幌延深地層研究計画 令和2年度調査研究成果報告

令和3年7月

日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター

目 次

. はじめに	1
. 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
。 令和2年度の主な調査研究の成果	5
3.1 主な調査研究の成果 3.2 稚内層深部 (深度 500 m) での研究の実施に関する検討結果	5 .11
. 実際の地質環境における人エバリアの適用性確認	. 15
4.1 人エバリア性能確認試験4.2 物質移行試験	. 15 . 20
. 処分概念オプションの実証	. 29
5.1 人エバリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験 5.2 高温度(100℃以上)等の限界的条件下での人エバリア性能確認試験	. 29 . 69
地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証	. 74
6.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化6.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験	. 74 . 89
	00
一令和2年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得	. 92
 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 地下施設の管理 	. 92 119
 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 地下施設の管理 8.1 地下施設の整備 8.2 地下施設の維持管理 8.3 掘削土 (ズリ)の管理 8.4 排水の管理 	. 92 119 119 119 120 121
 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 地下施設の管理 8.1 地下施設の整備 8.2 地下施設の維持管理 8.3 掘削土(ズリ)の管理 8.4 排水の管理 環境調査 	. 92 119 119 119 120 121 122
 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 地下施設の管理 8.1 地下施設の整備 8.2 地下施設の維持管理 8.3 掘削土(ズリ)の管理 8.4 排水の管理 環境調査 9.1 排水量および水質調査結果 9.2 研究所用地周辺の環境影響調査結果 	92 119 119 119 120 121 122 122 133
 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 地下施設の管理 8.1 地下施設の整備 8.2 地下施設の維持管理 8.3 掘削土(ズリ)の管理 8.4 排水の管理 環境調査 9.1 排水量および水質調査結果 9.2 研究所用地周辺の環境影響調査結果 0. 安全確保の取り組み 	92 119 119 120 121 122 122 133 136
 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 地下施設の管理 8.1 地下施設の整備 8.2 地下施設の維持管理 8.3 掘削土 (ズリ)の管理 8.4 排水の管理 第境調査 9.1 排水量および水質調査結果 9.2 研究所用地周辺の環境影響調査結果 9.2 研究の取り組み 1. 開かれた研究 	. 92 119 119 120 121 122 122 133 136 137
 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 地下施設の管理	. 92 119 119 120 121 122 133 136 137 137 142
 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 地下施設の管理	. 92 119 119 120 121 122 133 136 137 137 142 144
 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 地下施設の管理 8.1 地下施設の整備	. 92 119 119 120 121 122 122 133 136 137 137 142 144 147

図目次

义	1	令和2年度の主な調査研究	. 5
义	2	研究所用地における主な施設と観測装置の配置	. 9
义	3	ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所	. 9
义	4	350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所	10
义	5	人エバリア性能確認試験の概念図	17
义	6	人工バリア性能確認試験で取得した計測データの一例(緩衝材5段目)	17
义	7	比抵抗トモグラフィによる緩衝材中の飽和度の算出結果	18
义	8	試験施工の概要図(鉛直断面図)	19
义	9	施工の様子	19
义	10	EDZ を対象としたトレーサー試験のレイアウト(鳥瞰図)	21
义	11	EDZ を対象としたトレーサー試験結果	22
义	12	微生物・有機物・コロイドを対象とした物質移行試験のイメージ図	24
义	13	140m 調査坑道から採取した地下水および地表水中の溶存有機物のサイズ分	1
		布	25
义	14	ブロックスケールを対象としたトレーサー試験	27
义	15	水圧擾乱試験時の間隙水圧観測結果	28
义	16	吹付けコンクリート試験体作製状況	31
义	17	試験体の一軸圧縮強度の確認	32
义	18	坑道内における試験体の定置状況	32
义	19	坑道周辺の地質環境に関する力学的概念モデル	33
义	20	坑道周辺の地質環境に関する水理的概念モデル	34
义	21	透水係数の増加率(Case1)	35
义	22	圧力分布の時間変化	35
义	23	飽和度の時間変化	36
义	24	物質移行解析におけるモデルの概要	39
义	25		39
义	26	埋め戻し材の変質の程度に応じた核種移行の挙動の違い(粒子発生位置:	
_		処分孔①)	40
义	27	埋め戻し材の変質の程度に応じた核種移行の挙動の違い(粒子発生位置:	
_	• •		41
凶	28	縮尺模型試験の概念図	43
凶	29	縮尺模型試験における膨潤変形率の経時変化	44
図	30		45
図	31	縮尺模型試験における膨潤圧力の経時変化	45
図 図	32	粘土止水壁周辺の概要図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	46
× ×	33	ペントナイトの吹付けによる施工方法の予備試験実施状況	48
図 図	34	乾燥密度の平均値および最大値、最小値	48
× ×	35	含水比と乾燥密度の関係	49
図 図	36		50
× ×	3/	吹付け試験の試験状況と出米形の様子	51 Γ₁
医 同	<u>კ</u> გ	吹付け試験のサンノリンク位直	51
医 同	39	さ水比と乾燥省度の関係	52
1×	40	- 乳燥浴度の半均個およい最大個、最小個	52

义	41	試験の概念図	53
义	42	弾性波の振幅評価と比抵抗分布図	54
义	43	トモグラフィ調査の測点図	55
义	44	トモグラフィ結果図	56
义	45	弾性波速度分布の深度スライス断面図	57
义	46	数値シミュレーションよる調査時の弾性波の通過経路の比較例	59
义	47	調査により取得された弾性波の到達時間と EdZ が1m であると仮定した場	
		合に数値計算により推定される到達時間の比較	59
义	48	原位置での緩衝材流出試験設備の概要	65
义	49	緩衝材流出試験における水位と排水量の変化	66
义	50	緩衝材流出試験における緩衝材の総流出量と排水中のベントナイト濃度の	
		経時変化	67
义	51	緩衝材流出試験後に回収した試験体	68
义	52	蒸発による水分移動特性を評価するための室内試験および解析手法のイメ	
		ージ	70
义	53	高温度における人エバリア性能確認試験の施工状況ならびに計測機器の配	
		置断面図(海外での研究事例)	73
义	54	HDB-6 孔および PB-V01 孔における長期水圧観測結果	75
义	55	HDB-6 孔および PB-V01 孔における水圧低下量を流量で除した値と時間を距	
		離の二乗で除した値の関係	76
义	56	FZ-01 孔の深度 96.8 mの断層部へ注水を行った際の FZ-02 孔の深度 99.5	
		m(観測点 1)および深度 117.8 m(観測点 2)の断層部での水圧応答	77
义	57	稚内層中の割れ目の水理的連結性に関する DI を指標とした領域区分とボ	
		ーリング孔で得られた水理学的情報との比較	77
义	58	ボーリング孔における(a) 稚内層の割れ目を対象とした透水試験時の水圧	
		変化と(b)地下水の水圧と水質の深度分布	78
义	59	水圧上昇による断層内の開口部と水理的連結性の増加	79
义	60	断層間の離間距離と断層の水理的連結性の関係に関する解析結果	80
义	61	水圧擾乱試験を行った幅数十 cm の断層部のコア写真、孔壁画像および推	
		定形状	81
¥	62	水圧擾乱試験結果	82
义	63	電磁探査および反射法地震探査の測点・測線の配置	84
义	64	電磁探査により得られた三次元比抵抗分布の水平断面図	86
义	65	(a) 既存の地上からのボーリング調査において比抵抗検層により得られた	
		比抵抗値と水質分析により得られた酸素同位体比の関係、(b)既存の地上	
		からのボーリング調査の比抵抗検層により得られた比抵抗値の累積頻度分	
			86
凶	66	反射法地震探査の重合前深度マイクレーション(PSDM)解析結果と電磁探	~ ~
	07	査で得られた比抵抗分布の重ね合わせ	88
凶	6/		89
区	68	樹脂注人後に採取したコアの例	90
凶	69 70	割れ日の開口幅とせん断変位重の計測万法	90
凶	/0	EULの割れ日で計測された開口幅とせん断変位量の関係	91
凶	/1	地ト水の採取箇所(集水リンク)	94

义	72	地下水の採取箇所(ボーリング孔)	95
义	73	地下水の CI⁻濃度の経時変化	96
义	74	試験坑道4壁面からの浸出水の採取箇所	97
义	75	試験坑道2および試験坑道4周辺における水圧・水質モニタリング実施箇	
		所	98
义	76	CO5 における水圧モニタリング結果	99
义	77	CO6 における水圧モニタリング結果	99
义	78	C07 における水圧モニタリング結果10	00
义	79	CO8 における水圧モニタリング結果 10	00
义	80	CO9 における水圧モニタリング結果 10	01
义	81	試験坑道2および試験坑道4周辺における水質モニタリング継続可能区間	
			02
义	82	CO5の区間2における水質モニタリング結果10	03
义	83	解析領域と解析条件10	05
义	84	350m 調査坑道を模擬した感度解析による岩盤中への酸素の侵入量と侵入深	
		度の関係性10	05
义	85	140m 調査坑道から得られた岩石試料(声問層)中の微生物分布10	06
义	86	350m 調査坑道から得られた岩石試料(稚内層)中の微生物分布1	07
义	87	遺伝子解析結果に基づく各採水区間における地下水中の微生物種の存在割	
		合1(80
义	88	微小領域におけるセレン(Se)、鉄(Fe)、硫黄(S)のマッピング分析結果.1	10
义	89	セレン濃集部に対するセレン(Se)および鉄(Fe)の化学形態に関する分析結	
		果1	10
义	90	各抽出ステップにて抽出されたセレン(Se)の量1	11
义	91	地中変位計設置状況1	12
义	92	鋼製支保工応力計設置例1	12
义	93	計測器設置位置図1	13
义	94	光ファイバー式地中変位計の計測結果1	13
义	95	電気式地中変位計の計測結果1	14
义	96	鋼製支保工応力計の計測結果1	14
义	97	傾斜計データの一例1	16
义	98	幌延深地層研究センター周辺の震央分布1	17
义	99	地下施設の地震観測記録の例(令和3年2月6日午前4時10分ごろ発生	
		した地震)1	18
义	100	地下施設の整備状況1	19
义	101	設備の点検および更新状況1	19
义	102	掘削土(ズリ)置場1	20
义	103	ニ重遮水シートの構造1	20
义	104	排水処理設備1	21
义	105	排水系統と各水質調査の採水地点1	22
义	106	地下施設からの排水処理フローと採水地点12	24
义	107	天塩川の採水地点12	26
义	108	天塩川の採水状況1	26
义	109	掘削土 (ズリ) 置場周辺の地下水の採水地点12	28

110	掘削土(ズリ)置場周辺の地下水の採水状況(A1~A4)	128
111	清水川および掘削土(ズリ)置場雨水調整池の採水地点	130
112	清水川および掘削土(ズリ)置場雨水調整池の採水状況	130
113	環境調査実施場所	133
114	清水川の水質調査	134
115	生息魚類調査	135
116	安全パトロールの状況	136
117	安全行事の状況(安全大会)	136
	10 11 12 13 14 15 16 17	 110 掘削土(ズリ)置場周辺の地下水の採水状況(A1~A4) 111 清水川および掘削土(ズリ)置場雨水調整池の採水地点 112 清水川および掘削土(ズリ)置場雨水調整池の採水状況 113 環境調査実施場所 114 清水川の水質調査 115 生息魚類調査 116 安全パトロールの状況 117 安全行事の状況(安全大会)

表目次

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

1. はじめに

国立研究開発法人^{*1}日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)幌延 深地層研究センターでは、原子力発電に伴って発生する高レベル放射性 廃棄物を安全に地層処分するための基盤的な研究開発として、平成13年3 月より、北海道の幌延町において幌延深地層研究計画(堆積岩を対象とし た深地層の研究施設計画)を進めています。この計画は、堆積岩を対象と した深地層の科学的な研究(地層科学研究)および地層処分技術の信頼性 向上や安全評価手法の高度化に向けた研究開発(地層処分研究開発)を目 的として、「地上からの調査研究段階(第1段階)」、「坑道掘削(地下施設 建設)時の調査研究段階(第2段階)」、「地下施設での調査研究段階(第3 段階)」の3つの調査研究段階に分けて実施してきました。地層処分に関わ る地下研究施設には、最終処分場として使用しない施設で技術を磨く地 下研究施設(ジェネリックな地下研究施設)と最終処分候補地の適性を見 定める地下研究施設(サイトスペシフィックな地下研究施設)の2つの種 類があります。幌延深地層研究センターの地下施設はジェネリックな地 下研究施設です。

平成26年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、「高レベル 放射性廃棄物の問題の解決に向け、国が前面に立って取り組む必要があ る」との考え方が示され、そのために「地層処分の技術的信頼性について 最新の科学的知見を定期的かつ継続的に評価・反映する」ことが示されま した。これを踏まえて、文部科学省、経済産業省および原子力規制委員会 により「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が達成すべき業務運 営に関する目標(中長期目標)*2」(以下、第3期中長期目標*3)が定めら れ、この第3期中長期目標を達成するために、「国立研究開発法人日本原子 力研究開発機構の中長期目標を達成するための計画(中長期計画)(平成

^{*1:}独立行政法人通則法の改正(平成27年4月1日施行)により新たに設定された分類の一つで、研究開発に係 る業務を主要な業務として、中長期的(5~7年)な目標・計画に基づき行うことにより、わが国の科学技術の 水準の向上を通じた国民経済の発展その他の公益に資するため研究開発の最大限の成果を確保することを目的 とする法人に対する名称です。原子力機構は、平成27年4月1日に「独立行政法人日本原子力研究開発機構」 から「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構」に名称変更しています。

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

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

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

幌延深地層研究センターでは、北海道および幌延町により受け入れら れました、「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」で示した研究課題であ る、実際の地質環境における人工バリア*4の適用性確認、処分概念オプシ ョンの実証、地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力*5の検証について、令和 2年度以降、第3期および第4期中長期目標期間を目途に取り組むこととし ました*6。その上で、国内外の技術動向を踏まえて、地層処分の技術基盤 の整備の完了が確認できれば、地下施設の埋め戻しを行うことを具体的 工程として示します。

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

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

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

^{*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)。

2. 令和2年度以降の幌延深地層研究計画に基づく研究課題

令和2年度以降の幌延深地層研究計画では、必須の課題のうち、引き続き研究開発が必要と考えられる以下の課題(令和2年度以降の必須の課題) に取り組んでいます。

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

令和元年度までの人工バリア性能確認試験では、実際の地下環境にお けるヒーターの加熱過程のデータを取得しましたが、減熱過程*⁷のデータ が取得されていません。令和2年度以降は、注入する地下水の圧力や量を 増加させ緩衝材に地下水を浸潤させた場合のデータを取得し、分析・評価 します。その後、減熱時のデータを取得します。加えて、人工バリアの解 体作業を行い、緩衝材の飽和度などの確認を行います。

また、令和元年度までの物質移行試験により、トレーサー*8試験手法を 確立することができました。ただし、これまでの研究結果から、幌延の堆 積岩において、微生物や有機物が、放射性物質の岩盤への吸着を妨げ、閉 じ込め効果を低下させる可能性が確認されており、令和2年度以降は、確 立した試験手法を用いて掘削損傷領域*9での物質移行に関するデータ取 得を実施するとともに、有機物や微生物の影響を確認するためのトレー サー試験を実施します。

(2) 処分概念オプションの実証

令和元年度までの試験では、実際の環境下において、坑道の埋め戻し方 法の違い(締固め、ブロック方式など)による埋め戻し材の基本特性(密

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

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

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

度や均一性)を把握しましたが、緩衝材の施工方法や坑道閉鎖に関する 様々なオプションの検討には至っていません。令和2年度以降は、人工バ リア性能確認試験において、注入する地下水の圧力や量を増加させ、緩衝 材に十分に水を浸潤させた状態を確保して施工方法(締固め、ブロック方 式など)の違いによる緩衝材の品質の違いを把握するとともに、埋め戻し 方法(プラグの有無など)・回収方法による埋め戻し材の品質の違いを実 証試験で明らかにします。さらに、人工バリアの品質を踏まえて、廃棄体 の設置方法(間隔など)などを確認するための実証試験を行います。また、 人工バリアシステムの安全裕度の検証に向けて、緩衝材が100℃超になっ た状態を想定した解析手法を開発します。

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

令和元年度までの検討では、まずは小規模な断層(幅数cm)に着目して 試験を行い、断層への地震動の影響などを確認しました。これまでの研究 開発で手法の妥当性が確認できたため、この手法を使って、処分場の設 計・施工や安全評価とリンクした形で研究を進めることが可能となりま した。令和2年度以降は、より大型の断層において、地震動や坑道掘削に 伴う割れ目中の地下水の流れの変化に関して、堆積岩の緩衝能力(自己治 癒能力)の作用に係る実証試験を実施します。さらに、地下水が動いてい ない環境を調査してモデル化する技術を実証するとともに、人工バリア のひび割れに対する自己治癒能力¹⁰を解析する手法を開発します。

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

3. 令和2年度の主な調査研究の成果

3.1 主な調査研究の成果

令和2年度は、「幌延深地層研究計画 令和2年度調査研究計画」⁽¹⁾にしたがって、令和2年度以降の必須の課題に関わる調査研究および地下施設の管理などを実施しました。

調査研究では、必須の課題に重点的に取り組むとともに、必須の課題への対応に必要なデータ取得を継続しました(図 1)。以下に調査研究の概要を示します。



図 1 令和2年度の主な調査研究

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

人工バリア性能確認試験において、廃棄体の減熱過程を模擬した試験 を開始したことにより、緩衝材中の温度や間隙圧(隙間の空気と水の圧力 の和)が低下し、緩衝材の内側への地下水浸潤が進んだことを試験孔内に 設置したセンサーにより確認しました。加えて、模擬オーバーパック、緩 衝材および岩盤の間で発生する熱-水理-力学-化学連成現象*11に関わる解析について、国際共同研究DECOVALEX*12に参画し、室内試験結果を対象に、共同解析を行うための解析モデルや解析条件を設定するとともに、各国間の解析コードの違いを確認しました。また、空気の移動などを考慮した熱-水理-力学連成現象に関する室内試験については、事前の解析結果を基に浸潤挙動や膨潤挙動に及ぼす空気の影響を確認し、試験条件の設定を行いました。

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

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

(2) 処分概念オプションの実証

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

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

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

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

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

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

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

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

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握として、過年度に実施し

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

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

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

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

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

上記のほか、必須の課題に関わる調査研究における基礎情報として、既 存のボーリング孔などにおける地下水の圧力や水質の観測、地下施設で の調査研究で使用するための調査技術や調査機器の開発を継続し、地質 環境を推定するための手法について、信頼性の向上を図りました。さらに、 坑道を掘削した後の岩盤と支保の長期挙動の把握や地下施設の耐震安定 性に関する評価を行い、地下施設設計の妥当性の検証を継続しました。

研究所用地内の主な施設と観測装置の配置を図 2に示します。また、 幌延町内で実施している調査研究に関わる主要なボーリング調査や観測 地点などの位置を図 3に、350m調査坑道における主な調査研究の実施場 所を図 4に示します。

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

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

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



図 2 研究所用地における主な施設と観測装置の配置



図 3 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所



図 4 350m調査坑道における主な調査研究の実施場所

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

幌延深地層研究計画の成果は、原子力機構の核燃料サイクル工学研究 所などの成果と合わせて、一連の地層処分技術として、処分事業や安全規 制に適宜反映していきます。そのため、令和2年度も国内外の研究機関と の連携を図るとともに、大学などの専門家の協力を得ながら、本計画を着 実かつ効率的に進めました。また、研究開発業務の透明性・客観性を確保 する観点から、研究計画から成果までの情報を国内外の学会や学術誌な どを通じて広く公開するとともに、ホームページ*20などを活用した情報 発信を継続しました。参考資料として、巻末に令和2年度の外部発表実績

^{*20 :} https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/

を掲載しました。

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

3.2 稚内層深部(深度 500 m)での研究の実施に関する検討結果

令和2年度の「幌延深地層研究の確認会議」では、「令和2年度以降の幌 延深地層研究計画」の必須の研究課題の範囲内であることを前提として、 令和2年度以降の研究成果を最大化するため、稚内層深部(深度500 m)で の研究を実施するかどうかについて判断材料を集めるため、研究内容の 検討および設計を行うこととしていました。

深度500 mの地質環境に関しては、令和2年度に新たに実施した令和元 年度までの水圧擾乱試験などのデータの解析の結果、深度500 m付近は水 が流れにくい領域であると推定されました(6.1.1にて詳述:図 57参照)。 また、高密度電磁探査の結果、地下施設の深度500 m付近の化石海水の空 間分布を詳細に把握することができ、地下水が長期的に滞留状態にある ことが分かりました(6.1.2にて詳述:図 64参照)。この結果、深度500 m の地質環境は、深度350 mと比較して、地下水や物質の動きが極めて緩慢 であることが確認されました。なお、深度500 mは深度350 mに比べて土 Eや地下水圧が高く、地下坑道の設計・施工に関わる難易度は高くなりま す。深度500 mと深度350 mの地質環境の特徴を表 1に示します。

このような特徴を有する深度500 mにおいて「令和2年度以降の幌延深 地層研究計画」のうち、主として「坑道スケール〜ピットスケールでの調 査・設計・評価技術の体系化」の研究を実施することで、主に以下の成果 が得られ、令和2年度以降の研究成果の最大化を図ることができると考え られます。

高い地圧がかかり、坑道の設計・施工上の難易度が高い地質条件下で、
 処分技術に関わる基盤技術の実証

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

- ・物質が動きにくい環境で岩盤が有する物質を閉じ込める性能が実証でき、人工バリアなどの技術仕様の精緻化の提案が可能
- ・水の流れに大きな影響を及ぼす掘削影響領域を含めた安全評価技術
 を体系的に実証可能

また、本課題では、これまで培ってきた技術を効果的に選択し組み合わ せ、地質環境の調査・評価に基づく坑道の設計・施工、安全評価のための 一連の技術を実証します。処分事業において想定される様々な地質環境 に適用できる技術の体系を技術基盤として提示することができます。

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

また、設計の結果から、深度500 mで研究を行うために必要となる立坑 および研究坑道の掘削期間は、対策工事を含めても3年程度を見込んでお り、深度500 mで研究を実施した場合でも令和2年度以降の研究期間を前 提とした研究工程に収まることを確認しました(表 2)。

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

なお、研究期間の前半で行う予定であった人工バリア性能確認試験の 解体調査については、坑道掘削と試験用資材の搬出入の工程重複などを 避け、両者を効率的に実施するため、工程の見直しを行いました(表 2)。

土圧・地下水圧 ・土圧が大きく、岩石が軟らかい ・地下水圧が高い 地質の状態 (分布する割れ目の特徴) 断層沿いに割れ目の発達が乏しく、断層内れにくい 土圧が大きく、岩石が軟らか 近れにくい	 ・土圧が小さく、岩石が硬い ・地下水圧が低い
 地質の状態 (分布する割れ目の特徴) 	1444 - 111111 51張性割れ目
土圧が大きく、岩石が軟らか	・ 水が流 断層沿いに多数の割れ目が発達し、断層内を水が流 れやすい
割れ目の開口状況 割れ目 岩石 割れ目が閉じて → 水の動き(遅い 割わ日が閉じてたり、水や物質が流わにく	土圧が小さく、岩石が硬い

