

超深地層研究所計画 年度計画書 (2019 年度)

Mizunami Underground Research Laboratory Project Plan for Fiscal Year 2019

竹内 竜史 岩月 輝希 松井 裕哉 池田 幸喜
見掛 信一郎 濱 克宏 弥富 洋介 松岡 稔幸
笹尾 英嗣

Ryuji TAKEUCHI, Teruki IWATSUKI, Hiroya MATSUI, Koki IKEDA
Shinichiro MIKAKE, Katsuhiko HAMA, Yosuke IYATOMI, Toshiyuki MATSUOKA
and Eiji SASAO

核燃料・バックエンド研究開発部門
東濃地科学センター
地層科学研究部

Geoscientific Research Department
Tono Geoscience Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

October 2019

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2019

超深地層研究所計画 年度計画書（2019年度）

日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部

竹内 竜史, 岩月 輝希, 松井 裕哉, 池田 幸喜⁺¹, 見掛 信一郎⁺¹,
濱 克宏, 弥富 洋介, 松岡 稔幸, 笹尾 英嗣

(2019年8月1日受理)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）東濃地科学センターでは、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のうち、深地層の科学的研究（地層科学研究）の一環として、結晶質岩（花崗岩）を対象とした超深地層研究所計画を進めている。本研究所計画では、2014年度に原子力機構改革の一環として抽出された三つの必須の課題（地下坑道における工学的対策技術の開発、物質移動モデル化技術の開発、坑道埋め戻し技術の開発）の調査研究を進めている。

本計画書は、2015年に改訂した「超深地層研究所地層科学研究基本計画」および「超深地層研究所計画における調査研究計画 -第3期中長期計画における調査研究計画-」に基づき、2019年度の超深地層研究所計画の調査研究計画、施設計画、共同研究計画等を示したものである。

Mizunami Underground Research Laboratory Project
Plan for Fiscal Year 2019

Ryuji TAKEUCHI, Teruki IWATSUKI, Hiroya MATSUI, Koki IKEDA⁺¹,
Shinichiro MIKAKE⁺¹, Katsuhiro HAMA, Yosuke IYATOMI, Toshiyuki MATSUOKA
and Eiji SASAO

Geoscientific Research Department, Tono Geoscience Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development
Japan Atomic Energy Agency
Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received August 1, 2019)

The Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) Project is being pursued by the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) to enhance the reliability of geological disposal technologies through investigations of the deep geological environment in the crystalline host rock (granite) at Mizunami City, Gifu Prefecture, central Japan.

On the occasion of the reform of the entire JAEA organization in 2014, JAEA identified three important remaining issues on the geoscientific research program based on the synthesized latest results of research and development (R&D): “Development of countermeasure technologies for reducing groundwater inflow”, “Development of modeling technologies for mass transport” and “Development of drift backfilling technology”. The R&D on three remaining important issues have been carrying out in the MIU Project.

This report summarizes the R&D activities planned for fiscal year 2019 on the basis of the MIU Master Plan updated in 2015 and Investigation Plan for the Third Medium to Long-term Research Phase of the JAEA.

Keywords: Mizunami Underground Research Laboratory, MIU Project, Program for Fiscal Year 2019, Geological Disposal Technologies

⁺¹ Geoscience Facility Construction Section, Tono Geoscience Center

目 次

1. はじめに.....	1
2. 超深地層研究所計画の概要.....	3
2.1 目標.....	4
2.2 調査研究の進め方.....	7
2.3 成果の反映.....	9
2.4 瑞浪超深地層研究所用地周辺の地質.....	11
2.5 瑞浪超深地層研究所の施設の現状.....	12
3. 2019年度の調査研究および施設計画.....	13
3.1 地下坑道における工学的対策技術の開発.....	15
3.1.1 大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術の開発.....	15
3.1.2 地下水管理技術の開発.....	15
3.2 物質移動モデル化技術の開発.....	16
3.2.1 低透水性領域での割れ目ネットワークモデル化手法の開発.....	16
3.2.2 地質環境の長期変遷解析技術の開発.....	17
3.2.3 深部塩水系地下水の起源・滞留時間の理解.....	17
3.3 坑道埋め戻し技術の開発.....	18
3.3.1 坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術の開発.....	18
3.3.2 長期モニタリング技術の開発など.....	19
3.4 正馬様用地における調査研究.....	20
3.5 施設計画.....	22
4. 共同研究・施設利用.....	25
5. おわりに.....	27
参考文献.....	27
付録1 広域地下水流動研究2019年度計画.....	30

Contents

1. Introduction.....	1
2. Overview of the Mizunami Underground Research Laboratory Project	3
2.1 Goals of the MIU Project.....	4
2.2 Approach of the MIU Project	7
2.3 Application of research and development results	9
2.4 Geology.....	11
2.5 MIU facilities.....	12
3. Investigations and construction plan in FY2019.....	13
3.1 Development of countermeasure technologies for reducing groundwater inflow.....	15
3.1.1 Water-tight grouting technology	15
3.1.2 Effluent treatment technology	15
3.2 Development of modeling technologies for mass transport.....	16
3.2.1 In-situ test and modeling fracture network.....	16
3.2.2 Evaluating long-term change of geological environment.....	17
3.2.3 Inference of origin and residence time of deep saline water.....	17
3.3 Development of drift backfilling technology	18
3.3.1 Evaluation of recovery process and geological environment post closure.....	18
3.3.2 Long-term monitoring of geological environment	19
3.4 Investigation plan at the Shobasama Site	20
3.5 Facility plan at the MIU Construction Site	22
4. Collaboration studies with research organizations	25
5. Conclusions.....	27
References	27
Appendix1 Plan of the Regional Hydrogeological Study Project in FY2019.....	30

1. はじめに

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）東濃地科学センターは、原子力政策大綱¹⁾に定められている「深地層の研究施設等を活用して、深地層の科学的研究、地層処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化等に向けた基盤的な研究開発、安全規制のための研究開発を引き続き着実に進めるべきである」との方針に基づき、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のうち、深地層の科学的研究（地層科学研究）を進めている。このうち、超深地層研究所計画は、岐阜県瑞浪市において進めている結晶質岩（花崗岩）を主な対象とする研究計画である。

東濃地科学センターでは、1994年6月に公表された「原子力の研究、開発および利用に関する長期計画（以下、原子力長計）」²⁾において定められた「地層処分研究開発の基盤となる深部地質環境の科学的研究を着実に進めること」との方針および深地層の研究施設の位置づけに基づき1996年11月に「超深地層研究所地層科学研究基本計画（以下、基本計画）」³⁾を策定し、超深地層研究所計画における調査研究を進めてきた。その後、2000年11月に策定された原子力長計⁴⁾に示された「地層処分技術の信頼性の確認や安全評価手法の確立に向けて研究開発を着実に推進すること」との核燃料サイクル開発機構（現：原子力機構）の役割を踏まえて、2001年4月に基本計画を改訂した⁵⁾。さらに、2002年1月に瑞浪市との間で同市明世町の市有地の賃貸借契約を締結し、超深地層研究所の研究坑道*等を同市有地に設置することとしたのを機に基本計画を改訂した⁶⁾。改訂した基本計画を踏まえ、また、2005年7月に設置された国の地層処分基盤研究開発調整会議における議論の結果（資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構、2006）⁷⁾（以下、全体計画）や原子力政策大綱における原子力機構の役割に基づいて研究開発を進めてきた。

その後、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」（以下、「基本方針」）および「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」（以下、「最終処分計画」）の改定に関する閣議決定（2008年3月）がなされ（同年4月施行）、「基本方針」においては研究開発機関の役割として、深地層の研究施設や研究開発の内容の公開を通じた国民との相互理解促進への貢献について明示され、「最終処分計画」においては、処分事業の実施主体による精密調査地区の選定期間が「平成20年代前半」から「平成20年代中頃」に変更された。一方、2008年度までの超深地層研究所計画での調査研究により得られた情報から、深度300m付近は、より深部の地質環境と比較して割れ目が多く、湧水が多いことが予想された。「基本方針」と「最終処分計画」の改定およびこれまでの調査研究で得られた成果を踏まえ、深度300mに新たに研究坑道を設置して調査研究することにより、より深部での調査研究の成果とあわせて技術の高度化が可能になること、研究の場を広く一般に公開することで地層処分に関する国民との相互理解に資することが期待できること等から、2008年度に深度300mに調査研究用の水平坑道を整備することとした。以上のような「基本方針」と「最終処分計画」の改定および深度300mへの調査研究用の水平坑道の整備を背景に、原子力機構では2010年に基本計画を改訂した⁸⁾。

原子力機構は、2013年に文部科学省日本原子力研究開発機構改革本部が決定した「日本原子力研究開発機構の改革の基本的方向」⁹⁾を受けて、改革計画¹⁰⁾を策定した。同改革計画の中に示された事業の見直しの一環として、瑞浪と幌延の二つの深地層の研究施設計画については、2015年3月までに予定していた研究開発成果の取りまとめを前倒しして行い、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所事故後の地層処分事業の動向も視野に入れ、2014年9月末に深地層の研究施設で行うべき必須の課題を提示¹¹⁾し、この必須の課題に基づき基本計画を改訂¹²⁾する

* 調査研究のために掘削される主立坑、換気立坑、水平坑道等からなる超深地層研究所の地下部分

とともに、必須の課題に関する研究計画¹³⁾を策定し、2016年6月に公表した。

本計画書は、この必須の課題に関する研究計画に基づき、超深地層研究所計画の2019年度の調査研究計画の内容を示すものである。2019年度は、年度末までに研究の進捗状況等を確認し、坑道埋め戻し等のその後の進め方について決定するとともに、坑道の埋め戻しに着手する計画である。なお、調査研究の一部については、国からの受託研究を活用して実施する予定である。

また、東濃地科学センターでは、地質環境特性の研究を担うプロジェクトの一つとして、超深地層研究所計画に先立ち広域地下水流動研究を進めてきた¹⁴⁾。この研究は、広域における地表から地下深部までの地質・地質構造、岩盤の水理や地下水の水質を明らかにするために必要な調査・解析技術の開発を目標としているものであり、地下水流動系の涵養域から流出域までを包含する約10km四方の領域を対象に1992年度に調査研究を開始し、2004年度末をもって主要な現場調査を終了した。2005年度からは、土岐花崗岩における水理学的・地球化学的な基礎情報の取得および地下水流動解析結果の妥当性確認のためのデータ取得を目的として、既存の観測設備による表層水理（河川流量、降水量）観測およびボーリング孔を用いた地下水長期モニタリングを継続してきた。表層水理観測は、所期の目的を達成したことにより、2014年度で終了した。超深地層研究所計画では、広域地下水流動研究で取得されたこれらの観測データを、研究坑道の建設に伴う周辺の岩盤や地下水の変化を把握するために利用している。本計画書の巻末に、広域地下水流動研究についての2019年度の計画を示す。

2. 超深地層研究所計画の概要

超深地層研究所計画（以下、本計画）における調査研究は、研究坑道の建設に先立って開始し、研究坑道の完成後まで実施する。本計画では、研究坑道の建設工程やこれに伴う調査研究の課題、対象、空間スケール等を考慮し、計画全体を、第1段階（地表からの調査予測研究段階）、第2段階（研究坑道の掘削を伴う研究段階）および第3段階（研究坑道を利用した研究段階）の3段階に区分して進めている。このように段階的に進めることにより、自然の地質環境と、その地質環境が坑道の掘削等により変化する状況を把握することができる。また、この間、深部地質環境の予測とその予測の妥当性の確認を段階ごとに繰り返して行うことにより、前段階で適用した調査・解析・評価手法の妥当性や有効性を評価することが可能となる。これらにより得られた情報や知見等は、地質環境を対象とした一連の調査、評価等に関する総合的な方法論としての体系化を通じて、処分事業と安全規制の技術基盤の整備に資するとともに、地層処分に関する国民との相互理解促進にも貢献することが期待される。

