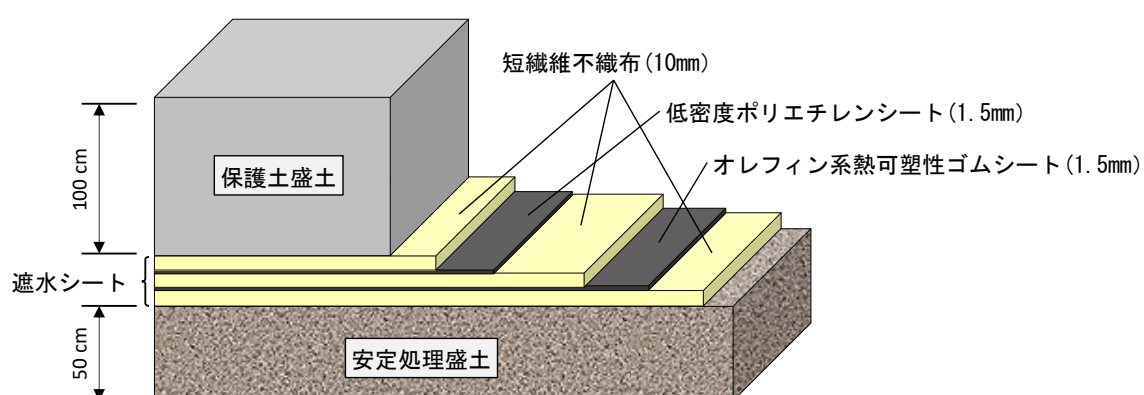
(3) 掘削土（ズリ）の管理

地下施設の建設により発生した掘削土（ズリ）には重金属などが含まれていますが、自然由来であることから土壤汚染対策法の適用外となっています。しかし、幌延深地層研究センターでは、周辺環境の保全に万全を期するため、土壤汚染対策法に準拠した管理を行っています。具体的には、対象となる物質が土壤汚染対策法に定める範囲内であることを確認するため、掘削土（ズリ）について建設現場における簡易分析と公的機関による詳細な分析（以下、公定分析）を実施し、同法に準じた適切な管理のもと掘削土（ズリ）置場へ搬入し、保管しています（図 126）。

掘削土（ズリ）置場は、土壤汚染対策法の遮水工封じ込め型に準じた二重遮水シート構造（図 127）となっています。



図 126 掘削土（ズリ）置場



※遮水シートの上に保護土盛土を行い、その上に掘削土（ズリ）が保管されています。

図 127 二重遮水シートの構造

(4) 排水の管理

地下施設からの排出水と掘削土（ズリ）置場に設置している浸出水調整池の浸出水については、硝酸性窒素処理設備、濁水処理設備、脱ホウ素設備、脱窒素設備および揚水設備から構成される排水処理設備（図 128）で処理を行っています。処理済排水は、排水基準値を超過していないことを確認した後、排水管路を通じて天塩川へ放流しています。

地下施設からの排水の公定分析結果については、9.1(2)に示します。



(a) 硝酸性窒素処理設備



(b) 濁水処理設備



(c) 脱ホウ素設備(1号機)



(d) 脱ホウ素設備(2号機)



(e) 脱窒素設備



(f) 揚水設備

図 128 排水処理設備

9. 環境調査

令和 2 年度に引き続き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実施しました。

9.1 排水量および水質調査結果

排水処理設備から天塩川へ放流している排水量について監視を行うとともに、排水処理前後の水質、天塩川の水質、浄化槽排水の水質について、調査を行っています。また、掘削土（ズリ）置場の周辺環境への影響を監視するため、清水川および掘削土（ズリ）置場周辺の地下水についても水質調査を行っています。

なお、水質の分析については、公的な分析資格を持つ民間の会社に委託しています。本調査の対象となっている排水系統と各水質調査の採水地点を図 129 に示します。

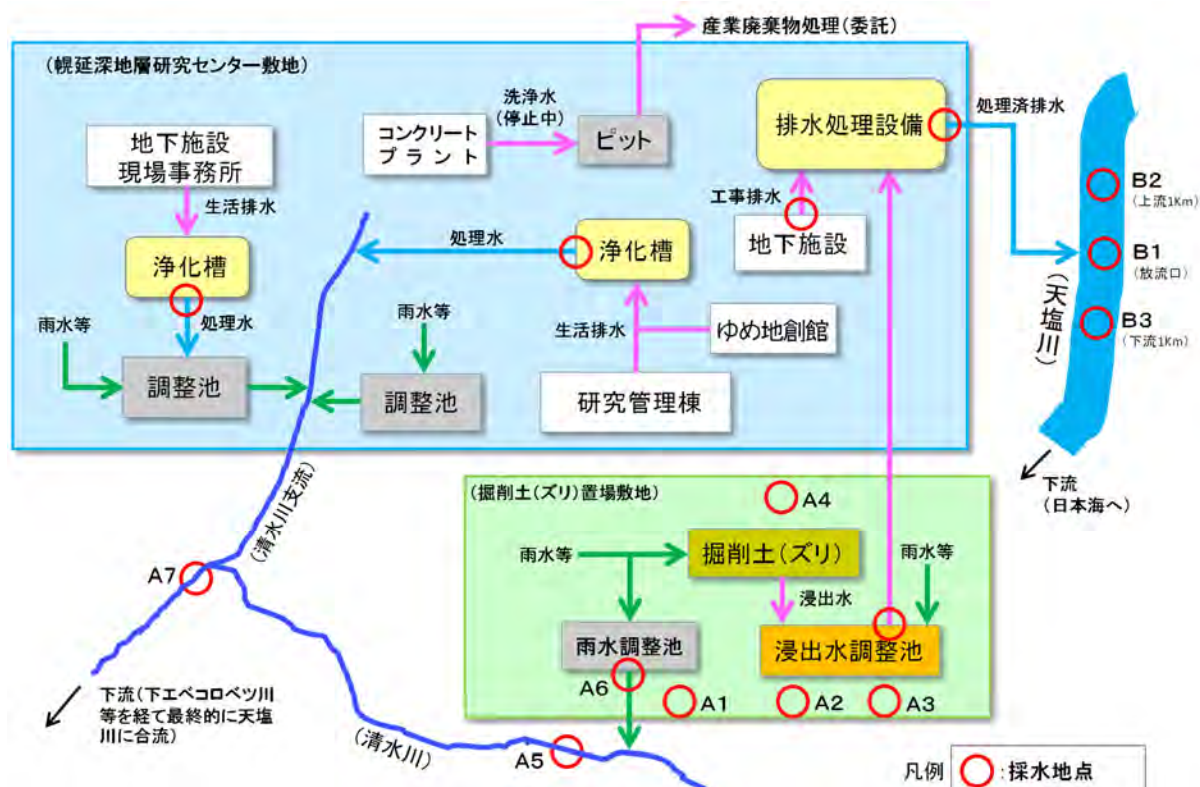


図 129 排水系統と各水質調査の採水地点

(1) 天塩川への排水量

地下施設からの排水水および掘削土（ズリ）置場の浸出水は、排水処理設備において処理を行った後、排水管路を通じて天塩川に放流しています。

令和3年度における天塩川への排水量は表10に示すとおりです。合計排水量は、43,891 m³であり、前年度同時期（52,301 m³）の約84%でした。日最大排水量は、融雪により増水した掘削土（ズリ）置場の浸出水を処理した4月の448 m³が最大値となっており、観測期間を通じて北るもい漁業協同組合との協定値（750 m³/日）を満足しています。また、月排水量および日平均排水量についても、掘削土（ズリ）置場の融雪水を多く処理した4月が最大となっており、月排水量が5,935 m³、日平均排水量が197.8 m³でした。

表 10 天塩川への排水量

年月	月排水量 (m ³)	日最大排水量 (m ³) ※1	日平均排水量 (m ³) ※2
令和3年4月	5,935*3	448*3	197.8*3
令和3年5月	3,436	282	110.8
令和3年6月	3,184	245	106.1
令和3年7月	2,545	220	82.1
令和3年8月	2,441	244	78.7
令和3年9月	2,865	246	95.5
令和3年10月	5,107	380	164.7
令和3年11月	4,315	345	143.8
令和3年12月	4,849	398	156.4
令和4年1月	2,472	249	79.7
令和4年2月	2,637	291	94.2
令和4年3月	4,105	357	132.4
合計	43,891	—	—
最大値	5,935	448	197.8

※1：北るもい漁業協同組合との協定値は750 m³/日

※2：月排水量を月の日数で除した値

※3：各項目の最大値

(2) 地下施設からの排水の水質調査結果

地下施設から排出される「立坑の原水」および「掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水」については、図130に示すとおり、濁水処理、脱ホ

ウ素処理および脱窒素処理（アンモニア性窒素）を行った後、「揚水設備における処理済排水」として排水管路を通じて天塩川に放流しています。また、「掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水」については、貯留時に硝化菌の働きによって生成される硝酸性窒素についても処理を行っています。これらの排水については、排水処理の前と後で定期的（原則1回/月）に水質調査を実施しています。

令和3年度における水質調査結果は、表11に示すとおり、排水基準を超える処理済排水はありませんでした。また、立坑および掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水についても、これまでの調査結果と同等となっています。

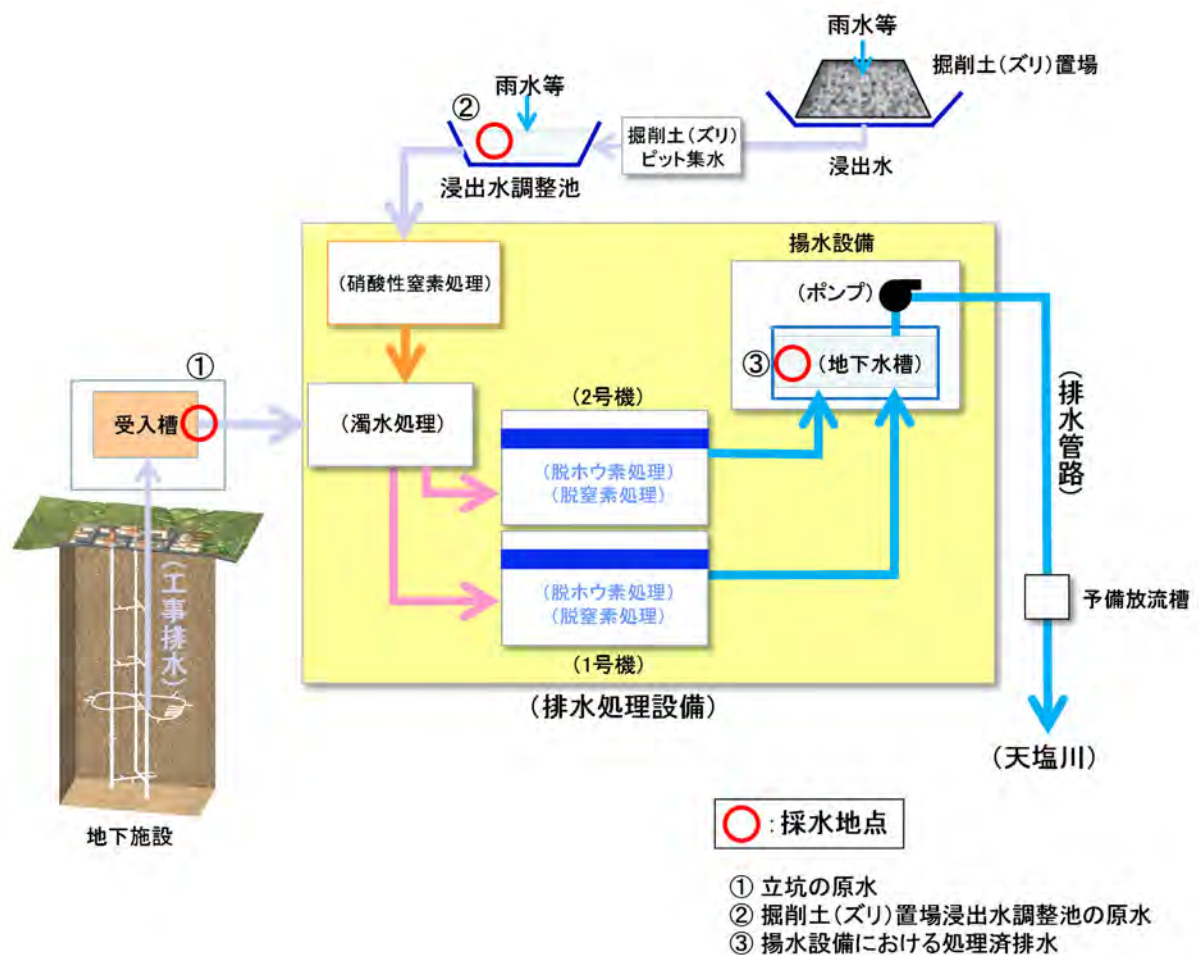


図 130 地下施設からの排水処理フローと採水地点

表 11 地下施設からの排水に係る水質調査結果

分析項目※1	採水地点※2	過年度	令和2年度	令和3年度	(参考値) 水質汚濁防止法 排水基準
		平成18年12月 ～令和2年3月	令和2年4月 ～令和3年3月	令和3年4月 ～令和4年3月	
カドミウム (mg/L)	立坑の原水	<0.01	<0.01	<0.01	0.03
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	<0.01	<0.01	<0.01	
	揚水設備における処理済排水	<0.01	<0.01	<0.01	
ヒ素 (mg/L)	立坑の原水	<0.01～0.08	<0.01	<0.01	0.1
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	<0.01～0.02	<0.01	<0.01	
	揚水設備における処理済排水	<0.01～0.02	<0.01	<0.01	
セレン (mg/L)	立坑の原水	<0.01～0.02	<0.01	<0.01	0.1
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	<0.01～0.04	<0.01～0.01	<0.01～0.02	
	揚水設備における処理済排水	<0.01	<0.01	<0.01	
フッ素 (mg/L)	立坑の原水	<0.8～3.5	<0.8	<0.8	8
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	<0.8	<0.8	<0.8	
	揚水設備における処理済排水	<0.8～1.6	<0.8	<0.8	
ホウ素 (mg/L)	立坑の原水	<0.1～160	69～79	71～79	10
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	<0.1～37	0.9～5.9	1.5～7.3	
	揚水設備における処理済排水	<0.1～3.0	<0.1～1.9	<0.1～0.5	
全窒素 (mg/L)	立坑の原水	0.41～117	68～81	59～79	120 (日間平均 60)
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	3.0～150	4.0～32	20～28	
	揚水設備における処理済排水	0.60～48	9.6～20	9.6～22	
全アンモニア (mg/L)	立坑の原水	0.12～110	39～61	37～59	—
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	0.12～22	0.17～1.1	0.17～1.2	
	揚水設備における処理済排水	<0.05～6.8	<0.05～1.7	<0.05～0.28	
pH	立坑の原水	7.5～9.5	8.1～8.3	8.1～8.2	5.8～8.6
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	6.7～8.7	7.2～7.6	7.2～8.6	
	揚水設備における処理済排水	6.9～8.6	7.5～8.2	7.5～8.1	
浮遊物質 (mg/L)	立坑の原水	4～580	10～49	8～24	200 (日間平均 150)
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	1～170	1～21	3～9	
	揚水設備における処理済排水	<1～9	<1～1	<1～3	
塩化物イオン (mg/L)	立坑の原水	20～4,300	3,100～3,600	3,300～3,700	—
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	10～1,500	29～150	37～240	
	揚水設備における処理済排水	38～4,700	1,400～3,300	1,300～2,900	

