

幌延深地層研究計画 平成 28 年度調査研究計画

Horonobe Underground Research Laboratory Project
Investigation Program for the 2016 Fiscal Year

(編) 花室 孝広

(Ed.) Takahiro HANAMURO

バックエンド研究開発部門

幌延深地層研究センター

深地層研究部

Horonobe Underground Research Department

Horonobe Underground Research Center

Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

July 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

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

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

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

幌延深地層研究計画 平成 28 年度調査研究計画

日本原子力研究開発機構

バックエンド研究開発部門 幌延深地層研究センター 深地層研究部

(編) 花室 孝広

(2016 年 4 月 27 日受理)

幌延深地層研究計画（本計画）は、日本原子力研究開発機構（原子力機構）が堆積岩を対象に北海道幌延町で実施しているものである。

原子力機構の第3期中長期計画では、本計画について、「実際の地質環境における人工バリアの適用性確認、処分概念オプションの実証、地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証に重点的に取り組む。また、平成31年度末までに研究終了までの工程やその後の埋戻しについて決定する。」としている。

幌延深地層研究計画は、「地上からの調査研究段階（第1段階）」、「坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階）」、「地下施設での調査研究段階（第3段階）」の3つの調査研究段階に分けて進めることとしており、全体の期間は20年程度を考えている。平成28年度は、地下施設での調査研究段階（第3段階）を継続しながら、第3期中長期計画の2年度目として、同計画に掲げた3つの課題を達成していくための調査研究を実施する。

**Horonobe Underground Research Laboratory Project
Investigation Program for the 2016 Fiscal Year**

(Ed.) Takahiro HANAMURO

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

(Received April 27, 2016)

As part of the research and development program on geological disposal of high-level radioactive waste (HLW), the Horonobe Underground Research Center, a division of the Japan Atomic Energy Agency (JAEA), is implementing the Horonobe Underground Research Laboratory Project (Horonobe URL Project) with the aim at investigating sedimentary rock formations.

According to the research plan described in the 3rd Mid- and Long- term Plan of JAEA, “Near-field performance study”, “Demonstration of repository design option”, and “Verification of crustal-movement buffering capacity of sedimentary rocks” are the top priority issues of the Horonobe URL Project, and schedule of future research and backfill plans of the project will be decided by the end of 2019 Fiscal Year.

The Horonobe URL Project is planned to extend over a period of about 20 years. The investigations will be conducted in three phases, namely “Phase 1: Surface-based investigations”, “Phase 2: Construction phase” (investigations during construction of the underground facilities) and “Phase 3: Operation phase” (research in the underground facilities). This report summarizes the investigation program for the 2016 fiscal year (2016/2017).

In the 2016 fiscal year, investigations in “geoscientific research”, including “development of techniques for investigating the geological environment”, “development of engineering techniques for use in the deep underground environment” and “studies on the long-term stability of the geological environment”, are continuously carried out. Investigations in “research and development on geological disposal technology”, including “improving the reliability of disposal technologies” and “enhancement of safety assessment methodologies”, are also continuously carried out.

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

目 次

1. はじめに	1
2. 必須の課題と調査研究	1
3. 平成 28 年度の主な調査研究内容	3
4. 地層科学研究	5
4.1 地質環境調査技術開発	5
4.1.1 地質環境モデルに関する調査・解析技術の開発	5
4.1.2 調査技術・調査機器開発	6
4.2 深地層における工学的技術の基礎の開発	7
4.3 地質環境の長期安定性に関する研究	7
5. 地層処分研究開発	7
5.1 処分技術の信頼性向上	7
5.2 安全評価手法の高度化	8
6. 地下施設の維持管理	8
7. 環境モニタリング	9
7.1 排水量及び水質調査	9
7.2 センター周辺の環境影響調査	9
8. 安全確保の取組み	9
9. 開かれた研究	9
9.1 国内機関との研究協力	9
9.2 国外機関との研究協力	10
付 録	15

Contents

1. Introduction	1
2. Indispensable theme on research and development	1
3. Outline of the investigation program for the 2016 fiscal year	3
4. Geoscientific research	5
4.1 Development of techniques for investigating the geological environment	5
4.1.1 Development of investigation/analysis techniques for modeling of the geological environment	5
4.1.2 Development of investigation techniques and equipment	6
4.2 Development of engineering techniques for use in deep geological environment	7
4.3 Studies on the long-term stability of the geological environment	7
5. Research and development on geological disposal technology	7
5.1 Improving the reliability of disposal technologies	7
5.2 Enhancement of safety assessment methodologies	8
6. Maintenance of the underground facilities	8
7. Environmental monitoring	9
7.1 Monitoring of drainage water and water property	9
7.2 Environmental impact study around the Horonobe Underground Research Center	9
8. Security effort	9
9. Collaboration with other research organizations	9
9.1 Collaboration with domestic research organizations	9
9.2 Collaboration with overseas research organizations	10
Appendix	15

1. はじめに

国立研究開発法人^{*1}日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）幌延深地層研究センターでは、原子力発電に伴って発生する高レベル放射性廃棄物を安全に地層処分するための基盤的な研究開発として、平成13年3月より、北海道の幌延町において幌延深地層研究計画（堆積岩を対象とした深地層の研究施設計画）を進めています。幌延深地層研究計画は、実際の地層処分事業とは明確に区別することを前提に、堆積岩を対象とした深地層の科学的な研究（地層科学研究）および地層処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化に向けた研究開発（地層処分研究開発）を行うものです。また、本計画では、「地上からの調査研究段階（第1段階）」、「坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階）」、「地下施設での調査研究段階（第3段階）」の3つの調査研究段階に分けて進めることとしており、全体の期間は20年程度を考えています。

平成26年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、「高レベル放射性廃棄物の問題の解決に向け、国が前面に立って取り組む必要がある」との考え方が示され、そのために「地層処分の技術的信頼性について最新の科学的知見を定期的かつ継続的に評価・反映する」ことが示されました。これを踏まえて、文部科学省、経済産業省および原子力規制委員会により「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が達成すべき業務運営に関する目標（中長期目標）^{*2}」（以下、第3期中長期目標^{*3}）が定められ、この第3期中長期目標を達成するために、「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の中長期目標を達成するための計画（中長期計画）（平成27年4月1日～平成34年3月31日）」（以下、第3期中長期計画）を策定しました。第3期中長期計画中の幌延深地層研究計画における研究開発としては、「実際の地質環境における人工バリアの適用性確認、処分概念オプションの実証、地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証に重点的に取り組む。また、平成31年度末までに研究終了までの工程やその後の埋戻しについて決定する。」としています。

平成28年度は、地下施設での調査研究段階（第3段階）を継続しながら、第3期中長期計画に掲げた3つの課題（以下、「必須の課題」）を達成していくための調査研究を実施します。

2. 必須の課題と調査研究

第2期中期計画期間の成果の取りまとめを踏まえて抽出した3つの必須の課題を、第3期中長期計画において重点的に取り組む課題としています。これらの課題の概要および幌延深地層研究計画における調査研究との関連について以下に示します。

