

幌延深地層研究計画
第2期中期計画（平成22年度～平成26年度）
調査研究計画書

Horonobe Underground Research Laboratory Project
Research and Development Plan (H22-H26)

（編）岩月 輝希 佐藤 治夫 野原 壮 棚井 憲治
杉田 裕 天野 健治 藪内 聡 大山 卓也
天野 由記 横田 秀晴 新里 忠史 常盤 哲也
稲垣 大介 阿部 寛信 中山 雅 操上 広志

(Eds.) Teruki IWATSUKI, Haruo SATO, Tsuyoshi NOHARA, Kenji TANAI
Yutaka SUGITA, Kenji AMANO, Satoshi YABUUCHI, Takuya OYAMA
Yuki AMANO, Hideharu YOKOTA, Tadafumi NIIZATO, Tetsuya TOKIWA
Daisuke INAGAKI, Hironobu ABE, Masashi NAKAYAMA and Hiroshi KURIKAMI

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

June 2011

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, 2011

幌延深地層研究計画
第 2 期中期計画（平成 22 年度～平成 26 年度）調査研究計画書

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) 岩月 輝希, 佐藤 治夫, 野原 壮, 棚井 憲治, 杉田 裕
天野 健治, 藪内 聡, 大山 卓也, 天野 由記, 横田 秀晴, 新里 忠史, 常盤 哲也,
稲垣 大介, 阿部 寛信, 中山 雅, 操上 広志

(2011 年 3 月 30 日受理)

本計画書は、第 2 期中期計画期間（平成 22 年度～平成 26 年度）において、幌延深地層研究センターの地下研究施設を利用して行う調査研究開発の計画を整理したものである。

当該期間においては、PFI 事業により深度 350m までの地下施設の整備、維持管理および研究支援に関する業務のほか、様々な受託事業や共同研究が行われる予定であり、第 2 段階（坑道掘削[地下施設建設]時の調査研究段階）と並行して、第 3 段階（地下施設での調査研究段階）の調査研究開発が開始される。

これらの調査研究開発を通して、地質環境調査技術や深地層における工学的技術、処分技術、安全評価手法を向上させるとともに、その成果を広く社会に公開することで、地層処分に関わる技術の実現性を示し、信頼感を醸成していく。

Horonobe Underground Research Laboratory Project
Research and Development Plan (H22-H26)

(Eds.) Teruki IWATSUKI, Haruo SATO, Tsuyoshi NOHARA, Kenji TANAI, Yutaka SUGITA
Kenji AMANO, Satoshi YABUUCHI, Takuya OYAMA, Yuki AMANO, Hideharu YOKOTA,
Tadafumi NIIZATO, Tetsuya TOKIWA, Daisuke INAGAKI, Hironobu ABE, Masashi NAKAYAMA
and Hiroshi KURIKAMI

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

(Received March 30, 2011)

The research and development plan in Horonobe Underground Research Laboratory are summarized according to the 2nd Midterm Plan till 2014 fiscal year of JAEA.

In this Midterm, galleries and the infrastructures for the research and development up to the depth of 350 m are constructed by Private Financial Initiative (PFI). Additionally “Phase 3: Operation phase (Investigations in the underground facilities)” in the galleries begins in parallel with “Phase 2: Construction phase (Investigations during construction of the underground facilities)”. In these phases, various researches and developments including collaboration with other institutes are conducted in the galleries.

General applicable techniques on the subject of the investigation of the geological environment, facility construction in deep underground and the reliability of geological disposal are developed during the phase. The feasibility and reliance of various technologies concerning geological disposal are demonstrated by widely opening the outcome to the public in the society.

Key-words: Horonobe Underground Research Laboratory, 2nd Midterm Plan, Phase 2: Construction Phase, Phase 3: Operation Phase

目次

1. はじめに	1
2. 幌延深地層研究計画の経緯.....	1
3. これまでの研究成果	3
4. 平成 26 年度までの研究技術開発計画	6
4.1 地質環境調査技術の開発.....	6
4.1.1 地上からの調査技術の適用性確認と地質環境モデルの構築・更新.....	7
4.1.2 地下施設建設に伴う地質環境変化の調査評価技術の開発.....	20
4.1.3 地質環境の長期変遷評価技術の開発	29
4.2 深地層における工学的技術の基礎の開発.....	36
4.2.1 地下施設建設における実施設計の適用性確認・更新.....	36
4.2.2 地下施設の耐震設計の適用性確認.....	40
4.2.3 地下施設の通気挙動評価技術.....	41
4.3 処分技術の信頼性向上	42
4.3.1 処分施設の設計・施工技術の開発.....	42
4.3.2 坑道閉鎖技術	47
4.3.3 処分システムの施工技術開発・品質確認	49
4.4 安全評価手法の高度化	56
4.4.1 人工バリアおよびその周辺岩盤を対象とした物質移行挙動評価.....	56
4.4.2 安全評価手法の適用性確認.....	59
5. 計画推進上の留意事項.....	61
6. まとめ.....	63
参考文献.....	64
付録 幌延深地層研究所の放流水に関する協定書（抜粋）	70

Contents

1. Introduction.....	1
2. Outline of Horonobe Underground Research Laboratory Project.....	1
3. Previous research.....	3
4. Pranning of research and development (H22-H26).....	6
4.1 Geoscientific research	6
4.1.1 Modelling of geological environment	7
4.1.2 Monitoring of the change of geological environment by facility construction.....	20
4.1.3 Long-term evolution of geological environment	29
4.2 Development of engineering technique	36
4.2.1 URL Facility designn and the construction.....	36
4.2.2 Earthquake-resistant designn.....	40
4.2.3 Evaluation of the ventiration in gallery	41
4.3 Geological isolation technique	42
4.3.1 Technical development on designn method of isolation facility.....	42
4.3.2 Technical development on backfilling method.....	47
4.3.3 Technical development on quality control	49
4.4 Safety assessment technique	56
4.4.1 Solutes transport analysis in and around the engineering / natural barrier system	56
4.4.2 Evaluation of safety assessment technique	59
5. Notice in the plan promotion.....	61
6. Summary	63
References	64
Appendix: Agreement about the drainage from URL facility	70

1. はじめに

「高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画（以下、全体計画）」（資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構，2006）では，処分事業や安全規制のニーズを満たすべく，関連機関が具体的な情報共有と調整を図りつつ効率的に基盤研究開発を進めることとしている。この基盤研究開発において，（独）日本原子力研究開発機構（以下，原子力機構）は，中核研究機関として深地層の科学的研究や安全評価手法の高度化など，主に科学的な視点や体系的調査解析・評価手法の整備といった視点に重点をおいた研究開発を担う。幌延深地層研究計画は，地下研究施設の建設を通して，堆積岩（軟岩）環境を対象とした深地層の科学的研究および地層処分研究開発を進めるものである。この計画は，地下施設の建設工程や研究開発課題の内容，実施時期の違いから以下の3段階に分けて推進している。

第1段階：地上からの調査研究段階

第2段階：坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階

第3段階：地下施設での調査研究段階

平成17年10月に原子力委員会が公表した「原子力政策大綱」には，深地層の研究施設などを活用した研究開発の重要性が示されており，文部科学省と経済産業省は，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）」（以下，第2期中期目標）の中で，高レベル放射性廃棄物の処分技術に関する研究開発のうち，深地層の科学的研究については，深地層環境の深度（幌延では地下350m程度）まで坑道を掘削しながら調査研究を実施し，処分事業の精密調査段階や安全規制に必要となる技術基盤を整備することとしている。また，地層処分研究開発については，深地層の研究施設など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場概念の構築手法や総合的な安全評価手法の整備を目標としている。

本計画書は，第2期中期目標を踏まえ，幌延深地層研究計画における第2，第3段階の深地層の科学的研究（地層科学研究）と地層処分研究開発に関わる平成26年度までの調査研究計画を記述するものである。

2. 幌延深地層研究計画の経緯

原子力機構（旧核燃料サイクル開発機構）は，平成12年11月に，北海道と幌延町の間で「幌延町における深地層の研究に関する協定」を締結し，平成13年3月より幌延深地層研究計画に着手した。三者協定には，「研究実施区域に放射性廃棄物を持ち込むことや使用することはしない」，「深地層研究所を放射性廃棄物の最終処分を行う実施主体へ譲渡，貸与しない」ことなどが定められており，幌延深地層研究計画は三者協定を遵守して進めている。

平成13年4月には幌延深地層研究センターを開設し，幌延深地層研究計画における地上からの調査研究（第1段階）を本格的に開始した。平成14年7月には幌延町北進地区に主な調査研究を行う研究所設置地区（約3km×3km）を選定した。また，平成15年3月には，研究所設置地区内において地下施設および地上施設を建設するための用地（研究所設置場所）を取得し，同年7月に用地の造成に着手した。平成18年3月には，平成13年3月からの約5年にわたる第1段階の調査研究を終了し，平成19年3月に第1段階の成果を取りまとめた「深地層の科学研究」および「地層処分研究開発」に関する

る報告書を公表した（太田ほか，2007，藤田ほか，2007）。

研究所設置場所においては，平成 17 年 11 月から地下施設工事（第 I 期）に着工し，それに伴い掘削（地下施設建設）時の調査研究（第 2 段階）を開始した。地下施設工事（第 I 期）では，2 本の立坑（換気立坑および東立坑）を建設しつつ水平坑道の整備を行い，平成 22 年 3 月末時点において，換気立坑が深度 250m まで，東立坑が 210m まで到達し，水平坑道については 140m 調査坑道（総延長 173.6m）を竣工した。平成 22 年度前半においては，東立坑を深度 250m まで掘り進め，深度 250m において東立坑と換気立坑を連絡する水平坑道を掘削・整備した。平成 22 年度後半からは，民間活力による深度 350m までの地下施設の整備，維持管理および研究支援に関する業務（以下，「PFI 事業」）を行う計画である。PFI 事業においては，平成 22 年度後半から平成 26 年度後半にかけて深度 350m までの地下施設を整備し，維持管理と研究支援に関する業務を行う。平成 27 年度からは維持管理と研究支援に関する業務を行う。研究支援業務としては，坑道を掘削しながら行う第 2 段階の調査研究および整備した坑道を利用して行う第 3 段階の調査研究を支援する以下の業務を実施する。

- ① 研究支援用計測システム整備
- ② ステップ管理計測（B 計測）
- ③ 坑道における研究支援（地質環境特性の定期観測や試験作業の実施など）
- ④ その他研究支援で必要となる業務（作業の安全管理，作業計画の策定，取得データの品質管理作業・報告等）

3. これまでの研究成果

第1段階の調査研究は、平成13年から平成18年までの約5年間に亘り実施した。第1段階では、以下の2つの目標を設定し調査研究を行った。

- (1) 地上からの調査研究による地質環境モデルの構築および坑道掘削前の深部地質環境状態の把握
- (2) 地下施設の詳細設計および施工計画の策定

深地層の科学的研究（地層科学研究）については、地質調査（文献調査、露頭調査など）、物理探査（重力探査、地震探査、電磁探査など）、表層水理調査（浅層ボーリング、気象観測、河川流量観測など）、ボーリング調査（500～1,000mの深層ボーリングなど）により、

- ① 研究所設置地区および研究所設置場所の選定
- ② 地上からの地質環境の調査研究
- ③ 深地層における工学技術の基礎の開発
- ④ 地下施設建設に伴う周辺地質環境への影響予測

を実施し、概要調査で活用するための地質環境調査技術の研究開発を行った（太田ほか、2007）。

①「研究所設置地区および研究所設置場所の選定」では、その選定過程における実経験を通じて確認した地区・用地の選定上の要件や考慮すべき条件とその重要性を示した。②「地上からの地質環境の調査研究」においては、地上からの調査結果の解釈と地質環境モデル（地質構造モデル、地下水の水理モデル、地下水の地球化学モデル、岩盤力学モデル）の構築を通じて、坑道掘削前の深部地質環境を把握すると共に、地層処分にとって重要な地質環境特性・プロセスを把握し、その過程で得られた技術的知見を踏まえて、地質環境モデルの構築手順を示す統合化データフローを整備した。地質環境モデルの構築においては、新たにデータを取得するたびにモデルを見直すといった、段階的にモデルの信頼性を向上させて行くアプローチを採用した。また、地上からの調査研究における主要な調査技術の有効性や技術課題などを整理し、堆積岩を対象とした地上からの調査・評価技術の整備を図った。③「深地層における工学技術の基礎の開発」では、堆積岩（軟岩）中での地下施設の仕様・レイアウトを決定し、地下施設を安全に建設・維持するための設計・施工計画を策定した。④「地下施設建設に伴う周辺地質環境への影響予測」では、地上および地下施設の建設に伴う地質環境の変化過程やその範囲について予察解析を行った。その他、地震観測などの地質環境の長期安定性に関する研究を行い、天然現象の特性を明らかにした。更に、一連の調査研究を通じて、第2段階以降における調査研究の課題を具体化した。

地層処分研究開発については、

- ① 処分技術の信頼性向上
- ② 安全評価手法の高度化

について実施し、第1段階で取得した地質環境データを活用し、幌延を事例とした人工バリアの試設計や予備的な物質移動解析を実施し、人工バリアや処分場に関わる工学技術や地質環境調査から安全評価に至る一連の調査解析技術の整備を図ってきた（藤田ほか、2007）。

具体的には、①「処分技術の信頼性向上」については、「第2次取りまとめ」（核燃料サイクル開発機構、1999a, b）において示された処分場設計全体設計フローの更新や人工バリアなどの設計手法の詳細化、並びに設計における地質環境条件の一般的な留意点や設計入力データ項目について整理すると共に、これらを踏まえて、幌延の地質環境条件を事例とした場合の施設設計、人工バリア設計および閉鎖設計

を通じて、「第 2 次取りまとめ」で採用された設計手法が適用可能であることを示した。②「安全評価手法の高度化」については、「第 2 次取りまとめ」において示された安全評価手法を実際の地質環境に適用するために必要な具体的な作業フローとして構築した。これに基づいて、幌延の地質環境条件を一例として物質移動解析を行い、これらの検討を通じて、「第 2 次取りまとめ」の手法を堆積岩地域に適用した場合の調査から解析・評価に至る一連の方法論およびその過程で得られるノウハウや知見、調査や解析上の留意点を整理した。また、一連の解析・評価を実施するために必要な基礎データを室内試験などにより取得を進めた。

第 2 段階の調査研究は、平成 17 年 11 月に坑道掘削に伴って開始し、現在、第 2 段階の途上にある。第 2 段階では、以下の 4 つの目標を設定し（核燃料サイクル開発機構、2005）、調査研究を進めている。

- (1) 坑道の掘削（地下施設の建設）に伴う一連の深部地質環境の調査・解析・評価技術の整備
- (2) 深地層における工学技術の基盤の整備
- (3) 地層処分技術に関する工学技術の有効性の確認
- (4) 安全評価手法の適用性の確認

また、「全体計画」（資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構、2009）のフェーズ 2（平成 24 年度頃まで）における達成目標を考慮し、大規模地下研究施設の建設を通じて、第 1 段階の調査研究成果と調査技術の適用性の評価、処分事業の実施主体が行う概要調査から精密調査の過程（主に精密調査における地下施設建設段階）で必要となる地質環境調査技術の研究開発、施設建設および処分場で適用する工学技術の研究開発、安全評価技術の研究開発を実施している。

標記の目標に対して第 2 段階の調査研究では、坑道掘削と並行して地質環境情報の取得を継続しており、断層や割れ目帯、酸化還元境界などの重要な調査研究対象が認められた地点においては、必要に応じて坑道から小さな坑道やボーリング孔などを掘削し、詳細な調査研究を実施することとしている。平成 22 年度までに、換気立坑については深度 250m、東立坑については深度 210m まで掘削を進め、その過程で坑道の壁面観察や切羽での簡易原位置測定などを実施し、地質環境データを取得した（日本原子力研究開発機構、2010a）。これらの調査研究により取得する情報に基づき、第 1 段階で構築した地質環境モデル（数 km～数百 m 四方のスケール：施設スケール）の妥当性や調査・解析手法の有効性を確認する予定であり、これまでの情報に基づいて、地上からの地質環境調査に必要な調査解析技術や得られる情報の品質や不確実性を把握した。また、坑道掘削に伴う地質環境の変化（坑道掘削影響）を実際に把握するための原位置測定を 140m 調査坑道で実施しており、地下施設の建設過程における周辺地質環境の変化の過程や程度などについて把握した（日本原子力研究開発機構、2010a）。更に、新たに取得する地質環境情報に基づき、地質環境モデル（数十 m～数 m 四方のスケール：坑道スケール）を構築し、坑道を利用した調査研究段階（第 3 段階）において展開する調査坑道周辺の地質環境を推定する予定である。

これらの調査研究と合わせて、第 2 段階までに取得する地質環境に関する情報を踏まえて、坑道を利用した調査研究の課題を抽出し、坑道を利用した研究段階における調査研究計画を詳細化および具体化する予定である。これまでに取得された情報に基づいて、深度 350m までの地下施設のレイアウトと調査研究計画を策定した（日本原子力研究開発機構、2010b）。一方、坑道の設計・施工・維持・管理に関わる工学技術については、情報化施工技術の有効性を確認すると共に、高度化を行う予定であり、坑道掘削に合わせて情報化施工計画の運用を実施している。また、地層処分研究開発については、140m の

調査坑道の施工過程において、低アルカリ性セメントを用いた吹付けコンクリートの施工試験（日本原子力研究開発機構，2010a）や低アルカリ性セメント材料のグラウト材としての原位置適用性試験（日本原子力研究開発機構，2010c）などを実施し，適用性を確認した。

4. 平成 26 年度までの研究技術開発計画

4.1 地質環境調査技術の開発

第 2 期中期計画(5 カ年)における深地層の科学的研究および地層処分研究開発の計画概要を述べる。各項目の実施場所および実施時期に関わる工程を表 4.1.1 に示す。

表 4.1.1 中期計画期間における施設整備と研究工程(地質環境調査技術の開発)

章・項番号	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度	H26年度
換気立坑整備		深度250m~350m	深度350m~380m		
東立坑整備		深度250m~350m			深度350m~380m
西立坑整備		深度0m~350m			深度350m~365m
250m坑道整備		槽設備等設計・製作			
350m坑道整備					
4.1.1 地上からの調査技術の適用性確認と地質環境モデルの構築・更新		<ul style="list-style-type: none"> 換気立坑における壁面地質観察作業 換気立坑集水リング, 壁面湧水の採取・分析 東立坑における壁面地質観察作業 東立坑集水リング, 壁面湧水の採取・分析 250m調査坑道の壁面地質観察 250m調査坑道の壁面湧水, ホーリング孔からの地下水の採取・分析 250m調査坑道における初期地圧測定(期間中2地点で実施) 孔間水理試験装置への物質移動試験機能の付加及び250m調査坑道における孔間水理試験, 物質移動試験 有機物回収試験 	<ul style="list-style-type: none"> 350m調査坑道における壁面地質観察 壁面湧水, ホーリング孔からの地下水の採取・分析 初期地圧測定 有機物回収試験 350m調査坑道における孔間トモグラフィ探査, 単孔水理試験 	<ul style="list-style-type: none"> 350m調査坑道における原位置岩盤物性試験 単十割れ目を対象とした物質移動試験 単孔・孔間水理試験 岩盤ブロックの開削 割れ目を対象とした物質移動試験 水理・物質移行試験装置の整備 孔間トモグラフィ探査 単孔・孔間水理試験の実施 健全部を対象とした物質移動試験 単孔水理試験 オーバーコアリング 	
4.1.2 地下施設建設に伴う地質環境変化の調査評価技術の開発		<ul style="list-style-type: none"> 140m調査坑道周辺の比抵抗特性, 弾性波特性, 水圧, 水分量の定期観測 水圧・水質モニタリング/化学緩衝能評価試験及び試験機器の開発 地球化学/微生物通成解析手法の開発 250m調査坑道における水平坑道掘削影響試験, 弾性波トモグラフィ 透水試験装置製作 閉鎖水圧測定装置製作 水分量計測装置製作 水圧・水質モニタリング装置製作 	<ul style="list-style-type: none"> 弾性波トモグラフィ 比抵抗トモグラフィ 地中変位計測設置 埋設ひずみ計測設置 透水試験装置設置 閉鎖水圧測定装置設置 水分量計測装置設置 水圧・水質モニタリング装置設置 水理・地球化学観測 閉鎖水圧観測装置の製作, 設置 水圧・水質連続モニタリング装置の改良, 設置 	<ul style="list-style-type: none"> 立坑掘削影響試験 弾性波トモグラフィ(立坑掘削前後) 透水試験(立坑掘削前後) 埋設ひずみ計測設置(立坑掘削前) 	
4.1.3 地質環境の長期変遷評価技術の開発		<ul style="list-style-type: none"> 地上からの調査で取得される地質環境データに基づく概念モデルの構築手法の提示 地震活動・断層運動が地質環境に与える影響の程度等を把握するための調査・解析 隆起・沈降域等の変遷とそれらの速度, 地質構造の発達過程を把握するための調査・解析 地下水流動等の長期変遷に関する数値解析技術の構築(3D解析技術, モジュール化) 地下施設で取得される地質環境データをを用いた長期変遷評価の考え方の提示 	<ul style="list-style-type: none"> 現地調査及び数値解析等に基づいた地質構造の発達過程の例示及び調査・解析手法の提示 地下施設を用いた調査で取得される地質環境データに基づいた解析モデルの境界/初期条件の修正, 解析モデルの更新, 及び構築した数値解析技術による地下水流動解析等の実施 		

4.1.1 地上からの調査技術の適用性確認と地質環境モデルの構築・更新

(1) 地質・地質構造の調査評価技術

【目的・概要】

地下水流動や地球化学環境、物質移動経路などの調査解析、地下施設レイアウトの検討の基盤となる地質構造モデルの構築に必要な技術を整備するため、坑道掘削時に得られる地質情報を用いて第1段階の地質構造モデルの妥当性確認、更新を行い、地質・地質構造に関する地上からの一連の調査研究手法の適用性を評価する。

第1段階では、研究所設置地区周辺を対象として物理探査、地表踏査およびボーリング調査を実施し、これらの既存の調査手法の組み合わせにより、大曲断層を事例として、数キロメートル以上の規模の断層の三次元分布を推定する手法を例示した(石井ほか, 2006)。また、地表踏査やボーリング調査の結果に基づき、岩盤中に分布する割れ目の地質学的性状(方向性・産状・成因など)を把握し、割れ目の連続性・連結性に関する概念を構築した(石井・福島, 2006)。割れ目が地下水流動に与える影響については、声問層中の割れ目は連続性・連結性に乏しく影響が小さいことや(舟木ほか, 2009)、稚内層において、断層運動によって引張割れ目が発達しやすい領域では、層理面に高角な断層が引張割れ目の派生を伴っており、それらが高い透水性を有することが明らかになってきた(Ishii et al., 2009)。しかし、現状では、地上からの調査データに基づく割れ目の三次元分布の予測に必要なデータの質や量が明らかになっておらず、今後の検討課題として挙げられている。割れ目の三次元分布を把握するための調査は、地表露頭や地下坑道壁面で得られる限られた範囲の割れ目データに依存し、坑道壁面観察においては地下深部の堆積岩を対象に割れ目の壁面観察の実施例が少なく、その壁面観察方法を整備する必要がある。

【実施内容】

①地下施設における地質調査(壁面地質観察・岩芯地質観察)

中期計画の全期間において第2段階の調査研究として、坑道掘削時に割れ目の壁面観察(声問層、稚内層)やボーリング孔を利用した岩芯地質観察・孔壁観察(声問層、稚内層)を実施し、それにより得られる割れ目の分布・連続性・連結性・方向性・幾何学的形状・地質学的産状などのデータを整理し(例えば、図4.1.1-1)、それに基づいて、第1段階で構築した概念と予測した地質分布の妥当性を確認する。さらに、その結果に基づいて、地上からの調査研究段階で実施した割れ目に関する一連の調査手法やモデル化・解析方法を体系的に整備するとともに、それらの適用範囲を明確にする。

中期計画後半では、第3段階の調査研究として、250m調査坑道と350m調査坑道およびそれらの坑道から掘削されるボーリング孔を用いた岩芯地質観察・孔壁観察(声問層、稚内層)を実施し、坑道周辺における地質分布を把握し、掘削影響を含む地質環境特性とその変遷の把握に資する情報を整理する。

②地質モデルの構築・更新

第2段階では、坑道掘削時の壁面地質観察およびボーリング孔を利用した岩芯地質観察・孔壁画像観察を継続し、得られた地質データを用いて地質構造モデルを必要に応じて確認し、主要な地下水の流動経路となり得る割れ目の三次元分布やネットワーク構造を再解釈するとともに、内部構造や組織、地質構造発達過程に関する情報を取得する。それら新規に得られるデータと既存データを統合し、各地質環境モデルや安全評価モデルの基盤となる地質構造モデルを年2回(上期末および下期末)更新する。な

お、更新の頻度は坑道の掘進に合わせて随時見直すこととする。

第3段階では、250m 調査坑道と 350m 調査坑道およびそれらの坑道から掘削されるボーリング孔から得られた地質データを基に、坑道周辺における地質構造モデルの構築・更新を行う。また、第2段階と第3段階を通して、地下施設や各原位置試験のレイアウトを詳細に検討するために、未掘削領域における主要な割れ目の分布を従来の決定論的な手法に加えて、確率論や地球統計学的手法、地質構造発達過程に基づいて予測する。

③地下施設における地質調査手法の体系化およびモデル化・解析技術の整備

主に中期計画前半において、壁面地質観察方法および地質分布の三次元モデル化手法を効果的に実施するために、地質観察からデータの解析・解釈、地質・地質構造モデル構築に至るまでの一連の方法論を品質管理・安全管理の観点を含めて、作業要領書として整備する。また、それらを汎用的な知識情報として分析・整理し、知識マネジメントシステム（KMS）に随時反映させる。

【構築される技術】

- ・ 割れ目を含む堆積岩に適用可能な壁面地質観察手法（品質管理・安全管理手法の構築を含む）
- ・ 堆積構造や断層・褶曲構造に起因する堆積岩中の割れ目の分布の不均質性を評価可能なモデル化・解析手法
- ・ 地質構造発達過程に基づく地質構造の分布予測手法