※1：主な分析項目を抜粋

※2：採水地点は図 130 参照

(3) 天塩川の水質調査結果

地下施設からの排水の放流先である天塩川の採水地点（図 131）において、定期的（原則 1 回/月）に採水し（図 132）、水質調査を実施しています。

令和 3 年度の調査結果は、表 12 に示すとおりです。浮遊物質について、北るもい漁業協同組合との協定値（20 mg/L）を超過した時期（4 月、

5月、12月) がありましたが、放流口の上流側 (B2) においても同程度の高い値を示しており、同日に採取した揚水設備における処理済排水の浮遊物質量は低い値 (<1 mg/L) であることから、地下施設からの排水の影響ではなく、融雪などに伴う自然的な要因によるものと考えられます。その他の調査項目については、協定値の範囲内であることから天塩川に影響を与えていないものと判断しています。



図 131 天塩川の採水地点

国土地理院地図 (<https://maps.gsi.go.jp/>) を加工し、採水地点などを追記



(a) 採水状況



(b) 採水試料

図 132 天塩川での採水状況

令和3年6月1日の実施状況

表 12 天塩川の水質調査結果

分析項目※1	採水地点※2		過年度		令和3年度	北るもい 漁業協同組合 協定値
			平成18年6月 ～平成18年11月 (放流前)	平成18年12月 ～令和3年3月 (放流後)	令和3年4月 ～令和4年3月	
ホウ素 (mg/L)	B1	表層	<0.02～0.04	<0.01～0.35	0.01～0.20	5
		中層	—	<0.01～3.5	0.01～0.98	
		深層	<0.02～3.35	<0.01～4.9	0.01～4.9	
	B2	表層	<0.02～0.04	<0.01～0.27	0.01～0.15	
		中層	—	<0.01～3.7	0.01～1.0	
		深層	<0.02～3.28	<0.01～5.0	0.01～4.8	
	B3	表層	<0.02～0.07	<0.01～0.28	0.01～0.27	
		中層	—	<0.01～2.5	0.01～1.0	
		深層	<0.02～1.03	<0.01～4.7	0.01～5.0	
全窒素 (mg/L)	B1	表層	0.37～1.06	0.11～2.2	0.24～0.85	20
		中層	—	0.15～2.2	0.27～0.84	
		深層	0.42～1.50	0.15～6.5	0.22～0.87	
	B2	表層	0.37～1.14	0.14～2.2	0.23～0.87	
		中層	—	0.15～2.3	0.26～0.86	
		深層	0.4～1.16	0.16～2.3	0.24～0.87	
	B3	表層	0.4～1.31	0.16～2.2	0.23～0.84	
		中層	—	0.11～2.3	0.24～0.87	
		深層	0.49～1.24	0.16～2.3	0.21～0.87	
全アンモニア (mg/L)	B1	表層	—	<0.05～0.83	<0.05～0.05	2※3
		中層	—	<0.05～0.92	<0.05～0.11	
		深層	—	<0.05～0.85	<0.05～0.06	
	B2	表層	<0.01～0.13	<0.05～0.89	<0.05～0.05	
		中層	—	<0.05～0.76	<0.05～0.14	
		深層	0.01～0.35	<0.05～0.85	<0.05～0.11	
	B3	表層	0.01～0.21	<0.05～0.89	<0.05～0.05	
		中層	—	<0.05～0.90	<0.05～0.12	
		深層	0.02～0.17	<0.05～0.96	<0.05～0.15	
pH	B1	表層	7.1～7.4	6.4～7.8	6.8～7.7	5.8～8.6
		中層	—	6.5～7.7	6.8～7.4	
		深層	7.0～7.6	6.5～8.0	6.8～8.0	
	B2	表層	7.1～7.4	6.6～7.9	6.7～7.7	
		中層	—	6.5～7.9	6.8～7.4	
		深層	7.2～7.6	6.6～8.0	6.8～7.9	
	B3	表層	7.0～7.6	6.6～7.9	6.8～7.6	
		中層	—	6.6～7.7	6.8～7.5	
		深層	7.1～7.4	6.6～8.0	6.9～8.0	
浮遊物質 (mg/L)	B1	表層	3～34	<1～360	<1～67	20
		中層	—	<1～390	<1～76	
		深層	6～86	<1～400	<1～68	
	B2	表層	3～36	<1～390	1～62	
		中層	—	<1～400	<1～69	
		深層	5～47	<1～460	<1～75	
	B3	表層	3～35	<1～420	<1～63	
		中層	—	<1～460	<1～68	
		深層	5～49	<1～650	<1～75	

※1：主な分析項目を抜粋

※2：採水地点は図 131 参照、表層（水面下 0.1 m 付近）、中層（塩水層と淡水層の間もしくは 1/2 深度）、深層（川床上 1 m 付近）

※3：北るもい漁業協同組合との確認により、放流口下流 1 km (B3) 地点の値

(4) 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果

地下施設の建設により発生した掘削土（ズリ）は、二重に遮水された掘削土（ズリ）置場で管理していますが、遮水された外側となる掘削土（ズリ）置場周辺への影響を監視するため、図 133 に示す採水地点において、観測用のボーリング孔から地下水を定期的（原則 4 回/年）に採水し（図 134）、水質調査を実施しています。

令和 3 年度における調査結果は、表 13 に示すとおり、これまでの調査結果と同等であることから、掘削土（ズリ）置場が周辺環境に影響を与えていないものと判断しています。

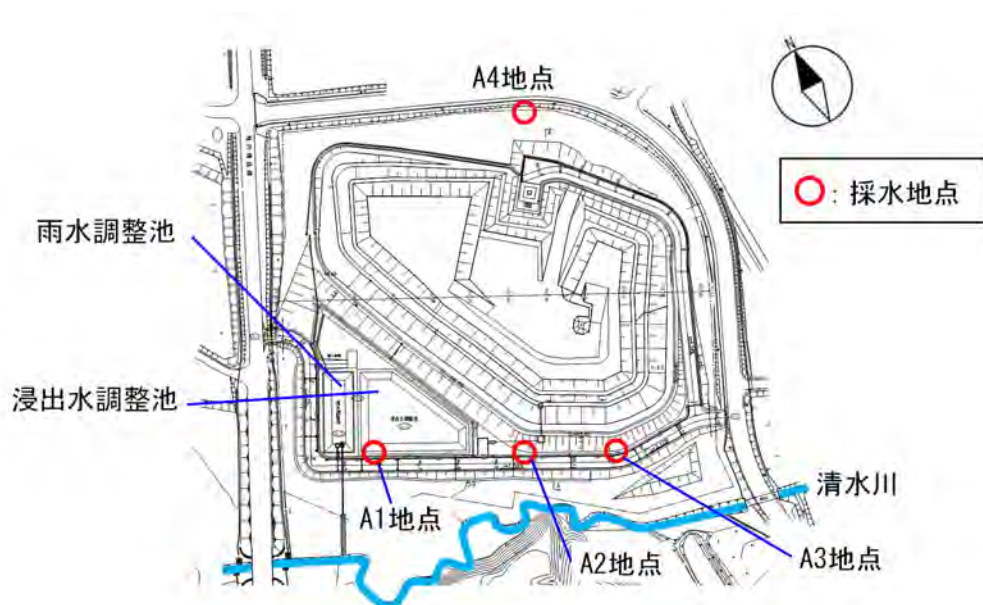


図 133 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水地点



(a) 採水状況（A3 地点）



(b) 採水状況（A4 地点）

図 134 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水

令和 3 年 5 月 11 日の実施状況

表 13 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果

分析項目※1	採水 地点※2	過年度		令和 3 年度			
		平成18年6月 ～平成19年4月 掘削土（ズリ） 搬入前	平成19年5月 ～令和3年2月 掘削土（ズリ） 搬入後	令和 3 年			令和 4 年
				5 月	8 月	11 月	2 月
カドミウム (mg/L)	A1	<0.001～0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	A2	<0.001～0.004	<0.001～0.002	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	A3	<0.001～0.003	<0.001～0.009	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	A4	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
鉛 (mg/L)	A1	<0.005～0.171	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	A2	<0.005～0.006	<0.005～0.007	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	A3	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	A4	<0.005～0.022	<0.005～0.007	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
ヒ素 (mg/L)	A1	<0.005	<0.005～0.012	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	A2	<0.005	<0.005～0.007	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	A3	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	A4	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
セレン (mg/L)	A1	<0.002	<0.002～0.005	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	A2	<0.002	<0.002～0.003	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	A3	<0.002	<0.002～0.005	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	A4	<0.002	<0.002～0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
フッ素 (mg/L)	A1	<0.1～0.3	<0.1～0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	A2	<0.1～0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	A3	<0.1～0.2	<0.1～0.3	<0.1	0.1	<0.1	<0.1
	A4	<0.1	<0.1～0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
ホウ素 (mg/L)	A1	19.8～50.7	0.40～63.0	21	28	24	24
	A2	1.29～43.5	0.43～23.0	8.6	37	17	23
	A3	12.5～34.0	0.18～41.8	4.0	21	8.8	14
	A4	<0.02～0.06	<0.02～0.47	0.03	0.04	0.04	0.03
pH	A1	6.9～7.2	6.1～7.9	6.5	6.6	6.6	6.6
	A2	4.6～6.3	3.7～6.9	6.5	6.7	6.8	6.8
	A3	6.8～7.3	4.2～7.4	6.5	6.7	6.5	6.6
	A4	5.4～6.6	5.0～6.7	5.1	5.2	5.1	5.2
塩化物イオン (mg/L)	A1	1,810～2,760	79～3,400	1,500	1,800	1,500	1,500
	A2	147～2,910	23～1,200	550	2,200	990	1,200
	A3	631～1,550	26～1,700	210	1,000	420	730
	A4	9.7～11.9	8.4～17.0	10	12	13	10

※1：主な分析項目を抜粋

※2：採水地点は図 133 参照

(5) 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

掘削土（ズリ）置場雨水調整池による清水川への影響がないことを確認するため、図 135 に示す清水川の上流（A5）と下流（A7）の 2 地点および掘削土（ズリ）置場雨水調整池（A6）において、定期的（原則 1 回/月）に採水を行い（図 136）、水質調査を実施しています。

令和 3 年度における調査結果は、表 14 に示すとおり、これまでの調査結果と同等であることから、掘削土（ズリ）置場が周辺環境に影響を与えていないものと判断しています。



図 135 清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水地点



(a) 清水川での採水状況



(b) 雨水調整池での採水状況

図 136 清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水状況

令和 3 年 5 月 11 日の実施状況

表 14 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

分析項目※1	採水地点※2	過年度		令和3年度
		平成18年6月 ～平成19年4月 掘削土（ズリ） 搬入前	平成19年5月 ～令和3年3月 掘削土（ズリ） 搬入後	令和3年4月 ～令和4年3月
カドミウム (mg/L)	A5	<0.001	<0.001	<0.001
	A6	<0.001～0.001	<0.001～0.002	<0.001
	A7	<0.001	<0.001	<0.001
鉛 (mg/L)	A5	<0.005	<0.005	<0.005
	A6	<0.005	<0.005～0.007	<0.005
	A7	<0.005	<0.005～0.008	<0.005
ヒ素 (mg/L)	A5	<0.005	<0.005～0.006	<0.005
	A6	<0.005～0.011	<0.005～0.015	<0.005
	A7	<0.005	<0.005～0.009	<0.005
セレン (mg/L)	A5	<0.002	<0.002～0.002	<0.002
	A6	<0.002	<0.002～0.003	<0.002
	A7	<0.002	<0.002	<0.002
フッ素 (mg/L)	A5	<0.1～0.1	<0.1～0.2	<0.1～0.1
	A6	<0.1～0.7	<0.1～1.1	<0.1～0.1
	A7	<0.1	<0.1～0.3	<0.1～0.1
ホウ素 (mg/L)	A5	0.03～0.25	<0.02～0.44	0.03～0.31
	A6	<0.02～0.09	<0.02～0.43	0.02～0.22
	A7	0.03～0.30	<0.02～0.42	0.03～0.44
pH	A5	6.4～7.1	6.0～7.9	6.4～7.4
	A6	5.8～7.4	5.7～9.1	6.4～8.5
	A7	6.5～7.0	6.1～7.8	6.4～7.3
浮遊物質 (mg/L)	A5	1～20	<1～66	1～65
	A6	12～173	<1～500	1～35
	A7	1～11	<1～270	1～55
塩化物イオン (mg/L)	A5	14.4～30.5	7.2～70	13～65
	A6	5.1～24.7	1.7～269	3.2～26
	A7	15.6～28.7	8.1～100	13～58

