幌延深地層研究計画 平成28年度調査研究成果報告

平成29年7月

(平成29年8月 修正版) 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター

本資料に関するお問い合わせは、下記へお願いいたします。 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 幌延深地層研究センター 総務・共生課 〒098-3224 北海道天塩郡幌延町字北進432番地2 TEL:01632-5-2022 FAX:01632-5-2033

目 次

1.	はじめに	. 1
2.	平成28年度の主な調査研究の成果	. 3
3.	地層科学研究	. 8
3. 3. 3.	1 地質環境調査技術開発 2 深地層における工学的技術の基礎の開発	. 8 46 55
4.	地層処分研究開発	66
4. 4.	1 処分技術の信頼性向上 2 安全評価手法の高度化	66 82
5.	地下施設の維持管理	90
5. 5. 5.	1 地下施設の維持管理 2 掘削土(ズリ)の管理	90 91 92
6.	環境モニタリング	93
6. 6.	1 排水量および水質調査結果	93 105
7.	安全確保の取組み	108
8.	開かれた研究	109
8. 8.	1 国内機関との研究協力 2 国外機関との研究協力	109 116
引月	用文献 ·····	118
参表	考資料	121

図目次

义	1	幌延深地層研究計画の全体スケジュール・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
义	2	平成 28 年度の主な調査研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
义	3	研究所用地における主な施設と観測装置の配置・・・・・・・・・・・・・・・	5
义	4	ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6
义	5	深度 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所	6
义	6	地下施設周辺の層面断層の位置と断層岩の写真・・・・・・・・・・・・・・・・・・	10
义	7	深度 350m の水平断面における割れ目分布図	11
义	8	坑道壁面における割れ目の分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	12
义	9	層面断層間の厚さの求め方・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	13
义	10	層面断層間のレイヤーの厚さと斜交断層の三次元密度の関係・・・・・	13
义	11	HDB-6 における地下水の間隙水圧の測定結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	14
义	12	HDB-7 における地下水の間隙水圧の測定結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	15
义	13	H4−1~H4−3 の区間 2(掘削損傷領域)の透水試験結果・・・・・・・・・・・	16
义	14	引張性の割れ目を伴う/伴わない断層中の水みちの透水性・・・・・・・・・	18
义	15	水圧擾乱試験に用いたボーリング孔の位置(a)と水圧上昇によって	
		誘発される断層のせん断変形(b)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	19
义	16	水圧擾乱試験の対象とした小規模なせん断割れ目(下段)と	
		それを含む試験区間(上段の黄色枠)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	19
义	17	水圧擾乱試験時における注入流量と注入圧(上段) および	
		試験区間の透水性と注入圧(下段)の関係⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯	20
义	18	水圧擾乱試験時におけるせん断割れ目の応力状態・・・・・・・・・・・・・・	20
义	19	断層帯/せん断割れ目系内に検出される主要な水みちの透水性と DI ······	21
义	20	坑道内で採取した地下水の塩分濃度の経時変化⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯	23
义	21	人エバリア性能確認試験の試験箇所周辺における地下水の塩分濃度の経時変化・・・	24
义	22	走査型電子顕微鏡により観察された黄鉄鉱の様子・・・・・・・・・・・・・・	25
义	23	透過型電子顕微鏡により観察されたコロイドの様子・・・・・・・・・・・・・	29
义	24	0.45µmフィルターろ過の有無による溶存有機物量の測定結果 ·······	30
义	25	350m 調査坑道における断層および主要割れ目の平面分布と	
		内空変位測定結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	32
义	26	水平面内の主応力に関する解析結果と既存調査結果との比較・・・・・・・・	32
义	27	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・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	34
义	28	C05 における水圧モニタリング結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	34
义	29	CO6 における水圧モニタリング結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	35
义	30	C07 における水圧モニタリング結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	35
义	31	CO8 における水圧モニタリング結果	36
义	32	C09 における水圧モニタリング結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	36
义	33	地中変位計設置状況写真と設置レイアウト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	38
义	34	地中変位計の計測結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	39
义	35	弾性波トモグラフィ調査のレイアウト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	41
义	36	弾性波トモグラフィ調査結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	42
义	37	鋼製支保工の応力計測結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	42
义	38	地震計設置位置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	46

义	39	震央分布·····	46
义	40	平成 28 年 11 月 7 日の地震の加速度波形 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	48
义	41	平成 28 年 11 月 7 日の地震の振幅と周波数の関係	49
义	42	換気立坑の深度 250m 以深におけるグラウト施エレイアウト・・・・・・・・	51
义	43	グラウト注入孔のレイアウト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	51
义	44	解析に使用したモデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	52
义	45	解析結果(グラウト材の濃度分布)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	52
义	46	解析結果(施工後の透水係数の分布)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	53
义	47	溶液型グラウトを対象とした室内試験の状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・	54
义	48	溶液型グラウトの固化試験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	54
义	49	有機物の分解に着目した炭酸塩の形成環境・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	56
义	50	100 万年前の復元古地形 (その1) ······	59
义	51	100 万年前の復元古地形 (その 2) ···································	60
义	52	古地形復元のための地形ブロック区分と傾斜補正区間・・・・・・・・・・・	61
义	53	地下施設に設置した地震計・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	63
义	54	全地震計のデータを用いた相関解析結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	64
义	55	人工バリア性能確認試験の概念図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	66
义	56	緩衝材への注水量の経時変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	67
义	57	緩衝材(5段目)の温度分布	67
义	58	緩衝材の飽和度の経時変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	68
义	59	緩衝材の膨潤圧の経時変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	69
义	60	オーバーパック腐食試験の概念図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	70
义	61	緩衝材 6 段目の計測センサー配置	70
义	62	手動測定結果の解析値・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	71
义	63	緩衝材定置試験設備のイメージ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	72
义	64	緩衝材可視化試験状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	73
义	65	オーバーパック溶接部腐食試験の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	76
义	66	模擬オーバーパックの腐食速度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	76
义	67	緩衝材流出試験の概略図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	78
义	68	土圧と水圧の変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	79
义	69	引き上げた緩衝材の外観・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	80
义	70	地中無線伝送システムの装置構成イメージ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	81
义	71	地中無線による計測データの例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	81
义	72	健岩部を対象とした原位置トレーサー試験装置の概念図・・・・・・・・・・	85
义	73	健岩部を対象とした原位置トレーサー試験の結果・・・・・・・・・・・・・・	85
义	74	マトリクス(健岩)部の D-05 のオーバーコア試料(a)、	
		研削状況(b)、トレーサー濃度プロファイル(c)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	86
义	75	D-05の解析結果······	86
义	76	原位置試験および室内試験で得られた各トレーサーの実効拡散係数	
		(D _e :青色バー)および収着分配係数(K _d :緑色バー)の比較	87
义	77	単一割れ目を対象とした原位置トレーサー試験の結果	
		(1回目、2回目、5回目) ······	89
义	78	単一割れ目を対象とした原位置トレーサー試験の結果	
		(3回目、4回目、6回目、7回目) ····································	89

义	79	掘削土 (ズリ) 置場の構造
义	80	排水系統と各水質分析の調査地点
义	81	地下施設からの排水の調査地点
义	82	天塩川の調査地点
义	83	掘削土(ズリ)置場周辺の地下水の調査地点
义	84	清水川および掘削土(ズリ)置場雨水調整池の調査地点102
义	85	環境調査実施場所

表目次

表	1	幌延町宮園で観測された震度1以上の地震46
表	2	作業項目と内在する不確実性(地質構造モデルの例)・・・・・・・・・・57
表	3	試験条件
表	4	天塩川への排水量・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・94
表	5	地下施設からの排水に係る水質調査結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・96
表	6	天塩川の水質調査結果・・・・・
表	7	掘削土(ズリ)置場周辺の地下水の水質調査結果・・・・・・・・・・・・・・・101
表	8	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・・・・・・103
表	9	浄化槽排水の水質調査結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・104
表	10	清水川の水質調査結果・・・・・106
表	11	確認された重要種(魚類)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・107

写真目次

1	脱ガス試験で用いた試験装置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・28
2	孔径の異なるフィルターを用いた段階的なろ過の様子 43
3	緩衝材定置試験の公開の様子・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・.73
4	実証試験に向けた試験坑道2の整備の様子74
5	緩衝材流出試験の試験体・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
6	地下施設の維持管理状況(機械設備の点検・整備)90
7	掘削土 (ズリ)の保管状況
8	排水処理設備の状況
9	天塩川の採水状況
10	掘削土(ズリ)置場周辺の地下水の採水状況(A1~A4)······100
11	清水川の採水状況
12	清水川の水質調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
13	生息魚類調査
14	安全パトロールの状況
15	安全行事の状況(安全大会)
	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

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。幌延深地層研究計画は、実際 の地層処分事業とは明確に区別することを前提に、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)を行うも のです。また、本計画では、「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(図 1)に分けて進めるこ ととしており、全体の期間は20年程度を考えています。

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~平成34年3月31日)」(以下、第3期中長期計画)を策定しまし た。第3期中長期計画中の幌延深地層研究計画における研究開発としては、

^{*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、我が国の科学技術の 水準の向上を通じた国民経済の発展その他の公益に資するため研究開発の最大限の成果を確保することを目的 とする法人に対する名称です。原子力機構は平成27年4月1日に「独立行政法人日本原子力研究開発機構」か ら「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構」に名称変更しています。

^{*2:}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、我が国における原子力の研究、開発および 利用を計画的に遂行するために原子力委員会が定める基本的考え方に則り、その業務を総合的、計画的かつ効 率的に行うことが定められています。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29条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~平成34年3月31日の7年間です。

「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」および「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」の3つの課題(以下、「必須の課題」)を重点的に取り組むこととしています。



第1段階: 地上からの調査研究段階 第2段階: 坑道掘削(地下施設建設)時の調査研究段階 第3段階: 地下施設での調査研究段階 ※平成31年度末までに研究終了までの工程やその後の埋め戻しについて決定する。

図 1 幌延深地層研究計画の全体スケジュール

^{*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、工学的に形成するものです。

2. 平成 28 年度の主な調査研究の成果

平成28年度は、「幌延深地層研究計画 平成28年度調査研究計画」⁽¹⁾に したがって、第3期中長期計画に掲げた必須の課題に関わる調査研究およ び地下施設の維持管理等を実施しました。

調査研究は、必須の課題を重点に取り組むとともに、必須の課題に関わる調査研究において基礎情報となる、坑道周辺の掘削影響領域を含む地 質環境特性の長期的な変化や地質環境情報に関するデータの取得などを 継続しました(図 2)。以下に調査研究の概要を示します。

実際の地質環境における人工バリアの適用性確認については、幌延深 地層研究計画の第3段階における調査研究のひとつとして、平成26年度 から深度350m調査坑道で実施している人工バリア性能確認試験、オーバ ーパック腐食試験および原位置トレーサー*5試験を実施します。これらの 試験を通して、実際の地質環境において人工バリアや周辺岩盤中での熱 ー水理ー力学ー化学連成挙動*6や物質の移行挙動などを計測・評価する技 術の適用性を確認し、地層処分事業における精密調査段階の後半に必要 となる技術基盤の確立を目的として実施します。平成28年度は、深度 350m調査坑道での人工バリア性能確認試験、オーバーパック腐食試験お よび物質移行試験を継続しました。具体的には、人工バリア性能確認試験 およびオーバーパック腐食試験では、地下水の浸潤状況、オーバーパック の腐食状況、温度、応力、化学特性等に関する計測を継続しました。また、 物質移行試験では、岩盤中の亀裂の有無の違いを考慮しながらトレーサ ーを利用した試験を実施し、物質の移行挙動に関する特性を把握しまし た。

処分概念オプションの実証については、人工バリアの設置環境の地質 環境条件や深度依存性^{*7}を考慮しつつ、種々の処分概念オプションの工学

^{*5:}地下水の流れの方向や流れる時間などを調べるために、地下水に目印として混ぜる染料やその他の薬品を指 します。重水や蛍光染料(ウラニンなど)、非放射性セシウムやユウロピウムなど、多種のトレーサーがありま す。幌延深地層研究計画では放射性トレーサーを利用したトレーサー試験を行うことはありません。

^{*6:}地下環境に設置された廃棄体の周辺の緩衝材や岩盤では、廃棄体からの熱、地下水の流れ、緩衝材や岩盤に作 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、などの現象が予想されます。実際の処分環境では、 これらの現象が複合的に生じ相互に影響すると考えられます。その挙動を、熱ー水理ーカ学ー化学連成挙動と 呼んでいます。

^{*7:}ここでは、深さによって地質環境条件などが変化していくことを意味しています。一般的に地下深くなるほど 温度が高くなり、地圧や水圧が高くなるなどの変化が認められています。

的実現性を実証することを目的として、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整備します。平 成28年度は、人工バリアの定置・品質確認などの実証試験のひとつとし て、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター^{*8}(以下、原環 センター)との共同研究において、地下環境での搬送定置・回収技術の実 証試験に向け、試験坑道の整備を行いました。また、これまでのグラウト 施工実績に基づき、グラウト効果の予測シミュレーション技術の開発を 継続しました。

地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証については、堆積岩が有す る地震・断層活動などの地殻変動に対する力学的・水理学的な緩衝能力を 評価し、堆積岩地域における処分場の立地選定や設計を、より科学的・合 理的に行うための技術と知見を整備します。平成28年度は、断層の透水 性と岩石の強度・応力状態との関係の解明を目指した研究を継続しまし た。また、一時的な水圧上昇が割れ目の水理特性に与える影響を確認する ために、通常よりも高い注入圧を用いた透水試験(水圧擾乱試験)を実施 する準備を進めました。



図 2 平成28年度の主な調査研究

^{*8:}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 しました。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。

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 ング孔等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 るための手法の信頼性を向上させました。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 3 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 4 に、深度 350m 調査坑道における主な調査研究の実 施場所を図 5 に示します。



図 3 研究所用地における主な施設と観測装置の配置



図 4 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所



図 5 深度 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

地下施設の維持管理などについては、施設内の機械設備や電気設備な どの維持管理業務(保守点検や修繕など)を引き続き実施するとともに、 地下施設からの排水および掘削土(ズリ)置場の浸出水は、排水処理設備 において適切に処理した上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 所などでの成果とあわせて、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、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、巻末に平成28年度の外部発表実績を掲載しました。

3. 地層科学研究

3.1 地質環境調查技術開発

3.1.1 地質環境モデルに関する調査・解析技術の開発

(1) 地質構造

坑道掘削時の壁面観察や地下施設からのボーリング調査によって取得した地層の分布や割れ目の連続性に関するデータに基づき解析を行うとともに、地質構造の概念や坑道周辺の地質構造モデル^{*9}の更新を進めています。また、地下施設や研究所設置地区およびその周辺の地表での地質観察、および地下施設や地表で取得した岩石の顕微鏡観察や分析などを行っています。

地下施設周辺の稚内層には、層理面に平行な断層(以下、「層面断層」) とそれに斜交する断層(以下、「斜交断層」)が分布しています⁽²⁾。換気 立坑と東立坑のそれぞれの掘削に先行して実施されたボーリング調査 (PB-V01およびSAB-1)では、声問層と稚内層の地層境界面から鉛直下向 きに約20m、約50m、約130m、約160m離れた位置に層面断層が確認されま した(図 6)。ここでは、それぞれ '20m層面断層'、'50m層面断層'、'130m 層面断層'、'160m層面断層'と呼ぶこととします。なお、130m層面断層 はこれまでS1断層と呼んできた断層です⁽³⁾。これら4つの層面断層は、視 認可能な幅数mm~数cm程度の断層ガウジを伴う特徴があり、断層角礫を 主体とする斜交断層の特徴とは異なります。視認可能な断層ガウジを 伴う層面断層の大きさは、これまでの坑道壁面の地質観察と坑内での ボーリング調査によって確認された層面断層の位置と方向性に基づ くと、少なくとも数十メートル以上の広がりを持つことが分かりまし た(図 7)⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

平成28年度は、坑道壁面の地質観察および地上からのボーリング調査 のデータに基づき、層面断層と斜交断層の交差関係を検討しました。

図 8のAには、換気立坑および東立坑の坑道壁面、また、図 8のBには、 350m調査坑道の壁面において観察された断層の分布を示しています。換 気立坑の割れ目観察では、20m層面断層、50m層面断層および130m層面断 層、東立坑の割れ目観察では、20m層面断層および50m層面断層が確認さ

^{*9:}岩相や断層などの地質構造の分布や形状を図や数式などを用いて表現したものです。

れました(図 8のA)。また、350m水平坑道の割れ目観察では、50m層面断 層および130m層面断層が確認されました(図 8のB)。350m調査坑道の西 周回坑道の西側(図 8のD)では、50m層面断層が斜交断層に切られてい ることが確認されました。これは、50m層面断層よりその斜交断層が後に 形成されたことを示しており、既往研究の解釈⁽⁶⁾⁽⁷⁾と一致しています。一 方、20m層面断層や130m層面断層は、斜交断層に切られている箇所は認め られず、むしろ、斜交断層が20m層面断層や130m層面断層の近傍において 終結している様子が確認されました(図 8のCとE)。このことは、視認可 能な断層ガウジを伴い数十メートル以上の広がりを有する層面断層がそ の後に形成された斜交断層の断層破壊の伝播に影響していた可能性を 示唆しています。すなわち、先に存在していた層面断層が、後から形成 される斜交断層の発達に影響を与えていた可能性が考えられます。そこ で、層面断層に挟まれた領域の厚さとその領域に形成される斜交断層の 密度の関係を調べました。その際、複数の層面断層が確認されたボーリン グ孔 (HDB-1、5、6、8、9、PB-V01、SAB-1) のデータを使用しました。図 9に、 層面断層に挟まれた領域の厚さの求め方を示します。層面断層に挟まれ た領域の厚さは、ボーリング孔において確認された層面断層の深度(位 置)の差と層面断層間の地層の傾斜角から求められます。一方、各領域 における断層の密度は、断層の面積の和を領域の体積で割った値として 定義される三次元空間内での密度(三次元密度)としました。三次元密 度はボーリング調査によって直接観測することはできません。ここでは、 Wang (2005)⁽⁸⁾に示された一次元頻度と三次元密度の関係式に基づいて います。一次元頻度と三次元密度に変換する際の変換係数は、ボーリン グ孔とボーリング孔で観測された断層の法線方向との間の角度に関す る確率密度関数から求められます⁽⁸⁾⁽⁹⁾。図 10に、層面断層に挟まれた領 域の厚さとその領域に形成される斜交断層の密度の関係を示します。薄 い領域(20m程度)の三次元密度のプロットの範囲は、厚い領域より幅が あり最大で0.30 m²/m³程度ですが、厚い領域ほど三次元密度のプロット の上限は低くなる傾向が認められます。この傾向から、斜交断層の形成 されにくい状態では領域の厚さに関係なく三次元密度は低いですが、斜 交断層が形成されやすい状態に達した場合、薄い領域ほど斜交断層がよ

9

く発達する可能性が考えられます。今後は、調査坑道から実施したボー リング孔のデータを追加して、断層の発達に影響を与える要因に関する 検討を継続します。



図 6 地下施設周辺の層面断層の位置と断層岩の写真



断面位置は、図 8のBに示すA-A'断面線です。



図 8 坑道壁面における割れ目の分布

A:換気立坑および東立坑の深度 250.5 mから 380 mまでの坑道壁面展開図(断層及び連続性の良い割れ目のみ表示)、B:350 m調査坑道における割れ目の分布(スプリングラインを基準にした水平断面)、C:換気立坑の深度 255.0 から 275 mまでの坑道壁面展開図(Aの点線に囲まれた範囲)、D:西周回坑道の西側の坑道壁面展開図(Bの点線に囲まれた範囲)、E:東周回坑道の北側の坑道壁面展開図(Bの点線に囲まれた範囲)







