

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 研究所用地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	高温度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	高温度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°C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るんで地下深くに定置するという、地層処分の概念を実現するための色々な方法のことで、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、

*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。

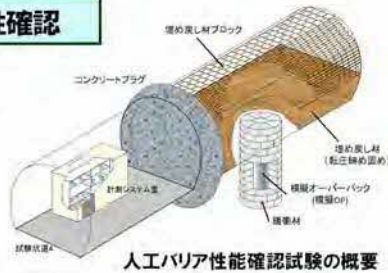
*13：ベントナイトやコンクリートなどが材料となって構成される、緩衝材や埋め戻し材が移動・膨出するのを防ぐため、あるいは掘削損傷領域の地下水の移動を抑制するために、処分坑道の両端やその周辺に設けられる構造物です。

*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解体調査のイメージ

②処分概念オプションの実証

- 人工バリアの位置・品質確認などの方法論に関する実証試験
 - ・採集・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証
 - ・坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化
- 高温（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

[概要] 位置・回収技術や閉鎖技術も含めた、種々の処分概念オプションの工学的実現性を実証し、多様な地質環境条件に対して柔軟な処分場設計を行うことを支援する技術オプションを提供する。廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報を整理する。



閉鎖技術オプションの整理

③地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

- 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化
 - ・地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握
 - ・地下水流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化
- 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

[概要] 地震・断層活動等の地殻変動に対する堆積岩の力学的・水理学的な緩衝能力を定量的に検証するとともに、化石海水の三次元分布に係る調査・評価手法を高度化し、堆積岩地域における立地選定や処分場の設計を、より科学的・合理的に行える技術と知見を整備する。



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、国際プロジェクトにおける解析		連成モデルの適用性確認、改良・高度化						
1.2	物質移行試験	掘削影響領域での有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した		物質移行に関するデータ取得、物質移行試験、等						
2. 処分概念オプションの実証										
2.1 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験										
2.1.1	操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証	搬送定置・回収技術、閉鎖技術の実証								
2.1.2	坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化					坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化、廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要となる情報の整理、等				
2.2	高温（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験	100℃超の際に国際プロジェクト		ニアフィールドにおいて発生する現象の整理、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の幅の断層の活動性		断層を対象とした水圧擾乱試験、評価手法の整備、等						
3.1.2	地下水の流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・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。

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。

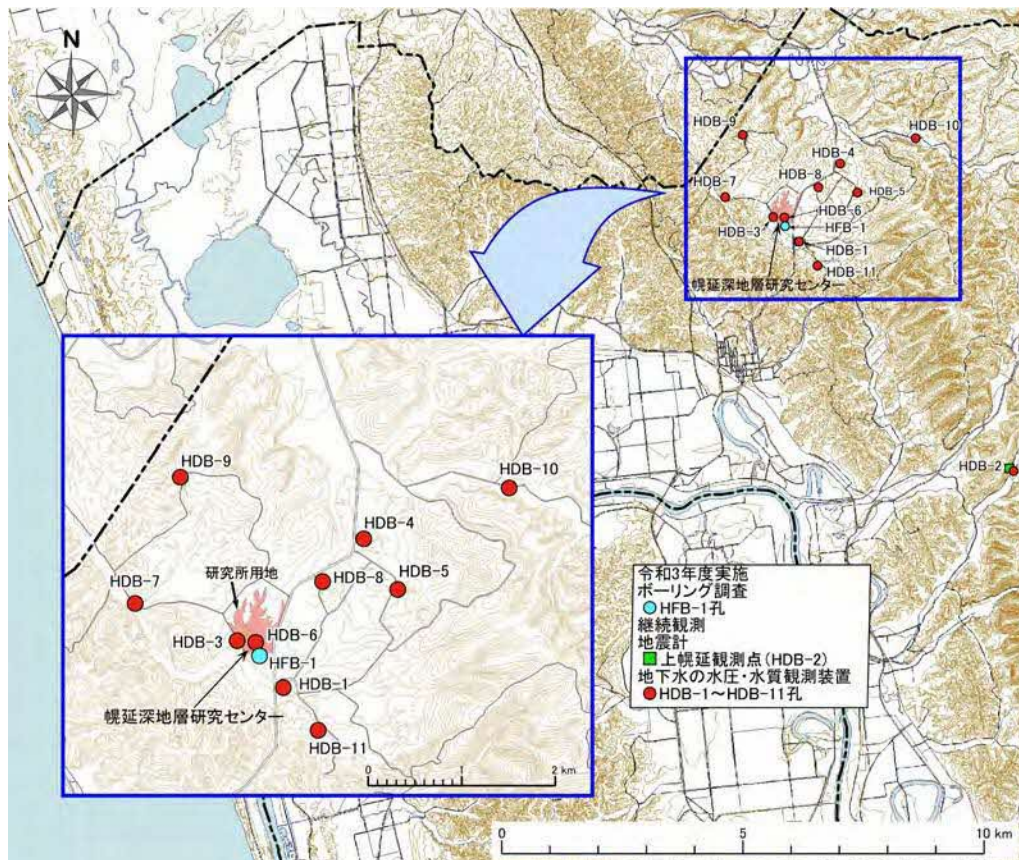


図 3 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所
 国土地理院の基盤地図情報（基本項目）を加工して作成



