

超深地層研究所計画 年度計画書（2018年度）

Mizunami Underground Research Laboratory Project Plan for Fiscal Year 2018

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 笹尾 英嗣

Ryuji TAKEUCHI, Teruki IWATSUKI, Hiroya MATSUI, Koki IKEDA
Shinichiro MIKAKE, Katsuhiro HAMA, Yosuke IYATOMI 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

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

超深地層研究所計画 年度計画書（2018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, 笹尾 英嗣

(2018年10月17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、2018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。

東濃地科学センター：〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64

⁺¹ 東濃地科学センター 施設建設課

Mizunami Underground Research Laboratory Project

Plan for Fiscal Year 2018

Ryuji TAKEUCHI, Teruki IWATSUKI, Hiroya MATSUI, Koki IKEDA⁺¹,
Shinichiro MIKAKE⁺¹, Katsuhiro HAMA, Yosuke IYATOMI 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 October 17, 2018)

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 latest results of the synthesizing 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 on the MIU Project.

This report summarizes the R&D activities planned for fiscal year 2018 on the basis of the MIU Master Plan updated in 2015 and Investigation Plan for the Third Medium to Long-term Research Phase.

Keywords: Mizunami Underground Research Laboratory, MIU Project, Program for Fiscal Year 2018, 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.....	3
2.2 調査研究の進め方	6
2.3 成果の反映	8
2.4 瑞浪超深地層研究所用地周辺の地質	10
2.5 瑞浪超深地層研究所の施設の現状.....	11
3. 2018 年度の調査研究および施設計画.....	12
3.1 地下坑道における工学的対策技術の開発.....	14
3.1.1 大規模湧水に対するウォータータイプグラウト技術の開発.....	14
3.1.2 地下水管理技術の開発	14
3.2 物質移動モデル化技術の開発	15
3.2.1 低透水性領域での亀裂ネットワークモデル化手法の開発.....	15
3.2.2 地質環境の長期変遷解析技術の開発.....	16
3.2.3 深部塩水系地下水の起源・滞留時間の理解	16
3.3 坑道埋め戻し技術の開発	17
3.3.1 坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術の開発.....	17
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	21
4. 共同研究・施設利用	24
5. おわりに	27
参考文献	27
付録 1 広域地下水流动研究 2018 年度計画.....	29

Contents

1. Introduction.....	1
2. Overview of the Mizunami Underground Research Laboratory Project	3
2.1 Goals of the MIU Project	3
2.2 Approach of the MIU Project.....	6
2.3 Application of research and development results.....	8
2.4 Geology.....	10
2.5 MIU facilities.....	11
3. Investigations and construction plan in FY2018.....	12
3.1 Development of countermeasure technologies for reducing groundwater inflow	14
3.1.1 Water-tight grouting technology	14
3.1.2 Effluent treatment technology	14
3.2 Development of modeling technologies for mass transport	15
3.2.1 In-situ test and modeling fracture network	15
3.2.2 Evaluating long-term change of geological environment	16
3.2.3 Inference of origin and residence time of deep saline water.....	16
3.3 Development of drift backfilling technology	17
3.3.1 Evaluation of recovery process and geological environment post closure.....	17
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	21
4. Collaboration studies with research organizations.....	24
5. Conclusions.....	27
References.....	27
Appendix1 Plan of the Regional Hydrogeological Study Project in FY2018.....	29

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⁾において核燃料サイクル開発機構（現：原子力機構）に新たな役割が定められたことに伴い、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、2008年3月に「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できる等から、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2018年度の調査研究計画の内容を示すものである。

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指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2018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年度末で一旦終了した。第3段階の調査研究は、2010年度から実施している。

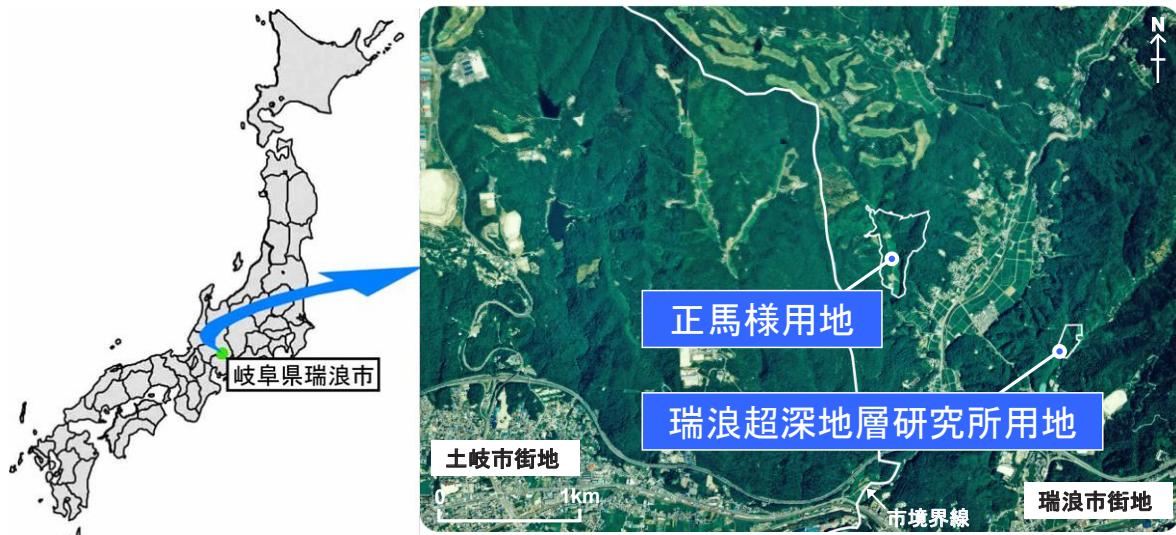


図 2-1 超深地層研究所の設置場所

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、地下水流动場、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）（図2.1-1、表2.1-1）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）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、研究坑道の掘削を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応できることを示す。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ともに、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。