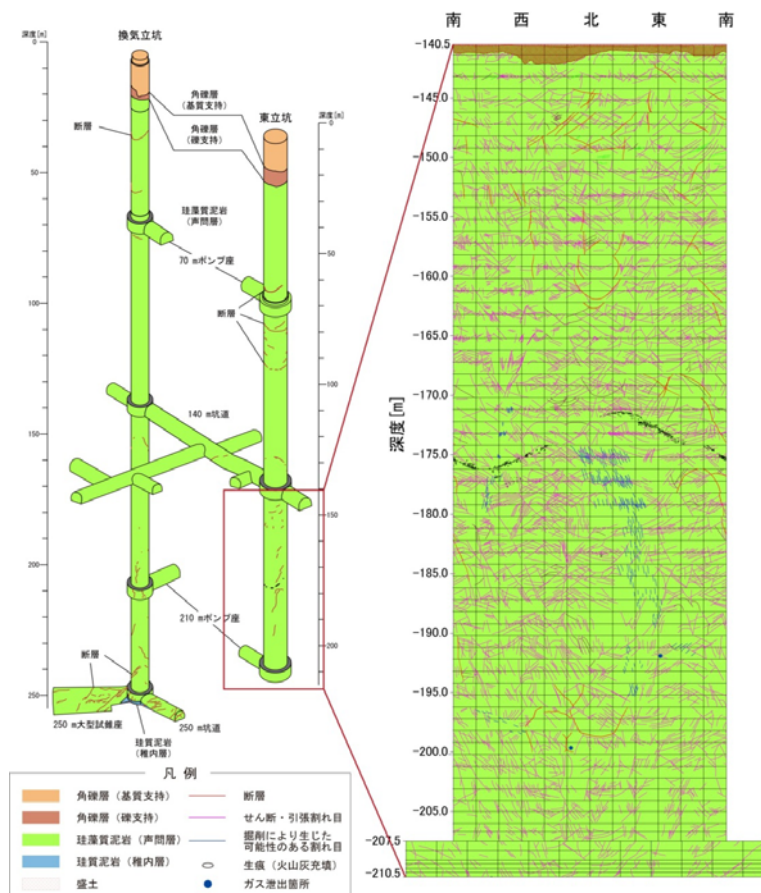


図 4.1.1-1 坑道壁面観察結果のとりまとめの一例

(2) 地下水流動の調査評価技術

【目的・概要】

地下深部における地下水流動を把握するための技術は、安全評価における物質移動解析や地下施設建設時の湧水量予測、地下施設の建設から施設閉鎖後までの周辺の地質環境における水理的な影響の評価などに反映される重要な研究開発項目である。地下水流動は、地形や地質構造、地表から地下への涵養量などの地質環境条件、それらを含む地質環境の長期的な変化などに影響を受ける。したがって、岩盤の水理特性や涵養量などの情報を取得するための調査技術や得られた情報に基づく水理地質構造の解釈・評価技術、これらに基づいて地下水流動を把握するためのモデル化・数値解析技術、さらに地下水の水質や同位体など地球化学的情報を利用した多面的なアプローチにより、解析結果の妥当性や調査・解析手法の有効性を評価するための技術を構築していく必要がある。

平成 21 年度までの研究開発においては、以下の項目を実施しそれぞれの知見、ノウハウを得ている。

- ・表層部から岩盤への地下水涵養量の把握を目的として、研究所設置地区およびその周辺にサンプル流域を選定し、気象、河川の流量と水質、土壌水分、地下水位などの観測システムを整備した。特に、積雪寒冷地においては、冬期の降水が積雪の形で地表に一時貯留されることや、土壌凍結により不浸透域が発生するなどの特有の現象があるため、これらを考慮した観測システムとした。
- ・観測データを用いて地下水涵養量の試算を行うとともに、観測手法の課題を整理した。また、表層地質の違いにより表流水の流量や水質に違いが生じていることや、予察的な地下水流動解析の結果が流域内の調査から得られた流出量と調和的であることを示した。
- ・第 1 段階の調査研究で得られた岩盤の水理特性などのデータに基づいて水理地質構造モデルを構築し、地下水流動解析を実施して研究所設置地区およびその周辺の地下水流動特性の評価を行った。また、地下施設の建設に伴い取得したデータに基づいて、声問層と稚内層の境界面の分布形状や各地層、断層および割れ目帯の水理特性に関して水理地質構造モデルの更新を行った。
- ・構築した水理地質構造モデルの妥当性の確認を目的として、立坑の掘削工程を模擬した湧水量の予測解析を実施し、実測値との対比を行った。その結果、透水性が高い水理地質構造としてモデル化された稚内層浅部で、湧水量が増加する傾向が示され、実測値の傾向と整合する結果が得られた。一方、湧水量予測の信頼性を向上させるには透水性に影響を及ぼす割れ目の三次元的な分布を考慮することが重要であるなどの知見を得た。
- ・第 3 段階の調査研究における岩盤の水理特性調査に適用する調査技術の開発として、140m 調査坑道から掘削したボーリング孔を用いて孔間透水試験を実施した。同試験において注水孔での圧力応答を異なる観測孔で取得できたことから、開発した孔間透水試験装置の基本的な性能を確認した。また、取得データの逆解析により孔間の岩盤の透水性分布を推定する数値解析手法の適用性を確認した。一方、試験区間に発生する脱ガスの対策や数値解析の最適化の方法などの検討課題を抽出した。

本中期計画においては、地上および地下施設を活用した調査を行い、岩盤の水理特性や涵養量などの情報を得るための調査技術の整備を図る。また、地下施設の建設に伴い取得されるデータを解釈した水理地質構造モデルの更新を継続的に実施し、更新したモデルに基づく地下水流動解析を繰り返し実施する。更新した水理地質構造モデルと第 1 段階で構築した水理地質構造モデルとの比較や地下水流動解析結果の妥当性の検討を通じて、地下水流動特性の評価を目的とした地上からの調査計画や調査・解析技術およびモデルの更新手法に関する有効性などを評価する。

【実施内容】

①表層における地下水流動調査手法の整備

地表部は、地下水の涵養域あるいは流出域であり、地下水涵養量（降水が地表から地下の岩盤に浸透する量）は地下水を流動させる駆動力として、深部岩盤を含めた広域の地下水流動を規定する要因の一つである。そのため、深部の地下水流動の評価に必要な、表層付近の地下水流動と地下水涵養量の把握を目的として表層水理調査を継続して実施する。特に積雪寒冷地固有の現象を考慮した観測機器の選定や取得されるデータの蓄積・評価を通じて、図 4.1.1-2 に示すような表層水理調査手法の整備と適用性の評価を継続する。

図中の水文学的手法（水収支法）による地下水涵養量算定で重要となる蒸発散量の算出については、気象観測要素から季節や地形、植生に応じた推定式を用いているが、どの推定式を用いるかによって算出値に年間 200mm 以上の違いがあるほか、同じ推定式を用いた場合でも気象観測項目のデータ処理方法によって年間 100mm 以上の違いが現れている。これらの問題に対して、図中の地下水工学的手法に追加する形で、2008 年度より設置箇所降水量、積雪水量、蒸発散量、鉛直浸透量等を直接観測できるライシメータによる観測を開始しており、各観測データを用いて水収支法における各観測項目の値や得られた涵養量の信頼性などについて評価を行う。

このように、第 2 段階では第 1 段階で整備した観測システムによる表層水理調査を継続し、地下水涵養量の算定に必要なデータの拡充、涵養量の年単位の変動幅などの評価を行う。また、第 1 段階で得られた流域ごとの涵養量に基づいた現地調査などにより、水理学的な境界である分水界の詳細な確認などを通じて、流域設定の妥当性の評価を行う。さらに、表層付近の地下水流動と植生、地質などとの関連などから、観測データに基づく水文諸量の空間分布の推定手法の検討を行う。これらの結果に基づき、地下水涵養量の調査・算定手法の信頼性を評価し、表層水理調査手法の整備を図る。

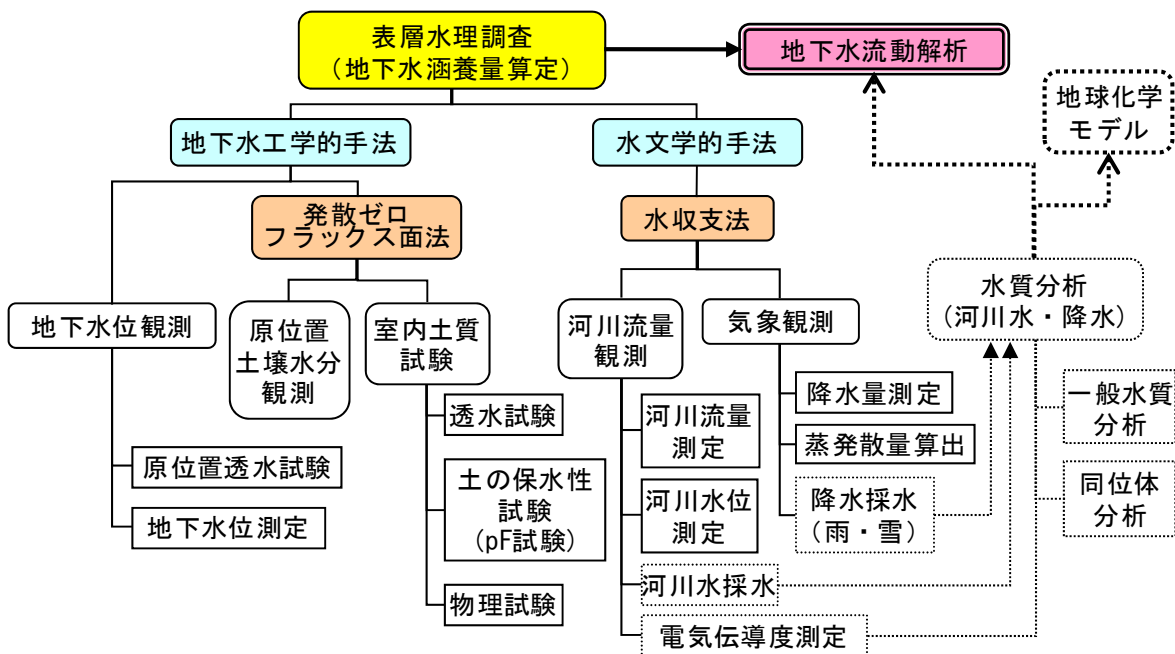


図 4.1.1-2 表層水理調査の体系

②地下施設における岩盤の水理特性調査

中期計画の全期間を通して第2段階の調査研究として、坑道の掘削と並行して実施する壁面観察により湧水を伴う割れ目の分布や性状に関する情報や湧水量の経時変化などの情報を継続して取得する。

また、主に中期計画後半には第3段階の調査研究として、350m 調査坑道から掘削したボーリング孔を用いて坑道スケール（数十 m～数 m 四方のスケール）を対象とした岩盤の水理特性を取得する。第1段階において、地上からの鉛直ボーリング孔を用いて実施した水理試験の試験区間長は概ね 10～100m 程度である。これに対し、坑道スケールを対象とした原位置試験では坑道内から傾斜ボーリング孔や水平ボーリング孔を掘削し、概ね数十 cm～数 m 程度の試験区間長で水理試験などを実施する。さらに、複数のボーリング孔を用いた孔間透水試験を実施し、孔間の岩盤の水理特性の三次元的な分布や透水異方性を把握する。このようにして得られた水理特性やその不均質性を決定づける要因（例えば地質構造による違い）についても検討を行い、坑道スケールを対象とした岩盤の水理特性を把握する手法を整備する。また、これらに必要な技術開発として、例えば溶存ガスの脱ガスに対処する透水試験装置・試験手順などの改良や透水試験データの解析技術の高度化などを実施する。

③水理地質構造のモデル化、解析技術の整備

②で述べた坑道の掘削に伴い取得されるデータを主に用いて、研究所設置地区とその周辺における水理地質構造の解釈を行い、その結果に基づく水理地質構造モデルの更新を行う。更新された水理地質構造モデルと第1段階で構築した水理地質構造モデルの比較を行い、後者のモデルの妥当性を確認することで水理地質構造モデル構築の手順や方法論を整備する。また、更新したモデルに基づく地下水流動解析を実施し、調査の進展に応じて更新した水理地質構造モデルによる解析結果と実測値の比較を行い、更新前と更新後で不確実性がどの程度低減されたか、その理由などについて評価を行う。具体的には全水頭分布や立坑からの湧水量などの実測値と地下水流動解析結果を比較し、モデルを更新したことで実測値の再現性がどの程度向上したかについて評価する。実測値の再現性の向上は地下水流動解析結果の信頼性が向上したことを意味し、地下水流動特性のうち、岩盤の透水性分布や動水勾配分布に関する不確実性が低減したと解釈できる。これにより、調査（情報）量と地下水流動特性の不確実性との関係を明らかにすることが期待できる。

また、第3段階の調査研究で実施する原位置試験の実施領域（250m 調査坑道および 350m 調査坑道）の地下水流動特性を解析によって推定し、原位置試験仕様の詳細化や具体化などに反映する。その際、上述のようにこれまでに地下水流動解析を実施してきたスケールより詳細なスケール（坑道スケール）のモデルを必要に応じて構築する。

【構築される技術】

- ・地下水流動を把握するための地上からの調査計画や調査技術および水理地質構造のモデル化や地下水流動解析技術
- ・水理地質構造モデルに記述される情報量と地下水流動解析で得られる地下水流動特性の不確実性の関係に関する評価手法
- ・溶存ガスを含む地下水環境における坑道スケールを対象とした岩盤の水理特性調査技術

(3) 地球化学特性の調査評価技術

【目的・概要】

地下施設周辺の地下水・岩石の地球化学特性については、性能・安全評価上重要なパラメータとして pH, 酸化還元電位 (Eh) や塩分濃度を理解するとともにその短期・長期的な変化に関わるプロセス・メカニズムの調査解析手法を開発する必要がある。平成 21 年度までの研究開発では、以下のような成果および知見が得られている。

- ・地表からの高密度電気探査による岩盤比抵抗分布の調査, ボーリング孔を利用した採水調査や可視化ソフトウェアを利用した解析などにより, 幌延地域に化石海水が分布することを明らかにし, 地層や地下水水質の空間分布, 地質構造や地下水流動状態との関連性を理解する技術を構築した (太田ほか, 2007)。
- ・地上からのボーリング調査で得られる情報を利用して, 多変量解析やマスバランス解析など数学解析と鉱物データを用いた水-鉱物反応に関わる熱力学解析を併用して, 幌延地域の地下水水質が塩分濃度の異なる地下水の混合と岩石-地下水反応により形成されていることを明らかにし, 地下水の水質分布, 形成プロセスを整理した地球化学モデルを構築した (Yamamoto et al., 2006 ; Hama et al., 2007)。
- ・地下施設坑道内に設置された集水リングおよび坑道から掘削したボーリング孔を利用して, 第 1 段階の調査研究で予測した深度 210 m 程度までの地球化学モデルの妥当性を確認, 更新した。
- ・深度 140 m 調査坑道に掘削したボーリング孔 (掘削長 100 m) を用いて, 原位置における水圧・水質モニタリング装置を開発した。
- ・微生物生態系を把握するとともに, 長期的な環境形成に関わる微生物の役割や処分場閉鎖後の環境回復能力に関わる試験装置の開発を行った (Shimizu et al., 2006 ; 日本原子力研究開発機構, 2009)。

以上の調査研究過程で抽出された課題として, 低透水性・高溶存ガス濃度の堆積岩を対象とした調査における脱ガスの影響を低減させるための技術開発や大規模地下施設の建設に伴う環境擾乱やその回復過程に関わる調査手法の構築などが挙げられた。本中期計画においては, 新規情報を利用して第 1 段階の調査技術の適用性確認を継続するとともに, 地下坑道における調査機器の改良, 適用性確認, 岩盤の化学的緩衝能力などに関わる研究開発を行っていく。

【実施内容】

①第 1 段階で構築した地球化学モデルの確認, 更新, 地上からの調査技術の適用性確認

中期計画の全期間を通して第 2 段階の調査研究として, 立坑に設置された集水リング, 壁面湧水, ボーリング孔等から採取される深度 350m までの地下水を対象として水質分析を行い, 立坑掘削時点の地下水水質の深度分布を把握する。また, 地表からの調査で用いた調査手法 (高密度電気探査等) の妥当性を評価する。地下水の水質, 同位体組成, ガス, 微生物などの三次元分布と水理地質構造, 地下水流動との相互関係などを把握するとともに, 第 1 段階で予測した深度 350m までの水質分布について, 予測の妥当性を確認し地球化学モデルを更新する。

②坑道内採水装置の開発と地下水の pH, 酸化還元電位, 溶存ガス組成, 有機物/微生物群集組成の把握 第 3 段階の調査研究として, 地下坑道において pH, Eh 値を取得するための採水・観測装置を製作し,

その適用試験を行う。採水・観測装置については、中期計画後半の深度 350 m 調査坑道において適用可能な耐圧性能を備え、溶存ガスの影響を極力排除した状態で計測可能な装置の開発を行う。350 m 調査坑道からボーリング孔を掘削し、観測装置を設置、連続観測試験を実施し、観測技術の適用性を確認する。観測装置は、坑道建設が周辺地下水の地球化学特性に与える影響を把握する目的も兼ねるため、調査坑道建設後、可能な限り迅速にボーリング孔を掘削して設置する。

③地球化学特性の形成に関わる微生物、コロイド／有機物の影響評価

第 1 段階で掘削された地上からのボーリング孔と 140 m, 250 m 調査坑道および 350 m 調査坑道から掘削されたボーリング孔において、限外ろ過やサイズ排除クロマトグラフなどの手法により地下水中のコロイド相のサイズ分類、主組成分析、ろ過液の微量元素濃度を把握するとともに、溶存有機物の起源や蛍光特性、分子サイズなどコロイド／有機物、微生物に関する基礎情報を取得する。

また、岩石、地下水、コロイド／有機物、微生物間の相互作用など地球化学特性に関与する生物化学プロセスや化学条件に応じたコロイド／有機物の存在状態に関わる概念モデルを構築する。また、140 m, 250 m 調査坑道および 350 m 周回坑道において掘削されたボーリング孔に適用可能な原位置試験装置を開発・設置し、pH、酸化還元電位、溶存酸素濃度、水質、ガス濃度、微生物量および種組成等の変化についてデータを取得し、岩盤および地下水が有する化学的緩衝能力に関わるシミュレーション解析を実施し、施設建設時から閉鎖後の環境回復過程の予測評価を行う。溶存有機物特性については、平成 21 年度までに開発した地下水中の有機物回収装置を用いて、有機物試料を濃縮採取し、その基本特性についての評価技術を確立する。

【構築される技術】

- ・地下水の地球化学特性に関わる地上からの調査技術とその適用手法
- ・性能・安全評価の事例研究に必要なインプットパラメータの提供
- ・堆積岩・塩水環境を念頭に置いた坑道建設段階で、適用可能な地下水の地球化学特性調査機器と調査方法および適用手法
- ・周辺地球化学環境の短期的および長期的な変化やその要因を把握するためのモデル化手法
- ・地球化学特性の形成に関わる微生物の影響評価技術
- ・地下環境中の有機物特性の評価技術

(4) 物質移動特性の調査評価技術

【目的・概要】

地下深部における物質移動プロセス・メカニズムについては、物質の移行経路（岩石マトリクスや岩体中の不連続構造など）における岩石鉱物への収着／脱着、岩石マトリクス内への拡散、コロイド／有機物・微生物による収着・輸送、微生物による核種取込など、複数の現象の相互関連やそれぞれの重要度を評価する技術が必要である。そのため、これらの現象について、室内試験や深度 350m までの建設が終了した地下施設の研究坑道における原位置物質移動試験で主要なプロセス・メカニズムを理解するための手法を体系的に整備する。また、地質・地質構造、岩盤中の水理、地下水の地球化学特性などの各分野から得られる地質環境特性に関する情報を統合して、天然バリアの安全機能を評価するために必要な物質移動場の概念モデルを構築する。人工バリアの評価については、「4.3.3 処分システムの施工技術開発・品質確認」に後述する。ここでは、幌延地域における物質移動場の概念構築や原位置試験の計画について述べ、それらの結果を用いた現象に関わるプロセス・メカニズムのモデル化や物質移動解析手法の開発については、安全評価との連携を考慮して「4.4 安全評価手法の高度化」に後述する。

平成 21 年度までの物質移動に関わる調査研究においては、地層中の物質移動・遅延評価として、これまでに得られた地質環境特性情報、岩芯試料（ボーリングコア）、地下水等を用いて、拡散係数や収着分配係数、物質移動経路などの物質移動に関する情報や知見を蓄積すると共に、マトリクス部への拡散については、深度や地層（声問層および稚内層）の深度変化や岩相の不均質性に起因する間隙率の違いを考慮することにより、「第 2 次取りまとめ」（核燃料サイクル開発機構、1999 a）において分類した新第三紀堆積岩（泥岩・凝灰岩類）に対する拡散係数（実効拡散係数）と間隙率との関係に適合することを示し、間隙率の関数として拡散係数を表現できることを確認している（下茂ほか、2003, 2004；核燃料サイクル開発機構、2005c）。様々な調査で得られた地質環境情報に基づいて物質移動解析に用いる各種パラメータ（移行経路における実流速や移行距離等）を設定し、物質移動解析におけるこれらのパラメータの感度や解析のノウハウを整理し、調査へのフィードバックを行ってきた。その結果として、幌延地域においては、

- ・ 稚内層および声問層が極めて高い物質移行の遅延効果を示す。
 - ・ 稚内層では、割れ目帯（石井・安江、2005）（後に小断層帯として再定義）（石井・福島、2006）が優勢な移行経路として機能する可能性がある。
- ことなどが示された（太田ほか、2007）。

一方で、これらの調査研究を通して、解析に用いる岩石毎の移行経路の概念（多孔質媒体や亀裂性媒体等）の構築に必要な割れ目帯の分布や水理特性情報を取得すること、物質移動経路における地下水の実流速や溶解度、分配係数、拡散係数、それらの係数に関わる収着・遅延プロセス・メカニズム、コロイド／有機物・微生物とアナログ元素との相互作用などが、以降の課題として挙げられ、原位置におけるトレーサー試験の活用などによりこれらの物質移動メカニズムを評価していく必要がある。これらの評価を、実施する試験毎に後述の「4.4 安全評価手法の高度化」における物質移行解析等に順次反映し、そこで得られた結果を段階的に実施する試験へ順次フィードバックすることで、装置開発を含む物質移動試験技術や方法論等の改良・高度化を進めていくことも必要である。また、断層・褶曲構造の形成と成長、侵食・堆積作用、隆起・沈降、気候変動、海水準変動などの自然現象に伴う物質移動特性の長期的な変化の把握は国際的な技術課題の一つであり、古水理地質学的手法によって得られる研究項目との

相互連携により、評価していく必要がある。さらには、地層処分事業・規制の技術移転の観点から、原位置試験から解析・評価に至るまでの一連の方法論の整備のほか、制約条件下での試験レイアウト・項目・数量などの最適化や得られたデータの品質管理・評価手法の構築を図ることも重要な課題である。

【実施内容】

①原位置物質移動試験

第3段階の原位置試験として、250m 調査坑道（図 4.1.1-3）および 350m 調査坑道（図 4.1.1-4）において原位置物質移動試験を実施する。250m 調査坑道における原位置物質移動試験は、掘削するボーリング孔と下記「③原位置物質移動試験手法およびモデル化・解析手法の整備・構築」で整備する物質移動試験設備を利用した予察試験と位置付けて実施する。試験実施においては、下記「③原位置物質移動試験手法およびモデル化・解析手法の整備・構築」で開発する原位置試験実施箇所の選定手法を利用する。また、予察試験中および終了後に、予察試験実施結果から原位置試験実施箇所の選定手法開発へのフィードバックを行う。原位置試験では、透水性の異なる地質構造（割れ目帯や健岩部等）を対象に、割れ目帯では移流・分散やマトリクス拡散現象、健岩部では拡散を把握するための複数孔間のトレーサー試験を主に実施し、試験手法の適用性を確認する。また、350m 調査坑道での試験に向けた装置や方法論の改良を実施するとともに、350m 調査坑道における物質移動試験計画（試験場所、レイアウト、調査項目・数量等）の策定・最適化・合理化のためのボーリング調査（地質、水理、地下水の地球化学特性、岩盤力学特性等の把握）を 250m 調査坑道および 350m 調査坑道において実施する。350m 調査坑道における原位置物質移動試験では、下記「③原位置物質移動試験手法およびモデル化・解析手法の整備・構築」および上記の 250m 調査坑道における原位置物質移動試験等により開発・構築された手法を用い、単一割れ目・割れ目帯・健岩部における移流・分散・拡散に関わる各種パラメータの取得および物質移動特性の把握をそれぞれ開始する。このうち、健岩部における拡散試験においては、後述の「4.4.1 人工バリアおよびその周辺岩盤を対象とした物質移行挙動評価」と連動して、原位置でのトレーサー試験を行う。なお、350m 調査坑道における原位置物質移動試験では、各種パラメータの取得や物質移動特性の把握の大部分は平成 27 年以降を想定している。また、下記「③原位置物質移動試験手法およびモデル化・解析手法の整備・構築」で整備・構築されたモデル化・解析手法を用いて試験対象空間である地下施設近傍の物質移動特性についての評価を行う。

また、(3) 地球化学特性の調査評価技術(③地球化学特性の形成に関わる微生物、コロイド/有機物の影響評価)で得られた基礎情報に基づき、原位置試験環境下でコロイド/有機物、微生物を添加したアナログ元素との反応試験を実施し、微量元素に対するコロイド/有機物・微生物の収着、錯体形成能力、および取込などに関わる評価方法を構築する。それらの結果に基づいて、優先的に研究が必要なコロイドサイズ、種類、化学条件などを明確にする。

②物質移動モデルの構築・更新

下記「③原位置物質移動試験手法およびモデル化・解析手法の整備・構築」と、250m 調査坑道および 350m 調査坑道における原位置物質移動試験により取りまとめられた知見や、前述の「4.1.1(1) 地質・地質構造の調査評価技術」、「4.1.1(2) 地下水流動の調査評価技術」、「4.1.1(3) 地球化学特性の調査評価技術」で取得される地質環境特性情報に基づき、ブロックスケールからサイトスケールまでの各スケール

ルにおける地質環境特性の概念化を主体とした物質移動モデルの構築を行う。350m 調査坑道における原位置物質移動試験では、各種パラメータの取得や物質移動特性の把握の大部分は平成 27 年以降を想定しているため、平成 26 年度までは、段階的に得られた地質環境特性情報に基づいた物質移動モデルの構築を順次行う。これらを基礎情報とした定量的な物質移動モデルの構築を、概念的なモデル構築に引き続き行う。

③原位置物質移動試験手法の体系化および試験装置、モデル化・解析技術の整備

主に中期計画後半に、地下施設の研究坑道を利用した原位置物質移動試験手法の体系化および試験装置、モデル化・解析技術の整備を行う。ここでは、原位置物質移動試験実施箇所の選定手法、および取得すべき物質移動特性情報に適した原位置試験方法の選択手法の整備も併せて行う。試験手法としては、具体的には、まず既存情報を利用した原位置物質移動試験対象となる地下空間の地質環境特性（割れ目帯分布、水理地質構造等）の推定、350m 調査坑道における物質移動試験計画の策定・最適化・合理化のためのボーリング調査などにおけるコア観察結果や各種物理・流体検層結果を用いた対象地下空間の地質環境特性情報の更新・付加等が必要である。また、これらに続いて、前述の調査ボーリング孔を利用した二次元・三次元トモグラフィ探査（弾性波トモグラフィ、比抵抗トモグラフィ、音響透水トモグラフィ等）・水理試験結果による対象地下空間の水理地質構造と不均質性の評価、取得情報のとりまとめによる対象地下空間の三次元地質環境特性モデルの構築等を実施する必要もある。このような項目に加え、取得すべきパラメータに適した原位置物質移動試験方法の選択、選択した原位置物質移動試験に適した試験実施箇所の選定等といった原位置試験実施までの一連の過程も含め、試験手法およびモデル化・解析手法として整備する。

また、250m 調査坑道に掘削するボーリング孔を利用して、原位置物質移動試験環境を整備するとともに、大量のガス・湧水を胚胎する透水性亀裂を含む堆積岩系岩盤である幌延地域の地質環境特性に適用可能な原位置物質移動試験装置・設備の開発・整備を行う。原位置試験設備は、差圧により発生するガスや湧水に起因する岩盤内の圧力減少や地質環境特性の変化を防止するため、原位置の圧力・化学・物性条件を維持可能な装置・設備とする。幌延地域においては、これまでの調査研究結果から、地下施設の 250m 調査坑道以深ではボーリング孔の孔壁が崩壊し、ボーリング孔が自立しない可能性が考えられる。そのため、ガス・湧水の発生、ボーリング孔の崩壊などのリスクに対処するための方法論についても原位置試験手法と合わせて整備する。

