

表 13 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果

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

※1：主な分析項目を抜粋

※2：採水地点は図 133 参照

(5) 清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の水質調査結果

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

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



図 135 清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水地点



(a) 清水川での採水状況



(b) 雨水調整池での採水状況

図 136 清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水状況

令和3年5月11日の実施状況

表 14 清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の水質調査結果

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

※1：主な分析項目を抜粋

※2：採水地点は図 135 参照

(6) 浄化槽排水の水質調査結果

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

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

表 15 浄化槽排水の水質調査結果

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

9.2 研究所用地周辺の環境影響調査結果

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

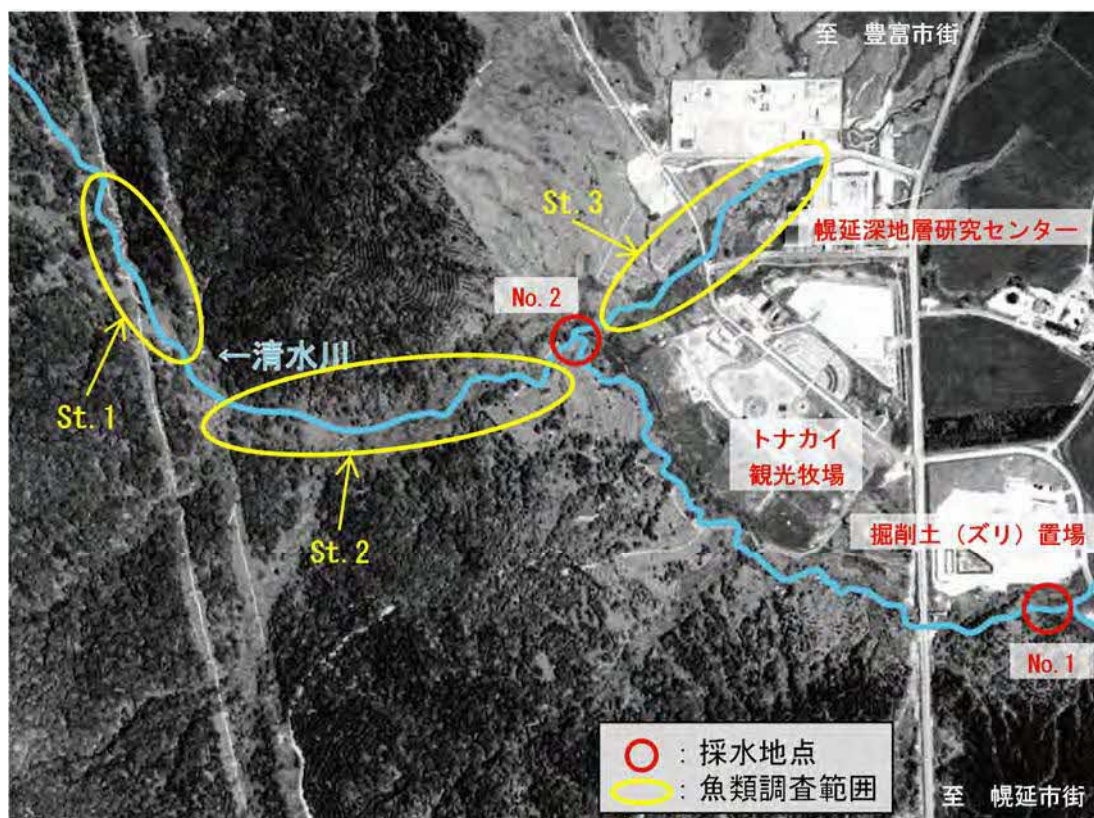


図 137 環境調査実施場所

(1) 清水川の水質調査結果

清水川の 2 地点において、定期的（原則 4 回/年）に採水を行い（図 138）、水質調査を実施しています。本調査は、清水川および掘削土(ズリ)置場雨水調整池の水質調査結果と別に、「水質汚濁に係る環境基準」に準拠して実施しているものです。

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



(a) 採水状況 (No. 1)



(b) 流量観測状況 (No. 2)