本計画は、当初は岐阜県瑞浪市明世町にある原子力機構用地（図2-1：正馬様用地）において「地表からの調査予測研究段階（第1段階）」を進めてきた。その後、2002年1月に瑞浪市と市有地の賃貸借契約を締結し、超深地層研究所の研究坑道等の施設を市有地（図2-1：瑞浪超深地層研究所用地；以下、研究所用地）に設置し、調査研究を進めることとした。

本計画の第1段階の調査研究は、1996年度から2004年度まで実施した。第2段階の調査研究は、2004年度に開始し、2013年度末で終了した。第3段階の調査研究は、2010年度から実施している。

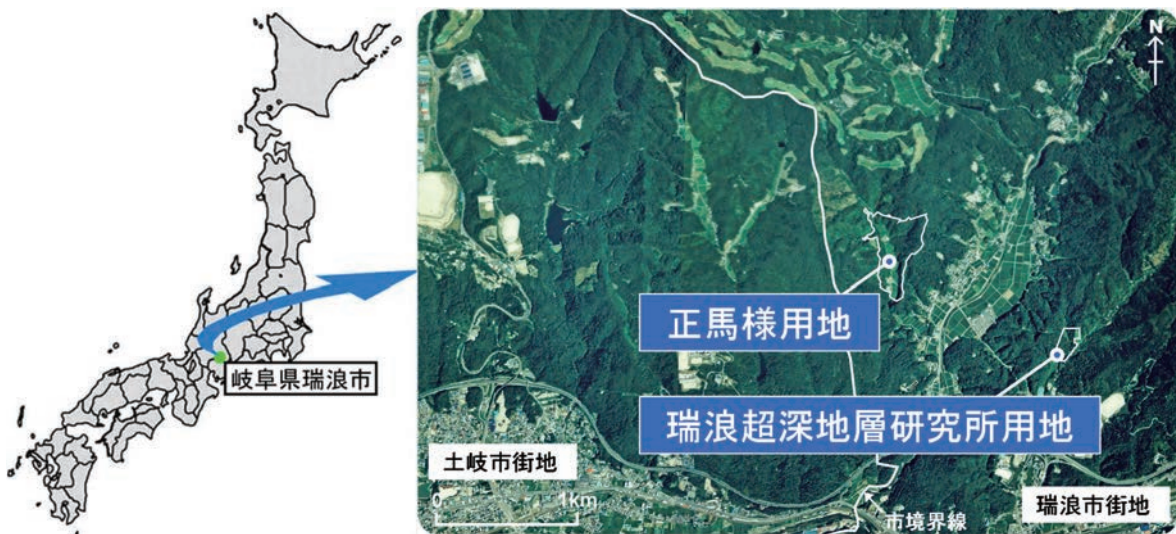


図 2-1 超深地層研究所の設置場所

2.1 目標

超深地層研究所計画においては、全体目標として以下の二つを設定している（詳細は、基本計画¹²⁾を参照）。

【全体目標】

- ①深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備
- ②深地層における工学技術の基盤の整備

本計画は、前述のように、三段階に区分して進めている。以下に各段階における目標とその内容を示す。

【段階目標】

第1段階：地表からの調査予測研究段階

- ①地表からの調査研究による地質環境モデルの構築および研究坑道掘削前の深部地質環境の状態の把握

地表からの調査研究等により深部地質環境に関する情報を取得し、以後の調査研究の初期条件として研究坑道掘削前の未擾乱の地質環境特性を詳細に把握する。また、取得した情報の集約と解釈をとおして、サイトスケール（数百m～数km四方）（図2.1-1、表2.1-1）の地質環境モデル（地質構造モデル、水理地質構造モデル、地球化学モデルおよび岩盤力学モデル）を構築する。さらに、新たに取得する情報に基づき、適宜、地質環境モデルを更新し、調査の種類・量、解析・評価の手法および結果の精度との関係を把握する。これにより、一連の調査・解析・評価手法の有効性を評価する。

また、これらの地質環境（たとえば、地下水流動場、地下水の地球化学特性、岩盤の力学特性等）の研究坑道掘削に伴う変化を推定する。

- ②研究坑道の詳細設計および施工計画の策定

後述の③において策定する研究坑道の掘削を伴う研究段階における具体的な調査研究計画および研究坑道を利用した研究段階における概略的な調査研究計画に基づいて、研究坑道の詳細レイアウトを決定する。この際、本段階において取得する深部地質環境に関する情報および研究坑道掘削に伴う深部地質環境の変化に関する推定結果等を考慮する。また、実際の地質環境が推定結果と大きく異なる場合や、突発的な事象（大量出水や山はね等）が発生した場合等においては、設計変更や対策工の適用により柔軟に対応することが重要である。さらに適用する施工技術ならびに機械・設備を選択し、具体的な施工計画を決定する。

- ③研究坑道の掘削を伴う研究段階の調査研究計画の策定

研究坑道の掘削を伴う研究段階における具体的な調査研究計画および研究坑道を利用した研究段階における概略的な調査研究計画を策定する。この際、前述の深部地質環境に関する情報ならびに研究坑道掘削に伴う深部地質環境の変化に関する推定結果等を踏まえ、原子力長計等に示された今後の研究開発の課題を考慮することが重要である。

第2段階：研究坑道の掘削を伴う研究段階

- ①研究坑道の掘削を伴う調査研究による地質環境モデルの構築および研究坑道の掘削による深部地質環境の変化の把握

研究坑道の掘削および坑道内からのボーリング掘削により取得される情報等に基づき、前段階

において構築した地質環境モデル（サイトスケール）の妥当性を確認するとともに、その結果を踏まえ、地質環境モデル（サイトスケール）を更新する。また、更新した地質環境モデル（サイトスケール）を基に、取得した情報を用いて、ブロックスケール（数十～数百m四方）（図2.1-1、表2.1-1）の地質環境モデルを構築する。さらに、新たに取得する情報に基づき、適宜、地質環境モデル（ブロックスケール）を更新し、調査の種類・量、解析・評価の手法および結果の精度との関係を把握する。

また、研究坑道の掘削に伴う地質環境の変化のモニタリングにより取得する情報および前述した地質環境モデル（サイトスケール）を用いた解析結果等に基づき、研究坑道掘削が周辺の地質環境に与える影響等を評価する。

以上の調査研究を実施することにより、研究坑道掘削時の段階的な地質環境の調査・解析およびその評価結果を基に、地表からの調査予測研究段階において実施した一連の調査・解析・評価手法の妥当性を確認するとともに、研究坑道の掘削に伴う研究段階において地質環境を段階的に調査・評価するための体系的な方法論を整備する。

②研究坑道の施工・維持管理に係わる工学技術の有効性の確認

研究坑道の施工・維持管理において適用した工学技術の有効性を確認するとともに、それらの高度化を図る。また、実際の地質環境が推定結果と大きく異なる場合や、突発的な事象が発生した場合等においては、設計および施工計画の変更に対処できることを示す。また、掘削中の研究坑道内の安全を確保するための技術を整備する。

以上をとおして、大深度での地下施設の設計・施工計画構築技術の妥当性や、建設技術、施工対策技術および安全確保技術の適用性を段階的に評価し、結晶質岩／淡水系地下水環境における体系化した深地層の工学技術の基礎を提示する。

③研究坑道を利用した研究段階の調査研究計画の策定

研究坑道を利用した研究の課題を見直すとともに、研究坑道を利用した研究段階における調査研究計画の具体化を図る。この際、前述の深部地質環境に関する情報、これまでに東濃鉱山や釜石鉱山ならびに海外の地下研究施設等において実施してきた調査研究の成果や課題等に加え、全体計画等に示された今後の研究開発の課題を考慮することが重要である。

第3段階：研究坑道を利用した研究段階

①研究坑道を利用した調査研究による地質環境モデルの構築および研究坑道の掘削から維持管理・閉鎖に伴う深部地質環境の変化の把握

研究坑道を利用した調査研究により深部地質環境の特性を把握するための手法の開発を行うと同時に、深部地質環境に関する情報を三次元的に取得・蓄積し、本段階までに構築した地質環境モデル（サイトスケールならびにブロックスケール）の妥当性を確認する。その結果に基づき、適宜、地質環境モデル（サイトスケールならびにブロックスケール）を更新する。また、本段階までの地質環境モデルの構築および更新をとおして、不確実性を明らかとするとともに重要な要素の特定を行う。これらに基づいて、調査の種類・量、解析・評価の手法と結果の精度との関係を明らかにする。

また、研究坑道の部分的な掘削・維持管理・閉鎖時の地質環境モニタリング等により取得する情報および前述の地質環境モデルを用いた解析結果等に基づき、研究坑道の掘削から維持管理・閉鎖に伴う研究坑道周辺の地質環境特性の一連の変化を把握する。さらに、地震や隆起・侵食といった長期的な自然現象が地質環境に与える影響も念頭に置いて、研究坑道周辺の地質環境特性の

長期的な変遷を統合的に解析する手法の検討を行う。

②深地層における工学技術の有効性の確認

地下深部における、研究坑道を長期にわたり維持・補修する技術の適用性を確認する。また、工程や品質等の管理体系を構築し、研究坑道内の研究環境を適切に維持管理し安全を確保するための技術を整備する。また、坑道掘削が地質環境に及ぼした影響を修復・軽減する工学技術等を開発・整備する。さらに、実際の地質環境が推定結果と大きく異なる場合や、突発的な事象が発生した場合等においては、必要に応じ、設計および施工計画の変更に対処できることを示す。