図 4 研究所用地における主な施設と観測装置の配置

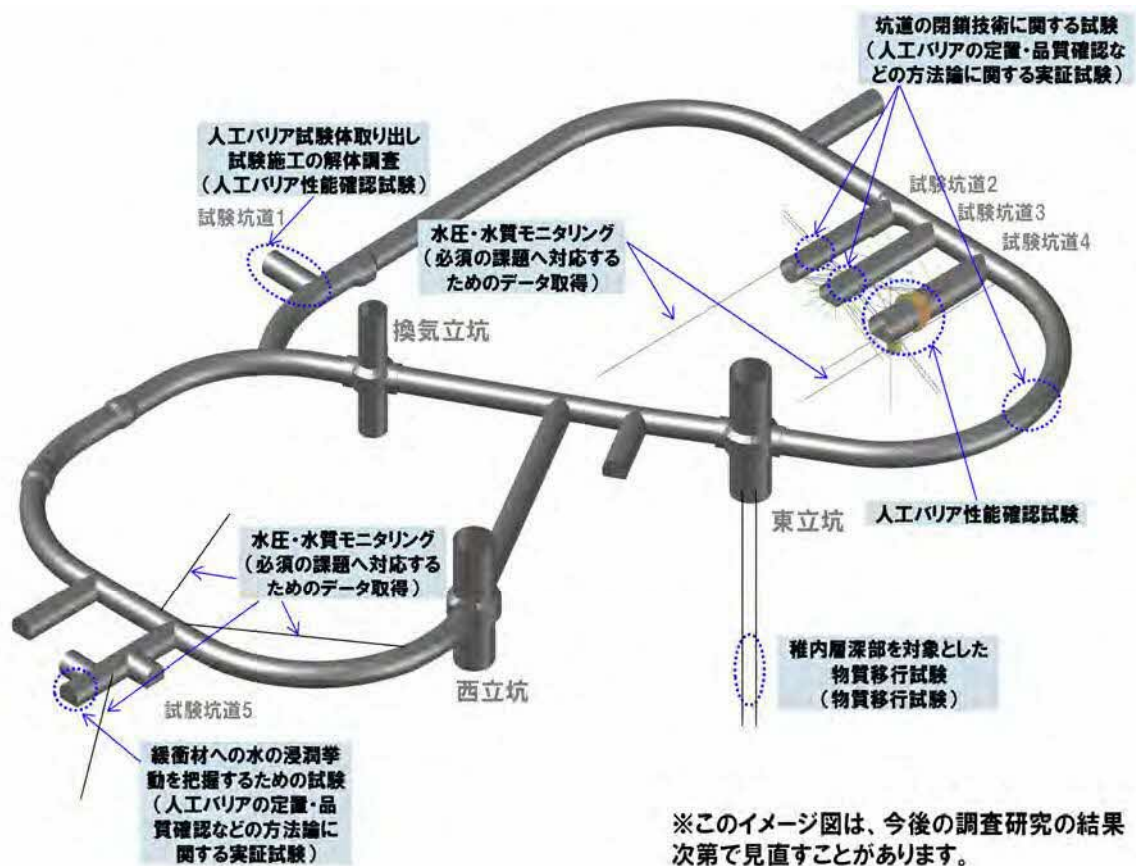


図 5 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

(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。

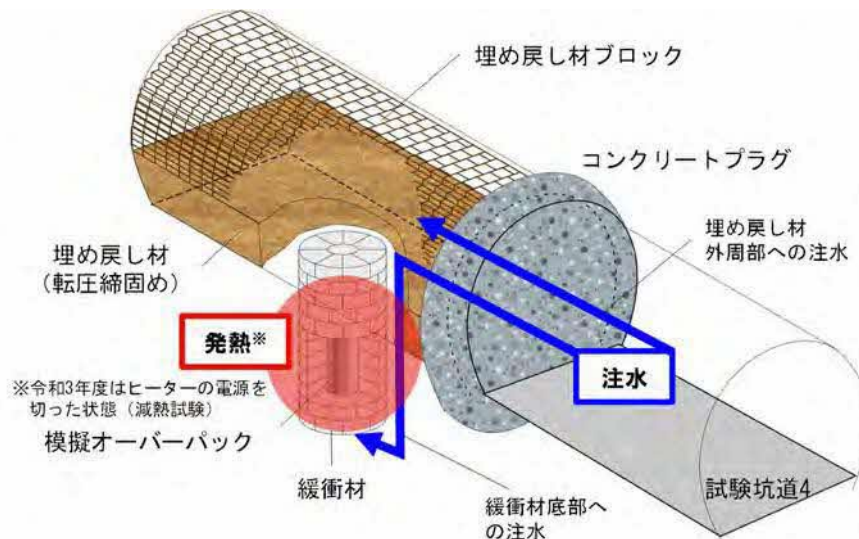
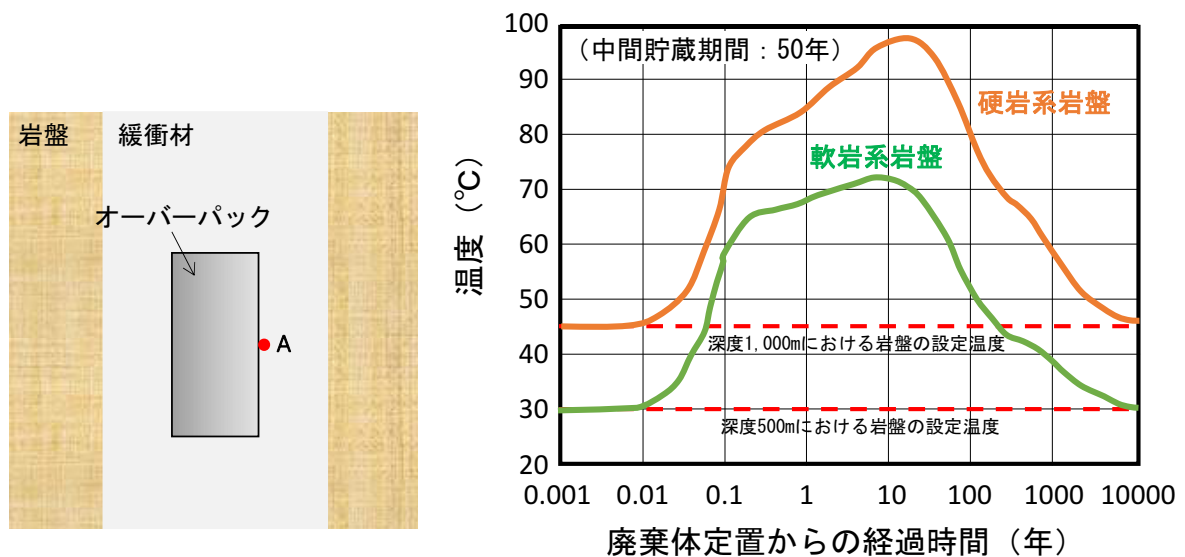


図 6 人工バリア性能確認試験の概念図

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°C 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°C 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。