*1：独立行政法人通則法の改正（平成27年4月1日施行）により新たに設定された分類の一つで、研究開発に係る業務を主要な業務として、中長期的（5～7年）な目標・計画に基づき行うことにより、我が国の科学技術の水準の向上を通じた国民経済の発展その他の公益に資するため研究開発の最大限の成果を確保することを目的とする法人に対する名称です。原子力機構は、平成27年4月1日に「独立行政法人日本原子力研究開発機構」から「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構」に名称変更しています。

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

*3：第3期中長期目標の期間は、平成27年4月1日～平成34年3月31日の7年間で。

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

幌延深地層研究計画の第3段階における調査研究のひとつとして、平成26年度から深度350m調査坑道で実施している人工バリア性能確認試験、オーバーパック腐食試験および原位置トレーサー試験^{*4}を通して、実際の地質環境において人工バリアや周辺岩盤中での熱－水理－力学－化学連成挙動^{*5}や物質の移動現象などを計測・評価する技術の適用性を確認し、地層処分事業における精密調査段階の後半に必要な技術基盤を確立します。

その際、これまでに構築してきた地質環境モデル^{*6}やこれまでに得られた岩盤の水理、地下水の地球化学、岩盤力学に関する地質環境データを、各試験の基礎情報として活用します。また、模擬オーバーパックからの熱の影響や坑道の埋め戻しによって生じる坑道周辺の地下水の流れおよび水質、岩盤の力学特性の変化や回復過程が重要であることから、坑道周辺の掘削影響領域を含む地質環境特性の時間的な変化に関するデータの取得などを継続します。これらのデータの取得は長期にわたることから、計測技術の適用性を確認するため、これまで進めてきた長期モニタリング技術の開発をあわせて行います。

(2) 処分概念オプションの実証

人工バリアの設置環境の地質環境条件や深度依存性^{*7}を考慮しつつ、種々の処分概念オプションの工学的実現性を実証することを通じて、多様な地質環境条件に対して柔軟な処分場設計を行うことを支援する技術オプションを整備、提供します。処分孔の湧水対策・支保^{*8}技術などの実証試験や人工バリアの定置・品質確認などの実証試験および高温（100℃以上）などの条件下での人工バリア性能確認試験などを行う予定です。これらの試験内容を具体化していくに際しては、地質環境特性の変化を把握する技術やモニタリング技術、岩盤の変位や支保工の応力を計測する技術、ならびにグラウト^{*9}材料の浸透範囲を評価するための解析手法などが必要となることから、地質環境調査技術開発および深地層における工学的技術の基礎の開発として実施しているデータ取得や技術開発を継続します。また、深度350m調査坑道で進めている人工バリア性能確認試験や公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター^{*10}（以下、原環センター）との共同研究として実施してきた緩衝材定置試験などの成果を適宜反映していきます。

*4：地下水の流れの方向や流れる時間などを調べるために、地下水に目印としてまぜる染料やその他の薬品を指します。塩化ナトリウム（食塩の主原料）が代表的なトレーサーとなりますが、調べたい地下水の化学成分が塩化ナトリウムに富む場合などにはヨウ化カリウムなどがあり、多種のトレーサーがあります。幌延深地層研究計画では放射性トレーサーを利用したトレーサー試験を行うことはありません。

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

*6：調査結果を総合的に検討して、地下の環境（地層や岩盤の種類、地下水の流れ、地下水の化学的性質など）を推定し、図や数式などを用いて表したものです。

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

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

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

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

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

堆積岩が有する地震・断層活動などの地殻変動に対する力学的・水理学的な緩衝能力を評価し、堆積岩地域における立地選定や処分場の設計を、より科学的・合理的に行うための技術と知見を整備します。そのため、堆積岩岩盤の緩衝能力を検証・定量化するための試験や、地殻変動の影響を考慮した人工バリアシステムの試験を実施します。これらの試験内容の具体化や試験結果の解析・評価に際しては、試験を実施する領域や試験条件を決定するための地質環境情報、とりわけ断層の透水性と岩石の強度・応力状態との関係性に関する情報やモデル化技術が必要となることから、地質環境調査技術開発として実施しているデータ取得や技術開発を継続します。

3. 平成 28 年度の主な調査研究内容

上述した必須の課題を達成していくため、平成 28 年度においては、主に以下の取り組みを進めます。

実際の地質環境における人工バリアの適用性確認については、平成 26 年度に深度 350m 調査坑道で開始した人工バリア性能確認試験、オーバーパック腐食試験および原位置トレーサー試験を着実に進めます。処分概念オプションの実証については、共同研究として搬送定置・回収技術に関する実証試験の検討を継続するとともに、実証試験のための準備作業などを行います。地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証については、一時的な水圧上昇が割れ目の水理特性に与える影響を確認するための試験を開始します。

上記の調査研究を含め、平成 28 年度に実施する調査研究の概要を以下に示します。

地層科学研究

・地質環境調査技術開発

既存のボーリング孔における地下水の圧力や水質の観測を継続するとともに、通常よりも高い注入圧を用いた透水試験を実施し、一時的な水圧上昇が割れ目の水理特性に与える影響を確認します。また、坑道の掘削時に取得した、岩石や地下水の化学組成、岩盤の透水性などの地質環境データを用いて、地質環境モデル（地質構造モデル^{*11}、岩盤の水理地質構造モデル^{*12}、地下水の地球化学モデル^{*13}など）を更新することにより、坑道周辺の地質環境を推定するための手法の信頼性を向上させます。さらに、最新の知見を取り入れながら、地下施設での調査研究で使用するための調査技術や調査機器の開発を継続するとともに、コントロールボーリング技術により地上から掘削したボーリング孔を用いた地下水モニタリング技術の開発を行います。

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

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

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

・ 深地層における工学的技術の基礎の開発

坑道を掘削した後の岩盤と支保の長期挙動を把握し、地下施設設計の妥当性の検証を行います。また、これまでの調査で取得したデータや耐震性評価結果に基づいて、地下施設の安全性をさらに向上するための方策の検討を継続します。

・ 地質環境の長期安定性に関する研究

地形、地質構造や地下水の流れ、水質などの長期的な変化を推定・評価する手法、および地震や断層活動が地質環境へ与える影響を推定するための手法の検討を進めます。そのため、地下施設や研究所周辺において、地形・地質の調査や岩石・地下水・ガスの試料採取・分析および地震観測を行います。

地層処分研究開発

・ 処分技術の信頼性向上

地層処分システムの構築に関わる工学技術の信頼性を向上させるため、人工バリア性能確認試験などの原位置試験^{*14}を通して、実際の地質環境における計測技術や評価技術の適用性を確認します。また、幌延の岩石や地下水を用いた室内試験を実施し、人工バリアなどの設計手法の適用性や長期健全性を評価するための基礎データの拡充を行います。

・ 安全評価手法^{*15}の高度化

岩盤および人工バリアを対象とした原位置トレーサー試験^{*16}や室内試験を行い、実際の地質環境中における物質の移動を評価するためのデータを取得します。また、原位置試験の方法や評価手法の適用性を確認します。

平成28年度に地下施設、研究用地および周辺地域（幌延町内）で行う主な調査研究の実施内容を表1に示します。また、表1に示した調査に関する地上からのボーリング孔の位置および観測装置の設置場所を図1に、研究用地における主な施設と観測装置の配置を図2に、350m調査坑道における主な調査研究の実施場所を図3に示します。

