

超深地層研究所計画における  
研究坑道の掘削を伴う研究段階  
(第2段階) 研究成果報告書

Project Report on the Construction Phase  
at the Mizunami Underground Research Laboratory Project

野原 壯 三枝 博光 岩月 輝希 濱 克宏  
松井 裕哉 見掛 信一郎 竹内 竜史 尾上 博則  
笹尾 英嗣

Tsuyoshi NOHARA, Hiromitsu SAEGUSA, Teruki IWATSUKI, Katsuhiko HAMA  
Hiroya MATSUI, Shinichiro MIKAKE, Ryuji TAKEUCHI, Hironori ONOE  
and Eiji SASAO

バックエンド研究開発部門  
東濃地科学センター  
地層科学研究部

Geoscientific Research Department  
Tono Geoscience Center  
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

March 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2016

超深地層研究所計画における研究坑道の掘削を伴う研究段階  
(第2段階) 研究成果報告書

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

野原 壯, 三枝 博光\*, 岩月 輝希, 濱 克宏, 松井 裕哉,  
見掛 信一郎, 竹内 竜史, 尾上 博則, 笹尾 英嗣

(2015年12月22日受理)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構東濃地科学センターでは、「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発」のうち深地層の科学的研究(地層科学研究)の一環として、結晶質岩(花崗岩)を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、「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」を全体目標として定め、「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段階に区分して調査研究を進めている。

本稿では、サイトスケールやブロックスケールの地質環境モデルを段階的に構築・更新するための体系的な考え方を示すとともに、深度500mの研究坑道掘削終了までの「第2段階; 研究坑道の掘削を伴う研究段階」における地質環境の調査・解析・評価結果を基に、第1段階から第2段階までに実施した一連の調査・解析・評価手法の妥当性を確認した。また、地下施設的设计・施工に関しては、研究坑道の施工・維持・管理に関わる工学技術の有効性を確認した。

ここで取りまとめる成果は、地層処分技術の知識基盤として整備されるばかりでなく、実施主体である原子力発電環境整備機構が実施する精密調査および国が進める安全規制の両面を支える技術基盤の強化を図っていくうえで、有効に活用されるものである。

Project Report on the Construction Phase at the Mizunami Underground Research Laboratory Project

Tsuyoshi NOHARA, Hiromitsu SAEGUSA\*, Teruki IWATSUKI, Katsuhiro HAMA,  
Hiroya MATSUI, Shinichiro MIKAKE, Ryuji TAKEUCHI, Hironori ONOE and Eiji SASAO

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

(Received December 22, 2015)

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 report summarizes the results of geoscientific study on Phase II to 500m depth. During Construction phase, we have evaluated adequacy of techniques for investigation, analysis and assessment of the deep geological environment established in Surface-based Investigation phase, and have shown systematic concept for stepwise establishment and update of the geological environment of the site scale and the block scale. Further, with respect to design and construction of underground facilities, it was confirmed the validity of the engineering involved in the construction, maintenance and management of underground facilities.

The results described in the report will be utilized as technical knowledge of disposal technology and effectively used to enhance technical foundation which will support disposal program and safety regulations.

Keywords: Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) Project, Crystalline Rock, Construction Phase (Phase II)

---

\* Nuclear Waste Management Organization of Japan

目 次

1	はじめに.....	1
2	超深地層研究所計画 .....	3
2.1	瑞浪超深地層研究所の位置づけと役割 .....	3
2.2	地層科学研究と超深地層研究所計画 .....	3
2.3	瑞浪超深地層研究所の設置場所 .....	4
2.4	超深地層研究所計画の目標と調査研究の進め方 .....	7
2.5	第2段階成果取りまとめの目標と構成 .....	10
2.5.1	第2段階成果取りまとめの目標 .....	10
2.5.2	報告書の構成.....	10
3	第2段階の調査研究計画 .....	11
3.1	第2段階の段階目標 .....	11
3.2	第1段階成果の概要と第2段階における調査研究の進め方 .....	11
3.2.1	第1段階成果の概要.....	12
3.2.2	第2段階における調査研究の進め方 .....	12
4	深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備 .....	15
4.1	地質構造の三次元的分布の把握 .....	15
4.2	地下水の流動特性の把握 .....	21
4.3	地下水の地球化学特性の把握 .....	42
4.4	物質移動の遅延効果の把握.....	47
4.5	EDZの地質環境特性の把握 .....	54
4.6	地下空洞の力学的安定性の把握 .....	57
5	深地層における工学技術の基盤の整備 .....	67
5.1	設計・施工計画技術の開発.....	67
5.2	建設技術の開発 .....	72
5.3	施工対策技術の開発.....	74
5.4	安全を確保する技術の開発.....	78
6	まとめ .....	82
	参考文献 .....	85
付録		
1	地表からのボーリング孔配置図（第2段階） .....	95
2	広域地下水流動研究におけるボーリング孔配置図 .....	97

Contents

1	Introduction .....	1
2	Mizunami Underground Research Laboratory project .....	3
2.1	Position and role of Underground Research Laboratory .....	3
2.2	Geoscientific research and the MIU project .....	3
2.3	Site overview .....	4
2.4	Goals and Study procedures .....	7
2.5	Aims and outlines of the report on the Construction phase .....	10
2.5.1	Aims of the report .....	10
2.5.2	Outline of the report .....	10
3	Plan for study on Construction phase .....	11
3.1	Phase II goal .....	11
3.2	Overview of Phase I results and Study procedures of Phase II .....	11
3.2.1	Overview of Phase I results .....	12
3.2.2	Study procedures of Phase II .....	12
4	Establishment of techniques for investigation, analysis and assessment of the deep geological environment .....	15
4.1	Geological structure .....	15
4.2	Groundwater flow characteristics .....	21
4.3	Geochemical characteristics of groundwater .....	42
4.4	Transport/retardation of nuclides .....	47
4.5	Geological environment properties of EDZ .....	54
4.6	Geomechanical properties of tunnel .....	57
5	Development of a range of engineering technologies for deep underground application .....	67
5.1	Development of engineering technologies for designing and planning the construction .....	67
5.2	Development of engineering technologies for the construction .....	72
5.3	Development of construction countermeasure technology .....	74
5.4	Development of technology to ensure the safety .....	78
6	Summary .....	82
	References .....	85
	Appendix 1 Location of borehole investigations in the MIU construction site (surface) .....	95
	Appendix 2 Location of borehole investigations on Regional Hydrogeological Study of Phase II .....	97

## 1. 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」<sup>1)</sup>（以下、「原子力長計（2000）」という）や「原子力政策大綱」<sup>2)</sup>に示された深地層の研究施設計画の一つである。本計画は、1996年度より、超深地層研究所基本計画<sup>3)</sup>に基づき、岐阜県瑞浪市明世町の正馬様洞（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<sup>注1)</sup>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「高レベル放射性廃棄物の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月に基本計画を改訂した<sup>4)</sup>（以下、「基本計画（2001）」という）。さらに、超深地層研究所計画では、2002年1月17日に瑞浪市と瑞浪市明世町の市有地（瑞浪超深地層研究所用地、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は、2002年2月に基本計画（2001）を改訂し<sup>5)</sup>（以下、「基本計画（2002）」という）、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示された「高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画」<sup>6)</sup>（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）、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に整備することとした。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の地質環境特性が異なっていると予想されたことから、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と考えられた。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られた。以上のような「基本方針」と「最終処分計画」の改定および深度300mへの調査研究用の水平坑道の整備を背景に、原子力機構では2010年に基本計画を改訂した<sup>7)</sup>。

その後、深度500mまでの研究坑道を掘削しながら調査研究を実施し、得られた地質環境データに基づき、調査技術やモデル化手法の妥当性評価および深地層における工学的適用性確認を行った。これにより、地質環境の調査手法、地下施設建設に伴う影響範囲のモニタリング方法等

---

注1) 調査研究のために掘削された主立坑、換気立坑、水平坑道などからなる超深地層研究所の地下部分

の地表からの精密調査の段階に必要となる技術基盤の整備を目標として、「深部地質環境の調査・解析・評価技術に係わる基盤の整備」と、「深地層における工学技術の基盤の整備」に関する調査研究を進め、2014年2月までに、深度500mまでの研究坑道の掘削を終了した。

本報告書は、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）における調査研究の成果を取りまとめたものである。

## 2. 超深地層研究所計画

### 2.1 瑞浪超深地層研究所の位置づけと役割

原子力委員会は2000年11月の原子力長計<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>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<sup>6)</sup>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、東濃地科学センターでは、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究であり、地層処分研究開発の基盤となる研究である、地層科学研究を進めてきた。

瑞浪超深地層研究所は、上記の原子力長計<sup>1)</sup>や原子力政策大綱<sup>2)</sup>、ならびに全体計画<sup>6)</sup>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。

### 2.2 地層科学研究と超深地層研究所計画

地層科学研究の歴史や、超深地層研究所計画の概要並びに目標については、「超深地層研究所地層科学研究基本計画」<sup>7)</sup>並びに「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—」<sup>8)</sup>に示されている。以下に、超深地層研究所計画における第2段階の背景として、広域地下水流動研究と超深地層研究所計画の関係について、それらの記述から抜粋する。

東濃地科学センターでは、超深地層研究所計画に先立ち、1992年度から広域地下水流動研究を行っている。広域地下水流動研究は、約10km四方、深さ約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、地下水の流動特性および地球化学的特性を把握するために必要な調査・解析・評価手法の開発を目的とした研究である<sup>9)</sup>。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、主要な現場調査を終了した後、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している<sup>10)</sup>。広域地下水流動研究と超深地層研究所計画は、研究成果を相互に活用し、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・評価手法の適用性について、事例的な確認を行っている。

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。原子力発電環境整備機構（以下、原環機構という。）が行う処分事業においても同様の考え方が適用される<sup>11)</sup>。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。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的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できる。

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3つの段階に区分して進めている。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（前段の地表からの精密調査と、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表からの精密調査に、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。

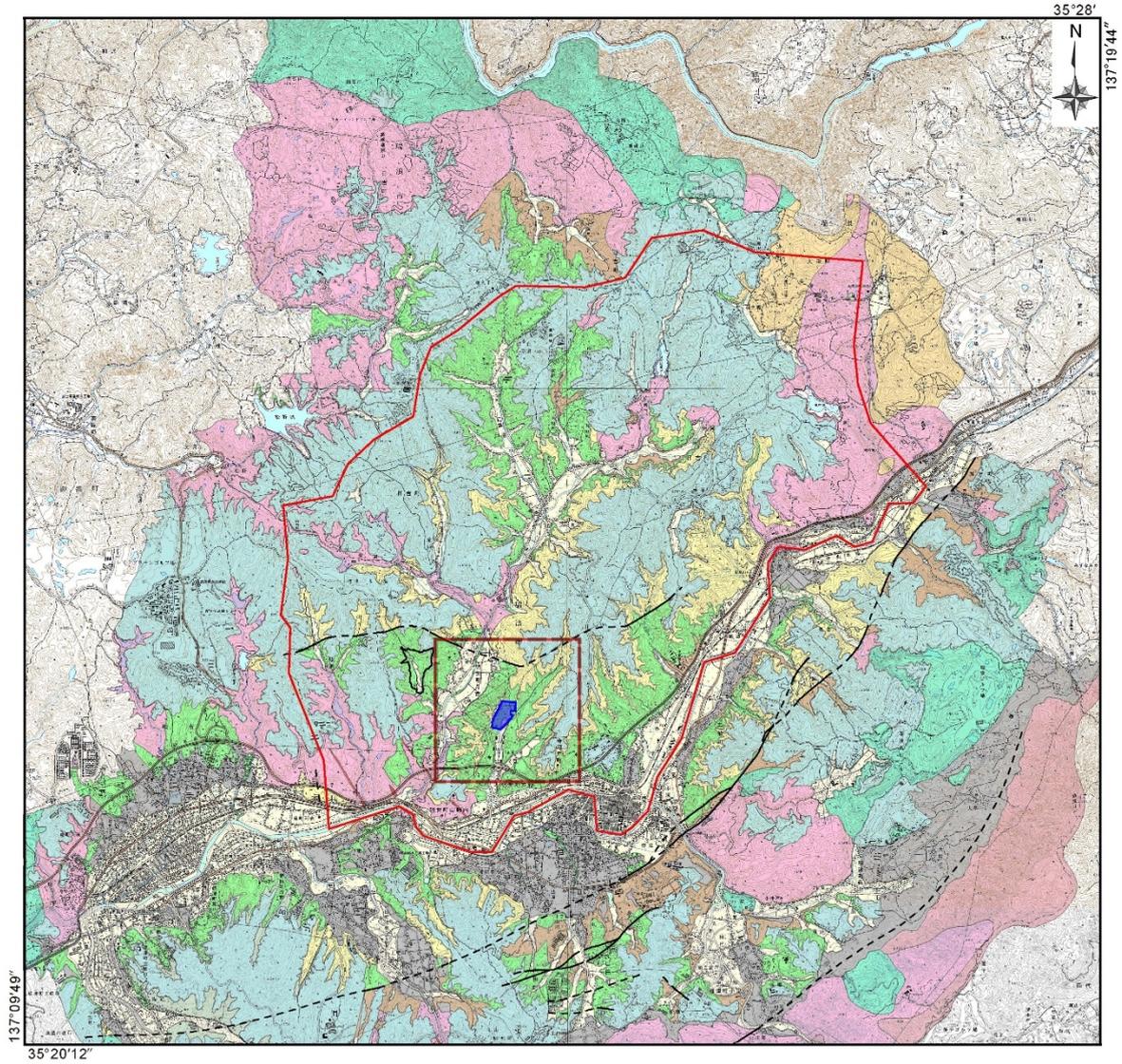
超深地層研究所計画においては、段階的な調査研究を展開することによって、原環機構が行う処分事業の各段階において必要となる体系的な調査・解析・評価技術や関連する個別の調査解析技術、計画立案や調査・解析の実施に関わる技術的ノウハウ（例えば、各作業における留意点や意思決定プロセス、トラブルシューティングなど）、品質管理の考え方などを整備することが重要である。

### 2.3 瑞浪超深地層研究所の設置場所

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、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<sup>9)</sup>。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中新世～鮮新世の砂礫層（瀬戸層群）が分布する（図2.3-1）。瑞浪超深地層研究所の研究坑道（図2.3-2）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ている。

正馬様用地では、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おり、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の開発を行っている。



※ 地形図は、『1/25000数値地図図画像』(国土地理院:平成12年9月1日発行)「御嵩」、「武並」、「土岐」、「瑞浪」を使用。

0 2000 4000m

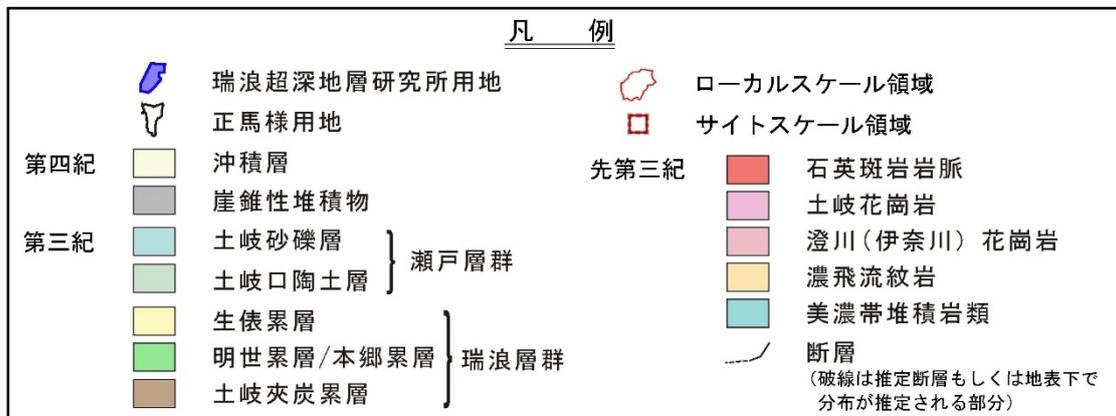


図 2.3-1 瑞浪超深地層研究所周辺の地質概要

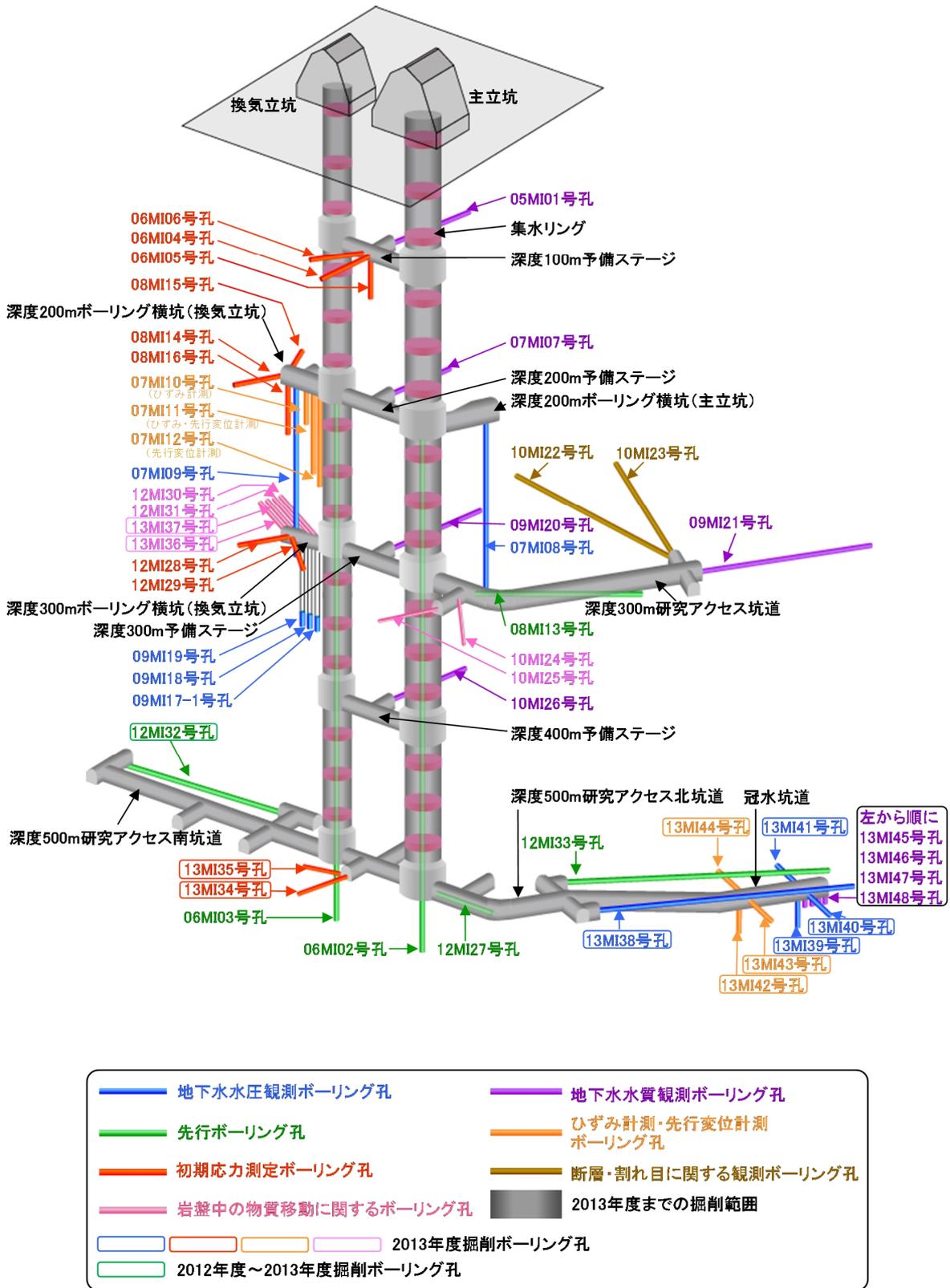


図 2.3-2 研究坑道のレイアウトおよび主な調査位置<sup>12)</sup>

## 2.4 超深地層研究所計画の目標と調査研究の進め方

超深地層研究所計画の全体目標、調査研究の進め方および個別目標と課題の設定については、超深地層研究所地層科学研究基本計画<sup>7)</sup>および「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—」<sup>8)</sup>に示されている。ここでは、第 2 段階の目標と調査研究の進め方に係わる記述を抜粋する。

超深地層研究所計画では、以下の 2 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、これら全体目標に関わる第 2 段階での段階目標については 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

また、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」、「地下施設的设计・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（図 2.4-1）<sup>8)</sup>。さらに、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 2.4-1）<sup>8)</sup>。その際、安全評価及び地下施設的设计・施工への研究成果の反映を念頭に置き、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、涵養域から流出域までの広域地下水流動のスケールや研究用地および研究坑道のレイアウトなどに着目して、図 2.4-2 に示すように、リージョナル、ローカル、サイトおよびブロックの 4 つの空間スケールを設定し、調査研究を進めている<sup>10)</sup>。空間スケールの区分と位置づけを表 2.4-1 に示す。

超深地層研究所計画では、第 1 段階から第 3 段階までの調査研究を進めるにあたり、繰り返しアプローチ（図 2.4-3）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。また、調査研究成果は、統合化データフローダイアグラム<sup>8)</sup>を用いて統合化している。

全体目標	個別目標	課題	広域地下水 流動研究	MU計画						
				第1段階		第2段階		第3段階		
				L	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 2.4-1 個別目標と課題および調査段階/空間スケールの対比<sup>8)</sup>

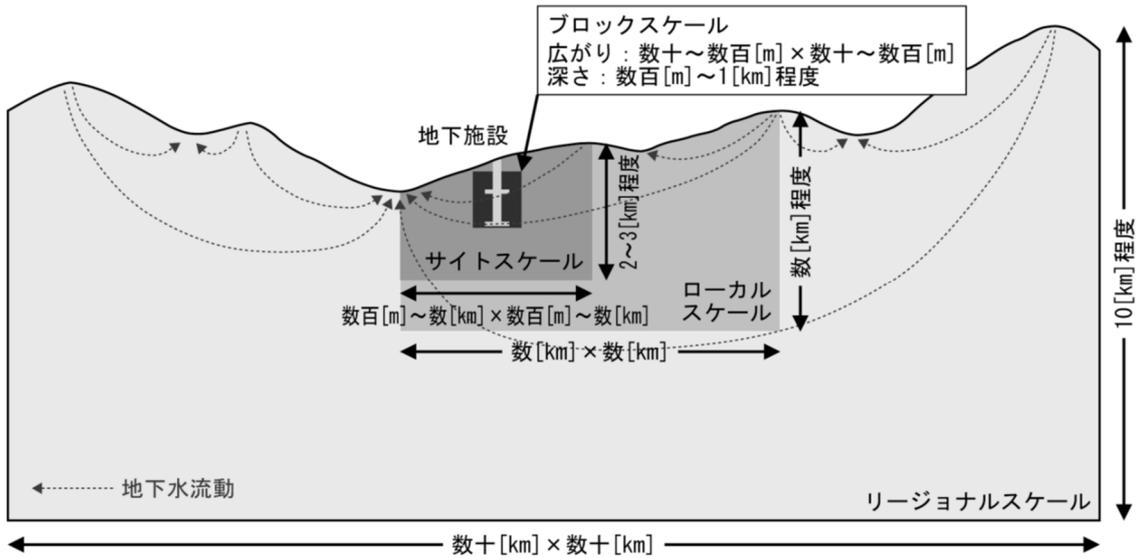


図 2.4-2 空間スケール概念<sup>8)</sup>

表 2.4-1 空間スケールの対象範囲と位置づけ<sup>8)</sup>

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 ・地下施設の設計のための基礎情報の収集 ・サイトスケールの研究領域/境界条件の設定
サイトスケール 平面: 数[km <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

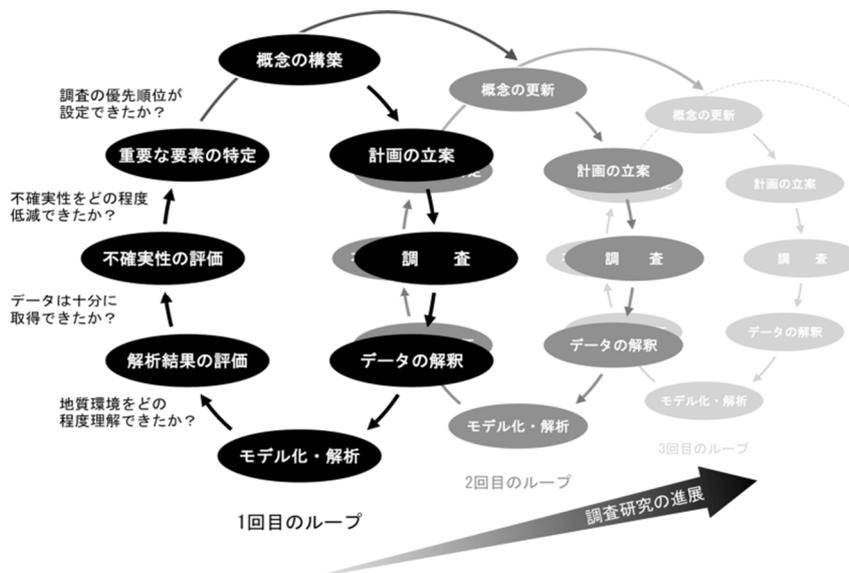


図 2.4-3 繰り返しアプローチ<sup>8)</sup>

## 2.5 第2段階成果取りまとめの目標と構成

### 2.5.1 第2段階成果取りまとめの目標

超深地層研究所計画の第2段階における調査研究の成果の取りまとめ（以下、「第2段階成果取りまとめ」という）は、2014年2月までに行った第2段階の調査研究の成果や、その後の解析評価を通じて得られた成果を取りまとめるものである。この取りまとめは、超深地層研究所計画の全体目標を踏まえて設定した第2段階における段階目標に対して、その達成度と今後の課題を明らかにするとともに、第3段階以降における調査研究の方向性を具体化するうえで重要な意味を持つ。また、ここで取りまとめる成果は、地層処分技術の知識基盤として、特に原環機構が実施する精密調査、並びに国が進める安全規制の両面を支える技術基盤の強化を図っていくうえで、有効に活用されるものであることが重要となる。

なお、第2段階における調査研究のうち2014年までに得られた成果の概要については、2015年8月に公表した「第2期中期計画期間における研究成果取りまとめ報告書—深地層の研究施設計画および地質環境の長期安定性に関する研究」<sup>13)</sup>にまとめており、第2段階における統合化データフローは、「超深地層研究所計画 統合化データフローの構築(研究坑道の掘削を伴う研究段階:第2段階)」<sup>14)</sup>にまとめている。

以上のような状況を踏まえ、第2段階成果取りまとめにおいては、「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」、「研究坑道の施工・維持・管理に関わる工学技術の有効性を確認する」の2点を主な目標として設定し、調査研究の成果を取りまとめる。

### 2.5.2 報告書の構成

本報告書は、全6章から構成される。第3章「第2段階の調査研究計画」では、第2段階における調査研究の目標や進め方について概括する。第4章「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」では、結晶質岩を対象とした第2段階の調査・解析・評価技術に関する技術的知見を整理する。第5章「深地層における工学技術の基盤の整備」では、硬岩を対象とした研究坑道の施工対策技術および安全確保技術について記述する。最後の第6章「まとめ」では、第2段階における深地層の科学的研究の成果を総括する。

本報告書では、第2段階の主な目標に対する調査研究の主な成果を、図2.4-1に示した個別目標と課題を踏まえて、第4章と第5章に記述する。なお、地下施設的设计・施工に係わる「地下空洞への地下水流入状態の把握」を安全評価の記述に含めるなど、一部の関連する課題はまとめて記述する。

### 3. 第2段階の調査研究計画

#### 3.1 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<sup>5),15)</sup>。

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<sup>6)</sup>などに示された今後の研究開発の課題を考慮することが重要である。

#### 3.2 第1段階の成果の概要と第2段階における調査研究の進め方

超深地層研究所計画の第2段階の段階目標のうち、「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」と、「深地層における工学技術の基盤の整備」に関する調査研究について、第1段階の成果の概要と、第2段階における調査研究の進め方を以下に述べる。

### 3.2.1 第1段階成果の概要

第1段階の研究成果は、「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」<sup>16)</sup>に取りまとめられている。地表からの調査予測研究段階（第1段階）の調査研究では、研究所用地を包含する領域を対象として、「地表からの調査研究による地質環境モデルの構築および研究坑道掘削前の深部地質環境状態の把握」と、「研究坑道の詳細設計および施工計画の策定」を段階目標として調査研究を進めた。前者の調査研究では、調査からモデル化・解析、評価に至る一連のプロセスを繰り返し行うことによって、段階的な調査研究を実施した。その結果、調査研究の進展に伴い、地層処分にとって重要な地質環境特性を効率的に理解することができた。また、調査から評価までの合理的な道筋を統合化データフローとして整理した。後者の調査研究では、実際に取得された地質環境情報に基づき、情報の取得や技術の実証を目的とした地下施設を安全に建設・維持するための工学技術の基盤の整備を目標として研究坑道を合理的に設計した。

このように、第1段階の調査研究をとおして、結晶質岩（硬岩）を対象とした調査・評価のための方法論を示すとともに、重要な調査技術や解析技術を整備した。また、処分事業の基盤技術となる技術的知見やノウハウなどを整理した。さらに、第1段階において残された課題を整理し、第2段階以降の調査研究の必要性を明確化した。

### 3.2.2 第2段階における調査研究の進め方

第2段階における調査研究の進め方は、以下のとおりである<sup>8)</sup>。

「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、地表からの調査・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

地表からの調査・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3.1-1）。

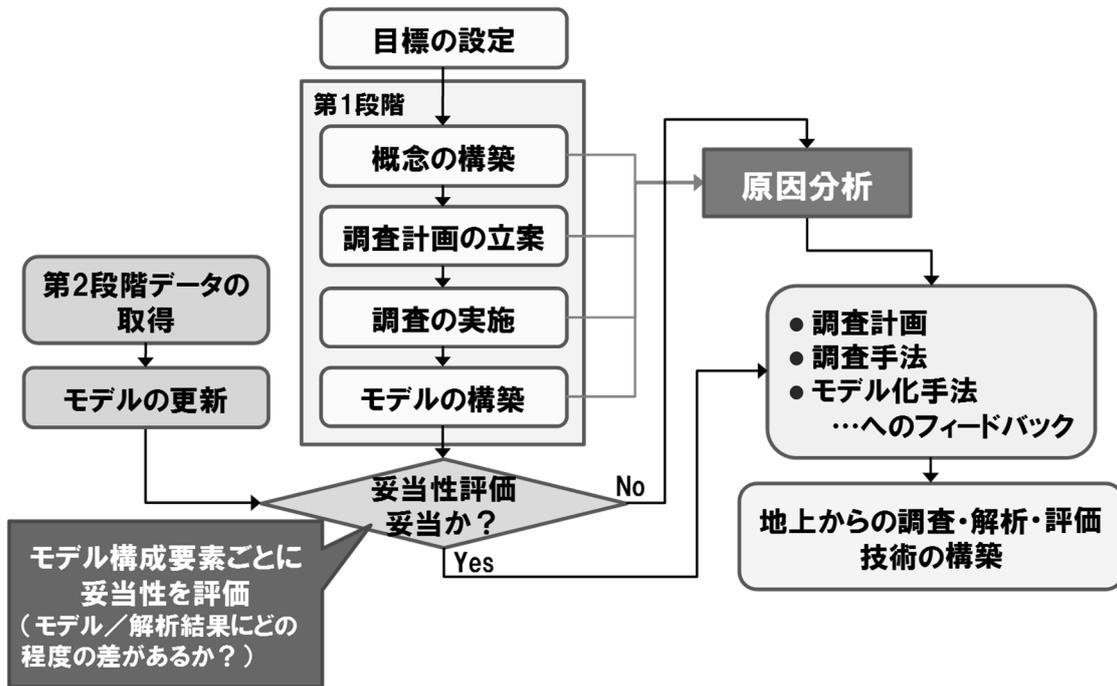


図 3.1-1 地表からの調査技術の妥当性評価の考え方<sup>16)</sup>

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。

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、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整理した（図 3.1-2）。

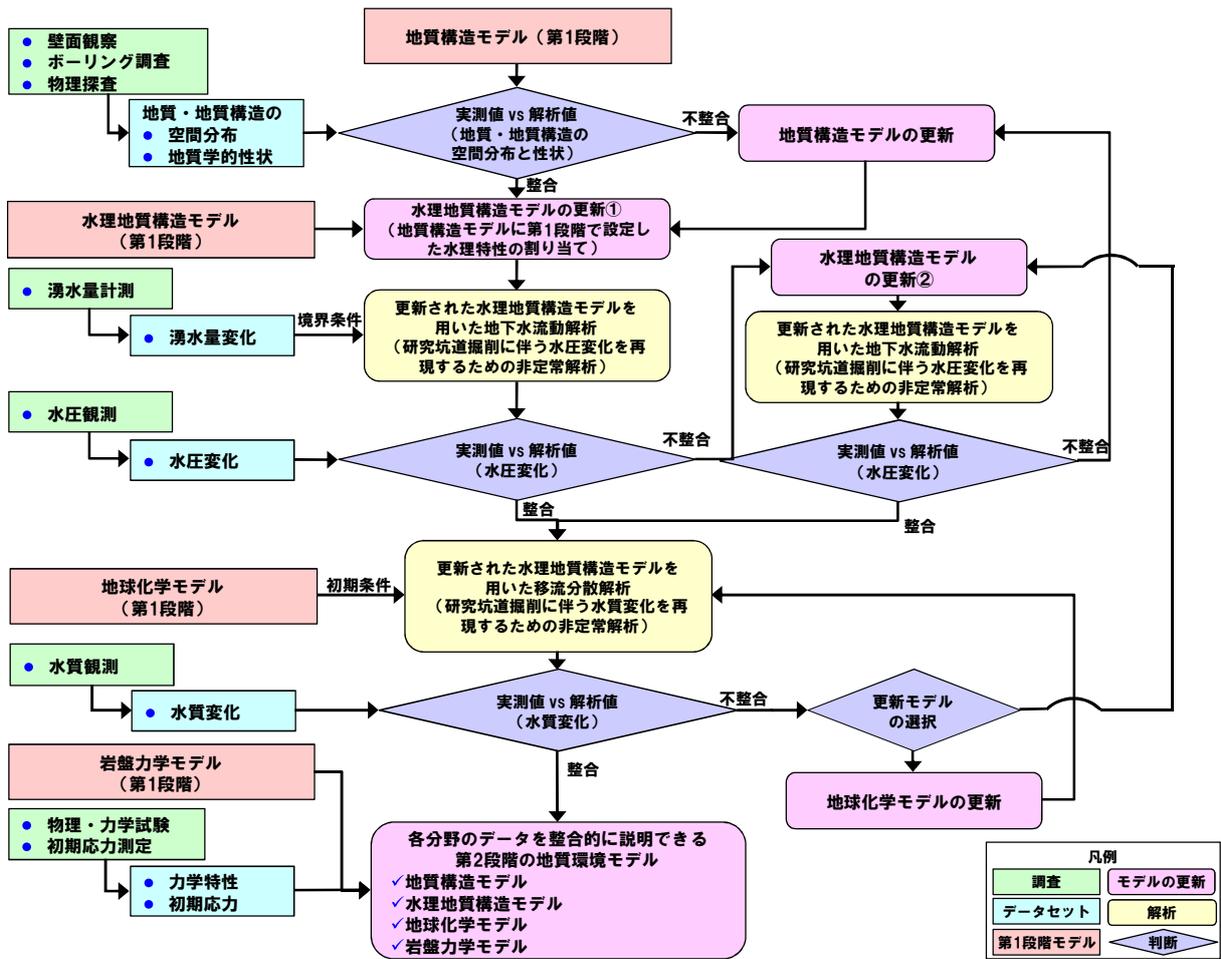


図 3.1-2 地質情報の統合的解釈による地質環境モデル更新の考え方<sup>16)</sup>

以上の検討を通じて、地表からの調査・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、地表からの調査・解析・評価技術の体系的な整理を図る。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・管理の考え方などを整理した。

「深地層における工学技術の基盤の整備」に係る調査研究では、結晶質岩を対象とした地下深部までの施設の設計・建設および操業に対する既往の技術の有効性の検討およ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た。

- 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

#### 4. 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備

第2段階における調査・解析では、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ため、結晶質岩を対象とした第2段階の調査・解析・評価技術に関する技術的知見を、個別目標ごとに整理する。

##### 4.1 地質構造の三次元的分布の把握

###### (1) 目標

第2段階では、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。また、一連の調査・モデル化・解析作業を通じて、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するための調査手法の精度と不確実性についての整理を行った。

###### (2) 第1段階における結果概要

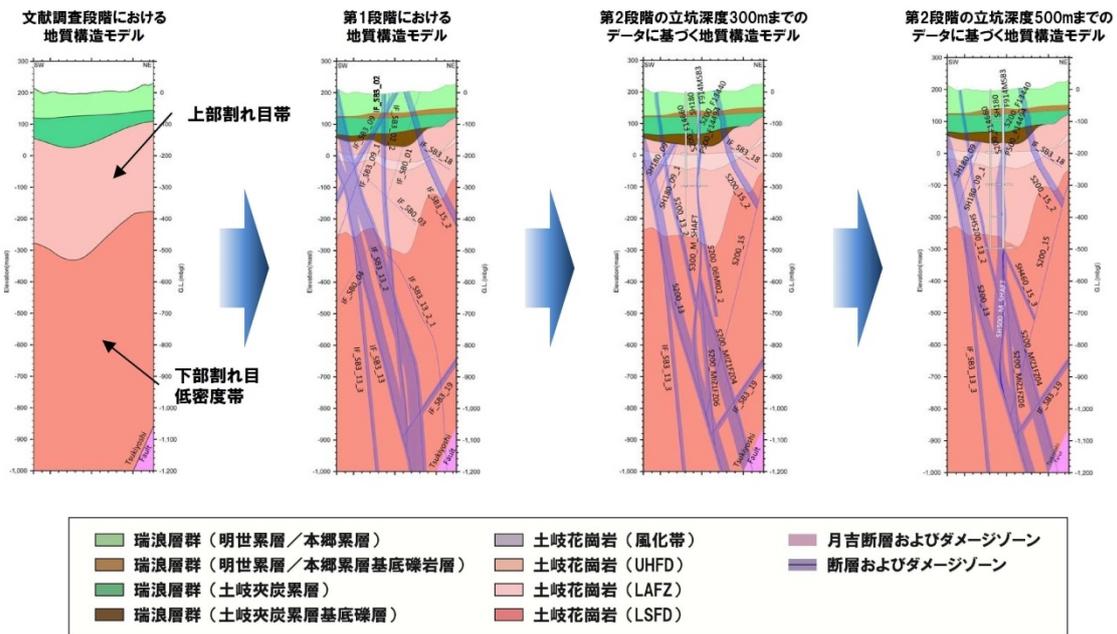
地表からの調査予測研究段階（第1段階）の調査研究では、研究所用地を包含する領域を対象として、既存情報を用いた調査、空中・地表からの調査、ボーリング孔を利用した調査を段階的に実施し、地層処分にとって重要な地質環境特性やプロセスなどを把握するとともに、地質構造モデルの構築とその妥当性の確認を通じて、一連の体系的な調査・評価技術ならびに調査研究を通じて得られた技術的知見の整備を図った<sup>16)</sup>。

