



超深地層研究所
地層科学研究基本計画

Master Plan of the Mizunami Underground Research Laboratory Project

東濃地科学研究ユニット
Tono Geoscientific Research Unit

地層処分研究開発部門
Geological Isolation Research and Development Directorate

June 2010

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

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

超深地層研究所 地層科学研究基本計画

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門
東濃地科学研究ユニット

(2010年3月5日受理)

超深地層研究所計画は、独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）が岐阜県瑞浪市で主に結晶質岩において実施している深地層の科学研究（地層科学研究）計画である。地層科学研究は、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一部であり、地層処分研究開発の基盤となる研究である。本計画については、1996年の基本計画（超深地層研究所地層科学研究基本計画）策定以来、原子力長期計画の改訂や主要な研究実施場所の変更などを受けて、適時見直しを行ってきた。

今般、2009年に国の地層処分に関する基本方針と計画が改定され、処分予定地の選定における地上からの精密調査技術の基盤整備に時間的な余裕が生じる一方で、地層処分事業推進の前提として重要な国民の理解促進に貢献するため地下施設の整備拡充が急務となった。このため原子力機構は、現行の基本計画を改訂し、超深地層研究所の深度約300mに水平坑道を新たに整備することとした。

今回の改訂では、すでに主要な調査研究が終了している地表からの調査予測段階（第1段階）の成果の概要を示すとともに、原子力機構が構築した統合化データフロー（核燃料サイクル開発機構、2005）の個別目標に基づいて調査研究項目を整理するとともに、研究坑道の掘削を伴う調査研究段階（第2段階）および研究坑道を利用した調査研究段階（第3段階）の調査研究項目を見直した。

Master Plan of the Mizunami Underground Research Laboratory Project

Tono Geoscientific Research Unit

Geological Isolation Research and Development Directorate

Japan Atomic Energy Agency

Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received March 5, 2010)

The Japan Atomic Energy Agency is implementing scientific studies of the deep geological environment and development of technologies to enhance the reliability of geological disposal technology ('geoscientific research') at Mizunami Underground Research Laboratory (MIU). The aims of the MIU Project are to establish techniques for investigation, analysis and assessment of the deep geological environment, and to develop a range of engineering techniques for deep underground application, with main focus on the crystalline rock with fresh ground-water condition. The master plan of the MIU project has been revised several times since 1996, reflecting the revision of "Long-term plan for Research, Development and Utilization of Nuclear Energy" and relocation of the research site.

In 2009, revisions of the basic policy about fundamental strategy for geological disposal have resulted in the extension of the time range to reach the milestone on the establishment of methodologies for the detailed investigation. On the other hand, increasing role of the underground research facility as a platform for achieving the public acceptance of the geological disposal has been recognized. Thus JAEA has intended to construct an additional research gallery at a depth of 300m of the MIU and to revise the master plan therein.

In this revision, major results of the Phase I (surface-based investigation) have highlighted and investigations for the Phase II (construction) and Phase III (operation) are restructured from the view point of their relative importance—to the implementation of the geological disposal programme.

Keywords: Mizunami Underground Research Laboratory Project, MIU Project,
Master Plan, Geological Disposal of HLW

目 次

1. 超深地層研究所設置の背景	1
1.1 超深地層研究所の位置づけ	1
1.2 超深地層研究所の意義	1
1.3 超深地層研究所の設置場所の概要	2
2. 超深地層研究所計画の目標	4
2.1 全体目標	5
2.2 段階目標	6
2.3 成果の反映	8
3. これまでの調査研究の概要	10
3.1 広域地下水流動研究の概要	10
3.2 地上からの調査予測研究段階（第1段階）の概要	11
3.3 研究坑道の掘削を伴う研究段階（第2段階）の概要	11
3.4 正馬様用地における調査研究の概要	14
4. 今後の調査研究計画の概要	15
4.1 研究所用地における調査研究	15
4.1.1 研究坑道の掘削を伴う研究段階（第2段階）	17
4.1.2 研究坑道を利用した研究段階（第3段階）	25
4.2 正馬様用地における調査研究	32
5. 超深地層研究所施設の概要	33
5.1 研究坑道の概要	33
5.2 地上施設の概要	33
6. 超深地層研究所計画の運営	34
6.1 超深地層研究所計画の組織体制	34
6.2 超深地層研究所計画のスケジュール	34
参考文献	36

Contents

1. Background of the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU)	1
1.1 Japanese Government policy position	1
1.2 Relevant geoscientific research	1
1.3 Project site	2
2. Goals of the MIU Project	4
2.1 Goals of entire project	5
2.2 Goals of Phase I, II, III	6
2.3 Application of the MIU research results	8
3. Overview of investigations executed up to now	10
3.1 Regional Hydrogeology Studies Project	10
3.2 Phase I (Surface-based Investigation Phase) investigation	11
3.3 Phase II (Construction Phase) investigation	11
3.4 MIU Project in the Shobasama Site	14
4. Overview of the investigation plan	15
4.1 Investigation plan in the MIU Construction Site	15
4.1.1 Phase II (Construction Phase) investigation	17
4.1.2 Phase III (Operation Phase) investigation	25
4.2 Investigation plan in the Shobasama Site	32
5. Overview of the facilities of the MIU	33
5.1 Research galleries	33
5.2 Ground facilities	33
6. Management of the MIU Project	34
6.1 Organization	34
6.2 Schedule	34
Reference	36

まえがき

超深地層研究所計画（以下、本計画）は、「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」（以下、原子力長計）の原子力長計（1994）や原子力長計（2000）、および「原子力政策大綱」（原子力委員会，2005，以下、原子力政策大綱）が定める深地層の研究施設計画のひとつとして、独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）が、前身である動力炉・核燃料開発事業団および核燃料サイクル開発機構の時代を通して、岐阜県瑞浪市で結晶質岩をおもな研究対象として進める深地層の科学的研究（以下、地層科学研究）計画である。

本計画では、1996年11月に策定した「超深地層研究所地層科学研究基本計画」（動力炉・核燃料開発事業団，1996；以下、基本計画（1996））に基づき、瑞浪市明世町（あきよちょう）正馬様洞（しょうばさまぼら）の原子力機構用地（以下、正馬様用地）における地層科学研究として、研究坑道（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）の建設に先立つ地表からの調査研究を進めてきた。

その後、原子力長計（2000）で示された「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」との原子力機構の役割をふまえて、2001年4月に基本計画（1996）を改訂した（核燃料サイクル開発機構，2001；以下、基本計画（2001））。さらに、原子力機構では、2002年1月17日に瑞浪市と瑞浪市明世町の市有地（瑞浪超深地層研究所研究用地，以下、研究用地）の賃貸借契約を締結し、ここに、超深地層研究所とその付帯施設を設置することとした。これを受け原子力機構では、2002年2月に基本計画（2001）を改訂する（核燃料サイクル開発機構，2002；以下、基本計画（2002））とともに、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）（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着実に進めてきた。

2008年3月には「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）の改訂に関する閣議決定がなされ（同年4月施行）、研究開発機関の役割として「深地層の研究施設の公開等を通じた国民との相互理解促進への貢献」があらためて明示されるとともに、処分事業の実施主体による精密調査地区の選定時期が「平成20年代前半」から「平成20年代中頃」に変更された。これを受け工事工程や研究成果の費用対効果における最大限の合理化を図りつつ、「独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画（中期計画）（平成17年10月1日～平成22年3月31日）」（日本原子力研究開発機構，2005）に掲げた中間深度（地下500m程度）までの調査研究目標の確実な達成を目指すとともに、地下での調査研究や国民との相互理解促進の場として、新たな水平坑道を、超深地層研究所の深度300mに整備することとした。この水平坑道においては、より深部の地質環境と比較して割れ目が多く、湧水の可能性が高いと予想され、深部での調査研究の成果と比較することにより、深度による地質環境の相違や関連する調査・解析手法の最適化などに関する知見を蓄積できるという利点を有している。また、研究坑道を公開することにより、見学者が“地下深部”を体験するとともに、そこを利用するための技術の存在を知ることなどにより、地層処分に対する理解の増進が期待できる。

深度300mにおける新たな水平坑道の整備を背景に、原子力機構では基本計画（2002）を見直すこととした。なお基本計画については、超深地層研究所における地層科学研究や地層処分研究開発の進展を踏まえ、今後も適宜見直していくこととする。

This is a blank page.

1. 超深地層研究所設置の背景

1.1 超深地層研究所の位置づけ

原子力委員会は原子力長計（2000）において、高レベル放射性廃棄物の最終処分の実施に向けて必要な取り組みや関係機関の役割分担を定めた。その中で、原子力機構（当時、核燃料サイクル開発機構）については、「これまでの研究開発成果を踏まえ、今後とも深地層の研究施設、地層処分放射化学研究施設等を活用し、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」とし、「深地層の研究施設は、学術研究の場であるとともに、国民の地層処分に関する研究開発の理解を深める場としての意義を有し、その計画は、処分施設の計画と明確に区分して進めることが必要である」とした。さらに、原子力委員会は2005年10月の原子力政策大綱において、原子力機構を中心とした研究開発機関に対し、「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着実に進めるべき」ことを定めた。また、全体計画は、2010年度頃までの基盤研究開発の全体戦略や関係機関における具体的な研究開発計画を定め、原子力機構には深地層の研究施設を用いた地表からの調査・解析・評価技術を体系的に整備することなどを課した。

これらに基づき、原子力機構東濃地科学センター（以下、東濃地科学センター）では、原子力政策大綱などに示された「深地層の科学的研究」を進めてきた。地層科学研究は、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一部であり、地層処分研究開発の基盤となる研究である。

超深地層研究所は、上記の原子力長計（2000）や原子力政策大綱、ならびに全体計画に示された深地層の研究施設のひとつであり、結晶質岩（花崗岩）をおもな対象としている。

1.2 超深地層研究所の意義

原子力機構では、わが国の地質環境の特徴を考慮し、堆積岩ならびに結晶質岩を対象として、東濃鉱山とその周辺（1986年4月～2004年3月）ならびに釜石鉱山（1988年4月～1998年3月）において、地層科学研究を実施した。東濃鉱山とその周辺においては、おもに堆積岩（新第三系瑞浪層群）を対象に、また釜石鉱山においては結晶質岩を対象に、地質・地質構造、地下水の流動特性、地下水の地球化学特性、岩盤の力学特性ならびに岩盤中での物質移動特性などに関する研究を実施した（核燃料サイクル開発機構、1999a 1999b）。

これらの地層科学研究は、地質環境に関する既存の情報や鉱山における既存坑道などを活用して行われ、深部地質環境に関する新たな情報・知見とともに、地表または坑道から深部地質環境を調査・解析・評価するための要素技術などの様々な成果が得られた（たとえば、核燃料サイクル開発機構、2000）。超深地層研究所計画においては、これらの成果を積極的に活かしていくことが可能である。特に、広域地下水流動研究の研究実施領域は、研究坑道を展開している研究所用地を含むことから、研究成果を相互に活用することにより、広い領域から研究坑道を展開する研究所用地までのスケールを対象とした調査・解析・評価手法の適用性を段階的に確認することが可能となる。

超深地層研究所における地層科学研究は、研究坑道の建設に先立って開始され、研究坑道の建設中および建設後と段階的に進められる。この間、深部地質環境の推定とその妥当性の評価が繰り返して行われる。また、研究坑道の掘削が地質環境に与える影響を含めた地下深部における様々

な現象が詳細に把握される。

このように超深地層研究所を建設しつつ地層科学研究を進めていくことにより、天然の地質環境が研究坑道の掘削の影響などにより変化していく状況について段階を追って詳細に把握することができる。また、研究坑道を適切に設計・施工することにより、調査研究の対象として重要な割れ目や断層などへのアクセスが容易になる。これにより、前段階で適用した調査・解析・評価手法や当該段階において適用すべき手法の妥当性などについて評価することが可能となる。ここで得られる知見は、実施主体が行う処分事業の各段階において実施する調査や成果の評価に資するものとなる。このような総合的かつ段階的な研究は、天然の地質環境を出発点とする超深地層研究所計画において初めて可能となるものである。

1.3 超深地層研究所の設置場所の概要

超深地層研究用地は、岐阜県瑞浪市明世町にある東濃研究学園都市インターガーデン内の瑞浪市市有地（約 7.5ha）に位置する。この地域は、領家帯に属する深成岩類と美濃帯に属する中生層（堆積岩類）との境界部にあたる。超深地層研究所は、この地域の基盤をなす深成岩類のひとつの岩体である白亜紀花崗岩体およびその上位の第三紀堆積岩である瑞浪層群中に建設されている。（図 1.3）。このうち、本計画で主な対象としている白亜紀花崗岩体（土岐花崗岩、以下、花崗岩）は我が国に広く分布する岩石である。

