



JAEA-Review

2016-022

DOI:10.11484/jaea-review-2016-022

JAEA-Review

## 幌延深地層研究計画 平成 27 年度調査研究成果報告

Horonobe Underground Research Laboratory Project  
Investigation Report for the 2015 Fiscal Year

(編) 花室 孝広

(Ed.) Takahiro HANAMURO

バックエンド研究開発部門

幌延深地層研究センター

深地層研究部

Horonobe Underground Research Department

Horonobe Underground Research Center

Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

November 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2016

## 幌延深地層研究計画 平成27年度調査研究成果報告

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 深地層研究部

(編) 花室 孝広

(2016年8月8日受理)

幌延深地層研究計画は、「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つの段階に分けて実施している。

平成27年度は、「幌延深地層研究計画 平成27年度調査研究計画」に従って、調査研究および地下施設の建設を進めた。研究開発は従来通り、「地層科学研究」と「地層処分研究開発」に区分して行った。具体的には、「地層科学研究」では、地質環境調査技術開発、地質環境モニタリング技術開発、深地層における工学的技術の基礎の開発、地質環境の長期安定性に関する研究、という研究課題を設定し、「地層処分研究開発」では、人工バリアなどの工学技術の検証、設計手法の適用性確認、安全評価モデルの高度化および安全評価手法の適用性確認、という研究課題を設定している。

幌延深地層研究計画の成果は、日本原子力研究開発機構（原子力機構）における他の研究開発拠点での成果と合わせて一連の地層処分技術として、処分事業や安全規制に適宜反映していく。そのため、国内外の研究機関との連携を図り、大学などの専門家の協力を得つつ、本計画を着実に効率的に進めていく。また、研究開発業務の透明性・客観性を確保する観点から研究計画の策定から成果までの情報を積極的に公表し、特に研究成果については国内外の学会や学術誌などを通じて広く公開していく。

Horonobe Underground Research Laboratory Project  
Investigation Report for the 2015 Fiscal Year

(Ed.) Takahiro HANAMURO

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

(Received August 8, 2016)

The Horonobe Underground Research Laboratory Project is planned to extend over a period 20 years. The investigations will be conducted in three phases, namely “Phase 1: Surface-based investigations”, “Phase 2: Construction Phase” (investigations during construction of the underground facilities) and “Phase 3: Operation phase” (research in the underground facilities). This report summarizes the results of the investigations for the 2015 fiscal year (2015/2016).

The investigations, which are composed of “Geoscientific research” and “R&D on geological disposal technology”, were carried out according to “Horonobe Underground Research Laboratory Project Investigation Program for the 2015 fiscal year”.

The results of these investigations, along with the results which were obtained in other departments of Japan Atomic Energy Agency (JAEA), are properly offered to the implementations and the safety regulations. For the sake of this, JAEA has proceeded with the project in collaboration with experts from domestic and overseas research organizations.

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

目 次

1. はじめに .....	1
2. 平成27年度の主な調査研究の成果 .....	3
3. 地層科学研究 .....	7
3.1 地質環境調査技術開発 .....	7
3.2 深地層における工学的技術の基礎の開発 .....	29
3.3 地質環境の長期安定性に関する研究 .....	35
4. 地層処分研究開発 .....	41
4.1 処分技術の信頼性向上 .....	41
4.2 安全評価手法の高度化 .....	55
5. 地下施設の維持管理 .....	64
5.1 地下施設の維持管理 .....	64
5.2 掘削土(ズリ)の管理 .....	65
5.3 排水の管理 .....	66
6. 環境モニタリング .....	67
6.1 排水量および水質調査結果 .....	67
6.2 センター周辺の環境影響調査結果 .....	80
7. 安全確保の取組み .....	83
8. 開かれた研究 .....	84
8.1 国内機関との研究協力 .....	84
8.2 国外機関との研究協力 .....	87
参考文献 .....	88
付録 .....	90

Contents

1. Introduction .....	1
2. Outline of the investigation program for the 2015 fiscal year .....	3
3. Geoscientific Research .....	7
3.1 Development of techniques for investigating the geological environment .....	7
3.2 Development of engineering techniques for use in deep geological environment .....	29
3.3 Studies on the long-term stability of the geological environment .....	35
4. Research and development on geological disposal technology .....	41
4.1 Improving the reliability of disposal technologies .....	41
4.2 Enhancement of safety assessment methodologies .....	55
5. Maintenance of the underground facilities .....	64
5.1 Maintenance of the underground facilities .....	64
5.2 Management of drilling material .....	65
5.3 Management of drainage .....	66
6. Environmental monitoring .....	67
6.1 Amount of drainage and water analysis .....	67
6.2 Environmental monitoring around the Horonobe Underground Research Center .....	80
7. Security effort .....	83
8. Collaboration with other research organizations .....	84
8.1 Collaboration with domestic research organizations .....	84
8.2 Collaboration with overseas research organizations .....	87
References .....	88
Appendix .....	90

図リスト

図 1	幌延深地層研究計画の全体スケジュール	2
図 2	平成 27 年度の主な調査研究	3
図 3	研究所用地における主な施設と観測装置の配置	5
図 4	ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所	5
図 5	深度 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所	6
図 6	深度 250m 以深における立坑壁面の地質観察結果	8
図 7	深度 350m の水平断面における割れ目分布図	9
図 8	地下施設周辺における層面断層の分布 (図 7 の A-A' 鉛直断面)	9
図 9	コアに認められる断層近傍の割れ目のタイプと DI の関係	10
図 10	人工亀裂端部に形成される割れ目のタイプと DI の関係	11
図 11	HDB-6 孔における地下水の間隙水圧の測定結果	12
図 12	HDB-7 孔における地下水の間隙水圧の測定結果	12
図 13	H4-2 孔の孔壁画像と透水試験結果	13
図 14	ダクティリティインデックスと地山強度比の比較	14
図 15	坑道内で採取した地下水の塩分濃度の経時変化	15
図 16	東立坑周辺における地下水中の塩分濃度の空間分布	16
図 17	集水リングおよびボーリング孔で採取した地下水に含まれるコロイドの サイズ・粒子数の測定結果	18
図 18	深度 350m 調査坑道掘削時の岩盤の変形挙動	19
図 19	数値解析および既存調査結果の比較	19
図 20	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	20
図 21	C05 孔における水圧モニタリング結果	21
図 22	C06 孔における水圧モニタリング結果	22
図 23	C07 孔における水圧モニタリング結果	22
図 24	C08 孔における水圧モニタリング結果	23
図 25	C09 孔における水圧モニタリング結果	23
図 26	地中変位計設置状況写真と設置レイアウト	25
図 27	地中変位計の計測結果	26
図 28	AE 計測および透水試験レイアウト	27
図 29	AE 発生位置 (左: 平面図, 右: 三次元分布図)	28
図 30	透水試験結果	28
図 31	地震計設置位置	29
図 32	震央分布	29
図 33	平成 27 年 8 月 29 日の地震の加速度波形	30
図 34	平成 27 年 8 月 29 日の地震の振幅と周波数の関係	31
図 35	基準地震動 Ss-1(上)と平成 19 年度検討波形(下)	32
図 36	基準地震動 Ss-1 と一様ハザードスペクトル	33
図 37	基準地震動 Ss-1 による覆工コンクリート最大圧縮応力深度分布	33
図 38	湧水発生に至るプロセス (推定)	34
図 39	隆起・侵食に伴う断層の発達様式の変化	35
図 40	モデル化領域	36
図 41	構築した各時間スケールの地質構造モデル	37
図 42	地下施設に設置した地震計	39
図 43	観測データ波形の確認	40
図 44	人工バリア性能確認試験の概念図	41
図 45	緩衝材 5 段目の温度分布	42
図 46	緩衝材の飽和度の経時変化	42

図 47	オーバーパック腐食試験の概念図	43
図 48	炭素鋼自然電位	44
図 49	緩衝材 6 段目の計測センサー配置	44
図 50	手動測定結果の解析値	45
図 51	自動測定結果	45
図 52	緩衝材定置試験設備の外観および各部の名称	46
図 53	緩衝材可視化試験装置	47
図 54	オーバーパック溶接部腐食試験の概要	48
図 55	試験装置の外観	49
図 56	模擬オーバーパック外表面の温度と腐食速度	49
図 57	試験孔および注水ボーリング孔の配置	51
図 58	地中無線伝送システムの装置構成イメージ	53
図 59	小型送信装置の設置状況の例（緩衝材ブロック内）	53
図 60	地中無線による計測データの伝送試験結果の例（全圧計 TPWL001）	54
図 61	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	56
図 62	トレーサー試験結果（セシウム）	56
図 63	D-03 孔におけるトレーサー試験結果（ヨウ素と重水）	57
図 64	D-05 孔におけるセシウムとモリブデンの減衰曲線	57
図 65	試験孔および間隙水圧孔のレイアウト（平面図）	59
図 66	試験装置概要（断面図）	59
図 67	ダイポール比が同じ条件でのトレーサー試験結果	60
図 68	試験期間中における注水孔(S-07)と揚水孔(S-02)の間隙水圧差	60
図 69	ダイポール比を変化させた場合のトレーサー試験結果	61
図 70	トレーサー試験における脱ガスの影響	63
図 71	掘削土（ズリ）置場の構造	65
図 72	排水系統と各水質分析の試料採取点	67
図 73	地下施設からの排水の採水地点	69
図 74	天塩川の採水地点	71
図 75	掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水地点	73
図 76	清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水地点	76
図 77	環境調査実施場所	80

表リスト

表 1	人工バリア性能確認試験に設置した小型送信装置の一覧	54
表 2	天塩川への排水量	68
表 3	地下施設からの排水に係る水質調査結果	70
表 4	天塩川の水質調査結果	72
表 5	掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果	75
表 6	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	78
表 7	浄化槽排水の水質調査結果	79
表 8	清水川の水質調査結果	81
表 9	確認された重要種（魚類）	82

写真リスト

写真 1	緩衝材定置試験の公開の様子	46
写真 2	緩衝材流出試験の実施場所	50

写真 3	水みち生成状況	51
写真 4	採取したボーリングコア試料(健岩部対象)	58
写真 5	採取したボーリングコア試料(単一割れ目対象)	61
写真 6	地下施設の維持管理状況(機械設備の点検・整備)	64
写真 7	掘削土(ズリ)の保管状況	65
写真 8	排水処理設備の状況	66
写真 9	天塩川の採水状況	71
写真 10	掘削土(ズリ)置場周辺の地下水の採水状況	74
写真 11	清水川の採水状況	77
写真 12	清水川の水質調査	81
写真 13	魚類生息調査	82
写真 14	安全パトロールの状況	83
写真 15	安全行事の状況(安全大会)	83

This is a blank page.

## 1. はじめに

国立研究開発法人<sup>注1</sup>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）<sup>注2</sup>」（以下、第3期中長期目標<sup>注3</sup>）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、「実際の地質環境における人工バリア<sup>注4</sup>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。

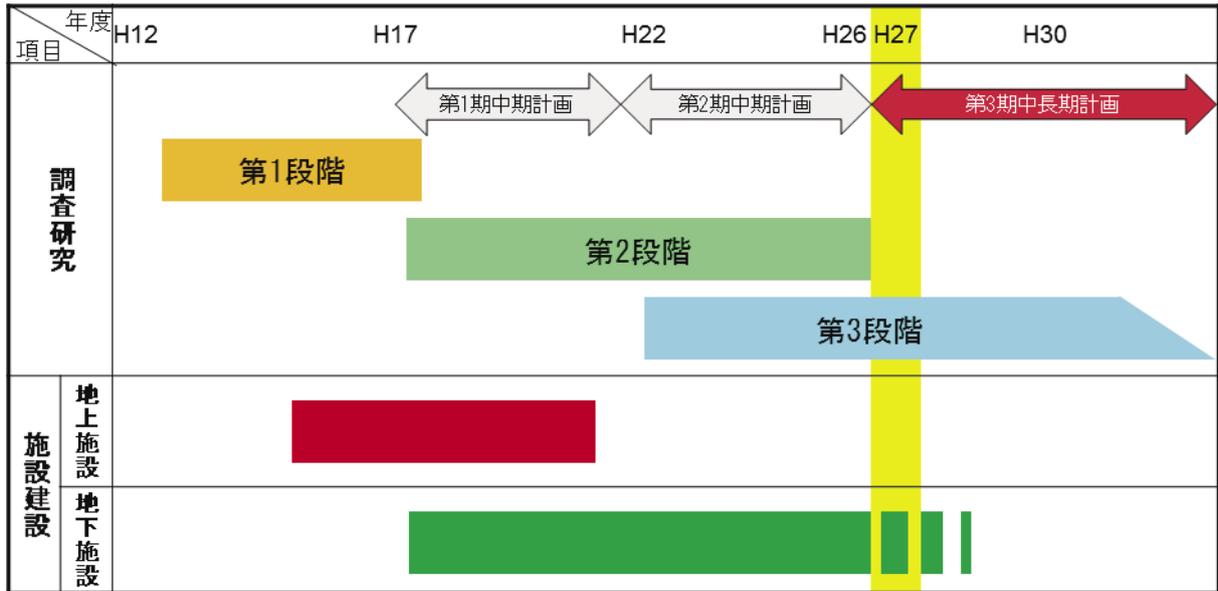
---

注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。

注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。

注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。

注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。



**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

## 2. 平成 27 年度の主な調査研究の成果

平成 27 年度は、「幌延深地層研究計画 平成 27 年度調査研究計画」<sup>(1)</sup>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、必須の課題の基礎情報となる、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、これまで同様に「地層科学研究」や「地層処分研究開発」を継続しました（図 2）。

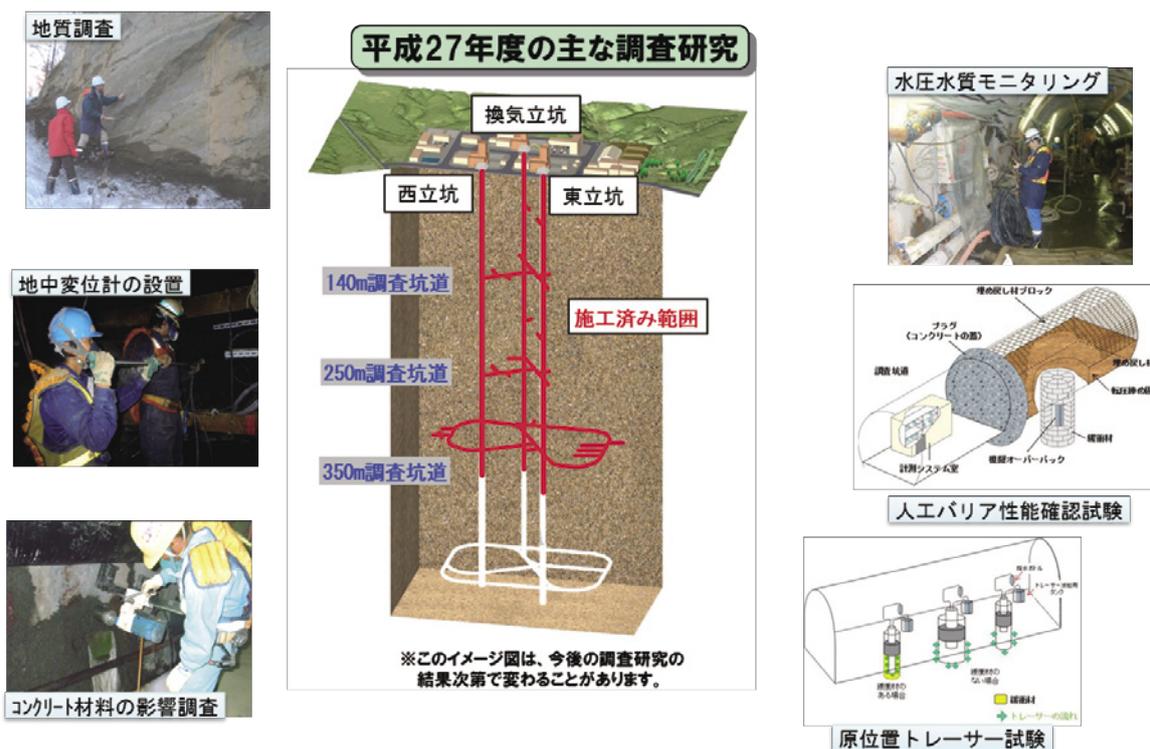


図 2 平成 27 年度の主な調査研究

以下に必須の課題の取り組み状況を含む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<sup>注 5</sup>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－水理－力学－化学連成挙動<sup>注 6</sup>や物質の移動現象などを計測・評価する技術の適用性を確認し、地層処分手業における精密調査段階の後半に必要な技術基盤の確立を目的として実施します。平成 27 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。人工バリア性能

注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。

注6：地下環境に設置された廃棄体の周辺の緩衝材や岩盤には廃棄体からの熱、地下水との反応、岩盤から（または岩盤へ）作用する応力、化学的な変化などによる影響が懸念されています。実際の処分環境では、これらの影響が複合的に発生すると考えられ、その挙動を、熱－水理－力学－化学連成挙動と呼んでいます。

確認試験およびオーバーパック腐食試験では、計測データから、地下水の浸潤状況を確認しています。また、物質移行試験では、試験孔の孔径、緩衝材の有無、注水流量などの試験条件の違いによるトレーサーの移行挙動の違いを確認しました。

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<sup>注7</sup>を考慮しつつ、種々の処分概念オプションの工学的実現性を実証することを通じて、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の整備、提供を目的として実施します。平成 27 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<sup>注8</sup>（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計画の検討を行いました。

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の整備を目的として実施します。平成 27 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、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実施する、通常よりも高い注入圧を用いた透水試験（水圧擾乱試験）の準備を進めました。

必須の課題の基礎情報となる地層科学研究では、既存のボーリング孔などにおける地下水の圧力や水質の観測、地下施設での調査研究で使用するための調査技術や調査機器の開発を継続し、地質環境を推定するための手法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。また、地層処分研究開発では、人工バリア性能確認試験、岩盤および人工バリアを対象とした原位置トレーサー試験などの原位置試験を通して、地下水の浸潤状況などに関わるデータの取得や岩盤中の物質の移行挙動の評価を継続しました。

研究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。

---

注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。

注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発足しました。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。



図 3 研究所用地における主な施設と観測装置の配置

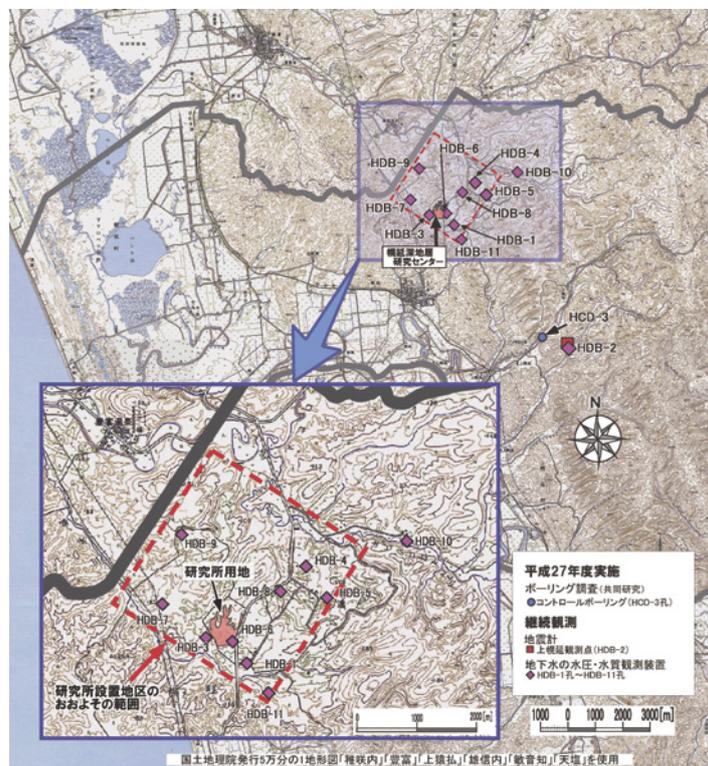


図 4 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所

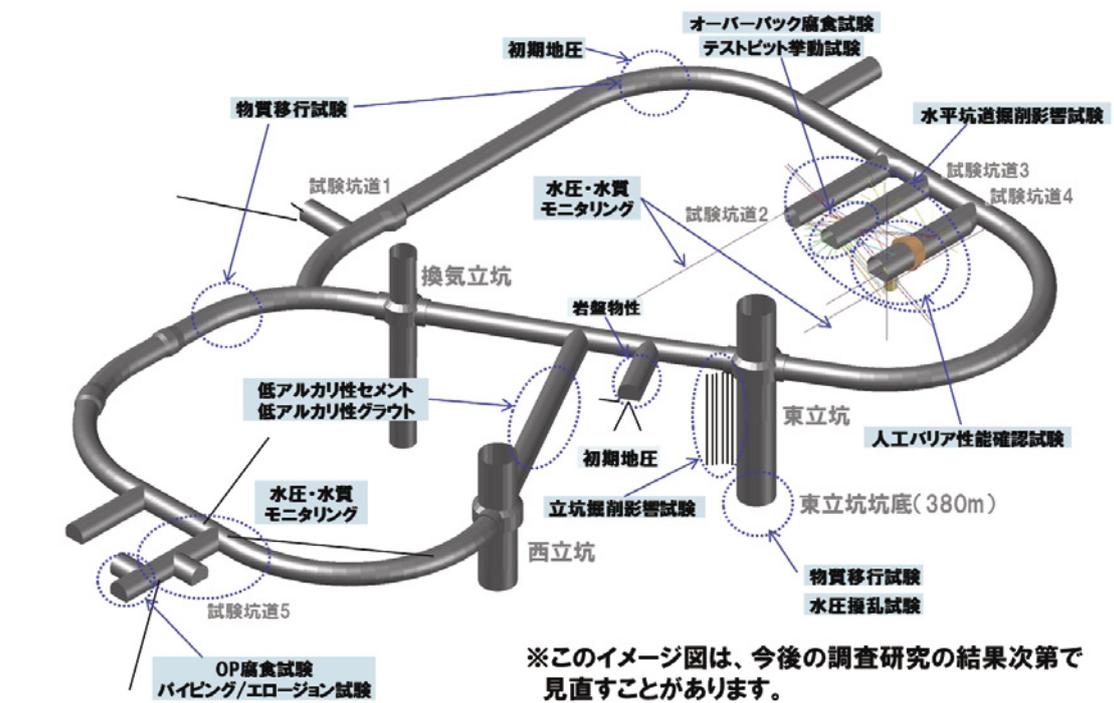


図 5 深度 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

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するため、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 27 年度の学会などへの発表実績を掲載しました。

### 3. 地層科学研究

#### 3.1 地質環境調査技術開発

##### 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<sup>注9</sup>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。

平成27年度においては、地下施設周辺の稚内層中の層理面<sup>注10</sup>に平行な断層（以下、層面断層）の分布について検証しました。地上からの調査研究段階（第1段階）の調査によって、稚内層には層面断層とそれと交差する断層（以下、交差断層）が分布することがわかっています<sup>(2)</sup>。地下施設周辺においてもそれらの断層は換気立坑および東立坑の先行ボーリング調査（PB-V01孔とSAB-1孔）によって確認され、声問層と稚内層の地層境界から鉛直下向きに約20m、約50m、約130m離れた位置に幅数mm～数cm程度の断層ガウジ<sup>注11</sup>を伴う層面断層が確認されています<sup>(3)(4)</sup>（層面断層は断層ガウジを伴う傾向があり、断層角礫<sup>注12</sup>を主体とする交差断層の特徴と異なります）。換気立坑および東立坑における壁面観察においても、先行ボーリング調査で確認した層面断層が地層境界から鉛直下向きに約20m、約50m、約130m離れた位置に確認されています（図6）。深度350m調査坑道の壁面観察では、明瞭な断層ガウジを伴う二つの層面断層が認められ、それぞれ西周回坑道および東周回坑道と交差しています（図7）（東周回坑道と交差する層面断層は、‘S1断層’と呼んでいます<sup>(5)</sup>）。これらの層面断層の空間的な連続性を検討するために、それぞれの層面断層の位置と方向に基づき、層面断層の位置を図7のA-A’線を通過する鉛直断面に投影しました（図8）。その結果、西周回坑道と交差する層面断層は地層境界から約50m離れた層面断層、東周回坑道と交差する層面断層は地層境界から約130m離れた層面断層と、位置と方向性の観点から対比が可能であることがわかりました（図7、図8）。地層境界から約20m離れた層面断層は、深度350m調査坑道と交差せず、試験坑道5から掘削した2本のボーリング孔に確認された層面断層と同様の対比が可能であると考えられます（図7、図8）。以上のことから、今回検討した幅数mm～数cm程度の断層ガウジを伴う層面断層は、少なくとも数十mの連続性を持って分布することが考えられます。今後はこの層面断層の成因や広がり、層面断層が他の交差断層の発達に与える影響などを検討していくとともに、新たなボーリング調査の追加検討も含め、断層の三次元分布の理解を深めていく予定です。

注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。

注10：地層を構成している層と層の境界面をいいます。

注11：未固結の断層岩（断層運動により形成された岩石の総称）のうち、破碎された岩石片の量が30%以下のものをいいます。

注12：未固結の断層岩のうち、破碎された岩石片の量が30%を超えるものをいいます。

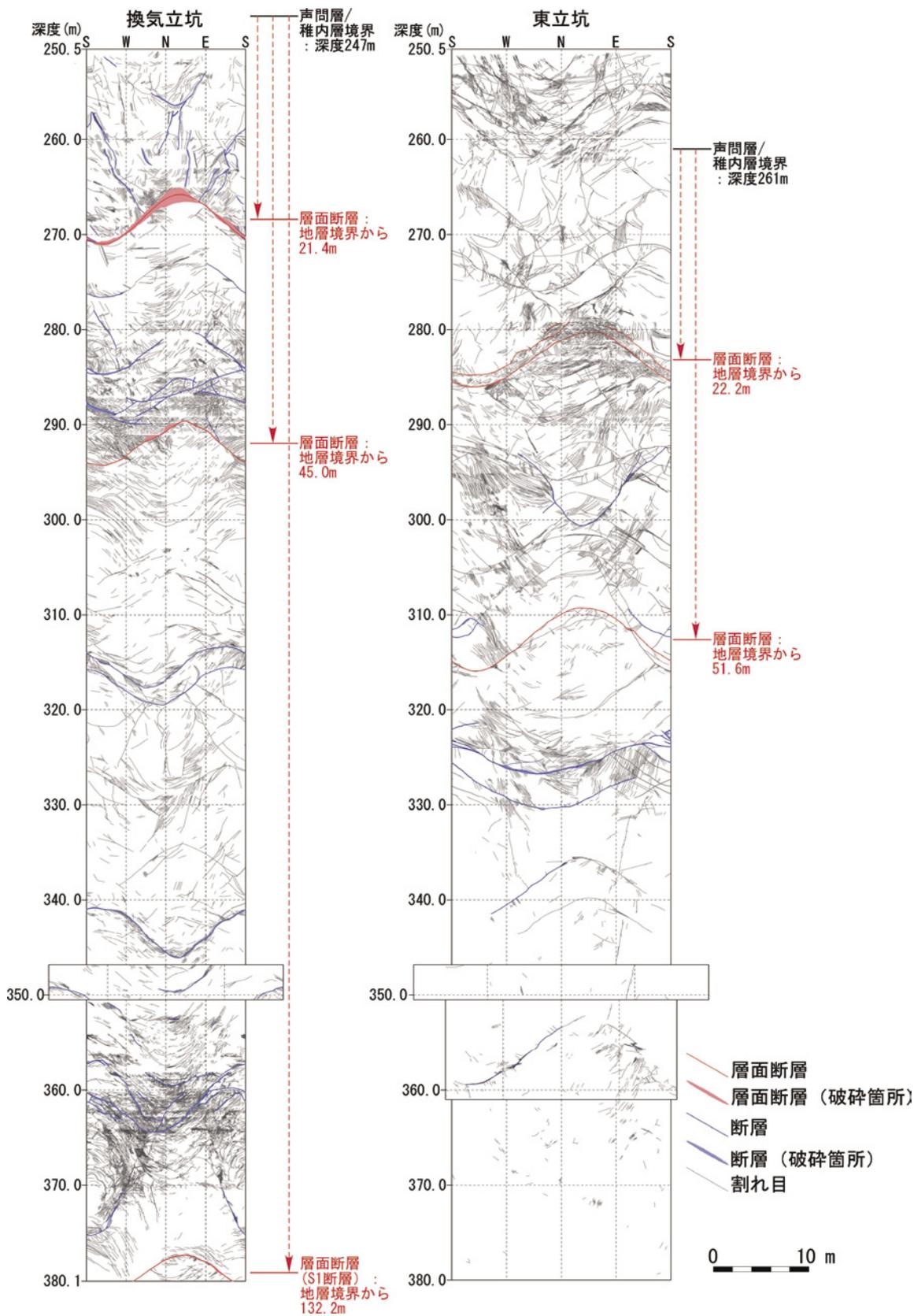
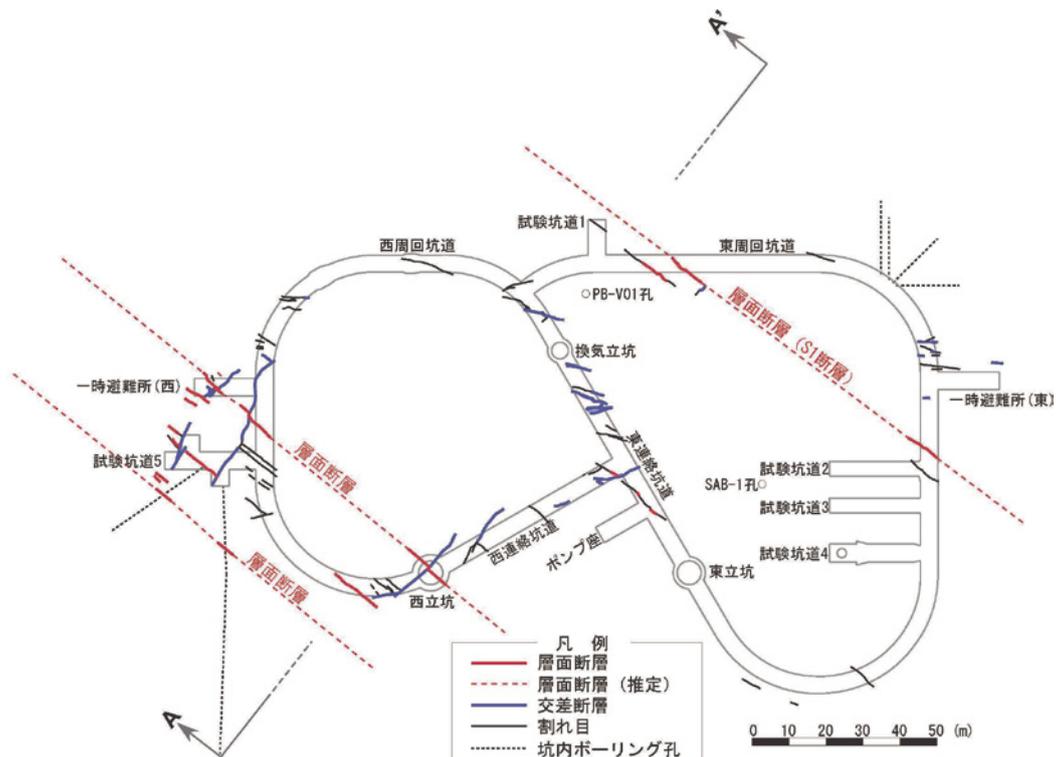


図 6 深度 250m 以深における立坑壁面の地質観察結果



(換気立坑および東立坑の展開図)

図 7 深度 350m の水平断面における割れ目分布図

深度 350m 調査坑道の壁面観察の結果に基づき、断層ガウジや断層角礫を伴う割れ目（断層）および複数の観察区間にわたって分布するような割れ目を深度 350m の水平断面に投影して作成。

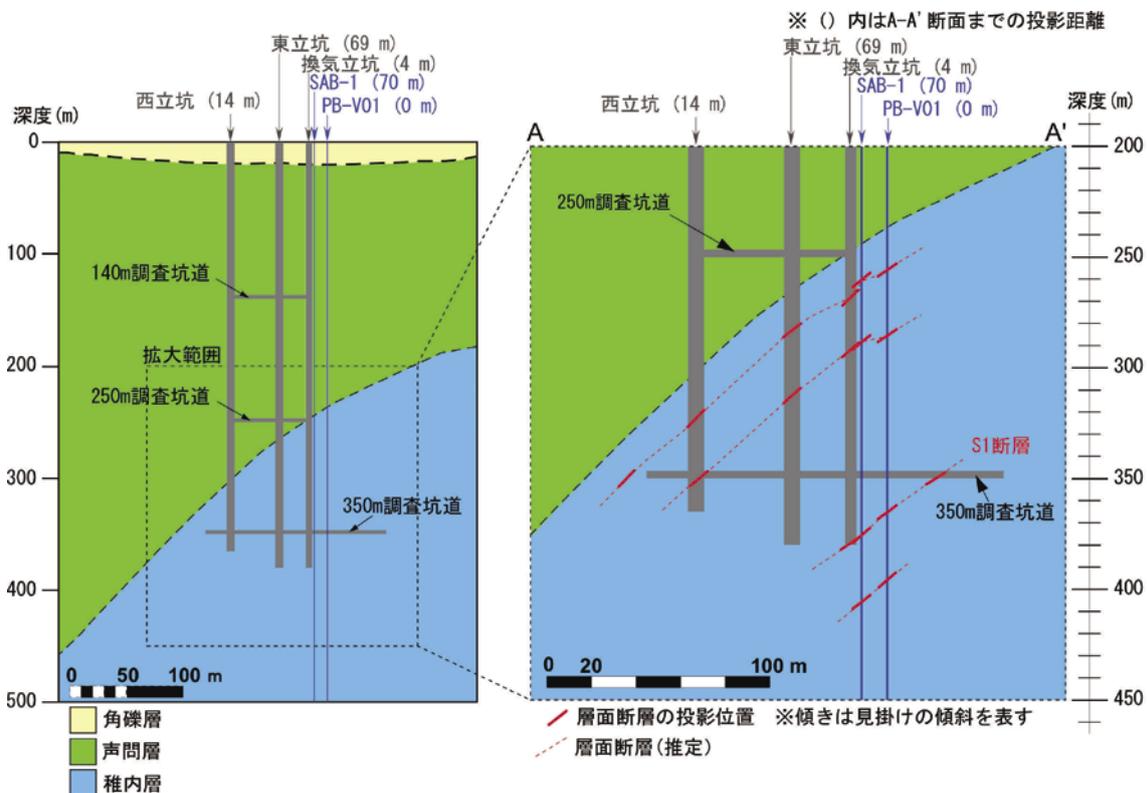
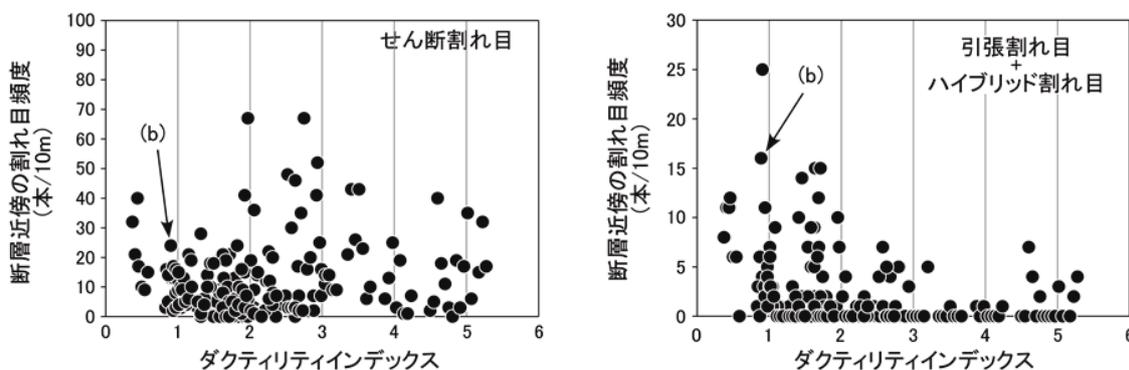