※1：主な分析項目を抜粋

※2：採水地点は図 135 参照

(6) 浄化槽排水の水質調査結果

研究所用地から排出される生活排水による環境への影響を監視するため、研究管理棟および地下施設現場事務所の浄化槽排水について、定期的（原則 1 回/4 週）に水質調査を実施しています。

令和 3 年度における水質調査結果は、表 15 に示すとおり、全ての項目において協定値を満足しています。

表 15 浄化槽排水の水質調査結果

分析項目	採水地点	過年度	令和 3 年度	北るもい 漁業協同組合 協定値
		平成 18 年 12 月 ～令和 3 年 3 月	令和 3 年 4 月 ～令和 4 年 3 月	
pH	研究管理棟	5.9～7.7	6.4～7.5	5.8～8.6
	地下施設 現場事務所	6.8～7.9	7.4～8.0	
生物化学的 酸素要求量 (mg/L)	研究管理棟	<0.5～17	1.3～16	20
	地下施設 現場事務所	<0.2～28	1.2～13	
浮遊物質 (mg/L)	研究管理棟	0.5～10	<1～3	20
	地下施設 現場事務所	<0.5～8	<1～3	
全窒素 (mg/L)	研究管理棟	6.6～52	11～31	60
	地下施設 現場事務所	0.2～45	0.5～5.4	
全リン (mg/L)	研究管理棟	0.5～5.0	1.3～3.3	8
	地下施設 現場事務所	<0.1～7.8	<0.1～0.7	
透視度 (cm)	研究管理棟	30	30	30
	地下施設 現場事務所	30	30	
大腸菌群数 (個/mL)	研究管理棟	0～30	0	3,000
	地下施設 現場事務所	0～2,100	0～1,600	

9.2 研究所用地周辺の環境影響調査結果

研究所用地周辺の環境影響調査として、図 137 に示す地点にて清水川の水質および魚類を対象に調査を実施しています。令和 3 年度における各調査結果は、これまでと比較して大きな変化がないことを確認しています。

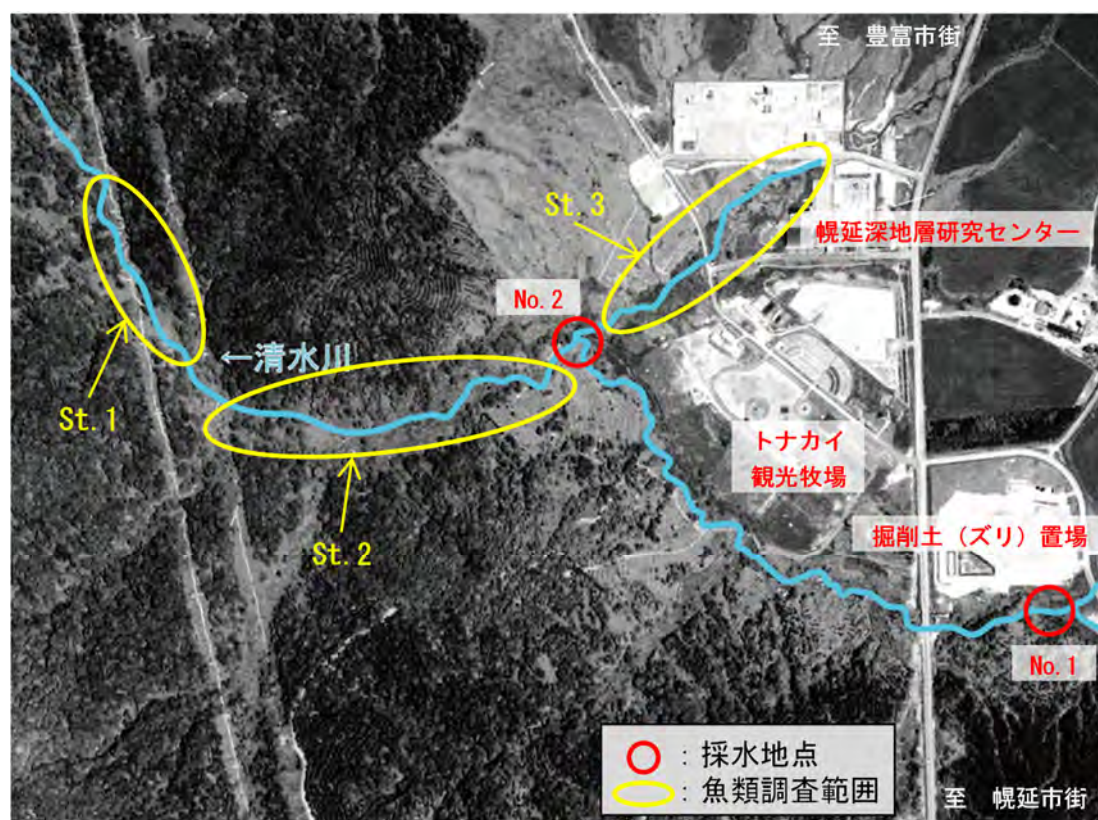


図 137 環境調査実施場所

(1) 清水川の水質調査結果

清水川の 2 地点において、定期的（原則 4 回/年）に採水を行い（図 138）、水質調査を実施しています。本調査は、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と別に、「水質汚濁に係る環境基準」に準拠して実施しているものです。

令和 3 年度における調査結果は、表 16 に示すとおり、これまでと比較して大きな変化がないことを確認しています。



(a) 採水状況 (No. 1)



(b) 流量観測状況 (No. 2)

図 138 清水川の水質調査

令和 3 年 6 月 1 日の実施状況

表 16 清水川の水質調査結果

分析項目※1	採水地点※2	過年度	令和 3 年度			
		平成14年8月 ～令和3年2月	令和 3 年			令和 4 年
			6 月	9 月	11 月	2 月
pH	No. 1	6.3～7.9	6.8	6.9	7.2	7.3
	No. 2	6.4～7.7	6.8	6.9	7.1	7.0
生物化学的 酸素要求量 (mg/L)	No. 1	<0.5～62	1.0	1.7	0.9	0.5
	No. 2	<0.5～10	1.1	4.6	1.3	0.7
浮遊物質 量 (mg/L)	No. 1	1～70	1	8	2	1
	No. 2	<1～69	2	8	1	1
溶存酸素量 (mg/L)	No. 1	6.6～13.9	10.6	7.4	11.1	12.6
	No. 2	5.5～12.5	9.8	6.9	10.1	10.7

※1：主な分析項目のみを抜粋

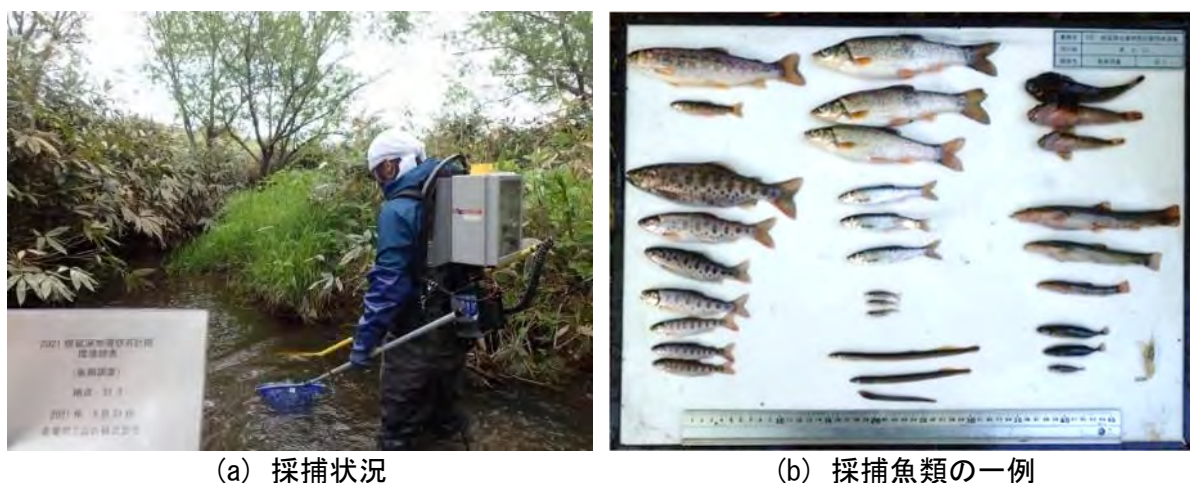
※2：採水地点は図 137 参照

(2) 魚類の調査結果

清水川において、定期的（原則 3 回/年（春・夏・秋））に生息魚類の調査を行っています（図 139）。調査は、図 137 に示す St. 1～St. 3 の 3 箇所で行っています。

令和 3 年度における調査結果は、これまでと大きな変化は認められませんでした。重要種としては、表 17 に示すとおり、スナヤツメ北方種、ヤチウグイ、エゾウグイ、エゾホトケドジョウ、サクラマス（ヤマメ）、

エゾトミヨ、ハナカジカの7種が確認されました。



(a) 採捕状況

(b) 採捕魚類の一例

図 139 生息魚類調査
令和3年5月31日の実施状況

表 17 確認された重要種（魚類）

目	科	種	選定根拠※1						
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
ヤツメウナギ	ヤツメウナギ	スナヤツメ北方種			VU		希		
コイ	コイ	ヤチウグイ			NT	Nt			
		エゾウグイ				N			
	ドジョウ	エゾホトケドジョウ			EN	En			
サケ	サケ	サクラマス（ヤマメ）			NT	N	減		
トゲウオ	トゲウオ	エゾトミヨ			VU	Nt			○
カサゴ	カジカ	ハナカジカ				N			

※1：重要種の選定根拠

- ①：「文化財保護法」（昭和25年 法律第214号）に基づく天然記念物および特別天然記念物
 - ②：「絶滅のおそれのある野生動植物の種の保存に関する法律」（平成4年 法律第75号）に基づく野生動植物種
 - ③：「環境省レッドリスト2020【汽水・淡水魚類】」（環境省2020年）の記載種
EN：絶滅危惧ⅠB類 VU：絶滅危惧Ⅱ類 NT：準絶滅危惧
 - ④：「北海道レッドリスト【魚類編（淡水・汽水）】改訂版（2018年）」（北海道 平成30年）の記載種
En：絶滅危惧ⅠB類 Nt：準絶滅危惧 N：留意
 - ⑤：「日本の希少な野生水生生物に関するデータブック（水産庁編）」（日本水産資源保護協会 1998年）の記載種
 - ⑥：「緑の国勢調査－自然環境保全調査報告書－」（環境庁 昭和51年）に基づく選定種
 - ⑦：「第2回自然環境保全基礎調査報告書（緑の国勢調査）」（環境庁 昭和57年）に基づく選定種
- ：調査対象種
- なお、③については、レッドリストの更新に伴い出典が変更となっている。

10. 安全確保の取り組み

安全確保の取組みとして、直営作業、請負作業、共同研究作業においては、作業の計画段階からリスクアセスメント評価を実施し、安全対策の妥当性の確認や改善に努めました。

その他、定期的な安全パトロールを実施し、現場の安全確認や改善などに努めました（図 140）。

さらに、新規配属者や請負作業・共同研究作業の責任者などに対して安全教育を実施した他、全国安全週間などの機会を捉えて、従業員のみならず請負企業も含めた安全行事に積極的に取り組むなど、安全意識の高揚に努めました（図 141）。



図 140 安全パトロールの状況
令和4年2月10日の実施状況



図 141 安全行事（安全大会：令和3年7月1日）の状況

11. 開かれた研究

幌延深地層研究計画で実施する地下深部を対象とした研究は、国内外の大学・研究機関との共同研究や研究協力をはじめ、広く関連する専門家の参加を得て進めています。令和 3 年度に実施した主な研究協力は以下のとおりです。

11.1 国内機関との研究協力

東京大学

地下深部の地下水は、一般に酸素が消費されることで還元性になっており、幌延では微生物活動による二酸化炭素還元反応により強還元性が維持されています。一方で、地下施設から掘削された一部のボーリング孔では、酸素の無い環境にも関わらずメタン酸化機能を持つ微生物の存在が明らかにされていきました。本共同研究では、地下深部の強還元雰囲気において進行するメタン酸化反応機構の解明を目的として、実験室内において原位置の水質・水圧を模擬したメタン酸化微生物の培養試験を行いました。その結果、地下水中の懸濁物^{*82}に含まれる 3 価の鉄がメタンの酸化剤として機能していることが分かりました。このような酸化剤が地下深部に存在する要因の 1 つとして、ボーリング掘削時の人為的影響が考えられます。高レベル放射性廃棄物の地層処分において閉鎖後の処分場坑道周辺の酸化性環境は、周辺母岩中の鉱物との反応などにより本来の還元性に戻ると考えられていますが、本共同研究で得られた知見は、この処分場閉鎖後の回復過程についてより正確な理解に繋がるものです。