この地域は超深地層研究所の設置場所として、以下のような特徴および利点を有している。

- ・地層科学研究の対象として重要な地下水（淡水系）、断層などの地質学的特徴を有する地層がアクセス可能な位置に存在する。
- ・活断層の直接的な影響が少なく、安定した地質環境条件における地層科学研究に適している。
- ・本州中央部に位置し、交通の便が良く、自然環境や生活環境に恵まれている。
- ・極限環境をテーマとした東濃研究学園都市構想が自治体により進められている。
- ・原子力機構が 30 年余にわたり国内外においてウラン資源の調査研究などをおおして培ってきた経験や情報など（たとえば、動力炉・核燃料開発事業団，1995）が蓄積されているとともに、地質環境を調査評価する上での知見や技術的ノウハウを有する研究者、技術者が集合しており、必要なインフラストラクチャが整っている。

以上のことから、これらの研究資源を地層科学研究に有効に活用できることが利点として挙げられる。

一方、正馬様用地については、これまでのボーリング調査などにより、地下数百 m の花崗岩（結晶質岩）中に存在する月吉断層をはじめとした地質環境に関する知見や調査・解析手法の適用事例が蓄積されてきており、今後もボーリング孔を利用した地下水のモニタリングを継続することにより、月吉断層などを含む花崗岩中の地下水流動特性を把握するための場として活用していく。

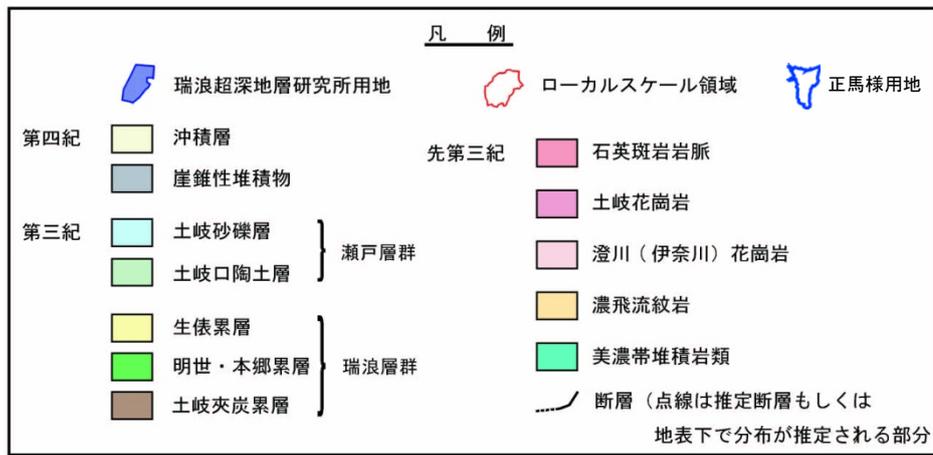
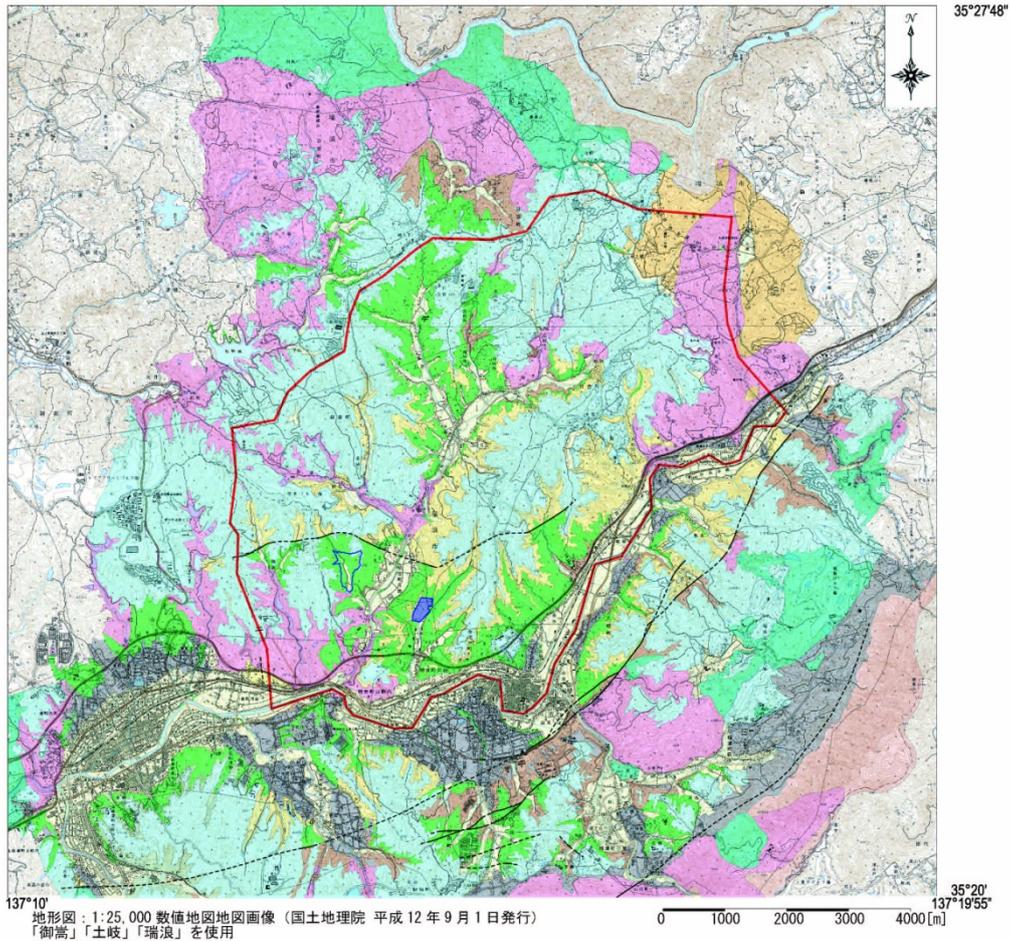


図 1.3 超深地層研究所周辺の地質概要

2. 超深地層研究所計画の目標

超深地層研究所における地層科学研究は、研究坑道の建設に先立って開始し、施設の建設中からその完成後までの約 20 年をかけて段階的に進め、これまでに東濃鉱山とその周辺ならびに釜石鉱山において進めてきた地層科学研究の一層の拡充を図る計画である（超深地層研究所計画のスケジュールについては 6.2 を参照）。1.2 に述べたように、段階的に研究を進めていくことにより、天然の地質環境と、研究坑道の掘削がそれに与える影響について把握することが可能となる。研究の過程で適用する調査・解析手法を整理し、遭遇するさまざまな事象やその対処法を整理し、知識として蓄積していくことが重要である。超深地層研究所における地層科学研究については、研究坑道の建設工程やこれに伴う調査研究の課題、対象、スケール（図 2.1）などの違いを考慮し、以下の 3 段階に区分して進めていくこととする。

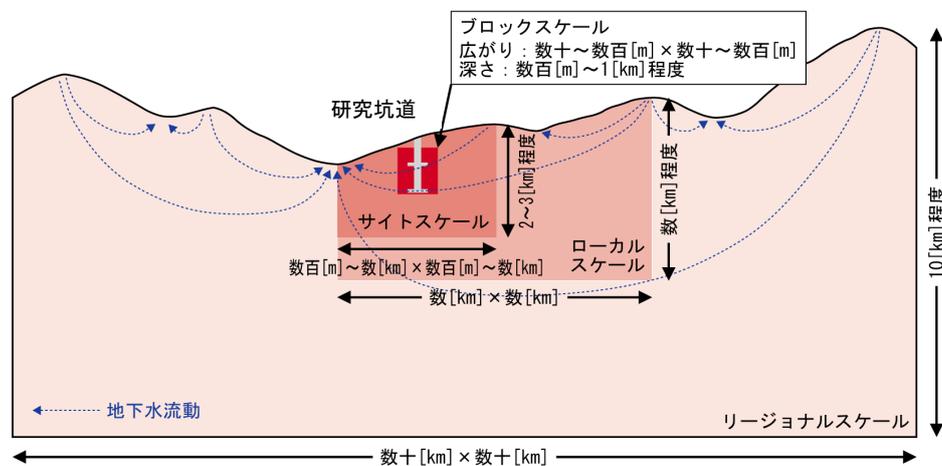


図 2.1 空間スケール概念

- 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
- 第 3 段階：研究坑道を利用した研究段階

超深地層研究所における地層科学研究において取得される地質環境特性などに関する情報や知見は、場に固有なものであり、日本に分布する結晶質岩に共通するとは限らないが、わが国に実存する特定の地質環境の調査・解析・評価に関する総合的なものである。前述の地表または坑道からの深部地質環境を合理的かつ効果的に評価するための調査・解析・評価手法は、このような総合的な情報や知見などにより、研究用地および正馬様用地を事例として整備することができると考えられる。また、ここで得られた情報や知見などは、実際の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、処分事業の実施と安全規制の技術基盤の整備に資すると共に、国民の信頼感の醸成に貢献するものである。

なお、空間的なスケールの区分に関しては、東濃地域における調査研究では、地層処分にとって重要な地質環境特性を段階的に理解するために、4 つのスケール（リージョナル、ローカル、サイト、ブロック）を設定している（図 2.1）。ここでリージョナルスケールは、ローカルスケールを包含し、その境界条件を規定する領域であり、ローカルスケールは広域地下水流動研究の

研究実施領域の範囲に、サイトスケールおよびブロックスケールは超深地層研究所計画における研究実施領域の範囲に相当する。リージョナルスケール、ローカルスケールにおける調査研究はサイトおよびブロックスケールとは独立して実施されてきたものであるが、得られた成果を相互に活用することにより、各スケールの調査研究を合理的に進めている。

また、超深地層研究所計画における全体目標とともに、上記のそれぞれの段階においても研究目標（段階目標）を設定する。2.1 および 2.2 にそれぞれの目標について示す。

2.1 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

「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」は、地質環境の特性として重要な地下水の流動特性、地下水の地球化学特性、岩盤の力学特性、岩盤中での物質移動特性、研究坑道の掘削が周辺の岩盤に与える影響などを明らかにしていくものであり、超深地層研究所計画を通じて、深部地質環境への理解を深めながら、これを体系的に調査・解析・評価するための技術基盤を整備していく。本計画では、地層処分にとって重要な地質環境の特性を安全評価および地下施設的设计・施工の観点から、調査研究の個別目標として整理し、その個別目標に基づいて課題を設定した（表 4.1-1；例えば、核燃料サイクル開発機構，2005）。これらの課題に対して、特定の領域の地表または研究坑道から深部地質環境に関する情報を取得し、信頼性の高い解析・評価手法を用いて、深部地質環境に関し品質の保証された評価を行うため、「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」の一連のプロセスを繰り返す（以下、繰り返しアプローチ）。また、これを実践する上で「調査→データの解釈→モデル化・解析」の具体的な道すじを系統的なデータの流れとして整理した統合化データフロー（核燃料サイクル開発機構，2005 など）に基づいて調査研究を進める。これらのプロセスを、段階ごとに、あるいはひとまとまりの調査研究ごとに繰り返して行うことにより、対象とする地質環境と空間スケールにおいて評価すべき項目が抽出され、情報の過不足や不確実性（OECD/NEA，1991）などが明確にできると考えられる。ここで重要なことは、これらの知見をフィードバックし、さらに一連のプロセスを繰り返すことにより、評価すべき項目の重要度を段階的に把握することである。また、調査の種類・量、解析・評価の手法と結果の精度（深部地質環境の理解度）との関係（何をどこまで実施し、どのような手法でどのように解釈すれば、どの程度まで理解できるのか）を事例的に示すことである。これにより、適用した一連の技術の有効性を確認し、深部地質環境を評価するための調査・解析・評価手法（調査・解析・評価の組み立て方）を段階的に整備する。また、国外における同様の調査研究成果との比較検討などをおして、整備した調査・解析・評価手法の妥当性を確認するとともに、適宜、それらの手法の見直しも行う。最終的には、対象とする地質環境および空間スケールにおいて、地表または研究坑道から深部地質環境を合理的かつ効果的に評価するための、調査・解析・評価手法を例示する。

②深地層における工学技術の基盤の整備

超深地層研究所計画においては、深地層における工学技術の基盤の整備として、既存のあるいは新たに開発される工学技術を特定の地質環境に適用することにより、地下深部に研究坑道を設計し安全かつ合理的に施工・維持・管理できることを確認する。

本計画では、既存の工学技術を研究用地において適用し、深部地質環境に関する取得情報お

よび推定結果に基づき、地下深部における岩盤の長期健全性、研究坑道の力学的安定性や耐震安定性などを解析・評価する。これにより地質環境の変動幅や実施する調査研究に対応可能な研究坑道の詳細設計および施工計画の策定が可能であることを例示する。さらに、研究坑道を実際に施工・維持・管理し、あるいは研究坑道の掘削による地質環境への影響の修復・軽減のために適用した工学技術の有効性を確認する。実際の地質環境が推定結果と大きく異なる場合や、想定外の事象（大量出水や山はねなど）に遭遇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できることが重要である。そのため、必要に応じて湧水抑制対策などの施工対策技術、施工管理システムや工学材料などの開発・改良を行う。研究坑道においては、研究坑道内の研究環境の維持・管理および安全確保の技術の適用性を確認し、これに関わる管理体系を構築する。

