JAEA-Review 2021-053

DOI:10.11484/jaea-review-2021-053

P-ROYION

幌延深地層研究計画 令和 2 年度調査研究成果報告

Horonobe Underground Research Laboratory Project Investigation Report for the 2020 Fiscal Year

(編) 中山雅

(Ed.) Masashi NAKAYAMA

核燃料・バックエンド研究開発部門 幌延深地層研究センター 深地層研究部

Horonobe Underground Research Department Horonobe Underground Research Center Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

February 2022

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。 本レポートの成果(データを含む)に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の 条件で利用してください。(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja) なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト(https://www.jaea.go.jp) より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課 〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2022

幌延深地層研究計画 令和2年度調査研究成果報告

日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 幌延深地層研究センター 深地層研究部

(編) 中山 雅

(2021年10月29日受理)

幌延深地層研究計画は、日本原子力研究開発機構が堆積岩を対象に北海道幌延町で実施しているものである。

令和2年度は、「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の適用性確認、処分概念オプションの実証、地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証について、調査研究を実施した。具体的には、「実際の地質環境における人工バリアの適用性確認」では、人工バリア性能確認試験および物質移行試験を、「処分概念オプションの実証」では、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および高温度等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験を実施した。また、「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」では、水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化および地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験を実施した。

幌延深地層研究計画の成果は、日本原子力研究開発機構における他の研究開発拠点で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く。そのため、国内外の研究機関との連携を図り、大学などの専門家の協力を得つつ、本計画を着実かつ効率的に進めていく。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の策定から成果までの情報を積極的に公表し、特に研究成果については国内外の学会や学術誌などを通じて広く公開していく。

Horonobe Underground Research Laboratory Project Investigation Report for the 2020 Fiscal Year

(Ed.) Masashi NAKAYAMA

Horonobe Underground Research Department
Horonobe Underground Research Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Department
Japan Atomic Energy Agency
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received October 29, 2021)

The Horonobe Underground Research Laboratory (URL) Project is being pursued by the Japan Atomic Energy Agency (JAEA). The main aim of this project is to enhance the reliability of relevant disposal technologies for geological disposal of high-level radioactive waste through a comprehensive research and development (R&D) program in the deep geological environment within the host sedimentary rock at Horonobe in Hokkaido, north Japan.

In fiscal year 2020, JAEA continued R&D on three important issues specified in the "Horonobe Underground Research Plan from Fiscal Year 2020", which involve "Study on near-field system performance in geological environment", "Demonstration of repository design options", and "Understanding of buffering behavior of sedimentary rock to natural perturbations".

Specifically, 'full scale engineered barrier system (EBS) experiment' and 'solute transport experiment' were carried out as part of "Study on near-field system performance in geological environment". 'Development and testing of EBS emplacement / retrieval and tunnel closure technologies' and 'evaluation of EBS behavior over 100°C' were addressed for "Demonstration of repository design options". A study on "Understanding of buffering behavior of sedimentary rock to natural perturbations" was also implemented in two areas, 'evaluation of hydromechanical responses of faults to water pressure changes' and 'development of techniques for evaluating self-sealing behavior of an excavation damaged zone after backfilling'.

The results of the R&D, along with those obtained in other departments of JAEA, will reinforce the technical basis for both repository implementation and safety regulation. For the sake of this, JAEA will steadily proceed with this project in collaboration with relevant organizations and universities both domestically and internationally and also widely publish the plans and results of the R&D to ensure their transparency and technical reliability.

Keywords: Horonobe URL Project, High-level Radioactive Waste, Geological Disposal Technology, Geoscientific Research, Sedimentary Rock

JAEA-Review 2021-053

目次

1.	はじめに	1
2.	令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画に基づく研究課題	3
3.	令和 2 年度の主な調査研究の成果	5
3	3.1 主な調査研究の成果	5
3	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	9
4.	実際の地質環境における人工バリアの適用性確認	13
4	l.1 人工バリア性能確認試験	13
4	I.2 物質移行試験	17
5.	処分概念オプションの実証	25
5	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	25
5	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	55
6.	地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証	60
6	6.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化	60
6	G.2 地殻変動による人エバリアへの影響·回復挙動試験	71
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	74
8.	地下施設の管理	97
8	3.1 地下施設の整備	97
8	3.2 地下施設の維持管理	97
8	3.3 掘削土(ズリ)の管理	98
8	3.4 排水の管理	99
9.	環境調査	100
9	9.1 排水量および水質調査結果	100
9	0.2 研究所用地周辺の環境影響調査結果	111
10.	安全確保の取り組み	114
11.	開かれた研究	115
1	1.1 国内機関との研究協力	115
1	1.2 国外機関との研究協力	118
参表	考文献	120
付金	录	122

JAEA-Review 2021-053

Contents

1. Introduction	1
2. Research subject based on the Horonobe Underground Research Project after 2020 fis	cal
year	3
3. Outline of the investigation program for the 2020 fiscal year	5
3.1 Results of the investigation research	5
3.2 Results of studies on the implementation of research in the deep Wakkanai	
Formation (depth 500 m)	9
4. Study on near-field system performance in geological environment	13
4.1 Full scale engineered barrier system experiment	
4.2 Solute transport experiment	17
5. Demonstration of repository design options	25
5.1 Development and testing of EBS emplacement / retrieval and tunnel closure	
technologies	
5.2 Evaluation of EBS behavior over 100°C	55
6. Understanding of buffering behavior of sedimentary rocks to natural perturbations	60
6.1 Evaluation of hydro-mechanical responses of faults to water pressure changes	60
6.2 Development of techniques for evaluating self-sealing behavior of an excavation	
damaged zone after backfilling	
7. Acquisition of data necessary for addressing the important issues after 2020	74
8. Management of the underground facilities	97
8.1 Construction of the underground facilities	97
8.2 Maintenance of the underground facilities	
8.3 Management of drilling material	98
8.4 Management of drainage	99
9. Environmental study	
9.1 Monitoring of drainage water and water property	
9.2 Environmental impact study around the Horonobe Underground Research Center	111
10. Safety efforts	114
11. Collaboration with other research organizations	115
11.1 Collaboration with domestic research organizations	
11.2 Collaboration with overseas research organizations	
References	
Appendix	122

図リスト

义	1	令和 2 年度の主な調査研究	
义	2	研究所用地における主な施設と観測装置の配置	8
义	3	ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所	8
义	4	350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所	9
巡	5	人工バリア性能確認試験の概念図	14
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		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	15
図		試験施工の概要図(鉛直断面図)	
図		施工の様子	
	10	#3000 1000	
	11	EDZ を対象としたトレーサー試験結果	
	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	
	13	140m 調査坑道から採取した地下水および地表水中の溶存有機物のサイズ分布	
	14	ブロックスケールを対象としたトレーサー試験	
	15	水圧擾乱試験時の間隙水圧観測結果	
	16		
	17	以下のコングサード試験体作製状況	
		武験体の一軸圧縮强度の確認	
	18	坑道周辺の地質環境に関する力学的概念モデル	
	19		
	20	坑道周辺の地質環境に関する水理的概念モデル	
	21	透水係数の増加率(Case1)	
	22	圧力分布の時間変化	
	23	飽和度の時間変化	
	24	物質移行解析におけるモデルの概要	
	25	解析条件における間隙水圧分布	
	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)	
	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)	
	28	縮尺模型試験の概念図	
	29	縮尺模型試験における膨潤変形率の経時変化	
	30	縮尺模型試験における注水量の経時変化	
	31	縮尺模型試験における膨潤圧力の経時変化	
	32	粘土止水壁周辺の概要図	
	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	
义	34	乾燥密度の平均値および最大値、最小値	40
义	35	含水比と乾燥密度の関係	.40
义	36	模擬型枠の形状	
义	37	吹付け試験の試験状況と出来形の様子	
义	38	吹付け試験のサンプリング位置	42
义	39	含水比と乾燥密度の関係	
図	40	乾燥密度の平均値および最大値、最小値	43
义	41	試験の概念図	
図	42	弾性波の振幅評価と比抵抗分布図	
	43	- トモグラフィ調査の測点図	
	44	トモグラフィ結果図	
_	45	弾性波速度分布の深度スライス断面図	
	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	
	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	
_	• •	算により推定される到達時間の比較	
		51	

JAEA-Review 2021-053

义	48	原位置での緩衝材流出試験設備の概要	.52
义	49	緩衝材流出試験における水位と排水量の変化	.53
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	.54
义	51	緩衝材流出試験後に回収した試験体	.55
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	.56
巡	53	高温度における人工バリア性能確認試験の施工状況ならびに計測機器の配置断面図	
		(海外での研究事例)	.59
巡	54	HDB-6 孔および PB-V01 孔における長期水圧観測結果	61
図	55	HDB-6 孔および PB-V01 孔における水圧低下量を流量で除した値と時間を距離の二乗	
		で除した値の関係	
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	62
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	
図	58	ボーリング孔における(a)稚内層の割れ目を対象とした透水試験時の水圧変化と(b)地下	
_		水の水圧と水質の深度分布	
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	
	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	
	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	
	62	水圧擾乱試験結果	
	63	電磁探査および反射法地震探査の測点・測線の配置	
_	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	
	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	69
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	. 00
		れた比抵抗分布の重ね合わせ	70
図	67	樹脂注入試験の概要	
	68	樹脂注入後に採取したコアの例	
	69	割れ目の開口幅とせん断変位量の計測方法	
	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	
	71	地下水の採取箇所(集水リング)	
	72	地下水の採取箇所(ボーリング孔)	
	73	地下水の CI ⁻ 濃度の経時変化	
	74	試験坑道4壁面からの浸出水の採取筒所	
_	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	_
	76	C05 における水圧モニタリング結果	
	77	C06 における水圧モニタリング結果	
	78	C07 における水圧モニタリング結果	
	79	C08 における水圧モニタリング結果	
	80	C09 における水圧モニタリング結果	
	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	
	82	C05 の区間 2 における水質モニタリング結果	
	83	解析領域と解析条件	
	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	.04
凶	04	350M 調査机道を模擬した感度解析による右盤中への酸素の使入重と使入床度の関係性	0 =
छ्य	0 <i>E</i>	性	
	85 86	140m 調査机道から待られた岩石試料(声尚暦)中の微生物分布	
	86 97	350M 調査机道から待られた石石試料(権内層)中の微生物分布	
	87	退伝士解析結果に基づく各採水区间における地下水中の似生物種の存在制管	
ıxı	$\Omega\Omega$	70は小型ははこのしなアクノのは、軟には、煙用は707とツチノケが煙電子	0.9

JAEA-Review 2021-053

_			
_	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	
_	90	各抽出ステップにて抽出されたセレン(Se)の量	
_	91	地中変位計設置状況	
_	92	鋼製支保工応力計設置例	
_	93	計測器設置位置図	
义	94	光ファイバー式地中変位計の計測結果	
义	95	電気式地中変位計の計測結果	
义	96	鋼製支保工応力計の計測結果	93
义	97	傾斜計データの一例	_
义	98	幌延深地層研究センター周辺の震央分布	
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)	.96
义	100	地下施設の整備状況	97
义	101	設備の点検および更新状況	97
义	102	掘削土(ズリ)置場	98
义	103	二重遮水シートの構造	98
図	104	排水処理設備	99
図	105	排水系統と各水質調査の採水地点	.100
义	106	地下施設からの排水処理フローと採水地点	
図	107	天塩川の採水地点	
_	108	天塩川の採水状況	
	109	掘削土(ズリ)置場周辺の地下水の採水地点	_
_	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)	
	,	文 至 日 事 少	
		表リスト	
表	1 3	深度 500 m と深度 350 m の地質環境の特徴	11
表表		稚内層深部での調査研究の実施を踏まえた研究工程	
表表		予察的解析の解析ケース	
表表		主な透水係数の設定値	
表表		立る22.7.1kgの改定に	
表表		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	
表表		緩衝材の変質に関する既往知見の整理	
表表		限国刊の复員に関する既任和兄の圭珪	
衣表		院延町	
	10	へ塩川への排水量	101
	11	地下他設からの排水に保る水質調査和来	
	12		
	13	掘削工(スリ)直場周辺の地下水の水負調査結果 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	
	14	清水川ゐよび掘削工(スリ)直場附水調金池の水負調査結果 浄化槽排水の水質調査結果	
	14	浄化僧排水の水負調宜結果	
衣	16	確認された重要種 (魚類)	. 113

This is a blank page.

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

^{*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。

^{*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)。

用することを検討します。

2. 令和2年度以降の幌延深地層研究計画に基づく研究課題

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

(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

^{*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:}地下水中に溶存している物質が地層中を移行する際の経路や収着・拡散といった挙動などを調査するために地下水に添加する物質をトレーサーと呼びます。幌延深地層研究計画では、トレーサーとしてウラニン(蛍光染料)やヨウ素などを用いています。これらはいずれも放射性物質ではありません。なお、幌延深地層研究計画では放射性のトレーサーを用いた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。

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。

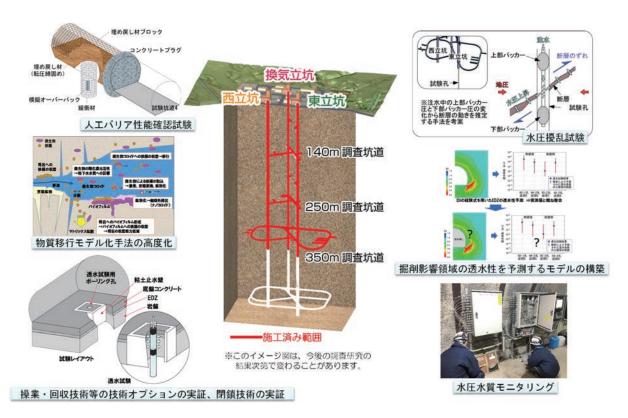


図 1 令和2年度の主な調査研究

(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ー水理ー力学ー化学連成現象*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ー水理ー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。

^{*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力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。

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。

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。

^{*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。

^{*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。

(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。

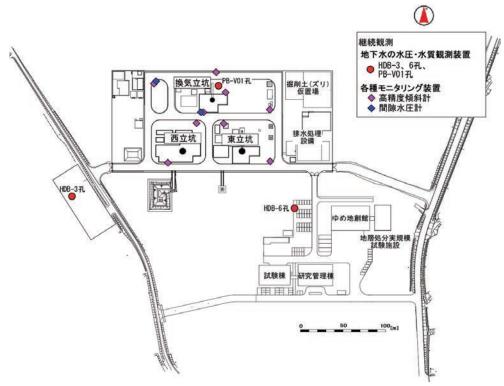


図 2 研究所用地における主な施設と観測装置の配置

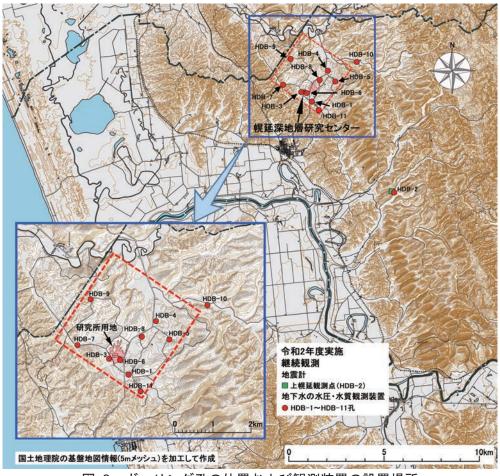


図 3 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所

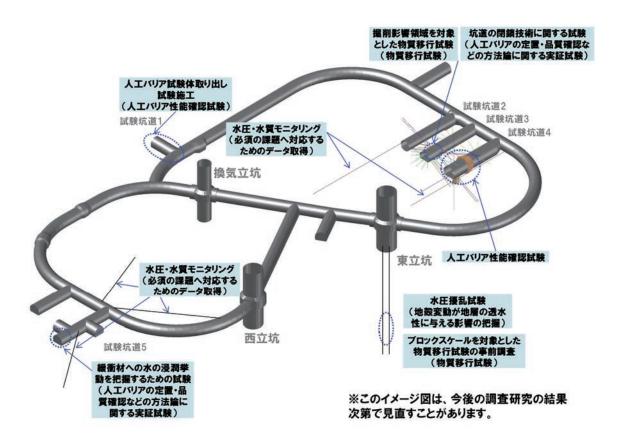


図 4 350m調査坑道における主な調査研究の実施場所

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

^{*20:} 幌延深地層研究センター、https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/(参照: 2021年12月6日)。

^{*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)。

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、地下水の流れが非常に遅い領域で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緩慢であることが確認されました。なお、深度500 mは深度350 mに比べて土圧や地下水圧が高く、地下坑道の設計・施工に関わる難易度は高くなります。深度500 mと深度350 mの地質環境の特徴を表 1に示します。

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

- ・ 高い土圧がかかり、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
- ・ 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)。

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 割れ目が開いている 土圧が小さく、岩石が硬い ▼ 水の動き(速い) 割れ目が開いており、水や物質が流れやすい 引張性割れ目 流れやすい 深度350 m ・土圧が小さく、岩石が硬い ・地下水圧が低い 岩石 割九目 深度500 mと深度350 mの地質環境の特徴 断層沿いに割れ目の発達が乏しく、断層内を水が流れにくい 割れ目が閉じている 土圧が大きく、岩石が軟らかい ---**水の動き(遅い)** 割れ目が閉じており、水や物質が流れにくい せん断性割れ目 流れにくい 深度500 m ・土圧が大きく、岩石が軟らかい・地下水圧が高い 岩石 表 割れ目、 (分布する割れ目の特徴) 割れ目の開口状況 土圧・地下水圧 地質の状態 ポイント

- 11 -

땞
Ή
柷
臣
77
ıΚ
116
恕
797
街
幫
50
五
至在
唖
一
Ď.
5
掘
然
璺
长
퐦
2
表

		インコンドー・デー	1	# E			-	
		KZ K3	ξ Σ	r	\ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \	2	2	2
		第3期	-	第4)	第4期中長期目標期間	調	-	
-	実際の地質環境における人エバリアの適用性確認							
	1.1 人工バリア性能確認試験	浸潤時・減熱棒のデータ取得、建成モデルの適用性確認 国際プロジェカトにおける解析コード間の比較検証、改良・高度化	、連成モデルの <u>歯</u> 用性確認 :コード間の比較検証、改貞	8 3·高度化	*			
	1.2 物質移行試験	掘削影響領域での物質移行に関するデータ取得 有機物、微生物、コロイドの聲響を考慮した物質移行試験、	での物質移行に関するデータ取得 効、コロイドの影響を考慮した物質移行試	. 等			H	
2.	処分概念オプションの実証							
	2.1 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							
	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	析の実 証				_	
							H	П
	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 判断や間隔の設		評価技術の体系化 情報の整理、等 -	
	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°C超の際にニアフィールドにおい 国際プロジェカド情報の収集・整理、	こニアフィールド において発生する 現象の整理 トバ情報の収集・整理、等	陸 種		П		
3.4	3.地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証							
	3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化							
	3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握	数十cmの幅の断層を対象とU 断層の活動性評価手法の整	た水圧擾乱試験 繭、等			T	H	
	312 地下水の遊れが非逆に遅い結婚を調本・望価する技術の真度化	地下水の流れが非常に遅い	が非常に遅い領域(化石海水領域)の調査・評価技術の検証	査・評価技術の検証、	#			
						r	ŀ	
	3.2 地殻変動による人エバリアへの影響・回復挙動試験	人エバリアの機衝材や坑道埋め戻し材が掘削影響領域の力率的・水理学的 な緩衝能力に与える影響を把握する解析手法の開発	Bめ戻し村が掘削影響領域握する解析手法の開発	の力学的・水理学的		T	H	
【拼	(施設計画)							
			掘削準備					
			350m調査坑道	śmi				
	坑道掘削		0	立坑(西,東,梅気)				
				Ш	П			
				500m	500m調査坑道 			
 	維持管理】							П
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きます。

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

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

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

人工バリア性能確認試験では、岩盤からの地下水浸潤を模擬するために、埋め戻し材外周部と緩衝材底部に注水管を設置し、人工的に地下水を注水しています。図 6(d)は埋め戻し材への注水流量と緩衝材への注水流量と注水圧力を示します。埋め戻し材への注水流量は約300 mL/minを維持しています。一方、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日ご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、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

^{*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。

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。

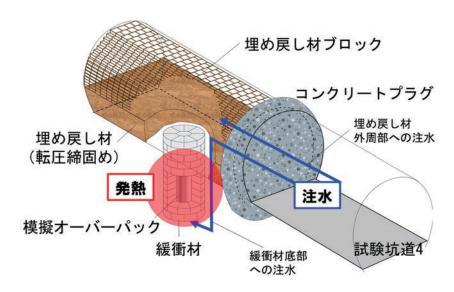


図 5 人工バリア性能確認試験の概念図

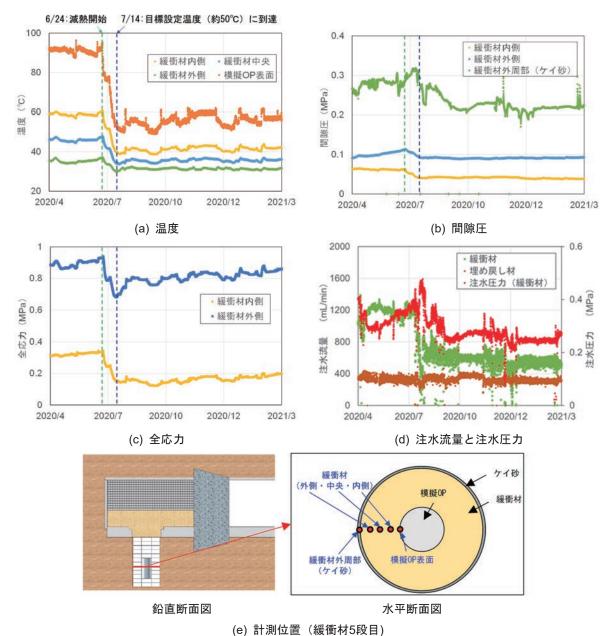


図 6 人工バリア性能確認試験で取得した計測データの一例(緩衝材5段目)