地下施設の維持管理

施設内の機械設備や電気設備などの維持管理業務(保守点検や修繕など)を実施します。地下施設からの排水および掘削土（ズリ）置場の浸出水は、排水処理設備において適切に処理した上で天塩川に放流します。

*14：試料を採取して行う室内試験に対して、実際の地下環境下で行う試験のことです。

*15：地層処分システム全体、あるいはその個別の要素が有する機能について解析した結果を適切な基準と比較し、その性能や安全性について判断を行う手法のことです。

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

環境モニタリング

研究所用地周辺における水質・魚類に関するモニタリング調査、坑道内および掘削土（ズリ）置場で発生する排水の水質調査を定期的に行います。また、排水の放流先である天塩川の水質モニタリング調査を継続します。

安全確保の取組み

作業者などに対する安全教育や定期的な安全パトロールなどの活動を継続します。

なお、幌延深地層研究計画で実施する地下深部の地質環境を対象とした研究は、地球科学の幅広い分野にわたり、学術研究の発展にも広く寄与することから、国内外の関連する研究機関の専門家の参加を得ながら進めていきます。

4. 地層科学研究

4.1 地質環境調査技術開発

調査坑道および坑道から掘削するボーリング孔を利用して、地質構造、岩盤の水理・力学特性、地下水の地球化学特性、物質の移動特性を詳細に把握することを目的とした地質観察、水理試験、採水調査などを実施します。また、坑道の掘削・埋め戻しによって生じる坑道周辺の岩盤における地下水の流れ、水質、岩盤の力学特性の変化や回復過程を観測し、坑道周辺の掘削影響を含む地質環境の特性とその時間的な変化に関するデータを取得します。取得したデータは地層処分研究開発として実施する原位置試験に反映します。さらに、これらのデータを取得するために必要な調査技術・調査機器の開発を行います。

4.1.1 地質環境モデルに関する調査・解析技術の開発

(1) 地質構造

坑道掘削時に取得した壁面観察データの解析を継続し、坑道周辺における岩盤の水理特性や地下水の地球化学特性に影響を及ぼす可能性のある地層や断層・割れ目を抽出するとともに、地質構造モデルを詳細化します。また、地下施設や地表で採取した岩石の顕微鏡観察や分析などを継続します。

(2) 岩盤の水理

坑道の掘削に伴う地質環境の変化を把握するため、既存のボーリング孔における地下水の圧力や水質の観測を継続します。

地下施設における調査では、坑道周辺岩盤の水理特性の変化を観測し、掘削影響領域の評価に必要なデータを取得します。また、東立坑の深度380mの坑底からボーリング孔を掘削して、一時的な水圧上昇が割れ目の水理特性に与える影響を確認するため、通常よりも高い注入圧を用いた透水試験（水圧擾乱試験）を実施します。

取得したデータに基づいて、これまでに構築した坑道周辺の水理地質構造モデルを更新します。

(3) 地下水の地球化学

坑道の壁面から採取した湧水や岩石、坑道内のボーリング孔から採取する地下水および岩石を対象として、化学組成、溶存ガス組成、コロイド、有機物および微生物などに関する分析や試験を行い、坑道の掘削に伴う周辺岩盤および地下水の地球化学特性の変化を把握します。あわせて、既存のボーリング孔（HDB-1～11孔など）および表層水を対象とした採水調査を行い、現在の地下水の水質の分布や、それがどのように形成されてきたのかを検討するとともに、坑道周辺における地球化学環境の時間的な変化に関わる地球化学モデルを更新します。

(4) 岩盤力学

これまでに実施してきた、深度140m、250mおよび350m調査坑道からのボーリング孔を用いた初期地圧^{*17}の測定結果に基づき、坑道周辺における地圧の空間的な分布を評価し、地下施設の設計上必要となる岩盤物性値の設定方法を検証します。

また、坑道内で実施している内空変位計測^{*18}などの結果から、坑道の掘削時に生じる周辺岩盤の変形や応力の変化を予測するための解析手法の適用性を確認します。

4.1.2 調査技術・調査機器開発

地下水の地球化学特性、坑道掘削の影響および岩盤の力学特性などに関する調査技術・調査機器開発を継続します。

地下水の地球化学特性に関する調査技術については、深度140m、250mおよび350mの各調査坑道から掘削したボーリング孔に設置した地下水の水圧・水質連続モニタリング装置や間隙水圧計、水分計などの長期的な性能を確認するとともに、地下水中的コロイドや有機物、微生物を調査するための試験装置の開発を行い、データを取得します。

坑道掘削の影響に関する調査技術については、地表や坑道に設置した高精度傾斜計^{*19}および坑道に設置した地中変位計、埋設ひずみ計や光ファイバー式AE^{*20}センサーを用いて、岩盤の微小な変形の観測を継続します。また、坑道の掘削が周辺の岩盤に与える影響を評価するための解析技術の開発を行います。

岩盤の力学特性に関する調査技術については、光ファイバー式地中変位計の長期モニタリング性能を確認するための観測を継続します。また、深度140m、250mおよび350mの各調査坑道で、坑道掘削後の岩盤の力学特性の長期的な変化を確認するために、弾性波トモグラフィ調査を定期的に実施します。これらの観測および調査を通じて、岩盤の力学特性の評価に必要なモニタリング技術の整備を図ります。

岩盤の水理特性に関する調査技術について、4.1.1(2)で述べた水圧擾乱試験を実施するため、通常よりも高い注入圧を用いた透水試験方法の整備を図ります。

その他の調査技術の開発として、通常の鉛直ボーリングの技術では調査が困難な場合に使用するコントロールボーリング技術（ボーリング孔の角度と方向を制御して掘削するボ

*17：坑道の掘削などが行われる前の、自然の状態で岩盤に作用している圧力のことです。主に、上部の岩盤自体の重さによって発生しますが、地殻変動などの影響を受けます。

*18：坑道内で覆工コンクリート内側の断面の相対変位量を計測することです。

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

*20：Acoustic Emissionの略。固体材料が変形・破壊する時に、ひずみが解放されて発生する微小な音波。これを分析することにより、掘削影響領域の評価に役立ちます。

ーリング)により掘削したボーリング孔を利用して、地下水モニタリング技術の開発を継続します。また、沿岸部における地質環境の調査技術の高度化開発を実施する予定です。

4.2 深地層における工学的技術の基礎の開発

既設の地中変位計やコンクリート応力計などの計測機器により、坑道を掘削した後の岩盤と支保の長期挙動を観測するとともに、得られたデータを用いて、地下施設設計の妥当性の検証を行います。

また、調査坑道で取得された長期的な変形計測結果などに関するデータや耐震性評価結果に基づいて、地下施設の安全性をさらに向上するための方策の検討を継続します。さらに、湧水抑制のための技術開発として、グラウト材料の岩盤中への浸透範囲を評価するための解析手法の高度化を図ります。

4.3 地質環境の長期安定性に関する研究

地下施設や地表の地形・地質の調査、岩石・地下水・ガスの測定・分析で得られたデータを利用して地質環境の長期的な変化に関する数値解析・評価を実施し、地下水の流れや水質の長期的な変化を評価する手法の開発を進めます。