本目標を達成することにより、地下深部に所要の施設を建設し安全に研究活動などが可能であることを実証することができると期待される。

2.2 段階目標

(1) 地表からの調査予測研究段階（第1段階）の目標

第1段階における段階目標を以下に示す。なお、第1段階は2005年度末で終了している。

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建設前の深部地質環境の把握

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、今後の調査研究の初期条件として研究坑道建設前の天然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）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）の研究坑道建設前の状態を推定する。

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、想定外の事象（大量出水や山はねなど）に遭遇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。

(2) 研究坑道の掘削を伴う研究段階（第2段階）の目標

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）を基に、取得した情報の集約と解釈をとおして、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など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た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・管理にかか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、想定外の事象に遭遇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。

(3) 研究坑道を利用した研究段階（第3段階）の目標

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拡張による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、坑道掘削が地質環境に与えた影響を評価する。さらに、研究坑道からの調査研究や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、研究坑道の拡張に伴う研究坑道周辺の地質環境特性の変化を把握する。

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。また、実際の地質環境が推定結果と大きく異なる場合や、想定外の事象に遭遇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。

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、国が進める安全規制や原子力発電環境整備機構が行う処分事業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（に関する研究開発）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おり、地層処分の観点から重要な環境であると考えられることから、地層科学研究を行う環境として好適である。一方で、深度 300m 付近については、これまでの調査研究の結果、割れ目の多い、高透水性の岩盤であることが明らかとなっており、長期にわたる物質移動に関する調査研究や湧水抑制対策に関する研究開発を行う場所としては有利である。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による地質環境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、地上からの調査に関わる技術基盤の確立（地上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、安定性評価、掘削、施工対策、維持・管理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、想定外の事象に遭遇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、地層処分技術の開発における地層処分場の設計、建設ならびに操業にかかわる合理的かつ最適な手法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。

3. これまでの調査研究の概要

研究所用地における調査研究は、2002年から開始され、2009年度末現在、深度459.6m（主立坑）、459.8m（換気立坑）の立坑および当該深度までの水平坑道の掘削が完了している。

超深地層研究所計画の「地表からの調査予測研究段階（第1段階）」の成果については、2005年9月の「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－」（核燃料サイクル開発機構、2005）および2007年3月の「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」（三枝ほか、2007）（以下、第1段階報告書）に、広域地下水流動研究の成果とともに取りまとめられた。これらの報告書では、超深地層研究所計画の全体目標の1つである「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の開発」を目指し、第2次取りまとめ以降における研究開発の目標の1つである「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」に関する成果を記述した。具体的には、地表からの調査研究を段階的に進めながら、これまでに整備してきた地質環境の調査技術や評価手法などを適用していくことを通じて、その信頼性や適用性などを確認した。その過程で、地質環境への理解や取得する地質環境情報の精度の向上を図りつつ、予測に用いた地質環境モデルの妥当性の確認や調査・解析・評価技術の改良を進め、段階ごとに適用可能な技術として体系的に整理した。この体系化においては、調査によるデータ取得からモデル化や解析作業を経た評価に至るまでの、地質環境を理解するための一連の方法論を例示することに重点をおきつつ、あわせて、その過程で得られた経験（失敗例を含む）やノウハウを根拠とともに提示した。これは、処分事業の実施や安全規制を支える技術基盤となるものである。

東濃地域における結晶質岩を対象とした調査研究では、2章で示した4つの空間スケール（リージョナル、ローカル、サイト、ブロック）を設定している。さらに、ローカルおよびサイトスケールでは安全評価および地下施設の設計・施工として重要と考えられる技術基盤としての反映を念頭に調査研究の個別目標と課題を設定した（核燃料サイクル開発機構、2005；三枝ほか、2007）。この個別目標と課題に向けて、繰り返しアプローチを適用して様々な調査研究を進めている。以下に、これまでの調査研究の概要を示す。

3.1 広域地下水流動研究の概要

広域地下水流動研究は、ローカルスケールにおける調査研究を指すが、ここでは、この領域を設定するためのより広い領域（リージョナルスケール；図2.1）における既存情報に基づく解析についても示す。

リージョナルスケールの調査解析においては、ローカルスケールの研究実施領域を設定するために、深部地下水の涵養域から流出域までの地下水流動系に注目し、既存情報に基づく後背地地形と大規模な不連続構造を考慮した解析領域の異なる数段階の地下水流動解析を実施した。この結果推定された、研究所用地付近の深部地下水の流動系に基づいて研究実施領域を設定した。また、この妥当性については後述するローカルスケールの調査研究を通して確認した（核燃料サイクル開発機構、2005）。

ローカルスケールの調査研究は、リージョナルスケールの調査研究で予測した深部地下水の流動系および研究実施領域の設定の妥当性を実際の調査結果などに基づき評価すること、設定した個別目標と課題の解決に向けて深部地質環境を段階的に理解し地質環境モデルの信頼性を向上していくこと、さらに、サイトスケールの解析領域や境界条件を設定することに重点をおいて調査研究を実施した。ここでの調査研究は、①既存情報を用いた調査・解析、②空中および地表から

の調査・解析および、③ボーリング孔を利用した調査・解析の3つのステップに区分した。これらの段階を経て、地質環境モデルの構築と更新を行い地下水の流動経路を再評価しつつサイトスケールの解析領域などを設定した。加えて、地質環境モデルの信頼性向上に向けて、例えば地下水流動解析結果と地球化学モデルの整合性などについて考察した。

以上の調査研究の過程で得た知見に基づいて、実際の地質環境を対象とした調査・解析・評価の経験に基づく体系的な方法論の一端として、上記の3つのステップごとに調査から反映先にいたるデータの流れを系統的に記述した統合化データフローを提示した。

3.2 地上からの調査予測研究段階（第1段階）の概要

超深地層研究所計画の第1段階は、広域地下水流動研究が対象としたローカルスケールでの調査研究の成果に基づいて抽出された研究領域（サイトスケール）を主な対象とする。

サイトスケール（ブロックスケールを包含）の調査研究は、ローカルスケールの調査研究を踏まえ、設定した個別目標と課題の解決に向けて、より精緻に深部地質環境を段階的に理解し地質環境モデルの信頼性を向上していくことに重点をおいた。特に、地下水流動に大きく影響を与えている断層などの不連続構造、岩盤中の透水性と水みちとなる構造、地球化学特性、岩盤力学特性の分布に注目した。加えて、データ、モデルおよび解析結果に含まれる不確実性についても注目し、その幅の低減に向けた調査研究の進め方についても検討した。ここでの調査研究はローカルスケールと同様に、①既存情報を用いた調査・解析、②地表からの調査・解析および、③ボーリング孔を利用した調査・解析の3つのステップに区分した。これらの段階を経て、地質環境モデルの構築と更新を行い、地下水流動解析により研究所用地周辺の地下水流動経路を推定するとともに、応力・掘削解析などにより地下空洞周辺の力学・水理状態を予測した。また、第2段階以降の検討課題を抽出し、整理した。

3.3 研究坑道の掘削を伴う研究段階（第2段階）の概要

超深地層研究所の研究坑道は、主立坑（直径 6.5m）と換気立坑（同 4.5m）の2本の立坑と、2本の立坑をつなぐ予備ステージおよび詳細な調査研究を実施するための水平坑道群からなる。現状では詳細な調査研究を実施するための水平坑道は深度 300m に設置されており、今後、深度約 500m、および約 1,000m にも設置していく計画である。施設の概要は第5章に示す。

超深地層研究所の研究坑道については、2004年度から本格的な掘削が開始され、2009年度末現在、主立坑および換気立坑とも深度約 460m までの立坑および当該深度までの水平坑道の掘削が完了している。これに伴い、超深地層研究所計画の研究坑道の掘削を伴う第2段階の調査研究は、2004年度に開始され2009年以降も継続している。第2段階においては、第1段階と同様に、段階的に調査研究を進めながら、地質環境の調査技術や評価手法などの信頼性や適用性などを確認してきた。その過程で地質環境への理解や取得する地質環境情報の精度の向上を図りつつ、予測した地質環境モデルの妥当性の確認や調査・評価技術の改良を進め、実際の地質環境に適用可能な技術として体系的に整理することとしている。このため、設定した個別目標と課題に対して、坑壁地質調査、坑内湧水量の観測、地下水の化学分析、岩盤の初期応力測定などを実施している。さらに、主立坑の深度 180m および換気立坑の 191m の坑底からは、地表から深度 500m を超える深さまでのパイロットボーリング調査を実施したほか、研究坑道内および地表から掘削したボーリング孔を用いた地下水圧および水質のモニタリングなどを継続実施している（図 3.3-1）。

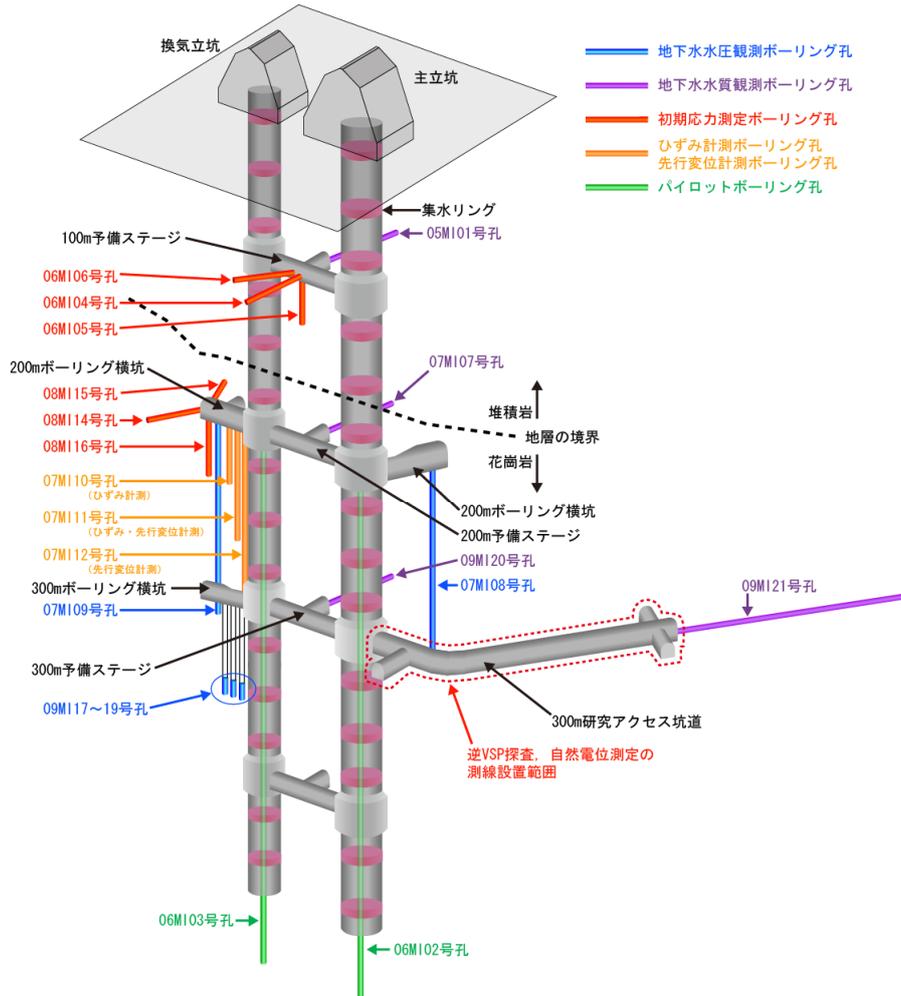
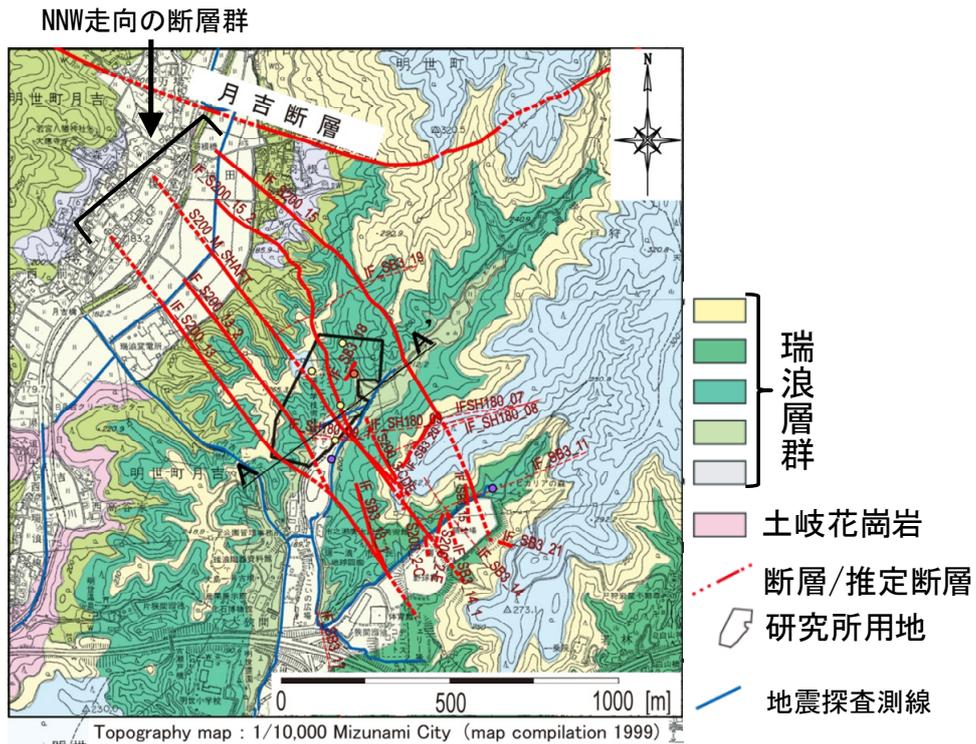
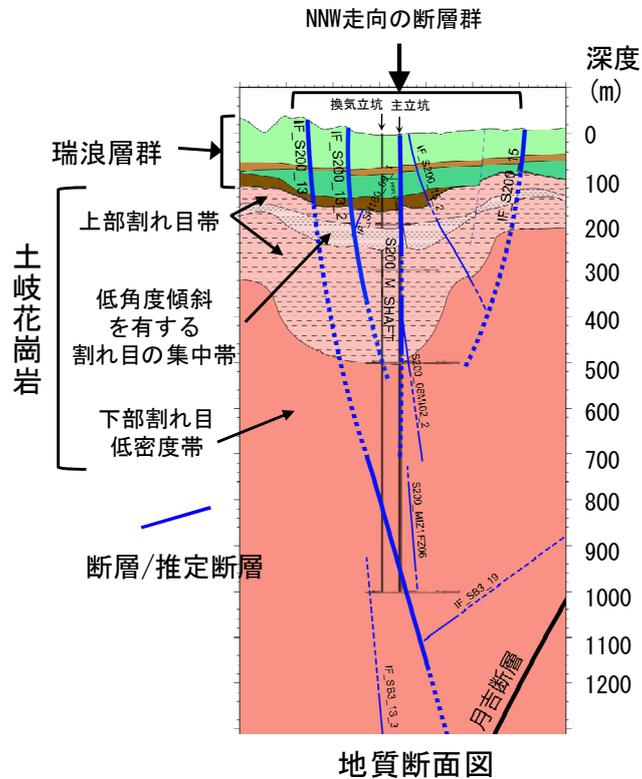


