

超深地層研究所計画 年度計画書 (2016 年度)

Mizunami Underground Research Laboratory Project Plan for Fiscal Year 2016

濱 克宏 竹内 竜史 岩月 輝希 笹尾 英嗣

見掛 信一郎 池田 幸喜 松井 裕哉 大澤 英昭

Katsuhiro HAMA, Ryuji TAKEUCHI, Teruki IWATSUKI, Eiji SASAO

Shinichiro MIKAKE, Koki IKEDA, Hiroya MATSUI and Hideaki OSAWA

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 Decommissioning and Radioactive Waste Management

July 2016

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 (<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

© Japan Atomic Energy Agency, 2016

超深地層研究所計画 年度計画書 (2016年度)

日本原子力研究開発機構
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

濱 克宏, 竹内 竜史, 岩月 輝希, 笹尾 英嗣, 見掛 信一郎⁺¹, 池田 幸喜⁺¹,
松井 裕哉, 大澤 英昭

(2016年5月30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」に基づき、2016年度の超深地層研究所計画の調査研究計画、施設計画、共同研究計画などを示したものである。

Mizunami Underground Research Laboratory Project
Plan for Fiscal Year 2016

Katsuhiro HAMA, Ryuji TAKEUCHI, Teruki IWATSUKI, Eiji SASAO, Shinichiro MIKAKE⁺¹,
Koki IKEDA⁺¹, Hiroya MATSUI and Hideaki OSAWA

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

(Received May 30, 2016)

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 in Gifu Prefecture, central Japan.

On the occasion of the reform of the entire JAEA organization in 2014, JAEA identified three important issues on the geoscientific research program: “Development of countermeasure technologies for reducing groundwater inflow”, “Development of modelling technologies for mass transport” and “Development of drift backfilling technologies”, based on the latest results of the synthesizing research and development (R&D). These 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 2016 based on the MIU Master Plan updated in 2015 and so on.

Keywords: Mizunami Underground Research Laboratory, MIU Project, Program for Fiscal Year 2016, 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. 2016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ト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.....	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.....	21
3.5 施設計画.....	22
4. 共同研究・施設利用.....	23
5. おわりに.....	27
参考文献.....	27
付録 1 広域地下水流動研究 2016 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 FY2016	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 modelling technologies for mass transport	15
3.2.1 In-situ test and modelling fracture network	15
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.....	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.....	21
3.5 Facility plan at the MIU Construction Site.....	22
4. Collaboration studies with research organizations.....	23
5. Conclusions	27
References	27
Appendix1 Plan of the Regional Hydrogeological Study Project in FY2016	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*など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、これ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などから、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⁾。

2013年度に、高速増殖原型炉「もんじゅ」における保守管理の不備、大強度陽子加速器施設J-PARCにおける放射性物質の漏えい事故を発端に、原子力機構に対する社会からの信頼を大きく損なう事態となった。原子力機構は、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(株)

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

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し¹¹⁾、この必須の課題に基づき、基本計画を改訂した¹²⁾。

本計画書は、改訂された基本計画¹²⁾に基づき、超深地層研究所計画の2016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¹³⁾。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。本計画書の付録に、広域地下水流動研究についての2016年度の計画を示す。なお、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。

2. 超深地層研究所計画の概要

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の約20年をかけて実施する。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、空間スケールなどを考慮し、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、天然の地質環境と、その地質環境が坑道の掘削など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などは、地質環境を対象とした一連の調査、評価など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などの施設を市有地（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。

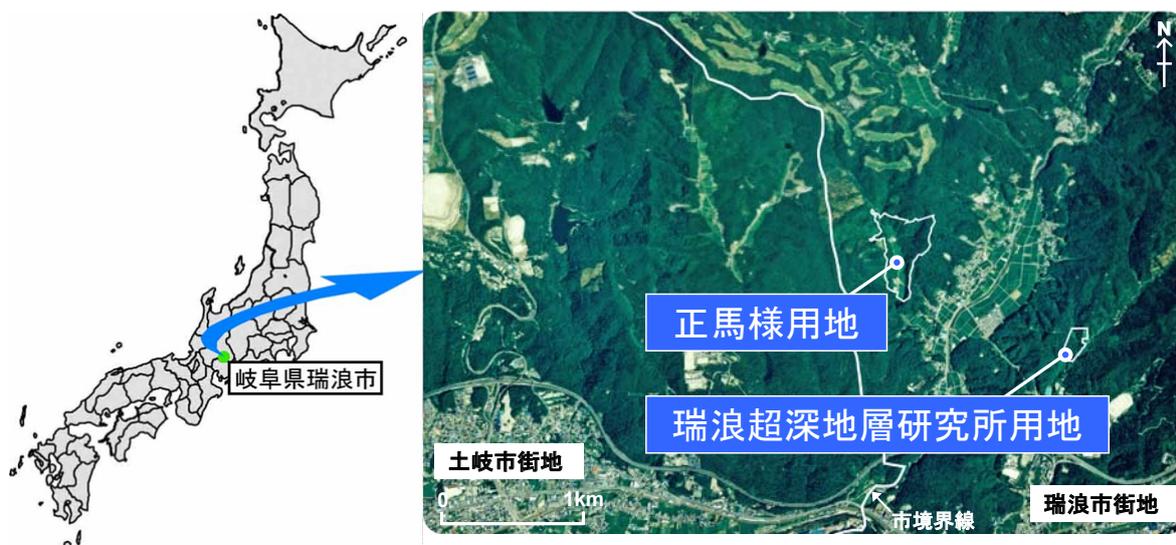


図 2-1 超深地層研究所の設置場所

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、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）の三つに区分して進めることとしている。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など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、岩盤の力学特性など）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などを考慮する。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（大量出水や山はねなど）が発生した場合などにおいては、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などを踏まえ、全体計画など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などに基づき、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）を用いた解析結果などに基づき、研究坑道掘削が周辺の地質環境に与える影響などを評価する。

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などにおいては、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などにおいて実施してきた調査研究の成果や課題などに加え、全体計画など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など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などに基づき、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、工程や品質など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・軽減する工学技術などを開発・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などにおいては、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。

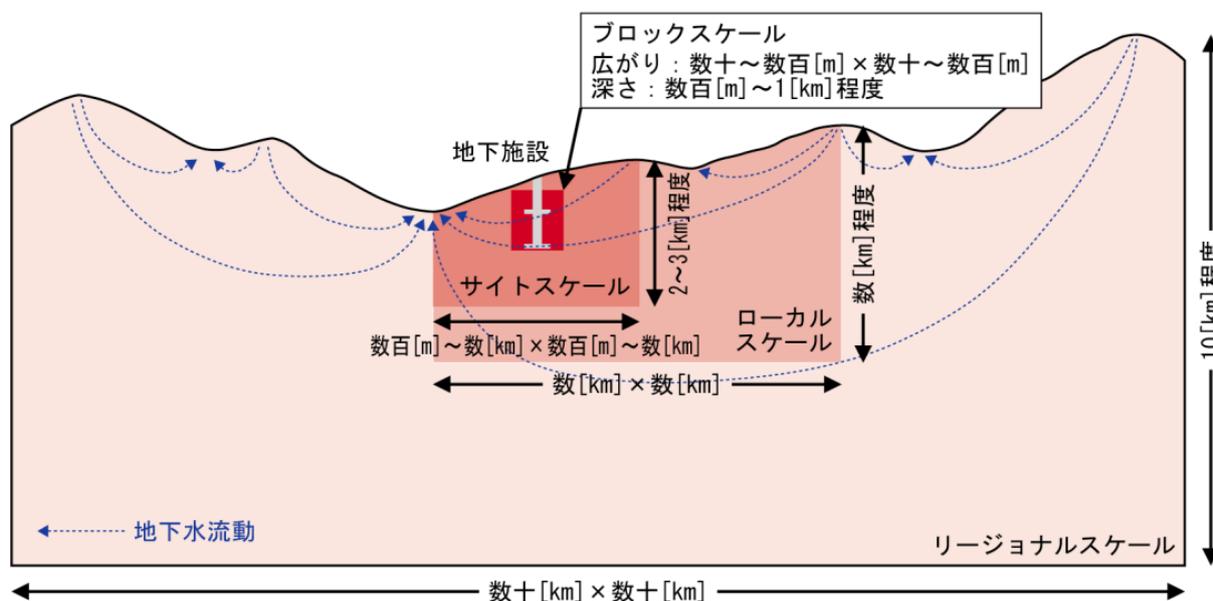


図 2.1-1 空間スケール概念

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] x 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] x 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] x 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] x 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^{14,15,16)}。