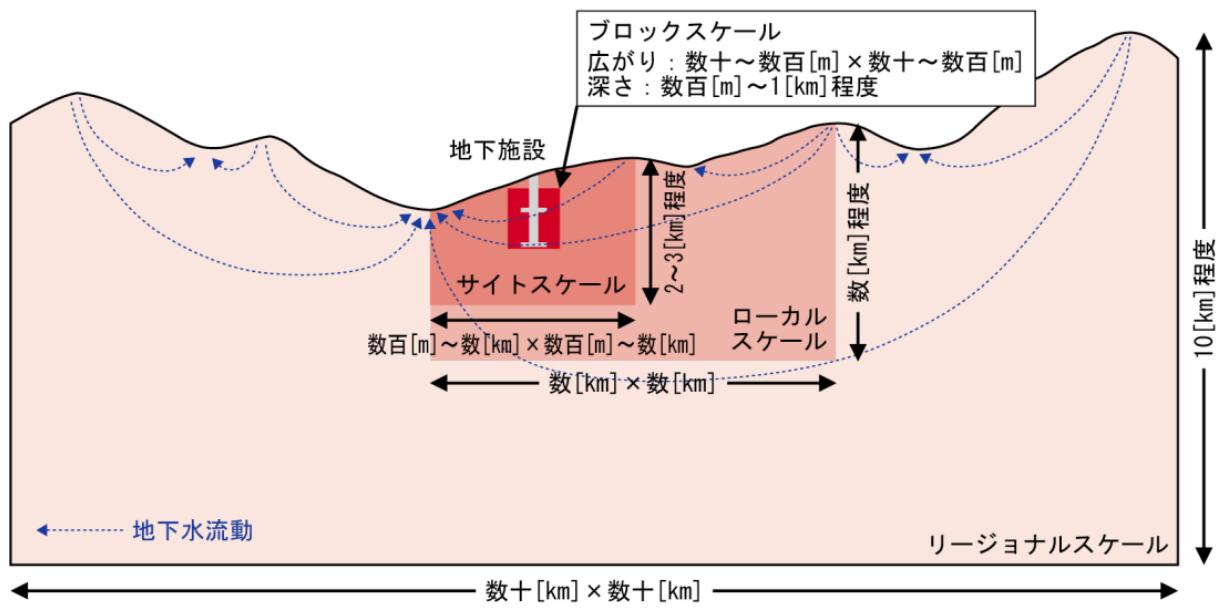


図 2.1-1 空間スケールの概念

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	・ローカルスケールの研究領域／境界条件の設定
ローカルスケール	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¹⁷⁾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2.2-1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。

個別目標	課題	広域地下水流动研究			MUH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	B	第1段階	S	B	第2段階	S	B	第3段階	S	B	
地質構造の三次元的分布の把握	移行経路として重要な構造の把握 玄武岩盤の分布と形状の把握 岩盤の地質学的不均質性の把握	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-
地下水の流動特性の把握	地下水流動特性の長期変化の推定 地下水流量分布の把握 地下水水質変化の把握	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-
地下水の地球化学特性の把握	地下水のpH-Eh環境の把握 地下水の水質変化の推定 物質移動量・拡散特性的把握	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-
物質移動の連延効果の把握	岩盤の吸着・拡散特性の把握 コロイド／有機物・微生物の影響の把握	-	-	○	-	○	-	○	-	○	○	○	-	-
EDZの地質環境特性の把握	EDZの透水性、物理・力学特性分布の把握 EDZの地球化学特性の把握 EDZの応力状態の把握	-	-	○	-	○	-	○	-	○	○	○	-	-
希杯効果の把握	帶水層の分布の把握 帶水層中などにおける漏速分布の把握 応力場の把握	○	○	-	○	-	○	○	-	○	○	○	-	-
地下空洞の力学安定性の把握	岩盤の物理・力学特性の把握 不連続構造などの有無の把握	○	○	-	○	○	-	○	○	-	○	○	-	-
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	-	-	-	-	○	-	○	-	○	○	○	-	-
地下の温度環境の把握	地温勾配分布の把握 岩盤の熱特性の把握	○	○	-	○	-	○	○	-	○	○	○	-	-
地下施設建設が周辺環境へ与える影響の把握	地下水位・水圧分布への影響の把握 地下水の水質への影響の把握 排水放流先河川の水質の把握 振動・騒音の把握	○	○	-	○	-	○	○	-	○	○	○	-	-
大深度地質環境下における工学技術の有効性の確認	設計・施工計画技術の開発 建設技術の開発 施工対策技術の開発 安全性能を確保する技術の開発 掘削影響の修復・整減技術の開発	-	-	○	-	○	-	○	-	○	○	○	-	-
地下構造物の設計・施工	地下構造物の設計・施工	○	○	-	○	-	○	○	-	○	○	○	-	-

○:個別目標／課題と関係あり
-:関係なし
L:ローカルスケール、S:サイクスケール、B:ブロックスケール
(注) 第3段階で対象とする課題は、三枝ほか(2011)¹⁷を一部修正
(EDZ: 剥離影響領域)

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。

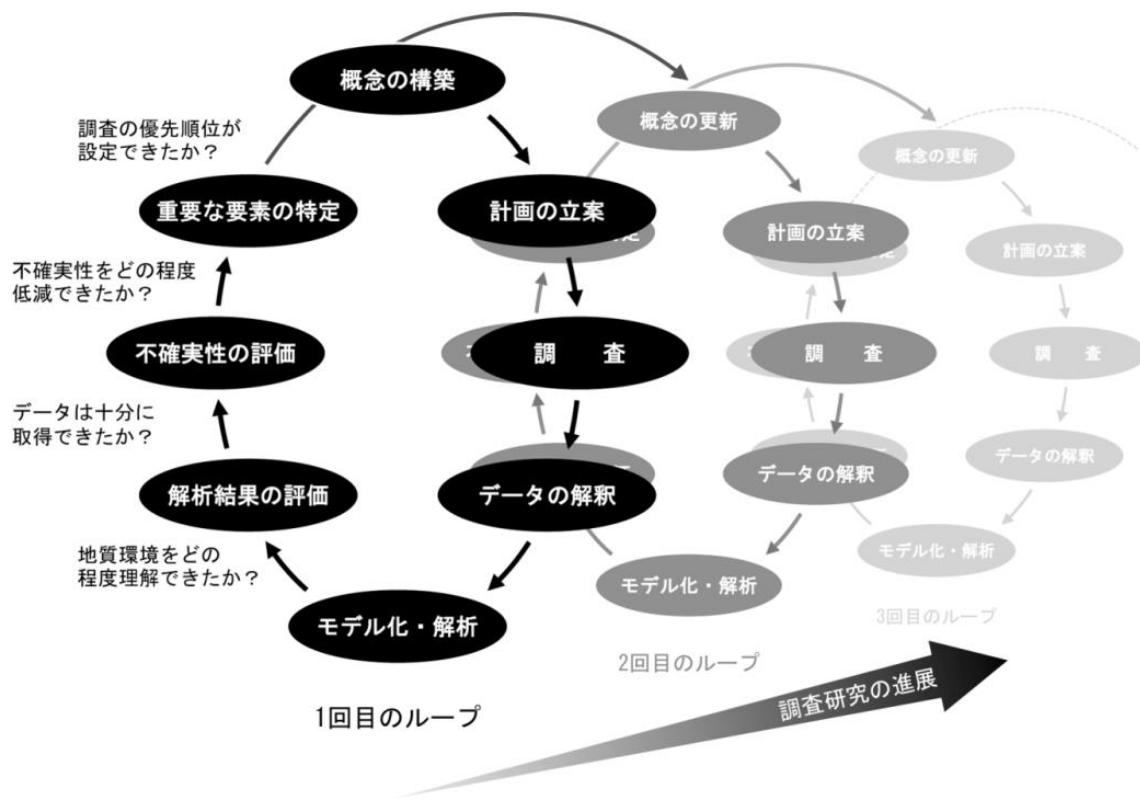
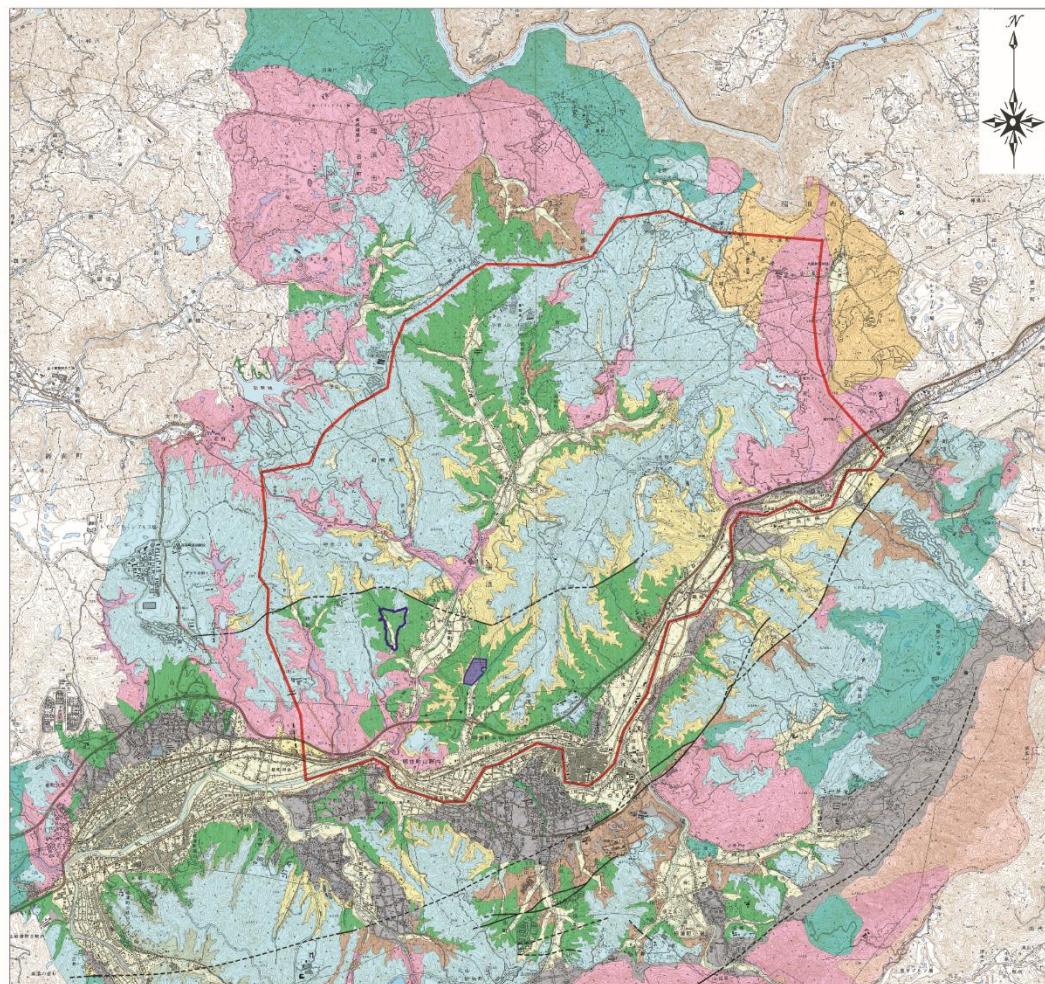