図 3. 3-1 第 2 段階の研究坑道におけるボーリングなどの調査位置図 (2009 年度末時点)

広域地下水流動研究から超深地層研究所計画の第 2 段階におけるこれまでの調査研究の結果、研究用地およびその周辺には高角度傾斜を有する NNW 走向の断層群が卓越しており (図 3. 3-2)、そのうち主立坑で確認された断層は、地下水の流動を規制する低透水性の断層であると推定されている (図 3. 3-3)。また、花崗岩中においては、水平割れ目が卓越する領域 (上部割れ目帯) が深度 460m 付近まで分布し、それ以深は比較的割れ目頻度の低い下部割れ目低密度帯が分布すること、上部割れ目帯のうち深度約 200~250m の間には、低角度傾斜を有する割れ目の集中帯が分布し、それらが透水性構造として機能していることが確認されている (図 3. 3-2)。さらには、地下水の塩素濃度などの水質の深度依存性なども把握されている。



地質平面図



地質断面図

図 3.3-2 研究所およびその周辺の地質・地質構造分布図 (Tsuruta et al., 2009 を基に修正) 平面図 (上), 断面図 (下) (深度 200m までの研究坑道の壁面地質調査, パイロットボーリング調査, 深度 200m ボーリング横坑などにおけるボーリング調査などの結果に基づく)

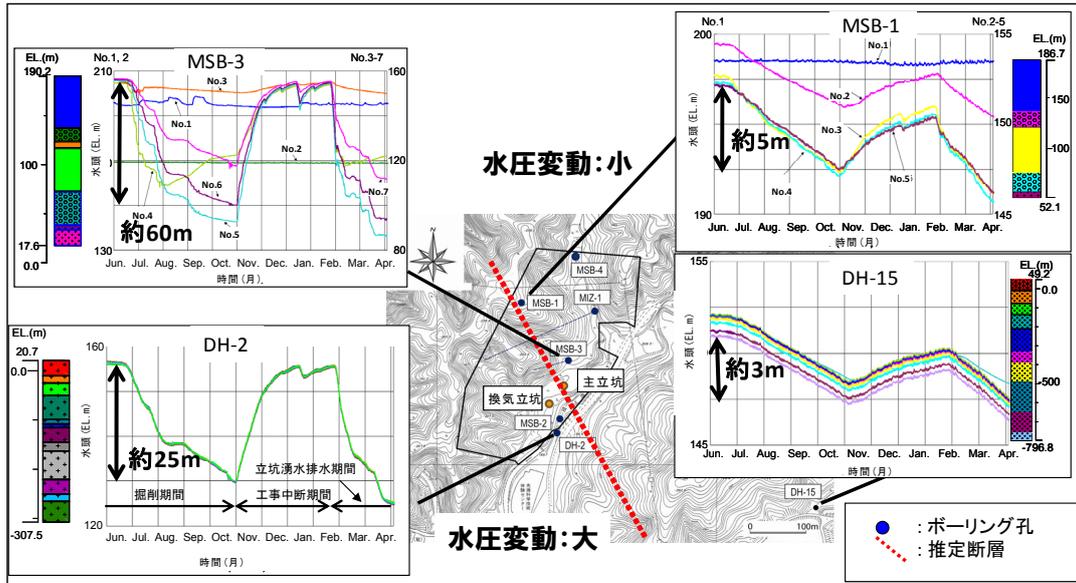


図 3.3-3 研究坑道の掘削に伴う地下水位（水頭）の変化（2005年6月から2006年3月末の変化。柱状図の色の違いは観測区間を示す。各区間と水頭変化を示す色は対応。Takeuchi et al., 2007 を基に修正）

（最も水頭が低下した時点の立坑深度は約170m。水頭の回復は掘削および排水の停止による。堆積岩を主な観測対象としたボーリング孔（MSB-1 および MSB-3）では堆積岩中の明世累層基底礫岩層の上位層を境に上下で地下水位変化の挙動が大きく異なる。また、用地中央部の推定断層の北東側と北西側では水圧の変動量と応答の傾向が異なることから、当該断層が低透水性と推定されている）

3.4 正馬様用地における調査研究の概要

正馬様用地においては、地下1,000m程度までの水理地質環境を明らかにするための調査手法の構築を目的として地表地質調査や物理探査、表層水理調査および6本の数百m～1,000mにおよぶボーリング調査などを実施した。現在はボーリング孔に設置した多区間水圧水質モニタリング装置による長期観測により、この地域の地下水流動場の境界をなしていると考えられる月吉断層の水理特性の調査研究を継続している。

4. 今後の調査研究計画の概要

4.1 研究所用地における調査研究

研究所用地における今後の調査研究の内容は、2. に示した「全体目標」と「段階目標」、および「成果の反映」に基づき、3. に示した「これまでの調査研究の概要」を勘案して設定していく。

深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備は、第1段階の調査研究において、「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（表4.1-1）（核燃料サイクル開発機構，2005；三枝ほか，2007）。第2段階および第3段階も同様の考え方で進めていくことを基本とする。

表 4.1-1 個別目標と課題

		安全評価					地下施設の設計・施工				環境影響評価	
個別目標	地質構造の三次元分布の把握	地下水の流動特性の把握	地下水の地球化学的特性の把握	物質移動の遅延効果の把握	希釈効果の把握	地下空洞周辺の力学・水理状態の把握	地下の温度環境の把握	地下施設建設が周辺環境へ与える影響の把握				
	課題	岩盤の地質学的不均質性の把握 被覆層の厚さの把握 移行経路として重要な構造の把握	動水勾配分布の把握 岩盤中の透水性分布の把握	酸化還元環境の把握 地下水のpH分布の把握 地下水の塩分濃度分布の把握	物質移動場の把握 岩盤の収着・拡散特性の把握	コロイド／有機物／微生物の影響の把握 帯水層中の流速分布の把握 帯水層の分布の把握	応力場の把握 岩盤の物理・力学特性の把握 地下空洞への地下水流入量の把握 EDZの分布／物理・力学特性の把握 不連続構造などの有無の把握	地温勾配分布の把握 岩盤の熱特性の把握	地下水の水質への影響の把握 地下水圧分布への影響の把握 地下水位分布への影響の把握	振動・騒音の把握		

安全評価に係る調査研究としては、「地質構造の三次元分布の把握」、「地下水の流動特性の把握」、「地下水の地球化学特性の把握」、「物質移動の遅延効果の把握」に関する調査・解析・評価を室内試験などと併せて実施していく。なお、「希釈効果の把握」は、主として第1段階において実施する調査研究項目から構成されており、第2段階以降の調査研究では重要性は低いと考えられる。このため、本目標に関する研究項目は今後の研究計画としては設定せず、必要に応じて実施することとする。

設計・施工に係る調査研究としては、「地下空洞周辺の力学・水理状態の把握」および「地下の温度環境の把握」に関する調査・解析・評価を室内試験などと併せて実施する。なお、「地下空洞周辺の力学・水理状態の把握」に関しては、研究坑道の掘削に伴って、力学・水理状態のみならず水質も変化することが想定されることから、関連する連成挙動の調査研究はこの個別目標の中で必要に応じて検討していくこととする。これらの個別分野の調査研究では、段階的に得られる調査結果に基づいて、繰り返しアプローチを適用しつつ、地質環境に関する重要な要素を抽出しこれらを段階的に明らかにするための方法論を構築していくとともに、前段階で構築した地質環

境モデルの妥当性を確認し必要に応じて更新する。

環境影響評価に関しては、「地下施設建設が周辺環境へ与える影響の把握」として、研究坑道の掘削が周辺の地質環境に与えた影響について、主として環境上の観点から必要に応じて検討するものであり、調査研究として特化した項目を設定する必要性は低いと考えられる。これらについては、検討の必要性が生じた場合に、別途実施している地下水圧や水質に関するモニタリングの結果や地表部での振動・騒音の観測結果などを参照し対応していくこととする。

さらに、個別の調査研究の成果に基づいて、それらを総合的に比較することにより、地質環境を把握する上で適切に重要な要素を抽出し、不確実性を効率的に低減する手法を構築する。なお、調査技術・機器開発やその高度化については、個別の調査研究の中で必要に応じて実施することとする。

深地層における工学技術の基盤の整備に関しては、深地層の工学技術の有効性の確認として、研究坑道の設計・施工・維持・管理に適用した工学技術の有効性を確認するとともに、研究坑道の安全な施工や適切な環境維持・補修に関わる技術の整備などを行う。

また、第2段階の調査研究においては、それまでの調査研究の結果に基づき、第3段階における調査研究項目を具体化する。

さらに、一連の調査研究で蓄積される経験や技術的ノウハウなどについては、その過程での判断根拠などとともに知識としてとりまとめていくこととする。

なお、表 4.1-1 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。

本節(4.1)においては、上記の実施項目を設定する上での基本的な考え方と実施内容の概要を示す。

4.1.1 研究坑道の掘削を伴う研究段階（第2段階）

研究坑道の掘削を伴う研究段階（第2段階）では、研究坑道の掘削と並行して、深部地質環境に関する情報を取得する。これらの情報に基づき、第1段階までに構築・更新した地質環境モデル（サイトスケール）の妥当性の確認や当該モデルの更新を行う。また、300m 研究アクセス坑道やボーリング横坑（図 3.3-1）などから掘削したボーリング孔を用いた長期観測結果などに基づき、研究坑道の掘削に伴う深部地質環境の変化を把握する。さらに、新たに取得する情報に基づき、地質環境モデル（ブロックスケール）を構築するとともに、第3段階において拡張する研究坑道周辺の調査・解析結果に基づいて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。第2段階においても、段階的に繰り返しアプローチを適用することにより、深部地質環境を適切かつ効率的に理解するための技術を整備する。

これらの調査研究と合わせ、第2段階までに取得する深部地質環境に関する情報などを踏まえ、第3段階の課題を抽出・特定し、第3段階における調査研究計画の詳細化・具体化を図る。一方、研究坑道の施工・維持・管理にかかわる工学技術については、既存技術の有効性を確認するとともに、その高度化を図る。

(1) 目標

2.2 に述べたように、第2段階における調査研究の目標は以下のとおりである。

- 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
- ②研究坑道の施工・維持・管理にかかわる工学技術の有効性の確認
- ③第3段階の研究段階の調査研究計画の策定