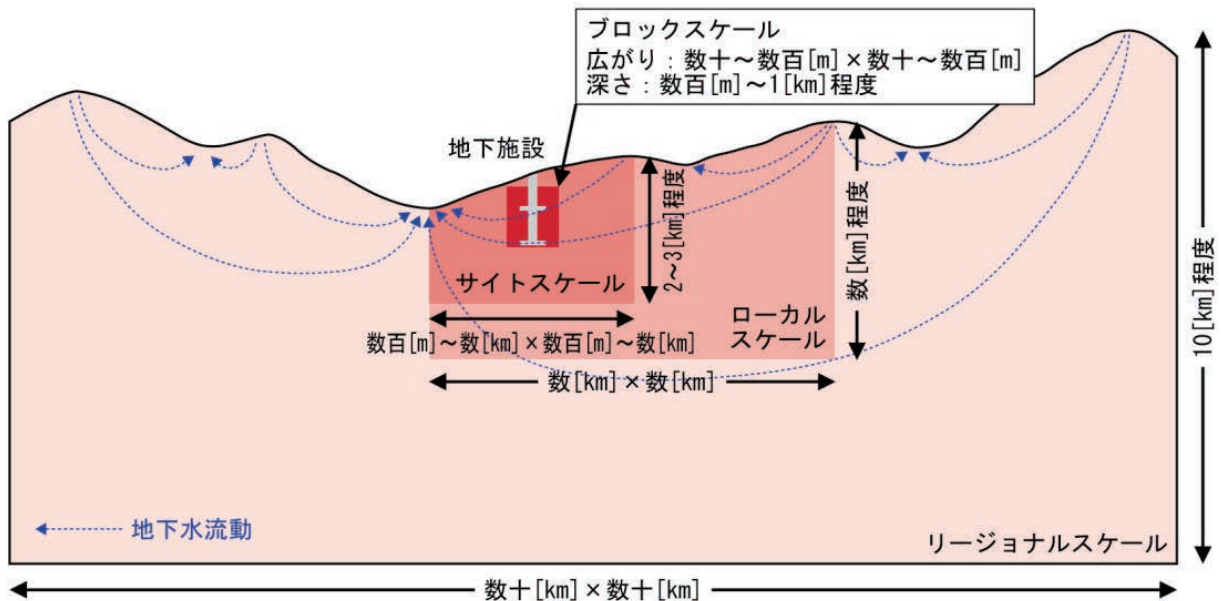


図 2.1-1 空間スケール概念

表 2.1-1 空間スケールの対象範囲と位置付け

空間スケール／対象範囲		地層処分技術に関する研究開発における位置付け
リージョナルスケール	平面：数百[km ²]程度 (数十[km] × 数十[km]) 深さ：10[km]程度	・ローカールスケールの研究領域／境界条件の設定
ローカールスケール	平面：数十[km ²]程度 (数[km] × 数[km]) 深さ：数[km]程度	・地層処分システム全体の安全評価 ・地下施設の設計のための基礎情報の収集 ・サイトスケールの研究領域／境界条件の設定
サイトスケール	平面：数[km ²]程度 (数百[m]～数[km] × 数百[m]～数[km]) 深さ：2～3[km]程度	・人工バリア周辺から対象岩盤全体の安全評価 ・地下施設建設時の力学・水理状態の予測 ・ブロックスケールの研究領域／境界条件の設定
ブロックスケール	平面：数百[m ²]程度 (数十～数百[m] × 数十～数百[m]) 深さ：数百[m]～1[km]程度	・人工バリアから生物圏までの一部における安全評価 ・地下施設建設時の力学・水理状態の予測 ・より小スケールの研究領域／境界条件の設定

2.2 調査研究の進め方

本計画の第1段階および第2段階の調査研究においては、地層処分における「安全評価」、「地下施設の設計・施工」および「環境影響評価」の観点から設定した個別目標と課題に対して調査研究項目を設定することを基本的な進め方としてきた^{15,16,17}。

第3段階も同様の考え方¹⁸で進めていくことを基本とする。第3段階の調査研究で対象とする個別目標を図2.2-1¹⁸に示す。なお、図2.2-1は今後の研究の進捗状況等を踏まえて、適宜最適化していくこととする。

全体目標	個別目標	課題	広域地下水流動研究		M/J計画						物質・移動・モデル化技術の開発	坑道埋め戻し技術の開発	地下坑道における工学的対策技術の開発									
			L	S	第1段階		第2段階		第3段階													
					S	B	S	B	S	B												
深地層における工学技術の進展の確保	地下施設の設計・施工	環境影響評価	地下空洞への地下水流入状態の把握	地下空洞への地下水流入量の把握	地下空洞への流入地下水水質の把握	◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
深地層における工学技術の進展の確保	地下施設の設計・施工	環境影響評価	地下空洞への地下水流入状態の把握	地下空洞への流入地下水水質の把握	地下空洞への流入地下水水質の把握	◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
深地層における工学技術の進展の確保	地下施設の設計・施工	環境影響評価	地下空洞への地下水流入状態の把握	地下空洞への流入地下水水質の把握	地下空洞への流入地下水水質の把握	◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
深地層における工学技術の進展の確保	地下施設の設計・施工	環境影響評価	地下空洞への地下水流入状態の把握	地下空洞への流入地下水水質の把握	地下空洞への流入地下水水質の把握	◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
深地層における工学技術の進展の確保	地下施設の設計・施工	環境影響評価	地下空洞への地下水流入状態の把握	地下空洞への流入地下水水質の把握	地下空洞への流入地下水水質の把握	◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

L: ローカルスケール, S: サイトスケール, B: ブロックスケール
 ◎: 主な研究対象の段階/スケール, ○: 補助的な研究対象の段階/スケール
 ○: 個別目標/課題と関係あり
 -: 関係なし

図 2.2-1 個別目標および課題

2.3 成果の反映

超深地層研究所における地層科学研究の成果は、原子力発電環境整備機構が進める処分事業や国が行う安全規制に対し技術基盤として反映されるほか、地下深部についての学術的な研究、ならびに地層処分に対する国民との相互理解の促進に寄与するものである。これまでの調査研究により、深度500m程度以深の地質環境は割れ目の少ない還元環境にあることが明らかとなってきた。また、深度300m付近については、高透水性の岩盤であることが明らかとなっている。このように異なった地質環境を対象とした研究開発の成果は、繰り返しアプローチ¹⁵⁾ (図2.3-1) による地質環境特性調査技術の構築のみならず、全体計画等に示された、処分事業の実施や安全規制の技術基盤として重要であるとともに、国民の地層処分に関する技術的信頼感の醸成に貢献できるものとなる。

以下に、2.1に示した二つの全体目標に対して得られる成果について、その具体的な反映先を示す。

①深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備

各段階において、「概念の提示→計画の立案→調査→データの解釈→モデル化・解析→解析結果の評価→不確実性の評価→重要な要素の特定」というプロセスを繰り返して調査研究を進め、段階的に地質環境に関する知見の不確実性を低減することにより、結晶質岩の地質環境を合理的に調査・評価するための体系的な方法論を提示する。この成果は、全体計画に示された段階目標である、地表からの調査に関わる技術基盤の確立（地表からの調査技術の検証～地下施設での調査の考え方）および地下施設を活用した調査に係る技術基盤の確立に役立てられるとともに、原子力政策大綱に示されたとおり地層処分技術の信頼性向上や安全規制のための研究開発にも活用される。また、一連の調査で取得される深部地質環境に関する情報や知見等は、国内外の地球科学分野の学術的研究の成果等と合わせて、地下深部における様々な現象（たとえば、地下水による物質の移動や地震の影響等）の理解、わが国の深部地質環境を示すモデルの信頼性の向上および地下空間利用の際に用いられる工学材料の検討等にも反映できる。

②深地層における工学技術の基盤の整備

超深地層研究所における地層科学研究の成果としては、研究坑道の設計、施工計画の策定、掘削、施工対策、維持管理、閉鎖および安全確保にかかわる、既存のあるいは新たに開発される工学技術の有効性の確認が期待される。また、実際の地質環境が推定結果と大きく異なる場合や、突発的な事象が発生した場合等においては、設計および施工計画の変更に対処できることを示す。

これらの工学技術は、地層処分場の設計、建設ならびに操業や閉鎖にかかわる合理的かつ最適な技術の開発の基盤として活用される一方、将来における地下空間利用の基礎として、地下深部に地下空間を設け安全に研究活動等が実施可能であること等を実証するために役立てられる。

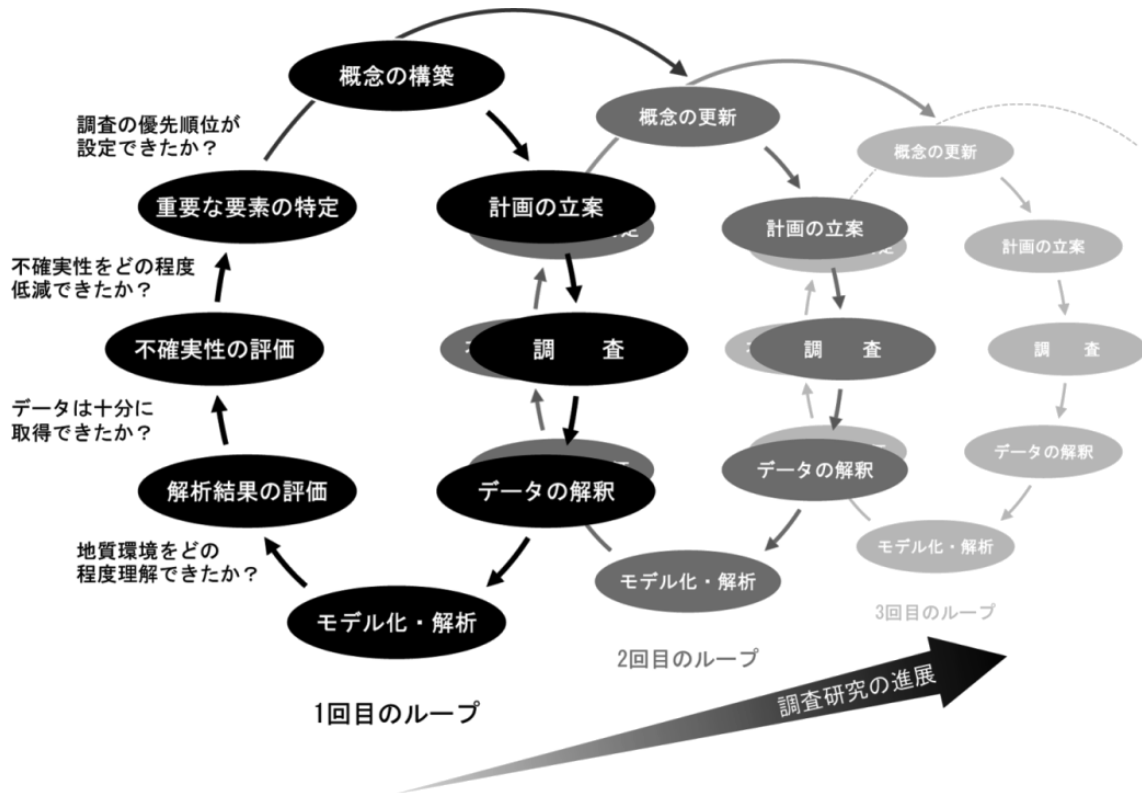
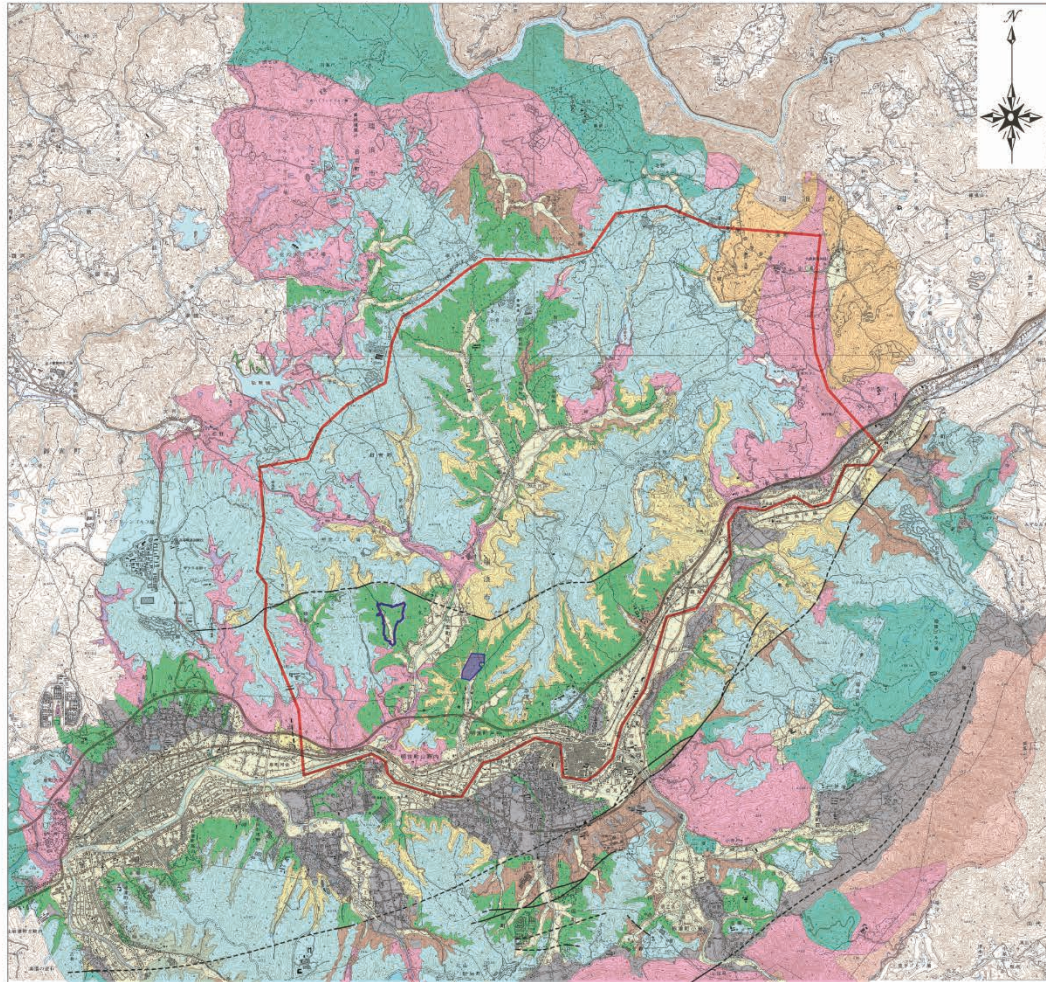