東海大学

本共同研究では、幌延深地層研究センターにおいて実施された調査・研究から得られた成果を安全評価へフィードバックすることを通じて、堆積岩を対象とした具体的な地質環境に即した安全評価手法について検討することを目的としています。令和 3 年度は、幌延深地層研究センターで実施されたシナリオ解析、モデル開発、および物質移行評価のそれぞれに関連する研究成果を整理するとともに、これらの成果の統合を通じて、

*82：水中に浮遊して溶解しない物質の総称です。浮遊物質とも呼ばれます。

堆積岩を対象とした安全評価の考え方、評価プロセス、留意すべき点などについて分析を行いました。

また、堆積岩の亀裂内で実際に生じる物質移行挙動を理解するために、稚内層中の亀裂を対象に実施したトレーサー試験から得られた情報を用いて、物質移行モデルの開発と解析を実施しました。解析ではパルスソース（短期間トレーサーを注入する条件）およびコンスタントソース（試験中常に一定濃度のトレーサーを注入する条件）を基に揚水孔での破過曲線^{*83}を推定する解析を行い、実測値と整合させることで、直接測定することができない未知の物質移行特性を評価しました。この結果、稚内層中の亀裂については、これまで一般的に用いられてきた平行平板亀裂モデル^{*84}の適用性が低いこと、さらに亀裂内の移行経路の不均質性を表現するために、移行経路の中に地下水流動が速い領域と遅い領域が存在することを仮定したモデルを適用することにより解析結果がより実測値と整合する傾向にあることが確認されました。今後、このような知見を安全評価へ反映させるための方法論について詳細に検討していく予定です。

東京工業大学、サンコーコンサルタント

掘削損傷領域の物理探査による調査の高精度化を目的として共同研究を実施しました。弾性波トモグラフィ調査で取得されたデータを解析する際に、近年着目されているスパースモデリングという手法を適用することで高精度化を行いました。これまでに 250m 調査坑道で取得された弾性波トモグラフィの測定データを用いて、開発した解析手法の検証を行いました。数値モデルを用いた解析性能評価では、スパースモデリングを用いることで既存の手法より高精度な再現結果を取得することができました。一方で、実データを用いた解析では、データ取得の際のノイズの低減や解析時にノイズを除去する必要があることが明らかになりました。

名古屋大学

炭酸カルシウムのコンクリーション化による、地下空洞掘削影響領域の水みちとなる割れ目や透水性空隙の自己シーリングに関する研究を行

*83：破過曲線とは、トレーサーの濃度の時間変化を示した図のことをいいます。

*84：岩盤中の亀裂が、2枚の平行な板で構成されると仮定したモデルです。

いました。この研究は、地下水中の重炭酸イオン (HCO_3^-) との反応により形成される炭酸カルシウムの反応・沈殿（自己シーリング）作用（コンクリーション化）に着目しています。重炭酸イオンと反応させる材料は、開発中のコンクリーション化充填材と地下環境の空洞維持に不可欠であるコンクリートからの溶出カルシウムイオンの 2 つです。コンクリーション化による掘削損傷領域などの水みちとなる割れ目や透水性空隙の自己シーリングプロセスについて調査・解析を行います。この自然環境下での自発的コンクリーション化現象によって、プラスの長期的バリア機能が期待されます。

令和 3 年度は、令和 2 年度に設置したコンクリーション化充填材を充填したボーリング孔周辺での透水性の測定を継続するとともに、測定終了後にオーバーコアリングを行いました。その結果、掘削損傷領域の透水性が約 1 年で 2 オーダー程度低下したことを確認するとともに、オーバーコアリングしたコアの元素マッピングなどの分析からコンクリーション化充填材のカルシウムが岩盤の微細な亀裂や空隙にも浸透し、炭酸カルシウム（カルサイト）として充填することで、水みちとなる亀裂をシーリングしていることが分かりました。

京都大学、東北大学

高レベル放射性廃棄物に含まれる長半減期核種である 3 価アクチノイドは、天然には存在しないため、堆積岩地域の地下深部における 3 価アクチノイドの挙動の理解をするためには、3 価アクチノイドと挙動が似ているランタノイド^{*85}の挙動を調べるのが有効になります。本研究では、3 価アクチノイドであるアメリシウム (Am) やキュリウム (Cm) の挙動を明らかにするため、ランタノイドであるランタン (La)、サマリウム (Sm)、ユウロピウム (Eu)、ホルミウム (Ho) などを用いて試験を行っています。令和 3 年度は、地下水に含まれる腐植物質であるフミン酸に着目し、放射線によるフミン酸の分解反応がランタノイドの岩石表面への収着挙動に与える影響について調べるための室内試験を実施しました。放射線を照射していないフミン酸の存在下では、ランタノイドはフミン酸と錯

*85：ランタノイドは、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 元素の総称です。

体^{*86}を形成することにより、岩石への収着能は低下しますが、放射線（ガンマ線）の照射によりフミン酸が分解されると、岩石へ収着するランタノイドが増加することが確認されました⁽⁸⁴⁾。このことから、高レベル放射性廃棄物の廃棄体の近傍ではガンマ線によるフミン酸の分解により、岩石に収着するランタノイドおよび 3 価アクチノイドの割合が大きくなることが考えられます。

地下水中のウランやランタノイドなどの微量元素と微小な物質（有機物・微生物・コロイド）との相互作用に関わる現象の理解の向上のため、これまでに、250m および 350m 調査坑道から得られた地下水試料に微量元素を添加する実験を実施してきています。添加後の地下水試料をフィルターでろ過し、ろ液およびフィルターを分析することで、地下水中に微量に存在する有機物などとの相互作用を調べています。令和 3 年度は、これまでに得られた実験結果を取りまとめました⁽⁸⁵⁾。その結果、ランタノイドは、幌延の地下水中ではリン酸塩を形成する傾向が強いことが分かりました。このことから、高レベル放射性廃棄物から海成堆積層の地下水中に溶出する 3 価アクチノイドの溶解度は、リン酸塩により規定されることが示唆されます。本研究は、日本学術振興会の運営する科学研究費助成事業、基盤研究(B)「深部地下水環境での長半減期核種の移行を支配する物質の解明」の助成を受けて実施しています。

京都大学

高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全性を確保するための 1 つの要件として、長期的に地下水流動が緩慢であることを示すために、水理学的な指標のみではなく、化学的な指標から地下水水質の形成プロセスを把握し、それに基づいた地下水流動状態の理解が試みられています。幌延町には海成堆積岩が広く分布し、地下深部には海水が変質した化石海水が分布しています。この化石海水の塩化物イオン濃度は海水の半分以下まで低下し、酸素・水素同位体比も海水の値から変化しており、水質の変化の詳細な過程については明らかではありませんでした。本共同研究では、地層の堆積時の圧密排水による間隙水の上方移動や鉱物の相変

*86：有機物と金属が配位結合や水素結合することで形成した化合物の総称です。

化といった堆積過程を模擬した一次元のモデリングにより、地下水の塩化物イオン濃度と酸素・水素同位体比の時空間変化を推定することで、本地域に分布する化石海水の水質形成メカニズムについて検討しました。その結果、本地域の深層地下水の水質は、下位層からの圧密排水により上昇した間隙水が生物起源シリカの相変化の影響を受けたことで形成されたものとの理解が確認されました^(86、87)。

岩盤の亀裂内における鉱物の析出による、岩盤の透水性の変化の調査を目的として共同研究を実施しました。令和2年度と同様に、350m調査坑道において、坑道壁面から約1m掘削したボーリング孔を用いた炭酸水の連続注入を実施しました。令和3年度は、炭酸カルシウムの析出をさらに促進させるために、炭酸水に加えてセメント含有水を注入しました。調査終了後、実験で使用したボーリング孔をオーバーコアリングし、炭酸水注入位置周辺の岩石試料を採取しました。

幌延地圏環境研究所

両機関の試験設備を活用した研究協力として、堆積岩の地下深部の微生物の生態系の把握および地下施設の建設に伴う微生物生態系への影響などの調査を目的として、これまでに地下施設を利用して微生物に関するデータを取得してきました。令和3年度は、幌延町の地下深部に存在する微生物群集の構造を規定する要因を明らかにするために、これまでに地下施設から掘削されたボーリング孔を利用して得られた微生物群集に関するデータについて、地下水の水質との関連性について統計手法を用いた解析的検討を実施しました⁽⁸⁸⁾。その結果、異なる採水地点において見られる微生物群集の違いは、採水深度や地下水の電気伝導度、溶存イオンなどの水質と関連性を持つことが分かりました。このことから、地下施設周辺の微生物群集の構造を規定する一因は、化石海水の希釈である可能性が示唆されました。

産業技術総合研究所

陸域から海域までの地質データを統合的に整備した三次元地質環境モデルとそれを使った地下水流動解析の結果を検証するためのデータの取

得方法の高度化を目的として、浜里地区の地下水調査孔において水位・水質などの水文地質データの取得を継続しています。令和 3 年度においても、浜里地区に設置された複数の地下水調査孔（DD-1～4 孔）において、孔内水位観測を孔内投げ込み型の小型水位計を用いて行いました。なお、令和 3 年度に幌延町沿岸部において海上物理探査を行う計画でしたが、他の地域での実施となりました。

電力中央研究所

地下施設建設時に周辺地質環境の初期状態と建設に伴う変化を観測し、施設建設に関わる影響領域の空間分布とその経時変化、変化のプロセスに関わる基礎的知見を得ることが重要であることから、地下施設建設時の坑道掘削影響領域の調査技術の高度化を図ることを目的として、継続的に共同研究を実施してきました。令和 3 年度は令和 2 年度までに引き続き、坑道掘削に伴う周辺岩盤への力学的な影響を把握するための調査として、140m および 250m の調査坑道において比抵抗トモグラフィを行いました。また、得られた物理探査の結果を検証するために、140m 調査坑道において実施した乾式ボーリング掘削により得られたコア試料を用いて飽和度を測定しました。その結果、坑道壁面から約 2 m の範囲では岩石の飽和度は約 95%であり、坑道掘削直後の計測値と同程度の値が得られました。

これまでに坑道周辺の地下水の飽和度の違いに着目した気液二相流に関する数値解析を実施し、地下水の不飽和領域の形成要因や坑道中の酸素が岩盤中へ侵入する要因について検討してきました^(89、90、91)。令和 3 年度は、多量の溶存メタンが含まれる地層における地下施設の建設に伴う不飽和領域の三次元分布を推定する手法の例示を目的として、幌延深地層研究センターの地下施設の掘削工程を反映した 10 年間の二相流解析を実施しました⁽⁹²⁾。その結果、地下施設からの地下水と溶存ガスの湧出量の解析結果は、それぞれの観測値と近い値が得られ、数値計算はおおむね妥当であったと判断されました。坑道掘削に伴う飽和度分布については、各調査坑道における観測結果と整合的な結果が得られ、定性的な観点ではおおむね妥当な解析結果が得られました。

また、地下水中にコロイドが存在する場合、岩石への収着性が低いコロイドが放射性核種を収着した状態で移行することにより、放射性核種の移行が促進される可能性があります。その影響を定量的に評価するためには、放射性核種の収着対象となる地下水中のコロイド種を明確にするとともに、対象となるコロイド種への放射性核種の収着挙動を評価する必要があります。本研究では、地下水中の無機コロイドを対象とし、塩濃度の高い地下水中に安定に存在するコロイド種に関する検討を実施し、コロイドへの放射性核種の不可逆的な収着挙動について検討します。令和3年度は、令和2年度に採取した地下水中のコロイド濃度の経時変化を調べ、コロイド濃度が時間とともに減少していることが確認されました。このことから、一部のコロイドは地下水の採水による人為的な影響により新たに生成したものであり、原位置の地下水中では安定的に存在していない可能性が示唆されました。また、採水後にコロイド濃度が安定した地下水試料に微量元素を添加し、地下水中のコロイドへの収着の影響を確認したところ、ほとんど影響が見られませんでした。このことは、原位置の地下水に存在するコロイド濃度が低いため、収着による影響が小さいことが要因として考えられます。今後は、さらに室内試験を実施し、放射性核種の不可逆的な収着挙動について検討を行います。

地下環境に存在する微生物の中には、鉄の酸化や還元反応を行う種が確認されており、これらの微生物は人工バリアの1つであるオーバーパックの腐食に影響を及ぼす可能性があります。本研究では、微生物腐食の影響を定量的に評価するために、地下施設で掘削したボーリング孔を利用して、地下環境下における緩衝材中の微生物活性や金属腐食影響を評価する試験を行います。令和3年度は、250m 調査坑道に調査用ボーリング孔を掘削し、炭素鋼片を圧縮ベントナイトで包埋した試験体を孔内に設置して、腐食影響試験を開始しました。今後は、ベントナイト中の微生物活性や炭素鋼の腐食挙動について検討を行います。

原子力規制庁（原子力機構 安全研究センターとの共同研究への協力）

350m 調査坑道において、放射性廃棄物処分坑道の閉鎖措置確認に向けた研究として、掘削損傷領域の水の流れ方の解明や、その領域を推定する

方法の確立を目的として、掘削損傷領域の水理特性に関する研究を実施しました。坑道壁面から 2 m のボーリング孔を掘削し、孔内の観察、透水試験および注水・注気を比抵抗トモグラフィ調査とあわせて実施し、掘削損傷領域における透水性の評価および注水・注気により掘削損傷領域内を流れる流体の可視化を行いました。これらの原位置試験の結果、掘削損傷領域において、坑道壁面から深くなるにつれて透水性が低下する様子が確認できました。また、注水時に実施した比抵抗トモグラフィでは、岩盤に注入する流量に応じて岩盤の比抵抗が低下する領域が変化する様子を捉えることができました。