図 138 清水川の水質調査
令和 3 年 6 月 1 日の実施状況

表 16 清水川の水質調査結果

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

※1：主な分析項目のみを抜粋

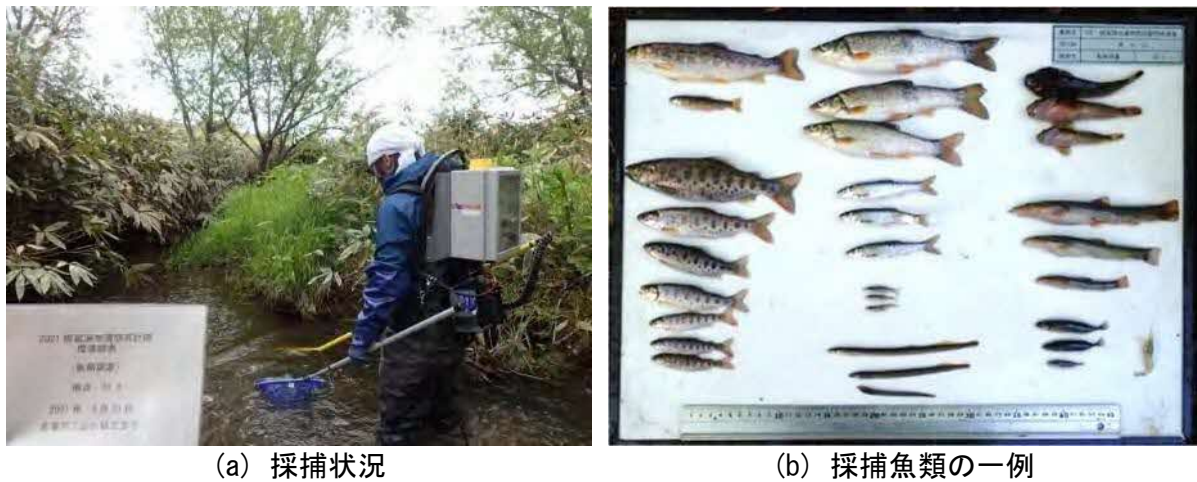
※2：採水地点は図 137 参照

(2) 魚類の調査結果

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

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

エゾトミヨ、ハナカジカの7種が確認されました。



(a) 採捕状況

(b) 採捕魚類の一例

図 139 生息魚類調査
令和3年5月31日の実施状況

表 17 確認された重要種（魚類）

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

※1：重要種の選定根拠

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

なお、③については、レッドリストの更新に伴い出典が変更となっている。

10. 安全確保の取り組み

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

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

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



図 140 安全パトロールの状況
令和4年2月10日の実施状況



図 141 安全行事（安全大会：令和3年7月1日）の状況

11. 開かれた研究

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

11.1 国内機関との研究協力

東京大学

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

東海大学

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

*82：水中に浮遊して溶解しない物質の総称です。浮遊物質とも呼ばれます。

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

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

東京工業大学、サンコーコンサルタント

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

名古屋大学

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

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

*84：岩盤中の亀裂が、2枚の平行な板で構成されると仮定したモデルです。

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

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

京都大学、東北大学

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

*85 : ランタノイドは、原子番号 57 のランタン (La) から 71 のルテチウム (Lu) までの 15 元素の総称です。

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

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

京都大学

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

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

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

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

幌延地圏環境研究所

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

産業技術総合研究所

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

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

電力中央研究所

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

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

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

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

原子力規制庁（原子力機構 安全研究センターとの共同研究への協力）

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

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

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

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

株式会社安藤・間

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

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

株式会社大林組

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

11.2 国外機関との研究協力

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

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

モンテリ・プロジェクト^{*88} (スイス)