図 2.3-1 調査研究の繰り返しアプローチ

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）^{18,19)}。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)¹⁸⁾

凡 例

瑞浪超深地層研究所用地	ローカルスケール領域	正馬様用地	
第四紀	沖積層	先新第三紀	石英斑岩岩脈
	崖錐性堆積物		土岐花崗岩
新第三紀 中新世	土岐砂礫層		澄川（伊奈川）花崗岩
～第四紀 更新世	土岐口陶土層		濃飛流紋岩
新第三紀 中新世	生俵累層		美濃帶堆積岩類
	明世累層/本郷累層		断層
	土岐夾炭累層		(点線は推定断層もしくは、 地表下で分布が推定される部分)

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¹⁸⁾。

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²⁰⁾。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²¹⁾。

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²²⁾。

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。

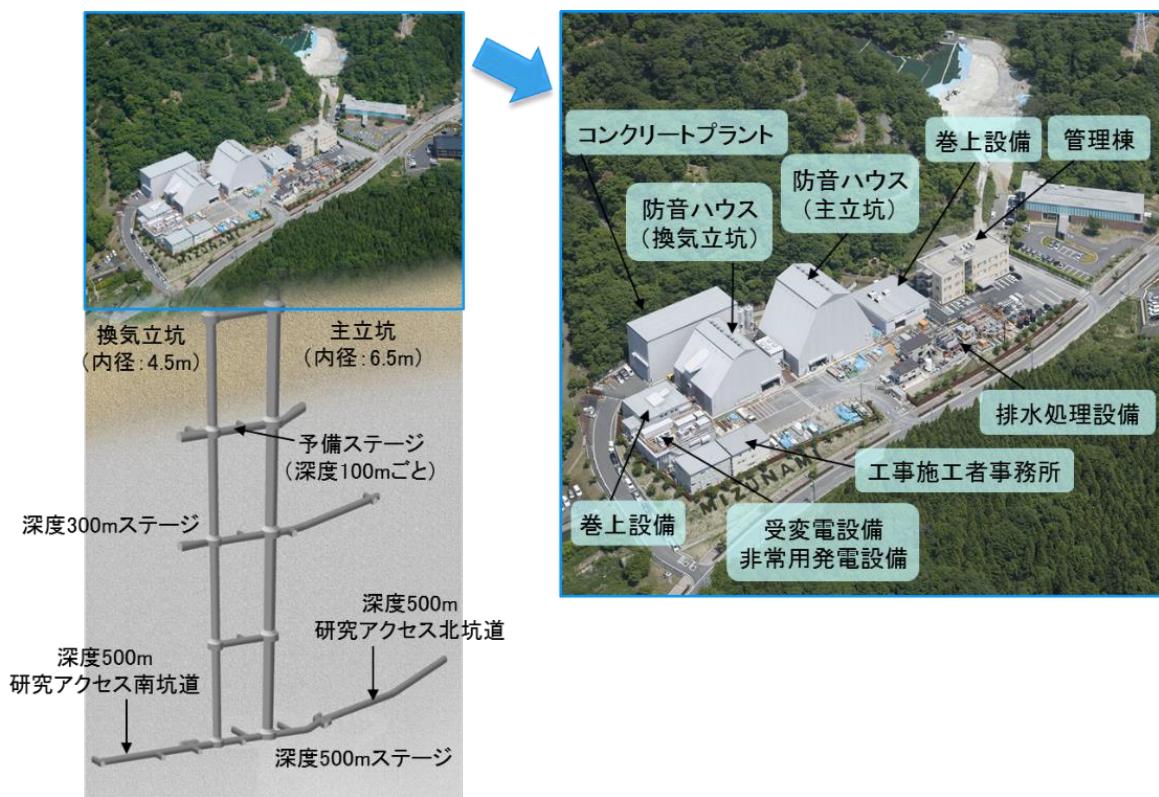


図 2.5-1 瑞浪超深地層研究所の施設の現状

3. 2018年度の調査研究および施設計画

2018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。また、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実施する。これまでに取得したデータと第3段階の調査・解析結果とあわせて、サイトスケール、ブロックスケールの地質環境モデルの妥当性を確認・更新するとともに、地上からの調査・解析手法、研究坑道掘削中の調査・解析手法の有効性の評価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の研究成果の取りまとめ作業も併せて実施する。具体的には、3.1以下に記載する。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。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計画である。