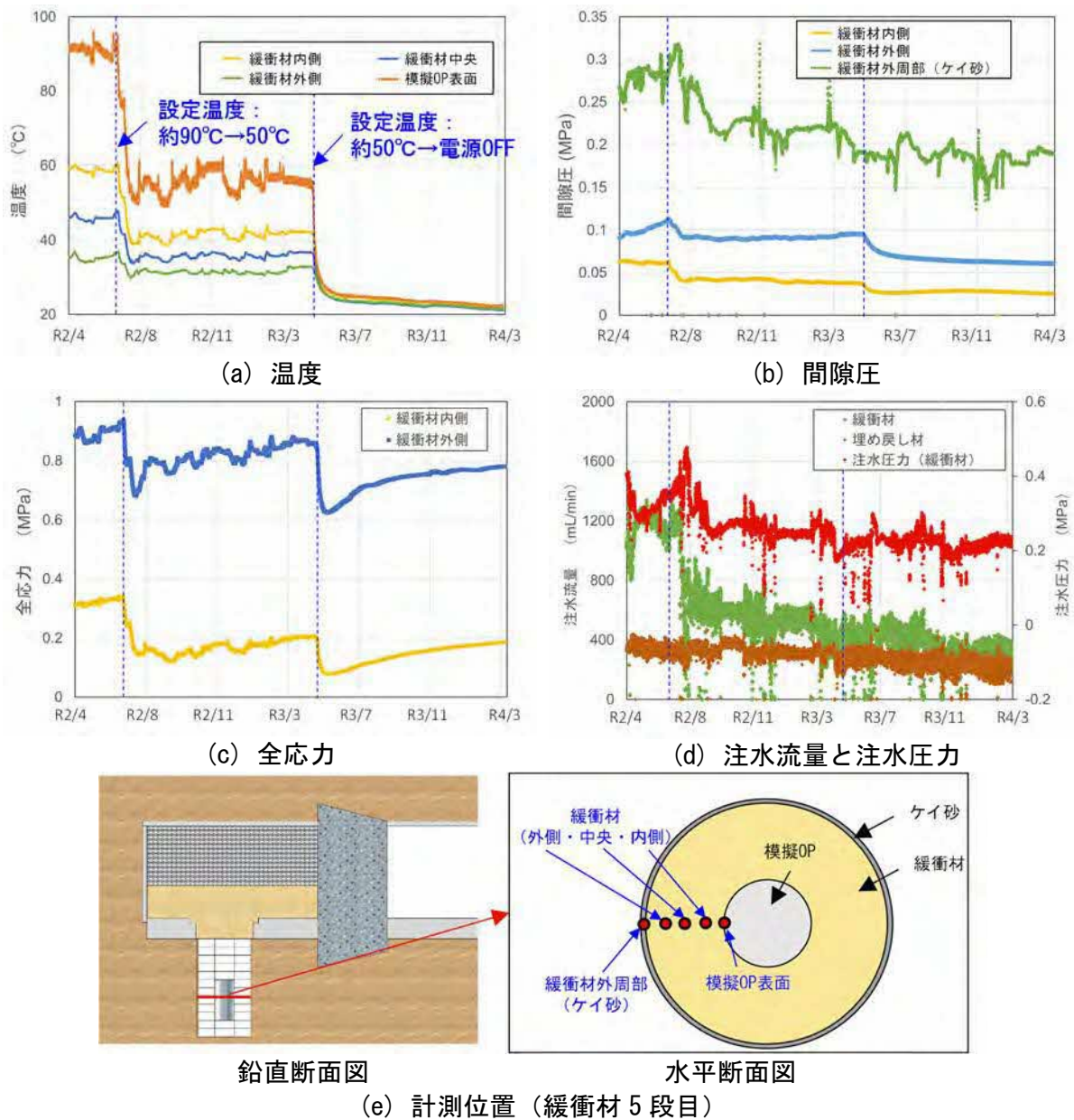


図 8 緩衝材 5 段目の計測データ

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。

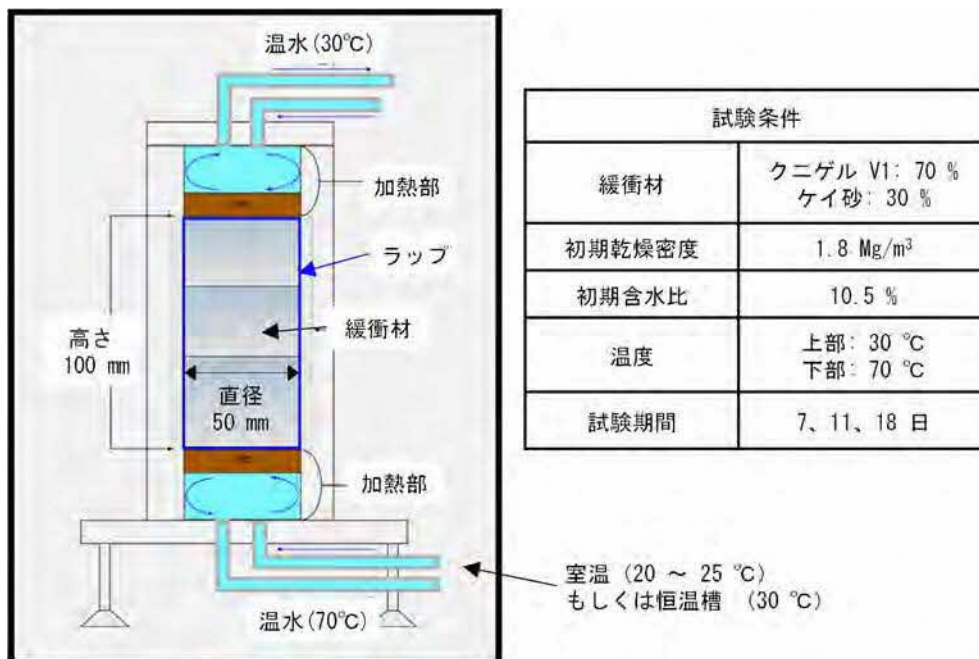


図9 温度勾配下における緩衝材中の水分移動特性に関する試験の概念図と試験条件

外部条件	室温		恒温槽	
	1回目	2回目	1回目	2回目
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