図 8 地下施設周辺における層面断層の分布 (図 7 の A-A' 鉛直断面)

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、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行っています<sup>(6)</sup>。現在、岩石の強度・応力状態を定量化する指標としてダクティリティインデックス (DI) <sup>注13</sup>の活用を検討しており、同指標を用いた既存データの解析などを行っています<sup>(7)</sup>。

平成 27 年度はDIの持つ地質学的な意味を検討するために、DIと断層近傍に発達する割れ目のタイプ (引張割れ目/ハイブリッド割れ目<sup>注14</sup>/せん断割れ目) の関係について検討しました。このような検討はDIの基礎情報として重要となります。岩石力学的な検討を踏まえると、DIは 2 未満の時に引張/ハイブリッド割れ目が断層運動に伴って断層近傍に発達しやすくなる一方で、DIが 2 以上になるとせん断割れ目も断層近傍に形成されるようになり、その形成が引張/ハイブリッド割れ目の発達を抑制することが推定されます<sup>(8)</sup>。稚内層中には多数の断層が発達しており、稚内層は現在の深度に至るまでの隆起・侵食の過程でDIが徐々に低下していったことが考えられます<sup>(8)</sup>。既存のボーリング調査結果に基づくと、現在のDIが 2 未満の岩盤領域では引張・ハイブリッド割れ目が断層近傍に多く発達していることが確認でき (図 9)、上記の岩石力学的検討に基づく推定と整合することが確認できました<sup>(8)</sup>。この結果は室内実験の結果からも支持され、円柱状に整形した岩石 (直径 3cm×高さ 6cm) に人工亀裂を入れた供試体を用いて、様々なDI条件下で人工亀裂端部に形成される二次亀裂のタイプを観察した結果、DIが 2 以上を経験した供試体だけにせん断割れ目が形成されることが確認されました (図 10) <sup>(8)</sup>。このように、DIは断層近傍に発達する亀裂のタイプ (破壊モード) と密接に関連し、地下の断層の地質学的・水理学的特性を理解する上で有効な指標となり得ることが確認できました。

(a) 断層近傍の割れ目の頻度



(b) 断層近傍の割れ目の産状

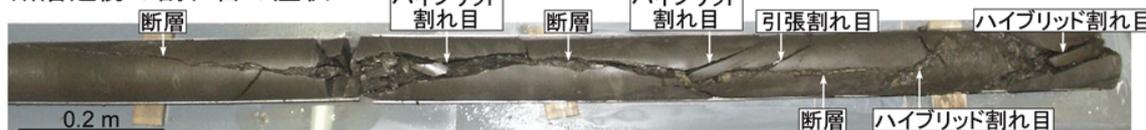


図 9 コアに認められる断層近傍の割れ目のタイプと DI の関係<sup>(8)</sup>

注13：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) をその健全部の引張強度 (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。

注14：引張割れ目とせん断割れ目の特徴を併せ持つ割れ目をいいます。

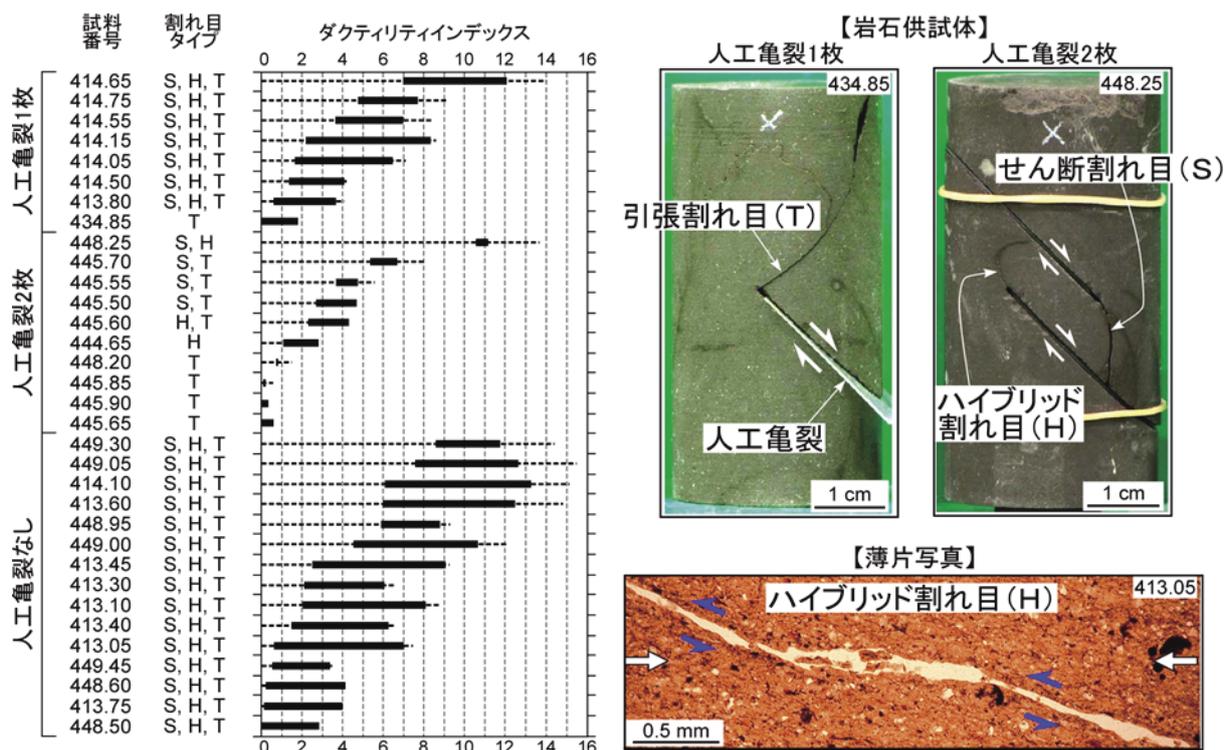


図 10 人工亀裂端部に形成される割れ目のタイプと DI の関係<sup>(8)</sup>

## (2) 岩盤の水理

表層水理調査や第 1 段階で掘削したボーリング孔での間隙水圧観測<sup>(9)</sup>を継続するほか、地下施設などを利用した坑道周辺岩盤の透水性や坑道内への湧水量などに関する調査を行っています。そして、これらの調査から得られる観測結果に基づいて、第 1 段階で構築した水理地質構造モデルの検証を行っています。

平成 27 年度は、平成 26 年度に引き続き、HDB 各孔および PB-V01 孔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 孔および PB-V01 孔) では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引き続き認められました (図 11 は換気立坑から 91.5m 離れた HDB-6 孔の例)。その低下速度は影響があらわれ始めた時期より遅くなる傾向にあります。しかし、一部の区間では水位低下が認められていません (例えば図 11 に示す HDB-6 孔の下位 3 つの観測区間 509.00-514.00m、562.50-567.50m、および 587.50-592.50m)。これは同観測区間に相当する稚内層深部の透水性が低いことなどが原因として考えられます。一方、地下施設から離れたボーリング孔 (HDB-3, 6 孔および PB-V01 孔以外) 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 孔の例)。

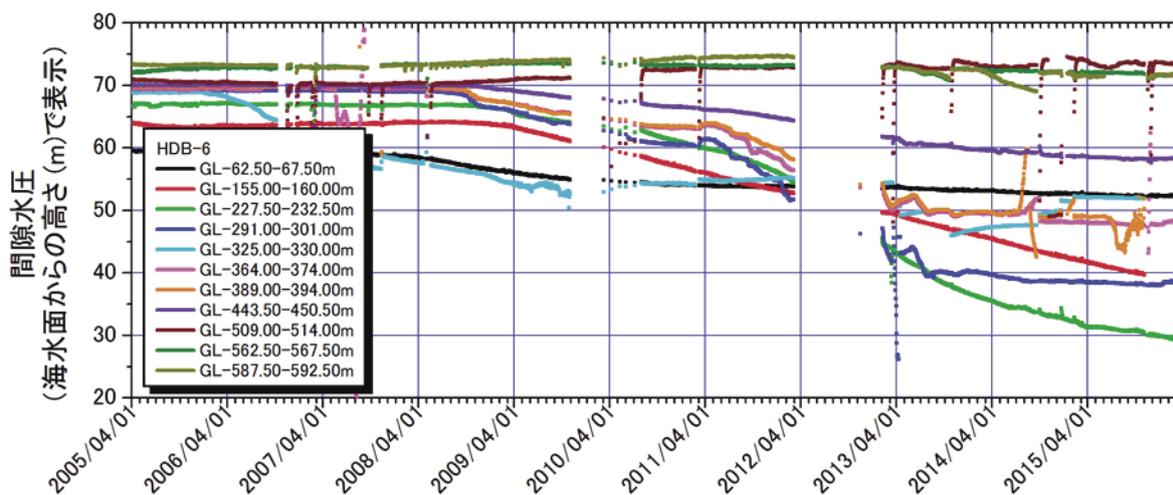


図 11 HDB-6 孔における地下水の間隙水圧の測定結果

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。

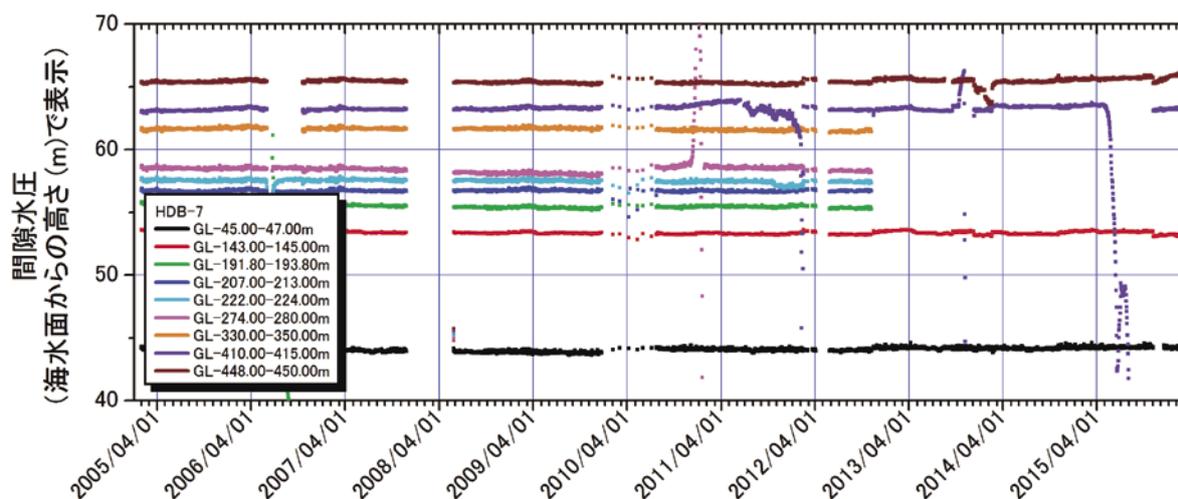


図 12 HDB-7 孔における地下水の間隙水圧の測定結果

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。

坑道周辺の掘削影響を被っ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、H4-2 孔の調査結果を示します。H4-2 孔は、試験坑道 3 の側壁から試験坑道 4 の人工バリア性能確認試験用の試験孔の西側に向けて、同試験孔掘削後に掘削しました<sup>(6)</sup> (図 13(a))。ボーリング孔壁観察の結果、試験孔の孔壁から西方約 1m の箇所 (ボーリング孔の掘削深度 11m 付近) にて、試験孔の掘削に伴って形成されたと考えられる亀裂の発達領域が確認されました<sup>(6)</sup> (図 13(b))。原位置透水試験の結果に基づくと、同亀裂発達領域の透水性は、試験坑道 3 の掘削に伴って形成された試験坑道 3 沿いの亀裂発達領域 (図 13(a) の区間 5 に相当) と同程度の透水性を示します<sup>(6)</sup> (図 13(c))。これまで計 5 回の透水試験を行ってきましたが、平成 26 年 7 月に行った 2 回目の透水試験では試験区間 2 で他の結果よりも高い透

水性が確認されました (図 13(c))。これは同試験前日に行った試験孔内のケーシング引き抜きによる物理的擾乱が原因と考えられます。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徐々に試験区間2で観測され始めました (図 13(c))。同区間の透水性に有意な変化はまだ認められませんが (図 13(c))、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亀裂発達領域の透水性に与える影響を確認していく予定です。

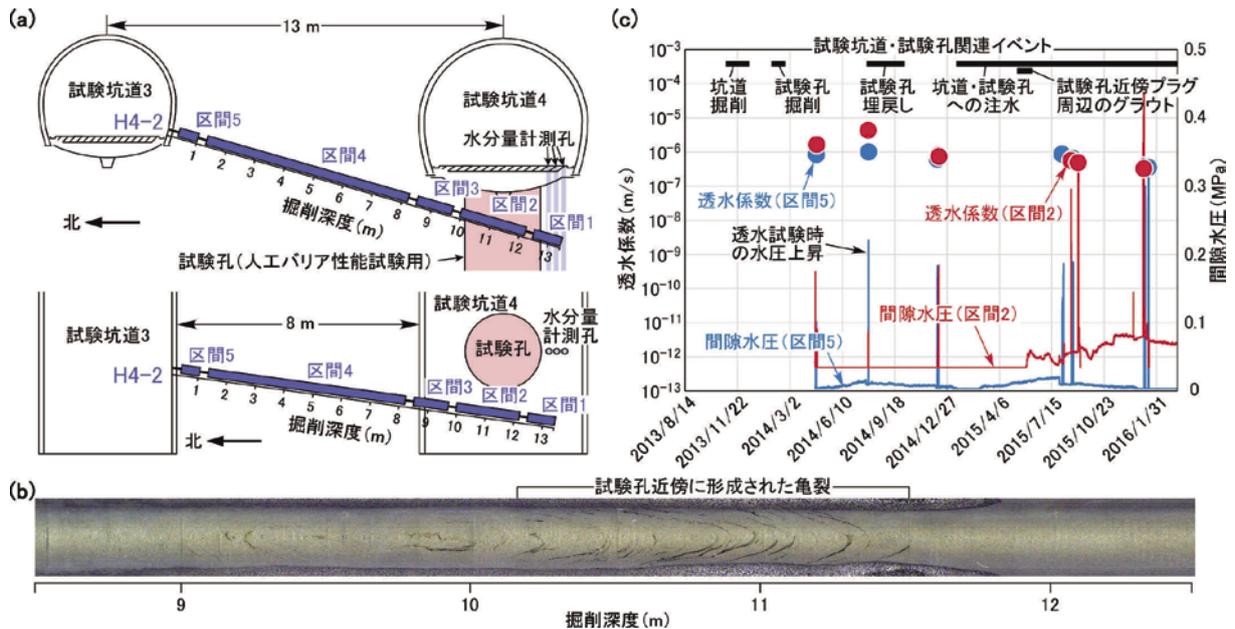


図 13 H4-2 孔の孔壁画像と透水試験結果

(a) ボーリング孔レイアウト (上図：鉛直断面；下図：水平断面)  
 (b) 孔壁画像 (c) 試験区間 2、区間 5 の透水性と間隙水圧

平成 27 年度は岩石の強度・応力状態と断層の透水性との関係について検討を継続しました。平成 24 年度は両者の関係について地山強度比<sup>注 15</sup>を指標に用いた整理を行いました。現在は 3.1.1(1) で述べたように DI を指標に用いた検討を進めています。図 14 に地山強度比と DI の比較例を示します。地山強度比も DI と同様に断層の透水性との相関性が個々の地域内で認められますが、DI のように全ての地域の断層の透水性を同一の関係式より説明することは困難であることが示唆されます (図中に示す P 値は図中の関係式の一般性を表しており、0.05 以下だとその関係式に一般性が無いことが示唆されます)。地山強度比は DI に比べて値を決定しやすいという利点がありますが、一般性の高い指標という点では DI の方が優れていると考えられます。

注15：地下空洞の力学的安定性を表す指標としてしばしば用いられる値で、この値が高いほど、岩石は見かけ上、やわらかくなります。一軸圧縮強度 (円筒状の岩石試料の両側に圧力をかけて行って破壊する際の圧力値) を有効土被り圧 (地下のある地点においてその地点から上にある土・岩石によってかかる圧力) で除した値で定義されます。

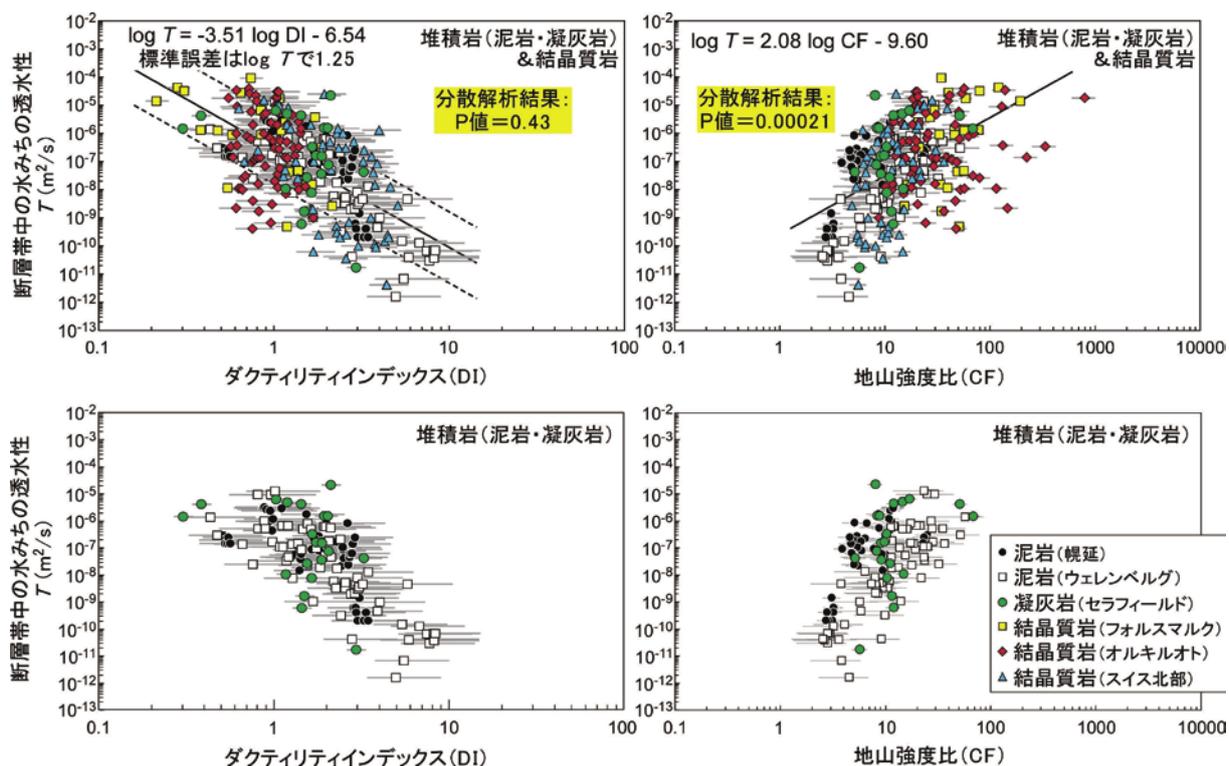


図 14 ダクティリティインデックスと地山強度比の比較<sup>(7)</sup>

### (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の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。このため、坑道内で採取した地下水の pH や電気伝導度<sup>注 16</sup>、酸化還元電位<sup>注 17</sup>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 27 年度は、平成 26 年度に引き続き、換気立坑および東立坑の壁面に設置した集水リング<sup>注 18</sup>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 15 に、これらの地点から採取した地下水の塩分濃度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）では、深度 100m～200m 程度の位置で採水された地下水の多く（たとえば、WR-V-98.0、WR-V-132.0、WR-E-100.0、WR-V-168.0、WR-V-202.0、WR-E-169.0、WR-E-202.0）は、他の深度で採水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 26 年度と同様な結果でした。

注 16：電気の通しやすさを表す値で、電気伝導度が高い（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。

注 17：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。

注 18：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。

次に、立坑周辺の地下水の水質分析結果に基づいて、立坑周辺における地下水中の塩分濃度の空間分布図を作成し、その変化について考察しました。図 16 に東立坑の掘削開始前から平成 27 年度までのデータに基づく東立坑周辺の地下水中の塩分濃度の空間分布図を示します。

平成 27 年度は平成 26 年度と同様に、これまでの坑道内のボーリング孔のほか、東立坑の南約 90m に位置する HDB-6 孔の 2 区間（深度 288.66~302.90m、深度 362.39~385.70m）において採水を実施し、新たに得られた地下水データに基づいて塩分濃度の空間分布図を作成しました。その結果、平成 25 年度から見られている浅部における塩分濃度の低下が、引き続き確認されました。また、平成 26 年度と同様に深度 350m 調査坑道で得られたデータを加えることにより、地下水中の塩分濃度分布の詳細がより明らかになりました。なお、稚内層下部における塩分濃度分布については、従来の結果と同様に顕著な変化は認められませんでした。立坑からの排水に伴い水質が変化することも考えられるため、今後もモニタリングを継続し、変化の傾向とプロセスを把握するとともに、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<sup>注19</sup>の更新に反映していきます。

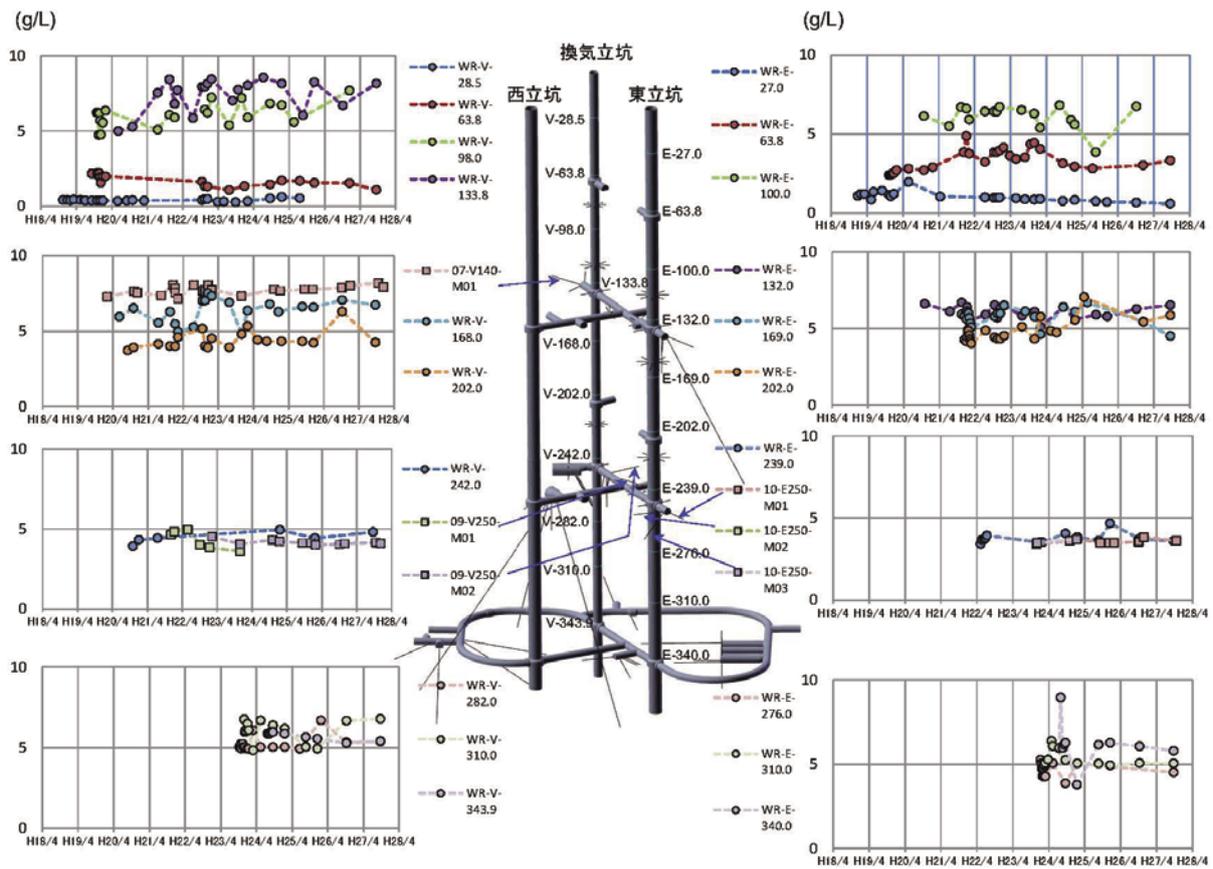
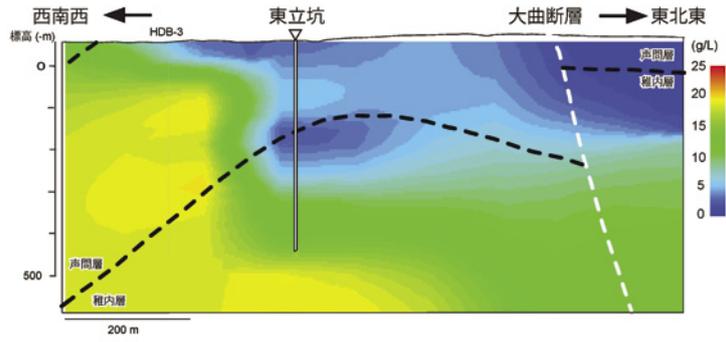


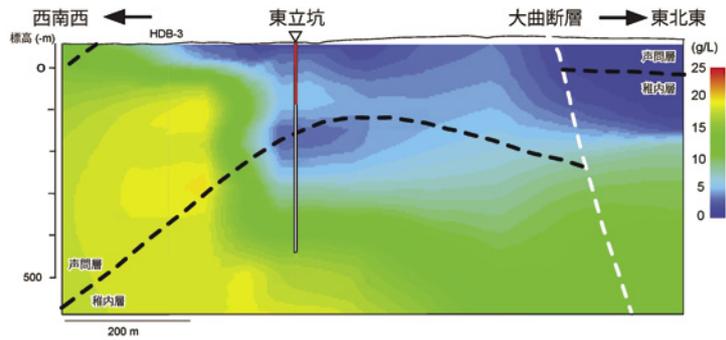
図 15 坑道内で採取した地下水の塩分濃度の経時変化

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、○は集水リング、□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。

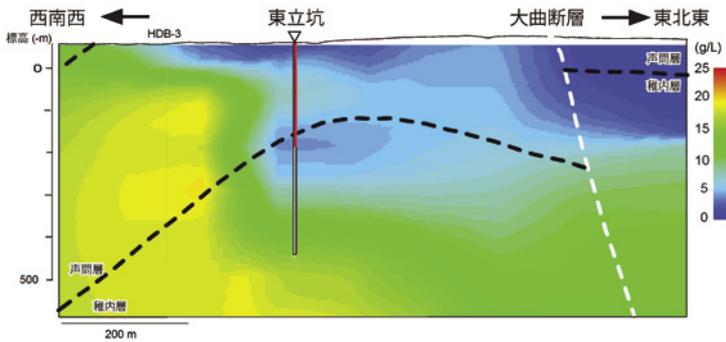
注19：地下水の水質が地下環境でどのように分布しているのかを図や数式などを用いて表現したものです。



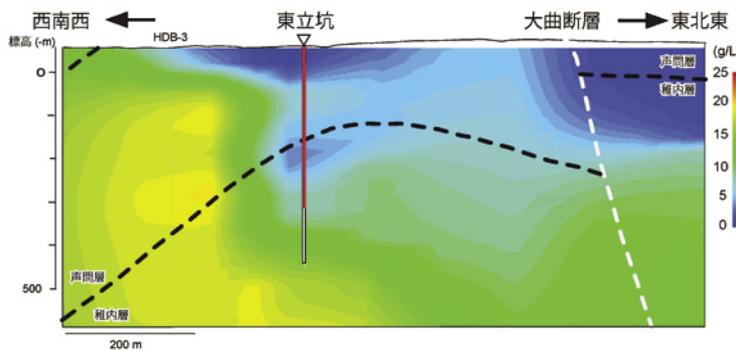
(a) 第1段階調査時（東立坑掘削前）



(b) 平成 20 年度（東立坑：地表から 140m まで掘削）



(c) 平成 22 年度（東立坑：地表から 250m まで掘削）



(d) 平成 27 年度（東立坑：地表から 380m まで掘削）

図 16 東立坑周辺における地下水中の塩分濃度の空間分布  
図中の東立坑の赤い部分は、各年度末の時点での掘削深度を表しています。

地下水年代測定方法の1つに、地下水に溶けているヘリウムガスの量を調べる方法があります。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。気泡が生じると地下水とガスが分離するため、元の地下水中に溶けていたガスの量がわからなくなります。また、溶存ガスの1つであるヘリウムは、分子量が小さいため、通常の採水装置に使用されているナイロン製の採水チューブを透過する可能性があります。このため、平成26年度に地下水年代測定用の採水装置として、深度350m調査坑道にステンレス製の採水チューブを備えた地下水循環装置を製作・設置しました。この装置を用い、平成27年度は採水チューブからのガスの透過を極力抑えた条件で採水を5回行い、溶存ガスであるヘリウムの量を測定しました。平成27年度の測定結果では、ヘリウムの量はバラツキが大きく、地下水年代を推定する上で必要な信頼性の高い測定値を得ることは困難でした。このことは、ナイロン製のチューブから漏れいするヘリウムの量よりも、地下施設の掘削などによる地下水圧の変動（低下）が地下水中に溶けているヘリウムの量に与える影響の方が大きいことを示唆しています。今後も引き続き採水を行い、測定値の再現性を確認するとともに、バラツキを低減するための対策についても検討する予定です。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<sup>注20</sup>（以下、電中研）との共同研究により実施しています。

地下水中にはイオンとして溶存している成分の他に、様々な元素などから成る微粒子が水中に浮遊しています。粒子の大きさが1nm<sup>注21</sup>～1000nm程度のものは、コロイドと呼ばれています。これまでの研究により、幌延の地下水中にも鉄やケイ素、カルシウム、リンなどの成分からなるコロイドが存在することが示唆されています。そこで、平成27年度は、地下水中のコロイドのサイズや粒子数を調べるため、レーザー散乱法<sup>注22</sup>を応用した装置を用いて測定を試みました。測定には、換気立坑の壁面に設置された集水リングで採取した地下水と坑道内で掘削されたボーリング孔から採取した地下水を用いました。図17に各々の地下水に含まれるコロイドのサイズと粒子数の測定結果を示します。

コロイドのサイズとしては、いずれの地下水でも100nm～200nm程度のものが多いことがわかります。また、コロイドの粒子数は集水リングで採取した地下水の方がボーリング孔から採取した地下水よりも多いこともわかります。なお、集水リングで採取した地下水は、立坑壁面を覆うコンクリート支保との接触や集水途中における微粒子の混入による影響を受けている可能性があります。このため、集水リングで採取した地下水の方がボーリング孔から採取した地下水より、コロイドの粒子数が多くなったと推定されます。今後は、ボーリング孔から採取した地下水を主な対象としコロイドに関わるデータを拡充するとともに、従来から行われている他の測定手法（様々なフィルターサイズのろ過膜を用いたろ過法）による結果とも比較しながら、測定結果の妥当性を確認していく予定です。

また、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。これまでに、幌延の地下水中に溶存する有機物として、分子量の大きい高分子有機物に相当する腐植物質に対する溶存量の評

注20：一般財団法人 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。

注21：長さの単位です。1 nm = 0.001 μm = 0.000001 mm。

注22：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。

価が行われています。そこで、平成 27 年度は、腐植物質に比べて、相対的に分子量の小さい低分子有機物（有機酸）の溶存量を予察的に把握するための分析を試みました。分析用の地下水試料としては、坑道内で掘削されたボーリング孔のうち、全有機炭素（TOC）の比較的多い地下水が存在する 07-V140-M01 孔（TOC=20mg/L 程度）を対象にしました。分析の結果、主な有機酸としてカルボン酸であるギ酸および酢酸が溶存すると推定されました。なお、溶存量としては、ギ酸=0.3mg/L 程度、酢酸=0.6mg/L 程度であることもわかりました。今後も調査・分析を継続し、未検出の溶存有機物を把握するための技術開発を進める予定です。