(2) 調査研究の概要

①深部地質環境における地質環境調査・解析・評価技術に関する研究

(i) 個別目標ごとの調査研究の実施内容

●地質構造の三次元分布の把握

第1段階において推定した、地下水流動などに影響を与える断層、割れ目、変質帯などの地質構造について、研究坑道の掘削と並行して実施する坑壁地質調査や研究坑道内からのボーリング調査により取得した情報などに基づき、その位置や特性などを明らかにし、第1段階において構築した地質構造モデル（サイトスケール）の妥当性を確認する。また、新たに取得する情報に基づき地質構造モデル（サイトスケール）を更新し、第3段階において対象とする研究坑道周辺の地質・地質構造に関する推定精度の向上を図る。これに基づき、地質構造モデル（ブロックスケール）を構築するとともに、新たに取得する情報に基づき適宜更新する。

(a) 地質構造の三次元分布に関する情報の取得

・第1段階の推定結果の確認のための地質構造調査

第1段階において推定した地下水流動などに影響を与える主要な断層、割れ目、変質帯など

の地質構造について、その遭遇位置や特性を確認するためのボーリング調査を数本実施する。

・電気探査法を用いた地下水流動モニタリング

研究坑道の掘削に伴って発生する地下水流動の動的変化の三次元分布を把握することを目的として、研究所周辺の地表や研究坑道において自然電位を測定する。

・坑壁地質調査

掘削した坑道の壁面観察や画像撮影などによって、地質構造要素（岩相、風化帯、変質帯、透水性割れ目、断層、岩脈など）に着目し、その分布および性状を詳細に把握する。また、それぞれの透水性割れ目について充填鉱物や湧水の状況などに関する情報も取得し、その観察結果を坑壁地質展開図にまとめる。本調査は研究坑道の全区間で実施する。また、岩盤や割れ目充填鉱物などの詳細な岩石学的・鉱物学的特性を把握するために、岩石試料を採取し、顕微鏡観察、化学分析、X線回折などを実施する。さらに効率良くかつ精度の高い調査を行うため、壁面の撮影手法や物性計測手法などの改良を行う。

・坑道前方地質調査

坑道の掘削に先立って取得する地質・地質構造に関する情報に基づき、高透水性割れ目帯や断層などの存在が予想される場合は、逆VSP探査や立坑の切羽からのボーリング調査、ボーリング孔を利用したトモグラフィ探査などを適宜実施し、切羽前方の高透水性割れ目帯や断層などの位置を推定する。本調査においては、様々な前方予知技術を適用し、それらの技術の有効性を評価する。

(b) 地質構造モデルの構築および地質学的解析

前述の調査や岩盤の水理や地球化学などの分野における調査研究成果に基づき、第1段階において構築した地質構造モデル（サイトスケール）の妥当性を確認する。また、新たに取得する情報に基づき地質構造モデル（サイトスケール）を更新し、第3段階において対象とする研究坑道周辺の地質・地質構造に関する推定精度の向上を図る。これに基づき、地質構造モデル（ブロックスケール）を構築するとともに、新たに取得する情報に基づき適宜更新する。

(c) 調査・解析・評価手法の整備

地質構造モデルの構築および解析をとおして、第1段階において構築した地質構造モデル（サイトスケール）の各地質構造要素の分布、方向性、連続性、傾度や形状などの妥当性を評価することにより、第1段階において適用した一連の調査・解析技術の有効性を確認する。さらに地質構造の発達過程も考慮した調査・解析・評価手法を整備するとともに、失敗事例なども含めた経験やノウハウなどを知識化、体系化していく。

●**地下水の流動特性の把握**

研究坑道から掘削したボーリング孔ならびに地表からのボーリング孔における地下水位や間隙水圧などの変化の観測、表層水理観測などを行う。これらの実測データと第1段階における推定結果とを比較し、同段階において構築した水理地質構造モデル（サイトスケール）の妥当性を確認するとともに適用した解析手法などの妥当性を評価する。また、ここで取得される情報に基づいて水理地質構造モデル（サイトスケール）を更新する。

さらに、更新された水理地質構造モデルに基づいて、ブロックスケールの水理地質構造モデル

を構築する。このモデルを用いて、第3段階において拡張する研究坑道周辺の地下水流動場（研究坑道拡張前）を推定する。

(a) 地下水の流動特性に関する情報の取得

・表層水理調査および地表からのボーリング孔を用いた地下水長期モニタリング

研究坑道の掘削による地表から地下深部における地下水流動場の変化などを把握するため、気象要素、河川流量、土壌水分などの表層水理に関する調査、およびボーリング孔に設置した多点式パッカーシステム、傾斜計などを利用した地下水の長期観測などを継続して実施する（図4.1.1-1）。また、必要に応じて計測手法や調査機器の開発や改良を行う。

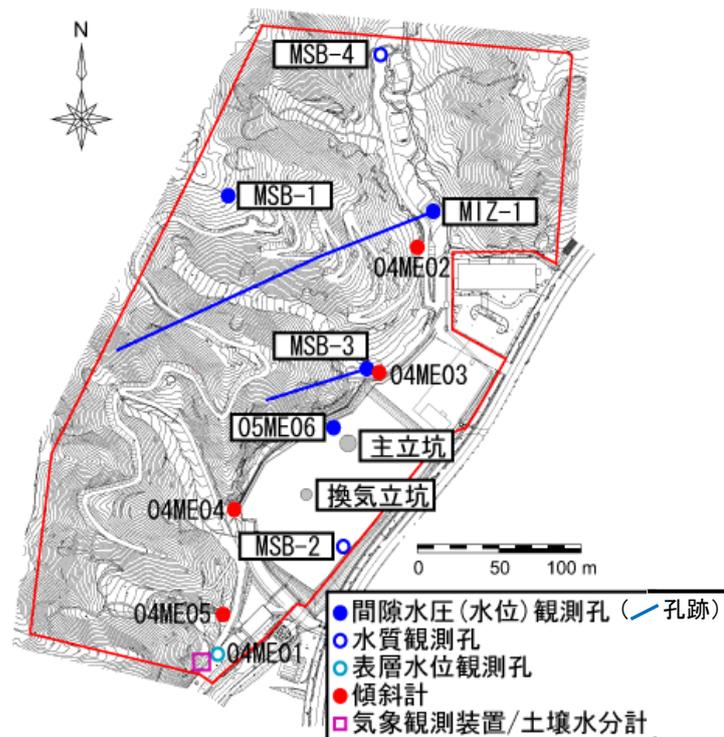


図 4.1.1-1 研究所の地表における地下水長期モニタリング孔の位置図

・研究坑道から掘削したボーリング孔を用いた地下水長期モニタリング

研究坑道の掘削に伴う地下水流動場の変化などを把握するため、坑道から掘削したボーリング孔に設置した観測機器などによる地下水位や間隙水圧などの長期観測を行う。また、必要に応じて計測手法や調査機器の開発や改良を行う。

(b) 水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析

第1段階においては、構築した水理地質構造モデル（サイトスケール）を用いた地下水流動解析によって、研究所における研究坑道掘削前の地下水流動場が推定されている。

本段階においては、研究坑道において認められた主要な地質構造要素ならびに花崗岩の水理特性に関する実測データと、前述の推定結果とを比較し、第1段階において構築した水理地質構造モデル（サイトスケール）や解析手法などの妥当性を評価する。また、この評価結果や坑内湧水量などの調査結果を踏まえ、水理地質構造モデル（サイトスケール）を更新するとともに、研究

坑道掘削に伴う地下水流動場の変化を把握する。

さらに、第3段階において調査研究を実施する研究坑道およびその周辺を対象とした地下水流動モデル(ブロックスケール)を構築するとともに、新たに取得する情報に基づき適宜更新する。このモデルを用いて第3段階において拡張する研究坑道周辺の地下水流動場を推定する。なお、必要に応じ、このモデルを用いて、第3段階において拡張する研究坑道周辺の地下水流動場の変化を推定する。

(c) 調査・解析・評価手法の整備

水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析をとおして、第1段階において構築した水理地質構造モデル(サイトスケール)の妥当性を評価し、第1段階において適用した一連の調査・解析技術の有効性を確認する。さらに地質環境の長期的な変化に関する調査・解析・評価手法を整備するとともに、失敗事例なども含めた経験やノウハウなどを知識化、体系化していく。

●地下水の地球化学特性の把握

研究坑道から掘削したボーリング孔ならびに地表からのボーリング孔における地下水採水や化学分析などを行い、深部地下水の地球化学特性の三次元分布や水質形成機構などを詳細に把握する。これらの実測データと第1段階における推定結果を比較し、同段階において構築した地球化学モデル(サイトスケールでの水質形成モデル)や解析手法などの妥当性を評価する。また、この評価結果を踏まえ、地球化学モデル(サイトスケールの水質形成モデル)を更新するとともに、研究坑道の掘削に伴う地下水の地球化学特性の変化を把握する。

(a) 地下水の地球化学特性に関する情報の取得

・地下水の地球化学調査

地下水の地球化学特性の三次元的分布および研究坑道掘削に伴う地下水の地球化学特性の変化を把握するため、研究坑道および地表から掘削したボーリング孔における地下水採水、物理化学パラメータの計測および化学分析(主要溶存成分濃度、微量溶存成分濃度、溶存ガス、環境同位体、微生物など)を実施する。また、研究坑道内で確認される割れ目からの湧水についても同様の地球化学調査を実施する。また、地球化学環境の長期的変遷を推定するために、ボーリングコアなどを用いた化学分析や鉱物学的調査などを実施する。また、必要に応じて計測手法や調査機器の開発や改良を行う。

(b) 地球化学モデル(水質形成モデル)の構築および地球化学解析

第1段階においては、研究所用地における花崗岩中の地下水の地球化学特性(物理化学パラメータ、化学組成および同位体組成)の三次元分布を表現する地球化学モデル(サイトスケールの水質形成モデル)が構築される。

第2段階においては、地下深部の地球化学特性に関する実測データと前述の推定結果とを比較し、第1段階において構築した地球化学モデル(サイトスケールの水質形成モデル)や解析手法などの妥当性を確認する。また、この評価結果を踏まえ、地球化学モデル(サイトスケールの水質形成モデル)を更新するとともに、研究坑道掘削に伴う地下水の地球化学特性の変化を把握する。

(c) 調査・解析・評価手法の整備

地球化学モデルの構築および地球化学解析をとおして、第1段階における、深部地下水の地球

化学特性（物理化学パラメータ，化学組成および同位体組成の三次元分布の変化）に関する推定結果の妥当性を評価することにより，第1段階において適用した一連の調査・解析技術の有効性を確認する。さらに地質環境の長期的な変化に関する調査・解析・評価手法を整備するとともに，失敗事例なども含めた経験やノウハウなどを知識化，体系化していく。

●物質移動の遅延効果の把握

岩芯あるいは研究坑道の壁面から採取する試料を用いた室内試験などにより，代表的な地質構造要素の地球化学，鉱物学的特性，空隙構造特性や収着・拡散特性などを把握し，第1段階において取得した基礎情報と合わせ，花崗岩中における物質移動・遅延を評価するためのデータセットを整備する。また，天然に存在する核種を用いた調査研究を継続し，地質学的に長期間にわたる物質の移動・遅延現象を把握する。

(a) 物質移動特性評価に関する情報の取得

・岩石試料を用いた室内試験

坑壁地質調査の結果に基づいて，割れ目や断層などから複数の岩石試料を採取する。これらの試料を用いて室内試験を実施し，物質移動・遅延の評価に必要な情報（たとえば，割れ目中のチャンネルング，物質移動・遅延に寄与する空隙構造および空隙率，割れ目充填鉱物などの収着特性などに関する定量的データ）を取得する。

●地下空洞周辺の力学・水理状態の把握および地下の温度環境の把握

研究坑道から掘削するボーリング孔を利用し，研究坑道の掘削に伴う坑道周辺岩盤の力学挙動や，初期応力状態などを把握する。また，第1段階において推定した坑道周辺岩盤の変形挙動および応力変化などについて，推定結果の妥当性を確認し，第1段階において構築した岩盤力学モデル（サイトスケール）や解析手法などの妥当性を確認する。また，この評価結果を踏まえ，岩盤力学モデル（サイトスケール）を更新するとともに，研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の力学特性の変化を把握する。

さらに，岩盤力学モデル（ブロックスケール）を構築するとともに，新たに取得する情報に基づき適宜更新する。このモデルを用いて，第3段階において拡張する坑道周辺の岩盤力学特性などを推定する。なお，必要に応じ，このモデルを用いて，第3段階において拡張する坑道周辺岩盤の変形挙動や応力変化などを推定する。

また，坑内湧水量の観測や，研究坑道から掘削したボーリング孔における間隙水圧などの情報に基づき，研究坑道近傍の覆工コンクリートや排水マットなどの人工物やグラウチングによる改良範囲を含むスキン効果などの影響を評価する。

(a) 岩盤の力学および水理に関する情報の取得

・岩盤の力学特性調査

第1段階で推定した力学物性の深度方向の変化や初期応力の分布などを確認するため，予備ステージなどからのボーリング孔を掘削し，岩石の力学試験，初期応力測定などを実施する。坑道掘削の影響が及ばない領域においてデータを取得するため，研究坑道から少なくとも坑道径の3倍以上離れた岩盤中において上記の試験や試料の採取などを行う。また，必要に応じて計測手法や調査機器の開発や改良を行う。