図 10 層面断層間のレイヤーの厚さと斜交断層の三次元密度の関係 赤い点線と矢印はプロットの範囲を示しています。

(2) 岩盤の水理

平成28年度は、平成27年度に引き続き、HDB各孔およびPB-V01に設置し たモニタリング装置による地下水の間隙水圧の観測を行いました。その 結果、地下施設近傍のボーリング孔 (HDB-3、6、PB-V01) においてこれま でと同様に地下施設建設の影響と考えられる水圧低下が認められました (図 11は換気立坑から91.5m離れたHDB-6の例)。その年間あたりの水圧 低下量は影響があらわれ始めた時期より小さくなる傾向にあります。一 部の区間では依然として水圧低下が認められていません (例えば図 11に 示すHDB-6の下位3つの観測区間509.00-514.00m、562.50-567.50m、および 587.50-592.50m)。また、地下施設から離れたボーリング孔 (HDB-3、6お よびPB-V01以外)では間隙水圧の低下は認められていません (図 12は西 立坑から約1,200m離れたHDB-7の例)。これらの水圧低下が認められない 現象は、地層の透水性の低さや地下施設からの距離の遠さが原因と考え られます。今後も引き続き、坑道掘削による周辺岩盤への影響を把握する ために、水圧モニタリングを継続する予定です。



図 11 HDB-6 における地下水の間隙水圧の測定結果

図中で急激に水圧が変化している箇所は、装置の不具合による変動です(メンテナンス後は 変動前の水圧を示します)。



図 12 HDB-7 における地下水の間隙水圧の測定結果

図中で急激に水圧が変化している箇所は、装置の不具合による変動です(メンテナンス後は 変動前の水圧を示します)。

坑道周辺の掘削影響を受けた岩盤の透水性を把握するための原位置透 水試験を深度350m調査坑道で継続しました。ここではその一例として、 H4-1、H4-2およびH4-3 (図 13(a))の調査結果を示します。H4-2では、人 エバリア性能確認試験用の試験孔の掘削に伴って形成されたと考えられ る割れ目の発達領域(掘削損傷領域)がコア観察および孔壁観察により確 認されています⁽¹⁰⁾ (図 13(a) のH4-2区間2に相当)。H4-1およびH4-3にお いても、試験坑道4の掘削に伴って形成されたと考えられる掘削損傷領域 が同様に認められています(図 13(a)のH4-1およびH4-3の区間2に相当)。 原位置透水試験の結果に基づくと、これらの掘削損傷領域の透水性は、健 岩部*10の透水性(10⁻¹² m/sec)よりも数オーダー高い値を示します(図 13(b))。平成28年度の透水試験結果は、これまでに得られた透水性と比べ て、大きな変化は認められませんでした(図 13(b))。平成27年1月より坑 道・試験孔内への注水を行った結果、同年5~6月に実施した試験孔東側近 傍のコンクリートプラグ周辺のグラウト施工以降、注水による水圧上昇 がコンクリートプラグ内側のH4-1およびH4-2の区間2で観測されていま す(図 13(b))。コンクリートプラグ外側のH4-3の区間2では観測されて

いません(図 13(b))。平成28年度に実施したH4-2の区間2の透水試験で は、注水時において、H4-1の区間2に明瞭な水圧応答が認められました。 しかし、コンクリートプラグを挟んだH4-3の区間2にはそのような水圧応 答が認められていません(図 13(c))。これらのことから、試験坑道4の掘 削損傷領域は数メートル以上にわたって水理的に連続する一方で、コン クリートプラグ(周辺グラウト含む)を挟んだ両側については水理的に連 続していない可能性が高いことが考えられます。今後も計測を継続し、試 験孔内に設置された緩衝材の膨張や周辺の間隙水圧の変化が割れ目発達 領域の透水性に与える影響を確認していくとともに、人工バリア性能確 認試験における周辺岩盤の水理状態をあわせて確認していく予定です。



図 13 H4-1~H4-3の区間2(掘削損傷領域)の透水試験結果 (a)ボーリング孔レイアウト(上・中段:鉛直断面、下段:水平断面)、 (b)透水性と間隙水圧、(c)H4-2区間2透水試験時における他孔の水圧応答

必須の課題のひとつである「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検 証」の一環として、平成28年度は断層の透水性と岩石の強度・応力状態と の関係の解明を目指した研究を継続するとともに、断層のせん断*11変形 が断層の水理特性に与える影響を確認することを目的とした、通常より も高い注入圧を用いた透水試験(水圧擾乱試験)に着手しました。断層の 透水性と岩石の強度・応力状態との関係については、これまでにダクティ リティインデックス (DI) *12という岩石の強度・応力状態を表す指標を用 いた検討を行ってきており、DIが2以上の時、水みちの透水性は10⁻⁸ m²/s 以下である可能性が高いことや、断層運動に伴う二次的な割れ目として 引張性の割れ目が断層沿いに発達しにくいことなどが明らかとなってき ています(4)。平成28年度は、これら2つの知見をこれまでとは異なる観点 からさらに検証するために、既存のボーリング孔(HDB-11、PB-V01および SAB-2)のデータを用いて、断層に伴う主要な水みちの透水性と割れ目の 破壊モードとの関係性を検討しました。その結果、引張性の割れ目を伴わ ない断層帯中の水みちの大部分(96%)が10⁻⁸ m²/s以下の透水性であるこ とが分かり(図 14)、上記の知見を間接的に支持する結果を得ることが できました(11)。これにより、断層の透水性と岩石の強度・応力状態との 関係について、DIという指標を用いることによってさらに理解を深める ことができました。

さらに、東立坑の坑底より掘削したボーリング孔(図 15(a))を用いた 水圧擾乱試験に着手しました。水圧擾乱試験では、これまでに複数の地 域・岩種のデータに基づいて構築してきたDIと透水性の相関式⁽¹²⁾を検証 するために、断層内の水圧を人工的に上昇させることによって断層内に せん断変形を誘発させ(図 15(b))、それに伴う断層の透水性の変化を観 測します。平成28年度は断層を対象とした本試験に先立って、明瞭な断層 破砕物を伴わない小規模なせん断割れ目(図 16)を対象に、予備試験的 な水圧擾乱試験を実施しました。試験では、同せん断割れ目を含む試験区 間を設定し(図 16)、試験区間の水圧を段階的に上昇させ(図 17のP0か

^{*11:} 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。

^{*12:}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、この値が低いほど、岩石は見かけ上、やわ らかくなります。岩盤にかかる平均有効応力(岩石に実際にかかる平均的な負荷応力)をその健岩部の引張強度 (岩石の引っ張り破壊に対する強度)で除した値で定義されます。

らP5)、各段階における注入流量と試験区間の透水性を求めました。その 結果、6.5MPa程度まで上昇させた時点で注入流量が増加し(89 mL/min→ 3350 mL/min)、試験区間の透水性も有意に増加しました(5.2×10⁻⁹ m²/s →1.4×10⁻⁷ m^2/s) (図 17のP5)。その後、水圧を6.0MPa以下まで戻すと、 注入流量および透水性は元の値近くまで戻りました(図 17のP6)。この 一連の水圧条件におけるせん断割れ目の応力状態を解析すると、6.5MPa まで水圧を上昇させた時点で同せん断割れ目内にせん断変形が起こって いた可能性が高いことが分かりました(図 18)。上記の注入流量および 透水性の増加は、同せん断割れ目内に生じたせん断変形による一時的な 空隙形成が原因と考えられます。今回の試験で得られたせん断割れ目の 透水性と応力状態の関係を既存のDIと透水性の相関式⁽¹²⁾と比較すると、 得られた結果が同相関式の範囲に収まることが確認できました(図 19)。 今後は今回適用した試験方法を踏まえ、断層破砕物を伴う断層を対象に 水圧擾乱試験を実施するとともに、試験により得られた結果と図 19に示 すDIと透水性の相関式とを比較検討することにより、将来的な地殻変動 を考慮した安全評価(場の状態設定)に資する基盤情報を整備していく予 定です。



図 14 引張性の割れ目を伴う/伴わない断層中の水みちの透水性⁽¹¹⁾



図 15 水圧擾乱試験に用いたボーリング孔の位置(a)と水圧上昇によっ て誘発される断層のせん断変形(b)



図 16 水圧擾乱試験の対象とした小規模なせん断割れ目(下段)とそ れを含む試験区間(上段の黄色枠)



図 17 水圧擾乱試験時における注入流量と注入圧(上段) および試験区間の透水性と注入圧(下段)の関係



図 18 水圧擾乱試験時におけるせん断割れ目の応力状態 図中のプロットは試験対象としたせん断割れ目面にかかる応力状態を表し、P0~P5は図 17に 示す水圧条件を表します。水圧が上昇すると(P0→P5)、割れ目面にかかる応力は図のように 変化します。プロットが図中の破線と接触すると割れ目に沿ってせん断変形が生じます。 は割れ目面の摩擦に関するパラメータ(摩擦係数)を表し、このような解析ではしばしば μ ≒0.6が仮定されます。



- 図 19 断層帯/せん断割れ目系内に検出される主要な水みちの透水性とDI 図中の丸印のプロットは既存のデータを表し、水平のバーは誤差を表します。
- (3) 地下水の地球化学

第1段階の調査結果から推定した坑道周辺の地下水の水質分布とその 形成プロセスを確認するとともに、地下施設の建設に伴う坑道周辺の地 下水の水質変化を把握するための調査・解析技術の開発を行っています。 また、350m調査坑道では、必須の課題のひとつである「実際の地質環境に おける人工バリアの適用性確認」として人工バリア性能確認試験が行わ れており、試験箇所周辺の地下水の水質変化を把握するための調査・解析 技術の開発も行っています。このため、坑道内で採取した地下水のpHや電 気伝導度*¹³、酸化還元電位*¹⁴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分析を実施し、その変化をモニタリングしてい ます。

平成28年度は、平成27年度に引き続き、換気立坑および東立坑の壁面に

^{*13:}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。

^{*14:}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。

設置した集水リング*¹⁵や、坑道内で掘削したボーリング孔から採取した 地下水の水質分析を行いました。図 20に、これらの地点から採取した地 下水の塩分濃度*¹⁶の経時変化を示します。集水リングで採取された地下 水(図中で○印のデータに相当)について、深度100m~200m程度の位置で 採取された地下水の多く(例えば、WR-V-98.0、WR-V-133.8、WR-E-100.0、 WR-V-168.0、WR-V-202.0、WR-E-169.0、WR-E-202.0)は、他の深度で採取 された地下水と比べると相対的に塩分濃度の変動が大きい傾向がありま す。また、坑道内から掘削されたボーリング孔から採取された地下水(図 中で□印のデータに相当)では、集水リングで採取された地下水に比べて 塩分濃度の変動が小さいことがわかります。このような傾向は、平成27年 度と同様でした。なお、集水リングとボーリング孔で採取された地下水で の塩分濃度の変動幅の違いは、主に採水方法の違いによるためと考えら れます。

また、350m調査坑道で行われている人工バリア性能確認試験の試験箇 所周辺のボーリング孔から採取した地下水の水質分析の結果についても 整理しました。図 21に、試験坑道2および試験坑道4周辺のボーリング孔 から採取した地下水の塩分濃度の経時変化を示します。両試験坑道は、い ずれも平成25年度に掘削され、試験坑道4では平成26年度より人工バリア 性能確認試験が実施されています。平成28年度までの分析結果では、これ らのボーリング孔において試験坑道の掘削および人工バリア性能確認試 験と関連するような塩分濃度の変化は認められませんでした。

立坑からの排水や試験の継続・進展に伴い、今後水質が変化することも 考えられます。このため、今後もモニタリングを継続し、地下水の水質変 化の傾向とプロセスを把握します。また、坑道周辺の地質・地質構造や地 下水の流れ方に関する検討とあわせて、地球化学モデル*¹⁷の更新に反映 していきます。

^{*15:} 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 30~40m ごとに設置されている 設備です。

^{*16:} ここでは、地下水 1L に溶けているナトリウムイオン、カリウムイオン、マグネシウムイオン、カルシウムイ オン、塩化物イオン、硫酸イオンの総重量を差します。

^{*17:}地下水の水質が地下環境でどのように分布しているのかを、図や数式などを用いて表現したものです。



図 20 坑道内で採取した地下水の塩分濃度の経時変化 図中の "V" および "E" はそれぞれ "換気立坑" と "東立坑"を、 "WR" は集水リングを表 しています。V または E のうしろの数字は深度(m)を表しています。また、Oは集水リング、 口は坑道内で掘削したボーリング孔から採取した地下水のデータを表しています。



図 21 人エバリア性能確認試験の試験箇所周辺における地下水の 塩分濃度の経時変化

さらに、必須の課題への取り組みにあたっては、基礎情報となる地質環 境に関わるデータ取得が必要になります。このうち、地球化学に関する調 査としては、坑道周辺の掘削影響領域を含む地質環境における岩盤の地 球化学的特性や地下水の水質、微生物、ガス、コロイドおよび有機物に関 わるデータ取得を行っています。

坑道周辺の掘削影響領域では、坑道内の空気が坑道掘削に伴い生じた 割れ目などを通じて岩盤中に拡散する可能性があります。拡散した空気 には酸素が含まれており、岩盤中の鉱物と反応したり、地下水に溶け込ん だりすることで、坑道周辺の地下水や岩盤が還元状態から酸化状態に変 化することが考えられます。平成28年度は、坑道周辺の岩盤を対象に、坑 道掘削後の経過年数と岩盤の酸化還元状態との関係を把握するための予 察的な調査を行いました。調査は、坑道掘削後の経過年数が異なる140m

(坑道掘削後7年経過)、250m(坑道掘削後6年経過)および350m(坑道掘 削後3年経過)調査坑道で行いました。調査にあたり、坑道壁面からコア

24

試料を採取する際には、断層や自然由来の割れ目がほとんど存在しない と考えられる健岩部を対象にしました。コア試料の長さは、坑道掘削に伴 う割れ目の影響範囲に相当する1m程度とし、2~10cmごとに区切って分析 に供しました。色調分析*¹⁸の結果、坑道掘削後の経過年数や坑道壁面から の距離によらず、コア試料の色調に明瞭な差は認められませんでした。ま た、走査型電子顕微鏡*¹⁹での観察でも、コア試料中には、坑道掘削後の経 過年数や坑道壁面からの距離によらず、還元環境で安定に存在する黄鉄 鉱*²⁰が含まれることがわかりました(図 22)。これらの結果は、坑道周辺 における岩盤の酸化がほとんど生じていないことを示唆します。なお、こ のように酸化が抑制された理由として、幌延の地下施設の坑道が、掘削直 後にコンクリート支保が施工されて岩盤と坑道内の空気が直接接してい ないことや、岩盤や地下水が有する酸化還元緩衝能の影響などが考えら れます。今後は、試料採取および分析手法についても検討を重ね、坑道周 辺のより詳細なスケールを対象に酸化還元状態に関するデータを拡充し ていく予定です。



図 22 走査型電子顕微鏡により観察された黄鉄鉱の様子

幌延の地下環境には多くの微生物が存在しています。これまでに主に 地下水中の微生物を対象に空間分布を調査しています。また、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*²¹の関連性

^{*18:} 試料の明度(L*)と色彩(a*および b*)を測定します。酸化が進んだ岩石ほど a*および b*が高い値を示す ことが報告されています。

^{*19:}試料に電子ビームを照射し、放出される二次電子を検出して観察を行う顕微鏡です。最小で1µm(1mmの1000分の1)程度の大きさの対象を観察できます。

^{*20:}化学組成 FeS2 で表される鉱物で、酸化的な環境では容易に溶解します。

^{*21:} 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。

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。平成28年度は、140m調査坑道から掘削されたボーリング孔(08-E140-C01)から採取した地下水中の微生物数と群集組成の調査を行いま した。調査の結果、1 mLの地下水中に10⁴~10⁶個の細胞の微生物が存在し、 坑道壁面に近いと微生物数が多くなることがわかりました。この理由と して、坑道壁面近傍の酸化還元状態の変化や脱ガス由来のpH変化が考え られます。また、分子生物学的手法を用いた微生物群集組成解析*²²により、 水素を代謝に利用する微生物種や鉄などの金属元素の酸化還元に関与す る微生物種が優占*²³して存在し、その群集組成は比較的安定しているこ とが示されました⁽¹³⁾。金属元素の酸化還元に関与する微生物の代謝反応 は、物質の移動反応にも影響を及ぼす可能性があることからも、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。

水素を代謝に利用する微生物種は、地下水中の二酸化炭素をメタンに 還元させる反応を促進させます。第1段階における地上からのボーリング 孔を用いた調査により、幌延の地下水に多量に溶存するメタンは、微生物 活動により二酸化炭素が還元されてできたものであると推定されていま した。しかしながら、メタンおよび二酸化炭素の炭素同位体組成(δ¹³C)^{*24} のこれまでに測定された値は、それぞれ、約-56.2‰~約-13.4‰および約 -12.4‰~約12.2‰とバラツキが大きく、より信頼性の高いデータが必要 でした。平成28年度は、これまでに得られたメタンと二酸化炭素のδ¹³C の分析結果をまとめるとともに、第3段階である地下施設を利用した調査 により、信頼性の高いデータ取得を試みました。その結果、メタンのδ¹³C として約-59.3‰~約-51.1‰、二酸化炭素のδ¹³Cとして約11.1‰~約 18.4‰の値が得られ、地上からのボーリング孔を用いた調査に比べ、バラ ツキの小さい値が得られました。このような信頼性の高いデータでメタ ンの起源を判定する基準を用いることにより、それぞれの炭素同位体組 成のバラツキの要因が深度依存性であることが明らかになり、メタンの

^{*22:}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。 *23: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。

^{*24:}炭素には質量の異なる同位体が存在します。炭素同位体組成(δ¹³C)は、質量数12の炭素に対する質量数 13の炭素の同位体比について(¹³C/¹²C)、測りたい試料と基準となる標準物質との同位体比の差を標準物質の同 位体比で規格化した割合を意味します。ここで使用するδ¹³Cは、千分率(‰)で表されます。

起源が微生物活動によるものであることをより詳細に確認することがで きました。

地下水年代測定方法のひとつに、地下水に溶けているヘリウムの量を 調べる方法があります。地下施設の建設に伴い地下水の圧力が低下する と地下水に溶けているガス(溶存ガス)が気泡として現れます。このよう な現象(脱ガス)が生じると、地下水とガスが分離して元の地下水中に溶 けていたガスの量が分からなくなるため、できるだけ脱ガスしないよう に採水する手法の検討を行ってきました。一方、ある程度の脱ガスは避け られない場合があり、その場合は、地下水中に溶存しているネオンもあわ せて調べることで、脱ガスが生じる前の地下水にもともと溶存していた ヘリウムの量を推定することができます。ヘリウムは岩石中に含まれる ウランやトリウムの放射壊変により生成されて地下水中の濃度が増加し ていきますが、ネオンは地下で生成されないため、脱ガスにより濃度が減 少していくため、地下水が涵養された当初の溶存ネオン量を基準とする ことで、地下水がどの程度の脱ガスを被っているのかを推定する目安と することができます。

これまでに地下施設を利用した溶存ガスの調査により、幌延の地下水 中には、メタンは約10mmol/L、二酸化炭素は約50mmol/Lと多量に溶存して いることが分かっています。一方、ヘリウムとネオンは、どちらも約10-⁶mmol/L程度の極微量しか溶存していません。このような場合、脱ガスの 際に生じたメタンや二酸化炭素の気泡の中に、どのような割合でヘリウ ムとネオンが取り込まれるのかを調べる必要があります。平成28年度は、 脱ガスにより地下水から気泡が生じる過程を模擬した室内試験を予察的 に行い、気泡が生じる際のガス組成の変化について調べました(写真 1)。 試験では、地下水タンクに地下水を満たし、ガスボンベ内のガスを反応容 器内にて地下水と接することで、地下水中にメタンや二酸化炭素、ヘリウ ム、ネオンを溶かし込み、その後、圧力を低下し脱ガスさせながら、試料 採取容器に地下水やガスを採取しました。試験の結果、約9気圧から約1気 圧に圧力を低下させると、地下水中のヘリウム濃度は約3×10⁻⁴mmol/Lか ら約1×10⁻⁴mmol/L、ネオン濃度は約3×10⁻³mmol/Lから約1×10⁻³mmol/Lに 低下し、ヘリウムとネオンは同様な挙動を示すことが分かりました。今後 は、試験に用いたガス濃度をより実際の条件に近い条件に変えた本試験 を行い、脱ガスした地下水を対象に正確な年代測定を行うための手法開 発を進めます。なお、地下水年代測定につきましては、一般財団法人電力 中央研究所^{*25}(以下、電中研)との共同研究により実施しています。



