JAEA-Review
2013-037

幌延深地層研究計画　平成 24 年度調査研究成果報告

Horonobe Underground Research Laboratory Project
Investigation Report for the 2012 Fiscal Year

（編）中山 雅
(Ed.) Masashi NAKAYAMA

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

January 2014
Japan Atomic Energy Agency
日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

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, 2014

幌延深地層研究計画　平成24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

(2013 年 9 月 9 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24年度は,「幌延深地層研究計画　平成24年度調査研究計画」に従って，調査研究および地下施設の建設を進めました。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。

幌延深地層研究センター（駐在）: 〒098-3224　北海道天塩郡幌延町北進 432 番地 2

Horonobe Underground Research Laboratory Project Investigation Report for the 2012 Fiscal Year

(Ed.) Masashi NAKAYAMA

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

(Received September 9, 2013)

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 2012 fiscal year (2012/2013).

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 2012 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, Sedimentary Rock

目　次

1. はじめに 1

2. 平成24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 地質環境モデルに関する調査・解析技術の開発 5
3.1.2 調査技術・調査機器開発 13
3.2 深地層における工学的技術の基礎の開発 20
3.3 地質環境の長期安定性に関する研究 24
3.3.1 地質環境の長期的変遷に関する研究 24
3.3.2 地震研究 25

4. 地層処分研究開発 27
4.1 処分技術の信頼性向上 27
4.1.1 人工バリアなどの工学技術の検証 27
4.1.2 設計手法の適用性確認 32
4.2 安全評価手法の高度化 36
4.2.1 安全評価モデルの高度化 36
4.2.2 安全評価手法の適用性確認 38

5. 地下施設の建設 41

6. 環境モニタリング 43
6.1 騒音・振動・水質・動植物に関するモニタリング調査 43
6.2 地下施設の建設に伴う水質モニタリング調査 45

7. 安全確保の取組み 52

8. 開かれた研究 53
8.1 国内機関との研究協力 53
8.1.1 大学との研究協力 53
8.1.2 その他の機関との研究協力 54
8.2 国外機関との研究協力 55

参考文献 57

付録 59

Contents

1. Introduction 1

2. Outline of the investigation program for the 2012 fiscal year 2

3. Geoscientific Research 5
3.1 Development of techniques for investigating the geological environment..... 5
3.1.1 Development of investigation/analysis techniques for modeling of the geological environment 5
3.1.2 Development of investigation techniques and equipment 13
3.2 Development of engineering techniques for use in deep geological environment... 20
3.3 Studies on the long-term stability of the geological environment 24
3.3.1 Studies on long-term changes in the geological environment 24
3.3.2 Seismological studies 25

4. Research and development on geological disposal technology 27
4.1 Improving the reliability of disposal technologies 27
4.1.1 Verification of the engineered barrier technology 27
4.1.2 Confirming the applicability of EBS design methods 32
4.2 Enhancement of safety assessment methodologies 36
4.2.1 Enhancement of safety assessment model 36
4.2.2 Confirming the applicability of safety assessment methodologies 38

5. Construction of the underground facilities 41

6. Environmental monitoring 43
6.1 Monitoring of noise, vibration, water property, flora and fauna 43
6.2 Monitoring the construction of the underground facilities 45

7. Security effort 52

8. Collaboration with other research organizations 53
8.1 Collaboration with domestic research organizations 53
8.1.1 Collaboration with universities 53
8.1.2 Collaboration with other research organizations 54
8.2 Collaboration with overseas research organizations 55

References 57

Appendix 59

図リスト

図 1　幌延深地層研究計画の全体スケジュール ・・・

表リスト

表 1　大曲断層に関する再解析ケース ･･･ 7
表 2　岩盤等級区分 ･･･ 23
表 3　平成 24 年度の主要な地震の計測震度 ･･･ 24
表 4　水質分析結果 ･･･ 29
表 5　掘削土(ズリ)モニタリング調査結果（土壌溶出量：公定分析） ･･･ 42
表 6　環境モニタリング調査実施内容 ･･･ 44
表 7　モニタリング調査項目と結果 ･･･ 44
表 8　確認された重要種（魚類） ･･･ 45
表 9　水質調査の実施対象と主な分析項目 ･･･ 46
表 10　地下施設から天塩川への排水量 ･･･ 48
表 11　地下施設からの排水に係る水質調査結果 ･･･ 48
表 12　天塩川の水質調査結果 ･･･ 49
表 13　浄化槽排水の水質調査結果 ･･･ 50
表 14　掘削土(ズリ)置場周辺の地下水の水質調査結果 ･･･ 50
表 15　清水川および掘削土(ズリ)置場雨水調整池の水質調査結果 ･･･ 51
表 16　メタンガス濃度に応じた作業管理体制 ･･･ 52

写真リスト

写真 1　載荷試験状況 ･･･ 22
写真 2　緩衝材定置試験の様子 ･･･ 32
写真 3　膨潤圧試験装置の外観 ･･･ 34
写真 4　埋め戻し材ブロック製作試験の様子 ･･･ 35
写真 5　緩衝材中における炭素鋼の腐食モニタリング用センサー ･･･ 36
写真 6　緩衝材中における腐食モニタリング用センサーの適用性確認試験状況 ･･･ 36
写真 7　350m 調査坑道貫通状況 ･･･ 41
写真 8　掘削土(ズリ)置場法面モルタル吹付け状況 ･･･ 41
写真 9　安全パトロールの様子 ･･･ 52

1. はじめに

独立行政法人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月の「原子力政策大綱[注1]」に示された「深地層の研究施設」を活用した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公表した第2期（平成22年4月1日～平成27年3月31日）の「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）」[注2]（以下、第2期中期目標）では、「幌延深地層研究計画に基づき、坑道掘削時の調査研究及び坑道を利用した調査研究を着実に進める。あわせて工学技術や安全評価に関する研究開発を実施」することが目標として掲げられています。

原子力機構では、第2期中期目標を受け、「独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画（中期計画）」[注3]を策定し、高レベル放射性廃棄物の処分技術に関する研究開発について、「「地層処分研究開発」と「深地層の科学的研究」の2つの領域において、他の研究開発機関と連携して研究開発を進め、地層処分の安全確保の考え方や評価に関わる様々な論拠を支える「知識ベース[注4]」を充実させる」こととしています。幌延深地層研究計画においては、深地層の科学的研究として、「深地層環境の深度（地下350m程度）まで坑道を掘削しながら調査研究を実施し」、「地上からの精密調査の段階に必要となる技術基盤を整備し、実施主体や安全規制機関に提供する」計画です。また、地層処分研究開発として、「深地層の研究施設等を活用して、実際の地質環境条件を考慮した現実的な処分概念の構築手法や総合的な安全評価手法を整備する」こととしています。さらに、「業務の合理化・効率化の観点から、幌延深地層研究計画に係わる研究坑道の整備等に民間活力の導入を図る」こととしており、平成22年度より施設整備、維持管理および研究支援からなるPFI契約[注5]を締結して調査研究を進めています。

注1：現在の原子力政策大綱は、平成17年10月に策定されたものです。平成22年11月に新たな大綱の策定を目指して「新大綱策定会議」が設置され、検討が開始されました。平成23年3月に東京電力福島第1原子力発電所における事故が発生したため一時中断し、その後再開したものの、原子力委員会は平成24年10月に原子力政策大綱の策定作業の中止を決定し、「新大綱策定会議」は廃止されています。

注2：原子力機構は、原子力基本法第2条に規定する基本方針に基づき、我が国における原子力の研究、開発および利用を計画的に遂行するために原子力委員会が定める基本的考え方に則り、その業務を総合的、計画的かつ効率的に行うことが定められています。中期目標はこれを踏まえ、文部科学省と経済産業省が、独立行政法人通則法第29条の規定に基づき定めた目標です。

注3：中期計画の期間は、中期目標と同じく平成22年4月1日～平成27年3月31日の5年間です。

注4：個別の研究開発で得られた成果を、地層処分技術全体に関わる様々な論拠や国内外の知見とあわせて、適切に管理し、伝達・継承していくための基盤となるものです。

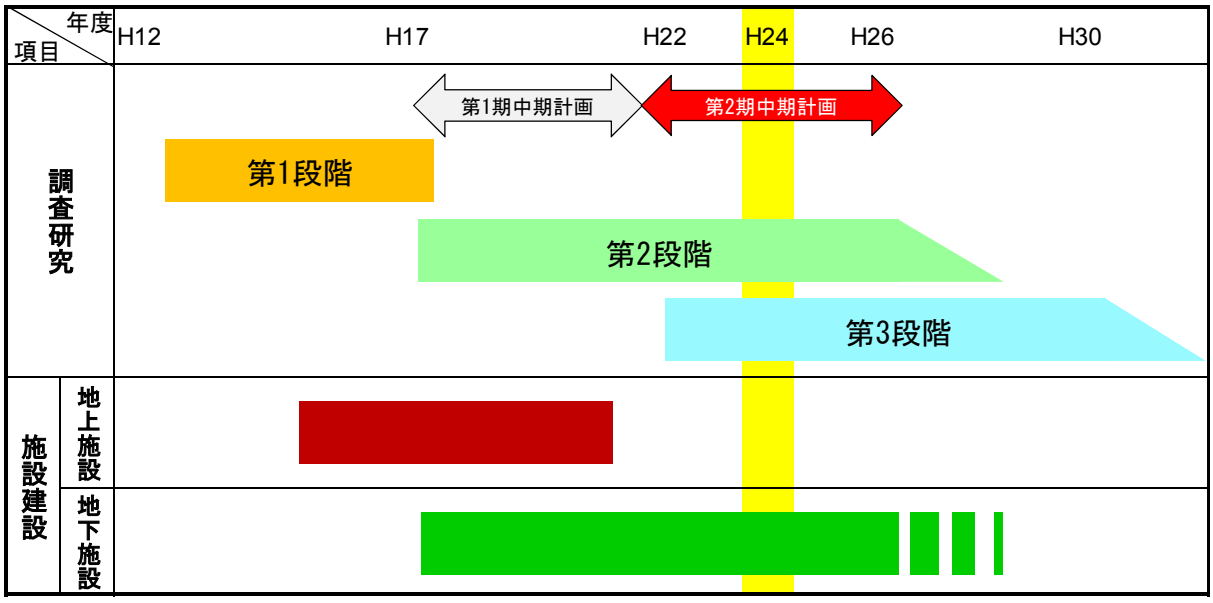
注5：Private Finance Initiative（民間資金等活用事業）の略称で、公共施設などの建設、維持管理、運営などを民間の資金、経営能力、技術的能力を活用することで、国や地方公共団体などが直接実施するよりも効率的かつ効果的に事業を実施するための方策です。幌延深地層研究計画における、PFIの契約期間は平成23年1月31日から平成31年3月31日までです。

2. 平成24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います（図 1）。

平成24年度は、「幌延深地層研究計画 平成24年度調査研究計画」[(1)]にしたがって、調査研究および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[注6]」と「地層処分研究開発」を行いました。「地層科学研究」では、地質環境調査技術開発、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、の3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[注7]の高度化、の2項目の研究課題を設定しています[(2)]。



第1段階： 地上からの調査研究段階
第2段階： 坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階
第3段階： 地下施設での調査研究段階

図 1 幌延深地層研究計画の全体スケジュール

地下施設の建設では、立坑については、西立坑を深度約300mまで掘削しました。調査坑道については、350m調査坑道の掘削を継続し、平成24年5月に換気立坑と東立坑を結ぶ調査坑道が貫通しました。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。

平成24年度の主な調査研究のイメージを図 2に、研究所用地内の主な施設と観測装置の配置を図 3に示します。また、幌延町内で実施している調査研究に関わる主要なボーリング調査や観測地点などの位置を図 4に示します。

幌延深地層研究計画の成果は、原子力機構の東海研究開発センター核燃料サイクル工学研究所

注6：幌延深地層研究計画では、原子力政策大綱で「深地層の科学的研究」とされている研究を「地層科学研究」と呼称しています。
注7：地層処分システム全体、あるいはその個別の要素が有する機能について解析した結果を適切な基準と比較し、その性能や安全性について判断を行う手法のことです。

など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。なお、平成25年2月に公表した「幌延深地層研究センターにおける情報公開の改善について」に基づき、より一層積極的に情報公開に努めていきます。参考資料として、巻末に平成24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24年度に実施した主な調査研究の成果および地下施設の建設について報告します。

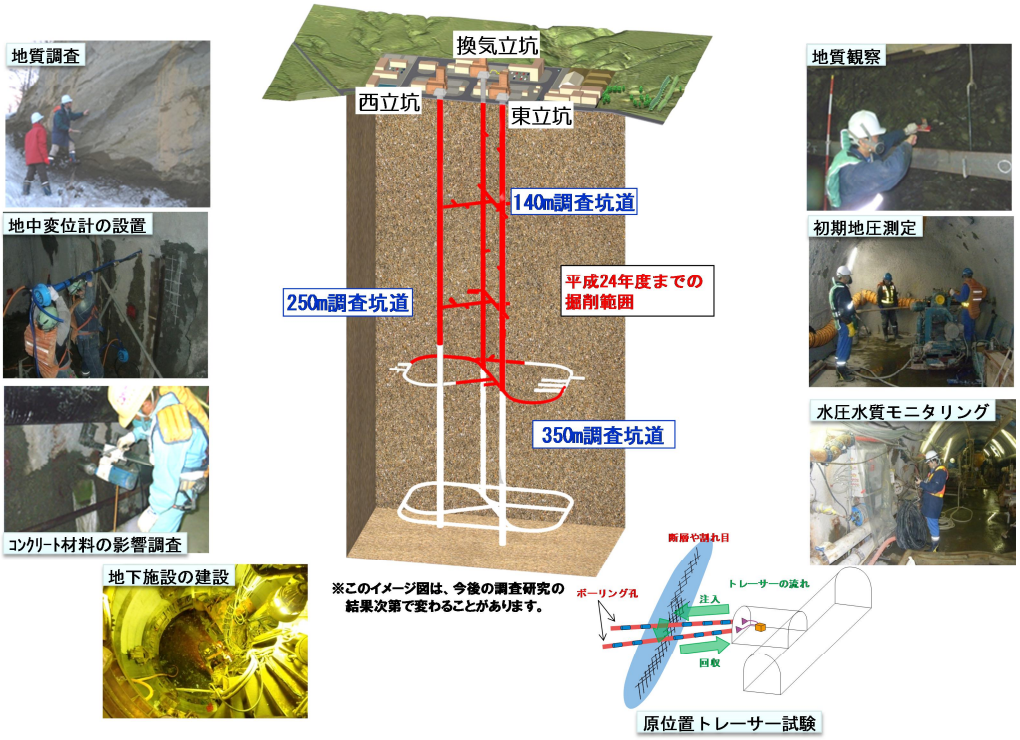


図 2　平成24年度の調査研究のイメージ

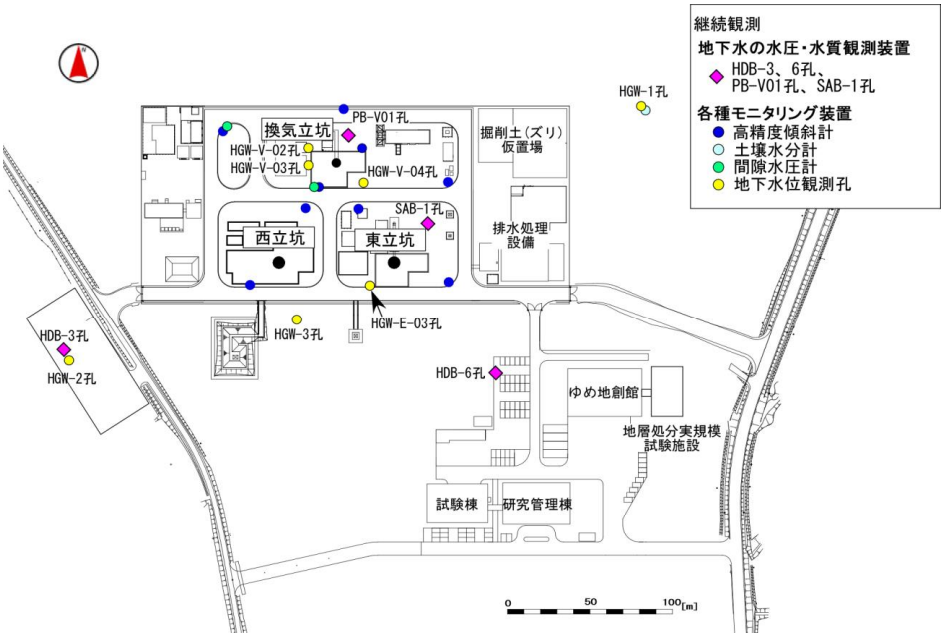


図 3　研究所用地における主な施設と観測装置の配置

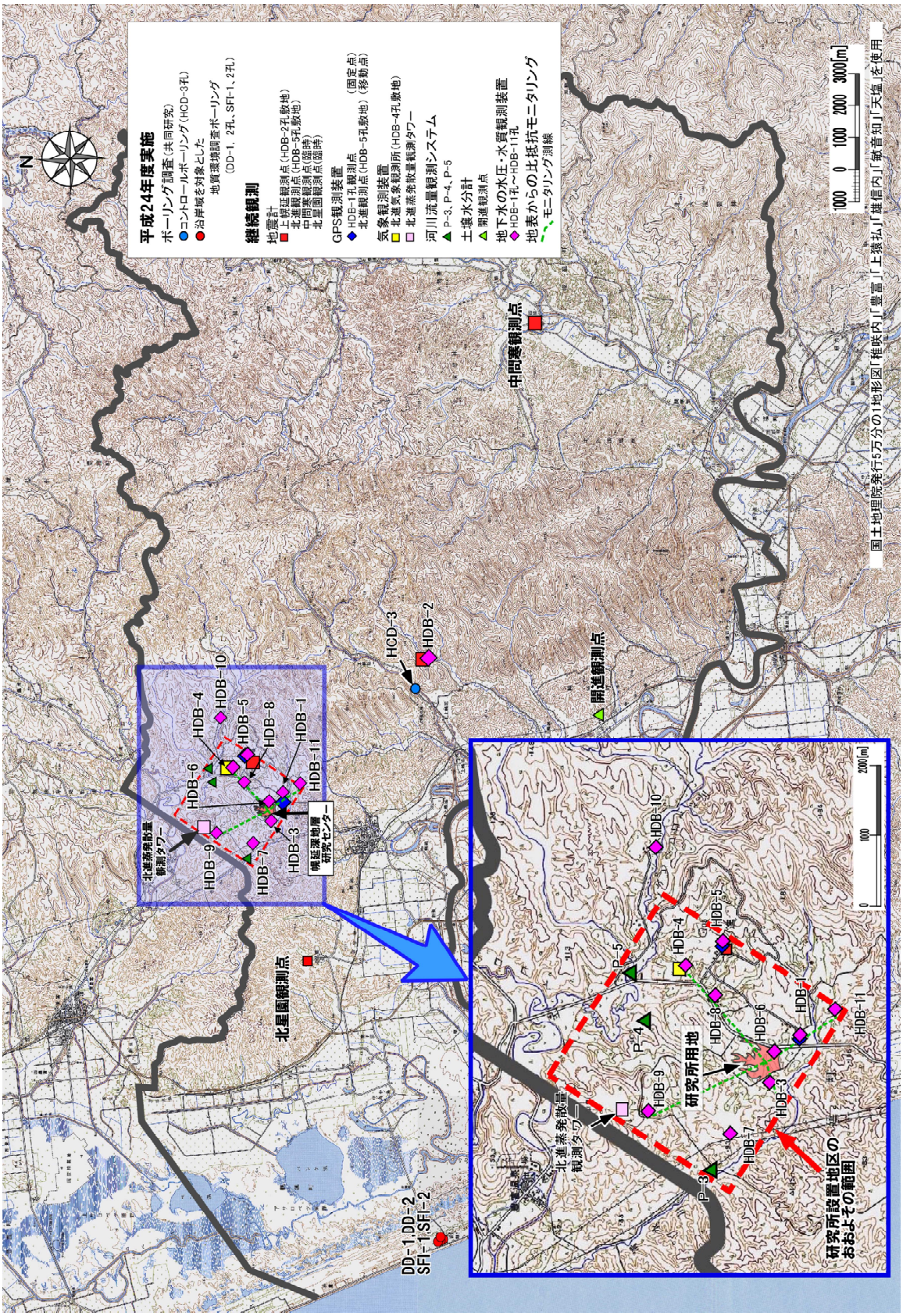


図 4　ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所

3. 地層科学研究

3.1 地質環境調査技術開発

3.1.1 地質環境モデルに関する調査・解析技術の開発

(1) 地質構造

第2段階では、地下施設やその周辺での地質観察、および採取した岩石の顕微鏡観察や分析などを行っています。そして、これらの調査から得られる情報に基づいて、第1段階の調査で構築した地質構造モデル[注8]の検証を行いながら、地上からの調査による地下の予測の妥当性や精度などを評価しています。

平成24年度は、東立坑や換気立坑、350m調査坑道近傍の地質分布を3次元的に可視化するとともに、坑道壁面や坑道からのボーリング調査から得られたデータにより、地質構造モデルを確認・更新しました。

具体的には、第1段階のボーリング調査によって、地下施設近傍に分布することが予測されていた小規模な断層のひとつであるF-1断層に着目し、第1段階の調査における断層の予測精度について検討を行いました。坑道壁面および坑道からのボーリング調査で得られたコアの観察結果から、東立坑と350m調査坑道の換気側調査坑道においてF-1断層の延長部が確認され、実際の位置と予測した位置との差は、数m程度であることが分かりました（図 5）。この予測精度は、平成23年度に検討した声問層と稚内層の地層境界面の例と同等であり[(3)]、地下の断層についても一定の程度で予測できることが確認されました。一方で、断層が交差する部分では、平成25年2月に発生したような大量湧水の可能性もあるため、地質構造を把握することの重要性が改めて示されました。

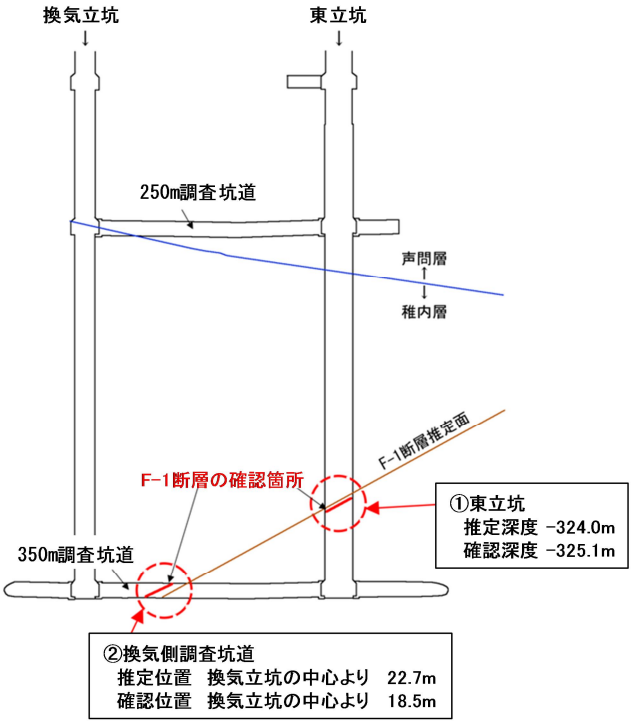


図 5　地下施設における F-1 断層の分布

注8：岩相や断層などの地質構造の分布や形状を図や数式などを用いて表現したものです。

今後は、湧水を導く可能性のある断層の交差位置やその近傍の地質状況について調査・検討を行うとともに、地質構造モデルの検証を進め、地上から地下を予測する際の精度や限界を明らかにしていきます。また本手法を他の堆積岩系の岩盤に適用していく際の課題を整理します。

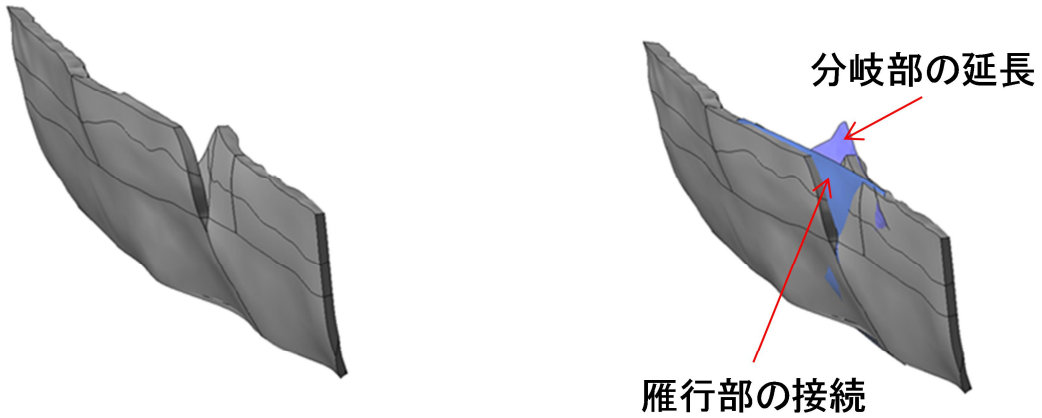
(2) 岩盤の水理

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坑道周辺岩盤の透水性や坑道内への湧水量などに関する調査を行っています。そして、これらの調査から得られる観測結果に基づいて、第1段階で予測した水理地質構造モデルの検証を行っています。

平成24年度は、研究所周辺に設定した調査流域の気象観測や河川流量などの観測を継続し、平成23年度に推定した地下水涵養量（雨や雪などの降水が地下岩盤にしみ込む量）について、平成23年度の推定が妥当であることを確認しました。このことにより、地下水涵養量の評価手法の妥当性が確認できたため、気象観測の一部と河川流量観測は平成24年度で終了することとしました。

