

## 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

—深度 500m までの調査研究計画—

Concept and Procedure of Geoscientific Study in the Mizunami Underground  
Research Laboratory Project  
-Study Plan on Construction Phase (Phase II) and  
Operation Phase (Phase III) to 500m Depth-

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

Hiromitsu SAEGUSA, Hiroya MATSUI, Katsuhiro HAMA, Toshinori SATO  
Tadahiko TSURUTA, Ryuji TAKEUCHI, Takanori KUNIMARU, Toshiyuki MATSUOKA  
and Takashi MIZUNO

地層処分研究開発部門  
東濃地科学研究ユニット  
Tono Geoscientific Research Unit  
Geological Isolation Research and Development Directorate

June 2011

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, 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  
ー深度 500m までの調査研究計画ー

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

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 年 4 月 18 日受理)

独立行政法人日本原子力研究開発機構東濃地科学センターでは、「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）を主な対象とした超深地層研究所計画を進めている。超深地層研究所計画は、「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」、「第 3 段階；研究坑道を利用した研究段階」の 3 段階からなる計画である。超深地層研究所計画は、「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」及び「深地層における工学技術の基盤の整備」を第 1 段階から第 3 段階までを通した全体目標として定め、調査研究を進めている。

本稿では、深度 300m における水平坑道において調査研究を開始した 2010 年度から深度 500m の研究坑道掘削終了までの第 2 段階、及び第 3 段階における調査研究の考え方と進め方を取りまとめた。具体的には、①地上からの調査評価技術の妥当性評価、②坑道掘削時の調査評価技術の整備、③坑道を利用した調査評価技術の整備、の考え方を明確化／具体化した。また、調査研究成果の統合化／知識化の考え方を明確化した。

Concept and Procedure of Geoscientific Study in the Mizunami Underground Research  
Laboratory Project  
— Study Plan on Construction Phase (Phase II) and Operation Phase (Phase III) to 500m Depth —

Hikomitsu SAEGUSA, Hiroya MATSUI, Katsuhiko HAMA, Toshinori SATO, Tadahiko TSURUTA  
Ryuji TAKEUCHI, Takanori KUNIMARU, Toshiyuki MATSUOKA and Takashi MIZUNO

Tono Geoscientific Research Unit  
Geological Isolation Research and Development Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Akeyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received April 18, 2011)

Tono Geoscience Center (TGC) of Japan Atomic Energy Agency (JAEA) is being performed Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) Project, which is a broad scientific study of the deep geological environment as a basis of research and development for geological disposal of nuclear wastes, in order to establish comprehensive techniques for the investigation, analysis and assessment of the deep geological environment in fractured crystalline rock.

The MIU Project has three overlapping phases: Surface-based Investigation phase (Phase I), Construction phase (Phase II), and Operation phase (Phase III). The project goals of the MIU Project from Phase I through to Phase III are: 1) to establish techniques for investigation, analysis and assessment of the deep geological environment, and 2) to develop a range of engineering for deep underground application.

This document presents the concept and procedure of geoscientific study on Phase II and III to 500m depth. Specifically, followings methodologies are clarified;

- Evaluation of adequacy of techniques of investigation, analysis and assessment adopted on Surface-based Investigation phase,
- Establishment of techniques of investigation, analysis and assessment on Construction phase and Operation phase, and
- Synthesizing of study results and knowledge base development.

*Keywords: Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) Project, Crystalline Rock, Construction Phase (Phase II), Operation Phase (Phase III), Study Plan*

目 次

はじめに .....	1
1 超深地層研究所計画 .....	2
1.1 瑞浪超深地層研究所の位置づけ .....	2
1.2 地層科学研究の歴史 .....	2
1.3 超深地層研究所計画の意義 .....	3
1.4 瑞浪超深地層研究所の設置場所の概要 .....	3
1.5 超深地層研究所計画の目標 .....	6
1.6 調査研究の進め方と概要 .....	6
2 第2段階の調査研究計画 .....	19
2.1 第2段階の段階目標 .....	19
2.2 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備 .....	19
2.3 深地層における工学技術の基盤の整備 .....	47
3 第3段階の調査研究計画 .....	54
3.1 第3段階の段階目標 .....	54
3.2 調査研究計画 .....	54
4 正馬様用地における調査研究 .....	72
おわりに .....	73
参考文献 .....	74

## Contents

Introduction .....	1
1 Mizunami Underground Research Laboratory .....	2
1.1 Position .....	2
1.2 History .....	2
1.3 Signification .....	3
1.4 Site overview .....	3
1.5 Goals.....	6
1.6 Study procedures and concept .....	6
2 Plan for study on Construction phase.....	19
2.1 Phase II goal .....	19
2.2 Establishment of techniques for investigation, analysis and assessment of the deep geological environment.....	19
2.3 Development of a range of engineering for deep underground application.....	47
3 Plan for study on Operation phase .....	54
3.1 Phase III goal.....	54
3.2 Study plan of each subject .....	54
4 Study at Shobasama Site .....	72
Summary .....	73
Reference.....	74

## はじめに

超深地層研究所計画は、日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という）が、前身である動力炉・核燃料開発事業団（以下、「動燃事業団」という）及び核燃料サイクル開発機構（以下、「サイクル機構」という）の時代を通して、岐阜県瑞浪市で進めている結晶質岩（花崗岩）を主な研究対象とした総合的な研究開発計画であり、「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」（原子力委員会、2000；以下、「原子力長計（2000）」という）や「原子力政策大綱」（原子力委員会、2005）に示された深地層の研究施設計画の一つである。同計画は、1996年度より岐阜県瑞浪市明世町（あきよちょう）の正馬様洞（しょうばさまぼら）にある原子力機構用地（以下、「正馬様用地」という）において、深地層の科学的研究（以下、「地層科学研究」という）として、研究坑道\*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」というサイクル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、2001a；以下、「基本計画（2001）」という）。さらに、超深地層研究所計画は、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用地、以下、「研究所用地」という）の賃貸借契約を締結し、ここに、超深地層研究所の研究坑道及び関連施設を設置することとした。これを受けサイクル機構では、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）」という）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・原子力機構、2006；以下、「全体計画」という）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」という）及び「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」という）の改訂に関する閣議決定がなされ（同年4月施行）、処分事業の実施主体（原子力発電環境整備機構；以下、「原環機構」という）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」に変更されるとともに、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」が改めて明示された。これを受け最大限の合理化を図りつつ、2005年から始まった中期計画に掲げた中間深度までの調査研究の確実な達成を目指すとともに、基本方針に定められた研究開発機関の役割を果たすため、地下での調査研究や国民との相互理解促進の場として活用できる新たな研究坑道を、研究所用地の深度300mに整備することとなった。当該深度における研究坑道は、より深部と比較して割れ目が多いなどといった地質環境特性が異なっていると予想されることから、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、地下深部に関する知見や技術的ノウハウなどを蓄積できるという利点を有している。また、地下深部の地質環境を理解するための調査研究の現場を広く公開することにより、地層処分の器である「地下深部」を明らかにするための技術に対する信頼感を醸成し、地層処分に対する国民との相互理解が可能になると考える。

以上のことから、2010年度は研究坑道掘削を継続するとともに、深度300mの研究坑道における調査研究を開始することとなり、本稿では、2010年度から深度500mの研究坑道掘削終了までの研究坑道の掘削を伴う研究段階（以下、「第2段階」という）、及び研究坑道を利用した研究段階（以下、「第3段階」という）における調査研究の考え方と進め方を取りまとめた。

なお、2011年3月11日に発生した東日本大震災による影響のため、超深地層研究所計画を含む地層処分研究開発全体の進め方を見直す必要が生じることが想定される。関係各所と調整を行いつつ適宜対応していく予定である。

---

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

## 1. 超深地層研究所計画

### 1.1 瑞浪超深地層研究所の位置づけ

原子力委員会は2000年11月の原子力長計(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示した。その中で、サイクル機構については、「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」ことを示した。また、全体計画は、2010年度頃までの期間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示し、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では、地層科学研究を進めてきた。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であり、地層処分研究開発の基盤となる研究である。

原子力機構が建設中の瑞浪超深地層研究所は、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)と淡水系地下水、硬岩を主な研究対象とする。

### 1.2 地層科学研究の歴史

東濃地科学センターでは、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、東濃鉾山や東濃鉾山を含む10km四方程度の領域において、地層科学研究を実施してきた。また、岩手県の釜石鉾山においては花崗岩を対象とした既存坑道を活用した調査研究を実施した。

東濃鉾山においては、おもに堆積岩(新第三紀中新世の瑞浪層群)を対象に、地質・地質構造、地下水の流動特性、地下水の地球化学的特性、岩盤の力学的特性ならびに岩盤中での物質移動特性(物質移動場や岩盤の収着・拡散特性、コロイド/有機物/微生物の影響)に関する研究を実施した(核燃料サイクル開発機構, 1999a)。このうち、直径6m、深さ150mの第2立坑を掘削しつつ実施した立坑掘削影響試験では、立坑掘削に伴う地質環境の変化の予測、及び予測結果と実際の観測結果との比較をとおした予測結果の妥当性の評価により、地質環境の調査・解析・評価手法の開発・改良を行った(動力炉・核燃料開発事業団, 1992)。

広域地下水流動研究では、東濃鉾山を包含する約10km四方、深さ1kmの領域において、地表から地下深部までの地質・地質構造、地下水の流動特性及び地球化学的特性を把握するために必要な調査・解析・評価手法の開発を行った(動力炉・核燃料開発事業団, 1997)。なお、広域地下水流動研究については、現在は主要な現場調査を終了し、ボーリング孔を用いた地下水の長期モニタリングを実施中である(核燃料サイクル開発機構, 2005)。

釜石鉾山において実施した釜石原位置試験研究では、地下約300m及び700mの既存坑道を利用し、結晶質岩(栗橋花崗閃緑岩)岩体の有する地質・地質構造、地下水の流動特性、地下水の地球化学的特性、岩盤の力学的特性の把握、及び地下深部における水平坑道掘削の力学的影響ならびに物質移動の遅延効果の評価を行った。また、地震が深部地質環境に与える影響についても把握したほか、工学的技術を含め、上記の試験研究に必要な要素技術を開発・改良し、その適用性を確認した(核燃料サイクル開発機構, 1999b)。

東濃鉾山ならびに釜石鉾山における調査研究、及び広域地下水流動研究では、地質環境に関する既存の情報や鉾山における既存坑道などの研究資源を十分に活用して行われ、深部地質環境に関する新たな情報・知見や、地表または坑道から深部地質環境を調査し解析・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必要である。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が合理的である。これにより、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事例的に確認することが可能となる。

### 1.3 超深地層研究所計画の意義

トンネルなどの地下空洞の建設などの際に、空間的な不均質性を有する地質環境を限られた調査量で効率的に理解していくためには、広範囲の全体の傾向を知る調査から狭い範囲の特定の目的をもつ調査へ段階的に進めることが一般的である。原環機構が行う処分事業（原子力発電環境整備機構，2001）の場合においても同様の考え方が適用される。

超深地層研究所計画では、研究坑道の建設に先立って調査研究を開始するとともに、研究坑道の建設中及び建設後の調査研究へと継続的に展開することによって、人工的な擾乱を受けていない地質環境とその地質環境が研究坑道の掘削などにより変化していく状況について把握することができる。また、研究坑道建設前の調査研究による情報に基づき、研究坑道を設計・施工することにより、調査研究領域を適切に確保することが可能となる。さらには、深部地質環境の推定（地質環境モデルの構築）とその推定結果の妥当性の評価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。

このような特徴を踏まえ、超深地層研究所計画は、地表からの調査予測研究段階（以下、「第1段階」という）、第2段階、第3段階の三つの段階に区分し、約20年をかけて進められる。なお、原環機構が行う処分地選定のための調査も、文献調査、概要調査、精密調査（前段の地上からの精密調査と、後段の地下施設を利用した精密調査）と段階的に進められる計画である。超深地層研究所計画における調査研究と原環機構による処分地選定を対比すると、概ね、超深地層研究所計画における第1段階が概要調査と地上からの精密調査に、第2段階及び第3段階が地下施設を利用した精密調査に対応する。

以上のことから、超深地層研究所計画においては、段階的な調査研究を展開することによって、原環機構が行う処分事業の各段階において必要となる体系的な調査・解析・評価技術や関連する個別の調査解析技術、計画立案や調査・解析の実施に関わる技術的ノウハウ（例えば、各作業における留意点や意思決定プロセス、トラブルシューティングなど）、品質管理の考え方などを整備することが重要である。なお、各段階の調査研究成果は、処分地の選定プロセスに対して適切なリードタイムをもって整備していく必要がある。さらに、堆積岩と塩水系地下水、軟岩を主な対象とした幌延深地層研究計画（核燃料サイクル開発機構，2001b）での調査研究成果と組み合わせることにより、日本の様々な地質環境に適用できる汎用的な地質環境の体系的な調査・解析・評価技術を整備することが可能となる。

### 1.4 瑞浪超深地層研究所の設置場所の概要

瑞浪超深地層研究所の研究坑道及び関連施設は、瑞浪市明世町に位置する、瑞浪市から借用した東濃研究学園都市インターガーデン内にある研究所用地（約7.5ha）に建設されている。

瑞浪超深地層研究所の周辺の地域は、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）との境界部にあたり、白亜紀の花崗岩（土岐花崗岩）が広く分布する。白亜紀花崗岩はわが国に広く分布する岩石である（核燃料サイクル開発機構，1999a）。この花崗岩を基盤として、新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）と、固結度の低い新第三紀鮮新世の砂礫層（瀬戸層群）が分布する（図 1.4-1）。瑞浪超深地層研究所の研究坑道は主として、この地域の基盤をなす土岐花崗岩中に掘削される（図 1.4-2）。また、瑞浪超深地層研究所が位置する東濃地域は、北西部に美濃飛驒山地、南東部に三河山地が分布し、その間に丘陵地が広がる地形概観を示す。北部の山地には木曾川が流れ、先行性の河川として深い谷を刻んでいる。丘陵地の中央部には、北東から南西に向かって土岐川（庄内川）が流れ、その本流及び支流の沿岸に段丘が発達して台地を作り、河川周辺の低地には沖積地が広がっている。

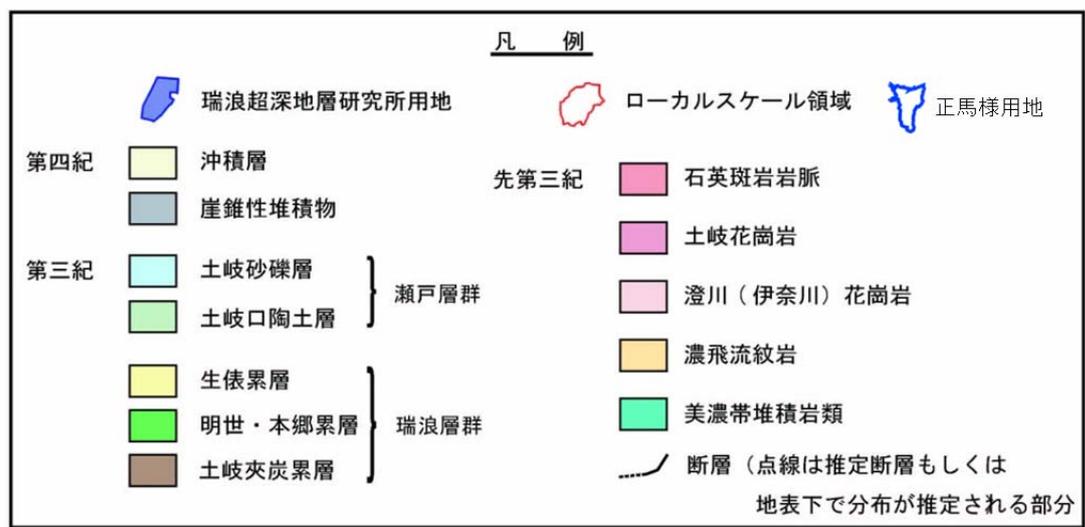
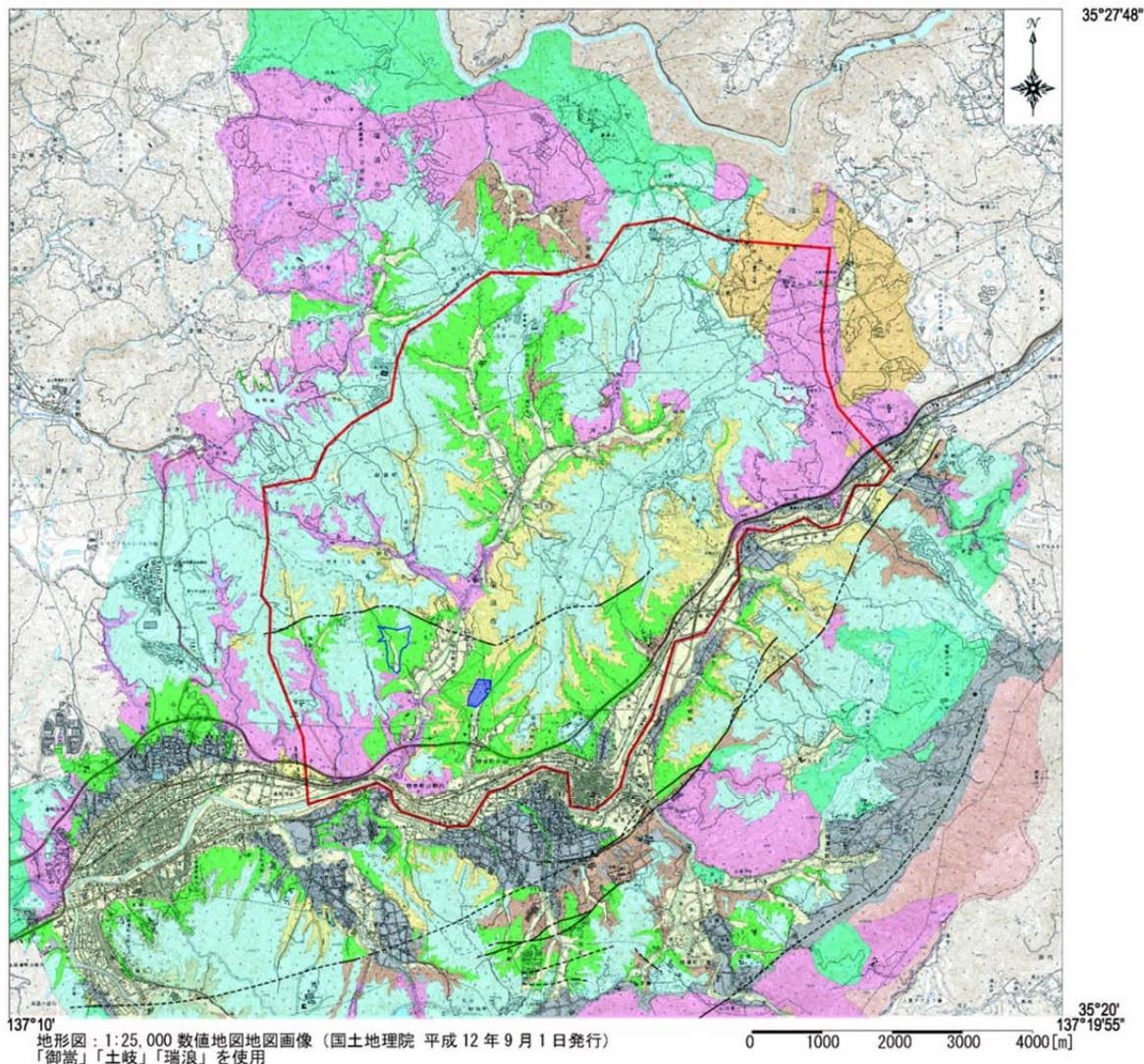


図 1.4-1 瑞浪超深地層研究所周辺の地質概要

この地域は瑞浪超深地層研究所の設置場所として、以下のような特徴及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、及び断層やウラン鉱床などの地質学的特徴を有する

地層が存在する。

- ・ 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。

以上の項目に加え、東濃地科学センターには、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，1994）が蓄積されており、地質環境を調査評価する上での経験を有する研究者、技術者が集合していることから、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、正馬様用地は研究坑道の掘削は行わないものの、これまでのボーリング調査などにより、地下数百 m の土岐花崗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いる。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。

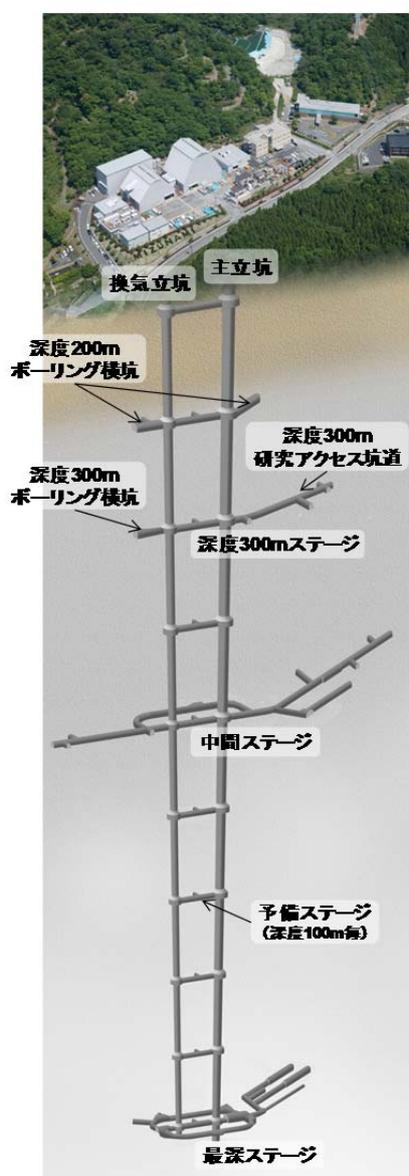


図 1.4-2 瑞浪超深地層研究所の研究坑道イメージ図  
(坑道の位置や長さなどは計画であり、地質環境や施工条件などにより決定していく。)

## 1.5 超深地層研究所計画の目標

超深地層研究所計画では、以下の二つを第1段階から第3段階までを通した全体目標として設定している。なお、これら全体計画に関わる各段階での段階目標も設定しており、それらについては2.1及び3.1で詳述する。

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

以下に、二つの全体目標の概要を示す。

### (1) 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備

「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質・地質構造、地下水の動きや性質、岩盤の熱・力学特性、岩盤中での物質の挙動、坑道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。

具体的には、超深地層研究所計画における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実際の地質環境に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ていく。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、地質環境モデルの妥当性確認や調査評価技術の改良を進め、段階ごとに、実際の地質環境に適用可能な技術として体系化していく。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く。あわせて、中期計画（日本原子力研究開発機構、2010）に示したように、処分事業と安全規制の両面を支える地層処分技術の知識基盤を整備していくため、深部地質環境の調査・解析・評価手法に関して、その過程で得られた経験や技術的ノウハウをできるだけ知識化し、知識ベースの充実を目指す。特に、本研究においては、実際の地質環境が有する空間的な不均質性をどう理解し、これに起因する不確実性にいかに対処していくかが重要な課題であり、そこには多くの試行錯誤が伴う。このような経験を通じて得られた技術的ノウハウは、生きた知識として、処分事業や安全規制を支える技術基盤に更なる厚みを与えるものである。

### (2) 深地層における工学技術の基盤の整備

「深地層における工学技術の基盤の整備」は、研究坑道を設計・施工・維持していくことを通じて、地層処分に特有の「情報の取得や技術の実証を目的とした地下施設」を設置するための工学技術の基盤を整備していくものである。すなわち、研究坑道の建設自体が目的ではなく、地質環境を理解するための調査手段として、また、深部地質環境に到達し試験を行う場を確保するために、地下に施設を展開し維持していく技術である。このような研究坑道の設計、施工及び維持管理を通じて培われた技術や経験は、実際の処分事業において、最終処分施設建設地の選定に向けた精密調査の後段に実施される地下施設を利用した調査の技術基盤として活用されることになる。

具体的には、瑞浪超深地層研究所において、第1段階で得られた地質環境情報に基づき、現状の土木工学技術や資源工学技術を適用して、調査・試験に必要となる地下深部までの研究坑道を設計するとともに、第2段階において実際に研究坑道を安全かつ合理的に施工することを通じて、計測結果などの情報を設計・施工法へフィードバックし、それらの適用性を確認する。さらに、第3段階で利用される場の構築と維持・管理ができることを確認しながら、その技術基盤を整備していく。その際、研究坑道の掘削による地質環境への影響を評価するための手法の整備や、影響を修復・軽減するための技術の開発なども重要な課題となる。また、研究坑道の設計・建設については、深地層に対する国民の理解促進の場としての役割にも留意して進めていく。

## 1.6 調査研究の進め方と概要

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の体系的な調査・解析・評価技

術の基盤を整備するために、超深地層研究所計画では、「安全評価」、「地下施設の設計・施工」及び「環境影響評価」の観点から、調査評価すべき地質環境の特性やプロセスの具体化を図るとともに整理を行い、それらを把握することを調査研究の個別目標と課題として設定している。また、安全評価及び地下施設の設計・施工への研究成果の反映を念頭に置いて、不均質性を有する地質環境を限られた調査量で効率的に理解していくために、空間スケールを設定を行った。さらに、繰り返しアプローチ（図 1.6-1）を用いた調査研究を展開し、調査研究で得られた情報に基づき地質環境モデルを構築し、次の段階における調査研究の対象を抽出・特定することとしている。このような考え方によって、調査・解析・評価を行うことによって、調査の種類や量と、個別目標と課題に対する理解度や不確実性との関連性を事例的に明らかにすることが可能となると考えられる。また、調査研究成果は、統合化データフローダイアグラム（例えば、三枝ほか，2007）を用いて統合化するとともに、処分事業と安全規制への技術移転や、次世代の研究者や技術者への技術継承を見据えて知識ベースを用いた経験や技術的ノウハウなどの整理を行う。この技術的ノウハウなどは、統合化データフローダイアグラムに関連付けて取りまとめることとする。ここで統合化データフローダイアグラムとは、個別目標と課題を達成するための「調査」から「モデル化・解析」までの合理的な道すじを示したものである。

以下に個別目標と課題の設定、及び空間スケールの設定、研究成果の統合化／知識化について詳述する。

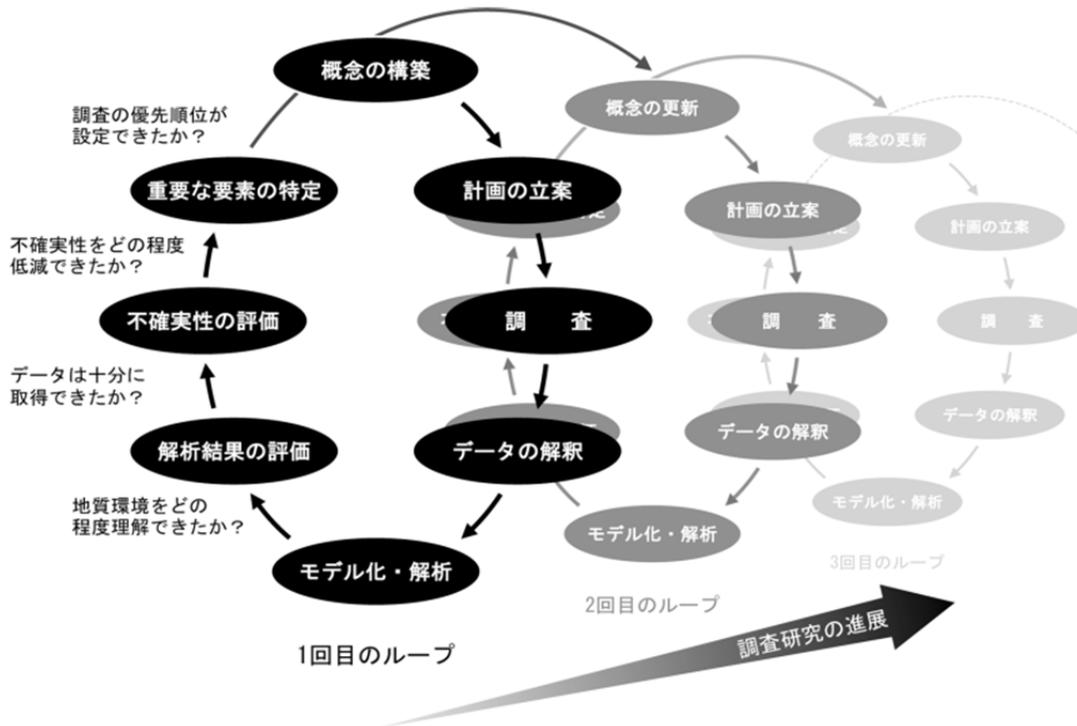


図 1.6-1 繰り返しアプローチ

(1) 調査研究の個別目標と課題の設定

地層処分においては、地質環境には、「廃棄物を長期にわたって物理的に隔離すること」、「人工バリアにとって適切な設置環境を提供すること」、「天然バリアとして機能すること」の三つの役割が期待されている（核燃料サイクル開発機構，1999a；清水ほか，2001）。このうち、地質環境が廃棄物を長期にわたって物理的に隔離するために考慮すべき事項については、「概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件」（原子力安全委員会，2002）として整理されている。対象とする地質環境がこの環境要件を満たしたうえで、地層処分の技術的実現性をより確かなものとしていくためには、地質環境には、さらに以下のような条件や機能が期待される。

- ・ 地層処分の場を確保する観点から、対象とする地層が十分な深度に分布し、処分場を建設するうえで十分な空間的広がりを持つこと

- ・ 人工バリアや処分施設を安全に設計・施工し、健全に維持する観点から、対象とする地層の応力状態が均質に近く、地温が低いこと
- ・ 緩衝材の流出、オーバーパックの腐食及びガラスの溶解を抑制する観点から、処分場を通過する地下水流束が低く、地下水が強酸性や強アルカリ性でなく、かつ還元的であること
- ・ 放射性核種の移動を抑制する観点から、対象とする地層中の地下水流動が緩慢で移動距離が長く、放射性核種の移動が十分に遅延されること
- ・ 放射性核種の濃度を低減させる観点から、対象とする地層が有する放射性核種の希釈・分散効果が大きいこと

そのうえで、対象とする地質環境が、人工バリアの設置環境及び天然バリアとしての安全機能を長期にわたって維持することが求められる。そこで、地層処分にとって重要な地質環境の条件や機能について、国際的な協力により作成されている汎用的な FEP（処分の場としての性質（Feature）と安全性能に影響を及ぼすと考えられる様々な事象（Event）及びプロセス（Process））のリスト（NEA, 2000）に加え、概要調査における調査項目や手法などを整理した事例（核燃料サイクル開発機構, 1999a；原子力発電環境整備機構, 2004）などを参考にして、「安全評価」の観点から調査評価すべき地質環境の特性やプロセスとして、具体化を図るとともに整理を行い、それらを把握することを調査研究の個別目標と課題として設定した（図 1.6-2）。

また、超深地層研究所計画では、調査研究において取得した地質環境情報に基づいて、実際に研究坑道の設計・施工を進めていく。このため、調査評価すべき地質環境の特性やプロセスについては、「地下施設の設計・施工」の観点からも整理しておくことが必要である。さらに、近年、処分事業の展開にあたっては、人間環境に対する安全性のみならず、社会的な影響や環境への影響などについても評価することの重要性が示されており（AECL, 1994; Posiva, 1999; DOE, 2002）、地表から地下深部までの「環境影響評価」は、トンネルやダムなどの大規模事業における地上での環境アセスメントと同様に重要であると考えられる（核燃料サイクル開発機構, 2004）。超深地層研究所計画では、実際に研究坑道を建設しながら調査研究を進めていくことから、地表から地下深部にいたる研究坑道の建設が周辺環境（地下水位や水質など）に与える影響を事例的に評価することが可能である。このような背景から、地下施設の設計・施工及び環境影響評価の観点からも、調査評価すべき地質環境の特性やプロセスの具体化と整理を行い（図 1.6-2）、それらを把握することを調査研究の個別目標と課題として設定した。さらに、深地層の工学技術の基盤の整備においては、研究坑道の設計や施工、維持、管理を通じて、大深度地質環境下における工学技術の有効性を確認することが重要となる。したがって、この観点からの課題の設定を行った（図 1.6-2）。

全体目標	個別目標	課題		
深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備	安全評価	地質構造の三次元的分布の把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>岩盤の地質学的不均質性の把握</li> <li>被覆層の厚さの把握</li> <li>移行経路として重要な構造の把握</li> </ul>	
		地下水の流動特性の把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>動水勾配分布の把握</li> <li>岩盤中の透水性分布の把握</li> </ul>	
		地下水の地球化学特性の把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>酸化還元環境の把握</li> <li>地下水のpH分布の把握</li> <li>地下水の塩分濃度分布の把握</li> </ul>	
		物質移動の遅延効果の把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>岩盤の収着・拡散特性の把握</li> <li>物質移動場の把握</li> <li>コロイド/有機物/微生物の影響の把握</li> </ul>	
		希釈効果の把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>帯水層の分布の把握</li> <li>帯水層などにおける流速分布の把握</li> </ul>	
	地下施設の設計・施工	地下空洞周辺の力学・水理状態の把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>応力場の把握</li> <li>岩盤の物理・力学特性の把握</li> <li>地下空洞への地下水流入量の把握</li> <li>EDZの分布/物理・力学特性の把握</li> <li>不連続構造などの有無の把握</li> </ul>	
		地下の温度環境の把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>地温勾配分布の把握</li> <li>岩盤の熱特性の把握</li> </ul>	
	環境影響評価	地下施設建設が周辺環境へ与える影響の把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水位分布への影響の把握</li> <li>地下水圧分布への影響の把握</li> <li>地下水の水質への影響の把握</li> <li>振動・騒音の把握</li> </ul>	
	深地層における工学技術の基盤の整備	地下施設の設計・施工	大深度地質環境下における工学技術の有効性の確認	<ul style="list-style-type: none"> <li>設計・施工計画技術の開発</li> <li>建設技術の開発</li> <li>施工対策技術の開発</li> <li>安全性を確保する技術の開発</li> <li>掘削影響の修復・軽減技術の開発</li> </ul>

(EDZ:掘削影響領域)

図 1.6-2 調査研究の個別目標と課題

この調査研究の個別目標と課題については、これまでの調査研究から得られた知見や、地層処分に関わる最近の動向を考慮して、若干の修正を行った。修正後の調査研究の個別目標と課題を図 1.6-3 に示すとともに、主な修正点と修正理由を以下にまとめる。また、調査研究の個別目標と課題の修正前後の両者を対比したものを図 1.6-4 に示す。

全体目標	個別目標	課題		
深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備	安全評価	地質構造の三次元的分布の把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>移行経路として重要な構造の把握</li> <li>対象岩盤の分布と形状の把握</li> <li>岩盤の地質学的不均質性の把握</li> <li>地質/地質構造の長期変化の推定</li> </ul>	
		地下水の流動特性の把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水流動場の把握</li> <li>地下水流束分布の把握</li> <li>地下水流動特性の長期変化の推定</li> </ul>	
		地下水の地球化学特性の把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水の塩分濃度分布の把握</li> <li>地下水のpH・Eh環境の把握</li> <li>地下水の水質変化の推定</li> </ul>	
		物質移動の遅延効果の把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>物質移動場の把握</li> <li>岩盤の収着・拡散特性の把握</li> <li>コロイド/有機物/微生物の影響の把握</li> </ul>	
		EDZの地質環境特性の把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>EDZの範囲の把握</li> <li>EDZの透水性、物理・力学特性分布の把握</li> <li>EDZの地球化学特性の把握</li> <li>EDZの応力状態の把握</li> </ul>	
		希釈効果の把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>帯水層の分布の把握</li> <li>帯水層中などにおける流速分布の把握</li> </ul>	
	地下施設の設計・施工	地下空洞の力学安定性の把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>応力場の把握</li> <li>岩盤の物理・力学特性の把握</li> <li>不連続構造などの有無の把握</li> </ul>	
		地下空洞への地下水流入状態の把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下空洞への地下水流入量の把握</li> <li>地下空洞への流入地下水水質の把握</li> </ul>	
		地下の温度環境の把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>地温勾配分布の把握</li> <li>岩盤の熱特性の把握</li> </ul>	
	環境影響評価	地下施設建設が周辺環境へ与える影響の把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水位・水圧分布への影響の把握</li> <li>地下水の水質への影響の把握</li> <li>排水放流先河川の水質の把握</li> <li>振動・騒音の把握</li> </ul>	
		地下施設の設計・施工	大深度地質環境下における工学技術の有効性の確認	<ul style="list-style-type: none"> <li>設計・施工計画技術の開発</li> <li>建設技術の開発</li> <li>施工対策技術の開発</li> <li>安全性を確保する技術の開発</li> <li>掘削影響の修復・軽減技術の開発</li> </ul>

(EDZ:掘削影響領域)