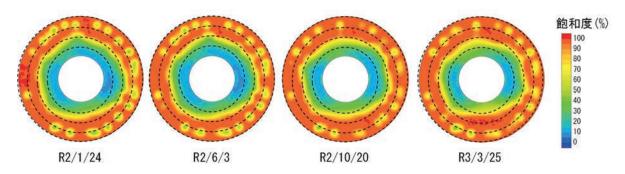


図 7 比抵抗トモグラフィによる緩衝材中の飽和度の算出結果

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ー水理ー力学連成挙動に関する室内試験については、事前の解析結果を基に浸潤挙動や膨潤挙動に及ぼす空気の影響を確認し、粘土材料の乾燥密度、設定温度、センサー(温度、水分量、応力、間隙圧)の設置位置、試験期間などの試験条件の設定を行いました。

人工バリア性能確認試験の解体調査のための試験施工(図 8)については、試験坑道4で実施している人工バリア性能確認試験の一部を模擬した埋め戻し部と試験孔部の施工を行いました。埋め戻し部は、試験坑道1の奥側の側面と底盤にコンクリートを打設し、人工バリア性能確認試験と同材料の埋め戻し材を、下部は電動ランマーにより転圧締固め、上部にはブロックを設置することにより埋め戻しました。埋め戻し材設置後は、コンクリートプラグを打設し、埋め戻し部内部への注水を開始しました。人工バリアを設置するための試験孔(孔径は約2.4 m、深さは約3 m)は、ブレ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います。

埋め戻し材 (ブロック) コンクリートプラグ 模擬オーバーパック 埋め戻し材 (転圧) 緩衝材

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



埋め戻し材転圧締固め



埋め戻し材ブロック設置





鉄筋組立・コンクリートプラグ打設



人工バリア試験孔掘削・コンクリート支保打設







模擬OPの設置 図 9 施工の様子



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与える影響を評価します。また、掘削損傷領域の物質移行特性に加え、微生物・有機物・コロイドの物質移行特性に与える影響を考慮した上で、割れ目を有する堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール(数m~100 m規模)における遅延性能評価手法の整備を行います。これらの成果は、処分事業で堆積岩を対象とする場合に、核種移行モデルを構築する際の基盤情報となるものです。

(1) 掘削損傷領域を対象とした物質移行試験

令和2年度は試験坑道3の既存孔(H4-1孔、H4-2孔およびP孔)において掘削損傷領域

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

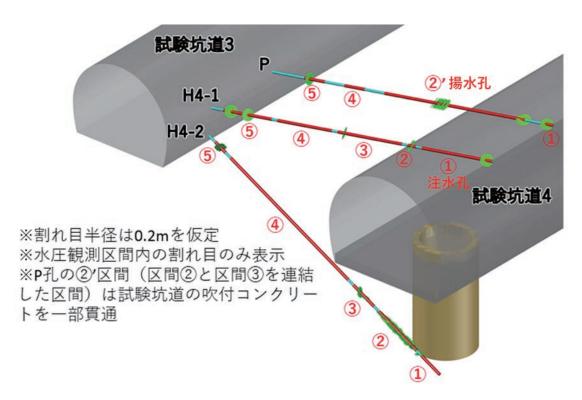


図 10 EDZを対象としたトレーサー試験のレイアウト(鳥瞰図)

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

^{*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、収着が起こらないトレーサーを非収着性トレーサーと呼びます。

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)およびョウ素(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。

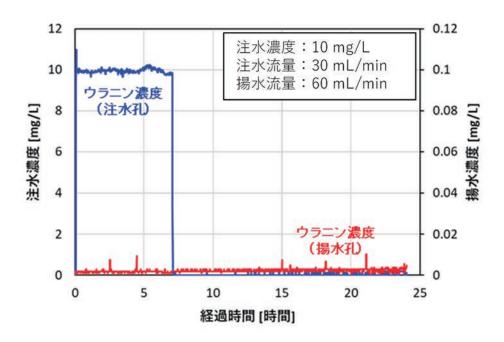


図 11 EDZを対象としたトレーサー試験結果

(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*24試験と同様に、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。

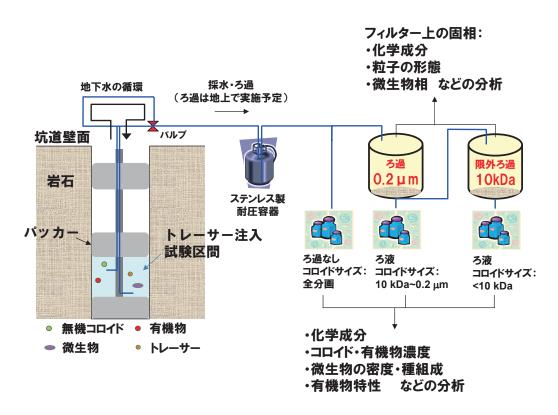


図 12 微生物・有機物・コロイドを対象とした物質移行試験のイメージ図

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

^{*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。

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

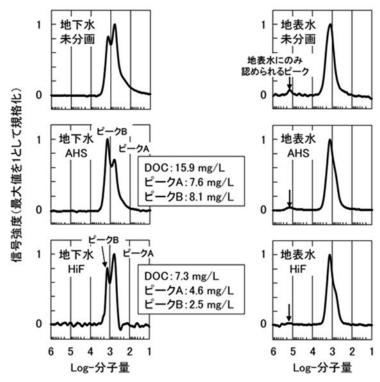


図 13 140m調査坑道から採取した地下水および地表水中の溶存有機物のサイズ分布 AHS: 腐植物質、HiF: 親水性物質

^{*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。

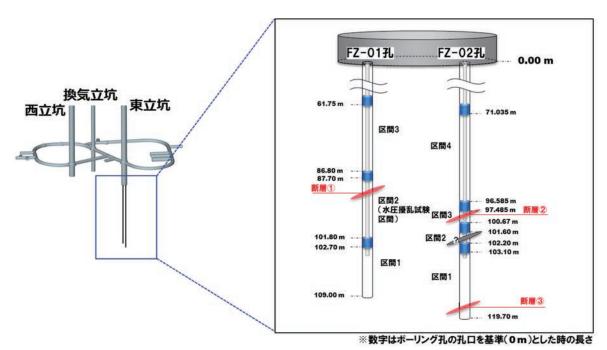
^{*26:} ある条件下で樹脂に吸着した物質のうち、アルカリ性溶液で溶出される物質群です。特定の化学構造を持ちません。

^{*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。

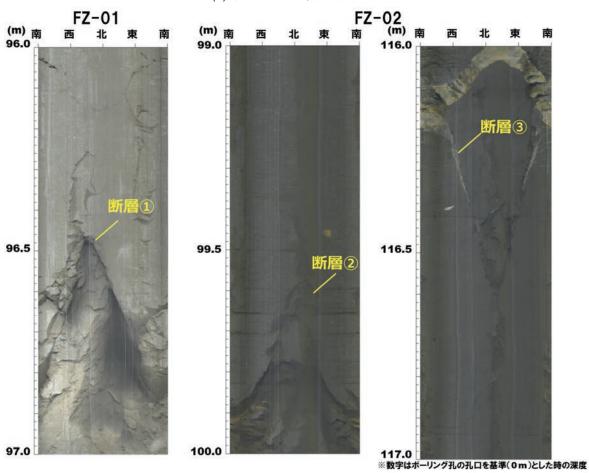
^{*28:}国立研究開発法人国立環境研究所は、国内外の環境問題に関するさまざまな研究開発を実施している研究組織です。

(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、 $101.6 \,\mathrm{m} \sim 101.7 \,\mathrm{m}$ 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、 $101.6 \text{ m} \sim 101.7 \text{ m}$ 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 \sim 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。



(a) 物質移行試験装置の設置状況



(b) 断層の孔壁画像 図 14 ブロックスケールを対象としたトレーサー試験

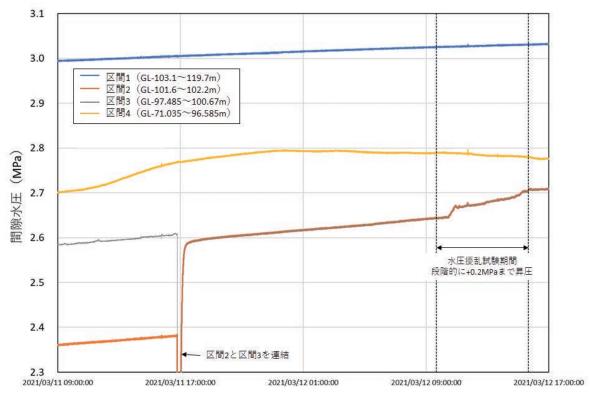


図 15 水圧擾乱試験時の間隙水圧観測結果

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。

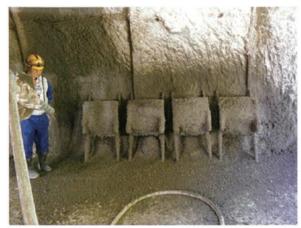
(1) 搬送定置・回収技術の実証

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。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確認されています。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

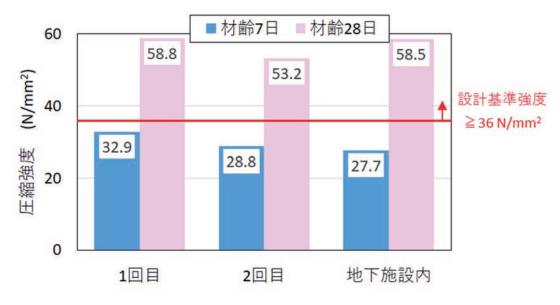


図 17 試験体の一軸圧縮強度の確認



(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。

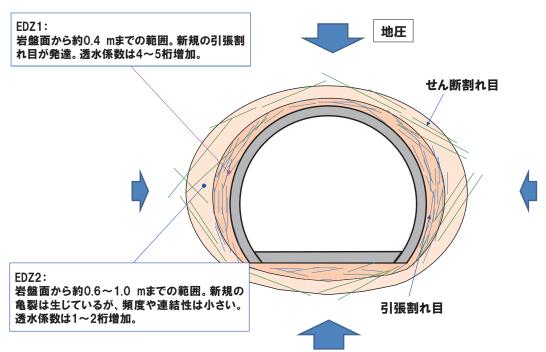


図 19 坑道周辺の地質環境に関する力学的概念モデル

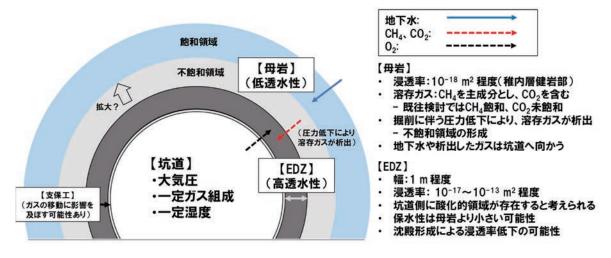


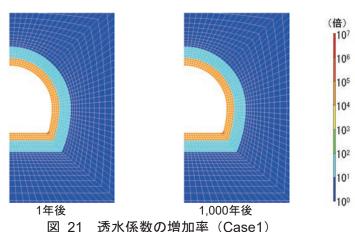
図 20 坑道周辺の地質環境に関する水理的概念モデル

			1				
	力学的	勺長期変化解析	水理学	備考			
	力学的因	子:クリープ変形	水理 支保工の				
Case1	支保工あり	標準的な場合	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		
Case i	支保工あり	(n ₀ =30、m=20)	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 (n₀=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 (n₀=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

(no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、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。

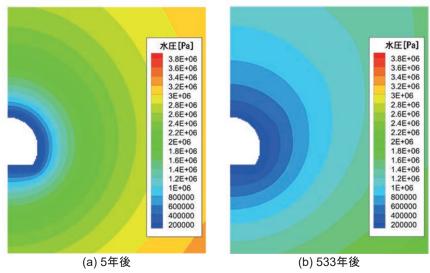


図 22 圧力分布の時間変化

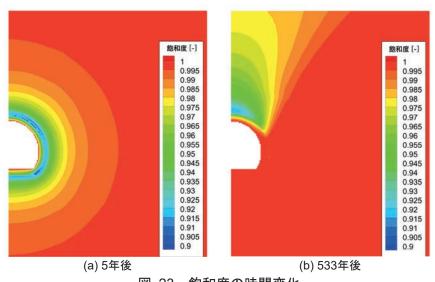


図 23 飽和度の時間変化

(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、

^{*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。

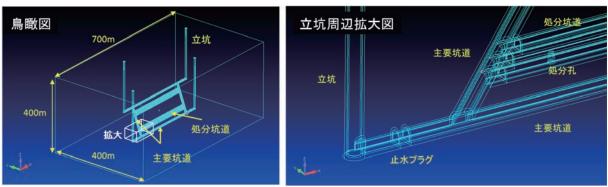
膨潤性や透水性が低下する可能性があります。一方、このようなベントナイト成分を含む地下水が埋め戻し部や岩盤中の割れ目を流れる過程で別の鉱物として沈殿し、結果として地下水が流れる間隙を閉塞する可能性も考えられます。このような長期的に生じうる現象が埋め戻し材やプラグの安全機能*30に与える影響を評価することは、将来的に処分場の安全性評価を行う上で、重要な知見となります。令和2年度は、令和元年度に設定したシナリオのうちコンクリート材料の地下水への溶出に起因した埋め戻し材の変質が核種移行に与える影響を把握するための水理解析および物質移行解析を実施しました。

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変失する場合)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。

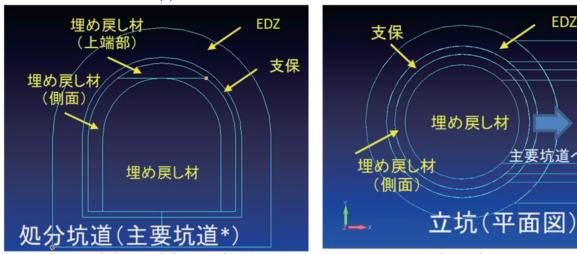
埋め戻し材の安全機能が維持する場合を想定した解析においては、粒子の発生位置にかかわら ず、岩盤を介して地上まで移行しています (図 26(a)および図 27(a))。すなわち、坑道や立坑を 移行する粒子はほとんど確認されません。一方、埋め戻し材の安全機能が喪失する場合を想定し た解析においては、基本的に岩盤中を粒子が移行するものの、その後、透水性が高い下流側立坑 に集水され、一部の粒子が下流側立坑の地表面に到達しています(図 26(b)および図 27(b))。本 解析結果から、下流側立坑の地表面に到達する粒子の割合を算出したものを表 5に示します。埋 め戻し材の安全機能が喪失する場合において、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

^{*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。

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。



(a) 解析モデルの鳥瞰図および立坑周辺のモデル詳細



(b) 処分坑道(主要坑道)のモデル詳細 (処分坑道と主要坑道で支保の厚みが異なります。) (c) 立坑のモデル詳細

EDZ

主要坑道へ

図 24 物質移行解析におけるモデルの概要

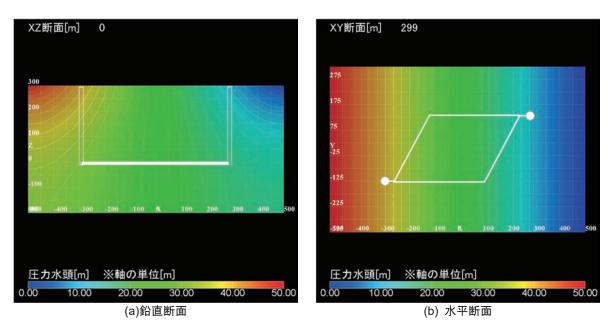
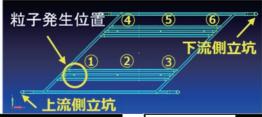


図 25 解析条件における間隙水圧分布

表 4 主な透水係数の設定値

	埋め戻し材の安全機能が	埋め戻し材の安全機能が					
	維持する場合(m/s)	喪失する場合(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	1.0 ^ 10 °					
止水プラグ	4.0×10 ⁻¹³						



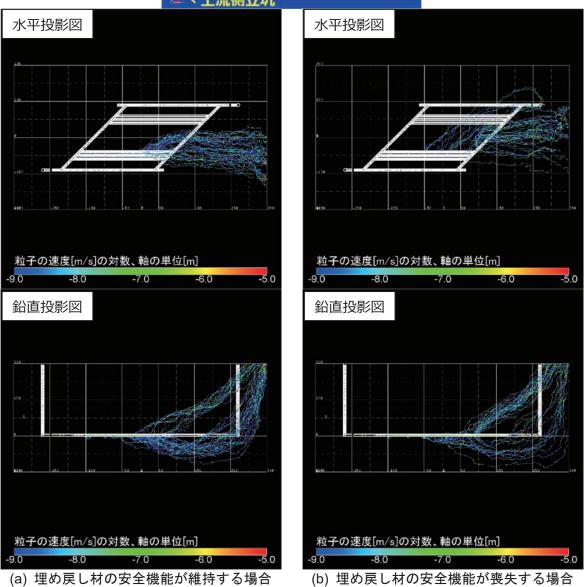
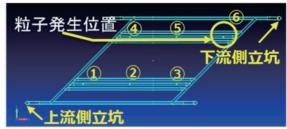


図 26 埋め戻し材の変質の程度に応じた核種移行の挙動の違い(粒子発生位置:処分孔①)



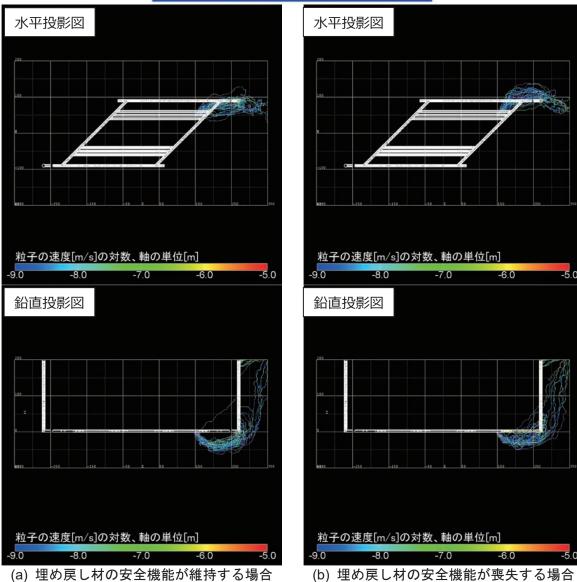


図 27 埋め戻し材の変質の程度に応じた核種移行の挙動の違い(粒子発生位置:処分孔⑥)

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

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%

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。

^{*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。

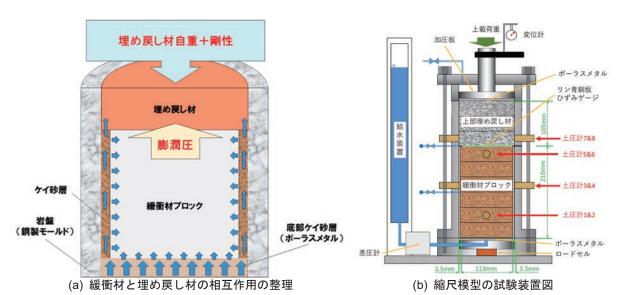


図 28 縮尺模型試験の概念図

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

令和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、 $1\sim2$ 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。 $15\sim20$ 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 $5 \ge 6$ では $0.5 \sim 0.6$ 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。

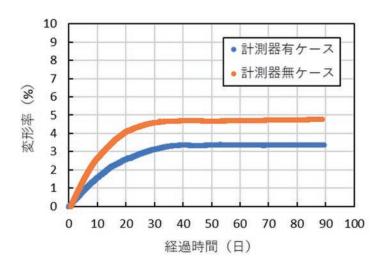


図 29 縮尺模型試験における膨潤変形率の経時変化

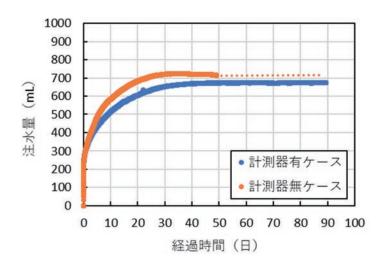
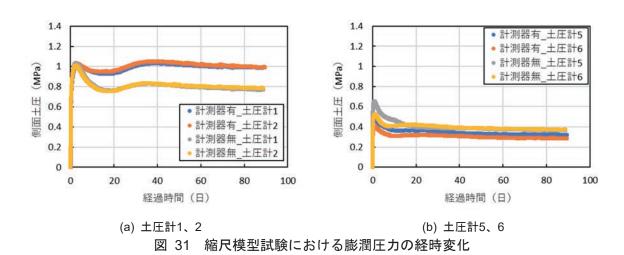