図 2.3-1 調査研究の繰り返しアプローチ

2.4 瑞浪超深地層研究所用地周辺の地質

研究所用地および正馬様用地においては、基盤をなす後期白亜紀の花崗岩（土岐花崗岩）を新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）が不整合に覆い、さらにそれを固結度の低い新第三紀中新世～第四紀更新世の砂礫層（瀬戸層群）が不整合に覆っている（図2.4-1）^{19,20}。また、土岐花崗



地形図：1:25,000 数値地図地図画像（国土地理院 平成12年9月1日発行）
「御嵩」「土岐」「瑞浪」を使用

0 2000 4000[m]
(糸魚川, 1980を一部修正)¹⁹

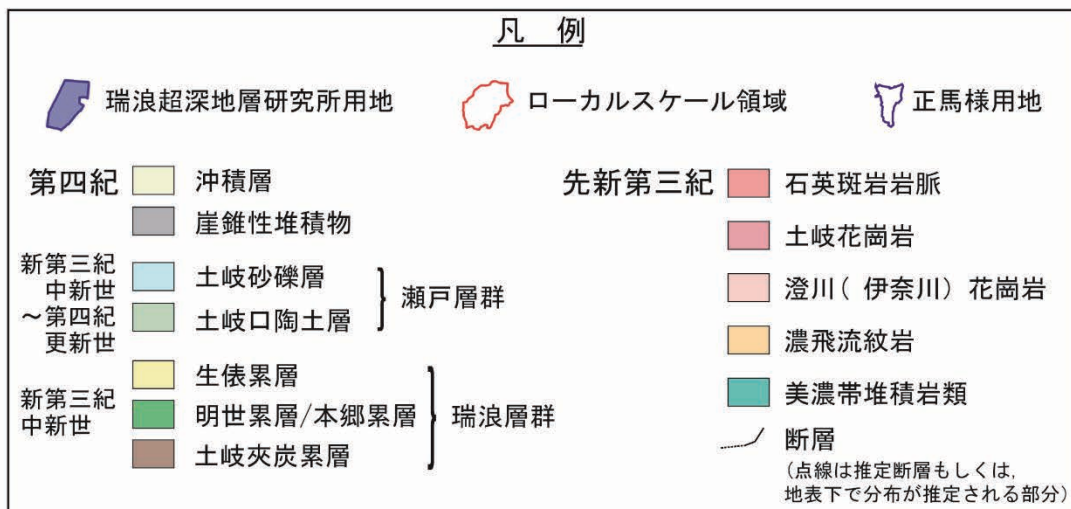


図 2.4-1 超深地層研究所周辺の地質概要

岩中には、石英斑岩の岩脈が分布する。研究所用地の北方、西方および東方には美濃帯堆積岩類が、北東方には濃飛流紋岩がそれぞれ分布する¹⁹⁾。

瑞浪層群は、美濃帯堆積岩類、土岐花崗岩および濃飛流紋岩を基盤として、新第三紀中新世～第四紀更新世の瀬戸層群に不整合で覆われる。岩相によって下位から土岐夾炭累層、本郷累層、明世累層、生俵累層に区分される²¹⁾。また、明世累層と生俵累層の間に宿洞累層が分布する場所もある²²⁾。

瀬戸層群は、美濃帯堆積岩類、濃飛流紋岩、土岐花崗岩および瑞浪層群を不整合に覆い、層相によって下位から土岐口陶土層と土岐砂礫層に区分される²³⁾。

2.5 瑞浪超深地層研究所の施設の現状

瑞浪超深地層研究所の施設は、地上施設と研究坑道からなる(図2.5-1)。地上施設は、櫓設備、巻上設備、給排水設備、換気設備、コンクリートプラント、排水処理設備、受変電設備、非常用発電設備、資材置場、火工所、管理棟等からなる。研究坑道は、主立坑、換気立坑、深度100mごとに主立坑と換気立坑をつなぐ予備ステージ、深度300mステージ、深度500mステージからなる。

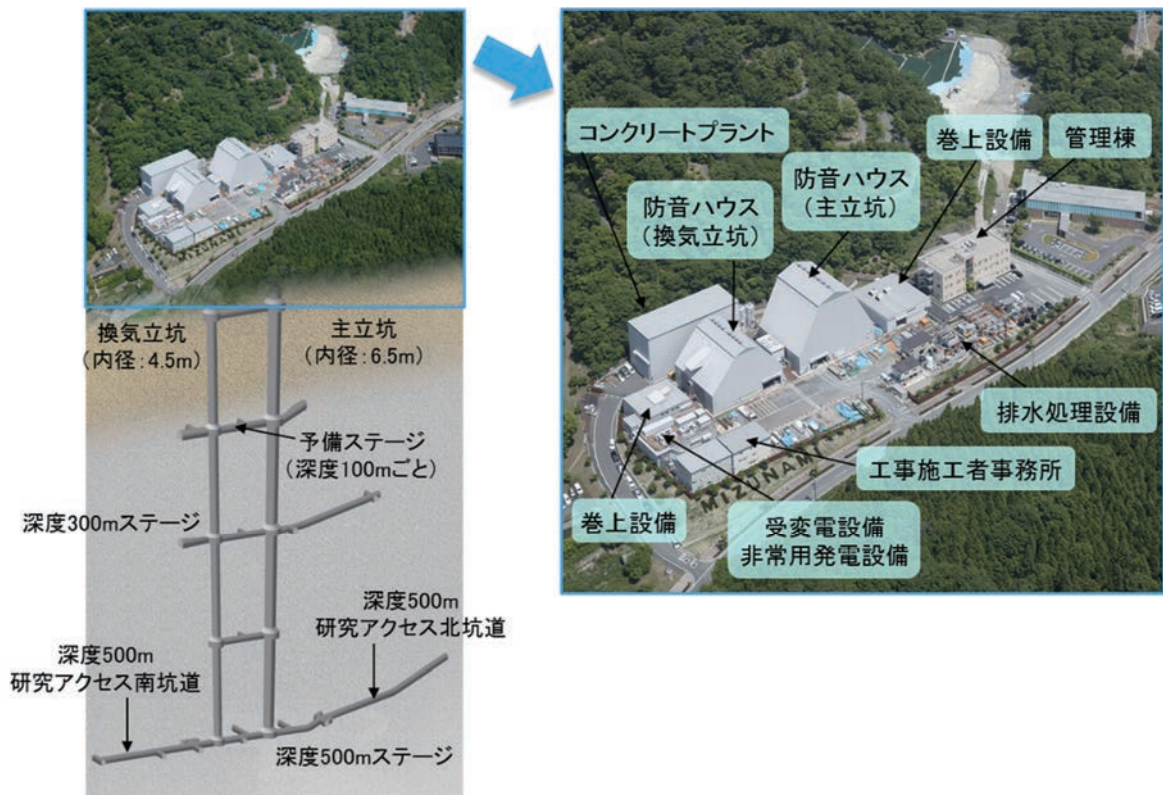


図 2.5-1 瑞浪超深地層研究所の施設の現状

3. 2019年度の調査研究および施設計画

2019年度は、第3段階の調査研究として、2014年度に原子力機構改革の一環として抽出された三つの必須の課題（地下坑道における工学的対策技術の開発、物質移動モデル化技術の開発、坑道埋め戻し技術の開発）についての調査研究を進めるとともに、これまでに得られた研究成果に基づく地質環境モデルの更新、調査技術や解析手法の有効性の評価・体系化および研究坑道の工事に適用された各種工学技術の評価等を含めて必須の課題に関わる研究成果の取りまとめを行う。

2019年度の主な調査研究としては、坑道閉鎖に伴う地質環境の回復現象の把握等を目的として、再冠水試験を2018年度に引き続き実施する。また、割れ目ネットワークのモデル化手法の妥当性確認や高度化を目的としたボーリング調査を継続する。第1段階で掘削したボーリング孔、深度300m研究アクセス坑道および深度500m研究アクセス南・北坑道やボーリング横坑等から掘削したボーリング孔を用いた長期観測については、第1段階の調査研究から進めてきた深部地質環境の変化を継続して把握していく必要があることから、第3段階の調査研究として継続する。なお、調査研究の一部については、国からの受託研究を活用して実施する予定である。

2019年度の主な研究坑道の工事としては、坑内外仮設備の補修、交換等の通常の維持管理に加えて、主立坑のワイヤーロープ（ズリキブル）、換気立坑のワイヤーロープ（スカフォード、ズリキブル）の交換を実施するとともに、坑道埋め戻しに着手する計画である。