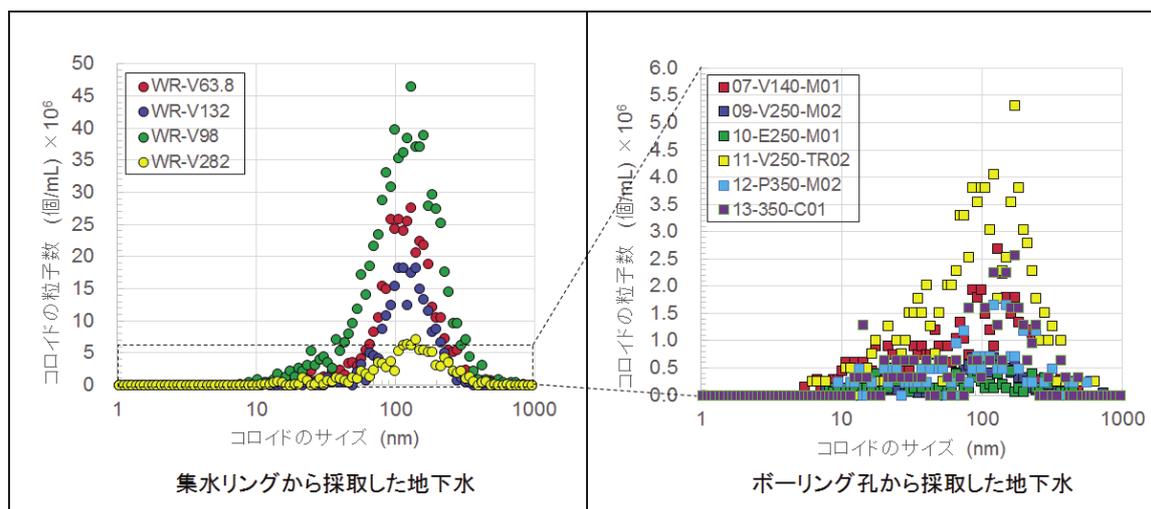


図 17 集水リングおよびボーリング孔で採取した地下水に含まれるコロイドのサイズ・粒子数の測定結果

#### (4) 岩盤力学

第 1 段階で構築した岩盤力学モデル<sup>注23</sup>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。

図 18 に、深度 350m 調査坑道で取得した掘削終了後の内空変位<sup>注24</sup>および天端沈下の計測値と掘削方位の関係を示します。このグラフは、断層などの不均質の影響を反映していると思われる部分（グラウト区間）や、試験坑道などの枝坑掘削周辺部（枝線）といった、特殊な変形挙動を示すと予測される箇所での測定結果も示しています。図 18 に示すような坑道全体の変形挙動に基づき、数値解析により調査坑道を含む数百メートルにわたる範囲の地圧状態を推定しました。

解析により得られた水平面内の最大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合わせて図 19 に示します。本図から、数値解析により推定された地圧値は、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、断層部などの岩盤の強度の不均質性を考慮し、地圧状態の推定の精度の向上を図っていきます。

注23： 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。

注24： 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。

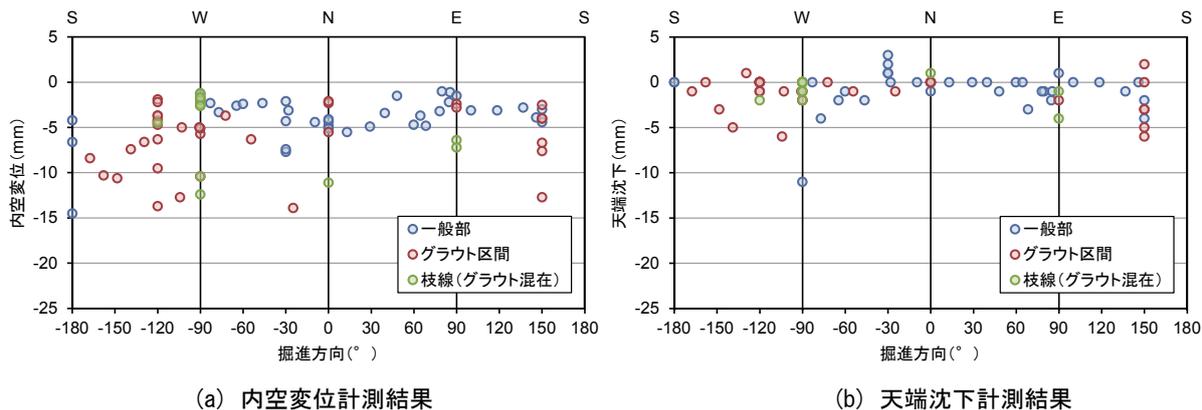


図 18 深度 350m 調査坑道掘削時の岩盤の変形挙動

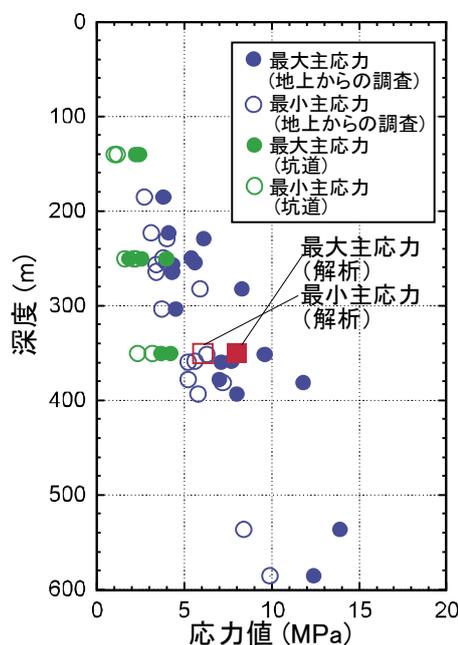


図 19 数値解析および既存調査結果の比較

### 3.1.2 調査技術・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のほか、コントロールボーリング<sup>注25</sup>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

注25：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。

ル<sup>注26</sup>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。

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、モニタリングを継続しました。装置の設置箇所を図20に示します。

観測装置は、ボーリング孔内の水圧・水質を連続でモニタリングすることが可能です。観測にあたっては、ボーリング孔内にパッカーを設置し、任意の観測区間に区切り、各観測区間からチューブを介し、嫌気・被圧状態<sup>注27</sup>を維持した地下水を調査坑道まで導きます。

平成27年度は、試験坑道掘削後の経時変化の把握や観測装置の長期的な性能確認の一環として13-350-C05孔、13-350-C06孔、13-350-C07孔、13-350-C08孔および13-350-C09孔（以下、C05孔、C06孔、C07孔、C08孔およびC09孔と略します）の5孔を用い、水圧・水質モニタリングを行いました。

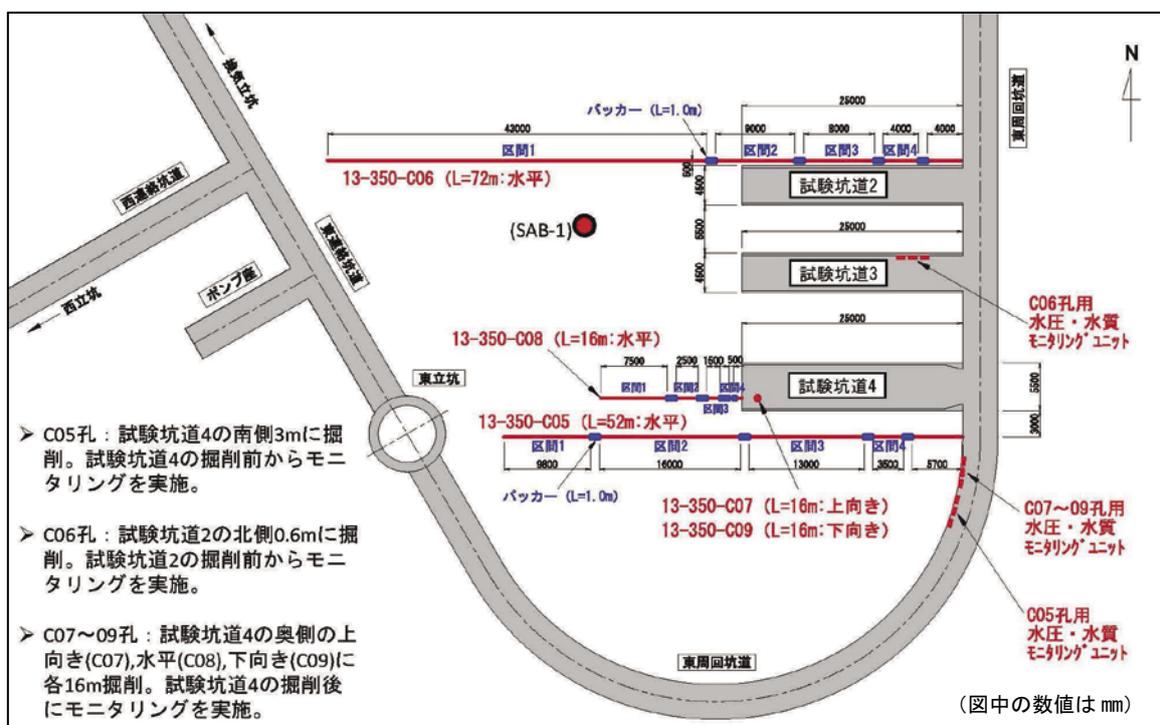


図 20 試験坑道 2 および試験坑道 4 周辺における水圧・水質モニタリング実施箇所

C05孔は試験坑道4の南側約3mの位置に掘削した孔長52mのボーリング孔、C06孔は試験坑道2の北側約0.6mの位置に掘削した孔長72mのボーリング孔です。両孔とも孔内はパッカーで4区

注26：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。

注27：酸素に触れず、地下の圧力を保ったままの状態のことをいいます。

間に区切り、試験坑道 2 および試験坑道 4 の掘削前（平成 25 年度）から、水圧・水質モニタリングを行っています。

また、平成 25 年度には試験坑道 4 の掘削後、坑道の突き当りの位置において、鉛直上方（C07 孔）、水平（C08 孔）および鉛直下方（C09 孔）の 3 方向にボーリングを掘削しました。3 孔ともに掘進長は 16m で、孔内はパッカーで 4 区間に区切られています。これら 3 孔のボーリング孔を用い、試験坑道 4 における人工バリア性能確認試験の実施前から、水圧・水質モニタリングを行っています。

C05 孔、C06 孔、C07 孔、C08 孔および C09 孔における水圧モニタリングの結果を図 21、図 22、図 23、図 24 および図 25 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。また、観測期間全体を通して、坑道掘削により徐々に水圧が低下する傾向がみられます。

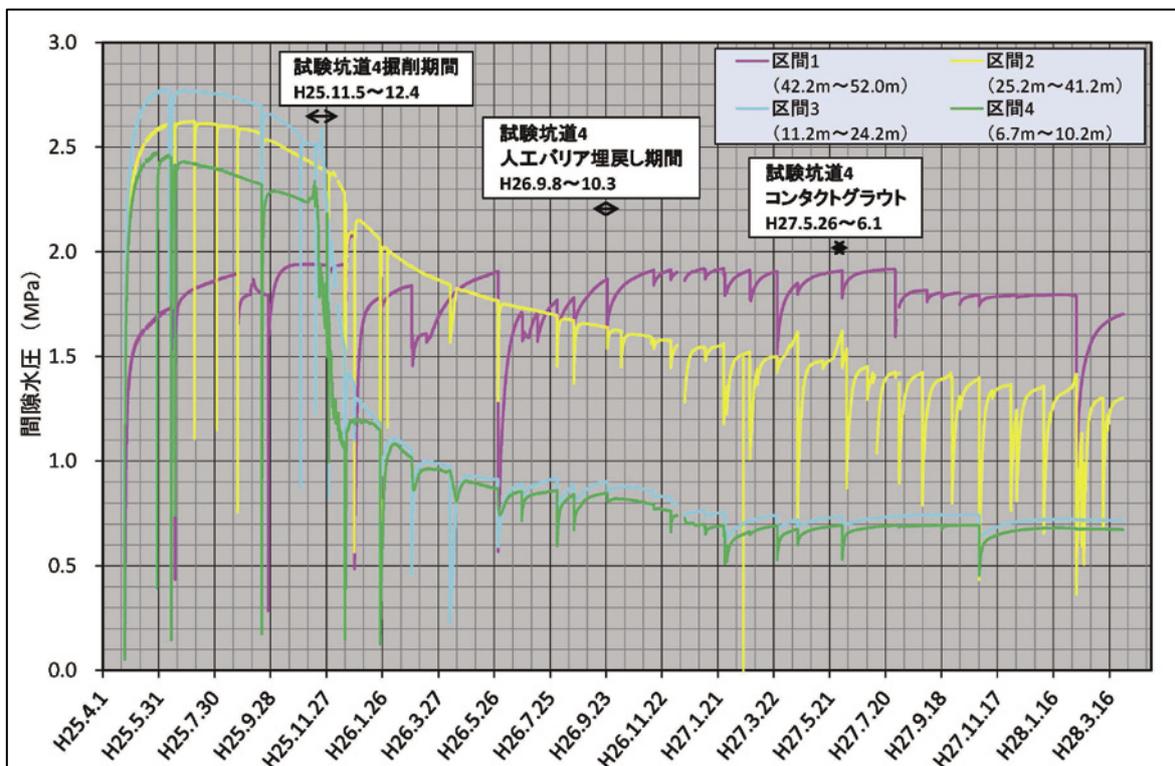


図 21 C05 孔における水圧モニタリング結果

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。

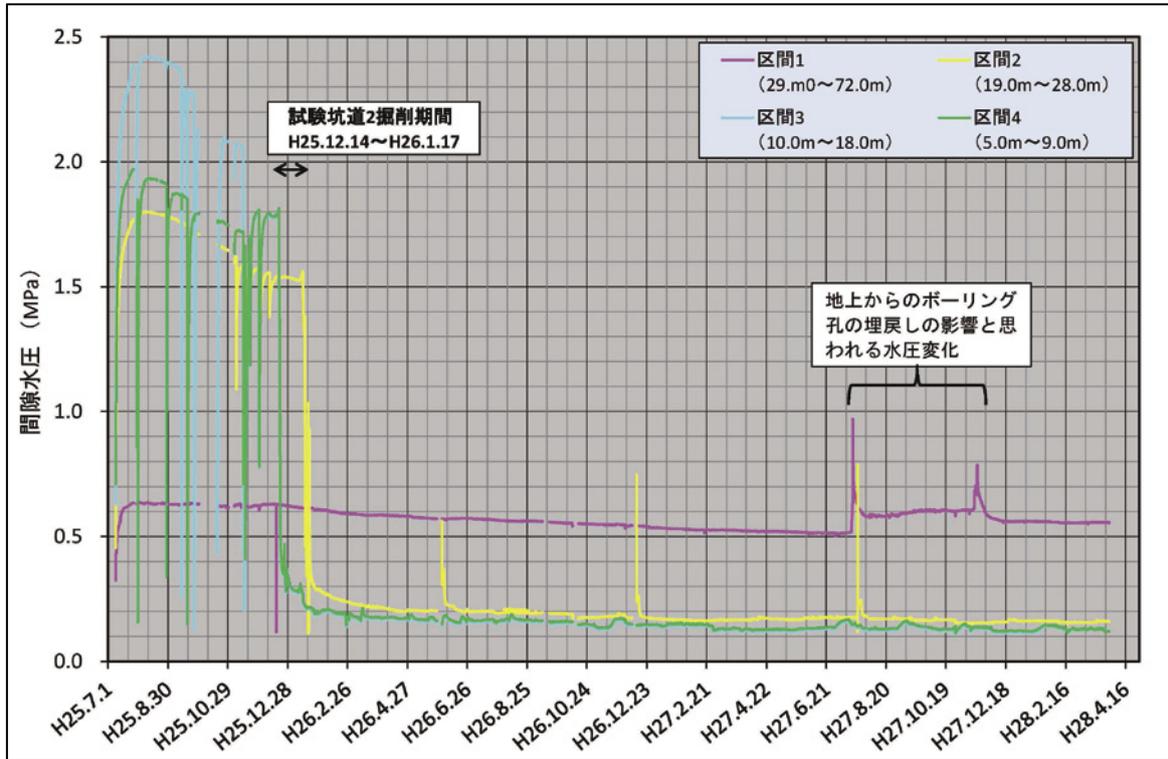


図 22 C06 孔における水圧モニタリング結果

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。

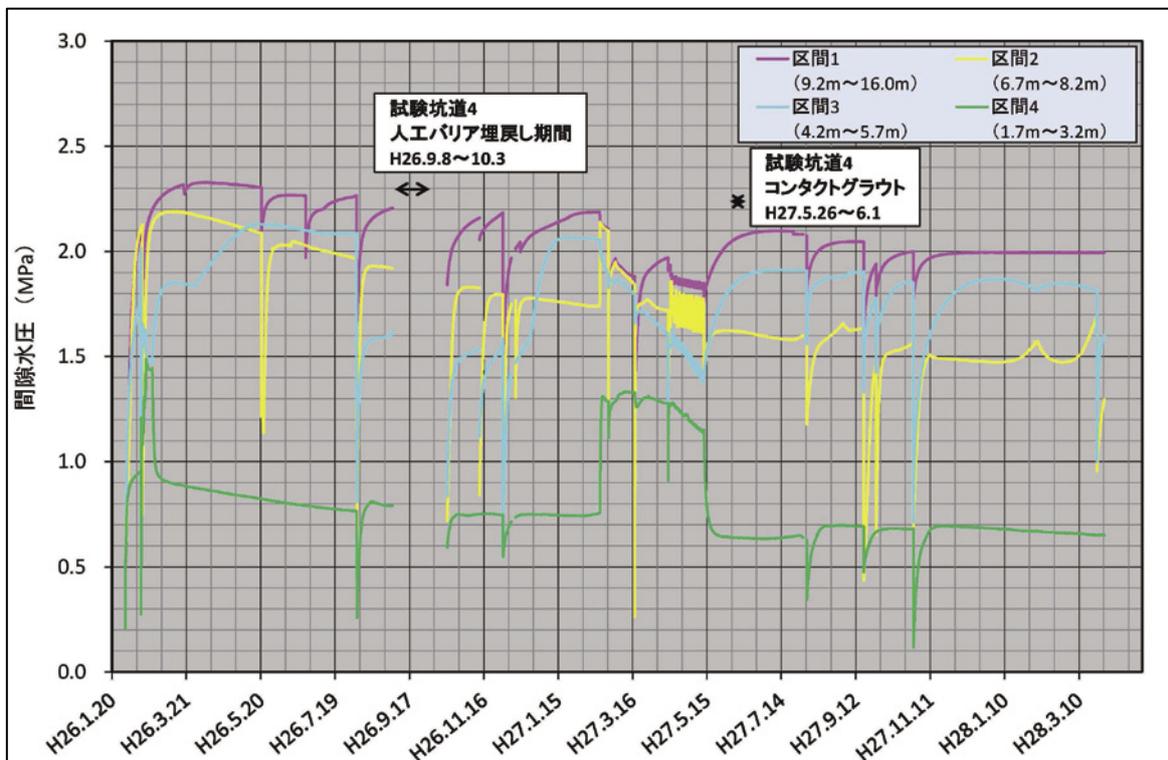


図 23 C07 孔における水圧モニタリング結果

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。

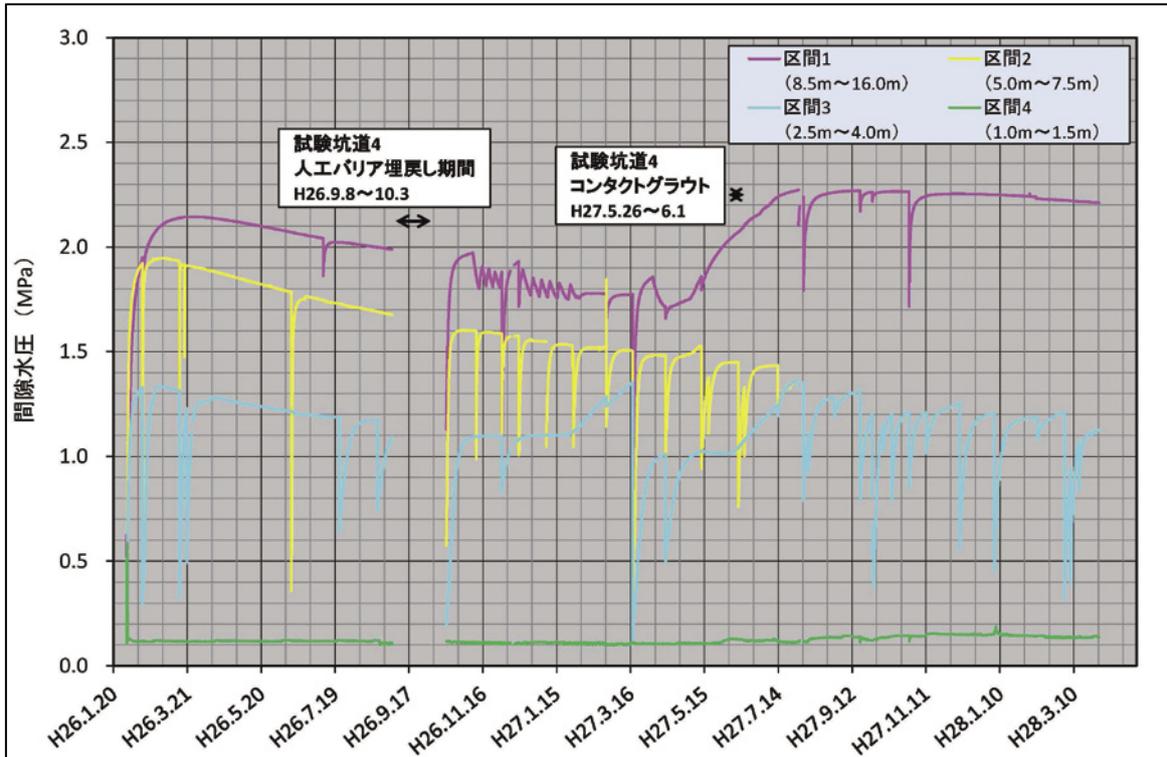


図 24 C08 孔における水圧モニタリング結果

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。

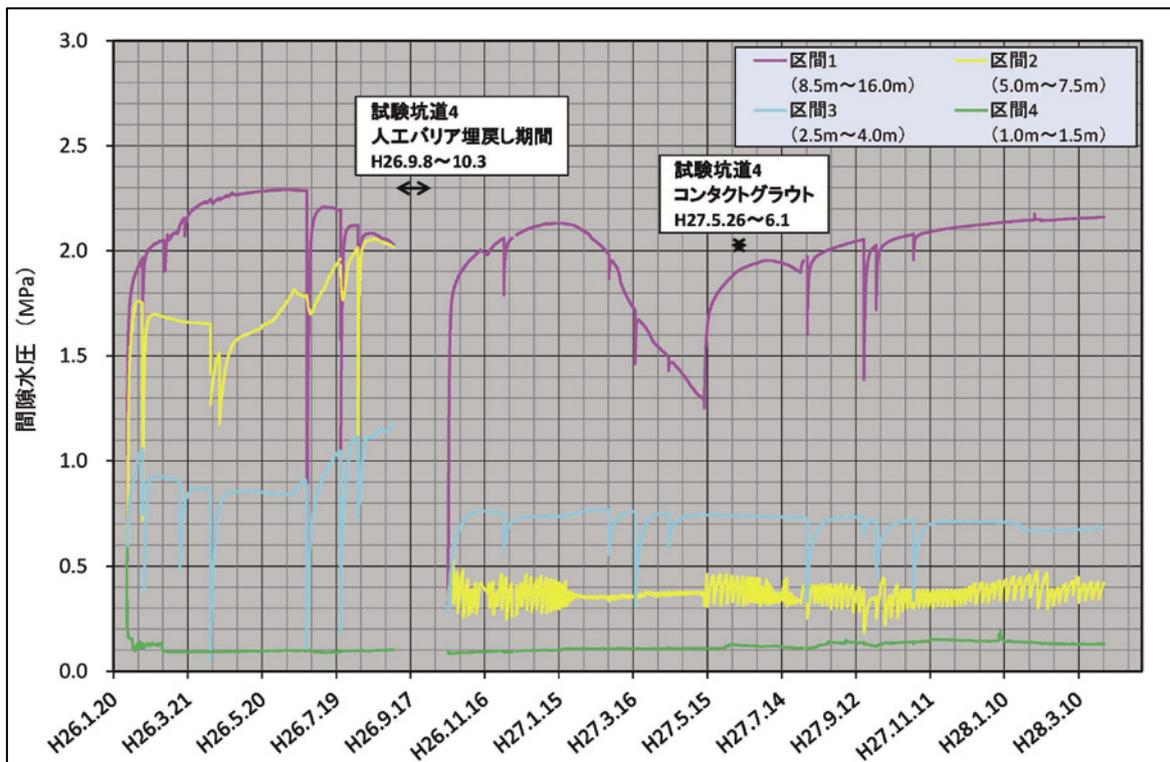


図 25 C09 孔における水圧モニタリング結果

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。

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 年度には同坑道においてコンタクトグラウト注入作業が行われました。この作業では、平成 26 年度に施工された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が行われました。これに伴い、埋め戻し範囲にある C07 孔、C08 孔および C09 孔（図 23、図 24 および図 25）において、最深部となる区間 1 を中心に、水圧の回復（上昇）または減少が生ずる傾向が認められました。一方で、試験坑道 4 の外側に位置する C05 孔では、コンタクトグラウト注入作業に伴う顕著な水圧への影響は確認されておりません。

さらに、平成 27 年度には地上からのボーリング孔である SAB-1 孔：孔長 512m（図 20 中の「SAB-1」の赤丸印）の埋め戻し作業が行われ、その際には SAB-1 孔の近傍に位置する C06 孔の区間 1 において、水圧の一時的な上昇も観測されました（図 22）。

なお、試験坑道掘削後、各観測区間に流入する地下水の量は減少する傾向にあり、一部の観測区間では水質モニタリングを行う上で十分な湧水量が得られない場合もあります。このため、地下水の水質については、各観測区間への湧水量の状況を確認し、水質モニタリングを継続する箇所を選定しました。平成 27 年度に水質モニタリングを継続した C05 孔および C06 孔における地下水は、pH 7 程度、酸化還元電位は-200～-280mV 程度の還元性の値を示し、平成 26 年度の測定値と同等でした。

また、観測装置の長期的な性能を維持する上では、装置の定期的なメンテナンスが重要になります。そのため、年 2 回の定期的なセンサーの検定・校正に加え、1 回/月程度の頻度でセンサーの異常の有無を確認するなど、取得するデータの品質保証にも配慮しています。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を評価するとともに、観測装置の長期的な性能を確認していく予定です。

## (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 26）。

計測結果を図 27 に示します。電気式の一部は早いもので設置後 3 年程度からセンサー不良により計測ができなくなっていますが、光ファイバー式は、これまでの期間にセンサー不良がなく、ノイズも少なく、安定した計測値が得られています。また、電気式の変位計は、センサー不良が出始めるまでの期間は、光ファイバー式の計測値とほぼ同様の傾向を示したことから、計測値の妥当性が確認されました。

掘削後約 6 年間の変位は、立坑壁面に最も近い区間 No. 1 では約 4.6mm 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、他区間では、計測値は概ね収束している傾向が見られますが、区間 No. 1 では徐々に縮む傾向にあることがわかります。一方、唯一伸びる方向に変位をしている区間 No. 3 は、0.2mm 程度の計測値でした。今後もデータの蓄積を進め、立坑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。

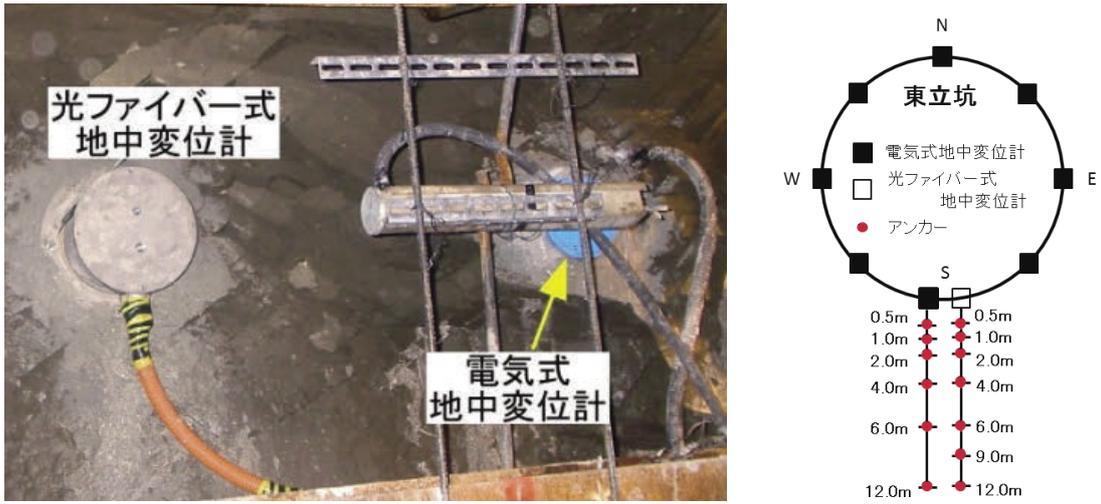
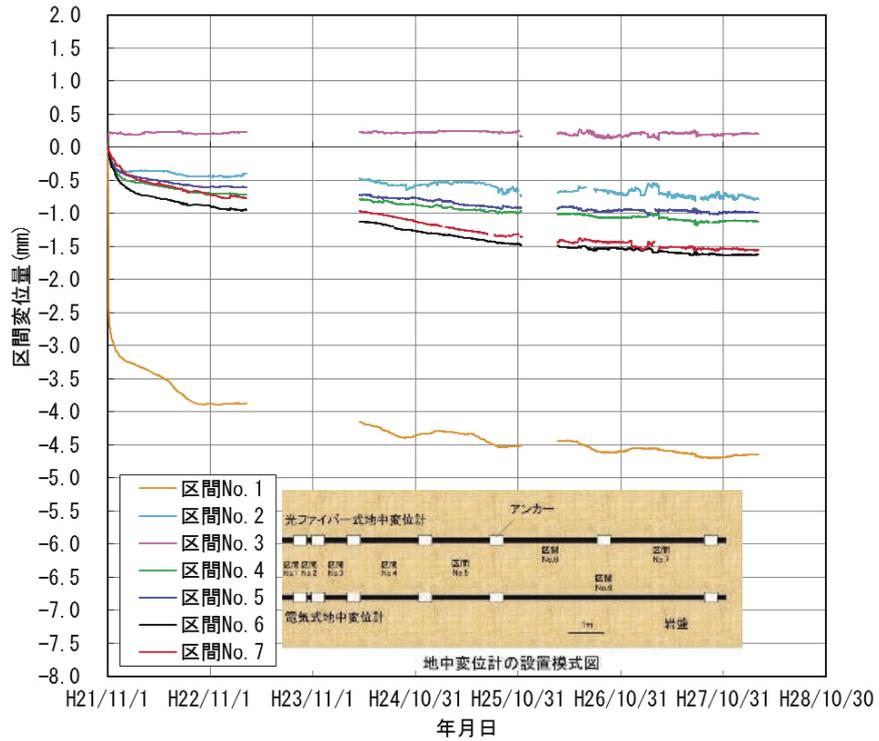
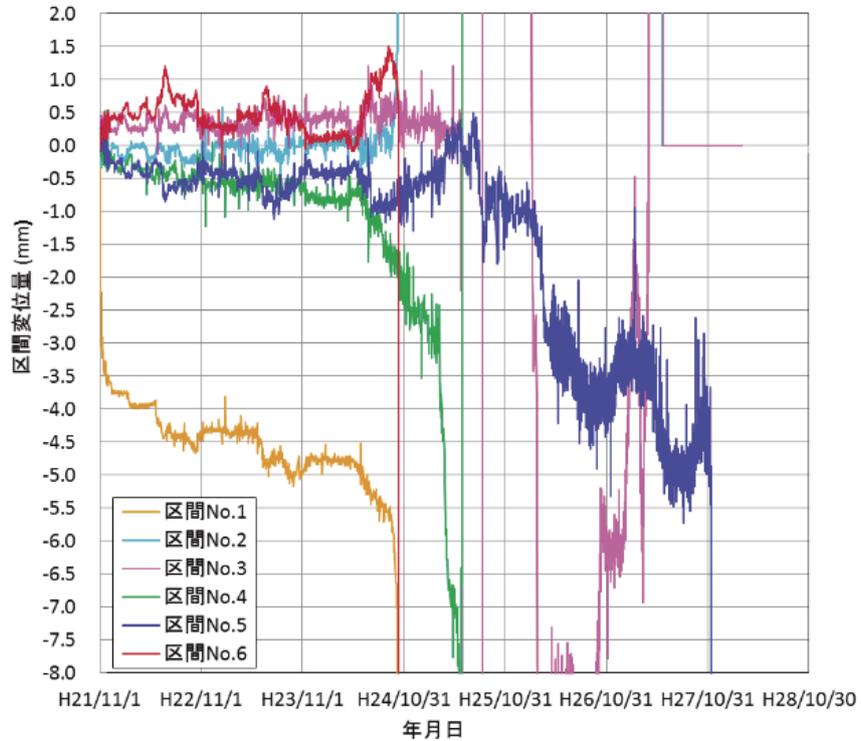


図 26 地中変位計設置状況写真と設置レイアウト



(a) 光ファイバー式



(b) 電気式

図 27 地中変位計の計測結果

(3) 岩盤の力学特性に関する調査技術の開発

(株)大林組との共同研究として、1本のボーリング孔内で微小振動（アコースティックエミッション、以下AE<sup>注28</sup>）、間隙水圧、温度を計測できる複数の光ファイバー式のセンサーを組み込んだマルチ光計測プローブを開発し、東立坑の深度350～380mの掘削時および掘削終了後の岩盤挙動の長期的なモニタリングを実施しています。また、立坑周辺岩盤の透水性の変化を検討するために、マルチ光計測プローブ設置領域近傍で透水試験を実施しました。図28にマルチ光計測プローブに設置された光ファイバー式のAEセンサーの位置および透水試験レイアウトを示します。マルチ光計測プローブは図28中のS1～S3孔に設置しました。また、透水試験は、図28(b)に示すように、立坑壁面近くまで掘削されたEおよびF孔で7区間、立坑壁面から4m以上離れたGおよびH孔で4区間設定して実施しました。

平成27年度は、岩盤に割れ目が生じたときに発生するAEの発生位置の推定を行いました。図29にAEの発生位置の平面図および三次元分布図を示します。結果として、立坑掘削中は、図中青色の円で示す、立坑壁面から約1.5mの範囲内に集中してAEが発生しました。一方、掘削終了後は、多くのAEが壁面から1.5m以上遠で発生していることがわかりました。

次に、図30に立坑周辺で実施した透水試験の結果を示します。立坑掘削前後の透水係数の比較から、壁面から約2mの範囲で透水係数が1～3桁増大することが確認されたため、この範囲内において割れ目の発達に伴う透水性の増大が発生したと推定されました。以上から、AEが集中して発生した領域と透水性が増大した領域がほぼ整合することがわかりました。