写真 1 脱ガス試験で用いた試験装置

地下水中にはイオンとして溶存している成分のほかに、様々な元素な どからなる微粒子が水中に浮遊しています。粒子の大きさが1nm~ 1000nm程度のものは、コロイドと呼ばれています。平成28年度は、平成 27年度と同様にレーザー散乱法*²⁶を応用した装置を用い、地下水中のコ ロイドのサイズや粒子数の測定を行いました。その結果、コロイドのサ イズや粒子数に係るデータは、平成27年度の結果とほぼ同様であり、デ

^{*25:}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。

^{*26:}溶液中に分散する粒子にレーザー光を当て、散乱・回折したレーザー光の強度パターンを観測し、粒子の大きさ(サイズ)や数を測定する方法です。

ータの再現性を確認できました。また、平成28年度は、透過型電子顕微 鏡*²⁷を用いたコロイドの観察を行い、コロイドのサイズや形状について も調べました。観察に供したコロイドは、集水リングで採取した地下水 (WR-V-98.0、WR-V-133.8)および坑道内で掘削されたボーリング孔から 採取した地下水(09-V250-M02、13-350-C01)になります。図 23に、透 過型電子顕微鏡により観察されたコロイドの様子を示します。集水リン グおよびボーリング孔から採取した地下水中のコロイドは、いずれも概 ね20nm~300nm程度のサイズであり、球状の形状であることがわかりま した。なお、これらコロイドを構成する主な成分は、シリカ、カルシウ ム、マグネシウムなどであり、これまでの研究で報じられていた分析結 果と整合していました。今後は、地下水中でコロイドの分散・安定性に ついても検討していく予定です。



図 23 透過型電子顕微鏡により観察されたコロイドの様子

^{*27:} 観察対象に電子線を当て、対象物を透かして観察するタイプの電子顕微鏡のことです。

幌延の地下水には比較的多くの有機物が溶存しています。溶存有機物 としては、一般的に0.45µmのフィルターを通過した有機物のことを示し ます。一方、0.45µmのフィルターを通過しない有機物については、粒状 有機物と呼ばれています。平成28年度は、0.45µmのフィルターを使い、 ろ過した場合とろ過しない場合での地下水中の溶存有機物量を測定しま した。その結果、0.45µmのフィルターろ過の有無に関わらず、溶存有機 物量に差異はほとんど認められませんでした(図 24)。このことから、幌 延の地下水には粒状有機物はほとんど含まれておらず、ほぼすべてが溶 存態であると推定されました。また、平成28年度は、坑道内で掘削された ボーリング孔のうち、全有機炭素(TOC)が比較的多く含まれる地下水が 存在する07-V140-M01を対象に、溶存有機物の種類を予察的に把握するた めの分析を試みました。分析の結果、溶存有機物の大部分は、腐植物質か らなることが推察されました。今後は、採水深度や塩分濃度の異なる箇所 の地下水も対象とし、腐植物質と腐植物質以外の溶存有機物の割合等に ついても調査する予定です。



図 24 0.45µm フィルターろ過の有無による溶存有機物量の測定結果
(4) 岩盤力学

第1段階で構築した岩盤力学モデル^{*28}の妥当性を評価することを目的 として、広範囲な地圧状態を把握するための手法の確立、およびこれまで に得られた初期地圧状態の妥当性を検討しました。平成28年度は、深度 350mの調査坑道で取得した内空変位^{*29}測定結果に基づき、広域的な初期 地圧状態を推定する手法を構築しました。

図 25に、深度350m調査坑道で取得した掘削終了後の内空変位*29の計測 値と計測位置関係、および深度350mで確認された地質構造との関係を示 します。この図に示すように、坑道全体を、断層部、割れ目卓越部、一般 部に分類して内空変位計測値を整理しました。解析では、すべての計測デ ータを対象としたケースと、一般部の計測結果を対象としたケースを設 定し、深度350m調査坑道周辺の初期地圧の推定を行いました。

解析により得られた水平面内の最大主応力および最小主応力を、これ までに地上からの調査および坑道内の測定により得られた値とあわせて 図 26に示します。本図から、数値解析により推定された両ケースの初期 地圧の値は、地上からの調査で得られた値に概ね整合することがわかり ました。今後は、断層部や割れ目卓越部など、岩盤の強度の不均質性を解 析モデルに反映させることで、初期地圧状態の推定手法の高度化を図っ ていきます。

^{*28:}割れ目などの性質を含めた岩盤の強度・変形などに関する特性を図や数式などを用いて表現したものです。 *29:坑道内で吹付けコンクリート内側の断面の相対変位量を計測することです。



図 25 350m 調査坑道における断層および主要割れ目の平面分布と 内空変位測定結果



図 26 水平面内の主応力に関する解析結果と既存調査結果との比較

3.1.2 調查技術·調査機器開発

調査技術・調査機器開発として、坑道周辺岩盤の地下水の地球化学特性、 坑道掘削の影響、岩盤の力学に関する調査技術、地下水中の微量元素の存 在状態に関する調査技術のほか、コントロールボーリング*³⁰孔を利用し たモニタリング技術の開発を実施しました。

(1) 地下水の地球化学特性に関する調査技術の開発

地下施設の建設が施設周辺の地下水の水圧や水質に与える影響を観測 する技術の整備を目的とした調査技術の開発を行っています。調査技術 の開発の中で得られたデータは、岩盤の水理モデル*³¹や地下水の地球化 学モデルの構築、構築したモデルや解析結果の妥当性を確認するために 利用します。また、得られたデータは、人工バリア性能確認試験における 熱-水理-力学-化学連成挙動に関わる解析において、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します。

地下水の地球化学特性に関する調査技術の開発では、平成26年度まで に深度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、平成 28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 27に示しま す。平成27年度に引き続き、平成28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、13-350-C06、 13-350-C07、13-350-C08および13-350-C09(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 28、図 29、 図 30、図 31および図 32に各々示します。図中で急激に水圧が変化(低 下)している箇所は、採水やメンテナンスによる一時的な影響によるもの です。観測の結果、試験坑道の掘削以降、徐々に水圧が低下する傾向が認 められます。

^{*30:}ボーリング孔の角度や方向を制御しながら掘削する技術のことをいいます。

^{*31:}地質構造の分布や形状にあわせて透水係数などの水理学的なデータを与えて、岩盤の水理特性を二次元的または三次元的な図や数式などを用いて表現したものです。







図 28 CO5 における水圧モニタリング結果 図中で急激に水圧が変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。



図 29 CO6 における水圧モニタリング結果 図中で急激に水圧が変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。



図中で急激に水圧が変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。



図 31 CO8 における水圧モニタリング結果 図中で急激に水圧が変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。



図中で急激に水圧が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するため、平成27年 1月から人工バリア内への注水が行われていますが、平成28年10月より 注水量をこれまでの0.1~0.4L/分から1.3L/分に増加しました。これに 伴い、埋め戻し範囲に位置するCO7、CO8およびCO9のうち、CO8(水平 孔)およびCO9(鉛直下方孔)の最浅部となる区間4において、水圧の微 増が認められました(図31および図32)。一方、試験坑道4の南側約3m に位置するCO5では、注水量の増加に伴う水圧への影響は確認されませ んでした(図28)。

試験坑道掘削後、各観測区間に流入する地下水の量が減少したため、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。平成28年度 に水質モニタリングを継続したC05およびC06では、地下水のpHは7程 度、酸化還元電位は-200~-280mV程度と平成27年度の測定値と同様でし た。

観測装置の長期的な性能を維持する上で必要な装置の定期的なメンテ ナンス(年2回のセンサーの検定・校正および1回/月程度のセンサー の異常有無の確認)も継続して行いました。今後も水圧・水質モニタリン グを継続し、試験坑道掘削後の経時変化の評価や、観測装置の長期的な性 能確認を行います。

(2) 坑道掘削の影響に関する調査技術の開発

平成21年度に東立坑の深度160mに設置した光ファイバー式の地中変位 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。光ファ イバー式の地中変位計を設置した際、その計測結果の妥当性の検証のた め、隣接する位置に、既に技術が確立されている電気式の地中変位計を設 置しています(図 33)。

計測結果を図 34に示します。電気式の変位計の一部は早いものでは設置後3年程度で計測値が逸脱して計測が困難となり、計測ができなくなっていますが、光ファイバー式の変位計は、これまでの期間にセンサー不良

がなく、ノイズも少ないため、安定した計測値が得られています。また、 光ファイバー式の変位計の計測値は、電気式の変位計のセンサー不良が 出始めるまで、ほぼ同様の傾向を示していたことから、計測値の妥当性を 確認することができました。

掘削後約7年間の変位は、立坑壁面に最も近い区間No.1で約4.7mm縮む 挙動を示しており、他地点に比べ変位量が大きいことがわかります。また、 他区間においても、No.3を除き変位量は小さいが縮む挙動を示しており、 H27年度以降の変位は収束傾向にあることがわかります。このことから、 立坑掘削後は、約5年間かけて徐々に圧縮方向に岩盤が1mm程度変形し、そ の後変形が収束していくことがわかります。今後もデータの蓄積を進め、 立坑掘削による周辺岩盤の長期的な変形挙動をモニタリングするととも に、装置の健全性の確認を継続し、計測手法の信頼性を高めていく予定で す。



図 33 地中変位計設置状況写真と設置レイアウト





(3) 岩盤の力学特性に関する調査技術の開発

地下坑道の安定性を議論するにあたっては、坑道周辺岩盤の損傷の広がりやその程度を把握することや、設置した支保工*³²の健全性を確認することが重要となります。

坑道周辺の損傷をモニタリングすることを目的として、深度250mの西 連絡坑道において、弾性波トモグラフィ調査*³³を実施しています。図35 に調査のレイアウトを示します。調査は、掘削前、掘削中(掘削1-12)、 および掘削後年4回実施しています。坑道掘削前、坑道掘削直後、掘削か ら2~5年後までの調査結果を図36に示します。結果は弾性波速度で表 され、速度の低下が大きい領域(暖色系の領域)ほど、掘削による損傷が 進行していることを示します。図より、坑道の掘削完了後の段階では、弾 性波速度が顕著に低下した領域が、壁面から約1mまで発達しました。坑 道掘削から2年から5年経過した段階の結果を見ると、壁面付近の速度 は若干低下しているものの、速度低下領域は、掘削直後にみられた壁面か ら約1mの範囲を超えて広がらないことがわかります。このことから、坑 道周辺の損傷は、壁面から約1.0mの範囲で安定して存在していると推定 されます。

坑道掘削時に設置した支保工の健全性を確認するために、弾性波トモ グラフィ調査を実施した位置において、支保工に作用する応力の計測を 実施しています。支保工のうち、鋼製支保工にかかる応力を計測した結果 を図 37に示します。図では、計測器設置後にあたる2011年3月9日から 2016年11月末までの計測結果を示しています。図より、各断面において、 応力の値は掘削直後から徐々に増加していますが、掘削から約1年10ヶ月 後に相当する2013年1月以降は、ほぼ安定した値で推移していることがわ かります。また、赤色で示す天井部分(天端部)の計測値が最も高い値と なっていますが、特段の対策が必要とされる基準値には達していないた め、今後も計測値や弾性波トモグラフィ調査結果を確認することで、坑道 の安定性について検討することとしています。

^{*32:}地下空間の安定性を保つために設置する、コンクリート、ロックボルト、アーチ状の鉄骨(鋼製支保工)な どの構造物のことを指します。

^{*33:} 岩盤内の決められた領域の周囲に発振器と受振器を設置し、いろいろな測線の弾性波(人工的に発生させた 地震波)の速度を計測することにより、領域内の岩盤の掘削による損傷範囲や、損傷の程度を確認する調査で す。

以上の調査・計測結果から、坑道の掘削から5年経過した時点では、周辺岩盤の損傷は広がっていないことや、設置した支保工の健全性が保たれていることが明らかとなりました。また、岩盤の損傷のひろがりも含めた支保工の健全性のモニタリングは、弾性波トモグラフィ調査と支保工の応力計測により実施が可能であることが示されました。



図 35 弾性波トモグラフィ調査のレイアウト



図 36 弾性波トモグラフィ調査結果



図 37 鋼製支保工の応力計測結果

計測位置の色と計測値の曲線の色は対応しています。

(4) 地下水中の微量元素の存在状態に関する調査技術の開発

地下水中には、ユウロピウム等の元素で代表される希土類元素*34が微量に存在します。地下水中に溶存している希土類元素は、イオンとして存在するもののほかに、地下水中に浮遊する様々な大きさのコロイド粒子に付着して存在するものがあります。そこで、幌延の地下水中に存在する希土類元素を対象に、希土類元素の存在状態を調べるため、孔径の異なるフィルター(0.2µm~1kDa*35)を用いた段階的なろ過手法を開発しました(写真 2)。



写真 2 孔径の異なるフィルターを用いた段階的なろ過の様子

地下水中にもともと存在する希土類元素の量は極微量なため、地下水 に希土類元素を添加し、検出精度を高めた条件で調査しました。調査の結 果、イオン半径の大きな希土類元素では、0.2µm 程度の粒子径のコロイ ドに付着して存在する割合は 80~90%となりました。一方、イオン半径 の小さな希土類元素では、0.2µm 程度の粒子径のコロイドに付着して存 在する割合は 10~30%程度でした。この結果から、イオン半径の大きい 希土類元素は、比較的粒径の大きなコロイドに付着して存在していたか、

^{*34:}希土類元素は、周期律表の第3族第6周期に属する原子番号57のランタンから原子番号71のルテチウムま での15元素の総称です。同族元素であるスカンジウムとイットリウムを含めた17元素のことを言う場合もあ ります。

^{*35:} Da (ダルトン)とは、質量を表す単位であり、質量数 12 の炭素原子の質量の 1/12 と定義されています。ここでは、1kDa (1000Da)より小さな分子量の粒子が通ることのできる孔径の指標を意味します。

或いはろ過の段階で沈殿が生じ捕獲された可能性が推察されました。な お、0.2µmのフィルターに捕獲された粒子は、化学組成分析の結果、リ ン酸塩であることがわかりました。また、イオン半径の小さい希土類元素 は、相対的に粒径の小さい(10kDaより小さい)コロイドに付着して存在 していたか、或いはイオンとして存在していた可能性が示唆されました。 このように、今回開発した段階的なろ過手法は、希土類元素のような微量 元素の地下水中での存在状態を把握する上で有効な手法であることを確 認できました。これらの成果は、京都大学・東北大学との共同研究により 得られたものです。

(5) コントロールボーリング孔を利用したモニタリング技術の開発

平成28年度は、平成27年10月からシステムの運用を開始した無人観測 システム(太陽光や風力による自家発電機能を有し、地下水の水圧観測や データ送信を無人で行える設備)を用い、地下水の水圧観測やデータ送信 を継続しました。また、コントロールボーリング孔を利用した地下水の採 水調査を2回(平成28年7月及び11月)行い、水質の変化についても調べま した。コントロールボーリング孔を用いたモニタリング技術に関しては、 平成28年度までの観測・調査により、実際の現場において技術の適用性を 確認するとともに、システム運用上の課題と対策を整理することができ、 所期の目的を達成しました。これらは、電力中央研究所との共同研究によ り実施しました。

平成29年度は、コントロールボーリング孔を用いたモニタリング技術 の開発を終了し、観測設備の撤去作業を行う予定です。

(6) 沿岸部における地質環境の調査技術の高度化開発

経済産業省資源エネルギー庁の委託事業(平成28年度地層処分技術調 査等事業:沿岸部処分システム高度化開発)の一環として、平成21年度か ら24年度にかけて幌延町の沿岸域に位置する浜里地区において掘削され たボーリング孔(DD-1:孔長約1,200m)*³⁶において、産業技術総合研究所*³⁷

^{*36:}経済産業省資源エネルギー庁の委託事業(地層処分技術調査等事業:沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化 開発)に関連して、産業技術総合研究所との共同研究として実施しました。

^{*37:}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。

が主体となって採水調査を実施しました。この調査は、日本全国の沿岸部 を、地質、地形および地下水流動の様式に基づいて区分して、代表的な地 域の深部地下水の地球化学特性や年代を把握するもので、浜里地区はそ の一例になります。平成28年度は、DD-1の深度約950mから原位置の地下水 を採水しました。今後は、採水した地下水を分析するとともにデータを蓄 積して、沿岸部の区分の妥当性を検証していく予定です。

3.2 深地層における工学的技術の基礎の開発

3.2.1 地震観測

地下施設設計の妥当性検証の一環として、地下施設内の3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(図 38)。平成28年4月1 日から平成29年2月28日までに幌延町で観測された震度1以上の地震は、 気象庁の発表に基づくと4回ありました(表 1)。上記の期間における気 象庁一元化震源データより作成した幌延深地層研究センター周辺の震央 分布を図 39に示します。



図 39 震央分布

						震度	
地震の発生日時	震央地名	緯度	経度	深さ	Mj ^{≫1}	幌延町 宮園	最大 震度
平成28年11月 7日 10時15分22.6秒	宗谷地方北部	45°03.4'N	141 [°] 57.3'E	18km	2.9	1	2
平成28年11月25日 17時22分49.3秒	留萌地方中北部	44° 50.1'N	141 [°] 50.8'E	27km	4.6	2	4
平成28年12月25日 01時15分21.9秒	留萌地方中北部	44° 50.2'N	141 [°] 51.5'E	26km	3.3	1	1
平成29年 2月28日 11時13分28.5秒	留萌地方中北部	44° 49.5'N	141 [°] 50.5'E	24km	3.1	1	1

表 1 幌延町宮園で観測された震度1以上の地震

※1):気象庁マグニチュード(地震の規模を表す数値)

このうち、平成28年11月7日に地下施設近傍で発生した地震(宗谷地方 北部、深さ18km、Mj=2.9)の地上と地下施設内の地震計で得られた加速度 波形を図 40に示します。地表および地下の地震波形を比べると、地上の 振幅が大きく、地下の振幅は小さいことがわかります。

また、地震波はいろいろな周波数の波の重なりからなっており、その周 波数別の波の振幅を図 41に示します。これでみると地表(西立坑アクセ スルーム)の地震計で観測した地震波の振幅が最大1.5cm/s 程度で2~ 4Hzに最大、0.1Hz付近に極小値があるのに対し、地下(深度350m調査坑道) の地震計の地震波は振幅の最大が0.3cm/s程度でピークが3~5Hzとやや 高周波数側に寄っていることがわかります。これに加え、前年度に発生し た規模や震源地の異なる地震波でも同様の傾向が確認されており⁽⁴⁾、地 表に比べて、地下施設に対する地震の影響が小さいことが確認できまし た。



地表:西立坑アクセスルーム

図 40 平成 28 年 11 月 7 日の地震の加速度波形



3.2.2 地下施設における湧水対策技術の開発

深度 250m 以深の換気立坑掘削前に実施した透水性の高い断層部へのグ ラウト施工実績に基づき、有限要素法を用いたシミュレーションを行い、 原位置透水試験との比較による解析結果の妥当性確認及び止水効果につ いて検証しました。本解析では、換気立坑におけるグラウト施工レイアウ トに示す深度 255.6~272.6mのA領域(図 42、赤枠)を対象としました。

図 43 にグラウト注入孔の配置を示します。これらの注入孔のうち、最 も多くのグラウト材が注入された A7 を対象として解析を実施しました。 解析に際し、図 44 に示すように、断層部と割れ目が卓越していない健岩 部とに分類した地質環境モデルを作成しました。主なグラウト対象とな る断層は、換気立坑掘削中に実施した壁面の地質観察に基づいて走向傾 斜や厚さを設定しました。また、断層部及び健岩部の透水係数は、掘削前 に実施した透水試験結果に基づき、断層部 5.75×10⁻⁵m/s、健岩部 1.82× 10⁻¹¹m/s に設定しました。なお、グラウト材の濃度、注入圧力並びに注入 時間についても、グラウト注入を行った際の実測値を用いました。