図3-1に研究坑道レイアウトおよび主な調査位置計画図を示す。

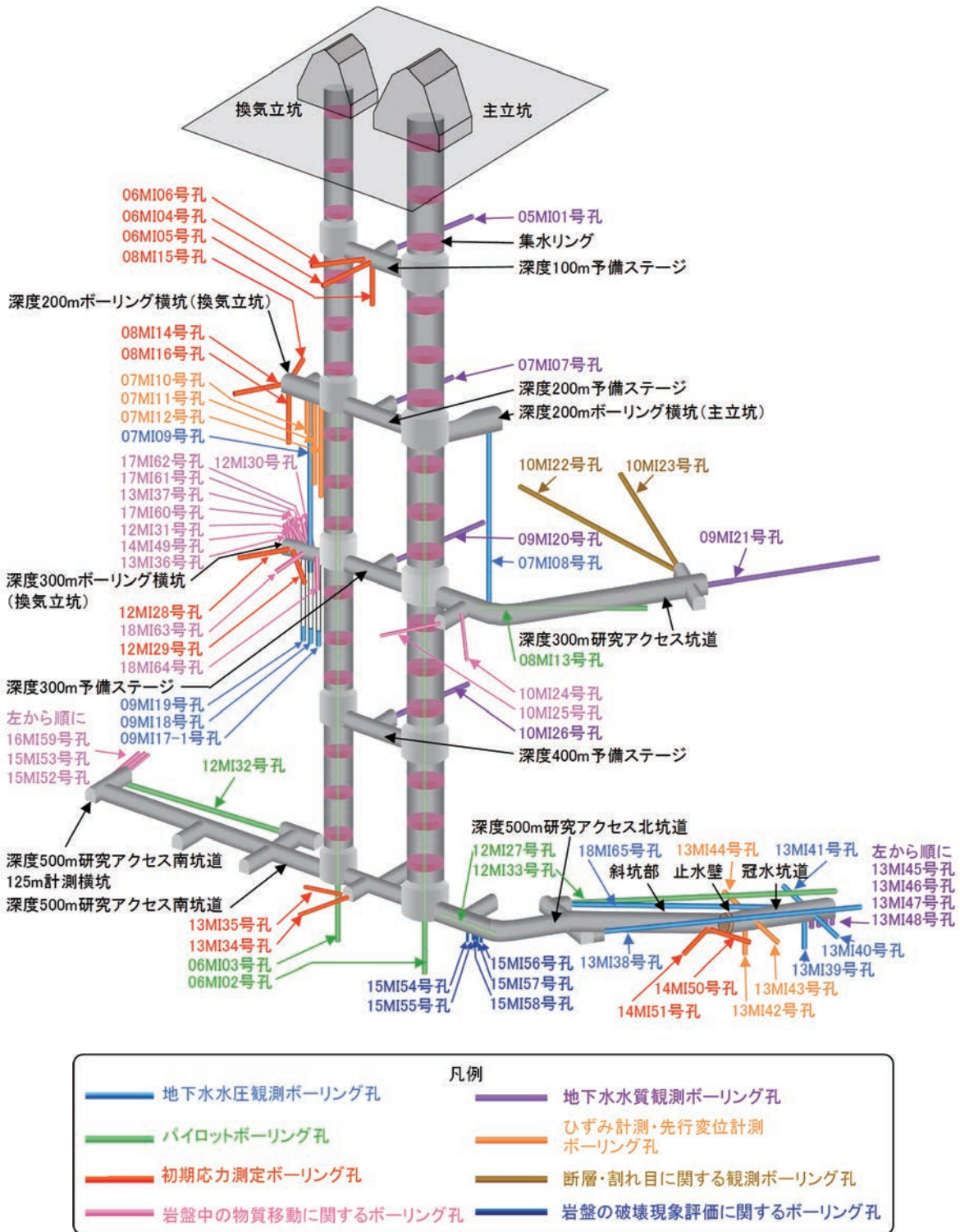


図 3-1 研究坑道レイアウトおよび主な調査位置計画図

3.1 地下坑道における工学的対策技術の開発

これまでに、深地層における工学技術の基礎の開発として、建設工事を通じて得られた情報に基づいて設計技術、掘削技術、施工対策技術（グラウチング等）、品質保証技術や安全対策に関連する技術の有効性を確認・評価した。一方、断層や割れ目が多く、それに起因して坑道内への湧水量も多い日本の地質環境において、地下施設の作業環境の維持、排水処理の効率化、坑道埋め戻しの際の埋め戻し材の浸食などを考慮し、それらに対し効果的な地下水抑制技術を確立することが重要な課題の一つである。そのため、研究坑道への湧水に対しては、プレグラウチングとポストグラウチングの組み合わせによって制御可能とするウォータータイトグラウト技術を実証する。また、地下水排水処理技術等の地下水管理技術の高度化に取り組む。

3.1.1 大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術の開発

2018年度は、プレグラウチングとポストグラウチングを併用した深度500m研究アクセス南坑道での湧水抑制効果について、これまでに得られた成果に基づき、必須の課題に係る研究成果の取りまとめに着手した。国からの受託研究として実施している主にグラウト材の透水性の変化に着目した検討については、これまでの結果を取りまとめるとともに、グラウト材の影響による岩盤状態の経年変化を把握するため、これまでに深度300m研究アクセス坑道で採取したグラウト材を含む試料を用いて化学分析等を実施した。また、深度500m研究アクセス南坑道の掘削工事で試験的に使用した低アルカリ性瞬結吹付けコンクリートについて、同コンクリートが周辺の地下水や岩盤に及ぼす影響を把握・評価するための室内試験（長期浸出試験）を開始した。

2019年度は、これまでに開発してきたグラウト技術の成果について、必須の課題に係る研究成果の取りまとめを行う。また、低アルカリ性瞬結吹付けコンクリート吹き付け箇所からの試料採取を行うとともに、低アルカリ性瞬結吹付けコンクリートの室内長期浸出試験を継続し、それらの成果についても必須の課題に係る研究成果としての取りまとめを実施する。また、グラウト材の影響による岩盤状態の経年変化の把握に関する検討については、国からの受託研究で実施される深度300m研究アクセス坑道におけるプレグラウチング施工箇所での試料採取および分析を活用して行う計画である。

3.1.2 地下水管理技術の開発

研究所の坑内湧水には自然由来のふっ素、ほう素が含まれており、凝集沈殿処理およびイオン交換処理によって環境基準値以下になるまで除去して河川に放流している。近年、公共工事等で自然由来の重金属による地下水汚染や土壌汚染が問題視され、その対策が求められている。このような背景を踏まえ、2015年度は、地下水汚染や土壌汚染の対策事例について文献調査を実施し、2016年度から原子力機構としての公開報告書作成に向けて情報を整理し、報告書²⁴⁾を作成した。

2019年度は、2018年度に引き続き、これまでに得られた最新の地下水排水処理技術等の文献調査結果に基づき、必須の課題に係る研究成果の取りまとめを行う。

3.2 物質移動モデル化技術の開発

スウェーデン等の安定大陸の地質環境と比較して、変動帯に位置し、高透水性の割れ目が多く、かつ割れ目充填物や変質を伴うなど、様々な特性を有する割れ目が混在する日本の地質環境においても、地下水流動や物質移動を適切に評価し、安全評価の信頼性を向上するため、低透水性領域での割れ目ネットワークモデル化手法の開発は重要な課題である。本研究では、花崗岩中の割れ目における物質の移動現象を理解し、モデル化するための調査・解析を実施する。また、割れ目の透水性および地下水の流動や水質の長期的変化や地下水流動の緩慢さを明らかにするための調査を実施する。

3.2.1 低透水性領域での割れ目ネットワークモデル化手法の開発

(1)不均質な割れ目ネットワークのモデル化手法の開発

①実際の割れ目の性状を考慮した割れ目ネットワークのモデル化手法の整備

割れ目ネットワークモデルを適用したブロックスケールの地質構造モデルの構築ならびに地下水流動解析を継続的に実施してきた。2018年度は、深度500m研究アクセス北坑道の冠水坑道周辺岩盤を事例としてこれまでに実施してきた割れ目ネットワークモデルの構築手法、構築したモデルを用いた岩盤特性の評価方法や地下施設設計等への反映方法を検討した結果について、必須の課題に係る研究成果として取りまとめを開始した。また、上記のモデル化手法の妥当性確認や高度化に資することを目的としたボーリング調査を実施した。

2019年度は、2018年度に引き続き、これまでの検討結果に基づいて必須の課題に係る研究成果の取りまとめを進めるとともに、上記のモデル化手法の妥当性確認や高度化を目的としたボーリング調査を継続して実施する。これらの調査研究は、共同研究や国からの受託研究で実施されるボーリング調査も活用して実施する計画である。

地質構造／水理地質構造モデルの構築・更新およびそれを用いた地下水流動解析を、高い信頼性を保持しつつ迅速に実施することを目的として、地質環境データ解析・可視化システム（GEOMASSシステム）を開発した。これまでに、地質構造／水理地質構造のモデル化・地下水流動解析およびモデル化・解析結果の可視化に関する作業を通じて、抽出されたシステムの問題点の改善および機能の拡張を適宜実施してきており、2019年度においても、システムの改善および機能の拡張を継続する。

②花崗岩中での物質移動現象の理解

2018年度は、新たな岩石試料を対象として、透過拡散試験や微視空隙構造の観察等を実施し、実効拡散係数と微小空隙構造との関係を検討した。

2019年度は、岩石試料を対象とした透過拡散試験や微視空隙構造の観察等を継続する。また、研究坑道内のボーリング孔を利用した水理試験やトレーサー試験等の調査研究については、共同研究や国からの受託研究として実施されるボーリング調査も活用して実施する計画である。これまでの調査研究で得られた成果や受託研究で得られた成果を活用し、必須の課題に係る研究成果の取りまとめを行う。

③物質移動におけるコロイド、有機物、微生物の影響因子の評価

地下水中のコロイド、有機物、微生物が放射性核種の移動や化学環境に与える影響については、知見が十分に得られておらず、様々な地下水・岩石環境において、その相互作用プロセスに関する知見の拡充が必要とされている。

2018年度は、研究坑道内のボーリング孔内に硫酸イオン等を添加して、微生物の還元能力を確

認する原位置試験を行った。

2019年度は、研究坑道内のボーリング孔から採取した地下水を用いて、コロイド、有機物、微生物に関する原位置調査、採水を実施し、それらと地下水中の元素との相互反応に関する調査を実施する。また、これまでの調査研究で得られた成果に基づき、必須の課題に係る研究成果の取りまとめを行う。

3.2.2 地質環境の長期変遷解析技術の開発

地下水の流動や水質等の地質環境の長期変化を推定するため、既存のデータや室内試験等の結果に基づいて、結晶質岩において主な地下水の流動経路となる断層や割れ目の充填状態と形成履歴について検討する。

2018年度は、透水性の高い花崗岩中の割れ目の特徴を調べた。その結果、割れ目があまり発達していないのに透水性が高い花崗岩の割れ目の充填鉱物は、セリサイトやカルサイトのほかに、比較的高い温度を示す熱水鉱物である緑泥石が認められた。

2019年度は、地下水の流動や水質等の地質環境の長期変化を推定するため、既存のデータや室内試験等の結果に基づいて、結晶質岩において主な地下水の流動経路となってきた断層や割れ目の充填状態と形成履歴を検討し、これまでに得られた成果に基づき、必須の課題に係る研究成果の取りまとめを行う。

3.2.3 深部塩水系地下水の起源・滞留時間の理解

地下水流動の緩慢さを明らかにすることを目的として深部花崗岩中の地下水水質の起源、滞留時間などの調査方法について検討を行う。

2018年度は、地下水水質形成機構や大深度ボーリング孔の掘削・調査について、既存技術の情報収集を行った。また、150万年前から現在までの地形変化、地表環境の変化を踏まえて得られた地下水流動解析と移流分散解析の結果から、塩水の深部への浸透プロセスや現在の水質分布の形成プロセスについての検討を行った。

2019年度は、地下水水質の起源、滞留時間等に関する既存技術の情報収集を継続するとともに、これまでに得られた成果に基づき、必須の課題に係る研究成果の取りまとめを行う。

3.3 坑道埋め戻し技術の開発

坑道の一部を埋め戻し、地下水で自然に冠水させることによって、地下水の水圧および水質、ならびに坑道周辺岩盤の化学的・力学的変化を観察し、地質環境の回復能力等を評価するとともに、地質環境に応じた埋め戻し技術の構築を行う。また、長期観測に必要なモニタリング技術を開発する。

3.3.1 坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術の開発

(1)再冠水試験

深度500m研究アクセス北坑道の先端約40mの冠水坑道（図3-1）において、止水壁を設けて地下水による坑道冠水と一部排水を繰り返し行い、坑道周辺岩盤における力学・水理・化学変化を観測する。観測データに基づき、坑道閉鎖後の水圧回復プロセス、坑道周辺の応力状態、化学状態について基礎データを取得し、坑道閉鎖時の環境回復に関わる具体的な観測技術、解析技術（割れ目や断層の多い日本の結晶質岩を念頭においた調査・解析技術）を提案する。