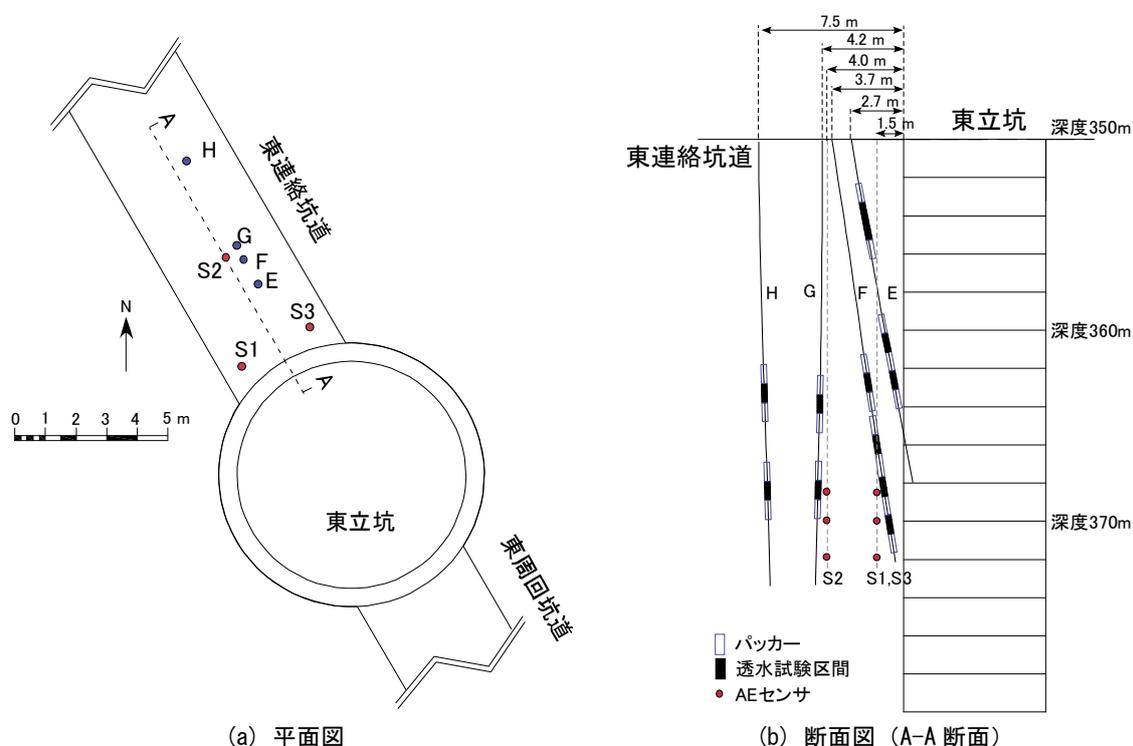


図 28 AE 計測および透水試験レイアウト

注28：AE：固体材料が変形・破壊する時に、ひずみが解放されて発生する微小な音波。これを分析することにより、割れ目の発生位置などを推定することができるため、立坑周辺岩盤の破壊現象をより詳細に把握することが可能となります。

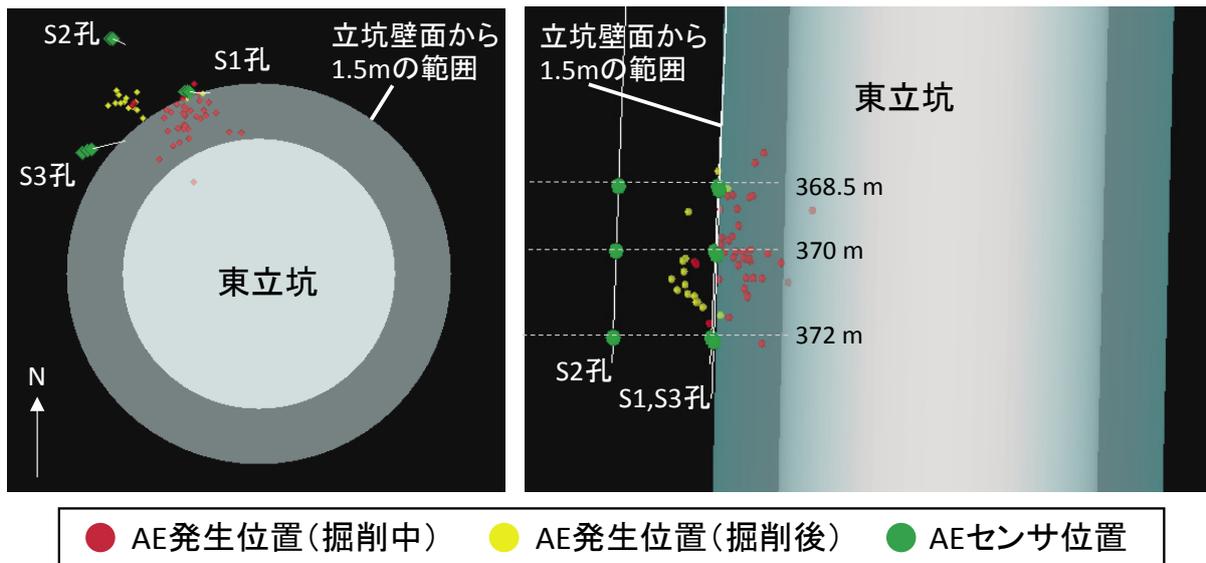


図 29 AE 発生位置 (左：平面図, 右：三次元分布図)

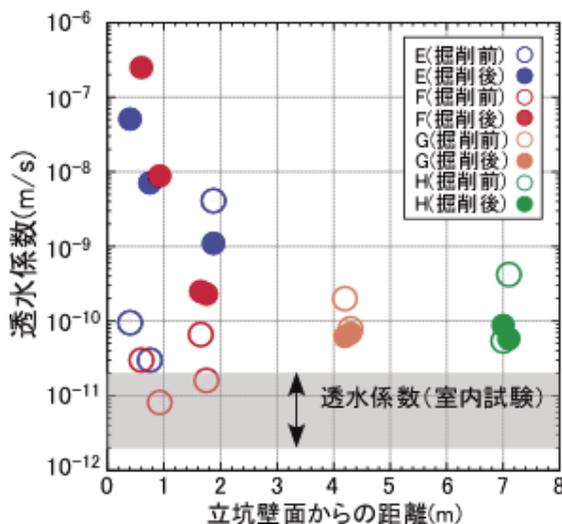


図 30 透水試験結果

(4) 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

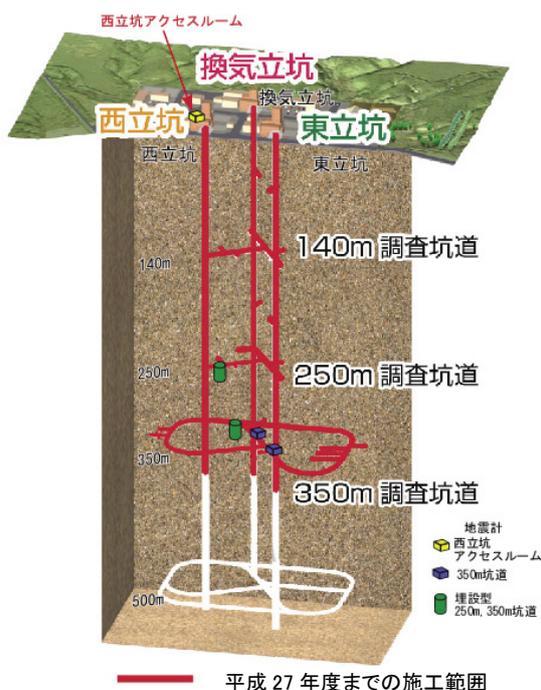
平成 27 年度は、平成 25 年度までコントロールボーリングの掘削技術開発を実施してきた上幌延地区において、平成 26 年度に概念設計を行った無人観測システム（太陽光や風力による自家発電機能を有し、地下水の水圧観測やデータ送信を無人で行える設備）を現地に設置し、平成 27 年 10 月からシステムの運用を開始しました。また、平成 27 年 11 月には、掘削が終了したコントロールボーリング孔を利用した地下水の採水調査も行いました。これらは電中研との共同研究により実施しました。

平成 28 年度は、無人観測システムの運用を継続し、システム運用上の課題を整理します。また採水調査も行い、水質の変化の有無についても確認する予定です。

### 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31)。気象庁一元化震源データより作成した平成27年4月1日から平成28年2月29日までの幌延深地層研究センター周辺の震央分布を図32に示します。



※このイメージ図は、今後の調査研究の結果次第で変わることがあります。

図31 地震計設置位置

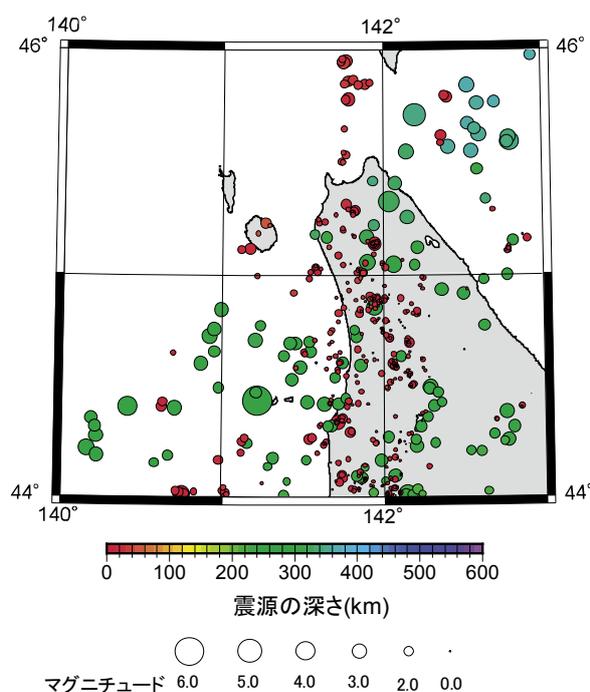


図32 震央分布

上記の期間中、気象庁の発表によれば、幌延町で震度1以上の体に感じられる地震となったのは、平成27年8月29日15時0分に北緯45度8.0分、東経141度56.6分で発生したごく浅い深度で発生した地震のみでした。この地震の地上と地下施設内地震計で得られた加速度波形を図33に示します。

深度の異なる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34に示します。

これで見ると西立坑アクセスルーム地震計で観測した地震波の振幅が最大0.8 cm/s程度で2~4Hzにピークがあるのに対し、深度350m調査坑道地震計の地震波は振幅の最大が0.2 cm/s程度でピークが4~7Hzと高周波数側に寄っていることがわかります。このように、地震波は深部岩盤で周波数が高く振幅の小さい波が、地上付近で周波数が低く振幅の大きな波に変わっていることがわかります。

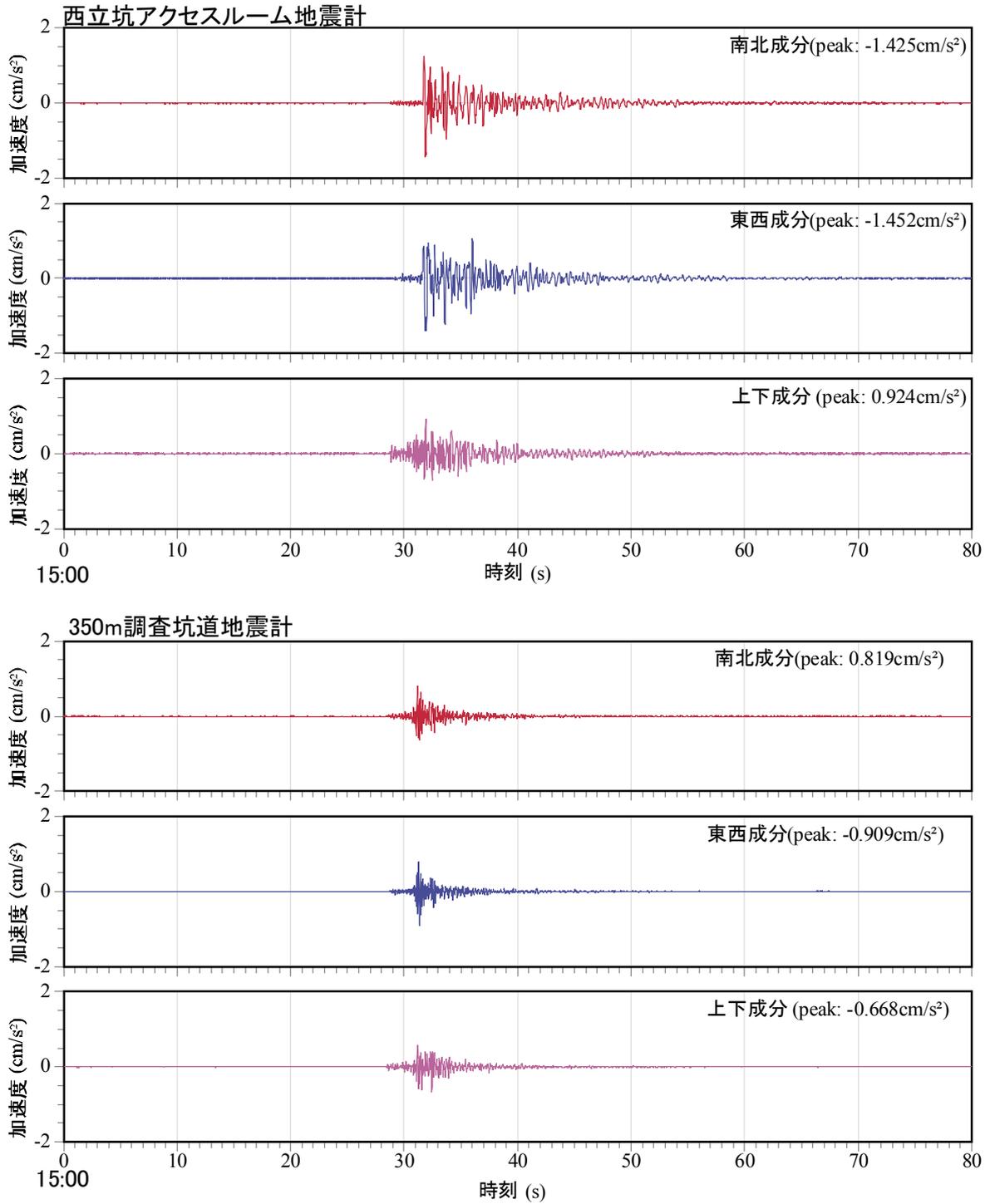


図 33 平成 27 年 8 月 29 日の地震の加速度波形

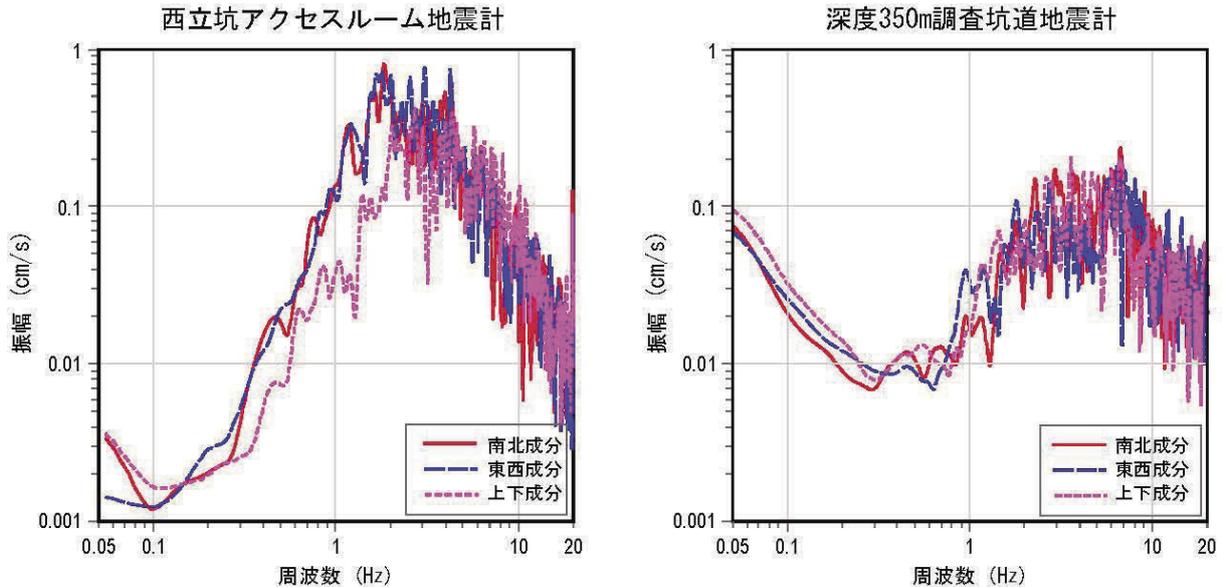


図 34 平成 27 年 8 月 29 日の地震の振幅と周波数の関係

### 3.2.2 地下施設の耐震安定性に関する検討

地下施設の耐震安定性に関しては、実施設計以降、地震データや周辺の活断層データに新しい情報が加わり、東北地方太平洋沖地震後、原子力規制委員会が原子力施設の基準地震動策定方法を改訂したのを受けて、最新の地震や活断層の情報を反映して地下施設の基準地震動の見直しを行い、耐震安定性の再評価を行いました。

対象とする地震は地震ハザードステーション<sup>注 29</sup>で公開されているサロベツ断層帯による地震を基本として、断層の角度、長さなどの条件を変えたケースを検討し、それらの加速度が最大となる結果から応答スペクトル法<sup>注 30</sup>による基準地震動をSs-1として設定しました。Ss-1の加速度波形を図 35 に示します。比較のため平成 19 年度に作成した検討波形を示しますが、もともとなるサロベツ断層の条件の違いにより 2 倍近い加速度となっています。

基準地震動 Ss-1 と確率論的ハザード評価によって得られた、地震の起きる頻度に対する地震の規模による加速度応答スペクトルを図 36 に示します。確率論的ハザード評価は、地震の発生や地震動の予測に関する種々の不確定性を確率モデルで表現し、発生確率に対する地震動の強さで表現したものです。Ss-1 規模の地震が起こる確率は地震ハザード曲線の結果に基づけば 1 万年から 10 万年に 1 回程度となっています。

基準地震動 Ss-1 を適用した幌延地下施設の一次元応答解析により、耐震安定性評価を実施した結果を図 37 に示します。覆工コンクリートに発生する圧縮応力がほぼ設計基準強度に納まり、また一部圧縮応力が超過している箇所もコンクリート強度が確保されていることを試験により確認しており、立坑の地震に対する安全性が確認されました。

注29：地震ハザードステーション（J-SHIS）は、地震調査研究推進本部が作成した全国地震動予測値図について、地震ハザード評価のプロセス情報を併せた形で国立研究開発法人防災科学技術研究所により作成された公開システムの呼称で、2005年5月より運用が開始されています。（<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>）

注30：応答スペクトル（構造物が地震波によって受ける加速度などの最大値を縦軸に、固有周期（構造物に固有の揺れやすい周期）を横軸にとりて表したグラフ）により構造物が受ける地震波の応答の最大値を推定する方法で、耐震設計の検討の際に用いられています。

今後は、地震データの解析結果と合わせて地盤の地震動に対するモデルの見直しを行い地下施設の耐震性評価技術の整備を進めていきます。

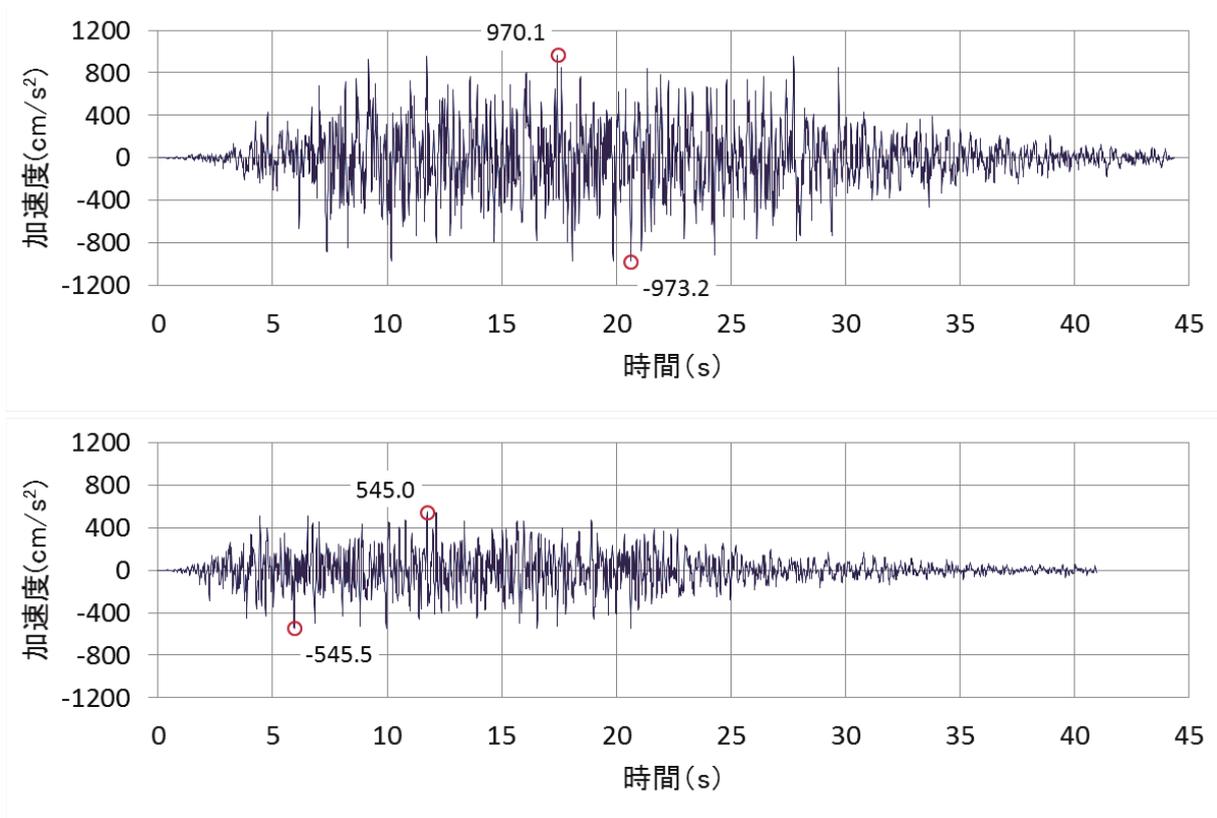


図 35 標準地震動 Ss-1(上)と平成 19 年度検討波形(下)

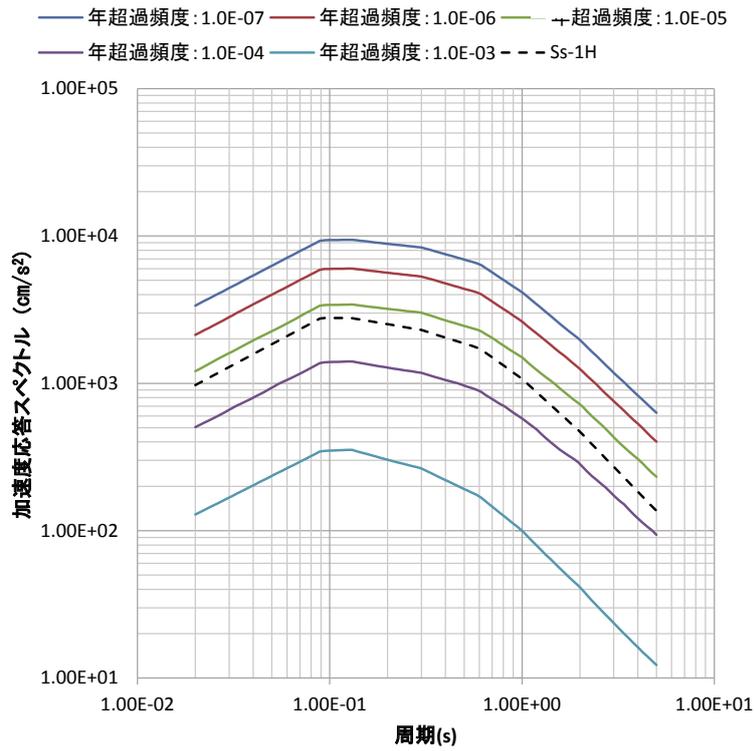


図 36 基準地震動 Ss-1 と一様ハザードスペクトル

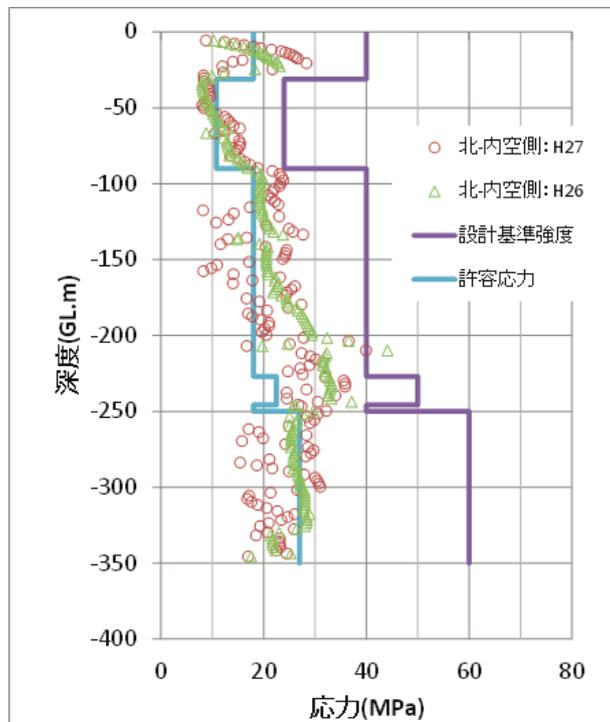


図 37 基準地震動 Ss-1 による覆工コンクリート最大圧縮応力深度分布  
(常時+地震時 圧縮が正)

### 3.2.3 地下施設建設時の湧水対策の検討

平成 25 年 2 月に周回坑道（東）において、事前にセメント注入（プレグラウト）を行った断層部を坑道掘削した際に発生した湧水の原因についてさらなる検討を行いました。本断層が切羽に出現した時点では切羽からの湧水量は  $1 \text{ m}^3/\text{h}$  以下でしたが、本断層に対して一次吹付けを行った翌日、吹付けコンクリートの一部を突き破る形で断層部から  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  程度の湧水が発生しました。

本原因を検討する上で以下の観察事実に着目しました。

- ① 断層部を貫いたロックボルト<sup>注 31</sup>や切羽側面の断層部と吹付けコンクリートの境界部から粘土混じりの湧水が発生していた。
- ② 本断層は他の断層と異なり、スメクタイト（粘土鉱物）を多量に含む断層粘土を厚く挟在する（厚さ<数十 cm；他の断層は粘土分に乏しい断層角礫）。
- ③ 突き破られた吹付けコンクリートの内側は断層粘土部が大きく削剥され、岩盤奥へと続く空洞が形成されていた。

これらの観察事実より、湧水の原因として、ロックボルトや切羽側面より徐々に断層粘土が洗い出され、そこに形成された新たな水みちがグラウト施工範囲外の地下水を導いてしまった可能性を考えています（図 38）<sup>(10)</sup>。

断層粘土の発達する断層を坑道掘削するには、ロックボルトの数量を最小限に留め、可能な限り坑道内への断層粘土の流出を防ぐことが肝要であり、加えて、グラウト範囲を通常よりも拡張するなどの対策も重要であることが示唆されます。

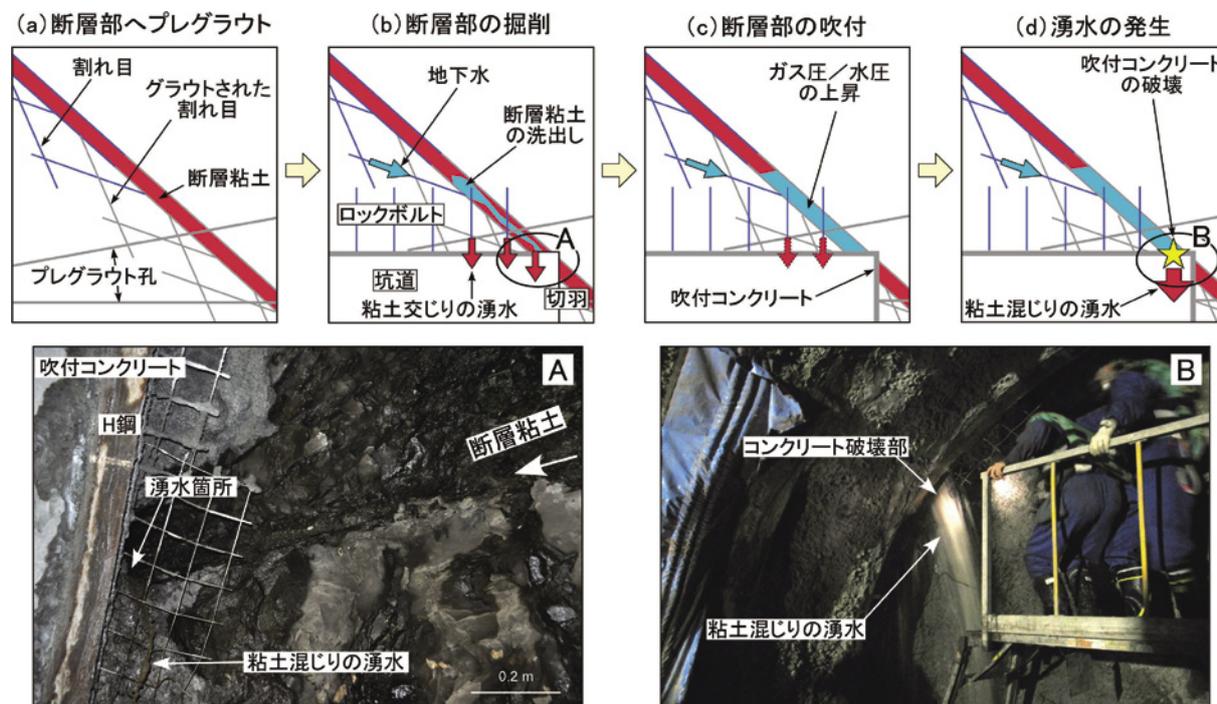


図 38 湧水発生に至るプロセス（推定）<sup>(10)</sup>

上図(a)～(d)は坑道周辺の水平断面を模式的に表現したもの。下写真Aは(b)の、Bは(d)の時点での坑内状況を示している。

注31：トンネルなどの壁面から鋼材を挿入して岩盤を固定することにより、地山の変形やすべりの発生を抑止するものです。

### 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、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ための調査・解析手法の開発を行っています。

平成 27 年度は、3.1.1(1)で述べたように、岩石の強度・応力状態と断層の発達様式の関係を検討するために、DI と断層近傍の二次割れ目のタイプ（破壊モード）の関係を野外観察と室内実験の結果より明らかにしました<sup>(8)</sup>。この結果に基づくと、DI が 2 未満だと断層近傍に引張／ハイブリッド割れ目が発達する一方で、DI が 2 以上だとせん断割れ目も発達するようになり、それらが引張／ハイブリッド割れ目の発達を抑制することが示唆されます。岩盤は隆起・侵食の過程で DI が徐々に低下していくことが予想されるので、図 39 に示すような隆起・侵食に伴う断層の発達様式の変化が考えられます。

また、これまでに二次元モデルを用いて進めてきた地形・地質構造の変遷や気候・海水準変動を考慮した地下水流動解析を、三次元モデルを用いて行いました（図 40）。

三次元モデルは、既存の地質構造モデル（日本原子力研究開発機構、2009<sup>(11)</sup>、中山ほか、2010<sup>(12)</sup>）に、その後の調査研究で得られた地表の地質境界、断層および褶曲軸などの位置情報<sup>(13)</sup>を反映するとともに、隆起・侵食に伴う断層の発達様式や透水性との関係に関する知見（3.1.1(1)、3.1.1(2)；図 39）をもとに稚内層を浅部と深部の二つに区分し、三次元地質構造モデル（現在）を構築しました（図 41）。また、地形・地質の発達史を取りまとめた編年表<sup>(2)(14)</sup>や幌延地域を対象に整理した隆起・沈降史<sup>(15)</sup>などの既存文献をもとに、約 100 万年前（モデル化領域東部の宗谷丘陵が陸化）と約 33 万年前（宗谷丘陵の西方が陸化）の三次元地質構造モデルを構築しました（図 41）。