図 1.6-3 調査研究の個別目標と課題（修正後）

- ・ 地層処分における地質環境の安定性を評価する上で、自然現象に伴う地質環境特性（地質・地質構造、地下水流動特性、地下水の地球化学特性、岩盤の熱特性・力学特性等）の長期変化を考慮することが重要視されている（楠瀬・小出，2001；高橋ほか，2004；武田ほか，2004；社団法人土木学会，2008；（独）原子力安全基盤機構，2008；原子力発電環境整備機構，2010）。これを踏まえ、超深地層研究所計画においても、地質環境の長期変化に関する個別目標と課題を設定した。
- ・ 対象岩盤の分布と形状は、地層処分の場を確保する観点から不可欠な情報である。また、これは処分場選定に際しての安全指針（IAEA，1994）の一つとして示されている、「処分場と移動経路として重要な構造との距離が十分に確保されていること」を示すためにも必要な情報であ

る。一方、スイスのオパナリナス粘土層を対象とした安全評価の例（Nagra, 2002）にあるように、周辺岩盤に関しても補足的なバリア機能や希釈効果などが期待できることから、その分布や幾何形状の特性に関する情報を対象岩盤と同様に取得する必要がある。このことから、「対象岩盤の分布と形状の把握」を「地質構造の三次元的分布の把握」に対する課題として設定し、これまでの「被覆層の厚さの把握」はこの課題の一部として考慮することとした。

- ・ 動水勾配と岩盤中の透水性に基づき地下水の流束分布が算出されることから、これまで課題に設定していた「動水勾配分布の把握」と「岩盤中の透水性分布の把握」を、「地下水流束分布の把握」に集約した。さらに、地下水流動場を把握することは、現在の地下水流動における水理学的な境界条件などの基本的な情報を与えることや、長期的な地形や地質の時間的な変化に伴う地下水流動の変化を評価するうえでの初期条件として重要であることから、「地下水流動場の把握」を「地下水の流動特性の把握」に対する課題として設定した。
- ・ 掘削影響領域（坑道の掘削により周辺の地質環境が変化した領域を意味し、Excavation Disturbed Zone と呼ばれる。本計画書では、以下「EDZ」という。）の地質環境特性を把握することは、第3段階における調査研究の重要なテーマの一つであり、その成果は安全評価の観点で活用されるものである。これまで、「EDZの分布／物理・力学特性の把握」は、「地下空洞周辺の力学・水理状態の把握」に対する課題の一つとして設定されていたが、安全評価の観点の個別目標に「EDZの地質環境特性の把握」を追加し、それに対する課題として、「EDZの範囲の把握」や「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」を設定した。
- ・ 主に第2段階で実施する地下空洞周辺を対象とした調査研究項目の目標を明確化するために、これまでの個別目標であった「地下空洞周辺の力学・水理状態の把握」に対するEDZに関するものを除いた課題を、「地下空洞の力学的安定性の把握」に関する課題と「地下空洞への地下水流入状態の把握」に関する課題に区分した。
- ・ 瑞浪超深地層研究所の建設工事中に、研究坑道へ流入した地下水を含んだ工事に付随する処理排水を放流している河川水中に環境基本法に基づく基準値を超えるふっ素、ほう素が含まれることが判明し、建設工事を中断し、排水を停止するという事態が発生した（西田, 2009）。この経験に基づき、地下空洞へ流入する地下水の水質を把握することは、環境影響評価の観点における排水放流先河川の水質を把握するための排水処理計画を検討する上で重要であると考え、「地下空洞への流入地下水水質の把握」を「地下空洞への地下水流入状態の把握」に対する課題として追加した。また、「排水放流先河川の水質の把握」を「地下施設建設が周辺環境へ与える影響の把握」に対する課題として追加設定した。

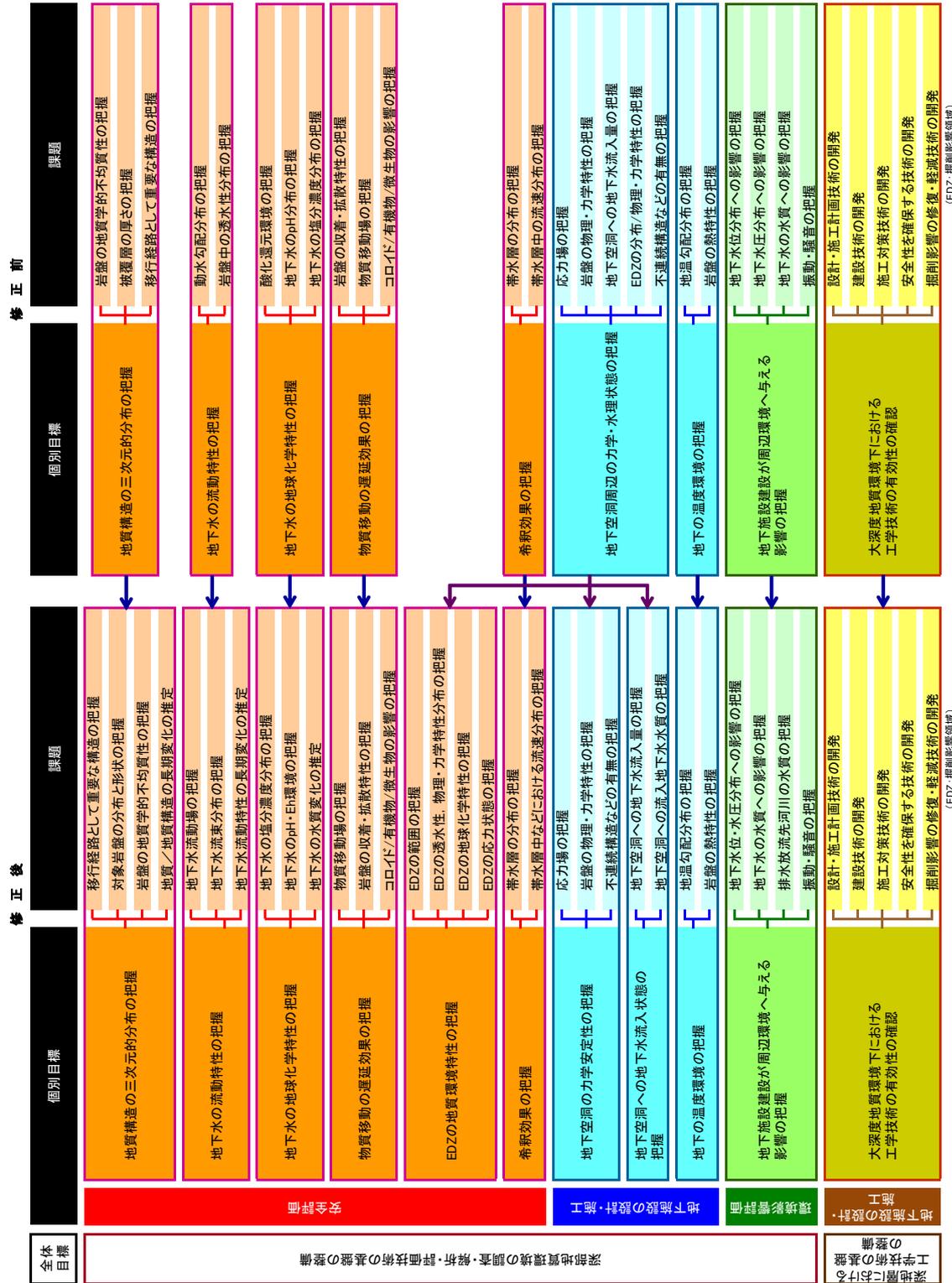


図 1.6-4 調査研究の個別目標と課題の修正前後の対比

(2) 空間スケールの設定

安全評価及び地下施設の設計・施工への研究成果の反映を念頭に置いて、不均質性を有する地質環境を限られた調査量で効率的に理解していくための手段の一つとして空間スケールの設定がある。広域地下水流動研究及び超深地層研究所計画では、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とともに地下水流動や物質移動などの評価を行うことから、涵養域から流出

域までの一つの地下水流動系や研究所用地及び研究坑道のレイアウトなどに着目して、図 1.6-5 に示すようにリージョナル、ローカル、サイト及びブロックの四つの空間スケールを設定し、調査研究を進めている（核燃料サイクル開発機構，2004）。設定した空間スケール区分や位置付けを表 1.6-1 に示す。このうち、広域地下水流動研究では、リージョナルスケール及びローカルスケールにおける調査研究を進めてきた。一方で、超深地層研究所計画では、サイトスケール及びブロックスケールにおける調査研究を進めている。リージョナルスケールは、ローカルスケールにおける研究領域を設定するための空間スケールであり、ローカルスケールは、研究所用地の地表から地下 1,000 m 程度を通過する地下水の涵養域から流出域までの一つの地下水流動系を包含する空間スケールである。また、サイトスケールの領域は、研究所用地を中心として月吉断層などの主要な地質構造の分布を考慮した範囲としている。また、ブロックスケールは、物質移動場の評価や研究坑道近傍での EDZ の評価などを実施する場合に、それに必要な空間をサイトスケールの地質環境モデルから切り出して詳細にモデル化する空間スケールである。なお、各空間スケールにおけるモデル化・解析を行う際の境界条件は、より広範囲のスケールにおけるモデル化・解析結果などを活用することがある。

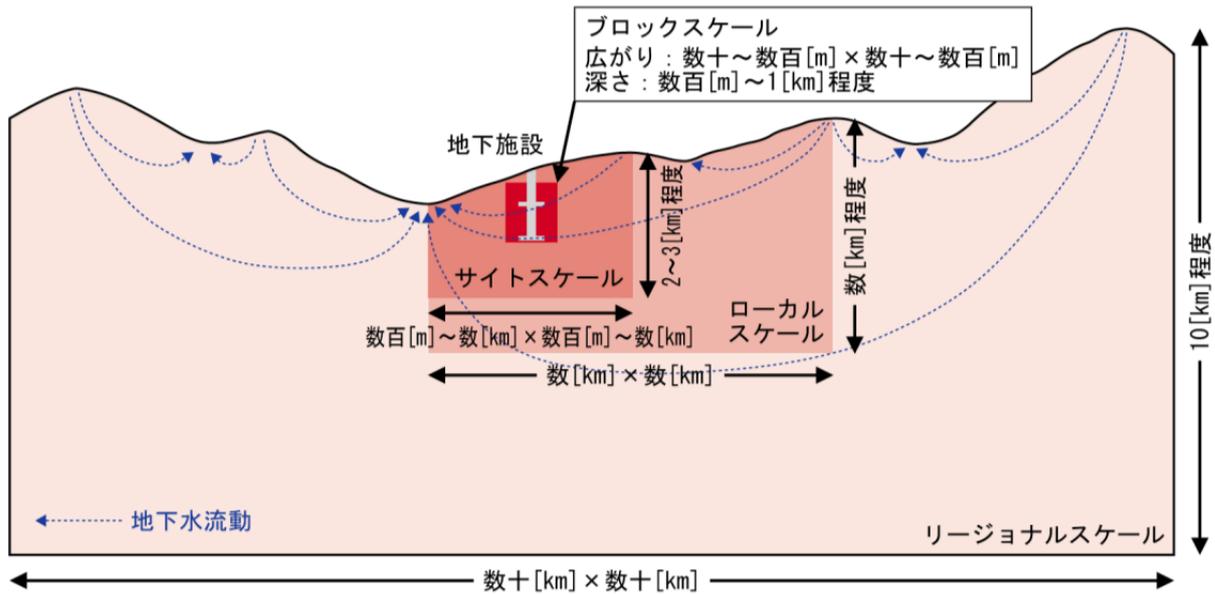


図 1.6-5 空間スケールの概念

表 1.6-1 空間スケールの対象範囲と位置づけ

空間スケール／対象範囲	位置づけ
リージョナルスケール 平面：数百 [km <sup>2</sup> ] 程度 (数十 [km] × 数十 [km]) 深さ：10 [km] 程度	・ローカルスケールの研究領域／境界条件の設定
ローカルスケール 平面：数十 [km <sup>2</sup> ] 程度 (数 [km] × 数 [km]) 深さ：数 [km] 程度	・地層処分システム全体の安全評価 ・地下施設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 <sup>2</sup> ] 程度 (数百 [m] ~ 数 [km] × 数百 [m] ~ 数 [km]) 深さ：2~3 [km] 程度	・人工バリア周辺から対象岩盤全体の安全評価 ・地下施設建設時の力学・水理状態の予測 ・ブロックスケールの研究領域／境界条件の設定
ブロックスケール 平面：数百 [m <sup>2</sup> ] 程度 (数十 ~ 数百 [m] × 数十 ~ 数百 [m]) 深さ：数百 [m] ~ 1 [km] 程度	・人工バリアから生物圏までの一部における安全評価 ・地下施設建設時の力学・水理状態の予測 ・より小スケールの研究領域／境界条件の設定

(3) 個別目標／課題と調査段階や空間スケールの関連性

各々の個別目標と課題に関わる調査研究を主に実施すべきと考えられる調査段階や空間スケールの対比を整理した（図 1.6-6）。また、その概要を以下にまとめる。

このような整理をすることによって、適用する調査・解析・評価手法と地質環境の理解度の関係を空間スケールや調査段階に応じて整理することが可能となり、それに基づき、地質環境を段階的に調査・解析・評価するための体系的な方法論やそれに関連する技術的知見を整備することができる。と考える。

全体目標	個別目標	課題	広域地下水 流動研究		MIU計画					
			L	第1段階			第2段階		第3段階	
				S	B	S	B	S	B	
深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備	安全評価	地質構造の三次元的分布の把握	移行経路として重要な構造の把握	◎	◎	-	◎	◎	◎	◎
			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	◎	◎	-	◎	-	◎	-
		地下水の流動特性の把握	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	◎	○	-	○	-	○	-
		地下水の地球化学特性の把握	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	◎	◎	-	◎	-	○	-
		物質移動の遅延効果の把握	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		-	-	-	-	◎	-	◎	
	EDZの地質環境特性の把握	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	-	-	○	-	○	-	◎	
	希釈効果の把握	帯水層の分布の把握	◎	◎	-	-	-	-	-	
		帯水層中などにおける流速分布の把握	◎	◎	-	-	-	-	-	
	地下施設の設計・施工	地下空洞の力学安定性の把握	応力場の把握	◎	◎	-	◎	◎	-	-
			岩盤の物理・力学特性の把握	○	◎	-	◎	◎	-	-
			不連続構造などの有無の把握	-	-	-	-	◎	-	-
		地下空洞への地下水流入状態の把握	地下空洞への地下水流入量の把握	-	-	-	◎	-	-	-
			地下空洞への流入地下水水質の把握	-	-	-	◎	-	-	-
地下の温度環境の把握		地温勾配分布の把握	◎	◎	-	-	-	-	-	
	岩盤の熱特性の把握	◎	◎	-	-	◎	-	-		
環境影響評価	地下施設建設が周辺環境へ与える影響の把握	地下水位・水圧分布への影響の把握	○	○	-	◎	-	◎	-	
		地下水の水質への影響の把握	○	○	-	◎	-	◎	-	
		排水放流先河川の水質の把握	○	○	-	◎	-	◎	-	
		振動・騒音の把握	○	○	-	◎	-	◎	-	
深地層における工学技術の基盤の整備	地下施設の設計・施工	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	-	-	-	-	◎	-	◎	
		掘削影響の修復・軽減技術の開発	-	-	-	-	-	-	◎	

(EDZ:掘削影響領域) (L:ローカールスケール, 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

図 1.6-6 個別目標と課題と調査段階／空間スケールの対比

1) 地質構造の三次元的分布の把握

- ・ 移動経路として重要な構造の三次元分布や幾何形状を表現するローカールスケール及びサイトスケールの地質構造モデルを構築する。このサイトスケールの地質構造モデルの構築・確認・更新は、第1段階から第3段階を通じて繰り返し実施する。また、ブロックスケールの地質構造モデルではサイトスケールのモデルで表現する地質構造要素内の不均質性を表現する。プロ

ックスケールの地質構造モデルの構築結果は、サイトスケールのモデルに反映する。

- ・対象岩盤の分布と形状は、主にローカスケールでの調査研究で評価し、それを第1段階と第2段階での調査研究で確認する。確認結果は、サイトスケールの地質構造モデルに反映する。
- ・割れ目の分布や頻度を指標として岩盤の地質学的不均質性（例えば、花崗岩中の上部割れ目帯や下部割れ目低密度帯、低角度を有する割れ目の集中帯の区分）を評価し、サイトスケールの地質構造モデルに反映する。また、ブロックスケールの地質構造モデルではサイトスケールのモデルで表現する地質構造要素内の不均質性を表現する。ブロックスケールの地質構造モデルの構築結果は、サイトスケールのモデルに反映する。
- ・地質／地質構造の長期変化に関しては、岩盤の地質学的不均質性や断層などの不連続構造の形成過程、及び断層の変質プロセスなどを評価し、ローカスケール及びサイトスケールの地質構造モデルに反映する。

## 2) 地下水の流動特性の把握

- ・地下水流動場（地下水の主流動方向、涵養域や流出域の位置など）は、主にローカスケールで評価し、その妥当性を第1段階におけるサイトスケールでの調査研究で確認する。
- ・サイトスケールの水理地質構造モデルの構築・確認・更新及びそれを用いた地下水流動解析を、第1段階から第3段階を通じて繰り返し実施する。
- ・ブロックスケールでの水理地質構造モデルではサイトスケールのモデルで表現した水理地質構造内の透水不均質性を表現する。ブロックスケールの水理地質構造モデルの構築結果は、サイトスケールのモデルに反映する。
- ・地質／地質構造の長期変化に伴う水理地質構造の長期変化を推定し、サイトスケールの水理地質構造モデルに反映する。地下水流動場や動水勾配の長期変化は主にローカスケールでの地下水流動解析によって推定する。

## 3) 地下水の地球化学特性の把握

- ・地下水の塩分濃度分布や pH・Eh 環境は、ローカスケール及びサイトスケールでモデル化する。サイトスケールでの地球化学モデルの構築・確認・更新は、第1段階から第3段階を通じて繰り返し実施する。
- ・地下水の水質変化は、主にローカスケールで評価するとともに、その結果は地下水流動場の評価結果の妥当性確認に用いる。

## 4) 物質移動の遅延効果の把握

- ・物質移動の遅延効果を把握するための調査研究は、第1段階及び第2段階では岩芯試料や岩石試料、地下水試料などを用いた室内試験による検討を中心に行う。第3段階では室内試験や原位置試験を組合せることにより物質移動の遅延特性を評価し、ブロックスケールでの物質移動概念モデルを構築する。

## 5) EDZ の地質環境特性の把握

- ・EDZ の範囲や、透水性／物理／力学特性分布、応力状態を把握するための調査研究においては、ブロックスケールでの岩盤力学概念モデルに基づく数値解析による予測を第1段階と第2段階で行う。また、EDZ の地質環境特性に関わる原位置試験は第3段階で実施し、ブロックスケールでの地質環境モデルを構築する。

## 6) 希釈効果の把握

- ・主にローカスケールや第1段階におけるサイトスケールにおける地下水流動解析結果を用いて水理地質構造区分ごとの流速分布により評価する。
- ・帯水層の空間分布は、ローカスケール及びサイトスケールにおける水理地質構造モデルを用いて評価する。

#### 7) 地下空洞の力学安定性の把握

- ・ 応力場や岩盤の物理・力学特性を表現する岩盤力学概念モデルは、ローカルスケール及びサイトスケールを対象として構築する。このサイトスケールの岩盤力学概念モデルの構築・確認・更新は、第1段階から第2段階を通じて繰り返し実施する。ブロックスケールの岩盤力学概念モデルの構築・確認・更新は、第2段階において実施する。なお、広域応力場の評価はローカルスケールで実施する。
- ・ 第2段階において、坑道で観測された断層などの不連続構造が坑道の力学安定性に与える影響を評価する。

#### 8) 地下空洞への地下水流入状態の把握

- ・ 第2段階において坑道への地下水流入量や坑道への流入地下水の水質を観測することにより、サイトスケールでの地下水流入状態を把握する。

#### 9) 地下の温度環境の把握

- ・ 地温勾配分布は、主にローカルスケールや第1段階での深層ボーリング調査でデータを取得し、ローカルスケールやサイトスケールの空間分布を推定する。
- ・ 岩盤の熱特性を把握するための調査研究においては、第1段階では岩芯試料を用いた室内試験を行い、サイトスケールにおける熱特性の空間分布を推定する。坑道近傍のブロックスケールでの熱特性分布は第2段階での試験により評価する。

#### 10) 地下施設建設が周辺環境へ与える影響の把握

- ・ ローカルスケールでの検討及び第1段階で地下水位・水圧分布や水質分布などの自然状態（初期状態）を把握し、地下施設建設中や建設後のそれらの変化を把握する。

#### 11) 大深度地質環境下における工学技術の有効性の確認

- ・ 設計・施工計画技術の開発に関しては、第1段階で実施する設計・施工計画の妥当性を第2段階で確認する。
- ・ 第2段階での建設を通じて建設技術の開発を行う。
- ・ 施工対策技術の開発に関しては、第1段階で坑道掘削工事に甚大な影響を与える可能性のある事象を抽出し、対策工の検討を行う。第2段階では、建設を通じてその妥当性や有効性を確認する。
- ・ 安全性を確保する技術の開発に関しては、第2段階での研究坑道の建設及び第3段階での研究坑道の維持・管理を通じて検討する。
- ・ 掘削影響の修復・軽減技術の開発に関しては、第3段階におけるEDZに関する調査研究と併せて実施する。

#### (4) 研究成果の統合化／知識化

##### ① 地上からの調査評価技術の整備

第2段階で取得するデータに基づく第1段階で構築した地質環境モデルの妥当性確認結果を踏まえ、第1段階で適用した地質環境特性評価に関わる調査計画や調査手法、モデル化手法などの個別要素技術の有効性や適用限界を評価する。また、設計・施工と安全評価の観点から、一連の評価の手順を整理し、地質環境調査結果を安全評価や設計に反映するための合理的な調査項目の組み合わせ方や、調査から解析、評価までのデータの流れを整理した統合化データフローダイアグラム（三枝ほか、2007）を更新する。ここで統合化データフローダイアグラムとは、個別目標と課題を達成するための「調査」から「モデル化・解析」までの合理的な道すじを示したものである。

また、統合化データフローダイアグラムに示された調査・解析・評価の実施、及び調査計画立案に係る技術的ノウハウ（各作業における留意点や意思決定プロセス、トラブルシューティングなど）や、品質管理の考え方を整理し、知識ベースとして蓄積する。

さらには、この技術的ノウハウや品質管理の考え方、個々の調査評価の手順などは、統合化デ

ータフローダイアグラムに関連付けて取りまとめることとする。

## ② 坑道掘削時の調査評価技術の整備

第2段階で適用している個別の調査解析技術の適用性、技術的ノウハウや品質管理の考え方を分析し文書化し、知識ベースとして蓄積する。また、第2段階における実経験に基づき、第2段階の調査研究を進めるために作成した統合化データフローダイアグラム(図1.6-7;竹内ほか,2009)についても必要に応じて更新する。

①の場合と同様に、個々の調査評価の技術的ノウハウや品質管理の考え方等を統合化データフローダイアグラムに関連付けて取りまとめることとする。

## ③ 坑道を利用した調査評価技術の整備

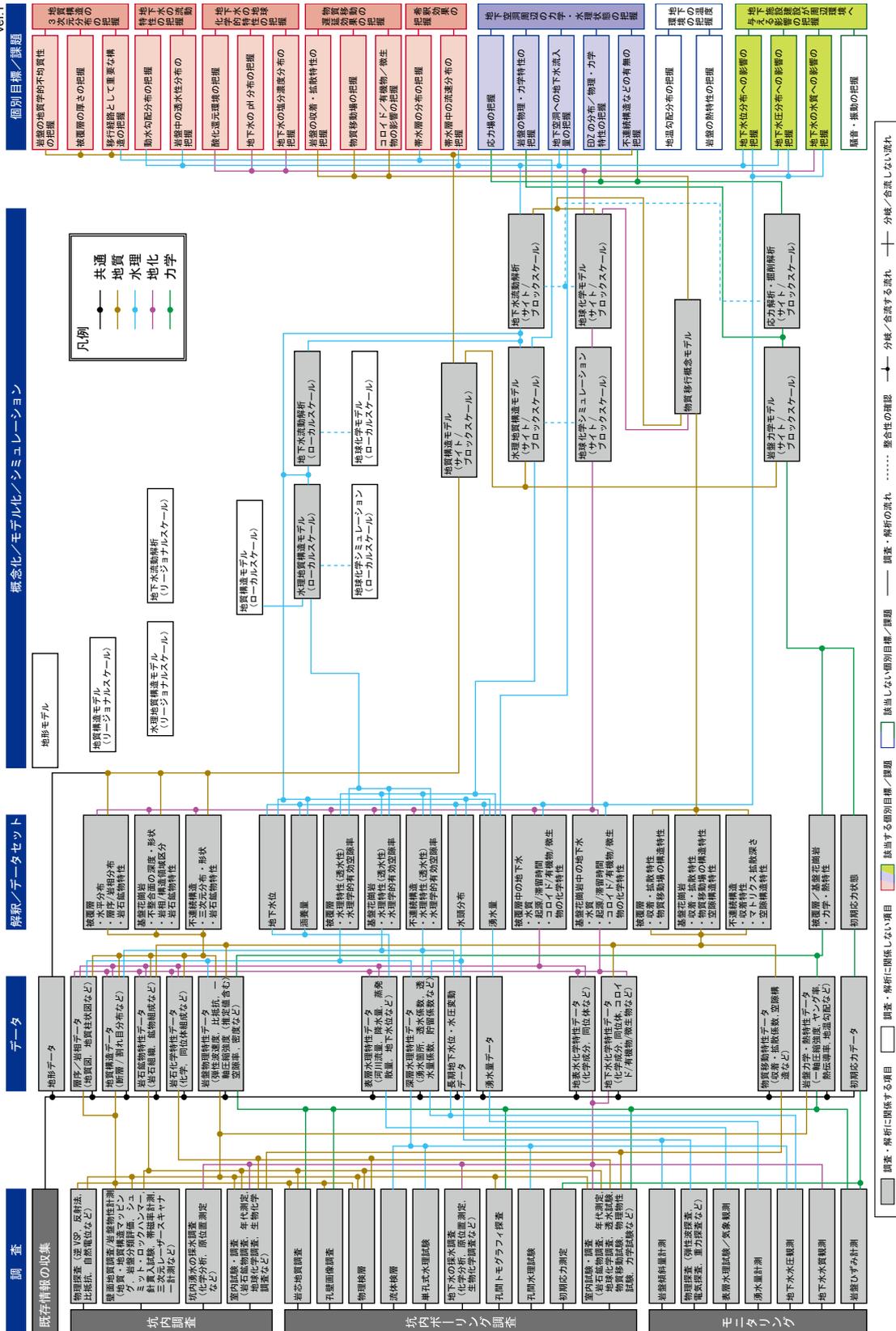
第3段階においても、第2段階と同様に、実際の地質環境を対象とした調査研究での経験を通じて、地質環境調査結果を安全評価や設計に反映するための合理的な調査項目の組み合わせ方や、調査から解析、評価までのデータの流れを整理した統合化データフローダイアグラム(三枝ほか,2007)を更新する。また、統合化データフローダイアグラムに示された調査・解析・評価の実施、及び調査計画立案に係る技術的ノウハウや、品質管理の考え方を整理し、知識ベースとして蓄積する。具体的には、主に以下を実施する。

- ・ 第3段階で適用している個別の調査解析技術の適用性、技術的ノウハウや品質管理の考え方を分析し文書化することにより、知識ベースとして蓄積する。
- ・ 第1,2段階で適用した地質環境特性評価に関わる調査計画や調査手法、モデル化手法などの有効性の第3段階での確認結果に基づき、第1,2段階で構築した統合化データフローダイアグラム(三枝ほか,2007)を更新する。
- ・ 個々の調査評価の技術的ノウハウや品質管理の考え方等を統合化データフローダイアグラムに関連付けて取りまとめる。
- ・ 第1段階から第3段階までの一連の調査研究成果に基づき、適用する調査・解析・評価手法と地質環境の理解度の関係を空間スケールや調査段階に応じて整理するとともに、その結果を用いて地質環境を段階的に調査・解析・評価するための体系的な方法論を整備する。

## ④ データベースシステムの整備

東濃地科学センターにおける地層科学研究の成果情報を管理運用するためのシステム(成果情報管理システム)について、本格運用を開始するとともに、それを通じて抽出されたシステムの問題点の改善や機能拡張を実施する。さらに、調査研究の進展に伴い蓄積されるデータや解釈・解析結果、知見・技術的ノウハウなどを管理・共有するためのデータベース及び研究坑道の掘削工事における工事工程や関連文書などを管理するためのデータベースについて、運用を継続するとともに、運用を通じて適宜改良を実施する。

Ver.1



統合化データフロー（第2段階）（※変更の可能性あり）  
（既存情報の収集」とは第一段階までの調査を示す）

図 1.6-7 研究目標/反映先と系統的なデータの流れを記述・整理したフローの例

## 2. 第2段階の調査研究計画

本章では、第2段階の段階目標を2.1で述べるとともに、全体目標のうち「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」に関する調査研究計画を2.2に、「深地層における工学技術の基盤の整備」に関する調査研究計画を2.3にまとめる。

### 2.1 第2段階の段階目標

超深地層研究所計画の第2段階の段階目標は、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及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的技術の有効性の確認、③研究坑道を利用した研究段階の調査研究計画の策定、の3点である（核燃料サイクル開発機構、2002；日本原子力研究開発機構、2010）。

#### 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及び研究坑道の掘削による深部地質環境の変化の把握

研究坑道の掘削に伴って取得する情報及び研究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に基づき、第1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・評価の手法及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って行う地質環境モニタリングなどにより取得する情報及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・解析及びその評価結果を基に、第1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、第2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的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的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、設計及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的设计・施工計画構築技術の妥当性や、建設技術、施工対策技術及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調査研究の課題を見直すとともに、第3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（資源エネルギー庁・原子力機構、2010）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。

### 2.2 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備

2.1で述べたように第2段階における深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備に係る調査研究では、地上からの調査・解析・評価の技術基盤を整備することが重要である。この技術基盤とは以下の2項目から構成される。

- ・ 深部地質環境の特性とその長期変化を適切に理解するための、1) 調査の合理的な展開やレイアウト、2) 有効性が確認された調査技術、3) データの統合的解釈や解析・モデル化の手法、4) 調査・解析・評価の体系的な組み合わせ、5) 計画・調査・解析に関する技術的ノウハウや品質評価の考え方
- ・ 地下施設建設に伴う地質環境の変化を合理的かつ精度よく把握するためのモニタリング手法とその考え方

地上からの調査・解析・評価の技術基盤を整備するためには、研究坑道掘削に伴う地質環境の変化に関するデータに基づき地質環境モデルを更新するとともに、それと第1段階で構築したモデルとの比較を行うことによって不確実性低減の程度を評価し、第1段階で構築したモデルの妥当性確認を行うことが重要である。具体的には、モデルの妥当性確認の際に、モデル構成要素ごとに妥当性を評価し、その結果、妥当でないと判断される場合は、その原因を、第1段階における調査計画や、適用した調査手法／モデル化解析手法の観点で分析する。さらに、その結果を第1段階での調査・解析・評価技術にフィードバックすることが重要となる（図 2.1-1）。

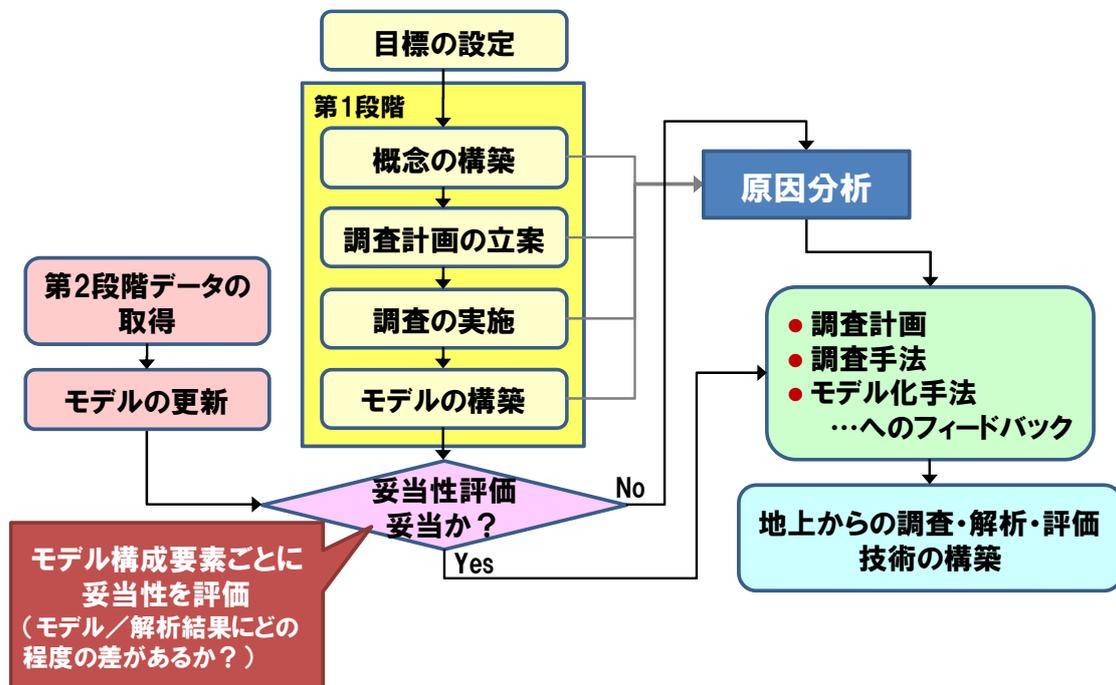


図 2.1-1 地上からの調査技術の妥当性評価の考え方

この地質環境モデルの妥当性確認においては、概略的には以下の2つの考え方があり、第1段階で構築したモデルと、第2段階での調査結果もしくは更新したモデルと比較した結果、相違がある場合は、それが設計・施工や安全評価のそれぞれの観点で許容できるかどうかを評価する必要がある。

- ① 研究坑道壁面や、研究坑道からのボーリング孔で直接観察／測定できるモデル構成要素（断層の形状や地質学的性状など）については、位置や性状の実測値（観察結果）と第1段階での予測結果とを比較する。
- ② 研究坑道壁面や、研究坑道からのボーリング孔で直接観察／測定できないモデル構成要素（サイトスケール全体の空間分布（例えば、断層分布や水理特性分布、水質分布）など）については、第2段階で取得するデータに基づき更新した地質環境モデルと第1段階で構築した地質環境モデルとを比較する。

ここで、②に関しては、各分野のデータを統合的に解釈することによる地質環境モデルの更新が重要となり、2009年度までに2.2(2)～(6)で詳述する検討を通じて、地質情報の統合的解釈による地質環境モデル更新の考え方を作業仮説として整理した(図2.1-2)。今後は、この考え方に基づく地質環境モデルを更新するとともに、この考え方の適用性を評価しつつ必要に応じて修正することとする。

以上の検討を通じて、地上からの調査・解析・評価技術に係る個別調査・解析技術の有効性や適用性、技術的ノウハウ、品質保証・管理の考え方などを整理するとともに、地上からの調査・解析・評価技術の体系的な整理を図る予定である。

また、坑道掘削時の調査評価技術についても、調査の進展に応じて、個別調査・解析技術の有効性や適用性、技術的ノウハウ、品質保証・管理の考え方などの整理を行う予定である。

以上で述べた第2段階の調査研究の現状でのスケジュールを、表2.1-1の年度展開表(2010年度～2014年度)に示す。スケジュールは、調査結果や予算展開に応じて適宜見直すものである。