解析の結果、グラウト材の濃度分布(図 45)に示すとおり、A7 で認め られる断層部を中心にグラウト材が高濃度で注入されることが示されま した。さらに施工後の透水係数の分布(図 46)では、断層部の透水係数 が1.0×10⁻⁹m/s前後を示しており、初期値(5.75×10⁻⁵m/s)から、4 オー ダー程度改善される結果となりました。この解析結果は、グラウト施工完 了後にチェック孔で実施した簡易的な透水試験結果に概ね整合しており、 解析の妥当性が示されました。

今後は、実際のグラウト施工後の岩盤の透水係数と解析により得られ た透水係数とを比較し、グラウトの止水効果についての詳細な検討を行 うことにより、予測シミュレーション技術を含む湧水対策技術の高度化 を進めていきます。

50



図 42 換気立坑の深度 250m 以深におけるグラウト施エレイアウト



図 43 グラウト注入孔のレイアウト









スウェーデンやフィンランドでは、処分坑道や処分孔周辺において湧 水量を大幅に少なくするために、浸透性が高くて耐久性の高い活性シリ カコロイドを用いた溶液型グラウトの研究が行われており、沿岸域に位 置する地下施設において実証試験および実際の施工が行われています。 ただし、海水条件下での溶液型グラウトの固化のメカニズムは不明で、施 工方法も未確立です。このような背景を踏まえて、以下の課題を設定し、 3年程度をかけて溶液型グラウトに関する研究を行う計画です*³⁸。

・海水条件下におけるグラウト材の特性データの拡充

・長期挙動の現象理解・モデル化・数値解析

・グラウト設計技術、影響評価技術の更新・適用性確認

平成28年度は、既存の知見及び課題の整理を行うとともに、室内試験 により、溶液型グラウト材の特性データを取得しました。具体的には、人 工海水、50%人工海水および精製水の3つの条件で、基本特性として基 本配合と固化時間の取得および強度試験(一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、 せん断試験)を実施し、施工特性および止水特性に関連する試験として白 濁試験と粘性測定試験を実施しました。各試験の状況を図47に示しま す。

^{*38:}本研究は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業(平成28年度地層処分技術調査等事業:沿岸部処分シス テム高度化開発)の一環として実施しました。

試験結果の一例として、固化試験の結果を図 48 に示します。試験の結果、固化時間(ゲルタイム)は硬化促進剤の量とグラウトの pH に影響を 受けること、ゲルタイムは人工海水の場合が最も短いことなどが分かり ました。



(a) 一軸圧縮試験(b) せん断試験(c) 白濁試験(d) 粘性測定試験図 47 溶液型グラウトを対象とした室内試験の状況



3.3 地質環境の長期安定性に関する研究

3.3.1 地質環境の長期的変遷に関する研究

本研究では、地下施設と地表で取得する地質のデータ、地下水のデータ、 地形のデータなどを利用して、海水準変動や地殻変動による長期的な変 化が地質環境に与える影響を評価する手法の開発を行っています。

平成28年度は、幌延地域に分布する稚内層および声問層の割れ目に認 められる炭酸塩鉱物に着目した調査研究を行いました。地層中に含まれ る炭酸塩鉱物からは、過去に鉱物が沈殿・形成された際の地下水が置かれ ていた環境(pHや酸化環元状態、温度、塩分濃度など)を推定するための 情報(炭素同位体組成、酸素同位体組成、微量元素濃度、結晶形など)を 得ることができます。幌延では、稚内層の割れ目には炭酸塩脈が見られま すが、声問層の割れ目にはほとんど見られません。炭酸塩鉱物は、地下水 中の二酸化炭素が微生物活動によりメタンに還元される際などに沈殿・ 形成されます。稚内層は声問層と比較して、過去の最大埋没時により深部 まで埋没されており、地層中に含まれる有機物が比較的低温の熱によっ てより多く分解されているために、隆起後の現在の環境では、稚内層中の 有機物は自然状態ではほとんど分解しない状態にある可能性が分かりま した。一方で、3.1.1(3)で述べたように、地下には二酸化炭素を消費して メタンを生成する微生物が存在しています。このため、稚内層では、地下 水中の二酸化炭素は微生物活動により消費される一方ですが、声問層で は、非常にゆっくりではあるものの、低温環境での有機物の熱分解が生じ るため、二酸化炭素は微生物により消費されるのみではなく、有機物の分 解により供給されていることが考えられます。二酸化炭素が供給される 環境では、炭酸塩鉱物は沈殿・形成されにくくなります。このように、稚 内層と声問層での炭酸塩鉱物の成因の違いは、過去の地殻変動に伴う地 層中での有機物の長期的な変化の違いと関連していることが明らかにな りました(図 49)⁽¹⁴⁾。なお、この成果は、産業技術総合研究所との共同 研究により得られたものです。



図 49 有機物の分解に着目した炭酸塩の形成環境⁽¹⁴⁾

(a)最大埋没時の声問層中では、微生物活動によるメタン生成と有機物分解による二酸化炭素の供給が同時に起きていたと考えられます。(b)現在の声問層では、反応速度は遅いものの、 メタン生成と二酸化炭素の供給は続いていると考えられます。(c)現在の稚内層では、二酸化 炭素の供給が少ないために、炭酸塩が形成しやすいと考えられます。(d)最大埋没時の稚内層 では、低温環境では有機物がこれ以上分解されない状態であったことが考えられます。

また、平成27年度⁽⁴⁾に引き続き、地形、地質構造や地下水の流れ、水質 などの長期的な変化を理解するための調査からモデル化解析・評価に至 る一連の方法論の体系化を進めました。平成28年度は、平成27年度までに 実施してきた地質環境の長期的な変化を考慮したモデル化・解析による 検討結果を踏まえて、地質構造モデル(地形モデルおよび地質モデル)の 構築と地質構造モデルをベースとする水理地質構造モデルを用いた地下 水流動解析・評価に至る一連の作業プロセスを作業フローとして整理す るとともにそれぞれの作業に内在する不確実性の抽出・整理を行いまし た⁽¹⁵⁾。表 2に一例として地質構造モデルを構築するための作業プロセス (作業項目・作業内容)およびそれぞれの作業において内在する不確実性 とその発生要因について整理した結果を示します。

表 2 作業項目と内在する不確実性(地質構造モデルの例)

作業の流れ	作業内容	不確実性	不確実性の発生要因
①情報の収集・整理	既存文献や調査結果に基づいて、地形 (陸上,海底)及び地質の分布・形状、 海岸線位置の変動範囲(沿岸地域の場 合)及びそれらの変化(地史)に関わる 情報や着目すべき地形・地質要素を把握 するための地下水流動解析結果などの情 報を収集・整理する。	地形・地質の分布・形状 とその変化に関する情報 の精度や解釈の違い	情報の欠如による理解不足や手法の違い (地形学的、地質学的、地球物理学的な ど)により異なる結果や解釈が得られる可 能性がある。
②FEP解析に基づく考慮すべき事象の抽	収集・整理した情報に基づいて対象地域 におけるFEP解析を実施し、百万年程度 の期間で考慮すべき事象を抽出する。	抽出したFEPの適切性	収集した情報の不確実性や情報の欠如によ る理解不足により、関連するすべての事象 が抽出できない(または、除外されたFEP が適切でない)可能性がある。
 ③編年表/シナリオの作成 	百万年程度の期間を対象に抽出した事象 を時系列で整理(気候・地形・地質・テ クトニクスなどを時系列で並べた編年表 を作成)するとともに、分野間で整合の 取れた長期変遷シナリオを作成する。	地形・地質事象に関す る天然のプロセスの理 解	編年表に整理する各事象の発生時期や事象 間の関連性(シナリオ)には、収集した情 報の不確実性や情報の欠如による理解不足 による影響が含まれており、複数のシナリ オが想定できる可能性がある。
④モデル化領域の設 定	概括的な地形・地質分布に基づいて、評価対象となる領域を通過する地下水流動 系を包含しつつ、地下水の分水界となる 尾根や河川などを境界とした領域を設定 する。	モデル化領域設定の違い	百万年程度の期間では、海水準変動や地殻 変動に伴う地形・地質分布の変化によっ て、地下水の分水界となる尾根や河川など が変化し、評価対象領域を通過する地下水 流動系に影響を及ぼす可能性がある。
⑤概念モデルの構築	抽出した事象とシナリオに基づいて、考 慮すべき事象とその変遷に関して概念的 に記述したモデルを作成する。	地形・地質事象に関す る天然のプロセスの理 解	各事象に対して収集した情報や編年表・シ ナリオの不確実性(例えば、事象の時空間 分布の解釈の違いなど)により、複数の概 念モデルが構築できる可能性がある。
⑥数値モデルの構築	概念モデルで表示した各事象に関して、 収集した情報に基づき、百万年程度の期 間の数値モデルを作成する。	数値モデルの構築方法	数値的なばらつきや異なる解釈がある情報 の取り扱い方や単純化の方法、地形・地質 の分布・形状の復元プロセスの違いなどに よって、複数の数値モデルが構築できる可 能性がある。

FEP : Features, Events and Processes (OECD/NEA, 2000⁽¹⁶⁾)

地質構造モデルは、地表環境や地下水の水理、地球化学などの地質環境 を評価するための基盤のモデルであり、地質構造モデルで記述する地形 および地質構造とその変化が地表環境や地質環境に影響を与えることか ら、地質構造モデルの構築のプロセスと内在する不確実性を明確にして おくことは重要です。表 2で整理した不確実性のうち、⑤概念モデルの 構築と⑥数値モデルの構築に着目すると、⑤概念モデルの構築では、その 上流の①~③の作業の不確実性が影響し、そこに含まれる不確実性に起 因して、複数の概念モデルが構築できると考えられます。例えば、幌延地 域では、サロベツ断層の分布・形状やサロベツ断層と大曲断層の活動開始 時期が複数想定できることや、隆起・侵食に伴う高透水性割れ目の形成・ 発達、氷期における不連続永久凍土の形成などの事象が挙げられ、これら の事象の取り扱い方によって複数の異なる概念モデルが設定できます。 ⑥数値モデルの構築では、概念の違い(事象の時空間分布の解釈の違い) や情報の数値的なバラツキの取り扱い方、地形・地質構造の分布・形状の 復元プロセスの違い、データ補間の違いなどにより、複数のモデルが構築 可能と考えられます。

そこで、平成28年度は、古地形復元の概念・プロセスの違い、データ補間の違いを考慮した複数の三次元地質構造モデルを構築するとともに、 気候変動(涵養量^{*39}と海水準の変動)幅も考慮した地下水流動解析を実施 しました。

古地形復元の概念・プロセスの違いについては、幌延断層周辺の丘陵の 発達時期とそれに伴う復元手法の違いであり、100万年前を対象に幌延断 層周辺の丘陵・山地の発達時期が異なる2つの地形モデルを構築しました。 それらの地形モデルの違いは、100万年前当時の幌延断層周辺の丘陵・山 地がどれくらいの標高であったかが不確かであることに起因しており、 図 50の地形モデルでは、周辺の堆積岩の堆積環境と時代など(例えば、 新里ほか(2007)⁽¹⁷⁾など)から、150万年前当時に海底にあった平らな地 形が150万年かけて現在の高さになったと仮定し、その仮定のもと100万 年前にはどの程度の高さにあったかを算出して構築しました。一方、幌延 地域の地質構造は、約230万年前から始まった東西圧縮応力場により形成 されていると考えられ、それ以降、東側からの短縮が顕著で、東から順次、 地質構造が形成されたと考えられていること(例えば、新里ほか(2007)⁽¹⁷⁾) などから、幌延断層以東では、100万年前以降には既に平衡状態(隆起速 度=侵食速度)にあった可能性も考えられます。図 51の地形モデルでは、 この仮定のもと、幌延断層以東の100万年前の地形が現在と同じ標高であ ったとして構築しました。なお、これらの地形モデルは、ESRI® ArcGIS® 10.4を用いて作成しました。

^{*39:}地表の降水や河川水が地下に浸透して地下水になる量をいいます。



データ補間の違いについては、幌延断層が活断層であることを示唆す る証拠は確認されていないことから、図 51の100万年前の地形モデルに おいて、幌延断層において断層崖が生じることがないよう傾斜補正を行 いました。図 51(a)では大曲断層以西の向斜(サロベツ向斜)から幌延断 層の区間(図 52(a))を、図 51(b)では大曲断層から幌延断層の区間(図 52(b))を傾斜補正区間としました。構築した地形モデル(図 50および図 51)を比較すると、現在の海岸線(汀線)より西側では、各モデルとも同 じ古地形の復元方法・補間方法による地形モデルであることから、100万 年前の寒冷期の海水準(標高-120mまたは-150m)の汀線位置は、各モデル とも共通して数十km程度西方に移動し、陸域が拡大しています。一方、現 在の汀線位置より東側では、上述した古地形復元の概念・プロセスとデー タの補間方法の違いによって構築したモデルの地形標高が異なることか ら、温暖期の汀線位置(標高0m)は異なるものとなります。







(a) サロベツ〜幌延ブロック(サロベツ向斜〜幌延断層間)において、サロベツ向斜で傾 斜補正量0m、幌延断層で幌延断層以東の標高と同じになるように傾斜補正



の人曲~幌延ノロック(人曲断層から幌延断層面)において、人曲断層で傾斜補正重 Om、幌延断層で幌延断層以東の標高と同じになるように傾斜補正

図 52 古地形復元のための地形ブロック区分と傾斜補正区間

次に、構築した地質構造モデルをベースとした三次元水理地質構造モ デルを用いた地下水流動の感度解析を実施しました。その結果、地形復元 の概念・プロセスの違いは、データ補間の違いよりも地下水流動への影響 度が大きいことがわかりました。また、気候変動の不確実性(涵養量の変 動幅および海水準の変動幅)に着目すると、温暖期と比較して寒冷期のほ うが地下水流動に対して影響が大きいことがわかりました⁽¹⁵⁾。平成28年 度に実施したモデル構築の作業フローに内在する不確実性を考慮した複 数の地下水流動の感度解析から、地下水流動状態の長期変動性の評価に おいて重要な不確実性要因を抽出するとともに、それらの不確実性が地 下水流動状態の長期変動性評価に及ぼす影響を定量的に把握することが できました。

今後は、地下水流動と地下水の水質(塩分濃度)分布の解析を行い、その結果を既存のボーリング調査に基づく地下水年代や塩化物イオン濃度 と比較することで、長期的な変化を考慮したモデル化・解析(地下水の滞 留時間や塩分濃度分布)の妥当性について検討するとともに、引き続き、 地形・地質構造や地下水の流れ、水質などの長期的な変化を理解するため の調査からモデル化解析・評価に至る一連の方法論の体系化を図ってい きます。

3.3.2 地震研究

平成28年度は、地震や断層の動きによって生じる地質環境への影響の 把握やその長期的な変化の大きさや変化した時期の推定結果を検証する ための地震動データを取得することを目的として、平成27年度に引き続 き、上幌延観測点(図 4)において地震観測を行いました。平成28年度中、 震度1以上に相当する地震を観測した回数は3回(幌延町宮園では4回)あ り、そのうち最も大きいものは震度2に相当しました(3.2.1参照)。

また、地下施設では、「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」の 一環として、断層や割れ目の位置、特徴などを推定することを目的に、平 成27年度から深度350m調査坑道と3つの立坑の坑底に設置した地震計(14 台)で微小地震の観測を行っています(図 53)。



深度 350m 調査坑道 平面図図 53 地下施設に設置した地震計

平成28年度は、水圧擾乱試験の予備試験(3.1.1参照)が実施されたこ とから、全地震計(3成分)すべての観測データを用いて簡易的に振動の 相関性に関する解析を行いました(図 54)。試験時間帯(図 54(a))で は、すべての時間において低周波数帯域(~5Hz)で相関指数値が高く、 とくに、12:00:50付近と12:54~12:57付近には、5Hz以上の周波数帯域で も高い相関指数値を示していることがわかります。一方、試験が行われて いない時間帯(図 54(b))では、試験時間帯と比べて相関指数値が低いこ とがわかります。これらのことから、試験時間帯(図 54(a))の観測デー タには、設置した複数の地震計に共通する振動が含まれており、試験が行 われていない時間帯(図 54 (b))の観測データは、定常的に発生してい る相関性の低いバックグラウンドノイズを示していると考えられます。



(b) 水圧擾乱試験前(8/2500:00から1時間)の相関指標値 縦軸:周波数(Hz)、横軸:時間(分)、カラーバー:相関指数値 相関指数値は0~1の間の値をとり、全地震計の波形(スペクトル)が一致すると1となる

図 54 全地震計のデータを用いた相関解析結果

試験時間帯では、前述のとおり、12:00:50付近と12:54~12:57付近に高 い相関指数値(以下、高相関値)が認められ、このうち、12:00:50付近の 高相関値は、2016年8月25日12:00:43に天塩町内において発生したMO.9の 自然地震(気象庁一元化処理震源リスト;震源の深度(km):10.1±2.0、 震源と地下施設の観測点との距離(km):28)によるイベントであると考え られます。また、これらの高相関値を示す部分の振幅を比較した結果、そ れらは同程度の振幅を持つことがわかりました。12:54~12:57付近につ いては、原記録波形から12:54頃に何らかのイベントが含まれていること が確認できましたが、このイベントが坑道内のノイズ(エレベータ稼動や 坑内作業など)であるのか、水圧擾乱試験によって発生したせん断変形の 応答であるのかは、さらなる検討が必要です。

今後も引き続き地震観測を継続し、地震波形データから微小地震の分 布を把握するとともに、地震や断層活動が地質環境に与える影響につい て、取得データを用いた解析により推定していく予定です。

4. 地層処分研究開発

4.1 処分技術の信頼性向上

平成28年度は、人工バリア性能確認試験およびオーバーパック腐食試験を継続するとともに、低アルカリ性セメント系材料の影響評価試験、緩 衝材の定置試験、オーバーパックの溶接部腐食試験、無線モニタリング装置の適用性確認などを実施しました。また、搬送定置・回収技術の実証試験に向け、試験坑道の整備を行いました。

4.1.1 人工バリア性能確認試験

深度350m調査坑道の試験坑道4(図 5)における人工バリア性能確認試 験(図 55)は、幌延を事例として、①地層処分研究開発の第2次取りまと め報告書⁽¹⁸⁾で示した処分概念が実際の地下で構築できることの実証、② 人工バリアや埋め戻し材の設計手法の適用性確認、③熱-水理-力学-化学連成挙動に係るデータの取得を目的として実施するものです。



平成28年度は、平成26年度に開始した加熱および注水を継続し、データの取得を継続しました。注水は、加熱開始の翌日(2015年1月16日)から開始し、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、最初は150 mL/minと設定し、各センサーの計測値などを見ながら、注水量を増加させてきました。平成28年10月からは緩衝材への注水量を約1000mL/min
に設定しています(図 56)。図 57に緩衝材5段目の温度分布の経時変化 を示します。加熱を始めてから徐々に上昇し、123日以降ほぼ同じ温度を 示していましたが、781日時点ではわずかに温度が低下する傾向が見られ、 注水量の増加が影響を及ぼしたと考えられます。



図 56 緩衝材への注水量の経時変化



図 57 緩衝材(5段目)の温度分布

図 58に比抵抗トモグラフィ^{*40}を用いて測定した緩衝材の水分飽和度 を示します。加熱が開始された後、徐々に中心(模擬オーバーパック)付 近の飽和度が低下するとともに周辺の飽和度が増加しており、測定開始 からおよそ250日以降は緩衝材のほぼ中間にまで地下水が浸潤してきて いると考えられます。また、緩衝材5段目に設置した土圧計による緩衝材 の径方向の膨潤圧の測定結果を図59に示します。図から、時間の経過に伴 い、膨潤圧が徐々に上昇し、TP010およびTP011で膨潤圧が大きくなってお り、TP010の位置(緩衝材外側から約30cm)までは地下水が浸潤している ことが示唆され、上記の比抵抗トモグラフィの結果と概ね整合する結果 が得られています。

今後は各種センサーによる計測を継続し、データの拡充および計測センサーの長期性能の確認を行うとともに、解析的な検討もあわせて実施 していきます。



図 58 緩衝材の飽和度の経時変化

^{*40:}配置された電極に電流を流し、その時の電圧分布から地下の比抵抗の分布を解析によって推定する技術で、 地下水の分布や地質構造を推定する技術として利用されています。