また、上幌延観測点（HDB-2）と深度350mの調査坑道での地震観測を継続し、地震や断層の動きによって生じる地質環境への影響の把握や推定手法の開発を進めます。

5. 地層処分研究開発

5.1 処分技術の信頼性向上

人工バリア性能確認試験や堅置き方式^{*21}の処分ピットの力学的な挙動の調査、ガス移行挙動試験^{*22}や坑道の密閉（シーリング）技術に関する原位置試験などを実施します。また、これらの試験を通じて、「実際の地質環境における人工バリアの適用性確認」として、実際の地質環境での計測手法や評価技術の適用性を確認していきます。さらに、坑道やボーリング孔から得られる岩石や地下水を用いた室内試験として、埋め戻し材の膨潤性や透水性などの基本特性試験やオーバーパックスの長期的な腐食試験などを実施します。

平成28年度は、平成26年度に開始した実物大の模擬オーバーパックおよび緩衝材を用いた人工バリア性能確認試験を継続します。この試験では、実際に坑道内に処分システムを構築し、オーバーパック、緩衝材および岩盤の間で発生する、熱－水理－力学－化学連成挙動に関わるデータを取得します。また、オーバーパックスの耐食性について、周辺のセメント材料の影響を考慮したオーバーパック腐食試験を継続します。これらの試験では、地下環境中の人工バリアがどのような影響を受けるかなどについて、今後数年間にわたってデータを取得していく計画です。さらに、平成25年度までに深度140m、250mおよび350mの各

*21：堅置き方式は、馬蹄形の坑道から下向きに処分ピット（人工バリアを設置するための堅穴）を掘削してオーバーパックを垂直に設置する方法です。一方、横置き方式は円形の坑道にオーバーパックを横向きに設置する方法です。そのため、設置方法によって、掘削する坑道の形状が異なり、坑道周辺の岩盤に与える影響が異なると考えられています。

*22：様々な環境条件を考慮して緩衝材、埋め戻し材および岩盤の基本的な透気特性に関するデータを把握するための試験です。処分場では、炭素鋼製オーバーパックスの腐食（錆）により水素ガスが発生する可能性が懸念されています。発生したガスが緩衝材や岩盤中をどのように移行していくかを確認するための試験です。

調査坑道において施工した低アルカリ性コンクリート材料が坑道周辺の岩盤や地下水に及ぼす影響を把握するための調査を継続します。

平成25年度から共同研究として実施しているオーバーパック溶接部の耐食性や緩衝材のパイピング・エロージョン^{*23}に関する原位置試験、および人工バリアなどを対象とした無線計測技術の適用性に関する試験をそれぞれ継続します。また、搬送定置・回収技術の実証に関する共同研究として、地層処分実規模試験施設の活用方策の検討を継続するとともに、緩衝材の定置試験や緩衝材への水の浸潤挙動を把握するための試験を継続します。さらに、試験坑道を活用した地下環境下での実証試験計画の検討を継続するとともに、その準備作業などを行います。

5.2 安全評価手法の高度化

天然バリアや人工バリア中での物質の移動を評価するため、原位置トレーサー試験などを行い、移流・分散や拡散・収着に関するデータを取得します。また、それらの試験と並行して、室内試験により、物質の移動現象を評価するために必要となる拡散係数^{*24}や収着分配係数^{*25}などのデータを取得します。これらの試験結果や地層科学研究で得られる情報を用いて、既存の調査・評価手法の適用性を確認するとともに、必要に応じて手法の改良を行うことにより、「実際の地質環境における人工バリアの適用性確認」を進めます。

平成28年度は、平成26年度から平成27年度にかけて実施した原位置トレーサー試験および室内試験結果の評価を継続します。また、これらの評価結果を踏まえ、必要に応じ試験条件等を見直した上で350m調査坑道および東立坑底盤から掘削したボーリング孔を利用したトレーサー試験を実施するとともに、必要な室内試験（原位置試験を補完・検証するための試験）を行います。

6. 地下施設の維持管理

平成27年度に引き続き、施設内の機械設備や電気設備などの維持管理業務（保守点検や修繕など）を実施します。

研究所用地およびその周辺の地下には、メタンを主成分とする可燃性ガスが存在しているため、地下坑道内の換気を十分に行うとともに、防爆仕様の機器の使用やガス濃度の監視などの防爆対策を徹底します。

地下施設からの排水および掘削土（ズリ）置場の浸出水は、排水処理設備においてホウ素および窒素などを取り除いた後、排水管路によって天塩川に放流します。

*23：人工バリアの一部である緩衝材（粘土）が、地下水によって削られたり、流出したりする現象のことです。

*24：岩盤などの中を元素が、濃度の高い方から低い方へ移動していく際の速さを表す係数です。

*25：岩盤中と地下水中における元素の濃度比を表す係数で、元素の岩盤への取り込まれやすさを表す係数です。拡散係数とともに、環境中における元素の移動の予測や放射性廃棄物の処分における安全評価などに使用される重要なパラメータのひとつです。

7. 環境モニタリング

平成27年度に引き続き、地下施設からの排水などの水質調査およびセンター周辺の環境影響調査を実施します。

7.1 排水量及び水質調査

排水処理設備から天塩川へ放流している排水量について監視を行うとともに、排水処理前後の水質、天塩川の水質、浄化槽排水の水質について調査を行います。また、掘削土（ズリ）置場の環境への影響を監視するため、清水川および掘削土（ズリ）置場周辺の地下水についても水質調査を行います。

7.2 センター周辺の環境影響調査

センター周辺の環境影響調査として、清水川の水質および魚類を対象に調査を実施します。

8. 安全確保の取組み

地下施設や研究所用地周辺などにおける調査研究にあたっては、作業計画時における安全対策の確認を徹底するとともに、作業員などに対する安全教育や安全パトロールを確実に実施するなど、安全確保を最優先に作業を実施します。

9. 開かれた研究

幌延深地層研究計画で実施する地下深部を対象とした研究は、地球科学の幅広い分野にわたり、学術研究の発展にも広く寄与します。このため、国内外の大学・研究機関との研究協力を積極的に行うとともに、国際交流施設などを利用して国内外の専門家と意見・情報交換を行いながら、研究を進めていきます。また、幌延深地層研究計画の施設や研究フィールドを、国内外の関連する研究機関に広く開放していきます。

地層処分や研究開発に関する国民との相互理解を促進するため、幌延深地層研究センターのホームページ^{*26}での情報発信、ゆめ地創館における地下深部での研究の紹介、および地下施設の見学会などによる研究施設の公開を進めていきます。また、ゆめ地創館に隣接する、地層処分の概念やその工学的実現性を体感できる地層処分実規模試験施設において、試験施設を活用した緩衝材の定置試験などを継続します。

9.1 国内機関との研究協力

- ・北海道大学・大成建設株式会社・株式会社地層科学研究所：
坑道掘削時の地質環境評価に関する研究
- ・室蘭工業大学：
三次元レーザスキャナ計測による割れ目分布データの取得方法の検討