表 1 深度500 mと深度350 mの地質環境の特徴

東藤の地質環境における人工パリアの適用性確認 第333 第4期中表現目表現目 1 大工パリア性能確認試験 2月時、満齢やワーク焼き、漫点すいのと特徴は、され、成している目は疲死 8 1 1 1.1 人工パリア性能確認試験 2月時、満齢やワーク焼き、急になどのの目は疲死 8 1 2.2 砂炭移方試験 2月時、大式パリアの定意・品質確認などの方法論に関する実証試験 1		R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
1. 未販の地理は現における人工ハリアの適用性確認 2. 無防・切理は現現における人工ハリアの適用性確認 2. 熱小照な法式 2. 熱小照などの方法論に関する実証試験 2. 熱小服などの方法論に関する実証試験 2. 熱小服などの方法論に関する実証 2. 熱小服などの方法論に関する実証試験 2. 熱小服などの方法論に関する実証試験 2. 私小の報告報告報 2. 私小の報告報 2. 私の報告報 2. 私の報告報 2. 私の報告報 2. A A A A A A A A A A A A A A A A A A A		第	3 <u>期</u>		1	第4期	中長期目根	票期間		1
1.1 人工パリア性能確認試験 2歳間 変がわらー2%時 3450-1-1%02(#1548) 24.1 人工パリアの注意があり 8 4 12 物質移行試験 間形影電は、50.881-1-1%02(#36481-1)%02(#36481-1)%	1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認									
12 物質移行試験 期影響報告:00% 時時に上却えが-20% 4 者後後、強生物:300 / 10% 学校がは秋.** 1 1 1 2. 処分紙念オブションの実証 1 1 1 1 2.1. 人にパリアの定意:品質確認などの方法論に関する実証試験 1 1 1 2.1.1 操業:回収技術等の技術オブションの実証、閉鎖技術の実証 第送定意:高 以抗, 時期は 恥の実症 1 1 2.1.2 坑道スケールービットスケールでの調査:設計:評価技術の体系化 第送定意:高 以抗, 時期は 恥の実症 1 1 2.2 高温度(100° に以上)等の限界的条件下での人工パリア性能確認試験 100° に高の線 = 27.2 (- ル, によいて発生する) 時象の登場 1 1 3.4 地区委動に対する堆積岩の破壊的の検証 100° に高の線 = 27.2 (- ル, によいて発生する) 時象の登場 1 1 3.1 ルビ展も試験などによる基督術的の検証 100° に高の線 = 27.2 (- ル, によいて発生する) 時象の登場 1 1 3.1 ルビ酸な動が地層の透水性に与える影響の把握 100° に高の線 = 27.2 (- ル, によいて発生する) 時象の登場 1 1 3.1 ルビ展も試験などによる経営術的の検証 1 1 1 1 3.1 ルビ版会変動が地層の透水性に与える影響の把握 2 1 1 1 1 3.1 ルビ版会変動による人工パリアへの影響・回復学動試験 2 1 1 1 1 3.1 ルビ版会変動による人工パリアへの影響・回復学動試験 2 1 1 1 1 3.1 ルビ版会変動による人工パリアへの影響・回復学動試験 2 1 1 1 1 3.1 北 世級変動になる人工パリアへの影響・回復学動試験 2 1 1 1 1 3.1 北 世級変動による人工パリアへの影響・回復学動試験 2 1 1 1	1.1 人工バリア性能確認試験	浸潤時・減熱 国際プロジェ	時のデータ取得 クトにおける解材	、運成モデルの コード間の比較	適用性確認 検証、改良・高度	化		*		
2. 処分機念オブションの実証 1	1.2 物質移行試験	掘削影響領 有機物、微生	での物質移行 物、コロイドの景	こ関するデータ耳 響を考慮した物	牌 質移行試験、等					
2.1 人工パリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験 1<	2. 処分概念オプションの実証									
2.1.1 操業・回収技術等の技術オブションの実証、閉鎖技術の実証 地送定置・回収技術等の技術オブションの実証、閉鎖技術の実証 地送定置・回収技術等の大小・ビッスケール・ビッスケールで回還・設計・評価技術の体系化 地送定置・回収技術等の法部、や説明の北マン・パッファールで回還・設計・評価技術の体系化 2.1 点 坑道スケールービットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化 100°C道の際 ニニアフィール「ニバ・ワ.9.2 % 読みの登望 「「「」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」	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 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 次選スケール~ビットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化 水選スケール~ビットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化 水選スケール~ビットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化 水選入ケール~ビットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化 水選入ケール~ビットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化 水選入ケール~ビットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化 水選入ケール~ビットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化 水選入ケール~ビットスケールでの調査・ジェンジェンジ 評価技術の体系化 水選入ケール~ビットスケールでの調査・ジェンジ 評価技術の体系化 水選入ケール~ビットスケールでの調査・ジェンジ 評価技術の体系化 アンジェンド情報の収集 ジェンジェンド情報の収集 ジェンジェンド情報の収集 ジェンジェンド情報の定望 評価 ケールド 3.1 水圧 揺乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化 100°C道の際にフラムシンド情報の成果 100°C道の際用を対象とした水圧退払減数 100°C道の際にフラムシンド情報の収集 100°C道の際にフラムシンド情報の定当 100°C道の服用 3.1 水圧 揺乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化 100°C道の際になび、事業に選い「報味(化石海水準知)の調査・評価する技術の高度化 100°C道の第一に選い「報味(化石海水準知)の調査・評価する技術の高度化 100°C道の服用 100°C道の服用 3.1 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 100°C道の服用 100°C道の服用 100°C道の服用 100°C道の服用 3.1 地設変変動による人工パリアへの影響・回復挙動試験 100°C道の服用 100°C道の服用 100°C道の服用 100°C道の服用 (施設計画) 100°C道の服用 100°C道の服用 100°C道の服用 100°C道の服用 100°C道の (施設計画) 100°C道の服用 100°C道の服用 100°C道の服用 100°C道の服用 100°C道の服用 (施設計画) 100°C道の服用 100°C道の服用 100°C道の服用 100°C道の服用 100°C道の (施設計画) 100°C道の服用 100°C道の服用 100°C道の服用	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						
2.2 高温度(100℃以上)等の限界的条件下での人工パリア性能確認試験 100℃起の際ニアウイルドにおいて免生する現象の整理 100 1 1 1 3.地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証 100 2 1 1 1 1 1 3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証 2 1 1 1 1 1 3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 数+mの価の断層を対象にた水圧摂乱試験 1 1 1 1 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を調査・評価する技術の高度化 1 1 1 1 3.2 地殻変動による人工パリアへの影響・回復挙動試験 ムエパリアの繊萄水生産(化た海水体地の開産・防滞(水道車)の開発・計算 1 1 1 1 (施設計画) 1 1 1 1 1 1 1 (抗道掘削 1 1 1 1 1 1 1 (指検査 1 1 1 1 1 1 1.2 地殻変動による人工パリアへの影響・回復学動試験 1 1 1 1 1 (指検査 1 1 1 1 1 1 1.2 地力の 1<	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 廃棄体設置の	~ピットスケール 判断や間隔の言	での調査・設計 定に必要となる	・評価技術の体 情報の整理、等	和比
3.地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証 <td>2.2 高温度(100°C以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験</td> <td>100℃超の際 国際プロジェ</td> <td>にニアフィールト クト情報の収集・</td> <td>において発生す 整理、等</td> <td>る現象の整理</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td>	2.2 高温度(100°C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 国際プロジェ	にニアフィールト クト情報の収集・	において発生す 整理、等	る現象の整理					
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 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化	3 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証									
11 地域の加速のでもいっての加速のでしたのに加速のについての加速の加速の加速の加速の加速の加速の加速の加速の加速の加速の加速の加速の加速の	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 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 <t< td=""><td>3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握</td><td>数十cmの幅の 断層の活動</td><td>の断層を対象とし 評価手法の整</td><td>た水圧擾乱試動 備、等</td><td>£</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></t<>	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	の断層を対象とし 評価手法の整	た水圧擾乱試動 備、等	£					
人工パリアの設備材や坑道単め戻し材が膨齢影響領域の力学的・水理学的 人工パリアへの影響・回復挙動試験 【施設計画】 レロ・ロー・ロー・ロー・ロー・ロー・ロー・ロー・ロー・ロー・ロー・ロー・ロー・ロー	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	地下水の流材	いが非常に遅い	領域(化石海水翁	載)の調査・評(両技術の検証、 ^会	Ŧ			
【施設計画】	3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験	人エバリアの な緩衝能力に	緩衝材や坑道 与える影響を把	め戻し材が掘り 握する解析手お	影響領域の力= の開発	幹的・水理学的				
抗道掘削 掘削準備 350 m調査坑道 」 <td>[施設計画]</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td>	[施設計画]									
	<u>↓ // □ □ ∧ </u> 坑道掘削			掘削準備 350	m調査坑道 立坑	(西、東、換気) 500m調	查坑道			
	【維持管理】									

表 2 稚内層深部での調査研究の実施を踏まえた研究工程

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

※ 人工バリア性能確認試験については、材料の水分量や密度、腐食の度合いなど詳細なデータ取得するための 解体調査を当初令和5、6年度に予定していましたが、500m 掘削中(令和5~7年度)は、安全管理上、作業が 2箇所(2切羽)までに限定され、規模の大きな作業が困難になるため、令和8、9年度に実施することとしました。 個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施 し、後半は体系化して取り組む課題(2.1.2)に統合して実施する。

2.1.2を実施する中で、情報の不足等があった場合に追 加で試験や解析を実施する。

4. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

4.1 人工バリア性能確認試験

令和2年度以降は、ガラス固化体設置直後の廃棄体の発熱過程に加えて、 減熱過程を模擬した原位置試験データや解体調査により得られるより詳 細なデータに基づく熱-水理-力学-化学(THMC)連成現象の評価モデル の高度化が課題となります。そのため、人工バリア性能確認試験で設置し ているヒーターの温度を下げた試験(減熱過程を模擬した原位置試験)を 行い、THMC連成現象に係るデータを取得します。また、減熱試験終了後は 解体調査により、人工バリア、埋め戻し材、コンクリート、周辺岩盤やそ れらの境界面のサンプリングや分析を行います。人工バリア性能確認試 験の解体調査については、適用する施工方法の検証を行うために事前に 試験施工を行います。設置したセンサーや解体調査により得られるデー タを基に、THMC連成解析を行い、評価モデルの高度化や適用性の確認を行 います。このような人工バリア周辺で起こる現象の理解は、地層処分後の 安全評価における初期状態の把握やオーバーパック(以下、0P)の寿命を 評価する際の人工バリア周辺の環境条件の設定に役立ちます。

令和2年度は、試験坑道4で実施している人工バリア性能確認試験(図 5) のヒーターの設定温度を約90℃から50℃に変更し、廃棄体の減熱過程を 模擬した試験を開始しました。図 6に令和2年度に計測したデータの一例 を示します。

ヒーターの設定温度は6月24日から徐々に低下させ、7月14日に50℃ま で低下させました。図 6(a)に示すように、模擬0Pの表面温度の低下に伴 い緩衝材中の温度も低下することが確認できます。図 6(b)は緩衝材中の 内側、外側と緩衝材外周部のケイ砂中の間隙圧を示しています。緩衝材内 側と外側の値は、温度低下とともに低下していることが分かります。これ は、温度が低下することにより、緩衝材中の気相の圧力が下がったことが 要因として考えられます。ケイ砂中については、温度変化はほとんどなく 温度低下の影響は受けず、図 6(d)の注水圧力と同様の傾向を示していま す。図 6(c)の全応力には、緩衝材中の間隙圧、熱応力、膨潤応力などが 含まれています。そのため、温度低下によって間隙圧や熱応力が低下し、 全応力が低下しているものと考えられます。 人工バリア性能確認試験では、岩盤からの地下水浸潤を模擬するため に、埋め戻し材外周部と緩衝材底部に注水管を設置し、人工的に地下水を 注水しています。図 6(d)は埋め戻し材への注水流量と緩衝材への注水流 量と注水圧力を示します。埋め戻し材への注水流量は約300 mL/minを維 持しています。一方で、緩衝材部は1,200 mL/minで注水を継続していたと ころ、設定流量を変更していないにもかかわらず、7月14日ころから急激 に低下しました。この時、注水管内にはガスが多く含まれていたことから、 注水流量や注水圧力の大きな振れはガスによって正確に計測されていな いことが原因と考えられます。その後、設定流量を約600 mL/minまで低下 させることにより、流量と圧力が安定しました。なお、これらの注水流量 の変化は、緩衝材中の温度や圧力変化に大きな影響を与えませんでした (図 6(a)、(b)、(c))。

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

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



図 5 人エバリア性能確認試験の概念図



図 6 人工バリア性能確認試験で取得した計測データの一例(緩衝材5 段目)



図 7 比抵抗トモグラフィによる緩衝材中の飽和度の算出結果

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

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

18

埋め戻し材(ブロック)



図 8 試験施工の概要図(鉛直断面図)



底盤・側面コンクリート打設



鉄筋組立・コンクリートプラグ打設



緩衝材ブロック設置



埋め戻し材転圧締固め





人エバリア試験孔掘削・コンクリート支保打設







施工完了

4.2 物質移行試験

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

(1) 掘削損傷領域を対象とした物質移行試験

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

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

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



図 10 EDZを対象としたトレーサー試験のレイアウト(鳥瞰図) 赤字で示した番号は各孔の間隙水圧観測区間を示します。このうちトレーサー試験で使用した区間は H4-1 孔の区間①(注水孔)と P 孔の区間②'(揚水孔)になります。

今回の試験では、非収着性トレーサーとして、非放射性のヨウ素とウラ ニンを使用しました。前述した予備試験結果を踏まえ、安定的に注水およ び揚水が行える条件として、注水流量を30 mL/min、揚水流量を60 mL/min に設定し、24時間継続しました。注水には350m調査坑道から掘削したボー リング孔から得た地下水を利用し、試験開始から7時間まではウラニン

(10 ppm)およびヨウ素 (1,000 ppm)を混合した地下水を注入しました。 ウラニンのトレーサー試験結果を図 11に示します。試験は累計24時間継 続しましたが、揚水孔であるP孔の区間②'において有意なトレーサー濃 度の変化は見られず、トレーサーの到達は確認できませんでした。このこ とから、移行経路の容積に対してトレーサーの注入濃度をより高く設定 する必要があると判断されました。トレーサー回収率をより正確に算出 するために、トレーサー濃度を5秒間隔で連続モニタリングしましたが、 今後は測定間隔を長くとり、より高濃度で注入したトレーサー濃度を一 旦希釈して測定する方法で試験を実施することが必要であると考えられ ます。

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



図 11 EDZを対象としたトレーサー試験結果

(2) 微生物・有機物・コロイドを対象とした物質移行試験

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

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

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



図 12 微生物・有機物・コロイドを対象とした物質移行試験のイメージ図

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

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

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

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

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





のサイズ分布 AHS: 腐植物質、HiF: 親水性物質

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

(3) ブロックスケールを対象とした物質移行試験

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

26



図 14 ブロックスケールを対象としたトレーサー試験



図 15 水圧擾乱試験時の間隙水圧観測結果

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 掘削損傷領域を遮断するための施工技術の実証
- ④ 掘削損傷領域調査技術の高度化
- 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

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、およびより合理的に人工バリアを回収するための手法の提示 については、4.1の人工バリア性能確認試験などのデータを利用して、人 エバリアの竪置きブロック方式における回収作業において考慮すべき条 件の整理を行いました。加熱試験開始(平成27年1月)から約6年が経過し た人工バリア性能確認試験では、緩衝材の外周部はほぼ飽和しているも のの、模擬オーバーパック近傍の緩衝材内側では廃棄体の発熱を模擬し たヒーターの加熱により、定置時から飽和度が低下していることが確認 されています。実際の処分場においても廃棄体定置後には、廃棄体の発熱 の影響を受けることが想定されます。これにより、例えばオーバーパック 近傍では緩衝材の飽和度が低く、この結果緩衝材とオーバーパックの密 着性は小さくなるため、廃棄体を回収するうえで必要となる緩衝材とオ ーバーパックとの密着部の除去が比較的容易となる可能性があります。 このように、回収作業においては解析などにより緩衝材の状態を予測し た上で、適した回収技術を選定することが必要であると考えられます。

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: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について、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。そこで、支保部材として利用されてい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の準備を行い ました。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 施工方法で試験体を作製し(図 16)、地下坑道の吹付けコンクリートと 同等の物理的特性(空隙率、弾性波速度)および力学的特性(一軸圧縮強) 度、静弾性係数、圧裂強度)を有することを確認しました。図 17には一 例として、一軸圧縮強度の試験結果を示します。コンクリート試験体は2 回作製しましたが、どちらのコンクリート試験体も地下施設内で使用さ れているコンクリートと同様の強度特性を有していることを確認できま した。また、試験体は、坑道内における大気条件下および浸潤条件下に定 置しました(図 18)。これら2つの条件は、坑道内において吹付けコンク リートが置かれうる両極端な条件であり、この2つの条件において取得さ れるデータを内挿することで、坑道内において考えられる様々な条件下 における吹付けコンクリートの変化を把握できると考えられます。今後、 約4年間にわたり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) 吹付けコンクリート施工状況
 (b) コアサンプリング
 図 16 吹付けコンクリート試験体作製状況





(a)定置装置全体





 (b) 大気条件下での定置試料
 (c) 湿潤条件下での定置試料

 図 18 坑道内における試験体の定置状況

②実際の地下深部の坑道で生じる事象の整理については、幌延で見ら れる岩盤の変形挙動や脱ガス現象に着目し、坑道開放条件下において岩 盤内部で生じうる事象を整理・モデル化しました。既往の研究成果を整理 すると、坑道周辺の地質環境に関する仮想的な力学的および水理的概念 モデルとして、それぞれ図 19および図 20が構築されました。さらに、構 築されたモデルに基づき、坑道の周辺地質環境の長期変化に関する力学 的および水理的な数値計算を実施しました。坑道周辺の地質環境の力学 的および水理的な数値計算を実施しました。坑道周辺の地質環境の力学 的な長期変化に影響を与える因子として周辺岩盤のクリープ変形に、水 理的な長期変化に影響を与える因子として支保工の有無、掘削損傷領域 (EDZ)の透水性の変化、脱ガス現象の有無に着目し、これらの因子を組 み合わせて解析ケースを設定しました(表 3)。解析期間は、処分事業に おける処分場閉鎖までの回収可能性維持期間が明確に設定されていない ことから、廃棄体の設置後十分に長い期間として、1,000年を設定しまし た。





図 20 坑道周辺の地質環境に関する水理的概念モデル

	力学的長期変化解析 力学的因子:クリープ変形		水理学的長期変化解析		備考
			水理学的因子: 支保工の有無・EDZの考慮		
Case1	支保工あり	標準的な場合 (n ₀ =30、m=20)	支保工なし	EDZ1 省略、EDZ2 は母岩 と同一	クリープ変形が標 準的なケース
	支保工あり		支保工なし	EDZ1 省略、EDZ2 考慮	
Case2	支保工あり	クリープ変形が速い場合 (n ₀ =18、m=18)	支保工なし	EDZ1 省略、EDZ2 考慮	クリープ変形が速 いケース
Case3	支保工あり	標準的な場合 (n ₀ =30、m=20)	支保工あり	EDZ1、EDZ2 共に考慮	支保工の効果を考 慮したケース (一次元解析)

表 3 予察的解析の解析ケース

(n₀およびmは、岩盤のクリープ挙動を支配する物性値を意味する。)

力学的な長期変化に関して、坑道開放条件での周辺岩盤の上端部における1,000年後の変位は、標準的なクリープ変形を考慮した場合(Case1)で3.5×10⁻⁵ m、より速いクリープ変形を考慮した場合(Case2)で8.9×10⁻⁴ mとなり、いずれの場合も非常に小さいという解析結果が得られました。坑道周辺に生じるひずみは小さく、EDZの拡大も生じず、側壁下部の隅角部を除いて透水係数の増加率にも変化は見られませんでした(図21)。



水理的な長期変化に関して、坑道上方の圧力が長期にわたって低下し 続けるという解析結果が得られました(図 22)。一方で、不飽和領域は坑 道掘削後から100年程度後までは坑道周辺に同心円状に拡大するものの、 その後、地下水が下方から供給され続けることにより、下端から側方に向 かって不飽和領域が飽和する解析結果も得られました(図 23)。また、支 保工の有無の影響に関してCase1とCase3の結果を比較すると、支保工が ある場合には坑道側に水が抜けにくくなるために水圧の低下が緩慢にな ること、および圧力低下により遊離したガスが捕捉されるために坑道近 傍のEDZでの飽和度が低下することも確認されました。ただし、これらの 結果は数値計算に用いたモデルの領域の大きさなどの計算条件の影響を 受けている可能性があるため、今後、計算精度の検証などが課題です。





図 23 飽和度の時間変化

(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: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^{*29}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、これらの性能が変化する可能性が考えられます。 例えば、コンクリート成分が溶出した比較的高いpHを有する地下水が埋 め戻し材やプラグと接触することで、ベントナイト中のモンモリロナイ トが変質あるいは溶出し、膨潤性や透水性が低下する可能性があります。 一方で、このようなベントナイト成分を含む地下水が埋め戻し部や岩盤 中の割れ目を流れる過程で別の鉱物として沈殿し、結果として地下水が 流れる間隙を閉塞する可能性も考えられます。このような長期的に生じ

^{*29:}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。

うる現象が埋め戻し材やプラグの安全機能*30に与える影響を評価することは、将来的に処分場の安全性評価を行う上で、重要な知見となります。 令和2年度は、令和元年度に設定したシナリオのうちコンクリート材料の 地下水への溶出に起因した埋め戻し材の変質が核種移行に与える影響を 把握するための水理解析および物質移行解析を実施しました。

物質移行解析では、埋め戻し材やプラグが長期間かかって変質し透水 性が上昇した場合の地下施設内および周辺岩盤中の核種移行へ与える影 響について確認するために、あえて保守的に解析初期から長期にわたっ て埋め戻し材やプラグの透水性が高い状態を仮定した解析を行いました。 図 24に示すように、処分坑道(連絡坑道、処分坑道および処分孔を含む) と立坑をモデル化し、放射性核種に見立てた非収着性の粒子の移行を解 析しました。水理条件としては、地表面の最上流部から最下流部にかけて 0.05 mの動水勾配がかかるように設定し、残りの境界部は不透水境界を 設定しました。岩盤は亀裂性媒体を仮定し、透水量係数分布として対数平 均値1.0×10⁻⁹ m²/s、対数標準偏差2.0を設定しました。この解析条件にお ける解析モデル内の間隙水圧分布を図 25に示します。物質移行解析ケー スとしては、埋め戻し材やプラグの透水性が変わらないケース(埋め戻し 材の安全機能が維持する場合)と埋め戻し材やプラグの透水性が変化す るケース(埋め戻し材の安全機能が喪失する場合)の2ケースを実施しま した。透水係数の主な設定値を表 4に示します。図 26に下流側立坑に最 も近い処分孔(処分孔①)から粒子を発した場合、図 27に上流側立坑に 最も近い処分孔 (処分孔⑥) から粒子を発した場合の解析結果を示します。

埋め戻し材の安全機能が維持する場合を想定した解析においては、粒子の発生位置にかかわらず、岩盤を介して地上まで移行しています(図26(a)および図27(a))。すなわち、坑道や立坑を移行する粒子はほとんど確認されません。一方、埋め戻し材の安全機能が喪失する場合を想定した解析においては、基本的に岩盤中を粒子が移行するものの、その後、透水性が高い下流側立坑に集水され、一部の粒子が下流側立坑の地表面に到達しています(図26(b)および図27(b))。本解析結果から、下流側立坑の地表面に到達する粒子の割合を算出したものを表5に示します。埋

^{*30:}地層処分において、放射性廃棄物を物理的に「隔離」し、長期にわたって処分場周辺に「閉じ込め」るため に、処分場がどのようにして安全性を提供するかを役割として表現したものです。