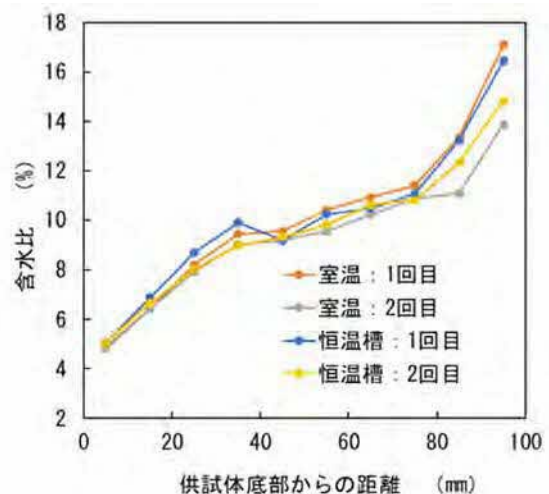


図 10 試験結果 (試験期間 18 日)

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。

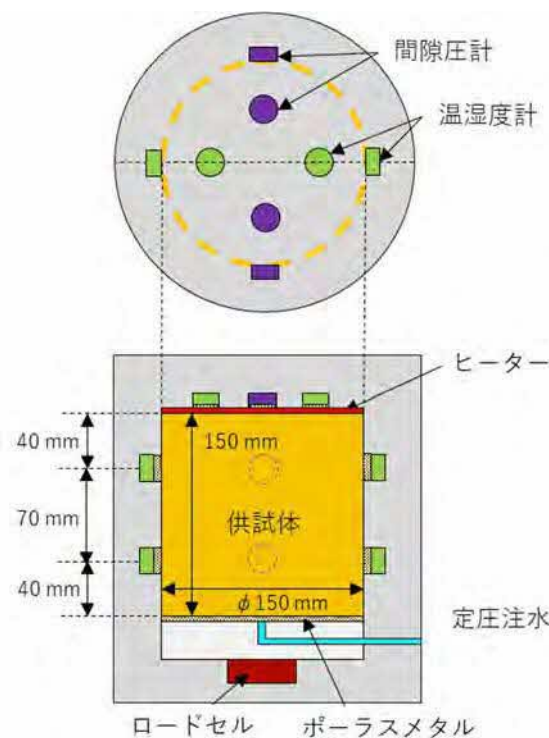


図 11 気相の影響を確認するための試験装置の概念図

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°C 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°C、側面上段は平均 37°C、側面下段は平均 28°C 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°C に対して 8°C 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。