・立坑変位計測

第1段階で推定した研究坑道の掘削に伴う坑道周辺岩盤の変形挙動および応力変化を把握するため、主立坑および換気立坑において、ボーリング孔を用いた岩盤の変位計測を実施する。また、必要に応じて計測手法や調査機器の開発や改良を実施する。

・坑内湧水量の観測、および研究坑道から掘削したボーリング孔を用いた地下水長期モニタリング

研究坑道周辺の水理状態を把握するため、坑内湧水量の変化を把握するとともに、坑道から掘削したボーリング孔に設置した観測機器などによる地下水位や間隙水圧の観測などを行う。

(b) 岩盤力学モデルの構築および力学解析，ならびに地下水流動解析

第1段階においては、花崗岩体の力学物性や初期応力状態などの三次元分布を表現する岩盤力学モデル（サイトスケール）が構築され、研究坑道掘削に伴う研究坑道周辺岩盤の変形挙動および応力変化，応力集中に伴う岩盤の損傷範囲が推定されている。

第2段階においては、力学物性や初期応力状態，研究坑道の掘削に伴う坑道周辺岩盤の力学挙動などに関する情報に基づき，第1段階において構築した岩盤力学モデル（サイトスケール）や解析手法などの妥当性を確認する。また，この評価結果を踏まえ，岩盤力学モデル（サイトスケール）を更新するとともに，研究坑道掘削に伴う力学特性の変化を把握する。

さらに，岩盤力学モデル（ブロックスケール）を構築するとともに，新たに取得する情報に基づき適宜更新する。このモデルを用いて，第3段階において拡張する研究坑道周辺の岩盤力学特性などを推定する。なお，必要に応じ，このモデルを用いて，第3段階において拡張する研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の変形挙動や応力変化などを推定する。

また，研究坑道の掘削に伴う人為的な影響を考慮した実際に即した内部境界条件を用いた地下水流動解析を実施し，その結果と実測値の比較を行う。

(c) 調査・解析・評価手法の整備

岩盤力学モデルの構築および力学解析ならびに地下水流動解析をとおして，第1段階において構築した岩盤力学モデル（サイトスケール），ならびに研究坑道の掘削に伴う研究坑道周辺岩盤の力学挙動，地下水の流入量などに関する推定結果の妥当性を評価することにより，第1段階において適用した一連の調査・解析技術の有効性を確認する。さらに深部地質環境を地表から評価するための調査・解析・評価手法を整備するとともに，失敗事例なども含めた経験やノウハウなどを知識化，体系化していく。

(ii) 調査研究成果の統合化

前述の「(i)」における調査・解析を通して構築された個別分野の地質環境モデルに基づいて抽出された重要な地質環境要素について，これらを分野ごとに比較検討することにより，地質環境全体として優先的に明らかにすべき重要な要素を抽出するための手法を検討する。

②深地層における工学技術に関する研究

本段階においては，研究坑道の掘削や設計変更などの実績によって，第1段階において適用した詳細設計や施工計画策定などの手法ならびに適用した工学技術の有効性を評価し，その評価結

果を適切に詳細設計や施工計画策定などに反映させる技術体系を整備する。

また、実際の地質環境が推定結果と大きく異なる場合、想定外の事象に遭遇した場合、研究坑道の掘削により深部地質環境を著しく乱す事象が生じた場合などにおいては、柔軟に設計変更ができ、さらに現状の対策工が適切に対応し得ることを示すことにより、設計・施工技術の有効性を確認する。さらに、地質環境の変化の事前予知や対策工実施後の品質保証のための工学技術の検討および整理も行う。一方、安全衛生面からの研究坑道内の研究環境の維持・管理や安全確保などのための技術開発も実施する。

(i) 研究坑道の設計・施工計画技術の開発

研究坑道の掘削に伴って取得される施工に関する情報（地震時の覆工挙動を含む）に基づき、第1段階に策定した設計・施工計画の妥当性を評価する。また、施工実績や研究の成果などを反映して設計・施工計画を更新する技術、深部地質環境を著しく乱さないような施工計画とする技術、および施工実績を設計にフィードバックする技術を開発し適用する。さらに、研究坑道の掘削にともなう調査・試験の結果を合理性ならびに安全性の観点から分析し、設計の見直しが図れるよう柔軟性のある設計・施工計画が策定されていたか否かを評価する。

(ii) 研究坑道の掘削技術および施工対策技術の開発

既存の地下構造物の施工実績などを踏まえ、地下深部において研究坑道の掘削を行う際に地質環境の変化に対応する掘削技術、深部地質環境を著しく乱す事象が生じた場合や想定外の事象（大量出水や山はねなど）への現状の対策技術の適用性を確認する。また、これらの対策の効果や実施した後の品質の確認のための調査技術を開発する。さらに、掘削、支保設置、ズリ搬出などの一連の施工方法の評価を行い、より合理的な施工を行うための対策を検討する。

(iii) 安全性を確保する技術の開発

研究坑道においては、研究者、施工業者、一般見学者等が同時に入坑する場合などが想定され、それぞれに対して十分な安全対策を考慮する必要がある。第1段階においては、第2段階以降に想定される事故や災害などへの対応を検討し、安全管理計画（通気・換気計画、常時の点検管理システム、非常時の情報伝達システム、指揮命令系統など）を策定した。本段階においては、この安全計画に従って必要な観測装置の設置および安全管理を実施する。また、定期的に安全確保の状況確認とその評価を行い、これらの安全管理システムに必要な改良を加えていく。

③次段階の調査研究計画の策定

前述の調査研究により取得した深部地質環境に関する情報、第3段階において対象とする研究坑道周辺の地質環境特性に関する推定結果などを踏まえ、第1段階において検討した、第3段階における概略的な調査研究計画の詳細化・具体化を図る。具体的には、第1段階において抽出した調査研究課題の必要性（優先度）を検討し、その絞込みや追加を行う。この際、これまでに東濃鉱山とその周辺や釜石鉱山、および海外の地下研究施設などにおいて実施された調査研究（先行事例）の成果や課題、第2次取りまとめの評価報告書（原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会、2000）、全体計画、第1段階報告書などに示された今後の課題、および研究開発の進展

に伴って新たに設定される課題を考慮し、必要に応じて計画に反映する。なお、第2段階における調査研究と、第3段階における調査研究が同時期に行われる場合は、第2段階における調査研究の結果を適宜反映することにより、第3段階における調査研究計画の最適化を図っていく。

4.1.2 研究坑道を利用した研究段階（第3段階）

研究坑道を利用した研究段階（第3段階）は、「2.3 成果の反映」で述べたように、長期にわたる調査研究の必要性や、異なる地質環境を対象とした適用の繰り返しによる地質環境調査技術の高度化などを踏まえて進める。

基本的には、第2段階と同様に、研究坑道周辺の地質環境を調査研究の対象とするが、研究坑道から掘削するボーリング孔を利用したより広い領域を対象とした調査研究も合わせて実施する。

本段階においては、調査研究の対象となる深部地質環境の特性を把握するばかりでなく、その地質環境中において生じる様々な現象（坑道掘削が周辺岩盤に与える影響、物質移動など）の理解にも重点をおいた調査研究を実施する。これらの深部地質環境に関する情報を三次元的に取得・蓄積し、研究坑道周辺の地質環境特性に関する推定結果の妥当性を評価する。あわせて、推定に用いた地質環境モデル（ブロックスケールおよびサイトスケール）の妥当性や解析手法の有効性なども評価する。また、その評価結果を踏まえ、それぞれの分野における各スケールの地質環境モデルならびに適用したそれぞれの調査・解析・評価手法について高度化を図る。本段階においては、とくに地下深部において生じる様々な現象を理解するための調査・解析・評価手法の妥当性について確認することも重要である。さらに、深部地質環境の評価に至る一連のプロセスの繰り返しをとおして、評価すべき項目やその重要度を明確にするとともに、調査の種類・量、解析・評価の手法と結果の精度との関係を整理する。この結果を踏まえ、最終的には、深部地質環境を評価するための調査・解析・評価手法を段階的に整備する。また、本段階の調査研究に必要な調査技術や調査機器についても適宜、開発を行う。

一方、深地層における工学技術については、研究坑道の維持・管理などをとおして、長期にわたる維持・補修技術、ならびに研究坑道内の安全確保のための技術の有効性を確認する。

さらに、一連の調査研究をとおして蓄積される失敗事例や経験、ノウハウなどについては、その過程などとともに知識として取りまとめていくこととする。

(1) 目標

2.2 に述べたように、第3段階における調査研究の目標は以下のとおりである。

- 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拡張による深部地質環境の変化の把握
- ②深地層における工学技術の有効性の確認

(2) 調査研究の概要

本段階では、異なる地質環境において、同様の調査・解析・評価技術や工学技術を適用し、これらの技術の有効性を評価するとともに高度化を図る。また、研究坑道の拡張による地質環境の擾乱を含め、ブロックスケールの地下深部における様々な現象を把握する。とくに、新規水平坑道の拡張を実施し、研究坑道の拡張に伴う坑道周辺岩盤の力学特性などの変化を把握するための調査研究を実施する。それぞれの調査研究については、本段階までに取得する深部地質環境に関する情報や推定結果などに基づいて具体化を図る。

①深部地質環境における地質環境調査・解析・評価技術に関する研究

(i) 個別目標ごとの調査研究の実施内容

●地質構造の三次元分布の把握

第2段階において推定した、地下水流動や水質に影響を与える断層、割れ目、変質帯などについて、研究坑道の拡張に伴う坑壁地質調査、物理探査および坑道からのボーリング調査を通して取得した情報に基づき、第2段階における研究坑道周辺の地質・地質構造の推定結果との比較により、第2段階において構築した地質構造モデル（ブロックスケール）の妥当性を確認する。この評価結果を踏まえ、地質構造モデル（ブロックスケール）を更新する。さらに新たに取得する情報に基づき、各スケールの地質構造モデルの高度化を図る。また、第2段階までに構築される地質環境モデル（サイトスケール）に用いられる深度1,000m程度までの情報について、必要に応じて研究坑道からのボーリング調査などによって直接的に情報を取得する。なお、必要に応じて調査・解析手法や調査機器の開発や改良を行う。

・第2段階までの推定結果の確認のための地質構造調査

第2段階までに推定した地下水流動などに影響を与える主要な断層、割れ目、変質帯などの地質構造について、その遭遇位置や特性を確認するためのボーリング調査を数本実施する。

・坑壁地質調査

拡張した研究坑道の壁面観察や画像撮影などによって、地質構造要素（岩相、変質帯、透水性割れ目、断層、岩脈など）に着目し、その分布および性状を詳細に把握する。また、それぞれの透水性割れ目について充填鉱物や湧水の状況などに関する情報も取得する。また、岩盤や割れ目充填鉱物などの詳細な岩石学的・鉱物学的特性を把握するために、岩石試料を採取し、顕微鏡観察、化学分析、X線回折などを実施する。

・深部領域地質調査

第2段階までに構築される地質環境モデル（サイトスケール）に用いられる情報の多くは、深度1,000mまでの地質環境に関するものである。したがって、本段階においては、研究坑道から深度方向へ1,000m程度のボーリング孔を掘削し、深度1,000m以深の情報を直接的に取得する。また、複数のボーリング孔を用いて孔間トモグラフィ（弾性波および電磁波）調査を実施し、その調査技術の有効性を確認する。

●地下水の流動特性の把握

研究坑道の拡張に伴う地下水位や間隙水圧などの観測、および研究坑道から掘削するボーリング孔における水理試験により、研究坑道周辺における主要な地質構造要素ならびに花崗岩の水理特性を詳細に把握する。またこれらの実測データと第2段階における推定結果とを比較し、同段階において構築した水理地質構造モデル（ブロックスケール）や解析手法などの妥当性を評価する。この評価結果を踏まえ、水理地質構造モデル（ブロックスケール）の更新と境界条件の見直しを行い、研究坑道周辺における地下水流動に関する解析精度の向上を図る。さらに、新たに取得する情報に基づき、各スケールの水理地質構造モデルの高度化を図る。また、必要に応じて調査・解析手法・調査機器の改良・開発を行う。

・表層水理調査および地表からのボーリング孔を用いた地下水長期モニタリング

研究坑道の拡張による地下水流動場の変化などを把握するため気象要素，河川流量，土壤水分などの表層水理に関する調査，およびボーリング孔に設置した多点式パッカーシステム，傾斜計などを利用した地下水の長期観測などを継続して実施する。

・研究坑道から掘削したボーリング孔を用いた水理調査および地下水長期モニタリング

研究坑道の拡張に伴う地下水流動場の変化などを把握するため，坑道から掘削したボーリング孔を用いた水理調査（流体検層や水理試験など）を実施するとともに，ボーリング孔内に設置した観測機器などによる間隙水圧などの長期観測などを行う。なお，ボーリング孔は必要に応じて数 100m におよぶ長さのボーリング孔調査も含めて検討する。