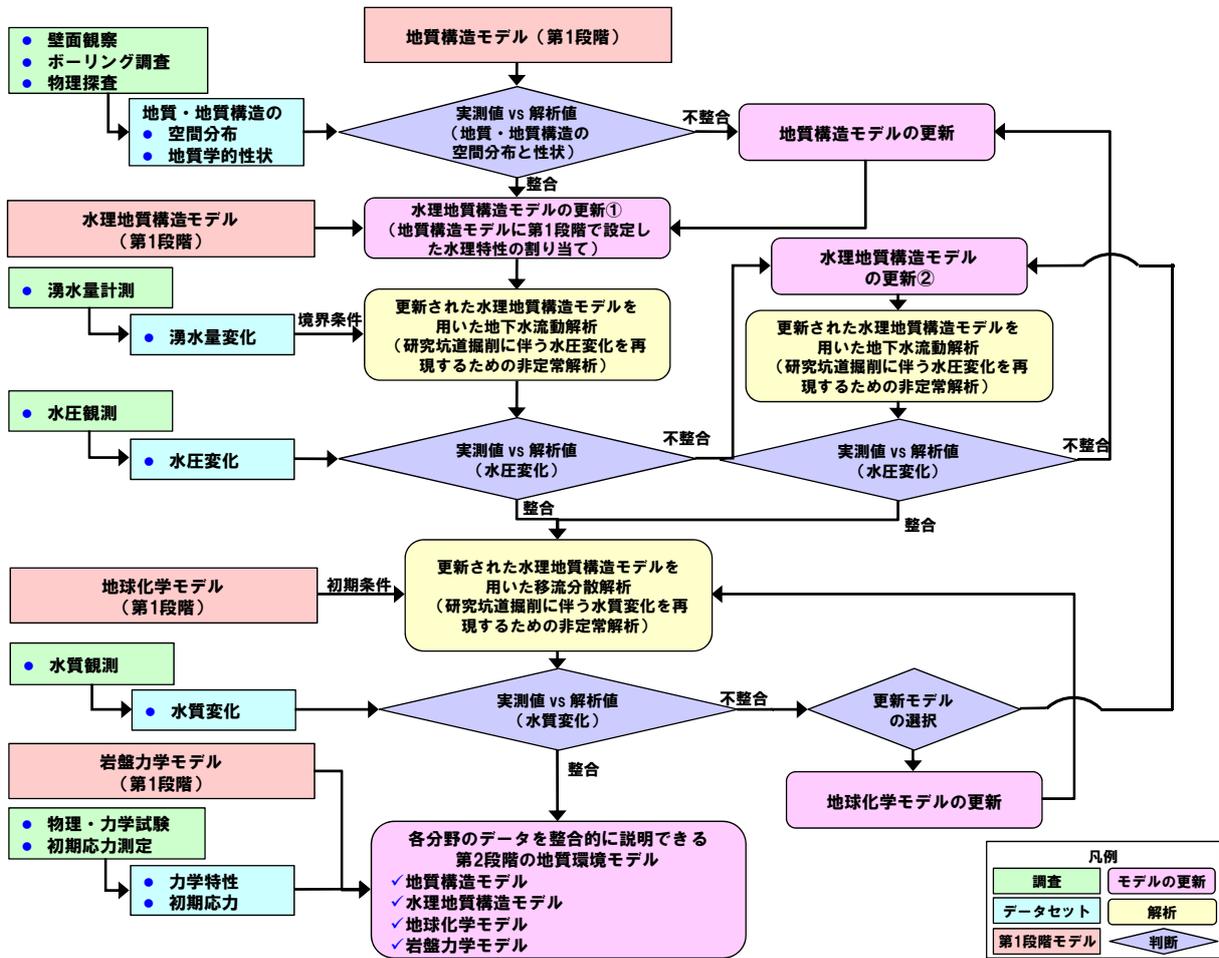


図 2.1-2 地質情報の統合的解釈による地質環境モデル更新の考え方

表 2.1-1 第 2 段階における調査研究の年度展開

	2010 年度	2011 年度	2012 年度	2013 年度	2014 年度
坑道掘削に伴う地質環境の変化の把握	壁面観察、水圧・水質モニタリング等を継続し、地質環境データを蓄積				
地質環境モデルの妥当性確認・更新	深度約 450m までの地質環境データを用いて地質環境モデルを更新し、第 1 段階モデルとの比較を通じて、不確実性の低減の程度を評価	深度約 500m までの地質環境データを用いて地質環境モデルを更新し、第 1 段階モデルとの比較を通じて、不確実性の低減の程度を評価			調査手法・量と不確実性との関係性を評価
地上からの調査評価技術の整備	地質環境モデルの妥当性確認を通じて個別の調査解析技術の有効性や適用限界を評価				
	設計・施工と安全評価の観点から、一連の調査評価の手順を整理				
	調査品質保証・管理の考え方・手順を整理				
				地上からの調査評価に関する統合化データフローダイアグラムを見直して提示	
			坑道掘削に伴う地質環境の変化を効果的に把握するための地上からのモニタリングの考え方等を整理		
坑道掘削時の調査評価技術の整備	個別の調査解析技術の適用性、技術的ノウハウや品質管理の考え方を分析し文書化				
				坑道掘削時の調査評価に関する統合化データフローダイアグラムを見直して提示	
					個別の調査解析技術の適用性、技術的ノウハウや品質管理の考え方を、統合化データフローダイアグラムに関連付けて取りまとめ

(1) 地質構造の三次元的分布の把握

① これまでの調査研究成果と課題

第 2 段階の地質構造の三次元分布の把握に関する調査研究では、研究坑道掘削を利用した物理探査、研究坑道の壁面地質調査及び研究坑道からのボーリング調査等を実施して、サイトスケールの地質構造モデルの妥当性確認及び更新を行うとともに、ブロックスケールでの地質構造モデルの構築を行う。

地質構造の三次元分布を把握するための物理探査では、立坑掘削の発破振動を利用した逆 VSP

探査、電気探査法による地下水流動モニタリング及び研究坑道内のボーリング孔間を利用したトモグラフィ探査などを実施した。逆 VSP 探査では、主立坑の発破振動を測定して、研究坑道周辺の地質構造（堆積岩と花崗岩の不整合面や断層など）の空間分布を推定するとともに、第 1 段階で実施した反射法地震探査結果と比較した。その結果、両者が整合していることを確認した（図 2.2(1)-1；松岡ほか，2008；鶴田ほか，2010）。電気探査法による地下水流動モニタリングは、研究所周辺において平面的に電極を設置し、自然電位測定や三次元比抵抗探査を行い（自然電位測定は 2009 年度末まで実施）、2005 年 10 月から排水を停止していた立坑からの再排水時を含む研究坑道掘削に伴う地下水流動場の変化を推定した。その結果、主立坑を北北西走向で通過する変質を伴う断層帯（以下、「主立坑断層」という）の空間分布と、この断層帯を境に北東側と南西側で地下水の流動が異なる様子を自然電位の時間変化に基づき確認した（図 2.2(1)-2；松岡ほか，2007）。

また、研究坑道の壁面地質調査では、研究坑道の掘削進捗に合わせて壁面地質観察、可視画像撮影及び三次元レーザー計測を実施するとともに、立坑坑底（主立坑；180m、換気立坑；191m）から掘削した鉛直パイロットボーリング孔（それぞれ、06MI02 号孔及び 06MI03 号孔）における調査や深度 200m ボーリング横坑などからのボーリング調査における岩芯観察などにより、瑞浪層群、花崗岩中の低角度を有する割れ目の集中帯などの割れ目（帯）、及び研究坑道で確認される断層などの分布特性や性状、岩石鉱物特性などの情報を取得した（竹内ほか，2010；鶴田ほか，2010；原子力機構，2009）。壁面地質調査で得られた瑞浪層群の地層境界深度は、地上からの浅層ボーリング孔（MSB-1, 2, 3, 4 号孔）及び深層ボーリング孔（MIZ-1 号孔）の岩芯観察に基づき解釈された地層境界深度と整合していることを確認した。また、瑞浪層群と花崗岩との不整合面深度は、主立坑で深度 166.27m であり、第 1 段階でのサイトスケールの地質構造モデルでの深度（167.79m）と概ね一致する結果であった。また、主立坑断層は、主立坑に沿って分布するとともに、高角度傾斜を有する 1～2 条の板状を呈し、貫入岩と粘土化した強変質岩盤を伴っていることが確認されたが、第 1 段階では主立坑と換気立坑の間を通過すると推定されていた。また、この断層については、第 1 段階でのサイトスケールでの地質構造概念モデル<sup>†</sup>においては、変質を伴う断層帯としてモデル化していなかった。これは、断層の発達過程における水（熱水）－岩石反応による変質（帯）を考慮していなかったためである。一方、低角度を有する割れ目の集中帯については、第 1 段階では約 26.5m の厚さを有する一枚の構造と推定していたが、壁面地質観察の結果、低角度割れ目の複数の密集部が分布していることや、約 50m の厚さを有していることが明らかになった（図 2.2(1)-3；鶴田ほか，2010）。また、低角度割れ目の密集部ではグラウト材の充填が確認され、これらが透水性構造となっていることが確認された。

さらに、これまでに取得した壁面地質調査やボーリング調査による断層及び割れ目に関するデータを基に、断層及び割れ目の類型区分を行った（図 2.2(1)-4）。この情報はサイトスケールの地質構造モデルに記述された断層や割れ目（帯）の発達過程の検討やブロックスケールの地質構造モデル構築に資するものである。

これらの研究坑道の掘削に伴い取得されたデータを用いて、第 1 段階で構築したサイトスケールの地質構造モデルを更新した。具体的には、研究坑道の壁面地質調査やボーリング調査などによる層序、岩相、構造領域の区分（以下、「モデル構成要素」という）や、それらの分布と形状の推定結果が、第 1 段階での地質構造モデルと整合的であることを確認した。

また、モデル構成要素の空間分布の推定結果の妥当性を確認するために、逆 VSP 探査などの物理探査結果や、堆積岩形成過程の推定結果や割れ目を対象とした古応力解析結果などによる地質構造発達史の整理、地質構造発達に係るアナログモデル実験やシミュレーションを実施した（鶴田ほか，2010）。

以上の調査・モデル化・解析作業を通じて、第 1 段階で構築したサイトスケールの地質構造モデルの更新の考え方として、モデル構成要素の地質学的性状や分布位置の直接的な確認と、その空間分布の推定を組み合わせた方法を整理してきた（図 2.2(1)-5）。また、地下水流動に大きな影響を及ぼす断層の透水異方性を含む透水不均質性を定量的に評価するために必要な断層や割れ目の地質学的性状や水理学的特性を把握することを今後の調査研究課題として抽出した。

<sup>†</sup> 概念モデルとは、場の状態やそこでの現象などに係る解釈結果を概念的に示したもの。

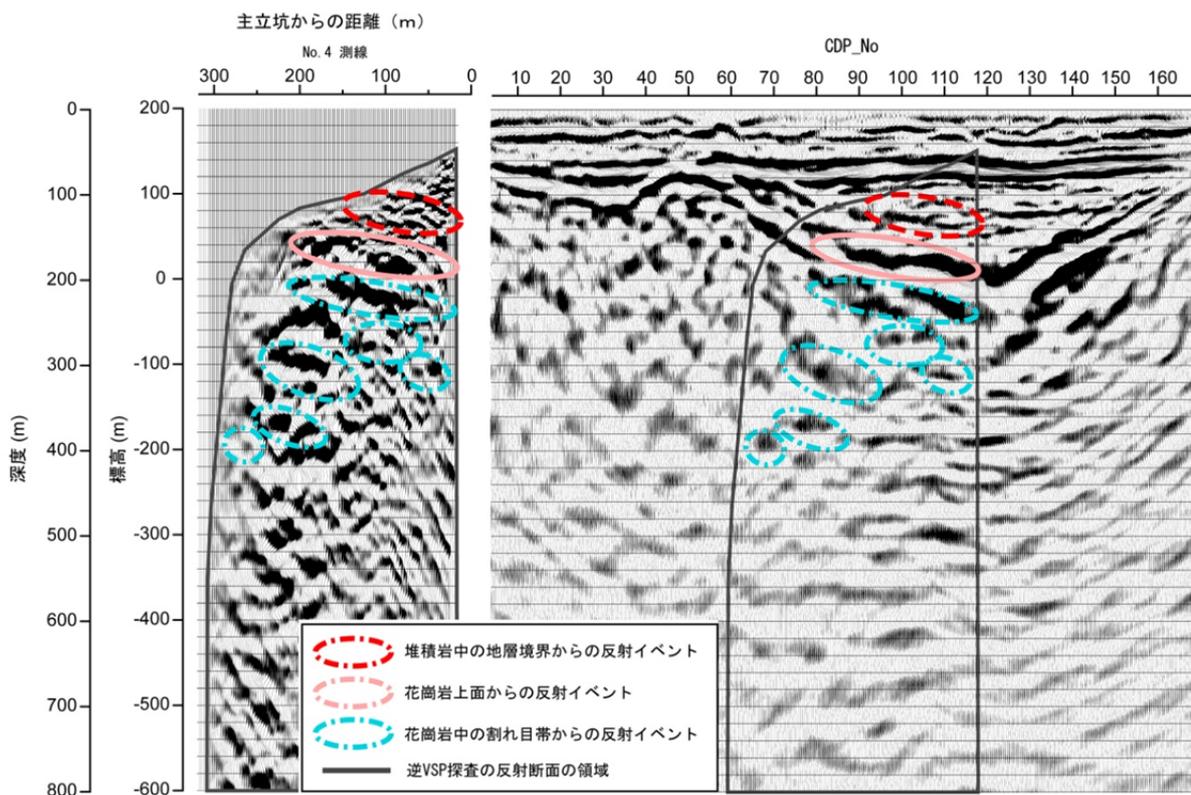


図 2.2(1)-1 逆 VSP 探査で得られた反射断面（左）と第 1 段階で実施した反射法地震探査による反射断面（右）の比較

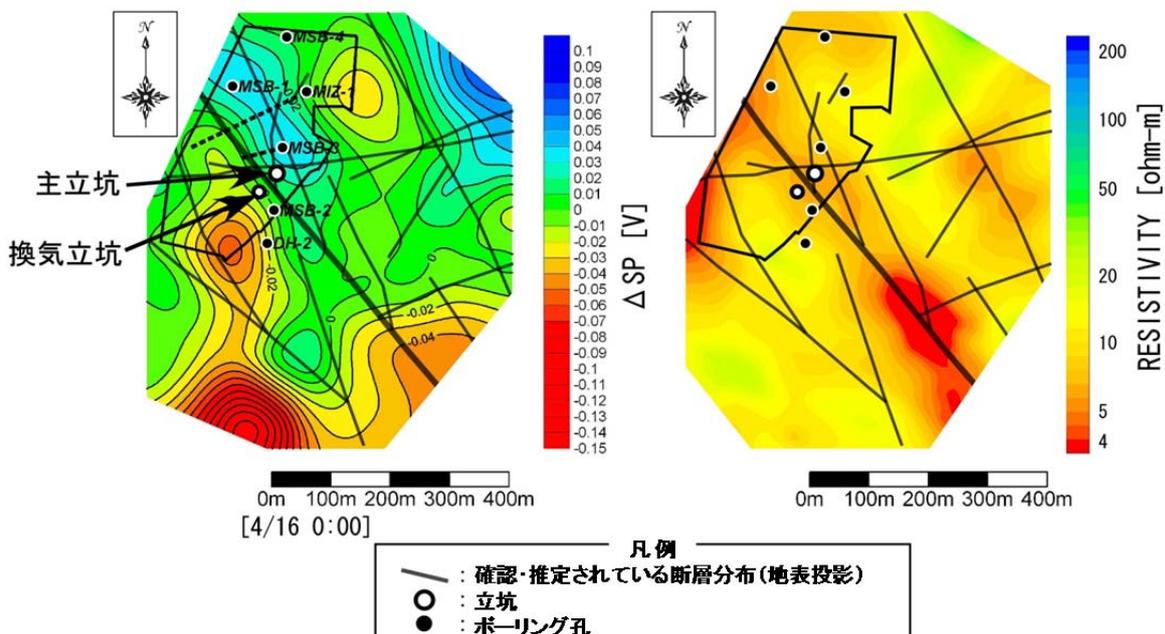


図 2.2(1)-2 自然電位分布の時間変化（左）及び地表下 50m の比抵抗スライス断面（右）と瑞浪超深地層研究所周辺において確認・推定されている断層分布の比較

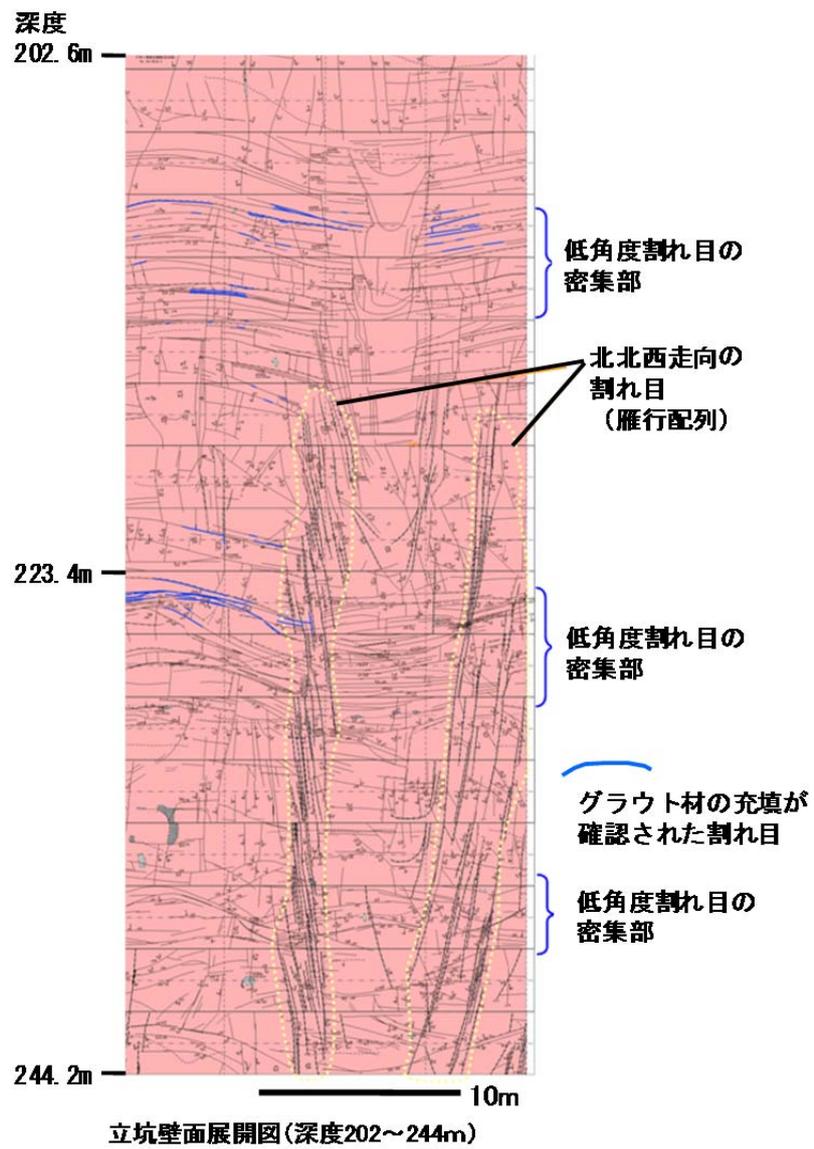
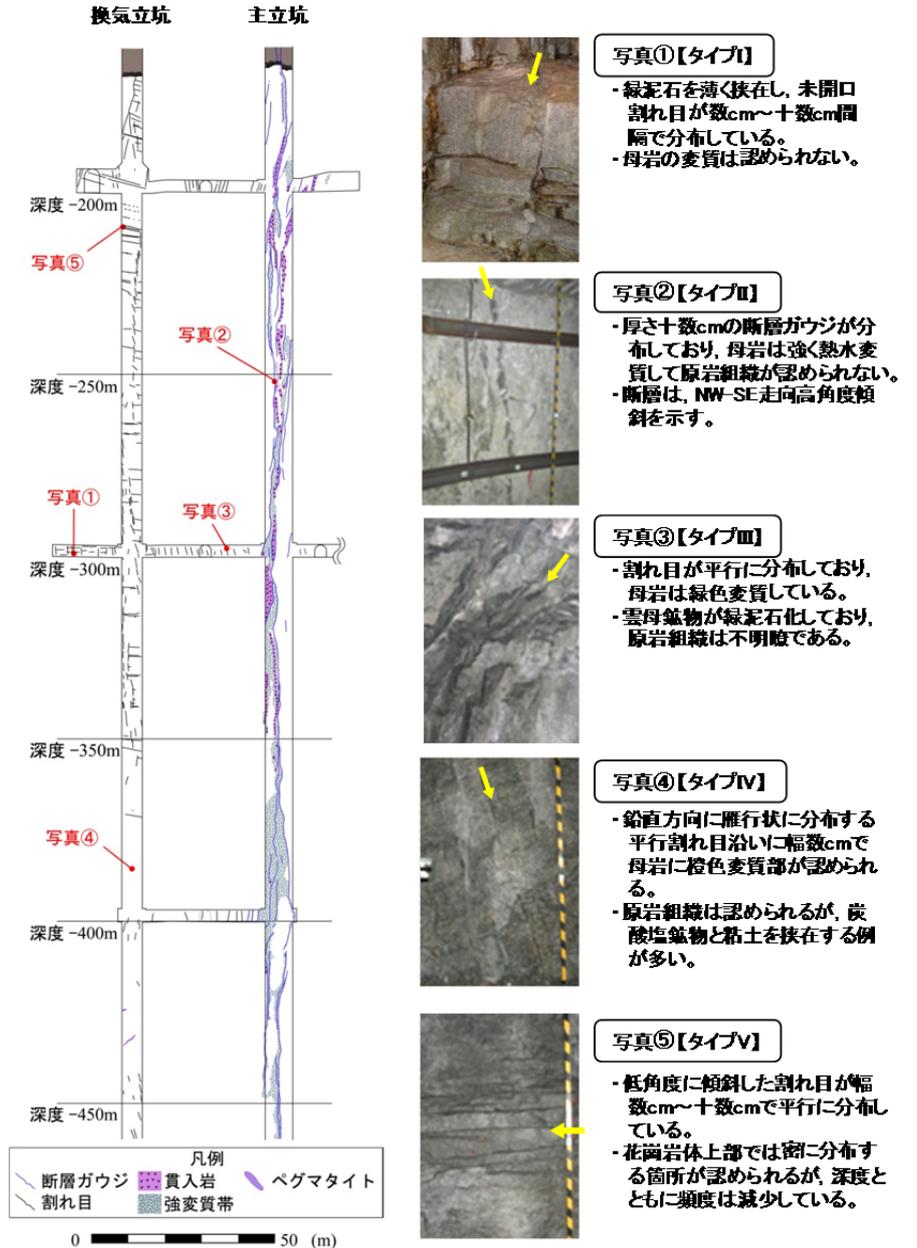


図 2.2(1)-3 換気立坑壁面地質スケッチ (深度 202.6~244.2m)



タイプ※1)	充填鉱物	母岩変質	開口割れ目・湧水	水理特性	温度目安※2) °C	備考
I 割れ目(高温型)	緑泥石	無し	少ない	遮水性	300-200	母岩変質は無いが、緑泥石を介在する
II 断層	-	強(白色粘土化)	僅少	遮水性	400-300	ガウジを有し、塩基性貫入岩や岩脈Dの強変質部をともなう
III 割れ目(高温変質型)	緑泥石	強～中(緑色・白色粘土化)	少ない	遮水性	300-200	割れ目を通じて母岩を幅数cm程度に緑色変質させる
IV 割れ目(低温型)	炭酸塩鉱物、粘土、無し	弱(橙色・灰色化)	有り	透水性	< 200	緑泥石も炭酸塩鉱物ともに充填している場合は、IVと認定する
V 割れ目(低角度)	炭酸塩鉱物、無し	無し	有り	透水性	< 100	傾斜30°以下の割れ目

※1) 想定される形成順にタイプ分け ※2) 充填鉱物、母岩変質の形成温度の目安

タイプ※1)	区分する上での特徴
I 割れ目(高温型)	断層ガウジや母岩変質は認められず、緑泥石を充填する割れ目
II 断層	断層ガウジを伴う割れ目(すなわち断層)
III 割れ目(高温変質型)	断層ガウジは無く、母岩に白色・緑色変質を生じさせた割れ目
IV 割れ目(低温型)	断層ガウジや母岩変質は認められず、方解石などの炭酸塩鉱物を充填する割れ目と、充填鉱物の無い割れ目
V 割れ目(低角度)	断層ガウジや母岩変質は認められず、割れ目の傾斜が30°以下の割れ目

図 2.2(1)-4 研究坑道で確認された割れ目の類型区分

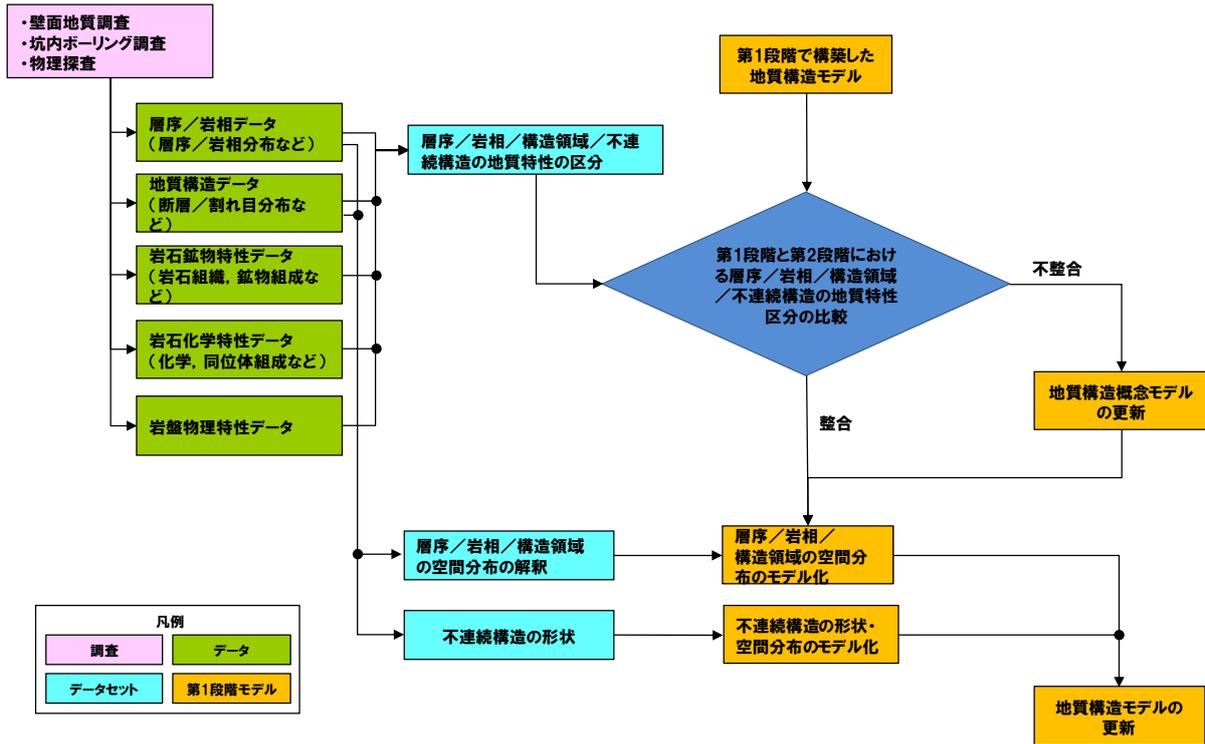


図 2.2(1)-5 地質構造モデルの更新の考え方

③ 2010 年度以降の調査研究計画

2010 年度以降は、主に花崗岩中の断層や割れ目などの分布に着目したデータの取得を実施するとともに、それらの情報に基づく第 1 段階で構築したサイトスケールの地質構造モデルの妥当性確認及び更新を実施する。また、モデルの妥当性確認結果に基づき、地質構造の三次元分布の把握の観点から、第 1 段階や第 2 段階で適用した調査手法、モデル化手法などの有効性や適用限界などを評価するとともに、技術的ノウハウや品質管理の考え方などを整理する。また、これらの結果は、地上からの調査・解析・評価技術や坑道掘削時の調査・解析・評価技術の体系的な整理に反映する。

このための具体的な実施内容は以下のとおり。

1) 調査

地質構造の三次元分布の把握に関する調査研究として、以下の調査を実施する。

物理探査は、深度 300m 研究アクセス坑道が整備されたことに伴い、これまで地上において測定を行ってきた逆 VSP 探査及び電気探査法にいる地下水流動モニタリングを坑道内で実施する。これにより、これまで花崗岩部を対象とした解析結果の解像度低下の主要因となっていた被覆堆積岩の影響を受けることのないデータを取得することが可能となり、花崗岩を対象とした高解像度の解析結果を取得できることが期待できる。また、研究坑道掘削の進捗に合わせて、研究坑道の壁面地質観察を継続するとともに、研究坑道からのボーリング調査における岩芯観察、孔壁画像観察、物理検層、孔間トモグラフィなどの地質学的・地球物理学的調査を実施する。2010 年度からは第 1 段階の調査研究で課題となっている断層の透水異方性や断層周辺に分布する割れ目の地質学的・水理学的特性などを評価するために、深度 300m ステージにおいて断層を対象としたボーリング調査を実施する。

2) モデル化・解析

2009 年度までに整理してきた地質情報の総合解釈によるサイトスケールでの地質環境モデル更新の考え方 (図 2.1-1) や地質構造モデルの更新の考え方 (図 2.2(1)-5) に基づき、各調査によって取得された研究坑道周辺の地質・地質構造データを用いた地質構造の三次元分布の解釈及びモ

デルの更新を継続する。更新する地質構造モデルと第1段階で構築した地質構造モデルの比較を行うことによって、第1段階で構築したモデルの妥当性を確認する。その際、モデル構成要素毎の位置や分布特性、性状などに着目した比較検討を行う。

また、研究坑道周辺の一部のブロックに着目したブロックスケールの地質構造モデルを構築する。この際、断層や割れ目を類型区分するとともに、アナログモデル実験や地球統計学を利用した断層や割れ目などの空間分布を推定し、それらを踏まえてサイトスケールの地質構造モデルを更新する。

以上の検討を通じて、地質構造モデルの妥当性確認及びその更新に関わる方法論を検討する。

なお、2010年度は2009年度までに掘削された深度約460mまでのデータを用いたモデルの妥当性確認及び更新を行う。2011年度から2013年度においては深度約500mまでのデータを用いた検討を行う。これらの結果は、主に2013年度、2014年度に実施する研究成果の統合化や体系化(2.2(7)参照)に反映する。

また、ブロックスケールの地質構造モデルの構築は、第3段階での調査研究実施領域における断層や割れ目の空間分布特性の予測やブロックスケールでの地下水流動解析にも反映する。

### 3) 調査・解析技術開発

地質構造の三次元分布を把握するために以下の技術開発を実施する。

#### a) 地質構造モデル化手法

これまでに、断層や割れ目の空間分布や割れ目密度の空間的不均質性のモデル化手法を構築することを目的に、スケールの異なる三つの割れ目データ (DEM (Digital Elevation Model) データを用いて判読されたリニアメント、ボーリング孔で遭遇した節理・断層、マイクロクラック) の関連性から割れ目の空間的相関構造と割れ目長さのスケール則を整理するとともに、マルチスケールにおける割れ目の空間的相関構造を考慮可能な割れ目分布のシミュレーション技術 (GEOFRAC) を開発した。また、アナログモデル実験や数値シミュレーションによる地質構造発達プロセスの推定結果に基づく地質構造モデルの構築を試みている。また、第1段階で適用した調査手法及びモデル化手法の有効性評価にあたって、調査データの質・量と理解度との関連性などについて検討するために、不連続構造に着目した不確実性評価システムの整備を実施している。

今後は、地質構造モデルが有する不確実性の低減を図ることを目的とした、マルチスケールモデリングや地質構造発達プロセスに基づく地質モデリング技術の開発を継続して実施する。また、適宜、第1段階で適用した調査手法及びモデル化手法の有効性評価に使用する不連続構造に着目した不確実性評価システムの改良を実施する。

## (2) 地下水の流動特性の把握

### ① これまでの調査研究成果と課題

第2段階における地下水の流動特性の把握に関する調査研究では、研究坑道の掘削に伴う地下水位や地下水圧といった地下水流動場の変化を地下水流動解析によって再現するための、岩盤中の透水性分布の推定結果を表現したサイトスケールの水理地質構造モデルの妥当性確認及びその更新を行う。

この地下水流動場の変化に関するデータを取得するため、研究坑道内への湧水量の計測及び地下水長期モニタリング (例えば、Ohyama et al., 2009) などを実施した。具体的には、研究坑道への総湧水量の経時変化の計測 (図 2.2(2)-1)、及び立坑への湧水量の深度分布と経時変化を把握するための集水リング (深度 100m あたり 4 箇所程度) 毎の湧水量計測を実施した。研究坑道の掘削が地下水流動場へ与える影響を把握するための地上から掘削されたボーリング孔での地下水長期モニタリング (図 2.2(2)-2)、表層水理観測 (図 2.2(2)-3)、及び傾斜計を用いた岩盤傾斜量観測 (図 2.2(2)-4) も継続実施した。これらの調査の結果、水圧変動の傾向や、地下水流動の変化に伴う岩盤の体積変化が主立坑断層を境に異なることなどが明らかとなり、断層面に直交方向が低透水性であることを確認した。また、換気立坑から数 m の範囲で急激に全水頭が低下しており、立坑近傍が低透水性であることを確認した。さらに、2006年度には立坑坑底 (主立坑; 180m, 換気立坑; 191m) からパイロットボーリング調査を実施し、深度約 500m までの立坑沿いの地質環境

(地質・地質構造の分布、透水性、水質など)を把握した(鶴田ほか, 2009)。

これらのデータを用いて、第1段階で構築したサイトスケールの水理地質構造モデルの妥当性確認及びその更新に関わる方法論を整備することを目的とした水理地質構造モデルの構築及び地下水流動解析を実施した(熊本ほか, 2009)。具体的には、湧水量計測データや水圧応答モニタリング結果に基づき水理地質構造を解釈するとともに、サイトスケールの水理地質構造モデルを適宜更新した(図 2.2(2)-5)。具体的には、水理地質構造の解釈結果と、2.2(4)(a)「地下空洞への地下水流入量の把握」での立坑ごく近傍の水理特性に着目した調査結果に基づき、水理地質構造モデルのキャリブレーション実施し、地下水流動解析による湧水量の再現性を向上させることができた(図 2.2(2)-6)。

さらに、地上からのボーリング孔、研究坑道からのボーリング孔及び深度 300m ステージなどの研究坑道を中心とした複数のブロックスケールの水理地質構造モデルを構築し(図 2.2(2)-7; 田中ほか, 2009)、それに基づき透水性構造の分布に起因した水理特性の不均質性を考慮したサイトスケールの水理地質構造モデルを構築した。

以上の調査・モデル化・解析作業を通じて、第1段階で構築したサイトスケールの水理地質構造モデルの更新の考え方を整理した(図 2.2(2)-8)。また、断層の透水不均質性を把握することを、モデルの妥当性確認及び更新に必要な調査研究課題として抽出した。

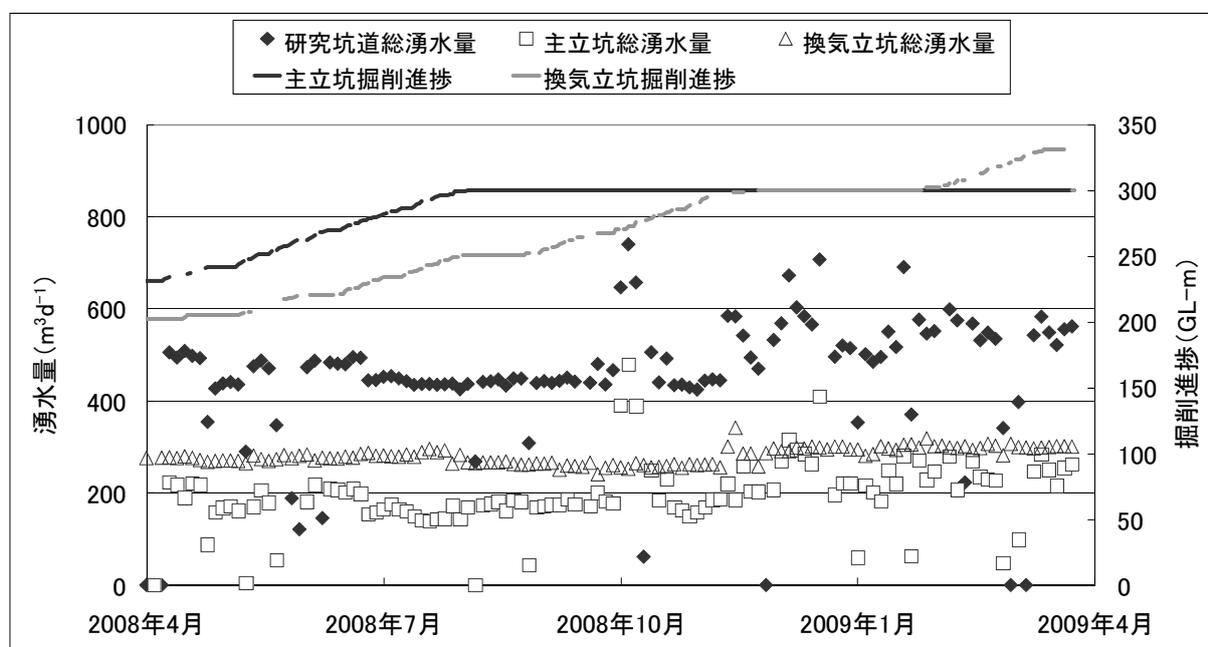
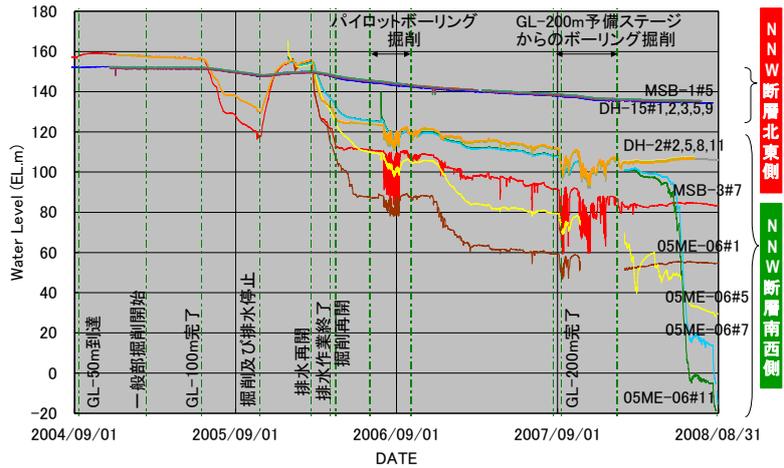
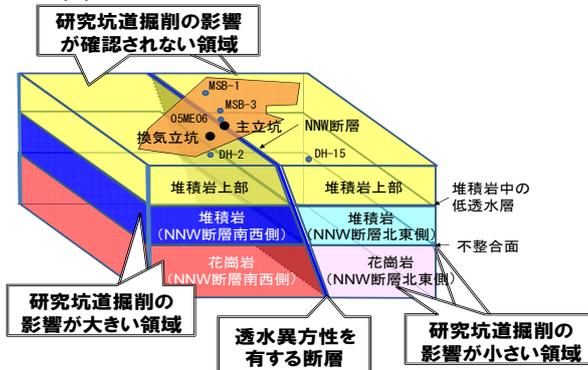


図 2.2(2)-1 研究坑道への総湧水量の経時変化



(a) 研究坑道掘削に伴う地下水圧変動



(b) 地下水圧変動データに基づく水理地質構造の解釈結果

図 2.2(2)-2 地下水長期モニタリング結果

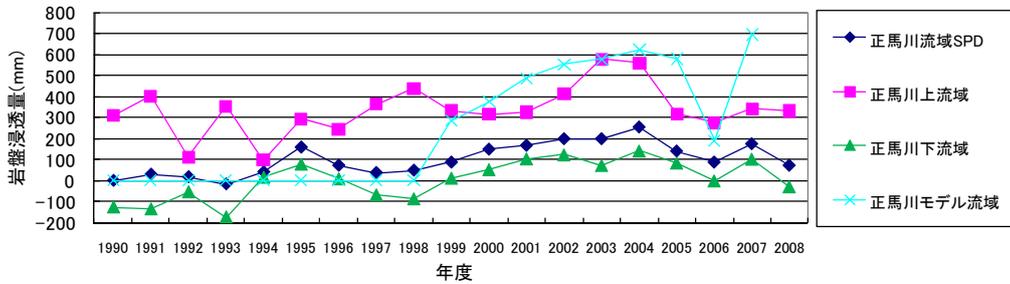


図 2.2(2)-3 岩盤浸透量の経年変化

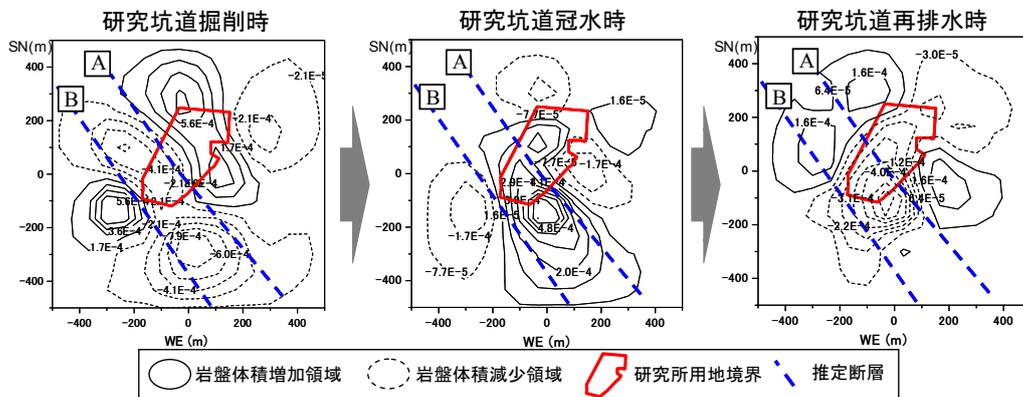


図 2.2(2)-4 岩盤傾斜量データを用いた水理地質構造の推定 (解析結果)

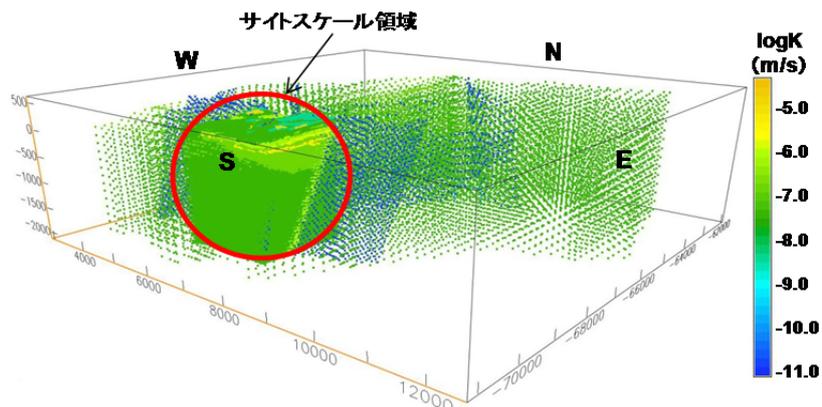


図 2.2(2)-5 更新したサイトスケールの水理地質構造モデル

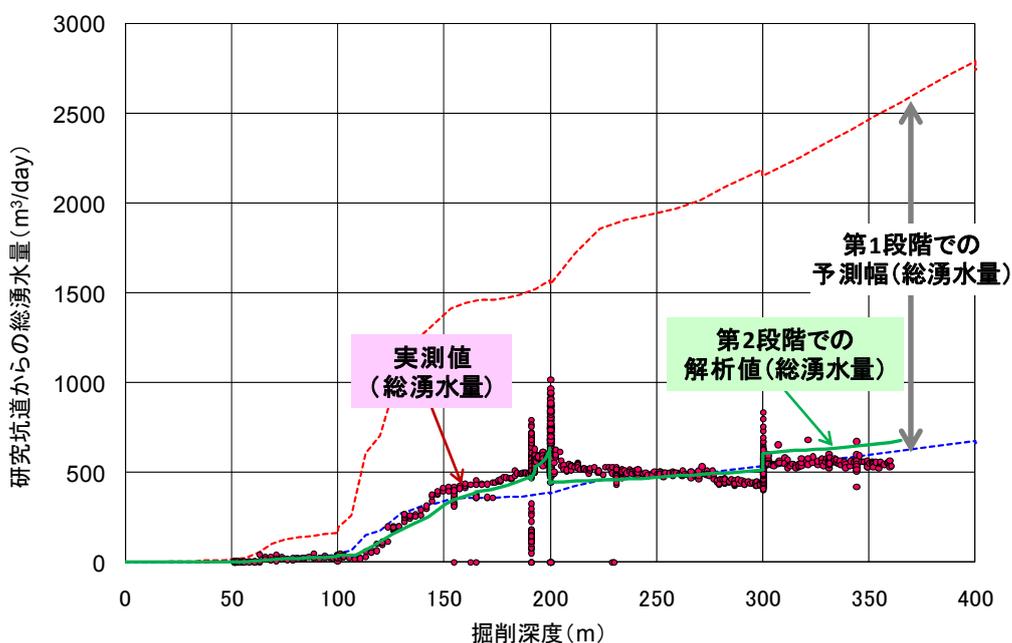


図 2.2(2)-6 立坑ごく近傍の水理特性に着目してキャリブレーションした水理地質構造モデルに基づく地下水流動解析結果

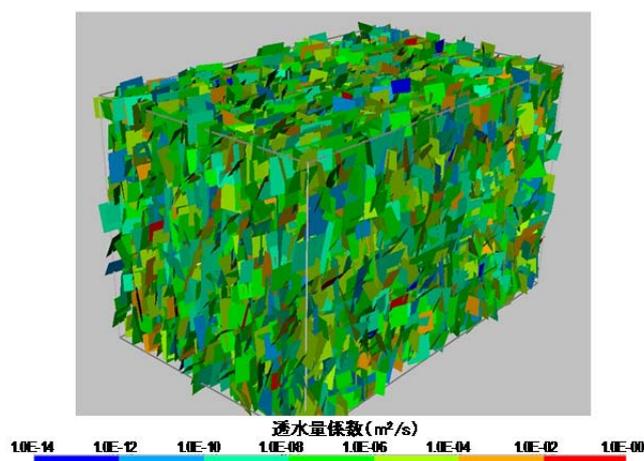


図 2.2(2)-7 ブロックスケールの透水性構造ネットワークモデル構築結果 (深度 300m 研究アクセス坑道周辺領域の例)

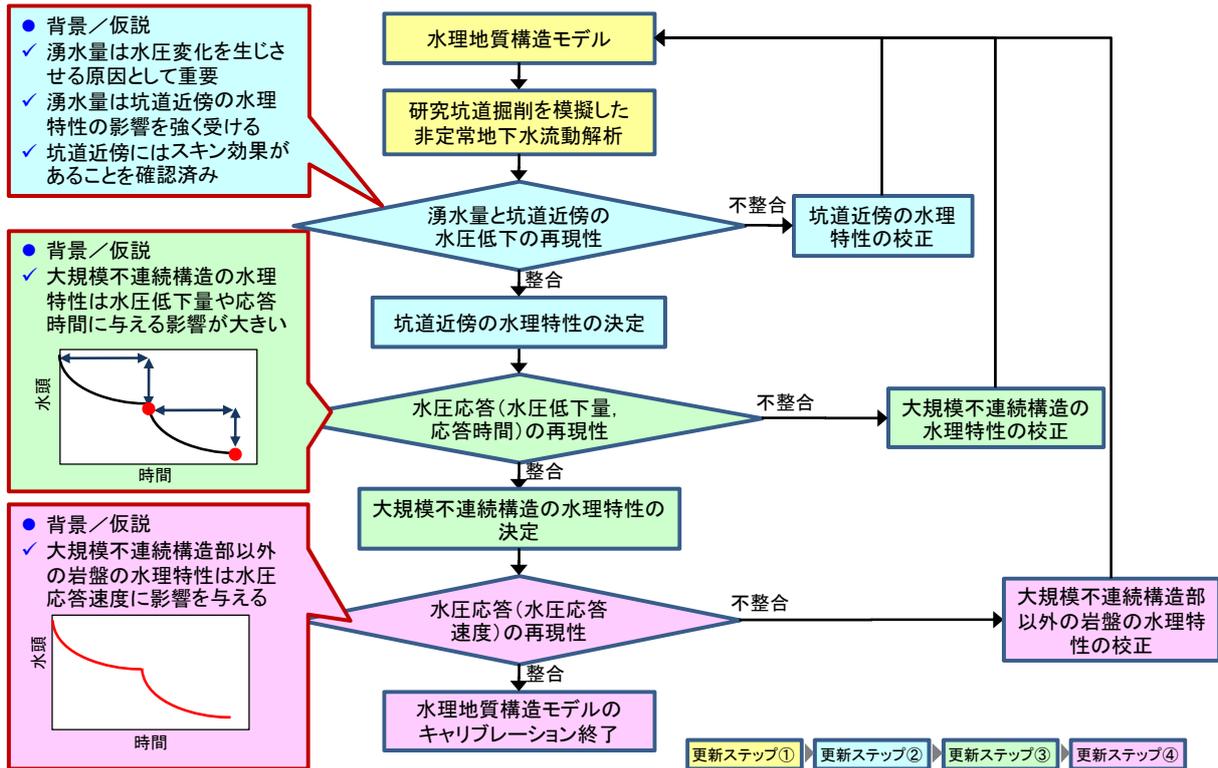


図 2.2(2)-8 サイトスケールの水理地質構造モデルの更新の考え方

② 2010 年度以降の調査研究計画

2010 年度以降は、研究坑道掘削に伴う地下水流動場の変化に関するデータの蓄積、及びそのデータを用いて第 1 段階のモデルの妥当性確認及び更新を実施する。さらに、その結果に基づき不確実性の低減の評価や、調査手法や量と不確実性の関係を評価する。また、モデルの妥当性確認結果に基づき、地下水流動特性の不確実性に関与する第 1 段階や第 2 段階で適用した調査手法、モデル化手法などの有効性や適用限界などを評価するとともに、技術的ノウハウや品質管理の考え方などを整理する。この際、研究坑道掘削に伴う地下水流動場の変化を効果的に把握するための地上からのモニタリングの考え方等を整理する。これらの結果は、地上からの調査・解析・評価技術や、坑道掘削時の調査・解析・評価技術の体系的な整理に反映する。

このための具体的な実施内容は以下のとおり。

1) 調査

研究坑道掘削に伴う地下水流動場の変化を把握するために、以下の調査を継続実施する。

- ・ 研究坑道への総湧水量計測
- ・ 集水リングを用いた区間湧水量計測
- ・ 地上から掘削されたボーリング孔を利用した地下水長期モニタリング
- ・ 研究坑道内で掘削されたボーリング孔を利用した地下水長期モニタリング
- ・ 表層水理観測
- ・ 傾斜計を用いた岩盤傾斜量観測

これらの調査を行うことによって、地上からのモニタリング技術の有効性を評価し、地下水流動場の変化を効果的に把握するための方法論を整備する。さらに、地下水長期モニタリング装置に関する耐久性やメンテナンス方法などの調査に関わる技術的ノウハウや、品質管理の考え方を整理する。

また、2010 年度からは第 1 段階の調査研究で課題となっている断層の透水異方性を評価するために、深度 300m ステージにおいて断層を対象としたボーリング調査を実施する。

## 2) モデル化・解析

2009年度までに整理した地質情報の総合解釈による地質環境モデル更新の考え方(図 2.1-1)、及びサイトスケールの水理地質構造モデルの更新の考え方(図 2.2(2)-8)に基づき、第2段階で取得されたデータを用いたサイトスケールの水理地質構造の解釈及びモデルの更新を継続する。更新する水理地質構造モデルと第1段階で構築した水理地質構造モデルの比較を行うことによって、後者のモデルの妥当性を確認する。その際、モデル化要素毎に比較を行うこととし、特に決定論的にモデル化した不連続構造の水理特性に着目する。また、更新するサイトスケール及びブロックスケールの水理地質構造モデルを統合するとともに(図 2.2(2)-9)、それを用いた地下水流動解析結果と第1段階での解析結果との比較を行い、サイトスケールの水理地質構造モデルのモデル化要素の一つである岩盤の透水性分布のモデル化手法に関する妥当性を評価する。以上の検討を通じて、水理地質構造モデルの妥当性確認及びその更新に関わる方法論を検討する。

具体的には、2010年度は2009年度までに掘削された深度約460mまでのデータを用いたモデルの妥当性確認及び更新を行う。2011年度から2013年度においては深度約500mまでのデータを用いた検討を行う。

これらの結果は、主に2013年度、2014年度に実施する研究成果の統合化や体系化(2.2(7)参照)に反映する。

さらに、自然現象に伴う地下水流動特性の長期変化を推定することを目的とした検討を実施する。具体的には、地形変化や気候変動などを考慮した地下水流動解析を実施し、地下水流動特性の変化の幅を推定する。この際、2.2(3)に示す地下水の水質・同位体を用いた地球化学的アプローチによる地下水流動解析結果の妥当性を示す方法を検討する。

以上のような検討を支援するために、調査や地下水長期モニタリングによって得られた様々なデータの三次元的な可視化や、水理地質構造モデルの構築や地下水流動解析を実施するためのシステムの拡充を図る(2.2(2)3参照)。

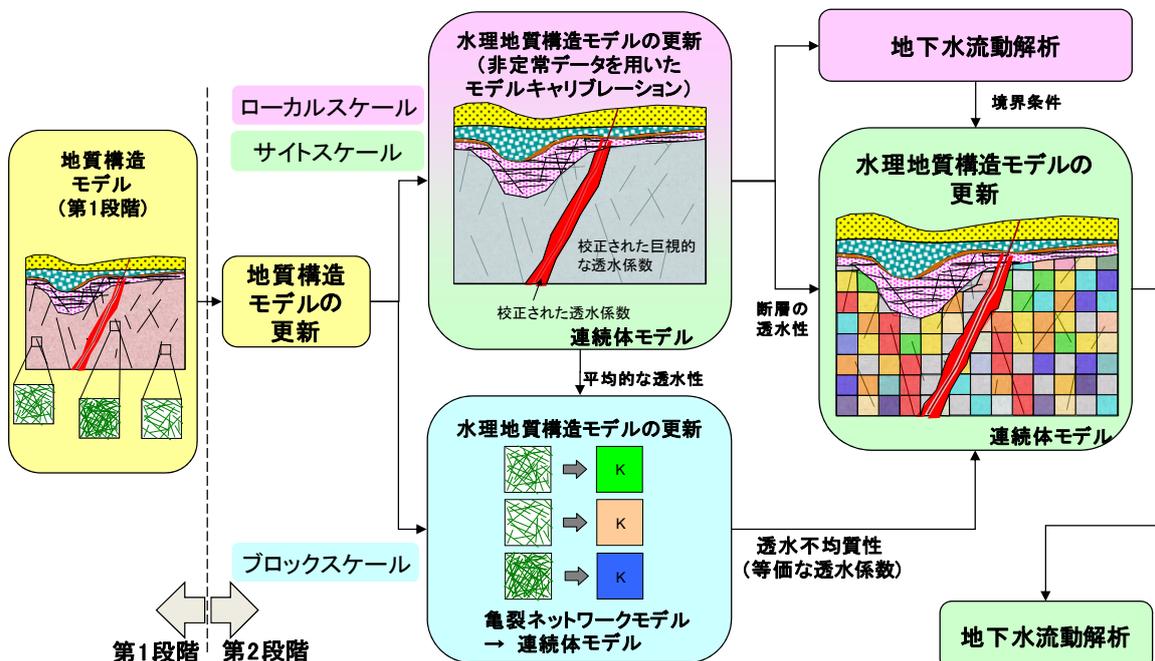


図 2.2(2)-9 サイトスケール及びブロックスケールの水理地質構造モデルの統合の考え方

## 3) 調査・解析技術開発

地下水の流動特性を把握するために以下の技術開発を実施する。

### a) 水圧モニタリング技術

地上から掘削されたボーリング孔を利用した地下水長期モニタリングでの観測を通して、モニ

タリング装置の適用性や長期耐久性、モニタリング装置の特徴に合わせたメンテナンス方法の確認を継続する。

研究坑道内での水圧観測を実施するに当たっては、坑内特有の環境（湧水条件下、高差圧環境、狭い作業空間など）を考慮した調査・モニタリング技術を整備するための技術開発を必要に応じて実施する。また、坑内でのモニタリング技術の有効性、地下水長期モニタリング装置に関する耐久性やメンテナンス方法などの調査に関わる技術的ノウハウや、品質管理の考え方を整理する。

#### b) 地質環境データ解析・可視化システム

複雑な水理地質環境における地下水流動解析の効率的なモデル化・解析を実施するため、これらを一貫して行うことができる GEOLOGICAL MODELLING ANALYSIS AND SIMULATION SOFTWARE システム（以下、GEOMASS システム）を開発してきており、データ解釈、地質構造及び水理地質構造のモデル化、地下水流動解析ならびにモデル化・解析結果の可視化に関する作業（2.2(2)参照）を通じて、抽出されたシステムの問題点の改善及び機能の拡張を継続的に実施している。

今後も引き続き、地質構造／水理地質構造のモデル化・地下水流動解析及びモデル化・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及び機能の拡張を適宜実施する。さらに、拡張したシステムの信頼性を確認する。

#### c) 逆解析を用いたモデル化・解析手法

研究坑道掘削に伴う地下水流動場の変化に関するデータ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を用いた水理地質構造（水理特性の三次元分布）を推定するための地下水流動の逆解析手法を構築する。

### (3) 地下水の地球化学特性の把握

#### ① これまでの調査研究成果と課題

第2段階における地下水の地球化学特性の把握に関する調査研究では、主に研究坑道の掘削に伴う水質変化に着目した調査を実施し、第1段階で構築した地球化学概念モデルの妥当性を確認するとともに、研究坑道の掘削が地下水の地球化学特性に与える影響を把握することとしている。

そのため、地上から掘削した2本の浅層ボーリング孔（MSB-2号孔：掘削長約200mの鉛直孔、MSB-4号孔：掘削長約100mの鉛直孔）、深度200m予備ステージから掘削したボーリング孔（07MI07号孔：掘削長約55mの水平孔）、深度300m予備ステージから掘削したボーリング孔（09MI20号孔：掘削長約102mの水平孔）、研究坑道掘削に伴う切羽での湧水及び研究坑道内に深度約25m毎に設置した集水リングで捕集される地下水を対象に、水質モニタリングを実施している。

その結果、研究坑道周辺では深度約80mを境に浅部ではNa-(Ca)-HCO<sub>3</sub>型地下水、深部ではNa-(Ca)-Cl型地下水が分布し、Na-(Ca)-Cl型地下水では深度とともに総溶存成分濃度（TDS）が増加していることを確認した。これらの結果は第1段階の結果と整合的であった。ただし、換気立坑の坑底付近では第1段階での結果と比較してTDSの高い地下水が存在し、その濃度分布は上に凸の形状を示していることから、研究坑道掘削に伴う地下水流動状態の変化を反映し、より深部のTDSの高い地下水が上昇していると考えられる（図2.2(3)-1（左）；萩原・水野，2009）。この研究坑道掘削による影響を定量的に評価するために、塩化物イオンの濃度分布に着目した移流分散解析を実施した。解析は、第1段階での調査結果により得られた塩化物イオン濃度分布を初期条件とした深度200mまでの研究坑道の掘削を模擬した三次元移流分散解析を実施し、研究坑道の掘削に伴う塩化物イオン濃度分布の変化を解析した（図2.2(3)-1（右））。その結果、深部地下水の上昇が解析的にも再現できことがわかった。また、主立坑断層を境に、その北東側でのTDSは南西側と比較して低いことが明らかになった（図2.2(3)-2；水野ほか，2009）。これらのことから、研究坑道近傍では研究坑道掘削に伴い坑底付近で深部地下水が上昇しているものの、主立坑断層の影響で上昇の程度が主立坑と換気立坑で異なっていると考えられる。以上の調査、解析作業を通して、第1段階で構築したサイトスケールの地球化学概念モデルの妥当性確認及びその考え方を整理した（図2.2(3)-3）。特に地球化学分野においては、第1段階において構築した地球化学概念

モデルに示した水質分布の状態が、研究坑道掘削の影響により変化しているため、第1段階で推定した水質分布を初期条件として設定した解析的な手法により、研究坑道掘削に伴う水質分布の変化を再現し、第2段階での調査結果と比較することが有効と考えられる。特に研究坑道掘削による短期的な水質分布の変化を解析的な手法により再現するためには、この変化に影響を与えている水理地質構造や地下水流動場を考慮した地球化学概念モデルの構築が重要である。このため、水理地質構造や地下水流動場を考慮した水質分布の変化に関する地球化学概念モデルの構築が今後の調査研究の主な課題となる。

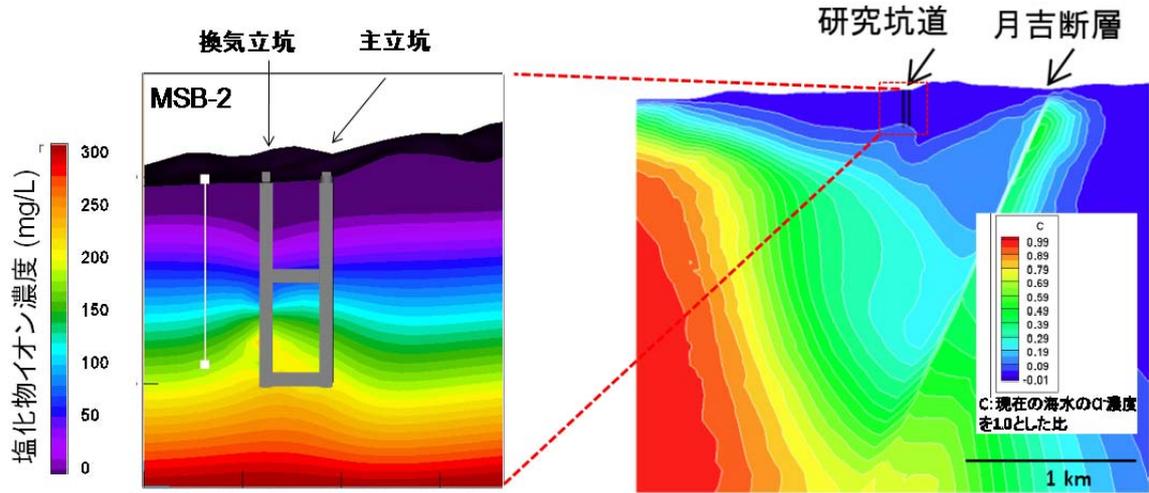


図 2.2(3)-1 研究用地内における塩化物イオン濃度の実測値に基づくコンターマップ（左）と移流分散解析の結果（右）

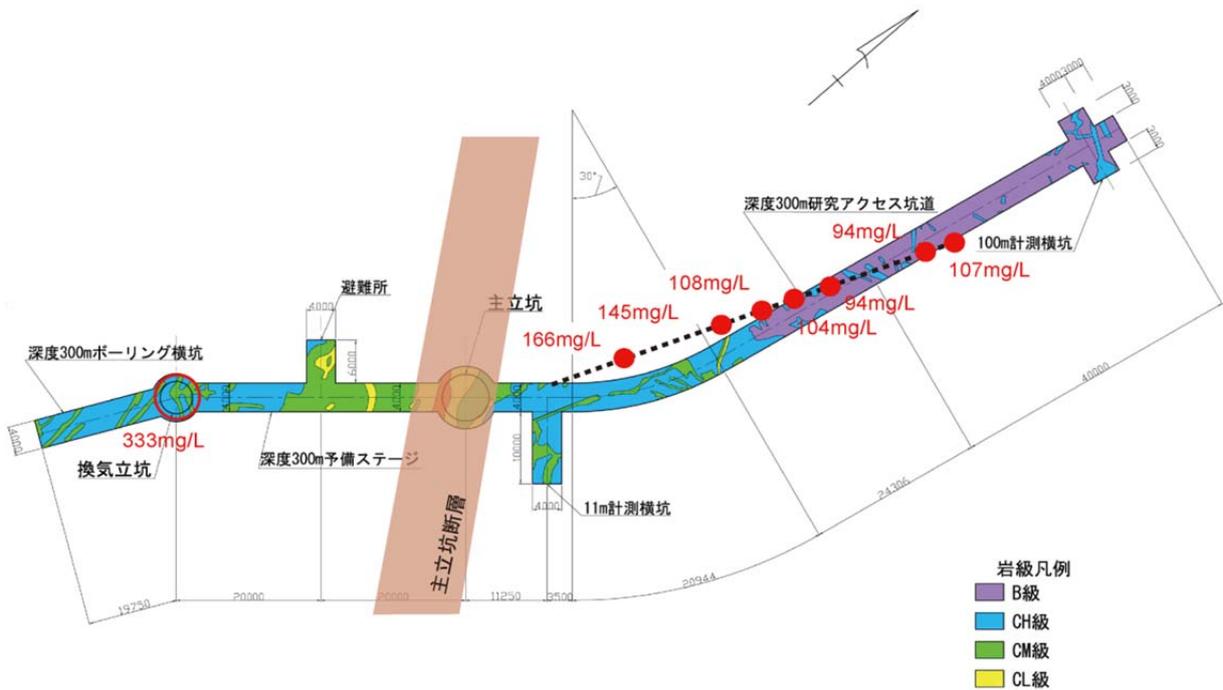


図 2.2(3)-2 深度 300m における塩化物イオン濃度分布（2008 年 12 月時点）

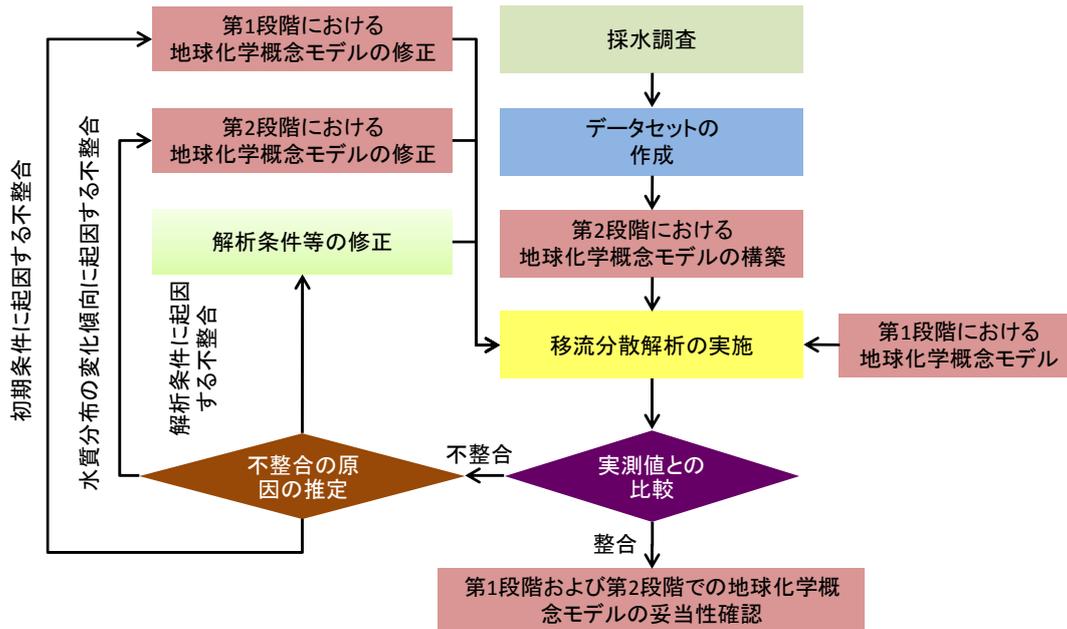


図 2.2(3)-3 第 1 段階における地球化学概念モデルの妥当性確認方法の例

第 1 段階での調査研究ではボーリング孔掘削時に使用する掘削水の混入の問題等から品質の高いデータを取得することが困難な、コロイド／有機物／微生物を対象とした調査を行っている。これまでにコロイドを採取するための調査技術として、被圧不活性条件下での限外ろ過方法の開発（青才ほか，2009）や、各深度における微生物種の生物化学的特性の調査手法の開発（福田ほか，2009）を実施してきている。コロイド／有機物／微生物については、物質移動の遅延効果に寄与する可能性が示唆されており、体系的な調査技術として構築し、第 3 段階に向けた調査技術を整備する必要がある。

## ② 2010 年度以降の調査研究計画

2010 年度以降は、研究坑道内及び研究用地内での地下水の地球化学特性に関するデータの取得を継続する。取得したデータに基づき、研究坑道掘削による水質変化を示した地球化学概念モデルを作成し、この概念モデルに基づく移流分散解析等を実施することにより、第 1 段階で構築した研究坑道掘削以前の地球化学概念モデル及び第 2 段階での水質分布の変化を示した地球化学概念モデルの妥当性確認を実施する。また、これらの結果に基づき、第 1 段階で実施した調査手法・手順の有効性を確認し、第 1 段階における調査結果に基づいて策定された第 2 段階における調査手法についても有効性を確認するとともに、技術的ノウハウや品質管理の考え方などを整理する。これらの結果は、地上からの調査・解析・評価技術や、坑道掘削時の調査・解析・評価技術の体系的な整理に反映する。

このための具体的な実施内容は以下のとおり。

### 1) 調査

研究坑道掘削に伴う水質変化を把握するために、以下の調査を継続実施する。

- ・ 地上から掘削されたボーリング孔を利用した水質モニタリング
- ・ 研究坑道内から掘削されたボーリング孔を利用した水質モニタリング
- ・ 集水リングからの湧水を用いた水質モニタリング
- ・ 壁面湧水や探り削孔からの湧水など研究坑道内における上記以外の地下水を対象とした採水調査
- ・ 岩芯を対象とした鉱物の化学分析

2010 年度には深度 400m 予備ステージからの水質観測用ボーリング孔設置のためのボーリング調査を行い、水質観測装置を設置する。2011 年度、2012 年度は、それまでに蓄積したデータに基

づき、第2段階における地球化学概念モデルを構築し、主に2013年度、2014年度に実施する研究成果の統合化や体系化（2.2(7)参照）に反映する。

## 2) モデル化・解析

第1段階で取得された地下水水質データを研究坑道掘削による擾乱を受けていない状態の水質分布として設定し、第2段階での調査によって更新されたサイトスケールの水理地質構造モデルを利用した移流分散解析及び水理-地球化学連成解析を実施する。解析の結果は、第2段階での地球化学調査で得られた実測値と比較し、第1段階での地球化学概念モデルの妥当性を確認する。また、地球化学特性を考慮した解析の結果は、水理地質構造モデルの妥当性を確認へ反映させる。この際、移流分散解析及び水理-地球化学連成解析に先立って第2段階における地球化学概念モデルを作成する。地球化学概念モデルは第2段階で得られた観測値に基づき構築することとなるが、複数の地球化学概念モデルが構築される場合には、それらの地球化学概念モデルからより確からしい地球化学概念モデルを選択するための基準や考え方を整理する。

さらに、地球化学環境の長期変化を推定するための手法を構築することを目的として、主に鉱物を対象とした解析を行う。この結果に基づき推定された深部地下環境の長期変化については、地質学的及び水理学的に推定される地質環境特性の長期変化と比較、検討することにより、信頼性を向上させ、地質/地質構造や地下水流動特性の長期変化の推定結果と統合的な地下水の水質変化を推定するための考え方を整備する。

## 3) 調査・解析技術開発

### a) 地下水の採水及び水質モニタリング技術

水質モニタリングで対象とする項目は、物理化学パラメータ（温度、圧力、電気伝導度や pH 等）、主要元素、微量元素、同位体組成等、多岐にわたる。これらのモニタリングデータや分析データの品質を管理しつつ、より効率的に取得する方法についての検討を継続する。具体的にはボーリング孔から地下水を採水するための採水装置の開発、試料採取時の品質管理方法の検討、測定及び分析に付随する不確実性の低減、品質評価手法の構築について、技術開発を進める。

### b) コロイド、有機物及び微生物を対象とした調査技術

コロイド、有機物及び微生物を対象とした調査技術の開発を行う。これらの調査対象は研究所用地周辺の地下水環境に低濃度で存在していることが確認されつつあり、このような低濃度の物質を高精度かつ効率的に分析、解析するための調査手法を構築する必要がある。特に、これらの調査対象は、原位置の環境を保持した状態での採取及び採取後に変質を受けない環境下において分析、解析することが必要となるため、試料の採取方法や処理方法に加え、変質の有無やその程度を評価するための手法を開発する。

## (4) 地下空洞への地下水流入状態の把握

第2段階における地下空洞への地下水流入状態の把握に関する調査研究は、研究坑道周辺の水理・地球化学状態に関わる知見から研究坑道へ流入する地下水流入量や地下水水質を把握し、研究坑道の設計、施工や第2段階以降の研究計画に反映させることを目的としている。

### (a) 地下空洞への地下水流入量の把握

#### ① これまでの調査研究成果と課題

研究坑道への地下水流入量を把握するための観測については、2.2(2)「地下水の流動特性の把握」での観測とあわせて、坑道内への湧水量の計測（図 2.2(2)-1）や立坑内への湧水量に影響を及ぼしていると考えられる人工構造物の影響を含む立坑近傍の透水性（スキン効果：人工構造物やグラウトによる湧水の抑制や掘削影響領域（EDZ）の形成による湧水の増加などの水理学的影響（例えば、小坂ほか、2009））に関わる情報を取得するための研究坑道近傍の地下水圧モニタリングを実施した。さらに、2006年度には立坑坑底（主立坑；180m、換気立坑；191m）からパイロットボーリング調査を実施し、深度約 500m までの立坑沿いの地質環境（地質・地質構造の分布、透水性、水質など）を把握した。また、深度 300m 研究アクセス坑道の掘削工事においても、掘削

前に湧水の有無，プレグラウト工の必要性の有無を確認するためのパイロットボーリングを掘削し，湧水量を把握した。

研究坑道への地下水流入量の予測に関しては，2.2(2)で構築した水理地質構造モデルを用いて，瑞浪超深地層研究所の研究坑道などの建設に伴う，研究坑道への湧水量や，地下水位分布及び水頭分布の変化等を推定するための地下水流動解析を実施した。これらは，研究坑道の設計・施工への情報提供，及び研究坑道建設に伴う地下水流動場の変化を用いたサイトスケールのモデルキャリブレーションに必要な調査項目や仕様を抽出すること（第2段階での調査計画策定への情報提供）を目的としている。地下水流動解析においては，有限要素法による等価不均質連続体モデル（下茂，山本，1996）を用いた飽和－不飽和状態における三次元非定常地下水流動解析を実施した。

以上の調査・モデル化・解析作業を通じて，主立坑沿いの断層と断層に伴う変質帯の透水不均質性や立坑近傍（立坑壁面から10m程度の範囲）のスキン効果の影響（図2.2(4)-1）を確認した（武田ほか，2009）。特に，モデルの妥当性確認及び更新のみならず，研究坑道の設計・施工への情報提供の観点から重要な課題として，研究坑道への地下水流入量を規制する要因の一つである立坑近傍のスキン効果を定量的に評価する必要があることを明確にした。なお，ここで得られた成果については，2.2(2)①に示す調査研究にも反映している。

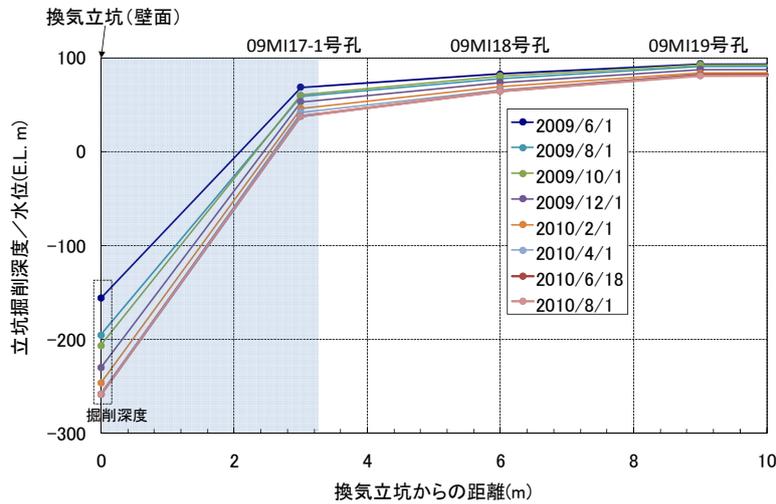


図 2.2(4)-1 換気立坑近傍の水圧分布

② 2010 年度以降の調査研究計画

2010 年度以降も，研究坑道への地下水流入量を把握するための観測として，研究坑道への総湧水量の計測，集水リングを用いた区間湧水量の計測，地上及び研究坑道内で掘削されたボーリング孔を利用した地下水長期モニタリングを継続する。水理地質構造モデルの構築及び地下水流動解析においては，取得される研究坑道掘削に伴う地下水流動場の変化に関するデータを用いて，2.2(2)に示す第1段階でのサイトスケールの水理地質構造モデルの妥当性を確認するとともに，水理地質構造モデルの更新を行うとともに，研究坑道の設計・施工に資する情報として，研究坑道掘削に伴う地下水流動場，研究坑道への湧水量の非定常変化を推定するための地下水流動解析を実施する。具体的には，以下のとおり。

1) 調査

研究坑道掘削に伴う地下水流動場の変化及び，研究坑道周辺のスキン効果を把握するために，2.2(2)で示した湧水量計測や地下水長期モニタリングに加え，立坑ごく近傍の水理特性を把握するために，立坑ごく近傍で掘削されたボーリング孔を利用した地下水長期モニタリングを継続実施する。

ここでの調査結果は，次に示すモデル化・解析に反映する。

## 2) モデル化・解析

上述したデータを用いて、研究坑道掘削を模擬した地下水流動解析を実施し、研究坑道周辺の地下水流動場の非定常変化の予測、研究坑道への地下水流入量の予測を実施する。ここで得られた成果は、研究坑道の設計・施工へ反映するとともに、研究坑道建設に伴う地下水流動場の変化に基づくサイトスケールのモデルキャリブレーションに必要な調査項目や仕様を抽出することで第2、第3段階での調査計画策定への情報提供を行う。

## 3) 調査・解析技術開発

2.2(2)で示した水圧モニタリング技術に関する検討を実施する。

### (b) 地下空洞への流入地下水水質の把握

#### ① これまでの調査研究成果と課題

研究坑道掘削開始時より、立坑掘削に伴い排出される地下水は排水基準（水質汚濁防止法）を満たすための処理を行った後に近隣の河川へ放流するとともに、放流先河川の水質を自主的に測定していた。また、掘削土については研究所用地内の堆積場で保管し、土壌汚染対策法で定められている基準を超過している場合には産業廃棄物として処理している。しかし、2005年に実施した放流先河川の水質分析の結果、環境基準（環境基本法）に対して、フッ素及びホウ素の濃度が超過していることが判明し、立坑内からの排水を停止した。そのため、排水処理計画及び掘削土の管理方法を再検討するために、第1段階での調査結果をとりまとめるとともに、深度約500mまでのフッ素、ホウ素を含めた関連法規に示された項目の分布状態の把握と供給源の特定を目的として、パイロットボーリング孔での採水、分析、及びパイロットボーリング調査で取得した岩芯を利用した土壌汚染対策法に定められた溶出試験及び含有試験に加え、全岩分析、XRD分析を行った。また、岩石試料を用いて水-岩石反応試験を行った。

地下水分析の結果、両ボーリング孔において、フッ素は概ね5mg/L～6mg/Lの範囲に分布し、ホウ素については1.5mg/L～2mg/Lの範囲で、深度とともに上昇する傾向を示した。他方、岩石試料については、06MI03号孔では土壌汚染対策法に定められた基準値を超える値を示す試料は認められなかった。しかし、06MI02号孔では、溶出試験において、フッ素及び砒素の濃度がそれぞれ基準値を超える試料が認められた。

地下水中のフッ素の起源については、水-岩石反応試験の結果（Abdelgawad, 2009）、花崗岩中のフッ素を含む鉱物（螢石や黒雲母）からの溶出である可能性が示唆された。岩石の全岩分析の結果からは、花崗岩中のフッ素濃度が150mg/kgから5,000mg/kgの広い分布範囲を示す結果が示されており、このことからフッ素の含有量が高い花崗岩と反応することにより、地下水中にフッ素が供給されていると考えられる。ホウ素の起源については明確にできていないものの、既存の研究では花崗岩地域の地下水や温泉水、海水において基準値を超える濃度が報告されている。研究所用地周辺の深部では、熱水もしくは海水起源と考えられる溶存成分濃度の高い地下水が確認されており（Iwatsuki et al., 2005）、ホウ素はこれらの溶存成分濃度の高い地下水及び花崗岩が供給源であると考えられる。また、岩石中の砒素については、全岩分析の結果、基盤岩である花崗岩ではなく、花崗岩中の塩基性貫入岩に特異的に含まれていることが認められた。砒素を共沈して取り込む鉱物としては、イライトや、燐灰石、ドロマイト、鉄硫化鉱物、鉄酸化物が知られている。XRD分析の結果、塩基性貫入岩中にはドロマイトが特徴的に認められることから、砒素を保持している主要な鉱物としてドロマイトが考えられる。また、溶出試験の結果では砒素の溶出が認められるものの、実際の地下水では砒素は検出されていない。熱力学的解析の結果、ドロマイトが溶出試験の条件である弱酸性条件下では溶解するものの、東濃地域に分布する地下水のpH領域である弱アルカリ領域で安定となる結果が得られており、地下水への溶出は少なかったと考えられる。

#### ② 2010年度以降の調査研究計画

##### 1) 調査

2010年度以降については、研究坑道内へ流入する地下水の水質を把握するために、以下の調査を実施する。

- ・ 集水リングから採取する地下水を対象とした水質モニタリング
- ・ セメント等の人工材料が水質に及ぼす影響を把握するための室内試験
- ・ 岩石の化学組成分析（花崗岩とは異なる岩相が出現した場合）

これらの調査を通して、地下水が研究坑道内へ流入する過程で生じる化学反応を抽出し、研究坑道の掘削及び研究坑道に設置された人工材料等が研究坑道内へ流入する地下水の水質へ及ぼす影響を推定する。

## 2) モデル化・解析

モデル化・解析では、2.2(3)で実施した移流分散解析の結果に基づき、研究坑道へ流入する地下水水質を定量的に評価する。ただし、移流分散解析で指標となる塩化物イオン以外の元素、特に人工材料や岩石との反応性が高い元素及び pH や酸化還元環境の変化に対して鋭敏に反応して変化する元素については、各移動経路での化学反応を考慮した水理・地球化学連成解析が必要となる。そのため、2010年以降については、具体的な解析方法の検討を実施し、有効な解析方法を決定する。また、決定した解析方法に基づいた解析結果と実測値を比較し、解析方法の妥当性を確認する予定である。

## 3) 調査・解析技術開発

調査・解析技術開発では、主に水理・地球化学連成解析コードに関する検討を行う。これまでも複数の解析コードが開発されており、これらの解析コードのメリット、デメリットを把握するとともに、海外での利用実績などを考慮し、使用する解析コードを決定する。その後、解析コードの選定方法に関する知見をとりまとめ、作業フローとして整理する。

## (5) 物質移動の遅延効果の把握

### ① これまでの調査研究成果と課題

第2段階における物質移動の遅延効果の把握に関する調査研究は、第1段階及び第2段階の調査において取得される地質環境特性に関するデータに基づいて、地質構造モデルや水理地質構造モデルなどを構築するとともに、地下水流動解析による地下水流動場の推定、物質移動場に関する概念（図 2.2(5)-1）の構築を踏まえ、対象とする地質環境における物質移動モデル<sup>‡</sup>（図 2.2(5)-2）の構築や、それをを用いた予察的な物質移動解析を実施することである。

原子力機構では、これまでに物質の収着・拡散特性、物質移動に寄与する間隙構造や間隙率、地下水中のコロイド／有機物／微生物などが物質移動に与える影響を把握することを目的として、東濃地域（土岐花崗岩）や釜石鉱山（栗橋花崗閃緑岩）において調査研究を実施している（Ota et al., 1999, 2004, 2005a, 2005b；核燃料サイクル開発機構, 1999b）。これら調査研究により、瑞浪層群中の物質移動特性については、東濃ウラン鉱床において天然ウランが鉱物表面へ収着、沈殿あるいは鉱物化により堆積岩中に長期間保持されていることが示されている（核燃料サイクル開発機構, 1999a）。一方、土岐花崗岩を対象とした物質移動特性に関する調査研究では、高透水性の割れ目近傍において鉄酸化物の沈殿・濃集に伴う天然ウランの共沈現象が確認されている。

しかし、これらの調査は、個々の地質環境特性に合わせて実施された調査結果であり、データの取得技術の確立、データの不確実性の把握などは十分でない。また、これらのデータ取得、場の把握、及び物質移動解析に至る一連の調査手法が体系的に構築されていないことから、研究坑道を利用した体系的な調査手法を構築する必要がある。

以下に、物質移動の遅延効果に影響を与える特性に関するこれまでの調査研究成果をとりまとめた。

<sup>‡</sup>移流、拡散、収着などの現象や特性を統合したモデル

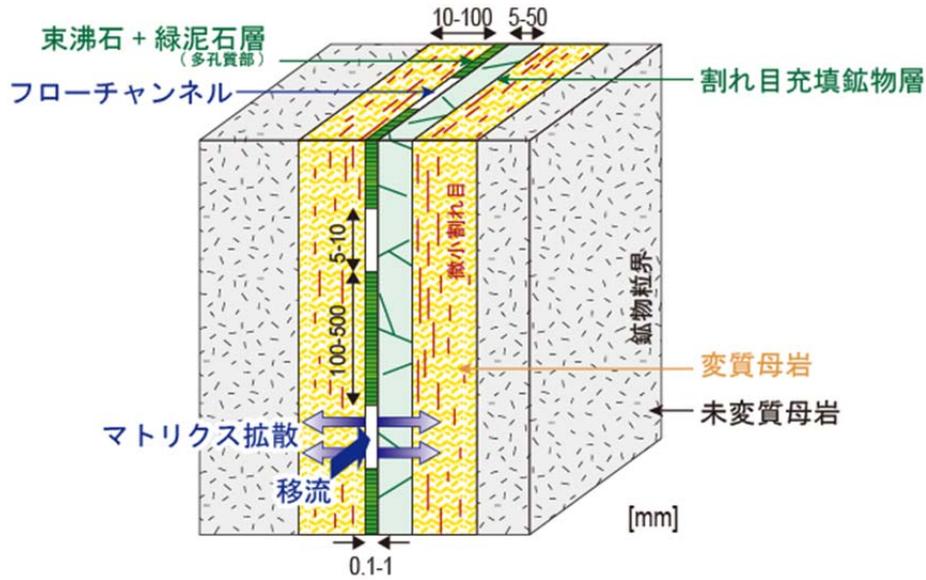


図 2.2(5)-1 結晶質岩中の物質移動経路の概念モデルの例 (Ota et al., 1999)

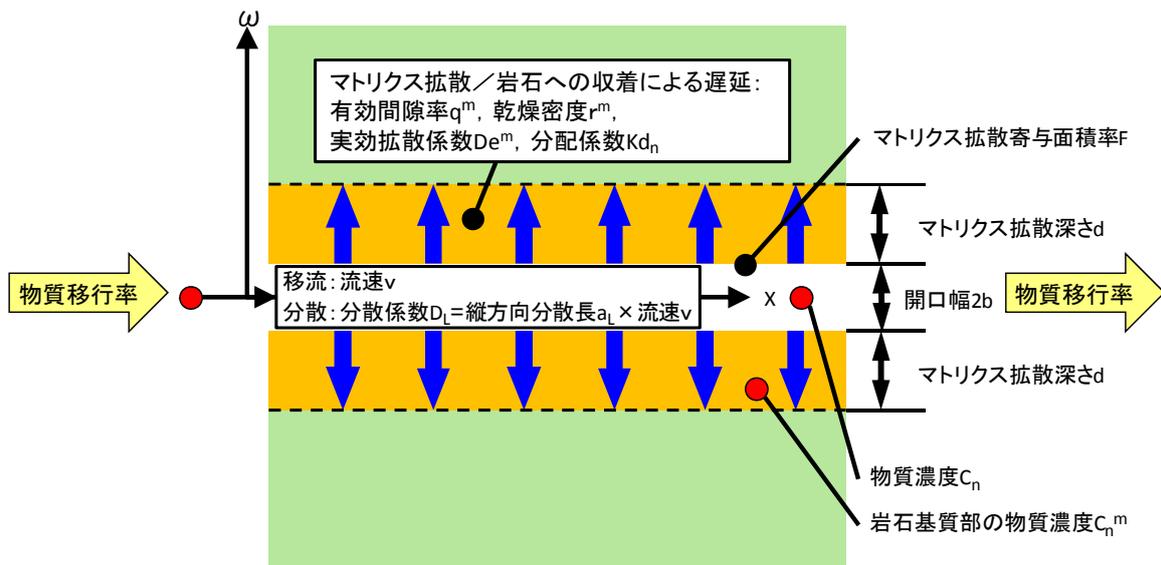


図 2.2(5)-2 結晶質岩中の物質移動モデルの概念の例 (核燃料サイクル開発機構, 1999a を修正)

a) 岩盤の収着・拡散特性

第 1 段階では、土岐花崗岩の収着係数や拡散係数は、ほとんど取得されていないため、これまでに多数のデータが取得された栗橋花崗閃緑岩との対比により、土岐花崗岩の収着係数や拡散係数が推定されている (太田ほか, 2005)。具体的には、土岐花崗岩と栗橋花崗閃緑岩の鉱物・化学組成及び地下水の水質 (弱アルカリ性, Na-HCO<sub>3</sub> 型) が類似していることから、栗橋花崗閃緑岩を対象に取得された収着係数 (Cs : 1.7-2.9×10<sup>-2</sup>m<sup>3</sup>/kg, Sr : 3.6×10<sup>-2</sup>m<sup>3</sup>/kg) の範囲、あるいは収着係数のオーダーが土岐花崗岩にも適用できると考えられている。同様に、土岐花崗岩と栗橋花崗閃緑岩の岩石組織や間隙分布などの類似性から、土岐花崗岩は栗橋花崗閃緑岩と同程度の拡散係数を有すると推定されている。また、研究所用地周辺の水質分布として予測されている Na-Cl 型の地下水水質に対する収着特性に関する情報は取得されていないものの、収着データベース (澁谷ほか, 1999 ; 陶山・笹本, 2004) を利用することにより、土岐花崗岩の収着特性を推定することが可能であることが示されている (太田ほか, 2005)。

また、深層ボーリング調査 (MIZ-1 号孔) により採取した岩芯を用いた室内試験では、研究所

用地周辺の深部に分布が推定されている Na-Cl 濃度が高い条件下において、土岐花崗岩のマトリクス及び透水性割れ目中の充填鉱物を用いたバッチ式収着試験（Cs 濃度：約 886mg/L，Sr 濃度：約 860mg/L，固液比：1/10，試験期間：20 日）を実施し，Cs と Sr の収着係数を取得した。その結果，土岐花崗岩のマトリクスの収着係数（Cs： $1.66-1.93 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$ ，Sr： $6.99-9.24 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{kg}$ ）は，栗橋花崗閃緑岩のデータから推定した収着係数より低いことが確認された。さらに，土岐花崗岩の透水性割れ目の充填鉱物の収着係数（Cs： $1.25 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{kg}$ ，Sr： $2.41 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{kg}$ ）についても，栗橋花崗閃緑岩の割れ目の充填鉱物の収着係数（Cs： $1.05-5.00 \times 10^{-1} \text{m}^3/\text{kg}$ ，Sr： $0.50-5.00 \times 10^{-1} \text{m}^3/\text{kg}$ ）より低く，割れ目充填鉱物は，マトリクス部と比較すると 1~2 オーダー大きな収着能力を有することが明らかとなっている（太田ほか，2005）。しかし，これらの拡散係数や収着係数は，ボーリング調査により採取された岩芯を用いた室内試験により取得されており，原位置試験により取得するデータとの相違について確認する必要がある。

#### b) 間隙構造や間隙率

物質移動の遅延効果に寄与するプロセスであるマトリクス拡散は，マトリクス中における間隙構造（微小割れ目，鉱物粒界，へき開などの連結間隙）で生じており，物質移動解析では，マトリクス拡散深さや拡散係数などのパラメータとして表現される。しかし，これらのパラメータはほとんどの場合，実際の地質環境とは異なる条件下である室内試験によって取得されている。室内試験に用いる試料は，物理的及び化学的に擾乱を受けているために，取得されたパラメータによって，岩盤の物質移動の遅延能力が過大に評価されていることが指摘されている（Bradbury and Green, 1986；Miller et al., 1994）。そのため，マトリクス中における間隙構造について，原位置試験と室内試験におけるマトリクスの間隙構造の違いを把握することが重要である。

釜石原位置試験研究では，栗橋花崗閃緑岩を対象として，天然ウラン系列核種（ $^{238}\text{U}$ ， $^{234}\text{U}$ ， $^{230}\text{Th}$ ）の分布及び放射非平衡調査によりマトリクス拡散深さが推定されている。また，原位置でのレジニ注入試験によりマトリクス中の間隙構造の連結性（ネットワーク）が把握された（核燃料サイクル開発機構，1999b）。土岐花崗岩のマトリクスにおける間隙構造については，岩石組織や鉱物組成，間隙率などとの類似性から栗橋花崗閃緑岩と同様の間隙構造が広がっていると推定されている（太田ほか，2005）。

深層ボーリング孔（MIZ-1 号孔）の岩芯を用いた室内試験では，透水性割れ目近傍におけるウラン系列核種（ $^{238}\text{U}$ ， $^{234}\text{U}$ ， $^{230}\text{Th}$ ）の分布プロファイルにより，マトリクス拡散深さを推定した（太田ほか，2005）。その結果，透水性割れ目近傍におけるマトリクス拡散深さは 20-50mm であることが分かった。このような岩盤中での物質移動現象や地球化学プロセスの天然環境下における類似プロセスの研究（ナチュラルアナログ研究）は，調査試験結果の信頼性を確認するうえで有効な手法である（Ota et al., 1999；太田・湯佐，2003）。しかし，岩芯は掘削・採取や調製などに伴う物理的な擾乱を被っており，そこで観察される間隙構造特性は，原位置のそれとは明らかに異なることが示されていることから（Möri et al., 2003；Ota et al., 2003），原位置における物質移動の遅延効果を把握するためには，原位置での調査試験が重要である。

#### c) コロイド／有機物／微生物

地下水中のコロイド／有機物／微生物について，研究所用地とその周辺における水質の深度方向の変化により，それらの種類や存在量などが変化する可能性が示されているものの，物質移動特性に与える影響に関して十分に検討されていない（核燃料サイクル開発機構，1999a；村上ほか，1999；彌榮ほか，2004；Mizuno et al., 2004）。また，第 1 段階におけるボーリング調査では，調査時間の制約や地下水の採水技術の課題などにより，地下水試料の掘削水による汚染が数~数十%（掘削水に添加した初期の蛍光染料濃度に対する掘削した地下水に蛍光染料濃度の百分率により評価）であり，コロイド／有機物／微生物について，品質が保証されたデータを取得することが困難であった。このことについては，地下水の地球化学特性調査において，原位置の環境を保持した状態での採取及び変質を受けない環境下での分析，解析する手法を開発していることから，物質移動の遅延効果に関する調査研究では，これらが設計・性能評価に資するためのパラメータとして提供できるまでの考え方を整備する必要がある。

#### d) 物質移動解析

第 1 段階で取得した地質環境特性に係わる情報を用いた物質移動解析が実施されている（牧野ほか，2005）。この解析は，地質環境特性の調査・研究から物質移動解析に至る一連の方法論の例示と，その過程の試行錯誤から得られる技術的ノウハウや知見の提示及び，物質移動解析を進める上で感度の高い因子や不確実性の幅が大きい因子などに関する検討を通じて地質環境特性調査やモデル化を進める上で留意すべき点が抽出されている。

#### ② 2010 年度以降の調査研究計画

第 1 段階の調査研究，海外における物質移動の遅延に関する調査，東濃鉱山や釜石鉱山などの既存の調査研究結果を収集し，物質移動の遅延効果に関する課題を整理し，今後の調査計画を検討する。また，既存の岩芯，研究坑道からのボーリング調査において採取する岩芯や地下水試料を用いた室内試験などにより，岩石・鉱物学的特性，地球化学，間隙構造，及び収着・拡散特性などを取得し，物質移動の遅延効果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移動・遅延現象を検討する。

##### 1) 調査

壁面地質調査の結果に基づいて，透水性割れ目や断層などから岩石試料や地下水試料を採取する。これらの試料を用いて室内試験を実施し，物質移動・遅延に寄与する間隙構造，間隙率，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し，物質移動・遅延の評価に必要なデータを整備する。具体的には，収着・拡散試験，間隙構造の把握のための試験，天然ウラン系列核種の分布調査，地下水や間隙水の地球化学特性調査などを実施し，これらの地質環境特性の二次元もしくは三次元的な広がりやその地質学的成因の違いに起因する収着特性，マトリクス拡散深さ，間隙構造などの相違やばらつきについても検討する。

##### 2) モデル化・解析

第 2 段階での調査によって取得される代表的な地質構造要素の地球化学，鉱物学的特性，間隙構造特性や収着・拡散特性などの情報に基づき，第 1 段階で構築した物質移動概念モデルの評価・更新を行う。

##### 3) 調査・解析技術開発

物質移動特性に関する調査では，室内試験，原位置試験，及び物質移動解析までの一連の手法を体系的に構築することを目標とする。これまでの調査により，室内試験で取得されるデータと原位置試験により取得されるデータでは，圧力や温度などの試験条件が異なるため，データ間に不整合があることが示されている。そこで，これらの異なるスケールを対象としたデータを物質移動解析の入力データとして適用するための考え方（適用の可能性を含め）を整理する。さらに，個々の地質環境特性調査により取得されるデータを，総合的に解釈し設計・性能評価に資するためのパラメータとして提供するまでの一連の調査及び考え方を整備する。

#### (6) 地下空洞の力学安定性の把握

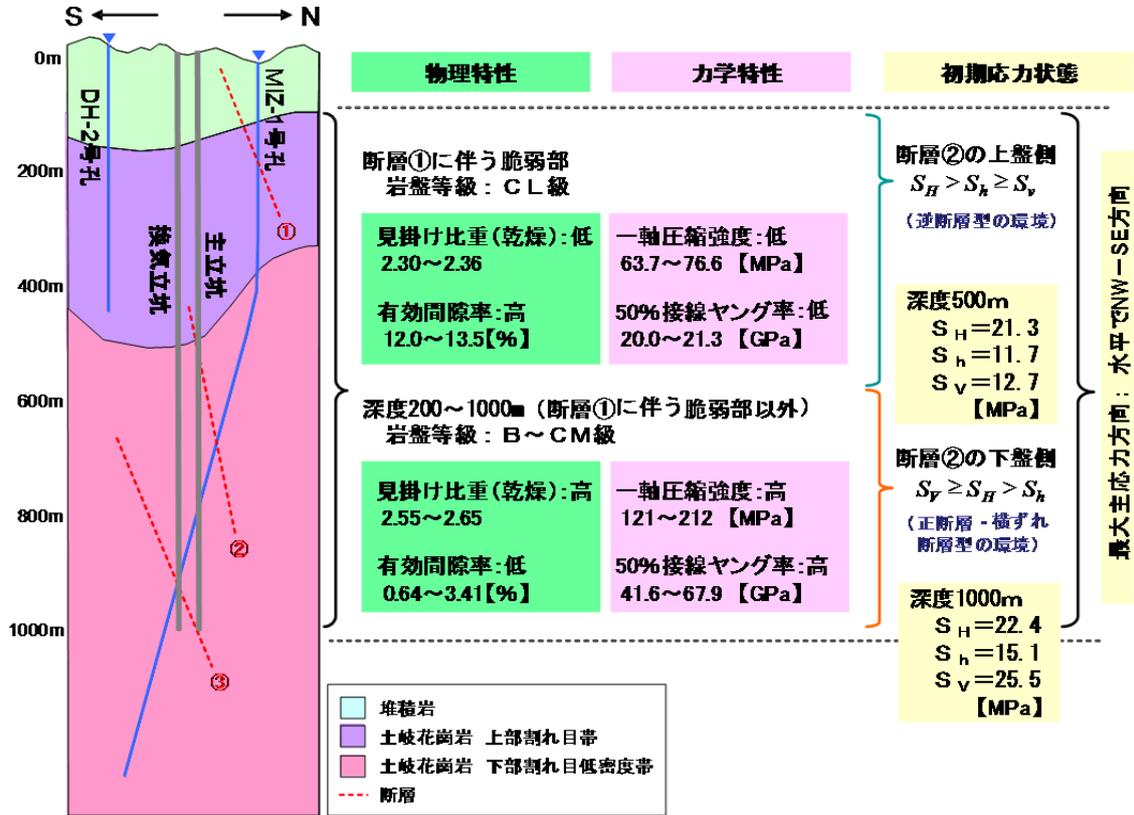
##### ① これまでの調査研究成果と課題

これまでの調査研究では，主に第 1 段階で構築した岩盤力学概念モデル（図 2.2(6)-1；平野ほか，2009）の妥当性確認を目的とし，図 2.2(6)-2 に記すフローに基づいて，深度 100m（堆積岩中），深度 200m（花崗岩中）において研究坑道内からのボーリング調査，室内物理・力学試験，初期応力測定（原位置測定，コア法による応力測定）を実施し，これらの情報を元に第 2 段階でのモデルを作成・更新してきた（松井・平野，2010）。

これらの調査結果に基づき第 1 段階における岩盤力学概念モデルの妥当性を検討した結果，岩石物性については第 1 段階で実施した各調査試験で精度の良い予測が行われていること（表 2.2(6)-1），初期応力については第 1 段階での予測は概ね妥当と考えられるといった成果が得られ

たが（図 2.2(6)-3），断層が初期応力場に与える影響は現状評価できていない。一方で，岩盤の力学物性評価という観点では，割れ目等の不連続面の分布特性の予測精度の向上が必要という結果が得られている（松井・平野，2010）。

研究坑道に遭遇する不連続構造については，主立坑に沿って高角度に分布することが確認された主立坑断層が，第 1 段階の地質構造モデルにおいて主立坑と換気立坑の間に分布する推定されていた（MIZ-1 号孔の 830~850m 付近の断層に対応）。今後，この断層を境とする力学特性や初期応力状態の変化の有無などについても確認していく必要がある。



※上図は概念図であり、実際の坑道はN-S断面上で本図のようには並ばない

図 2.2(6)-1 第 1 段階の岩盤力学モデル

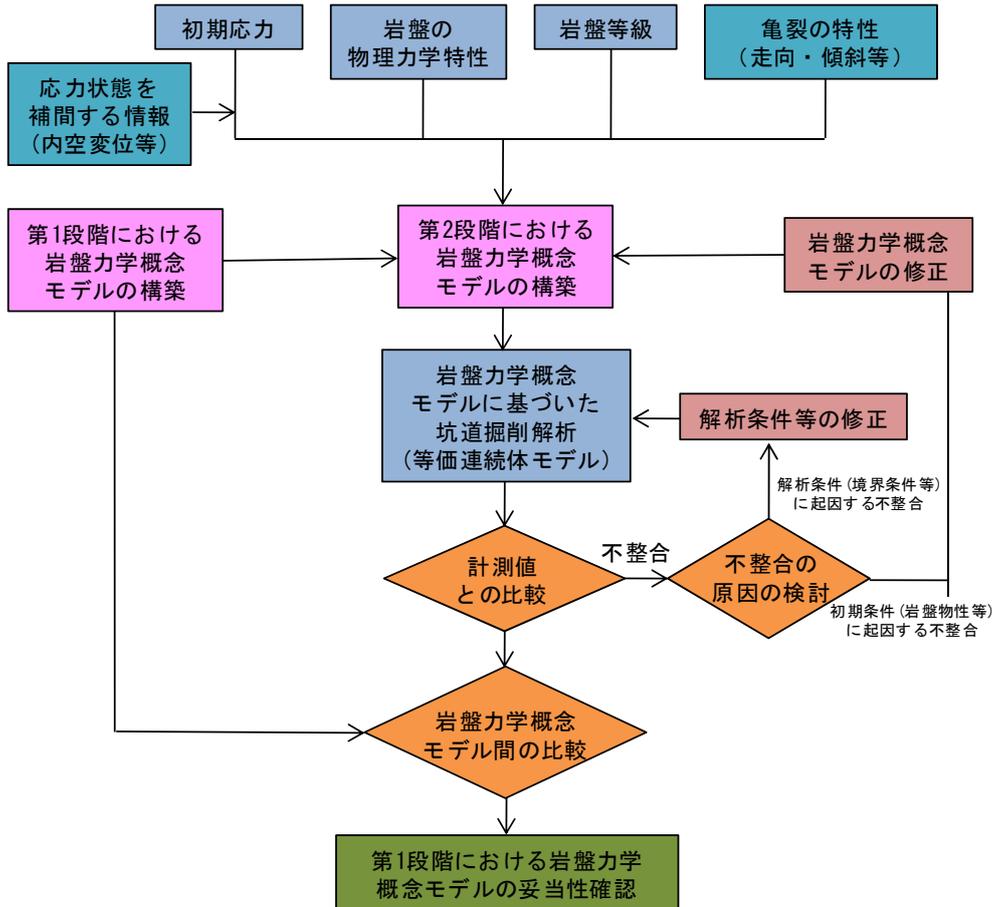


図 2.2(6)-2 岩盤力学概念モデルの構築 フローと妥当性確認の例

表 2.2(6)-1 岩盤力学ボーリング調査と第 1 段階の調査で把握した物理・力学特性

調査地点	第 1 段階調査 <sup>注1</sup> (平均値±σ <sup>注2</sup> )	深度 200m 調査 (平均値±σ)	第 1 段階調査 <sup>注1</sup> (平均値±σ)	深度 100m 調査 (平均値±σ)
岩相	土岐花崗岩		土岐夾炭累層	
乾燥状態の見かけ比重 (乾燥相対密度)	2.62±0.01	2.62±0.01	1.47±0.35	1.51±0.11
含水比 (%)	0.41±0.15	0.24±0.00	30.5±4.9	29.7±4.5
有効間隙率 (%)	1.12 ±0.40	1.05±0.09	44.3±3.8	44.6±3.6
P 波弾性波速度 (km/s)	5.45±0.41	5.42±0.20	2.39±0.11	2.57±0.29
S 波弾性波速度 (km/s)	2.91±0.32	3.44±0.19	1.09±0.03	1.22±0.12
一軸圧縮強さ (MPa)	173±25	143.2±9.4	12.3±0.4	10.7±2.0
50%接線ヤング率 (GPa)	53.9±5.8	51.9±4.3	4.5±0.3	4.97±1.16
静ポアソン比	0.265±0.043	0.34±0.07	0.290±0.049	0.42±0.05
圧裂引張強さ (MPa)	6.48±1.86	6.32±0.71	1.00±0.04	0.782±0.184
粘着力 (MPa)	39.1±2.2	16.3±0.9	3.30 <sup>注3</sup>	3.99±0.68
	側圧 0-30MPa 時	側圧 0-20MPa 時	側圧 0-4MPa 時	側圧 0-4MPa 時
内部摩擦角 (°)	52.2±1.3	64±1	24.3 <sup>注3</sup>	15.4±4.2
	側圧 0-30MPa 時	側圧 0-20MPa 時	側圧 0-4MPa 時	側圧 0-4MPa 時

注 1) MIZ-1 号孔で実施した第 1 段階調査の結果である

注 2) MIZ-1 号孔の花崗岩部の全平均である。ただし鉛直深度 199.5m の局所的な軟質部のデータは除いた

注 3) 測定値が 1 つのため σ の計算なし

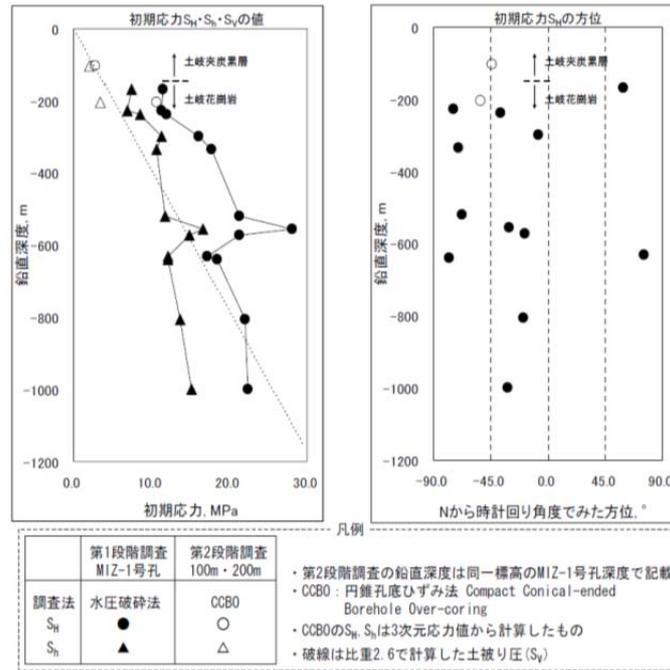


図 2.2(6)-3 岩盤力学ボーリング調査と第 1 段階の調査で把握した初期応力

② 2010 年度以降の調査研究計画

第 1 段階の予測は、深度 1,000m までの範囲を対象としているため、第 2 段階における研究の範囲として、当該深度までの室内試験や初期応力測定を繰り返し実施し、地下深部までの予測精度の妥当性を確認する。深度 200m 以深は花崗岩体中に位置することになることと、①の評価結果を考慮し、試験深度は、先行して行われる研究坑道掘削時の地質学的・力学的な情報（壁面観察結果、掘削ずりによる強度試験結果等）を勘案し選定することとする。さらに、MIZ-1 号孔で交差する断層が応力場に与えている影響を検討するためのコア法による応力測定等を実施する。

これらの測定結果を第 1 段階の岩盤力学概念モデルと比較・検討し、その妥当性を確認するとともに、妥当性確認の結果得られる情報に基づくモデルの更新を必要に応じ実施する。平行して、第 1 段階の調査の内容を見直し、最終的な地上からの調査・解析・評価技術を確立する。

1) 調査

岩盤力学概念モデルの妥当性確認のため、以下の調査を実施する。

- ・異なる深度での原位置応力測定（応力解放法）及び岩芯を用いた室内物理・力学試験（目安の深度：300m, 500m）
- ・岩芯を用いた応力測定（主に深度 300m, 500m レベルで展開した研究坑道内から掘削したボーリング孔を対象）
- ・掘削ずりを用いた室内物理・力学試験（掘削深度 10m 毎）

2) モデル化・解析

主に、第 2 段階のブロックスケールの岩盤力学概念モデル構築に資するため、現状把握されている割れ目等の不連続面の影響を考慮できる等価連続体モデル等（図 2.2(6)-4）を用いた力学的なモデル化・解析を試行する。これによりブロックスケールでの等価な岩盤力学物性の評価が可能となる。これらのモデル化・解析結果を、研究坑道掘削中に取得する変位・応力計測結果、岩盤分類から推定される岩盤の力学物性等と比較し、その妥当性を確認するとともに調査からモデル化に至る体系的な方法論を構築する。

以上の調査やモデル化・解析を行うことにより、地下空洞の力学安定性を把握するための方法論を整備する。

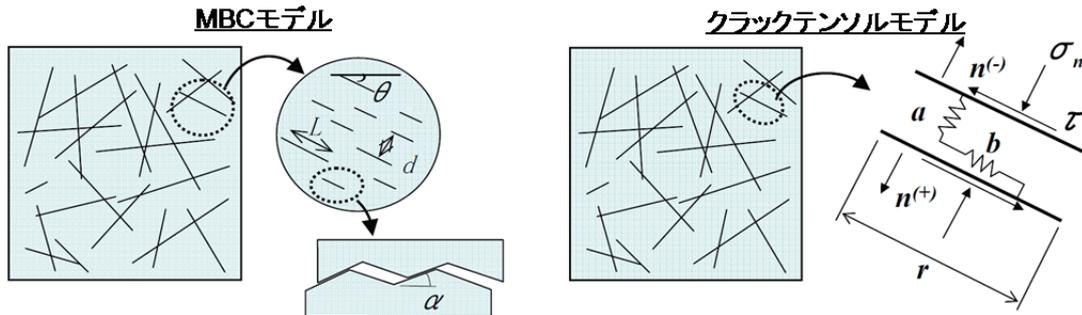


図 2.2(6)-4 等価連続体モデルの概念（割れ目のモデル化）

### 3) 調査・解析技術開発

第1段階で実施した掘削影響予測手法の妥当性を確認するための研究坑道周辺岩盤を対象とした掘削影響調査（各種物理探査，変位計測等）を実施するとともに，過去10年あまりにわたって研究開発を進めてきた岩盤の長期挙動評価手法（大久保ほか，2009；市川ほか，2009）の有効性を確認するため，研究坑道掘削に伴い発生したEDZを含む研究坑道周辺岩盤の長期挙動計測を実施する。この際，花崗岩で生じる長期変形が非常に微小であることを考慮し，必要に応じ微小変形を原位置にて測定可能な機器開発も合わせて実施する。さらに，研究坑道がより深部へ到達することから研究坑道周辺の初期応力の絶対値が大きくなる。そのため，研究坑道で高抜け，山はねなどの応力集中による岩盤破壊が生じる恐れが高くなることから，ブロックスケールよりもさらに局所的な現象であるこれら岩盤破壊を調査評価できる技術開発を平行して進める。

### 2.3 深地層における工学技術の基盤の整備

深地層における工学技術の基盤の整備については，結晶質岩を対象とした地下深部までの施設的设计・建設及び操業に対する既往の技術の有効性の検討及び必要に応じた技術開発を行うことを主目的とし，以下の4つの研究課題を設定し，実証的な研究開発を進めている。

- ① 研究坑道の設計・施工計画技術の有効性の確認
- ② 研究坑道の建設技術の有効性の確認
- ③ 研究坑道の施工対策技術の有効性の確認
- ④ 安全性を確保する技術の有効性の確認

ここで，①は地上からの調査段階，②と③は施設建設段階，④は施設操業段階において必要となる技術的な基盤を提供するものとなる。表 2.3-1 に，2009年度までに実施してきた工学技術に関する研究項目の一覧を示す。

第1段階では，東濃鉱山，正馬様用地にて実施した深度1,000mまでのボーリング調査結果に加え，研究所用地で実施した深層ボーリング（MIZ-1号孔）における調査結果も加味し，超深地層研究所の研究坑道掘削に際しての設計及び施工計画の策定を実施した。

超深地層研究所計画は，現在第2段階の途上であり，2009年度末までに主立坑，換気立坑を深度430mまで掘削するとともに，深度400mにおいて，100m毎に掘削する主立坑，換気立坑を結ぶ連絡坑道（予備ステージ）の掘削が完了した。さらに，調査研究のために深度200m，300地点にボーリング横坑を設けるとともに，深度300mでは研究所用地北側に延長約100mの水平坑道（深度300m研究アクセス坑道）を掘削した。これらの研究坑道掘削時に，一般の地下施設建設工事で行われる壁面地質調査，各種の変位・応力計測（A，B計測）の他，深度200mボーリング横坑より数本の鉛直ボーリング孔を掘削し立坑掘削中の変位計測を実施し設計の妥当性の検証を行うとともに，施工実績に基づく施工計画の妥当性の評価を行った。リスクマネジメント手法の開発については，湧水抑制リスクの検討から開始し，現在までに地下施設建設プロジェクトという視点からのリスクマネジメント手法の開発をほぼ終了した。また，掘削技術として適用しているショートステップ発破工法の適用性の評価を中心としつつ，主立坑掘削中の坑壁安定化対策として実施しているレジン注入工法の適用性の検討を行った。さらに，排水処理の問題に端を発した湧

水抑制対策技術について、既往の技術によるグラウチングを深度 430m までの研究坑道掘削に対して適用し、その有効性の評価や設計・施工方法の合理化を進めてきた。安全を確保する技術については、特に研究坑道の長期的な維持管理の観点からの技術的検討を進めてきた。

以下、各研究課題において得られた成果と課題及びそれらを踏まえた 2010 年度から 5 ヶ年程度の研究計画について述べる。また、各研究項目の試験位置とスケジュール案を図 2.3-1 に示す。

表 2.3-1 第 1 期中期計画期間中の工学技術の開発に関わる研究項目

分類	大分類	中分類	
①研究坑道の設計・施工計画 技術の有効性の確認	施設・坑道設計	研究坑道レイアウト	
		支保設計	
		排水設計	
		通気設計	
	リスクマネジメント		
	施工計画	工事全体工程計画	サイクルタイム検討
			工法選定
			設備計画
			立坑建設プロセス検討
			施工管理手法
	施工設備計画	掘削設備	掘削設備
			運搬設備
			換気・排水設備
			排水処理設備
その他設備			
機械設備費用の考え方			
②研究坑道の建設技術の有効性の確認	掘削工法	掘削技術の検討	
		支保技術の検討	
		覆工技術の検討	
		補助工法の検討	
		その他工法の検討	
	品質管理・保証	取得情報の品質管理技術	
設計変更柔軟性	設計・施工計画の妥当性検討	施工出来形の品質管理技術	
		新工法・合理化・高度化技術の適用性検討	
③研究坑道の施工対策技術の有効性の確認	空洞の安定性に関わる突発的事象	岩盤力学モデルの不均質場の調査評価技術	
		空洞安定性の評価技術	
		空洞安定性の対策技術	
	地下水に関わる突発的事象	水理地質構造モデルの不均質場の調査評価技術	湧水影響評価技術
			湧水対策技術
			グラウト後の品質管理のための調査評価技術
	環境基準の動向や社会的要因に関わる対策技術	環境基準などの動向調査	社会的状況などの動向調査
④安全性を確保する技術の有効性の確認	安全管理(常時, 非常時)	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	
		維持管理	
		安全管理システムの評価	



図 2.3-1 各研究項目の試験位置とスケジュール (案)

(1) 研究坑道の設計・施工計画技術の開発

① これまでの調査研究成果と課題

2005年度～2009年度までの第1期中期計画期間では、瑞浪超深地層研究所の研究坑道の設計・施工計画の策定を第1段階で実施した調査結果に基づき実施するとともに、深度430mまで進捗した研究坑道掘削時に取得した各種のデータ分析・評価から以下のような知見が得られている。

- ・ 第1段階で実施した研究坑道の設計は、換気立坑側で見られる健全な土岐花崗岩を対象としており、設計時に設定した岩盤等級区分に基づく岩盤モデルと物性値及び応力解放率等の各種パラメータは、研究坑道掘削中に得られたそれらのデータとの比較の結果概ね妥当と判断される。
- ・ 主立坑側は、当初設計で想定していない断層及びそれに伴う変質部を掘削しているが、当初設計時の支保工の形態（覆工コンクリート、鋼製支保工、吹き付けコンクリートとロックボルトの組み合わせ）やその仕様（材料、厚さ等）は大きな変更なく適用され、現状支保工の変状も生じていない。このことから、当初設計に適用した手法は、幅広い地質状況に対応可能なものであることが示された。
- ・ パイロットボーリング調査は、換気立坑部、深度300m研究アクセス坑道掘削時の湧水抑制対策の計画策定及び実施にあたり非常に有効であった。また、支保工設計時の物性データ評価にも直接反映できるものであることから、掘削地点でのパイロットボーリング調査の重要性が確認できた。
- ・ 地震時の覆工挙動の観測結果から、地表に比べ地下の地震動が大幅に低下することを実測で示すとともに、第1段階で実施した耐震設計は十分な安全裕度を持つことが示唆された。
- ・ 施工計画については、第1段階で設定した掘削のサイクルタイムが大幅に増加しており、この原因は、当初想定していた深度の増加よりも、安全上付加された事項（キブルの運転速度の制限等）や掘削機械の保守、発破の良否に依存していることが明らかになった。

一方、設計・施工計画技術に関しては以下のような課題が残っていると考える。

- ・ 立坑に比べ水平坑道の展開長が短いことと、短い水平坑道も工区分けされているため、水平坑道の設計・施工計画の妥当性評価を行うためのデータが不足している。
- ・ 換気立坑側では、研究坑道周辺岩盤に発生している変形や覆工に作用している応力は非常に小さく、支保工の仕様をより合理化できる可能性があるが、そのような原位置での計測結果に基

づき支保工の仕様等を見直しつつ施工を進めていくようなシステム（情報化施工システム）のようなものが整備されていない。

- ・ 主立坑側は、断層及び変質部といった脆弱部を掘削しているが、今後深度が増加するに伴ってその状況下で設計の妥当性を検討するための基礎的な物性値や地震時における覆工の挙動に関するデータが不足している。

## ② 2010年度以降の調査研究計画

2010年度以降は、①で実施した手法と同様の方法により、より深部の研究坑道掘削に対する設計・施工計画の妥当性の検証を継続する。また、①に示した課題をふまえた研究開発を行っている。以下具体的な研究項目を列挙する。

### a) 施工管理上実施している各種計測（壁面地質観察，A計測，B計測）結果の分析による設計の妥当性の検討（主立坑，換気立坑）

2009年度までと同様に、設計に際して基本的な情報となっている岩盤等級区分やそれに基づく数値解析結果と、上記のデータを比較し、設計の妥当性を評価する。具体的には、パイロットボーリング調査結果の有効活用や地震時の覆工挙動を把握するための観測点の追加等で随時蓄積をはかり解析評価を行っていく。

### b) 掘削サイクルタイムの分析等に基づく施工計画の妥当性の検討（主立坑，換気立坑）

2009年度までと同様に、施工計画策定に際して基本的な情報となっている掘削サイクルタイムの詳細な分析を行い、施工計画の妥当性を評価する。

### c) 掘削ずりを用いた一軸圧縮試験による岩石物性の評価（主立坑，換気立坑）

2009年度までに換気立坑側で実施した掘削ずりを用いた一軸圧縮試験は、簡便・安価に実施できかつ設計の妥当性評価等に際して有効であったことと、課題の一つである断層及び変質部の物性値情報の不足を補うため、掘削ずりを用いた一軸圧縮試験及び付帯する物理物性（密度，有効間隙率，弾性波速度等）の計測を実施する。

### d) 地震時の覆工挙動の計測（主立坑，換気立坑）

前述のとおり、地震時の覆工挙動の計測から、深度の増加に伴い地震動が小さくなることは確認しているが、それは換気立坑で対象としている健全な土岐花崗岩と堆積岩部であり、断層及び変質部の挙動についてはデータがない状態であった。これを踏まえ、主立坑側にも換気立坑と同様の計測システムを配し地震時の覆工挙動計測を実施する。

### e) 原位置計測結果をフィードバック可能な設計／施工システムの構築

原位置での計測結果に基づき当初設計で設定した支保工をより合理的なものに変更しつつ施工を行う手法は、情報化施工として知られている。しかし、一方では支保工の変更を定量的に行うためには、設計時に実施する空洞安定性評価等が必要不可欠である。このような背景を踏まえ、原位置計測結果に基づき当初設計で実施した空洞安定性評価等を再試行することで定量的／合理的な支保工の選定を可能とするシステムの構築を図る。具体的には、中間ステージの研究坑道展開時に先行ボーリング調査を基本とする施工計画の立案とその妥当性評価等を進めていく。

## (2) 研究坑道の掘削技術の開発

### ① これまでの調査研究成果と課題

2005年度～2009年度までの第1期中期計画期間では、瑞浪超深地層研究所の研究坑道の掘削を通じ適用している掘削技術（ショートステップによる発破工法）、主立坑側の壁面の安定化対策として適用しているレジン注入工法の有効性を評価するとともに、適用事例のほとんどない立坑掘削へのスムーズブラッシング工法の適用を試行した。これらについては、深度430mまで進捗した研究坑道掘削時に取得した各種のデータ分析・評価から以下のような知見が得られている。

- ・ 掘削工法であるショートステップによる発破工法は、設計同様に主立坑と換気立坑で現れてい

る地質性状が大きく異なる岩盤に対して適用され、大きなトラブルもなくほぼ計画とおりの進行をあげていることから幅広い地質環境に適用可能な工法と評価できる。

- ・安定化対策として適用しているレジン注入工法は、3D レーザースキャナーデータの解析等による余掘量の評価等から一定の効果を上げていることが示唆されるとともに、室内試験により強度増加への効果等に関する定量的な情報を取得した。
- ・立坑掘削へのスムーズブラッシング工法の適用については、断面径が小さいため現行の掘削機械でその効果を発揮するような穿孔作業を実施することが困難であることから、十分な効果が得られない可能性が高いことがわかった。

一方、掘削技術に関しては以下のような課題が残っていると考える。

- ・立坑に比べ水平坑道の展開長が短いことと、短い水平坑道も工区分けされているため、水平坑道の掘削技術の妥当性評価を行うための情報が不足している。
- ・レジン注入工法に関しては、原位置岩盤に対する効果確認を定量的に実施するための情報が不足している。
- ・現在の研究坑道掘削工事の中では、多様な掘削工法（機械掘削等）を適用できる状況ではないことから、発破工法自体の有効性を評価できない。

## ② 2010 年度以降の調査研究計画

残された課題のうち、2 つ目については主立坑掘削時の地山安定化対策の必要性が減少してきており原位置での調査が困難になってきていることから、以下の研究開発を実施する。

### a) 水平坑道における掘削技術の有効性評価

深度 500m 付近に展開される予定の中間ステージ掘削時に、現行の坑道掘削方法（掘削長、支保工の設置時期等）を変化させるとともに、各種の変位応力計測を実施することにより、現行の掘削工法の有効性を評価する。なお、発破工法以外の掘削技術については、当面現場での適用による有効性評価は困難と考えられる。

### b) レジン注入工法の有効性評価

レジン注入工法の効果については、パイロットボーリングコアを用いた室内試験を実施するとともに、必要に応じ原位置での調査を加え評価を実施する。

## (3) 施工対策技術の開発

### ① これまでの調査研究成果と課題

施工対策技術については、実際の研究坑道掘削工事に甚大な影響を与えうる事象を抽出整理するとともにそれらに対して対策工の検討を行ってきた。具体的には、以下のとおりである。

#### (a) 岩盤の力学的安定性から生じる事象

- (i) 高抜け：結晶質岩のような不連続性岩盤において、ある程度の規模の岩盤が割れ目に囲まれる形でブロック化して滑動する現象
- (ii) 山はね：結晶質岩のような硬岩で、坑道掘削時に周辺岩盤に発生する応力集中により岩盤の破壊が起こり、岩石が飛び散るような現象

#### (b) 地下水流動から生じる事象

- (i) 突発湧水：結晶質岩のような不連続性岩盤で、大量の地下水の流動経路となっている箇所を掘削した際に、瞬時に大量の湧水が空洞内に流れ込む現象
- (ii) 高差圧：大気圧となっている空洞内と岩盤中の地下水の圧力差が大きくなり高圧の水が壁面から噴出したり覆工に過大な応力を発生させるような現象

第 1 段階では、研究坑道の展開深度が比較的浅いことと、第 1 段階の調査において特に被圧されている領域がなかったこと、ショートステップ工法という掘削方法を採用していたことにより、

山はね、高抜け、高差圧については現在の現場で実際に発生するとは考えられなかったことから、既往の土木構造物の建設事例等を参照しつつ必要に応じて数値解析等により現象の理解と対策工の検討を行っている。一方、突発湧水に関しては、この現象への対策とともに排水処理量を抑制するといった観点も加え、湧水抑制対策技術として既往の技術の現場への適用等を通じた有効性の検討を行ってきた。

この結果以下のような知見が得られている。

- ・ 湧水抑制対策については、深度 450m までの範囲で既往のグラウチング技術を適用した。その結果、既往のグラウチング技術を適用しプレグラウチングを行うことにより、研究坑道内への湧水を排水処理設備の容量から設定した目標値(2Lu)以下に低減できることを実証した(見掛ほか, 2010; 石井ほか, 2011)。また、数回のプレグラウチング作業を通じ、グラウチング施工計画の合理化・最適化をはかっている。
- ・ 高抜け、高差圧については、既往の土木構造物の建設事例を参照しつつ PFC や簡易な理論解析により現象理解を進めるとともに、それを踏まえた第 1 次的な対策工を提示した(黒崎ほか, 2008; 納多ほか, 2009)。
- ・ 山はねについては、その前兆となるような現象(スポーリング破壊等)の発生について既往の事例を参照しつつ検討を行うとともに、そのような現象を把握する上で必要な調査手法を提示した。

また、残された課題としては、以下のようなものが考えられる。

- ・ 湧水抑制対策技術については、既往の事例がほとんどない深度の増加とともに想定される高水圧/低透水性岩盤という条件下での湧水抑制対策技術の開発が必要となる。同時に深度 500m 以深については、研究坑道掘削前の地質環境情報がないことから、合理的・効率的な研究坑道掘削を行うため新たなパイロットボーリング調査を実施する必要がある。
- ・ 主立坑側では、断層及び変質領域を引き続き掘削していくため、ショートステップ(掘削長 1.3m×2)の状況下での高抜けの発生可能性を検討するための物性値等を取得する必要がある。
- ・ 換気立坑側では、健全な土岐花崗岩中を掘削するため、深度の増加とともに山はねやその前兆となるスポーリング破壊を早期に把握できる調査技術が必要となる。
- ・ 高差圧については、概念的な検討とともに原位置計測により支保工の安定性等にそのような事象がどの程度の影響を及ぼすかを定量的に把握する必要がある。

## ② 2010 年度以降の調査研究計画

残された課題のうち、高差圧現象については覆工の裏面排水機能を考慮すると覆工に直接水圧が作用する可能性が低いこと、高抜けについては拘束圧が高くなる地下深部では相対的に発生する可能性が低くなることを考慮し、当面 5 ヶ年間でそれを実施する緊急性が低いと考えられることから、以下の研究開発を実施する。

### a) 高水圧/低透水性岩盤を対象とした湧水抑制対策技術の開発(主立坑, 換気立坑)

深度の増加に伴い想定される地下水の化学組成の変化による排水処理コストの増加を勘案し、高水圧/低透水性岩盤を対象として、目標値以下に確実に透水性を低減させる技術を開発する。留意点は以下のとおり。

- ・ 経済産業省資源エネルギー庁からの受託研究「地下坑道施工技術高度化開発」の中で同様の目的をもった手法開発が行われてきているため、そこでの知見/成果(材料, 注入方法, 機材等)を活用する。
- ・ 主立坑側では立坑周辺の岩盤が脆弱であるため、それを踏まえたグラウチング施工方法の検討を実施する(例えば、低圧力で容易に岩盤中に浸透するような材料によるグラウチング施工など)。
- ・ 地震等の不測の事態による坑道内湧水量の増加も考慮し、従来のプレグラウチングに加えポストグラウチングによる対策技術の開発も行う。

**b) パイロットボーリング調査（主立坑，換気立坑）**

深度 180～500m の範囲で実施したパイロットボーリング調査を深度 500m 以深を対象に実施し、深度 500m 以深を対象とした湧水抑制対策工や研究坑道掘削の確度の高い計画策定に反映する。

**c) 坑道周辺岩盤の破壊現象の観測（換気立坑）**

換気立坑側で掘削している健全な土岐花崗岩で想定されるスポーリング破壊や山はねといった事象は非常に短時間で生じるため、それらの前兆を捉えることが対策上、重要となる。このため、これらの破壊現象の前兆を捉えうる技術として、原位置計測システムの検討と構築・設置を行い、システムの有効性を評価する。

**(4) 安全を確保する技術の開発**

**① これまでの調査研究成果と課題**

本研究課題については、2009 年度までは常時の安全確保と非常時の安全確保の 2 つに分けつつ検討を進めてきた。非常時の安全確保の技術については、設計段階での通気網解析結果等に基づく防災コンセプトの設定とそれに基づく研究坑道内への設備（避難所や非常時対応用品）の設置を行っている。このため特に研究開発要素は現状ではない。常時の安全確保については、他の地下施設と比べ、坑道掘削に関わる現場の状況を熟知した作業員以外の研究坑道内への入坑や研究業務に関連する作業が多いため、その観点から入出坑を管理できるシステムの構築とその運用とともに、空間確保の前提である支保工の変状をいち早く検知し対策を講じるためのシステムの検討を進めてきた。以下に得られた知見を示す。

- ・ 2009 年度までに 1 万人以上の見学者と研究者を受け入れているが、入出坑管理システムは特段の問題もなく運用されており、現場作業員以外の人間の安全確保対策として有効であることが実証されている。
- ・ 支保工の維持管理システムについては、近年導入が進んでいるアセットマネジメントの考え方に基づく変状を監視するシステム（例えば、土木学会，2009）とともに変状の原因を特定し有効な対策を講じることが可能となるシステムの検討を合わせて実施した。
- ・ 非常時の安全確保システムについてはその有効性を検証するすべがないことから、残された課題は支保工の維持管理システムの有効性の検討となる。

**② 2010 年度以降の調査研究計画**

2010 年度までに、設置後 5 年を経過する支保工が出てくることから、以下の研究を実施する。

**a) 支保工の維持管理システムの有効性の検討**

2010 年度までに検討した同システムを研究坑道内の所定の箇所に適用し、その有効性を検討する。

**(5) 地下施設の建設が周辺環境に与える影響の把握**

**① これまでの調査研究成果と課題**

振動，騒音，水質といった環境への影響については、工事契約の中で、防音ハウスの設置，定期的な振動，騒音及び水質の観測を行っており、特に研究開発要素となる事項はない。しかしながら、プロジェクトを進める上では、この種の定常観測は実施し続ける必要がある。

さらに、今後のパイロットボーリング調査や研究坑道掘削により、場合によっては新たな掘削土の処理や排水処理が必要となることも考えられる。これに対してはその必要性に応じ技術開発を実施することとする。

**② 2010 年度以降の調査研究計画**

**a) 環境負荷低減のための技術開発**

掘削土や排水処理について新たな課題が生じかつ研究開発の必要性があると認められた場合には、それらの処理方法等に関する技術開発を実施する。

### 3. 第3段階の調査研究計画

本章では、第3段階の段階目標を3.1で述べるとともに、全体目標のうち「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」及び「深地層における工学技術の基盤の整備」に関する調査研究計画を3.2にまとめる。

#### 3.1 第3段階の段階目標

超深地層研究所計画の第3段階の段階目標は、①研究坑道からの調査研究による地質環境モデルの構築及び研究坑道の拡張による深部地質環境の変化の把握、②地層における工学技術の有効性の確認、の2点である（核燃料サイクル開発機構，2002；日本原子力研究開発機構，2010）。

##### ① 研究坑道からの調査研究による地質環境モデルの構築及び研究坑道の拡張による深部地質環境の変化の把握

研究坑道からの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及び更新をとおして、不確実性を明らかに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及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。

以上の調査研究を実施することによって、深地層環境の特性（特に研究坑道周辺岩盤の地質環境特性）を精度よく理解するための、1) 調査の考え方やレイアウト、2) 適用性が確認された調査技術や解析・モデル化の手法、3) 調査・解析・評価の体系的な組み合わせ、4) 計画・調査・解析に関する技術的ノウハウや品質評価の考え方を整理する。

##### 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、研究坑道の長期にわたる維持・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、研究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、設計及び施工計画の変更に対処できることを示す。

#### 3.2 調査研究計画

地質環境の調査研究において、研究坑道を利用することの利点としては、調査対象の地質構造要素へ直接もしくは近傍よりアクセスすることが可能であることや、長時間を要する試験の実施が可能であること、数十 cm 規模の岩石試料の採取が可能であることなどが挙げられる。

これまでの調査研究により、土岐花崗岩中には割れ目頻度や酸化還元状態の異なる領域が存在することが推定されている。具体的には、深度 500m 程度以深は割れ目の少ない還元環境下の地質環境であることが明らかとなっており、地層科学研究の観点から重要な環境であると考えられることから、研究開発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、比較的高透水性の岩盤であることが明らかとなっている。早期に研究開発に着手でき、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。このような異なる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、国民の信頼感の醸成に貢献できるものとなる。

第3段階での調査研究では、研究坑道を利用することの利点や、異なる地質環境を対象とした

調査研究ができるといった観点を考慮しつつ、第3段階の段階目標を達成するために、第1段階や第2段階での調査研究を通じて課題として抽出された設計・性能評価の観点から重要となる地質環境特性評価に関わる調査研究を実施する予定である。

具体的には、断層や割れ目の地質学的・水理学的特性の評価に関する研究（2.2(1)参照）成果に基づき設定した研究坑道周辺のブロックスケール領域や坑道近傍領域（以下、「坑道スケール」という）における物質移動などの現象や特性の理解を目的とした調査研究や、坑道掘削や人工材料の使用を含む施工対策が坑道近傍の地質環境の性質や状態に与える影響の評価を目的とした調査研究などを実施する。これらの調査研究で取得する情報に基づくサイトスケールならびにブロックスケールの地質環境モデルの妥当性確認及び更新を実施する。さらに、モデルの妥当性確認・更新を通じて、坑道掘削時の調査段階での地質環境特性の調査・評価の体系的な方法論を適宜見直す。また、第3段階までの調査研究結果に基づき、地質環境の調査・解析から物質移動解析に至る一連の方法論を例示しつつ、坑道を利用した調査・評価における体系的な方法論も整理する。

地下水圧や水質の長期モニタリングを継続し、研究坑道の拡張や、研究坑道で実施する試験、調査による地質環境の変化を把握する。

研究坑道において、これら調査研究を実施する予定の領域もしくは位置の案を図 3.2-1 及び図 3.2-2 に示す。

第3段階での調査研究は、表 3.2-1 の年度展開表（2010年度～2014年度）に示すスケジュールで実施することとする。スケジュールは、調査結果や予算展開に応じて適宜見直すものである。

表 3.2-1 第3段階における調査研究の年度展開

	2010年度	2011年度	2012年度	2013年度	2014年度
計画策定	深度300mステージの個別調査研究計画及び深度500mステージにおける調査研究計画を策定	深度500mステージにおける調査研究計画を策定			深度500m以深での調査研究計画を検討
調査試験	深度300mステージにおける物質移動試験の対象領域を設定し、試験方法の適用性や課題を検討	深度300mステージにおける物質移動試験の対象割れ目を選定し、試験方法を決定	割れ目の不均質性やマトリクス部の拡散特性などを把握するための室内試験、及び対象割れ目の連続性や透水性などを把握するためのボーリング調査を実施	室内試験の継続及びトレーサー試験の実施	物質移動解析に必要なパラメータの取得・設定方法を整理
	水平坑道の掘削に伴う岩盤の長期挙動を理解するための室内試験を実施		岩盤の長期挙動を理解するための室内試験の継続、及び試験坑道掘削前の初期状態の地質環境の把握やグラウチングの実施	室内試験の継続、グラウチング後の地質環境（試験坑道掘削前）の把握、及び試験坑道掘削に伴う地質環境の変化の予測解析を実施	室内試験の継続及び試験坑道掘削に伴う地質環境の変化の把握
モデル化～解析 (ブロック～坑道スケール)	地質構造／水理地質構造モデルの構築及び物質移動解析手法を検討	地質構造／水理地質構造モデルを更新し、原位置試験の予測解析を実施		地質構造／水理地質構造モデルの更新及び原位置試験結果に基づく解析手法の見直し	地質構造／水理地質構造モデルの更新及び物質移動特性データセットを作成
坑道を利用した調査評価技術の整備	個別の調査解析技術の適用性、技術的ノウハウや品質管理の考え方を分析し文書化				

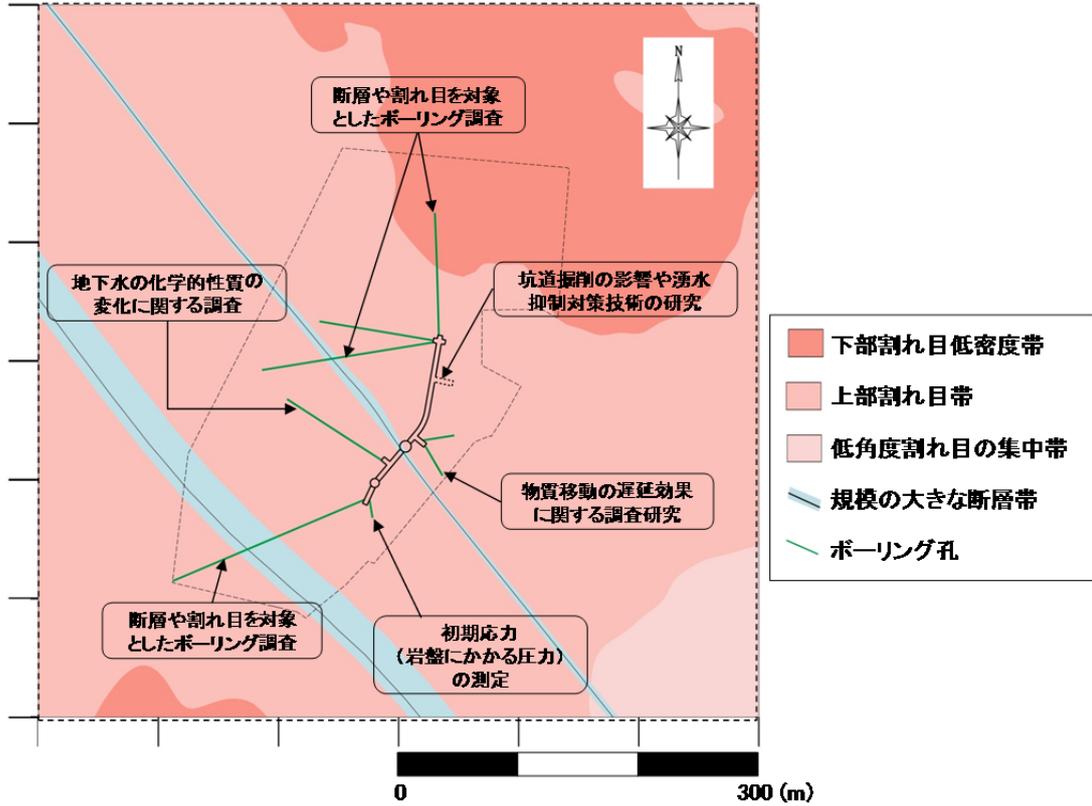


図 3.2-1 深度 300m ステージでの調査試験位置図 (案)

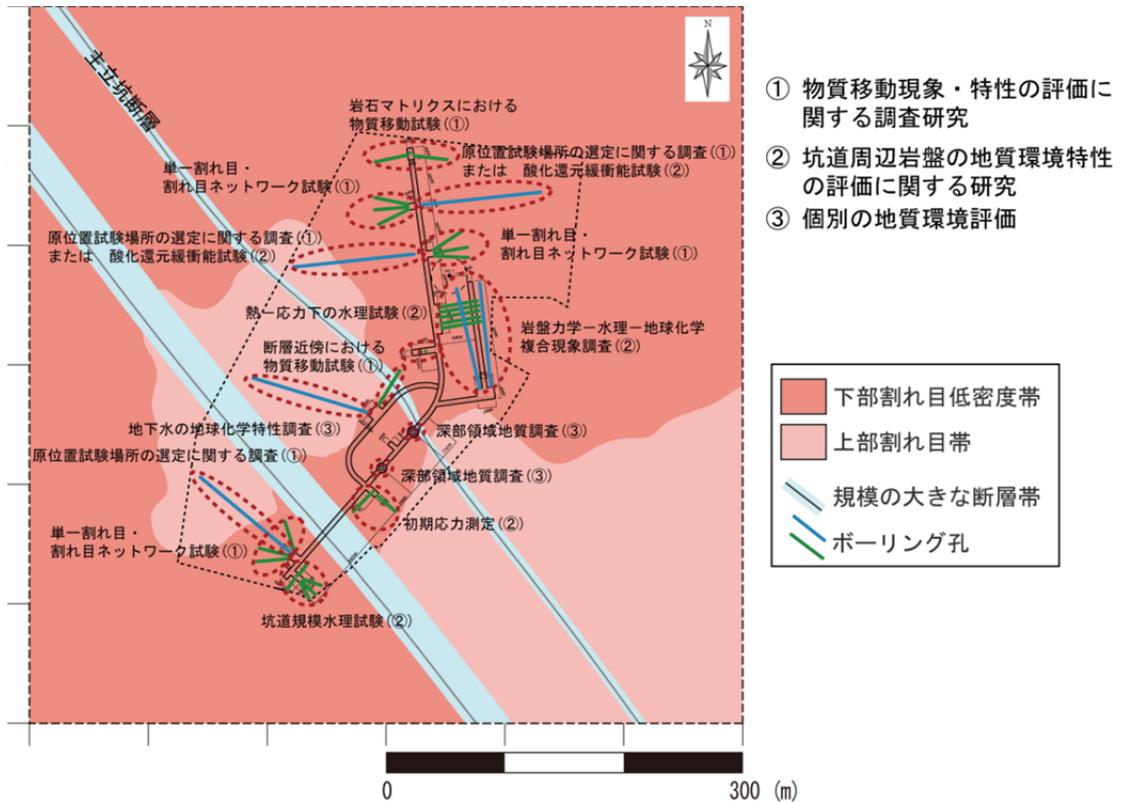


図 3.2-2 深度 500m ステージでの調査試験位置図 (案)

## (1) 物質移動現象・特性の評価に関する研究

### ① これまでの調査研究成果と課題

一般に、結晶質岩盤における物質移動の概念は、移流場として機能する開口した透水性割れ目のネットワークや、その周辺のマトリクス部における拡散や収着により説明され、土岐花崗岩においても同様の物質移動の概念が考えられている（核燃料サイクル開発機構，1999b）。このような物質移動の概念に基づいて、物質移動の遅延効果の把握に関する調査研究では、研究坑道周辺における物質の移動・遅延を評価するために、物質移動経路となりうる透水性割れ目を主な対象として、物質移動のメカニズムである化学的、物理的プロセスを把握することが重要であると考えられる（図 3.2(1)-1）。

第 1 段階の調査研究では、深層ボーリング調査により採取した岩芯を用いた室内試験を実施し、土岐花崗岩のマトリクスにおける収着特性の把握や、天然ウラン系列核種 ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ) の分布プロファイルを用いたマトリクス拡散深さの推定が行われている（太田ほか，2004；三枝ほか，2007）。しかし、室内試験に用いる岩芯は、ボーリング孔掘削や試料成形時の物理的、化学的擾乱を受けているため、室内試験によって取得されるこれらのパラメータを、実際の地質環境条件を仮定した物質移動解析に適用することは、不確実性を大きくする要因となる（Bradbury and Green, 1986；Miller et al., 1994）。そのため、実際の地質環境条件を仮定した物質移動解析を実施するために、原位置試験により物質移動特性に係わるパラメータを取得し、さらに、室内試験データから実際の地質環境に適用可能なパラメータを設定する手法を整備する必要がある。

物質移動解析については、第 1 段階の調査研究により取得した地質環境特性の情報をを用い、地質環境の調査・研究から物質移動解析に至る一連の調査・解析技術に関する方法論が構築・確認されるとともに、地質環境の調査・解析から物質移動解析における技術的ノウハウや知見が示されている。具体的には、物質移動モデル及び物質移動解析において重要なパラメータを設定する際の考え方や、情報の選別とその判断プロセスの記録が重要であることが挙げられている（牧野ほか，2005）。例えば、地上からの調査段階では、ボーリング調査により取得される情報量に限界があり、物質移動解析において重要となる実流速の設定に用いる割れ目の開口幅、有効間隙率及びマトリクス拡散などに関する情報を整備することが困難である。そのため、物質移動解析結果の不確実性を大きくする要因のひとつとなっていることから、限られた情報に関する品質（情報源、データの取得方法や精度など）を吟味し、不確実性の幅を整理した上で、既存情報などを広く活用する方法論が例示された。

第 2 段階では、物質移動の場となる地質環境特性を理解するために、壁面地質調査及び研究坑道内のボーリング調査によって、坑道周辺領域における物質移動に係る現象や特性を理解するために、地質・地質構造や水理地質構造、地球化学、物質移動の遅延効果などの地質環境特性（物質移動経路となりうる不連続構造の地質学的特性、その不連続構造の透水性、地下水の水質など）に関する情報を取得し、主にブロックスケールの地質環境モデルを構築した。この結果、研究坑道に分布する不連続構造（割れ目、断層）は、割れ目ネットワークが発達しているとともに、割れ目が多様な鉱物で充填されているとの特徴が認められた。また、この割れ目の充填鉱物の種類や不連続構造に伴う母岩の変質の程度などに基づき類型化できることが示されている。しかし、これらの類型化された不連続構造に関する物質移動特性の相違に関しては理解できていないのが現状である。

第 3 段階では、主に、研究坑道からのボーリング調査を実施するとともに、その結果に基づくブロックスケールの地質環境モデルの妥当性確認及び更新を実施する。また、このモデルに基づき、物質移動特性を把握するための原位置試験実施場所の選定や試験条件の設定を行う。ここで物質移動に係る現象や特性を理解するために必要な地質環境特性のうち、主に第 3 段階で評価する物質移動特性については、以下に着目した調査研究を実施する。

- ・ 類型化した割れ目のタイプ毎に、その周辺のマトリクス部での収着・拡散特性や、移流・分散に関する特性を把握し、割れ目の類型毎の相違を確認する。
- ・ 割れ目の充填鉱物が有する物質移動特性を把握する。
- ・ 物質移動解析において重要となる実流速の設定に用いる割れ目の開口幅、有効間隙率及びマトリクス拡散に関する情報を原位置試験により取得する。
- ・ 室内試験の取得データから実際の地質環境（原位置）に適用可能なパラメータを設定する手法

を整備する。

- 地下水の水質（特に、Na-Cl 濃度）の変化が物質移動における収着・拡散特性に与える影響を把握する。

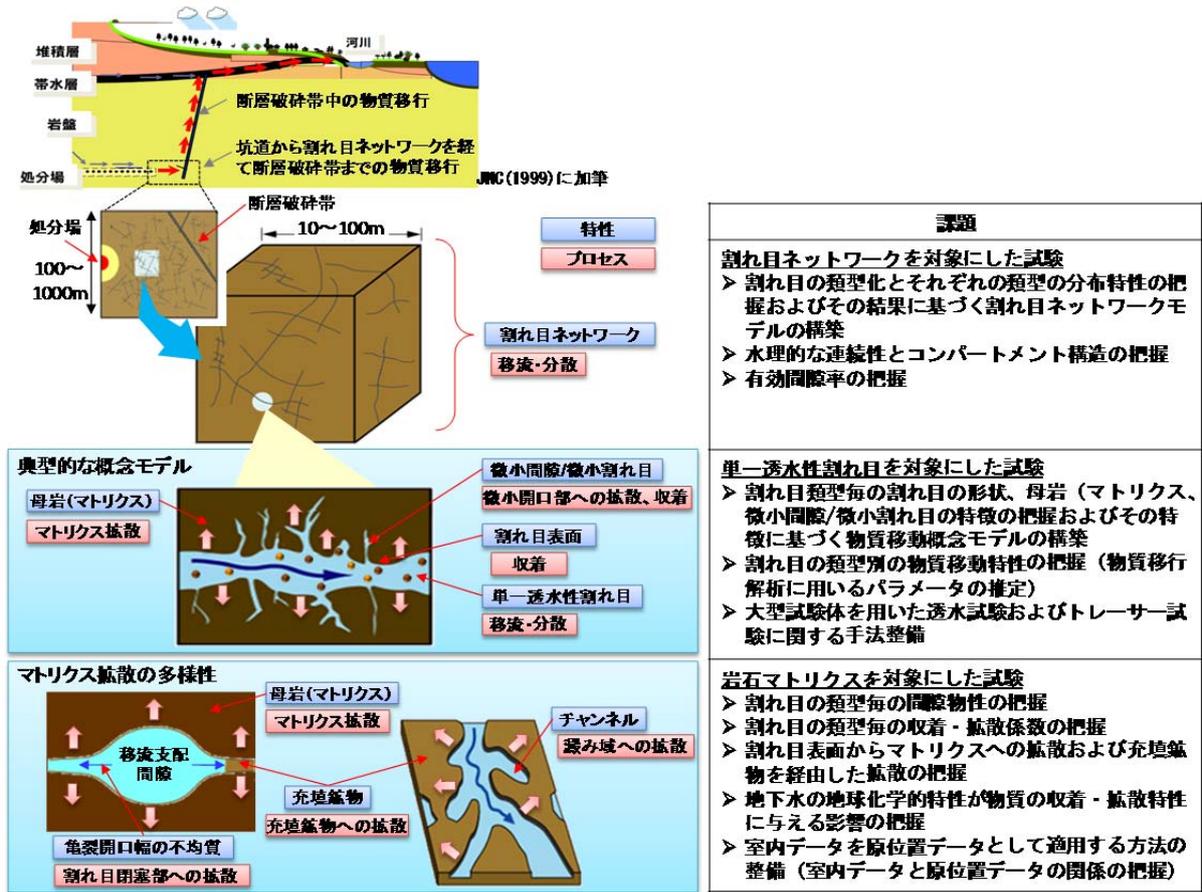


図 3.2(1)-1 物質移動現象・特性評価において対象とするスケールとプロセス及び課題

② 2010 年度以降の調査研究計画

1) 深度 300m ステージでの調査研究

(a) 目的

深度 300m ステージでは、主立坑断層が分布しており、これまでの調査により断層面に直交する方向については、低透水性の特徴を有する断層であることが分かっている。また、深度 300m ステージは、上部割れ目帯に位置しており、断層から離れた場所においても比較的透水性が高い岩盤が分布していることが確認されている。このことから、深度 300m ステージ周辺における物質移動については、高透水性の不連続構造で主に生じると考えられる。一方、低透水性を有する断層の近傍は、物質移動の遅延の場として機能していると考えられる。

以上のことから、深度 300m ステージにおける物質移動に係る現象・特性に関する調査研究では、数十 m スケールの評価領域を設定し、その領域における物質移動に係る現象・特性を評価する。具体的には、研究坑道からのボーリング調査を行い、数十 m スケールの割れ目ネットワークと、割れ目ネットワークを構成する数 m スケールの単一透水性割れ目の地質学的・水理学的特性を把握（推定）し、ブロックスケールの地質環境モデルを更新する。その際、第 2 段階で構築したブロックスケールの地質環境モデルの妥当性確認を実施する。また、割れ目ネットワークや単一透水性割れ目を調査対象とした移流・分散特性を把握するとともに、透水性割れ目近傍の数 cm スケールのマトリクス中で生じる収着・拡散に関する物質移動特性を把握する。これらの一連の調査を通じて、評価領域の選定、原位置試験や室内試験による物質移動特性の取得、及びこれらのパラメータを用いた物質移動解析に至る一連の調査手法を整備することを目的とする。第 3 段階

において実施する物質移動に係る現象・特性評価に関わる課題と調査試験の関係を表 3.2(1)-1 に示す。以下に、これらの調査の概要を記す。

表 3.2(1)-1 物質移動特性評価に関わる課題と調査試験の関係

試験対象	割れ目ネットワーク (~数10m)		単一透水性割れ目 (~約 5m)			岩石マトリクス (~数 10cm)		
	水理地質 構造調査	トレーサー 試験	トレーサー 試験	大型試験体 試験	割れ目の 内部構造 調査	長期拡散 試験	収着・拡散 試験	間隙構造 調査
原位置 / 室内	原位置	原位置	原位置	室内	室内	原位置	室内	室内
<b>割れ目の地質学的特性</b>								
・母岩/充填鉱物の岩石学・鉱物学的特徴	○					○		
・割れ目密度/開口幅	○				○	○		
<b>水理特性に関するパラメータ</b>								
・湧水量/湧水圧/間隙水圧	○					○		
・透水量係数/透水係数	○			○		○		
・WCFの位置/密度	○					○		
・割れ目の連続性	○	○						
<b>物質移動経路に関するパラメータ</b>								
・水理学的/物質移行開口幅		△	△	△				
・分散長		△	△	△				
・水理的有効間隙率		△	△	△				
・マトリクス拡散寄与面積		△	△	△				
透水性割れ目の三次元形状					○			
<b>岩石マトリクスにおける収着・拡散に関するパラメータ</b>								
・拡散係数			△	△		○	○	
・分配係数			△	△		○	○	
・有効間隙率						○	△	○
・マトリクス拡散深さ			△	△		○	○	
岩石マトリクスにおける間隙構造								○
<b>地下水の地球化学的特性</b>								
水質(pH, Eh, 溶存イオン濃度)		○	○			○		
コロイド		○	○			○		
微生物		○	○			○		

○: 試験の実測値など直接的に取得するデータ      △: モデル解析などにより間接的に取得するデータ

(b) 実施概要

(i) 室内試験

a) 岩石マトリクスにおける物質移動に係る現象・特性調査

深度 300m ステージの坑道壁面や研究坑道で実施するボーリング調査により採取する岩芯を用いて、岩石のマトリクスに関する収着・拡散特性を把握するための室内試験を実施する。具体的には、バッチ式収着試験による収着係数の取得及び透過型拡散試験による拡散係数の取得を実施する。室内試験により取得される収着係数及び拡散係数は、原位置条件に適用可能なパラメータとして整備する必要があるため、岩石試料の鉱物組成や間隙率などの基本特性を把握する。

b) 大型試験体を用いた透水試験及びトレーサー試験

透水試験やトレーサー試験を実施した透水性割れ目を対象にして、ブロック状の岩石試料を採取し、ブロック状の岩石試料を用いた室内透水試験及びトレーサー試験を実施する。原位置試験と室内試験データの比較を行い異なる試験のスケールにおいて取得された物質移動特性に係わるデータのアップスケールについて検討するとともに、透水性割れ目近傍に認められる微小領域の水の流れと物質移動現象をより詳細に把握することを目的として実施する。また、透水性割れ目の開口部の不均質性を評価するために、ブロック状の岩石試料における透水性割れ目の三次元形状を測定する。

**(ii) 原位置試験****a) 原位置試験実施場所の選定に関する調査**

トレーサー試験の対象とする透水性割れ目を選定するために、数本のボーリング調査を実施し、評価領域における水理場及び物質移動場を支配する透水性割れ目を抽出する。具体的には、岩芯観察やボアホールテレビ (BTV) による割れ目の地質学的調査を行い、割れ目の分布、充填鉱物や母岩の変質などの特性を把握する。さらに、透水試験や間隙水圧観測により割れ目の透水性、水理学的連続性及び間隙水圧分布を把握する。これらの情報に基づいてトレーサー試験の対象とする透水性割れ目を選定し、圧力干渉試験やトレーサー予備試験により、トレーサー試験の実施可能性を評価した後、トレーサー試験を実施する。

**b) 単一透水性割れ目における物質移動試験**

原位置試験実施場所の選定に関する調査結果から選定された透水性割れ目を対象にしてトレーサー試験を実施する。トレーサー試験では、2本のボーリング孔を用いて、一方からトレーサー溶液を注水し、他方からトレーサー溶液を回収する。使用するトレーサーについては、非収着性及び収着性の異なるトレーサーを利用し、土岐花崗岩中における物質移動の遅延効果を把握する。トレーサー試験によって取得したデータを用いた解析により、物質移動に寄与する割れ目の開口幅や分散長等を評価する。

**c) 割れ目ネットワークを対象にした物質移動試験**

数十 m スケールの評価領域における割れ目ネットワークの物質移動経路としての連続性を評価するために、トレーサー試験を実施する。トレーサー試験の実施にあたっては、単一透水性割れ目を対象にした水理試験及びトレーサー試験により取得した水理・物質移動パラメータについて、数十 m スケールの評価領域における代表性を評価するために、ボーリング調査のデータに基づき構築した割れ目ネットワークモデルと単一透水性割れ目を対象にしたトレーサー試験及び収着・拡散試験により取得したパラメータを用いた予測解析を実施し、予測解析の結果と割れ目ネットワークを対象にしたトレーサー試験により得られる実測との比較を行う。

**d) 岩石マトリクスにおける物質移動試験**

単一透水性割れ目近傍のマトリクス拡散現象に関するパラメータを取得するために原位置拡散試験を実施する。原位置において取得したパラメータについては、室内試験により取得するパラメータと比較し、室内試験データから原位置試験データにアップスケールする手法を整備する。

また、透水性割れ目近傍のマトリクスにおける天然ウラン系列核種 ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ) のプロファイルなどのナチュラルアナログ研究を通じたマトリクス拡散深さの評価を実施する。

**(iii) 物質移動場に関する概念化**

深度 300m ステージの物質移動試験の前に、数十 m スケールの評価領域を設定し、第 2 段階までの調査研究で取得した情報に基づき評価領域における物質移動場に関する概念モデルを構築する。これを用いた物質移動モデルを構築するとともに物質移動解析を実施し、深度 300m ステージにおける物質移動試験の前段階における物質移動現象や特性を予測するとともに、解析結果の不確実性の要因、試験に反映すべき知見を整理する。

調査終了後には、深度 300m ステージにおける一連の物質移動調査結果に基づいて、物質移動場に関する概念モデルや解析に用いるパラメータを更新し、解析を実施する。この解析結果と事前の予測解析の結果の比較により、解析結果の不確実性の低減について評価する。

**2) 深度 500m ステージでの調査研究****(a) 目的**

深度 500m ステージでは、下部割れ目低密度帯に位置するため、深度 300m ステージと比較して割れ目頻度が低く、地下水水質や間隙水圧も異なることが予想される。特に、深度 300m ステージと比較して割れ目が少ないことから低透水性の岩盤が分布していることが予想され、マトリクス部を対象として物質移動の遅延に関する調査研究に適した場であると考えられる。したがって、

深度 500m ステージでは、主に、マトリクス部における拡散場を対象とした原位置試験を実施し、深度 300m ステージにおいて取得したデータと組み合わせることにより、数 cm～数十 m スケールにおよぶ物質移動の遅延効果に関する体系的な評価手法を構築する。

また、深度 500m ステージにおける割れ目分布は、十分に把握されていないことから、大規模な割れ目帯が確認されるような場合には、深度 300m ステージで認められる断層や割れ目帯の連続性、及び割れ目の特徴を把握するための調査を実施し、地質環境特性情報を取得するとともに、ブロックスケールの地質環境モデルを適宜更新する。

## (b) 実施概要

### (i) 室内試験

深度 500m ステージの研究坑道壁面及び研究坑道内でのボーリング調査により取得した岩石試料を用いた収着・拡散試験を実施し、マトリクス部における収着・拡散係数を取得する。取得したパラメータについて、深度 300m ステージで取得したパラメータと比較し、深度方向における物質移動特性の変化を確認する。また、深度 500m ステージにおいては、割れ目が少ないと予測されていることから、マトリクスにおける原位置拡散試験を実施し、室内試験により取得されるデータを、原位置の条件とするための手法を検討し、物質移動解析に必要なパラメータの設定方法を整備する。

また、割れ目が多く分布する場が認められた場合には、割れ目の類型化を実施し、深度 300m ステージで構築した手法の適用性を確認するとともに、深度方向における物質移動特性の変化を把握するための調査を実施する。

### (ii) 原位置試験

#### a) 原位置試験実施場所の選定に関する調査

深度 500m ステージにおける原位置試験実施場所の選定にあたっては、2 箇所の試験候補地点を選定する。深度 500m ステージにおいて断層や割れ目が卓越する場所が確認された場合には、深度 300m で構築した割れ目の類型化との比較を行い、割れ目の特徴を把握する。その結果に基づき、深度 300m ステージで取得した物質移動特性に関するデータとの比較を行い、断層や割れ目の物質移動特性の深度方向における変化について確認を実施する場を選定する。

一方、深度 500m ステージは、割れ目が少ないことが予測されていることから、原位置における収着・拡散に関する特性を把握するために、長期的な原位置試験を実施する。これらの試験は、試験中に大きな圧力変化が生じないことが重要であることから、研究坑道掘削工程を考慮する必要はある。

#### b) 単一透水性割れ目及び断層近傍における物質移動試験

深度 500m ステージ周辺に分布する単一透水性割れ目を対象にしたトレーサー試験を実施する。トレーサー試験については、深度 300m ステージにおいて実施したトレーサー試験の結果に基づき、試験手法の改良を行う。特に、自然の地下水流動場に近い条件でのトレーサー試験を実施するために、研究坑道掘削に伴い人為的に形成された動水勾配の影響を極力回避できるトレーサー試験について検討する。

また、断層に伴う破碎帯や変質帯などの影響範囲の物質移動の遅延特性を把握するためのトレーサー試験を実施する。

#### c) 割れ目ネットワークを対象にした物質移動試験

ブロックスケールの評価領域における割れ目ネットワークの物質移動経路としての連続性を評価するために、トレーサー試験を実施する。トレーサー試験の実施にあたっては、深度 500m ステージからのボーリング調査により更新する割れ目ネットワークモデルを用いた予測解析を行い、トレーサー試験により取得される実測データとの比較を行い、単一透水性割れ目を対象にした水理試験及びトレーサー試験により取得した物質移動現象や特性の評価領域における代表性を評価する。

#### d) 岩石マトリクスにおける物質移動試験

深度 300m ステージでの調査試験結果との比較を行うために、透水性割れ目近傍のマトリクスを対象にして、原位置拡散試験を実施し収着・拡散係数を取得する。原位置拡散試験の実施にあたっては、深度 300m ステージにおける原位置拡散試験の結果に基づき、試験手法の改良を行う。

また、深度 500m ステージでは、断層や割れ目の影響を受けないマトリクス部を対象とした長期拡散試験を実施し、岩盤のマトリクスが有する収着・拡散特性を把握するための試験を実施する。

#### (iii) 物質移動場に関する概念化

深度 500m ステージにおける物質移動調査の結果に基づき、深度 300m ステージの物質移動調査終了時における物質移動場に関する概念モデルや物質移動解析に用いるパラメータを更新し、解析を実施する。この解析結果と深度 300m の調査結果に基づき実施した解析の結果との比較により、解析結果の不確実性の低減について評価する。また、深度方向の物質移動現象や特性の相違点を評価する。

### ③ 調査・解析技術開発

物質移動の遅延効果に関する調査では、室内試験、原位置試験、及び物質移動解析までの一連の手法を体系的に構築する必要がある。特に、室内試験で取得されるデータと原位置試験により取得されるデータでは、試験条件が異なるため、取得されるデータに不確実性が生じる。したがって、室内試験データを物質移動解析において、原位置データとして適用できる手法を構築することが求められる。

また、原位置試験で実施するトレーサー試験や収着・拡散試験については、国内や海外でのこれまでの事例においても残された課題があることから、これらの課題を整理し原位置試験機器の開発や手法を整備する。

## (2) 坑道周辺岩盤の地質環境特性の評価に関する研究

### ① これまでの調査研究成果と課題

掘削影響領域 (EDZ) では、坑道掘削に伴う地質環境の変化すなわちマイクロクラックの発生などの掘削損傷、応力再配分及び水理的な不飽和が発生する (核燃料サイクル開発機構, 1999a) とともに、グラウトやコンクリート敷設に伴う環境変化が起こる。EDZ は、処分において想定されている人工バリアの設置などにより、人工バリア近傍の岩盤において生じるものと考えられる。また、処分ピットでは廃棄体とベントナイトがオーバーパックとともに埋設される。坑道周辺岩盤は、処分後において様々なバリア要素が互いに干渉しあう複合環境である。坑道周辺の地質環境は、グラウトやコンクリート支保など人工材料とのインターフェイスであり、操業に伴う微生物活動をも伴う酸化還元反応といった物理的・化学的变化を伴う環境 (場) である (図 3.2(2)-1, 図 3.2(2)-2)。

瑞浪超深地層研究所の研究坑道掘削工事においては、湧水抑制の観点からグラウチングを行いながら工事を進めている所である。また、結晶質岩のような亀裂性岩盤を対象とした地下空洞の掘削にはグラウチングや支保工 (ロックボルト, 吹付コンクリート, 覆工等) といった人工材料の使用が不可欠である。

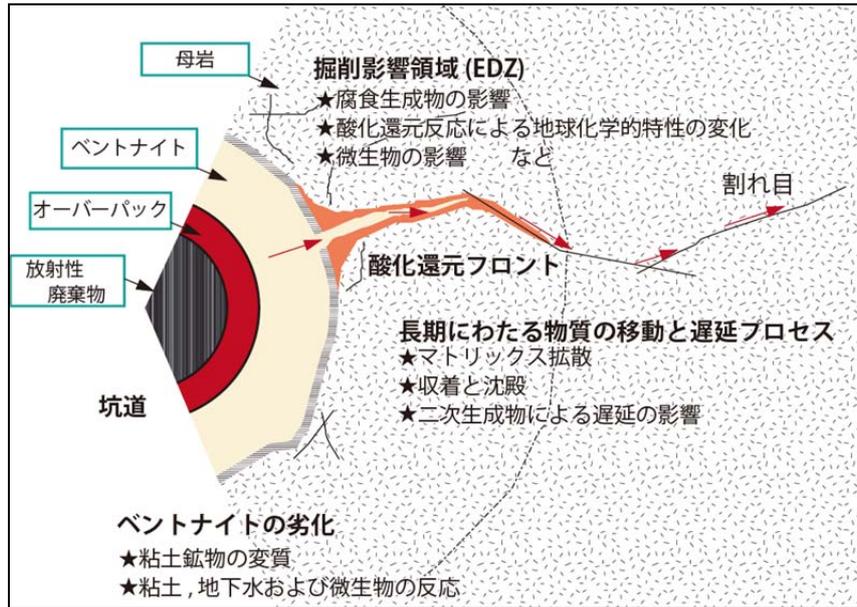


図 3.2(2)-1 坑道周辺岩盤の概念モデル

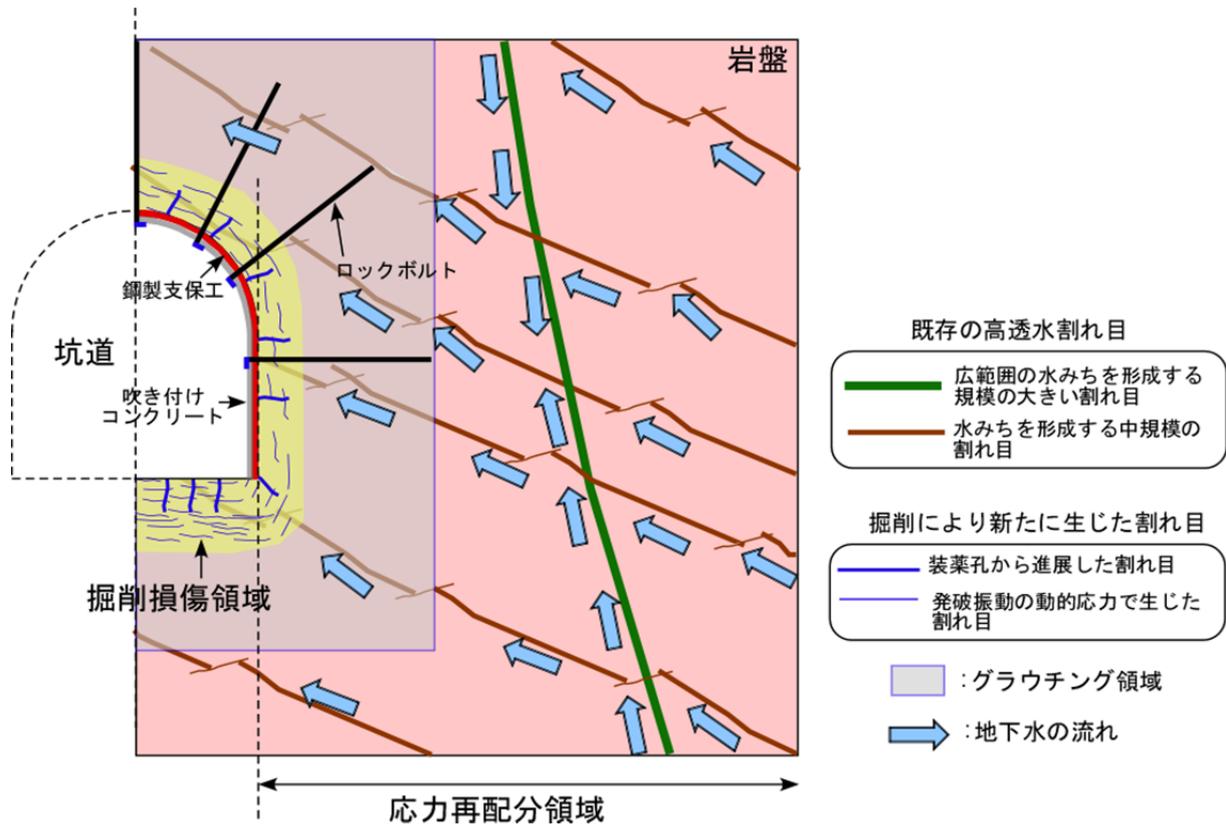


図 3.2(2)-2 MIUにおける坑道周辺岩盤の概念モデル

これまででは、これらの複合状態の概念が明確になっていないため、性能評価において考慮されていなかった。したがって、この概念を構築するとともに、坑道周辺岩盤における多重バリア性能の健全性を明確にする必要がある。また、これら坑道周辺岩盤の地質環境の変化は、これらを取り巻くサイトスケールやサイトスケールを包含する広域的な水理や地球化学的、地質学的な地質環境に強く影響されると考えられ、地層処分においては、坑道周辺岩盤とそれを包含する広域的な地質環境との相関を考慮した体系化を行う必要がある。

これまでの調査研究としては、東濃鉱山と釜石鉱山において、EDZに関する調査研究を実施してきた。東濃鉱山では堆積岩を対象とし、釜石鉱山では結晶質岩を対象として、EDZの空間的広がりや岩盤物性の変化、それらの推定手法の適用性を確認することを目的に、坑道の掘削に伴う原位置試験を実施してきた。具体的には、坑道掘削前の岩盤応力測定、掘削中の壁面調査、岩盤変位測定、岩盤ひずみ測定、水理試験及び反射法弾性波探査、また、掘削中及び掘削後に反射法弾性波探査、割れ目観察及びFEMによる数値解析等が実施された。あわせて坑道の掘削方法がEDZの発生に与える影響についての研究も実施されてきている。これらの結果から、発破工法による坑道の掘削においては、EDZはおよそ1mの幅を有すること、岩盤の力学特性は健岩部と比較してEDZ部で約50%低下し、応力再配分領域は坑道壁面から坑道径の2倍程度までであること、坑道底面における透水係数が2オーダー程度高くなるのに対し、坑道壁面では透水係数の変化は観測されていなかったこと、FEMを用いた岩盤変位とひずみの解析結果は観測結果を再現できたことなどの成果が得られた。成果の一例として、東濃鉱山における岩盤変位に関する解析値と実測値の比較を図3.2(2)-3に示す(核燃料サイクル開発機構,1999a)。しかしながら、EDZをより詳細に調査し理解するためには、計測手法の改良・改善が必要である等の課題も残っている(Sugihara, 2009)。

また、EDZ周辺の環境は、酸素が浸入することによる化学的な変化や微生物の影響なども考慮すべき複雑な現象を理解する必要があること、長期的なEDZの特性についての議論が十分なされていないこと、地下水が多量にある環境における坑道掘削に用いられるグラウトが、化学的な状態や地下水流動を変化させるといった課題もある(Sugihara and Matsui, 2008)。

これらの課題を解決するため、これまでに、人工材料が坑道周辺岩盤に与える影響因子の抽出やその影響に関する予察的な検討を行うとともに、それらの影響度合いを評価する手法の開発を目的とした原位置試験計画(施工対策影響評価試験)の概念検討を進めてきた。

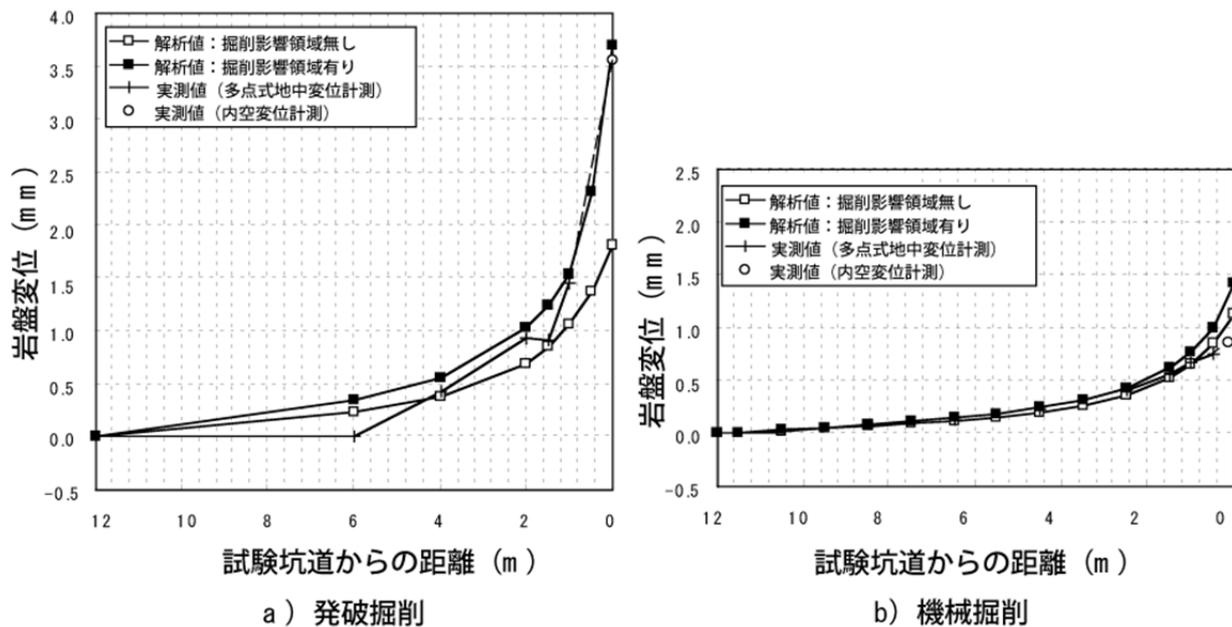


図 3.2(2)-3 有限要素法による弾塑性解析結果と実測値の比較(東濃鉱山)  
(核燃料サイクル開発機構,1999a を引用)

② 2010 年度以降の調査研究計画

坑道掘削及び施工対策の影響評価に関しては、主に以下の2点を目的とした調査研究を実施する。

- ・ 研究坑道の掘削に伴う坑道周辺の岩盤中に形成される力学特性、水理特性、地下水地球化学特性の変化領域及び人工材料の影響範囲を含めた坑道周辺岩盤に関する統合的な地質環境モデルの構築

- ・ 統合的な地質環境モデルの構築を通して、坑道周辺岩盤を調査・解析・評価するための一連の手法の構築

以上の目的を達成するためには、坑道周辺岩盤における現象を説明するための概念モデルを構築する必要があり、概念モデルの構築に必要なデータを取得することが必要となる。したがって、坑道周辺岩盤における力学特性、水理特性、熱-応力下の水理特性、岩盤力学-水理-地球化学複合現象に関するデータ及びグラウト・掘削影響に関するデータ等を取得するため、各種試験や観測を今後実施していく。また、これらの試験や観測結果に基づくブロックスケールの地質環境モデルの妥当性確認及び更新を実施する。

## 1) 深度 300m ステージでの調査研究

### (a) 目的

深度 300m レベルは、第 1 段階の予測において上部割れ目帯に属しており、既往の深度 300m 研究アクセス坑道掘削等により主立坑北部領域では多量の湧水が発生することが明らかとなっている。一方、地下空洞の建設に使用される人工材料（コンクリート、鋼材等）はその使用が不可欠であるが、それらが及ぼす周辺の地質環境への長期的影響は十分把握されていない。さらに、瑞浪超深地層研究所では、湧水抑制対策としてグラウチングを多用しており、岩盤中に浸透・固化したセメント材料も地質環境に影響を与える可能性がある。

これらを踏まえ、深度 300m レベルでは、湧水抑制対策工までを含む人工材料が周辺地質環境に与える影響を把握・評価するための技術の開発を主目的とした調査試験研究（施工対策影響評価試験）を実施する。

### (b) 実施概要

#### (i) 調査

図 3.2(2)-2 に示すような湧水対策工、支保工及び研究坑道掘削が地質環境に及ぼす影響を把握・評価する手法を構築することを目的とする。

本試験では、研究坑道掘削の事前調査としてボーリング孔掘削、地質観察、物理探査、初期応力測定等を実施し、地質環境の初期状態を把握する。その後、湧水対策工を施し新規の坑道を掘削して支保工を設置するとともに、研究坑道掘削中の変化について事前調査孔を用いた岩盤の変形や水圧・水質の変化のモニタリングを実施する。さらに、研究坑道掘削後に、事前調査と同じ調査試験を実施し、掘削前後での短期的な地質環境の変化を把握する。

湧水対策工によって岩盤に注入したセメント材料や設置した支保工による地質環境への影響は長期にわたって生じる可能性があるため、坑道掘削後も長期モニタリングを実施するとともに、支保工等からのサンプリング・分析により材料そのものの長期的な劣化状況を把握する。検討した試験レイアウト案の一例を図 3.2(2)-4 に示す。

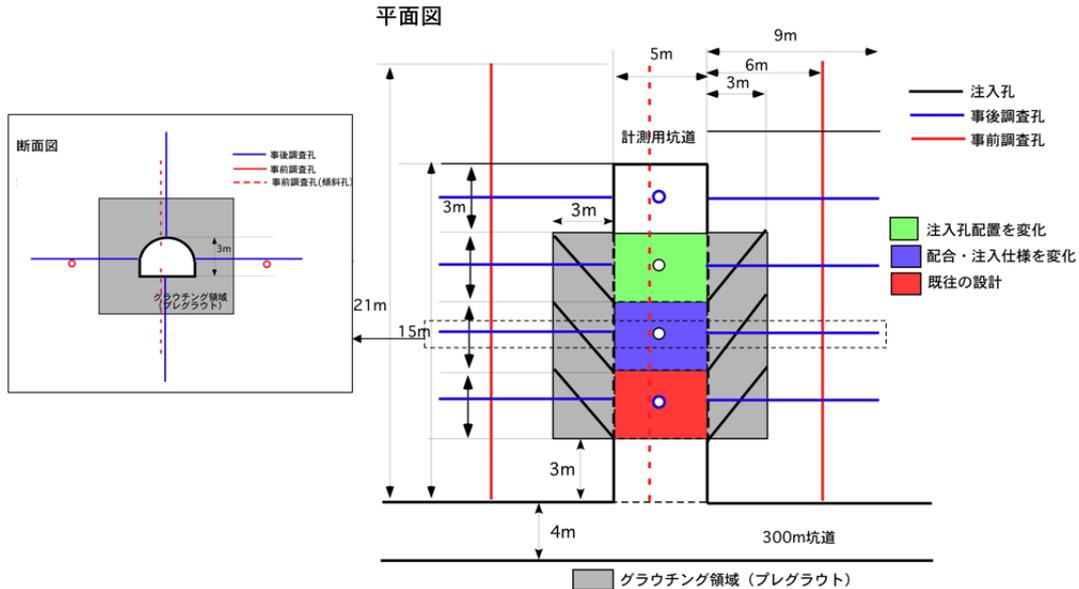


図 3.2(2)-4 施工対策影響評価試験レイアウト案

(ii) モデル化・解析

事前調査により取得された地質環境条件を初期条件とし、グラウチングされた領域の研究坑道掘削に伴う岩盤の力学的・水理的な変化や人工材料等による地下水や岩盤への化学的影響を予測するとともに、掘削中・掘削後の調査結果に基づきその妥当性を確認する。さらに、必要に応じ事後解析を実施し、人工材料が地質環境に与える短期・長期的な影響を把握・評価する技術を体系的に示す。本モデル化・解析の一部については、2012年度まで経済産業省資源エネルギー庁からの受託研究として実施した「地下坑道施工技術高度化開発」にて開発された最新の手法を導入する。

2) 深度 500m ステージでの調査研究

(a) 目的

深度 500m レベルは第 1 段階の予測では下部割れ目低密度帯の領域となり、換気立坑深度 190m 地点から実施したパイロットボーリング調査でも相対的に透水性が低い領域であることが確認されている。このため、300m レベルの調査試験よりも、地質環境の変化がより緩慢に生じる可能性が高いことから、坑道周辺の限られた領域に発生する可能性のある複合的な現象による地質環境の変化や低透水性岩盤を対象とした割れ目のネットワーク構造等を把握・評価するための技術の開発を目的とする。

(b) 実施概要

(i) 坑道規模水理試験

本試験では、研究坑道周辺における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の検討することを目的とする。

研究坑道内から複数本のボーリング孔を掘削し、各種水理試験、水圧モニタリング及び湧水量の計測等を実施し、坑道壁面周辺の EDZ における水理特性やブロックスケールの水理特性に影響を与える割れ目を評価する (図 3.2(2)-5)。

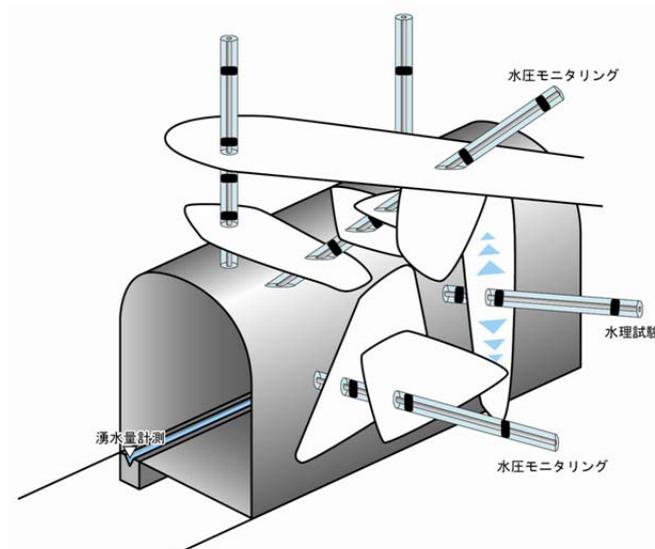


図 3.2(2)-5 坑道規模水理試験

(ii) 熱一応力下の水理試験

本試験では、常温時から高温下における岩盤の水理特性、岩盤力学特性及び地下水化学特性の変化を評価することを目的とする。

研究坑道内の数 m 四方程度の岩盤に熱源を設置し、その近傍に水理試験・水圧モニタリング、水質モニタリング、岩盤変位観測を実施するためのボーリング孔を掘削し、常温時と高温時における水理試験、モニタリング及び岩盤変位の計測を実施する（図 3.2(2)-6）。また、研究坑道から採取する岩石試料を用いた室内試験を実施する。

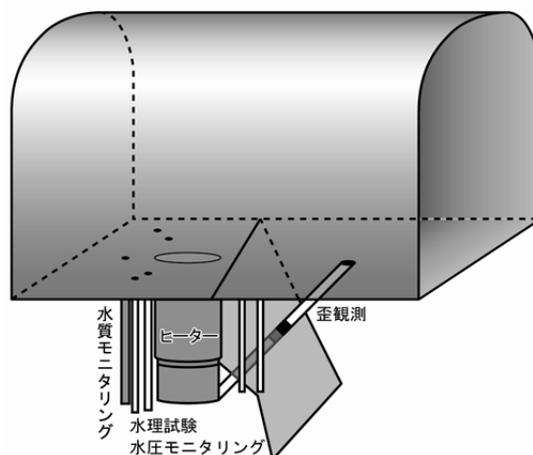


図 3.2(2)-6 熱一応力下における水理試験

(iii) 酸化還元緩衝能試験

本試験では、天然環境中の岩石、地下水などが持つ、酸化還元環境の変化に対する緩衝能を把握することを目的とする。

ボーリング孔での閉塞された区間を利用し、天然環境での酸化還元環境とその形成に寄与しているプロセスを把握する。その後、対象区間には酸素等の酸化剤を注入し、閉鎖系内で循環、もしくは滞留させ、酸化剤の消費速度を測定するとともに、酸化還元電位の測定を行い、天然環境が持つ酸化還元環境の変化に対する緩衝能を評価する。また、試験条件を模擬した熱力学的解析を行い、観測された酸化還元電位の変化と比較することで、緩衝に関する地球化学的プロセスを推定する。

(iv) 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 EDZ の範囲及び、それらの変化を複合的に把握するため、力学特性、水理特性及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（EDZ と考えられる低速度帯）及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 EDZ 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、坑道の一部を拡幅する。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（図 3.2(2)-7）。

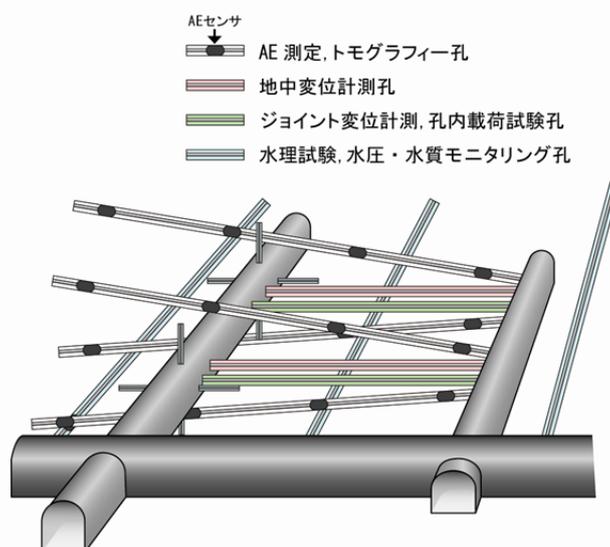


図 3.2(2)-7 岩盤力学－水理－地球化学複合現象調査

(v) 施工対策影響評価試験

深度 300m ステージの試験とほぼ同様のスペックの試験を、低透水性岩盤を対象に実施する。ただし、湧水抑制対策が必要ない場合は、この部分を調査対象から減じた形で調査試験を実施する。

なお、上記(i)～(v)の試験は、具体的な試験計画が策定された段階で、可能な限り統合化・合理化しつつ実施することとする。

(3) 深部領域地質調査

① これまでの調査研究成果と課題

これまでの調査により構築されたサイトスケールの地質環境モデルは、深度約 1,000m までの地質環境情報に基づき構築されたものである。具体的には、MIZ-1 号孔（掘削長 1,300m；深度は約 1,270m）や DH-15 号孔（掘削長 1,012m；深度 1,012m）などを利用した地質や地下水の水理、水質などに関する調査結果に基づいた地質環境モデルである（例えば、竹内ほか、2010）。

例えば地下水流動解析においては、深度約 1,000m までの調査で取得されたデータを深度 2,000m

まで外挿することにより水理地質構造モデルを構築し、それを用いた解析を実施している（例えば、尾上ほか，2007）。また，深度約 1,000m 以深の水質分布については，MIZ-1 号孔の調査により取得した水質情報を，深度 2,000m まで外挿して推定している（水野ほか，2009）。

よって，深度約 1,000m 以深の水理地質構造や地下水の水質分布等の情報を直接取得することにより，これらの外挿結果の妥当性を確認する。具体的には研究坑道から深度 1,000m を超えるボーリング孔を掘削し，地質や地下水の水理，水質の特性を把握するための調査を実施する。

## ② 2010 年度以降の調査研究計画

本調査は被圧下の状態におけるボーリング孔掘削や試験となることから，湧水抑制対策が重要となる。一方で，湧水を掘削水として利用することが可能であるため，掘削水の混入による地下水の汚染を低減することが可能であるとともに，透水性構造に遭遇した場合は多量の地下水の採水が可能であるため，地下水中に含まれる微生物の評価に有効な調査である。そのような特徴を踏まえ，以下の調査及び解析・モデル化を実施する。

### 1) 調査

深度 1,000m 以深の断層や割れ目の分布，岩盤の水理特性，水質分布，ならびに水質や水圧の変化に関する情報を，以下に示す調査によって取得する。

- ・ 深度 1,000m 以深におけるボーリング孔掘削
- ・ 岩芯を用いた地質調査
- ・ 不連続構造の分布や特性，岩盤物性の不均質性を把握するための物理検層
- ・ 地下水の水質分布（微生物の分布含む）を把握するための地下水採水調査
- ・ 透水性構造や岩盤の水理特性を把握するための流体検層や水理試験
- ・ 水質や水圧の変化を把握するための長期観測

これらの情報取得を通して坑道からのボーリング孔掘削及びボーリング孔を利用した調査に関わる技術的ノウハウや，品質管理の考え方を整理する。

本調査は，ボーリング孔の掘削に必要な空間（ボーリング孔口から櫓頂部までの高さは約十 m 必要）の確保が重要である。したがって，調査に必要な空間の確保に関わる研究坑道の掘削工法や掘削期間なども考慮して，調査実施地点や実施時期を決定する。

### 2) モデル化・解析

本調査により取得した情報に基づき地質環境モデルを更新し，深度約 1,000m までの情報に基づく地質環境モデルとの比較を行うことによって，調査量と不確実性の関係を整理するとともに，調査の有効性を確認する。

## (4) 研究坑道の拡張による深部地質環境の変化の把握

### ① 目的

研究坑道の拡張による深部地質環境の変化の把握では，第 3 段階における研究坑道の拡張や，研究坑道で実施する試験，調査による地質環境の変化を把握し，第 3 段階で実施する試験での適切な条件設定に反映させること，及び，サイトスケールもしくはブロックスケールの地質環境モデルの更新に反映させることを目的とする。

## ② 2010 年度以降の調査研究計画

2010 年度以降は，2.2(2)「地下水の流動特性の把握」，2.2(3)「地下水の地球化学特性の把握」，2.2(4)「地下空洞への地下水流入状態での把握」での地下水の水圧・水質モニタリングとあわせて，研究坑道内及び研究所用地内での地下水の流動特性，地球化学特性に関するデータの取得を継続する。このための具体的な実施内容は以下のとおり。

### 1) 調査

研究坑道掘削に伴う地下水の水圧，水質の変化を把握するための以下の調査を継続実施する。

- ・ 地上から掘削されたボーリング孔を利用した水圧，水質モニタリング
- ・ 研究坑道内から掘削されたボーリング孔を利用した水圧，水質モニタリング
- ・ 研究坑道への総湧水量計測
- ・ 集水リングを用いた区間湧水量計測
- ・ 集水リングからの湧水を用いた水質モニタリング
- ・ 壁面湧水や探り削孔からの湧水など研究坑道内における上記以外の地下水を対象とした採水調査

上記の観測を通じて得られた結果は，第3段階で実施する調査，試験の初期条件や境界条件，試験条件の設定に反映する。また，3.2(1)「物質移動現象・特性の評価に関する研究」や3.2(2)「坑道周辺岩盤の地質環境特性の評価に関する研究」の一部として実施する第3段階における水理地質構造モデル（サイトスケール，ブロックスケール）の更新や，地下水の地球化学概念モデルの作成に反映する。

## 2) 調査・解析技術開発

上述した観測を通じて得られる知見は，地下水モニタリング技術の有効性，長期モニタリング装置に関する耐久性やメンテナンス方法などの調査に関わる技術的ノウハウや，品質管理の考え方の整理に反映する。

### (5) 地質環境特性の長期変化に関する研究

#### ① 目的

現在の地質環境をより詳細に理解するとともに，地質環境の長期的な安定性を検討するため，地質・地質構造の形成過程やその後の自然事象等に伴う地質環境の変化に関する知見を整理することにより，地質環境の長期変化を評価するための調査からモデル化・解析，評価までの一連の基盤技術を構築することを目的とする。

#### ② 2010年以降の調査研究計画

地質環境特性の時空間上の変化を評価するために，主に以下の研究を実施する。

- ・ 地質・地質構造の長期変化に関する研究（断層や割れ目の発達や断層の変質プロセスに関する研究，風化に関する研究）
- ・ 地下水流動特性の長期変化に関する研究（古環境変化に伴う岩盤浸透量の推定に関する研究や地形変化・気候変動を考慮した地下水流動解析手法に関する研究）
- ・ 地下水の水質変化に関する研究（水質形成プロセスとその変化や酸化還元状態の変化に関する研究，生物化学的プロセスに関する研究）
- ・ 地質環境特性の長期変化の推定に係る方法論の検討

### (6) 深地層における工学技術に関する研究

#### ① 目的

研究坑道の維持・管理などをおして，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。

#### ② 2010年以降の調査研究計画

##### 1) 安全を確保する技術の整備

##### (a) 地下深部における研究坑道の長期にわたる維持・補修する技術の適用性確認

既存の維持補修技術のレビューを行い，研究坑道で適用可能なものを抽出し原位置での適用試験を行うことで，その有効性を評価する。

##### (b) 工程や品質などの管理体系の構築

施工実績と維持管理時に取得したデータの比較から，研究坑道内の研究環境を適切に維持・管理する手法の体系的な整備を実施する。

**2) 研究坑道掘削が地質環境に及ぼした影響を修復・軽減する技術の開発**

施工対策影響評価試験等の結果を分析し、実際の地質環境に影響を及ぼすと考えられる要因の抽出と必要に応じそれらの影響を修復／軽減する技術を開発する。

#### 4. 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ている。具体的には、結晶質岩中の地下水流動を把握するため深度約 500m～約 1,000m の深層ボーリング孔における地下水圧（水位）観測を実施している。また、地下水涵養量を推定するための調査技術開発として、表層水理観測として、深度数十 m の浅層ボーリング孔における水位観測や、河川流量観測，気象観測を実施している。

今後も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結晶質岩中の地下水流動を把握するための調査技術を開発するとともに、表層水理観測を継続することにより、地下水涵養量の推定技術を開発していく（図 4-1）。

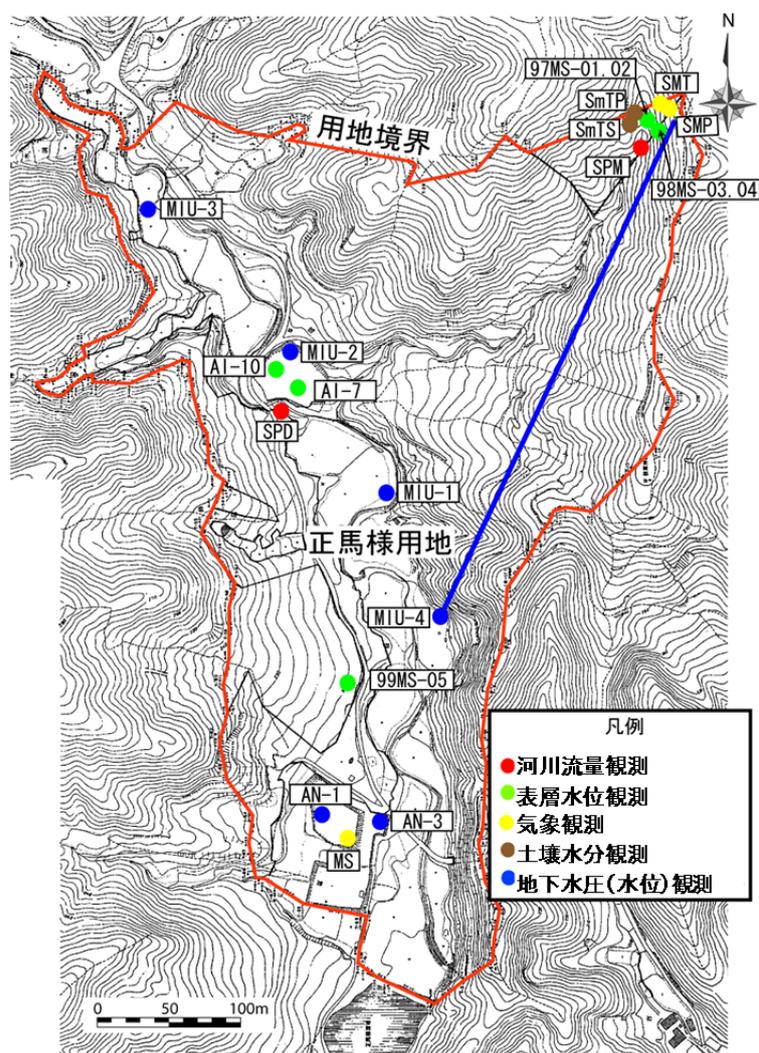


図4-1 正馬様用地における地下水モニタリング孔などの位置図

## おわりに

超深地層研究所計画は、原子力政策大綱などに示された深地層の研究施設計画の一つとして、結晶質岩（花崗岩）と淡水系地下水を主な対象に、1996年度から実施しているプロジェクトである。調査研究を段階的に進めつつ、地層処分に関連する様々な技術を実際の地質環境に適用することを通じて、地質環境に対する理解を深めながら、これを段階的かつ体系的に調査・解析・評価するための技術基盤を整備していくことが主たる目的である。

一方、北海道幌延町においては、堆積岩と塩水系地下水を主な対象とした幌延深地層研究計画が進められている。これら超深地層研究所計画と幌延深地層研究計画の両者の研究成果を組み合わせることにより、日本の様々な地質環境に適用できる汎用的な調査・解析・評価の技術基盤を整備していく予定である。

ここで整備した技術基盤は、主に以下の点で活用されることが期待される。

- ・ 概要調査～精密調査における計画立案や調査・解析・評価の実施を支援
- ・ 概要調査及び精密調査結果の妥当性評価のための判断指標の策定や安全審査に向けた基本的考え方の整備を支援

また、超深地層研究所計画は、以下のことを考慮した環境を整備していくことも重要であると考えられる。

- ・ 今後最先端技術が開発された場合にその適用性を評価する場
- ・ 地層処分事業に関わる人材育成の場
- ・ 組織間や世代間での技術継承に寄与する場
- ・ 地層処分ならびにそれに係る研究開発に対する国民との相互理解促進の場
- ・ 国際協力／国際貢献の場

## 参考文献

- Abdelgawad, M. A., Watanabe, K., Takeuchi, S. and Mizuno, T. (2009): The origin of fluoride-rich groundwater in Mizunami area, Japan — Mineralogy and geochemistry implications, *Engineering Geology*, vol.108, pp.76-85.
- AECL (1994): Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste, Atomic Energy of Canada Limited, AECL-10711, COG-93-1.
- 青才大介, 吉田治生, 水野 崇 (2009): 超深地層研究所における地下水の地球化学に関する調査研究 —地下水の地球化学環境を保持したろ過手法に関する技術開発—, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Testing 2009-003.
- Bradbury, M.H. and Green, A., (1986): Investigations into the factors influencing long range matrix diffusion rates and pore space accessibility at depth in granite, *J. Hydrol.*, 89, pp.123-139.
- 土木学会 (2009): 岩盤構造物の建設と維持管理におけるマネジメント—ジオリスクマネジメントへの取り組み—, 岩盤力学委員会岩盤構造物のアセットマネジメント研究小委員会
- DOE (2002): Final Environmental Impact Statement for a Geologic Repository for the Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste at Yucca Mountain, Nye County, Nevada, U.S. Department of Energy, DOE/EIS-0250.
- 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—発表論文集—, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN7410 92-052.
- 動力炉・核燃料開発事業団 (1994): 日本のウラン資源, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN7420 94-006.
- 動力炉・核燃料開発事業団 (1997): 広域地下水流動研究基本計画書, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN7020 98-001.
- 福田朱里, 萩原大樹, 石村豊徳, 幸塚真理子, 伊藤一誠, 角皆潤, 鈴木庸平, 水野崇 (2009): 瑞浪超深地層研究所 (MIU) における地球化学分野での JAEA/AIST 共同研究 —その 2 生物地球化学特性に関する研究—, 地球惑星科学関連合同学会 2009 年合同大会講演要旨集.
- 原子力安全委員会 (2002): 高レベル放射性廃棄物の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について, 平成 14 年 9 月 30 日.
- 原子力安全基盤機構 (2008): 地層処分の立地選定段階の調査に関わるガイドラインの検討—将来の安全評価に必要な調査のあり方と調査活動に関する品質保証について—, JNES-SS-0802.
- 原子力発電環境整備機構 (2001): “特定放射性廃棄物の概要調査地区等の選定手順の基本的考え方について”, 官報, 号外第 238 号, 平成 13 年 11 月 8 日.
- 原子力発電環境整備機構 (2004): 概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠, 「概要調査地区選定上の考慮事項」の説明資料, NUMO-TR-04-02.
- 原子力発電環境整備機構 (2010): 地層処分技術開発ニーズの整理 ～精密調査地区選定に向けて～, 原子力発電環境整備機構, NUMO-TR-10-02.
- 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).
- 小坂寛, 三枝博光, 大山卓也 (2009): GEOMASS システムを用いた現場対話型研究坑道掘削影響解析, 日本地下水学会 2009 年春季講演会講演要旨, pp.70-75.
- 萩原大樹, 水野崇 (2009): 瑞浪超深地層研究所における地球化学研究 —研究坑道掘削に伴う地下水水質の変化に関する検討—, 地球惑星科学関連合同学会 2009 年合同大会講演要旨集
- 平野享, 中間茂雄, 山田淳夫, 瀬野康弘, 佐藤稔紀 (2009): 超深地層研究所計画 (岩盤力学に関する調査研究) MIZ-1 号孔における岩盤力学調査, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2009-031.
- IAEA (1994): Siting of Geological Disposal Facilities, IAEA Safety Guides, Safety Series No. 111-G-4.1.
- 市川康明, Choi, J. H., 平野享, 松井裕哉 (2009): 結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価のための理論的研究, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2009-027.
- 石井洋司, 見掛信一郎, 神谷晃, 渡辺和彦, 延藤遵, 草野隆司 (2011): 瑞浪超深地層研究所深度 400m 以深の立坑掘削におけるプレグラウチングの施工, 第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.185-190.

- Iwatsuki, T., Furue, R., Mie, H., Ioka, S. and Mizuno, T. (2005): Hydrochemical baseline condition of groundwater at the Mizunami underground research laboratory (MIU), Applied Geochemistry, vol.20, pp.2283-2302.
- 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—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ, 核燃料サイクル開発機構, 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, 核燃料サイクル開発機構, 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—平成 4 年度~平成 11 年度—, 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 (2001a) : 超深地層研究所地層科学研究基本計画, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2001-009.
- 核燃料サイクル開発機構 (2001b) : 深地層研究所 (仮称) 計画 地表から行う調査研究 (第 1 段階) 計画, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1410 2001-001.
- 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, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2001-018.
- 核燃料サイクル開発機構 (2004) : 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 (平成 15~17 年度), 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2004-008.
- 核燃料サイクル開発機構 (2005a) : 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—, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2005-014~016,-020.
- 熊本創, 下茂道人, 三枝博光, 大山卓也 (2009) : 立坑の冠水・排水時の湧水量・水圧観測データを用いた水理地質構造モデルの構築, 第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 281-286.
- 黒崎幸夫, 山地宏志, 松井裕哉 (2008) : 超大深度立坑における高抜け崩落機構に関する調査・解析 (委託研究), 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2008-066.
- 楠瀬謹一郎, 小出仁 (2001) : 地質環境予測期間と不確実性の取り扱い, 資源と素材, 117, pp.808-815.
- 牧野仁史, 澤田淳, 前川恵輔, 柴田雅博, 笹本広, 吉川英樹, 若杉圭一郎, 小尾繁, 濱克宏, 操上広志, 國丸貴紀, 石井英一, 竹内竜史, 中野勝志, 三枝博光, 竹内真司, 岩月輝希, 太田久仁雄, 瀬尾俊弘 (2005) : 地質環境の調査から物質移行解析にいたる一連の調査・解析技術—2 つの深地層の研究施設計画の地上からの調査研究段階 (第 1 段階) における地質環境情報に基づく検討—, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 2005-021.
- 松井裕哉, 平野 享 (2010) : 超深地層研究所計画 第 2 段階の力学調査結果に基づく岩盤力学概念モデルの妥当性評価, 第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集.
- 松岡稔幸, 石垣孝一, 杉本芳博 (2007) : ”瑞浪超深地層研究所における立坑掘削を利用した水理地質構造モデルの検討 (その 3) —電気探査法を用いた水理地質構造の検討—”, 日本原子力学会 2007 年春の年会 要旨集, 109.
- 松岡稔幸, 程塚保行, 鶴田忠彦, 石垣孝一, 山田信人, 山口伸治 (2008) : “花崗岩を対象とした立坑掘削工事振動を利用した物理探査技術の開発 -逆 VSP 探査の適用-”, 物理探査学会第 119 回 (平成 20 年度秋季) 学術講演論文集, P-19.
- 彌榮英樹, 岩月輝希, 古江良治, 水野崇 (2004) : “超深地層研究所計画 (第 1 段階) における地下水の地球化学特性調査”, サイクル機構技報, No.23 (2004.6), pp.41-50.
- 見掛信一郎, 山本勝, 池田幸喜, 杉原弘造, 竹内真司, 早野明, 佐藤稔紀, 武田信一, 石井洋司, 石田英明, 浅井秀明, 原雅人, 久慈雅栄, 南出賢司, 黒田英高, 松井裕哉, 鶴田忠彦, 竹内竜史, 三枝博光, 松岡稔幸, 水野崇, 大山卓也 (2010) : 結晶質岩を対象とした坑道掘削における湧水抑制対策の計画策定と施工結果に関する考察, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Technology 2010-026.
- Miller, W., Alexander, W.R., Chapman, N.A., McKinley, I.G. and Smellie, J.A.T. (1994): Naturel analogue studies in the geological disposal of radioactive wastes. Studies in Environmental Science 57, Elsevier, Amsterdam.
- 水野崇, 齋 正貴, 萩原大樹, 青才大介, 山本祐平 (2009) : 瑞浪超深地層研究所における地球化学研究 —第 1 段階における地球化学概念モデルの妥当性の確認方法について—, 日本地球化学会第 56 回年会講演要旨集, p.145.

- Mizuno, T., Iwatsuki, T., Mie, H., Furue, R. and Ioka, S. (2004): “Hydrogeochemical baseline groundwater conditions in and around the Mizunami Underground Research Laboratory, the MIU Construction Site”, In: International Conference on JNC Underground Research Laboratory Projects in Mizunami and Horonobe, Japan (2004), Part 1: International Conference on Geoscientific Study in Mizunami’04 (ICGM’04) –Record, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN7400 2004-010, pp.111-121.
- Möri, A., Mazurek, M., Adler, M., Schild, M., Siegesmund, S., Vollbrecht, A., Ota, K., Ando, T., Alexander, W.R., Smith, P.A., Haag, P. and Bühler, Ch. (2003): “Grimsel Test Site – Investigation Phase IV (1994-1996): The Nagra-JNC In Situ Study of Safety Relevant Radionuclide Retardation in Fractured Crystalline Rock IV: The In Situ Study of Matrix Porosity in the Vicinity of a Water-Conducting Fracture”, Nagra Technical Report, NTB 00-08.
- 村上由記, 長沼毅, 岩月輝希 (1999): “深部地質環境における微生物群集－東濃地域を例として－”, 原子力バックエンド研究, Vol.5, pp.59-66.
- Nagra (2002): Project Opalinus Clay: Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), Nagra Technical Report NTB 02-05.
- NEA (2000): Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste – An International Database, OECD Nuclear Energy Agency.
- 日本原子力研究開発機構(2009): “超深地層研究所計画 年度報告書 (2007 年度)”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Review 2009-002.
- 日本原子力研究開発機構 (2010): 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 22 年 4 月 1 日～平成 27 年 3 月 31 日), 日本原子力研究開発機構.
- 日本原子力研究開発機構 (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, JAEA-Review 2010-016.
- 西田伸穂 (2009): 環境マネジメントシステムを用いたリスク・危機管理能力の強化, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Technology 2009-027.
- 納多勝, 須山泰宏, 延藤遵, 井尻裕二, 見掛信一郎, 松井裕哉 (2009): 瑞浪超深地層研究所計画における工学技術に関する検討 (平成 19 年), 日本原子力研究開発機構, JAEA-Technology 2009-009, pp.117-123.
- 大久保誠介, 平野享, 松井裕哉 (2009): 結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価のための現象論的研究, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2009-020.
- 大山卓也, 三枝博光, 水野 崇, 小坂 寛, 平川芳明 (2009): 研究坑道掘削に伴う地下水流動場及び地下水水質の変化を考慮した地下水流動のモデル化・解析, 日本地下水学会 2009 年春季講演会講演要旨, pp.258-263.
- 尾上博則, 三枝博光, 大山卓也, 遠藤令誕(2007): “繰り返しアプローチに基づくサイトスケールの水理地質構造のモデル化・地下水流動解析 (ステップ 4), 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-034.
- Ota, K., Amano, K. and Ando, T. (1999): Brief overview of in situ nuclide retardation in a fractured crystalline rock, Kamaishi In Situ Test Site, In: Proc. International Workshop for the Kamaishi In Situ Experiments, Kamaishi, Japan, 24-25 August 1998, JNC Technical Report, JNC TN7400 99-007, pp.67-76.
- 太田久仁雄, 佐藤稔紀, 竹内真司, 岩月輝希, 天野健治, 三枝博光, 松岡稔幸, 尾上博則: “東濃地域における地上からの地質環境の調査・評価技術”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-023 (2005).
- Ota, K., Möri, A., Alexander, W.R., Frieg, B. and Schild, M. (2003): Influence of the mode of matrix porosity determination on matrix calculations, Jour. Contam. Hydrol. Vol.61, pp.131-145.
- Ota, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Horimoto, S., Amano, K., Kumazaki, N., Matsuoka, T., Yabuuchi, S., Fujita, Y., Iwatsuki, T. and Furue, R. (2004): An Overview of the MIZ-1 Borehole Investigations during Phase I/II: MIZ-1 Progress Report 03-01, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN7400 2004-001.
- Ota, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Amano, K., Matsuoka, T., Iwatsuki, T., Yabuuchi, S. and Sato, T. (2005a): Overview of MIZ-1 Borehole Investigations, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC

- TN7400 2005-024.
- Ota, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Horimoto, S., Amano, K., Yabuuchi, S., Fujita, Y., Iwatsuki, T. and Furue, R. (2005b): An Overview of the MIZ-1 Borehole Investigations during Phase III: MIZ-1 Progress Report 03-02, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN7400 2005-001.
- Ota K. and Yoshida H. (1995): Influence of microscopic heterogeneity on diffusion for sedimentary rocks, In: Geoval'94, Validation Through Model Testing, Proc. NEA/SKI Symposium, Paris, 11-14 Oct. 1994, pp.237-243, OECD Paris.
- 太田久仁雄, 湯佐泰久 (2003): “放射性廃棄物地層処分の概念とナチュラルアナログ研究の役割”, 資源環境地質学: 地球史と環境汚染を読む (資源地質学会編), 資源地質学会, pp.379-386.
- Posiva (1999): The Final Disposal Facility for Spent Nuclear Fuel - Environmental Impact Assessment Report.
- 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, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-043.
- Seo T., and Yoshida, H. (1994): Natural analogue studies of the Tono uranium deposit in Japan, In: von Marvic H. and Smellie J. (editors) Fifth CEC natural analogue working group meeting and Alligator Rivers analogue project (ARAP) final workshop – Proceeding of an international workshop held in Toledo, Spain, 5-9 October 1992, CEC Nuclear Science and Technology Series, EUR 15176, pp.179-184, CEC Luxembourg.
- 社団法人土木学会 (2008): 余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方, エネルギー委員会低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会.
- 澁谷朝紀, 陶山忠宏, 柴田雅博 (1999): 核種のベントナイトおよび岩石に対する収着データベース, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8410 99-050.
- 資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構 (2010): 高レベル放射性廃棄物及び TRU の地層処分基盤研究開発に関する全体計画, 資源エネルギー庁・(独)日本原子力研究開発機構.
- 清水和彦, 瀬尾俊弘, 吉田英一 (2001): 高レベル放射性廃棄物の地層処分と我が国の地質環境, 資源と素材, Vol.117, pp.775-784.
- 下茂道人, 山本肇 (1996): 等価不均質連続体モデルによる亀裂性岩盤の浸透流解析手法, 大成建設技術研究所報, pp.257-262.
- Sugihara, K. (2009): Geological disposal of high-level radioactive waste and the role of rock engineering, International Journal of JCRM INVITED PAPER, Volume 5, Number 1, pp.19-24.
- Sugihara, K. and Matsui, H. (2008): Experience of EDZ studies in Japan and Views for Mizunami URL, EDZ Workshop.
- 陶山忠宏, 笹本広 (2004): JNC 収着データベース (JNC-SDB) の更新: 1998年~2003年までに公開された文献データの追加, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8410 2003-018.
- 高橋正樹, 吉田英一, 増田俊明 (2004): 地質環境の長期安定性 - 高レベル放射性廃棄物の地層処分と地球科学 -, 月刊地球, 26, No.6, pp.329-331.
- 武田匡樹, 竹内竜史, 小坂寛, 大山卓也, 毛屋博道 (2009): 研究坑道の掘削を考慮した地下水流動解析における立坑の境界条件設定に関する考察, 日本地下水学会 2009年秋季講演会講演要旨, pp.24-27.
- 武田精悦, 中司昇, 梅田浩司 (2004): 地質環境の長期安定性と地層処分 - 今後の研究開発に向けた視点 -, 月刊地球, 26, No.6, pp.332-338.
- 竹内真司, 國丸貴紀, 見掛信一郎, 西尾和久, 鶴田忠彦, 松岡稔幸, 早野明, 竹内竜史, 三枝博光, 大山卓也, 水野崇, 平野享, 尾方伸久, 濱克宏, 池田幸喜, 山本勝, 弥富洋介, 島田顕臣, 松井裕哉, 伊藤洋昭, 杉原弘造 (2010): “超深地層研究所計画年度報告書 (2008年度)”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Review 2010-014.
- 竹内真司, 見掛信一郎, 西尾和久, 鶴田忠彦, 天野健治, 松岡稔幸, 早野明, 竹内竜史, 三枝博光, 大山卓也, 水野崇, 平野享, 尾方伸久, 濱克宏, 池田幸喜, 山本勝, 弥富洋介, 島田顕臣, 松井裕哉, 伊藤洋昭, 内田雅大, 杉原弘造 (2009): 超深地層研究所計画 年度計画書 (2009年度), 日本原子力研究開発機構, JAEA-Review 2009-017.

- 田中達也, 松井裕哉, 橋本秀彌, 安藤賢一, 竹内真司, 三枝博光 (2009) : 結晶質岩中の地下坑道掘削を対象としたグラウト効果に関する研究(3)-プレグラウトによる湧水抑制効果の数値解析的検討, 第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.143-148.
- 鶴田忠彦, 竹内真司, 竹内竜史, 水野崇, 大山卓也 (2009) : 瑞浪超深地層研究所における立坑内からのパイロットボーリング調査報告書, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2008-098.
- 鶴田忠彦, 松岡稔幸, 程塚保行, 田上雅彦, 石田英明, 早野明, 栗原新, 湯口貴史(2010) : “超深地層研究所計画 地質・地質構造に関する調査研究 (2008 年度) 報告書”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2010-039.
- Yamakawa M. (1991): Geochemical behaviour of natural uranium series nuclides in the geological formation, In: Global environment and Nuclear Energy, Proc. The 3rd International Symposium on Advanced Nuclear Energy Research, Mito, Japan, 13-15 March 1991 pp.150-158.
- Yoshida, H. (1994): Relation between U-series nuclide migration and microstructural properties of sedimentary rocks, Applied Geochemistry, Vol. 9, pp.479-490.
- Yoshida, H., Yui, M. and Shibutani T. (1994a): Flow-path structure in relation to nuclide migration in sedimentary rocks: An approach with field investigations and experiments for uranium migration at Tono uranium deposit, central Japan, Jour. Nucl. Sci. Technol., Vol. 31, pp.803-812.
- Yoshida, H., Kodama, K. and Ota K. (1994b): Role of microscopic flow-paths on nuclide migration in sedimentary rocks – A case study from the Tono uranium deposit, central Japan, Radiochimica Acta, Vol. 66/67, pp.505-511.
- Yusa Y., Ishimaru K. Ota K. and Umeda K. (1993): Geological and geochemical indicators of paleohydrogeology in Tono uranium deposits, Japan, In: Paleohydrogeological Methods and their Applications, Proc. NEA Workshop, Paris, 9-10 Nov. 1992, pp. 117-146, OECD.

# 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
物質の量	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 <sup>2</sup>
体積	立法メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(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
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
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
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	Vs
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C	K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg
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 <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg
酸素活性化	カタール	kat	s <sup>-1</sup> 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間には1:1の関係がある。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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s
表面張力	ニュートンメートル	N m
角速度	ラジアン毎秒	rad/s
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K
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)
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>
電表面積	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>
誘電率	ファラド毎メートル	F/m
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol
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)
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr
放射線輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	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 <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> 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 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> 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 <sup>11</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
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 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(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 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°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 <sup>-6</sup> m