対象岩盤の分布と形状の把握については、地質図などの既存情報に加えて、地表地質調査、物理探査（反射法地震探査）、ボーリング調査を段階的に実施し、土岐花崗岩（白亜紀後期）とそれを被覆する新第三紀中新世の瑞浪層群の分布・形状や断層の分布が推定された<sup>16)</sup>。また、土岐花崗岩では、地表から掘削した複数のボーリング調査において、割れ目が多い上部割れ目帯と割れ目が少ない下部割れ目低密度帯が識別され、地表から実施した反射法地震探査の結果と組み合わせ、上部割れ目帯の厚さは花崗岩上位に分布する被覆堆積岩（瑞浪層群）の層厚との関係があり、堆積岩が厚いほど上部割れ目帯も厚いことが明らかにされ<sup>17)</sup>。それらの三次元分布の推定とモデル化が行われた<sup>16)</sup>。研究所用地には、花崗岩上面にチャネル構造が発達しており、被覆堆積岩の層厚が非常に厚い。このため、上部割れ目帯の下限は深度 470m 付近に位置すると推定された<sup>16),18)</sup>。

岩盤の地質学的不均質性としては、岩相・層相の違いによるもの（岩種、粒度など）と構造発達の違いによるもの（割れ目、断層の頻度など）が考えられる<sup>19)</sup>。土岐花崗岩の岩相については、これまでに地表から掘削したボーリングのコアを用いた岩石記載（鉱物組み合わせおよびモード組成）によって、白雲母－黒雲母花崗岩、ホルンブレンド－黒雲母花崗岩および黒雲母花崗岩の3つの岩相に区分されている<sup>20)</sup>。これらの岩相は系統的に推移しており、岩体中心部には黒雲母花崗岩が、縁辺部には白雲母－黒雲母花崗岩が分布し、両者の間にホルンブレンド－黒雲母花崗岩が分布する<sup>20)</sup>。研究坑道周辺では、地表から掘削した MIZ-1 号孔を用いた岩石記載より、ホルンブレンド－黒雲母花崗岩および黒雲母花崗岩が確認されており、深度約 500m より浅部にはホルンブレンド－黒雲母花崗岩が、深部には黒雲母花崗岩が分布する<sup>20)</sup>。なお、ホルンブレンドは一般に細粒で含有量が少ない。

断層については、詳細な地表地質踏査により確認された断層<sup>17)</sup>のほか、反射法地震探査により断層と解釈される反射イベントのずれから推定された断層や、地表からのボーリング調査により確認された断層があり、研究坑道周辺に分布する断層の多くは、既存地質図には記載されていない南北～北西走向および東西～西北西走向の比較的小規模な断層である<sup>16)</sup>。

移行経路として重要な構造としては、初生的な構造要因によって形成される粒子間の間隙、層理面、不整合面、片理面とともに、二次的な構造要因によって形成される不連続構造（割れ目や断層）が挙げられている<sup>21)</sup>。第1段階では、地表からのボーリング調査および物理探査により、移行経路となる不連続構造（割れ目、断層など）の分布や発達状況などの調査研究結果に基づき、地質構造モデルを構築した<sup>16)</sup>（図4.1-1）。



UHFD: Upper Highly Fractured Domain, LAFZ: Low Angle Fractured Zone, LSFD: Lower Sparsely Fractured Domain

図 4.1-1 地質構造モデルの更新の履歴<sup>14)</sup>

(3) 第2段階における結果概要

対象岩盤の分布と形状の把握において、研究坑道の掘削を伴う研究段階（第2段階）では、深地層の研究施設およびその周辺における地質観察や坑道を利用したボーリング調査および物理探査などにより、実際の地層の分布や、割れ目の分布を把握して、第1段階の地質構造モデルの妥当性を確認するとともに、対象岩盤の分布と形状の把握に関する技術的知見を整備してきた。立坑の坑底から実施したパイロットボーリング調査<sup>22)</sup>の結果、上部割れ目帯の下限は深度460m付近に位置すると推定された。また、その後実施した換気立坑の壁面地質調査<sup>23)</sup>においても、深度約460m以深で割れ目頻度が減少することが確認され（図4.1-2）、パイロットボーリング調査では、上部割れ目帯の分布を10m程度の誤差で推定できることを確認した。研究坑道で観察された花崗岩中には、ペグマタイトおよびアプライトが岩脈として局所的に分布するほか、主立坑に沿って分布する断層（以下、主立坑断層という。）に沿っては塩基性のランプロファイア岩脈が分布する<sup>24),25)</sup>。ただし、これらの分布は主立坑とその近傍に限られ、サイトスケールの岩相はほぼ

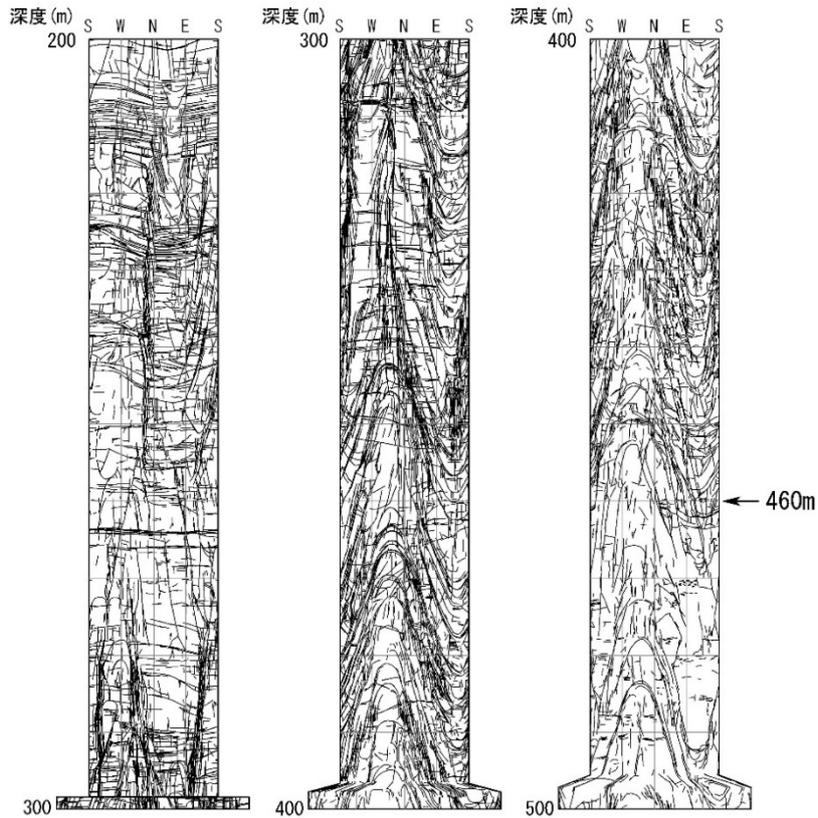


図 4.1-2 換気立坑（深度 200～500m）における割れ目の分布（展開図）  
 （換気立坑（直径約 5m～8m）の壁面観察結果に基づく。円筒の南を開いた平面図。）

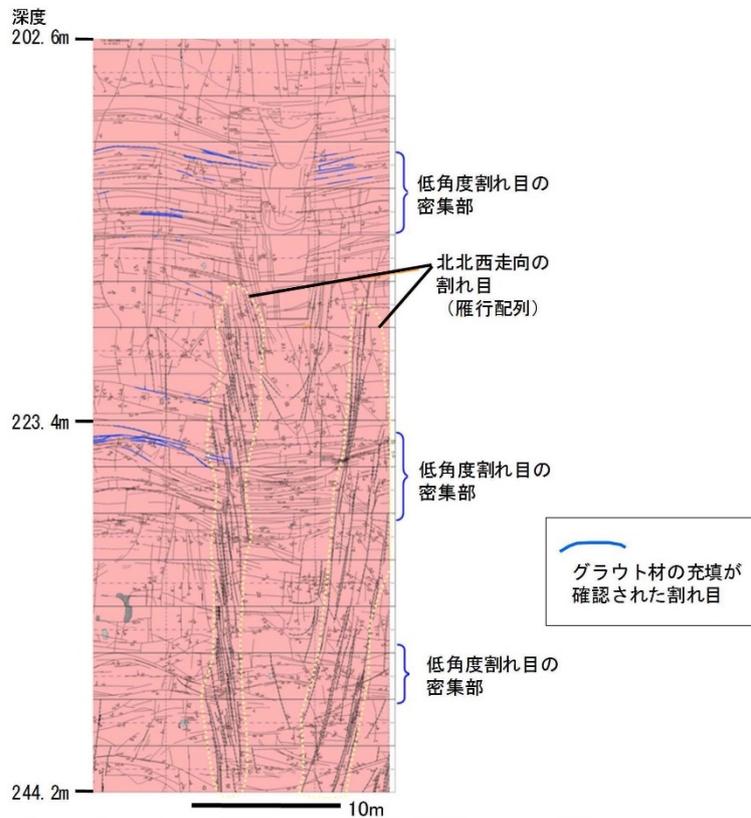


図 4.1-3 換気立坑（深度 202.6～244.2m）壁面地質スケッチ（展開図）<sup>31)</sup>

均質といえる。

移行経路として重要な構造のひとつである割れ目について、土岐花崗岩の割れ目頻度は、花崗岩の冷却速度に関係していることが分かった<sup>26)~29)</sup>。透水性割れ目については、研究坑道の壁面地質調査によって、実際の湧水割れ目を把握した<sup>23)~25),30)</sup>。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27mの厚さを有する単一構造を推定していたが、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、それらが約50mの厚さを有することを確認した<sup>17)</sup>。この密集部では、透水性割れ目をグラウト材の充填状況から確認した(図4.1-3)<sup>31)</sup>。長期的な変遷を踏まえて透水性割れ目を検出する技術については、研究坑道における充填鉱物や割れ目周辺の岩盤の変質に着目した類型区分が行われている(図4.1-4)<sup>8)</sup>。さらに、深度300mの研究坑道においては、断層や割れ目の成因的アプローチが試みられ、研究坑道からのボーリング調査と割れ目の薄片観察により、変質の特徴や割れ目の充填物の特徴に基づいて、それらの成因を推定するとともに、透水性割れ目の特徴を把握した<sup>32)</sup>。

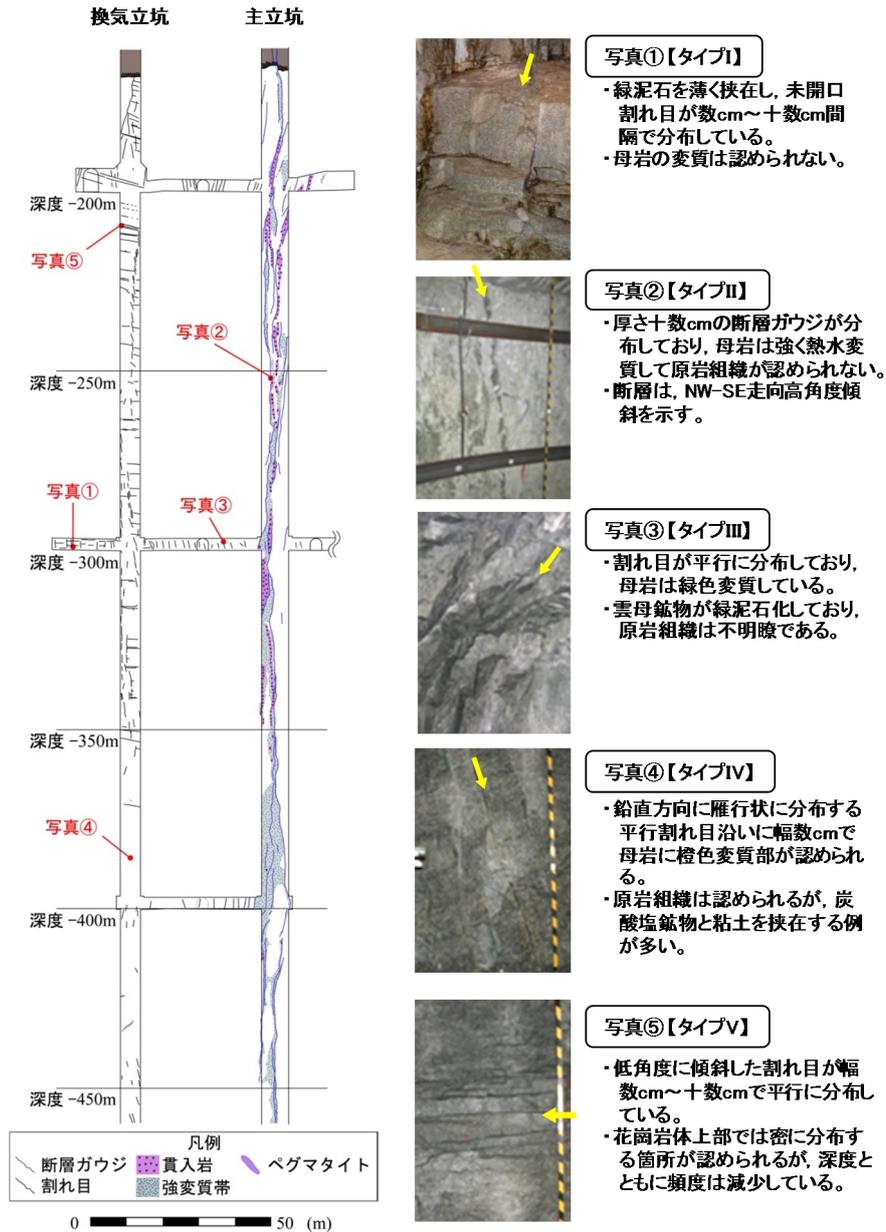
そのほか、深度300m研究アクセス坑道の先行ボーリング(08MI13号孔)の湧水前後の自然電位データについて解析を実施し、08MI13号孔が位置する、主立坑断層の北東側で正の電位変化を確認した(図4.1-5)<sup>33)</sup>。この結果から、湧水箇所に向かう地下水流動に伴う流動電位が発生したと考えられ、地下水流動に影響する構造の分布を、坑道掘削中の自然電位測定により把握できる可能性が示された。

従来の地質図には記載されていない比較的小規模の断層の分布については、研究坑道の壁面地質調査および深度300mの研究坑道からのボーリング調査と物理探査によって把握することができることを確認した<sup>24),25)</sup>。一方、主立坑断層は、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が、壁面地質調査の結果、主立坑沿いに分布しており、ほぼ鉛直傾斜であった。主立坑の壁面では、しばしば分岐する断層ガウジ群が、貫入岩と粘土化した変質部を伴って、深度160mから深度500mまで連続的に分布する。さらに、地表からの調査で確認されていた断層の中には、異なる断層を同一と推定した事例や、同一の断層を異なる断層と推定した事例が認められた<sup>18),24),25),35)</sup>。また、その分布に関しては、研究坑道から行ったボーリング調査および物理探査(逆VSP探査)の結果から推定した位置では確認できない場合がある<sup>34),37)</sup>。

断層の性状については、断層ガウジとそれに伴う変質部(以下、断層部という)は粘土を伴い、低透水性を示す<sup>22),30),37)</sup>。ボーリングコアでは、変質を受けて白色を帯びた粘土状の部分と、その周囲に割れ目に沿って淡緑色~暗緑色を呈する変質を受けた部分が認められた<sup>32),37)</sup>。このような断層部は一般に脆弱で、ボーリングコアが取得できない場合があるため、ボーリング孔を利用した物理検層データの多変量解析により、断層部の位置や特性を推定する手法を示した<sup>38)</sup>。

第2段階におけるサイトスケールの地質構造概念モデル<sup>注2)</sup>の更新において、主立坑断層は、断層の発達過程における水(熱水)-岩石反応による変質(帯)を伴う断層帯であることを確認するとともに、その走向傾斜や幅の変化のほか、断層の分岐、他の断層との交差を考慮してモデル化を行った。(図4.1-1)。

注2) 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。



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) ℃	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、塩基性貫入岩や岩鏡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 4.1-4 研究坑道で確認された割れ目の類型区分<sup>8)</sup>

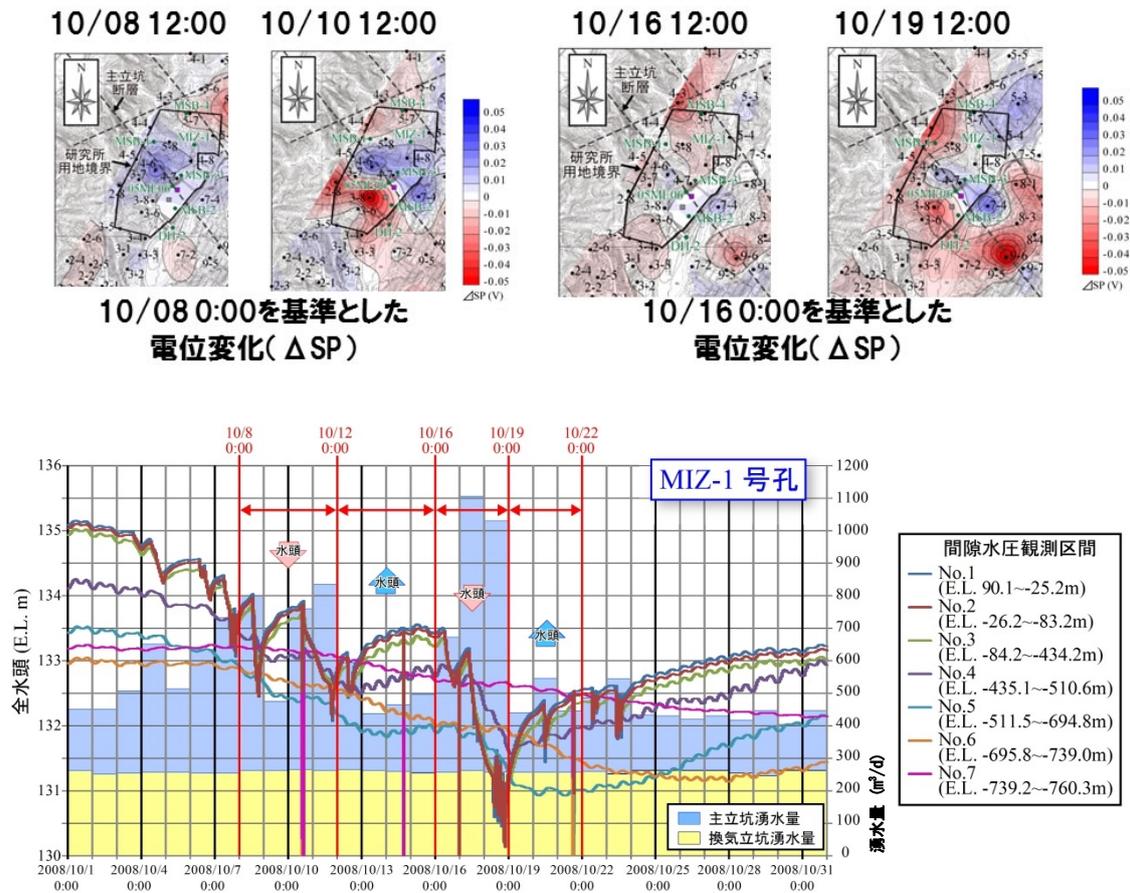


図 4.1-5 自然電位の変化（上）と立坑湧水量および MIZ-1 号孔の水頭の変化（下）<sup>8)</sup>

（主立坑断層の北東側で正の電位変化が確認され、湧水箇所に向かう地下水流動に伴う流動電位が発生したと考えられる）

#### (4) 汎用的知見

花崗岩を対象とした地質構造の三次元的分布の把握に関しては、地表と研究坑道から実施した地質調査、物理探査、ボーリング調査などを組み合わせた総合的な原位置調査の事例により、断層の分布や割れ目の頻度などを考慮した対象岩盤の地質学的分類や、割れ目の少ない領域の特定が可能であることを具体的に示すことができた。

地下深部における高角傾斜の断層の分布に関しては、海外の事例では地表からの調査による正確な把握は困難とされていたが<sup>39)</sup>、第2段階までの調査の結果、断層の分布や連続性（断層の分岐や他の断層との交差を含む）の推定が困難な場合があることが確認された。その様な断層に対して、研究坑道からの前方探査（逆 VSP 探査）により分布を把握できる可能性を示した<sup>40),41)</sup>。さらに、研究坑道からのボーリング調査により、断層の分布や性状を把握できることを示した<sup>37)</sup>。

また、従来は個別に進められてきた調査内容をトップダウン的に「調査」⇒「データ」⇒「解釈/データセット」⇒「概念化/モデル化」の流れで整理することにより、各種調査結果を統合して地質構造モデルを構築するための方法論を、フロー図として整備した<sup>42)</sup>。さらに、従来のモデルでは明示されなかった、調査の進展にともなう地質環境の理解度や構築した地質構造モデルの不確実性の表示方法を検討し、手法の整備を行った<sup>12),43),44)</sup>。

## 4.2 地下水の流動特性の把握

### (1) 目標

地下水の流動特性の把握に関する調査研究では、地下水の流動特性を理解するための調査・解析・評価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を目標<sup>8)</sup>として、地下水流動場や地下水流束分布の把握および地下水の流動特性の長期変化の推定に着目した検討を実施した。また、研究坑道の設計や施工や第3段階の研究計画の策定に反映させることを目的<sup>8)</sup>として、研究坑道への地下水流入量を把握した。

#### ①地下水流動場の把握

涵養域から流出域までの地下水流動系の範囲や、地下水の流動状態（移流場／拡散場の違い）、地下水流動の駆動力の種類（水圧差による流動や、密度流、熱対流）といった地下水流動場を把握することは、着目する地点を通過する地下水流動の特性を評価する上で重要である。この地下水流動を規定する基本的な要素としては、地形および地質・地質構造が挙げられる。

#### ②地下水流束分布の把握

地下水流束（単位面積当たりの流量）の三次元分布は、透水係数や透水量係数などの岩盤の水理特性と、地下水流動の駆動力である動水勾配によって規定される。岩盤の水理特性は、断層や割れ目、岩相の違いに起因した不均質性を有しており、この不均質な水理特性の三次元分布を推定することが重要である。

#### ③地下水の流動特性の長期変化の推定

地下水流動場および地下水流束分布は、自然現象に伴い長期的に変動することが想定されることから、地質学的時間スケールにおける長期変動幅を推測することが重要である。

#### ④地下空洞への地下水流入量の把握

地下水流入量の把握は、地下施設の設計や建設、維持、管理を行う上で重要である。また、地下施設の埋戻し時の地下水の流動特性の回復挙動を予測する際にも必須の情報である。

### (2) 第1段階における結果概要

第1段階における地下水の流動特性の把握では、調査量と地下水の流動特性の理解度や不確実性との関係を明確にするとともに、次の調査で確認すべき重要な要素を抽出することを目的として、地下水の流動特性に関する現場調査とサイトスケールの水理地質構造モデルの構築、地下水流動解析を繰り返し実施した（図4.2-1）<sup>45)</sup>。具体的には、既存情報の整理、既存ボーリング孔および新規浅層ボーリング孔における調査、新規深層ボーリング孔における調査、孔間水理試験という流れで調査を進めた。ボーリング調査においては、コア観察などの地質調査や流体検層によって断層や割れ目帯などの透水性構造を抽出し、その透水性構造およびそれ以外の岩盤部の透水性を把握するための水理試験を実施した。これらの調査の終了後は、直ちにモニタリング装置を設置し、地下水圧などの長期観測を開始した。また、それらの調査結果に基づく水理地質構造モデルを構築し、地下水流動解析を実施した。地下水流動解析では、地下水の流動特性に対する影響が大きいと考えられる断層の水理特性に着目した定常地下水流動解析や、研究坑道掘削に伴う地下水流動場への影響予測解析などを実施した。さらに、上記の調査研究結果に基づき、調査の各時点での調査量と地下水の流動特性の理解度や不確実性との関係を評価するとともに、次の調査で確認すべき重要な要素を抽出し、次の調査計画に反映させてきた。第1段階の調査研究の結果、調査・解析・評価を繰り返し実施することによって、調査の進展に伴い段階的に地下水の流動特性に関する不確実性を低減させることができた（図4.2-2）。

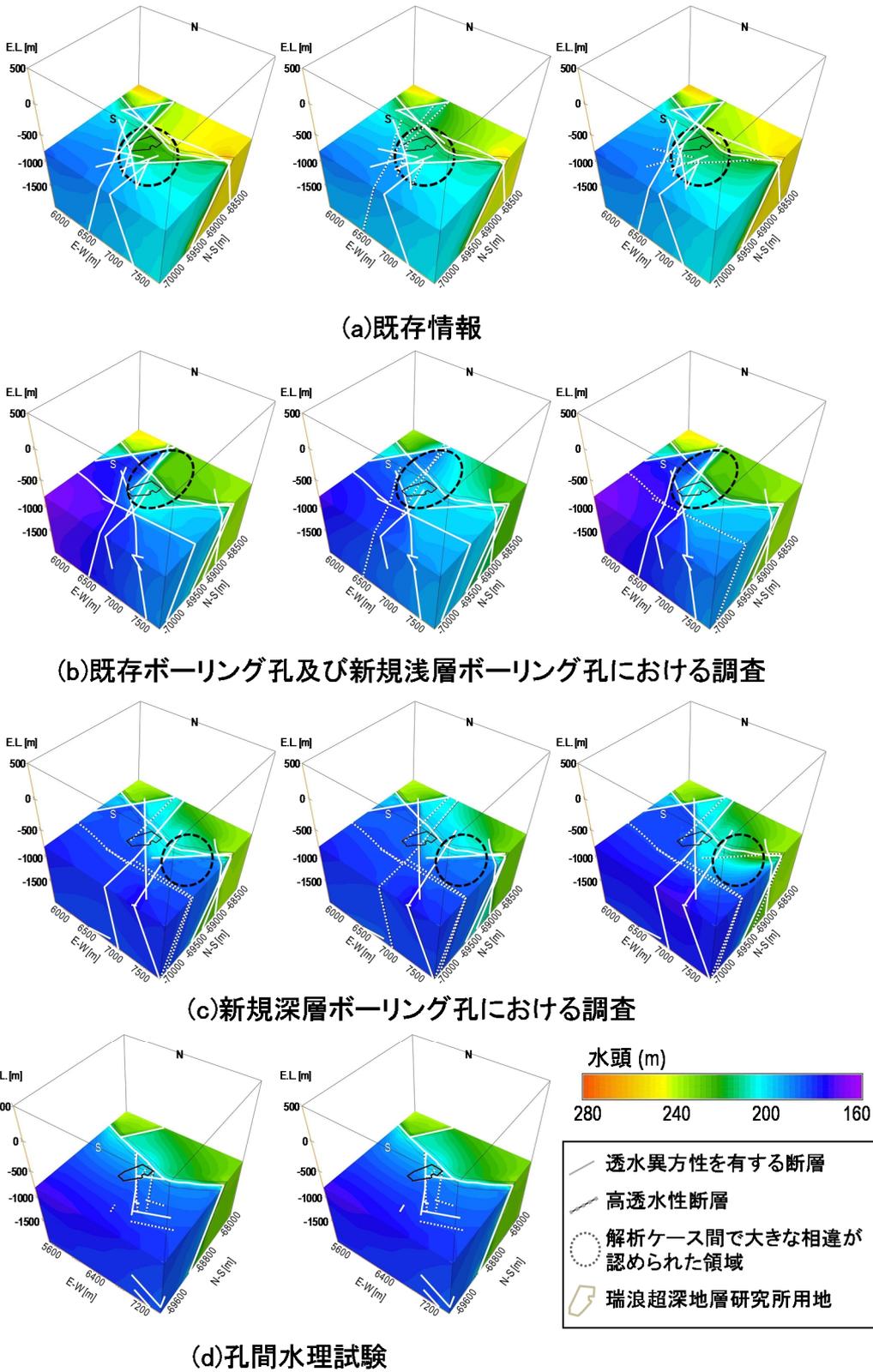


図 4.2-1 地下水流動解析結果の一例

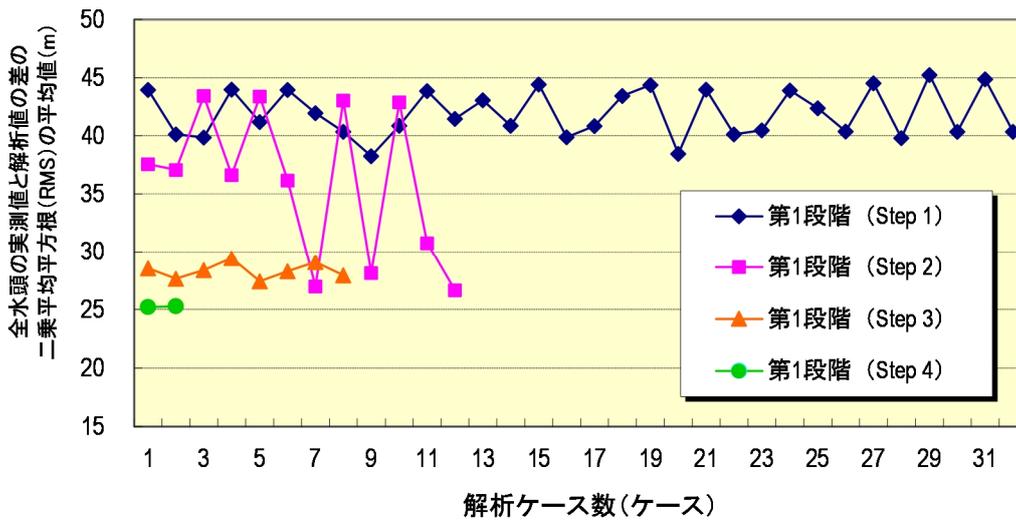


図 4.2-2 地下水の流動特性の不確実性の推移

また、前述したボーリング調査結果を用いて、土岐花崗岩中の透水性構造分布に起因する水理学的な不均質性を考慮したブロックスケール(ボーリング孔や研究坑道周辺の数十 m 四方の領域)の水理地質構造モデルを構築した<sup>46)</sup>。モデルの構築の際には、確率論的割れ目ネットワークモデルを適用した。また、構築したブロックスケールの水理地質構造モデルに基づき、モデル化領域を対象とした等価な水理特性を算出し、既往の単孔式水理試験結果との比較することで算出した等価な水理特性の妥当性を確認した。

第 1 段階の調査研究を通じて、以下に示す技術的知見を得ることができた。

- ・第 1 段階において地下水流動に影響を及ぼす可能性のある不連続構造を効率的に抽出するためには、その水理特性に着目した地下水流動解析を実施し、不連続構造が動水勾配分布に及ぼす影響などを評価することが有効である。また、この結果に基づいて次段階で優先的に調査・評価すべき項目を抽出することができる。
- ・ボーリング孔間に分布する断層などの地質・地質構造要素の水理学的連続性を推定するための手法の一つとして、ボーリング調査中に他のボーリング孔でその掘削応答をモニタリングすることが有効である。
- ・精度良く透水性構造を検出し、透水性を把握するためには、電気伝導度検層および水理試験を適宜組み合わせることが有効である。

地下空洞への地下水流入量の把握においては、研究坑道への地下水流入量を予測するため、水理特性の空間分布の不均質性を表現した水理地質構造モデルを用いた地下水流動解析を実施した<sup>47)</sup>。地下水流動解析は、有限要素法による等価不均質連続体モデル<sup>48)</sup>を用いた飽和-不飽和状態における三次元非定常問題として実施した。また、研究坑道への地下水流入量は、研究坑道壁面からの流入量に対する覆工コンクリートや覆工と岩盤の間に設置される排水マットなどの影響(スキン効果)を受けていると考えられることから、研究坑道壁面の境界条件については、完全大気圧開放条件と不透水境界の中間に設定するために式(1)で示すように、「圧力開放係数： $\alpha$ 」の概念を導入した。

$$P_D = \alpha (P_{D0} - P_A) \cdots (1)$$

ここで、 $\alpha$  は圧力開放係数、 $P_D$  は研究坑道の境界水圧、 $P_{D0}$  は対象地点の掘削前初期水圧、 $P_A$  は大気圧を示す。式(1)より、 $\alpha$  が 0 の際は研究坑道が完全大気圧開放状態、1 の際は不透水状態を示している。解析の際には、この  $\alpha$  を 0.2 および 0.8 とした 2 ケースについて内部境界条件を設定した。また、内部境界条件については、研究坑道の掘削工程を模擬して内部境界条件を非定常に変化させた。

地下水流動解析の結果、同じモデルでも圧力開放係数が異なる場合には地下水流入量は大きく異なることが明らかとなった (図 4.2-3)。また、高透水性構造と研究坑道が交差する際に、地下水流入量が急増することが予測された。高透水性構造の坑道への出現確率は、高透水性構造の分布 (走向・傾斜) の不確かさの影響を大きく受け、この出現確率が地下水流入量の予測結果に与える影響が大きいことが明らかとなった。

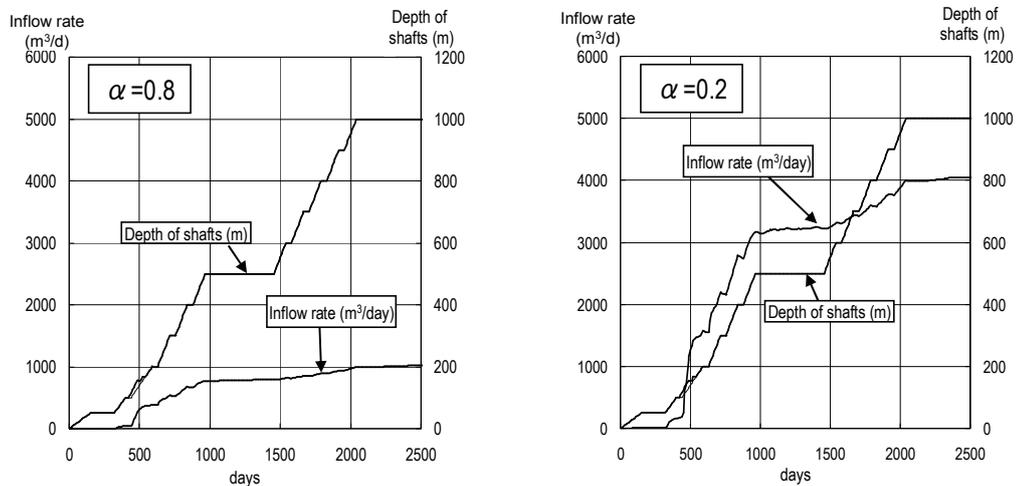


図 4.2-3 第 1 段階における地下水流動解析による地下水流入量の予測結果

さらに、多量の地下水流入を発生させる可能性のある岩盤の割れ目の存在や分布などの不確かさに伴う地下空洞への地下水流入量の予測結果のばらつきが、対策工に関わるコスト変動に与える影響を評価するとともに、コスト変動を低減させるために有効な調査の進め方についての検討を実施した (図 4.2-4) <sup>49)~52)</sup>。その結果、以下の知見を得ることができた。

- ・坑道に出現する割れ目情報や水理特性を把握することは重要であり、そのためのパイロットボーリング調査は有効である。
- ・坑道への地下水流入は、坑道近傍のみならず周辺の場からの地下水の供給を受けて発生することから、周辺岩盤中の割れ目の分布や水理特性を把握する必要がある。
- ・周辺岩盤中の割れ目の分布や水理特性を効果的に把握するためには、地表地質調査や物理探査などによって、広い領域を概略的に把握した上で、詳細な情報を必要とする項目を抽出・特定し、それをボーリング調査によって詳細に把握するといった調査手順によって情報量を蓄積することが有効である。

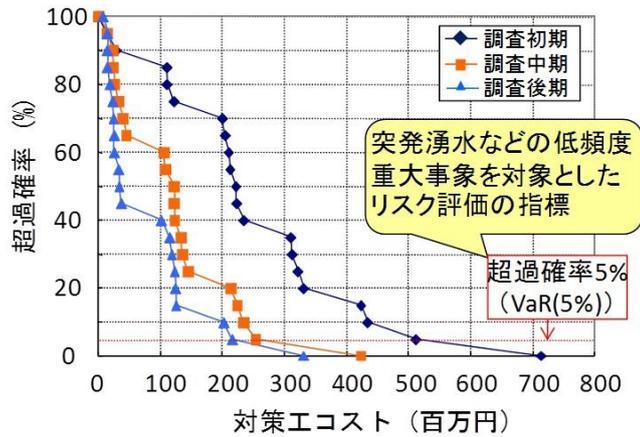


図 4.2-4 対策コストに関わるリスクを示したリスクカーブの例<sup>49)</sup>

(3) 第2段階における結果概要

第2段階の調査研究では、研究坑道の掘削に伴う研究坑道への地下水流入量や地下水圧の変化に関わる情報などを取得するとともに、それらの情報に基づき、岩盤中の水理特性の空間分布を表現した水理地質構造モデルの妥当性確認及び更新を実施した。

1) 地下空洞への地下水流入量の把握

地下水流入量計測は、坑道掘削に伴い発生する坑道内への流入量の深度分布および変化を把握することを目的として実施した<sup>53)</sup>。地下水流入量は、坑道への総流入量と区間流入量として、両立坑沿いの地質・地質構造分布を考慮しつつ、約25m間隔で設置した集水リング（Water Ring；以下、WR）および主要な水平坑道で流入量を計測した。流入量の計測にあたっては、突発的な変化を観測できるように、連続的な自動計測を基本とし、流入量の計測範囲を勘案して流量計の種類を選定した。WRでの区間流入量計測には、付着性異物には弱いのが、立坑の掘削に応じた流入量の増減を想定して、微少流量の測定が可能であり比較的広い測定範囲を有する熱線式流量計を採用した。総流入量および深度100mごとの水平坑道での区間流入量の計測には、熱線式流量計に比べて大流量での測定が可能で、比較的付着性異物に強く測定精度の高い電磁流量計と電磁式水道メーターを用いた。また、流入量が比較的多い換気立坑の深度100～200m区間および深度200m予備ステージの流入量は、大流量の計測に適している超音波式流量計を用いて計測した。なお、WRの流入量については、定期的（月1回）に実施しているWRからの採水時に手計りによる計測も実施した。手計り時の流入量は、1Lの容器が満水になるまでの計測時間から算出した。

図4.2-5に、計測開始から深度500mに両立坑の切羽が到達するまでの、掘削深度に応じた地下水の流入量変化を立坑沿いの地質分布とともに示す<sup>54)</sup>。図中の主立坑の流入量は、主立坑ならびに主立坑に接続する予備ステージおよび水平坑道からの流入量を合算したものである。換気立坑の流入量は、換気立坑ならびに換気立坑に接続する水平坑道からの流入量の合算である。なお、坑道内から実施したボーリング調査および計器の故障などの不具合による流入量変動は、ノイズとして除外してある。流入量計測の結果、各立坑の掘削深度に伴う流入量の増加傾向は異なるものの、深度500mまでの立坑掘削時の流入量は両立坑ともに350m<sup>3</sup>/日程度である。また、両立坑からの流入量変化は、立坑沿いの地質分布との関連性が高いことがわかる。特に、透水性の高い地質である土岐夾炭累層中の砂岩優勢砂岩泥岩互層（以下、高透水層；図中、MS①およびVS①）から基底礫層の区間および土岐花崗岩中の低角度割れ目集中帯（図中、MS②）に坑道切羽が到達