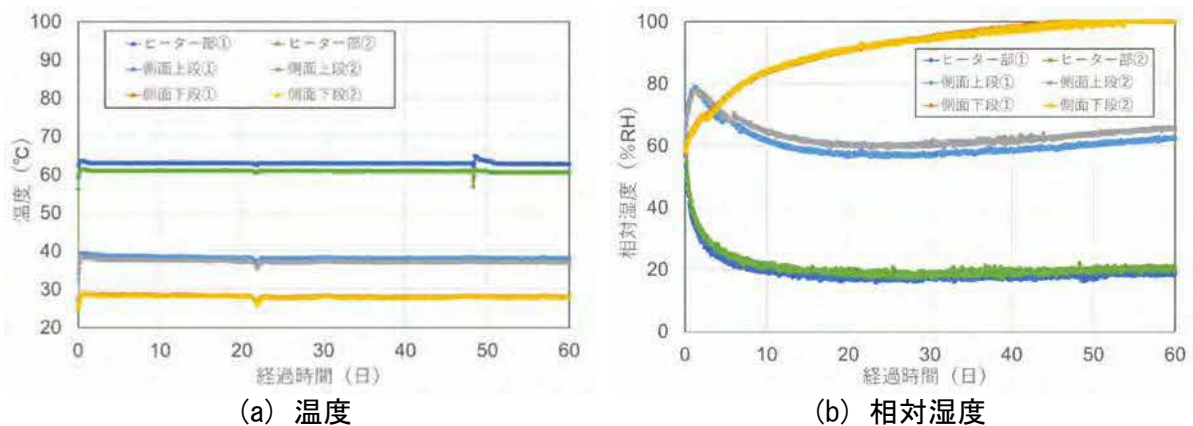


図 12 温度、相対湿度の測定結果

(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。

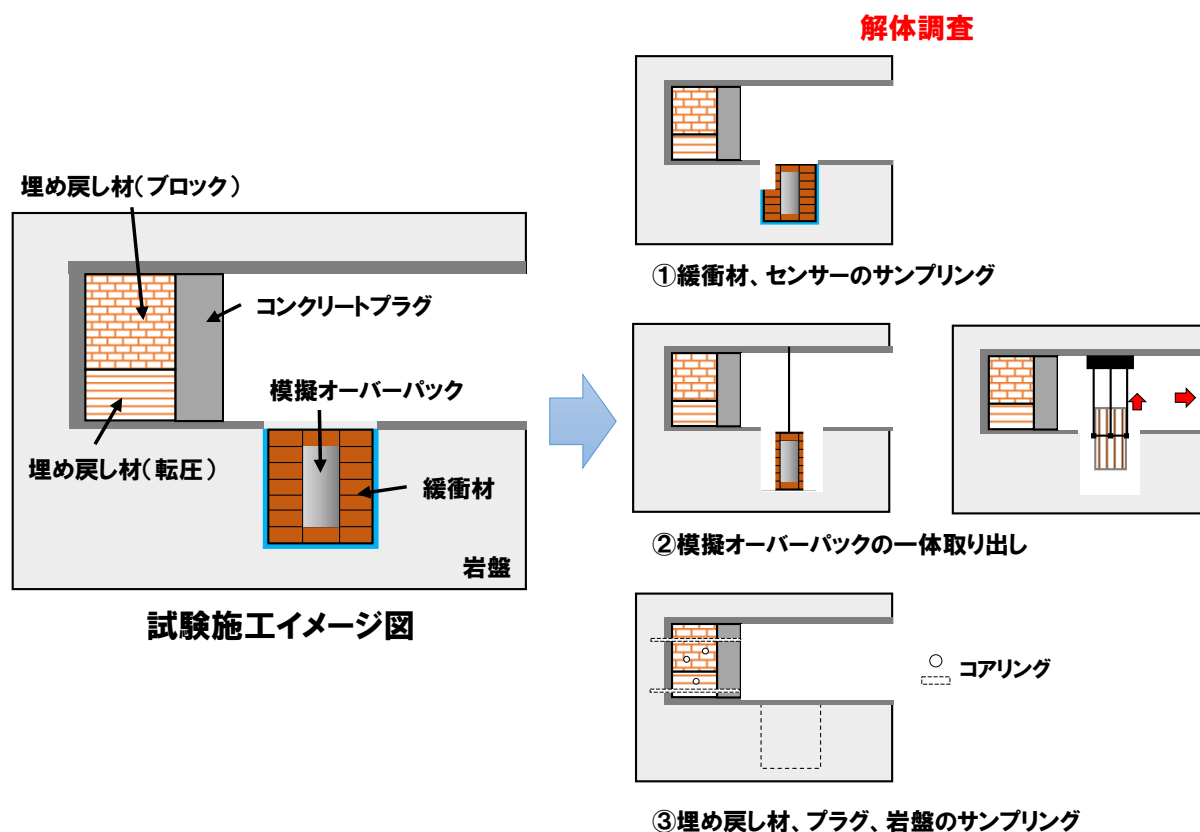


図 13 人工バリア解体試験施工の概念図

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際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。

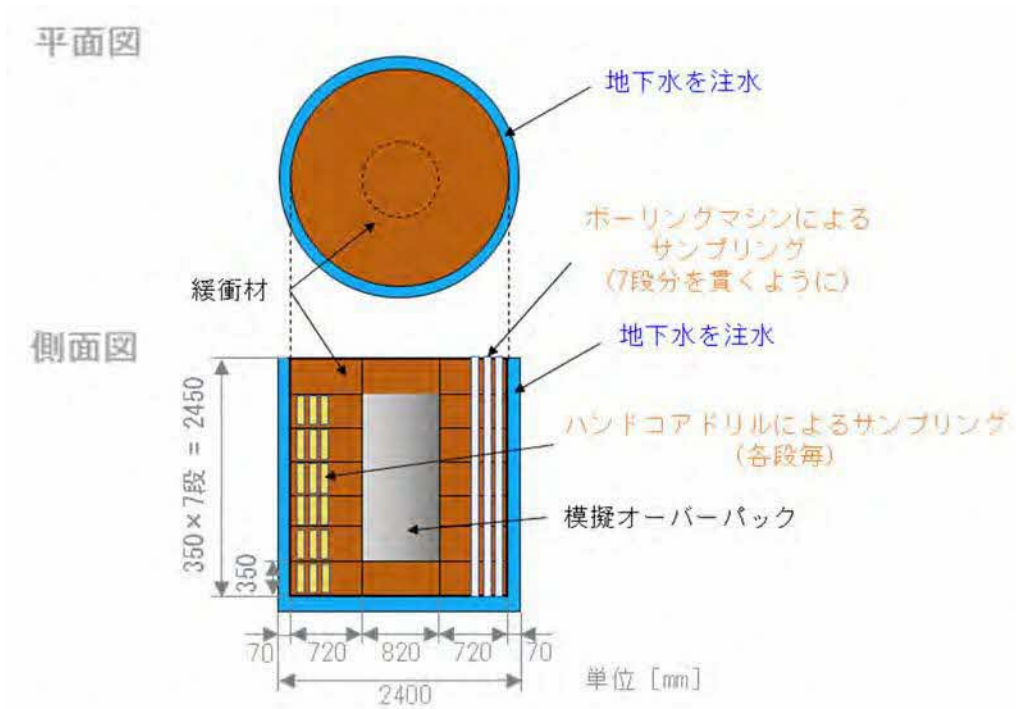
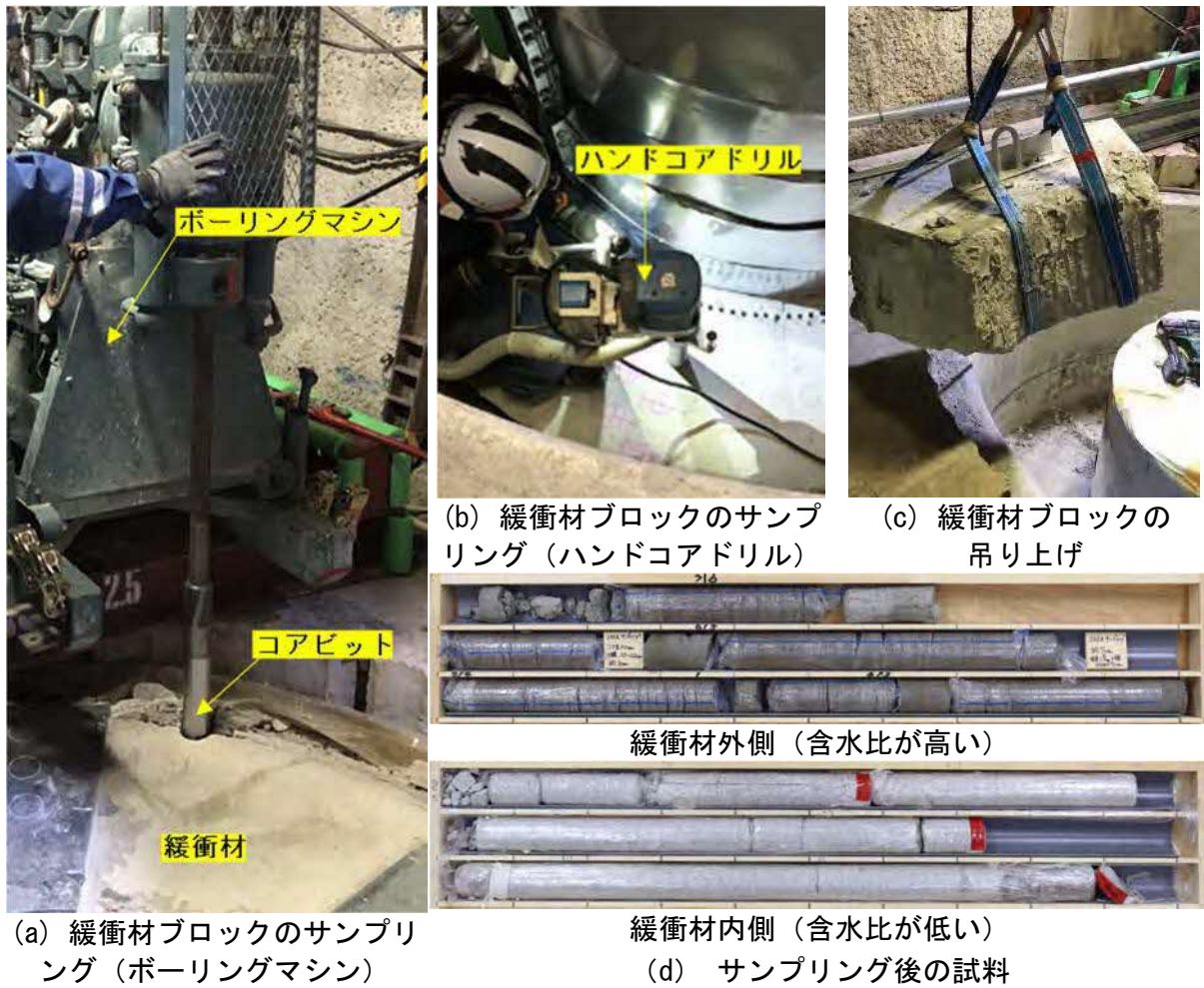