【構築される技術】

- ・原位置物質移動試験手法およびモデル化・解析手法
- ・透水性亀裂を含む堆積岩系岩盤に対応可能な原位置物質移動試験装置（ガス、湧水対策を含む）
- ・堆積構造、亀裂のネットワーク構造、亀裂面の粗さ、亀裂充填物等に起因する物質移動経路の不均質性を評価可能な統合的な地質環境調査技術
- ・原位置物質移動試験計画の策定・合理化手法（ガス、湧水、崩落などのリスク対策を含む）

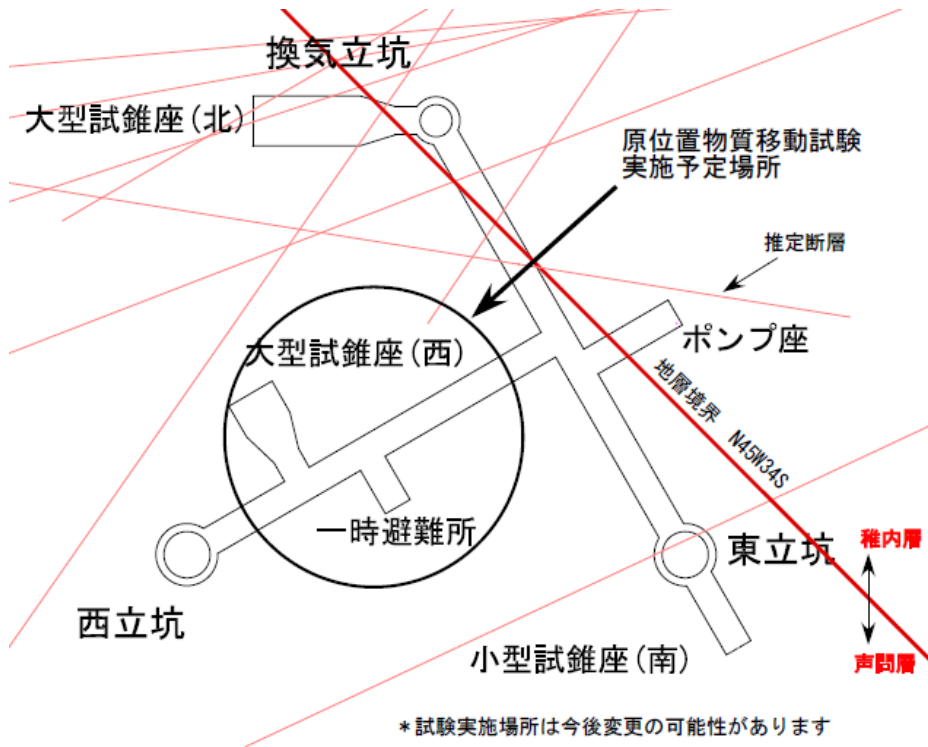


図 4.1.1-3 250m 調査坑道における原位置物質移動試験実施予定場所

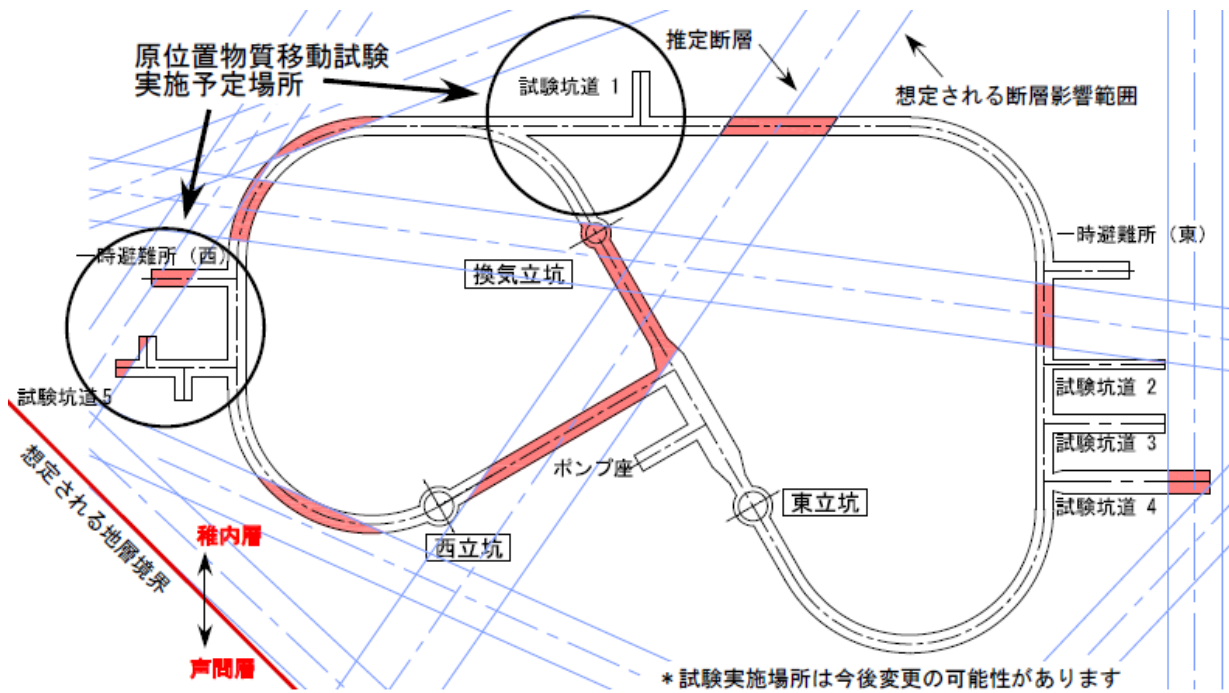


図 4.1.1-4 350m 調査坑道における原位置物質移動試験実施場所

(5) 岩盤の熱・力学特性の調査評価技術

【目的・概要】

岩盤の熱・力学特性については、坑道掘削時（第2段階）および調査坑道から特定の試験目的で掘削する試験坑道を利用した調査研究（第3段階）を通して第1段階に構築した岩盤力学モデルの妥当性を評価する。また、地上からの調査段階で整備した岩盤力学特性の調査・評価技術の有効性を評価し、一連の方法論として成果をとりまとめる。坑道掘削時においては、掘削影響領域が評価できる体系的な方法論を提示するために、段階的に岩盤の力学物性や三次元応力状態が把握できることを例示する。また、坑道掘削時および調査坑道から特定の試験目的で掘削する試験坑道を利用した調査研究で必要となる調査・解析などの要素技術の改良、高度化を進める。また、熱特性については、既存の物性値を外挿している未取得パラメータを取得する。

平成21年度までの岩盤の熱・力学特性の調査評価技術に関する研究開発においては、以下のような成果・知見が得られている。

- ・第1段階では、数kmエリア内の新第三紀堆積岩の力学特性を把握する技術の検討を行ってきた。その結果、岩盤物性の分布についてはボーリング孔を使用した物理探査結果と室内試験結果を組み合わせることにより、幌延地域に分布する珪質岩のような岩相変化に乏しい岩盤でもその不均質性を把握した上で岩盤物性を評価することが可能であること、応力状態については不連続性岩盤に比べ局所的な変化が小さいことを示し、研究所設置地区およびその周辺は、力学的な観点から3つのゾーンで区分可能であることがわかった（丹生屋・松井，2006）。
- ・岩盤の熱特性に関して、モニタリング装置の計測の結果から、地温勾配は深度に対して線形近似できることが明らかとなり、深度500mで30℃程度であった（松井ほか，2005）。また、コアを用いた熱伝導率、比熱、線膨張係数はゾーン1とそれ以外の区分として評価でき（山本ほか，2004）、熱伝導率に関しては25℃、比熱は30℃、線膨張係数は40℃での相関式をそれぞれ算出し（松井ほか，2005）、幌延を例とした熱特性に関する設計用の物性値を設定した（藤田ほか，2007）。
- ・第2段階では、坑道の掘削時の各種ボーリング調査、先行ボーリング調査のボーリングコアを用いた室内試験から得られた有効間隙率・静弾性係数、一軸圧縮強さ、単位体積重量等の結果と第1段階の調査結果との比較では調和的であることが確認された。
- ・140m調査坑道で実施した、水圧破碎法による三次元初期地圧の結果から、浅部の三次元応力状態の把握と声問層を対象とした軟岩における初期地圧測定手法の適用性について提示した（中村ほか，2009，2010）。
- ・岩盤力学に関する調査機器開発として、光ファイバーを用いた地中変位計を地下施設内に設置し（柏井ほか2009）、原位置での適用性試験を実施し有効性を確認し実用化を図った。

【実施内容】

本中期計画においては、同様な調査試験を引き続き深部岩盤に対して実施する。

①第1段階で予想した力学特性の妥当性の評価

岩盤深部の力学特性を把握するため、深度250m、350mに展開する調査坑道および250m以深の立坑から任意の方向に掘削したボーリング孔から得られるボーリングコアを用いて室内試験（一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、圧裂引張試験）を行う。得られた情報に基づき、第1段階で構築した岩盤力学概念

モデルの妥当性の評価を行い、各深度を対象とした評価手法の方法論を提示する。

②深度 250m, 350m 調査坑道を対象とした初期地圧の把握

深度 250m, 350m における調査坑道よりボーリング孔を掘削し、水圧破碎法、円錐孔底法、埋設ひずみ法等により初期地圧測定を実施し深部岩盤の三次元初期地圧を把握する。さらに、これらの結果より、声問層、稚内層の様な軟質な岩盤を対象とした初期地圧手法の適用性を評価する。

③情報化施工で実施される地中変位・支保部材の応力測定結果を用いた再現解析（順解析と計測結果の比較）。

解析は、東立坑 220m, 370m の 2 断面、換気立坑 280m, 310m の 2 断面および 250m 調査坑道の 2 断面（東連絡坑道 1 所、西連絡坑道 1 箇所）、350m 周回坑道の水平坑道掘削影響試験の 2 断面で実施し、ステップ管理計測結果との比較検討を行い堆積岩における岩盤力学モデルの見直し、および解析評価技術の確立を図る。なおこの解析結果は、東立坑 370m, 250m 調査坑道、350m 調査坑道で実施される掘削影響試験結果の解釈にも利用する。

④熱-水-応力連成解析のための熱特性の把握

熱-水-応力連成解析でこれまで外挿してきた熱特性について、深度 350m に展開する水平坑道において岩盤、支保工の熱物性（熱伝導率）を原位置にて計測する。また、室内試験によって含水比をパラメータとして熱伝導率、比熱をホットディスク法、点熱源法などにより取得する。

【構築される技術】

- ・新第三紀堆積軟岩の力学特性に関して、第 1 段階で用いた地上からの調査技術の適用性を例示する。また、地上からの調査結果とボーリングコアを用いた室内試験の結果を合わせ、地下施設の設計に必要なインプットパラメータを示す。
- ・新第三紀堆積軟岩を念頭に置いた坑道掘削段階で、適用可能な力学特性の空間分布の調査手法および適用事例を示す。
- ・坑道掘削が行われる各調査坑道の深度に対して、地上からの調査段階および坑道掘削段階の調査結果に基づき、堆積軟岩の力学特性を段階的に調査・評価するための体系的な方法論および岩盤力学モデルの構築の方法論を例示する。
- ・熱-水-応力連成解析で用いる熱特性に関するインプットパラメータを示す。

4.1.2 地下施設建設に伴う地質環境変化の調査評価技術の開発

(1) 施設建設が広域領域に与える影響評価技術の開発

【目的・概要】

処分事業においては、処分場を設置する前の調査・解析で予測された地下水流動や地球化学特性などの地質環境条件が処分場の建設により擾乱をうける程度や、処分場の閉鎖後、擾乱をうけた地質環境が元の状態に回復する程度・時間などの知見を処分場の管理や安全評価、周辺の環境保全などに適切に反映することが重要と考えられる。しかしながら、これらの地質環境の擾乱・回復に関わる知見は十分ではない。このような地質環境の変化を定量的に評価する技術の整備を目的として、地下施設の建設により施設周辺の比較的広範囲に及ぶと考えられる影響を評価するために必要な計測・解析技術を開発する。

平成 21 年度までは、140m 調査坑道と深度 220m までの東立坑、深度 250m までの換気立坑の建設過程でその影響の有無を確認するため、地上からの既存ボーリング孔における地下水の水圧、水質の観測や地下施設周辺を対象とした定期的な岩盤の比抵抗の観測、遠隔監視システムの開発などを行ってきた。その結果、地下水圧の低下領域や水質の変化領域が立坑から約 200m 程度の平面的範囲に及び、今後、その領域が拡大する可能性があることや変化領域が水理地質構造と密接に関連していることなどが明らかになった。

本中期計画では既存ボーリング孔における観測を継続実施し、深度 350m までの施設建設に伴う中長期的な水圧・水質変化（影響領域やその広がり、変化量など）を把握する。さらに、観測機器の適用性を示すとともに、施設建設における影響を評価する長期観測および解析技術の手順や考え方、ノウハウを整理する。また、比抵抗探査や遠隔監視システムの適用性について評価する。

【実施内容】

①岩盤の水理特性・地下水流動特性に対する影響評価

中期計画の全期間を通して、研究所設置地区（約 3km 四方）およびその周辺を対象として、地上からの既存ボーリング孔（図 4.1.2-1）を用いた地下水の水圧の長期モニタリングを継続して実施し、施設建設に起因すると考えられる水圧変化の程度や範囲、水理地質構造との関連性などを確認する。また、効果的・効率的な計測機器の校正やデータ管理方法などの検討を行い長期観測技術としての整備を図る。

さらに、地下施設の建設が地下水流動特性（全水頭分布や流動経路など）に与える影響を評価するための地下水流動解析手法の構築を行う。施設建設に伴って取得される情報を反映した地質環境モデル（4.1.1 参照）を更新し、新たに得られる情報とそれによるモデルの更新過程を整理する。また、更新したモデルを用いて地下施設の掘削を模擬した地下水流動解析を行い、解析で得られた水圧分布と既存ボーリング孔で取得される実測値を比較する。モデルの更新前と更新後において解析値と実測値の比較を行い、施設建設に伴う影響を適切に評価する観点からモデル化手法やその不確実性の低減過程の整理や解析技術の整備を図る。

一方、坑道の埋め戻しによる影響（発生する現象）としては、地下水中の溶存ガスの脱ガス現象などにより坑道周辺に形成された不飽和領域が、坑道部の再冠水に伴い、再び飽和状態に回復することが考えられる。また、このような不飽和領域が再飽和に至るまでの時間や残留する不飽和領域の規模などは岩盤の透水性や毛管圧力などに依存するものと考えられる。そこで、坑道の埋め戻しによる地下水流動特性の回復過程を推測するために必要な情報の整理や実データ（地下施設におけるガス湧出量や不飽和

領域に関するモニタリングデータなど)の蓄積を行う。また、解析手法(脱ガスを考慮した気液二相流解析など)や解析結果に大きく影響を与える重要なパラメータ(例えば相対浸透率や毛管圧力など)、時間スケールや解析条件の明確化など、坑道の埋め戻しと再冠水による影響を定量的に評価する地下水流動解析技術の検討を行う。

②地球化学特性に対する影響評価手法の構築

中期計画の全期間を通して、研究所設置地区およびその周辺を対象として、地上からの既存ボーリング孔を用いた地下水の水質の長期モニタリングを継続して実施し、施設建設に起因すると考えられる水質変化の程度や範囲を確認する。

また、前述の施設閉鎖後の地下水流動特性の変化に伴って起こり得る地球化学特性の変化(施設建設前の状態への回復過程)を推測するために必要な情報の整理、重要なパラメータや解析条件の明確化など、処分場の閉鎖を想定した地球化学解析技術の検討も行う。

③岩盤比抵抗を用いた影響評価

中期計画期間中の地下施設への湧水量に応じて、周辺の地下水流動が大きく変化している可能性が想定される場合は、施設建設に伴う地下水流動特性への影響を把握するため、地下水の水質(塩分濃度)と相関がある岩盤の比抵抗分布を取得する高密度比抵抗探査を実施する。研究所用地を通過する二本の探査測線(図 4.1.2-2)を研究所設置地区内に配置して繰り返しの探査を行うことにより、施設建設に伴う周辺岩盤の広域な比抵抗分布の変化を把握する。②に記した地下水の水質分布情報との組み合わせなどにより、比抵抗探査による地下水モニタリングの適用性を評価する。

④遠隔監視システムの適用性評価

平成 21 年度までに取得した観測データおよび解析(伝達関数)さらにはコンピュータ上で模擬した波動場シミュレーション解析結果に基づいて、坑道掘削に伴う地質環境の変化に対する感度特性などの解析結果の取りまとめを実施する。また、今後より良い品質のデータを取得するための課題などについて整理を行う。

【構築される技術】

堆積岩を対象とした技術として、以下の知見・技術を提示・構築する。

- ・深度 350m までの施設建設に伴う中長期的な水圧・水質の変化(影響領域やその広がり、変化量など)
- ・地下水の長期観測に関わるノウハウ(観測データの品質管理など)や観測機器の適用性の例示
- ・施設建設による影響を評価する地下水流動解析技術に関わる手順や考え方、ノウハウなどの提示
- ・坑道の埋め戻し後から再冠水までの期間における不飽和領域の解析手法

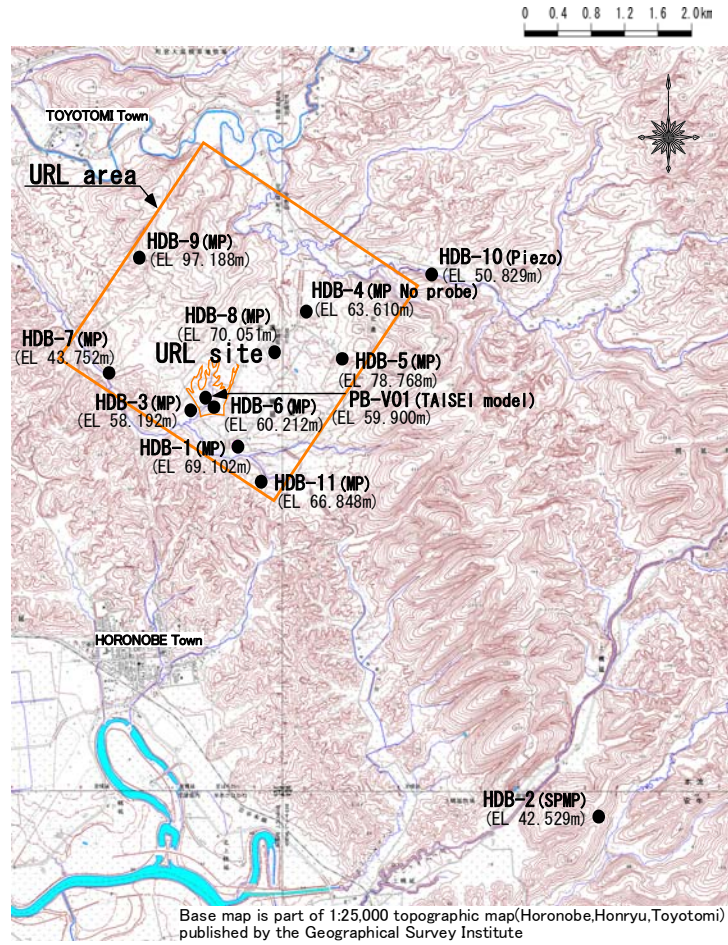


図 4.1.2-1 地下水の長期モニタリング孔位置図

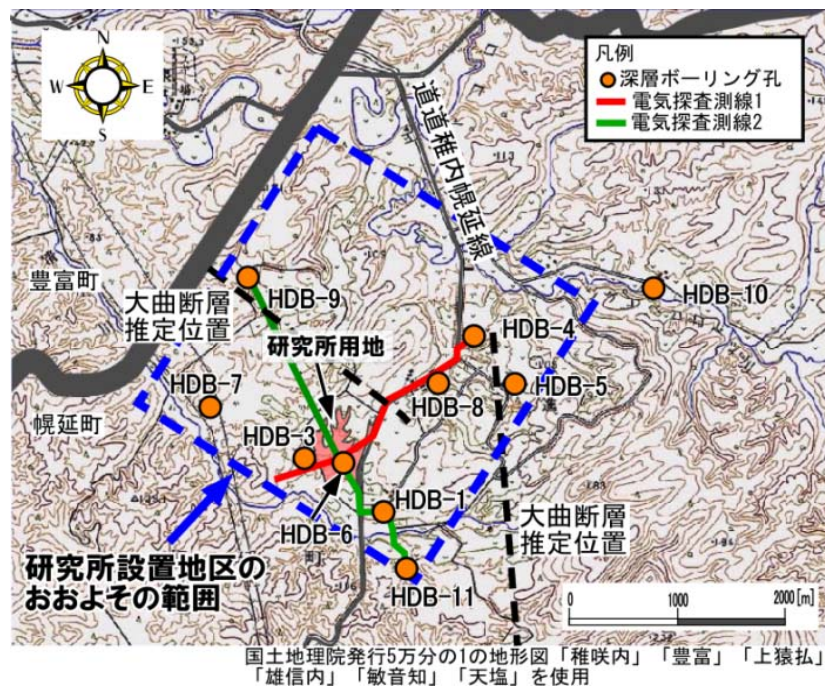


図 4.1.2-2 電気探査測線位置図

(2)施設建設が施設領域、坑道周辺に与える影響評価技術の開発

【目的・概要】

施設建設が施設領域、坑道周辺に与える影響として、掘削影響領域（国際的に **Excavation disturbed zone[EdZ]**と **Excavation damaged zone[EDZ]**に分けられる；Tsang et al.,2005）の形成が挙げられる。EdZ は岩盤の弾性変形や地下水の水圧低下などの可逆的な影響を受けた領域であり、EDZ は岩盤の力学特性あるいは水理地質特性や化学特性などが不可逆変化を生じた領域である。前者については、前章で述べたように、安全評価の時間スケール、空間スケールを念頭においてその影響領域の広がりや変化プロセス（いつ、どのような状態で定常となるのか？）などを理解する必要がある、一方で後者は施設の健全性や物質の移行経路としての観点から重要な領域となる。本節では、主に後者に関わる調査研究計画について述べる。

平成 21 年度までの調査研究においては、140m 調査坑道と深度 220m までの東立坑、深度 250m までの換気立坑の建設とその過程の調査を通して、掘削影響領域（EDZ, EdZ）の発生メカニズムおよびその範囲と諸物性の変化量の調査評価技術として、坑道内透水試験装置や水圧・水質モニタリング装置、地中変位計などの開発や適用試験、さらに、各種測定方法の適用性の検討、それらを利用した観測を実施し、観測データに基づいて力学的長期挙動、地下水圧・水質変化の解析技術の開発を行ってきた（Sugita et al.,2000）。その結果、以下のような成果・知見が得られている。

- ・ 140m 調査坑道で実施した岩盤の力学特性に関する水平坑道掘削影響試験では、弾性波トモグラフィ調査を掘削の進捗に合わせて繰り返し行った結果、掘削の進捗に伴う掘削影響領域の発現を弾性波速度の変化として捉えることができた。弾性波トモグラフィ調査は引き続き行い、経時変化に関するデータの蓄積を行っている。また、立坑掘削影響試験では、ボアホールテレビ観察、岩盤内変位計測、低圧ルジオン試験等により周辺岩盤の変化を捉えることができた。声問層のような珪藻質泥岩の掘削に伴う周辺岩盤の動きを捉えることが可能な調査技術の優劣をある程度把握することができた。
- ・ 140m 調査坑道で実施した岩盤の水理特性に関する水平坑道掘削影響試験では、透水試験、間隙水圧計測および水分量計測を行った。坑道の掘削の進捗に伴い間隙水圧が低下する様子を捉える事が出来た。また、水分量についても、坑道が掘削されることにより坑道壁面近傍において飽和度換算で 75% 程度まで低下したことが計測された。間隙水圧および水分量については、引き続き経時変化に関するデータを蓄積している。坑道壁面からの距離が約 3m の場所で実施した透水試験の結果からは坑道の掘削に伴う透水性の変化は認められなかった。また、原位置での透水試験手法に関して、試験区間における溶存ガスの脱ガスの影響のため、パルス試験では精度の良い測定が困難であり、注水試験により脱ガスの影響を抑制する必要があることなどが明らかになった。
- ・ 地下水の化学特性については、立坑集水リングにて採取した地下水の水質分析結果から、立坑掘削に伴い一部の深度において水質が変化しており、掘削による表層水の混入や塩分濃度の濃い地下水の混入が確認されている。一方で、140 m 調査坑道において立坑掘削による水圧・水質変化をモニタリングするための装置を開発し、その適用性を確認できたが、観測されている水圧の低下領域において、水圧の低下に伴い pH, 酸化還元状態あるいは水質変化が生じているか否かについては今後確認する必要がある。

一方で、溶存ガスの脱ガスに起因する観測データ品質の低下などが確認され、個々の観測技術について技術改良項目などを整理することができた。本中期計画では、深度 250m 調査坑道および深度 250m

以深の各立坑、350m 調査坑道を利用した掘削影響領域の調査を行い、各観測、解析技術の改良を行っていく。特に、350m 調査坑道においては、大規模坑道およびプラグ試験を行う坑道群周辺の掘削影響評価、環境回復過程などに関わる新たな試験、観測を行っていく。

【実施内容】

掘削影響領域の評価とそのため技術開発として、既存の坑道、ボーリング孔、観測装置を利用した地質環境特性の変化プロセスの観測、坑道周辺領域の水平坑道掘削影響試験、立坑掘削影響試験、プラグ試験時の環境回復過程の観測などを行っていく。

①既存の坑道、ボーリング孔、観測装置を利用した地質環境特性の変化プロセスの観測

中期計画の全期間を通して、以下の観測を行う。

- ・力学特性の変化の観測：地下施設建設用地内における地盤傾斜計を利用した表層地形変化の観測を行う。また、深度 140m、250m 調査坑道において、水平坑道および立坑周辺の力学特性の長期変化を把握するため、既存ボーリング孔を利用した弾性波トモグラフィ調査、地中変位および埋設ひずみ計測について長期測定を行う。
- ・岩盤の水理特性の変化の観測：深度 140m 調査坑道における間隙水圧および水分量計測を継続して実施し、坑道掘削後のこれらの長期挙動を把握する。←この部分は別の項目で記述
- ・地球化学特性の変化の観測：立坑集水リング、壁面湧水、深度 140m、250m 調査坑道の既存ボーリング孔から得られる地下水を対象とした水質・同位体・ガス組成・微生物群集特性の変化の観測を行う。また、観測データを基に坑道周辺の水質変化を事例として示し、その中長期的変化を予測・検証するための解析技術（マスバランス解析や混合解析、水-岩石反応解析など）を構築する。