深田地質研究所、東京大学（原子力機構 東濃地科学センターとの共同研究への協力）

断層の地表分布位置および物質移動経路に関する情報を取得する調査手法として、地表地質調査や物理探査に加えてガス濃度に関する情報を取得する調査手法があります。断層の地表部において微量なガスの湧出が見られることがあり、この湧出ガスを検出することにより、断層分布に関する情報が得られます。近年、ガス濃度測定技術の大幅な向上により、従来の測定技術では検出することができなかった小さな変化まで迅速に検出することが可能になっています。本研究では、地表から特定することが困難な伏在断層や地下水の流動経路（水みち）の検出精度の向上を目的として、新たなガス濃度測定技術の適用性の検討を行っています。令和 3 年度は、高精度メタン測定装置を用いて、幌延町内の大曲断層を横断しながらメタンガス濃度分布を測定しました。その結果、断層のみならず背斜軸上にガスの移行経路が存在することが確認されました^(93、94)。今後も引き続きデータを拡充することで、新たな測定技術の適用性の検討に取り組めます。

株式会社安藤・間

岩盤の初期応力と変形係数を同時に評価することが可能な、ボアホールジャッキ試験の原位置での適用性を確認することを目的として共同研究を実施しています。令和 3 年度も令和 2 年度に引き続き、350m 調査坑

道の東周回坑道南側のボーリング孔において原位置試験を実施しました。原位置試験で取得したデータと、原子力機構がこれまで取得した測定データとの比較・検討を通じ、本測定手法の適用性を確認しました。

株式会社大林組

東立坑の深度 350 m で光式の AE^{*87}センサーを用いて、岩盤の微小変形の長期モニタリングを実施しています。センサーの振動検知領域を広げる別の手段として光ファイバー自体が振動の分布を検出する DVS (Distributed Vibration Sensor) 技術を用いた試験を実施しました。今後は、さらに試験データを蓄積して、長期モニタリング技術への適用性を評価する予定です。

11.2 国外機関との研究協力

DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments)

国際共同研究 DECOVALEX は、地層処分環境における熱－水理－力学－化学連成現象の理解および評価モデルの検証を目的に実施されています。令和 2 年度からは DECOVALEX-2023 (令和 2 年度～令和 5 年度) が実施されており、このフェイズではタスクの 1 つとして、人工バリア性能確認試験を対象とした共同解析を実施しています。令和 3 年度の成果については、4.1 に記載しています。

モンテリ・プロジェクト^{*88} (スイス)

国際共同研究のモンテリ・プロジェクトで実施されている各種試験のうち、原子力機構は「オパリナス粘土^{*89}の摩擦特性に関する室内試験」に参加しています。令和 3 年度は、断層すべり、間隙水圧、流体化学および流体移動間の複合的な関係性を評価するための試験が継続されました。こ

^{*87} : Acoustic Emission の略で、岩盤の内部で微小破壊が生じる際に出る音を意味しており、この破壊音の測定が、構造物や岩盤の破壊現象の監視や岩盤にかかっている力の測定に応用されています。

^{*88} : 堆積岩を対象とした地層処分研究に関する国際的な原位置試験プロジェクトです。スイスのモンテリ・トンネル内において地層処分に関連する各種の原位置試験が実施されています。

^{*89} : オパリナス粘土 (オパリナスクレイ) は、1 億 7,500 万年前 (ジュラ紀) に形成された粘土鉱物です。スイスをはじめヨーロッパに広く分布しています。

これらの試験で得られた成果は、地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証などに反映していきます。

クレイクラブ (Clay Club) ^{*90}

クレイクラブでは各国の参加機関との情報交換を通じて、国外における堆積岩類を対象とした調査研究や技術開発などに係る最新の情報を取得しました。

幌延国際共同プロジェクト (Horonobe International Project : HIP) ^{*91}

「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」の研究課題について、先進的な安全評価技術や工学技術にかかわる研究開発の成果を最大化するとともに、知識と経験を共有し次世代を担う国内外の技術者や研究者を育成することを目的に、地下研究施設を活用した「幌延国際共同プロジェクト」を新たに立ち上げるための準備を進めました。具体的には、OECD/NEA（経済協力開発機構/原子力機関）の協力を得て、プロジェクトの立ち上げのための準備会合への参加機関の募集を行い、日本を含む 8 つの国と地域から 10 機関の参加希望を受けて第 1 回準備会合を開催しました。今後も引き続き準備会合を開催し、プロジェクトの契約締結に向けて研究内容や役割分担などを議論します。

^{*90} : Clay Club は、OECD/NEA（経済協力開発機構/原子力機関）の放射性廃棄物管理委員会の下に置かれたプロジェクトの 1 つです。地層処分の実施・規制・研究機関を中心とした組織であり、様々な粘土質媒体の特性の比較や粘土の物性や挙動および、地下施設で実施される試験に関する技術的かつ科学的情報の交換、さらには、サイト特性調査技術の詳細な評価を実施しています。

^{*91} : HIP ホームページ ; <https://www.jaea.go.jp/english/04/horonobe/IJP/HIP/index.html>

参考資料

令和 2 年度以降の研究工程

1.1 人工バリア性能確認試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R4の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
・実際の地質環境下における処分孔設置方式を対象とした熱－水－応力－化学連成現象（ガラス固化体設置以降の加熱時から浸潤時・減熱時を模擬した現象）に関する試験をとおして、設計や連成挙動評価手法の適用性の確認（人工バリアの解体調査および緩衝材の飽和度の確認を含む）、ならびに施工方法などの工学的実現性の例示等を行い、設計、施工および評価・解析といった一連の技術に関する基盤情報を整備する ・これらをととして、廃棄体埋設後において、廃棄体周辺で起こる現象の理解を深め、安全評価において前提としている環境条件が達成されること確認するとともに、その予測技術を確立することで、人工バリアの設計に反映する	③④ 熱－水－応力－化学連成現象（ガラス固化体設置以降の加熱時③から浸潤時・減熱時④）を模擬した現象④の評価手法（モデル化・解析手法）の確立	④浸潤時・減熱時のデータを含め、ガラス固化体設置以降の加熱・注水時から浸潤時・減熱時を全て模擬したデータに基づく熱－水－応力－化学連成現象のモデルの高度化、及び浸潤時の実際の飽和度などの確認（解体調査による）	④-1 注入する地下水の圧力や量を増加させ緩衝材に地下水を浸潤させた場合のデータ（浸潤時・減熱時）を取得、連成モデルの適用性確認	④-1 人工バリア性能確認試験において、廃棄体の発熱がおさまった状態を模擬した条件での試験を継続し、データを分析・評価	前半の5年程度で実施									
					体系化して取り組む課題（②処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施									
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
					④-1 浸潤時・減熱時のデータ取得・連成モデルの適用性確認									
					緩衝材中の発熱がおさまった条件下での試験に移行、緩衝材の低下を圧の低下を確認					令和4年度までに得られる成果 減熱過程における ○緩衝材で生じる連成現象の把握 ○解析用パラメータの整理 ○熱－水理－力学連成解析モデルの適用性の確認				
					国際プロジェクト（DECOVALEX等）における解析コード間の比較検証、改良・高度化					令和9年度までに得られる成果 解体調査における ○緩衝材で生じる連成現象の把握 ○解析用パラメータの整理 ○熱－水理－力学連成解析モデルの適用性の確認				
					国際プロジェクト（DECOVALEX等）における解析コード間の比較検証、改良・高度化					国際プロジェクトでの解析コード間の比較検証、改良・高度化				
解析モデルや解析条件を設定する解析結果の違いを把握					令和5年度までに得られる成果 ○各国の解析コード間の比較検証を通じた解析コードの有効性の確認									
④-2 人工バリアの解体作業および緩衝材の飽和度の確認を実施する					④-2 人工バリアの解体作業、緩衝材の飽和度の確認									
試験施工では、埋めの解体を戻し材、プを行い、緩衝ラグ、試験材の解体孔、人工バリアを設け、注水開始					令和4年度までに得られる成果 ○人工バリアの解体作業の方針及び施工手順・方法の決定									
試験施工では、埋めの解体を戻し材、プを行い、緩衝ラグ、試験材の解体孔、人工バリアを設け、注水開始					令和9年度までに得られる成果 ○人工バリア周辺における連成現象の実データの取得									

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

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

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

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

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

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

1.2 物質移行試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2 以降の課題	R2 以降の実施内容	R4 の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
					前半の5年程度で実施					体系化して取り組む課題（(2)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施				
・ 幌延地域に分布する泥岩は断層等の構造的な割れ目が分布することが知られているため、岩盤基質部（＝健岩部）における拡散および割れ目（掘削損傷領域などの人為的な割れ目も含む）を介した移流・分散が主要な移行経路や形態として考えられる ・ 有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に影響を及ぼすことが考えられる ・ したがって、割れ目を有する堆積岩での物質移行経路や形態と物質移行に与える要因（有機物・微生物・コロイド等）を総合的に評価することが必要 ・ そのために、幌延の泥岩を事例として、岩盤基質部（＝健岩部）および割れ目の双方を対象とした原位置トレーサー試験等を実施し、それぞれの構造の物質移行特性評価手法を構築することが重要 ・ 世界的にも事例が少ない泥岩中の割れ目を対象としたトレーサー試験手法を確立することも重要 ・ あわせて、有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に及ぼす影響を把握することが重要	① 岩盤基質部（＝健岩部）を対象とした物質移行特性（物質の移動速度や岩盤へのくつきやすさ等）の評価手法の検証 ② 割れ目を対象とした物質移行特性（物質の移動速度や岩盤へのくつきやすさ等）の評価手法の検証 ③ 泥岩中の割れ目を対象としたトレーサー試験手法の検証 ④ 掘削損傷領域などの人為的な割れ目を対象とした物質移行特性（物質の移動速度や岩盤へのくつきやすさ等）の評価手法の検証 ⑤ 有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に及ぼす影響を把握 ⑥ 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	④ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立 ⑤ 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行モデル化手法の高度化 ⑥ 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	- 確立した試験手法を用いて掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得を実施するとともに、有機物や微生物が放射性物質を取り込んで移動する影響が限定的であることを確認する。また、物質移行評価手法の高度化するため以下を実施 ④ 確立したトレーサー試験手法を用いた掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑤ 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行試験 ⑥ 割れ目を有する堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール（数 m～100m 規模）における遅延性能評価手法の整備	④ 過年度の掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の解析評価 ⑤ 有機物・微生物・コロイドが核種移行に及ぼす影響の現象理解の継続、原位置トレーサー試験の着手 ⑥ 過年度に実施した稚内層深部のブロックスケールを対象としたトレーサー試験の解析評価および声問層のブロックスケールにおける遅延性能評価手法の整備に係るボーリング調査	④ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					掘削損傷領域の水領域の物理・物質移行特性を評価するためのデータの取得					令和6年度までに得られる成果 ○原位置試験データ（非収着性／収着性トレーサー）の取得 ○EDZ におけるモデル化／解析評価手法の提示				
					⑤ 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行モデル化手法の高度化					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					室内試験データ（地中の有機物の分布等）の取得					令和6年度までに得られる成果 ○室内試験データの拡充 ○有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行モデルの提示				
					⑥ ブロックスケール（数 m～100m 規模）における遅延性能評価手法の整備					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					原位置試験の準備作業としての掘削・装置設置、基礎データを取得					令和6年度までに得られる成果 ○原位置試験データ（非収着性／収着性トレーサー）の取得 ○幌延を事例としたブロックスケールの評価手法の提示				

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

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

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

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

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R4の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
・処分場の操業（廃棄体の搬送・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証を目的として、幌延の地下施設を事例に、原位置試験を実施し、人工バリアの搬送定置・回収技術及び閉鎖技術を実証する	① 処分場の操業（廃棄体の搬送・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証 ② 個別の要素技術の実証試験 ③ 埋め戻し材、プラグに関する設計手法、製作・施工及び品質管理手法の確立	①②③ 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	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（締め、ブロック方式等）の違いによる緩衝材の品質の違いを把握する。また、埋め戻し方法（プラグの有無等）・回収方法による埋め戻し材の品質の違いを把握する。 ① 搬送定置・回収技術の実証（緩衝材や埋め戻し材の状態に応じた除去技術の技術オプションの整理、回収容易性を考慮した概念オプション提示、回収維持の影響に関する品質評価手法の提示） ② 閉鎖技術（埋め戻し方法：プラグ等）の実証	① 地下環境におけるコンクリートの劣化に関する試験、分析の継続 ② 閉鎖システム（埋め戻し材やプラグなど）に関する基盤情報の整備を目的とした解析検討、室内試験および原位置試験の継続	前半の5年程度で実施					体系化して取り組む課題（(2)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施				
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
					① 搬送定置・回収技術の実証					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					地下環境でのコンクリートの劣化に関する試験を開始					乾燥および湿潤条件下でのコンクリートの劣化に関する試験を開始 約1年間定置したコンクリートの中硬化の程度を確認				
					② 閉鎖技術（埋め戻し方法：プラグ等）の実証					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					閉鎖システムに関する基盤情報の整備を目的とした解析検討、室内試験、工学規模試験を実施					閉鎖システムに関する基盤情報の整備を目的とした解析検討・室内試験、工学規模試験・原位置試験を実施				
					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係る品質保証体系の構築					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					自然湧水環境での緩衝材の流出状況を確認					流量による影響に着目した緩衝材の流出試験を実施				
										令和6年度までに得られる成果 ○緩衝材の施工方法に関する技術オプションの実証 ○坑道閉鎖に関する技術オプションの実証				