また、第1段階で構築した水理地質構造モデルを検証するために、予測した地下水の水圧分布と実測との差が認められるボーリング孔（HDB-4､5､9および10孔）周辺に関して、その要因のひとつとして考えられる、大曲断層の形状と透水性（水の流れやすさ）に着目した解析を行いました。これまで、大曲断層は不連続な形状で、水の流れやすい構造として解析していましたが、今回は、断層が連続し、水の流れにくい構造であるとして解析しました（図 6および表 1)。その結果、解析により求められた地下水の水圧分布と実測値の差は従来の結果とほとんど変わらないか、さらに大きくなることが分かりました（図 7)。このことから、大曲断層の形状や水の流れやすさがHDB-4､5､9および10孔に与えている影響は限られており、差を生じた原因は、その他の要因（調査密度、褶曲軸などの地質構造、地下水涵養量など）によるものと考えられます。

今後は、他の要因についての検討を進めるとともに、第1段階で実施した調査の項目や数量、品質などの過不足を評価します。また、地上から地下を予測する際により効果的に不確実性を低減する調査の組み合わせやレイアウトを検討していきます。

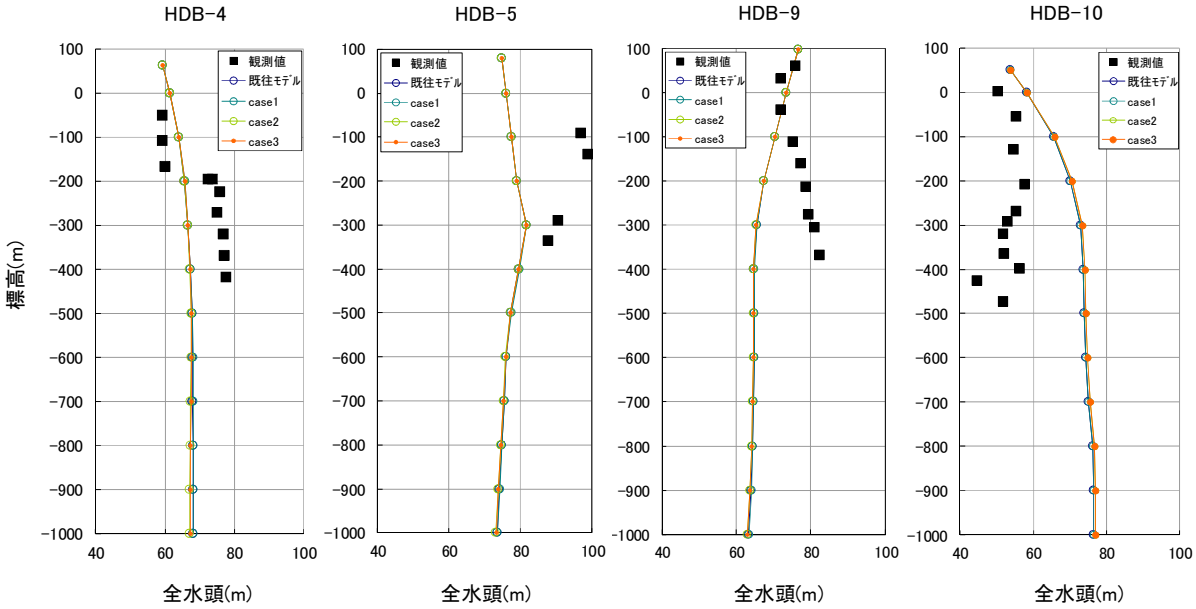


(a) 大曲断層既往モデル　　(b) 大曲断層再解析モデル

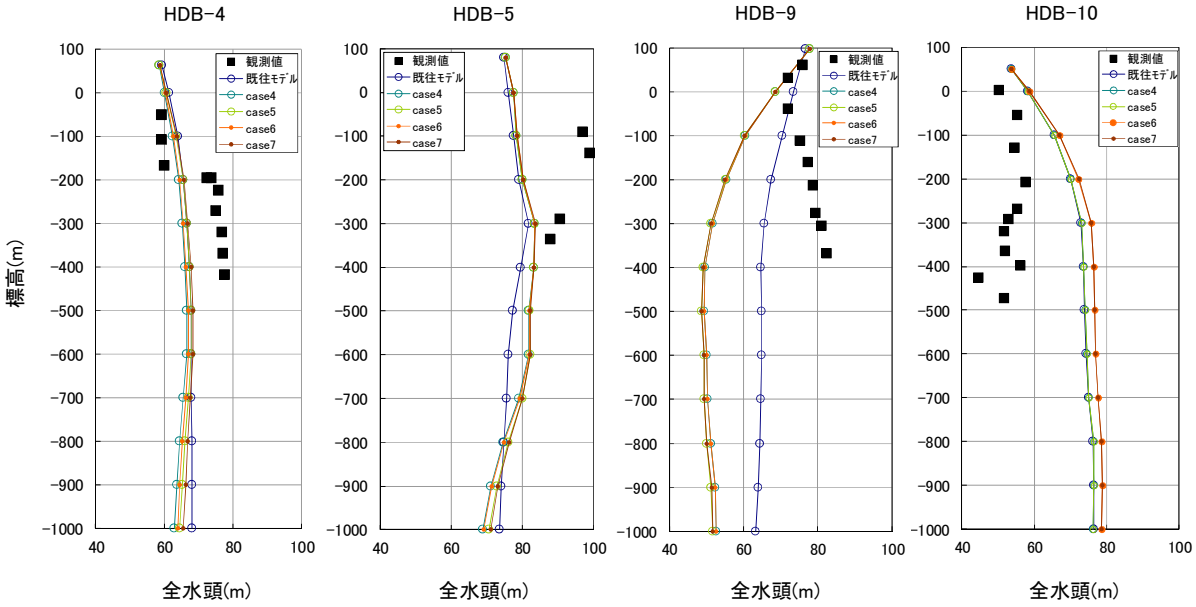
図 6 大曲断層に関する再解析モデルのイメージ

表 1　大曲断層に関する再解析ケース

再解析ケース	大曲断層の構造の変更点(解析上の設定)	
	透水係数(m/sec)	既往モデルとの形状の違い
既往モデル	1.0×10^{-7}	―
case 1	1.0×10^{-7} (既往モデルと同じ)	雁行部をつないだケース
case 2		分岐部を延長したケース
case 3		雁行部をつなぎ分岐部を延長したケース(case1+case2)
case 4	1.0×10^{-9} (既往モデルより水が流れにくい)	形状が同じケース
case 5		雁行部をつないだケース
case 6		分岐部を延長したケース
case 7		雁行部をつなぎ分岐部を延長したケース(case5+case6)



(a) case1～3 の結果



(b) case4～7 の結果

図 7　再解析モデルを用いた地下水の水圧分布解析結果

図では水圧を全水頭[注9]で示しています。

注9：水の持つエネルギーを基準面からの水柱の高さに置き換えたものです。水の流れる速度が非常に遅い地下水では、運動エネルギーは無視できるほど小さいため、水が持つエネルギーは圧力エネルギーと位置エネルギーを考えれば良く、これらを水柱の高さに置き換えたものをそれぞれ圧力水頭、位置水頭と呼びます。圧力水頭と位置水頭を合わせたものを全水頭（あるいは単に水頭）と呼び、全水頭は長さの単位であるメートルで表します。

(3) 地下水の地球化学

地下水の地球化学に関する第2段階の調査では、第1段階の調査結果から推定した坑道周辺の地下水の水質分布の確認と、地下施設の建設に伴う坑道周辺の地下水の水質の変化を把握するための調査・解析技術の開発を目的としています。このため、坑道内で採取した地下水のpHや電気伝導度[注10]、酸化還元電位[注11]などの物理化学パラメータを測定するとともに、採取した地下水の水質分析を実施し、その変化をモニタリングしています。

平成24年度は、平成23年度に引き続き、換気立坑および東立坑の壁面に設置した集水リング[注12]や、坑道内で掘削したボーリング孔から採取した地下水の水質分析を行いました。図 8にこれらの地点から採取した地下水の塩分濃度の経時変化を示します。この図から、集水リングの一部の区間（WR-V-98.0、WR-V132.0、WR-V-202.0、WR-V242.0、WR-E-63.8およびWR-E-202.0）では観測初期と比べて塩分濃度の上昇が観測されており、地下施設の西側あるいは換気立坑の深度140m付近などに分布する塩分濃度の高い地下水が流入している可能性が考えられました。一方、地下水の塩分濃度が低下する区間（WR-V-310.0、WR-V-343.9、WR-E-276.0およびWR-E-340.0）も観測さ

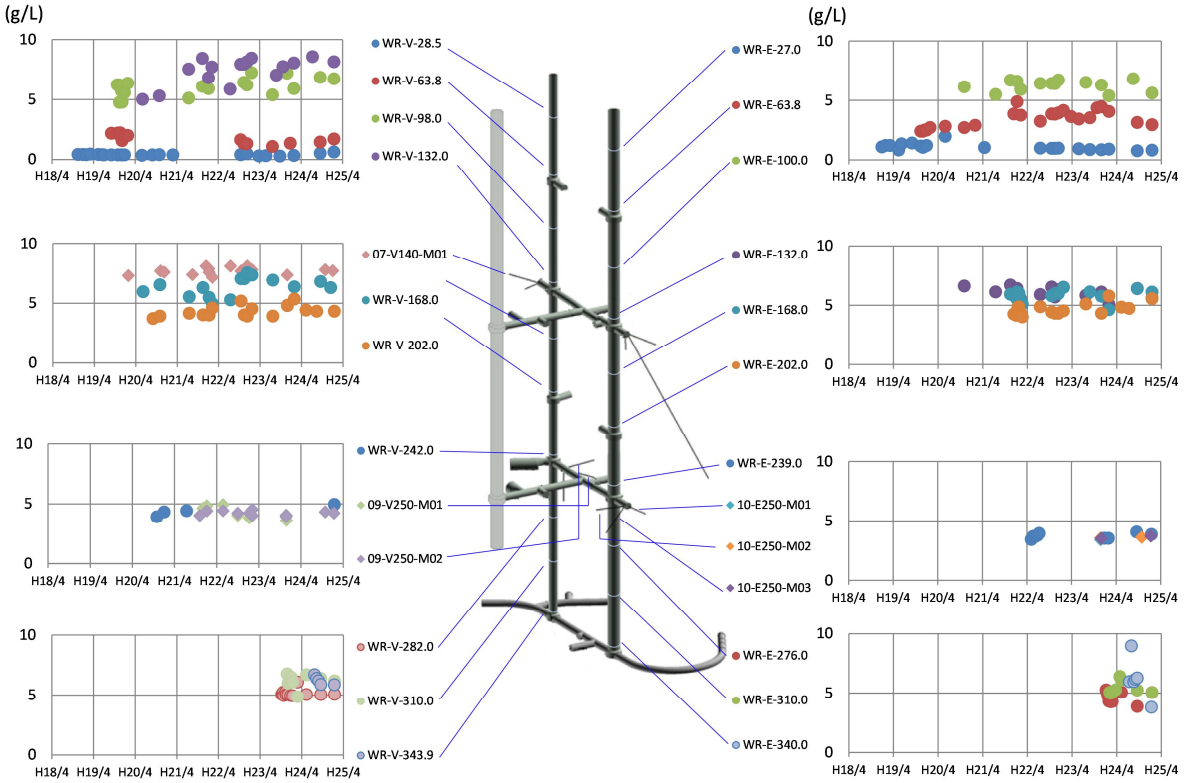


図 8　坑道内で採取した地下水の塩分濃度の経時変化

図中の“V”および“E”はそれぞれ“換気立坑”と“東立坑”を、“WR”は集水リングを表しています。V またはＥのうしろの数字は深度(m)を表しています。凡例の○は集水リング、◇は坑道内で掘削したボーリング孔から採取した地下水のデータを表しています。

注10：電気の通しやすさを表す値で、電気伝導度が大きい(電気を通しやすい)ほど地下水に溶けているイオンの量が多いことを表します。

注11：地下水の酸化還元状態を表します。酸化還元電位が低い地下水ほど、含まれる酸素が少なく還元状態であることを表します。

注12：立坑内で、坑壁から染み出した地下水を回収・採取するために、立坑壁面に 30～40m ごとに設置されている設備です。

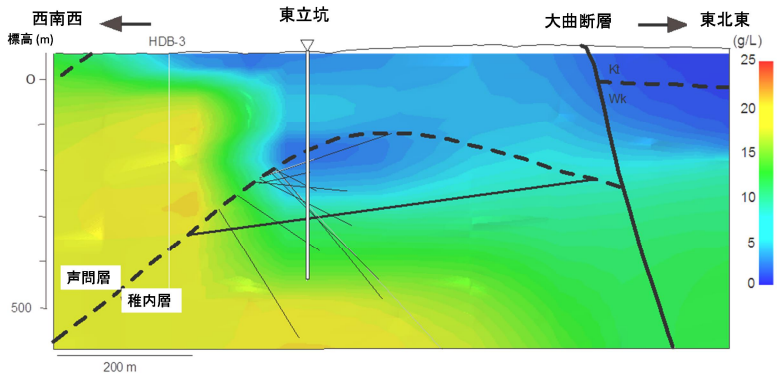
れており、地下施設の東側に分布する比較的塩分濃度の低い地下水が引き込まれている可能性が考えられました。これらの水質変化の要因については今後、周辺の地下水の流れ方や地質構造に関する調査結果と合わせて評価を進めていく予定です。

坑道の掘削による周辺の地下水のpHおよび酸化還元状態の変化を把握するために、坑道内に掘削したボーリング孔内をパッカーで区切り、原位置の嫌気状態および圧力状態を保持しながら、pHと酸化還元電位のモニタリングを行いました。平成21年度から継続している地下水のモニタリングデータを確認すると、pHは全ての観測区間でやや上昇する傾向がありました。各観測区間では地下水の水圧が徐々に低下していることから、水圧の低下に伴って地下水に含まれていた炭酸ガスが脱ガスすることによって、地下水のpHが上昇していると考えられます。一方、全ての観測区間における地下水の酸化還元電位は約-250～-200mVであり、平成21年度から継続して地下水の還元状態が維持されていることが分かりました。一般的には、地下施設建設時に坑道内に大気が侵入し、坑道周辺の岩盤や地下水は酸化されると考えられます(4)が、現段階で観測区間が設定されている、坑道壁面から3mより奥側の地下水は、還元状態が維持されています。還元環境が維持されている要因として、観測対象である岩盤中に、還元剤となる鉱物や有機物、酸化還元反応を促進する微生物が豊富に含まれており、それによって岩盤自体が還元状態を維持する高い酸化還元緩衝能力注13を有しているためと推測されます。

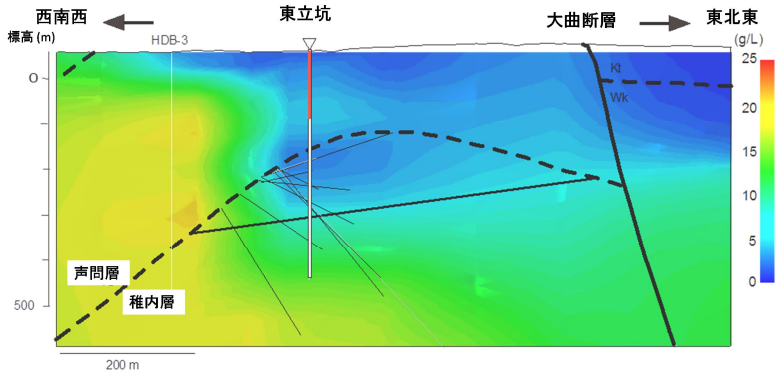
また、坑道周辺の地下水の水質分析結果に基づいて、坑道周辺における地下水中の塩分濃度の空間分布図を作成し、その変化を考察しました。図 9に坑道の掘削開始前から平成24年度までのデータに基づく研究所用地周辺の地下水中の塩分濃度の空間分布図を示します。この図から、坑道の掘削開始以降、地下水中の塩分濃度分布が著しく変化していないことがわかります。この結果は、坑道の掘削に伴う周辺水質の変化に関する事前の予測解析結果(5)とほぼ一致しており、第1段階で適用した調査・解析・評価に関する一連の手法が適切であったことを示しています。今後も坑道周辺の地下水の水質観測を継続して行い、坑道周辺の地質・地質構造や地下水の流れ方に関する検討と連携しつつ、新たに取得するデータに基づいて地球化学モデル注14を更新していきます。

なお、これまで実施してきた地下水や地表水の分析結果を再検討したところ、酸素・水素同位体の分析誤差に誤りがあることが判明しました。すなわち、酸素と水素の同位体の分析値において、これまで分析誤差をそれぞれ±0.1‰注15および±1.0‰としていましたが、実際にはそれぞれ最大で±0.6‰および±3.0‰であることが分かりました。ただし、これれを修正しても、酸素・水素同位体に基づく地下水の起源や形成機構に関する、これまでの考察結果は変わりませんでした。

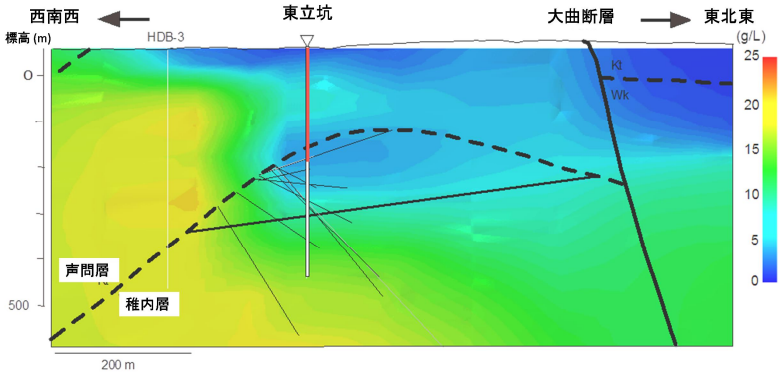
注13：化学的な変化が生じても、元の状態に回復しようとする能力のことです。
注14：地下水の水質が地下環境でどのように分布しているのかを図や数式などを用いて表現したものです。
注15：‰（パーミル）は千分率とも呼ばれ、1‰＝1,000 分の 1 です。



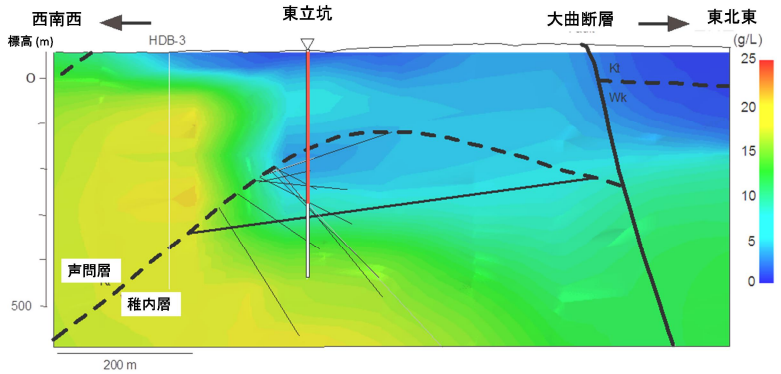
(a) 第 1 段階調査時（坑道掘削前）



(b) 平成 20 年度



(c) 平成 22 年度



(d) 平成 24 年度

図 9　坑道周辺における地下水中の塩分濃度の空間分布

図中の東立坑の赤い部分は、各年度の時点での掘削深度を表しています。

(4) 岩盤力学

第2段階では、第1段階で構築した岩盤力学モデル[注16]の妥当性を評価するために、地下施設において初期地圧測定を実施しています。

平成24年度は、350m調査坑道のポンプ座で測定を実施しました（図 10）。本測定では、さまざまな方向・傾斜の4本のボーリング孔を掘削し、水圧破砕法[注17]により初期地圧を3次元的に測定しました。

初期地圧測定結果を図 11に示します。図中●は最大主応力σ_1、▲は中間主応力σ_2、■は最小主応力σ_3を表しています。最大主応力は、北方向から約30° 西寄りで、鉛直方向から約45° 傾いた結果となりました。第1段階の調査では、主応力のひとつは鉛直方向であるという仮定の下で、最大主応力の方向は水平面内のほぼ東西方向であるとの予測結果が得られていましたが、今回の測定ではそれと異なる結果となりました。

平成25年度以降には、350m調査坑道であと2箇所の初期地圧測定を計画しています。今後はそれら2箇所の測定結果に加え、地質構造、内空変位[注18]や吹付けコンクリートの応力などの計測結果を利用して地下坑道での測定結果の妥当性を検討していきます。さらに、第1段階の調査で得られた初期地圧状態の予測を、地下坑道での測定結果を用いて検証していきます。

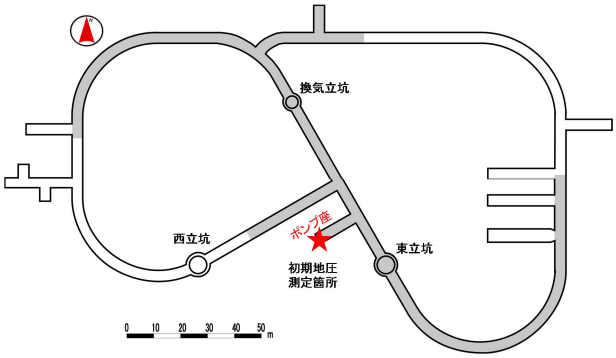


図 10　初期地圧測定の実施位置（350m調査坑道）
網掛けは平成24年度までに掘削した範囲を示しています。

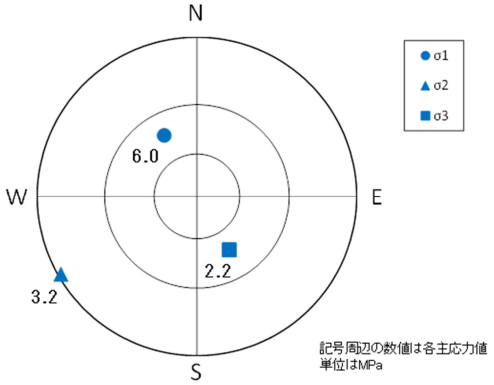


図 11　350m調査坑道のポンプ座における初期地圧測定の結果
（下半球投影図[注19]）

注16：割れ目などの性質を含めた岩盤の強度・変形などに関する特性を図や数式などを用いて表現したものです。
注17：ボーリング孔内のある区間をパッカーで仕切り、同区間内に高水圧を作用させて岩盤に人工的なき裂を発生させ、その時のき裂閉口圧やき裂方位などを調べ、これらの結果から初期地圧を求める方法です。
注18：坑道内で覆工コンクリート内側の断面の相対変位量を計測することです。
注19：球面上にある点を球面の天頂からみて、球の赤道面上にその点を投影したものです。

3.1.2 調査技術・調査機器開発

調査技術・調査機器開発として坑道周辺岩盤の地下水の地球化学特性、坑道掘削の影響調査、岩盤の力学に関する調査のほか、コントロールボーリング技術や塩水と淡水が混在する場における地下水流動に関する技術の開発を継続しました。

(1) 地下水の地球化学特性に関する調査技術の開発

第2段階では、地下施設の建設が施設周辺の地下水の水圧や水質に与える影響を観測する技術の整備、岩盤の水理モデル[注20]や地下水の地球化学モデルの構築、構築したモデルや解析結果の妥当性を確認するためのデータの取得を目的として技術開発を行っています。

地下水の地球化学調査においては、350m調査坑道において水質モニタリングを実施するため、水質および水圧のモニタリングが可能な装置の設計・開発を行いました。平成24年度におけるモニタリング装置の設計・製作に際して、これまでの140m調査坑道および250m調査坑道に設置してきたモニタリング装置における課題を抽出し、それらを解決しつつ、350m調査坑道で使用可能な耐圧性能を有する装置を製作しました。また、岩盤の酸化還元反応に対する緩衝能力を理解するために、140m調査坑道においてボーリング孔を埋め戻す試験を実施し、掘削土(ズリ)と粘土（ベントナイト[注21]）を混合した材料に含まれる間隙水や微生物を分析する手法を構築しました。

地下水の長期観測として、HDB-1～11孔およびPB-V01孔（図 3および図 4参照）に設置したモニタリング装置による地下水の間隙水圧・水質の観測を継続しました。このほか、原子力安全基盤機構[注22]、産業技術総合研究所[注23]（以下、産総研）との共同研究として、平成20年度に東立坑近傍に掘削したSAB-1孔(図 3参照)においても地下水の間隙水圧･水質モニタリングを継続しました。図 12にPB-V01孔、図 13にHDB-7孔における地下水の間隙水圧の測定結果を示します。地下施設に近いPB-V01孔(図 12)では、平成24年4月初めの350m調査坑道における高透水性断層部の掘削や、湧水抑制対策（グラウト[注24]施工）に伴う水圧の低下が深度357.01～370.51mおよび深度372.01～459.51mの区間で観測されました。これらの水圧の低下した区間は、第1段階で予測した高透水性断層の3次元分布と整合的であることが確認できました。

一方、地下施設から離れたHDB-7孔（図 13）では、東立坑や350m調査坑道の掘削、およびグラウト施工に伴うと考えられる間隙水圧の変化は観測されていません。

注20：地質構造の分布や形状に合わせて透水係数などの水理学的なデータを与えて、岩盤の水理特性を 2 次元的または 3 次元的な図や数式などを用いて表現したものです。

注21：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る材料です。ボーリング孔の掘削時には、孔壁の崩壊防止のために用いられる場合もあります。なお、地層処分では、水と接すると膨潤する性質に着目して、緩衝材の候補材料としています。

注22：独立行政法人 原子力安全基盤機構は、原子力の安全の確保のための基盤の整備を図ることを目的とした機関です。具体的には、原子力施設および原子炉施設に関する検査など、原子力施設および原子炉施設の設計に関する安全性の解析および評価、並びに原子力災害の予防、原子力災害の拡大の防止および原子力災害の復旧に関する業務などを行っています。

注23：独立行政法人 産業技術総合研究所は、産業技術の広い分野における様々な技術開発を総合的に行っている研究組織です。研究分野は「環境・エネルギー」、「地質」などの 6 分野に大別されます。