*26 : <http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/>

- ・信州大学：
 - 掘削影響領域に関する研究
- ・京都大学：
 - 掘削影響領域の可視化手法の検討
- ・北海道大学：
 - 堆積岩中における物質移動現象の評価に関する研究
- ・京都大学・東北大学：
 - 地下水中の微量元素と有機物を対象とした地球化学研究
- ・幌延地圏環境研究所^{*27}：
 - 堆積岩を対象とした岩盤力学や微生物などに関する研究
- ・原環センター：
 - 人工バリアなどの健全性評価および無線計測技術の適用性に関する研究
 - 地下環境での人工バリアの搬送定置・回収技術に関する研究
- ・産業技術総合研究所^{*28}：
 - 岩盤の水理・化学・生物連成現象に関わる研究
- ・電力中央研究所^{*29}：
 - 幌延地域における地質・地下水環境特性評価に関する研究
- ・株式会社大林組：
 - マルチ光計測プローブによる掘削影響領域の長期モニタリングとその評価
- ・大成建設株式会社・株式会社地層科学研究所：
 - 高精度傾斜計を用いた岩盤・地下水挙動のモニタリング技術に関する研究

上記のほか、他の大学や研究機関などとの研究協力についても検討します。また、経済産業省資源エネルギー庁などが進めるプロジェクトなどに協力していきます。

9.2 国外機関との研究協力

- ・クレイクラブ（Clay Club）^{*30}：
 - 様々な粘土質媒体の特性の比較、粘土の物性や挙動および地下施設で実施される試験に関する情報交換など

^{*27}：幌延地圏環境研究所は、公益財団法人 北海道科学技術総合振興センターが設置した研究所であり、国の補助を受けて、幌延深地層研究センターの施設や設備を活用した地下空間利用を中心とする研究を実施しています。

^{*28}：国立研究開発法人 産業技術総合研究所は、産業技術の広い分野における様々な技術開発を総合的に行っている研究組織です。

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

^{*30}：Clay Clubは、経済協力開発機構 原子力機関（OECD/NEA）の放射性廃棄物管理委員会の下に置かれたプロジェクトのひとつです。地層処分の実施・規制・研究機関を中心とした組織であり、様々な粘土質媒体の特性の比較や粘土の物性や挙動および、地下施設で実施される試験に関する技術的かつ科学的情報の交換、さらには、サイト特性調査技術の詳細な評価を実施しています。

- ・モンテリ・プロジェクト^{*31}（スイス）：
鉄材料の腐食に関する原位置試験など

上記のほか、ANDRA^{*32}（フランス）などと、地質環境調査技術や地下施設における原位置試験などに関わる情報交換や研究協力を進めます。

*31：堆積岩を対象とした地層処分研究に関する国際的な原位置試験プロジェクトです。原子力機構を含め8ヶ国から16機関が参加し、スイスのモンテリ・トンネル内において地層処分に関連する各種の原位置試験が実施されています。

*32：Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (National radioactive waste management agency)：放射性廃棄物管理公社は、フランスにおける放射性廃棄物処分の実施機関であり、低中レベルの放射性廃棄物処分場を操業するとともに、高レベル放射性廃棄物および長寿命の中レベル放射性廃棄物処分に関する研究開発の中核機関でもあり、堆積岩を対象に深地層の研究施設計画を進めています。

表1 平成28年度の主な調査研究内容

実施項目			研究内容	実施場所	
地層科学研究	地質環境調査技術開発	地質環境モデルに関する調査・解析技術の開発	地質観察、地下施設や地表で採取した岩石の分析など	地下施設、北進地区、上幌延地区など	
		地質構造	岩盤の水理	地下水の水圧・水質モニタリング、岩盤の水理に関する情報（湧水量など）の取得、水圧擾乱試験の実施など	研究所用地、地下施設、HDB-1～11孔など
			地下水の地球化学	坑道壁面からの湧水、ボーリング孔の孔内水、岩石からの間隙水の化学分析、溶存ガス・コロイド・有機物・微生物の分析、河川水・降水の分析	研究所用地、地下施設、HDB-1～11孔など
	深地層における工学的技術の基礎の開発	岩盤力学	坑道内での初期地圧の測定結果に基づく地下深部の地圧の空間分布の把握、内空変位計測結果に基づく坑道周辺岩盤の変形・応力変化の予測解析手法の適用性確認など	地下施設など	研究所用地、地下施設、上幌延地区、北進地区
調査技術・調査機器開発			水圧・水質モニタリング装置、高精度傾斜計、間隙水圧計、光ファイバー式中変位計の長期性能確認、弾性波トモグラフィ調査、コントロールボーリング技術により掘削したボーリング孔を利用したモニタリング技術の開発など		
地層処分研究開発	地質環境の長期安定性に関する研究		坑道周辺岩盤・支保の長期挙動の観測、地下施設設計の妥当性の検証、地下施設の安全性に関する検討、グラウト材料の岩盤中への浸透範囲を評価するための解析手法の検討など	地下施設など	
			地形調査、地質調査、岩石・地下水・ガスの分析・測定、地震の観測	研究所用地、地下施設、北進地区、上幌延地区、下沼地区、天塩川および間寒別川沿い	
	処分技術の信頼性向上		人工バリア性能確認試験、オーバーバックス腐食試験、低アルカリ性コンクリート材料の周辺岩盤などへの影響調査、オーバーバックス溶接部の耐食性や緩衝材のバイピンング・エロージョンに関する原位置試験、人工バリアなどにおける無線計測技術の適用性に関する試験など	研究所用地、地下施設など	
			安全評価手法の高度化	原位置トレーサー試験の継続、室内トレーサー試験、拡散・収着試験などの実施	研究所用地、地下施設など
地下施設の維持管理			施設内の機械設備や電気設備などの維持管理業務、排水処理設備の運転	研究所用地、地下施設など	
環境モニタリング			水質・魚類のモニタリング調査、地下施設からの排水などの水質調査	研究所用地、天塩川、清水川など	