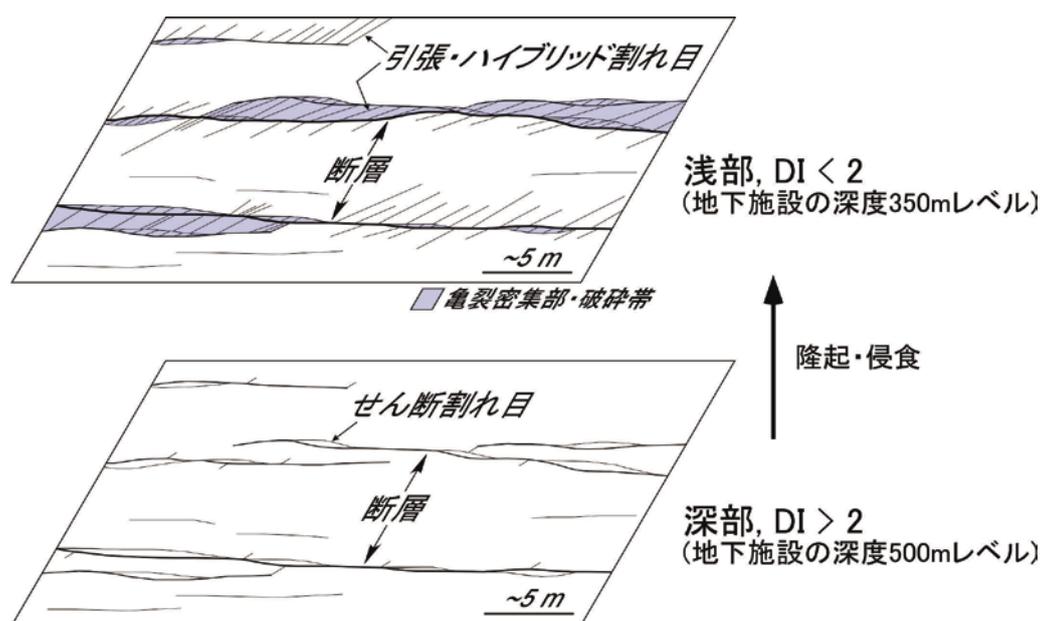


図 39 隆起・侵食に伴う断層の発達様式の変化<sup>(8)</sup>

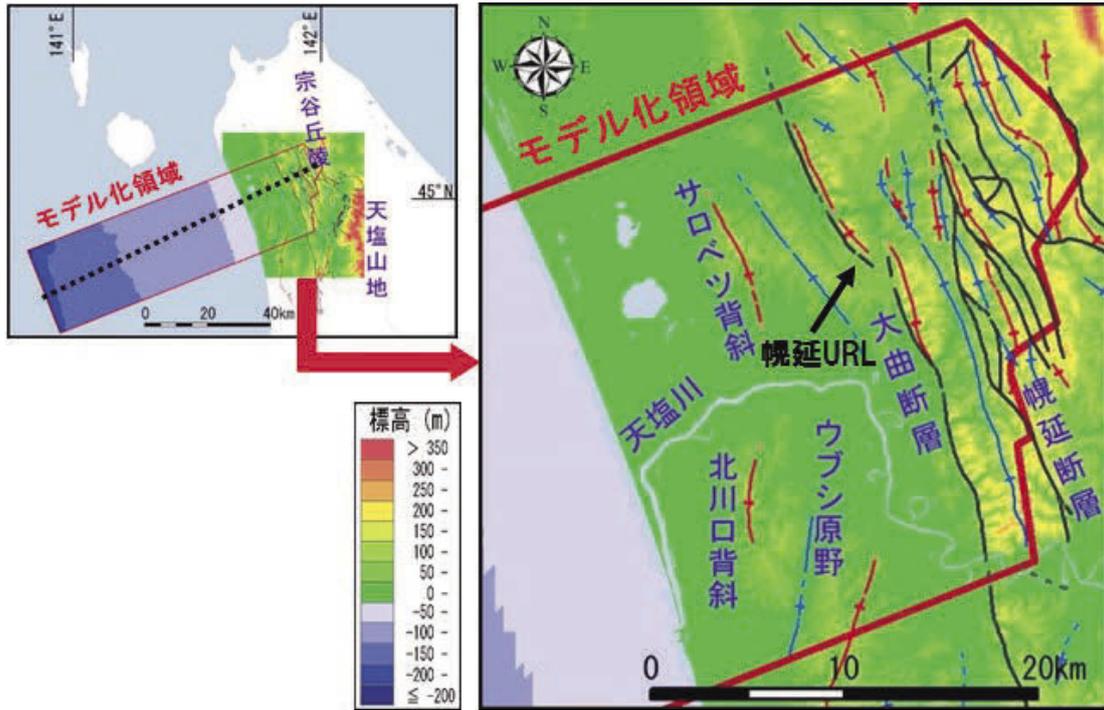


図 40 モデル化領域

地形は、国土地理院 “基盤地図情報ダウンロードサービス”、海上保安庁海洋情報部 “沿岸の海の基本図 (5 万分の 1)”、日本海洋データセンター “500 m メッシュ水深データ” による。左図の黒色破線は図 41 のモデル断面位置を示す。右図の黒色線 (断層)、赤色線 (背斜軸) および青色線 (向斜軸) の分布は酒井・松岡 (2015) <sup>(16)</sup> による。

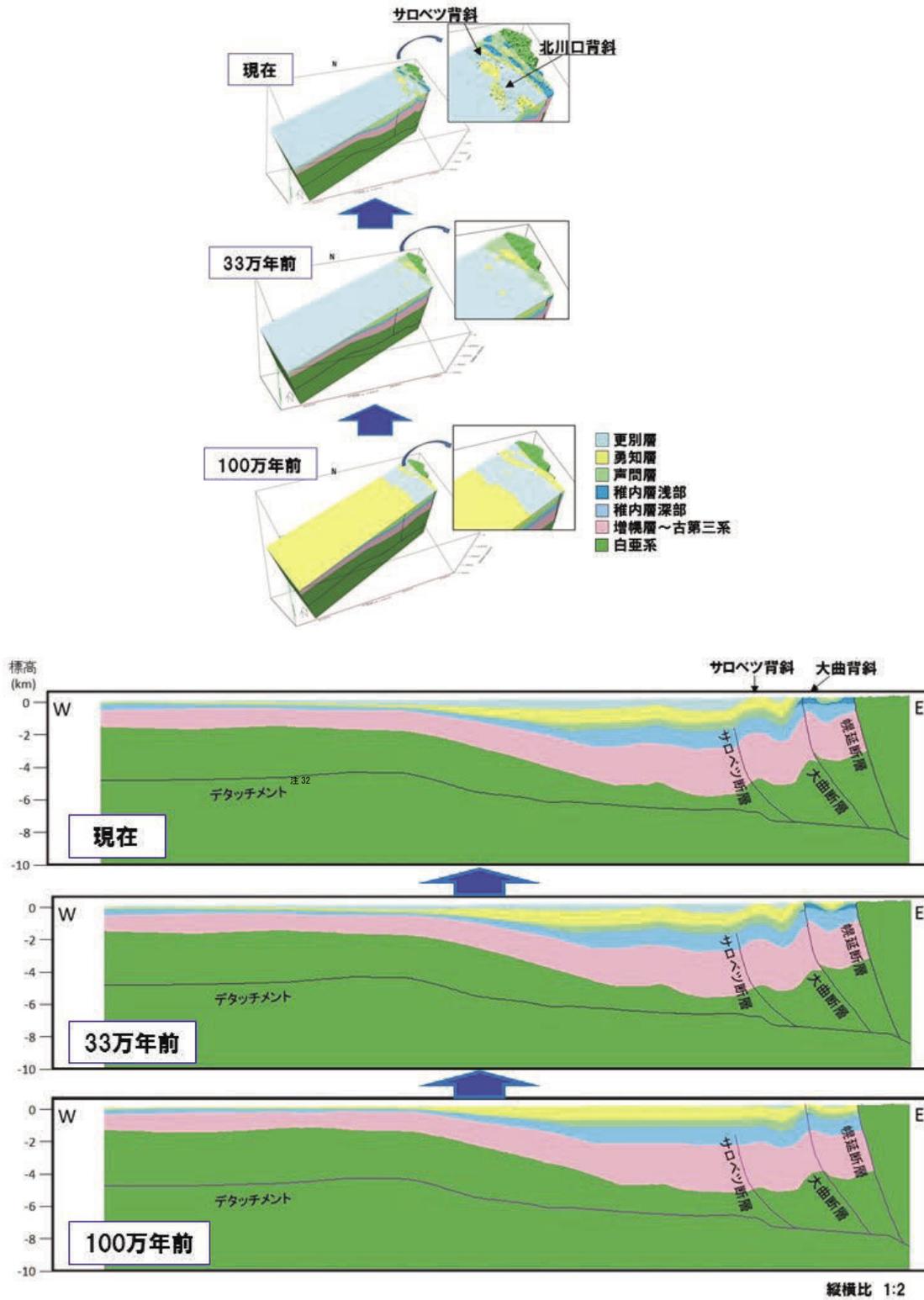


図 41 構築した各時間スケールの地質構造モデル<sup>注32</sup>

モデル断面（下段）の位置は、図 40 の黒色破線

注32：断層・褶曲で変形した上盤と、変形を被っていない下盤との境界をなす低角度の断層のことをいいます。

また、地質構造モデルをベースに構築した三次元水理地質構造モデルを用いて地下水流動解析を実施しました。地下水流動解析では、地下水の流れに影響を及ぼす可能性がある因子として「地形変化」、「気候変動（涵養量<sup>注 33</sup>および海水準変動）」、「断層分布」、「断層や地層の透水性」および「氷期における不連続永久凍土の形成」に着目し、これらが地下水流動に及ぼす長期変動の評価を目的とした感度解析を実施しました。解析の結果、幌延地域を事例とした地下水流動の長期変動の評価における重要因子として、地形変化と気候変動が抽出されました。また、氷期における不連続永久凍土の影響は、気候変動の影響と比べて2オーダー程度小さいことを確認しました。

今後は、モデルが有する不確実性についても整理しつつ、より詳細な検討を行うとともに、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進めていきます。

### 3.3.2 地震研究

平成27年度は、地殻変動について、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26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。年度期間中、震度1に相当する地震が1回観測されました（3.2.1参照）。

研究坑道における観測については、新たに11台の地震計を導入し、図42に示すように深度350m調査坑道と立坑の坑底に地震計（計14台）を設置しました。これは、これまでの観測に加えて、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としています。また、設置した地震計については、平常時や微小地震発生時などの観測データ波形を確認（図43）することで、品質（動作）確認を行いました。

今後は、これらの観測点において岩盤中の微小地震の観測を行い、観測した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推定していく予定です。

---

注33：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。

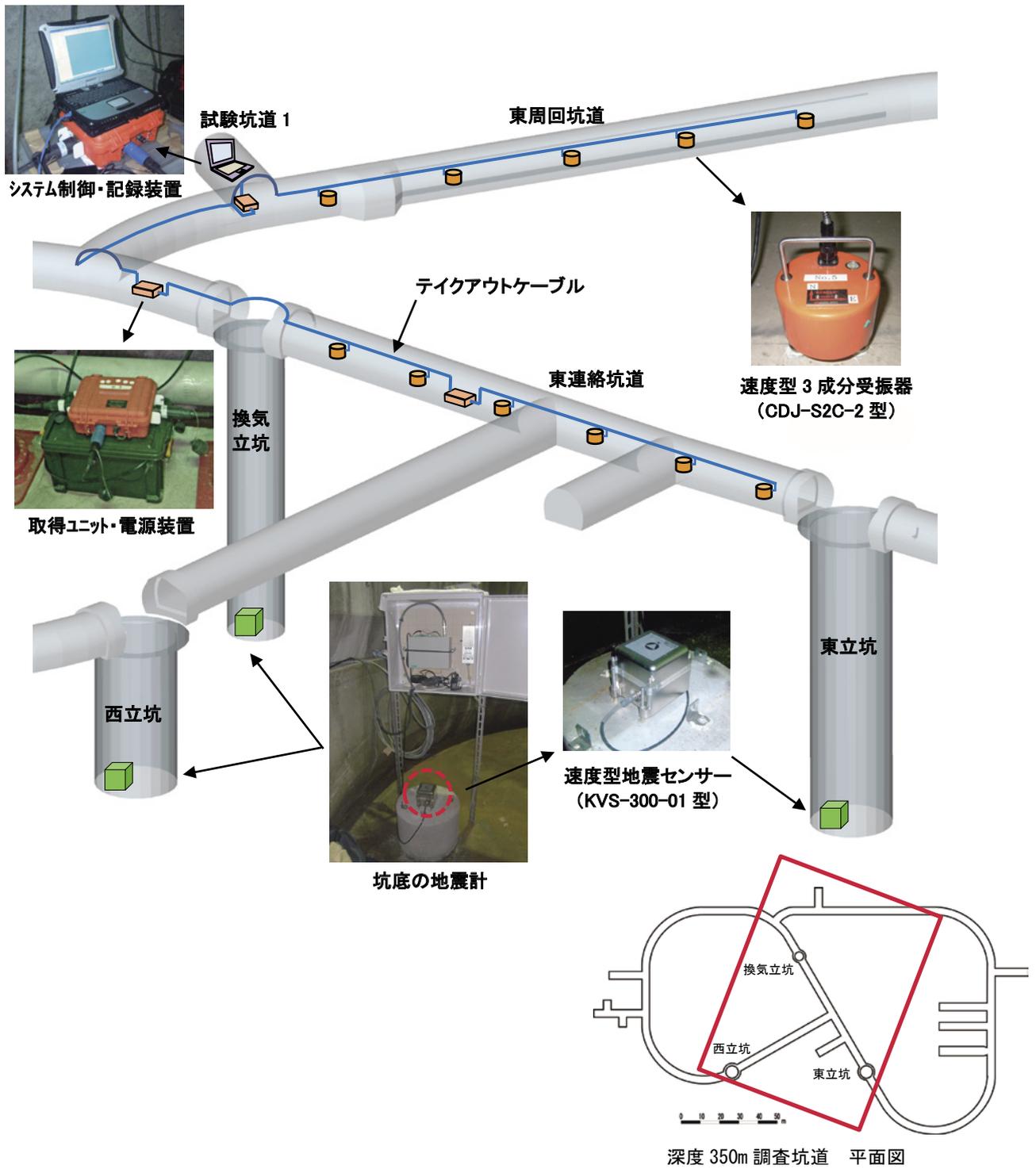


図 42 地下施設に設置した地震計

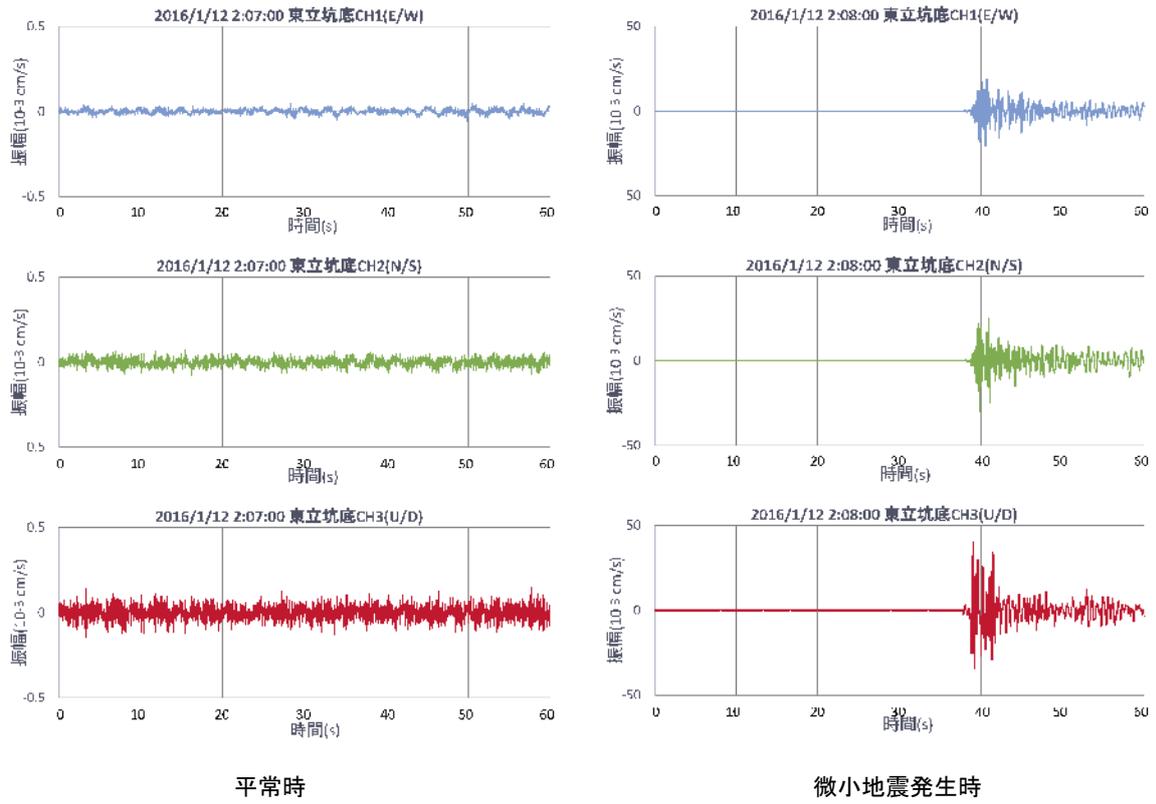


図 43 観測データ波形の確認

## 4. 地層処分研究開発

### 4.1 処分技術の信頼性向上

平成 27 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。

#### 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 44) 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<sup>(17)</sup>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。

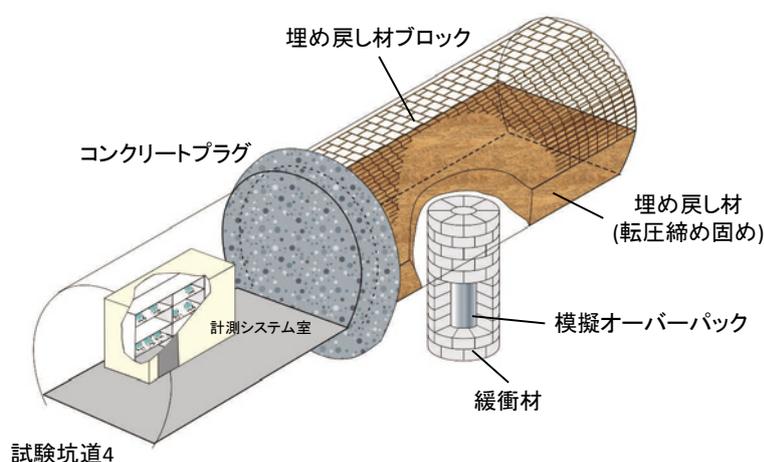


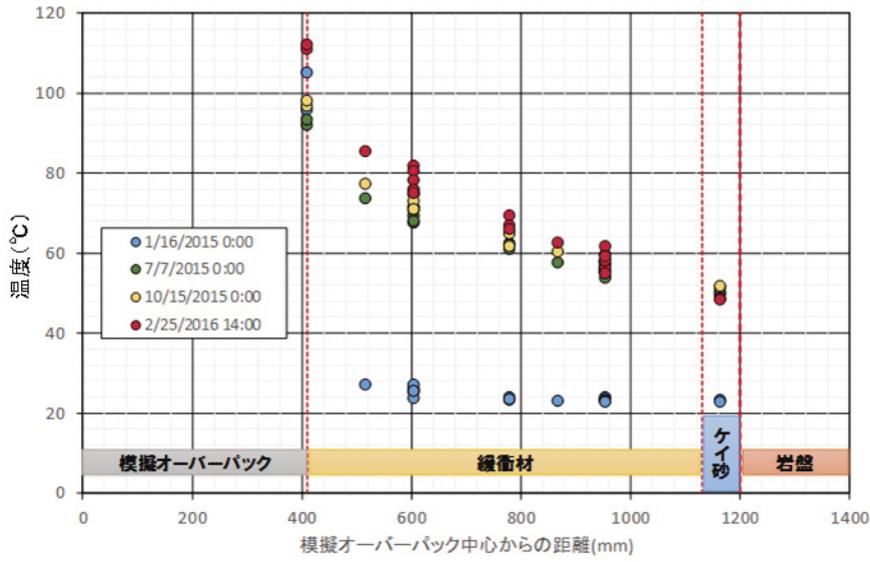
図 44 人工バリア性能確認試験の概念図

平成 27 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。測定データの例を以下に示します。

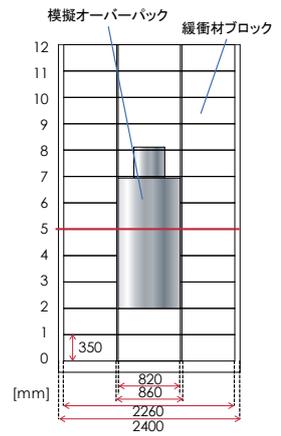
図 45 に緩衝材 5 段目の温度分布を示します。青色のプロットは模擬オーバーパックの加熱開始後半日程度の値です。加熱直後はほぼ一定だった温度が、時間が経つにつれて上昇していること、約 1 年後には定常状態になり、模擬オーバーパック表面から遠ざかるにつれて緩やかな温度勾配を示すことがわかります。また、図 46 に比抵抗トモグラフィ<sup>注 34</sup>を用いて測定した緩衝材の水分飽和度を示します。加熱が開始された後、徐々に中心 (模擬オーバーパック) 付近の飽和度が低下するとともに周辺の飽和度が増加しており、382 日後 (平成 28 年 2 月 1 日) の段階で緩衝材のほぼ中間にまで地下水が浸潤してきていると考えられます。

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います。

注34：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。

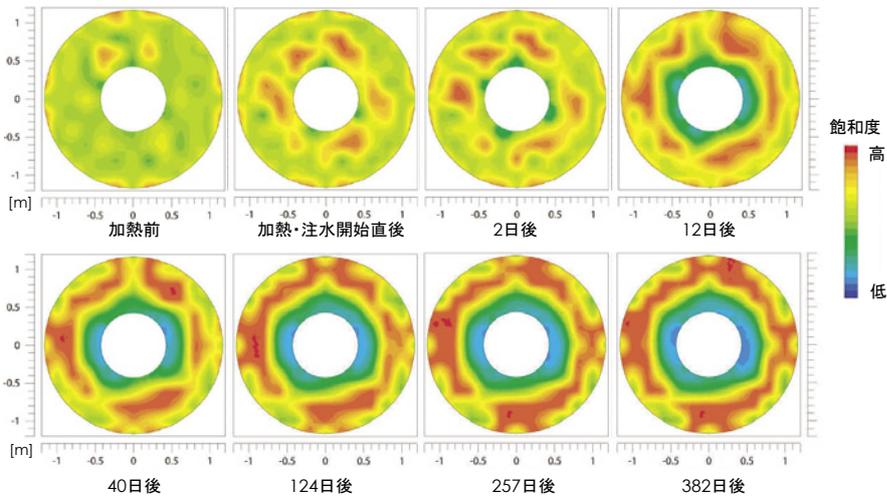


温度分布

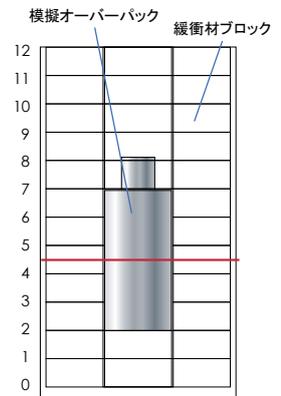


測定断面(赤線)

図 45 緩衝材 5 段目の温度分布



飽和度の経時変化



測定断面(赤線)

図 46 緩衝材の飽和度の経時変化

#### 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<sup>注 35</sup>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 (図 47) し、平成 26 年度に試験を開始しました。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より交流<sup>注 36</sup>インピーダンス<sup>注 37</sup>を測定し、腐食の速度を評価します。

平成 27 年度は、ヒーターの温度を 95°C 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による自然電位<sup>注 38</sup>を図 48 に示します。センサーの配置は図 49 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 48 から、どのセンサーに対しても約 80 日までは自然電位がばらついた値を示していることから地下水がセンサー近傍に到達していないと考えられ、約 80 日以降はばらつきが収まり、ほぼ同一の値を示したことから地下水がセンサー近傍に到達したと考えられます。

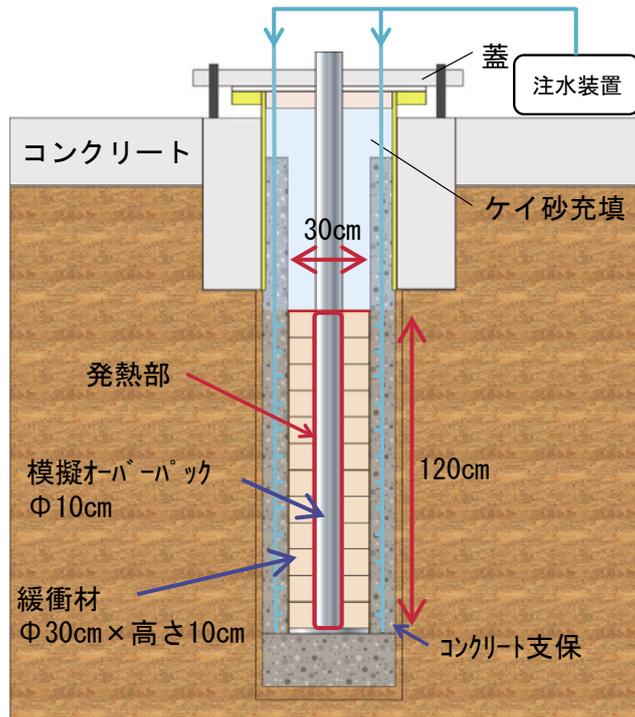


図 47 オーバーパック腐食試験の概念図

注35：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。

注36：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。

注37：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。

注38：地表もしくは地中・海中に自然に存在する電位のこと。地下水が流れることにより電位が変化することから、地下水流動に関する情報を得るために測定が行われています。

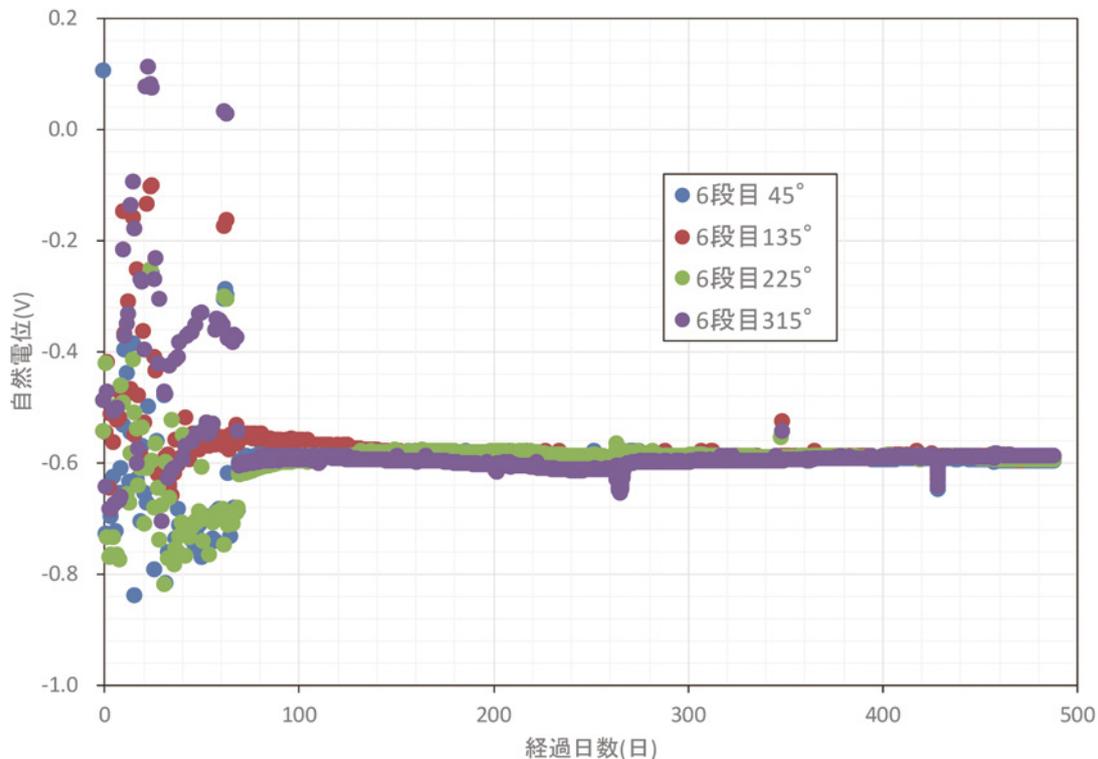
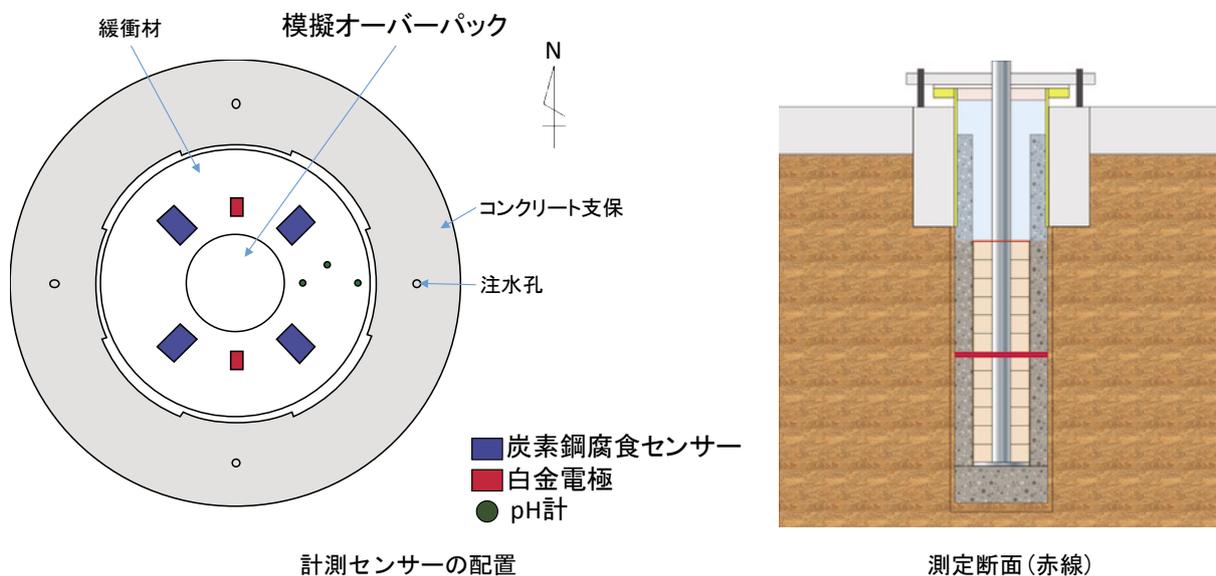


図 48 炭素鋼自然電位

縦軸は Ag/AgCl (KCl 飽和) 参照電極に対する値を示します。



計測センサーの配置

図 49 緩衝材 6 段目の計測センサー配置

腐食に関する測定は、高周波数（3, 200Hz）と低周波数（0. 0025Hz）の2周波数測定を自動で実施しており、これらの値を補正する目的で、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。自動測定と手動測定による測定結果の比較により、炭素鋼腐食センサーによる測定の妥当性を評価しました。

手動測定の結果を解析し溶液抵抗 $R_s$ （低周波側のインピーダンス）と分極抵抗 $R_p$ （高周波側のインピーダンス）を求めた結果を図50に示します。 $R_s$ は $10 \sim 20 \Omega \text{ cm}^2$ 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、時間とともにわずかに上昇する傾向を示しました。一方、 $R_p$ の値は時間とともに上昇する傾向を示しています。これは、腐食速度が経時的に低下していることを示しています。腐食速度に換算すると、80日後では $6 \sim 60 \mu \text{ m/年}$ 、250日後では $2 \sim 5 \mu \text{ m/年}$ となり、室内試験<sup>(18)</sup>の結果と同様であり、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、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。

次に、2周波数測定の結果を図51に示します。高周波数側（3, 200Hz）の値は約20日ではばらつきが収まり、 $10 \sim 20 \Omega \text{ cm}^2$ 程度でほぼ一定となり、経時的にわずかに上昇する傾向が見られます。これは、図50の $R_s$ とほぼ一致しています。一方、低周波数側（0. 0025Hz）の値は約80日ではばらつきが収まり、それ以降は時間とともに低下する傾向を示しました。これは、図50の $R_p$ とは大きく異なる値であり、経時的な変化の傾向も異なっています。以上のことから、2周波数による自動測定において高周波数側（3, 200Hz）では妥当な計測ができているが、低周波数側（0. 0025Hz）では更に小さい周波数で測定するなどの検討が必要であることが示唆されました。

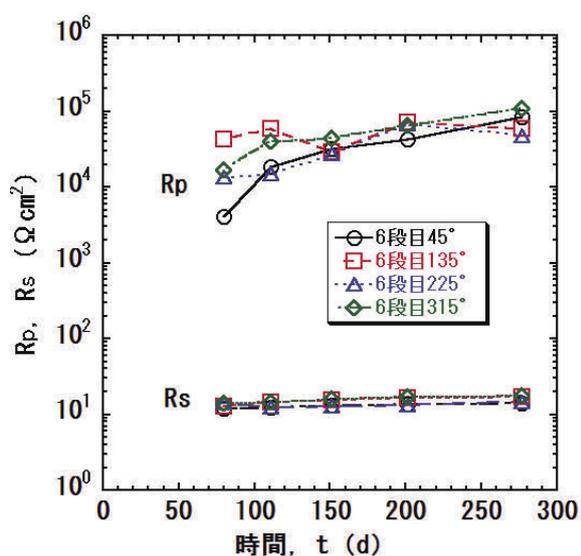


図 50 手動測定結果の解析値

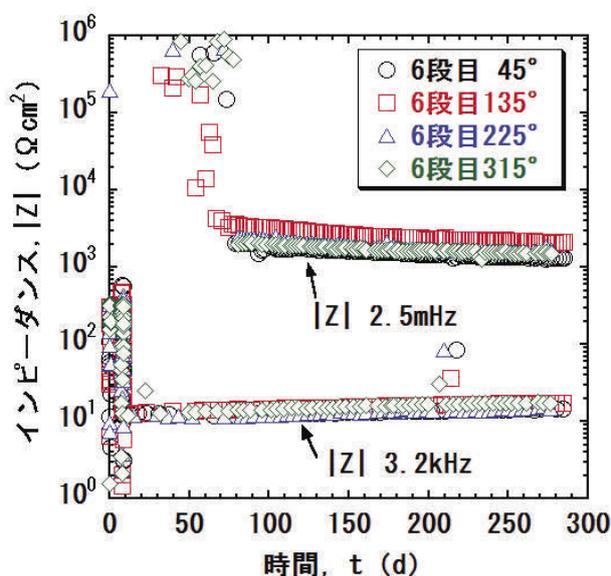


図 51 自動測定結果

#### 4.1.3 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

原環センターが管理・運営している地上の施設を利用し、同センターとの共同研究（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）を実施しました。

平成 27 年度は、緩衝材定置試験および緩衝材中に水がしみ込んで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しました。また、地上の施設において処分孔竖置き方式の実証試験の試験計画の検討を行い、緩衝材除去装置<sup>注 39</sup>の展示を開始しました。

##### (1) 緩衝材定置試験

緩衝材定置試験設備（図 52）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、1 段目から 4 段目まで緩衝材ブロックを模擬処分孔へ定置し、その速度や精度（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 2015 in ほろのべ」（平成 27 年 9 月）で一般公開しました（写真 1）。この定置試験結果で、平成 25 年に実施した定置試験結果と同様の結果が得られたことを確認しました。