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

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

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

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

2.1.2 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

目的・背景・必要性・意義	課題	R2 以降の課題	R2 以降の実施内容	R4 の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
					— 他の研究課題を取り込んで体系化して取り組む課題として、後半の 5 年程度で実施									
R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10						
・ 処分場の操業（廃棄体の搬送・定置・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証を目的として、幌延の地下施設を事例に、原位置試験を実施し、人工バリアの搬送・定置・回収技術及び閉鎖技術を実証する	① 処分場の操業（廃棄体の搬送・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証 ② 個別の要素技術の実証試験 ③ 埋め戻し材、プラグに関する設計手法、製作・施工及び品質管理手法の確立	④ 廃棄体の設置方法等の実証試験を通じた、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	人工バリアの品質を踏まえて、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するため以下を実施 ④-1 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 ④-2 先行ボーリングによる地質環境特性調査ならびに工学的対策技術を考慮した、地下施設及び人工バリアの設計評価技術の体系化 ④-3 多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術及び処分孔支保技術の整備、緩衝材流出・侵入現象評価手法及び抑制対策技術の整備 ④-4 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理	後半の 5 年程度で実施するため、R4 は実施しない	④-1 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									

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

■	個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「2.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」）に統合して実施する。
■	「2.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

2.2 高温度(100℃超)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R4の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
					前半の5年程度で実施					体系化して取り組む課題（(2)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施				
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
・人工バリア設置環境の深度依存性を考慮し、種々の処分概念オプションの工学的実現性を実証し、多様な地質環境条件に対して柔軟な処分場設計を行うことを支援する技術オプションを提供する ・実際の処分事業では、オーバーバックが100℃以下になってから処分することが基本であるが、想定外の要因によって100℃を超えた状態になることを想定して、人工バリアシステムの安全裕度を検証する	① 100℃超の高温での限界環境が人工バリアに与える影響と上限温度設定の考え方の整備、解析的な検討	① 高温度(100℃以上)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験による緩衝材が100℃超になった状態を想定した解析手法の開発	人工バリアシステムの安全裕度の検証に向けて、緩衝材が100℃超になった状態を想定した解析手法を開発するため以下を実施	①-1 100℃を超えた状態における現象等の調査事例に基づく課題の抽出、データ取得や解析手法の高度化の計画の策定	①-1 限界的条件下での人工バリア性能確認試験の解析・検討					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					海外での原位置試験の情報（試験条件、手法等）を入手					令和6年度までに得られる成果 ○高温度(100℃以上)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験データの収集				
					①-2 100℃を超えた状態での人工バリアの基本特性やニアフィールドでの熱-水-応力-化学に係る連成現象に関する試験・解析およびシナリオ検討事例の調査、わが国の処分概念や設計オプションを想定したシナリオの整理					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					シナリオの検討に着手（水分移動、物質移動特性）					令和6年度までに得られる成果 ○100℃超になった際にニアフィールドにおいて発生する現象の整理				
					①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示（国際プロジェクト情報を収集し、発生する現象を整理）					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					海外での原位置試験に関する情報取得の継続					令和6年度までに得られる成果 ○ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方の提示				

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

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

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

3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R4の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
- 岩盤中には大小様々な断層が存在するが、小規模なものいくつかは処分場に取り込まざるを得ない可能性がある。それらの断層が地震や隆起などの地殻変動の影響を受けた場合に、その透水性がどの程度まで上昇し得るかを検討しておく必要がある - 断層の透水性は断層の変形様式に大きく依存する。脆性的な変形が起こると断層の透水性は有意に上昇しやすいが、延性的な変形の場合は透水性が上昇しにくい。生じる変形が脆性的か延性的かは、変形時の岩石強度、応力などに依存する - 本研究では、地殻変動に対する緩衝能力が潜在的に高いことから堆積岩に重点を置き、断層の変形様式を支配する岩石の強度・応力状態を計測でき、かつマッピング（空間的な分布図を示すこと）が可能なパラメータで指標化することを試みる。そのようなパラメータと断層の透水性の潜在的な上限を関係付けることができれば処分場閉鎖後の断層の透水性について現実的な状態設定が可能となる - 断層は動いたとしても、その透水性は、地層の力学的な緩衝能力が働くことにより、一定の値を超えない。この現象を定量的に示したい	①地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力を表現するパラメータ（指標）の提案 ②水圧擾乱試験によるパラメータの有効性の検証	②地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握	断層の幅が数十 cm の断層における地震動や坑道掘削に伴う、割れ目における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）を実証するために、以下の検討や試験を実施する ②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握（ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験） ②-2 DI（ダクティリティインデックス：岩盤にかかる平均応力を引張強度で割った値）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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1～3 既往の水圧擾乱試験の結果の解析 ②-1～3 DI と断層/割れ目の水理学的連結性の関係に関する解析	前半の5年程度で実施					体系化して取り組む課題（(2)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施				
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
					②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					より大型の水圧擾乱の断層を試験やシミュレーションの水圧擾乱試験の結果に基づきモデルを改良					令和6年度までに得られる成果 ○ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験データの取得				
					②-2 DIを用いた透水性評価の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					割れ目の水圧擾乱水理学的試験やシミュレーションの領域区分に遷移領域を追加					令和6年度までに得られる成果 ○DIを用いた透水性評価手法の高度化				
					②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					より大型の断層の活動性評価対象として係る既往の水圧擾乱試験を取得実施し、データを取得					令和6年度までに得られる成果 ○水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備				

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

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

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

3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

3.1.2 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

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R4の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
・地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域に相当と仮定）の分布を把握することは、処分事業における処分場選定の際に有用な情報になり得る。このため、地上からの調査により、化石海水の三次元分布を評価する既存技術の高度化を図る	③ 地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）を調査・解析・評価する手法の確立 ④ 三次元分布を調査・解析・評価する手法の確立	③④ 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ため以下を実施 ③ 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 ④-1 化石海水の三次元分布に係る調査・評価手法の検証 ④-2 広域スケール（十数km×十数km）を対象とした水理・物質移動評価手法の検証（地下水滞留時間）評価のための水理解析、塩濃度分布評価のための水理・物質移動解析）	③、④-1 電磁探査により推定した化石海水領域の三次元分布の妥当性を確認するためのボーリング調査 R4 までの成果に基づく、物理探査およびボーリング調査によるデータ取得から地球統計学的手法による化石海水領域の三次元分布の推定に至る一連の手法の整理	前半の5年程度で実施					体系化して取り組む課題（(2)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施				
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
					③ 地下水の流れが非常に遅い領域の調査・評価技術の検証					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					化石海水領域を把握するための物理探査を実施し、比抵抗分布を推定					電磁探査により推定した化石海水の三次元分布の妥当性を確認するためのボーリング調査を実施				
					④-1 化石海水の三次元分布に係る調査・評価手法の検証					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					化石海水分布の把握に必要なボーリングの位置・本数等を検討					物理探査とボーリング調査のデータの組み合わせにより化石海水分布を推定する方法の検討				
					④-2 広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の検証					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					広域スケールの地下水流動に深度・気候などが与える影響を整理					化石海水領域に影響する古水理地質学的変遷に関する因子を抽出する感度解析を実施				
										令和6年度までに得られる成果 ○化石海水領域の調査・評価技術の整備・高度化				
										令和6年度までに得られる成果 ○化石海水の三次元分布に係る調査・評価技術の整備・高度化				

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

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

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

3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R4の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
					前半の5年程度で実施					体系化して取り組む課題（(2)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施				
・ 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（自己治癒能力）を定量的に検証し、堆積岩地域における立地選定や処分場の設計を、より科学的・合理的に行える技術と知見を整備する	① 人工バリアの緩衝材や坑道の埋め戻し材による掘削損傷領域（EDZ）のひび割れの自己治癒能力を評価する手法の確立 ② 人工バリアの自己治癒能力（ひび割れの修復）を実証	② 地殻変動による人工バリアの緩衝材や坑道埋め戻し材の掘削損傷領域（EDZ）への自己治癒能力の実証	人工バリアのひび割れに対する自己治癒能力を実証するため以下の机上検討を実施 ② 人工バリアの緩衝材や坑道埋め戻し材が掘削損傷領域（EDZ）の力学的・水理学的な緩衝能力（自己治癒能力）に与える影響を把握する解析手法の開発 ✓ DIを用いたEDZの透水性を予測する既存モデルの再検証	② DIを用いたEDZの透水性を予測する既存モデルの再検証	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
					②-1 DIを用いたEDZの透水性を予測する既存モデルの再検証					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					試料観察に基づき、試験やシミュレーションの結果に基づきモデルを改良					令和4年度までに得られる成果 ○DIを用いたEDZの透水性を予測する既存モデルの再検証				
			✓ 坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデルの構築	② 坑道埋め戻し後のEDZの透水性を推定するモデルの構築	②-2 坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデルの構築					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					試料観察に基づき、戻し後のEDZの割れ目開口状況を定量的に把握					令和4年度までに得られる成果 ○坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデルの構築				
					坑道埋め戻し後のEDZの割れ目がEDZの透水性に与える影響を確認									

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

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

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

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

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

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

参考文献

- (1) 中山雅(編):幌延深地層研究計画 令和3年度調査研究計画, JAEA-Review 2021-009, 2021, 54p.
- (2) 核燃料サイクル開発機構:わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 地層処分研究開発第2次取りまとめ 分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999, 703p.
- (3) 中山雅, 松崎達二, 丹生屋純夫:幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験ー大口径掘削機の開発、模擬オーバーパック、緩衝材および埋め戻し材の製作ー, JAEA-Research 2016-010, 2016, 57p.
- (4) 中山雅, 大野宏和:幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験ー350m調査坑道における人工バリアの設置および坑道の埋め戻しー, JAEA-Research 2019-007, 2019, 132p.
- (5) 佐藤伸, 大野宏和, 棚井憲治, 山本修一, 深谷正明, 志村友行, 丹生屋純夫, 熱・流体・応力連成解析による水蒸気が及ぼす再冠水時のバリア性能への影響, 地盤工学ジャーナル, Vol.15, 2020, No.3, pp.529-541.
- (6) J-C. Mayor: ENRESA, Manuel Velasco/GOLDER: EB dismantling Synthesis report, (DELIVERABLE-Nº D2.1-8), Long-term Performance of Engineered Barrier Systems PEBS, Contract (grant agreement) number: FP7 249681, 2014.
- (7) Mäder, U., Detzner, K., Kober, F., Abplanalp, H., Baer, T., Cloet, V.: FEBEX-DP - Plug Overcoring and Concrete-Bentonite Interface Sampling prior to Dismantling, 2016, Nagra NAB 16-10.
- (8) 中山雅(編):幌延深地層研究計画 令和2年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2021-053, 2022, 133p.
- (9) 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター:令和2年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 [JPJ007597] ニアフィールドシステム評価確証技術開発 報告書, 2021, 533p.
- (10) 出井俊太郎, 望月陽人, 宮川和也, 笹本広:幌延の地下施設における地下水の地球化学モニタリング装置を用いた物理化学パラメータ測定結果(2017年度~2019年度), JAEA-Data/Code 2021-005, 2021, 54p.
- (11) Kurikami, H., Takeuchi, R. and Yabuuchi, S.: Scale effect and heterogeneity of hydraulic conductivity of sedimentary rocks at Horonobe URL site, Physics and Chemistry of the Earth, 33, 2008, pp.S37-S44.
- (12) Nakata, K., Hasegawa, T., Oyama, T. and Miyakawa, K.: Evaluation of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of water in pores extracted by compression method-effects of closed pores and comparison to direct vapor equilibration and laser spectrometry method, Journal of Hydrology, 561, 2018, pp.547-556.

- (13) 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備・資金管理センター: 令和 3 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 [JPJ007597] 地層処分施設閉鎖技術確証試験 報告書, 2022.
- (14) 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備・資金管理センター: 令和 2 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 [JPJ007597] 地層処分施設閉鎖技術確証試験報告書, 2021, 569p.
- (15) Archie, G.E.: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. AIME, 146, 1942, pp.54-62.
- (16) Biot, M.A.: General theory of three dimensional consolidation, J. Appl. Phys., 12, 1941, pp.155-164.
- (17) Gassmann, F.: Über die Elastizität poröser Medien, Vierteljahrschrift der Naturforschenden Gessellschaft in Zurich, 96, 1951, pp.1-23.
- (18) 日本原子力研究開発機構: 平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書 廃棄物埋設における性能評価手法に関する調査, 2019.
- (19) 原子力発電環境整備機構: 包括的技術報告書: わが国における安全な地層処分の実現ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー, NUMO-TR-20-03, 2021, 807p.
- (20) Wersin, P., Johnson, L. H. and McKinley, I. G.: Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100°C, Physics and Chemistry of the Earth, vol.32, 2007, pp.780-788.
- (21) Pusch, P. and Madsen, F. T.: Aspects on the illitization of the Kinnekulle bentonites, Clays and Clay Minerals, vol.43, 1995, pp.261-270.
- (22) Zheng, L., Rutqvist, J., Birkholzer, J. T. and Liu, H. H.: On the impact of temperatures up to 200°C in clay repositories with bentonite engineer barrier systems: A study with coupled thermal, hydrological, chemical, and mechanical modeling, Engineering Geology, vol.197, 2015, pp.278-295.
- (23) Zheng, L., Rutqvist, J., Xu, H. and Birkholzer, J. T: Coupled THMC models for bentonite in an argillaceous repository for nuclear waste: Illitization and its effect on swelling stress under high temperature, Engineering Geology, vol.230, 2017, pp.118-129.
- (24) Müller-Vonmoos, M., Kahr, G., Bucher, F. and Madsen, F. T.: Investigation of Kinnekulle K-bentonite aimed at assessing the long-term stability of bentonites under repository conditions, Engineering Geology, vol.28, 1990, pp.269-280.
- (25) Huang, W. L., Longo, J. M. and Pevear, D. R.: An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer, Clays and Clay Minerals, vol.41, 1993, pp.162-177.
- (26) Savage, D., Wilson, J., Benbow, S., Sasamoto, H., Oda, C., Walker, C., Kawama,