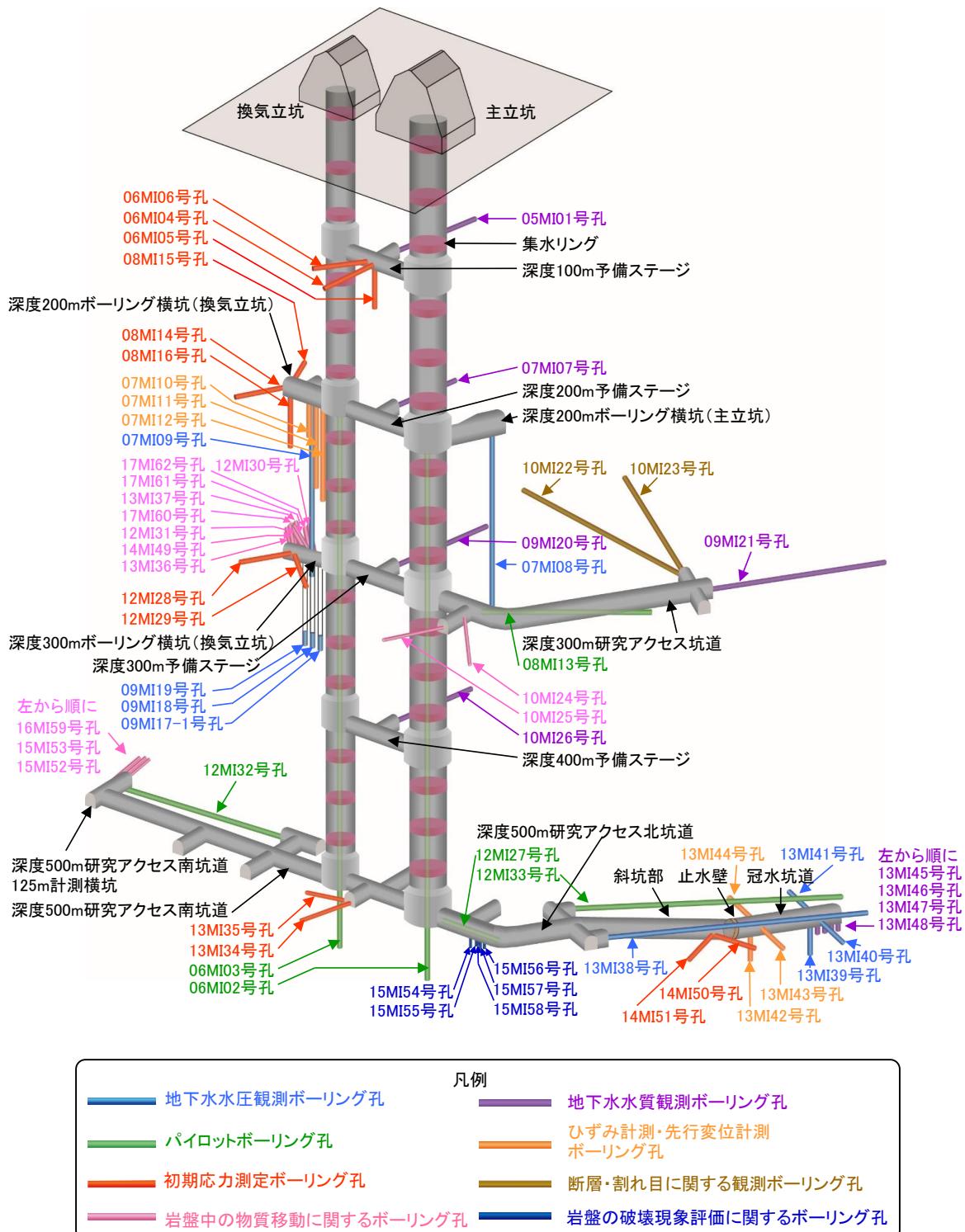


図 3-1 研究坑道レイアウトおよび主な調査位置計画図

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する技術の有効性を確認・評価した。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グラウト技術の開発

2017年度は、2016年度までに実施してきたプレグラウチングとポストグラウチングを併用したグラウト技術について、施工方法や湧水抑制効果の評価を実施した。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。

2018年度は、これまでに開発してきたグラウト技術の成果取りまとめに着手するとともに、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室内試験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つ素、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壤汚染が問題視され、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、地下水汚染や土壤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²³⁾を作成した。

2018年度は、2017年度までに実施した最新の地下水排水処理技術等の文献調査結果の取りまとめを開始する。

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、地下水流动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、低透水性領域での亀裂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动や水質の長期的変化や地下水流动の緩慢さを明らかにするための調査を実施する。

3.2.1 低透水性領域での亀裂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

亀裂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动解析を継続的に実施してきた。2017年度には、深度500m研究アクセス北坑道の冠水坑道周辺岩盤を対象として、割れ目の位置、方向や透水性等の統計分布を再現するためのモデル化手法について検討を行った。

2018年度は、これまでに取得された冠水坑道周辺の地下水の水圧および水質データに基づき割れ目分布の概念の妥当性を確認するとともに、亀裂ネットワークモデルの更新を進め、坑道近傍の水理学的連続性や透水不均質性のモデル化手法の高度化について検討を行う。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动解析を、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・地下水流动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、2018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

2017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するとともに地質学的特徴と物質移動経路の関連性について検討した。また、深度500m研究アクセス南坑道および深度300mボーリング横坑においては、これまでに掘削したボーリング孔および新規に掘削した3本のボーリング孔（17MI60～62号孔；図3-1）を利用して、物質移動試験（トレーサー試験やレジン注入試験等）を行い、これまでに開発してきた調査手法を用いることにより、花崗岩中の物質移動特性を評価するための試験データが取得できることを確認した。

2018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。

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。

2017年度は、既存のボーリング孔および冠水坑道を利用して地下水中のコロイド・有機物・微生物の採取および観察・分析を継続するとともに、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、冠水坑道内でコロイドとともに坑壁に沈着した微量元素の分析等を行った。また、深度500m研究アクセス北坑道の冠水坑道周辺に掘削したボーリング孔と冠水坑道内の地下水を対象としてコロイドや放射性元素と同様の化学的挙動を示す希土類元素の分析と分析結果の整理を行い、坑道を閉鎖後、その内部では放射性元素が移動し難い環境が形成されていることを確認した。

2018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、微生物に関する調査や、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。

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。

2017年度は、花崗岩中の透水性が高い割れ目を対象として、これまでの調査研究で取得されたデータの解析、薄片観察や室内試験を行い割れ目の特徴を調べた結果、熱衝撃の特徴を示す割れ目と、高温を示す充填鉱物が認められた。充填鉱物の化学組成と、結晶中に閉じ込められた流体を詳細に調べた結果、土岐花崗岩体の形成直後に700°C程度の高温の流体が割れ目に沿って侵入したことが明らかとなった。また、この充填鉱物は破碎を受けていないことから、断層運動の影響を受けず長期間保存してきたことが明らかとなった。

2018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る断層や割れ目の形成過程等を検討する。

3.2.3 深部塩水系地下水の起源・滞留時間の理解

2017年度は、研究坑道内からの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、100万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多数の地下水流动解析結果を統計処理することで、地下水の滞留時間を評価する上で重要な地下水流动の変動性を評価する手法について検討を行った。

2018年度は、研究坑道内からの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継続するとともに、地下水の滞留時間を目的とした年代測定手法について、既存技術の情報収集を行う。

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・力学的变化を観察し、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、止水壁を利用し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す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。

2016年度までに①坑道掘削前の水圧分布の確認、②冠水坑道の掘削、③冠水坑道でのモニタリング装置設置、④冠水坑道掘削後の力学・水理・化学変化の観測、⑤冠水時の水理・化学変化の予測解析、⑥止水壁の施工および止水性能確認、⑦坑道閉鎖、冠水、冠水後の水理、力学、化学特性のモニタリングを実施した。

2017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、冠水後の地下水の水圧や水質の変化、岩盤変位や透水性の変化のモニタリングを継続するとともに、坑道内の地下水の一部排水と排水停止を繰り返す試験を実施した。また、2017年9月に冠水坑道内の地下水を全て排水し、これに伴う冠水坑道周辺の地質環境の変化を観測した。これらの結果、冠水坑道周辺の地下水圧を低下させても比較的短期間で回復することや、閉鎖後の冠水坑道内の地下水の化学的な状態は還元状態にあり、坑道壁面のセメント等との反応によりpH10程度のアルカリ性の状態で定常状態となることが確認された。また、坑道内の地下水排水後には、坑道壁面近傍の比抵抗値が比較的短期間で変化することが確認された。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、連成解析技術に関する国際協同研究（DECOVALEX-2019）²⁴⁾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。

2018年度は、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。

なお、坑道埋め戻し試験や施設全体の埋め戻しの事前検討のための基礎情報となる冠水坑道床面のボーリングピット（図3.3.1-1）を利用した各種試験については、3.3.1（3）埋め戻し試験に記述する。

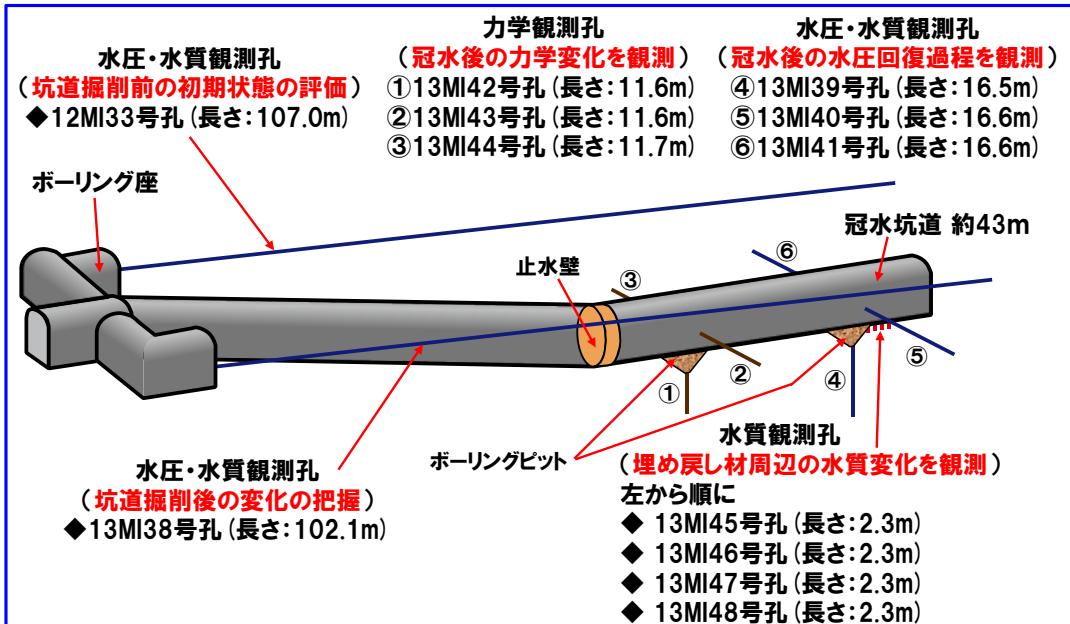


図 3.3.1-1 冠水坑道周辺における観測孔の概要

(2) 岩盤の破壊現象評価

坑道周辺岩盤の掘削影響領域では、既存割れ目の開閉あるいは新たな割れ目が発生することがあるため、物質の選択的な移動経路になりうる。掘削影響領域の発生は、初期応力状態、岩盤物性、掘削工法に依存する。掘削影響領域を含む坑道周辺岩盤が、坑道埋め戻しの際の外側境界に接する領域となるため、坑道埋め戻し後の周辺岩盤の長期的な挙動の評価にあたっては、初期応力と埋め戻し材の膨潤圧との力学的な釣り合いの評価が特に重要である。このため、坑道掘削から埋め戻しまでを想定した周辺岩盤における破壊挙動とその後の変化を評価することは重要な課題である。日本の地質環境において坑道を掘削する際に力学的に弱部となる不連続面を避けることは不可能である。ゆえに、不連続面を考慮した掘削影響や熱負荷に伴う岩盤挙動、特に長期挙動を含めた力学モデルや解析手法の高度化が課題である。そのため、大口径ボーリング孔の掘削による孔壁破壊現象の調査や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い、坑道掘削から埋め戻しまでを想定した周辺岩盤における破壊挙動とその後の変化を評価する方法を整備する。

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を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。

2018年度は、これまでに得られた成果の取りまとめを行う。

(3) 埋め戻し試験

2017年度は、2014年度に埋め戻し材（砂、粘土等）で埋め戻した深度500m研究アクセス北坑道の冠水坑道床面のボーリングピットにおいて、埋め戻し材の力学・水理・化学変化の計測を継

続するとともに、冠水坑道内の地下水排水後に埋め戻し材を採取し、その状態を確認するための室内試験を開始した。また、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。

2018年度は、冠水坑道床面のボーリング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関する解析を行う。また、坑道の一部を利用した埋め戻し試験については、国からの受託事業を活用する計画である。

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。

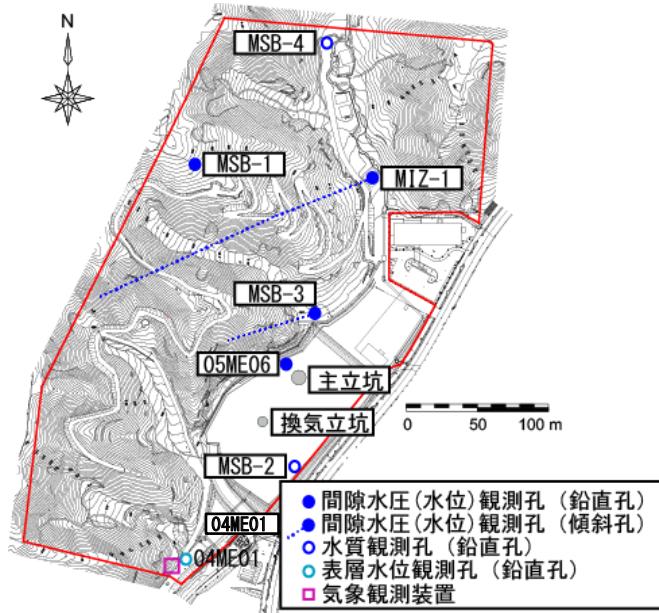


図 3.3.2-1 研究所用地内観測位置図

(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の整備を行う。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

ター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、ボーリング孔閉塞技術に係る検討を行う。

(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取りまとめる。

3.4 正馬様用地における調査研究

2017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。

2018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。

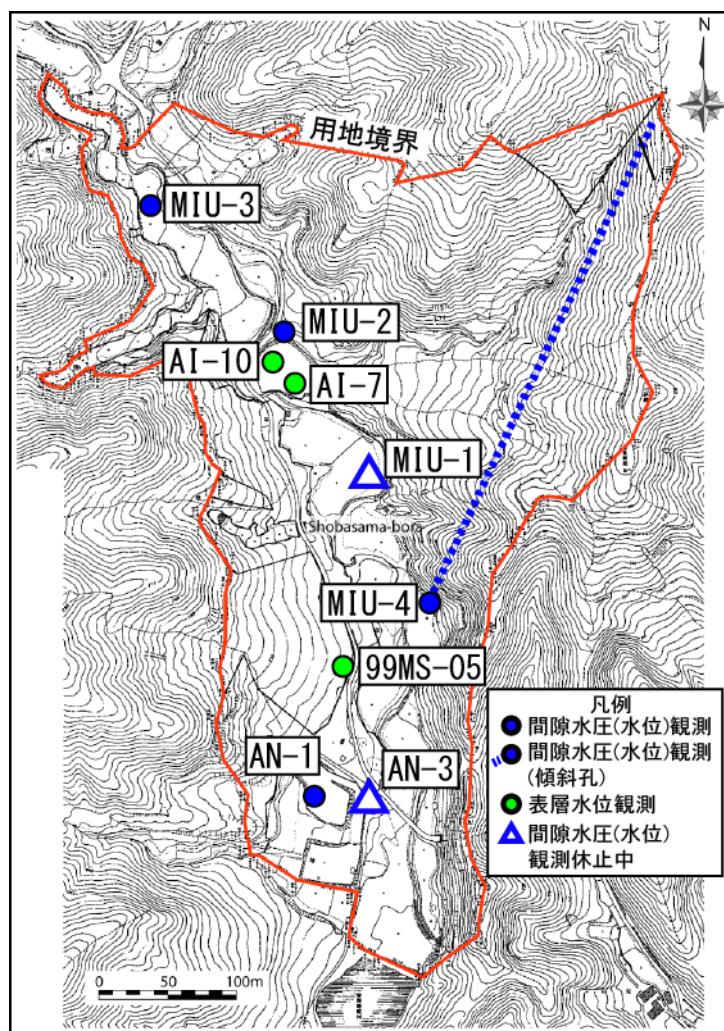


図 3.4-1 正馬様用地内における観測施設位置図（原図は瑞浪市都市計画基本図）

3.5 施設計画

(1)施設建設

2017年度は、坑内外仮設備の維持管理作業、換気立坑巻上設備の制御盤の交換、再冠水試験に伴う深度500m研究アクセス北坑道冠水坑道内の環境整備として、排水、換気および照明設備の設置を実施した。

2018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、主立坑のスカフォードやズリキブルのワイヤーロープおよび制御盤の交換を実施する。また、坑道埋め戻しの検討を進める。

