

幌延深地層研究計画 平成20年度調査研究成果報告

Horonobe Underground Research Laboratory Project
Investigation Report for the 2008 Fiscal Year

(編) 中山 雅 佐野 満昭 真田 祐幸 杉田 裕

(Eds.) Masashi NAKAYAMA, Michiaki SANNO, Hiroyuki SANADA and Yutaka SUGITA

地層処分研究開発部門
幌延深地層研究ユニット

Horonobe Underground Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate

November 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは独立行政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。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 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
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, 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, 2009

幌延深地層研究計画 平成20年度調査研究成果報告

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット
(編) 中山 雅、佐野 満昭[※]、真田 祐幸、杉田 裕

(2009年8月28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ます。平成20年度は平成17年度から開始した第2段階の4年目にあたります。

平成20年度は、「幌延深地層研究計画 平成20年度調査研究計画」に従って、調査研究および地上施設と地下施設の建設を進めました。研究開発は、従来通り、「地層科学研究」と地層処分研究開発」に区分して行いました。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ます。

幌延深地層研究計画の成果は、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きます。そのため、国内外の研究機関との連携を図り、大学などの専門家の協力を得つつ、本計画を着実かつ効率的に進めていきます。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きます。

**Horonobe Underground Research Laboratory Project
Investigation Report for the 2008 Fiscal Year**

(Eds.) Masashi NAKAYAMA, Michiaki SANO*, Hiroyuki SANADA and Yutaka SUGITA

Horonobe Underground Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received August 28, 2009)

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 2008 fiscal year (2008/2009), the 4th year of the Phase 2 investigations.

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 2008 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 organisations.

Keywords: Horonobe URL Project, High-Level Radioactive Waste, Geological Disposal Technology, Geoscientific Research

※ Collaborating Engineer

目 次

1. はじめに	1
2. 平成20年度の主な調査研究の進め方	2
3. 地層科学研究	5
3.1 地質環境調査技術開発	5
3.1.1 地質環境データの取得	5
3.1.2 地上からの調査・解析手法の妥当性確認と地質環境モデルの構築	18
3.1.3 調査技術・調査機器開発	21
3.2 地質環境モニタリング技術開発	27
3.2.1 ボーリング孔を用いたモニタリング技術開発	27
3.2.2 比抵抗モニタリング技術の適用性確認	28
3.2.3 遠隔監視システムの開発	31
3.3 深地層における工学的技術の基礎の開発	32
3.4 地質環境の長期安定性に関する研究	36
3.4.1 地質環境の長期的変遷に関する研究	36
3.4.2 地震研究	39
4. 地層処分研究開発	42
4.1 処分技術の信頼性向上	42
4.1.1 人工バリアなどの工学技術の検証	42
4.1.2 設計手法の適用性確認	44
4.2 安全評価手法の高度化	44
4.2.1 安全評価モデルの高度化	44
4.2.2 安全評価手法の適用性確認	46
5. 地下施設の建設	47
6. 地上施設の建設	49
7. 環境モニタリング	50
7.1 騒音・振動・水質・動植物に関するモニタリング調査	50
7.2 地下施設の建設に伴うモニタリング調査	52
8. 開かれた研究	57
8.1 国内機関との研究協力	57
8.1.1 大学などとの研究協力	57
8.1.2 その他の機関との研究協力	58
8.2 国外機関との研究協力	60
引用文献	61
付録	63

Contents

1. Introduction	1
2. Stance of 2008 investigation	2
3. Geoscientific research	5
3.1 Development of techniques for investigating the geological environment	5
3.1.1 Acquisition of geoscientific data	5
3.1.2 Evaluation of methodologies for investigation analysis and for modeling of the geological environment	18
3.1.3 Development of investigation techniques and equipment	21
3.2 Development of techniques for long-term monitoring of the geological environment	27
3.2.1 Development of monitoring techniques in boreholes	27
3.2.2 Applicability confirmation of specific resistance monitoring technique	28
3.2.3 Development of a remotely operated monitoring system	31
3.3 Development of engineering techniques for use in the deep underground environment	32
3.4 Studies on the long-term stability of the geological environment	36
3.4.1 Studies on long-term changes in the geological environment	36
3.4.2 Seismological studies	39
4. Research and development on geological disposal technology	42
4.1 Improving the reliability of disposal techniques	42
4.1.1 Verification of the engineered barrier technology	42
4.1.2 Conforming applicability of EBS design methodologies	44
4.2 Enhancement of safety assessment methodologies	44
4.2.1 Confirming the applicability of safety assessment methodologies	44
4.2.2 Confirming of the applicability of safety assessment methodologies	46
5. Construction of the underground facilities	47
6. Construction of the surface facilities	49
7. Environmental monitoring	50
7.1 Monitoring of noise, vibration, water property, flora and fauna	50
7.2 Monitoring the construction of the underground facilities	52
8. Collaboration with other research organizations	57
8.1 Collaboration with domestic research organizations	57
8.1.1 Collaboration with universities	57
8.1.2 Collaboration with other research organizations	58
8.2 Collaboration with overseas research organizations	60
References	61
Appendix	63

目 次

図 1	主なボーリング調査および観測装置の設置場所	3
図 2	研究所用地における主な施設と観測装置の配置	4
図 3	第1段階のデータに基づく稚内層中の断層の発達モデル	6
図 4	立坑における壁面の地質観察結果（展開図）	7
図 5	稚内層中の主要な水みち（割れ目）の例	8
図 6	水みち（割れ目）の方向性に関するボーリング調査結果	8
図 7	稚内層の割れ目スケッチ（換気立坑深度248m底盤西半部）	9
図 8	表層水理調査位置	10
図 9	河川流量観測および気象観測結果	10
図 10	地下施設近傍（HGW-2孔、HGW-3孔、HGW-V-4孔、HGW-E-3孔）の地下水位の経時変化	10
図 11	表層の水収支に関するデータをより精密に取得するための観測装置（ライシメータ）	11
図 12	PB-V01孔における水理試験結果	11
図 13	換気立坑の集水リングにおける地下水の水質モニタリング結果	13
図 14	東立坑の集水リングにおける地下水の水質モニタリング結果	15
図 15	初期地圧測定実施位置図	17
図 16	三次元初期地圧の評価結果	17
図 17	既存の初期地圧測定結果との比較	18
図 18	地質構造モデル	19
図 19	坑道周辺の地球化学反応と岩石鉱物の変化量	20
図 20	坑道周辺の溶存ガスの脱ガスにより形成される不飽和帯の広がりについての予測結果	20
図 21	切羽からの深さと鉛直変位の関係（換気立坑）	21
図 22	水平坑道壁面から掘削したボーリング孔の間隙水圧の観測結果	22
図 23	各試験区間の透水係数の分布（速報値*）	23
図 24	周波数の高いノイズの例（2008年9月データ）	24
図 25	解析結果および計測データに含まれる気圧、潮汐成分の例	24
図 26	ノイズ除去後の総合傾斜角と傾斜方位角の例	25
図 27	換気立坑方向に向かう傾斜量	25
図 28	光ファイバー式地中変位計の構成	26
図 29	沿岸域での塩分濃度分布の推定例	27
図 30	モデル化、解析の手順、判断根拠の整理例	27
図 31	HDB-6孔および9孔における地下水の間隙水圧の測定結果	28
図 32	電気探査の測線配置	28
図 33	電気探査で得られた見掛け抵抗分布（測線1）	29
図 34	電気探査で得られた見掛け抵抗分布（測線2）	30
図 35	遠隔監視システムの観測機器配置図	31
図 36	電磁波についてのシミュレーション結果の例	32
図 37	日常管理計測およびステップ管理計測の主要な項目および取得データの分析・評価の流れ	33
図 38	計測結果の一例	34
図 39	模型実験の模式図（温度変化の測定）	34
図 40	模型実験による温度変化測定結果の一例	35
図 41	温度変化解析結果の一例（立坑2本・水平坑道2本モデル）	35
図 42	北進地区の地質、段丘および地すべり地形の分布（上）、各地層の地形断面図（下）	37
図 43	浜里地区の北部に分布する砂丘の地形と年代	37
図 44	過去約150万年間の地形・地質構造の変遷	38
図 45	地下水流動と塩分濃度の長期的変遷の解析例	38
図 46	北海道北部地域で発生した地震の震源分布	40
図 47	平成20年10月4日16時24分頃に上幌延観測点地上（左図）および地下（右図）地震計で記録された南北方向成分の地震波形	40

図 48	数値解析によって推定した大曲断層の活動に伴う北海道北部地域の鉛直変動量	40
図 49	大曲断層より東側の地点における過去の岩石の方位	41
図 50	低アルカリ性グラウト材料の原位置試験計画位置	43
図 51	緩衝材定置試験設備の概念図と把持装置	43
図 52	岩石および粘土鉱物へのセシウムの収着分配係数とカリウム濃度との関係	46
図 53	地下施設関連設備の状況	47
図 54	掘削土(ズリ)置場の盛土・保管状況	47
図 55	国際交流施設(仮称)	49
図 56	環境モニタリング調査位置	50
図 57	掘削土(ズリ)置場とその周辺の水質モニタリング調査位置	53
図 58	天塩川の水質モニタリング調査位置	53

表 目 次

表 1	策定した情報化施工プログラムに基づく計測データの分析・評価結果の反映先	33
表 2	HFSCを用いた覆工コンクリートの基本配合	43
表 3	HFSCを用いた覆工コンクリートの目標性能および試験結果	43
表 4	掘削土(ズリ)モニタリング調査結果(土壌溶出量:公定分析)	48
表 5	環境モニタリング調査実施内容(平成20年度)	51
表 6	確認された重要種(魚類)	51
表 7	モニタリング調査項目と結果	52
表 8	地下施設の建設に伴う水質モニタリング調査項目	53
表 9	地下施設からの排水に係るモニタリング調査結果(水質分析:公定分析)	54
表 10	掘削土(ズリ)置場とその周辺の地表水の水質モニタリング調査結果	54
表 11	清水川の水質モニタリング調査結果	55
表 12	天塩川の水質モニタリング調査結果	56

1. はじめに

独立行政法人^{*1}日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）が、北海道幌延町で実施している幌延深地層研究計画は、平成17年10月に原子力委員会が公表した「原子力政策大綱」^{*2}に示された「深地層の研究施設」計画のひとつであり、堆積岩を対象に深地層の研究を行うものです。

「原子力政策大綱」においては、「日本原子力研究開発機構を中心とした研究開発機関は、深地層の研究施設等を活用して、深地層の科学的研究、地層処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化等に向けた基盤的な研究開発、安全規制のための研究開発を引き続き着実に進めるべきである」と述べられており、幌延深地層研究計画の重要性が示されています。幌延深地層研究計画では、ここで示された「深地層の科学的研究」については「地層科学研究」、また、「地層処分技術の信頼性向上」と「安全評価手法の高度化」については「地層処分研究開発」として研究開発を進めています。

また、文部科学省と経済産業省が平成17年10月に公表した「独立行政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（中期目標）」（以下、中期目標）^{*3}では、「深地層の研究計画について、中間的な深度までの坑道掘削時の調査研究を進める。あわせて工学技術や安全評価に関する研究開発を他の研究開発機関と連携して実施し、これらの成果を地層処分の安全性に係る一連の論拠を支える知識ベースとして体系化する」ことが目標として掲げられ、幌延深地層研究計画を着実に推進することとなっています。

本文中に“*番号”で示した用語はページの下部に説明を示しています。また、“(番号)”で示したものは、引用文献で、巻末に著者名、文献名などを示しました。

*1：独立行政法人通則法 第二条には、『この法律において「独立行政法人」とは、国民生活及び社会経済の安定等の公共上の見地から確実に実施されることが必要な事務及び事業であって、国が自ら主体となって直接に実施する必要のないもののうち、民間の主体にゆだねた場合には必ずしも実施されないおそれがあるもの又は一の主体に独占して行わせることが必要であるものを効率的かつ効果的に行わせることを目的として、この法律及び個別法の定めるところにより設立される法人をいう』と規定されています。

*2：原子力政策大綱は、国の原子力委員会が、今後10年程度の期間をひとつの目安とした、原子力の研究、開発および利用に関する基本的な考え方を明らかにしたものです。（<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/tyoki.htm>）

*3：中期目標の対象としている期間は平成17年10月1日から平成22年3月31日までの4年6ヶ月間です。

2. 平成20年度の主な調査研究の進め方

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おり、平成20年度は、平成17年度に開始した第2段階の4年目にあたります。

平成20年度は、「幌延深地層研究計画 平成20年度調査研究計画」⁽¹⁾に従って、調査研究および地上施設と地下施設の建設を進めました。

調査研究は、これまでと同様に、「地層科学研究」と「地層処分研究開発」に区分して行いました。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4項目の研究課題を設定し、「地層処分研究開発」では、処分技術の信頼性向上、安全評価手法の高度化という2項目の研究課題を設定しています⁽²⁾。

地下施設の建設では、換気立坑の深度約250mおよび東立坑の深度約140mまで掘削し、水平坑道の一部掘削を行いました。地上施設の建設では、国際交流施設の建設工事を開始しました。また、研究所設置地区周辺や天塩川において環境モニタリングを継続しました。

原子力機構が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 1に、研究所用地内の主な施設と観測装置の配置を図 2に示します。

幌延深地層研究計画の成果は、原子力機構におけるほか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きます。そのため、国内外の研究機関との連携を図り、大学などの専門家の協力を得つつ、本計画を着実かつ効率的に進めます。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ます。参考資料として、巻末に平成20年度の学会などへの発表実績を掲載しました。

以下に、平成20年度に実施した主な調査研究の成果および地上施設と地下施設の建設について報告します。

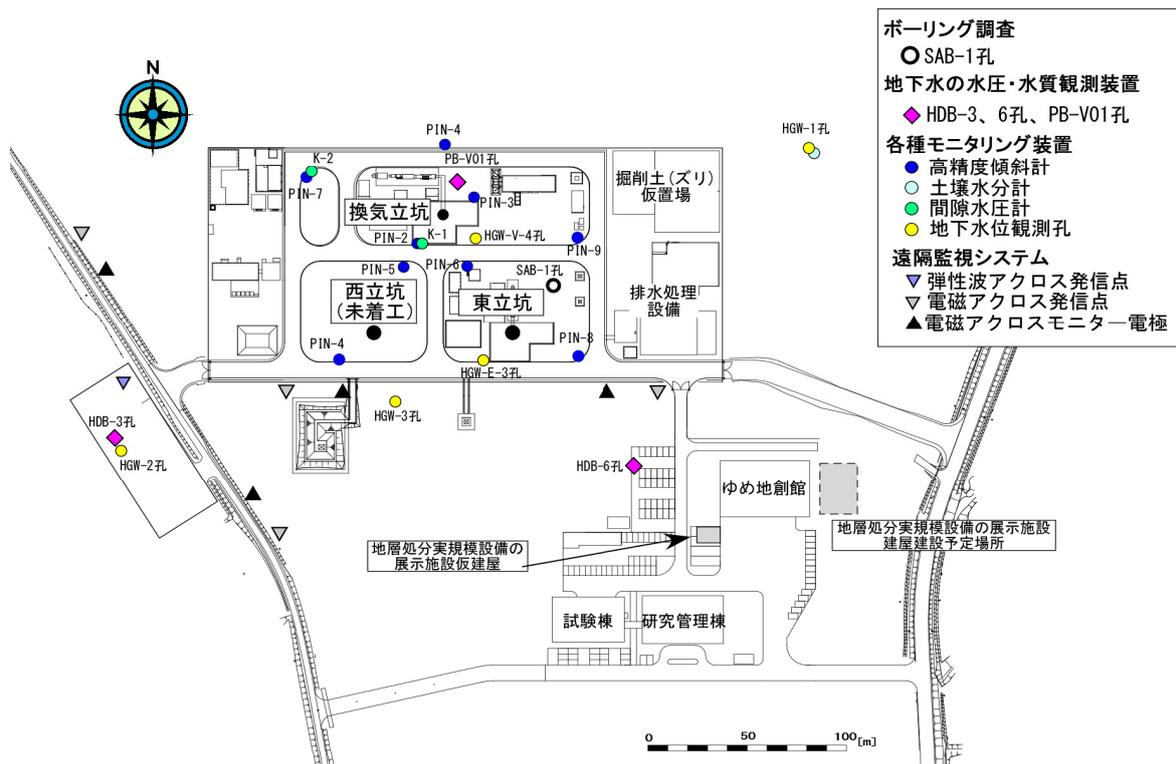


図 2 研究所用地における主な施設と観測装置の配置

3. 地層科学研究

3.1 地質環境調査技術開発

3.1.1 地質環境データの取得

(1) 地質構造

坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階）では、地上からの調査研究段階（第1段階）の調査結果に基づく地下施設周辺の地質構造モデルの妥当性確認と更新を目的として、坑道内における地質観察などにより地層の分布や割れ目の発達状況を把握することとしています。第1段階の調査結果に基づくモデルでは、1) 声問層中の割れ目は連続性・連結性（あるいは開口性）に乏しく、割れ目が多くあっても地下水の流れには影響しない性質を持つこと、2) 稚内層中の割れ目は層理面にほぼ平行な割れ目（研究所設置地区では北西—南東走向で南西傾斜）と層理面に高角な割れ目（同地区では東西走向で高角度傾斜）に大別され、後者の割れ目の一部が稚内層中の主要な水みち（割れ目）として機能していること、3) 稚内層の浅部（概ね深度400m以浅）においては上記の層理面に高角な割れ目が、断層（破碎物を含みせん断割れ目）として成長する際に、断層から派生する引張割れ目（スプレークラック）が形成されやすく（図 3）、これらの断層/割れ目のネットワークが稚内層浅部の高透水ゾーンを形成している可能性が高いこと、などが推定されました。第2段階ではこれらのモデルの妥当性確認と更新を行うことが重要となります。

平成20年度は、上記の割れ目に関するモデルの妥当性確認と更新を目的として、平成19年度に引き続き坑道壁面/底盤における地質観察と、換気立坑先行ボーリング（PB-V01孔、図 2参照）から取得した地質データの解析を行いました。図 4に立坑の地質観察結果を示します。

換気立坑における声問層と稚内層の境界が深度約247mであることを確認するとともに、換気立坑の深度約20～約247mと東立坑の深度約20～約140mにおける声問層の地質観察の結果、稚内層との境界付近（換気立坑の深度約200～約247m）では長さ数m以上の連続性・連結性を有する断層が複数認められたものの、全深度を通じて観察された割れ目の大部分は連続性・連結性に乏しい割れ目（長さ数十cm程度）であり、湧水箇所も稚内層との境界付近以外では認められませんでした（図 4）。この結果は声問層の割れ目は多数存在しても地下水の流れに影響しない性質を持つとする第1段階のモデルと整合的と言えます。なお、稚内層との境界付近に認められた断層の連続性（広がり）については、これらの断層の深度・方向性・産状に対応する割れ目がPB-V01孔（換気立坑中心との距離：約17m）に認められなかったことから、概ね数m～十数m程度と推定されます。

一方、換気立坑の深度約247～約250mにおける稚内層の地質観察の結果、層理面に高角な断層/せん断割れ目/引張割れ目（東西走向～北東-南西走向）からの湧水（約1 l/min以下）が複数の箇所でも認められ、掘削深度がこの部分を通じた後には、換気立坑からの湧水量が約20m³/日から約80m³/日へと上昇しました。この結果は、稚内層中の主要な水みち（割れ目）が層理面に高角な割れ目であるとする第1段階のモデルと整合しています。同様の結果は換気立坑の底盤から掘削した鉛直ボーリング孔とPB-V01孔からも得られ、前者の鉛直ボーリング孔では掘削中に観測された湧水箇所（約5 l/min以下）に、層理面に高角な引張割れ目が認められ（図 5）、後者のPB-V01孔では流体電気伝導度検層から検出された地下水の流出入深度（計18箇所）付近に認められる割れ目が、いずれも層理面に高角な断層/せん断割れ目/引張割れ目（東西走向で高角度傾斜）であることが確認されました（図 6）。さらに、換気立坑の深度248mにおける底盤の地質観察などでは、第1段階のモデルで予測されたスプレークラックの発達が層理面に高角な断層沿いに認められたほか、それらの断層が応力的に共役な関係で互いに連結し合っていることなどが新たに認められました（図 7）。このような引張割れ目を伴う断層の発達状況は、稚内層のような堆積岩における高透水ゾーンの形成メカニズムや分布を明らかにする上で重要な情報になると考えられます。

上記のように、平成20年度は、坑道壁面/底盤の地質観察や立坑周辺のボーリング調査の結果に基づいて、立坑近傍の地表から深度約250mまでの地層の分布や割れ目の発達状況を把握することができました。今後も同様な調査を行い、第1段階のモデルを確認・更新するためのデータを取得していく予定です。

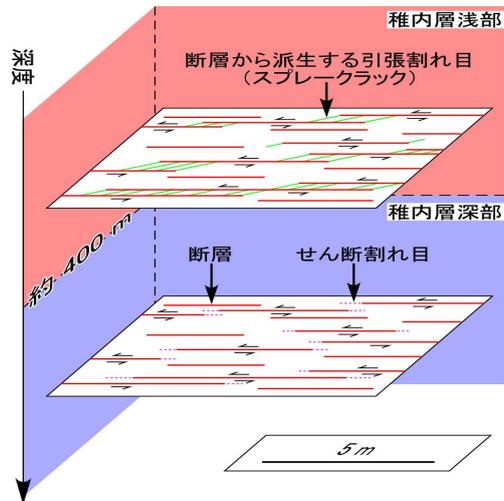


図 3 第1段階のデータに基づく稚内層中の断層の発達モデル

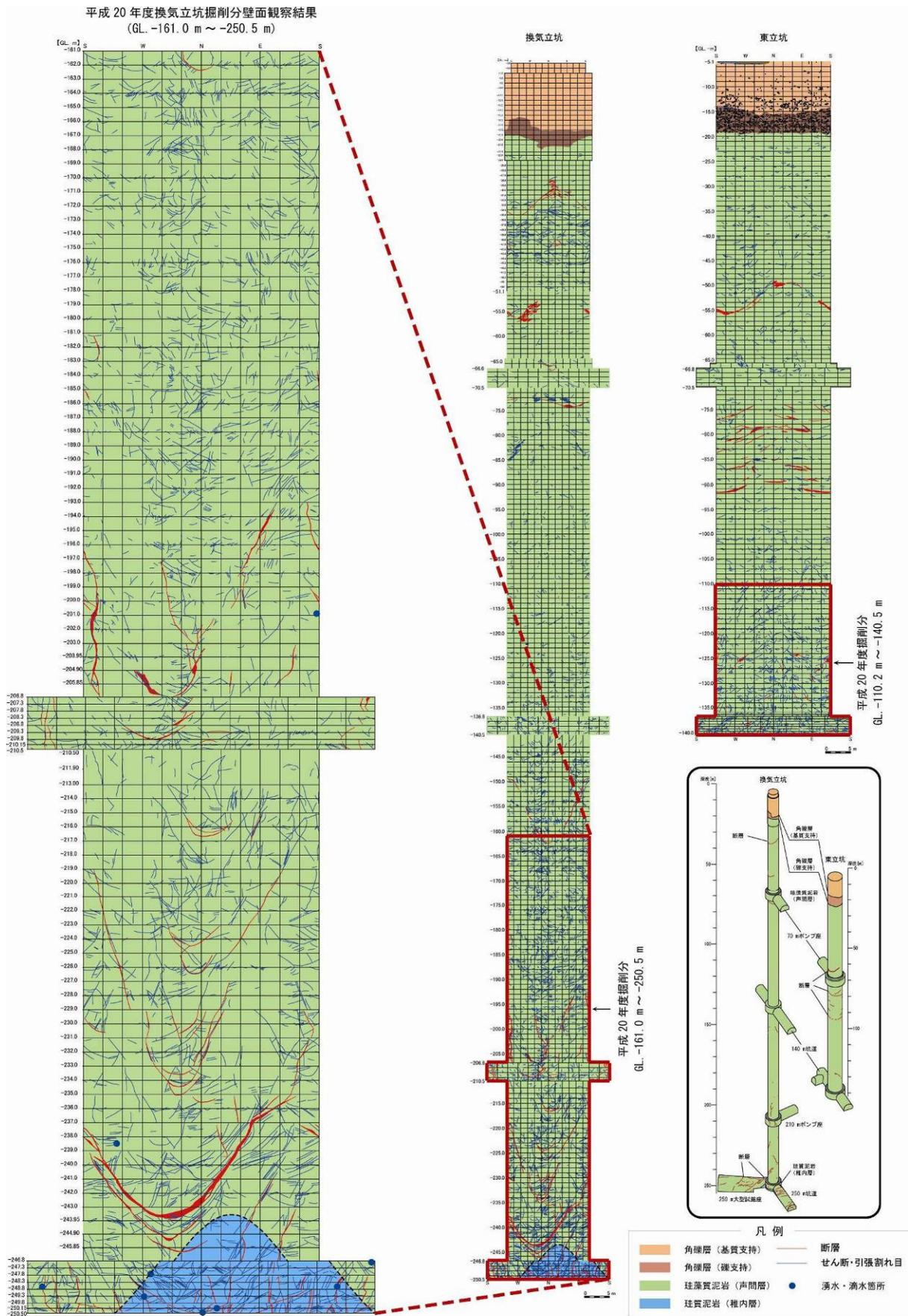


図 4 立坑における壁面の地質観察結果 (展開図)

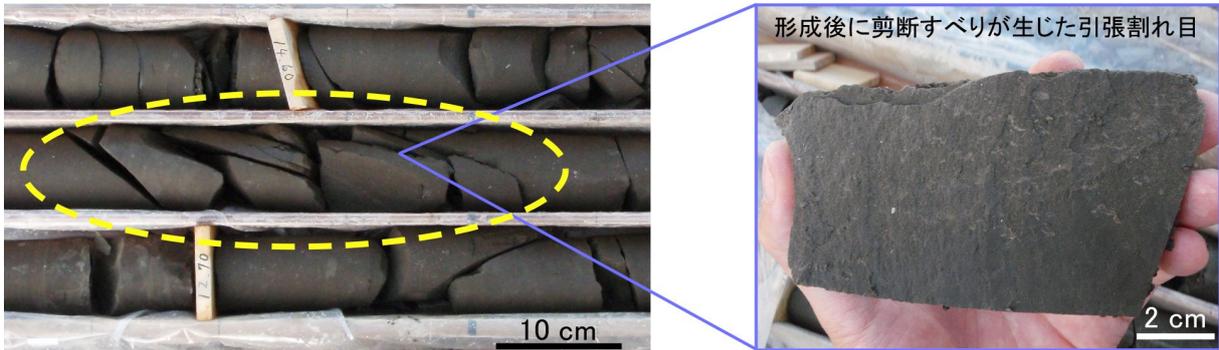


図 5 稚内層中の主要な水みち（割れ目）の例
換気立坑底盤からの鉛直ボーリング孔で観測された湧水割れ目（深度248.6m）

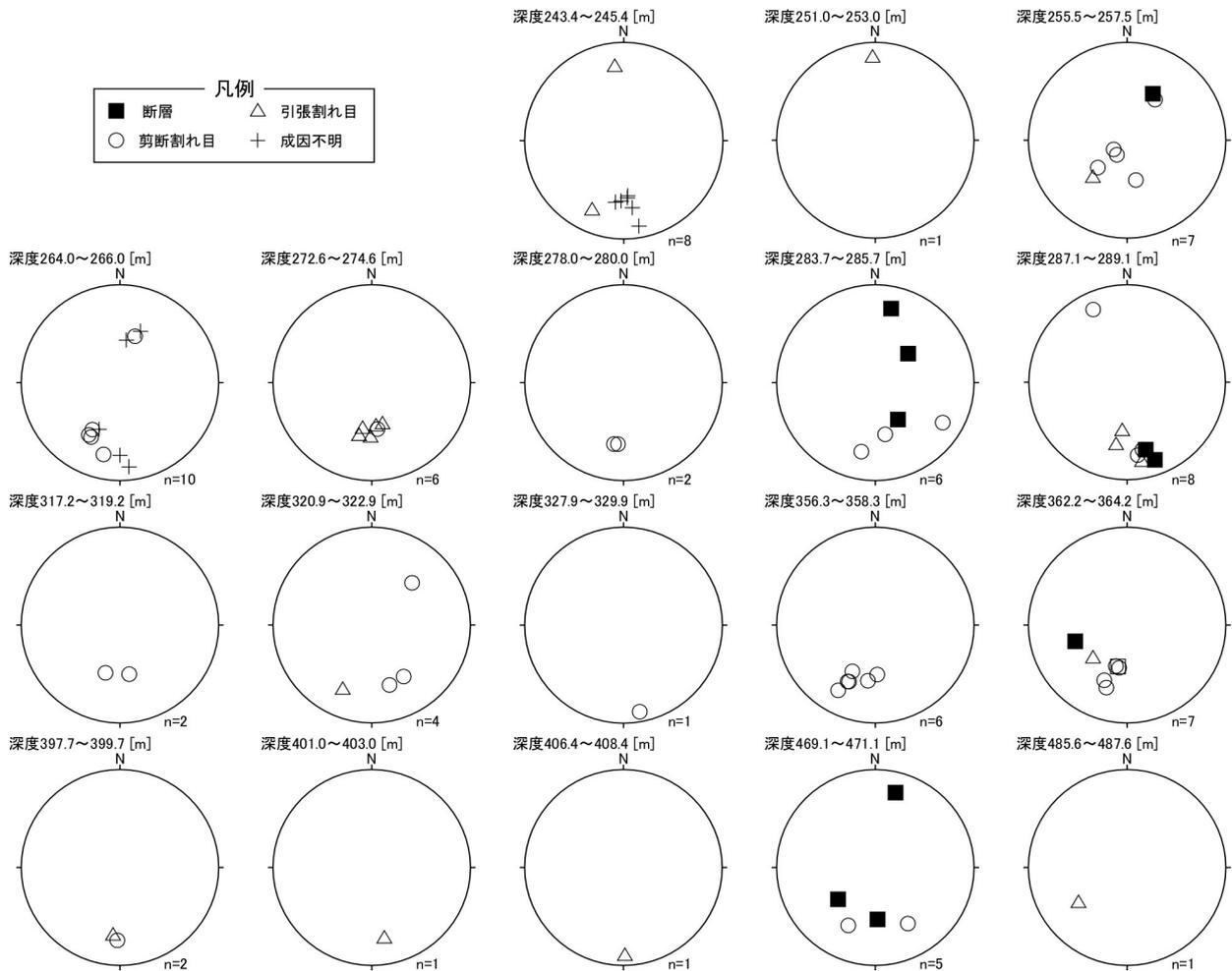


図 6 水みち（割れ目）の方向性に関するボーリング調査結果
PB-V01孔における流体電気伝導度検層により検出された稚内層中の地下水の流出入深度（計18深度）付近に認められる割れ目の方向性（下半球投影図）