図 30 縮尺模型試験における注水量の経時変化 計測器無ケースでは、差圧計の不具合により50日以降の注水量のデータが欠測しています。



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2×10⁶ m/sの値を、構築後の透水係数は約3×10⁹ 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2×10⁹ 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。

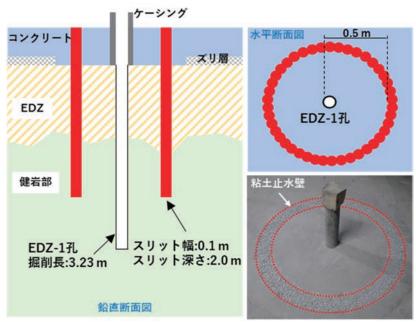


図 32 粘土止水壁周辺の概要図

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

^{*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。

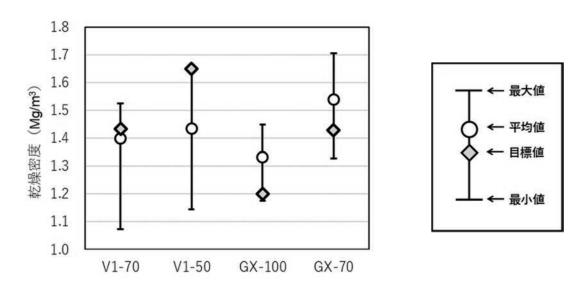
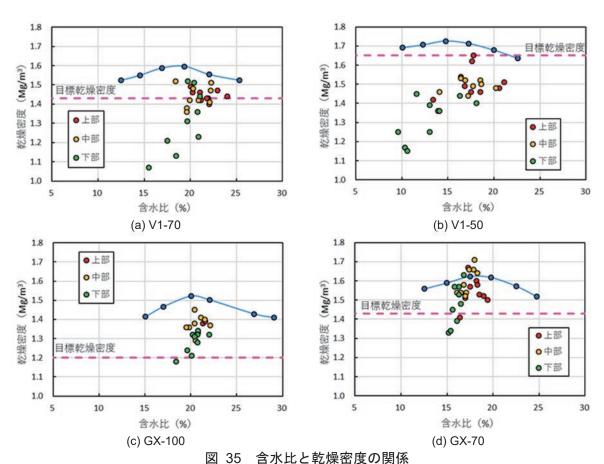


図 34 乾燥密度の平均値および最大値、最小値



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。

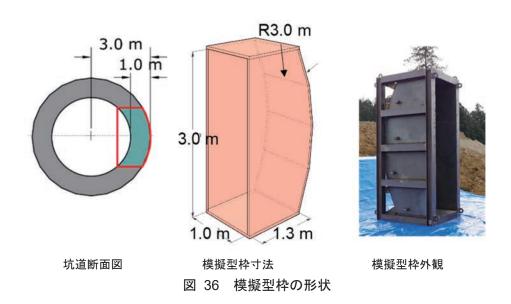
令和2年度はさらに、上部に位置する狭隘な空間への吹付け施工の適用性の確認を目的として、 切欠き部の形状を模擬した型枠に対する吹付け試験を実施しました。

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 $1.2~Mg/m^3$ を確保できる $1.43~Mg/m^3$ 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



(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

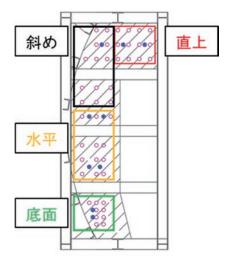


図 38 吹付け試験のサンプリング位置

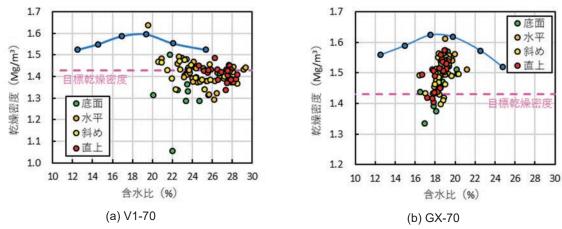
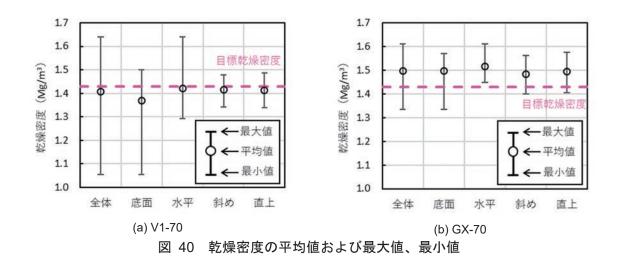


図 39 含水比と乾燥密度の関係

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。

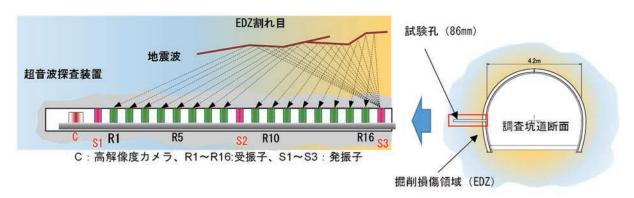


図 41 試験の概念図

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。

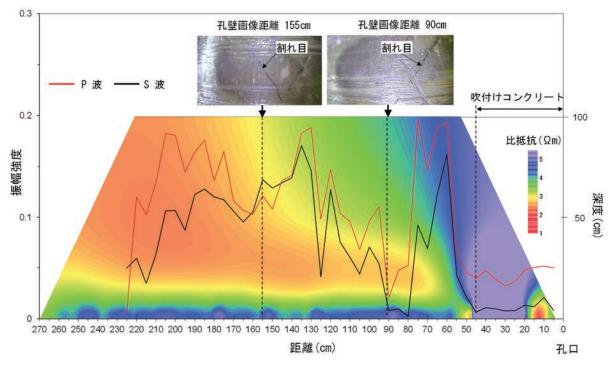


図 42 弾性波の振幅評価と比抵抗分布図

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。

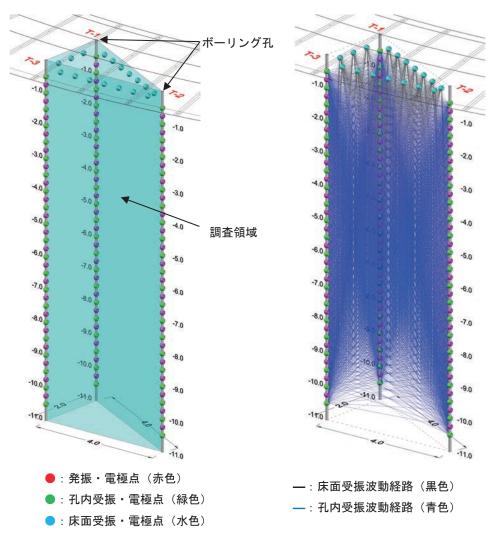


図 43 トモグラフィ調査の測点図

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。

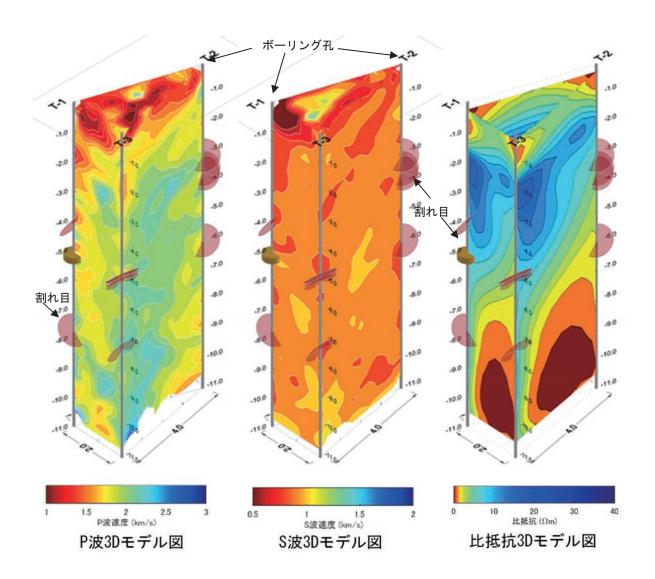


図 44 トモグラフィ結果図

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。

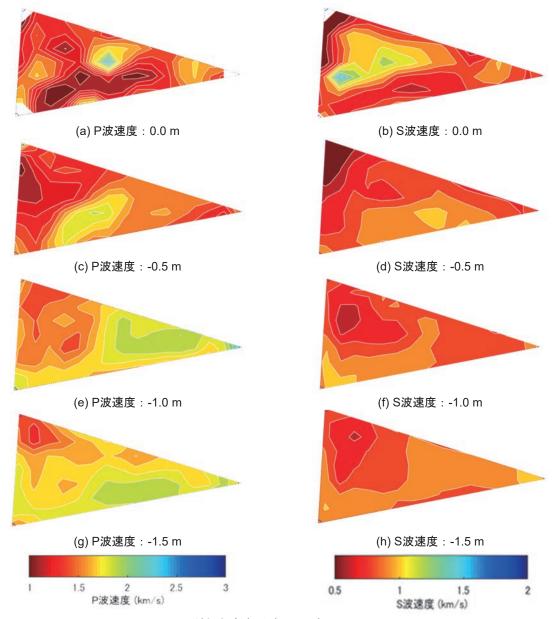


図 45 弾性波速度分布の深度スライス断面図

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。

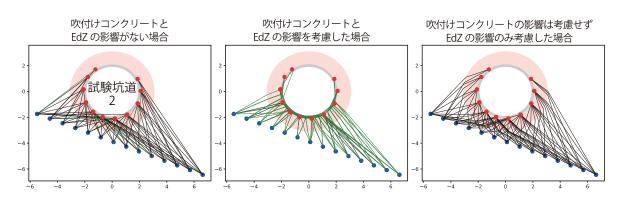
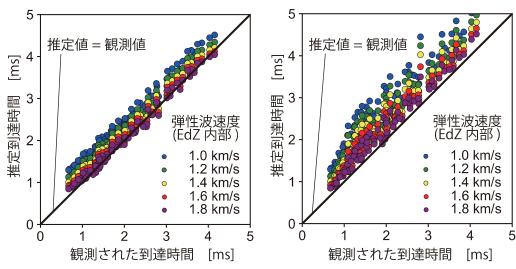


図 46 数値シミュレーションよる調査時の弾性波の通過経路の比較例



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

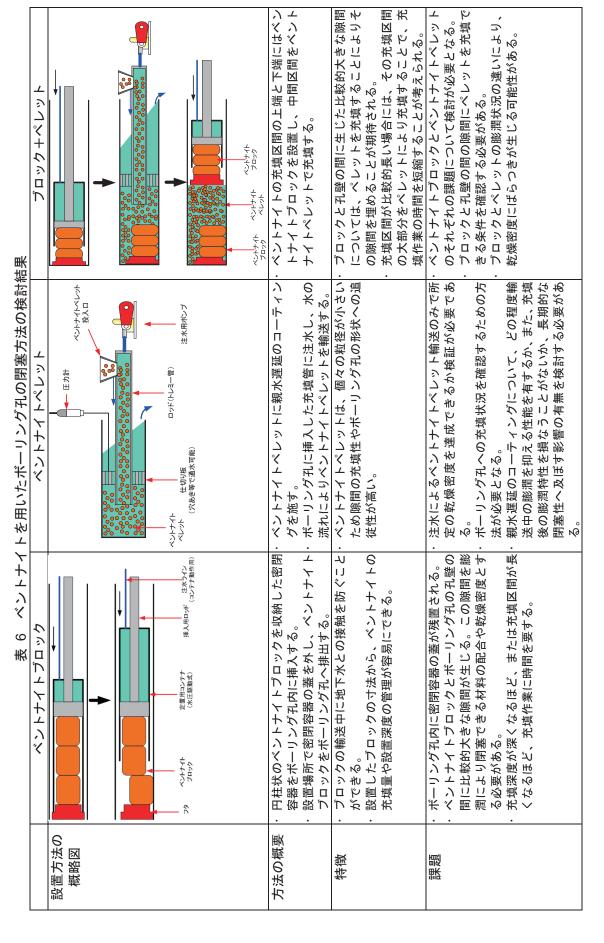
そこで、本検討では、坑道内から水平に近い向きに掘削されたボーリング孔を対象に、地下深部の地質環境条件を考慮した上で閉塞する材料の仕様を決定する考え方を整理するとともに、施工方法の適用性を検討します。令和2年度は、原位置試験の計画検討の一環として、国内外での研究事例を調査し、ボーリング孔を閉塞する際の材料の種類や配合を決定するための考え方や閉塞方法に関する技術的な課題を、以下に示すように抽出・整理しました。

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。



- 50 -

(3) 人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いによる品質保証体系の構築

経済産業省資源エネルギー庁の委託事業(令和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「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。

^{*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。

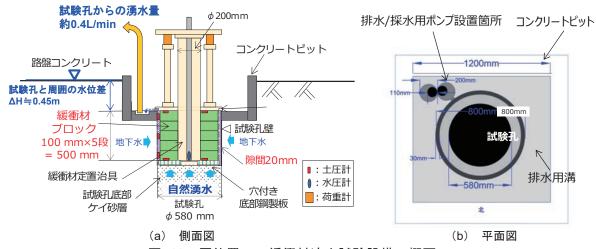


図 48 原位置での緩衝材流出試験設備の概要

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。

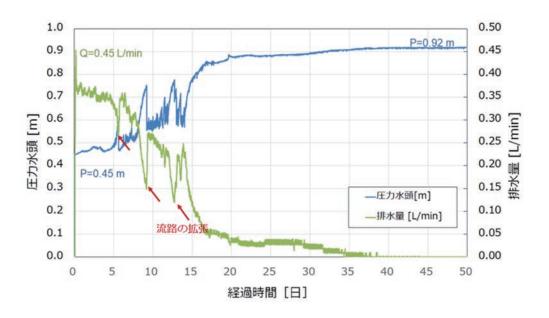


図 49 緩衝材流出試験における水位と排水量の変化

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。

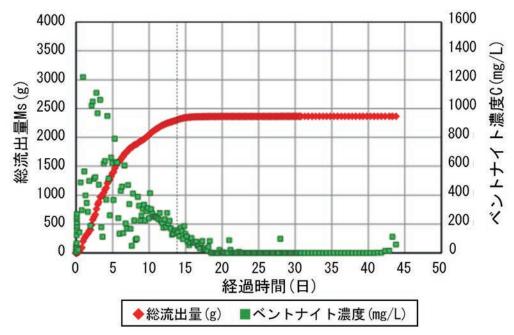


図 50 緩衝材流出試験における緩衝材の総流出量と排水中のベントナイト濃度の経時変化

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 $5\sim10~\mathrm{kPa}$ 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ー水理ー力学ー化学(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。

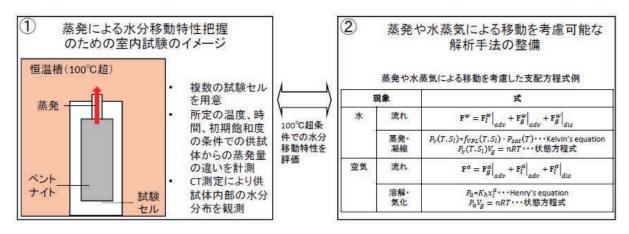


図 52 蒸発による水分移動特性を評価するための室内試験および解析手法のイメージ

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 C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、一部の現象については、 100 C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 C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 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ー水理ー力学ー化学(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。

表 7 緩衝材の変質に関する既往知見の整理(1/2)

非野が サップ フロボ		表/ 緩衝杯の変質 ※4の第四	緩衝材の変質に関する耽任知見の整理(1/2) 4の第四 (一個年刊の世界に言う影響もに	4000~ おこと 正常人の行
炎貝がエレノの场別	おたられる炎貝克米	光主の安囚	板割の ひおはしせん の 影音 ゆく	100 0名酉んに分別に02年兄
岩盤/緩衝材境界部~	スメクタイト(天然ケイ酸	・ 地下水や方解石に	緩運	・100℃超での実験・解析例などはなし。
緩衝材内部	アルミニウム)のイオン型	由来する Ca との		
	変化(Na 型→Ca 型)	相互作用		
			データが充実化されている。	
緩衝材內部	塩・鉱物の沈殿	・高温環境での地下	・緩衝材内部に沈殿した塩のセメンテー	・100°C超での実験・解析例などはなし。
~緩衝材/オーバーパ		水の蒸発	ションにより、緩衝材の可塑性や膨潤性	
ック境界部			能が低下しうる。	
			・ヒーター加熱温度 90°C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	
			みられる。	
	スメクタイトのイナン	・オーバーパックの		・ナチュラルアナログ研究では、変質期間が
	(Na 對↓Ee 對)	(単一日来する Fe		mlE
) 	ではおれています。	(の)には、これに、これに、これに、これに、これに、これに、これに、これに、これに、これに	0.05.0.12/12/15/16/16/16/16/16/16/16/16/16/16/16/16/16/
		この相互作用	・ 降付上は、板側を付出にするの影響は小	※冥典期间が、100~1,000年・通長が、100~町
			さいと考えられる。	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°C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	・オーバーパックの	・非膨潤性の鉱物に変質した場合、膨潤性	・250°C以上の高温で変質を起こす報告例が
	ライト化など)	腐食に由来するFe		多い。
		との相互作用		・ バッチ試験では、温度 120~150°C、鉄/粘土
		マグネシウムの供	度、溶液条件、鉄/粘土比、スメクタイ	比 0.5~1.0 の場合に変質が認められた。
		給が必要		・ナチュラルアナログ研究では、変質期間が
			・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	コレンサイト、クロライトが生成する可能
			バーパック/緩衝材間の空隙が閉塞し、	性がある。
			緩衝村の変質はそれ以上進まなくなる	・現状の知見では、100°Cを超えた場合には、
			と考えられる。	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。
		3		

_
(2/2)
\sim
質に関する既往知見の整理
0
≕
豆
并
*
盘
N
┢
鸓
ij
ıłm
ŒW.
-の変配
6
7
*
徸
緩衝材
. 1.
/
米

	100℃を超えた状態での知見	130°C程度で約 1 年間加熱されたベントナイン・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	イトだは、アーター (鉄)/ペントナイト界 固仕 HO 名 2 RE においた 光勢 4 辞り プロ		•	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				•	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。	・室内試験および原位置試験より、緩衝材が	100°C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°C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。
7 緩衝材の変質に関する既征知見の整埋(2/2)	緩衝材の特性に与える影響など	・緩衝村間隙への腐食生成物の充填に伴っては、	い、緩衝材の可塑性や膨潤性能が低下しょる。	、ある。	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。	・緩衝材が 100°Cを超えた場合に特有の	現象						・緩衝材が 100°Cを超えた場合に特有の	現象						
表 7 緩衝柄の変質	発生の要因	・オーバーパックの	属食生成物								・高温での変質(埋	没続成作用や熱水		スメクタイトに見	られる現象)	カリウムの供給が	必要	・緩衝材中のシリカ	含有鉱物の溶解お	よび再沈殿					
ייויי	想定される変質現象	腐食生成物によるセメンテ	ーンョン・								スメクタイトのイライト	(雲母鉱物) 化						シリカ含有鉱物の溶解・再	沈殿(シ リカセメソトーシ	$\widetilde{\mathcal{Y}}^{m}$					
	変質が生じうる場所	緩衝材内部	~緩衝材/オーバーペ ーンョン	シン鬼外部																					

さらに、海外で実施されている緩衝材の最高温度が100 \mathbb{C} 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 \mathbb{C} 程度まで上昇させることを想定した人工バリア試験が実施されています($\mathbf{HotBENT}$ \mathbf{T} \mathbf

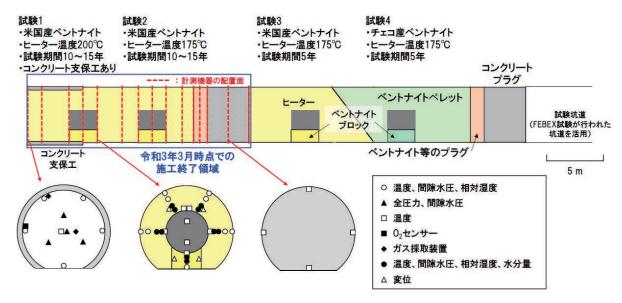


図 53 高温度における人工バリア性能確認試験の施工状況ならびに計測機器の配置断面図 (海 外での研究事例)

6. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

6.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

6.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

令和2年度以降は、地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握が課題となります。そのため、断層沿いに亀裂の発達する幅が数十cm程度のより大型の断層における地震動や坑道掘削に伴う割れ目中の地下水の流れの変化に関して、堆積岩の緩衝能力(自己治癒能力)の評価手法の確認を行います。具体的には、地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握(ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験)、ダクティリティインデックス(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。