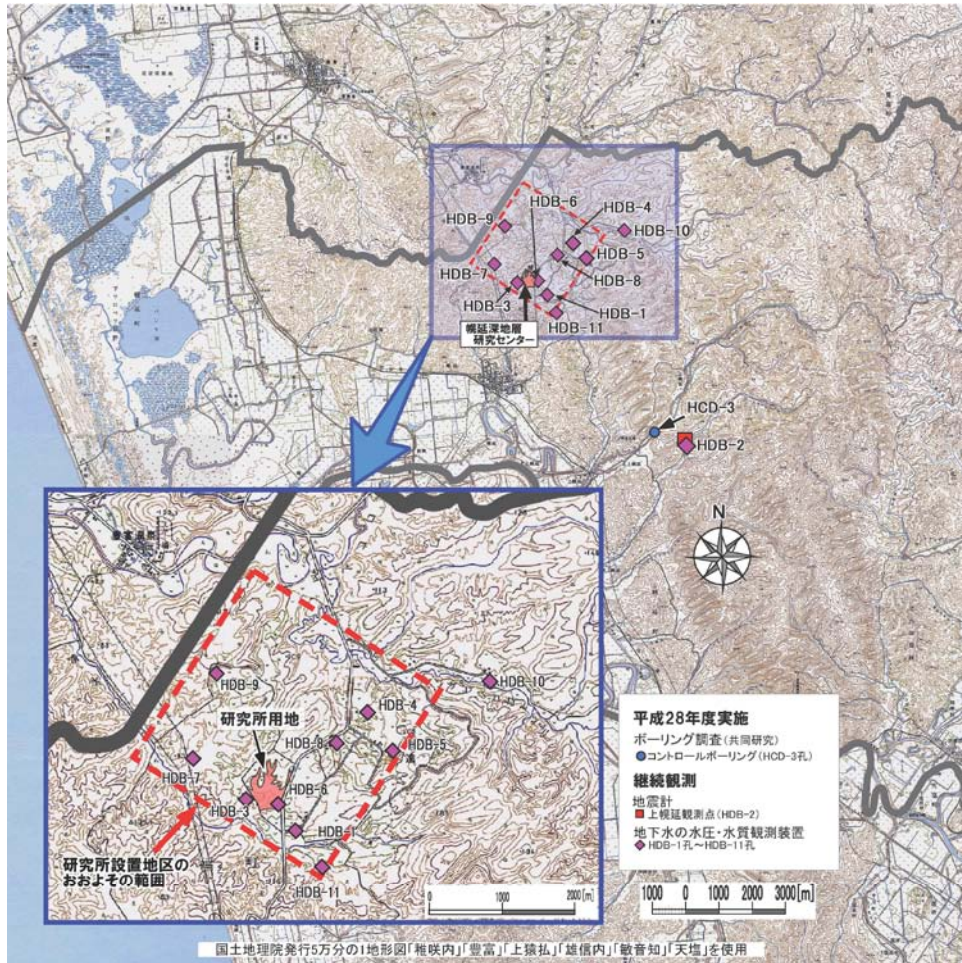


図1 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所



図2 研究所用地における主な施設と観測装置の配置

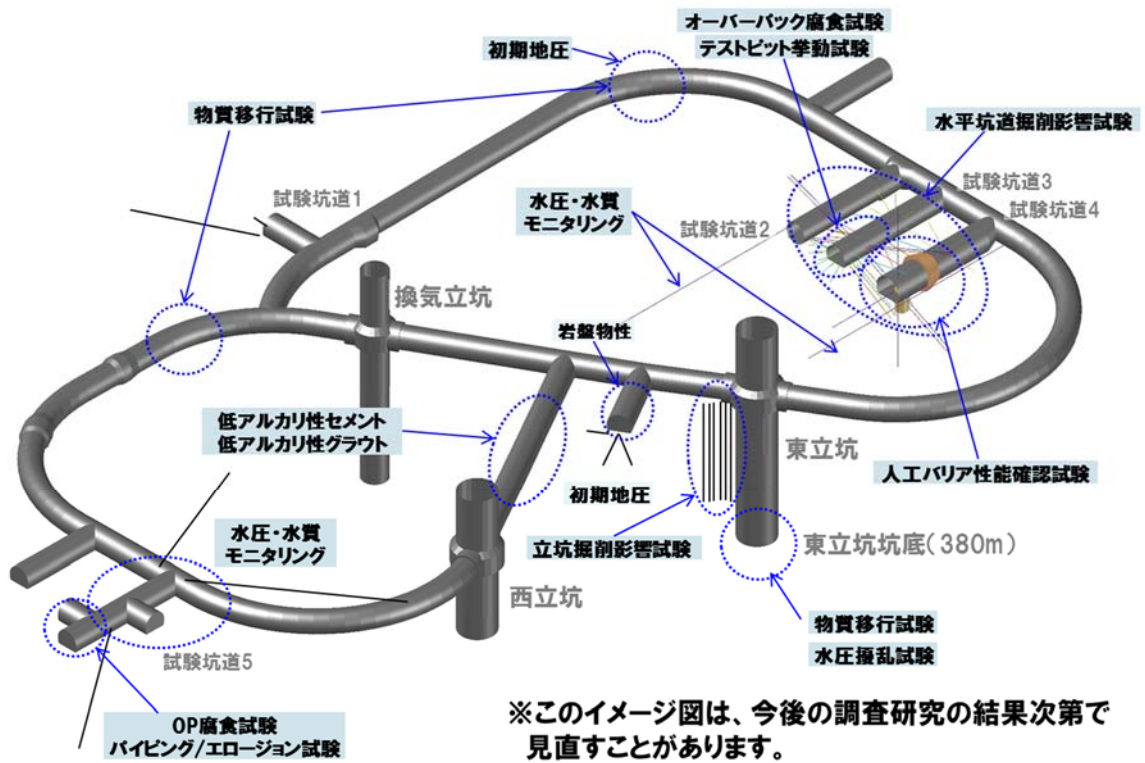
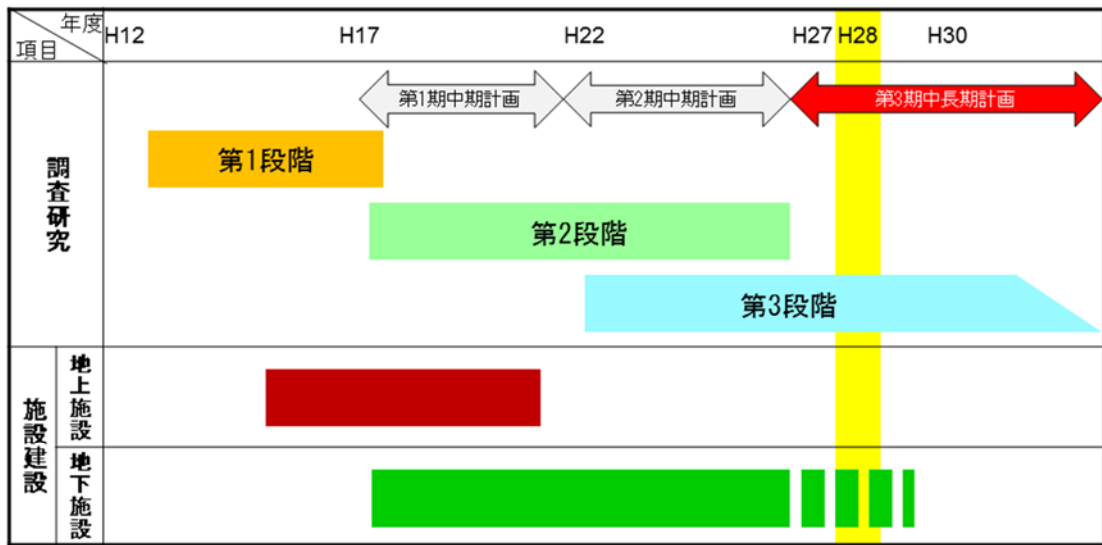


図3 深度350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

付 録

This is a blank page.