め戻し材の安全機能が喪失する場合において、処分孔(処分孔④)から発 した粒子の40%程度が下流側立坑に到達するものの、ほとんどの粒子は 岩盤中を移行する傾向にあることが分かります。なお、埋め戻し材の変質 の有無やその程度を解析にて評価した結果、埋め戻し材中のモンモリロ ナイトの変質が生じるのは坑道の上流側端部や岩盤中の割れ目交差部な ど、限定的である可能性が示されていることから⁽³⁾、埋め戻し材の安全機 能が喪失するという仮定は、保守的であることが分かります。一方で、先 に述べたように、一部の粒子は坑道や立坑を介して立坑地表面に到達し ているとともに、部分的に主要坑道や処分坑道を移行した後に岩盤中へ 移行する粒子も確認されています。このような経路をたどる粒子の移行 時間が、埋め戻し材の安全機能が維持する場合と比較して顕著に速い場 合、埋め戻し材の安全機能が喪失することが、結果として、処分場全体と しての岩盤中や坑道を介した核種移行を促進させる可能性が考えられま す。したがって、粒子のたどる経路や移行時間などを分析するとともに、 粒子の発生位置などに着目し、埋め戻し材の安全機能が喪失した場合の 核種移行への影響を評価することが今後必要になります。このような検 討も含め、シーリングシステムが卓越した移行経路となるシナリオが生 じにくいことを示すとともに、仮にこのようなシナリオを考慮した場合 に、安全評価の観点からの核種移行を低減可能な工学的対策、シーリング システムや処分場の設計要件に対する留意点の整理を行っていく予定で す。

38



図 24 物質移行解析におけるモデルの概要



解析条件における間隙水圧分布 図 25

	埋め戻し材の安全機能が維持する	埋め戻し材の安全機能が喪失する	
	場合(m/s)	場合(m/s)	
吹付けコンクリート	1. 0 × 10 ⁻⁵		
埋め戻し材	5. 0×10^{-12}	1. 0 × 10⁻⁵	
EDZ	1.0×10 ⁻⁵		
止水プラグ	4. 0×10^{-13}		

表 4 主な透水係数の設定値



図 26 埋め戻し材の安全機能が維持する場合 (b) 埋め戻し材の安全機能が喪失する場合 図 26 埋め戻し材の変質の程度に応じた核種移行の挙動の違い(粒子 発生位置:処分孔①)



図 27 埋め戻し材の変質の程度に応じた核種移行の挙動の違い(粒子 発生位置:処分孔⑥)

粒子発生位置	処分孔④	処分孔(5)	処分孔⑥
埋め戻し材の安全機能が維持 する場合	0. 0%	0.0%	0.0%
埋め戻し材の安全機能が喪失 する場合	41.0%	23.0%	4.0%
粒子発生位置	処分孔①	処分孔②	処分孔③
埋め戻し材の安全機能が維持 する場合	0. 0%	0.0%	0.0%
埋め戻し材の安全機能が喪失 する場合	0.0%	0.0%	0.0%

表 5 処分孔から発した粒子の下流側立坑地表面への到達割合

立坑地表面まで到達した粒子については、一度岩盤に移行した後に、立坑へ集積された粒子 が含まれます。このような粒子は埋め戻し材の安全機能よりむしろ、天然バリアである岩盤 の安全機能(ここでは粒子が岩盤中の複数の割れ目に分散する効果による核種の遅延性能) が発揮されることが期待されます。したがって、本検討では、第2次取りまとめ⁽⁴⁾における 岩盤中の核種移行評価で用いられた移行距離である100 mを指標とし、岩盤中を100 m以上 移行した粒子については計算から除外しています。

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一つである処分孔竪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*³¹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 28(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 28(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加圧板を介して 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

^{*31:}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。

り生じる上部への膨出変形量は試験装置頂部に設置した外部変位計によ 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 たロードセル(荷重センサー)により膨潤圧を計測するとともに、緩衝材 と埋め戻し材の境界面にはリン青銅板やひずみゲージを設置して境界面 付近の緩衝材の膨出挙動の把握を試みています。



凶 20 施尺侯空武駅の城忌凶

(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2年度は、緩衝材と埋め戻し材の境界面に設置したひずみゲージと リン青銅板が膨潤挙動におよぼす影響を把握するために、ひずみゲージ とリン青銅板を設置した条件(計測器有ケース)と設置しない条件(計測 器無ケース)の2条件で試験を実施しました。外部変位計で計測した変形 量は緩衝材と埋め戻し材の縮尺模型全体の高さで除して、膨潤変形率と して整理しました。図 29に膨潤変形率の経時変化を、図 30に注水量の 経時変化を示します。試験開始後、注水量の増加に伴い膨潤変形率が増加 しました。その後、20日を経過したころからその増加が緩やかになる傾向 を示し、注水量が一定の値に収束した40日を経過したころから膨潤変形 率も一定の値へと収束しました。膨潤変形率の最終値は計測器有ケース で3.36%、計測器無ケースで4.76%となり、境界面にひずみゲージとリン青 銅板を設置していない計測器無ケースの方が上方への変位が大きい結果 となりました。また、膨潤圧の計測例として、図 31に緩衝材の下段に設 置した土圧計1と2および上段に設置した土圧計5と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、1~2日を経 過したころにピークを示し、減少傾向に転じました。15~20日を経過する ころまでは減少傾向を示していましたが、その後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。計測した圧力の最大 値は、下段の土圧計1と2では圧力の最大値が1 MPa程度の値であるのに対 して、上段の土圧計5と6では0.5~0.6 MPa程度とおおよそ半分ほどの大 きさでした。計測器有ケースと計測器無ケースを比較すると、計測器無ケ ースの方が緩衝材下段において、ピークを迎えた後の圧力の減少が大き く、最終的な圧力の値も0.2 MPa程度低い値を示しました。

以上の結果から、境界面にひずみゲージとリン青銅板を設置している 計測器有ケースでは、膨潤変形量が小さく、緩衝材の下段で圧力が高い値 を示していることから境界面に設置したセンサーが緩衝材の膨潤変形に 対する抵抗となっている可能性があることが分かりました。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ります。



図 29 縮尺模型試験における膨潤変形率の経時変化



図 30 縮尺模型試験における注水量の経時変化 計測器無ケースでは、差圧計の不具合により50日以降の注水量のデータが欠測しています。



図 31 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の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、透水性を指標の一つとして評価することを目的として、 EDZを遮る機能が期待される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2年度は、令和元年度に引き続き、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 32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2年度 の透水試験は、令和元年度の透水試験からおよそ1年が経過した時点で実 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の区間より注水し粘土止水壁で区切られた内側の領域 を対象としました。令和元年度は、同じ注水区間において粘土止水壁の構 築前後で透水試験を実施しており、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2 年度の透水試験の結果、試験領域の透水係数は約2×10⁻⁹ m/sの値を示し ました。このことから、粘土止水壁を構築して1年が経過した時点におい ても構築直後と同程度の透水係数の値を示し、透水性を低下させる機能 が維持されていることを確認しました。



また、止水プラグがEDZの連続性を遮断する構造物として成立するため には、要求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 水プラグの切欠きのように坑道の上部に位置する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検討してい ます。

令和2年度は、吹付けに用いるベントナイトの材料の種類や配合に応じ た吹付け施工に係る特性データの取得のための予備試験を実施しました。 予備試験の実施状況を図 33に示します。

ベントナイトは、粉末ベントナイト (クニゲルV1) と粒状ベントナイト (クニゲルGX) の2種類を用いました。吹付け材料は、ベントナイトとケ イ砂を混合した材料である①クニゲルV1 70%+ケイ砂 30% (V1-70)、②ク ニゲルV1 50%+ケイ砂 50% (V1-50)、③クニゲルGX 100% (GX-100)、④ク ニゲルGX 70%+ケイ砂30% (GX-70) の4種類を検討しました。予備試験で は、幅1 m、高さ50 cm、奥行き48 cmの木製型枠に対して吹付けを行いま した。吹付けによる乾燥密度の目標値は、それぞれの材料で有効粘土密 度*32が1.2 Mg/m³を確保できる値に設定しました。

吹付けた後の材料からサンプリングを行い、含水比と乾燥密度の測定 を行いました。図 34に、吹付けた後の材料の乾燥密度の目標値とサンプ リング試料全体の平均値および最大値、最小値を示します。クニゲルGXの 吹付け材は、平均値が目標値を上回っているのに対して、クニゲルV1の吹 付け材では、乾燥密度のばらつきが大きい傾向にあり、平均値が目標値を 下回りました。図 35に測定した含水比と乾燥密度の関係をサンプリング の位置ごとに上部、中部、下部と分けて整理した結果を示します。吹付け た後の材料は、型枠の下部で乾燥密度が低くなっていることが分かりま す。これは、型枠の下部では、吹付けの際にはね返りが発生し付着しなか った材料(リバウンド材)を巻き込んだことによるものと考えられます。 V1-70では型枠の下部での乾燥密度の低下により平均値が目標値を下回

^{*32:}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。

っているのに対して、V1-50ではほぼ全ての場所において乾燥密度が目標 値を下回っていることが分かりました。



(a) ベントナイト材料の吹付け状況

(b) サンプリングの実施状況

図 33 ベントナイトの吹付けによる施工方法の予備試験実施状況



図 34 乾燥密度の平均値および最大値、最小値



図 35 ろ小比と取除留度の関係 図中の青色の実線とプロットは、予備試験の実施前に最も乾燥密度が高くなる乾燥密度を 求めるために実施した締固め試験の結果を示しています。

令和2年度はさらに、上部に位置する狭隘な空間への吹付け施工の適用 性の確認を目的として、切欠き部の形状を模擬した型枠に対する吹付け 試験を実施しました。

図 36の赤枠で示す坑道の側壁から天端にかかる範囲の形状を、鋼板を 組み合わせた模擬型枠により再現しました。模擬型枠の寸法は、幅1 m、 高さ3 m、奥行き1.3 mで、模擬型枠の背面の曲率は切欠き部の背面の曲 率 (R=3.0 m)を再現しました。吹付け材料は、クニゲルV1では予備試験 の結果よりV1-70を用いることとし、クニゲルGXではV1-70と材料の配合 を揃えて結果を比較するためにGX-70を用いることとしました。吹付けに よる乾燥密度の目標値は、それぞれの材料で有効粘土密度が1.2 Mg/m³を 確保できる1.43 Mg/m³に設定しました。吹付け時の様子と吹付け後の出来 形の様子を図 37に示します。模擬型枠の天端部では、ノズルを斜め上方 や直上に向けて材料を吹付け、背面に吹付けられている材料と連続する ように吹付けを形成することで、隙間なく施工することができました。吹 付けた後の材料はサンプリングを行い、含水比と乾燥密度の測定を行い ました。測定結果は、サンプリングした位置ごとに図 38に示す4つの領 域で整理しました。

図 39に含水比と乾燥密度の関係を、図 40にサンプリング位置ごとの 乾燥密度の平均値と最大値、最小値を示します。V1-70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/m³となり、目標値よりもわずか に低い値を示しました。乾燥密度の平均値は、サンプリング位置ごとの違 いはほとんどありませんが、模擬型枠下部の底面の領域で乾燥密度が低 下した領域が見られました。これは、吹付けの際に模擬型枠の下部に堆積 したリバウンドを巻き込んだために、極端に乾燥密度が低下したと考え られます。一方、GX-70では、サンプリング試料全体の乾燥密度の平均値 が1.50 Mg/m³となり、目標乾燥密度を上回る値を示しました。乾燥密度の 平均値はV1-70と同様に、サンプリング位置ごとの違いはほとんどありま せんが、模擬型枠下部の底面の領域で乾燥密度が低下した領域が見られ ました。これらの結果より、ノズルを直上に向けた天端部や斜め上方に向 けた背面上部においても水平に向けた場合と同等の乾燥密度で施工が可 能なことを確認しました。

令和3年度は、地上での吹付け試験の結果を踏まえ、350m調査坑道において側壁部に切欠きを設け、ベントナイトの吹付けによる施工方法を検証する予定です。







(a) 斜め上方への吹付け



(c) V1-70の吹付け出来形

(b) 直上への吹付け



(d) GX-70の吹付け出来形

図 37 吹付け試験の試験状況と出来形の様子



図 38 吹付け試験のサンプリング位置



図 39 含水比と乾燥密度の関係

図中の青色の実線とプロットは、予備試験の実施前に最も乾燥密度が高くなる乾燥密度を求 めるために実施した室内試験の結果を示しています。



④ 掘削損傷領域調査技術の高度化

処分場の閉鎖後に坑道や掘削損傷領域(EDZ)が水みちとなることを防止するためのプラグや埋め戻しといった坑道シーリング技術開発においては、実際の処分場での設計や安全性評価の基盤情報となるEDZの特性お

よびその空間的連続性などに係る調査技術が重要となります。

令和2年度は、EDZの物性や連続性を高精度に探査する技術の構築のため、超音波探査試験装置(Mini-seismic装置)⁽⁵⁾のプロトタイプを製作し、 250m調査坑道の堆積岩へ適用しました。また、水理調査・物理探査、地質 調査を同一の領域で実施し、EDZの範囲や損傷状態、地質性状を空間的に 高精度に把握する三次元トモグラフィの結果と比較検討しました。 試験装置は、EDZの割れ目位置を特定し、損傷状態、性状を空間的に評価するために、超音波(周波数の高い弾性振動波)を地震探査の手法に適用して、岩石中の物性変化をセンチメートルオーダーの高い空間解像度で測定することを目的に開発しました。試験の概念を図 41に示します。



図 41 試験の概念図

試験装置の発振子(S1~S3)から放出される地震波は、試験孔の壁に沿って異なる深さの屈 折波として受振子に伝わり、これらの深さは、坑道壁周りの EDZ 割れ目・微小割れ目の程度 に依存します。

EDZが発生していると想定される箇所に試験孔を削孔し、製作した装置 を使用して取得した波形の解析を行い、P波とS波の振幅の評価により、 EDZ内の割れ目が見られる区間は相対的に振幅が小さい領域として検知 できる可能性があることが分かりました。比抵抗測定の結果と合わせて 図 42に示します。今後は、割れ目による微小な速度の差異を判別するた めに、測定箇所や測定手法の違うデータをさらに蓄積し、より詳細な解析 を実施して原位置の物理特性を定量的に把握する必要があります。



図 42 弾性波の振幅評価と比抵抗分布図

原位置の岩盤を広範囲に非破壊で調査する手法として物理探査技術が あります。従来の物理探査結果で示されるものは、平均的な弾性波速度や 比抵抗の分布であり、EDZのような坑道周辺の局部的な領域の力学的・水 理学的物性値と定量的に結びつける総合的な調査技術として整備するた めには、物理探査自体の高度化が重要と考えられます。また、弾性波速度 や比抵抗は、割れ目の形成や温度などといった様々な要因に伴い時空間 的に変化することから、そのような経時変化を定量的に評価するために は、概ね同じ箇所、同じ時点における温度や飽和度、割れ目の分布や形成 などに関する情報が存在する箇所で物理探査を行うことが重要となりま す^{(6)、(7)}。

そこで、EDZの範囲や損傷状態、性状を空間的に評価する技術の高度化 を図ることを目的として、350m調査坑道の同一領域で水理・地質調査と物 理探査(三次元トモグラフィ調査)を実施しました。

トモグラフィ調査は、対象領域の周囲に0.5 m間隔で起振点および発受 振点、電極点を配置して、領域内を伝播する弾性波や電位を観測して領域 内の弾性波の伝播特性や電位を測定しました。弾性波および比抵抗トモ グラフィ調査の測点(発受振・電極点の間隔0.5 m)を図 43に示します。



図 43 トモグラフィ調査の測点図

弾性波や比抵抗の空間分布を高分解能で可視化するために、弾性波は、 0.25 m間隔の三次元メッシュ、比抵抗は0.25 m間隔の二次元メッシュで 解析を行いました。図 44に弾性波および比抵抗トモグラフィ結果の3Dモ デルを示し、図 45に弾性波速度分布を深度方向にスライスした断面を示 します。調査の結果、一般的なトモグラフィの平均的な速度分布に比べP 波およびS波ともに低速度の変化の領域を詳細に表し、コア観察およびボ アホールテレビ観察で判明した速度変化の要因となる孔内の割れ目の位 置や比抵抗分布とも整合しています。



図 44 トモグラフィ結果図

坑道床面下から深度約-1.0 mまではEDZを示します。ボーリング孔の円盤は、割れ目の位置 と走行傾斜の方向を表しています。



図 45 弾性波速度分布の深度スライス断面図

坑道の掘削により、坑道周辺の岩盤の損傷などによる掘削損傷領域 (EDZ)が生じたり、溶存ガスの発生などによる不飽和領域の形成といっ た掘削擾乱領域が生じ、そこでは、岩盤の透水性の増大や、地下水の水質 変化といった地層が有する放射性核種の移行を遅延させる機能に影響を 与えることが考えられます。EDZや掘削擾乱領域をまとめて掘削影響領域

(Excavation disturbed Zone:以下、EdZ)と呼びます。閉鎖技術の実証の技術開発の一環として、EdZの経時変化の調査を実施しています。EdZは、 坑道の掘削直後に坑道壁面周辺の岩盤への亀裂により発生しますが、そ のEdZが経時変化により拡大していないことを確認するための調査を実施しました。

令和2年度は、これまで物理探査を繰り返し実施している250m調査坑道 で弾性波トモグラフィを、350m調査坑道で弾性波および比抵抗トモグラ フィを実施し、物理探査によるEdZの経時変化を把握するためのデータを 蓄積しました。また、取得されたデータを精密に調査するために、数値シ ミュレーションにより坑道壁面に施工された吹付けコンクリートが弾性 波トモグラフィ調査の精度に与える影響や、EdZの範囲やEdZ内の物性値 が変化した場合に弾性波トモグラフィの調査で取得されるデータがどの 程度変化するのかを見積もり、これまで蓄積されてきたデータを分析す るための手法を検討しました。

数値計算により、吹付けコンクリートが弾性波トモグラフィ調査結果 に与える影響を調べたところ、吹付けコンクリートは岩盤よりも弾性波 が速く伝達するために弾性波は選択的に吹付けコンクリートを通過して おり、弾性波トモグラフィ調査においてレンズのような役割を果たして いる可能性があることが分かりました(図 46)。図 47はシミュレーショ ンにより予測された弾性波の到達時間と350m調査坑道における調査で実 際に計測された時間を比較したグラフで、各々吹付けコンクリートの影 響を考慮した場合と考慮しない場合の結果の比較になります。吹付けコ ンクリートの影響を考慮した場合の方が、実測値と近い値が推定され斜 線付近にデータが集中しており、この結果より実際の現場において取得 されたデータは吹付けコンクリートの影響を受けていることが分かりま した。この結果は、坑道周辺で実施した弾性波トモグラフィ調査の結果を 解析する際に吹付けコンクリートの影響を考慮して解析することにより 高精度に可視化できることを意味し、物理探査の調査結果の解析技術の 向上に役立ちます。数値シミュレーションによる結果に基づき、試験坑道 2においてこれまでに取得した弾性波トモグラフィの調査結果を解析し たところ、坑道掘削の約1年後から現在に至るまで、弾性波トモグラフィ 調査のノイズレベルを超える有意な変化は認められませんでした。

58



図 46 数値シミュレーションよる調査時の弾性波の通過経路の比較例



図 47 調査により取得された弾性波の到達時間とEdZが1 mであると仮 定した場合に数値計算により推定される到達時間の比較

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掘削される地上からの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地上までの短絡 経路となることや地層処分システムの長期安全性に影響を及ぼさないよ 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。

地上からのボーリング孔と坑道内からのボーリング孔では、ボーリン グ孔の状態や作業環境の違いにより、閉塞のために必要となる要素技術 や考慮すべき事項、技術的な課題点などが異なると考えられます。例えば、 坑道内からのボーリング孔では、水平に近い向きに掘削されることも想 定されます。水平ボーリング孔の場合には、重力方向へ材料を充填するこ とのできる鉛直孔とは異なり、重力以外の駆動力によって目的の閉塞位 置まで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、高湧水量条件下で閉塞が適用 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2年度は、原位置試験の計画検討の一環として、国内外での研 究事例を調査し、ボーリング孔を閉塞する際の材料の種類や配合を決定 するための考え方や閉塞方法に関する技術的な課題を、以下に示すよう に抽出・整理しました。

閉塞材料に関しては、ボーリング孔の岩盤に損傷が少なく透水性が低い区間には低透水性を有するベントナイトを設置する考え方が示されています。ボーリング孔が水みちとならないためには、設置したベントナイトの透水係数が設置場所の周辺の岩盤の透水係数と同程度かそれより低い値である必要があると考えられており、閉塞するボーリング孔の寸法や流入する地下水の水質、ベントナイトを設置する場所の周辺岩盤の透水係数を計測した上で、ベントナイトの種類や配合、乾燥密度などの仕様を決定する必要があることが分かりました。

閉塞方法に関しては、あらかじめ高密度に圧縮したベントナイトブロ ックを孔の開いた銅管や密閉容器に充填して設置場所まで輸送する方法 や、ベントナイトペレットをボーリング孔へ流し込む方法が示されてい ます。いずれの場合にも、設置場所への輸送中にベントナイトと地下水が 接触することによる膨潤により、輸送途中での閉塞やベントナイトの侵 食などが発生することが課題であることが分かりました。日本のように 豊富に地下水が存在する地質環境では、ベントナイトと地下水との接触

60

をできるだけ少なくする方法が必要となると考えられます。

上記の整理した結果を踏まえて、水平ボーリング孔を対象としたベン トナイトによる閉塞方法の検討に着手しました。ベントナイトの材料形 態は、①ベントナイトブロック、②ベントナイトペレット、③ブロックと ペレットの組み合わせ、の3つの方法について表 6のように整理しました。 例えば、ブロックの場合には、ブロックを収納した密閉容器を設置場所ま で輸送し、容器の蓋を外してベントナイトをボーリング孔へ排出する方 法が考えられますが、蓋がボーリング孔へ残ることが課題となります。ペ レットの場合には、ボーリング孔内に挿入した充填管に注水し、水の流れ によって親水遅延の処理を施したペレットを輸送することが考えられま す。この場合には、親水遅延の処理によって輸送中の膨潤がどの程度抑え られるのか、充填後のペレットの膨潤特性を損なわないかなどを確認し、 その適用性を評価する必要があります。

令和3年度は、検討した閉塞方法について、室内試験によりボーリング 孔の閉塞に係るベントナイトブロックとペレットの基礎的物性データの 取得やボーリング孔への設置方法の検討を実施します。



表 6 ベントナイトを用いたボーリング孔の閉塞方法の検討結果

(3) 人エ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: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*³³ と協力して緩衝材流出試験を実施しました。

人工バリアの一部を構成する緩衝材の定置方法として、圧縮成形した ブロックを廃棄体の周りに定置する施工方法が考えられています。この 方法では、処分孔の孔壁と緩衝材の間に数cmの隙間ができます。日本で一 般的に想定される豊富な地下水環境では、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。

室内の試験では、水みちの形成や、水みちの周囲の粘土鉱物が削り取ら れる現象を確認し、そのような現象が発生する条件や湧水量などとの関 係を定量化するための要素試験を実施してきました。しかし、実際の地下 環境は多様な条件(湧水量・流速、水圧、水質など)が複合しており、室 内試験では地下環境を完全に模擬することは難しいため、実際の地下環 境において流出挙動を把握することが必要となります。

350m調査坑道の試験坑道5で実施する原位置試験(約1/4スケールの縮 尺モデル)では、孔壁と緩衝材ブロックの隙間は20 mmあります。令和元 年度は、隙間に何も充填しない「隙間未充填ケース」とケイ砂を充填する

^{*33:}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(NUMO)を通して積み立てられる最終処分積立金の管理などを行 う資金管理業務も実施しています。

「ケイ砂充填ケース」に関する予備試験(短期の流出試験)を行い、緩衝 材の流出濃度(単位体積あたりに含まれる緩衝材の流出量)、総流出量、 試験孔からの排水量、膨潤圧の発生に伴い処分孔に作用する圧力(土圧) などを比較しました。その結果、ケイ砂充填ケースでは流出濃度が低く維 持されること、隙間未充填ケースでは短期の試験期間における緩衝材の 流出量は相対的に多くなったものの試験孔からの排水量は徐々に減少す ること(0.4 L/minから0.02 L/min程度になった)などが分かりました。