第3段階も同様の考え方¹⁶⁾を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などを踏まえて、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		MU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基礎的課題	地下施設の設計・施工	環境影響評価	地下施設の設計・施工	L	S	B	S	B	S	B	移行経路として重要な構造の把握	○	○	○	○	○	○	○										
											対象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	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
											地質/地質構造の長期変化の推定	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
											地下水流動場の把握	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
											地下水流束分布の把握	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
											地下水流動特性の長期変化の推定	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
											地下水の塩分濃度分布の把握	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
											地下水のpH・Eh環境の把握	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
											地下水の水質変化の推定	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
深地層における工学技術の基礎的課題	地下施設の設計・施工	環境影響評価	地下施設の設計・施工	L	S	B	S	B	S	B	物質移動場の把握	○	○	○	○	○	○	○										
											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の範囲の把握	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○					
											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	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○					
											帯水層の分布の把握	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎					
											帯水層などにおける流速分布の把握	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎					
											応力場の把握	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎					
深地層における工学技術の基礎的課題	地下施設の設計・施工	環境影響評価	地下施設の設計・施工	L	S	B	S	B	S	B	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量の把握	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
											地下空洞への流入地下水水質の把握	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
											地温勾配分布の把握	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎						
											岩盤の熱特性の把握	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎						
											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	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
											排水板流先河川の水質の把握	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
											振動・騒音の把握	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
深地層における工学技術の基礎的課題	地下施設の設計・施工	環境影響評価	地下施設の設計・施工	L	S	B	S	B	S	B	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	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
											安全性を確保する技術の開発	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
											細削影響の修復・軽減技術の開発	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
											(EDZ: 掘削影響領域)																	
											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																	
											(注) 第3段階で対象とする課題は、三枝ほか(2011) ⁽⁶⁾ を一部修正																	

○: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
 (注) 第3段階で対象とする課題は、三枝ほか(2011)⁽⁶⁾を一部修正

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。このように多様な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¹⁴⁾ (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、全体計画などに示された、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→調査の実施→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などは、国内外の地球科学分野の学術的研究の成果などと合わせて、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など）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などにも反映できる。

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などにおいては、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などが実施可能であることなどを実証するために役立てられる。