図 59 緩衝材の膨潤圧の経時変化

4.1.2 オーバーパック腐食試験

深度350m調査坑道の試験坑道3(図 5)におけるオーバーパック腐食 試験は、幌延を事例として、塩水系地下水環境におけるオーバーパック の耐食性*⁴¹や腐食モニタリング手法の適用性を例示することを目的と して実施するものです。本試験では、オーバーパックの耐食性を中心に、 コンクリート支保の影響についても検討するため、実物よりも縮小した 模擬オーバーパックおよび緩衝材を、低アルカリ性のコンクリート材料 の中に設置し(図 60)、平成26年度に試験を開始しました。試験では、 緩衝材の下から2段目、6段目、10段目に設置した炭素鋼腐食センサーに

^{*41:}金属の腐食(さび)に対する抵抗性のことで、耐食性のある合金として、一般的にはステンレス鋼やアルミニウム系合金など、オーバーパックの候補材料としては銅やチタン合金などがあります。

より交流*42インピーダンス*43を測定し、腐食の速度を評価します。

平成 28 年度は、平成 26 年度から引き続きヒーターの温度を 95℃に固定し、測定を継続しました。測定結果の例として、6 段目の炭素鋼腐食センサーの結果を示します。なお、センサーの配置は図 61 に示すとおりで、炭素鋼腐食センサーは北から右回りに 45°、135°、225°、315°の位置です。



図 61 緩衝材 6 段目の計測センサー配置

^{*42:}電流には、直流と交流があり、交流は電流の流れる向きが周期的に変化している電流のことです。その周期 を"周波数"と呼びます。普段私たちが使っている電気も交流であり、その周波数は、東日本では 50Hz (ヘルツ)、 西日本では 60Hz となっています。50Hz とは、1 秒間に 50 回向きが変わることを意味しています。

^{*43:} インピーダンス (Z) とは、電気回路のうち、交流回路における電圧 (V) と電流 (I) の比で表される値で、単位は Ω (オーム)です。直流回路における抵抗に相当し、Z=V/I となります。

腐食速度に関する測定として、炭素鋼腐食センサーに対して1~2ヶ月 に1回程度、周波数範囲を0.001Hz~100,000Hzとする多周波数測定を手動 で行いました。測定の結果を解析し液抵抗Rs (低周波側のインピーダンス) と分極抵抗Rp(高周波側のインピーダンス)を求めた結果を図 62に示し ます。液抵抗Rsは10~20 Ω cm²の値を示しており、センサーの設置位置に よる違いや経時変化は小さいものの、これまでに引き続き時間とともに わずかに上昇する傾向を示しました。一方、分極抵抗Rpの値は250日程度 までは時間とともに上昇する傾向を示しており、腐食速度が経時的に低 下していると考えられます。250日以降はRpの値がほぼ一定となっている ことから、腐食速度もほぼ一定で経過していると考えられます。腐食速度 は80日後で6~60µm/年、250日以降では2~5µm/年となり、室内試験⁽¹⁹⁾ の結果と整合しています。このことから、原位置環境においても炭素鋼腐 食センサーによって概ね妥当な測定ができていることがわかります。ま た、原位置試験においても室内試験と同様に、センサー近傍の酸素濃度の 低下や腐食生成物の被膜形成によって腐食の進行が抑制されていること が示唆されます(19)。

今後は、計測を継続し、腐食速度の変化などについてデータを拡充する とともに、試験体の取り出しおよび解体・分析に向けた計画について検討 します。



4.1.3 搬送定置・回収技術の実証的検討に関する研究

原環センターとの共同研究として、搬送定置・回収技術の実証的検討に 関する研究を実施しました。

平成28年度は、地上の施設(地層処分実規模試験施設)において緩衝材 定置試験および緩衝材中に水が浸潤して隙間が閉塞される過程を観察で きる可視化装置を用いた浸潤試験を継続するとともに、緩衝材除去装 置*44のうち、塩水リユース設備を実規模試験施設に搬入し、公開を開始し ました。また、地下施設を用いて行う、搬送定置・回収技術の実証試験に 向け、試験坑道の整備を行いました。

(1) 緩衝材定置試験

緩衝材定置試験設備(図 63)にて、模擬緩衝材ブロック(以下、緩衝 材ブロック)の1段分(8個または9個)を一括して模擬処分孔に搬送およ び定置し、その定置状態を確認しました。具体的には、4段目の緩衝材ブ ロック(8個)を模擬処分孔へ定置する作業を繰り返し実施し、作業の再 現性、速度や精度(各緩衝材ブロック間のずれ)を確認しました。なお、 この試験は「おもしろ科学館2016 in ほろのべ」(平成28年7月開催)で 一般公開しました(写真 3)。



^{*44:} 塩水を噴射して緩衝材を除去する装置です。



写真 3 緩衝材定置試験の公開の様子

(2) 緩衝材の浸潤挙動に係る試験

緩衝材の浸潤挙動を確かめるために、緩衝材中に水が浸潤し、隙間が閉 塞される過程と浸潤後の緩衝材の密度分布、含水比分布を確認しました。 平成28年度は、試験容器を鋼製からアクリル製に変更し、隙間における緩 衝材挙動を上面及び側面から観察できるように試験装置を改良しました。 試験では、緩衝材の上端面に設けた隙間が、水の浸潤により閉塞する様子 を確認しました(図 64)。



図 64 緩衝材可視化試験状況

(3) 地下環境での搬送定置・回収試験に向けた施設の整備

原環センターとの共同研究として、地下環境での搬送定置・回収技術に 関する研究を継続しました。地下環境での搬送定置・回収技術の実証試験 は、平成26年度までに同センターとの共同研究として実施してきた地層 処分実規模試験施設を活用した工学技術に関する研究で計画していたも のです^{(20) (21) (22) (23) (24) (25)}。

平成28年度は、地下実証試験の実施場所として選定した試験坑道2の整備を行いました。具体的には、処分坑道横置き定置方式の搬送定置・回収 技術の実証試験に向けて、試験坑道内にコンクリート製の坑道面の施工 や資材を仮置きするための作業台の設置などの工事を実施しました (写真 4)。



(a) 整備前(b) 整備後写真 4 実証試験に向けた試験坑道2の整備の様子

4.1.4 人工バリアなどの健全性評価および無線計測技術の適用性に関する研究

平成25年度から原環センターと実施している共同研究であるオーバー パックおよび緩衝材の健全性評価手法の構築および地中無線計測技術に 関わる研究を平成28年度も継続して実施しました。

オーバーパックおよび緩衝材の健全性評価手法の構築に関しては、こ れまでの研究により、オーバーパックの溶接部分の腐食現象や、定置され た緩衝材が地下水によって削られて流出する現象(パイピング/エロージ ョン)が、緩衝材の品質や長期健全性に影響を及ぼす要因のひとつである ことがわかっています。人工バリアの長期健全性に対する信頼性を向上 するためには、地下の環境条件でのオーバーパックおよび緩衝材に生じ るこれらの現象を調査することが重要です。一方、地中無線計測技術に関 しては、実際の深部地下環境での適用性を確認し、これらの技術の信頼性 を高めることが重要です。このような背景のもと、平成28年度は、試験坑 道5において、オーバーパック溶接部の腐食試験を継続するとともに緩衝 材流出試験を実施しました。また、試験坑道4で行われている人工バリア 性能確認試験の緩衝材および埋め戻し材中に設置した無線モニタリング 装置による計測を継続しました。

(1) オーバーパック溶接部腐食試験

地上の実験室で行われる溶接部の腐食試験では、試験体の大きさや地 下の環境条件を完全に模擬することができないため、地下環境において 実際にオーバーパック溶接部で生じる腐食現象を把握するための試験を 継続しています。

平成26年度に溶接部付きの試験体(模擬オーバーパック)と緩衝材ブロ ックを試験孔に設置して、岩盤からの地下水を使用した腐食試験を開始 しました(図 65)。平成27年度には、模擬オーバーパックの内部にヒータ ーを設置し、処分場におけるガラス固化体の発熱を考慮して、模擬オーバ ーパックの外表面の温度が80℃になるようにヒーターの出力を調節して います。

平成 28 年度は、継続して腐食速度などの試験データを取得しました。 試験開始後の経過日数と腐食速度の関係を図 66 に示します。腐食速度の 測定値にはバラツキが見られますが、試験開始後 300 日以降は 10 µ m/年 以下の腐食速度になっています。今後も試験装置の適切な維持管理を実 施しつつ、腐食に関するデータを取得していきます。

75



図 65 オーバーパック溶接部腐食試験の概要⁽⁴⁾





(2) 緩衝材流出試験

緩衝材の主な成分であるベントナイト*45は水を吸収して膨潤する性質 があります。そのため、地下水が浸透することによって、緩衝材と岩盤、 緩衝材とオーバーパックなどの隙間を埋めて地下水の流れを止める働き をします。ただし、地下水の流れが速いと緩衝材の内部に地下水が浸み込 む前に表面のベントナイトが流されることがあります。緩衝材の流出現 象が起こる条件を確認し、起こる場合には工学的な対策を検討すること が必要です。

これまでに実施した実験室での試験の結果、緩衝材の定置後に地下水 が緩衝材に浸潤する過程の初期を模擬した条件で、緩衝材の流出が発生 すると水の流路(水みち)ができること、塩分濃度が高い場合には時間が 経つと緩衝材の流出量が減少することなどがわかっています⁽²⁶⁾。また、 地下の試験孔に緩衝材を定置し、岩盤の割れ目からの地下水を模擬して 試験孔の下部から注水した試験の結果から、緩衝材の上部が開放された 状態では、実験室での試験と同じように水みちが生成されること、水みち が生成される時の水圧は約0.04MPaであることがわかりました⁽²⁶⁾。

実際の処分孔竪置き方式においては、緩衝材の上部は埋め戻されるため、上部への膨潤は抑制されると考えられます。平成28年度は、そのような状態を模擬するために、緩衝材が上部に膨潤するのを防ぐ蓋を上部に設置して緩衝材流出試験を行いました。写真 5に試験体を図 67に緩衝材流出試験の概略図を示します。

^{*45:}ベントナイトは粘土鉱物のスメクタイトと石英などの鉱物から構成され、地層処分における人工バリアシス テムに用いる緩衝材の候補材料です。



写真 5 緩衝材流出試験の試験体





注水ボーリング孔から0.1mL/minの一定流量で水を注入した試験の結 果、緩衝材側部の土圧が上昇し、緩衝材と岩盤の間にあった約2cmの隙間 が埋まったことが確認できました。また、この土圧は緩衝材に求められて いる膨潤による自己シール性を達成するのに十分な圧力でした。土圧の 上昇に伴い、注水区間の水圧も上昇しましたが、約0.05MPaまで上がった 後はほぼ一定になりました(図 68)。平成27年度に実施した試験では、水 みちが生成した時に水圧が急激に下降したため、今回の試験では緩衝材 の上部に蓋を設置し、緩衝材の体積を拘束したことにより、水みちができ なかったことが予想されます。注水ボーリング孔から食紅で着色した地 下水を注入しましたが、緩衝材の上部からは排出されず、注水ボーリング 孔から繋がっている水みちは確認されませんでした。試験後に引き上げ た緩衝材の表面にも水みちは見られなかった(図 69(a))ため、緩衝材が 膨潤して止水性を発揮したことにより、表面のベントナイトが流される 状態にはならなかった可能性があります。さらに、緩衝材を引き上げた後 に解体したところ、水は表面から5cm付近まで浸潤していました(図 69(b))。このことから、緩衝材は完全に浸潤しなくても定置後の比較的早 い時期から、表面の膨潤によって止水性能を持つことが今回の試験で示 されました。

今後、試験孔周囲の岩盤の透水性に関する調査なども実施し、緩衝材の 流出が起こる条件を確認することを計画しています。





図 69 引き上げた緩衝材の外観

(3) 無線モニタリング装置の適用性確認

深度350m調査坑道の試験坑道4では、様々なセンサーを使って人工バリ アの挙動を計測・評価する人工バリア性能確認試験を行っています (4.1.1参照)。センサーとデータの受信装置の間はケーブルで接続され ているのが一般的ですが、このケーブルの周りが水みちとなって計測す る環境を乱す要因となることがあります。また、多くのセンサーを使う場 合、ケーブルの本数が膨大になり、組み立て作業時の煩雑さや断線などに より計測システムの信頼性に影響を及ぼすことも考えられます。このよ うな課題を解決する方法として、ケーブルを使わずに電磁波を用いてデ ータを送信する地中無線技術を人工バリア性能確認試験に適用し、岩盤 やコンクリートなどを介した電磁波の減衰や、装置に内蔵された電池の 寿命を評価する試験を実施しています。

本研究で開発した地中無線伝送システムの装置構成を図 70に示しま す。人工バリア性能確認試験の緩衝材と埋め戻し材の中にセンサー付 き小型送信器が埋め込まれています。このセンサーにより間隙水圧や 緩衝材の膨潤圧を測定し、送信器が無線でデータを送信します。一方、 試験坑道4に設置されたプラグの外側のボーリング孔内には、受信ア ンテナと受信装置が設置されており、送信装置から送信されたデータ は、緩衝材、埋め戻し材、岩盤、プラグを通過して、ケーブルを介さ ずに受信装置へ届きます。



図 70 地中無線伝送システムの装置構成イメージ

平成26年度に人工バリア性能確認試験の緩衝材および埋め戻し材装置 内に設置した緩衝材や埋め戻し材の土圧を計測するための全圧計と間隙 水圧計を接続した7体の小型送信装置を設置しました⁽²⁷⁾。設置後に土圧と 間隙水圧の計測を開始しており、小型送信装置は、自動的に1日に1回の計 測を行い、1週間分のデータを無線で送信しています。

平成28年度は、引き続き計測と無線によるデータ送信を行っています。 土圧と温度の計測データの例を図71に示します。注水量の増加(図 56を 参照)に伴い土圧が上昇している傾向が見られ、センサーおよび送信装置 が機能していることを確認しました。今後も、無線によるデータ送信技術 の適用性を確認する試験を継続して実施していきます。



4.2 安全評価手法の高度化

安全評価手法の高度化では、人工バリアや天然バリアにおける物質 の移行挙動を解析・評価するための基礎データや知見を整備していま す*46。平成28年度は、深度350m調査坑道において、健岩部および割れ 目を対象とした原位置トレーサー試験を行いました。また、前年度実 施した、健岩部を対象としたトレーサー試験後に採取したコア試料を 用いて室内試験を進めました。なお、原位置トレーサー試験で使用し たトレーサーはすべて一般に販売されている試薬であり、放射性トレ ーサーは使用していません。

4.2.1 健岩部を対象とした物質移行試験

平成28年度は健岩部における地下水中の塩分濃度の違いによる拡散/ 収着*47挙動の違いを評価するために、健岩部(稚内層)を対象とした物質 移行試験を行いました。350m 調査坑道の底盤から鉛直方向に 3m 程度のボ ーリング孔を3本掘削し、水理試験の結果から、健岩部相当の透水性で あると評価された区間を試験区間としました。その後、図 72 に示す原位 置トレーサー試験装置を設置し、3 孔それぞれで試験区間内の塩化ナトリ ウム濃度を変化(D-06:約10%、D-07:約4%(海水相当)、D-09:1%未満 (原位置地下水相当)) させた状態で、試験区間にトレーサーを循環させ て試験を行いました。試験期間中は試料採取ユニットから定期的に採取 した水のトレーサー濃度の分析を行うとともに、拡散試験中における試 験孔内および試験孔周辺の地下水の塩分濃度の経時変化を推定するため に、試験孔内の地下水の塩分濃度(主に、Na⁺と Cl⁻濃度)の分析を行いま した。トレーサーは重水や蛍光染料(ウラニン*48)などの非収着性の物質 やセシウムやユウロピウムなどの収着性の物質を混合したものを使用し ました。図 73 に各孔のセシウム、重水、ヨウ素の濃度の経時変化を示し ます。セシウムおよび重水については、各孔とも時間経過に伴い濃度が減 衰しており、収着性のトレーサーであるセシウムの方が速い濃度減衰を

^{*46:} 岩盤を対象とした原位置トレーサー試験については、これまで調査技術開発として地層科学研究の項目に記 載していましたが、人工バリアを対象とした原位置トレーサー試験とあわせて評価することから、安全評価手 法の高度化の項目にまとめて記載しています。

^{*47:}地下水中にある元素が、岩盤などに取り込まれる現象です。

^{*48:}黄緑色の蛍光染料で、フルオレセインナトリウムともいいます。化学式は C20H10Na2O5 であらわされます。トレーサー試薬としての利用のほか、入浴剤の着色料などとしても利用されています。

示していることがわかります。また、ヨウ素については、試験開始から約 2ヶ月の期間では、顕著な濃度変化は確認できませんでした。次に、各孔 における濃度変化を比較すると、陽イオンであるセシウムでは、塩分濃度 が高いほど濃度減衰が遅れている一方で、中性である重水や陰イオンで あるヨウ素では、顕著な濃度減衰の違いは見られませんでした。既存の室 内試験結果から、稚内層中において、陽イオンはイオン強度が高いほど実 効拡散係数が低くなり、陰イオンはイオン強度が高いほど実効拡散係数 が高くなる傾向にあることがわかっており⁽²⁸⁾、セシウムについては原位 置試験においても整合的な結果が得られていることがわかります。ヨウ 素において、原位置試験と室内試験結果で整合した結果とならなかった 点については、引き続きデータを蓄積した上で検討していきます。

平成 27 年度に実施した拡散試験において採取したボーリングコア試 料⁽⁴⁾を利用し、層理面に対して複数方向に研削を行い、マトリクス中にお けるトレーサー元素の濃度プロファイルを取得しました。図 74 に D-05 におけるトレーサー濃度プロファイルを示します。陽イオンのセシウム とストロンチウムについては、層理面に対して走向方向および傾斜方向 でプロファイルに顕著な差異が見られないものの、鉛直方向については、 その差異を確認することができました。一方、陰イオンであるヨウ素につ いては、その差異はわずかでした。次に、得られた濃度プロファイルのう ち、走向方向の濃度プロファイルとトレーサー試験区間内の濃度減衰曲 線について一次元の拡散試験解析コード⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾を用いて同時フィッティ ングを行い、各トレーサーの実効拡散係数と収着分配係数を導出しまし た。図 75 に減衰曲線の解析結果、濃度プロファイルの解析結果、および 解析結果から導出された各トレーサーの実効拡散係数、収着分配係数を 示します。濃度プロファイルの解析結果から、ストロンチウムおよびヨウ 素については表面近傍(横軸の 0mm から数 mm の領域) とそれ以深とで、 二重のプロファイル(表面近傍は急峻な勾配、以深はなだらかな勾配)が 認められていますが、同時フィッティングの結果、以深の濃度プロファイ ルの方がフィッティング結果と整合的であり、主として拡散によるプロ ファイルであることが確認できました。一方で、表面近傍の濃度プロファ イルについては、試験孔掘削に伴う表面部分の物理的擾乱の影響もしく

は、高濃度のトレーサーを用いたことに起因する界面でのトレーサー の析出の影響が考えられます。実効拡散係数と収着分配係数について は、これまでに室内試験で確認されてきた傾向と概ね整合する結果と なりました。

さらに、今回の原位置試験から得られた多様なトレーサーの実効拡散 係数と収着分配係数について、既存の研究成果との比較分析を行いまし た。

図 76 に既存の2 例の室内試験結果に基づく各トレーサーの実効拡散 係数および収着分配係数(図中のHDB-6とSAB-2)および今回の原位置試 験結果に基づく実効拡散係数および収着分配係数(図中の D-05)を示し ます。実効拡散係数については、中性および陽イオン/陰イオンで室内試 験結果と概ね整合する結果となりました。また、中性のトリチウム水また は重水と比べ、陽イオンは実効拡散係数が高くなり、陰イオンはヨウ素を 除き実効拡散係数が低くなる傾向が室内試験結果と同様に確認できまし た。原位置試験結果のヨウ素の実効拡散係数が高い理由については、今後 詳細な評価を行っていく予定です。収着分配係数については、陽イオンで あるセシウムで室内試験結果と概ね整合する値が得られたとともに、2 価の陰イオンであるモリブデンとセレンを比較すると概ね整合する値が 得られました。一方で、高収着性トレーサーについては、ニッケルで室内 試験結果と原位置試験結果との間で収着分配係数に一桁以上の差異が確 認されたとともに、化学的性質が似ているアメリシウム(室内試験)とユ ウロピウム (原位置試験) との間で収着分配係数に一桁以上の差異が確認 されました。これら高収着性核種は pH の差異に起因する化学種の変化や それに伴う収着特性の変化の影響が大きいと考えられることから、これ らの影響について今後詳細な評価を進めていく予定です。