令和2年度は、隙間未充填ケースを対象に地下の実環境における自然湧 水環境下における長期的な試験を行い、自己シール機能が発揮されて緩 衝材の流出現象(試験孔からの排水)が止まることを確認するとともに、 その過程における詳細なデータを取得しました(緩衝材への浸潤、膨潤の 進行に伴う試験孔からの排水量の変化、緩衝材の流出濃度と総流出量、孔 内の水圧の変化、膨潤により発生する圧力など)。これらの緩衝材の流出 挙動に関するデータ取得に加えて、処分孔竪置き方式で懸念される緩衝 材の膨出に関連するデータ(緩衝材が上方向に動こうとする力)の取得も 行いました。さらに、緩衝材などの人工バリアの定置および処分坑道の埋 め戻し後に、処分孔と周囲の地下水位の差が大きくなる場合に緩衝材に どのような現象が発生しうるかを把握するために、上記の長期的な試験 の後に強制注水試験を行いました。

自然湧水環境下で実施した原位置試験装置の概要を図 48に示します。 試験開始時の試験孔(直径0.58 m×深さ約1.6 m)からの湧水量は約0.4 L/minでした。試験孔天端を上端として緩衝材を模擬した試験体を設置し、 流出試験を行いました。試験体の大きさは、実際に処分される際の緩衝材 のほぼ1/4の大きさです。

64



試験の結果を図 49と図 50に示します。図 49には、緩衝材ブロック底 面位置の圧力水頭と試験孔からの排水量を示しました。試験開始直後の 緩衝材ブロックと試験孔壁面との隙間がある期間は、試験孔からの排水 量は試験孔の当初の湧水量(約0.4 L/min)と同等であり、時間経過とと もに(浸潤・膨潤が進むにつれ)徐々に湧水量が減少しました。また、試 験開始直後の圧力水頭は約0.45 mであり、緩衝材ブロック上面の排水さ れている位置と、緩衝材ブロック底面に近い水圧計の設置位置との高低 差と概ね一致しています。この図から、緩衝材ブロック底面位置の圧力水 頭と試験孔からの排水量は相関があることが分かります。緩衝材ブロッ クと試験孔壁面との隙間が、緩衝材の膨潤により埋められることにより 排水量が低下すると、圧力水頭は試験孔周囲の地下水位(緩衝材ブロック 底面から上に約0.95 m)と釣り合うように上昇しています。その後、排水 量は試験開始後48日でゼロとなり、隙間が閉塞したことが確認されまし た。この時の圧力水頭は約0.91 mであり、水圧計の設置位置に起因する計 測誤差を考慮すると試験孔周囲の地下水位とほぼ等しい値となりました。

試験開始以降、緩衝材ブロック底面位置の圧力水頭は徐々に上昇しま したが、開始後6、9、13日目に急激な水位の上下動が見られました。これ は緩衝材の膨潤によって隙間が埋められ、隙間の断面積が小さくなった ことにより、緩衝材ブロック周囲の水圧が上昇し、それによって試験孔壁 面と膨潤した緩衝材ブロックの界面で流路の拡張が起こったためと考え

65

られます。13日以降は水位の上下動は見られず、圧力水頭は0.9 mに収束 しました。これは、緩衝材の膨潤により隙間が埋められた後、さらに内側 が膨潤することにより孔壁付近の密度が高くなったため、水頭差による 流路の再拡張が起こらなくなったためと考えられます。そのため、流路は 徐々に狭まって、48日で排水量はゼロとなり、閉塞に至りました。



図 49 緩衝材流出試験における水位と排水量の変化

緩衝材の総流出量と排水中のベントナイト濃度の経時変化を図 50に 示します。採水間隔は、試験開始から3時間は10分ごと、それから30日間 は240分ごと、それ以降は480分ごととしました。総流出量は試験開始から 15日以降はほとんど増えておらず、13.8日までの緩衝材の総流出量は、最 終的な総流出量の97%を占めています。流路の縮小と拡張を繰り返す期 間においては、流路が拡張する際に水位と流量が大きく変動するため、流 出濃度(流出量)が一時的に増加することも影響していると考えられます。 13.8日以降は、緩衝材ブロックと試験孔の隙間が埋まり、流路の拡張が起 こらなくなることで、排水量、ベントナイト濃度が低下し、流出量が少量 となっています。48日以降は排水量がゼロとなったため採水できず、流出 量もゼロとしました。隙間がある場合にはこのような流出挙動が起こる ことから、緩衝材の流出量の評価については、流路の縮小と拡張を繰り返 す期間(排水量が大きい期間)が重要であると考えられます。また、完全
に閉塞したのは試験開始から48日後ですが、排水量が0.05 L/min以下と なった期間(試験開始から20日以降)にはベントナイト濃度がほぼゼロと なっています。隙間未充填での施工の適用性の確認には、閉塞するか否か が判断指標の一つになると考えられますが、完全に閉塞しなくても緩衝 材の流出が顕著な量でなければ、適用できる可能性があります。よって、 隙間未充填で施工した場合の緩衝材の流出の評価には、地下水が上部に 排出される流路が縮小と拡張を繰り返す期間の流出量の把握が必要とな ります。

ただし、ベントナイト濃度(流出量)が低い場合には地下水の濁りなど が計測精度に影響するため、低濃度の計測精度やバックグラウンド濃度 の影響について検証が必要と考えており、今後の検討課題です。



図 50 緩衝材流出試験における緩衝材の総流出量と排水中のベントナ イト濃度の経時変化

試験体の定置後約120日間自然湧水条件で流出挙動を確認した後、隙間 が閉塞した状態に対して注水し、水圧がかかることによって再度水みち ができる事象(破過)が起こるかどうかを確認する試験を実施しました。 注水試験は、埋め戻し後の水位の上昇による水圧の上昇の影響を見るた めに圧力制御の試験とし、およそ5~10 kPaの範囲で段階的に注水圧を昇 圧させました。 注水試験は2日間実施しました。1日目の注水試験では、試験孔からのわ ずかな湧水(瞬時排水量1~2 mL/min)を確認したものの、最大90 kPa(注 水流量約4.3 L/min)までの注水では明確な破過を示すデータが取得でき ませんでした。2日目の注水試験では、注水圧90 kPa(注水流量約4.3 L/min) で約2.5時間通水を継続したところ、10 kPaまで注水圧が低下し、ベント ナイトおよびケイ砂の噴出に伴って試験体底面から上面まで水みちが貫 通する破過が確認されました。図 51に試験後に回収した試験体の写真を 示します。赤紫色の部分は、回収直前に染料を入れた水を流したことによ るもので、水みちと考えられます。

はじめに述べたように、注水試験は埋め戻し後の流出の可能性につい て検討するために行いました。今回の試験では、水圧が上がることにより 一旦閉塞した部分が破過することが示されました。破過に至った水圧は 90 kPaでしたが、この圧力は隙間閉塞後の緩衝材の浸潤と膨潤の進行に よる岩盤との界面の緩衝材の密度などによって変化すると考えられます。 また、今回の試験では緩衝材の上部に設置される埋め戻し材を考慮して いませんが、実際には仮に破過した場合でも埋め戻し材によって緩衝材 の流出を少なく抑えられることも考えられます。そのため、今回の試験結 果が、実環境での現象を完全に再現できたものではありませんが、埋め戻 し後の水圧の上昇によって流出挙動が再度起こる可能性があることを示 していると考えられます。



図 51 緩衝材流出試験後に回収した試験体

今後は、これまでの試験と湧水量などが異なる環境での流出試験など を行い、竪置きブロック方式による緩衝材の複数の施工方法による流出 挙動と適用性の把握を進めます。また、室内試験によって、水頭差(水圧)、 湧水量、スケール効果などに関する試験を行い、緩衝材流出への影響を観 点にしてその利点や欠点、緩衝材に求められる性能を保持するための流 出についての評価指標などの整理を進め、実際の処分場設計における施 工方法の選択のための情報として整備します。

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℃以下で 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2年度は、緩衝材の最高温度が100℃を超えた状態で発生しうる現 象の検討に着手しました。100℃を超えた温度条件において、埋め戻しに 伴う間隙圧の回復が比較的緩やかである場合には、沸騰による水の蒸発 と溶存成分の析出、水蒸気の移動、温度低下による水蒸気の凝縮、析出成 分の再溶解などの現象が生じうると考えられました。水の蒸発や水蒸気 の移動・凝縮を含めた水分移動特性については、100℃を超えた恒温槽を 用いた室内試験(図 52①)や、空気や水蒸気を考慮した高温状態での解 析手法の整備(図 52②)により評価可能と考えられ、解析手法の整備に より、100℃を超えた状態における緩衝材中の熱や水分分布の履歴を解析 的に予測できるようになると考えられます。解析により得られた熱や水 分分布の履歴のパターンに応じて、緩衝材が変質しやすい条件や緩衝材 の特性が大きく変化しうる条件を抽出することにより、100℃を超えた状 態でのシナリオの整理が可能となると考えられます。





上記のことを考慮に入れて、緩衝材の変質現象に関する原子力機構の これまでの知見を、表 7のように整理しました^{(8)、(9)、(10)、(11)}。緩衝材に 生じると想定される変質現象のうち、スメクタイト(ベントナイトに含ま れる膨潤性の粘土鉱物)のイオン型変化や変質、およびシリカセメンテー ション*³⁴などは、100℃を超えた状態を想定した解析や実験が行われてお り、特にシリカセメンテーションは、緩衝材の可塑性の低下や透水性の上 昇につながる可能性が示唆されます。一方で、一部の現象については、 100℃を超えた状態での変質に関する知見が不十分であるといえます。令 和3年度は、現状での知見が不十分な現象を中心に、100℃を超えた状態で 発生しうる現象の調査を継続していくとともに、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-水理-力学-化学 (THMC) 連成現象に関する試験や解析の事例についても調査を進めてい きます。

^{*34:}緩衝材中に含まれる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、可塑性や膨潤性の低下などが認められることがあります。

変質が生じうる場所	想定される変質現象	発生の要因	緩衝材の特性に与える影響など	100℃を超えた状態での知見
岩盤/緩衝材境界部~ 緩衝材内部	スメクタイト(天然ケイ 酸アルミニウム)のイオ ン型変化(Na 型→Ca 型)	 ・ 地下水や方解石に 由来する Ca との相 互作用 	 ・ 緩衝材の体積(密度)変化が生じた場合に、 膨潤性能が低下する可能性がある。 ・ Ca 型スメクタイトに対する核種の収着デ ータが充実化されている。 	・100℃超での実験・解析例などはなし。
緩衝材内部 ~緩衝材/オーバーパ ック境界部	塩・鉱物の沈殿	 高温環境での地下 水の蒸発 	 ・ 緩衝材内部に沈殿した塩のセメンテーションにより、緩衝材の可塑性や膨潤性能が低下しうる。 ・ ヒーター加熱温度 90℃の室内試験において、残存空気が緩衝材中に閉じ込められている場合にヒーター近傍で塩濃縮が生じる。生じた塩や鉱物は水の浸透にしたがい長期的には溶解する。 ・ 緩衝材性能に与える影響は小さいと考えられる。 	・100℃超での実験・解析例などはなし。
	スメクタイトのイオン 型変化(Na 型→Fe 型)	・オーバーパックの 腐食に由来する Fe との相互作用	 Fe 型スメクタイトは Ca 型と同程度の膨潤 性能を有すると考えられる。 解析上は、緩衝材特性に与える影響は小さ いと考えられる。 	 ナチュラルアナログ研究では、変質期間が~10 年・温度が~50℃程度の場合、および変質期間 が 100~1,000 年・温度が 100℃前後の場合に、 Fe 型スメクタイトが生成する可能性がある。 現状の知見では、100℃を大きく超えた場合に は影響は小さいと考えられる。
	スメクタイトの変質(ク ロライト化など)	 オーバーパックの 腐食に由来する Fe との相互作用 マグネシウムの供 給が必要 	 ・ 非膨潤性の鉱物に変質した場合、膨潤性能 やイオン交換能が低下する。 ・ 変質に影響する主なパラメータは、温度、 溶液条件、鉄/粘土比、スメクタイト組成 である。 ・ 解析では、オーバーパックとの接触面近辺 で Fe に富む二次鉱物が生成してオーバー パック/緩衝材間の空隙が閉塞し、緩衝材 の変質はそれ以上進まなくなると考えら れる。 	 250℃以上の高温で変質を起こす報告例が多い。 バッチ試験では、温度 120~150℃、鉄/粘土比 0.5~1.0の場合に変質が認められた。 ナチュラルアナログ研究では、変質期間が短く 100℃を超えた場合にはバーチェリン、コレン サイト、クロライトが生成する可能性がある。 現状の知見では、100℃を超えた場合には、オーバーパック/緩衝材境界で変質反応が速く進む と考えられる。ただし、変質鉱物が空隙を閉塞 すると、変質はそれ以上進まなくなると考えられる。

表 7 緩衝材の変質に関する既往知見の整理(1/2)

変質が生じうる場所	想定される変質現象	発生の要因	緩衝材の特性に与える影響など	100℃を超えた状態での知見
緩衝材内部 ~緩衝材/オーバーパッ ク境界部	腐食生成物によるセメ ンテーション	 オーバーパックの 腐食生成物 	 緩衝材間隙への腐食生成物の充填に伴い、 緩衝材の可塑性や膨潤性能が低下しうる。 炭素鋼とベントナイトを用いた室内試験 では、4年程度であればベントナイトの特 性に顕著な変化は認められない。 磁鉄鉱や水酸化鉄が腐食生成物としてオ ーバーパック/緩衝材境界付近に生成する 可能性があるが、緩衝材特性に与える影響 は小さいと考えられる。 	 130°C程度で約1年間加熱されたベントナイトでは、ヒーター(鉄)/ベントナイト界面付近の約5mmにおいて水酸化鉄などの沈殿が生じた。 100°Cを超えた場合には腐食速度が速くなり、腐食生成物の生成も促進されると考えられる。ただし、それが緩衝材全体の特性に与える影響は小さいと考えられる。
	スメクタイトのイライ ト(雲母鉱物)化	 高温での変質(埋 没続成作用や熱水 変質作用を受けた スメクタイトに見 られる現象) カリウムの供給が 必要 	・緩衝材が 100℃を超えた場合に特有の現 象	 陽イオン交換容量およびイオン交換性核種の収着性能が低下し、Csの分配係数は高くなる。 イライト化の反応時間やナチュラルアナログ研究の結果を考慮すると、イライト化の発生確率および緩衝材特性への影響は小さいと考えられる。
	シリカ含有鉱物の溶 解・再沈殿 (シリカセメ ンテーション)	・緩衝材中のシリカ 含有鉱物の溶解お よび再沈殿	・緩衝材が 100℃を超えた場合に特有の現 象	 ・室内試験および原位置試験より、緩衝材が100℃ を超えた場合にセメンテーションが観察され、緩 衝材の可塑性や膨潤性能の低下および透水性の 増加が認められた。 ・150℃程度の温度履歴を受けたベントナイトは、 セメンテーションのために、室温の場合と比べて 透水係数は2桁程度増加し、膨潤圧は50%程度低 下する。

表 7 緩衝材の変質に関する既往知見の整理(2/2)

さらに、海外で実施されている緩衝材の最高温度が100℃を超えた状態 を模擬する原位置試験について、試験条件、試験手法、計測機器の選定・ 配置などに関する情報を入手しました。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℃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)。 ベントナイトの種類(米国産およびチェコ産)や形状(ブロックおよびペ レット)、ヒーターの加熱温度(175℃および200℃)などの条件を変えて 試験を行うことにより、異なる条件下での人工バリアの挙動が検証され る予定です。図 53に示すように、令和3年3月の時点では、坑道奥側のコ ンクリートプラグの施工までが終了しています。同図中に例示している ように、温度、間隙水圧、相対湿度、全圧力、水分量、変位、ガスの組成 および濃度の計測が可能な機器が、各ヒーターの周囲やベントナイトの 内部、および試験坑道の周囲に配置されています。100℃を超えた状態で 人工バリアに生じる現象を観測するにあたっては、温度、間隙水圧、相対 湿度が特に重要なパラメータと考えられており、これらのパラメータを 測定可能な計測機器が、ヒーター周囲やベントナイト内部には特に密に 配置されています。令和3年度も、同試験に関する情報を引き続き入手し ていきます。



図 53 高温度における人エバリア性能確認試験の施工状況ならびに計 測機器の配置断面図(海外での研究事例)

- 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証
- 6.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化
- 6.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

令和2年度以降は、地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握が課題 となります。そのため、断層沿いに亀裂の発達する幅が数十cm程度のより 大型の断層における地震動や坑道掘削に伴う割れ目中の地下水の流れの 変化に関して、堆積岩の緩衝能力(自己治癒能力)の評価手法の確認を行 います。具体的には、地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握(ボー リング孔を用いた水圧擾乱試験)、ダクティリティインデックス(以下、 DI)*35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2年度は、地層の透水性を評価する上で重要となる割れ目の水理的 連結性について、これまでに稚内層で得られてきている知見やデータの 見直しを行いました。稚内層中の割れ目の水理的連結性については、平成 30年度にDIの概念を用いて、割れ目内に隙間ができやすく、断層同士の連 結も促されやすいDI<2の領域(稚内層浅部)と、割れ目内に隙間ができ にくく、断層同士の連結が促されにくいDI≧2の領域(稚内層深部)に区 分し、浅部が水理的連結性の高い領域である一方で深部が水理的連結性 の低い領域であることを透水試験・水圧観測・水質分析結果から示しまし た^{(12)、(13)}。さらに平成30年度から令和元年度に、この結果と立坑掘削時に HDB-6孔で観測された水圧応答との整合性を検討し、同孔の深度500 m以 深で観測された継続的な水圧上昇が割れ目の水理的連結性の低さを表す ことを明らかにしました^{(13)、(14)、(15)}。しかし、稚内層深部の深度500 m以 浅では立坑掘削時に水圧低下が一部に認められており、十分な整合性が とれていませんでした⁽¹⁵⁾。令和2年度に既存データの見直しと解析を行っ た結果、長期水圧観測に関して以下のことが新たに分かりました。

図 54に示すように、立坑の掘削に伴い、HDB-6孔の深度500 m以深の観

^{*35:}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、軟ら 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。

測点(No.9~11)を除くHDB-6孔およびPB-V01孔の稚内層中の観測点で水 圧低下が認められています。各観測点の水圧低下量を流量で、経過時間を 距離の二乗で除して整理すると、図 55のように整理することができます

(前者の値を水圧低下量/流量と表記)。すなわち、HDB-6孔の観測点No.4、 6、7とPB-V01孔の観測点No.6は互いに類似した水圧低下量/流量の値を示 すのに対し、HDB-6孔のNo.8は早い時間帯においてこれらよりも明らかに 小さな水圧低下量/流量の値を示します(図 55)。さらに、PB-V01孔のNo.9、 10はこの早い時間帯において負の値を示しており(水圧が増加している)、 これは水圧低下が認められていないHDB-6孔の深度500 m以深のNo.9~11 と同様な特徴です(図 55)。これらのことは、HDB-6孔のNo.4、6、7やPB-V01孔のNo.6の観測点周辺の割れ目の水理的連結性が高く、水圧が一様に 伝搬しやすい環境にあるのに対し、HDB-6孔のNo.8やPB-V01孔のNo.9、10 の観測点周辺の割れ目は水理的連結性が低く、特にPB-V01孔のNo.9、10周 辺は非常に水圧が伝搬しにくい環境にあることを示唆します。



図 54 HDB-6孔およびPB-V01孔における長期水圧観測結果 立坑掘削に伴い湧水量が顕著に増加した 2008 年 10 月 9 日以降のデータを示します。センサ 一の不具合などによる異常値と考えられるデータは除外しています。





流量は立坑での湧水量、時間は 2008 年 10 月 9 日以降の経過時間、距離は各観測区間と換気 立坑深度 250 m との直線距離を表します。

上記の長期水圧観測に関する検討結果に加え、東立坑底盤から掘削し たボーリング孔 (FZ-01孔およびFZ-02孔、図 14参照) での水圧擾乱試験・ 物質移行試験時の水圧応答の情報(図 56) やPB-V01孔の孔内検層の結 果⁽¹⁶⁾も合わせると、立坑周辺の稚内層中の割れ目の水理的連結性につい ては図 57のように整理することができます。すなわち、稚内層浅部と稚 内層深部の境界面 (DI=2の深度) から深度方向に100 m程度、割れ目の水 理的連結性が高い領域から低い領域へと徐々に変化する遷移的な領域が 存在することが考えられ(図 57)、この考えは地上からのボーリング調 査における透水試験・水圧観測・水質分析結果とも整合します(図 58)。 図 57に基づくと、地下施設における深度500 m以深の領域は、この遷移 領域を超えた、割れ目の水理的連結性が低い深度領域に相当することが 考えられます。



図 56 FZ-01孔の深度96.8 mの断層部へ注水を行った際のFZ-02孔の深 度99.5 m(観測点1) および深度117.8 m(観測点2)の断層部での水圧

応答

注水点から約4.5 m離れた観測点1では注水終了後に明瞭な水圧応答(水圧低下)が確認で きますが、注水点から約21.3 m離れた観測点2では水圧応答が確認されません。



図 57 稚内層中の割れ目の水理的連結性に関するDIを指標とした領域 区分とボーリング孔で得られた水理学的情報との比較





時の水圧変化と(b) 地下水の水圧と水質の深度分布^{(12)に加筆}

(a) 透水試験の後半の時間帯で水圧の変化速度が一定もしくは小さくなる場合は割れ目の水 理的連結性が高く、大きくなる場合は水理的連結性が低いことを示唆します。稚内層浅部で は前者の水圧変化、稚内層深部(遷移領域)では両者の水圧変化、そして稚内層深部では後 者の水圧変化が認められます。(b) 稚内層深部では、特に遷移領域より深い領域において、淡 水水頭が深度とともに変化します。また、稚内層深部は、遷移領域で表層水の混入が一部に 認められるものの、遷移領域より深い領域では表層水の混入は認められず、化石海水が残っ ていることが確認できます。これらの水圧・水質情報は割れ目の水理的連結性が低いことを 示唆します。

椎内層の深部領域の断層を対象に実施した既往の水圧擾乱試験⁽¹⁷⁾前後 の透水試験時に得られた水圧データを解析し、水圧擾乱試験中の高圧注 水が断層の水理的連結性にどのような影響を与えたかを検討しました。 その結果、高圧注水によって断層の水理的連結性が一時的に高くなる一 方で、水圧が元の状態に戻ると水理的連結性も数日の時間差を置いて元 の低い状態に戻ることが確認できました⁽¹⁸⁾。この結果は、断層の水理的 連結性が断層面に垂直に掛かる力に支配されていることを示唆してお り⁽¹⁸⁾(図 59)、このようなメカニズムは断層の水理的連結性の低さをも たらす普遍的な要因として重要と考えられます。令和2年度は水圧擾乱試 験で確認された上記の現象とメカニズムを理解するために、まずは断層 同士の離間距離が断層の水理的連結性に与える影響を解析的に検討しま した。解析では、一様な開口幅を持つ2枚の断層を稚内層中に仮定し、一 方の断層に注水を行った際に、両断層の離間距離に応じて、注水点におけ る水圧変化がどのように異なるかを調べました。その結果、数cmでも断層 が離れることにより、断層の水理的連結性が有意に低くなることが確認 できました(図 60)。今後は、断層同士が連結し合うような場において、 図 59に示すような断層内の開口幅の不均質性がどの程度、断層の水理的 連結性に影響を与えるかを解析的に検討する予定です。



図 59 水圧上昇による断層内の開口部と水理的連結性の増加



下図において、水圧変化量の時間微分の値がほぼ一定だと断層の水理的連結性が高く、後半の時間帯で増加する(傾き0.5以上)と断層の水理的連結性が低いことを示唆します⁽¹²⁾。