- D. and Tachi, Y.: Natural systems evidence for the effects of temperature and the activity of aqueous silica upon montmorillonite stability in clay barriers for the disposal of radioactive wastes, *Applied Clay Science*, vol.179, 2019, pp.105-146.
- (27) Leupin, O. X., Birgersson, M., Karnland, O., Korkeakoski, P., Sellin, P., Mäder, U. and Wersin, P.: Montmorillonite stability under near-field conditions, NAGRA Technical Report NTB-14-12, 2014, 120p.
- (28) Pusch, R., Kasbohm, J. and Thao, H. T. M.: Chemical stability of montmorillonite buffer clay under repository-like conditions—A synthesis of relevant experimental data, *Applied clay science*, vol.47, 2010, pp.113-119.
- (29) Sauer, K., Caporuscio, F., Rock, M., Cheshire, M. and Jové-Colón, C.: Hydrothermal interaction of Wyoming bentonite and Opalinus Clay, *Clays and Clay Minerals*, vol.68, 2020, pp.144-160.
- (30) Laine, H. and Karttunen, P.: Long-term stability of bentonite: A literature review, Posiva Working Report 2010-53, 2010, 128p.
- (31) Karnland, O., Olsson, S., Dueck, A., Birgersson, M., Nilsson, U., Hernan-Håkansson, T., Pederson, K., Nilsson, S., Eriksen, T. E. and Rosborg, B.: Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project: Final report on the A2 test parcel, SKB Technical Report TR-09-29, 2009, 279p.
- (32) Cho, W. J., Lee, J. O. and Kang, C. H.: Influence of temperature elevation on the sealing performance of a potential buffer material for a high-level radioactive waste repository, *Annals of Nuclear Energy*, vol.27, 2000, pp.1271-1284.
- (33) Daniels, K. A., Harrington, J. F., Zihms, S. G. and Wiseall, A. C.: Bentonite permeability at elevated temperature, *Geosciences*, vol.7, 2017, pp.3.
- (34) Pusch, R. and Kasbohm, J.: Alteration of MX-80 by hydrothermal treatment under high salt content conditions, SKB Technical Report TR-02-06, 2002, 39p.
- (35) 小峯秀雄, 大橋良哉, 安原一哉, 村上哲: ベントナイトの膨潤圧・膨潤変形特性に及ぼす温度履歴の影響とその要因, *土木学会論文集 C*, vol.63, 2007, pp. 731-741.
- (36) Oscarson, D. W. and Dixon, D. A.: The effect of steam on montmorillonite, *Applied Clay Science*, vol.4, 1989, pp.279-292.
- (37) Pusch, R.: On the effect of hot water vapor on MX-80 clay, SKB Technical Report TR-00-16, 2000, 36p.
- (38) Pusch, R., Bluemling, P. and Johnson, L.: Performance of strongly compressed MX-80 pellets under repository-like conditions, *Applied Clay Science*, vol.23, 2003, pp.239-244.

- (39) Dixon, D. A.: Review of the THMC properties of MX-80 bentonite, NWMO TR-2019-07, 2019, 211p.
- (40) Åkesson, M., Olsson, S., Dueck, A., Nilsson, U., Karnland, O., Kiviranta, L., Kumpulainen, S. and Lindén, J.: Temperature Buffer Test: Hydro-mechanical and chemical/mineralogical characterizations, SKB P-12-06, 2012, 84p.
- (41) Svensson, D., Dueck, A., Nilsson, U., Olsson, S., Sandén, T., Lydmark, S., Jägerwall, S., Pedersen, K. and Hansen, S.: Alternative buffer material: Status of the ongoing laboratory investigation of reference materials and test package 1, SKB Technical Report TR-11-06, 2011, 140p.
- (42) Akinwunmi, B., Sun, L., Hirvi, J. T., Kasa, S. and Pakkanen, T. A.: Influence of temperature on the swelling pressure of bentonite clay, *Chemical Physics*, vol.516, 2019, pp.177-181.
- (43) Kaufhold, S., Dohrmann, R., Sandén, T., Sellin, P. and Svensson, D.: Mineralogical investigations of the first package of the alternative buffer material test—I: Alteration of bentonites, *Clay Minerals*, vol.48, 2013, pp.199-213.
- (44) Hoch, A., Metcalfe, R. and Benbow, S.: The effects of steam on bentonite: Literature review and gap analysis, NDA Report No. RWM/Contr/20/027, 2020, 89p.
- (45) Couture, R. A.: Steam rapidly reduces the swelling capacity of bentonite, *Nature*, vol.318, 1985, pp.50-52.
- (46) 日本原子力研究開発機構：平成 20 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発 報告書，2009，311p.
- (47) Beaufort, D., Rigault, C., Billon, S., Billault, V., Inoue, A., Inoue, S. and Partier, P.: Chlorite and chloritization processes through mixed-layer mineral series in low-temperature geological systems—a review. *Clay Minerals*, vol.50, 2015, pp.497-523.
- (48) Guillaume, D., Neaman, A., Cathelineau, M., Mosser-Ruck, R., Peiffert, C., Abdelmoula, M., Dubessy, J., Villiéras, F. and Michau, N.: Experimental study of the transformation of smectite at 80 and 300°C in the presence of Fe oxides. *Clay Minerals*, vol.39, 2004, pp.17-34.
- (49) Mosser-Ruck, R., Cathelineau, M., Guillaume, D., Charpentier, D., Rousset, D., Barres, O. and Michau, N.: Effects of temperature, pH, and iron/clay and liquid/clay ratios on experimental conversion of dioctahedral smectite to berthierine, chlorite, vermiculite, or saponite, *Clays and Clay Minerals*, vol.58, 2010, pp.280-291.
- (50) Wilson, J., Cressey, G., Cressey, B., Cuadros, J., Ragnarsdottir, K. V., Savage,

- D. and Shibata, M.: The effect of iron on montmorillonite stability. (II) Experimental investigation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.70, 2006, pp.323-336.
- (51) 日本原子力研究開発機構：平成 19 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発 報告書，2008，260p.
- (52) Svensson, P. D. and Hansen, S.: Redox chemistry in two iron-bentonite field experiments at Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden: An XRD and Fe K-edge XANES study. *Clays and Clay Minerals*, vol.61, 2013, pp.566-579.
- (53) Wersin, P., Hadi, J., Jenni, A., Svensson, D., Grenèche, J. M., Sellin, P. and Leupin, O. X.: Interaction of corroding iron with eight bentonites in the Alternative Buffer Materials Field Experiment (ABM2), *Minerals*, vol.11, 2021, pp.907.
- (54) Sasamoto, H., Isogai, T., Kikuchi, H., Satoh, H. and Svensson, D.: Mineralogical, physical and chemical investigation of compacted Kunigel V1 bentonite in contact with a steel heater in the ABM test package 1 experiment, Äspö laboratory, Sweden, *Clay Minerals*, vol.52, 2017, pp.127-141.
- (55) Fernández, R., Ruiz, A. I. and Cuevas, J.: Formation of C-A-S-H phases from the interaction between concrete or cement and bentonite, *Clay Minerals*, vol.51, 2016, pp.223-235.
- (56) Mosser-Ruck, R. and Cathelineau, M.: Experimental transformation of Na, Ca-smectite under basic conditions at 150°C, *Applied Clay Science*, vol.26, 2004, pp.259-273.
- (57) Pusch, R., Karnland, O., Lajudie, A. and Decarreau, A.: MX 80 clay exposed to high temperatures and gamma radiation, SKB Technical Report TR--93-03, 1992, 55p.
- (58) 横山信吾, 田中幸久：イオン交換水で飽和したベントナイト系材料の透水性と膨潤特性に及ぼす熱影響に関する実験的検討, 電力中央研究所報告 N11021, 2012, 32p.
- (59) Karnland, O., Olsson, S., Sandén, T., Fälth, B., Jansson, M., Eriksen, T. E., Svärdstörn, K., Rosborg, B and Muurinen, A.: Long term test of buffer material at the Äspö HRL, LOT project: Final report on the A0 test parcel, SKB Technical Report TR-09-31, 2011, 112p.
- (60) Kumpulainen, S. and Kiviranta, L.: Mineralogical, chemical and physical study of potential buffer and backfill materials from ABM. Test Package 1, POSIVA Working Report 2011-41, 2011, 54p.
- (61) 日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター：令和 3 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 [JPJ007597] ニアフ

イールドシステム評価確証技術開発 報告書, 2022.

- (62) Ishii, E.: Predictions of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones from rock rheology: Preliminary results, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.120, 2015, pp.2220-2241.
- (63) Kuang, X. and Jiao, J.J.: An integrated permeability-depth model for Earth's crust, *Geophysical Research Letters*, vol.41, 2014, pp.7539-7545.
- (64) Ishii, E.: The highest potential transmissivities of fractures in fault zones: Reference values based on laboratory and in situ hydro-mechanical experimental data, *Engineering Geology*, vol.294, 2021, 106369.
- (65) Bandis, S.C.: Experimental studies of scale effects on shear strength and deformation of rock joints, Ph.D. thesis, Univ. of Leeds, 1980.
- (66) Ohno, H. and Ishii, E.: Effect of fault activation on the hydraulic connectivity of faults in mudstone, *Geomechanics for Energy and the Environment*, 100317, in press.
- (67) Ishii, E.: Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single-borehole investigations, *Water Resources Research*, vol.54, 2018, pp.3335-3356.
- (68) Krietsch, H., Gischig, V.S., Doetsch, J., Evans, K.F., Villiger, L., Jalali, M., Valley, B., Löw, S. and Amann, F.: Hydromechanical processes and their influence on the stimulation effected volume: observations from a decameter-scale hydraulic stimulation project, *Solid Earth*, vol.11, 2020, pp.1699-1729.
- (69) Ishii, E.: A conventional straddle-sliding-packer system as a borehole extensometer: Monitoring shear displacement of a fault during an injection test, *Engineering Geology*, vol.275, 2020, 105748.
- (70) 水野崇, 岩月輝希, 松崎達二: ボーリング孔を利用した比抵抗検層結果に基づく地下水水質の推定方法に関する検討, *応用地質*, 第 58 巻 第 3 号, 2017, pp.178-187.
- (71) 天野由記, 山本陽一, 南條功, 村上裕晃, 横田秀晴, 山崎雅則, 國丸貴紀, 大山隆弘, 岩月輝希: 幌延深地層研究計画における地下水, 河川水及び降水の水質データ (2001~2010 年度), *JAEA-Data/Code 2011-023*, 2012, 312p.
- (72) 岸本宗丸, 高山純一, 横井浩一: 電磁法による地上物理探査, *JNC TJ1420 2001-036*, 2001, 177p.
- (73) 太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 国丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱克宏, 松井祐哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍郎: 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階 (第 1 段階) 研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」, *JAEA-Research 2007-044*, 2007, 434p.

- (74) 松尾公一，根木健之，横井浩一，高橋武春，手島稔：幌延深地層研究計画における電磁法による大曲断層調査，JNC TJ5410 2004-002，2004，188p..
- (75) 産業技術総合研究所：沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発 平成 19 年度成果報告書，2008，256p.
- (76) 日本原子力研究開発機構，電力中央研究所：令和 2 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 岩盤中地下水流動評価技術高度化開発 報告書，2021，343p.
- (77) 酒井利啓，松岡稔幸：幌延地域を対象とした地表踏査および地形データにもとづく地質分布の推定，JAEA-Research 2015-004，2015，109p.
- (78) 酒井利啓，石井英一：幌延深地層研究計画における広域スケールを対象とした地質構造モデルの更新，JAEA-Data/Code 2021-009，2021，13p.
- (79) 五十嵐亨，池田和隆，東宏幸，今村杉夫，大島雅浩：ヘリコプターを用いた空中物理探査，JNC TJ1420 2001-035，2001，164p.
- (80) Asadollahi, P. and Tonon, F.: Constitutive model for rock fractures: Revisiting Barton's empirical model, Engineering Geology, vol.113, 2010, pp.11-32.
- (81) Aoyagi, K., Ishii, E., Chen, Y. and Ishida, T.: Resin-injection testing and measurement of the shear displacement and aperture of excavation-damaged-zone fractures: A case study of mudstone at the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, Rock Mechanics and Rock Engineering, 55, 2022, pp.1855-1869.
- (82) 宮川和也：幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質データ（2021 年度），JAEA-Data/Code 2021-021，2022，23p.
- (83) 中山雅，佐野満昭，真田祐幸，杉田裕（編）：幌延深地層研究計画 平成 20 年度調査研究成果報告 JAEA-Research 2009-032，2009，68p.
- (84) Zhao, Q., Saito, T., Miyakawa, K., Sasamoto, H., Kobayashi, T. and Sasaki, T.: Sorption of Cs⁺ and Eu³⁺ ions onto sedimentary rock in the presence of gamma-irradiated humic acid, Journal of Hazardous Materials, 428, 2022, 128211.
- (85) Kirishima, A., Terasaki, M., Miyakawa, K., Okamoto, Y. and Akiyama, D.: Deep groundwater physicochemical components affecting actinide migration, Chemosphere, 289, 2022, 133181.
- (86) 小村悠人，柏谷公希，宮川和也，中田弘太郎，小池克明：堆積岩の圧密・続成過程における間隙水移動と水質変化の数値モデル化，2021 年度資源・素材関係学協会合同秋季大会，2021.
- (87) 小村悠人，柏谷公希，宮川和也，中田弘太郎，小池克明：圧密・続成作用を考慮した数値モデルから示される幌延地域深層地下水の水質進化，日本地下水学会 2021 年秋季講演会，2021.
- (88) 玉澤聡，上野晃生，村上拓馬，宮川和也，玉村修司，木山保，猪股英紀，長沼毅，

金子勝比古，五十嵐敏文：陸域深部地下珪藻質/珪質泥岩層の微生物群集構造解析および微生物群集構造を規定する要因の探索，日本微生物生態学会 第 34 回大会，2021，新潟市.