幌延深地層研究計画の全体スケジュール

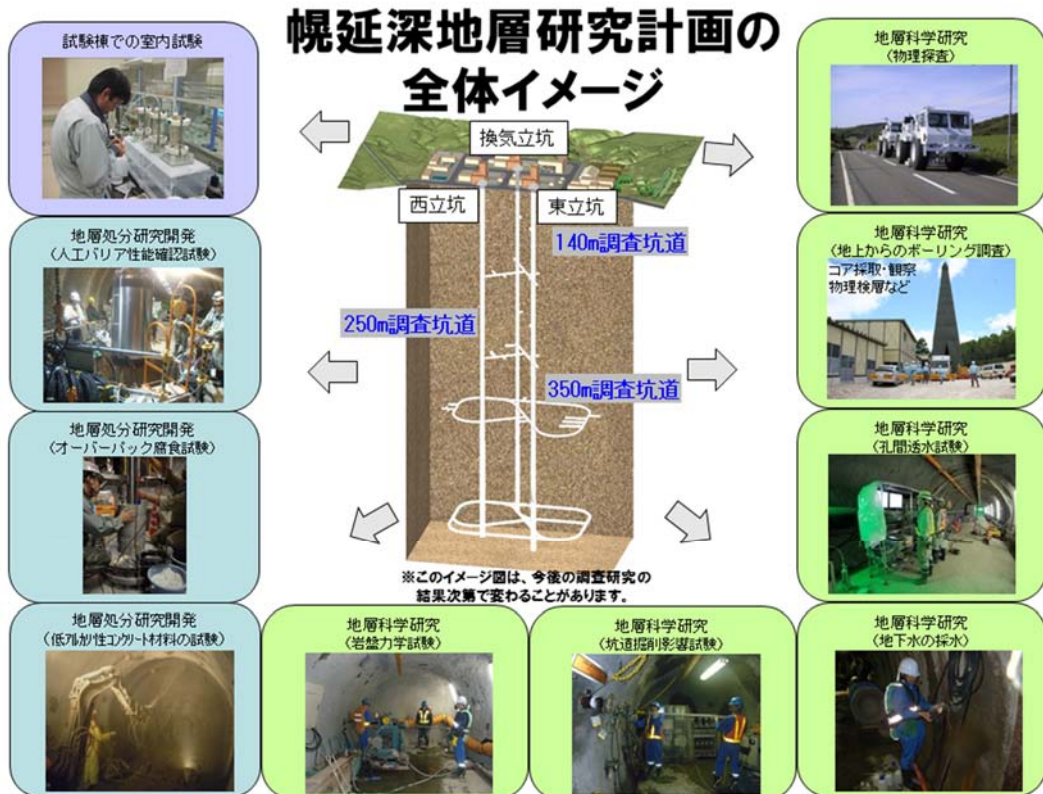


第1段階：地上からの調査研究段階

第2段階：坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階

第3段階：地下施設での調査研究段階

※平成31年度末までに研究終了までの工程やその後の埋め戻しについて決定する。

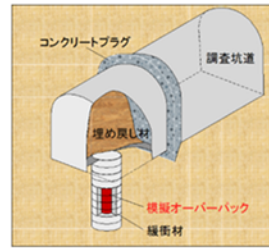


必須の課題

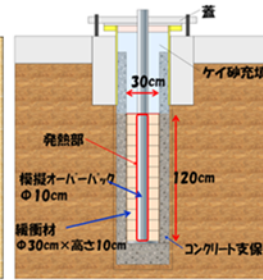
①実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

平成26年度から深度350m調査坑道で実施している人工バリア性能確認試験、オーバーバック腐食試験、物質移行試験を通して、実際の地質環境において、人工バリアや周辺岩盤中での熱-水-応力-化学連成挙動や物質移行現象などを計測・評価する技術の適用性を確認し、「精密調査後半」に必要となる実証試験の技術基盤を確立する。

- 人工バリア性能確認試験
- オーバーバック腐食試験
- 物質移行試験



人工バリア性能確認試験

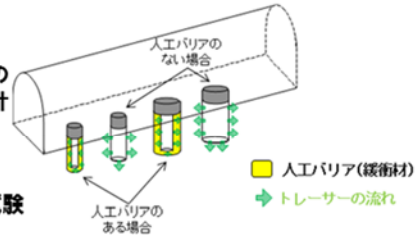


オーバーバック腐食試験

②処分概念オプションの実証

人工バリア設置環境の深度依存性を考慮し、種々の処分概念オプションの工学的実現性を実証し、多様な地質環境条件に対して柔軟な処分場設計を行うことを支援する技術オプションを提供する。

- 処分孔等の湧水対策・支保技術などの実証試験
- 人工バリアの配置・品質確認などの方法論に関する実証試験
- 高温(100℃以上)などの限界条件下での人工バリア性能確認試験



物質移行試験

③地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

地震・断層活動等の地殻変動に対する力学的・水理学的な緩衝能力を定量的に検証し、堆積岩地域における立地選定や処分場の設計を、より科学的・合理的に行える技術と知見を整備する。

- 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化
- 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

平成28年度の調査研究



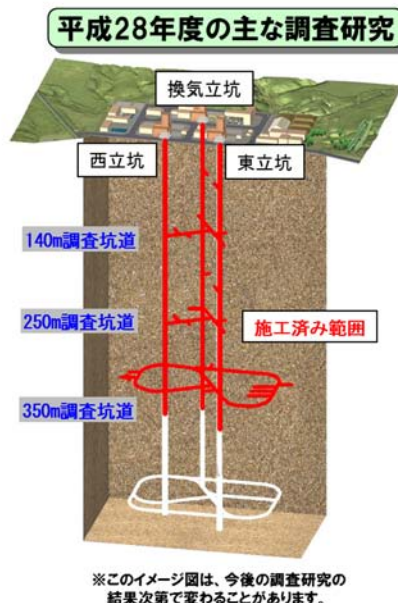
地質調査



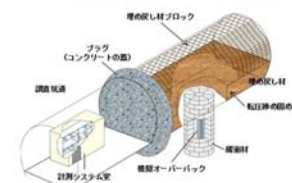
内空変位測定の様子



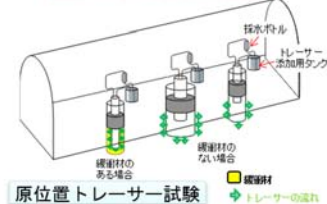
コンクリート材料の影響調査



水圧水質モニタリング



人工バリア性能確認試験



原位置トレーサー試験

平成28年度の調査研究

地質環境調査技術開発 (地質環境モデルに関する調査・解析技術の開発)

- 地質構造： 地表での地質観察、岩石の顕微鏡観察・分析、壁面観察データの解析
- 岩盤の水理： 地下水の水圧・水質の観測、岩盤の水理に関する情報の取得、水圧擾乱試験の実施
- 地下水の地球化学： 地下水の化学組成分析、溶存ガス組成・コロイド・有機物・微生物などに関する分析、河川水・降水の分析
- 岩盤力学： 坑道周辺岩盤・支保の長期挙動の観測

※青字は、現地調査・試験



内空変位測定の様子
(250m調査坑道)



地下水の水質調査の様子
(140m調査坑道)

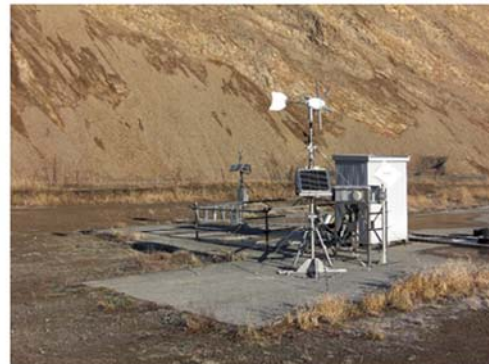
平成28年度の調査研究

地質環境調査技術開発 (調査技術・調査機器開発)