84



図 72 健岩部を対象とした原位置トレーサー試験装置の概念図



図 73 健岩部を対象とした原位置トレーサー試験の結果

濃度比は試験開始初期の濃度に対する比率を表しています。また、凡例の括弧内の 数字は各孔の試験区間内の塩分濃度を示しています。



(平成 28 年度地層処分技術等事業処分システム評価確証技術開発報告書⁽³¹⁾の図に一部追記)



図 75 D-05の解析結果⁽³¹⁾



図 76 原位置試験および室内試験で得られた各トレーサーの実効拡散 係数(D_e: 青色バー)および収着分配係数(K_d: 緑色バー)の比較 グラフの上部には試験条件を示しており、εは間隙率、/はイオン強度を表します。 横軸の括弧内の数字は価数を示しており、赤字が陽イオン、青字は陰イオンです。

4.2.2 単一割れ目を対象とした物質移行試験

平成28年度は平成26年度に開始した、単一割れ目を対象とした物質移 行試験を継続しました。具体的には、新たにボーリング孔を掘削し、非収 着性トレーサーを用いたトレーサー試験を実施しました。

トレーサー試験はトレーサー投入前の事前注水・揚水時間や注水・揚水 流量などを変化させ、合計7ケースの試験を実施しました。試験条件を表 3に、試験結果を図 77、図 78に示します。

注水流量と揚水流量を変化させることにより、結果のグラフの形状が 変化していることが確認できます。これは、流量を変化させたことにより、 トレーサーの移行経路が変化したことによる影響と考えられます。また、 1回目と5回目を比較すると同条件にも関わらず、結果に大きな違いが見 られます。これは、試験の回数を重ねるごとに、割れ目内の充填物等が移 動したことで、場の条件が変化したことが原因と考えられます。3回目と 4回目、6回目と7回目はトレーサー注入前に事前に実施する注水・揚水時 間を変化させることによる影響を検証しました。なお、その他の条件につ いては同一としています。これらの結果から、事前注水・揚水を長くした 場合、2つ目のピーク時間が遅くなっていることがわかります。これは、 事前注水・揚水を長くすることで、より遠方にも水が行き渡り、トレーサ ーの移行経路が変化していると考えられます。これらの結果に対して一 次元物質移行モデルによる逆解析を行った結果、物質移行特性の異なる 複数経路を仮定し、事前注水・揚水時間により経路長を変化させたモデル が整合的であることを確認しました。

今後は、収着性トレーサーを用いたトレーサー試験を実施するととも に、対象割れ目内に収着したトレーサー濃度を分析するためのボーリン グコア試料を取得します。それらの分析結果から物質移行特性の評価を 行い、室内試験との関連付けやアップスケーリング、性能評価モデルへの 反映手法も合わせて検討していく予定です。

	注水流量 [mL/min]	揚水流量 [mL/min]	事前注水·揚水時間 [min]				
1 回目	30	30	1389				
2回目	20	25	30				
3回目	40	30	45				
4回目	40	30	1370				
5回目	30	30	1200				
6回目	40	30	1150				
7回目	40	30	155				

表 3 試験条件



図 77 単一割れ目を対象とした原位置トレーサー試験の結果 (1回目、2回目、5回目)

凡例の括弧内の数字は注水流量と揚水流量(単位:mL/min)を示しています。



図 78 単一割れ目を対象とした原位置トレーサー試験の結果 (3回目、4回目、6回目、7回目)

凡例の括弧内の数字は注水流量と揚水流量(単位:mL/min)を示しています。

5. 地下施設の維持管理

5.1 地下施設の維持管理

平成28年度は、平成27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点検保守・修繕などを行い、地下施設の安全性確保 に努めました。主な業務内容としては、地下施設坑内に設置しているガス 検知器の動作確認、工事用エレベータ設備の点検・整備などを実施してい ます(写真 6)。



写真 6 地下施設の維持管理状況(機械設備の点検・整備)

5.2 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、当センターでは、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」という。)を定期的に実施し、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(写真 7)。

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 79)となっています。



写真7 掘削土 (ズリ)の保管状況



5.3 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、濁水処理設備、脱ホウ素設備、脱窒素設備、揚水 設備から構成される排水処理設備(写真 8)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、「6.1(2)地下施設からの排水の水質調査結果」に示します。



濁水処理設備



脱ホウ素設備



脱窒素設備



揚水設備



6. 環境モニタリング

平成27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当 センター周辺の環境影響調査を実施しました。

6.1 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)置場の環境への影響を監視す るため、近接する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。これらの分析結果の詳細については、幌延深 地層研究センターのホームページ^{*49}で公開しています。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。 当センターにおける排水系統と各水質分析用試料の調査地点を図 80 に示します。



^{*49 :} http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/suishitsu.html

(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。

平成28年度における天塩川への排水量は、表4に示す通りです。合 計排水量は、55,983m³であり、平成27年度(61,907m³)の約90%でし た。日最大排水量は、融雪により増水した掘削土(ズリ)置場の浸出水 を処理した4月の401m³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(750m³/日)を満足しています。また、月 排水量および日平均排水量についても、掘削土(ズリ)置場の融雪水を 多く処理した4月が最大となっており、月排水量が7,142m³、日平均排 水量が238.1m³でした。

年 月	月排水量(m ³)	日最大排水量(m ³) ^{※1}	日平均排水量(m ³)*2
平成 28 年 4 月	7, 142* ³	401* ³	238. 1 ^{*3}
平成 28 年 5 月	4, 202	291	135. 5
平成 28 年 6 月	5,004	296	166.8
平成 28 年 7 月	5, 220	363	168.4
平成 28 年 8 月	5, 337	361	172.2
平成 28 年 9 月	5,053	372	168.4
平成 28 年 10 月	4,958	339	159.9
平成 28 年 11 月	4, 513	329	150. 4
平成 28 年 12 月	4,078	264	131.5
平成 29 年 1 月	3, 288	272	106. 1
平成 29 年 2 月	3, 073	244	109.8
平成 29 年 3 月	4, 115	266	132. 7
合 計	55, 983	_	_

表 4 天塩川への排水量

※1:北るもい漁業協同組合との協定値は 750m³/日

※2:月排水量を月の日数で除した値

※3:各項目の最大値

(2) 地下施設からの排水の水質調査結果

地下施設から排出される「立坑の原水」および「掘削土(ズリ)置場の 浸出水調整池の原水」については、図81に示す通り、濁水処理や脱ホウ 素、脱窒素の排水処理を行った後、「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。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。

平成28年度における水質調査結果は、表5の通りであり、排水基準値 を超える処理済排水はありませんでした。



図 81 地下施設からの排水の調査地点

表 5 地下施設からの排水に係る水質調査結果

		過年度	平成28年度	(参考値)	
分析項目*1	調査地点 ^{※2}	平成18年12月 ~平成28年3月	平成28年4月 ~平成29年3月	水質汚濁防止法 排水基準	
カドミウム (mg/L)	立坑の原水	<0.01	<0.01		
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	<0.01	<0.01	0.03	
	揚水設備における処理済排水	<0.01	<0.01		
	立坑の原水	<0.01~0.08	<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	0.1	
(ing/ L)	揚水設備における処理済排水	<0.01~0.02	<0.01		
	立坑の原水	<0.01~0.02	<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	<0.01~0.02	0.1	
(IIIg/L)	揚水設備における処理済排水	<0.01	<0.01		
	立坑の原水	<0.8~3.5	<0.8		
フッ素 (mg/I)	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	<0.8	<0.8	8	
(mg/L)	揚水設備における処理済排水	<0.8~1.6	<0.8		
	立坑の原水	<0.1~160	68~95		
ホウ素 (mg/I)	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	<0.1~37	0.4~8.9	10	
(IIIg/L)	揚水設備における処理済排水	<0.1~3.0	<0.1~1.0		
	立坑の原水	0.41~117	72~89		
全窒素 (mg/I)	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	6.79~150	19~84	120 (日間亚均 60)	
全窒素 (mg/L)	揚水設備における処理済排水	0.60~48	15~25	(口間千均 00)	
	立坑の原水	0.12~110	58~69		
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	0.37~2.0	_	
(揚水設備における処理済排水	<0.05~5.92	<0.05		
рН	立坑の原水	7.5~9.5	8.1~8.2		
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	6.7~8.7	7.0~7.8	5.8~8.6	
	揚水設備における処理済排水	6.9~8.6	7.1~8.3		
	立坑の原水	4~580	15~310		
浮遊物質量 (mg/L)	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	5~170	7~13		
	揚水設備における処理済排水	<1~9	<1~2		
塩化物	立坑の原水	20~4, 300	3,400~4,200		
ユロ初 イオン (mg/L)	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	18.2~1,500	21~260	_	
	揚水設備における処理済排水	38~4,700	2,500~4,000		

※1:主な分析項目を抜粋

※2:調査地点は図 81 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調査地点(図 82)において、定期的(原則1回/月)に採水し(写真 9)、水質調査を実施しています。

平成28年度における調査結果は、表6に示す通りです。浮遊物質量に ついて、北るもい漁業協同組合との協定値(20mg/L)を超過した時期(融 雪時期と降雨による増水時期:4月、5月、6月、8月)がありましたが、 放流口の上流側(B2)においても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も低い値(最大1mg/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。



国土地理院の電子地形図(タイル)に試料採取点などの情報を追記



図 82 天塩川の調査地点



写真 9 天塩川の採水状況

			過年度		平成28年度	11	
分析項目*1	調査		平成18年6月	平成18年12月		北るもい	
	ţ	也点 ^{※2}	~平成18年11月	~平成28年3月	平成28年4月	漁業協同組合	
	2011		(放流前)	(放流後)	~平成29年3月	協定値	
ホウ素 (mg/L)	B1	表層	$< 0.02 \sim 0.04$	<0.01~0.35	<0.01~0.03		
		中層		<0.01~3.5	<0.01~0.07		
		深層	<0.02~3.35	<0.01~4.9	<0.01~0.05		
		表層	<0.02~0.04	<0.01~0.27	<0.01~0.03		
	B2	中層	_	<0.01∼3.7	<0.01~0.03	5	
		深層	<0.02~3.28	<0.01~5.0	<0.01~0.03		
		表層	<0.02~0.07	<0.01∼0.26	<0.01~0.04		
	B3	中層	—	<0.01~2.5	<0.01~0.06		
		深層	<0.02~1.03	<0.01~4.5	<0.01~0.09		
		表層	0.37~1.06	0.11~2.2	0.20~2.0	_	
	B1	中層	—	0.15~2.1	0.20~2.1	-	
		深層	$0.42 \sim 1.50$	0.15~6.5	0.19~2.1		
令空害		表層	0.37~1.14	0.14~2.1	0.19~2.2		
土 全 糸 (mg/I)	B2	中層	_	0.15~2.2	0.21~2.3	20	
(IIIg/L)		深層	0.4~1.16	$0.16 \sim 2.3$	0.19~2.3		
		表層	0.4~1.31	0.16~2.2	0.20~2.1]	
	B3	中層	—	0.11~2.2	0.20~2.3		
		深層	0.49~1.24	0.16~2.2	0.21~2.3		
		表層	—	<0.05∼0.83	<0.05∼0.11		
	B1	中層	—	<0.05∼0.92	<0.05∼0.13		
		深層	—	<0.05~0.85	<0.05~0.11	2^{*3}	
ムマンエーマ		表層	<0.01~0.13	<0.05~0.89	<0.05∼0.11		
生) ノモニ) (mg/I)	B2	中層	—	<0.05∼0.76	<0.05∼0.11		
(IIIg/L)		深層	0.01~0.35	<0.05∼0.85	<0.05∼0.12		
		表層	0.01~0.21	<0.05∼0.89	<0.05∼0.11]	
	B3	中層	—	<0.05~0.90	<0.05∼0.11		
		深層	0.02~0.17	<0.05∼0.96	<0.05∼0.12		
	B1	表層	7.1~7.4	6.6~7.7	6.5~7.5		
		中層	_	6.6~7.6	6.5~7.4		
		深層	7.0~7.6	6.7~8.0	6.5~7.4		
		表層	7.1~7.4	6.7~7.9	6.6~7.4]	
рН	B2	中層	—	6.7~7.6	6.6~7.4	5.8~8.6	
		深層	7.2~7.6	6.7~8.0	6.6~7.3		
		表層	7.0~7.6	6.6~7.9	6.6~7.5]	
	B3	中層	—	6.6~7.6	6.6~7.4		
		深層	7.1~7.4	6.7~8.0	6.6~7.5		
		表層	$3\sim\!34$	$<1\sim360$	<1~190		
	B1	中層	_	<1~390	$<1\sim220$		
		深層	$6 \sim 86$	$<1\sim\!400$	$<1\sim\!240$		
		表層	3~36	<1~390	1~240		
浮遊物質量	B2	中層		<1~400	<1~280	20	
(mg/L)		深層	5~47	<1~460	<1~300		
		表層	3~35	$<1\sim\!420$	$<1\sim 250$		
	B3	中層	—	<1~460	<1~290	1	
	50	深層	5~49	<1~650	<1~300	-	

表 6 天塩川の水質調査結果

※1:主な分析項目を抜粋

※2:調査地点は図 82参照。表層(水面下 0.1m 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 1m 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)地点の値としています。

(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 83に示す調査地点において、 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(写 真 10)、水質調査を実施しています。

平成28年度における調査結果は、表7に示す通りです。A1の塩化物 イオン濃度が、これまでの結果と比べ低い値となっていますが、融雪に伴 う地表水の増加により希釈されたと考えられます。その他の調査項目に ついては、これまでの調査結果の範囲内であることから、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。

なお、地下水を採取している観測用の井戸(観測井)については、経年 劣化が認められたため、平成27年に新たな観測井を既設観測井の直近に 設け、既設観測井を含め新規観測井の水質を確認してきました。その結果、 過去の分析値の変動範囲内にあることから、新規観測井による運用に問 題はないものと判断しています。



図 83 掘削土 (ズリ) 置場周辺の地下水の調査地点



写真 10 掘削土 (ズリ) 置場周辺の地下水の採水状況 (A1~A4)

	調査 地点 ^{*2}	過年度		平成 28 年度			
分析項目 ^{※1}					平成 28 年		平成 29 年
		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 ~平成 28 年 2 月 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	<0.005	<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	<0.005	平成 28 年度 平 5月 8月 11月 (0.001 (0.001 (0.001 (0.001 (0.001 (0.001 (0.001 (0.001 (0.001 (0.001 (0.001 (0.001 (0.001 (0.001 (0.001 (0.005 (0.005 (0.005 (0.005 (0.005 (0.005 (0.005 (0.005 (0.005 (0.005 (0.005 (0.005 (0.005 (0.005 (0.005 (0.005 (0.005 (0.005 (0.005 (0.005 (0.005 (0.002 (0.002 (0.002 (0.002 (0.002 (0.002 (0.002 (0.002 (0.002 (0.01 (0.1 (0.1 (0.1 (0.1 (0.1 (0.1 (0.1 (0.1 (0.1 (0.1 (0.1 (0.1 (0.1 (0.1 (0.1 (0.1 (0.1 (<0.005	
	A1	<0.005	<0.005~0.012	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
ヒ素	A2	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
(mg/L)	A3	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
カドミウム (mg/L) 鉛 (mg/L) ヒ素 (mg/L) セレン (mg/L) フッ素 (mg/L) ホウ素 (mg/L)	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	 月 2月 3月 2月 3月 5月 302 002 009 009 009 009 009 009 0001 009 009 0001 0001 0001 0001 0005 0005 0005 0005 0005 0005 0005 0005 0005 0005 0005 0005 0005 0005 0005 0005 0002 0005 0002 0002 0002 0002 0011 002 002 002 002 003 0011 002 002 003 002 003 0012 0011 005 002 002 003 0011 0012 0011 002 002 002 002 003 0011 0011 002 	<0.002	<0.002	<0.002
(mg/L)	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	平成 28 年 月 8 月 11 月 001 <0.001	<0.1	<0.1
	A1	19.8~50.7	0.40~63.0	2.1	3.5	8 Д11 Д 8 Д11 Д 0.001 <0.001 0.001 <0.001 0.001 <0.001 0.001 <0.001 0.001 <0.001 0.005 <0.005 0.005 <0.005 0.005 <0.005 0.005 <0.005 0.005 <0.005 0.005 <0.005 0.005 <0.005 0.005 <0.002 0.002 <0.002 0.002 <0.002 0.002 <0.002 0.002 <0.002 0.002 <0.002 0.002 <0.002 0.002 <0.002 0.002 <0.002 0.002 <0.002 0.002 <0.002 0.002 <0.002 0.01 <0.1 <0.1 <0.1 <0.1 <0.1 <0.1 <0.1 <0.1 <0.1 <0.1 <0.1 <0.1 <0.1 <0.1 <0.1 <0.1 <0.1 <0.1 <0.1 <0.02 <0.02 <0.02 <0.02 6.5 6.9 6.4 6.6 6.9 7.1 5.7 5.9 160 310 250 230 $,000$ $1,200$ 8.9 10	5.4
ホウ素	A2	1.29~43.5	0.43~9.0	4.5	4.8	5.1	3.0
(mg/L)	A3	12.5~34.0	0.18~41.8	20	22	27	23
	A4	<0.02~0.06	<0.02~0.47	<0.02	<0.02	平成 29 4 11月 2月 <0.001	0.09
	A1	6.9~7.2	6.5~7.3	6.5	6.5	6.9	6.6
. 11	A2	4.6~6.3	3.7~6.6	6.3	6.4	6.6	6.3
рН	A3	6.8~7.3	4.2~7.4	6.8	6.9	7.1	6.9
	A4	5.4~6.6	5.2~6.7	5.6	平成 28 年度平成 28 年8月11月<0.001	5.8	
	A1	1,810~2,760	210~3,400	79	160	310	350
塩化物イオ	A2	147~2,910	23~620	230	250	230	160
ン (mg/L)	A3	631~1,550	27~1,700	850	1,000	1,200	1,200
	A4	9.7~11.9	8.4~17	9.4	8.9	10	9.4

表 7 掘削土(ズリ)置場周辺の地下水の水質調査結果

※1:主な分析項目を抜粋

※2:調査地点は図 83参照

(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 84 に示す清水川の上流と下流の2地点および掘削土(ズ リ)置場雨水調整池において、定期的(原則1回/月)に採水を行い(写 真 11)、水質調査を実施しています。

平成28年度における調査結果は、表8に示す通りです。清水川上流の A5の調査結果において微量のヒ素(0.006mg/L)が検出されましたが、掘 削土(ズリ)置場整備前に同地点の川底から採取した土からもヒ素が検出 されていることから、周辺土壌の影響と判断しています。その他の調査項 目については、これまでの調査結果の範囲内であることから、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 84 清水川および掘削土(ズリ)置場雨水調整池の調査地点