2018年度は、冠水坑道内および冠水坑道周辺に掘削したボーリング孔（12MI33号孔、13MI38～48号孔；図3.3.1-1）に設置した観測装置を用いて、冠水坑道内の地下水排水後の周辺岩盤の水圧・水質および岩盤変位や透水性の変化を把握するためのモニタリングを継続した。また、これらの観測結果に基づき、予測解析結果の妥当性確認および解析モデルの更新を行うとともに、連成解析技術に関わる国際協同研究（DECOVALEX-2019）²⁵⁾に参加し、共同研究課題の一つとして再冠水試験の解析を継続した。さらに、再冠水試験を通じて得られた坑道閉鎖後の地質環境特性の回復・定常化過程の知見や観測・解析技術について、必須の課題に係る研究成果としての取りまとめに着手した。

2019年度は、2018年度に開始した必須の課題に係る研究成果の取りまとめを進めるとともに、冠水坑道内の地下水排水後の周辺岩盤の水圧・水質および岩盤変位や透水性の変化を把握するためのモニタリングを継続する。また、ボーリング孔と冠水坑道間の割れ目の連続性等を詳細に確認するための試験を実施する。解析技術に関しては、引き続きDECOVALEX-2019に参加し、海外の研究機関と連携しつつ観測結果を利用した検討を通じて高度化を行う。

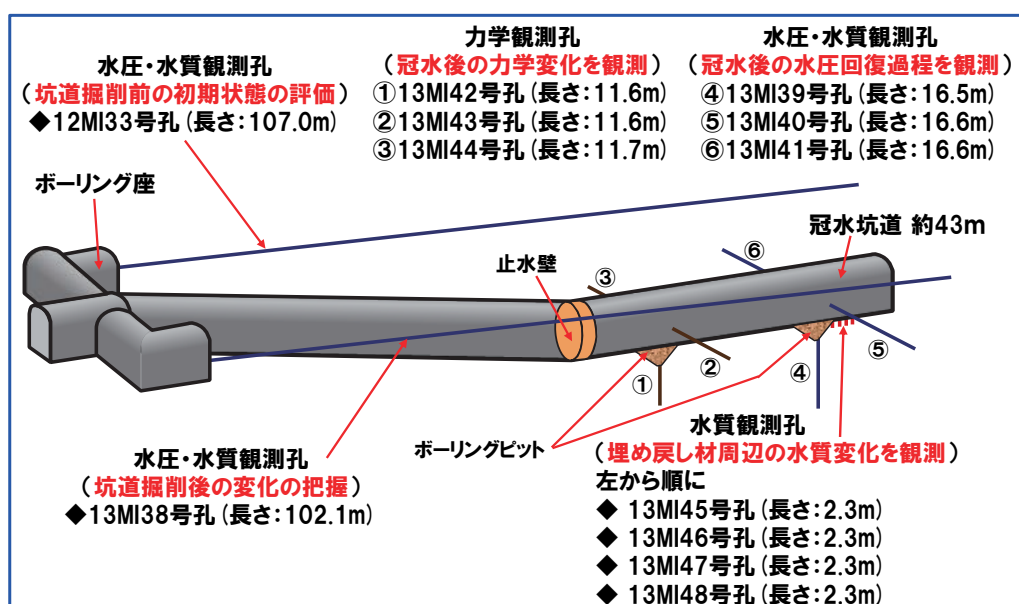


図 3.3.1-1 冠水坑道周辺における観測孔の概要

(2)岩盤の破壊現象評価

地下深部に坑道を掘削すると、坑道規模の大小によらず周辺岩盤に掘削影響領域が発生する。掘削影響領域では、既存割れ目の開閉あるいは坑道周辺に再配分された応力の集中により新たな割れ目が発生することがある。このような岩盤のダメージの範囲や物性変化のメカニズム・程度を把握することは地層処分の安全評価の観点から重要である。そのため、主に坑道周辺に生じる応力的な破壊現象を対象に、その範囲や物性変化のメカニズム・程度の把握と評価手法の構築を目的として、大口径ボーリング孔の掘削による孔壁破壊現象の観察、熱負荷に伴う岩盤挙動、粘性流体注入による割れ目進展挙動の観察および岩盤の破壊現象を含む長期岩盤挙動の評価手法の開発を行う。

本研究は、2015年度と2016年度に京都大学および株式会社大林組との共同研究として実施した。それにより、岩盤の破壊挙動とその後の変化に関するデータを取得し、それらに基づく破壊のメカニズムについての知見が得られた。熱負荷による影響については、幌延深地層研究センターを含む国内外での研究成果により温度影響を解析的に評価できる見通しが得られた。2017年度は共同研究で得られた成果の取りまとめを行った。なお、これまでの結果に基づき、大口径ボーリング孔の掘削に伴う孔壁破壊現象の観測は、必要に応じ室内試験もしくは幌延等の別のサイトにて行うこととした。本研究は、2018年度に、これまでに得られた成果の取りまとめとして、研究成果を国際誌（*Rock Mechanics and Rock Engineering*）へ論文発表²⁶⁾して終了した。2019年度は、これまでの研究成果や取りまとめに基づき、必須の課題に係る研究成果の取りまとめを行う。

(3)埋め戻し試験

地下坑道の埋め戻しに係る施工管理に関わる留意点や地質環境への影響等に関する知見を得るため、冠水坑道内のピットや坑道の一部を利用した埋め戻し試験を実施する。

冠水坑道床面のボーリングピットでの埋め戻し試験については、2018年度にピットから採取した埋め戻し材および坑道壁面のセメント材料を用いた試験・分析を行い、これらの物性変化や周辺岩盤、地下水等への影響について検討した。2019年度は2018年度に実施した検討結果に基づき、必須の課題に係る研究成果の取りまとめを行う。

坑道の一部を利用した埋め戻し試験については、2018年度に国内外での研究事例の調査から試験の目標を定めた上で、研究坑道内での試験候補位置を決定し、地質環境等の条件の整理と前出のボーリングピットの埋め戻し材について再冠水試験中に得られた各種計測結果等に基づいた試験方法の検討等を行った。また、国からの受託事業の一部として、瑞浪超深地層研究所研究坑道を活用した埋め戻し材の吹き付け施工試験を実施し、施工試験のベースとなった試験計画について技術報告書として取りまとめた²⁷⁾。2019年度は、2018年度に引き続き、国からの受託事業の一部として施工後の観測等を実施する計画である。また、これまでに得られた成果を活用し、必須の課題に係る研究成果の取りまとめを行う。

3.3.2 長期モニタリング技術の開発など

(1)長期モニタリング

研究坑道掘削に伴う周辺の地質環境の変化を把握するため、研究坑道への湧水量の計測、ボーリング孔（04ME01号孔；図3.3.2-1）を利用した地表付近の地下水位の観測、地上のボーリング孔（MSB-1～4号孔，MIZ-1号孔，05ME06号孔；図3.3.2-1）を利用した地下深部の地下水の水圧および水質の観測を継続する。また、研究坑道の維持管理、再冠水試験に起因する坑道周辺の地下水の水圧分布およびその長期変化を把握するため、研究坑道から掘削されたボーリング孔にお

いて地下水の水圧・水質観測を継続する。さらに、坑道壁面や集水リングで採取した地下水の分析を継続して行う。加えて、観測およびメンテナンス作業を通じて、モニタリング装置の耐久性の確認や合理的なメンテナンス方法の検討を継続するとともに、観測を通じて得られた情報を基にしたモニタリング装置の適用性や観測における留意点、モニタリング装置の選定に資する知見を整理する。



図 3.3.2-1 研究所用地内観測位置図

(2)モニタリング技術の開発

研究坑道内に設置された地下水の水圧および水質、岩盤変位をモニタリングする装置を活用して、地上から地下水の水圧および水質、岩盤変位を長期モニタリングする方法の検討を継続するとともに、これらのモニタリング装置で取得したデータを地上でモニターするためのシステムを整備し、整備したシステムの適用性を確認する。また、原子力機構安全研究・防災支援部門が国からの受託研究として実施するモニタリング孔の閉塞確認に係る技術的知見の整備等を支援する。また、この成果を活用したボーリング孔閉塞技術に係る検討を継続する。

(3)モニタリングデータの取りまとめ・評価

調査研究で得られるデータや地上から掘削したボーリング孔および研究坑道から掘削したボーリング孔を利用した地下水の水圧および水質のモニタリングデータをそれぞれ取りまとめるとともに、正馬様用地での地下水の長期モニタリング(3.4)で得られた成果を含めて評価し、それらの結果に基づき必須の課題に係る研究成果の取りまとめを行う。

3.4 正馬様用地における調査研究

2018年度の正馬様用地での調査研究では、月吉断層に着目した地下水流動特性の把握を目的とした地下水の長期モニタリングを継続した。

2019年度も、正馬様用地内のボーリング孔(AN-1号孔, MIU-2号孔, MIU-3号孔, MIU-4号孔:図3.4-1)において地下水の長期モニタリングを継続する。また、表層水位観測(AI-7号孔, AI-10号孔, 99MS-05号孔:図3.4-1)を継続して実施する。

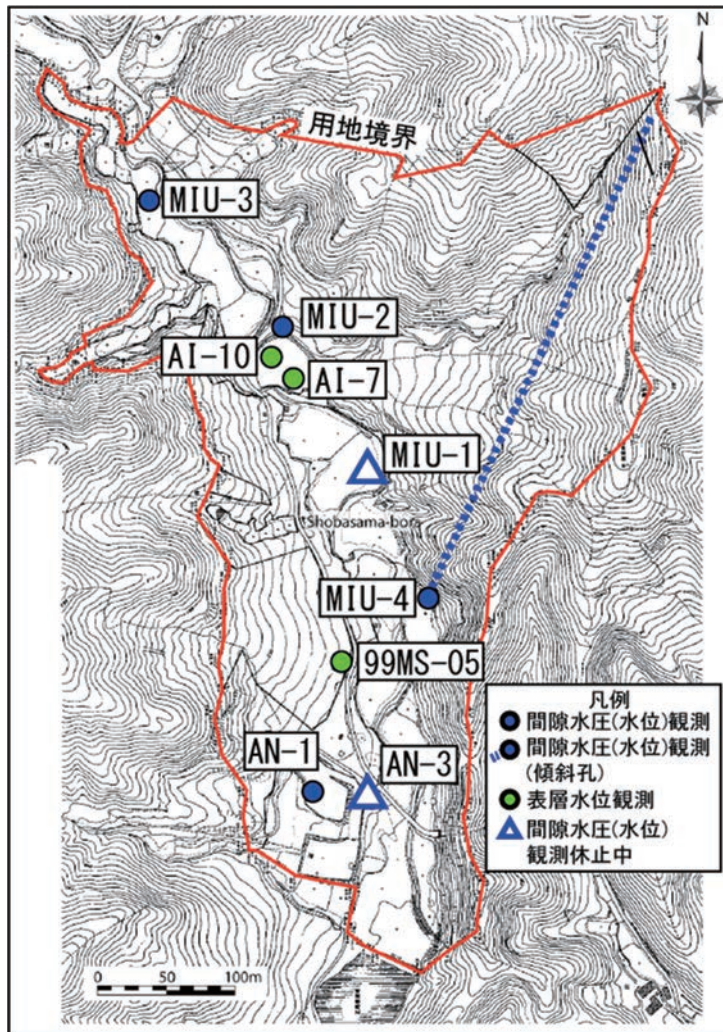


図 3.4-1 正馬様用地内における観測施設位置図（原図は瑞浪市都市計画基本図）

3.5 施設計画

(1)施設建設

2018年度は、坑内外仮設備の維持管理作業のほか、老朽化した配管等の交換や撤去、主立坑巻上設備のワイヤーロープ（スカフォード）および制御盤（スカフォード、ズリキブル）の交換を実施するとともに、坑道埋め戻しの検討を実施した。