- (89) Miyakawa, K., Aoyagi, K., Sasamoto, H., Akaki, T. and Yamamoto, H.: The effect of dissolved gas on rock desaturation in artificial openings in geological formations, The Extended Abstract of the ISRM 2019 Specialized Conference, 2019, 6p.
- (90) Miyakawa, K., Aoyagi, K., Akaki, T. and Yamamoto, H.: Numerical simulation of oxygen infusion into desaturation resulting from artificial openings in sedimentary formations, 第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演集, 2021, pp.609-614.
- (91) Miyakawa, K., Aoyagi, K., Akaki, T. and Yamamoto, H.: A numerical simulation study of the desaturation and oxygen infusion into the sedimentary rock around the tunnel in the Horonobe Underground Research Laboratory, JAEA-Data/Code 2021-002, 2021, 26p.
- (92) 宮川和也，山本肇：地下水と溶存ガスを考慮した三次元二相流解析による掘削影響領域における飽和度分布，JAEA-Research 2022-003, 2022, 40p.
- (93) 下茂道人，丹羽正和，宮川和也，天野健治，戸野倉賢一，徳永朋祥：大気中メタンの分布に基づく断層周辺のガス移行経路の推定，深田地質研究所年報，22, 2021, pp.119–137.
- (94) 宮川和也，下茂道人，丹羽正和，天野健治，徳永朋祥，戸野倉賢一：大気環境中のメタンと二酸化炭素濃度変化の関係に着目した地下起源ガスの判別，深田地質研究所年報，22, 2021, pp.139–153.

付録

(令和3年度外部発表)

著者アルファベット順に記載

Bateman, K, Amano, Y., Kubota, M., Ouchi, Y. and Tachi, Y.: Reaction and alteration of mudstone with ordinary portland cement and low alkali cement pore fluids, Minerals (Internet), 11(6), 2021, 588.

Bateman, K, Amano, Y. and Tachi, Y.: Evolution of the reaction and alteration of mudstone with cement leachate; Flow experiments and reactive-transport modelling, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, 2021.

壇英恵, 本島貴之, 木村駿, 武田匡樹: 粘土系材料が有する EDZ のシーリング機能の検証(4)原位置試験および浸透流解析による透水性評価, 日本原子力学会 2021 年秋の大会, 2021.

出井俊太郎, 望月陽人, 宮川和也, 笹本広: 幌延の地下施設における地下水の地球化学モニタリング装置を用いた物理化学パラメータ測定結果(2017年度~2019年度), JAEA-Data/Code 2021-005, 2021, 54p.

江口綾乃, 紀室辰伍, 天野由紀, 舘幸男: フミン酸共存下における幌延堆積岩への Eu の収着挙動の評価, 第 37 回日本腐食物質学会講演会, 2021.

郷家光男, 沖原光信, 前村庸之, 安田涼, 松井裕哉, 尾崎裕介, 望月陽人: 幌延深地層研究所を事例とした坑道周辺地質環境の長期変遷に関する予察的解析, 日本原子力学会 2021 年秋の大会, 2021.

長谷川琢磨, 中田弘太朗, 宮川和也: Cl 濃度と $\delta^{37}\text{Cl}$ による拡散場の評価, 日本地下水学会 2021 年秋季講演会, 2021.

畑浩二, 丹生屋純夫, 青柳和平, 宮良信勝: 幌延深地層研究センターの東立坑における掘削損傷領域の評価, 土木学会論文集, F1 (トンネル工学) (インターネット), 77(2), 2021, pp.I29-I43.

Hu, Q., Wang, Q., Zhao, C., Zhang, T., Tachi, Y. and Fukatsu, Y.: Fluid flow and chemical transport in shallow and deep mudrocks being implicated by pore geometry and connectivity, 11th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS11), 2021.

Ishii, E.: The highest potential transmissivities of fractures in fault zones: Reference values based on laboratory and in situ hydro-mechanical experimental data, Engineering Geology, 294, 5, 2021, 106369.

鎌田健人, 奈良禎太, 柏谷公希, 多田洋平, 藤井宏和, Zhao, Y., 松井裕哉, 尾崎裕介: 北海道幌延地域の原位置岩盤における炭酸注入実験, 資源・素材学会関西支部第 18 回若手研究者・学生のための研究発表会, 2021.

- 鎌田健人, 奈良禎太, 松井裕哉, 尾崎裕介, 藤井宏和, Zhao, Y.: 北海道幌延地域の泥岩層における炭酸水注入実験, 日本材料学会第 70 期通常総会・学術講演会, 2021.
- 川久保昌平, 千々松正和, 松井裕哉, 尾崎裕介: 小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験(4)-事後調査における室内試験結果-, 土木学会第 76 回年次学術講演会, 2021.
- 川久保昌平, 大野宏和, 松井裕哉, 加藤猛士: 孔壁と載荷板の曲率不一致を考慮したボアホールジャッキ試験による変形係数の評価方法, 第 48 回岩盤力学に関するシンポジウム, 2022.
- 木村駿, 武田匡樹, 本島貴之, 檀英恵: 止水プラグを対象としたベントナイト系材料の吹付け施工性確認試験(1)地上吹付け試験におけるベントナイトの吹付け特性データの取得, 日本原子力学会 2021 年秋の大会, 2021.
- Kirishima, A., Terasaki, M., Miyakawa, K., Okamoto, Y. and Akiyama, D.: Deep groundwater physicochemical components affecting actinide migration, *Chemosphere*, Vol.289, 2022, 133181.
- 小村悠人, 柏谷公希, 宮川和也, 中田弘太郎, 小池克明: 堆積岩の圧密・続成過程における間隙水移動と水質変化の数値モデル化, 資源素材 2021 (札幌); 2021 年度資源素材関係学協会合同秋季大会, 2021.
- 小村悠人, 柏谷公希, 宮川和也, 中田弘太郎, 小池克明: 圧密・続成作用を考慮した数値モデルから示される幌延地域深層地下水の水質変化, 日本地下水学会 2021 年秋季講演会, 2021.
- 栗林千佳, 宮川和也, 伊藤茜, 谷水雅治: 還元的な深部地下水の $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 放射能比の把握, 日本地球化学会第 68 回年会, 2021.
- 松井裕哉, 尾崎裕介, 川久保昌平, 千々松正和, 今井久: 小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験(3)-事後調査の概要-, 土木学会第 76 回年次学術講演会, 2021.
- 三寫星輝, 緒方奨, 乾徹, 安原英明, 岸田潔, 青柳和平: 損傷モデルによる珪質泥岩を対象とした坑道掘削解析, 第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集 (インターネット), 2021, pp.215-220.
- 宮川和也: 幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質データ (2020 年度), JAEA-Data/Code 2021-003, 2021, 25p.
- 宮川和也: 幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質データ (2021 年度), JAEA-Data/Code 2021-021, 2022, 23p.
- 宮川和也, 青柳和平, 赤木俊文, 山本肇: A Numerical simulation study of the desaturation and oxygen infusion into the sedimentary rock around the tunnel in the Horonobe Underground Research Laboratory, JAEA-Data/Code 2021-002, 2021, 26p.

- 宮川和也, 下茂道人, 丹羽正和, 天野健治, 徳永朋祥, 戸野倉賢一: 大気環境中のメタンと二酸化炭素濃度変化の關係に着目した地下起源ガスの判別, 深田地質研究所年報, 22, 2021, pp.139-153.
- 望月陽人, 石井英一: 亀裂水および間隙水中の安定同位体比の比較にもとづく亀裂に沿った移流の程度の評価, 日本地質学会第 128 年学術大会, 2021.
- 望月陽人, 笹本広, 馬場大哉, 生垣加代子: 少量試料に適用可能な簡易分析法に基づく深部地下水中の溶存有機物の特性評価, 陸水学会誌, 81(2), 2020, pp.153-166.
- Möri, A., Mazurek, M., Ota, K., Siitari-Kauppi, M., Eichinger, F. and Leuenberger, M.: Quantifying the Porosity of Crystalline Rocks by In Situ and Laboratory Injection Methods, Minerals, 11(10), 2021, 1072.
- 本島貴之, 松井裕哉, 川久保政洋, 小林正人, 市村哲大, 杉田裕: オールジャパンでとりくむ地層処分のいま 第 4 回処分場の設計と工学技術 (その 2), 日本原子力学会誌, 64 巻, 第 3 号, 2022, pp.163-167.
- 村岡亜美, 千代延俊, 荒戸裕之, Martizzi Paolo, 石井英一: 北海道幌延町に分布する鮮新統から中新統の珪質岩に含まれる有機物の堆積過程の検討, 石油技術協会誌, 87 巻, 第 1 号, 2022, pp.86-88.
- 中山雅 (編): 幌延深地層研究計画 令和 3 年度調査研究計画, JAEA-Review 2021-009, 2021, 54p.
- 中山雅 (編): 幌延深地層研究計画 令和 2 年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2021-053, 2022, 133p.
- 西柊作, 宮川和也, 戸田賀奈子, 斉藤拓巳: 蛍光分光測定と多変量解析を用いた深部地下水天然有機物と金属イオンの相互作用評価とその起源の整理, 日本原子力学会 2021 年秋の大会, 2021.
- Onoe, H., Ishibashi, M., Ozaki, Y. and Iwatsuki, T. : Development of modeling methodology for hydrogeological heterogeneity of the deep fractured granite in Japan, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 144, 2021, 104737.
- Otomo, S., Hirose, Y., Osawa, H. and Onuma, S.: The Effects of procedure of the veil of ignorance on public acceptance for a NIMBY facility, 32nd International Congress of Psychology (ICP2020), 2021.
- 尾崎裕介: 会員機関紹介 幌延深地層研究センター, 物理探査ニュース, No.52, 2021, pp.8-9.
- Ozaki, Y., Iwatsuki, T., Taniguchi, N. and Ohno, H.: International joint research on thermal-hydraulic-mechanical-chemical modelling of engineering/geological systems at Horonobe URL, Japan, Proceedings of INMM & ESARDA Joint

Annual Meeting (Internet), 2021.

Ozaki, Y. and Miyara, N.: Evaluation of time lapse behavior of excavation damaged zone by first arrival tomography in Horonobe Underground Research Laboratory, The 14th SEGJ International Symposium, 2021.

酒井利啓, 石井英一: 幌延深地層研究計画における広域スケールを対象とした地質構造モデルの更新, JAEA-Data/Code 2021-009, 2021, 13p.

酒井利啓, 早野明: 幌延深地層研究計画; 深度 380m までの立坑および調査坑道における坑道壁面の地質観察により取得したデータの統合・整理, JAEA-Data/Code 2021-010, 2021, 243p.

佐藤菜央美, 早野明, 手島稔, 根木健之, 山根照真, 川崎慎治: 化石海水分布の把握を目的とした MT 法による三次元比抵抗分布, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, 2021.

下茂道人, 丹羽正和, 宮川和也, 天野健治, 戸野倉賢一, 徳永朋祥: 大気中メタンの分布に基づく断層周辺のガス移行経路の推定, 深田地質研究所年報, 22, 2021, pp.119-137.

高村浩彰, 浜田元, 佐藤稔紀: 山岳トンネル単孔起爆における振動・音圧の伝播波形特性, 第 48 回岩盤力学に関するシンポジウム, 2022.

玉澤聡, 上野晃生, 村上拓馬, 宮川和也, 玉村修司, 木山保, 猪股英紀, 長沼毅, 金子勝比古, 五十嵐敏文: 陸域深部地下珪藻質/珪質泥岩層の微生物群集構造解析および微生物群集構造を規定する要因の探索, 日本微生物生態学会第 34 回大会, 2021.

田中達也, 戸谷成寿, 奥木さくら, 橋本秀彌, 松井裕哉: 止水プラグの設計に関する数値解析的検討, 土木学会第 76 回年次学術講演会, 2021.

上田祥央, 川久保昌平, 千々松正和, 松井裕哉, 尾崎裕介: 小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験(5)-事後調査による品質管理手法の検討-, 土木学会第 76 回年次学術講演会, 2021.

渡部豪, 浅森浩一, 島田顕臣, 雑賀敦, 小川大輝, 梅田浩司, 後藤翠, 島田耕史, 石丸恒存: 南九州せん断帯における GNSS 観測, 5, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, 2021.

代永佑輔, 佐野直美, 雨宮浩樹, 小北康弘, 丹羽正和, 安江健一: EPMA による重鉍物の迅速な定量分析を用いた後背地解析; 北海道幌延地域の事例, 応用地質, 62(1), 2021, pp.2-12.

吉田英一, 山本鋼志, 丸山一平, 浅原良浩, 南雅代, 城野信一, 長谷川精, 勝田長貴, 西本昌司, 村宮悠介, 隈隆成, 竹内真司, 松井裕哉, 刈茅孝一, Metcalfe, R: コンクリーション化プロセスの理解と応用, 2021 年地質学会シンポジウム, 2021.

吉田英一，山本鋼志，丸山一平，刈茅孝一，中山雅，櫻井彰孝，佐藤稔紀：コンクリーション化による **EDZ** および水みち割れ目の自己シーリングに関する研究，日本応用地質学会研究発表会，2021.