写真 11 清水川の採水状況
		過	年度	平成28年度
分析項目**1	調査 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 	平成28年4月 ~平成29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
	A7	<0.001	<0.001	<0.001
	A5	<0.005	<0.005	<0.005
鉛 (mg/L)	A6	<0.005	<0.005~0.006	<0.005
	Α7	<0.005		<0.005
	A5	<0.005	<0.005	<0.005~0.006
と素 (mg/L)	A6	<0.005~0.011	<0.005~0.015	<0.005~0.005
	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
() /	Α7	<0.002	$A = A$ $\neg = \pi k 2 19 + 5 \cdot A$ $\neg = \pi k 2 28 + 3 = A$ $W = k 2 28 + 3 = A$ $w = k 2 28 + 4 = A$ $\neg = w = k 2 28 + 3 = A$ $W = k 2 28 + 3 = A$ $w = k 2 28 + 3 = A$ $\neg = w = k 2 28 + 3 = A$ $W = k 2 28 + 3 = A$ $w = k 2 28 + 3 = A$ $\neg = w = k 2 28 + 3 = A$ $0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0$ $\langle 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0$ $\langle 0 = 0 = 0 = 0 = A$ $\langle 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0$ $\langle 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = A$ $\langle 0 = 0 = 0 = 0 = A$ $\langle 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0$ $\langle 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = A$ $\langle 0 = 0 = 0 = 0 = A$ $\langle 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0$ $\langle 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = A$ $\langle 0 = 0 = 0 = 0 = A$ $\langle 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0$ $\langle 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = A$ $\langle 0 = 0 = 0 = 0 = A$ $\langle 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 $	<0.002
フッ素 (mg/I)	A5	<0.1~0.1	<0.1~0.2	<0.1
	A6	<0.1~0.7	<0.1~1.1	<0.1
	Α7	<0.1	<0.1~0.3	<0.1
カドミウム (mg/L) 鉛 (mg/L) と素 (mg/L) セレン (mg/L) フッ素 (mg/L) ホウ素 (mg/L) ア学媒物質量 (mg/L) 遅ば物了量 (mg/L) 塩化物イオン (mg/L)	A5	0.03~0.25	<0.02~0.44	0.04~0.27
ホウ素 (mg/L)	A6	<0.02~0.09	$\sim \mp \chi_{0}$ 19 #4 月 #\mathbf{m} $(\times \gamma)$) #\mathbf{m} $(\times \gamma)$ #\mathbf{m} $(\times \gamma)$) #\mathbf{m} $(\times \gamma)$ m $(\times \gamma)$ (\mathbf{m} - \mathbf{m}) $(\times \gamma)$ \mathbf{m} $(\times \gamma)$ m $(\times \gamma)$ m $(\times \gamma)$ (\mathbf{m}) $(\times \gamma)$ m $(\times \gamma)$ m $(\times \gamma)$ (\mathbf{m}) $(\times \gamma)$ 	0.06~0.22
	Α7	0.03~0.30	<0.02~0.42	0.04~0.30
	A5	6.4~7.1	6.0~7.9	6.4~7.7
рН	A6	5.8~7.4	5. 7~9. 1	6.4~8.3
Г.т.	Α7	6.5~7.0	6.2~7.8	6.4~7.7
浮遊物質量 (mg/L)	A5	1~20	<1~66	1~7
	A6	12~173	<1~500	<1~38
/	A7	1~11	<1~270	2~7
	A5	14. 4~30. 5	7.2~70	18~44
塩化物イオン (mg/L)	A6	5.1~24.7	2.9~269	4.1~28
	Α7	15.6~28.7	8.1~100	19~40

衣 δ	筫譋笡秙朱
-----	-------

※1:主な分析項目を抜粋

※2:調査地点は図 84参照

(6) 浄化槽排水の水質調査結果

当センター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において、定期的 (原則1回/4週)に水質調査を実施しています。

平成28年度における水質調査結果は、表9に示す通り、すべての項目 において協定値を満足しています。

	X · /				
	ㅋ피-★ㅋ니슈 Ի	過年度 平成 28		北るもい	
分析項日		平成 18 年 12 月 ~平成 28 年 3 月	平成 28 年 4 月 ~平成 29 年 3 月	四、未 肠 同 組 合 協 定 値	
На	研究管理棟	5.9~7.4	6.2~7.2	5 0 0 0	
	地下施設 現場事務所	6.8~7.9	7.5~7.8	5.8~8.6	
生物化学的 酸素要求量 (mg/L)	研究管理棟	<0.5~17	1.6~11	20	
	地下施設 現場事務所	<0.2~28	0.6~4.5		
浮遊物質量 (mg/L)	研究管理棟	0.5~10	2.0~10	20	
	地下施設 現場事務所	<0.5~7.0	<1.0~3.0	20	
全窒素 (mg/L)	研究管理棟	6.6~52	17~32	C O	
	地下施設 現場事務所	0.6~45	0.7~4.8	60	
全リン (mg/L)	研究管理棟	0.5~4.5	1.8~3.7	8	
	地下施設 現場事務所	<0.1~7.8	0.1~2.2		
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	2.000	
	地下施設 現場事務所	0~1,500	0~210	3,000	

表 9 浄化槽排水の水質調査結果

6.2 センター周辺の環境影響調査結果

平成27年度に引き続き、当センター周辺の環境影響調査として、図85 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。 平成28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。



(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(写真 12)、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。

平成28年度における調査結果は、表10に示す通り、下流の調査地点 No.2において生物化学的酸素要求量が10mg/Lと、これまでの調査結果より若干高めの値を示しましたが、降雨による濁りなどが要因と考えられます。



写真 12 清水川の水質調査

		冯在庄	平成 28 年度				
		迥平皮		平成 29 年			
分析項目**	調査地点*2	平成14年8月~ 平成28年2月	6 月	9月	11 月	2 月	
11	No. 1	6.3~7.9	7.6	7.5	7.6	7.5	
рН	No. 2	6.4~7.7	7.5	7.5	7.6	7.3	
生物化学的 酸素要求量 (ng/L)	No. 1	<0.5~62	3.2	8.4	2.0	0.8	
	No. 2	<0.5~6.8	6.0	10	2.2	4.6	
浮遊物質量 (mg/L)	No. 1	1~70	3	4	1	2	
	No. 2	<1~69	4	5	2	3	
溶存酸素量 (mg/L)	No. 1	6.6~13.9	9.9	8.5	12	12.8	
	No. 2	5.5~12.5	8.4	6.2	9.8	8.4	

表 10 清水川の水質調査結果

※1:主な分析項目のみを抜粋

※2:調査地点は図 85 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(写真 13)。

平成28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 11 に示す通り、スナヤツメ、エゾウグ イ、エゾホトケドジョウ、サクラマス(ヤマメ)、エゾトミヨ、ハナカジ カの6種が確認されました。



写真 13 生息魚類調査

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	エゾウグイ				N			
11	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	R			0
カサゴ	カジカ	ハナカジカ				N			

表 11 確認された重要種(角類)

*1:重要種の選定根拠

①:「文化財保護法」(昭和25年 法律第214号)に基づく天然記念物および特別天然記念物

②:「絶滅のおそれのある野生動植物の種の保存に関する法律」(平成4年 法律第75号)に基づく野生動植物種

 ③:「レッドデータブック 2014-日本の絶滅のおそれのある野生生物-4 汽水・淡水魚類」(環境省 2015 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 EN: 絶滅危惧 IB 類 VU: 絶滅危惧 II 類 NT: 準絶滅危惧
 ④:「北海道の希少野生生物 北海道レッドデータブック 2001」(北海道 平成 13 年)の記載種 Cr: 絶滅危機種 En: 絶滅危惧種 R:希少種 N:留意種

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 危:危急種 希:希少種 減:減少種

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

7. 安全確保の取組み

安全確保の取組みとして、請負作業や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 認や改善の指導・助言を行いました。

そのほか、所長や保安・建設課などによる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を指導・助言しました(写真 14)。

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 全教育を実施するほか、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(写真 15)。



写真 14 安全パトロールの状況



写真 15 安全行事の状況 (安全大会)

8. 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、以下に 示す研究機関との共同研究や研究協力をはじめ、広く関連する国内外の 研究機関や専門家の参加を得て進めています。平成28年度に実施した主 な研究協力は以下のとおりです。

8.1 国内機関との研究協力

8.1.1 大学との研究協力

京都大学

坑道掘削に伴う岩盤の応力変化により周辺岩盤に生じる割れ目の連結 性や三次元分布を可視化することを目的として、坑道周辺岩盤に樹脂を 注入し、樹脂固化後に採取した岩石試料を顕微鏡などで観察する樹脂注 入試験を実施しています。平成28年度は、平成27年度に実施した深度350m 調査坑道の試験坑道3における樹脂注入試験の樹脂注入箇所周辺の試料 採取および試料の観察作業を行い、掘削損傷領域内部の割れ目の連結性 や開口幅といった詳細な情報を明らかにしました。また、今回採用した樹 脂注入により、割れ目を適切に可視化することが可能であることを確認 しました。

京都大学、東北大学

地下水中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理解の向上のため、平成27年度に引き続き、幌延の地 下水中に溶存する微量元素の濃度を支配する固相を推定するための分析 手法や解析手法について検討しました。また、幌延の地下水を用い、微量 元素や有機物の添加濃度を変えた条件で、孔径の異なるろ紙を用いたろ 過試験を行いました(3.1.2(3)参照)。さらに、これまでの共同研究にお ける成果を京都大学・東北大学とともに論文として取りまとめまし た⁽³²⁾⁽³³⁾。今後は、微量元素の濃度を支配する固相の同定や有機物の添 加濃度の違いによる微量元素の存在状態の違い等について評価する予 定です。

信州大学

立坑および水平坑道の掘削に伴って坑道周辺岩盤に生じる損傷に関す る詳細な知見を得ることを目的として、東立坑および換気立坑における 岩盤壁面の割れ目情報の統計処理を行い、割れ目の密度や方位・傾斜の傾 向を明らかにしました。立坑壁面の方位別の分析結果から、最大水平圧縮 方向に直交する南北方向では割れ目が発達し、最大水平圧縮方向に水平 な東西方向では割れ目の発達が弱いことが明らかとなりました。このデ ータを活用し、さらに弾性波トモグラフィや透水試験により得られるデ ータと組み合わせることにより、立坑周辺岩盤に発達した割れ目の概念 モデルの構築を進めていきます。

東京大学

坑道掘削に伴う長期的な岩盤の変形や力学特性の変化について検討す ることを目的として、稚内層珪質泥岩を用いた破壊後の強度回復の検討 や岩盤内部の水分の状態が岩石の強度や変形に及ぼす影響の検討を行う ため、室内試験を実施しています。平成28年度は、X線CTスキャナを用い て、破壊後の岩石を圧縮した際の亀裂の閉塞の状況や岩石が乾燥する際 の水分の移動の状況を可視化することにより、強度回復や水分変化に伴 う力学特性変化について詳細に検討を行いました。

また、化学的浸透現象*50が原位置地下環境に及ぼす影響を検証するこ とを目的に、350m調査坑道のボーリング孔に高塩濃度溶液を投入し、濃度 変化と間隙水圧変化の測定を実施しました。平成28年度は、試験手法の確 立と原位置試験が成立する試験条件を確認しました。間隙水圧測定結果 からは、化学的浸透現象により、原位置の圧力が変化している可能性が示 唆されました。今後は、得られたデータを用いて、解析による評価を実施 していきます。

^{*50:}地下水中の溶存物質の濃度の違いにより物質が移動する際に、一定の条件を満たした地層が半透膜(一定の 大きさ以下の分子またはイオンのみを透過させる膜)のように機能することにより水が移動する現象をいいま す。この現象により、間隙水圧が局所的に高くなる可能性があると考えられています。

名古屋大学

掘削影響領域における炭酸カルシウムによる自己シーリング*51に関す る研究を実施しました。この研究は、コンクリート材料から溶出するカル シウムイオンが地下水と反応して炭酸カルシウムが形成され、掘削影響 領域において空隙構造を充填して閉塞する可能性について、試験坑道か ら試料を採取して検討するものです。平成28年度は、分析試料の採取方法 および採取場所の検討などを行いました。

北海道大学

堆積岩中の物質移行挙動を評価することを目的として、幌延の堆積岩 を使用した室内試験を実施しました。平成28年度は、稚内層におけるCsの 見かけの拡散係数の温度依存性のデータを取得し、拡散の活性化エネル ギー(E_a)を評価しました。この結果、E_a = 47 kJ/mol となり、第2次取 りまとめの設定値(15 kJ/mol)よりもかなり大きな値を示しました。こ の理由としては、堆積岩に含まれるイライトやスメクタイト等の粘土鉱 物に、Csが強く収着することに起因している可能性が考えられます。今後 はSrや他の元素についても試験を進め、拡散係数などと温度との関係に ついて明らかにしていきます。

北海道大学、大成建設株式会社、株式会社地層科学研究所

地下の坑道内におけるメタンの発生量や移行経路を評価するための 測定手法の開発を行いました。平成28年度は、平成27年度に開発した三 次元レーザースキャナとレーザーメタンセンサーを組み合わせた技術 を用いて、350m調査坑道内における坑道の形状の計測とあわせて坑道 壁面におけるメタン濃度分布の測定を行いました。その結果、坑道内に 湧出した地下水を排水するために地下水を集約している設備(ポンプ 座)の周囲や、主要な断層沿いには比較的高濃度(最大でも0.1%未満) のメタンが分布していることが分かりました。従来の固定式メタンセ

^{*51:}炭酸カルシウムによる自己シーリングとは、コンクリート材料から溶出するカルシウムイオンが地下水と反応して炭酸カルシウムが形成され、坑道掘削によって生じる掘削影響領域の空隙構造を閉塞することにより、 掘削影響領域を地下水が選択的に移動することを抑制する効果を指します。

ンサーは、350m調査坑道では8ヶ所に設置してありますが、そのうち今 回の調査領域に対応するのは2ヶ所であるため、このような詳細な濃度 分布は、従来の固定式メタンセンサーでは把握できませんでした。なお、 今回明らかになった比較的高濃度に分布しているメタンは最大でも0.1% 未満であり、坑道内のメタン濃度のモニタリングは、従来の固定式センサ ーにより適切に実施されています。今後は、これらの結果をまとめるとと もに、地下施設からのメタンの排出量についてモニタリングを継続する 予定です。

室蘭工業大学

坑道壁面の地質観察手法の整備の一環として、三次元レーザースキャ ナ計測によって取得される点群データから坑道壁面の地質情報を取得す る手法の整備を進めています。平成28年度においては、坑道壁面に分布す る掘削影響割れ目の方位を分析する2つの手法を検討しました。1つは、 DiAnaアルゴリズム*52を適用し点群データを可変サイズのブロックによ り分割する手法、もう1つは、地理情報システムのソフトウェアである ESRI® Arc GIS® 10.4の拡張機能である地形分析ツールを適用した手法で す。手法の検討にあたっては、掘削影響割れ目が坑道壁面において顕著に 発達している東立坑の深度371.8~372.8mのデータを使用しました。この 区間の壁面には数多くの掘削影響割れ目が分布しているため、壁面形状 は引張破断面によって支配されています。この2つの手法は、2から3cm程 度の解像度で掘削影響割れ目の方位を分析し、その結果を可視化するこ とが可能です。これらの手法によって得られた割れ目の方位を、実際の壁 面観察時に調査員が取得した坑道壁面の割れ目の方位と比較した結果、 それらが整合することが確認できました。今後は、これらの手法によって 取得される掘削影響割れ目の方位データを岩盤力学解析に反映し、掘削 影響割れ目に対する調査・評価手法を整備していきます。

^{*52:} Di Ana アルゴリズムとは、三次元空間に置かれた点群をあるサイズの立方体ブロックで格子状に分割し、各 立方体内に含まれる点に対して最小二乗法により面をフィッティングする手法です。

琉球大学、地殻工学防災研究所、アース・スキャニング研究会*53

幌延深地層研究センターの地下に分布する稚内層のような、不連続性 岩盤の特徴を併せ持つ堆積軟岩の物性評価法を構築することを目的とし て研究を開始しました。平成28年度は、東立坑の坑底から掘削したボーリ ング孔において、超音波式ボアホールカメラを用いて孔壁の画像を取得 しました。今後は、ボーリングコア試料を用いて針貫入試験などの室内試 験を実施するとともに、新たな岩盤分類法を適用するなど、不連続性堆積 軟岩の物性評価法を提案するための調査・検討を進めます。

8.1.2 その他の機関との研究協力

株式会社大林組

深度350m以深の東立坑掘削によって、立坑周辺岩盤に生じる掘削影響 領域の長期挙動の概念モデル構築を目的として、岩盤に割れ目が発生し た時に生じる微小振動(アコースティック・エミッション)、間隙水圧、 温度を計測する3種のセンサーで構成されるマルチ光プローブによる計 測を継続しています。平成28年度は、立坑掘削後の周辺岩盤の損傷や、そ れに伴う水の流れに関する測定を継続するとともに、微小振動の発生位 置や、割れ目発生に起因する波形の選別方法などを検討しました。

原子力環境整備促進・資金管理センター

人工バリアの搬送定置・回収技術に関する研究開発、人工バリアの健 全性評価及び無線計測技術の適用性に関する研究開発について、共同研 究を実施しました。

地層処分実規模試験施設は、地層処分概念とその工学的な実現性や人 エバリアの長期挙動を実感・体感できる地上設備を利用し、人工バリアの 搬送・定置に係る操業技術や長期挙動などの工学技術に関する研究を行 うものです。

平成28年度は4.1.3でも述べたように、地層処分実規模試験施設に おいて緩衝材の定置試験を実施し、その様子を公開するとともに、緩衝 材が膨潤して隙間が閉塞される過程を観察できる装置を用いた浸潤試験

^{*53:} アース・スキャニング研究会は、地質調査会社 10 社で構成される会員制の組織であり、ボーリング孔壁画像 化装置の高度化研究や応用技術開発を行うことで、地盤工学の発展に貢献する活動を行っています。

を継続しました。搬送定置・回収技術に関する研究開発では、原環セン ターが開発した緩衝材除去装置の一部を地層処分実規模試験施設に移設 しました。また、地下での実証試験に向けて、試験坑道2の整備を行い ました。

人工バリアの健全性評価および無線計測技術の適用性に関する研究開 発では、4.1.4でも述べたように、オーバーパックや緩衝材の健全性に関 する原位置試験として、オーバーパック溶接部の腐食挙動に関わる試験 を継続するとともに緩衝材のパイピング/エロージョンに関わる流出試 験を実施しました。また、無線モニタリング装置の適用性確認として、人 エバリア性能確認試験の緩衝材および埋め戻し材中に設置した無線計測 装置によるデータ取得を継続しました。

産業技術総合研究所

過去の地下水の化学的環境を推定する手法を開発するため、深度140m、 250mおよび350m調査坑道から採取した地下水に含まれる溶存ガス(メタ ンや二酸化炭素)の分析・評価を共同で行いました。また、成果を論文と して取りまとめました。詳細は、3.3.1に述べたとおりです。

大成建設株式会社

幌延深地層研究センターの地下施設周辺岩盤は軟岩に分類されますが、 このような軟岩では、立坑掘削時に軟弱な部分に遭遇する場合なども想 定されます。したがって、効率的かつ効果的な立坑の支保設計を行うこと が重要となります。これを踏まえ、地質状況や岩盤の強度物性等のデータ を精査し、地山状況に応じた最適な支保パターンを決定することを目標 とした支保の妥当性検証の高度化を目的とした研究を進めています。支 保設計の妥当性の検討に先立ち、平成28年度は、これまでの水平坑道や 立坑掘削において取得されたデータおよび立坑掘削前に研究所用地周辺 で実施したボーリング調査データ等に基づいて岩盤物性値および地質状 況の整理を実施しました。

大成建設株式会社、株式会社地層科学研究所

立坑および水平坑道の掘削開始から掘削終了までの掘削進行に伴う高 精度傾斜計による計測データ、湧水量データ、周辺ボーリング孔内での地 下水位や間隙水圧計測データなどを比較し、地下施設掘削に伴う広域的 な岩盤・地下水挙動を把握しました。平成28年度は、数値解析により地 下水位低下に伴う岩盤の傾斜挙動を検討しました。その結果、深度350m の水平坑道の断層部を掘削した際の地下水変動による岩盤の傾斜挙動は、 実際に計測された傾斜挙動に整合するものであることが確認されました。 今後も数値解析の継続により、詳細な岩盤の傾斜挙動を検討するととも に、高精度傾斜計を用いた岩盤の変形挙動および地下水流動挙動のモニ タリング技術の確立を図ります。