②水平坑道掘削影響試験

主に、中期計画の後半において、以下の調査観測を行う。

- ・深度 250m 調査坑道：坑道を掘削する際に坑道周辺に発生する掘削影響を把握するため、坑道周辺を重点的に調査する弾性波トモグラフィ調査を行う。同一の調査領域において坑道掘削前から坑道掘削中、坑道掘削後にかけて繰り返し弾性波トモグラフィ調査を行うことにより、周辺岩盤における掘削影響領域の経時変化に関するデータを取得する。また、弾性波トモグラフィ実施時に、ボアホールテレビ観察を行う。
- ・深度 350m 調査坑道（坑道群）：坑道を掘削する際に坑道周辺に発生する掘削影響、およびプラグ試験時の再冠水を考慮に入れた掘削影響や人工バリア近傍の掘削影響の長期モニタリングを実施する。弾性波トモグラフィ、比抵抗トモグラフィ、地中変位計測、埋設ひずみ計測、透水試験、間隙水圧計測、水分量計測、水圧・水質モニタリング用のボーリング孔を掘削し（図 4.1.2-3）、各孔においてコア観察・試験、ボアホールテレビ観察、検層を行う。その後、弾性波トモグラフィ、比抵抗トモグラフィ調査、および、地中変位計測、埋設ひずみ計測、水分量計測、水圧・水質モニタリング、透水試験の長期測定を実施する。

③立坑掘削影響試験

主に、中期計画の後半において、深度 365m 付近（稚内層）の立坑を掘削する際の立坑周辺に発生す

る掘削影響を把握するために、350m調査坑道より図 4.1.2-4 に示す下向きのボーリング孔を掘削し、ボアホールテレビ観察、透水試験、埋設ひずみ計測、弾性波速度トモグラフィ調査を立坑の掘削前後に行い、あわせて立坑掘削後に地中変位計および施工時のステップ管理計測（B計測）などを行う。これらで得られる情報に基づき、立坑周辺岩盤の掘削影響（力学特性・水理特性等）を把握する。

④水理・地球化学観測

主に、中期計画の後半において、大規模坑道周辺における地下水圧・水質の長期変化を観測し、地下施設の建設が周辺地下水環境に与える影響を評価ために、深度 350m 調査坑道において、複数のボーリング孔（掘削長数十～100m）の掘削、検層、間隙水圧観測装置の製作・設置、水圧・水質モニタリング装置の改良・設置、適用試験、それらを用いた長期観測を行う。観測データに基づき、地質構造や水圧変化、地球化学特性変化の関連性を整理し、それらに関わる解析技術を構築する。

なお、間隙水圧観測装置、水圧・水質モニタリング装置の開発・改良に際しては、前中期計画で課題として提起された課題（溶存ガスの脱ガスなどに伴う観測データの品質低下）を踏まえて、観測区間内外で生じる差圧環境や脱ガスなどを考慮した設計を行う。

⑤熱－水－応力－化学連成現象に関わる解析技術の整備

地下施設の建設による立坑周辺の水圧分布の変化に起因して、塩化物イオン濃度の高い地下水が浅部に上昇するなど（アップコーニング）、地下水水質の空間的な分布は、地下施設の建設の影響による地下水流動場（水頭分布）の変化に伴い、地下施設建設以前の初期状態から変化する可能性がある。このように水理と地球化学を組み合わせた現象や、それに力学を加えた連成現象は、立坑の周辺や調査坑道周辺で発生する可能性があり、これらの現象を定量的に予測する手法を開発することは、地層処分システムの安全評価や、坑道の施工計画策定に必要かつ重要である。

そこで、まず主に第 1 段階で構築した地質環境モデルを更新し、施設建設に伴って取得される情報を反映したモデル（4.1.1 参照）を構築するとともに、施設建設により生じる周辺岩盤の変形や水圧変化、水質変化などの挙動を多孔弾性論や混合・マスバランス理論などに基づく力学－水理－地球化学の連成解析により求める。次に、解析結果を①～④に記した各種の原位置試験・計測により取得したデータや施設建設における日常・ステップ管理計測データ（①～④で読める（重複する）ので削除）などに対比することにより、堆積岩を対象として施設建設により生じる力学特性、水理特性、地球化学特性の変化を適切に表現できるモデル化手法や解析技術の整備を図るとともに、モデル化・解析の対象とする現象に応じ、力学、水理、地球化学のすべてを連成させて解析する必要があるか、2 分野だけの連成で解析できるかなど、モデル化・解析の方法論についても検討を行う。また、熱－水－応力－化学連成現象に関わる既存の解析コード(TOUGHREACT, THAMES, CODE-BRIGHT, GETFLOWS, CORE など)の実現象への適用性確認、必要に応じてコードの改良を行う。

解析スケールとしては、西立坑を含む研究所用地内およびその周辺（施設領域）と原位置試験を実施する坑道周辺の領域を対象とする。後者においては、異なる複数の深度を対象とすることにより、地層や深度の違いによる掘削影響の違いを明らかにする。また、第 3 段階の調査研究で実施する調査坑道（深度 250m および深度 350m）を利用した原位置試験に対して、試験の対象とする領域の地下水流動特性を解析によって推定し、計画の詳細化や具体化などに反映していく。なお、主に第 1 段階で構築した地

質環境モデルをベースとして施設建設に伴って取得される情報を反映したモデル（4.1.1 参照）などを用いて、地下施設の建設に伴う地下水位分布、湧水量やその湧水区間などを予測するための地下水流動解析を実施する。これらの予測結果と評価結果は、地下施設の建設時の湧水抑制対策であるグラウトの必要性の有無や必要な場合の位置や範囲などを検討する際の判断材料のひとつとして考慮すべき情報であると考えられることから、施設の建設が開始される前に実施しておく。施設建設により生じる湧水量を解析により予測する。解析結果と地下施設で計測される湧水量と対比を行い、モデル（透水係数分布）や境界条件、グラウト効果の見積もりなどの解析条件の見直し・整理を通じて湧水量解析技術の整備も図る。

【構築される技術】

堆積岩を対象とした技術として、以下の知見・技術を提示・構築する。

- ・ 掘削影響領域の範囲とその物性の観察事例（立坑部においては、掘削影響の深度依存性も含む）
- ・ 掘削影響の長期的な安定性の観察事例
- ・ 掘削影響の発生メカニズムの把握とそれを定量的に把握・予測できる調査・解析技術や掘削影響の長期的変遷を概略的に把握・予測できる調査・解析技術

また、施設の設計・施工や安全評価技術（例えば、処分場閉鎖後の地質環境を推測するための基礎データや推測手法など）の提言を行う。

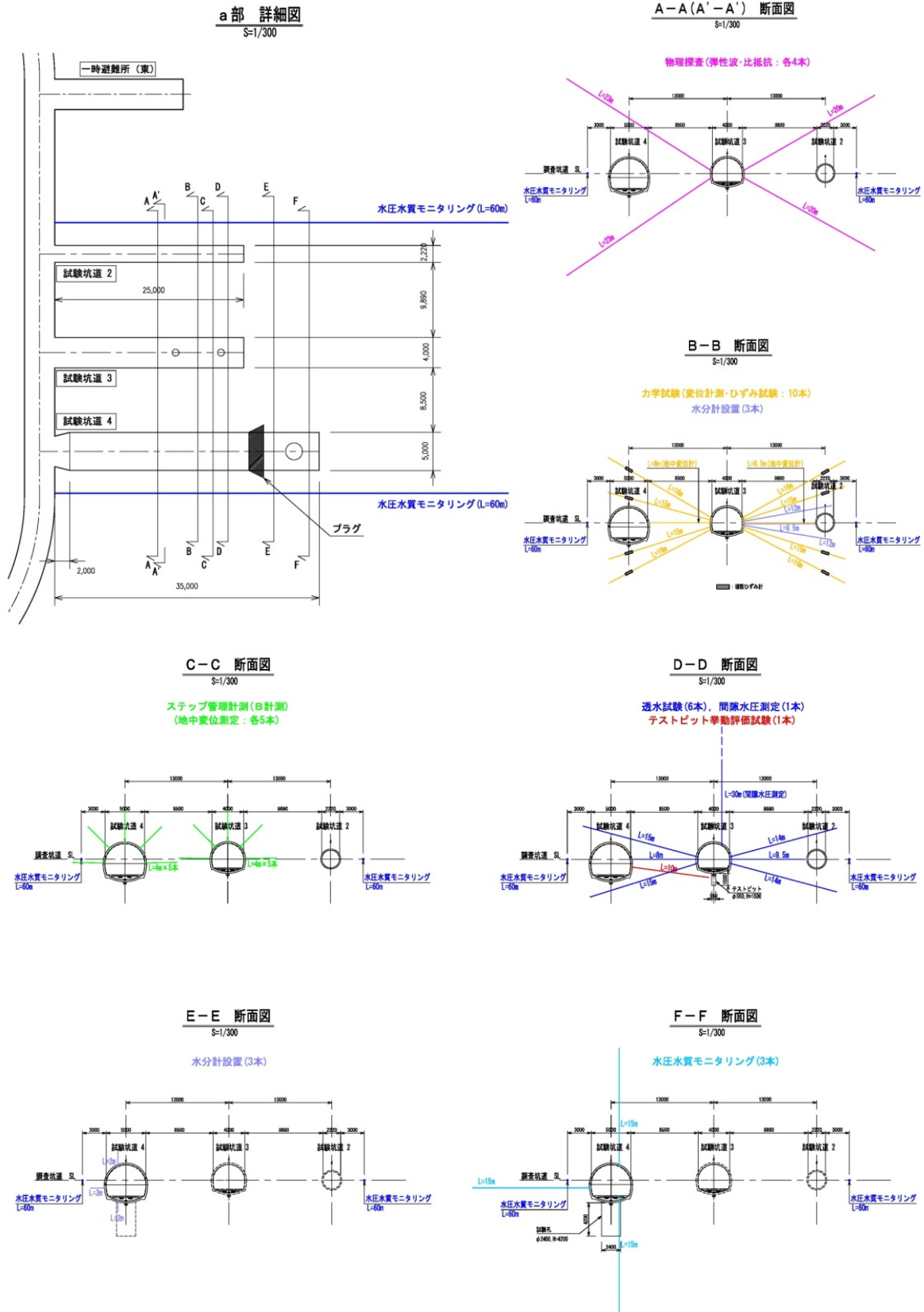


図 4.1.2-3 深度 350m 調査坑道における水平坑道掘削影響試験イメージ

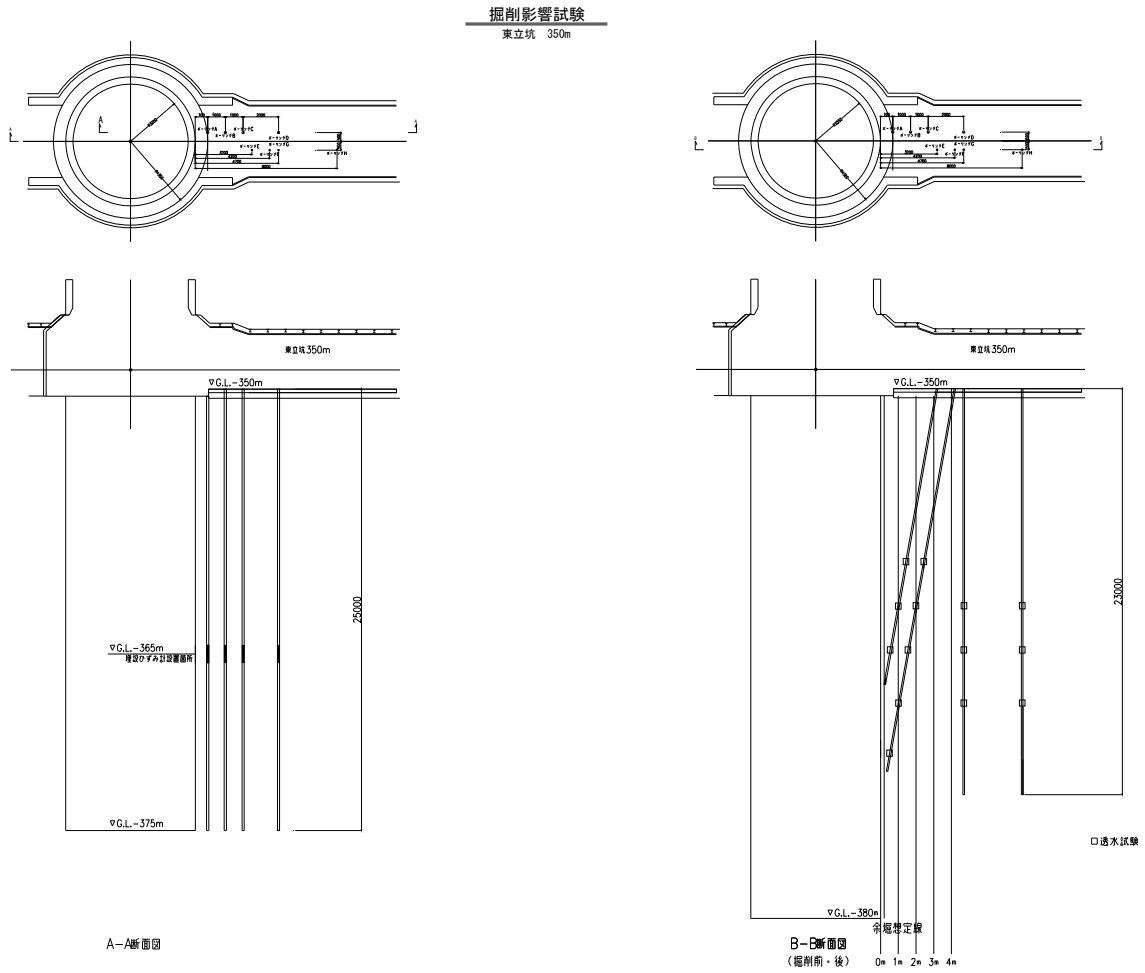


図 4.1.2-4 立坑掘削影響試験イメージ

4.1.3 地質環境の長期変遷評価技術の開発

【目的・概要】

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、数万年以上の期間をかけて広域的に進行する隆起・沈降あるいは侵食・堆積、気候・海水準変動によって、対象とする地質環境が緩慢ではあるものの絶えず変化しても、地層処分に適した熱・水理・力学・化学的条件を維持し、長期にわたり物質を閉じ込める機能が求められる（OECD/NEA, 2009）。地層処分の長期的な安全性の信頼性を向上させるためには、この地質環境の安全機能が現時点で十分であることだけでなく、数万年以上という長期にわたり維持されることを示すための調査・解析・評価手法や論拠を整備することが重要となる。

平成 21 年度までの前中期計画では、対象とする地質環境の過去から現在に至る地質学的、水理学的、地球化学的な特性の長期変遷を評価する古水理地質学的手法に基づいて、数万年以上の期間に及ぶ地質環境特性の長期変遷を記述するための調査・解析手順を整備した（太田ほか, 2007）。また、この手順に基づき、幌延地域を事例として、段階的に空間スケールを区切りながら調査を進める際の考え方を整理するとともに、調査の種類と組み合わせ、取得するデータの種別および異なる分野間で得られたデータの統合など、地質環境特性の長期変遷に関する一連の調査・解析における合理的なデータの流れを具体化した統合化データフローダイアグラムを構築した（太田ほか, 2007）。前中期計画における調査研究では、このダイアグラムに従って段階的に調査・解析を実施し、幌延地域で過去に生じた自然現象の発生様式や規則性を把握するとともに、同地域のような沿岸域・堆積岩分布地域において地質環境特性の長期変遷を記述する際に考慮すべき自然現象を抽出し、それら自然現象の特徴とその影響を整理した概念モデルを構築した。さらに、構築した概念モデルに基づいて、自然現象による影響を考慮して地下水流動解析および移流分散解析を実施するための数値解析技術の開発を進めるとともに（今井ほか, 2009）、地上からの調査研究段階（第 1 段階）で得られた地質環境データを参考にしつつ感度解析的な数値解析を実施し、現在の地下水の流動方向にほぼ平行な東西方向約 100 km の鉛直二次元断面における過去約 150 万年間の地下水の流動特性（全水頭）と地下水中の塩分濃度の長期変遷の概略を推定することができた（今井ほか, 2009 ; Niizato et al., 2009）。また、断層運動に伴い生じる断層周辺での主応力軸の回転や地表面の鉛直変位などについて、幌延地域に分布する断層を対象とした試解析を実施し、断層運動に伴う力学的影響の評価手法の開発に着手した。

以上のように、前中期計画では、自然現象の特徴を把握しそれを考慮して地質環境の長期変遷を推定するための大まかな手順と数値解析技術はほぼ整備できたものの、それらを適用し推定した地質環境の長期変遷は概略的な検討にとどまっている。このため、数値解析に用いるパラメータの設定手順も含めた方法論の整備が必要である。一方で、自然現象の発生様式・規則性・規模の解釈とその根拠となるデータ、数値解析のパラメータ、および地質環境の長期変遷に関する推定やその判断根拠について、それらに含まれる不確実性を示すための手順や方法論の整備が、以降の主要な課題として挙げられる。

他方、国内の地層処分に係る動向をみると、実施主体である原環機構は、2010 年 3 月に、実際の地層処分事業の各段階における安全確保に係る目標や実施事項を「安全確保構想 2009」として整理している（NUMO, 2010）。それによると、閉鎖後長期の安全性を確認するための実施事項は、「適切なサイト選定と確認」、「処分場の設計・施工などの適切な工学的対策」、および「地層処分システムの長期安全性の評価」に区分されている。そのうち、適切なサイト選定と確認については、“自然現象の著しい影響の回避”および“地質環境特性の把握”に細分されている。前者については、概要調査の段階におい

て文献調査における長期安定性評価の妥当性を確認するとともに、ほぼ最終的な評価を行って著しい影響を回避し、精密調査の段階において概要調査の結果の妥当性を確認するとされている。後者については、文献調査の段階から地質環境の長期変遷について検討を開始し、概要調査および精密調査の段階では、“広域”から“精密調査地区を対象としたスケール”を経て“地下調査施設を対象”としたスケールへと、調査の進展に応じて空間スケールを狭めつつ地質環境モデルを更新し、地質環境の長期変遷について検討するとされている(NUMO, 2010)。なお、精密調査地区および最終処分施設建設地の選定は、それぞれ、平成 20 年代中頃および平成 40 年代前後とされている(特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画, 2008)。

また、原子力安全委員会は、2010 年 4 月に、余裕深度処分における放射性廃棄物処分の安全確保について、長期の安全評価に係るシナリオ設定の考え方を示した報告書を公表している(原子力安全委員会, 2010)。同報告書では、“発生の可能性が高く、通常考えられるシナリオであり、過去および現在の状況から、処分システムおよび被ばく経路の特性並びにそれらにおいて将来起こることが確からしいと予見される一連の変化を考慮”するものとして、安全評価における基本シナリオの状態を設定している(原子力安全委員会, 2010)。その基本シナリオでは、プレート運動や気候変動は、それらの過去の変動傾向とその要因が今後も継続するものとし、プレート運動に起因する火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・沈降運動とともに、気候変動に起因する海水準変動、気温・降水量変化、涵養量変化に関する将来の状態を設定するとしている。これら余裕深度処分の安全評価に係るシナリオ設定の考え方は、今後策定される高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る安全審査の基本的考え方においても考慮される可能性があり、地質環境調査から安全評価へと至る一連の調査・解析・評価手法の構築に際して注視していく必要がある。

以上、前中期計画の成果を踏まえて抽出された課題とともに、実施主体と規制機関の動向、特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画、および幌延地域の地理・地形・地質条件を踏まえて、本中期計画では、以下を目的とする。

- ・ 施設スケール(数 km～数百 m 四方のスケール)を対象として、地震・断層運動が地質環境に与える影響の程度や範囲を把握するための調査・解析技術の確立(以下、4.1.3(1)①に該当)
- ・ 施設スケールを対象として、地質環境の長期変遷を推定するための方法論の検討(以下、4.1.3(1)②、③および 4.1.3(3)に該当)
- ・ 地質環境の長期変遷に関する数値解析で必要となるパラメータの設定手順と方法論の整備(以下、4.1.3(2)に該当)
- ・ 地質環境の長期変遷を推定する際に利用する地質環境データとともに、長期変遷の推定結果に伴う不確実性を示すための手順の検討(以下、4.1.3(1)②、③および 4.1.3(3)に該当)
- ・ 沿岸域・堆積岩分布域を対象とした隆起・沈降、侵食・堆積、および気候・海水準変動に伴う地質環境の長期変遷を考慮した性能・安全評価手法の開発を念頭に置き、現在から将来にわたる地質環境の長期変遷を記述するための方法論の整備(以下、4.1.3(3)に該当)

(1) 施設スケールを対象とした地質環境の長期変遷評価技術

【実施内容】

- ① 地震・断層運動が地質環境に与える影響の程度や範囲を把握するための調査・解析

本中期計画では、施設スケールを対象とした影響評価手法の構築を目的として、地層処分研究開発部門の各ユニットと連携し以下を実施する。

- ・ 地震・断層活動域の推定

幌延町内に展開する地震観測点および他研究機関にて取得された地震観測データに基づく精密な震源位置の決定を行い、地質・地質構造との関係に関する検討を行う。また、上記に加え、露頭、ボーリング、立抗などの地下施設において得られたデータや、これまでに取得された GPS 観測データを他研究機関における取得データと併合処理することにより、地殻変動を把握するとともに、これまでに実施されている重力データの解析結果などを踏まえ、幌延地域における地震・断層活動域に関する概念モデルを構築する。なお、地震および GPS 観測データの解析範囲は北海道北部地域とし、地質調査などのデータ取得は、主に研究所所用地とその周辺を対象とする。

- ・ 断層面形状の数値モデルおよび評価の対象地域における物性モデルの構築

上記により構築される地震・断層活動に関する概念モデル、第 1 段階における調査研究で得られた過去の履歴に関するデータのとりまとめ、および既存情報を対象とした調査の結果に基づいて、地震・断層活動に伴う地質環境への影響評価シミュレーションに必要な断層面形状の数値モデルおよび評価の対象地域における物性モデルの構築を行う。

- ・ 地震・断層活動に伴う影響評価の実施と妥当性の検討

構築された数値モデルを用いて、地震・断層活動に伴う力学的影響評価シミュレーションを行う。影響評価シミュレーションに用いる手法は、既存の大地震発生域などを事例にその有効性が評価されているものとし、必要に応じて上記の数値モデルに合わせた改良を行う。また、シミュレーションの結果と地質調査などにより得られたデータを比較し、シミュレーションにより推定された地質環境の変化パターンやその空間分布などに関する妥当性を検討する。

なお、影響評価シミュレーションの対象領域は、主に研究所設置地区とその周辺を対象とする。

② 古水理地質に関する地質環境データの取得

過去から現在に至る地質学的変遷に伴う地質環境の長期変遷を推定し、それに基づいて現在から将来にわたる地質環境の長期変遷を記述するという古水理地質学的手法のもと、本中期計画では、沿岸域プロジェクト等の公募事業等や国際共同研究等で得られる成果を活用し、地層処分研究開発部門の各ユニットと連携しつつ以下を実施する。

- ・ 隆起・沈降域と侵食・堆積域の変遷およびそれらの速度

幌延町西部のサロベツ原野から、地下施設が位置する幌延町北進地区の宗谷丘陵に至る東西 20 km 程度の空間スケールを対象として、前中期計画の成果および沿岸域プロジェクト等の公募事業で得られる成果を活用した沈降史解析により、地質構造の発達過程を推定する際の基礎情報となる隆起・沈降域および侵食・堆積域とそれらの速度に関する情報の取得とともに、その手順を整理する。

- ・ 地質構造の発達過程

地下施設を通過する東西方向 100 km 程度の鉛直二次元断面をリファレンス断面として、前中期計画で作成した二次元の地質構造発達史や沿岸域プロジェクト等の成果を活用しつつ、バランス断面解析やアナログ実験、数値シミュレーション等に基づいて、水理地質構造の長期変遷を推定する際の基礎情報となる地質構造の発達過程を三次元で推定する。その推定結果については、研究所設置地区お

よびその周辺を対象として得られた地質・地質構造に関するデータとともに、地下施設で実施される地質・地質構造に関する調査の結果（4.1.1 (1)参照）などを参照し、その妥当性を検討する。一方で、地質構造の発達過程に関する推定結果は、地下施設の未掘削領域における主要な地質構造要素の空間的拡がりや空間配置の予測にも利用される（4.1.1 (1)参照）。このように、地質構造の発達過程に関する推定結果は複数の観点から利用されるため、結果に含まれる不確実性を示す手順も併せて検討する。

- ・ 水理・物質移動特性パラメータ（有効間隙率、透水係数、涵養量など）の時間変化

前期中期計画で取得された地質環境特性データに加えて、地下施設の異なる深度や地点、試験条件で実施される原位置試験（4.1.1 参照）の結果、および沿岸域プロジェクト等の公募事業等で得られる研究成果を活用し、地質環境の長期変遷に関する数値解析で用いる水理・物質移動特性パラメータの時間変化を検討するとともに、その設定手順を整理する。

異なる深度や地点、実験条件で実施される原位置試験は、時間変化に伴う地質環境特性データの変化に関するアナログ試験とも読み替えられると考えられる。この考え方に基づいて水理・物質移動特性パラメータの長期的な時間変化を推定する手法を検討する。涵養量の変動については、現在の植生と気候要素（気温や降水量など）の対応関係をもとに、古植生の推定結果から過去の気候要素を推定するモダンアナログの考え方に基づいて設定するとともに、その手順を整理する。沈降あるいは埋没に伴う間隙率と透水性の変化については、現在の深度分布から推定する手法とともに、室内試験による推定手法も検討する。室内試験については、原位置の岩盤から採取した不攪乱試料の圧密試験により間隙比-有効応力曲線（もしくは圧縮曲線）を描き、その結果から圧密先行荷重を求めることにより、隆起・沈降あるいは削剥・埋没に伴う間隙率および透水性の変化を推定する手法（上原ほか，2009；岡崎ほか，2009）などが、一例として挙げられる。

一方、研究所設置地区およびその周辺で実施されたボーリング調査の結果や地下施設の複数深度で取得される地下水の溶存成分や同位体組成、割れ目充填物の鉱物・地球化学特性は、地下水流動および移流分散解析の結果の信頼性を検討するためのデータとなることから（4.1.1(3)）、それらデータの整理も合わせて実施する。

なお、地下施設で取得される地質環境特性データは、地下施設建設に伴う影響が少なからず付加されていると考えられる。このため、データの取り扱いにあたっては、地下施設建設に伴う地質環境の変化に関する検討内容（4.1.2 参照）を考慮する必要がある。

③ 地質環境の長期変遷に関する概念モデルの構築

以上の調査研究に基づいて、地質環境の長期変遷に関する情報を図の形式で整理し表現した概念モデルを構築する。本中期計画では、研究所設置地区およびその周辺を主な対象とした施設スケール（数 km～数百 m 四方のスケール）程度の空間的拡がりを対象とした概念モデルの構築を目標とし、地層処分にとって重要な地質環境の特性とプロセスとともに、それらに対して長い期間をかけて変化をもたらすと想定される自然現象の発生様式・規則性・規模を表現する。

概念モデルを構築するためには、過去から現在までに生じた自然現象とそれに伴う地質環境特性の長期変遷を時系列で表現する編年表や、品質保証およびシステム分析等でリスク分析や因果分析で用いられる特性要因図、インフルエンシ・ダイアグラムあるいは連関図法などの様々な図解ツールにより、自

然現象の特徴と地質環境特性の相互作用を整理することが必要となる。そのため、概念モデルを構築する作業の流れと各作業で利用可能な手法を整理するとともに、概念モデルに示された情報の不確実性を示すための手順も合わせて検討する。