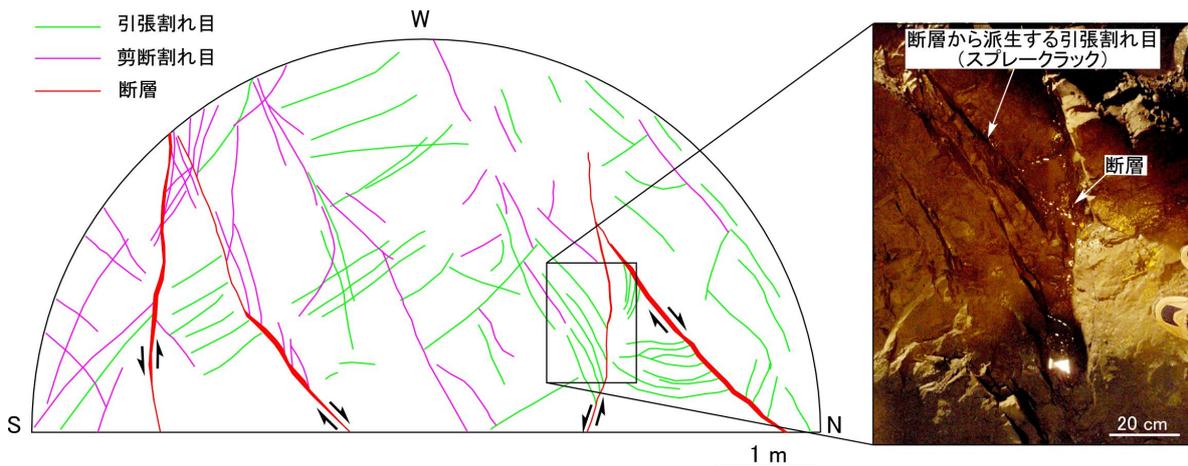


図 7 稚内層の割れ目スケッチ（換気立坑深度248m底盤西半部）
北東－南西走向と東西走向の、層理面に高角な断層が連結する。

(2) 岩盤の水理

第2段階では、表層水理調査や第1段階で掘削したボーリング孔での地下水位観測を継続するほか、地下施設などを利用した立坑周辺の岩盤の透水性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情報に基づいて、第1段階の調査手法、予測結果の妥当性を確認するとともに、地下水の流れを理解するための調査手法の検討とその適用性の確認を行っています。

平成20年度は、平成17年度までに整備した気象観測所や河川流量観測地点（図 8）での降水量および、積雪深、気温・水温、河川流出高^{*4}の観測（図 9）や、これらの観測結果に基づく地下水涵養量（雨や雪などの降水が地下にしみ込む量）の推定における誤差などの検討のほか、研究所設置地区およびその周辺における表層部の地下水の流れを把握するため、浅層ボーリング孔（図 2）を利用した地下水位観測を継続しました⁽³⁾。これまでの地下水位観測の結果のうち、地下施設近傍の例を図 10に示します。この結果からは、地下施設の建設に伴うと考えられる地下水位への顕著な変化は認められませんでした。また、これまでに得られた地下水涵養量の推定結果の信頼性を評価するため、降水量、蒸発散量^{*5}などの表層の水収支に関するデータをより精密に取得するための観測装置（ライシメータ^{*6}）を北進気象観測所に新たに設置し、観測を開始しました（図 11）。

今後、各観測を継続し、ライシメータでの観測結果をこれまでの観測結果などと比較することにより、各観測結果の精度向上や信頼性について検討する予定です。また、地下施設の建設が立坑周辺の表層部の地下水流動に与える影響についても引き続き検討を行っていく予定です。

また、平成20年度は、PB-V01孔で実施した水理試験⁽⁴⁾の結果（図 12）について、第1段階で得られた岩盤の透水性などに関する知見との対比を行いました。第1段階の調査研究では、研究所設置地区およびその周辺における稚内層の透水係数の値は $10^{-11} \sim 10^{-5} \text{m/s}$ 程度の広い幅があること、深部ほど透水係数が低くなる傾向が認められること、全水頭分布がボーリング孔の地表の標高よりわずかに高い状態にあることなどが分かっています⁽⁵⁾。PB-V01孔での水理試験の結果（図 12）から、稚内層の透水係数の値の幅が広いことや、全水頭が地表の標高より概ね7～17m高い値を示すことなど、第1段階の調査研究結果と整合的であることが確認されました。一方で、深部ほど透水係数が低くなる傾向は、明瞭には認められませんでした。稚内層の浅部（深度236.5～350m付近）では他の深度に比べて透水性が高い結果が得られており、地下施設の建設においても、3.1.1(1)で述べたように、換気立坑の深度約247m付近から、湧水量（排水処理量）の増加が確認されている。

*4：河川流出高は、河川流量を流量観測地点から上流の流域面積で割った値で、降水量と同じく mm で表します。今回の試算では、P-3、P-4、P-5 流域からの流出高の加重平均値を用いています。

*5：蒸発散とは、湖沼などからの水面蒸発、土壌からの蒸発と、主に植物の葉からの蒸散の総称です。蒸発散量は、風速、気温、湿度などの気象データから推定することができます。

*6：周囲と同じ土壌を詰めた容器を地中へ埋設し、重量などを計測することにより降水量や蒸発散量などの水収支に関するデータを直接求める装置です。

ます。今後、地層の分布や割れ目の発達状況などとの関係を検討する予定です。

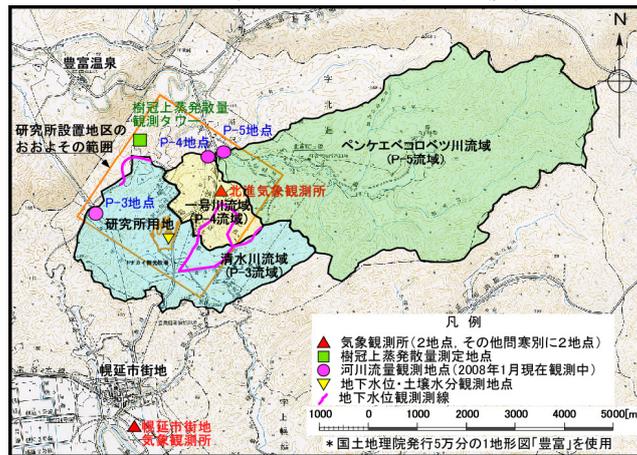


図 8 表層水理調査位置

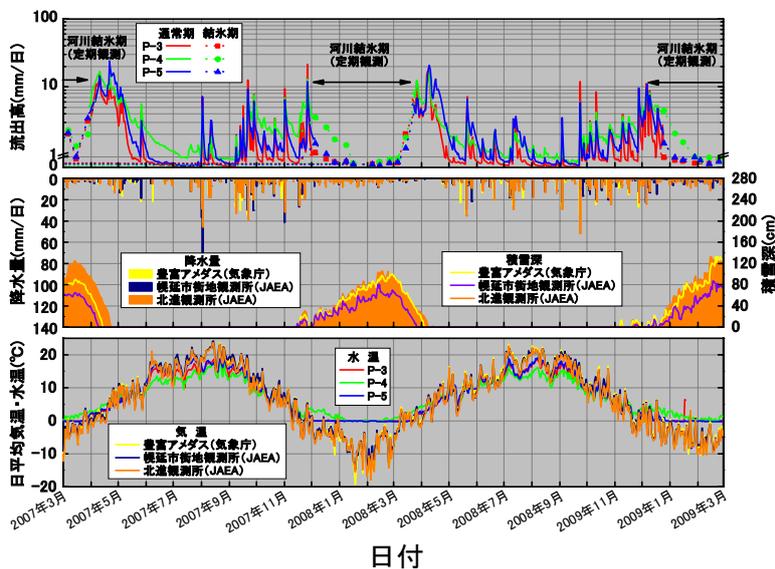


図 9 河川流量観測および気象観測結果

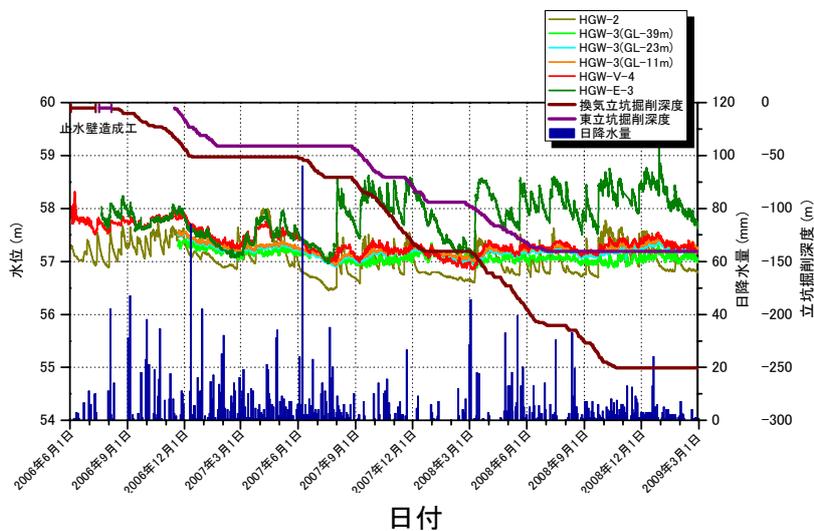


図 10 地下施設近傍 (HGW-2孔、HGW-3孔、HGW-V-4孔、HGW-E-3孔) の地下水位の経時変化

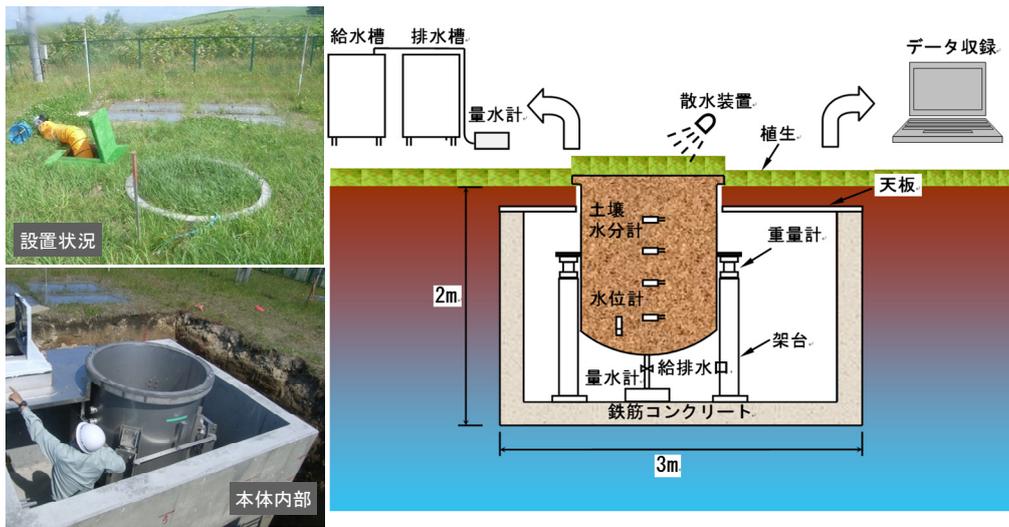


図 11 表層の水収支に関するデータをより精密に取得するための観測装置（ライシメータ）

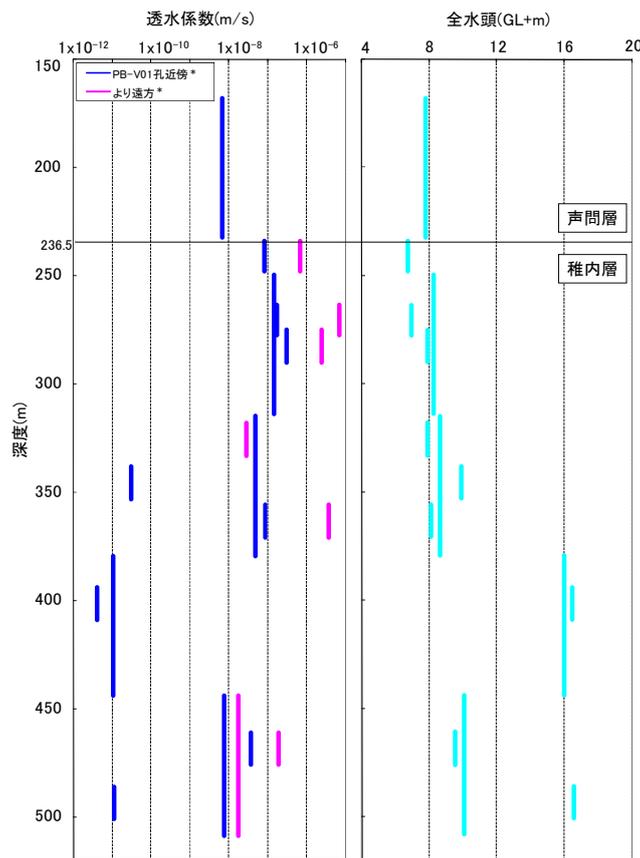


図 12 PB-V01孔における水理試験結果

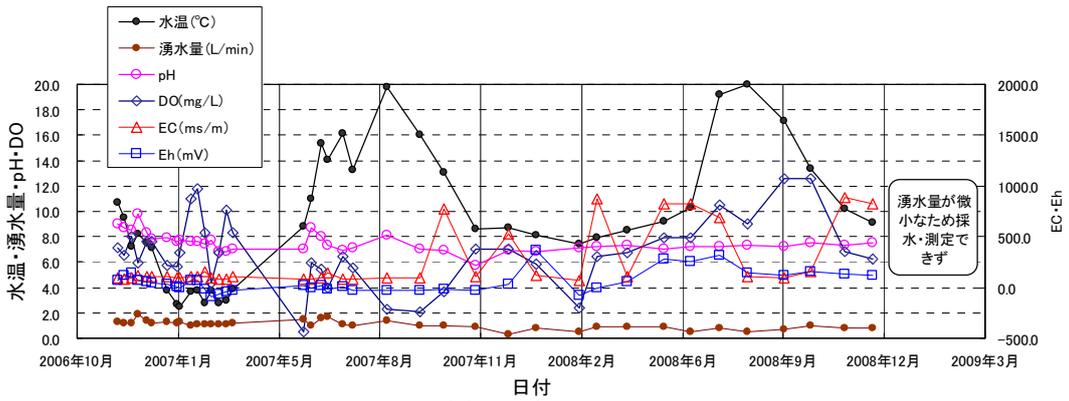
*実施した異なる水理試験方法により得られた結果のうち、PB-V01孔近傍の岩盤の透水係数を表していると考えられるものを「PB-V01孔近傍」、より遠方までの岩盤の透水係数を表していると考えられるものを「より遠方」と表現しました。

(3) 地下水の地球化学

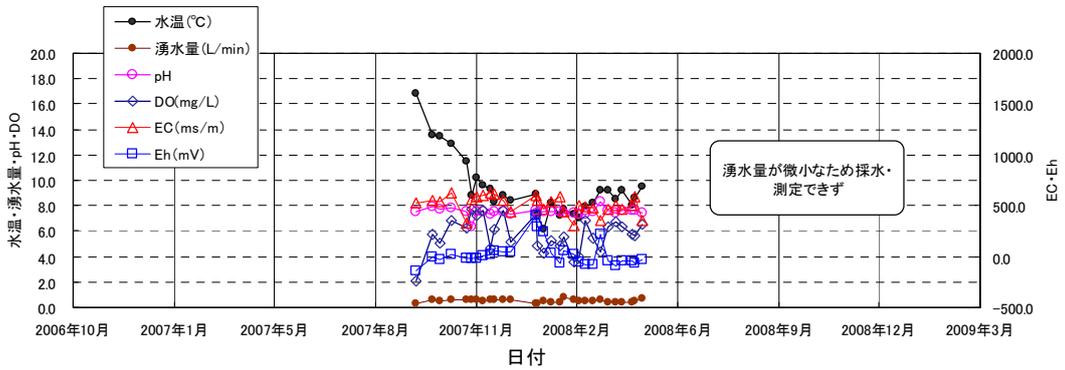
第2段階における地下水の地球化学に関する調査試験では、第1段階で推定した地下水の水質の空間分布および地下施設の建設に伴い生じる地下水の水質変化を確認することを目的としています。このためのひとつとして、坑道内において地下水の水素イオン濃度 (pH) や酸化還元電位 (Eh) などを測定するための装置を製作し、その適用性の確認を行うとともに、坑道近傍の地下水の水質変化を把握することとしています。

平成20年度は、換気立坑および東立坑に設置した集水リングによる地下水の水質モニタリングを継続するとともに、換気立坑の深度140m小型試錐座において坑道内から掘削したボーリング孔から得られた地下水のpHやEhなどの測定を行いました。

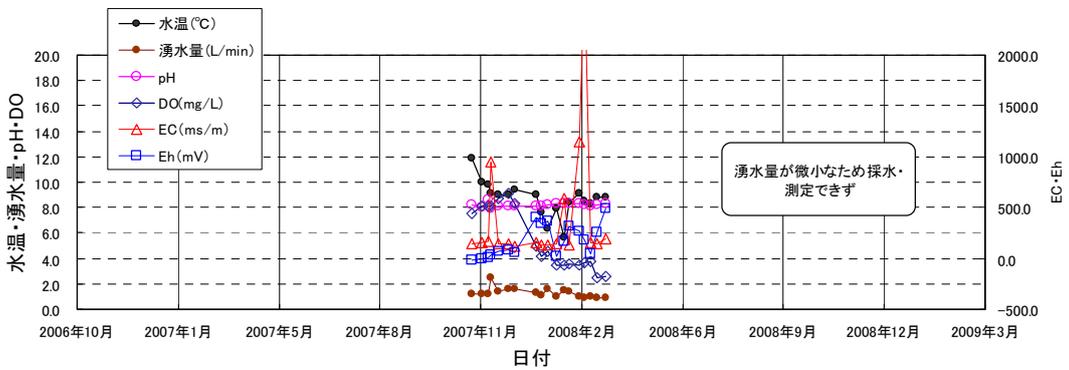
平成20年度までに換気立坑および東立坑に設置した集水リングによる水質モニタリング結果をそれぞれ図 13および図 14に示します。一部の集水リングにおいては地下水の湧水量が少なくEhや溶存酸素濃度 (DO) の値が安定しない状態ですが、一定の湧水量がある集水リングにおいては、大気中の酸素や脱ガスによる影響を受けにくい電気伝導度 (EC) の値が安定してきました。また、換気立坑の深度140m小型試錐座においてボーリング孔からの湧水を対象として、空気に触れない状態でpHやEhなどの連続観測を行いました。その結果、この深度の地下水が中性のpH (約7.6)、強還元状態 (Eh: 約-280mV) にあることが明らかになりました。このような地下水の化学的性質は、坑道周辺の地下水の坑道への流入や坑道から岩盤への空気の浸入により、徐々に変化していくと予想されます。今後、長期的に地下水の水質の観測を行い、その変化のプロセスやメカニズムを坑道周辺の地質や地下水の流れ方も踏まえた解析に利用します。



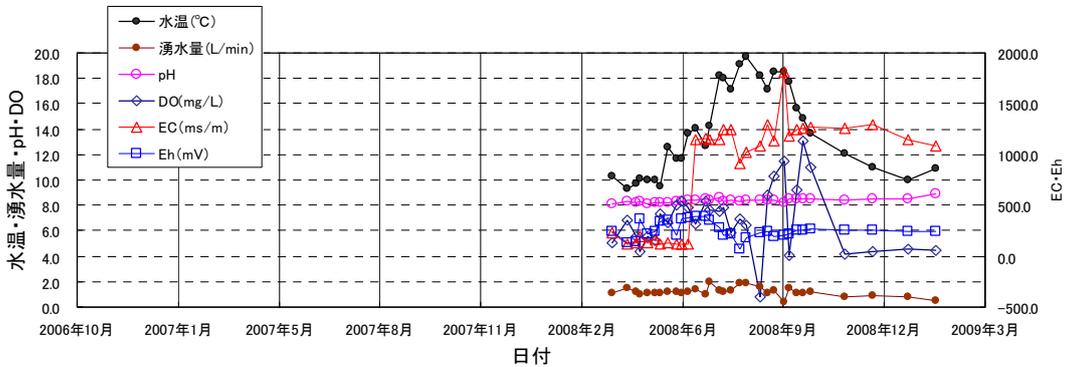
(a) 深度28.5m



(b) 深度63.8m

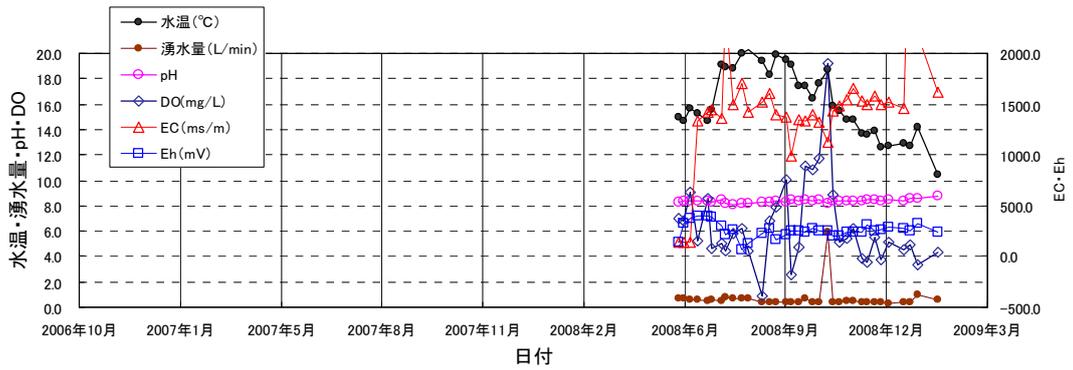


(c) 深度98.0m



(d) 深度133.8m

図 13 換気立坑の集水リングにおける地下水の水質モニタリング結果 (1/2)



(e) 深度168.0m

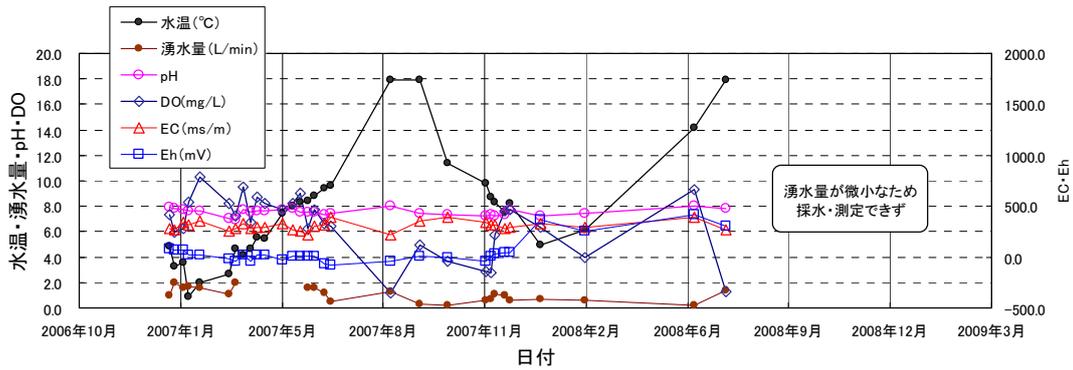


(f) 深度202.0m

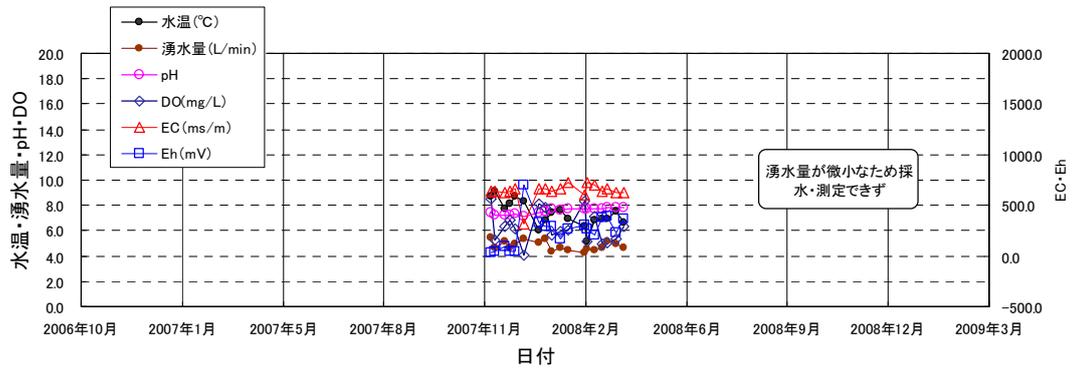


(g) 深度242.0m

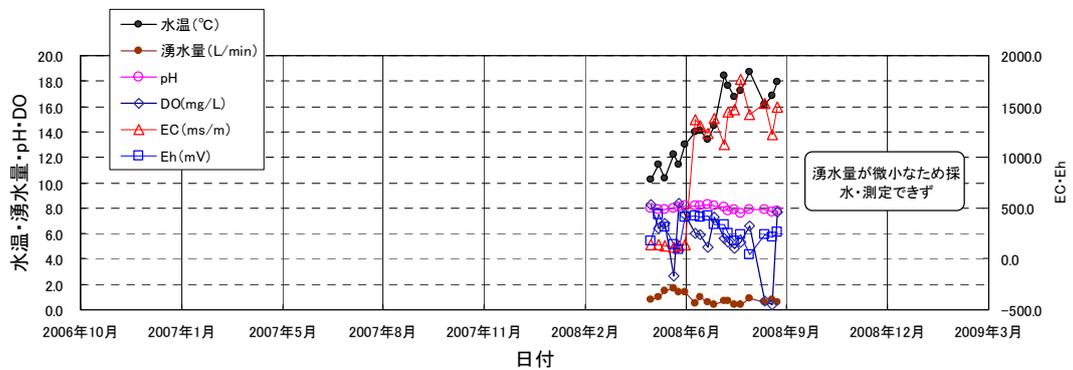
図 13 換気立坑の集水リングにおける地下水の水質モニタリング結果 (2/2)



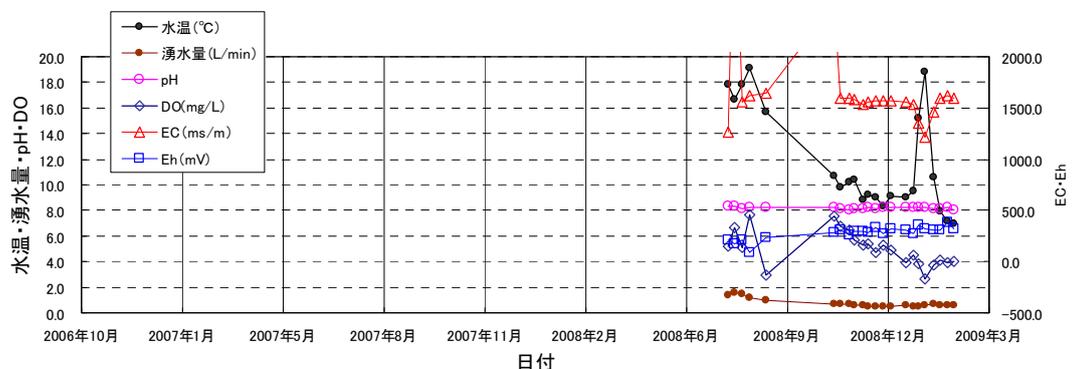
(a) 深度27.0m



(b) 深度63.9m



(c) 深度100.0m



(d) 深度132.0m

図 14 東立坑の集水リングにおける地下水の水質モニタリング結果

(4) 岩盤力学

平成20年度は、平成19年度の換気立坑の深度140m小型試錐座での測定に引き続き、東立坑の深度140m小型試錐座において掘削した図 15中の④～⑥孔の3本のボーリング孔において、水圧破碎法による初期地圧測定を実施しました。

④～⑥孔では、水圧破碎法から得られた孔壁形状の型取記録より、ボアホールブレイクアウト^{*7}と考えられる孔壁の連続的な破壊が認められました。この現象は、平成19年度に実施した、換気立坑側の①～③孔でも認められました。

平成19年度に実施した初期地圧の評価は、水圧破碎法による方法と、ボアホールブレイクアウトによる方法で別々に行いました。しかし、平成20年度に実施した評価では、これら2つの方法により別々に評価するより、両方の結果を一度に用いて評価することで信頼性が向上することが分かりました。そこで、平成19年度に実施した試験結果に対しても、両方の結果を一度に用いる方法を適用し、再評価を実施しました。

図 16に三次元初期地圧の評価結果を示します。図 16に示した主応力の下半球投影図より、換気立坑と東立坑の深度140mにおける主応力の方向と大きさには比較的良い一致が認められることが分かりました。

また、図 17は、これまで地上から実施したボーリング調査（HDB-1、3、6、8、11孔）より得られた初期地圧測定結果と深度140mの小型試錐座で実施した測定結果を水平面内の主応力として表示し、比較したものです。図 17(a)より、換気立坑と東立坑の深度140mにおける水平面内の最大主応力値は、その深度分の岩盤の重さにはほぼ一致しているものの、水平面内の最小主応力値については、小さな値となっています。図 17(b)より、水平面内の最大主応力の方向については、これまで、地表から地下700m程度までは、ほぼ東西方向であるとの結果が得られていましたが、平成19、20年度の結果からは、東西方向から反時計回りにそれぞれ46°と26°の方向となりました。これまでの傾向と異なる原因については、今後、声問層および稚内層を対象とした水平坑道での初期地圧測定を順次行い、データを蓄積して検討を行っていく予定です。

また、水平坑道の掘削に伴う坑道周囲の掘削影響領域^{*8}の特性を評価するために、力学試験用ボーリング孔（図 15(a)参照）を掘削して、弾性波トモグラフィ^{*9}による調査を実施し、坑道掘削前の初期値を取得しました。今後、坑道掘削によって生じる周辺岩盤の弾性波の速度変化の範囲と程度を継続して調査していきます。

*7：ボーリング孔周辺の最大圧力と最小圧力に差がある場合、ボーリング孔の掘削によって孔周辺に生じた圧力集中で、最小圧力がかかっている場所に破壊が生じ、それが孔軸方向に連続して生じる現象です。

*8：坑道を掘削することにより坑道の周囲に発生する坑道掘削前と状態が変化する領域のことをいいます。岩盤の強度が低下するような力学的な変化、間隙水圧が低下するような水理学的な変化、酸素が触れることによる地球化学的な変化などが起こります。