^{*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。

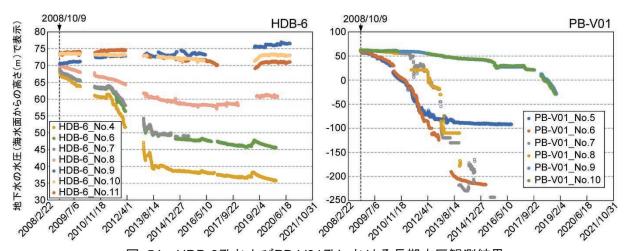


図 54 HDB-6孔およびPB-V01孔における長期水圧観測結果

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。センサー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。

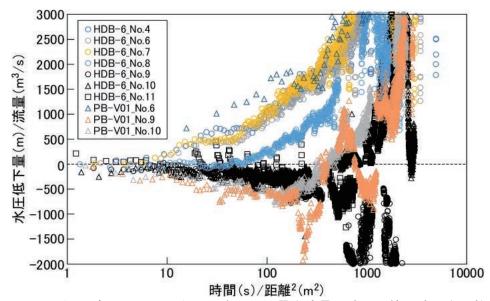


図 55 HDB-6孔およびPB-V01孔における水圧低下量を流量で除した値と時間を距離の二乗で除した値の関係

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。

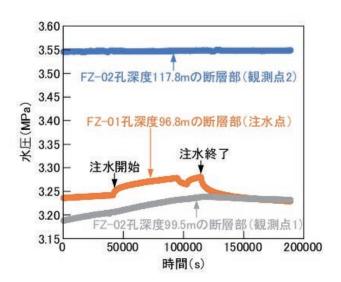
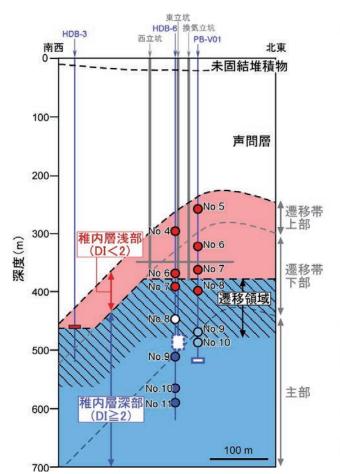


図 56 FZ-01孔の深度96.8 mの断層部へ注水を行った際のFZ-02孔の深度99.5 m (観測点1) および深度117.8 m (観測点2) の断層部での水圧応答

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。



長期水圧観測

- 立坑掘削に伴い水圧低下が認め ● られる観測点(断層/割れ目の水 理的連結性が高い)
- 立坑掘削に伴い水圧低下が認め られるが、解析的には初期段階の 低下量が小さい観測点(断層/割 れ目の水理的連結性が低い)
- 立坑掘削に伴い水圧低下が認められるが、初期段階では水圧上昇が認められる観測点(断層/割れ目の水理的連結性が低い)
- 立坑掘削に伴い継続的な水圧上 ● 昇が認められる観測点(断層/割 れ目の水理的連結性が低い)

水圧擾乱·物質移行試験

数mを超えた距離で断層間の水圧 応答が認められない領域(断層の 水理的連結性が低い)

孔内検層

地下水の流出入が検出されない □ 断層区間(断層の水理的連結性 が低い)

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

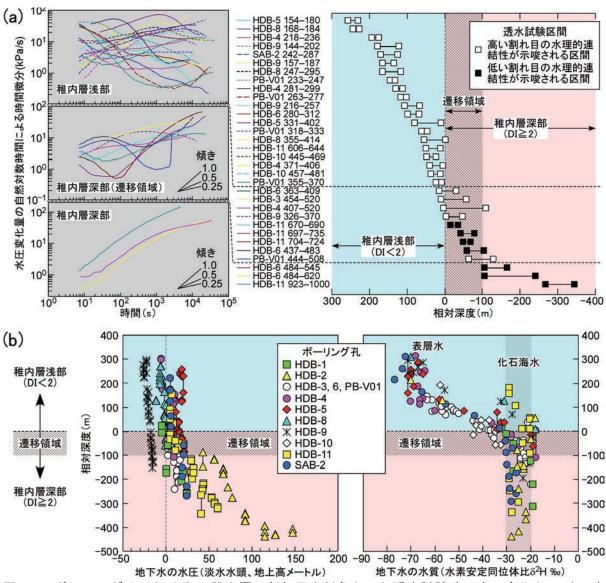


図 58 ボーリング孔における(a)稚内層の割れ目を対象とした透水試験時の水圧変化と(b)地下水の水圧と水質の深度分布(12)に加筆

(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。

稚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。

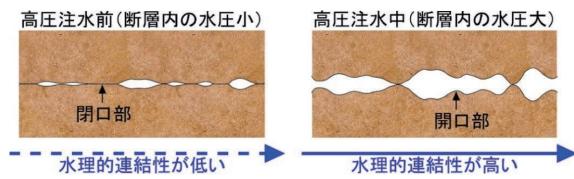


図 59 水圧上昇による断層内の開口部と水理的連結性の増加

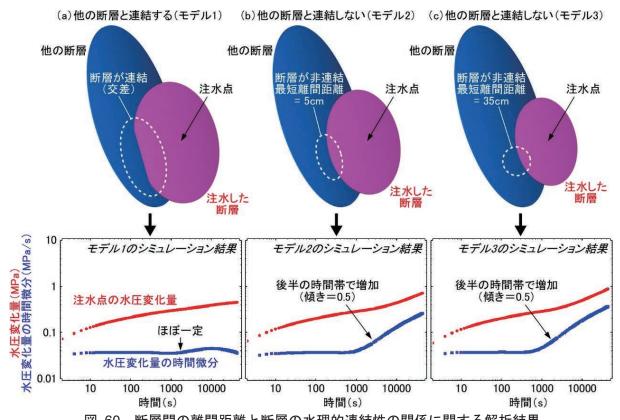


図 60 断層間の離間距離と断層の水理的連結性の関係に関する解析結果 下図において、水圧変化量の時間微分の値がほぼ一定だと断層の水理的連結性が高く、後半の時間帯で増加する (傾き 0.5 以上)と断層の水理的連結性が低いことを示唆します (12)。

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 $13\sim49\,\mathrm{mm}$ のずれに到達、図 $62\,\mathrm{左図}$)。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。

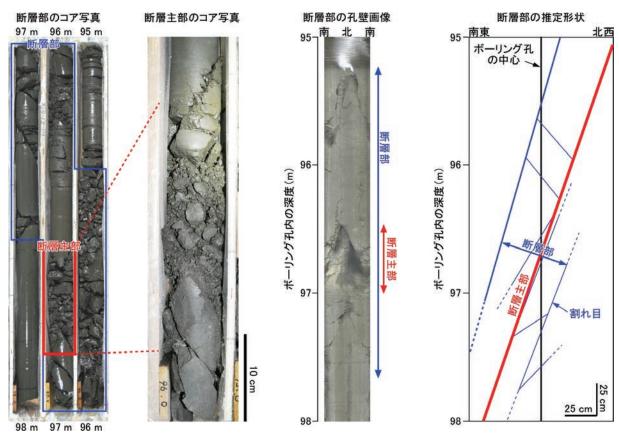
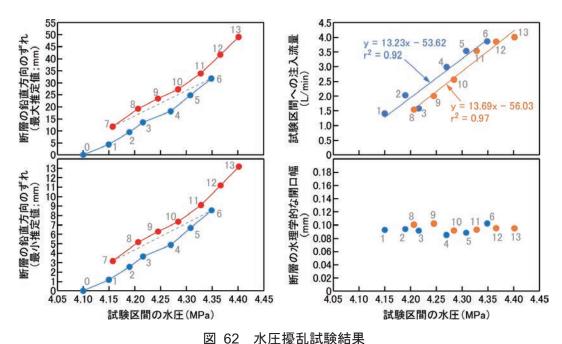


図 61 水圧擾乱試験を行った幅数十cmの断層部のコア写真、孔壁画像および推定形状断層主部の傾斜角は水平面に対して 71 度です。断層主部の周辺数十 cm の範囲に割れ目が発達しています。



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。

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

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。

^{*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。

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*37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3km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、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*38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*39と探査深度の深いMT法*40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。

^{*37:}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 δ^2 H または δ D と表記されます。

^{*38:}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。

^{*39:} 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。

^{*40:} 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。

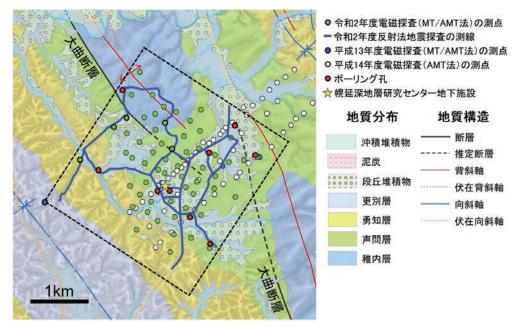


図 63 電磁探査および反射法地震探査の測点・測線の配置 地質図は国土地理院の基盤地図情報(10 mメッシュ)を加工して作成(参考文献(22))しています。

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 $1\sim50~\Omega$ ·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 $2.4~\Omega$ ・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 $2.4~\Omega$ ・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 $2.4~\Omega$ ・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、 $2.4~\Omega$ ・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、 $5.9~\Omega$ ・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、 $2.4\,\Omega\cdot m$ および $5.9\,\Omega\cdot m$ 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 $2.4\,\Omega\cdot m$ 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 $5.9\,\Omega\cdot m$ 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。

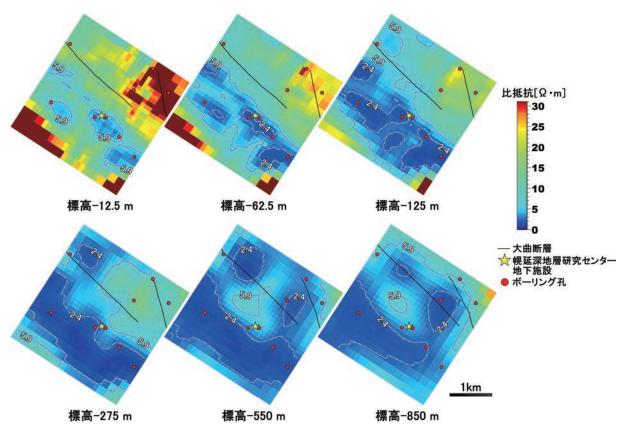


図 64 電磁探査により得られた三次元比抵抗分布の水平断面図

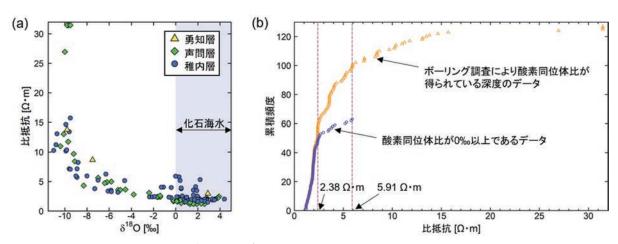


図 65 (a)既存の地上からのボーリング調査において比抵抗検層により得られた比抵抗値と水質 分析により得られた酸素同位体比の関係、(b)既存の地上からのボーリング調査の比抵抗検層に より得られた比抵抗値の累積頻度分布

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) *41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。

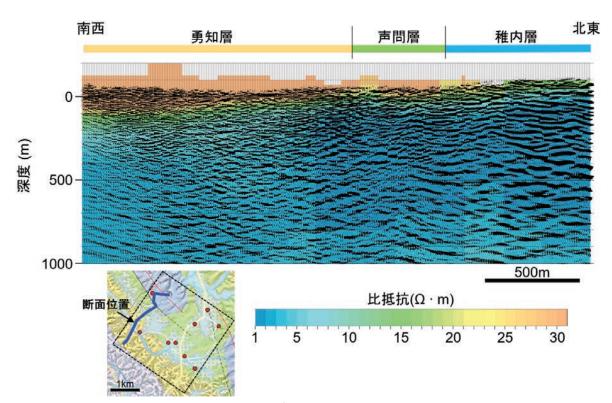


図 66 反射法地震探査の重合前深度マイグレーション (PSDM) 解析結果と電磁探査で得られた比抵抗分布の重ね合わせ

地質図は参考文献(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

^{*41:} 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。

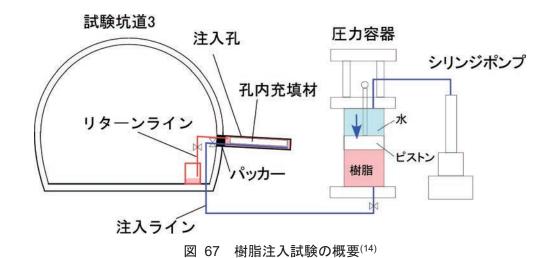
理を行うとともに、物理探査とボーリング調査を組み合わせた手法により化石海水の三次元分布を把握する際に、それを効率的に実施できる調査数量や仕様などの検討に着手しました。今後は、令和2年度に取得した物理探査データを加えた検討を進めます。

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*42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 $1\,\mathrm{mm}$ 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($0.2\sim0.3\,\mathrm{mm}$)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。



*42: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。

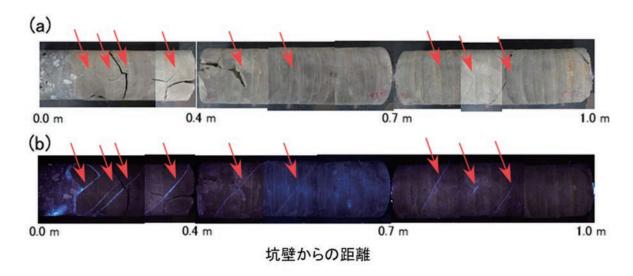


図 68 樹脂注入後に採取したコアの例 (a)自然光で撮影、(b)紫外線照射下で撮影 (図中の赤矢印は樹脂注入された割れ目を示します。)

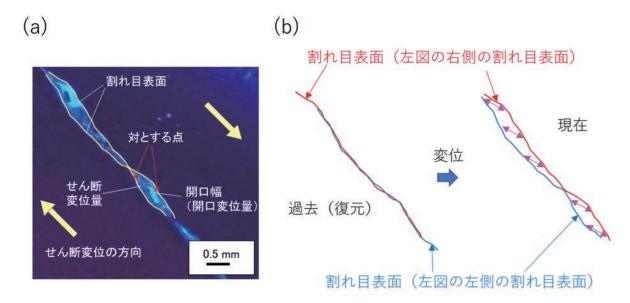


図 69 割れ目の開口幅とせん断変位量の計測方法

(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

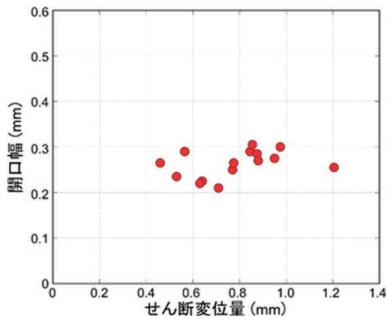


図 70 EDZの割れ目で計測された開口幅とせん断変位量の関係

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*43、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*44、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*45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、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(Cl-) 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Cl-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Cl-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。Cl-は反応性に乏しいため、Cl-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、Cl-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、令和2年度は地下水試料中にトリチウム*46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

^{*43:}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。

^{*44:}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。

^{*45:}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。

^{*46:}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。

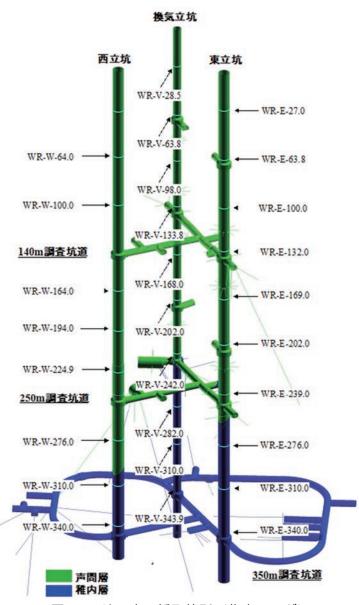


図 71 地下水の採取箇所(集水リング)

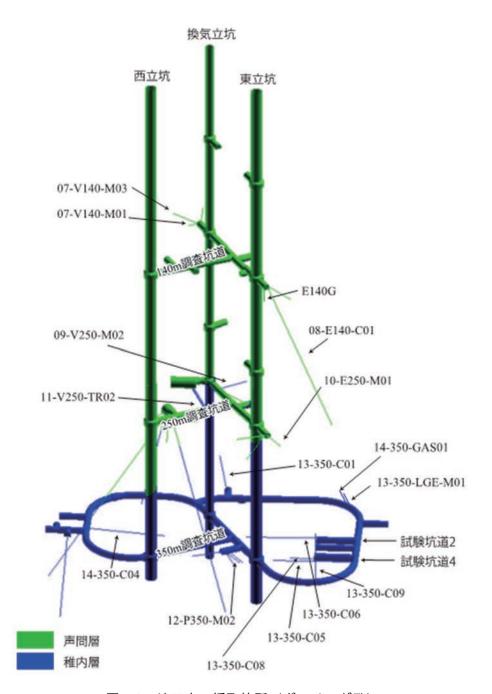


図 72 地下水の採取箇所 (ボーリング孔)

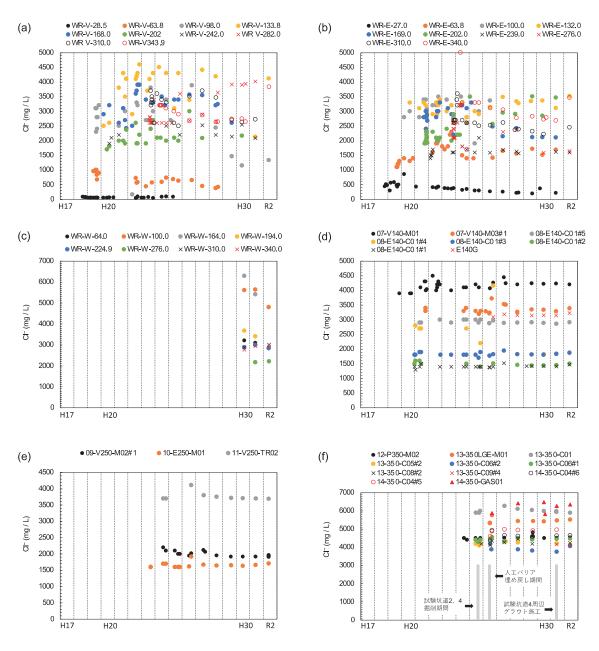


図 73 地下水のCI-濃度の経時変化

(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、人工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)