・坑道規模水理試験

花崗岩体中の不均質な透水性分布をモデル化する有効な手法と考えられる等価不均質連続体モデルの構築手法を検討するため，ブロックスケールの等価透水性，透水性のスケール効果，および透水性に影響を及ぼす割れ目特性を評価する。このため，研究坑道周辺領域を対象として複数本のボーリング孔を掘削し，各種の水理調査を実施する。本調査の概念を図 4.1.2-1 に示す。

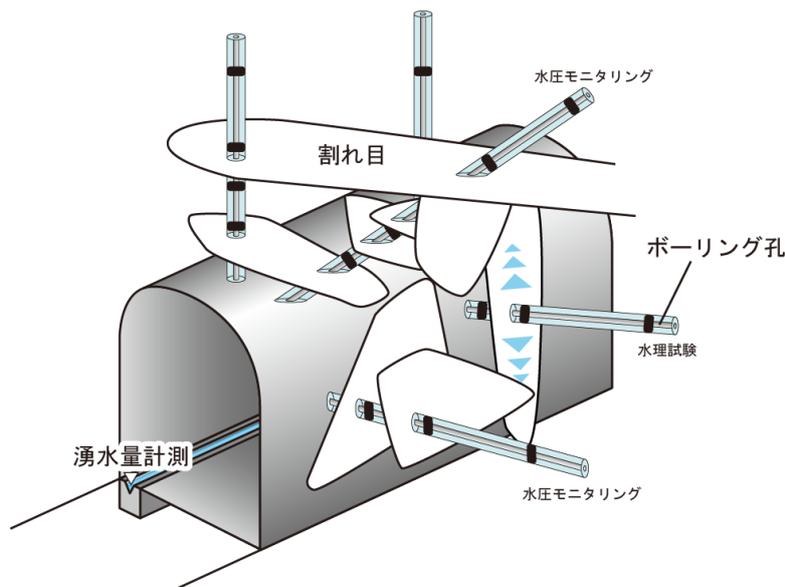


図 4.1.2-1 坑道規模水理試験の概念図 (SKB (2004) を基に編集)

・地下水流動を規制する断層や割れ目の水理学調査

第 2 段階までに把握されている地下水流動を規制する断層や割れ目，変質帯などを対象として，研究坑道から掘削したボーリング孔を利用した水理試験，ボーリング孔間の水圧応答試験，トレーサーを用いた水理試験などを実施し，断層内部の水理特性や，割れ目のチャネリングなどによる透水性の不均質性，割れ目の交差（ネットワーク）状況と透水性の関連などについて把握する。

●**地下水の地球化学特性の把握**

研究坑道から掘削するボーリング孔ならびに既存ボーリング孔における地下水採水や化学分析などを継続し，深部地下水の地球化学特性の三次元分布を把握する。これらの実測データと第 2

段階における推定結果とを比較し、同段階までに構築・改良した地球化学モデル（ブロックスケールの水質形成モデル）や解析手法などの妥当性を確認する。また、この結果を踏まえ、各スケールの地球化学モデルを更新する。さらに新たに取得する情報に基づき、各スケールの地球化学モデルの高度化を図る。なお、必要に応じて調査・解析手法・調査機器の改良・開発を行う。

・地下水の地球化学調査

地下水の地球化学特性の三次元的分布を把握するため、研究坑道および地表から掘削したボーリング孔における地下水採水、物理化学パラメータの計測および化学分析（主要溶存成分濃度、微量溶存成分濃度、溶存ガス、環境同位体、微生物など）を実施する。また、研究坑道内で確認される割れ目からの湧水についても同様の地球化学調査を実施する。さらに、天然環境中の岩石、地下水などが有する酸化還元環境の変化に関する緩衝能力を把握することを目的としたボーリング孔を利用する調査（酸化還元緩衝能試験）を実施する。なお、研究坑道から掘削するボーリング孔は必要に応じて数 100m におよぶ長さのボーリング調査も含めて検討する。

・水-岩石反応による水質形成機構の調査

研究坑道の拡張に伴い、坑道壁面や研究坑道から掘削するボーリング孔などから岩石試料を採取し、鉱物組成、割れ目充填鉱物や変質鉱物などの化学組成や同位体組成などの分析を行う。さらに、採取した岩石試料を用いた水-岩石反応を確認するための室内試験などを実施する。

●物質移動の遅延効果の把握

岩芯を用いた室内試験などにより、花崗岩中の物質移動経路や収着・拡散特性などを評価するとともに、研究坑道周辺において、花崗岩中における物質移動・遅延現象を把握するためのトレーサー試験などを実施する。さらに、花崗岩中における物質移動・遅延現象を把握するために必要な地下水中のコロイド、有機物、微生物に関するデータを取得する。なお、必要に応じて調査・解析手法・調査機器の改良・開発を行う。

・岩石試料を用いた物質移動試験

トレーサー試験を実施する割れ目から岩芯や数十 cm 四方の岩体試料を採取し、透水試験、物質移動試験、地球化学的・鉱物学的調査などを実施する。これらの調査・試験により、割れ目におけるチャンネルング、物質移動時間および収着・拡散特性に関する情報を取得する。

・割れ目を対象とした物質移動試験

水平坑道と交差する割れ目を対象にトレーサー試験を実施する。対象とする割れ目に掘削する複数のボーリング孔において、一方からトレーサーを注入し、他方でそのトレーサーを回収する。また割れ目の開削を行い、採取した岩石試料中のトレーサーの分布や物質移動経路などの調査を行い、物質移動・遅延を直接的に評価する。

・断層の影響範囲における物質移動試験

断層に伴う割れ目帯や変質帯などの影響範囲における物質移動・遅延特性を把握するために、研究坑道またはボーリング孔を利用して、割れ目帯や変質帯などを対象としたトレーサー試験を実施する。

●地下空洞周辺の力学・水理状態の把握および地下の温度環境の把握

割れ目の頻度や透水性などの異なる地質環境条件を対象に、新規水平坑道の拡張を実施し、坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の水理特性および力学特性の変化や熱特性などを把握する。これらの実測データと第2段階までにおける予測結果とを比較し、同段階において構築した地下水流動モデルや岩盤力学モデル（ブロックスケール）や解析手法などの妥当性を評価する。また、研究坑道における変位計測などを継続し、坑道周辺岩盤の長期的な安定性を評価するとともに岩盤の破壊現象（山はねなど）を把握する。これらの結果を踏まえ、岩盤力学モデル（ブロックスケール）を更新し、坑道周辺岩盤の力学挙動などに関する解析精度の向上を図る。さらに、新たに取得する情報に基づき、各スケールの岩盤力学モデルの高度化を図る。なお、必要に応じて調査・解析手法や調査機器の開発や改良を行う。

・岩盤の力学特性に関する調査

研究坑道の拡張やセメントなどの工学材料の影響による坑道周辺の力学物性（物理特性、変形特性、強度特性）の深度方向の変化や、初期応力の分布などを確認するため、研究坑道からボーリング孔を掘削し、岩石の力学試験、初期応力測定、速度検層などを実施する。

・研究坑道周辺の岩盤力学－水理－地球化学複合現象調査

研究坑道周辺の岩盤中に形成される力学、水理ならびに地下水の地球化学に関する掘削影響領域の範囲および、それらの変化を複合的に把握するため、力学特性、水理特性および地球化学特性に関する調査・解析を組み合わせた新規水平坑道の拡張を伴う試験を実施する。具体的には、新規坑道の拡張前に周辺に掘削するボーリング孔において、孔内載荷試験、水理調査（流体検層や水理試験など）、地下水の物理化学パラメータ計測などを実施し、岩盤の変形特性、透水（量）係数、水質などについて研究坑道拡張前の計測値を取得する。研究坑道の拡張中はボーリング孔内に設置した観測機器などによる間隙水圧、水質、坑内湧水量、変位計測、AE計測などの観測を行う。拡張後の計測においては、研究坑道周辺における物性の変化領域（掘削損傷領域と考えられる低速度帯）および坑道間の物性の変化領域の同定、ならびに坑道壁面の安定性評価のため、研究坑道の拡張前に実施した試験・計測を実施し、拡張前の計測値からの変化を把握するとともに、坑道壁面沿いに三次元的に設けた測線に沿った弾性波トモグラフィ調査などを実施する。さらに、同定された掘削損傷領域を含む岩盤中の割れ目やその透水性分布などに関する詳細な調査のため、坑道の一部を拡張する。また、スムーズブラスティング工法などの実施によって、掘削損傷の工法依存性を比較し評価する。これらの調査結果と、力学－水理－地球化学に係る複合現象の解析をとおして、坑道掘削に伴う連成現象を理解する。本調査の概念を図4.1.2-2に示す。

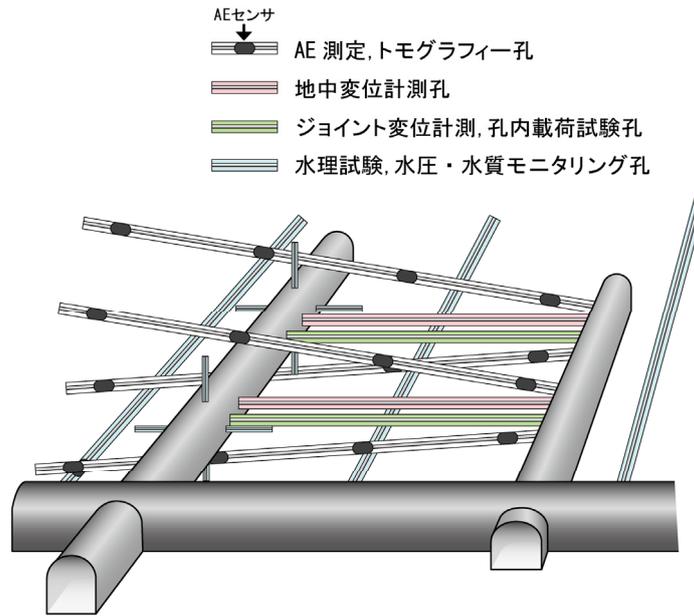


図 4.1.2-2 岩盤力学－水理－地球化学複合現象調査の概念図

・坑道長期安定性調査

坑道周辺岩盤の長期的な安定性の解析手法を評価するため、坑道周辺の岩盤力学－水理－地球化学複合現象調査における変位計測およびAE計測などを継続する。さらに、同定された掘削損傷領域の拡大傾向を評価するため、坑道掘削後一定期間を経た時点で、弾性波調査などを実施する。

・熱-応力下の水理試験

常温から高温下における岩盤の水理特性の変化を評価するため、研究坑道から採取した岩石試料を用いた室内試験のほか、研究坑道内の数m四方程度の岩盤に熱源を設置し、その近傍に掘削するボーリング孔を用いた水理試験、水圧・水質モニタリングや岩盤変位計測などを実施する。本調査の概念を図4.1.2-3に示す。

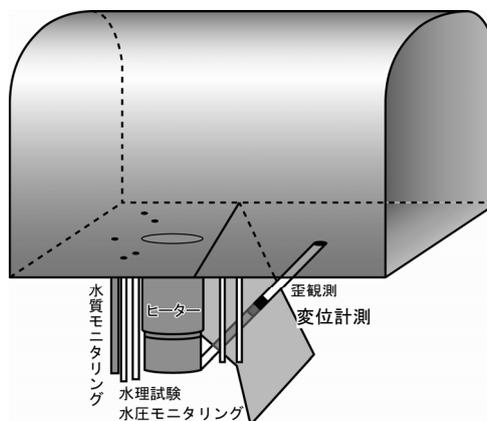


図 4.1.2-3 熱-応力下の水理試験の概念図

●その他の技術開発

研究坑道掘削に伴う地質環境の変化の把握が可能なモニタリング技術開発を目的として、高分解能と大可探深度の両立を図ることができる ACROSS (Accurately Controlled Routinely Operated Signal System) を用いたモニタリングを継続する。

(ii) 個別調査研究成果の統合化・体系化

前述の「(i)」における調査・解析を通して構築された個別分野の地質環境モデルに基づいて抽出された研究坑道周辺岩盤における重要な地質環境要素について、これらを分野ごとに比較検討することにより、地質環境全体として優先的に明らかにすべき重要な要素を抽出するための手法を検討する。

また、第1段階から第3段階まで実施してきた物質移動特性評価について、調査段階の進展と不確実性の低減の程度を整理し、地質環境の調査から物質移動の解析および評価に関する方法論の妥当性を評価する。

②深地層における工学技術に関する研究

地下深部における、研究坑道の長期にわたる維持・補修技術ならびに研究坑道内の環境保全技術の適用性の確認を行う。また、施工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。さらに研究坑道の掘削が地質環境に及ぼした影響の修復・軽減に関する技術を開発・整備する。加えて研究坑道の健全性の確認、大深度立坑の耐震設計手法の確立を目的として、研究坑道の異なる深度に地震計や湧水量計などを設置し、地下深部における地震動の観測を行う。