2019年度は、坑内外仮設備の補修、交換等の通常の維持管理に加えて、主立坑巻上設備のワイヤーロープ（ズリキブル）、換気立坑巻上設備のワイヤーロープ（スカフォード、ズリキブル）の交換を実施するとともに、坑道埋め戻しに着手する計画である。

坑道内に湧出する地下水（湧水）は、地上に設置している排水処理設備により適切に処理し、岐阜県および瑞浪市と原子力機構の間で締結している「瑞浪超深地層研究所に係る環境保全協定」に基づく管理目標値に適合させた水質での河川への放流を継続する。排水処理については、処理方法や設備規模等について検討し、費用対効果を考慮しつつ環境保全を最優先として対応を進めていく。

(2)周辺環境モニタリング調査

2019年度は、2018年度に引き続いて周辺環境への影響の有無を確認するため、以下のモニタリングを継続する。

①排水処理プラントの放流水（排出水）の水量・水質の測定

排出水の水量、pH、濁度等の測定を実施する。

②河川の流量測定および水質分析

・流量測定

研究所用地近傍の狭間川の上流、下流において計4地点（図3.5-1）で河川流量測定を実施する。

・水質分析

排出水の放流先である狭間川の水質調査として、排水口の上流および下流の計2箇所（図3.5-2）で生活環境項目および健康項目に関する水質分析を実施する。また、図3.5-2の狭間川上流、図3.5-1の明世小学校前地点、立坑湧水および排出水の塩化物イオン濃度を測定する。

③井戸の水位測定

研究所用地近傍の10箇所において井戸の水位測定を実施する。

④騒音・振動測定

用地境界1箇所（図3.5-2）において騒音・振動測定を実施する。



図3.5-1 河川流量測定位置図

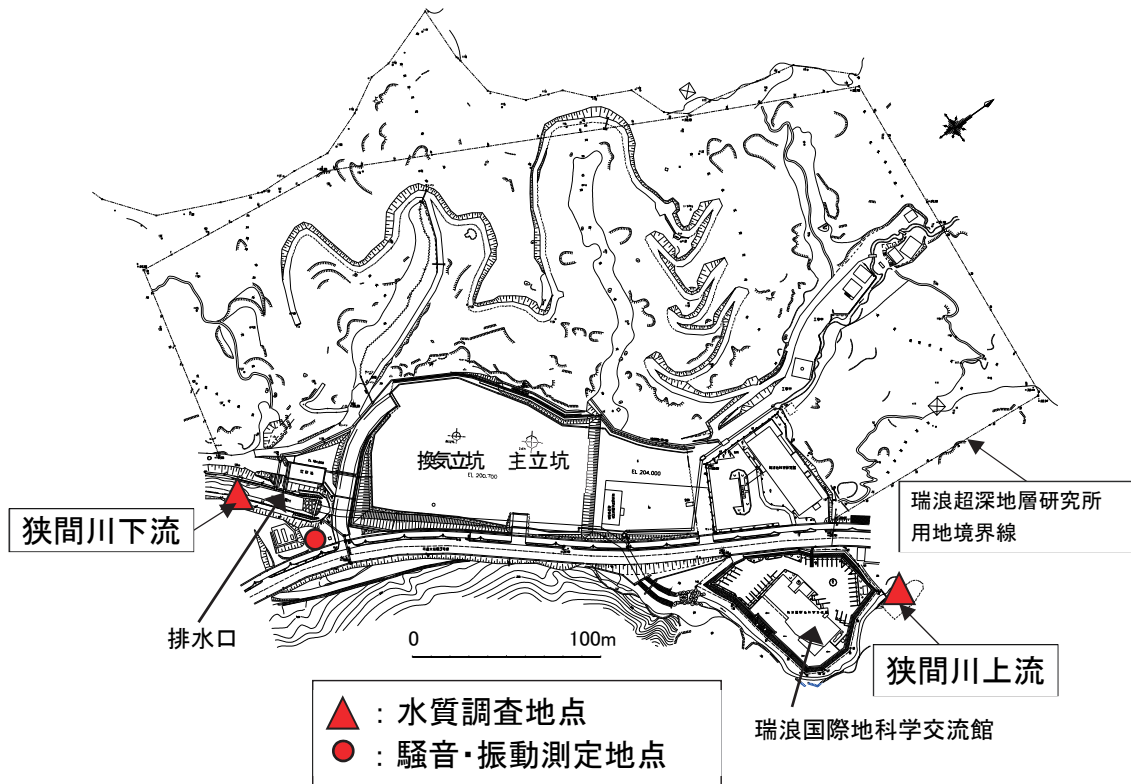


図3.5-2 水質調査および騒音・振動測定位置図

4. 共同研究・施設利用

瑞浪超深地層研究所における主な共同研究・施設利用として、2019年度は、以下の外部機関との共同研究および研究坑道の施設利用を行う予定である。

(1)共同研究

①国立研究開発法人産業技術総合研究所：岩盤の水理・化学・生物連成現象に関わる研究

地下深部における長期的な物質移動挙動に関わる岩盤の水理特性、化学特性および化学特性の形成に関与する微生物・有機物特性の調査・解析技術の高度化を目的として、結晶質岩を対象とした調査研究を実施する。

2018年度は、研究坑道内のボーリング孔や冠水坑道において地下水中の微量元素、同位体組成分析を目的とした採水調査を実施した。2019年度は、各深度のボーリング孔を利用して採水調査を継続し、微量元素の価数、存在比、同位体比等の地球化学情報に基づく水質形成プロセス評価手法の開発を行う。

②韓国原子力研究所（KAERI）：地質環境調査・地質環境モデルの構築に関する技術的支援

花崗岩中の地下水流動および水質形成メカニズムを把握するための原位置調査手法・モデル化技術の高度化を目的として、原子力機構とKAERIの地下の研究施設計画や成果に関する技術検討を行うとともに、両機関の研究者の交流を継続して実施する。

2019年度は、主に割れ目ネットワークモデルの構築手法と地質環境の長期変遷モデル化技術について両機関で検討を進め、その結果について技術検討会議で確認を行う。

③国立大学法人岡山大学：結晶質岩を対象とした微視的構造変化が長期挙動におよぼす影響に関する研究

本研究は2016年度から共同研究として実施しているものであり、超長期を対象とした岩盤の長期挙動メカニズムの把握に資するため、微視的亀裂の進展に着目した室内実験および化学反応も考慮できるような数値解析による研究を通じ、一般性の高い岩盤の長期挙動メカニズムに関する知見を得ることを目的とする。

2016年度は、2015年度に実施した弾性波の群速度による室内試験結果²⁸⁾について、物性評価に対する検討を進めるため、円柱状のコアを用いた詳細な弾性波速度測定を実施し、これまで計測してきた表面波と一般的に用いられる透過波との関係性について比較・検討した。その結果、透過波測定で得られた弾性波速度の異方性は、群速度としても同様に見られることを確認した。2017年度は、主に群速度の周波数依存性に着目した基礎的検討を実施した。2018年度は、室内試験システムの高度化を行うとともに、弾性波速度から微視的構造を把握するための方法論に関する予察的な検討を実施した。2019年度は、高度化した室内試験システムを用いた室内実験を継続するとともに、波動伝播シミュレーション技術の検討を行う。

④国立大学法人東京大学：結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価手法に関する研究

本研究は2016年度から共同研究として実施しているものであり、岩盤の長期挙動を把握・評価できる技術の確立に資するため、年単位を超えるような岩石の長期クリープ試験や、高レベル放射性廃棄物の地層処分において想定される常温から100℃程度の高温度条件下での岩石の長期挙動を把握するための技術の開発等を実施し、想定される様々な条件下での岩石の長期挙動現象の特徴やその影響の程度に関する実験的評価を行うことを目的としている。

2016年度は、岩石の長期クリープ試験を行うとともに、主に水分の影響に関する室内試験と長期挙動を表現するための構成方程式（大久保モデル）の改良を行った。2017年度以降は、岩石の長期クリープ試験を継続するとともに、水分量をより細かく変化させた室内試験を実施し、改良した構成方程式の適用性評価を進めた。2019年度は、引き続き構成方程式の高度化等を進める。

⑤国立大学法人東京大学：深部地球化学環境の形成プロセスに関わる地下微生物と岩石・地下水相互作用の評価技術の構築

地下深部における地球化学特性や物質移動特性と微生物特性の関連性を把握する上で重要な原位置での微生物、地下水、鉱物の分析・解析技術の開発を行う。

2018年度は、研究坑道内のボーリング孔内に硫酸イオンを添加し、微生物活性、主要化学成分、微量元素、同位体組成等の分析を行った。2019年度は、ボーリング孔を利用した原位置試験を継続し、微生物活動と地下水の地球化学特性の関連についての調査を行う。

⑥西松建設株式会社：地質環境変化の把握を目的とした高精度弾性波測定システムの適用性に関する研究

本研究は、100m程度のスケールを対象に開発されてきた高精度弾性波測定システムをさらに改良したシステムを構築し、瑞浪超深地層研究所を活用して、より広いスケール（数百m以上）までの弾性波速度の経時変化等を高精度で観測することにより、地層処分が必要と考えられるスケールでの地質環境の経時変化、特に地下水流動状況の変化の把握に対する適用性を評価するものであり、2017年度から3年間の計画で実施する予定である。

2017年度は、冠水坑道周辺で生じると考えられる地下水流動の変化に対する高精度弾性波計測システムの適用性検討を実施し、結果を取りまとめた。2018年度は、2017年度の計測評価で課題となった点についての室内試験を開始した。2019年度は、共同研究の最終年度として、研究坑道が利用可能であれば、測線長を伸ばした計測を実施し、高精度弾性波計測システムの適用性検討を継続する。

(2)施設利用

①公益財団法人地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所

地震予知総合研究振興会東濃地震科学研究所（以下、東濃地震科学研究所）とは、研究協力会議に関する確認書に基づき研究協力会議を設置し研究協力を進めている。地震発生機構の解明や地域防災に関する研究を進めている東濃地震科学研究所と、超深地層研究所計画等の地層科学研究を行っている東濃地科学センターが緊密な相互協力を進めることにより、両機関の研究開発や地域の地震防災対策への寄与が期待されている。

2018年度は、2017年度に引き続き、研究坑道における地球物理学的変動観測研究および地震動観測のため、2006年度以降に研究坑道に設置した傾斜計、地震計、応力計、重力計を用いて連続観測を継続した。また、深度500mステージに応力計を設置し、観測を開始した。2019年度は、これまでに設置した傾斜計、地震計、応力計、重力計を用いて連続観測を行うとともに、研究坑道の埋め戻しに備えて、観測データの地上モニタリング化のための通信システムを整備する。

②国立大学法人名古屋大学

名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構（以下、素粒子宇宙起源研究機構）は、スイスの欧州原子核研究所で人工的に作ったニュートリノビームを730km離れたイタリアの研究所へ照射し、ニュートリノが質量を持つことを証明するための国際共同実験（OPERA実験）に参加している。この

実験においては、放射線の飛跡を検出するために原子核乾板が使用されている。原子核乾板の保管は、宇宙線の蓄積を抑えることが重要であることから、素粒子宇宙起源研究機構より、低宇宙線環境である研究所の研究坑道を原子核乾板の保管場所として使用したいとの依頼があり、2011年度より深度200mボーリング横坑（主立坑）の一部を貸与している。