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

2018年度は、2017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。

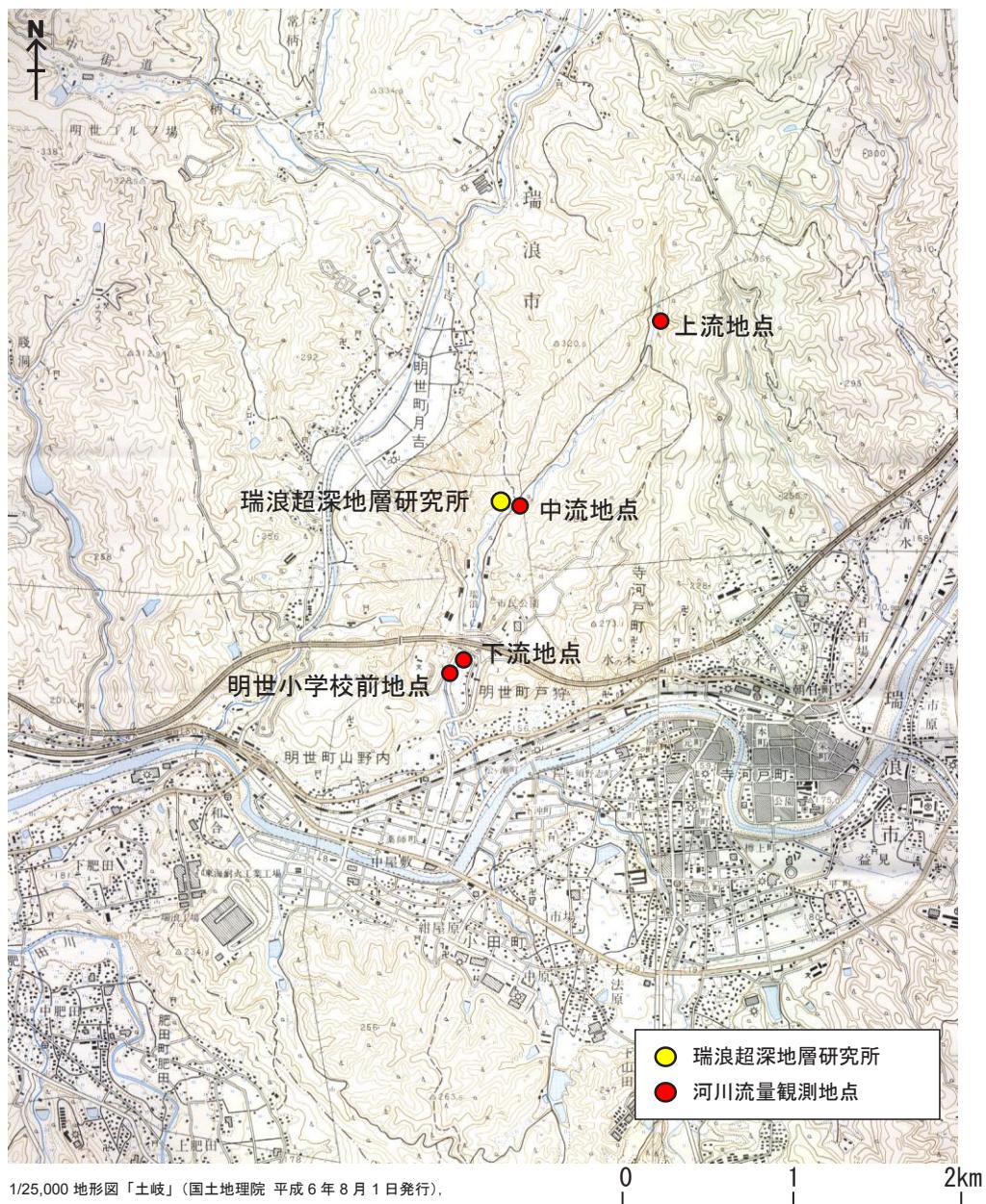


図3.5-1 河川流量測定位置図

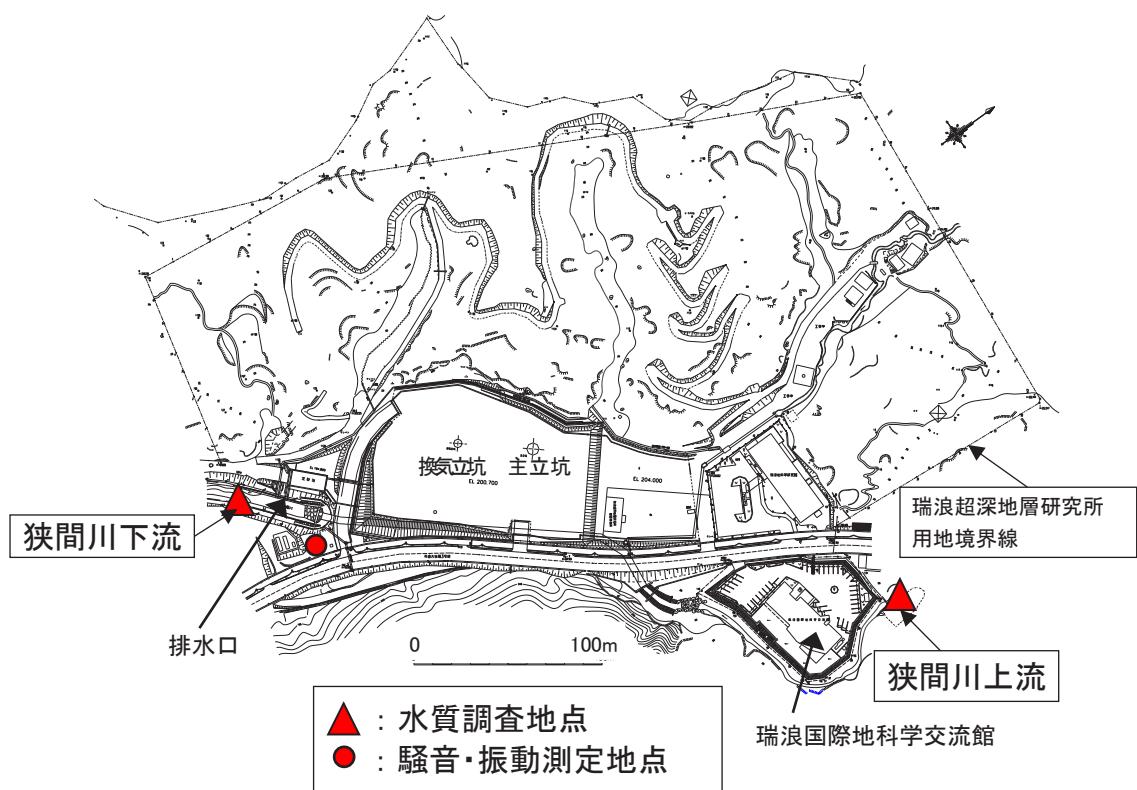


図3.5-2 水質調査および騒音・振動測定位置図

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、2018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・生物連成現象に関する研究

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。

2017年度は、既往のボーリング孔や冠水坑道において地下水・岩石中の微生物・有機物の分析を実施し、それらが地球化学特性に与える影響を評価した。2018年度は、各深度のボーリング孔を利用して採水調査を実施し、微量元素の値数、同位体等の地球化学情報に基づく水質推定手法の開発を行う。

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动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。

2018年度は、主に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²⁵⁾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、室内試験を引き続き実施するとともに、前年度までの結果を踏まえた波動伝播シミュレーション技術の検討を行う。

④国立大学法人京都大学：土岐花崗岩の浸透率空間分布の詳細把握と地下水流动系との関連性に関する研究

本研究は、異なる複数のスケール（マルチスケール）における透水性の空間分布の詳細把握およびその方法論の検討を目的として、研究坑道内（原位置）の調査やモデル化・解析を実施する。

2018年度は、2017年度に引き続き数cm～数mスケールの透水性を推定する手法の検討に向けた、原位置調査や既存の情報等により地質構造と透水性の関連性を検討し、モデル化・解析手法の検討を行う。

⑤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°C程度の高温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。2018年度は、引き続き構成方程式の高度化等を進める。

⑥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。

2017年度は、原位置での微生物による鉱物生成や関連する微生物活性、主要化学成分、微量元素、同位体組成等の分析を行った。2018年度は、ボーリング孔を利用した微生物活性に関わる原位置試験を継続し、深部地下環境における微生物活動の評価技術の開発を行う。

⑦国立大学法人東北大学：花崗岩の割れ目と充填鉱物の形成条件に関する研究

本研究は、2017年度から2018年度に共同研究として実施するものであり、花崗岩の割れ目と充填鉱物の形成条件を把握する手法の高度化を目的としている。

2018年度は、研究所およびその周辺で採取したボーリングコアを用いて、薄片観察と室内分析を実施し、充填鉱物が形成された当時の温度条件や、透水性の高い割れ目の特徴を検討する。

⑧株式会社大林組：亀裂性岩盤における透水不均質性のモデル化に関する研究

本研究は、亀裂性岩盤の水理・物質移動現象を評価するためのモデル化手法の体系化に資することを目的として、亀裂ネットワークモデル（Discrete Fracture Network Model；以下、DFNモデル）の構築と、その DFN モデルを用いた水理・物質移動現象のシミュレーション解析、解析結果と実測データとの比較等のモデル化・解析手法に関する検討を実施する。

2018年度は、これまでの検討で構築したDFNモデルを用いて、研究坑道周辺における透水不均質性の評価に関する検討を行う。また、調査の実施からDFNモデルの構築・妥当性確認に至る方法論やDFNモデルを用いた亀裂性岩盤の透水不均質性の評価手法について検討する。

⑨株式会社東京測器研究所：光ファイバひび割れ検知センサーの安全確保技術としての適用性に関する研究

深地層における工学技術の有効性の確認のうち、安全対策に関する技術の有効性確認の一環として、東京測器研究所が開発した光ファイバひび割れ検知センサーの適用性確認を目的とした共同研究を2011年度より開始した。

本研究では、瑞浪超深地層研究所の深度300mステージで、温度・湿度環境が異なる3箇所（計測点1；深度300mボーリング横坑（換気立坑）、計測点2；避難所、計測点3；深度300m研究アクセス坑道11m計測坑道）に同センサーを設置し、センサーおよび坑道壁面とセンサーを接着させるために用いた接着剤（ポリエステル系接着剤；PS、エポキシ系接着剤；EB-2、いずれも東京測

器研究所製)の長期耐久性を確認する試験を実施してきた。2015年度に、計測点1(接着剤;PS, EB-2), 計測点2(接着剤;PS), 計測点3(接着剤;PS)のひび割れ検知センサーに剥離が確認されたため、2016年4月26日をもって同箇所の測定を終了し、それ以降、残りの測定点2(接着剤;EB-2)および測定点3(接着剤;EB-2)におけるセンサーおよび接着剤の長期耐久性試験を継続している。