- ・坑道内での調査技術や調査機器の開発：地下水の水圧・水質連続モニタリング装置の長期性能確認
- ・モニタリング技術開発：高精度傾斜計・間隙水圧計・光ファイバー式地中変位計の長期性能確認、弾性波トモグラフィ調査、コントロールボーリング孔を用いた地下水観測など



地下水の水圧・水質モニタリングの様子
(350m調査坑道)

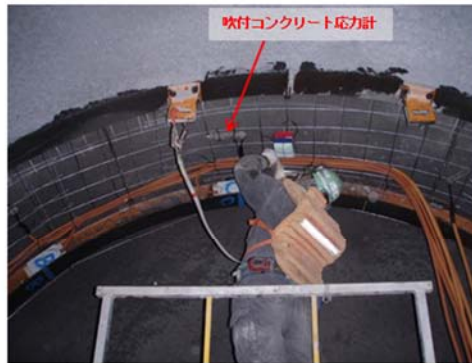


コントロールボーリング孔を用いた
地下水観測（無人観測）

平成28年度の調査研究

深地層における工学的技術の基礎の開発

- ・ 地下施設の設計の妥当性確認および更新：
地中変位計・コンクリート応力計などによる観測
- ・ 湧水抑制対策のための技術開発：
グラウト材料の岩盤中への浸透範囲の評価のための解析技術の検討



吹付コンクリート応力計の設置の様子

平成28年度の調査研究

地質環境の長期安定性に関する研究

- 地形・地質の調査、岩石・地下水・ガスの測定・分析
地震の観測、地震や断層によって生じる地質環境への影響の把握や推定手法の開発

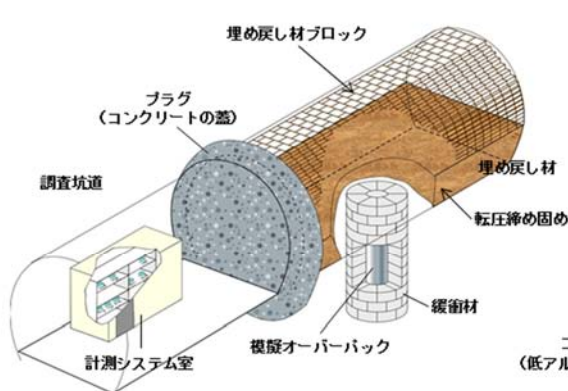


地震観測モニターの設置の様子

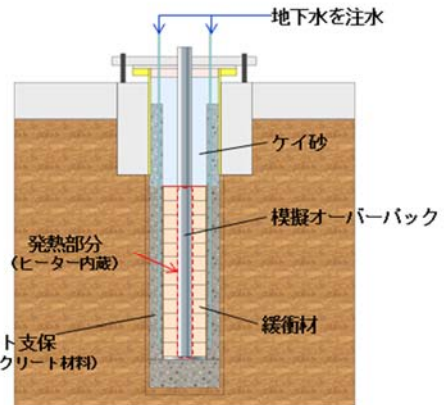
平成28年度の調査研究

地層処分研究開発 (処分技術の信頼性向上)

熱－水理－力学－化学連成挙動等を対象とした試験(人工バリア性能確認試験)、オーバーバック腐食試験、低アルカリ性コンクリート材料が坑道周辺の岩盤や地下水に及ぼす影響を把握するための調査、緩衝材の定置試験・長期挙動試験



熱－水理－力学－化学連成挙動に関する試験
(人工バリア性能確認試験) の概念図

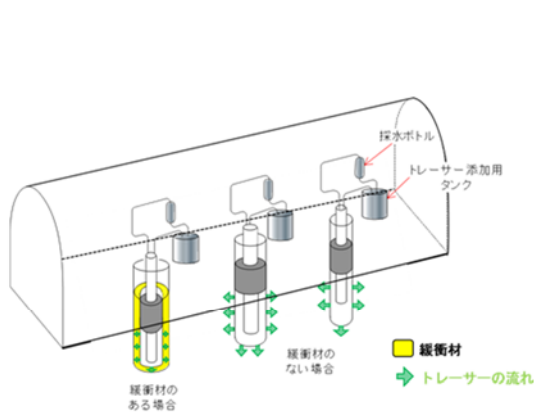


オーバーバック腐食試験の
概念図

平成28年度の調査研究

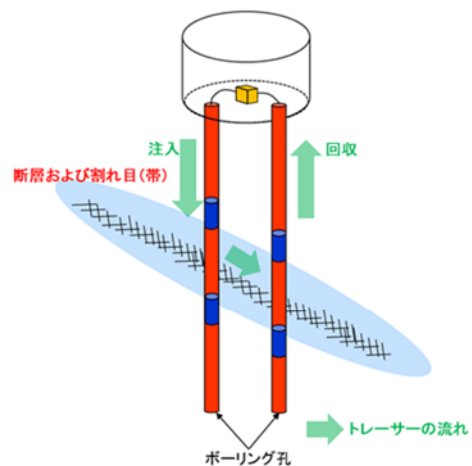
地層処分研究開発 (安全評価手法の高度化)

原位置トレーサー試験や室内試験の実施、実際の地質環境中における物質の移動を評価するためのデータの取得、原位置試験の方法や評価手法の適用性の確認



岩盤を対象とした試験

原位置トレーサー試験の概念図



割れ目(帯)を対象とした試験

平成28年度の調査研究

地下施設の維持管理

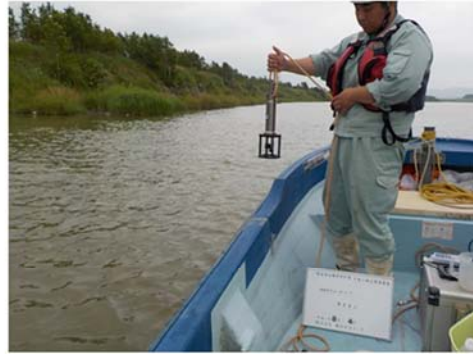
- ・施設内の機械設備や電気設備などの維持管理
- ・排水処理設備の運転



機械設備の維持管理の様子

環境モニタリング

- ・水質・魚類に関するモニタリング調査
- ・地下施設からの排水等の水質モニタリング調査



環境モニタリング調査の様子
(水質)

平成28年度の調査研究

安全確保の取組み

- ・安全教育の実施
- ・定期的な安全パトロールの実施



避難所器具の点検作業

開かれた研究

- ・国内機関との研究協力:
北海道大学、東北大学、京都大学、室蘭工業大学、
幌延地圏環境研究所、原子力環境整備促進・資金
管理センター、電力中央研究所、産業技術総合研究
所など
- ・国外機関との研究協力:
Clay Club、モンテリ・プロジェクト(スイス)など
- ・ホームページでの情報発信、ゆめ地創館での研究紹介、
地下施設見学会の実施など



350m調査坑道での見学の様子

国際単位系（SI）

表 1. SI 基本単位

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

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

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

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

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

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。

(g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

表 5. SI 接頭語

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

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 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単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベール	B	
デシベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エル	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 ^(a)	Oe	1 Oe Δ (10 ³ /4 π) A m ⁻¹

(a) 3 元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 Δ 」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=0.2 g = 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℃」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
ミクロン	μ	1 μ =1 μm=10 ⁻⁶ m