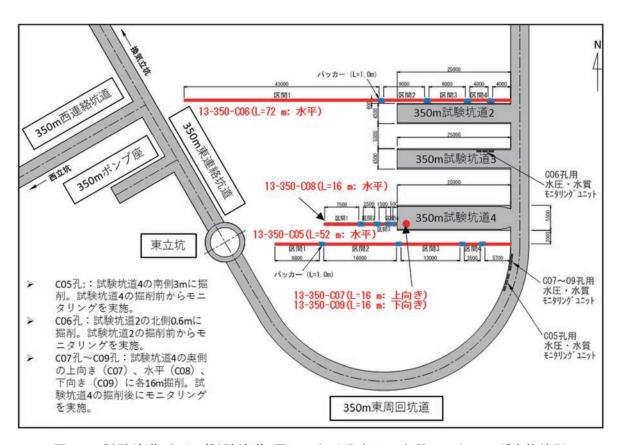


図 75 試験坑道2および試験坑道4周辺における水圧・水質モニタリング実施箇所

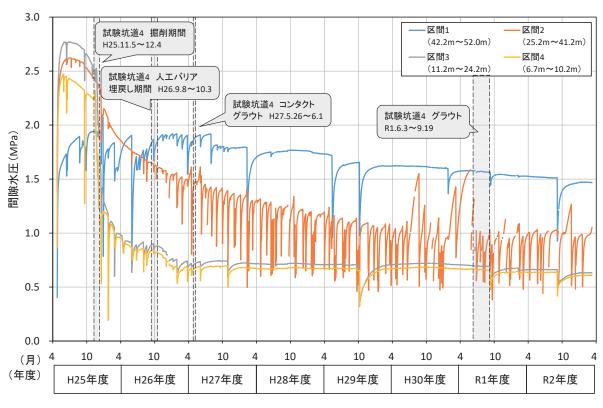


図 76 C05における水圧モニタリング結果 水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

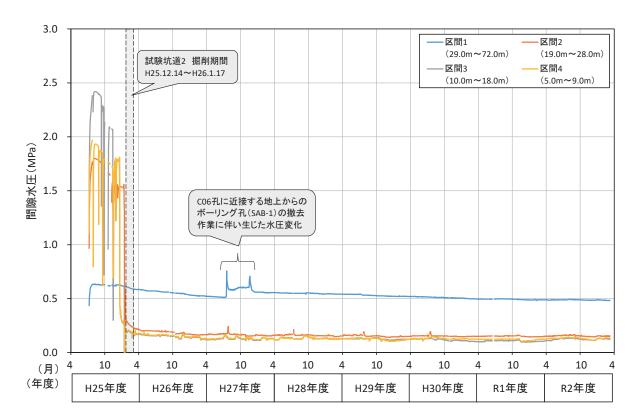


図 77 C06における水圧モニタリング結果 水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

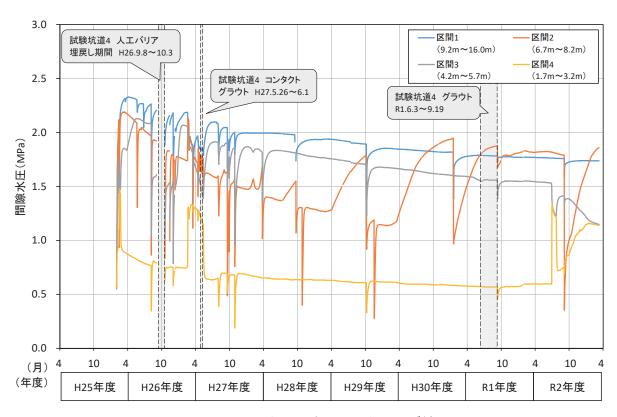


図 78 C07における水圧モニタリング結果 水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

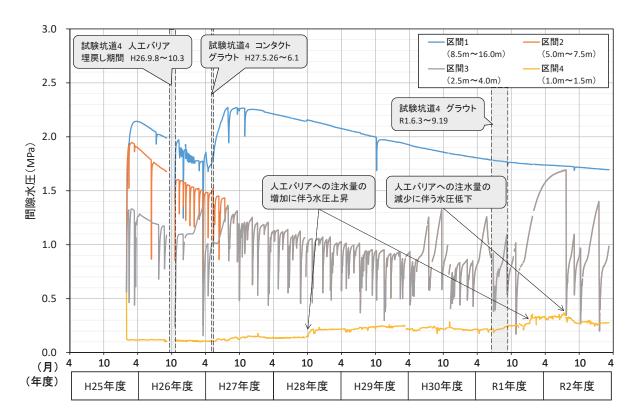


図 79 C08における水圧モニタリング結果 水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

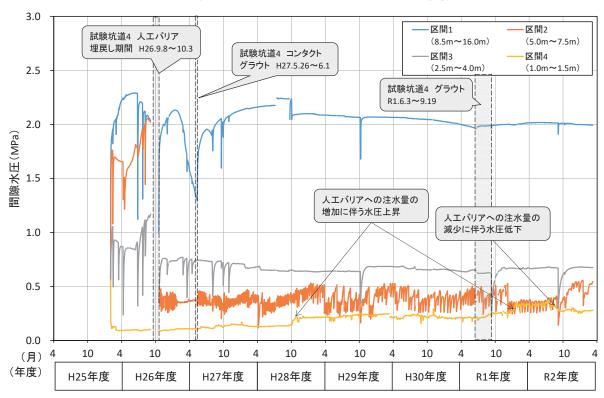


図 80 C09における水圧モニタリング結果 水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

試験坑道の掘削後、水圧の低下に伴い地下水中の溶存ガスが遊離した影響により、水質モニタリングの継続可能な箇所は限定されつつあります(図 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 \sim -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。

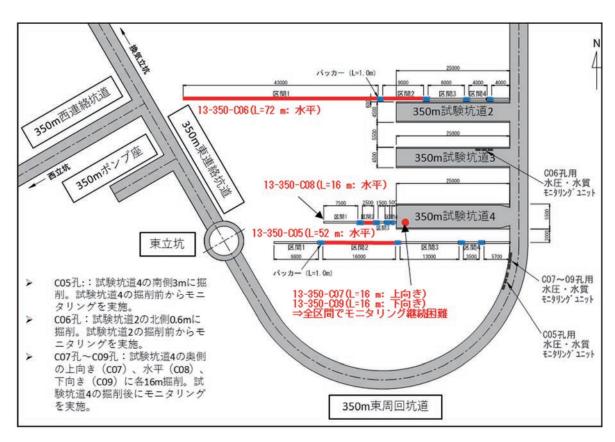


図 81 試験坑道2および試験坑道4周辺における水質モニタリング継続可能区間 各ボーリング孔のうち、水質モニタリングが継続可能な区間のみを赤色で示しています。

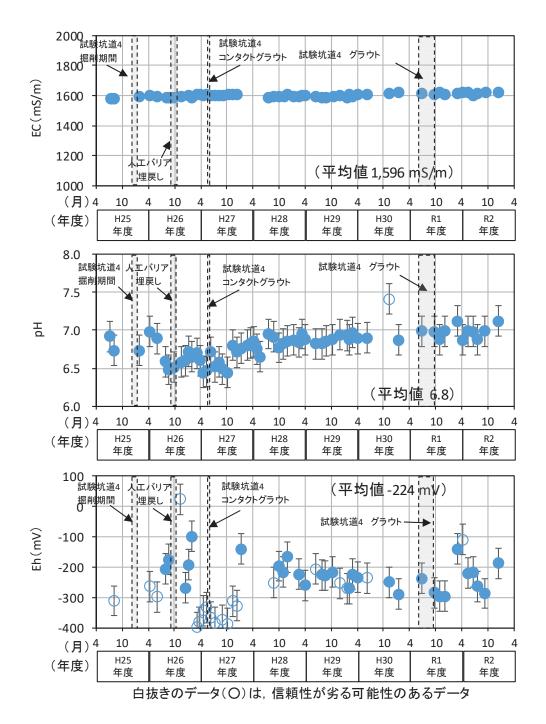


図 82 C05の区間2における水質モニタリング結果

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」における熱ー水理ー力学ー化学(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*47との共同研究の一環として実施しています。

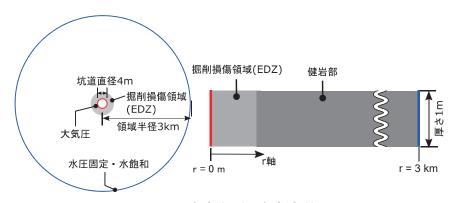
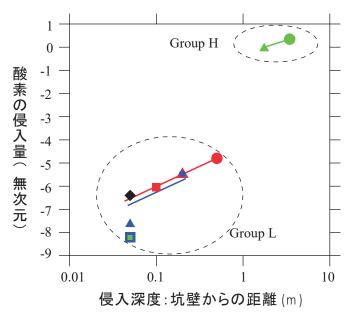


図 83 解析領域と解析条件

^{*47:}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。



•Group L: 坑壁における湿度を100%で固定

• Group H: 坑壁における湿度を50%で固定

溶存ガス量: ◆= ■= ▲= ● > ■> ▲> ●

岩盤の透水性:■>■>▲>◆=▲>●>●

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、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。

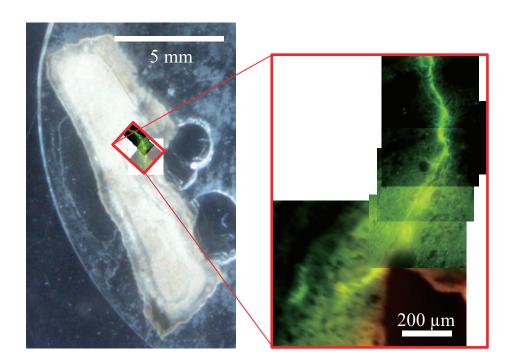


図 85 140m調査坑道から得られた岩石試料 (声問層) 中の微生物分布 左図は、実体顕微鏡写真の上に、蛍光顕微鏡写真を重ね合わせたもので、右図は、左図の蛍光顕微鏡写真部を拡大 したものになります。蛍光顕微鏡写真で黄緑色が強い部分ほど、微生物が密集していることを示しています。

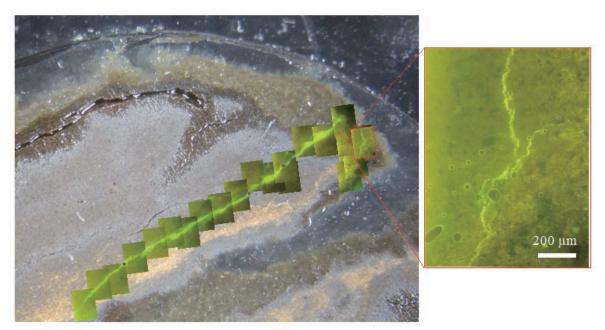


図 86 350m調査坑道から得られた岩石試料 (稚内層) 中の微生物分布 左図は、実体顕微鏡写真の上に、蛍光顕微鏡写真を重ね合わせたもので、右図は、左図の蛍光顕微鏡写真部を拡大 したものになります。蛍光顕微鏡写真で黄緑色が強い部分ほど、微生物が密集していることを示しています。

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*48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*49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*50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、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。

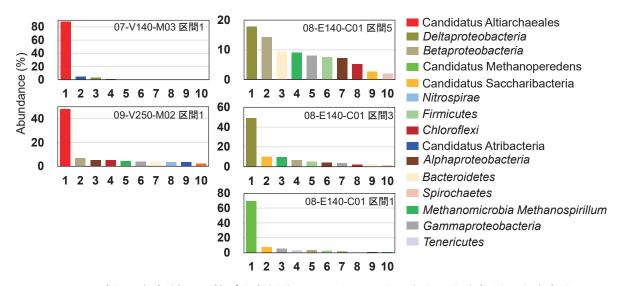


図 87 遺伝子解析結果に基づく各採水区間における地下水中の微生物種の存在割合

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。

^{*48:}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。

^{*49:}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。

^{*50:}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。

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 μ mスケールにて μ -XRF法*51による元素のマッピング分析および μ -XAFS法*52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*53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、パイライトやフェロセライトへの分配率については声間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。

^{*51:}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。

^{*52:}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。

^{*53:}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。

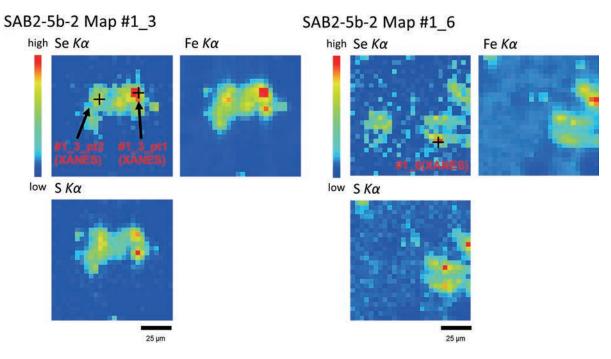


図 88 微小領域におけるセレン(Se)、鉄(Fe)、硫黄(S)のマッピング分析結果

SAB2-5b-2 XANES

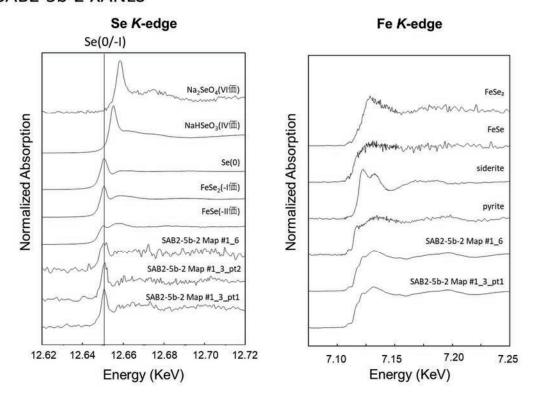


図 89 セレン濃集部に対するセレン(Se)および鉄(Fe)の化学形態に関する分析結果

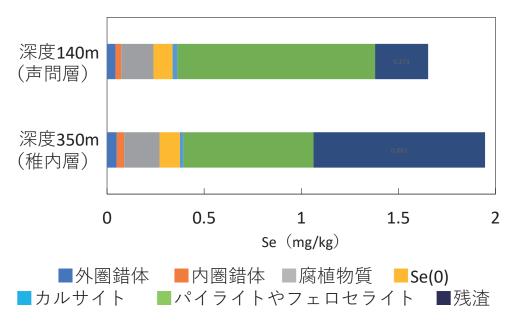


図 90 各抽出ステップにて抽出されたセレン(Se)の量

(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。

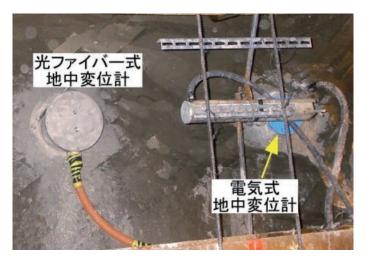


図 91 地中変位計設置状況



図 92 鋼製支保工応力計設置例

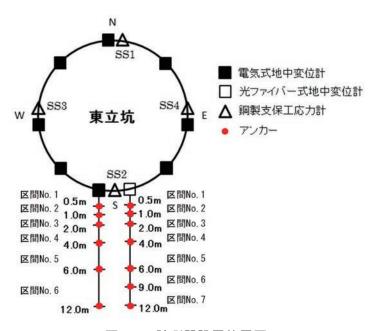


図 93 計測器設置位置図

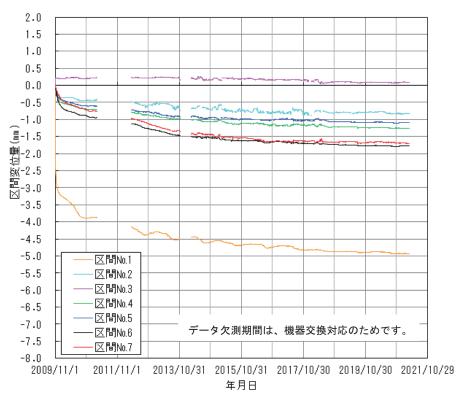


図 94 光ファイバー式地中変位計の計測結果

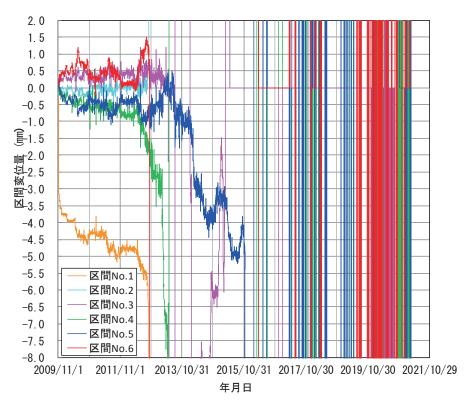


図 95 電気式地中変位計の計測結果

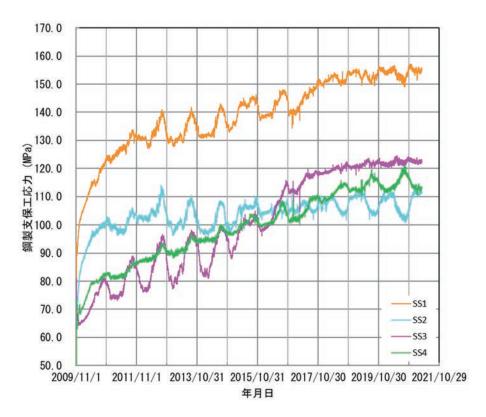


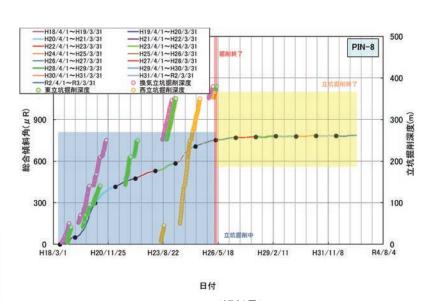
図 96 鋼製支保工応力計の計測結果

(4) 坑道掘削の影響に関する調査技術の開発

地表面から坑道掘削時の地下深部の岩盤や地下水の挙動をモニタリングする技術を確立することを目的として、立坑の周辺(換気立坑から半径100 m以内)に9台、東立坑の深度140 mの連接部付近に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*54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 km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。

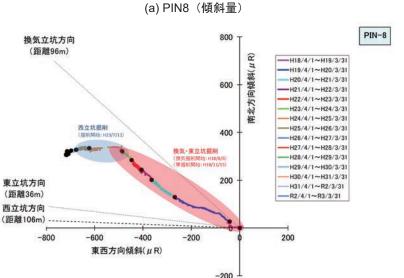
これまでの計測データにより、立坑の周辺の高精度傾斜計では地下深部の坑道の掘削に伴う地表付近での微小な傾斜量やその傾斜方向が検知できることを確認しました。今後も引き続き傾斜量および傾斜方向のモニタリングを継続するとともに、地下深部の岩盤の挙動との関係性を検討していきます。

^{*54:}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。



PIN4 PIN9 PIN9 PIN7 換気立坑 PIN5 PIN6 PIN6 PIN1

高精度傾斜計の配置





高精度傾斜計の配置 国土地理院発行5万分の1地 形図を使用

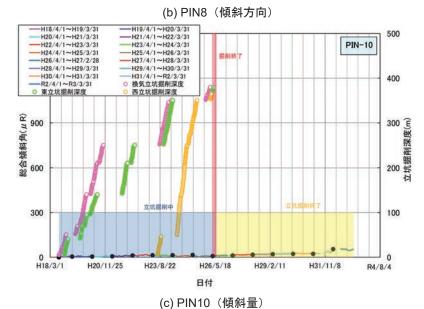


図 97 傾斜計データの一例

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。

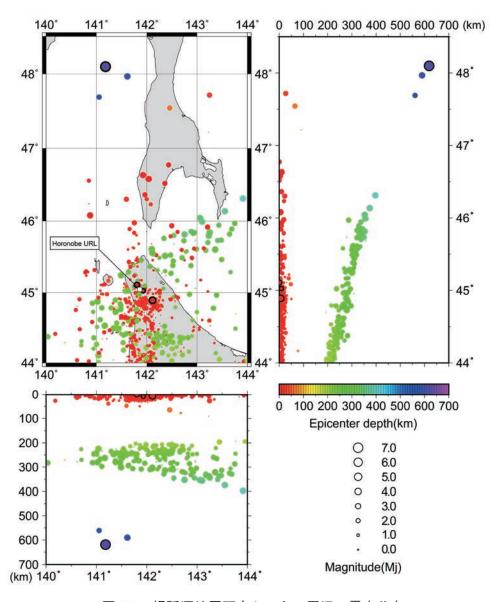


図 98 幌延深地層研究センター周辺の震央分布

表 8 幌延町宮園で観測された震度1以上の地震

地震の発生日時	震央地名	緯度	経度	深さ	Mj* ⁵⁵	震度	
						幌延町	最大
						宮園	震度
2021/2/6	上川地方北部	44°53.6′N	142°06.8′E	2 km	3.9	2	3
4:10:01							
2021/2/6	上川地方北部	44°53.5′N	142°07.0′E	7 km	3.5	1	2
4:02:4							
2020/12/1	サハリン西方沖	48°05.8′N	141°10.8′E	619 km	6.7	2	3
7:54:33							
2020/8/27	宗谷地方北部	45°01.5′N	141°55.8′E	9 km	1.7	1	1
17:36:34							
2020/4/1	宗谷地方北部	45°06.4′N	141°48.2′E	0 km	2.6	2	2
4:39:34							

これらの地震の震央は図 98に黒丸で示しています。

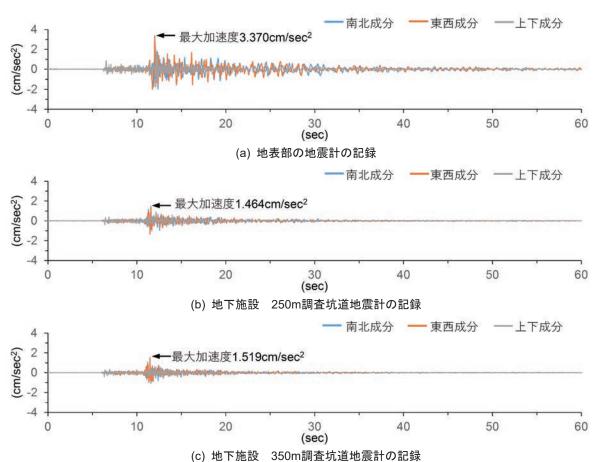


図 99 地下施設の地震観測記録の例(令和3年2月6日午前4時10分ごろ発生した地震)地下施設の地震観測結果は幌延深地層研究センターのホームページに掲載しています。

*55: 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

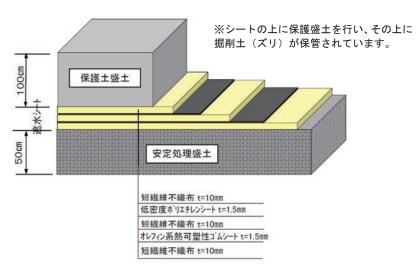


図 103 二重遮水シートの構造

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



(b) 濁水処理設備



(c) 脱ホウ素設備(1号機)



(d) 脱ホウ素設備(2号機)



(e) 脱窒素設備



(f) 揚水設備

図 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。

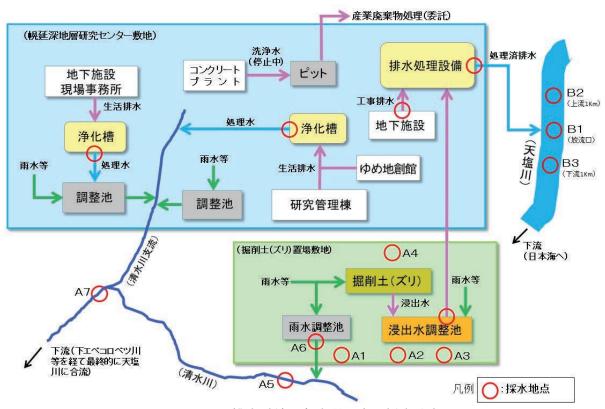


図 105 排水系統と各水質調査の採水地点

(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。

表 9 天塩川への排水量

年月	月排水量(m³)	日最大排水量(m³) ^{※1}	日平均排水量(m³) ^{※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