2017年度は、約3箇月の間隔で4月, 8月, 10月, 1月に測定点2および測定点3におけるセンサーおよび接着剤の点検を実施するとともに、これらの耐久性を確認した。2018年度は、2017年に引き続き、センサーおよび接着剤の長期耐久性確認試験を継続し、約3箇月の間隔で点検を実施する。

⑩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、地層処分で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、再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、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。

2017年度は、2016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ステージに地震計を増設し、観測を開始した。2018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、深度500mステージに新たに応力計を設置する。

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、名古屋大学)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、名古屋大学より、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。

2017年度は、2016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。2018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。

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2018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。

2018年度は、原子力機構の第3期中長期計画期間の4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）の調査研究を実施する。2018年度の主な調査研究としては、坑道埋め戻し技術の開発の一環として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た再冠水試験を引き続き実施する。本試験においては、冠水坑道内の地下水を全て排水した後の坑道周辺岩盤の地下水の水圧・水質の経時変化の観測を継続するとともに、冠水坑道周辺に掘削し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など、今後計画している研究成果の取りまとめに向けて調査研究を着実に実施していく。

参考文献

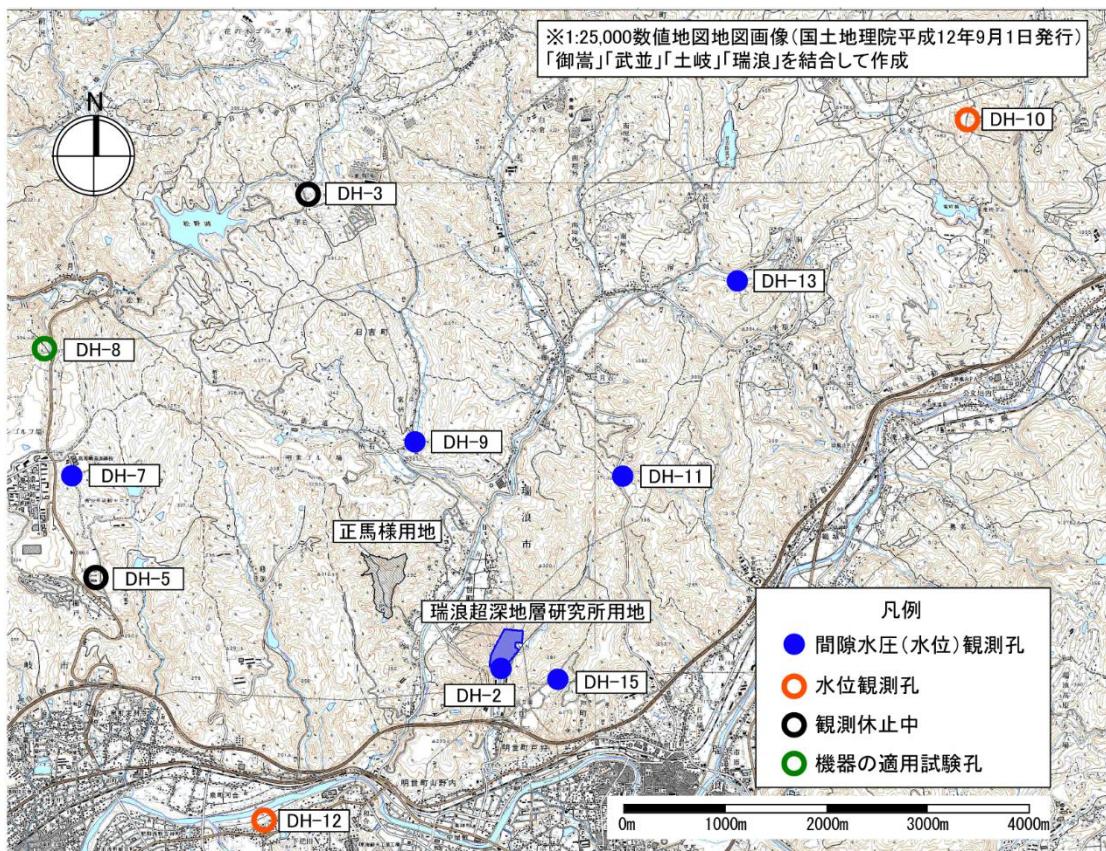
- 1) 原子力委員会：原子力政策大綱, 2005.
- 2) 原子力委員会：原子力の研究、開発および利用に関する長期計画, 1994.
- 3) 動力炉・核燃料開発事業団：超深地層研究所地層科学研究基本計画, PNC TN7070 96-002, 1996, 20p.
- 4) 原子力委員会：原子力の研究、開発および利用に関する長期計画, 2000.
- 5) 核燃料サイクル開発機構：超深地層研究所地層科学研究基本計画, JNC TN7410 2001-009, 2001, 100p.
- 6) 核燃料サイクル開発機構：超深地層研究所地層科学研究基本計画, JNC TN7410 2001-018, 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：2018年5月10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, <http://www.jaea.go.jp/02/press2013/p13092601/01.pdf>(参照:2018年5月10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.

- 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:広域地下水流动研究基本計画書, 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年取りまとめ一分冊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 育, 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 (2011) :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) 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.
- 19) 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) 一, 島弧変動, 地団研専報, no.24, 1982, pp.143-155.
- 20) 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.
- 21) 氏原 温, 入月俊明, 細山光也:岐阜県東濃地域の新第三系, 日本地質学会第106年学術大会見学旅行案内書, 1999, pp.97-116.
- 22) 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.
- 23) 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.
- 24) DECOVALEX : <http://decovalex.org/index.html>(参照:2018年5月10日).
- 25) 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, 第66回材料学会講演論文集, 2017, 講演番号103, in USB Flash Drive.

付録 1 広域地下水流动研究 2018 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学的・地球化学的な基礎情報の取得および地下水流动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。

2018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-9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：広域地下水流动研究 年度報告書(平成 16 年度), JNC TN7400 2005-013, 2005, 56p.

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI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
比體積	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) これらは無次元あるいは次元をもつ量であるが、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	1/s
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	m ² kg s ⁻²
仕事率、工率、放射束	ワット	W	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	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	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	kg s ² A ⁻¹
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	Wb/A
光照度	ルーメン	lm	cd sr ^(e)
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	lm/m ²
吸収線量、比エネルギー分与、カーマ	グレイ	Gy	m ² s ⁻²
線量当量、周辺線量当量、方向線量当量、個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg
酸素活性	カタール	kat	m ² s ⁻²

(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じである。したがって、温度差や温度間隔を表す數値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で“radioactivity”と記される。(g) 単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

表5. SI接頭語

乗数	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	ゼット	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	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
ノット	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネバ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	1 dB=10 ² lx
デシベル	dB	1 dB=10 ² lx

(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「△」は対応関係を示すものである。

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
ダイーン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	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
フォント	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マックスウェル	Mx	1 Mx=1G cm ² =10 ⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe△(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「△」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	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	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
力口リ	cal	1 cal=4.1858J (15°Cカロリー), 4.1868J (ITカロリー), 4.184J (熱化学カロリー)
ミクロシン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