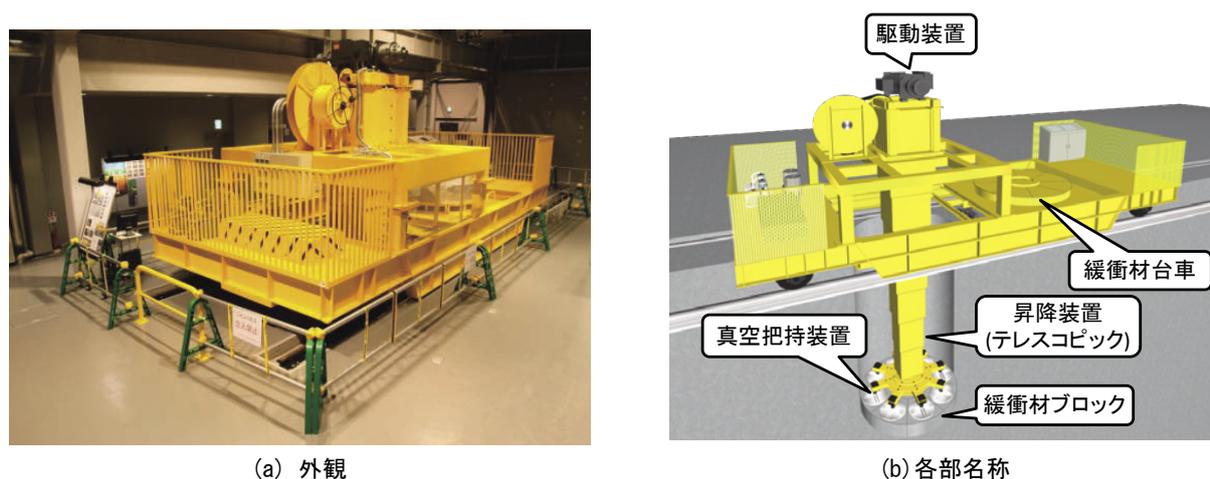


図 52 緩衝材定置試験設備の外観および各部の名称

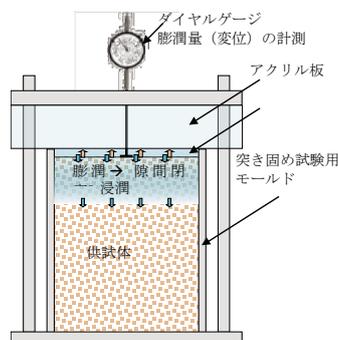


写真 1 緩衝材定置試験の公開の様子

注39: 塩水を噴射して緩衝材を除去する装置です。

## (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。試験には、隙間における緩衝材挙動を観察できるように、緩衝材の上端面に隙間を設け、水の浸潤による隙間の閉塞が確認できる緩衝材可視化試験装置（図 53）を使用しました。



(a) 緩衝材可視化試験装置 概念図



(b) 緩衝材可視化試験装置の設置状況

図 53 緩衝材可視化試験装置

### 4.1.4 地下環境での搬送定置・回収に関する研究

平成 27 年度から、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開始しました。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 (19)、(20)、(21)、(22)、(23)、(24) で計画していたものです。

平成 27 年度は、地下実証試験の実施場所として試験坑道 2 を選定し、処分坑道横置き方式の搬送定置・回収技術の実証試験計画の検討を行いました。また、試験坑道 2 を地下実証試験の実施場所として活用するため、既設設備の移設などの準備工事を実施しました。

### 4.1.5 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 27 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湧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、品質や長期健全性に影響を及ぼす要因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向上のためには、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 27 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、試験片の大きさが実際のオーバーパックよりも小さく、また地下の環境条件を完全に模擬することができません。本研究は、地下環境においてオーバーパック溶接部に生じる腐食現象を把握するために行います。

平成 26 年度に溶接部付きの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、岩盤からの湧水を使用した腐食試験を開始しました。オーバーパック溶接部腐食試験の概要を図 54 に示します。試験体は直径 10cm、長さ 125cm の炭素鋼製の模擬オーバーパックで、長手方向に TIG(Tungsten Inert Gas)溶接で溶接部分を設けました。緩衝材ブロックは直径 30cm、厚さ 10cm のリング状で、ブロック内部には温度、含水率、腐食速度などを計測するセンサーを埋め込みました。緩衝材ブロックを積み上げ、内部に模擬オーバーパックを挿入し、地層処分における人工バリアを模擬して腐食試験データの取得を開始しました。

平成 27 年度は、模擬オーバーパックの内部にヒーターを設置しました。ヒーターはガラス固化体の発熱を模擬するために設置しました (図 55)。設置したヒーターの出力は、ヒーター制御盤で調節し、データロガーに模擬オーバーパックの表面温度を記録しています。処分場にオーバーパックを定置した後の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。また、地下ではメタンなどのガスが発生する可能性があり、それらのガスが試験装置内に溜まることを防止するために、ガスを抜くための配管を設置しました。

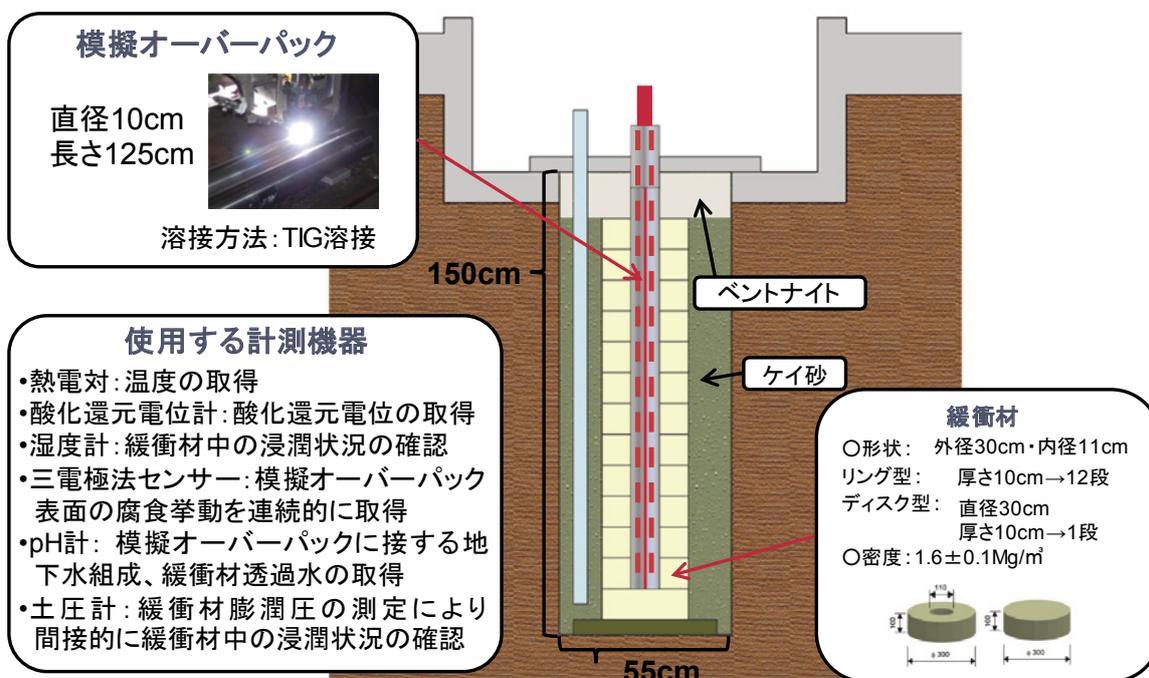


図 54 オーバーパック溶接部腐食試験の概要



図 55 試験装置の外観

試験体設置後の経過日数と模擬オーバーパック表面温度および腐食速度の関係を図 56 に示します。試験体設置後 300 日前後における温度の急激な変動はメンテナンスによる影響です。腐食速度にはばらつきが見られますが、現在は 0.2~0.3 mm/y 程度の腐食速度が測定されています。酸素が豊富な酸化性雰囲気では腐食速度が速くなるので、試験孔内の酸素濃度を測定するために、溶存酸素センサーを設置しました。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。

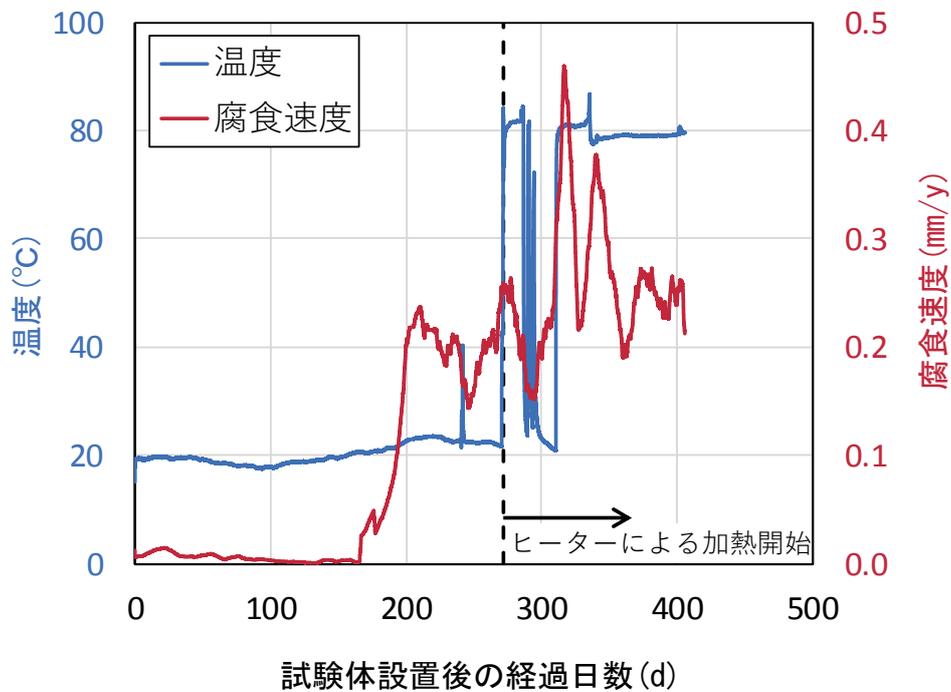


図 56 模擬オーバーパック外表面の温度と腐食速度

## (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<sup>注 40</sup>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、緩衝材ブロック同士または緩衝材ブロックと岩盤の隙間を埋めて地下水の流れを止めるはたらきをします。ただし、地下水の流れが速いと緩衝材の内部に地下水がし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。そのような現象がどのような条件で起こるかどうかを確認し、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、実験室での地下水の湧水を模擬した試験で、湧水の流量と緩衝材の流出量の関係、塩分濃度と緩衝材の流出の仕方との関係、試験規模が流出の仕方に与える影響などを検討しました。その結果、緩衝材の流出が発生すると水の流れる流路（水みち）ができますが、初めに複数の水みちができて時間経つと1経路だけになること、塩分濃度が低い場合には緩衝材の流出量は時間経ってもほぼ一定であるのに対し、塩分濃度が高い場合には時間経つと緩衝材の流出量が減少すること、などがわかりました。

平成27年度は、自然湧水の環境で緩衝材が流出する水みちが生成するかを確認すること、どのくらいの湧水量および水圧が作用すれば水みちが生成するかを確認することなどを目的として緩衝材流出試験を実施しました。また、これらの目的を達成するため、試験孔の深さを延長するとともに、試験孔に流入する地下水の量をコントロールするための注水ボーリング孔を掘削しました。写真2に試験の実施場所を、図57に試験孔と注水ボーリング孔の配置を示します。



試験坑道 5 全景



試験孔

写真 2 緩衝材流出試験の実施場所

注40：ベントナイトは粘度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。

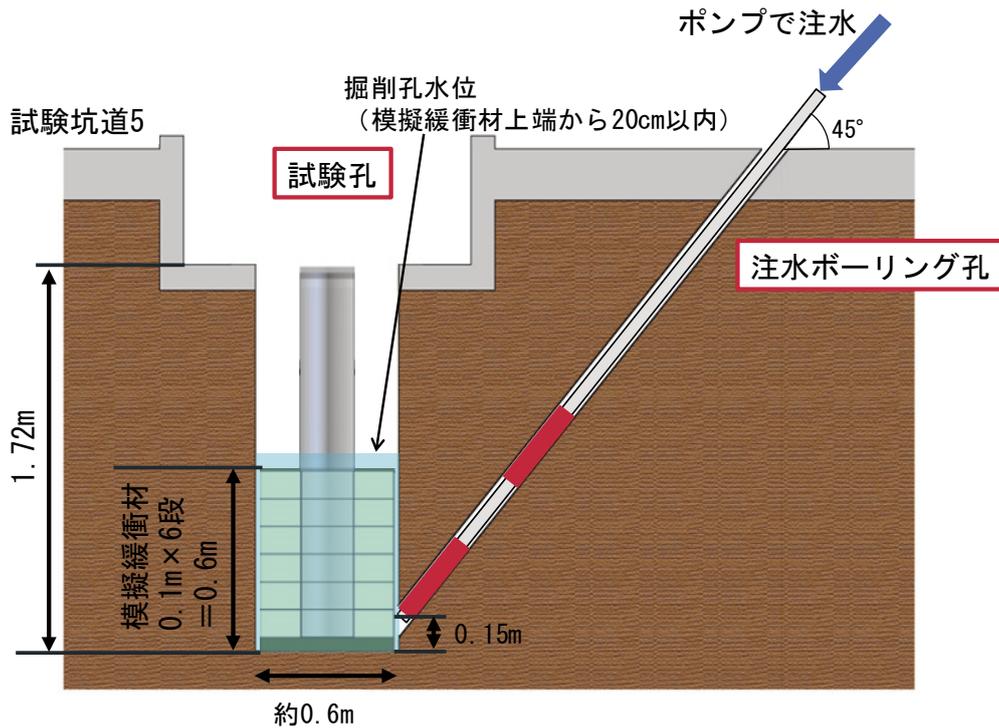


図 57 試験孔および注水ボーリング孔の配置

注水ボーリング孔を使用して注水量を徐々に増やして試験を行った結果、水みちが生成したことを確認しました。この時の水圧は 20kPa に相当しました。また、注水ボーリング孔から食紅で着色した地下水を注入することで、水みちが注水ボーリング孔から繋がっていることを確認しました。写真 3 に緩衝材上部の水みちの生成状況を示します。この水みち以外のところから着色した地下水は観察されなかったため、緩衝材を設置した時にあった緩衝材と試験孔の岩盤との約 2cm のすき間は、緩衝材の膨潤により塞がっていることがわかりました。



(a) 注水前



(b) 注水後 (流量 0.5L/min)  
試験孔と接する部分に水みちができた (赤丸部分)。

写真 3 水みち生成状況

注水をしない場合でも試験孔全体からわずかな自然な湧水がありますが、注水を中断して約 2 週間放置したところ、上記の水みちが塞がりました。このことから試験孔内からの自然の湧水は水みちを生成しない条件にあると考えられます。水みちが塞がった後に再度注水試験を行い、水みちが生成する条件を調査した結果、水みちの生成は注水量よりも水圧によって影響を受けていることがわかりました。

試験後に模擬緩衝材を引き上げて観察したところ、緩衝材ブロックは膨潤により一体化しており、表面に水みちの跡が見られました。

今回の試験は、注水の条件を変えて試験を繰り返したため、条件の変化が水みちのでき方に影響を与えている可能性が考えられます。そのため、新たに最初から一定の条件での注水を行い、水みちができる水圧を確認するための試験を開始しました。また、今後、水圧の影響をさらに調べ、緩衝材の流出を防ぐための対策についても検討することを計画しています。

### (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が行われています (5.1.1 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、このケーブルの配置部位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、組立作業時の煩雑さや断線など計測システムの信頼性に影響する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やり取り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。

地中無線伝送システムの装置構成を図 58 に示します。緩衝材と坑道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、小型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にはボーリング孔内に設置された受信アンテナと受信装置が設置されています。小型送信装置から送信したデータは、緩衝材、坑道埋め戻し材、岩盤、プラグを通過して、ケーブル無しで受信装置に届きます。

平成 26 年度に実施した緩衝材ブロックへの小型送信器の設置状況を図 59 に示します。設置作業は緩衝材ブロックに予め設けた窪みにセンサーと送信器を設置し、隙間を緩衝材で埋めるという手順で行いました。ケーブルが無いことにより設置作業を効率的に進めることができることを確認しました。

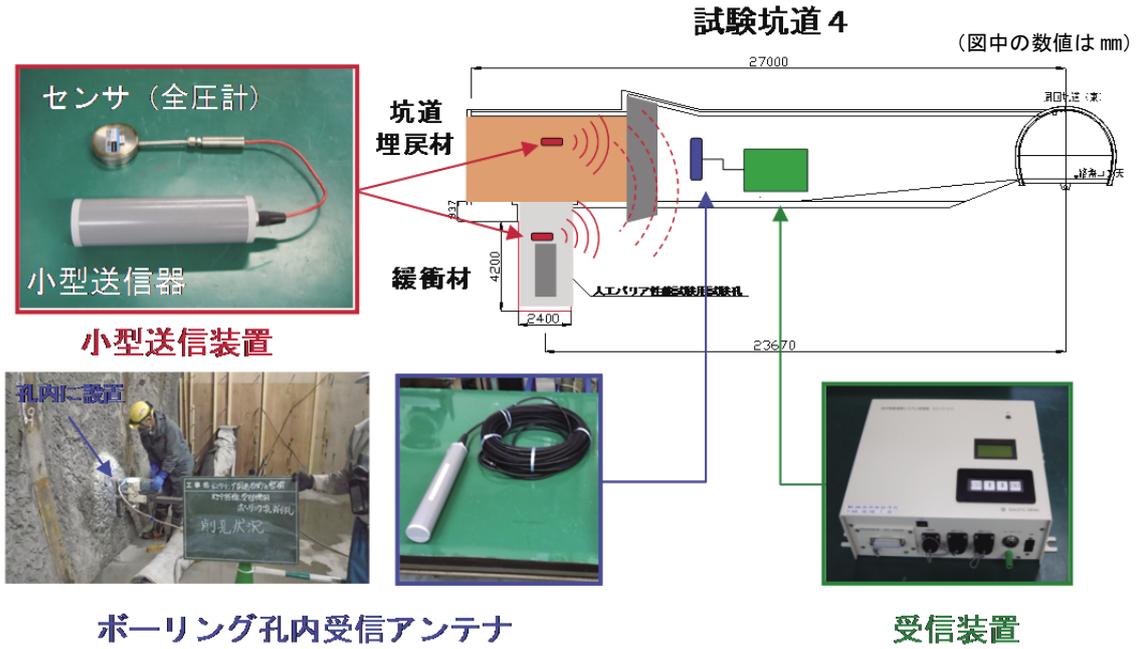


図 58 地中無線伝送システムの装置構成イメージ

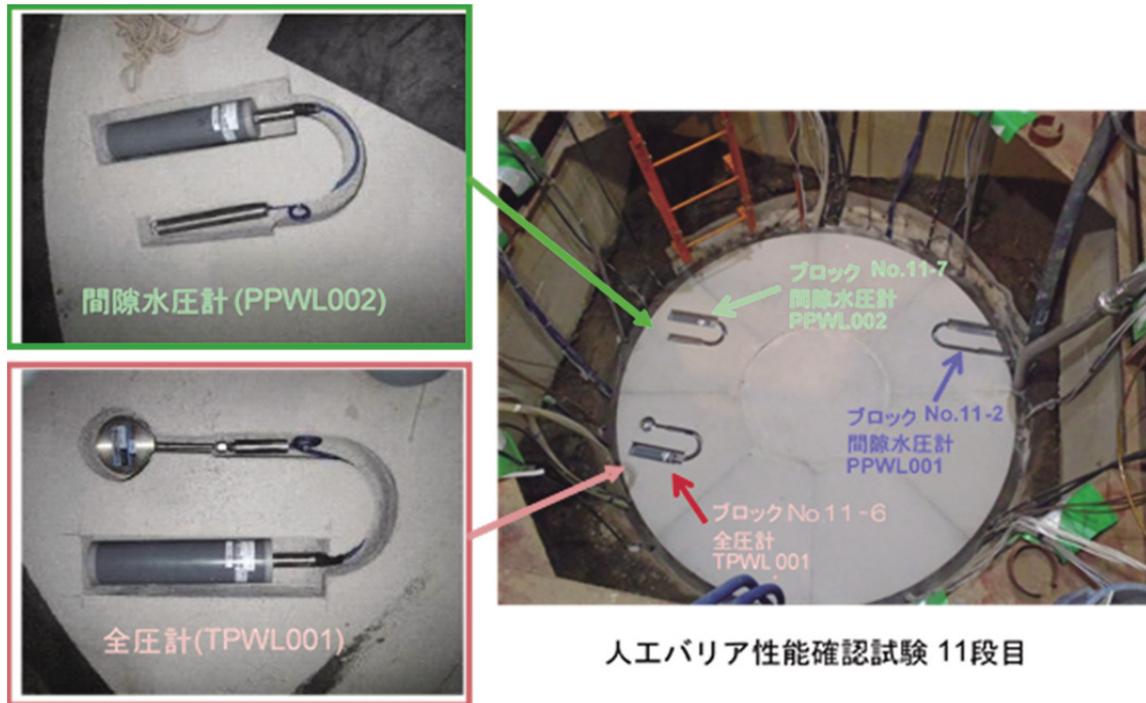


図 59 小型送信装置の設置状況の例 (緩衝材ブロック内)

表 1 に小型送信装置のリストを示します。緩衝材や埋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小型送信装置を、人工バリア性能確認試験内の各部位に合計 7 体設置しました。

表 1 人工バリア性能確認試験に設置した小型送信装置の一覧

設置場所	設置位置	センサー	小型送信装置名称
緩衝材 ブロック	11 段目-6	間隙水圧計	PPWL001
	11 段目-2	全圧計	TPWL001
	11 段目-7	間隙水圧計	PPWL002
坑道 埋戻材 ブロック	6 段目	間隙水圧計	PPBWL001
	6 段目	全圧計	TPBWL001
	20 段目	間隙水圧計	PPBWL002
	20 段目	全圧計	TPBWL002

平成 27 年度は、設置した小型送信装置が予定通りに機能していることを確認するとともに、設置位置の土圧と間隙水圧を計測しました。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。図 60 に計測データの例を示します。模擬オーバーパックの加熱によって緩衝材中の温度が上昇している様子が取得されており、計画通り小型送信装置が機能していることを確認しました。今後は、ケーブル付きのセンサーで取得している計測結果と共に状態変遷の評価を進めます。また、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。

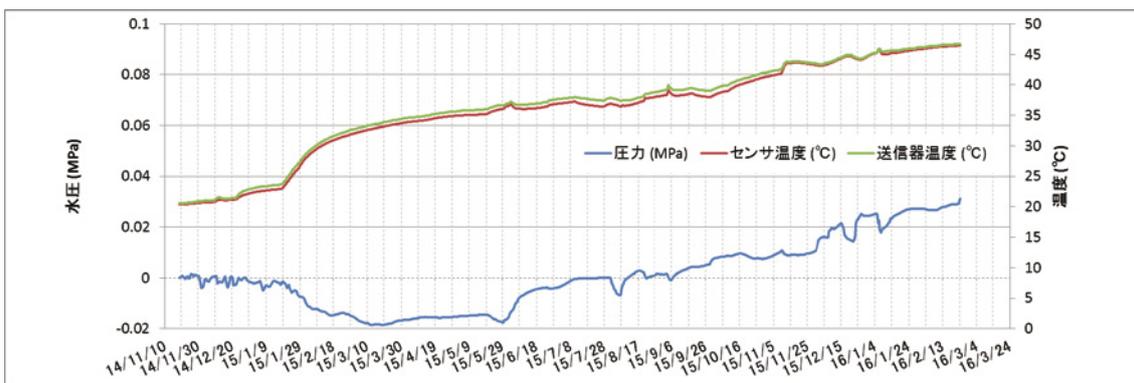


図 60 地中無線による計測データの伝送試験結果の例（全圧計 TPWL001）

## 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動現象を解析・評価するための基礎データや知見を整備しています<sup>注41</sup>。平成27年度は、深度350m調査坑道での原位置トレーサー試験を継続しました。また、原位置トレーサー試験を補完・検証するための室内試験も進めました。なお、原位置トレーサー試験で使用したトレーサーは全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ません。

### 4.2.1 健岩部<sup>注42</sup>を対象とした物質移行試験

平成27年度は平成26年度に開始した健岩部を対象とした物質移行試験<sup>(7)</sup>を継続しました。具体的には、図61に示す原位置トレーサー試験装置を用いて、試験区間にトレーサーを循環させ、一定期間毎に試料採取ユニットから採取した水のトレーサー濃度の分析を行いました。なお、トレーサーは重水や蛍光染料（ウラニン<sup>注43</sup>など）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<sup>注44</sup>性の物質を混合したものを使用しました。図62に各孔のセシウム濃度の経時変化を示します。D-03孔とD-05孔を比較すると、試験孔の孔径が大きい、すなわち試験区間の断面積が大きいD03孔の方がセシウムの濃度減衰が速いことが確認できます。また、D-02孔（緩衝材有）とD-05孔（緩衝材無）のセシウム濃度の経時変化を比較すると、D-02孔の方がD-05孔と比べて濃度減衰が遅いことが確認できます。このように、試験孔の孔径の違いや緩衝材の有無による、岩盤中での拡散<sup>注45</sup>や収着といった移行挙動の違いを原位置の試験にて確認することができました。

図63から、D-03孔におけるヨウ素と重水のトレーサー試験結果と一次元モデルにより拡散のみを考慮した場合の試験解析を比較すると、両物質の減衰は見掛けの拡散係数で概ね  $1.0 \times 10^{-10}$  (m<sup>2</sup>/s) と  $1.0 \times 10^{-11}$  (m<sup>2</sup>/s) の間で推移しており、ヨウ素については既存の室内試験結果<sup>(25)</sup>から算出した見掛けの拡散係数と概ね整合します。また、D-05孔のセシウムとモリブデンのトレーサー試験結果について、地球化学計算コードである「PHREEQC<sup>(26)</sup>」と核種移行解析コードである「GoldSim<sup>(27)</sup>」の2つの計算コードによる予察的解析を実施しました。図64に示すように、セシウムおよびモリブデンともに、解析結果が試験結果を概ね説明できることが確認できました。

トレーサー試験終了後に、岩盤中へのトレーサーの収着や拡散を評価するための室内分析を行うために、ボーリングコア試料の採取を行いました。ボーリングコア試料の採取にあたっては、事前に試験区間内に樹脂を充填し、試験孔周辺の複数個所で採取を行いました。写真4に取得したボーリングコア試料を示します。今後は、取得したボーリングコア試料を用いた室内試験を行い、層理面の方向の違いや透水性の違いに着目した岩盤中の拡散、収着挙動の評価を行う予定です。

注41：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実施することから、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。

注42：割れ目や変質のない岩盤の部分をいいます。

注43：黄緑色の蛍光染料で、フルオレセインナトリウムともいいます。化学式は  $C_{20}H_{10}Na_2O_5$  であらわされます。トレーサー試薬としての利用のほか、入浴剤の着色料などとしても利用されています。

注44：地下水中有る元素が、岩盤などに取り込まれる現象です。

注45：岩盤などの中を元素が、濃度の高い方から低い方へ移動していく現象です。

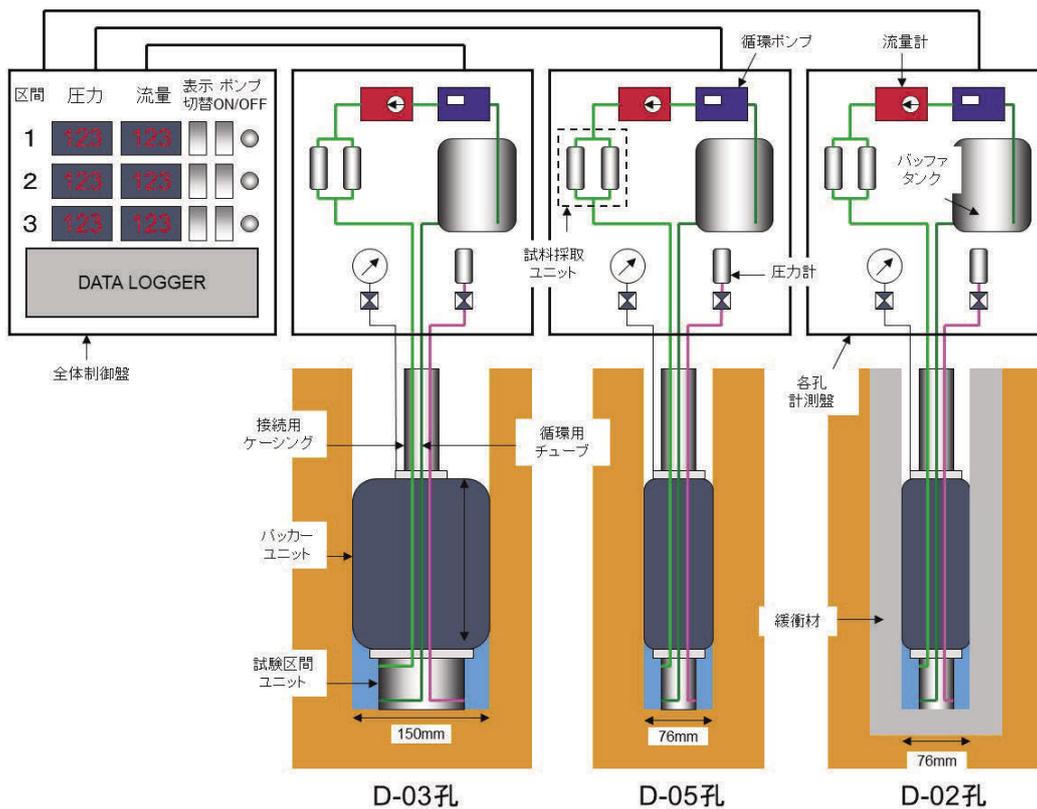


図 61 健岩部を対象とした原位置トレーサー試験装置の概念図

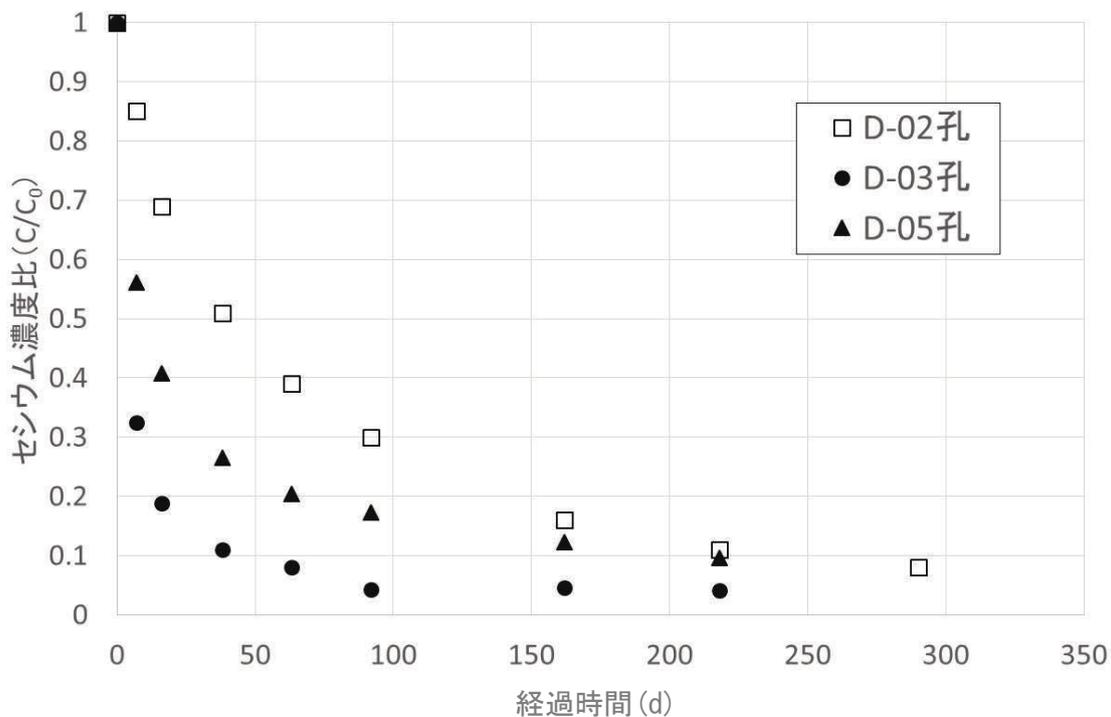


図 62 トレーサー試験結果（セシウム）

セシウム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。

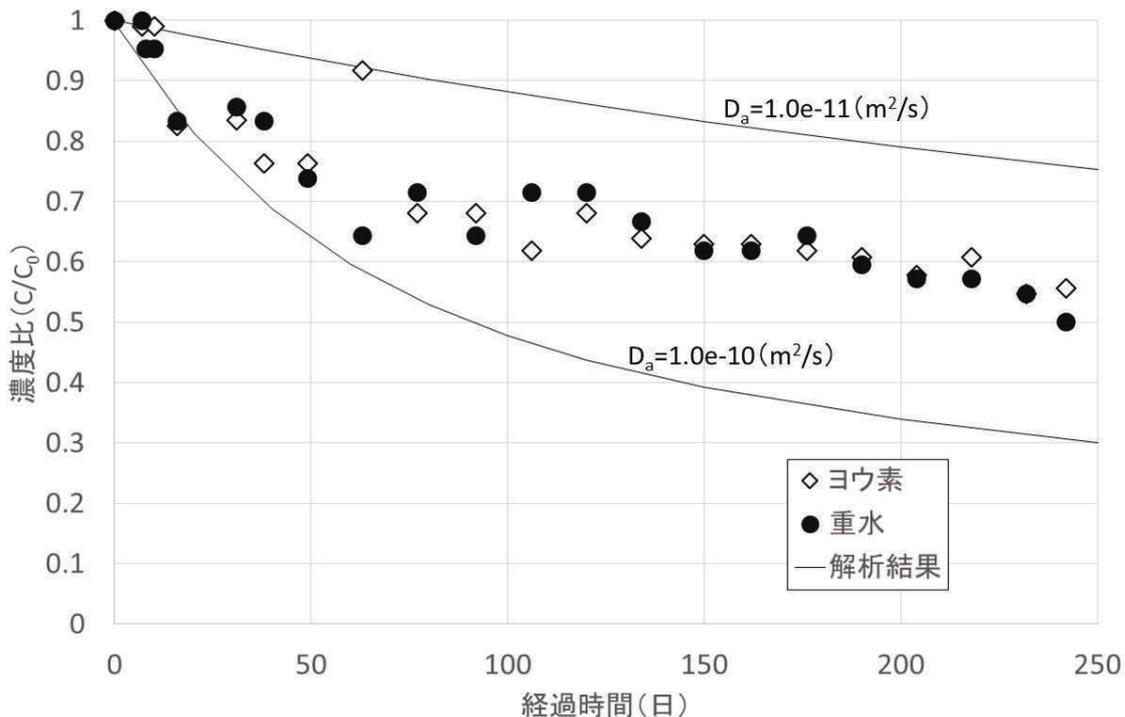


図 63 D-03 孔におけるトレーサー試験結果（ヨウ素と重水）

解析結果はそれぞれ見掛けの拡散係数を  $1.0 \times 10^{-11} \text{ (m}^2/\text{s)}$ 、 $1.0 \times 10^{-10} \text{ (m}^2/\text{s)}$ にした場合の減衰を表しています。