注24：岩盤に孔をあけ、水みちとなる岩盤の割れ目の中にセメントなどの固化材を圧入し充填することにより、湧水を止める技術のことです。

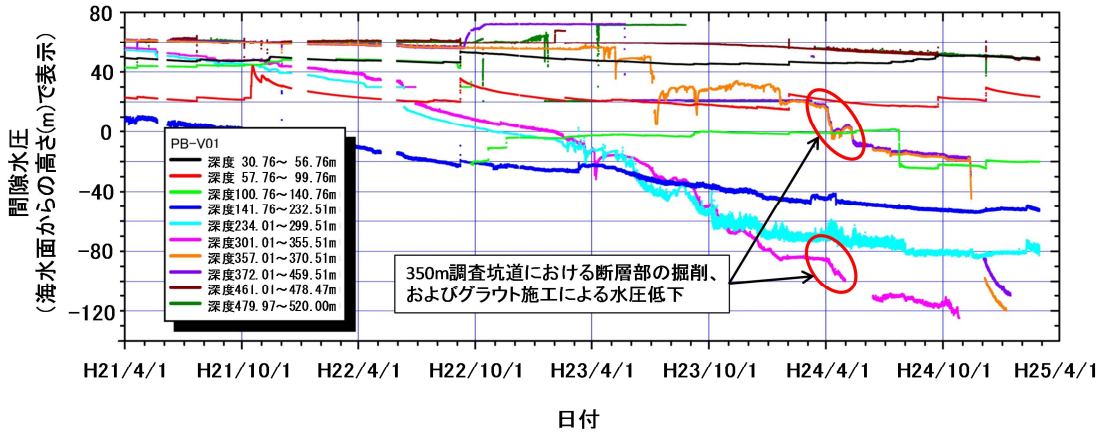


図 12　PB-V01 孔における地下水の間隙水圧の測定結果

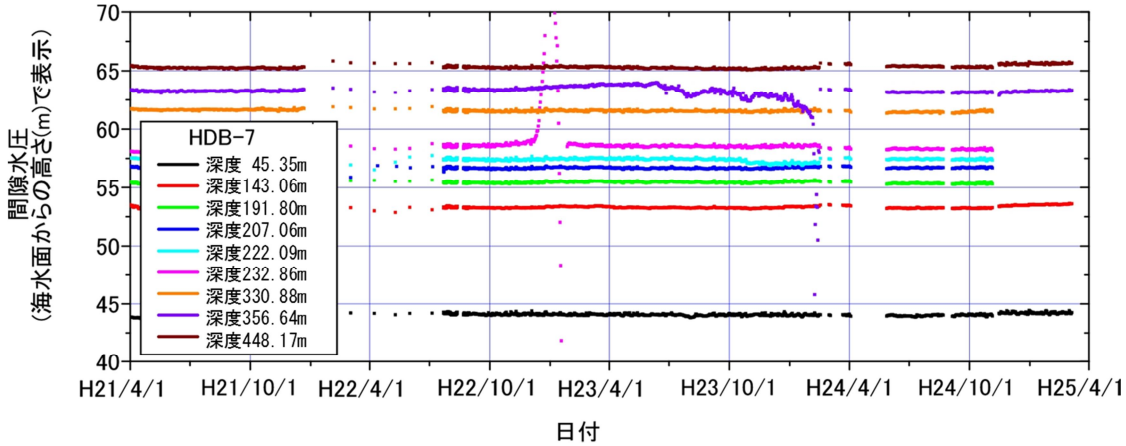


図 13　HDB-7 孔における地下水の間隙水圧の測定結果

坑道掘削に伴う地下水の水質に関する変化の程度と影響の範囲を把握するため、平成24年度においては東立坑から約80m離れているHDB-6孔に設置した水圧・水質モニタリング装置を利用して、地下水の採水・分析を実施しました（図 14）。ボーリング孔を掘削した平成15年度とそれ以降の水質分析結果を比較すると、深度300m付近の地下水の塩分濃度はほとんど変化していませんでした。一方、深度400m付近の地下水はモニタリング開始当初と比較するとやや塩分濃度の低くなる傾向があることを確認しました。このような地下水中の塩分濃度の変化は、坑道掘削の進捗や周辺の水理地質構造に依存すると考えられますが、これらの関連性をより明確にするために、今後も水圧・水質モニタリングを継続していく予定です。

坑道周辺岩盤の割れ目を対象とした物質の移動特性に関する調査技術開発として、平成24年度は、原位置トレーサー[注25]試験装置を改良するとともに、その試験装置が適切に機能するかを確認するための原位置試験を実施しました。

注25：地下水の流れの方向や流れる時間などを調べるために、地下水に目印として混ぜる染料やその他の薬品を指します。食塩が代表的なトレーサーとなりますが、調べたい地下水の化学成分が食塩に満ちている場合などにはヨウ化カリウムなどがあり、多種のトレーサーがあります。幌延深地層研究計画では放射性同位体をトレーサーとして使用することはありません。

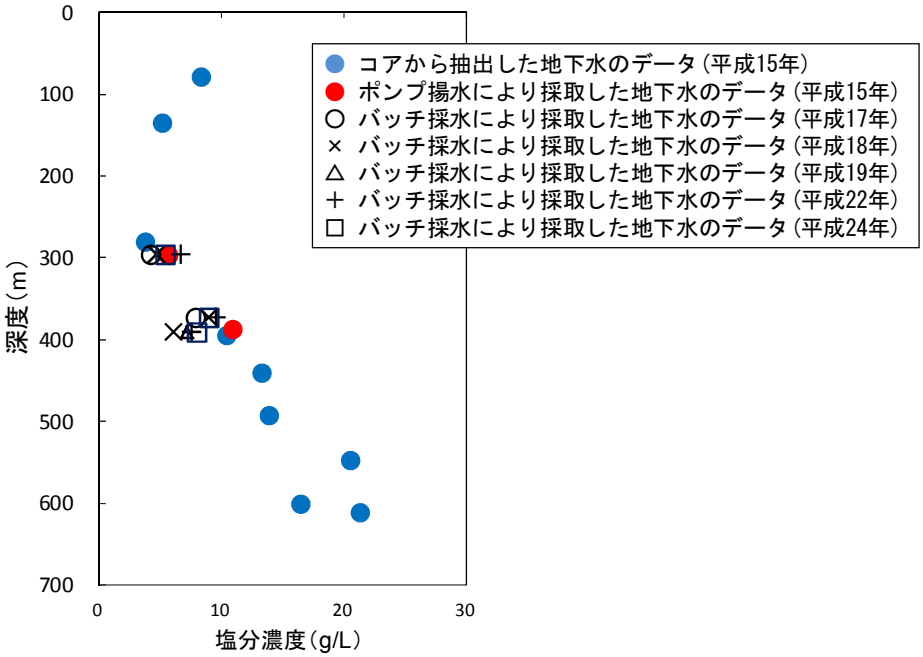


図 14　HDB-6孔における水質分析結果

試験装置については、平成23年度までに実施した原位置トレーサー試験の結果に基づき、トレーサー濃度の計測装置における光ファイバー部の破断防止および濃度計測部の防水を課題として抽出し、必要な改良を行いました。また、水圧のかかった状態で電気伝導度や水温などの物理化学パラメータを連続的に取得できる機能を新たに組み込みました。装置の改良後に動作確認および改良効果の確認のため、ウラニン[注26]を使った原位置トレーサー試験を実施しました。その結果、平成23年度までに認められたトレーサー濃度の計測不良および計測ノイズが改善・低減され、より正確に岩盤内の自然状態を示す物理化学パラメータを取得できました（図 15）。これらの改良により、より高精度かつ信頼性の高い原位置トレーサー試験が実施できるようになりました。

今後は、構築した装置の改良点についての検証を引き続き行うとともに、350m調査坑道において計画している物質移行試験に装置を適用していきます。

注26：フルオレセインナトリウム、黄色 202 号などとも呼ばれる物質で、一般的な蛍光染料として入浴剤にも用いられています。

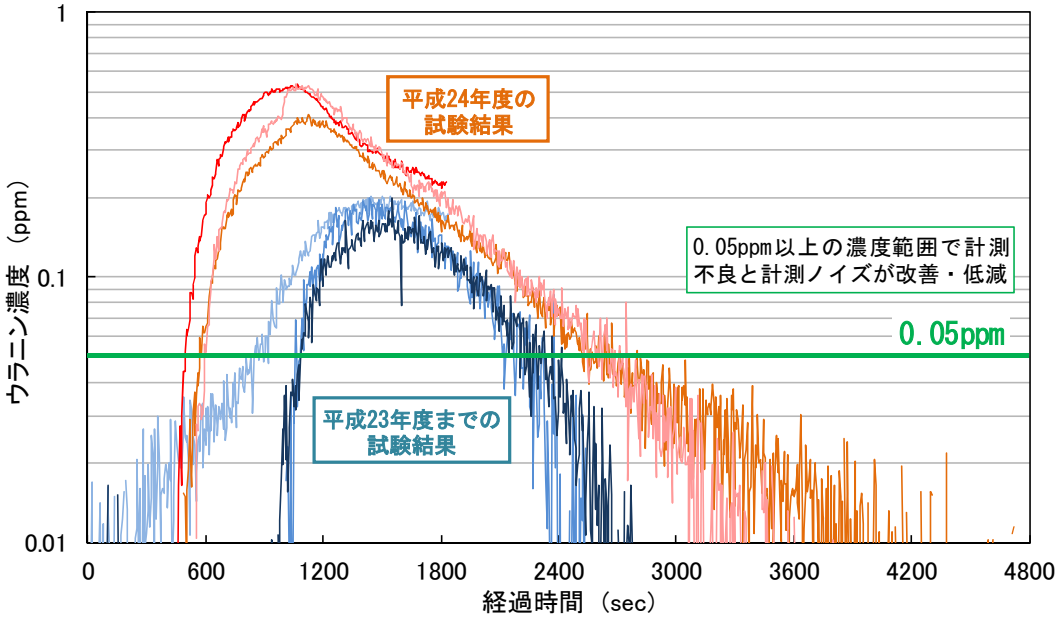


図 15　装置の改良前後の試験結果の比較例（揚水孔フローセルの測定結果）

平成24年度の試験結果では、平成23年度までの試験結果と比べて、それぞれの濃度の値が示すばらつきが小さくなっています。

但し、平成24年度はウラニンの注入量を2倍にしています（濃度は同じ）。

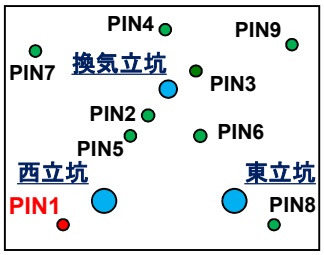
(2) 坑道掘削の影響調査に関する調査技術の開発

地表面から坑道掘削時の地下深部の岩盤や地下水の挙動をモニタリングする技術を確立することを目的として、立坑の周辺に9台の高精度傾斜計[注27]を配置し、坑道掘削に伴う地表面における岩盤の傾斜の変化を計測しています。平成24年度は、平成23年度と同様の方法[(6)]で計測データ（直交する2方向での傾斜角度の時系列データ）に含まれるノイズ成分を除去した後、計測した傾斜データと地下施設建設の工程との対比を行いました。平成24年度の主要な掘削工事は、西立坑の掘削（深度約47mから深度約300m）および350m調査坑道の総延長の半分程度の掘削であり、一部の傾斜計で、それらの影響が確認されました。

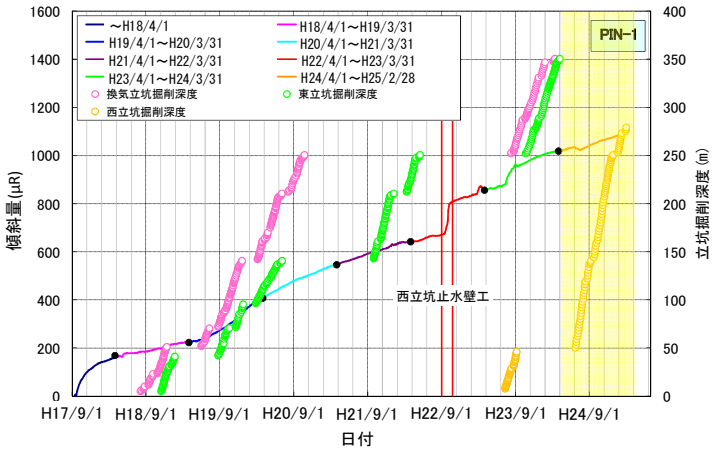
西立坑の近傍のPIN1、換気立坑の近傍のPIN2およびHDB-8孔の近傍のPIN10、の各傾斜量を図 16に示します。平成24年度に得られた傾斜データの全体的な傾向として、平成23年度までの結果と同様に、掘削が進行する立坑の近傍の傾斜量が増加していることを確認しました。特に、西立坑の深度250m以深の掘削によって、換気立坑周辺においても地表の傾斜量の増加が認められ（図16(a)および(b)）、高精度傾斜計によって地下深部の坑道の掘削に伴う地表の傾斜量を捉えられることを確認しました。一方、西立坑から北東方向へ約1km離れたPIN10（図 16(c)）では、地下施設建設に伴う地表の傾斜はほとんど観測されていません。つまり、地下施設付近は、地下施設の建設に伴って地表面が微小に傾斜していますが、地下施設から1km程度離れるとその地表面への影響はほとんど生じていません。

今後も引き続き、傾斜量のモニタリングを継続し、高精度傾斜計による地下深部の岩盤挙動のモニタリング技術の開発を行っていきます。

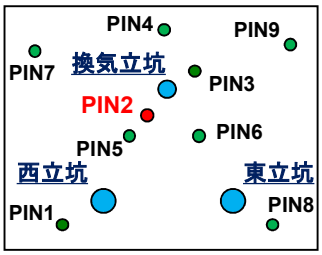
注27：通常の傾斜計が計測できる角度は約 3,600 分の 1 度であるのに対し、約 1 億分の 6 度の傾斜量を計測することができる非常に計測精度の高い傾斜計です。



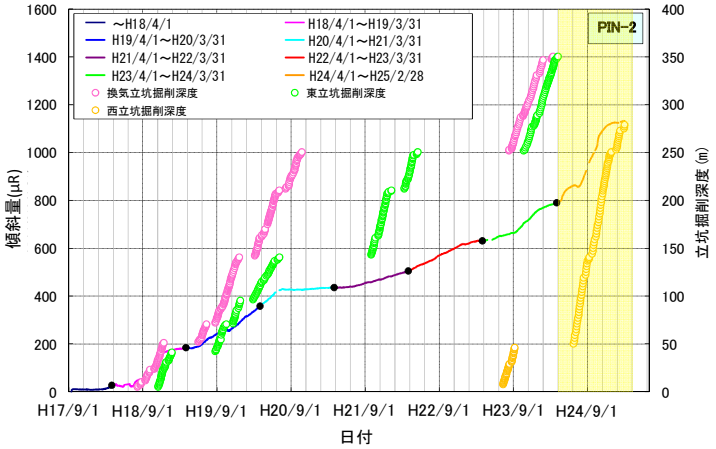
高精度傾斜計の配置



(a) PIN1

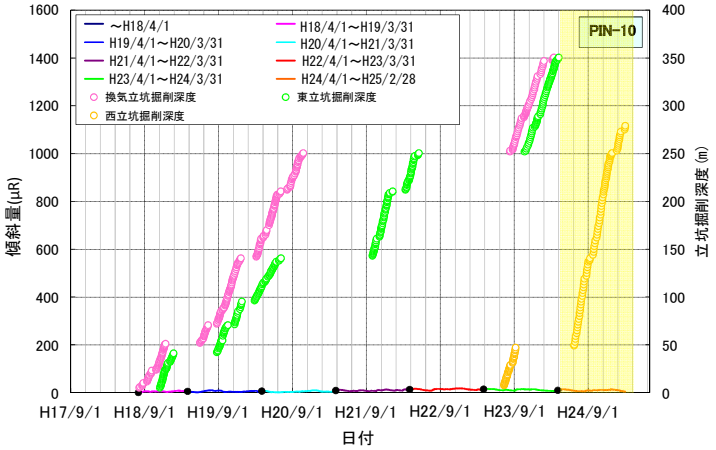


高精度傾斜計の配置



(b) PIN2

高精度傾斜計の配置



(c) PIN10

図 16　傾斜量データの一例

グラフの縦軸の単位μR(マイクロラジアン)は角度の単位で、1,000μRが約0.06°に相当します。

(3) 岩盤力学に関する調査技術の開発

掘削影響試験の一環として、250m西側調査坑道で弾性波トモグラフィ調査[注28]を実施しています。図 17に弾性波トモグラフィ調査のレイアウトを示します。掘削中の調査は、掘削切羽が調査領域を通過する前後6段階で実施し、調査領域の掘削後から1年間は50日ごと、それ以降は100日ごとに調査を実施しています。

図 18に調査結果を示します。結果は弾性波の速度で表され、速度の低下が大きい領域ほど掘削の影響が大きいことになります。図 18の(a)～(d)に示す掘削中の結果より、掘削切羽が調査領域に到達する掘削6（図 18(c)）までは坑道周辺岩盤の弾性波速度に顕著な低下は見られませんが、掘削切羽が調査領域を通過した掘削12（図 18(d)）では、壁面から1m以内に、暖色系で示される顕著な弾性波速度が低下した領域が見られました[(7)]。また、図 18の(e)～(j)に示す、調査領域掘削後の長期的な弾性波速度の分布を見ると、50～150日後（図 18(e)、(f)）の速度低下領域は、掘削12（図 18(d)）に比べて狭まりましたが、250～650日後（図 18(g)～(j)）では、速度低下領域は徐々に拡がっていく様子が見られました。今後も100日ごとの調査を継続して行い、季節的な影響を含めた長期的な坑道周辺岩盤の弾性波速度の変化の分布やその大きさをモニタリングし、調査技術としての適用性を確認していきます。

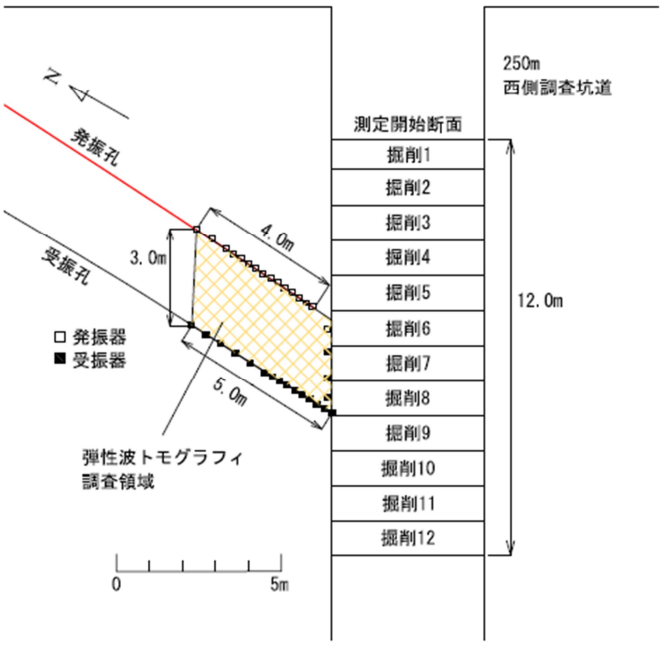


図 17　弾性波トモグラフィ調査のレイアウト

注28：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、いろいろな測線の弾性波（人工的に発生させた微小な地震波）の速度を計測することにより、領域内の岩盤の掘削による損傷範囲や、損傷の程度を確認する調査です。

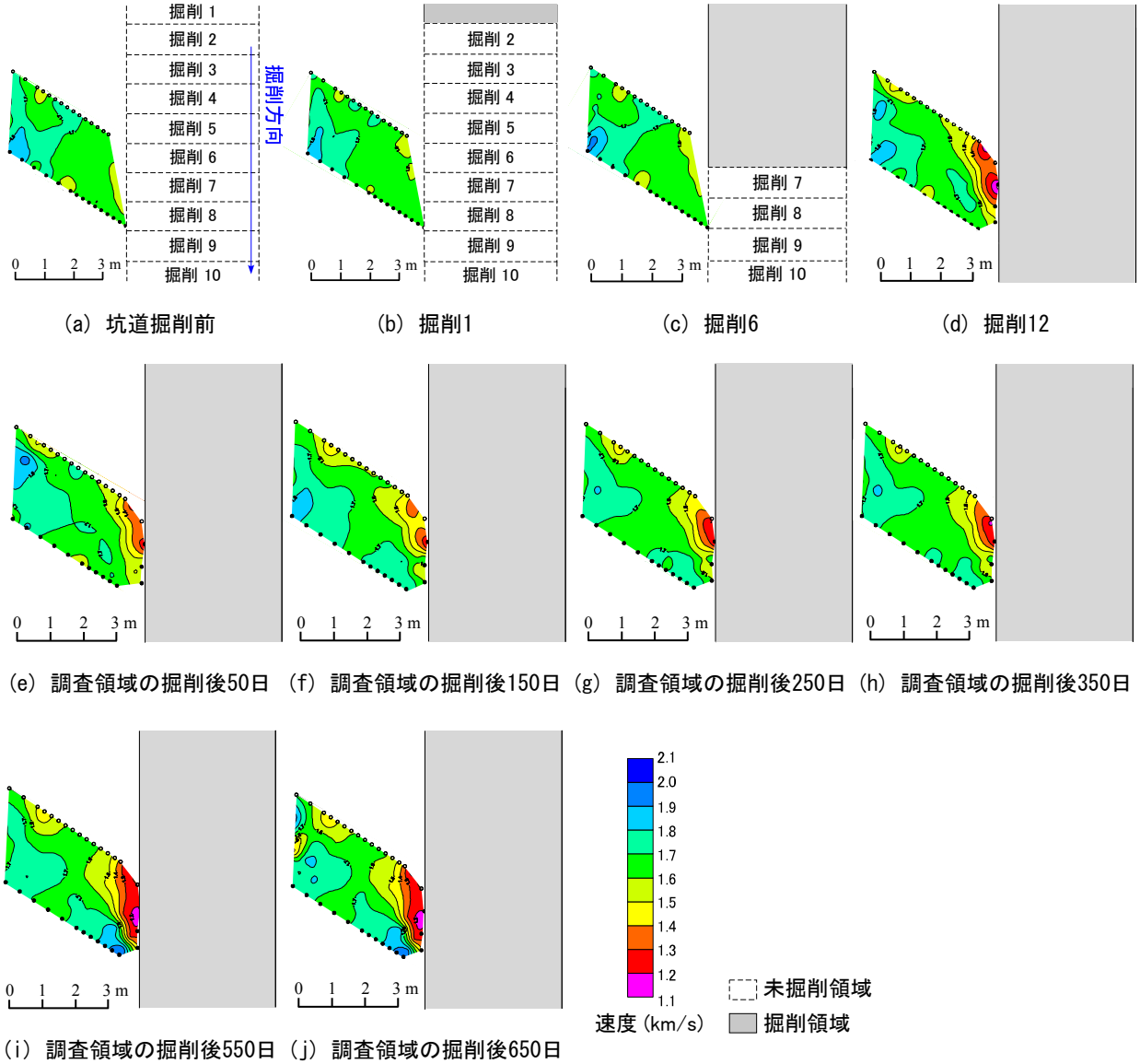


図 18　弾性波トモグラフィ調査の結果

速度の低下が大きい部分が掘削の影響を受けている部分です。

(4) コントロールボーリング技術の開発

平成23年度に引き続き、電力中央研究所[注29]（以下、電中研）との共同研究により、ボーリング孔の角度や方向を制御しながら掘削するコントロールボーリングの掘削技術およびボーリング孔を利用した観測技術の適用性の確認を行いました。平成24年度は、平成23年度までに上幌延地区で掘削した掘削長約1,000mのコントロールボーリング孔の孔内において、応力の状態を測定する装置の挿入設置に関する動作確認を行うとともに、耐圧性能および通信機能などの適用性を確認しました。

注29：一般財団法人 電力中央研究所は、電力技術の専門研究機関として設立されました。電力技術の研究として、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発を実施しています。

(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

産総研、電中研との共同研究により、塩水と淡水が混在する場における地下水流動や水質形成などに関する調査解析技術の開発を継続して実施しました。

平成24年度は、幌延町の沿岸域に位置する浜里地区の既存ボーリング孔(DD-1孔:孔長約1,000m、図 4参照）を約1,200mまで掘削し、水理試験や地下水分析などを行い、地下水流動や地下水年代を調査しました。地下水年代測定の結果は、長期的な海水準変動を考慮した地下水流動解析による評価結果とも整合しており、沿岸域の地下深部にも塩水系の古い地下水が滞留していることが確認されました。今後は、これまでに実施した沿岸域を対象とした調査解析技術とその利用方法を取りまとめていきます。

3.2 深地層における工学的技術の基礎の開発

平成24年度は、350m調査坑道、東立坑および西立坑の掘削を進めながら、コンクリート応力や坑道周辺岩盤の変位などを計測するとともに、350m調査坑道において、原位置岩盤物性試験を実施しました。これらの結果をもとに、地下施設設計と計測技術の妥当性の確認ならびに更新を行いました。また、地下施設の耐震設計技術を評価するための調査として、250m調査坑道およびHDB-3孔敷地に設置した地震計による地震動の計測を継続しました。

具体的には、平成23年度に施工した換気立坑の深度282mから284mに構築した覆工コンクリートの北東側に生じた、円周方向約4m、最大幅約1mmのクラックの原因を分析しました。対象としたクラックの状況を図 19に示します。クラックが発生した時点で、クラックから湧水の染み出しが認められたため、クラックは岩盤側から内空側へ貫通していることが推察されました。また、クラックは、深度286～287mまでの掘削を終了し、鋼製型枠を取り外した際に認められました。したがって、クラックは深度282～284mに覆工コンクリートを構築してから、深度287mまでを掘削している間に生じたと考えられます。さらに、図 19に示すとおり、クラックは、深度284～287mの北東側で生じた立坑壁面の崩落の直上に発生しました。なお、当該クラックは、深度287m以深の掘削を開始する前に、セメントミルクを充填し、補修しました。