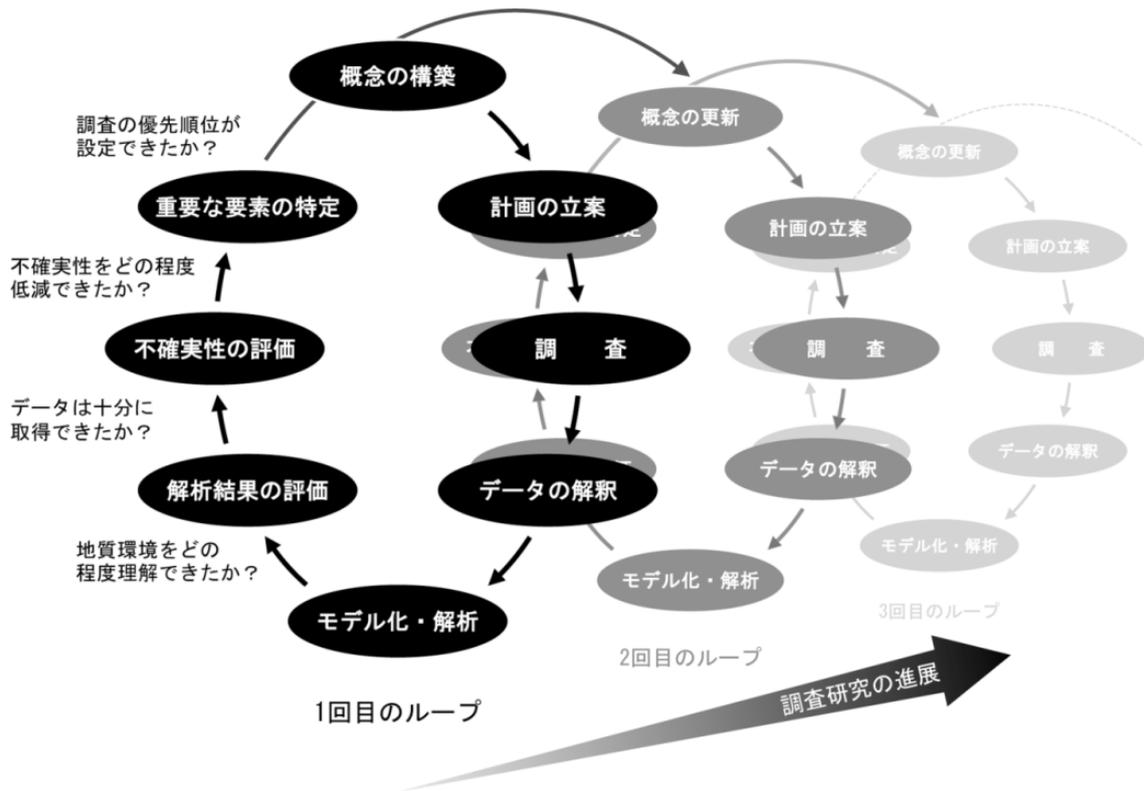


図 2.3-1 調査研究の繰り返しアプローチ

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）^{17,18)}。

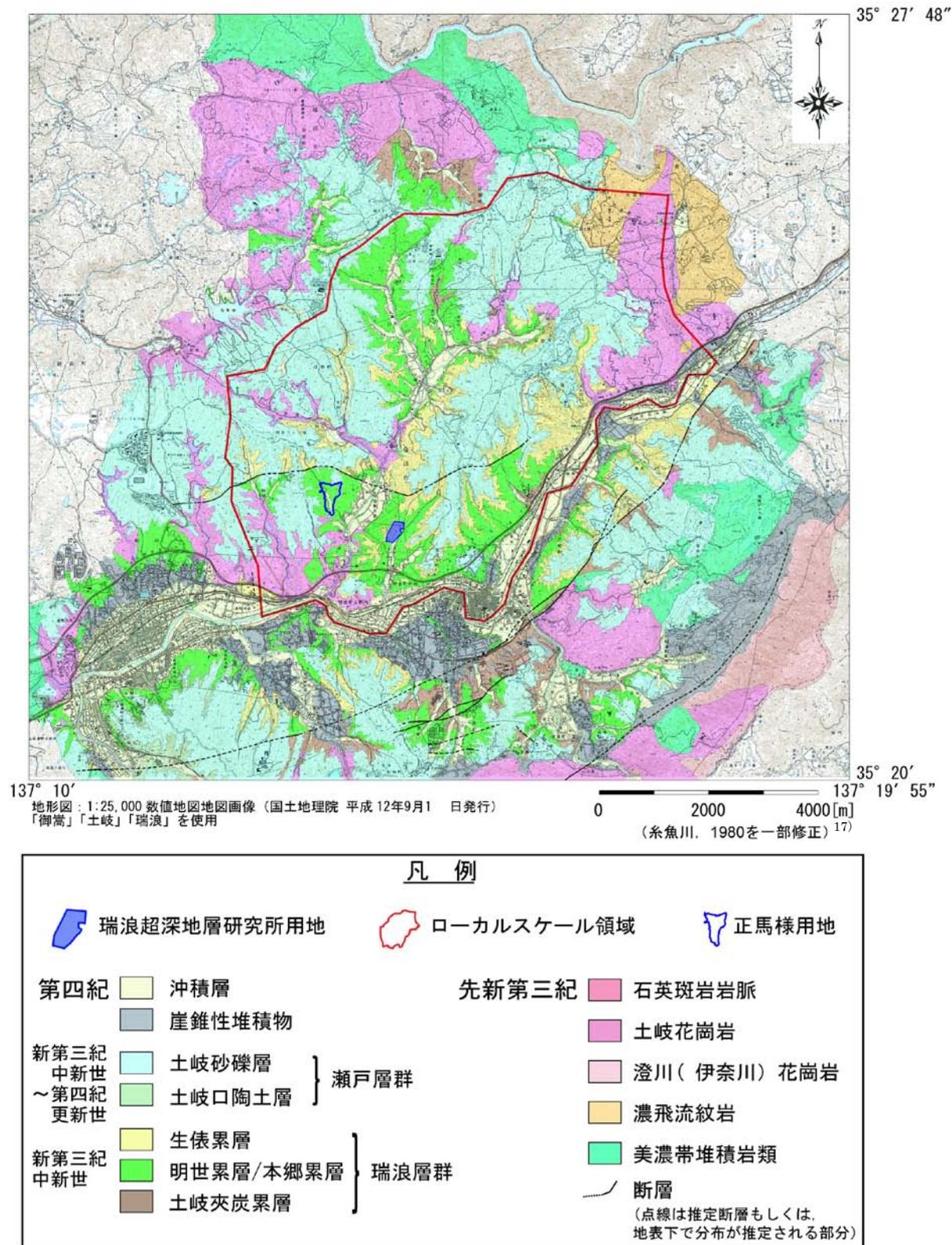


図 2.4-1 超深地層研究所周辺の地質概要

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、槽設備、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、管理棟などからなる。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。

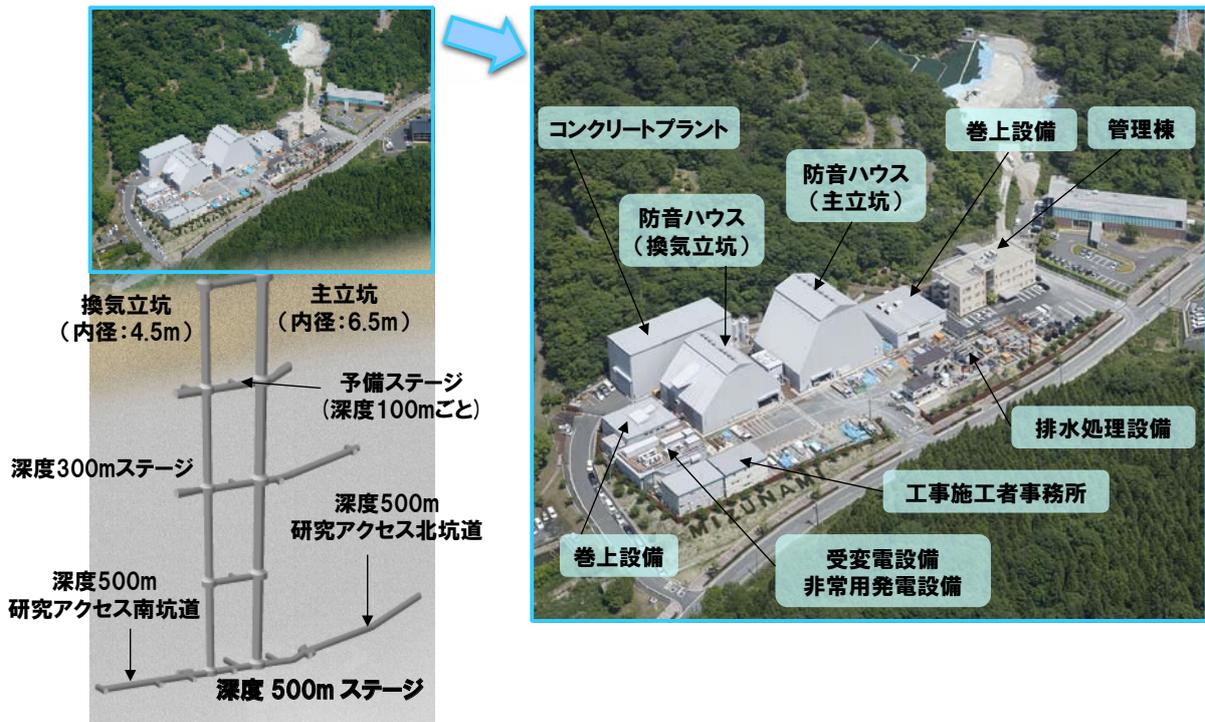


図 2.5-1 瑞浪超深地層研究所の施設の現状

3. 2016 年度の調査研究および施設計画

2016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など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など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。