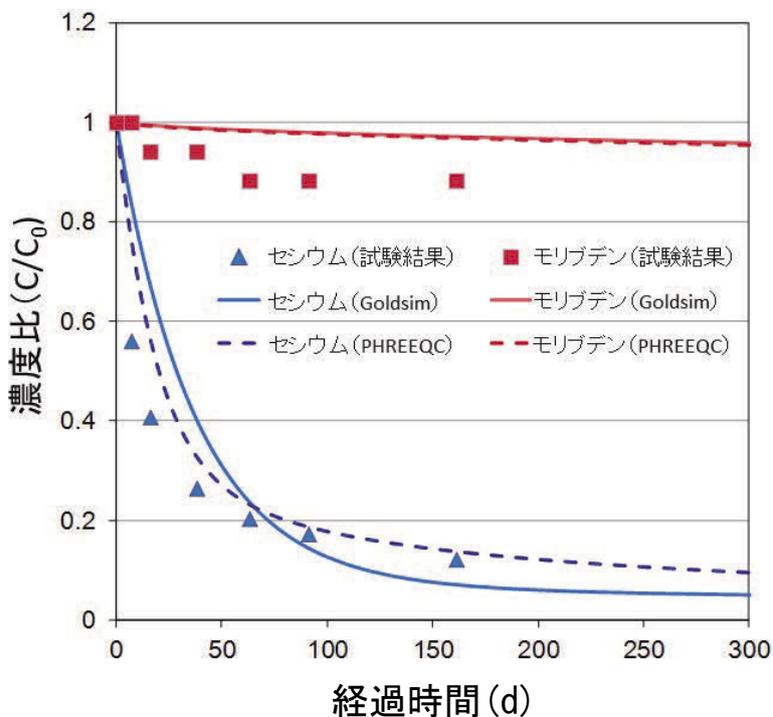
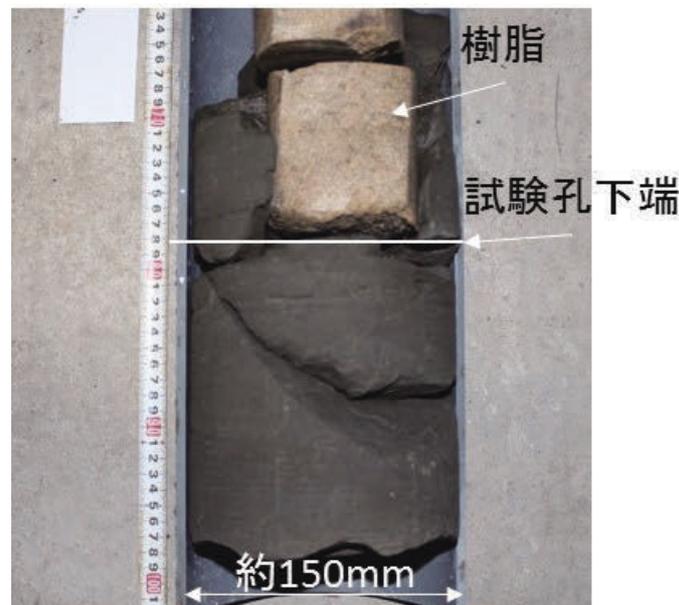


図 64 D-05 孔におけるセシウムとモリブデンの減衰曲線

シンボルは原位置試験の試験結果、実線および破線は解析結果を示しています。



取得コアの状況

写真 4 採取したボーリングコア試料(健岩部対象)

#### 4.2.2 単一割れ目を対象とした物質移行試験

平成 27 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<sup>(7)</sup>を継続しました。具体的には非収着性、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、収着性トレーサー試験実施後に試験対象割れ目を包含するようにオーバーコアリングを行い、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した。

トレーサー試験は試験対象とする試験孔や試験条件（注水流量や揚水流量）などを変化させ、合計 20 ケースの試験を実施しました。試験孔のレイアウトを図 65 に、試験装置概要を図 66 に示します。S-07 孔を注水孔、S-02 孔を揚水孔としたトレーサー試験では、同じ試験条件における試験結果の再現性の確認と異なる試験条件でのトレーサーの移行挙動の違いについて検証しました。図 67 に注水流量と揚水流量をほぼ等しく設定した条件での試験結果を示します。4 つのケースともに、試験開始から概ね 50 分～100 分の間にピークが生じ、その後、緩やかな濃度低下が確認できます。このことから、割れ目の中をトレーサー（ウラニン）が分散しながら移行していることが推察されました。ピーク位置が試験ケース毎に異なっているのは、試験期間中の揚水孔と注水孔の間隙水圧差が異なる（図 68）ことで、孔間の動水勾配が変化したことによる影響と考えられます。注水流量と揚水流量の比（ダイポール比）を変えたケースで比較すると、注水流量を大きくした 1P-6 および 1P-7 のケースではピーク位置が 2 つ確認されました（図 69）。これは、注水流量を大きくすることで、透水性や揚水孔までの移行距離が異なる経路にもトレーサーが移行し、時間差でトレーサーが揚水孔に到達した結果を示していると考えられます。また、この二つのピークが生じるケースについて 1 次元物質移行モデル（曲線状の経路を移動すると仮定したモデル）による逆解析を行った結果、複数経路を仮定したモデルの方がより整合的であることから、割れ目内は透水性の異なる複数の移行経路が分布していることが推察できます。

トレーサー試験実施後に対象割れ目を包含するように、オーバーコアリングを実施しました。コアリングは収着性トレーサーを用いた試験を行った S-07 孔および S02 孔を対象に、試験孔周辺と孔間について複数本のボーリング掘削を行いました。写真 5 に取得したボーリングコア試料の一例を示します。取得したボーリングコア試料については、室内実験を実施中であり、割れ目表面へ収着したトレーサーの濃度プロファイルを取得する予定です。今後はこれらの室内試験結果を含め、原位置試験と室内試験結果との整合性を検証しつつ、割れ目の物質移行特性の評価を継続していきます。

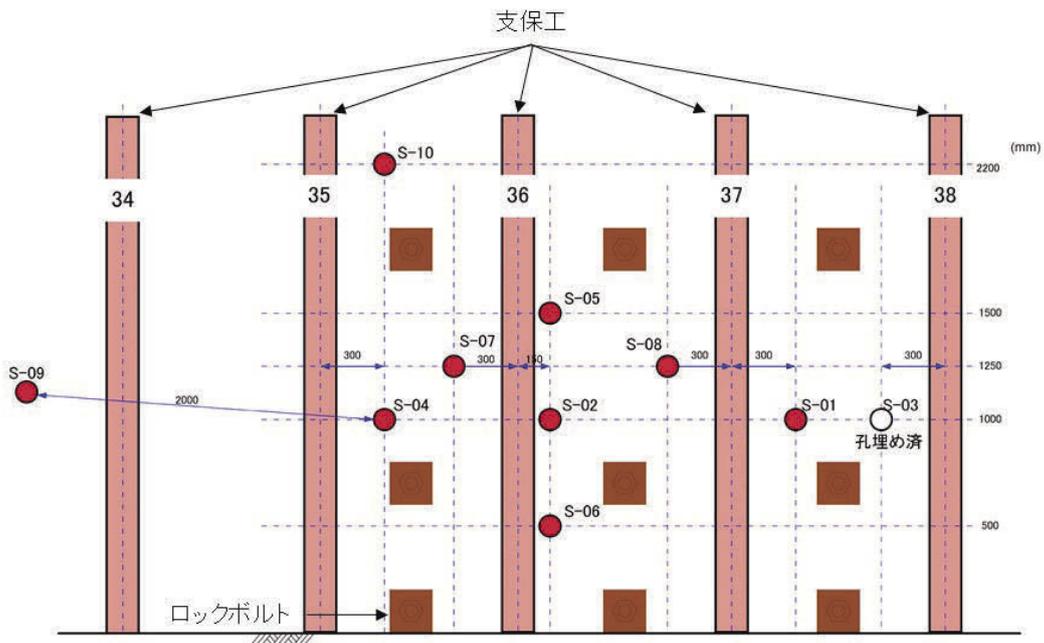


図 65 試験孔および間隙水圧孔のレイアウト（平面図）

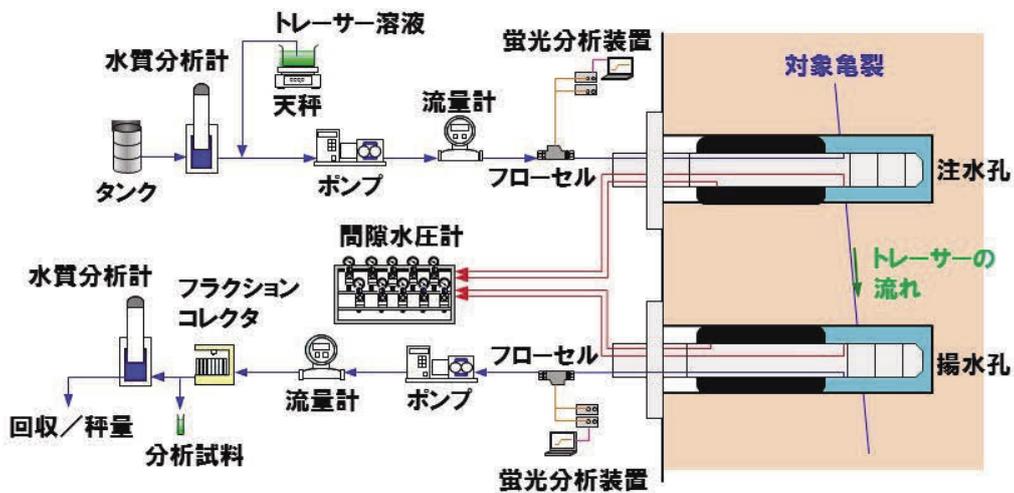


図 66 試験装置概要（断面図）

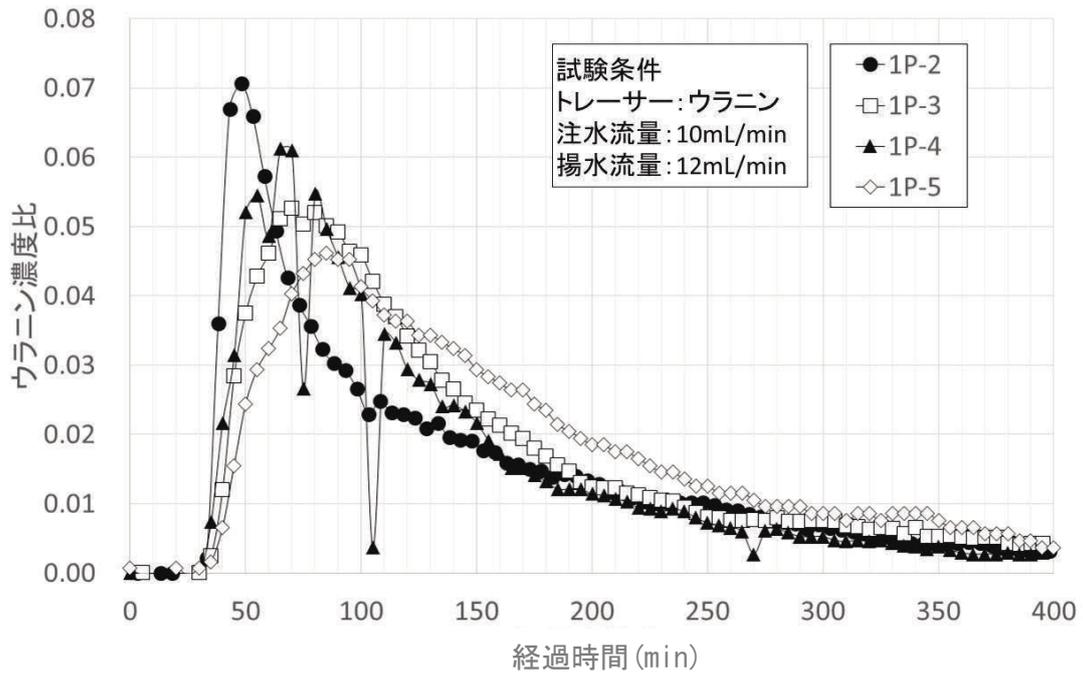


図 67 ダイポール比が同じ条件でのトレーサー試験結果

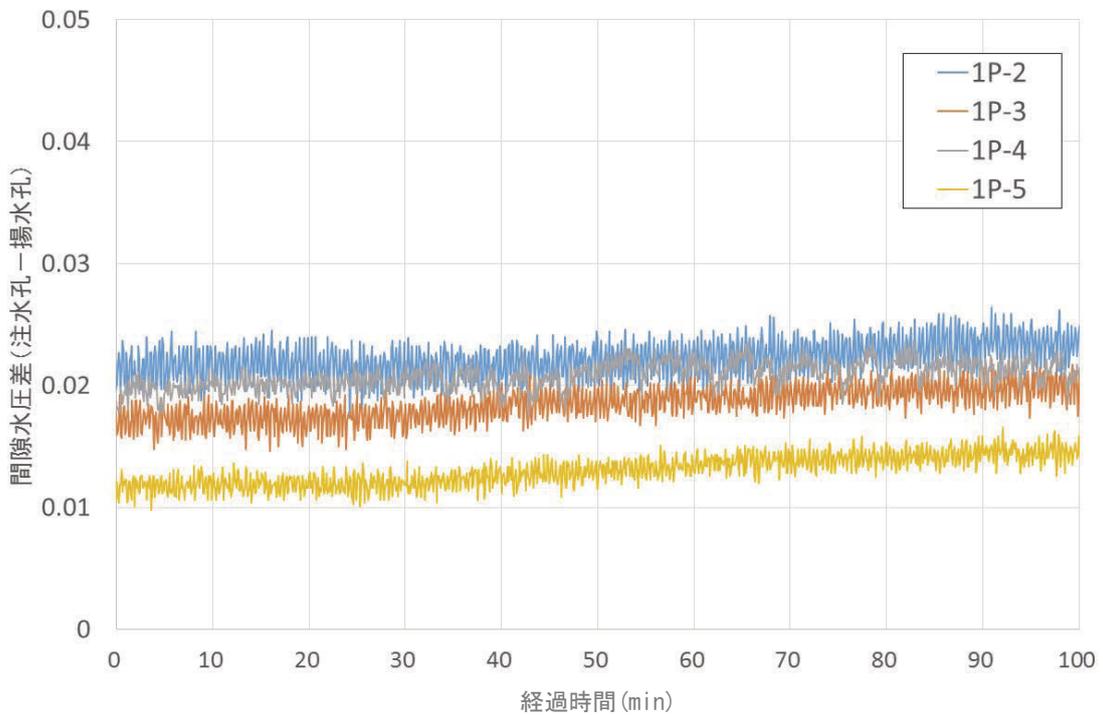


図 68 試験期間中における注水孔(S-07)と揚水孔(S-02)の間隙水圧差

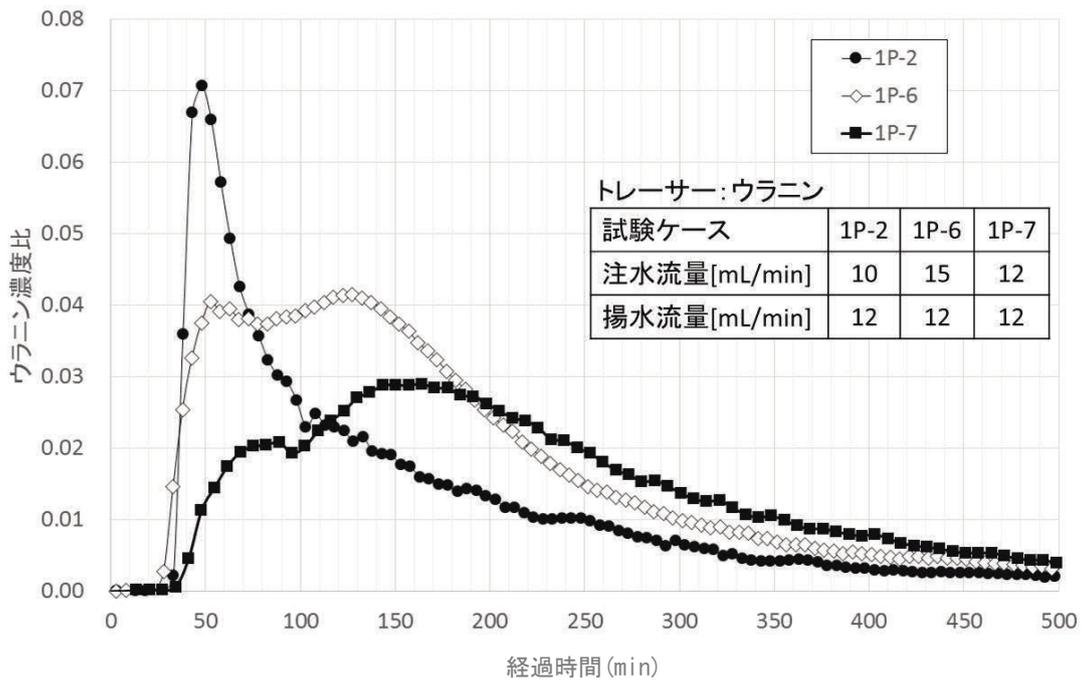


図 69 ダイポール比を変化させた場合のトレーサー試験結果

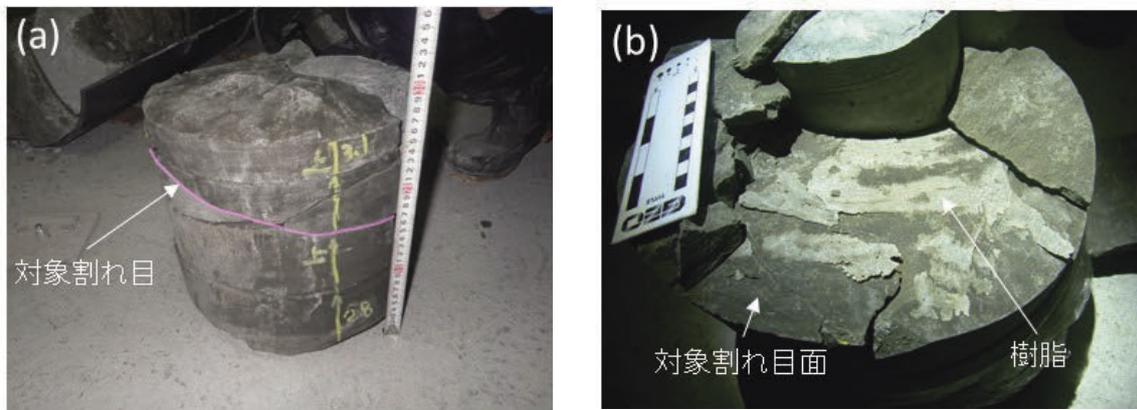


写真 5 採取したボーリングコア試料(単一割れ目対象)

写真(b)は写真(a)の対象割れ目面を示しています。ボーリングコア試料の採取前に試験孔に樹脂を充填しており、割れ目内の一部に樹脂が充填されている様子が確認できます。

#### 4.2.3 物質の移動特性に関する調査技術開発

平成 27 年度は、注水および揚水を伴うトレーサー試験に対し、地下水中に溶存するガスの影響を低減させるための技術開発を行いました。具体的には、平成 26 年度から平成 27 年度にかけて実施した単一割れ目を対象とした物質移行試験において、トレーサー投入前に試験装置内の水抜きを行い、試験装置内に残留するガスを排除するとともに、トレーサー試験期間中において脱ガスが発生しうるかを確認するために、事前にトレーサーを使わずに注水／揚水を行う手順を加えました。その結果、脱ガスによる注水／揚水流量の乱れや間隙水圧変化を低減させた状態でトレーサー試験を実施することが可能となりました（図 70）。このように脱ガスを伴うような地質環境下での注水および揚水を伴うトレーサー試験を行う場合、今回行った手順は試験結果の品質を向上させる上で有効であることが確認できました。

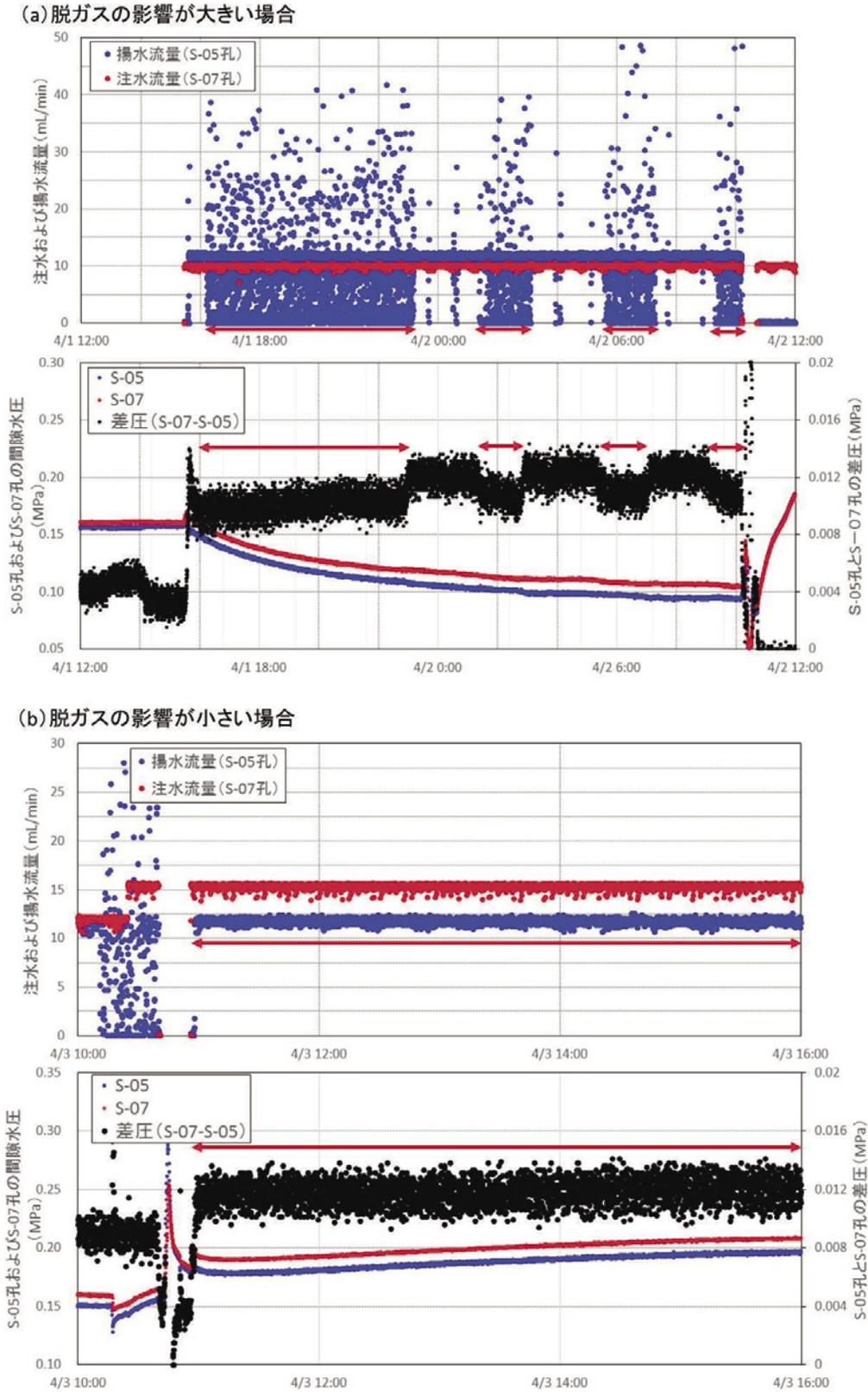


図 70 トレーサー試験における脱ガスの影響

(a) のグラフでは脱ガスの影響が大きいことにより、揚水流量が乱れている赤矢印の期間で、揚水孔と注水孔の差圧が変化しています。一方、(b) のグラフでは、脱ガスの影響が小さく、赤矢印の期間で、揚水流量および揚水孔と注水孔の差圧はほぼ安定しています。

## 5. 地下施設の維持管理

### 5.1 地下施設の維持管理

平成 27 年度は、平成 26 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）。なお、PFI<sup>注 46</sup>契約による地下施設の維持管理業務は、平成 31 年 3 月末まで継続します。



写真 6 地下施設の維持管理状況（機械設備の点検・整備）

---

注46：PFI (Private Finance Initiative) は、とは、公共施設などの建設、維持管理、運営などを民間の資金、経営能力および技術的能力を活用して行う手法のことで、民間の資金、経営能力、技術的能力を活用することにより、国や地方公共団体などが直接実施するよりも効率的かつ効果的に公共サービスを提供できる事業について導入が進められています。

## 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壤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、土壤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壤汚染対策法に定める範囲内であることを確認するため、建設現場における簡易分析と公的機関による詳細な分析(以下、公定分析)を定期的を実施し、同法に準じた適切な管理のもと掘削土(ズリ)置場へ搬入し、保管しています(写真7)。

掘削土(ズリ)置場は、土壤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71)となっています。



写真7 掘削土(ズリ)の保管状況

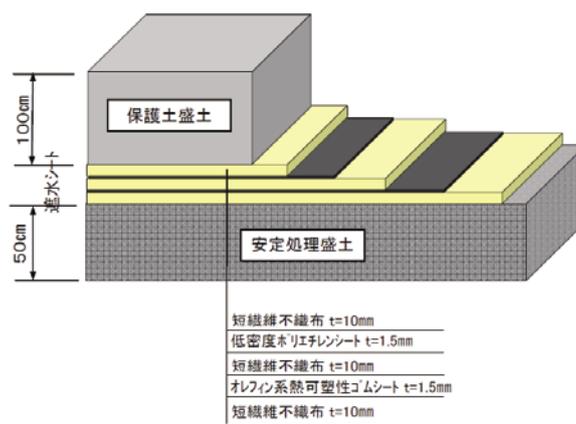


図71 掘削土(ズリ)置場の構造

### 5.3 排水の管理

地下施設からの排水と掘削土(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)

写真 8 排水処理設備の状況

## 6. 環境モニタリング

平成 26 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、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<sup>注47</sup>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採水地点を図 72 に示します。

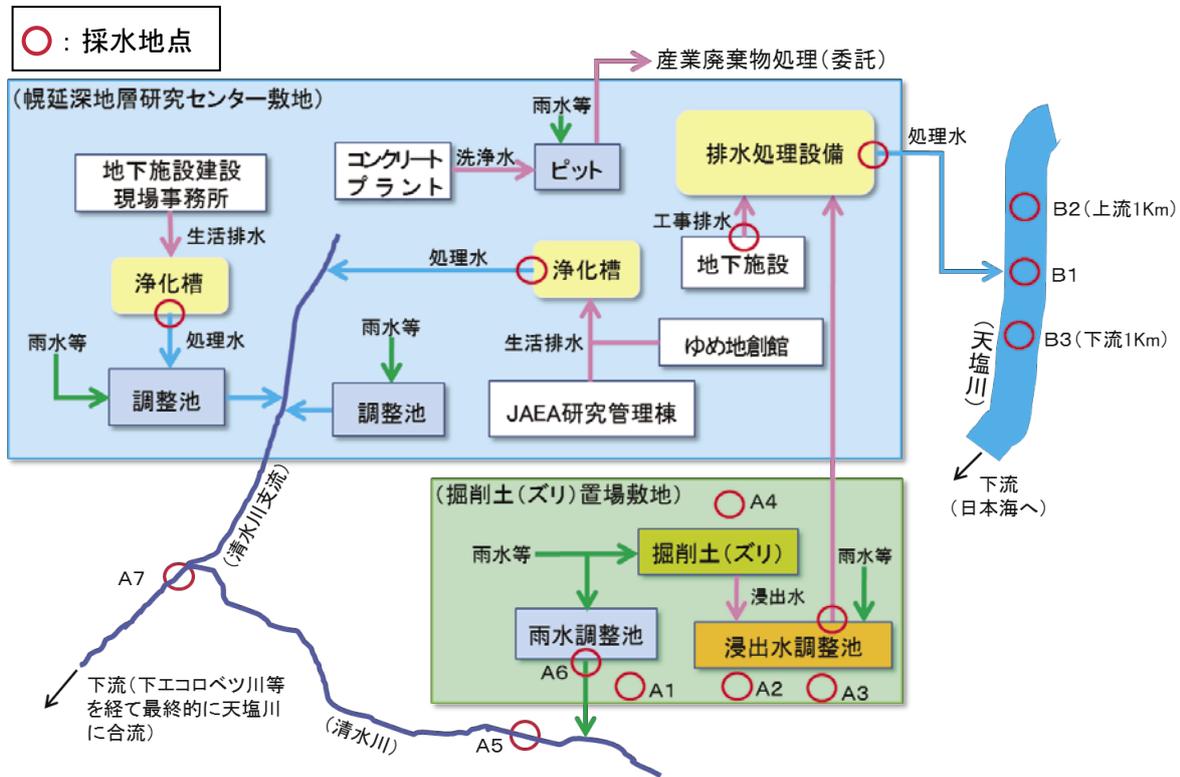


図 72 排水系統と各水質分析の試料採取点

注47 : <http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/suishitsu.html>

## (1) 天塩川への排水量

地下施設からの排水および掘削土（ズリ）置場の浸出水は、排水処理施設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 27 年度における天塩川への排水量は、表 2 に示す通りです。合計排水量は 61,907m<sup>3</sup>であり、平成 26 年度（63,243m<sup>3</sup>）と同程度（約 98%）でした。日最大排水量は、融雪水の流入の影響により掘削土（ズリ）置場の浸出水を多く処理した 3 月の 429m<sup>3</sup>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（750m<sup>3</sup>/d）を満足しています。また、月排水量および日平均排水量は、降雨により増水した掘削土（ズリ）置場の浸出水を多く処理した 7 月が最大となっており、月排水量が 6,975m<sup>3</sup>、日平均排水量が 225.0m<sup>3</sup>でした。

表 2 天塩川への排水量

年 月	月排水量 (m <sup>3</sup> )	日最大排水量 (m <sup>3</sup> ) ※1	日平均排水量 (m <sup>3</sup> ) ※2
平成 27 年 4 月	6,376	406	212.5
平成 27 年 5 月	4,557	280	147.0
平成 27 年 6 月	5,365	361	178.8
平成 27 年 7 月	<b>6,975</b> <sup>*3</sup>	364	<b>225.0</b> <sup>*3</sup>
平成 27 年 8 月	4,511	343	145.5
平成 27 年 9 月	5,165	305	172.2
平成 27 年 10 月	6,877	339	221.8
平成 27 年 11 月	3,928	220	130.9
平成 27 年 12 月	4,803	301	154.9
平成 28 年 1 月	3,604	286	116.3
平成 28 年 2 月	3,970	308	136.9
平成 28 年 3 月	5,776	<b>429</b> <sup>*3</sup>	186.3
年 間	61,907	—	—

※1：北るもい漁業協同組合との協定値は 750m<sup>3</sup>/d

※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 73 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 27 年度における水質調査結果は、表 3 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。

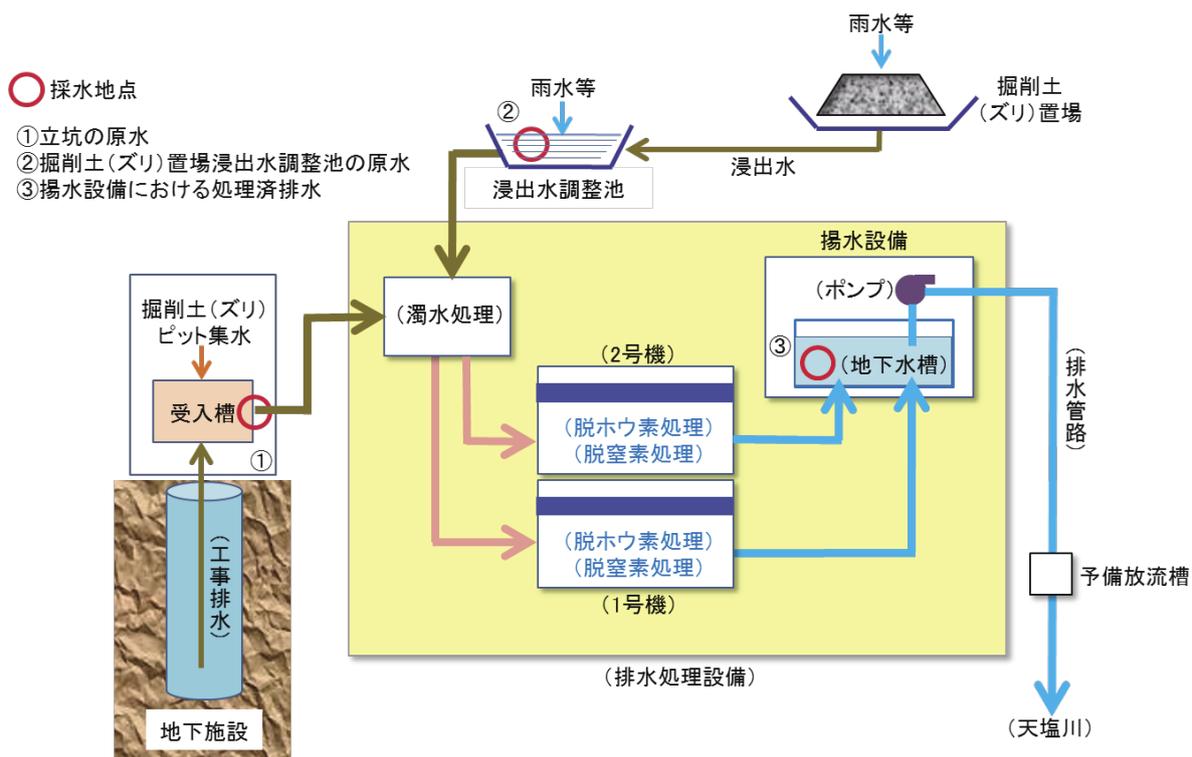


図 73 地下施設からの排水の採水地点

表 3 地下施設からの排水に係る水質調査結果

分析項目※1	採水地点※2	過年度	平成 27 年度	(参考値) 水質汚濁防止法 排水基準
		平成 18 年 12 月 ～平成 27 年 3 月	平成 27 年 4 月 ～平成 28 年 3 月	
カドミウム (mg/L)	立坑の原水	<0.01	<0.01	0.03
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	<0.01	<0.01	
	揚水設備における処理済排水	<0.01	<0.01	
ヒ素 (mg/L)	立坑の原水	<0.01～0.08	<0.01	0.1
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	<0.01～0.02	<0.01～0.01	
	揚水設備における処理済排水	<0.01～0.02	<0.01	
セレン (mg/L)	立坑の原水	<0.01～0.02	<0.01	0.1
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	<0.01～0.04	<0.01～0.01	
	揚水設備における処理済排水	<0.01	<0.01	
フッ素 (mg/L)	立坑の原水	<0.8～3.5	<0.8	8
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	<0.8	<0.8	
	揚水設備における処理済排水	<0.8	<0.8～1.6	
ホウ素 (mg/L)	立坑の原水	<0.1～160	61～86	10
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	<0.1～37	0.2～9.3	
	揚水設備における処理済排水	<0.1～3.0	0.1～2.1	
全窒素 (mg/L)	立坑の原水	0.41～117	76～91	120 (日間平均 60)
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	6.79～150	23～79	
	揚水設備における処理済排水	0.60～48	13～29	
全アンモニア (mg/L)	立坑の原水	0.12～110	54～72	—
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	0.30～22	0.12～2.1	
	揚水設備における処理済排水	<0.05～5.92	<0.05～0.91	
pH	立坑の原水	7.5～9.5	8.1～8.2	5.8～8.6
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	6.7～8.7	7.1～7.4	
	揚水設備における処理済排水	6.9～8.6	7.2～8.0	
浮遊物質 (mg/L)	立坑の原水	4～580	4～48	200 (日間平均 150)
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	5～170	5～18	
	揚水設備における処理済排水	<1～9	<1～4	
塩化物 イオン (mg/L)	立坑の原水	20～4,300	3,400～4,100	—
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	18.2～1,500	22～330	
	揚水設備における処理済排水	38～4,700	2,400～4,400	