令和2年度は、地下施設内の既存のボーリング孔(FZ-01 孔、図 14参 照)において、幅数十 cm の断層(図 61)を対象に水圧擾乱試験を実施し ました。これまでは幅数 cm 程度の小規模な断層を対象に同試験方法を確 立してきましたが⁽¹⁷⁾、今回はより大型の断層に対して同試験方法を試み ました。水圧擾乱試験では、注水により断層部の水圧を上昇させ、断層の 摩擦力を一時的に低下させることにより断層を人工的にずらし、そのず れが透水性に与える影響を調べます⁽¹⁷⁾。今回の試験では、ステップ 0 か らステップ 6 まで段階的に試験区間(断層部)の水圧を上昇させた後、一 旦、水圧を急速に解放し、再びステップ 7 からステップ 13 まで段階的に 水圧を上昇させました(図 62)。その結果、水圧上昇とともに鉛直方向の ずれが断層面に発生し始め、ステップ 6 後の急速な水圧解放後に数 mm の ずれが断層面に残された状態で再び水圧上昇とともにずれが増加してい きました(ステップ 13 の最終段階で 13~49 mm のずれに到達、図 62 左 図)。この間、注入流量は水圧上昇とともに線形的に増加し、その増加率 はステップ 1~6 とステップ 8~13 の間でほぼ同じことが分かりました

(図 62 右上図の 2 本の近似直線の傾きがほぼ同じ)。これらの結果は、 断層のずれが断層の透水性にほとんど影響を与えていないことを示唆し ており、このことは試験中の注入流量と水圧の経時変化から別途計算さ れる断層の水理学的な開口幅(水の通しやすさを表す開口幅)が全ステッ プを通じて 0.09~0.10 mm とほぼ一定であることからも示唆されます(図 62 右下図)。この水理学的な開口幅に対して、与えた断層のずれは数 mm 以上に達していることから、試験を行った断層の透水性は断層のずれに 対して非常に鈍感であることが分かります。今回の試験により、小規模な 断層を対象に確立した試験方法⁽¹⁷⁾がより大型の断層に対しても適用可能 であることが確認できました。今後は今回得られた結果について、さらに 検討を行っていく予定です。



図 61 水圧擾乱試験を行った幅数十cmの断層部のコア写真、孔壁画像 および推定形状

断層主部の傾斜角は水平面に対して 71 度です。断層主部の周辺数十 cm の範囲に割れ目が発達しています。



図中の番号は試験中のステップの番号(ステップ0→ステップ13)に対応しています。

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。

- 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(10数km×10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
- 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*³⁶が、化石海水の三次元分布におよ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について検討します。

令和2年度は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業(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)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 検証に関して、化石海水の分布を推定するための物理探査を実施しまし た。ここで言う化石海水とは、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*37が支配的であることを示す証拠となります。 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*38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電気の流れやすさ(比抵抗) と相関することが分かっており⁽²⁰⁾、塩濃度が高い場合は比抵抗値が低く、 塩濃度が低い場合は比抵抗値が高くなります。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 は、幌延深地層研究センターを含む約3 km四方の範囲を対象とした電磁 探査を実施しました。また、既往研究から天水の浸透が地質構造と関係す ることが分かっており^{例えば(21)}、化石海水分布の推定を効率的に行うには、

^{*36:}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。

^{*37:} 拡散とは、物質の濃度の違いによって物質が散らばり広がる現象を言います。

^{*38:}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。水素同位体比はる²HまたはるDと表記されます。

地層や地質構造の分布との関係付けが肝要であることから、地層や地質 構造の分布を推定するための反射法地震探査^{*39}も併せて実施しました。

図 63に、令和2年度の探査範囲と、電磁探査および反射法地震探査の 測点・測線の配置を示します。電磁探査は、探査深度の浅いAMT法*40と探 査深度の深いMT法*41を併用した高密度電磁探査として実施しました。設 定した探査範囲に対して満遍なく一様の精度で三次元比抵抗分布を推定 するためには、測点を規則的かつ格子状に配置させることが理想的です が、実際には、電磁探査のノイズとなる高圧電線や作業者の安全性などを 考慮して、図 63に示すとおり60箇所の測点配置としました。そして、三 次元比抵抗分布を推定する解析には、3測点分の既往MT/AMT法データと36 測点分の既往AMT法データを追加した合計99測点のデータを使用しまし た。一方、反射法地震探査は、地層・地質構造の三次元分布を得るために、 アクセス可能な道路を最大限使用した準三次元反射法地震探査として実 施しました。



地質図は引用文献(22)に基づいています。

^{*39:} 地上で人工的に地震波(振動)を発生させ、その地震波が地下の地層境界や亀裂に達すると、その一部はそこ で反射して再び地表に戻ってきます。この反射してきた地震波を地表に設置した多数の受振器(小型地震計)で 測定することにより、地層の重なり方やその連続性を推定する手法です。

^{*40:} AMT (Audio-frequency Magnetotellurics) 法は、太陽の黒点活動や雷放電といった自然の電磁波に応答して 地球内部から生じる自然電磁場のうち高い周波数帯を測定し、地下の比抵抗分布を推定する電磁探査法です。

^{*41:}MT (Magnetotelluric) 法は、AMT 法と測定原理は同じですが、AMT 法よりも低い周波数帯の自然電磁場を測定し、より深部の地下の比抵抗分布を推定する電磁探査法です。

図 64に、電磁探査の取得データを用いた解析により推定した三次元比 抵抗分布から、6つの深度の水平断面を切り出した結果を示します。探査 範囲における比抵抗値は1~50 Q·mの範囲にあり、深度が増加すると比 抵抗値が低くなる傾向が認められました。また、側方方向にも異なる傾向 が認められ、探査範囲の南西側の比抵抗は相対的に低く、一方、大曲断層 が分布する北東側の比抵抗は相対的に高いです。

図 65(a)に、既存の地上からのボーリング調査において比抵抗検層に より得られた比抵抗値と水質分析により得られた酸素同位体比の関係を 示します。化石海水に相当する酸素同位体比の範囲を0‰以上とした場合、 その範囲の比抵抗値は大半が2.4 Ω ·m以下です。図 65(b)に、既存の地 上からのボーリング調査の比抵抗検層により得られた比抵抗値の累積頻 度分布を示します。図 65(b)のオレンジ色の三角のプロットは、すべて のデータ(127個)を示しており、この中から酸素同位体比が0‰以上であ るデータ(63個)を抽出し、青色の丸で改めてプロットしました。この累 積頻度分布からも、酸素同位体比が0‰以上となる比抵抗値は大半が2.4 Ω ·m以下であることが分かります。すなわち、幌延深地層研究センター周 辺では、比抵抗値が2.4 Ω ·m以下の場合は高い確率で化石海水に相当す る地下水であると判断できます。一方、2.4 Ω ·mを超えると徐々に化石 海水ではない地下水が含まれるようになり、5.9 Ω ·m以上は化石海水で ある可能性がほとんどないことを示しています。

これらを電磁探査により得られた比抵抗分布から化石海水の存在可能 性を判断する際の目安としました。図 64に示す三次元比抵抗分布の水平 断面図には、化石海水の存在可能性を判断するために、2.4 Q·mおよび 5.9 Q·mの等値線を示しています。標高-12.5 mでは、化石海水が存在す る領域はほとんどないと判断できますが、深度が増加するにつれて化石 海水が存在する可能性がある領域が広がることが分かります。探査範囲 の南西側では、化石海水の可能性が高い2.4 Q·m以下の領域が標高-125 mから標高-550 mにかけて広がります。一方、北東側では、標高-550 mに おいて化石海水の可能性がある5.9 Q·m以下の領域が広く分布します。 しかし、令和2年度の三次元比抵抗分布の解析結果では、既存の地上から のボーリング調査の結果とは異なり、おおよそ標高-800 mより深くなる

85

と比抵抗値が高くなる可能性が認められました。今後は、解析条件の見直 しを行い、より正確な三次元比抵抗分布を推定します。



図 65 (a)既存の地上からのボーリング調査において比抵抗検層により 得られた比抵抗値と水質分析により得られた酸素同位体比の関係、(b) 既存の地上からのボーリング調査の比抵抗検層により得られた比抵抗値 の累積頻度分布

図 66に、反射法地震探査の結果の一例として、探査範囲北西側の測線 における重合前深度マイグレーション (PSDM) *42解析結果と電磁探査で得 られた比抵抗分布を重ね合わせた図を示します。この断面図では、南西側 から順に勇知層、声問層および稚内層が分布する範囲になります。PSDM解 析結果で示されている黒い縞模様は、観測された地震波の時間が深度に 変換され、地震波の振幅が強調されて表示されたものです。稚内層の方で は縞模様がより明瞭であることから振幅が強く、一方、勇知層の方では縞 模様が細かく振幅が弱いことが分かります。これはそれぞれの地層を構 成する岩石の硬さの違いが反映された結果であると解釈することができ ます。比抵抗分布の傾向も岩石の硬さの違いが反映されていると解釈で き、勇知層の方では高い比抵抗の領域がより深くまで分布している様子 が分かります。すなわち、これは、地層ごとに天水の浸透の程度が異なる ことを表していると考えられます。このように反射法地震探査により得 られる情報を組み合わせることにより化石海水が分布する可能性が高い 領域を効率的に判読できることが分かりました。

今後は、令和2年度に取得した物理探査データのさらなる解析や地質構 造判読を進め、化石海水分布の推定精度を向上させるとともに、推定結果 の解釈の正確性を確認するためにボーリング調査を実施することが課題 となります。

^{*42:}反射法地震探査により取得された反射波データの処理・解析手法の一つです。重合前深度マイグレーション (PSDM: Pre-Stack Depth Migration)では、反射波データとモデル化された地下の地震波速度構造の形状を組 み合わせることにより、複雑な地震波伝搬の影響が補正され、正しい地下のイメージを得ることができます。



図 66 反射法地震探査の重合前深度マイグレーション(PSDM)解析結 果と電磁探査で得られた比抵抗分布の重ね合わせ 地質図は引用文献(22)に基づいています。地質図の凡例は図 63に示すとおりです。

②化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証については、 令和2年度は、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方法論に関して概略的な整理を行うとともに、物理 探査とボーリング調査を組み合わせた手法により化石海水の三次元分布 を把握する際に、それを効率的に実施できる調査数量や仕様などの検討 に着手しました。今後は、令和2年度に取得した物理探査データを加えた 検討を進めます。

③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・物質移動解析では、既存の 解析結果に基づき、隆起・侵食による古地形変化、密度流、異常高圧、海 水準変動、涵養量変化*43などの古水理地質学的変遷に関する考慮事項が 水理・物質移動解析における地下水移行時間に及ぼす影響について整理 しました。また、これらの影響を考慮した水理・物質移動解析を実施する ために、既存の解析モデルを改良しました。今後は、改良した解析モデル

^{*43:}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の変化のことです。

を用いて、古水理地質学的変遷が化石海水の分布におよぼす影響について、解析的検討を進めます。

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2年度は、EDZの割れ目の開口状況を定量的に把握するために、原位 置で樹脂注入(図 67)を行った後に採取した割れ目試料(図 68)の詳細 な観察を行い、割れ目の開口幅とせん断変位量を計測しました(図 69)。 その結果、最大で1 mm程度のせん断変位(ずれ)が割れ目沿いに発生して いることが確認できる一方で、そのせん断変位量と開口幅(0.2~0.3 mm) の相関性は小さいことが分かりました(図 70)。一般に、せん断変位とと もに割れ目の開口幅が増加することが既往の室内試験により分かってい ますが、今回の結果では、そのような傾向は認められませんでした。この 原因として、割れ目面に垂直に掛かる力が大きいために、せん断変位に伴 う割れ目開口が抑制されている可能性が考えられます。今回の結果は、 EDZの割れ目の開口メカニズムを理解する上で重要であることから、今後、 さらに検討を行う予定です。





図 68 樹脂注入後に採取したコアの例

(a) 自然光で撮影、(b) 紫外線照射下で撮影(図中の赤矢印は樹脂注入された割れ目を示します。)



図 69 割れ目の開口幅とせん断変位量の計測方法

(a) 樹脂注入割れ目の拡大写真(紫外線照射下)と計測した開口幅とせん断変位量の例、(b) 対となる割れ目表面のフィッティングによる変位前の状態の復元



図 70 EDZの割れ目で計測された開口幅とせん断変位量の関係

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*44、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 への対応に必要であることから、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になります。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2年度は、これまでに得られた水圧観測データの解析を行い、必須の 課題「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」における稚内層中の割 れ目の水理的連結性に関する検討に供しました(6.1.1参照)。

(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*45、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2年度は、 令和元年度に引き続き、地下施設の3本の立坑に設置された集水リング*46 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 約40試料の地下水を採取し、水質を分析しました⁽²³⁾。図 71と図 72に、

^{*44:}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。

^{*45:}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。

^{*46:} 立坑内で、坑壁から染み出した地下水を回収・採取するために、立坑壁面に 30~40 m ごとに設置されている 設備です。

集水リングとボーリング孔の位置をそれぞれ示します。図 73に塩化物イ オン(C1⁻) 濃度の分析結果を示します。集水リングから得られた地下水 のC1⁻濃度(図 73(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C1⁻濃度(図 73(d)~(f))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。C1⁻は反応性に乏しいため、C1⁻ 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、C1⁻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。一方で、 令和2年度は地下水試料中にトリチウム^{*47}は、ほぼ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、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はなく、異なる深度の地下水 の混合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 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C1-濃度 については、目立った変化は見られていません(図 73(f))。令和2年度 に、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 74)の水質を分析した結果、Cl⁻濃度はそれぞれ約4,100 mg/L と約3,900 mg/Lとなり、ほぼ同じ水質でした。これらの注入水と浸み出し ている地下水のCl-濃度は、試験箇所周辺の地下水とほぼ同じですが、酸 素同位体比および水素同位体比がわずかに異なりました。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。また、350m調査坑道の他のボー リング孔 (12-P350-M02孔、13-350LGE-M01孔、13-350-C01孔、13-350-C06 孔、14-350-C04孔および14-350-GAS01孔)に関しても、令和2年度までC1-

^{*47:} 質量数が3である水素の放射性同位体です。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。



94







(a) 立坑の集水リング、(b) は東立坑の集水リング、(c) は西立坑の集水リング、(d) は140m調 査坑道から掘削されたボーリング孔、(e) は250m調査坑道から掘削されたボーリング孔、(f) は350m調査坑道から掘削されたボーリング孔の分析結果をそれぞれ示しています。



図 74 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。写真の奥に見えるものは、人エバリア性能確 認試験のコンクリートプラグになります。

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2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 75に示します。令和元年度に引き続き、令和2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 76、図 77、図 78、図 79および図 80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において水圧が緩やかに上昇する傾向が確認 されています。また、同区間では、人工バリア内への注水量の増加・減少 に伴い、令和元年12月に約0.1 MPaの水圧の増加、令和2年7月に約0.1 MPa の水圧の減少が確認されています(図 79および図 80)。一方、試験坑道 4の南側約3 mに位置するC05では、注水量の増加・減少に伴う水圧への影 響は確認されていません(図 76)。



図 75 試験坑道2および試験坑道4周辺における水圧・水質モニタリン

グ実施箇所







図 77 CO6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 79 CO8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 81)。図 82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 の結果は令和元年度の測定値と概ね同様の傾向を示しており⁽¹⁴⁾、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。



図 81 試験坑道2および試験坑道4周辺における水質モニタリング継続 可能区間

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 82 CO5の区間2における水質モニタリング結果

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。 令和2年度以降の必須の課題の一つである「物質移行試験」に関して、 掘削影響領域(EdZ)の物質移行試験の評価手法の確立に必要な検討とし て、不飽和領域の形成メカニズムの検討や不飽和領域への酸素の侵入要 因の検討を実施しています。

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について検 討してきました⁽²⁴⁾。EdZでは、坑道内の大気がEdZに侵入し、坑道周辺の 岩盤や地下水が還元状態から酸化状態に変化する可能性が考えられてい ます。しかしながら、これまでに、坑道周辺のEdZにおける酸化の兆候は 確認されておらず⁽²⁵⁾、その理由として、地下水中の溶存ガスが遊離する ことで、岩盤内への酸素の侵入を抑制している可能性が指摘されていま した。令和元年度は、坑道内の酸素がEdZへ侵入する要因について検討す るために、350m調査坑道の条件を模擬した数値解析を実施してきました。

解析では、図 83に示すように、坑道壁面、掘削損傷領域(EDZ)および 健岩部を準一次元的に模擬し、数値解析コードTMVOC⁽²⁶⁾を用いて、坑道掘 削から50年間の地下水と溶存ガスの流れおよび岩盤中への酸素の流れに ついて計算しました。令和2年度は、これまでに実施してきた数値解析の 結果を取りまとめました^{(27)、(28)}。その結果、地下水中の溶存ガス量が減少 したり、岩盤の透水性が低くなると不飽和領域における気相拡散を介し て酸素の侵入量が大きくなり、坑道壁面における湿度が低下した場合も 不飽和領域の形成が促進されることで、これを介した酸素の侵入が促進 されることが分かりました(図 84)。なお、本研究は、電力中央研究所*48 との共同研究の一環として実施しています。

^{*48:}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。



図 84 350m調査坑道を模擬した感度解析による岩盤中への酸素の侵入 量と侵入深度の関係性

令和2年度以降の必須の課題である「物質移行試験」では、微生物の影響を考慮したモデル化手法の高度化が進められています。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健岩部もまた、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。微生物が活動するためには水が必要であることか ら、岩石中の生きた微生物が存在する箇所には地下水が存在することに なります。この関係性に着目し、微生物を指標とした岩盤中の水みちの評 価に取り組んでいます。

令和2年度は、地下施設の140mおよび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。140m調査坑道から得られた岩石試料は珪藻 質泥岩の声問層であり、そこでは微生物は割れ目とその周囲の健岩部に 多く見られることが分かりました(図 85)。一方で、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、そこでは微生物は割れ目の 中に密集していることが分かりました(図 86)。微生物の密集部を拡大 して観察すると、微生物の存在する箇所には粘土鉱物も存在することが 分かりました。なお、本研究は、東京大学との共同研究として実施してい ます。



図 85 140m調査坑道から得られた岩石試料(声問層)中の微生物分布 左図は、実体顕微鏡写真の上に、蛍光顕微鏡写真を重ね合わせたもので、右図は、左図の蛍 光顕微鏡写真部を拡大したものになります。蛍光顕微鏡写真で黄緑色が強い部分ほど、微生 物が密集していることを示しています。



図 86 350m調査坑道から得られた岩石試料(稚内層)中の微生物分布 左図は、実体顕微鏡写真の上に、蛍光顕微鏡写真を重ね合わせたもので、右図は、左図の蛍 光顕微鏡写真部を拡大したものになります。蛍光顕微鏡写真で黄緑色が強い部分ほど、微生 物が密集していることを示しています。

地下環境には多くの微生物が存在しており、幌延の地下環境にも他の 環境と同様に様々な種類の微生物が豊富に存在しています。これまでに 地下施設の建設に伴う坑道周辺の地球化学環境の変化と微生物代謝活 性*49の関連性を調査するため、微生物の現存量や群集組成の変化をモニ タリングしています。令和2年度は、令和元年度に引き続き、140m、250m および350m調査坑道から掘削されたボーリング孔(08-E140-C01孔、07-V140-M03孔、09-V250-M02孔および13-350-C01孔)から採取した地下水試 料を対象として、顕微鏡観察や遺伝子解析*50を行いました。その結果、令 和元年度に引き続き、坑道壁面周辺と坑道から離れた領域では微生物種 の群集構成が異なり、いずれの領域においても優占種*51は未だかつて培 養されたことのない未知微生物が非常に高い割合で優占していることが 確認されました(図 87)。遺伝子解析の結果から、これらの菌は地下水中 の炭酸ガス、メタンガス、水素ガスや鉄を利用して増殖する種であること が推察されました。また、これまでのモニタリング結果と同様に、

^{*49:} 微生物が生きるために周辺環境から有機物や無機物を取り込んで化学反応を行ったり、物質を生成したりす る活動の程度のことです。

^{*50:}環境中に存在する遺伝子を解析することにより、環境中の微生物の種類や特定の性質を調べることです。

^{*51:}生物群集である種の量が特に多く、その群集を特徴付けていることです。

BetaproteobacteriaやGammaproteobacteriaなどのやや酸化還元電位の 高い環境でも生息可能な微生物に近縁な種の割合が増加していることが 明らかになってきました。さらに、バイオフィルムを形成する種として知 られるCandidatus Altiarchaealesに属する古細菌に近縁な未知微生物は、 これまでは坑道壁面近傍のみで確認されておりましたが、令和2年度の解 析結果から坑道壁面から離れた領域で増加する傾向が確認され、坑道周 辺の酸化還元状態やpHなどの化学条件が徐々に変化していることが示唆 されました。これらの優占種の地下環境中での働きや不均一な微生物種 の分布が物質の移動反応に及ぼす影響について、今後も調査を継続し、坑 道周辺の地球化学環境と微生物代謝活性の関連性を調査するための技術 開発を進める予定です。



図 87 遺伝子解析結果に基づく各採水区間における地下水中の微生物 種の存在割合

令和2年度以降の必須の課題の一つである「物質移行試験」に関して、 これまでに確立した物質移行特性評価手法の適用化/高度化が求められ ています。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年度は、様々な化学反応が収 着に寄与すると考えられ、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。堆積岩試料を薄片加工し、数十umスケール にてu-XRF法^{*52}による元素のマッピング分析およびu-XAFS法^{*53}によるセレ ンの化学形態分析を行った結果、セレンは鉄(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(FeS₂)に濃集している 可能性が示唆されました(図 88)。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 89)。また、令和元年度に適用 した手法を改良し、低酸素雰囲気下で実施した逐次抽出試験*54の結果か ら、声問層・稚内層の試料ともにパイライトやフェロセライト(FeSe₂) のような還元的な鉄鉱物中への分配が多くマッピング分析と同様の結果 が得られました (図 90)。一方で、パイライトやフェロセライトへの分配 率については声問層の試料と稚内層の試料で異なる傾向が示されました。 この違いについて明らかにするために、セレンの結合状態に関する解析 や収着固相の生成メカニズムに関する分析を実施することで、より詳細 なセレンの収着メカニズムについて明らかにし、室内試験の結果と比較 していく予定です。

このような微量元素の化学形態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。

^{*52:}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。

^{*53:}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。

^{*54:} 岩石試料に対して複数の溶液を連続的に反応させることで、岩石中の重金属元素を化学的特性に基づいて抽 出する試験手法です。



図 88 微小領域におけるセレン(Se)、鉄(Fe)、硫黄(S)のマッピング分 析結果

SAB2-5b-2 XANES



図 89 セレン濃集部に対するセレン(Se)および鉄(Fe)の化学形態に関 する分析結果



図 90 各抽出ステップにて抽出されたセレン(Se)の量

(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 91)。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 92)。 地中変位計および鋼製支保工応力計の設置位置を図 93に示します。

地中変位計の計測結果を図 94および図 95に示します。光ファイバー 式変位計は、10年程度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年程度で計測値が逸脱しはじめ、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。 また、光ファイバー式変位計の測定結果は、電気式地中変位計の計測値が 逸脱するまでは、同様の傾向を示したことから、測定値の妥当性が検証で きました。

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 96)。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。



図 91 地中変位計設置状況



図 92 鋼製支保工応力計設置例









図 95 電気式地中変位計の計測結果



(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の連接部付近に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*55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2年度 も、過年度までと同様の方法⁽²⁹⁾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2年度は坑道掘削工 事はなく、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 Lm離れた HDB-8孔近傍のPIN10の傾斜量を図 97に示します。PIN8では坑道掘削時に 顕著な傾斜が計測されました。傾斜方向は、掘削を実施した東立坑および 西立坑の方向でした。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 97(a)、(b))。一方、PIN10 (図 97(c)) 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、立坑の周辺の高精度傾斜計では地下深 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。

^{*55:}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。



図 97 傾斜計データの一例

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。

(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2年4月1日から令和3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 98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5回発生しました(表 8)。図 99に 令和3年2月6日午前4時10分ごろに発生した地震の地下施設の観測記録を 示します。地下では、地上に比べて揺れが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350m調査坑道での地震観測を継続します。



表 8 幌延町宮園で観測された震度1以上の地震

							震度		
地震の発生日時	震央地名	緯度	経度	深さ	Mj*56	幌延町 宮園	最大 震度		
2021/2/6	上川地方北部	44° 53 6′ N	142° 06 8′ F	2 km	39	2	3		
4:10:01		44 00.0 N	142 00.0 L	2 1111	0.0	2	5		
2020/2/6	ᅣᄪᇔᆂᄮᇓ	11° 53 5′ N	142° 07 0' F	7 km	35	1	2		
4:02:4		44 00.0 N	142 07.0 L	/ 1	5.5	•	2		
2020/12/1	サンロン声士法	40° 05 0' N	1/1° 10 0' E	610 km	67	0	2		
7:54:33	リハリン四万冲	40 UJ.O N	141 IV.O E	019 KIII	0.7	Ζ	ა		
2020/8/27	中公本十七日	45° 01 5' N	1/1° 55 0' 5	0 km	17	1	1		
17:36:34	示谷地力北部	40 01.0 N	141 00.0 E	9 KIII	1.7	I	I		
2020/4/1	ウシャナキショ	45° 06 4' N	141° 40 0' F	0 km	0.6	0	0		
4:39:34	示谷地力北部	40 00.4 N	141 40.Z E		2.0	Z	Z		
ニカらの地震の震央け図 98に思って示しています									

これらの地震の震央は図 98に黒丸で示しています。



地下施設の地震観測結果は幌延深地層研究センターのホームページに掲載しています。

*56:気象庁マグニチュード(地震の規模を表す数値)です。

8. 地下施設の管理

8.1 地下施設の整備

令和2年度は、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(4.1参照)で使用するプラグおよび試験体の設置を行 いました(図 100)。



図 100 地下施設の整備状況

8.2 地下施設の維持管理

令和元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(東立坑櫓設備)などを行い、地下 施設の安全確保に努めました(図 101)。



図 101 設備の点検および更新状況

8.3 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壌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 期すため、土壌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壌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 102)。

掘削土(ズリ)置場は、土壌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 103)となっています。



図 102 掘削土 (ズリ) 置場



8.4 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 104)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



(c) 脱ホウ素設備(1号機)



(e) 脱窒素設備



(b) 濁水処理設備



(d) 脱ホウ素設備(2号機)



(f) 揚水設備

図 104 排水処理設備

9. 環境調査

令和元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 105に示します。



図 105 排水系統と各水質調査の採水地点

(1) 天塩川への排水量

地下施設からの排出水および掘削土(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2年度における天塩川への排水量は、表 9に示すとおりです。合計 排水量は、令和元年度に比べ通年で降水量(降雪量)が増加したことによ り、52,301 m³と前年度同時期(44,956 m³)の約116%でした。日最大排水 量は、一過的な降雨の影響を受けた9月の495 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は、掘削土(ズ リ)置場の融雪水を多く処理した3月が最大となっており、月排水量が 5,938 m³、日平均排水量が191.5 m³でした。

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2年4月	4, 606	351	153. 5
令和2年5月	3, 616	310	116.6
令和2年6月	4, 697	340	156. 6
令和2年7月	3, 066	229	98.9
令和2年8月	5, 726	439	184. 7
令和2年9月	5, 129	495 ^{**3}	171.0
令和 2 年 10 月	4, 908	342	158. 3
令和2年11月	5, 136	390	171. 2
令和2年12月	3, 716	302	119.9
令和3年1月	2, 559	209	82.5
令和3年2月	3, 204	451	114.4
令和3年3月	5, 938 ^{**3}	491	191. 5 ^{**3}
合 計	52, 301	_	_
最大値	5, 938	495	191.5

表 9 天塩川への排水量

※1:北るもい漁業協同組合との協定値は750 m³/日

※2: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 106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2年度における水質調査結果は、表 10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 106 地下施設からの排水処理フローと採水地点

		2				
		過年度	令和元年度	令和2年度	(参考値)	
分析項目 ^{※1}	採水地点 ^{※2}	平成18年12月	平成31年4月	令和2年4月	水質汚濁防止法	
		~平成31年3月	~令和2年3月	~令和3年3月	排水基準	
	立坑の原水	<0.01	<0. 01	<0. 01		
カドミウム (mg/l)	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	<0. 01	<0. 01	<0. 01	0. 03	
(118/ 2/	揚水設備における処理済排水	<0. 01	<0. 01	<0. 01		
	立坑の原水	<0. 01~0. 08	<0. 01	<0.01		
ヒ素 (mg/L)	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	<0.01~0.02	<0. 01	<0. 01	0. 1	
(揚水設備における処理済排水	<0. 01~0. 02	<0. 01	<0. 01		
	立坑の原水	<0.01~0.02	<0. 01	<0. 01		
セレン (mg/l)	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	<0. 01~0. 04	<0.01~0.01	<0.01~0.01	0. 1	
	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		
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	<0.8	<0.8	<0.8	8	
	揚水設備における処理済排水	<0.8 ~ 1.6	<0.8	<0.8		
	立坑の原水	<0.1~160	57~80	69~79		
ホウ素 (mg/l)	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	<0.1 ~ 37	2.4~6.2	0.9~5.9	10	
(116) E)	揚水設備における処理済排水	<0.1~3.0	0. 2~2. 2	<0.1~1.9		
·	立坑の原水	0.41~117	55~90	68~81	120	
全窒素 (mg/L)	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	3.0 ~ 150	18~35	4.0~32	120 (日間平均 60)	
(118/ 2/	揚水設備における処理済排水	0.60~48	6. 2~21	9.6~20		
	立坑の原水	0.12~110	30~61	39~61		
全アンモニア (mg/l)	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	0.12~22	0. 27~1. 1 0. 17~1. 1		_	
(IIIB/ L/	揚水設備における処理済排水	<0.05~6.8	<0. 05	<0.05~1.7		
	立坑の原水	7.5 ~ 9.5	8.1~8.2	8.1~8.3		
pН	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	6.7 ~ 8.7	7. 2~7. 8	7. 2~7. 6	5.8 ~ 8.6	
	揚水設備における処理済排水	6.9~8.6	7.4~7.9	7.5 ~ 8.2		
	立坑の原水	4~580	6~130	10~49		
浮遊物質量 (mg/l)	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	1~170	3~6	1~21	200 (日間亚均 150)	
(116/ 2/	揚水設備における処理済排水	<1~9	<1	<1~1		
	立坑の原水	20~4, 300	2, 500~3, 900	3, 100~3, 600		
塩化物イオン (mg/l)	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	10~1, 500	77~170	29~150	—	
(116/ L)	揚水設備における処理済排水	38~4, 700	1, 500~4, 000	1,400~3,300		

表 10 地下施設からの排水に係る水質調査結果

※1:主な分析項目を抜粋

※2:採水地点は図 106 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 107)において、定期的(原則1回/月)に採水し(図 108)、水質調査を実施しています。

令和2年度における調査結果は、表 11に示すとおりです。浮遊物質量 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)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、融雪や降雨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 107 天塩川の採水地点



図 108 天塩川の採水状況

			王度	令和2年度			
	採水		亚式19年6日			北るもい	
分析項目 ^{※1}	tith	⊼/\\ 占 ^{※2}	一元10年0月 ~平成18年11日	一一八10年12月 ~今和2年3日	令和2年4月	漁業協同組合	
			(放流前)	(放流後)	~令和3年3月	協定値	
		表層	<0.02~0.04	<0.01~0.35	0 01~0 10		
	B1	山岡	_	<0.01~3.5	0 01~1 1	-	
		涩菌	<pre> < 0 02~3 35</pre>	<0.01~4.9	0.01~3.8	-	
ホウ素 (mg/L)		末屆	<0.02~0.04	<0.01~0.27	<0.01~0.07		
	B2	山區	<u> </u>	<0.01~3.7	0.01~0.10	5	
	02	深層	<0 02~3 28	<0.01~5.0	<0 01~0 49		
		表層	<0.02~0.07	<0.01~0.28	0.01~0.11		
	B3	中層	—	<0.01~2.5	<0.01~0.15	-	
		深層	<0.02~1.03	<0.01~4.7	0.01~0.22		
		表層	0.37~1.06	0.11~2.2	0.34~2.2		
B1	B1	山國	_	0 15~2 1	0.34~2.2	-	
		深層	0 42~1 50	0 15~6 5	0.37~2.2	-	
		表層	0.37~1.14	0 14~2 2	0.33~2.2		
全窒素	B2	山區	_	0 15~2 3	0.34~2.3	20	
(mg/L)	02	深層	0 4~1 16	0 16~2 3	0.34~2.3		
		<u>未</u> 層	0 4~1 31	0 16~2 2	0.33~2.2		
	B3	山層		0 11~2 3	0.34~2.2	-	
	50	深層	0 49~1 24	0 16~2 3	0 33~2 2		
B1		<u>未</u> 層	_	<0.05~0.83	<0.05~0.11		
	B1	山岡	_	<0.05~0.92	<0.05~0.09		
	51	空国	_	<pre> <0.05 ~0.02 <0.05~0.85</pre>	<pre> <0.05 ~ 0.03</pre>		
		末届	<0.01~0.13	<0.05~0.89	<0.05~0.10	-	
全アンモニア	B2	山岡		<0.05~0.76	<0.05~0.09	2 ** ³	
(mg/L)	02	深層	0 01~0 35	<0.05~0.85	<0.05~0.09	-	
		表層	0.01~0.21	<0.05~0.89	<0.05~0.10		
	B3	中層	_	<0.05~0.90	<0.05~0.10		
		深層	0.02~0.17	<0.05~0.96	<0.05~0.10		
		表層	7.1~7.4	6.4~7.8	6.9~7.7		
	B1	中層		6.5~7.7	6.9~7.6		
		深層	7.0~7.6	6.5~8.0	7.0~7.5		
		表層	7, 1~7, 4	6.6~7.9	6.9~7.6		
рН	B2	中層	_	6.5~7.9	7.0~7.6	5.8 ~ 8.6	
		深層	7. 2~7. 6	6. 6~8. 0	7.0~7.6	-	
		表層	7.0~7.6	6.6~7.9	7.0~7.6	1	
	B3	中層	_	6.6~7.7	7.0~7.6	-	
		深層	7.1~7.4	6. 6~8. 0	7.0~7.5		
		表層	3~34	<1~360	<1~95		
	B1	中層	_	<1~390	<1~96	-	
		深層	6~86	<1~400	<1~98		
这年代中国		表層	3~36	<1~390	<1~90	1	
	B2	中層	—	<1~400	<1~94	20	
(IIIg/L)		深層	5~47	<1~460	<1~84		
		表層	3~35	<1~420	<1~90		
	B3	中層		<1~460	<1~100	1	
		深層	5~49	<u><</u> 1 ~ 650	<1~94	1	

表 11 天塩川の水質調査結果

※1:主な分析項目を抜粋

※2:採水地点は図 107参照、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 109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 110)、水質調査を実施しています。

令和2年度における調査結果は、表 12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 109 掘削土 (ズリ) 置場周辺の地下水の採水地点



図 110 掘削土 (ズリ) 置場周辺の地下水の採水状況 (A1~A4)

表 12 掘削土 (ズリ) 置場周辺の地下水の水質調査結果

		過	令和2年度					
	すま	平成18年6月	平成19年5月		公知り左		△和り左	
分析項目 ^{※1}	休小	~平成19年4月	~令和2年2月		节和 2 年		市和3年	
	地京"	掘削土(ズリ)	掘削土(ズリ)		0 🗖	11 🗆	0 🗆	
		搬入前	搬入後	эд	٥Л	ΠЯ	2 Л	
	A1	<0. 001~0. 001	<0. 001	<0. 001	<0. 001	<0. 001	<0. 001	
カドミウム	A2	<0.001~0.004	<0.001~0.002	<0. 001	<0. 001	<0. 001	<0. 001	
(mg/L)	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	
	A1	<0. 005 ~ 0. 171	<0. 005	<0. 005	<0. 005	<0. 005	<0. 005	
鉛	A2	<0.005~0.006	<0.005~0.007	<0. 005	<0. 005	<0. 005	<0. 005	
(mg/L)	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	
	A1	<0. 005	<0. 005 ~ 0. 012	<0. 005	<0. 005	<0. 005	<0. 005	
ヒ素	A2	<0. 005	<0. 005 ~ 0. 007	<0. 005	<0. 005	<0. 005	<0. 005	
(mg/L)	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	
	A1	<0. 002	<0. 002 ~ 0. 005	<0. 002	<0. 002	<0. 002	<0. 002	
セレン (mg/L)	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	
	A1	<0. 1 ~ 0. 3	<0.1~0.4	<0. 1	<0. 1	<0. 1	<0.1	
フッ素	A2	<0. 1 ~ 0. 4	<0.1	<0. 1	<0. 1	<0. 1	<0.1	
(mg/L)	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	
	A1	19. 8 ~ 50. 7	0.40~63.0	23	29	23	15	
ホウ素	A2	1.29~43.5	0. 43~19. 0	7.3	10	8.0	23	
(mg/L)	A3	12. 5 ~ 34. 0	0.18~41.8	2. 4	11	3. 3	19	
	A4	<0.02 ~ 0.06	<0. 02 ~ 0. 47	0. 03	0. 06	0. 04	0. 10	
	A1	6.9 ~ 7.2	6.1 ~ 7.9	6. 5	6. 6	6. 5	6. 5	
۳H	A2	4.6~6.3	3.7~6.9	6. 5	6. 5	6. 5	6. 8	
pn	A3	6.8 ~ 7.3	4. 2 ~ 7. 4	6. 5	6. 5	6. 5	6. 7	
	A4	5.4~6.6	5.0 ~ 6.7	5. 1	5. 1	5. 1	5. 2	
	A1	1, 810~2, 760	79 ~ 3, 400	1, 500	1, 800	1, 600	1000	
塩化物イオン	A2	147~2, 910	23~1, 200	450	590	430	1000	
(mg/L)	A3	631 ~ 1,550	26 ~ 1, 700	110	690	160	860	
	A4	9.7~11.9	8. 4~17. 0	9.9	10	10	15	

※1:主な分析項目を抜粋

※2:採水地点は図 109 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 111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 112)、水質調査を実施しています。

令和2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 111 清水川および掘削土 (ズリ) 置場雨水調整池の採水地点



図 112 清水川および掘削土(ズリ)置場雨水調整池の採水状況

24 -				
			F度	令和2年度
	採水	平成18年6月	平成19年5月	
分析項目*1	小小 地点 ^{※2}	~平成19年4月	~令和2年3月	令和2年4月
	, <u>, , , , , , , , , , , , , , , , , , </u>	掘削土(ズリ)	掘削土(ズリ)	~令和3年3月
		一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	一 一 	
ᆂᆙᅕᄨᄼ	A5	<0. 001	<0. 001	<0. 001
ファミワム (mg/L)	A6	<0. 001~0. 001	<0. 001~0. 002	<0.001
	A7	<0. 001	<0. 001	<0. 001
\$1\	A5	<0. 005	<0. 005	<0. 005
≢⊡ (mg/L)	A6	<0. 005	<0. 005~0. 007	<0. 005 ~ 0. 005
···· ·· ······························	A7	<0. 005	<0. 005~0. 008	<0. 005
	A5	<0. 005	<0. 005~0. 006	<0. 005
ヒ素 (mg/L)	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
- +	A5	<0. 1 ~ 0. 1	<0. 1 ~ 0. 2	<0.1
フッ素 (mg/L)	A6	<0. 1 ~ 0. 7	<0. 1∼1. 1	<0.1
(110/ -/	A7	<0. 1	<0. 1~0. 3	<0. 1
_L=	A5	0. 03~0. 25	<0. 02 ~ 0. 44	0. 04~0. 39
ホワ系 (mg/L)	A6	<0.02 ~ 0.09	<0. 02 ~ 0. 43	0. 02~0. 20
(110/ -/	A7	0.03~0.30	<0. 02 ~ 0. 42	0. 04~0. 37
	A5	6. 4~7. 1	6.0~7.9	6.4~7.4
pН	A6	5.8 ~ 7.4	5. 7 ~ 9. 1	6.6~8.1
	A7	6.5 ~ 7.0	6. 1 ~ 7. 8	6.5 ~ 7.3
这半年期日	A5	1~20	<1~66	1~62
浮遊物筫重 (mg/L)	A6	12~173	<1~500	<1~50
	A7	1~11	<1~270	1~54
	A5	14. 4~30. 5	7. 2~70	13~45
塩化物イオン (mg /I)	A6	5.1~24.7	1.7~269	3.0~25
	A7	15. 6 ~ 28. 7	8.1~100	14~43

表 13 清水川および掘削土 (ズリ) 置場雨水調整池の水質調査結果

※1:主な分析項目を抜粋

※2:採水地点は図 111 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2年度における水質調査結果は、表 14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。

	X 11		天的生物水		
		過年度	令和2年度	北るもい	
分析項目	採水地点	平成 18 年 12 月 ~令和 2 年 3 月	令和2年4月 ~令和3年3月	漁業協同組合 協定値	
-11	研究管理棟	5.9 ~ 7.7	6.0 ~ 7.4		
рН	地下施設 現場事務所	6.8~7.9	7. 1 ~ 7. 9	5.8~8.0	
生物化学的	研究管理棟	<0.5 ~ 17	1. 4~8. 9	20	
酸素安水重 (mg/L)	地下施設 現場事務所	<0. 2 ~ 28	0. 7~18		
浮遊物質量 (mg/L)	研究管理棟	0.5~10	<1~6	20	
	地下施設 現場事務所	<0.5 ~ 8.0	<1~2	20	
全窒素	研究管理棟	6.6 ~ 52	8.1~27	60	
(mg/L)	地下施設 現場事務所	0. 2~45	0. 7~9. 5	60	
全リン	研究管理棟	0.5~5.0	1. 1~2. 9	0	
(mg/L)	地下施設 現場事務所	<0. 1 ~ 7. 8	<0. 1 ~ 1. 0	o	
透視度	研究管理棟	30	30	20	
(cm)	地下施設 現場事務所	30	30	50	
大腸菌群数	研究管理棟	0~30	0	2,000	
(個/mL)	地下施設 現場事務所	0~2, 100	0~21	3,000	

表 14 浄化槽排水の水質調査結果

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 113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。



図 113 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 114)、 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2年度における調査結果は、表 15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。



図 114 清水川の水質調査

	1	调在使					
分析項目 ^{※1}	採水地点 ^{※2}	平成14年8月		令和3年			
		点 ^{※2} 平成14年8月 ~令和2年2月 6月 1 6.3~7.9 7.6 2 6.4~7.7 7.2 1 $<0.5~62$ 1.5 2 $<0.5~10.0$ 2.7 1 $1~70$ 5 2 $<1~69$ 3	9月	11 月	2月		
pH	No. 1	6.3 ~ 7.9	7.6	7. 1	7. 1	7. 2	
	No. 2	6.4 ~ 7.7	7. 2	7.0	7.0	7.0	
生物化学的	No. 1	<0.5 ~ 62	1.5	1.0	0. 7	1.0	
酸系安水重 (mg/L)	No. 2	<0.5 ~ 10.0	2.7	1. 2	1. 2	1.5	
浮遊物質量	No. 1	1~70	5	8	3	3	
(mg/L)	No. 2	<1~69	3	6	4	1	
溶存酸素量	No. 1	6.6~13.9	10. 2	9. 2	11.3	13. 3	
(mg/L)	No. 2	5.5 ~ 12.5	7.4	7.4	9. 9	9. 7	

表 15 清水川の水質調査結果

※1:主な分析項目のみを抜粋 ※2:採水地点は図 113 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 115)。調査は、図 113に示すSt. 1~St. 3の3箇所で 実施しています。

令和2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 16に示すとおり、スナヤツメ北方種、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6種が確認されました。



図 115 生息魚類調査

в	利		選定根拠 ^{※1}						
	14	↑ 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	1	2	3	4	5	6	\bigcirc
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	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			0
カサゴ	カジカ	ハナカジカ				N			

表 16 確認された重要種(魚類)

※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

O:調査対象種

※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。

そのほか、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 116)。

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 全教育を実施したほか、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 117)。



図 116 安全パトロールの状況



図 117 安全行事の状況 (安全大会)

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2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

堆積軟岩の力学挙動評価の開発に関して共同研究を行いました。令和 元年度と令和2年度の2年間で、強度の載荷速度依存性とクリープ寿命の 応力依存性の関係を整理し、時間依存性の程度を調べる試験方法につい てまとめました。稚内層珪質泥岩と他の堆積岩について、時間依存性の程 度を比較したところ、稚内層珪質泥岩の結果は、これまでに得られた堆積 岩の結果と大きな違いはないことが分かりました。また、幌延で計測した 岩盤の長期変形挙動計測結果と、過去に実施された変形挙動計測エリア 付近を対象とした予測解析結果とを比較し、実岩盤中の長期変形挙動に ついて検討しました。

また、微生物を指標とした堆積岩中の水みち調査手法に関して共同研 究を実施しました。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健岩部も また、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開発が重要になります。微生物が活動するた めには水が必要であることから、岩石中の生きた微生物が存在する箇所 には地下水が存在することになります。この関係性に着目し、本共同研究 では、岩盤中の地下水流動に対する健岩部の寄与の評価手法の開発を目 的として、堆積岩における微生物を指標とした健岩部の地下水移動経路 の評価手法の開発に取り組んでいます。令和2年度は、7.(2)で述べたよう に、地下施設の調査坑道から得られた岩石試料および地上からのボーリ ング掘削時に得られた岩石試料を用いて、岩石中の微生物分布を取得し、 同時に、岩石を構成する主要元素濃度の分布を調べました。その結果、微 生物の存在する場所には粘土鉱物も合わせて存在することが分かりました。 今後は、粘土鉱物にも着目しながら、データを拡充させていきます。

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 いました。この研究は、地下水中の重炭酸イオン(HCO₃⁻)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 化による掘削影響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、プラスのバリア機能が期待され ます。

令和2年度は、地下施設の坑道壁面から、支保工であるコンクリートと 岩盤の双方を試料として採取できるようにボーリング孔を掘削し、この ボーリング孔にコンクリーション化充填材を注入しました。そして、コン クリーション化充填材が充填されたボーリング孔周辺の透水性を経時的 に測定しました。

今後、コンクリートの裏側の岩盤中に形成された炭酸カルシウム(カル サイト)の産状や形成速度を分析・調査する予定です。

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 る希土類元素の挙動を調べることが有効になります。令和元年度は、250m および350m調査坑道から掘削されたボーリング孔を利用して、地下水試 料および岩石試料を採取しました。令和2年度は、これまでの共同研究に より構築された分析手法を用いて、250m調査坑道から得られた地下水試
料中の希土類元素濃度を精確に定量しました。また、グローブボックスを 用いて酸素の無い環境で粉砕した岩石試料と地下水試料を用いて岩石中 に含まれる希土類元素の溶出試験を開始しました。今後は、得られた結果 を用いて熱力学的な考察を行うことで、堆積岩地域の地下深部環境にお ける希土類元素の挙動の理解を深めていきます。

地下水中のウランや希土類元素などの微量元素と微小な物質(コロイ ド・有機物・微生物)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2年度は、350m調 査坑道から得られた地下水試料を用いて追試を実施し、実験結果の確か らしさを確認しました。その結果、希土類元素は原子番号が大きくなるほ ど地下水中の濃度が減少する結果や、添加した希土類元素がリン酸塩な どの鉱物を形成している可能性が再確認されました。今後は、別途東北大 学において実施した室内試験結果と合わせて、地下水中の微量元素とコ ロイドや有機物との相互作用について考察を行っていきます。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

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。350m調査坑道において、坑道壁面か ら約1 m程度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、 岩盤の亀裂内において炭酸カルシウムの析出を促進させるとともに、透 水試験を繰り返し実施し透水性の変化を調査しました。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。今後は、これまで取得したデータや採取した 岩石試料を分析する予定です。

139

幌延地圏環境研究所*57

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2年度は、深度約300 mの地下水から酸 素の無い環境のもと、硫酸で呼吸して生育する細菌の新種を発見しまし た⁽³⁰⁾。この新種の細菌は、地下深部の硫酸に乏しい環境において、酸化 鉄や二酸化マンガン、腐植物質などの地層中に含まれる物質も使いなが ら呼吸をしている可能性が分かりました。このような機能を持つ微生物 は、地下施設の掘削により一時的に酸化的になった環境を、地下施設の閉 鎖後に還元的な環境に戻す役割の一端を担うことが期待されます。

產業技術総合研究所*58

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2年度は、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。

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ています。令和2年度は令和元年度までに引き 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や弾性 波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

^{*57:} 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。

^{*58:}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。

ために、140m調査坑道において簡易な乾式ボーリング掘削を実施しました。今後は、得られたコア試料を用いて坑道周辺岩盤の飽和度を測定し、物理探査の結果と比較していきます。

令和元年度は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について検 討しました⁽²⁴⁾。令和2年度は、7.(2)で述べたように、不飽和領域の形成 に関連して、坑道中の酸素が岩盤中へ侵入する要因を検討しました⁽²⁷⁾。 その結果、地下水中の溶存ガス量が減少したり、岩盤の透水性が低くなる と酸素の侵入量が大きくなり、坑道壁面における湿度が低下した場合も 酸素の侵入が促進されることが分かりました。今後も、実測データの拡充 および数値解析を活用した解釈などを通して、坑道周辺の不飽和領域の 形成メカニズムの解明に取り組みます。

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2年度は、140m、250mおよび350m調査坑道から地下水を採水し、コロイ ドを構成する元素の同定やコロイドの粒径分布などを調べました。今後 は、同定されたコロイド種に対し、収着脱離試験を実施し、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。

国立環境研究所

深部地下水中に溶存する有機物の特性評価ならびに調査解析手法の開 発を目的として共同研究を実施しました。令和2年度は、4.2(2)で述べた ように、地下水中の有機物をその性質に応じて分画するとともに、分画さ れた各物質群の溶存有機炭素濃度や分子サイズ分布などに関する特性評 価を行いました。

深田地質研究所、東京大学

従来、断層分布の調査においては、地形・地質調査に加え、地表および 空中からの物理探査が主として実施されてきています。一方、断層の地表 部においては微量なガスの湧出が見られることがあります。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 ス濃度測定技術が大幅に向上しており、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。本共同研究では、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2年度は、高精度メタン測定 機を車に載せて、幌延町内を走行しながらメタンガス濃度分布を測定し ました。今後は、追加調査によりデータを拡充させていく予定です。本共 同研究の成果の一部は、6.1.2に示した令和2年度以降の必須の課題「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」の物理探査技 術に反映させることで、技術の高度化を図ります。

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2年度は、350m調査坑道の東周回坑道南側のボ ーリング孔において載荷試験を実施しました。今後は、異なるボーリング 孔での載荷試験を実施するとともに、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評価を実施する予定 です。

11.2 国外機関との研究協力

クレイクラブ (Clay Club) *⁵⁹

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

^{*59:} Clay Club は、経済協力開発機構 原子力機関(OECD/NEA)の放射性廃棄物管理委員会の下に置かれたプロジ ェクトの一つです。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。

得しました。

モンテリ・プロジェクト*60 (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「オパリナス粘土の摩擦特性に関する室内試験」に参 加しています。令和2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を評価するための試験が継続されました。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。

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(THMC)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)が開始 されており、このフェイズではタスクの一つとして、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ます。令和2年度の成果については、 4.1に記載しています。

^{*60:} 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。

引用文献

- (1) 中山雅, 雑賀敦(編) (2020): 幌延深地層研究計画 令和2年度調査研究計画, JAEA-Review 2022-022, 34p.
- (2) Kimuro, S., Kirishima, A., Nagao, S., Saito, T., Amano, Y., Miyakawa, K., Akiyama, D. and Sato, N. (2018) : Characterization and thermodynamic study of humic acid in deep groundwater at Horonobe, Hokkaido, Japan, Journal of Nuclear Science and Technology, 55(5), 503-515.
- (3)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(2021):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 地層処分施
 設閉鎖技術確証試験 報告書.
- (4) 核燃料サイクル開発機構(1999):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3 地層処分の 安全評価, JNC TN1400 99-023, 526p.
- (5) Schuster, K., Amann, F., Yong, S., Bossart, P. and Connolly, P. (2017): High-resolution mini-seismic methods applied in the Mont Terri rock laboratory (Switzerland), Swiss Journal of Geosci, pp. 213-231.
- (6) 杉田裕, 青柳和平, 窪田健二, 中田英二, 大山隆弘 (2018): 幌延深地層研究施設 における掘削影響領域の評価 (その1) ―深度 140m を対象とした試験― (共同 研究), JAEA-Research 2018-002, 72p.
- (7) 青柳和平,津坂仁和,窪田健二,常盤哲也,近藤桂二,稲垣大介(2014):幌延深 地層研究所の250m調査坑道における掘削損傷領域の経時変化に関する検討,土 木学会論文集,C(地圏工学)(インターネット),70(4), pp.412-423.
- (8) 核燃料サイクル開発機構(1999):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一地層処分研究開発第2次取りまとめ一分冊2 地層処分の 工学技術, JNC TN1400 99-022, 703p.
- (9) 柴田雅博, 笹本広, 神徳敬, 油井三和(2004):緩衝材の長期安定性評価技術の現 状(研究報告), JNC TN8400 2004-010, 40p.
- (10) 日本原子力研究開発機構(2013):平成 24 年度地層処分技術調査等事業 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—6 ヶ年研 究成果の取りまとめ—, 239p.
- (11) 日本原子力研究開発機構(2018):平成 29 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 処分システム評価確証技術開発 5 か年成果報告 書, 259p.
- (12) Ishii, E. (2018) : Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single-borehole investigations, Water Resources Research, vol. 54, pp. 3335-3356.
- (13) 雑賀敦(編)(2020): 幌延深地層研究計画 平成 30 年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2019-018, 122p.
- (14) 中山雅, 雑賀敦(編)(2021): 幌延深地層研究計画 令和元年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2020-042, 116p.
- (15) Ozaki, Y., Ishii, E. and Sugawara, K. (2020) : Poroelastic response of fractured mudstone in the Horonobe URL: A possible indicator of fracture

hydraulic dysconnectivity, Proceedings of ISRM Specialized Conference CouFrac2020, GS11-04, pp.1-4.

- (16) 舟木泰智,浅森浩一,真田祐幸,羽出山吉裕,山本卓也,井尻裕二,松岡清幸, 木村和洋,Lin,S.,熊谷敏文(2010):幌延深地層研究計画換気立坑先行ボーリ ング(PB-V01孔)調査報告書―物理検層―,JAEA-Data/Code 2010-002, 151p.
- (17) Ishii, E. (2020) : A conventional straddle-sliding-packer system as a borehole extensometer: Monitoring shear displacement of a fault during an injection test, Engineering Geology, vol. 275, 105748.
- (18) Ohno, H., Takeda, M. and Ishii, E. (2020) : Does fault activation affect the hydraulic disconnectivity of faults in mudstone? Proceedings of ISRM Specialized Conference CouFrac2020, GS11-03, pp. 1-4.
- (19) 原子力発電環境整備機構(2021):包括的技術報告:わが国における安全な地 層処分の実現―適切なサイトの選定に向けたセーフティーケースの構築―, NUM0-TR-20-03, 803p.
- (20) 水野崇, 岩月輝希, 松崎達二 (2017): 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, pp. 178-187.
- (21) 石井英一,安江健一,田中竹延,津久井朗太,松尾公一,杉山和稔,松尾重明 (2006):北海道北部、幌延地域における大曲断層の三次元分布と水理特性,地 質学雑誌,vol.112, no.5, pp. 301-314.
- (22) 酒井利啓, 松岡稔幸 (2015): 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, 109p.
- (23) 宮川和也 (2021): 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, 25p.
- (24) Miyakawa, K., Aoyagi, K., Sasamoto, H., Akaki, T. and Yamamoto, H. (2019) : The effect of dissolved gas on rock desaturation in artificial openings in geological formations, The Extended Abstract of the ISRM 2019 Specialized Conference, 6p.
- (25) Mochizuki, A., Ishii, E., Miyakawa, K. and Sasamoto, H. (2020) : Mudstone redox conditions at the Horonobe Underground Research Laboratory, Hokkaido, Japan: Effects of dritf excavation, Engineering Geology, 267, 105496.
- (26) Pruess, K. and Battistelli, A. (2002) : TMVOC, a numerical simulator for three-phase non-isothermal flows of multicomponent hydrocarbon mixtures in saturated-unsaturated heterogeneous media, LBNL-49375, Lawrence Berkeley National Lab., Berkeley,, CA.
- (27) Miyakawa, K., Aoyagi, K., Akaki, T. and Yamamoto, H. (2021): 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, pp. 609-614.
- (28) Miyakawa, K., Aoyagi, K., Akaki, T. and Yamamoto, H. (2021): 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, 26p.

- (29) 中山雅, 佐野満昭, 真田祐幸, 杉田裕(編)(2009): 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, 68p.
- (30) Ueno, A., Tamazawa, S., Tamamura, S., Murakami, T., Kiyama, T., Inomata, H., Amano, Y., Miyakawa, K., Tamaki, H., Naganuma, T. and Kaneko, K. (2021) : Desulfovibrio subterraneus sp. nov., a mesophilic sulfate-reducing deltaproteobacterium isolated from a deep siliceous mudstone formation, International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, DOI: 10.1099/ijsem.0.004683.

参考資料

(令和2年度外部発表)

著者アルファベット順に記載

- 青木智幸,谷卓也,坂井一雄,古賀快尚,青柳和平,石井英一(2020):珪質泥岩(稚 内層)を対象とした多孔質弾性パラメータ取得試験, JAEA-Research 2020-002, 83p.
- 青柳和平,櫻井彰孝,宮良信勝,杉田裕(2020):幌延深地層研究センターの地下施設 における坑道安定性の長期モニタリング,JAEA-Research 2020-004, 68p.
- 檀英恵,本島貴之,木村駿,武田匡樹(2020):粘土系材料が有する EDZ のシーリング 機能の検証(3)浸透流解析による透水性評価,日本原子力学会 2020 年秋の大会.
- 出井俊太郎,宮川和也,笹本広,舘幸男,天野由紀, Francisco, P.C.M.,杉浦佑樹,高 橋嘉夫(2020):北海道幌延地域における堆積岩中のセレンの存在形態,2020年度 日本地球化学会第67回年会.
- Fujimoto, S., Tsuchiya, H., Ogawa, S., Iida, Y. and Taniguchi, N. (2021) : Stress corrosion cracking of copper in swollen bentonite simulating nuclear waste disposal environment, Materials and Corrosion, 72(1-2), pp.333-338.
- 畑浩二,丹生屋純夫,鵜山雅夫,中岡健一,深谷正明,青柳和平,櫻井彰孝,棚井憲治 (2020):マルチ光計測プローブを用いた立坑周辺岩盤の掘削影響領域の長期モニ タリングとその評価(共同研究), JAEA-Research 2020-010, 142p.
- Ishii, E. (2020) : A Conventional straddle-sliding-packer system as a borehole extensometer; Monitoring shear displacement of a fault during an injection test, Engineering Geology, 275, pp.105748_1 - 105748_12.
- 石山宏二,吉野修,引間亮一,松井裕哉,尾崎裕介,竹内竜史,榊原淳一,佐ノ木哲, 林邦彦 (2020):疑似ランダム波を使った原位置計測による高精度弾性波測定シス テムの評価検証,土木学会第75回年次学術講演会,CS12-10.
- 城まゆみ,本島貴之,磯さち恵,白瀬光泰,小林正人,中山雅(2020):幌延 URL にお けるベントナイト系充填材の除去回収実証試験;機械的除去技術(オーガ方式), 土木学会第75回年次学術講演会.
- 鎌田健人,奈良禎太,藤井宏和,趙越,松井裕哉,尾崎裕介(2020):幌延地域の泥岩 層における原位置透水試験,資源・素材学会関西支部主催・第17回若手研究者・ 学生のための研究発表会.
- 鎌田健人,奈良禎太,松井裕哉,尾崎裕介(2021):破壊した幌延泥岩の透水係数測定, 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), pp.205-209.
- 木本和志,岡野蒼,斎藤隆泰,佐藤忠信,松井裕哉(2020):超音波計測に基づく花 崗岩中の表面波伝播特性に関する研究,土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 76, No.2(応用力学論文集 Vol.23), I 97-I 108.

- 木村駿,武田匡樹,本島貴之,檀英恵(2020):粘土系材料が有する EDZ のシーリング 機能の検証(1)材料選定に資する基礎物性の取得,日本原子力学会 2020 年秋の 大会.
- Kitayama, A., Taniguchi, N. and Mitsui, S. (2021) : Electrochemical behavior of carbon steel with bentonite/sand in saline environment, Materials and Corrosion, 72(1-2), pp.211-217.
- Matsui, H., Yahagi, R., Ishizuka, H. and Toguri, T. (2020) : In-situ backfilling experiment of the small scale drift by spray method in Mizunami Underground Research Laboratory, Japan, Waste Management and the Environment X, Vol. 247, pp.145-159.
- 三嶌星輝,緒方奨,乾徹,安原英明,岸田潔,青柳和平(2021):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), pp.215-220.
- 三津山和朗,武田匡樹,杉田裕,大野宏和,若杉圭一郎,高瀬博康,高橋博一,橋本朋子(2020):シーリングシステムの長期劣化が安全機能に与える影響評価(2)シナリオ設定,日本原子力学会 2020 年秋の大会.
- Miyakawa, K., Aoyagi, K., Akaki, T. and Yamamoto, H. (2021): 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論文集(インターネット), pp.609-614.
- 望月陽人(2021):入門講座「分析試料の正しい取り扱いかた」,環境(陸水),ぶんせき,553, pp.2-7.
- 望月陽人,小松一弘,笹本広(2021):堆積岩深部地下水中の溶存有機物の分画ならび に各画分の特性評価,第55回日本水環境学会年会
- 望月陽人, 笹本広, 馬場大哉, 生垣加代子(2020): 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, 陸水学雑誌, 81(2), pp.153-166.
- 本島貴之,城まゆみ,磯さち恵,白瀬光泰,小林正人,中山雅(2020):幌延 URL に おけるベントナイト系充填材の除去回収実証試験;流体的除去技術(ウォーター ジェット方式),土木学会第75回年次学術講演会.
- 村岡亜美,荒戸裕之,千代延俊,石井英一(2020):北海道北部、幌延町に分布する珪 質岩に含まれる有機物の保存過程の検討,令和2年度石油技術協会春季講演会.
- 中山雅(2020): 幌延 URL における低アルカリ性セメント系材料の劣化および周辺環境への影響調査, JAEA-Data/Code 2020-009, 98p.
- 中山雅, 雑賀敦(編)(2020): 幌延深地層研究計画 令和2年度調査研究計画, JAEA-Review 2020-022, 34p.
- 中山雅, 雑賀敦(編)(2021): 幌延深地層研究計画 令和元年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2020-042, 116p.

- 丹羽正和,雨宮浩樹,代永佑輔,小北康弘,安江健一,岩野英樹,檀原徹,平田岳史 (2020):北海道北部,幌延地域の新第三系〜第四系に挟在するテフラのジルコン U-Pb およびフィッション・トラック年代,地質学雑誌,126(5), pp.267-283.
- 野上利信, 星野雅人, 徳永博昭, 堀越秀彦 (2020): 幌延深地層研究センターゆめ地創 館を活用したリスク・コミュニケーションについて (2018 年度), JAEA-Review 2020-005, 120p.
- Ogawa, Y., Suzuki, S., Taniguchi, N., Kawasaki, M., Suzuki, H. and Takahashi, R. (2021) : Corrosion resistance of a cast steel overpack for high-level radioactive waste disposal in Japan, Materials and Corrosion, 72(1-2), pp.52-66.
- Ohno, H., Takeda, M. and Ishii, E. (2020) : Does fault activation affect the hydraulic disconnectivity of faults in mudstone? Proceedings of ISRM Specialized Conference CouFrac2020, GS11-03, pp.1-4.
- 岡野蒼,木本和志,松井裕哉(2021):表面波計測による花崗岩の音響異方性評価に関 する研究,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), pp.633-636.
- Ozaki, Y., Ishii, E. and Sugawara, K. (2020) : Poroelastic response of fractured mudstone in the Horonobe URL: A possible indicator of fracture hydraulic dysconnectivity, Proceedings of ISRM Specialized Conference CouFrac2020, GS11-04, pp.1-4.
- 仙波毅(2020):「深地層の研究施設におけるこれまでの成果と今後への期待」バック エンド部会活動報告,1;原子力機構における深地層の研究施設計画の成果の概要, 日本原子力学会誌, 62(4), pp.186-190.
- 杉田裕, 菊池広人, 星野笑美子(2021): 幌延深地層研究計画で得られた掘削土を用いた埋め戻し材の特性試験(受託研究), JAEA-Data/Code 2020-017, 39p.
- 杉田裕,武田匡樹,大野宏和,若杉圭一郎,高瀬博康(2020):シーリングシステムの 長期劣化が安全機能に与える影響評価(1) FEP の整理,日本原子力学会 2020 年 秋の大会.
- 鈴木英明,高山裕介(2020):ニアフィールドにおける過渡期の熱-水-応力連成挙動に 及ぼす緩衝材の密度変化の影響評価(受託研究), JAEA-Research 2020-015, 52p.
- 高橋博一,武田匡樹,杉田裕,大野宏和,若杉圭一郎,高瀬博康,三津山和朗,橋本朋子(2020):シーリングシステムの長期劣化が安全機能に与える影響評価(3)物質移行解析,日本原子力学会2020年秋の大会.
- 武田匡樹,木村駿,本島貴之,檀英恵(2020):粘土系材料が有する EDZ のシーリング 機能の検証(2)原位置試験による透水性評価,日本原子力学会 2020 年秋の大会.
- Terashima, M., Endo, T. and Miyakawa, K. (2020) : Determination of humic substances in deep groundwater from sedimentary formations by the carbon concentration-based DAX-8 resin

isolation technique, Journal of Nuclear Science and Technology, 57(4), pp.380-387.

Ueno, A., Tamazawa, S., Tamamura, S., Murakami, T., Kiyama, T., Inomata, H., Amano, Y., Miyakawa, K., Tamaki, H., Naganuma, T. and Kaneko, K. (2021) : Desulfovibrio subterraneus sp. nov., a mesophilic sulfate-reducing deltaproteobacterium isolated from a deep siliceous mudstone formation, International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, DOI: 10.1099/ijsem.0.004683. 付録

пшг														
区分	目的・背景・必要性・	望朝	R2 以降の	R2 以降の実施内突	R3の実施内容				:	研究期間				
	意義		課題					前半				後半	<u> </u>	
1.1 人工 バリ	 実際の地質環境下における処分孔 竪置き方式を対象とした熱ー水ー 応カー化学連成現象(ガラス固化 体設置以降の加熱時から浸潤時・ 	 ③④ 熱-水-応 カー化学連成現 象(ガラス固化体 設置以降の加熱 	 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 			54	前半の	5 年程度で実	ミ施	体糸化して取り組む課題(2)処分概念 ンの実証のうち人エバリアの定置・品 どの方法論に関する実証試験)で実施				急オプショ 品質確認な ₪
74	減熱時を模擬した現象)に関する	時(③)から浸潤	水時から浸潤時・			R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
/1生	試験をとおして、設計や連成挙動	時・減熱時(④)を	減熱時を全て模	④-1 注入する地下水の圧力や	④-1 人工バリア性能確認試験の	④-1 浸潤	時・減熱	い時のデータ	取得・連成	モデルの適	囿用性確認			
能確	計画于法の適用性の確認(人工ハリアの解体調査および緩衝材の的	(操縦 ひに 35 (新) (城 ひに 35 (木) - 水) ((モデル 基づく 熱 - 水 - 化・解析手法)の 応 カ - 化学連成 確立 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)	 扱したテータに 基づく熱ー水ー 応カー化学連成 現象のモデルの 高度化、及び逸和 皮などの確認(解 体調査による) 	童を増加させ緩衝材に地下水 た温潤させた場合のデータ(温)	ヒーターの電源を UFF にし、発熱 による影響を無くした冬州での									
認試	和度の確認を含む)、ならびに施工			を () 「 潤時・ 減熱時) を 取得、 連成 ?	試験に移行し、データを分析・評	(<u></u>			
験	和度の確認を含む人ならいに応生 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 ・これらをとおして、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 パリアの設計に反映する			潤時・減熟時)を取得、連成モ デルの適用性確認 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	●-1 連成解析については、 E004LEXで令和2年度に設定し と解析条件を基に共同解析を行 い、解析コート間の比較検証を行 い、解析コート間の比較検証を行 い、評価モデルの検証を実施。気 目を考慮した熱ー水理ーカ学連 成挙動に関する室内試験につい ては、令和2年度に設定した条件 下での試験を開始	緩の低衝のの確 国較 解ル条定衛温下材間低認 際検 析や件すの緩側圧を つ改 デ析設	 令減 ○ 解熱 ○ 解熱 ● 欠・ ○ 次良 ○ ても ○ しょ ○ しょ <l< th=""><th>F度に そ ま な け て の に そ う 、 力 学 に や う 、 力 学 一 和 認 の 解 析 コ 一 で た い し 、 ー 、 力 、 学 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の の の の 、 の の の の の の の の の の の の の</th><th>られる成果 成現象の把 の整理 成解析モラ ド間の比</th><th>¹ : : : : : : : : : : : : :</th><th> 令和99年査材 今解公 今解2 今解2 一(1) (1) (1)</th><th>度にでパ理確 まお生ラー認 の解 れた して の解 れた して の の 報 、 して して の の 解 、 、 ら 間 の 確 に る る の 解 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、</th><th>募られる成男 <u>車</u>成現象の抵 <u>車</u>の解析モー</th><th>² 巴握 デルの適</th></l<>	F度に そ ま な け て の に そ う 、 力 学 に や う 、 力 学 一 和 認 の 解 析 コ 一 で た い し 、 ー 、 力 、 学 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の の の の 、 の の の の の の の の の の の の の	られる成果 成現象の把 の整理 成解析モラ ド間の比	¹ : : : : : : : : : : : : :	 令和99年査材 今解公 今解2 今解2 一(1) (1) (1)	度にでパ理確 まお生ラー認 の解 れた して の解 れた して の の 報 、 して して の の 解 、 、 ら 間 の 確 に る る の 解 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	募られる成男 <u>車</u> 成現象の抵 <u>車</u> の解析モー	² 巴握 デルの適
				④-2 人エ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 試験施工では、解体調査を 実施し、緩衝材、視疑オーバーパ ック、埋め戻し材、コンクリート、 岩盤、設置したセンサー等のサン ブリング手法や各種材料の境界 面を一体化した状態でサンプリ ングする手法の適用性を確認	④ 記でめ材グ孔バ設水酸は 、、、リ置開 して しん	マンジョン マンジン マンジン マンジン マン マン マン マン マン マン マン マン マン マ)解体作業・ 4 年度までに エバリアの剤 エ手順・方法	緩衝材の飽 に得られる〕 解体作業の: 去の決定	和度確認 成果 方針及び	令和 9 年 〇緩衝杯	を度までに行 すの飽和度の	得られる成: の実データ(果 の取得
					※1 本資料は ※2 研究の進	は現段階で想 ┋捗管理とし	にするス て、各年	ケジュール ⁻ 度の成果を行	であり、年 各年度の欄	度ごとに得 に追記する	られた研究 。	2成果を評(価し見直し ⁻	ていく。
					個別の要素技術の)課題につい	ては、期	間の前半で第	実施し、後望	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	技術の体系の	と」)に統合	して実施す	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、情報のス	下足等があ
					った場合に追加で	試験や解析	を実施す	る。						

稚内層深部での調査研究の実施を踏まえた研究工程(1/8)

稚内層深部での調査研究の実施を踏まえた研究工程(2/8)

一一日	目的・背景・必要性・		R2 以降の	D2 以降不安佐内索	D2 不安佐古索				7	研究期間									
۳	意義	計理	課題	12 以降の美肥内谷	いの天旭内谷			前半				後半							
1.2 物質 移行	・幌延地域に分布する泥岩は断層等 の構造性の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	 岩盤基質部 (=健岩部)を対象とした物質移 行特性(物質の移 							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		DO	前半の 5	年程度で実	施	体系 ンの どの	化して取り 実証のうち 方法論に関	組む課題(人エバリフ する実証詞	 (2)処分概念 7の定置・品 1)(験)で実施 	☆オプショ 4質確認な j
試験	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	動のさの 酸のさの に で 等)の の 部価手 数 た つの 評価手 数 た の の 部 で や き で 、 の 記 れ 目 を 質 盤 や き き し た (物 岩 盤 や つ 家 、 割 れ れ 目 を 質 盤 し た (物 岩 盤 や う の 記 し た (物 岩 整 を う の 記 た ち (物 岩 匙 た た 物 質 盤 や う 、 う し た (物 岩 整 を う の 記 た 物 質 盤 や う こ た も た ち の 言 、 本 う た た 物 質 盤 や さ き 手 、 か う の 記 た ち の 言 一 本 う の 言 た た 、 物 気 盤 や さ き 手 、 う の 言 品 た ち 質 盤 や き き 手 、 う の 手 、 、 の 手 一 、 の う 二 の い 一 の 二 の 一 の 二 の 一 、 の う 一 の 二 の 一 の 一 、 の う の 二 の う の 一 、 の う の 一 、 の う の 一 、 ろ の う の 一 、 の う の の 一 、 う の 一 、 の う の 一 、 の う の 一 、 の う の う の う の の う 一 、 の つ 三 一 一 、 つ 三 一 、 の う 一 、 の う つ 二 の う つ 三 一 う 一 、 つ う 二 の つ こ の 、 の う つ こ の 、 の 、 の う つ 二 の 、 の 、 の う の う の う の う の 、 の う の う の う の う の う の 、 の 、 の う の う の う の う の う の う の つ 三 の つ う の う の う の う の う の う の う の う の う の う の う の う の う の う の う の う の う つ 三 の う の う の う の う の う の う の う の う の う の う の う の う の う の う の う の う の う つ う の う の う つ う の う の つ う の う の う の う の う の う の う の う の つ こ つ う の う の つ こ の つ こ の つ つ こ の つ こ の つ つ こ つ つ こ つ こ つ つ こ つ つ こ つ つ こ つ こ つ つ つ こ つ つ つ つ つ こ つ つ こ つ こ つ つ こ つ こ つ こ つ つ こ つ こ つ こ つ こ つ つ こ こ つ こ こ つ つ こ つ こ つ こ つ こ つ つ こ つ つ つ こ こ つ こ つ こ つ こ つ つ こ つ こ つ こ つ こ つ つ こ つ こ つ こ つ こ こ つ こ つ つ こ つ こ こ つ こ つ こ こ つ つ こ つ つ こ つ こ つ こ つ こ つ こ つ つ こ つ つ こ つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ	 週削損傷領域 の物質移行の評 価手法の確立 	 あ影響が限定的であることを 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 数 数 数 (⑤ 有機物、微生物、コロイドの の 影響を考慮した物質移行試験 い化 	④ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価、試験箇所の 水理・物質移行に関する情報取得 を継続	R2 ④ 掘 削域 ・行評たータ	R3 員傷領域の ⁴	K4 勿質移行の言	R5 平価手法の	R6 灌立	R7 体系化の ¹ 場合に追加 令和6年 〇原位置 着性ト 〇EDZ に 手法の	R9 の不足等が 解析を実施 いましたる成果 はられる成果 での取得 でル化/解析	R10 あった 						
	 そのために、既延の泥岩を手例として、岩盤基質部(=健岩部)よ して、岩盤基質部(=健岩部)よ 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計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 該等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景響を把握することが重要 	 ③目に、 記台、 記台、<td> 有機物、微生物、二口イドの影響を考慮した物 響を考慮した物 質移行モデル化 手法の高度化 </td><td> 微生物・有機物・コロイドが核 種移行に及ぼす影響の現象理解 の継続、予備的な原位置試験に着 手 </td><td>,取⑤ 室デ(中物ズ等得得 内一地のの分) 有物 試一下有サ分を 機質 験タ水機イ布取</td><td>7、微生物、 8行モデル(</td><td>コロイ ドの 化手法の高所</td><td>影響を考慮 度化</td><td>i<i>Lt</i>=</td><td>体系化の 場合に追 令和6年) 〇 年 歳し :</td><td>中で、情報 加で試験、 度までに得 験、 微 て 生物 た 物 質 移 行</td><td>の不足等が が 解析を実施 られる成果 ホ充 コロイドの モデルの提</td><td>あった 影響を 示</td>	 有機物、微生物、二口イドの影響を考慮した物 響を考慮した物 質移行モデル化 手法の高度化 		 微生物・有機物・コロイドが核 種移行に及ぼす影響の現象理解 の継続、予備的な原位置試験に着 手 	,取⑤ 室デ(中物ズ等得得 内一地のの分) 有物 試一下有サ分を 機質 験タ水機イ布取	7、微生物、 8行モデル(コロイ ドの 化手法の高所	影響を考慮 度化	i <i>Lt</i> =	体系化の 場合に追 令和6年) 〇 年 歳し :	中で、情報 加で試験、 度までに得 験、 微 て 生物 た 物 質 移 行	の不足等が が 解析を実施 られる成果 ホ充 コロイドの モデルの提	あった 影響を 示					
		 「有機物・微学 「初ロイド 「初ロイド 「のの移行に 「の響を把 「割れ目を有の 「な評価手法の の確立 	 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 	 ⑧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 	⑥ 稚内層深部のブロックスケー ルを対象とした物質移行試験を 実施	1.⑥ 原験作て移装置ブ遅 置準と物試をして して延 武備し質験設	, クスケー) É能評価手;	レ(数 m~1 去の整備	00m 規模)	における	体系化の 場合に追 令和6年 〇原位性ト の原位性ト の訳 ルの評	中で、情報 加で試験、 に度までに行 記試験デーク シーサー) こ事例とした M価手法の打	の不足等が 解析を実施 身られる成射 マ(非収得 こブロックフ 是示	あった <u> </u> <u> </u> <u> </u>					
	※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。

稚内層深部での調査研究の実施を踏まえた研究工程(3/8)

南八	目的・背景・必要性・		R2 以降の	R2 以降の実施	D2 本中体中感				1	研究期間							
区方	意義	訴退	課題	内容	低の美心内谷			前半			後半						
2.1 人エバ	・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) に関わる人エパリアの搬送・定置 ちずなどの工学技術の実現性 人	 1) 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) 	 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 	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」 て施工方法(締固め			前半の	5 年程度で実	ミ施	体系 ンの どの	化して取り 実証のうち 方法論に関	組む課題(人エバリァ する実証詞	(2)処分概約 7の定置・品 【験)で実旅	₨オプショ 品質確認な ₪			
リアの定置・	エ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	に関わる人工バリアの搬送・定置	実証	ブロック方式等)の違いによる緩衝材の品質の違いを		R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10			
品質確	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	方式などの工学 技術の実現性、人		 把握する。また、埋め戻し方 法(プラグの有無等)・回収 	 地下環境におけるコンクリート の劣化に関する試験、分析を継続 	① 搬送定	『置・回収	技術の実証			体系化の中場合に追加	中で、情報 nで試験、	の不足等が 解析を実施	あった			
認などの支法	鎖技術を実証する	エバリアの回収 技術の実証		方法による埋め戻し材の品質の違いを把握する。		地下環境で											
の方法論に関		 (2) 個別の要素技 		 (1) 搬送定置・回収技術の実 		のコンクリートの劣化					令和6年	度までに得	身られる成果	1			
する実		術の実証試験		証(緩衝材や埋め戻し材の 状態に応じた除去技術の技		に 関 す る 試 験 を 開 始					〇実際のの経年	地下環境に 変化に係る	こおける支付 らデータ取得	^{未部材}			
証試験		③ 埋め戻し材、 プラグに関する		術オプションの整理、回収容易性を考慮した概念オプ							〇坑道掘に関す	削・閉鎖後 る事象の把	後の地質環却 回握	竟変化			
2.1.1		設計手法、製作・ 施工及び品質管 理手法の確立		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)													
保耒 回収技		2) A0 #2		② 閉鎖技術(埋め戻し方 法:プラグ等)の実証	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	②閉鎖打	技術(埋め	戻し方法:	プラグ等)(の実証	体系化の場合に追	中で、情幸 加で試験、	服の不足等が 解析を実施	があった E			
術等の 技術オ					目的とした解析検討、室内試験およ び工学規模試験の継続	閉鎖システ				Г							
1 プショ ンの実 証、閉						ムに関する 基盤情報の 整備を目的 とした解析 検討、室内				-	令和6年度ま ○シーリング え方の整理 ○緩衝材の膨 ○止水プラグ	でに得られる システムの長 潤挙動に影響 の施工に関す	る成果 長期性能評価(響を与える事業 する重要技術(こ関する考 象の整理 の抽出			
鎖技術 の実証						試験、工学 規模試験を 実施					OEDZ 調査技行 O坑道内から 技術の整備	时の評価・高 のボーリンク ・実証	△度化 ブ孔に対する:	シーリング			
				③ 人工バリアの緩衝材と 坑道の埋め戻し材の施工方 法の違いに係る日質保証は	③ 緩衝材流出の抑制に関する試験	 3 人エノ 施工力 	ベリアの約 5法の違い	暖衝材と坑道 に係る品質	の埋め戻 保証体系の	ー し材の 構築	体系化の 場合に追加	中で、情報 加で試験、	るの不足等か 解析を実施	「あった 」			
			法の通いに除る前員味証件 系の構築((1)実際の地質環 境における人工パリアの適 用性確認のうち、人工パリ ア性能確認試験とあわせて 実施)		自然湧水環 境での緩衝 材の流出状 況を確認					令和6年 〇緩衝材 プショ 〇坑道閉 の実証	度までに の施工方 ンの実証 鎖に関する	导られる成5 まに関する打 る技術オプミ	果 支術才 ンヨン				
					※1 本資料は ※2 研究の進	は現段階で想 進捗管理とし	見定するス して、各年	、ケジュール 度の成果を	であり、年 各年度の欄	度ごとに得 に追記する	导られた研究 る。	R成果を評	価し見直し	ていく。			
					個別の要素技術の	の課題につい	いては、期	間の前半で罰	€施し、後当	ドは体系化	して取り組	む課題(「2	2.1.2 坑道2	ペケール~			

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。

稚内層深部での調査研究の実施を踏まえた研究工程(4/8)

豆八	目的・背景・必要性・	응해 모품	R2 以降の	R2 以降の実施	D2 不安佐山索					研究期	間					
БЛ	意義	林旭	課題	内容	いの実施内谷			前半		後半						
2.1 人エバ	 ・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) に関わる人エバリアの搬送・定置 	 ① 処分場の操業 (廃棄体の搬送 定置・回収、処分 	 ④ 廃棄体の設置 方法等の実証試 験を通じた、坑道 	【 人工バリアの品質を踏まえ 後: ば て、これまで実証してきた要 R3 i 素技術を体系的に適用し、廃 y 棄体の設置方法(間隔など)を 0 確認するため以下を実施 価 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	後半の5年程度で実施するため、 R3は実施しない			_		他(課题	の研究課題を 題として、後	取り込んで 後半の5年和	で体系化して 程度で実施	て取り組む		
リアの	方式などの工学技術の実現性、人	場の閉鎖を含む)	スケール~ピッ		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		R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
定置・ 品質確 認など	エハリアの回収投制の実証を目 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 増比終た実証する	リアの搬送・定置 方式などの工学 技術の実現性、人	調査・設計・評価 技術の体系化							 ④-1 坑道スケール~ピットスケールでの 設計・評価技術の体系化)調査・			
の方法	頻取削を大証する	技術の実証														
論に関する実		 個別の要素技術の実証試験 														
証試験		 ③ 埋め戻し材、 プラグに関する 設計手法、製作・ 		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						④-2	地下施設及(体系化	「人工バリ	アの設計評(西技術の		
2.1.2 坑道ス		施工及び品質管 理手法の確立		下施設及び人工バリアの設計評価技術の体系化												
ケール																
~ヒッ トスケ																
ールで の 調				 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・ 4.3.4.5.5.5.5.5.5.5.5.5.5.5.5.5.5.5.5.5.						(4)−3 ∰ (多連接坑道を び処分孔支係 入現象評価手	考慮した 浸 技術の整備 法及び抑制	9水抑制対策 請、緩衝材流 対策技術の	き技術及 記出・侵 D整備		
全・設 計・評 価技術				後入533 計画子 2000 印刷列 策技術の整備												
の体系										<u> </u>						
				 ④-4 廃業体設直の判断や間 隔の設定に必要となる情報の 整理 						(4)-4 B	^廃 栗体設置の る情報の整理)判断や間隙 目	南の設定に必	ふ安とな		
						TB 50.01+				·	(月 > 1, 1,					

※1 本資料は現段階で認定するスケンユールであり、年度ことに待られた研究成果を評価し見直してい ※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。



稚内層深部での調査研究の実施を踏まえた研究工程(5/8)

一页八	目的・背景・必要性・	田町	R2 以降の	R2 以降の実施	D2 小史佐山索					研究期間						
区方	意義	訴題	課題	内容	K3 の美施内谷			前半				後当	<u>×</u>			
2.2 高温度 (100℃	人エ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	 100°C超の高 温での限界環境 が人エバリアに 与える影響と上 	① 高温度(100℃ 以上)などの限界 的条件下での人 エバリア性能確	人工パリアシステムの安 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		20	前半のほ	5年程度で身	€施	体系・ ンの どの	化して取り 実証のうち)方法論に関	組む課題(っ人エバリ する実証)	((2)処分概 アの定置・ 試験)で実)	念オプショ 品質確認な 施		
おど界件のバ性認いの的下人リ能試験でエア確論	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、オーバーパ 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、人工パリアシ ステムの安全裕度を検証する	限温度設定の考 え方の整備、解析 的な検討	価材が100℃超に なった状態を想 ①-1 高温度(100℃以上)な 定した解析手法 どの限界的条件下での人工 の開発 パリア性能確認試験	100°C超に = 状態を想 ①-1 高温度(100°C以上)な = 解析手法 どの限界的条件下での人工 バリア性能確認試験	[№] C超に 態を想 ①-1 高温度(100℃以上)な 新手法 どの限界的条件下での人工 パリア性能確認試験 の	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	R2 ①-1 限解 海原の 験 (試法 ま 子 入手	R3 !界的条件下 析・検討 D 式 式 扱 を	R4 での人工バ	R5 リア性能码	R6 雀認試験の	R7 体系化の 場合に追う 令和6年 〇高温度 験デー	R8 中で、情報 加で試験、 注度までに1 髪(100℃以 こでの人工、 -タの収集	R9 その不足等が 解析を実施 得られる成長 上)などの「 バリア性能:	R10 、あった う 果 限界的 確認試	
				①-2 100℃超になった際に ニアフィールド(人工パリ アとその周辺岩盤の領域) において発生する現象の整 理	①-2 100°C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	①-2 10 お シナリァ)0℃超になっ ;いて発生す オ	った際にニフ る現象の整 ³	アフィール 理	・ドに	体系化の場合に追)中で、情幸 <u>}加で試験</u> 、	₩の不足等か <u>、解析を実</u> 加	バあった <u>毎</u>		
					や設計オプションを想定したシナリ オの整理	の検討に 着手(オ 分移動、 物質移動 特性)	こ				令和 6 年 ○100℃ ルドI:	- F度までに 超になった こおいて発	得られる成: :際にニアフ 生する現象	果 <i>?ィー</i> 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)	①-3 海外の原位置試験に関する情報取得の継続	 ①-3 二 考 満 海外で0 原位置調 	- アフィール :え方を提示 の 試	ドにおける)上限温度	設定の	体系化の場合に追	中で、情報 加で試験、	報の不足等た 解析を実施 	があった 世		
						かに し に 転 た 条 件 手 法 等) ぞ そ 入 手	- _限 - , を				PAD 0 4 Oニアフ 設定の	「度までに」 フィールド の考え方の:	時られる(は) における上間 提示	^来 狠温度		
	※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 坑道スケールへ 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。													スケール~		

「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。

稚内層深部での調査研究の実施を踏まえた研究工程(6/8)

	目的・背景・必要性・	40.85	R2 以降の	R2 以降の実施						研究期間							
区分	意義	詳 想	課題	内容	K3の実施内谷			前半			後半 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)						
区分 3.1 圧試どる能 ・化 1.設がの性 していた。 の証量 3.地動層水 した。 の証量 3.地動層水	目的・背景・必要性・ 意義 意義 岩盤中には大小様々な断層が存 在するが、小規模なもののいくつ 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的 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	 課題 ①地殻変動に対す気能の表するパラメータ(指 標)の提案 ②によるパラメータ 証 	R2 以降の 課題 ② 地殻変動が地 層の透水性に与 える影響の把握	R2 以降の実施 内容 所層の幅が数+ 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	R3の実施内容 ②-1~3 より大型の断層を対象とした水圧擾乱試験結果の解析 ②-1~3 稚内層中の断層/割れ目の水理的不連結性に関する検討の継続 ②-1~3 既存の室内試験結果や水圧 擾乱試験結果を用いた既存の DI モデルの再検証	R2 ② よの対た乱実デ取 ② 力 り断象水試施一得 2-2 り	前半の5 R3 地殻変動が地所 型を し 援 を 、 を DIを用いた透 目 を用いた透	前半 年程度で R4 層の透水性 層の透水性		研究期間 体系 ンの どの R6 響の把握	トレー 化して取り 実証法論に関 R7 体系化のに 場合に追加 令和6年 のボーリ 験デー 体系化の 場合に追	後半 組 む エ ズ 町 市 で で 武 駅 中 で で 武 駅 一 で で 式 歌 の で 、 武 駅 一 で で 、 武 駅 の の で 、 記 二 、 「 記 記 二 、 「 記 記 二 、 、 「 記 記 二 、 、 「 記 記 二 、 、 「 記 記 二 、 、 「 記 記 二 、 、 「 記 記 二 、 一 で で 、 、 二 、 一 の の の の の の の の の の の の の の の の の の	 (2)処分概念 アの定置・品 アの定置・品 限9 の不足等が 解析を実施 身られる成果 利いた水圧損 級の不足等加 級の不足等加 	スオプショ 為質確認な 了 R10 あった			
水与影把握	(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			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・歴化侵食 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	※1 本資料は	割水結域遷を ② よの対た乱実デ取現れ理性区移追 3 り断象水試施一得段目的の分領加 、大層と圧験しタ 階	の 連領 に 域 水の 型 を し 援 を、 を で 想 を ス く	による断層	層の活動性 であり、年	評価手法	 令和6年 〇DIを月 度化 体系化の 場合に追 令和6年 〇水圧擾 評価手 られた研 	:度までに行 別いた透水 中で、情報、 度までにに :注記の整備 R成果を評	 得られる成身 役の不足等が 解析を実施 得られる成り 得られるのがり 得しりれるのがり 一価し見直し 				
					※2 研究の進 個別の要素技術の ピットスケールで	捗管理課題にの調査	<u>として、各年</u> ついては、期間 ・設計・評価打	度の成果を 聞の前半で 支術の体系	各年度の欄 実施し、後 化」) に統1	に追記する 半は体系化 合して実施	る。 して取り組 する。	む課題(「	2.1.2 坑道ス	ミケール~			
					「2.1.2 坑道スケ った場合に追加で	ール~L [*] 試験やf	ピットスケール 解析を実施する	レでの調査 る。	・設計・評	価技術の体	系化」を実	施する中で	で、情報の不	∇足等があ			

稚内層深部での調査研究の実施を踏まえた研究工程(7/8)

豆八	目的・背景・必要性・		R2 以降の	R2 以降の実施	D2 不安体力索					研究期間						
四方	意義	訴起	課題	内容			Ì	前半				後半	<u>1</u>			
3.1 水圧擾 利試除	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	 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・ 	 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			前半の5	年程度で実	ミ施	体系 ンの どの	化して取り 実証のうち 方法論に関	組む課題(人エバリフ する実証詞	(2)処分概系 アの定置・品 試験)で実旅	念オプショ 品質確認な ^施		
11110日 1111日 1111日 1111日 111日 111日 111日	り得る。このため、地上からの調査	評価する手法の				R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10		
なとによる緩	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	催立		③ 地下水の流れが非常に 遅い領域(化石海水領域)の	③、④-1 化石海水領域の三次元分布	③ 地下水	の流れがま	常に遅い	領域の調査	・評価	体系化の	中で、情報	の不足等が	あった		
5 0 w		 ④ 三次元分布を 調査・解析・評価 		調査・評価技術の検証	ためのボーリング調査	技術の)検証				場合に追加	加で試験、	解析を実施			
の検		する手法の確立				化石海水										
証・定						領域を把握するた					令和6年 ○化石海	度までに得	}られる成果 ∥杏・証価≭	長 表術の		
量化						めの物理					整備・	高度化				
						探査を実施レード										
3.1.2						旭し、比 抵抗分布										
地下小の流わ				④-1 ルモ海水の三次テム	④1 物理探太ニークナ会めた 調太	を推定				== /== -*	4.5.4.0	-L 1=+		18 L		
が非常				布に係る調査・評価手法の	の展開と評価結果の関係の分析	(4)-1 化化法	コ海水の三。 D検証	火元分布に	係る調査・	評1四于	体系化の場合に追	中で、情報 加で試験、	取の不定寺7 解析を実施	かめつ7c 拒		
に遅い				検証												
領域を						化石海水 分布の把										
調査・						握に必要					令和 6 年	度までに	得られる成果	果		
評価す						なホーリ ングの位					〇化石油	₽水の三次: 評価技術の₹	元分布に係々 整備・高度(る調 化		
る技術						置・本数										
の高度						等を検討										
				④-2 広域スケール(10 数	④-2 調査データと水理解析結果の 款合、 天敷合に開まる 悪田の公告の	④-2 広域	はスケールを	対象とし	た水理・物	質移動評	体系化の	中で、情報	8の不足等/	があった		
				水理・物質移動評価手法の	継続ならびに不整合箇所を低減する	価手	法の検証				場合に追	加で試験、	解析を実施	<u>5</u>		
				検証(地下水滞留時間)評価 のための水理解析、塩濃度	ための改良	広域スケ										
				分布評価のための水理・物 雪移動解析)		ールの地下水流動					令和6年	度までに	导られる成果	果		
				更1930/H1/1//		に深度・					の広域ス物質移	、ケールを> 多動評価手シ	∮家とした♪ 去の整備	小理・		
						気候など										
						影響を整										
					Libbert 上 1 (V)	理				☆ ご \. <i>! - 4</i>		╗ ┺ ┲ ┲ ┲ ┲ ┲ ┲ ┲	(年) 日本 !			
					※I本資料は ※2研究の進	、現段階で急 捗管理とし	ミモ す る人 か して、各年月	アンユール 夏の成果を	じめり、年 各年度の欄	度ことに得	す られた研究 5。	6.成果を評	1回し 見 但し	しいく。		
					■■■■ 個別の要素技術の ピットスケールで	課題につい の調査・設	っては、期間 計・評価技	の前半で雪 支術の体系	実施し、後 ⁴ 化」)に統合	¥は体系化 ≧して実施 [∶]	して取り組 する。	む課題(「	2.1.2 坑道ス	スケール~		
						ール~ピッ 弐段ムのセ	トスケール	での調査	・設計・評	両技術の体	系化」を実	施する中で	で、情報のイ	下足等があ		

稚内層深部での調査研究の実施を踏まえた研究工程(8/8)



った場合に追加で試験や解析を実施する。