【構築される技術】

沿岸域・堆積岩の分布地域を事例として、以下の技術を整備する。

- ・施設スケールを対象とした地震・断層活動に伴う力学的影響評価手法（地震・断層活動域の抽出技術、断層パラメータの設定手順、および設定に必要な地質環境データの体系的な調査手法を含む）
- ・施設スケールを対象として、地質環境の長期変遷を推定し概念モデルを構築するための方法論
- ・地質環境の長期変遷に関する数値解析で必要となるパラメータの設定手法
- ・地質環境の長期変遷を推定する際に利用する地質環境データとともに、長期変遷の推定結果に伴う不確実性を示すための手順

(2) 地質環境の長期変遷に関する数値解析技術

【実施内容】

前中期計画では、地形や地質構造、水理特性を変化させながら地下水流動・移流分散解析を連続的に実施する数値解析システムを構築した（今井ほか，2009）。このシステムは大きく4つの要素から構成される。

- i) 代表的な複数の時間断面における地質モデルの作成
- ii) 代表的な時間断面間の地質モデルを内挿により補間し、時間的に変化する地質モデルと解析用メッシュとを関連づけ、非定常解析データの引き継ぎやパラメータの変更を行いつつ地下水流動・移流分散解析を連続的に実施するプログラム
- iii) 地質構造の変形を考慮した解析結果を出力するプログラム
- iv) 有限要素法による飽和・不飽和浸透流・移流・分散解析プログラム（Dtransu3D・EL；菱谷ほか，1999）

i)はデジタイザ等により地質構造発達モデルを作成する作業であり、ii)およびiii)において、解析のタイムステップ間で水圧分布や塩化物イオン濃度分布などのデータを受け渡すことにより、iv)の地下水流動・移流分散解析を連続的に実行する。

本中期計画では、4.1.3 (1)で整理される数値解析パラメータの設定手順をSMSにおける要素の一つとして組み込むとともに、資源エネルギー庁からの受託研究等で進められている沿岸域を対象とした地下水流動解析事例の成果（前川ほか，2010）を活用しつつ、パラメータ設定、地質構造モデルの作成、データ受け渡し、地下水流動・移流分散解析のそれぞれの要素にモジュール性を持たせた一連の解析パッケージの構築方法を検討する（イメージは図4.1.3-1）。本中期計画以降、各モジュールで利用可能と考えられる解析技術が開発された場合には、各モジュールのプログラムを入れ替えることにより、新たな技術を随時取り込む。

なお、間隙率等の水理・物質移動特性パラメータを変化させつつ流体移動の解析を実行するプログラムについては、利用可能なプログラムが石油探鉱分野においてすでに複数存在する。このため、その分野で開発されている手法の利用を視野にいれ、関係機関等と情報交換を行いつつ進めることとする。

【構築される技術】

- ・地質環境の長期変遷に関する数値解析で必要となるパラメータの設定手順と方法論
- ・自然現象による影響を考慮しつつ地下水流動・移流分散解析を実行する数値解析パッケージ

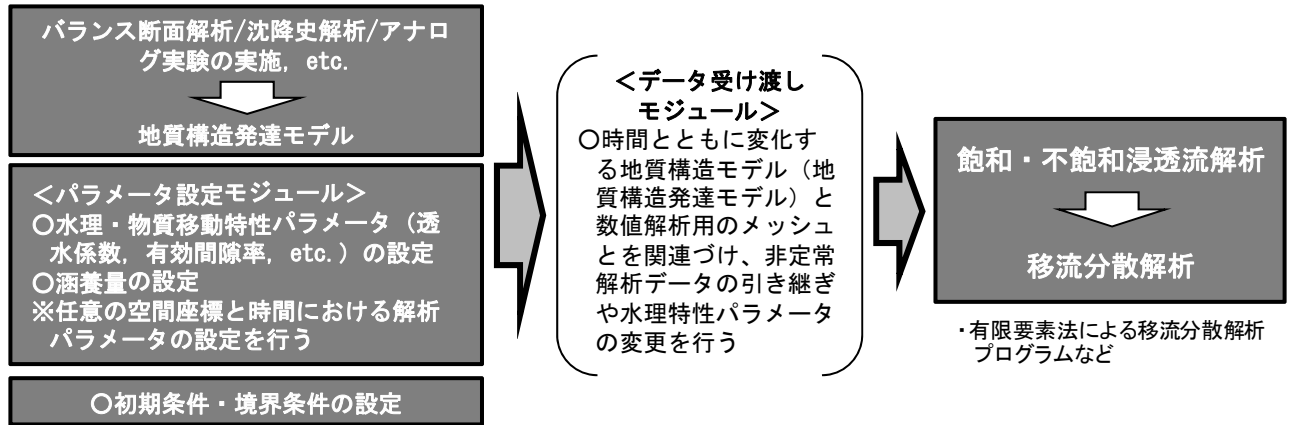


図 4.1.3-1 数値解析モジュールの組み合わせの例

(3) 現在から将来にわたる地質環境の長期変遷を記述するための方法論

【実施内容】

4.1.3 (1)および(2)で得られた成果に基づいて、沿岸域・堆積岩分布域を対象とした隆起・沈降、侵食・堆積、および気候・海水準変動に伴う地質環境の長期変遷を考慮した性能・安全評価手法の開発を念頭に置き、geosynthesis methodology と古水理地質学的手法を結びつけた現在から将来にわたる地質環境の長期変遷を記述するための一連の調査・解析・評価手法を例示する。

具体的には、地層処分研究開発部門の各ユニットと連携し、自然現象の発生様式・規則性・規模およびそれに伴う地質環境の長期変遷について、異なる評価期間や空間スケール、地理・地形・地質条件を対象とした場合の基本的な考え方と手順を整理する。また、性能・安全評価手法の一部を構成するシナリオ構築への反映を指向して、幌延地域を事例に地質環境の将来にわたる長期変遷の記述を試行し、その結果に含まれる不確実性の示し方を検討する。さらに、沿岸域プロジェクト等の公募事業で得られる成果とともに、地層処分基盤研究開発ユニットを中心として進められている天然現象影響評価研究（川村ほか、2010）の成果に基づいて、性能・安全評価で必要となる自然現象および地質環境特性に関するデータが漏れなく含まれるよう、前中期計画で作成した地質環境の長期変遷に関わる統合化データフローダイアグラムを更新する。

地質環境の将来にわたる長期変遷に関する情報は、自然現象による地質環境の長期変化を考慮した性能・安全評価の作業フレーム（川村ほか、2010）において、地層処分システムの記述や評価シナリオの構築で重要な役割を果たす。このため、本調査研究開発は、地層処分基盤研究開発ユニットと密に連携して実施する。

【構築される技術】

現在から将来にわたる地質環境の長期変遷を記述するための方法論とその不確実性の例示。特に、隆起・沈降，侵食・堆積，および気候・海水準変動に伴う地質環境の長期変遷を考慮して，沿岸域，堆積岩分布域における性能・安全評価手法への反映方法を例示する。

4.2 深地層における工学的技術の基礎の開発

第2期中期計画（5カ年）における深地層の工学技術開発の計画概要を述べる。各項目の実施場所および実施時期に関わる工程を表4.2.1に示す。

表 4.2.1 中期計画期間における施設整備と研究工程（深地層における工学技術の開発）

章・項番号	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度	H26年度
換気立坑整備		深度250m～350m	深度350m～380m		
東立坑整備		深度250m～350m			深度350m～380m
西立坑整備		深度0m～350m			深度350m～365m
250m坑道整備		槽設備等設計・製作			
350m坑道整備					
4.2 深地層における工学的技術の基礎の開発		・換気立坑における計測工, 実施設計の適用性確認			
		・東立坑における計測工, 実施設計の適用性確認			
		・250m調査坑道における計測工, 実施設計の適用性確認			
		・250m調査坑道における地震計の設置, 地震データ取得(連続観測), 耐震設計適用性確認			
		・地下施設を想定したモデルによる通気挙動評価(深度250mまで)			
			・350m調査坑道における計測工, 実施設計の適用性確認		
			・350m調査坑道における地震計の設置, 地震データ取得(連続観測), 耐震設計適用性確認		
			・地下施設を想定したモデルによる通気挙動評価(深度350mまで), 地下施設の安全設備設置への反映計画の策定		

4.2.1 地下施設建設における実施設計の適用性確認・更新

【目的・概要】

堆積岩を対象として地上からの調査研究により得られた地質環境情報に基づき、実際の設計・施工を通じ、地層処分に反映可能な基盤技術として、地下施設の設計・施工計画技術、建設技術、施工対策技術の高度化・体系化を図るとともに、「情報の取得や技術の実証を目的とした地下施設」を安全に建設・維持するための工学技術を確立する。

第2段階では、研究坑道の掘削を通じて、計測結果等の分析評価を行い、既往の地下施設設計手法等の適用性の評価を進めている。これらは、地下施設の設計・施工の手順や技術の適用性を明確にし、精密調査に向けて行われる地下施設の設計・施工計画や実施を支援するものとなっている。

平成21年度までの地下施設建設において、設計時に設定した支保部材が変状を生じるような事象が発生していないことから、H12 取りまとめ（核燃料サイクル開発機構、1999）で示した既往の地下施設設計手法が堆積岩に対応可能な安全裕度を有する方法であることを確認した。また、実施設計（松永ほか、2005）に基づき堆積軟岩を対象とした計測計画ならびに情報化施工プログラム（森岡ほか、2007；山崎ほか、2008）を策定し、取得した計測データを分析して既設支保の健全性と坑道の安定性評価ならびに実施設計の適用性を確認した。さらに、工学的技術に関する研究開発においては、以下のような成果・知見を得ている。

- ・取得した計測データの挙動分析より、声問層の岩盤物性は実施設計の岩級区分 CL-H(Hr)と CL-M(Hr)

の岩盤物性のほぼ中間に相当し、地表からのボーリングコアによる岩盤物性の設定方法の有効性を示した。

- ・地山分類評価、簡易原位置試験結果の分析より、声問層については、地山分類評価等に大きなばらつきは見られず、工学的にほぼ均質な地山であることを示した。
- ・ショートステップ工法により立坑を掘削する場合、剛性の高い覆工コンクリートを掘削直後に打設するため、覆工背面の地山には顕著な圧縮ひずみが発生する。このため、深度 250m 以浅の声問層においては、ロックボルトの合理化が可能であることを取得した計測データの挙動分析、実施工試験により示した。
- ・取得した計測データの挙動分析より、立坑の支保は偏圧、切羽の影響により、NATM 工法とは異なる特有な挙動を示すことから、ショートステップ工法では、三次元逐次掘削解析が、より挙動を再現できる解析手法であることを示した。

本中期計画においては、前中期計画と同様に以下の点を目的とする。

- ・ 250m 以深の研究坑道を対象とした工学技術（設計・施工技術）の適用性確認
- ・ 堆積岩を対象とした大深度地下施設の設計・施工技術の高度化に関する研究開発
- ・ 堆積岩を対象とした安全かつ合理的な大深度地下施設建設のための情報化施工技術の開発・体系化

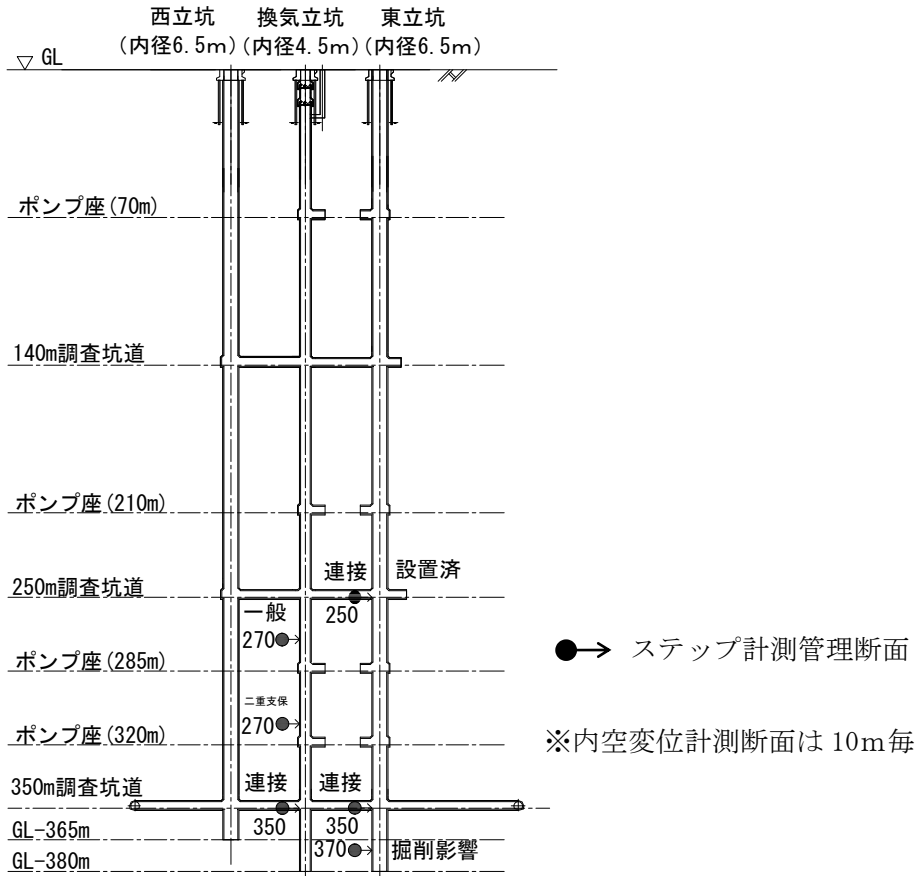
【実施内容】

第 I 期工事から継続している以下の項目を掘削の進捗に応じて実施する。

- ①計測計画および情報化施工計画（森岡ほか，2007；山崎ほか，2008）に基づく地下施設の計測管理（日常管理計測，ステップ管理計測）の実施（図 4.2.1-1,2）
- ②深度 250m 以深の研究坑道を対象とした工学技術（設計・施工技術）の適用性確認と支保の健全性の確認，計測データを用いた設計・施工技術の高度化，計測データを用いた後続施工箇所的设计や管理基準値の更新ならびにその更新方法の開発・体系化（図 4.2.1-3,表 4.2.1-1）

【構築される技術】

- ・地下施設を安全に建設・維持するための、原位置での地質環境情報を利用した地下施設の設計・施工および維持管理技術



立坑 立面図

図 4.2.1-1 計測位置図 (立坑)

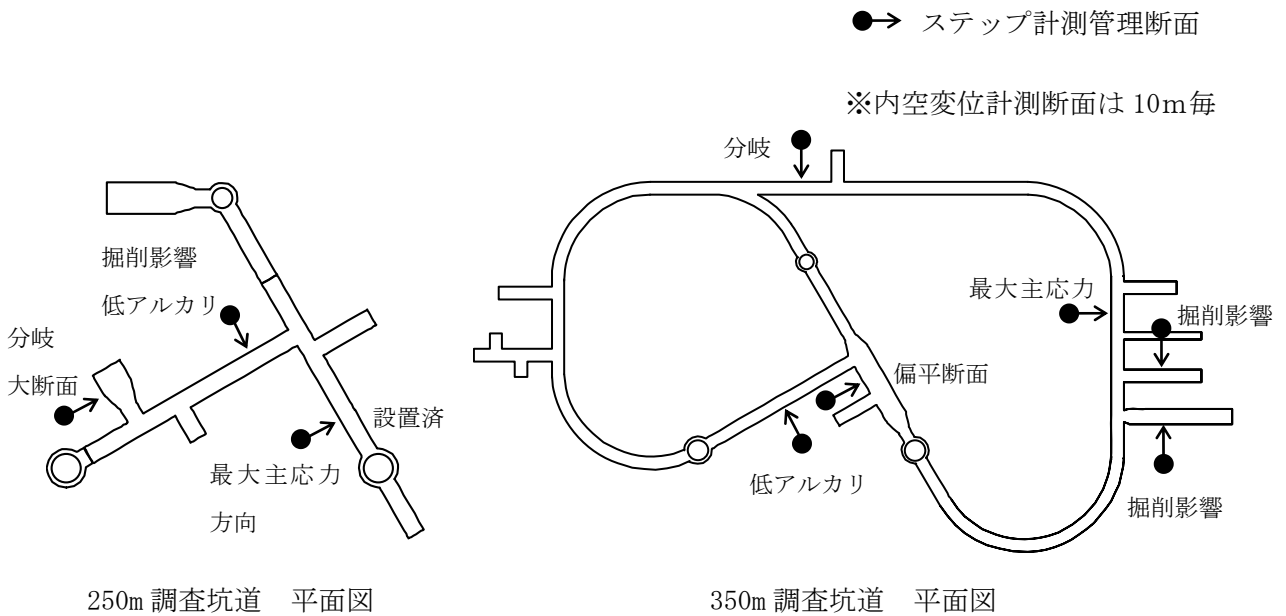


図 4.2.1-2 計測位置図 (調査坑道)

表 4.2.1-1 観察・調査項目とその活用先

観察・調査項目	成果の活用先(項目)										
	1) 地下施設の建設				2) 坑道の設計・施工技術の高度化に関する研究開発					3) 地質研究	
	日常管理		ステップ管理								
	現切羽の評価と支保パターンの選定	既設支保の健全性の監視と長期安定性の評価	挙動予測解析モデル・計測管理基準値の更新	後続施工箇所設計・施工への反映	既存の設計技術(実施設計)の検証	合理的な地山評価手法に関する検討	岩盤の挙動解析モデルの高度化に関する検討	立坑掘削工法・掘削径の違いによる力学的掘削影響の比較分析	掘削後の岩盤長期挙動の分析	地下施設のリスクマネジメントに関する検討	地質環境モデルの精査・検証
切羽(壁面)観察調査	●	○	○	○	●	●	○	○	○	○	●
簡易弾性波探査試験		△				●					○
シュミットハンマー反発度試験		△				●					○
エコーチップ硬さ試験		△				●					○
針貫入試験		△				●					○
点載荷試験		△				●					○
内空変位計測	△	●	●	○	●	●	○	○	○	○	△
地中変位測定			●	○	●	●	○	○	●	○	△
ロックボルト軸力測定		○	●	○	●	●	○	○	●	○	
吹付コンクリート応力測定		○	●	○	●	●	○	○	●	○	
覆工コンクリート応力測定		○	●	○	●	●	○	○	●	○	
鋼製支保工応力測定		○	●	○	●	●	○	○	●	○	
先行変位計測			●	○	●	●	○	○	○	○	△
孔内水平載荷試験			○	○	●	●					○
一軸圧縮試験			○	○	●	●					○
三軸圧縮試験			○	○	●	●					○
圧裂引張強度試験			○	○	●	●					○

●: 主体的に活用する項目
 ○: 検討時に利用する項目
 △: 検討時に参考とする項目

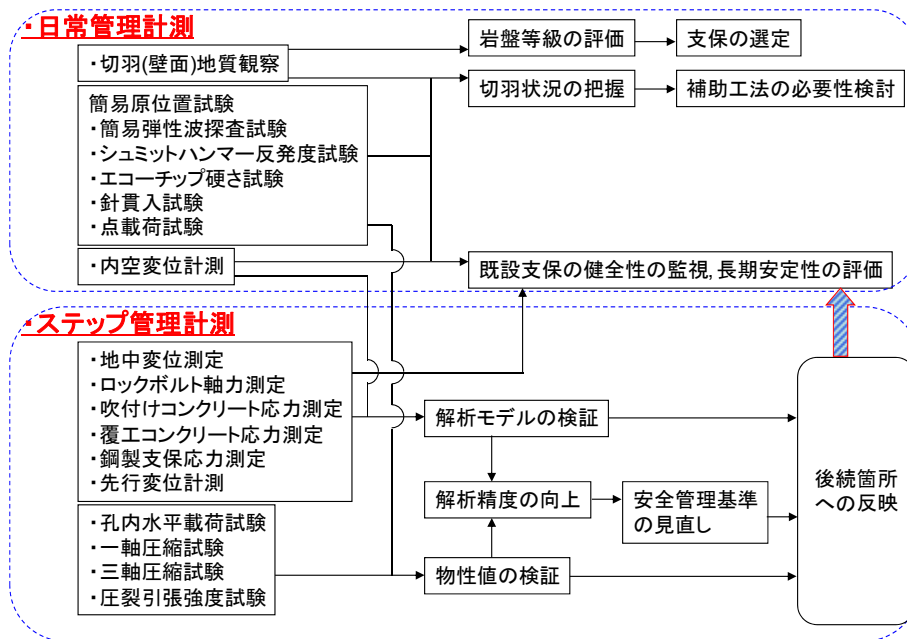


図 4.2.1-3 計測結果の反映フロー図

4.2.2 地下施設の耐震設計の適用性確認

【目的・概要】

堆積岩を対象とした大深度地下施設建設における実施設計（松永ほか，2005）のうち，耐震設計について，実際の観測を通じ，地層処分に反映可能な基盤技術として，設計の適用性確認と高度化・体系化を行う。

平成 21 年度までについては，地震前後の支保応力の計測データ分析結果より，地震時に支保応力が変化していないことを確認した。

本中期計画においては，研究坑道を対象とした耐震設計に関する工学技術（設計・施工技術）の適用性確認，堆積岩を対象とした大深度地下施設の耐震設計の高度化に関する研究開発を目的とする。

【実施内容】

250m 調査坑道・350m 調査坑道への地震計の設置・観測（図 4.2.2-1）および観測データを用いた耐震設計手法の検証を行う。具体的には，実施設計の支保設計のうち，地震による支保の応力増分について，設計値と実測値の分析評価，地震時における各支保部材の応力が終局強度以内であることの確認により，耐震設計の適用性を検証する（ただし，建設期間に設計地震動相当の地震がない場合には，十分な確認は出来ない）。

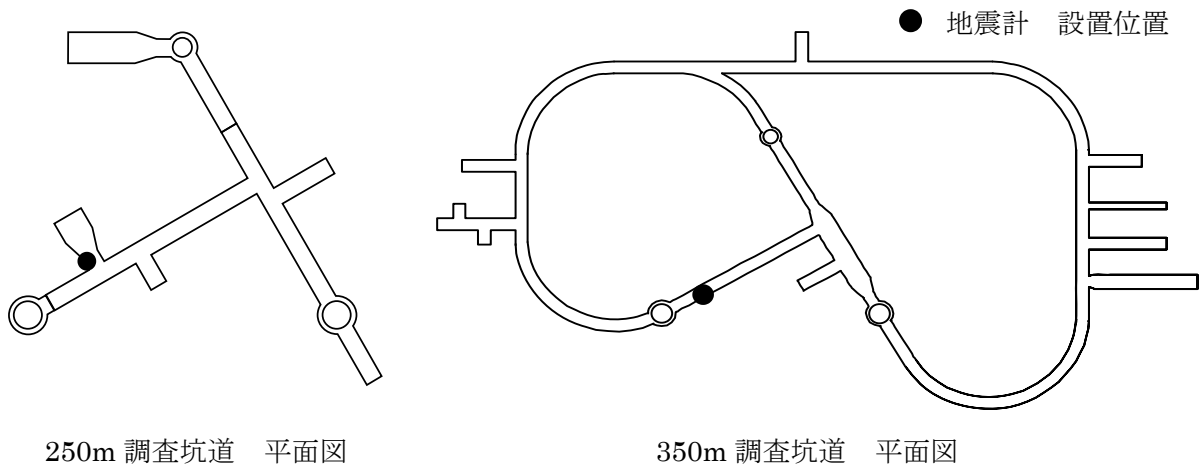


図 4.2.2-1 地震計設置位置図

【構築される技術】

- ・地下施設の耐震設計ならびに地下施設を安全に建設・維持するための，原位置での地質環境情報を利用した地下施設の耐震設計・施工および維持管理技術

4.2.3 地下施設の通気挙動評価技術

【目的・概要】

比較的短時間で地下施設の通気挙動を把握することは、火災等の緊急時において、入坑者を迅速・安全に坑外へ避難させるための防災対策の立案，検討のために必要不可欠である。

立坑など落差の大きな坑道における火災ガスは火災により発生する浮力効果と絞り効果によって複雑な挙動を示し，その予測が難しいことが分かっている。平成 17 年度から平成 21 年度にかけて，実施した委託研究「火災時の通気挙動の検証 (1)～(5)」(水野ほか，2006；水野ほか，2007；奥園ほか，2008；遠藤ほか，2009；遠藤ほか，2010) では，模型実験を通じて，火災ガスの挙動を把握し，一次元通気網解析プログラムおよび流体解析プログラムを統合し，上記の通気挙動をシミュレート可能な通気挙動解析システムを構築した。

システムの検証の結果，URL のような複数の立坑と水平坑道で構成される地下施設での火災時の火災ガスの流れや火災ガス流動範囲の経時変化を数分程度の比較的短時間で計算できるようになった。

本解析システムを用いて，緊急時における安全確保を目的として，火災などのさまざまなケースを想定した通気挙動について検討するとともに，解析の高度化を目的とした，原位置での解析条件（パラメータ）の設定について検討する。

【実施内容】

平成 21 年度までの委託研究の成果（通気網解析プログラム VENETS）を用いて，実際の地下施設を想定した解析精度を向上のためのパラメータ設定（地下施設レイアウト，通気抵抗等）の検討・整理を行う。それらの結果を基により現実の環境に即した解析条件を設定し，定常時および坑道内の火災時を想定した通気解析を行う。地下施設の通気挙動解析を実施する。また，実際の地下施設を用いた原位置でのプログラムの検証を行うために必要な計測項目，条件等について，検討・整理を行う。具体的には，坑道内の温度，湿度，風量などの坑内環境測定項目，モニタリング方法などを検討・整理する。

【構築される技術】

- ・ 地下施設の火災等緊急時の退避経路の検討等，安全確保技術
- ・ 通気網解析プログラム VENETS のパラメータに実際の地下施設でのより現実に即した環境条件を設定することにより，より現実の地下環境を反映した火災時の通気挙動評価が可能となる。

4.3 処分技術の信頼性向上

第2期中期計画（5カ年）における地層処分研究開発の計画概要を述べる。各項目の実施場所および実施時期に関わる工程を表4.3.1に示す。

表 4.3.1 中期計画期間における施設整備と研究工程（処分技術）

章・項番号	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度	H26年度
換気立坑整備		深度250m～350m	深度350m～380m		
東立坑整備		深度250m～350m			深度350m～380m
西立坑整備		深度0m～350m			深度350m～365m
250m坑道整備		槽設備等設計・製作			
350m坑道整備					
4.3.1 処分施設の設計・施工技術の開発		低アルカリ性セメント系材料の施工・影響評価試験(140m, 250m調査坑) ・吹付けコンクリート施工, グラウト施工, コア, 地下水採取・分析, 内空変位測定 ・設計用解析モデルの構築 ・施工管理基準の構築		低アルカリ性セメント系材料の施工・影響評価試験(換気立坑) ・覆工コンクリート施工, コア, 地下水採取・分析, 内空変位測定 低アルカリ性セメント系材料の施工・影響評価試験(350m調査坑道) ・設計用岩盤物性値の設定手法の検証(深度250mまで) ・設計用岩盤物性値の設定手法の検証(深度350mまで) ・緩衝材回収試験設備の設計	
4.3.2 坑道閉鎖技術		・埋め戻し材の仕様決定, 試験計画の立案		・埋め戻し試験(350m調査坑道)	
4.3.3 処分システムの施工技術開発・品質確認				テストピット挙動評価試験(350m調査坑道) -テストピット掘削 -岩盤変位計製作・設置 -内空変位計製作・設置 オーバーバック腐食試験(350m調査坑道) -緩衝材, 注水装置, オーバーバック, 蓋の製作・設置 -緩衝材飽和 -腐食試験(モニタリング) 人工バリア性能試験(350m調査坑道) -傾斜計の計測(試験孔掘削前後, 坑道埋め戻しまで) -試験孔掘削 -緩衝材, 注水装置, オーバーバックの製作・設置 -坑道埋め戻し・プラグ設置 -データ計測(連続計測)	