※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。

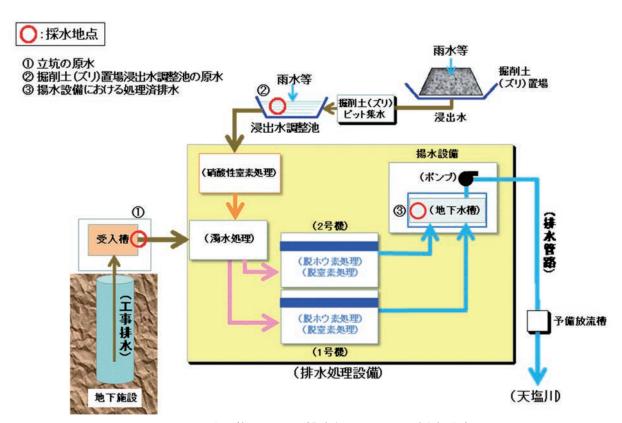


図 106 地下施設からの排水処理フローと採水地点

表 10 地下施設からの排水に係る水質調査結果

		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3月	平成31年4月 ~令和2年3月	令和2年4月 ~令和3年3月	水質汚濁防止法 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
(111g/L)	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
. 5	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
,g, _,	揚水設備における処理済排水	<0.01	<0.01	<0.01	
	立坑の原水	<0.8~3.5	<0.8	<0.8	
フッ素 (mg/L)	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	<0.8	<0.8	<0.8	8
. 5	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
. 5	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	
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)
	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	_
	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	
рН	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	
75.44.7.7.E	立坑の原水	4~580	6~130	10~49	25-
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 (日間平均 150)
3 .	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	_
\g/ =/	揚水設備における処理済排水	38~4,700	1,500~4,000	1,400~3,300	

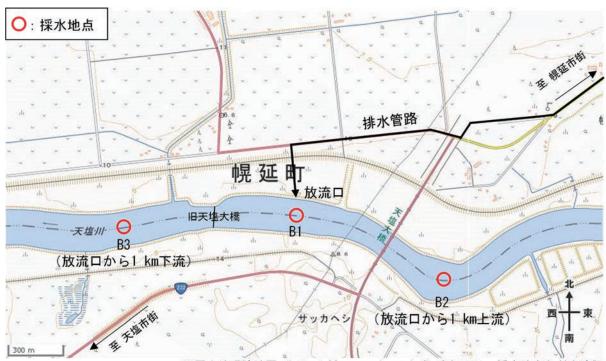
※1:主な分析項目を抜粋 ※2:採水地点は図 106 参照

(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。



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

図 107 天塩川の採水地点



図 108 天塩川の採水状況

表 11 天塩川の水質調査結果

	l		• •	温川の水貝調宜結果		1
			過年		令和2年度	北るもい
分析項目※1	_	水	平成18年6月	平成18年12月	令和2年4月	漁業協同組合
	地	点※2	~平成18年11月	~令和2年3月	~令和3年3月	協定値
			(放流前)	(放流後)	11410-071	1337 C IL
		表層	<0.02~0.04	<0.01~0.35	0.01~0.10	
	B1	中層	_	<0.01~3.5	0.01~1.1	
		深層	<0.02~3.35	<0.01~4.9	0.01~3.8	
ホウ素		表層	<0.02~0.04	<0.01~0.27	<0.01~0.07	•••
(mg/L)	B2	中層		<0.01~3.7	0.01~0.10	5
(IIIg/L)		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	
	В3	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	中層		0.15~2.1	0.34~2.2	
		深層	0.42~1.50	0.15~6.5	0.37~2.2	_
全窒素		表層	0.37~1.14	0.14~2.2	0.33~2.2	
主至系 (mg/L)	B2	中層	_	0.15~2.3	0.34~2.3	20
(IIIg/L)		深層	0.4~1.16	0.16~2.3	0.34~2.3	
		表層	0.4~1.31	0.16~2.2	0.33~2.2	
	В3	中層	_	0.11~2.3	0.34~2.2	
		深層	0.49~1.24	0.16~2.3	0.33~2.2	
Ī		表層	_	<0.05~0.83	<0.05~0.11	
	В1	中層	-	<0.05~0.92	<0.05~0.09	
		深層	_	<0.05~0.85	<0.05~0.13	
ヘマンエーマ		表層	<0.01~0.13	<0.05~0.89	<0.05~0.09	1
全アンモニア	B2	中層	_	<0.05~0.76	<0.05~0.09	2*3
(mg/L)		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	
	В3	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	
ļ	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
ļ		深層	7.2~7.6	6.6~8.0	7.0~7.6	
ļ		表層	7.0~7.6	6.6~7.9	7.0~7.6	
	В3	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	
ļ	B1	中層		<1~390	<1~96	
ļ		深層	6~86	<1~400	<1~98	
河华州所目		表層	3~36	<1~390	<1~90	
浮遊物質量	B2	中層	_	<1~400	<1~94	20
(mg/L)		深層	5~47	<1~460	<1~84	
ļ		表層	3~35	<1~420	<1~90	1
ļ	В3	中層	_	<1~460	<1~100	
}		深層	5 ~ 49	<1~650	<1~94	

※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1km(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

			 穫		令和 2	 2 年度	
分析項目※1	採水 地点 ^{※2}	平成18年6月 ~平成19年4月	平成19年5月 ~令和2年2月		令和2年		令和3年
	地点 -	掘削土(ズリ) 搬入前	掘削土(ズリ) 搬入後	5 月	8 月	11 月	2 月
	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	A2	<0.002	<0.002~0.003	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
(mg/L)	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
-11	A2	4.6~6.3	3.7~6.9	6.5	6.5	6.5	6.8
рН	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

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

	衣しる		、リ)直场附小調金池の小	ī
			F度 	令和2年度
分析項目**1	採水 地点 ^{※2}	平成18年6月 ~平成19年4月 掘削土(ズリ) 搬入前	平成19年5月 〜令和2年3月 掘削土(ズリ) 搬入後	令和2年4月 ~令和3年3月
	A5	<0.001	<0.001	<0.001
カドミウム (mg/L)	A6	<0.001~0.001	<0.001~0.002	<0.001
(1119/12)	A7	<0.001	<0.001	<0.001
An	A5	<0.005	<0.005	<0.005
鉛 (mg/L)	A6	<0.005	<0.005~0.007	<0.005 ~ 0.005
(11.g/ Ξ /	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
(11.g/ Ξ /	A7	<0.005	<0.005~0.009	<0.005
	A5	<0.002	<0.002~0.002	<0.002
セレン (mg/L)	A6	<0.002	<0.002~0.003	<0.002
(11.g, 1 .	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
(11.g/ Ξ /	A7	<0.1	<0.1~0.3	<0.1
+	A5	0.03~0.25	<0.02~0.44	0.04~0.39
ホウ素 (mg/L)	A6	<0.02~0.09	<0.02~0.43	0.02~0.20
νιι 9 , 1	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
рН	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
1214 TE F	A5	1~20	<1~66	1~62
浮遊物質量 (mg/L)	A6	12~173	<1~500	<1~50
\g/ L/	A7	1~11	<1~270	1~54
15 mile - 1	A5	14.4~30.5	7.2~70	13~45
塩化物イオン (mg/L)	A6	5.1~24.7	1.7~269	3.0~25
\g, _ /	A7	15.6~28.7	8.1~100	14~43

※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。

表 14 浄化槽排水の水質調査結果

		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
	研究管理棟	5.9~7.7	6.0~7.4	50.00
рН	地下施設 現場事務所	6.8~7.9	7.1~7.9	5.8~8.6
生物化学的	研究管理棟	<0.5 ~ 17	1.4~8.9	20
酸素要求量 (mg/L)	地下施設 現場事務所	<0.2~28	0.7~18	20
浮遊物質量	研究管理棟	0.5~10	<1~6	00
(mg/L)	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	8
(mg/L)	地下施設 現場事務所	<0.1~7.8	<0.1~1.0	0
透視度	研究管理棟	30	30	20
(cm)	地下施設 現場事務所	30	30	30
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

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。

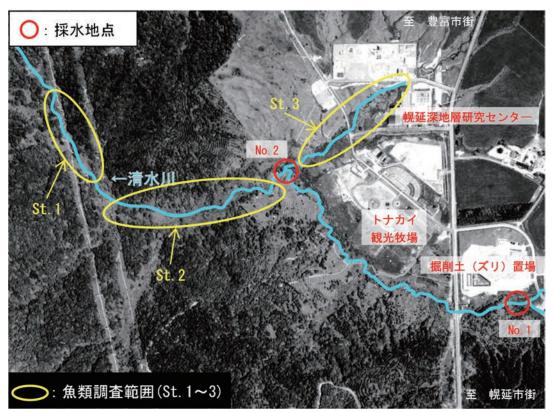


図 113 環境調査実施場所

(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

表 15 清水川の水質調査結果

		過年度		令和 2	2 年度	
分析項目※1	採水地点※2	平成14年8月		令和2年		令和3年
		~令和2年2月	6 月	9月	11 月	2月
nU.	No.1	6.3 ~ 7.9	7.6	7.1	7.1	7.2
pН	No.2	6.4~7.7	7.2	7.0	7.0	7.0
生物化学的 酸素要求量	No.1	<0.5~62	1.5	1.0	0.7	1.0
酸系安水里 (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

※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 $St.1 \sim St.3$ 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)、エゾトミョ、ハナカジカの6種が確認されました。





図 115 生息魚類調査

表 16 確認された重要種 (魚類)

目	科	種			選	定根拠	※ 1		
Ħ	1 ²	↑里	1	2	3	4	5	6	7
ヤツメウナギ	ヤツメウナギ	スナヤツメ北方種			VU		希		
コイ	コイ	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			

※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
- 〇: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、地下水中の炭酸水素イオン (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。炭酸水素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アメリシウム (Am) やキュリウム (Cm) などのマイナーアクチノイドは、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マイナーアクチノイドの挙動の理解をするためには、マイナー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。

幌延地圏環境研究所*56

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、

^{*56:} 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。

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。

産業技術総合研究所*57

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

^{*57:}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。

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) *58

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

モンテリ・プロジェクト*59 (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

^{*58:} 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。

^{*59:} 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。

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。

参考文献

- (1) 中山雅, 雜賀敦 (編): 幌延深地層研究計画 令和 2 年度調査研究計画, JAEA-Review 2022-022, 2020, 34p.
- (2) Kimuro, S., Kirishima, A., Nagao, S., Saito, T., Amano, Y., Miyakawa, K., Akiyama, D. and Sato, N.: Characterization and thermodynamic study of humic acid in deep groundwater at Horonobe, Hokkaido, Japan, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.55, No.5, 2018, pp.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: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, 2021.
- (4) 核燃料サイクル開発機構:わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性ー地層処分研究開発第2次取りまとめー分冊3 地層処分の安全評価,JNC TN1400 99-023, 1999, 526p.
- (5) Schuster, K., Amann, F., Yong, S., Bossart, P. and Connolly, P.: High-resolution mini-seismic methods applied in the Mont Terri rock laboratory (Switzerland), Swiss Journal of Geosciences, 2017, pp.213-231.
- (6) 杉田裕, 青柳和平, 窪田健二, 中田英二, 大山隆弘: 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, 2018, 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: 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), Vol.70, No.4, 2014, pp.412-423.
- (8) 核燃料サイクル開発機構:わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999, 703p.
- (9) 柴田雅博, 笹本広, 神徳敬, 油井三和:緩衝材の長期安定性評価技術の現状 (研究報告), JNC TN8400 2004-010, 2004, 40p.
- (10) 日本原子力研究開発機構: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—, 2013, 239p.
- (11) 日本原子力研究開発機構: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, 2018, 259p.
- (12) Ishii, E.: Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single-borehole investigations, Water Resources Research, Vol.54, 2018, pp.3335-3356.
- (13) 雜賀敦(編): 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, 2020, 122p.
- (14) 中山雅, 雜賀敦 (編): 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, 2021, 116p.
- (15) Ozaki, Y., Ishii, E. and Sugawara, K.: Poroelastic response of fractured mudstone in the Horonobe URL: A possible indicator of fracture hydraulic dysconnectivity, Proceedings of ISRM Specialized Conference CouFrac2020, GS11-04, 2020, 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: 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, 2010, 151p.
- (17) Ishii, E.: A conventional straddle-sliding-packer system as a borehole extensometer: Monitoring shear displacement of a fault during an injection test, Engineering Geology, vol.275, 2020, 105748.
- (18) Ohno, H., Takeda, M. and Ishii, E.: Does fault activation affect the hydraulic disconnectivity of faults in mudstone? Proceedings of ISRM Specialized Conference CouFrac2020, GS11-03, 2020, pp.1-4.
- (19) 原子力発電環境整備機構: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—,NUMO-TR-20-03,2021,803p.
- (20) 水野崇, 岩月輝希, 松崎達二:ボーリング孔を利用した比抵抗検層結果に基づく地下水水質の推定方法に関する検討,応用地質, Vol.58, No.3, 2017, 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: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.5,2006,pp.301-314.
- (22) 酒井利啓, 松岡稔幸: 幌延地域を対象とした地表踏査および地形データにもとづく地質分布の推定, JAEA-Research 2015-004, 2015, 109p.
- (23) 宮川和也: 幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質データ (2020 年度), JAEA-Data/Code 2021-003, 2021, 25p.
- (24) Miyakawa, K., Aoyagi, K., Sasamoto, H., Akaki, T. and Yamamoto, H.: The effect of dissolved gas on rock desaturation in artificial openings in geological formations, The Extended Abstract of the ISRM 2019 Specialized Conference, 2019, 6p.
- (25) Mochizuki, A., Ishii, E., Miyakawa, K. and Sasamoto, H.: Mudstone redox conditions at the Horonobe Underground Research Laboratory, Hokkaido, Japan: Effects of dritf excavation, Engineering Geology, 267, 2020, 105496.
- (26) Pruess, K. and Battistelli, A.: 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, 2002.
- (27) Miyakawa, K., Aoyagi, K., Akaki, T. and Yamamoto, H.: Numerical simulation of oxygen infusion into desaturation resulting from artificial openings in sedimentary formations, 第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演集,2021,pp.609-614.
- (28) Miyakawa, K., Aoyagi, K., Akaki, T. and Yamamoto, H.: A numerical simulation study of the desaturation and oxygen infusion into the sedimentary rock around the tunnel in the Horonobe Underground Research Laboratory, JAEA-Data/Code 2021-002, 2021, 26p.
- (29) 中山雅, 佐野満昭, 真田祐幸, 杉田裕(編): 幌延深地層研究計画 平成 20 年度調査研究成果報告, JAEA-Research 2009-032, 2009, 68p.
- (30) Ueno, A., Tamazawa, S., Tamamura, S., Murakami, T., Kiyama, T., Inomata, H., Amano, Y., Miyakawa, K., Tamaki, H., Naganuma, T. and Kaneko, K.: Desulfovibrio subterraneus sp. nov., a mesophilic sulfate—reducing deltaproteobacterium isolated from a deep siliceous mudstone formation, International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, Vol.71, No.2, 2021, DOI: 10.1099/ijsem.0.004683.

付録 1 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: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, 2020, 83p.
- 青柳和平, 櫻井彰孝, 宮良信勝, 杉田裕: 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, 2020, 68p.
- 檀英恵,本島貴之,木村駿,武田匡樹:粘土系材料が有する EDZ のシーリング機能の検証(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,2020.
- 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: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,2020.
- Fujimoto, S., Tsuchiya, H., Ogawa, S., Iida, Y. and Taniguchi, N.: Stress corrosion cracking of copper in swollen bentonite simulating nuclear waste disposal environment, Materials and Corrosion, 72(1-2), 2021, 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: 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, 2020, 142p.
- Ishii, E.: A conventional straddle-sliding-packer system as a borehole extensometer; Monitoring shear displacement of a fault during an injection test, Engineering Geology, 275, 2020, 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: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,CS12-10,2020.
- 城まゆみ,本島貴之,磯さち恵,白瀬光泰,小林正人,中山雅: 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,2020.
- 鎌田健人, 奈良禎太, 藤井宏和, 趙越, 松井裕哉, 尾崎裕介: 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, 2020.
- 鎌田健人, 奈良禎太, 松井裕哉, 尾崎裕介: 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), 2021, pp.205-209.
- 本本和志、岡野蒼、斎藤隆泰、佐藤忠信、松井裕哉: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)、2020、I_97-I_108.
- 木村駿,武田匡樹,本島貴之,檀英恵: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,2020.
- Kitayama, A., Taniguchi, N. and Mitsui, S.: Electrochemical behavior of carbon steel with bentonite/sand in saline environment, Materials and Corrosion, 72(1-2), 2021, pp.211-217.
- Matsui, H., Yahagi, R., Ishizuka, H. and Toguri, T.: 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, 2020, pp.145-159.
- 三嶌星輝,緒方奨,乾徹,安原英明,岸田潔,青柳和平:損傷モデルによる珪質泥岩を対象とした 坑道掘削解析,第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集(インターネット), 2021, pp.215-220.
- 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: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,2020.

- Miyakawa, K., Aoyagi, K., Akaki, T. and Yamamoto, H.: Numerical simulation of oxygen infusion into desaturation resulting from artificial openings in sedimentary formations, 第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集(インターネット), 2021, pp.609-614.
- 望月陽人: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,553,2021,pp.2-7.
- 望月陽人,小松一弘,笹本広: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,2021.
- 望月陽人, 笹本広, 馬場大哉, 生垣加代子:少量試料に適用可能な簡易分析法に基づく深部地下水中の溶存有機物の特性評価, 陸水学雑誌, 81(2), 2020, 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: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,2020.
- 村岡亜美, 荒戸裕之, 千代延俊, 石井英一: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, 2020.
- 中山雅: 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, 2020, 98p.
- 中山雅, 雜賀敦 (編): 幌延深地層研究計画 令和 2 年度調査研究計画, JAEA-Review 2020-022, 2020, 34p.
- 中山雅, 雜賀敦(編): 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, 2021, 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: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),2020,pp.267-283.
- 野上利信, 星野雅人, 徳永博昭, 堀越秀彦: 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, 2020, 120p.
- Ogawa, Y., Suzuki, S., Taniguchi, N., Kawasaki, M., Suzuki, H. and Takahashi, R.: Corrosion resistance of a cast steel overpack for high-level radioactive waste disposal in Japan, Materials and Corrosion, 72(1-2), 2021, pp.52-66.
- Ohno, H., Takeda, M. and Ishii, E.: Does fault activation affect the hydraulic disconnectivity of faults in mudstone? Proceedings of ISRM Specialized Conference CouFrac2020, GS11-03, 2020, pp.1-4.
- 岡野蒼, 木本和志, 松井裕哉: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),2021,pp.633-636.
- Ozaki, Y., Ishii, E. and Sugawara, K.: Poroelastic response of fractured mudstone in the Horonobe URL: A possible indicator of fracture hydraulic dysconnectivity, Proceedings of ISRM Specialized Conference CouFrac2020, GS11-04, 2020, pp.1-4.
- 仙波毅:「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),2020, pp.186-190.
- 杉田裕, 菊池広人, 星野笑美子: 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, 2021, 39p.
- 杉田裕,武田匡樹,大野宏和,若杉圭一郎,高瀬博康: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,2020.
- 鈴木英明, 高山裕介: 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, 2020, 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: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,2020.
- 武田匡樹,木村駿,本島貴之,檀英恵: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,2020.

- Terashima, M., Endo, T. and Miyakawa, K.: 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), 2020, 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.: Desulfovibrio subterraneus sp. nov., a mesophilic sulfate—reducing deltaproteobacterium isolated from a deep siliceous mudstone formation, International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 71(2), 2021, DOI: 10.1099/ijsem.0.004683.

付録2 稚内層深部での調査研究の実施を踏まえた研究工程

$\overline{}$
∞
\overline{z}
맱
:研究工程
拀
臣
た
iK
#6
が器
1七J ゾヘ
の実施を
卌
咒
臣
香研究
靐
6
(V)
쓾
5 K
言
有人
雅

			小器				Γ	į,mi	7	الا						1		
			既念オブ ・品質確 実施	R10			推翻	デルの脳		出記が		た解					展 5 取得	
			体系化して取り組む課題((2)処分概念オプションの実証のうち人エバリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験)で実施	R9			令和 9 年度までに得られる成果解体調査における (公養衛村で生じる連成現象の把握	○群が用ハフメータの登埋 ○熱 - 水理一力学連成解析モデルの適用性の確認		った場合		令和 5 年度までに得られる成果 〇各国の解析コード間の比較検証を通じた解 ガコードの右効性の確認					令和 9 年度までに得られる成果 〇緩衝材の飽和度の実データの取得	
		後半	課題 (() エバリア る実証討	R8			にに得りする (1) を連成しても	* 一 * 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5		5等があ		る成果 比較検言	<u>ş</u>				でに得らい度の実	
			Xり組む >うちん 部に関す		Rá		令和 9 年度までに 解体調査における 〇緩衝材で生じる の紹子用。 - ・	幕ケヨハフン 熱 − 水理 − ∵ 用在の確認		報の不足		: 得られ、 - ド間の ならな。	# 				年度まず村の飽料	
	_		化して利 の実証の の方法論	R7	適用性確		命和 解体調 ()緩衝	○ O S M M M M M M M M M M M M M M M M M M		中で、情所を実施		5年度までに得られる 国の解析コード間の出 コードの有効性の確認	8				令和 9 〇緩僅	
Toto team	虾乳 期间		体ョな系ンど	R6	モデルの		蝉	ルの過		体系化の中で、情試験、解析を実施		令和 5 年度までに得られる成果 ○各国の解析コード間の比較材 ボコードの右効性の確認	ī =	和度確認			 	
Ī				R5	₽•連成-		いる成果 現象の把	音弾 解析モデ		間の比(, o		所の飽			ルる成果 業の方金 E	
			で実施				に得られる る を連成型	一々の3-1学連成(-				業・緩偅			に得られる解体作法の決定	
		前半	前半の5年程度で実施	R4	熱時の子		令和 4 年度までに得られる成果 減熱過程における 〇緩衝材で生じる連成現象の把握	○群が用ハフメータの登埋 ○熱-水理一力学連成解析モデルの適用性の確認		での解析度化				の解体作			令和4年度までに得られる成果 〇人エバリアの解体作業の方針及び 施工手順・方法の決定	
			部半の	R3	浸潤時・減熱時のデータ取得・連成モデルの適用性確認					ジェクト λ良・高E				ニバリアの				
				R2	(4)-1 浸譜	緩衝材中	(の低)を(は)を(は)を(は)を(は)を(は)を(は)を(は)を(は)を(は)を(は	の国际内を確認を		国際プロジェクトでの解析コード間の比 体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で較検証、改良・高度化 試験、解析を実施	解析モデ	ディタ 作を離れる でいる。	1	④-2 人工バリアの解体作業・緩衝材の飽和度確認		試験施工では、埋	な、女女、女、人。 はんしい はんしい はんしん はんしん はんしん はんしん	れ、人上バリアを
	E/A						60 电值 6	3.6. 篇					ž		クリー	一等の記材料のスタ	で性 サを ソ確 、 が 木 ク i	+ /
	P2 C甲格丘疹				④-1 人工バリア性能確認試験のヒーターの電源を OFF にし、発熱による影響を無くした条件で	の試験に移行し、データを分析・				クト (DECOVALEX (4) - 連成解析については、 解析コード間の DECOVALEX で令和2 年度に設定し 良・高度化 た に	5.、年行1 「同5.733数収明 S作1、間角・上げの格響を開発	ので、Brimとアグラングである。 気相を考慮した熱・水理・力学 連成挙動に関する室内試験については、令和2年度に設定した条	岩	④-2 試験施工では、解体調査を 事施し、緩衝材、模擬オーバーパ	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 サンプ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 を 数	
	# C 24	K			人工バリーターの画との影響を	礼を行し				連成解析 ALEX で合え 所条件を基		に	件下での試験を開始	試験施工。緩衝材	埋め戻し	盤、設置し プリング手	5を一体化ノグする手	
					カ 下 の 型 し し に が に が に よ に に に に に に に に に に に に に に	連の試験	岸			EX (4) -1 の DECOV/ た解札	· () ()	御御り、御田谷の、八田谷の、八田谷の、八田谷の、八田谷の、八田谷の、八田田の、	4	業 40-2 調 新 41-2	ック、	サン、北	境プ認界リ	
	P2 以發色事格内容				④-1 注入する地下水の圧力や量を増加させ緩衝材に地下水を浸潤させた場合のデータ	(浸潤時·減熱時)を取得、連	用性確認			クト (DECOVALEX 解析コード間の 良・高度化				④-2 人工バリアの解体作業 および緩衝材の約和度の確認	を実施する			
	世色绘	K 全			注入する地で増加させ総理ははは	÷ ·減熱時	を 通知 単語			1ジェクト 3ける解析 E、改良・				、エバリア等番材の館	1 P			
	2		4th , 20 ,		黄 (4) 上 江 ら 中 か 上 か 手 を 上 か 手 を 上 子 か 過温	5 (浸潤品	5 成モデルの適 8 n 1 n 4 n 4 n			国際プロジェ 等)における 比較検証、改				4-2 X	を実施す			
(万文科の	課題	(4) 浸潤時・減熱時のデータを含め、ガラス固化体設置に	■数件の加数・A 水時から漫瀬時・	: 減熱時を全て模の数したデータに、基づく熱ー米ーン	- 化学連原	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(解析語)に	(のより) 画語◆										
200	<u>\</u>	dines.		派言を記述、不能が	を減くると、数様で、ない。ない。ない。	9 57-	現高時度は象度のなった。											
	器器	N K	③④ 熱ー水ー応力ー化学連成現力ー化学連成現象(ガラス固化体影響に終ら世離	取画文年の加級年(③)から漫画年(③)から過剰	時・減熱時(4)を 模擬した現象)の 評価手法(モデル	化・解析手法)の												
-					な連 年 記 解 を 数 様 様 を まん は ま ま ま ま ま ま ま ま ま ま ま ま ま ま ま ま ま		学、一整的 海 連 循	体辺埋で血	X F	o れそ b ₹	<u>د</u>							
V 100 A	む・育恵・必要性		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力一化学連成現象した熱ー田水土部署に終め土物群はおい国の土地を実に終め土物群はおいる	当に 作政 自 公平 ひが が が が り 没 潤時・減熱時を模擬した現象) に	関する試験をとおして、設計や連 成挙動評価手法の適用性の確認 (人エバリアの解体調査および	緩衝材の飽和度の確認を含む)	ならびに施工方法などの工学的実現性の例示等を行い、設計、施工および評価・解析といった一連工および評価・解析といった一連の技術に関する基盤情報を整備) これらをとおして、廃棄体埋設後において、廃棄体周辺で コープログロエル・エー	陌しの祝家のA単軒を深め、女全評価にだいと 首語 サート	いる環境条件が達成される いる環境条件が達成される にを確認するともに、その 予測技術を確立することで、 エジョンの歌書に同時す	ヘエハリアの設計に及映9 z							
77 II		意義	質環境下方式を対して学連度	■ 吹牌の 快時を模携	職をとお	飽和度の砂	施工方法 例示等を1 評価・解析 関する基	うをとおしこおいて、	の路米の指用において	職場条件: 無認すると 技術を確立	6 4 6 4							
14.	22 		来際の法化を表して、大型のでは、オージン・	国に予改選手・減	関する試成挙動評(人工バ	緩衝材の	ならびに乗りませた。日および、日および、日かながに	9 6 ・ に がい がい がい がい がい いい に がい いい に がい いい に がい に がい に がい に がい に に に に	· 山山 山山 山山	よいこぞ・	イト	Q						
		3	- H:	- ‡ }		認												

※1本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直していく。※2研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

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

$\widehat{\infty}$
$\langle 5 \rangle$
땦
H
究
出
た
ıΚ
₩
龆
₩
煋
洲
9
弘
配包
調學
の言
つじ
뽕
账
画
尺
推

			体系化して取り組む課題 ((2)処分概念オブションの実証のうち人エバリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験)で実施	R10	情報の不足等があった場 、解析を実施			■ 【本/ 本	解析評価			体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施			光	○有機物・微生物・コロイドの影響を考します。	长温		プロックスケール(数 m~100m 規模)における 体系化の中で、情報の不足等があった場 短びみ総部届手生の数構			X.X 并 / 声 :	
			((2) 処分 Jアの定置 正試験) 7	R9	の不足等析を実施		导られる原	7 (非収) 9 取得	デル化/			精がを実施 解析を実施		-	₽られるE O拡充	וח בל וח בל וח בל ור ה	モナルのま		報の不足等 解析を実施	N N N N	日 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	するようのにずくがある。	メ ヘンアイス 一
		後半	組む課題 ち人エバリ 関する実調	82	で、情報 試験、解		要までに	〇原位置試簸データ(非収者性、 着性トレーサー)の取得	のEDZ におけるモデル化/解析評価	光光		で、情報試験、解			英までに(獅データ(- 徴牛物	慮した物質移行モナルの提示 		で、情報書		% 1 2 1 3 1 4 4 4 4 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	アン・アン・アン・アン・アン・アン・アン・アン・アン・アン・アン・アン・アン・ア	, <100 to
			体系化して取り組む課題((2) 処分概念: ョンの実証のうち人エバリアの定置・品: などの方法論に関する実証試験)で実施	R7	体系化の中で、情報の不足等 合に追加で試験、解析を実施		令和6年度までに得られる成果	の原位置著作と	OEDZ (C	手法の提示		体系化の中で、f 合に追加で試験、		,	令和 6 年度までに得られる成果 ○室内試験データの拡充	〇有機物	慮した		体系化の中で、「今に当古が背際			■ 1440年及までに持ちれるの米米 ○原位置試験データ(非収着性)	
	研究期間		体ョな系ング	R6	雄立							な慮した物							における				
	PG.		掲	R5	評価手法の							の影響を潰 L							00m 規模)				
		前半	前半の 5 年程度で実施	R4	掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立							有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行モデル化手法の高度化							/ (数 m~1:)	出出の			
		- pac	前半の5:	R3	傷領域の粉)、徴生物、モデル化手							ブロックスケール (数 mind state を まま の 数 mind を が を が を が を が を が を が を が を が を が を	HE H-1 III -1-12			
				R2	4 掘削損	막	掘門損湯領域の水	理・物質	を 合い お 中 か 評 値 中	るための	データを 取得	⑤ 有機物 質移行		室内試験 データ	(名 人 名 人 子 人 子 人 子	中の血線をした	メシャ 本語	できる。	(e) プロッ端 は は は は は は は は は は は は は は は は は は は	世典	原位置試驗充準備	戦の年編布業イプ	
•	£	中				E. 0 6 K																	
	D2 6 串推任家	る人ので			④ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価、試験箇所のでは、	がいか年・初具を1.1 報取得を継続						⑤ 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ができます。 エエ・エー	解の継続、予備的な原位直試験 に着手						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	tr of sea	φ 2	田 な と な と な と な か か か か な な な な な な な な な	不移動・			トワーサー試験 描当指令領域を	が所収めていずーク取				(生物、コロイド ⑤ : した物質移行試 核種	の満し										
	7 4 4 4 4 4 4 4 4		を質実徴	₹ 3·	P. D. C.		1 4	4 4				物は											
1			した試験手法を用いて 傷領域での物質移行に データ取得を実施する	に、有版的で関物質を取り込ん	響が限定的でする。また、物の高度化する		なしたトレ田にも指述	移行に関				数が、微生 を考慮した							い目を有する した掘削損傷	ックスケール種)における	法の整備		
•		KZ タヸの米高な中	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リン・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	C 6 5 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	域 する影響が限定的であること 域 を確認する。また、物質移行評 評 価手法の高度化するため以下	を実施	4 確立したトレモネを田にも指述	の物質移行に関するデータ取				⑤ 有機物、織の影響を考慮	物 類 化						·す ⑥ 割れ目を有する堆積岩を 物 対象とした掘削損傷領域を含	※ ひょうしょう **********************************	評価手法の整		
]	R2 以降の B2 I21屋	課題 1/2 公年の天』	確立した試験手法を掘削損傷領域での物質関するデータ取得を実	ひつつ は、 は 窓 な ら 版 放射 性 物質 を 取 り 込ん ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・	④ 掘削損傷領域 する影響が限定的での物質移行の評 を確認する。また、物の物質移行の評 価手法の高度化する エエエ・エエ		④ 確立したトレーギャを囲いた描述	の物質移行に関				⑤ 有機物、徴生物、コロイドの影響・サード・	響を考慮した物 質移行モデル化	手法の高度化					⑤割れ目を有す⑥割れ目を有す⑤生を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目を有す⑥割れ目をす⑥割れ目をす⑥割れ目をす⑥割れ目をす⑥割れ目をす⑥割れ目をす⑥割れ目をす⑥割れ目をす⑥割れ目をす⑥割れ目をす⑥割れ目をす⑥割れ目をす⑥割れ目をす⑥割れ	質移行特性の総合を対理を	の確立 対象が表現の表現を対象を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を		
		講題	質を質量を 動材を 数		④ 掘削損傷領域の物質移行の評価を注めなす。	古典で対十里				描	泥岩中の割れ	⑤ 有機物、徴生物、コロイドの影響・サード・	響を考慮した物 質移行モデル化	どの人為的な 手法の高度化れ日を対象と	木物質移行特 木物質移行特	(20回の参盟)A 6 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	つきわずさ等) 評価手法の検		⑥ 割れ目を有する堆積岩での物	質移行特性の総合を対理を	の確立 対象が表現の表現を対象を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を	割れ目を有す	
	Mag R2 以降の	講題	① 市館基質部 (一種計割)を対象とした物質等が存在(本質を対す)を対けます。	引作ほん物質の物動速度や岩盤へ	のくっつきやす ④ 掘削損傷領域さ等)の評価手法 の物質移行の評の検証 にまぶった	国十分の電子(2) 割れ目を対象	とした物質移行 特性(物質の終計	はは、おうないでき、速度や指盤への	くっつきやすさ等)の評価手法の	<u>د</u> ک	っての の 泥岩中の割れ コナ ユケ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	日 5 2 3 5 C C C C C C C C C C C C C C C C C C	響を考慮した物(4)掘削損傷領域(質移行モデル化	などの人為的な関れ日を対象と	いに活ってお餌移作権ない。まず都的な物質があった。まずをおります。			8行に及 証 ことが重		質移行特性の総合的な証明事業	の確立 対象が表現の表現を対象を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を	⑥ 割れ目を有す	
	Mag R2 以降の		① 市館基質部 (一種計割)を対象とした物質等が存在(本質を対す)を対けます。	引作ほん物質の物動速度や岩盤へ	のくっつきやす ④ 掘削損傷領域さ等)の評価手法 の物質移行の評の検証 にまぶった	国十分の電子(2) 割れ目を対象	とした物質移行 特性(物質の終計	はは、おうないでき、速度や指盤への	くっつきやすさ等)の評価手法の	<u>د</u> ک	anichimy のこの の 泥油中の割れ ・ mix e in n + n ー + 4 e · ・ + 4 e · · +	日 5 2 3 5 C C C C C C C C C C C C C C C C C C	響を考慮した物(4)掘削損傷領域(質移行モデル化	などの人為的な関れ日を対象と	5事例が少ない記事 した物質物で推出を対象でして、「本代を贈りを発展が				⑥ 割れ目を有する堆積岩での物	質移行特性の総合を対理を	の確立 対象が表現の表現を対象を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を	⑤ 割れ目を有す	
	R2 以降の	講題	質を質量を 動材を 数	引作ほん物質の物動速度や岩盤へ	④ 掘削損傷領域の物質移行の評価を注めなす。	古典で対十里	とした物質移行 特性(物質の終計	はは、おうないでき、速度や指盤への	くっつきやすさ等)の評価手法の		サンで終日的1-FF回りのこと ・	日 5 2 3 5 C 7 C 6 日 6 2 5 6 5 6 7 5 7 5 7 5 7 5 7 5 7 5 7 5 7 5	響を考慮した物 質移行モデル化	などの人為的な関れ日を対象と	ない泥岩した。			ロイト等が、物質の移行に及 証ぼす影響を把握することが重	⑥ 割れ目を有する堆積岩での物	質移行特性の総合を対理を	の確立 対象が表現の表現を対象を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を表現を	⑥ 割れ目を有す	

※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。 あった場合に追加で試験や解析を実施する。

$\widehat{\otimes}$
\approx
\mathfrak{S}
뻝
ïì
ו וו
況
臣
اند
7.
11/
#6
恕
까
IT)
Z
胀
8
<u>ک</u> رو
Ŧ
田
皙
需
0
٢
船
K K
国国
뺻
尺.
粬

_						_																				
			oオプショ n質確認な a	R10	あった場合		mv i	平 部本	竟変化				もつに場印			こ関する考	の整理	丑罪	ノーリング	\ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \	かっ た 場 印			(果 7 4 4 4 4 4 4 4	0 1X 111 2	プ ョン ソョン
			2)処分概â の定置・B 簸)で実加	R9	不足等が3 実施		られる成男	実際の地下環境における支保 の経年変化に係るデータ取得	の地質環	歴			イエキがき実施		大果	明性能評価は	r ちえる事务	5重要技術の	.1.7.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.	- ****	↑ 圧 帯 か 3 : 実 括			令和 6 年度までに得られる成果 〇徳無井の始エエギに闘士 2 井然士	. 6 選しば	〇坑道閉鎖に関する技術オプション の実証
		後半	引む課題((エバリアる実証試	R8	で、情報の 険、解析を		までに得	9下環境になれて係る。	・閉鎖後	に関する事家の把握		÷	ご、I言報の4万≓ 険、解析を実施		こ得られる原	ステムの長∮	挙動に影響る	色工に関する	7評価・厄坂ボーリング3	A THE	で、情報の个足等後、解析を実施			度までに%	板画をの施工のプションの実証	鎖に関す
			体系化して取り組む課題 ((2)処分概念オプションの実証のうち人エバリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験)で実施	R7	体系化の中で、情報の不足等があった場合 に追加で試験、解析を実施		今和6年度までに得られる成果	〇実際の地下環境における支保部材 の経年変化に係るデータ取得	○坑道掘削・閉鎖後の地質環境変化	1.			体糸化の中で、情報の个足寺がめつた場合 に追加で試験、解析を実施		令和6年度までに得られる成果	○シーリングシステムの長期性能評価に関する考 ○ 士の乾畑	んガの定性 ○緩衝材の膨潤挙動に影響を与える事象の整理	〇止水プラグの施工に関する重要技術の抽出 OED2 調本井代の語伝、宣年ル	OEDZ 調宜な術の評価・高度に 〇坑道内からのボーリング孔に対するシーリング 抹徐の整備・事計	11日	体糸化の中で、情報の4 足等かめった場合に追加で試験、解析を実施			令和 6 年 (1) 6 年	るを制めて	〇坑道開 の実証
the the BB	奸 光别闾		体 米 と の 実 に ら り と ら 方 に ら か ご	R6	本 口										令和	٥ ٧ با		~ 1	O O							
ţ	每			R5								(1)	(幸)(6 7 11	単め戻しをその構築					
		和	程度で実施	R4	の実証							; ;	カ ボ い く							* 1	と巩迫のJ 質保証体系					
		非信	前半の5年程度で実施	R3	回収技術								(理の)所し							1 世 9 0 0	での繊衝をいて係る品					
			瘟	R2 F	搬送定置・回収技術の実証		お下環境にのロンクリー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	ートの劣化 に関する試	뮸			-17-71-00	闭鎖技術(埋め)戻し方法:ノフグ寺) 0/美証		閉鎖システル 関ポス	基盤情報の	整備を回的ケーケの特	検討、室内	試験、工学 規模試験を	1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 -	人エハリアの緩衝やと玩追の理め戻し村の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築		自然湧水環	境での緩衝材の流出状	電影	
				~	Θ		地の	- L - M - M - M - M - M - M - M - M - M - M	験を開始			(9	H.	閉鎖ン	華	整備ツー	体 、	試験、規模試	実。	9		自然》	基点ななりが	況を確認	
	松	欧			5コンクリ 験、分析を							1 1 1	数医に抱い 基盤情報の	映記、生内 験の継続						Z + BB + Z	三					
	P2 6 甲格丘疹	8米3			① 地下環境におけるコンクリートの劣化に関する試験、分析を継							1	② fl製ンヘナム(埋め床しややく) ラグなど) に関する基盤情報の整件ナロギー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	哺で目的とした時が快討、至内試験およびエ学規模試験の継続						がまる	板質付流田の抑制に関9 の武					
	2	2				影								偏を目的の瞬だれている						6	の無					
	の米層	P/de	3下水の圧力せ、緩衝材にき潤させた状態を上が洗め	11万万(青万八年)カボ等(カボ等)の	き目付の品買 する。また、 (プラグの有	元法による埋	買の座にを	回収技術の調みには	が異なった。上京の大学に対する	一ンの整理、 希慮した概	い回収維する品質評	- - - - -	(埋め床しか)の実証							6 2 4 7 7	の核値なのしなの格用	係る品質保((1)実際の	ナる人エバ	確認のうち、	E)	
1 141	22 交番の	囚	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がない。 十分に水を浸潤させた状態なな ロー・サー・サー・サー・サー・サー・サー・サー・サー・サー・サー・サー・サー・サー	災で軍隊して過去が近に間め、ブロック方式等)の まいこしょうがん せんじき	座いによる綾訇Mの品頁 の違いを把握する。また、 埋め戻し方法(プラグの有	無等)・回収方法による埋み。十十〇日間の事によ	の床したの品 把握する。	① 搬送定置・回収技術の中間 (参楽士 4曲 4目) 井	米罪(後割をなりの決態に応じた	の技術オフションの整理、 回収容易性を考慮した概	令オプション提示、回収維 持の影響に関する品質評	価手法の提示)	る お い の の の の の の の の の の の の の) P = %; H =		方法の違いに 証体系の構築		リアの適用性確認のうち、 人下バリア性能確認計略	サバン 下間をわせて実施)	
					理の 埋ら 関める	無子	80年	⊕ #	₩ G □ 功 :	回 8 号	念井	申 ∈	· 》 形							(がれる。	大 門 女	出		(-7)	
	万本和の	課題	①②③ 操業・回収技術などの技術などの技術などの技術オープションの事話 間盤は係	の実践を																						
		图	① 処分場の操業 業(廃棄体の搬送定置・回収、処ひはの間路を含	に関わる人に関わる人	エハリアの嵌、迷・定置方式などの工学技術の	実現性、人工バニマの同時井然	20回收按师	②個別の要素は金の単純	ン夫証試験	③ 埋め戻し村、 プラグに関する	設計手法、製作・ 施工及び品質管	理手法の確立														
١.	, v		① 業 送 は	- 女 2 個 () () () () () () () () () (、「別様・ごだられる」	たび 実現!	の実証	# # # # #	技利(® プラン	設計: 施工,	理手》														
ji ji	· 5型	撇	廃棄体の掛分場の場の場の対象の対象の対象の対象の対象があっていた。	よべりアのコンドン	であることを事例に、「人工人」	回収技術及	0																			
4	ロ巴・ 河ボ・ 必敢	在 意識	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 船送・守署モキャンの干学は		W技術の美証を目的として、 幌延の地下施設を事例に、原 位置試験を実施し、人エバリ	アの搬送定置・回収技術及び開発は作るで	技術を未開																			
				S 🖫			によって	、温			0] 岩	E #67	٦	٧	ئىر	技	₽K								
	☆ ►	R 4	2.1 7.1	しい。	』 たま	؛ لا	光 噩		試験	,	2.1.1 極繼・回	対がい	等の技法	笔子	₩ m	の実証、	獵	6	温							