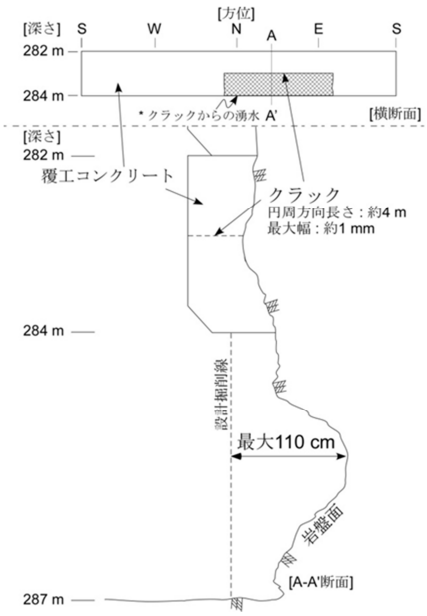


図 19　換気立坑の覆工コンクリートのクラックと壁面の崩落状況

クラックの発生箇所が立坑壁面の崩落箇所の直上であることから、岩盤が崩落したことによって周辺の岩盤の応力状態が変化したため、その近傍の覆工コンクリートに新たな応力が生じたと推察されました。そこで、岩盤の崩落を模擬した数値解析を実施して、崩落箇所直上に構築した覆工コンクリート内の応力分布の変化を分析しました。その結果を図 20に示します。図 20は、掘削が深度287mに到達した時点（崩落0cm）および崩落が50cm、100cm、150cmと進展したそれぞれの時点での、崩落の直上に構築された覆工コンクリート内にはたらく鉛直方向応力の分布を示しています。図 20より、深度287mまで掘削した時点で、覆工コンクリートの内空側には圧縮応力が生じたのに対して、岩盤側にはわずかな引張応力が発生しました（図 20(a)）。続いて、崩落が50cmから150cmまで進展するにしたがって、覆工コンクリートの岩盤側の下半分の部分に、引張応力が大きく生じました（図 20(b)～(d)）。崩落が150cmまで進展した時点の結果では、覆工コンクリートの約75%の範囲で鉛直方向に引張応力が発生しました（図 20(d)）。この結果によって、換気立坑の深度282～284mの覆工コンクリートに生じた水平クラックの主な原因は、その直下の岩盤崩落によって、岩盤内の応力が変化したためという予測が裏付けられました。この分析結果は、平成24年度の東立坑および西立坑の掘削時において、立坑壁面の崩落を抑制するための追加のロックボルト工や覆工コンクリートの構築高さの変更を判断する技術的根拠として活用しました。

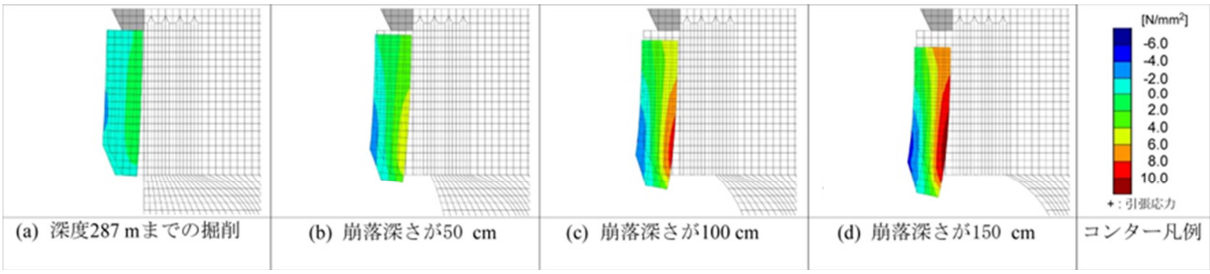


図 20　覆工コンクリート内の鉛直応力分布

寒色系が濃いほど圧縮応力が大きく、暖色系になるほど引張応力が大きいことを示します。

地下深部に坑道を掘削する際には、空洞を保持するために支保工[注30]をどの程度構築する必要があるのか、掘削によって坑道周辺の岩盤がどの程度影響を受け、その範囲はどのくらいかなどを、事前に計算し予測を立てる必要があります。その計算を行うためには、地下深部の岩盤の強さはどのくらいかを調査によって把握しておく必要があります。

一般的に、岩盤の強度特性は、岩盤中に存在する割れ目の頻度や分布性状に大きく依存し、採取した岩石試料の強度特性に比べて、その半分以下となる場合もあります。第1段階の調査では、地上からのボーリング調査で採取した岩石コアを用いて力学試験を実施し、その結果と、割れ目および強度特性に関する経験則などをもとに、地下深部の岩盤の強度特性を予測しました。第2段階および第3段階の調査では、地下施設内で実際の岩盤を切り出して、その強度特性を調査し、第1段階の予測値や予測手法などについて評価します。

平成24年度は、350mポンプ座（図 10参照）において、珪質泥岩である稚内層を対象に岩盤に荷重をかける載荷試験を実施しました。岩盤の供試体の大きさは、縦と横が約60cm、高さが約30cmです。試験では、岩盤供試体を4つ作製した後、坑道の天井と側壁にコンクリート製のブロックを作り、載荷用ジャッキを鉛直方向とせん断方向（横方向）に設置しました（写真 1および図 21）。

注30：地下空間の安定を保つために設ける、ロックボルト、鉄骨、コンクリートの壁などの構造物です。

試験では、供試体に鉛直方向の荷重をかけながら、せん断荷重（水平から下向き15°の荷重）を徐々にかけていきます。試験位置の岩盤状況を図 22に、岩級区分を表 2に示します。350mポンプ座には、CM-H(Hr.)級とCM-M(Hr.)級の岩盤が分布していましたが、このうち、350m調査坑道の壁面観察結果において主に観察されたCM-H(Hr.)級を対象に試験を実施しました。

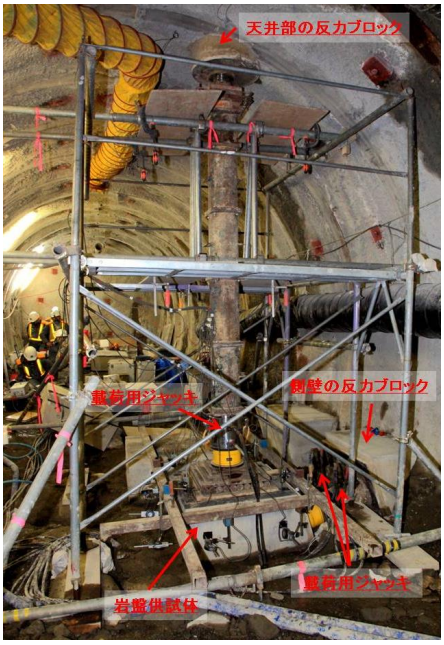


写真 1　載荷試験状況

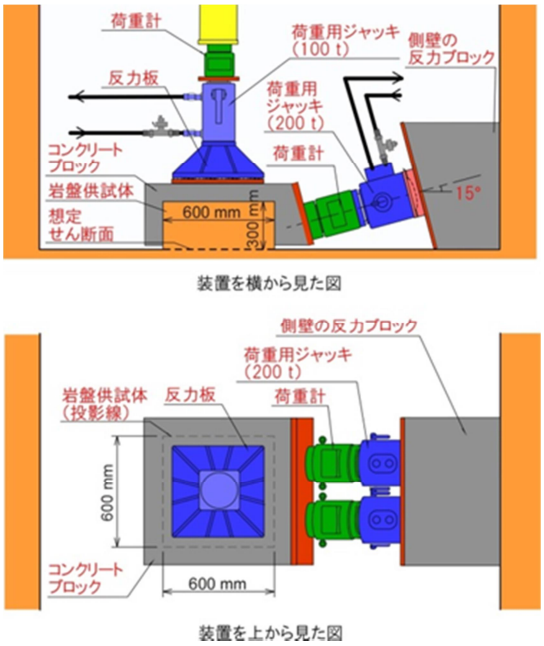


図 21　試験装置のイメージ

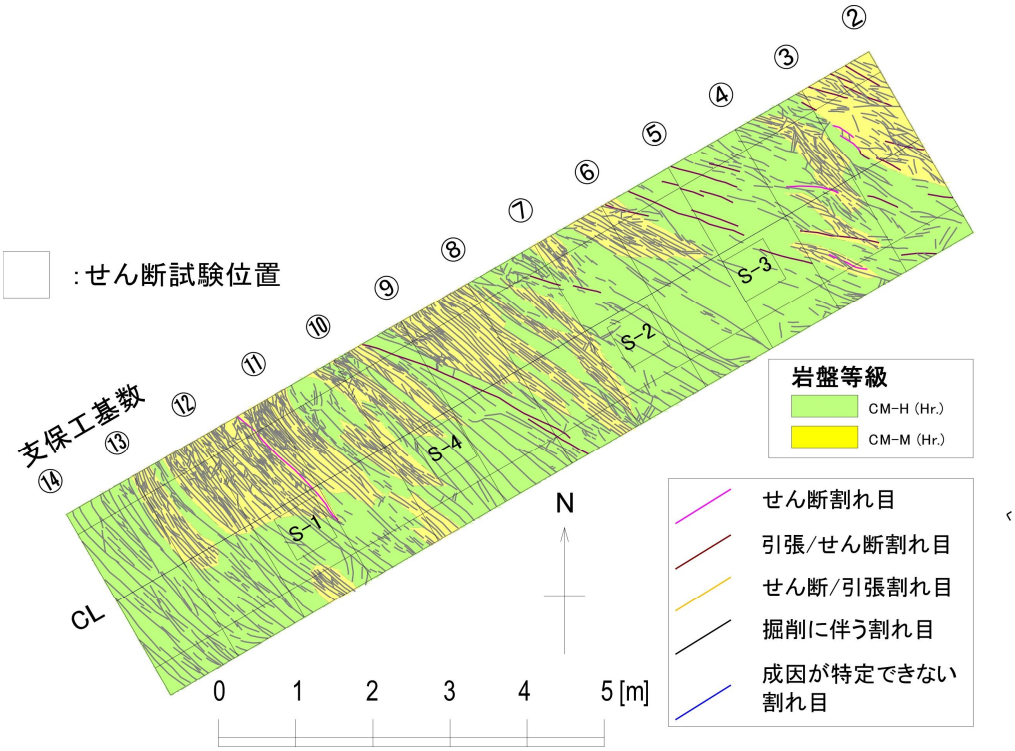


図 22　試験位置の岩盤状況

表 2　岩盤等級区分

地層	岩盤等級区分	岩石コアの特徴
声問層	D	岩石は軟質でカッターの刃が2mm以上刺さる。 コアは角礫状～岩片状～粘土状を示す。
	CL-L	岩石はカッターの刃が1mm程度刺さる硬さを有し、 コアは角礫状～岩片状を示す。
	CL-M CL-M(Hr.)	岩石はカッターの刃が1mm程度刺さる硬さを有し、 コアは概ね10cm未満の短柱状を主体とする。
	CL-H CL-H(Hr.)	岩石はカッターの刃が1mm程度刺さる硬さを有し、 コアは概ね10cm以上の長柱状～棒状を主体とする。
稚内層	CM-L	岩石はカッターの刃で傷がつく程度の硬さを有し、 コアはコアは角礫状～岩片状を示す。
	CM-M CM-M(Hr.)	岩石はカッターの刃で傷がつく程度の硬さを有し、 コアは概ね10cm未満の短柱状を主体とする。
	CM-H CM-H(Hr.)	岩石はカッターの刃で傷がつく程度の硬さを有し、 コアは概ね10cm以上の長柱状～棒状を主体とする。

（Hr.）はヘアークラックの有無を示します。ボーリングコア10m分の区間において10%以上の範囲にヘアークラックが観察されたものに（Hr.）を付しています。

載荷試験の結果を図 23に示します。図 23には、第1段階で得られたボーリングコアを用いた岩石試験結果（CM-H級）および岩石試験結果をもとに岩盤中の割れ目の影響を考慮して予測した、本試験で対象とした岩級（CM-H(Hr.)級）における事前予測線も併せて示しました。地下施設の設計の観点から、載荷試験の結果は事前予測の結果と大きく違わないことが確認できました。

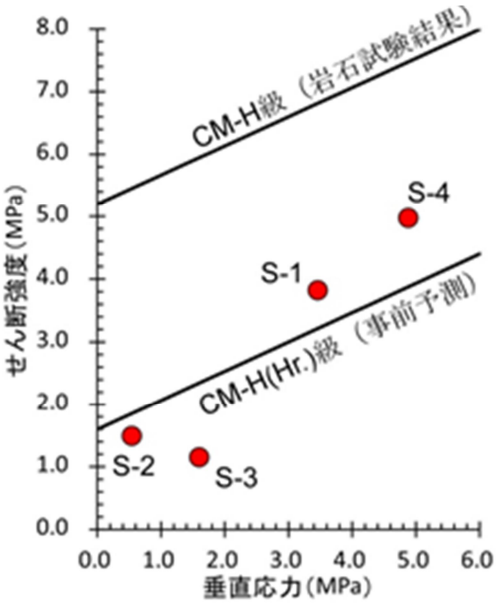


図 23　原位置における載荷試験結果と事前予測結果の比較

また、地下施設の耐震安全性評価に係わる調査技術開発を主な目的として、250m調査坑道およびHDB-3孔敷地の地震計（強震計）を用いて観測を行いました。

平成24年度は、観測機器の設置方法とデータ解析方法の確認を行いました。観測機器の設置方法については、複数の地震計を用いて同時観測を行い、250m調査坑道の地震計の設置手順とセン

サー方向の妥当性を確認しました。解析方法については、地震計の生データを加速度に変換する際に用いる増幅感度の値などの妥当性を確認しました。一連の観測方法の適用性を確認した上で、気象庁発表の幌延町宮園町の震度が1以上の地震（有感地震）を対象に強震計データの詳細な解析を行い、計測震度(参考値)[注31]を求めました。平成24年度の主な観測結果を表 3に示します。地表と地下の計測震度を比較すると、全般に地下の方が小さく、地表で地震を感じても、地下では地震を感じない場合が多いと言えます。今後、350m調査坑道にも地震計を設置する計画です。

表 3　平成 24 年度の主要な地震の計測震度

平成24年度に気象庁が発表した地震のうち、幌延町宮園町で震度1以上を記録した主なもの				計測震度（参考値）		
				地下	地表	
発生日時	マグニチュード	震源地	幌延町宮園町の震度	250m調査坑道	HDB-3 孔観測点	KiK-net [注32] 幌延
平成24年7月15日 23:08頃	4.2	上川地方北部	2	0.1	1.4	1.5
平成24年7月16日 6:49頃	4.3	上川地方北部	2	0.4	1.5	1.8
平成24年7月18日 4:39頃	4.1	上川地方北部	2	0.0	1.1	1.5
平成24年7月18日 4:50頃	4.1	上川地方北部	2	0.0	1.2	1.6
平成24年12月17日 15:30頃	3.7	宗谷地方北部	2	1.0	1.8	1.8
平成25年1月3日 20:14 頃	4.8	留萌地方中北部	2	1.1	2.0	2.8

3.3 地質環境の長期安定性に関する研究

3.3.1 地質環境の長期的変遷に関する研究

本研究では、過去から現在に至るまでの地質環境の復元や、現在から将来にわたる変化の傾向を知るための研究開発を行っています。これまでに、地形・地質構造の変遷や気候変動に伴って変化すると考えられる地下水の流れを解析する手法の整備を進めてきました[(8)、(9)]。本手法は、従来、個別に評価されることの多かった自然現象の統合的解釈やデータが得られにくい古い時代の地質環境の推定などに役立つものと期待されます。

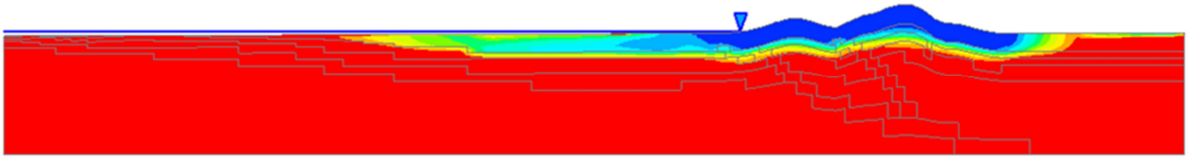
平成24年度は、課題であった堆積岩中の圧密作用と侵食作用の解析ができるように、解析プログラムを改良しました。改良前と改良後の解析結果の比較を図 24に示します。図中で寒色系の部分が地下水の塩分濃度の低い領域、暖色系の部分が塩分濃度の高い領域です。向かって右側の透

注31：気象庁の計測震度は計測震度計により観測されたものですが、ここで示した計測震度（参考値）は気象庁によって定められた方法に基づき研究用強震計データを用いて計算したものです。計測震度は小数点第１位まで表示されます。一般に用いられる気象庁の震度は計測震度から換算されるもので、例えば震度２に対応する計測震度は 1.5 以上 2.5 未満です。

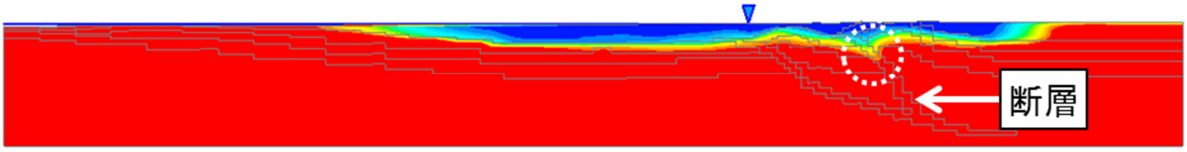
注32：KiK-netは、独立行政法人防災科学技術研究所により整備・運用されている強震観測網です。被害を及ぼす様な強い揺れを確実に記録するために強震計を用いており、観測により得られたデータはホームページで公開されており、地震災害・被害リスク評価などの様々な研究や実務に役立てられています。

水性の高い断層近傍に着目すると、改良後の結果は、改良前と比べて塩分濃度の低い地下水がより深くまで及んでいる傾向が明瞭になりました（図 24(b)の白点線丸印の部分）。このことは、過去に行われた地上からの物理探査結果やボーリング孔から採水した地下水の水質分析結果[10]とも整合しており、解析結果の再現性が向上したものと考えています。

今後は、本手法による解析結果の確からしさを実際の観測値などを用いて検討していくとともに、解析精度や速度の向上を図っていく予定です。



(a) 改良前（圧密・侵食作用を考慮していない）



(b) 改良後（圧密・侵食作用を考慮）

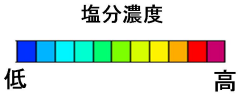


図 24　圧密・侵食作用の有無による地下水の塩分濃度の解析結果

3.3.2 地震研究

地震研究では、地震分布の把握を主な目的として、人が感じない非常に小さな地震（微小地震）を捉えるため汎用型地震計を用いて観測を行ってきました。微小地震の観測では、地震による揺れが小さいため、観測点でのノイズ[注33]の大きさを事前に把握しておくことが重要になります。

そこで、平成24年度は、上幌延観測点、北進観測点、中問寒観測点および北星園観測点（図 25）の観測データを用いて、それぞれの観測点のノイズを解析しました。その結果、上幌延観測点と北進観測点におけるノイズは、世界の主な地震記録におけるノイズと同程度でした。一方、軟らかい地盤が厚い場所に設置した北星園観測点および中問寒観測点は比較的ノイズが大きく[注34]、設置場所の地盤条件がノイズに影響したものと推定されました。

また、観測された微小地震の震源分布は、これまでの観測結果と同様であり、主にサロベツ原野と幌延町東部の深部に集中していました。

注33：地震の無いときに測定される地面の揺れの事を指します。バックグラウンドノイズとも言われます。
注34：軟らかい地盤では、一般に揺れが大きくなります。

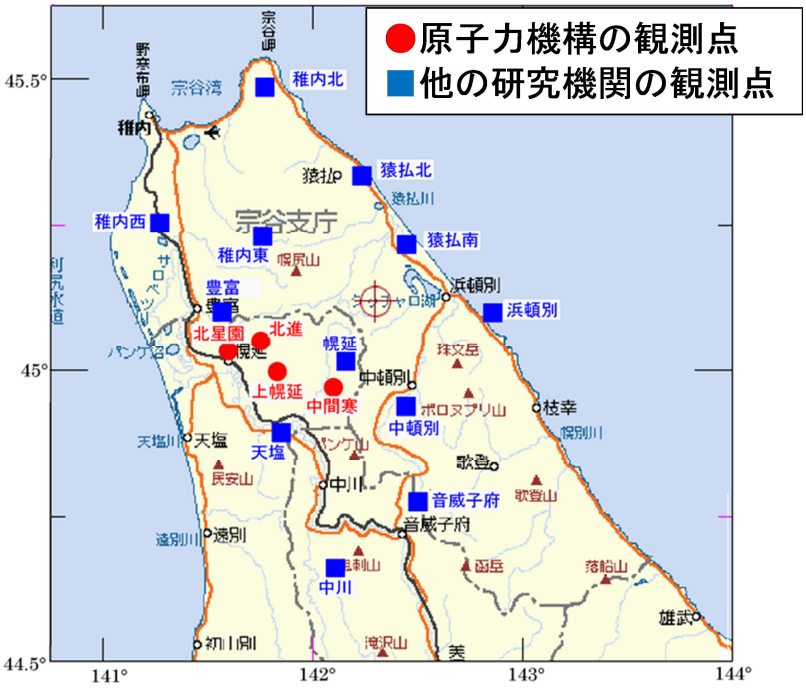

●原子力機構の観測点
■他の研究機関の観測点
宗谷岬
野寒布岬
宗谷湾
稚内
稚内北
猿払
猿払北
猿払川
宗谷支庁
稚内西
稚内東
猿払南
幌尻山
豊富
浜頓別
シャコタン半島
北星園
北進
幌延
珠文岳
上幌延
中間寒
中頓別
ポロヌプリ山
枝幸
天塩川
天塩
ペンケ山
歌登
民安山
中川
音威子府
歌登山
遠別川
遠別
函岳
落船山
中川
雄武
初山別
滝沢山
美
45.5°
45°
44.5°
141°
142°
143°
144°

図 25　地震観測網

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

平成24年度は、低アルカリ性コンクリート材料に関する施工試験や周辺環境への影響調査、緩衝材の定置試験設備の設計・製作などを実施しました。

(1) 低アルカリ性コンクリート材料の施工性の確認

地下施設の建設に、支保工の材料としてセメント系材料であるコンクリートを使用した場合、コンクリートと接触した部分の地下水のpHが12以上の高アルカリ性となることが想定されます。この高アルカリ性の地下水が、緩衝材（ベントナイト）や坑道周辺の岩盤を変質させ、人工バリア[注35]や天然バリアの性能に影響を与える可能性があります。このような影響を緩和するために通常のセメントに比べてpHが低くなるセメント(低アルカリ性セメント)の開発を継続しています。低アルカリ性セメントは、通常のセメントに産業副産物であるシリカフューム[注36]とフライアッシュ[注37]を配合し、これらの材料を高pHの原因となるカルシウムなどと反応させることで、pHを低く抑えるものです。これまでに、140mおよび250m調査坑道において吹付けコンクリートとしての施工性を確認するとともに、平成22年度からは4.1.1(2)で述べる坑道周辺の環境への影響調査を継続しています。

平成24年度は、350m調査坑道の一部に低アルカリ性セメントをグラウト材料に使用した湧水抑制対策を実施するとともに、低アルカリ性セメントを350m調査坑道の支保工に吹付けコンクリートとして使用し、施工性の確認を行いました。

具体的には、低アルカリ性のグラウト材料の施工試験として、グラウト改良範囲として設定した350m調査坑道を掘削する前に、250m調査坑道からボーリング孔（グラウト注入孔）を掘削し、湧水のあった箇所に対して低アルカリ性のグラウト材料を注入しました。図 26に施工範囲とグラウト注入孔の掘削の様子を示します。施工試験は従来の湧水抑制対策と同じ施工機械を用いて実施し、低アルカリ性のグラウト材料が通常の湧水抑制対策と同様に施工できることを確認しました。この施工試験が終了した後、グラウト改良範囲の坑道の掘削を平成25年2月から開始しましたが、3月末時点では顕著な湧水は観測されておらず湧水抑制対策が効果をあげたと考えられます。今後、坑道の掘削終了後にも調査を行い、止水性や周辺環境への影響について確認していきます。

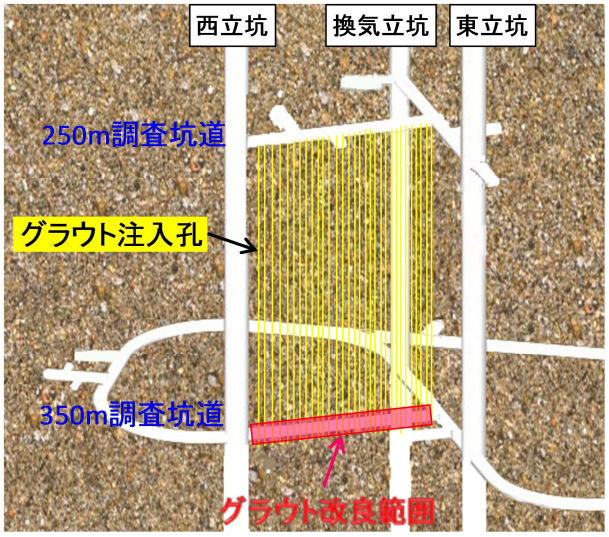
低アルカリ性セメントの吹付けコンクリートの施工試験では、上記のグラウト施工試験の改良範囲である350m調査坑道の西側調査坑道の掘削において、250m調査坑道と同様[(11)]に吹付け施工試験を行い、施工性や強度について確認しました。図 27に施工試験の実施状況を示します。試験の結果、設計基準強度を上回る強度が発現することを確認しました。

今後は、施工箇所周辺の岩盤や地下水への影響について継続的に調査していきます。

注35：ガラス固化体、オーバーパックおよび緩衝材からなる地層処分システムの構成要素のことで、高レベル放射性廃棄物が人間の生活環境に影響を及ぼさないようにする障壁として、工学的に形成するものです。