図 14 緩衝材サンプリングの概念図



(a) 緩衝材ブロックのサンプリング (ボーリングマシン)

(b) 緩衝材ブロックのサンプリング (ハンドコアドリル)

(c) 緩衝材ブロックの吊り上げ

緩衝材外側 (含水比が高い)

緩衝材内側 (含水比が低い)

(d) サンプリング後の試料

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

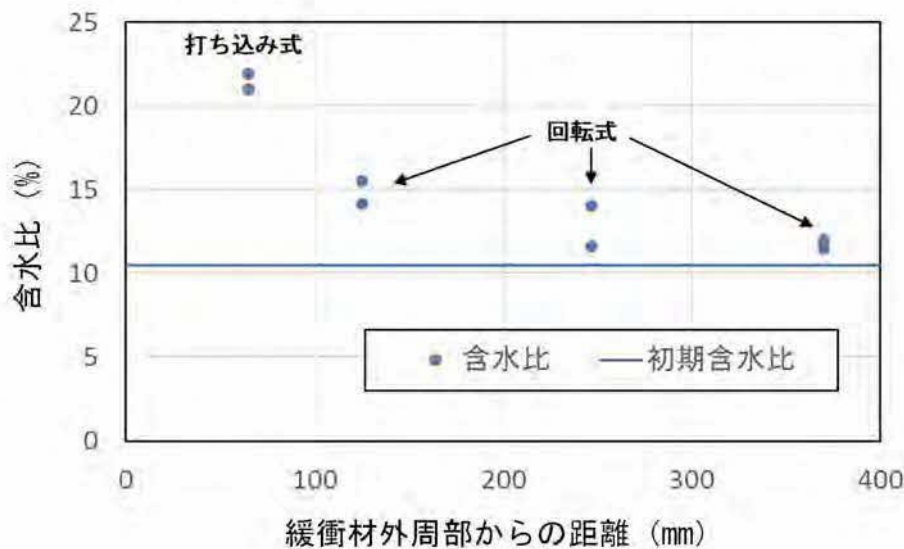
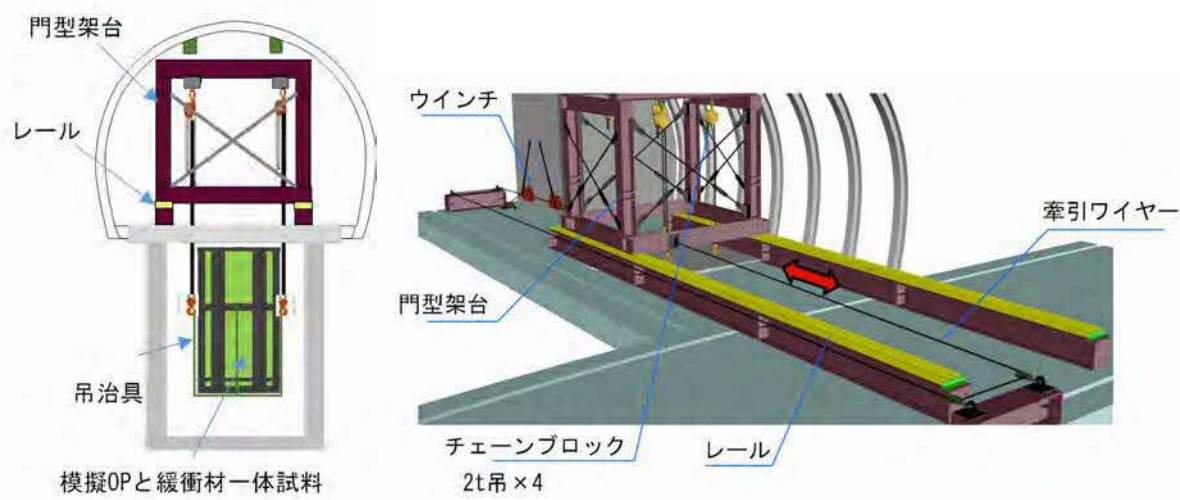