4.3.1 処分施設の設計・施工技術の開発

(1) 低アルカリ性セメント系材料の開発

【目的・概要】

高レベル放射性廃棄物(HLW)の処分施設は、地下300m以深に建設されることから、坑道の空洞安定性確保や周辺岩盤のゆるみ領域の抑制、掘削に伴う湧水量の抑制のため、セメント系材料を用いた吹付けコンクリートやグラウトが検討されている。また、坑道埋め戻し時に設置されるプラグのうち、埋め戻し材に混合されるベントナイト等の膨潤応力に対する反力を確保するための力学プラグについてもコンクリートの使用が想定されている（核燃料サイクル開発機構，2005）。従来の地下構造物に一般的によく用いられるセメント系材料として、普通ポルトランドセメント（Ordinary Portland Cement;

OPC) がある。このセメントは、セメント硬化体の細孔溶液中に含まれる $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 KOH 、 NaOH などのアルカリ成分により、 pH が 12~13 程度の高アルカリ性を呈する。この特性により、鉄筋コンクリート中の鉄筋の表面には不導体皮膜が生成され、鉄筋の耐腐食性が高められ、鉄筋コンクリートが長期にわたりその性能を保持するために必要な条件となっている。

一方、HLW 処分施設では、上記のセメント硬化体中に含まれる高アルカリ成分が地下水に溶出した場合、緩衝材を構成するベントナイトや周辺の岩盤を変質させ、人工バリアおよび天然バリアとしての性能に影響を与えることが懸念されている。このため、高アルカリ性のセメント系材料からの、緩衝材や岩盤の性質に与える影響が様々な研究機関で検討されている (Cama et al., 2000; 大和田ほか, 2000)。また、セメント系材料は、水和生成物の地下水への溶脱などによる劣化に伴い、核種移行経路となる可能性もあることから、セメントの長期挙動特性を把握する事も重要であるとされている (土木学会, 2004)。

原子力機構では、セメント系材料の低アルカリ性を担保する材料として、OPC にシリカフューム (Silicafume; SF) およびフライアッシュ (Fly-ash; FA) を添加した低アルカリ性セメントである、HFSC (Highly Fly-ash contained Silicafume Cement) を開発し (三原ほか, 1999)、化学的特性、機械的特性、施工性、鉄筋の耐腐食性などについて検討を行ってきている (藤田ほか, 2007)。HFSC は、ポゾラン材料である、SF や FA のポゾラン反応により、セメント水和物中で高アルカリ性を示す $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を珪酸カルシウム水和物 (CSH) などの難溶性の水和物に変化させ、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の量を減少させるとともに、カルシウムシリカモル比を OPC のみの場合よりも低下させることにより、 pH を低下させることを指向したセメントである。

第 1 段階においては、室内試験や小規模な模擬トンネルへの吹付け試験などを通じて、施工性、強度特性、 pH 低下挙動、鉄筋の耐腐食性などについての成果が得られている (岩月ほか, 2009)。また、第 2 段階においては、平成 21 年度に幌延深地層研究センターの地下施設 (以下、幌延 URL) の深度 140m 調査坑道において、HFSC を用いた吹付けコンクリートを坑道の支保工として施工し、施工性の確認等を実施した (Nakayama et al., 2010)。

低アルカリ性のグラウト材料としては、OPC と SF を混合した材料について、室内試験等を実施し、浸透性などについてのデータを取得するとともに、平成 21 年度に幌延 URL の深度 250m 調査坑道において原位置注入試験を行い、その施工性、止水性などについて確認した (日本原子力研究開発機構, 2010c)。

【実施内容】

①坑道支保工への適用性確認

HFSC を HLW の処分施設に適用するためには、コンクリート製の支保工やグラウト材料として、施工性や強度などの力学的性能および操業期間中の耐久性能に関して検討する必要がある。これらの性能に関して、幌延 URL の坑道を用いた原位置試験を通じて、実証していく計画である。

中期計画期間 (平成 22~26 年度) においては、建設工程に合わせて、深度 250m 調査坑道、350m 調査坑道および換気立坑の深度 370m~380m 区間において HFSC を用いた吹付けコンクリートおよび覆工コンクリートを施工し、施工性などを確認する。

②低アルカリ性セメント系材料の周辺岩盤への影響評価

セメント系材料からの高アルカリ成分の地下水への溶出によるベントナイトや周辺岩盤への影響の評価を目的として、HFSC コンクリートを施工した部分から、試料を採取し、分析を実施する。周辺岩盤等への影響は非常にゆっくりと進行すると考えられるので、試料の採取、分析は長期間にわたり複数回実施し、OPC コンクリートの施工部分との比較を通じて、影響を評価する。

また、室内試験等により HFSC と地下水との反応について、浸出水の pH の低下挙動や HFSC コンクリートの溶脱挙動等に関するデータ取得を継続し、セメントと地下水の反応に関するモデルの改良を実施する。上記、坑道支保工への適用性確認で実施する HFSC コンクリートの施工後にコンクリート、周辺岩盤および地下水を採取し、分析を行う。また、施工後の長期的な影響を把握するために、一定期間毎に試料採取・分析を実施する。また、140m 調査坑道で施工済みの HFSC 吹付けコンクリートおよび OPC コンクリートに対しても同様の分析を実施する。

③低アルカリ性のグラウト材料の開発

法定深度以深である 350m 調査坑道において、低アルカリ性のグラウト材料の施工を行い、材料としての施工性を実証する。また、施工後の周辺岩盤や地下水への影響について把握するためのデータを取得する。

【構築される技術】

- ・低アルカリ性グラウト材料を用いたグラウト施工の施工性を例示
- ・セメント系材料およびグラウト施工時の周辺岩盤および地下水への影響およびモデル化手法を例示
- ・HLW 処分施設で懸念されるセメント系材料からの高アルカリ成分による影響を緩和するための技術を例示

(2) 処分施設の設計・施工監理技術の開発

【目的・概要】

幌延深地層研究計画では、堆積軟岩を対象として深度 500m までの地下施設の建設を行っている。ボーリングなどの地上からの調査技術によって、地下深部の岩盤性状やその空間分布を詳細に把握することは困難である。そのため、地上からの調査段階において、地下施設建設のための情報化施工プログラム（森岡ほか、2007、山崎ほか、2008）を立案し、同計画に沿って掘削に伴う坑道の力学的安定性を逐次評価しながら地下施設の建設を進めている。4.2.1「情報化施工計画に基づく地下施設設計の適用性確認・更新」で述べたとおり、これまでの一般的な地下構造物の建設事例において、大深度かつ堆積軟岩を施工条件とした事例は多くない。そのため、幌延での地下施設建設をとおして、第1段階で立案した情報化施工計画の適用性の確認とその更新を行っている。

処分施設の設計・施工においては、これまでに一般的な地下構造物で実施されてきた岩盤の変形量から坑道の力学的安定性を判断するだけでなく、坑道周辺岩盤に拡がる透水性の上昇した領域（以下、水理学的な EDZ という）を安全評価上許容できる幅や程度に保持しつつ、設計時の支保構造の増強・軽減を実施していくことが必要である。さらに、人工的な支保部材と岩盤や地下水の長期的な化学的な相互作用によって生じる人工・天然バリアの機能低下の不確実性を低減するために、構築する支保部材の

量は最小限にとどめる必要がある。そのため、幌延での地下施設建設にて実施される坑道の安定性を評価するための計測（A および B 計測）や坑道周辺岩盤の掘削影響調査等の結果を逐次分析していき、第 1 段階で立案された情報化施工計画をベースとして、坑道の力学的安定性と水理学的な EDZ の幅や程度の両方を考慮した処分施設の設計・施工監理技術の開発を行う必要がある。

平成 21 年度までの本研究課題に関する成果・知見は、主として、地下施設建設に伴う岩盤の変形と構築した支保部材の安定性に関する分析結果に基づいている。具体的には、立坑の施工では、掘削直後の岩盤の変形計測結果（A 計測）から、坑道が安定する際の支保部材の応力値や立坑周辺岩盤の非弾性挙動の発達の程度を予測するための施工管理指標を提案した（Tsusaka et. al., 2009, 津坂, 2010）。また、水平坑道の施工では、岩盤の変形計測結果（A 計測）に基づいて、掘削直後の変形速度と坑道が安定する際の最終的な変形量の関係を分析し、その結果を既存の関係と比較することによって、使用した支保部材量の評価を行った（津坂, 2009）。本中期計画にて実施する地下施設建設においても、これらの分析をさらに進めるとともに、坑道掘削に伴って実施される掘削影響試験による水理学的な EDZ の幅や程度の評価を行って、坑道の力学的安定性と水理学的な EDZ の幅や程度の両方を考慮した処分施設の設計・施工監理技術を構築していく。

【実施内容】

①設計用解析モデルの構築

堆積軟岩においては、坑道の掘削によって生じる岩盤の応力状態は、掘削工法や支保部材の量や構築する時期などによって大きく変化する。その坑道周辺岩盤の応力状態の変化は、水理学的な EDZ の発生の主な要因である。幌延に地下施設の実施設設計では、掘削手順等を単純化した二次元解析が実施された。これに対して、処分施設の設計段階において、掘削に伴う坑道周辺岩盤の応力状態の変化をより詳細に予測するために、掘削工法や支保部材の量や構築する時期などを再現できる三次元掘削解析モデルを構築する。

②設計用岩盤物性値の設定手法の検証

施工段階の空洞安定性と水理学的な EDZ の程度や広がりやを設計段階にてより詳細に予測するためには、地上からの調査段階（第 1 段階）にて、設計用解析モデルの岩盤物性値を適切な確度により設定する必要がある。そこで、幌延深地層研究計画の第一段階で設定した岩盤物性値の設定手法を検証するために、250m および 350m 坑道にて原位置岩盤試験を実施する。原位置岩盤試験の実施予定場所を図 4.3.1-1 に示す。

③坑道の施工監理のための施工管理基準値の構築

水平坑道および立坑にて実施する掘削影響試験と A および B 計測の結果を分析する。その結果に基づいて、坑道の安定性および水理学的な EDZ の範囲と程度を施工時に監理するための施工段階での方法論を構築し、その具体的な施工管理基準値を提示する。

④施工監理フロー図の構築とその適用性の検証

実施内容①～③の成果に基づいて、処分施設の建設における設計段階から各施工段階における予測解

析と原位置調査結果の具体的なフィードバック方法を示す設計・施工監理フロー図を構築する。350m 調査坑道および東立坑 350m 以深の施工にて、構築したフロー図に基づく設計・施工監理を実施し、その適用性の検証を行う。

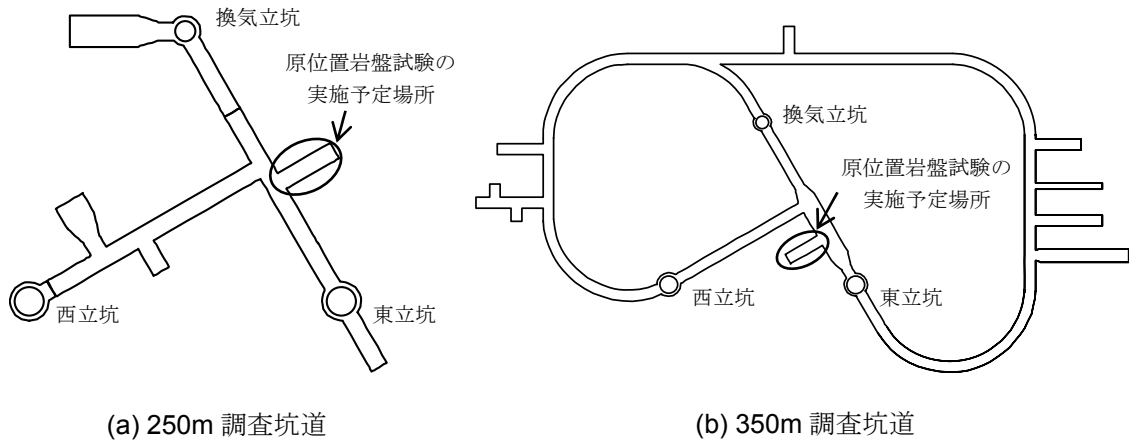


図 4.3.1-1 原位置岩盤試験の実施予定場所

【構築される技術】

- ・ 処分施設の設計のための解析モデルと入力物性値の設定手法
- ・ 坑道の力学的安定性と水理学的な EDZ の幅や程度の両方を考慮した処分施設の施工監理手法

4.3.2 坑道閉鎖技術

【目的・概要】

地下施設に人工バリアを定置した後に残された地上から地下施設に至る坑道や立坑などは、処分場全体のバリア性能に有意な影響を与えないように適切に処置する必要がある。坑道閉鎖技術は、施工技術としては坑道や立坑などを埋め戻し材で埋め戻す技術、プラグなどを設置する技術があり、評価技術としてはそれらの機能を考慮した閉鎖シナリオの構築技術がある。埋め戻し材の材料としては、掘削ズリにベントナイトを混合した材料が示されており、プラグは、その機能により構造体としての機能を期待する強度プラグと地下水の移動を抑制する機能を期待する止水プラグがある。また、地上等から行う調査やモニタリング用の深層ボーリングは、その役割を終えた後には立坑と同じように適切に処置することが求められる。閉鎖シナリオとしては、処分場の設置される岩盤により処分場の仕様が異なることから、設計される処分場の仕様に応じた閉鎖シナリオを構築し、それに基づく数値解析評価を行う必要がある。

埋め戻し材やプラグの機能に関しては、その仕様が示されれば要素試験においてその機能を定量的に示すことが可能となるが、原位置において重要となるのは、設計された仕様で要素を構築できることの確認である。

平成 21 年度までの坑道閉鎖技術に関する研究開発においては、以下のような成果・知見が得られている。

- 具体的な閉鎖性能のシナリオの構築、閉鎖要素の要件検討については、閉鎖要素の止水性能、EDZ や支保工の水理特性などの閉鎖性能に影響を与える因子について、それまでの知見を整理し、母岩以外の核種の支配的な移行の可能性として「連絡坑道を横切る破砕帯を経由する移行の発生」に着目して Fault ツリーを用いた分析を行い、閉鎖性能を論じるためのシナリオの検討を行った。検討の結果として、閉鎖要素においてその機能が発揮されること、その核種移行のためにはいくつかの条件を同時に満たすことが必要であることから、「連絡坑道から小規模の破砕帯を伴う断層を経由する支配的な核種移行が存在する」というシナリオの可能性は低く、「第 2 次取りまとめ」の「母岩を経由して大規模な破砕帯を伴う断層に至る」とするシナリオが妥当であることが示した（核燃料サイクル開発機構、2005）。
- 埋め戻し材および止水プラグの基盤情報の整備については、坑道内の隙間が生じた場合に、隙間を充填すると同時に、低透水性、膨潤性・剛性などの性能を保持する必要があることから、幌延の地下水条件である海水系地下水を用いた埋め戻し材の隙間充填性能に着目した基礎試験を実施した。その結果、膨潤特性は、試験水のイオン強度の影響を受け、降水系地下水条件下よりも海水系地下水条件下の方が低下することが示された。しかしながら、海水系地下水環境下でも降水系地下水環境下と同様、掘削岩片（ズリ）を基本とする埋め戻し材料に粘土を混合させることにより、降水系地下水環境下と同等のシーリング性能が確保できるとことを確認した（核燃料サイクル開発機構、2005）。
- 原位置での実規模試験の評価およびシーリング評価手法については、施工されたプラグの閉鎖性能に関する検証データを取得し、低透水性を確認するとともに、解析によって EDZ を含めたプラグ設置部の物質移動挙動を表現することができた。また、結晶質岩を対象とした原位置試験を行ったカナダの花崗岩の場合、EDZ が選択的物質移動経路となることを示した。これにより、結晶質岩系に対する評価手法の適用性を評価した（核燃料サイクル開発機構、2005）。

・埋め戻し材の隙間充填性能に着目した基礎試験を実施し、埋め戻し材概念について検討した。

本中期計画においては、幌延における坑道閉鎖技術を確認する原位置試験計画の立案を行う。また、
 縦置き方式の人工バリアを対象とした人工バリア性能試験において、坑道部分の埋め戻しや強度プラグ
 の設置を行うことから、埋め戻し材の仕様設定の検討を行う。

【実施内容】

①坑道閉鎖技術を確認する試験計画の立案

堆積岩を対象とする処分場では、地下施設を建設するためには岩盤強度や作用する地圧の関係から、
 坑道の安定性を確保するために支保工が施工されることとなる。このため、堆積岩を対象とした処分場
 に対する坑道閉鎖技術は、これら支保工を考慮したものでなくてはならない。実際の処分場において閉
 鎖要素の機能が求められるのは、支保工などが劣化した後の段階であり、施工した支保工がまだ健全な
 状態で実施できる原位置試験計画を具体化させる。

また、この試験計画の中で、人工バリア性能試験において実施する坑道部分の埋め戻しや強度プラグ
 の設置で実施が可能なものに関しては、人工バリア性の吸い研の範囲において実施していく。

②埋め戻し材の仕様設定

坑道や立坑などを埋め戻すための埋め戻し材は、現地発生土に所定のベントナイトを混合する材料が
 示されている（核燃料サイクル開発機構，1999）。このため、幌延深地層研究計画においても幌延の地
 下施設建設で発生したズリを埋め戻し材として使用する計画である。地下施設の設置地区に分布する岩
 盤は、上部は珪藻質泥岩、深部は珪質泥岩であり、これらの岩盤を粉砕するなど粒度調整を行い、骨材
 として使用する。ベントナイト混合率としては、幌延の地下水を考慮すると 40wt%というのが示されて
 おり（核燃料サイクル開発機構，2005）、これを基準とする。

縦置き方式の人工バリアを対象とした人工バリア性能試験において、坑道部分の埋め戻しを行うが、
 上記配合を基準とする。骨材とする現地発生土は、砕石 2005 相当の粒度に調整することとし、含水比
 をパラメータとした締め固め試験を行い、最適含水比を求めるとともに、埋め戻し材の最大締め固め密度
 を決定する。

【構築される技術】

坑道掘削の工程との関係から、本項目に関する原位置試験は、本中期計画に続く期間に本格的に実施
 することになる。原位置試験を実施することにより構築される技術は以下の通りである。

- ・閉鎖シナリオを構築し、評価する技術
- ・閉鎖要素を原位置において構築する技術

4.3.3 処分システムの施工技術開発・品質確認

(1) ガス移行挙動評価

【目的・概要】

炭素鋼オーバーパックの腐食により発生する水素ガスは、緩衝材が低透気性であるため、緩衝材とオーバーパックの界面に蓄積されることや、水素ガスが緩衝材中を移行する際、緩衝材中の間隙水を押し出すことなどが考えられる。これらについては、緩衝材の長期力学的安定性や放射性核種の移行に悪影響を及ぼすことが考えられることから、処分場の設計において設定される人工バリアシステムの長期健全性を示すためにも、その影響を定量的に評価する技術の開発が不可欠となる。このためには、ガス移行・力学連成モデルの改良・高度化を行うとともに、原位置試験により評価手法の妥当性を評価することが必要である。

平成 21 年度までのガス移行挙動評価に関する研究開発においては、以下のような成果・知見が得られている。

- ・第 1 段階の調査研究においては、実際の地質環境条件下での緩衝材の透気特性データを充足するという観点から、海水系地下水条件下における緩衝材の透気特性データの拡充を進めた（核燃料サイクル開発機構，2005）。緩衝材の透気特性については、降水系と海水系の地下水条件とでは顕著な違いは見られないことが明らかとなった。
- ・より詳細な現象の理解という観点から、従来の実験を補完する新たな手法として、X 線CT 法の適用性に関する検討を行った。試料断面におけるCT 値の相対的な変化をある程度把握することが可能であることがわかった。
- ・ガス移行評価手法の一つである改良型TOUGH2 モデルの適用性の確認として、ガス移行試験結果とガス移行評価モデルによる解析結果との比較を行ったところ、改良型TOUGH2 やGAMBIT-GWS モデル（Hoch et al., 2004）によって実験結果をある程度再現できることが分かった（核燃料サイクル開発機構，2005）。また、GAMBIT-GWS モデルの改良・更新を継続して行った。
- ・幌延の地下研究施設を利用したガス移行原位置試験に関わる概略的な検討を行った。

本中期計画においては、地下施設で実施する原位置試験計画の詳細化について検討を行う。

【実施内容】

緩衝材の候補材料であるベントナイトや幌延におけるボーリングコアを用いた室内試験により透気特性データの拡充を行うとともに、解析上必要となるパラメータの整備を行う。また、GAMBIT-GWS モデルによるガス移行試験結果との比較検討を通じて課題を抽出するとともにモデルの改良を実施する。さらに、これらの成果に基づき、原位置試験計画の策定を行う。

原位置試験計画の策定に当たっては、幌延で採取されたボーリングコアおよびベントナイトを用いたガス移行試験データを用いて、原位置試験を考慮した予備解析等の結果を合わせて考慮する。

【構築される技術】

坑道掘削の工程との関係から、本項目に関する原位置試験は、本中期計画に続く期間に本格的に実施することになる。原位置試験を実施することにより構築される技術は以下の通りである。

- ・具体的な地質環境条件を踏まえた緩衝材および岩盤の透気特性に関する基礎データの拡充によって、

ガス移行パラメータ設定方法の考え方を提示する技術

- ・改良型TOUGH2 やGAMBIT-GWS モデルなどを用いた比較検討により、これらのモデルの特徴や利用に際しての留意事項を提示する技術
- ・具体的な地質環境条件に対するガス移行-力学連成評価手法（GAMBIT-GWS）の技術

(2)テストピット挙動評価

【目的・概要】

堅置き方式の処分場概念では、処分坑道から掘削したピットに人工バリアを定置することとなる。ピットの挙動（特に変形挙動）は人工バリア周囲のニアフィールド環境の力学的、水理学的特性に直接的な影響を与えることから、その挙動の評価が重要となっている。幌延深地層研究計画で掘削される坑道は安全性確保の観点から、原則、支保工が設置されることとなっているが、第2次取りまとめでも示されているように、堅置き方式の処分場概念における処分孔には支保工は施工しないこととなっている。そのため、支保工が施工されていない状態でのピットの挙動を評価することが重要となる。

平成21年度までのテストピット挙動評価に関連する岩盤の長期挙動の評価技術に関する研究開発においては、以下のような成果・知見が得られている。

- ・第1段階の地上からの調査研究段階において、岩盤の長期力学挙動予測に必要なデータ（強度特性、変形特性、コンプライアンス可変型構成方程式の定数 n , m ）の取得、解析用物性値の設定例の提示および堅置き方式における処分孔周辺岩盤の長期力学挙動予測手法の提示を行った（核燃料サイクル開発機構、2005）。
- ・岩盤の長期変形挙動予測の妥当性を検証するためのナチュラルアナログ的概念を提示し、超長期を対象としたときには地圧現象がナチュラルアナログ的手法として有望であることを示した（核燃料サイクル開発機構、2005）。
- ・データが公開されている二つの山岳トンネルの計測データを対象としてコンプライアンス可変型構成方程式を用いてシミュレートを行った結果、内空変位や支保工軸力に関する計算値は、計測データと概ね一致し、コンプライアンス可変型構成方程式を用いた解析手法により、ニアフィールド岩盤の長期安定性評価のみならず、トンネル掘削時の岩盤の挙動を再現可能であることを示した（平本ほか、2007）。

本中期計画においては、幌延におけるテストピットの挙動を確認する原位置試験計画の立案を行う。試験では、テストピット周囲の岩盤の長期挙動に関する検証データを取得するため、無支保のテストピットを対象とした原位置試験を行う。

【実施内容】

①坑道掘削時の岩盤挙動に対するコンプライアンス可変型構成方程式の再現性の検証

坑道掘削時の調査研究段階で得られる計測データ（坑道掘削における内空変位、支保工応力（吹付けコンクリート応力、鋼製支保工応力）など）を対象にシミュレートし、坑道掘削時の岩盤挙動に対するコンプライアンス可変型構成方程式の m , n などのパラメータ設定の妥当性について検証を行う。

② 幌延の原位置試験計画の立案

これまでの初期地圧や岩盤強度等を考慮した予備解析からは、フルスケールの処分孔を模擬したテストピットを掘削することは困難であることが示されており、無支保であるテストピットの挙動を評価することは出来ないと考えられる。テストピットの長期挙動を把握するためには、無支保のテストピットを対象とした試験の実施が不可欠である。

そこで、350mで取得される岩盤の力学定数や初期地圧を考慮した空洞安定性解析により、試験に供するテストピットの寸法を設定する。

【構築される技術】

坑道掘削の工程との関係から、本項目に関する原位置試験は、本中期計画に続く期間に本格的に実施することになる。原位置試験を実施することにより構築される技術は以下の通りである。

- ・岩盤の長期挙動を予測・評価する解析技術（コンプライアンス可変型方程式）
- ・岩盤の長期変形挙動を評価する検証データを取得する技術

(3)人工バリア性能試験

【目的・概要】

人工バリア設計や性能評価の信頼性の向上のためには、建設、操業時にニアフィールドに生起する連成現象の時間的、空間的な変遷を定量的に把握する必要がある。このためには、ニアフィールドにおける熱-水-応力-化学連成挙動（建設時には主に水-応力-化学連成挙動）を数値解析により評価する技術の開発が不可欠であり、これを目標として、連成解析モデル／コードの構築・高度化、構築したモデル／コードの検証／確認のための室内および原位置試験の実施を進め、一連の試験において連成挙動に関わるデータを取得する技術の開発も行う。

平成 21 年度までの人工バリア性能に関する研究開発においては、以下のような成果・知見が得られている（核燃料サイクル開発機構，2005）。

- ・第 1 段階では、熱、水、応力、化学現象の相関関係を整理し連成モデルの作成を行うとともに、熱-水-応力連成解析コード（THAMES）に、地球化学解析コード（PHREEQC）と移流分散解析コード（Dtransu3D-EL）を連携させて、熱-水-応力-化学連成解析プロトタイプコードを開発した。
- ・開発したプロトタイプコードを用いて、「第 2 次取りまとめ」の処分場レイアウトを用いた熱-水-化学連成解析を実施し、「第 2 次取りまとめ」における緩衝材最高温度、再冠水時間や緩衝材の pH の解析結果の妥当性を提示した。
- ・室内連成試験設備（以下、COUPLE という）を用いて、連成挙動に関わるデータを取得し、開発したプロトタイプコードの確認解析を実施した結果、熱-水-化学連成モデルにより緩衝材中の pH の変化を表現可能であることを確認した。
- ・国際機関や欧米各国における情報や国内の関連情報に基づき、熱-水-応力-化学連成現象確認のための計測項目・技術に関する情報を整理した。

本中期計画においては、地下施設で実施する原位置試験計画の詳細化に必要な室内試験を行い、データについて検討を行う。

【実施内容】

第2段階で得られる地質環境データを用いた連成解析結果に基づいて、ニアフィールド環境に影響を与えるパラメータを整理するとともに、人工バリア性能試験の詳細化のための予備解析を実施する。