注36：SiO_2を主成分とした粒径 0.1μm 程度の球形の超微粒子の産業副産物です。ケイ素と鉄の合金であるフェロシリコンなどの製造時に発生する廃ガスを集じんすることにより得られます。

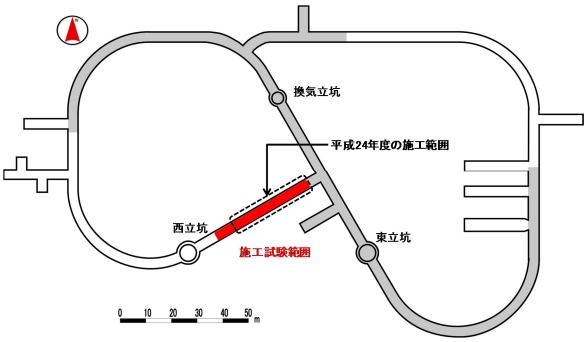
注37：火力発電所の微粉炭燃焼で発生する産業副産物です。シリカフュームと同様にSiO_2を主成分とし、集じん機で集じんすることにより得られます。



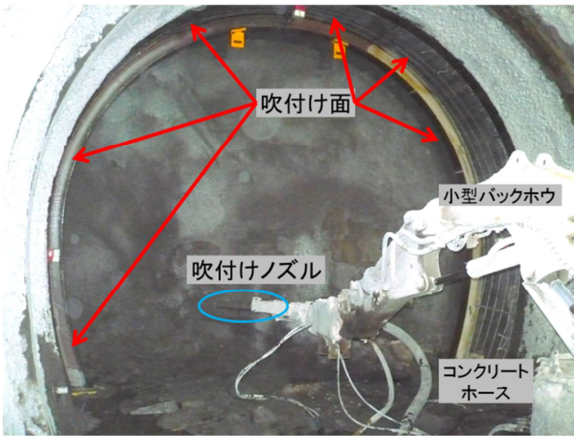
(a)　グラウト施工範囲　　(b)　グラウト注入孔の掘削状況

図 26　低アルカリ性グラウト材料の施工範囲

250m 調査坑道からグラウト注入孔を掘削し、湧水のあった箇所に対してグラウト材を注入します。



350m 調査坑道（網掛けは平成 24 年度までに掘削した範囲を示しています。）



(a)　吹付け施工範囲　　(b)　施工状況

図 27　低アルカリ性の吹付けコンクリート施工試験

コンクリートは圧縮空気によってコンクリートホース内を移送され、小型バックホウの先端に取り付けられた吹付けノズルから吹付け面に向かって吹付けられます。

(2) 低アルカリ性コンクリート材料の周辺岩盤への影響調査

低アルカリ性セメントを用いた吹付けコンクリートが、坑道周辺の岩盤および地下水に与える影響を調査するため、250m調査坑道で施工試験を実施した約6ヶ月後に、坑道壁面から、コンクリートおよび岩石のコアを採取し、分析を実施しました。岩石の分析結果は、これまでに地上から実施したボーリング調査や140m調査坑道で採取・分析した結果と同等であり、コンクリートの影響を受ける前の初期値を取得することができました。

また、250m調査坑道で施工した低アルカリ性の吹付けコンクリートの区間に設置した採水装置（図 28）から、坑道付近の地下水を採取して分析しました。表 4に採水した地下水の分析結果を示します。比較のため、これまでに140m調査坑道から採水した地下水の分析結果を合わせて示し

ます。どちらも区間-3では分析に十分な採水量が得られなかったため、示していません。表 4から、今回得られた結果は、140m調査坑道で得られた結果と比較しても、高アルカリ性の原因となるカルシウム、カリウムおよびナトリウムの濃度が低く、未だコンクリート材料による影響を受けていないと考えられます。今後も継続して採水・分析を行って調査し、コンクリート材料の周辺環境への影響について検討していきます。

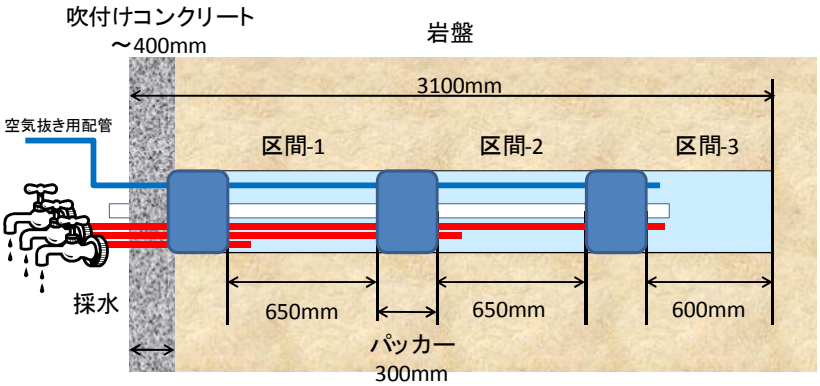


図 28　採水装置のイメージ

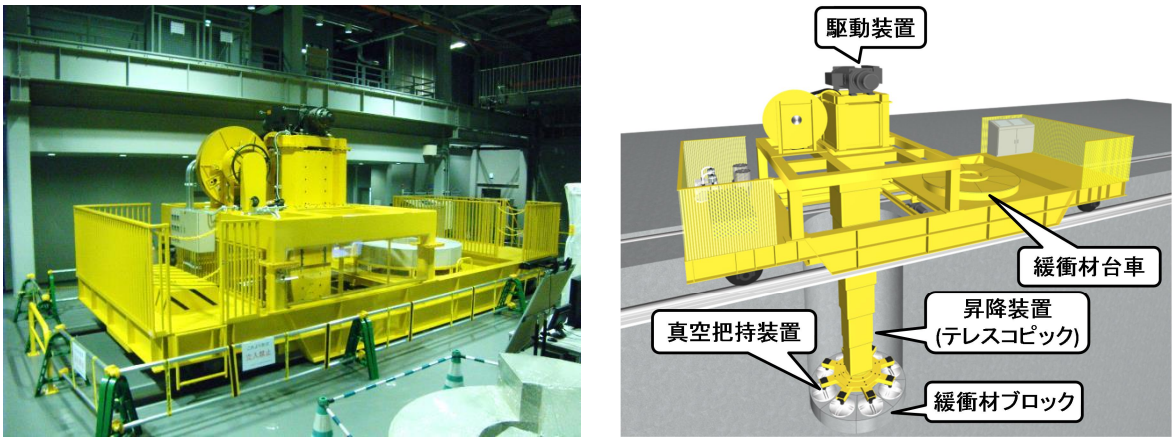
表 4　水質分析結果

測定項目	単位	250m調査坑道（施工後約6ヶ月）		140m調査坑道[11]			
		区間-1	区間-2	区間-1		区間-2	
				施工後 約3ヶ月	施工後 約21ヶ月	施工後 約3ヶ月	施工後 約21ヶ月
pH	-	8.6	8.0	7.3	7.3	7.5	7.3
水温	℃	18.5	20.7	15.8	23.0	15.8	23.5
電気伝導率	mS/m	428	804	1,110	1,140	1,120	1,140
ナトリウム	mg/L	870	1,880	2,440	2,410	2,480	2,390
カリウム		26.5	48.2	95.1	94.4	98.0	86.0
カルシウム		17	33	56.6	56.9	55.2	58.5
シリカ		31	58	56	58	61	58
アンモニウムイオン		32.7	64.9	116	125	110	122
塩化物イオン		886	1,770	2,580	2,580	2,510	2,510

(3) 緩衝材の定置試験・人工バリア長期挙動試験

平成23年度に引き続き、原子力環境整備促進・資金管理センター[注38]との共同研究として、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業である地層処分実規模設備整備事業における操業技術や人工バリアの長期挙動に関する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。また、緩衝材中に水がしみ込んで隙間が閉塞される過程を観察できる装置を用いた浸潤試験を継続しました。

緩衝材定置試験設備の整備として、一連の緩衝材の定置動作を自動化するためのソフトウェアを設計・製作しました。また、運転時の動作確認として5日間で計100回の自動運転を実施し、運転時に異常な引っかかりや揺れがないことや、異常時を模擬した状態で所定の安全対策が機能することなどを確認しました。緩衝材定置試験設備の外観と各部の名称を図 29に、確認した一連の定置動作を図 30に示します。各動作のうち、動作1を除くすべての動作を自動化しました。



(a) 外観　　(b) 各部名称

図 29　緩衝材定置試験設備の外観および各部の名称

注38：公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターは、放射性廃棄物処理処分の専門研究機関として発足しました。現在は、原子力発電環境整備機構(NUMO)を通して積み立てられる最終処分積立金の管理などを行う資金管理業務も実施しています。

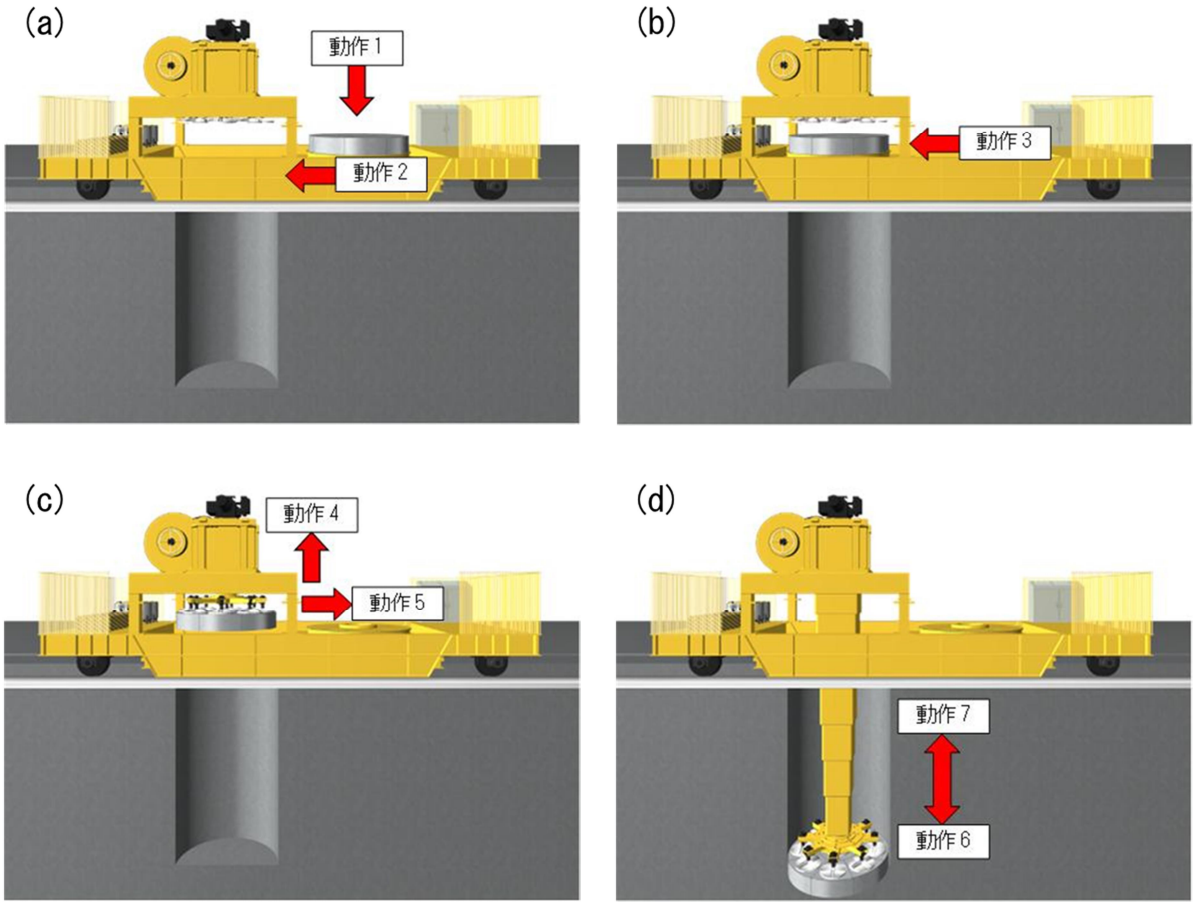


図 30　緩衝材定置装置の定置動作

- 動作1：天井クレーンを使用して緩衝材台車へ緩衝材ブロックを乗せる（図 30(a)）
- 動作2：緩衝材台車を昇降装置(テレスコピック)下部へ移動させる（図 30(a)）
- 動作3：緩衝材台車に乗せた緩衝材ブロックを昇降装置(テレスコピック)の下で停止させる（図 30(b)）
- 動作4：昇降装置(テレスコピック)に取り付けられた真空把持装置にて緩衝材ブロックを真空把持する（図 30(c)）
- 動作5：緩衝材台車を始動位置へ移動する（図 30(c)）
- 動作6：模擬処分孔に緩衝材ブロックを定置する（図 30(d)）
- 動作7：緩衝材定置後に昇降装置(テレスコピック)を上部へ移動させる（図 30(d)）

また、連続運転によって緩衝材（4段分）を模擬の処分孔に定置し、定置の速度および精度などを確認する定置試験を実施しました。その結果、設計段階で想定していた性能を確認できました。なお、この試験は「おもしろ科学館2012inほろのべ」（平成24年9月）で一般公開しました[(12)(13)]（写真 2)。

写真 2　緩衝材定置試験の様子

4.1.2 設計手法の適用性確認

地下施設で実施する、人工バリアに関する試験や坑道閉鎖試験などでは、緩衝材やオーバーパック注39の候補材料を用いる予定です。それら人工バリアの材料は幌延地域に見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2段階ではベントナイトや炭素鋼などの金属材料の特性に関して、塩水系地下水やセメントの影響に対して不足しているデータの取得を継続しています。また、塩水系地下水の環境で生じる反応についての理解や、一般化された個別のモデルの開発などを継続するとともに、それらを複合させた人工バリアとその周辺岩盤の長期的な挙動に関する研究を、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実施しています。さらに、坑道掘削に伴い得られる地質環境データ、室内試験から得られる人工バリア材料の特性や挙動に関するデータを用いて、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を適宜見直し、その設計手法を原位置試験の仕様検討に適用することで、手法の妥当性を確認します。

平成24年度は、オーバーパックの候補材料の腐食特性や第3段階で実施する人工バリア性能確認試験などの原位置試験の詳細な計画について検討しました。

(1) 人工バリア性能確認試験計画の検討

350m調査坑道における第3段階の試験のひとつとして予定されている人工バリア性能確認試験（図 31）は、幌延を事例として、①地層処分研究開発の第2次取りまとめ報告書(14)で示した処分概念が実際の地下で構築できることの実証、②人工バリアや埋め戻し材の手法の適用性確認、③熱、水、応力、化学の連成現象注40に係るデータの取得、を目的として実施するものです。

平成24年度は人工バリア性能確認試験計画に関わる検討のひとつとして、試験坑道の埋め戻し材の仕様や施工・製作方法などを検討するため、第1段階で検討した設計手法の適用性確認と並行しつつ、材料の基本特性データを取得しました。本試験で使用予定の埋め戻し材は、ベントナイ

注39：人工バリアの構成要素のひとつです。ガラス固化体を内部に封入することにより、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。

注40：地下環境に設置された廃棄体の周辺の緩衝材や岩盤には、廃棄体からの熱、地下水との反応、岩盤から（または岩盤へ）作用する応力、化学的な変化などによる影響が複合的に発生すると考えられます。

ト（40%）に350m調査坑道の掘削土(ズリ)（60%）を混合したもので、坑道の下部は現場で転圧しながら締固め、上部は埋め戻し材を圧縮成型してブロック状にしたものを積み重ねることによって施工する計画です（図 32)。そのため､埋め戻し材ブロックの製作性を確認するための予備試験をあわせて行いました。

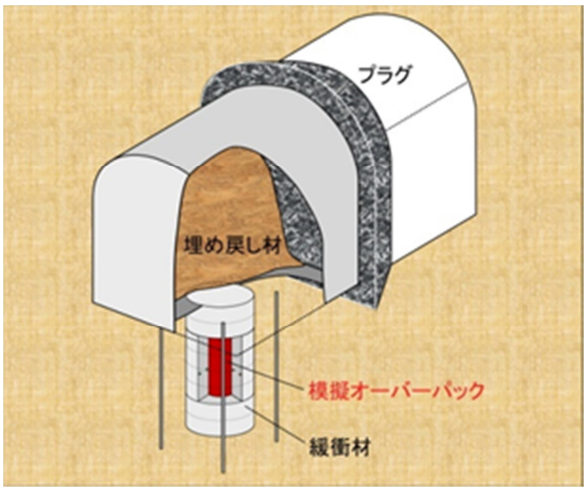


図 31　人工バリア性能確認試験の概要

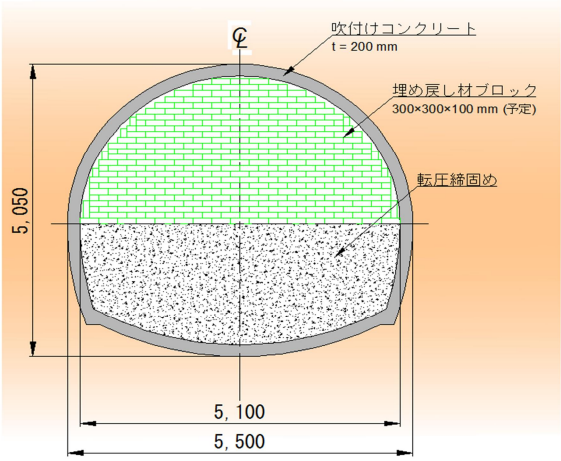


図 32　人工バリア性能確認試験坑道埋め戻しの概要（予定）

埋め戻し材の仕様の選定要件としては、施工・製作性、低い透水性、膨潤性があげられます。そのため、これらの特性データを取得するため、締固め試験、透水試験および膨潤圧試験を行いました。

材料の締め固まり具合は、材料に含ませる水の量、突き固める際に加える力および突き固める回数で変化します。そのため、これらの条件を変えながら締固め試験を行い、転圧締固め方法によって達成可能な密度のおよその範囲を把握しました。

また、締固め試験で作製した試料(乾燥密度:約1.2～1.3Mg/m^3)を対象に幌延の地下水を用いて透水試験を実施した結果、透水係数として10^{-9}m/sec程度の低透水性が確保できることが分かりました（図 33)。なお、図 33に示した含水比とは、材料に加えた水の量を表し、1E$_C$、2E$_C$および4E$_C$は､突き固めのエネルギーを示すもので1E$_C$よりも4E$_C$の方が大きなエネルギーを与えたことになります。

一方、埋め戻し材の膨潤性は、坑道壁面と埋め戻し材の間に生じる隙間などを充填し、それらの隙間が水みちとならないようにするために必要な特性で、これを確認するための試験のひとつとして膨潤圧試験を行いました。膨潤圧については、これまでの研究や諸外国の事例から、0.1MPa以上をひとつの判断基準としました。締固め試験の結果を参考に、供試体の乾燥状態での密度（乾燥密度）を1.2、1.3および1.4Mg/m^{3}とした試験を行いました（写真 3)。試験の結果、これらの材料は全て0.1MPa以上の膨潤圧を確保可能であることが確認できました（図 34)。

このような特性試験の結果から得られた乾燥密度の範囲をもとに、坑道上部の埋め戻しに用いられるブロックの製作性などについて検討を行うため、ブロックの製作試験を実施しました（写真 4)。本試験では、ブロックを圧縮成型する時の圧力の測定や脱型方法の確認、持ち運びや積み重ねといった取扱いやすさ、製作したブロックの寸法や重量などの品質確認を実施しました。

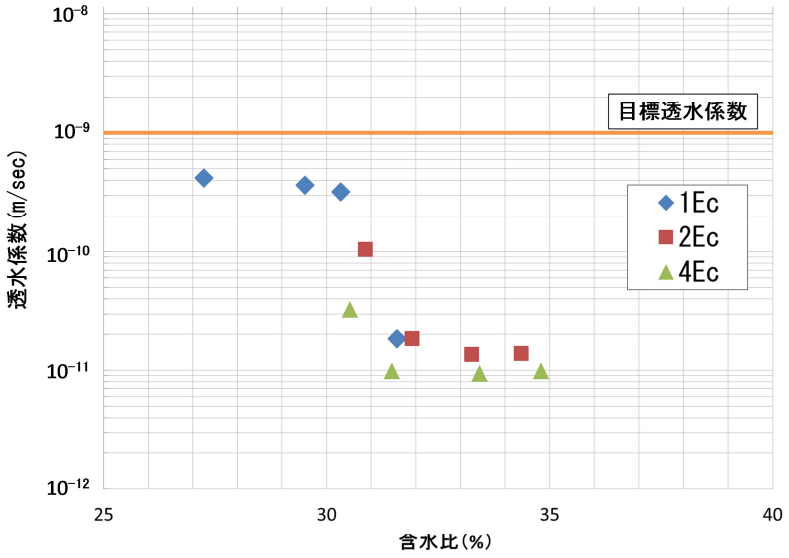


図 33　透水試験の結果

写真 3　膨潤圧試験装置の外観

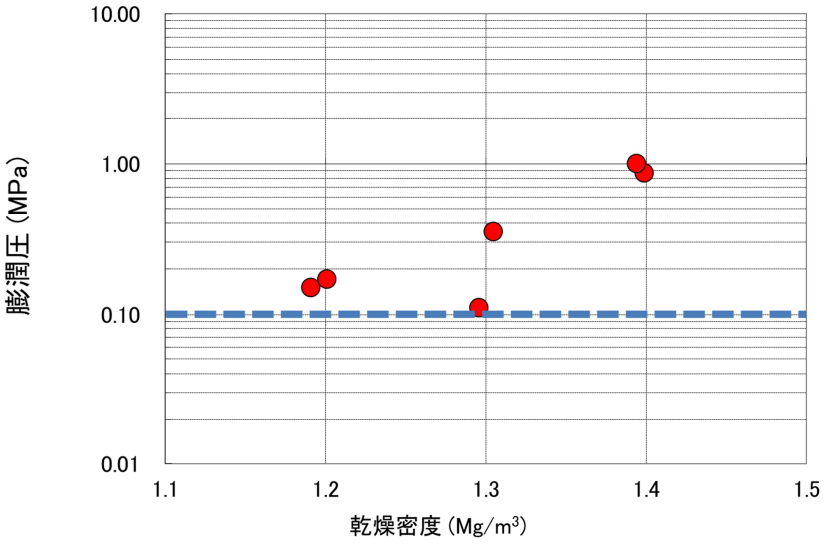


図 34　膨潤圧試験結果

(a) 圧縮成型（80トンプレス機）

(b) 作製した埋め戻し材ブロック

写真 4　埋め戻し材ブロック製作試験の様子

(2) オーバーパック腐食試験計画の検討

350m調査坑道における第3段階の試験のひとつとして予定されているオーバーパック腐食試験は、幌延を事例として、塩水系地下水環境におけるオーバーパックの耐食性[注41]や腐食モニタリング手法の適用性を例示することを目的として実施するものです。

平成24年度はオーバーパックの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や、代替材料であるチタンに対してHDB-6孔（図 4参照）の地下水を用いた腐食試験を継続しました。また、オーバーパック腐食試験計画に関わる検討のひとつとして、緩衝材中における腐食挙動をモニタリングする手法の検討を行いました。具体的には、コンクリート中や土壌中の金属の腐食速度を計測する方法として適用事例のある、電気化学的な手法を用いた計測の適用性について検討を行いました。写真 5に示すように、円筒状の樹脂の中に炭素鋼電極を配置したセンサーを試作し、このセンサーをHDB-6孔から採取した地下水で飽和させた緩衝材中に埋め込んで測定を行いました。その結果、これまで報告されている緩衝材中での炭素鋼の腐食速度と整合する値が得られ、第3段階で計画しているオーバーパック腐食試験に適用可能な見通しが得られました。現在、長期的な耐久性や腐食挙動を確認するため試験を継続中です（写真 6）。今後は、センサー自体やセンサー中の電極の耐久性を確認するとともに、センサーの寸法や電極の配置などの最適化を図る予定です。また、地下での試験を想定してより大きなスケールでの試験により、適用性を確認する予定です。