図 16 含水比測定結果の一例（緩衝材ブロック：下から 5 段目）

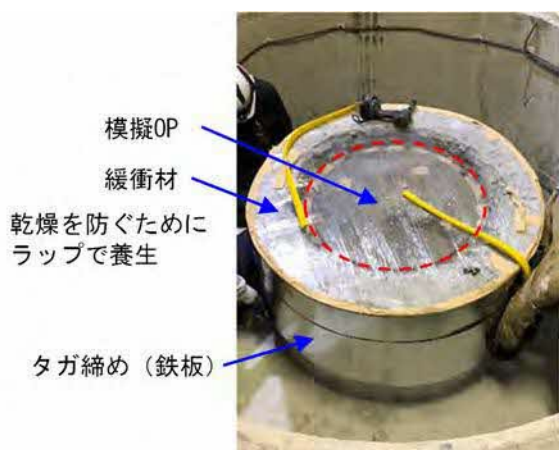
模擬 OP については、腐食や緩衝材との相互作用に関する調査などを予定しています。それらの調査のためには、模擬 OP 本体と付近の緩衝材の接触状態を維持したまま、試験孔から取り出す必要があります。模擬 OP と付近の緩衝材を一体で取り出す場合、その重量は約 4 t を超えることが想定されます。しかし、地下施設の揚重設備で引き上げ可能な重量は 2 t までであるため、取り出し方法を新たに検証する必要があります。そこで、本試験施工では、模擬 OP 一体取出し用の揚重設備を設置し、試験孔からの取り出し方法の検証を行いました。図 17 に取り出しの概念図を、図 18 に作業状況を示します。まず、模擬 OP 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 まで揚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。