また、人工バリア性能試験において連成挙動に関するデータを取得するための測定技術の開発として、COUPLE などを用いた室内試験を実施する。

【構築される技術】

坑道掘削の工程との関係から、本項目に関する原位置試験は、本中期計画に続く期間に本格的に実施することになる。原位置試験を実施することにより構築される技術は以下の通りである。

- ・熱-水-応力-化学連成現象を把握するための計測技術
- ・原位置試験で取得される熱-水-応力-化学連成現象を評価する解析技術

(4)オーバーパック腐食挙動

【目的・概要】

オーバーパックの腐食挙動に関しては、「平成17年取りまとめ」までに幅広い地質環境条件を想定してオーバーパックの腐食寿命評価手法の検討、腐食しろの設定を行ってきた（核燃料サイクル開発機構, 2005）。将来的には処分場の地質環境条件に対応したオーバーパックの設計が求められることから、具体的な地質環境条件を想定したオーバーパック材料の選定や寿命評価手法の適用性評価を行う必要がある。そこで、オーバーパックの設計に反映させることを目的として、幌延地域の地下水環境を事例としてオーバーパック候補材料の腐食挙動を検討し、各候補材料の適用性や長期腐食量の推定を行う。

平成21年度までのオーバーパック腐食挙動に関する研究開発においては、以下のような成果・知見が得られている。

- ・第1段階における工学技術の開発では、幌延地域の地下水環境における炭素鋼オーバーパックの腐食形態が全面腐食であることを示すとともに、腐食速度、腐食局在化の大きさは「第2次取りまとめ」および「平成17年度取りまとめ」にて推定した範囲内であることを示した。
- ・酸素による腐食量、水の還元による腐食量を「第2次取りまとめ」にて提示した手法により評価した。また、代替材料についても既存の知見を基にオーバーパックとしての適用性を概略的に検討した。
- ・残された課題として、放射線遮へい厚さなどについて、より合理的なオーバーパック設計の考え方を構築することや支保工の影響を含めた実地下水条件での腐食挙動の実験的検討、代替オーバーパックに関する知見の整備などが挙げられている。
- ・原位置における腐食モニタリング技術については、電気化学手法の一つである交流インピーダンス法が代表的であり、土壌環境での石油タンクの腐食モニタリングなど参考となる事例もある（Sudo et al., 1995）。この方法は、原位置試験においても適用可能な技術の一つと予想される。また、近年は電気化学ノイズ測定による腐食速度のモニタリング（水流・柳沼, 2003）、電気化学的透過法を用いた水素吸収量のモニタリング（立川ほか, 2006）なども処分環境への適用に向けて基礎的な検討が行われている。

本中期計画においては、幌延の地下水環境を事例とした室内試験、腐食挙動の解析評価、腐食挙動のモニタリング技術の適用性確認を行うとともに、地下施設で実施する原位置試験計画の詳細化について

検討を行う。

【実施内容】

①幌延地域の地下水環境を事例とした炭素鋼，チタン，銅の腐食挙動の検討とオーバーパックの適用性評価，腐食寿命評価

腐食試験溶液として実際に採取した実地下水，地下水の分析値やモデル計算結果に基づく模擬地下水を用いて以下の項目について実験的な検討を行う。

1) 炭素鋼

炭素鋼については「第2次取りまとめ」における腐食シナリオに基づき，以下の検討を行う。

- ・ 不動態化挙動
- ・ 酸化性雰囲気での全面腐食／局部腐食進展挙動
- ・ 低酸素雰囲気での全面腐食進展挙動
- ・ 応力腐食割れ挙動

幌延地域の地下水中には炭素鋼の不動態化を促進する炭酸塩が含まれるほか，コンクリート製支保工による影響で高pH化した環境となり，より不動態化しやすくなるため，局部腐食の発生が懸念される。よってこれらの検討では，コンクリート製支保工により高pH化した地下水条件での挙動を重点的に調べる。

2) チタン

チタンは高炭酸塩環境やアルカリ性環境において耐食性が低下する傾向がある（鈴木ほか，2006）。よってコンクリート製支保工により高pH化した地下水条件での水素吸収挙動を調べ，脆化の可能性を確認する。

3) 銅

幌延地域の地下水中には硫化物はほとんど含まれていないため，低酸素濃度環境において銅は熱力学的に安定となることが期待される。よって酸化性環境での腐食挙動を明らかにすることが重要な課題であり，以下の検討を行う。

- ・ 局部腐食生起可能性
- ・ 酸化性雰囲気での全面腐食／局部腐食生起／進展挙動
- ・ 応力腐食割れ挙動

上記の結果に基づき，銅材料のオーバーパックとしての適用性を評価するとともに，適用可能な場合については腐食寿命評価または腐食しろの設定を行う。

②原位置試験における腐食モニタリング手法の検討

交流インピーダンス法は人工海水を用いた実験室規模での測定実績があり（谷口ほか，1999），幌延地域の地下水条件で適用性の評価を行うとともに，緩衝材，試験片の規模を大きくした条件での測定を試みる。また，電気化学ノイズ測定による腐食速度のモニタリング方法について，ベントナイト環境での適用性，測定結果の妥当性などを室内試験によって評価し，原位置試験での適用可能性を検討する。電気化学的水素透過法についても室内試験を行い，ベントナイト環境での適用性，適用限界，課題などについて検討する。

【構築される技術】

坑道掘削の工程との関係から、本項目に関する原位置試験は、本中期計画に続く期間に本格的に実施することになる。原位置試験を実施することにより構築される技術は以下の通りである。

- ・原位置に適用できる腐食挙動モニタリング技術
- ・炭素鋼については、高pH 環境での局部腐食挙動に関する実験データおよびそのデータに基づく長期腐食量の推定結果を提示する。
- ・チタンについては、高pH 環境での水素発生/吸収量測定結果に基づき、腐食速度、長期水素吸収量を推定し、水素脆化の可能性について提示する。
- ・銅については、電気化学的な手法を用いて酸化性環境における腐食形態、局部腐食の可能性を提示する。

(5)緩衝材の回収技術

【目的と概要】

操業期間中、オーバーパックや緩衝材を上手く定置出来なかった場合や定置後に欠陥や不具合が確認された場合、品質管理の観点から、一度定置したオーバーパックや緩衝材を回収する必要がある。この場合、定置直後の場合は定置装置を用いて回収可能であるものの、定置後、一定時間が経過し、地下水が緩衝材中を浸潤することにより緩衝材が膨潤し、除去回収することが困難となることが考えられる。オーバーパックについては、緩衝材を除去することができれば、定置と逆の動作により回収可能であると考えられるが、緩衝材については含水することによって膨潤し、簡単には除去できなくなるため、緩衝材を除去回収するための技術が必要となる。

緩衝材の除去技術については、スウェーデンのSKB（スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社）が先行しており、地下研究施設であるÄspö岩盤研究所において、塩水を利用した原位置での実証試験が実施された（SKB, 2004）。2006年5月24日付のプレスリリースにおいて、キャニスタの回収に成功したことが報告されている（SKB, 2006）。この原位置実証試験では、キャニスタの半分の深さまでベントナイトを掘削除去した後、CaCl₂溶液でベントナイトをスラリー状に溶かしてポンプで排出しており、全てのベントナイトを溶解除去している訳ではない。我が国においても、実験室規模での塩水を利用した圧縮ベントナイトの分解除去試験が実施されており、様々な濃度でのNaCl溶液やCaCl₂溶液と様々なベントナイトへの吹付け圧力に対して最適条件の検討が行われている（岩佐ほか, 2007a, 2007b, 2008; 張ほか, 2008, 2009; 石井ほか, 2009）。その他、ドライアイスペレットを吹きかけてベントナイトを除去回収するアイスブラスト工法についても実験室規模で実施されている（高村ほか, 2008）。

人工バリアの定置・回収技術に関する実証試験については、資源エネルギー庁が、平成20年度から公募事業として「実規模設備整備事業（体感設備）」を開始し、その一環として、原子力機構と原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、原環センター）との共同研究の中で、緩衝材の回収技術に関する原位置での実証試験について検討している。実用性の観点から、塩水を利用した除去回収方法について検討している（中司ほか, 2009; 原環センター, 2009）。

本中期計画においては、PFI事業の中で整備される地下坑道を利用し、上述のような共同研究の利用を視野に入れて、外部資金を有効活用しながら埋め戻し前の緩衝材の回収技術に関する実証試験の具体化を図ると共に、地下施設での試験設備の整備方法などについて検討する。また、地下施設の仕様やイ

インフラの整備状況，資材搬出入および運搬の制約条件などの条件を考慮し，試験設備の具体的な検討を行うと共に，試験設備の設計に着手する。

【実施内容】

①緩衝材の回収試験の具体化

これまでの検討結果（中司ほか，2009；原子力環境整備促進・資金管理センター，2009）に基づいて，地下施設での緩衝材の回収試験について具体化する。具体的には，試験装置の概要と試験項目などについて整理し，原位置試験計画を策定する。

②地下施設での試験設備の整備方法の検討

PFI 事業下で実施することを考慮し，坑道の仕様，地下施設の整備工程，インフラの整備状況，資材搬出入および運搬の制約条件，地質環境条件などについて調査し，試験場所，試験設備の搬入方法，時期などの試験設備の整備計画について検討する。

③試験設備の設計

①と②の検討結果を考慮し，試験設備の具体的な検討を行うと共に，設計を実施する。なお，試験設備の規模や設計・製作時期および製作期間については公募事業の予算によって変動するため，本中期計画の中で具体化していないが，試験設備の製作を開始する可能性もある。

【構築される技術】

- ・緩衝材の回収技術の実現性について，その見通しを提示する。

4.4 安全評価手法の高度化

第2期中期計画（5カ年）における深地層の安全評価手法の高度化に関わる計画概要を述べる。各項目の実施場所および実施時期に関わる工程を表4.4.1に示す。

表 4.4.1 中期計画期間における施設整備と研究工程（安全評価手法の高度化）

章・項 番号	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度	H26年度
換気立坑整備		深度250m～350m	深度350m～380m		
東立坑整備		深度250m～350m			深度350m～380m
西立坑整備		深度0m～350m			深度350m～365m
250m坑道整備		槽設備等設計・製作			
350m坑道整備					
4.4 安全評価手法の高度化	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材及び岩石に対する物質移行・遅延プロセスに関する室内試験 ベントナイト中の物質移行データの取得 セメント系材料中の物質移行データの取得 室内試験データ、データベースなどに基づく原位置物質移動試験に関わる解析と原位置試験の最適化 ベントナイトとセメント系材料界面近傍でのデータ取得とベントナイトへの影響評価 界面近傍でのセメントの変態に関するデータ取得 地上からの調査で取得される地質環境データに基づいた性能・安全評価の考え方の提示 地下施設を用いた調査で取得される地質環境データに基づいた性能・安全評価の考え方の提示 				

4.4.1 人工バリアおよびその周辺岩盤を対象とした物質移行挙動評価

【目的・概要】

地下深部における物質移動プロセス・メカニズムについては、「4.1.1(4)物質移動特性の調査評価技術」で述べた通りである。ここでは、緩衝材とその周辺岩盤中の物質移行・遅延プロセスに関連して実施される室内・原位置試験ならびにモデル化・解析について記述する。

第1段階の調査研究においては、それまでに得られた地質環境情報、岩芯試料（ボーリングコア）、地下水などを用いて、拡散係数や収着分配係数、物質移行経路などの物質移行に関する情報や知見を蓄積すると共に、マトリクス部への拡散については、深度や地層（声間層および稚内層）の深度変化や岩相の不均質性に起因する間隙率の違いを考慮することにより、「第2次取りまとめ」（核燃料サイクル開発機構，1999）において分類した新第三紀堆積岩（泥岩・凝灰岩類）に対する拡散係数（実効拡散係数）と間隙率との関係に適合することを示し、間隙率の関数として拡散係数を表現できることを確認している（下茂ほか，2003, 2004；核燃料サイクル開発機構，2005）。また、安全評価上重要かつ代表的な元素であるCsやSeの岩石に対する収着挙動に関するデータを取得した（Xia et al., 2006a, 2006b）。それらと並行して、それまでに構築したJNC-SDB収着データベース（澁谷ほか，1999；陶山・笹本，2004）やDDB拡散データベース（Sato, 1999）などを活用して、幌延地域を事例とした地質環境中での地下水による物質移行に関する試解析を行った。一方、第1段階の課題として、物質移行経路における地下水の実流速や溶解度、分配係数、拡散係数、それらの係数に関わる収着・遅延プロセス・メカニズム、コロイド/有機物、微生物の影響の把握などが挙げられた（太田ほか，2007）。加えて、処分坑道の支保材料や坑道の埋め戻しの際に設置されるプラグなどの止水材料、湧水抑制のための止水材料としてセメント材料が使用され、これらは埋め戻し時に地下に残置されるため、長期に亘り緩衝材や埋め戻し材と

接触し、変質させる可能性が指摘されているものの、セメント材料と緩衝材（ベントナイト）の界面における相互作用やそれらの影響を受けた両材料中の原位置での物質移行挙動に関する情報はほとんど得られていない。

これらの課題を踏まえて、第2段階の調査研究においては、実際の地質環境への安全評価手法の適用性を確認するための研究開発の一環として、これまでの調査で得られた地質環境情報や岩芯試料、地下施設における調査などで取得した岩石試料や地下水などを用いて、安全評価における物質移行・遅延の解析で重要な元素や移行プロセスに関する基礎データ（拡散係数、収着分配係数、間隙率、溶解度など）を室内試験により取得し、データの蓄積と現象解明に加えて、モデルの構築を進めている。また、物質移行・遅延に影響を及ぼすと考えられている有機物/コロイド、微生物の影響などに関する情報や知見の蓄積を進める（日本原子力研究開発機構、2008, 2009）と共に、原位置でのデータ取得技術や定量評価手法の整備を進めている（石寺・黒澤、2007；石寺ほか、2008；日本原子力研究開発機構、2008, 2009）。また、セメント材料とベントナイトとの相互作用（物質移行、二次鉱物生成、変質、長期的変化など）に関するデータ取得を進めている。

安全評価手法の高度化に関わる第2～3段階の調査研究の概要は、以下の通りである。

- ・ 第2および第3段階の調査研究において取得した地質環境情報や物質移行・遅延に関わるデータや知見、ならびに熱力学・収着・拡散データベース等を活用して、幌延地域を事例とした物質移行解析を行い、地質環境調査から物質移行解析に至る一連の安全評価手法の適用性を確認する。
- ・ 各段階での物質移行解析におけるモデルやパラメータの設定や設定根拠、パラメータの感度や解析のノウハウなどを整理し、地下水による物質移行に関わる調査・解析技術を体系化する。
- ・ 有機物/コロイド、微生物、セメントなどが物質移行・遅延プロセスに及ぼす影響評価や物質移行・遅延プロセス・メカニズムに関わる収着・拡散、有機物/コロイド、微生物、セメントなどの影響を把握するための解析技術を整備する。

第3段階では、緩衝材とその周辺岩盤を対象とした原位置でのトレーサー試験が主な研究テーマとして計画されている。段階的に得られる地質環境情報と構築された物質移動モデル（「4.1.1(4)物質移動特性の調査評価技術」）、室内試験から取得されたデータ、整備・更新された物質移行・遅延に関わる熱力学・収着・拡散データベース（日本原子力研究開発機構：<http://migrationdb.jaea.go.jp/>）などに基づいて、緩衝材および岩石中の物質移行に関わる予測解析を実施し、原位置試験結果と比較することで物質移行解析技術の適用性を確認する。なお、緩衝材とその周辺岩盤を対象とした原位置試験は、350m坑道において計画されており、各種パラメータの取得や物質移行特性の把握の大部分は平成27年度以降を想定しているため、平成26年度までは、段階的に得られる地質環境情報と構築された物質移動モデルに基づいた物質移行に関する予測解析を中心に実施する。また、予測解析結果に基づいて、原位置試験計画（試験場所や数量、レイアウト等）の最適化を図る。

ここでは、緩衝材とその周辺岩盤中の物質移行・遅延プロセスについて、収着・拡散、有機物/コロイド、微生物、セメントなどの影響や挙動を把握するための一連の調査・解析技術について記述する。なお、セメント材料については、「4.3.1(1)低アルカリ性セメント系材料の開発」の中で、原位置施工したコンクリートの周辺岩盤や地下水への物理化学的影響について調査すると共に、熱力学解析を行う計画であり、そこで得られたデータや情報も反映する。

【実施内容】

①緩衝材および岩石に対する物質移行・遅延プロセスに関する室内試験

段階的に得られる地質環境情報や岩芯試料，地下施設における調査などで取得した岩石試料や地下水などを用いて，安全評価における緩衝材および岩石中の物質移行・遅延の解析で重要な元素や移行プロセスに関する基礎データ（拡散係数，収着分配係数，間隙率，溶解度など）を室内試験により取得し，データの蓄積と現象解明に加えて，モデルの構築を行う。また，緩衝材から岩石への物質移行・遅延に影響を及ぼすと考えられている有機物/コロイド，微生物などの影響に関するデータの取得と情報や知見の蓄積を行う。

②緩衝材および岩石に対する物質移行・遅延プロセスに関する原位置試験

350m 調査坑道において実施される予定の岩盤を対象とした原位置物質移動試験（「4.1.1(4)物質移動特性の調査評価技術」）と連携して，人工バリアを模擬した緩衝材が充填された複数のボーリング孔を設置し，原位置でのトレーサー試験（長期拡散試験）を開始する。試験に際しては，対象となる稚内層中の健岩部領域を地質学的，水理学的調査により事前に把握した上で，候補岩盤となりうる試験箇所を設定する。また，250m調査坑道の既存施設等を用いた予備的な試験を実施し，350m 調査坑道で実施する原位置トレーサー試験のための試験装置や試験手法を段階的に整備する。

③原位置物質移行試験に関わるモデル化・解析

段階的に得られる地質環境情報と構築された物質移動モデル，室内試験から取得されたデータ，整備・更新された物質移行・遅延に関わる熱力学・収着・拡散データベースなどに基づいて，緩衝材および岩石中の物質移行に関わる予測解析を実施する。また，予測解析結果に基づいて，原位置試験計画（試験場所や数量，レイアウト等）の最適化を図る。

④セメントの影響に関する室内試験

セメントおよびベントナイト中の物質移行に関するデータやセメントとベントナイトが接触する界面近傍での物質移行に関するパラメータや固相変化，間隙水変化，二次鉱物生成，反応メカニズムなどについて調査し，ベントナイトとセメント系材料が接触する場合の界面での相互作用やベントナイトへの影響などについて検討する。

【構築される技術】

- ・ 幌延の地質環境条件を事例とした緩衝材およびその周辺岩石に対する物質移行調査解析技術
- ・ 緩衝材および岩石中の物質移行・遅延，有機物/コロイド，微生物などの影響評価技術
- ・ ベントナイトとセメントが接触した場合のセメントの影響評価技術

4.4.2 安全評価手法の適用性確認

【目的・概要】

NUMO が行う最終的な安全評価は安全審査の段階（精密調査の段階終了後）で実施することとなるが、概要調査が始まる前までに精密調査地区選定上の考慮事項を公表することとしている（原子力発電環境整備機構，2010）。一方，原子力安全・保安院は，「概要調査結果の妥当性レビューのための判断指標の検討」について（案）（原子力安全・保安院，2010a）の中で，概要調査結果の妥当性レビューにおける視点として，特魔法に示された法定要件のみならず，長期安全性などを考慮する方針を示している。また，概要調査結果の妥当性レビューのための判断指標を，2012年を目途に作成する計画としている（原子力安全・保安院，2010b）。

一方，原子力安全委員会は，2010年4月に「余裕深度処分管理期間終了以後における安全評価に関する考え方」を公開した（原子力安全委員会，2010）。この報告書は，2004年6月に公開した「放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について」（原子力安全委員会，2004）に示されたリスク論的考え方に基づき，余裕深度処分に対する安全評価手法に係るシナリオ設定の考え方を示したものである。本報告書では，地質環境に係る状態設定に関して，「基本シナリオにおける状態設定は，長期変動事象に関する過去の変動傾向とその要因を踏まえ，できるだけ確からしいものとする」としている。「共通的な重要事項」は，低レベル放射性廃棄物の処分だけでなく，高レベル放射性廃棄物の処分も対象としていることから，高レベル放射性廃棄物（および地層処分低レベル放射性廃棄物）の地層処分の安全評価についても，近年中に類似の考え方が示されることが想定される。

以上のように，安全評価に関する検討は，実施主体および規制当局において精密調査の段階終了までに行われることとなる。そのため，原子力機構に課せられた，安全評価手法の高度化，ならびに幌延の情報を利用した安全評価手法の適用性確認は，それらの検討に反映すべく，地上及び地下での調査段階の結果を基に進める必要がある。

NUMO は，精密調査の段階を，地上からの調査段階と地下調査施設での調査段階に分けて安全審査基本指針への適合性を確認するとしている（原子力発電環境整備機構，2010）。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）は，NUMO の概要調査段階および精密調査段階の地上からの調査段階に反映することとしていることから，原子力機構は，精密調査段階が開始する前に，地上からの調査に基づく安全評価の枠組みと精密調査を見据えての地下施設を利用した調査に基づく安全評価の考え方を示すことが必要である。「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」（平成20年3月14日閣議決定）では，精密調査地区は平成20年代中頃を目途に選定するものとされている。NUMO によるサイト選定は進んでいないものの，本計画を踏まえ，地下施設を利用した調査に基づく安全評価の考え方を提示することが必要である。

幌延深地層研究計画の地上からの調査研究段階（第1段階）においては，安全評価手法の適用性確認に関して，幌延の地質環境情報に基づく物質移行解析を実施した（牧野ほか，2005）。ここでは，岩盤を多孔質媒体と仮定している。第1段階終了時において，「幌延地域の岩盤は，水理特性の観点からは，亀裂性岩盤ないし亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性をあわせ持つ岩盤」（太田ほか，2007）ということがわかっていたが，各分野の情報の統合化，モデル化との時間的なラグによって，物質移行解析には反映されていなかった。その後，物質移行解析に反映するため，亀裂を直接モデル化した地下水流動解析を導入した（太田ほか，2007）。また，安全評価において人間の生活環境と地下深部の境界に位置する表

層部を対象とした水理・物質移動について、これを把握するための方法論の整備を目的とした既存文献に基づくモデル化・解析の手順などを整理した（太田ほか，2007）。自然現象による地質環境の変化が地層処分システムに及ぼす影響を考慮した性能評価手法については、その手順を示した作業フレームを構築し、その作業フレームに従った地質環境データの整理方法が適用可能であり、より適切なシナリオの選択が可能となる見通しを得た（川村ほか，2010）。

本中期計画において取り組むべき重要な課題は、以下のとおりである。

- ・ 地上からの調査及び地下施設を利用した調査で取得される地質環境データを利用した安全評価の考え方の提示

【実施内容】

- ①地上からの調査及び地下施設を利用した調査で取得される地質環境データを利用した安全評価の考え方の提示

地上からの調査及び地下施設などにおいて取得されるデータを追加して物質移動概念およびそれらに基づく安全評価モデルを更新するとともに、地質環境特性評価から安全評価に至る一連の安全評価手法について取りまとめる。

【構築される技術】

安全評価手法の適用性確認を通じ、その信頼性を例示する。

5. 計画推進上の留意事項

研究技術開発の過程で得られる情報については、研究技術開発のみならず地下施設の建設を含めた全体のプロジェクト管理（リスクマネジメント）の観点から、安全管理や施設建設管理、調査研究の実施計画に反映するために、安全管理、周辺の社会環境管理、プロジェクト全体のリスクに関わる情報を集約し、関係者および計画に加わる新規研究者に周知していく。

具体的には以下の項目について関連情報を集約するとともに、安全管理関係者、施設建設関係者との連絡を密にし、プロジェクト推進上のリスクマネジメントを行っていく。なお、本中期計画内において、下記項目以外のリスクが想定される場合は、逐次、個々の研究開発関連業務において対応する。

（1）工事排水の排水量

地下施設の建設、維持管理に伴い発生する工事排水については、水質管理のための処理後、天塩川に放水しており、その放水量は北るもい漁業協同組合との協定（付録）により $750\text{m}^3/\text{日}$ 以下とすることが定められている。この協定を順守するため、 $400\text{m}^3/\text{日}$ の処理能力を有する排水処理施設が 2 基設けられている。深度 250m 調査坑道までの施設建設においては、日平均で百数十 m^3 の工事排水を放水している。平成 22 年度～平成 26 年度の 5 年に行われる施設建設では、深度 250m 以深の稚内層上部の立坑掘削時および深度 350m 調査坑道展開時に地下水湧水量が増加する可能性がある。深度 350m 以深の施設建設時の工事排水量も勘案すると、現中期計画期間における工事排水量については可能な限り少なく維持する必要がある。

工事排水量の抑制には、高透水性領域における坑道掘削前にグラウト施工を行う事で対処する計画となっており、調査研究により明らかになった高透水性領域の分布およびその水理特性、湧水量予測について遅滞なく施工関係者に周知する。

（2）地下水湧水の排出に伴う施設周辺の地下水圧

地下施設建設、維持管理中における地下水の排水は、周辺の地下水位を低下させる可能性がある。豊富温泉（豊富町）に対しては、温泉揚水量に影響が及んでいないことを示すため地下水観測の結果を毎月報告することとしており、プロジェクト終了まで継続する必要がある。また、施設建設時の地下水湧水量と周辺の水圧観測孔における水圧応答を長期的に観測し、施設建設に伴う周辺井戸への影響範囲について把握しておく必要がある。そのため、既存の HDB 孔の水圧観測機器のメンテナンスを行う。また、水圧観測結果を関係者に周知する。

（3）工事排水の水質

地下施設の建設、維持管理に伴い発生する工事排水については天塩川に放水しており、水質汚濁防止法に定められた排水基準および北るもい漁業協同組合との協定を順守するための水質管理を行わなければならない。工事排水は、坑道掘削時および維持管理時に発生する工事排水（地下水湧水と掘削時の工事排水）と掘削土（ズリ）置き場からの浸出水から構成されおり、主にホウ素(B)とアンモニウムイオン(NH_4^+)について、現有の処理施設において濃度の低減を図っている。ホウ素、アンモニウムイオン以外の成分については、工事排水中のそれら濃度の増減について予測するとともに定期的に分析しておく必要がある。そのため、調査研究により予測される水質分布について遅滞なく施工関係者に周知する。

(4) 突発湧水、溶存ガス

深度 250m 以深の高透水性領域に対しては、グラウト施工により透水性を低減させるため坑道掘削時の突発湧水の可能性は低いですが、一方で坑内への湧水が抑制されるために支保に外水圧が作用する恐れがある（これまでは、湧水箇所にはドレーン材を埋設してウォーターリングまで抜く設計思想で、覆工等へ外水圧はかからないようにしていた）。そのため、実施の施工で地山の間隙水圧の変化と支保への荷重負担の増加を注意深く観測しておく必要がある。

そのような環境に研究目的によりボーリング孔などを掘削する場合は、被圧した地下水、溶存ガスが暴噴する可能性がある。したがって、暴噴防止装置(BOP)を設置し、ボーリング孔掘削時の暴噴を防止する。また、ボーリング孔掘削後の各種試験、観測装置の設置に際しては、湧水の排水経路や溶存ガスの換気環境を十分に確認、リスクアセスメントを行ったうえで実施する。

また、地下水中には、水体积の 2 倍前後の溶存ガス（メタンガスが 8~9 割、炭酸ガスが 1~2 割の割合）が含まれており、坑道掘削、維持管理時に排気されるメタン、炭酸ガスについても留意する必要がある。