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

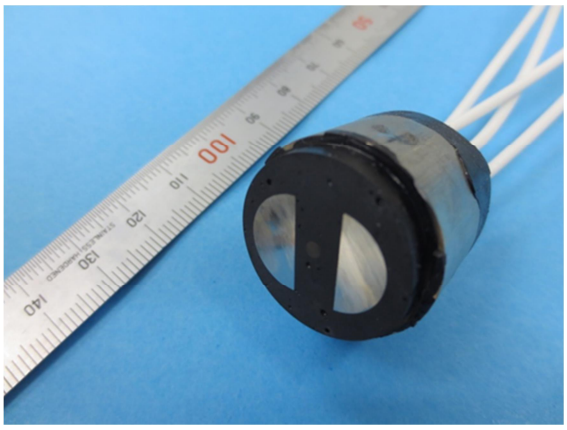


写真 5　緩衝材中における炭素鋼の腐食モニタリング用センサー

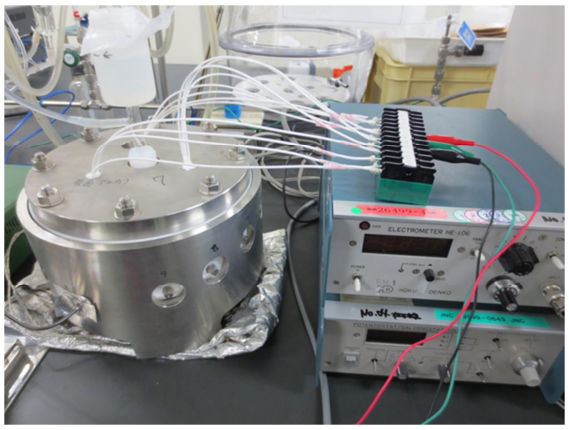


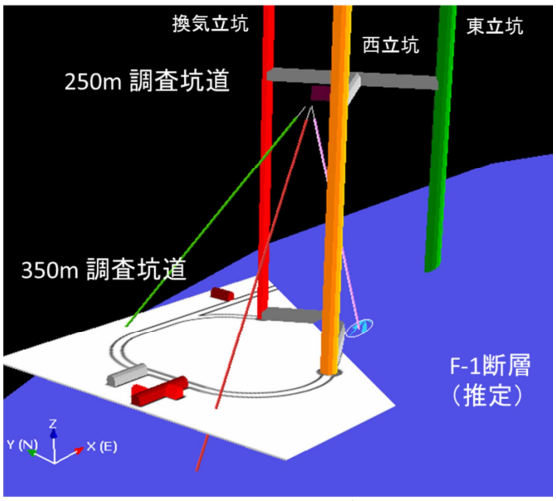
写真 6　緩衝材中における腐食モニタリング用センサーの適用性確認試験状況

4.2 安全評価手法の高度化

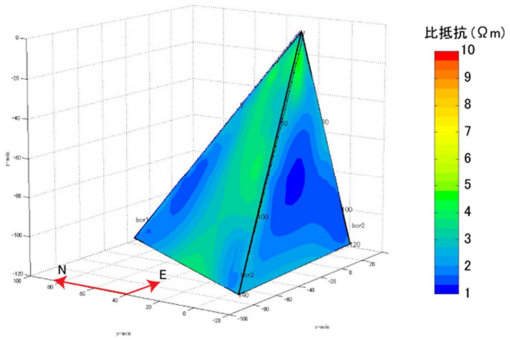
4.2.1 安全評価モデルの高度化

安全評価手法の高度化では、天然バリアである岩石中での物質の移動特性に関わるデータおよび知見を取得することが目的のひとつです。その一環として、平成24年度は、350m調査坑道周辺の地質環境特性（水理地質構造、割れ目帯分布など）の把握を目的とした調査ボーリングを継続するとともに、安全評価に関わる物質移行解析や室内試験によるデータ取得を行いました。

具体的には、平成23年度に250m調査坑道から実施した孔長140m程度のボーリング孔の掘削（斜め下方向に3孔：図 35(a)の緑・赤・紫の線）、コア観察および物理・流体検層[注42]に引き続き、平成24年度は比抵抗トモグラフィ調査[注43]、音響・弾性波トモグラフィ調査および水理試験を実施しました。その結果から、350m調査坑道周辺の水理地質構造として重要なF-1断層の透水性など、350m調査坑道で実施する物質移行試験の詳細計画の策定に必要となる地質構造・水理地質構造を把握しました。



(a)　調査ボーリングの配置



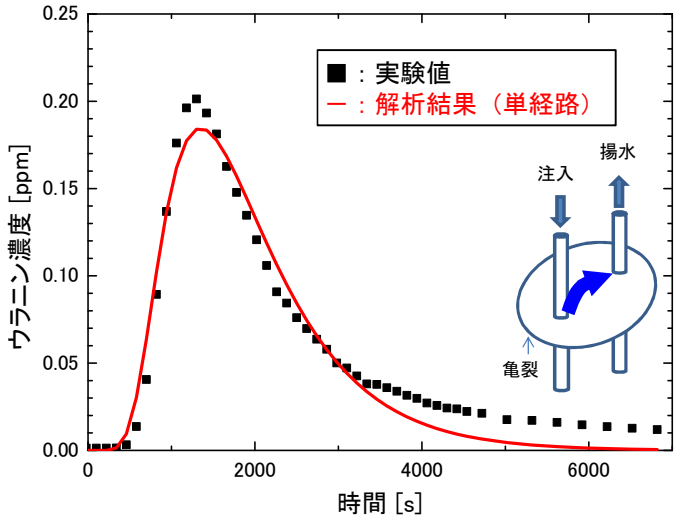
(b)　比抵抗トモグラフィ

図 35　350m 調査坑道周辺の調査ボーリング結果の例

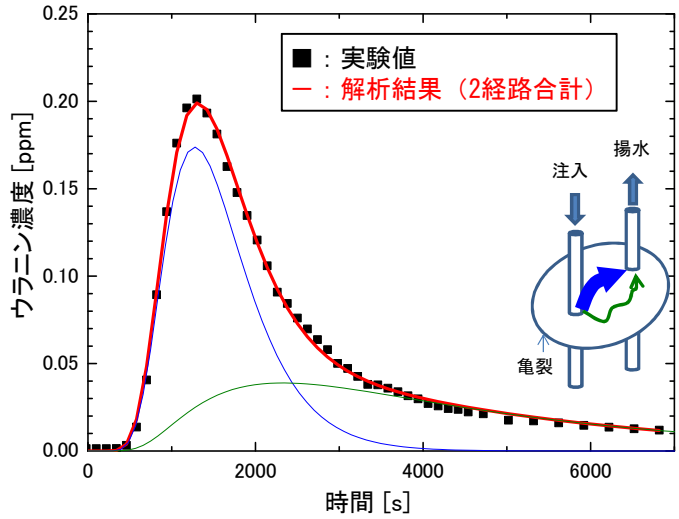
注42：ボーリング孔内に測定機器を設置して、岩盤の温度や密度、地下水が流れている位置などを地上から連続的に計測する測定手法です。

注43：岩盤内の決められた領域の周囲で岩盤の比抵抗（電気の通しやすさ）をいろいろな測線で計測することにより、領域内の水理地質構造などを確認する調査です。

また、250m調査坑道において調査技術・調査機器開発の一環として実施した物質移行試験の結果を用いて、物質移行の試解析を実施しました。具体的には、1次元物質移行モデル（曲線状の経路を移動すると仮定したモデル）による逆解析を行いました（図 36）。その結果、単経路での移動を仮定した場合（図 36(a)）よりも、2経路での移動を仮定した場合（図 36(b)）の方がトレーサー濃度分布の再現性が高いことが分かりました。このことはトレーサーが通過した亀裂面内の物質の移動特性や水理特性が不均質であることを示唆しています。この結果をもとに、今後は2次元物質移行モデル（平面上に拡がりながら移動すると仮定したモデル）による解析を実施していきます。



(a)　単経路（青の経路）を仮定した場合



(b)　2 経路（移動の早い青の経路と遅い緑の経路）を仮定した場合

図 36　1次元物質移行モデルによる逆解析の例

安全評価に関わるデータ取得としては、既存のコア試料や調査ボーリングで採取したコア試料、および地下水試料を用いて、岩石中での物質の拡散[注44]特性や収着[注45]特性に関する室内試験を継続しました。具体的には、北海道大学と協力して、上述の調査ボーリングで採取した堆積岩中におけるナトリウムイオンの拡散係数を取得するとともに、拡散のメカニズムに関する検討を行いました。また、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業で平成19年度より実施している処分システム化学影響評価高度化開発の一環として、岩石や緩衝材中での物質の拡散特性や収着特性のほか、物質移行に及ぼす微生物、有機物などの影響に関する検討を継続しました。

拡散特性や収着特性については、堆積岩の収着分配係数を評価するための手法（収着モデル）について、平成24年度は主にニッケルを対象に検討を行いました。幌延地域のように様々な鉱物からなる堆積岩の場合の収着モデルを構築するために、粘土鉱物であるスメクタイトやイライトなどの主要構成鉱物ごとの収着モデルを組み合わせる手法を採用しました。その結果、ニッケルの収着分配係数のpH依存性を概ねモデル化することができました。

収着・拡散特性に及ぼす微生物影響については、140m調査坑道より採取した地下水から単離した*Bacillus*属[注46]の菌株を用いてバイオフィルム[注47]を生成し、銅イオンの収着実験を行いました。その結果、銅イオンに対して高い収着能を持つことが分かりました。

一方で、有機物の影響については、平成23年度に引き続き、核種－有機物－岩の三者間でのモデル化について検討しました。平成24年度は、三者間の拡散モデルの開発を目的として、ユーロピウム－腐植物質[注48]の錯体[注49]が堆積岩中に拡散する可能性について調査しました。その結果、ユーロピウム－腐植物質錯体の堆積岩内部への拡散は無視できるほど小さいことが分かりました。

4.2.2 安全評価手法の適用性確認

地層処分システムにおける天然バリアとしての堆積岩を考えた場合、亀裂を含む堆積岩中の物質の移動現象を評価する上では、亀裂の連続性／連結性や地下水の流量などの検討が重要となります。平成24年度は、岩盤力学的な岩盤の領域区分と亀裂ネットワークモデル[注50]を併用した評価手法の適用性を検討しました。具体的には、岩盤力学的に区分した個々の岩盤領域を対象に亀裂ネットワークモデルを用いて亀裂の連続性／連結性を検討し、それぞれの領域において遅延性能を評価する上で重要な場の移動特性（多孔質媒体／亀裂性媒体）の検討を行いました。さらに、構築したモデルを用いて領域間での流量の比較も行いました。

地下施設周辺の亀裂に関する既往の調査研究 (15)、(16) に基づくと、地下施設周辺の深度300m～400m付近の稚内層は数十m以上の連続性を有する断層が引張亀裂を伴って高透水性断層として発達するのに対し、深度500m以深の稚内層はそのような断層が発達しないことが推定されています。

注44：岩盤などの中を元素が、濃度の高い方から低い方へ移動していく現象です。
注45：地下水中にある元素が、岩盤などに取り込まれる現象です。
注46：微生物の一属です。標準株 *Bacillus cereus* はセレウス菌とも呼ばれ、常在菌として、土壌、ほこり、汚水など自然界に多く存在することが知られています。
注47：菌膜（きんまく）とも呼ばれ、微生物の群集からなり、コミュニティーを形成しています。身近な例としては、歯垢、台所や排水溝のヌメリなどがあります。
注48：植物が枯死したあとに、土壌中や地下水中で分解されてできる有機物の総称です。抽出方法によって、フルボ酸とフミン酸に分離されます。
注49：有機物と金属が配位結合や水素結合することで形成した化合物の総称です。
注50：岩盤中の地下水の流れや物質の移動現象を評価するために、対象とする領域に亀裂を統計的に配置する解析手法です。

すなわち、このような断層の発達状況の違いは岩石強度と応力状態との関係（地山強度比[注51]）の違いを反映しており、前者の領域（高透水性断層が発達する領域）は現在の地山強度比で4以上、後者の領域（高透水性断層が発達しない領域）は4以下の領域に相当すると解釈されています[(15)]。図 37に地下施設近傍の地山強度比4以上の「領域1」と4以下の「領域2」の分布を示します。

稚内層の領域1および領域2を対象に、解析領域として1辺100mの立方体を想定し、断層の3次元ネットワークをシミュレーションしました。シミュレーションにあたっては、既往のボーリング調査や立坑の底盤観察などより得られたデータを用いて、通常の解析方法[(17)]により断層を統計的に発生させました。シミュレーションの結果、稚内層の領域1では解析領域の各境界面をつなぐような断層のネットワークが常に形成されるのに対し、領域2ではほとんどのケースでネットワークが形成されませんでした（100ケース中3ケースのみでネットワークが形成）。図 38にそれぞれの領域でネットワークが形成されたケースを例示します。この結果は、これまで地下施設周辺のボーリング孔において、領域1では地下施設での湧水に対して水圧応答が断層箇所で敏感に観測されるのに対し、領域2ではそのような応答がほとんど観測されないことと整合します。すなわち、稚内層の領域1は想定したスケールにおいて亀裂性媒体とみなせるのに対し、領域2は多孔質媒体とみなせる可能性が高いことが示唆されます。

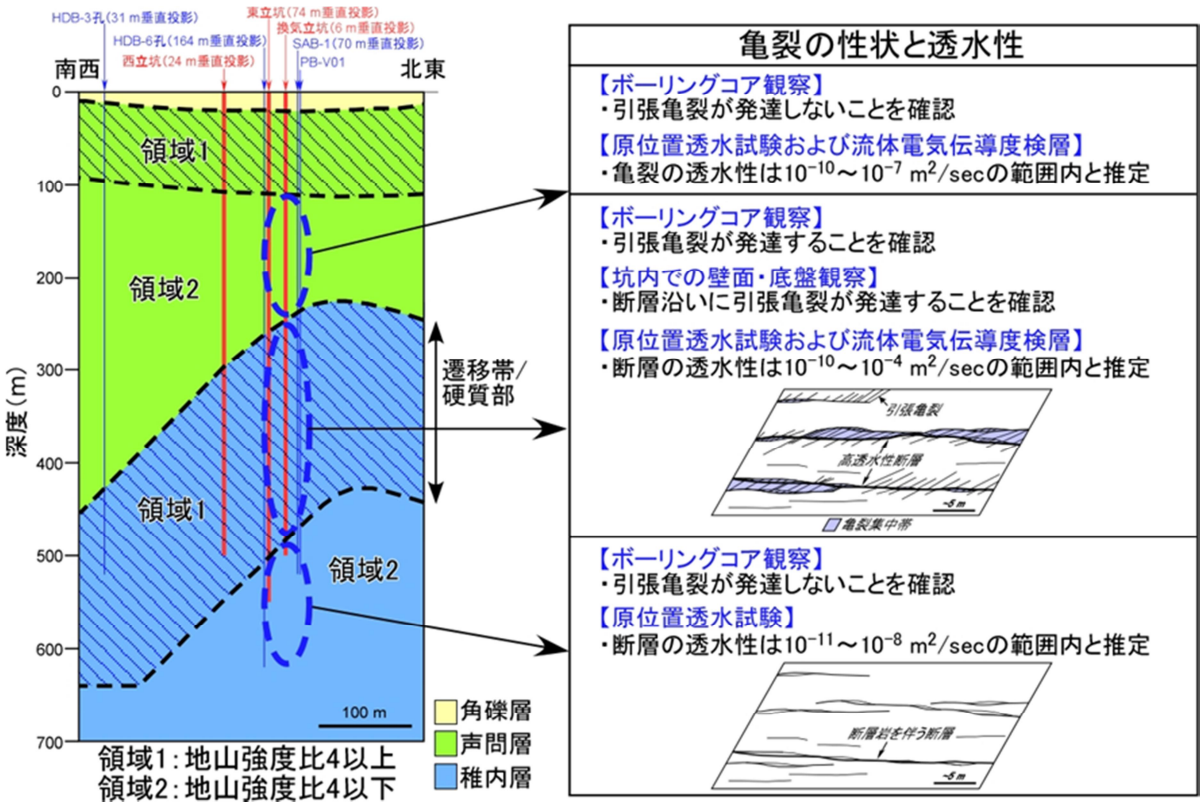
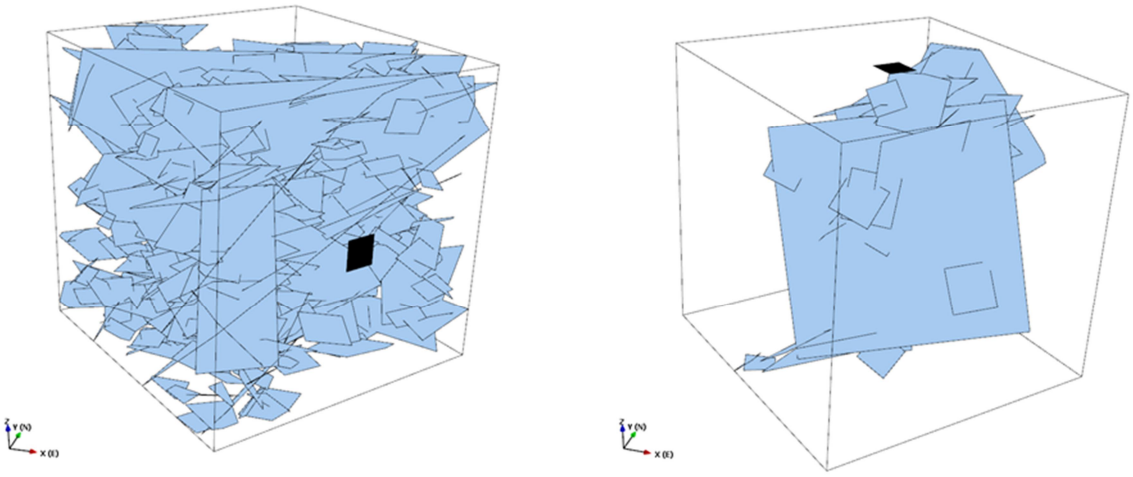


図 37　地山強度比に基づいた岩盤の領域区分と亀裂の性状／透水性

注51：地下空洞の力学的安定性を表す指標としてしばしば用いられる値で、有効土被り圧と一軸圧縮強度の比で表されます。

また、稚内層の領域2を仮に亀裂性媒体とみなした場合についての検討も行いました。領域2のシミュレーションにおいて、断層のネットワークが形成されたケース（図 38(b)）における地下水の流量を広域的な地下水流動より得られる境界条件を用いて計算すると8.31×10^{-11}m^3/secとなります。同様に図 38(a)の領域1の流量を算出すると1.25×10^{-5}m^3/secとなり、仮に領域2を亀裂性媒体としてみなした場合でもその流量は領域1と比べると極めて小さいことが分かります。

以上より、岩盤力学的な岩盤の領域区分と亀裂ネットワークモデルを併用して亀裂の連続性／連結性を検討した結果、地下施設周辺のボーリング孔での水圧モニタリング結果と整合する結果を得ることができました。また、岩盤中の流量についても検討を行いましたが、今後、この流量の推定結果についての検証も含め、今回適用した評価手法の適用性について更に検討していく予定です。



(a) 領域 1　　(b) 領域 2

図 38　地下施設近傍の稚内層の(a)領域1および(b)領域2における断層のネットワークモデルの例

1辺100mの立方体：図中の黒パッチと境界面とをつなぐ断層のみ表示

5. 地下施設の建設

平成24年度は、平成22年度から導入したPFI契約による地下施設（立坑および調査坑道）の建設を継続しました。

立坑については、西立坑の深度約300mまでの掘削を行いました。また、350m調査坑道は平成24年3月から掘削を開始し、5月に換気立坑と東立坑をつなぐ調査坑道が貫通しました（写真 7）。その後、平成25年2月上旬に調査ボーリング箇所からのメタンガスの噴出と坑道切羽からの大量湧水により掘削工事を一時中断しましたが、湧水を抑制する対策などを行い、湧水量の減少を確認して掘削工事を再開しました。なお、今後、同様の地質環境における坑道の掘削においては、湧水に係るリスクの低減を図るため、地質の詳細な評価や、より効果的な湧水抑制対策（グラウト範囲の拡張や注入圧力の見直し）を行うこととしました。

坑道掘削に伴い発生する掘削土(ズリ)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の掘削土(ズリ)置場に保管しています。掘削土(ズリ)置場の拡張工事は平成23年度に終了していますが、掘削土(ズリ)置場盛土部の被覆シートが紫外線や暴風により損傷してきたため、今後とも掘削土(ズリ)置場への浸透水の抑制を維持する観点から、平成24年度に法面に敷設している被覆シートを撤去し、モルタル吹付けを実施しました（写真 8）。

写真 7　350m調査坑道貫通状況

写真 8　掘削土(ズリ)置場法面モルタル吹付け状況

坑道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と公的機関による詳細な分析（以下、公定分析）を定期的に実施し、適切な管理のもと掘削土(ズリ)置場へ搬入しています。

掘削土(ズリ)に係るモニタリングの公定分析結果を表 5に示します。ホウ素、ヒ素、フッ素、セレンおよび鉛の5項目については自然由来（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および掘削土(ズリ)置場からの浸出水については、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。なお、地下施設か

らの排水の水質については、6.2に分析項目と結果を示します。

表 5　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	東立坑	西立坑	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	6.4	4.3～12	1	30
ヒ素		0.057	0.008～0.044	0.01	0.3
フッ素		0.13	<0.08～0.38	0.8	24
セレン		0.016	0.009～0.018	0.01	0.3
カドミウム		<0.001	<0.001	0.01	0.3
鉛		0.002	0.003～0.013	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24年4月から平成25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. 環境モニタリング

6.1 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（平成14年度）から継続して実施しています。調査位置を図 39に示します。

調査項目は地下施設工事により発生する可能性のある「騒音」、「振動」、変化する可能性のある「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」です。

調査の実施時期、調査方法を表 6に示します。これらの調査のうち、水質、魚類および植物の調査計画ならびに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。モニタリングの調査項目と結果を表 7にまとめて示します。

騒音・振動および清水川の水質については、平成24年度の西立坑と350m調査坑道の掘削の影響は認められませんでした。

魚類については、これまでと比べて大きな変化がみられず、6科10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 8に示します。確認された重要種は、スナヤツメ、ヤマメ(サクラマス)、エゾウグイ、エゾホトケドジョウ、エゾトミヨ、ハナカジカの計6種でした。

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。

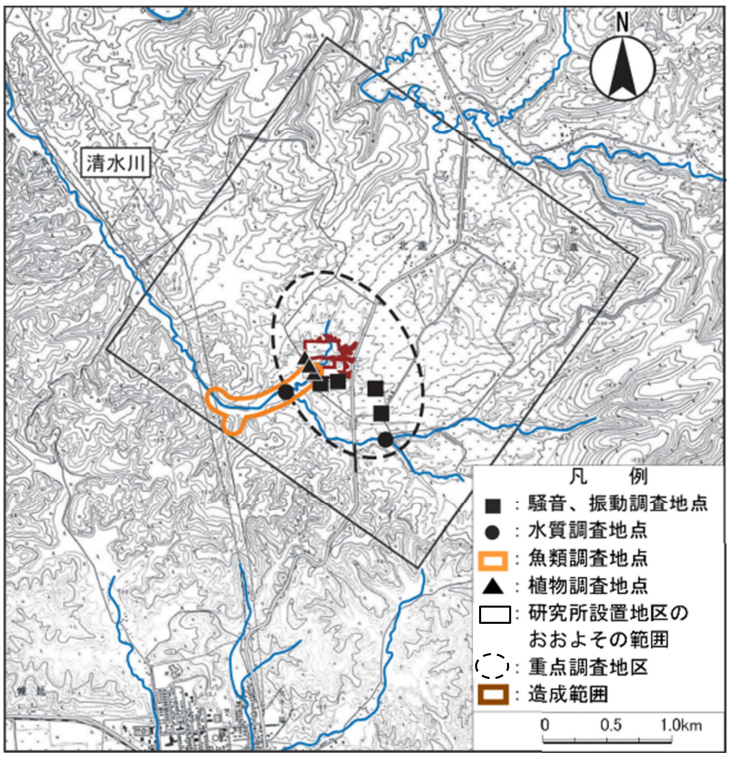


図 39　環境モニタリング調査位置

表 6　環境モニタリング調査実施内容

調査項目	調査実施日				調査方法
	春季	夏季	秋季	冬季	
騒音	H24 5/31、6/1	H24 9/3、4	H24 10/31、 11/1	H25 1/31、2/1	「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」に定める測定方法
振動					「振動規制法施行規則」に定める測定方法
水質 （清水川）	H24 6/1	H24 9/3	H24 11/1	H25 1/31、2/1	「水質汚濁に係る環境基準について」に基づく測定方法
魚類	H24 5/31、6/1	H24 9/3、4	H24 10/1、2	－	目視観察・採捕調査
植物群落	H24 5/31	H24 9/4	H24 10/2	－	コドラート調査[注52]

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、昼間は38～56デシベル、夜間は36～54デシベルであった。なお、夏季調査日は、風がやや強く草木の揺れる音の影響が大きかったため、全体的に高い値であった。（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	昼間は35デシベル以下、夜間は30デシベル未満であり、工事着工前と同程度であった。（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（清水川）	清水川の水質については、工事の影響とみられる変化は認められなかった。
魚類	春季、夏季および秋季調査で 6 科 10 種を確認した。 重要種については、スナヤツメ、ヤマメ（サクラマス）、エゾウグイ、エゾホトケドジョウ、エゾトミヨ、ハナカジカの6種を確認した。
植物	植物群落は、これまでとほぼ同様な種構成が確認され、大きな変化はみられなかった。

注52：1m×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 8　確認された重要種（魚類）

目	科	種	選定根拠[注1]							
			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[注2]			VU	VU		希		
サケ	サケ	ヤマメ （サクラマス）				NT[注3]	N[注4]	減[注5]		
コイ	コイ	エゾウグイ					N			
コイ	ドジョウ	エゾホトケドジョウ			VU	EN	EN			
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			

注1：重要種の選定根拠
①：「文化財保護法」（昭和25年 法律第214号）に基づく天然記念物および特別天然記念物
②：「絶滅のおそれのある野生動植物の種の保存に関する法律」（平成4年 法律第75号）に基づく野生動植物種
③：「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　　EN:絶滅危惧IB類
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
N：留意種　　EN: 絶滅危惧ⅠB類　　R：希少種
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

注2：④では「スナヤツメ北方種」として記載されている
注3、4：ヤマメが対象
注5：サクラマスが対象

6.2 地下施設の建設に伴う水質モニタリング調査

地下施設の建設に伴う水質モニタリング調査として、地下施設からの排水、排水処理設備で処理した処理済排水の放流先である天塩川放流口の河川水のほか、研究所用地からの生活排水について環境への影響を把握するための水質調査を平成23年度に引き続き実施しました。水質調査の実施対象と主な分析項目を表 9に示します。また、地下施設からの排水の処理系統図を図 40に、幌延深地層研究センター全体の排水系統図を図 41に、天塩川の水質モニタリング調査位置を図42に示します。

分析項目については、水質汚濁防止法の排水基準や北るもい漁業協同組合との協定に基づいていますが、分析項目が多いため本報告書では主な分析項目を掲載しました。分析はすべて公定分析であり、分析結果の詳細については、幌延深地層研究センターのホームページ[注53]で公開しています。また、ホームページでは毎日のホウ素およびアンモニア性窒素の簡易分析結果ならびに毎週の処理済排水の現地分析[注54]結果についても公開しています。

注53:http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/suishitsu.html
注54:排水処理設備において処理水を採取し、敷地内にある分析室で実施している、JIS 又は JIS に準じた分析のことです。