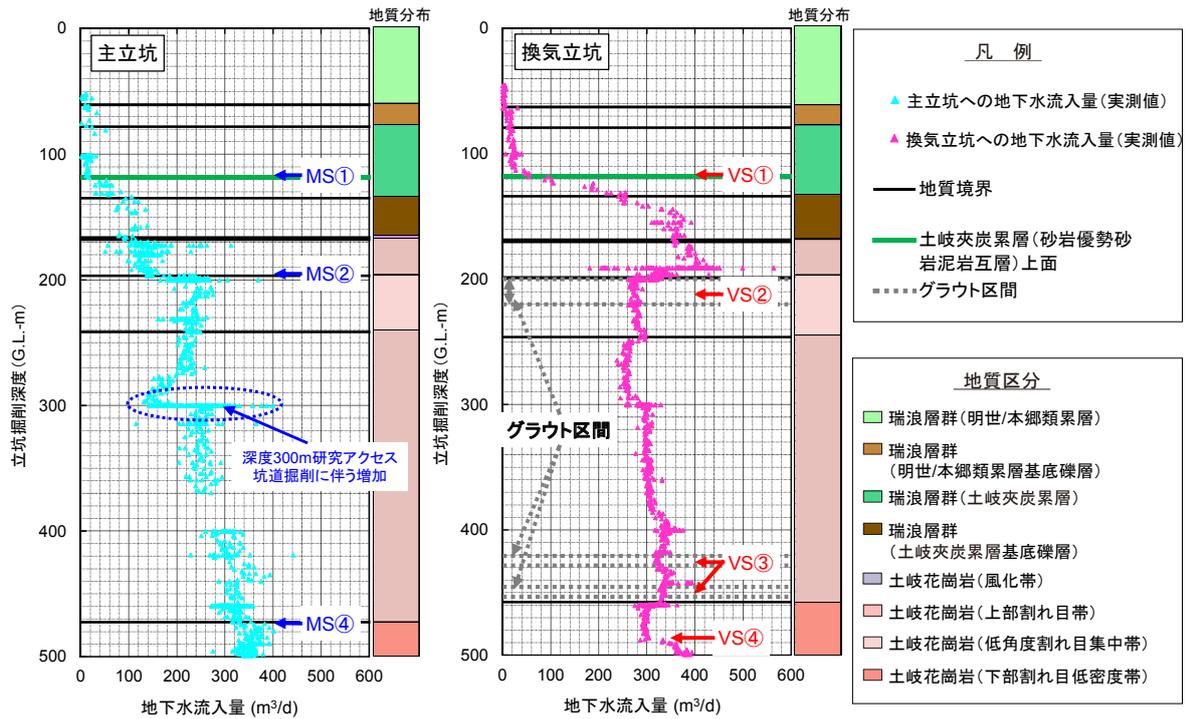


図 4.2-5 立坑への地下水流入量の深度分布（ボーリング調査の影響等を除外）

した際の流入量の増加が顕著である。一方、透水性の高い地質からの湧水量の抑制を目的として実施した換気立坑でのグラウト対象区間<sup>55),56)</sup>（図中、VS②およびVS③）では流入量の増加は確認されていない。また、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震後には、両立坑湧水量の一時的な増加が計測された（図中、MS④およびVS④）。

図 4.2-6 に、2011 年度に計測した両立坑の深度 100～200m における区間流入量を例示する。採水時の手計りの計測結果は信頼性が高いと考えられるため、これを真値として各種流量計の計測結果の信頼性を確認した。両立坑ともに、手計りの 100m 区間流入量と、電磁流量計 (EF4) および超音波式流量計 (UF1) の流入量は概ね一致している。一方、各 WR での熱線式流量計 (TF) の流入量は、地下水に含まれる付着性異物による影響と考えられる計測値異常が頻繁に検出されるとともに、上記 2 種類の流量計に比べて計測値のばらつきが大きく、手計りとの違いが大きい結果となった。このように地下水流入量の計測方法毎の測定結果を比較することにより、流入量に応じてそれぞれの計測方法の適用性が異なることが明らかとなった。また、両立坑の深度 100m～200m においては、透水性の高い土岐夾炭累層基底礫層が分布する深度 170m 付近の WR の区間流入量が卓越しており、図 4.2-5 に示した立坑の掘削深度に伴う流入量の変化と整合している。

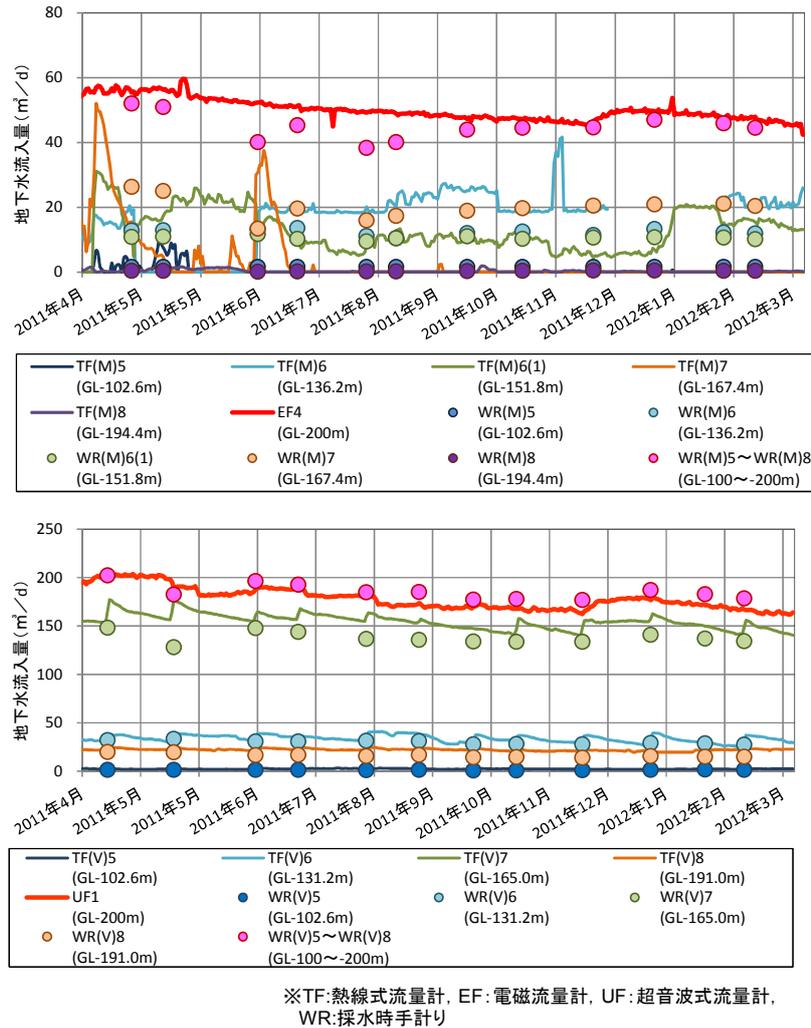


図 4.2-6 区間湧水量の計測結果 (深度 100m~200m)

## 2) 地下水圧観測

地下水圧観測には図 4.2-7 に示す広域地下水流動研究<sup>57)</sup>の一環として地表から掘削されたボーリング孔 (掘削長約 500~1,000m), MIU 計画の第 1 段階で地表から掘削したボーリング孔 (掘削長約 100~1,300m), ならびに図 4.2-8 に示す第 2 段階で坑道から掘削したボーリング孔 (掘削長約 50~100m) を用いた<sup>58),59)</sup>。これらのボーリング孔には, パッカーによる複数区間の地下水圧を計測することのできるモニタリング装置が設置されている。地下水圧観測では, 観測区間の地下水圧を直接観測する直接水圧計測方式と, 観測区間に接続されたピエゾ管内の水位を観測するピエゾ水頭計測方式の 2 種類を採用した。ボーリング孔へのモニタリング装置設置に先立っては, 岩盤の水理特性を把握するためのボーリング孔を利用した単孔式水理試験などの調査<sup>60)</sup>ならびに坑道内から掘削したボーリング孔を揚水孔とした長期揚水試験を実施した<sup>61)</sup>。

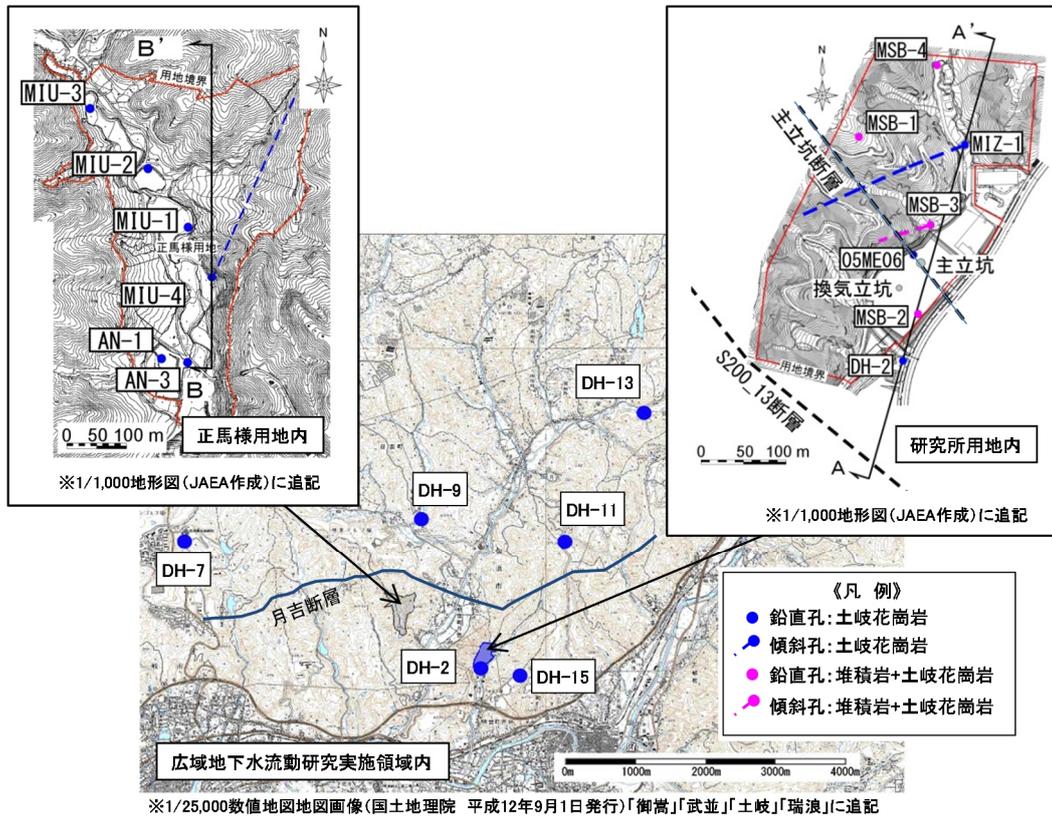


図 4.2-7 地表から掘削したボーリング孔を利用した地下水長期モニタリング位置

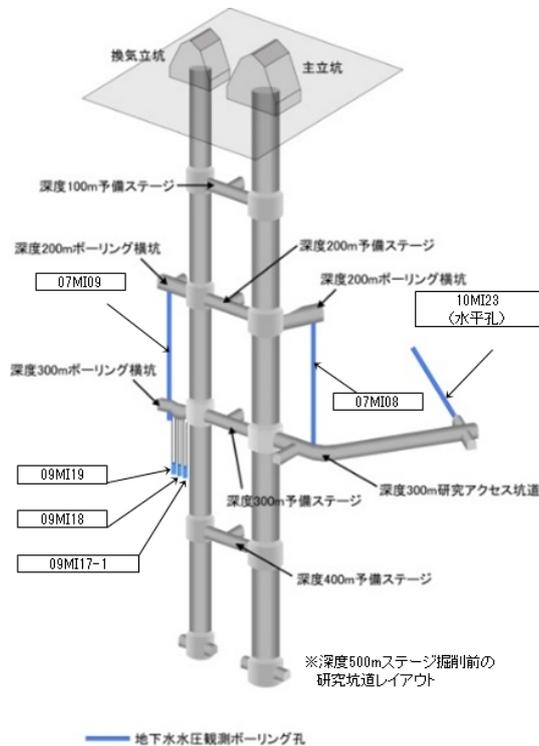


図 4.2-8 研究坑道内の地下水長期モニタリング孔の位置

さらに、地下水流動解析の境界条件設定や、坑道掘削に伴う地下水位変化の有無を確認するための表層水理（気象要素、河川流量、地下水位、土壌水分）観測も継続的に実施した<sup>62)</sup>。地下水圧観測の補間的な調査として傾斜計を用いた岩盤傾斜量観測も実施した<sup>63)</sup>。岩盤傾斜量観測にはナノラジアン（ $10^{-9}$  radian）オーダーの分解能を有する高精度傾斜計を使用した。傾斜計は研究所用地内を横断する主要な断層である主立坑断層の位置関係を考慮して掘削した4本のボーリング孔（掘削長約10m）に配置した。

図4.2-9に、研究所用地周辺における代表的な水圧観測区間と主要な地質構造との位置関係を示す。また、図4.2-10に、坑道掘削が開始された2003年度から2011年度末までの研究所用地周辺の地下水圧変化を示す。なお、MIZ-1ではピエゾ水頭計測方式を採用しているが、観測開始時からスタンドパイプ内での溶存ガスの遊離による異常値が観測されているため<sup>59)</sup>、観測データから異常値を除去した。

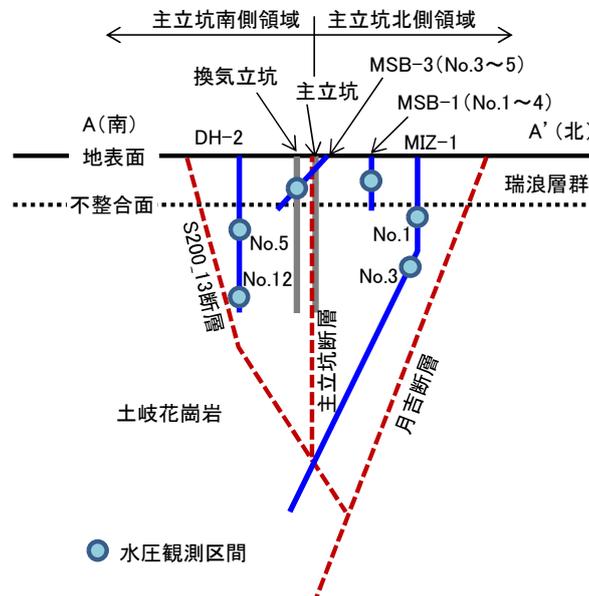


図4.2-9 研究所用地周辺の水圧観測区間と主要な地質構造との位置関係  
(図4.2-7中A-A'断面)

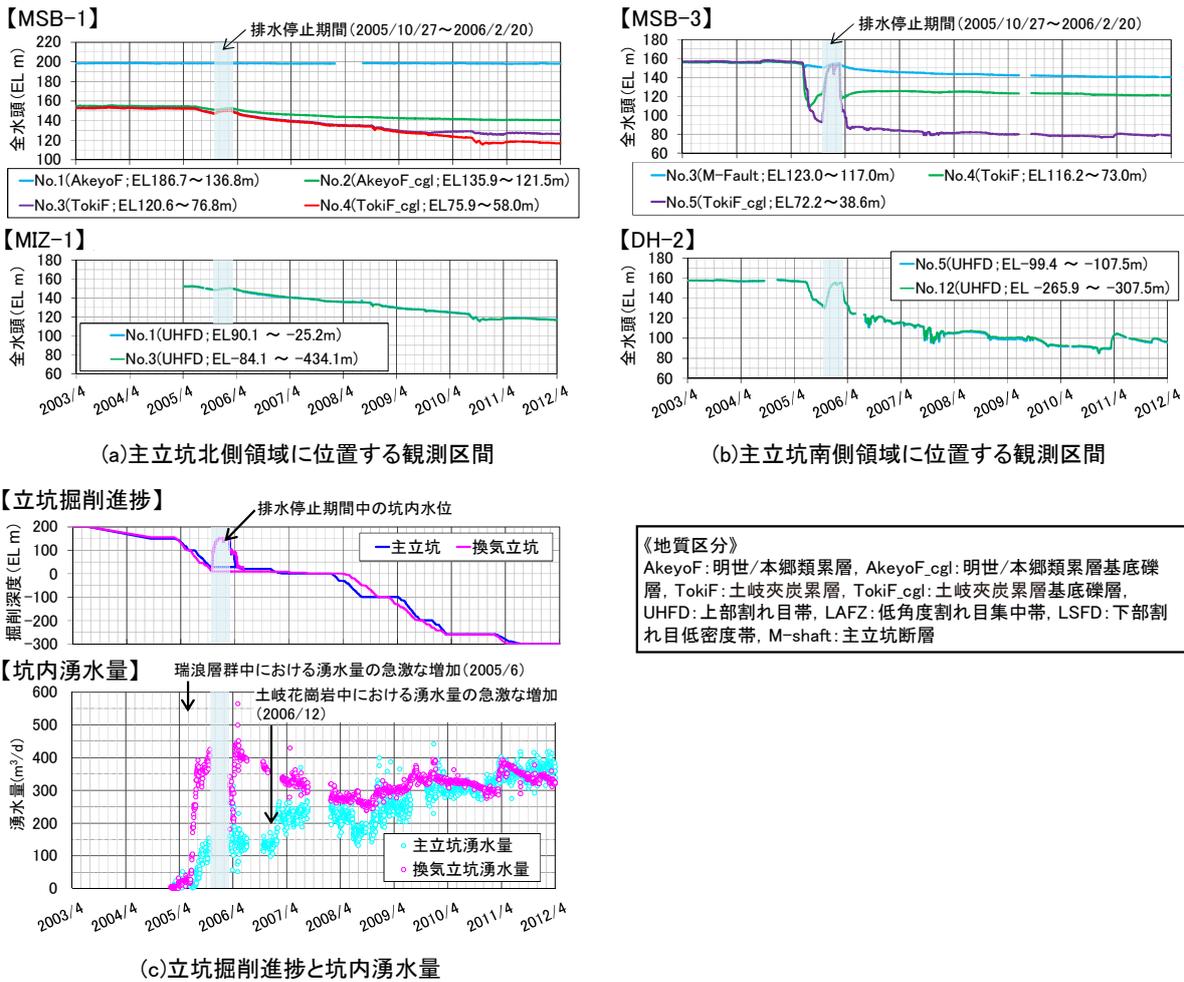


図 4.2-10 研究所用地周辺の地下水圧変化

MSB-1 号孔における観測結果からは、瑞浪層群中の明世/本郷累層の基底礫層付近を境として坑道掘削前の地下水位および坑道掘削に伴う変化が大きく異なっており、明世/本郷累層 (MSB-1\_No.1) では坑道掘削による地下水位の低下は認められない。明世/本郷累層以深では、2005 年 6 月頃から明瞭な地下水圧低下が認められ、坑道への地下水流入量の急激な増加時期 (図 4.1.2-5 中、MS①および VS①) と整合している。河川への放流排水の水質を環境基準で管理するための排水処理設備の増設期間である 2005 年 10 月から 2006 年 2 月にかけては、坑道からの排水を停止しており、研究所用地周辺では坑道掘削前の地下水圧に回復する傾向が見られた。瑞浪層群中の地下水圧の低下傾向や低下量は、観測区間が位置する地層毎に異なっており、立坑切羽が観測区間深度に近づくにつれて地下水圧が急激に低下し、切羽がより深部にいくと低下傾向が緩やかになる。また、主立坑断層を境として水圧低下量が大きく異なっており、2011 年度末で MSB-1 号孔における観測結果は最大約 40m、MSB-3\_No.5 では最大約 80m であり、同断層南側領域のほうが 2 倍程度低下した。主立坑断層を境とした地下水圧低下の違いは、土岐花崗岩でも観測されており、同断層北側に位置する MIZ-1\_No.2 では最大約 40m、同断層南側に位置する DH-2\_No.5 では最大約 90m であり、瑞浪層群中と同様の傾向を示す。さらに、MIZ-1\_No.10 は主立坑断層の南側に位置するものの、DH-2\_No.5 とは大きく異なる水圧変化が観測され、DH-2\_No.5 と MIZ-1\_No.10 の間には S200\_13 断層が分布すると解釈されている<sup>35)</sup>。なお、観測期間においては、2011 年 3 月

11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う地下水圧変化が観測されており、DH-2\_No.5では約20mの水圧上昇が認められる<sup>64)</sup>。この地震に伴う地下水圧変化は、地下水流入量の一時的な増加(図4.2-5中、MS④およびVS④)と整合的である。

図4.2-11に、坑道掘削が開始された2003年度から2011年度末までの正馬様用地(MIU-4号孔)における地下水圧変化と、観測区間と主要な地質構造との位置関係を示す。月吉断層上盤側(南側)に位置するNo.6では、研究所用地周辺において坑道掘削に伴う明瞭な地下水圧の低下が観測される2005年6月以前から緩やかに水圧低下が継続しているものの、坑道掘削開始後にその低下傾向が変動しているため、坑道掘削や湧水量の排水停止などのイベントによる影響と推定され、2013年度末で最大約20mの水圧低下量となる。一方、月吉断層下盤側(北側)に位置するNo.9では、No.6と比べて坑道掘削前の地下水圧が20m程度高く、坑道掘削などに伴う水圧低下も認められない。また、東北地方太平洋沖地震発生後には、No.6では水圧が低下するのに対して、No.9では水圧が上昇しており、月吉断層を境として異なる水圧変化が生じている。その他、月吉断層下盤側に位置する地下水圧観測孔(DH-9号孔、DH-11号孔およびDH-13号孔)においては、坑道掘削に伴う明瞭な変化は認められていない。また、これらの観測を通じて、地下水圧観測データから、地球潮汐や気圧変動、地震に伴う水圧変動などの成分を除去し、坑道掘削に伴う水圧変化を同定するデータ処理方法を構築した(図4.2-12)。

表層部の自由地下水の水位は、主に降水量に同期した変動を示しており、坑道掘削の影響による水位低下は生じていないことが明らかとなった(図4.2-13)。

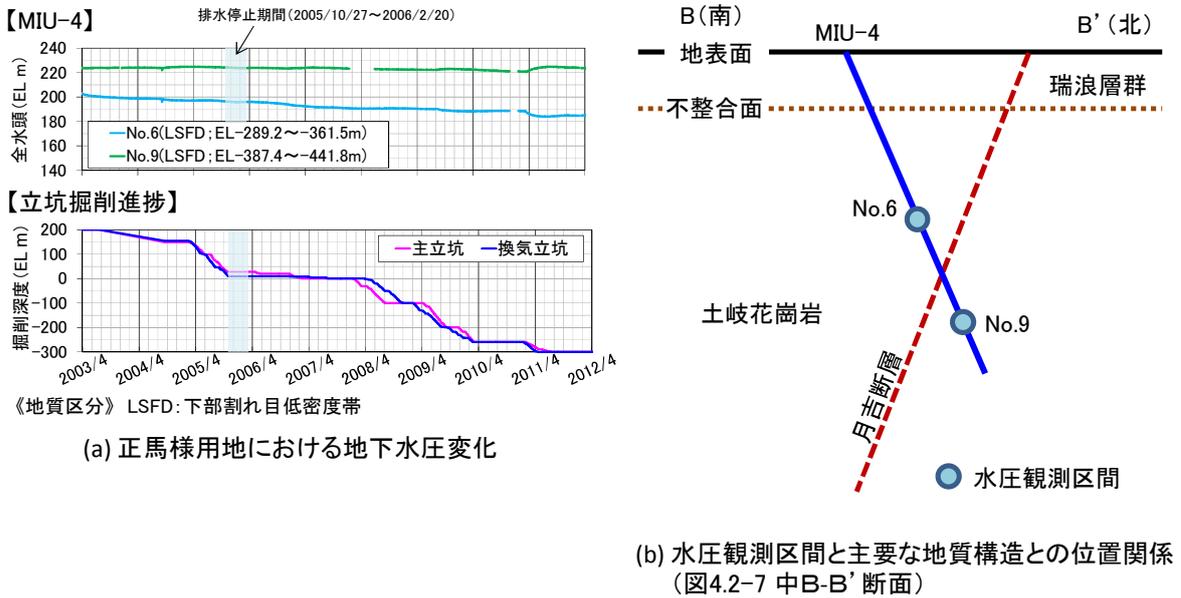


図4.2-11 正馬様用地(MIU-4号孔)における地下水圧変化

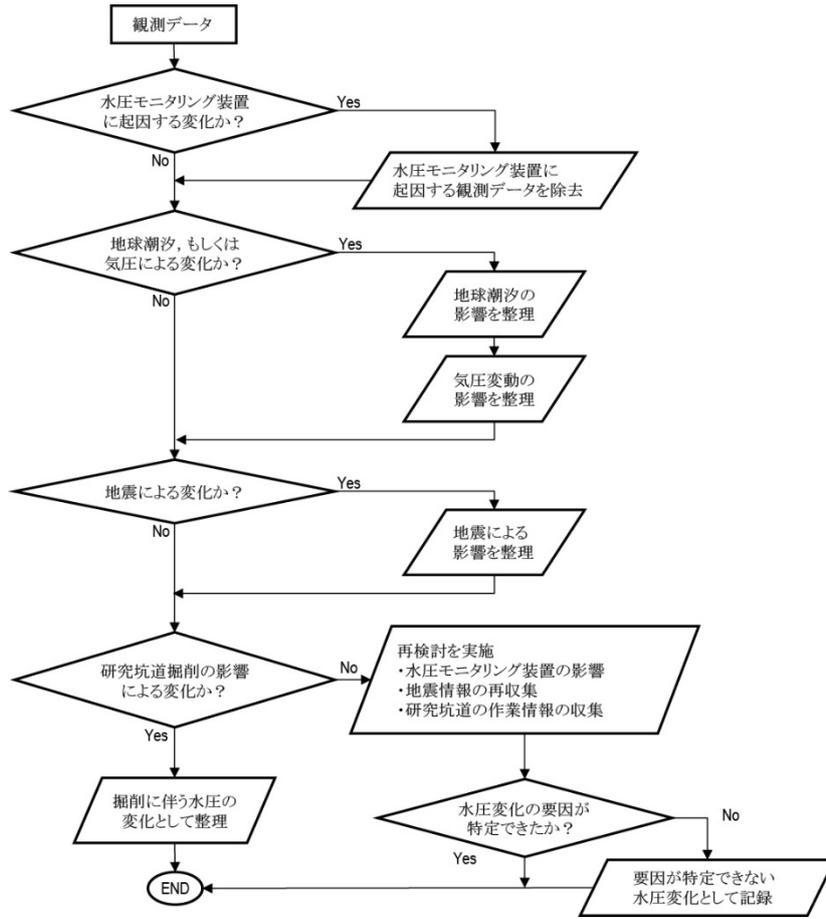


図 4.2-12 水圧変化を同定するデータ処理方法

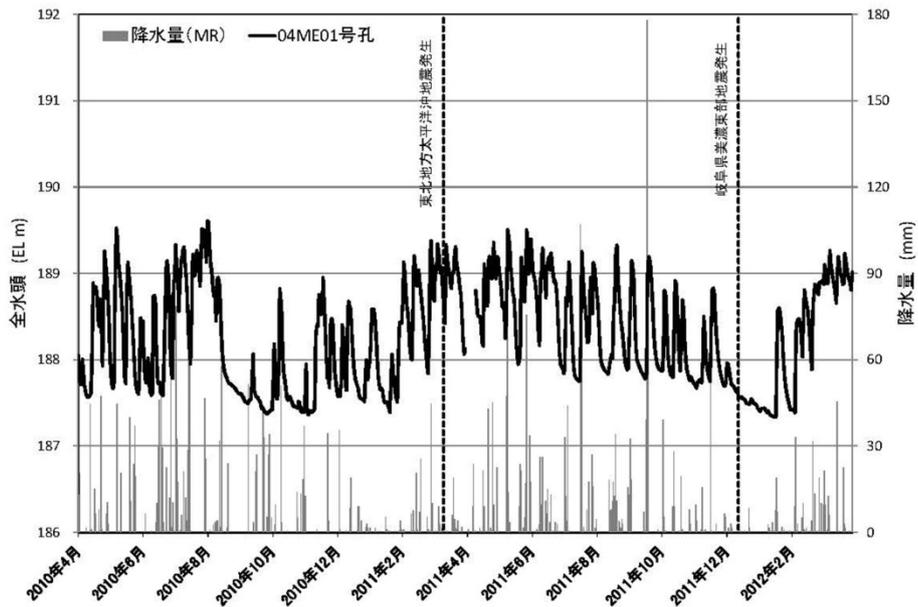


図 4.2-13 表層部の自由地下水位の変化

岩盤傾斜量観測では、掘削期間中は立坑に向かう方向に地表傾斜が大きくなり、排水停止期間中は地表傾斜が小さくなるものの、排水再開とともに再び立坑方向に地表傾斜が増加する変化が見られる(図 4.2-14)。図 4.2-10 に示したように、立坑内水位に同期して研究所用地周辺の地下水圧も回復・低下しており、地表の傾斜方向の変化時期と整合している。

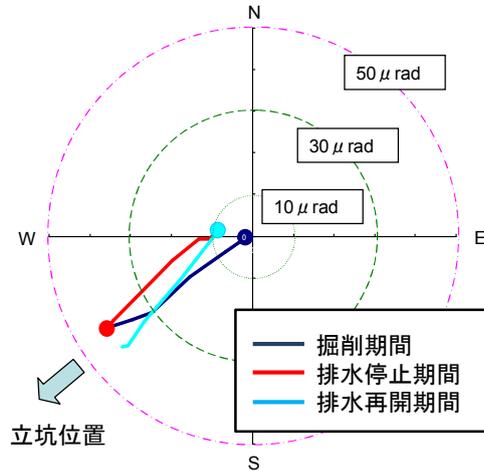


図 4.1.2-14 地表傾斜量観測結果 (04ME03 号孔)

坑道周辺数メートル程度の領域に形成されるスキン効果(人工構造物による地下水流入量の抑制や EDZ の形成による地下水流入量の増加などの水理学的影響, グラウトなど)に関わる情報を取得するために、立坑掘削の進展に伴う立坑近傍の水平方向の地下水圧変化に着目し、深度 300m の坑道内から換気立坑壁面から 3m ごとに鉛直に掘削した観測孔(09MI17-1 号孔, 09MI18 号孔および 09MI19 号孔)において地下水圧計測を実施した<sup>53)</sup>。その結果、地下水圧分布は、図 4.2-15 に示すように換気立坑掘削の進展とともに低下しているものの、立坑切羽が深度-500m(標高-300m)到達時においても、換気立坑壁面から数 m の位置では立坑切羽深度に対して約 300m の水圧差を維持していることが確認された。このことから、立坑近傍でスキン効果が発生しているとともに、その影響により急激な水圧低下が生じていることが明らかとなった。

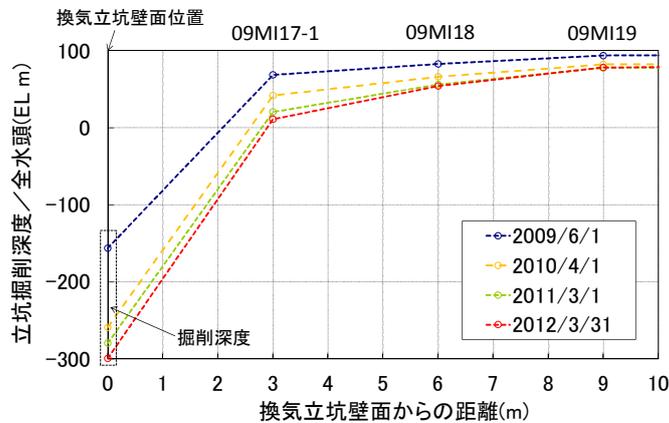


図 4.2-15 換気立坑近傍の地下水圧分布

また、地下水流入量の予測精度を向上させることを目的として、研究坑道の掘削に際しては、研究坑道においてパイロットボーリング調査を行い、その結果に基づき、必要に応じて地下水流入量を抑制するためのグラウチングを施工した<sup>22),55),65)</sup>。パイロットボーリング調査の結果、地下水流入抑制対策を実施する上で重要な地下水流入箇所を特定することができるとともに、地下水流入箇所の地質学的特徴や水理特性を把握することができた。また、グラウチングの施工により、地下水流入量を予測結果と比較して大幅に低減させることができた。

### 3) 水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析

#### ① 水理地質構造モデル（ローカルスケール）の更新

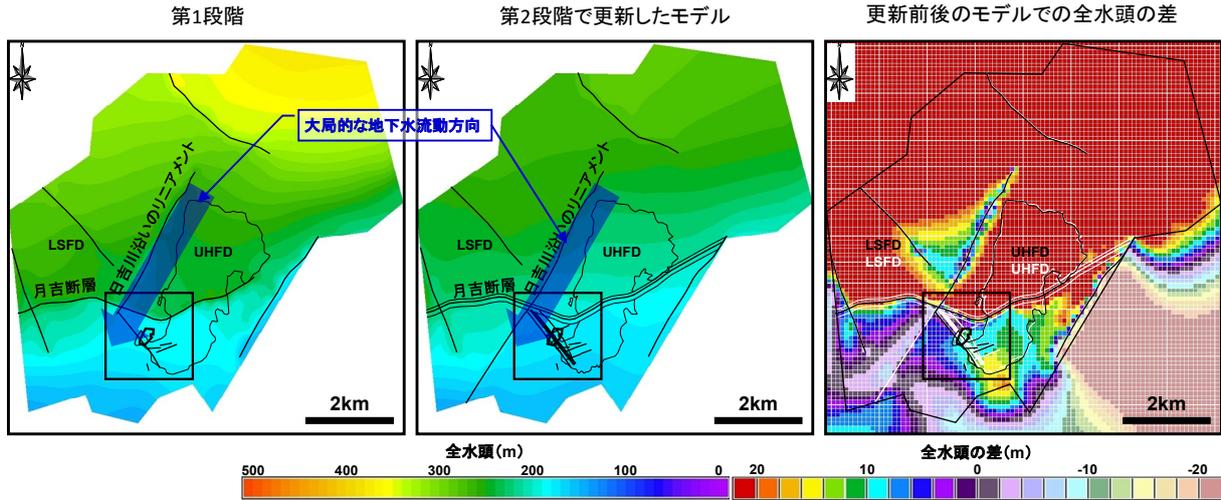
研究坑道周辺に位置するボーリング孔における坑道掘削前の水頭値は、研究所用地から南側に1.5km程度離れ、かつ標高が50m程度低い位置を流れる河川の水位と同様であることが確認されている。しかしながら、第1段階でのサイトスケールの水理地質構造モデルを包含するローカルスケールモデルを用いた地下水流動解析では、この低水頭分布を示す領域での解析値と実測値の差が、他の領域より大きかった<sup>66)</sup>。そこで、以下に示す点に着目した水理地質構造モデルや解析条件の更新を実施し、水頭分布の再現性を向上させることができた。

- ・ 月吉断層を含む数 km 程度の長さを有すると想定される大規模不連続構造の長さや水理特性
- ・ 研究坑道周辺から河川まで連続する水理地質構造要素の水理特性
- ・ 地下水涵養量
- ・ 地下水の分水界と考えられる河川部の側方境界条件

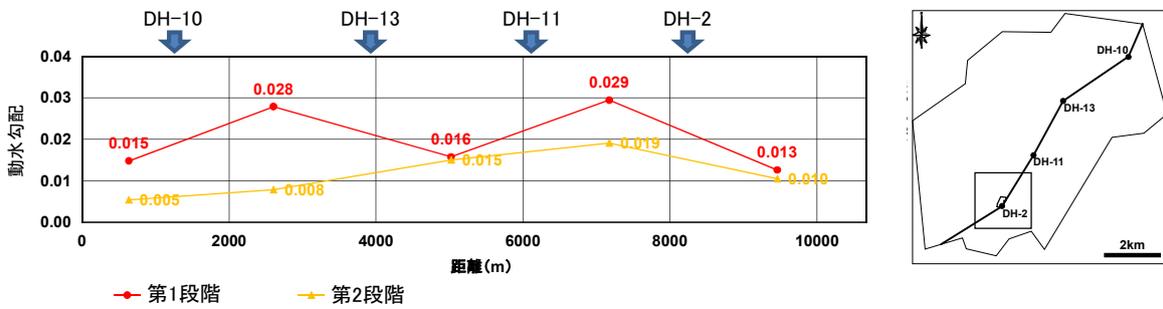
更新した水理地質構造モデルおよび解析条件を用いた地下水流動解析によって全水頭分布や動水勾配分布を推定し、第1段階での推定結果との比較を行い、地表からの調査で構築した水理地質構造モデルや解析条件の妥当性を評価した（図4.2-16）。その結果、大局的な地下水の流動方向や動水勾配分布は大きな相違がなく、第1段階の調査結果が妥当であることが確認できた。

#### ③ 水理地質構造モデル（サイトスケール）の更新

研究坑道への地下水流入量計測結果や地下水圧観測結果に基づき、研究所用地周辺の水理地質構造の概念化を実施した（図4.2-17）。瑞浪層群中の明世／本郷累層では坑道掘削による地下水位の変化が観測されていないことから、第1段階で確認されていた明世／本郷累層の基底礫層付近に分布する低透水性を有する泥岩層が広範囲に連続しており<sup>66)</sup>、深度500mの研究坑道掘削による大規模な水理学的影響に対しても遮水層の役割を果たす水理地質構造として機能している。各観測区間の地下水圧変化の不均質性から、研究所用地周辺は断層などの低透水性構造によって囲まれた領域（以下、水理学的コンパートメント領域）が複数形成されていると推定される。単孔式水理試験結果<sup>60)</sup>からは、水理学的コンパートメント領域を形成する水理地質構造としては、月吉断層、主立坑断層およびS200\_13断層が挙げられる。このうち主立坑断層については、断層沿いに厚さ40m程度を有する低透水性領域が形成されていると推定されており<sup>55)</sup>、瑞浪層群掘削中の両立坑における湧水の増加傾向が大きく異なることから、主立坑断層の低透水性領域は土岐夾炭累層の高透水層および基底礫層から地下深部まで連続していると考えられる。また、研究坑道掘削に伴う湧水量の顕著な増加が認められる深度から、土岐夾炭累層の高透水層および基底礫層、および花崗岩中の低角度割れ目集中帯が主要な帯水層として機能していることが推定される。さらに、図4.2-10に示したMIZ-1号孔およびDH-2号孔での地下水圧変化に見られるように、深度



(a)水頭分布(標高-300mの水平断面)



(b)動水勾配分布(標高-300m)

図 4.2-16 第1段階と第2段階のローカールスケールの水理地質構造モデルを用いた地下水流動解析結果の比較

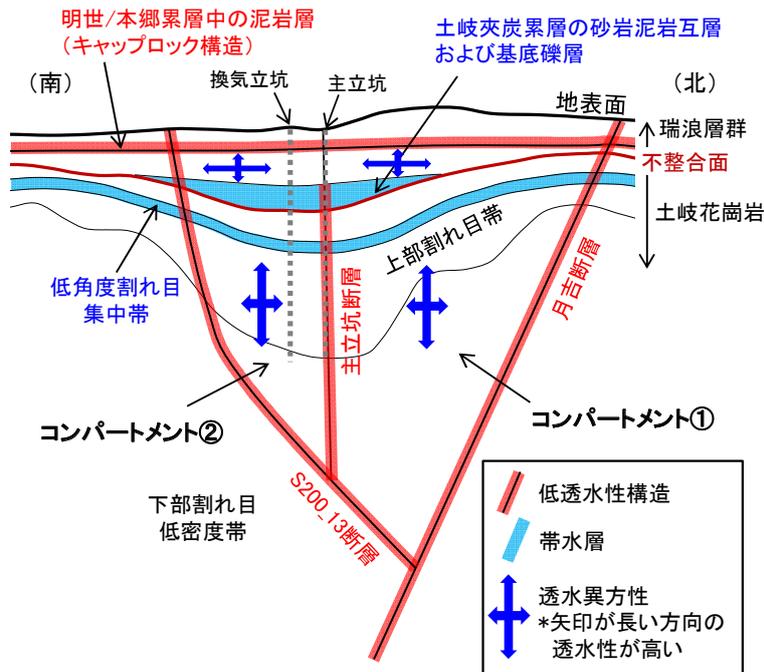


図 4.2-17 研究所用地周辺の水理地質構造の概念モデル

が大きく異なる観測区間で同様の値で変化していることから、花崗岩中に分布する高角度の亀裂の影響で、水平方向に比べて鉛直方向の透水性が高い透水異方性を有していると考えられる。