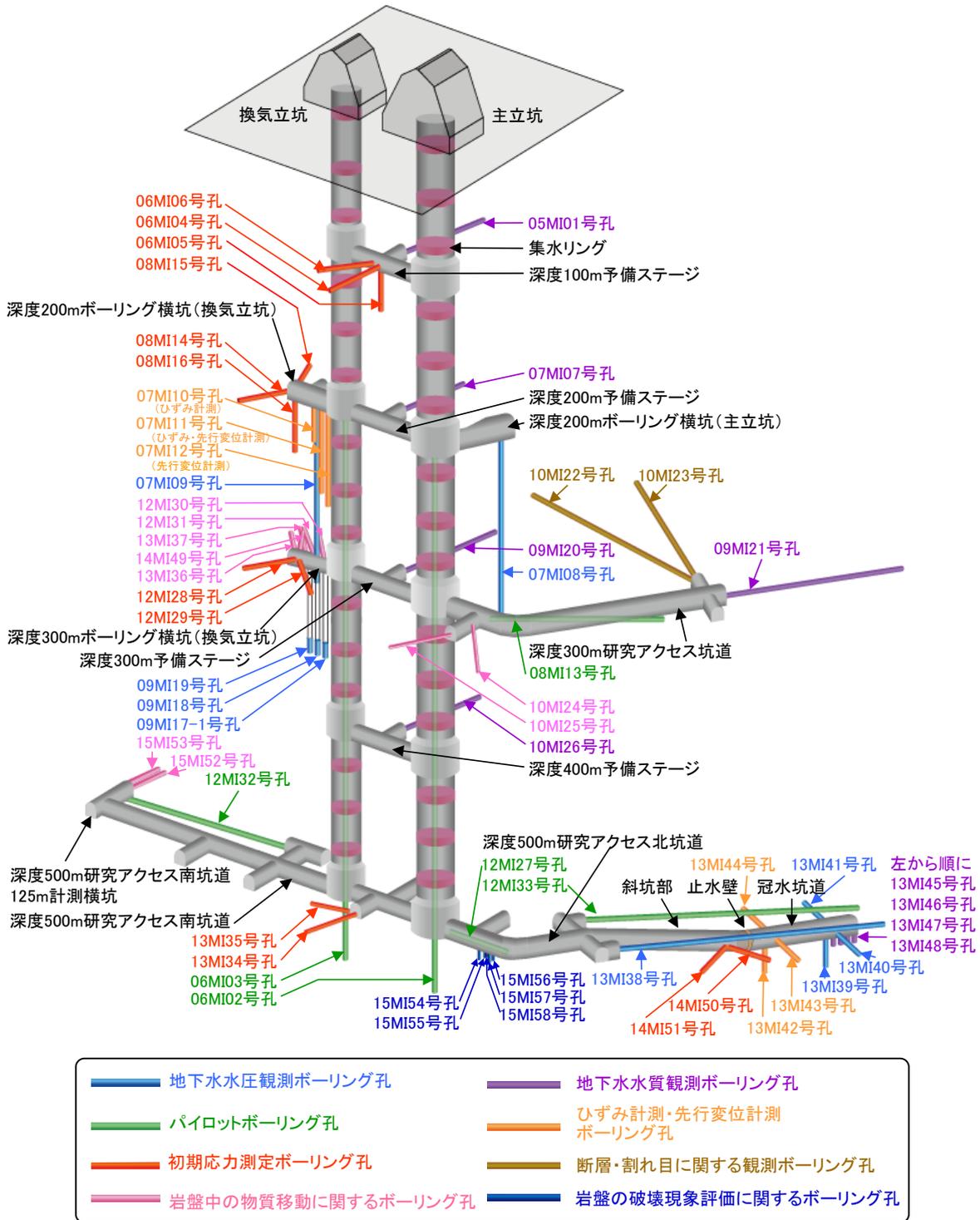


図 3-1 研究坑道レイアウトおよび主な調査位置計画図

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（グラウトなど）、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。研究坑道への湧水に対しては、プレグラウトとポストグラウト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など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

2015年度は、深度500m研究アクセス南坑道において2014年度までに実施したプレグラウトとポストグラウトの組み合わせによる湧水抑制効果を検証した。また、岩盤の透水係数に応じたグラウト材料の選定や注入方法、効果的な注入孔の配置について検討した。

2016年度は、2015年度までの成果に基づき、研究坑道全域を対象として湧水が多く認められる区間を選定し、ポストグラウト技術を適用する場合の施工方法や湧水抑制効果に関する検討を行い、研究坑道内への総湧水量を低減するための計画について検討する。

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。近年公共工事など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た。2016年度は、その結果を報告書として取りまとめ公表する。

3.2 物質移動モデル化技術の開発

スウェーデンなどの安定大陸の結晶質岩と比較して、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、花崗岩中の割れ目での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動解析を継続的に実施してきた（図3.2.1-1）。具体的には、深度500m研究アクセス北坑道の冠水坑道周辺領域を対象として亀裂ネットワークモデルを構築し、割れ目の分布特性が坑道掘削に伴う湧水量や水圧変化に及ぼす影響を統計的に分析した。2016年度は、2015年度に構築した亀裂ネットワークモデルをベースとして、冠水坑道の掘削や冠水に伴う地下水圧の変化データを用いた割れ目の分布特性のコンディショニングを実施し、モデルの更新ならびに地下水流動解析を行う。また、坑道掘削に伴う地下水流動特性の変化に関するデータや複数のボーリング孔を利用した孔間水理試験結果に基づく水理地質構造モデルの更新を支援することを目的として、水圧変化データや湧水量データから水理地質構造を推定するための地下水流動の逆解析手法を構築する。この調査研究は清水建設株式会社との共同研究として実施する。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、2016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。

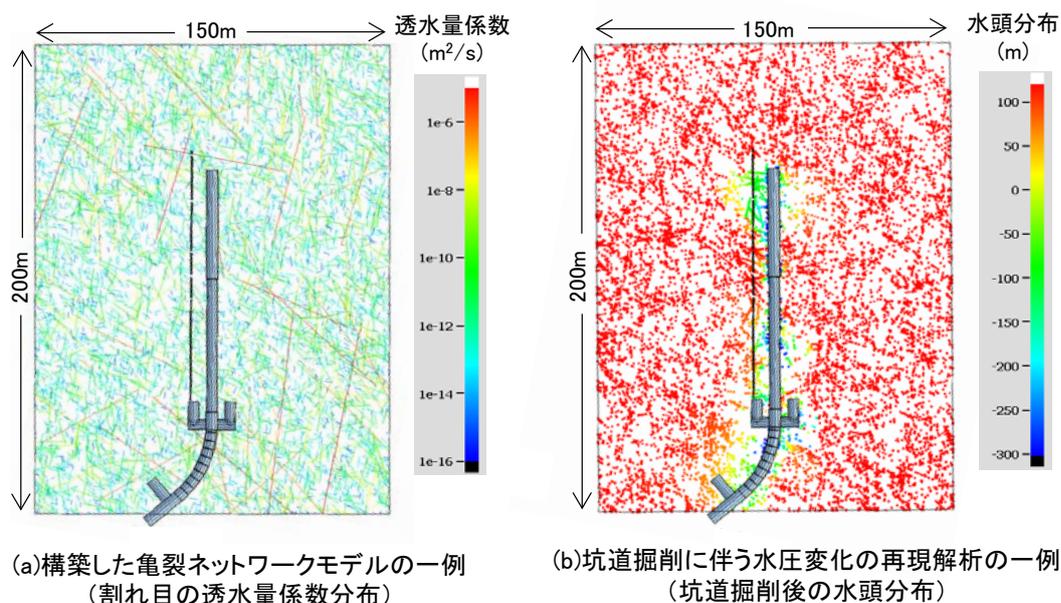


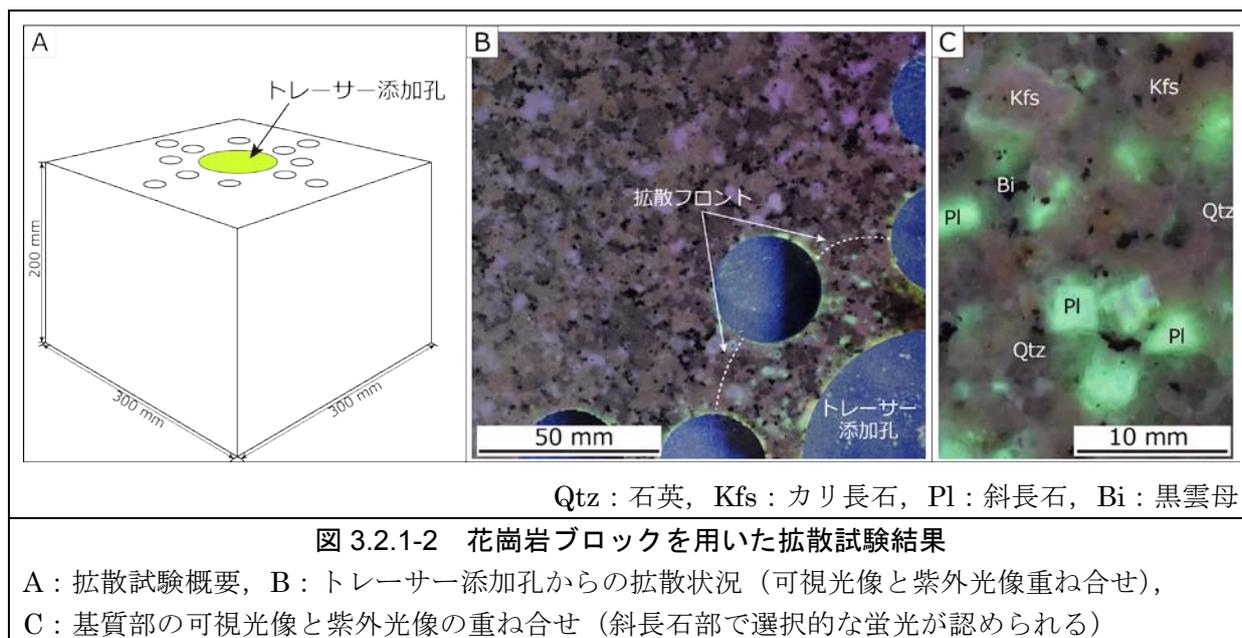
図 3.2.1-1 冠水坑道周辺領域を対象としたブロックスケールの水理地質構造モデル