※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。った場合に追加で試験や解析を実施する。

「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。 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。

$\widehat{\sim}$
\sim
4
$\overline{}$
때
Н
紀
击
Ţ,
7
₩,
名司
品
<i>1</i> 67
絽
巛
6
紀
击
犁
噩
0
3
恕
脒
蜖
口
#
퐦

			/2		₽N P		₩ ■		~ ™			
			取り組む	R10	梅		技術のを		技術及で侵入現象	囲 マ た	S J	,717
			5条化してで実施	R9	ルでの		設計評価		(対制対策を対策に) を整備の整備	次 二串語		価し見直し
		後半	スり込んで体 5の5年程度	R8	よっトスケ体系化体系化		エバリアの		がた の整備、緩利 を 制対策技術	の問題の		究成果を評
			他の研究課題を取り込んで体系化して取り組む 課題として、後半の5年程度で実施	R7	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		地下施設及び人エバリアの設計評価技術の体系化		多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術及び 処分孔支保技術の整備、緩衝材流出・侵入現象 評価手法及び抑制対策技術の整備	 卒華休設署 (2) 開拓と開宿() 設守 に 3) 面 ア た	情報の整理	※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。
	軒光期间		他の課題	R6	4-1 坑道		(A)-2 胎	(A) A W W W W W W W W W W W W W W W W W W	N	-	※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 ※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。	
ŀ	₽			R5) <u> </u>	/であり、: :各年度の
		41		R4								アジュー/J 度の成果を
		非偏	I									定するスク て、各年D
				R3								段階で想え管理として
			10	R2								資料は現 究の進捗
	P2 C甲特丘疹	中で見来る。	後半の 5 年程度で実施する ため、R3 は実施しない									※1 ※ ※
	KZ 辺南の米島	内容	人工バリアの品質を踏まえて、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃	棄体の設置方法 (間隔など) を 確認するため以下を実施	①-1 坑道スケール~ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化		④-2 先行ボーリングによる 地質環境特性調査ならびに工 学的対策技術を考慮した、地 下施設及び人工バリアの設計 評価技術の体系化		④-3 多連接坑道を寿慮した 湧水抑制対策技術及び処分孔 妥保技術の整備、緩衝材流出・ 侵入現象評価手法及び抑制対 策技術の整備	②-4 麔童体詩書の判断や間	隔の設定に必要となる情報の 整理	_
92 11 00	万文和の		④ 廃棄体の設置 方法等の実証試 験を通じた、坑道	スケール~ピットスケールだの	調査・設計・評価技術の体系化							
	器器	型		場の閉鎖を含む)に関わる人エバ	リアの搬送・定置 方式などの工学 技術の実現性、人 エバリアの回収 技術の実証	② 個別の要素技術の実証試験 ※ コニーニュ	● 埋め床しや、 プラグに関する 設計手法、製作・ 施工及び品質管理手法の確立					
# # # # # # # # # # # # # # # # # # #	田配・河ボ・分取			送・定置方式などの工学技術 の実現性、人工バリアの回収	技術の実証を目的として、幌 延の地下施設を事例に、原位 置試験を実施し、人エバリア の搬送だ置・回収技術及び閉 鎖技術を実証する							
	\$	R 4	2.1 人エバ	1		に関策験を調査	で 2.1.2 が ゴード カード	・~ ト ピス	一の設価の記事・ を計算を は、対象を表			

- 129 -

_
$\hat{\infty}$
\sim
\Box
맱
Н
絽
黑
力
+
ıΚ
116
治
긆
147 140
焻
巛
6
鋁
馬
温
置
遍
6
٣
뽔
跃
ま に に に に に に に に に に に に に
靊
伾
雅

		オプシ質確認	R10	った場	٦	- - -	話	7	った場		Г		#	った場	西田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田	
		3概念7 置・品質で実施	Œ	手があっ		改制 の間を	能確認		手があっ		以無	アントライン	※ 	手があっ	成果 5上限	
		(2) 処分 アの定 試験) -	R9	情報の不足等 解析を実施		いれるア	アプー		青報の不足等 解析を実施		られる	際に二	9 9 9 1 9	情報の不足等 解析を実施	られる 1おける 示	
	後半	課題 (エバリ7 5実証記	œ	情報の解析		でに争ぶるという	人口バー	K	情報 Ø. 解析		でに得	なった。	第	情報の解析	ト に ((((((((((((((((((
		り組むっちんこ	82	中で、で試験		丰度ま- 第 (100)	条件下での人工バリア性能確認試験データの14		中で、で試験			O100°C超になった際にニアフィニットが、よいでは、	ルトにおいて発生する現象の登埋	中で、で試験	令和 6 年度までに得られる成果 〇ニアフィールドにおける上限温度 設定の考え方の提示	
		体系化して取り組む課題((2)処分概念オプションの実証のうち人エバリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験)で実施	R7	体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施		令和 6 年度までに得られる成果 〇高温度 (100°C以 F) などの限界	*************************************	K	体系化の中で、fi 合に追加で試験、		令和 6	0100%	7 7	体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施	今和 6 〇二プ 設定	
研究期間		春巻 ョンの などの	R6	験の体					おい 4							
卑別			~	限界的条件下での人エバリア性能確認試験の 解析・検討					100°C超になった際にニアフィールドにおい 体系化の中で、情報の不足等があった場で発生する現象の整理 合に追加で試験、解析を実施					ニアフィールドにおける上限温度設定の考え 方を提示		
		娼	R5	リア性					774-					上限温息		
	ᅫ	程度で実	R4	人エバ					際に二二					おける		
	前半	前半の5年程度で実施		- 下での 					なった 現象の	Н				-ルドに		
		計量(R3	限界的条件 解析·検討					100°C超になった際に. て発生する現象の整理					ニアフィー 方を提示		
			R2	①-1 限	新外での	海イ での でいま かいまい かいまい はいまい はいまい はいまい はいまい はいまい はい	誤験条件、大学など	+	①-2 100 τ≸	シナレオ	の検討に	a 七、小 分移動、	物質移動特性)		海外での原位置試験の情報(試験条件、手法等)を手法等)を	入手
					州	2 医金	¥ (ii) 1	+ ~				中分	を称	 ①-3 ニアフィールドにお ①-3 海外の原位置試験に関する情 ①-3 ける上限温度設定の考え 轍取得の継続 方を提示 「国際プロジェク 上権和を旧律」 タルナス 	海原験⑤手	\prec
-{	体工			状態にお 軽づく調 析手法の					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 ドャの勢- 水-広カーが学に係る連形	現象に関する試験・解析およびシナリオ検討事例の調査、わが国の処分	概念や設計オプションを想定した シナリオの整理			験に関す		
\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \	55 の米筒54		①-1 100°C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						超えた、特性やご	試験・解り調査、	プ重ション			5 位置試		
6	5 3 3			100°Cを Fの調査 データ項	化の計画の策定				100°Cを7の基本を2000であります。	関する調料	概念や設計オン シナリオの整理			海外の原 の継続		
		O .U.4	1 Ful/						になった際 ①-2 100℃を超えた状態での人工 ド 〈人エバリ バリアの基本特性やニアコイール当般の語は) ドアの勢-米-ボル-ザ学F なる道形		頼がかい			S (1)−3 E 報取得	3	
の実施		人エバリアシステムの !全裕度の検証に向けて、 !衝材が 100 ^c 超になった 能を相定! た 軽	以下各個)°C以上#+#	認試験				になった際に ド(人工バリ 半般の領域)	る現象の				ルドになるの地ででいます。ロジェンドの名が、ロジェンドン・ストン・ストン・ストン・ストン・ストン・ストン・ストン・ストン・ストン・スト	H H	
と	松	リアシンの を 100°c 指 100°c 指	るため	間所 (100 8.8%)	了性能確				C超にな -ルド(ヨゴ岩の	発作す				70イー温度設(国際プ	χ ∰ Κ ΄΄ ()	
R2 以爾		人エバリアシステムの安全裕度の検証に向けて、緩衝材が 100°C超になった。	へぶ c ふた C C F F U T A を開発するため以下を実	施 ①-1 高温度(100°C以上) たどの暗野ぬ条件下がの	スエバリア性能確認試験				①-2 100°C超 ニアフィール アンキの国辺	ゲーンが通行車が受払 において発生する現象の 整理				①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示(国際プロジョンを表表をはない。	に 間報でなが 現象を整理 (1) 後を整理 (1) を表現 (1) を表	
6	Lense's.			10°C 配表 大学 で 発料 を 手 (ゴーナ)					<u> </u>	P)el ·				0 - K -	H41	
R2 以降の	課題	① 高温度(100°C以上)などの限界的条件下での人工が17を発送	お試験による緩	衝材が 100℃超 になった状態を 想定した解析手 注9闘祭												
~		高速アトロックの	1 多 1 表 1 記 1	解析 を	Í											
H.	世	① 100°C超の高① 高温度(100°C 温での限界環境以上)などの限界が人工バリアに的条件下での人方って多数率と下に、「下件体体を対している。	サインが自己工限温度設定の考	え方の整備、解析的な検討												
			るる。図の記述		一型	え人	₩Y ₩									
目的・背景・必要	-MIRK	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 まなれた場合を表現し、種々の必分概念オープションの工学的実現性を実証	の、グーボ・などのは、ベルト・バン・ストライン・ストライン・ストラー・ステー・ステー・エー・ステー・エー・ステー・エー・ステー・エー・ステー・エー・ステー・エー・ステー・エー・ステー・ステー・ステー・ステー・ステー・ステー・ステー・ステー・ステー・ステ	支援する技術オブションを提供する する 実際の処分事業では、オーバーパッカが100℃にエーホっナか	ルンプル 100 000 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	定外の要因によって100°Cを超えた状態になることを想定して、人	安 全 名									
完	性・意識	・設置環 、種々の ・学的実 普唱音を	はなれる。	オレンド語楽事	が基本で	よって」	テムの									
恶	型	T バリアを帯慮しョンのコルのコ	な処分増	する技術部の例の方式を表現る方式を対していません。	すること	の要因に 態になる	レマンン									
				小眼を 支す。 浜の実				# 48K								
Ė	XI K	2.2 高温度	に は さ な た は た は た	記して記りの関係の関係を関係を関する	年下で	S S A T C S C T C C C C C C C C C C C C C C C	スプト	対は								

※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。

$\widehat{\cong}$
%
\odot
工權
H
詺
こ研
71
7
#
認
쒸
石
実施。
花の河
开设
1
龗
器
0
2
弬
層深語
靊
内
퐦

目的・背景・必要性・	商業	 ・ 岩盤中には大小様々な断層が存 ①地殻変動に対在するが、小規模なもののいくする推構岩の緩在するがもの場に取り込まざるを簡能力を表現すつつがは必場に取り込まざるを簡能力を表現す コート コート コート コート コート コート コート コート コート コート			るかを検討しておく必要がある によるパラメー・ 斯爾の涤水性は新屬の恋形構式 タの有効性の格		形が起こると断層の透水性は有 寛に上昇しやすいが、延性的な		くい。生じる変形が肺性的か延 検証・ 性的かは、変形時の岩石強度、応	カなどに依存する	・ 全町光 こは、地阪変割に刈りの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、かつく ・ ・・ アング (空間的な分布図を示	・ カーノン (王間の)のカード回を分していた。 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	よっなパラメータと断層の透水		ことかできれる地が場別類後の上 斯届の添水性「ついて相害的な		に 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 ナギ艦ノー・ドード	カか働くことにより、一足の値 ・ を超えない。 この現象を定量的							
R2 以降の R2 以降の	課題内容	4 ② 地級変動が 断層の幅が数十 cm の断象 地層の過水性に 層における地震動や坑道 ド 中える影響の指側に伴う、艶れ目における またる かいしょく きんしょう	1	(目の治療		②-1 地殼3	水柱に与える影響の把握(ボーコング4を用いた)	水圧擾乱試験)				1 2 2 6	②-2 DI (タンナイリナイ・ン・イン・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	- ノノノノス: 石頭になる 日間になる 中地 ない ター おい りょう はん	割った値)を用	評価の信頼性向上・隆起侵令の影響を行った。	度の影響評価手法の整備					E C	②5.3 水圧援乱試験による断層の活動性評価手法の							
降の実施	なの実施である。	数十cmの断震動や坑道 側か目におけ	積岩の緩衝能力	質問刀)を実訓引 ②-1~3 より大型の断層を対象と以下の検討や試 1 たかに値引討除禁門の部状		カが地層の透 ②-1~3 雑内層中の断層/割か目		が発売	9.1.2.8 用杯色排出	②□○3 欧仔の至内武毅和来で小 圧擾乱試験結果を用いた既存の DI	モデルの再検証	1	ナインナイ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	引張強度で	を用いた透水性	句上・隆起侵によった。	手法の整備					- 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1	L試験による 評価手法の							
4	华 一			「層を対象と ②-1 の影片	10.15#42J	4	する検討の の断	恢	たり はまる 乱割	tong tong tong tong tong tong tong tong	デ か か	取领	7-(2)				大 型	型 L			を追加	(F-(2)		74	8 8 8 8 8	然	たオ	11年	K
		の非温	R2 R3		歴	り大型	の断層を	でいる。	た水圧 乱試験を	実施し、	- 女 内			取の影響評		割れ目の	水理的連	箱性の領げる	類 区分 に	遷移領域	<u> </u>			単語の	より大型	の断層を	対象とし	く圧擾	扎試験を 事格 I	,) E
	前半	前半の 5 年程度で実施	R4 R	地殻変動が地層の透水性に与える影響の把								**************************************	透水性評価の信頼モディの特殊	良の影響評価手法の整備								1	颞による断層のに							
研究期間		体=な条ンど	R5 R6	ラえる影響の把									年 上• 蜂起慢										古凱性評価手法							
	後半	体系化して取り組む課題((2)処分概念オプションの実証のうち人エバリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験)で実施	R7 R8		台に追加で試験、解析を実施		令和6年度までに得られる成果	〇ホーリングれを用いた水圧撥む武 臨データの取得	N VICE A VICE			# H H H H H H H H H H H H H H H H H H H	DIを用いた必水住評価の信頼性同上・降起慢 体糸化の中で、情報の不足等かめった場へで実証によいで執用	台に追加で試験、解析を実施		今むら午年十九一治	予和 0 年及までに待られる政米 〇D1 女田 7 本家が特護併手注の中	ODI AED NIMA A	2			1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	水上優乱試験による断層の活動性評価手法、体糸化の中で、情報の不足等かあった場で数は			会和6年度までに得られる成果	〇水圧擾乱試験による断層の活動性	評価手法の整備		
		(2) 処分概念オブアの定置・品質確試験) で実施	R9 R10	り不足等があった	Lを実施		られる成果	いた水上撥乱試				+ *** ± ***	0 个圧帯かめした1	Tを実施		出出される。	まったの以来 ギョダー エン・コング かいしょう かいしょう かいしょう かいしょう かいしょう かいしょう かいしょう しょう しょう しょう しょう しょう しょう しょう しょう しょう	# 計画十次の高度					i戦の个足寺かあった! 恕おえ宝姑	一次米旭		いれる成果	よる断層の活動性			

※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 坑道スケーループ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 坑道スケーループ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。

- 131 -

$\widehat{\otimes}$
\approx
$\overline{}$
掘
Ĥ
<u>ک</u> ر
翌
臣
た
え
116
Ϋ́Ш
<i>1</i> 67
掟
実施?
8
災
芫
户
枰
膃
8
(L)
部1
加
災
靊
内
番
11

※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 (12.1.2 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1) 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。

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

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

			体系化して取り組む課題((2)処分概念オプションの実証のうち人エバリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験)で実施	R9 R10	体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で 試験、解析を実施	一	坑道埋め戻し後の EDZ の透水性を 体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で 予測するモデルの構築 記録 解析を実施 う 合和4年度までに得られる成果 の いう でが道埋め戻し後の EDZ の透水性を 予測するモデルの構築
		後半)組む課題 ;ち人エバ! :関する実証	R8	の不足等が	令和 4 年度までに得られる成果 ODI を用いた EDZ の透水性を予測す る既存モデルの再検証	s系化の中で、情報の不足等があった 職が、解析を実施 令和4年度までに得られる成果 ○坑道理め戻し後の EDZ の透水性を 予測するモデルの構築
			s化して取り の実証のラ の方法論に	R7	体系化の中で、情報 試験、解析を実施	和 4 年度までに得られ 01 を用いた EDZ の透水 る既存モブルの再検証	strの中で、情報の不及 、解析を実施 和 4 年度までに得られ 坑道埋め戻し後の EDZ 予測するモデルの構築
	研究期間		体ョな系ンと	R6		- 合和 4 4 4 6 0 0 1 を 8 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	を 体系化の 試験、解 今和 44 の 5 地道は 予判。
			》 漢施	R5	〈性を予測♪		の 透水性 3
		非偏	前半の5年程度で実施	R4	DI を用いた EDZ の透水性を予測する既存モデルの再検証		が道理め戻し後の EDZ 予測するモデルの構築 が の の で で に に に
			事 生の	R3	DI を用いたる既存モデ	際づの開をじ	がは 一般 で の 開 を し と を を と を と を と と と と と と と と と と と
				R2	©-1	試にき割りませた。 料理、たけにとれ、 でDZ と状量 観報、 の目況的 察での関をに	御事ににほぶが
(8/8)	别————————————————————————————————————	中で見来らら			② 人エバリアの緩衝材や ② D1 を用いた EDZ の透水性を予測 坑道埋め戻し材が掘削損傷 する既存モデルの再検証 領域(EDZ)の力学的・水理学		原し後の EDZ の ② 坑道埋め戻し後の EDZ の透水性 ②-2予測するモデル を推定するモデルの構築 試料 に 基金・ET という はい
踏まえた研究	R2 以降の実施	区	② 地級変動によ 人工バリアのひび割れに対る人工バリアの する自己治癒能力を実証する人工バリアの する自己治癒能力を実証する人のが道理 るため以下の机上検討を実 ギョ・サル 中部 地	- n	② 人工バリアの緩衝材や 坑道埋め戻し材が掘削損傷 領域(EDZ)の力学的・水理学	的な緩衝能力(自己治癒能力)に与える影響を把握する解析手採の開発 る解析手状の開発 とりを用いた EDZ の透水性 さ予剤する既存モデルの 再検証	
)実施を	R2 以降の	課題	① 人工バリアの② 地殻変動によ緩衝材や坑道のる人工バリアの埋め戻し材によ緩衝材や坑道埋埋を見せばによ緩衝材や坑道埋きで高いるのです。	の の 個 引 長 勝 原 域 の 妖 しん り 猫 引 過 リ (EDZ)のひ び割 損傷領域 (EDZ) へ	8 の目に治瀬能力 の実証 の実証		
査研究の	福	1470	① 人工バリアの緩衝材や坑道の埋め戻し材による指数店を結び	の語言 質 圏 短 後 (EDZ) のひび割	れの自己治憲語 力を評価する手 法の確立	② 人工バリアの 自己治癒能力(ひ び割れの修復)を 実証	
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)	目的・背景・必要	件· 意義	地震・断層活動等の地殻変動に対する推積岩の力学的・水理学的な緩衝能力(自己治癒能力)を定量的にな話、は軽さいはには、	即に候組し、堆積有地域にありる立地選定や処分場の設計を、より	科字的・台埋的に行える技術と知見を整備する		
稚内	1	R 4	3.2 日本	変に関す		エリヘ影回挙試等 響験 験	

- 133 -

This is a blank page.