以上の水理地質構造の概念モデルに基づき、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を更新した。図4.2-18に、水理地質構造モデル更新の考え方を示す。具体的には、不確実性の大きい水理特性のキャリブレーションによる水理地質構造モデルの更新と、そのモデルを用いた地下水流動解析による地下水流入量や水圧応答の再現性確認を繰り返し実施することにより、地下水流入量や水圧応答といった異なる調査データを総合的に再現できる水理地質構造モデルを構築するものである。この考え方をを用いて水理地質構造モデルの更新を行った結果、地下水流入量の変化や水圧応答に関わる実測データを総合的に再現することができた(図4.2-19, 図4.2-20)。このことから、図4.2-18に示した水理地質構造モデル更新の考え方は妥当であり、汎用性を有していることが確認できた。また、水理地質構造モデルの更新が地下水流動解析結果に与える影響を検討した結果、平均的な地下水の流動方向や動水勾配分布、流束分布はモデルの更新前後で同様であった(図4.2-21)。さらに、第1段階から深度500mまでの第2段階までの調査の進展に伴い、水頭分布の実測値と解析値の差を低減させることができた。なお、調査では、地下水流動解析結果に与える影響の大きい不確実性要因を優先的に調査するという考え方を適用しており、このような調査・解析・評価の考え方の有効性を確認することができた。更新した水理地質構造モデルを用いて、研究坑道掘削に伴う塩化物イオン濃度の変化に着目した移流分散解析を実施し、水圧応答のみならず、塩化物イオン濃度の変化傾向を概括的に再現することができた(図4.2-22)<sup>67)</sup>。

加えて、第2段階においては、坑道内からのボーリング孔を利用した調査によって取得した割れ目の分布特性や水理特性のデータセットを用いてブロックスケールの水理地質構造モデルを更新した<sup>68)</sup>。また、第1段階と第2段階における各モデル入力パラメータの設定方法の違いや、第1段階から第2段階で変更した理由を整理した(表4.2-1)。

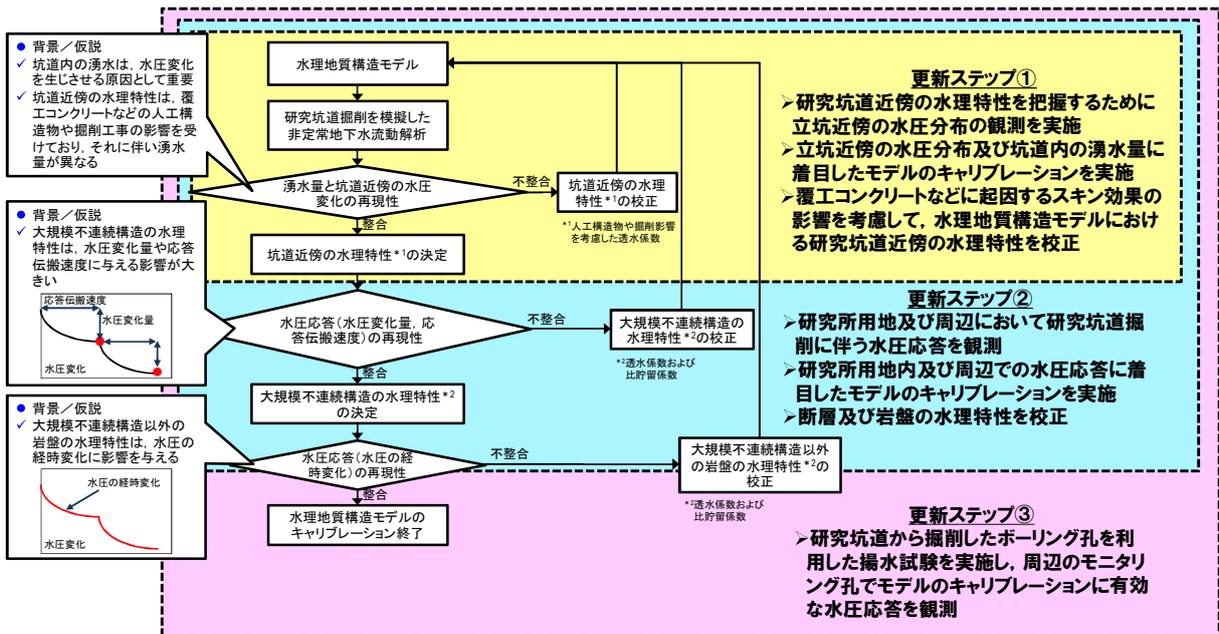


図 4.2-18 水理地質構造モデル更新の考え方

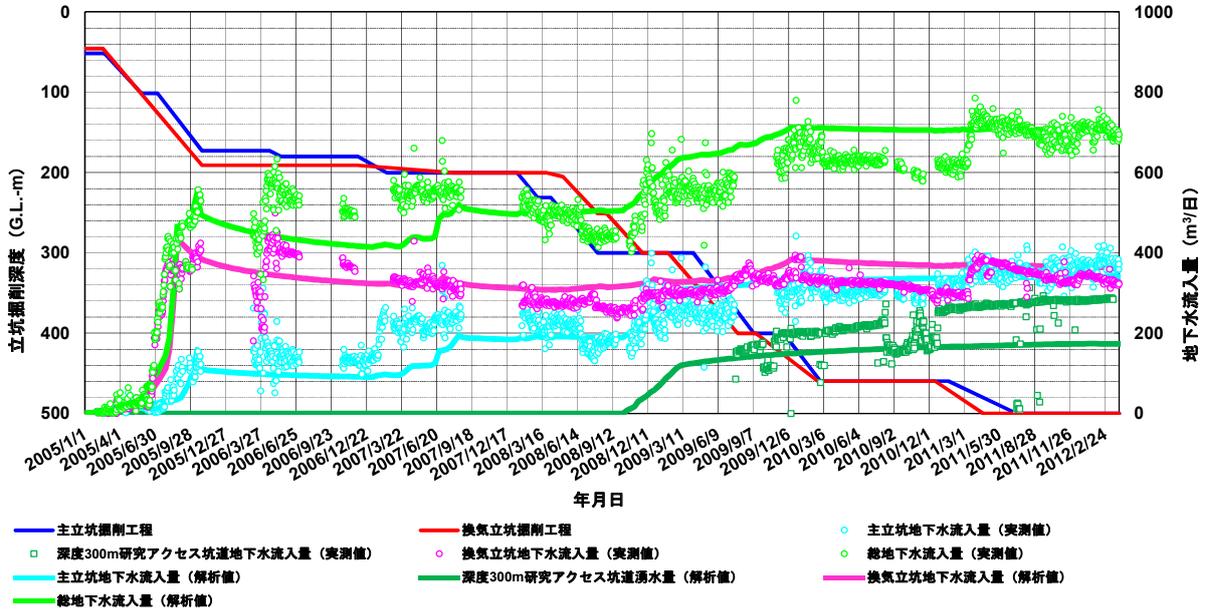


図 4.2-19 地下水流入量の実測値と更新したモデルによる解析値の比較

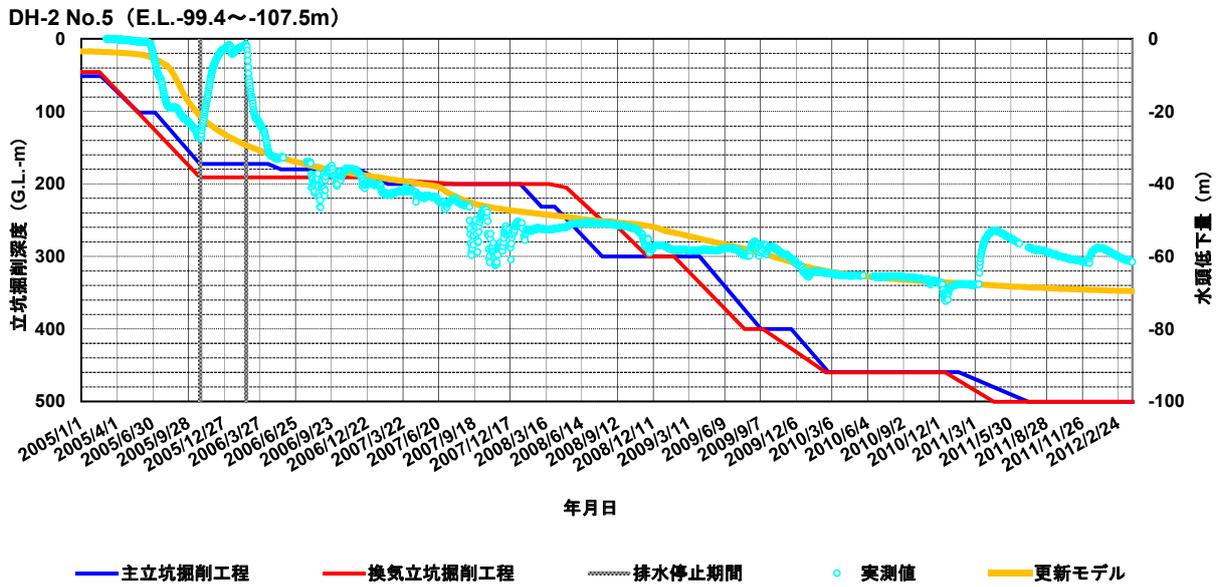


図 4.2-20 地下水圧変化の実測値と更新したモデルによる解析値の比較

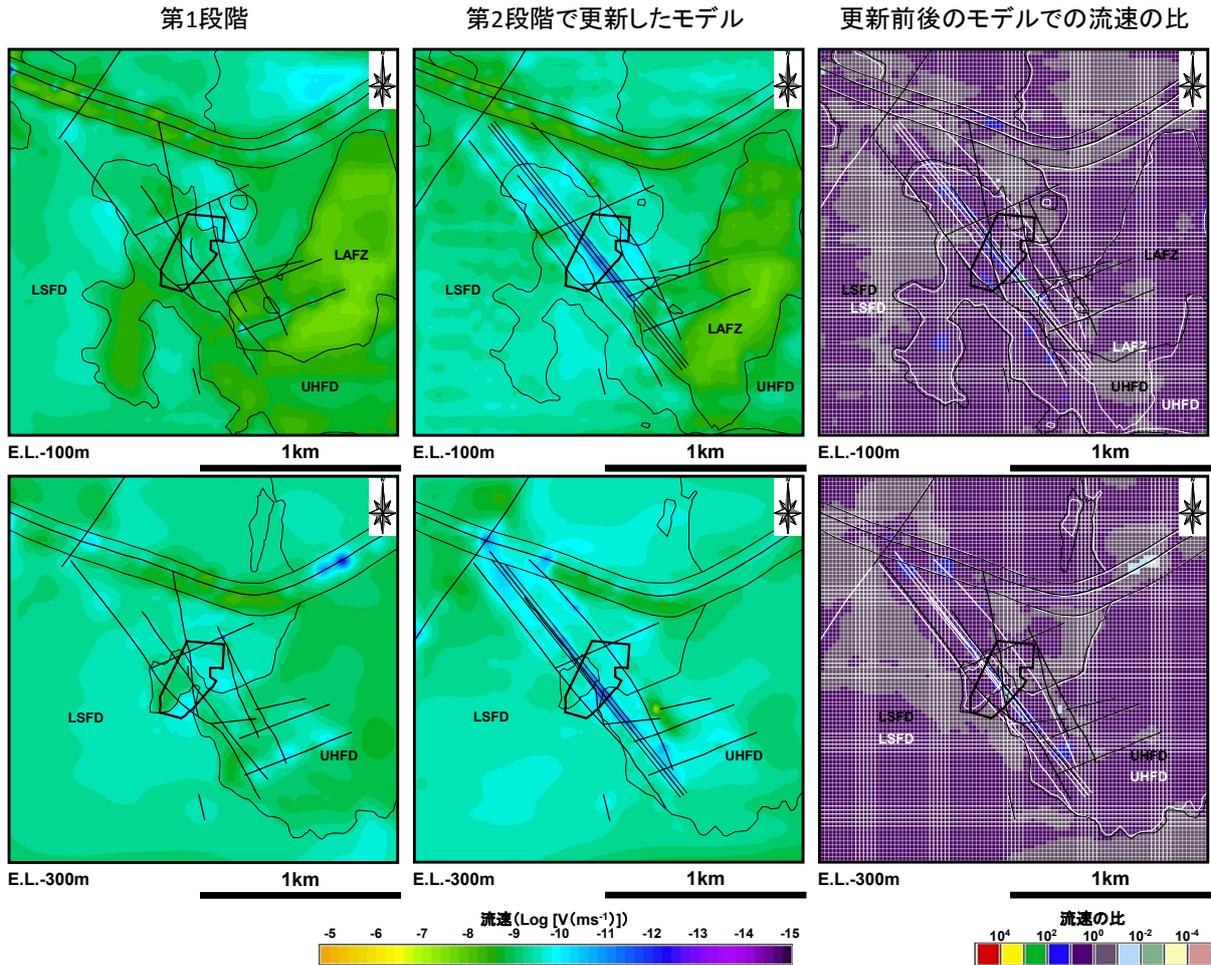


図 4.2-21 第 1 段階と第 2 段階のサイトスケールの水理地質構造モデルを用いた地下水流動解析結果の比較

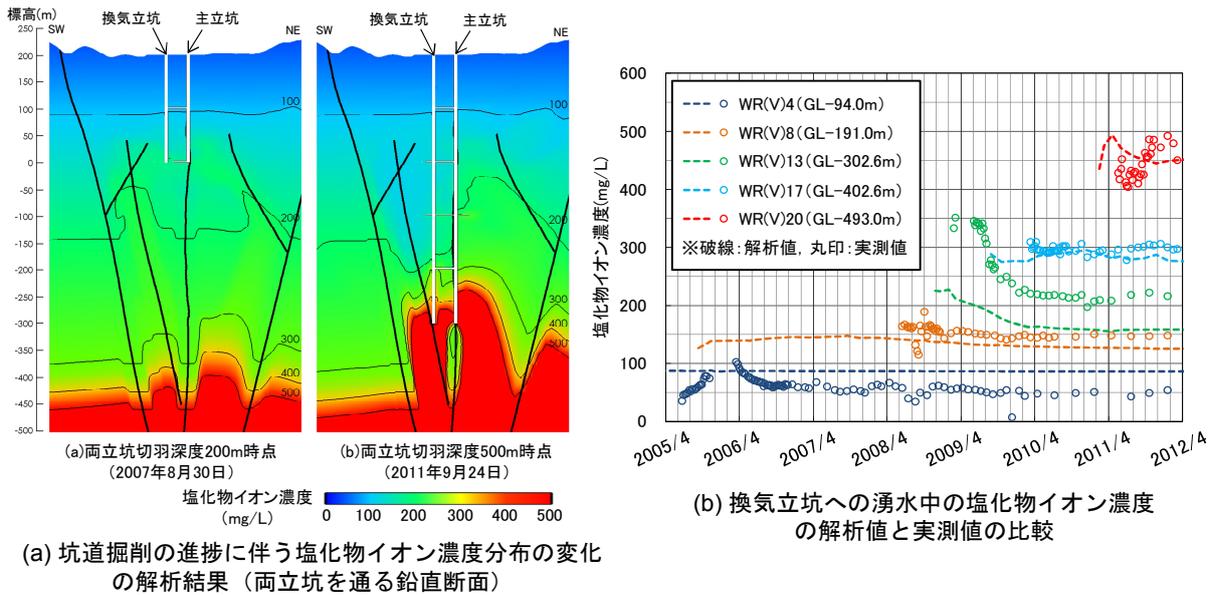


図 4.2-22 研究坑道掘削に伴う塩化物イオン濃度の変化に着目した移流分散解析結果

表 4.2-1 各モデル入力パラメータの設定方法

パラメータ	第1段階	第1段階+第2段階	変更した理由
割れ目卓越方位分布	地表からのボーリング孔の BTV 観察結果に基づく、クラスター解析による卓越方位セット(方位, 傾斜, フィッシャー係数)を設定	坑内からのボーリング孔の BTV 観察結果に基づく、クラスター解析による卓越方位セット(方位, 傾斜, フィッシャー係数)を設定	パラメータの算出方法の変更はなし。 ただし, 様々な方向性を有するボーリング調査により, サンプリングバイアスの小さいパラメータ算出用データセットを作成することができた。
割れ目長さ分布	べき乗分布を仮定したパラメータを設定 <ul style="list-style-type: none"> <li>割れ目最小長さ(L0): 露頭観察結果に基づき設定</li> <li>割れ目最大長さ(Lmax): リニアメント解析結果に基づく長さ 3km 以上の不連続構造</li> <li>べき乗数(kr): 割れ目長さの頻度分布により設定</li> </ul>	べき乗分布を仮定したパラメータを設定 <ul style="list-style-type: none"> <li>割れ目最小長さ(L0): ボーリング孔径</li> <li>割れ目最大長さ(Lmax): 地質構造モデルで表現された長さ 1km 以上の不連続構造分布に基づき設定</li> <li>べき乗数(kr): 割れ目密度と長さ分布の関係式(Follin et. al., 2007<sup>69</sup>)により設定</li> </ul>	坑内からのボーリング調査により, BTV 観察による割れ目密度データが増加したことから, 割れ目の密度に基づく割れ目長さの推定方法を適用することとした。
割れ目密度分布	BTV 観察結果による割れ目の一次元密度の実測値をモデル上で再現できるように三次元密度を設定	BTV 観察結果による割れ目の一次元密度から Wang (2005) <sup>70</sup> に基づき三次元密度を算出	坑内からのボーリング調査により, BTV 観察による割れ目密度データが増加したことから, 割れ目の一次元密度から三次元密度を推定することとした。
透水量係数分布	単孔式水理試験で得られた区間透水量係数を, 抽出した割れ目の本数で除すことにより各割れ目の透水量係数を算定し, 対数正規分布を仮定してモデル上の対数平均値及び標準偏差を設定	電気伝導度検層時の比湧水量の頻度分布と合計値をモデル上で再現するための対数平均値及び標準偏差を設定	単孔式水理試験は, 高透水性区間の水理特性を把握することを目的として試験区間設定を行われていることによるサンプリングバイアスがあると考えられることから, 検討から除外することとした。

(4) 汎用的知見

地下水の流動特性を把握するための個別技術や, 調査・解析・評価技術に関わる汎用的な技術的知見を以下にまとめる。

- ・面的に調査できる手法を適用して, 広域地下水流動系に影響を及ぼしている大規模な不連続構造を概略的に把握・概念モデル化した上で, 詳細な情報を必要とする項目を抽出し, それらをボ

- ーリング調査などにより更に精緻化する（モデルの更新を含む）といった手順が有効である。
- ・調査を展開する際には、当該時点において地下水流動解析結果に与える影響の大きい不確実性要因を優先的に調査することが合理的である。
  - ・地下水の主流動方向とほぼ直交し遮水性を有する断層部においては、その上流側と下流側で異なる水頭分布を示し、このような水理特性を有する断層で挟まれた領域（水理学的コンパートメント）の動水勾配は小さくなる傾向である。
  - ・水理地質学的コンパートメント毎に観測孔を配置し、揚水試験や坑道掘削などに伴う地下水圧応答を観測することによって、水理地質構造の連続性や水理学的コンパートメントを形成している水理地質構造の水理特性を把握することが可能である。
  - ・パイロットボーリング調査をすることによって、地下水流入量や流入地点の予測精度が向上することを確認した。坑道掘削中の湧水量や水圧の変化を用いて水理特性の不均質性を評価するためには、坑道への総湧水量のみならず、水理地質構造区分を考慮した区間湧水量の変化を測定することが有効である。
  - ・スキン効果（人工構造物やグラウト、亀裂の透水性変化など）が地下水流入量に影響を与えていることを把握した。
  - ・モニタリング装置の機器選定や維持管理に資することを目的に、適用したそれぞれのモニタリング装置について設置時、観測中の考慮事項を整理した（表 4.2-2）
  - ・岩盤傾斜量観測は水圧変化の面的な分布を把握することが可能であり、これらを用いて水圧観測孔での測定結果を補間することが可能である。
  - ・坑道掘削に伴い実施した水理関連モニタリングから得られた個別の情報を組み合わせて総合的な解釈することで、水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析を実施するための基盤となる水理地質構造の概念化が可能である。

表 4.2-2 モニタリング装置に関わる設置時、観測中の考慮事項

観測方式		直接水頭観測方式	ピエゾ水頭観測方式		
機器名称		MP	PIEZO	SPMP	
MIU計画及び広域地下水流動研究における設置孔		AN-1号孔, MIU-2~4号孔, MSB-1~4号孔, 05ME06号孔, 07MI08号孔, DH-2, 7, 9, 11, 13号孔	07MI09号孔	MIZ-1号孔, DH-15号孔	
観測方法の概要		多連バッカーによりボーリング孔内を複数の区間に分離			
		バッカーで閉鎖された区間に水圧計を設置し、閉鎖区間内の水圧を計測する方式	バッカーで閉鎖された区間からピエゾ管を立ち上げ、管内の水位を計測する方式		
設置時の考慮事項	観測区間数・区間長の設定	<ul style="list-style-type: none"> <li>区間数: 最大30区間程度</li> <li>区間長: 任意に設定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>区間数: 任意(但し、ボーリング孔径に依存) 1)</li> <li>区間長: 任意に設定</li> </ul>		
	測定範囲、精度の設定	<ul style="list-style-type: none"> <li>測定範囲: 水圧計の測定範囲に依存(深度が深いほど広レンジが必要)</li> <li>測定精度: 区間深度に依存2)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>測定範囲: ピエゾ管長さに依存(水圧低下に対して)</li> <li>測定精度: 区間深度に依存せず3)</li> </ul>		
	地下水環境条件への適合	自噴区間に対する特別な対応は必要なし(但し、水圧計の測定範囲は考慮)	自噴区間に対しては閉鎖環境での測定機構が必要(特に地上からの場合)		
観測中の考慮事項	電源供給方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>電気をバッテリーから供給している場合は、バッテリーが劣化してきた際、バッテリーの交換が必要</li> <li>いずれの装置も消費電流が小さく、装置の違いによるバッテリー劣化速度に大きな差はない</li> <li>電気を外部から供給している場合は、停電作業に伴い、観測の停止および再起動が必要</li> <li>高台や周囲に何も無い場所に設置した場合は、稀に落雷(誘導雷)の影響有り</li> </ul>			
	データ回収方法	通信機器を用いて、現場から事務所へデータ転送可能			
	地下水環境条件への適合方法	遊離ガスがデータ品質に与える影響小	遊離ガスがデータ品質に与える影響大 →SPMPは、各観測地点(深度)からポリアミドチューブ(内径4mm)を通してピエゾ管(内径16.5mmのスタンドパイプ)に接続されており、ポリアミドチューブが遊離ガスで閉塞している可能性がある。一方、PIEZO(ピエゾ管の内径6mm)はSPMPに比べて遊離ガスの影響が小さい。したがって、遊離ガスの影響が小さくするためには、内径を6mm以上にすれば良いと考えられる。		
	メンテナンス頻度	<ul style="list-style-type: none"> <li>1回/週: 現地状況確認</li> <li>1回/年: メーカ点検</li> <li>1回/3年: プローブ(水圧センサー)の交換</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1回/週: 現地状況確認</li> <li>1回/月: データロガーの内部時計の時刻合わせ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1回/週: 現地状況確認および観測管内の気泡除去(窒素ガスによるエアラフト)</li> </ul>	
	発生した故障内容(→対処方法)	<ul style="list-style-type: none"> <li>データロガー、プローブ(水圧センサー)、ストリングス(ケーブル): 経年劣化(絶縁抵抗の低下)による故障</li> <li>プローブ(水圧センサー)とストリングス(ケーブル)との接続部分: バックキンの経年劣化による漏水の影響による故障</li> <li>データロガー、プローブ(水圧センサー): 過電流、過電圧による故障(地上の場合は落雷(誘導雷)、坑内の場合は漏電により発生)</li> </ul> →データロガーは、接続されている電源ケーブルの抜き差しで修復する場合有り。	<ul style="list-style-type: none"> <li>水圧センサー: 経年劣化(絶縁抵抗の低下)による故障</li> <li>データロガー、水圧センサー: 過電流、過電圧による故障(地上の場合は落雷(誘導雷)、坑内の場合は漏電により発生)</li> </ul> →水圧センサーが故障した場合、管頭に水圧センサーが設置している場合は、交換が可能。ただし、自噴する場合は管頭にかかる水圧を止める必要有り。	<ul style="list-style-type: none"> <li>水圧センサー: 経年劣化(絶縁抵抗の低下)による故障</li> </ul> →水圧センサーが故障した場合、水圧センサーはスタンドパイプ内にあり、引き上げて交換することが可能。ただし、自噴する場合は管頭にかかる水圧を止める必要有り。	

- 1) 観測区間数×ピエゾ管径が確保可能な装置径が必要なため、区間数が多い場合は装置径が大きくなる。これに伴い、多数の観測区間数を確保するためには大口径ボーリング孔が必要となる。
- 2) 観測深度が深いほど、水圧計の測定範囲(Fs)を広く取る必要がある。一般的に、水圧計の精度や分解能はFsに対する割合で定められるため、Fsが広くなると精度、分解能は粗くなる。
- 3) センサーの測定範囲はピエゾ管内での水圧計の被り水位の設定により決まるため、観測区間の水圧に関係なく水圧計の測定範囲を小さくすることが出来る。これに伴い、高精度、高分解能が確保可能である。

### 4.3 地下水の地球化学特性の把握

#### (1) 目標

地下深部での人工バリアの性能や物質移動に関与する重要なパラメータとして、地下水の水質、pH、酸化還元状態（酸化還元電位）が挙げられ、地表からの調査によりこれらの3次元分布を把握する技術を構築することを第1段階の調査研究の目標とした。一方で、数十年～百年にわたる地層処分場の建設・操業フェーズでは、事前に地表からの調査結果に基づいて推察した地質環境特性が、建設・操業に伴う力学的、水理的、化学的擾乱により変化する。このため、第2段階では、深地層の研究施設のような実際の大規模地下空洞周辺において、経時的な地球化学変化や関連するプロセスを観測・解析することで、地下調査施設の建設・操業に関わる地球化学特性の変化について基礎的な知見を得るとともに、関連する調査技術（モニタリング技術など）を構築することを目標とした。

#### (2) 第1段階における結果概要

研究所用地の堆積岩に対して2本（MSB-2、4号孔：深度100～200m）、花崗岩に対して1本のボーリング孔（MIZ-1号孔：深度約1,200m）を掘削し、地下水の採水・分析を行った。また、広域地下水流動研究で掘削された複数のボーリング孔<sup>71)</sup>の調査結果を参照し、研究坑道掘削前の地下水の水質分布やその形成機構に関わる調査研究を行った。その結果、地下水の水質分布、形成過程に関して図4.3-1に示す概念モデルを構築した<sup>72)</sup>。

これらの水質分布については、第2段階の深度500mまでの研究坑道掘削時に得られる地下水データを利用して妥当性を確認した。

第1段階で利用した地表からの調査技術については三枝ほか（2007）<sup>16)</sup>に取りまとめた。重要な点として、特定の地質構造（涵養域と流出域の間にある月吉断層、研究所用地の瑞浪層群中の低透水層、研究所用地周辺の花崗岩の上部割れ目帯／下部割れ目低密度帯など）を境にして地下水の水質・塩分濃度分布が異なることが確認された。地表から地球化学特性の調査を行う場合は、このような地質構造の三次元分布を踏まえてボーリング孔の配置を検討することが不可欠である。地下水の物理化学パラメータ（pH、酸化還元電位）については、深度約1,200mまでの地下水について、中性から弱アルカリ性のpHであること、酸化還元電位が0mV付近から-400mV付近の弱還元～強還元状態にあることを明らかにした<sup>16),73),74)</sup>。地表からのボーリング調査においては、ボーリング孔掘削後、各深度で水理試験（揚水試験）時に酸化還元電位をフローセル式電極により測定する手法と、ボーリング掘削時に掘削を一時中断して揚水試験を行い、その過程で酸化還元電位を測定する手法がある。前者の手法においては、工期が短縮でき多深度で水理特性データを取得できるものの、ボーリング孔内水が岩盤の高透水性部に侵入し、揚水試験時に得られる地下水の地球化学特性データの品質が低下する。後者の手法においては、より長期の工期を要し調査数量が少なくなるが、ボーリング孔内水の岩盤への侵入が少ないため、汚染の少ない地球化学特性データを得ることができる。また、掘削時の人為由来物質の汚染によるpH、酸化還元電位への影響について、研究所用地内に掘削されたMIZ-1号孔において定期的に観測を行い確認した<sup>74)</sup>。同孔では、ボーリング孔掘削直後の2005年に弱アルカリ性、還元状態（pH8、Eh-300mV付近）の地下水が得られている。その後の観測では、ボーリング孔壁に鉄化合物の被膜が確認されており、2008年、2009年、2011年は相対的に酸化還元電位が観測され、2012年に2005年と同様の還元的な値が得られている。2008～2011年の複数回にわたる採水調査では総計30,000L近い地下水が排水されており、長期的な排水に伴い観測区間内の人為由来の鉄化合物の量が減少

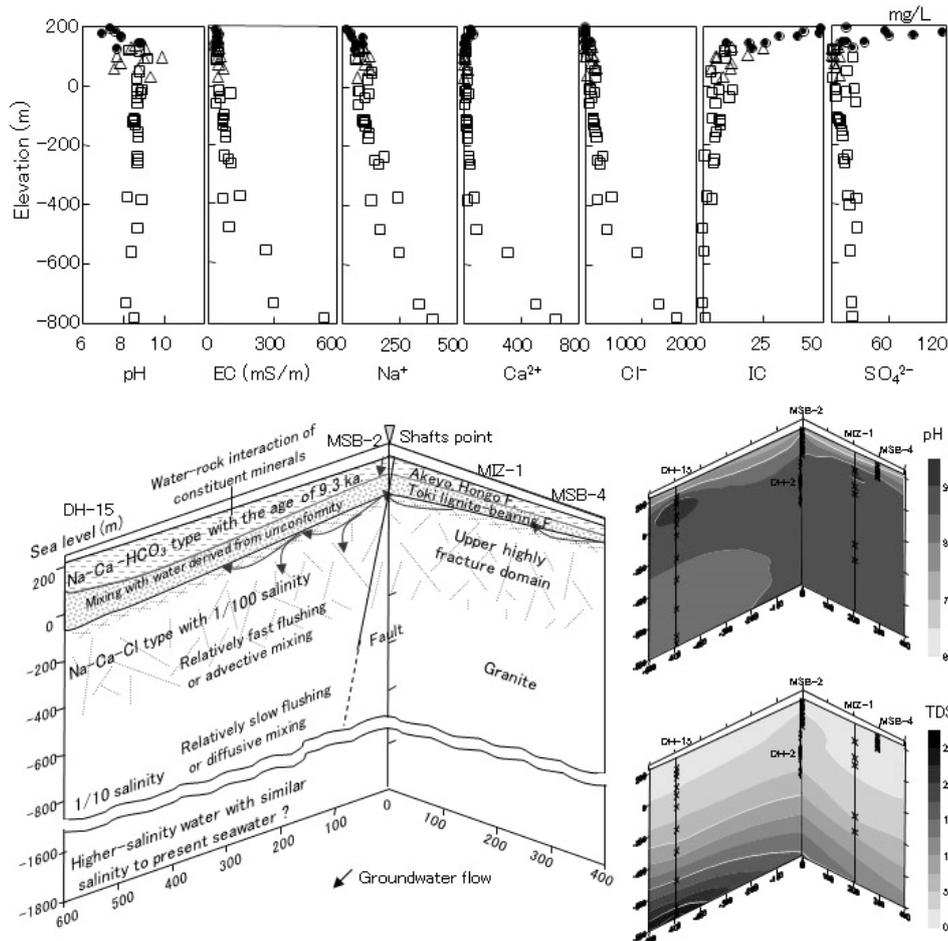


図 4.3-1 第 1 段階の調査により構築された地球化学モデル <sup>72)</sup>

(地下水は Na, Ca, 溶存無機炭素, SO<sub>4</sub> に富む水質と、総溶存成分は低濃度で Na, Ca, Cl に富む水質、総溶存成分は高濃度で Na, Cl に富む水質に分類でき、水質分布はこれらの地下水の混合により形成されている。)

し、酸化還元電位が当初の状態に回復している可能性がある。また、鉄化合物の生成プロセスについては不明な点が多いが、ボーリング孔掘削時に使用するドリルビットやケーシングの削剥に由来する鉄成分が還元的な地下水と接触することにより還元され、物性が変化して孔壁に付着し易くなっている可能性が考えられた。このプロセスの解明、鉄化合物の生成防止・除去方法の開発は今後の課題として残された。

(3) 第 2 段階における結果概要

深度 500m までの研究坑道の掘削に伴い、日量数百 m<sup>3</sup> の地下水の湧水（排水）があり、この人為的環境擾乱に対する地球化学特性の変化について、図 4.3-2 に示す観測孔において長期観測を行った。坑道への湧水量は堆積岩中の礫岩部で高く、その他の深度では相対的に湧水量が小さくなっている（図 4.3-2）。また、主立坑に低透水性の主立坑断層が存在するため <sup>30)</sup>、主立坑での湧水量が少なく、換気立坑で湧水量が多くなっている。更に花崗岩中では、深度 300m 研究アクセス坑道での湧水量が多く、坑道と割れ目の遭遇率を反映している可能性がある <sup>75)</sup>。地下水の湧水に伴う水圧変化は主に瑞浪層群中の低透水層の上下で大きく異なり、低透水層以浅ではほとんど変化

していない (3.1.2 参照)。低透水層以深では研究坑道から 100m 程度の範囲において、水頭が 100～150m 程度 (1.0～1.5MPa 程度) 低下している。主立坑断層の北側と南側にそれぞれ位置する 09MI21 号孔と 09MI20 号孔 (深度 300m) を比較すると、09MI21 号孔の水頭低下量が相対的に小さくなっており、主立坑断層の南側にある換気立坑での地下水排水の影響が抑制されていると考えられる。これらの水圧低下領域が地球化学的擾乱領域に相当すると考えられる。

地球化学的擾乱領域における地球化学特性の変化は、主に異なる水質の地下水の混合状態の変化に起因する。そのため、水-鉱物反応などで濃度が変化しにくい Cl 濃度について集水リングでの経時変化を図 4.3-3 に示す。主立坑の集水リングにおける Cl 濃度の経時変化は顕著でないものの、換気立坑では各集水リングで観測初期に Cl 濃度が増加し、その後低下する傾向にある。この Cl 濃度の変化については、立坑掘削前の Cl 濃度分布に基づいて、相対的に深部の地下水の湧昇と浅部の地下水の浸透を仮定して推定した結果、両立坑において立坑掘削初期に数十～百数十 m 相対的深部にある地下水が立坑切羽まで湧昇し、その後、浅部から相対的に Cl 濃度の低い地下水が浸透することにより濃度が低下していると考えられた<sup>74),76)</sup>。

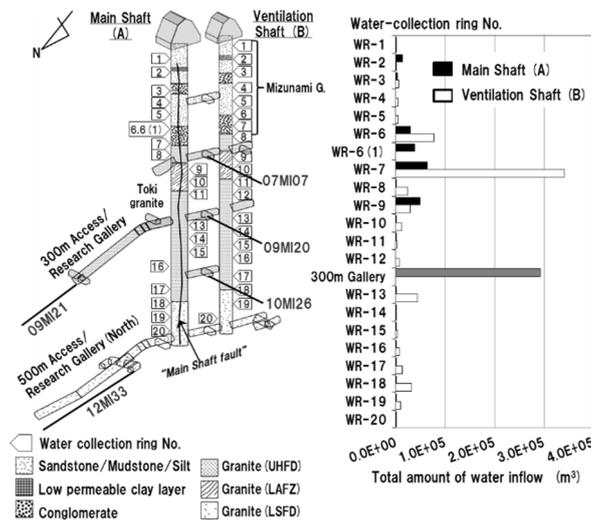


図 4.3-2 瑞浪超深地層研究所における水質観測孔と集水リング (WR) における湧水量<sup>75)</sup>

また、主立坑断層南側の深度 200～400m の坑道から掘削した観測孔 (07MI07, 09MI20, 10MI26 号孔) においては、観測孔掘削後の観測開始時に Na, Ca, Cl 濃度が高いものの、時間とともに低下する一方で、無機溶存炭素 (DIC), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は当初濃度が低く時間とともに増加する傾向が認められた<sup>75)</sup>。これらの傾向は、研究坑道に近い観測区間ほど顕著である。主立坑断層北側に位置する観測孔 (09MI21 号孔) では、このような傾向は認められない<sup>75)</sup>。これは、換気立坑を含む主立坑断層南側では、立坑掘削時に周辺地下水の排水に伴い湧昇した相対的に深部の地下水 (相対的に Na, Ca, Cl 濃度が高い地下水) が、ボーリング孔での観測開始時に周辺に分布しているためと考えられる。また、その後の水質変化は、坑道からの恒常的な地下水排水に伴い周辺の地下水位が低下し、元々、観測深度より浅い深度に分布していた浅層地下水が浸透したためと推察される<sup>74)~76)</sup>。このような、長期的な地下水の排水に伴う地下水の入れ替わりについては、浅層地下水に含まれるトリチウムやフロンガス (1930 年代に人工的に生産され大気中に放出された化合物) の濃度が指標になる。2009 年度はこれらの成分は検出されなかったものの、その後、深度 200～300m では徐々に濃度が上昇しており、深度 400m においても検出されており、徐々に浅層地下水の浸透割合が増加していると推測される<sup>75),77)</sup>。