②花崗岩中での物質移動現象の理解

これまでの調査研究により、不連続構造周りの変質の程度が大きいほど、実効拡散係数が大きくなるなど、不連続構造周りの変質の有無が物質移動特性に影響を与えることが明らかとなっている^{19,20)}。また、変質を被っていない花崗岩ブロックを用いた拡散試験の結果、非収着性のトレーサー物質（ここではウラン）が斜長石中心部に選択的に分布していることが明らかとなった（図3.2.1-2）。また、研究所用地周辺に分布する土岐花崗岩中の健岩部を対象に微小空隙構造の分布を調査した結果、斜長石中心部に選択的に微小空隙が分布することが確認され、これらの微小空隙構造の分布が物質移動特性に影響を与えている可能性が考えられた。

2016年度は、室内試験を実施した試料およびその他の岩石試料について、微視的観察などを実施し、室内試験結果との関係性を評価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を行う。また、深度500m研究アクセス南坑道において、岩盤中の透水性割れ目の分布や連続性などを把握するためのボーリング調査を実施する。なお、ボーリング調査は電力中央研究所との共同研究として実施する。

長期にわたる物質移動現象を評価するための指標として、ウラン系列核種やトリウム系列核種に着目し、土岐花崗岩中の地下水および透水性割れ目沿いのウラン系列核種、トリウム系列核種の分布を把握し、ウランなどの移動特性を評価する。



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については、主に限外ろ過法により採取し、その化学形と微量元素（希土類元素など）濃度を分析した結果、微量元素は主に炭酸塩から構成されるコロイドに多く含まれ、コロイドとともに移動していることが明らかになってきている²¹⁾。

2016年度においても、既存のボーリング孔を利用して地下水中のコロイドの採取および観察・分析を継続する。

3.2.2 地質環境の長期変遷解析技術の開発

断層などの天然現象が地質環境に影響する範囲を推定する技術の整備を目的として、主立坑断層を主な調査対象として、主に地質と水理の状況を把握し、断層による影響を把握するための調査手法の検討を行う。また、地上から掘削されたボーリング孔の情報も活用し、断層や割れ目の形成過程を検討する。

2015年度は、主立坑断層は、貫入岩沿いに発達した断層ガウジ群として観察され、ほぼ鉛直の傾斜でMIZ-1号孔¹⁵⁾まで連続することを確認し、地質構造モデルを更新した。また、主立坑断層沿いには、割れ目を充填する粘土や固結した断層（カタクレーサイト）が分布しており、これらが低い透水性をもたらす原因になることがわかった。一方、主立坑断層近傍の高い透水性を示す花崗岩は、比較的強度が高く引張り性の割れ目が発達し、割れ目の充填物にはカルサイトが多く粘土が少ない。この引張り性の割れ目の中には、固結した断層や割れ目が、再び割れたものも含まれることがわかった。

2016年度は2015年度に引き続き、断層による地質環境への影響に係る既存情報の収集・整理や既存調査手法の有効性や課題の整理を行う。また、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、割れ目の連続性のほか、固結した断層や割れ目の鉱物の組み合わせや分布などの特徴を把握するとともに、それらの形成過程を検討する。

3.2.3 深部塩水系地下水の起源・滞留時間の理解

2015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実施した。このうち、地下水の滞留時間を推定する手法（年代測定法）については、地下深部に存在が想定される滞留時間の長い塩水系地下水に適用できる推定方法を選定するために、国内外において、これまで適用されてきた年代測定法に関する情報収集を実施した結果、これまで広く用いられている¹⁴C（半減期5,730年）に加えて、³⁶Cl（半減期301,000年）およびヘリウムの安定同位体（⁴He）を用いる方法が有効であることがわかった。

2016年度においても、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うなど、実施計画などについての検討を継続する。

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など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、止水壁を介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。

2015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を実施し、冠水を開始した。

2016年度は、冠水坑道周辺に掘削したボーリング孔（12MI33, 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行う。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。また、水理－力学－化学連成解析技術に関わる国際協同研究（DECOVALEX-2019）²²⁾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進めていく。

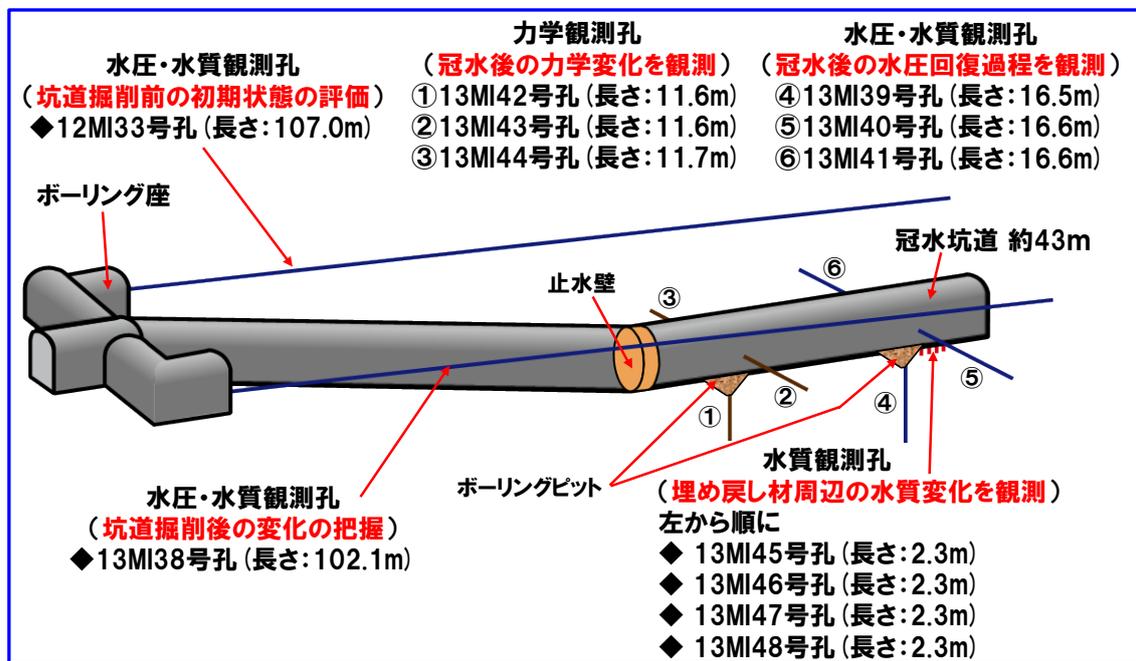


図 3.3.1-1 冠水坑道周辺における観測孔の概要

(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の発生が生じることがあるため、物質の選択的な移行経路になる。この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。

2016年度は、2015年度に京都大学および大林組との共同研究として実施した、ボーリング孔における粘性流体の注入試験結果の評価を主に行い、花崗岩の破壊メカニズムなどについて検討を進める。