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

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

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

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

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

クレイクラブ (Clay Club) ^{*90}

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

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

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

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

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

参考資料

令和2年度以降の研究工程

1.1 人工バリア性能確認試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R4の実施内容	研究期間														
					前半					後半									
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10						
<p>実際の地質環境下における処分孔設置方式を対象とした熱-水-応力-化学連成現象（ガラス固化体設置以降の加熱時から浸潤時・減熱時を模擬した現象）に関する試験をとおして、設計や連成挙動評価手法の適用性の確認（人工バリアの解体調査および緩衝材の飽和度の確認を含む）、ならびに施工方法などの工学的実現性の例示等を行い、設計、施工および評価・解析といった一連の技術に関する基盤情報を整備する</p> <p>これらをとおして、廃棄体埋設後において、廃棄体周辺で起こる現象の理解を深め、安全評価において前提としている環境条件が達成されること確認するとともに、その予測技術を確立することで、人工バリアの設計に反映する</p>	<p>③④ 熱-水-応力-化学連成現象（ガラス固化体設置以降の加熱時(③)から浸潤時・減熱時(④)を模擬した現象)の評価手法(モデル化・解析手法)の確立</p>	<p>④浸潤時・減熱時のデータを含め、ガラス固化体設置以降の加熱・注水時から浸潤時・減熱時を全て模擬したデータに基づく熱-水-応力-化学連成現象のモデルの高度化、及び浸潤時の実際の飽和度などの確認(解体調査による)</p>	<p>④-1 注入する地下水の圧力や量を増加させ緩衝材に地下水を浸潤させた場合のデータ(浸潤時・減熱時)を取得、連成モデルの適用性確認</p>	<p>④-1 人工バリア性能確認試験において、廃棄体の発熱がおさまった状態を模擬した条件下での試験を継続し、データを分析・評価</p>	<p>前半の5年程度で実施</p> <p>体系化して取り組む課題（(2)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施</p>														
					<p>④-1 浸潤時・減熱時のデータ取得・連成モデルの適用性確認</p>														
					<p>緩衝材中発熱がおの温度のさまたげ、低下や緩衝材内側試験に移の間隙圧中の間隙圧の低下を確認</p>					<p>令和4年度までに得られる成果 減熱過程における ○緩衝材で生じる連成現象の把握 ○解析用パラメータの整理 ○熱-水理-力学連成解析モデルの適用性の確認</p>					<p>令和9年度までに得られる成果 解体調査における ○緩衝材で生じる連成現象の把握 ○解析用パラメータの整理 ○熱-水理-力学連成解析モデルの適用性の確認</p>				
					<p>国際プロジェクト（DECOVALEX等）における解析コード間の比較検証、改良・高度化</p>					<p>④-1 国際共同研究 DECOVALEXによる連成解析コード間の比較検証の継続</p>					<p>国際プロジェクトでの解析コード間の比較検証、改良・高度化</p> <p>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</p>				
<p>解析モデルや解析条件を設定</p>										<p>各解析コードによる解析結果の違いを把握</p>					<p>令和5年度までに得られる成果 ○各国の解析コード間の比較検証を通じた解析コードの有効性の確認</p>				
<p>④-2 人工バリアの解体作業および緩衝材の飽和度の確認を実施する</p>			<p>④-2 試験施工の解体調査結果を整理し、解体調査計画に反映するための手法などの取りまとめ</p>		<p>④-2 人工バリアの解体作業、緩衝材の飽和度の確認</p>														
<p>試験施工では、埋め戻し材、ブラグ、試験孔、人工バリアを設置、注水開始</p>					<p>試験施工の解体を行い、緩衝材の解体方法や模擬オーバーバックの取り出し手法を確認</p>					<p>令和4年度までに得られる成果 ○人工バリアの解体作業の方針及び施工手順・方法の決定</p>					<p>令和9年度までに得られる成果 ○人工バリア周辺における連成現象の実データの取得</p>				
<p>※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。</p>										<p>個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「2.1.2 坑道スケール～ビットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」）に統合して実施する。</p>									
<p>※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。</p>										<p>「2.1.2 坑道スケール～ビットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。</p>									