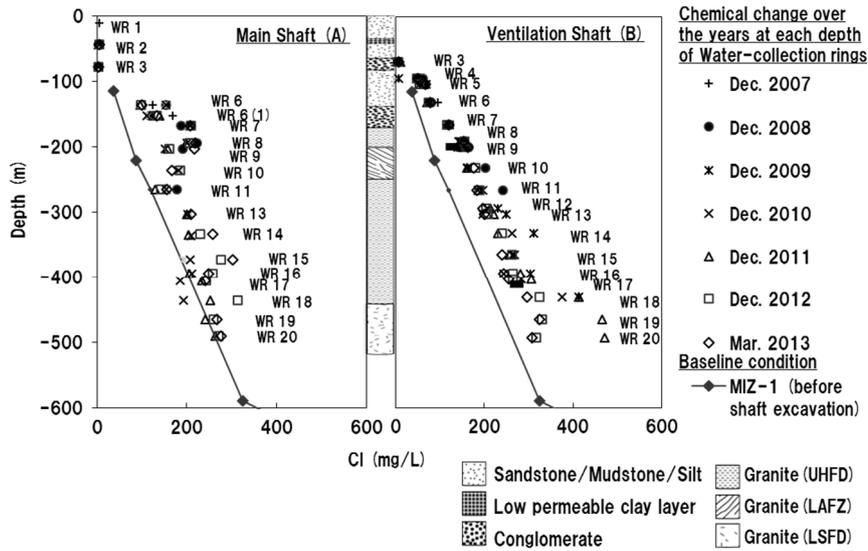


図 4.3-3 主立坑・換気立坑の集水リングの地下水水質の経時変化<sup>75)</sup>

坑道掘削に伴う地下水の pH, 酸化還元電位の変化については, 地下水の水圧低下に伴う溶存ガス (炭酸ガス) の脱ガスによるアルカリ側への pH 変化や, 地下水の水圧低下に伴う浅層地下水の引き込みによる pH, 酸化還元電位の変化といったプロセスが想定される。深度 200~400m の坑道から掘削された観測孔においては, 坑道直近のセメント材料の影響を受けていない区間の pH は数年間の観測期間中 8~9 の範囲内に収まっている<sup>74)</sup>。酸化還元電位については, 花崗岩を覆う堆積岩直下 (深度 200m) の 07MI07 号孔において変化に乏しいものの, 深度 300~400m の一部の観測区間においては約-200mV から-百数十 mV への上昇が認められている。この酸化還元電位の経時変化は, 鉄水酸化物 (goethite) と二価鉄イオンの酸化還元反応の平衡電位線に沿っており, 鉄の化学種の酸化還元平衡を維持しながら相対的に酸化的環境になっている可能性がある。このことから, 花崗岩においては, 地下施設建設時に人為的に生じる酸化インパクトに対して, 鉄を含む鉱物の水-鉱物反応 (黒雲母類などの変質, 溶解に伴う二価鉄イオンの放出や鉄水酸化物の生成など) が, 主要な酸化還元緩衝反応になると推察される。この反応は不可逆反応であり, 花崗岩中の割れ目表面の雲母類を消費した後, 酸化還元緩衝能力が回復しないことも想定される。今後, 酸化還元電位の変化が定常状態に達した時点で, その空間分布についてより詳細な解析を行う必要がある。

(4) 汎用的知見

地表からの調査方法, 地下施設の建設・維持管理時の地球化学変化について, 以下のような技術的な知見・ノウハウが挙げられる<sup>78),13)</sup>。

- ・施設建設時の周辺環境の擾乱範囲, 程度は, 断層などの低透水性構造によって囲まれた領域 (水理学的コンパートメント領域) 毎に異なるため, コンパートメント領域毎にモニタリング孔を配置するなど, コンパートメントに注目したモニタリング孔のレイアウトが望ましい。
- ・坑道掘削時に坑道最深部では, 地下水の排水に伴い相対的に深部の地下水の上昇が認められ, 坑道の掘削深度がより深部に移動した後も, 上昇した地下水が立坑周縁部に数か月間にわたっ

て残留する可能性がある。その後、各深度の坑道における定常的な地下水の排水により、浅層地下水が浸透し地下水が再度入れ替わる。立坑周縁部における水質の経時変化は、異なる深度に分布していた地下水の湧昇や浸透を仮定して推定することができる。浅層地下水との混合については、地下水中の同位体（トリチウムなど）、フロンガスの長期観測が有効となる。

- 地下水の物理化学パラメータの測定については、ボーリング調査時の擾乱により、人為的な酸化還元電位制限固相（鉄鉱物など）が孔壁に付着することがあるため、ボアホールテレビなどにより孔壁を随時確認する必要がある。また、信頼性の高いデータを取得するため、長期モニタリングも必要となる。地表からの酸化還元電位の調査においては、品質低下要因が多く予察的な情報の取得に留まる可能性が高い。そのため、地表からの調査結果は坑道からの調査により補完する必要がある。また、酸化還元電位の測定においては、測定電極の応答性が重要であり、複数の電極による測定と熱力学的な理論解析に基づく検証が不可欠である。
- 酸化的な地下水が地下施設周辺に残留した場合、坑道閉鎖後に早期に還元環境に回復させるためには、地下施設建設、維持管理時に浸透した相対的に浅部の地下水を坑道閉鎖時に、より還元状態にある深部の地下水に入れ替える必要がある。また、深度毎の坑道への湧水量、水質を把握した上で、深部の坑道から還元的な地下水を利用して冠水させるための坑道閉鎖手順を確認しておく必要がある。そのためには、酸化的地下水が深部に涵養し地下施設周辺が酸化的になる前に坑道を閉鎖し、低下した地下水頭を回復させることを念頭においた事前解析が必要となる。

以上を踏まえて、今後は、地層処分事業時の部分的埋戻しや坑道閉鎖の考え方に反映するために、研究坑道の維持管理中の地球化学特性の経時変化の知見を拡充するとともに、研究坑道の閉鎖に関わる地球化学特性の変化に関わる研究開発が今後の課題として挙げられる。

#### 4.4 物質移動の遅延効果の把握

##### (1) 目標

物質移動に関する研究では、岩盤および地下水による物質移動の遅延効果などの物質移動特性を理解するため、段階的に調査・解析・評価する方法論やそれに関連する技術的知見を整備することを目標として検討を実施した。この際、以下の地質環境の特性とプロセスに着目した<sup>8)</sup>。

- ①岩盤の収着・拡散特性の把握
- ②物質移動場の把握
- ③コロイド／有機物／微生物の影響の把握

##### (2) 第1段階における結果概要

浅層ボーリング調査および深層ボーリング調査において採取したボーリングコアおよび地下水試料を用いた室内調査試験を実施し、瑞浪層群および土岐花崗岩について、透水性割れ目の岩石・鉱物特性、地球化学特性および物理特性、ならびに地下水の地球化学特性を把握した<sup>16)</sup>。また、深層ボーリング孔（MIZ-1号孔）のボーリングコアを用いた室内試験により、透水性割れ目近傍におけるウラン系列核種（<sup>238</sup>U, <sup>234</sup>U, <sup>230</sup>Th）の分布プロファイルからマトリクス拡散深さを推定した<sup>16)</sup>。ボーリングコアを用いた室内試験により取得した土岐花崗岩の収着係数及びマトリクス拡散深さのデータについては、既得情報とそれに基づく推定値と整合的であるものの、ボーリングコアは掘削・採取や調製などに伴う物理的な擾乱を被っており、そこで観察される空隙構造特性は原位置のそれとは明らかに異なる<sup>79)</sup>ことから、物質移動場の厳密な評価は第2段階以降の調査により行う必要があることが示された。

地下水中のコロイド／有機物及び微生物については、地表から掘削したボーリング孔から採取した地下水を利用して、地下水中の微生物の存在の有無の確認、硫酸還元菌および鉄関連細菌の生細菌数の測定を実施した。その結果、 $10^6$ cells/ml程度の全菌数であり、これは海洋細菌の現存量に匹敵するものであった<sup>80)</sup>。また、特定の深度においてのみ硫酸還元菌が検出されることが示され、地球化学的な条件を反映して微生物の群集構造が形成されていることが分かった<sup>16),80)</sup>（図4.4-1）。

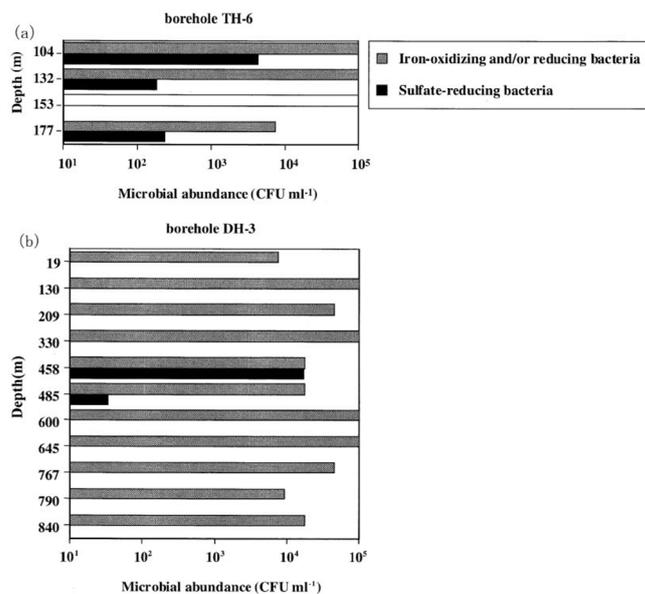


図 4.4-1 地下水中の硫酸還元菌，鉄関連細菌の深度分布<sup>80)</sup>

(a) 堆積岩中の地下水，(b) 花崗岩中の地下水

### (3) 第2段階における結果概要

第2段階の調査研究では、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、個別目標と課題<sup>8)</sup>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、統合化データフローダイアグラムを構築した(図 4.4-2)<sup>14)</sup>。この統合化データフローダイアグラムを念頭に調査研究を実施した。得られた成果を以下に示す。

データセットとして、立坑、水平坑道の壁面から採取した岩石や研究坑道から掘削したボーリングコアを利用して取得した全岩化学組成、含有鉱物および鉱物組成などの岩石学的・鉱物学的データを取りまとめて整備した<sup>81)</sup>。

研究坑道掘削時の壁面観察、研究坑道から掘削したボーリングコア観察およびボーリング孔を利用した水理試験の結果から、物質の移動経路となり得る断層や割れ目を抽出した。このうち、深度 300m 研究アクセス坑道で確認した断層や割れ目について、主に地質学的な観点から充填鉱物の種類・有無、割れ目近傍の母岩の変質の程度・色調、透水性、割れ目の卓越方位などに着目して、類型区分を実施した<sup>82)</sup>(表 4.4-1)。また、深度 300m 研究アクセス坑道で確認した割れ目を対象に、類型区分にしたがい、個々の割れ目を分類するとともに、これらの方位・大きさ・空間分布を三次元で可視化した(図 4.4-3)。



表 4. 4-1 深度 300m ステージで確認された割れ目の類型区分

タイプ	充填鉱物	母岩変質	開口・湧水・グラウト	透水性への影響	変形時階	時期目安 Ma	温度目安 °C	備考
I 割れ目(高温型)	Chl	無し	少ない	遮水性	1~2	69-43	300-200	母岩変質は無いが、緑泥石を介在する
II 断層	-	強変質	僅少	遮水性	2	64-43	400-300	ガウジを有し、塩基性貫入岩や岩鏡Dの強変質部をとまう
III 割れ目(高温変質型)	Chl	緑色・白色	少ない	遮水性	2	64-43	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)	Carb, Cl, 無し	橙色・グレー	有り	透水性	1~3	69-24	<200	ChlもCarb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)	Carb, 無し	無し	有り	透水性	3~4	43-22	<100	傾斜30°以下の割れ目

タイプ	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

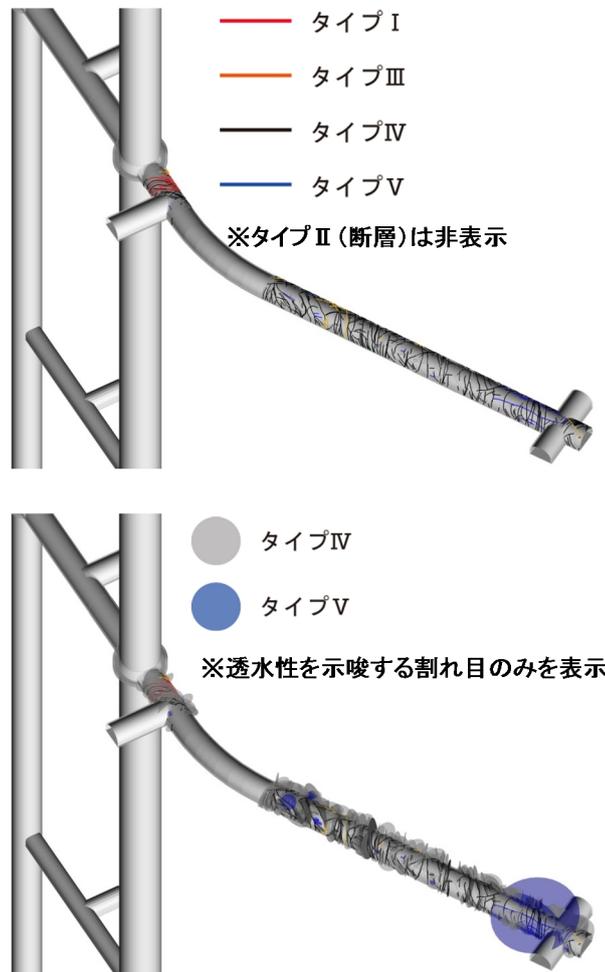


図 4. 4-3 深度 300m 研究アクセス坑道周辺の割れ目のトレース線(上)と面状構造モデル(下)

ボーリングコアや地下水を利用して微生物などの分析を行う場合、ボーリング掘削に使用する掘削水の混入などによる汚染の評価が重要である。コアに対する掘削水中の微生物による汚

染を把握するために、微生物を模擬した粒径 0.5  $\mu\text{m}$  の蛍光ビーズ (Fluoresbrite Carboxylate Microspheres 0.50ph YG) を研究坑道内のボーリング孔 (09MI20 号孔 : 図 2.3-2) の掘削長 21.6m からの掘削時に掘削水に添加し、掘削後のコアを蛍光顕微鏡で観察した。その結果、割れ目表面では蛍光ビーズの付着が確認され (図 4.4-4)、掘削水中の微生物による汚染が生じている可能性を確認した。このことから、コアを利用した微生物の DNA 解析や代謝活性実験などを行う場合には、汚染により混入した微生物を原位置の微生物と誤って解釈する恐れがあり、群集構造や代謝活性速度を正しく評価できない可能性があることが分かった。これを解決するため、ボーリング掘削水を紫外線で滅菌してから使用するシステムを構築し、現場調査に適用した。ここで構築したシステムの適用により、掘削水中の生菌数をシステム適用前の 1/5~1/4 に低減することが可能となった。

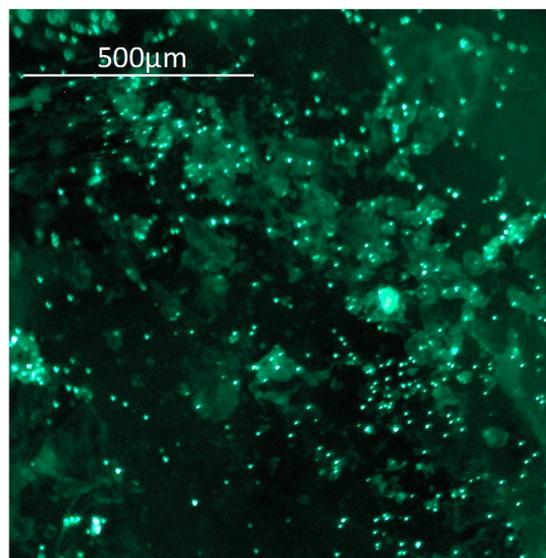


図 4.4-4 花崗岩の割れ目の表面に付着した蛍光ビーズ  
(緑色の粒状の物質が蛍光ビーズ)

上述の検討を行いつつ、09MI20 号孔から採取した地下水を対象として、微生物が地球化学環境形成へ及ぼす影響を把握するために、微生物の群集組成の解析を実施した。具体的には、地下水試料をろ過し、ろ過膜上の全 DNA を抽出した後、PCR (Polymerase Chain Reaction) 法を用いて増幅した微生物の 16S rDNA (保存性の良い遺伝子の一つ) について、群集組成を把握するための DGGE (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis) 解析を実施した。

DGGE 解析の結果により得られた 09MI20 号孔における微生物の群集構造を図 4.4-5 に示す。DGGE 解析の結果、09MI20 号孔では研究坑道からの距離に応じて、各区间で微生物の群集構造が漸移的に変化していることが分かった。区間 1 から区間 5 にかけて、硝酸還元菌が減少しているのに対し、より還元的な環境を示す硫酸還元菌が増加しており、研究坑道からの距離に応じてより酸化的环境へと変化していると考えられる。これらの結果から、微生物は硝酸や硫酸などの酸化剤を消費し、地下環境を還元的に維持する役割を担うとともに、水質とともに群集構造が変化することによって、水質の変化を緩衝する機能を有している可能性が考えられる。

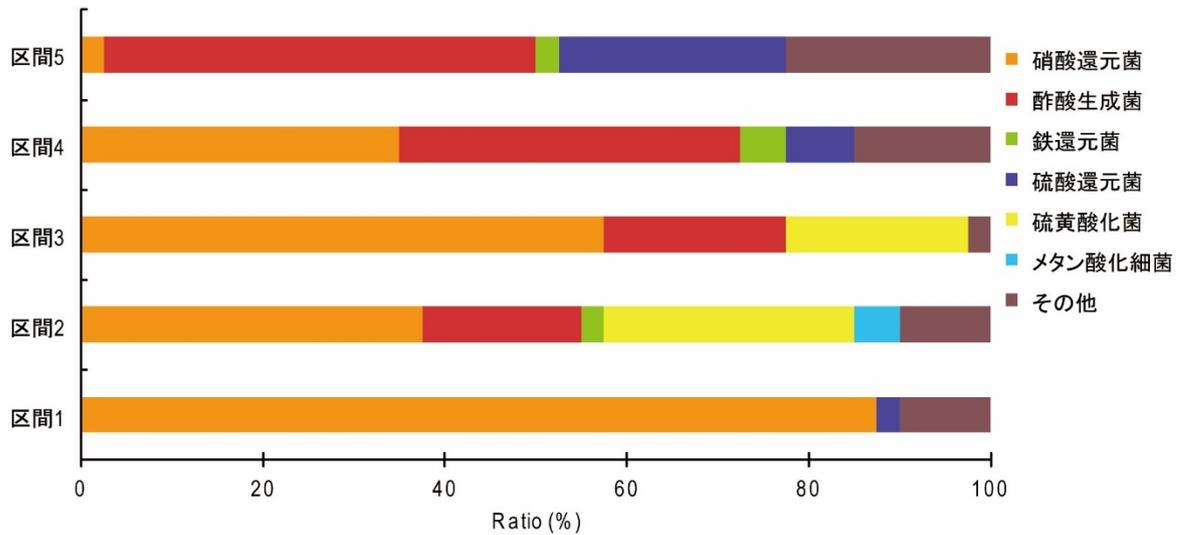


図 4.4-5 09MI20 号孔における微生物の群集構造

地下水中のコロイドが物質の移動に与える影響を検討するため、コロイドを形成している、もしくはコロイドに吸着していると考えられる微量金属元素の存在状態に関する調査を行った。地下水中の微量金属元素濃度の分析に加えて、ろ過膜上に捕集されたコロイドについても分光学的分析を実施した。コロイドの分光学的分析として、サイズや形状を把握するための電子顕微鏡観察、元素の酸化数を把握するための X 線分光分析、有機物の種別を把握するための赤外線分光分析を実施した。

その結果、地下水中の希土類元素濃度は分画サイズが小さくなるに伴って低下することが分かった<sup>82)</sup>。このことは、希土類元素がコロイドを形成し、ろ過膜上に捕集されているために、ろ液中の濃度が分画サイズと相関性を持ったものと考えられる。

ろ過膜上のコロイドに対する電子顕微鏡観察の結果、地下水中のコロイドは Fe, Al, Si などを含む無機物と有機物の混合物であることが分かった (図 4.4-6)。コロイドとして存在する元素のうち Fe に着目した X 線分光分析では、3 価の Fe の標準試料と類似性を示したことから、コロイド中の Fe は 3 価が支配的であることが示された。X 線吸収スペクトルの解析の結果、水酸化鉄と有機酸鉄が共存している可能性が示された。また、コロイド中の有機物に着目した赤外線分光分析では、コロイド中の有機物が腐植物質 (動植物遺骸由来の高分子有機物) を多く含むことが示された。水酸化鉄と腐植物質は希土類元素と強く錯生成することが知られており、希土類元素はコロイド中でこれらの物質と結合している可能性があることが分かった。

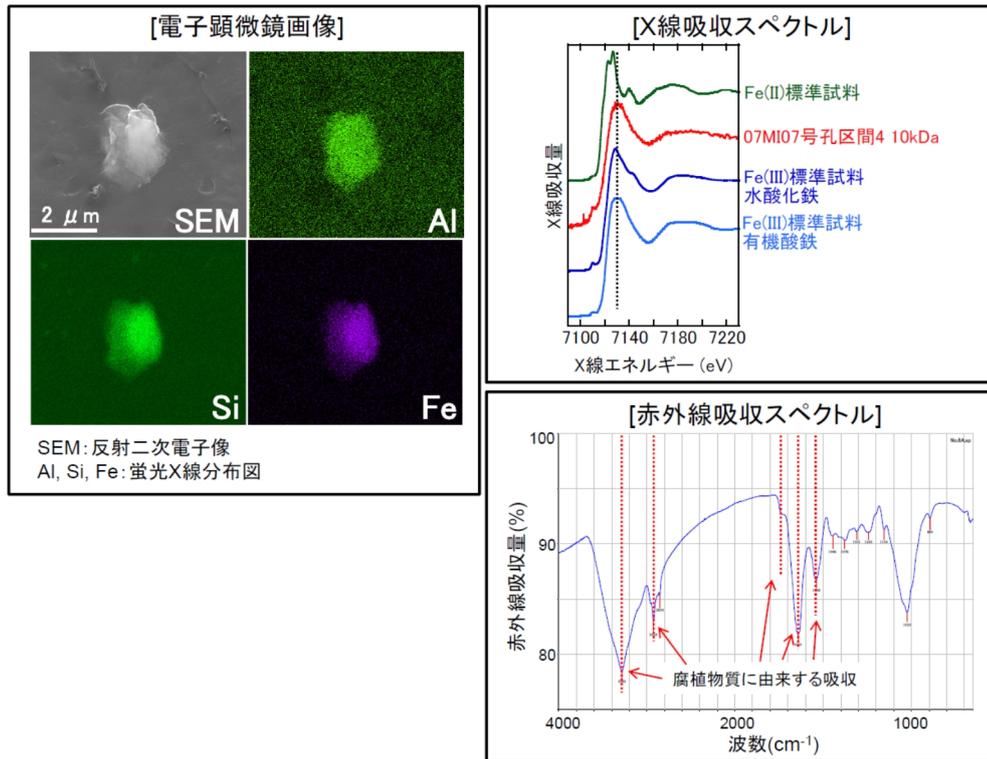


図 4.4-6 コロイドの電子顕微鏡観察, X線分光分析, 赤外線分光分析結果

#### (4) 汎用的知見

第1段階の地表からの調査に加えて, 研究坑道掘削に伴う研究段階における調査を行い, 地質環境中の物質移動に関わる特性を理解するための基礎的な情報を取得してきた。そのための個別技術や調査・解析・評価技術に関わる汎用的な技術的知見を以下にまとめる。

- ・割れ目や断層など物質移動経路となる構造の特性や空間分布を把握するためには, ボーリング調査と立坑・水平坑道の壁面観察を組み合わせることが有効である。
- ・特に, 透水性の割れ目分布を把握するためには, ボーリング調査などの点の調査を複数実施するより, 立坑・水平坑道壁面を調査するような面的な調査が重要である。
- ・土岐花崗岩のように割れ目頻度が高い亀裂性媒体中での物質移動現象を評価するためには, 割れ目を区分して評価するアプローチが重要である。
- ・花崗岩中の地下水のような貧栄養条件下においても, 地下水に微生物が存在し, 地球化学的な環境の形成および維持に寄与する可能性がある。
- ・土岐花崗岩のような淡水系地下水で溶存有機物が少ない環境においても, コロイド態で移動する元素が存在する。
- ・本研究により構築した, 地下水中の微生物, コロイドを調査・評価する手法は他の調査位置においても適用可能な汎用的な要素技術である。

## 4.5 EDZの地質環境特性の把握

### (1) 目標

第2段階では、EDZの範囲や物性に関するデータを取得し、第1段階における予測結果の検証等を通じて、ブロックスケール（数十～数百 m 四方）の力学モデルを構築することを目標とした。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・解析・評価の手法と結果の精度との関係を把握することを目標とした。

### (2) 第1段階における結果概要<sup>16),83)</sup>

第1段階では、瑞浪超深地層研究所と同じ土岐花崗岩体を対象にした正馬様用地における調査研究により構築した岩盤力学モデルに基づき、研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の影響予測解析を実施した。具体的には、対象が結晶質岩であることから、岩盤の不連続面の影響を考慮できるモデル化・解析手法として、MBC（Micro-mechanics Based Continuum model）、BEMF（Boundary Element Method for Rock Fracture）、クラックテンソルと仮想割れ目モデルの組み合わせによる解析をそれぞれ実施した。EDZは力学的にはExcavation Damaged Zone（掘削損傷領域）とStress Redistributed Zone（応力再配分領域）で形成されるが、応力的な破壊現象による新規の割れ目の生成を表現できるモデルはBEFMのみであった。そのため、MBCとクラックテンソルについては掘削損傷領域の幅を仮定し、この領域内で生成される新規亀裂の発生や既存亀裂の進展による物性変化を深度500mおよび1000mを対象として感度解析的に検討した。この結果、掘削損傷領域の有無により壁面変位に2倍程度の差が生じること、透水性は健全な花崗岩部に比べ3オーダー以上変化する可能性があること、影響の度合いは新たに発生させた亀裂の幾何学的条件に大きく影響されるといった知見が得られた。

### (3) 第2段階における結果概要

第2段階では、第1段階で実施した予測解析に加え、研究所用地で取得されたデータを用いたクラックテンソル理論に基づく掘削影響に関する予測解析を行うとともに、原位置での調査研究を実施した。ただし、研究坑道掘削工程に与える影響が最小限の調査試験とする必要があったことと、主立坑周辺は主立坑断層の存在による影響が及んでいたことから、掘削影響に関する調査試験は健全な土岐花崗岩体中を掘削している換気立坑側の深度200m付近1箇所のみで実施した<sup>84)</sup>。得られた成果を以下に示す。

- ・亀裂開口幅と透水係数の関係を考慮するとともに掘削損傷に関する仮説を設け、坑道周辺岩盤の透水係数の変化を予測した結果、EDZにおいて最大で2オーダー程度の透水係数の増加が予測された。これは、掘削に伴って発生する坑道壁面に平行な割れ目が透水係数の増加に寄与したものである<sup>85)~87)</sup>。EDZをモデル化する場合、亀裂密度が重要となるため、亀裂の長さや間隔などの調査が重要であることが解析結果から言える。
- ・換気立坑の深度200mからの立坑の掘削では、切羽通過前後における応力解放による岩盤ひずみ・変位を計測した（図4.5-1）。岩盤のひずみの量は限界ひずみより小さく、弾性解析によって得られる値と概ね同じオーダーであったが、半径方向のひずみの理論値が伸びであるのに対して計測値は圧縮であった。したがって、岩盤のひずみ・変位の挙動は、割れ目の挙動に起因する変形が支配的であったものと推定される<sup>84)</sup>。また、上記計測結果から、少なくとも換気立坑壁面から0.2D（1.1m）以上離れると、掘削に伴う物理的な岩盤の損傷は及ん

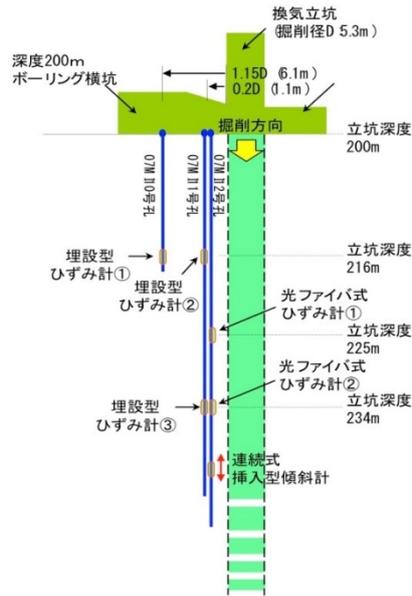


図 4.5-1 立坑掘削に伴うひずみ計測<sup>84)</sup>

でないと評価された<sup>88)</sup>。この範囲の大きさは、同等の岩石の力学物性を有する栗橋花崗岩体中で実施された掘削影響試験で評価されている発破時の損傷範囲の大きさ(60~80cm)<sup>89)</sup>と概ね整合的である。

- なお、掘削によって生じる事象の対策工の影響も一つの掘削影響と考えることができる。上記計測では、データの詳細な分析によりプレグラウト時の岩盤の変形に関する情報も抽出した。その結果、グラウト注入時の 1MPa の差圧と、計測された引張ひずみ  $45\mu$  から見積もられた岩盤の等価弾性係数は 22GPa 程度であった。この等価弾性係数の値は、一般に岩盤の弾性係数がコア試験のそれより小さいことを考慮すると、200m 地点のボーリングコア試験から得られた平均 52GPa に対しても調和的であることから、プレグラウト注入時に発生したひずみ量は、注入材の侵入によるものと評価された<sup>3)</sup>。これは、湧水対策工で発生する岩盤の変形は、注入による破壊が生じない場合、単純に岩盤の弾性係数と注入時の差圧によって見積もることができること、弾性変形での評価が可能な範囲ではグラウト注入が長期的に岩盤の透水性を初期状態から変化させる可能性も低いことを示唆している。
- 坑道周辺部の応力的な破壊現象の発生は、少なくとも深度 500m までの研究坑道掘削では観察されていないが、AECL や Äspö HRL での知見に基づく評価では、深度 560m 以深で生じることが示されている(表 4.5-1)<sup>90)</sup>。従って、深度 500m までで生じている岩盤の損傷は、発破の衝撃波による損傷と考えられ、応力集中に伴う岩盤の損傷の把握等は第 3 段階以降の研究課題となる。発破や応力集中による EDZ 内の物性取得も同様である。

表 4.5-1 坑道周辺の応力集中による破壊現象の発生予測<sup>90)</sup>

	エスポ APSEトンネル	瑞浪超深地層研究所	
		立坑	水平坑道
深度(m)	450	560	560
一軸圧縮強度の平均値(MPa)	211.0	166.2	166.2
最大初期地圧(MPa)	30.0	30.6	30.6
最小初期地圧(MPa)	10.0	15.5	14.3
剥離型破壊発生強度 $\alpha_m$ (MPa)	120.3	94.7	94.7
円周方向応力(MPa)	80.0	76.3	77.5
安全率	1.50	1.24	1.22

一方、掘削した空洞が通常維持・管理される数十年から 100 年を超えるような空洞周辺岩盤の将来的な力学的変化については、長期クリープ試験と応力緩和試験を行う現象論的な検討を行うとともに<sup>91)~104)</sup>、岩石の微視的な構造や長期挙動に影響を及ぼす温度や化学的影響に関する理論的な検討を継続している<sup>105)~113)</sup>。これまでの主な成果は以下のとおりである。

- ・ 田下凝灰岩の 10 年を超す長期クリープ試験などを実施し、岩石の長期挙動や坑道の力学的な超長期挙動を解析的に検討するための基礎データを取得した<sup>114), 115)</sup>。また、コンプライアンス可変方程式を軸とする岩盤のクリープ現象評価のためのパラメータ取得から解析評価までの方法論を整備し、土岐花崗岩中に立坑を掘削した場合の坑道周辺岩盤のクリープ現象予測に適用した。
- ・ 花崗岩の一軸圧縮試験を行い、顕微鏡による微視的観察や石英の圧力溶解現象を評価するための化学分析結果から、花崗岩のマイクロクラック進展のメカニズムや因子について評価した。

これらにより、坑道周辺岩盤の超長期の予測が必要な場合の一つの方法論は整備されてきているが、その信頼性の向上には、超長期に生じる変化のメカニズムと考えられる岩盤と圧力・熱・水などの物理的・化学的相互作用の理解（連成現象の理解）が課題である。また、このような研究は結晶質岩の場合、原位置での変化は非常に微小であり、それを測定値として捉えることは容易ではないことから、室内試験を中心とした基礎的な研究を進めることが必要である。なお、結晶質岩の熱特性については、室内試験等で把握できることが国内外の研究事例で示されており、応力的な破壊が生じない範囲では、岩石の微視的構造が大きく変化する可能性が小さいことから、第 1 段階における調査で必要十分な評価が可能と考えられる。

#### (4) 汎用的知見

瑞浪および過去の類似の研究事例から、第 2 次取りまとめで示される程度の初期応力の条件下では、健全な土岐花崗岩程度の強度を有する岩盤では、深度 500m 程度までの範囲で応力的な岩盤の損傷が発生する可能性は低く、かつ発破掘削が損傷を与える範囲は、壁面から 1m 程度内に収まるものと考えられる。

## 4.6 地下空洞の力学的安定性の把握

### (1) 目標

研究坑道の掘削および坑道内からのボーリング掘削により取得される情報などに基づき、前段階において構築した地質環境モデル（サイトスケール）の妥当性を確認するとともに、その結果を踏まえ、地質環境モデル（サイトスケール）を更新することを目標とした。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とともに、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・解析・評価の手法と結果の精度との関係を把握することを目標とした。

### (2) 第1段階における結果概要<sup>16),116)</sup>

MIZ-1 号孔における水圧破碎法による初期応力測定結果や室内物性試験結果および地質構造モデルに基づき、任意の深度における地下空洞の力学的安定性評価に必要な研究所用地における岩盤力学モデルを構築した（図 4.6-1）。

岩盤の物理・力学特性は、同じ土岐花崗岩を対象としているものの、正馬様用地における調査結果などに比べ、一軸圧縮強度、ヤング率などの物性値が大きく、やや硬質な岩石が分布していると評価した。一方、深度 200m 付近の断層が交差する近傍では、有効空隙率が大きく、見掛け比重も低く、一軸圧縮強度などの力学特性が小さい軟質な岩石が分布していることを確認した。

初期応力状態は、深度 600m の断層帯に近づく付近を境に変化していることが明らかとなった。

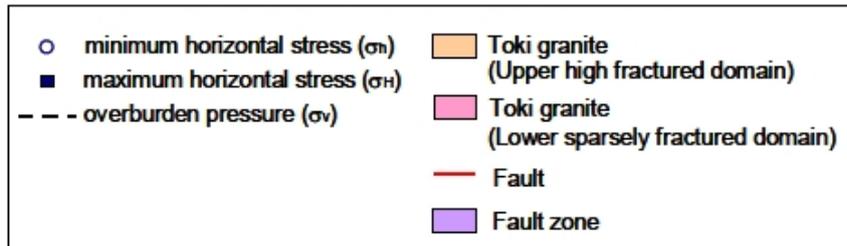
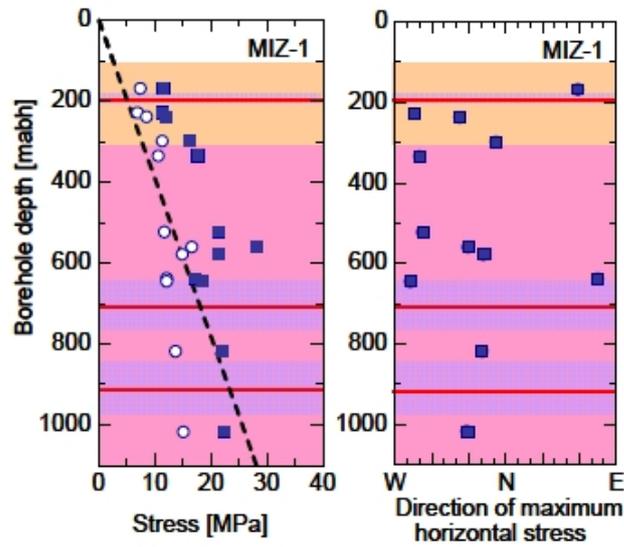
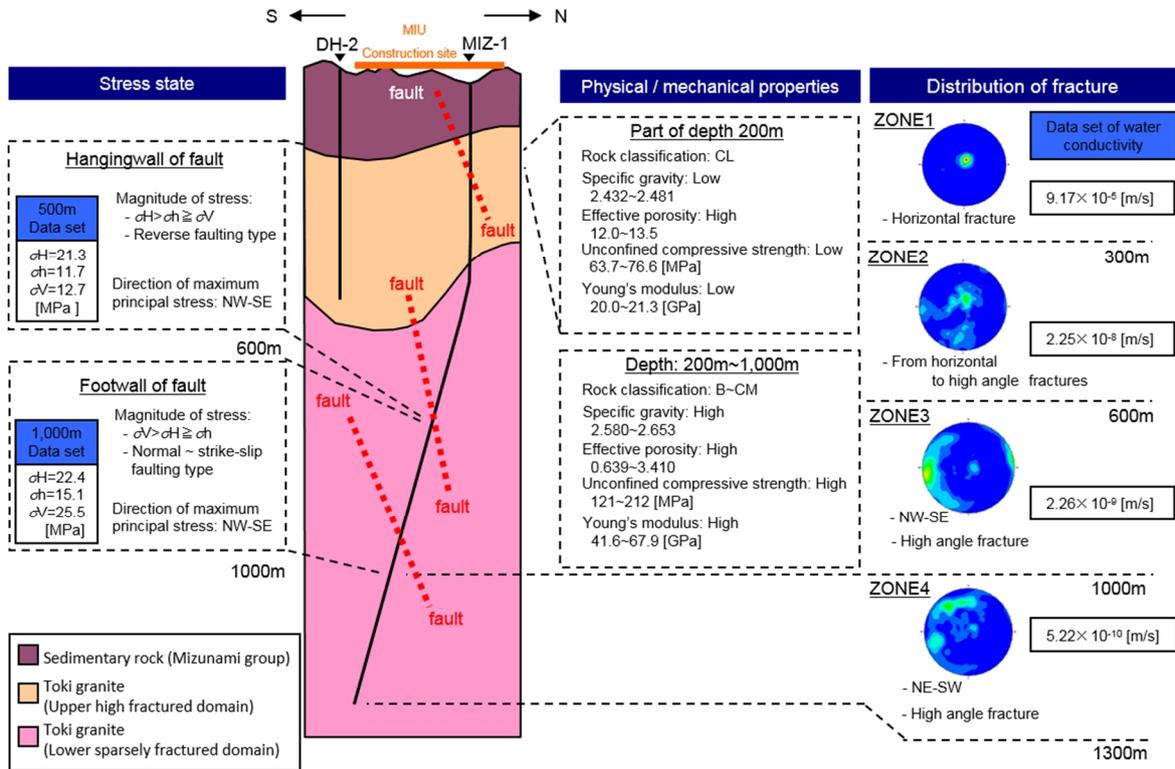