(3)埋め戻し試験

2014年度に埋め戻し材（砂、粘土など）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、埋め戻し材の水理・化学・力学的な変化の計測を継続する。また、それらの計測結果や、Nagra（スイス放射性廃棄物管理共同組合）との共同研究として実施している埋め戻し材の密度計測に関する研究の成果などを参考にして、坑道の一部埋め戻し試験の計画検討を開始する。

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

研究坑道への湧水量計測や、研究所用地内での降水量などの観測、ボーリング孔（04MI01号孔；図3.3.2-1）を利用した地表付近の地下水位の観測、土壌水分量の観測を継続する。また、研究坑道周辺における、坑道掘削に伴う地下水の水圧および水質の変化の把握を目的として、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）において、地下水の水圧および水質の観測を継続する。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。また、研究坑道周辺における地下水の流動方向を推定する技術を開発するため、深度300mステージにおいて自然電位測定による地下水流動のモニタリングを引き続き実施する。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。さらに、観測を通じて得られた情報を基に、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。

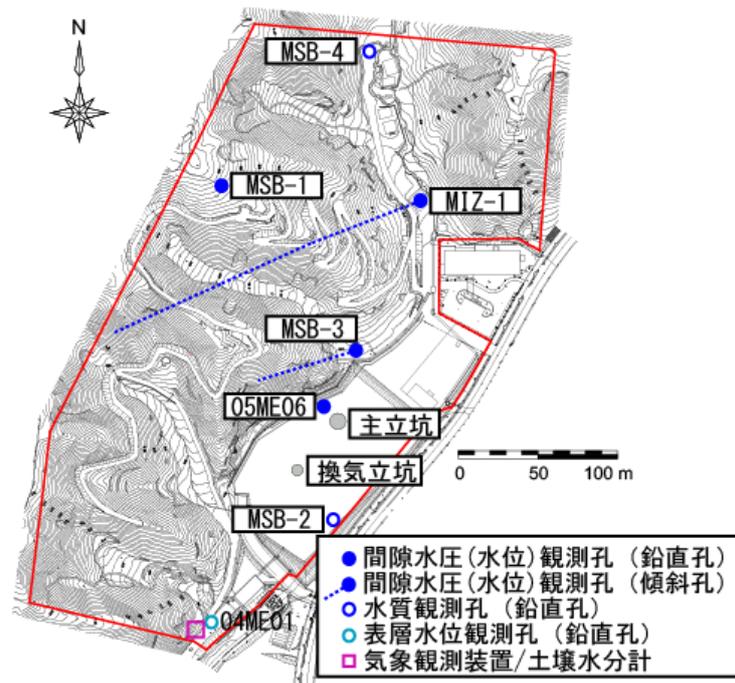


図 3.3.2-1 研究所用地内観測位置図

(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，地中無線によるデータ伝送方法（原子力環境整備促進・資金管理センターとの共同研究），レーザー光による給電技術などの検討（静岡大学との共同研究）を行う。また，冠水坑道内に設置した埋め戻し材内外の物性・地質環境特性（水圧や水分量，土圧，化学特性など）を計測するためのモニタリング機器の適用性評価を行う。

(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

2015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。

2016年度においても、上述の地下水の長期モニタリングを継続する。

(1)調査試験

①地下水長期モニタリング

正馬様用地内のボーリング孔（AN-1号孔，AN-3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行う。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。

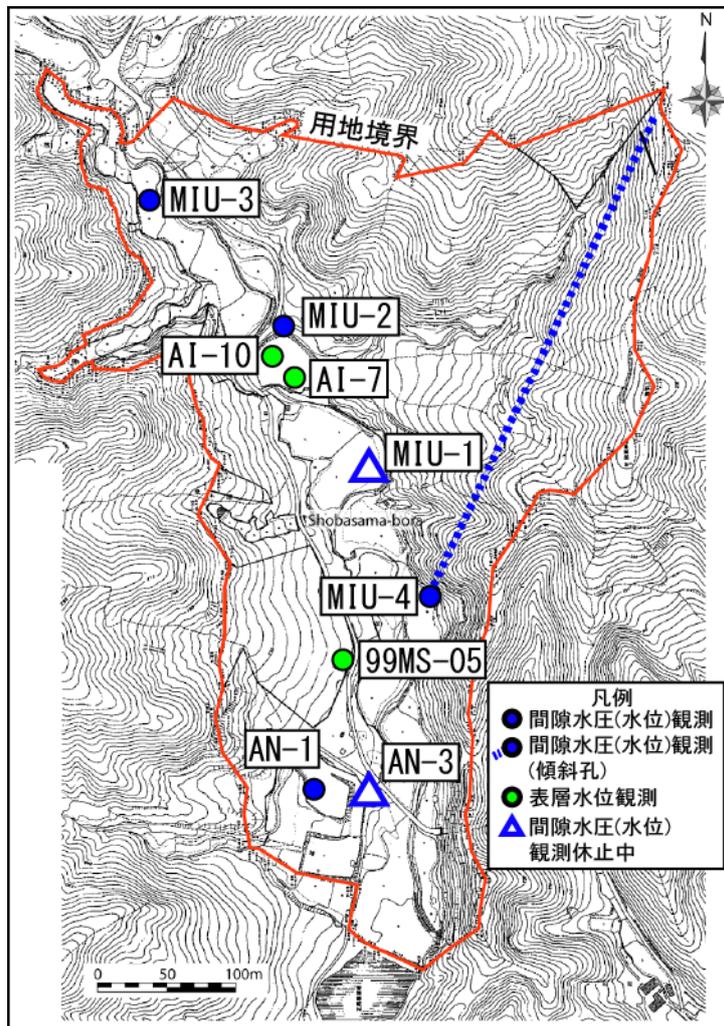


図 3.4-1 正馬様用地内における観測施設位置図（原図は瑞浪市都市計画基本図）

3.5 施設計画

(1)施設建設

2016年度は、深度500m研究アクセス南坑道における湧水抑制対策（ポストグラウト）および坑内外仮設備の補修、交換などの維持管理を実施する。

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」（以下、「環境保全協定」）に基づく管理基準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などについて検討し、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

2016年度は、2015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。

- ・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，濁度などの測定を実施する。
- ・河川の流量測定および水質分析
（流量測定）
研究所周地近傍の狭間川の上流，下流において計4地点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箇所では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，狭間川の上流，下流，立坑湧水および排出水の塩化物イオン濃度を測定する。
- ・井戸の水位測定
研究所周地近傍の10箇所において井戸の水位測定を実施する。
- ・騒音・振動測定
用地境界1箇所において騒音・振動測定を実施する。

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、2016年度は、以下の外部研究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)共同研究等

①公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター：地質環境モニタリング技術の適用性に関する研究

2013年度から結晶質岩を対象とした地下水圧の観測などに関する地中無線モニタリング技術の検証を目的とする共同研究（件名：無線計測技術の適用性に関する研究）を実施してきたものである。本年度からは、これまでに加えて、結晶質岩における地下施設の建設から閉鎖までの地質環境の変遷に関わる地質環境モニタリング技術の体系化を目的とする。

2015年度は、深度500m研究アクセス北坑道に設置した地中無線モニタリングシステムを用いて冠水坑道内の水位・水圧観測を実施した。

2016年度は、結晶質岩を対象とした地中無線モニタリング技術の検証を目的とした深度500m研究アクセス北坑道での地中無線モニタリングシステムを用いた冠水坑道内の水位・水圧観測を継続するとともに、地質環境の長期変遷を評価するためのモニタリング技術について、地質環境回復過程を評価するためのモニタリング項目や適用可能なモニタリング技術、モニタリング方法などについて整理する。