※1：主な分析項目を抜粋

※2：採水地点は図 73 参照

(3) 天塩川の水質調査結果

地下施設からの排水の放流先である天塩川の採水地点（図 74）において、定期的（原則 1 回/月）に採水を行い（写真 9）、水質調査を実施しています。

平成 27 年度における調査結果は、表 4 に示す通りです。浮遊物質質量について、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、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質量も低い値（最大 4mg/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原因によるものと考えられます。



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 74 天塩川の採水地点

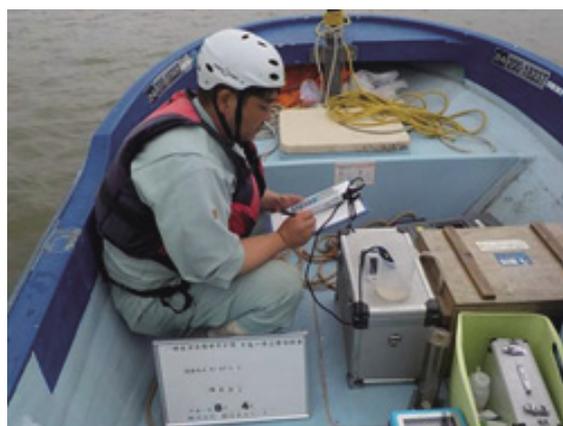


写真 9 天塩川の採水状況

表 4 天塩川の水質調査結果

分析項目※1	採水地点※2	過年度		平成 27 年度	北るもい 漁業協同 組合協定値	
		平成 18 年 6 月 ～平成 18 年 11 月 (放流前)	平成 18 年 12 月 ～平成 27 年 3 月 (放流後)	平成 27 年 4 月 ～平成 28 年 3 月		
ホウ素 (mg/L)	B1	表層	<0.02～0.04	<0.01～0.35	0.01～0.1	5
		中層	—	<0.01～3.5	0.01～1.7	
		深層	<0.02～3.35	<0.01～4.9	0.01～4.7	
	B2	表層	<0.02～0.04	<0.01～0.27	<0.01～0.04	
		中層	—	<0.01～3.7	<0.01～1.5	
		深層	<0.02～3.28	<0.01～5.0	<0.01～4.6	
	B3	表層	<0.02～0.07	<0.01～0.26	<0.01～0.07	
		中層	—	<0.01～2.5	<0.01～1.6	
		深層	<0.02～1.03	<0.01～4.5	<0.01～4.5	
全窒素 (mg/L)	B1	表層	0.37～1.06	0.11～2.2	0.17～1.2	20
		中層	—	0.15～2.1	0.23～1.4	
		深層	0.42～1.50	0.15～6.5	0.31～2.1	
	B2	表層	0.37～1.14	0.14～2.1	0.16～1.3	
		中層	—	0.15～2.2	0.21～1.4	
		深層	0.4～1.16	0.16～2.3	0.33～1.3	
	B3	表層	0.4～1.31	0.16～2.2	0.17～1.3	
		中層	—	0.11～2.2	0.25～1.4	
		深層	0.49～1.24	0.16～2.2	0.36～1.4	
全アンモニア (mg/L)	B1	表層	—	<0.05～0.83	<0.05～0.08	2※3
		中層	—	<0.05～0.92	<0.05～0.08	
		深層	—	<0.05～0.85	<0.05～0.08	
	B2	表層	<0.01～0.13	<0.05～0.89	<0.05～0.08	
		中層	—	<0.05～0.76	<0.05～0.08	
		深層	0.01～0.35	<0.05～0.85	<0.05～0.07	
	B3	表層	0.01～0.21	<0.05～0.89	<0.05～0.09	
		中層	—	<0.05～0.90	<0.05～0.08	
		深層	0.02～0.17	<0.05～0.96	<0.05～0.08	
pH	B1	表層	7.1～7.4	6.6～7.7	6.6～7.6	5.8～8.6
		中層	—	6.7～7.6	6.6～7.4	
		深層	7.0～7.6	6.7～8.0	6.7～7.7	
	B2	表層	7.1～7.4	6.8～7.9	6.7～7.6	
		中層	—	6.8～7.6	6.7～7.4	
		深層	7.2～7.6	6.9～8.0	6.7～7.6	
	B3	表層	7.0～7.6	6.7～7.9	6.6～7.6	
		中層	—	6.7～7.6	6.6～7.3	
		深層	7.1～7.4	6.8～8.0	6.7～7.6	
浮遊物質 (mg/L)	B1	表層	3～34	<1～260	<1～360	20
		中層	—	<1～390	<1～360	
		深層	6～86	<1～400	<1～370	
	B2	表層	3～36	<1～340	<1～390	
		中層	—	<1～360	<1～400	
		深層	5～47	<1～460	<1～410	
	B3	表層	3～35	<1～420	<1～270	
		中層	—	<1～460	<1～410	
		深層	5～49	<1～650	<1～420	

※1：主な分析項目を抜粋

※2：採水地点は図 74 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 75 に示す採水地点において、観測用のボーリング孔から地下水の採水を定期的（原則 4 回/年）に行い（写真 10）、水質調査を実施しています。

平成 27 年度における調査結果は、表 5 に示す通りです。pH について、A1 (6.5) と A3 (7.4) において過去の測定範囲の最大・最小値を僅かに超えています。排水基準 (5.8~8.6) から見ても特異な値ではないと判断しています。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。

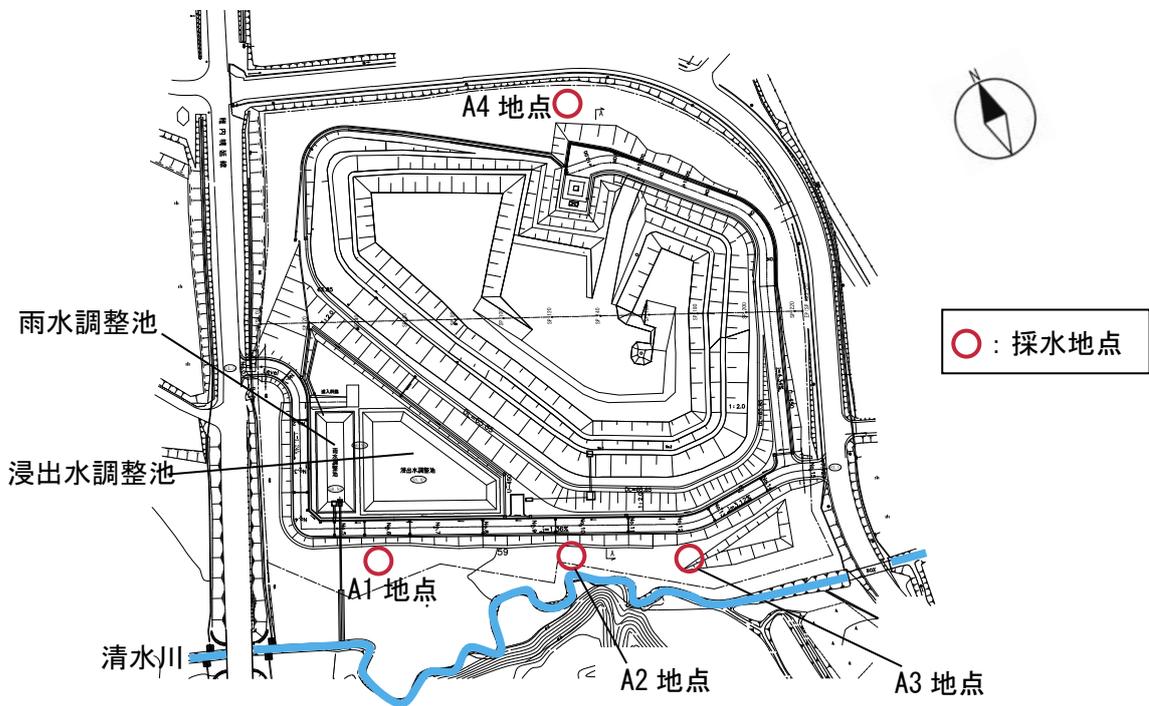


図 75 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水地点



写真 10 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水状況

表 5 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		平成 27 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 ～平成 27 年 3 月 掘削土(ズリ) 搬入後	平成 27 年			平成 28 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	<0.005	<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	<0.005	<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	<0.005	<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	0.3	<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	4.7	21	6.1	20
	A2	1.29～43.5	0.43～9.0	6.7	2.5	2.8	6.4
	A3	12.5～34.0	0.18～41.8	25	32	26	23
	A4	<0.02～0.06	<0.02～0.47	<0.02	<0.02	<0.02	0.03
pH	A1	6.9～7.2	6.6～7.3	6.6	7.0	6.5	6.7
	A2	4.6～6.3	3.7～6.6	6.1	6.5	6.1	6.5
	A3	6.8～7.3	4.2～7.3	6.9	7.4	6.9	6.9
	A4	5.4～6.6	5.2～6.7	5.5	5.2	5.5	5.8
塩化物 イオン (mg/L)	A1	1,810～2,760	210～3,400	250	1,300	370	1,400
	A2	147～2,910	23～620	390	120	150	370
	A3	631～1,550	27～1,700	1,100	1,300	1,200	1,300
	A4	9.7～11.9	8.4～17	12	11	17	13

※1：主な分析項目を抜粋

※2：採水地点は図 75 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 76 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 27 年度における調査結果は、表 6 に示す通りです。pH について、A5 (6.0) と A7 (6.2、7.8) において過去の測定範囲の最大・最小値を僅かに超えています。排水基準 (5.8~8.6) から見ても特異な値ではないと判断しています。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 76 清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水地点



写真 11 清水川の採水状況

表 6 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		平成 27 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 ～平成 27 年 3 月 掘削土(ズリ) 搬入後	平成 27 年 4 月 ～平成 28 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	<0.005～0.006	<0.005
	A7	<0.005	<0.005～0.008	<0.005
ヒ素 (mg/L)	A5	<0.005	<0.005	<0.005
	A6	<0.005～0.011	<0.005～0.015	<0.005～0.005
	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
	A7	<0.1	<0.1～0.3	<0.1
ホウ素 (mg/L)	A5	0.03～0.25	<0.02～0.44	0.04～0.29
	A6	<0.02～0.09	0.02～0.43	0.08～0.23
	A7	0.03～0.30	<0.02～0.42	0.04～0.31
pH	A5	6.4～7.1	6.2～7.9	6.0～7.9
	A6	5.8～7.4	5.7～9.1	6.4～8.9
	A7	6.5～7.0	6.4～7.5	6.2～7.8
浮遊物質 質量 (mg/L)	A5	1～20	<1～66	1～16
	A6	12～173	<1～500	1～80
	A7	1～11	<1～270	1～24
塩化物イオン (mg/L)	A5	14.4～30.5	7.2～70	17～50
	A6	5.1～24.7	2.9～269	5.6～38
	A7	15.6～28.7	8.1～100	18～46

※1：主な分析項目を抜粋

※2：採水地点は図 76 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27年度における水質調査結果は、表7に示す通り、全ての項目において協定値を満足しています。

表7 浄化槽排水の水質調査結果

分析項目	採水地点	過年度	平成27年度	北るもい 漁業協同組合 協定値
		平成18年12月 ～平成27年3月	平成27年4月 ～平成28年3月	
pH	研究管理棟	5.9～7.4	6.0～7.3	5.8～8.6
	地下施設 現場事務所	6.8～7.9	7.6～7.8	
生物化学的 酸素要求量 (mg/L)	研究管理棟	<0.5～17	1.8～7.2	20
	地下施設 現場事務所	<0.2～28	0.5～1.5	
浮遊物質 量 (mg/L)	研究管理棟	0.5～10	2.0～7.0	20
	地下施設 現場事務所	<0.5～7.0	<1.0～1.0	
全窒素 (mg/L)	研究管理棟	6.6～52	14～36	60
	地下施設 現場事務所	0.6～45	0.6～4.5	
全リン (mg/L)	研究管理棟	0.5～4.4	2.4～4.5	8
	地下施設 現場事務所	<0.1～7.8	0.2～1.2	
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	3,000
	地下施設 現場事務所	0～1,500	0～14	

## 6.2 センター周辺の環境影響調査結果

平成 26 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 77 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 27 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。

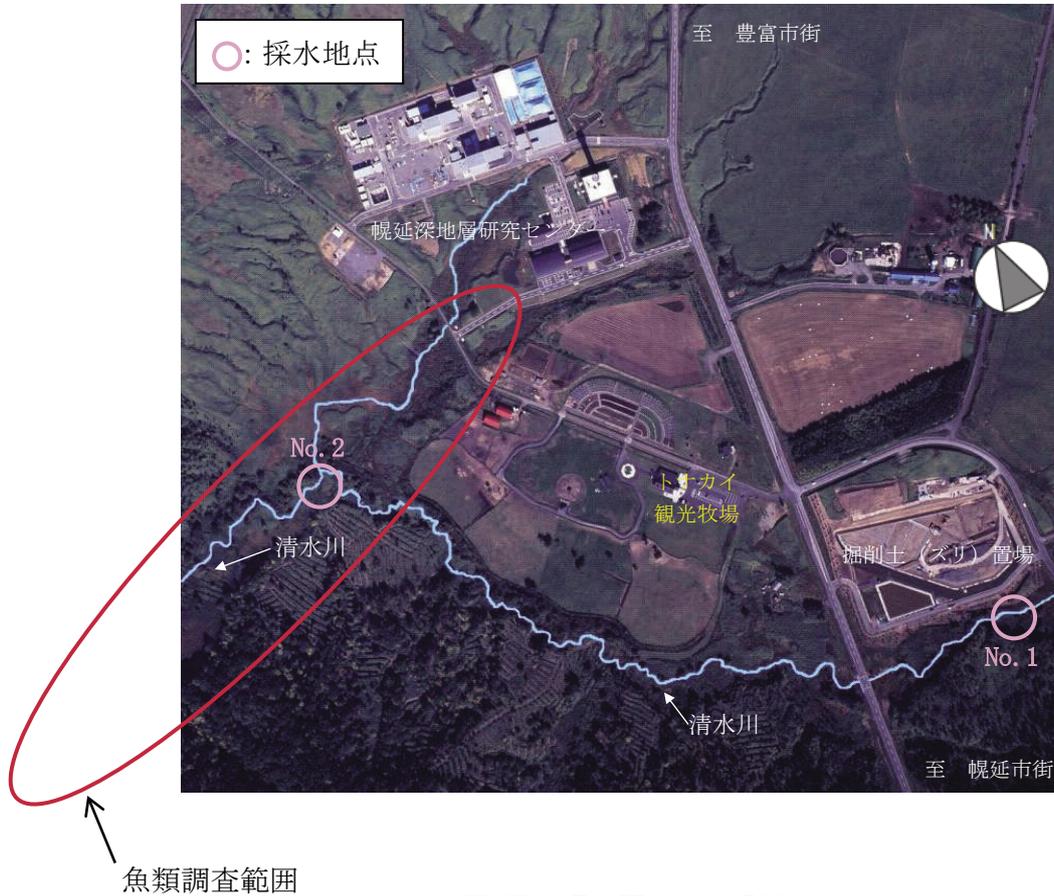


図 77 環境調査実施場所

### (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（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とは別に、「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 27 年度における調査結果は、表 8 に示す通り、掘削土（ズリ）置場上流の採水地点 No. 1 において生物化学的酸素要求量が 62mg/L と高い値を示していますが、雨水調整池から清水川へ雨水が流入する位置より上流での値であることから、掘削土（ズリ）置場の影響ではなく、上流側の影響によるものと考えられます。



写真 12 清水川の水質調査

表 8 清水川の水質調査結果

分析項目※1	採水地点※2	過年度 平成 14 年 8 月 ～ 平成 27 年 2 月	平成 27 年度			
			平成 27 年			平成 28 年
			6 月	9 月	11 月	2 月
pH	No. 1	6.3～7.8	7.9	7.3	7.3	7.3
	No. 2	6.4～7.7	7.4	7.0	6.7	7.1
生物化学的 酸素要求量 (mg/L)	No. 1	<0.5～31	7.1	62	6.5	0.9
	No. 2	<0.5～6.8	1.3	5.6	2.5	2.1
浮遊物質量 (mg/L)	No. 1	1～70	2	59	4	4
	No. 2	<1～69	6	4	4	2
溶存酸素量 (mg/L)	No. 1	6.7～13.8	9.3	6.6	10	13.9
	No. 2	5.5～12.5	8.2	6.4	8.8	10

※1：主な分析項目のみを抜粋

※2：採水地点は図 77 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 27 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 9 に示す通り、スナヤツメ北方種、エゾウグイ、エゾホトケドジョウ、サクラマス（ヤマメ）、エゾトミヨ、ハナカジカの 6 科 6 種が確認されました。



写真 13 魚類生息調査

表 9 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	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			NT	R			○
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：「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
- 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、継続的に現場の安全確認や改善などを指導しました（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参加し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 27 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します。平成 27 年度は岩盤に注入する樹脂の選定を行い、深度 350m 調査坑道の試験坑道 3 において樹脂注入試験を実施しました。

##### 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 年度は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。今後、試験後溶液やろ紙上に残った物質の分析などを行い、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について評価する予定です。

##### 信州大学

坑道の掘削に伴って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、350m 東連絡坑道および西連絡坑道において、掘削により生じた割れ目の長さや密度を分析し、坑道の掘削方向・掘削効率と岩盤損傷の関係を検討しました。その結果、最大主応力方向に掘削した西連絡坑道では、掘削効率がよく、なおかつ岩盤の損傷も抑えられることが確認されました。今後も深度 350m 調査坑道において発達した割れ目の分析を進め、他の試験結果と比較することにより、掘削効率・掘削方向と岩盤損傷の関係を明らかにしていきます。

##### 北海道大学

拡散係数や収着分配係数の温度依存性に関する知見を得ることを目的として、ボーリングコア（稚内層）試料を用いた室内拡散試験を行い、ヨウ素における温度と拡散係数および収着分配係数との関係を検討しました。その結果、温度が低くなるにしたがい、ヨウ素の拡散係数は小さくなる関係にあることが確認されました。また、ヨウ素は 25℃において有意に岩盤に収着することが確認されました。今後もヨウ素や他の元素について、室内試験を進め、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ガスの発生量や移動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 27 年度は、三次元レーザスキャナとレーザーメタンセンサーを組み合わせ、坑道の形状データにメタンガスの発生箇所や発生量に関わるデータを付加する技術を開発するとともに、実際に坑道内において試測定を行いました。また、レーザーメタンセンサーを用い、地下施設から排出されるメタンガス量のモニタリングを予察的に行いました。その結果、地下水の湧出量から予想されるメタンガス量より多い量のメタンガスが排出されている可能性が示唆されました。坑道内における測定手法の開発や地下施設から排出されるメタンガス量のモニタリングについては、今後も継続して行う予定です。

室蘭工業大学

三次元レーザスキャナを用いた坑道壁面の地質観察手法を整備するために、三次元レーザスキャナによって取得された点群データを用いて坑道壁面における割れ目分布の解析手法を検討しています。平成 27 年度は、平成 26 年度に引き続き 2 つの手法の検討を進めました。一つは、DiAna アルゴリズム<sup>注 48</sup>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、もう一つは、ArcGIS<sup>注 49</sup>の拡張機能である地形分析ツールを適用した手法です。今後は、この 2 つの手法の適用事例として坑道壁面に発達する EDZ 割れ目の方向解析とその可視化を進めていきます。

### 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ときに生じる微小振動（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 27 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

地層処分実規模試験施設を利用した研究開発、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、および人工バリアの搬送定置・回収技術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工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・定置に係わ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。

注48：DiAna 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のことです。

注49：Esri 社の地理情報システムソフトウェアの名称です。

平成 27 年度は、4.1.3 でも述べたように、平成 26 年度に引き続き、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、その様子を公開しました。また、緩衝材中に水がしみ込んで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を継続しました。また、原環センターが開発した、緩衝材除去装置を地層処分実規模試験施設に設置し、地上での試験に向けた準備を進めました。

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緩衝材の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、人工バリア性能確認試験の一部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。

人工バリアの搬送定置・回収技術に関する研究開発では、地下施設での原位置試験に向けて試験坑道 2 を利用した研究計画を検討するとともに、既設設備の移設などの試験坑道の整備に着手しました。

#### 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に、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（メタンガスや二酸化炭素ガス）の化学分析を行いました。その結果、メタンガスは主に微生物活動により二酸化炭素ガスが還元されて生成したものであることがわかり、また、地層の埋没から隆起後までの非常に長い時間にわたり微生物活動が継続していた可能性が示唆されました。

#### 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。今後、数値解析により詳細な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。

#### 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。また、地下水年代測定については、主に地下施設の坑道内で採取した地下水を対象とし、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行いました。

なお、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の内容については、3.1.2(4)で述べたとおりです。

幌延地圏環境研究所<sup>注50</sup>

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。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

DECOVALEXプロジェクト<sup>注51</sup>

試験坑道 4 で実施している、人工バリア性能確認試験を対象とした熱－水理－力学－化学連成挙動のデータを各機関に提供し、モデルによる連成挙動の評価を実施しました。また、平成 27 年の 10 月には国際交流施設において、評価についての技術検討会を実施しました。

モンテリ・プロジェクト<sup>注52</sup>

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 27 年度は、モンテリ岩盤研究所の調査坑道内に掘削したボーリング孔での原位置試験を継続しました。

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)<sup>注53</sup>定例会合 (平成 27 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を相互に比較可能なデータセット) の更新作業の状況について、諸外国の専門家らとの情報交換を行いました。

また、平成 27 年 10 月には、幌延深地層研究センター国際交流施設において IAEA (国際原子力機関) URF (地下研究施設) ネットワークの技術会合が開催され、各国の地下研究施設の調査研究や放射性廃棄物処分事業の現状に関する情報交換を行うとともに、地層処分概念の基礎に関する講義や演習が行われました。

注50：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。

注51：DECOVALEX は、地層処分システムの性能評価において重要な課題のひとつである熱－水理－力学－化学連成モデルの開発、検証を目的とした国際共同研究であり、室内試験や原位置試験などの同一の課題を対象として、各国の機関で開発、運用しているモデルやコードを用いて解析・評価を行うことにより、モデルやコードの高度化を目指すものです。本プロジェクトには、ドイツ、中国、アメリカ、スイス、フランス、韓国、イギリス、チェコおよび日本から 10 機関が参加しています。

注52：堆積岩を対象とした地層処分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。

注53：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。

## 参考文献

- (1) 花室孝広(編)：“幌延深地層研究計画 平成 27 年度調査研究計画”，JAEA-Review 2015-010, 2015, 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：“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.
- (3) 舟木泰智, 常盤哲也, 石井英一, 羽出山吉裕, 松尾重明, 津田和康, 小泉朗, 石川泰己, 大條裕一, 杉山和稔：“幌延深地層研究計画換気立坑先行ボーリング(PB-V01 孔)調査報告書；地質調査”，JAEA-Data/Code 2008-013, 2008, 65p.
- (4) 須甲武志, 高野仁, 内田雅大, 関陽児, 伊藤一誠, 渡部芳夫, 宗像雅弘, 田中忠夫, 天野健治：“幌延深地層研究施設周辺の地質環境情報に基づく地下水流動評価手法の検証に関する研究”，JNES-RE-2013-9032, 2013, 65p.
- (5) 花室孝広(編)：“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, 2014, 69p.
- (6) 花室孝広(編)：“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, 2015, 95p.
- (7) 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.
- (8) Ishii, E.：“Far-field stress dependency of the failure mode of damage-zone fractures in fault zones: Results from laboratory tests and field observations of siliceous mudstone”，Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol.121, 2016, pp.70-91.
- (9) 吉野浩光, 岸敦康, 横田秀晴：“幌延深地層研究計画における深層ボーリング孔を利用した長期水圧観測”，JAEA-Data/Code 2015-014, 2015, 42p.
- (10) Ishii, E., Hashimoto, Y. and Inagaki, D.：“Washout of clay-rich gouge in a pre-grouted fault zone and increase in groundwater inflow during tunnel excavation in Neogene siliceous mudstone (Horonobe, Japan)”，Proceedings of 10th Asian Regional Conference of IAEG, Tp3-P02, 2015.
- (11) 日本原子力研究開発機構：“平成 21 年度 地層処分技術調査等委託費 地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発 報告書”，2010.
- (12) 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 21 年度調査研究成果報告”，JAEA-Review 2010-039, 2010, 67p.
- (13) 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 地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発 報告書”，2009.

- (14) 中山雅, 澤田純之, 杉田裕(編): “幌延深地層研究計画 平成 22 年度調査研究成果報告”, JAEA-Review 2011-033, 2011, 80p.
- (15) 日本原子力研究開発機構: “平成 27 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”, 2016.
- (16) 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.
- (17) 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.
- (18) 谷口直樹, 川崎学, 杉田裕, 柴田雅博, 本田明: “第 61 回材料と環境討論会講演集”, B209, 2014.
- (19) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター: “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”, 2010.
- (20) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター: “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”, 2011.
- (21) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター: “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”, 2012.
- (22) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター: “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”, 2013.
- (23) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター: “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”, 2014.
- (24) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター: “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”, 2015.
- (25) 下茂道人, 熊本創, 伊藤章, 唐崎健二, 澤田淳, 小田好博, 佐藤久: “亀裂を有する堆積岩の水理・物質移行評価のためのデータ取得・解析(Ⅲ)”, JAEA-Research 2009-060, 2010, 70p.
- (26) Parkhurst, D.L., and Appelo, C.A.J.: “Description of input and examples for PHREEQC version 3 - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations”, U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 2013, 497p.
- (27) GoldSim Technology Group LLC: “GoldSim Contaminant Transport Module User’s Guide”, GoldSim Technology Group LLC, 2010.

付録

(平成 27 年度外部発表・研究開発報告書類)

\*著者アルファベット順に記載

青柳和平, 石井英一, 藤田朝雄, 本島貴之: “幌延深地層研究センターの立坑における掘削損傷領域の進展に関する検討”, 第 44 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集 (CD-ROM), 2016, pp. 313-318.

青柳和平, 川手訓: “幌延深地層研究計画; 平成 25 年度地下施設計測データ集”, JAEA-Data/Code 2015-017, 2015, 118p.

青柳和平, 櫻井彰孝, 丹生屋純夫: “幌延深地層研究センターの 250m 小型試錐座(南)における初期地圧測定”, JAEA-Data/Code 2015-011, 2015, 182p.

青柳和平, 櫻井彰孝, 丹生屋純夫: “幌延深地層研究センターの 250m 大型試錐座(西)における初期地圧測定”, JAEA-Data/Code 2015-012, 2015, 171p.

青柳和平, 櫻井彰孝, 丹生屋純夫: “幌延深地層研究センターの 350m ポンプ座における初期地圧測定”, JAEA-Data/Code 2015-010, 2015, 190p.

藤田朝雄, 青柳和平, 名合牧人: “情報化施工による大深度立坑掘削の中間評価; 幌延深地層研究計画地下研究施設整備(第 II 期)事業”, トンネルと地下, 46(7), 2015, pp. 481-489.

藤原利如, 片田偉奈雄, 星野雅人, 徳永博昭, 堀越秀彦: “幌延深地層研究センターゆめ地創館を活用したリスク・コミュニケーションについて(2014 年度)”, JAEA-Review 2015-035, 2016, 103p.

花室孝広(編): “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, 2015, 95p.

花室孝広(編): “幌延深地層研究計画; 平成 27 年度調査研究計画”, JAEA-Review 2015-010, 2015, 22p.

畑浩二, 丹生屋純夫, 青柳和平, 藤田朝雄: “マルチ光計測プローブを用いた幌延深地層研究センターの立坑掘削損傷評価”, 第 44 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集 (CD-ROM), 2016, pp. 319-324.

穂刈利之, 沖原光信, 岸敦康, 水野崇, 宮川和也: “試錐調査における地下水水質の時間的推移(2)”, 日本地下水学会 2015 年秋季講演会予稿集, 2015, pp. 38-43.

細谷真一, 石井英一, 菱谷智幸: “立坑掘削時の湧水に対する水圧応答を利用した水理特性の推定—幌延深地層研究センターにおける適用事例—”, 日本地下水学会 2015 年秋季講演会講演要旨, 2015, pp. 96-101.

- Inagaki, D., Tsusaka, K., Aoyagi, K., Nago, M., Ijiri, Y. and Shigehiro, M. : “Effective 3D data visualization in deep shaft construction” , Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress 2015 (WTC 2015)/41th General Assembly, 2015, 10p.
- Ishii, E. : “Predictions of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones from rock rheology; Preliminary results” , Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120(4), 2015, pp.2220-2241, DOI: 10.1002/2014JB011756.
- Ishii, E. : “Far-field stress dependency of the failure mode of damage-zone fractures in fault zones; Results from laboratory tests and field observations of siliceous mudstone” , Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121(1), 2016, pp.70-91, DOI: 10.1002/2015JB012238.
- Ishii, E., Hashimoto, Y. and Inagaki, D. : “Washout of clay-rich gouge in a pre-grouted fault zone and increase in groundwater inflow during tunnel excavation in Neogene siliceous mudstone (Horonobe, Japan)” , Proceedings of 10th Asian Regional Conference of IAEG (Internet), 2015, 4p.
- 石井英一, 松岡稔幸, 三枝博光, 竹内竜史: “岩石の強度・応力状態に基づく断層帯の透水性予測”, 日本応用地質学会平成 27 年度研究発表会講演論文集, 2015, pp.135-136.
- 亀村勝美, 藤田朝雄, 青柳和平, 名合牧人, 白瀬光泰, 菅原健太郎: “周回坑道掘削時の内空変位計測結果に基づく初期地圧の推定”, 第 44 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集 (CD-ROM), 2016, pp.109-114.
- 紀室辰伍, 桐島陽, 秋山大輔, 佐藤修彰, 水野崇, 天野由記, 南條功: “幌延深部地下水中のフミン酸のプロトン化反応機構について”, 第 31 回バックエンド夏期セミナー資料集, 2015, p.8.
- 小林正人, 齋藤雅彦, 岩谷隆文, 中山雅, 棚井憲治, 藤田朝雄, 朝野英一: “地層処分実規模設備運営等事業における工学技術に関する研究; 平成 26 年度成果報告(共同研究)”, JAEA-Research 2015-018, 2015, 14p.
- 草野友宏, 石井英一: “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割れ目データ集”, JAEA-Data/Code 2015-024, 2016, 6p.
- Miyakawa, K., Mizuno, T., Ishii, E., Hirota, A., Komatsu, D.D., Ikeya, K., and Tsunogai, U. : “Relative burial-depth-profiles of carbon isotope ratios of methane and carbon dioxide preserved for up to 1 million years” , Abstracts of 13th International Conference on Gas Geochemistry, 2015, pp.36-38.
- 中田弘太郎, 長谷川琢磨, 大山隆弘, 笹本広, 石井英一, 宮川和也: “幌延地域における地下水年代と地質年代・地史の比較検討”, 日本原子力学会 2016 年春の年会, 1E13, 2016.

- 中山雅, 大野宏和, 中山真理子, 小林正人: “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 26 年度), JAEA-Data/Code 2015-013, 2015, 53p.
- 丹生屋純夫, 青柳和平, 藤田朝雄, 白瀬光泰: “幌延深地層研究センターにおける原位置岩盤の強度・変形物性の検討”, 第 44 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集 (CD-ROM), 2016, pp. 336-341.
- 大野宏和, 武田匡樹, 松岡稔幸: “深層ボーリング孔を利用した地質学的調査および力学試験データ集(HDB-1~11 孔)”, JAEA-Data/Code 2015-021, 2016, 52p.
- 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.
- 櫻井彰孝, 青柳和平, 藤田朝雄, 本島貴之: “幌延深地層研究センターの 350m 調査坑道における原位置岩盤の長期変形挙動の計測”, JAEA-Data/Code 2015-023, 2016, 46p.
- Tanaka, S., Yokota, H., Ohno, H. and Nakayama, M., Fujita, T., Takiya, H., Watanabe, N. and Kozaki, T. : “Dipole tracer migration and diffusion tests in fractured sedimentary rock at Horonobe URL”, Proceedings of 23rd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-23) (DVD-ROM), 2015, 6p.
- 山崎雅直, 津坂仁和, 大谷達彦, 進士正人: “クラックテンソルによる現場スケールにおける透水係数の評価”, 土木学会論文集, F2 (地下空間研究) (インターネット), 71(1), 2015, pp. 1-10.
- 吉野浩光, 岸敦康, 横田秀晴: “幌延深地層研究計画における深層ボーリング孔を利用した長期水圧観測”, JAEA-Data/Code 2015-014, 2015, 42p.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(e)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr <sup>(e)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間には1:1の関係がある。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