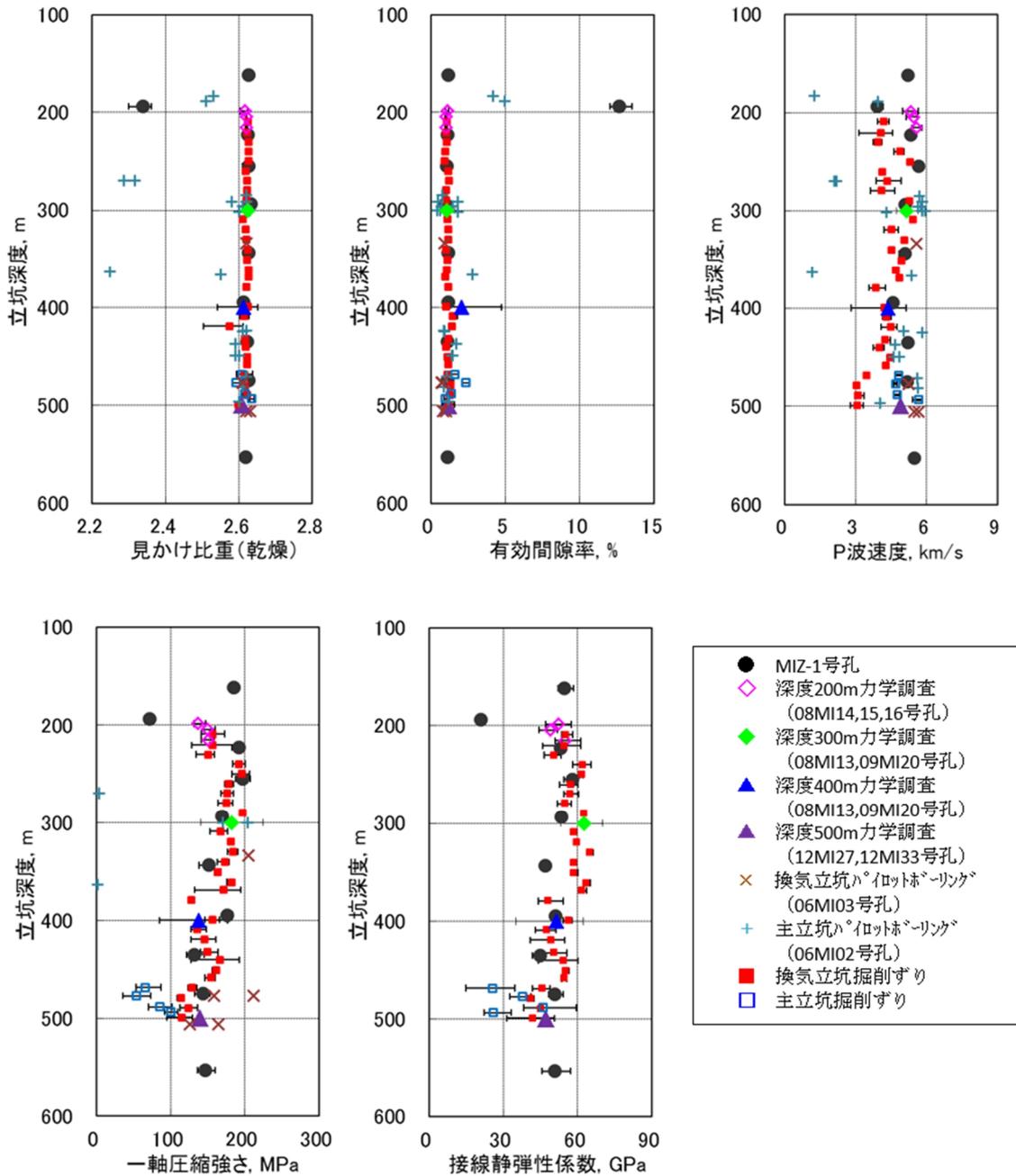
図 4.6-1 第 1 段階で構築した岩盤力学概念モデル(上図)および初期応力分布(下図)<sup>16)</sup>

(3) 第2段階における結果概要

1) 力学物性や初期応力の分布

第2段階においては、応力解放法（円錐孔底ひずみ法）による初期応力測定を各深度の水平坑道において実施し3次元応力状態を把握するとともに、第1段階の測定結果と比較し、予測結果の妥当性を確認した。あわせて岩盤力学モデルを更新した<sup>117)~121)</sup>。また、数値解析を用いて広域応力場を推定する手法の開発を行った。得られた成果は以下のとおりである。

- ・換気立坑部を対象に、10mピッチで掘削ずりを用いた室内物性試験を実施した結果、第1段階で実施した50mピッチでの力学物性値の取得により、健全な土岐花崗岩部に関しては深度方向の不均一性も概ね把握できていることが示された（図4.6-2）。50mピッチという頻度は、当初想定していた研究坑道坑道径（5m）とその坑道の力学的安定性を評価する上で必要なモデル領域の大きさを勘案し設定したが、そのような考え方が有効であることが確認できた。



※図は土岐花崗岩のみプロットしている。  
 ※MIZ-1号孔力学調査, 深度200~500m力学調査, 換気立坑・主立坑掘削ずりは深度毎の平均値を示す。  
 プロットに表示しているバーは測定値の上限と下限を示す。  
 ※換気立坑パイロットボーリング, 主立坑パイロットボーリングは全データを表示している。

図 4.6-2 第1段階で取得した岩石の力学物性と第2段階調査結果との比較<sup>120)</sup>を一部改変

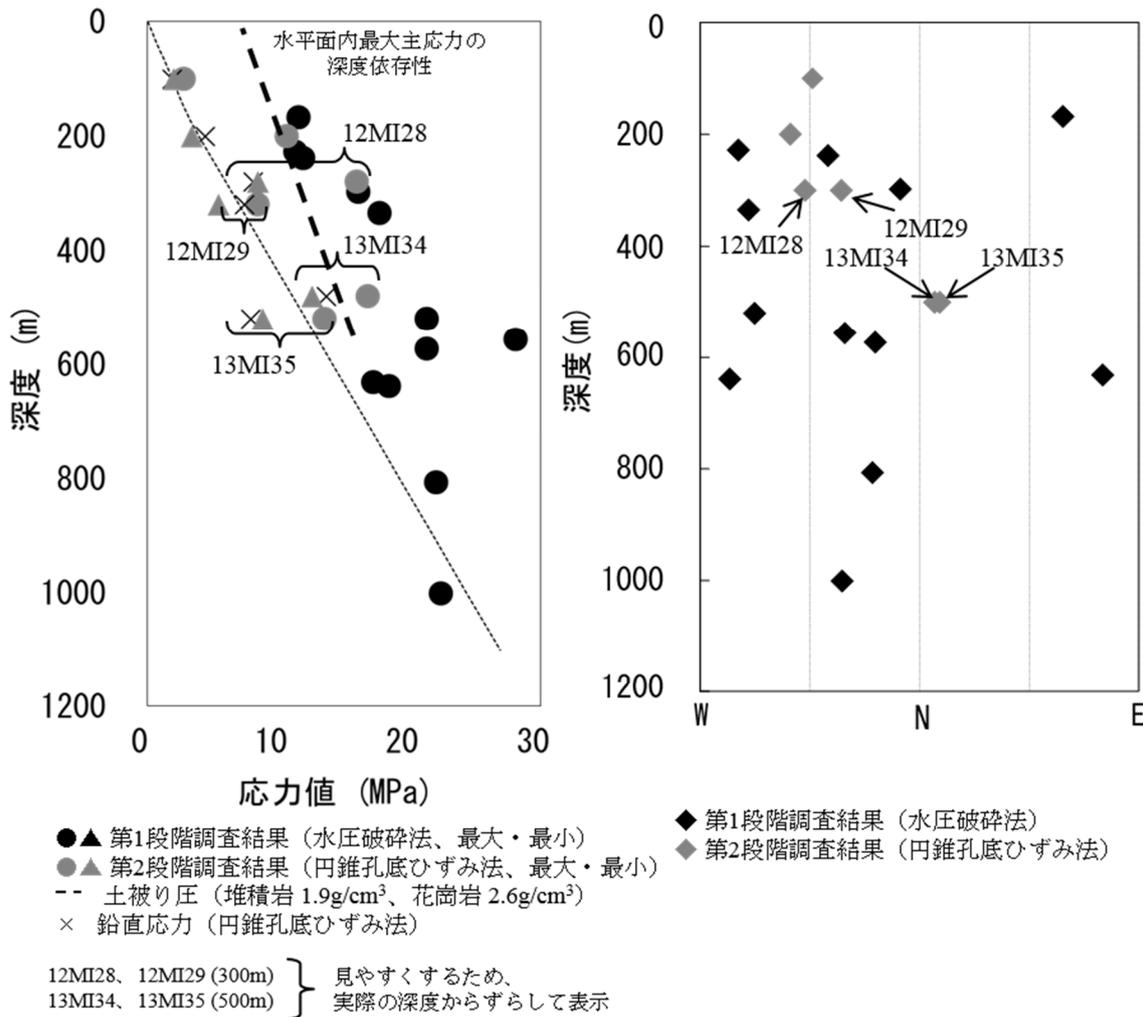


図 4.6-3 第 1 段階で取得した初期応力分布と第 2 段階調査結果との比較 <sup>120)</sup>を一部改変

- ・深度 100m, 200m, 300m および 500m の研究坑道で実施した円錐孔底ひずみ法による初期応力測定の結果、水平面内の最大主応力の方向は概ね NW-SE 方向を示し、第 1 段階で実施した水圧破碎法による初期応力測定の結果と整合的であった。応力値についても同様の傾向を示した（図 4.6-3）。
- ・初期応力の実測値を入力値とする有限要素法などの逆解析を行って広域ひずみや広域応力を算出し、次にこれらを境界条件とした順解析を行うことで任意の場所における応力値を導く解析手法を開発した <sup>122)~125)</sup>。この手法により、研究所用地における初期応力値を算出した結果と実測と整合的であったことから、本手法の適用性が示された <sup>126)</sup>。
- ・個別要素技術の適用性については、高剛性型の水圧破碎試験装置を適用し、主応力値の算出にあたっての品質について検討するとともに <sup>127)</sup>、円錐孔底ひずみ法についてはボーリング孔内の湧水に対処する装置を適用し、その有効性を示した <sup>128)</sup>。研究開発段階と評価されているコアを用いた初期応力測定法（DSCA 法）について、原位置応力測定法との結果を比較し、手法の有効性を確認した <sup>129)</sup>。

## 2) 結晶質岩盤における地下空洞の力学的安定性について

結晶質岩盤では、割れ目の幾何学特性が岩盤としての変形特性を支配するため、力学的安定性の評価のためには、その影響を考慮することが必要である。第1段階では、表4.6-1に示すように割れ目の存在による変形特性への影響を岩石コアと岩盤としての弾性波速度の比として考慮し、深度方向の岩盤物性の不均一性を岩盤等級区分で表した。第2段階では、前述の岩盤力学的特性調査の結果に加え、坑道壁面観察により実際に岩盤中に分布する割れ目の幾何学特性を把握することができるため、その情報に基づき、上記の考え方の有効性等について検討した。得られた成果を以下に示す。

- ・ 研究坑道の壁面観察結果からクラックテンソル理論に基づき算定された等価弾性係数（図4.6-4）は、スケール（ここでは坑道長さ）が大きくなるほど小さくなり、これは一般的に言われる寸法効果に該当する。等価弾性係数比は、最大で2.5倍程度であり、相対区間長が0.2の時点（500mで区間長100m）で1.5程度となり、それ以上になるとほぼ1に近い（図4.6-5）<sup>130)</sup>。釜石原位置試験における水理的観点からの代表寸法の検討では、区間長の違いにより数オーダーの範囲で透水係数が変化する結果であった<sup>131)</sup>が、これまでの調査結果の評価では、力学特性については区間長の違いの影響は相対的には小さい。なお、表4.6-1に示した第1段階で設定した岩盤等級毎の等価弾性係数の最大値と最小値の比は1.45であり、図4.6-5の等価弾性係数比の範囲内であることから、第1段階における結晶質岩盤の変形特性の与え方は、実岩盤中の割れ目の幾何学特性の不均質性のある程度考慮できたものであると考えられる。
- ・ 坑道壁面観察結果に基づきクラックテンソル理論に基づく2次元解析を実施した結果では、換気立坑掘削時の異方的な変形挙動をある程度表現できていることから、不連続面を含んだ岩盤を等価連続体としてモデル化できる可能性があることが分かった<sup>13)</sup>（図4.6-6、図4.6-7）。

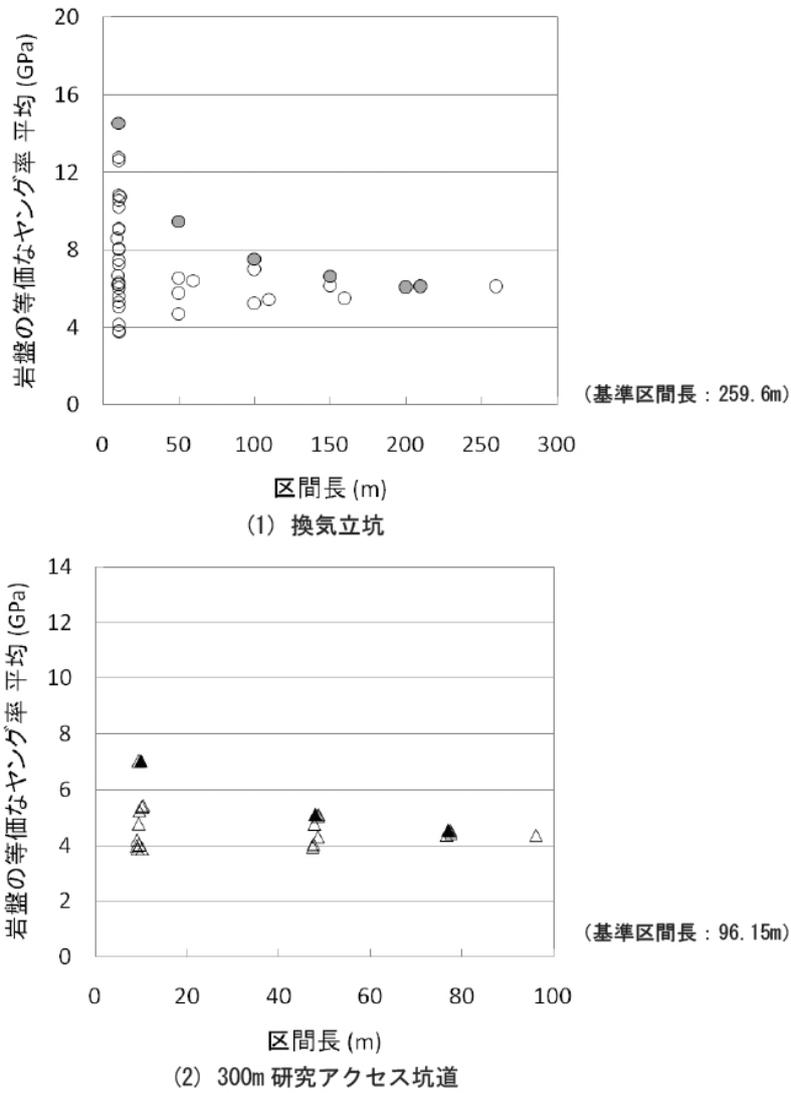


図 4.6-4 坑道壁面観察結果からクラックテンソル理論により算定した平均等価弾性係数<sup>130)</sup>

(下図 : 各スキャンライン方向で算定した等価弾性係数を平均したもの)

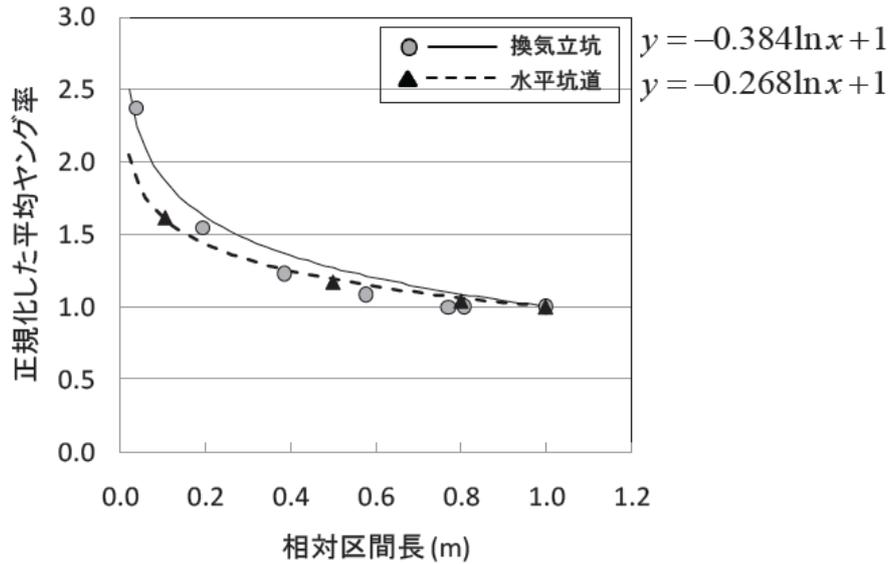


図 4.6-5 正規化した平均等価弾性係数と相対区間長との関係<sup>13)</sup>

表 4.6-1 第1段階での研究坑道設計時に設定した岩盤物性<sup>16)</sup>

Geology	Rock Class	Unit Weight $\gamma_t$ [kN m <sup>-3</sup> ]	Unconfined Compressive Strength $q_u$ [MPa]	Young's Modulus $E$ [GPa]	Poisson's Ratio $\nu$ [-]	Cohesion $C$ [MPa]	Internal Friction Angle $\phi$ [deg]	Critical Strain $\epsilon_0$ [%]	Critical Shearing Strain $\gamma_0$ [%]
Granite	B	26.0	116.36	35.6	0.35	18.9	53.9	0.33	0.44
	C <sub>H</sub>	26.0	89.74	30.1	0.35	14.6	53.9	0.30	0.40
	C <sub>M</sub>	26.0	63.12	24.5	0.35	10.3	53.9	0.26	0.35
Sedimentary Rock	C <sub>L</sub>	18.8	6.40	2.15	0.31	2.10	23.5	0.30	0.39
	D	18.8	1.37	0.628	0.38	0.449	21.5	0.22	0.30

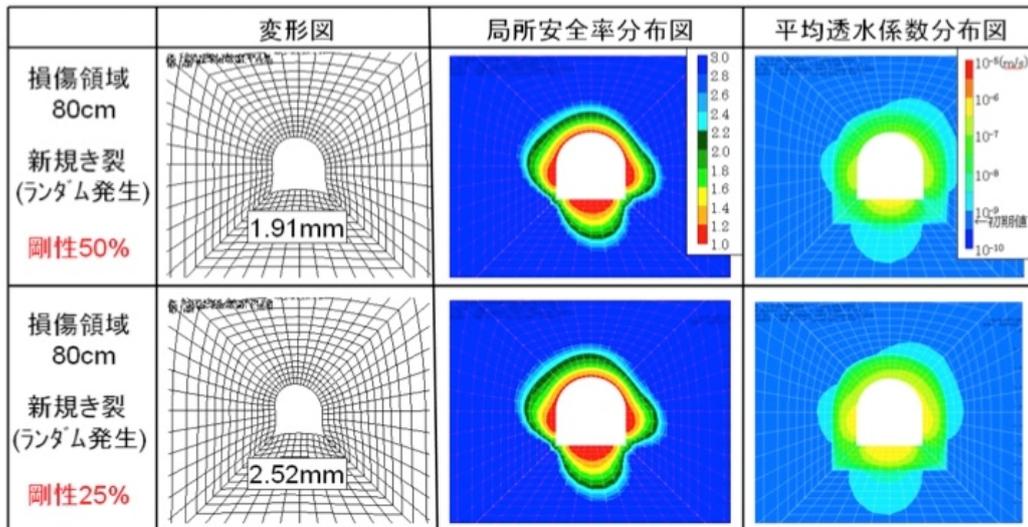


図 4.6-6 クラックテンソルモデルによる坑道掘削解析の例

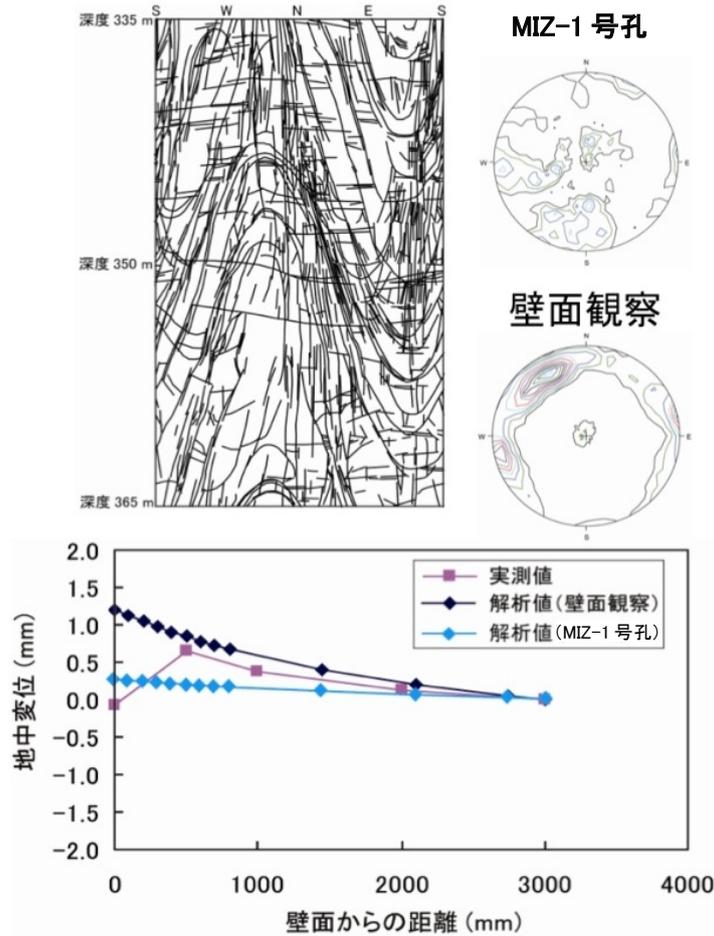


図 4.6-7 解析値と実測値の比較

なお、実際の換気立坑壁面観察結果から求めた割れ目密度、トレース長とこれらに基づき算定したクラックテンソルの  $F_0$  の値について、MIZ-1 号孔までのボーリング調査結果に基づき仮想割れ目モデルを作成して設定したそれらのパラメータと比較すると以下のような相違が見られた。

	(第1段階仮想割れ目モデル)	(換気立坑壁面観察)
割れ目密度 (/m)	0.85~2.29	0.24~2.20
平均トレース (m)	0.83(CH 級岩盤部)	1.53~2.95
$F_0$	1.0~2.85(B,CH,CL 級岩盤部)	4.10~21.4

割れ目密度に関しては、ボーリング孔と立坑といった体積の違いや抽出できる割れ目の解像度の違いによる影響は見られていないようである。これは、MIZ-1 号孔と換気立坑の掘削方向がほぼ同一であったことによると考えられる。一方、割れ目の平均トレース長には大きな差があるが、これは地表からの調査段階で得られたボーリング調査結果からの割れ目のトレース長の評価方法に改善の余地があることを示していると考えられる。等価連続体モデルでは、トレース長の評価が算定される岩盤の等価弾性係数に大きく影響することから、地表からの調査段階での地下空洞の力学的安定性評価の信頼性を向上するためには、地表からの調査段階における割れ目のトレース長の評価方法は今後の重要な課題である。また、空洞掘削によって生じる

応力再配分の範囲は空洞周辺に限定されることから、壁面観察結果のデータからパラメータを設定していく場合、応力変化の範囲を考慮しつつトレース長の分布を設定していくことも精度の良い解析評価の上で留意する必要があると考えられる。

#### (4) 汎用的知見

第1段階で実施した正馬様用地における力学特性調査結果等から、①岩盤の力学的特性は地質・地質構造によって異なる、②土岐花崗岩体の深度方向の物性値分布が一様でない可能性が高いことと、数 m の空洞径の坑道を掘削するにあたり、その力学的安定性評価には数十 m の領域のモデル化が必要となることから、任意の深度で適切な評価を行うために、物性値は原則として 50m ピッチで取得する、③初期応力については、規模の大きな不連続構造（概ねサイトスケールで連続するような規模）を境に主応力値やその方向が大きく変化することを考慮しつつ、適切な応力測定法が適用できる場所で計測を行う、④不連続面の力学物性は、割れ目の成因や方向により異なる可能性があることから、それらを考慮したサンプリングと試験を行う、といった調査方針をたて調査等を進めた結果、深度 500m までの範囲で、適切な概念モデルとそれに基づく力学的環境の把握が行えたものと判断しており、このような考え方は、他の結晶質岩系岩盤を対象とした調査においても適用可能なものである。また、併せてサイトスケール程度の領域では、出現する可能性が高い大規模不連続構造を考慮した領域内の初期応力分布の推定手法も構築した。これにより、初期応力分布と物性値分布等から、領域内の任意の箇所を対象とした力学的環境の設定が可能となり、3次元的な坑道展開を想定した場合の信頼性の高い力学的安定性評価が可能な技術を整備できたと考える。また、地下空洞の力学的安定性評価のための岩盤物性値の設定方法についても、既往の設計の考え方である程度割れ目分布の不均質性も考慮した評価が行えることを確認した。

一方、断層の影響領域は、その分布が局部的であることから、定型の調査によってその力学的物性を評価することは難しく、対象とする影響領域の地質学的性状を踏まえ適切な調査手法により物性値の評価を行うことが必要となる。また、そのような影響領域内の応力を第1段階で適用可能な測定手法（水圧破碎法や DSCA といったコア法）で把握することは困難であり、応力解放法などの手法が適用可能になった環境で必要に応じ計測を行う必要がある。

## 5 深地層における工学技術の基盤の整備

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、施工対策技術および安全確保技術の適用性を段階的に評価し、結晶質岩／淡水系地下水環境における体系化した深地層の工学技術の基礎を提示する。

### 5.1 設計・施工計画技術の開発

#### (1) 目標

研究坑道の施工・維持管理において適用した工学技術の有効性を確認するとともに、それらの高度化を図ることを目標とした。

#### (2) 第1段階における結果概要<sup>16)</sup>

研究坑道のレイアウトについては、主に用地の広さの制約から立坑方式を採用し、主たるアクセス立坑の離隔は、土木学会のトンネル標準示方書「山岳工法編」に基づき、主立坑掘削径(7.5m)の5倍の40mを両立坑道の中心間距離とした。

支保安定性の検討では、第2次取りまとめの手法を踏襲し、地表からの調査結果に基づいて地山区分を行い、この区分に応じて物性値を設定し、日本鉄道建設公団、道路公団などの標準支保パターンを参考に、支保パターンを仮設定した後、2次元・3次元の有限要素法解析により支保発生応力と許容応力を比較することで支保パターンを確定した。

これらの情報に基づき、具体的な施工計画の設定や施工に必要な資機材の選定を行っている。

#### (3) 第2段階における結果概要

第1段階で策定した設計・施工計画に基づき、研究坑道の施工を実施するとともに、深度500mまでの掘削時に取得した各種データを分析・評価することにより、設計・施工計画の妥当性の確認を進めてきた。これにより、以下のような知見が得られた<sup>90),132),133)</sup>。

- ・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および応力解放率など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た。
- ・主立坑側は、断層およびそれに伴う変質部を掘削しているが、一部の区間を除いては、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、厚さなど)は大きな変更なく適用され、支保工の変状も生じていない(主立坑側での支保工に関わる計測結果の例:図5.1-1、主立坑側におけるB計測(支保工応力や岩盤変位の計測)結果の評価:表5.1-1)。また、健全な花崗岩部を掘削している換気立坑側における計測結果は、当初設計に比べ小さい応力・変位のみ観測されている。これらのことから、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。
- ・立坑および水平坑道掘削時の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および実施にあたり有効であった。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、坑道掘削地点でのパイ

ロットボーリング調査の重要性が確認できた<sup>134)</sup>。

- 地震動の観測結果から、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された(図 5.1-2, 図 5.1-3)<sup>135)</sup>。
- 工種ごとのサイクルタイム全体に占める割合については、主立坑では岩盤が脆弱であったため、削孔・装薬・発破の実作業時間が設計値より短縮されており、全体に占める割合も低減しているものの、覆工とその他が大幅に増加している。その他については、設計では見込んでいない設備の故障・修理, 補助工法, スカフォード移動のための時間が大幅に増加している。覆工の増分については、設計では見込んでいない仮設中継ポンプ座用の箱抜き型枠を設置する作業のためにサイクルタイムが大幅に増加しているが、これらの作業がないサイクルにおいても定常的に設計値より大きくなっている。この要因としては、ズリの積み込み時間が設計値を上回っていることが想定されるため、これについては改善が必要と考えられる。設計では想定していなかった、その他に含まれる事項の取扱いについても見直すべきと考えられる(図 5.1-4)。
- 各工種ともに、深度の増加とともにサイクルタイムが大幅に増加している項目は見られず、増減がほとんどないかむしろ減少している項目も認められた。これについては、深度増加に伴うサイクルタイムの増加を作業の習熟による短縮が上回ったものと考えられる(図 5.1-4)。
- 換気立坑においては健岩部を掘削しているが、主立坑と同様にサイクルタイムが大幅に増加している。この原因としては、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, コソク作業の重機化など)や機械保守(掘削機やポンプなど), 発破の施工数(発破孔の数量や長さ)に依存していることが明らかになった。
- 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いる。この原因は、当初想定していた深度の増加によるサイクルタイムの増加分よりも、安全上付加された事項(キブルの運転速度の制限など)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<sup>136),137)</sup>。

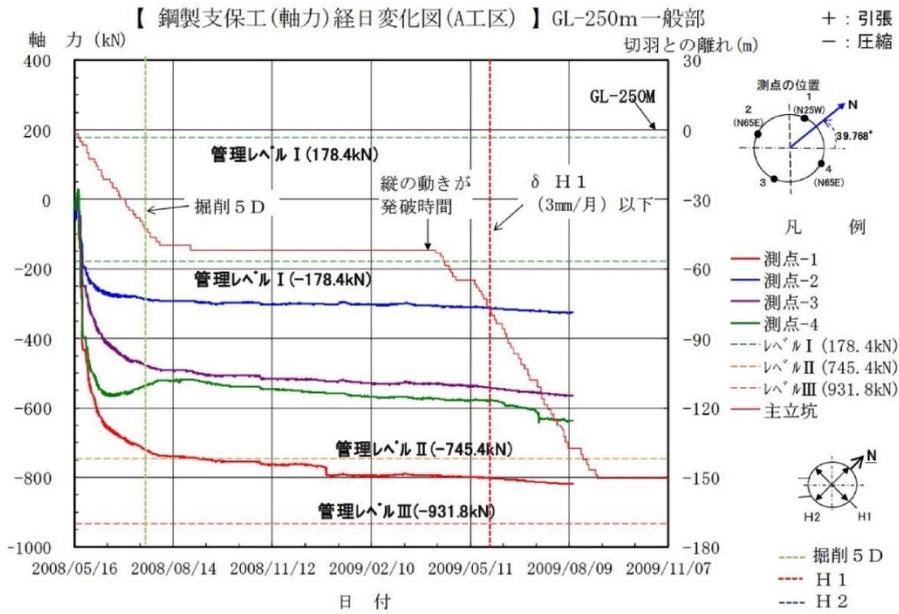


図 5.1-1 主立坑深度 250m 鋼製支保工軸力の計測結果の例<sup>133)</sup>

表 5.1-1 主立坑 B 計測結果の評価の例<sup>133)</sup>

計測深度	深度250m	深度450m
鋼製支保工	管理レベル II を超過しているものもあるが、概ね健全	管理レベル II を超過しているものもあるが、概ね健全
覆工コンクリート	全て管理レベル II 以下であり、ほぼ健全である。	全て管理レベル I 以下であり、健全である。
内空変位	管理レベル II に接近しているとともに、偏圧的な変位となっているが、収束している。	管理レベル I 以下で、収束しており、偏圧的な変形モードも小さい。
評価	覆工コンクリートに最大17N/mm <sup>2</sup> の応力が発生しているが、立坑構造としては、概ね安定性を確保している。ただし、覆工応力が増加傾向なので、今後の監視と坑壁点検が必要	覆工コンクリートに最大12N/mm <sup>2</sup> の応力が発生しているが、立坑構造としては、概ね安定性を確保している。ただし、今後の監視と坑壁点検は必要

最大加速度の深度分布

Data No.	発生日時	震源	環浪市震度	最大加速度 (gal) [計測成分]		
				地表部	GL-100m	GL-300m
1	2008年11月24日 06:15	岐阜県美濃東部 深さ 11km, M:3.9	1	12 [E-W]	7.1 [E-W]	---
2	2009年5月25日 20:26	静岡県西部 深さ 26km, M:4.7	2	5.6 [E-W]	3.1 [E-W]	1.8 [N-S]
3	2009年7月14日 03:57	岐阜県美濃東部 深さ 50km, M:3.4	2	6.5 [E-W]	3.1 [E-W]	2.0 [E-W]
4	2009年7月27日 09:44	愛知県西部 深さ 40km, M:4.0	2	8.2 [N-S]	3.0 [N-S]	1.9 [E-W]
5	2009年8月11日 05:07	駿河湾 深さ 23km, M:6.5	3	30.8 [E-W]	14.7 [N-S]	6.7 [E-W]
6	2011年3月11日 14:46	三陸沖 深さ 24km, M:9.0	3	10.4 [N-S]	7.7 [N-S]	5.7 [U-D]
7	2011年12月14日 13:11	岐阜県美濃東部 深さ 50km, M:5.2	3	68.7 [U-D]	40.3 [E-W]	29.8 [E-W]

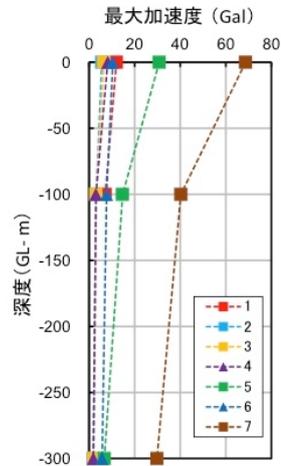


図 5.1-2 地表および研究坑道において観測された地震動<sup>90)</sup>

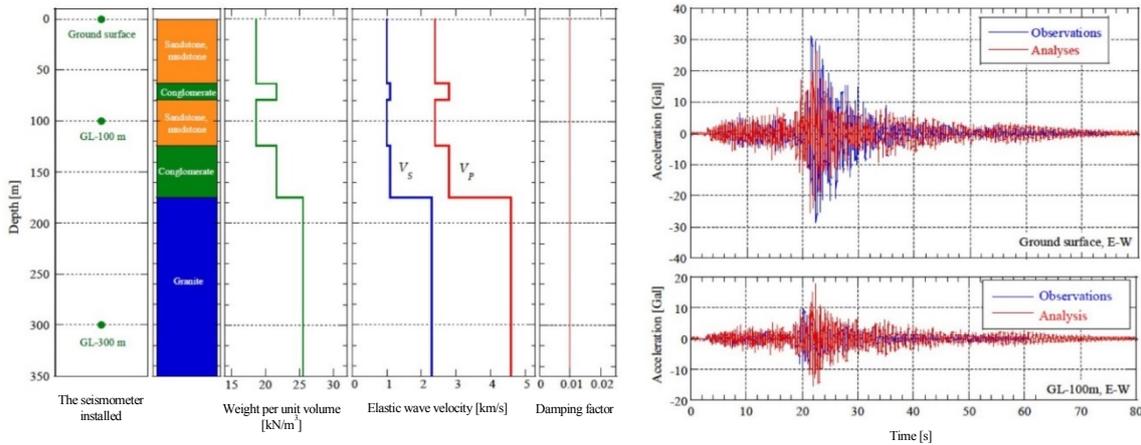


図 5.1-3 2009 年 8 月 11 日の駿河湾地震で観測された地震動の実測と解析の比較<sup>135)</sup>

なお、一般的な情報化施工技術は、掘削毎の地質観察結果の他、変位計測（内空変位、岩盤内変位等）を定常的に行い、その結果に基づき設計の妥当性を確認しつつ必要に応じ支保工の最適化などのフィードバックをかける方法である。瑞浪超深地層研究所の掘削工事の場合には、排水処理等の問題と主立坑側と換気立坑側で地質や岩盤の力学特性が大きく異なっていた等から、先行ボーリング調査によって掘削部分の状況を把握した上で、必要な対処を行っている。具体的には、主立坑については、先行ボーリング調査によって深度 500m まで脆弱な地質状況が大きく変わらないことが明らかとなったため、適用試験を行いある程度の岩盤の補強効果が見られた後述のレジンを脆弱部に行いつつ掘削した。また換気立坑では、深度 500m までの範囲では健全な土岐花崗岩が分布していることが明らかとなったため、岩盤の力学的安定性に問題が生じる可能性はほとんどなかったことから、特に湧水に着目した探り孔の掘削（掘削長 10m）を行いつつ立坑掘削を進めた<sup>138),139)</sup>。これらの方法により、深度 500m までの間、排水処理に関する大きな問題も生じることなく安全に両立坑の掘削が実施できている。このことから、先行ボーリング調査による施工方法等の最適化は、地質状況が複雑な際には有効であることを確認できた。

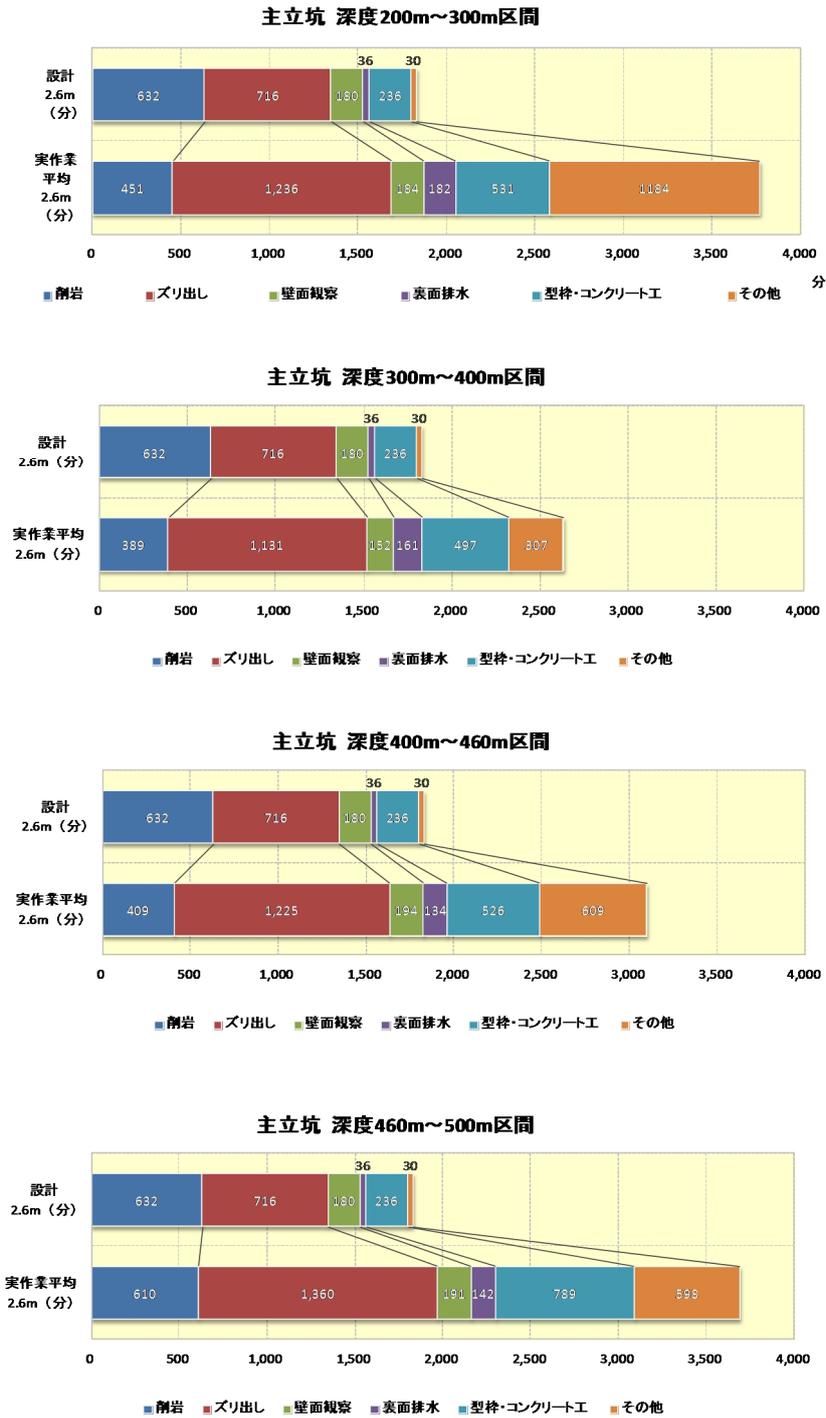


図 5.1-4 サイクルタイム設計・実績比較（主立坑、接続部を除く）<sup>133)</sup>

(4) 汎用的知見

第2次取りまとめで示された既往の地下空洞の設計・施工計画の手法は、瑞浪超深地層研究所の建設工事に実際に適用され、第2段階における検証を経てその有効性が確認できた。また、設計の更なる信頼性向上のためには、第1段階において掘削対象領域内のパイロットボーリング調査を実施することが有効であることを併せて示した。