②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。

2016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する。

③一般財団法人電力中央研究所：瑞浪超深地層研究所周辺の水理・物質移動特性評価および地下水年代測定技術に関する研究

地下水の年代測定技術および物質移動の現象の理解やそれに関わるパラメータを取得するための調査技術について、地質環境への適用性の確認を目的として、電力中央研究所との共同研究を実施している。

2015年度は、深度300mボーリング横坑（換気立坑）において、トレーサー試験装置の原位置での適用性を確認するために、単孔式のトレーサー試験および2本のボーリング孔間のトレーサー試験を実施した（図3-1：12MI31号孔，12MI37号孔）。その結果、今回使用したトレーサー試験装置および試験手法を適用することにより、岩盤中の物質移動評価のためのパラメータ（割れ目幅、坑道周辺の動水勾配、分散長など）を取得できることが確認できた。さらに、深度500m研究アクセス南坑道において、2本の新規ボーリング調査を実施し（図3-1：15MI52号孔，15MI53号孔）、透水性割れ目の分布や連続性などを評価するためのデータを取得した。

また、地下水年代測定技術に関する研究では、地下水年代測定技術の高度化および研究坑道掘削に伴う地下水流動の変化の評価手法の開発のために、主に研究坑道から掘削したボーリング孔から地下水を採取し、地下水中の水素・酸素安定同位体（ $2\text{H}/^1\text{H}$ ， $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ），地下水中の天然放射性元素（ ^3H ， ^{14}C ， ^{36}Cl ），希ガス濃度（ ^4He ），地球温暖化ガス（CFCs(フロン)， SF_6 (六フッ化硫

黄))を調査した。その結果、研究坑道掘削に伴う地下水流動の変化については、研究坑道周辺の水圧低下に伴う浅層水の浸透割合の評価には、水素・酸素安定同位体 ($^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) や SF_6 が有効である可能性が示された。また、地下水中の ^{14}C を用いた年代測定について、測定精度の向上を目的として、地下水の前処理方法の改善を行った。

2016年度は、深度300mステージにおいて2014年度までに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、深度500mステージにおいて、新たに数本のボーリング調査に着手する。

地下水年代測定技術に関する研究では、2015年度に引き続き地下水年代測定技術の高度化や研究坑道掘削に伴う地下水流動の変化の評価手法の開発のために、研究坑道内や地上からのボーリング孔において地下水の採水、地下水中の天然放射性元素などの分析を継続して実施する。

④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。

2016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。

⑤スイス放射性廃棄物管理協同組合 (Nagra) : 超深地層研究所計画における調査計画の立案・実施に関する技術的支援

Nagraがこれまでに蓄積してきたサイト特性調査、地下研究施設 (グリムゼル原位置試験場やモンテリ試験場など) での調査計画および管理運営に関する経験などに基づいて、超深地層研究所計画で実施する地質環境調査に対する技術的な助言や、研究成果のレビューなどを実施してきた。

2015年度は、埋め戻し材の管理指標に用いる密度の測定方法としての土壌水分計測の適用などについて情報交換を行った。

2016年度も、引き続き埋め戻し材の管理指標に用いる密度の測定方法としての土壌水分計測の適用などについて情報交換を行う。

⑥国立大学法人京都大学・株式会社大林組 : 粘性流体注入に伴う周辺岩盤への影響に関する研究

本共同研究では、グラウトや二酸化炭素といった粘性流体が岩盤内に注入された際の亀裂などの不連続面の力学的挙動を解明することを目的として、原位置における注入試験を実施する。

2016年度は、主に瑞浪超深地層研究所の深度500m研究アクセス北坑道内において実施した粘性流体の注入試験結果の解析評価を実施する。

⑦国立大学法人静岡大学 : 大深度地球化学モニタリング技術に関わる研究

地下深部における地球化学特性のモニタリング技術の高度化を目的として、チップ式化学電極を利用した地下水の物理化学パラメータ測定技術の開発、瑞浪超深地層研究所での原位置適用試験を実施する。

2016年度は、光ファイバを介したチップ式化学電極へ給電技術の検討を継続する。

⑧国立大学法人東京大学：地下環境の形成に関わる微生物プロセスの評価技術の研究

地下深部における地球化学特性や物質移動に関わる微生物特性や微生物特性を反映する地下水、鉱物の分析、解析技術の開発を行うとともに、それらを活用した原位置試験を実施する。

2016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、同位体組成などの分析を行う。

⑨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

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などのモデル化・解析手法に関する共同研究を2016年度に開始する。

2016年度は、DFNモデルの構築に用いる調査データとその適用方法や解釈、モデル化方法についての検討を行うとともに、それらの相互関係・作業フローを整理する。また、瑞浪超深地層研究所で取得された調査データに基づきDFNモデルを構築することで、調査の実施からDFNモデル構築の各作業段階における不確実性や課題の抽出、DFNモデルの構築に有効な調査データを整理する。

⑩鹿島建設株式会社：地中レーダによる坑道周辺岩盤における水理特性評価に関する研究

本研究は、坑道周辺岩盤の水理特性（水の通り易さや水みちとなる割れ目の連結性、割れ目内の水分状態）を、水分に敏感な地中レーダを適用して非破壊的に評価するための手法の開発を目的とする。

2015年度は、深度500m研究アクセス南坑道において地中レーダによる計測を行い、本手法が坑道近傍の水みちとなる割れ目の評価に適用可能であることを確認した。

2016年度は、2015年度に実施した計測結果の解析を行うとともに、必要に応じて追加調査を行う。

⑪清水建設株式会社：逆解析を用いた地下水流動のモデル化・解析に関する研究

本研究では、限られた調査データを有効に活用して不均質な水理特性の空間分布を効率的に評価できるように、逆解析を組み込んだ地下水流動特性の評価手法に関する検討を行う。具体的には、複数の逆解析手法を用いた数値実験を実施し、解析手法の違いが解析結果に及ぼす影響についての分析と逆解析を実施する上での重要因子の抽出を行い、解析手法の高度化を図る。また、原位置調査データを用いた逆解析手法の適用性を確認しつつ、地下深部かつ広範囲の空間スケールを評価対象とした逆解析ツールを整備する。最終的には、逆解析を組み込んだ地下水流動特性の評価手法の方法論を示す。

2015年度は、瑞浪超深地層研究所周辺における水理地質構造を模擬した解析モデル（1km～数百m規模）を用いた数値実験を実施し、広範囲を対象とした逆解析の適用条件として、推定対象とする水理地質構造を絞り込むとともに、その水理地質構造の代表的な水理特性を推定することが有効であることを示した。

2016年度は、原位置で実施した揚水試験に伴う水圧変化データを用いた逆解析を実施することで、逆解析手法の適用性確認・高度化を進めるとともに、逆解析を組み込んだ地下水流動特性の評価手法の方法論について検討を行う。

⑫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する。

2015年度は、2014年度に引き続き、センサーおよび接着剤の長期耐久性を確認する試験を継続し、約3箇月の間隔で4月、8月、10月、1月に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。

2016年度は、2015年度に引き続き、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。

(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、情報交換などを行っている。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など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。

2015年度は、2014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、東濃地震科学研究所が2006年度以降に研究坑道に設置した傾斜計、地震計、応力計、重力計により行っている連続観測や観測装置のメンテナンスなどについて協力した。また、東濃地震科学研究所は、深度200mボーリング横坑（換気立坑）にボーリング孔を掘削して応力計を設置し、応力変動などの観測を開始した。原子力機構はこれらの作業に協力した。

2016年度は、東濃地震科学研究所が実施するこれらの観測、メンテナンスおよび新たな観測装置設置などのための協力を継続する。

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内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）の一部を貸与することとした。