2018年度は、2017年度に引き続き、深度200mボーリング横坑（主立坑）における原子核乾板の保管を継続した。2019年度は、深度200mボーリング横坑（主立坑）における原子核乾板の保管を継続するとともに、必要に応じて原子核乾板の搬出入等を行う。

③国立大学法人京都大学

京都大学大学院工学研究科では、天然の岩盤中の亀裂が鉱物の沈殿により充填され自己修復するケースが見受けられることに着目し、天然の亀裂を含む岩石や鉱物で充填された亀裂を含む岩石を供試体とした室内透水試験により、岩石の透水係数の低下度合いを調査する研究を進めている。当研究では、長期的な透水性の変化に関する知見を取得することが可能なため、地質環境変化の理解への寄与が期待される。

2019年度は、深度300m研究アクセス坑道の既存ボーリング孔（掘削長1m程度）を利用し、ボーリング孔内に炭酸水を循環させることで炭酸カルシウムの析出を促進させ、それに伴う亀裂の閉塞等の現象を把握するための実験を行う。

5. おわりに

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のうち、結晶質岩を対象とした深地層の科学的研究の一環として、超深地層研究所計画における2019年度に実施する調査研究等の内容を年度計画書としてまとめた。

2019年度は、原子力機構の第3期中長期計画期間の5年目にあたり、超深地層研究所計画においては、2014年度に原子力機構改革の一環として抽出された三つの必須の課題（地下坑道における工学的対策技術の開発、物質移動モデル化技術の開発、坑道埋め戻し技術の開発）の調査研究を進めるとともに、これまでに得られた研究成果に基づく地質環境モデルの更新、調査技術や解析手法の有効性の評価・体系化および研究坑道の工事に適用された各種工学技術の評価等を含めて必須の課題に関わる研究成果の取りまとめを行う計画である。

参考文献

- 1) 原子力委員会：原子力政策大綱, 2005.
- 2) 原子力委員会：原子力の研究, 開発および利用に関する長期計画, 1994.
- 3) 動力炉・核燃料開発事業団：超深地層研究所地層科学研究基本計画, PNC TN7070 96-002, 1996, 20p.
- 4) 原子力委員会：原子力の研究, 開発および利用に関する長期計画, 2000.
- 5) 核燃料サイクル開発機構：超深地層研究所地層科学研究基本計画, JNC TN7410 2001-009, 2001, 100p.
- 6) 核燃料サイクル開発機構：超深地層研究所地層科学研究基本計画, JNC TN7410 2001-018, 2002, 103p.
- 7) 資源エネルギー庁, 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, 2006.

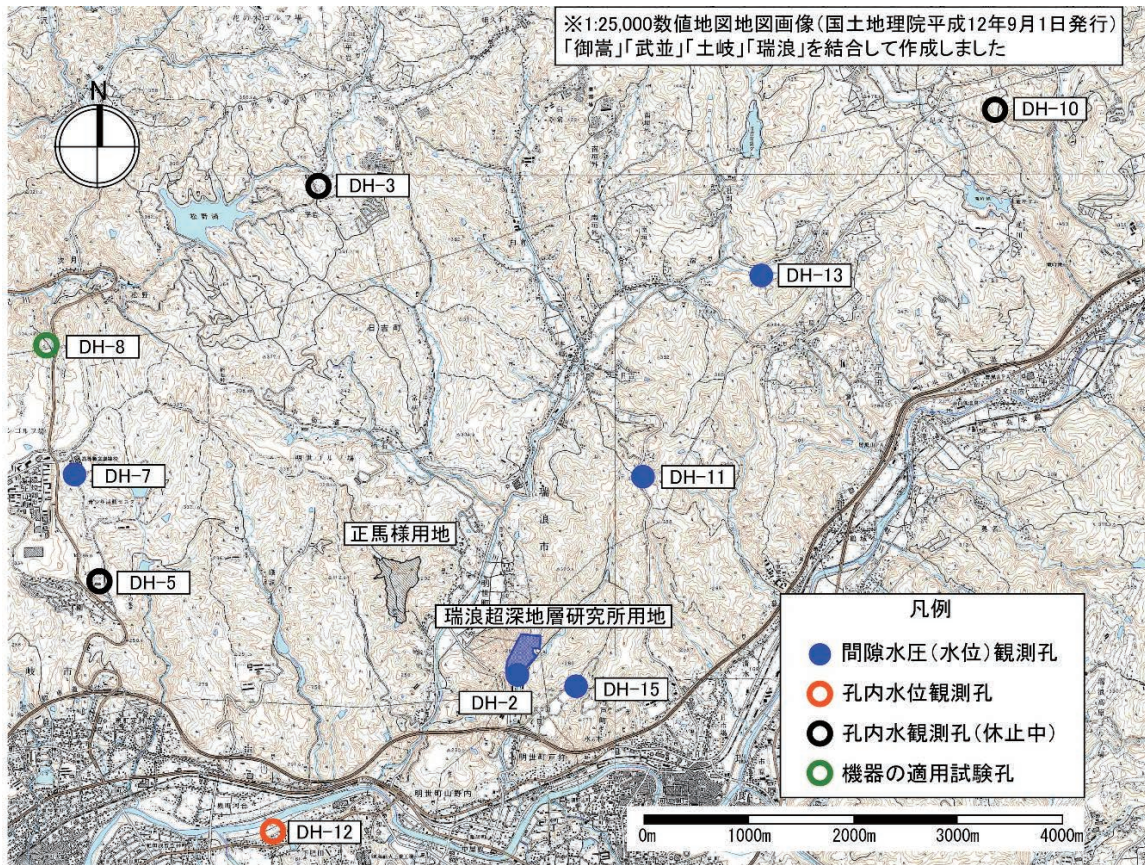
- 8) 日本原子力研究開発機構：超深地層研究所地層科学研究基本計画, JAEA-Review 2010-016, 2010, 37p.
- 9) 日本原子力研究開発機構改革本部：日本原子力研究開発機構の改革の基本的方向－安全を最優先とした組織への変革を目指して－, 平成25年8月8日, http://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afieldfile/2013/08/14/1338627_3_1.pdf (参照：2019年5月7日).
- 10) 日本原子力研究開発機構：日本原子力研究開発機構の改革計画 自己改革－「新生」へのみち－, 平成25年9月26日, 2013, <http://www.jaea.go.jp/02/press2013/p13092601/01.pdf> (参照：2019年5月7日).
- 11) 日本原子力研究開発機構：日本原子力研究開発機構の改革計画に基づく「地層処分技術に関する研究開発」報告書－今後の研究課題について－, 平成26年9月30日, 2013.
- 12) 日本原子力研究開発機構：超深地層研究所 地層科学研究基本計画, JAEA-Review 2015-015, 2015, 39p.
- 13) 濱 克宏, 岩月輝希, 松井裕哉, 見掛信一郎, 笹尾英嗣, 大澤英昭：超深地層研究所計画における調査研究計画－第3期中長期計画における調査研究－, JAEA-Review 2016-004, 2016, 38p.
- 14) 動力炉・核燃料開発事業団：広域地下水流動研究基本計画書, PNC TN7020 98-001, 1997, 12p.
- 15) 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年取りまとめ一冊1深地層の科学的研究－, JNC TN1400 2005-014, 2005, 415p.
- 16) 三枝博光, 瀬野康弘, 中間茂雄, 鶴田忠彦, 岩月輝希, 天野健治, 竹内竜史, 松岡稔幸, 尾上博則, 水野 崇, 大山卓也, 濱 克宏, 佐藤稔紀, 久慈雅栄, 黒田英高, 仙波 毅, 内田雅大, 杉原弘造, 坂巻昌工：超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第1段階）研究成果報告書, JAEA-Research 2007-043, 2007, 337p.
- 17) 三枝博光, 松井裕哉, 濱 克宏, 佐藤稔紀, 鶴田忠彦, 竹内竜史, 國丸貴紀, 松岡稔幸, 水野 崇：超深地層研究所計画における調査研究の考え方と進め方, JAEA-Review 2011-022, 2011, 78p.
- 18) 東濃地科学センター地層科学研究部：超深地層研究所 地層科学研究基本計画, JAEA-Review 2015-015, 2015, 39p.
- 19) 糸魚川淳二：瑞浪地域の地質, 瑞浪市化石博物館専報, no.1, 1980, pp.1-50.
- 20) 陶土団体研究グループ：岐阜県瑞浪市南部の瀬戸層群－瀬戸層群の堆積盆地の発生から発展に関する研究（2）－, 島孤変動, 地団研専報, no.24, 1982, pp.143-155.
- 21) 糸魚川淳二：瑞浪層群の地質, 瑞浪市化石博物館研究報告, no.1, 1974, pp.9-42.
- 22) 氏原 温, 入月俊明, 細山光也：岐阜県東濃地域の第三系, 日本地質学会第106年学術大会見学旅行案内書, 1999, pp.97-116.
- 23) 日本の地質「中部地方Ⅱ」編集委員会：日本の地質5, 中部地方Ⅱ, 共立出版, 1988, 310p.
- 24) 弥富洋介, 見掛信一郎, 松井裕哉：地下水管理技術の開発 報告書, JAEA-Review 2018-004, 2018, 42p.
- 25) DECOVALEX : <https://decovallex.org/index.html> (参照：2019年5月7日).
- 26) Ishida, T., Fujito, W., Yamashita, H., Naoi, M., Fujii, H., Suzuki, K., Matsui, H.: Crack expansion and fracturing mode of hydraulic refracturing from acoustic emission monitoring in a small-scale field experiment, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol.52, no.2, 2019, pp. 543-553.
- 27) 戸栗智仁, 矢萩良二, 沖原光信, 竹内伸光, 黒崎ひろみ, 松井裕哉：瑞浪超深地層研究所に

- おける坑道一部埋め戻し試験の計画策定, JAEA-Technology 2018-017, 2019, 161p.
- 28) 松井裕哉, 尾崎裕介, 木本和志, 市川康明: 表面波計測による結晶質岩の物性評価に向けた基礎的検討, 日本材料学会第66期材料学会学術講演会講演論文集, 2017, 講演番号103, in USB Flash Drive.

付録 1 広域地下水流動研究 2019 年度計画

本研究は、広域における地表から地下深部までの地質・地質構造、岩盤の水理や地下水の水質を明らかにするために必要な調査・解析技術等の開発を目標として1992年度から進めてきており、2004年度をもって主な現場調査（ボーリング調査等）を終了した¹⁾。2005年度以降は、土岐花崗岩における水理的・地球化学的な基礎情報の取得および地下水流動解析結果の妥当性確認のためのデータ取得を目的として、既存の観測設備を用いた表層水理観測（河川流量、降水量）および既存のボーリング孔を用いた地下水の長期モニタリングを継続してきた。このうち、表層水理観測は、涵養量の空間的・時間的な変化に関わる十分なデータや知見を蓄積することができたことから、2014年度末を以て終了した。また、外部研究機関との研究協力等に係わる調査／観測技術の開発の場として、既存ボーリング孔を活用することとしている。

2019年度については、上述した地下水の長期モニタリングを継続する。具体的には、既存のボーリング孔（DH-2号孔、DH-7号孔、DH-10号孔、DH-11号孔、DH-12号孔、DH-13号孔、DH-15号孔）において地下水の長期モニタリングを行う（付図1）。



付図 1 ボーリング孔配置図

参考文献

- 1) 岩月輝希, 太田久仁雄, 竹内真司, 天野健治, 竹内竜史, 三枝博光, 松岡稔幸, 大澤英昭: 広域地下水流動研究 年度報告書 (平成 16 年度), JNC TN7400 2005-013, 2005, 56p.

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
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	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(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み、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	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	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	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=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的關係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)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「△」は対応關係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

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