2.1 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験

2.1.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R4の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
<p>・処分場の操業（廃棄体の搬送定置・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証を目的として、幌延の地下施設を事例に、原位置試験を実施し、人工バリアの搬送定置・回収技術及び閉鎖技術を実証する</p> <p>① 処分場の操業（廃棄体の搬送定置・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証</p> <p>② 個別の要素技術の実証試験</p> <p>③ 埋め戻し材、プラグに関する設計手法、製作・施工及び品質管理手法の確立</p>	<p>① 処分場の操業（廃棄体の搬送定置・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証</p> <p>② 個別の要素技術の実証試験</p> <p>③ 埋め戻し材、プラグに関する設計手法、製作・施工及び品質管理手法の確立</p>	<p>①②③ 操業・回収技術などの技術オプションの実証、閉鎖技術の実証</p>	<p>注入する地下水の圧力や量を増加させ、緩衝材に十分に水を浸潤させた状態を確保して施工方法（締め、ブロック方式等）の違いによる緩衝材の品質の違いを把握する。また、埋め戻し方法（プラグの有無等）・回収方法による埋め戻し材の品質の違いを把握する。</p> <p>① 搬送定置・回収技術の実証（緩衝材や埋め戻し材の状態に応じた除去技術の技術オプションの整理、回収容易性を考慮した概念オプション提示、回収維持の影響に関する品質評価手法の提示）</p> <p>② 閉鎖技術（埋め戻し方法：プラグ等）の実証</p>	<p>① 地下環境におけるコンクリートの劣化に関する試験、分析の継続</p> <p>② 閉鎖システム（埋め戻し材やプラグなど）に関する基盤情報の整備を目的とした解析検討、室内試験および原位置試験の継続</p> <p>③ 緩衝材の施工方法に応じた緩衝材の流出量を把握するための試験の継続</p>	前半の5年程度で実施					体系化して取り組む課題（(2)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施				
					① 搬送定置・回収技術の実証					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					地下環境で乾燥および湿潤条件下のコンクリートの劣化に関する試験を開始					令和6年度までに得られる成果 ○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に関する事象の把握				
閉鎖システムに関する基盤情報の整備を目的とした解析検討、室内試験、工学規模試験を実施					② 閉鎖技術（埋め戻し方法：プラグ等）の実証					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
閉鎖システムに関する基盤情報の整備を目的とした解析検討、室内試験、工学規模試験を実施					閉鎖システムに関する基盤情報の整備を目的とした解析検討、室内試験、工学規模試験を実施					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え方の整理 ○緩衝材の膨潤挙動に影響を与える事象の整理 ○止水プラグの施工に関する重要技術の抽出 ○EDZ調査技術の評価・高度化 ○坑道内からのボーリング孔に対するシーリング技術の整備・実証				
自然湧水環境での緩衝材の流出状況を確認					③ 人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
流水量による影響に着目した緩衝材の流出試験を実施					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					令和6年度までに得られる成果 ○緩衝材の施工方法に関する技術オプションの実証 ○坑道閉鎖に関する技術オプションの実証				

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

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

2.1 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験

2.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化

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

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

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

2.2 高温(100℃超)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験

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

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

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

3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R4の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
<ul style="list-style-type: none"> 岩盤中には大小様々な断層が存在するが、小規模なものいくつかは処分場に取り込まざるを得ない可能性がある。それらの断層が地震や隆起などの地殻変動の影響を受けた場合に、その透水性がどの程度まで上昇し得るかを検討しておく必要がある。 断層の透水性は断層の変形様式に大きく依存する。脆性的な変形が起こると断層の透水性は有意に上昇しやすいが、延性的な変形の場合は透水性が上昇しにくい。生じる変形が脆性的か延性的かは、変形時の岩石強度、応力などに依存する。 本研究では、地殻変動に対する緩衝能力が潜在的に高いことから堆積岩に重点を置き、断層の変形様式を支配する岩石の強度・応力状態を計測でき、かつマッピング（空間的な分布図を示すこと）が可能なパラメータで指標化することを試みる。そのようなパラメータと断層の透水性の潜在的な上限を関係付けることができれば処分場閉鎖後の断層の透水性について現実的な状態設定が可能となる。 断層は動いたとしても、その透水性は、地層の力学的な緩衝能力が働くことにより、一定の値を超えない。この現象を定量的に示したい。 	①地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力を表現するパラメータ（指標）の提案 ②水圧擾乱試験によるパラメータの有効性の検証	② 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握	断層の幅が数十 cm の断層における地震動や坑道掘削に伴う、割れ目における地下水の流れの変化に関して、堆積岩の緩衝能力（自己治癒能力）を実証するために、以下の検討や試験を実施する ②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握（ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験） ②-2 DI（ダクティリティインデックス・岩盤にかかる平均応力を引張強度で割った値）を用いた透水性評価の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1～3 既往の水圧擾乱試験の結果の解析 ②-1～3 DI と断層/割れ目の水理学的連結性の関係に関する解析	前半の5年程度で実施									
					②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握					体系化して取り組む課題（(2)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施				
					②-2 DI を用いた透水性評価の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					割れ目の水圧擾乱水理学的試験やシミュレーションの領域区分に遷移領域を追加					令和6年度までに得られる成果 ○ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験データの取得				
					②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					より大型断層の活動性評価対象として係る既往水圧擾乱試験を実施し、データを取得					令和6年度までに得られる成果 ○水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備				

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

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

3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

3.1.2 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化

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

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

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

3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

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

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

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

参考文献

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

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

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

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

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

イールドシステム評価確証技術開発 報告書, 2022.

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

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

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

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

付録

(令和3年度外部発表)

著者アルファベット順に記載

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Annual Meeting (Internet), 2021.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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