2015年度は、原子核乾板の深度200mボーリング横坑（主立坑）への設置・保管作業および原子核乾板を用いた地下空間におけるミュー粒子（以下、 μ 粒子）観測に協力した。

2016年度は、深度200mボーリング横坑（主立坑）への資材の搬出入やメンテナンス作業および原子核乾板を用いた地下空間における μ 粒子観測のための協力を継続する。

③学校法人早稲田大学

早稲田大学理工学術院総合研究所では、名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構・現象解析研究センターと協働し、わが国がノーベル物理学賞を受賞している素粒子関連の研究を進めており、現在、理論的にその存在が予測されているダークマター（暗黒物質）の実験的検証に取り組んでいる。2015年度は、この研究に関する地下空間利用への予察的な知見を得ることを目的として、研究所用地の地上および深度100m研究坑道内で短期間の環境中性子観測を実施した。この観測結果の一部は、2016年3月の日本物理学会で報告された²³⁾。

2016年度は、2015年度に引き続き、早稲田大学から研究所の研究坑道内などでの環境中性子観測の実施要請があった場合は、これらの観測に協力する。

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2016年度に実施する調査研究などの内容を年度計画書としてまとめた。

本年度計画は、超深地層研究所地層科学研究基本計画¹²⁾およびこれまでの調査研究で得られた成果・課題などを踏まえたものであり、この計画に沿った研究の実施は、地層処分技術に関する研究開発の着実な進展に資するものであると考える。

参考文献

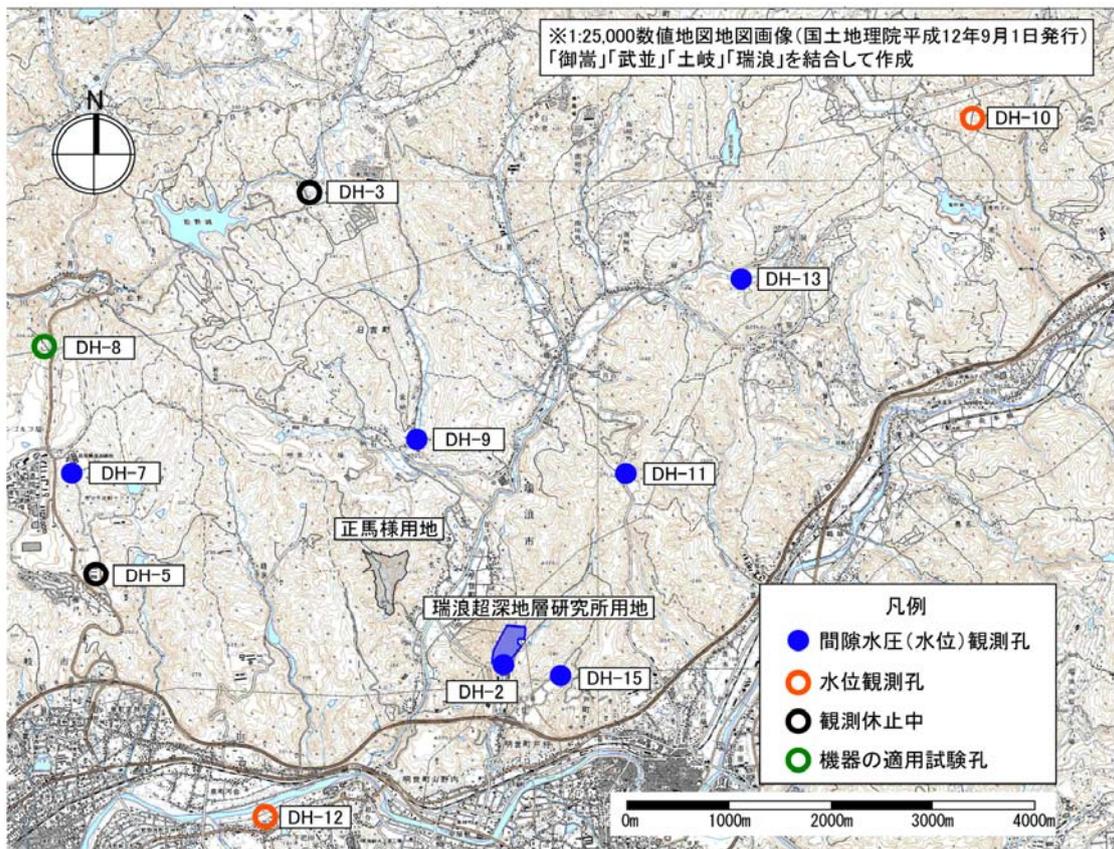
- 1) 原子力委員会：原子力政策大綱, 2005.
- 2) 原子力委員会：原子力の研究, 開発および利用に関する長期計画, 1994.
- 3) 動力炉・核燃料開発事業団：超深地層研究所地層科学研究基本計画, PNC TN7070 96-002, 1996, 20p.
- 4) 原子力委員会：原子力の研究, 開発および利用に関する長期計画, 2000.
- 5) 核燃料サイクル開発機構：超深地層研究所地層科学研究基本計画, JNC TN7410 2001-009, 2001, 100p.
- 6) 核燃料サイクル開発機構：超深地層研究所地層科学研究基本計画, JNC TN7410 2001-018, 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
- 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>
- 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) 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.
 - 14) 核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—分冊1深地層の科学的研究—, JNC TN1400 2005-014, 2005, 415p.
 - 15) 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.
 - 16) 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.
 - 17) 糸魚川淳二：瑞浪地域の地質, 瑞浪市化石博物館専報, no.1, pp.1-50, 1980.
 - 18) 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 (Monogr. Assoc. Geol. Collab. Japan), no.24, pp.143-155, 1982.
 - 19) 國丸貴紀, 森川佳太, 舘 幸男, 久野義夫, 細谷真一, 下田紗音子, 加藤博康, 中澤俊之, 生瀬博之, 久保田政子：花崗岩試料を用いた収着・拡散試験および間隙率測定, JAEA-Data/Code 2012-013, 2012, 96p.
 - 20) 濱 克宏, 見掛信一郎, 西尾和久, 川本康司, 山田信人, 石橋正祐紀, 村上裕晃, 松岡稔幸, 笹尾英嗣, 真田祐幸, 大貫賢二, 佐藤成二, 別府伸治, 尾上博則, 竹内竜史, 三枝博光, 大森一秋, 長谷川 隆, 宗本隆志, 湯口貴史, 岩月輝希, 岩崎理代, 池田幸喜, 堀内泰治, 佐藤稔紀, 大澤英昭, 小出 馨, 杉原弘造：超深地層研究所計画 年度報告書（2013年度）, JAEA-Review 2014-038, 2014, 137p.
 - 21) Munemoto, T., Ohmori, K. and Iwatsuki, T. : “Rare earth elements (REE) in deep groundwater from granite and fracture-filling calcite in the Tono area, central Japan: Prediction of REE fractionation in paleo- to present-day groundwater, Chemical Geology, 417, 2015, pp.58-67.
 - 22) DECOVALEX : <http://www.decovalex.org/index.html>
 - 23) 菊地崇矩, 鈴木優飛, 田中雅士, 寄田浩平：液体シンチレータを用いた環境高速中性子エネルギースペクトルの算出, 日本物理学会講演概要集 第71回年次大会(2016), 第71巻, 第1号, 2016.

付録 1 広域地下水流動研究 2016 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・解析技術など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（ボーリング調査など）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などに係わる調査／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。

2016 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: 広域地下水流動研究 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
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
角加減	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電表面電荷	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	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	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 =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	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
フォト	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=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	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