4.2 正馬様用地における調査研究

正馬様用地では、超深地層研究所計画の全体目標のひとつである深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備に関連し、これまで蓄積された月吉断層やその周辺の地質環境の情報やボーリング孔などの研究資源を利用した要素技術開発の場として活用し、研究所での調査研究の効率化を図るための要素技術の高度化に向けた調査研究を実施してきた。今後はボーリング孔における地下水のモニタリングを継続することにより、月吉断層やその周辺の不連続構造を含む花崗岩中の地下水流動を把握するための調査技術を開発していく（図 4.2-1）。

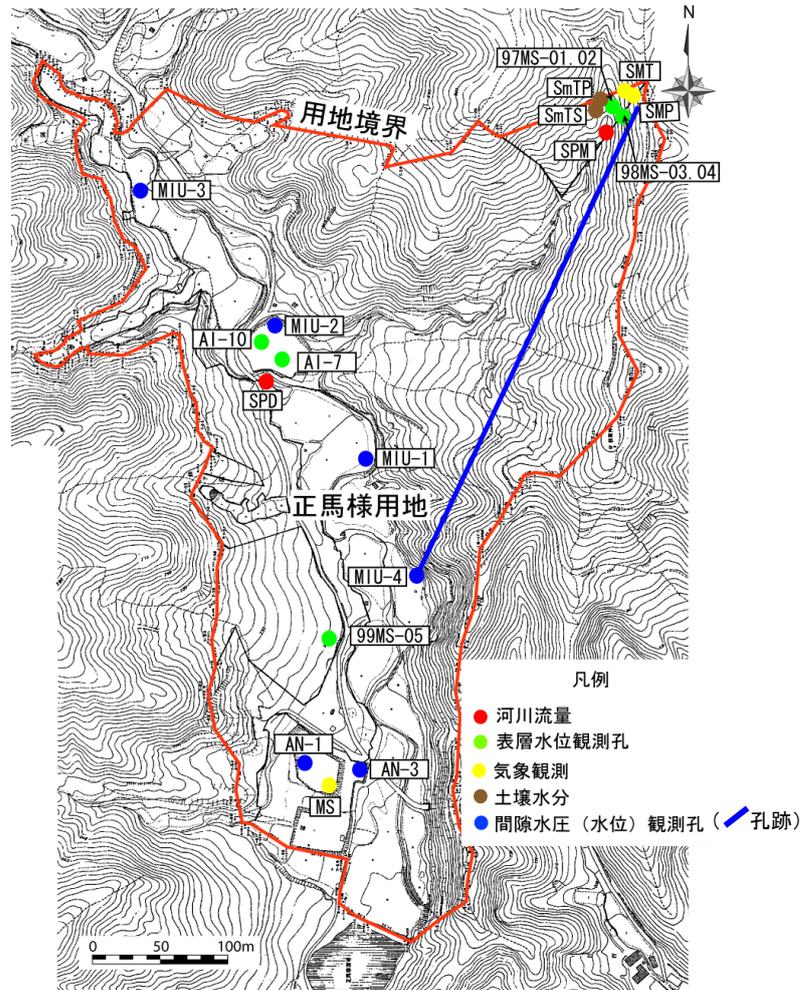


図 4.2-1 正馬様用地内における地下水モニタリング孔などの位置図

5. 超深地層研究所施設の概要

超深地層研究所は研究坑道および地上施設からなる。それぞれの概要については以下に示すとおりである。

5.1 研究坑道の概要

研究坑道の設計は、地表からの調査研究による深部地質環境に関する情報、および研究坑道周辺の地質環境特性（地質環境モデル）やそれらにより推定された地質環境の状態などを考慮しつつ、第2段階および第3段階における調査研究計画に基づいて実施された。これまでの検討結果を踏まえ、図5.2-1に示すような研究坑道のレイアウト案を提示している。

2. に示した「成果の反映」のとおり、花崗岩中には割れ目頻度や酸化還元状態を異にする領域が存在することが推定される。したがって図5.2-1で示す通り、地質環境の異なる領域において調査研究の場を確保することとしている。研究坑道は2本の立坑（主立坑および換気立坑）とそれらを約100mごとにつなぐ予備ステージ、ならびに詳細な調査研究を実施するための水平坑道群からなる。現状では水平坑道は深度300mに設置したほか、今後約500m、および深度約1,000mに設ける計画である。このように、異なる地質環境において複数の水平坑道を設けて調査研究を繰り返し行うことにより、適用する調査・解析・評価技術や工学技術などの高度化およびそれらの有効性を確認することができる。なお、研究坑道などのレイアウト案については、今後取得する深部地質環境に基づき、随時見直すこととする。

5.2 地上施設の概要

地上施設は、立坑掘削に用いる櫓を収納した防音ハウスと巻上設備、掘削に伴い必要となる排水処理設備、コンクリートプラントなどの付帯設備や、作業全体にかかわる設備としての受変電設備、資材置場、火工所、工事施工者事務所などからなる。

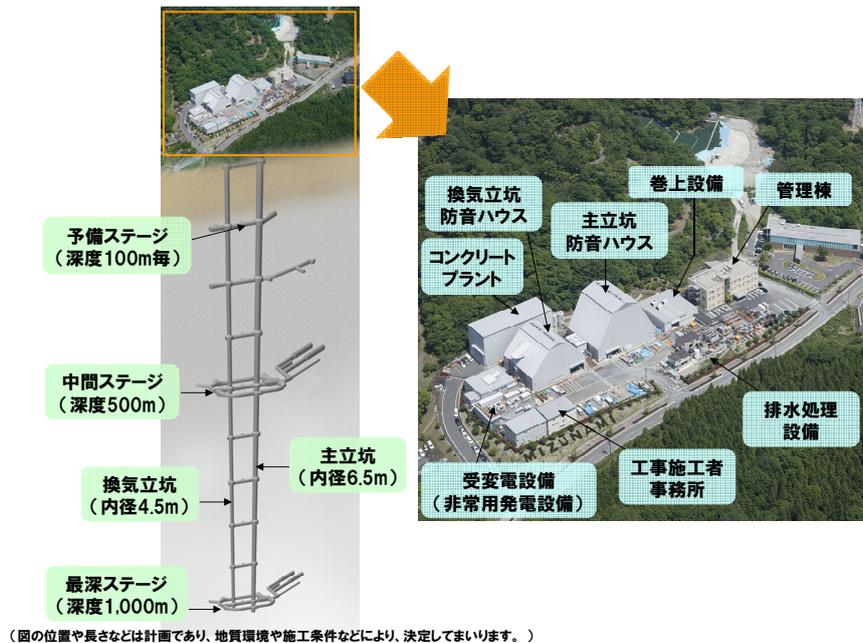


図 5.2-1 超深地層研究所の施設レイアウト（案）

6. 超深地層研究所計画の運営

6.1 超深地層研究所計画の組織体制

超深地層研究所計画の組織体制は研究段階ごとに整備される。第1段階においては、調査研究の計画・調整や評価などの全体管理を担当するグループと各分野の調査研究を実行するグループとが相互に連携を図り、超深地層研究所計画を進めてきた。第2段階では、これらのグループに加え研究坑道の設計や工程管理などを担当するグループが設置され、超深地層研究所の建設と調査研究との調整などが図られてきている。今後とも組織の整備を図り、超深地層研究所計画を着実に進めていく予定である。また、北海道幌延町において実施している幌延深地層研究計画や、茨城県東海村の東海研究開発センターのエントリーなどの室内試験施設における成果も考慮しつつ、それらの関係部署が技術的な協力関係をより一層強化していくことも重要である。具体的には、堆積岩を対象とする幌延深地層研究計画や結晶質岩を対象とする超深地層研究所計画では、地質環境を調査・評価するための体系的な方法論を提示する一方で、エントリーやクオリティーにおいては、条件を制御した室内・工学試験や放射性核種のデータを取得することにより、メカニズムや時間依存性に対する理解を深めていく。これらの成果を相互に活用することにより、原子力政策大綱に示された地層処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化に向けた基盤的な研究開発、および安全規制のための研究開発を進めていく。

一方、超深地層研究所計画を効率的に、かつ透明性をもって進め、科学的・技術的により高度な成果を上げるためには、委員会や学会などの場において様々な外部の専門家による評価や助言などを受けることが必要である。そのため、原子力機構が外部の専門家を招聘して設置した深地層の研究施設計画検討委員会などを定期的に開催するとともに、国内外の学会などの場において、調査研究の計画や成果などを公表し、技術的な助言を得るための取り組みを継続してきた。今後も、上記の委員会などを定期的に開催するとともに、国内外の学会などの場において、調査研究の計画や成果などを公表し、技術的な助言を求めていく。

超深地層研究所における地層科学研究は、地質学、水理学、地球化学、岩盤力学などの基礎的な研究分野にまたがる極めて学術的な研究である。また、高度な土木工学の技術などを用いることが必要なため、国際協力を含め関係する研究機関や大学などとの協力を進めていくことが重要である。これまでに、スイス放射性廃棄物処分協同組合 (Nagra) ならびに米国サンディア国立研究所 (SNL) との国際共同研究の実施や、スウェーデン原子燃料廃棄物管理会社 (SKB) およびカナダ原子力公社 (AECL) からの国際特別研究員の受け入れなどを行ってきている。さらに韓国原子力研究所 (KAERI) との研究協力協定を締結し、両機関の地下研究施設計画に関する技術情報交換および研究者の受け入れ・派遣などを継続的に実施しており、アジア地域における研究支援を積極的に行っている。今後も、国内外の研究機関や大学などとの協力関係を維持していく。また、深地層は物質の貯蔵や人間活動など空間利用の場としても期待されていることから、超深地層研究所を原子力機構の研究施設としてのみ利用するのではなく、広く外部の研究者にも提供される研究の場としても活用していく。また研究所では、建設段階から安全確保を図りながら公開していく予定であり、児童・生徒の学習の場としても活用できるよう整備し、積極的に開放していく計画である。

6.2 超深地層研究所計画のスケジュール

超深地層研究所計画においては、基本的に、研究段階ごとに調査研究計画の策定、調査研究の

実施および調査研究成果の評価を実施する。全体の期間は約20年であり、そのスケジュールは表 6.2-1 に示すとおりである。本スケジュールについては、本計画や研究段階ごとの計画の見直し・改訂に伴い、必要に応じて見直すこととする。

表 6.2-1 超深地層研究所計画のスケジュール

年度	1996 H8		2000 H12		2005 H17		2010 H22		2015 H27
第1段階									
第2段階									
第3段階									

参考文献

動力炉・核燃料開発事業団 (1992) : 立坑掘削影響試験ワークショップー発表論文集ー, 動燃事業団技術資料, PNC TN7410 92-052.

動力炉・核燃料開発事業団 (1996) : 超深地層研究所地層科学研究基本計画, 動燃事業団技術資料, PNC TN7070 96-002.

原子力委員会 (2000) : 原子力の研究, 開発及び利用に関する長期計画 (平成 12 年 11 月 24 日) .

原子力委員会 (2005) : 原子力政策大綱 (平成 17 年 10 月 11 日) .

原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会 (2000) : 我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価 (平成 12 年 10 月 11 日) .

核燃料サイクル開発機構 (1999a) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性ー地層処分研究開発第 2 次取りまとめ, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 99-020~-024.

核燃料サイクル開発機構 (1999b) : 釜石原位置試験総括報告書, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 99-001.

核燃料サイクル開発機構 (2000) : 広域地下水流動研究の現状ー平成 4 年度~平成 11 年度ー, サイクル機構技術資料, JNC TN7400 2000-014.

核燃料サイクル開発機構 (2001) : 超深地層研究所地層科学研究基本計画, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2001-009.

核燃料サイクル開発機構 (2002) : 超深地層研究所地層科学研究基本計画, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2001-018.

核燃料サイクル開発機構 (2005) : 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ー平成 17 年取りまとめー, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2005-014~-016, -020.

日本原子力研究開発機構 (2005) : 独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画 (中期計画) (平成 17 年 10 月 1 日~平成 22 年 3 月 31 日), 日本原子力研究開発機構.

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 (2007) : 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, 原子力機構研究開発報告書類, JAEA-Research 2007-043.

Takeuchi S., Takeuchi R., Salden W., Saegusa H., Arai T. and Matsuki K (2007) :

Hydrogeological conceptual model determined from baseline and construction phase groundwater pressure and surface tiltmeter data at the Mizunami Underground Research Laboratory, Japan, Proceedings of the 11th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management ICEM2007.

Tsuruta T., Uchida M., Hama K., Matsui H., Takeuchi S., Amano K., Saegusa H., Matsuoka T. and Mizuno T. (2009) : Current statue of Phase II investigation, Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) project, Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management ICEM2009.

資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構 (2006) : 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.

OECD/NEA(1991) : Review of Safety Assessment Methods, Disposal of Radioactive Waste, A Report of the Performance Assessment, Advisory Group of the Radioactive Waste Management Committee.

SKB (2004) : Äspö Hard Rock Laboratory Annual Report 2003, TR-04-10.

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基本単位	
	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 ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線量	ルクス	lx		lm/m ²
放射線種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		m ² cd 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、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	ジュール毎平方メートル	J/m ²	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	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
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 ² 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	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	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=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
ファ	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガラ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 f=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1868 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