## 5.2 建設技術の開発

### (1) 目標

建設技術，施工対策技術および安全確保技術の適用性を段階的に評価し，工学技術の有効性を確認するとともに，それらの高度化を図ることを目標とした。

### (2) 第1段階における結果概要

施工計画の検討においては，最も工程に影響を与える立坑部を中心とした検討を行い，掘削のサイクルと1回あたりの発破進捗の関係を検討し，安全かつ最も効率のよい掘削工法・掘削サイクルとして，1.3mの発破とズリ搬出を2回繰り返した後に，2.6mの覆工を打設する変則的なショートステップ工法を採用することとした。また，深度500m以深の掘削ではズリキブルを2台用いる替キブル方式を採用することで，掘削速度を向上させることが可能であることを示した。

### (3) 第2段階における結果概要

第1段階で選定した建設技術により，安全かつ合理的に深度500mまでの掘削が実施できることを実証的に示した<sup>140)</sup>。主立坑部の掘削では一部スームブラスティング工法の適用を試みたが，断層の影響により岩盤が脆弱になっていたことと，装薬孔の穿孔角度の制約から余掘の減少などの効果はほとんど認められておらず，立坑部の掘削における同工法の適用には資機材の改良が必要なことが分かった<sup>90)</sup>。

主立坑は，主立坑断層沿いに掘削が進んだことから，健全な土岐花崗岩である換気立坑に比べ著しく脆弱な岩盤中を掘削することになり，湧水は生じなかったものの覆工設置時にも背面の岩盤が抜け落ちるような現象が生じた。このため，レジンを岩盤に注入することにより脆弱部の強度増加をはかる対策工を一部に適用し，その効果を検証した<sup>90)</sup>。

覆工長さの低減や NATM など，立坑に適用できる方法はいくつか考えられたが，今回は立坑掘削直後の壁面の自立性の確保に優れたシリカレジンによる周辺地山の締め付け効果と短期間の固結性に期待し，地山補強注入工を選択した。まず，立坑掘削に先立ち実施する鉛直斜め下方への先受け工を実施し，実施対象領域の掘削後に立坑壁面からの垂直方向への補強工を実施した。得られた成果は以下のとおりである<sup>90),140)</sup>。

- ・覆工コンクリートの打設量から算出した余掘量については，深度130m以浅の安定した地山では設計値に対して50～100%増（平均値：75%増）であったものの，地山崩落が発生した箇所では150%増を超過したが，シリカレジンによる対策を実施した箇所では平均100%増まで低減した。
- ・シリカレジンの注入のために大掛かりな設備や機械を投入することなく，シャフトジャンボを用いたことで，立坑掘削のサイクルタイムに組み入れて効率的に対策工を実施することができた。
- ・ショートステップによる発破工法は，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。

(4) 汎用的知見

ショートステップ発破工法は、古典的な工法ではあるが、地質状況の変化にフレキシブルに対応しつつ小口径の立坑を安全に掘削する観点からは実用性が高い方法である。

### 5.3 施工対策技術の開発

#### (1) 目標

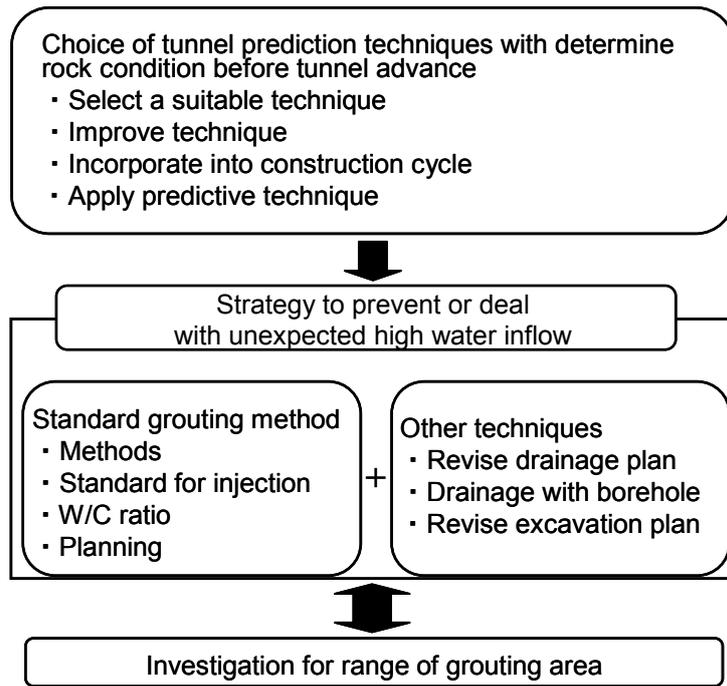
実際の地質環境が推定結果と大きく異なる場合や、突発的な事象が発生した場合などにおいては、設計および施工計画の変更に対処できることを示すことを目標とした。

#### (2) 第1段階における結果概要<sup>16)</sup>

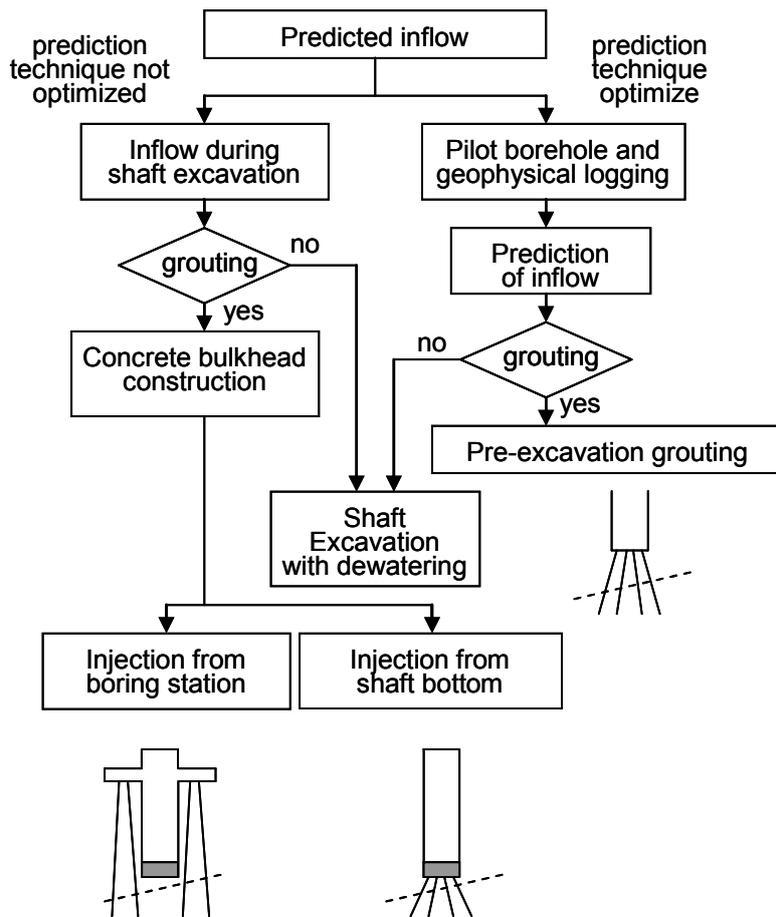
第1段階では、立坑工事における突発事象の中で、予期しない大量の湧水、すなわち突発湧水を避けなければいけないトラブルのひとつとして対策を検討していた。この際、坑道掘削に伴い突発湧水や大量出水が発生した後での対応（ポストグラウト：坑道掘削後の注入）は期間と予算が多大となることが想定されたため、プレグラウト（坑道掘削前の注入）を基本的な対策工とした上で、検討を進めた。図 5.3-1 は設計時に想定した突発湧水に伴う対策工とグラウトを行う場合の概略的な手順を示している。

具体的には、地質条件から湧水を伴う割れ目出現深度を想定し、これらに対処するための前方予測調査計画、グラウチング実施基準などの計画、その他の対策技術の検討を実施した。前方予測技術としては、直接的な先行ボーリング調査と間接的な物理探査手法を選択肢として挙げていた。グラウチングの実施については、想定される湧水発生箇所、湧水量および排水設備（ポンプ能力など）を勘案し、通常排水工法からの切り替え基準、グラウチング判定フロー、注入圧力基準、注入完了基準といったものの検討を実施した。具体的には、既往の事例や指針などを参照して、注入孔は掘削半径の2.5倍の範囲を1.5mピッチで内挿する配置で計画した。

その他、深部硬岩領域で発生が懸念される山はね現象や、立坑坑壁で主に不連続面に沿って岩塊が滑落する高抜け現象について事例調査を行うとともに、その発生可能性や対策工法などの検討を行った。



a) 突発湧水時の対策工



b) グラウチングの概略的な手順

図 5.3-1 第 1 段階における突発湧水に対する対策工の検討例<sup>16)</sup>

(3) 第2段階における結果概要

第2段階では、研究坑道の建設工程に非常に大きな影響を及ぼすことと水平坑道については既存のトンネル工事などの知見が豊富にあることから、立坑およびその周辺の湧水対策をまず検討した上で、その知見を水平坑道掘削時にも展開している。排水処理対策（ふっ素、ほう素を環境基準値以下まで低減させること）と既存の排水処理プラントの容量および主立坑、換気立坑中心地点のパイロットボーリング調査による湧水箇所の特定と、調査結果に基づく研究坑道掘削時の湧水量予測の再解析（2次元、3次元解析および理論解による評価）の結果に基づき、現実に即した形でのプレグラウチング計画に変更している<sup>55),141)</sup>。主なポイントは以下の通りである。

- ・深度500mの範囲では、主立坑断面内およびその周辺で湧水は発生せず、換気立坑側では深度200m付近に分布する低角度傾斜の割れ目集中帯と400～460m間、水平坑道では深度300mの主立坑北側、深度500mの換気立坑南側に存在する水みちからの多量の湧水が生じることが想定されたことから、グラウチング対象領域として設定した。
- ・排水処理設備容量(深度500mの範囲までは、1500m<sup>3</sup>/day)、再解析で得られた予測湧水量(第1段階の予測結果(深度500mまでの掘削時に6000m<sup>3</sup>/day)の1/3程度)を勘案し、4割程度の湧水量の削減を目標として掲げ、図5.3-2に示す緩み領域の範囲とその透水性を考慮できる理論式に基づく改良目標の透水係数と幅の設定を行った(図5.3-3)。
- ・注入材料は、通常の普通ポルトランドセメント、超微粒子セメントを使用し、プレグラウトの実施にあたっては、従来の薄いセメントミルクの注入から順次濃いセメントミルクの注入に切り替える配合に加えて、パイロットボーリング掘削時の湧水抑制対策実績を踏まえ高濃度のセメントミルク(C:W=1:0.75程度)まで注入する配合を採用した<sup>55)</sup>。さらに、地山の透水係数が大きい場合には初期配合において濃いセメントミルクを注入することにより早期に水みちを閉塞することで、周辺の地質環境への影響が及ぶ範囲を最小化しつつグラウチング効果が見込まれる方法を採用した。
- ・前方予測調査としては、空洞周辺岩盤中の改良対象範囲が狭いことから、効率的に水みちを特定しグラウチング効果を得るため、切羽前方への探り削孔と水押し試験による透水性評価を適用した。

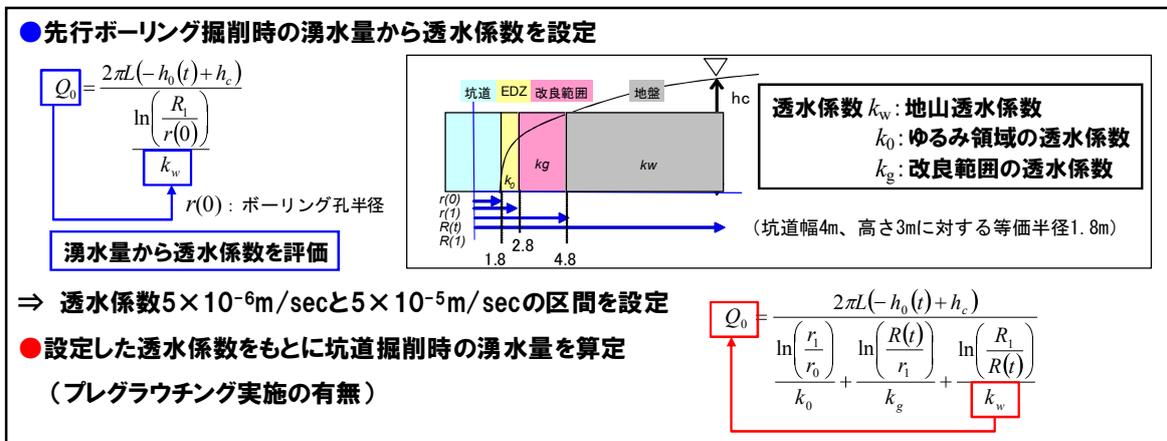


図 5.3-2 理論式に基づく改良目標値設定の考え方<sup>55)</sup>

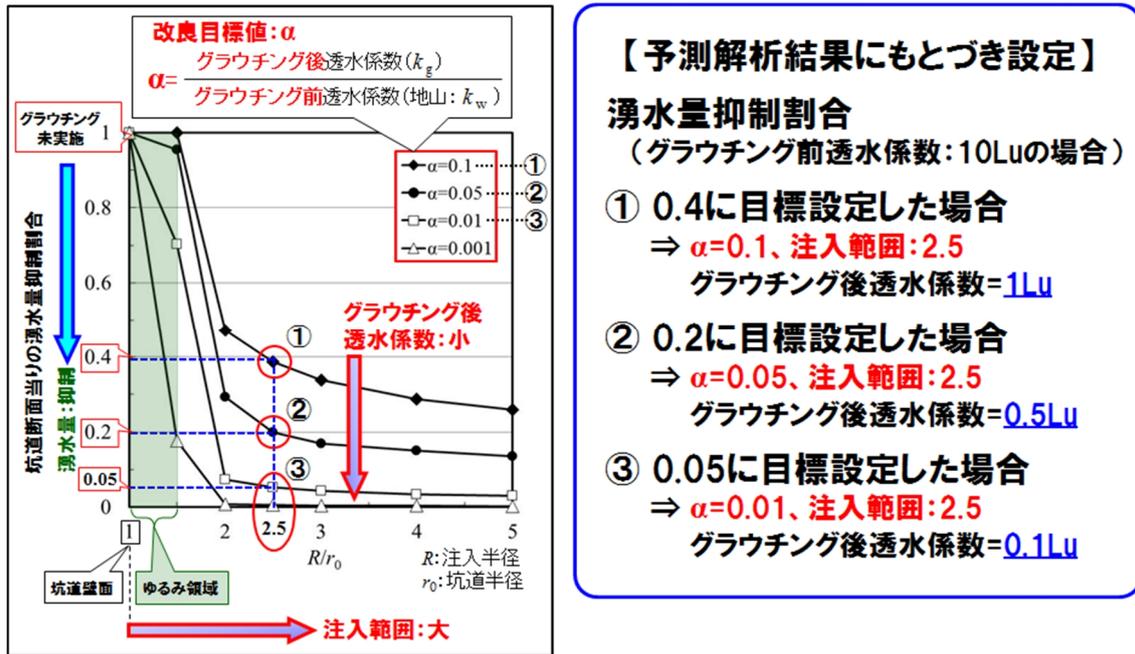


図 5.3-3 理論式から得られる湧水低減割合と改良幅との関係<sup>55)</sup>

上記の考え方に基づくプレグラウチングにより、深度 500m までの範囲で掘削した研究坑道全体からの湧水量は最大 900m<sup>3</sup>/day 程度であり、パイロットボーリング調査に基づく予測湧水量（深度 500m の範囲で 2500m<sup>3</sup>/day）の 3 割程度に抑えることができ、当初目標とした湧水抑制が十分なされていると考えられる。さらに溶液型グラウトの試験施工も実施し、この材料を用いることでより透水性の低い岩盤部分の改良が可能であることも実証的に示した。

(4) 汎用的知見

湧水対策については、以下のような知見が上げられる。

- ・結晶質岩のような割れ目が地下水の流路となる岩盤を対象とした場合、効果的・合理的な湧水抑制対策を行う上では、掘削断面内の先行パイロットボーリング調査が非常に有効である。
- ・湧水の低減目標の設定には、これまで構築した理論解に基づく検討が実務的な観点からも有効である。また、その検討結果から、湧水量の低減目標によらず、効果的な空洞周辺岩盤中の改良幅は大きく変わらないと考えられる（瑞浪超深地層研究所の研究坑道の場合は 3m 程度）
- ・湧水抑制対策の改良対象範囲が狭い場合には、前方予測調査としては、広範囲を対象とした物理探査ではなく、探り削孔と水押し試験が効率的・効果的である。

## 5.4 安全を確保する技術の開発

### (1) 目標

掘削中及び掘削後の研究坑道内の安全を確保するための技術を整備することを目標とした。

### (2) 第1段階における結果概要

防災コンセプトの検討として、通気網解析による検討を実施し、研究坑道内の避難所の位置や仕様を検討するとともに、換気設備や消防設備の設計を行った。図 5.4-1 に通気システムの概要を示す。深度 1000m の研究坑道の通気システムは、立坑全体を利用した坑道換気と、局部換気ファンと風管による換気を併用するシステムを想定していた。

また、瑞浪超深地層研究所が世界でも有数の大深度研究坑道であり、建設工事事例も少ないことから、様々なリスクが内在し工事に重大な影響を及ぼすことが懸念されたため、リスクマネジメント手法を導入し（図 5.4-2）、リスク要因の抽出・特定とその影響の定量化を図った。

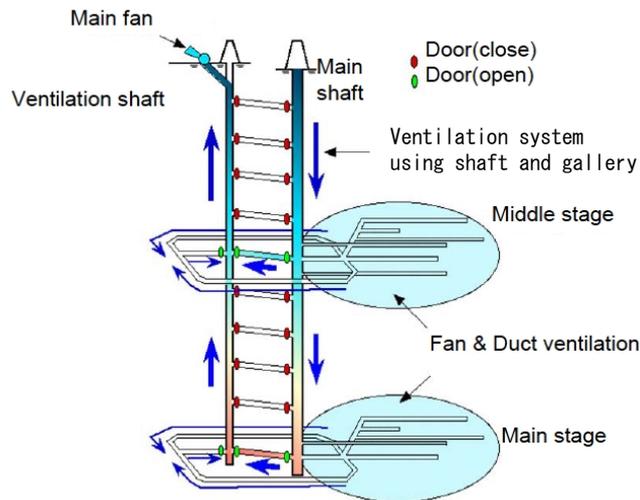


図 5.4-1 第1段階で検討した通気概念<sup>16)</sup>

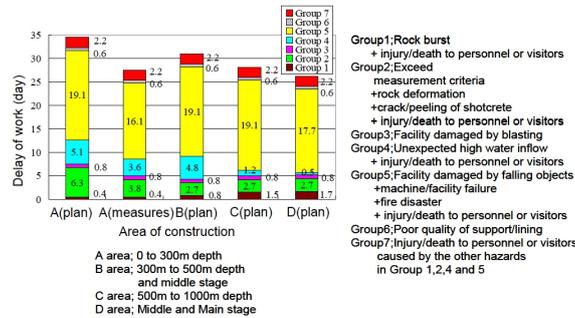
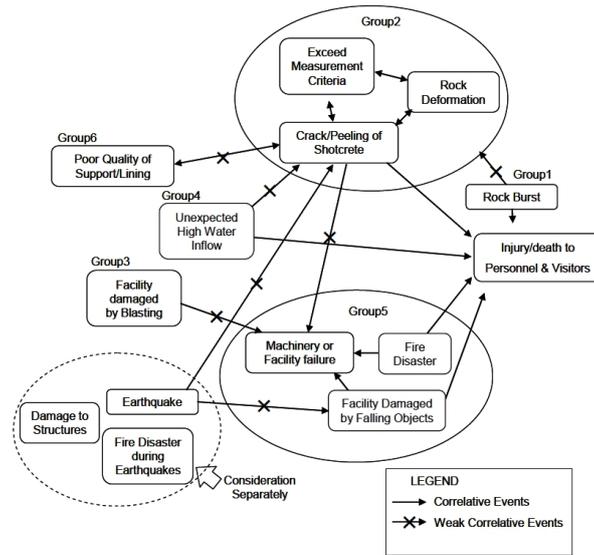


図 5.4-2 第 1 段階で適用したリスクマネジメント手法<sup>16)</sup>  
 (上：リスク要因相関図，下：個々のリスクが発生した場合の損失の見積もり)

(3) 第 2 段階における結果概要

深度 500m までの研究坑道の通気システムは、坑道内作業環境維持の観点から、局部換気ファンと風管を用いている。

リスクマネジメント手法については、地表からの調査段階で得られる情報に基づき、サイト毎に固有のリスクも含んだ評価を行う必要があるという観点から、前述の関連図と調査をリンクさせた形で第一段階から適用可能な評価フローに更新するとともに、それに基づくリスクの再評価を実施した (図 5.4-3)<sup>142)</sup>。

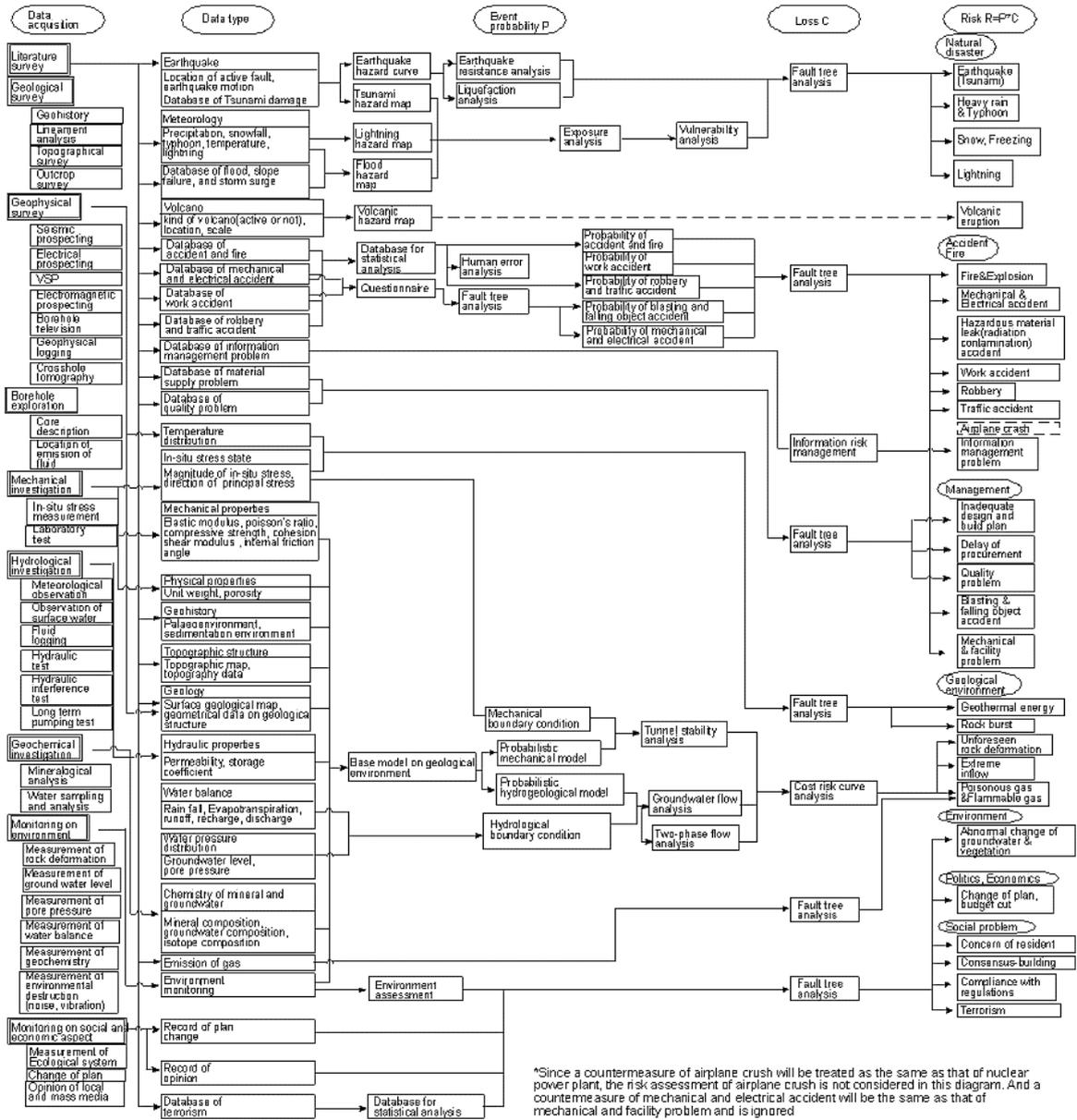


図 5.4-3 地表からの調査段階で得られる情報を考慮したリスク評価のフロー<sup>142)</sup>

また、坑道の維持管理の観点での技術として、定期的な点検等が大変な立坑部を対象に、坑道壁面全周を画像データとして取り込みひび割れ等の変状箇所の早期発見をするためのシステムの構築と試行を行った。その結果、実際に覆工に発生したひび割れを撮影画像から抽出できることを確認した（図 5.4-4）<sup>133)</sup>。

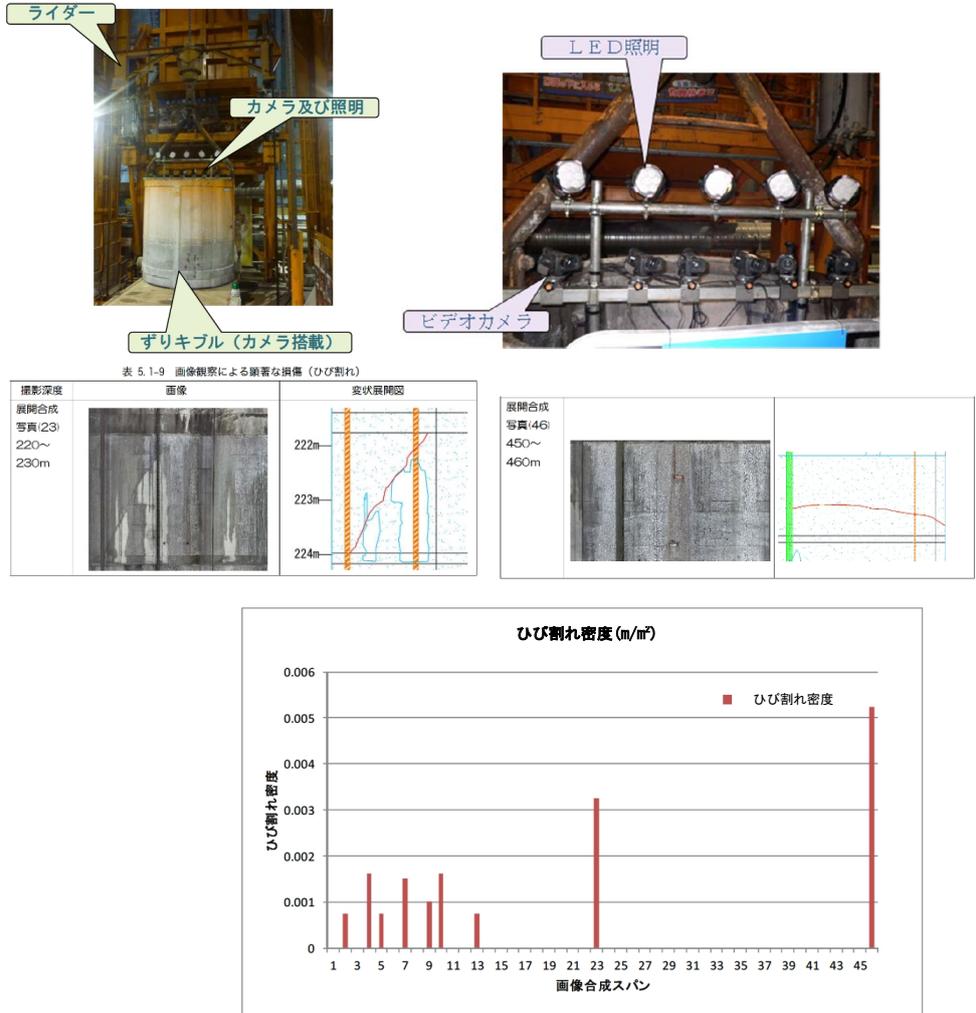


図 5.4-4 立坑覆工の健全性評価技術（画像によるひび割れ判読技術）の適用例<sup>133)</sup>

(4) 汎用的知見

安全確保については、構造物の使用目的があり、その目的と、構造物が建設される場所の地質環境が有する固有の特徴も勘案したリスク評価やそれに対する対策の検討が求められる。地下に構造物を作る場合は、空洞内への地下水流入とそれによって発生するリスクは、岩盤の種類等によらず一般的に評価すべきものであるが、それ以外のリスク要因も考慮した形での図 5.4-3 に示したような網羅的評価を第 1 段階から実施することが、地層処分を含む地下空間利用プロジェクトにおいて経済性・合理性の観点から有効と考えられる。

## 6. まとめ

超深地層研究所計画の第2段階の段階目標のうち、「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」と、「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」に対し、以下の成果を得た。

### 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）を更新した。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した。さらに、坑道壁面の調査や坑道からのボーリング調査によって新たに取得した情報に基づき、地質環境モデル（ブロックスケール）を更新し、地表や坑道から実施する調査・解析・評価の手法と結果の精度との関係を把握した。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、研究坑道の掘削による深部地質環境の変化を把握するとともに、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した。主な結果は以下のとおりである。

- ・ 花崗岩を対象とした地質構造の三次元的分布の把握に関しては、坑道から実施した地質調査、物理探査、ボーリング調査の結果を踏まえて、第1段階で推定した低密度割れ目帯の分布の妥当性を確認するとともに、断層ガウジと変質部の分布を考慮して、モデルを更新した。坑道周辺に分布する花崗岩中の断層については、前方探査（逆 VSP 探査）により分布を把握できる可能性がある。
- ・ 地下水の流動特性の把握と地下空洞への地下水流入状態の把握に関しては、立坑における流入量と、地表および研究坑道からのボーリング孔を用いた地下水圧のモニタリングを行い、研究坑道の掘削に伴う変化を把握した。その結果、主立坑断層を境として水圧低下量が大きく異なること、表層部の自由地下水は坑道掘削の影響による水位低下が生じていないこと、立坑近傍でスキン効果が生じていることが分かった。地下水流入量や流入箇所予測では、パイロットボーリング調査と、その結果に基づくグラウチングの施工の有効性を確認した。また、モニタリング結果を用いて、断層などの低透水性構造に囲まれた領域を考慮して水理地質構造モデルを更新するとともに、移流分散解析によって塩化物イオン濃度の変化傾向を概括的に再現した。加えて、第1段階と第2段階における入力パラメータの設定方法の違いと変更理由、観測手法の適用性とモニタリングに係わる考慮事項を整理した。
- ・ 地下水の地球化学特性の把握に関しては、主に研究坑道からのボーリング孔を用いて、地下水の塩分濃度などの分析、pH、Eh の測定を行い、研究坑道の掘削に伴う地球化学特性の変化を把握した。その結果、掘削に伴う恒常的な地下水位の低下により、深部の地下水の湧昇の後、徐々に浅層地下水の浸透割合が増加していると推測された。加えて、技術的な知見として、掘削に伴う変化を把握するためには、モニタリング孔のレイアウトを、断層

などの低透水性構造に囲まれた領域ごとに配置する必要があることや、鉄鉱物などの酸化還元電位制限固相が人為的に孔壁に付着すると、調査データの品質低下要因となるため、孔壁の確認や長期モニタリングが必要であることが分かった。

- ・物質移動の遅延効果の把握に関しては、国内外の研究事例を参考に、「調査」から「モデル化・解析」までの合理的な道すじを示した統合化データフローダイアグラムを構築するとともに、研究坑道壁面やボーリング孔から採取した岩石試料を用いて、物質の移行経路となる割れ目の地質学的特徴や透水性を把握、類型化するとともに、実際の坑道における割れ目の分布を三次元的に可視化した。微生物の影響については、ボーリング掘削水中の微生物による汚染に対して紫外線により滅菌するシステムを適用し、研究坑道から掘削したボーリング孔から地下水を採取し、微生物の群集組成の解析を行った。その結果、微生物は、硝酸や硫酸などの酸化剤を消費して地下環境を還元的に維持するなど、群集組成を変えながら水質の変化を緩衝している可能性が考えられた。
- ・EDZの地質環境特性の把握に関しては、立坑の掘削に伴う岩盤のひずみ・変位を計測した結果、クラックテンソル理論に基づく予測解析による値と概ね同じオーダーであったが、半径方向のひずみの計測地が圧縮を示したことから、割れ目の挙動による変形が支配的であると推定された。また、深度 500m までの研究坑道では、応力的な破壊現象は観察されず、かつ発破掘削による損傷は、壁面から 1m 程度内に収まると考えられた。
- ・地下空洞の力学的安定性の把握に関しては、研究坑道において、湧水対策を施した応力解法による初期応力測定を実施し、3次元応力状態を把握するとともに、第1段階の予測結果の妥当性の確認と、岩盤力学モデルの更新を行った。

以上の調査研究を実施することにより、サイトスケールやブロックスケールの地質環境モデルを段階的に構築・更新するための体系的な考え方を示すとともに、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段階から第2段階までに実施した一連の調査・解析・評価手法の妥当性を確認した。また、断層などの低透水性構造に囲まれた領域を考慮した調査とモニタリングの有効性を確認し、それらの結果を踏まえた解析・評価の事例や、移流分散解析によって塩化物イオン濃度の変化傾向を概括的に再現する手法を示した。

## 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った。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し、研究坑道の施工・維持・管理にかかわる工学技術の有効性を確認した。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した。主な結果は以下のとおり。

- ・設計・施工計画技術の開発に関しては、研究坑道の施工時に取得した各種データの分析・評価により、設計・施工計画の妥当性を確認した。パイロットボーリング調査は、湧水抑制対策の計画策定および実施や、支保工設計時の物性データ評価に対して有効であり、その重要性を確認した。地震動の観測により、地表に比べて地下の地震動が低下することが確認され、耐震設計が十分な安全尤度を持つことが示された。

- 建設技術の開発に関しては、脆弱部の強度増加をはかるシリカレジンを対策工の有効性を把握するとともに、ショートステップ発破工法は、小口径の立坑を安全に掘削する観点からは、地質状況の変化に対応できる実用性が高い方法であることを確認した。
- 施工対策技術の開発に関しては、プレグラウトの実施に際し、従来の手法に加えて超微粒子セメントを使用するとともに、高濃度のセメントミルクを採用した。さらに、湧水抑制対策の改良対象範囲が狭いため、前方予測調査として、切羽前方への探り削孔と水押し試験による透水性評価を適用し、これらの手法が効率的・効果的であることを確認した。
- 安全を確保する技術の開発に関しては、立坑部を対象とした画像データによるひび割れ等の変状箇所の有無を点検するシステムを構築、試行を行った。また、地下水流入とそれにより発生するリスクのほか、それ以外のリスク要因も考慮した網羅的評価について、検討を行った。

以上のように、第2段階では、実際の結晶質岩における地質環境を対象とした一連の地表からの調査・評価技術を整備することができ、概要調査や精密調査での地表からの調査の技術基盤となる技術的知見が得られた。

参考文献

- 1) 原子力委員会：“原子力の研究，開発及び利用に関する長期計画”，2000，67p.
- 2) 原子力委員会：“原子力政策大綱”，2005，52p.
- 3) 佐久間秀樹，長谷川健，吉田英一，戸高法文，杉原弘造，小出馨，瀬尾俊弘：“超深地層研究所地層科学研究基本計画”，PNC-TN7070 96-002，1996，20p.
- 4) 核燃料サイクル開発機構：“超深地層研究所地層科学研究基本計画”，JNC TN7410 2001-009，2001，100p.
- 5) 核燃料サイクル開発機構：“超深地層研究所地層科学研究基本計画”，JNC TN7410 2001-018，2002，103p.
- 6) 資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画”，2010，73p.
- 7) 日本原子力研究開発機構：“超深地層研究所地層科学研究基本計画”，JAEA-Review 2010-016，2010，37p.
- 8) 三枝博光，松井裕哉，濱 克宏，佐藤稔紀，鶴田忠彦，竹内竜史，國丸貴紀，松岡稔幸，水野崇：“超深地層研究所計画における調査研究の考え方と進め方－深度 500m までの調査研究計画－”，JAEA-Review 2011-022，2011，78p.
- 9) 核燃料サイクル開発機構：“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 分冊 3 我が国の地質環境”，JNC TN1400 99-023，1999，526p.
- 10) 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ 分冊 1 深地層の科学的研究－”，JNC TN1400 2005-014，2005，415p.
- 11) 原子力発電環境整備機構：“高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性－「処分場の概要」の説明資料”，NUMO-TR-04-01，2004，250p.
- 12) 濱克宏，見掛信一郎，西尾和久，川本康司，山田信人，石橋正祐紀，村上裕晃，松岡稔幸，笹尾英嗣，真田祐幸，大貫賢二，佐藤成二，別府伸治，尾上博則，竹内竜史，三枝博光，大森一秋，長谷川隆，宗本隆志，湯口貴史，岩月輝希，岩崎理代，池田幸喜，堀内泰治，佐藤稔紀，大澤英昭，小出馨，杉原弘造：“超深地層研究所計画 年度報告書(2013 年度)”，JAEA-Review 2014-038，2014，137p.
- 13) 濱克宏，水野崇，笹尾英嗣，岩月輝希，三枝博光，佐藤稔紀，藤田朝雄，笹本広，松岡稔幸，横田秀晴，石井英一，津坂仁和，青柳和平，中山雅，大山卓也，梅田浩司，安江健一，浅森浩一，大澤英昭，小出馨，伊藤洋昭，長江衣佐子，夏山諒子，仙波毅，天野建治：“第 2 期中期計画期間における研究成果取りまとめ報告書－深地層の研究施設計画および地質環境の長期安定性に関する研究－”，JAEA-Research 2015-007，2015，269p.
- 14) 濱克宏，佐藤稔紀，笹尾英嗣，岩月輝希，國丸貴紀，松岡稔幸，竹内竜史，尾上博則，見掛信一郎：“超深地層研究所計画 統合化データフローの構築(研究坑道の掘削を伴う研究段階：第 2 段階)”，JAEA-Data/Code 2013-010，2013，58p.
- 15) 日本原子力研究開発機構：“超深地層研究所地層科学研究基本計画”，JAEA-Review 2010-016，2010，37p.

- 16) 三枝博光, 瀬野康弘, 中間茂雄, 鶴田忠彦, 岩月輝希, 天野健治, 竹内竜史, 松岡稔幸, 尾上博則, 水野崇, 大山卓也, 濱克宏, 佐藤稔紀, 久慈雅栄, 黒田英高, 仙波毅, 内田雅大, 杉原弘造, 坂巻昌工: “超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第1段階)研究成果報告書”, JAEA-Research 2007-043, 2007, 337p.
- 17) 松岡稔幸, 熊崎直樹, 三枝博光, 佐々木圭一, 遠藤令誕, 天野健治: “繰り返しアプローチに基づく地質構造のモデル化(Step1 および Step2)”, JNC TN7400 2005-007, 2005, 99p.
- 18) 石橋正祐紀, 栗原新, 松岡稔幸, 笹尾英嗣: “超深地層研究所計画におけるサイトスケール地質構造モデルの構築—第2段階における Shaft180 から Stage300 地質構造モデルへの更新—”, JAEA-Research 2012-018, 2012, 48p.
- 19) 大澤英昭, 太田久仁雄, 濱克宏, 澤田淳, 竹内真司, 天野健治, 三枝博光, 松岡稔幸, 宮本哲雄, 豊田岳司, 岩月輝希, 前川恵輔, 國丸貴紀, 新里忠史, 浅森浩一, 平賀正人, 山中義彰, 重廣道子, 島田顕臣, 阿部寛信, 梅木博之: “「地質環境総合評価技術高度化開発 - 次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発 - 」平成 19 年度成果報告書(受託研究)”, JAEA-Research 2008-085, 2008, 742 p.
- 20) 湯口貴史, 鶴田忠彦, 西山忠男: “中部日本土岐花崗岩体の岩相と化学組成の累帯変化”, 岩石鉱物科学, Vol.39, 2010, pp.50-70.
- 21) 核燃料サイクル開発機構: “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—; 分冊1 わが国の地質環境”, JNC TN1400 99-021, 1999, 559p.
- 22) 鶴田忠彦, 竹内真司, 竹内竜史, 水野崇, 大山卓也: “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”, JAEA-Research 2008-098, 2008, 116p.
- 23) 川本康司, 窪島光志, 石橋正祐紀, 鶴田忠彦, 笹尾英嗣, 池田幸喜, 見掛信一郎, 原郁夫, 山本勝: “超深地層研究所計画 瑞浪超深地層研究所 深度 300m~500m の研究坑道の壁面地質調査データ集”, JAEA-Data/Code 2012-025, 2013, 32p.
- 24) 窪島光志, 石橋正祐紀, 笹尾英嗣, 鶴田忠彦, 田上雅彦, 湯口貴史: “超深地層研究所計画 地質・地質構造に関する調査研究 - 深度 300m までの地質・地質構造 - ”, JAEA-Research 2012-037, 2013, 78p.
- 25) 鶴田忠彦, 笹尾英嗣, 川本康司, 窪島光志, 石橋正祐紀: “超深地層研究所計画 地質・地質構造に関する調査研究—深度 300m から 500m までの地質・地質構造—”, JAEA-Research 2013-014, 2013, 35p.
- 26) Yuguchi, T., Amano, K., Tsuruta, T., Danhara, T. and Nishiyama, T.: “Thermochronology and the three-dimensional cooling pattern of a granitic pluton: An example from the Toki granite, Central Japan”, Contributions to Mineralogy and Petrology, Vol.162, 2011, pp.1063-1077.
- 27) Yuguchi, T., Tsuruta, T. and Nishiyama, T.: “Three-dimensional cooling pattern of a granitic pluton I: The study of exsolution sub-solidus reactions in the Toki granite, Central Japan”, Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, Vol.106, 2011, pp.61-78.
- 28) Yuguchi, T., Tsuruta, T. and Nishiyama, T.: “Three-dimensional cooling pattern of a granitic pluton II: The study of deuteric sub-solidus reactions in the Toki granite, Central Japan”, Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, Vol.106, 2011, pp.130-141.

- 29) Yuguchi, T., Tagami, M., Tsuruta, T. and Nishiyama, T.: “Three-dimensional fracture distribution in relation to local cooling in a granitic body: An example from the Toki granitic pluton, Central Japan”, *Engineering Geology*, Vol.149-150, 2012, pp.35-46.
- 30) 川本康司, 窪島光志, 石橋正祐紀, 鶴田忠彦, 笹尾英嗣, 池田幸喜, 見掛信一郎, 原郁夫, 山本勝: “超深地層研究所計画 瑞浪超深地層研究所 研究坑道の壁面調査データ集”, JAEA-Data/Code 2012-009, 2012, 47p.
- 31) 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: “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”, JAEA-Research 2010-039, 2010, 135p.
- 32) 石橋正祐紀, 安藤友美, 笹尾英嗣, 湯口貴史, 西本昌司, 吉田英一: “深部結晶質岩における割れ目の形成・充填過程と透水性割れ目の地質学的特徴—土岐花崗岩を例として—”, *応用地質*, Vol.55, 2014, pp.156-165.
- 33) 徳安真吾, 松岡稔幸, 程塚保行: “自然電位測定を用いた瑞浪超深地層研究所周辺の水理地質構造の推定に関する研究”, JAEA-Research 2012-007, 2012, 55p.
- 34) 川本康司, 黒岩弘, 山田信人, 大貫賢二, 大森一秋, 竹内竜史, 尾方伸久, 大森将樹, 渡辺和彦: “深度 500m 研究アクセス南坑道における先行ボーリング調査報告書(12MI32 号孔)”, JAEA-Technology 2014-011, 2014, 92p.
- 35) 石橋正祐紀, 笹尾英嗣, 窪島光志, 松岡稔幸: “超深地層研究所計画におけるサイトスケール地質構造モデルの構築—第 2 段階における Shaft460 および Shaft500 地質構造モデルへの更新—”, JAEA-Research 2013-019, 2013, 31p.
- 36) 西尾和久, 島田顕臣(編): “「平成 25 年度 東濃地科学センター 地層科学研究 情報・意見交換会」資料集”, JAEA-Review 2013-060, 2014, 97p.
- 37) 鶴田忠彦, 武田匡樹, 上野孝志, 大丸修二, 徳安真吾, 尾上博則, 新宮信也, 石橋正祐紀, 竹内竜史, 松岡稔幸, 水野崇, 田上雅彦: “超深地層研究所計画; 主立坑断層を対象としたボーリング調査結果報告書”, JAEA-Technology 2012-001, 2012, 134p.
- 38) 鏡頭正, 天野健治, 小池克明, 鶴田忠彦, 松岡稔幸: “多変量解析を用いたボーリング孔での断層の区間判定と岩盤区分—瑞浪超深地層研究所における深層ボーリング孔での事例—”, *情報地質*, Vol.22, 2011, pp. 171-188.
- 39) Rhen I., Backblow G., Gustafson G., Stanfors R., Wikberg P.: “ÄSPÖ HRL – Geoscientific Evaluation 1997/2 Results from Pre-investigations and Detailed Site Characterization. Summary Report”, Technical Report 97-03, 1997, 240p.
- 40) 松岡稔幸, 程塚保行, 山田信人: “研究坑道の掘削工事振動を利用した逆 VSP 探査”, JAEA-Research 2012-028, 2012, 70p.
- 41) 山田信人, 松岡稔幸, 石垣孝一, 金澤洋平, 徳安真吾, 中原純一: “研究坑道を利用した花崗岩体における逆 VSP 探査”, 物理探査学会第 129 回(平成 25 年度秋季)学術講演会, 2013, pp.152-155.
- 42) 日本原子力研究開発機構: “平成 24 年度地層処分技術調査等事業地層処分共通技術調査地質環境総合評価技術高度化開発 6 カ年とりまとめ報告書(平成 24 年度経済産業省資源エネルギー庁委託事業)”, 2013, 166p.
- 43) Kurihara, A., Matsuoka, T. and Martin, A. J.: “Quantitative evaluation of fault distribution

- uncertainty: Applicability of an analytical method for evaluating 3-D geological models in the Mizunami Underground Research Laboratory Project”, Proceedings of International symposium on earth science and technology 2010 (by CINEST), December 7-8, Fukuoka, Japan, 2010, pp.453-456.
- 44) 濱克宏, 見掛信一郎, 西尾和久, 松岡稔幸, 石橋正祐紀, 笹尾英嗣, 引間亮一, 丹野剛男, 真田祐幸, 尾上博則, 佐藤成二, 狩野智之, 竹内竜史, 新宮信也, 大森一秋, 岩月輝希, 湯口貴史, 森川佳太, 尾方伸久, 小出馨, 池田幸喜, 山本勝, 島田顕臣, 佐藤稔紀, 伊藤洋昭, 杉原弘造: “超深地層研究所計画 年度報告書 (2012 年度)”, JAEA-Review 2013-050, 2013, 114p.
  - 45) Saegusa, H., Onoe, H., Takeuchi, S., Takeuchi, R. and Ohyama, T.: Hydrogeological Characterization on Surface-based Investigation Phase in the Mizunami Underground Research Laboratory Project, in Japan, The 11th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM'07), 2007, 8p.
  - 46) 安藤賢一, 田中達也, 橋本秀爾, 三枝博光, 尾上博則: “岩盤中の透水性構造分布に着目した水理地質構造モデルの構築手法の検討 (岩盤の水理に関する調査研究)”, JAEA-Research 2012-022, 2012, 60p.
  - 47) Saegusa, H., Shimo, M., Kumamoto, S., Onoe, H., Takeuchi, R., Takeuchi, S. and Ohyama, T.: Hydrogeological characterization for estimation of hydraulic responses due to construction of the Mizunami Underground Research Laboratory, Proceedings of 36<sup>th</sup> IAH congress, October, 2008, Toyama, Japan, p.10.
  - 48) 下茂道人, 山本肇: “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, 1996, pp.257-262.
  - 49) 本島貴之, 井尻裕二, 大津宏康, 尾上博則, 三枝博光, 渡邊正: “地質環境調査の進展に伴う情報量と立坑掘削時の突発湧水リスクの関係について—瑞浪超深地層研究所立坑掘削を例として—”, 土木学会第 60 回年次学術講演会論文集, 6-315, 2005, pp.629-630.
  - 50) 大津宏康, 堀田洋平, 三枝博光, 井尻裕二, 尾上博則: “不連続性岩盤における突発湧水リスク評価手法の事後評価への適用”, 土木学会論文集 F, Vol.64, 2008, pp.353-368.
  - 51) 大津宏康, 大川淳之介, 竹内竜史, 三枝博光, 太田康貴: “地盤リスクという観点からみた地質調査の意義に関する研究”, 第 41 回岩盤力学に関するシンポジウム論文講演集, 2012, pp.276-281.
  - 52) 本島貴之, 尾上博則, 井尻裕二, 大津宏康, 三枝博光: “割れ目が卓越する岩盤に大深度立坑を掘削する際の突発湧水リスク評価手法の提案”, 土木学会論文集 C, Vol.66, 2010, pp.370-386.
  - 53) 佐藤成二, 尾方伸久, 竹内竜史, 武田匡樹: “超深地層研究所計画における研究坑道での湧水量計測 (2004~2011 年度) データ集”, JAEA-Data/Code 2013-020, 2014, 38p.
  - 54) 尾上博則, 小坂寛, 竹内竜史, 三枝博光: “超深地層研究所計画 (岩盤の水理に関する調査研究) 第 2 段階におけるサイトスケールの水理地質構造モデルの構築”, JAEA-Research 2015-008, 2015, p.146.
  - 55) 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: “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”, JAEA-Technology 2010-026, 2010, 146p.
- 56) 石井洋司, 渡辺和彦, 神谷晃, 早野明, 見掛信一郎, 竹内真司, 池田幸喜, 山本勝, 杉原弘造: “深度 400m 以深の換気立坑掘削において実施したプレグラウチングの施工結果と考察”, JAEA-Technology 2010-044, 2011, 92p.
- 57) 動力炉・核燃料開発事業団: “広域地下水流動研究基本計画書”, PNC TN7020 98-001, 1997, 12p.
- 58) 狩野智之, 竹内竜史: “広域地下水流動研究における地下水の水圧長期モニタリング(2011年度)”, JAEA-Data/Code 2013-002, 2013, 45p.
- 59) 狩野智之, 竹内竜史: “超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング(2011年度)”, JAEA-Data/Code 2013-007, 2013, 100p.
- 60) 大丸修二, 竹内竜史, 尾上博則, 三枝博光: “超深地層研究所計画の第 2 段階における単孔式水理試験結果”, JAEA-Data/Code 2012-020, 2012, 44p.
- 61) 大丸修二, 竹内竜史, 尾上博則: “超深地層研究所計画(岩盤の水理に関する調査研究)主立坑断層を対象とした水理学的調査”, JAEA-Research 2012-008, 2012, 70p.
- 62) 佐藤成二, 尾方伸久, 竹内竜史, 武田匡樹: “超深地層研究所計画における表層水理観測データ集-2010~2011年度-”, JAEA-Data/Code 2013-016, 2013, 50p.
- 63) 成川達也, 松木浩二, 新井孝志, 大山卓也, 竹内竜史, 竹内真司: “立坑掘削に伴う排水・冠水・再排水時の地表面傾斜量の逆解析に基づく岐阜県東濃地域超深地層研究用地の地下水流動場評価”, 土木学会論文集 C, Vol.65, 2009, pp.442-455.
- 64) Niwa, M., R., Takeuchi, H., Onoe, K., Tsuyuguchi, K., Asamori, K., Umeda, and K., Sugihara: Groundwater pressure changes in Central Japan induced by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, Vol.13, Q05020, doi:10.1029/2012GC004052, 2011.
- 65) 露口耕治, 黒岩弘, 川本康司, 山田信人, 大貫賢二, 岩月輝希, 竹内竜史, 尾方伸久, 須藤正大, 見掛信一郎: “深度 500m 研究アクセス北坑道における先行ボーリング調査報告書(12MI27 号孔, 12MI33 号孔)”, JAEA-Technology 2013-044, 2014, 89p.
- 66) 尾上博則, 三枝博光, 大山卓也, 竹内真司: “孔間水理試験による水圧応答に基づく地下深部の水理地質構造の解析的推定”, 地下水学会誌, Vol.50, 2008, pp.251-274.
- 67) 菱谷智幸, 前村庸之, 木村仁, 尾上博則, 三枝博光, 水野崇: “超深地層研究所計画(岩盤の水理に関する調査研究)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(2010年度)”, JAEA-Research 2013-023, 2013, 84p.
- 68) 三枝博光, 尾上博則, 石橋正祐紀, 田中達也, 鏝頭正, 橋本秀爾, Bruines, P.: “割れ目分布に起因した水理特性の不均質性を考慮した水理地質構造のマルチスケールモデル化手法開発に関わる検討”, JAEA-Research 2015-011, 2015, 59p.
- 69) Follin, S., Levén, J., Hartley, L., Jackson, P., Joyce, S., Roberts, D., Swift, B.: Hydrogeological characterisation and modelling of deformation zones and fracture domains, Forsmark modeling stage 2.2., SKB R-07-48, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2007, 188p.
- 70) Wang, X: Stereological Interpretation of Rock Fracture Traces on Borehole Wall and Other

- Cylindrical Surfaces, Ph. D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005, 104p.
- 71) 鶴田忠彦, 藤田有二, 鑑頭正, 彌榮英樹, 富士代秀之: “広域地下水流動研究におけるボーリング調査 (DH-15 号孔)”, JNC TN7400 2005-025, 2005, p.74.
- 72) Iwatsuki, T., Furue, R., Mie, H., Ioka, S., Mizuno, T.: “Hydrochemical baseline condition of groundwater at the Mizunami underground research laboratory (MIU)”, Applied Geochemistry, Vol.20, 2005, pp.2283-2302.
- 73) 核燃料サイクル開発機構: “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—総論レポート”, JNC TN1400 99-020, 1999, 634p.
- 74) 岩月輝希, 湯口貴史, 大森一秋, 長谷川隆, 宗本隆志: “瑞浪超深地層研究所における深度 500m までの地球化学調査および調査技術開発”, JAEA-Research 2013-021, 2013, 63p.
- 75) Iwatsuki, T., Hagiwara, H., Ohmori, K., Munemoto, T. and Onoe, H.: Hydrochemical disturbances measured in groundwater during the construction and operation of a large-scale underground facility in deep crystalline rock in Japan. Environmental Earth Sciences, Vol.74, 2015, pp.3041-3057.
- 76) 水野崇, 青才大介, 新宮信也, 萩原大樹, 山本祐平, 福田朱里: “瑞浪超深地層研究所の建設に伴う地下水水質の変化”, 原子力学会誌, Vol.12, 2013, pp.89-102.
- 77) 萩原大樹, 岩月輝希, 長谷川琢磨, 中田弘太郎, 富岡祐一: “大規模地下施設の建設, 排水に伴う浅層地下水の地下深部への侵入—3H, CFCs, SF6 トレーサーを用いた評価—”, 日本水文科学会誌, Vol.45, 2015, pp.1-18.
- 78) 岩月輝希, 水野崇, 國丸貴紀, 天野由記, 松崎達二, 仙波毅: “地層処分事業に関わる地球化学分野の技術者が継承すべき知見のエキスパート化—文献調査から精密調査段階における地球化学解析手順について—”, 原子力バックエンド研究, Vol.19, 2012, pp.51-63.
- 79) Ota, K., Mōri, A., Alexander, W.R., Frieg, B. and Schild, M.: “Influence of the mode of matrix porosity determination on matrix calculations”, Jour. Contam. Hydrol. Vol.61, 2003, pp.131-145.
- 80) 村上由記, 岩月輝希, 長沼毅: “東濃地域における地下水化学と地下微生物の相互作用”, 地学雑誌, Vol.112, 2003, pp.277-287.
- 81) 湯口貴史, 鶴田忠彦, 水野崇, 國丸貴紀: “瑞浪超深地層研究所用地で採取された岩石試料の岩石学的・鉱物学的データ—全岩化学組成, 含有鉱物および鉱物組成—”, JAEA-Data/Code 2011-009, 2011, 85p.
- 82) 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, 丹野剛男, 平野亨, 竹内真司, 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: “超深地層研究所計画 年度報告書 (2009 年度)”, JAEA-Review 2011-007, 2011, 145p.
- 83) Sato, T., Mikake, S., Nakama, S. Seno, Y., Mori, T., Iwano, K., Gohke M. and Tada, H.: “Japanese underground research laboratory project and prediction of rock mass behavior around deep shafts and galleries using continuous and discontinuous models”, ICADD-7, the Seventh International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, held in Honolulu, Hawaii, December 10-12, 2005, pp.245-256.
- 84) 平野亨, 中間茂雄, 山田淳夫, 瀬野康弘, 佐藤稔紀: “超深地層研究所計画 (岩盤力学に関

- する調査研究) 深度 200m における立坑掘削中のひずみ計測”, JAEA-Research 2011-019, 2011, 51p.
- 85) 丹野剛男, 佐藤稔紀, 真田祐幸, 引間亮一, 熊坂博夫, 多田浩幸: “瑞浪超深地層研究所におけるクラックテンソルの相対誤差に基づいた REV の基礎的研究”, 第 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 2013, pp.109-113.
- 86) 郷家光男, 多田浩幸, 瀬野康弘, 中間茂雄, 佐藤稔紀: “瑞浪超深地層研究所の研究坑道における掘削損傷領域を考慮した掘削影響解析”, トンネル工学論文集, Vol.16, 2006, pp.35-45.
- 87) 中間茂雄, 青木俊朗, 佐藤稔紀, 郷家光男, 森孝之: “掘削損傷領域を考慮した MBC およびクラックテンソルモデルによる岩盤挙動の予測解析”, 第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2005, pp.33-40.
- 88) 平野享, 松井裕哉, 木下晴信: “結晶質岩における大深度立坑掘削を対象とした岩盤の変位・ひずみ計測”, 第 64 回土木学会年次学術講演会, 2009.
- 89) 核燃料サイクル開発機構: “釜石原位置試験総括報告書”, JNC-TN7410 99-001, 1999, 348p.
- 90) 井尻裕二, 納多勝, 延藤遵, 松井裕哉, 見掛信一郎, 橋詰茂: “瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討: 平成 21 年度, 平成 22 年度”, JAEA-Technology 2013-047, 2013, 819p.
- 91) 大久保誠介: “長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究”, PNC TJ1602 98-004, 1998, 87p.
- 92) 大久保誠介: “長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究”, JNC TJ7400 99-003, 1999, 100p.
- 93) 大久保誠介: “長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究”, JNC TJ7400 2000-002, 2000, 74p.
- 94) 大久保誠介: “長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究”, JNC TJ7400 2001-003, 2001, 134p.
- 95) 大久保誠介: “長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究”, JNC TJ7400 2001-010, 2002, 100p.
- 96) 大久保誠介: “長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究”, JNC TJ7400 2002-011, 2003, 89p.
- 97) 大久保誠介: “長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究”, JNC TJ7400 2004-002, 2004, 115p.
- 98) 大久保誠介: “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”, JNC TJ7400 2005-004, 2005, 107p.
- 99) 大久保誠介, 瀬野康弘, 中間茂雄, 佐藤稔紀, 平野享: “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(委託研究)”, JAEA-Research 2007-088, 2008, 118p.
- 100) 大久保誠介, 瀬野康弘, 平野享, 中間茂雄, 松井裕哉: “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(委託研究)”, JAEA-Research 2008-065, 2008, 51p.
- 101) 大久保誠介, 平野享, 松井裕哉: “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(委託研究)”, JAEA-Research 2009-020, 2009, 36p.

- 102) 大久保誠介, 引間亮一, 平野享, 松井裕哉: “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(委託研究)”, JAEA-Research 2010-031, 2010, 45p.
- 103) 大久保誠介, 福井勝則, 羽柴公博, 引間亮一, 丹野剛男, 真田祐幸, 松井裕哉, 佐藤稔紀: “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(委託研究)”, JAEA-Research 2011-040, 2012, 54p.
- 104) 福井勝則, 羽柴公博, 丹野剛男, 引間亮一, 真田祐幸, 佐藤稔紀: “結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価手法に関する研究(2012年度)(委託研究)”, JAEA-Research 2013-031, 2013, 52p.
- 105) 市川康明: “長期岩盤挙動評価のための微視的観点による基礎的研究(核燃料サイクル開発機構委託研究成果報告書)”, JNC TJ7400 2003-002, 2003, 91p.
- 106) 市川康明: “長期岩盤挙動評価のための微視的観点による基礎的研究(核燃料サイクル開発機構委託研究成果報告書)”, JNC TJ7400 2004-014, 2004, 98p.
- 107) 市川康明: “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(核燃料サイクル開発機構委託研究成果報告書)”, JNC TJ7400 2005-003, 2005, 60p.
- 108) 市川康明, 瀬野康弘, 中間茂雄, 佐藤稔紀: “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(委託研究)”, JAEA-Research 2008-005, 2008, 60p.
- 109) 市川康明, 瀬野康弘, 平野享, 中間茂雄, 松井裕哉: “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(委託研究)”, JAEA-Research 2008-090, 2008, 52p.
- 110) 市川康明, 崔定海, 平野享, 松井裕哉: “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(委託研究)”, JAEA-Research 2009-027, 2009, 48p.
- 111) 市川康明, 崔定海, 丹野剛男, 平野享, 松井裕哉: “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(2009年度)(委託研究)”, JAEA-Research 2011-007, 2011, 91p.
- 112) 市川康明, 丹野剛男, 引間亮一, 真田祐幸, 松井裕哉, 佐藤稔紀: “結晶を対象とした連成現象が長期挙動におよぼす影響に関する研究(2010年度)(委託研究)”, JAEA-Research 2012-003, 2012, 34p.
- 113) 市川康明, 木本和志, 佐藤稔紀, 丹野剛男, 引間亮一, 真田祐幸: “結晶質岩を対象とした連成現象が長期挙動におよぼす影響に関する研究(2012年度)(委託研究)”, JAEA-Research 2013-045, 2014, 69p.
- 114) 大久保誠介, 福井勝則: “田下凝灰岩の長期クリープ試験と構成方程式”, 資源と素材, Vol.118, 2002, pp.36-42.
- 115) 羽柴公博, 大久保誠介, 福井勝則: “田下凝灰岩の10年クリープ試験”, Journal of MMIJ, Vol.124, 2008, pp.741-747.
- 116) 平野享, 中間茂雄, 山田淳夫, 瀬野康弘, 佐藤稔紀: “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”, JAEA-Research 2009-031, 2009, 58p.
- 117) 平野享, 中間茂雄, 山田淳夫, 瀬野康弘, 佐藤稔紀: “超深地層研究所計画(岩盤力学に関する調査研究) 深度100mにおける岩盤力学ボーリング調査”, JAEA-Research 2010-002, 2010, 48p.
- 118) 平野享, 瀬野康弘, 松井裕哉: “超深地層研究所計画(岩盤力学に関する調査研究) 深度

- 200mにおける岩盤力学ボーリング調査”， JAEA-Research 2010-013, 2010, 51p.
- 119) 丹野剛男, 佐藤稔紀, 真田祐幸, 引間亮一: “超深地層研究所計画 (岩盤力学に関する調査研究) 深度 300m および深度 400m における岩盤力学調査”, JAEA-Research 2013-044, 2014, 257p.
- 120) 松井裕哉, 平野亨: “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集, 2010, pp.48-53.
- 121) Sato, T., Tanno, T., Hikima, R., Sanada, H. and Kato, H.: “*In situ* stress measurement in the Mizunami Underground Research Laboratory, Japan”, Proceedings on the 6<sup>th</sup> International Symposium on In-Situ Rock Stress, 20-22 August 2013, Sendai, Japan, 2013, pp.354-359.
- 122) 木村直樹, 松木浩二, 中間茂雄, 佐藤稔紀: “不均一岩体の広域応力場評価法”, 資源と素材, Vol.119, 2003, pp.655-662.
- 123) Matsuki, K., Nakama, S. and Sato, T.: “Estimation of regional stress by FEM for a heterogeneous rock mass with a large fault”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.46, 2009, pp.31-50.
- 124) Li, G., Mizuta, Y., Ishida, T., Li, H., Nakama, S. and Sato, T.: “Stress field determination from local stress measurements by numerical modeling”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.46, 2009, pp.138-147.
- 125) Nara, Y., Cho, S. H., Yoshizaki, T., Kaneko, K., Sato, T., Nakama, S. and Matsui, H.: “Estimation of three-dimensional stress distribution and elastic moduli in rock mass of the Tono area”, Internet Journal of the JCRM, Vol.7, 2011, pp.1-9.
- 126) Tanno, T., Hirano, T. and Matsui, H.: “Development of method for evaluation of three dimensional distribution of in situ stress state and preliminary estimation of applicability”, Rock Stress and Earthquakes, Xie (ed.), Taylor & Francis Group, London, 2010, pp.521-526.
- 127) 佐藤稔紀, 丹野剛男, 引間亮一, 真田祐幸, 加藤春實: “水圧破碎法による初期応力データの品質について—花崗岩における実測結果に基づく高剛性装置の適用性と最大主応力値の評価—”, Journal of MMIJ, Vol.128, 2012, pp.449-454.
- 128) 佐藤稔紀, 丹野剛男, 引間亮一, 真田祐幸, 加藤春實: “円錐孔底ひずみ法とコアディスクキングについて—土岐花崗岩における湧水孔での測定結果を例にして—”, Journal of MMIJ, Vol.129, 2013, pp.59-64.
- 129) Sanada, H., Hikima, R., Tanno, T., Matsui, H. and Sato, T.: “Application of differential strain curve analysis to the Toki Granite for *in situ* stress determination at the Mizunami underground research laboratory, Japan”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 59, 2013, pp.50-56.
- 130) 丹野剛男, 佐藤稔紀, 真田祐幸, 引間亮一, 松井裕哉, 多田浩幸, 郷家光男, 熊坂博夫, 石井卓: “結晶質岩を対象としたクラックテンソルによる等価連続体モデル化手法に関する研究”, JAEA-Research 2012-002, 2012, p.86
- 131) 核燃料サイクル開発機構: “釜石原位置試験総括報告書”, JNC-TN7410 99-001, 1999, 348p.
- 132) 橋詰茂, 松井裕哉, 堀内泰治, 畑浩二, 秋好賢治, 佐藤伸, 柴田千穂子, 丹生屋純夫, 納多勝: “結晶質岩中の立坑掘削を対象とした脆弱部における空洞および周辺岩盤の力学的

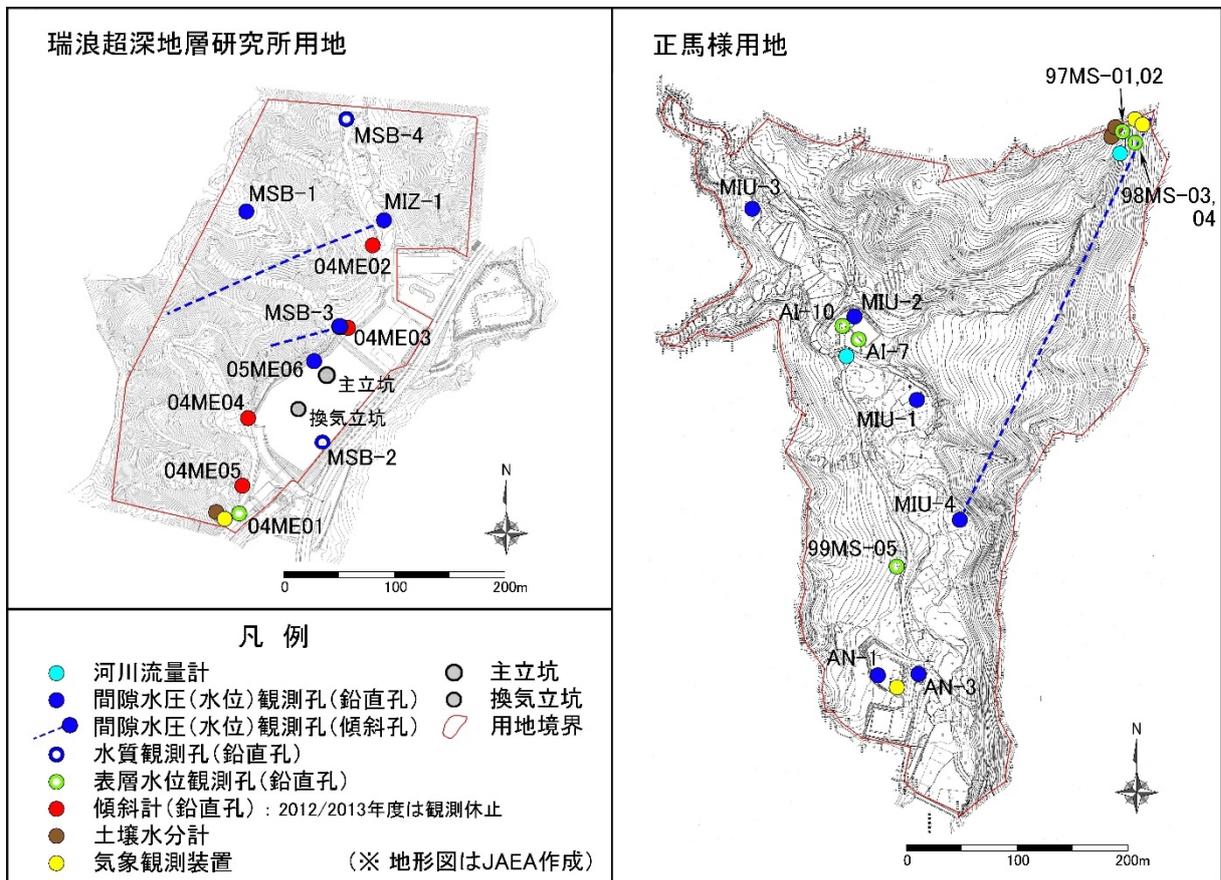
- 挙動に関する検討”，第13回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，2013，pp.121-126.
- 133) 深谷正明，納多勝，畑浩二，竹田宣典，秋好賢治，石関嘉一，金田勉，佐藤伸，柴田千穂子，上田正，戸田亜希子，小林伸司，新美勝之，沖原光信，辻正邦，山田俊子，佐藤稔紀，見掛信一郎，堀内泰治，橋詰茂：“瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討（平成24年度）（委託研究）”，JAEA-Technology 2014-019，2014，495p.
- 134) 丹生屋純夫，松井裕哉，見掛信一郎，佐藤伸，納多勝，畑浩二：“パイロットボーリング調査から設定した力学モデルの有効性検討”，第41回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，2012，pp.214-219.
- 135) Niimi, K., Kobayashi, S., Nobuto, J., Matsui, H. and Yamamoto, M.: “Analysis and Numerical Simulation of Seismic Events Recorded in the Ventilation Shaft at the Mizunami URL”, Proceedings of European Rock Mechanics Symposium (EUROCK 2012) (CD-ROM), 2012, p.13.
- 136) 佐藤稔紀，見掛信一郎，納多勝，小林伸司：“深度500mまでの施工実績に基づく立坑掘削技術の評価 瑞浪超深地層研究所研究坑道掘削工事”，トンネルと地下，Vol.45，2014，pp.501-510.
- 137) Sanada, H., Sato, T., Horiuchi, Y., Mikake, S., Okihara, M., Yahagi, R. and Kobayashi, S.: “Analysis of excavation cycle time during sinking of the Ventilation Shaft at the Mizunami Underground Research Laboratory”, Proceedings of 2014 ISRM International Symposium - 8th Asia Rock Mechanics Symposium, 2014, pp.1263-1269.
- 138) 施設建設課：“瑞浪超深地層研究所 研究坑道掘削工事 平成21年度建設工事記録”，JAEA-Review 2014-032，2014，112p.
- 139) 施設建設課：“瑞浪超深地層研究所 研究坑道掘削工事（その4） 平成22年度，平成23年度建設工事記録”，JAEA-Review 2014-036，2014，149p.
- 140) Matsui H., Noda M. and Nobuto J.: “Status of the Mizunami URL construction and Study on engineering technology”, Proc. of World Tunnel Congress 2011 (CD-ROM), 2011.
- 141) 見掛信一郎，山本勝，池田幸喜：“瑞浪超深地層研究所における研究坑道掘削と施工対策技術の適用”，第40回岩盤力学シンポジウム講演論文集，2011，pp.191-196.
- 142) Matsui H., Ijiri Y. and Kamemura K.: “Risk Management Methodology for Construction of Underground Structures”, Proc. of World Tunnel Congress 2012, 38<sup>th</sup> General Assembly (CD-ROM), 2010, p.8.

付録 1

地表からのボーリング孔配置図  
(第 2 段階)

瑞浪超深地層研究所用地では、研究坑道の掘削による地表から地下深部における地下水流動場の変化などを把握するため、気象要素、河川流量、土壌水分などの表層水理に関する調査、およびボーリング孔に設置した多点式パッカーシステム、傾斜計などを利用した地下水の長期観測などを継続して実施している(下図左)。地下水の採水・分析は、研究所用地の堆積岩(MSB-2, 4号孔:深度100~200m)と花崗岩(MIZ-1号孔:深度約1,200m)を対象に行っている。

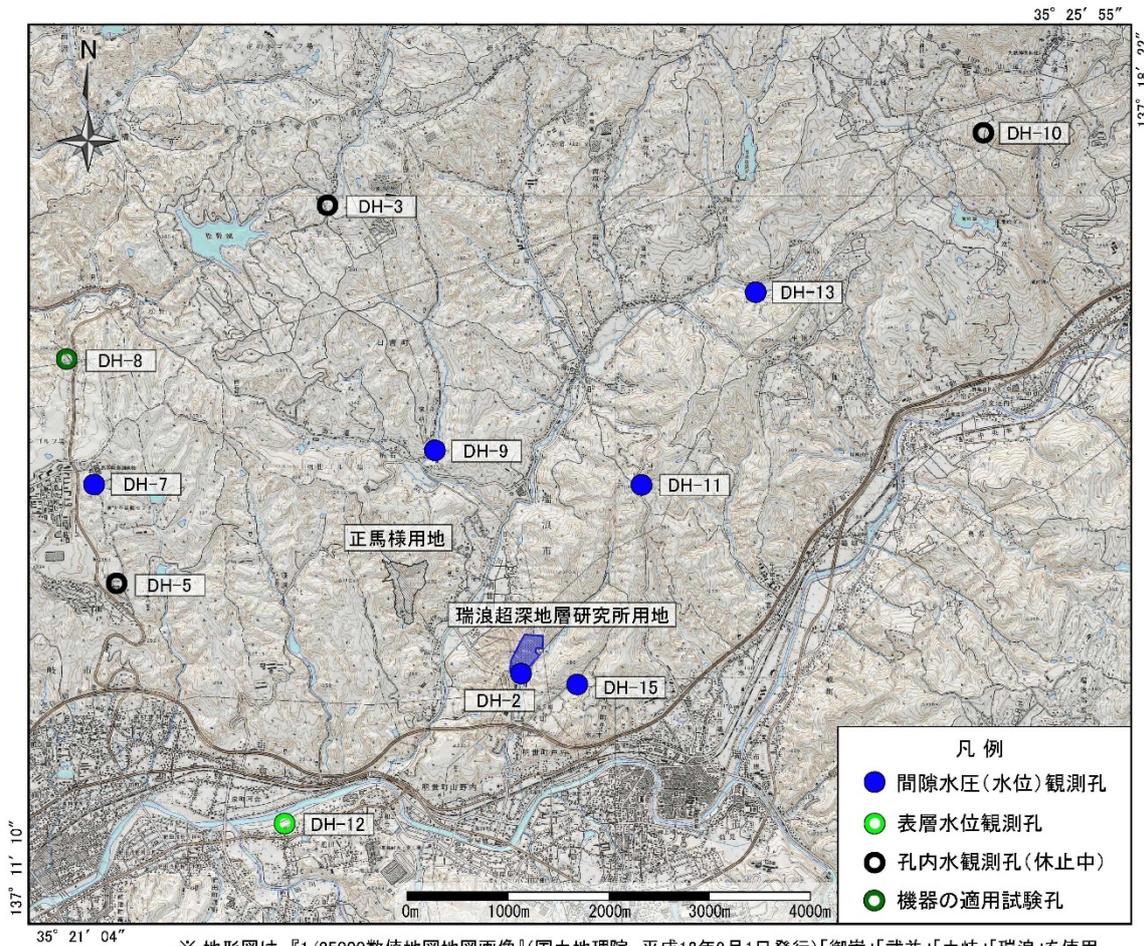
正馬様用地では、超深地層研究所計画の全体目標のひとつである深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備に関連し、これまで蓄積された月吉断層やその周辺の地質環境の情報やボーリング孔などの研究資源を利用した要素技術開発の場として活用し、研究所での調査・研究の効率化を図るための要素技術の高度化に向けた調査研究を実施してきている。具体的には、結晶質岩中の地下水流動を把握するため深度約500m~約1,000mの深層ボーリング孔における地下水圧(水位)観測を実施している(下図右)。また、地下水涵養量を推定するための調査技術開発として、表層水理観測として、深度数十mの浅層ボーリング孔における水位観測や、河川流量観測、気象観測を実施している。



付録 2

広域地下水流動研究におけるボーリング孔配置図

広域地下水流動研究は、地下水流動系の涵養域から流出域までを包含する約 10km 四方の領域（広域スケール）における地表から地下深部までの地質・地質構造、岩盤の水理や地下水の水質を明らかにするために必要な調査・解析技術の開発を目標とした研究である。2004 年度末に主要な現場調査を終了した後、2005 年度からは、土岐花崗岩における水理学的・地球化学的な基礎情報の取得および地下水流動解析結果の妥当性確認のためのデータ取得を目的として、既存の観測設備による表層水理観測（河川流量、降水量）およびボーリング孔を用いた地下水長期モニタリングを継続している。超深地層研究所計画では、広域地下水流動研究で取得されたこれらの観測データを、研究坑道の建設に伴う研究用地周辺の岩盤や地下水の変化を把握するために利用している。



※ 地形図は、『1/25000数値地図図画像』(国土地理院、平成12年9月1日発行)「御嵩」「武並」「土岐」「瑞浪」を使用。  
陰影図は、『基盤地図情報数値標高モデル(10mメッシュ)』(国土地理院)より作成。

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	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	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</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>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
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	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
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	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性	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大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

表5. SI接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	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=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <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=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm <sup>2</sup> ) <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	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	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> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <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=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm 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=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

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

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <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=1cGy=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=0.2 g=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=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