大成建設株式会社、日鉄住金セメント株式会社

低アルカリ性セメントグラウトに関する研究として、農業残渣である もみ殻由来シリカを用いた低アルカリ性セメント*54を対象に、原位置で のグラウト材料としての施工性確認および周辺地下水への影響確認に関 する研究を実施しました。平成28年度は、350m調査坑道において注入試験 を行うとともに、周辺地下水のpH測定装置を設置して連続計測を開始し ました。なお、比較のために普通ポルトランドセメントについても同様の 注入試験を行い、周辺地下水のpHの連続計測を開始しました。

電力中央研究所

地下施設建設時の坑道掘削影響領域の調査技術の開発、岩盤中の地下 水移行評価技術の開発(地下水年代測定)およびコントロールボーリング 孔を用いたモニタリング技術の開発について、共同研究を実施しました。

坑道掘削影響領域の調査技術の開発については、地下施設において、坑 道掘削に伴う周辺岩盤の力学、地球化学特性への影響を把握するための

^{*54:}大阪大学 接合科学研究所により開発されたもので、もみ殻から得られるシリカ(二酸化ケイ素:SiO₂)を利 用し、普通ポルトランドセメントよりも地層処分環境として好ましい低アルカリ性(pH<11)を早期に達成する ことが期待されます。シリカは食品の乾燥剤などとしても利用されています。なお、本共同研究では、国立研究 開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 生物系特定産業技術支援センターの委託事業である、革新的技術創 造促進事業(異分野融合共同研究)「ナノ構造体シリカ粒子の高純度・低コスト化製法開発と工業用機能性素材 の用途開拓」の一部を活用しています。

調査(比抵抗トモグラフィや音響トモグラフィ、地下水の採水・分析など) を継続して行い、坑道掘削に伴う地質環境特性の変化に関するデータを 蓄積しました。なお、140mおよび250m調査坑道を対象とした坑道掘削影響 領域の調査技術に関しては、これまでの研究成果を報告書として取りま とめる作業を進めました。また、地下水年代測定については、主に地下施 設を対象とし、採水の際の脱ガスを低減するための採水治具や容器を用 い、地下水およびガスのサンプリングを継続しました。さらに、脱ガス前 後の地下水中の溶存ガスの組成変化を調べるため、室内試験を行いまし た(3.1.2(3)参照)。

コントロールボーリング孔を用いたモニタリング技術の開発の内容に ついては、3.1.2(5)で述べたとおりです。

幌延地圏環境研究所*55

両機関の試験設備を活用した研究協力として、調査坑道において取得 した岩石、地下水を利用したガスや有機物、微生物などの分析を行い、相 互にデータを取得しました。また、地下水中の溶存ガスに関して、脱ガス 前に地下水に溶存していたメタン、二酸化炭素および水素などの複数の ガス濃度を推定する補正手法の開発を共同で進めました。取得したデー タは両機関で共有し、原子力機構では地質環境モデル更新のための基盤 データとしました。幌延地圏環境研究所では、地下深部における微生物の 活動に関する調査研究に活用しています。

8.2 国外機関との研究協力

モンテリ・プロジェクト*56

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「鉄材料の腐食に関する原位置試験」に参加していま す。平成28年度は、モンテリ岩盤研究所で実施した原位置試験から回収し

^{*55:} 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、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。

^{*56:} 堆積岩を対象とした地層処分研究に関する国際共同研究です。平成28年3月現在、原子力機構を含め8ヶ国から16機関が参加し、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。

た試料の室内分析と、総合解析および全体報告書の作成を行いました。

これらの手法や原位置での試験に関する情報などは、幌延深地層研究計画における坑道内での調査研究に反映していきます。

上記のほか、クレイクラブ(Clay Club)*⁵⁷定例会合(平成28年9月)に 出席し、クレイクラブカタログ(各機関が研究対象としている粘土質媒体 の諸特性が相互に比較可能なデータセット)の更新作業の進捗状況や新 たに開始されたCLAYWATプロジェクト(粘土質媒体を対象とした間隙水の 存在・結合状態に関わる調査)について、諸外国の専門家らとの情報交換 を行いました。

また、平成28年10月には、国際共同研究プロジェクト(グリムゼルLTD プロジェクト*58)に関わる国際会議が開催され、その中で、幌延深地層研 究センターで実施している原位置での物質移行試験について報告し、物 質移行に関する各研究機関の専門家と意見交換を行いました。

^{*57:} 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ひとつです。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。

^{*58:} グリムゼルLTD プロジェクトは、スイスのグリムゼル原位置試験場において実施されている国際共同研究の 1 プロジェクトとして進められている原位置長期拡散試験(LTD:Long-Term Diffusion)に関するプロジェクト です。

引用文献

- (1) 花室孝広(編)(2016): "幌延深地層研究計画 平成28年度調査研究計画", JAEA-Review 2016-010, 22p.
- (2) 太田久仁雄,阿部寛信,山口雄大,國丸貴紀,石井英一,操上広志,戸村豪治, 柴野一則,濱 克宏,松井裕哉,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,福島龍朗(2007): "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, 434p.
- (3) 花室孝広(編)(2014): "幌延深地層研究計画 平成 25 年度調査研究成果報告", JAEA-Review 2014-039, 69p.
- (4) 花室孝広(編)(2016): "幌延深地層研究計画 平成 27 年度調査研究成果報告", JAEA-Review 2016-022, 92p.
- (5) Hayano, A. and Ishii, E. (2016): "Relationship between faults oriented parallel and oblique to bedding in Neogene massive siliceous mudstones at the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan", IOP Conference Series; Earth and Environmental Science, Vol. 44, pp. 022004_1-022004_8, DOI:10.1088/1755-1315/44/2/022004.
- (6) 石井英一, 福島龍朗 (2006): "新第三紀珪質岩における断層の解析事例", 応用地 質, 47巻, 5号, pp. 280-291, http://doi.org/10.5110/jjseg. 47.280.
- (7) Ishii, E., Funaki, H., Tokiwa, T. and Ota, K. (2010): "Relationship between fault growth mechanism and permeability variations with depth of siliceous mudstones in northern Hokkaido, Japan", Journal of Structural Geology, Vol. 32, pp. 1792-1805, DOI:10.1016/j.jsg. 2009.10.012.
- (8) Wang, X. (2005): "Stereological Interpretation of Rock Fracture Traces on Borehole Walls and Other Cylindrical Surfaces", Ph D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- (9) 鈴木俊一,本島貴之,井尻裕二,青木広臣(2009): "確率統計理論による亀裂特性 データの相互関係の整理と数値解析モデルによる妥当性検証",土木学会論文集 C Vol. 65, No. 1, pp185-195.
- (10) 花室孝広(編)(2015):"幌延深地層研究計画 平成 26 年度調査研究成果報告", JAEA-Review 2015-017, 95p.
- (11) Ishii, E. (2017): "Preliminary assessment of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones by core logging", Engineering Geology, 221, pp.124-132.

- (12) Ishii, E. (2015): "Predictions of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones from rock rheology; Preliminary results", Journal of Geophysical Research; Solid Earth, 120(4), pp.2220-2241.
- (13) Hernsdorf, A., Amano, Y., Miyakawa, K., Ise, K., Suzuki, Y., Anantharaman, K., Probst, A., Burstein, D., Thomas, B. and Banfield, J. (2017):
 "Potential for microbial H₂ and metal transformations associated with novel bacteria and archaea in deep terrestrial subsurface sediments", The ISME Journal, 1-15.
- (14) Miyakawa, K., Ishii, E., Hirota, A., Komatsu, D.D., Ikeya, K. and Tsunogai, U. (2017): "The role of low-temperature organic matter diagenesis in carbonate precipitation within a marine deposit", Applied Geochemistry, Vol. 76, pp. 218-231.
- (15)日本原子力研究開発機構(2017):"平成28年度地層処分技術調査等事業 地質 環境長期安定性評価確証技術開発 報告書".
- (16) OECD/NEA (2000): "Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste An International Database", OECD, 2000, 88p.
- (17)新里忠史,舟木泰智,安江健一(2007): "北海道北部,幌延地域における後期鮮新世以降の古地理と地質構造発達史",地質学雑誌,vol. 113,補遺,pp. 119-135.
- (18) 核燃料サイクル開発機構(1999): "わが国における高レベル放射性廃棄物地層 処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ- 分冊2 地層処分 の工学技術", JNC TN1400 99-022.
- (19)谷口直樹,川崎 学,杉田 裕,柴田雅博,本田 明(2014): "ベントナイトの再 冠水過程における炭素鋼の腐食モニタリング",第61回材料と環境討論会講演集, pp.241-244, B209.
- (20) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター(2010): "平成 21 年度核燃料サイクル関係推進調整等委託費(地層処分実規模設備整備事業)報告書".
- (21) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター(2011): "平成 22 年度核燃料サイクル関係推進調整委託費(地層処分実規模設備整備事業)報告書".
- (22) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター(2012): "平成23年度原子力発 電施設広聴・広報等事業委託費(地層処分実規模設備整備事業)報告書".
- (23)(公財)原子力環境整備促進・資金管理センター(2013): "平成 24 年度原子力施設立地推進調整事業等委託費(地層処分実規模設備整備事業)報告書".
- (24) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター(2014): "平成 25 年度原子力発 電施設広聴・広報等事業委託費(地層処分実規模設備事業)報告書".
- (25)(公財)原子力環境整備促進・資金管理センター(2015): "平成 26 年度原子力発 電施設広聴・広報等事業委託費(地層処分実規模設備運営等事業)報告書".

- (26) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター(2016): "平成27年度地層処分 技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発報告書(第2分冊)-人工バリ ア品質/健全性評価手法の構築-緩衝材".
- (27)中山雅,大野宏和,中山真理子,小林正人(2016): "幌延深地層研究計画における 人工バリア性能確認試験 計測データ集(平成 27 年度)", JAEA-Data/Code 2016-005, 55p.
- (28) Tachi, Y., Tadahiro, S., Kenji, Y., Yasuo I. and Hiroaki, T. (2016): "Clay-based modeling approach to diffusion and sorption in the argillaceous rock from the Horonobe URL: application to Ni(II), Am(III), and Se(IV)", Clay Minerals Society Workshop Lectures Series, vol.21 chapter19, 241-250.
- (29) Tachi, Y., Tadahiro, S., Michael, O. and Chalotte G. (2010): "Development of JAEA Sorption Database (JAEA-SDB): Update of Data Evaluation Functions and Sorption/QA Data", JAEA-Data/Code 2010-031, 168p.
- (30) Tachi, Y., Yotsuji, K., Seida, Y. and Yui, M. (2011): "Diffusion and sorption of Cs⁺, I⁻ and HTO in samples of the argillaceous Wakkanai Formation from the Horonobe URL, Japan: Clay-based modeling", Geochim. Cosmochim. Acta, 75, pp. 6742–6759.
- (31) 日本原子力研究開発機構(2017): "平成 28 年度地層処分技術等事業 処分シス テム評価確証技術開発 報告書".
- (32) Sasaki, T., Koukami, T., Kobayashi, T., Kirishima, A., Murakami, H., Amano, Y., Mizuno, T., Iwatsuki, T., Sasamoto, H. and Miyakawa, K. (2017):
 "Determination of dissolved natural thorium and uranium in Horonobe and Mizunami Underground Research Laboratory groundwater and its thermodynamic analysis", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 54, pp. 373–381.
- (33) Kirishima, A., Kuno, A., Amamiya, H., Kubota, T., Kimuro, S., Amano, Y., Miyakawa, K., Iwatsuki, T., Mizuno, T., Sasaki, T. and Sato, N. (2017): "Interaction of rare earth elements and components of the Horonobe deep groundwater", Chemosphere, Vol. 168, pp. 798-806.

参考資料

(平成28年度外部発表)

著者アルファベット順に記載

青柳和平,石井英一(2017): "幌延深地層研究センターの深度の異なる水平坑道を対象とした掘削損傷領域の水理力学特性の検討",第14回岩の力学国内シンポジウム講演論文集,

http://www.ec-pro.co.jp/irms2017/jsrm2017_Proceedings/index.html.

- 青柳和平,石井英一,石田毅(2017): "幌延深地層研究センターの350m 調査坑道に おける掘削損傷領域の破壊様式の検討", Journal of MMIJ, Vol. 133, No. 2, pp. 25-33.
- 青柳和平,石井英一,中山雅,藤田朝雄(2016): "幌延深地層研究センターにおける人工バリア性能確認試験孔周辺の岩盤損傷の検討",日本材料学会第65期通常総会・学術講演会論文集, pp.19-20.
- Aoyagi, K., Nago, M., Kamemura, K. and Sugawara, K. (2016): "Estimation of rock mass stress state based on convergence measurement during gallery excavation", Proceedings of 9th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS-9), 10p.
- 青柳和平,櫻井彰孝,丹生屋純夫(2017): "幌延深地層研究センターの350m 周回坑 道(東)における初期地圧測定",JAEA-Data/Code 2016-022, 91p.
- Aoyagi, K., Tokiwa, T. and Fujita, T. (2016): "A Study of efficient excavation limiting the extent of an excavation damaged zone in Horonobe URL", Rock Mechanics and Rock Engineering; From the Past to the Future (EUROCK 2016), pp. 1023-1028.
- Asahina, D., Aoyagi, K., Kim, K., Birkholzer, J., Birkholzer, J.T. and Bolander, J.E. (2017): "Elastically-homogeneous lattice models of damage in geomaterials", Computers and Geotechnics, Vol. 81, pp. 195-206.
- 花室孝広(編)(2016):"幌延深地層研究計画 平成28年度調査研究計画", JAEA-Review 2016-010, 22p.
- 花室孝広(編)(2016): "幌延深地層研究計画 平成 27 年度調査研究成果報告", JAEA-Review 2016-022, 92p.

- 畑 浩二,丹生屋純夫,青柳和平(2017): "光計測を用いた幌延深地層研究センター の立坑周辺岩盤における長期挙動評価",第14回岩の力学国内シンポジウム講演 論文集,http://www.ec-pro.co.jp/irms2017/jsrm2017_Proceedings/index.html.
- Hayano, A. and Ishii, E. (2016): "Relationship between faults oriented parallel and oblique to bedding in Neogene massive siliceous mudstones at the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan", IOP Conference Series, Earth and Environmental Science, Vol. 44, pp. 022004_1-022004_8.
- Hernsdorf, A., Amano, Y., Miyakawa, K., Ise, K., Suzuki, Y., Anantharaman, K., Probst, A., Burstein, D., Thomas, B. and Banfield, J. (2017): "Potential for microbial H_2 and metal transformations associated with novel bacteria and archaea in deep terrestrial subsurface sediments", The ISME Journal, 1-15.
- Ishii, E. (2016): "The Role of bedding in the evolution of meso- and microstructural fabrics in fault zones", Journal of Structural Geology, Vol. 89, pp. 130-143.
- 亀村勝美,青柳和平,名合牧人,菅原健太郎,松原 誠(2017): "坑道掘削時内空変 位に基づく広域岩盤の初期地圧評価",第14回岩の力学国内シンポジウム講演論 文集,http://www.ec-pro.co.jp/irms2017/jsrm2017_Proceedings/index.html.
- 加藤昌治,奈良禎太,福田大祐,河野勝宣,佐藤稔紀,佐藤 努,高橋 学(2016): "岩 石の透水試験における環境温度の制御の重要性",材料,65(7), pp.489-495.
- Kirishima, A., Kuno, A., Amamiya, H., Kubota, T., Kimuro, S., Amano, Y., Miyakawa, K., Iwatsuki, T., Mizuno, T., Sasaki, T. and Sato, N. (2017): "Interaction of rare earth elements and components of the Horonobe deep groundwater", Chemosphere, Vol. 168, pp. 798-806.
- 女澤徹也,宮川和也,笹本広,曽我弘一 (2016): "幌延深地層研究センター350m 調査 坑道における地下水の地球化学モニタリング装置の改良・開発", JAEA-Technology 2016-003, 25p.
- Miyakawa, K., Ishii, E., Hirota, A., Komatsu, D., Ikeya, K. and Tsunogai, U. (2017): "The Role of low-temperature organic matter diagenesis in carbonate precipitation within a marine deposit", Applied Geochemistry, Vol. 76, pp. 218-231.

- 宮川和也,玉村修司,中田弘太郎,長谷川琢磨(2017): "幌延深地層研究計画に関わるガス組成データ", JAEA-Data/Code 2016-021, 60p.
- 宮良信勝, 松岡稔幸(2017): "幌延深地層研究計画(第1段階)における深層ボーリン グ調査の物理検層データ集", JAEA-Data/Code 2017-005, 34p.
- Motoshima, T., Fujita, T., Aoyagi, K., Shirase, M. and Nago, M. (2016): "Design and verification of support system for underground excavations under anisotropic stress conditions", Proceedings of 7th International Symposium on In-situ Rock Stress (RS 2016).
- 村上拓馬, 笹本 広, 水野 崇 (2016): "希土類元素・トリウムおよびウランの堆積岩 中における保持状態, 北海道幌延地域における調査例", 地球化学, 50(4), pp. 299-317.
- 中嶋仁慶,小山倫史,龍田圭亮,片山辰雄,青柳和平(2017): "幌延深地層研究セン ターの換気立坑におけるグラウト注入シミュレーションおよびその効果の検証", 第14回岩の力学国内シンポジウム講演論文集,

http://www.ec-pro.co.jp/irms2017/jsrm2017_Proceedings/index.html.

- 中山 雅, 松崎達二, 丹生屋純夫(2016): "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, 57p.
- 中山 雅, 大野宏和, 中山真理子, 小林正人 (2016): "幌延深地層研究計画における 人工バリア性能確認試験 計測データ集 (平成 27 年度)", JAEA-Data/Code 2016-005, 55p.
- 中山 雅, 大野宏和, 棚井憲治, 杉田 裕, 藤田朝雄(2016): "幌延深地層研究計画に おける人工バリア性能確認試験 坑道の埋め戻し材に関する検討", JAEA-Research 2016-002, 280p.
- 中山 雅,丹生屋純夫,南出賢司(2016): "幌延 URL における低アルカリ性セメント 系材料の適用性確認",原子力バックエンド研究,23(1), pp.25-30.
- 岡崎泰幸,青柳和平,熊坂博夫,進士正人(2016): "トンネル掘削時のトンネル支保 工応力に地山の不均質性が与える影響",土木学会論文集,F1(トンネル工学), Vol. 72, No. 3, pp. I_1-I_15.
- 櫻井彰孝,青柳和平(2016): "幌延深地層研究計画 平成26年度地下施設計測デー タ集", JAEA-Data/Code 2016-003,84p.

- Sasaki, T., Kokami, T., Kobayashi, T., Kirishima, A., Murakami, H., Amano, Y., Mizuno, T., Iwatsuki, T., Sasamoto, H. and Miyakawa, K. (2017):
 "Determination of dissolved natural thorium and uranium in Horonobe and Mizunami Underground Research Laboratory groundwater and its thermodynamic analysis", Journal of Nuclear Science and Technology, 54(3), pp. 373-381.
- 佐藤稔紀, 笹本 広, 石井英一, 松岡稔幸, 早野 明, 宮川和也, 藤田朝雄, 棚井憲治, 中山 雅, 武田匡樹, 横田秀晴, 青柳和平, 大野宏和, 茂田直孝, 花室孝広, 伊 藤洋昭(2017): "幌延深地層研究計画における坑道掘削(地下施設建設)時の調査 研究段階(第2段階:深度350mまで)研究成果報告書", JAEA-Research 2016-025, 313p.
- 瀬野康弘,中山 雅,杉田 裕,棚井憲治,藤田朝雄(2016): "低アルカリ性セメント (HFSC)を使用したコンクリートの基本特性", JAEA-Data/Code 2016-011, 164p.
- Togo, Y., Takahashi, Y., Amano, Y., Matsuzaki, H., Suzuki, Y., Terada, Y., Muramatsu, Y., Ito, K. and Iwatsuki, T. (2016): "Age and speciation of iodine in groundwater and mudstones of the Horonobe area, Hokkaido, Japan, Implications for the origin and migration of iodine during basin evolution", Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 191, pp. 165-186.
- Tokiwa, T., Aoyagi, K. and Fujita, T. (2016): "Excavation damaged zone inferred by geophysical surveys on drift floor of Horonobe URL", Rock Mechanics and Rock Engineering; From the Past to the Future (EUROCK 2016), pp.901-906.