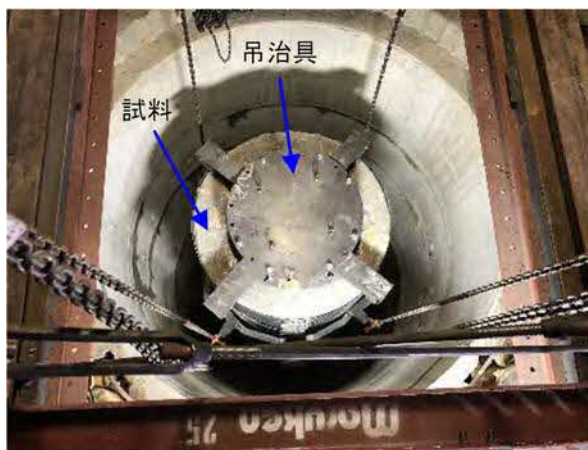
(a) 一体取り出しイメージ

(b) 坑道内移動イメージ

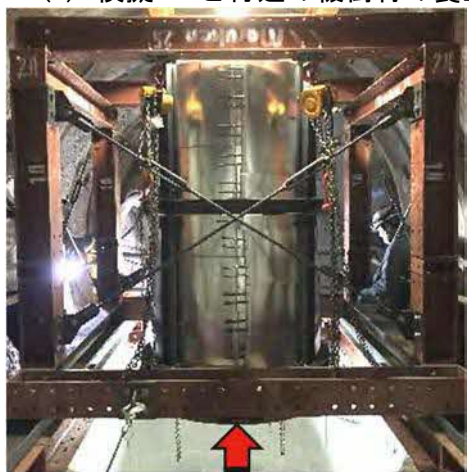
図 17 模擬 OP の一体取り出しの概念図



(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。

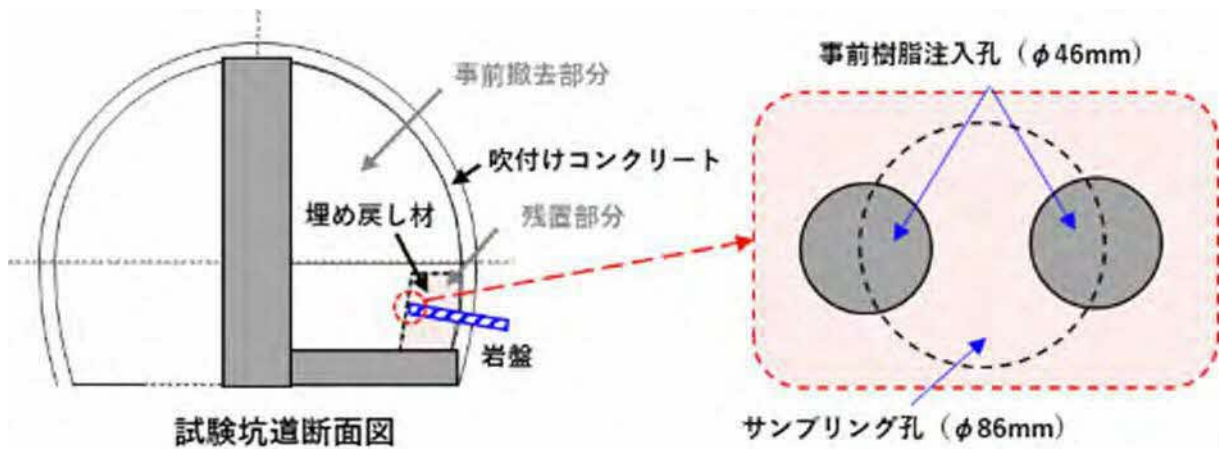


図 19 サンプリングと事前樹脂注入の概念図

*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。

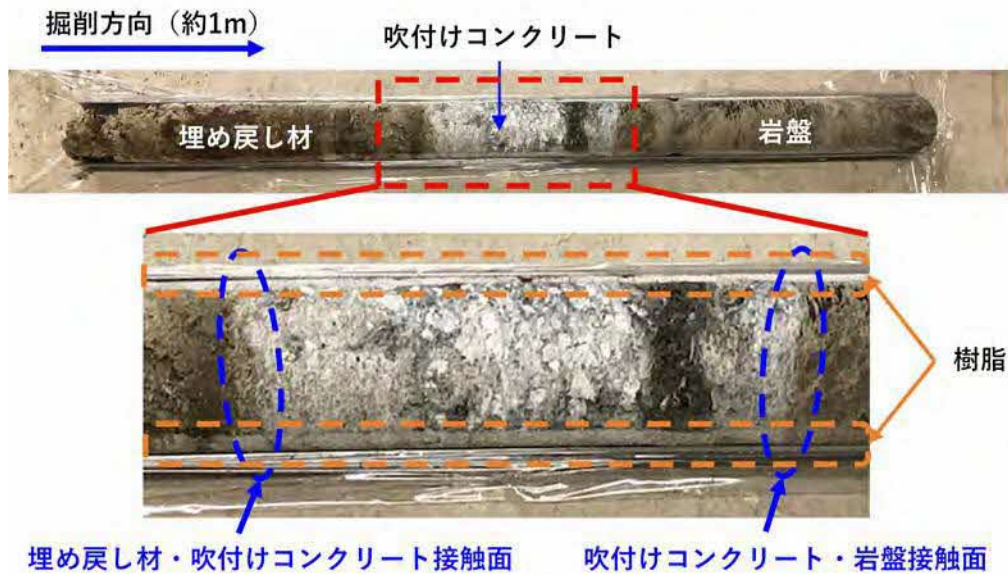


図 20 サンプルングした試料（樹脂充填）

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）。

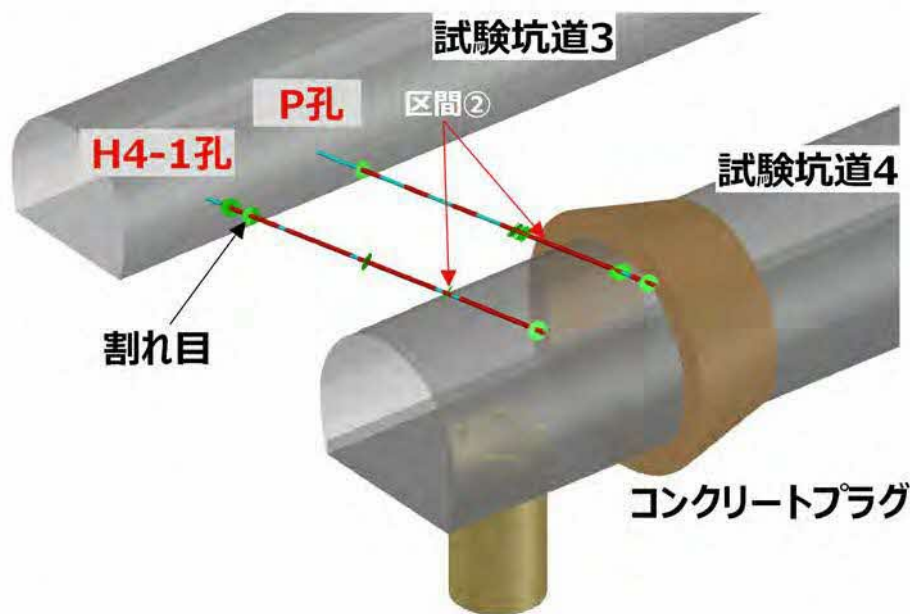


図 21 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験のレイアウト

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ひ、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的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。

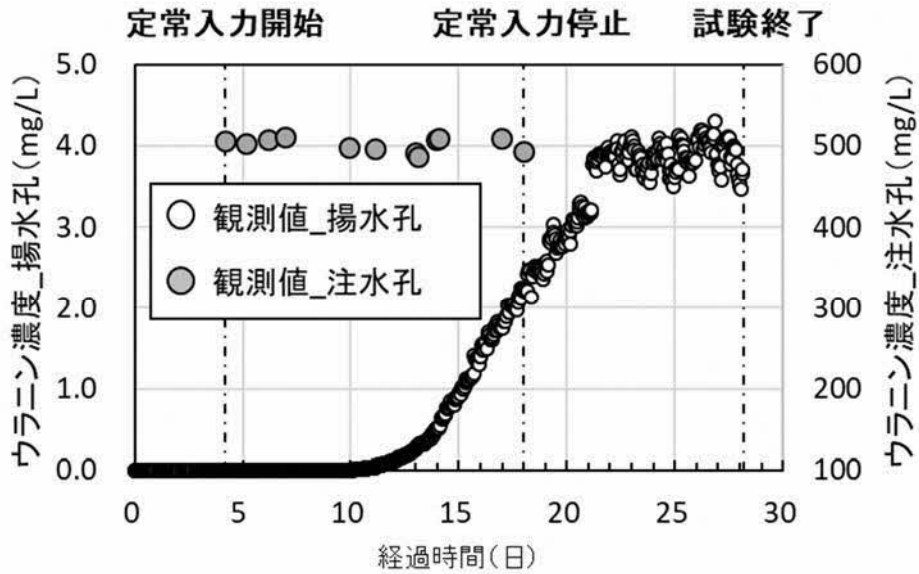


図 22 トレーサー濃度変化（注水・揚水区間）
経過時間はパルス入力（500 mg/L のウランニを 20 分間注入）した時点から起算しています。

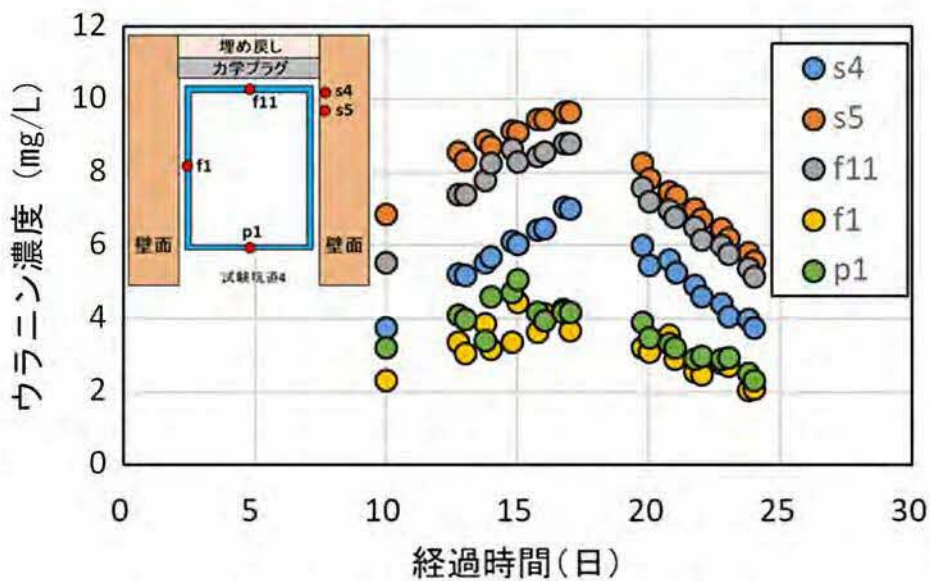


図 23 トレーサー濃度変化（壁面湧水など）
経過時間はパルス入力（500 mg/L のウランニを 20 分間注入）した時点から起算しています。

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に移行し、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、電気伝導度が大きい（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。