*9：岩盤内の決められた領域の周囲に受振器と発振器を設置し、色々な測線の弾性波の速度を計測することにより、領域内の弾性波速度分布を画像化する技術です。

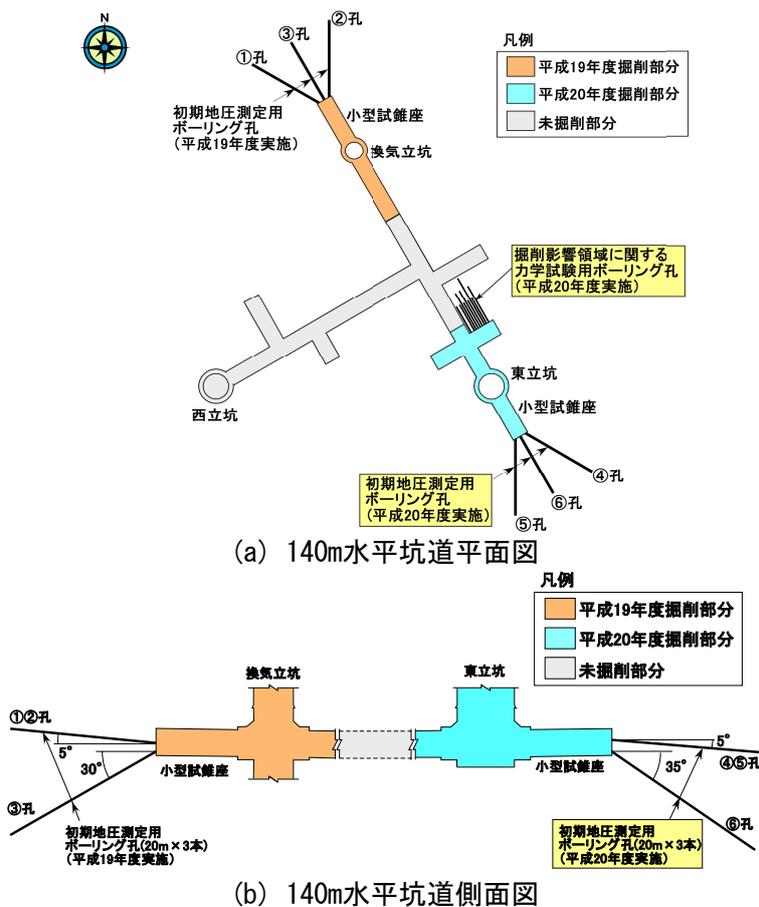


図 15 初期地圧測定実施位置図

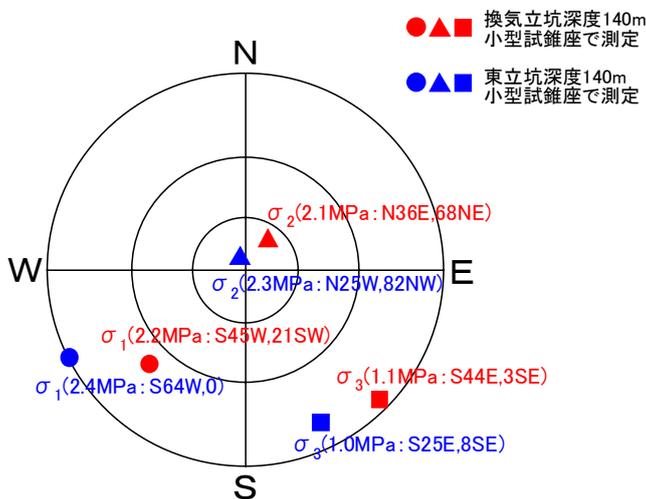


図 16 三次元初期地圧の評価結果

深度140mにおける主応力の下半球投影図。図中括弧内は（主応力値：方位、傾斜）を表します。

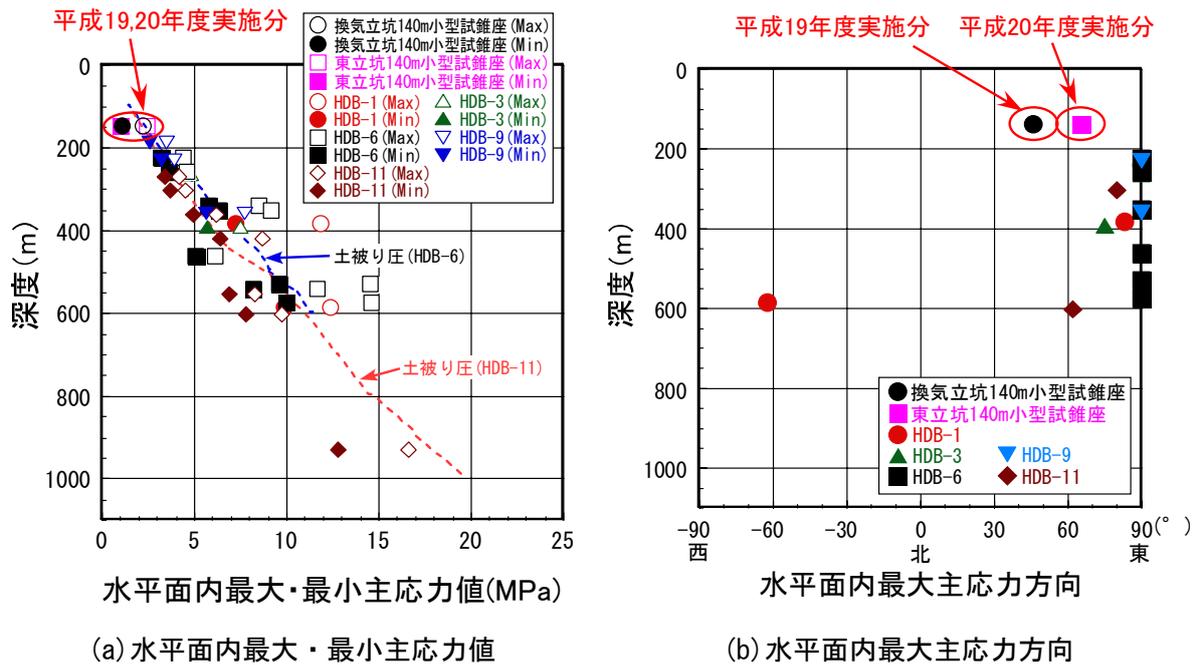


図 17 既存の初期地圧測定結果との比較
 凡例のMaxは最大主応力値、Minは最小主応力値を表します。

3.1.2 地上からの調査・解析手法の妥当性確認と地質環境モデルの構築

(1) 地質構造モデル

坑道壁面の地質観察や既存のボーリング調査におけるコア観察で得られた地質・地質構造に関するデータ（地層や断層の分布など）を用いて、地質構造モデルを更新しました。図 18に、地下施設周辺の地層や高透水ゾーンの詳細な分布を三次元的に表現した地質構造モデルを示します。

このように、坑道掘削時の調査結果を用いて、既存の地質構造モデルの更新を逐次行い、地下施設の詳細なレイアウトの検討や地下施設内での調査試験位置の検討、ならびに地下水の流動状態を把握するための水理地質構造モデルの基盤情報として活用していきます。

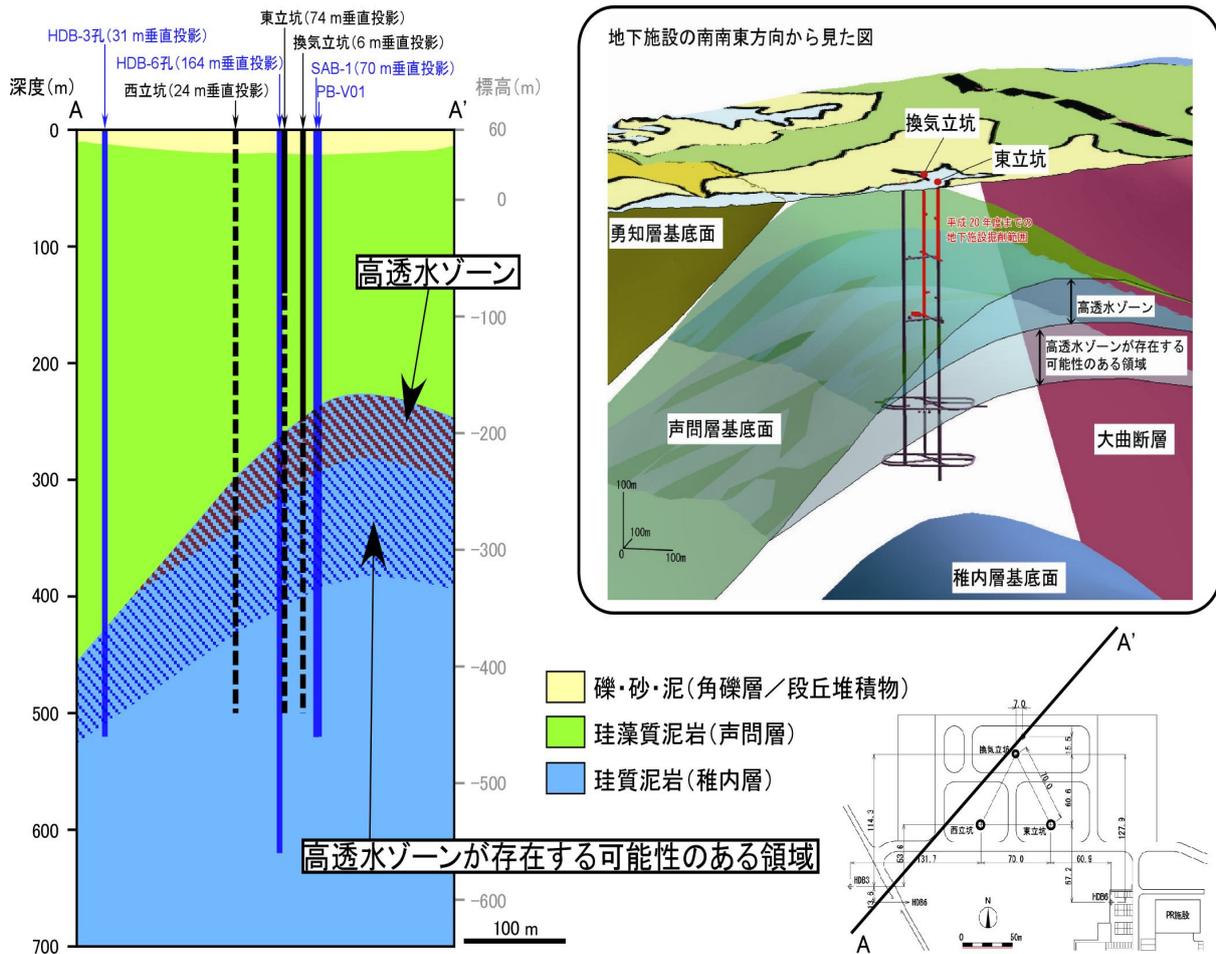


図 18 地質構造モデル

(2) 岩盤の水理モデル

坑道掘削に伴う周辺の地質環境への影響の検討、および作成した水理地質構造モデルの妥当性の確認を目的として、地下施設の建設に伴う地下水流動の変化を推定するための予測解析を行いました。予測解析では、大曲断層などの地質構造や声問層および稚内層中の割れ目に伴う透水性の不均質性や異方性といった特徴を仮定した三次元モデルと、換気立坑先行ボーリング調査から得られた地層の分布や透水性に基づく一次元モデルの2つの手法を用いて、立坑を掘削した際の湧水量を推定しました。その結果、2つの手法の仮定や、実際の地下施設の建設と推定した時期の違いに起因する設定条件の違いなどがあるものの、透水性が高いと想定された稚内層の浅部に換気立坑の掘削が進んだ際に、湧水量が増加することが推定されました。予測解析に際して、一次元モデルでは地層や地下施設の形状を単純化し、調査結果を比較的迅速に反映できる一方、三次元モデルではモデルの作成などが煩雑になるものの、地層や地下施設の形状などを詳細に推定に反映でき、水圧などの湧水量以外の推定が可能です。各手法の特徴や推定の目的を踏まえて、地質環境の特徴や地下施設の建設工程などの条件に応じて解析手法を選ぶことにより、効果的な推定を行うことができました。

今後は、第2段階の調査研究において、地下施設の建設に伴う湧水量の変化を継続的に観測するとともに、坑道およびその周辺で取得されるデータやその解釈結果を反映して水理モデルを更新することや、更新したモデルによる地下水流動解析を行うことを通じて、堆積岩地域を対象とした地質環境のモデル化および解析手法の整備を行う予定です。

(3) 地下水の地球化学モデル

地下に坑道掘削を行うと、坑道周辺は地下水圧の低下などにより、坑道周辺の地下水や岩石の

化学的状態が変化すると考えられます。坑道掘削に伴って地下水の圧力が解放されると、地下水中に溶存している二酸化炭素が脱ガスし、pHがアルカリ側に変化すると考えられています。また、脱ガスによって形成される不飽和帯中では、坑道から岩盤内への酸素の拡散が促進される可能性があります。坑道掘削後に坑道壁面に打設される覆工コンクリートの近傍では、コンクリートを構成するセメントと地下水との反応により地下水のpHが高くなり、これと接触する岩盤中の鉱物に変質すると考えられます。

平成20年度は、平成19年度までに開発した解析技術を用いて、地下施設の建設に伴って、坑道周辺で生じる地下水の水質ならびに岩石鉱物の変質の予測解析を行いました（図 19）。さらに、スーパーコンピュータを活用し、坑道周辺の脱ガスによる不飽和帯の広がりについての予測解析を行いました（図 20）。以上の地球化学に関する解析により、坑道の壁面から深さ数mの岩盤内部まで化学的酸化が進み、還元的な環境に特有な鉄と硫黄から成る既存の鉱物（黄鉄鉱）の組成が変化し、酸化的环境下に特有な水酸化鉄鉱物（ゲーサイト）が生成することが分かりました。また、声間層と稚内層の地層境界の付近では、地下水中の溶存ガスの脱ガスにより形成される不飽和帯中において、酸素の拡散による化学的変化が起こりやすい可能性が示されました。

今後は、坑道周辺において実際の鉱物の変化や不飽和帯の広がりを観測し、予測結果と比較することにより、開発した解析技術の適用性を確認する予定です。

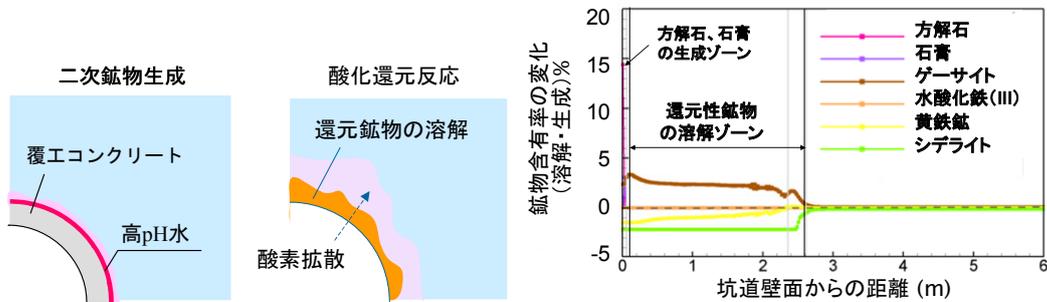


図 19 坑道周辺の地球化学反応と岩石鉱物の変化量

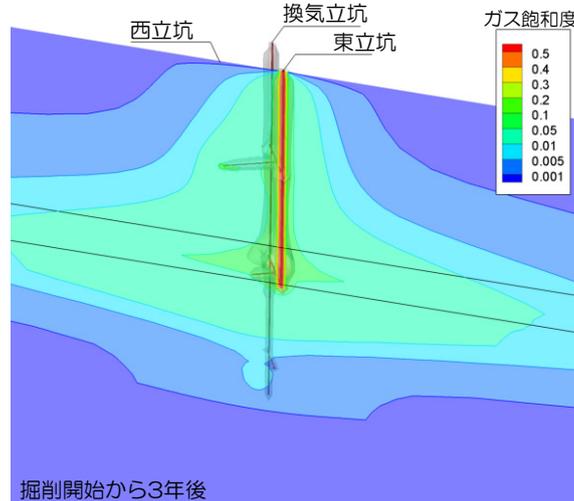


図 20 坑道周辺の溶存ガスの脱ガスにより形成される不飽和帯の広がりについての予測結果

(4) 岩盤力学モデル

立坑の掘削に伴い取得される岩盤の変位や覆工にかかる荷重などの計測データを使用して、岩

盤力学モデルの検証を行っています。立坑の掘削はショートステップ工法*10で行われているため、立坑の掘削および覆工コンクリートの施工と前後して設置する計測機器で取得される計測データは覆工コンクリートの影響を強く受けることとなります。これに対して、これから掘削しようとする立坑の切羽よりも深度の深い岩盤部分は覆工の影響が小さい部分となります。そのため、掘削予定の岩盤内にあらかじめ先行するボーリング孔を掘削して変位計を設置しておき、立坑の掘削に伴う岩盤の変位を計測（先行変位計測）することで、岩盤の物性をより正確に把握することが可能になると考えられます。

そこで、図 21の左図に示すように、換気立坑の切羽の中心から鉛直下向きに約23mのボーリング孔を掘削し、先行変位計測用の機器を設置し、鉛直下向き方向の岩盤の変形を計測しました。先行変位計は9つのアンカーがあり、最深部のアンカーを不動点と見なしました。

図 21の右図に換気立坑での計測結果を示します。この図は、各アンカー設置点の鉛直変位を切羽との距離の関係で示したものです。切羽が近づくにつれて岩盤は隆起（図中変位計のプラス側への変位）していることが分かりました。そして、立坑の掘削が進行し、計測区間に切羽が最も接近した時に変位が最大となること、このような岩盤の変位挙動はほぼ一様で、10mm程度に収まることが分かりました。

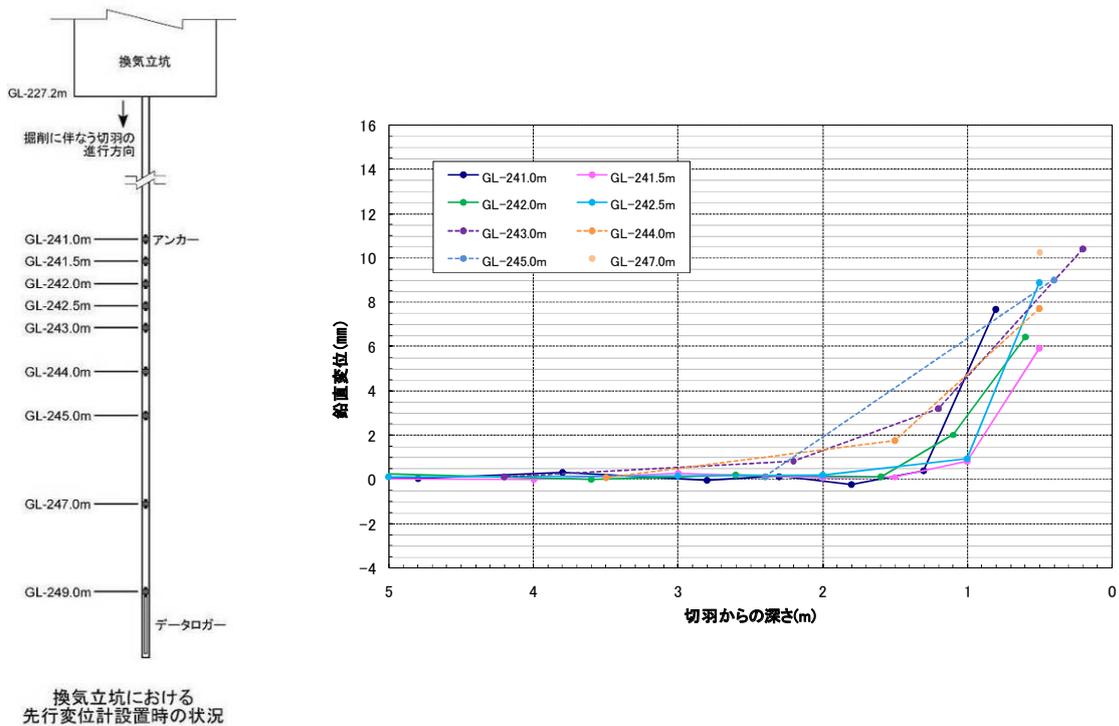


図 21 切羽からの深さと鉛直変位の関係（換気立坑）

3.1.3 調査技術・調査機器開発

(1) 岩盤の水理に関する調査機器開発

坑道の掘削に伴う発破、周辺の岩盤の応力解放、および応力の再配分などにより力学的・水理学的性質が変化する領域が坑道周辺に発生すると考えられています。平成20年度は、坑道周辺の水理特性の変化を把握するための調査機器（間隙水圧計、水分計および透水試験装置）を深度140m 水平坑道の壁面から掘削したボーリング孔に設置し、その場所から先の水平坑道を掘削する前の水理特性を調べました。その結果、坑道掘削前の地下水の間隙水圧は立坑の壁面に近いほど低くなっていることが分かりました（図 22）。これは、地下水が坑道に近い壁面から地下施設内に湧出するために、坑道に近い方の間隙水圧がより大きく低下していることを示しています。

*10: 掘削、掘削土(ズリ)搬出、覆工コンクリートなどの支保工の施工を1回の施工サイクルとして、立坑を掘り下げていく工法のことです。

また、同一区間で複数の異なる透水試験方法を適用して得られた結果には類似した傾向がみられますが、試験方法によってバラツキも認められます。特に、パルス試験とほかの方法との間には、最大1桁程度の差がみられました（図 23）。このことは、試験中に試験区間内でのガスの発生が圧力へ影響を与えている可能性が考えられますが、今後、詳細な解析や試験区間の岩相との対比を実施し、試験結果を再確認する予定です。また、試験区間によって透水係数が異なることについては、地層中の割れ目の分布などが不均質なため、水を通しやすい場所と通しにくい場所との差が出ているものと考えています。

今後、坑道の掘削による透水性の変化を確認するための調査を行い、水平坑道周辺の透水性を把握するための調査技術を確立する予定です。

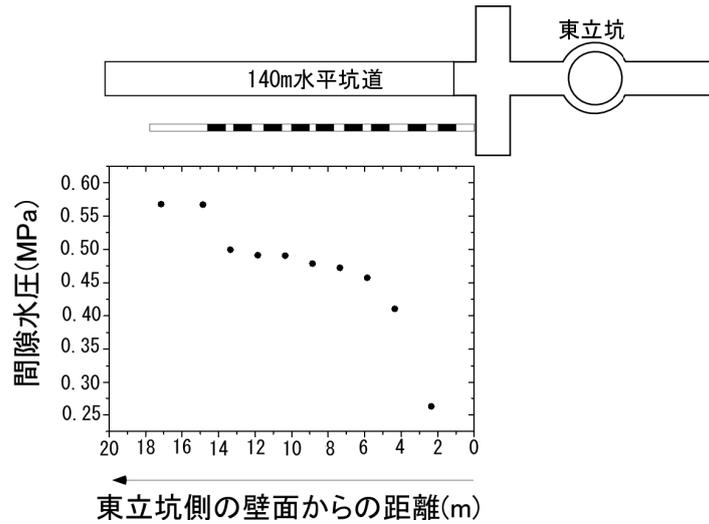


図 22 水平坑道壁面から掘削したボーリング孔の間隙水圧の観測結果

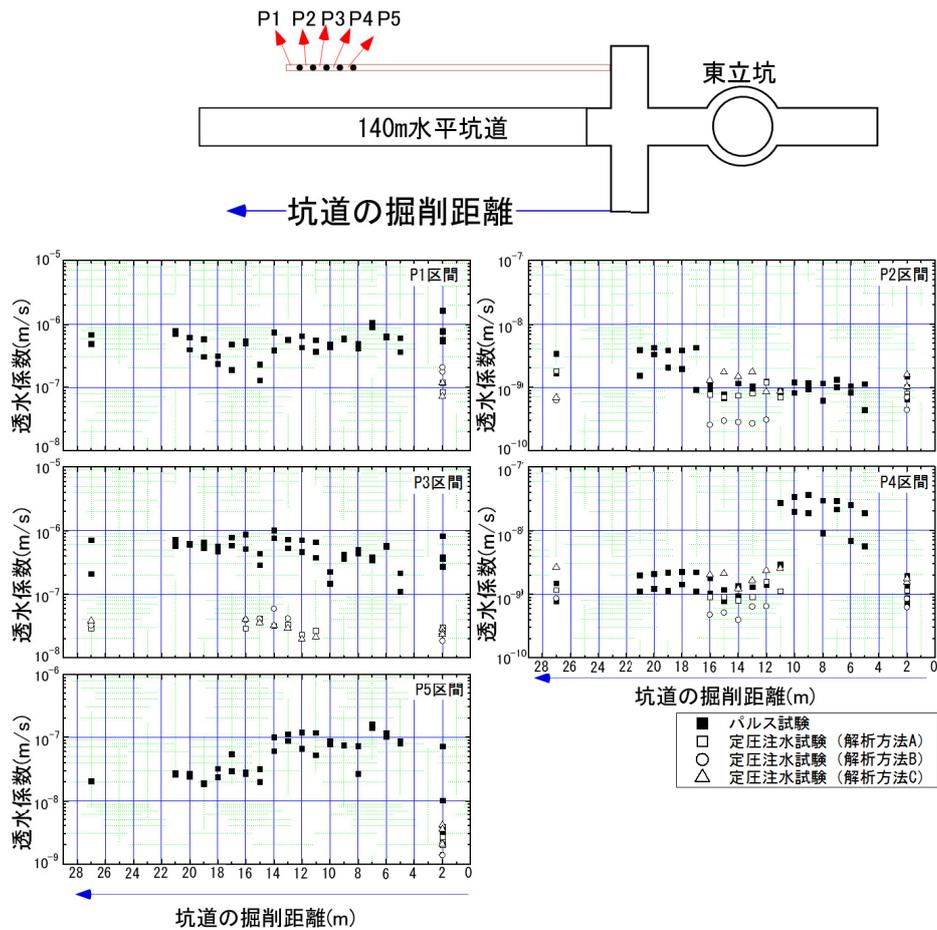


図 23 各試験区間の透水性係数の分布 (速報値*)
 *今後の解析により透水性係数を見直すことがあります。

(2) 地下施設の建設に伴う表層の変位観測技術開発

地表面から岩盤を乱すことなく地下深部の岩盤や地下水の挙動をモニタリングする技術を確立することを目的として、立坑の周辺に9台の高精度傾斜計を配置し (図 2参照)、坑道掘削に伴う地表面の傾斜の変化を計測しています。平成20年度は、高精度傾斜計により得られた計測データ (2007年4月1日から2008年11月31日) に含まれるノイズ成分を周波数の高い成分を主体とするノイズと、そうでないノイズ (周波数の低い成分のみのノイズ) に分類し、それらの除去を試みました。周波数の高い成分を主体とするノイズには電気的なノイズ、地上の工事によるノイズ、工事用の重機の移動などによるノイズが含まれ、これらはスパイク状の波形や階段状 (図 24) の波形として観測されます。図中のxtilt、ytiltは傾斜計が計測している直交する2方向の傾斜成分であり、この2つの成分および傾斜計の内部で計測されている方位から、総合傾斜角と傾斜方位角を算出します。周波数の高い成分を主体とするノイズは平行移動による方法で除去を行いました。これは直前のデータと一定値以上の差があるデータをノイズを含むデータとみなし、ノイズ直前のデータと同じ値とする方法です。一方、周波数の低い成分のみのノイズには気圧、潮汐などの影響によるノイズが考えられます。モニタリングデータを潮汐や気圧などの応答成分に分離解析するBAYTAP-G (BAYesian Tidal Analysis Program (Grouping method)) と呼ばれるプログラムを使用して、周波数の低いノイズを除去しました。計測データに含まれる気圧成分、潮汐成分の一例を図 25に、ノイズを除去した結果を図 26に示します。

また、これまでの調査により地表面は立坑掘削に伴い緩やかに立坑の方向に傾斜していくことや、立坑掘削が行われていない期間においても傾斜の変化が継続すること、立坑掘削による弾性的な変形が生ずると推定される範囲より広い範囲で傾斜変化が生じていることなどが分かっており、高精度傾斜計による観測結果は、地下水の流れの変化に起因する岩盤変形を捉えている可能

性が高いことが示唆されています。そこで、コンピュータにより換気立坑の掘削時において、換気立坑に向かう地下水流れの発生がもたらす岩盤の圧密変形を推定し、この変形による地表面の傾斜変化を計算し、観測結果との比較を行いました。図 27 に換気立坑中心から半径約20mの距離にある傾斜計で観測された換気立坑へ向かう傾斜成分（投影傾斜角）と、解析結果を比較したものです。これらの比較の結果、岩盤の透水係数を $5 \times 10^{-8} \text{m/s}$ と設定した場合に、観測された傾斜の変化と解析結果が、変化の傾向や大きさの点で整合的であることが示されました。なお、観測結果には、東立坑掘削に伴って生ずる、東立坑方向に向かう傾斜成分が含まれており、これが換気立坑へ向かう傾斜変化とは逆方向であることから、日数の経過とともに換気立坑へ向かう傾斜量は解析結果より小さくなっていくと考えられます。

これらのことは、観測された地表面の傾斜変化が、立坑に向かう地下水の流れの発生に伴う岩盤の圧密変形に起因するものであることを示すと同時に、地表面の傾斜変化や分布から、地下水の流れの変化やそれに伴う岩盤変形を推定することができる可能性を示していると考えられます。

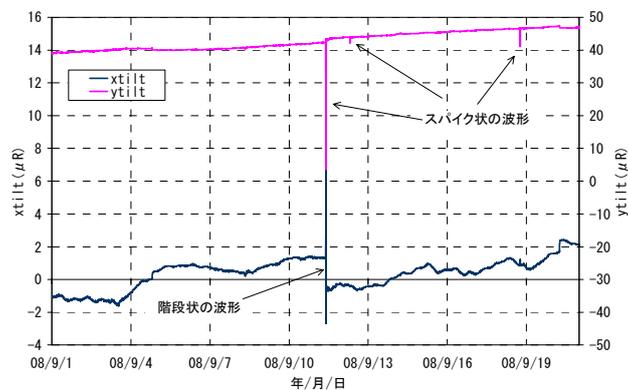


図 24 周波数の高いノイズの例 (2008年9月データ)
縦軸の単位は 10^{-6} ラジアン*11

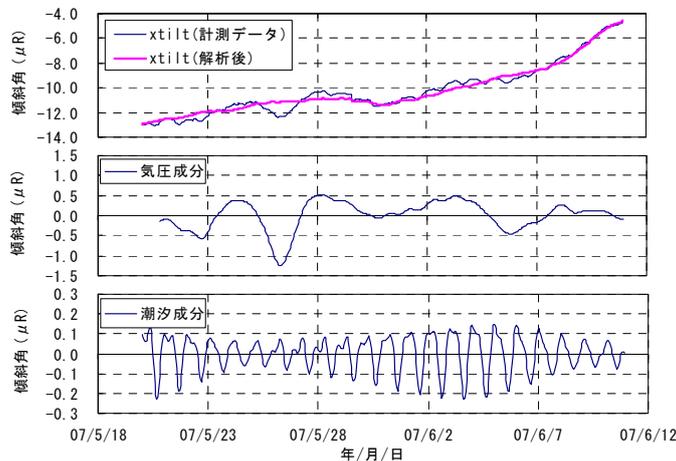


図 25 解析結果および計測データに含まれる気圧、潮汐成分の例

*11 : ラジアンは角度の単位で、 π (約 3.14) = 180° に相当します。

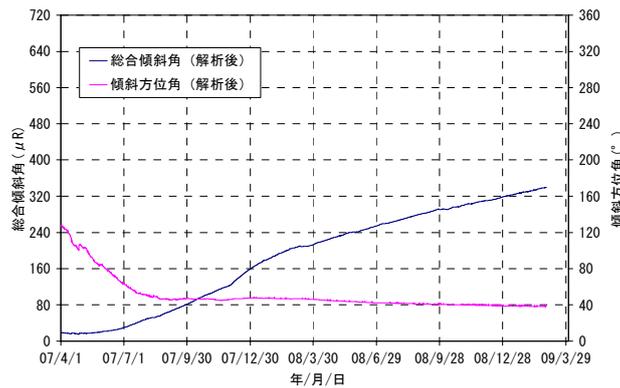


図 26 ノイズ除去後の総合傾斜角と傾斜方位角の例

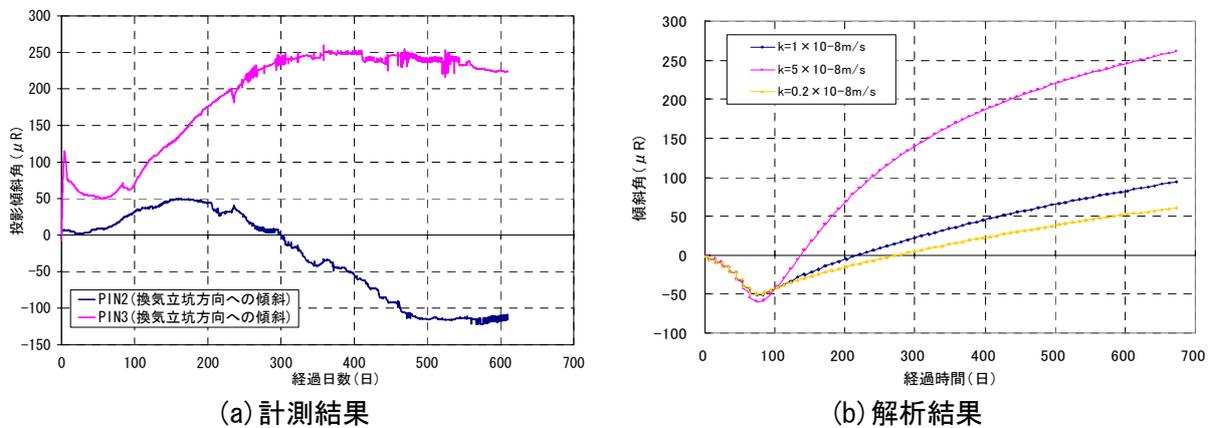


図 27 換気立坑方向に向かう傾斜量

(3) 岩盤力学に関する調査機器開発

地下深部に坑道を掘削すると、坑道の周囲に生じている応力の再配分や岩盤のクリープにより、坑道が微小に変形します。坑道の長期的な変形挙動を把握することは、坑道の合理的な支保^{*12}設計や施工の実施ならびに掘削によって生じる坑道周辺岩盤の物性の変化を評価する上で重要です。そのため、原子力機構では坑道掘削直後からの岩盤の変形を長期的に安定して計測できる光ファイバー式地中変位計の開発を実施しています。

光ファイバー内に光を入射させると、特定の波長の光だけが反射されます。そして、光ファイバーに変位が生じると反射した光の波長の変化が生じます。そのため、反射した光の波長を計測することにより、光ファイバーの変位量を知ることができます。光ファイバー式地中変位計は、上記のような特性を利用したものです。

光ファイバー式地中変位計は、図 28に示すように、光ファイバーが収納されている測定部分、固定アンカー、アンカー間を結ぶロッドで構成され、岩盤内に生じる変位（アンカー区間内の変位量）は、アンカー間の変位量と図中の金属板に接着された光ファイバーの反射光の波長変化量との関係より求められます。平成19年度までは、光ファイバーを利用した多段式の地中変位計を試作し、埋設における作業性の確認などを主に実施しました。

長期間の計測を想定した場合、変位計の測定部分は温度や湿度の変動などを受けて、光ファイバーの収縮や膨張が生じる可能性が予想されます。平成20年度は、それらの影響を極力少なくするために室内試験を実施し、金属板と光ファイバーの接着方法を改良しました。

今後は、開発した変位計を地下施設内に埋設してデータを取得しつつ、適用性について確認す

*12：周辺岩盤と地下空間の安定を保つために設ける構造物のことです。通常、ロックボルト、鋼製支保、吹付けコンクリートなどから構成されます。

る予定です。

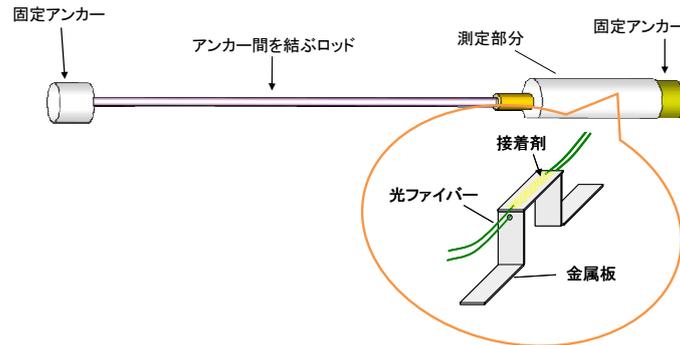


図 28 光ファイバー式地中変位計の構成

(4) コントロールボーリング技術の開発

コントロールボーリング技術の開発について、財団法人電力中央研究所^{*13}（以下、電中研）との共同研究を継続しました。平成20年度は、平成19年度に引き続き、断層破砕帯を対象としたコントロールボーリング掘削技術の適用性を確認するために、上幌延地区の大曲断層近傍において掘削および試験装置の適用性の確認を継続しました。掘削長は約800mとなり、ボーリング孔(HCD-3孔、図1参照)の角度がほぼ水平に達しました。また、地下水の間隙水圧のモニタリングシステムの適用性の確認のため、敷地内のボーリング孔（深度約80m）でのモニタリングを継続しました。今後、水平方向への掘削を継続し、水理試験装置などの適用性の検討を行う予定です。

(5) 塩水と淡水が混在する場における地下水流動などに関する調査技術開発

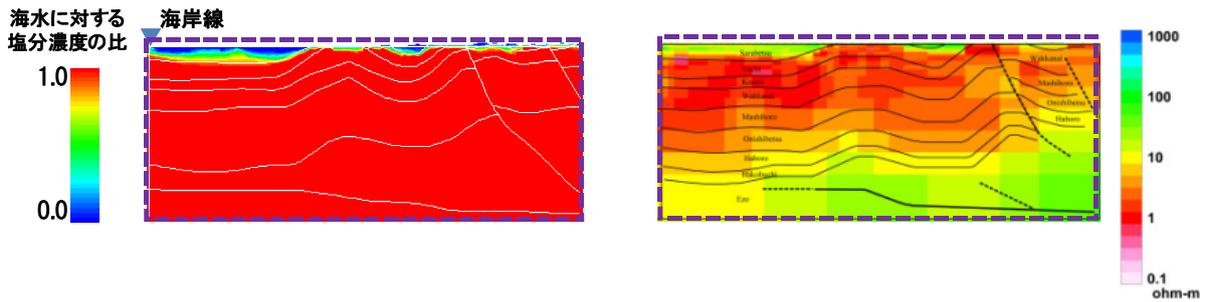
平成19年度に着手した、塩水と淡水が混在する場における地下水流動、水質形成および物質移動に関する調査を、財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター^{*14}（以下、原環センター）との共同研究、および電中研との共同研究を活用して実施しました。

平成20年度は、わが国の沿岸域を対象とした調査から解析に至る一連の評価手法を構築するために、幌延町沿岸域を事例として、文献の調査やこれまで実施してきた陸域の電磁法探査に加え、海域での電磁法探査などの調査結果に基づいて水理モデルを作成し、地下水流動および地下水の塩分が降水によって洗い出される条件を仮定した塩分濃度分布の推定を行いました（図 29）。その結果、推定された淡水の分布範囲と比抵抗の高い部分が一致する結果が得られました。この推定を行う過程を通じて、モデル化および解析における手順や判断根拠などの抽出、整理を行いました（図 30）。

今後は、解析と並行して実施した国外事例の調査結果などを参考にして、幌延町沿岸域での調査研究を進める予定です。

*13：財団法人電力中央研究所は、電力技術の専門研究機関であり、原子力技術、先進保守技術、環境・革新技術、最適エネルギー利用技術、社会・経営リスクマネジメントを研究開発課題としています。原子力技術の一環として、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。

*14：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。



(a) 推定結果例 (b) 調査結果
平成19年度に産総研が実施した電磁法探査による比抵抗分布

図 29 沿岸域での塩分濃度分布の推定例
推定結果と電磁法探査結果による調査結果との比較。
破線は水平方向約20km、鉛直方向約8kmを示す。

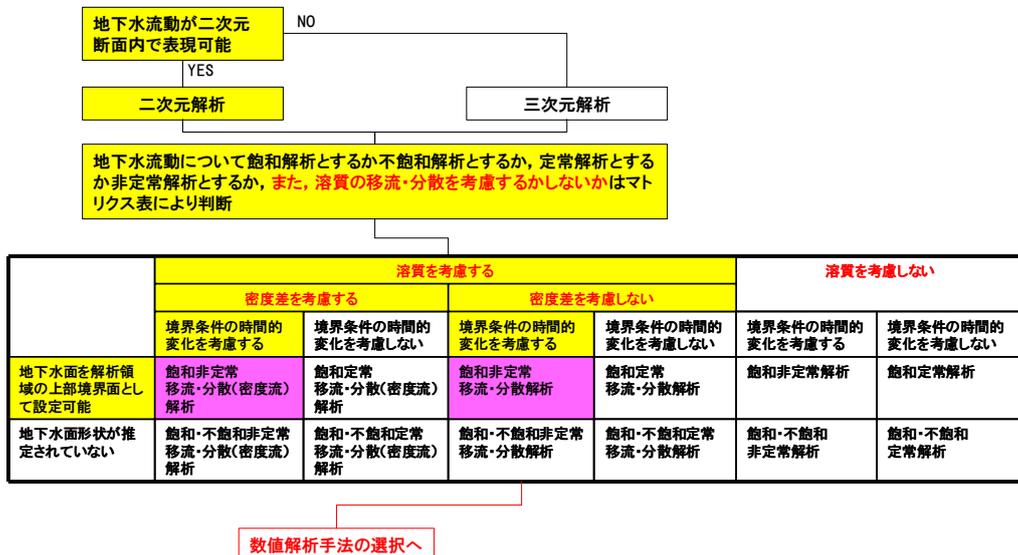


図 30 モデル化、解析の手順、判断根拠の整理例

3.2 地質環境モニタリング技術開発

3.2.1 ボーリング孔を用いたモニタリング技術開発

第2段階では、地下施設の建設が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、岩盤の水理モデルや地下水の地球化学モデルの構築、地下水流動解析などに必要なデータの取得、および構築したモデルや解析結果の妥当性を確認するためのデータの取得を目的として技術開発を行っています。

平成20年度は、PB-V01孔に地下水の水圧・水質の長期モニタリング装置を設置し、観測を開始しました。また、HDB-1～4孔およびHDB-6～11孔に設置した地下水の水圧・水質の長期モニタリング装置により、モニタリングを継続しました。

図 31にHDB-6孔およびHDB-9孔の地下水の間隙水圧の測定結果を示します。モニタリングを実施しているボーリング孔のうち、地下施設に最も近いHDB-6孔では、深度64.06m、292.15m、365.85m、390.06mの測定区間において、立坑の掘削の影響と考えられる間隙水圧の変化が観測されました(立坑の掘削工程は図 10を参照)。一方、地下施設から離れたHDB-9孔の間隙水圧の変化には、平成19年度と同様、深度34.02mの測定区間において、積雪地域にみられる雪解け時期の水圧上昇と、降雨による水圧の上昇がみられますが、立坑の掘削に伴うと考えられる変化は観測されていません。

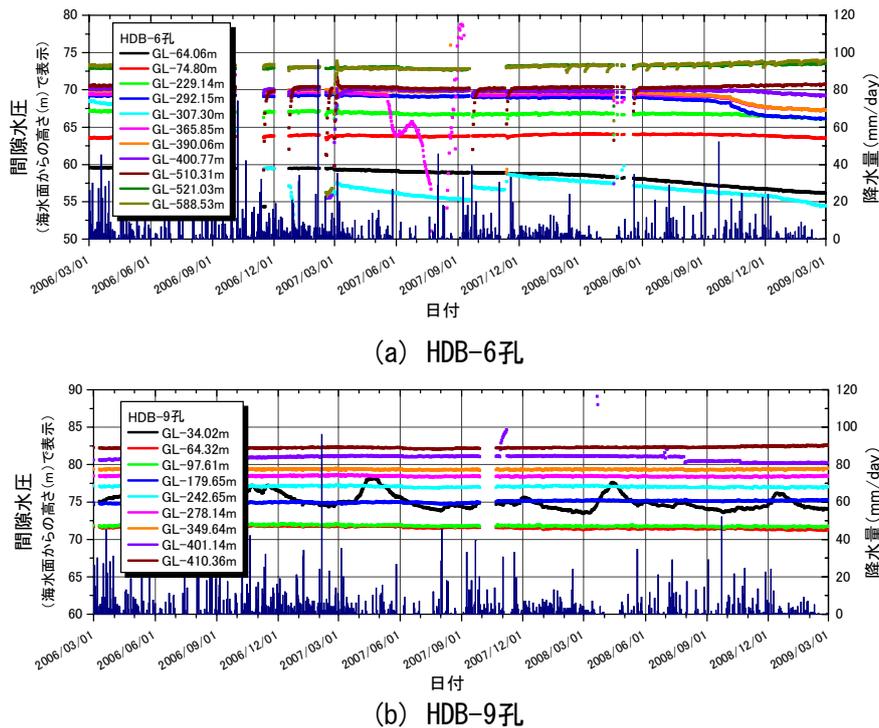


図 31 HDB-6孔および9孔における地下水の間隙水圧の測定結果

3.2.2 比抵抗モニタリング技術の適用性確認

第1段階の調査研究結果より、岩盤中の見掛比抵抗値と地下水の塩化物イオン濃度には良好な相関関係があることが分かりました。そこで、この見掛比抵抗値を定期的に測定し、変化を捉えることにより、地下施設建設に伴う周辺地下水流動の変化をモニタリングする試みを平成18年度より実施し、適用性の確認を行っています。岩盤中の見掛比抵抗分布は、図 32に示すような既存のボーリング孔を結ぶ2つの測線を配置し、電気探査法により測定しました。測定の結果を図 33、図 34に示します。平成18、19、20年度の結果を比較すると、全体的に見掛比抵抗の値や分布形状が大きく変わる区域はみられませんでした。深度の深い部分で見掛比抵抗の変化がやや大きい箇所が認められますが、この原因については、今後検討する予定です。また、立坑付近に関しては、立坑掘削に起因すると考えられる明瞭な比抵抗の変化域は認められませんでした。今後も、同じ測線上で電気探査法を実施し、地下施設建設に伴う岩盤中の比抵抗の変化を観測していく予定です。

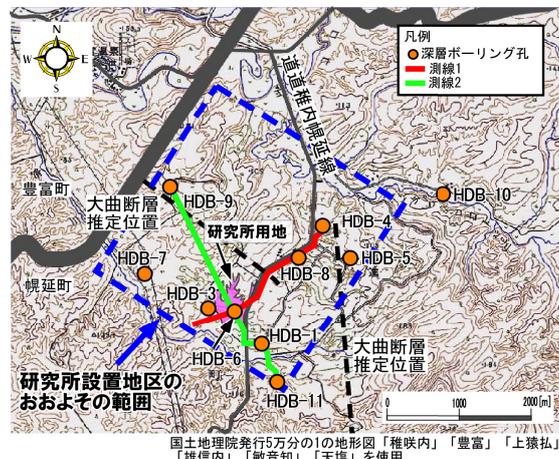


図 32 電気探査の測線配置

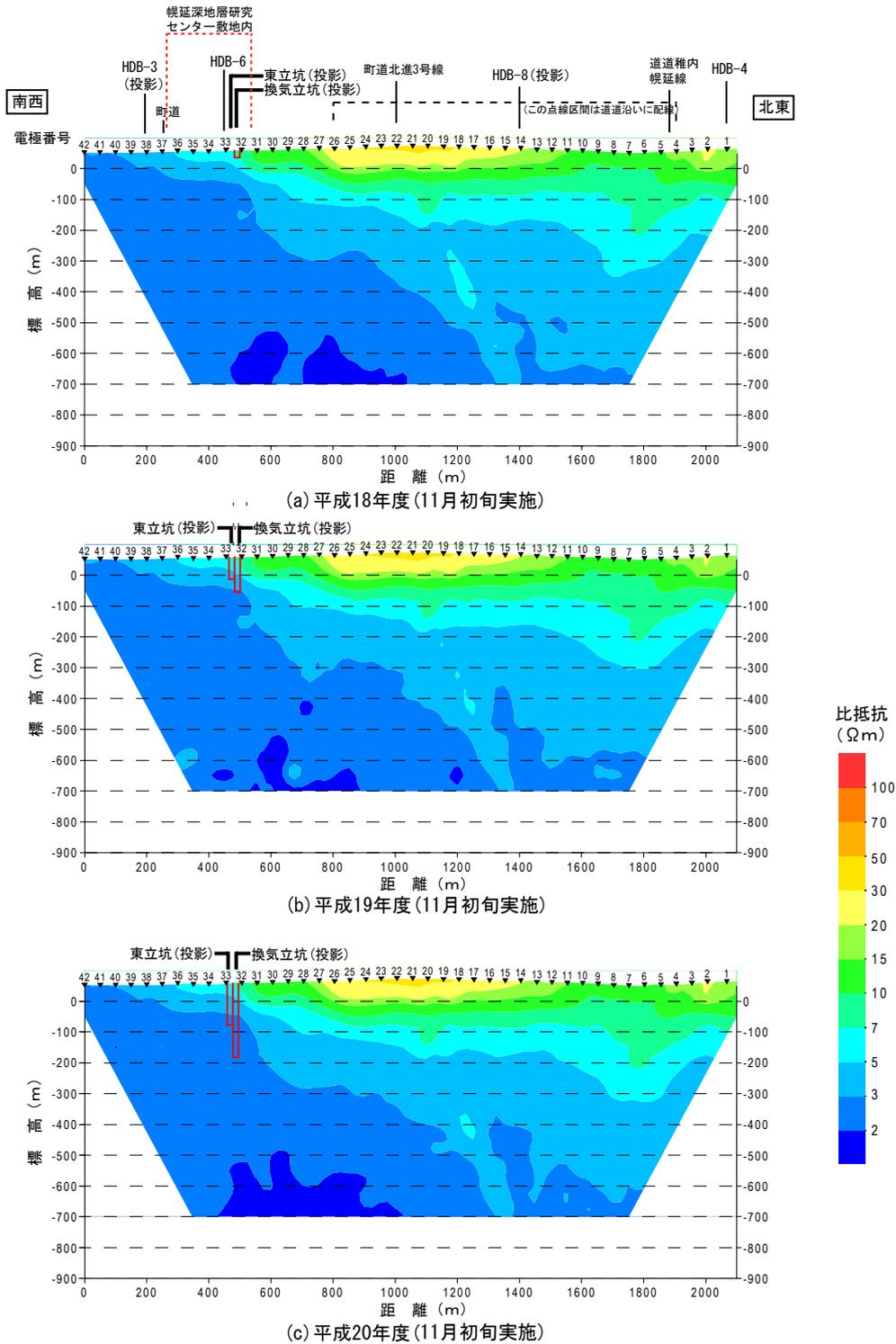
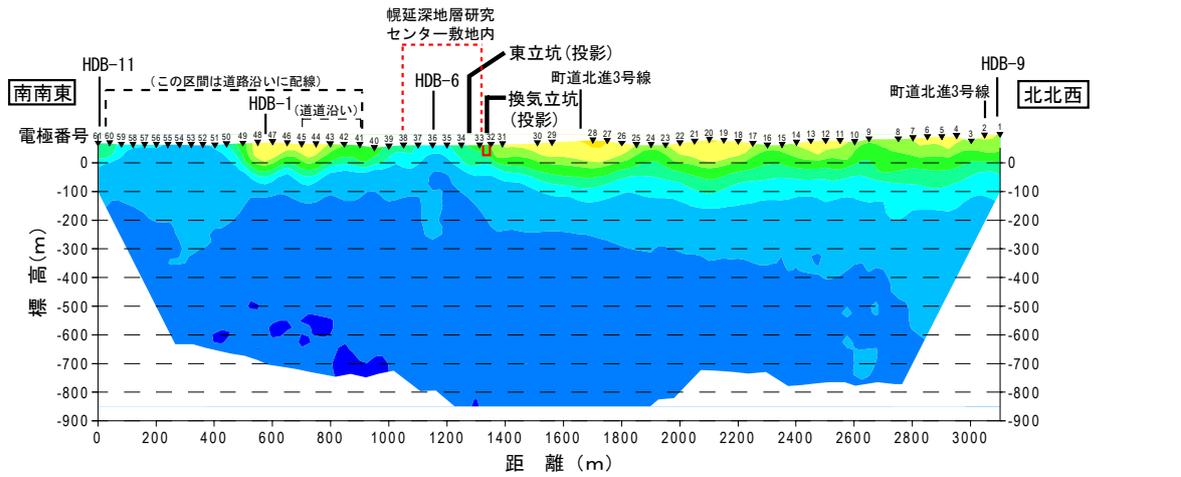
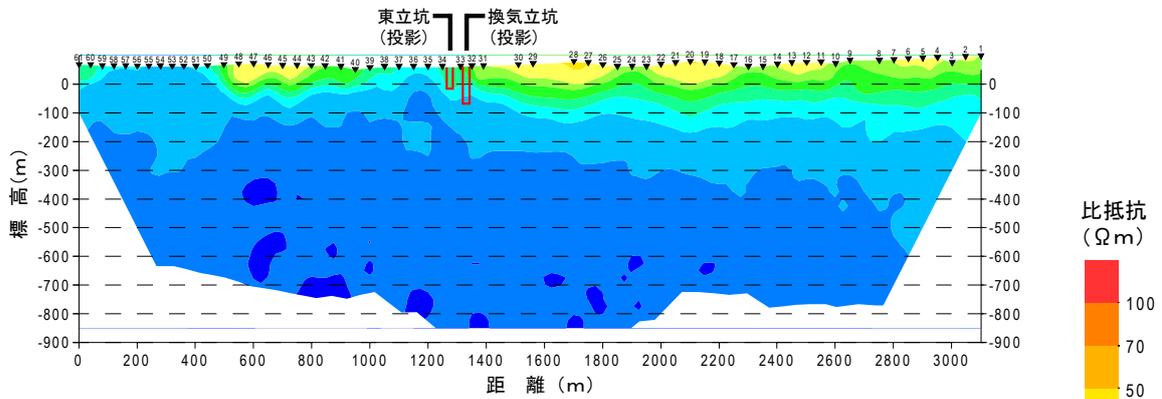


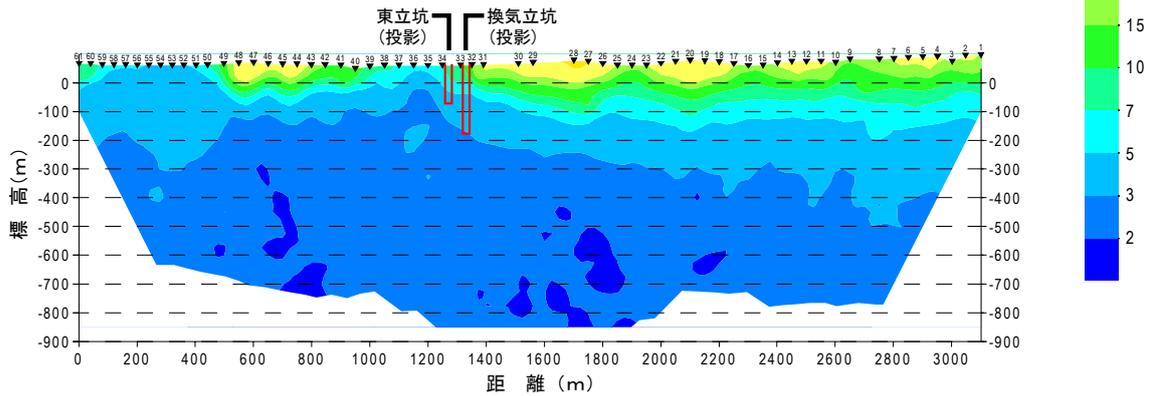
図 33 電気探査で得られた見掛比抵抗分布 (測線1)



(a) 平成18年度(11月初旬実施)



(b) 平成19年度(11月初旬実施)



(c) 平成20年度(11月初旬実施)

図 34 電気探査で得られた見掛比抵抗分布 (測線2)

3.2.3 遠隔監視システムの開発

遠隔監視システムの開発は、精密に制御した弾性波や電磁波の連続信号を用いる「アクロス」*15と呼ばれる信号システムを応用して、地下施設の建設に伴う地質環境の変化(地下水飽和度の変化などに伴う岩盤物性値の変化)を地表付近から精度良く把握する技術の確立を目標としています。

平成17年度までに、弾性波と電磁波の観測システムを設置し、試験観測を経て、長期観測を開始しました。平成20年度は、この長期観測を継続するとともに、平成19年度に引き続き、地下施設建設に伴う地質環境の変化が遠隔監視システムの受信信号にどのような変化をもたらすかを検討するための波動場シミュレーションを行いました。

遠隔監視システムの送信点と受信点の配置を図 35に示します。このような送受信点の配置や、これまでの調査研究によって分かっていた研究所周辺の地下構造、さらには地下施設の建設に伴う立坑近傍の地質環境の変化(立坑近傍における地下水飽和度の低下)を想定した地下物性値モデルをもとに、送信された弾性波や電磁波がどのように伝わるかを、コンピュータ上で模擬(波動場シミュレーション)しました。このようなシミュレーションによって、実際に観測を行っている各受信点、あるいは仮想の受信点で、どのような信号が受信され、地下施設建設に伴う地質環境の変化により受信信号にどのような変化が現れるかを検討することができます。

図 36は、電磁波についてのシミュレーション結果の例です。この例は、立坑からの距離が30m以内の領域で地下水飽和度が低下した場合、地表で観測される信号がどの程度変化するか(信号変化量*16)を示しています。このうち、(a)は信号の周波数を61.25Hzとした場合の平面分布であり、暖色系になるほど信号変化量が大きいことを表しています。この図から、信号変化量は立坑から遠ざかるにつれて小さくなることや、送信ダイポールの方位などに依存し、方向によって減少の度合いが異なることが分かります。また、(b)は送信点から約1km離れたHDB-8受信点での信号変化量を様々な信号の周波数について計算した結果を示しています。この図からは、信号を受信する場所が同じでも、送受信する信号の周波数の違いによって、信号変化量が異なることが分かります。

今後も、長期観測を継続しつつ、様々なケースを想定したシミュレーションを行い、地下施設の建設に伴う地質環境の変化を把握するために、必要な送信周波数や送受信点位置についての検討を行います。

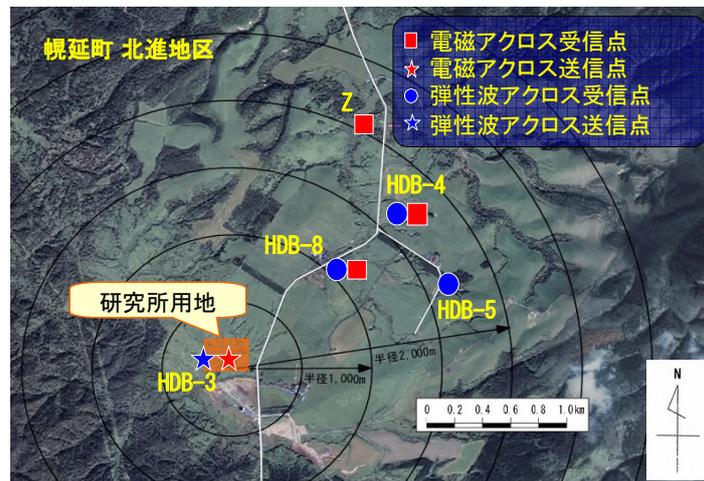
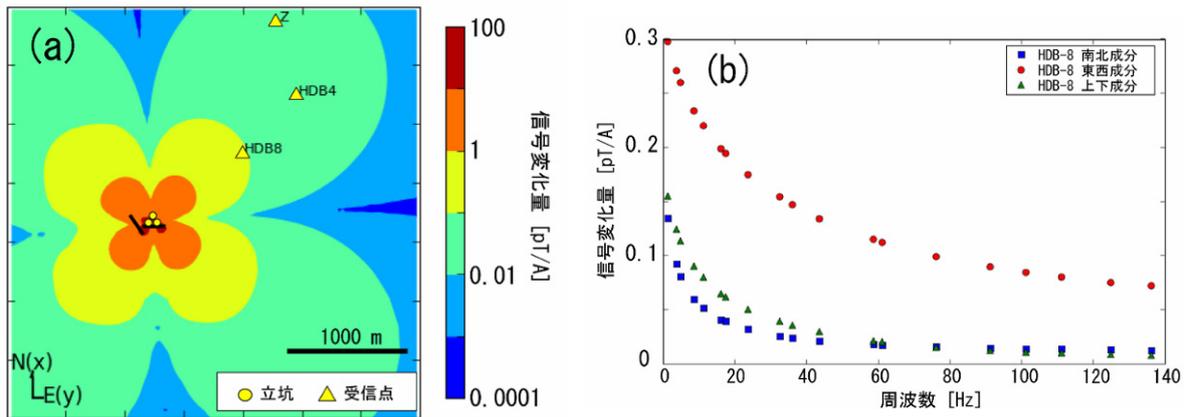


図 35 遠隔監視システムの観測機器配置図
IKONOS衛星画像データ*17を利用

*15：アクロス (ACROSS) は、「精密制御定常信号システム」の英訳、Accurately Controlled Routinely Operated Signal System の頭文字をつないだ略語です。

*16：電磁アクロスにおける磁場の信号は、複素伝達関数 $[pT$ (ピコテスラ；受信磁束密度) / A (アンペア；送信電流)]として観測されます。

*17：IKONOS衛星画像データの所有権・著作権は日本スペースイメージング㈱にあり、正規登録ユーザーとしての利用許諾を得て、これを使用したものです。



(a) 信号の周波数を61.25Hzとした場合に地表で観測される磁場東西成分信号変化量の平面分布
 (b) HDB-8受信点で観測した場合の各周波数での磁場の信号変化量

図 36 電磁波についてのシミュレーション結果の例

立坑近傍の地質環境に変化が生じた場合に観測される電磁波信号変化の程度（信号変化量）

3.3 深地層における工学的技術の基礎の開発

平成20年度は、情報化施工^{*18}プログラム^{(6), (7)}に基づき、地下施設建設工事を進めながら、地中変位計やコンクリート応力計などの計測機器により取得したデータを分析・評価して、これまでに施工した支保の健全性を監視することで、坑道の安定性評価を行いました。

計測項目は、日常的なデータ取得（日常管理計測）とある頻度でのデータ取得（ステップ管理計測）に区分しました（図 37）。計測の実施にあたっては、地下施設実施設計⁽⁸⁾で設定した地山区分などを考慮して、計測の頻度・位置などを設定し、データを取得しました。取得したデータは、図 37に示す流れで分析し、既設支保の健全性の確認と坑道の安定性評価を行いました。また、当初設計時の挙動解析結果との比較を行い当初設計で用いた解析モデル・物性値の検証により、解析精度を向上させるとともに、後続施工箇所の設計の修正や管理基準値の再設定に順次反映します。表 1に取得したデータの分析・評価結果の反映先を示します。

これまでに取得した岩盤の変位や覆工コンクリートの応力などの計測データの一例として、図 38に換気立坑の深度177mにおける覆工コンクリート応力の経時変化を示します。図から、覆工コンクリート応力が当該深度の許容応力度（6MPa）以下であり、既設支保は健全であることがわかります。また、計測断面付近の覆工コンクリート表面にはひび割れの発生などは確認されておりません。

今後も引き続き、地下施設建設工事を進めながら、データ取得ならびに分析・評価を行い、設計の妥当性を確認しつつ、後続箇所の施工方法の最適化に反映していく予定です。

また、坑道内における防災対策の信頼性向上を目的として、平成18年度までに実施した坑内火災を想定した立坑模型実験の結果を踏まえた、火災時の通気網解析手法の高度化を検討しました。具体的には、平成19年度に構築した解析手法に基づき、覆工の熱伝達の効果を考慮した計算機能を開発し、模型実験と同様の条件でシミュレーションを行い、検証・評価しました。その結果、模型実験で確認された坑道内の温度変化が再現されました。図 39に模型実験の模式図を、図 40および図 41に立坑2本・水平坑道2本モデルにおいて、水平坑道に火災源を設けた場合の実験結果と解析結果の一例を示します。

今後も、解析手法を改良し、火災時の通気網解析手法の高度化を進めていく予定です。

さらに、湧水抑制対策のための技術開発として、新たなグラウト^{*19}材料や注入技術の開発、そ

*18：坑道を実際に掘削している段階で、岩盤や支保工に生じる応力やそれらの変形を計測し、当初設計の妥当性を確認するとともに、必要に応じて設計や施工方法を修正しながら施工に反映させる、施工管理方法のことを言います。

*19：岩盤に孔を明け、セメントなどの固化材を注入することにより、岩盤の割れ目を充填して湧水を抑制する技術のことです。

のグラウト材料が周辺岩盤の長期挙動に与える影響を評価する手法に関する原位置試験などについて検討を継続しました。

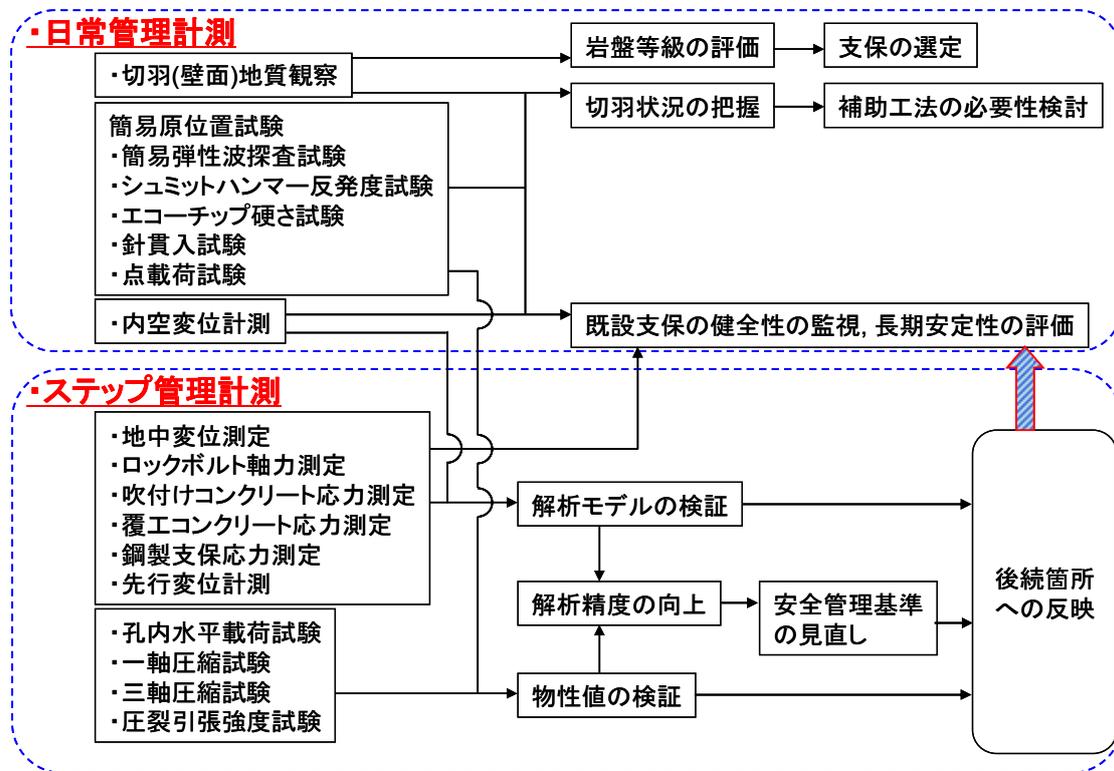


図 37 日常管理計測およびステップ管理計測の主要な項目および取得データの分析・評価の流れ

表 1 策定した情報化施工プログラムに基づく計測データの分析・評価結果の反映先

	ステップ管理	ステップ管理計測データの分析・評価結果の反映先
①	・換気立坑：～深度140m	・東立坑：～深度140m、140m水平坑道 ・西立坑：～深度140m、140m水平坑道
	・東立坑：～深度140m	・西立坑：～深度140m、140m水平坑道
②	・換気立坑：深度140m～深度250m	・東立坑：深度140m～深度250m、250m水平坑道 ・西立坑：深度140m～深度250m、250m水平坑道
	・東立坑：深度140m～深度250m	・西立坑：深度140m～深度250m、250m水平坑道
③	・換気立坑：深度250m～深度400m	・東立坑：深度250m～深度400m、400m水平坑道 ・西立坑：深度250m～深度400m、400m水平坑道
	・東立坑：深度250m～深度400m	・西立坑：深度250m～深度400m、400m水平坑道
	・西立坑：深度250m～深度400m	・400m坑道
④	・換気立坑：深度400m～深度500m	・東立坑：深度400m～深度500m、500m水平坑道
	・東立坑：深度400m～深度500m	・500m水平坑道

水平坑道におけるステップ管理は、同一深度の後続施工のステップ管理に用います。各深度は、実施設計に基づき設定したものであり、今後の研究計画にあわせて、深度を見直すことがあります。

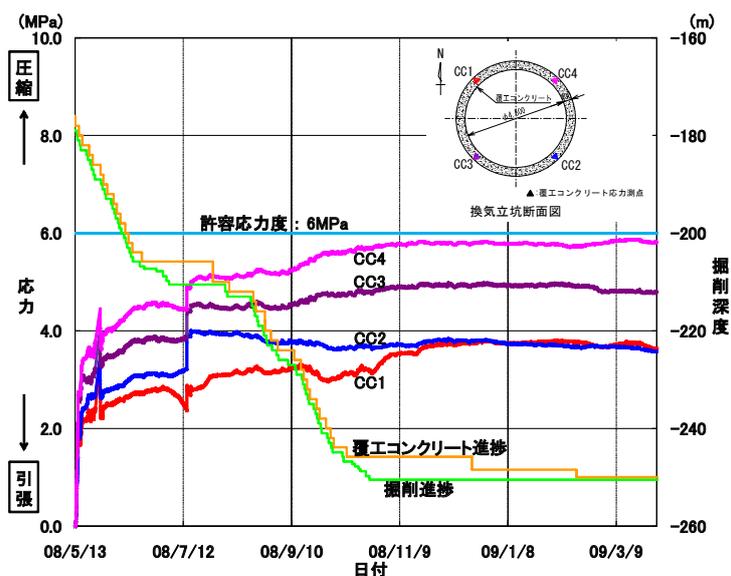


図 38 計測結果の一例
換気立坑の深度177mの覆エコンクリート応力計測結果

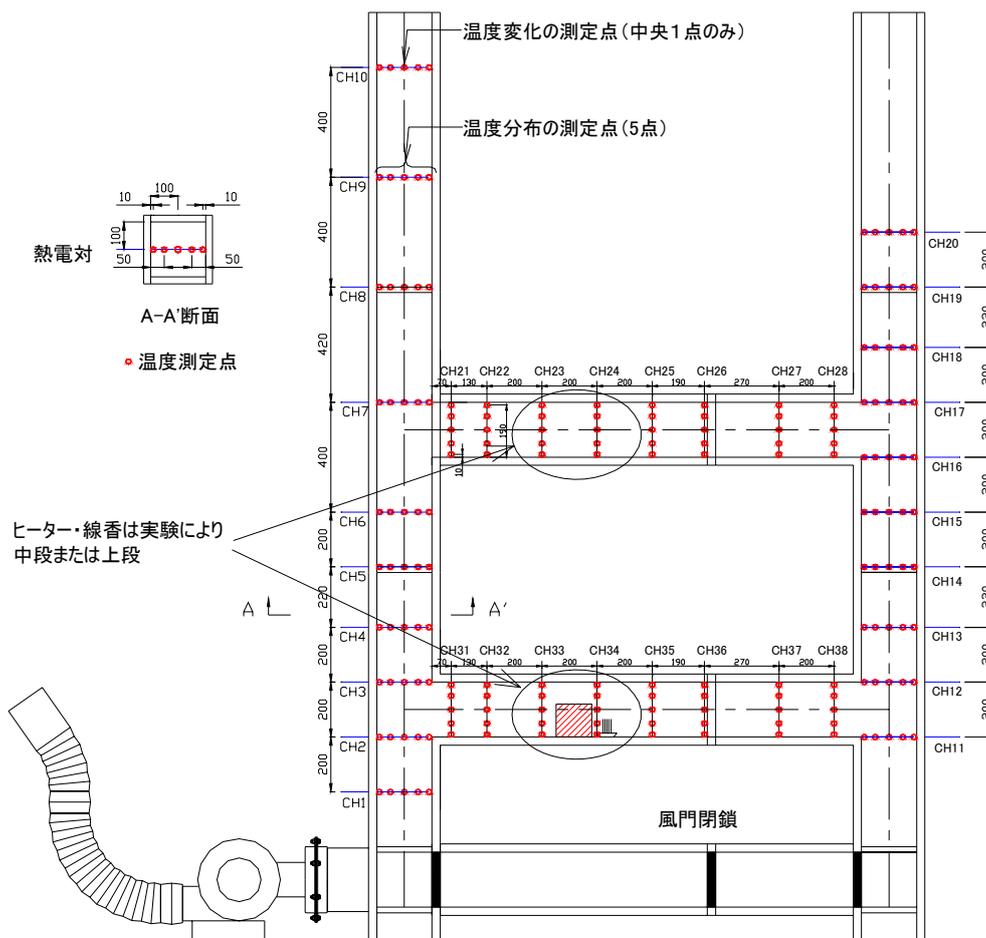
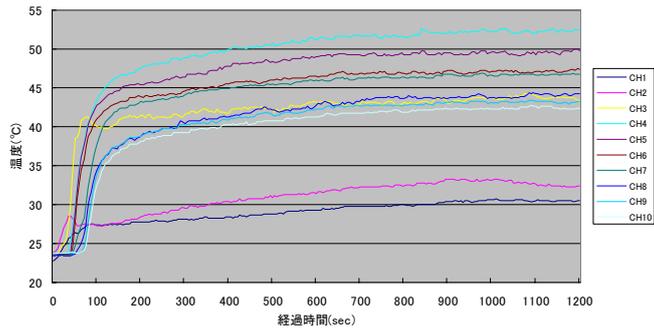
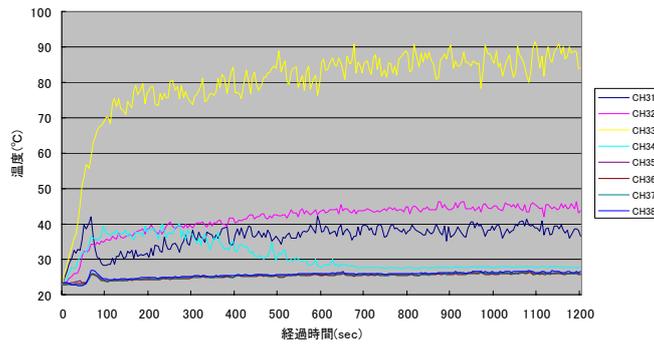


図 39 模型実験の模式図 (温度変化の測定)

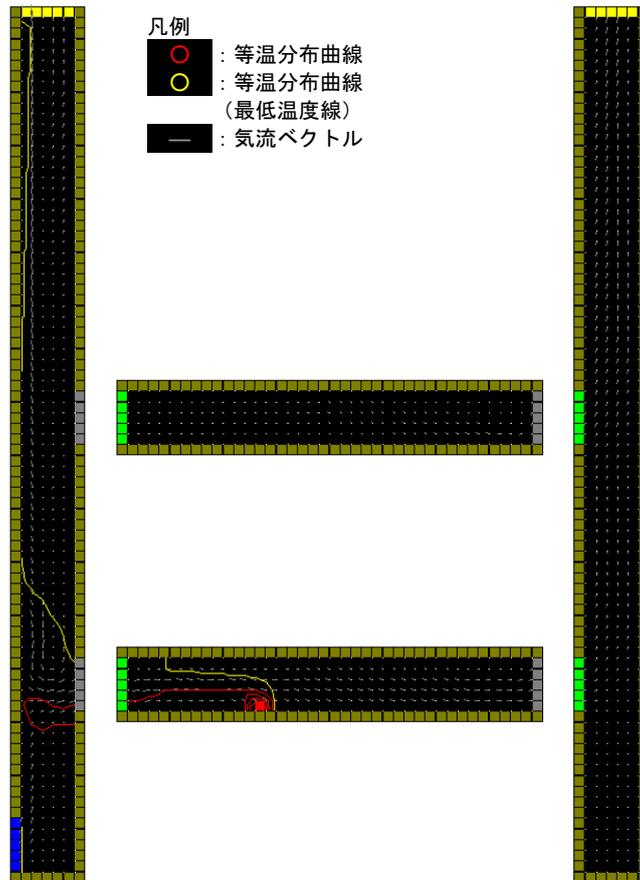


(a) 左側立坑



(b) 中段水平坑道

図 40 模型実験による温度変化測定結果の一例



火災発生から200秒後

図 41 温度変化解析結果の一例 (立坑2本・水平坑道2本モデル)

3.4 地質環境の長期安定性に関する研究

3.4.1 地質環境の長期的変遷に関する研究

第2段階では、幌延地域を事例として、断層運動や海水準変動などの天然現象の履歴に関する調査手法と、地下水流動などに関する調査・解析手法とを組み合わせ、天然現象に伴う地質環境の長期的変遷を予測する手法の検討を行います。

(1) 地形・地質構造と古環境の変遷

平成19年度までに、既存情報の収集・整理、地形・地質調査および花粉分析などを行い、幌延地域における地質構造の変遷や最終氷期における気候の概要を把握することができました⁽⁹⁾、⁽¹⁰⁾。

平成20年度は、地形の変遷を推定するために、宗谷丘陵に位置する幌延町北進地区およびサロベツ平野に位置する幌延町浜里地区の北部において、空中写真の判読、地形・地質調査および砂丘列の地形測量を行いました。また、研究所設置地区周辺に分布する断層やしゅう曲の活動の程度を検討するため、既存の観測点におけるGPS観測を継続しました。

北進地区において地形図や空中写真を用いた地形の判読と地形・地質調査を行った結果、段丘は、声間層（珪藻質泥岩）が広く分布する北進地区の中央部付近に多く認められることが分かりました（図 42上）。また、地すべり地形は、増幌層などの古い時代の地層（中期中新世以前；約1,000万年前以前）が広く分布する北進地区の東部に多いことが分かりました（図 42上）。さらに、谷や尾根の形状は地層ごとに異なることが分かりました（図 42下）。現在認められる地形の分布や形状が地層ごとに異なることは、地層ごとに地形変化の様式が異なることを示唆すると考えられます。このことは、岩盤強度や透水性が地層ごとに異なることを反映している可能性があります。

一方、浜里地区の北部において地形・地質調査および地形測量を行った結果、海岸線から約1kmの範囲では標高約6～8.5mの砂丘が13列あり、それらがほぼ等間隔に配列していることが分かりました⁽¹¹⁾（図 43上）。また、砂丘の地形が良く保存されている侵食をほとんど被っていない地点において、それらの砂丘を形作る砂丘砂を対象に、光ルミネッセンス(OSL)年代測定^{*20}を行いました。その結果、海岸線から約1,800m、1,000mおよび500m離れた砂丘は、それぞれ約5,000年前、約3,000年前および約1,900年前に堆積したことが分かりました⁽¹¹⁾（図 43上）。さらに、最も海側の砂丘からは厚さ5cm程度のピンク色をした火山灰層が見つかりました（図 43右下）。この火山灰層には植物の根の痕が観察され、砂丘砂の岩相や粒度などの特徴と合わせて検討すると、火山灰層を含む砂丘は、陸上で風の作用により形成されたと考えられます⁽¹¹⁾。その火山灰層に含まれる火山ガラスや鉱物の化学組成などを分析した結果、約270年前の樽前山の火山灰であることが分かりました。これらのことから、浜里地区に分布する砂丘は、海側ほどより新しい時代に形成された可能性が考えられます。

今後とも調査を継続して行い、海岸線付近の砂丘や砂州を含めて、サロベツ原野および宗谷丘陵における地形発達史を検討することにより、地形・地質構造の変遷を考慮した水理地質構造モデルの構築手法の信頼性を向上させていく予定です。

*20：OSL年代測定とは、砂が最後に日光にさらされた時点から現在までに浴びた自然放射線量から年代を求める方法です。この方法は、砂丘砂のように、堆積前に十分に日光を浴びて、堆積後は埋没して日光にさらされなかったと考えられる砂粒の年代測定に適用することができます。

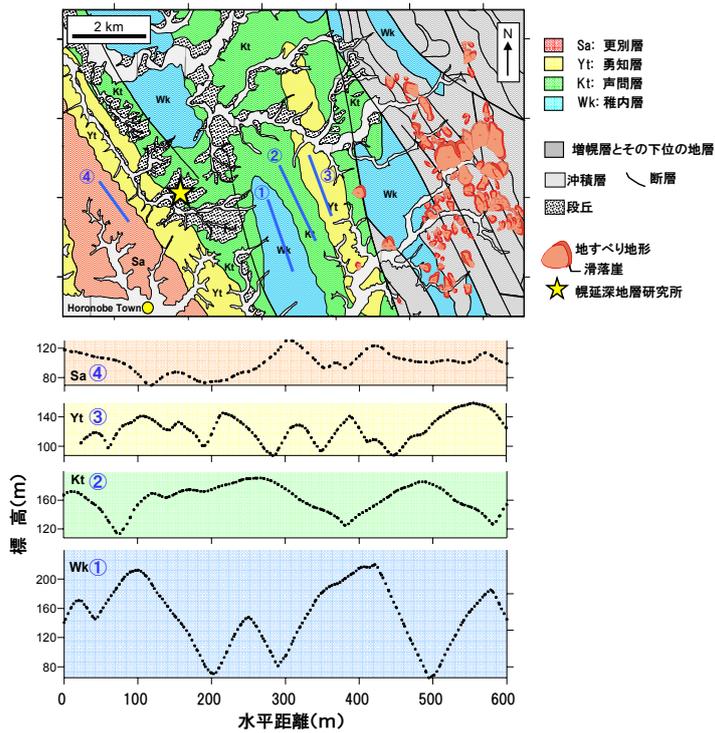


図 42 北進地区の地質、段丘および地すべり地形の分布（上）、各地層の地形断面図（下）
 上図の丸数字と青線は、下図の丸数字に対応した地形断面図の位置を示す。
 地形断面図は、各地層の分布域に認められる河谷を横断するように設定した。

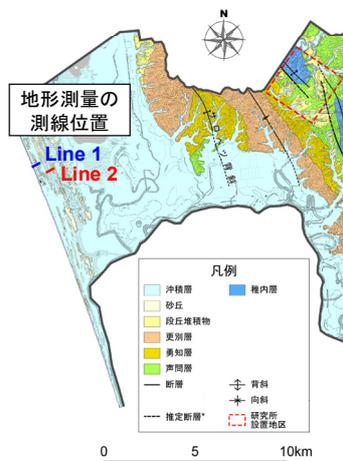
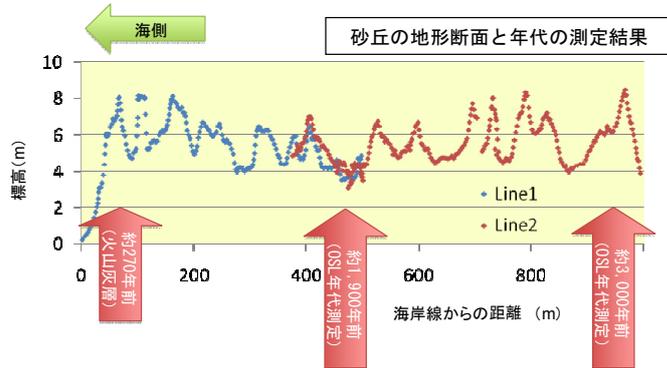


図 43 浜里地区の北部に分布する砂丘の地形と年代⁽¹¹⁾
 上図のLine1とLine2は、左下図のLine1とLine2に対応している。
 左下の地質分布は、原子力機構の成果⁽⁵⁾による。

(2) 地質環境の長期的変化

地形・地質構造の変遷や気候変動などの天然現象に伴う地下水流動の変化を把握するための手法を整備するために、これらの天然現象を考慮した地下水流動解析を、研究所設置地区を含む幌延町西側の海域を対象として行いました⁽¹²⁾。

地形や地質構造、海岸線の位置は、既存文献などに基づいて推定した過去から現在までの地形や地質構造の変遷に基づいて設定しました(図 44)。地下水流動に影響を及ぼす海水面の高さや、地下水涵養量およびその時間変化は、過去の世界的な気候変動、海水準変動の記録に基づいて設定しました。地下水流動解析を行うにあたっては、地形や地質構造などの時間変化に伴う地下水流動や塩分濃度分布への影響を水圧や塩分濃度の時間変化として考慮した解析手法の改良を行いました。

図 45は、約100万年前と現在の地下水の水圧(全水頭)と塩分濃度の分布の解析例です。解析結果から、水圧や塩分濃度は断層の近傍や地表から深度1km程度の範囲での変化が大きく、水圧に比べて塩分濃度の変化の程度は小さいことが分かりました。

今後は、地形や地質構造、気候などの変化の程度に応じた地下水流動への影響や、将来の地質環境の変化を推定し、地下水流動への影響の範囲や変化の程度を把握するための手法の検討を進めていく予定です。

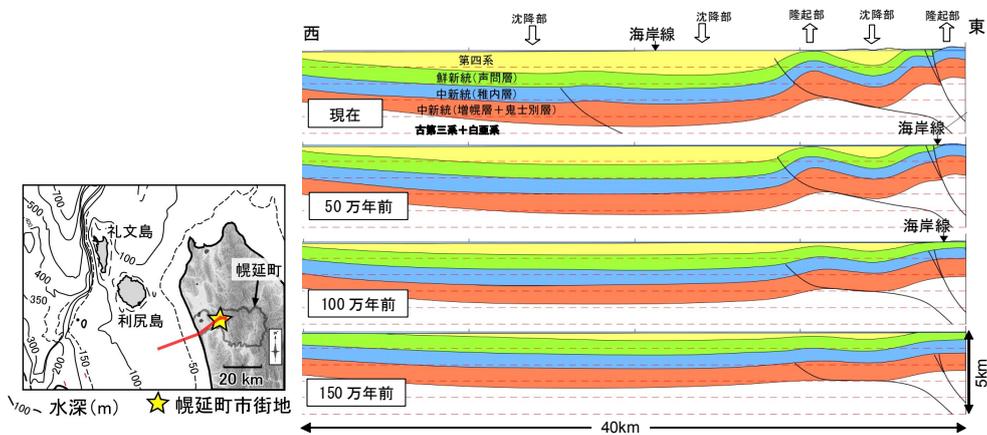


図 44 過去約150万年間の地形・地質構造の変遷⁽⁹⁾、⁽¹²⁾
地質断面図の位置を左下図に示す⁽⁹⁾。

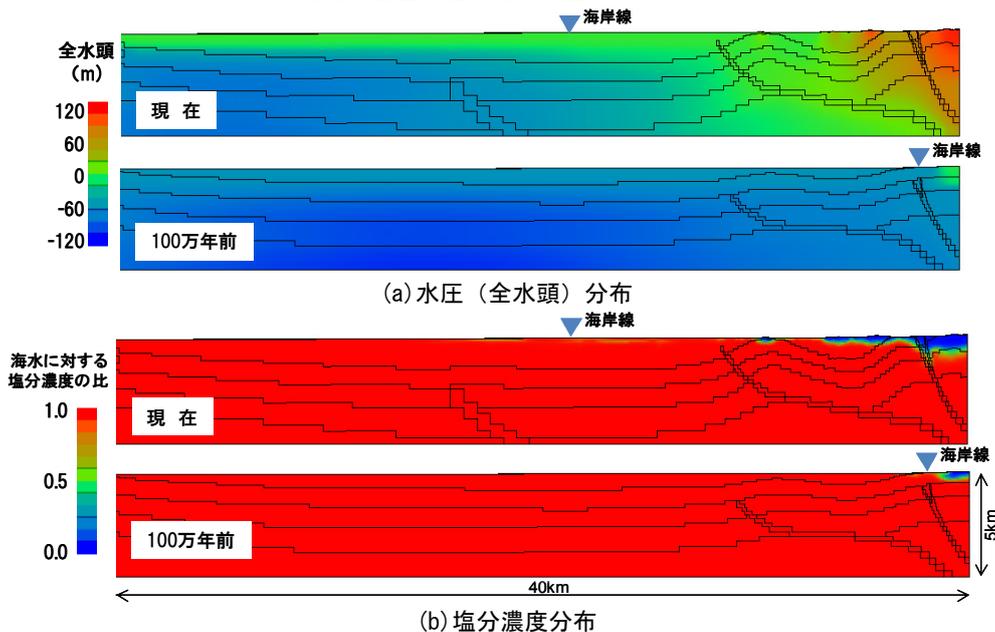


図 45 地下水流動と塩分濃度の長期的変遷の解析例⁽¹²⁾

3.4.2 地震研究

第2段階では、地震観測を継続するとともに、地表および地下施設で取得する地質環境データを組み合わせて、断層活動が地質環境に与える影響について検討します。

平成20年度は、幌延町内に設置している4箇所地震観測点での連続観測を継続するとともに、断層活動が地質環境に与える影響を把握するための地質調査、岩石サンプルの分析および数値解析を行いました。

このうち、地震観測点での連続観測については、平成19年10月1日から平成20年10月4日までの観測データを使って、幌延地域周辺で発生した地震の震源位置の再決定を行いました。この解析には原子力機構が取得した地震観測データに加えて、気象庁や独立行政法人防災科学技術研究所などの研究機関が取得した観測データ^{*21}も利用しました。図 46は、この期間に北海道北部地域で発生した地震の震源分布を表しています。

ほとんどの地震は、地震の規模を示すマグニチュードが3よりも小さい地震でしたが、平成20年10月4日には、図中に星印で示す地点を震源としたマグニチュード3.5の地震が40秒ほどの間隔をあけて2度発生しました。また、地上と地下138mの2箇所地震計が設置されている上幌延観測点での地震観測データ（図 47）から、これらの2つの地震に伴う地下の揺れは地上の揺れに比べてかなり小さいものであったことが確認されました。これらの地震を含め、観測期間中に発生した地震の震源位置は、これまでに観測されてきたものと同様の分布傾向を示しており、同じような場所で地震が発生していることが分かりました。断層活動が地質環境に与える影響を把握するための数値解析では、北海道北部地域を対象に、断層の運動に伴って周辺の岩盤がどのように変形するかについて、感度解析的にコンピュータ上でのシミュレーションを行いました。図 48は、大曲断層を含む一連の断層の分布を仮定した数値解析の結果です。断層の運動に伴って断層を挟んだ両側の岩盤がずれることで、その周辺の地面が鉛直方向にどの程度動くか（鉛直変動量）を示しています。暖色系は隆起、寒色系は沈降を表しています。この図から、断層から10km程度以内の地点において、断層の東側では隆起し、西側では沈降することが分かります。このような断層の運動はこの地域の地質構造の変遷に深く関わっていると推測されます。

断層の活動の特徴を調べるための地質調査および岩石サンプルの分析では、上幌延の大曲断層より東側で地質調査を行い、計6箇所採取した試料の磁化の方向を測定しました。堆積岩には一般に、磁石に引き寄せられる性質を持つ鉱物（磁性鉱物）が含まれています。磁性鉱物は堆積する時に地磁気の影響を受け、N極とS極の方向（地磁気の方位）にほぼ平行な方向を向いて配列します。堆積の後に断層運動などによって岩石が変形したり回転したりすると、岩石中の磁性鉱物のN極とS極の方向（磁化の方向）が地磁気の方位からずれることとなります。このため、岩石の磁化の方向を測定し、現在の地磁気の方位と比較することで、断層運動に伴う岩石の変形や回転を調べることができます。

図 49は、測定結果に基づいて推定した大曲断層の東側における過去の岩石の方位を示しています。この図から、大曲断層の東側の岩石は、現在とほぼ同じ方位を向いていたことが分かります。これにより、大曲断層東側の地層では、過去の断層運動による水平方向の回転がほとんど生じていないことが推測されました。

今後も、断層運動に伴う地質環境の変化について検討を進めていくため、北海道北部地域のほかの断層やその運動に関する特徴を踏まえた数値解析、断層周辺の地質調査および岩石サンプルの分析を実施するとともに、地震観測点での連続観測を継続して行う予定です。

*21：本解析には、気象庁、防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、産業技術総合研究所地質調査総合研究センター、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市および海洋科学技術センターのデータを気象庁・文部科学省が処理した気象庁一元化処理検測値データを利用しました。

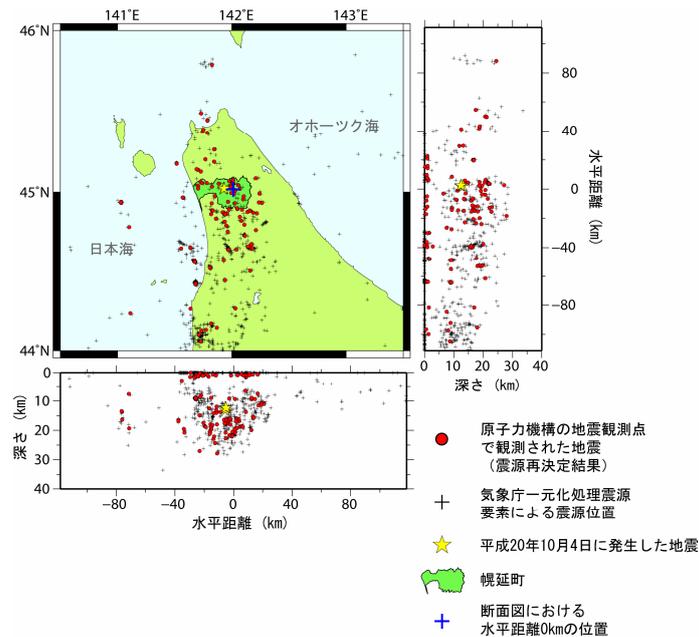


図 46 北海道北部地域で発生した地震の震源分布

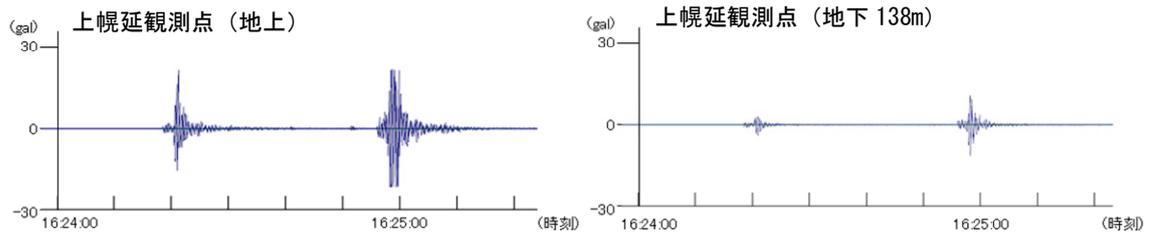


図 47 平成 20 年 10 月 4 日 16 時 24 分頃に上幌延観測点地上（左図）および地下（右図）地震計で記録された南北方向成分の地震波形*22

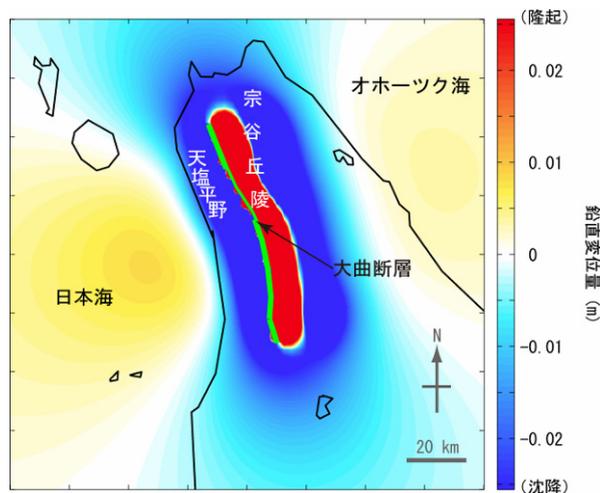


図 48 数値解析によって推定した大曲断層の活動に伴う北海道北部地域の鉛直変動量

*22：記録された地震波形の一部が観測可能な振幅の上限値（20.48gal）を超えています。本観測地点では規模の小さな地震を検知するため、通常に比べて加速度に対する感度を高く設定しており、その結果として、観測可能な振幅の上限値が低くなっています。

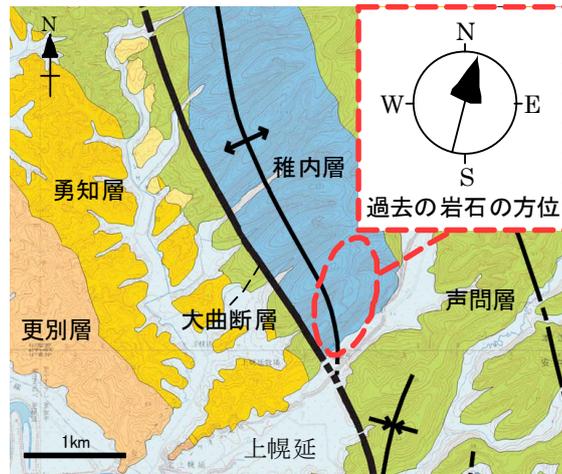


図 49 大曲断層より東側の地点における過去の岩石の方位
地形図は国土地理院発行5万分の1地形図「豊富」「雄信内」を使用

4. 地層処分研究開発

4.1 処分技術の信頼性向上

4.1.1 人工バリアなどの工学技術の検証

地下施設の建設には、支保工の材料としてコンクリート材料を使用しますが、その場合、セメントの間隙水がpH12程度の高アルカリ性となり、周辺の岩盤と地下水に影響を及ぼす可能性があります。そこで、その影響を緩和するために通常のセメントに比べて間隙水のpHが低くなるセメント（以下、低アルカリ性セメント：HFSC^{*23}）の開発を平成13年度から継続しています。平成19年度までに、室内試験や模擬坑道への吹付け試験を通じて、HFSCを用いた吹付けコンクリートが地下施設の建設で要求される強度を得られること⁽¹³⁾やHFSCを用いた鉄筋コンクリートの耐久性などを確認しました⁽¹⁴⁾。

平成20年度は、HFSCを立坑の覆工コンクリートとして用いる場合のセメント材料などの配合の検討や、初期強度の確認などを実施しました。具体的には、地下施設建設で用いられている材料を用いて、設計基準強度および型枠脱型時の強度を満たす配合を選定しました。表 2に選定した基本配合を、表 3に目標とする性能および基本配合における試験結果を示します。表 3から、HFSCを用いた覆工コンクリートが十分な強度を有していることが分かりました。平成21年度以降に予定している原位置試験の実施に際しては、表 2に示した基本配合のコンクリートを地下施設の建設で用いられているコンクリート製造設備を用いて製造し、表 3で示す試験を行い、目標性能が確保されていることを最終的に確認する計画です。

また、坑道掘削に伴い発生する湧水対策のための技術開発の一環として、低アルカリ性のグラウト材料の原位置試験計画を作成しました。原位置試験では、平成19年度から20年度にかけて実施したPB-V01孔の調査結果や換気立坑底盤からのボーリング調査結果から、深度280m付近に存在すると予想される透水性の比較的高い部分を対象として、HFSCの知見を反映したセメント系材料を用いる計画です⁽¹⁵⁾。今後、換気立坑の深度250m大型試験錐座からボーリング孔を掘削し、グラウト材料を注入して透水性を低下させる試験を平成21年度に実施し、その止水性や地下水への化学的影響などを確認する計画です（図 50）。なお本研究は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業である、地下坑道施工技術高度化開発として、平成19年度より実施しています。

さらに、経済産業省資源エネルギー庁が進める地層処分実規模設備の整備に関するプロジェクトを原環センターとの共同研究として実施し、操業技術や人工バリアの長期挙動について、実物大での試験設備について検討し、一部の設備を製作しました。具体的には、地上での設備として、操業技術に係る人工バリアの定置試験設備と人工バリアの長期挙動に係る再冠水挙動の試験設備についての試験計画の立案や設計を行い、人工バリア定置試験設備のうち、緩衝材を持ち上げるための把持装置を製作しました。図 51に緩衝材定置試験設備の概念図と製作した把持装置を示します。一方、地下での設備については、操業技術に係る人工バリアの定置試験設備および人工バリアの回収試験設備と、人工バリアの長期挙動に係る再冠水挙動およびオーバーパック^{*24}の腐食挙動の試験設備について検討しました。また、これらの検討結果に、幌延の地下施設の建設工程や坑道の仕様、試験条件や地質環境条件などのほか、国外事例の調査結果を踏まえ、地上と地下での試験設備の絞り込みを行い、全体計画を策定しました^{(16)、(17)}。

*23：Highly Fly-ash contained Silicafume Cement の略で通常のセメント（普通ポルトランドセメント）にシリカフェーム、フライアッシュを加えて、組成を変えることで間隙水のpHを低下させたセメントのことです。

*24：人工バリアの構成要素の1つです。ガラス固化体を包み込み、ガラス固化体に地下水が接触することを防止し、地圧などの外力からガラス固化体を保護する容器のことを言います。候補材料は炭素鋼などの金属です。

表 2 HFSCを用いた覆工コンクリートの基本配合

種類	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単体量 (kg/m ³)						高性能 AE減水剤 (結合材×%)	
			水	結合材			細骨材	粗骨材		
				OPC	SF	FA				
一般部	45.0	44.0	144	320	128	64	128	793	1037	1.00
高強度	37.5	42.5	144	384	154	77	154	737	1025	1.10

OPC: 普通ポルトランドセメント、SF: シリカフューム、FA: フライアッシュ

表 3 HFSCを用いた覆工コンクリートの目標性能および試験結果

試験項目	目標値	基本配合での試験結果
スランプ*25 (cm)	18±2.5	19.0
空気量 (%)	4.5±1.0	4.6~5.0
圧縮強度 (N/mm ²)	一般部	24*
	高強度	40*

*幌延の地下施設における設計基準強度 (材齢28日)

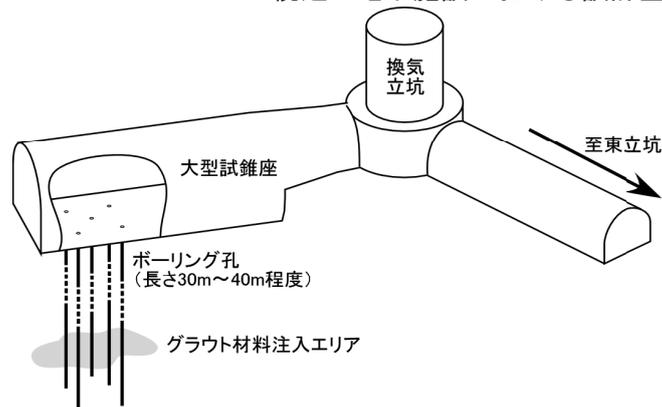


図 50 低アルカリ性グラウト材料の原位置試験計画位置

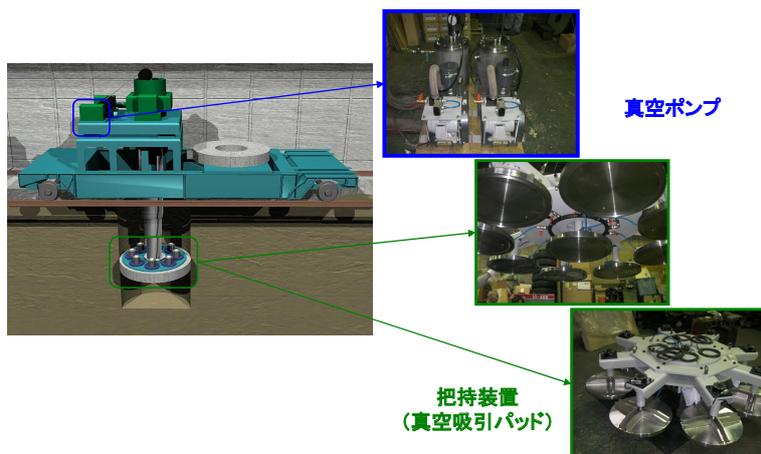


図 51 緩衝材定置試験設備の概念図と把持装置⁽¹⁶⁾、⁽¹⁷⁾

*25: 硬化前のコンクリートの軟らかさの程度を示す指標の1つで、円錐状の試験器に硬化前のコンクリートを詰め、その試験器をはずした時の、コンクリートの上端の沈下量で表します。

4.1.2 設計手法の適用性確認

幌延の地下施設で実施予定の原位置試験のうち、人工バリアに関する試験や坑道閉鎖試験などでは、緩衝材（ベントナイト^{*26}）やオーバーパック材料（炭素鋼などの金属材料）を用いる予定です。しかし、それらの人工バリアの材料は幌延地域にみられるような塩水系地下水に対しては、淡水系地下水と異なる挙動を示すことが知られています。このため、第1段階では、塩水系地下水を用いて、緩衝材やオーバーパックなどの人工バリアの構成材料の特性や挙動に関する基礎データ取得のための室内試験を実施しました。また、これまでに得られた室内試験結果や第1段階で取得した地質環境データなどに基づき、「第2次取りまとめ」⁽¹⁸⁾で示された人工バリアなどの設計手法の適用性を検討し、更新しました⁽¹⁹⁾。

第2段階では、これまでに十分な基礎データが取得されていない塩水系地下水やセメントの影響を考慮した条件に対する人工バリアの構成材料の特性や挙動について、データの取得を継続し、メカニズムの理解や、その理解に基づいたより一般化されたモデル（汎用モデル）の開発などを進めるとともに、人工バリアとその周辺岩盤の長期挙動について東海研究開発センター核燃料サイクル工学研究所と協力して検討します。また、それらの情報を整理し、第1段階で取得した地質環境データおよび坑道掘削に伴い得られるデータを用いて、第1段階で検討した人工バリアや地下施設などの設計手法⁽²⁷⁾を原位置試験の仕様検討に適用します。

平成20年度は、緩衝材の膨潤特性、透水特性、オーバーパック材料の腐食特性のほか、オーバーパック材料の腐食に伴って発生する水素ガスの岩石中の透気特性などについての室内試験やモデルの検討を継続しました。膨潤特性については、ベントナイトが地下水と接触した際に発生する膨潤圧^{*27}について、塩水系地下水やセメントの影響を考慮した条件でのデータ取得を継続しました。また、ベントナイトが様々な塩濃度の地下水と接触した際に発生する膨潤圧を、ベントナイトの種類や密度、あるいはケイ砂混合率などが異なった場合でも、接触する地下水の熱力学データ^{*28}に基づいて計算できるモデルの開発を継続しました。具体的には、平成19年度までに開発したモデル⁽²⁰⁾、⁽²¹⁾に温度の影響を考慮したモデルの検討を行いました。これまでの研究で、膨潤圧に及ぼす温度の影響についてはほとんど報告されていませんが、温度上昇に伴って膨潤圧は低下すると推測されます。

ベントナイトの透水特性については、膨潤特性と同様に、塩水系地下水やセメントの影響を考慮した条件でのデータ取得を継続しました。従来の結果では、淡水系の地下水の場合と比較して、透水係数は増加する傾向であることが分かっており、これまでのところ、同様な傾向が得られています。

オーバーパック材料の腐食特性については、候補材料である炭素鋼に対するセメントの影響を考慮した高アルカリ性の塩水系地下水を用いた腐食試験（局部腐食や応力腐食割れ試験）や、代替材料であるチタンと銅に対する幌延の地下水（HDB-6孔および10孔）を用いた腐食試験を継続しました。

また、ガスの移行特性については、地層中の透気特性に関するデータ拡充のため、コア試料（HDB-6孔およびPB-V01孔）を用いたガスの移行試験を継続しました。

4.2 安全評価手法の高度化

4.2.1 安全評価モデルの高度化

第1段階の調査研究では、ボーリング調査で得られたコアや地下水を用いて物質移動・遅延に関する室内試験を行いました⁽²²⁾。これまでに、幌延地域の岩石（HDB-3孔）へのセシウムやセレン

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

*27：ベントナイトは水と接触すると水を吸って膨らむ性質があり、その現象を膨潤と言います。膨潤しようとするベントナイトを膨らまないように拘束した時に発生する圧力を膨潤圧と言います。

*28：この解析で対象としている熱力学データは、地下水中の水の活量に着目しています。例えば、地下水の塩濃度が変化した場合、水分子は溶解しているナトリウムや塩化物イオンなどに水和することにより束縛され、活動度（活量）が低い水となります。この水の状態をエネルギーで表したものが熱力学データで、条件に左右されない普遍的な指標として取扱うことができます。

などの元素の収着分配係数^{*29}を取得したほか、それらの収着メカニズムについて検討しました⁽²³⁾。その結果、セシウムは岩石に含有されている粘土鉱物（スメクタイトやイライト）とのイオン交換反応により選択的に収着すること、その中でも特にイライトへの収着が重要であることが分かりました。一方、酸化還元条件に鋭敏なセレンは岩石試料中の有機物や鉄鉱物（黄鉄鉱）の部分に濃集していたことから、酸化還元反応により岩石中の有機物や鉄鉱物へ選択的に収着すると推定しました。

第2段階の調査研究では、第1段階から継続実施するものを含めて、実際の地質環境への安全評価手法の適用性を確認するにあたり、既存のボーリング調査や換気立坑先行ボーリング調査のほか、坑道掘削時の調査などで取得した岩石や地下水などを利用した室内試験を行います。その室内試験を通じて、安全評価における物質移動・遅延の解析に必要な基礎データ（拡散係数^{*30}、収着分配係数、間隙率、溶解度など）の取得を東海研究開発センター核燃料サイクル工学研究所と協力して継続します。また、物質移動・遅延に影響を及ぼすと考えられる要因（有機物、コロイド^{*31}、微生物活動など）に関する基礎データの蓄積を進め、メカニズムや現象の理解を通じて、データの信頼性と精度の向上を図ります。

平成20年度は、平成18年度から実施している既存のボーリング孔から採取したコアや地下水を用いての、岩石中での物質（セシウム、ヨウ素、重水^{*32}）の拡散特性と収着特性、ならびに有機物の特性評価に関する室内試験を継続しました。

具体的には、岩石へのセシウムの収着分配係数を、深度の浅い順から、声問層（HDB-11孔、深度約400m）、稚内層の浅部（HDB-11孔、深度約460m）、稚内層（HDB-11孔、深度約600m）の各岩石に対して、カリウム濃度を変化させて取得するとともに、各岩石の粘土鉱物（スメクタイトやイライト）含有率と各粘土鉱物に対する収着分配係数も取得し、セシウムの収着メカニズムについて検討しました。図 52に岩石と粘土鉱物へのセシウムの収着分配係数とカリウム濃度との関係⁽²⁴⁾を示します。図 52から、岩石とイライトへの収着分配係数はカリウム濃度の増加に伴い減少するものの、スメクタイトへの収着分配係数に変化がみられないことから、第1段階の調査研究で示唆されたイライトへの収着が重要であることが確認されました⁽²⁴⁾。また、各粘土鉱物へのセシウムの収着分配係数と各粘土鉱物含有率から、岩石全体に対する収着分配係数を見積もったところ、計算値の方が実測値より低目になるものの、傾向は良く一致することが分かりました。この原因として、イライトがセシウムを単位面積あたりに収着できる量（収着サイト密度）の違いが考えられるため、今後、この課題について検討する予定です。

また、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業として、平成19年度より実施している処分システムの化学影響評価に関する研究として、既存のボーリング孔から採取したコアや地下水を用いての、岩石中での物質の拡散特性や収着特性のほか、微生物の特性評価に関する室内試験を継続しました。

具体的には、拡散試験は、HDB-6孔から採取した岩石（稚内層）を用いて、セシウムを例として、評価手法や測定手法が異なる3種類の代表的な方法（枯渇法、濃度分布法、透過拡散法）で実施し、それぞれの試験方法から得られた拡散係数と収着分配係数の整合性について検討しました。その結果、3種類とも整合性のある拡散係数と収着分配係数を取得できることが分かりました。また、セシウム、ヨウ素、トリチウムの拡散係数に及ぼす塩濃度の影響や、ニッケルおよびユーロピウムの拡散試験についても、上記の3種類の方法で実施しました。陽イオンであるセシウムの拡散係

*29：収着分配係数は、特に放射性廃棄物の処分においては、岩盤などの固相と地下水などの液相における放射性核種などの収着による濃度比を表しており、環境中における放射性核種の移行予測や放射性廃棄物の処分における安全評価などに利用される重要なパラメータのひとつです。

*30：岩盤などの固相中を放射性核種などが、濃度の高い方から低い方へ移動していく際の速さを表す係数で、収着分配係数と同様、安全評価などに利用される重要なパラメータのひとつです。

*31：0.1～0.001マイクロメートル程度の極微細な粒子が、液体・気体・固体などの中に分散している状態のことで、ここでは地下水中に分散した粘土鉱物などを想定しています。

*32：水分子（H₂O）を構成する水素原子が通常2倍の質量数を持つ2重水素（D：重水素）で置換されている水を重水と言い、D₂Oと表現します。また、片方の水素原子がDに置換されている場合、HDOと表現します。通常、濃度が薄い場合は、HDOになっています。この重水素原子と酸素原子間の結合による赤外線吸収の違いを分析することにより、HDOの濃度を求めることができます。

数は塩濃度の増加に伴い減少し、反対に、陰イオンであるヨウ素の拡散係数は増加することが分かり、岩石中においてもベントナイト中と同様に静電的影響を受けることが分かりました。さらに、セメント系材料と岩石との接触を想定し、高アルカリ性の環境の影響を模擬した研究として、pH12.5程度の高アルカリ性の溶液と一定期間接触させた岩石（HDB-6孔、稚内層）へのセシウム、ニッケル、トリウム の 収着試験を行いました。その結果、未変質の岩石への収着分配係数と同等であったことから、アルカリ変質による影響はないことが示唆されました。しかしながら、X線回折法による表面分析からも岩石の状態に変化がみられなかったことから、変質そのものが起こっていなかった可能性もあり、今後も検討を継続する予定です。平成19年度は、有機物（フミン酸^{*33}）の存在が岩石への収着分配係数に及ぼす影響について検討し、セレンの岩石への収着分配係数はフミン酸の影響をほとんど受けないことを示しましたが、平成20年度は、ユーロピウムとトリウムについて調べました。その結果、両元素の収着分配係数は、共存するフミン酸濃度の増加に伴い減少し、特に酸化数の多いトリウムの方が強い影響を受けることが分かりました。この傾向は、従来の知見とも一致しています⁽²⁵⁾。

微生物については、平成19年度に引き続いて、HDB-10孔（深度500～550m）から採取した地下水中の微生物の種類や生菌数などの定量評価手法について検討し、微生物定量評価手法の標準化案を提示しました。

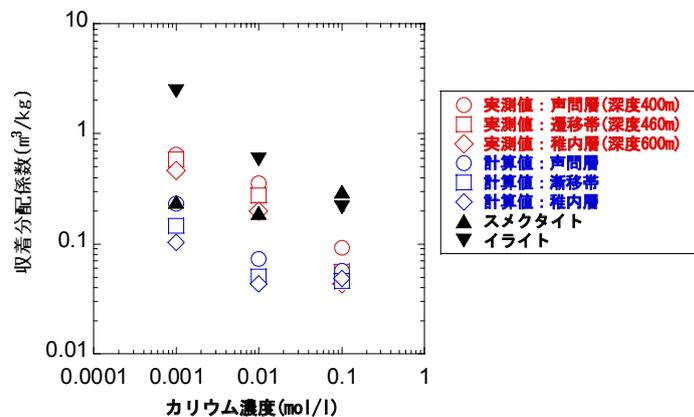


図 52 岩石および粘土鉱物へのセシウムの収着分配係数とカリウム濃度との関係⁽²⁴⁾

4.2.2 安全評価手法の適用性確認

第2段階の調査研究では、第1段階で地下水流動や物質移動の解析に用いたモデルの妥当性を確認するとともに、先行ボーリング調査や坑道内で取得される岩石などを用いた透水性などの物性データの拡充⁽²⁶⁾などを継続します。また、地下水流動や物質移動の解析を試行する過程で得られる知見を整理・統合することにより、安全評価手法の高度化を進めます。

平成20年度は、実際の地質環境データによる安全評価手法の適用性の確認を目的とした調査や解析などへの取り組みの具体的化について検討を継続しました⁽²⁷⁾。検討にあたっては、第1段階の調査研究で取得したデータによる幌延地域の地質環境を事例とした物質移動の解析結果⁽²⁸⁾や、地質環境の調査から解析、物質移動に至る一連の手法の高度化に関する研究計画⁽²⁹⁾の基本方針に基づいて、安全評価上重要な項目の抽出や整理に関する検討を行いました。表層部については、安全評価上重要と考えられる地層の透水性などの調査、水収支に関する観測から地質構造のモデル化、降水量などの水理学的な条件の設定、評価に至る情報の反映の手順などを含めた評価のための考え方の整理を行いました⁽³⁰⁾。

今後の調査研究においては、第2段階の調査研究計画⁽²⁷⁾に基づく調査や解析において、解析に必要な手法の適用に際しての空間的な規模などの特徴に応じた整理を行うとともに、第2段階の調査の進展に伴って更新する地質構造モデルなどに基づく解析結果への影響の大きさや範囲などについて検討を行う予定です。

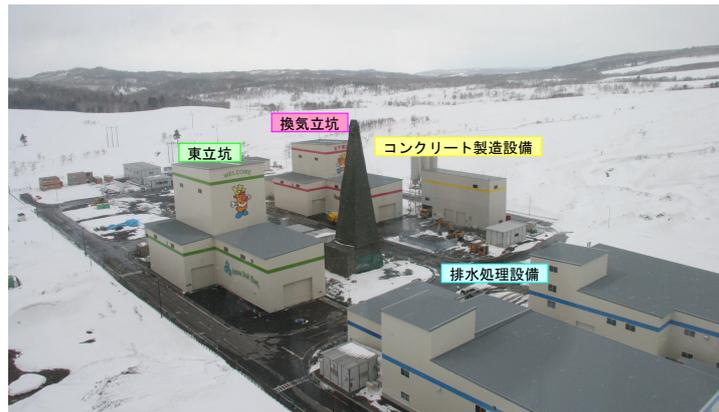
*33：植物などが微生物により分解される最終生成物のうち、酸性である無定形高分子物質のことで、腐植酸とも呼ばれます。

5. 地下施設の建設

平成20年度は、平成17年度に開始した地下施設工事（第Ⅰ期）を継続しました。地下施設工事については換気立坑を深度約250m、東立坑を深度約140mまで掘削するとともに、換気立坑の深度250mおよび東立坑の深度140mにおいて水平坑道の一部掘削を行いました。また、立坑掘削の進捗に伴い発生する湧水対策として、排水処理設備の増設を行うとともに、湧水量の推定および湧水箇所を特定するための換気立坑先行ボーリング調査（PB-V01孔）を継続しました。立坑および水平坑道の掘削では、可燃性ガスの存在を考慮し、切羽での防爆仕様機器の使用やガス濃度測定などの可燃性ガス対策を行いながら掘削を進めました。地下施設関連設備の状況を図 53に示します。

また、立坑掘削に伴い発生する掘削土（ズリ）は、掘削土（ズリ）置場（図 54）に保管しています。掘削土（ズリ）置場は土壌汚染対策法の遮水工封じ込め型に準じた二重遮水シート構造としています。

立坑掘削に伴い発生する掘削土（ズリ）は、建設現場における簡易分析や公的機関による詳細な分析（公定分析）を定期的実施し、適切な管理を行いながら掘削を進めています。表 4に掘削土（ズリ）に係るモニタリングの公定分析の結果を示します。分析結果から、ホウ素、ヒ素およびセレンは自然的原因（岩石に元から含まれているため）により溶出量基準値以上の値となっていますが、いずれも掘削土（ズリ）置場に保管可能な第2溶出量基準値以下でした。また、掘削に伴い発生する坑道からの排水^{*34}および掘削土（ズリ）置場浸出水については、排水処理設備にて処理した後に排水管路を経由して天塩川に放流しています。地下施設からの排水の水質については、7.2に分析項目と結果を示します。



平成21年3月27日撮影

図 53 地下施設関連設備の状況



平成20年5月8日撮影

図 54 掘削土（ズリ）置場の盛土・保管状況

*34: 「排水」とは、地下施設工事掘削に伴って発生する水とし、「湧水」とは、坑道内に自然に発生する水を指します。

表 4 掘削土(ズリ)モニタリング調査結果 (土壌溶出量: 公定分析)

分析項目	単位	換気立坑	東立坑	参考値 (土壌汚染対策法)	
				溶出量基準値	第2溶出量基準値
ホウ素	mg/l	3.7~5.6	9.8	1	30
ヒ素		0.007~0.040	0.028	0.01	0.3
フッ素		<0.08~0.24	<0.08	0.8	24
セレン		0.015~0.022	0.024	0.01	0.3
カドミウム		<0.001	<0.001	0.01	0.3
鉛		<0.001~0.004	0.002	0.01	0.3
シアン		不検出 (<0.1)	不検出 (<0.1)	不検出	1
六価クロム		<0.005	<0.005	0.05	1.5
水銀		<0.0005	<0.0005	0.0005	0.005
アルキル水銀		不検出 (<0.0005)	不検出 (<0.0005)	不検出	不検出

掘削土(ズリ)モニタリングは平成20年4月から平成21年3月までの試料採取における調査分析結果を記載しています。

6. 地上施設の建設

平成20年度は、国際交流施設（仮称）の建設工事を6月より開始し、鉄骨工事まで行いました。図 55(a)に国際交流施設（仮称）の完成イメージ図（外観）および図 55(b)に平成21年3月時の工事状況（鉄骨工事）を示します。

本施設では、国外および国内研究者との交流活動を行うとともに、地域の方々との交流の場として講演会や報告会などを行います。

なお、運用開始は、平成21年秋頃を予定しています。



(a) 完成イメージ図（外観）



平成21年3月20日撮影

(b) 工事状況（鉄骨工事）

図 55 国際交流施設（仮称）

7. 環境モニタリング

7.1 騒音・振動・水質・動植物に関するモニタリング調査

研究所設置地区を対象とした環境モニタリング調査については、幌延深地層研究センターの造成工事着手前より継続して実施しています。調査位置を図 56に示します。

調査項目は、これまでと同様、地下施設工事により発生する可能性のある「騒音」、「振動」、変化し可能性のある「水質」、水質・水量などの変化により影響を受ける可能性がある工事範囲下流域の「魚類」、「植物」を対象としました。

また、平成15年度の調査において環境保全措置として移植を行ったハイドジョウツナギの移植先での生育状況の調査を継続しました。

調査の実施時期、調査方法を表 5に示します。

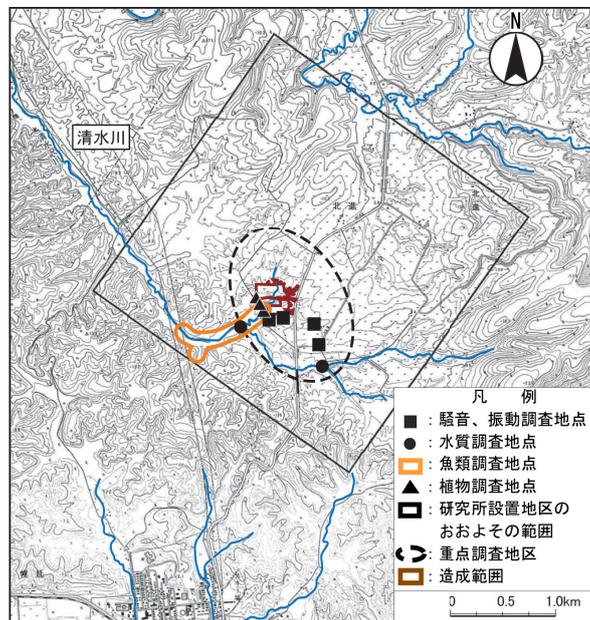
騒音・振動および水質については、平成20年度に換気立坑、東立坑および水平坑道の掘削と地下施設関連設備の工事を実施しましたが、いずれもそれ以前と比較して大きな変化は認められませんでした。

魚類については、これまでと較べて大きな変化がみられず、6科7種が確認されました。法指定種や環境省のレッドリストなどで絶滅のおそれのある魚類を抽出したものを重要種として表 6に示します。確認された重要種は、スナヤツメ、サクラマス、エゾウグイ、エゾトミヨ、ハナカジカの計5種でした。

ハイドジョウツナギは、移植地への活着および自生地の個体と同様の伸長成長が確認され、さらには平成19年度と同様に多数の繁殖個体（開花個体）も確認されました。

植物については、造成工事などの着手前と比較して主要種の生育状況に変化は認められませんでした。

なお、これらの調査のうち、魚類およびハイドジョウツナギを含む植物の調査計画および調査結果については、有識者からの助言をもとに評価しています。モニタリング調査項目と結果を、表 7にまとめて示します。



国土地理院発行2万5千分の1地形図「幌延」、「本流」を使用

図 56 環境モニタリング調査位置

表 5 環境モニタリング調査実施内容(平成20年度)

調査項目	調査実施日	調査方法
騒音	春季：平成20年 6月 3日～ 4日 夏季：平成20年 9月 1日～ 2日 秋季：平成20年11月 5日～ 6日 冬季：平成21年 2月 3日～ 4日	「特定建設作業に伴って発生する騒音の規制に関する基準」および「騒音に係る環境基準の評価マニュアル」に示す方法
振動	春季：平成20年 6月 3日～ 4日 夏季：平成20年 9月 1日～ 2日 秋季：平成20年11月 5日～ 6日 冬季：平成21年 2月 3日～ 4日	「振動規制法施行規則」に準拠する日本工業規格Z8735「振動レベル測定方法」に示す方法
水質	春季：平成20年 6月 3日 夏季：平成20年 9月 1日 秋季：平成20年11月 4日 冬季：平成21年 2月 2日	「水質汚濁に係る環境基準、生活環境の保全に関する環境基準（河川）」に示す方法
魚類	春季：平成20年 6月 2日 夏季：平成20年 9月 1日 秋季：平成20年10月 8日	目視観察・採捕調査
ハイドジョウツナギ	春季：平成20年 6月 2日 夏季：平成20年 9月 2日	目視観察
植物	春季：平成20年 6月 2日 夏季：平成20年 9月 2日 秋季：平成20年10月 8日	コドラート調査*35

表 6 確認された重要種（魚類）

目	科	種	選定根拠							
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
ヤツメウナギ	ヤツメウナギ	スナヤツメ			VU	VU		希		
サケ	サケ	サクラマス(ヤマメ)				NT*	N*	減**		
コイ	コイ	エゾウグイ					N			
トゲウオ	トゲウオ	エゾトミヨ			NT	NT	R			○
カサゴ	カジカ	ハナカジカ					N			

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：「改定・日本の絶滅のおそれのある野生生物—レッドデータブック—4 汽水・淡水魚類」(環境省2003年)の記載種
VU：絶滅危惧Ⅱ類 NT：準絶滅危惧
- ④：「汽水・淡水魚類のレッドリストの見直しについて」(環境省 2007年)の記載種
VU：絶滅危惧Ⅱ類 NT：準絶滅危惧
- ⑤：「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
R：希少種 N：留意種
- ⑥：「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
希：希少種 減：減少種
- ⑦：「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
- ⑧：「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

*：ヤマメが対象

**：サクラマスが対象

*35：1m×1m程度の調査区(コドラート)を設定し、調査区内の植物の生育状況(種類、占有面積、生育密度など)を詳細に把握し、毎年度の調査によって、変化の状況を確認する方法です。

表 7 モニタリング調査項目と結果

調査項目	調査結果
騒音	等価騒音レベルは、春季～冬季を通じて、昼間は38～55デシベル、夜間は31～49デシベルでした。(工事着手前：昼間39～53デシベル 夜間30未満～37デシベル)
振動	春季～冬季を通じて、昼間は30デシベル未満～33デシベル、夜間は30デシベル未満でした。(工事着手前：昼間30未満～33デシベル 夜間30未満～30デシベル)
水質	造成工事着手以前と同様に、水質が維持されているものと判断されました。
魚類	6科7種を確認しました。 重要種はスナヤツメ、サクラマス、エゾウグイ、エゾトミヨ、ハナカジカの5種を確認しました。造成工事着手以前と同様に魚類の生息環境が維持されていると判断されました。
ハイドジョウツナギ	移植地への活着および自生地の個体と同様の伸長成長が確認され、さらには多数の繁殖個体(開花個体)も確認されました。生育は良好であると判断されました。
植物	造成工事着手以前と比較するとほぼ同様の種構成が確認され、主要種について被度・群度の大きな変化は認められませんでした。植生環境は造成工事着手以前と同様に維持されていると判断されました。

7.2 地下施設の建設に伴うモニタリング調査

地下施設の建設に伴うモニタリング調査として実施している、水質モニタリング調査については、立坑掘削に伴い発生する排水、掘削土(ズリ)置場からの浸出水、排水処理設備にて処理後の水、掘削土(ズリ)置場とその周辺の地表水、清水川河川水および排水の放流先である天塩川河川水について実施しました。掘削土(ズリ)置場とその周辺の水質モニタリング調査位置を図 57に、天塩川の水質モニタリング調査位置を図 58に示します。

水質モニタリング調査の分析項目は、表 8に示すとおりであり、水質汚濁防止法の排水基準および北のりもい漁業協同組合との協定書に記載されている分析項目などです。なお、モニタリングの分析項目が多いため、本報告書では表 8の「主要な分析項目」についてのみ、結果を掲載しています。モニタリング調査の詳細な結果は、ホームページ^{*36}で公開しています。平成20年度の調査結果について、以下に示します。

地下施設からの排水に係るモニタリングの公定分析の結果を表 9に示します。立坑からの排水は、坑道からの湧水に含まれるホウ素が自然的原因(地下水に元から含まれているため)により高い値を示していますが、排水処理設備からの排水処理後の水は排水基準値以下となっています。

掘削土(ズリ)置場とその周辺の地表水の調査結果を表 10に示します。平成19年5月より掘削土(ズリ)置場へ掘削土(ズリ)の搬入を開始しておりますが、掘削土(ズリ)搬入前後でのA1～A4地点、A6地点の水質分析結果については、季節変動があるものの、ほぼ同じような値と傾向を示しました。この結果から、掘削土(ズリ)搬入による周辺環境への影響はないものと考えられます。

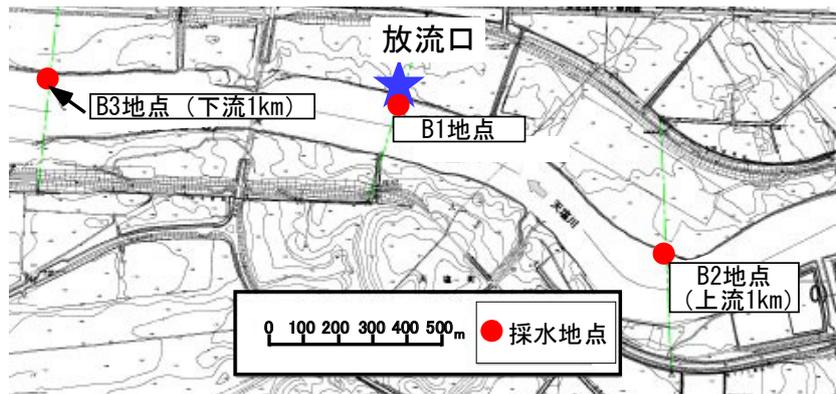
清水川の水質モニタリング調査結果を表 11に示します。図 57に示したA5地点およびA7地点の水質分析結果は、平成20年10月に降雨の影響で浮遊物質量が低い値を示した以外は、掘削土(ズリ)の搬入前とほとんど変化がみられないことから、地下施設や幌延深地層研究センターからの環境への影響はないものと考えられます。

天塩川の調査結果を表 12に示します。4月、5月および8月の結果では、浮遊物質量が協定値を超えた箇所がありましたが、融雪による増水などの影響によるもので、自然的要因と考えられます。また、その他の分析値においては、協定値を下回る結果となりました。天塩川への放流前後において、明瞭な変化が確認されないことから、放流口周辺環境への影響はないものと考えられます。

*36：幌延深地層研究センターホームページ URL ; <http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/>



図 57 掘削土(ズリ)置場とその周辺の水質モニタリング調査位置



※採水は、各地点において、表層、中層および深層の3層で行った。

図 58 天塩川の水質モニタリング調査位置

表 8 地下施設の建設に伴う水質モニタリング調査項目

調査対象	調査地点	調査頻度	主要な分析項目*
立坑からの排水	排水処理施設(原水槽)	1回/月	カドミウム、ヒ素、セレン、フッ素、ホウ素、pH、浮遊物質量、塩化物イオン、ほか
掘削土(ズリ)置場浸出水	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池		
排水処理設備にて処理後の水	排水処理施設(揚水設備)		
清水川	掘削土(ズリ)置場の近傍(A5地点)および幌延深地層研究センターの近傍(A7地点)(計2地点)	1回/月	ホウ素、全窒素、全アンモニア、pH、浮遊物質量、ほか
天塩川	放流口前面(B1地点:河口から19km)および放流口の上流1km(B2地点)・下流1km(B3地点)の表層・中層・深層(計9地点)		
掘削土(ズリ)置場とその周辺の地表水	掘削土(ズリ)置場近傍の観測井(A1~A4地点)および掘削土(ズリ)置場雨水調整池(A6地点)	A1~A4地点: 4回/年 A6地点: 1回/月	カドミウム、ヒ素、セレン、フッ素、ホウ素、pH、浮遊物質量、塩化物イオン、ほか

*水質汚濁防止法および北のもい漁業協同組合との協定書等により、「主要な分析項目」以外の分析項目については、別途、4回/年実施している(A1~A4地点を除く)。

表 9 地下施設からの排水に係るモニタリング調査結果（水質分析：公定分析）

分析項目	単位	立坑からの排水	掘削土(ズリ)置場浸出水	排水処理設備にて処理後の水	参考値 (水質汚濁防止法排水基準値)
カドミウム	mg/l	<0.01	<0.01	<0.01	0.1
ヒ素		<0.01~0.04	<0.01~0.02	<0.01	0.1
セレン		<0.01	<0.01~0.01	<0.01	0.1
フッ素		<0.8~2.30	<0.8	<0.8	8
ホウ素		36~61	1.2~8	<0.1~3.0	10
pH	—	8.2~8.6	7.5~7.9	7.0~8.6	5.8~8.6
浮遊物質	mg/l	14~180	7~51	<1~1	200 (日間平均150)
塩化物イオン		1,300~1,910	68.5~422	715~2,330	—

地下施設からの排水に係るモニタリングは平成20年4月から平成21年3月までの採水における調査分析結果を記載しています。

表 10 掘削土(ズリ)置場とその周辺の地表水の水質モニタリング調査結果

分析項目	採水地点	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20年3月 掘削土(ズリ) 搬入後	平成20年			平成21年
				5月	8月	11月	2月
カドミウム mg/l	A1	<0.001~0.004	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	A2			<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	A3			<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	A4			<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	A6			<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
ヒ素 mg/l	A1	<0.005~0.011	<0.005~0.015	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	A2			<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	A3			<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	A4			<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	A6			<0.005	0.006	<0.005	<0.005
セレン mg/l	A1	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	A2			<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	A3			<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	A4			<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	A6			<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
フッ素 mg/l	A1	<0.1~0.7	<0.1~1.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	A2			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	A3			<0.1	0.1	0.1	0.1
	A4			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	A6			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
ホウ素 mg/l	A1	<0.02~50.7	<0.02~63.0	46.7	49.1	44.7	32.9
	A2			2.97	6.20	7.34	3.86
	A3			24.7	29.4	26.0	22.0
	A4			0.1	0.02	0.02	<0.02
	A6			0.09	0.09	0.09	0.03
pH	A1	4.6~7.4	5.2~7.2	7.0	6.9	6.9	6.8
	A2			5.7	6.0	5.7	6.1
	A3			6.7	6.8	6.8	6.8
	A4			5.7	5.4	5.3	5.4
	A6			6.6	7.2	6.5	7.4
浮遊物質 mg/l	A1	12~173	13~500	—	—	—	—
	A2			—	—	—	—
	A3			—	—	—	—
	A4			—	—	—	—
	A6			26	33	27	1
塩化物イオン mg/l	A1	5.1~2,910	9.3~2,740	2,500	2,900	2,930	2,550
	A2			245	374	492	303
	A3			1,110	1,420	1,440	1,400
	A4			13.7	10.7	11.2	10.0
	A6			31.5	16.9	36.1	23.7

表 8に示した「主要な分析項目」のみを抜粋。平成20年度のA6地点の結果はA1~A4地点と同じ調査月のみを記載。

表 11 清水川の水質モニタリング調査結果

分析項目	採水地点	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20年3月 掘削土(ズリ) 搬入後	平成20年												平成21年		
				4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月			
カドミウム mg/l	A5	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	
	A7			<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	
ヒ素 mg/l	A5	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	
	A7			<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	
セレン mg/l	A5	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	
	A7			<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	
フッ素 mg/l	A5	<0.1～0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
	A7			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
ホウ素 mg/l	A5	0.03～0.3	0.11～0.44	0.04	0.13	0.17	0.23	0.19	0.29	0.29	0.25	0.25	0.29	0.31	0.24	0.20	0.21	
	A7			0.03	0.16	0.20	0.29	0.25	0.25	0.29	0.25	0.25	0.24	0.20	0.24	0.20	0.21	
pH	A5	6.4～7.1	6.8～7.2	6.5	6.6	7.0	7.1	6.8	7.1	7.1	6.8	7.0	6.9	6.6	7.1	7.0	7.2	
	A7			6.6	6.8	7.0	7.3	7.0	7.0	7.2	6.8	6.8	6.8	7.0	6.8	6.8	6.8	
浮遊 物質 mg/l	A5	1～20	1～12	18	5	6	10	8	11	36	3	3	3	3	3	2	2	
	A7			15	5	3	4	6	6	6	270	2	1	3	1	1		
塩化物 イオン mg/l	A5	14.4～30.5	16.3～42.4	16.0	16.1	29.4	32.8	18.2	26.6	24.0	18.6	17.6	44.8	36.1	59.0	26.7	25.8	
	A7			16.6	18.9	20.5	24.5	24.8	31.4	27.0	24.2	19.9	26.6	26.7				

表 8に示した「主要な分析項目」のみを抜粋。

表 12 天塩川の水質モニタリング調査結果

分析項目	採水地点	平成18年6月~11月	平成18年12月~平成20年3月	平成20年												平成21年	平成20年4月	北るもい漁業協同組合 協定値
		(放流前)	(放流後)	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	~平成21年3月		
ホウ素 mg/l	B1	表層	0.01~4.1	0.01	0.01	0.03	0.06	0.15	0.06	0.04	0.03	0.03	0.01	0.03	0.03	<0.01~4.6	5	
		中層		0.01	0.01	0.03	0.14	0.60	0.27	0.94	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03			
		深層		<0.01	<0.01	4.6	3.8	3.0	3.5	2.8	0.03	0.04	0.02	0.03				
	B2	表層		0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.08			0.03
		中層		0.01	0.01	0.03	0.13	0.04	0.86	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02			0.03
		深層		0.01	0.01	4.5	3.9	3.3	3.7	0.96	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03			
	B3	表層		0.01	0.01	0.03	0.09	0.06	0.07	0.05	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02			0.03
		中層		0.01	0.01	0.16	0.18	0.42	1.2	0.06	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02			0.03
		深層		0.01	0.01	1.4	2.2	4.1	3.8	0.05	0.03	0.13	0.02	0.03	0.03			
全窒素 mg/l	B1	表層	0.16~2.30	0.89	0.56	0.50	0.11	0.18	0.81	0.78	0.50	1.4	0.93	0.88	0.66	0.11~1.8	20	
		中層		1.30	0.48	0.60	0.15	0.21	0.73	0.69	0.60	1.4	0.99	0.81	0.70			
		深層		1.30	0.66	0.16	0.86	0.88	1.6	0.62	1.4	1.0	1.0	0.75				
	B2	表層		1.10	0.46	0.62	0.14	0.21	0.73	1.0	0.67	1.4	0.90	0.74	0.64			
		中層		1.00	0.50	0.71	0.25	0.23	0.83	1.1	1.0	1.3	0.82	0.84	0.66			
		深層		1.30	0.50	0.16	1.0	0.81	1.8	1.0	0.66	1.6	0.91	0.80	0.71			
	B3	表層		1.00	0.80	0.61	0.28	0.26	0.72	0.80	0.64	1.6	0.91	0.94	0.70			
		中層		1.10	0.81	0.54	0.11	0.21	0.84	0.98	0.58	1.4	0.92	0.88	0.60			
		深層		1.10	0.67	0.40	0.37	0.85	1.6	0.92	0.62	1.7	0.97	0.83	0.69			
全アノモニア mg/l	B1	表層	<0.05~0.26	<0.05	0.06	<0.05	<0.05	0.05	0.12	<0.05	0.05	0.11	0.83	0.09	0.08	<0.05~0.96	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 している。	
		中層		0.05	0.06	<0.05	0.05	0.11	0.17	0.15	<0.05	0.09	0.92	0.13	0.11			
		深層		0.06	<0.05	<0.05	0.45	0.26	0.42	0.55	0.05	0.11	0.85	0.09	0.07			
	B2	表層		<0.05	0.06	<0.05	0.06	0.11	0.08	0.05	0.05	0.12	0.89	0.11	0.11			
		中層		<0.05	<0.05	<0.05	0.17	<0.05	0.22	0.06	<0.05	0.12	0.76	0.07	0.06			
		深層		0.06	<0.05	0.25	0.77	0.25	0.41	0.36	<0.05	0.11	0.85	0.09	0.09			
	B3	表層		0.05	<0.05	<0.05	0.06	0.05	0.09	<0.05	<0.05	0.09	0.89	0.13	0.10			
		中層		0.08	0.05	0.08	0.10	0.21	0.25	<0.05	0.06	0.11	0.90	0.09	0.06			
		深層		0.07	0.05	0.24	0.29	0.28	0.34	<0.05	0.09	0.16	0.96	0.11	0.09			
pH	B1	表層	6.9~7.9	7.2	7.1	7.6	7.5	7.7	7.5	7.3	7.2	7.3	7.0	7.2	6.9	6.9~7.9	5.8~8.6	
		中層		7.1	7.1	7.6	7.4	7.4	7.3	7.1	7.2	7.3	7.2	7.2	7.0			
		深層		7.1	7.1	7.5	7.5	7.5	7.4	7.0	7.2	7.3	7.1	7.3	6.9			
	B2	表層		7.1	7.2	7.7	7.7	7.6	7.5	7.4	7.3	7.3	7.2	7.2	7.0			
		中層		7.1	7.3	7.5	7.5	7.5	7.3	7.5	7.3	7.5	7.3	7.2	7.1			
		深層		7.1	7.3	7.5	7.5	7.5	7.4	7.0	7.3	7.3	7.2	7.2	7.1			
	B3	表層		7.1	7.0	7.9	7.7	7.5	7.2	7.0	7.1	7.3	7.2	7.1	7.0			
		中層		7.1	7.1	7.6	7.6	7.3	7.2	7.2	7.1	7.3	7.2	7.2	7.1			
		深層		7.1	7.1	7.6	7.6	7.5	7.4	7.2	7.2	7.2	7.1	7.2	7.1			
浮遊物質 mg/l	B1	表層	<1~120	80	25	2	1	3	2	1	3	6	<1	2	1	<1~140	20	
		中層		100	26	2	3	3	2	5	3	8	<1	2	1			
		深層		100	29	9	7	27	5	5	3	6	2	2	2			
	B2	表層		100	24	2	2	3	1	1	3	3	<1	<1	<1			
		中層		130	30	3	2	3	4	4	2	3	<1	<1	<1			
		深層		130	29	4	5	12	8	2	4	5	<1	<1	2			
	B3	表層		120	19	2	2	2	2	1	1	3	3	<1	<1			
		中層		120	22	<1	7	3	4	2	4	3	<1	<1	<1			
		深層		140	22	4	2	6	5	2	15	5	<1	<1	<1			

表 8に示した「主要な分析項目」のみを抜粋。採取地点の表層とは水面、深層とは河床1m付近における採取場所です。中層は基本的に表層と深層の1/2の水深で採取しました。

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、その他にも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20年度の主な研究協力の結果は以下のとおりです。

8.1 国内機関との研究協力

8.1.1 大学などとの研究協力

北海道大学

圧縮ベントナイト中における物質の移動経路の評価に関する研究および地下水・岩石中の有機物特性に関する研究について研究協力を行いました。

前者について、平成20年度は、ベントナイト中の水の動きや物質の移動経路に関する室内試験を継続するとともに、平成18年度から開始したこの研究を総括し、1) $\text{H}_2^{18}\text{O}^{*37}$ とトリチウム水^{*38}をトレーサーとして行った、ベントナイトの主要な粘土鉱物のスメクタイト中の拡散実験と電場勾配をかけた電気浸透実験から、スメクタイト中の層間水と間隙水ともに移動可能であり、水素イオンと水酸化イオンへの解離状態が通常の水と同様の性質であること、2) スメクタイト中の物質の流れに対する広がりやすさ（分散長）は、間隙水の塩濃度やスメクタイトの密度によらず、溶存ヘリウム>水>ナトリウムイオンの順となり、その違いは、移動経路として、層間と間隙を考慮することで説明できること、および3) 陰イオンである塩化物イオンの分散長は水とナトリウムイオンの中間程度であり、スメクタイトの密度の増加に伴い増加し、この原因として、移動経路の屈曲度^{*39}が増加する可能性がある、という結論を得ました。

塩濃度やスメクタイトの層間に存在する陽イオン（層間陽イオン）は層間距離や粘土表面の電場に影響を及ぼすことが知られています。今後、間隙水の塩濃度や層間陽イオンの種類を変えた試験などを行い、間隙水の種類と移動するイオンの種類との関係などについて検討する予定です。

後者の、地下水・岩石中の有機物特性に関する研究においては、地下水に溶けている有機物と岩石に含まれる有機物の分析を行いました。その結果、有機物の化学成分比や安定同位体の分析結果から、地下深部の岩石中の有機物の起源が、地層の堆積時に海水から同時に堆積した植物プランクトン（主に珪藻）であると考えられました。また、地下水中の有機物は岩石中から溶出したものであり、地下に生息する微生物の栄養源になっている可能性が示されました。今後、地下水の化学組成や微生物活動と有機物の関わりについて研究を行っていく予定です。

埼玉大学

研究所設置地区周辺に分布する新第三紀堆積岩（稚内層、声間層）を対象に、換気立坑先行ボーリング調査で取得したコア試料からガスを抽出し、その成因を炭素の同位体組成から検討するとともに、同位体組成の深度方向の変化から、ガスの流れを遮る地層・地質構造の存在について推定を試みました。

筑波大学

岩石などに対する地球化学的研究として、幌延地域の岩石や地下水を用いてカラム試験などの室内試験や化学分析を実施しました。その結果をもとに、岩石の反応性、特にpHの緩衝作用^{*40}についての考察を行い、酸化的環境下において黄鉄鉱の溶解反応により水素イオンが生じ、pHが低下することが分かりました。また、岩石の様々なサイズの空隙の分布を把握し、岩石-水反応の

*37：水分子（ H_2O ）を構成する酸素原子のほとんどは質量数が16ですが、この研究では、質量数が18の酸素原子に置換された特殊な水を使用します。この酸素原子の質量数の違いを分析することにより、水の動きを測定します。

*38：水分子（ H_2O ）を構成する水素原子が通常の水素原子の3倍の質量数を持つ3重水素（T：トリチウム）で置換されている水をトリチウム水と言います。Tは低いエネルギーのβ線を放出することから、このβ線を検出することにより水の動きをみる事ができるため、水のトレーサーとして生物学など様々な研究に使用されています。

*39：物質が岩石などの媒体中を移動する場合、間隙中を屈曲しながら進むことになります。屈曲度は、この実際に移動した経路の長さ（経路長）と最短の経路の長さ（媒体の厚さに相当）の比で表され、経路の複雑さを表す指標として取扱われています。

*40：pHの緩衝作用とは、酸や塩基を加えても溶液中の水素イオン濃度（pH）をほぼ一定に保つ作用のことです。

化学計算に必要な比表面積^{*41}に関する情報を取得しました。

名古屋大学、静岡大学

精密制御定常信号システムデータの解析技術の高度化について、共同研究を行いました。平成20年度は、遠隔監視システムの観測データを使って地下の散乱体（使用する信号の波長に比べて短波長の不均質構造）を推定するための理論的検討や計算プログラムの開発を進めました。

広島大学

断層帯および亀裂を考慮した堆積岩地盤の水理学的構造の決定と地下水の移動解析について共同研究を行いました。平成20年度は、既存のボーリング調査で採取した稚内層、声間層、勇知層の岩石試料を用いて、各地層の透水係数や間隙率と、各地層が過去に受けた応力との関係を室内試験などにより調べるとともに、これまでに実施した研究の成果を取りまとめました。

武蔵工業大学^{*42}

微量元素の放射化分析手法に関して共同研究を行いました。平成20年度は、稚内層、声間層の岩石を対象として、岩石中に含まれる微量元素の放射化分析を行い、地質構造や岩石の種類、鉱物の種類ごとに、微量元素の分布状態を確認しました。また、微量元素が岩石中に保持される化学条件（pH・酸化還元条件）を確認しました。

静岡大学

地下深部に生息する微生物の種類や性質を把握することを目的として、深度500m付近の地下水を採取し、その分析を行いました。その結果、地下水の酸化還元状態に関与する微生物として硝酸イオンや硫酸イオンを還元する微生物、メタンを生成する微生物などを同定することができました。また、実際の地下深部における、これらの微生物の活性（増殖速度など）を知るために、現場培養法の検討を行い、酸化剤の還元速度などの増殖速度に関わる基礎的知見を得ることができました。

岡山大学

光ファイバーを用いた水分計測技術の開発について、研究協力を開始しました。地下水流動解析の上部境界条件として必要となる地下水涵養量を算出するため、表層地盤の不飽和帯における土壤水分観測は重要な調査技術です。また、この技術は、人工バリアである緩衝材中の水分挙動のモニタリングへの適用についても有望であると考えています。本研究は、表層地盤の不飽和帯や人工バリアの緩衝材などの高精度な水分データの取得を目的として実施しました。光ファイバーを用いることによりケーブル1本で多点かつ長距離にわたって計測が可能であり、従来の測定機器と比較して土壤水分の分布を求める上での利点が多いと考えています。

平成20年度は、従来の圧力を計測するセンサーを、光ファイバーに置き換えることを検討しました。その結果、光ファイバー式の圧力計でこれまでに事例のない負圧の計測に関して、既存の光ファイバー式の圧力センサーを適用することが可能であり、その中でもFPI^{*43}と呼ばれる方式が望ましいことが分かりました。

8.1.2 その他の機関との研究協力

電力中央研究所

地質・地下水環境特性評価に関する共同研究を実施しています。平成20年度は、ボーリング孔の角度がほぼ水平に近い状態のコントロールボーリング技術（掘削と各種調査）の適用性を確認しました（HCD-3孔）。また、地下施設においては、坑道掘削に伴う周辺岩盤の力学、地球化学特

*41：ある物体の単位質量あたりの表面積のことです。

*42：武蔵工業大学は、平成21年4月1日から、「東京都大学」に校名を変更しました。

*43：ファブリ・ペロー干渉計（Fabry-Perot interferometer）の略で、非常に高い分解能を持つのが特徴です。

性への影響を把握するための調査ボーリング孔を、深度140mの立坑や水平坑道から周囲に掘削し、坑道掘削前の初期値として、BTV、ガンマ線密度、比抵抗調査、弾性波探査、地下水の採水・分析を行いました。今後、坑道の掘削に伴う変化のデータを取得していきます。

幌延地圏環境研究所^{*44}

「財団法人北海道科学技術総合振興センターとの地層の研究に関する研究協力協定」に基づき、室内試験や種々の分析に必要な岩石コアや地下水の提供を行うとともに、定期的に研究に関する情報交換会や両機関の所有する試験設備を利用した技術的な交流を行いました。

清水建設株式会社

化学平衡論解析を用いた地下水流動調査に関する共同研究および地質環境モデルの構築技術の高度化に関する共同研究を行いました。前者は、地上で計測された物理化学パラメータ（pH、Eh、電気伝導度など）や地下水の水質データをもとに、原位置におけるpHやEhを定量的に推定する地球化学計算の手法を構築することを目的としています。HDB-11孔の試験結果を用いた地球化学モデリングによる平衡論解析では、原位置地下水の水質の推定が可能になりました。また、同様の解析をHDB-1～11孔のデータについても検討した結果、深度とともにpHは酸性側にシフトすること、Ehは約-220mVに収束することが推定されました。今後は、これらの解析結果と原位置のデータとの整合性を確認していく予定です。

また、後者については、平成20年度は、第1段階で得られた比抵抗データの再整理ならびに平成18、19年度に原子力機構が地下施設周辺で取得した高密度電気探査結果を活用し、三次元比抵抗モデルと水質分布モデルの更新作業を実施しました。

原子力安全基盤機構^{*45}・産業技術総合研究所^{*46}

安全評価手法の適用性に関する研究を、原子力機構を含めた三者の共同研究として実施しました。安全評価手法のうち、特に地下水流動・物質移動解析手法の適用性を確認することを目的に、研究所用地内の東立坑近傍においてボーリング調査（SAB-1孔）を実施しました。

北海道立地質研究所^{*47}

幌延地域における古地形の変遷について意見交換を実施しました。また、幌延地域における第四紀以降の海陸分布や堆積環境の変遷について、現地での地層観察を含めて意見交換を実施しました。

原子力環境整備促進・資金管理センター

経済産業省資源エネルギー庁が進める沿岸域塩淡水境界・断層評価技術に関するプロジェクトと地層処分実規模設備の整備に関するプロジェクトの2テーマについて共同研究を実施しました。前者については、塩水と淡水が混在する場における地下水流動、水質形成および物質移動に関する調査を幌延町沿岸域での陸域と海域で電磁法探査を実施し、その領域の二次元（一部、三次元）比抵抗構造を推定しました。また、浜里地区でボーリング孔を掘削し、地下水の分布に関する情報を把握するためトモグラフィー調査を実施しました。

また、後者のプロジェクトは、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

*44：幌延地圏環境研究所は、財団法人 北海道科学技術総合振興センターが設置した研究所であり、国の補助を受けて、幌延深地層研究センターの施設や設備を活用した地下空間利用を中心とする研究を実施しています。

*45：独立行政法人 原子力安全基盤機構は、平成15年に設立され、規制行政庁である経済産業省原子力安全・保安院とともに、原子力エネルギーの利用における安全の確保を目的とした機関です。

*46：独立行政法人 産業技術総合研究所は、平成13年に設立され、産業技術の幅広い分野における様々な技術開発を総合的に行っている、日本最大級の研究組織です。研究分野は大きく分けてライフサイエンス、情報通信・エレクトロニクス、ナノテクノロジー・材料・製造、環境・エネルギー、地質・標準・計測の6分野があります。

*47：北海道立地質研究所は、北海道の地質と地下資源に関する研究機関（北海道立地下資源調査所）として設立されました。現在、①地域資源の開発・利用・管理に関する研究、②国土利用保全、地下環境保全に関する研究、③地質災害の要因解明と防止に関する研究、④地学情報のセンター機能の充実、などを行っています。

実感・体感できる地上設備と、深地層研究施設を活用した地下設備を整備し、人工バリアの搬送・定置に関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。

平成20年度は、4.1.1でも述べたように、地上および地下で実施するための操業技術と人工バリアの長期挙動に関わる試験設備について検討し、地上での試験設備の一部を製作しました。また、試験を実施するための建屋の設計を行うとともに、仮設の建屋を建設し、実物大のオーバーパックと人工バリアシステムの展示を開始しました。

8.2 国外機関との研究協力

Nagra^{*48} (スイス)

幌延深地層研究計画では、ボーリング調査で地下水の流れやすさ(透水性)を調べる透水試験を実施してきました。

平成20年度は、これまでに取得した透水試験データの品質確認と数値解法による透水性の再解析を、Nagraの専門家と共同で実施しました。その結果、品質管理された現場での試験手法に従い取得したデータは、透水性の解析に使用できる良好な品質であることが確認されました。一方、試験データの一部において、数値解法による透水性の解析結果が現場で算出した解析結果と異なることが分かりました。

今後は、引き続き透水試験のデータについて再解析を実施し、データの品質確認を行う計画です。

モンテリ・プロジェクト^{*49}

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「難透水性堆積岩の地球化学的評価試験」および「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20年度は、前者の試験において、難透水性堆積岩中に存在する間隙水の地球化学特性を把握し、その形成プロセスを解明する手法の開発、地下水採取方法などの要素技術開発を実施しました。

後者の試験においては、鉄の腐食の状況を観測するための装置を設計、製作するとともに、モンテリ岩盤研究所の調査坑道に装置を設置しました。

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、ANDRA^{*50}(フランス)と堆積岩を対象とした地質環境調査技術や地下施設における調査手法や原位置試験などについて情報交換を行いました。

*48: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste): 放射性廃棄物管理協同組合

Nagraは、スイスにおける放射性廃棄物の地層処分の実施機関で、スイス国内の地下研究施設(グリムゼルなど)や幌延と同種の堆積岩のサイトにおいて地層処分に係る様々な調査研究を行っています。

*49: モンテリ・プロジェクト (Mont Terri Project) は、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。現在、原子力機構を含め6ヶ国から12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。

*50: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (National radioactive waste management agency): 放射性廃棄物管理公社

ANDRAは、フランスにおける放射性廃棄物処分の実施機関であり、低中レベルの放射性廃棄物処分場を操業するとともに、高レベル放射性廃棄物および長寿命の中レベル放射性廃棄物処分に関する研究開発の中核機関で、現在、幌延と同種の岩石である堆積岩を対象に深地層の研究施設計画を進めています。

引用文献

- (1) 中山雅, 真田祐幸, 山口雄大, 杉田裕 (編) (2008): “幌延深地層研究計画 平成 20 年度調査研究計画”, JAEA-Research 2008-063.
- (2) 核燃料サイクル開発機構 (2005): “平成 16 年度研究開発評価 (中間評価) 報告書評価課題「幌延深地層研究計画」”, JNC TN1440 2005-002, 参考資料 4, pp. 18-23.
- (3) 戸村豪治, 前川恵輔, 横田秀晴 (2008): “幌延深地層研究計画における表層水理現地調査”, 日本地下水学会 2008 年秋季講演会, pp. 160-165.
- (4) 藪内聡, 國丸貴紀, 石井英一, 羽出山吉裕, 井尻裕二, 松岡清幸, 井原哲夫, 松波伸次朗, 牧野章也 (2009): “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-岩盤の水理特性調査-”, JAEA-Data/Code 2008-026.
- (5) 太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗 (2007): “幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階 (第 1 段階) 研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」”, JAEA-Research 2007-044.
- (6) 森岡宏之, 山口雄大, 舟木泰智, 尾留川剛 (2007): “幌延深地層研究計画における立坑掘削時の計測計画及び情報化施工プログラム”, JAEA-Research 2007-050.
- (7) 山崎雅直, 山口雄大, 舟木泰智, 藤川大輔, 津坂仁和 (2008): “幌延深地層研究計画における水平坑道掘削時の計測計画及び情報化施工プログラム”, JAEA-Research 2008-068.
- (8) 核燃料サイクル開発機構 (2005): “幌延深地層研究計画 地下施設実施設計 -設計報告書-”, JNC TJ5410 2005-002.
- (9) 松井裕哉, 中山雅, 真田祐幸 (編) (2007): “幌延深地層研究計画 平成 18 年度調査研究成果報告”, JAEA-Research 2007-092.
- (10) 中山雅, 真田祐幸, 杉田裕 (編) (2008): “幌延深地層研究計画 平成 19 年度調査研究成果報告”, JAEA-Research 2008-074.
- (11) 北沢俊幸 (2009): “北海道北部天塩平野における海岸砂丘列の配列様式と年代”, 日本堆積学会 2009 年大会, ポスター13.
- (12) 今井久, 山下亮, 塩崎功, 浦野和彦, 笠博義, 丸山能生, 新里忠史, 前川恵輔 (2009): “地下水流動に対する地質環境の長期変遷の影響に関する研究”, JAEA-Research 2009-001.
- (13) 松田武, 納多勝, 入矢桂史郎, 小西一寛, 中山雅, 小林保之 (2008): “幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメントの適用性に関する研究”, JAEA-Research 2007-089.
- (14) 中山雅, 小林保之, 佐藤治夫, 入矢桂史郎, 納多勝, 松田武 (2009): “低アルカリ性セメントを用いた吹付けコンクリートの実用性検討- (3) 6 年間の海洋暴露試験に基づいた鉄筋コンクリートの耐久性評価”, 日本原子力学会 2009 年春の年会, p. 219.
- (15) 日本原子力研究開発機構 (2009): “平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 地下坑道施工技術高度化開発 報告書”.
- (16) 原子力環境整備促進・資金管理センター (2009): “平成 20 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”.
- (17) 中司昇, 畑中耕一郎, 佐藤治夫, 杉田裕, 中山雅, 宮原重憲, 朝野英一, 斉藤雅彦, 須山泰宏, 林秀郎, 本田ゆう子, 菱岡宗介: “地層処分実規模設備整備事業における工学技術に関する研究 (共同研究)”, JAEA-Research 2009-044.
- (18) 核燃料サイクル開発機構 (1999): “わが国における高レベル放射性廃棄物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, p. III-2.
- (19) 藤田朝雄, 谷口直樹, 松井裕哉, 棚井憲治, 西村繭果, 小林保之, 平本正行, 前川恵輔, 澤田淳, 牧野仁史, 笹本広, 吉川英樹, 柴田雅博, 若杉圭一郎, 濱克宏, 操上広志, 國丸貴紀, 石井英一, 竹内竜史, 中野勝志, 太田久仁雄, 瀬尾俊弘, 宮原要, 内藤守正, 油井三和 (2007): “幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階 (第 1 段階) 研究成果報告書 分冊「地層処分研究開発」”, JAEA-Research 2007-045.
- (20) 佐藤治夫 (2007): “Thermodynamic Understanding on Swelling Pressure of Bentonite Buffer”, Proceedings for the 15th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE15), April 22-26, 2007, Nagoya, Japan, ICONE15-10207 (pdf format).
- (21) 佐藤治夫 (2008): “緩衝材及び埋め戻し材の膨潤圧の熱力学的計算”, 第 10 回放射性廃棄物地

- 層処分に関する情報交換会 (Sapporo Conference 2008) 報告書, pp.145-155.
- (22) 核燃料サイクル開発機構 (2005) : “幌延深地層研究計画 平成 16 年度調査研究成果報告”, JNC TN5400 2005-001.
- (23) Xia, X., 柴田雅博, 亀井玄人(2004) : “海水系地下水条件下での堆積岩に対するセレンの収着”, 日本原子力学会バックエンド部会, 第 20 回バックエンド夏期セミナー資料集, ポスター7-1~7-9.
- (24) 石寺孝充, 黒澤精一(2008) : “幌延地域に分布する堆積岩類への Cs⁺の収着に及ぼすイライト含有率及び K⁺の影響”, 日本原子力学会 2008 年秋の大会, p. 685.
- (25) 飛塚早智子, 小原幸利, 飯島和毅, 佐藤治夫(2003) : “還元条件における Np の溶解度に及ぼすフミン酸の影響”, JNC TN8400 2003-018.
- (26) 下茂道人, 熊本創, 唐崎健二, 佐藤久, 澤田淳(2008) : “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(II)”, JAEA-Research 2008-101.
- (27) 岩月輝希, 佐藤治夫, 棚井憲治, 稲垣学, 澤田淳, 新沼寛明, 石井英一, 前川恵輔, 戸村豪治, 真田祐幸, 國丸貴紀, 浅森浩一, 新里忠史, 常盤哲也, 杉田裕, 山崎雅直, 中村隆浩, 藤田朝雄, 谷口直樹, 小林保之, 林克彦, 斉藤雄也, 館幸男, 飯島和毅, 笹本広(2009) : “幌延深地層研究計画における第 2 段階の調査研究計画(H20-21)”, JAEA-Research 2009-002.
- (28) 牧野仁史, 澤田淳, 前川恵輔, 柴田雅博, 笹本広, 吉川英樹, 若杉圭一郎, 小尾繁, 濱克宏, 操上広志, 國丸貴紀, 石井英一, 竹内竜史, 中野勝志, 三枝博光, 竹内真司, 岩月輝希, 太田久仁雄, 瀬尾俊弘(2005) : “地質環境の調査から物質移行解析にいたる一連の調査・解析技術; 2 つの深地層の研究施設計画の地上からの調査研究段階(第 1 段階)における地質環境情報に基づく検討”, JNC-TN1400 2005-021.
- (29) 前川恵輔, 澤田淳, 太田久仁雄, 操上広志, 國丸貴紀, 舟木泰智, 濱克宏, 竹内真司, 天野健治, 三枝博光, 牧野仁史, 中野勝志, 石丸恒存, 瀬尾俊弘, 清水和彦(2007) : “地質環境調査・物質移行評価に関する研究の基本的な方針”, JAEA-Review 2007-011.
- (30) 前川恵輔, 川村淳, 加藤智子, 戸村豪治, 稲垣学(2008) : “北海道幌延地域を事例とした堆積岩地域の浅層部における水理・物質移行特性把握のための手法検討の進め方”, 日本原子力学会第 24 回バックエンド夏期セミナー資料集, ポスター5.

付録 参考資料
(平成20年度外部発表資料)

*著者アルファベット順に記載

- 天野健治, 濱克宏, 三枝博光, 松岡稔幸, 竹内真司, 岩月輝希, 宮本哲雄, 豊田岳司(2008): “次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発, 4; 東濃地域の地質環境調査事例を対象としたボーリング調査のノウハウや判断根拠の分析”, 日本原子力学会2008年秋の大会, 2008年9月.
- 青木智幸, 真田祐幸, 城まゆみ, 山本卓也, 松井裕哉(2008): “堆積軟岩中の坑道掘削に伴う応力-水連成現象による長期的変形挙動について”, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集(CD-ROM), pp. 709-716, 2008年9月.
- 浅森浩一, 國友孝洋, 中島崇裕, 大原英史, 茂田直孝, 渡辺俊樹, 熊澤峰夫(2008): “ACROSSの地質環境モニタリング技術への適用-北海道幌延地域における遠隔監視システムの開発-”, 日本地球惑星科学連合2008年大会, 0135-P004, 2008年5月.
- Doughty, C., Thang, C.-F., 畑中耕一郎, 藪内聡, 操上広志(2008): “Application of direct-fitting, mass integral, and multirate methods to analysis of flowing fluid electric conductivity logs from Horonobe, Japan”, Water resources research, vol.44, W08403, 2008年8月.
- 舟木泰智, 石井英一, 常盤哲也(2009): “新第三紀堆積岩中の割れ目は主要な水みちとなり得るか?”, 応用地質, (印刷中).
- 濱克宏, 天野健治, 三枝博光, 宮本哲雄, 豊田岳司, 太田久仁雄(2008): “次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発, 3; 東濃地域の地質環境調査事例を対象とした統合化データフローダイアグラム作成の履歴分析”, 日本原子力学会2008年秋の大会, 2008年9月.
- 濱克宏, 岩月輝希, 長谷川琢磨, 中田弘太郎, 富岡祐一, 後藤和幸(2008): “原子力機構-電力中央研究所共同研究; 瑞浪超深地層研究所周辺の水理・物質移動特性評価に関する研究”, 平成20年度東濃地科学センター地層科学研究情報・意見交換会, 2008年10月.
- 畠山信也, 山崎雅直, 井上雅弘, 坂井哲郎, 奥園昭彦(2009): 大深度地下施設における火災ガス挙動に関する研究, 第14回地下空間シンポジウム論文・報告集, PP. 165-172, 2009年1月.
- 畑中耕一郎, 大澤英昭, 梅木博之(2008): “Geosynthesis; Testing a safety case methodology at generic Japanese URLs”, Proceedings of 3rd Amigo Workshop on Approaches and Challenges for the Use of Geological Information in the Safety Case, 2008年4月.
- 羽出山吉裕, 井尻裕二, 名合牧人, 亀村勝美, 里優, 佐ノ木哲, 國丸貴紀(2008): “立坑掘削に伴う岩盤挙動に関する高精度傾斜計測結果と弾性解析の比較”, 土木学会平成20年度全国大会第63回年次学術講演会, 2008年9月.
- 本多眞, 櫻井英行, 鈴木誠, 穂刈利之, 岩佐健吾, 松井裕哉, 杉田裕, 真田祐幸(2008): “地球統計学に基づく統合比抵抗値モデルの構築と地下水水質分布の推定-その1: 統合比抵抗値モデルの有効性検討-”, 第38回地盤工学会全国大会予稿集, pp. 2129-2130, 2008年7月.
- 井尻裕二, 羽出山吉裕, 名合牧人, 亀村勝美, 里優, 佐ノ木哲, 國丸貴紀(2008): “幌延深地層研究所施設工事における高精度傾斜計データの分析”, 土木学会平成20年度全国大会第63回年次学術講演会, 2008年9月.
- 石井英一, 舟木泰智, 常盤哲也, 太田久仁雄(2008): “Relationship between growth mechanism of faults and permeability variations with depth in siliceous mudstone”, Fault Zones: Structure, Geomechanics and Fluid Flow, The Geological Society, 2008年9月.
- 石井英一, 舟木泰智(2008): “北海道北部、幌延地域の珪質泥岩中における割れ目の発達メカニズムと岩盤透水係数の深度依存性との関係”, 日本地質学会第115年学術大会, 2008年9月.
- 石井英一, 舟木泰智, 平賀正人(2008): “北海道幌延地域を事例とした地質環境調査評価技術の研究開発; 地質・地質構造に関する調査”, 日本原子力学会バックエンド部会第24回バックエンド夏期セミナー, 2008年7月.
- 岩月輝希, 濱克宏, 今北毅, 栗本宣孝, 吉田治生, 加藤修(2008): “微量元素の有機錯体形成にかかわる圧力依存性について”, 2008年度日本地球化学学会年会, 2008年9月.
- 岩月輝希, 水野崇, 濱克宏, 國丸貴紀(2008): “Hydrochemical records on long-term changes of

- deep groundwater system, Japan”, Proceedings of 36th International Association of Hydrogeologists Congress 2008 (IAH 2008) (CD-ROM), 2008年10月.
- 岩月輝希, 森川佳太, 細谷真一, 吉川英樹(2008): “深部地下水の物理化学パラメータ計測とその留意点”, 地下水学会誌,
- 岩月輝希, 竹内真司(2008): “次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発, 5; 諸外国の地質環境調査事例を対象としたノウハウや判断根拠の分析”, 日本原子力学会2008年秋の大会, 2008年9月.
- 岩月輝希, 吉川英樹, 浅野貴博, 佐々木祥人(2008): “Long-term evolution of water-rock-microbe system in Horonobe, Japan”, 7th International Symposium for Subsurface Microbiology (ISSM 2008), 2008年10月.
- 甲斐邦男, 前川恵輔(2008): “北海道天北地方幌延地域の新第三系珪藻質泥岩中の続成鉱物の分布—地下水流動の推定—”, 日本地熱学会誌, 第30巻, 第3号, pp. 205-214, 2008年7月.
- 甲斐邦男, 前川恵輔(2009): “北海道幌延地域の新第三系珪藻質泥岩中の地下水の酸素・水素同位体比と塩化物イオン濃度”, 石油技術協会誌, 第74巻, 第1号, pp. 96-106, 2009年1月.
- 加藤春實, 中村隆浩, 真田祐幸, 杉田裕, 伊藤高敏(2008): “水圧破砕及びボアホールブレイクアウトのデータを用いた初期地圧の算出”, 平成20年度資源・素材学会合同秋季大会予稿集, pp. 93-94, 2008年10月.
- 加藤新, 川田耕司, 星一良, 原彰男, 甲斐邦男, 前川恵輔(2008) “Development of 3-D geological modeling software based on sedimentary process of diatomaceous sediment”, AAPG Bulletin, 川村淳, 安江健一, 新里忠史, 常盤哲也, 江橋健, 大井貴夫, 牧野仁史, 石丸恒存, 梅田浩司(2008): “Study on perturbation scenario for uplift and denudation in performance assessment of a HLW disposal system”, Proceedings of 2008 East Asia Forum on Radwaste Management Conference (2008 EAFORM 2nd Conference) (USB Flash Drive), 2008年10月.
- 北川義人, 藤川大輔(2008): “近年の地下空間利用例; 幌延深地層研究計画地下施設”, エンジニアリング振興協会地下利用推進専門部会, 2009年1月.
- 北沢俊幸(2009): “北海道北部天塩平野における海岸砂丘列の配列様式と年代”, 日本堆積学会2009年京都大会, 2009年3月.
- 北沢俊幸, 重野聖之, 小板橋重一, 宮坂省吾, 新里忠史, 保柳康一(2008): “北海道北部地域幌延町に分布する下部更新統更別層のシーケンス層序”, 日本地質学会第115年学術大会, 2008年9月.
- 北沢俊幸, 重野聖之, 小板橋重一, 宮坂省吾, 新里忠史, 保柳康一(2008): “小規模デルタの形成過程における暴浪および洪水流の役割”, 日本堆積学会2008年大会, 2008年3月.
- 北沢俊幸, 重野聖之, 小板橋重一, 宮坂省吾, 新里忠史, 保柳康一(2008): “Storm-influenced tiny delta”, International Conference on DELTAS, 2008年10月.
- 小林保之, 中山雅, 竹田宣典, 松田武(2008): “暴露試験による低アルカリ性コンクリート中の鉄筋腐食に関する検討”, 土木学会平成20年度全国大会第63回年次学術講演会, 2008年9月.
- 小島亘, 山上光憲, 齋藤綾佑, 北川義人, 萩原健司, 藤川大輔(2008): “振とう時間が及ぼすホウ素溶出量への影響”, 土木学会平成20年度全国大会第63回年次学術講演会, 2008年9月.
- 小島亘, 山上光憲, 北川義人, 尾留川剛, 土井崇志, 齋藤綾佑, 藤川大輔(2008): “大深度立坑掘削に伴い発生するズリのモニタリング手法経過報告”, 土木学会平成20年度全国大会第63回年次学術講演会, 2008年9月.
- 國丸貴紀, 太田久仁雄, Russell W ALEXANDER, 山本肇(2009): “幌延深地層研究計画: (1)地上からの調査における地下水水質データの品質保証”, 日本原子力学会2009年春の年会, 2009年3月.
- 國丸貴紀, 山中義彰, 太田久仁雄, 新里忠史, 浅森浩一, 平賀正人, 松岡稔幸(2008): “次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発, 7; 沿岸域を対象とした地質環境調査・評価のノウハウや判断根拠の抽出と整理”, 日本原子力学会2008年秋の大会, 2008年9月.
- 操上広志, 竹内竜史, 藪内聡, 瀬尾昭治, 戸村豪治, 柴野一則, 原稔, 國丸貴紀(2008): “幌延深地層研究計画の地上からの調査研究段階における地下水流動に関する調査研究”, 土木学会論文集C, Vol. 64, No. 3, pp. 680-695, 2008年9月.
- 前川恵輔, 川村淳, 加藤智子, 戸村豪治, 稲垣学(2008): “北海道幌延地域を事例とした堆積岩地

- 域の浅層部における水理・物質移行特性把握のための手法検討の進め方”, 日本原子力学会バックエンド部会第24回バックエンド夏期セミナー, 2008年7月.
- 前川恵輔, 原彰男, 川村淳, 加藤新(2009): “前進的モデルによる堆積岩地域の地質構造推定手法の検討; 幌延地域を事例とした適用性検討”, 日本原子力学会2009年春の年会, 2009年3月.
- 前川恵輔, 新里忠史, 今井久, 塩崎功, 山下亮(2008): “地質環境の長期的な変遷を考慮した地下水流動への影響の検討”, 日本地下水学会2008年秋季講演会, 2008年11月.
- 前川恵輔, 新里忠史, 操上広志, 浅森浩一, 今井久, 塩崎功(2008): “幌延深地層研究計画における地質環境の長期安定性研究—地下水流動の長期的変遷に関わる検討—”, 日本地球惑星科学連合2008年大会, 2008年5月.
- 前川恵輔, 新里忠史, 常盤哲也, 浅森浩一(2008): “地質環境の長期安定性に関する研究の現状, 4; 幌延を事例とした地質環境の長期変遷”, 日本原子力学会2008年秋の大会, 2008年9月.
- 松岡稔幸, 山中義彰, 浅森浩一, 天野健治, 新里忠史, 太田久仁雄, 茂田直孝, 丸井敦尚, 内田利弘(2008): “沿岸域プロジェクト, 2; 幌延町の沿岸域を対象とした既存情報の収集・解釈と地上物理探査による地質構造と水質分布の推定”, 日本原子力学会2008年秋の大会, 2008年9月.
- 水野崇, 岩月輝希, 濱克宏, 三枝博光(2008): “地球化学データに基づく地下水流動状態の長期的変遷に関する検討”, 2008年度日本地球化学学会年会, 2008年9月.
- Möri, A., Soler, P., 太田久仁雄, Havlova, V. (2007): “Grimsel test site phase VI, LTD WP 1; Predictive modelling for LTD monopole experiment”, Nagra NAB 07-42, 2007年12月.
- 森谷祐一, 浅森浩一, 北村至, 堀田光, 大原英史, 新里忠史(2008): “Estimation of crustal structure in Horonobe area, Hokkaido, Japan, by using Multiplet-Crustering analysis”, The 19th International Acoustic Emission Symposium, 2008年12月.
- 苗村由美, 井尻裕二, 澤田淳, 國丸貴紀, 太田久仁雄(2008): “割れ目を対象とした原位置トレーサ試験結果に対する1次元モデルの適用性に関する検討”, 土木学会平成20年度全国大会第63回年次学術講演会, 2008年9月.
- 長尾誠也, 岩月輝希, 吉川英樹(2008): “北海道幌延地域の深部地下水中腐植物質の特徴”, 2008年度日本地球化学学会年会, 2008年9月.
- 永田寛, 本多照幸, 岩月輝希(2008): “断層帯における主要及び微量元素の分布と挙動”, 日本地球惑星科学連合2008年大会, C204-007, 2008年5月.
- 永田寛, 本多照幸, 岩月輝希, 水野崇(2008): “地球化学的環境の相違に起因する堆積岩中の微量・主要元素の分布と挙動”, 第45回アイソトープ・放射線研究発表会
- 永田寛, 本多照幸, 岩月輝希, 水野崇(2008): “深部岩盤中の微量元素を対象としたナチュラルアナログ研究”, 日本原子力学会2008年秋の大会予稿集, p. 668, 2008年9月.
- 中村隆浩, 加藤春實, 真田祐幸, 杉田裕(2008): “珪藻質泥岩における水圧破碎法による初期地圧の推定”, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集(CD-ROM), pp. 297-303, 2008年9月.
- 中山雅, 小林保之, 佐藤治夫, 入矢桂史郎, 納多勝, 松田武(2009): “低アルカリ性セメントを用いた吹付けコンクリートの実用性検討- (3)6年間の海洋暴露試験に基づいた鉄筋コンクリートの耐久性評価”, 日本原子力学会2009年春の年会, p. 219, 2009年3月.
- 根木健之, 梅田浩司, 浅森浩一(2008): “MT法における2次元比抵抗断面の不確実性評価に関する一考察”, 物理探査学会第118回学術講演会論文集, pp. 198-201, 2008年5月.
- 新里忠史(2008): “天然現象に対する深部地質環境の応答; 北海道北部、幌延地域を事例とした地下水の流動状態の長期的変遷”, 日本地質学会第115年学術大会, 2008年9月.
- 新里忠史, 前川恵輔, 安江健一, 浅森浩一, 操上広志, 今井久, 塩崎功(2008): “幌延深地層研究計画における地質環境の長期安定性研究—地質環境の長期的変遷に関わる調査・解析・評価技術の体系化の試み—”, 日本地球惑星科学連合2008年大会, 2008年5月.
- 新里忠史, 安江健一, 操上広志, 川村淳, 大井貴夫(2008): “Synthesizing geoscientific data into a site model for performance assessment; A Study of the long-term evolution of the geological environment in and around the Horonobe URL, Hokkaido, northern Japan”, 3rd Amigo Workshop, OECD/NEA, 2008年4月
- 新里忠史, 安江健一, 操上広志(2008): “幌延深地層研究計画における地質環境の長期安定性研究—地質環境の将来予測に関わる検討—”, 日本地球惑星科学連合2008年大会, 2008年5月.

- 小川豊和, 青木智幸, 木ノ村幸士, 真田祐幸, 松井裕哉(2008): “物性の深度依存性を考慮した堆積軟岩中の立坑掘削解析”, 土木学会第63回年次学術講演会予稿集, pp. 591-592, 2008年9月.
- 小川豊和, 木ノ村幸士, 青木智幸, 山本卓也, 真田祐幸, 松井裕哉(2008): “物性の深度依存性を考慮した堆積軟岩中の大深度立坑逐次掘削解析”, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集(CD-ROM), pp. 933-940, 2008年9月.
- 大澤英昭, 梅木博之, 太田久仁雄, 濱克宏, 澤田淳, 竹内真司, 高瀬博康, McKinley, I. G. (2009): “Development of next-generation technology for integrated site characterization of deep geological repositories”, Proceedings of International Waste Management Symposium 2009 (WM '09), 2009年3月.
- 太田久仁雄, 茂田直孝, 丸井敦尚, 内田利弘, 木方建造, 長谷川琢磨(2008): “沿岸域プロジェクト, 1; 全体計画”, 日本原子力学会2008年秋の大会, 2008年9月.
- 太田久仁雄, 國丸貴紀, W Russell ALEXANDER(2009): “幌延深地層研究計画: (2) 採水調査のための現場品質マニュアルの整備”, 日本原子力学会2009年春の年会, 2009年3月.
- 三枝博光, 太田久仁雄, 新里忠史, 天野健治, 山中義彰, 前川恵輔, 國丸貴紀, 濱克宏(2008): “次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発, 6; 沿岸域を対象とした統合化データフローダイアグラムの構築”, 日本原子力学会2008年秋の大会, 2008年9月.
- 櫻井英行, 本多眞, 鈴木誠, 穂刈利之, 岩佐健吾, 松井裕哉, 杉田裕, 真田祐幸(2008): “地球統計学に基づく統合比抵抗値モデルの構築と地下水水質分布の推定—その2: モデルの信頼性と調査計画の関係に関するケーススタディー”, 第38回地盤工学会全国大会予稿集, pp. 2131-2132, 2008年7月.
- 真田祐幸, 加藤春實, 中村隆浩, 杉田裕, 藤井義明(2008): “水圧破砕法とブレイクアウト法による堆積軟岩中での初期地圧の推定”, 平成20年度資源・素材学会北海道支部大会予稿集, pp. 23-24, 2008年6月.
- 真田祐幸, 松井裕哉, 藤井義明(2008): “幌延地域に分布する珪質岩の力学特性”, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集(CD-ROM), pp. 703-708, 2008年9月.
- 佐々木祥人, 浅野貴博, 岩月輝希, 吉川英樹, 油井三和(2008): “Microbial communities of groundwater from deep borehole in Horonobe, Japan”, Extremophiles 2008 Meeting, 2008年9月.
- 佐藤治夫(2008): “A thermodynamic approach on effect of salinity on swelling pressure of bentonite”, 4th Japan-Korea Joint Workshop on Radioactive Waste Disposal 2008: Perspective of Science and Engineering, May 27-28, 2008, Hakone, Japan, 2008年5月.
- 佐藤治夫(2008): “A thermodynamic approach on the effect of salt concentration on swelling pressure of water-saturated bentonite”, International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXII, Dec. 1-5, 2008, Boston, MA, USA, 2008年12月.
- 佐藤治夫(2008): “Thermodynamic model on swelling of bentonite buffer and backfill materials”, Physics and Chemistry of the Earth 33, pp. S538-S543, 2008年12月.
- 佐藤治夫(2009): “高レベル放射性廃棄物地層処分における緩衝材の核種移行抑制機能”, Journal of MMIJ, vol.125, No.1, pp.1-12, 2009年1月.
- 佐藤治夫(2009): “低アルカリ性セメントを用いた吹付けコンクリートの実用性検討: 幌延地下研究施設における深度140m水平坑道での原位置試験計画概要”, 第11回放射性廃棄物地層処分に関する情報交換会(Sapporo Conference 2009), 2009年3月.
- 佐藤治夫(2008): “緩衝材及び埋め戻し材の膨潤圧の熱力学的計算”, 第10回放射性廃棄物地層処分に関する情報交換会(Sapporo Conference 2008), 2008年6月.
- 佐藤治夫, 中山雅, 杉田裕, 畑中耕一郎, 入矢桂史郎, 納多勝: “低アルカリ性セメントを用いた吹付けコンクリートの実用性検討-(4) 幌延URLにおける深度140m水平坑道での原位置試験計画”, 日本原子力学会2009年春の年会, p. 220, 2009年3月.
- 仙波毅, 大澤英昭, 太田久仁雄, 濱克宏, 澤田淳, 梅木博之(2008): “次世代型サイト特性調査情報統合システム, 1; 開発のアプローチと開発計画”, 日本原子力学会バックエンド部会第24回バックエンド夏期セミナー, 2008年7月.
- 重廣道子, 豊田岳司, 大澤英昭, 宮本哲雄, 里優(2008): “次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発, 2; 地質環境総合評価にかかわる知識の分類”, 日本原子力学会2008年秋の大会,

2008年9月.

茂田直孝(2008):“ウラン探査における物理探査”, 最新の物理探査適用事例集, pp. 61-68, 2008年10月.

茂田直孝(2008):“高レベル放射性廃棄物の地層処分における物理探査の役割と深地層の科学研究における物理探査技術開発”, 最新の物理探査適用事例集, pp. 257-264, 2008年10月.

杉田裕(2009):“幌延の地下研を例とした放射性廃棄物地層処分技術と地盤工学”, 地盤工学会誌, Vol. 57, No. 2, pp. 14-17, 2009年2月.

竹田宣典, 入矢桂史郎, 人見尚, 小西一寛, 栗原雄二(2008):“低アルカリコンクリートの鉄筋腐食ひび割れの予測に関する研究”, 大林組技術研究所報(CD-ROM), vol. 72, 2008年12月.

田中真悟, 野田菜摘子, 佐藤正知, 小崎完, 佐藤治夫, 畑中耕一郎(2008):“拡散と電気浸透現象を利用した圧縮モンモリロナイト中の水の移行挙動”, 日本原子力学会2008年秋の大会, 2008年9月.

田中真悟, 東原知広, 野田菜摘子, 佐藤正知, 小崎完, 佐藤治夫, 畑中耕一郎(2008):“Kinetics behavior of waters as migration media in compacted montmorillonite using $H_2^{18}O$ and applying electric potential gradient”, Physics and Chemistry of the Earth 33, pp. S163-S168, 2008年12月.

田中真悟, 野田菜摘子, 佐藤正知, 小崎完, 佐藤治夫, 畑中耕一郎(2008):“電位勾配下における圧縮モンモリロナイト中の Cl^- イオンの移行挙動”, 日本原子力学会2009年春の年会, 2009年3月.

谷卓也, 下野正人, 岩野政浩, 山本卓也, 山崎雅直, 真田祐幸(2008):“ショートステップ工法における地中変位挙動の評価”, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集(CD-ROM), pp. 319-324, 2008年9月.

常盤哲也, 浅森浩一, 新里忠史, 安江健一, 阿部寛信, 前川恵輔(2008):“幌延深地層研究計画における地質環境の長期安定性研究—「断層活動」を対象とした調査の体系化の取り組み—”, 日本地球惑星科学連合2008年大会, 2008年5月.

常盤哲也, 石井英一, 舟木泰智(2008):“北海道北部幌延地域におけるボーリングコアの小断層解析”, 日本地質学会第115年学術大会, 2008年9月.

戸村豪治, 前川恵輔, 横田秀晴(2008):“幌延深地層研究計画における表層水理現地調査”, 日本地下水学会2008年秋季講演会, 2008年11月.

津坂仁和, 小泉悠, 谷本親伯, 亀山克裕, 宮嶋保幸(2008):“TBM施工における二次破砕を考慮したディスクカッタの交換寿命の評価”, トンネル工学報告集, vol. 18, pp. 77-84, 2008年11月.

津坂仁和, 山崎雅直, 羽出山吉裕, 山本卓也(2008):“幌延深地層研究所の立坑掘削に伴うコンバージェンス曲線の評価”, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集(CD-ROM), pp. 311-317, 2008年9月.

津坂仁和, 山崎雅直, 羽出山吉裕, 山本卓也(2008):“Proposal of a practical guide of convergence measurements in Horonobe Underground Research Laboratory”, Proceedings of 42nd U. S. Rock Mechanics Symposium and 2nd U. S. -Canada Rock Mechanics Symposium (CD-ROM), ARMA 08-027, 2008年6月.

津坂仁和, 山崎雅直, 羽出山吉裕, 山本卓也(2008):“幌延深地層研究所の立坑掘削におけるコンバージェンス曲線の評価”, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集(CD-ROM), pp. 311-317, 2008年9月.

津坂仁和, 山崎雅直, 南出賢司, 羽出山吉裕(2008):“幌延深地層研究所における立坑底盤の割れ目の方向性と頻度分布”, 土木学会第63回年次学術講演会, pp. 781-782, 2008年9月.

梅木博之, 大澤英昭, 太田久仁雄, 濱克宏, 澤田淳, 高瀬博泰(2008):“次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発, 1: 基本的考え方”, 日本原子力学会2008年秋の大会, 2008年9月.

藪内聡, 國丸貴紀, 太田久仁雄, Frieg, B. (2009):“幌延深地層研究計画:(3)地上からの調査における水理試験データの品質保証”, 日本原子力学会2009年春の年会, 2009年3月.

山中義彰, 平賀正人, 浅森浩一(2008):“沿岸域プロジェクト; 北海道幌延町の沿岸域における地質環境に関する調査・評価技術の整備”, 日本原子力学会バックエンド部会第24回バックエンド夏期セミナー, 2008年7月.

山中義彰, 松岡稔幸, 浅森浩一, 太田久仁雄(2008):“幌延沿岸域を対象とした地質環境の調査・

- 評価技術の整備”，社団法人物理探査学会第119回(平成20年度秋季)学術講演会講演論文集，pp. 73-75，2008年10月.
- 山西毅，関谷美智，鈴木達也，伊藤誠二，北川義人，萩原健司，土井崇志，齋藤綾佑(2008)：“重金属含有掘削ズリのモニタリング手法”，平成20年度資源・素材学会北海道支部総会及び春季講演会，2008年6月.
- 山本肇，下茂道人，國丸貴紀(2008)：“内陸部における塩淡境界形状に着目した地下水流動モデルのキャリブレーションの試み”，土木学会平成20年度全国大会第63回年次学術講演会，2008年9月.
- 山本真哉，本多眞，櫻井英行，鈴木誠，白石知成，松井裕哉，杉田裕，真田祐幸(2008)：“比抵抗探査および試錐孔のデータによる地下水水質分布の地球統計学的推定”，日本地下水学会秋季講演会講演要旨，pp. 126-129，2008年11月.
- 山崎雅直，森岡宏之，羽出山吉裕，津坂仁和(2008)：“幌延深地層研究計画における立坑掘削の情報化施工と挙動計測”，第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集(CD-ROM)，pp. 305-311，2008年9月.
- 山崎雅直，津坂仁和，羽出山吉裕，南出賢司，高橋昭博(2009)：“立坑掘削における内空変位の初期変形率と覆工コンクリート応力の相関”，第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集(CD-ROM)，pp. 196-201，2009年1月.
- 山崎雅直，関谷美智，藤川大輔，北川義人：(2009)：“幌延深地層研究計画における立坑工事の施工実績とサイクルタイム分析”，第14回地下空間シンポジウム論文・報告集，PP. 191-196，2009年1月.
- 山下亮，今井久，塩崎功，前川恵輔，新里忠史(2008)：“堆積岩地域における深部の過剰間隙水圧についての検討”，日本地下水学会2008年秋季講演会，2008年11月.
- 安江健一，三枝博光，尾上博則，竹内竜史，新里忠史(2008)：“Study for evaluation of the influence of long-term climate change on deep groundwater flow conditions; Integration of paleo-climatology and hydrogeology”，Proceedings of 36th International Association of Hydrogeologists Congress 2008 (IAH 2008) (CD-ROM)，2008年10月.

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
物質の量	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基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(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 ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
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 ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ 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大きさは同一である。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
粘り度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ³ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨクタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	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=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ 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	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ 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=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バロン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻¹² cm ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	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 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フット	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁴ T
エルステッド (c)	Oe	1 Oe≐ (10 ³ /4π)A m ⁻¹

(c) 3元素の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 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ 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	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ) 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