(5) その他（地震）

北海道北部に分布する活断層帯のうち、幌延町東部には間寒別断層帯、同町西部のサロベツ原野東縁にはサロベツ断層帯が分布している（中田・今泉，2002）。サロベツ断層帯は、豊富町から幌延町を経て、天塩町に至る全体の長さが約 44 km でほぼ南北方向に延びる断層帯である。この断層帯に認められる地表面の変形は、地下に伏在する断層のずれによる褶曲の結果生じたものであり、地表で実施された群列ボーリングの結果などから、平均活動間隔は約 4 千~8 千年、過去の活動時期は約 5,100 年以後、約 4,500 年以前であったと推定されている。また、本断層帯が一つの区間として活動した場合には、マグニチュード 7.6 程度の地震が発生する可能性がある（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2007）。いくつかの仮定のもと活断層評価の手法により見積もられた上記のような規模の地震が発生する確率は、今後 30 年以内で 4%以下であり、日本の主な活断層の中では高いグループに属することになる（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2007）。一方、防災科学研究所による地震ハザードステーションの想定地震地図によると、サロベツ断層帯を起震断層とする地震により、研究所用地では震度 6 弱、北海道北部の西半部では震度 6~7 弱が想定されている（防災科学研究所，2010）。

もし仮に、サロベツ断層帯の活動による地震が発生した場合には、地下施設に限らず、北海道北部の全域に多大な被害が生じるものと想定される。本断層帯では、地震の発生確率を見積もる際の基礎データとなる最新活動時期を特定できていないため、上述した将来における地震発生の可能性について十分な検討ができていない段階にある（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2007）。よって、大学等の研究機関による本断層帯を対象とした調査研究の進展に関する最新情報に逐次着目し、新たな知見が得られた場合には、サロベツ断層帯による地下施設への影響検討（日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター，2010）とともに、地震発生時における従業員等の安全確保に関する対応について、適宜見直すこととする。

6. まとめ

幌延深地層研究計画における第2期中期計画末までの具体的な研究開発課題，研究開発の現状，実施内容，達成目標などを踏まえて今後の研究開発計画を整理した。本資料に整理された内容は，現行の予算計画，施設建設工程を踏まえたものである。第2期中期計画の実施にあたっては，計画推進期間の技術者の入れ替わりに伴う調査研究に関わる経験・知見の逸散，技術継承の断絶を回避するため，計画に関わる技術者間で情報共有を密にし連携して調査研究を実施していく。

計画期間中に得られる調査研究の成果や経験・知見は，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とともに，報告書や論文，ウェブ上の知識管理システムなどを利用して情報管理及び発信を行っていく。さらに，地元自治体などへの理解促進活動の一環として，地下施設における試験研究に関わる見学環境を整備し積極的に一般見学者に公開し，地層処分に関わる安心感の醸成を進めていく。

参考文献

- 防災科学研究所：“地震ハザードステーション (J-SHIS: Japan Seismic Hazard information Station)”，
<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>, <アクセス日 ; 2010年7月30日>
- Cama J., Ganor J., Ayora C., Lasaga A.: “Smectite dissolution kinetics at 80°C and pH 8.8”, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64, pp.2701-2717 (2000)
- 土木学会：“高レベル放射性廃棄物地層処分の現状とさらなる信頼性向上に向けて”(2004)
- 遠藤太嘉志, 河原裕徳, 成田穰, 佐ノ木哲, 林邦彦, 井上雅弘：“火災時の通気挙動の検証 (4)”, 日本原子力研究開発機構 委託研究報告書(2009)
- 遠藤太嘉志, 成田穰, 河原裕徳, 佐ノ木哲, 林邦彦, 富永英治, 井上雅弘：“火災時の通気挙動の検証 (5)”, 日本原子力研究開発機構 委託研究報告書(2010)
- 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：“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)研究成果報告書一分冊「地層処分研究開発」”, *JAEA-Research 2007-045* (2007)
- 舟木泰智, 石井英一, 常盤哲也：“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*, 50, pp.238-247 (2009)
- 原子力安全委員会：“余裕深度処分の管理期間終了後における安全評価に関する考え方”, 平成 22 年 4 月 1 日 (2010)
- 原子力安全・保安院：“「概要調査結果の妥当性レビューのための判断指標の検討」について (案)”, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会放射性廃棄物規制支援研究ワーキンググループ (第 9 回) (2010a)
- 原子力安全・保安院：“規制支援研究年次計画, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会放射性廃棄物規制支援研究ワーキンググループ (第 10 回) -資料 1-4” (2010b)
- 原子力安全委員会：“放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について” (2004)
- 原子力安全委員会：“余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方” (2010)
- 原子力発電環境整備機構：“安全確保構想 2009～安全な地層処分の実現のために～, 原子力発電環境整備機構”, NUMO-TR-09-05 (2010)
- 原子力環境整備促進・資金管理センター：“平成 21 年度核燃料サイクル関係推進調整等委託費 地層処分実規模設備整備事業報告書(2010)”, 原子力環境整備促進・資金管理センター (2010)
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会：“サロベツ断層帯の長期評価について”, 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 平成 19 年 11 月 21 日 (2007)
- Hama, K., Kunimaru, T., Metcalfe, R. and Martin, A. J.: “The hydrogeochemistry of argillaceous rock formations at the Horonobe URL site, Japan”. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32, pp. 170-180 (2007)
- 菱谷智幸, 西垣誠, 橋本学：“物質移動を伴う密度依存地下水流の三次元数値解析手法に関する研究”, *土木学会論文集*, 638/III-49, pp.59-69 (1999)

- 平本正行, 小林保之, 青柳茂男, 宮野前俊一, 森田篤: “ニアフィールド岩盤の長期力学挙動予測評価手法の信頼性向上に関する検討”, JAEA-Research 2007-003 (2007)
- Hoch, A.R., Cliffe, K.A., Swift, B.T. and Rodwell, W.R.: “Modelling Gas Migration in Compacted Bentonite – GAMBIT Club Phase 3 Final Report –”, POSIVA 2004-02 (2004)
- 石井英一, 福島龍朗: “新第三紀珪質岩における断層の解析事例”, 応用地質, 47, pp.280-291 (2006)
- 石井英一, 安江健一: “幌延深地層研究計画における断層の解析と地質構造モデルの構築”, JNC TN5400 2005-008 (2005)
- 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, 112, pp.301-314 (2006)
- Ishii E., Funaki H., Tokiwa T. and Ota K.: “Relationship between fault growth mechanism and permeability variations with depth of siliceous mudstones in northern Hokkaido, Japan”, Journal of Structural Geology, doi: 10.1016/j. jsg. 2009. 10.012 (2009)
- 石井卓, 張至鎬, 沖原光信, 戸栗智仁, 岩佐健吾, 齋藤亮: “塩水を利用した緩衝材の除去方法の検討(6) – 小規模模擬緩衝材の除去実験 (飽和条件) –”, 原子力学会「2009 年秋の大会」, M16, p.631 (2009)
- 石寺孝充, 黒澤精一: “幌延堆積岩中の核種の拡散係数の取得”, 原子力学会「2007 年秋の大会」, I15, p.494 (2007)
- 石寺孝充, 黒澤精一, 木部智: “幌延地域に分布する堆積岩類への Cs⁺収着に及ぼすイライト含有率および K⁺の影響”, 原子力学会「2008 年秋の大会」, L45, p.685 (2008)
- 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: “地下水流動に対する地質環境の長期的変遷の影響に関する研究”, JAEA-Research 2009-001 (2009)
- 岩佐健吾, 石井卓, 中島均, 澤田正雄, 青木孝, 齋藤亮: “塩水を利用した緩衝材の除去方法の検討(1) – 浸漬分解実験および沈降実験 –”, 原子力学会「2007 年秋の大会」, J37, p.574 (2007a)
- 岩佐健吾, 石井卓, 中島均, 澤田正雄, 青木孝, 齋藤亮: “塩水を利用した緩衝材の除去方法の検討(2) – 塩水噴射実験 –”, 原子力学会「2007 年秋の大会」, J38, p.575 (2007b)
- 岩佐健吾, 張至鎬, 石井卓, 沖原光信: “塩水を利用した緩衝材の除去方法の検討(3) – CaCl₂ 溶液による浸漬分解実験および沈降実験 –”, 原子力学会「2008 年秋の大会」, M32, p.728 (2008)
- 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, 齋藤雄也, 館幸男, 飯島和毅, 笹本広: “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 (2009)
- 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 – 総論レポート”, JNC TN1400 99-020 (1999a)
- 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 次とりまとめ – 分冊 2 地層処分の工学技術”, JNC TN1400 99-022 (1999b)
- 核燃料サイクル開発機構: “高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 – 平成 17 年取りまとめ – 分冊 2 工学技術の開発”, JNC TN 1400 2005-015 (2005a)
- 核燃料サイクル開発機構: “高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基礎の構築 – 平成 17 年取りまとめ – 分冊 3 安全評価手法の開発 –”, JNC TN1400 2005-016 (2005b)

- 核燃料サイクル開発機構：“幌延深地層研究計画－坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第 2 段階）計画”，JNC TN5400 2005-002 (2005c)
- 柏井善夫，大丸修二，真田祐幸，松井裕哉：“光ファイバー式岩盤内変位計の開発 3”，JAEA-Technology 2008-047 (2009)
- 川村淳，牧野仁史，笹尾英嗣，新里忠史，安江健一，浅森浩一，梅田浩司，石丸恒存，大澤英昭，江橋健，小尾繁，柴田雅博，稲垣学：“高レベル放射性廃棄物地層処分に係わる天然現象影響に関する研究”，JAEA-Research 2010-027 (2010)
- 前川恵輔，三枝博光，稲葉薫，下河内隆文：“幌延沿岸域を対象とした地下水流動評価のためのモデル化・解析(受託研究)”，JAEA-Research 2010-001 (2010)
- 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：“地質環境の調査から物質移動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 (2005)
- 松井裕哉，棚井憲治，川上 進，佐藤稔紀，西村繭果，青柳茂男，藤田朝雄，谷口直樹，菊池広人，松本一浩，油井三和：“設計技術（地下施設設計，人工バリア設計，閉鎖設計）の実際の地質環境条件への適用性評価”，JNC TN5400 2005-004 (2005)
- 松永浩一，田村彰教，村川史朗，西山誠治，青木七郎，布施正人，與三智彦，高橋剛弘：“幌延深地層研究計画 地下施設実施設計－設計報告書－（核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書）”，JNC TJ5410 2005-002 (2005)
- 三原守弘，入矢桂史郎：“放射性廃棄物処分場用セメント系材料”，特許公報，第 2941269 号 (1999)
- 水流徹，柳沼基：“連続型電気化学ノイズの解析による腐食速度の推定”，材料と環境，52，pp.488-495 (2003)
- 水野正勝，柿崎厚，坂井哲郎，奥園昭彦，鹿島栄：“火災時の通気挙動の検証 (1)”，日本原子力研究開発機構 委託研究報告書 (2006)
- 水野正勝，坂井哲郎，奥園昭彦，鹿島栄，柿田毅，柏瀬陽一：“火災時の通気挙動の検証 (2)”，日本原子力研究開発機構 委託研究報告書 (2007)
- 森岡宏之，山口雄大，舟木泰智，尾留川剛：“幌延深地層研究計画における立坑掘削時の計測計画および情報化施工プログラム”，JAEA-Research 2007-050 (2007)
- 中村隆浩，真田祐幸，杉田裕，加藤春實：“幌延深地層研究センター換気立坑 140m 試験座における初期応力測定”，JAEA-Research 2009-004 (2009)
- 中村隆浩，真田祐幸，杉田裕，加藤春實：“幌延深地層研究センター東立坑 140m 小型試験座における水圧破砕法による初期地圧の評価”，JAEA-Research 2010-017 (2010)
- 中田高，今泉俊文編：“「活断層デジタルマップ」”，東京大学出版会，DVD-ROM 2 枚・付図 1 葉・60p. (2002)
- 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－平成 20 年度成果報告－（共同研究）”，JAEA-Research 2009-044 (2010)

- Nakayama, M., Sato, H., Sugita, Y., Ito, S., Minamide, M. and Kitagawa, Y.: "Low Alkaline Cement Used in the Construction of a Gallery in the Horonobe Underground Research Laboratory", *Proceeding of The 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM2010)* (2010)
- 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター: "サロベツ断層帯による幌延深地層研究センター地下施設への影響検討結果について", <http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/press/07/press1227.html>, <アクセス日; 2010年7月30日>
- 日本原子力研究開発機構: "熱力学・収着・拡散データベース" (<http://migrationdb.jaea.go.jp/>)
- 日本原子力研究開発機構: "平成19年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発報告書" (2008)
- 日本原子力研究開発機構: "平成20年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発報告書" (2009)
- 日本原子力研究開発機構: "幌延深地層研究計画 平成21年度調査研究成果報告", 平成22年7月(2010a)
- 日本原子力研究開発機構: "幌延深地層研究計画 地下施設での調査研究段階(第3段階) 計画-その1: 深度350mまでの調査研究計画-", 平成22年7月(2010b)
- 日本原子力研究開発機構: "平成21年度地層処分技術調査等委託費 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" (2010c)
- Niizato, T., Yasue, K.I., Kurikami, H., et al.: "Synthesizing geoscientific data into a site model for performance assessment: a study of the long-term evolution of the geological environments in and around the Horonobe URL, Hokkaido, northern Japan", *Proceedings of third AMIGO workshop, Approaches and challenges for the use of geological information in the safety case for deep disposal of radioactive waste, 15-17 April 2008, Nancy, France*, pp. 222-234 (2009)
- NUMO: "安全確保構想 2009~安全な地層処分の実現のために~", 原子力発電環境整備機構, NUMO-TR-09-05 (2010)
- 丹生屋純夫, 松井裕哉: "原位置と室内試験に基づいた第三紀珪質岩盤の力学モデル構築", 第35回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.177-182 (2006)
- OECD/NEA: "Stability and buffering capacity of the geosphere for long-term isolation of radioactive waste: application to crystalline rock", *Workshop Proceedings, Manchester, United Kingdom, 13-15 November 2009*, OECD, pp.9-41 (2009)
- 岡崎啓史, 嶋本利彦, 上原真一, 新里忠史: "北海道北部, 幌延地域の新第三紀堆積岩における浸透率・間隙率に対する変形の影響", 日本地球惑星科学連合2009年大会予稿集, G122-008 (2009)
- 奥園昭彦, 水野正勝, 鹿島栄, 坂井哲郎, 井上雅弘: "火災時の通気挙動の検証(3)", 日本原子力研究開発機構 委託研究報告書(2008)
- 太田久仁雄, 阿部寛信, 山口 雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗: "幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階) 研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」", JAEA-Research 2007-044 (2007)
- 大和田仁, 三原守弘, 黒木泰貴, 有本邦重: "アルカリ溶液中での花崗岩の変質挙動", JNC TN8400

2000-027 (2000)

Sato, H.: Diffusivity Database (DDB) for Major Rocks: "Database for the Second Progress Report", JNC Technical Report, JNC TN8400 99-065 (1999)

澁谷朝紀, 陶山忠宏, 柴田雅博: "核種のベントナイトおよび岩石に対する収着データベース", サイクル機構技術資料, JNC TN8410 99-050 (1999)

資源エネルギー庁・(独) 日本原子力研究開発機構: "高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画", 2009年7月(平成20年度版) (2009)

Shimizu, S., Akiyama, M., Ishijima, Y., Hama, K., Kunimaru, T., Naganuma, T.: "Molecular characterization of microbial communities in fault-bordered aquifers in the Miocene formation of northernmost Japan", *Geobiology*, 4, pp.203-213 (2006)

下茂道人, 山本肇, 熊本創: "亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象に関する研究", サイクル機構技術資料, JNC TJ8400 2003-028 (2003)

下茂道人, 山本肇, 熊本創: "亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象に関する研究(II)", サイクル機構技術資料, JNC TJ8400 2004-011 (2004)

Sugita, Y. Nakamura, T. Sanada, H. Aizawa, T and Ito, S.: "Seismic tomography investigation in 140m Gallery in the Horonobe URL project", *Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1265*, AA06-03 (2010)

Sudo, S., Tsuchidoi, T., Kudo, K., Baba K. and Tsuru T.: "Corrosion monitoring of bottom plate of fuel storage tanks based on the impedance method", *Proc. of International Symposium on Plant aging and life prediction of corrodible structures*, pp.439-446 (1995)

陶山忠宏, 笹本広: "JNC 収着データベース (JNC-SDB) の更新: 1998年~2003年までに公開された文献データの追加", サイクル機構技術資料, JNC TN8410 2003-018 (2004)

SKB: "R&D-Programme 2004 -Programme for Research, Development and Demonstration of Methods for the Management and Disposal of Nuclear Waste, including Social Science Research-", Technical Report, TR-04-21 (2004)

SKB: "http://www.skb.se/templates/SKBPage_17375.aspx", (2006)

Tsang, Chin-Fu, Bernier, F. and Davies C: "Geohydronechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays - in the context of radioactive waste disposal", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 42, pp.109-125 (2005)

高村尚, 奥津一夫, 松井信行, 戸井田克, 小林一三, 中畷誠門: "アイスブラスト工法によるベントナイト系バリア除去に関する検討", 原子力学会「2008年春の年会」, I35, p.438 (2008)

立川博一, 川久保文恵, 清水亮彦, 柴田俊夫, 杉本克久, 瀬尾眞浩, 水流徹, 藤本慎司, 井上博之: "オーバーパックの長期耐食性に関する調査", *JAEA-Research* 2006-058 (2006)

谷口直樹, 本田明, 川崎学, 水流徹: "圧縮ベントナイト中における炭素鋼の腐食形態と腐食速度の評価", JNC TN8400 99-003 (1999)

特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画, 平成20年3月14日, 閣議決定 (2008)

津坂仁和: "幌延深地層研究所の水平坑道の内空変位計測結果に基づく支保工規模の評価", 土木学会年

次学術講演会講演概要集第3部, Vol.63, pp.783-784 (2009)

Tsusaka K., M. Yamasaki, and Y. Hatsuyama: "Rock deformation and support load in shaft sinking in Horonobe URL Project, Proceedings of the regional symposium of the International Society for Rock Mechanics", EUROCK 2009, pp.589-594 (2009)

津坂仁和: "堆積軟岩における立坑掘削の内空変位計測に基づく岩盤挙動分類の提案", 土木学会論文集 F, Vol.66, No.1, pp.181-192 (2010)

張至鎬, 岩佐健吾, 石井卓, 沖原光信: "塩水を利用した緩衝材の除去方法の検討(4) - 供試体の初期飽和度に着目した浸漬分解実験 -", 原子力学会「2008年秋の大会」, M33, p.729 (2008)

張至鎬, 石井卓, 沖原光信, 戸栗智仁, 岩佐健吾, 齋藤亮: "塩水を利用した緩衝材の除去方法の検討(5) - 小規模模擬緩衝材の除去実験(不飽和条件) -", 原子力学会「2009年秋の大会」, M15, p.630 (2009)

上原真一, 松本拓真, 嶋本利彦, 岡崎啓史, 新里忠史: "新第三紀泥質岩中の亀裂の透水性の深度依存性: 北海道北部幌延地域の例", 日本地球惑星科学連合 2009年大会予稿集, L215-P004 (2009)

Xia, X., Kamei, G., Iijima, K., Shibata, M., Ohnuki, T., Kozaki, N.: "Selenium Sorption in a Sedimentary Rock/Saline Groundwater System and Spectroscopic Evidence", Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIX, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.932, pp.933-941 (2006a)

Xia, X., Iijima, K., Kamei, G., Shibata, M.: "Comparative Study of Cesium Sorption on Crushed and Intact Sedimentary", Radiochimica Acta, 94, pp.683-687 (2006b)

山本卓也, 松井裕哉, 堀内康光, 富永英治: "幌延深地層研究計画における堆積軟岩の熱特性について", 第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.153-158 (2004)

Yamamoto, H., Kunimaru, T., Kurikami, H., Shimo, M. and Xu, T.: "Long-term simulation of ambient groundwater chemistry at Horonobe underground research laboratory, Japan - Application of coupled hydro-geochemical model", GEOPROC2006, 2nd International Conference on Coupled Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Processes in Geosystems and Engineering, Nanjing, China, pp. 382-387 (2006)

山崎雅直, 山口雄大, 舟木泰智, 藤川大輔, 津坂仁和: "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および情報化施工プログラム", JAEA-Research 2008-068 (2008)

付録

幌延深地層研究所の放流水に関する協定書（抜粋）

北るもい漁業協同組合（以下「甲」という。）と独立行政法人日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター（以下「乙」という。）は、乙が天塩郡幌延町北進地区に建設する幌延深地層研究所の排水処理施設（以下「施設」という。）の運転を円滑に行うため、以下のとおり協定を締結する。

（目的）

第1条 この協定は、施設からの放流水について、これによる天塩川および前面海域の環境並びに水産資源への悪影響を未然に防止するとともに、万一これにより漁業被害が発生した場合の補償措置について定めることを目的とする。

（関係法令等の遵守）

第2条 乙は、地下施設から排出する地下水と掘削土(ズリ)置場の浸出水等の処理に当たっては、環境および漁業に悪影響を与えることのないよう、関係法令および本協定に定める事項を遵守し適切に管理するものとする。

（放流先）

第3条放流先は、天塩郡幌延町289-8地先(天塩川河口より約19km地点右岸)とする。

（水質および排水量）

第4条放流口における水質および排水量は、以下のとおりとする。

- (1) pH 5.8-8.6
- (2) BOD 20mg/L以下
- (3) ss 20mg/L以下
- (4) 全窒素20mg/L以下
- (5) 全アンモニア2mg/L以下
- (6) 全リン5mg/L以下
- (7) 油分(鉱油) 5mg/L以下
- (8) ホウ素5mg/L以下
- (9) 透視度30cm以上
- (10) 大腸菌群数3,000個/mL以下
- (11) 排水量最大750m³/日(工事用水量50m³/日)

2 前項に掲げる以外の有害物質については、水質汚濁防止法の排水基準を遵守するものとする。

3 第1項の基準は、水質汚濁防止法の排水基準等の改正が行われ、これにより改定が必要となった場合は、甲乙協議の上、改定するものとする。

(掘削土からの浸出水の処理)

第5条 乙は、掘削土(ズリ)については、専用の速水工型の掘削土(ズリ)置場において保管するものとする。掘削土(ズリ)置場から発生する浸出水については、施設で処理した後に放流するものとする。

(放流口、周辺水域および掘削土(ズリ)の浸出水の水質の調査等)

第6条 乙は、放流口、周辺水域および掘削土(ズリ)の浸出水の水質を調査測定し、その結果を甲に通知するものとする。

2 前項の調査測定の時期、場所、内容および調査機関等は、別途、甲乙協議して定めるものとする。

3 第1項の調査測定に係る経費は乙が負担するものとする。

(廃棄物の処理)

第7条 乙は、施設の運転に伴って発生する廃棄物は、公害発生のおそれのない方法により処理するものとする。

(排水量の変更等)

第8条 乙は、第4条第1項第11号に掲げる排水量を変更しようとするときは、事前に甲に協議し、その同意を得るものとする。

(管理運営)

第9条 乙は、施設の管理運営に当たっては、関係法令を遵守し、常に環境の保全に万全を期すとともに、甲との連絡を密にするものとする。

(施設の改善)

第10条 乙は、甲から施設の放流水により漁業に影響を与えるおそれがあるとの苦情を受けた場合は、その影響のおそれについて調査検討の上、必要な場合には、管理技術の検討および施設の改善等の措置を速やかに講じるものとする。

(立入調査等)

第11条 乙は、甲又は甲の指定する者が、第6条に規定する調査測定について、施設への立ち入りを申し入れたときは、これに同意し、協力するものとする。

2 乙は、甲から第6条に規定する調査測定の結果について照会があったときは誠意をもって速やかに対応するものとする。

(異常事態発生時の措置)

第12条 乙は、施設の故障、破損その他の異常事態が発生し、第4条に規定する水質を維持することが困難になった場合は、速やかに連絡するとともに、必要な措置(施設の一部運転中止等を含む。)を講じるものとする。

(被害補償)

第13条 乙は、施設からの放流水が原因となって漁業被害が発生したと甲から申入れを受けた場合は、誠意を持って協議し、甲乙両者の協議が整った場合には、速やかに補償を行うとともに、本協定の趣旨に従い適切な措置を講じるものとする。

2 前項の協議が整わない場合は、原因調査、被害の認定方法および補償措置について、甲乙双方協議成立を目指し更に協議するものとする。

3 前項の被害の原因調査等甲が当該問題に要した費用の負担方法については甲乙協議するものとする。

(天災その他不可抗力による被害補償)

第14条 乙は、暴風、豪雨、洪水、高潮、地震、津波、地すべり、落盤、火災その他の自然的又は人為的な乙にとって不可抗力な事象が発生した場合において、施設が損傷し、施設からの放流水が原因となって漁業被害が発生したと甲から申入れを受けた場合は、誠意を持って協議し、甲乙両者の協議が整った場合には、速やかに補償を行うとともに、本協定の趣旨に従い適切な措置を講じるものとする。2 前項の補償については、前条の規定を準用する。

(協議)

第15条 この協定に定める事項に疑義若しくは変更の必要が生じたとき、又は協定に定めない事項については、その都度、甲乙協議して定めるものとする。

本協定の証として本書3通を作成し、甲乙および立会人記名押印の上、各自1通を保有するものとする。

平成18年1月27日

幌延探地層研究所の放流水等に関する確認書（図表は省略）

北るもい漁業協同組合と独立行政法人日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センターは、平成18年1月27日付けをもって締結した幌延深地層研究所の放流水に関する協定書（以下「協定」という。）について、次のとおり確認する。

1. 協定第3条に定める「放流先」の位置は、図-1に示すとおりとする。
2. 協定第4条第1項第5号にある全アンモニアについては、当面の間目標値とし、水質等調査結果を踏まえて別途協議する。
3. 協定第5条の「掘削土(ズリ)置場」の位置は、図-2に示すとおりとする。
4. 協定第6条第2項の「調査測定」の時期、場所、内容については、次のとおりとする。

(1)水質調査

水質調査の分析項目および測定頻度は、表-1および表-2に示すとおりとする。

(2)放流口、周辺水域および掘削土(ズリ)の浸出水の水質調査場所(全アンモニアを除く)

水質調査場所は、放流口、および上下流1km区間とし、その位置は図-1に示すとおりとする。なお、採水および水質分析は各地点の表層および底層を実施するとともに、当面の間、躍層(中間層)についても実施する。ただし、放流口での採水が難しい場合は、施設からの排水槽とする。

(3)全アンモニアの水質等調査場所

水質等調査場所については、図-1のKP18.0右岸地点とする。

5. 研究管理棟等からの浄化槽排水については、協定第3条(放革先)、第4条(水質および排水量)を、別添のとおり読み替えて準用する。

平成18年12月11日

甲 北海道苫前郡羽幌町港町1丁目31番地 北るもい漁業協同組合 代表理事組合長

乙 北海道天塩郡幌延町北進432番2 独立行政法人日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター
所長

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	立法メートル	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
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)
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
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
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
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウエーバ	Wb	Vs
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
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 ^(c)
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
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
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
酸素活性化	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間には1:1の関係がある。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

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	ヘクタ	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	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=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	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベール	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 =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π) 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=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=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	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