表 9　水質調査の実施対象と主な分析項目

水質調査実施対象		調査頻度	主な分析項目[注1]
地下施設からの排水	立坑の原水	1回/月	カドミウム、ヒ素、セレン、フッ素、ホウ素、pH、浮遊物質(SS)、塩化物イオン
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水		
	揚水設備における処理済排水		
天塩川放流口の河川水（B1:放流口、B2:上流 1km、B3:下流 1km）			ホウ素、全窒素、全アンモニア、pH、浮遊物質(SS)
研究所用地からの排水	研究管理棟浄化槽排水	1回/4週[注2]	全窒素、全リン、pH、BOD、浮遊物質量(SS)、大腸菌群数、透視度
	地下施設建設現場事務所浄化槽排水		
環境への影響を把握するための水質調査	掘削土(ズリ)置場周辺の地下水(A1～A4)	4回/年	カドミウム、ヒ素、セレン、フッ素、ホウ素、pH、浮遊物質(SS)、塩化物イオン
	掘削土(ズリ)置場近傍の清水川(A5)	1回/月	
	掘削土(ズリ)置場雨水調整池(A6)		
	研究所用地下流の清水川(A7)		

注 1：水質汚濁防止法および北るもい漁業協同組合との協定書などにより「主な分析項目」以外の分析項目については、調査頻度を変えて実施している項目もあります。
注 2：浄化槽排水についての調査頻度を平成 24 年 4 月から 1 回/2 週を 1 回/4 週に変更しました。

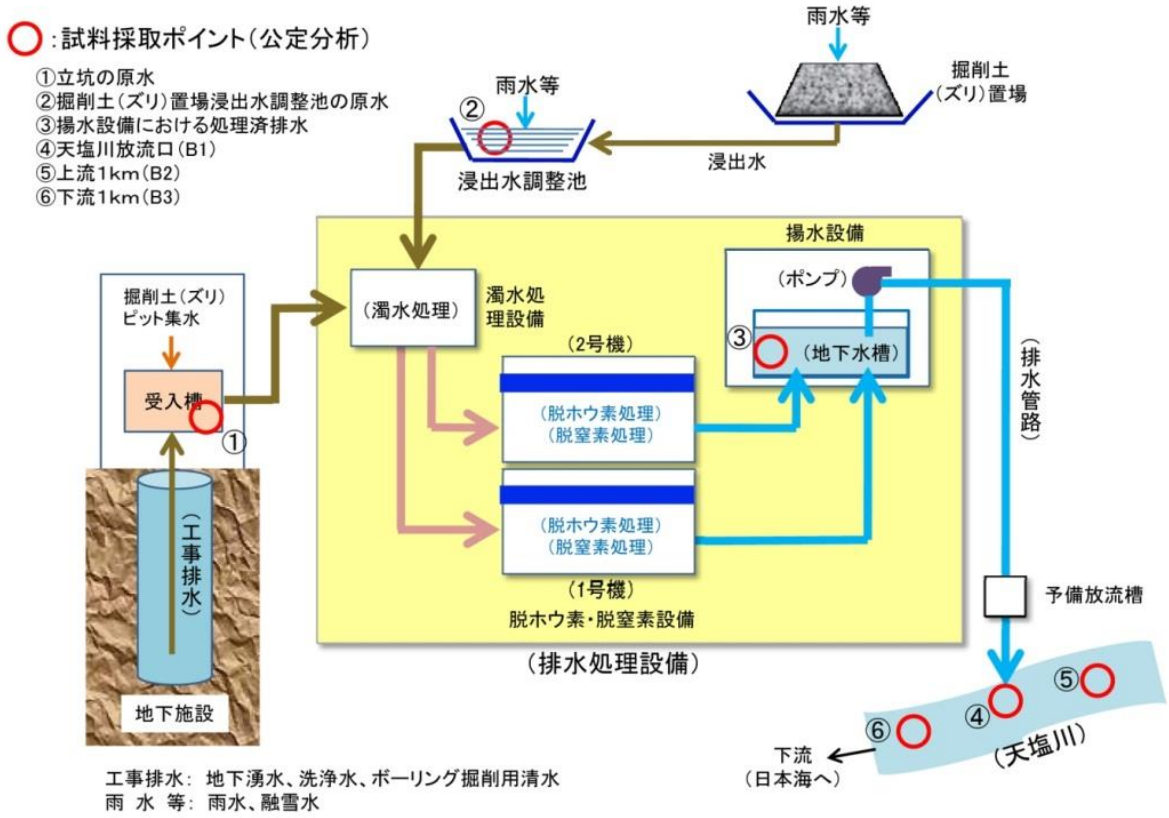


図 40　地下施設排水処理系統図

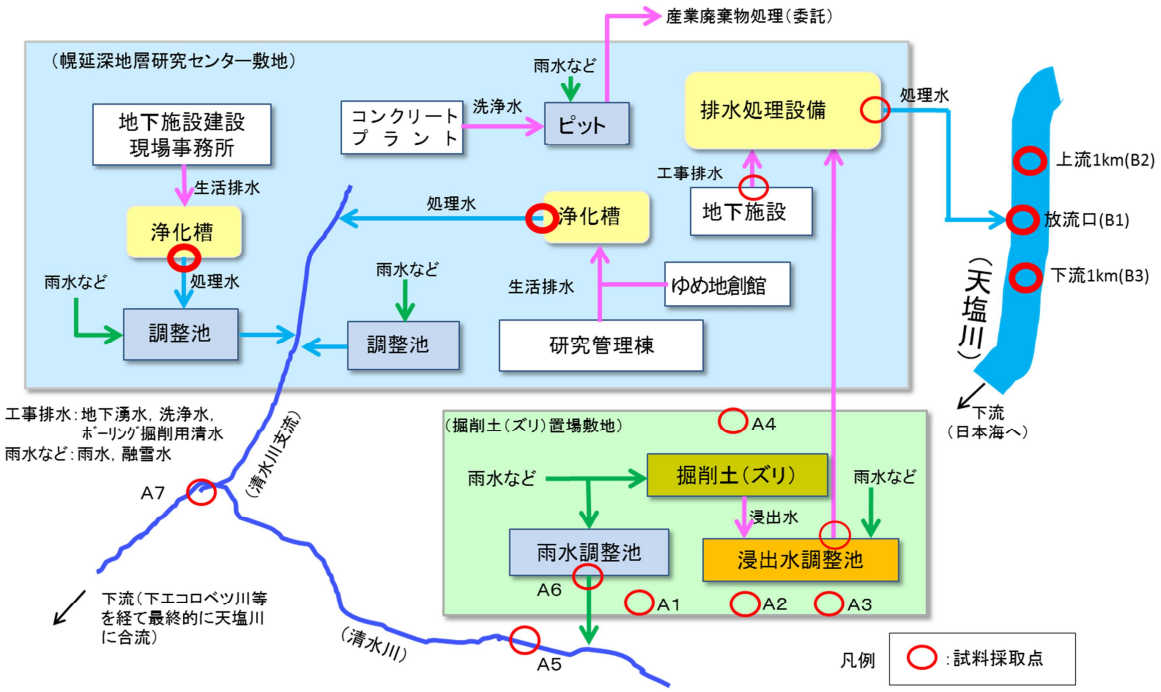


図 41　幌延深地層研究センター排水系統図

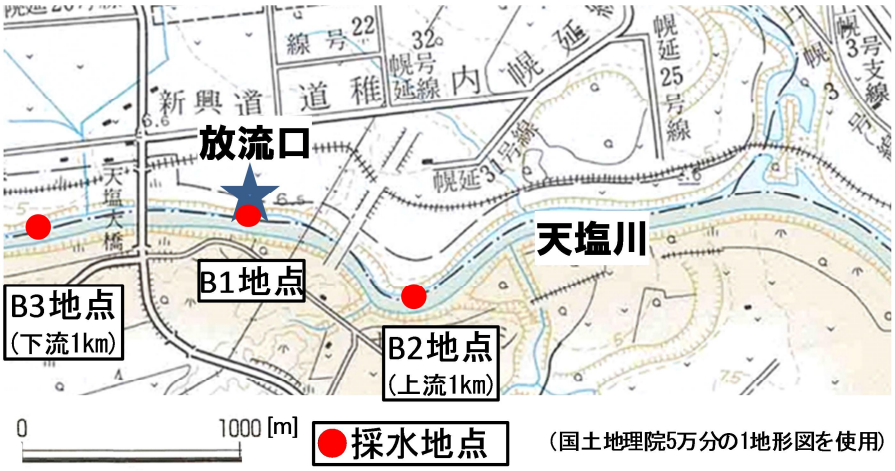


図 42　天塩川の水質モニタリング調査位置

採水は、各地点において、表層、中層および深層の 3 層で行っています。

平成24年度における処理済排水の天塩川への排水量を表 10に示します。排水量の多い平成24年4月および5月は、平成23年度と比べると約2倍に増加しており、その原因は融雪期における増水と思われます。なお、平成25年2月には、坑道切羽からの大量湧水により一時的に地下施設からの排水が増加しましたが、北るもい漁業協同組合との協定に定める1日あたりの排水量を遵守しつつ、排水処理を適切に行った上で天塩川へ放流しました。

地下施設からの排水の水質調査結果を表 11に示します。「立坑の原水」のホウ素が高い値を示していますが、これは自然由来によるもので排水処理後の「揚水設備における処理済排水」は排水基準値以下となっています。

天塩川の水質調査結果を表 12に示します。平成24年4月および5月の浮遊物質量が協定値を超えていますが、地下施設からの排水は協定値を超えていないことや、天塩川の上流においても同様の値であることから、融雪期における増水が原因と考えられます。

研究所用地からの生活排水である浄化槽排水の水質調査結果を表 13に示します。研究管理棟お

よび地下施設建設現場事務所ともすべて北るもい漁業協同組合との協定値を満足していました。

掘削土(ズリ)置場周辺の地下水の水質調査結果を表 14に示します。過去の結果と比較しても大きな変化が確認されないことから、環境への影響はないものと考えられます。

清水川および掘削土(ズリ)置場雨水調整池の水質調査結果を表 15に示します。これらについても、過去の結果と比較して大きな変化がないことから、清水川への影響はないものと考えられます。

表 10　地下施設から天塩川への排水量

月	排水量 (m^3)	日最大排水量[注1] (m^3)	日平均排水量[注2] (m^3)
平成24年4月	14,243	670	474.8
5月	10,176	533	328.3
6月	7,531	411	251.0
7月	9,116	524	294.1
8月	9,121	457	294.2
9月	9,901	634	330.0
10月	9,150	461	295.2
11月	9,774	623	325.8
12月	6,720	434	216.8
平成25年1月	5,905	330	190.5
2月	11,662	701	416.5
3月	9,980	554	321.9
平成24年度	合計：113,279	日最大：701	日平均：310.4

注 1：北るもい漁協との協定では最大 750m^3/日
注 2：排水量を月の日数で除した値

表 11　地下施設からの排水に係る水質調査結果

分析項目[注1]	単位	採水地点[注2]			参考値 (水質汚濁防止法排水基準)
		立坑の原水	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	揚水設備における処理済排水	
pH	―	8.0～8.4	7.0～7.5	7.0～8.4	5.8～8.6
カドミウム	mg/L	<0.01	<0.01	<0.01	0.1
ヒ素		<0.01～0.01	<0.01	<0.01～0.02	0.1
セレン		<0.01	<0.01～0.03	<0.01	0.1
フッ素		<0.8	<0.8	<0.8	8
ホウ素		68～160	2.4～37	0.1～1.3	10
浮遊物質量		7～580	22～49	<1～2	200 (日間平均 150)
塩化物イオン		3,100～4,100	130～1,400	700～4,200	―

注 1：分析項目は、表 9 に示した「主要な分析項目」のみを抜粋
注 2：採水地点は図 40 参照

表 12　天塩川の水質調査結果

分析項目[注1]	採水地点[注2]		平成18年6月～11月（放流前）	平成18年12月～平成24年3月（放流後）	平成24年 4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平成25年 1月	2月	3月	北るもい漁業協同組合協定値
ホウ素（mg/L）	B1	表層	<0.02～3.35	<0.01～5.0	0.01	0.01	0.01	0.08	0.16	0.05	0.07	0.06	0.02	0.02	0.03	0.03	5
		中層			0.01	0.02	0.01	0.53	0.31	0.38	1.0	0.05	0.02	0.02	0.03	0.02	
		深層			0.01	0.02	0.01	3.0	3.4	2.7	2.0	0.05	0.02	0.02	0.03	0.02	
	B2	表層			0.01	0.01	0.01	0.08	0.11	0.03	0.05	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	
		中層			0.01	0.02	0.01	0.32	0.16	0.16	1.4	0.05	0.02	0.02	0.03	0.02	
		深層			0.01	0.01	0.01	2.8	2.9	2.1	2.0	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	
	B3	表層			0.01	0.01	0.01	0.11	0.16	0.04	0.10	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	
		中層			0.01	0.02	0.02	0.36	0.48	0.18	0.43	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	
		深層			0.01	0.02	0.01	2.7	3.2	0.58	0.49	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	
全窒素（mg/L）	B1	表層	0.37～1.50	0.11～6.5	2.2	0.69	0.40	0.26	0.26	0.22	0.29	0.67	1.1	0.43	0.76	0.52	20
		中層			2.1	0.79	0.43	0.42	0.33	0.33	0.57	0.62	1.3	0.40	0.66	0.68	
		深層			2.1	0.83	0.45	0.61	0.56	0.52	0.69	0.75	1.2	0.39	0.69	1.0	
	B2	表層			2.1	0.69	0.38	0.26	0.24	0.20	0.27	0.87	1.4	0.40	0.61	0.56	
		中層			2.2	0.75	0.37	0.43	0.30	0.31	0.50	0.68	1.4	0.44	0.60	0.58	
		深層			2.2	0.70	0.53	0.62	0.55	0.55	0.60	0.71	1.4	0.39	0.64	0.57	
	B3	表層			2.2	0.71	0.64	0.38	0.28	0.16	0.27	0.78	1.4	0.43	0.73	0.72	
		中層			2.2	0.65	0.38	0.63	0.31	0.22	0.39	0.85	1.3	0.35	1.0	0.66	
		深層			2.2	0.76	0.51	0.64	0.46	0.39	0.43	1.2	1.3	0.39	0.67	0.67	
全アンモニア（mg/L）	B1	表層	<0.01～0.35	<0.05～0.96	0.31	0.06	<0.05	<0.05	0.11	0.07	<0.05	0.05	0.11	0.21	0.10	<0.05	2[注3]
		中層			0.34	0.16	<0.05	0.06	0.18	0.26	0.23	<0.05	0.11	0.20	0.11	<0.05	
		深層			0.38	0.14	<0.05	<0.05	0.31	0.32	0.41	<0.05	0.09	0.20	0.15	0.06	
	B2	表層			0.48	0.06	<0.05	<0.05	0.06	<0.05	<0.05	<0.05	0.09	0.19	0.10	0.05	
		中層			0.44	0.06	<0.05	<0.05	0.20	0.07	0.25	<0.05	0.08	0.18	0.10	<0.05	
		深層			0.40	0.12	<0.05	<0.05	0.34	0.33	0.28	<0.05	0.09	0.18	0.10	<0.05	
	B3	表層			0.39	0.06	<0.05	<0.05	0.08	<0.05	<0.05	0.05	0.09	0.19	0.13	<0.05	
		中層			0.53	0.07	<0.05	<0.05	0.14	0.07	0.07	0.07	0.09	0.20	0.11	<0.05	
		深層			0.41	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.07	0.12	<0.05	0.10	0.19	0.11	<0.05	
pH	B1	表層	7.0～7.6	6.7～8.0	7.1	7.2	7.4	7.2	7.3	7.3	7.1	7.4	7.2	7.3	7.1	7.5	5.8～8.6
		中層			7.1	7.2	7.4	7.3	7.2	7.3	7.0	7.5	7.3	6.9	7.0	7.5	
		深層			7.0	7.2	7.4	7.8	7.4	7.5	7.2	7.4	7.2	6.9	7.1	7.3	
	B2	表層			7.1	7.2	7.4	7.5	7.4	7.5	7.6	7.4	7.3	7.0	7.2	7.4	
		中層			7.0	7.2	7.4	7.3	7.2	7.3	7.1	7.4	7.2	6.9	7.2	7.3	
		深層			7.0	7.2	7.4	7.9	7.4	7.3	7.2	7.5	7.2	6.9	7.2	7.4	
	B3	表層			7.0	7.2	7.4	7.6	7.3	7.4	7.5	7.4	7.2	6.9	7.2	7.5	
		中層			7.1	7.2	7.4	7.6	7.3	7.4	7.2	7.4	7.2	6.9	7.1	7.5	
		深層			7.1	7.3	7.4	8.0	7.4	7.3	7.2	7.4	7.3	6.9	7.2	7.4	
浮遊物質量（mg/L）	B1	表層	3～86	<1～650	10	76	5	1	1	2	1	2	3	1	<1	<1	20
		中層			9	90	5	3	2	4	3	3	3	1	<1	<1	
		深層			10	68	4	3	6	5	4	5	3	1	<1	<1	
	B2	表層			21	92	4	1	2	1	1	4	6	<1	<1	<1	
		中層			14	99	5	3	2	2	3	3	5	3	<1	<1	
		深層			16	100	5	3	4	2	3	4	7	1	<1	1	
	B3	表層			17	93	3	1	1	2	1	3	3	<1	<1	<1	
		中層			15	100	4	2	2	2	3	4	3	1	<1	<1	
		深層			21	100	4	2	2	3	3	4	3	2	<1	<1	

注1：分析項目は、表 9に示した「主要な分析項目」のみを抜粋
注2：採水地点は図 42参照
注3：北るもい漁業協同組合との確認により、放流口下流1km(B3)地点の値としている

表 13　浄化槽排水の水質調査結果

主な調査項目	単位	研究管理棟	地下施設現場事務所	協定値
pH	―	6.0～7.1	7.3～7.8	5.8～8.6
生物化学的酸素要求量(BOD)	mg/L	1.0～16	<2.0～8.2	20
浮遊物質量(SS)	mg/L	0.9～5.3	<2.0～7.0	20
全窒素	mg/L	6.6～35	2.3～14	60
全リン	mg/L	2.2～3.4	0.3～2.1	8
透視度	cm	30	30	30
大腸菌群数	個/ml	0	0～400	3,000

採水地点は図 41参照。

表 14　掘削土(ズリ)置場周辺の地下水の水質調査結果

分析項目注1	採水地点注2	平成18年6月～平成19年4月 掘削土(ズリ)搬入前	平成19年5月～平成24年3月 掘削土(ズリ)搬入後	平成24年			平成25年
				5月	8月	11月	2月
pH	A1	4.6～7.3	4.2～7.2	6.8	6.6	6.9	7.1
	A2			6.4	6.2	6.2	6.3
	A3			6.5	6.5	6.8	7.3
	A4			5.6	5.4	5.4	6.0
カドミウム (mg/L)	A1	<0.001～0.004	<0.001～0.009	<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
ヒ素 (mg/L)	A1	<0.005	<0.005	<0.005	0.007	<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
セレン (mg/L)	A1	<0.002	<0.002～0.005	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	A2			<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	A3			<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	A4			<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
フッ素 (mg/L)	A1	<0.1～0.4	<0.1～0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	A2			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	A3			<0.1	0.2	<0.1	<0.1
	A4			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
ホウ素 (mg/L)	A1	<0.02～50.7	<0.02～63.0	10	10	32	8.7
	A2			2.2	5.4	4.1	3.8
	A3			7.1	7.3	21	31
	A4			0.06	0.10	0.11	0.06
塩化物イオン (mg/L)	A1	9.7～2,910	9.3～3,400	730	780	2,100	560
	A2			160	480	270	180
	A3			350	320	1,100	1,500
	A4			12	12	17	11

注1：分析項目は、表 9に示した「主要な分析項目」のみを抜粋
注2：採水地点は図 41参照

表 15　清水川および掘削土(ズリ)置場雨水調整池の水質調査結果

分析項目[注1]	採水地点[注2]	平成18年6月～平成19年4月 掘削土(ズリ)搬入前	平成19年5月～平成24年3月 掘削土(ズリ)搬入後	平成24年									平成25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
pH	A5	5.8～7.4	5.7～8.3	6.8	6.8	7.2	7.1	7.0	7.0	7.2	7.0	7.3	7.2	7.1	7.6
	A6			7.0	7.3	7.8	8.0	7.1	8.6	7.6	7.9	6.5	6.5	6.5	6.6
	A7			6.4	6.7	7.4	7.3	7.1	7.3	7.2	7.1	7.0	6.9	7.1	7.2
カドミウム (mg/L)	A5	<0.001～0.001	<0.001～0.002	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	A6			<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
ヒ素 (mg/L)	A5	<0.005～0.011	<0.005～0.015	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	A6			<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
セレン (mg/L)	A5	<0.002	<0.002～0.003	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	A6			<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
フッ素 (mg/L)	A5	<0.1～0.7	<0.1～1.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	A6			<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
ホウ素 (mg/L)	A5	<0.02～0.3	0.02～0.44	0.07	0.07	0.16	0.30	0.17	0.16	0.07	0.13	0.12	0.18	0.23	0.22
	A6			0.05	0.08	0.22	0.43	0.11	0.27	0.07	0.13	0.15	0.12	0.17	0.18
	A7			0.05	0.06	0.20	0.33	0.22	0.17	0.08	0.12	0.14	0.17	0.20	0.24
浮遊物質量 (mg/L)	A5	1～173	<1～500	13	5	2	2	4	2	11	3	1	1	<1	1
	A6			4	7	5	45	19	1	5	2	6	7	13	6
	A7			3	6	2	3	9	3	3	3	<1	1	<1	1
塩化物イオン (mg/L)	A5	5.1～30.5	5.8～269	23	15	26	24	21	34	22	21	25	35	19	41
	A6			29	13	34	35	3.9	20	7.1	11	23	31	26	25
	A7			24	14	37	38	21	23	20	19	22	21	21	32

注1：分析項目は、表 9に示した「主な分析項目」から抜粋
注2：採水地点は図 41参照

7. 安全確保の取組み

安全確保の取組みとして、請負作業や共同研究作業については、計画段階から作業担当課などが作業のリスクアセスメントを実施し、安全対策の妥当性を確認するとともに、必要に応じて改善するように指導を行いました。

そのほか、所長や保安管理課によるパトロールなど、定期的な安全パトロールを実施し、継続的に現場の安全確認や改善などを指導しています（写真 9)。

さらに、新規配属者や請負作業または共同研究作業の責任者などに対して安全教育を実施するほか、全国安全週間などの機会を捉えて、従業員のみならず請負企業も参加した安全行事に積極的に取り組むなど、安全意識の高揚に努めています。

なお、坑内から発生するメタンガスについては、表 16に示すように、濃度に応じた段階的な自主基準を定めて、作業の管理を行っています。

表 16　メタンガス濃度に応じた作業管理体制

メタンガス濃度(Vol%)	対応内容
0.25以上～0.5未満	火気使用作業の禁止、非防爆電動工具の使用禁止
0.5以上～1.0未満	火薬取扱作業の禁止
1.0以上	パトライト点灯＋一斉放送
1.0以上～1.5未満	作業員退避
1.3以上	パトライト点灯＋サイレン
1.5以上	坑内電源遮断

写真 9　安全パトロールの様子

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、そのほか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24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 大学との研究協力

北海道大学

安全評価手法の高度化を目的として、圧縮ベントナイト中におけるカルシウムイオンや炭酸イオンの移動現象の評価、およびベントナイト中における炭酸カルシウムなどの析出反応に関する検討を行いました。また拡散現象に関する室内試験を行い、350m調査坑道周辺の堆積岩中におけるナトリウムイオンの拡散係数を取得しました。

また、地質調査や地質構造モデル構築に係る専門技術の継承のために、暗黙知やノウハウをまとめました。この研究では、過去に作成された複数の地質図に対して、階層分析法と呼ばれる手法を適用し、調査者間で異なる解釈結果を得た場合の原因や解決法を調べることができるようになりました。

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、140m調査坑道に設置されたボーリング孔から地下水を採取し、地下水中の微生物増殖速度や活性を明らかにするための培養試験を行いました。その結果、地下水中の微生物生態系に関わる基礎的知見を得ることができました。

東京都市大学

地層中での微量元素の状態を理解するため、140m調査坑道から得られた声問層の岩石を対象として、微量元素の分析を行いました。分析の際には微量元素が岩石中でどのような状態で存在しているのかを理解するために、複数の異なる条件で前処理を行い、様々な状態での分析を実施しました。その結果、岩石中の微量元素は、特定の鉱物に取り込まれて存在していることなどが分かりました。

岡山大学など

光ファイバーを用いた水分計測技術の開発について、研究協力を継続しました。平成24年度は、光ファイバーを利用したセンサーの試作と改良を進めるとともに、幌延町内での現地測定を継続して積雪期を含む土中水分量の季節変動データを取得しました。また、現地で測定された土中水分量の変化から降雨浸透量の試算を行い、土中の水分計測手法としての適用性を検討しました。

新潟大学

地形および地質発達モデル構築に関する調査・解析手法を対象として、専門家への聞き取り調

査を継続して行い、調査計画の立案からモデル構築に至るまでの作業全体の流れを示した作業フローを作成しました。また、作成した作業フローを参考に隆起速度の算出を試みるとともに、算出結果の確からしさを分析し、分析結果をとりまとめました。

京都大学

地質発達モデル構築に際して用いられる室内試験やシミュレーションを行う際の暗黙知やノウハウを整理・分析するとともに、作業手順や意思決定を行う際の判断基準などを取りまとめました。この研究により、モデル構築に際して生じる不確実性の発生や低減に関する新たな知見が得られました。

東北大学、京都大学

地下水中の微量元素と微小な物質（コロイド[注55]や有機物、微生物）との相互反応を理解するために、通る孔の大きさの異なるろ紙を利用して140m調査坑道から得られた地下水に分析対象とする微量元素を添加した後にろ過し、ろ紙上に残った微小な物質の観察や分析を実施しました。その結果、微量元素は特定の鉱物に取り込まれる、もしくは有機物と一緒に存在していることが分かりました。

8.1.2 その他の機関との研究協力

幌延地圏環境研究所[注56]

両機関の試験設備を利用した研究協力の一環として、調査坑道において岩石、地下水を採取し、その微生物特性、化学特性の分析を行いました。また、両機関の研究状況について報告する研究交流会を2回、実施しました。

電力中央研究所

地下施設建設時の坑道掘削影響領域の調査技術、経済産業省資源エネルギー庁が進めるコントロールボーリング技術に関するプロジェクトおよび岩盤中の地下水移行評価技術に関するプロジェクト（地下水年代測定）について、共同研究を実施しました。地下施設においては、坑道掘削に伴う周辺岩盤の力学、地球化学特性への影響を把握するための調査（比抵抗トモグラフィや音響トモグラフィ、地下水の採水・分析など）を継続して行い、坑道掘削に伴う地質環境特性の変化に関するデータを蓄積しました。また、地下水年代測定については、産総研との共同研究において実施した幌延町沿岸域でのボーリング孔から採取した地下水を対象とした調査を行い、深度800m以深では、堆積時の海水が残留している可能性が示されました。その他、コントロールボーリング技術については、3.1.2(4)を参照して下さい。

注55：1万分の1mm～100万分の1mm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す。

注56：幌延地圏環境研究所は、公益財団法人北海道科学技術総合振興センターが設置した研究所であり、国の補助を受けて、幌延深地層研究センターの施設や設備を活用した地下空間利用を中心とする研究を実施しています。

北海道立総合研究機構　地質研究所[注57]

北海道立総合研究機構により公開された道北地域の重力調査に関わるデータをもとに、幌延を含む地域を対象とした地質構造などの解析を行いました。

産業技術総合研究所

経済産業省資源エネルギー庁が進める沿岸域塩淡境界・断層評価技術に関するプロジェクトについて、共同研究を実施しました。

平成24年度は、幌延町の沿岸域に位置する浜里地区に掘削されたボーリング孔（DD-1孔）を用い、これまでの掘削深度（約1,000m）から約1,200mまで掘削作業を追加するとともに水理試験などを行い、より深部のデータを取得しました。また、平成24年度までの成果を踏まえ、沿岸域における塩淡境界や断層評価に必要な調査・解析方法などをまとめました。

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地層処分実規模設備の整備に関するプロジェクトについて、共同研究を実施しました。このプロジェクトは、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・定置に係わる操業技術や長期挙動などの工学技術に関する研究を行うものです。

平成24年度は、4.1.1(3)でも述べたように、平成23年度に引き続き、地層処分実規模試験施設において既存の展示物とともに、緩衝材定置試験設備を展示しました。緩衝材定置試験設備の整備として、一連の緩衝材の定置動作を自動で行うためのソフトウェアを設計・製作しました。また、緩衝材中に水がしみ込んで隙間が閉塞される過程を観察できる装置を用いた浸潤試験を継続しました。

8.2 国外機関との研究協力

Nagra[注58]**（スイス）**

沿岸域を含む幌延地域を対象に、過去から現在までの地下水の流れと水質の形成過程の復元研究を協働で実施しました。平成24年度は、気候変動に伴う地下水の流れの変化に関する国内外の研究事例をレビューしました。

注57：地方独立行政法人北海道立総合研究機構は、6つの研究本部から構成され、地質研究所はそのうちの環境・地質研究本部に属します。地質分野の先駆をなす研究機構の一研究所として、道民生活の安全・安心の確保と、地下資源の安定的確保や環境負荷の軽減などの産業・経済の持続的発展に資する調査研究活動と成果の普及に取り組んでいます。

注58：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す。

モンテリ・プロジェクト[注59]

国際共同研究のモンテリ・プロジェクトで実施されている各種試験のうち、原子力機構は「鉄材料の腐食に関する原位置試験」に参加しています。平成24年度は、平成23年度に引き続き、モンテリ岩盤研究所の調査坑道内に掘削したボーリング孔での原位置試験を継続しました。

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

上記のほか、ANDRA[注60]（フランス）などと地質環境調査技術および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。

注59:堆積岩を対象とした地層処分研究に関する国際共同研究です。平成24年3月現在、原子力機構を含め8ヶ国から14機関が参加し、スイスのモンテリ・トンネル内において地層処分に関連する各種の原位置試験が実施されています。

注60 Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (National radioactive waste management agency)：放射性廃棄物管理公社は、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もあり、堆積岩を対象に深地層の研究施設計画を進めています。

参考文献

(1) 中山雅，澤田純之（編），“幌延深地層研究計画　平成 24 年度調査研究計画”，JAEA-Review 2012-023，2012.

(2) 核燃料サイクル開発機構，“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 2005-002，2005，参考資料 4，pp.18-23.

(3) 中山雅，天野健治，常盤哲也，山本陽一，大山卓也，天野由記，村上裕晃，稲垣大介，津坂仁和，近藤桂二，横田秀晴，南條功，新里忠史，田中真悟，大原正嗣，神和美，“幌延深地層研究計画　平成 23 年度調査研究成果報告”，JAEA-Review 2012-035，2012.

(4) 岩月輝希，天野由記，井岡聖一郎，三枝博光，竹内竜二，“大規模地下施設の建設に伴う周辺地下水環境の変化”，日本原子力学会和文論文誌，2007，Vol.6, No. 1, pp.73-84.

(5) Yamamoto, H., Kunimaru, T., Kurikami, H., Shimo, M. and Xu, T., “Long-term simulation of ambient groundwater chemistry at Horonobe URL, Japan -Application of coupled hydrogeochemical model-”, GEOPROC2006, 2nd International Conference on Coupled Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Processes in Geosystems and Engineering, Nanjing, China, May 22-25, 2006, pp.382-387.

(6) 中山雅，佐野満昭，真田祐幸，杉田裕（編），“幌延深地層研究計画　平成 20 年度調査研究成果報告”，JAEA-Research 2009-032，2009.

(7) Aoyagi, K., Tsusaka, K., Tokiwa, T., Kondo, K. and Inagaki, D., “Geomecahnical Assessment of the Excavation Damaged Zone in the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan”, Proceedings of the 13th Japan Symposium on Rock Mechanics & 6th Japan-Korea Symposium on Rock Engineering, 2013, pp.905-910.

(8) 今井久，山下亮，塩﨑功，浦野和彦，笠博義，丸山能生，新里忠史，前川恵輔，“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（委託研究）”，JAEA-Research 2009-001，2009.

(9) 山下亮，塩﨑功，大山卓也，新里忠史，前川恵輔，今井久，“地質環境の長期変遷を考慮した地下水流動解析による塩淡分布の検討”、日本地下水学会 2011 年秋季講演会，2011.

(10) 石井英一，安江健一，田中竹延，津久井朗太，松尾公一，杉山和稔，松尾重明，“北海道北部，幌延地域における大曲断層の三次元分布と水理特性”，地質学雑誌, Vol.112, No.5, 2006, pp.301-304.

(11) 中山雅，澤田純之，杉田裕（編），“幌延深地層研究計画平成 22 年度調査研究成果報告”，JAEA-Review 2011-033，2011.

(12) 原子力環境整備促進・資金管理センター，“平成 24 年度原子力発電施設広聴・広報事業　地層処分実規模設備整備事業　報告書”，2012.

(13) 中司昇，佐藤治夫，藤田朝雄，棚井憲治，中山雅，澤田純之，朝野英一，斎藤雅彦，吉野修，塚原成樹，菱岡宗介，小林正人，“地層処分実規模設備整備事業おける工学技術に関する研究-平成 24 年度成果報告-(共同研究)”，JAEA-Research 2013-034，2013.

(14) 核燃料サイクル開発機構，“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性

—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊2　地層処分の工学技術”, JNC TN1400 99-022, 1999.

(15) Ishii, E., Sanada, H., Funaki, H., Sugita, Y., Kurikami, H., “The relationships among brittleness, deformation behavior, and transport properties in mudstones: an example from the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan”, Journal of Geophysical Research, Vol.116, 2011, B09206, DOI: 10.1029/2011JB008279.

(16) Ishii, E., “Microstructure and origin of faults in siliceous mudstone at the Horonobe Underground Research Laboratory site, Japan”, Journal of Structural Geology, Vol.34, 2012, pp.20-29.

(17) FracMan, “FracMan Interactive Discrete Feature Data Analysis, Geometric Modeling and Exploration Simulation, User Manual, FracMan Technology Group, Golder Associates, 2013.

付録

(平成 24 年度外部発表)

*著者アルファベット順に記載

阿部寛信，池田幸喜，見掛信一郎，永崎靖志，新里忠史，浅妻新一郎，青木勲，石川信行，石川浩康，石崎暢洋，今村弘章，上坂貴洋，内田伸一，江口和利，菊池栄，古宮友和，薗田暁，須藤智之，高橋修，照沼章弘，松本正喜(2012)：“福島県除染推進活動に関する平成 23 年度の専門家活動について；仮置場の設置にかかわる原子力機構の支援対応”，日本地質学会第 119 年学術大会(大阪大会)，2012 年 9 月.

天野由記，南條功，村上裕晃，藪内聡，横田秀晴，佐々木祥人，岩月輝希(2012)：“北海道幌延地域における深部地下水調査; 地上からの地球化学調査の妥当性評価と地下施設建設に伴う地球化学特性変化”，地下水学会誌，Vol.54，No.4，pp.207-228，2012 年 11 月.

青木和弘，佐藤治夫，新里忠史，田中真悟，阿部寛信(2012)：“東京電力福島第一原子力発電所の事故に伴い放出された放射性物質の土壌中深度方向の分布状況に関する調査研究(その 2)，1；調査研究の概要”，日本原子力学会 2012 年秋の大会，2012 年 9 月.

青柳和平，津坂仁和，常盤哲也，近藤桂二，稲垣大介(2013)：“Geomechanical Assessment of the Excavation Damaged Zone in the Horonobe Underground Researh Laoratory, Japan”，第 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，第 13 回岩の力学国内シンポジウム/第 6 回日韓ジョイントシンポジウム，2013 年 1 月.

千々松正和，小山倫史，清水浩之，中間茂雄，藤田朝雄(2013)：“スウェーデン Äspö 地下研究施設において実施された pillar stability test の解析評価，1；連続体解析手法を用いた解析と各機関の解析結果の比較”，第 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，第 13 回岩の力学国内シンポジウム/第 6 回日韓ジョイントシンポジウム，2013 年 1 月.

藤田朝雄, 川口昌尚, Walker, C., 笹本広, 油井三和, 大西有三(2012)：“ Development of grouting technologies for HLW disposal in Japan, 1; Overall program and key engineering technologies”, Proceedings of 7th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS-7), 7th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS-7)，2012 年 10 月.

藤田朝雄，笹本広，杉田裕，松井裕哉(2013)：“地層処分におけるグラウト技術の高度化開発，1；プロジェクトの概要と開発技術の適用例”，第 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，第 13 回岩の力学国内シンポジウム/第 6 回日韓ジョイントシンポジウム，2013 年 1 月.

藤田朝雄，棚井憲治，志村友行，納多勝，山本修一，佐藤伸(2012)：“岩盤中のガス移行挙動試験に関する基本計画，2；溶存メタンの影響把握”，日本原子力学会 2012 年秋の大会，2012 年 9 月.

萩原健司，名合牧人，工藤元，津坂仁和(2012)：“堆積軟岩における大深度立坑の施工”，日本トンネル技術協会第 70 回(山岳)施工体験発表会，2012 年 6 月.

萩原健司，名合牧人，南出賢司，小川弘之，宇山幹紀，傳馬啓輔，木須芳男，森本勤，工藤元，津坂仁和(2012)：“堆積軟岩における大深度立坑掘削に伴う崩落対策工の検討”，土木学会平成 24 年度全国大会第 67 回年次学術講演会，2012 年 9 月.

五十嵐敏文，上田貴宏，洞秀幸，城まゆみ，工藤元(2012)：“Factors affecting the leaching of nitrogen species from diatomaceous mudstone”, 5th AUN/SEED-Net Regional Conference on Geo-Disaster Mitigation in ASEAN，2012 年 9 月.

伊勢孝太郎，南條功，雨宮浩樹，天野由記，岩月輝希，浅野貴博，景山幸二，佐々木祥人，吉川

英樹(2012)：“Microbial structure change in the groundwater samples from two boreholes at depths of -250m in Horonobe Underground Research Laboratory”，14th International Symposium on Microbial Ecology (ISME-14)，2012 年 8 月.

岩月輝希，水野崇，萩原大樹，新宮信也，大森一秋，福田朱里(2012)：“多変量解析による大規模地下施設周辺の地下水水質変化プロセスの推定”，2012 年度日本地球化学会年会，2012 年 9 月.

加藤欣也，板橋秀治，佐高裕之，城まゆみ(2012)：“シート被覆による掘削土(ズリ)置場の浸出水量の低減及びホウ素・窒素濃度低減の検証”，土木学会平成 24 年度全国大会第 67 回年次学術講演会，2012 年 9 月.

川口昌尚，岸裕和，藤田朝雄，岸田潔(2013)：“地層処分におけるグラウト技術の高度化開発，2；グラウト材料の選定”，第 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，第 13 回岩の力学国内シンポジウム/第 6 回日韓ジョイントシンポジウム 2013 年 1 月.

菊池広人，棚井憲治，澤田純之，前川恵輔(2013)：“幌延 URL における人工バリアの性能確認試験，3；堆積岩の掘削ズリを用いた坑道の埋め戻し材の膨潤圧特性に関する検討”，日本原子力学会 2013 年春の年会，2013 年 3 月.

近藤桂二，津坂仁和，稲垣大介，杉田裕，加藤春實，丹生屋純夫(2013)：“幌延深地層研究所における珪藻質泥岩を対象とした水圧破砕法による初期地圧の測定”，第 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，第 13 回岩の力学国内シンポジウム/第 6 回日韓ジョイントシンポジウム，2013 年 1 月.

松井裕哉，水野崇，笹本広，佐藤稔紀(2013)：“地層処分におけるグラウト技術の高度化開発，7；結晶質岩における地震前後のプレグラウト領域の地下水流動及び水質変化”，第 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，第 13 回岩の力学国内シンポジウム/第 6 回日韓ジョイントシンポジウム，2013 年 1 月.

松崎達二，常盤哲也，中務真志，山田泰広，赤嶺辰之介，天野健治，新里忠史(2012)：“アナログ実験を用いた地質発達モデルによる隆起量の定量的推定の試み；北海道北部幌延地域の事例”，日本地質学会第 119 年学術大会，2012 年 9 月.

南出賢司，萩原健司，名合牧人，小川弘之，宇山幹紀，傳馬啓輔，木須芳男，森本勤，工藤元，津坂仁和(2012)：“堆積軟岩における大深度立坑掘削に伴う崩落対策工の効果”，土木学会平成 24 年度全国大会第 67 回年次学術講演会，2012 年 9 月.

宮川和也，野原壮，山崎雅則，常盤哲也(2013)：“Repetition of spectral analysis on rock permeability applied to seven years record of pore-pressure response to atmospheric loading at the Horonobe URL in Japan”，第 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，第 13 回岩の力学国内シンポジウム/第 6 回日韓ジョイントシンポジウム，2013 年 1 月.

宮坂省吾，新里忠史，重野聖之(2012)：“北海道北部、幌延地域西部の地すべり地形”，北海道の地すべり 2012，pp.61-66，2012 年 8 月.

水野崇，岩月輝希，松崎達二(2012)：“Procedure for estimation of salinity distribution based on resistivity data of rock mass”，American Geophysical Union 2012 Fall Meeting，2012 年 12 月.

村上裕晃，天野由記，雨宮浩樹，佐々木祥人，岩月輝希，吉川英樹(2012)：“埋め戻し材を用いた岩盤中の酸化還元緩衝能力に関する原位置試験”，日本原子力学会 2012 年秋の大会，2012 年 9 月.

中山雅，澤田純之，棚井憲治，杉田裕(2013)：“幌延 URL における人工バリアの性能確認試験，1；

試験計画の全体概要”，日本原子力学会 2013 年春の年会，2013 年 3 月.
新里忠史，阿部寛信，佐藤治夫，酒井利啓，田中真悟，青木和弘(2012)：“東京電力福島第一原子力発電所の事故に伴い放出された放射性物質の土壌中深度方向の分布状況に関する調査研究(その 2)，2；調査地域の地形,土壌,地質及び土地利用条件と放射性物質の深度方向の分布状況の関連性”，日本原子力学会 2012 年秋の大会，2012 年 9 月.
新里忠史，大澤英昭，石丸恒存，道家涼介，中安昭夫(2012)：“地質環境調査における意思決定過程と論理構造の表出化”，日本地質学会第 119 年学術大会，2012 年 9 月.
斉藤拓巳，鈴木庸平，水野崇(2012)：“Size and elemental analyses of nano colloids in deep granitic groundwater; Implications for transport of trace elements”，Colloids and Surfaces A; Physicochemical and Engineering Aspects，inpress.
佐々木祥人，浅野貴博，伊勢孝太郎，佐藤智文，村上裕晃，雨宮浩樹，天野由記，岩月輝希，吉川英樹(2012)：“Planktonic and attached microbes in deep subsurface”，14th International Symposium on Microbial Ecology (ISME-14)，2012 年 8 月.
佐藤治夫, 新里忠史, 天野健治, 田中真悟, 青木和弘(2012)：“Investigation and Research on Depth Distribution in Soil of Radionuclides Released by the TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident”，Materials Research Society Symposium Proceedings, Materials Research Society 2012 Fall Meeting，2012 年 11 月.
佐藤治夫，新里忠史，田中真悟，阿部寛信，青木和弘(2012)：“東京電力福島第 1 原子力発電所の事故に伴い放出された放射性物質の土壌中深度方向の分布状況に関する調査研究(第 2 次調査)”，日本原子力学会バックエンド部会第 28 回バックエンド夏期セミナー，2012 年 8 月.
佐藤治夫，田中真悟，新里忠史，阿部寛信，青木和弘(2012)：“東京電力福島第一原子力発電所の事故に伴い放出された放射性物質の土壌中深度方向の分布状況に関する調査研究(その 2)，4；深度方向における放射性物質の濃度分布と移行に関する検討”，日本原子力学会 2012 年秋の大会，2012 年 9 月.
澤田純之，中山雅，棚井憲治，森川義人，城まゆみ(2013)：“幌延 URL における人工バリアの性能確認試験，2；堆積岩の掘削ズリを用いた坑道の埋め戻し材の締固め特性と透水性に関する検討”，日本原子力学会 2013 年春の年会，2013 年 3 月.
澤田純之，常盤哲也，熊谷誓也，南出賢司(2012)：“堆積軟岩を対象としたプレグラウト施工範囲の調査方法に関する研究”，土木学会平成 24 年度全国大会第 67 回年次学術講演会，2012 年 9 月.
清水浩之，菊池広人，棚井憲治，藤田朝雄(2012)：“ベントナイト膨潤圧試験における壁面摩擦力の影響に関する粒状個別要素法解析”，土木学会平成 24 年度全国大会第 67 回年次学術講演会，2012 年 9 月.
清水浩之，小山倫史，千々松正和，中間茂雄，藤田朝雄(2013)：“スウェーデン Äspö 地下研究施設において実施された pillar stability test の解析評価，2；不連続体解析手法である粒状体個別要素法を用いた解析”，第 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，第 13 回岩の力学国内シンポジウム/第 6 回日韓ジョイントシンポジウム，2013 年 1 月.
塩崎功，山下亮，大山卓也，新里忠史，天野健治，今井久(2012)：“地質環境の長期変遷を考慮した地下水流動解析；仮想変動事象による影響の推定”，日本地下水学会 2012 年秋季講演会，2012 年 9 月.
杉田裕，真田昌慶，藤田朝雄，羽柴公博，福井勝則，大久保誠介(2013)：“破砕した珪質泥岩の強度及び遮水性の回復”，第 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，第 13 回岩の力学国

内シンポジウム/第 6 回日韓ジョイントシンポジウム，2013 年 1 月.
須藤智之，石川浩康，上坂貴洋，薗田暁，石川信行，新里忠史，見掛信一郎，青木勲，石崎暢洋，今村弘章，梅澤克洋，江口和利，高橋修，和田孝雄，浅妻新一郎(2012)：“JAEA 福島環境安全センターにおける除染活動にかかわる経験・教訓，4；自治体支援”，日本原子力学会 2012 年秋の大会，2012 年 9 月.
多田浩幸，熊坂博夫，齋藤亮，中谷篤史，石井卓，真田昌慶，野口聡，岸裕和，中間茂雄，藤田朝雄(2013)：“セメントの使用を極力抑えた岩石利用セグメント支保工の開発”，第 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，第 13 回岩の力学国内シンポジウム/第 6 回日韓ジョイントシンポジウム，2013 年 1 月.
田中真悟，佐藤治夫，大熊成地，渡辺直子，小崎完，佐藤正知，阿部寛信，新里忠史，青木和弘(2012)：“東京電力福島第一原子力発電所の事故に伴い放出された放射性物質の土壌中深度方向の分布状況に関する調査研究(その 2)，3；土壌特性評価と Cs 及び I の収着・脱着試験”，日本原子力学会 2012 年秋の大会，2012 年 9 月.
棚井憲治，藤田朝雄，納多勝，山本修一，志村友行，佐藤伸(2012)：“岩盤中のガス移行挙動試験に関する基本計画，1；試験条件の設定”，日本原子力学会 2012 年秋の大会，2012 年 9 月.
棚井憲治，藤田朝雄，納多勝，山本修一，志村友行，佐藤伸(2013)：“岩盤中のガス移行挙動試験計画の立案，1；ガス移行挙動試験に用いる載荷ガス圧の設定”，第 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 第 13 回岩の力学国内シンポジウム/第 6 回日韓ジョイントシンポジウム，2013 年 1 月.
棚井憲治，藤田朝雄，佐藤伸，納多勝，山本修一，志村友行(2013)：“岩盤中のガス移行挙動試験計画の立案，2；溶存メタンが及ぼすガス移行挙動試験への影響検討”，第 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，第 13 回岩の力学国内シンポジウム/第 6 回日韓ジョイントシンポジウム，2013 年 1 月.
東郷洋子，鈴木庸平，福田朱里，水野崇，伊藤一誠(2012)：“SEC-ICP-MS を用いた地下水中の微量元素とコロイドの相互作用の検討”，2012 年度日本地球化学会年会，2012 年 9 月.
東郷洋子，高橋嘉夫，天野由記，松崎浩之，鈴木庸平，村松康行，岩月輝希(2012)：“Long-term migration of iodine in sedimentary rocks based on iodine speciation and $^{129}I/^{127}I$ ratios”，American Geophysical Union 2012 Fall Meeting，2012 年 12 月.
常盤哲也，澤田純之，落合彰二，宮川和也(2013)：“Occurrence of high-permeability fracture estimated by grouting in Horonobe URL of Japan”，第 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.1021-1025，第 13 回岩の力学国内シンポジウム/第 6 回日韓ジョイントシンポジウム，2013 年 1 月.
常盤哲也，津坂仁和，松原誠，石川泰己，小川大介(2012)：“Formation mechanism of extension fractures induced by excavation of a gallery in soft sedimentary rock, Horonobe area, northern Japan”, Geoscience Frontiers, 4(1),pp.105-111, DOI: 10.1016/j.gsf.2012.05.003., 2012 年 6 月.
常盤哲也，津坂仁和，松原誠，石川泰己，小川大介(2012)：“北海道幌延地域に分布する堆積軟岩における坑道掘削に伴う割れ目の特徴”，日本地質学会第 119 年学術大会，2012 年 9 月.
鳥潟一文，本多照幸，岩月輝希，村上裕晃(2012)：“逐次溶解法を併用した中性子放射化分析法による堆積岩中の微量元素の存在形態に関する研究”，2012 日本放射化学会年会・第 56 回放射化学討論会，2012 年 10 月.
津坂仁和(2012)：“幌延深地層研究所”，地下空間利用ガイドブック 2012.

津坂仁和，稲垣大介，羽出山吉裕，小池真史，島田智浩，井尻裕二(2012)：“ショートステップ工法による立坑掘削に伴う支保部材の力学挙動に関する研究”, 土木学会論文集 F1, Vol.68, No.1，pp.7-20. ，2012 年 5 月.

津坂仁和，稲垣大介，名合牧人，小池真史，松原誠，菅原健太郎(2013)：“幌延深地層研究所での立坑掘削における覆工コンクリートに対する岩盤崩落の影響”，第 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 第 13 回岩の力学国内シンポジウム/第 6 回日韓ジョイントシンポジウム, 2013 年 1 月.

津坂仁和, 稲垣大介, 常盤哲也, 横田秀晴, 名合牧人, 松原誠, 重廣道子(2012)：“An Observational Construction Management in the Horonobe Underground Research Laboratory Project”, In Proceedings of World Tunnel Congress 2012, Bangkok, Thailand, 20 ~ 23 May 2012., 2012 年 5 月.

津坂仁和，常盤哲也，稲垣大介，羽出山吉裕，小池真史，井尻裕二(2012)：“幌延深地層研究所におけるショートステップ工法による立坑掘削に伴う岩盤の力学挙動に関する研究”，土木学会論文集 F1，Vol.68，No.2，pp.40-54，2012 年 9 月.

上原倫子，國丸貴紀，岩月輝希，松崎達二，中安昭夫(2012)：“ボーリング調査計画策定における知識の分析・整理”，日本原子力学会 2012 年秋の大会，2012 年 9 月.

This is a blank page.

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	立法メートル	m^3
速さ，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	キログラム毎立法メートル	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	1
比透磁率[b]	（数字の）　1	1

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

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	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	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	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]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
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	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
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	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
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	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

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	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
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
バーン	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	$1\ sb\ =1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	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	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

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

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
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=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	$1\ \mu\ =1\mu m=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています