

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

Final Report on the Surface-based Investigation (Phase I)
at the Mizunami Underground Laboratory Project

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

Hiromitsu SAEGUSA, Yasuhiro SENO, Shigeo NAKAMA, Tadahiko TSURUTA
Teruki IWATSUKI, Kenji AMANO, Ryuji TAKEUCHI, Toshiyuki MATSUOKA
Hironori ONOE, Takashi MIZUNO, Takuya OHYAMA, Katsuhiro HAMA
Toshinori SATO, Masayoshi KUJI, Hidetaka KURODA, Takeshi SEMBA
Masahiro UCHIDA, Kozo SUGIHARA and Masanori SAKAMAKI

地層処分研究開発部門
結晶質岩地質環境研究グループ
結晶質岩工学技術開発グループ

Crystalline Environment Research Group
Crystalline Environment Engineering Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2007

本レポートは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/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第1段階）研究成果報告書

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門

三枝 博光、瀬野 康弘[※]、中間 茂雄、鶴田 忠彦、岩月 輝希⁺、天野 健治、竹内 竜史、
松岡 稔幸、尾上 博則[※]、水野 崇、大山 卓也、濱 克宏、佐藤 稔紀、久慈 雅栄[※]、
黒田 英高[※]、仙波 毅、内田 雅大、杉原 弘造、坂巻 昌工

(2007年3月27日受理)

超深地層研究所計画は、原子力政策大綱に示された深地層の研究施設計画の一つであり、結晶質岩を対象として、独立行政法人日本原子力研究開発機構が岐阜県瑞浪市で進めているプロジェクトである。この超深地層研究所計画では、「第1段階：地表からの調査予測研究段階」、「第2段階：研究坑道の掘削を伴う研究段階」、「第3段階：研究坑道を利用した研究段階」の三つの段階に区分し、約20年をかけて進める計画である。超深地層研究所計画は、「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」および「深地層における工学技術の基盤の整備」を第1段階から第3段階までを通した全体目標として定め、そのうち第1段階では、全体目標の前者については「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」、後者については「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。本報告書は、2005年3月で終了した第1段階の調査研究成果を取りまとめたものである。この取りまとめは、これらの段階目標に対して、その達成度と今後の課題を明らかにするとともに、第2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っている。

第1段階における「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」に関する調査研究では、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すじを統合化データフローとして整理した。「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することができた。

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することができた。

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、処分事業ならびに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。

東濃地科学センター（駐在）：〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64

※ 技術開発協力員

＋ 幌延深地層研究センター（駐在）

Final Report on the Surface-based Investigation (Phase I) at the Mizunami Underground Laboratory Project

Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency
Mizunami-shi, Gifu-ken

Hiromitsu SAEGUSA, Yasuhiro SENO*, Shigeo NAKAMA, Tadahiko TSURUTA,
Teruki IWATSUKI+, Kenji AMANO, Ryuji TAKEUCHI, Toshiyuki MATSUOKA,
Hironori ONOE*, Takashi MIZUNO, Takuya OHYAMA, Katsuhiko HAMA, Toshinori SATO,
Masayoshi KUJI*, Hidetaka KURODA*, Takeshi SEMBA,
Masahiro UCHIDA, Kozo SUGIHARA and Masanori SAKAMAKI

(Received March 27, 2007)

The Mizunami Underground Laboratory (MIU) Project is a comprehensive research project investigating the deep underground environment within crystalline rock being conducted by Japan Atomic Energy Agency at Mizunami City in Gifu Prefecture, central Japan and its role is defined in “Framework for Nuclear Energy Policy” by Japan Atomic Energy Commission. The MIU Project has three overlapping phases: Surface-based Investigation phase (Phase I), Construction phase (Phase II), and Operation phase (Phase III), with a total duration of 20 years. The overall 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. During Phase I, the overall project goals were supported by Phase I goals. For the overall project goals 1), the Phase I goals were set to construct models of the geological environment from all surface-based investigation results that describe the geological environment prior to excavation and predict excavation response. For the overall project goals 2), the Phase I goals were set to formulate detailed design concepts and a construction plan for the underground facilities. This report summarizes the Phase I investigation which was completed in March 2005. The authors believe this report will make an important milestone, since this report clarifies how the Phase I goals are achieved and evaluate the future issues thereby direct the research which will be conducted during Phase II.

With regard to the overall project goals 1), “To establish techniques for investigation, analysis and assessment of the deep geological environment,” a step-wise investigation was conducted by iterating investigation, interpretation, and assessment, thereby understanding of geologic environment was progressively and effectively improved with progress of investigation. An optimal procedure from investigation to assessment was compiled as a set of geosynthesis data flow diagram for each investigation step. With regard to the overall project goals 2), “To formulate detailed design concepts and a construction plan for the underground facilities,” an optimal design of MIU was completed with the aim to provide a foundation for engineering technologies in deep underground to safely construct and operate an underground facility which will be built for the purpose of acquiring data and demonstrating disposal technologies.

Thus, this report summarizes geosynthesis procedures to investigate and assess the crystalline rock, and development of individual investigation and assessment methods. At the same time, technical findings and know-how which can serve as foundation to disposal business were compiled. Also, this report clarified the necessity for the Phase II and Phase III investigation by compiling unresolved issues during the Phase I investigation.

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

Keywords: Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) Project, Crystalline Rock, Surface-based Investigation (Phase I), Deep Geological Environment

※Cooperative Staff

+Horonobe Underground Research Center

目 次

1. はじめに	1
1.1 深地層の研究施設計画の位置付けと役割	1
1.1.1 深地層の研究施設計画の位置付け	1
1.1.2 深地層の研究施設計画における研究開発の目標	2
1.1.3 わが国の地層処分計画における深地層の研究施設計画の役割	3
1.2 超深地層研究所計画の概要	4
1.2.1 超深地層研究所計画の経緯	4
1.2.2 超深地層研究所計画の目標と進め方	5
1.3 超深地層研究所計画・第1段階成果取りまとめの目標と構成	6
1.3.1 第1段階成果取りまとめの目標	6
1.3.2 報告書の構成	7
参考文献	7
2. 超深地層研究所計画・第1段階調査研究の概要	11
2.1 第1段階調査研究の目標	11
2.2 第1段階調査研究の進め方と概要	12
2.2.1 調査研究の個別目標と課題の設定	12
2.2.2 空間スケールの設定	13
2.2.3 繰り返しアプローチの適用	14
2.2.4 第1段階における調査研究の流れ	15
2.2.5 第1段階における調査研究の制約条件及び初期条件	15
参考文献	16
3. 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備	22
3.1 調査・解析・評価結果の取りまとめの考え方	22
参考文献	22
3.2 地質環境の調査・解析・評価技術	24
3.2.1 既得情報を用いた調査・解析・評価（ステップ0）	24
参考文献	48
3.2.2 地表からの調査・解析・評価（ステップ1）	54
参考文献	63
3.2.3 既存・浅層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価（ステップ2）	65
参考文献	81
3.2.4 深層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価（ステップ3）	84
参考文献	105
3.2.5 ボーリング孔間を対象とした調査・解析・評価（ステップ4）	108
参考文献	126
3.2.6 個別目標ごとの調査の進展に伴う理解度の変遷及び第2段階以降の課題	128
参考文献	157
3.2.7 地下施設建設が周辺環境へ与える影響を把握する技術	159
参考文献	163

3.2.8 第2段階の調査研究に向けた深部地質環境とその変化の推定	165
参考文献	170
3.3 地質環境の調査・評価技術の整備	173
3.3.1 リニアメント調査技術	173
3.3.2 物理探査技術	176
3.3.3 ボーリング調査に関わる計画の策定と改定	181
3.3.4 掘削技術	183
3.3.5 物理検層技術	187
3.3.6 流体検層技術	189
3.3.7 水理試験技術	190
3.3.8 地下水の地球化学調査に関わる調査技術	192
3.3.9 初期応力測定技術	193
3.3.10 地質構造／水理地質構造のモデル化及び地下水流動解析	195
3.3.11 品質管理手法	198
参考文献	199
3.4 まとめ	203
4. 深地層における工学技術の基盤の整備	204
4.1 第1段階における研究坑道の設計・施工計画の検討	204
4.1.1 進め方	204
4.1.2 研究坑道のレイアウト	205
4.1.3 研究坑道の安定性・支保安定性の検討	205
4.1.4 計測結果の設計・施工計画へのフィードバック技術の検討	210
4.1.5 研究坑道における地震時安定性に関する検討	211
4.1.6 突発事象に対する掘削・施工対策技術の検討	212
4.1.7 安全対策に関する検討	213
4.1.8 施工計画の検討	215
4.2 周辺環境への影響調査	234
4.2.1 騒音・振動調査	234
4.2.2 河川（表流水）水質・底質調査	234
4.2.3 水文調査	234
4.3 まとめ	237
参考文献	237
5. おわりに	239
参考文献	240
付録1 広域地下水流動研究及び超深地層研究所計画第1段階における 調査研究の実施位置図	241
付録2 第1段階における調査研究のスケジュール	245
付録3 ボーリング孔を利用した調査の概要	249
付録4 統合化データフロー	253
付録5 広域地下水流動研究におけるボーリング孔を利用した調査の結果概要	265

付録 6	正馬様用地におけるボーリング孔を利用した調査の結果概要	287
付録 7	研究所用地におけるボーリング孔を利用した調査の結果概要	297
付録 8	第 1 段階で実施、開発した地質環境の調査・評価技術	319
付録 9	共同研究リスト	327
付録 10	用語集	331

CONTENTS

1. Introduction	1
1.1 Positioning and role of underground research laboratory project	1
1.1.1 Positioning of underground research laboratory project	1
1.1.2 Objective of R&D on underground research laboratory project	2
1.1.3 Role of the underground research laboratory project in high level radioactive waste disposal program in Japan	3
1.2 Overview of the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) project	4
1.2.1 Historical evolution of the MIU project	4
1.2.2 Goals and plan of the MIU project	5
1.3 Aims and outline of the report on the Surface-based investigation phase at the MIU project	6
1.3.1 Aims of the report	6
1.3.2 Outline of the report	7
References	7
2. Overview of Surface-based investigation phase at the MIU project	11
2.1 Goals of the Surface-based investigation phase	11
2.2 Overview of the Surface-based investigation phase	12
2.2.1 Specific aims and items to be understood	12
2.2.2 Spatial scales	13
2.2.3 Iterative approach	14
2.2.4 Strategy for the Surface-based investigation	15
2.2.5 Boundary and initial conditions on the Surface-based investigation	15
References	16
3. Establishment of techniques for investigation, analysis and assessment of the deep geological environment	22
3.1 Concept for summarizing of the investigation results	22
References	22
3.2 Techniques for investigation, analysis and assessment of the geological environment	24
3.2.1 Investigation, analysis and assessment using existing data (Step 0)	24
References	48
3.2.2 Investigation, analysis and assessment at surface (Step 1)	54
References	63
3.2.3 Investigation, analysis and assessment using existing and shallow boreholes (Step 2)	65
References	81
3.2.4 Investigation, analysis and assessment using deep borehole (Step 3)	84
References	105
3.2.5 Investigation, analysis and assessment objected between boreholes (Step 4) ·	108
References	126

3.2.6 Improvement of the understanding of geological environments by the step-wise investigations and issues for Construction and Operation phase	128
References	157
3.2.7 Techniques to understand environmental impact induced by construction of underground facilities	159
References	163
3.2.8 Prediction of geological environment around the underground facilities and of its changes caused by the construction	165
References	170
3.3 Techniques/methods for investigation and assessment of geological environment	173
3.3.1 Lineament survey	173
3.3.2 Geophysical survey	176
3.3.3 Planning of borehole investigations	181
3.3.4 Borehole drilling	183
3.3.5 Geophysical logging	187
3.3.6 Fluid logging	189
3.3.7 Hydraulic test	190
3.3.8 Groundwater sampling and analyses	192
3.3.9 Initial stress measurement	193
3.3.10 Geological and Hydrogeological modeling and groundwater flow simulation	195
3.3.11 Quality control	198
References	199
3.4 Summary	203
4. Develop a range of engineering technologies for deep underground application	204
4.1 Study on designing and planning the construction of the underground facilities in Surface-based investigation phase	204
4.1.1 Flow of the study	204
4.1.2 Layout of underground facilities	205
4.1.3 Rock mass stability around underground facilities and support system stability	205
4.1.4 Feedback technique of measurement results to design and construction plan	210
4.1.5 Earthquake-resistant design of shaft	211
4.1.6 Countermeasures against limit inflow of groundwater and mitigate rock bursts	212
4.1.7 Techniques for safety security	213
4.1.8 Planning of construction	215
4.2 Investigations for environmental assessment	234
4.2.1 Investigations for effects of noise and vibration	234
4.2.2 Investigations for surface water quality and sediments quality	234

4.2.3 Hydrologic investigations	234
4.3 Summary	237
References	237
5. Conclusions	239
References	240
Appendix 1 Locations of investigations on Regional Hydrogeological Study and the Surface-based investigation phase at the MIU project	241
Appendix 2 Schedule of the Surface-based investigation phase at the MIU project	245
Appendix 3 Overview of the borehole investigations	249
Appendix 4 Geosynthesis flow diagram	253
Appendix 5 Overview of the results of borehole investigations in Regional Hydrogeological Study area	265
Appendix 6 Overview of the results of borehole investigations in Shobasama site	287
Appendix 7 Overview of the results of borehole investigations in the MIU construction site	297
Appendix 8 Techniques/methods for investigation and assessment of geological environment, applied and developed in the Surface-based investigation	319
Appendix 9 List of collaborative studies	327
Appendix 10 Glossary	331

1. はじめに

超深地層研究所計画は、独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という）が、前身である動力炉・核燃料開発事業団及び核燃料サイクル開発機構（以下、「サイクル機構」という）を通して、岐阜県瑞浪市で進めている結晶質岩を対象とした総合的な研究開発計画であり、堆積岩を対象として北海道幌延町で実施中の幌延深地層研究計画と並んで、「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」¹⁾（以下、「原子力長期計画」という）や「原子力政策大綱」²⁾に示された深地層の研究施設計画の一つである。本報告書は、超深地層研究所計画の第1段階である地表からの調査予測研究段階の研究成果を取りまとめたものである。以下、1.1 において、わが国における深地層の研究施設計画の位置付けと役割を概観したうえで、1.2 で超深地層研究所計画における研究開発の概要及び 1.3 で超深地層研究所計画における第1段階成果の取りまとめの目標と構成について述べる。

1.1 深地層の研究施設計画の位置付けと役割

1.1.1 深地層の研究施設計画の位置付け

わが国における高レベル放射性廃棄物の地層処分計画は、サイクル機構（現、原子力機構）が1999年に公表した「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—」³⁾（以下、「第2次取りまとめ」という）を技術的な拠り所として、研究開発だけの段階から、研究開発と並行して、地層処分の事業と安全規制の施策を進めていく事業段階へと進展した。2000年6月には「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（平成12年、法律第117号、以下、「最終処分法」という）が公布され、この法律に基づき、同年10月に処分事業の実施主体である原子力発電環境整備機構（以下、「原環機構」という）が発足した。一方で、原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会により、「高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第1次報告）」⁴⁾が公表されるなど、処分事業と安全規制を進めていくうえでの基本的な枠組みが整備された。

この状況を踏まえ、原子力委員会は、原子力長期計画¹⁾において、最終処分の実施に向けて必要となる取組みと役割分担を示した。すなわち、実施主体である原環機構は「最終処分事業の安全な実施、経済性及び効率性の向上等を目的とする技術開発」を、また、国及び関係機関は「最終処分の安全規制、安全評価のために必要な研究開発や深地層の科学的研究等の基盤的な研究開発及び地層処分技術の信頼性の向上に関する技術開発等」を進めることとした。特に、サイクル機構には「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」が求められた。

サイクル機構は、原子力長期計画などに示された研究開発の役割を踏まえ、第2次取りまとめ以降の事業段階における研究開発計画を策定し、2001年に「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の全体計画」⁵⁾（以下、「全体計画」という）として公表した。全体計画では、第2次取りまとめが示した「わが国における地層処分の技術的信頼性」を更に向上し、処分事業や安全規制を支える技術基盤を強化していく観点から、「①実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」と「②地層処分システムの長期挙動の理解」の二つの研究開発目標を設定した。前者は、これまでに整備してきた地層処分に関連する様々な技術を実際の地質環境へ適用することを通じて、その信頼性や実用性を確認していくことであり、後者は、処分システムに関連する様々な現象への理解を更に深めながら、モデルやデータベースを改良し、評価の信頼性や裕度を高めていくことである。このうち、深地層の研究施設は、主として第1の目標である「実際の地質環境への地層処

分技術の適用性確認」を進めるための中核となる研究施設である。全体計画では、これら二つの研究開発目標を達成するために、「処分技術の信頼性向上」と「安全評価手法の高度化」から構成される「地層処分研究開発」と、その基盤となる「深地層の科学的研究」を設け、それぞれに研究開発課題を設定した。原子力機構の発足後も、引き続き上記の二つの研究開発目標や研究開発課題に沿って研究開発を進めており、「独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画（中期計画）（平成17年10月1日～平成22年3月31日）」⁶⁾（以下、「中期計画」という）において、「深地層の科学的研究」と「地層処分研究開発」の二つの領域を設けて研究開発を進めていくことや、岐阜県瑞浪市と北海道幌延町における二つの深地層の研究施設計画を進めていくことを明記している。

第2次取りまとめまでの研究開発は、具体的な地質環境を特定せずに、わが国における地層処分の成立性を科学的根拠に基づき概括的に示すことを目標として進められてきた。地層処分技術の信頼性を更に向上し、処分事業や安全規制の段階的な進展にあわせて、その技術基盤を強化していくためには、第2次取りまとめで示したような技術を実際の地質環境に適用して、その実用性や信頼性を確認することが重要となる。これを総合的に行う場が深地層の研究施設である。

深地層の研究施設については、わが国の地質環境の特性と分布を考慮して、「複数の設置が望まれる」⁷⁾とされてきた。これを受けて、原子力機構では、結晶質岩と淡水系地下水を対象とした超深地層研究所計画⁸⁾（岐阜県瑞浪市）及び堆積岩と塩水系地下水を対象とした幌延深地層研究計画⁹⁾（北海道幌延町）の二つの計画を進めている（Fig. 1.1.1-1）。いずれも、地上からの調査研究段階（第1段階）、坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階）、地下施設での調査研究段階（第3段階）の3段階からなる、全体で20年程度の計画である（Table 1.1.1-1）。超深地層研究所計画では、第1段階を「地表からの調査予測研究段階」、第2段階を「研究坑道の掘削を伴う研究段階」、第3段階を「研究坑道を利用した研究段階」と呼んでいる⁸⁾。

なお、原環機構が行う処分地選定のための調査も、最終処分法に基づき、文献調査、概要調査、精密調査（前段の地上からの精密調査と、後段の地下施設を利用した精密調査）と段階的に進められ、概要調査の開始から精密調査の終了までが20年程度の計画である¹⁰⁾。深地層へのアプローチの方法としては、概ね、深地層の研究施設計画における第1段階が、概要調査と地上からの精密調査に、また、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。このうち、概要調査のための技術基盤は、「第2次取りまとめ」やその後の深地層の研究施設計画における第1段階での調査研究などにより整備されてきた。今後は、地下施設の設置を前提として行われる地上からの精密調査の技術基盤を強化していく観点から、深地層の研究施設計画の第2段階に得られる地質環境データに基づき、第1段階に構築した地質環境モデルを確認することなどを通じて、地上からの調査技術やモデル化手法の妥当性を評価し、信頼性を高めていくことが重要となる。国の基盤研究開発に関する全体計画¹¹⁾においても、地質環境調査評価技術に関するフェーズ2（平成18年度～平成22年度）の段階目標を「地上からの調査に関わる技術基盤の確立」、フェーズ3（平成23年度以降）の段階目標を「地下施設を活用した調査に関わる技術基盤の確立」としている。

1.1.2 深地層の研究施設計画における研究開発の目標

第2次取りまとめで示したような地層処分に関連する技術を実際の地質環境に適用し、その実用性や信頼性を確認することを通じて、地層処分技術の信頼性を向上していくことが深地層の研究施設計画における大きな研究開発目標である。第2次取りまとめでは、釜石鉾山（花崗岩）や東濃鉾山（堆積岩）の既存坑道を活用した調査研究、あるいは海外の地下研究施設での共同研究の成果などに基づき、地質環境を調査・評価するための要素技術や基盤的な手法を整備した。ま

た、これらの研究で得られた情報や文献情報を比較検討したうえで、現状あるいはその延長上にある工学技術により処分場を合理的に設計・施工し、地層処分の長期的な安全性を解析的に評価できる見通しなどを示した。第2次取りまとめは、質・量の異なる様々な分野の情報を組み合わせて解析・評価することにより、理論的に地層処分の成立性を示したといえる。

これを受け、二つの深地層の研究施設計画では、第2次取りまとめで示したような地層処分に関連する様々な技術を実際の地質環境に適用して、未擾乱の状態から段階的に調査研究を進めながら、順次得られてくる地質環境情報に基づき、実証的に地層処分技術としての信頼性を確認していく。調査研究を段階的に進めることにより、地下深部の地質環境についての理解を深め、また理解の程度を確かめながら、これを体系的に調査・解析・評価するための技術基盤を整備していく計画である。また、得られた地質環境情報に基づき、研究坑道を設計・施工していくことを通じて、地層処分に特有の「情報の取得や技術の実証を目的とした地下施設」を設置するための工学技術の基盤を整備していく。これら、「地質環境の調査・解析・評価技術」と「深地層における工学技術」の基盤を整備していくことが、深地層の研究施設計画における「深地層の科学研究」としての重要な技術課題である。

さらに、「深地層の科学研究」を通じて得られた情報や知見、あるいは岩石や地下水の試料などを、地層処分システムに関する工学技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化を目指した地層処分研究開発の基盤情報として活用する。実際の地質環境情報に基づく設計手法や安全評価手法の検討においては、調査が進展し得られる地質環境情報が詳細化されるのに応じて、繰り返し進めることが重要となる。これにより、地層処分技術全体としての適用性を確認することができ、検討結果を調査側へフィードバックすることにより、地質環境の理解度と安全評価上の感度や必要な調査量との関係などを検討することができる。また、深地層の研究施設における特定の地質環境下での調査・試験結果と比較検討しながら、条件を制御した室内・工学試験や放射性核種を用いた試験を行うことにより、地層処分システムに関連する様々な現象に対する理解や一般化を進め、設計・安全評価にかかわる技術の信頼性向上を図ることができる。なお、幌延深地層研究計画においては、深地層の科学研究に加えて、堆積岩における人工バリアの施工技術の開発や性能試験など、地下施設を利用した地層処分研究開発をあわせて実施する予定である¹²⁾。

1.1.3 わが国の地層処分計画における深地層の研究施設計画の役割

深地層の研究施設計画で成すべきことを端的に表現すれば、「技術が現場で実際に、体系的に機能することの確認」といえる。この確認は、データの取得や技術の適用性評価といった課題設定のもと、「地質環境を的確に理解する」という目標意識によって達成される。その成果は、技術の最適化や改良・高度化を果たすと同時に、技術の精度や限界に対する理解と経験をもたらす。技術の限界を知ることは、処分事業における具体的な計画や安全規制に関する現実的な方法論を検討するうえでの基本となる。処分事業は最終処分法に基づいて段階的に進められ、これに伴い安全規制に関する指針なども段階的に整備されていくため、その技術基盤となる研究開発は、それらの進展に先行して進めることが必要である。特に、深地層の研究施設計画における各調査研究段階の成果については、処分地の選定プロセスに対して適切なリードタイムをもって整備していくことが重要である。その一方で、前項に述べたように、深地層の研究施設計画で得られる実際の地質環境に関する情報や知見を活用して、地層処分システムの設計や安全評価手法に関する検討を進めていくことが重要となる。そのような検討の過程を通じて、地質環境を合理的に調査・評価する技術や、限られた地質環境情報あるいは段階的に得られてくる情報に基づいて、効率的に処分システムの設計や安全性の検討を進める手法などが整備されていくことになる。

地質環境を調査・評価し、その結果を踏まえて処分システムの設計・安全性の検討を進めてい

くうえでの大きな課題は、実際の地質環境が有する空間的な不均質性をどう理解し、これに起因する不確実性にいかに対処していくかである。そこには多くの試行錯誤や反復的なフィードバック作業が伴う。一般的に言えば、調査の量に応じて理解は深まるが、調査が進むにつれて調査量に対する理解向上の感度は鈍くなり、コストパフォーマンスは低下していく。地質環境を詳細に調べるためには大きな費用が必要となるが、いかに詳細な調査を行っても地質環境を完全に理解し尽くすることはできない。地層処分は本来的に、様々な不確実性を包含して成り立つシステムであるが、地質環境の理解に伴う不確実性の程度に応じて、評価に見込むべき安全裕度が違ってくる。実際の処分事業であれば、それが処分場の設計における安全率の取り方、ひいては建設コストに反映される。地質環境をどの程度まで理解し、残る不確実性を設計や安全評価上の裕度としてどう扱うかは、まさに総合的課題である。その中で、地質環境の調査・評価には、不確実性をできるだけ低減し、また、その幅を妥当な範囲に限定することが求められる。そのため、処分地の選定に向けた各調査段階においては、その段階で目標とすべき理解の程度や判断すべき要件と、次段階に保留すべき課題や不確実性などを見極めながら、調査の目的や内容を検討することが重要となる。また、同規模の調査であっても、対象とするサイトの地質・地形条件や社会的な制約などに応じて、得られる情報の精度や理解の程度は異なってくる。このようなスペシフィックな現実の条件に対応していくためには、調査技術・機器のカタログを整備するだけでなく、現場での経験を積み、実際の適用事例に学ぶことが重要である。深地層の研究施設計画での現実の地質環境を通して培った経験は、処分地選定の調査を進めるための技術を支え、また安全規制を具体化していくための議論を支える知識として、生かしていかなければならない。深地層の研究施設計画を進めていくに当たっては、学術的な成果や技術開発の実績だけではなく、失敗事例なども含めた経験・ノウハウを重要な研究の成果と認識し、それらをできるだけ知識化、体系化して継承していく工夫が必要である。このような認識のもと、深地層の研究施設計画においては、淡々と調査を進めるのではなく、調査の段階とその進展を明確に認識して、段階ごとに計画から実施、評価までの流れを意識的に繰り返していくアプローチをとっている。これは、調査の進捗と理解の進展や不確実性の低減との関係を明確に意識することにより、前段階の成果を次段階に反映しつつ調査全体を最適化し、収束を図っていくことを意図している。それは、理解や不確実性の程度を定量的にとらえ、経験を知識化していくプロセスでもある。

一方で、深地層の研究施設計画は、「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」¹⁾とされている。このため、深地層の研究施設においては、国内外の研究機関や専門家との研究協力を積極的に進め、また、広く学術的な研究の場としての活用を図るとともに、国民が地下深部の環境を実際に体験・学習し、研究者との対話を通じて、地層処分やその研究開発に対する理解を深める場としても整備していく。また、計画の内容や得られた成果については、地域の方々をはじめ広く国民に公開し、透明性の確保に努めていく。なお、深地層の研究施設計画を進めるにあたっては、放射性廃棄物を持ち込まないことや将来にわたって処分場としないことなどを、関係自治体との協定により約束している。

1.2 超深地層研究所計画の概要

1.2.1 超深地層研究所計画の経緯

瑞浪超深地層研究所周辺には、白亜紀の花崗岩（土岐花崗岩）が広く分布しており、これを基盤として、新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）と、固結度の低い新第三紀鮮新世の砂礫層（瀬戸層群）が分布する（Fig. 1.2.1-1）。瑞浪超深地層研究所の研究坑道は主として、この地域の基盤をなす土岐花崗岩中に建設される（Fig. 1.2.1-2）。また、瑞浪超深地層研究所が位置する東濃

地域は、北西部に美濃飛驒山地、南東部に三河山地が分布し、その間に丘陵地が広がる地形概観を示す。北部の山地には木曽川が流れ、先行性の河川として深い谷を刻んでいる。丘陵地の中央部には、北東から南西に向かって土岐川（庄内川）が流れ、その本流及び支流の沿岸に段丘が発達して台地を作り、河川周辺の低地には沖積地が広がっている。

超深地層研究所計画は、1995年12月、科学技術庁（現、文部科学省）立ち合いの下に、岐阜県、瑞浪市、土岐市及び動力炉・核燃料開発事業団（現、原子力機構）間で、「東濃地科学センターにおける地層科学研究に係る協定書」を締結し、1996年度より、岐阜県瑞浪市明世町の正馬様洞にある原子力機構用地（以下、「正馬様用地」という。Fig. 1.2.1-1 及び付録1 参照）において開始した¹³⁾。

その後、2002年1月に、瑞浪市と瑞浪市明世町の市有地（以下、「研究所用地」という）の賃貸借契約及び「土地賃貸借契約に係る協定」を締結し、超深地層研究所計画における研究坑道及び関連施設（以下、「瑞浪超深地層研究所」という）を、この研究所用地に設置することとなった⁸⁾。2002年7月には瑞浪超深地層研究所の造成工事に着工し、2003年7月には立坑の基礎部の掘削工事に着手、2004年度には本格的な掘削を開始した。研究所用地における第1段階の調査研究は、2002年から2004年度までの約3年間で実施した。

東濃地科学センターにおいては、超深地層研究所計画に先立ち、全体計画⁵⁾に示された深地層の科学研究に関する研究課題に係る研究開発として、1986年度から2003年度まで、東濃鉾山における堆積岩を対象とした調査試験研究を実施した¹⁴⁾。また、1992年度から東濃鉾山を含む10 km 四方程度の領域を対象に広域地下水流動研究を開始した¹⁵⁾。広域地下水流動研究は、2004年度末をもって長期地下水モニタリングを除く現場調査を終了し¹⁶⁾、調査研究成果を取りまとめた^{17),18)}。広域地下水流動研究の研究領域は、瑞浪超深地層研究所を含むため、2005年度以降は既設の観測設備やボーリング孔を活用して、瑞浪超深地層研究所における研究坑道の建設に伴う周辺地下水の水質や水圧の変化を把握するための長期観測を行っている^{16),17)}。研究所用地での超深地層研究所計画においては、広域地下水流動研究のほか、正馬様用地での調査研究成果を取り入れて研究を進めている^{18),19)}。

1.2.2 超深地層研究所計画の目標と進め方

超深地層研究所計画では、2002年に策定した「超深地層研究所地層科学研究基本計画」⁸⁾において、1.1.2 で述べた全体計画⁵⁾に示された深地層の科学研究に関する研究課題のうち、「地質環境特性の研究」及び「深地層における工学技術の基礎の開発」のそれぞれに対応する以下の二つを全体目標として設定している⁸⁾。

- ① 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備
- ② 深地層における工学技術の基盤の整備

以下に、二つの目標の概要を示す。

(1) 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備

「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」は、地質環境の特性として重要な地下水の動きや性質、岩盤の熱・力学特性、岩盤中での物質の挙動、坑道掘削が周辺の岩盤に与える影響などを明らかにしていくものであり、超深地層研究所計画を通じて、深部地質環境への理解を深めながら、これを体系的に調査・解析・評価するための技術基盤を整備していく。

具体的には、超深地層研究所計画における調査研究を段階的に進めながら、これまでに整備してきた地質環境の調査技術や評価手法などを実際の地質環境に適用していくことを通じて、その信頼性や適用性などを確認していく。その過程で、地質環境への理解や取得する地質環境情報の

精度の向上を図りつつ、地質環境モデルの検証や調査・評価技術の改良を進め、段階ごとに、実際の地質環境に適用可能な技術として体系化していく。この体系化においては、調査によるデータ取得からモデル化や解析作業を経た評価に至るまでの、地質環境を理解するための一連の方法論を例示することに重点をおく。あわせて、中期計画⁹⁾に示したように、処分事業と安全規制の両面を支える地層処分技術の知識基盤を整備していくため、深部地質環境の調査・解析・評価手法に関して、その過程で得られた経験（失敗例を含む）やノウハウをできるだけ知識化して提示することを目指す。特に、本研究においては、実際の地質環境が有する空間的な不均質性をどう理解し、これに起因する不確実性にいかに対処していくかが重要な課題であり、そこには多くの試行錯誤が伴う。このような経験を通じて得られた知見やノウハウは、生きた知識として、処分事業や安全規制を支える技術基盤に更なる厚みを与えるものである。

(2)深地層における工学技術の基盤の整備

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

具体的には、瑞浪超深地層研究所において、第1段階で得られた地質環境情報に基づき、現状の土木工学技術や資源工学技術を適用して、調査・試験に必要となる地下深部までの研究坑道を設計するとともに、第2段階において実際に研究坑道を安全かつ合理的に施工することを通じて、計測結果などの情報を設計・施工法へフィードバックし、それらの適用性を確認する。さらに、第3段階に利用される場の構築と維持・管理ができることを確認しながら、その技術基盤を整備していく。その際、研究坑道の掘削による地質環境への影響を評価するための手法の整備や、影響を修復・軽減するための技術の開発なども重要な課題となる⁸⁾。また、研究坑道の設計・建設については、深地層に対する国民の理解促進の場としての役割にも留意して進めていく。

1.3 超深地層研究所計画・第1段階成果取りまとめの目標と構成

1.3.1 第1段階成果取りまとめの目標

超深地層研究所計画の第1段階における調査研究の成果の取りまとめ（以下、「第1段階成果取りまとめ」という）は、2004年度までに行った第1段階の地上から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などを網羅的に取りまとめたものである。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1段階における段階目標（2.1参照）⁷⁾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2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っている。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²⁰⁾、特に原環機構が実施する概要調査及び精密調査、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1段階における調査研究のうち2004年度までに得られた成果（2.2.4で述べるステップ3までの調査研究成果）については、2005年9月に公表した研究開発報告書「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—」（以下、「H17取りまとめ」という）の分冊1¹⁷⁾に取りまとめている。

以上のような状況を踏まえ、第 1 段階成果取りまとめにおいては、「第 1 段階目標に対して調査研究の成果を適切に取りまとめるとともに、課題を抽出・整理し、第 2 段階以降の調査研究の必要性について言及すること」を目標として設定し、H17 取りまとめ以降に得られた成果も含めて、第 1 段階におけるすべての調査研究の成果を整理した。また、取りまとめを進めていくにあたっては、H17 取りまとめで示した今後の課題や、H17 取りまとめに対する意見などを参考にしつつ、取得したデータや結果のみならず、一連の調査・解析・評価の方法論や工学的な技術の基盤、さらには実際の調査研究を通じて得られた知見（ノウハウや失敗例）を整備することに留意することとした。

なお、第 1 段階の段階目標の一つである「研究坑道の掘削を伴う研究段階の調査研究計画の策定」については、別途計画書として取りまとめる。

1.3.2 報告書の構成

本報告書は、全 5 章から構成される。第 2 章「超深地層研究所計画・第 1 段階調査研究の概要」では、第 1 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 3 章「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」では、第 2 章で設定した調査研究の個別目標と課題に関する調査研究の成果に基づき、結晶質岩を対象とした第 1 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とともに、第 2 段階の調査研究に向けた深部地質環境とその変化の予測結果について取りまとめる。第 4 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設計・施工対策技術及び安全確保技術について記述する。最後の第 5 章「おわりに」では、第 3 章と第 4 章までの記述を踏まえて、第 1 段階における深地層の科学研究の成果を総括するとともに、今後の展開について記述する。

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（平成 12 年度）”, 原子力委員会 (2000).
- 2) 原子力委員会:“原子力政策大綱”, 原子力委員会 (2005).
- 3) 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”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1410 99-020 (1999).
- 4) 原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会:“高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第 1 次報告）”, (2000).
- 5) 核燃料サイクル開発機構研究開発課題評価委員会:“平成 13 年度研究開発課題評価（中間評価）報告書 研究課題「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全体計画」”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1440 2001-008 (2001).
- 6) 日本原子力研究開発機構:“独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画（中期計画）（平成 17 年 10 月 1 日～平成 22 年 3 月 31 日）”, 日本原子力研究開発機構, (2005).
- 7) 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（平成 6 年）”, (1994).
- 8) 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”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2001-018 (2002).
- 9) 核燃料サイクル開発機構:“深地層研究所（仮称）計画 地表から行う調査研究（第 1 段階）計画”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1410 2001-001 (2001).
- 10) 原子力発電環境整備機構:“特定放射性廃棄物の概要調査地区等の選定手順の基本的考え方に

- ついて”, 官報, 号外第 238 号, 平成 13 年 11 月 8 日 (2001).
- 11) 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”, 資源エネルギー庁・(独)日本原子力研究開発機構 (2007).
 - 12) 核燃料サイクル開発機構研究開発課題評価委員会: “平成 16 年度研究開発課題評価 (中間評価) 報告書 研究課題「幌延深地層研究計画」”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1440 2005-002 (2005).
 - 13) 動力炉・核燃料開発事業団: “超深地層研究所 地層科学研究基本計画”, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN7070 96-002 (1996).
 - 14) 核燃料サイクル開発機構: “東濃鉱山における調査試験研究年度報告書 (2003 年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2004-003 (2004).
 - 15) 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”, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN7020 98-001 (1997).
 - 16) 核燃料サイクル開発機構: “広域地下水流動研究年度報告書 (平成 16 年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-013 (2005).
 - 17) 核燃料サイクル開発機構: “高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成 17 年取りまとめ— 一分冊 1 深地層の科学的研究—”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 2005-014 (2005).
 - 18) 太田久仁雄, 佐藤稔紀, 竹内真司, 岩月輝希, 天野健治, 三枝博光, 松岡稔幸, 尾上博則: “東濃地域における地上からの地質環境の調査・評価技術”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-023 (2005).
 - 19) 核燃料サイクル開発機構: “東濃地域における地質環境特性に関する調査研究-地表からの調査時研究の考え方と進め方-”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2002-008 (2002).
 - 20) 梅木博之, 大澤英昭, 内藤守正, 中野勝志, 牧野仁史: “地層処分技術に関する知識管理システムの基本概念”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Review 2006-078 (2006).
 - 21) 糸魚川淳二: “瑞浪地域の地質”, 瑞浪市化石博物館専報, 第 1 号, pp.1-50 (1980).

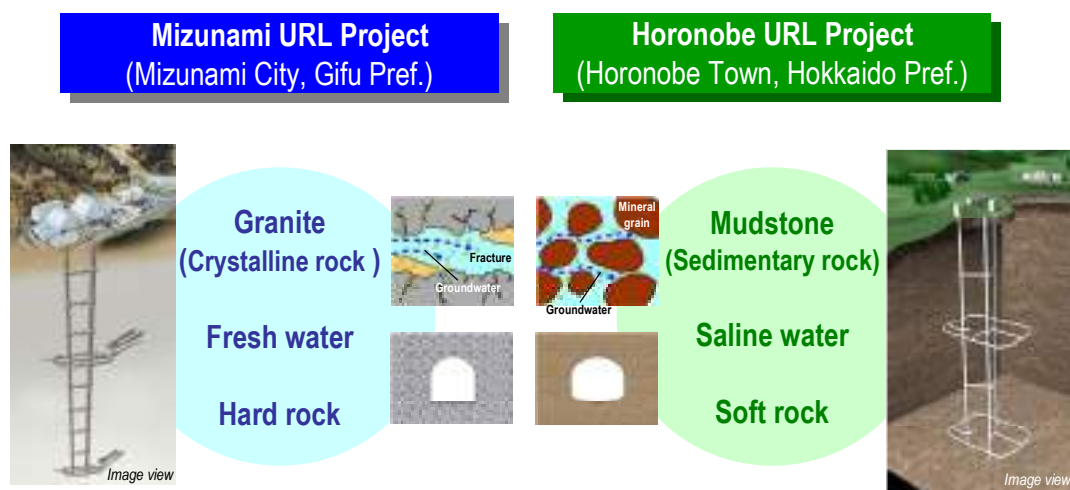


Fig. 1.1.1-1 Two generic URL projects in Japan¹⁶⁾

Table 1.1.1-1 Schedule of the MIU project

Fiscal year	2000	2010	2020
Research			
Phase I			
Phase II			
Phase III			
Design and construction of facilities			
Site preparation			
Shaft excavation			
Middle and Main Stage construction			

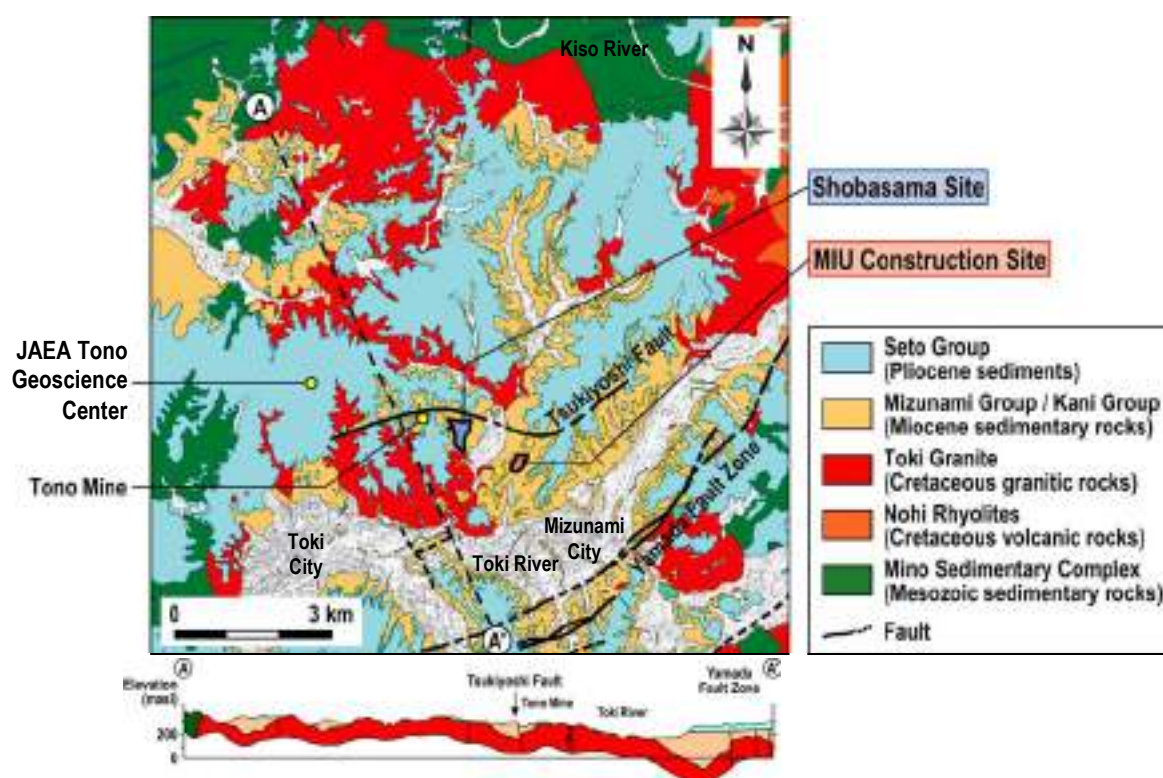


Fig. 1.2.1-1 Geological map and geological section of the Tono area
(Simplified from Itoigawa (1980)²¹⁾)

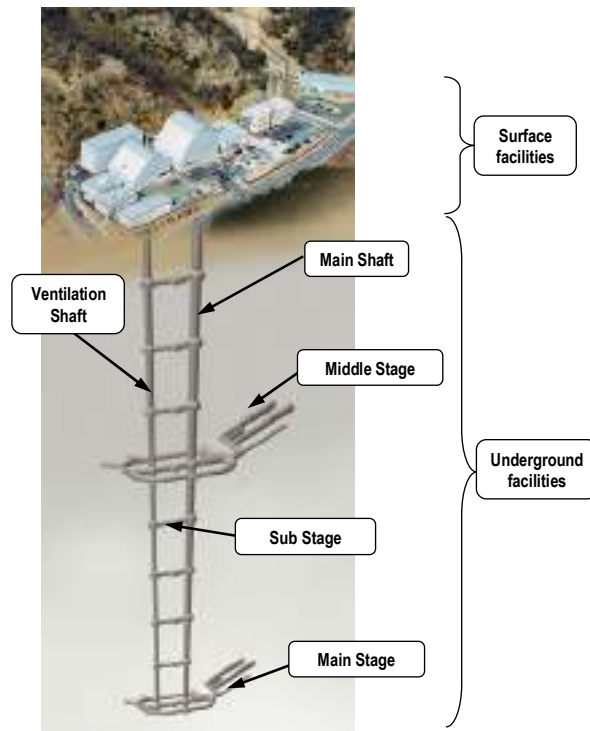


Fig. 1.2.1-2 Layout of the MIU facilities

2. 超深地層研究所計画・第1段階調査研究の概要

2.1 第1段階調査研究の目標

超深地層研究所計画の第1段階の段階目標は、①地表での調査・研究による地質環境モデルの構築及び研究坑道掘削前の深部地質環境の状態の把握、②研究坑道の詳細設計及び施工計画の策定、③研究坑道の掘削を伴う研究段階の調査・研究計画の策定、の3点である¹⁾。

①地表での調査研究による地質環境モデルの構築及び研究坑道掘削前の深部地質環境の状態の把握

地表での調査研究などにより深部地質環境に関する情報を取得し、研究坑道建設前の未擾乱の地質環境特性を詳細に把握する。また、取得した情報の集約と解釈をとおして、地質環境モデル（地質構造モデル、水理地質構造モデル、地球化学モデル、岩盤力学モデル及び物質移動概念モデル）を構築する。さらに、調査の進展とともに順次取得する情報に基づき、適宜、地質環境モデルを更新し、調査の種類・量、解析・評価の手法及び結果の精度との関係を把握する。これにより、一連の調査・解析・評価手法の有効性を評価する。

また、これらの地質環境モデルなどを用いて、研究坑道の掘削により変化することが予想される深部地質環境（たとえば、地下水流動場、深部地下水の地球化学的特性、岩盤の力学的特性など）の研究坑道掘削前の状態を推定する。

②研究坑道の詳細設計及び施工計画の策定

後述の③において策定する第2段階及び第3段階における調査研究計画に基づいて、研究坑道の詳細レイアウトを決定する。この際、本段階において取得する深部地質環境に関する情報及び研究坑道掘削に伴う深部地質環境の変化に関する推定結果などを考慮する。また、実際に適用する施工技術並びに機械・設備を選定し、具体的な施工計画を決定する。なお、施工計画は、研究坑道掘削前の深部地質環境を可能な限り乱さないものとするよう配慮することが重要である。

③研究坑道の掘削を伴う研究段階の調査・研究計画の策定

第2段階における具体的な調査研究計画及び第3段階における概略的な調査研究計画を策定する。この際、前述の深部地質環境に関する情報、並びに研究坑道掘削に伴う深部地質環境の変化に関する推定結果などを踏まえ、第2次取りまとめの評価報告書²⁾などに示された研究開発の課題を考慮することが重要である。

第1段階の調査では調査量や調査精度に限界があるため、地下深部の地質環境特性の評価モデルの不確実性を低減するには限界がある。そのため、地層処分の安全評価や地下施設の設計・施工の際に考慮すべき要件を念頭において、「どのような調査を地表から実施すればどれぐらいの理解度が得られるか」を実例として示すことが第1段階における成果として求められる。以上のような調査の質・量に対する地質環境特性の理解度や不確実性の程度について、両者の関係を地質環境モデルの構築などを通じて整理することにより、調査・解析（地質環境のモデル化・解析）・評価（地質環境特性の評価）の体系化が図られると考えられる。第1段階で構築した地質環境モデルの妥当性については、その評価に必要な調査研究項目を抽出し、第2段階以降の調査研究計画に反映することとした。

また、研究坑道掘削に関しては第1段階において次段階以降の具体的な設計、施工、管理計画を立案しておくこととした。

2.2 第1段階調査研究の進め方と概要

2.2.1 調査研究の個別目標と課題の設定

地層処分においては、地質環境には、「廃棄物を長期にわたって物理的に隔離すること」、「人工バリアにとって適切な設置環境を提供すること」、「天然バリアとして機能すること」の三つの役割が期待されている^{3), 4)}。このうち、地質環境が廃棄物を長期にわたって物理的に隔離するために考慮すべき事項については、「概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件」⁵⁾として整理されている。対象とする地質環境がこの環境要件を満たしたうえで、地層処分の技術的実現性をより確かなものとしていくためには、地質環境には、さらに以下のような条件や機能が期待される。

- ・ 地層処分の場を確保する観点から、対象とする地層が十分な深度に分布し、処分場を建設するうえで十分な空間的広がりを持つこと
- ・ 人工バリアや処分施設を安全に設計・施工し、健全に維持する観点から、対象とする地層の応力状態が均質に近く、地温が低いこと
- ・ 緩衝材の流出、オーバーパックの腐食及びガラスの溶解を抑制する観点から、処分場を通過する地下水流速が低く、地下水が強酸性や強アルカリ性でなく、かつ還元性であること
- ・ 放射性核種の移行を抑制する観点から、対象とする地層中の地下水流動が緩慢で移行距離が長く、放射性核種の移行が十分に遅延されること
- ・ 放射性核種の濃度を低減させる観点から、対象とする地層が有する放射性核種の希釈・分散効果が大いこと

そのうえで、対象とする地質環境が、人工バリアの設置環境及び天然バリアとしての安全機能を長期にわたって維持することが求められる。第1段階の調査研究では、地層処分にとって重要な地質環境の条件や機能について、国際的な協力により作成されている汎用的な FEP（処分の場としての性質（Feature）と安全性能に影響を及ぼすと考えられる様々な事象（Event）及びプロセス（Process））のリスト⁶⁾に加え、概要調査における調査項目や手法などを整理した事例^{3), 7)}などを参考に、「安全評価」の観点から調査・評価すべき地質環境の特性やプロセスとして、具体化を図るとともに整理を行い（Fig. 2.2.1-1）、それらを把握することを調査研究の個別目標と課題として設定した。

また、超深地層研究所計画では、第1段階の調査研究において取得した地質環境情報に基づいて、実際に研究坑道の設計・施工を進めていく（詳細は第4章を参照）。このため、調査・評価すべき地質環境の特性やプロセスについては、「地下施設の設計・施工」の観点からも整理しておくことが必要である。さらに、近年、処分事業の展開にあたっては、人間環境に対する安全性のみならず、社会的な影響や環境への影響などについても評価することの重要性が示されており^{8), 9), 10)}、地表から地下深部までの「環境影響評価」は、トンネルやダムなどの大規模事業における地上での環境アセスメントと同様に重要であると考えられる¹¹⁾。超深地層研究所計画では、実際に研究坑道を建設しながら調査研究を進めていくことから、地表から地下深部にいたる研究坑道の建設が周辺環境（地下水位や水質など）に与える影響を事例的に評価することが可能である。このような背景から、地下施設の設計・施工及び環境影響評価の観点からも、調査・評価すべき地質環境の特性やプロセスの具体化と整理を行い（Fig. 2.2.1-1）、それらを把握することを調査研究の個別目標と課題として設定した。

第1段階の調査研究においては、以上の三つの観点はもちろんのこと、特に安全評価の観点に重点を置いて、整理した地質環境の特性やプロセスを把握していくことが、具体的な課題となる。さらに、それぞれの調査研究分野では、これらの課題に対して、個別の調査・評価技術を整備す

るとともに、それぞれの調査研究分野で得られた結果を統合・解釈することを通じて、調査・評価技術の体系化を図っていくことが重要である。

2.2.2 空間スケールの設定

安全評価及び地下施設の設計・施工への研究成果の反映を念頭に置いて、不均質性を有する地質環境を限られた調査量で効率的に理解していくための手段の1つとして空間スケールの設定がある。広域地下水流動研究¹²⁾及び超深地層研究所計画¹⁾では、地上からの調査研究をとおして地層処分にとって重要な地質環境特性を段階的に理解するとともに地下水流動や物質移動などの評価を行うことから、涵養域から流出域までの一つの地下水流動系や研究所用地及び研究坑道のレイアウトなどに着目して、Fig. 2.2.2-1に示すようにリージョナル、ローカル、サイト及びブロックの4つの空間スケールを設定し、調査研究を進めている¹¹⁾。

調査研究の実施に当たりスケールを区分するという考え方は、これまでも地層処分以外の分野においても広く用いられてきている。例えば、「原子力発電所の地質、地盤に関する安全審査の手引き」¹³⁾では、原子炉施設の設置予定場所の敷地の中心から少なくとも半径30 kmの範囲、半径1 km程度の範囲、原子炉炉心予定位置を中心とする半径200 m程度の範囲及び原子炉建屋基礎岩盤の4スケールにおける調査・評価が必要であるとしている。また、ダムサイトにおける地質調査の基本的な進め方¹⁴⁾においても、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向かう流れと該当するスケール(地形図の縮尺)ごとの調査項目が明示されている。しかしながら、地層処分にとって重要な地質環境特性を理解するための調査研究では、安全評価を念頭に置いて地下水流動や物質移動の評価を行うことから、原子力発電所やダムサイトなどにおける調査と比較して、区分したスケール間での地質環境特性やそこで生じる現象の整合性あるいは連続性がより強く求められるという点が大きな特徴と言える。したがって、区分した空間スケールごとに、その整合性や連続性が確保できる調査・評価技術を整備することが必要となる。

広域地下水流動研究及び超深地層研究所計画において設定した空間スケール区分や位置付けをTable 2.2.2-1に示す。このうち、広域地下水流動研究では、リージョナルスケール及びローカルスケールにおける調査研究を進めてきた。一方で、超深地層研究所計画では、サイトスケール及びブロックスケールにおける調査研究を進めている。リージョナルスケールは、ローカルスケールにおける研究領域を設定するための空間スケールであり、ローカルスケールは、研究所用地の地表から地下1,000 m程度を通過する地下水の涵養域から流出域までの一つの地下水流動系を包含する空間スケールである。また、サイトスケールの領域は、研究所用地を中心として月吉断層などの主要な地質構造の分布を考慮してFig. 2.2.2-2に示す範囲としている。このサイトスケール領域において地下水流動解析を行う際の境界条件は、ローカルスケールでの地下水流動解析結果を用いて設定している。サイトスケールの境界条件を適切に設定するためには、サイトスケールの境界条件に影響を与える水理地質構造を考慮したローカルスケールの地下水流動解析が必要となる。したがって、サイトスケールでの調査研究でこのような水理地質構造の位置や透水性などが更新された場合は、ローカルスケールの水理地質構造モデルを更新し、それに基づく地下水流動解析を実施し、サイトスケールの境界条件を設定している(Fig. 2.2.2-3)。また、ブロックスケールは、研究坑道の近傍の応力場、研究坑道の建設に伴う掘削影響や地下水流入量などの予測解析などを実施する場合に、それに必要な空間をサイトスケールの地質環境モデルから切り出して詳細にモデル化する空間スケールである。

本報告書では、2.2.1で設定した個別目標と課題を念頭に進めてきたサイトスケール(ブロックスケールを包含する)における調査研究の成果を取りまとめている。

2.2.3 繰り返しアプローチの適用

実際の場所で地質環境特性を段階的に理解するための調査研究を進める場合、空間的、時間的さらには経済的な多くの制約が課されることとなる。このような条件の下で効率的に調査研究を進めていくためには、調査研究の進展に伴う情報の種類・量と地質環境の理解度や調査研究の達成度との関係を順次評価し、その結果を次の調査研究の具体的な計画立案及び次の段階へと展開する際の判断につなげていくことが重要である。このための基本的な考え方が Fig. 2.2.3-1 に示す繰り返しアプローチである。繰り返しアプローチにおけるループは大きく以下の 8 項目で構成されている。

- ① 概念の構築／更新：地質環境特性に関する前ループまでの調査・解析・評価結果に基づき、地層処分にとって重要な構造や特性（例えば、地下水の流動や水質形成などに影響を及ぼすと考えられる不連続構造や岩盤中の水理学的不均質性¹⁵⁾）を抽出し、対象となる範囲の地質環境を概念化する。
- ② 計画立案／更新：前述の地質環境の概念、調査研究の個別目標と課題及び空間スケールの概念に基づくとともに、制約条件を勘案しつつ、調査研究計画を具体化するとともに適宜見直しを図る。
- ③ 調査：立案した調査研究計画に沿って、それぞれの調査研究を実施する。
- ④ データの解釈：調査研究の個別目標と課題に向け、調査研究により得られたデータを「モデル化・解析」するための情報として解釈し、空間分布やデータが有する不確実性の幅などとして整理する。
- ⑤ モデル化・解析：「データの解釈」の結果（データセットなど）を基に、地質構造、水理地質構造、地球化学、岩盤力学及び物質移動のモデルをそれぞれ構築する。ただし、調査ステップごとに対象とする調査研究の個別目標と課題は異なるため、調査ステップごとに「モデル化・解析」の対象を設定する。また、構築した地質環境モデルを用いて時間の経過に伴う地下水の流動や水質変化などを予測する。
- ⑥ 解析結果の評価：「モデル化・解析」により得られた結果について考察する。特に、データ、証拠及び根拠が異なる各分野のモデル間において、その結果が整合的か否かなどを考察することが重要である。さらに、「モデル化・解析」をとおして、調査研究の個別目標と課題に向けた地質環境特性に関する情報が十分に取得できたか、あるいは、対象とする地質環境をどこまで理解・記述できたかなどについて評価する。
- ⑦ 不確実性の評価：「解析結果の評価」で得られた結果を定量化し、客観的に理解しやすい情報として整理する。調査研究の個別目標と課題に向けた「モデル化・解析」の結果の妥当性や信頼性を向上させるために、データの品質や解釈、モデル化手法の違いなどに起因する不確実性を定量化し、どの程度まで不確実性が低減できたのかを順次示していく。
- ⑧ 重要な要素の特定：①から⑦までの結果を踏まえ、調査研究の個別目標と課題を達成するうえで重要な要素を次のループの調査研究対象として特定する。

このような一連のループを繰り返す中で、次のループで重要な要素を明確にするとともに、繰り返してきた一連のループにおいて積み重ねた知見に基づき、ここで実践された総合的な地質環境の調査・解析・評価技術の有効性を確認しつつ一つの方法論として最適化していく。ただし、ここで示した繰り返しアプローチは理想型であり、現実的には、調査研究の進展や制約条件などに合わせて、ループごとにそのループの進め方（ループを構成する項目）に柔軟性を持たせることが必要である。

2.2.4 第1段階における調査研究の流れ

研究所用地における第1段階の調査研究では、地質環境特性を面的に調査できる手法を用い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、それをボーリング孔を利用した調査によって把握するといった手順で実施した。また、複数のボーリング孔を利用した調査の同時実施による掘削や孔内試験による相互干渉を避ける調査研究工程とした（付録2参照）。具体的には Fig. 2.2.4-1 に示すように既得情報整理／地表地質調査から孔間トモグラフィ探査／孔間水理試験までの6つの調査項目を設け、それらを5つの調査ステップにグループ化した。さらに、各調査ステップにおいて、統合化データフロー^{(16),(17),(18),(19)}に基づき、繰り返しアプローチを用いた調査研究を展開した^{(11),(20),(21)}。この統合化データフローは、調査研究の個別目標と課題に対して、調査の種類と組合せ、取得するデータの種類の、データの解釈及び異なる分野で得られた情報の統合などを示すものである。また、それぞれのステップにおいて、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・特定した。このような考え方によって、調査・解析・評価を行うことによって、調査の種類や量と、個別目標と課題に対する理解度や不確実性との関連性を事例的に明らかにした。

具体的には、既得情報整理（ステップ0）に基づき、サイトスケール領域における地質構造の三次元分布や地下水の流動特性、地下水の地球化学特性など個別目標として設定した項目の概略を理解した。ここで、既得情報とは、文献調査、広域地下水流動研究や正馬様用地での調査研究などにおいて瑞浪超深地層研究所における調査研究を開始する前に取得された情報である。次に、地表地質調査や反射法弾性波探査（ステップ1）によって岩相境界や不連続構造の位置を面的に推定し、各岩相や不連続構造の特性をボーリング調査（ステップ2、3）によって評価した。なお、ボーリング調査においては、基本的に、既存ボーリング調査や新規浅層ボーリング調査、新規深層ボーリング調査などは順次実施することが理想的であるが、時間的な制約を考慮して既存ボーリング調査と新規浅層ボーリング調査（ステップ2）を同時期に実施したため、これらを一つの調査ステップとしてまとめることとした。さらに、孔間トモグラフィ探査や孔間水理試験（ステップ4）によって、ボーリング孔間における不連続構造の位置及び幾何学的形状の同定、水理特性やその連続性を評価した。

なお、付録1に第1段階における調査研究の実施位置図を、付録2に第1段階における調査研究のスケジュールを、付録3にボーリング孔を利用した調査の実施概要をまとめた表を添付する。

以上の流れで実施した調査研究の成果は、「調査」から「個別目標と課題」までの合理的な道すじを示した統合化データフローを用いて調査ステップごとに取りまとめた（付録4参照）。

2.2.5 第1段階における調査研究の制約条件及び初期条件

ここでは、第1段階における調査研究の制約条件及び初期条件を整理する。

(1)制約条件

- ・ ボーリング孔や研究坑道及び地上設備を含む関連施設を設置する場所は研究所用地内（約7.8ha）とする。
- ・ 処分事業及び安全規制に対し調査研究成果を反映するための適切なリードタイムを確保するために、第1段階の野外における調査研究は、瑞浪市との間で土地賃貸借契約を締結した2002年1月から2005年3月までの約3年間とする。
- ・ 同様の理由から、研究坑道の掘削工事（研究所用地内の整地作業や地上施設の建設作業を含む）と並行して調査研究を実施する。
- ・ 研究所用地の多くは地形の起伏が大きく平坦な土地に限られる。このような平坦な土地で、研究所用地の造成工事や深層ボーリング掘削の櫓などの設置、研究坑道掘削のための地上設

備の設置が実施される。これらは、同時に進められることから、調査地点が限定される。

(2)初期条件

- ・ 研究所用地における第 1 段階の調査研究が開始される以前の広域地下水流動研究や正馬様用地での調査研究成果は、研究所用地での調査研究の既得情報として活用することができる。
- ・ 研究所用地における第 1 段階の調査研究が開始される以前に広域地下水流動研究や正馬様用地での調査研究において開発もしくは適用性が確認された調査手法を活用することができる。

参考文献

- 1) 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”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2001-018 (2002).
- 2) 原子力委員会: “我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価” (2000).
- 3) 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”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1410 99-020 (1999).
- 4) 清水和彦, 瀬尾俊弘, 吉田英一: “高レベル放射性廃棄物の地層処分と我が国の地質環境”, 資源と素材, Vol.117, pp.775-784 (2001).
- 5) 原子力安全委員会: “高レベル放射性廃棄物の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について”, 平成 14 年 9 月 30 日 (2002).
- 6) NEA: “Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste – An International Database”, OECD Nuclear Energy Agency (2000).
- 7) 原子力発電環境整備機構: “概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠”, 「概要調査地区選定上の考慮事項」の説明資料, NUMO-TR-04-02 (2004).
- 8) AECL: “Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada’s Nuclear Fuel Waste”, Atomic Energy of Canada Limited, AECL-10711, COG-93-1 (1994).
- 9) Posiva: “The Final Disposal Facility for Spent Nuclear Fuel - Environmental Impact Assessment Report” (1999).
- 10) DOE: “Final Environmental Impact Statement for a Geologic Repository for the Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste at Yucca Mountain, Nye County, Nevada”, U.S. Department of Energy, DOE/EIS-0250 (2002).
- 11) 核燃料サイクル開発機構: “超深地層研究所計画における調査研究の考え方と進め方 (平成 15 ~17 年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2004-008 (2004).
- 12) 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”, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN7020 98-001 (1997).
- 13) 原子力安全調査室: “原子力安全委員会安全審査指針集 (改訂 8 版)”, 科学技術庁原子力安全局 原子力安全調査室 (1994).
- 14) 土木学会岩盤力学委員会: “ダムの地質調査”, 土木学会 (1986).
- 15) 太田久仁雄, 天野健治, 須山泰宏, 三枝博光: “広域地下水流動研究における三次元地質構造モデルの構築”, サイクル機構技報, No.4, pp.101-110 (1999).
- 16) 大澤英昭, 中野勝志, 太田久仁雄: “超深地層研究所計画における地表での調査研究成果の統合化”, 日本原子力学会 2001 年秋の大会予稿集, p.918 (2001).
- 17) 中野勝志, 太田久仁雄, 竹内真司, 三枝博光, 大澤英昭: “瑞浪超深地層研究所を中心とした東濃における深地層の科学的研究—調査研究の進め方—”, 地球惑星科学関連学会 2005 年合同大

会予稿集, G018-010 (CD-ROM) (2005).

- 18) 太田久仁雄, 佐藤稔紀, 竹内真司, 岩月輝希, 天野健治, 三枝博光, 松岡稔幸, 尾上博則: “東濃地域における地上からの地質環境の調査・評価技術”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-023 (2005).
- 19) Nagra: “Geosynthese Wellenberg 1996, Ergebnisse der Untersuchungsphasen I und II”, Nagra Technical Report NTB96-01 (1997).
- 20) 核燃料サイクル開発機構: “高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－ 一分冊 1 深地層の科学的研究－”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 2005-014 (2005).
- 21) 核燃料サイクル開発機構: “東濃地域における地質環境特性に関する調査研究－地表での調査研究の考え方と進め方－”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2002-008 (2002).
- 22) 太田久仁雄, 佐藤稔紀, 小出馨, 坂巻昌工: “超深地層研究所計画－地層科学研究の現状－”, 第 7 回 NUCEF セミナー講演報文集, 日本原子力研究所研究報告書, W-17 (2004).

Table 2.2.2-1 Dimensions and objectives of each scale²⁰⁾

Scale	Dimensions / Area and depth	Objectives
Regional	Hundreds of km ² (Tens of km square) Depth : About 10 km.	✓ Set modeling area and boundary conditions of local scale
Local	Tens of km ² (several km square) Depth : Several km.	✓ Evaluate the geological disposal system ✓ Collect fundamental information for design of underground facility ✓ Set modeling area and boundary conditions of site scale
Site	Several km ² (hundreds of meters to several km square) Depth : 2 to 3 km.	✓ Evaluate the far-field and near-field around the engineered barrier ✓ Predict rock mechanical and hydrogeological conditions during construction of underground facility ✓ Set modeling area and boundary conditions of block scale
Block	Hundreds of m ² (tens of meters to hundreds of meters square) Depth : hundreds of meters to 1 km.	✓ Evaluate near-field around the engineered barrier ✓ Predict rock mechanical and hydrogeological conditions during construction of underground facility

	Important factors to be characterized	Data requirements
Safety assessment	Geological structure	Size and geometry of host rock; heterogeneity within host rock
		Size and extent of surrounding formations
		Spatial distribution and geometry of transport pathways (groundwater flowpaths)
	Groundwater flow characteristics	Spatial variability of magnitude of hydraulic gradient
		Spatial variability of hydraulic properties of rocks
	Geochemical characteristics of groundwater	Redox conditions
		Spatial variability of groundwater pH values
		Spatial distribution of different groundwaters; degree of groundwater mineralization
	Transport/retardation of nuclides	Sorption capacity and diffusivity of rock matrix and of transport pathways
		Geometry of transport pathways; depth of diffusion-accessible rock matrix
		Effect of colloid/organics/microbes on nuclide transport/retardation
Designing & construction of underground facilities	Dilution of nuclides	Spatial distribution of higher-permeability rocks, aquifers and surface waters
		Spatial variability of water fluxes in higher-permeability rocks, aquifers and surface waters
	Geomechanical/hydraulic properties of tunnel near-field environment	Local stress regime
		Spatial variability of petrophysical/geomechanical properties of rocks
		Volume of inflow into underground tunnels
		Size and structure of EDZ; petrophysical/geomechanical properties of EDZ
		Distribution of discontinuities intersecting underground tunnels
	Subsurface thermal conditions	Spatial variability of geothermal gradient
		Thermal rock properties
Environmental assessment	Environmental impact induced by construction of underground facilities	Impact on water table
		Impact on hydraulic pressure
		Impact on groundwater chemistry
		Effects of noise and vibration

(EDZ : Excavation Disturbed Zone)

Fig. 2.2.1-1 Important factors to be characterized and data requirements, relevant to safety assessment, designing/construction of underground facilities and environmental assessment

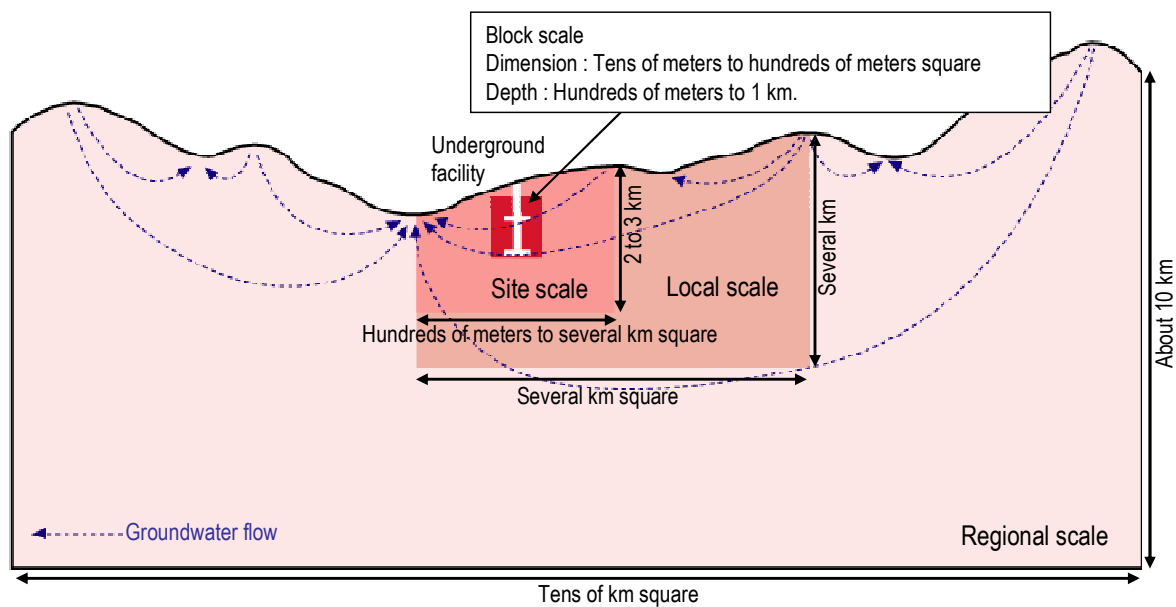


Fig. 2.2.2-1 Concept of scale²⁰⁾

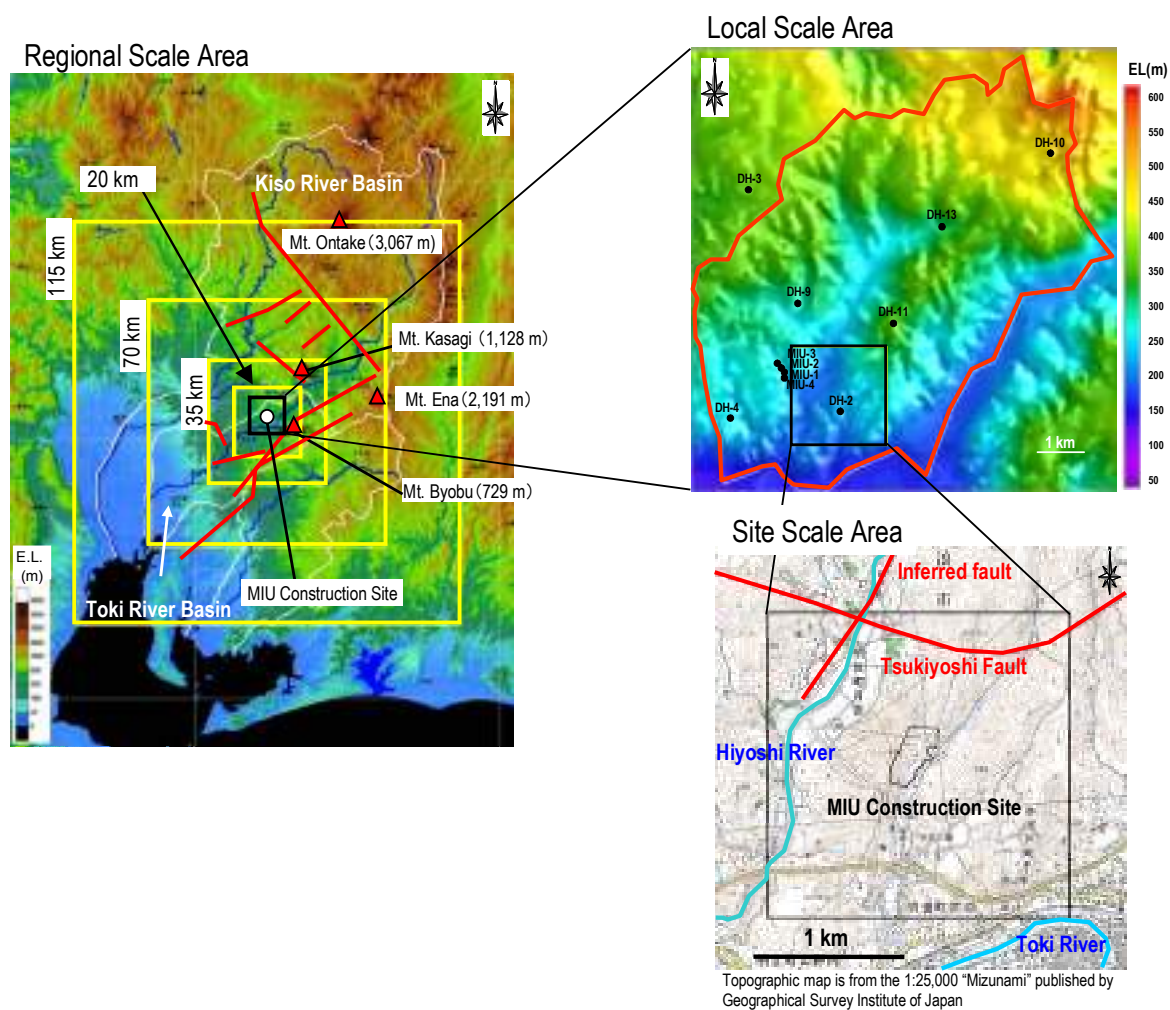
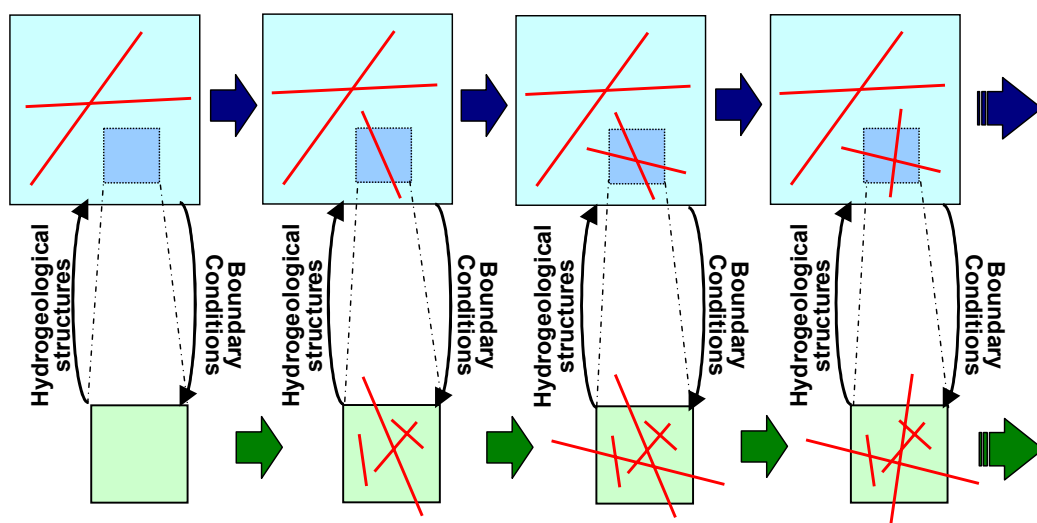


Fig. 2.2.2-2 Areas of each scale

Hydrogeological modeling on Local scale

(Groundwater flow simulation considering hydrogeological features influenced on boundary conditions on Site scale)



Hydrogeological modeling on Site scale

Fig. 2.2.2-3 Methodology for setting boundary conditions of groundwater flow simulation on Site scale

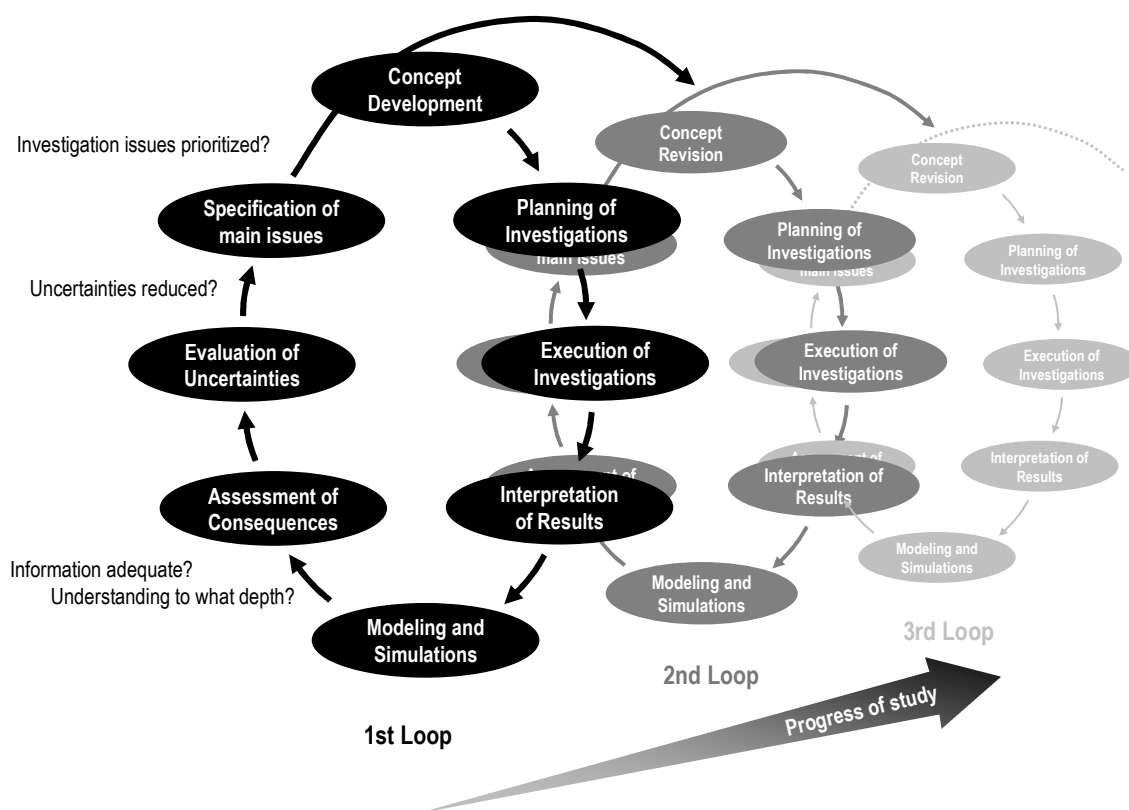


Fig. 2.2.3-1 Iterative approach for the characterization of geological environment²⁰⁾

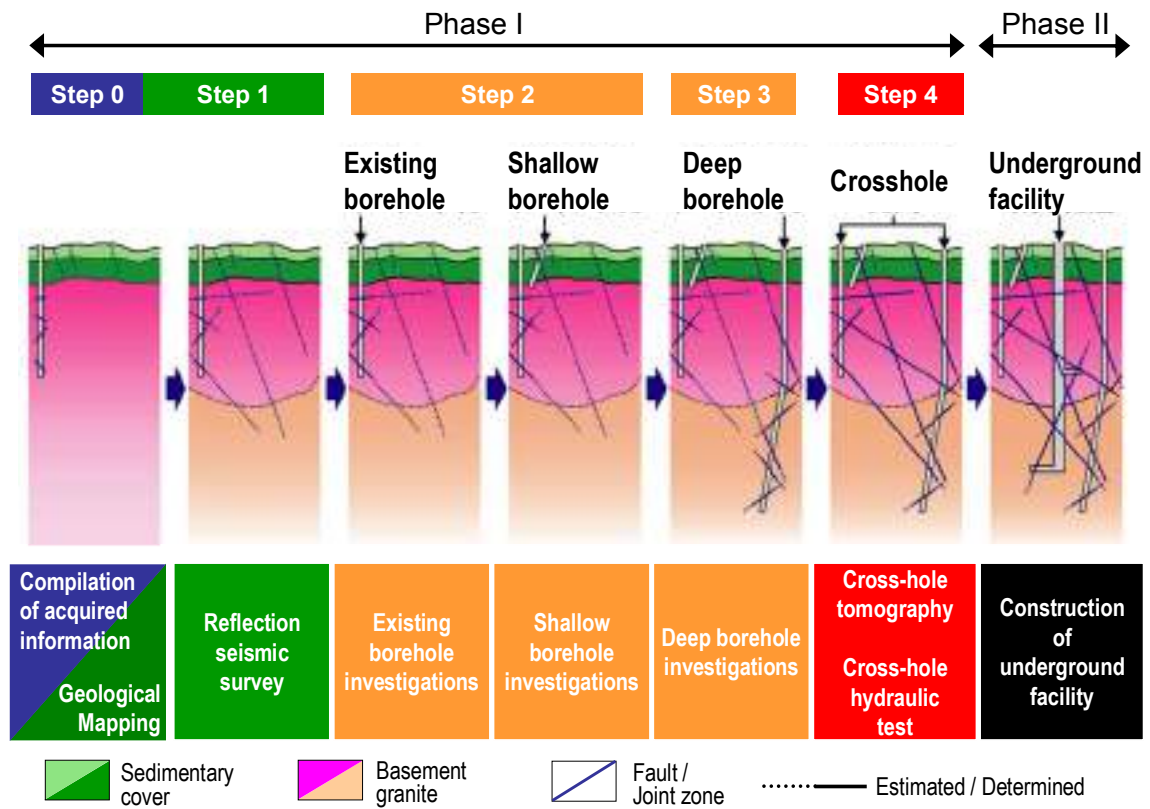


Fig. 2.2.4-1 Concept of Phase I investigations²⁰⁾

3. 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備

3.1 調査・解析・評価結果の取りまとめの考え方

2.2.4 でも述べたように瑞浪超深地層研究所における第 1 段階では、個別目標と課題を設定するとともに、調査研究を 5 つの調査ステップに区分し、繰り返しアプローチを用いた調査研究を展開した^{1),2),3)}。

3.2.1 から 3.2.5 では、安全評価および地下施設の設計・施工に関わる個別目標と課題に関する調査研究成果を調査ステップごとに以下の点について整理した。

- ・当該調査ステップでの調査・解析・評価の目的および実施概要
- ・当該調査ステップでの個別目標と課題ごとの目標／実施概要、および結果概要／得られた技術的知見
- ・当該調査ステップの調査・解析・評価のまとめ
- ・当該調査ステップで整理された処分事業および安全規制のための基盤技術

また、第 1 段階の調査研究をととして得られた経験に基づき、調査ステップごとに調査研究の個別目標と課題に向けた合理的な調査・解析・評価の道すじを統合化データフローとして整理した（付録 4 参照）。なお、統合化データフロー中の「既存情報の収集」とは、当該ステップ以前に取得された情報の収集・整理を意味している。

調査ステップごとに対象とした個別目標と課題は、調査内容に応じて異なり、これを Table3.1-1 に示す。

さらに、3.2.1 から 3.2.5 が個別目標と課題に関する調査研究成果を調査ステップごとに整理したのに対し、3.2.6 では調査の進展に伴う個別目標と課題に関わる理解度の変遷を述べるとともに第 2 段階以降の課題について取りまとめた。

また、環境影響評価に関わる個別目標と課題については、3.2.7 で取りまとめるとともに、第 1 段階の調査研究成果を踏まえた第 2 段階の調査研究に向けた深部地質環境とその変化の予測結果について 3.2.8 に取りまとめた。

さらに、第 1 段階の調査研究を通じて整備された重要と考えられる調査・解析技術を 3.3 で取りまとめた。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：“東濃地域における地質環境特性に関する調査研究－地表からの調査研究の考え方と進め方－”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7410 2002-008 (2002)。
- 2) 太田久仁雄，佐藤稔紀，小出馨，坂巻昌工：“超深地層研究所計画－地層科学研究の現状－”，第 7 回 NUCEF セミナー講演報文集，日本原子力研究所研究報告書，W-17 (2004)。
- 3) 核燃料サイクル開発機構：“超深地層研究所計画における調査研究の考え方と進め方（平成 15～17 年度）”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7400 2004-008 (2004)。

Table3.1-1 Important factors to be characterized in each investigation step

Important factors to be characterized		Data requirements	Step 0	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4
Safety assessment	Geological structure	Size and geometry of host rock; heterogeneity within host rock	x	x	x	x	x
		Size and extent of surrounding formations	x	x	x	x	x
		Spatial distribution and geometry of transport pathways (groundwater flowpaths)	x	x	x	x	x
	Groundwater flow characteristics	Spatial variability of magnitude of hydraulic gradient	x	x	x	x	x
		Spatial variability of hydraulic properties of rocks	x	x	x	x	x
	Geochemical characteristics of groundwater	Redox conditions	x	-	x	x	-
		Spatial variability of groundwater pH values	x	-	x	x	-
		Spatial distribution of different groundwaters; degree of groundwater mineralization	x	-	x	x	-
	Transport/retardation of nuclides	Sorption capacity and diffusivity of rock matrix and of transport pathways	x	-	-	x	-
		Geometry of transport pathways; depth of diffusion-accessible rock matrix	x	-	-	x	-
		Effect of colloid/organics/microbes on nuclide transport/retardation	x	-	-	-	-
	Dilution of nuclides	Spatial distribution of higher-permeability rocks, aquifers and surface waters	x	x	x	x	x
		Spatial variability of water fluxes in higher-permeability rocks, aquifers and surface waters	x	x	x	x	x
Designing & construction of underground facilities	Geomechanical/hydraulic properties of tunnel near-field environment	Local stress regime	x	-	x	x	-
		Spatial variability of petrophysical/geomechanical properties of rocks	x	-	x	x	-
		Volume of inflow into underground tunnels	x	-	x	x	x
		Size and structure of EDZ; petrophysical/geomechanical properties of EDZ	x	-	-	x	-
		Distribution of discontinuities intersecting underground tunnels	x	x	x	x	x
	Subsurface thermal conditions	Spatial variability of geothermal gradient	x	-	x	x	-
		Thermal rock properties	x	-	x	x	-

3.2 地質環境の調査・解析・評価技術

3.2.1 既得情報を用いた調査・解析・評価（ステップ0）

(1)既得情報を用いた調査・解析・評価の目的及び実施概要

既得情報を用いた調査・解析・評価においては、Table 3.1-1 に示すようにすべての個別目標と課題を対象として、それらを概括的に把握することを目的として、文献情報や地質図、広域地下水流動研究、東濃鉱山における調査試験研究、及び超深地層研究所計画における正馬様用地での調査研究において取得された情報などを収集・整理した。

本ステップで収集した主な文献資料は、Table 3.2.1(1)-1 のとおりである。

超深地層研究所計画の第1段階の調査研究が開始される以前に行った広域地下水流動研究における調査研究成果の概要^{21),22)}を以下にまとめる。なお、広域地下水流動研究は、地下深部における地下水流動の涵養域から流出域までを包含する数 km 四方以上の領域における地表から地下深部までの地質・地質構造、地下水の流動や水質などを明らかにするために必要な調査・解析、並びに調査解析結果の妥当性を評価するための技術の開発を目標としたプロジェクトである。

- ・ リージョナルスケールでの調査研究においては、文献情報に基づき後背地地形の特徴を考慮した複数領域における地下水流動解析が実施され、その結果に基づきローカルスケール領域が設定された^{23),24)}。
- ・ ローカルスケール領域においては、下記の原位置調査を含む調査研究が実施された（付録 1 参照）。
- ・ 地表での地質及び大規模な不連続構造の分布並びに地下浅部における地質構造の把握に重点を置き、リモートセンシング（例えば、空中写真などの判読）、空中物理探査（電磁法探査、磁気探査、放射能探査）、地上物理探査（反射法弾性波探査、屈折法弾性波探査、電磁法探査、高密度電気探査；Fig. 3.2.1(1)-1）、及び地表地質調査が実施された^{25),26),27),28),29),30),31)}。特に反射法弾性波探査などの地上物理探査を広域的に展開することにより瑞浪層群と土岐花崗岩の不整合面などの地下浅部の地質構造が推定された（Fig. 3.2.1(1)-2）。
- ・ 表層水理調査や気象観測が実施され^{32),33),34)}、岩盤への涵養量などの表層水理特性に関する情報が取得される^{35),36)}とともに、降水・地表水の採水調査が実施され^{37),38),39)}、地表水化学特性に関する情報が取得された¹³⁾。
- ・ 複数のボーリング孔を利用した調査研究が実施され^{28),40)}、ローカルスケール領域における大規模な不連続構造（断層など）の空間分布、地質構造の特徴（割れ目帯など）に基づく岩盤の大まかな領域区分、岩盤中の透水性分布及び地下水の地球化学特性が把握され（付録 3、5 参照）^{13),27),41),42),43)}、ボーリング調査実施後は、間隙水圧モニタリングが開始された²⁶⁾。
- ・ 調査結果に基づき、地質構造モデル（Fig. 3.2.1(1)-3）、水理地質構造モデル（Fig. 3.2.1(1)-4）並びに地球化学モデルが構築された（Fig. 3.2.1(1)-5）^{44),45),46),47),48)}。
- ・ 水理地質構造モデルを用いた地下水流動解析によって動水勾配分布などが評価されるとともに、サイトスケールにおける解析の領域やその境界条件が設定された（Fig. 3.2.1(1)-6）^{44),45)}。この地下水流動解析結果については、長期地下水モニタリングや地球化学モデルとの整合性の確認などを通してその妥当性が評価された。
- ・ 研究坑道の概念・基本設計への反映の観点から、初期応力、岩盤の物理・力学・熱特性などの情報が取得された⁴⁹⁾。

東濃鉱山における調査試験研究⁵⁰⁾の成果の概要^{51),52),53),54)}を以下にまとめる。

- ・ 瑞浪層群中に掘削された坑道を利用した調査試験研究によってウラン鉱床を胚胎する堆積岩の地質学的特性、水理学的特性、力学的特性、地下水の地球化学特性、物質移行特性や掘削

Table 3.2.1(1)-1 Principal literature used for the study

Discipline	Type of information	Literatures
Geology	Stratigraphical and Lithological data	Matsuzawa and Uemura, 1967 ¹⁾ Itoigawa, 1980 ²⁾ Ishihara and Suzuki, 1969 ³⁾ Todo collaborative research group, 1982 ⁴⁾ Power reactor and nuclear fuel development corporation, 1994 ⁵⁾ Yamanoi et al, 1996 ⁶⁾
	Structural data	Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 1987 ⁷⁾ Imanura and Kato, 1990 ⁸⁾ Yamanoi et al, 1994 ⁹⁾
Hydrogeology	Hydraulic data	Umeda et al, 1997 ¹⁰⁾ Ishibashi and Yamada, 1986 ¹¹⁾
Hydrochemistry	Hydrochemical data	Mikai and Hayakawa, 1970 ¹²⁾ Furue et al., 2003 ¹³⁾
Rock mechanics	Initial stress data	Kanagawa et al., 1986 ¹⁴⁾ Saito et al, 1988 ¹⁵⁾ Association for the Development of Earthquake Prediction, 1990 ¹⁶⁾
	Petrophysical data	Sato et al, 1992 ¹⁷⁾ Sato et al, 1999 ¹⁸⁾ Hoshino et al, 2001 ¹⁹⁾
	Thermal data	Geological Survey of Japan, 1991 ²⁰⁾

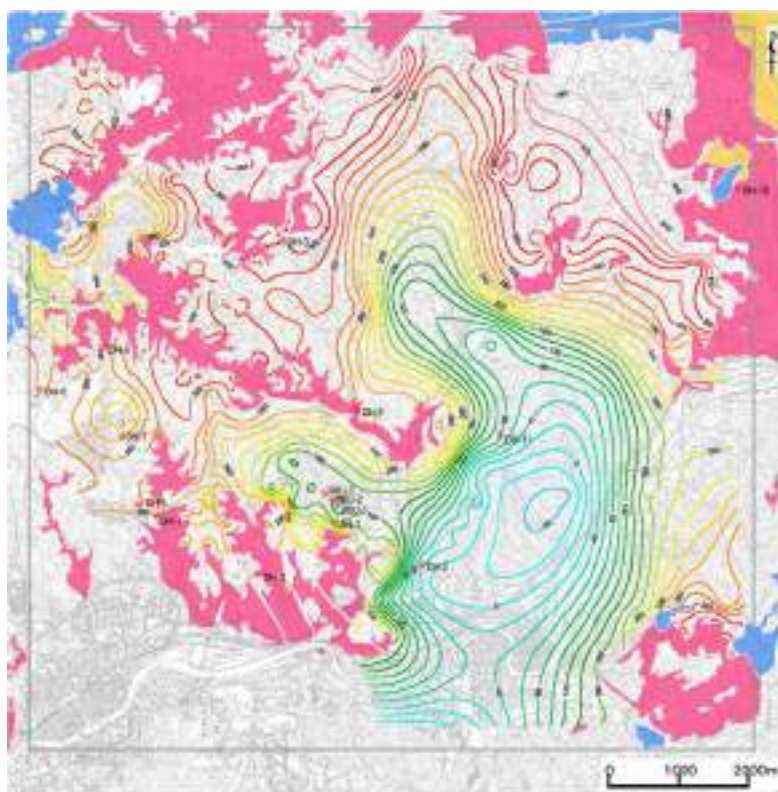


Fig. 3.2.1(1)-1 Elevation of unconformity between Toki granite and Mizunami Group, determined by the electromagnetic survey

影響に関する情報など、個々の地質環境特性や現象に関する知見が幅広く収集された。

- ・ ウラン鉱床をナチュラルアナログの事例研究の場として、長期的な時間スケールで生じる地質学的事象とそれに伴う地質環境の変化に関する検討が行われた。
- ・ 岩盤の力学的安定性に関する試験研究により、堆積岩を対象とした長期挙動計測手法、長期岩石クリープ試験手法並びにモデル化手法が整備された。
- ・ 坑道周辺の地質環境に関する調査研究により、堆積岩における水理学的・地球化学的状態の長期的な変化とそのメカニズムを把握するための計測手法などが整備された。

超深地層研究所計画における正馬様用地での調査研究成果の概要を以下にまとめる。

- ・ 正馬様用地では、反射法弾性波探査を実施し、地下浅部の地質構造を推定した。
- ・ 複数のボーリング孔を利用し、存在が確認されている月吉断層の空間分布の確認、地質構造の特徴（割れ目帯など）に基づく岩盤の大まかな領域区分、岩盤中の透水性分布を把握した（付録 3、6 参照）^{27),55)}。
- ・ 月吉断層を対象として複数孔を用いた孔間水理試験を行い、断層が水理的に遮水構造をなしていることを確認するとともに、断層沿いに存在する割れ目帯の水理学的連続性を把握した^{56),57),58)}。
- ・ 調査研究の結果に基づき、地質構造モデル（Fig. 3.2.1(1)-7）、水理地質構造モデルを構築した^{59),60),61),62),63),64)}。
- ・ 研究坑道の概念・基本設計への反映の観点から、初期応力、岩盤の物理・力学・熱特性などの情報を取得する^{65),66),67)}とともに、それに基づき構築した岩盤力学モデルを用いた研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の掘削影響解析を行い、研究坑道掘削に伴う掘削影響の程度とその範囲を推定した^{66),67)}。

本ステップでは、文献情報並びに、上記の調査研究結果を解釈し、地質構造の概念モデルを構築（Fig. 3.2.1(1)-8）するとともに、サイトスケールの地質構造モデル、水理地質構造モデル、地球化学モデル、並びに岩盤力学モデルを構築した。さらに、これらのモデルに基づき地下水流動解析や応力・掘削解析などを実施し、研究坑道周辺の力学状態などを予測した。また、これらの結果に基づき次ステップ以降の調査・解析における重要要素を抽出・特定した。

なお、本ステップでの調査・解析・評価を通じた経験に基づき構築した統合化データフローを付録 4 に示すとともに、各個別目標と課題に向けた取組の詳細を、3.2.1(2)～3.2.1(8)にまとめた。また、3.2.1(9)に本ステップでの調査・解析・評価に基づき抽出・特定した次ステップ以降の調査・解析における重要要素をまとめた。さらに、3.2.1(10)において、本ステップでの調査・解析・評価を通じて整理された処分事業及び安全規制のための基盤技術をまとめた。

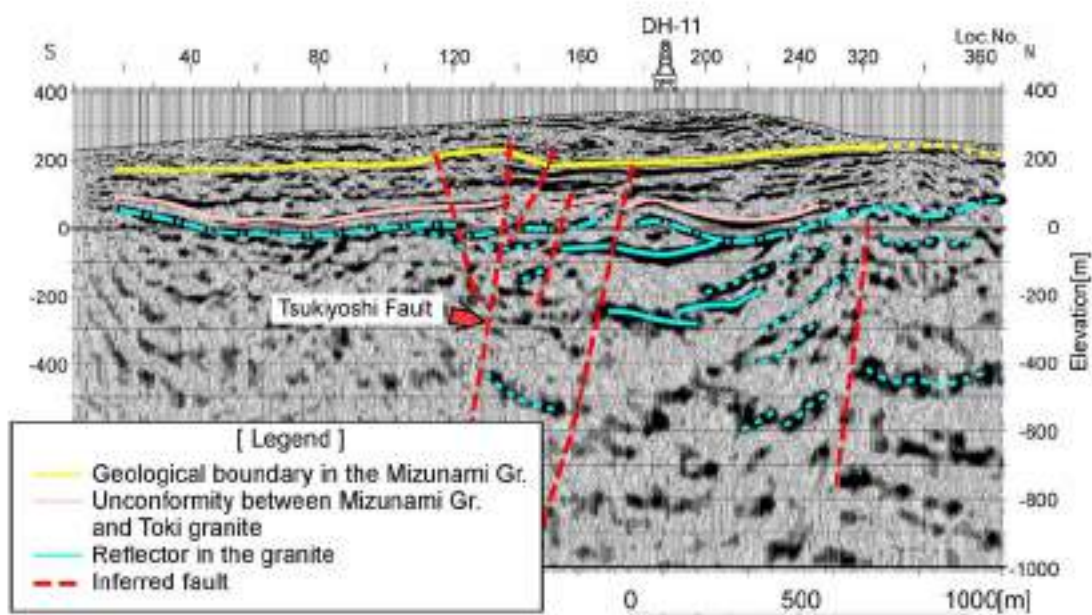


Fig. 3.2.1(1)-2 Geological interpretation based on the results of reflection seismic survey in the Regional Hydrogeological Study²¹⁾

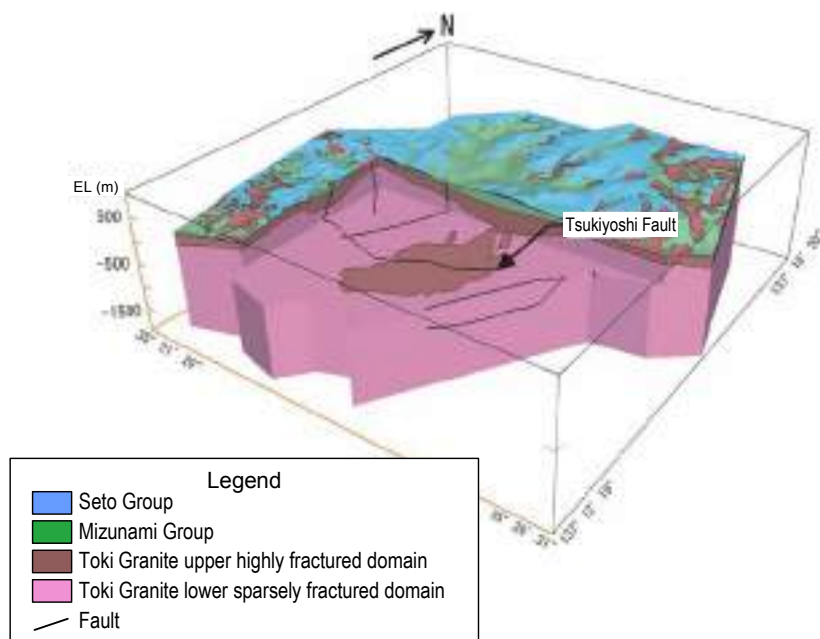


Fig. 3.2.1(1)-3 Geological model on the Local scale⁴⁴⁾

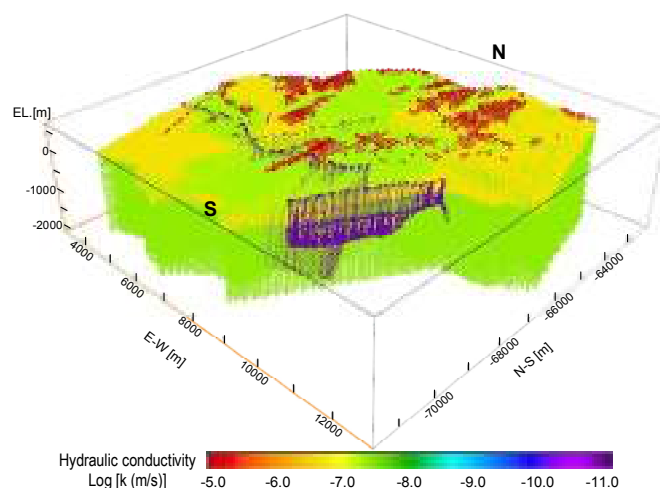


Fig. 3.2.1(1)-4 Hydrogeological model on the Local scale⁴⁴⁾

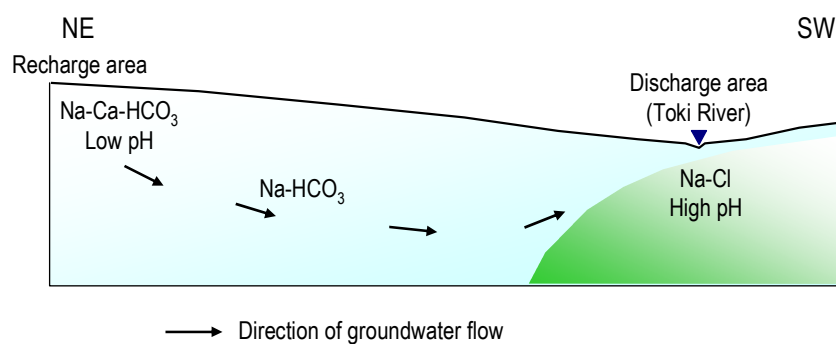


Fig. 3.2.1(1)-5 Groundwater type on the Local scale⁴⁴⁾

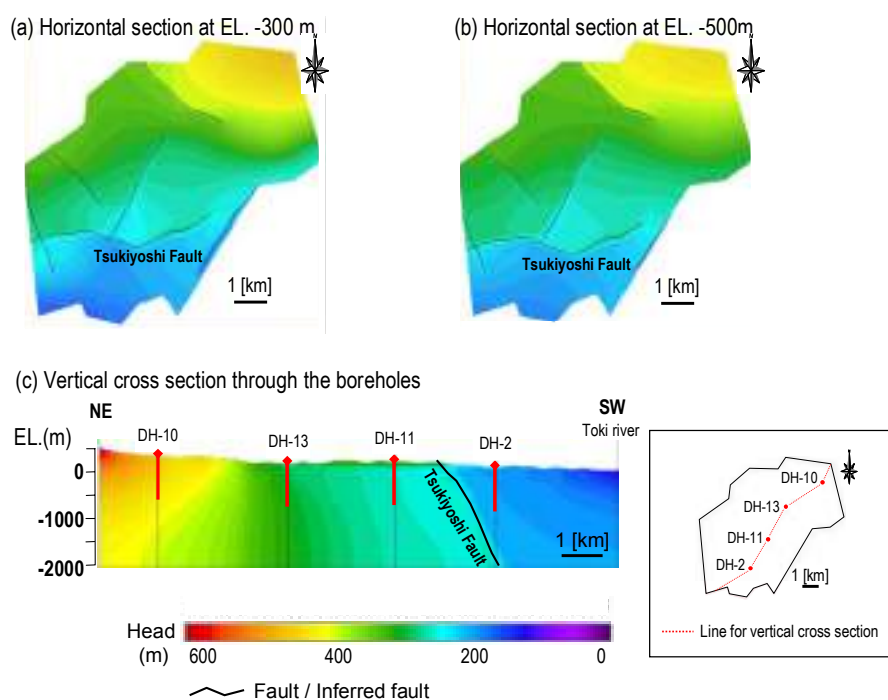


Fig. 3.2.1(1)-6 Results of groundwater flow simulation on the Local scale⁴⁴⁾

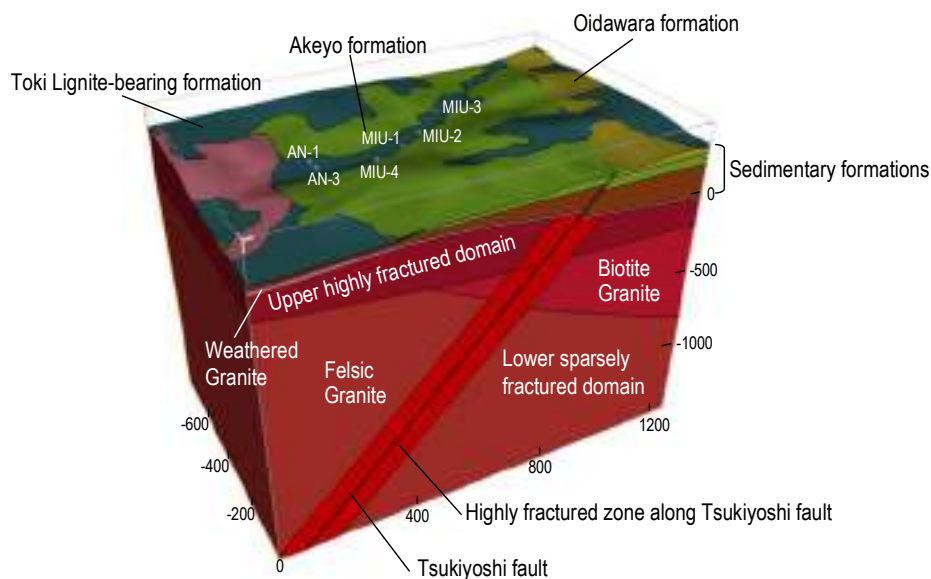
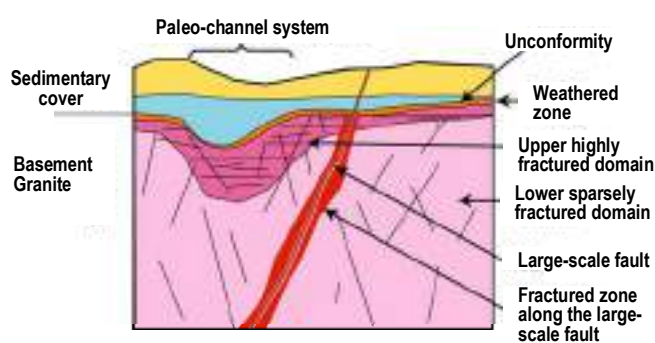


Fig. 3.2.1(1)-7 Geological model at the Shobasama site



General description of the conceptual geological model

- Sedimentary rocks widely and unconformably cover the basement granite.
- The eroded surface of the weathered zone of the granite basement is underlain by the unconformity between the sedimentary cover and the basement granite. The paleo-channel systems that has a significant elevational change of the unconformity can be observed in the region with a thick sedimentary cover.
- The basement granite is structurally divided into the upper highly fractured domain (UHFD) and the lower sparsely fractured domain (LSFD) based on the fracture frequency of low-angle fractures.
- Joints and faults of varying scale are formed in the basement granite.
- Some large-scale faults act as major conduits or hydraulic barriers.

Fig. 3.2.1(1)-8 Geological conceptual model⁶⁸⁾

(2)地質構造の三次元分布の把握

①目標／実施概要

既得情報を用いた調査・解析・評価では、サイトスケール領域の地質構造の三次元分布（岩盤の地質学的不均質性、被覆層の厚さ、移行経路として重要な構造）を把握するために、既得情報を整理し、土岐花崗岩、瑞浪層群、瀬戸層群及び地下水流動に影響を及ぼすと考えられる不連続構造の分布特性に関する情報を取得した。本ステップでは、既往の文献並びに、リージョナル及びローカスケール領域を対象に実施した調査研究結果を解釈し、地質構造の概念モデルを構築（Fig. 3.2.1(1)-7）するとともに、ローカスケールの地質構造モデル⁶⁹⁾に基づき、対象領域内における地質構造の三次元的な分布を推定し、サイトスケールの最初の地質構造モデルを構築した^{22),26),27),69),70)}。地質構造モデルの構築に当たっては、既存地質図との照合や精査などを行うことにより、その整合性や情報の過不足、研究所用地に特徴的な地質・地質構造などを検討した²²⁾。

②結果概要／得られた技術的知見

ローカスケールの地質構造モデル⁶⁹⁾を基にサイトスケール領域の地質・地質構造を推定した結果、サイトスケール領域の地質・地質構造として、土岐花崗岩や瑞浪層群及び瀬戸層群並びに

主要な不連続構造として月吉断層の分布を推定し、それぞれが既存地質図⁵⁾と矛盾のないことを確認した⁷⁰⁾。さらに、ローカスケールからサイトスケールへのスケールの詳細化に伴い、連続性が詳細に推定できる地質・地質構造として、瑞浪層群及び瀬戸層群中の各累層並びに土岐花崗岩上部に分布する上部割れ目帯（土岐花崗岩中の上部において低角度の傾斜（0～30度）を有する割れ目の分布密度が有意に高い岩盤領域）を抽出して、サイトスケールの最初の地質構造モデルを構築した（Fig. 3.2.1(2)-1：地表地質図（左）と地質構造モデル（右））²²⁾。なお、上部割れ目帯の成因としては、堆積岩が厚く被覆する谷底部での比較的大きな応力開放の発生とそれに伴う水平的な引張節理の形成など⁷¹⁾がその一因として考えられ、それに対応する本地域の地質学的事象としては、瑞浪層群や瀬戸層群の堆積期における侵食・削剥現象^{1),2),72)}や陸化に伴う海水の除荷が挙げられる。研究所用地周辺に特徴的な地質・地質構造としては、Fig. 3.2.1(2)-2に示す起伏に富む土岐花崗岩と瑞浪層群との不整合面の分布（特に、東濃鉾山から研究所用地へ分布する地形（月吉チャンネル））⁶⁸⁾を確認することができた。

一方、衛星写真及び空中写真を用いたリニアメント判読の調査結果からは、サイトスケール領域内に30数条の数百m～数km規模のリニアメントを抽出することができた^{9),31)}。このうちの1条は、ローカスケールの地質構造モデルに反映されている3km以上のリニアメント²²⁾であり、構築したサイトスケールの地質構造モデルにおいても断層としてモデル化した。

判読したリニアメント³¹⁾（Fig. 3.2.1(2)-3）の長さや頻度との関係には、これまでの研究例⁷³⁾と同様にフラクタル特性が認められるほか（Fig. 3.2.1(2)-4）、ローカスケール領域で実施された調査（地表地質調査やボーリング孔を用いた調査など）で確認もしくは推定した不連続構造とおおむね整合的な分布傾向を示した^{28),31)}。これらに加え、抽出されたリニアメントの推定精度（伸張方向に直交する位置の不確実性にして20～60m程度）³¹⁾から、サイトスケール領域に分布するリニアメントは、不連続構造の分布頻度や位置の概括的な推定に用いることができると考えられ、次ステップ以降の調査研究レイアウトの選定においても有益な情報として活用できると考えられる。

東濃鉾山や研究所用地周辺において採取したボーリングコアを用いた岩石・鉱物試験の結果では、土岐花崗岩が、石英－斜長石－カリ長石ダイヤグラム⁷⁴⁾上の「花崗岩」に相当し、その鉱物組成や化学組成などは深度にかかわらず大きく変化しないこと⁷⁵⁾、瑞浪層群中の土岐夾炭累層が石英、長石類、黒雲母、粘土鉱物、方解石などから構成され、肉眼観察により識別される岩相ごとに特徴的な組成範囲を示すこと⁷⁶⁾などを確認することができた。また、花崗岩中の割れ目を充填する鉱物としては、石英及び長石類が50%以上を占め、そのほかに数～数十%の粘土鉱物（セリサイト、スメクタイト）や方解石、数%以下の黒雲母、緑泥石、緑れん石などが不均質に含まれること⁷⁰⁾などの情報を取得することができた。

本ステップでは、ローカスケールでの情報に基づきサイトスケールの地質・地質構造を推定し地質構造モデルを構築していることから、次ステップ以降の課題として、実際にサイトスケール領域に分布する土岐花崗岩や瑞浪層群及び瀬戸層群の分布状況を確認するとともに、判読したリニアメントの実際の不連続構造としての存在有無を含め、既存地質図では記載されていない不連続構造の有無を確認していくことが重要である。

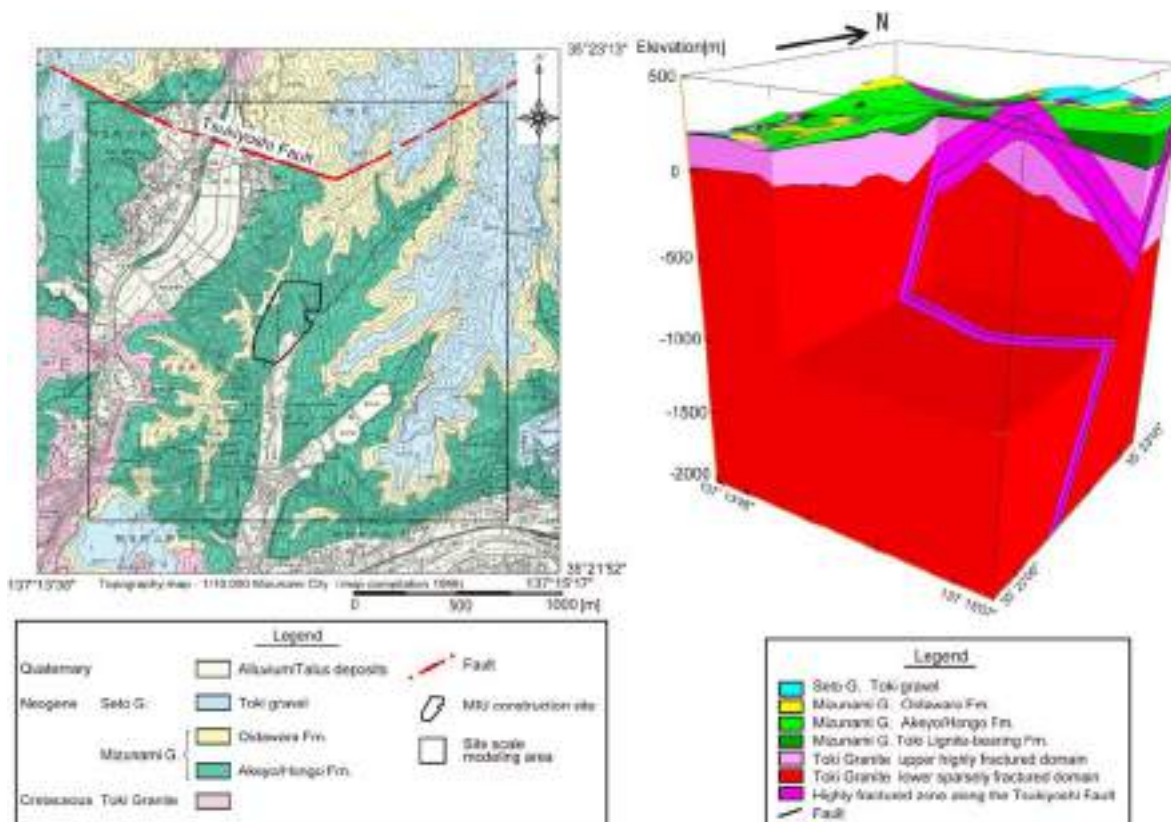


Fig. 3.2.1(2)-1 Geological map and geological model based on the existing geological information²²⁾

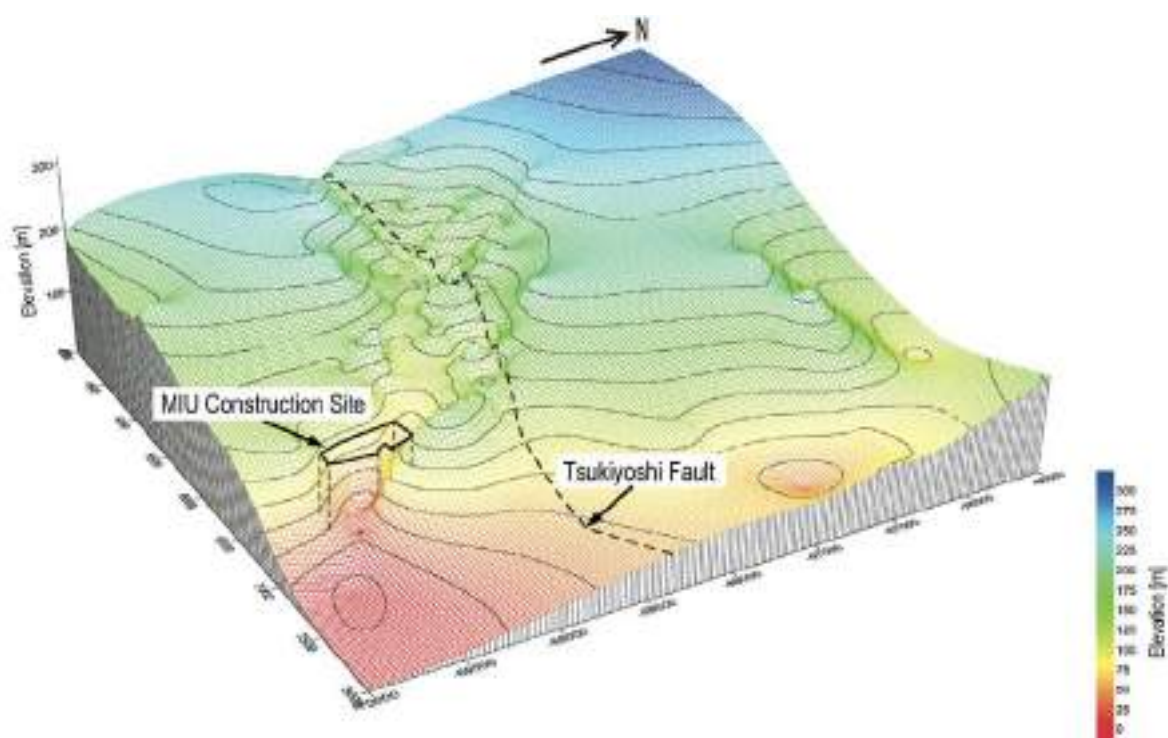


Fig. 3.2.1(2)-2 Elevation of the unconformity between Toki granite and Mizunami Group⁶⁸⁾

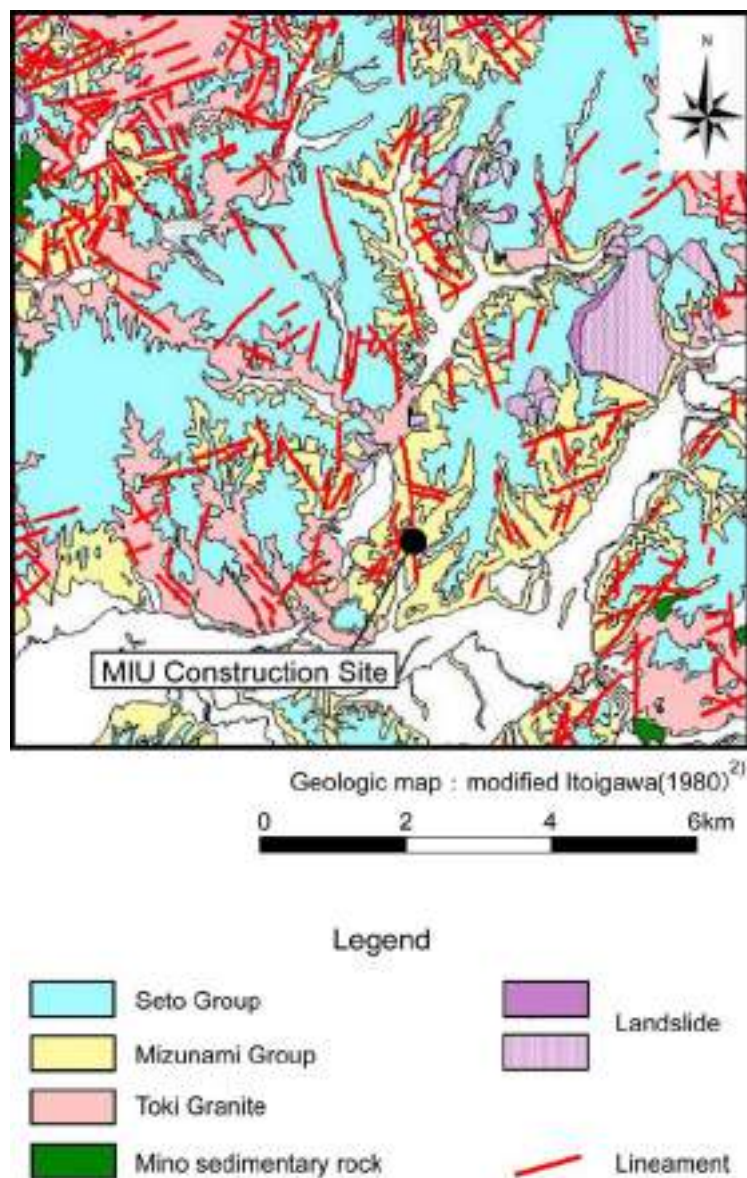


Fig. 3.2.1(2)-3 Lineament interpreted from aerial photographs of a scale of 1:10,000³¹⁾

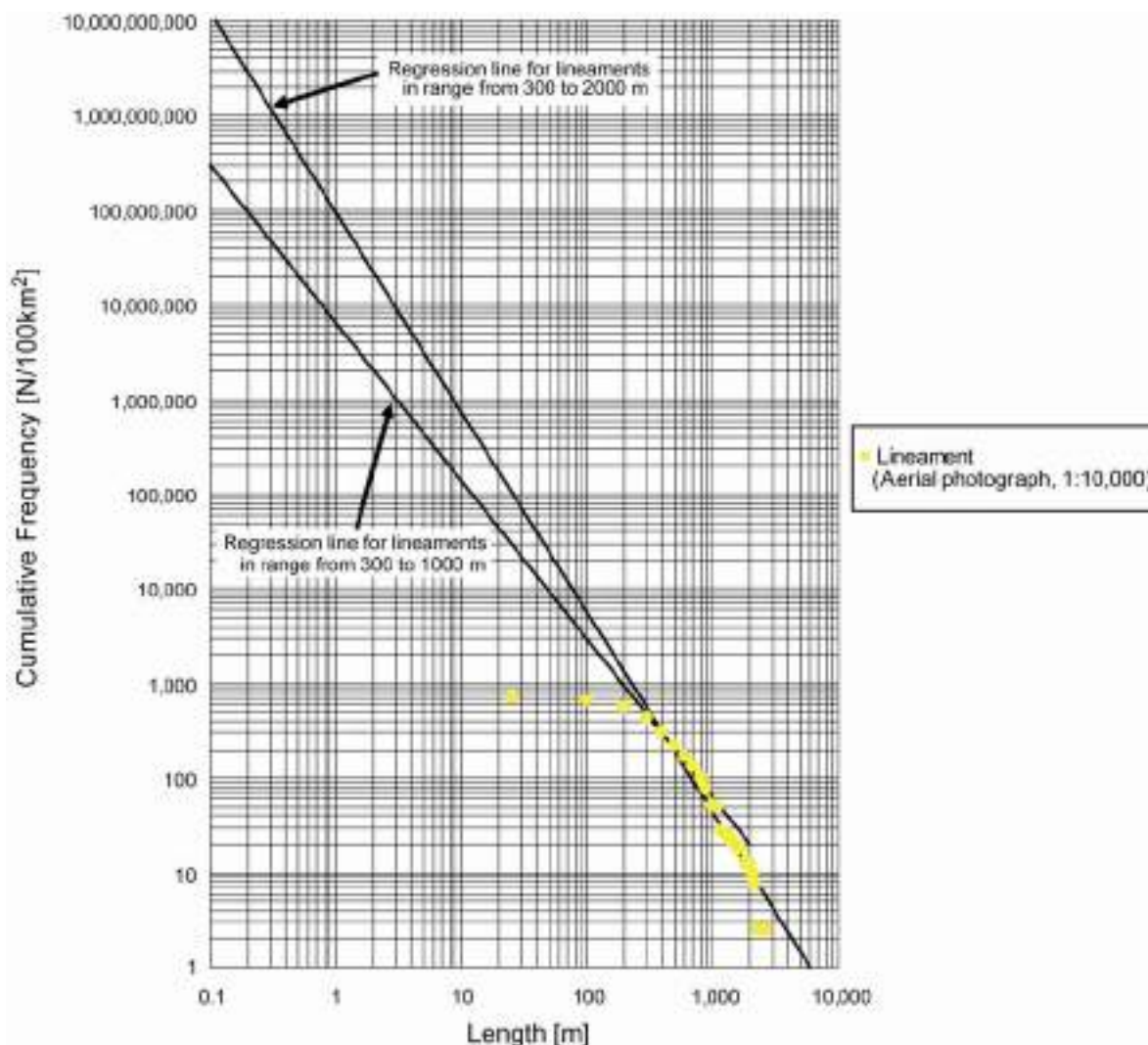


Fig. 3.2.1(2)-4 Cumulative frequency distributions -lineament lengths³¹⁾

(3)地下水の流動特性の把握

①目標／実施概要

既得情報を用いた調査・解析・評価では、本ステップで構築された地質構造モデル（3.2.1(2)参照）に考慮されている地質・地質構造要素ごとに、既得情報のうちボーリング孔で実施した単孔式水理試験結果²²⁾を整理し、それらの透水性を把握した⁷⁷⁾。

また、この地質・地質構造要素ごとに得られた透水性を、本ステップで構築された地質構造モデル（3.2.1(2)参照）に加えて三次元的な水理地質構造モデルの構築を行うとともに、その水理地質構造モデルを用いて地下水流動解析を実施し、サイトスケール領域における動水勾配分布を把握した⁷⁷⁾。なお、地質構造／水理地質構造モデルの構築及び地下水流動解析は GEOMASS システム（3.3.10 参照）を用いて実施した。

②結果概要／得られた技術的知見

Fig. 3.2.1(3)-1 に、本ステップで構築した水理地質構造モデル及び各地質・地質構造の透水係数を示す。水理地質構造モデルの構築に当たっては、透水性のコントラストに応じて地層を区分

することが重要である。地質構造モデルで区分されたそれぞれの地質・地質構造に応じて単孔式水理試験結果を整理し、算出した幾何平均値をその地質・地質構造の透水性の代表値として設定した結果、瑞浪層群及び土岐花崗岩中におけるそれぞれの地質・地質構造の透水性には 5～6 倍程度のコントラストが認められた。このことは、水理学的な観点からも堆積岩である瑞浪層群においては層序や岩相データに基づく地質・地質構造区分が有効であり、土岐花崗岩などの亀裂性岩盤においては亀裂密度に基づく地質・地質構造区分が有効であることを示している。

ある対象領域内の地下水流動特性を把握するための地下水流動解析を実施するうえでは、一般的に 1 つの閉じた地下水流動系の範囲（分水界）を領域境界とすることが望ましい。しかし、地下深部までの地下水流動の分水界を領域境界として設定すると、地下水流動特性を把握したい領域に対して解析領域が拡大し、地下水流動解析結果の精度が低下するといった問題が生じる可能性がある。サイトスケール領域を対象とした地下水流動解析⁷⁷⁾を実施するに当たっても、このことが問題となった。そのため、サイトスケール領域を包含し、かつ地下水の涵養域から流出域までの一つの地下水流動系を包含したローカールスケール領域を対象とした地下水流動解析結果⁴⁴⁾から得られるサイトスケール領域の境界面上での全水頭分布を側方境界条件として設定し、地下水流動解析を実施した。また、水理地質構造モデルの構築及び地下水流動解析を実施する際には、調査データに基づく様々な仮定を用いて水理地質構造のモデル化や解析条件の設定が行われる。対象とする領域の地下水流動場の状態や、調査に与えられた時間・コストなどの制約条件によってその重要度は異なってくるが、河川流量、降水量、蒸発散量などから推定される岩盤浸透量及び地下水面に関する情報²²⁾を既得情報として収集しておくことにより、地下水流動解析の境界条件を設定するためのデータとして有効に活用することができる。

サイトスケール領域における動水勾配分布を求めるために、地下水流動解析結果に基づき三次元的な全水頭分布を算出した（Fig. 3.2.1(3)-2）。サイトスケール領域内の地下水の主流動方向は大局的な地形の起伏と同様に北東方向から南西方向を示している。この地下水の主流動方向は、ローカールスケール領域を対象とした地下水流動解析結果⁴⁴⁾と整合的であることが確認され、上記の側方境界条件の設定方法が適切であったことが示された。また、Fig. 3.2.1(3)-2 からは、透水異方性（透水係数の異方性）を有する月吉断層を境界として、全水頭の分布傾向が大きく異なっており、同断層が動水勾配分布に影響を及ぼしていることが推定された。このことは、断層などの不連続構造が地下水の流動特性に大きな影響を及ぼす可能性があり、水理学的な観点からも地質学的調査によって断層などの不連続構造の分布や幾何形状を把握することが重要であることを示している。さらに、より広範囲の地下水流動解析結果に基づき境界条件を設定する際には、領域境界周辺に分布する断層などの不連続構造を考慮した地下水流動解析を実施する必要があると考えられる。

したがって、次ステップ以降の調査においては、特に、サイトスケール領域を対象とした地質学的調査によって断層などの不連続構造の分布や幾何形状を把握したうえで、それらを考慮した地質構造／水理地質構造のモデル化、並びに地下水流動解析を実施することが重要である。

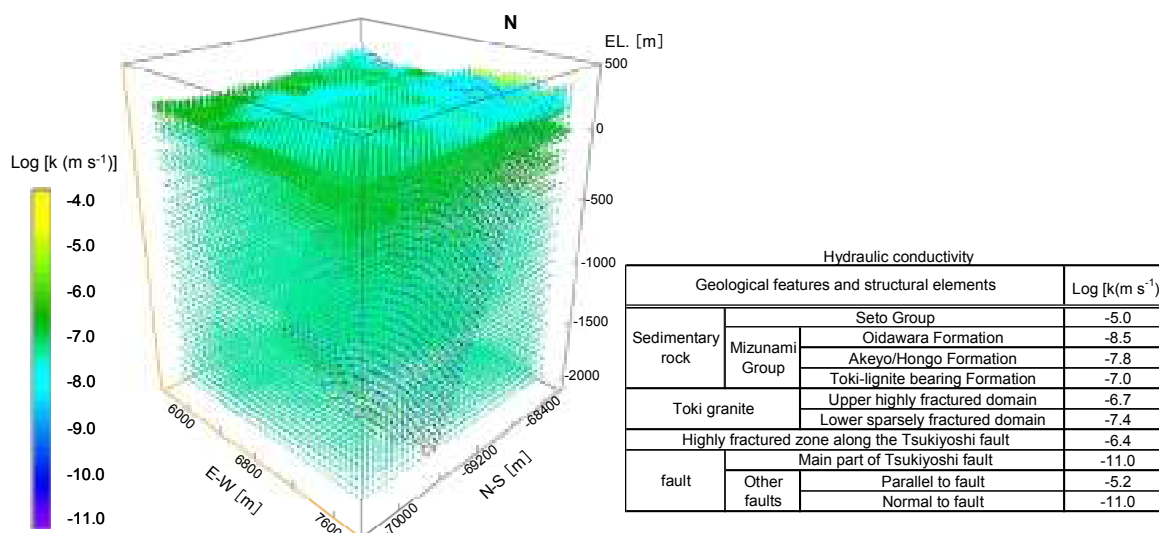
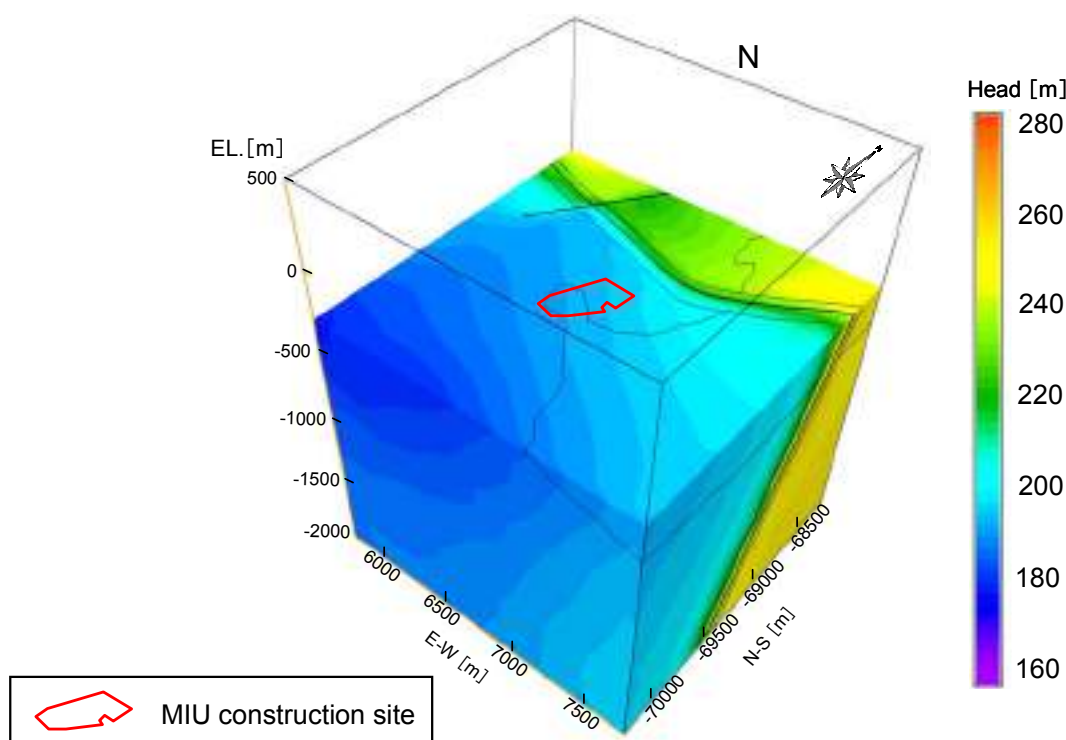


Fig. 3.2.1(3)-1 Hydrogeological model (3D distribution of hydraulic conductivity)



※Refer to Fig. 2.2.2-2 for location of Site scale area

Fig. 3.2.1(3)-2 Head distribution (Elevation -300 m : Depth of the shaft 500 m)

(4)地下水の地球化学特性の把握

①目標／実施概要

既得情報を用いた調査・解析・評価では、サイトスケール領域を包含するローカスケール領域における地球化学調査・解析結果、地質・地質構造、地下水流動に関わる情報²⁶⁾に基づき、サイトスケールの地下水の地球化学特性に関する既得情報の整理を行い、地下水水質などの三次元

的分布を推定した。これらの知見をサイトスケールにおけるボーリング孔を利用した調査や研究坑道における研究計画などに反映した。

②結果概要／得られた技術的知見

ローカールスケール領域では、前述の「広域地下水流動研究」として、主としてボーリング調査により地下水水質、pH、酸化還元状態に関わるデータが取得されていた。これらのデータを利用して、kriging 法⁷⁸⁾によりボーリング孔間及びサイトスケールの領域内に分布する地下水の地球化学特性の空間分布を推定した。なお、空間分布の推定には、Golden Software 社が開発したソフトウェア (SURFER) を使用した。その結果、サイトスケール内の南側の領域では、土岐花崗岩中の地下水水質が Na-Cl 型であり、深度とともに塩化物イオン濃度が高くなること⁴⁸⁾、地下水の pH が弱アルカリ性であること、酸化還元状態が弱～強還元性であることなどが推定できた (Fig. 3.2.1(4)-1)。また、マスバランス解析、多変量解析によりサイトスケール領域の水質分布が、塩分濃度の異なる複数の地下水の混合により説明可能であることが示された⁴⁸⁾ことから、塩分濃度の異なる地下水の混合が主要な水質形成プロセスの一つであると判断した。

一方、サイトスケール領域から約 3km 南東に位置し深度約 1,300m まで掘削された温泉 (瑞浪市内高砂温泉) では、塩分濃度が数千 mg l⁻¹ の Na-Ca-Cl 型地下水を汲み上げている¹³⁾。この温泉データは採水深度などのデータ品質が不明確であることから、Fig. 3.2.1(4)-1 には反映していない。また、同図ではサイトスケール境界に位置するボーリング孔のデータとして DH-2 号孔の深度 500m までの水質データを用いており、サイトスケールの深度 500m 以深の水質分布については不確実性が残る。そのため、サイトスケールの深部においては、Fig. 3.2.1(4)-1 に示した推定値を上回る塩分濃度 (数千 mg l⁻¹ 程度) の Na-Ca-Cl 型地下水 (塩分濃度上、淡水と定義される) が存在する可能性もある。ステップ 1 以降の調査では、Na-Ca-Cl 型地下水の分布を把握することが重要な課題として抽出された。さらに、地下水水質分布 (Fig. 3.2.1(4)-1) と水圧分布 (Fig. 3.2.1(4)-2) との比較を行い、整合性を確認することなどを通じて両者の結果の信頼性を向上させることが重要であると考えられる。

塩分濃度の高い地下水が存在し、塩分濃度に深度依存性が見られる環境においては、kriging 法による水質分布の図化、マスバランス解析、多変量解析を行うことにより、水質形成プロセス (異なる塩分濃度の地下水の混合の有無など) を理解することができると考えられる。

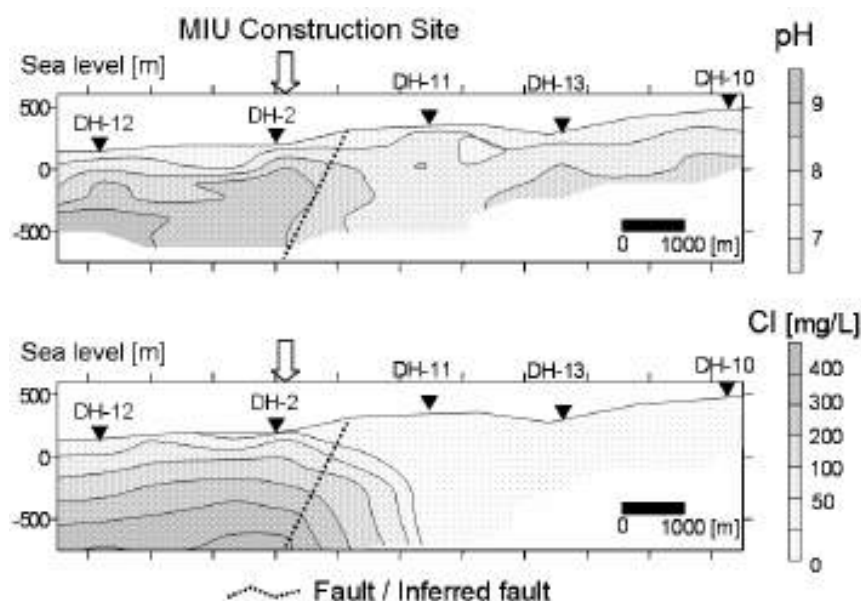


Fig. 3.2.1(4)-1 Estimated distribution of groundwater chemistry (pH, Cl concentration)⁴⁸⁾

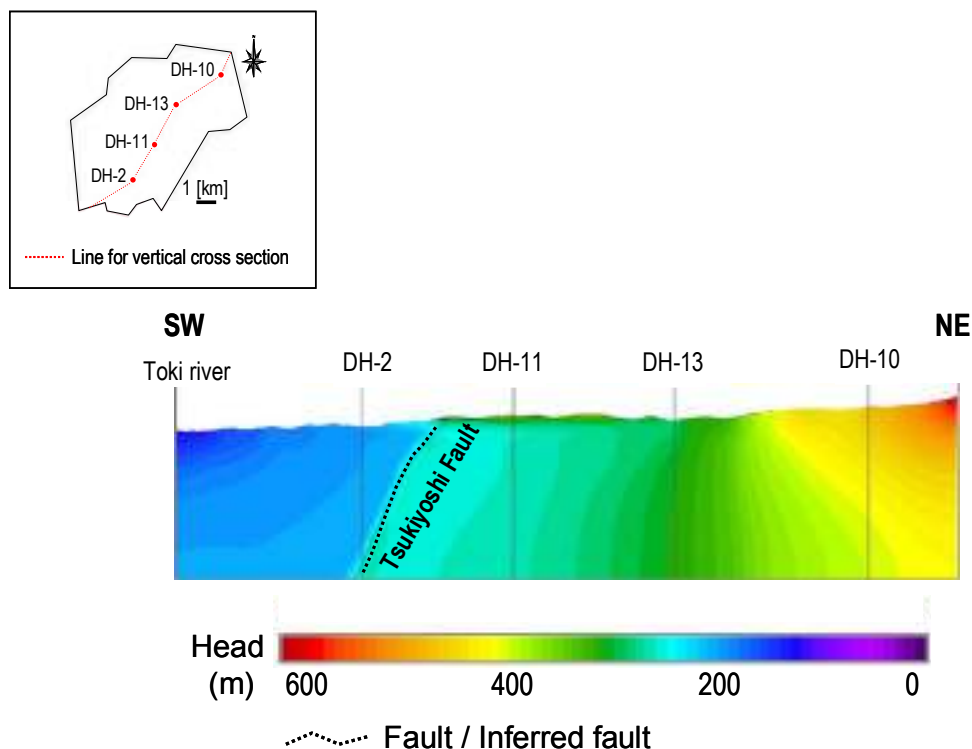


Fig. 3.2.1(4)-2 Simulated head distribution of groundwater

(5)物質移動の遅延効果の把握

①目標／実施概要

既得情報を用いた調査・解析・評価では、岩盤中での物質の収着・拡散特性、岩盤中の物質移動場（物質移動に寄与する空隙構造や空隙率など）、及びコロイド／有機物と微生物が物質移動に及ぼす影響の把握を目標として、東濃地域における既往の調査研究から関連する情報を集約するとともに、釜石鉱山において花崗岩（栗橋花崗閃緑岩）を対象に実施した調査研究データ^{79),80)}についても参考情報として取りまとめた。さらに、ここで集約した、岩盤中での収着・拡散係数、空隙構造分布や透水性割れ目の幾何形状、透水性割れ目近傍における元素分布プロファイル、地下水中のコロイド／有機物及び微生物の種類や化学特性などの情報に、ローカールスケールにおける調査・解析を通して取得された岩盤の岩石・鉱物特性及び物理特性、地下水の地球化学特性などの情報を加えて、岩盤中での物質移動の遅延特性について評価した。

②結果概要／得られた技術的知見

瑞浪層群中の物質移動特性については、東濃ウラン鉱床での天然ウランが収着及び鉱物化され堆積岩中に長期間保持されていることが多面的な調査研究により把握されている⁸¹⁾のに対し、土岐花崗岩中の物質移動特性に関する既得情報は高透水性割れ目近傍における鉄酸化物の沈殿・濃集に伴う天然ウランの共沈現象の確認例などに限られている²²⁾。ただし、土岐花崗岩については、物質の拡散場となる空隙構造（鉱物粒界や微小割れ目など）のネットワークが広がっており、不連続構造中には物質の移流に寄与する開口チャンネルのネットワークが存在すると考えられる⁸¹⁾。また、土岐花崗岩中の透水性割れ目近傍のマトリクスでは主要な物質移動の遅延メカニズムであるマトリクス拡散が生じており、土岐花崗岩中の物質移動プロセスは栗橋花崗閃緑岩におけるそれ⁸⁰⁾と同じである²²⁾。これらのことや土岐花崗岩と栗橋花崗閃緑岩の鉱物・化学組成、地下水の水質（ $\text{Na}\cdot\text{HCO}_3$ 型）、岩石組織や空隙分布の類似性²²⁾から土岐花崗岩の収着能力及びマトリクス拡散が栗橋花崗閃緑岩と同程度であると類推できる。さらに、瑞浪層群、土岐花崗岩ともに、

研究所用地において予測されるNa-Cl型地下水中での収着特性に関する情報が得られていないものの、JNC-SDB 収着データベース^{82),83)}における同様の岩石種のデータを利用して推定することが可能と考えられる。

地下水中のコロイド／有機物及び微生物については、その種類や存在量などに関する情報が取得されている^{81),84)}ものの、物質との相互作用などに関するデータは得られていない。また、対象とする岩盤中で予測される地球化学環境（例えば、還元性、Na-Cl 型水質など）における既得情報も皆無であるため、それが物質移動に及ぼす影響について評価することはできない。このことから、ステップ0で取得したいずれの物質移動の遅延特性に関する情報も不確実性が大きいと考えられ、次ステップ以降におけるボーリング孔を利用した調査により詳細に評価する必要があると言える。

(6)希釈効果の把握

①目標／実施概要

地下水中の溶質の希釈は、地下水流動に沿って低透水性の岩盤領域から高透水性の岩盤領域や高透水性構造への移動の際に、地下水流束が変化することによって生じると考えられる⁸⁵⁾。このことから、本調査研究においては、希釈効果の観点から分布領域が広くかつ比較的幅広い厚さを有する高透水性の帯水層や大規模な割れ目帯などを、重要な地質・地質構造として考えた。東濃地域においてこの希釈効果が期待できる地質・地質構造は、多量の地下水を有する、いわゆる帯水層としての機能を果たすと考えられる、土岐花崗岩を覆う堆積岩や大規模な断層などに伴う割れ目帯などが挙げられる。希釈効果を評価するためには帯水槽などにおける地下水流束の把握が必要であり、そのためには帯水層に相当する地質・地質構造の特性（正確には断面積）と其中での流量分布を把握する必要がある。しかし、帯水層の断面積については空間的な不均質性があり、これを把握することは容易ではない。したがって、ここでは帯水層の分布領域の広さを指標として、帯水層として想定される地質・地質構造を抽出したうえで、それらにおけるダルシー流速分布を比較することにより希釈効果を推定した。

②結果概要／得られた技術的知見

本ステップの水理地質構造モデル（3.2.1(3)参照）には、瀬戸層群、瑞浪層群を構成する各累層（生俵累層、明世累層／本郷累層、土岐夾炭累層）、土岐花崗岩中の上部割れ目帯及び下部割れ目低密度帯、並びに日吉川沿いのリニアメントから推定される不連続構造と月吉断層の分布が考慮されている。これらの中で比較的広い分布範囲を有する瑞浪層群を構成する各累層、上部割れ目帯、下部割れ目低密度帯並びに月吉断層に伴う割れ目帯を対象として、3.2.1(3)で実施した地下水流動解析結果に基づき、それらの地質・地質構造におけるダルシー流速の頻度分布を算出した（Fig. 3.2.1(6)-1）。基盤岩である土岐花崗岩のうち、透水性が相対的に低い下部割れ目低密度帯のダルシー流速分布を基準とすると、月吉断層に伴う割れ目帯、上部割れ目帯、土岐夾炭累層のダルシー流速が比較的高い結果となり、これらが希釈効果を考えるうえで重要な地質・地質構造であることが示唆された。

上記のように、水理地質構造モデルに考慮された地質・地質構造ごとに算出したダルシー流速は、その地質・地質構造ごとに異なる分布を示すことが確認された。このことから、ダルシー流速分布を評価指標の1つとして、帯水層の希釈効果を推定することが可能であると考えられる。Fig. 3.2.1(6)-1に示されるように、瑞浪層群中の各累層においてもダルシー流速分布が異なることから、ダルシー流速分布を算出するに当たっては、地質学的・水理学的観点から可能な限り詳細に地質・地質構造を区分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する必要がある。

次ステップ以降の調査においては、特に、サイトスケール領域に広く分布することが想定される地質構造のうち、本ステップで算出したダルシー流速分布より希釈層としての機能を有する可能性が期待される、上部割れ目帯や土岐夾炭累層の三次元的な分布及び水理特性を把握することが重要である。

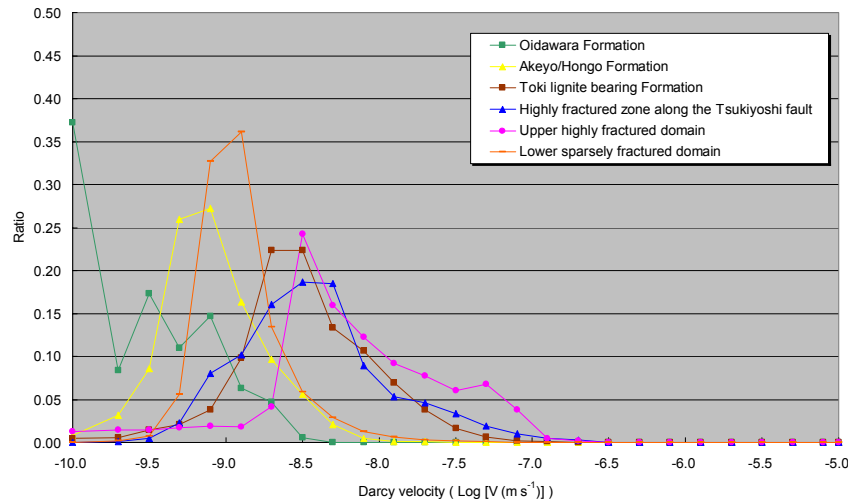


Fig. 3.2.1(6)-1 Darcy velocity distribution

(The vertical axis shows the ratio (cumulative frequency is 1 in each geological formation and domain))

(7)地下空洞周辺の力学・水理状態の把握

1)応力場の把握、岩盤の物理・力学特性の把握、EDZ の分布／物理・力学特性の把握

①目標／実施概要

既得情報を用いた調査・解析・評価では、既得情報に基づき、調査対象領域となる研究用地及びその周辺に分布する土岐花崗岩の物理・力学特性及び初期応力状態を把握し、岩盤力学モデルを構築するとともに、「掘削損傷領域」、「不飽和領域」、「応力再配分領域」の三つの領域の重ね合わせと考えられる掘削影響領域（Excavation Disturbed Zone、以下「EDZ」という）の分布とその物理・力学特性の変化を予測することが目標となる。

このため、最初のステップとして、正馬様用地において実施されたボーリング調査のデータとそれに基づく解釈を既得情報として参照し、岩盤の初期応力状態や物理・力学特性などを把握するとともに、岩盤力学モデルを構築した。また、岩盤の不連続面を考慮できる解析手法により、掘削損傷領域を考慮した坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の掘削影響予測解析を実施した。

②結果概要／得られた技術的知見

正馬様用地において実施された調査結果の例として、ボーリング孔を用いた水圧破碎試験結果^{65),66),67)}を Fig. 3.2.1(7)-1 に示す。また、これらの調査結果及び室内物理・力学試験結果並びに本ステップの地質構造モデル（Fig. 3.2.1(1)-7）を基に構築された正馬様用地の岩盤力学モデル⁶⁷⁾を Fig. 3.2.1(7)-2 に示す。このモデルでは、岩盤の物理・力学特性、亀裂密度及び初期応力状態（主応力値の大小関係、最大主応力方向）が異なる四つのゾーンを設定した。四つのゾーン設定の詳細は、Fig. 3.2.1(7)-2 内に示しているとおりである。初期応力状態は深度や地質構造の変化などにより変化を生じることから、これを評価するためには、①地質構造モデルや力学特性を考慮した複数の深度における初期応力測定結果、及び②点の情報である初期応力データや地質構造、

岩盤の物性データなどを基に、三次元初期応力場を同定する必要があることが明らかとなった⁸⁶⁾。

本ステップでは、上記の正馬様用地の岩盤力学モデルを基に、研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の掘削影響予測解析を実施した。まず、岩盤の不連続面の影響を考慮できる解析手法として、MBC (Micro-mechanics Based Continuum model) 解析^{87),88)}、BEMF (Boundary Element Method for Rock Fracture) 解析⁸⁹⁾、クラックテンソルモデル⁹⁰⁾と仮想割れ目モデル⁹¹⁾を用いた解析⁹²⁾を行った。しかし、これら一般的な解析では、坑道掘削により発生する EDZ のうち、坑道周辺岩盤の応力が解放されることによって生じる応力再配分領域が推定されるのみであり、発破や機械掘削により生じる掘削損傷領域の発生過程を表現するような基本構成式は含まれていないため、解析上表現できない。実際の掘削では、坑道壁面の周囲に掘削損傷領域が発生するため、EDZ を予測するためには掘削損傷領域を適切にモデル化することが重要となる。

そのため、上記の解析手法のうち、等価連続体解析を基本とした MBC 解析手法及びクラックテンソルモデルと仮想割れ目モデルを用いた解析手法を選定し、解析の際に掘削損傷領域をあらかじめ入力することによって、これが掘削影響予測解析結果に与える影響を評価した。掘削損傷領域の幅は、釜石鉱山や東濃鉱山における研究事例⁹³⁾において、機械掘削では 30cm、発破掘削では 80cm とされていることから、解析における掘削損傷領域の幅を 30cm 及び 80cm とし、岩盤基質部の剛性や亀裂の発生方法 (新規亀裂の発生、既存亀裂の進展)、亀裂の分布 (長さ、密度、方向) などを変化させた解析を実施した⁹⁴⁾。

解析の結果、掘削損傷領域を考慮することにより、壁面変位は掘削損傷領域を考慮しない場合の 2 倍程度に増大する可能性があること (Fig. 3.2.1(7)-3)、掘削損傷領域内の透水係数が掘削前の透水係数に比して 3 オーダー以上増加する可能性があること、影響の度合いは、掘削損傷領域に新たに発生させた亀裂の幾何条件に大きく影響される可能性があること (Fig. 3.2.1(7)-4) が明らかとなった。本ステップでは、掘削損傷領域を設定し解析を実施しているが、第 3 段階において実施する掘削影響試験においては、この掘削損傷領域を評価することも重要な課題となる。

2) 地下空洞への地下水流入量の把握

① 目標／実施概要

既得情報を用いた調査・解析・評価では、地下水流入量に影響を及ぼしていると考えられる研究坑道掘削予定地点周辺の透水性構造や遮水性構造などの水理地質構造が明確になっていないものの、研究坑道の排水方法などを検討する必要があることから、ここでは等方均質媒体を仮定した理論式を用いて研究坑道への地下水流入量を簡易的に推定した。この理論式での推定のために、本ステップでは 3.2.1(1)で示した情報に基づき、花崗岩の水理特性を整理した。

② 結果概要／得られた技術的知見

本ステップで整理された情報を用いて花崗岩の水理特性分布を整理した (Fig. 3.2.1(7)-5)。この整理結果に基づき、透水係数の幾何平均値 (10^{-8} m s^{-1}) を研究坑道設計時における地下水流入量算定のための定数とし、この値を用いて研究坑道を立坑部と水平坑道部に分類し、それぞれへの地下水流入量について等方均質媒体を仮定した理論式^{95),96)}を用いて算定した。この際、立坑及び水平坑道の本数や長さなどは、Fig. 1.1.2-2 に示す研究坑道レイアウトを考慮した。その結果、研究坑道への地下水流入量は約 $3,000 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ と推定された⁹⁷⁾。この推定結果は研究坑道の排水処理設備の設計 (4.1.4 参照) に反映した。

次ステップ以降の課題としては、より現実的な流入量の評価を行うために透水性構造や遮水性構造などを考慮した水理地質構造モデルを構築し、それを用いた地下水流動解析による推定が必要であると考えられる。

3)不連続構造などの有無の把握

①目標／実施概要

既得情報を用いた調査・解析・評価では、岩盤の物理・力学特性に影響を与えると考えられる断層や割れ目帯などの不連続構造の研究坑道での出現に関する情報を取得することを目的に、3.2.1(2)で構築した地質構造モデルに基づき、研究坑道周辺の不連続構造の有無を推定した。

②結果概要／得られた技術的知見

3.2.1(2)で構築した地質構造モデルを用いて、研究坑道周辺の不連続構造の有無を推定した (Fig. 3.2.1(7)-6)。その結果、サイトスケール領域における主要な不連続構造である月吉断層は研究坑道には出現せずに、その最深深度よりも約 480m 以上も深部に分布していると推定された。

不連続構造の分布の推定において、既存地質図に記載されている月吉断層は、ローカルスケール領域での調査を含めて多数の既得情報が存在することから、その空間的な分布をモデル化することが比較的容易である。一方で、既存地質図に記載されていない不連続構造に関しては、リニアメントからその頻度や位置などを概括的に推定することはできるものの (3.2.1(2)参照)、それらを適切にモデル化するうえでは、その不確実性も考慮する必要がある。

次ステップ以降の課題としては、3.2.1(2)と同様、既存地質図には記載されていない不連続構造の有無を確認していくことが重要である。

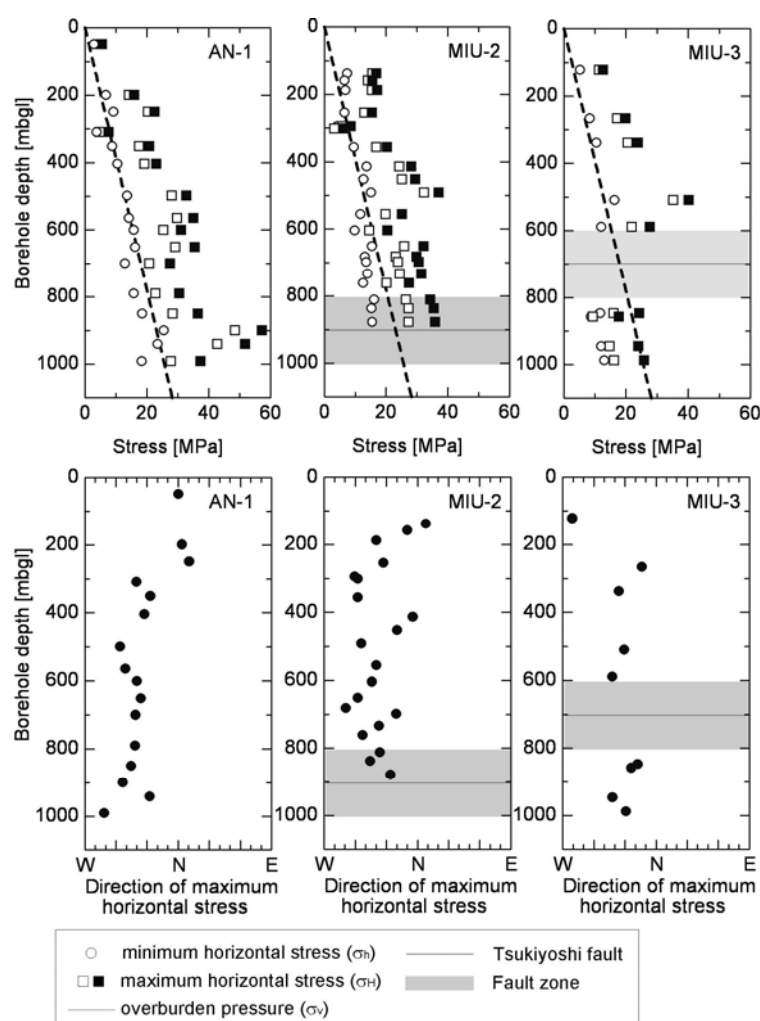


Fig. 3.2.1(7)-1 Results of hydraulic fracturing tests (AN-1, MIU-2, MIU-3)^{(65),(66),(67)}

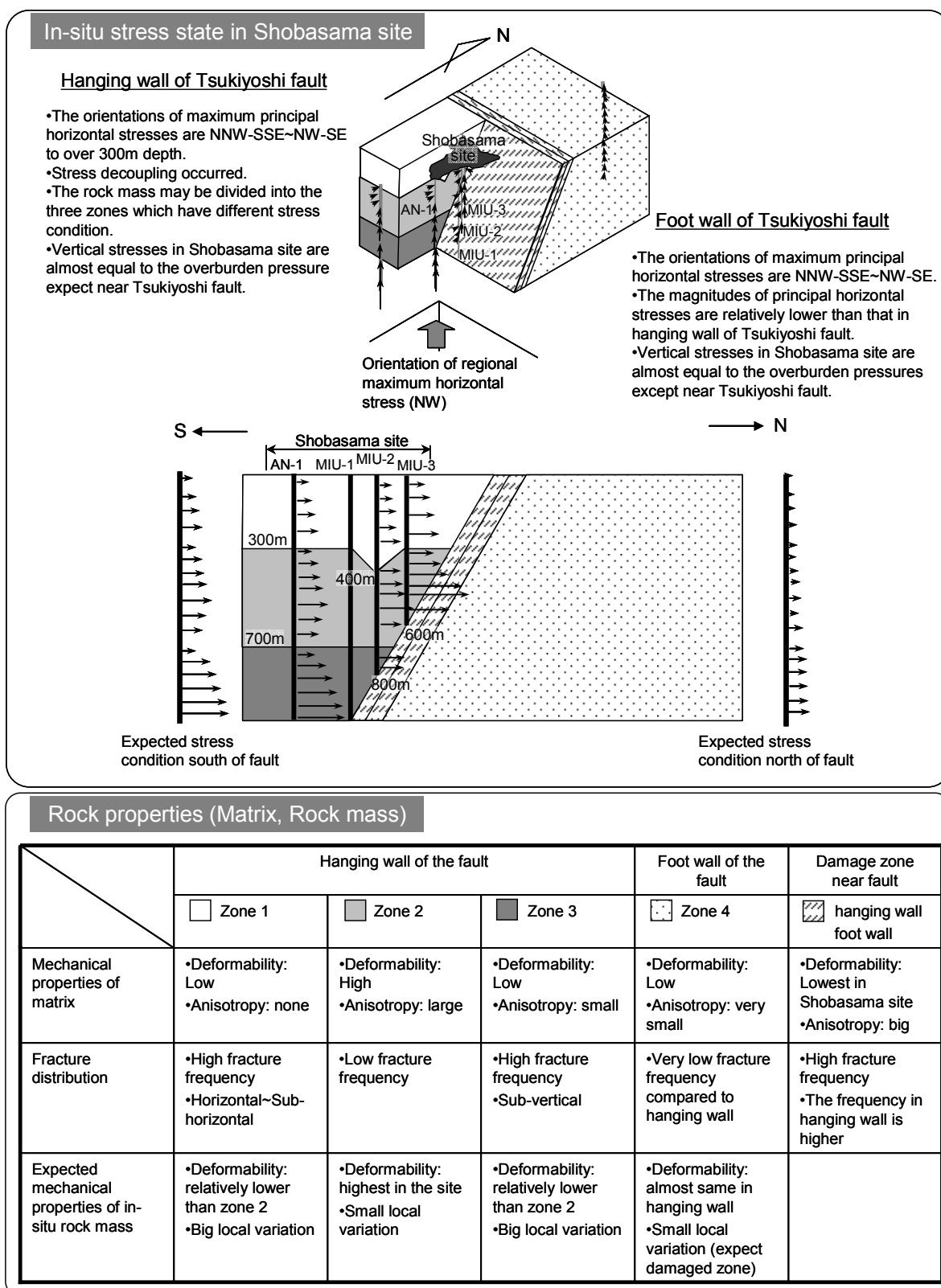


Fig. 3.2.1(7)-2 Rock mechanical model in Shobasama site⁶⁷⁾

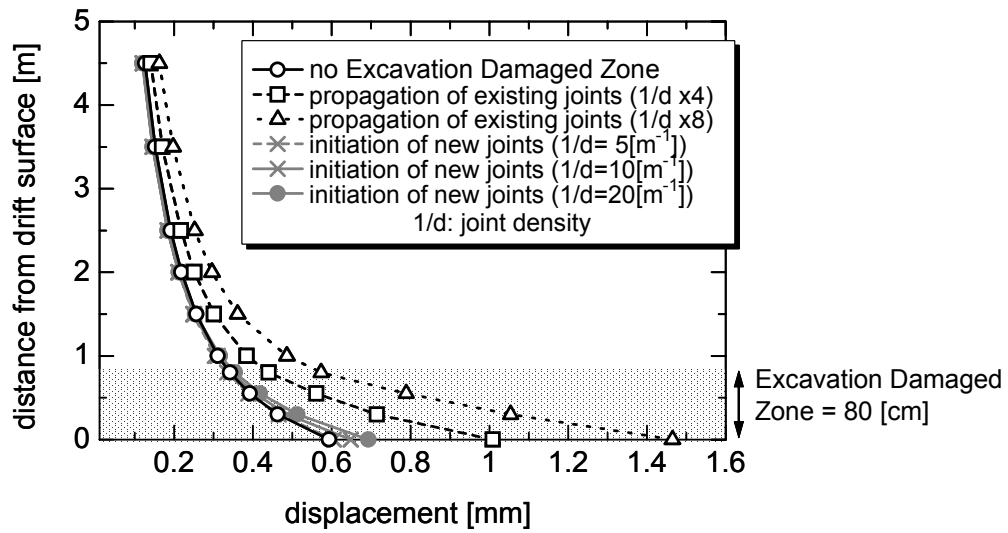


Fig. 3.2.1(7)-3 Distribution of rock displacement around drift (MBC model)

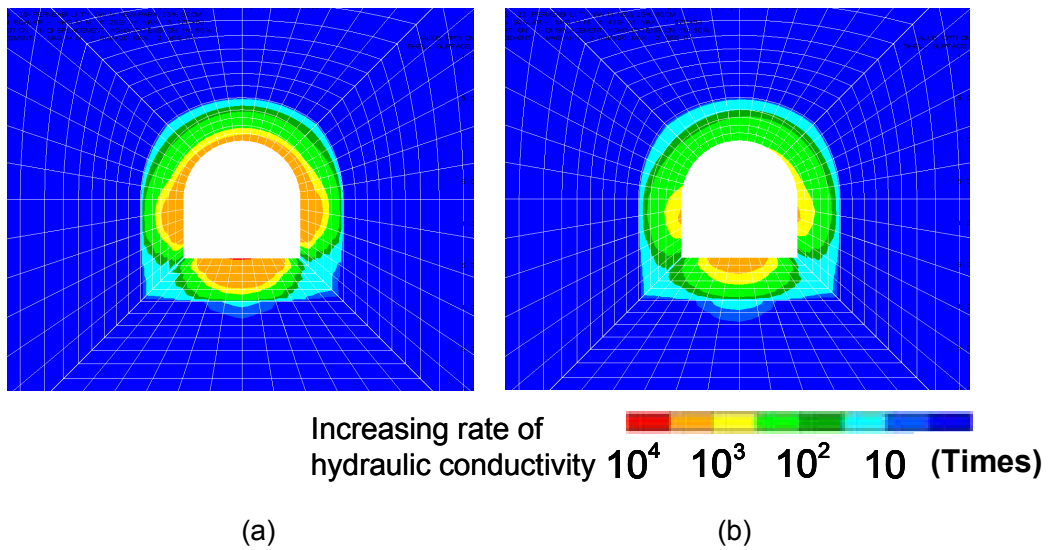


Fig. 3.2.1(7)-4 Distribution of hydraulic conductivity increase around drift
(Crack tensor + Virtual fracture model Analysis)
(a) New cracks parallel to the wall
(b) New cracks in random orientations

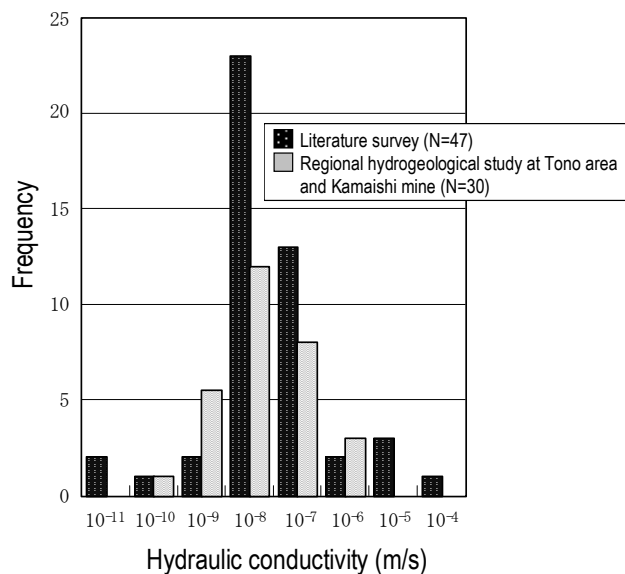


Fig. 3.2.1(7)-5 Distribution of hydraulic conductivity of granitic rocks in Japan

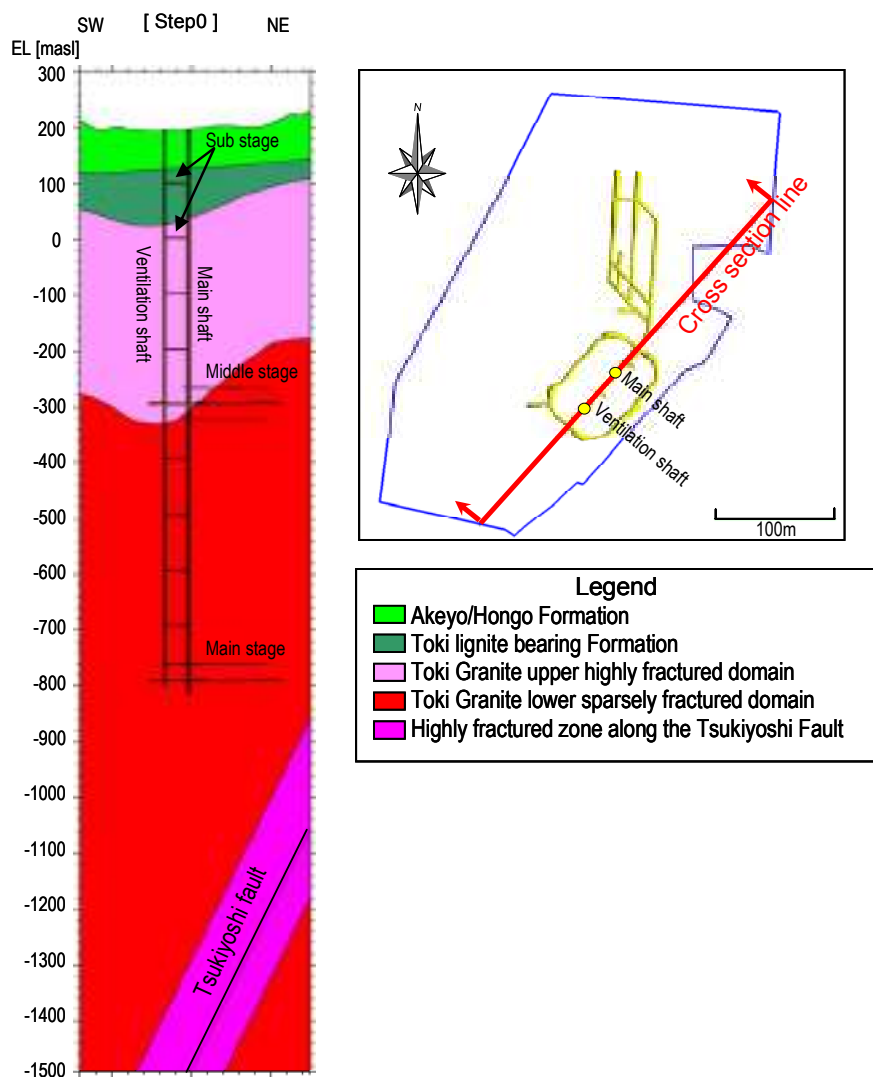


Fig. 3.2.1(7)-6 Predicted geological structure around the MIU facility (Step0)

(8)地下の温度環境の把握

①目標／実施概要

既得情報を用いた調査・解析・評価では、調査対象領域となる研究所用地及びその周辺に分布する土岐花崗岩の地下の温度環境データを取得することが目標となる。ここで温度環境データの取得とは、Table 3.1-1 に示すように、地温勾配分布や岩盤の熱特性を把握することをいう。

このため、本ステップでは、正馬様用地及びその周辺（ローカールスケール領域）において実施された温度検層結果及びボーリングコアを用いた熱特性試験結果（熱伝導率、比熱、線膨張係数）を既得情報として参照し、地下の温度環境特性を把握した。

②結果概要／得られた技術的知見

正馬様用地及びローカールスケール領域の深度 1,000m までの地温勾配の平均値は $2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ であり (Fig. 3.2.1(8)-1)、火山地帯を除いた全国平均 ($3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) よりも若干低めの値であった²¹⁾。また、Fig. 3.2.1(8)-2 に文献データ^{17,18)}と DH-6～8 号孔並びに正馬様用地のボーリングコアを用いた室内試験⁴⁹⁾から得られた熱特性を示す。土岐花崗岩の熱伝導率と線膨張係数については、ピーク値は異なるが、分布範囲は文献データの範囲内にある²¹⁾。比熱については、文献データより幅広い分布を示した。以上のことから、地温勾配や熱特性などの地下の温度環境は、火山地帯のように局所的な熱源が無い限り、ローカールスケール程度の範囲では、地温勾配については 1 本のボーリング孔での温度検層により把握可能であり、熱特性については、ボーリングコア数本程度の熱特性試験が必用であることが明らかとなった。

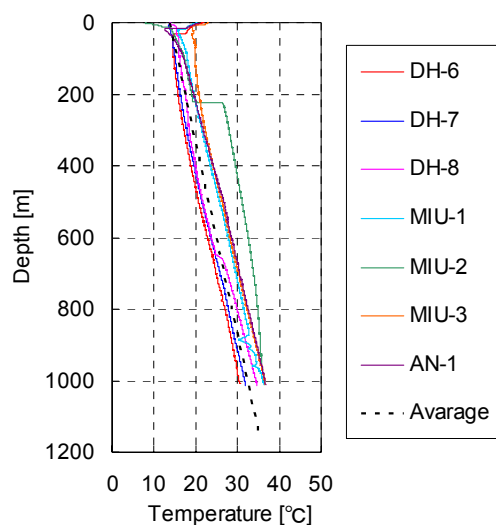


Fig. 3.2.1(8)-1 Result of temperature logging (Shobasama site, DH-6, 7 and 8)

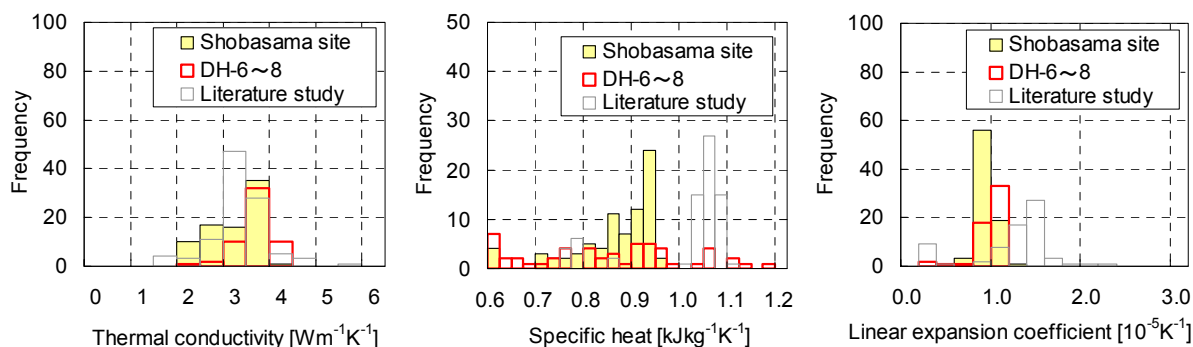


Fig. 3.2.1(8)-2 Result of thermal property test (Shobasama site, DH-6, 7 and 8)

(9)既得情報を用いた調査・解析・評価のまとめ及び次ステップ以降の課題

既得情報を用いた調査・解析・評価では、Table 3.1-1 に示すようにすべての個別目標と課題を対象に、それらを概括的に把握することを目的として、既往の文献や地質図、広域地下水流動研究や、東濃鉱山における調査試験研究、正馬様用地での調査研究において取得された情報などを収集・整理した。

また、収集・整理した情報に基づき、地質構造の概念モデルを構築するとともに、サイトスケールの地質構造モデル、水理地質構造モデル、地球化学モデル、並びに岩盤力学モデルを構築した。さらに、これらのモデルに基づき地下水流動解析や応力・掘削解析などを実施し、研究坑道周辺の力学状態などを予測した。

これらの調査やモデル化・解析を通じて、次ステップ以降の調査・解析における重要要素を抽出・特定した。具体的には、以下のとおり。

- ・ サイトスケール領域に分布する地質・地質構造の分布状況の詳細な確認
- ・ 既存地質図には記載されていない不連続構造の有無の確認及びその分布の把握
- ・ サイトスケール領域における地下水流動に影響を及ぼすと考えられる断層分布の把握並びに、断層の水理特性に着目した調査・解析の実施
- ・ サイトスケール領域における地下水の地球化学特性に関する情報の取得
- ・ ボーリング孔を利用した調査による物質移動の遅延特性に関する情報の取得
- ・ サイトスケール領域に広く分布することが想定され、希釈層としての機能を有する可能性のある上部割れ目帯や土岐夾炭累層の三次元的分布及び水理特性の把握
- ・ 透水性構造や遮水性構造を考慮した水理地質構造モデルを用いた地下水流動解析による研究坑道への地下水流入量の推定

(10)処分事業及び安全規制のための技術基盤

①地質構造の三次元分布の把握

既得情報を多角的に検討することにより、被覆堆積岩中の累層や花崗岩中の岩相などの情報を抽出することが可能である。また、リニアメントの長さや頻度の関係に、フラクタル特性が認められたほか、ローカルスケール領域で実施された調査で確認もしくは推定した不連続構造と概ね整合的な分布傾向を示すことから（3.2.1(2)参照）、既存地質図では記載されていない小規模な不連続構造の分布に関する情報を取得するうえで、リニアメント判読結果を参照することは有効であると考えられる。また、次ステップ以降の調査研究レイアウトの選定においてもリニアメントは有益な情報として活用できると考えられる。ただし、リニアメントを適切にモデルに反映するためには、例えば、リニアメントと露頭での割れ目のフラクタル特性などの確率論的な観点を考慮した不連続構造のモデル化技術の整備などが重要と考えられる。

②地下水の流動特性の把握

既得情報を有効に活用してサイトスケール領域を対象とした水理地質構造モデルを構築し、地下水流動解析を実施する必要がある。サイトスケール領域を対象とした水理地質構造モデルを構築するに当たっては、地質構造モデルに考慮された地質・地質構造を十分に反映させることが重要であるため、層序や岩相データなどの地質学的情報に基づき、可能な限り詳細に区分された地質・地質構造に応じた水理特性データを整備しておくことが有効である。

また、地下水流動解析を実施する際の境界条件として有効に活用できることから、河川流量、降水量、蒸発散量などから推定される岩盤浸透量及び地下水面に関する情報を収集しておくことが望ましい。

さらに、事前にサイトスケール領域を包含する広範囲の地下水流動解析を実施しておくことで、

サイトスケール領域を対象とした地下水流動解析の側方境界条件に適用できるとともに、その地下水流動解析結果の信頼性を評価することが可能となる。その際には、地下水流動特性に影響を及ぼす可能性のある断層などの不連続構造を、両空間スケールにおいて水理地質構造としてモデル化するなど、両空間スケールの水理地質構造モデルの整合性を確保することが重要である。

③地下水の地球化学特性の把握

周辺地域の文献データなどから、ボーリング調査において重点的に調査すべき地下水の水質とその分布、考慮すべき水質形成プロセスを抽出することができ、原位置調査の前提となる概念モデルの構築及びこのモデルのオプションを提示することができる。しかしながら、このステップで収集されるデータでは、採水深度や方法といったデータの品質に関わる情報が不足していることが多く、それに由来する不確実性が大きいと考えられる。この段階における地球化学解析結果の解釈では、データの品質に関する不確実性の評価が重要となる。

④物質移動の遅延効果の把握

対象とする岩盤中での物質移動の遅延特性に関する情報が十分に得られないことが想定される。このような場合、類似した地質環境における調査研究事例や該当する情報に関するデータベースなどを活用することにより、対象とする岩盤中での物質移動の遅延効果について、部分的に、あるいは大まかに推定することは可能であると考えられる。しかしながら、物質移動の遅延特性はその場の地質環境条件に強く支配されるため、その特性を詳細に評価することは本段階では困難である。したがって、本ステップでは、概要調査に向けて前述のデータベースなどの拡充を図っていくことが望まれる。

⑤希釈効果の把握

地質・地質構造における地下水流速を評価指標の一つとして、帯水層の希釈効果を把握するに当たっては、帯水層の分布領域の広さを指標としてあらかじめ希釈層としての機能を有する帯水層を抽出したうえで、その希釈効果を把握するための基礎情報を整理するために、地質学的・水理学的観点から流速分布の不均質性の要因となる地質・地質構造をスケールに応じて可能な限り詳細に区分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することが有効である。

⑥応力場の把握、岩盤の物理・力学特性の把握、EDZの分布／物理・力学特性の把握

応力場や岩盤の物理・力学特性に関する情報は、研究坑道の設計の基礎となるばかりでなく、EDZの分布／物理・力学特性を把握するための坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の掘削影響解析を行う際に必要となる解析入力条件を設定するうえでも重要となる。

参照可能な調査データが取得されている地点においては、このようなデータを既得情報として位置づけ、初期応力や物理・力学特性の空間分布を把握し、これらの情報を用いて研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の掘削影響解析を実施することが可能である。

⑦地下空洞への地下水流入量の把握

実際に地下空洞を建設する地点の水理地質構造が明確になっていない限られた情報から概括的な地下水流入量を推定する際には、一般的な土木工事でも適用されている理論式を用いることが効率的である。しかしながら、水理地質構造が不連続構造などによって不均質性を有している場合において、より詳細に地下水流入量を推定するためには、分布が推定される断層などの水理地質構造を考慮した水理地質構造モデルの構築及び地下水流動解析を行う必要がある。

⑧不連続構造などの有無の把握

本ステップでは、既存地質図に記載されている以外の不連続構造を直接把握することは困難であるが、その推定に利用できる情報としてリニアメントが挙げられる。リニアメントの情報を参照することで不連続構造の分布頻度や位置の概括的な推定ができる可能性があるとともに、次ステップ以降の調査研究計画の策定においても有益な情報として活用できると考えられる。

⑨地下の温度環境の把握

地下の温度環境に関する情報は、研究坑道の設計や施工環境の把握などの基礎となるものである。参照可能な調査データが取得されている地点においては、このようなデータを既得情報として位置づけ、地下の温度環境を把握することが可能である。

参考文献

- 1) Matsuzawa, I. and Uemura, T.: “Geotectonic Studies on the Toki Miocene sedimentary basin, Central Japan”, Jour. Earth Sci., Nagoya Univ., Vol.15, pp.35-79 (1967).
- 2) 糸魚川淳二: “瑞浪地域の地質”, 瑞浪市化石博物館専報, 第1号, pp.1-50 (1980).
- 3) 石原舜三, 鈴木淑夫: “東濃地方ウラン鉱床の基盤花崗岩類”, 地調報告, 232, pp.113-127 (1969).
- 4) 陶土団体研究グループ: “岐阜県瑞浪市南部の瀬戸層群－瀬戸層群の堆積盆地の発生～発展に関する研究 (2)－”, 島弧変動・地団研専報 24号, pp.143-155 (1982).
- 5) 動力炉・核燃料開発事業団: “日本のウラン資源”, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN7420 94-006 (1994).
- 6) 山井忠世, 角南基亮, 若松尚則, 岡崎彦哉, 高遠俊一: “東濃地域を対象とした表層水理調査 (その3)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7440 2001-005 (1996).
- 7) 動力炉・核燃料開発事業団: “航空写真等による水理地質構造の解析”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7440 2001-009 (1987).
- 8) 今村遼平・加藤芳郎: “中部地方における広域地質環境評価のための断裂系調査”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7440 2000-028 (1990).
- 9) 山井忠世, 角南基亮, 小林公一: “東濃地域を対象としたリニアメント調査 (その1)”, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TJ7361 94-002 (1994).
- 10) 梅田浩司, 柳澤孝一, 米田茂夫: “日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成”, 日本地下水学会誌, 37, pp.69-77 (1997).
- 11) 石橋弘道, 山田憲夫: “トンネル湧水の湧出機構と水質－恵那山トンネルの場合－”, ハイドロロジー, Vol.16, No.1, pp.18-26 (1986).
- 12) 三階衣子, 早川友邦: “岐阜県東濃地方の放射能泉について”, 温泉科学, 21, pp.104-120 (1970).
- 13) Furue, R., Iwatsuki, T. Mizuno, T. and Mie, H.: “Data Book on Groundwater Chemistry in the Tono Area”, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN 7450 2003-001 (2003).
- 14) Kanagawa, T., Hibino, S., Ishida, T., Hayashi, M. and Kitahara, Y.: “In Situ Stress Measurements in the Japanese Islands: Over-coring Results from a Multi-element Gauge Used at 23 Sites”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst. 23, pp.29-39 (1986).
- 15) 斎藤敏明, 石田毅, 寺田孚, 田中豊: “実測結果に基づくわが国の地下岩盤内の初期地圧状態の検討”, 土木学会論文集, 394, pp.71-78 (1988).
- 16) 地震予知総合研究振興会: “日本の地殻水平歪 1885－1983年”, pp.63-64 (1990).
- 17) 佐藤稔紀, 石丸恒存, 杉原弘造, 清水和彦: “文献調査による我が国の岩石の物理的特性に関するデータの収集”, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN7410 92-018 (1992).
- 18) 佐藤稔紀, 谷口航, 藤田朝雄, 長谷川宏: “文献調査によるわが国の岩石の物理的特性に関するデータの収集 (その2)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 99-011 (1999).
- 19) 星野一男, 加藤碩一, 田中莊一, 小俣明, 森口安宏, 服部昌樹, 今村哲己: “本邦産岩石の深部

- 物性データ集”，地質調査総合センター速報，産業技術総合研究所 地質調査総合センター，no.23 (2001).
- 20) 地質調査所：“日本の地熱調査における坑井データ，その 1，コア計測データ ー物性，地質層序，年代，化学組成ー”，地質調査所報告，第 271 号 (1991).
- 21) 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ー平成 17 年取りまとめー ー分冊 1 深地層の科学的研究ー”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 2005-014 (2005).
- 22) 太田久仁雄，佐藤稔紀，竹内真司，岩月輝希，天野健治，三枝博光，松岡稔幸，尾上博則：“東濃地域における地上からの地質環境の調査・評価技術”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7400 2005-023 (2005).
- 23) 稲葉薫，三枝博光，中野勝志，小出馨：“深部地下水の流動系を把握するためのモデル化領域とその境界条件の設定に関する検討”，第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム論文講演集，pp.359-364 (2003).
- 24) 稲葉薫，三枝博光：“深部地下水流動系を抽出するための後背地地形の影響を考慮した広域地下水流動解析”，地下水学会誌，第 47 巻第 1 号，pp.81-95 (2005).
- 25) 小野傳，奥野孝晴，安藤茂，池田和隆，佐藤徹，黒浜忠一：“ヘリコプターによる空中物理探査”，核燃料サイクル開発機構，JNC TJ7420 00-008 (1999).
- 26) 小出馨，中野勝志，竹内真司，濱克宏，松井裕哉，池田幸喜，長谷川健，杉原弘造，武田精悦：“広域地下水流動研究の現状ー平成 4 年度～平成 11 年度ー”，核燃料サイクル開発機構，JNC TJ7400 2000-014 (2000).
- 27) 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研究開発ー平成 13 年度報告ー”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 2002-003 (2002).
- 28) 天野健治，岩月輝希，上原大二郎，佐々木圭一，竹内真司，中間茂雄：“広域地下水流動研究年度報告書 (平成 14 年度)”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN 7400 2003-002 (2003).
- 29) 石垣孝一，松岡稔幸，上原大二郎：“花崗岩を対象とした断層調査技術の開発ー高密度電気探査，マルチオフセット VSP 探査の適用性評価ー”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7400 2005-009 (2005).
- 30) 山井忠世，若松尚則，和知剛，小田川信哉：“地表地質および水圧調査”，核燃料サイクル開発機構，JNC TJ7440 2000-001 (1998).
- 31) 佐々木圭一，太田久仁雄：“大縮尺の空中写真により判読したリニアメントに関する検討ー東濃地域における事例研究ー”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7400 2004-007 (2004).
- 32) 宮原智哉，片岡達也，竹内真司：“1989～2000 年度表層水理観測年報 (データ集)”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7450 2002-002 (2002).
- 33) 荒井靖：“超深地層研究所計画における表層水理観測年報ー2001～2003 年度 (データ集)ー”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7450 2005-004 (2005).
- 34) 荒井靖：“広域地下水流動研究における表層水理観測年報ー2001～2003 年度 (データ集)ー”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7450 2005-005 (2005).
- 35) 山内大祐，宮原智哉，竹内真司，小田川信哉：“超深地層研究所計画用地周辺の水収支観測結果”，サイクル機構技報，No.9 (2000.12)，pp.103-114 (2000).
- 36) 宮原智哉，稲葉薫，三枝博光，竹内真司：“広域地下水流動研究実施領域における水収支観測結果と地下水流動スケールの検討”，サイクル機構技報，No.16 (2002.9)，pp.137-148 (2002).
- 37) 遠山茂行，岡崎彦哉，和知剛：“雨水・河川水の採取・分析 (平成 11 年度)”，核燃料サイクル開発機構，JNC TJ7420 2000-005 (2000).

- 38) 浅井和見: “雨水・河川水の採取・分析 (平成 12 年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7440 2001-017 (2001).
- 39) 浅井和見: “雨水・河川水の採取・分析 (平成 13 年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7440 2002-026 (2002).
- 40) 天野健治, 岩月輝希, 太田久仁雄, 大澤英昭, 竹内真司, 藪内聡: “広域地下水流動研究年度報告書 (平成 15 年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN 7400 2004-002 (2004).
- 41) Hama, K., Amano, K., Metcalfe, R., Yoshida, H., Iwatsuki, T., Milodowski, A.E. and Gillespie, M.R.: “Mineralogical and petrological evidence for the hydrogeological characteristics of the Tsukiyoshi Fault, Japan”, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol.35, pp.189-202 (2002).
- 42) 三枝博光, 前田勝彦, 稲葉薫: “水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価 (その 6) —不連続構造の水理特性及び水理学的境界条件に着目した水理地質構造のモデル化及び地下水流動解析—”, 社団法人地盤工学会 亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム発表論文集, pp.299-308 (2001).
- 43) 竹内真司, 天野健治, 藤田有二: “広域地下水流動研究における単孔式水理試験データ”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7450 2005-010 (2005).
- 44) 大山卓也, 三枝博光, 尾上博則: “ローカルスケールにおける地下水流動解析—ローカルスケールでの地下水流動特性評価およびサイトスケールにおけるステップ 0 の地下水流動解析の境界条件の設定—”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-004 (2005).
- 45) 森田豊, 三枝博光, 竹内真司, 天野健治, 渡辺邦夫, 宋元泰: “断層に着目した岐阜県東濃地域の広域地下水流動解析”, 日本地下水学会 2005 年春季講演会講演要旨, pp.78-83 (2005).
- 46) Arthur, R.C.: “東濃地域を対象とした地球化学モデルの構築”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7400 2003-007 (2003).
- 47) Metcalfe, R., Hama, K., Amano, K., Iwatsuki, T. and Saegusa, H.: “Geochemical approaches to understanding a deep groundwater flow system in the Tono area, Gifu-ken, Japan”, In: Nishigaki and Komatsu (eds.), *Groundwater Engineering*, pp.555-561 (2003).
- 48) 阿島秀司, 戸高法文, 岩月輝希, 古江良治: “多変量解析による瑞浪超深地層研究所周辺の地下水化学モデルの構築”, 応用地質, 47, p.120-130 (2006).
- 49) 松井裕哉, 佐藤稔紀: “DH-6, 7, 8 号孔における力学特性調査結果”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7420 99-006 (1999).
- 50) 核燃料サイクル開発機構: “東濃鉱山における調査試験研究基本計画書”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 99-006 (1999).
- 51) 動力炉・核燃料開発事業団: “立坑掘削影響試験ワークショップ—発表論文集—”, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN7410 92-052 (1992).
- 52) 核燃料サイクル開発機構: “東濃鉱山における調査試験研究年度報告書 (平成 11 年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2001-006 (2001).
- 53) 核燃料サイクル開発機構: “東濃鉱山における調査試験研究年度報告書 (2000 年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2001-007 (2001).
- 54) 核燃料サイクル開発機構: “東濃鉱山における調査試験研究年度報告書 (2001 年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2002-003 (2002).
- 55) 中野勝志, 竹内真司, 濱克宏, 松井裕哉, 池田幸喜, 天野健治, 山内大祐, 大澤英昭, 長谷川健, 杉原弘造, 武田精悦: “超深地層研究所計画の現状—平成 8 年度～平成 11 年度—”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2001-001 (2001).

- 56) 竹内真司, 下茂道人, 西寫望, 後藤和幸: “1000m ボーリング孔を用いた圧力干渉試験による断層近傍の透水性調査”, 第 31 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.296-300 (2001).
- 57) 竹内真司, 下茂道人, 山本肇, 文村賢一: “1,000m 級ボーリング孔を用いた長期揚水試験”, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.173-178 (2003).
- 58) 升元一彦, 向井圭, 竹内真司: “花崗岩地域における大深度長期間隙水圧モニタリング”, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.277-282 (2004).
- 59) 三枝博光, 須山泰宏: “超深地層研究所計画における地質構造モデルの構築及び地下水流動解析”, サイクル技報, No.9, pp.89-101 (2000).
- 60) 澤田淳, 三枝博光, 竹内真司, 中野勝志, 井尻裕二: “水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価 (その 1) - 複数の概念モデル化手法による不確実性の検討 -”, 亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム論文集, pp.249-258 (2001).
- 61) 澤田淳, 三枝博光, 中野勝志, 大澤英昭: “複数のモデル化手法を用いた地下水流動評価の不確実性について”, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, pp.161-166 (2003).
- 62) 三枝博光, 澤田淳: “地質環境特性調査における地下水流動の不確実性評価に対する試み”, 原子力バックエンド研究, Vol.9, No.2, pp.167-178 (2003).
- 63) 三枝博光, 澤田淳, 稲葉薫, 竹内真司, 中野勝志: “複数のモデル化手法を用いた地質環境特性調査における地下水流動特性評価の不確実性の検討”, サイクル機構技報, No.20, pp.75-89 (2003).
- 64) A. Sawada, H. Saegusa and Y. Ijiri: “Uncertainty in Groundwater Flow Simulations Caused by Multiple Modeling Approaches, at the Mizunami Underground Research Laboratory, Japan”, Dynamics of Fluids in Fractured Rock, Geophysical Monograph Series 162, pp.91-101 (2006).
- 65) 松井裕哉: “AN-1 号孔及びMIU-1 号孔における力学特性調査結果”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7420 99-004 (1999).
- 66) 松井裕哉, 前田信行, 吉川和夫: “MIU-2 号孔における力学特性調査結果及び月吉断層上盤側岩体の岩盤力学的概念モデル”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7420 2000-001 (2000).
- 67) 松井裕哉, 前田信行, 吉川和夫: “MIU-3 号孔における力学特性調査結果及び正馬様用地における土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデル”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7420 2001-001 (2000).
- 68) 核燃料サイクル開発機構: “東濃地域における地質環境特性に関する調査研究—地表からの調査研究の考え方と進め方—”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2002-008 (2002).
- 69) 須山泰宏, 三枝博光: “広域地下水流動研究における地質構造モデルの構築と地下水流動解析”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7400 2000-012 (2000).
- 70) 花室孝広, 天野健治, 三枝博光, 佐藤稔紀, 竹内真司, 中間茂雄, 濱克宏, 池田幸喜, 中野勝志, 大澤英昭, 茂田直孝: “超深地層研究所計画年度報告書 (平成 13 年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2002-004 (2002).
- 71) Lee, F.T., D.R. Miller, D.R. and T.C. Nichols, T.C.: “The relation of stresses in granite and gneiss near Mount Waldo, Maine, to structure, topography, and rock bursts” in K.E. Gray ed., Proceedings, 20th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Austin, Texas, University of Texas Press, pp.663-673 (1979).
- 72) 中山勝博: “岐阜県土岐市における瀬戸層群の堆積盆地”, 地団研専報, Vol.29, pp.119-129 (1985).

- 73) 大野博之, 小島圭二: “岩盤割れ目のフラクタル (その 1)”, 応用地質, Vol.22, No.3, pp.11-24 (1992).
- 74) Strekeisen, A.: “To each plutonic rock is proper name”, Earth - Science Reviews, Vol.12, pp.1-33 (1976).
- 75) 核燃料サイクル開発機構: “超深地層研究所計画 年度報告書 (平成 11 年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2001-003 (2000).
- 76) Yoshida, H.: “Relation between U-series nuclide migration and microstructural properties of sedimentary rocks”, Appl. Geochem., Vol.9, pp.479-490 (1994).
- 77) 大山卓也, 三枝博光, 尾上博則, 遠藤令誕: “繰り返しアプローチに基づくサイトスケールの水理地質構造のモデル化・地下水流動解析 (ステップ 0 および 1)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-008 (2005).
- 78) Isaaks, E.H., Srivastava, R.M.: “An Introduction to Applied Geostatistics”, Oxford Univ. Press, New York (1989).
- 79) 核燃料サイクル開発機構: “釜石原位置試験総括報告書”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 99-001 (1999).
- 80) Ota, K., Amano, K. and Ando, T.: “Brief overview of in situ nuclide retardation in a fractured crystalline rock, Kamaishi In Situ Test Site”, In: Proc. International Workshop for the Kamaishi In Situ Experiments, Kamaishi, Japan, 24-25 August 1998, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN7400 99-007, pp.67-76 (1999).
- 81) 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”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 99-021 (1999).
- 82) 澁谷朝紀, 陶山忠宏, 柴田雅博: “核種のベントナイトおよび岩石に対する収着データベース”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8410 99-050 (1999).
- 83) 陶山忠宏, 笹本広: “JNC 収着データベース (JNC-SDB)の更新: 1998 年~2003 年までに公開された文献データの追加”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8410 2003-018 (2004).
- 84) 村上由記, 長沼毅, 岩月輝希: “深部地質環境における微生物群集—東濃地域を例として—”, 原子力バックエンド研究, Vol.5, pp.59-66 (1999).
- 85) Thury, M., Gautschi, A., Mazurek, M., Müller, W. H., Naef, H., Pearson, F. J., Vomvoris, S. and Wilson, W.: “Geology and Hydrogeology of the Crystalline Basement of Northern Switzerland: Synthesis of Regional Investigations 1981-1993 within the Nagra Radioactive Waste Disposal Programme”, Nagra Technical Report, NTB93-01 (1994).
- 86) 中間茂雄, 山田淳夫, 青木俊朗, 佐藤稔紀: “超深地層研究所計画 (第 1 段階)における岩盤力学調査研究”, サイクル機構技報, No.26, pp.77-86 (2005).
- 87) 吉田秀典, 堀井秀之: “マイクロメカニズムに基づく岩盤の連続体モデルと大規模空洞掘削の解析”, 土木学会論文集 No.535, III-34, pp.23-41 (1996).
- 88) Yoshida, H. and Hori, H.: “Micromechanics-based continuum model for a jointed rock mass and excavation analysis of a large-scale carven”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 41, Issue1, pp. 119-145 (2004).
- 89) Stephansson, O. , Shen, B. , Rinne, M. , Backers, T. , Koide, K., Nakama, S. , Ishida, T. , Moro, Y. and Amemiya, K. : “Geomechanical evaluation and analysis of research shafts and galleries in MIU project, Japan”, Environmental Rock Engineering, Saito & Murata(eds), pp.37-46 (2003).

- 90) Oda, M.: “An experimental study of the elasticity of mylonite rock with random cracks”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Vol. 25, No. 2, pp. 59-68 (1988).
- 91) 石井卓, 郷家光男, 桜井英行, 里優, 木下直人, 菅原健太郎: “仮想割れ目モデルによる空洞周辺岩盤の透水性変化予測手法”, 土木学会論文集, No.715/III-60, pp.237-250 (2002).
- 92) 郷家光男, 堀田政國, 若林成樹, 多田浩幸, 佐藤稔紀, 中間茂雄, 青木俊朗: “坑道展開方向による水理学的な掘削影響の変化に関する解析的検討”, 第 58 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 3-335, pp.669-670 (2004).
- 93) Sato, T., Kikuchi, T. and Sugihara, K.: “In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan”, Engineering Geology, 56, pp97-108 (2000).
- 94) 中間茂雄, 郷家光男, 森孝之, 青木俊朗, 佐藤稔紀: “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, pp.33-40 (2005).
- 95) 大島洋志: “トンネル掘削に伴う湧水, 渴水の予測”, トンネルと地下, 14[10], pp.51-57 (1983).
- 96) 根切り工事と地下水編集委員会: “根切り工事と地下水”, 土質工学会 (1991).
- 97) 今津雅紀, 佐藤稔紀, 見掛信一郎, 玉井猛: “瑞浪超深地層研究所立坑の湧水とその排水方法”, 第 39 回地盤工学研究発表会論文集, pp.1677-1678 (2004).

3.2.2 地表からの調査・解析・評価（ステップ1）

(1)地表からの調査・解析・評価の目的及び実施概要

地表からの調査・解析・評価においては、ステップ0で抽出された課題（3.2.1(9)参照）のうち、地下水の流動特性や地球化学特性を把握する際に、これらに影響を与える要因である地質構造の三次元分布を把握するための調査を優先的に実施した。そのための調査としては、ボーリング孔を利用した調査による詳細な情報取得の前段として、地質構造の三次元分布の概略を面的に把握するための調査を実施した。具体的には、土岐花崗岩、瑞浪層群、瀬戸層群及び地下水流動に影響を及ぼすと考えられる不連続構造の分布や形状、岩石・鉱物特性に関する情報を取得することを目的として、地表地質調査及び反射法弾性波探査（3.3.2参照）を実施した。これらの調査は、次ステップ以降でのボーリング調査地点を選定するうえでも重要である。本ステップでは、これらの調査で必要なデータが取得できない個別目標と課題を除き Table 3.1-1 に示す個別目標と課題を対象とした調査研究を実施した。

地表地質調査は、研究所用地及びその周辺の露頭並びに研究所用地南東部に存在する地下壕跡で実施し、地表地質分布及び断層分布に関する調査を実施した¹⁾（Fig. 3.2.2(1)-1）。

反射法弾性波探査は、ステップ0（3.2.1参照）及び前述の地表地質調査結果に基づき推定した研究所用地及びその周辺に分布する瑞浪層群中の地層境界や土岐花崗岩との境界、及び土岐花崗岩上部の岩相、断層の分布形状などのデータを取得することを目的とした²⁾。探査測線は、研究所用地の地表から地下深部までの不連続構造の三次元分布を精度良く把握するために、可能な限り研究所用地を包含するように研究所用地内外の市道に設定して実施した（Fig. 3.2.2(1)-2）。その際、地表地質調査やリニアメント判読により確認・推定された断層の走向と探査測線が可能な限り直交するように工夫した。また、探査測線を研究所用地のみに限定すると探査深度が表層付近までしか得られないことから、土岐花崗岩が分布している深度約200m以深を探査深度とするために、研究所用地外にも探査測線を設定した。さらに、反射法弾性波探査によって取得される反射断面と実際の地質・地質構造分布を直接比較するために、既存ボーリング孔近傍を通過するように探査測線を設定した。

これらの調査結果に基づき、ステップ0までに構築した地質構造モデルに月吉断層以外の不連続構造を追加するなどの更新を行うとともに、それに基づき水理地質構造モデルを更新した。この更新した水理地質構造モデルにおける断層の水理特性の不確実性に着目した地下水流動の感度解析などを実施した。また、これらの結果に基づき、地下水流動特性に与える影響が大きいと推定された北北西走向の断層や研究坑道に出現すると考えられる断層の地質学的特性及び水理特性などを、次ステップ以降の調査・解析における重要要素として抽出・特定した。

なお、本ステップでの調査・解析・評価を通じた経験に基づき構築した統合化データフローを付録4に示すとともに、各個別目標と課題に向けた取組の詳細は、3.2.2(2)～3.2.2(5)にまとめた。また、3.2.2(6)に本ステップでの調査・解析・評価に基づき抽出・特定した次ステップ以降の調査・解析における重要要素をまとめた。さらに、3.2.2(7)において、本ステップでの調査・解析・評価を通じて整理された処分事業及び安全規制のための基盤技術をまとめた。

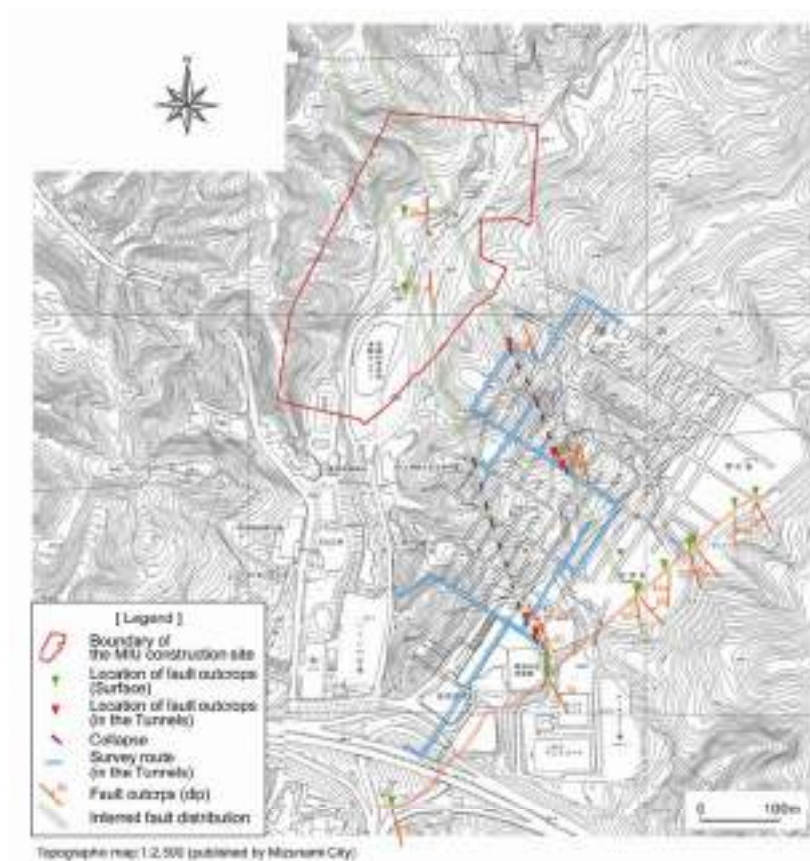


Fig. 3.2.2(1)-1 Location of fault outcrops identified from the geological survey³⁾

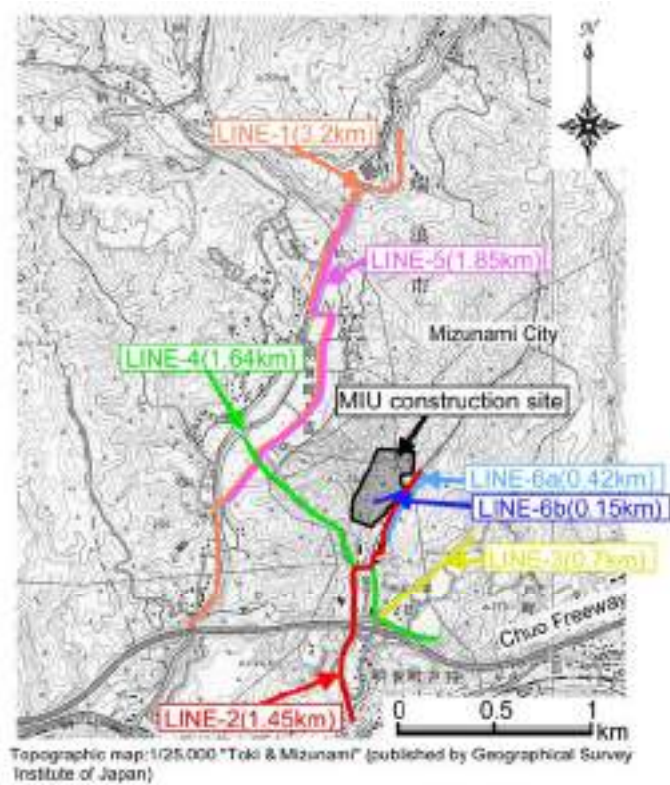


Fig. 3.2.2(1)-2 Reflection seismic survey lines around the MIU Construction Site²⁾

(2)地質構造の三次元分布の把握

①目標／実施概要

地表からの調査・解析・評価では、ステップ0で抽出されたサイトスケール領域に分布する土岐花崗岩や瑞浪層群及び瀬戸層群の分布状況や既存地質図では記載されていない不連続構造の有無などを把握するために、地表地質調査及び反射法弾性波探査を実施し、土岐花崗岩、瑞浪層群、瀬戸層群及び地下水流動に影響を及ぼすと考えられる不連続構造の分布や形状、岩石・鉱物特性に関する情報を取得した^{2),3),4),5),6)}。取得した情報に基づき、ステップ0で構築した地質構造モデル(3.2.1(2)参照)を更新した⁷⁾。本モデルでは、既得情報であるリニアメント(3.2.1(2)参照)についても、本ステップ並びにローカルスケール領域で取得した情報を基に地表下の分布を推定し、不連続構造としてモデル化した^{3),8)}。

②結果概要／得られた技術的知見

研究用地周辺に特徴的な地質・地質構造⁹⁾(起伏に富む土岐花崗岩と瑞浪層群の不整合面など)に着目した地表地質調査及び反射法弾性波探査の実施により、瑞浪層群中の地層境界面や土岐花崗岩と瑞浪層群の不整合面の分布を把握したほか、土岐花崗岩中の上部割れ目帯に対応する反射イベントの分布を確認できた。また、新たに既存地質図には記載されていない南北～北北西走向の小規模な断層の分布を確認することができた(Fig. 3.2.2(2)-1)^{2),4),5),6)}。本ステップで抽出された断層に関しては、地表地質調査により、断層露頭³⁾でそれらの分布や形状、岩石・鉱物特性を確認することが可能であるほか、反射法弾性波探査と組合せることにより、深度方向への連続性の推定が可能であった。反射法弾性波探査では、地表の露頭での断層の分布と対応付けられるもののほか、断層と解釈される反射イベントのずれが複数箇所で確認されており^{3),4)}、サイトスケール領域内の地表下において、地表までは達してない、変位量の小さい、もしくは古い年代に活動した断層も分布している可能性が考えられる。

本ステップにより取得された情報を基に地質構造モデルを更新した(Fig. 3.2.2(2)-2: 更新した地表地質図(左)と地質構造モデル(右))^{3),7)}。なお、更新した地質構造モデルには、とくに本ステップの未調査領域における不連続構造の分布を捕捉するために、既得情報であるリニアメント(3.2.1(2)参照)について、本ステップで実施した反射法弾性波探査で推定された断層やローカルスケール領域でのボーリング調査(付録1参照)において確認されている断層とその方向性や分布位置などを比較して、実際に断層として存在する可能性が低いリニアメントを除外^{3),8)}したうえでモデル化した。モデル化したリニアメントの地表下での傾斜角度については、ローカルスケール領域でのボーリング調査で確認されている断層の走向傾斜と比較して決定した^{3),8)}。

地質構造モデルの更新により、ステップ0までに構築した地質構造モデルと比べて、土岐花崗岩、瑞浪層群及び瀬戸層群の分布とともに、既存地質図では記載されていない不連続構造が新たに27条追加され(このうち直接確認された断層は、Fig. 3.2.2(2)-2(左)に示す5条)、不連続構造の分布に関する理解度を向上させることができた。とくに、反射法弾性波探査は、起伏に富む瑞浪層群と土岐花崗岩との不整合面、土岐花崗岩中の上部割れ目帯の分布を精度良く推定するほか、地表地質調査との組合せにより、既存地質図に記載されていない不連続構造を抽出・推定することができる有効な手法であると言える。ただし、地質が起伏に富む場所ほど、測線間の反射イベントのずれの特徴を比較することで断層の水平方向への連続性を推定することが困難となるため、あらかじめそのような地質分布が予測される場所においては、測線間隔をより密に設定するか、あるいは別途、三次元で探査を実施することが効果的であると考えられる。これに加えて、反射法弾性波探査のデータを利用した三次元トモグラフィ解析や地表トレンチ調査なども有効と考えられる。また、このステップでは断層の分布に関する事前情報が少ないため、反射法弾

性波探査の測線の設定においてはリニアメント判読結果を参照することが有効であると言える。

本ステップで確認した小規模な断層は、南北～北北西走向を有し地下水の主流動方向（北東～南西方向：3.2.1(3)参照）に対して影響を与える方向であるとともに、地表地質調査の結果、遮水構造として機能しうる粘土分を多く含む断層ガウジや断層角礫を実際に挟在していることが明らかとなり、地下水流動に大きな影響を与えている可能性がある。

本ステップで得られる情報は、露頭が確認される場所や反射法弾性波探査の測線沿いなどの地表の限られた範囲で取得された情報である。ただし、反射法弾性波探査においては、今後、実際の地下の地質構造分布と対比することにより、地質構造の推定精度を大幅に向上させることが期待できる。次ステップ以降の課題としては、本ステップで確認あるいは推定された地層境界面や不連続構造の地下での実際の分布状況を確認するとともに、本ステップでは抽出が困難なより深部の地質構造の分布を把握することが挙げられる。

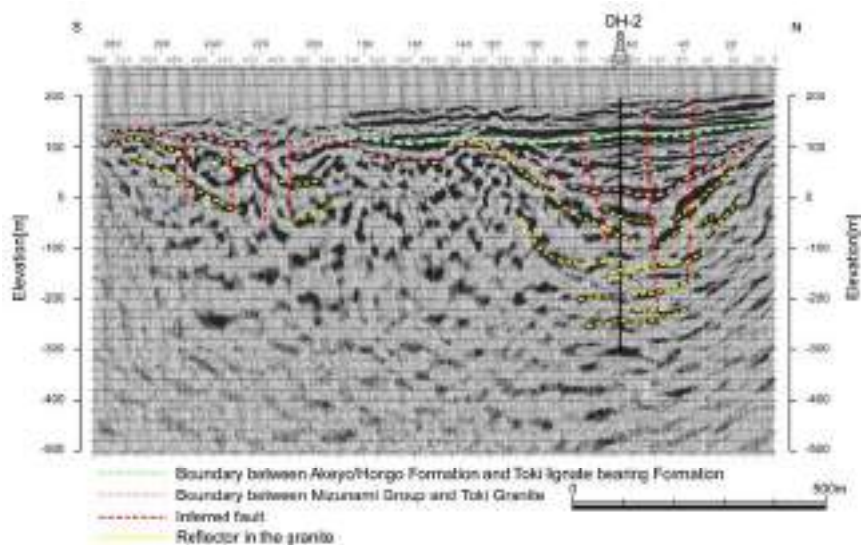


Fig. 3.2.2(2)-1 Geological interpretation of the reflection seismic profile²⁾

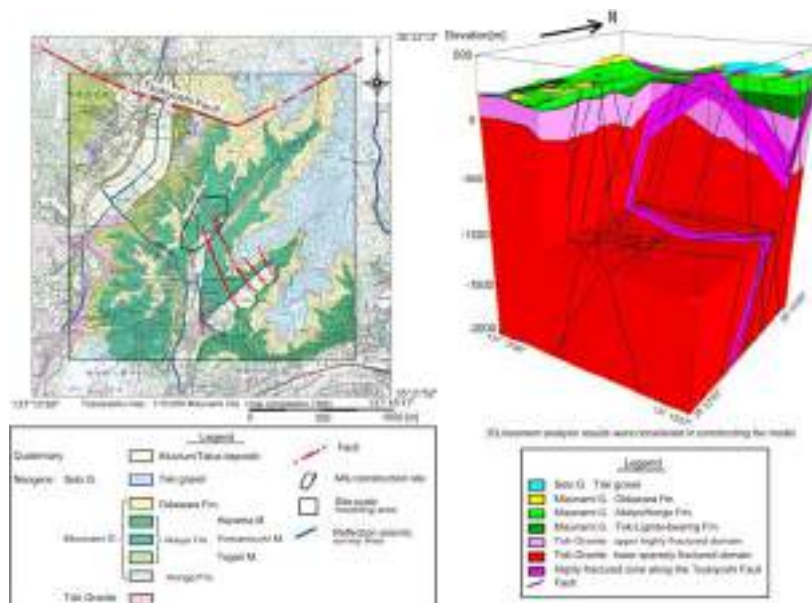


Fig. 3.2.2(2)-2 Geological map and geological model revised with the surface-based investigation phase data⁷⁾

(3)地下水の流動特性の把握

①目標／実施概要

地表からの調査・解析・評価では、地表地質調査及び反射法弾性波探査によって不連続構造の分布や形状に関する情報が取得されている（3.2.2(2)参照）。ステップ0で実施した地下水流動解析結果（3.2.1(3)参照）において、断層が地下水の流動特性に及ぼす影響が大きい地質・地質構造要素の一つであることが推定されている。このことから、本ステップにおいては、ステップ0の水理地質構造モデル（3.2.1(3)参照）に、不連続構造として断層を考慮するとともに、それらの断層の透水性が地下水の流動特性に及ぼす影響の程度を地下水流動に関する感度解析によって把握した。なお、本ステップで得られた調査データをローカルスケール領域の水理地質構造のモデル化及び地下水流動解析に反映させ、サイトスケール領域の境界条件の更新が行なわれた¹⁰⁾。上記の地質構造／水理地質構造モデルの構築及び地下水流動解析は GEOMASS システム（3.3.10 参照）を用いて実施した。

本ステップでは、地質・地質構造要素の水理特性データが新たに取得されていないため、各地層及び断層の分布深度や形状などの情報に基づき更新された地質構造モデル（3.2.2(2)参照）に表現される地質・地質構造要素の水理特性として、ステップ0で用いた水理特性データを適用し、水理地質構造モデルを更新した。Fig. 3.2.2(3)-1 に示す水理地質構造モデルには、本ステップで新たに13条の断層が組み込まれたものの、それらの水理特性は把握されていない。正馬様用地における月吉断層を対象にした調査研究^{11),12)}及びステップ0で実施した地下水流動解析結果（3.2.1(3)参照）から、月吉断層の有する透水異方性が動水勾配分布に及ぼす影響が大きいことが明らかとなっているため、地下水流動解析においては、断層の水理特性のうち透水異方性の有無に着目した感度解析を実施し、断層系統ごとの透水性が動水勾配分布に及ぼす影響を評価した^{13),14)}。断層の系統は、水理特性が把握されていない断層を対象として、それらの断層の卓越する走向に基づきグループ化したうえで五つに分類した。

②結果概要／得られた技術的知見

断層系統ごとの透水異方性の有無がサイトスケール領域における動水勾配分布に及ぼす影響を評価するために、地下水流動解析に基づき三次元的な全水頭分布を算出した。Fig. 3.2.2(3)-2 に感度解析結果の一例を示す。断層系統ごとの透水異方性の有無に着目した感度解析結果から得られた全水頭分布の比較を行うことによって、遮水性を有する断層の上流側と下流側では水頭差が生じるとともに、それらの断層で囲まれた領域内では動水勾配が小さくなるといった、断層系統ごとの透水異方性の有無が動水勾配分布に及ぼす影響の程度や傾向を把握することができた。したがって、断層の透水異方性に着目した地下水流動解析は、断層の透水性が動水勾配分布に及ぼす影響の評価及び解析領域内の動水勾配分布に大きな影響を及ぼす断層を抽出し、調査を行う断層の優先順位をつけるうえで有効な手法であると言える。

また、Fig. 3.2.2(3)-2 からは、トレース長が長い断層ほど、その断層の上流側と下流側でより大きな水頭差を生じる水理境界となる傾向が示唆された。水理地質構造モデルを構築する際には、断層の分布位置及び断層のトレース長に着目したスクリーニングによって、モデル化対象断層の選定を行うことが効率的であると考えられる。スクリーニングの閾値は、地下水流動解析結果に大きな影響を及ぼす断層の規模を感度解析的に把握したうえで設定することが望ましい。一方、調査によって情報が取得されていない部分においても断層が分布しているなどの可能性があることから、断層の空間的分布及び水理特性の不確実性が動水勾配分布などの地下水流動特性に与える影響を評価するためには、決定論的モデルのみならず断層の分布密度などを考慮した確率論的モデルを用いた地下水流動解析なども併せて行うことが有効と考えられる。

次ステップ以降の調査においては、とくに本ステップで実施した地下水流動解析によって研究所用地周辺の地下水流動に大きな影響を及ぼすことが推定された北北西走向、北東走向の断層の地質学的特性及び水理特性を把握することが重要である。

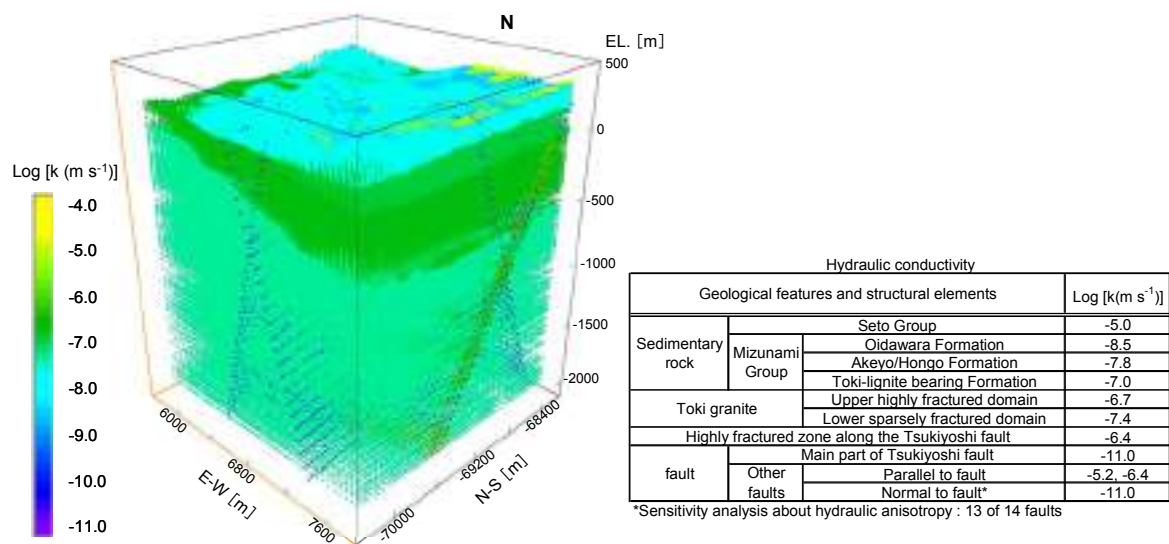


Fig. 3.2.2(3)-1 Hydrogeological model (3D distribution of hydraulic conductivity)

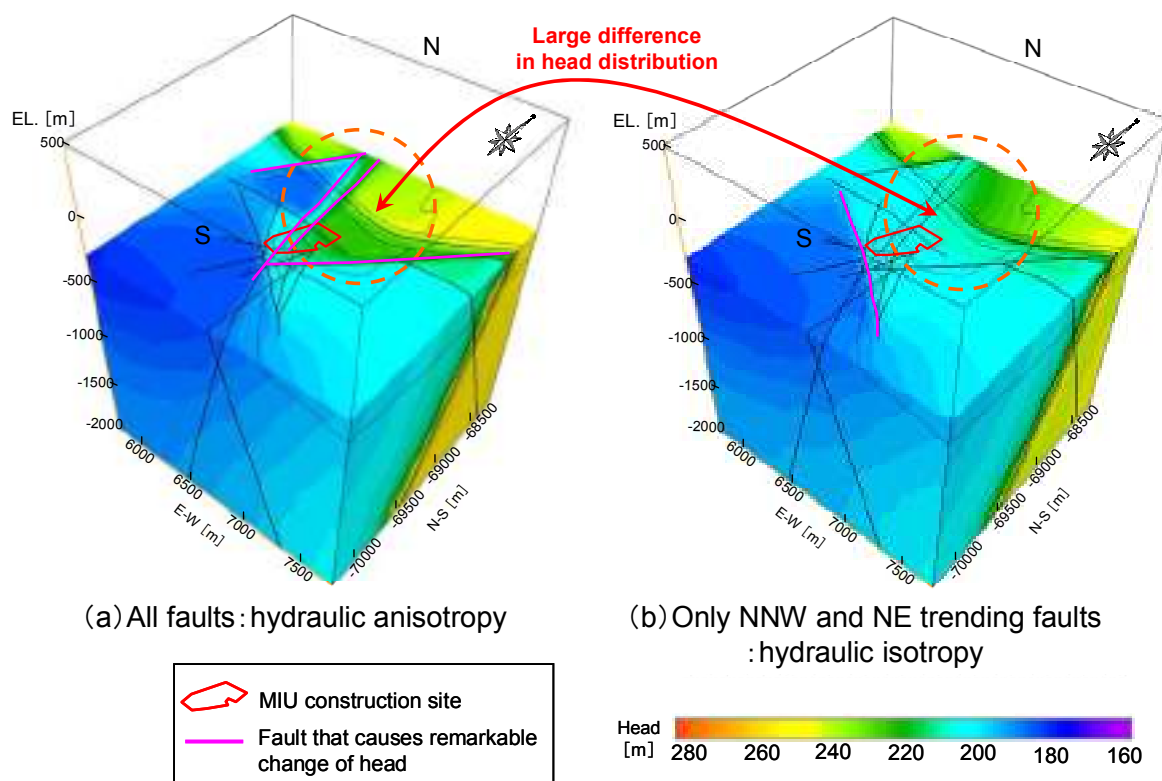


Fig. 3.2.2(3)-2 Example of a sensitivity analysis focused on hydraulic anisotropy of faults (Elevation -300 m : Depth of the shaft 500 m)

(4)希釈効果の把握

①目標／実施概要

地表からの調査・解析・評価では、地質・地質構造ごとの希釈効果を把握するために、3.2.2(3)で実施した地下水流動解析結果に基づき、地質・地質構造ごとのダルシー流速分布を算出した。

②結果概要／得られた技術的知見

本ステップで更新した水理地質構造モデル（3.2.2(3)参照）の中で、比較的広い分布範囲を有する瑞浪層群と土岐花崗岩中の上部割れ目帯及び下部割れ目低密度帯並びに月吉断層に伴う割れ目帯を対象として、ダルシー流速の頻度分布を算出した（Fig. 3.2.2(4)-1）。本ステップでは、新たに複数の断層が水理地質構造モデル（3.2.2(3)参照）に考慮されているが、算出した地質・地質構造ごとのダルシー流速の分布傾向は、ステップ0のものとほとんど同様であり、基盤岩である土岐花崗岩のうち、透水性が相対的に低い下部割れ目低密度帯のダルシー流速分布を基準とすると、月吉断層に伴う割れ目帯、上部割れ目帯、土岐夾炭累層のダルシー流速が比較的高い結果となった。これは本ステップにおいては、地質・地質構造の水理特性データが新たに取得されておらず、ステップ0で用いた水理特性データを適用し、水理地質構造モデルを更新したことと（3.2.2(3)参照）、新たに抽出された不連続構造の分布範囲が狭く、そのほかの帯水層と想定される地質・地質構造の分布が支配的であることに起因していることが考えられる。このことは、希釈効果を把握するに当たっては、帯水層の希釈効果の観点から、その分布範囲が広い地質・地質構造の水理特性データを正確に把握することが重要であることを示唆している。

次ステップ以降の調査においては、比較的広く分布する瑞浪層群中の各累層と上部割れ目帯を対象としたボーリング調査を実施し、それらの三次元的な分布や水理特性に関する情報を取得するとともに水理地質構造モデルに反映させることで、本ステップよりも信頼性の高いダルシー流速分布を算出することが重要である。

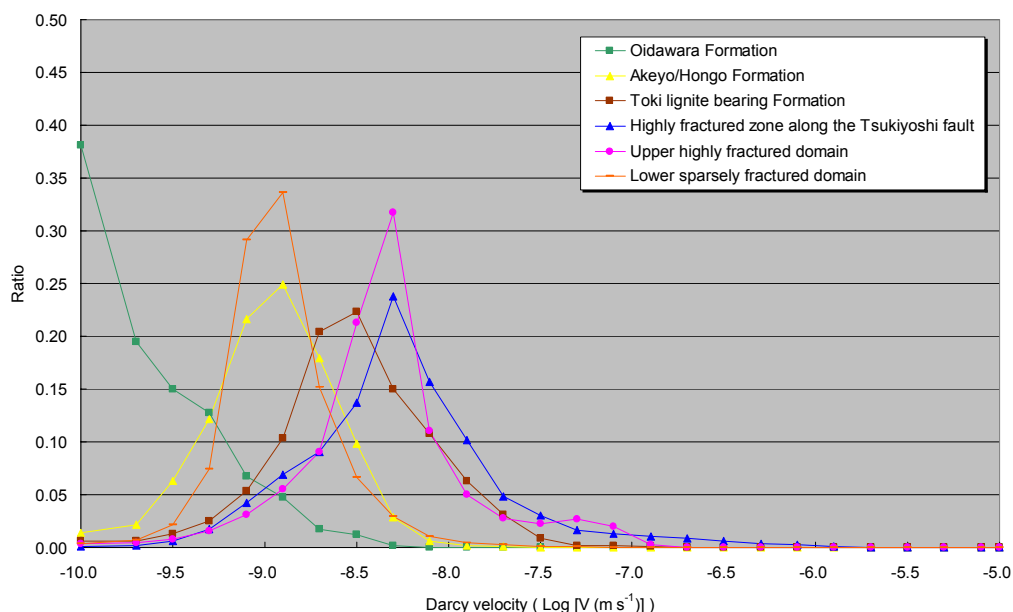


Fig. 3.2.2(4)-1 Darcy velocity distribution (The vertical axis shows the ratio (cumulative frequency is 1 in each geological formation and domain))

(5)地下空洞周辺の力学・水理状態の把握

1)不連続構造などの有無の把握

①目標／実施概要

地表からの調査・解析・評価では、岩盤の物理・力学特性に影響を与えられ断層や割れ目帯などの不連続構造の研究坑道での出現に関する情報を取得することを目的に、3.2.2(2)で構築した地質構造モデルを基に、研究坑道掘削予定地点における不連続構造の出現位置を予測した³⁾。

②結果概要／得られた技術的知見

予測した結果、本ステップで確認された北北西走向の断層 2 条 (Fig. 3.2.2(5)-1 中の IF_SB0_002 及び IF_SB0_005) を含む 7 条の不連続構造が、研究坑道掘削予定地点に出現する可能性があることが推定できた³⁾ (Fig. 3.2.2(5)-1)。

本ステップでは、新たに既存地質図に記載されていない小規模な断層をモデル化することができ、ステップ 0 に比べて、断層分布の推定精度を向上できたと考えられる。

次ステップ以降の課題としては、3.2.2(2)と同様に、本ステップで確認あるいは推定された不連続構造の地下での実際の分布状況を確認するとともに、本ステップでは抽出が困難なより深部の不連続構造の分布を把握することが挙げられる。

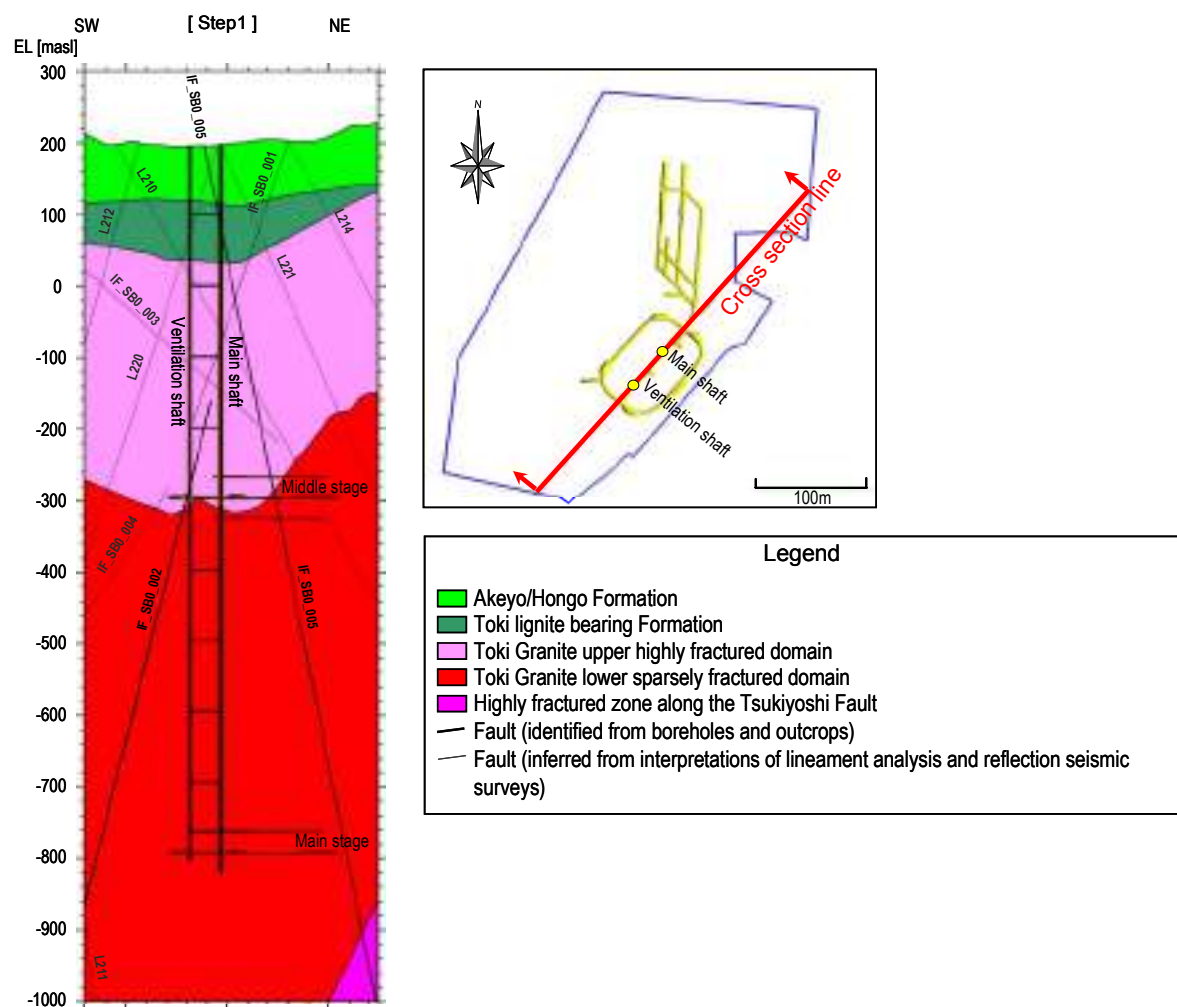


Fig. 3.2.2(5)-1 Predicted geological structures around the MIU facility (Step1)

(6)地表からの調査・解析・評価のまとめ及び次ステップ以降の課題

地表からの調査・解析・評価では、Table 3.1-1に示すように「地質構造の三次元的分布の把握」、「地下水の流動特性の把握」、「希釈効果の把握」、及び「地下空洞周辺の力学・水理状態の把握／不連続構造などの有無の把握」を対象に、土岐花崗岩、瑞浪層群、瀬戸層群及び地下水流動に影響を及ぼすと考えられる不連続構造の分布や形状を面的に把握するとともに、岩石・鉱物特性に関する情報を取得することを目的として、地表地質調査及び反射法弾性波探査を実施した。

また、調査で取得した情報に基づき、月吉断層以外の不連続構造を追加するなど、ステップ0までに構築した地質構造モデルを更新するとともに、それに基づき水理地質構造モデルを更新した。さらに、この更新した水理地質構造モデルにおける断層の水理特性の不確実性に着目した地下水流動の感度解析などを実施した。

これらの調査やモデル化・解析を通じて、次ステップ以降の調査・解析における重要要素を抽出・特定した。具体的には、以下のとおり。

- ・ サイトスケール領域における地下水流動に大きな影響を及ぼすことが推定された北北西走向、北東走向の断層、及び研究坑道に出現すると推定された断層の地質学的特性及び水理特性の把握
- ・ サイトスケール領域に広く分布し、希釈層としての機能を有する可能性のある上部割れ目帯や瑞浪層群中の各累層の三次元的分布及び水理特性の把握

(7)処分事業及び安全規制のための技術基盤

①地質構造の三次元分布の把握

地表地質調査および反射法弾性波探査は、堆積岩や花崗岩の不整合面の分布や、花崗岩中の不均質性の推定精度などを大幅に向上できるほか、既存地質図には記載されていない比較的小規模な断層を抽出するうえで有効である。また、岩石・鉱物特性や地下水流動方向を考慮した不連続構造の評価は、地下水流動に影響を及ぼすと考えられる不連続構造を抽出し、地質構造モデルや水理地質構造モデルの不確実性を低減させるうえで有効である。ただし、反射法弾性波探査では、土岐花崗岩の地形が起伏に富み、反射イベントのずれの特徴を測線間で比較して断層の水平方向への連続性を推定することが困難であったため、あらかじめそのような地質分布が予測される場合においては、測線間隔をより密に設定するか、あるいは別途、三次元で実施することが効果的であると考えられる。また、これに加えて、反射法弾性波探査のデータを利用した三次元トモグラフィ解析や地表トレンチ調査などを実施することも有効と考えられる。このステップでは断層の分布に関する事前情報が少ないため、反射法弾性波探査の測線の設定においてはリニアメント判読結果を参照することが有効であると考えられる。

②地下水の流動特性の把握

ボーリング孔を利用した調査を実施するに当たっての事前検討として、その存在が推定された断層の透水性に着目した地下水流動の感度解析を実施し、地下水の流動特性に大きな影響を及ぼすことが想定される断層を抽出することによって、調査コスト、調査期間及び掘削による場の攪乱の影響などの観点から、効率的な調査計画の策定が可能になると考えられる。

一方、調査によって情報が取得されていない部分においても断層が分布しているなどの可能性があることから、断層の空間的な不確実性が動水勾配分布などの地下水流動特性に与える影響を評価するためには、決定論的モデルのみならず断層の分布密度などを考慮した確率論的モデルを用いた検討も併せて行うことが有効であると考えられる。

③希釈効果の把握

地表地質調査や反射法弾性波探査などで新たな断層の存在が推定されたとしても、その水理特性データが得られないことから、その希釈効果について正確に把握することは困難であるが、これらの断層がほかの帯水層としての希釈効果が期待できる地質・地質構造に及ぼす影響を把握しておくことが望ましい。また、帯水層の希釈効果が期待できる地質・地質構造の分布を詳細に把握するうえで、地表地質調査や反射法弾性波探査などを実施することは非常に有効であると考えられる。

④不連続構造などの有無の把握

地表地質調査および反射法弾性波探査は、堆積岩や花崗岩、花崗岩中の不均質性の推定精度などを大幅に向上できるほか、既存地質図には記載されていない比較的小規模な断層を抽出するうえで有効である。ただし、反射法弾性波探査では、あらかじめ基盤花崗岩の地形が起伏に富むような予測が得られている場合においては、その測線間隔をより密に設定するか、あるいは別途、三次元で実施することが効果的であると考えられる。このステップでは断層の分布に関する情報が少ないため、反射法弾性波探査の測線の設定においてはリニアメント判読結果を参照することが有効であると言える。

参考文献

- 1) 花室孝広, 天野健治, 三枝博光, 佐藤稔紀, 竹内真司, 中間茂雄, 濱克宏, 池田幸喜, 中野勝志, 大澤英昭, 茂田直孝: “超深地層研究所計画年度報告書 (平成 13 年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2002-004 (2002).
- 2) 太田久仁雄, 天野健治, 熊崎直樹, 松岡稔幸, 竹内真司, 升元一彦, 藪内聡, 三枝博光, 稲葉薫, 向井圭, 片岡達彦, 岩月輝希, 佐藤稔紀, 中間茂雄, 今津雅紀, 玉井猛, 見掛信一郎, 大澤英昭, 川瀬啓一, 小出馨: “超深地層研究所計画年度報告書 (平成 14 年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2003-006(2003).
- 3) 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)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-007 (2005).
- 4) 松岡稔幸, 石垣孝一: “花崗岩分布地域における地球物理学的手法を用いた地質構造調査－反射法弾性波探査およびマルチオフセット VSP 探査の適用－”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2005-003 (2005).
- 5) 松岡稔幸, 上原大二郎, 藪内聡, 太田陽一, 川中卓: “花崗岩地域を対象とした反射法弾性波探査の適用”, 平成 14 年度応用地質学会中部支部研究発表会・講演予稿集, pp.31-36 (2002).
- 6) 松岡稔幸, 上原大二郎, 藪内聡, 中野勝志, 太田陽一, 川中卓: “花崗岩中の地質構造を対象とした反射法弾性波探査の適用”, 日本地震学会 2002 年度秋季大会講演予稿集, P.003 (2002).
- 7) 太田久仁雄, 佐藤稔紀, 竹内真司, 岩月輝希, 天野健治, 三枝博光, 松岡稔幸, 尾上博則: “東濃地域における地上からの地質環境の調査・評価技術”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-023 (2005).
- 8) 核燃料サイクル開発機構: “平成 15 年度地層科学研究情報・意見交換会－要旨集－”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2003-002 (2003).
- 9) 核燃料サイクル開発機構: “東濃地域における地質環境特性に関する調査研究－地表からの調査研究の考え方と進め方－”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2002-008 (2002).
- 10) 大山卓也, 三枝博光, 尾上博則: “ローカルスケールにおける地下水流動解析－サイトスケー

- ルにおけるステップ 1 の地下水流動解析の境界条件の設定”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7400 2005-005 (2005).
- 11) 三枝博光，稲葉薫，澤田淳：“断層の透水異方性に着目した水理地質構造のモデル化・地下水流動解析－東濃地域を例として－”，第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム論文講演集，pp.371-376 (2003).
 - 12) 竹内真司，下茂道人，西畠望，後藤和幸：“1000m ボーリング孔を用いた圧力干渉試験による断層近傍の透水性調査”，第 31 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.296-300 (2001).
 - 13) 大山卓也，三枝博光，尾上博則，遠藤令誕：“繰り返しアプローチに基づくサイトスケールの水理地質構造のモデル化・地下水流動解析（ステップ 0 および 1）”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7400 2005-008 (2005).
 - 14) 三枝博光，松岡稔幸，熊崎直樹，稲葉薫：“超深地層研究所計画における研究の現状－繰り返しアプローチに基づく地質構造モデルの構築及び地下水流動解析について－”，土木学会第 59 回年次学術講演会論文集，CS1-18, pp.35-36 (2004).
 - 15) 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）”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7400 2005-007 (2005).

3.2.3 既存・浅層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価（ステップ2）

(1) 既存・浅層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価の目的及び実施概要

既存・浅層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価においては、ステップ0及び1で抽出された課題（3.2.1(9)及び3.2.2(6)参照）のうち、地表から地下浅部の地質環境特性（地質学的特性や水理特性、地下水の地球化学特性）を把握することを目的として、4本の浅層ボーリング孔（MSB-1～4号孔）による調査を実施した。深層ボーリング孔では、通常、ボーリング孔の保孔のために浅層の堆積岩部までケーシングを設置することから、堆積岩部の長期地下水モニタリング孔として用いることが難しい。このため、浅層ボーリング孔を利用した調査は、深層ボーリング孔を利用した調査と区別して実施することとした。また、広域地下水流動研究の一環として実施された深度500mまで掘削されていた既存ボーリング孔（DH-2号孔）での調査結果を利用した（3.3.3及び3.3.4参照）。本ステップでは、これらの調査で必要なデータが取得できない個別目標と課題を除きTable 3.1-1に示す個別目標と課題を対象とした調査研究を実施した。

浅層ボーリング孔を利用した調査では、以下の4点を目的とした¹⁾。

- ・ ステップ1において地下水流動に影響を及ぼすと考えられた重要な地質構造要素として抽出された研究所用地を通過する北北西走向の断層（3.2.2参照）の幾何形状や水理特性を把握すること
- ・ 堆積岩及び花崗岩風化帯における地下水流動場の研究坑道掘削前の初期状態を把握すること
- ・ 堆積岩及び花崗岩風化帯の地下水及び岩石の化学的特性を把握すること
- ・ 研究坑道掘削に伴う間隙水圧や水質の変化を把握するための長期地下水モニタリングを開始すること

これらの目的及び予算や工程を総合的に考慮し、浅層ボーリング孔の本数及びボーリングの位置やレイアウトを決定した（Fig. 3.2.3(1)-1）。具体的には、ステップ0（3.2.1参照）及び1（3.2.2参照）での調査研究から推定された大局的な地下水の主流動方向の上流側と下流側に配置した。さらに、想定される月吉チャンネルに沿った局所的な地下水流動及び酸化還元境界の深度を考慮して、月吉チャンネルに沿った花崗岩を被覆する堆積岩の厚さの異なる地点での堆積岩と花崗岩上部の水理特性や地下水及び岩石の化学的特性を把握するためのボーリング位置とした。また、ステップ1の調査・解析で推定された北北西走向の断層は高角の傾斜を有していると推定されていることから、1本のボーリング孔はこの幾何形状や水理特性を把握するために傾斜孔とした。なお、これらのボーリング孔の掘削長は、花崗岩上面の深度（堆積岩の厚さ）を勘案して99～201mとした。また、浅層ボーリング孔を利用した調査では、ボーリングコアを用いた地質学的調査、孔壁画像調査、物理検層（3.3.5参照）、流体検層（3.3.6参照）、水理試験（3.3.7参照）、地下水の採水・分析（3.3.8参照）などを実施した。さらに、ボーリング調査終了後、研究坑道掘削に伴う間隙水圧や水質の変化を把握するために、間隙水圧モニタリング装置もしくは水質モニタリング装置を設置し長期地下水モニタリングを開始した。

既存ボーリング孔を利用した調査では、掘削当時の調査項目や精度が超深地層研究所計画第1段階の調査研究で必要としているものと大きく異なることから、深度約500mまでの土岐花崗岩中の風化部や上部割れ目帯、断層、水みちとして機能する構造の分布や幾何形状、水理特性などを把握することを目的とした地質学的調査及び水理学的調査の再調査が実施された²⁾。ここでの調査においては、地下水流動に影響を及ぼすと考えられる透水性構造を抽出するために、ボーリングコアを用いた地質学的調査に加えて流体検層の一つである電気伝導度検層をはじめとする複数の流体検層（3.3.6参照）が適用された。また、抽出された透水性構造やそれ以外の区間を対象

とした水理試験が実施された。さらに、ボーリングコアを用いた初期応力測定（3.3.9 参照）も実施された。このボーリング孔についても調査終了後、研究坑道掘削に伴う間隙水圧の変化を把握するために、間隙水圧モニタリング装置が設置され、長期地下水モニタリングが開始された。

なお、付録 3 にボーリング孔を利用した調査の実施概要、また、付録 5、7 にボーリング孔を利用した調査の結果概要をまとめて示す。

これらの調査結果に基づき、ステップ 1 までに構築したサイトスケールにおける地質構造モデル、水理地質構造モデル、地球化学モデル、並びに岩盤力学モデルを更新した。さらに、これらのモデルに基づき地下水流動解析などを実施し、動水勾配分布や地下空洞周辺の力学・水理状態などを予測した。これらのモデル化・解析において、モデルや解析結果などの分野間の整合性などを確認し、調査研究結果の信頼性の向上を図るとともに、不確実性の幅の変化や解析結果に与える影響の大きな因子について評価した。また、これらの結果に基づき、北北西走向の断層の花崗岩中での地質学的特性及び水理特性などを、次ステップ以降の調査・解析における重要要素として抽出・特定した。

なお、本ステップでの調査・解析・評価を通じた経験に基づき構築した統合化データフローを付録 4 に示すとともに、各個別目標と課題に向けた取組の詳細は、3.2.3(2)～3.2.3(7)にまとめた。また、3.2.3(8)に本ステップでの調査・解析・評価に基づき抽出・特定した次ステップ以降の調査・解析における重要要素をまとめた。さらに、3.2.3(9)において、本ステップでの調査・解析・評価を通じて整理された処分事業及び安全規制のための基盤技術をまとめた。

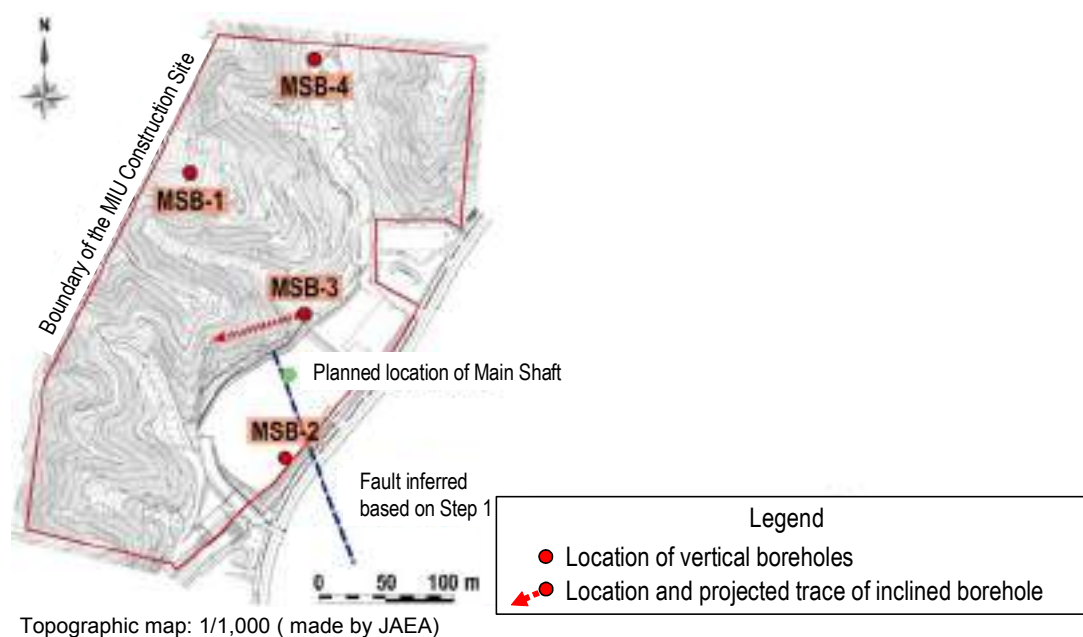


Fig. 3.2.3(1)-1 Location of the shallow boreholes

(2)地質構造の三次元分布の把握

①目標／実施概要

既存・浅層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価では、土岐花崗岩の深度 500m 以浅を対象にステップ 1 で推定されたサイトスケール領域の地質構造の三次元分布を直接把握するために、サイトスケール領域の既存及び浅層ボーリング孔において、コア観察、孔壁画像調査、物理検層、マルチオフセット VSP 探査、流体検層、水理試験などを実施した^{1),2),3),4),5)}。ここで得られた地質

学的情報に基づき、堆積岩の層厚や月吉チャンネル (3.2.1(2)参照) の分布と土岐花崗岩中の構造区分 (具体的には、風化帯、上部割れ目帯、後述する低角度傾斜を有する割れ目の集中帯) との相関性や不連続構造の幅とトレース長との関係などからそれらの空間分布を推定し地質構造モデルを更新した^{6),7)}。また、推定した不連続構造の分布と流体検層によって把握した地下水の流出入箇所分布、並びに水理試験から求めた透水量係数などの水理特性に関する情報とを合わせて解釈し、水みちの分布を推定した^{2),3),4)}。

②結果概要／得られた技術的知見

浅層ボーリング孔において、コア観察、孔壁画像調査や物理検層などを組合せた地質学的調査の実施により、瑞浪層群の各累層の深度分布を特定するとともに、ステップ1で確認された北北西走向の断層の地表下での分布と性状を確認することができた。断層には断層ガウジや断層角礫が認められ、ステップ1で確認された性状 (3.2.2(2)参照) と整合的であることが明らかになった¹⁾。また、研究坑道近傍に位置する既存ボーリング孔において、コア観察、孔壁画像調査や物理検層などを組合せた地質学的調査を実施し、土岐花崗岩中に、新たに東西走向で分布する断層を2条抽出したほか、南北走向の断層の連続性が判明した。また、花崗岩上部には数 m 程度の厚さで風化帯 (初生鉱物のほぼすべてが粘土鉱物に変質もしくは溶脱し、結晶粒子間に鉄酸化鉱物や水酸化鉄が濃集・沈着している領域) が分布すること、少なくとも深度 500m までは花崗岩中に上部割れ目帯が分布していること、及び上部割れ目帯中に、低角度の割れ目が集中している領域 (低角度傾斜を有する割れ目の集中帯) が存在することを新たに確認した^{2),3),4)}。一方、既存ボーリング孔を用いたマルチオフセット VSP 探査では、反射法弾性波探査で得られた反射イベントとボーリング孔で確認される各累層や花崗岩中の構造区分 (低角度傾斜を有する割れ目の集中帯など) とを詳細に対応づけることで、それらの空間分布の精度を向上させるとともに、反射法弾性波探査では、ステップ1までの調査では不明確であった花崗岩中の北北西走向の断層の分布を捕捉し、その形状を三次元的に把握することができた^{2),4),6)} (3.3.2(3)参照)。

これらの情報を基に地質構造モデルを更新した (Fig. 3.2.3(2)-1: 更新した地表地質図 (左) と地質構造モデル (右))。モデルの更新により、ステップ1までに構築した地質構造モデルと比べて、瑞浪層群中の各累層の分布精度を向上させたほか、土岐花崗岩中の構造区分 (風化帯、上部割れ目帯及び低角度傾斜を有する割れ目の集中帯) 並びに花崗岩中の断層分布に関する理解度の向上を図ることができた。

本ステップでは、地下における堆積岩の各累層や花崗岩中の構造区分に関して、その分布深度を正確に確認することができたほか、花崗岩中の断層分布及び性状の把握が可能となった。特に、ボーリング孔における地質学的調査とマルチオフセット VSP 探査との組合せは、花崗岩中の断層の空間分布を精度良く推定するための有効な手法であると言える。

また、流体検層 (3.3.6 参照) のうち、特に電気伝導度検層^{8),9)}により、花崗岩中における地下水の流出入箇所の分布を精度良く把握することができ、この手法と地質学的調査及び水理試験を組合せることにより、北北西、北東及び東西走向の割れ目が地下水の流出入箇所として機能していることを確認した。地質情報だけにに基づき地質構造モデルを構築する手順では、規模は小さくとも水理的に重要な構造が見落とされる可能性があることから、地質学的調査と水理試験の組合せは水みちとして重要な不連続構造の分布とその水理特性を効率的にかつ精度良く把握できる手順と考えられる^{2),3),4)}。

次ステップ以降の課題としては、本ステップで解釈された断層のより深部の花崗岩中での分布や性状の把握が挙げられる。

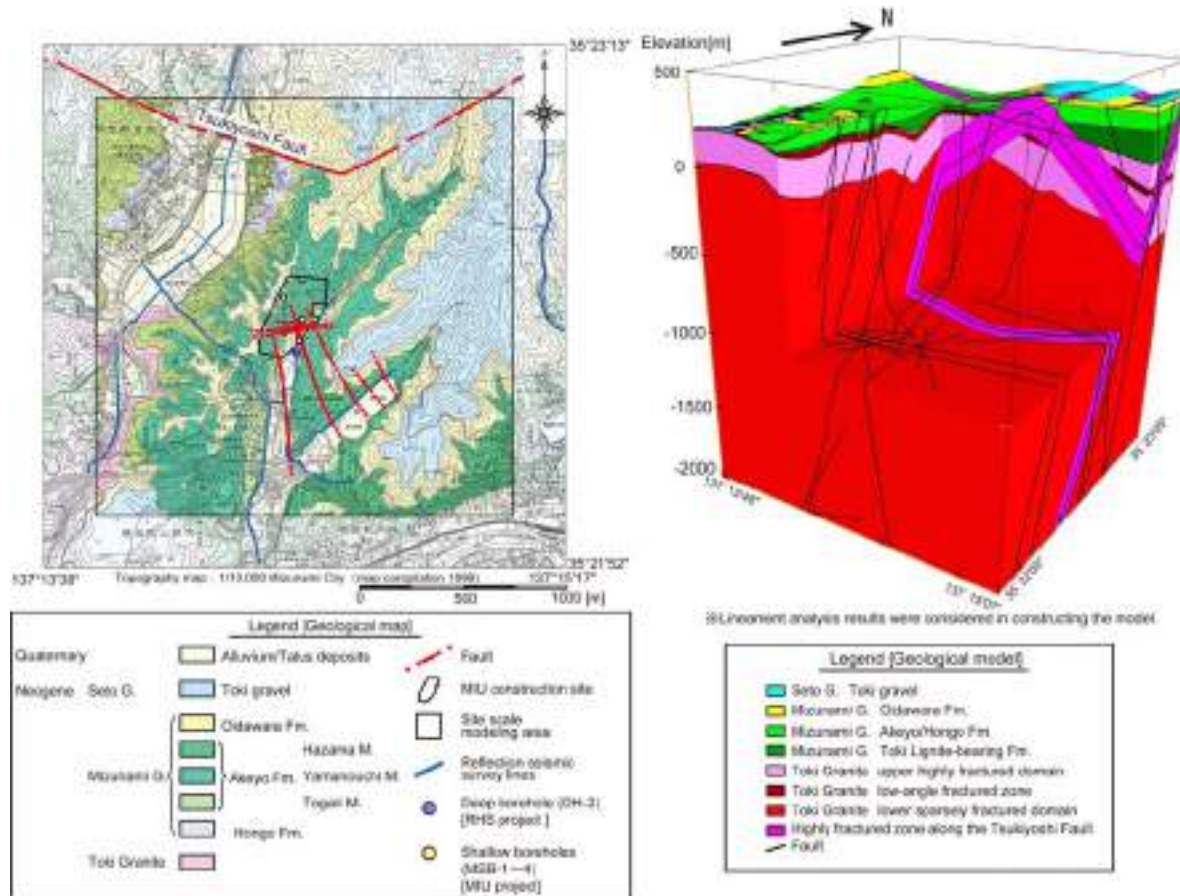


Fig. 3.2.3(2)-1 Geological map and geological model revised using existing and new shallow borehole investigation phase data⁵⁾

(3)地下水の流動特性の把握

①目標／実施概要

既存・浅層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価では、ステップ 1 で実施した地下水流動解析において地下水流動特性に与える影響が大きいと予測された北北西走向の断層に対し、ボーリング孔を利用した調査によって直接的に岩盤の水理特性データを取得する必要がある。本ステップにおいては、瑞浪層群、土岐花崗岩及び不連続構造の水理特性に関する情報の取得を目的として、瑞浪層群を調査の対象とした浅層ボーリング孔及び既存ボーリング孔を利用した流体検層、単孔式水理試験を実施した^{2),10)}。さらに、原位置での間隙水圧データの取得による研究用地周辺における概略的な動水勾配分布の把握及び地下水流動解析結果の妥当性の定量的な確認を目的として、上記調査実施後のボーリング孔を活用した長期地下水モニタリングを実施した^{11),12),13)}。

各調査によって得られた地質・地質構造の水理特性を、本ステップで更新した三次元的な地質構造モデル (3.2.3(2)参照) に加えることにより水理地質構造モデルを更新した^{14),15)}。断層のモデル化に当たっては、ステップ 1 における地下水流動解析の結果 (3.2.2(3)参照) から、トレース長が長い断層ほど、地下水の流動特性に及ぼす影響が大きくなる傾向が示されたため、効率的に水理地質構造モデルの構築、地下水流動解析を実施するために、本ステップにおいては断層のトレース長に着目したスクリーニングを行った。さらに、更新した水理地質構造モデルを用いて、断層が動水勾配分布に与える影響の把握、調査の進展に伴う地下水の流動特性に関する理解度を把握するために、ステップ 1 の地下水流動解析 (3.2.2(3)参照) と同様に、断層の透水異方性に

着目した感度解析を実施した^{14),15)}。なお、本ステップで得られた調査データをローカルスケール領域の水理地質構造のモデル化及び地下水流動解析に反映させ、サイトスケール領域の境界条件の更新が行われた¹⁶⁾。上記の地質構造／水理地質構造モデルの構築及び地下水流動解析は GEOMASS システム (3.3.10 参照) を用いて実施した。

②結果概要／得られた技術的知見

Fig. 3.2.3(3)-1 に、本ステップで更新した水理地質構造モデルを示す。水理地質構造モデルには、新たに土岐花崗岩中の上部割れ目帯に低角度傾斜を有する割れ目の集中帯が考慮されるとともに、地層境界面形状や断層の分布形状が更新されている。地質・地質構造ごとに設定した試験区間において実施した単孔式水理試験の結果 (3.3.7 参照)、瑞浪層群中の各累層においては、3～12 倍程度の透水性のコントラストが確認された^{2),10)}。このことは、単孔式水理試験を実施するに当たっては、ボーリング調査で把握された地質・地質構造に基づいた試験区間を設定することが重要であることを示している。また、流体検層 (3.3.6 参照) のうち、電気伝導度検層で抽出された水みちの流量と電気伝導度に基づく数値解析によって得られた透水量係数の分布は水理試験結果とよく一致する^{17),18)}ことから、同検層に基づく数値解析結果は水理試験を補間する有効な手法であることが確認できた。

ボーリング孔を利用した長期地下水モニタリングの結果、瑞浪層群中の明世／本郷累層と土岐夾炭累層の境界付近において、深度方向に間隙水圧が 40～50m 程度低下する傾向が観測されており、瑞浪層群中に堆積構造に起因する水理境界の存在が推定された^{11),12),13)}。この水理境界の浅部と深部においては、地下水の水質も大きく異なっていることが確認されており、地球化学的な観点からも水理境界の存在の可能性が示された (3.2.3(4)参照)。このことから、ボーリング孔における水理地質構造ごとの間隙水圧の観測が重要であるとともに、地下水の地球化学特性に基づき、得られた観測結果や推定した地下水流動特性の妥当性を確認する必要がある。

サイトスケール領域における動水勾配分布の把握及び断層の透水異方性の有無が動水勾配分布に及ぼす影響を評価するために、地下水流動解析結果に基づき三次元的な全水頭分布を算出した^{14),15)}。本ステップ及びステップ 1 における感度解析結果 (3.2.2(3)参照) との比較を行った結果 (Fig. 3.2.3(3)-2)、解析領域における全水頭の分布傾向は大きく異なっており、調査の進展による水理地質構造モデルの更新に伴い、研究所用地周辺の地下水流動場に大きな影響を及ぼす断層が異なることが確認された。このことは、調査の進展に伴って調査・解析・評価を繰り返し実施するなかで感度解析などを行い、次の調査で確認すべき重要な地質・地質構造を確認していくことが重要であることを示している。

既存ボーリング孔における長期地下水モニタリングから得られた全水頭分布の実測値と、地下水流動解析結果に基づく解析値を比較した。調査の進展に伴い信頼性が向上しているかを確認するために、ステップ 1 (3.2.2(3)参照) とステップ 2 の解析結果の比較検討を行った。Fig. 3.2.3(3)-3 に、本ステップ及びステップ 1 で実施した地下水流動解析のうち、最も実測値の再現性が高い解析結果の実測値との差の標準偏差を示す。同図より、本ステップの解析値のほうがステップ 1 に比べ実測値の再現性が 10m 程度向上していることが確認された。この実測値の再現性の向上は、①ボーリング調査による直接的な地質・地質構造の水理特性を取得したこと、②調査の進展に伴い取得された情報を地下水流動解析の境界条件に反映させたことに起因するものと考えられる。このことから、より広範囲の地下水流動解析結果に基づき境界条件を設定している場合には、それぞれのステップにおいて取得された情報に基づき、必要に応じて地下水流動解析の境界条件も更新していく必要がある。また、ボーリング孔を利用した長期地下水モニタリングを実施し間隙水圧を観測することで、深度方向の概略的な動水勾配の分布傾向が把握できるとともに、取得した実測値との地下水流動解析結果の定量的な比較が可能となる。

次ステップ以降の調査においては、特に、本ステップで実施した地下水流動解析によって研究所用地周辺の地下水流動場に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった北北西走向、北西走向、東西走向の断層の花崗岩中での地質学的特性及び水理特性の評価、並びに水理地質構造モデルの大部分を占める花崗岩の地質学的特性及び水理特性に関する情報を取得することが重要である。

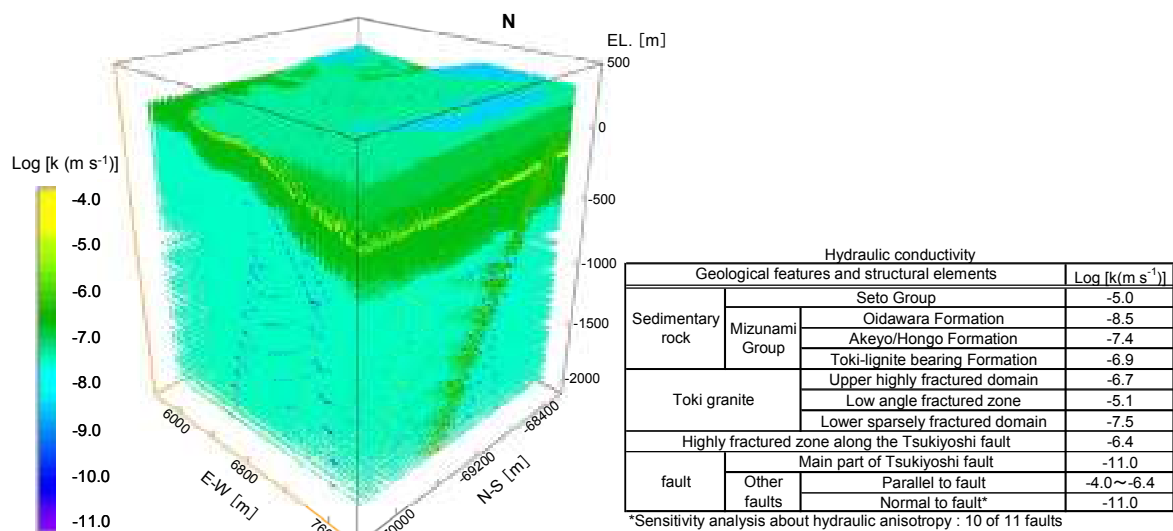


Fig. 3.2.3(3)-1 Hydrogeological model (3D distribution of hydraulic conductivity)

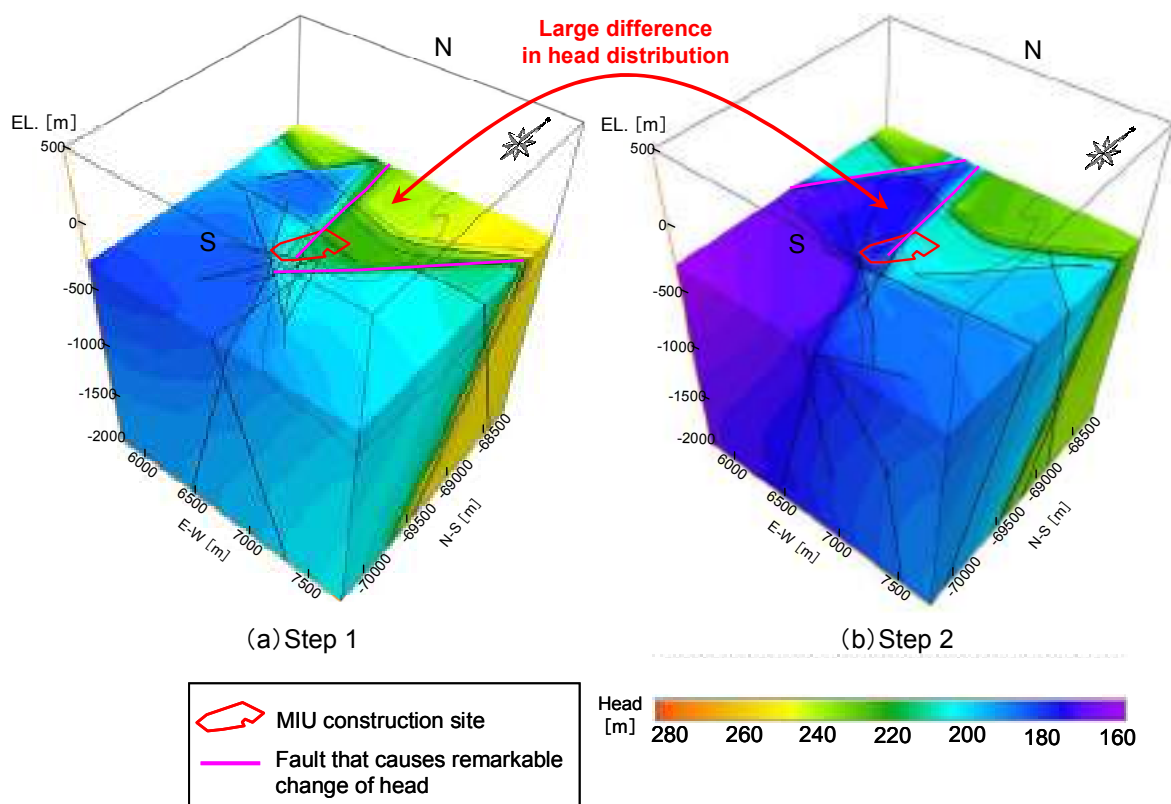


Fig. 3.2.3(3)-2 Comparison of head distribution between Step1 and 2
(All fault : hydraulic anisotropy)

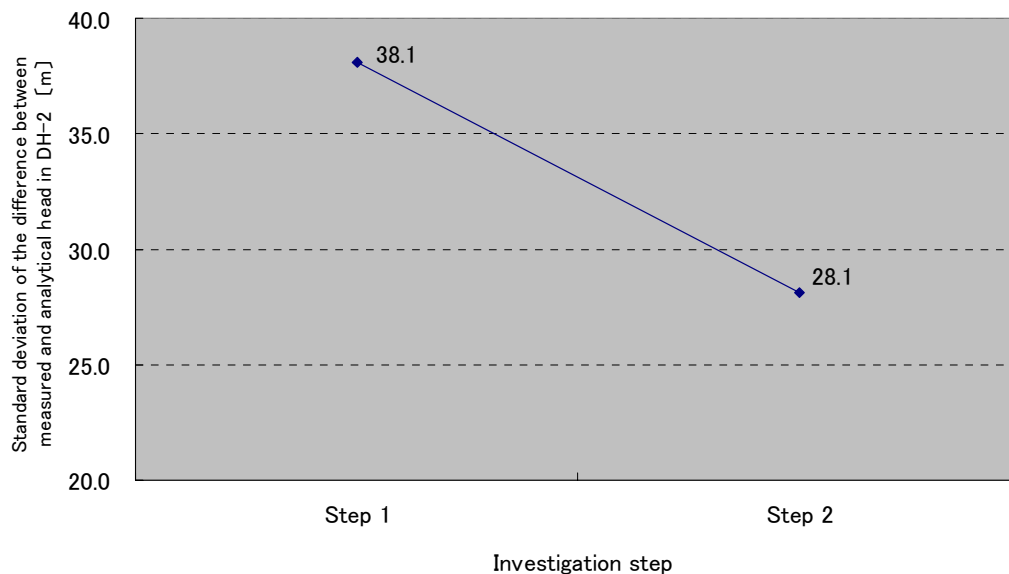


Fig. 3.2.3(3)-3 Comparison between measured and analytical head differences in Step 1 and 2

(4)地下水の地球化学特性の把握

①目標／実施概要

既存・浅層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価では、ステップ 1 までに取得したデータ及び解析結果を踏まえて、地球化学モデルの確認・更新、研究坑道掘削前の地質環境の把握が目標として挙げられる。ステップ 1 までの調査では、サイトスケール領域内の堆積岩中の地下水の地球化学特性のデータが得られていなかったことから、本ステップでは、新たに堆積岩中の地下水の地球化学特性の取得及び地球化学モデルの構築を目的とした。また、モデルに基づいて土岐花崗岩中の地下水の地球化学特性について、次のステップの深層ボーリング孔を用いた調査・解析に反映することなどが求められる。本ステップでは、土岐花崗岩を覆う厚さ数十～約 200m の瑞浪層群を対象としたボーリング調査により、地下水及び岩石試料を採取・分析し、地球化学解析とモデルの更新を行った。

②結果概要／得られた技術的知見

上記調査解析の結果、サイトスケールの領域内の堆積岩中の地下水は、瑞浪層群浅部で、ケイ素、硫酸イオンに富む Na-Ca-HCO₃ 型水質を示すこと (Fig. 3.2.3(4)-1)、瑞浪層群深部並びに土岐花崗岩上部では Na-Cl 型水質を示し、おおむね深度とともに塩分濃度が増加することが新たに明らかになった。瑞浪層群中の Na-Ca-HCO₃ 型地下水と Na-Cl 型地下水の分布境界の深度では、低透水層の存在により低透水層以深での水頭の急激な低下が観察されており¹⁹⁾、地下水の地球化学特性の分布が水理地質構造に支配されていることが考えられる (Fig. 3.2.3(4)-2)。

瑞浪層群浅部の地下水の水素・酸素同位体比は、研究所用地周辺で採取した降水中の同位体比の変動幅の範囲内ではばらついており、トリチウムも検出されることから、瑞浪層群浅部の地下水の起源は最近の降水であり、瑞浪層群深部の地下水と比較して涵養速度が速いと考えられる^{20),21)}。これはステップ 0 の知見 (3.2.1(3)、3.2.1(4)) とあわせて、月吉断層と堆積岩中の低透水層に囲まれた研究所用地の深部の地下水流動速度が非常に遅い可能性を示唆するものであり、地下水流動解析結果と整合的である。

地下水の水質分布及び流動状態が堆積岩中の低透水層の分布に影響を受けていると考えられることから、研究坑道の掘削時には、低透水層を境にして地下水の水質分布及び流動状態に対する

影響の範囲や程度が異なることが予想される。そのため、第2段階以降の掘削に伴う周辺地下水環境の変化を評価するうえで、水理地質構造ごとの観測、解析が不可欠であると考えられる。

ステップ2では瑞浪層群中の地下水の水質の分布と水理地質構造の関係を明らかにするとともに、ステップ2での地下水流動解析結果の妥当性を示すための知見を得ることができた。また、第2段階以降の調査研究の指針を得ることができた。このように、岩盤の水理特性と地下水の水質分布を比較し、整合性を確認することにより、地下水流動解析結果の妥当性を確認するとともに地球化学モデルの信頼性を向上させることが可能である。

次ステップ以降の調査においては、花崗岩中での地下水の地球化学特性に関する情報を取得することが重要である。

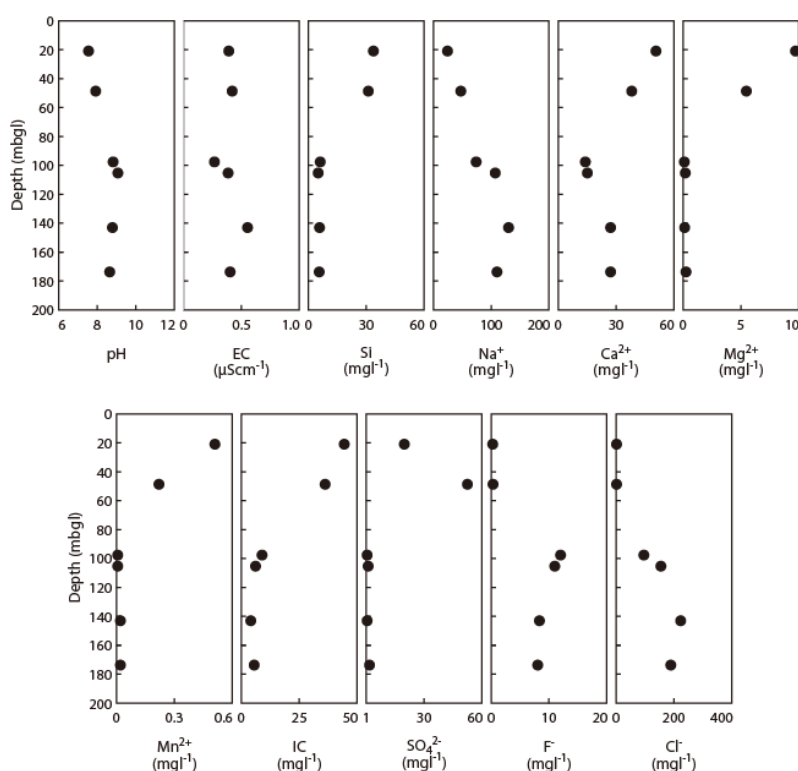


Fig. 3.2.3(4)-1 Depth profile of groundwater chemistry in the borehole (MSB-2,4)¹⁹⁾

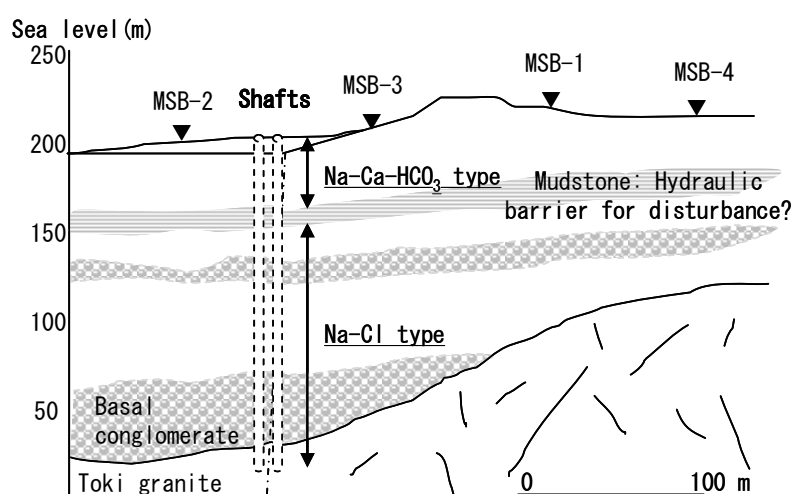


Fig. 3.2.3(4)-2 Schematic view of groundwater chemistry in the sedimentary rock of site scale

(5)希釈効果の把握

①目標／実施概要

既存・浅層ボーリングを利用した調査・解析・評価では、本ステップで実施した地下水流動解析結果（3.2.3(3)参照）に基づき、地質・地質構造ごとのダルシー流速分布を算出した。

②結果概要／得られた技術的知見

本ステップで取得された情報に伴う水理地質構造モデルの更新（3.2.3(3)参照）により、帯水層としての効果が期待される地質・地質構造としては、ステップ1で想定したものに加え、上部割れ目帯中で特に高い透水性を有する低角度傾斜を有する割れ目の集中帯を抽出した。

上記の地質・地質構造についてダルシー流速の頻度分布を算出した（Fig. 3.2.3(5)-1）。その結果、低角度傾斜を有する割れ目の集中帯のダルシー流速が突出して高く、次いで上部割れ目帯、土岐夾炭累層、月吉断層に伴う割れ目帯が全体的に高い傾向にある。さらに、ステップ1（3.2.2(4)参照）では下部割れ目低密度帯よりも低いダルシー流速分布を有していた明世／本郷累層のダルシー流速が高い結果となっている。これは、浅層ボーリング調査により、同累層において高い透水性を示すデータが取得されたことに起因すると考えられる。このことから、直接的に地質・地質構造の水理特性を取得することのできるボーリング調査が希釈効果を把握するうえでも有効であることが示された。基盤岩である土岐花崗岩のうち、透水性が相対的に低い下部割れ目低密度帯のダルシー流速分布を基準とすると、低角度傾斜を有する割れ目の集中帯をはじめ、上部割れ目帯、土岐夾炭累層、月吉断層に伴う割れ目帯及び明世／本郷累層のダルシー流速が比較的高い結果となり、これらが希釈効果を考えるうえで重要な地質・地質構造であることが示唆された。

本ステップにおいては、希釈効果が期待できる地質・地質構造として、低角度傾斜を有する割れ目の集中帯が新たに抽出された。サイトスケール領域における信頼性の高い希釈効果を把握するためには、ボーリング調査を実施し、地下深部の地質・地質構造の分布や水理特性に関する情報を直接的に取得することが有効である。

次ステップ以降の調査においては、本ステップで実施したよりも更に地下深部までを対象としたボーリング調査を実施し、帯水層としての希釈効果が期待できる新たな地質・地質構造の存在の有無を把握する必要がある。また、それらの三次元的な分布範囲、水理特性データに関する情報を取得するとともに水理地質構造モデルに反映させることで、本ステップよりも信頼性の高いダルシー流速分布を算出することが重要である。

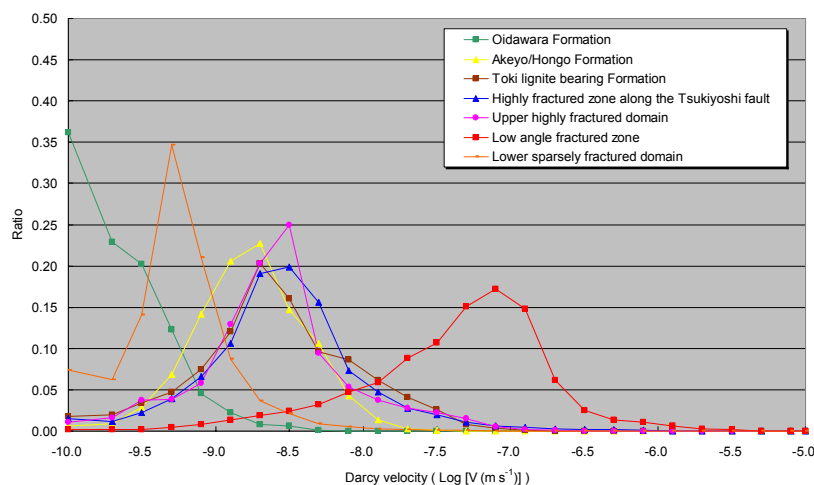


Fig. 3.2.3(5)-1 Darcy velocity distribution

(The vertical axis shows the ratio (cumulative frequency is 1 in each geological formation and domain))

(6)地下空洞周辺の力学・水理状態の把握

1)応力場の把握、岩盤の物理・力学特性の把握

①目標／実施概要

既存・浅層ボーリングを利用した調査・解析・評価では、調査対象領域となる研究所用地及びその周辺に分布する土岐花崗岩の物理・力学特性及び初期応力状態を把握するとともに、岩盤力学モデルを構築することが目標となる。

このため、研究所用地近傍の既存ボーリング孔のボーリングコアを用いた室内物理・力学試験及び初期応力状態を推定するための DSCA (Differential Strain Curve Analysis) 法による室内試験を実施した²²⁾。DH-2 号孔のコアは採取から年数が経過していることから、測定原理上、コア採取後の時間に依存しない DSCA 法を用いた。なお、DSCA 法で得られる初期応力状態は主応力の方向のみであり、掘削影響解析に用いる境界条件としては情報が不足するため、研究坑道掘削に伴う研究坑道周辺岩盤の掘削影響解析は実施していない。

②結果概要／得られた技術的知見

DH-2 号孔のコアを用いた室内試験結果並びに本ステップで更新された地質構造モデル (Fig. 3.2.3(2)-1) を基に、研究所用地周辺の岩盤力学モデルを構築した (Fig. 3.2.3(6)-1)。DH-2 号孔に現れる土岐花崗岩は上部割れ目帯に属しており、ステップ 0 の正馬様用地の岩盤力学モデル (3.2.1(7)1参照) と比べて、岩盤基質部の物理特性としては、見かけ比重は高く、有効空隙率及び弾性波速度は低い結果が得られた。一方、力学特性としては、一軸圧縮強度は小さく、剛性や破壊基準は同程度であった。DSCA 法による室内試験により推定した初期応力状態は、最大主応力方向が N-S から NW-SE 方向であり、この傾向は、ステップ 0 の正馬様用地の岩盤力学モデルと同様であった。ただし、本ステップで得られた初期応力状態は、DSCA 法による主応力の方向のみであり、主応力の大きさについては評価できていない。したがって、主応力の大きさを評価するためには、ボーリング孔を用いた水圧破碎試験などの原位置試験の実施が必要である。さらに、本ステップで把握した応力場及び岩盤の物理・力学特性は、深度 500m までの土岐花崗岩上部割れ目帯のみであり、500m 以深の情報については、ステップ 0 の情報などを参照する必要がある。

次ステップ以降の調査においては、瑞浪超深地層研究所における研究坑道は地下 1,000m まで展開される計画であることから、研究所用地における深度 1,000m までの岩盤力学モデルを構築するためには、深度 1,000m 程度のボーリング孔を用いた調査により応力場及び岩盤の物理・力学特性に関する情報を取得する必要がある。

2)地下空洞への地下水流入量の把握

①目標／実施概要

既存・浅層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価では、更新した水理地質構造モデル¹⁴⁾ (3.2.3(3)参照) を用いて研究坑道への地下水流入量を推定することを目的とした地下水流動解析を実施した²³⁾。

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²⁴⁾ 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。要素分割の際には、研究坑道周辺の水理地質構造を詳細にモデル化するために、研究坑道周辺領域の要素サイズをその外側より詳細にした「入れ子モデル (Nested Model)」を採用した。また、主立坑、換気立坑、水平坑道、及び予備ステージ (Fig. 1.1.2-2) についても要素分割の際にモデルに取込むとともに、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。また、研究坑道壁面は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により完全大気開放条件と不透水境界の間であると考

えられる。したがって、坑道壁面からの地下水流入量に対するこれらの影響を考慮するために坑道壁面の境界条件を完全大気開放条件と不透水境界の中間に設定するために「圧力開放係数： α 」の概念を導入した。坑道壁面の境界は、掘削前の初期水圧と大気圧の差にこの α を掛けることによって求めた水圧を設定した。

地下水流動解析においては、この圧力開放係数の違い及び水理地質構造モデルの不確実性（モデル化する不連続構造の数の違い）に着目した感度解析を実施した（Table 3.2.3(6)-1）。ここで、Model A は、入れ子モデル内側領域にサイトスケール領域の水理地質構造（3.2.3(3)参照）をモデル化するとともに入れ子モデルの外側領域において月吉断層をモデル化したものである。Model B は、Model A の入れ子モデル外側領域においてリニアメントから月吉断層と同様の規模を有すると考えられる推定断層を追加したモデルである。さらに、Model C は、Model B の花崗岩部における透水性割れ目分布に伴う透水不均質性を確率論的にモデル化したものである。

②結果概要／得られた技術的知見

不均質性の異なる水理地質構造モデル（Model A, Model B, Model C）を用いた地下水流動解析結果による研究坑道への地下水流入量は、圧力開放係数が同じ場合は、異なるモデルでも類似した結果となった（Fig. 3.2.3(6)-2）。一方、圧力開放係数が異なる場合の地下水流入量は、同じモデルでも大きく異なることが明らかとなった。

また、研究坑道への地下水流入量については、上部割れ目帯はほかの水理地質構造と比較して透水性が高いことから、上部割れ目帯が分布する範囲（深度 200～500m 程度）からの地下水流入量が全体の 60～80%を示している。なお、中間ステージ以浅での地下水流入量が総地下水流入量に占める割合は圧力開放係数が小さいほど多い結果となった。さらに、圧力開放係数が小さい場合は、中間ステージ以深でも地下水流入量が増加するのに対して、圧力開放係数が大きいケースでの地下水流入量は、中間ステージ掘削完了直後に最大値（約 4,000 m³ day⁻¹）を示した後、徐々に減少するといった結果となった。以上のことから、覆工コンクリートや排水マットなどの人工構造物を含むスキン効果などの影響を受ける坑道近傍の水理特性が地下水流入量に与える影響が非常に大きいことが明らかになった。

また、研究坑道への地下水の流入に伴う周辺での水圧低下領域は、圧力開放係数による違いはあるものの、すべてのモデルにおいて、透水異方性を有していると仮定した研究所用地周辺に分布する断層の影響を強く受けていることが示唆された。水圧低下の範囲や量は、地下水の流入量に影響を及ぼすものであることから、研究所用地周辺に分布する断層の空間分布や水理特性に関する情報を取得することが重要と考えられる。

本ステップで取得した情報に基づき更新した水理地質構造モデルを用いた地下水流動解析を行うことによって、ステップ 0 と比較して透水性構造や遮水性構造などの水理地質構造の影響を考慮したうえで、研究坑道への地下水流入量が推定できた。また、研究坑道への地下水流入量に影響を与える坑道近傍の水理特性など、第 2 段階における調査研究の重要要素を抽出することができた。さらに、研究坑道への地下水流入量の多い深度区間を抽出することができた。

以上のことから、不均質性を有する水理地質構造モデルに基づき、地下空洞への地下水流入量を推定する際には、三次元地下水流動解析を実施することによって水理地質構造の不均質性が研究坑道への地下水流入量に与える影響を評価することができる。しかしながら、三次元地下水流動解析は、理論式による推定と比較してメッシュ分割や計算に多大な時間を要することから、地下施設の設計・施工の観点で求められる予測精度によって両手法を使い分けることが有効である。

本ステップでは、研究坑道に出現すると推定された断層の花崗岩中での地質学的特性及び水理特性や、下部割れ目低密度帯などの水理特性に関するデータが不足していることから、次ステップ以降の調査においては、これらの情報を取得するための調査が重要である。また、上部割れ目

帯からの地下水流入量が多いことが推定されたことから、この推定精度を向上させるためには上部割れ目帯の水理特性やその連続性を把握することも重要な課題と考えられる。

3)不連続構造などの有無の把握

①目標／実施概要

既存・浅層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価では、岩盤の物理・力学特性に影響を与えると考えられる断層や割れ目帯などの不連続構造の研究坑道への出現に関する情報を取得することを目的に、3.2.3(2)で構築した地質構造モデルを基に、研究坑道掘削予定地点における不連続構造の出現位置を予測した⁶⁾。

②結果概要／得られた技術的知見

3.2.3(2)で構築した地質構造モデルを用いて、研究坑道掘削予定地点における不連続構造の出現位置を予測した (Fig. 3.2.3(6)-3)。その結果、ステップ1で抽出された北北西走向の断層 (Fig. 3.2.2(5)-1 中の IF_SB0_005) の地下での分布状況を確認し、その情報を更新するとともに (Fig. 3.2.3(6)-3 中の IF_SB1_004)、本ステップで新たに抽出した南北走向及び東西走向の断層 (IF_SB1_001 及び IF_SB1_002,003,005) について、これらの断層が研究坑道掘削予定地点において出現する可能性があることを推定した。また、このうちの多くは高角度の傾斜を有していると推定した。

本ステップでは、特に、地質学的調査とマルチオフセット VSP 探査とを組み合わせることにより、地下における断層分布に関する情報が取得され、ステップ1に比べて、花崗岩浅部まで(深度500m以浅)の断層の分布を精度良く把握できたと考えられる。

次ステップ以降の課題としては、本ステップで研究坑道に出現すると推定された断層の花崗岩深部での分布状況や地質学的特性の把握が挙げられる。

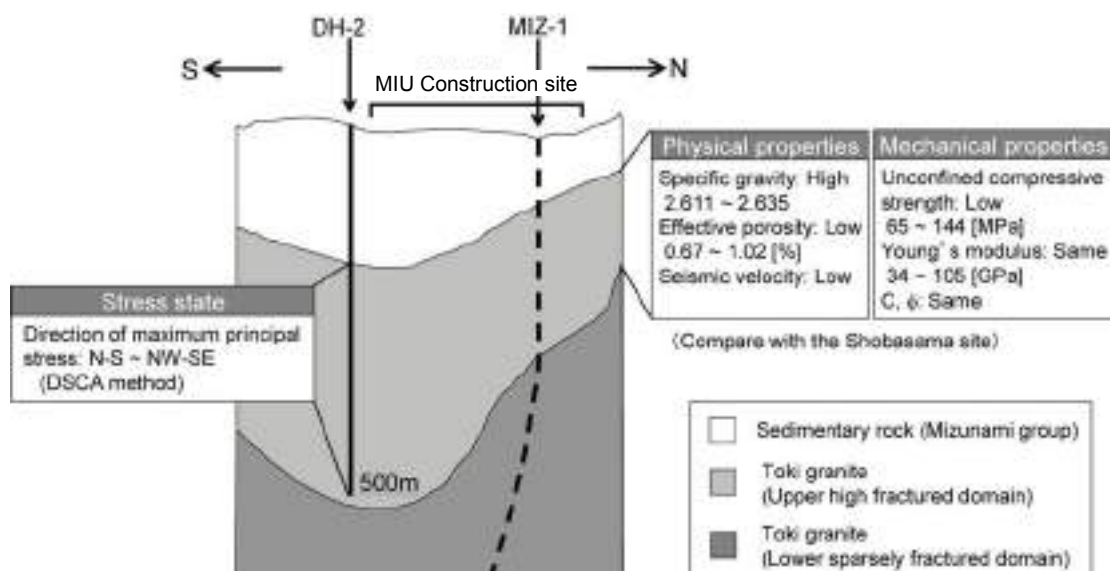
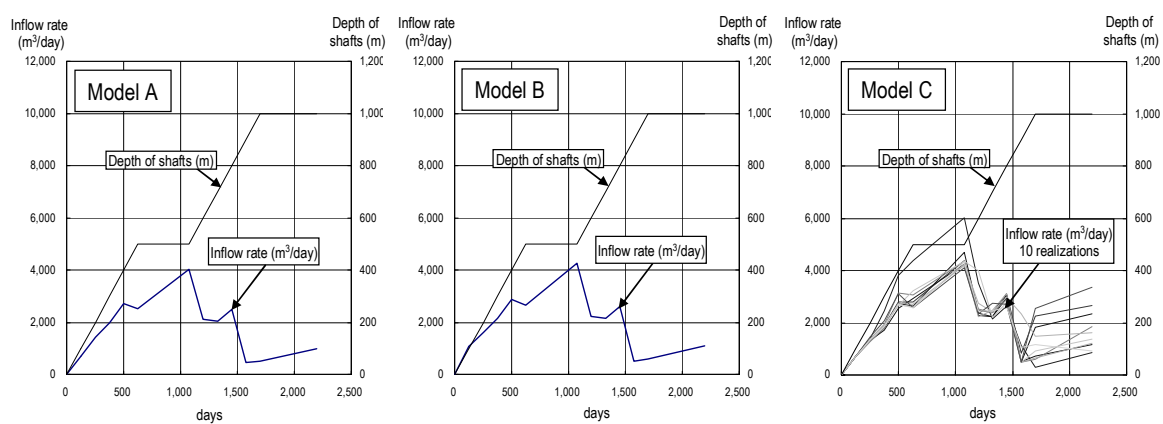


Fig. 3.2.3(6)-1 Rock mechanical model in and around the MIU construction site

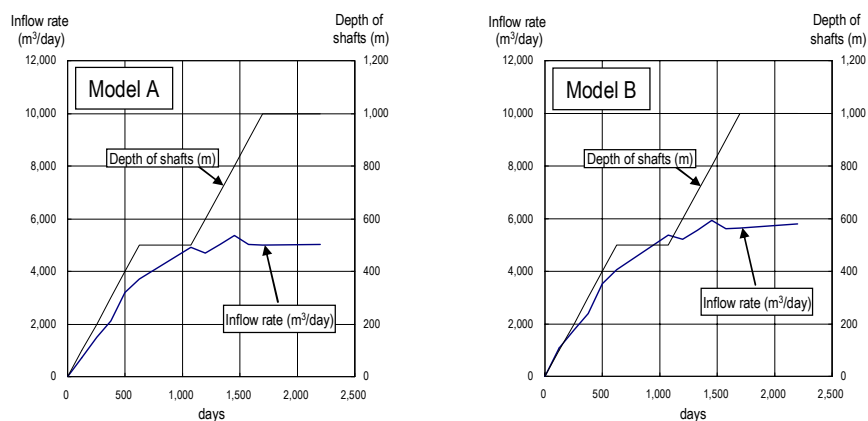
Table 3.2.3(6)-1 Groundwater flow simulations

Case	Modeled fault/WCF	Pressure relief factor
Model A	Tsukiyoshi Fault + Faults around MIU Construction Site	$\alpha = 0.2, 0.8$
Model B	Model A + Lineaments with length more than 3km	$\alpha = 0.2, 0.8$
Model C	Model B + WCF (Modeled using Equivalent Heterogeneous Porous medium) ; 10 realizations	$\alpha = 0.8$

WCF: Water Conducting Feature



(a) Pressure relief factor: 0.8



(b) Pressure relief factor: 0.2

Fig. 3.2.3(6)-2 Inflow rate into MIU

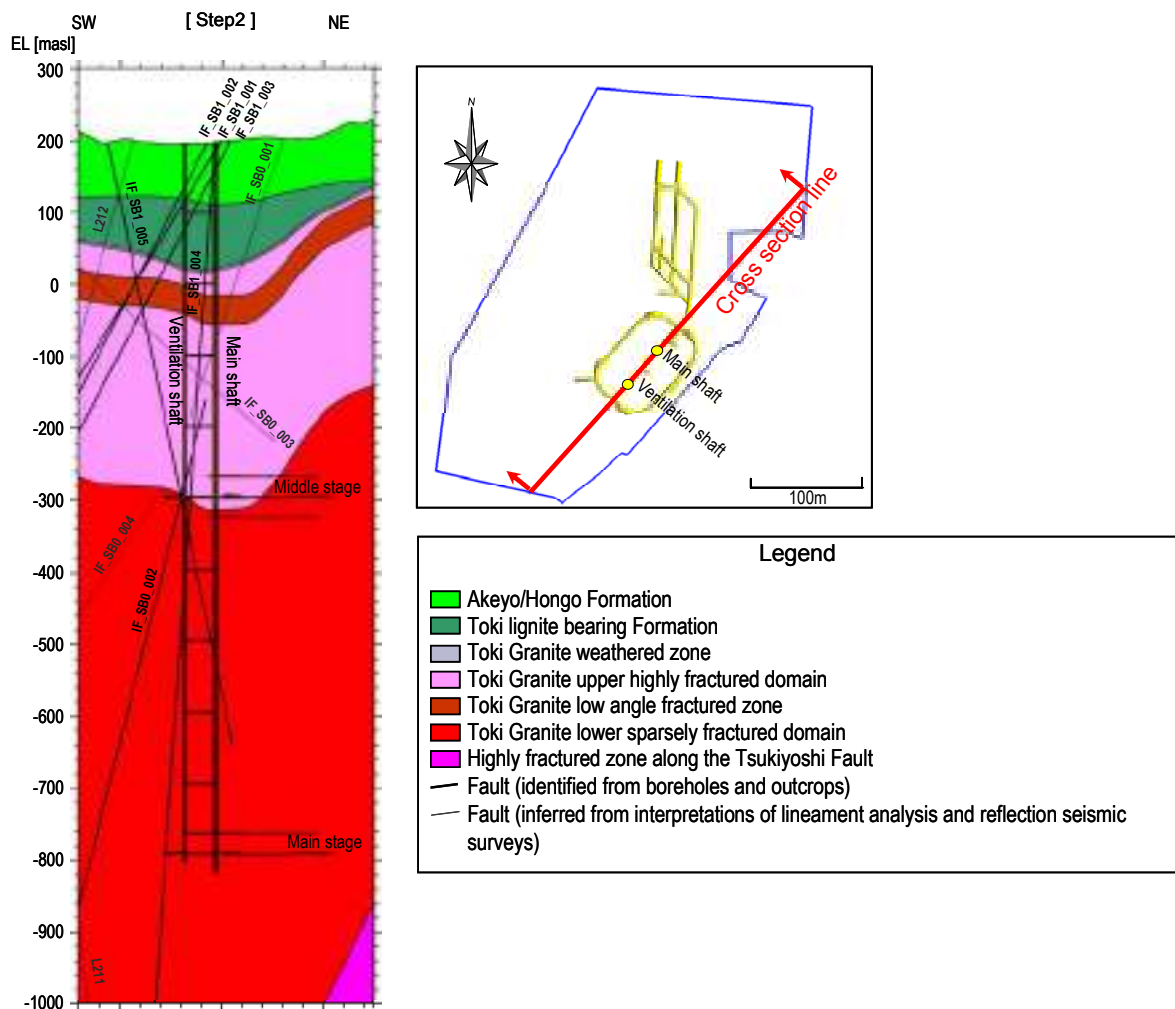


Fig. 3.2.3(6)-3 Predicted geological structures around the MIU facility (Step2)

(7)地下の温度環境の把握

①目標／実施概要

既存・浅層ボーリングを利用した調査・解析・評価では、調査対象領域となる研究所用地及びその周辺に分布する土岐花崗岩の地下の温度環境データを取得することが目標となる。

ステップ2では、研究所用地近傍の既存ボーリング孔において地温勾配を把握するための温度検層を実施し、地下の温度環境特性を把握した。

②結果概要／得られた技術的知見

温度検層の結果、DH-2号孔の深度500mまでの地温勾配は $2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ であり、ローカールスケール領域における地温勾配と一致する結果となった (Fig3.2.3(7)-1)²⁵⁾。このことから、サイト／ブロックスケール規模での地下の温度環境 (地温勾配) は、火山地帯のように局所的な熱源が無い限り、ローカールスケール程度の範囲で1本のボーリング孔での温度検層により把握可能であることが示された。

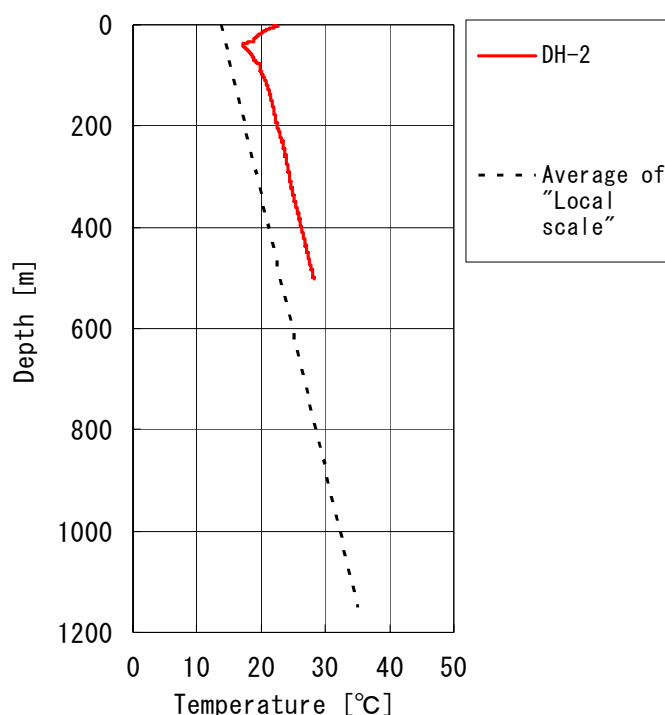


Fig. 3.2.3(7)-1 Result of temperature logging (DH-2)

(8)既存・浅層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価のまとめ及び次ステップ以降の課題

既存・浅層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価では、Table 3.1-1に示すように「物質移動の遅延効果の把握」及び「地下空洞周辺の力学・水理状態の把握／EDZの分布／物理・力学特性の把握」を除く個別目標と課題を対象に、地表から地下浅部の地質学的特性や水理特性、地下水の地球化学特性を把握することを目的として、4本の浅層ボーリング孔における調査を実施するとともに、広域地下水流動研究で実施した既存ボーリング孔を利用した調査結果を利用した。

また、これらの調査結果に基づき、ステップ1までに構築したサイトスケールにおける地質構造モデル、水理地質構造モデル、地球化学モデル、並びに岩盤力学モデルを更新した。さらに、これらのモデルに基づき地下水流動解析などを実施し、動水勾配分布や地下空洞周辺の水理状態などを予測した。

これらの調査やモデル化・解析を通じて、次ステップ以降の調査・解析における重要要素を抽出・特定した。具体的には、以下のとおり。

- ・ サイトスケール領域における地下水流動に大きな影響を及ぼすことが推定された北北西系、北西系、東西系断層、及び研究坑道に出現すると推定された断層の花崗岩中での地質学的特性及び水理特性の把握
- ・ サイトスケール領域における花崗岩の地質学的特性及び水理特性の把握
- ・ サイトスケール領域における花崗岩中での地下水の地球化学特性に関する情報の取得
- ・ ボーリング孔を利用した調査による応力場及び岩盤の物理・力学特性に関する情報の取得

(9)処分事業及び安全規制のための技術基盤

①地質構造の三次元分布の把握

本ステップにおいて適用した一連の調査の組合せは、ステップ1により把握した地質・地質構造要素の推定精度を確認・向上させるうえで有効であるほか、ステップ1では抽出が困難であっ

た花崗岩中の断層や上部割れ目帯、及び水みちとして機能する構造の分布特性を把握することを可能とする。特にマルチオフセット VSP 探査は、反射法弾性波探査では捉えることが困難な花崗岩深部における断層分布を可視化するうえで有効である。また、断層の分布特性をより詳細に把握するためには、マルチオフセット VSP 探査の測線を異なる方向に複数本展開することにより、解析範囲を三次元的に拡張することなども有効である²⁶⁾と考えられる。

②地下水の流動特性の把握

ボーリング調査において単孔式水理試験及び電気伝導度検層を適宜組合せて、岩盤中の透水性分布を把握することが有効である。単孔式水理試験の実施に当たっては、地質学的な調査・解析から推定された地質構造要素の分布や流体検層から把握されるボーリング孔内の地下水の流入・流出箇所の分布に基づく実施計画（試験区間の設定、試験方法の選定など）の立案が重要である。また、調査コスト、調査期間などの制約によって十分な単孔式水理試験が実施できない場合は、電気伝導度検層に基づく数値解析結果で水理試験を補間することが可能である。

調査の進展ごとに、地質／水理地質構造モデルの更新及び地下水流動解析を実施し同一の性能指標を用いて繰り返し評価を行うことによって、特定の地質・地質構造が地下水の流動特性に及ぼす影響の評価、及び各ステップにおいて動水勾配分布に大きな影響を及ぼす地質・地質構造の抽出が可能であり、その結果に基づき、次段階以降の調査方針・計画を随時見直すことができる。この調査・解析・評価の繰り返しは、迅速に実施する必要があるため、地質／水理地質構造モデルの構築や地下水流動解析が効率的に実施できるシステムを構築しておくことが有効である。また、ボーリング調査や地下水流動解析結果に基づき地下水流動特性の評価を行うに当たっては、地下水の地球化学特性に関する情報を積極的に取り入れることが有効である。

ボーリング孔を利用した長期地下水モニタリングを実施し間隙水圧を観測することで、深度方向の概括的な動水勾配の分布傾向の把握や水理境界などの水理地質構造の推定ができるとともに、取得した実測値と地下水流動解析結果との定量的な比較が可能となる。そのため、ボーリング調査を実施するに当たっては、サイトスケール領域における概括的な動水勾配分布の情報を効果的に取得するために、①水理地質構造ごとの長期地下水モニタリングの実施、②母岩と透水性のコントラストが大きい断層などの不連続構造の水理特性の把握、③その不連続構造の上流側、下流側の水圧分布の把握、④地下水流動の駆動力となり得る地形の起伏の影響の把握などを目的としたボーリング調査計画の立案が必要である。

③地下水の地球化学特性の把握

本ステップでは、透水性の低い水理地質構造が地下水流動状態のみでなく地下水の地球化学特性の分布にも影響を与える可能性があることが示された。本ステップのように、初めてボーリング調査を行う際には、まず断層などの地質構造や、透水性の異なる地層の分布やその広がりを評価することが必要であり、これを踏まえて追加ボーリング調査を行い、地下水水質の分布などについて調査を進める手順が有効である。

④希釈効果の把握

サイトスケール領域における信頼性の高い希釈効果を把握するためには、ボーリング調査を実施し、地下の地質・地質構造の分布や水理特性に関する情報を直接的に取得することが有効である。

⑤応力場の把握、岩盤の物理・力学特性の把握

応力場や岩盤の物理・力学特性に関する情報は、地下施設の設計の基礎となるばかりでなく、EDZ の分布／物理・力学特性を評価するための坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の掘削影響解析を行う際に必要となる解析入力条件を設定するうえでも重要となる。

ボーリングコアを用いた室内物理・力学試験や、DSCA 法などの室内試験を複数の深度で実施

し、これらのデータを解釈することにより、岩盤の物理・力学特性や初期応力状態の深度分布を把握することが可能となる。処分事業においては、利用可能な既存ボーリング孔などのボーリングコアがある場合には、このコアを用いた室内試験を行うことにより、初期応力状態や岩盤の物理・力学特性の深度分布を把握することが可能である。

⑥地下空洞への地下水流入量の把握

不均質性を有する水理地質構造を考慮することによって地下空洞への地下水流入量を精度良く推定するとともに、地下水流入量の推定に対する影響因子を抽出するうえでは、地下空洞を建設する地点における水理特性を把握すること、及び水理地質構造モデルに基づく三次元地下水流動解析を行うことが有効である。特に、三次元地下水流動解析を行ううえでは地下空洞への地下水流入量に与える影響の大きい不確実性要因に着目した感度解析を行うことが必要である。しかしながら、三次元地下水流動解析は、理論式による推定と比較してメッシュ分割や計算に多大な時間を要することから、地下施設の設計・施工の観点で求められる予測精度によって両手法を使い分けることが有効である。

⑦不連続構造などの有無の把握

本ステップにおいて適用した一連の調査の組合せは、ステップ1により把握した地質・地質構造要素の推定精度を確認・向上させるうえで有効であるほか、ステップ1では抽出が困難であった花崗岩中の断層及び水みちとして機能する構造の分布特性を把握することを可能とする。特にマルチオフセット VSP 探査は、反射法弾性波探査では捉えることが困難な花崗岩深部における断層分布を可視化するうえで有効である。また、断層の分布特性をより精細に把握するためには、マルチオフセット VSP 探査の測線を異なる方向に複数本展開することにより、解析範囲を三次元的に拡張することなども有効である²⁶⁾と考えられる。

⑧地下の温度環境の把握

地下の温度環境に関する情報は、地下施設の設計や施工環境などの把握のための基礎となるものである。ボーリング孔を用いた温度検層により、地温勾配の情報を取得することができる。処分事業では、利用可能な既存ボーリング孔がある場合には、このボーリング孔を用いた温度検層を行うことにより、地下の温度環境を把握することが可能である。

参考文献

- 1) Kumazaki, N., Ikeda, K., Goto, J., Mukai, K., Iwatsuki, T. and Furue, R.: “Synthesis of the Shallow Borehole Investigations at the MIU Construction Site”, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN7400 2003-005 (2003).
- 2) 天野健治, 岩月輝希, 上原大二郎, 佐々木圭一, 竹内真司, 中間茂雄: “広域地下水流動研究年度報告書 (平成 14 年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN 7400 2003-002 (2003).
- 3) 石井英一, 天野健治, 水野崇, 竹内真司: “亀裂性岩盤中の水みちに認められる特徴—土岐花崗岩を対象とした研究事例—”, 日本応用地質学会中部支部平成 14 年度応用地質学会中部支部研究発表会・講演予稿集, pp.1-4 (2002).
- 4) 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研究開発—平成 14 年度報告—”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 2003-004 (2003).
- 5) 松岡稔幸, 太田久仁雄, 川中卓, 檜原省吾, 土家輝光, 成田憲文: “東濃地域における花崗岩を対象とした地質構造調査への反射法弾性波探査の適用例”, 物理探査学会第 110 回 (平成 16 年度春季) 学術講演会講演論文集, pp.129-132 (2004).
- 6) 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)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400

2005-007 (2005).

- 7) 太田久仁雄, 佐藤稔紀, 竹内真司, 岩月輝希, 天野健治, 三枝博光, 松岡稔幸, 尾上博則: “東濃地域における地上からの地質環境の調査・評価技術”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-023 (2005).
- 8) Tsang, C.-F., Hufschmied, P. and Hale, F.V.: “Determination of Fracture Inflow parameters with a Borehole Fluid Conductivity Logging Method”, Water Resources Research, vol.26, No.4, pp.561-578 (1990).
- 9) Tsang, C.-F. and Doughty, C.: “Multirate flowing fluid electric conductivity logging method”, Water Resources Research, vol.39, No.12, pp.1354-1353 (2003).
- 10) 太田久仁雄, 天野健治, 熊崎直樹, 松岡稔幸, 竹内真司, 升元一彦, 藪内聡, 三枝博光, 稲葉薫, 向井圭, 片岡達彦, 岩月輝希, 佐藤稔紀, 中間茂雄, 今津雅紀, 玉井猛, 見掛信一郎, 大澤英昭, 川瀬啓一, 小出馨: “超深地層研究所計画年度報告書(平成14年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2003-006 (2003).
- 11) 藤田有二: “超深地層研究所計画における間隙水圧観測ー(2004年7月～9月)調査速報 IR05-02ー”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7450 2004-004 (2005).
- 12) 藤田有二: “広域地下水流動研究における間隙水圧観測ー(2004年7月～9月)調査速報ー”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7450 2005-001 (2005).
- 13) 藤田有二: “超深地層研究所計画における間隙水圧長期観測 2003年4月～2004年3月”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7450 2005-002 (2005).
- 14) 尾上博則, 三枝博光, 遠藤令誕: “繰り返しアプローチに基づくサイトスケールの水理地質構造のモデル化・地下水流動解析(ステップ2)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-006 (2005).
- 15) 尾上博則, 三枝博光, 澤田淳: “断層の水理特性に着目した地下水流動解析ー東濃地域を例としてー”, 第40回地盤工学研究発表会論文集, p.1291 (2005).
- 16) 尾上博則, 三枝博光: “ローカルスケールにおける地下水流動解析ーサイトスケールにおけるステップ2の地下水流動解析の境界条件の設定ー”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-003 (2005).
- 17) 竹内真司, 下茂道人, 城まゆみ, Chin-Fu Tsang: “電気伝導度検層による深部花崗岩中の水みちの抽出と水理特性の評価”, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム論文講演集, pp.451-456 (2004).
- 18) Takeuchi, S., Shimo, M., Doughty, C. and Tsang, C.-F.: “Identification of the Water-Conducting Features and Evaluation of Hydraulic parameters using Fluid Electric Conductivity Logging”, Proceedings of the Second International Symposium on Dynamics of Fluids in Fractured Rock, pp.349-354 (2004).
- 19) 古江良治, 岩月輝希, 水野崇: “MSB-2号孔・MSB-4号孔における地下水水質観測(2003年1月～2004年3月)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7450 2004-002 (2005).
- 20) 彌榮英樹, 岩月輝希, 古江良治, 水野崇: “超深地層研究所計画(第1段階)における地下水の地球化学特性調査”, サイクル機構技報, No.23, p.41-50 (2004).
- 21) Iwatsuki, T., Furue, R., Mie, H., Ioka, S. and Mizuno, T.: “Hydrochemical baseline condition of groundwater at the Mizunami underground research laboratory (MIU)”, Applied Geochemistry, 20, p.2283-2302 (2005).
- 22) 中間茂雄, 中島貴弘, 青木俊朗, 佐藤稔紀: “DH-2号孔の岩芯を用いた力学特性調査結果”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2003-003, (2003).

- 23) 下茂道人, 文村賢一, 熊本創: “超深地層研究所計画における水理地質構造のモデル化および地下水流動解析”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7440 2005-077 (2004).
- 24) 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, pp.257-262 (1996).
- 25) 核燃料サイクル開発機構: “高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成 17 年取りまとめ— 一分冊 1 深地層の科学的研究—”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 2005-014 (2005).
- 26) Omnes, G. and Clough, P.: "Data acquisition with a 12-level 48-channel borehole seismic system", The Leading Edge, Vol.17, pp.955-959 (1998).

3.2.4 深層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価（ステップ3）

(1) 深層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価の目的及び実施概要

深層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価においては、ステップ0から2で抽出された課題（3.2.1(9)、3.2.2(6)及び3.2.3(8)参照）のうち、地表から地下深部の地質・地質構造や水理特性、地下水の地球化学特性、岩盤の力学特性などを把握することを目的として、深層ボーリング調査を実施した（3.3.3 及び 3.3.4 参照）。さらに、本ステップでは、超深地層研究所計画における深層ボーリング（MIZ-1 号孔）調査と同時期に実施した広域地下水流動研究におけるボーリング（DH-15 号孔）調査の結果も利用した。ステップ3では、これらの調査で必要なデータが取得できない個別目標と課題を除き Table 3.1-1 に示す個別目標と課題を対象とした調査研究を実施した。

MIZ-1 ボーリング調査では、ステップ2（3.2.3 参照）までに重要要素として抽出された研究用地を通過する北北西走向の断層の花崗岩中での水理特性を把握するとともに、上部割れ目帯などの地質構造の空間分布の確認及び水理特性を把握することを目的とした^{1),2)}。特に透水構造とその分布を確認すること、並びに地下水水質の三次元分布及び岩盤の物理・力学特性を詳細に把握することに重点を置いて、ボーリング孔における調査研究を包括的に実施した。また、研究坑道掘削に伴う間隙水圧の変化を把握するための長期地下水モニタリングに供することも目的の一つである。これらの目的及び予算、工程に加えて、ボーリング孔が研究用地を越境しないこと、及び研究坑道掘削のための地上設備の設置工事の妨げにならないことといった空間的制約条件を総合的に考慮し、ボーリング孔のレイアウトや深度を決定した（Fig. 3.2.4(1)-1；付録1 参照）。具体的には、鉛直掘削の後、調査対象の断層に向かって方位と傾斜角をコントロールしながら掘削するコントロールボーリングを採用した。ボーリング孔の掘削長は、できる限り地下深部の情報を取得するために、調査対象の断層を捕捉するために必要な方位と傾斜角を保ちつつ、かつ、用地境界を越えない範囲で最大限掘削可能な深度である1,350mと計画した。

MIZ-1 ボーリング調査では、ボーリングコアを用いた地質学的調査、孔壁画像調査、物理検層（3.3.5 参照）、流体検層（3.3.6 参照）、水理試験（3.3.7 参照）、地下水の採水・分析（3.3.8 参照）、初期応力測定（3.3.9 参照）などを実施した。また、これらのボーリング調査における逸水や孔間水理試験などに伴う水圧応答を既存・浅層ボーリングに設置した間隙水圧モニタリング装置によって観測し、水理地質構造の連続性の把握を試みた。さらに、調査終了後、研究坑道掘削に伴う間隙水圧の変化を把握するために、間隙水圧モニタリング装置を設置し、長期地下水モニタリングを開始した。

DH-15 ボーリング調査では、ステップ2までに重要要素として抽出された研究用地を通過する東西走向の断層の花崗岩中での水理特性を把握するとともに、この断層が地下水の地球化学特性に及ぼす影響を把握することが目的とされた。また、研究坑道掘削に伴う間隙水圧の変化を把握するための長期地下水モニタリングを開始することも目的の一つとされた³⁾。これらの目的及び予算や工程を総合的に考慮し、ボーリング孔の位置やレイアウトが決定された（付録1 参照）。このボーリングは、鉛直掘削として掘削長は1,000mと計画された。DH-15 ボーリング調査においてもMIZ-1 ボーリング調査と同様の項目の調査が実施された。さらに、調査終了後、研究坑道掘削に伴う間隙水圧の変化を把握するための間隙水圧モニタリング装置が設置され、長期地下水モニタリングが開始された。

なお、付録3にボーリング孔を利用した調査の実施概要、また、付録5、7にボーリング孔を利用した調査の結果概要をまとめて示す。

これらの調査結果に基づき、ステップ2までに構築したサイトスケールにおける地質構造モデル、水理地質構造モデル、地球化学モデル並びにブロックスケールの岩盤力学モデルを更新した。

さらに、これらのモデルに基づき地下水流動解析や応力・掘削解析などを実施し、動水勾配分布や研究坑道周辺の力学・水理状態などを予測した。これらのモデル化・解析においても、モデルや解析結果などの分野間の整合性などを確認し、調査研究結果の信頼性の向上を図るとともに、不確実性の幅の変化や解析結果に与える影響の大きな因子について評価した。また、地下水流動に影響を与えている水理地質構造の水理学的連続性などを、次ステップ以降の調査・解析における重要要素として抽出・特定した。

なお、本ステップでの調査・解析・評価を通じた経験に基づき構築した統合化データフローを付録4に示すとともに、各個別目標と課題に向けた取組の詳細は、3.2.4(2)～3.2.4(8)にまとめた。また、3.2.4(9)に本ステップでの調査・解析・評価に基づき抽出・特定した次ステップ以降の調査・解析における重要要素をまとめた。さらに、3.2.4(10)において、本ステップでの調査・解析・評価を通じて整理された処分事業および安全規制のための基盤技術をまとめた。

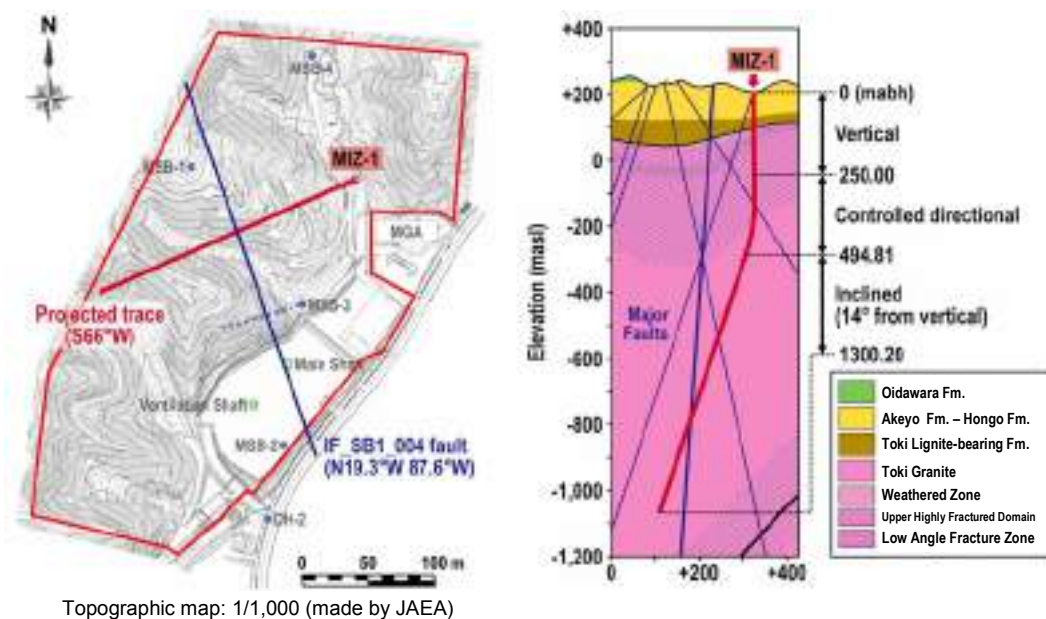


Fig. 3.2.4(1)-1 Location and layout of the planned MIZ-1 borehole¹⁾

(2)地質構造の三次元分布の把握

①目標／実施概要

深層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価では、特に、ステップ2まででは調査されていない花崗岩深部（具体的に、深度500m以深）における地質構造の三次元分布を把握することを目的として、深層ボーリング調査（MIZ-1号孔及びローカルスケール領域で掘削したDH-15号孔）において、コア観察、孔壁画像調査、物理検層、流体検層、水理試験などを実施した^{3),4),5),6),7),8)}。

ここで得られた地質学的情報に基づき、ステップ2までに用いた堆積岩の層厚や月吉チャンネル

(3.2.1(2)参照)の分布と土岐花崗岩中の構造区分（具体的に、風化帯、上部割れ目帯及び低角度傾斜を有する割れ目の集中帯）との相関性⁹⁾の精度などを確認し、その情報を更新するとともに、新たに抽出された不連続構造を基にサイトスケールの不連続構造の空間分布を推定して地質構造モデルを更新した¹⁰⁾。また、推定した不連続構造の分布と流体検層によって把握した地下水の流出入箇所分布並びに水理試験から求めた透水量係数などの水理特性に関する情報とを合わせて解釈し、水みちの分布を推定するとともに^{3),5),6),7),8)}、さらに、長期地下水モニタリング装置を設置した浅層ボーリング孔での掘削応答モニタリングにより、不連続構造の遮水性や水理学的連続性

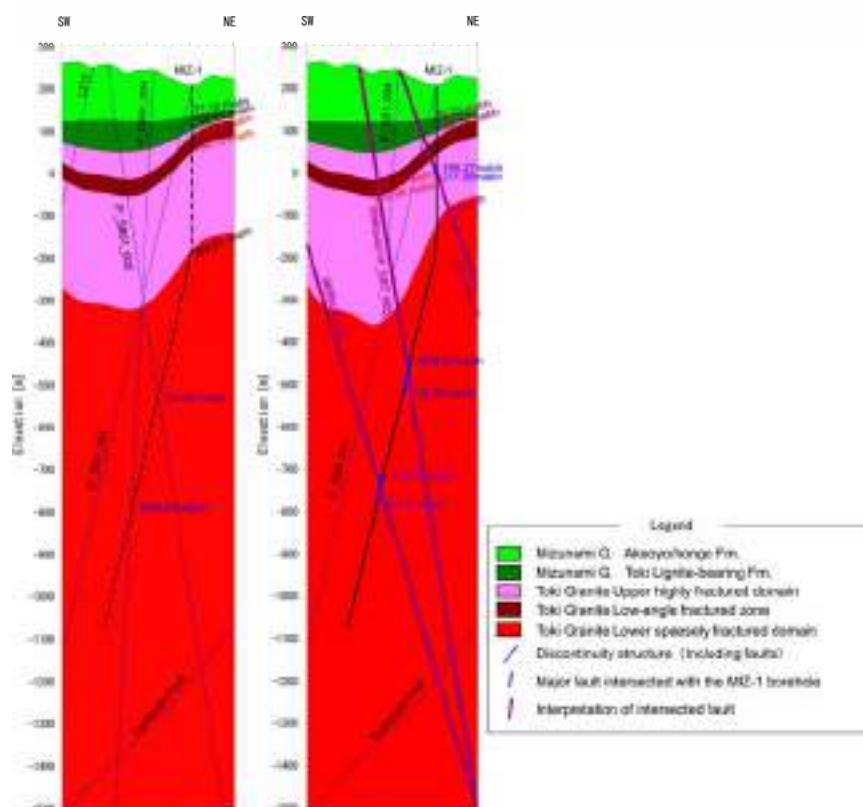
に関する情報を取得した^{5),6),7)}。

②結果概要／得られた技術的知見

コア観察、孔壁画像調査や物理検層などを組合せた地質学的調査の実施により、花崗岩の上部割れ目帯の分布深度を確認するとともに、更にそれ以深に認められる下部割れ目低密度帯や主に北西～北北西走向及び東西走向の断層の性状と分布を把握することができた (Fig. 3.2.4(2)-1)。断層のうち、緑泥石や粘土鉱物により特徴付けられる強い変質を伴い、研究所用地を横断すると推定される規模の大きな断層が 3 条 (Fig. 3.2.4(2)-1 の青太線で示した断層) 確認された⁹⁾。これらの情報に基づき、地質構造モデルを更新し (Fig. 3.2.4(2)-2：更新した地表地質図 (左) と地質構造モデル (右))¹⁰⁾、ステップ 2 までに構築した地質構造モデルに、花崗岩深部の構造区分 (上部割れ目帯、低角度傾斜を有する割れ目の集中帯及び下部割れ目低密度帯) 並びに花崗岩深部に分布する断層の情報を追加することにより、地質構造モデルの理解度の向上を図ることができた。なお、ステップ 1 及び 2 で確認された北北西走向の断層 (Fig. 3.2.4(2)-1 の IF_SB01_004) は、本ボーリング孔では確認されず、研究所用地を横断する規模を有すると推定される断層の一つにより変位したものと解釈された。

電気伝導度検層により、花崗岩中における地下水の流出入箇所 (透水量係数 $>10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) の分布を精度良く把握するとともに、地質学的調査及び水理試験と組合せることにより、水みちとして重要な不連続構造の分布とその水理特性を把握することができた (Fig. 3.2.4(2)-3)^{3),5),6),7),8)}。また、ボーリング孔掘削中にその周辺のボーリング孔で観測される水圧変動データに着目し¹¹⁾、それらのデータと推定した不連続構造の空間分布を比較することにより、不連続構造が有する遮水性や水理学的連続性を把握できた^{4),5),6),7)}ことから、掘削応答モニタリングは不連続構造の分布や水理学的連続性の評価に有効な調査手法であると考えられる。

次ステップ以降の課題としては、本ステップで解釈された断層の空間的な連続性の把握が挙げられ、特に研究坑道に近傍に分布している南北～北北西走向並びに東西走向を有する断層の分布位置を詳細に把握することが重要である。



Left : Predicted geological intersection of the MIZ-1 borehole (Based on step2)
 Right: Actual geological intersection of the MIZ-1 borehole (Based on step3)
 * Depth[mab] shows the predicted/actual geological intersection of the MIZ-1 borehole

Fig. 3.2.4(2)-1 Result of MIZ-1 borehole investigations¹⁰⁾

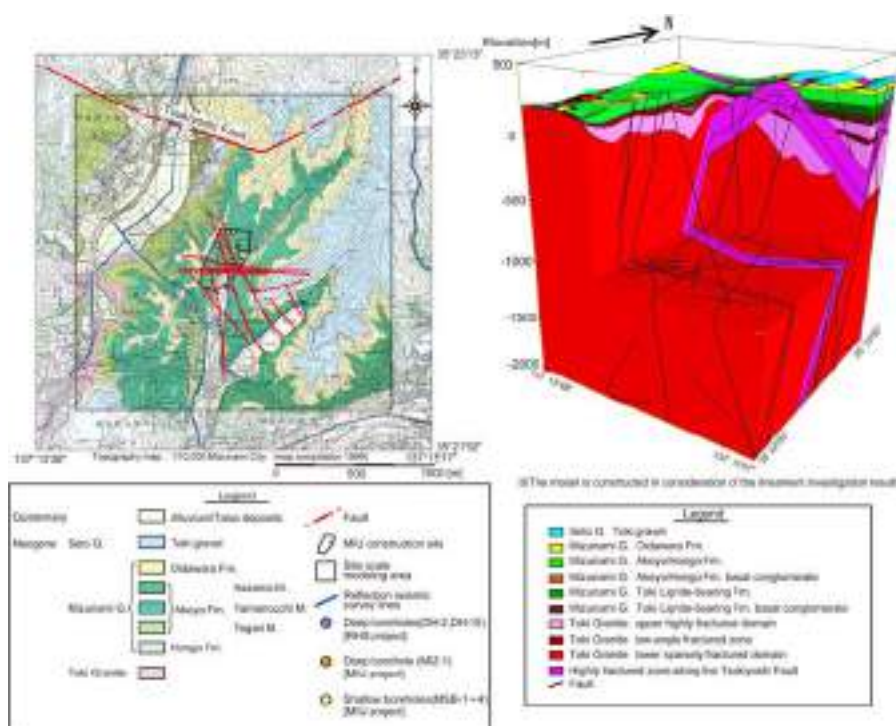


Fig. 3.2.4(2)-2 Geological map and geological model revised using deep borehole investigation phase data¹⁰⁾

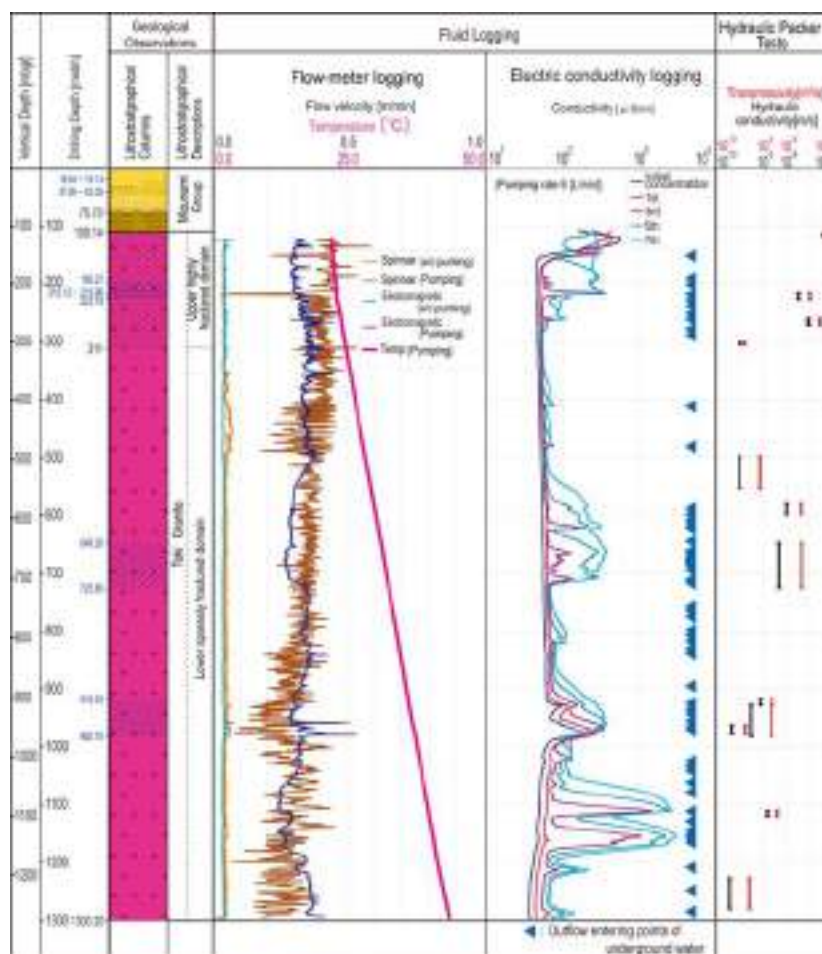


Fig. 3.2.4(2)-3 Result of FEC logging and hydraulic tests in the MIZ-1 borehole

(3)地下水の流動特性の把握

①目標／実施概要

深層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価では、土岐花崗岩を対象とした深層ボーリング調査によって直接的に水理特性データを取得し、土岐花崗岩中の地下水の流動特性を把握する必要がある。また、深層ボーリング調査を実施するに当たっては、これまでのステップにおいて重要要素として抽出・特定した主要な断層の水理特性を把握することを目的の一つとした。瑞浪層群、土岐花崗岩及び不連続構造の水理特性に関する情報を取得するために、掘削した深層ボーリング孔において単孔式水理試験、流体検層を実施した^{3),5),7),12)}。さらに、ステップ2で長期地下水モニタリング装置を設置した浅層ボーリング孔での掘削応答モニタリングを実施し、深層ボーリング調査に伴い発生する間隙水圧の変化を観測することで、岩盤中の水理特性の連続性や水理境界を把握した^{13),14),15)}。

各調査によって得られた地質・地質構造の水理特性を、本ステップで更新された三次元的な地質構造モデル(3.2.4(2)参照)に加えることにより水理地質構造モデルを更新した¹⁶⁾。水理地質構造として考慮する断層のモデル化に当たっては、ステップ2と同様の考え方で断層のトレース長に基づいたスクリーニングを行うとともに、掘削応答モニタリングから推定されるボーリング孔間の水理特性の連続性に基づき、断層の透水異方性の有無を推定した¹⁶⁾。さらに、水理地質構造モデルを用いて地下水流動解析を実施し、ボーリング孔における長期地下水モニタリングから得られる全水頭分布を用いた水理地質構造モデルのキャリブレーションを行うとともに、断層の

透水異方性に着目した感度解析を実施した¹⁶⁾。なお、本ステップで得られた調査データをローカルスケール領域の水理地質構造のモデル化及び地下水流動解析に反映させ、サイトスケール領域の境界条件の更新が行われた¹⁷⁾。上記の地質構造／水理地質構造モデルの構築及び地下水流動解析は GEOMASS システム (3.3.10 参照) を用いて実施した。

②結果概要／得られた技術的知見

Fig. 3.2.4(3)-1 に、本ステップで更新した水理地質構造モデルを示す。深層ボーリング調査結果に基づき地層境界面形状や断層の分布形状並びに地質・地質構造の代表的な透水係数が更新された。深層ボーリング調査で実施した単孔式水理試験結果からは、土岐花崗岩中の上部割れ目帯、低角度傾斜を有する割れ目の集中帯、下部割れ目低密度帯に、6 倍程度の透水性のコントラストが確認された^{3),5),7),12)}。また、ボーリング孔におけるコア観察、孔壁画像調査、物理検層及び流体検層の調査結果に基づき抽出された断層部を対象として実施した単孔式水理試験の結果、断層面方向の透水性については、花崗岩中の下部割れ目低密度帯の透水性より高いものと低いものの 2 種類に大きく区分できた。よって、断層はその水理特性に応じて、地下水の移行経路である水みちとなる場合や地下水の流動に影響を及ぼす遮水機能を有する可能性が考えられる¹⁶⁾。

深度 500m 以深の地下深部においても、フローメータ検層や温度検層と比較して電気伝導度検層が高い精度で地下水の流出入点を検出可能なことが確認できた (Fig. 3.2.4(2)-3)^{3),5),7),12)}。一方、電気伝導度検層は孔内水を地下水の電気伝導度と異なる水 (脱イオン水や塩水など) で置換する調査手法であるため (3.3.6 参照)、地下水中の塩分濃度などの水質の違いによって影響を受けることが考えられる。表層に比べ大きく異なる塩分濃度が検出される可能性のある地下深部を調査対象とした場合には、電気伝導度検層によって検出された地下水の流入点を調査対象とした単孔式水理試験を実施して、透水性の高い割れ目の有無を確認することが望ましい。また、深層ボーリング調査において掘削水に泥剤を使用した区間では、泥水が割れ目に浸入しボーリング孔周辺の透水性を低下させ、電気伝導度検層の結果から算出される透水性の値は、岩盤本来の透水性よりも低い値を示している可能性が示唆された^{5),7),12)}。したがって、泥水掘削を実施したボーリング孔においては、電気伝導度検層に基づいて算出される水理特性を使用する際は、単孔式水理試験との比較を実施するなどの検討が必要である。

ステップ 2 で設置した浅層ボーリング孔を有効に活用した深層ボーリング掘削時の掘削応答モニタリングや長期地下水モニタリングにより、研究所用地内及び近傍の水理特性の連続性や水理境界の存在が推定できた。調査対象領域における地質・地質構造の分布やその透水性によって大きく異なるが、数 100m 程度のボーリング孔間の水理地質構造の推定が可能であると考えられるため、複数のボーリング調査を実施する場合はこれらを同時に実施するよりも 1 本ずつ順次掘削調査を実施し、終了後に地下水モニタリング装置を挿入して、次の掘削調査による水圧応答のモニタリングなどを実施することが望ましい¹⁶⁾。

サイトスケールにおける動水勾配分布の把握及び断層の透水異方性の有無が動水勾配分布に及ぼす影響を評価するために、地下水流動解析結果に基づき三次元的な全水頭分布を算出した。Fig. 3.2.4(3)-2 に、感度解析結果の一例を示す。本ステップにおいては、ステップ 1、2 に比べて感度解析ケース間の全水頭分布のばらつきが小さく、北東走向の断層の透水異方性の有無によってのみ全水頭分布が大きく異なる結果が得られた。この感度解析ケース間の全水頭分布のばらつきの低減の主要因としては、ステップ 2 で研究所用地周辺の地下水流動場に大きな影響を及ぼすと推定された断層のうち、北北西走向、東西走向の断層の大半の断層の透水異方性の有無が、掘削応答モニタリングの結果に基づき推定されているためと考えられる。また、ボーリング孔で実測した全水頭分布と、地下水流動解析結果に基づく解析値を比較した。Fig. 3.2.4(3)-3 に、本ステップ及びステップ 1、2 で実施した地下水流動解析のうち、最も実測値の再現性が高い解析結果の

実測値との差の標準偏差を示す。同図より、本ステップの解析値のほうがステップ2に比べ実測値の再現性が2m程度向上していることが確認され、深層ボーリング調査によって直接的に地下深部の岩盤及び断層に関する情報を取得することの有効性が示された。

ボーリング調査を実施するに当たっては、調査コスト、作業時間及び社会的な制約条件に加え、ボーリング孔の掘削による場の攪乱の影響などの観点から、掘削可能なボーリング孔の数量が限定されることが考えられるため、限られたボーリング孔で多くの情報を取得する必要がある。したがって、次ステップ以降の調査においては、本ステップ及びステップ2で掘削したボーリング孔を有効に活用し、研究所用地内及びその近傍の地質・地質構造要素の連続性や水理特性に関する情報をより詳細に取得し、これらが地下水の流動特性に及ぼす影響を評価することが重要である。

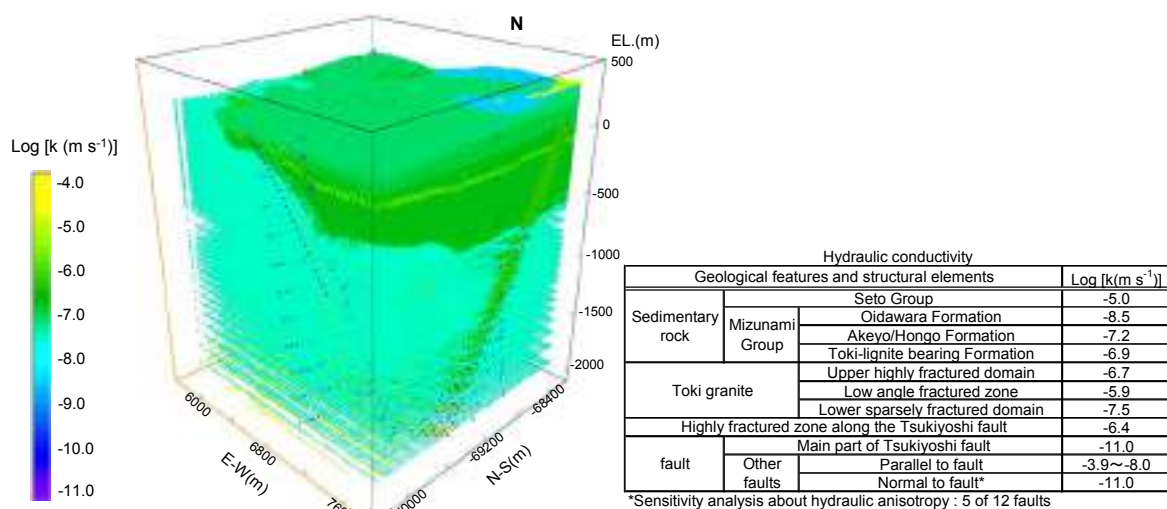


Fig. 3.2.4(3)-1 Hydrogeological model (3D distribution of hydraulic conductivity)

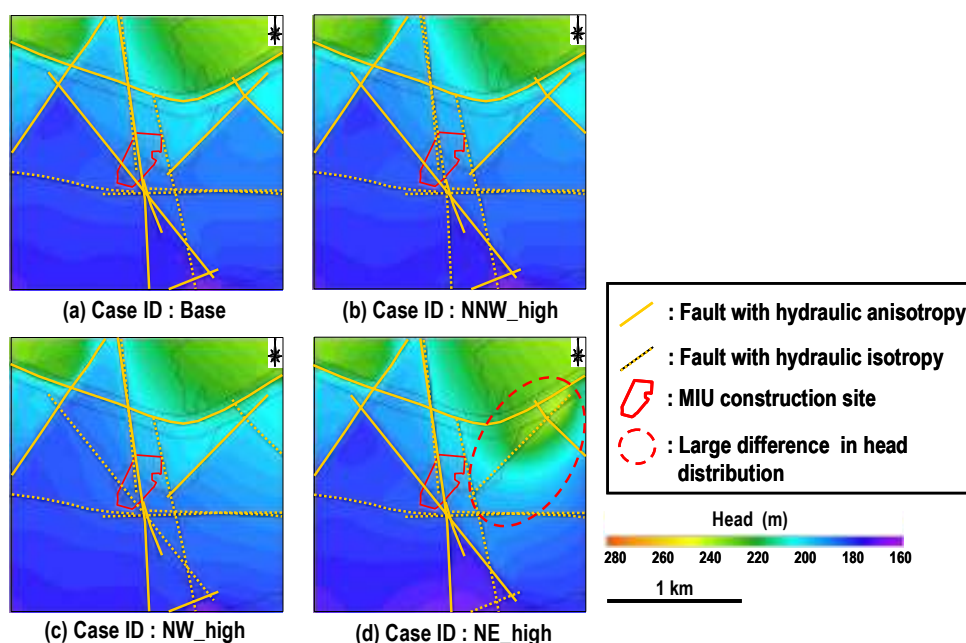


Fig. 3.2.4(3)-2 Example of a sensitivity analysis focused on hydraulic anisotropy of faults
(Elevation -300 m : Depth of the shaft 500 m)

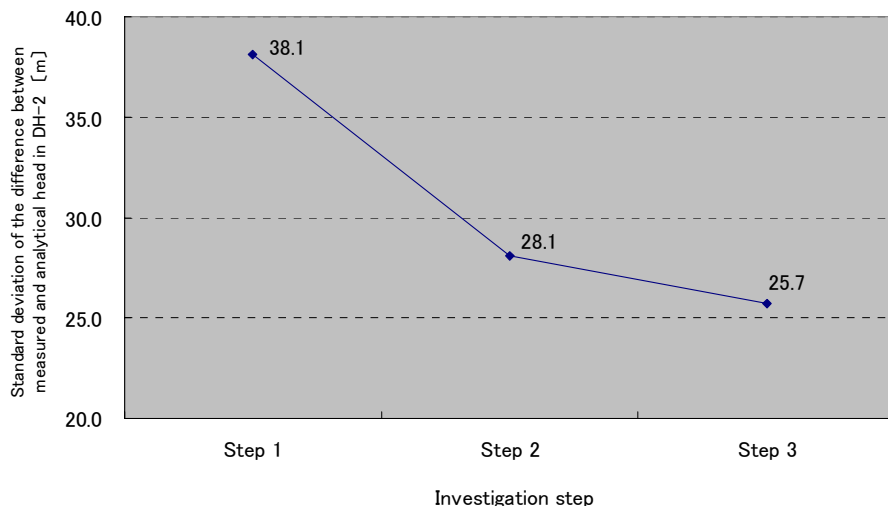


Fig. 3.2.4(3)-3 Comparison between measured and analytical head differences in Step 1 to 3

(4)地下水の地球化学特性の把握

①目標／実施概要

深層ボーリング孔を用いた調査・解析・評価では、深度 1,000m 程度までの花崗岩を対象として、研究坑道掘削前の地下水の地球化学特性を把握し、第 2 段階以降の研究坑道掘削が周辺地下水環境に与える影響の解析における初期条件データとして反映させること、研究坑道で遭遇する地下水の地球化学特性を把握し、第 2 段階の調査研究計画に反映することを目的として、深層ボーリング調査により、地下水及び岩石試料を採取・分析し、ステップ 2 までの調査結果を基に構築した地球化学モデルの更新を行った。

②結果概要／得られた技術的知見

サイトスケールの深度 1,000m 程度の花崗岩中に塩分濃度が $2,500\text{mg l}^{-1}$ 程度（海水の塩分濃度の 10 分の 1 程度）の Na-Ca-Cl 型地下水が存在しており（Fig. 3.2.4(4)-1）、ステップ 0 で行った多変量解析（3.2.1(4)参照）において抽出した水質形成に関わる混合の端成分を、本ステップで取得した、より信頼性の高い水質データに置き換えて多変量解析を繰り返すことにより、地下水水質の三次元的分布に関わる定量的地球化学モデルを更新し、より詳細な水質分布を推定した¹⁸⁾。地下水の pH については、約 8～9 の範囲ではほぼ一定であり、ステップ 0 で予測した結果（3.2.1(4)参照）と矛盾しない。水-岩石反応の平衡状態に関わる熱力学的な解析や微視的な鉱物の変質状態の観察結果から、主要な pH 緩衝反応は炭酸塩鉱物の溶解・沈殿反応であると推察できる¹⁹⁾。酸化還元電位については、原位置での実測値がないものの、鉱物観察や溶存ガス分析の結果から、含鉄鉱物、含硫黄鉱物、硫化水素ガスが関連した酸化還元反応が、主に酸化還元電位に関与している可能性が考えられる¹⁹⁾。一方で、Na-Ca-Cl 型地下水の起源や滞留時間については、同位体組成や溶存化学成分比から化石海水や長期にわたる水-岩石反応を経て生成した塩水が希釈されたものである可能性が考えられるが、塩分濃度が海水などと比較して低いため、本ステップの調査では特定することはできなかった。地下水の起源や滞留時間は、地下水流動解析結果の妥当性を確認するために有用な情報の一つであることから、第 2 段階以降の調査における課題として残されている¹⁹⁾。

本ステップの調査結果を用いて、ステップ 0 で構築されたサイトスケールにおける地下水の水質分布に関わる地球化学モデル（3.2.1(4)参照）を更新し、研究坑道掘削前の地球化学的初期条件に関わる定量的な地球化学モデルを構築することができた^{18),19)}（Fig. 3.2.4(4)-2）。

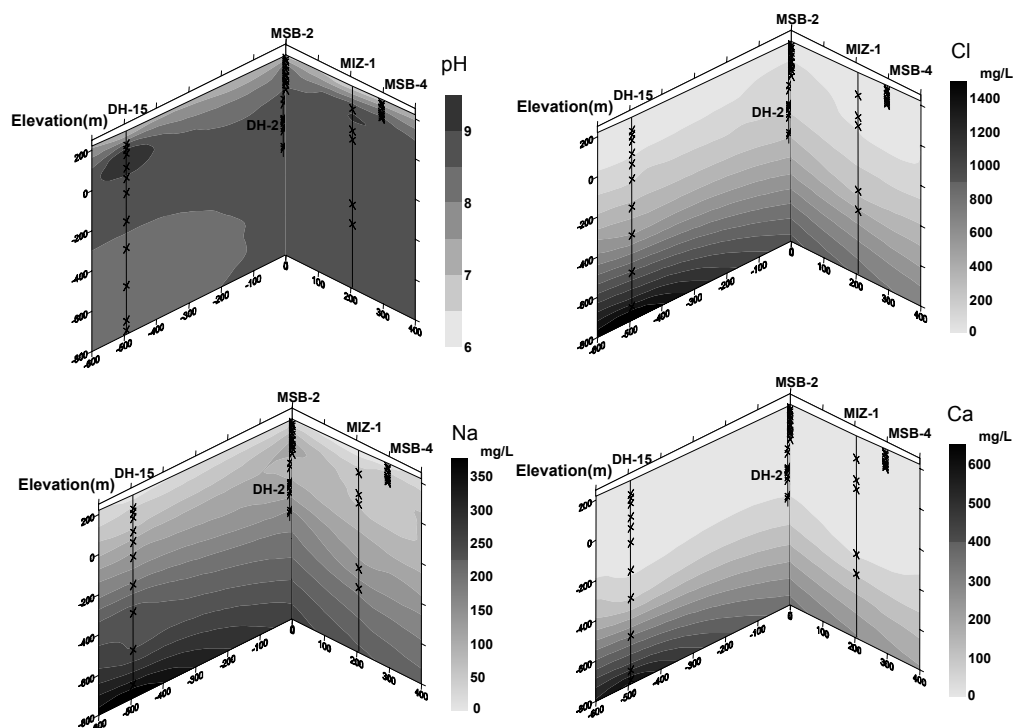


Fig. 3.2.4(4)-1 Three-dimensional distribution of groundwater chemistry in the site scale

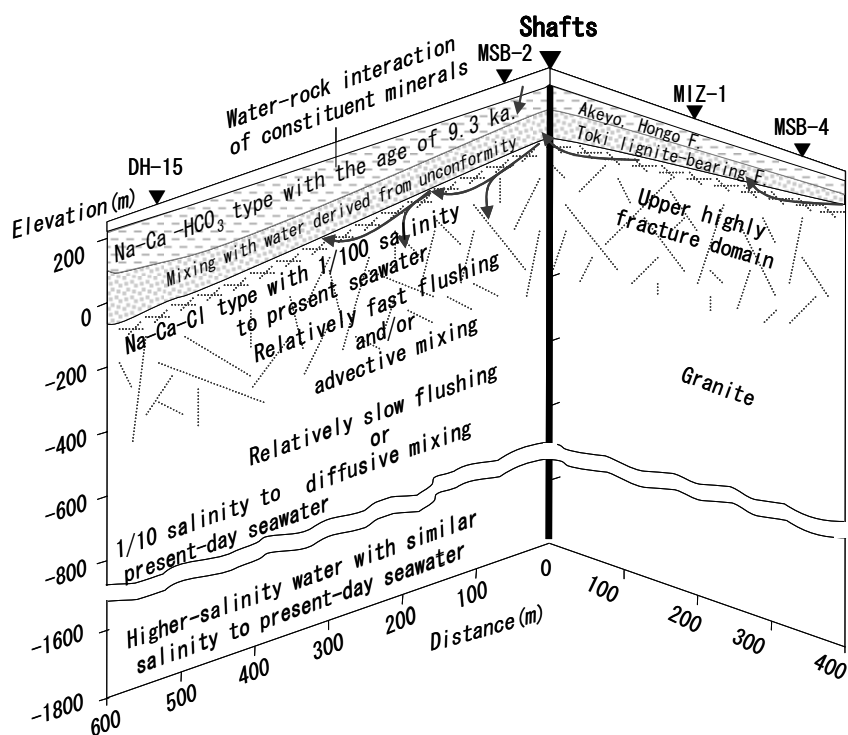


Fig. 3.2.4(4)-2 Hydrochemical conceptual model around site scale.

(5)物質移動の遅延効果の把握

①目標／実施概要

深層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価では、ステップ0で取得した岩盤中での物質移動の遅延特性に関して、岩盤中での物質の収着・拡散特性、岩盤中の物質移動場（物質移動に寄与する空隙構造や空隙率など）及びコロイド／有機物と微生物が物質移動に及ぼす影響のより詳細な把握が目標である。深層ボーリング調査において採取したボーリングコア及び地下水試料を用いた室内調査試験を実施し、土岐花崗岩及び透水性割れ目の岩石・鉱物特性、地球化学特性及び物理特性、並びに地下水の地球化学特性を詳細に把握した^{5),6),7)}。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、高Na-Cl濃度条件下でのCs、Srの収着係数を取得するとともに、透水性割れ目近傍におけるウラン系列核種（²³⁸U、²³⁴U、²³⁰Th）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¹⁰⁾。ここで得られたデータに基づき、土岐花崗岩中での主要な物質移動の遅延メカニズムである収着及びマトリクス拡散について評価した。

②結果概要／得られた技術的知見

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¹⁰⁾は、既得情報とそれに基づく推定値と整合的であり¹⁰⁾、割れ目充填鉱物は花崗岩基質よりも1～2オーダー大きな収着能力を有することや透水性割れ目近傍におけるマトリクス拡散は数十mm以上に及ぶことなど、ステップ0での調査結果・解釈をより具体的に評価することが可能である。また、ウラン系列核種の分布プロファイルは対象とする岩盤中において実際にマトリクス拡散現象が生じていることを示しており、このように地層処分において発生すると想定される岩盤中での物質移動現象や地球化学プロセスの天然環境下における類似プロセスの研究（ナチュラルアナログ研究）は、調査試験結果の信頼性を確認するうえで有効な手法である^{20),21)}。しかしながら、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^{22),23)}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。

地下水中のコロイド／有機物及び微生物については、研究所用地とその周辺における水質の深度方向の変化^{24),25)}に伴い、その種類や存在量なども変化する可能性が考えられる。しかしながら、ボーリング調査における時間的制約などのために、採取した地下水試料の掘削水による汚染率（掘削水に添加した初期の蛍光染料濃度に対する採取した地下水中の蛍光染料濃度の百分率）が数～数十％とコロイド／有機物及び微生物に関して品質の保証された情報を取得することは困難であった。したがって、掘削水の汚染が十分に低下した地下水試料を取得するためには、長期間の採水が可能な第2段階以降の調査、特に坑道掘削の影響がより少ない第3段階の調査により評価を進めていく必要がある。

(6)希釈効果の把握

①目標／実施概要

深層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価では、本ステップで実施した地下水流動解析結果（3.2.4(3)参照）に基づき、地質・地質構造ごとのダルシー流速分布を算出した。

②結果概要／得られた技術的知見

本ステップで更新された水理地質構造モデル（3.2.4(3)参照）では、ステップ2の調査結果（3.2.3(5)参照）に、帯水層としての効果が期待される地質・地質構造が新たに追加されていないため、ステップ2と同様に希釈効果が期待される帯水層として、低角度傾斜を有する割れ目の集中帯をはじめ、上部割れ目帯、土岐夾炭累層、月吉断層に伴う割れ目帯及び明世／本郷累層を抽

出した。

上記の地質・地質構造についてダルシー流速の頻度分布を算出した (Fig. 3.2.4(6)-1)。その結果、地質・地質構造ごとのダルシー流速の分布は、低角度傾斜を有する割れ目の集中帯が最も高い分布を示した。次いで上部割れ目帯、土岐夾炭累層、月吉断層に伴う割れ目帯、及び明世／本郷累層が高い流速分布を示した。低角度傾斜を有する割れ目の集中帯に着目すると、ステップ 2 に比べてダルシー流速の分布のばらつきが小さくなるとともに、全体的に小さな値となっている。これは、2 本の深層ボーリング孔において、その水理特性データが取得されたことに起因しているものと考えられる。基盤岩である土岐花崗岩のうち、透水性が相対的に低い下部割れ目低密度帯のダルシー流速分布を基準とすると、ステップ 2 と同様に、低角度傾斜を有する割れ目の集中帯をはじめ、上部割れ目帯、土岐夾炭累層、月吉断層に伴う割れ目帯及び明世／本郷累層のダルシー流速が比較的高い結果となり、これらが希釈効果を考えるうえで重要な地質・地質構造であることが示唆された。

本ステップで実施した深層ボーリング調査によって、帯水層としての希釈効果が期待できる新たな地質・地質構造は抽出されなかったものの、低角度傾斜を有する割れ目の集中帯の水理特性データが取得されたことで、その希釈効果が更新された。地質・地質構造の水理特性や地質構造特性に関する情報が増加するに伴って、その情報が考慮された地下水流動解析結果から算出されるダルシー流速の信頼性は高くなると考えられる。

ボーリング調査を実施するに当たっては、調査コスト、作業時間及び社会的な制約条件に加え、ボーリング孔の掘削による場の攪乱の影響などの観点から、掘削可能なボーリング孔の数量が限定されることが考えられるため、限られたボーリング孔で多くの情報を取得する必要がある。したがって、次ステップ以降の調査においては、本ステップ及びステップ 2 で掘削したボーリング孔を有効に活用し、ボーリング孔でその存在が確認されている高い透水性のある地質・地質構造の連続性、三次元的な分布範囲及び水理特性に関する情報を取得するとともに、水理地質構造モデルに反映させることで本ステップよりも信頼性の高いダルシー流速分布を算出することが重要である。

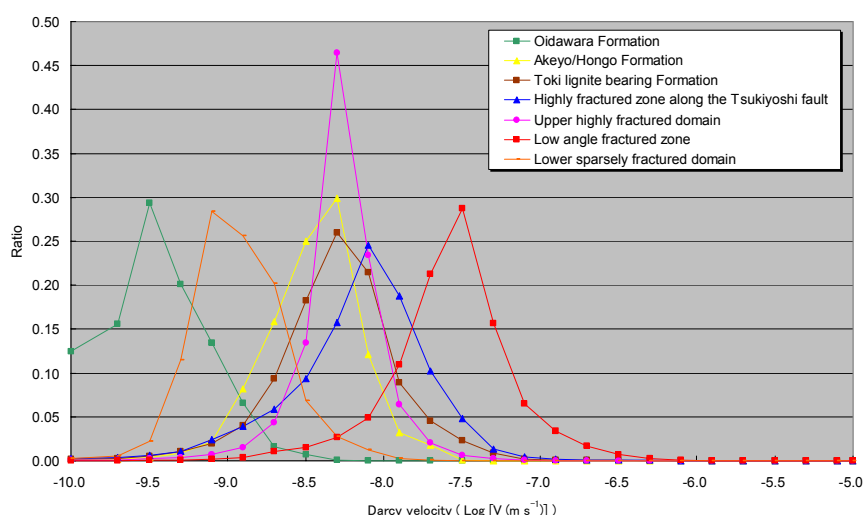


Fig. 3.2.4(6)-1 Darcy velocity distribution (The vertical axis shows the ratio (cumulative frequency is 1 in each geological formation and domain))

(7)地下空洞周辺の力学・水理状態の把握

1)応力場の把握、岩盤の物理・力学特性の把握、EDZ の分布／物理・力学特性の把握

①目標／実施概要

深層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価では、調査対象となる研究用地に分布する土岐花崗岩の物理・力学特性及び初期応力状態を把握し、岩盤力学モデルを構築するとともに、EDZ の分布とその物理・力学特性を予測することが目標となる。

このため、研究用地内の深層ボーリング孔並びに採取したボーリングコアを対象として、初期応力状態を把握するための水圧破碎法による初期応力測定及び室内物理・力学試験などを実施し、岩盤力学モデルを構築した。また、岩盤の不連続面を考慮できる解析手法により、掘削損傷領域を考慮した研究坑道周辺岩盤の掘削影響予測解析を実施した。

②結果概要／得られた技術的知見

MIZ-1 号孔における水圧破碎法による初期応力測定結果^{26),27)}を Fig. 3.2.4(7)-1 に示す。また、これらの調査結果と本ステップにおける地質構造モデル (3.2.4(2)参照) をもとに、研究用地における岩盤力学モデルを構築した (Fig. 3.2.4(7)-2)。MIZ-1 号孔に現れる土岐花崗岩は、上部割れ目帯及び下部割れ目低密度帯に属しており、複数の高角度の断層を含んでいる。岩盤の物理・力学特性は、土岐花崗岩全体を通じてステップ 0 (3.2.1(7)1参照) 及びステップ 2 (3.2.3(6)1参照) で得たデータに比べて一軸圧縮強度、ヤング率などの物性値が大きく、電研式岩盤分類²⁸⁾で B~CM 級のやや硬質な岩石が分布しているものと評価した。ただし、深度 200m 付近の断層が交差する近傍では、電研式岩盤分類で CL 級であり、有効空隙率が高く、見かけ比重も低く、一軸圧縮強度などの力学特性の小さい軟質な岩石が分布していることが確認された。また、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^{26),27)}。このような局所的な応力状態の変化は原位置における測定によってのみ把握することが可能であることから、詳細な初期応力分布を把握するためには、水圧破碎法などの原位置試験を断層の分布を考慮して複数点で実施する必要がある。

EDZ の予測については、本ステップで構築した上記の岩盤力学モデルをもとに、ステップ 0 と同様に掘削損傷領域を考慮した MBC モデルを用いた解析²⁹⁾及びクラックテンソルモデル³⁰⁾と仮想割れ目モデル³¹⁾を用いた解析³²⁾を行った。これらの解析では二次元解析 (深度 500m、1,000m) 及び三次元解析 (深度 1,000m) を実施し、研究坑道掘削による坑道周辺岩盤の変位やひずみ、亀裂開口幅の分布、せん断ひずみや局所安全率の分布を予測した。解析結果の一例を Fig. 3.2.4(7)-3 及び Fig. 3.2.4(7)-4 に示す。解析の結果、研究坑道周辺岩盤の変形、応力、掘削の影響により発生する坑道周辺の亀裂特性は、初期応力状態、既存亀裂及び掘削により発生する新規亀裂の大きさや方向の影響を強く受けることが推定できた。また、亀裂の方向性の影響を正確に反映させ、立坑と水平坑道の接続部の岩盤挙動を評価するためには、二次元解析よりも、三次元解析が有効であると考えられた。

次段階以降の調査研究では、坑道内での各種計測により得られるデータ (地中変位や内空変位など) との比較や、掘削影響に関する原位置試験などを通じて、解析手法の適正を評価するとともに、不連続体解析手法の適用を検討する必要がある。

2)地下空洞への地下水流入量の把握

①目標／実施概要

深層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価では、更新した水理地質構造モデル¹⁶⁾ (3.2.4(3)参照) を用いて、研究坑道への地下水流入量を推定することを目的とした地下水流動解析を実施した³³⁾。

地下水流動解析は、ステップ 2 での検討 (3.2.3(6)2参照) と同様に有限要素法による等価不均質連続体モデル³⁴⁾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。この地下水流動解析においても、ステップ 2 での検討 (3.2.3(6)2参照) と同様に水理地質構造モデルの不均質性の違い (モデル化する不連続構造の数の違い) に着目した感度解析を実施した (Table 3.2.4(7)-1)。また、研究坑道近傍の水理特性を考慮した圧力開放係数 (3.2.3(6)2参照) については、第 1 段階の調査研究では必要な情報を取得することができないことから、ステップ 2 と同じ係数を与えた感度解析を実施した。

②結果概要／得られた技術的知見

不均質性の異なる水理地質構造モデル (Model A、Model B、Model C) を用いた地下水流動解析結果による研究坑道への地下水流入量は、圧力開放係数が同じ場合は、異なるモデルでも類似した結果となった (Fig. 3.2.4(7)-5)。一方、圧力開放係数が異なる場合の地下水流入量は、同じモデルでも大きく異なることが確認された。これらは、異なる水理パラメータを設定したステップ 2 での地下水流動解析結果と同様の傾向である。

圧力開放係数が 0.8 の場合においては、中間ステージ及び最深ステージ掘削中を除いて全体的には 1,000～1,500 $\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$ 程度の地下水流入量が予測された (Fig. 3.2.4(7)-5(a))。また、掘削中は、断層部などの透水性が高い構造が出現した場合は、局所的に 2,000 $\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$ 程度の地下水流入量となり、高透水性構造が出現しない場合に比べて地下水流入量が 500～1,000 $\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$ 程度増加する結果となった。

圧力開放係数が 0.2 の場合においては、研究坑道の掘削深度が深くなると共に地下水流入量が増加し、最大で 10,000 $\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$ を越す地下水流入量が予測された (Fig. 3.2.4(7)-5(b))。具体的には、深度 200～500m 付近に分布する花崗岩上部割れ目帯からの地下水流入量が多い。また、下部割れ目低密度帯については、上部割れ目帯と比較して地下水流入量は小さいものの、高透水性の断層が通過する箇所については地下水流入量が多くなっている (Fig. 3.2.4(7)-6)。さらに、ステップ 2 とステップ 3 での地下水流入量の推定結果を比較すると、ステップ 3 での地下水流入量は大きく増加している結果となった。これは、情報量の増加に伴い、高透水性の構造の空間分布 (研究坑道に出現する数) やその水理特性が更新されたことによるものと考えられる。当該地点では、研究坑道への地下水流入量に大きな影響を及ぼす可能性のある高透水性構造が高角度で分布する。これらの高透水性構造が研究坑道 (特に、立坑) に出現する数や位置を精度よく把握するためには、研究坑道掘削地点での高透水性構造の空間分布や水理特性に関する情報を優先的に取得することが重要と考えられる。

以上のことから、ステップ 2 と同様に研究坑道への地下水流入量に対しては、ほかの要因と比較して内部境界条件の影響が大きいことが明らかとなった。また、断層などの透水性構造が地下水流入量へ与える影響が大きいことが分かった。

また、ステップ 2 と同様に研究坑道への地下水の流入に伴う周辺での水圧低下領域は、圧力開放係数による違いはあるものの、すべてのモデルにおいて、透水異方性を有していると仮定した研究用地周辺に分布する断層の影響を強く受けていることが示唆された。水圧低下の範囲や量は、地下水の流入量に影響を及ぼすものであることから、研究用地周辺に分布する断層の空間分布や水理特性に関する情報を取得することが重要と考えられる。

以上のことから次ステップ以降の調査においては、高透水性構造が研究坑道に出現する数や位置の推定精度を高めるとともに、研究坑道への地下水流入量の予測精度を高めるために、研究坑道掘削地点および研究用地周辺での断層の地質学的特性および水理特性を取得するための調査が重要である。

3)不連続構造などの有無の把握

①目標／実施概要

深層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価では、岩盤の物理・力学特性に影響を与えると考えられる断層や割れ目帯などの不連続構造の研究坑道への出現深度に関する情報を取得することを目的に、3.2.4(2)で構築した地質構造モデル¹⁰⁾を基に、研究坑道掘削予定地点における不連続構造の遭遇位置を予測した。

②結果概要／得られた技術的知見

3.2.4(2)で構築した地質構造モデルを基に、研究坑道掘削予定地点における不連続構造の出現位置を予測した (Fig. 3.2.4(7)-7)。その結果、ステップ 2 で抽出された断層 (Fig. 3.2.3(6)-3 中の IF_SB1_002 及び IF_SB1_003) と同一と考えられる断層を抽出し、その分布を更新するとともに (Fig. 3.2.4(7)-7 中の IF_SB2a_07 及び IF_SB2a_08)、本ステップで新たに抽出した断層を含めて、研究坑道に遭遇する可能性がある断層を抽出した。また、このうちの多くは高角度の傾斜を有していると推定した。

本ステップでは、花崗岩深部における断層分布に関する情報が取得され、ステップ 2 に比べて、特に花崗岩深部での断層の分布をより精度良く把握できたと考えられる。

次ステップ以降の課題としては、本ステップで研究坑道に出現すると推定された断層の花崗岩深部での分布をより精度良く把握するために断層の空間的な連続性に関わる情報を取得することが重要である。

Table 3.2.4(7)-1 Groundwater flow simulations

Case	Modeled fault/WCF	Pressure relief factor
Model A	Tsukiyoshi Fault + Faults around MIU Construction Site	$\alpha = 0.2, 0.8$
Model B	Model A + Lineaments with length more than 3km	$\alpha = 0.2, 0.8$
Model C	Model B + WCF (Modeled using Equivalent Heterogeneous Porous medium); 10 realizations	$\alpha = 0.2, 0.8$

WCF: Water Conducting Feature

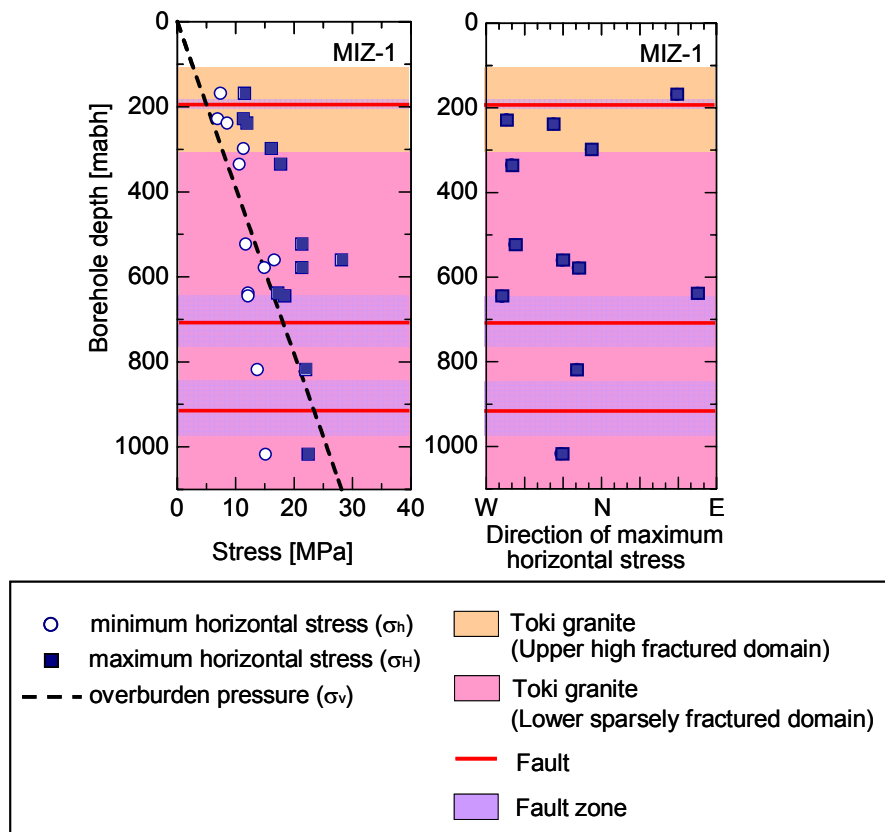


Fig. 3.2.4(7)-1 Results of hydraulic fracturing tests at the MIU Construction site (MIZ-1)

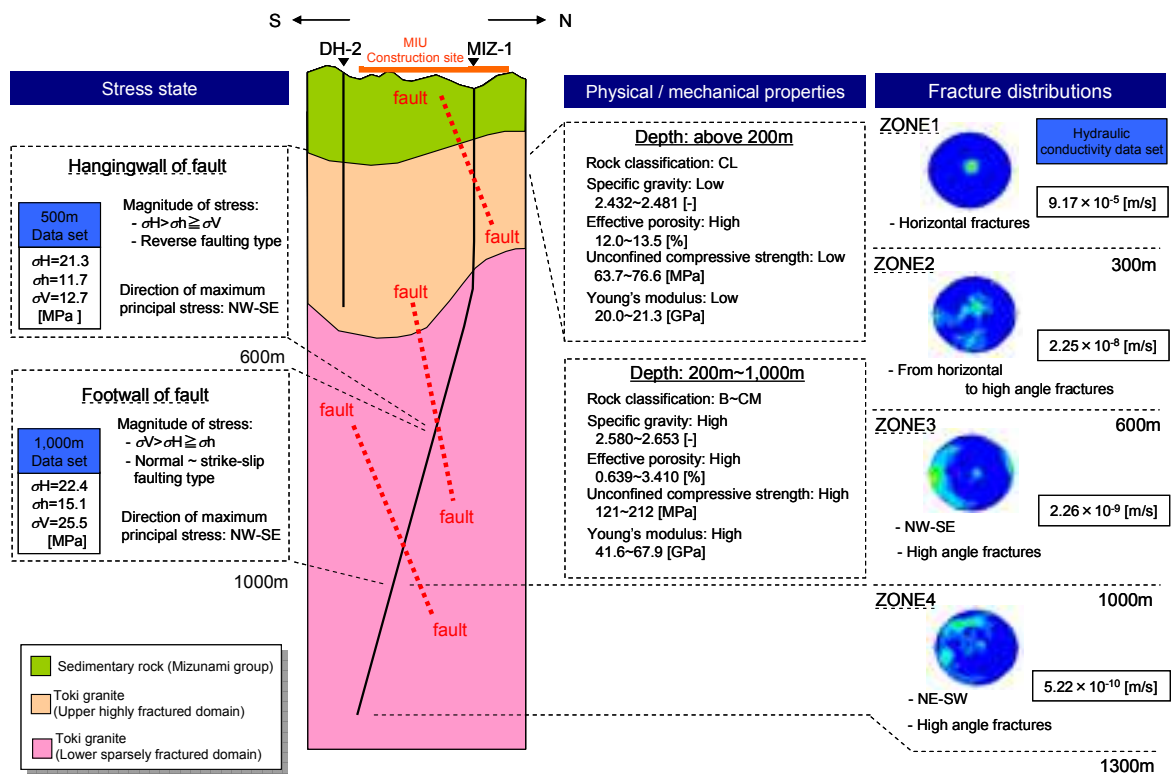


Fig. 3.2.4(7)-2 Rock mechanical model (Step3)

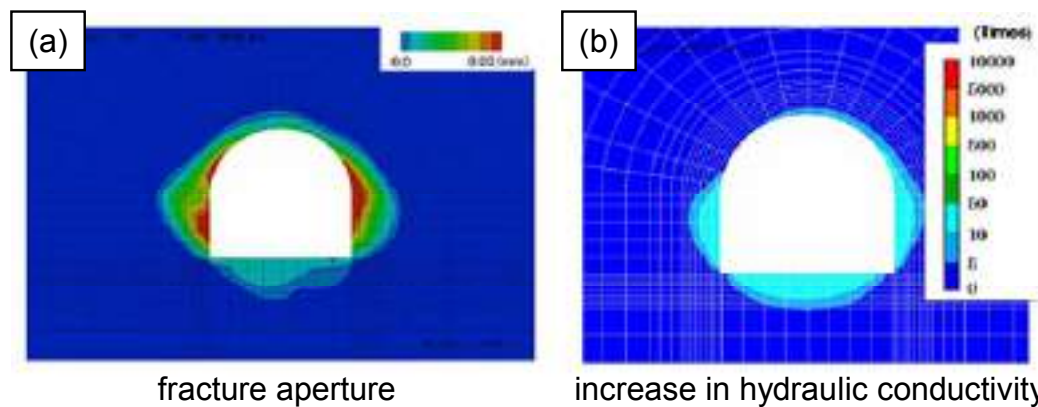


Fig. 3.2.4(7)-3 Fracture aperture and increase in hydraulic conductivity (2-D analysis)
(a) MBC model, (b) Crack tensor model and virtual fracture model

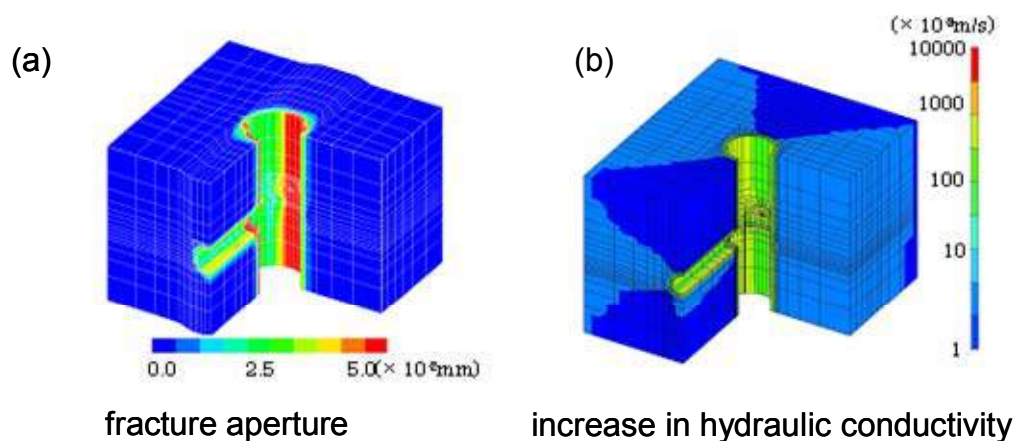
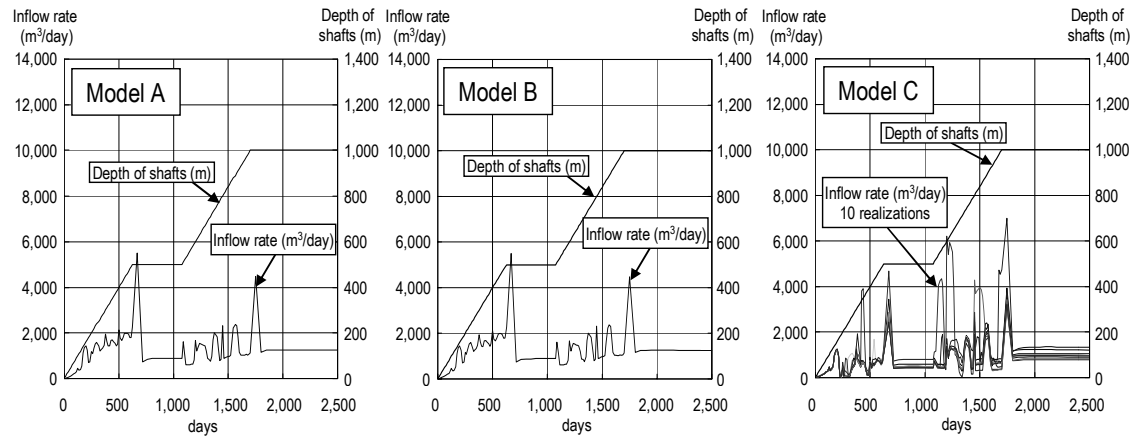
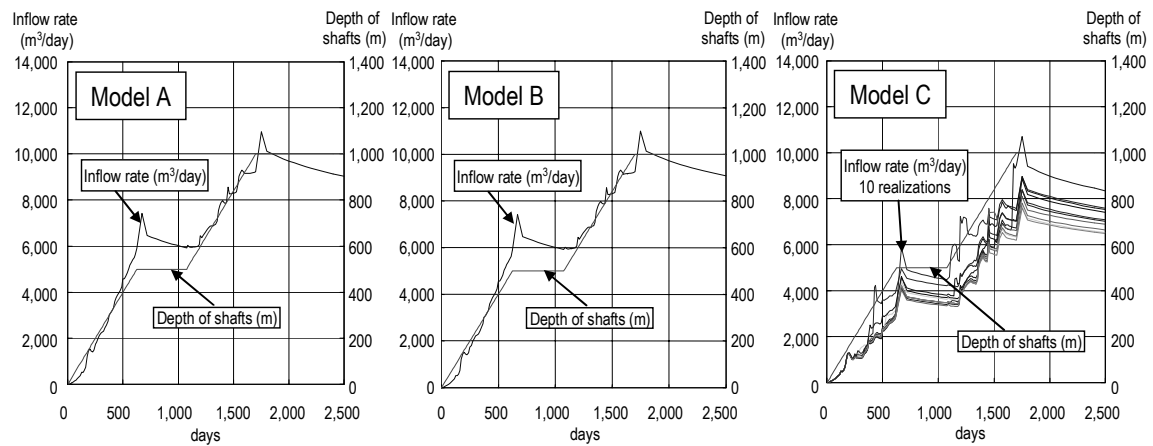


Fig. 3.2.4(7)-4 Distribution of fracture apertures and hydraulic conductivity (3-D analysis)
(a) MBC model, (b) Crack tensor model and virtual fracture model

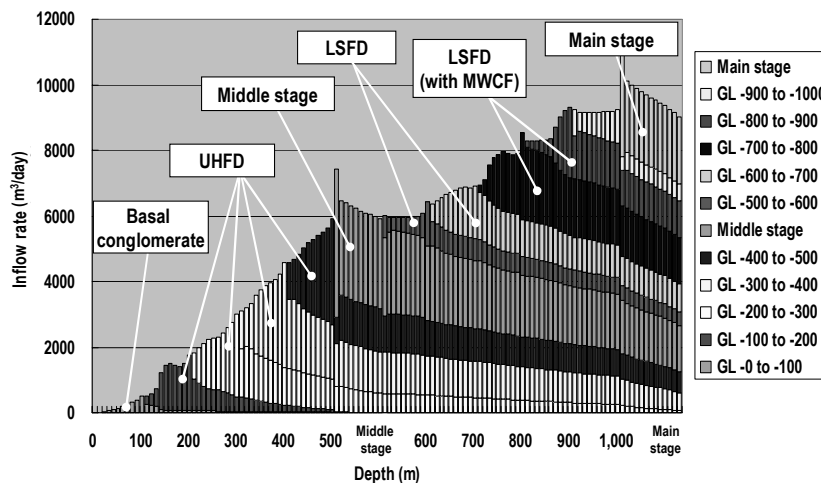


(a) Pressure relief factor: 0.8



(b) Pressure relief factor: 0.2

Fig. 3.2.4(7)-5 Inflow rate into MIU



(MWCF: Major Water Conducting Feature)

Fig. 3.2.4(7)-6 Distributions of inflow rate into MIU (pressure relief factor: 0.2)

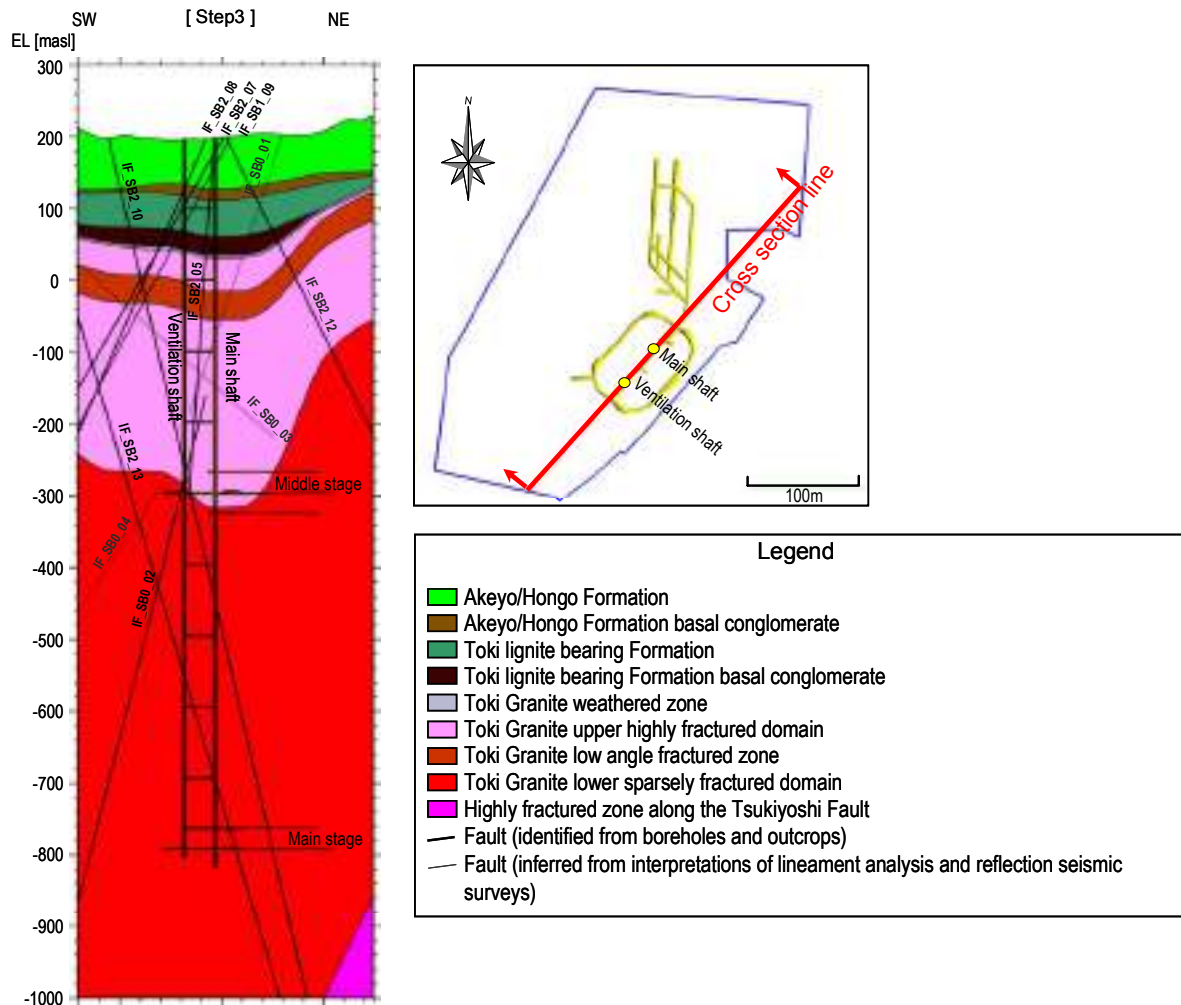


Fig. 3.2.4(7)-7 Predicted geological structures around the MIU facility (Step3)

(8)地下の温度環境の把握

①目標／実施概要

深層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価では、調査対象領域となる研究所用地に分布する土岐花崗岩の地下の温度環境データを取得することが目標となる。

このため、本ステップでは、研究所用地における深層ボーリング孔（MIZ-1 号孔）において、温度検層及びボーリングコアを用いた熱特性試験（熱伝導率、比熱、線膨張係数の測定）を実施し、地下の温度環境特性を把握した。

②結果概要／得られた技術的知見

調査・試験の結果、MIZ-1 号孔の地温勾配はステップ 0 及びステップ 2 の結果の範囲内にあることが明らかとなった（Fig. 3.2.4(8)-1）³⁵⁾。熱特性についても、ローカールスケールと同様の分布であった（Fig. 3.2.4(8)-2）。以上のことから、研究所用地のようなサイト／ブロックスケール規模での温度環境のうち地温勾配は、火山地帯のように局所的な熱源が無い限り、ローカールスケール程度の範囲では、1 本のボーリング孔での温度検層により把握可能である。熱特性については、岩盤の空隙構造や構成鉱物の変化が無い限り、1 本のボーリング孔のコア数個程度の熱特性試験により把握可能であることが明らかとなった。

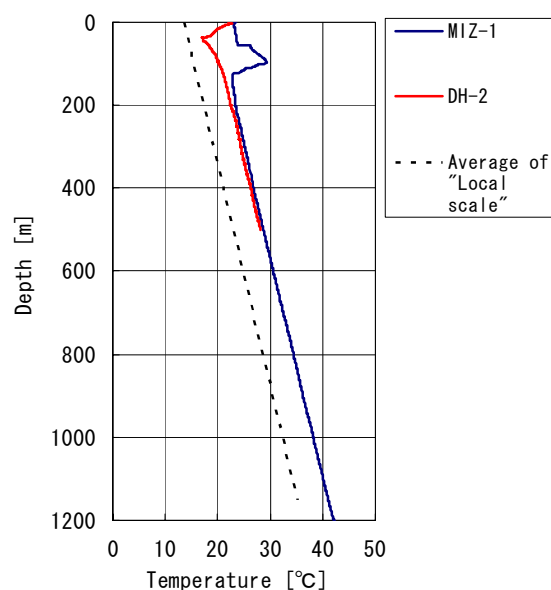


Fig. 3.2.4(8)-1 Result of temperature logging (MIZ-1)

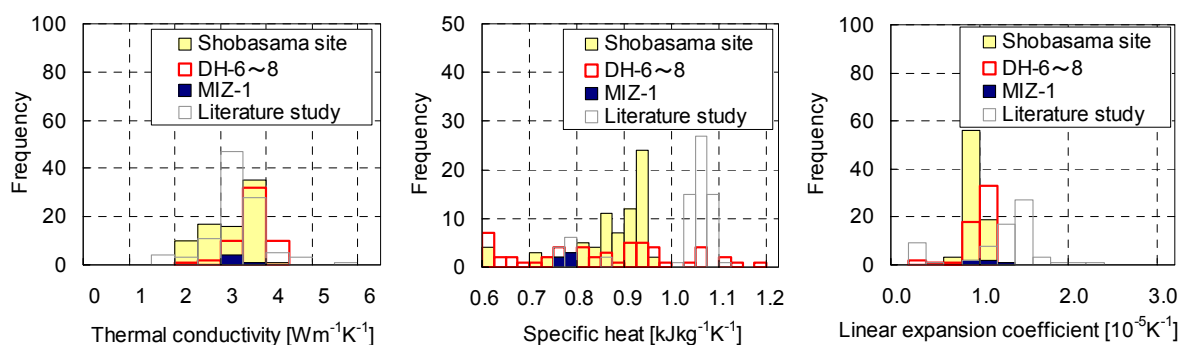


Fig. 3.2.4(8)-2 Result of thermal property test (MIZ-1)

(9) 深層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価のまとめ及び次ステップ以降の課題

深層ボーリング孔を利用した調査・解析・評価では、Table 3.1-1 に示すように「物質移動の遅延効果の把握／コロイド／有機物／微生物の影響の把握」を除く個別目標と課題を対象に、地表から地下深部の地質・地質構造や水理特性、地下水の地球化学特性、岩盤の力学特性などを把握することを目的として、深層ボーリング調査を実施した。

また、これらの調査結果に基づき、ステップ2までに構築したサイトスケールにおける地質構造モデル、水理地質構造モデル、地球化学モデル並びにブロックスケールの岩盤力学モデルを更新した。さらに、これらのモデルに基づき地下水流動解析や応力・掘削解析などを実施し、動水勾配分布や研究坑道周辺の力学・水理状態などを予測した。

これらの調査やモデル化・解析を通じて、次ステップ以降の調査・解析における重要要素を抽出・特定した。具体的には、以下のとおり。

- ・ 研究坑道近傍に分布していると推定された南北～北北西走向並びに東西走向を有する断層の空間的な連続性の把握
- ・ ボーリング孔間の透水性構造の水理特性やその連続性に関する情報の取得
- ・ 研究坑道に出現すると推定された断層の地質学的特性及び水理特性の把握

(10)処分事業及び安全規制のための技術基盤

①地質構造の三次元分布の把握

本ステップにおいて適用した一連の調査の組み合わせは、花崗岩深部の地質構造の三次元分布を把握する上で、極めて有効な調査である。特に、コア観察や孔壁画像調査などを組み合わせた地質学的調査は、花崗岩の地質構造の分布と特性を詳細かつ直接的に把握することが可能である。また、電気伝導度検層や水理試験を組み合わせることにより、水みちとして重要な不連続構造の分布と水理特性を把握することも可能である。このように、ステップ3の調査は、ステップ2までの地質構造モデルなど結果の評価と、ステップ4以降の計画策定にあたって極めて重要な位置づけを有している。

②地下水の流動特性の把握

地下深部の地下水においては、地表に比べて塩分濃度などの地球化学的特性が大きく異なる可能性がある。そのため、単孔式水理試験及び電気伝導度検層などで岩盤中の透水性分布を把握する際には、地質学的、水理学的観点に加えて、地下水の地球化学的観点からも十分に勘案して総合的に評価する必要がある。

研究領域内で複数のボーリング調査を実施する際には、ボーリング孔間の水理学的な連続性や水理境界を把握することを前提として、確認すべき対象領域や地質・地質構造の明確化、最適なボーリング調査位置、ボーリング調査の実施時期などの調査計画を立案することが重要である。また、調査終了後のボーリング孔を有効に活用して次の掘削調査による応答のモニタリングを実施することで、ボーリング孔間の水理学的連続性や水理境界などの水理地質構造を推定する際の情報をより多く取得することができるため、水理学的観点からは、ボーリング調査は同時に実施するよりも段階的に実施するほうが有効である。

③地下水の地球化学特性の把握

東濃地域のサイトスケールのように異なる塩分濃度の複数の異なる地下水の混合と水-岩石反応により地下水の水質が形成される場では、地下水の地球化学特性を理解する手法として、ステップ0から3で採用した多変量解析や水-岩石反応の熱力学解析と鉱物観察の観察、地下水の水質・同位体分析を組合せた調査・解析が有効であると考えられる。これらの解析手法を併用することで、主要な水質形成プロセスが何であるか（主要な水-岩石反応や端成分地下水の混合状態など）を明確にすることができ、さらに、起源や滞留時間に関わる情報に基づいて、水理地質構造や地下水の流動状態に関わる解析結果の信頼性を確認することができる。これらの調査・解析手法は、ステップ3までの調査・解析で示したように、既得情報の整理からボーリング調査までの一連の調査・解析において、データ数量と品質を向上させ解析を繰り返すことで、段階的に地質環境の理解度を向上させることができる。

④物質移動の遅延効果の把握

ボーリングコアを用いた室内試験により、主要な物質移動遅延メカニズムである収着及びマトリクス拡散特性についての概括的な評価が可能になると考えられる。この際、ナチュラルアナログ研究手法の適用により評価したマトリクス拡散特性との比較をとおして調査試験結果の信頼性を確認することができるため、室内調査・試験とナチュラルアナログ研究を組合せた手法の適用が有効である。一方、本ステップにおいて地下水中のコロイド／有機物及び微生物に関する評価を行うためには、原位置の条件を維持した汚染の極めて少ない地下水試料を採取することが不可欠であると考えられる。このためには、モニタリング孔などを利用した長期にわたる採水調査の実施が現実的である。

⑤希釈効果の把握

評価対象スケールの深度を考慮した場合、地下深部までのボーリング調査を実施し、希釈効果

が期待できる地質・地質構造の地質構造特性や水理特性に関する情報を取得することが有効である。

⑥応力場の把握、岩盤の物理・力学特性の把握、EDZ の分布／物理・力学特性の把握

応力場や岩盤の物理・力学特性に関する情報は、地下施設の設計の基礎となるばかりでなく、EDZ の分布／物理・力学特性を把握するための研究坑道掘削に伴う研究坑道周辺岩盤の掘削影響解析を行う際に必要となる解析入力条件を設定するうえでも重要となる。

本ステップでは、深層ボーリング孔のボーリングコアを用いた室内物理・力学試験により、岩盤の物理・力学特性の深度分布を把握することができた。また、初期応力状態については、水圧破碎法などのボーリング孔を用いた複数の深度での調査により、初期応力の深度分布を把握することができた。処分事業における概要調査では、深層ボーリング孔及びボーリングコアを用いた室内物理・力学試験並びに水圧破碎法などの初期応力測定を行うことにより、初期応力状態や岩盤の物理・力学特性の深度分布を把握することが可能である。また、本ステップにおける調査で明らかとなったように、断層などの地質構造の変化により応力状態が変化する場合もあることから、調査計画の立案に当たっては、主要な地質構造に着目することも重要である。研究坑道掘削に伴う研究坑道周辺岩盤の掘削影響解析については、研究坑道掘削後の調査結果を待たないとその妥当性を評価することができないが、地表での調査結果から、研究坑道周辺岩盤の力学的な掘削影響をある程度予測することが可能である。

⑦地下空洞への地下水流入量の把握

地下空洞と遭遇する断層などの不連続構造の空間分布や水理特性が地下水流入量に与える影響が大きいことが明らかとなった。しかしながら、このような構造が高角度の傾斜を有しており、かつ地下空洞が鉛直方向に展開される場合においては、地下空洞建設地点から離れた地点でのボーリング調査では高透水性の構造の遭遇深度を精度よく把握することは困難なことが想定される。したがって、高角度を有する高透水性構造と地下空洞とが遭遇する数や深度を精度よく把握するためには、地下空洞建設地点におけるボーリング調査などを用いて断層などの不連続構造の空間分布や水理特性に関する情報を取得することが有効である。

さらに、水圧低下の範囲や量は、地下水の流入量に影響を及ぼすものであることから、この水圧低下に影響を与えていると考えられる断層の空間分布や水理特性に関する情報を取得することが重要である。この際、様々な制約によりボーリング孔の数が限られると考えられることから、地下水流入量に大きな影響を与える可能性のある断層などの水理地質構造を感度解析などによって抽出・特定し、それを対象としたボーリング調査を実施することも有効である。

⑧不連続構造などの有無の把握

本ステップにおいて適用した一連の調査の組合せは、地質・地質構造要素の推定精度を確認・向上させるほか、花崗岩深部に分布する断層並びに水みちとして機能する構造を把握することができる。また、ボーリング孔掘削中の周辺ボーリング孔での掘削応答モニタリングは、抽出された不連続構造が有する遮水性や水理学的連続性を把握するうえでも有効である。

⑨地下の温度環境の把握

地下の温度環境に関する情報は、地下施設の設計や施工環境などの把握のための基礎となるものである。本ステップでは、深層ボーリング孔及びボーリングコアを用いた温度検層並びに熱特性試験により、地温勾配や熱特性の情報を取得することができた。処分事業における概要調査においては、深層ボーリング孔及びボーリングコアを用いた温度検層並びに熱特性試験により地下の温度環境を把握することが可能である。地温勾配については火山地帯のように局所的な熱源がない限り、ローカールスケール数 km 程度の規模の範囲内で大きな変化は見られないことから、ローカールスケール程度の規模の範囲内で、地温勾配については 1 本のボーリング孔での温度検層に

より把握可能である。熱特性については1本のボーリング孔のコア数個程度の熱特性試験により把握可能である。ただし、対象とする範囲内において、岩盤の空隙構造や構成鉱物の種類や量が変化する場合は熱特性が変化することが考えられることから、これらの不均質性を把握した上で、それに応じた熱特性の把握が必要である。

参考文献

- 1) Nakano, K., Amano, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Saegusa, H., Hama, K., Kumazaki, N., Iwatsuki, T., Yabuuchi, S. and Sato, T.: “Working Program for MIZ-1 Borehole Investigations”, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN7400 2002-008 (2003).
- 2) Takeuchi, S. and Ota, K.: “Working Programme for MIZ-1 Borehole Investigations: Revision of Work Procedures after Phase IV”, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN7400 2005-010 (2005).
- 3) 鶴田忠彦, 鏝頭正, 彌榮英樹, 富士代秀之, 藤田有二: “広域地下水流動研究におけるボーリング調査 (DH-15 号孔)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-025 (2005).
- 4) 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研究開発—平成 15 年度報告—”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 2004-007 (2004).
- 5) Ota, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Horimoto, S., Amano, K., Kumazaki, N., Matsuoka, T., Yabuuchi, S., Fujita, Y., Iwatsuki, T. and Furue, R.: “An Overview of the MIZ-1 Borehole Investigations during Phase I/II: MIZ-1 Progress Report 03-01”, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN7400 2004-001 (2004).
- 6) Ota, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Amano, K., Matsuoka, T., Iwatsuki, T., Yabuuchi, S. and Sato, T.: “Overview of MIZ-1 Borehole Investigations”, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN7400 2005-024 (2005).
- 7) Ota, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Horimoto, S., Amano, K., Yabuuchi, S., Fujita, Y., Iwatsuki, T. and Furue, R.: “An Overview of the MIZ-1 Borehole Investigations during Phase III: MIZ-1 Progress Report 03-02”, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN7400 2005-001 (2005).
- 8) 岩月輝希, 太田久仁雄, 竹内真司, 天野健治, 竹内竜史, 三枝博光, 松岡稔幸, 大澤英昭: “広域地下水流動研究 年度報告書 (平成 16 年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-013 (2005).
- 9) 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)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-007 (2005).
- 10) 太田久仁雄, 佐藤稔紀, 竹内真司, 岩月輝希, 天野健治, 三枝博光, 松岡稔幸, 尾上博則: “東濃地域における地上からの地質環境の調査・評価技術”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-023 (2005).
- 11) Anderson, P., Byegard, J., Dershowitz, B., Doe, T., Hermanson, J., Meier, P., Tullborg, E.-L. and Winberg, A.: “Final report of the TRUE Block Scale project – 1. Characterization and model development, Swedish Nuclear and Waste Management Company (SKB), Technical Report TR-02-13 (2002).
- 12) Ota, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Amano, K., Matsuoka, T., Iwatsuki, T., Yabuuchi, S. and Sato, T.: “Overview of MIZ-1 Borehole Investigations”, Japan Nuclear Cycle

- Development Institute, JNC TN7400 2005-024 (2005).
- 13) 藤田有二: “超深地層研究所計画における間隙水圧観測－(2004 年 7 月～9 月) 調査速報 IR05-02－”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7450 2004-004 (2005).
 - 14) 藤田有二: “広域地下水流動研究における間隙水圧観測－(2004 年 7 月～9 月) 調査速報－”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7450 2005-001 (2005).
 - 15) 藤田有二: “超深地層研究所計画における間隙水圧長期観測 2003 年 4 月～2004 年 3 月”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7450 2005-002 (2005).
 - 16) 尾上博則, 三枝博光, 遠藤令誕: “繰り返しアプローチに基づくサイトスケールの水理地質構造のモデル化・地下水流動解析 (ステップ 3 前半)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-012 (2005).
 - 17) 尾上博則, 三枝博光: “ローカルスケールにおける地下水流動解析－サイトスケールにおけるステップ 3 前半の地下水流動解析の境界条件の設定－”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-011 (2005).
 - 18) 阿島秀司, 戸高法文, 岩月輝希, 古江良治: “多変量解析による瑞浪超深地層研究所周辺の地下水化学モデルの構築”, 応用地質, 47, pp.120-130 (2006).
 - 19) Iwatsuki, T., Furue, R., Mie, H., Ioka, S. and Mizuno, T.: “Hydrochemical baseline condition of groundwater at the Mizunami underground research laboratory (MIU)”, *Applied Geochemistry*, 20, pp.2283-2302 (2005).
 - 20) Ota, K., Amano, K. and Ando, T.: “Brief overview of in situ nuclide retardation in a fractured crystalline rock, Kamaishi In Situ Test Site”, In: *Proc. International Workshop for the Kamaishi In Situ Experiments*, Kamaishi, Japan, 24-25 August 1998, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN7400 99-007, pp.67-76 (1999).
 - 21) 太田久仁雄, 湯佐泰久: “放射性廃棄物地層処分の概念とナチュラルアナログ研究の役割”, 資源環境地質学: 地球史と環境汚染を読む (資源地質学会編), 資源地質学会, pp.379-386 (2003).
 - 22) Möri, A., Mazurek, M., Adler, M., Schild, M., Siegesmund, S., Vollbrecht, A., Ota, K., Ando, T., Alexander, W.R., Smith, P.A., Haag, P. and Bühler, Ch.: “Grimsel Test Site – Investigation Phase IV (1994-1996): The Nagra-JNC In Situ Study of Safety Relevant Radionuclide Retardation in Fractured Crystalline Rock IV: The In Situ Study of Matrix Porosity in the Vicinity of a Water-Conducting Fracture”, *Nagra Technical Report*, NTB 00-08 (2003).
 - 23) Ota, K., Möri, 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, pp.131-145 (2003).
 - 24) 彌榮英樹, 岩月輝希, 古江良治, 水野崇: “超深地層研究所計画 (第 1 段階)における地下水の地球化学特性調査”, 核燃料サイクル開発機構, No.23 (2004.6), pp.41-50 (2004).
 - 25) Mizuno, T., Iwatsuki, T., Mie, H., Furue, R. and. Ioka, S.: “Hydrogeochemical baseline groundwater conditions in and around the Mizunami Underground Research Laboratory, the MIU Construction Site”, In: *International Conference on JNC Underground Research Laboratory Projects in Mizunami and Horonobe, Japan (2004)*, Part 1: *International Conference on Geoscientific Study in Mizunami'04 (ICGM'04) – Record*, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN7400 2004-010, pp.111-121 (2004).
 - 26) 山田淳夫, 佐藤稔紀, 中間茂雄, 加藤春實: “瑞浪超深地層研究所を中心とした東濃における深

- 地層の科学的研究－水圧破碎法による初期応力測定結果と地質構造－”，地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会要旨集, G018-P003 (CD-ROM) (2005).
- 27) Nakama, S., Sato, T. and Kato, H.: “Status of study on in-situ stress in the Mizunami Underground Research Laboratory Project”, Alaska Rocks 2005, The 40th U.S. Rock Mechanics Symposium, 05-887 (CD-ROM) (2005).
- 28) 田中治雄: “土木技術者のための地質学入門”, 山海堂 (1964).
- 29) Yoshida, H. and Horii, H.: “Micromechanics-based continuum model for a jointed rock mass and excavation analysis of a large-scale carven”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 41, Issue1, pp.119-145 (2004).
- 30) Oda, M.: “An experimental study of the elasticity of mylonite rock with random cracks”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Vol. 25, No. 2, pp.59-68 (1988).
- 31) 石井卓, 郷家光男, 桜井英行, 里優, 木下直人, 菅原健太郎: “仮想割れ目モデルによる空洞周辺岩盤の透水性変化予測手法”, 土木学会論文集, No.715/III-60, pp.237-250 (2002).
- 32) 郷家光男, 堀田政國, 若林成樹, 多田浩幸, 佐藤稔紀, 中間茂雄, 青木俊朗: “坑道展開方向による水理学的な掘削影響の変化に関する解析的検討”, 第 58 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 3-335, pp.669-670 (2004).
- 33) 三枝博光, 下茂道人, 文村賢一, 竹内真司, 尾上博則: “地下研究坑道掘削に伴う地下水流動状態の変化を予測するための地下水流動解析とそれに基づく調査研究計画の策定”, 日本地下水学会 2006 年秋季講演会講演要旨, pp.258-263 (2006).
- 34) 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, pp.257-262 (1996).
- 35) 核燃料サイクル開発機構: “高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－ 一分冊 1 深地層の科学的研究－”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 2005-014 (2005).

3.2.5 ボーリング孔間を対象とした調査・解析・評価（ステップ4）

(1)ボーリング孔間を対象とした調査・解析・評価の目的及び実施概要

ボーリング孔間を対象とした調査・解析・評価においては、ステップ3で抽出された課題（3.2.4(9)参照）に基づき、ステップ3（3.2.4参照）までに推定された地下水流動に影響を及ぼす重要な地質・地質構造要素の連続性及びこれらの水理特性の連続性を把握することを目的として、研究所用地及びその周辺のボーリング孔間を利用した一連の地球物理学的、水理学的調査を実施した。なお、ボーリング孔間を対象とした調査・解析では、広域地下水流動研究の一環として掘削された既存ボーリング孔（DH-2号孔）及び深層ボーリング孔（DH-15号孔）も活用した。本ステップでは、これらの調査で必要なデータが取得できない個別目標と課題を除き Table 3.1-1 に示す個別目標と課題を対象とした調査研究を実施した。

ボーリング孔間を対象とした調査では、以下の3点を目的とした。

- ① 立坑近傍の花崗岩中を対象として、ステップ3までのボーリング調査で確認された地質構造のボーリング孔間での分布や連続性を把握すること
- ② 岩盤の物理・水理・力学特性に影響を与えると考えられる断層や割れ目帯などの不連続構造の地下施設への分布に関する情報を取得すること
- ③ ボーリング孔間における水理特性やその連続性を把握すること

①及び②については深層ボーリング孔（MIZ-1号孔）と既存ボーリング孔（DH-2号孔）間を利用した弾性波及び比抵抗トモグラフィ探査、深層ボーリング孔（MIZ-1号孔及びDH-15号孔）を利用したマルチオフセットVSP探査（3.3.2参照）及び、深層ボーリング孔（MIZ-1号孔及びDH-15号孔）近傍を通過する測線での反射法弾性波探査を実施した。また、③については深層ボーリング孔（MIZ-1号孔）を揚水孔とし、浅層ボーリング孔（MSB-1、MSB-3号孔）や既存ボーリング孔（DH-2号孔）、深層ボーリング孔（DH-15号孔）を圧力応答観測孔とした孔間水理試験を実施した。

弾性波及び比抵抗トモグラフィ探査は、土岐花崗岩中の上部割れ目帯や研究所用地内に分布する主要な不連続構造の詳細な分布特性を取得することを目的に、Fig. 3.2.5(1)-1 に示す調査レイアウトによって実施した（Fig. 3.2.5(1)-2）¹⁾。

マルチオフセットVSP探査は、ステップ3までに分布が確認・推定されている不連続構造や上部割れ目帯、上部割れ目帯中の低角度傾斜を有する割れ目の集中帯のボーリング孔周辺における分布特性を精度良く把握することを目的として、Fig. 3.2.5(1)-3 に示す調査レイアウトによって実施した（Fig. 3.2.5(1)-4）¹⁾。

深層ボーリング孔近傍を通過する測線での反射法弾性波探査は、ステップ2までに分布が確認・推定された不連続構造について、これまでに情報が取得されていない研究所用地の北～北東領域における分布状況や連続性などを把握することを目的として、Fig. 3.2.5(1)-5 に示す調査レイアウトで、MIZ-1号孔やDH-15号孔の近傍を通過する2測線で実施した（Fig. 3.2.5(1)-6）¹⁾。

孔間水理試験は、ステップ3までに分布が確認・推定されている低角度傾斜を有する割れ目の集中帯及び不連続構造の水理特性やその連続性を把握することを目的として、MIZ-1号孔における低角度傾斜を有する割れ目の集中帯から揚水する試験と、MIZ-1号孔とDH-2号孔間で連続すると推定した不連続構造から揚水する試験の2回の試験を実施した^{1),2)}。揚水区間と観測区間の配置図を Fig. 3.2.5(1)-7 に、試験条件を Table 3.2.5(1)-1 に示す。また、試験結果の概要を Fig. 3.2.5(1)-8 に示す。

これらの調査結果に基づき、ステップ3までに構築したサイトスケールにおける地質構造モデル及び水理地質構造モデルを更新した。さらに、これらのモデルに基づき地下水流動解析を実施

し、動水勾配分布や研究坑道周辺の水理状態などを予測した。これらの調査・解析においても、モデルや解析結果などの分野間の整合性などを確認し調査結果の信頼性の向上を図るとともに、不確実性の幅の変化や解析結果に与える影響の大きな因子について評価し、第2段階の調査・解析における重要要素を抽出・特定した（3.2.6 参照）。

なお、本ステップでの調査・解析・評価を通じた経験に基づき構築した統合化データフローを付録4に示すとともに、各個別目標と課題に向けた取組の詳細は、3.2.5(2)～3.2.5(5)にまとめた。また、3.2.5(6)に本ステップでの調査・解析・評価に基づき抽出・特定した次ステップ以降の調査・解析における重要要素をまとめた。さらに、3.2.5(7)において、本ステップでの調査・解析・評価を通じて整理された処分事業及び安全規制のための基盤技術をまとめた。

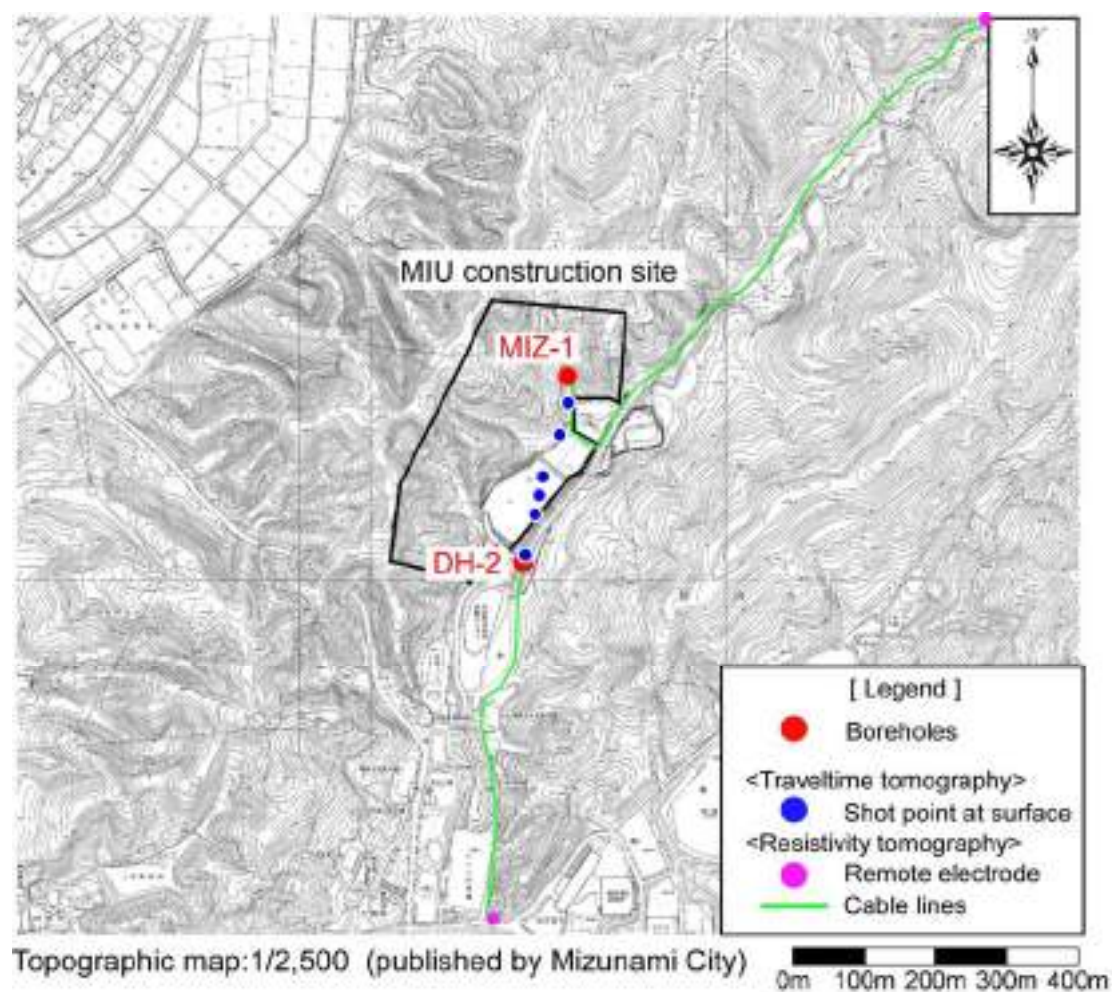


Fig. 3.2.5(1)-1 Location of the crosshole tomography survey¹⁾

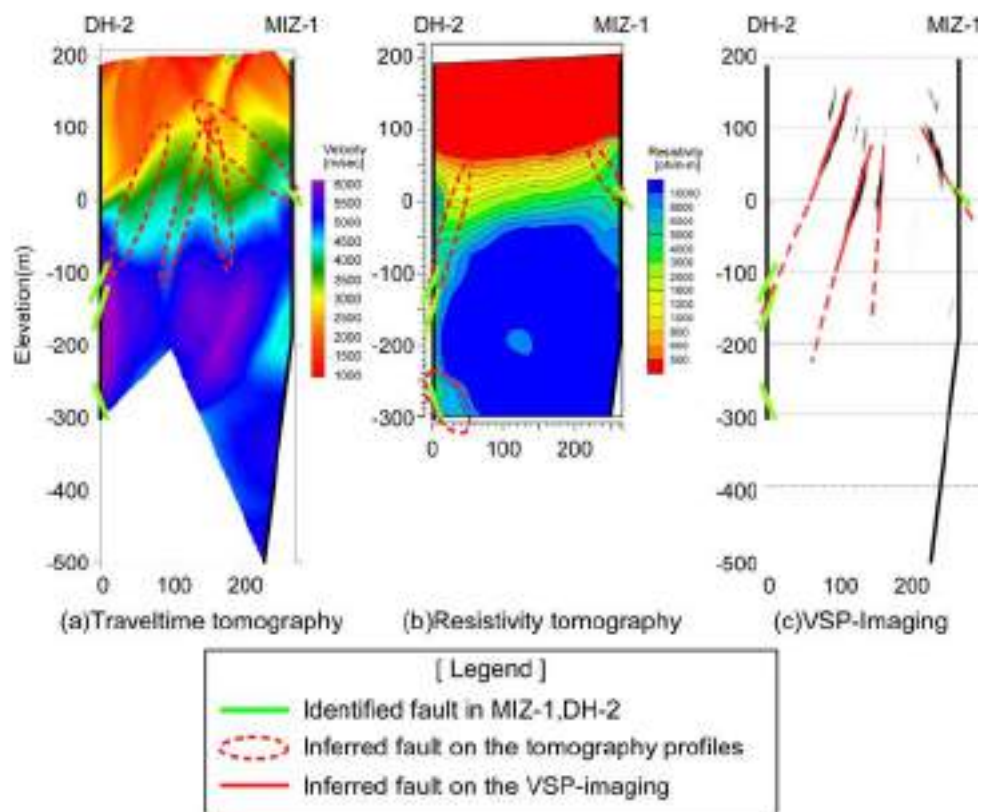


Fig. 3.2.5(1)-2 Geological interpretations based on tomograms and the VSP imaging using seismic data³⁾

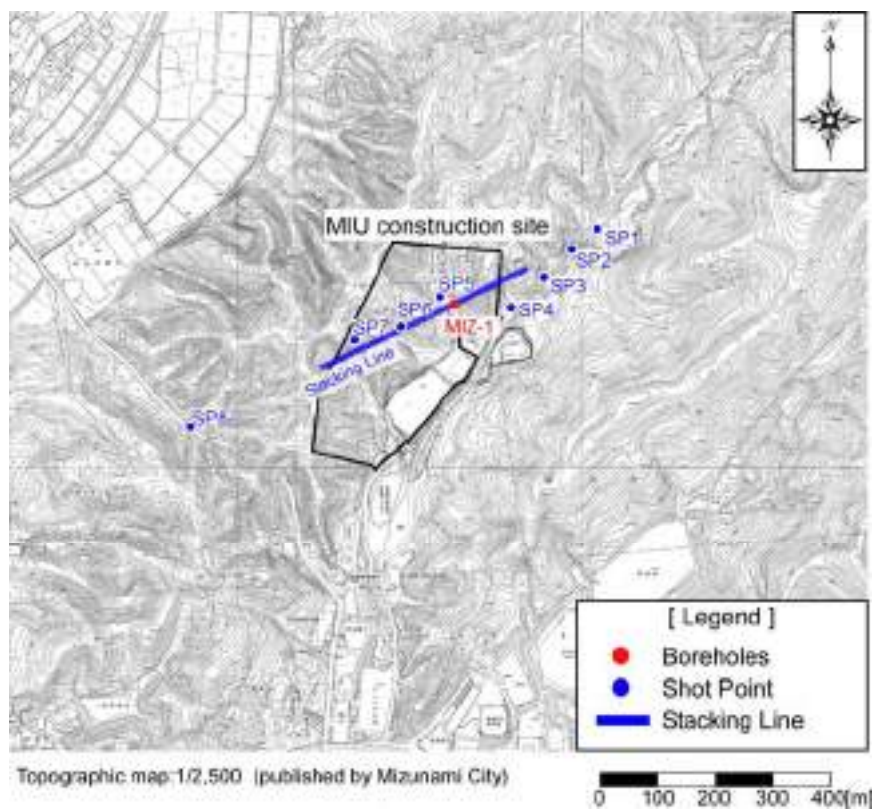


Fig. 3.2.5(1)-3 Location of the multi-offset VSP survey¹⁾

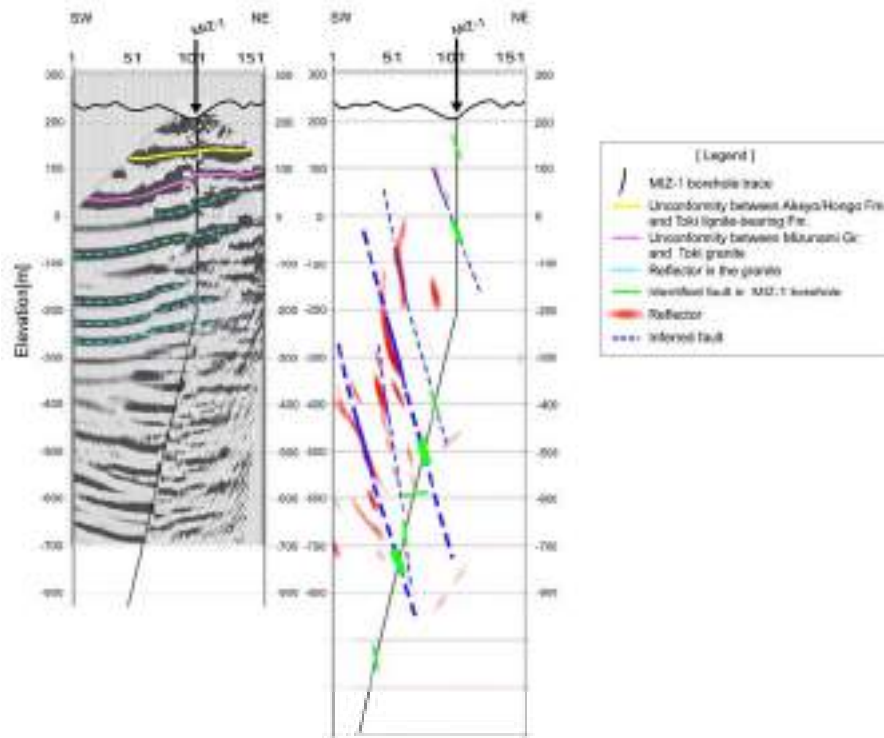


Fig. 3.2.5(1)-4 Geological interpretations based on reflection profiles using the multi-offset VSP³⁾

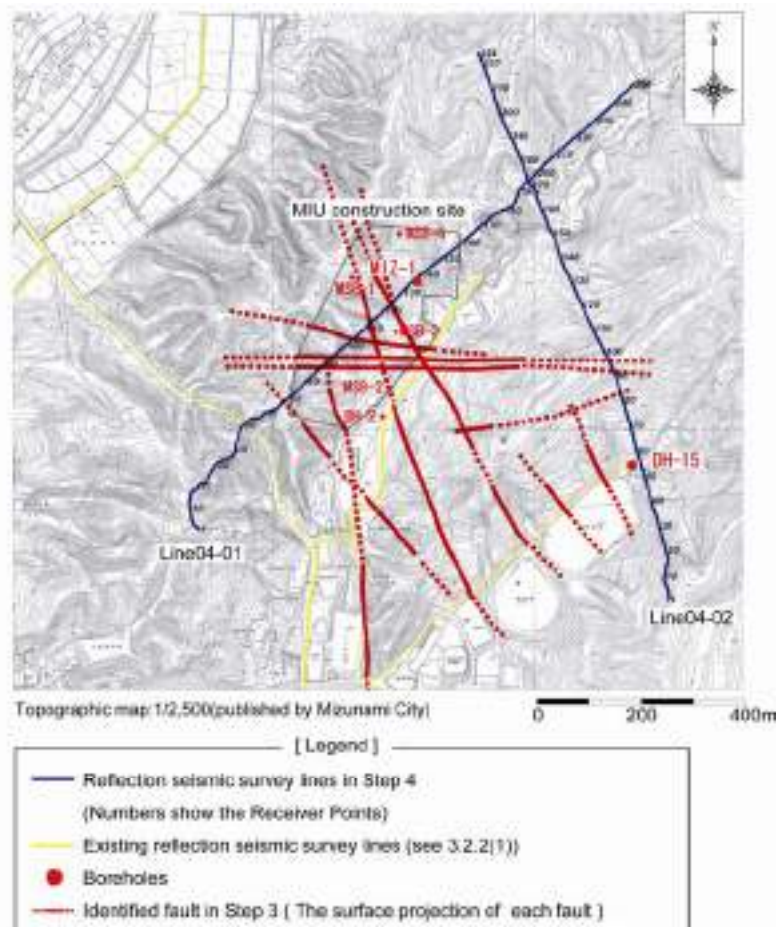


Fig. 3.2.5(1)-5 Location of lines for reflection seismic survey in Step 4¹⁾

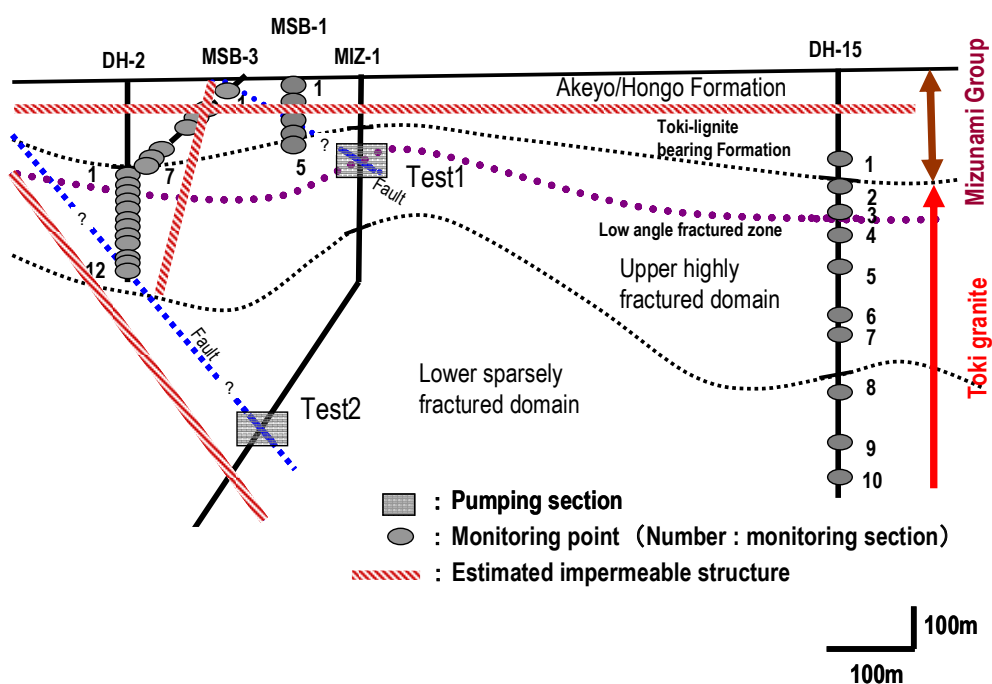
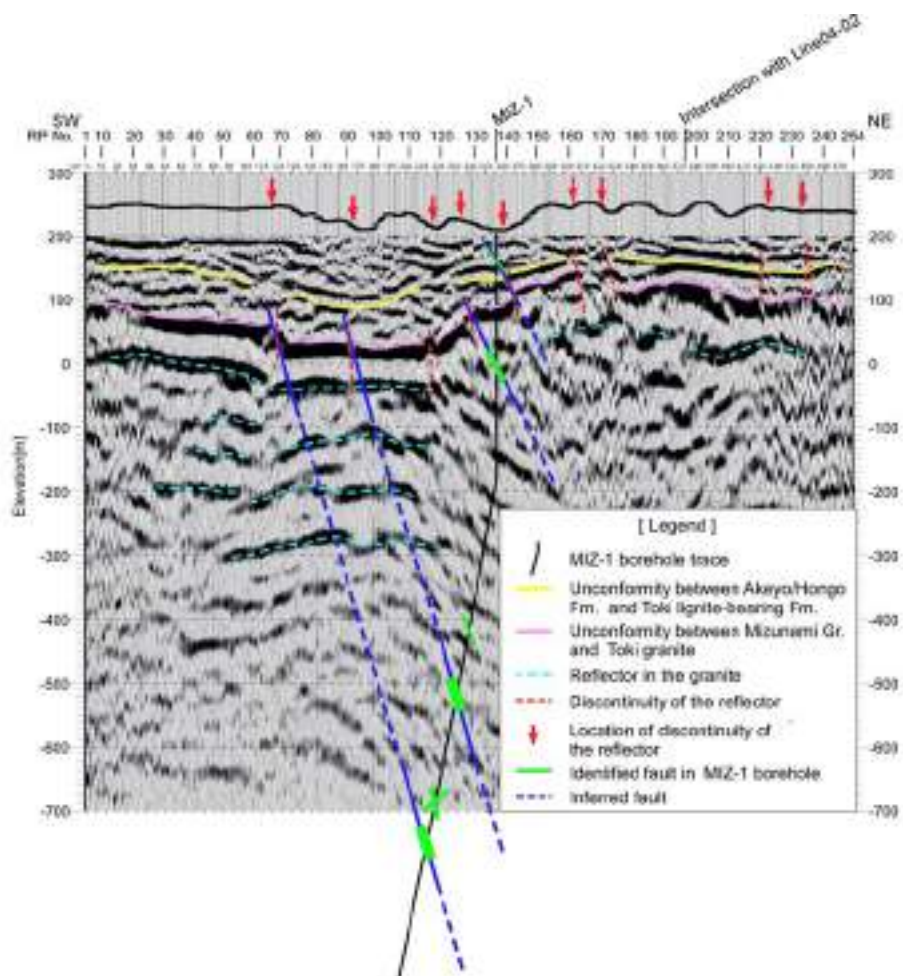


Table 3.2.5(1)-1 Specifications for the crosshole hydraulic tests

Test ID	Test interval (meter along borehole)	Main events in the test	Pumping flow rate (l/min)	Pumping time (hour)	Pumping volume (m ³)
Test 1	191.00 – 226.41	PW-SW/SWS- RW1/RWS1- RW9/RWS9	10.8 (RW9)	244.6 (RW9)	157.6 (RW9)
Test 2	662.20 – 706.23	PW-SW/SWS- RW/RWS-PI	5.2	355.2	110.9

*PW : Pulse withdrawal test, SW : Slug withdrawal test, SWS : Pressure recovery test after slug withdrawal, RW : Constant rate withdrawal test, RWS : Pressure recovery test after constant rate withdrawal, PI : Pulse injection test

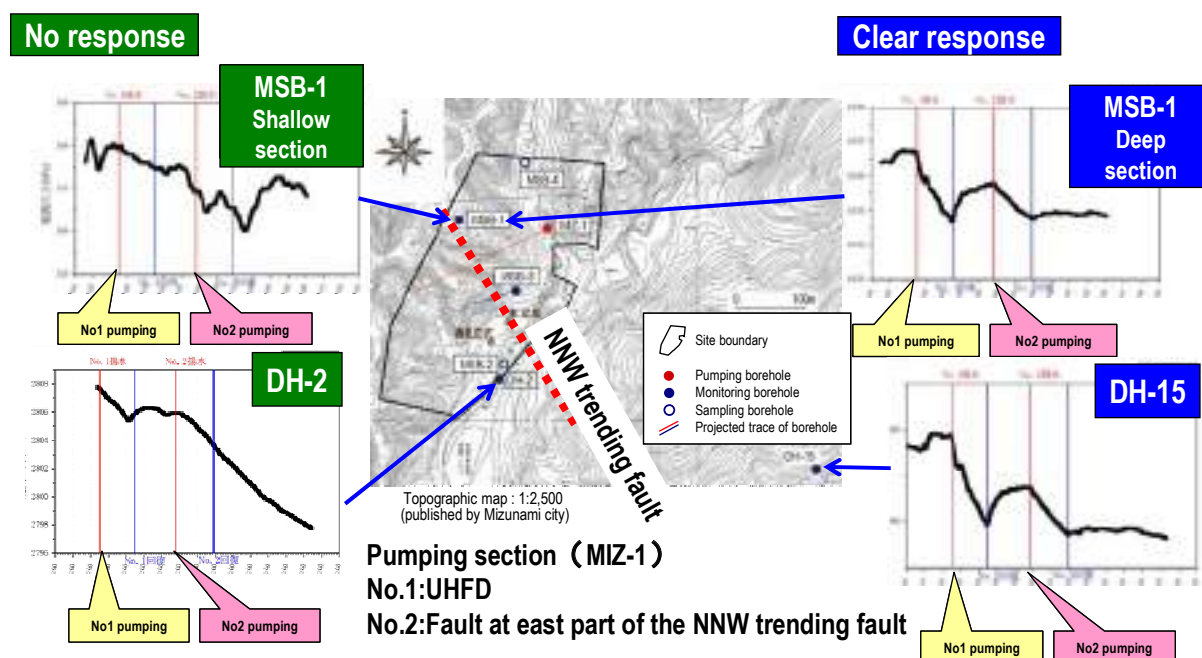


Fig. 3.2.5(1)-8 Results of the crosshole hydraulic tests

(2)地質構造の三次元分布の把握

①目標／実施概要

ボーリング孔間を対象とした調査・解析・評価では、研究坑道の近傍を対象に、特にステップ 3 までに確認・推定された不連続構造の分布や連続性などを把握することを目的に、深層ボーリング孔 (MIZ-1 号孔) と既存ボーリング孔 (DH-2 号孔) 間を利用した弾性波及び比抵抗トモグラフィ探査を実施した (Fig. 3.2.5(1)-1)^{1),3)}。また、ステップ 3 の深層ボーリング孔 (MIZ-1 号孔) 及びローカルスケール領域で掘削した DH-15 号孔) において抽出された断層の空間的な分布や深層ボーリング孔近傍の不連続構造の有無などを把握することを目的に、MIZ-1 号孔及び DH-15 号孔を利用してマルチオフセット VSP 探査を実施した (Fig. 3.2.5(1)-3)^{1),3),4),5)}。さらに、ステップ 3 までに研究坑道周辺において確認・推定された北西、北北西及び東西走向の断層の連続性を把握することを目的に、ステップ 2 では調査を実施しなかった研究用地の北～北東において、

MIZ-1 号孔及び DH-15 号孔の近傍を通過する 2 測線の反射法弾性波探査を実施した(Fig. 3.2.5(1)-5)¹⁾。

ここで得られた地質学的情報に基づき、ステップ 3 までに確認・推定した土岐花崗岩中の構造区分（具体的に、上部割れ目帯と低角度傾斜を有する割れ目の集中帯）の分布との整合性を確認した。また、ステップ 3 までに調査を実施したボーリング孔（具体的には、花崗岩を主な調査対象とした DH-2 号孔、MIZ-1 号孔及び DH-15 号孔）に対して物理検層データ及び岩芯地質調査データを用いた主成分分析⁶⁾（3.3.5 参照）により、断層区間の詳細な設定を行うとともに、新たにステップ 4 で抽出された不連続構造の情報を加えて、サイトスケールの不連続構造の空間分布を推定し、地質構造モデルを更新した⁷⁾。

②結果概要／得られた技術的知見

トモグラフィ探査により、MIZ-1 号孔と DH-2 号孔間において 4 条の断層を推定した (Fig. 3.2.5(1)-2)。また、深層ボーリング孔を利用したマルチオフセット VSP 探査及び反射法弾性波探査により、主に研究所用地の北～北東における瑞浪層群中の地層境界や土岐花崗岩と瑞浪層群の不整合面の境界の分布を把握するとともに、花崗岩中の上部割れ目帯及び低角度傾斜を有する割れ目の集中帯の分布に関してもステップ 3 の地質構造モデルと反射イベントの分布がおおむね整合していることを確認した。また、マルチオフセット VSP 探査及び反射法弾性波探査を合わせて、合計 24 条の断層を推定した(Fig. 3.2.5(1)-4、Fig. 3.2.4(1)-6))。これらの情報に基づき地質構造モデルを更新した (Fig. 3.2.5(2)-1)⁷⁾。

本ステップでは特に孔間トモグラフィ探査により、主立坑近傍に位置する不連続構造を抽出 (Fig. 3.2.5(2)-2)できたほか、ステップ 3 の深層ボーリング孔を利用したマルチオフセット VSP 探査及び研究坑道の周辺を囲う測線配置での反射法弾性波探査（ステップ 1 の測線を含む）により、ステップ 3 までと比較して、研究坑道近傍に位置する不連続構造の分布を詳細に推定することができた。また、本ステップまでに取得された地表から地下深部までの断層分布に関する情報（分布位置や断層の方向性と規模との関係などに関する知見）からは、研究所用地周辺では北西走向の断層幅の規模が大きく、その分布が月吉チャンネル（3.2.1(2)参照）の急崖地形とほぼ整合して見られることを確認したほか、断層分布形状の曲面性や互いの断層の接合関係などを解釈することができ、その分布の推定精度を大幅に向上させることができたと考えられる。

本ステップで実施した弾性波トモグラフィ探査では、当初、大孔間距離（孔口距離で約 260m）であることに加えて孔間に断層が分布したことで孔内震源エネルギーが孔間を十分に伝播しなかったことから、その代替手法として孔間の地表に震源を設置した地表－孔内の弾性波トモグラフィ探査を実施している。地表－孔内の弾性波トモグラフィ探査では、その測定ジオメトリにより、より深部での情報を取得することが困難になるものの、比較的浅部（本調査では深度約 300m まで）における孔間の不連続構造を抽出する手段としては有効であると言える。

また、未調査領域における不連続構造の分布の推定精度を上げるうえでは、これまでに取得した地質学的・地球物理学的データを用いた地質構造シミュレーション解析の実施⁸⁾などが有効と考えられる。

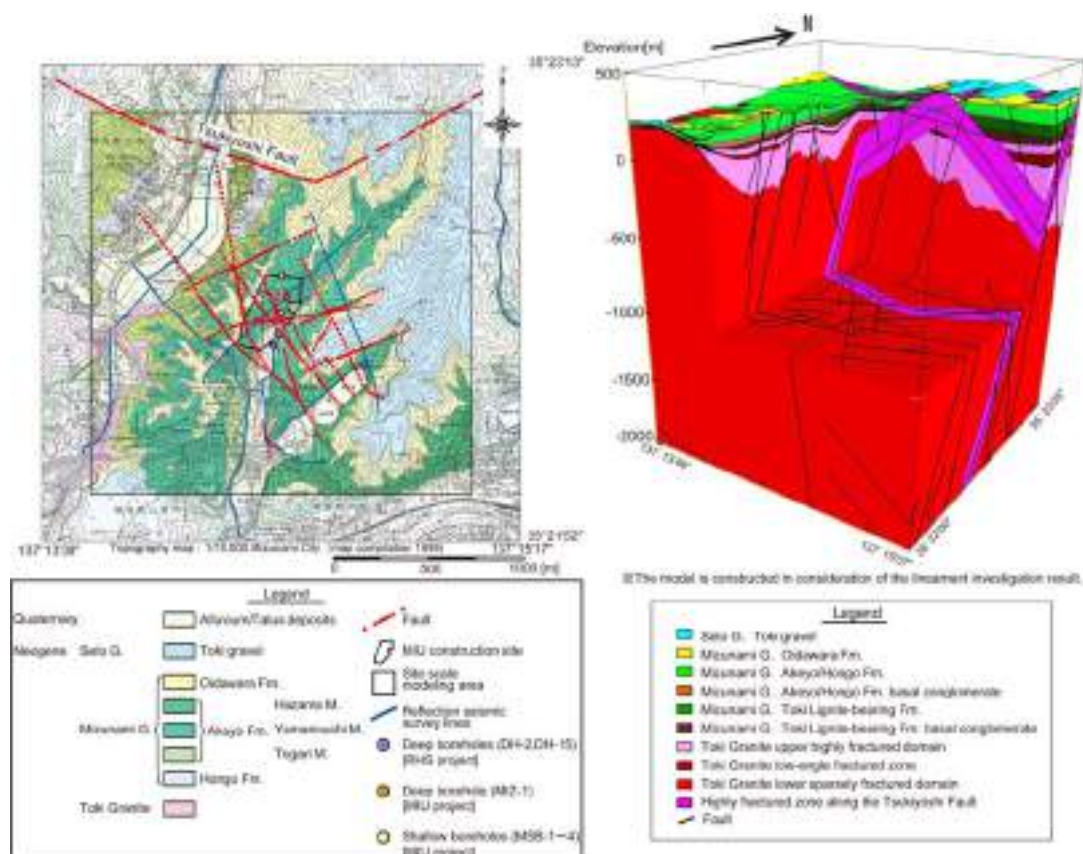


Fig. 3.2.5(2)-1 Geological map and geological model revised using the crosshole investigation phase data

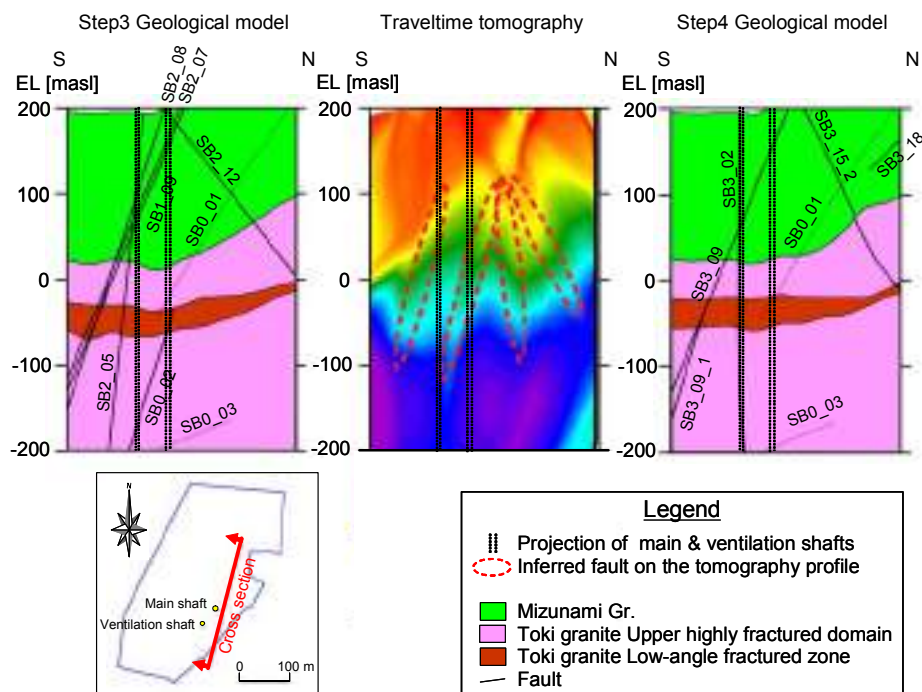


Fig. 3.2.5(2)-2 Comparison between geological interpretation of travel-time tomography profile and geological model

(3)地下水の流動特性の把握

①目標／実施概要

ボーリング孔間を対象とした調査・解析・評価では、ステップ3までに推定された透水性の高い割れ目帯の水理特性（透水性や貯留性など）やその連続性に関する情報を取得するために、研究所用地内の深層ボーリング孔（MIZ-1号孔）を揚水孔とし、掘削長約100～200mの浅層ボーリング孔（MSB-1、MSB-3号孔）に加えて、研究所用地周辺にある既存ボーリング孔（DH-2号孔）、掘削長約1,000mの深層ボーリング孔（DH-15号孔）の4孔を観測孔とした、長期間（揚水期間で2週間程度）の孔間水理試験を実施した²⁾。

孔間水理試験によって得られた地質・地質構造の水理特性を、本ステップで更新された三次元的な地質構造モデル（3.2.5(2)参照）に加えることにより水理地質構造モデルを更新した⁹⁾。更新した水理地質構造モデル及び各観測孔における孔間水理試験に伴う間隙水圧の非定常データに基づき、地下水流動解析による水理地質構造モデルのキャリブレーションを行うとともに、断層の透水異方性に着目した感度解析を実施した^{9),10)}。なお、本ステップで得られた調査データをローカルスケール領域の水理地質構造のモデル化及び地下水流動解析に反映させ、サイトスケール領域の境界条件の更新を行った¹¹⁾。上記の地質構造／水理地質構造モデルの構築及び地下水流動解析はGEOMASSシステム（3.3.10参照）を用いて実施した。

②結果概要／得られた技術的知見

孔間水理試験は最大で10L min⁻¹程度の揚水流量で実施したが、観測孔における孔間水理試験に伴う水圧の変化量は最大でも2kPa程度（水頭換算で約0.2m）であり、地球潮汐変動の幅に相当する量であったことから、得られたデータから地球潮汐、大気圧並びに計測機器の分解能などに由来する異常値などのノイズ成分を除去し、孔間水理試験に伴う明瞭な水圧応答を抽出した²⁾。Fig. 3.2.5(3)-1に、孔間水理試験結果に基づき推定した研究所用地周辺の水理地質構造の模式図を示す。観測孔における水圧応答からは、研究所用地周辺における浅部と深部での水圧応答の違いや、研究所用地中央部に存在する断層を境とする水圧応答の違いが認められ、研究所用地周辺でこれまでに実施してきた長期地下水モニタリング結果¹²⁾から推定されたものと同様の堆積構造に起因する水理境界の存在及び遮水性を有する断層の存在が推定された。

地下水流動解析による水理地質構造モデルのキャリブレーションは、地質・地質構造の水理特性と、断層の分布範囲・位置の2点の不確実性に着目して実施した^{9),10)}。その結果、水圧の非定常変化のデータをキャリブレーションに用いることによって、本ステップまでに把握できなかった地質・地質構造の水理特性及び分布範囲・位置を特定することができた。Fig. 3.2.5(3)-2に、本ステップで更新した水理地質構造モデルを示す。本ステップでは、水理地質構造モデルに新たな水理地質構造として、瑞浪層群中の明世／本郷累層と土岐夾炭累層の下部にそれぞれ基底礫岩を考慮した。さらに、そのほかの地層境界面形状や断層の分布形状及び、地質・地質構造の代表的な水理特性（透水性や貯留性など）を更新した。

上記の水理地質構造モデルのキャリブレーションでは、水理地質構造モデルで考慮した断層のうち、1条の断層を除く全断層の透水異方性の有無が推定された。そこで、透水異方性の有無が推定できなかった1条の断層を対象として、本ステップまでと同様に、断層の透水異方性の有無に着目した地下水流動解析を実施し、その結果に基づき三次元的な全水頭分布を算出した。Fig. 3.2.5(3)-3に示す感度解析結果からは、おおむね同様の全水頭分布が得られ、感度解析の対象となった研究所用地の南側に位置する北北西走向の断層の透水異方性の有無が地下水流動場に及ぼす影響は小さいことが確認された。また、ボーリング孔で実測した全水頭分布と、地下水流動解析結果に基づく解析値を比較した。Fig. 3.2.5(3)-4に、本ステップ及びステップ1～3で実施した地下水流動解析のうち、最も実測値の再現性が高い解析結果の実測値との差の標準偏差を示す。

同図より、本ステップの解析値のほうがステップ3に比べ実測値の再現性が2m程度向上していることが確認され、ボーリング孔間を対象とした調査によって、高透水性の割れ目帯の分布、連続性及び水理特性に関する情報を取得することの有効性が示された。

第1段階においては、繰り返しアプローチに基づき、それぞれのステップの調査結果を反映させた水理地質構造モデルの構築、地下水流動解析結果に基づく次段階以降の調査で対象とすべき重要な要素の特定など、調査・解析・評価の一連のプロセスを繰り返し実施することで、研究坑道建設前の水理地質構造モデルの信頼性を向上させることができた。

一方、ボーリング孔で観測された全水頭の実測値と解析値との間には、依然として20m程度の誤差が認められる (Fig. 3.2.5(3)-4)。この主要因としては、長期地下水モニタリングで観測された瑞浪層群中の明世／本郷累層以深の低水頭分布 (3.2.3(3)参照) の解釈が十分ではなく、本ステップの水理地質構造モデルに基づく地下水流動解析では再現できていないことが挙げられる。瑞浪層群中の明世／本郷累層以深の水頭値は、研究所用地周辺の地下深部を通過する地下水の水理境界であると考えられている土岐川の水頭値と同程度であることから、研究所用地周辺の地下深部から土岐川への流出傾向を高める高透水性の地質・地質構造の存在などの可能性が考えられる。第1段階調査では、調査コスト、作業時間及び社会的な制約条件などの問題があり、上記の仮説を確認する調査は実施できていない。また、東濃地震科学研究所では、超深地層研究所計画が開始される以前の1998年より、研究所用地の南側約250mの地点で、ボーリング孔 (TGR350) による地下水位の観測を実施している¹³⁾。Fig. 3.2.5(3)-5に示すように、このボーリング孔の地下水位は、観測当初から約0.4m/年の割合で低下している。原子力機構が保有している研究所用地内及び周辺のボーリング孔における地下水位も同様の傾向にあると考えられ、定常状態における地下水流動解析の解析結果との比較に用いている実測値が、長期的な視点では定常状態の地下水位を示していない可能性がある。現時点では、この長期的な地下水位の低下を引き起こしている要因については解明されていない。さらに、Fig. 3.2.5(3)-5に示すように、研究所用地周辺のボーリング孔では地震による間隙水圧の変動が観測されている。このことから、ある時点における地下水の間隙水圧分布の状態を正確に把握するうえでは、長期地下水モニタリングによる長期的な観測が必要であると考えられる。

地下水の流動特性の理解度を深めるためには、これらの未だ解決できていない課題を第2段階以降の調査・研究に取り入れつつ、継続的に繰り返しアプローチに基づく調査・解析・評価を行っていくことが重要である。

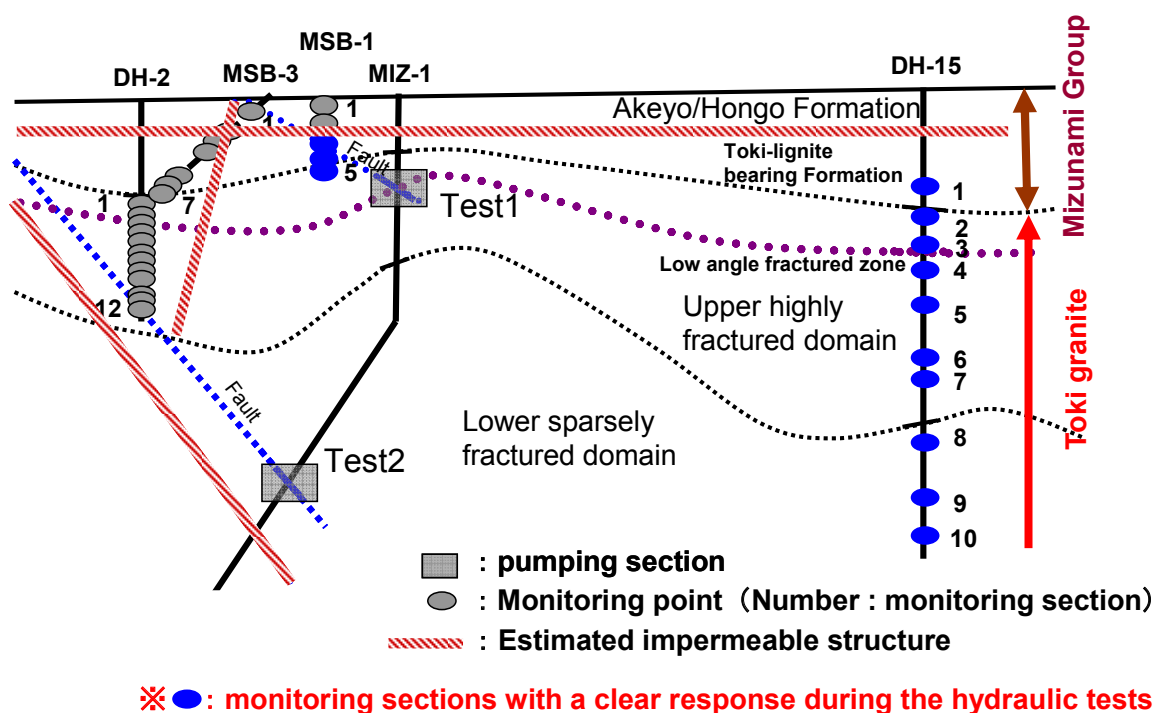


Fig. 3.2.5(3)-1 Observed hydraulic response in monitoring boreholes during the crosshole hydraulic tests

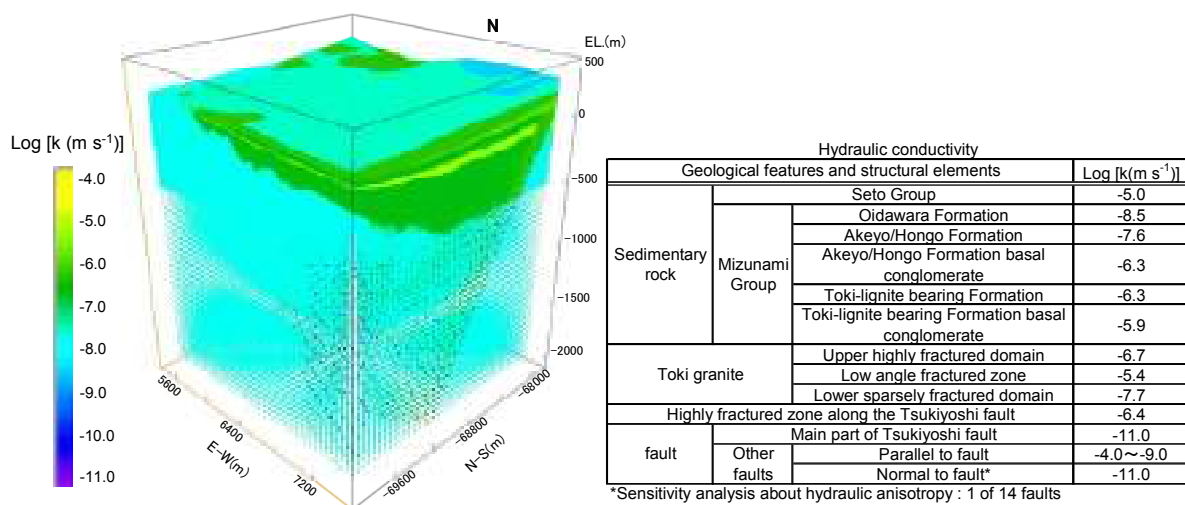


Fig. 3.2.5(3)-2 Hydrogeological model (3D distribution of hydraulic conductivity)

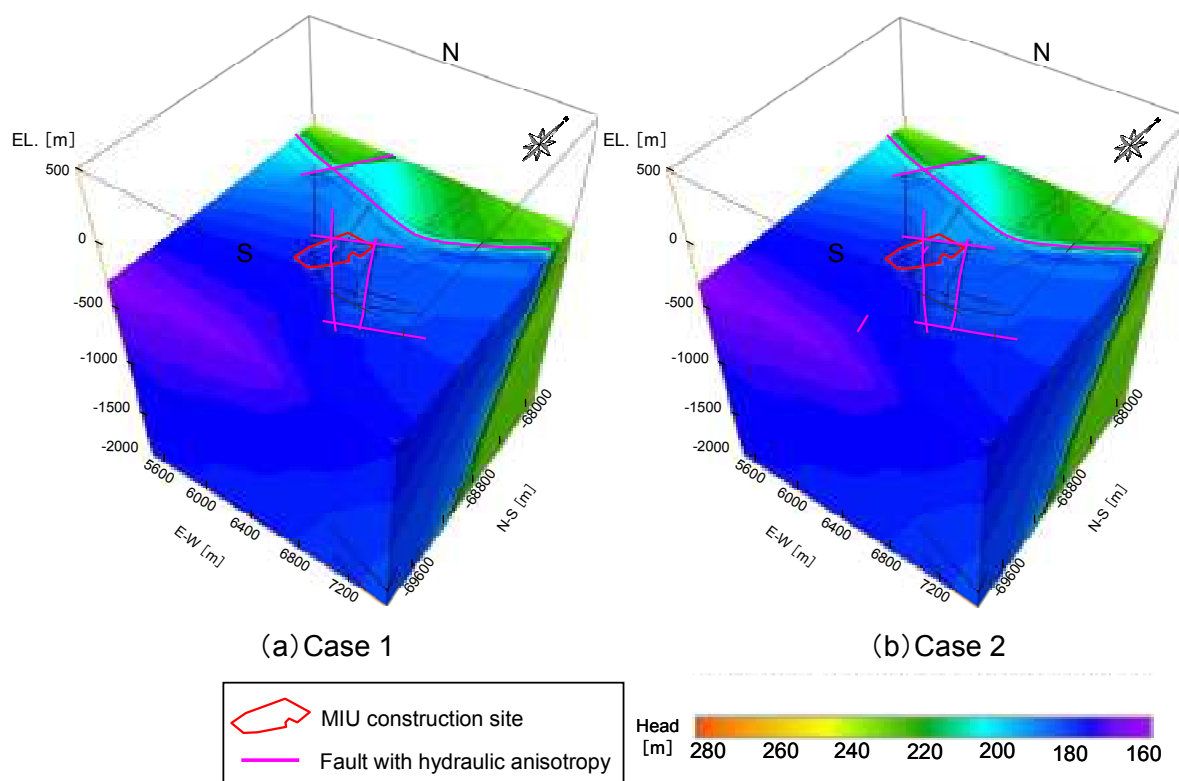


Fig. 3.2.5(3)-3 Sensitivity analysis focused on hydraulic anisotropy of faults (Elevation -300 m : Depth of the shaft 500 m)

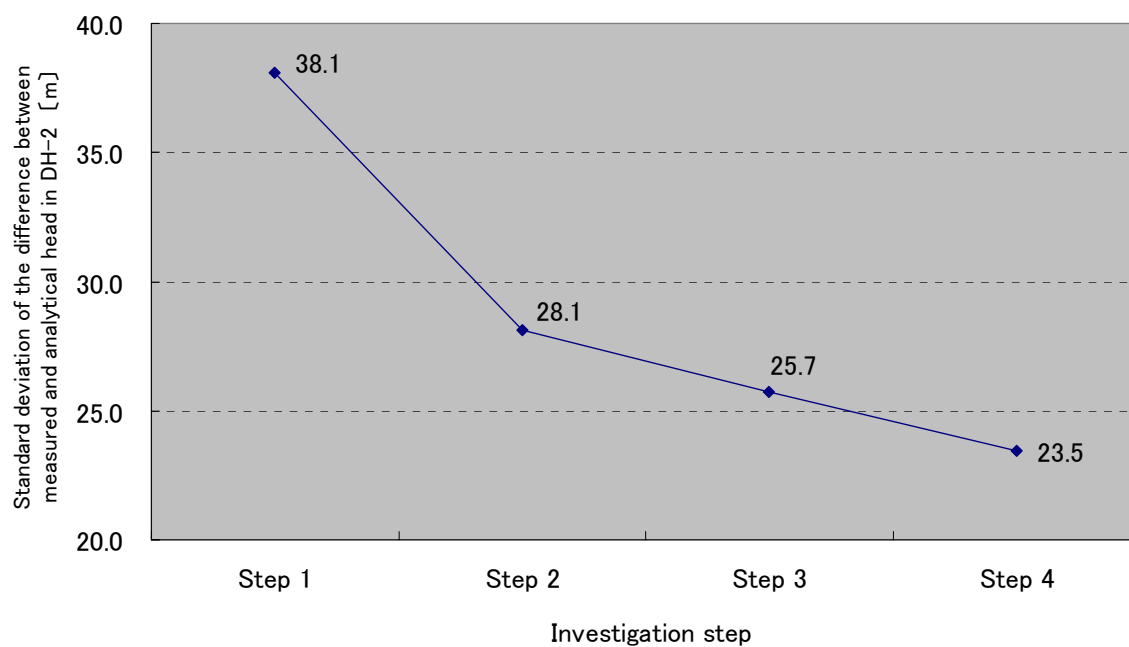


Fig. 3.2.5(3)-4 Comparison between measured and analytical head differences in Step 1 to 4

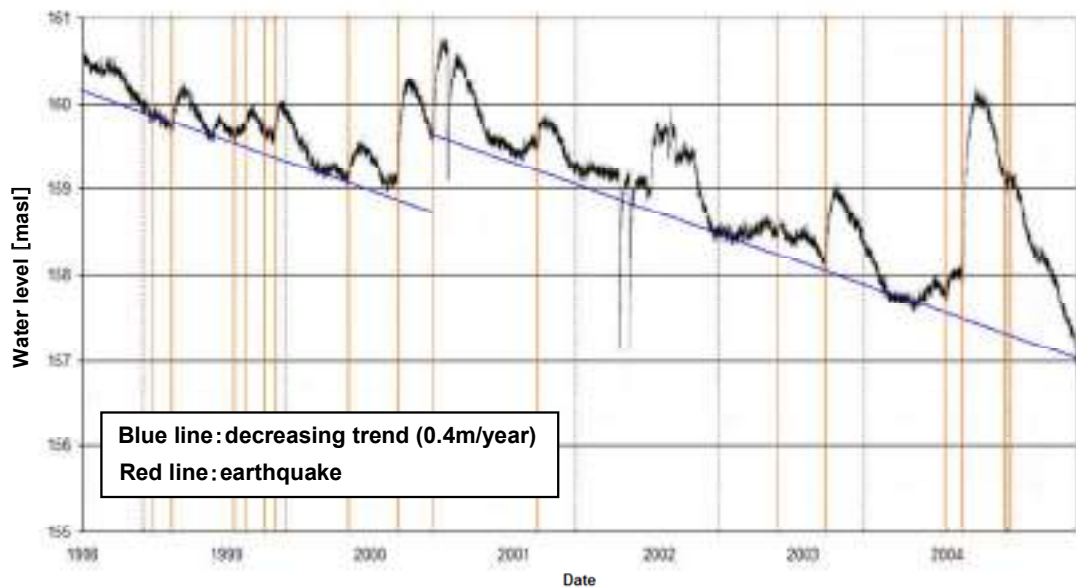


Fig. 3.2.5(3)-5 Result of long-term water level investigation by TRIES in TGR350 (Modified from Asai et al(2003))

(4)希釈効果の把握

①目標／実施概要

ボーリング孔間を対象とした調査・解析・評価では、本ステップで実施した地下水流動解析結果（3.2.5(3)参照）に基づき、地質・地質構造ごとのダルシー流速分布を算出した。

②結果概要／得られた技術的知見

本ステップで更新された水理地質構造モデル（3.2.5(3)参照）では、瑞浪層群中の明世／本郷累層と土岐夾炭累層の下部にそれぞれ基底礫岩が新たな水理地質構造として区分されている。そのため、本ステップでは、帯水層としての効果が期待される地質・地質構造として、ステップ3でその効果が期待された地質・地質構造（低角度傾斜を有する割れ目の集中帯、上部割れ目帯、土岐夾炭累層、月吉断層に伴う割れ目帯及び明世／本郷累層）に加え、上記の基底礫岩を抽出した。

上記の地質・地質構造についてダルシー流速の頻度分布を算出した（Fig. 3.2.5(4)-1）。その結果、地質・地質構造ごとのダルシー流速の分布は、低角度傾斜を有する割れ目の集中帯が最も高い分布を示した。次いで、明世／本郷累層の基底礫岩、土岐夾炭累層とその基底礫岩及び月吉断層に伴う割れ目帯が高い流速分布を示した。上部割れ目帯及び月吉断層に伴う割れ目帯に着目すると、ほぼ同程度の透水係数を有するにも関わらず、ダルシー流速の頻度分布は異なる傾向を示している。また、上部割れ目帯の透水係数はステップ3と同様の値であるにも関わらず、ダルシー流速の頻度分布はステップ3と大きく異なる結果が得られた。これらのことから、同様の透水性を有する帯水層であっても、その分布範囲・形状だけでなく、そのほかの地質・地質構造の分布範囲、形状、位置及び透水性によって、期待される希釈効果は異なる可能性が示された。土岐花崗岩のうち、透水性が相対的に低い下部割れ目低密度帯のダルシー流速分布を基準とすると、低角度傾斜を有する割れ目の集中帯をはじめ、明世／本郷累層とその基底礫岩、土岐夾炭累層とその基底礫岩及び月吉断層に伴う割れ目帯、上部割れ目帯のダルシー流速が比較的高い結果となり、これらが希釈効果を考えるうえで重要な地質・地質構造であることが示唆された。

本ステップにおいては、ボーリング孔間を対象とした調査によって、ステップ3までの調査では把握されなかった地質・地質構造の存在並びに、その存在が確認または推定されていた地質・

地質構造の三次元的な分布、連続性及び水理特性に関する情報を取得し、水理地質構造モデルの信頼性を向上させた（3.2.5(3)参照）。これに基づいて実施した地下水流動解析により得られたダルシー流速分布についても同様に、その信頼性が向上していると考えられる。

第1段階においては、繰り返しアプローチに基づき、水理地質構造モデルの信頼性の向上とともに、サイトスケール領域における希釈効果について把握してきた。第2段階での研究坑道の掘削に伴う水圧変化に関する情報を取得することで、本ステップで希釈効果が期待される地質・地質構造の連続性、三次元的な分布範囲及び水理特性を把握または推定する必要があると考えられる。

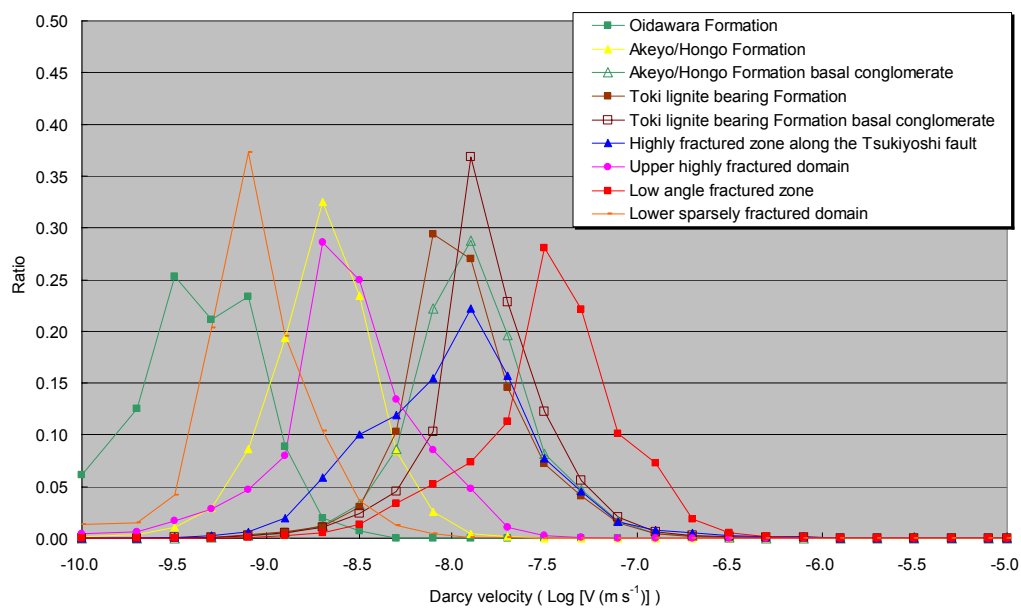


Fig. 3.2.5(4)-1 Darcy velocity distribution

(The vertical axis shows the ratio (cumulative frequency is 1 in each geological formation and domain))

(5)地下空洞周辺の力学・水理状態の把握

1)地下空洞への地下水流入量の把握

①目標／実施概要

ボーリング孔間を対象とした調査・解析・評価では、孔間水理試験に伴う間隙水圧の非定常データを用いたキャリブレーションによって更新した水理地質構造モデル⁹⁾（3.2.5(3)参照）を用いて、研究坑道への地下水流入量を推定することを目的とした地下水流動解析を実施した。

地下水流動解析は、ステップ2、3での検討（3.2.3(6)2及び3.2.4(7)2参照）と同様に有限要素法による等価不均質連続体モデル¹⁴⁾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。この地下水流動解析においては、ステップ2、3での検討と同様に研究坑道近傍の水理特性を考慮した圧力開放係数の違いに着目した感度解析を実施した（Table 3.2.5(5)-1）。なお、研究坑道近傍の水理特性を考慮した圧力開放係数については、第1段階の調査研究では必要な情報を取得できないことから、ステップ2及び3と同じ係数を与えた感度解析を実施した。また、ステップ2、3での検討から研究坑道への地下水流入量に対するモデル間の違いが小さいことが明らかとなったことから、本ステップでは一つのモデルに絞った検討を実施した。

②結果概要／得られた技術的知見

ステップ4での地下水流動解析の結果からは、ステップ2及び3の場合と同様に、圧力開放係数が異なる場合は、同じモデルでも地下水流入量が大きく異なることが確認できた(Fig. 3.2.5(5)-1)。

圧力開放係数が0.8の場合においては、最大で $1,000 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 程度の地下水流入量が予測された。全体的には、立坑の掘削が土岐夾炭累層基底礫部に達した後に地下水流入量が増加するとともに、花崗岩下部割れ目低密度帯では増加傾向が緩やかになるといった傾向が認められた。

圧力開放係数が0.2の場合においては、立坑の掘削が土岐夾炭累層基底礫部に達した後に地下水流入量が急激に増加し、500m以深の花崗岩下部割れ目低密度帯で増加傾向が緩やかとなるといった結果が得られた。また、最大の地下水流入量は、1,000mの最深ステージの掘削を完了した時点で $4,000 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 程度となることが予測された。ステップ3の場合(3.2.4(7)2参照)では、地下水流入量の最大値は、 $10,000 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 以上であったが、ステップ4の解析結果では、ステップ3の場合と比較して約4割程度にまで減少した。また、ステップ3の場合では、中間ステージ及び最深ステージの掘削時において急激な地下水流入量の増加が見られたが、ステップ4の場合では、そのような傾向は見られなかった。これらの原因としては、地質構造モデルの更新(3.2.5(2)参照)及び孔間水理試験結果を用いた水理地質構造モデルのキャリブレーション(3.2.5(3)参照)によって、研究所用地周辺においてモデル化した断層の数がステップ3の場合と比べて少なく、立坑と交差する断層数も少なくなったとともに、その水理特性もステップ3の場合と比べて低いことが挙げられる。また、解析の際に、掘削工程をより詳細に再現するために掘削ステップを細かくしたことも原因であると考えられる。

また、研究坑道への地下水の流入に伴う周辺での水圧低下領域は、ステップ3の場合と同様に、すべてのモデルにおいて、透水異方性を有していると仮定した研究所用地周辺に分布する断層の影響を強く受けていることが示唆された。

さらに、ステップ2から4での地下水流入量の推定結果を比較すると、情報量の増加に伴い、高透水性構造と研究坑道との交差数や位置及びその水理特性が更新されたことによって、地下水流入量の推定結果が大きく異なっていることが明らかとなった。このことから、研究坑道への地下水流入量を精度よく予測するためには、高透水性構造と研究坑道との交差数や位置、その水理特性を把握する必要がある、そのためには、3.2.4(7)2でも述べたように研究坑道掘削地点もしくはその近傍において高透水性構造の空間分布や水理特性に関する情報を取得することが重要であると考えられる。

2)不連続構造などの有無の把握

①目標／実施概要

ボーリング孔間を対象とした調査・解析・評価では、岩盤の物理・力学特性に影響を与えると考えられる断層や割れ目帯などの不連続構造の研究坑道への出現に関する情報を取得することを目的に、3.2.5(2)で構築した地質構造モデルを基に、研究坑道掘削予定地点における不連続構造の出現位置を予測した。

②結果概要／得られた技術的知見

3.2.5(2)で構築した地質構造モデルを基に、研究坑道掘削予定地点における不連続構造の出現位置を予測した(Fig. 3.2.5(5)-2)。ステップ4では、孔間トモグラフィ探査に加えて、ステップ3の深層ボーリング孔を利用したマルチオフセットVSP探査、さらに、これまで調査されていなかった研究所用地の北～北東領域における反射法弾性波探査の実施により、研究坑道周辺において、計28条の断層分布を推定した。このうちの多くは高角度の傾斜を有していると推定した。

本ステップでは特に孔間トモグラフィ探査の実施により、主立坑近傍に位置する不連続構造を抽出できたほか、その近傍に位置する MIZ-1 号孔を利用したマルチオフセット VSP 探査及び研究坑道周辺を囲う測線での反射法弾性波探査（ステップ 1 の測線を含む）により、ステップ 3 までと比べて、研究坑道に遭遇する可能性がある断層の推定精度を高めることができたと考えられる。また、本ステップまでに取得された地表から地下深部までの断層分布に関する情報（分布位置や断層の方向性と規模との関係に関する知見など）に基づき、断層分布形状の曲面化や互いの断層の接合関係などを解釈することができ、その分布の推定精度を大幅に向上させることができたと考えられる。

Table 3.2.5(5)-1 Groundwater flow simulations

Case	Modeled fault/WCF	Pressure relief factor
Model B_1	Tsukiyoshi Fault + Faults around MIU Construction Site + Lineaments with length more than 3km	$\alpha = 0.2$
Model B_2		$\alpha = 0.8$

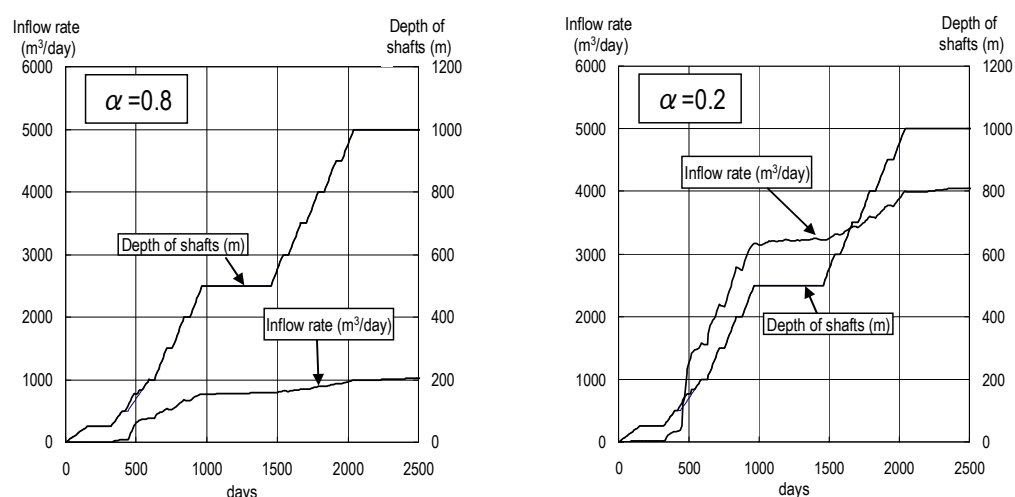


Fig. 3.2.5(5)-1 Inflow rate into MIU (pressure relief factor: 0.8 and 0.2)

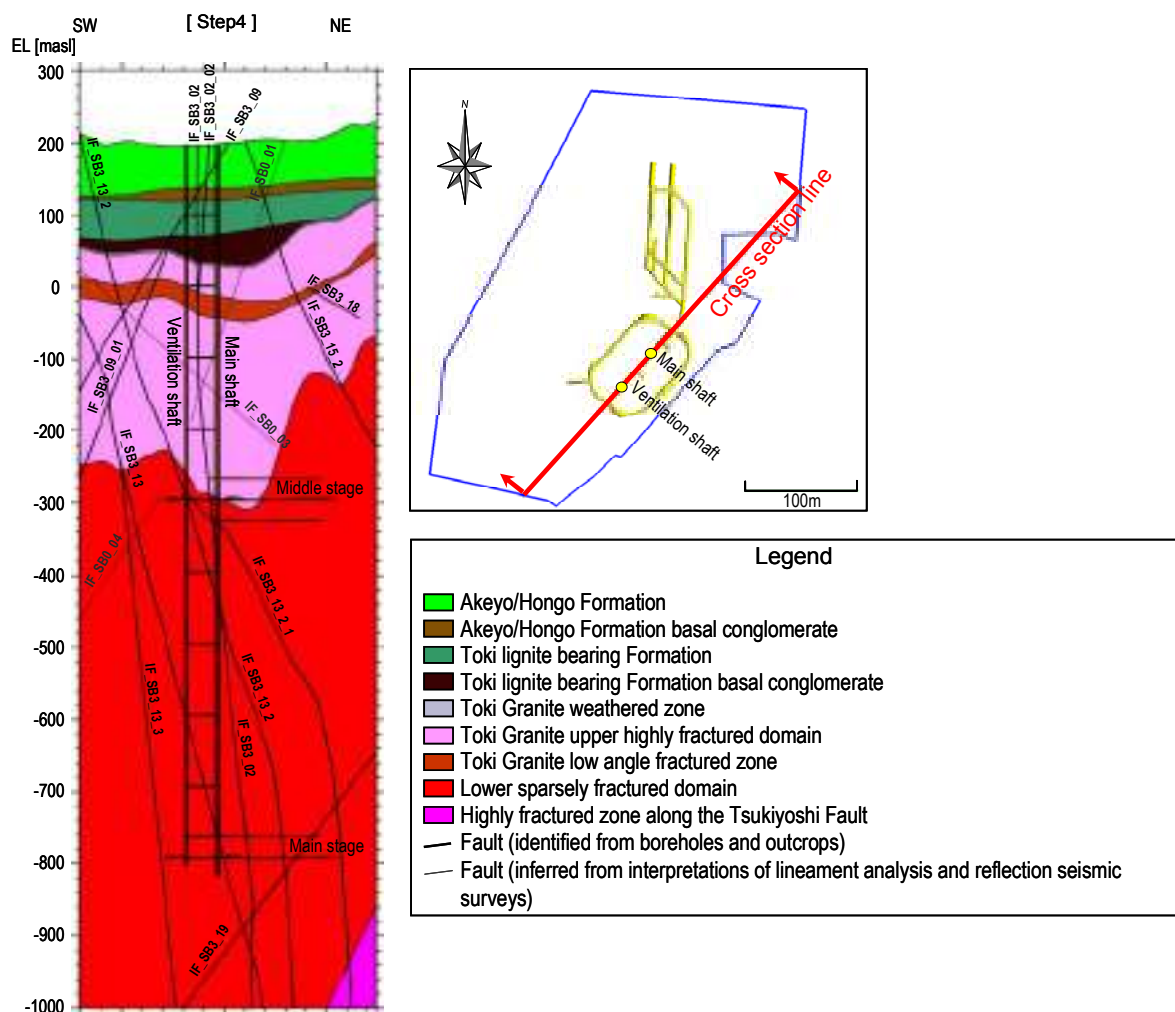


Fig. 3.2.5(5) -2 Predicted geological structures around the MIU facility (Step4)

(6)ボーリング孔間を対象とした調査・解析・評価のまとめ

ボーリング孔間を対象とした調査・解析・評価では、Table 3.1-1 に示すように「地質構造の三次元的分布の把握」、「地下水の流動特性の把握」、「希釈効果の把握」、及び「地下空洞周辺の力学・水理状態の把握／地下空洞への地下水流入量の把握・不連続構造などの有無の把握」を対象に、地下水流動に影響を及ぼす重要な地質・地質構造要素の連続性、及びこれらの水理特性やその連続性を把握することを目的として、研究用地及びその周辺のボーリング孔間を利用した弾性波及び比抵抗トモグラフィ探査、深層ボーリング孔を利用したマルチオフセット VSP 探査、深層ボーリング孔近傍を通過する測線での反射法弾性波探査、並びに孔間水理試験を実施した。

これらの調査結果に基づき、ステップ 3 までに構築したサイトスケールにおける地質構造モデル及び水理地質構造モデルを更新した。さらに、これらのモデルに基づき地下水流動解析を実施し、動水勾配分布や研究坑道周辺の水理特性などを予測した。

第 1 段階においては、ステップ 0 から 4 までに実施した調査やモデル化・解析を通じて、第 2 段階以降の調査・解析における重要要素を抽出・特定した。詳細については、3.2.6 でまとめる。

(7)処分事業及び安全規制のための技術基盤

①地質構造の三次元分布の把握

研究坑道の近傍を通過する断面での孔間トモグラフィ探査は、研究坑道に遭遇する断層の分布を推定するうえで有効である。また、本調査では、適用した調査すべてを同一線上で実施することができなかったが、浅部から深部までの断層分布を精度よく推定するうえでは、できるだけ、孔間トモグラフィや反射法弾性波探査及びマルチオフセット VSP 探査を組合せて同一地点（同じ測線上）で実施できることが望ましい。弾性波トモグラフィ探査では、当初、大孔間距離（孔口距離で約 260m）であることに加えて孔間に断層が分布したことで孔内震源エネルギーが孔間を十分に伝播しなかったことから、その代替手法として孔間の地表に震源を設置した地表－孔内の弾性波トモグラフィ探査を実施した。代替手法として実施した地表－孔内の弾性波トモグラフィ探査では、その測定ジオメトリにより、より深部での情報を取得することが困難になるものの、比較的浅部における孔間の不連続構造を抽出する手段としては有効であった。また、孔間トモグラフィ探査では、孔間距離や地質条件などによっては、十分に信号が伝播しない可能性も考えられるため、調査を実施する際はあらかじめ利用可能な複数の震源を準備しておくことも重要である。ただし、調査のコストや取得データの品質管理の観点から、孔間距離や地質条件などに応じた適切な機器・仕様の選定に関する技術整備をしておくことも重要と考えられる。

また、今後、未調査領域における不連続構造の分布の推定精度を上げるためには、取得した地質学的・地球物理学的データを用いた地質構造シミュレーション解析の実施⁹⁾なども有効と考えられる。

②地下水の流動特性の把握

ボーリング調査を実施するに当たっては、調査コスト、作業時間及び社会的な制約条件に加え、ボーリング孔の掘削による場の攪乱の影響などの観点から、掘削可能なボーリング孔の数量が限定されることが考えられるため、限られたボーリング孔で多くの情報を取得する必要がある。

孔間水理試験は、新たなボーリング調査を実施することなく、掘削済みの複数のボーリング孔を有効に活用し、ボーリング孔間の水理地質構造を効率的に推定できる調査手法といえる。孔間水理試験を実施するに当たっては、これまでのステップで構築された水理地質構造モデル及び地下水流動解析結果に基づいて試験実施領域や推定すべき地質・地質構造の特定を行ったうえで、揚水孔や観測孔のレイアウト、揚水量、揚水期間などの調査計画を立案することが重要である。また、孔間水理試験に伴う水圧の変化量が地球潮汐変動の幅に相当するような微小なものであっても、得られたデータから地球潮汐、大気圧並びに計測機器の分解能などに由来する異常値などのノイズ成分を除去することで明瞭な水圧応答の抽出が可能である。

これまでのステップで把握できなかった地質・地質構造の水理特性及び地質構造特性（分布範囲・位置）を特定する上では、孔間水理試験によって得られた水圧の非定常データを用いた地下水流動解析による水理地質構造モデルのキャリブレーションの実施が有効である。

また、地下水の間隙水圧は地震などによって大きく変動する可能性があるため、ある時点における間隙水圧分布の状態を正確に把握する上では、長期地下水モニタリングによる長期的な観測が必要である。

③希釈効果の把握

地表から地下深部までの不連続構造の分布を効果的に推定するためには、複数のボーリング孔を利用した弾性波・比抵抗トモグラフィ探査やマルチオフセット VSP 探査及び反射法弾性波探査を組合せて同一地点（測線上）で実施することが有効である。また、ボーリング孔間を対象とした孔間水理試験及び孔間水理試験結果に伴う水圧の非定常データを利用した地下水流動解析を実施し、希釈効果が期待される帯水層の連続性や水理特性並びに、希釈効果に影響を及ぼす不連

続構造の地質学的・水理学的特性を特定することが有効である。

④地下空洞への地下水流入量の把握

地下空洞への地下水流入量に与える影響が大きい高透水性構造の空間的な広がりや水理学的な連続性を把握する上では、ボーリング孔間を対象とした調査は有効であるものの、高角度の傾斜を有している構造と鉛直方向に展開される地下空洞との交差部を精度良く予測するには不十分である。したがって、高角度を有する高透水性構造と研究坑道とが遭遇する数を精度よく把握するためには、研究坑道掘削地点におけるボーリング調査などを用いて高透水性構造の空間分布や水理特性に関する情報を取得することが重要である。

⑤不連続構造などの有無の把握

研究坑道の近傍を通過する断面での孔間トモグラフィ探査は、研究坑道に遭遇する断層の分布を推定するうえで有効である。また、本調査では、適用した調査すべてを同一線上で実施することができなかったが、浅部から深部までの断層分布を精度よく推定するうえでは、できるだけ、孔間トモグラフィや反射法弾性波探査及びマルチオフセット VSP 探査を組合せて同一地点（同じ測線上）で実施できることが望ましい。弾性波トモグラフィ探査では、当初、大孔間距離（孔口距離で約 260m）であることに加えて孔間に断層が分布したことで孔内震源エネルギーが孔間を十分に伝播しなかったことから、その代替手法として孔間の地表に震源を設置した地表－孔内の弾性波トモグラフィ探査を実施した。代替手法として実施した地表－孔内の弾性波トモグラフィ探査では、その測定ジオメトリにより、より深部での情報を取得することが困難になるものの、比較的浅部における孔間の不連続構造を抽出する手段としては有効であった。また、孔間トモグラフィ探査では、孔間距離や地質条件などによっては、十分に信号が伝播しない可能性も考えられるため、調査を実施する際はあらかじめ利用可能な複数の震源を準備しておくことも重要である。ただし、調査のコストや取得データの品質管理の観点から、孔間距離や地質条件などに応じた適切な機器・仕様の選定に関する技術整備をしておくことも重要と考えられる。

参考文献

- 1) 渡邊正, 天野健治, 池田幸喜, 岩月輝希, 三枝博光, 佐藤稔紀, 竹内真司, 竹内竜史, 鶴田忠彦: “超深地層研究所計画 年度報告書(2004年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-027 (2005).
- 2) 竹内真司, 藤田有二, 安藤賢一: “亀裂性岩盤を対象とした長期揚水試験”, 2005年秋季講演会講演要旨, 日本地下水学会, pp.10-15 (2005).
- 3) 核燃料サイクル開発機構: “2005年度地層科学研究情報・意見交換会－資料集－”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-029 (2005).
- 4) 岩月輝希, 太田久仁雄, 竹内真司, 天野健治, 竹内竜史, 三枝博光, 松岡稔幸, 大澤英昭: “広域地下水流動研究 年度報告書(平成16年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-013 (2005).
- 5) 鶴田忠彦, 鏡頭正, 彌榮英樹, 富士代秀之, 藤田有二: “広域地下水流動研究におけるボーリング調査(DH-15号孔)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-025 (2005).
- 6) 鏡頭正, 天野健治: “多変量解析を利用した断層分布区間の判定”, 日本応用地質学会平成18年度研究発表会講演論文集, pp.263-266 (2006).
- 7) 中俣公德, 天野健治, 松岡稔幸: “瑞浪超深地層研究所の研究坑道に遭遇する地質分布の地表からの予測と実際”, 日本原子力学会中部支部第38回研究発表会要旨集, p.6 (2006).
- 8) Yamada, Y. and Matsuoka T.: “Digital Sandbox Modeling Using Distinct Element Method: Applications to Fault Tectonics” Faults, Fluid flow, & Petroleum Traps, Rasoul

- Sorkhabi and Yoshihiro Tsuji (eds), AAPG Memoir 85, pp.107-123 (2005).
- 9) 尾上博則, 三枝博光, 大山卓也, 遠藤令誕: “繰り返しアプローチに基づくサイトスケールの水理地質構造のモデル化・地下水流動解析 (ステップ 4)”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-034 (2007).
 - 10) 尾上博則, 三枝博光, 大山卓也: “長期間の孔間揚水試験データに基づく水理地質構造のモデルキャリブレーション”, 2006 年秋季講演会講演要旨, 日本地下水学会, pp.96-101 (2006).
 - 11) 尾上博則, 三枝博光, 大山卓也: “ローカルスケールにおける地下水流動解析—サイトスケールにおけるステップ 4 の地下水流動解析の境界条件の設定—”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-035 (2007).
 - 12) 藤田有二: “超深地層研究所計画における間隙水圧長期観測 2003 年 4 月～2004 年 3 月”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7450 2005-002 (2005).
 - 13) Asai, Y., Ishii, H. Aoki, T. Yamauchi, M. Okubo, T. Tanaka and S. Matsumoto.: “Three dimensional array observation of crustal movements by using deep boreholes and a vault, Active experiments by pumping up groundwater and their application to poroelastic theory”, IUGG XXIII General Assembly, Int. Union of Geod. And Geophys., Sapporo, JAPAN (2003).
 - 14) 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, pp.257-262 (1996).

3.2.6 個別目標ごとの調査の進展に伴う理解度の変遷及び第2段階以降の課題

3.2.1 から 3.2.5 では、安全評価及び地下施設の設計・施工に関わる個別目標と課題に関する調査研究成果を調査ステップごとに整理した。本項では、調査の種類や量と、個別目標と課題に対する理解度や不確実性との関連性について個別目標と課題ごとに整理する。

(1)地質構造の三次元分布の把握

①調査の進展に伴う理解度の変遷

地質構造の三次元分布を把握するための調査・解析においては、ステップ毎の調査の進展に合わせて、地質構造モデルを構築し、その理解度や不確実性を整理したうえで、次の調査を実施していくことで、効率的に精度よく研究用地及びその周辺の地質構造を把握していくことが重要である。Fig.3.2.6(1)-1 及び Fig.3.2.6(1)-2 に、第1段階における調査ステップごとの地質構造モデルの変遷を示す。

ステップ0では、既往の文献並びに、リージョナル及びローカールスケール領域を対象に実施した調査研究結果を解釈し、地質構造の概念モデルを構築 (Fig.3.2.1(1)-8) するとともに、ローカールスケールの地質構造モデルに基づき、サイトスケール領域に分布する地質・地質構造を推定し、既存地質図との照合や精査などを行うことにより、モデルの整合性や情報の過不足、研究用地に特徴的な地質・地質構造などを検討した。この結果、サイトスケールへのスケールの詳細化に伴い、連続性が推定できる地質・地質構造として、瑞浪層群及び瀬戸層群中の各累層並びに土岐花崗岩上部に分布する上部割れ目帯、下部割れ目低密度帯、主要な不連続構造として月吉断層 (断層に伴う割れ目帯を含む) を抽出して、サイトスケールの最初の地質構造モデルを構築した (3.2.1(2)参照)。概念モデル (Fig.3.2.1(1)-8) に示された構造のうち花崗岩の風化帯については、この時点では、サイトスケール領域における空間的な分布が推定できなかったため、地質構造モデルに表現することができなかった。また、この時点では、構築した地質構造モデルにはサイトスケール領域における調査情報を持たないことから、モデル化された各地質構造の分布深度に関しては、大きな不確実性がある。

(a)ステップ0からステップ1への理解度の変遷

ステップ1では、地表地質調査及び反射法弾性波探査を実施し、土岐花崗岩や瑞浪層群、瀬戸層群をはじめ、月吉断層及び土岐花崗岩中の上部割れ目帯などの既得情報との整合性を確認するとともに、ステップ0では得られない既存地質図には記載されていないより小規模な断層を抽出した。ステップ1では、地表地質調査によって、地表露頭における断層分布を確認することができるとともに、反射法弾性波探査と組合せることで、断層の地表下での分布に関する情報を取得できる。抽出された断層は、主に南北～北北西走向を有し、断層には断層ガウジや断層角礫が認められた。この方向は、地下水の主流動方向 (北東～南西方向 : 3.2.1(3)参照) に対して影響を与える方向であるとともに、遮水構造として機能しうる粘土分を多く含む断層ガウジや断層角礫を挟在していることから、地下水流動に大きな影響を与えている可能性があると推測でき、次ステップ以降の調査において、優先的に調査すべきターゲットを抽出できた。断層の分布に関しては、ステップ0と比較して、地質構造モデルにおいてその理解度は向上したと言える。一方で、瑞浪層群中の地層境界面や土岐花崗岩と瑞浪層群の不整合面、並びに土岐花崗岩中の上部割れ目帯に関しては、そのおおよその分布は推定することができているものの、この時点では反射断面の反射イベントと実際の地質分布との対比及びその深度情報の確認が可能なボーリング調査データが得られていないことから、正確な深度の対応付けは困難であり、このため、抽出された地質構造の分布深度に関しては不確実性を有している。また、花崗岩の風化帯に関しては、反射断面からは顕著にそれと判断される反射イベントは抽出されなかった。

(b)ステップ 1 からステップ 2 への理解度の変遷

ステップ 2 では、ステップ 1 までに抽出された地質構造の地表下での分布深度を確認することが可能であり、反射法弾性波探査で抽出された瑞浪層群中の地層境界面や土岐花崗岩と瑞浪層群の不整合面に対応すると考えられる反射イベントとボーリング孔で確認される地質分布とを対比付けてそれらの分布を詳細に把握することができた。また、ステップ 1 までには把握できなかった地質構造として、各累層の基底礫岩の分布、花崗岩中の風化帯の分布を確認するとともに、上部割れ目帯中において、新たに低角度傾斜を有する割れ目の集中帯の存在を確認しその分布を推定した (3.2.3(2)参照)。また、ステップ 1 で抽出された北北西走向の断層に加えて、東西走向と南北走向の断層を新たに抽出した。断層には断層ガウジや断層角礫が認められ、ステップ 1 で確認された性状 (3.2.2(2)参照) と整合的であることを確認した。ステップ 2 では、ステップ 0 の概念モデルに示された花崗岩の風化帯について、初めてその分布を把握することができた。また、既存ボーリング調査により、これまでには把握されていなかった上部割れ目帯中の低角度傾斜を有する割れ目の集中帯の存在を確認し、地質構造モデルとともに概念モデルについても更新した。

(c)ステップ 2 からステップ 3 への理解度の変遷

ステップ 3 では、ステップ 2 までに把握した地質・地質構造要素の分布深度を確認するとともに、ステップ 2 まででは取得できない花崗岩深部の地質・地質構造を確認することができた。とくにステップ 2 に比べて花崗岩深部までの実測データが取得できたことにより、深部の地質構造モデルの精度を大幅に向上させることができたと言える。具体的には、瑞浪層群中の地層境界面や土岐花崗岩と瑞浪層群の不整合面及び低角度傾斜を有する割れ目の集中帯の分布深度を把握するとともに、上部割れ目帯及び下部割れ目低密度帯について、その境界深度を確認した。また、長期地下水モニタリング装置を設置した浅層ボーリング孔での掘削応答モニタリングにより、本ステップまでに確認あるいは推定していた不連続構造について、遮水性や水理学的連続性に関する情報を取得することができた。また、断層については、緑泥石や粘土鉱物により特徴付けられる強い変質を伴い、研究所用地を横断すると推定される規模の大きな断層を 5 条抽出することができた。また、ステップ 1 及び 2 で確認された北北西走向の断層については、本ボーリング調査では確認されなかった。これは、研究所用地を横断する規模を有すると推定される断層の一つにより変位したものと解釈された。

(d)ステップ 3 からステップ 4 への理解度の変遷

ステップ 4 では、研究坑道を挟むボーリング孔間 (MIZ-1 号孔および DH-2 号孔間) を対象とした弾性波及び比抵抗トモグラフィ探査とともに、深層ボーリング孔 (MIZ-1 号孔及び DH-15 号孔) を利用したマルチオフセット VSP 探査、及び深層ボーリング孔 (MIZ-1 号孔及び DH-15 号孔) 近傍を通過する測線での反射法弾性波探査の実施により、研究坑道周辺における地質構造の推定精度を向上させることができた。とくに断層の分布に関しては、ステップ 3 までの情報と合わせて研究坑道を囲む領域でその分布位置情報を取得できたことから、ステップ 3 までと比べて断層の解釈精度が向上し、研究坑道近傍における断層分布の推定精度を大幅に向上させることができた。

地質構造の三次元分布の理解度の変遷に関しては、調査の進展に伴い個々の地質・地質構造要素の分布深度に関する推定精度を段階的に向上させることができるとともに、とくに不連続構造においては、調査が進展して地表から地下深部までの抽出される断層が増加することにより、調査地域に分布する断層の分布傾向 (断層の方向性と規模) などに関する知見が蓄積され、より詳細な断層の解釈が可能となり、その推定精度を大幅に向上させることができると考えられる。

一方、地表地質調査や物理探査およびボーリング調査により確認・推定された断層に比べて、断層としての分布の可能性の低いリニアメントのみの情報も地質構造モデルにおいて考慮されて

いることから、今後の課題としては、不確実性の定量化手法を含むモデル化技術の高度化が挙げられ、統計学手法を用いた不確実性の評価技術や様々な不均質性を考慮可能な地質構造・水理地質構造のモデル化手法の整備が重要と考えられる。また、未調査領域における不連続構造の分布の推定手段のひとつとして、それまでに取得した地質学的・地球物理学的データを用いた地質構造シミュレーション解析の実施なども重要と考えられる。

②第2段階以降の課題

第1段階における調査研究において、地下水流動、地下水の水質及び岩盤の応力状態などに影響を及ぼすと考えられるモデル化すべき地質・地質構造を抽出し、それらの空間分布を示した地質構造モデルを段階的に構築してきた。今後、第2段階の調査研究では、これらのモデル化された地質・地質構造の分布を確認し第1段階の調査研究で適用した体系的な調査手法と予測された地質・地質構造の精度に関する評価を行うとともに、モデルを更新していく。さらに、研究坑道に分布するより詳細な地質・地質構造として、とくに不連続構造に着目して、その分布、幾何形状、構造形態、岩石・鉱物特性などを把握し、ブロックスケールを対象とした地質構造モデルを構築する。

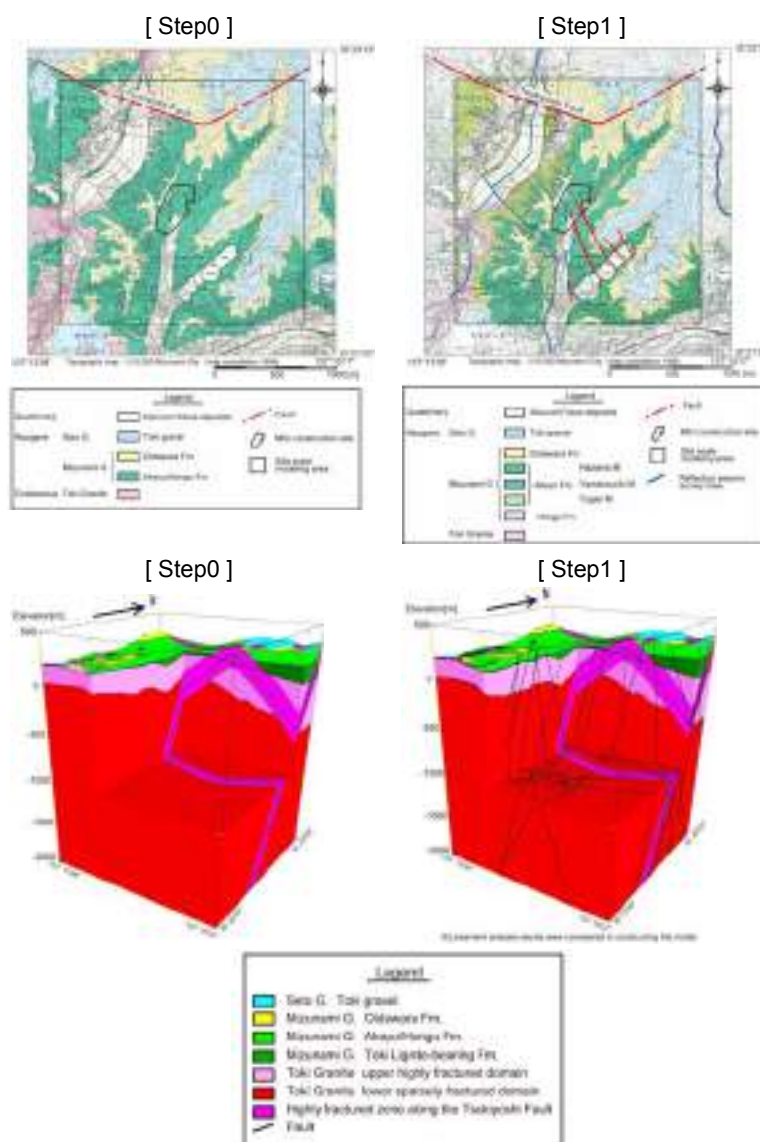
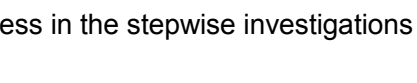


Fig.3.2.6(1)-1 Evaluation of the geological model with progress in the stepwise investigations (Step0-Step1)



(2)地下水の流動特性の把握

①調査の進展に伴う理解度の変遷

地下水の流動特性を明らかにするための調査・解析・評価技術の基盤を整備するためには、調査量と地下水流動特性の理解度や不確実性との関係を明確にすること、及び次の調査で確認すべき重要な要素を特定することが重要である。これらの課題に対して、第1段階においてはそれぞれの調査ステップで実施された調査結果に基づき、地質構造モデルに基づく水理地質構造モデルの構築及び地下水流動解析を実施し、地下水の流動特性に影響を及ぼす可能性のある重要な要素を特定し、次の調査に反映させてきた。

ステップ0では、断層が地下水の流動特性に影響を及ぼすとともに、地下水の地球化学的特性や研究坑道への地下水流入量にも大きな影響を及ぼす可能性が示唆されている(3.2.1(3)、3.2.1(4)、3.2.1(7)2参照)。特に、透水異方性を有する月吉断層が地下水の流動特性に及ぼす影響が大きいことが確認されている(3.2.1(3)参照)。地質学的調査によって、その存在が確認もしくは推定されたすべての断層の透水性や透水異方性などの水理特性を調査することは、調査コスト、作業時間などの様々な制約条件やボーリング孔の掘削による場の攪乱の影響の観点から現実的ではない。そのため、地下水流動解析では、地下水流動特性に特に大きな影響を及ぼすと考えられる断層を抽出・特定するために、水理地質構造モデルに考慮された断層の水理特性のうち、透水異方性に着目した感度解析をステップごとに繰り返し実施してきた。調査の進展に伴う地下水の流動特性に関する理解度を評価するにあたっては、上記の感度解析結果に基づき、研究坑道掘削前の地下水流動特性の把握及びそれぞれのステップにおいて特定することのできない水理特性の有無の観点から、その評価指標を以下のように設定した。

- ・感度解析のケース数
- ・感度解析のケース間での全水頭分布のばらつき
- ・ボーリング孔における全水頭分布の実測値の再現性

感度解析のケース数の減少は、地下水流動特性に影響を及ぼす断層のうち、水理特性が把握／推定された断層が増加していることを意味しており、地下水流動特性のうち岩盤中の透水性分布に関する理解度が向上したと解釈できる。感度解析のケース間での全水頭分布のばらつきの減少は、地下水流動特性に特に大きな影響を及ぼす断層の水理特性が把握／推定されていることを意味しており、地下水流動特性のうち岩盤中の透水性分布に関する理解度が向上したと解釈できる。ボーリング孔における全水頭分布の実測値の再現性の向上は、地下水流動解析結果の信頼性が向上したことを意味しており、地下水流動特性のうち動水勾配分布並びに岩盤中の透水性分布に関する理解度が向上したと解釈できる。

Fig. 3.2.6(2)-1 に、第1段階における調査ステップごとの水理地質構造モデルと地下水流動解析結果に基づき算出した全水頭分布の一例を示す。Fig. 3.2.6(2)-2 に、ボーリング孔で実測された全水頭分布と各ステップで実施した感度解析ケースにおける解析値との差の標準偏差を示す。なお、Fig. 3.2.6(2)-1 に示した水理地質構造モデル及び全水頭分布は、各ステップで実施した感度解析結果のうち最も実測値の再現性が高い解析ケース (Fig. 3.2.6(2)-2 における標準偏差が最小) のものである。

以下より、ステップの進展に伴う理解度の変遷について、その概要をとりまとめる。

(a)ステップ0からステップ1に伴う理解度の変遷

ステップ0は既得情報を用いた調査段階であるため、水理地質構造モデルにはローカルスケール領域を対象とした調査研究において、断層として抽出された月吉断層及び3km以上の連続性

を有するリニアメントのみが考慮されている (Fig. 3.2.6(2)-1)。月吉断層については、同断層を対象とした調査研究から透水異方性を有することが確認されている (3.2.1(3)参照)。また、3km以上の連続性を有するリニアメントについては、同等の規模を持つ月吉断層と類似した水理特性を有していると仮定して透水異方性を設定した。このため、ステップ0においては、感度解析は実施していない (Table 3.2.6(2)-1)。

ステップ0の地下水流動解析結果からは、断層が地下水流動特性に大きな影響を及ぼす地質・地質構造であることが認められ、その分布、幾何形状の把握が重要であることが示された (Fig. 3.2.6(2)-3)。そのため、ステップ1では、リニアメント判読、地表地質調査及び反射法弾性波探査を実施し、その調査結果に基づき、13条の断層が新たに水理地質構造モデルに組み込まれるとともに、各地層境界面の深度分布が更新された (Fig. 3.2.6(2)-1)。水理特性が把握されていない断層の追加により、ステップ1においては、断層の主要な走向ごとに32ケースの感度解析を実施した (Table 3.2.6(2)-2)。

Fig. 3.2.6(2)-2をみると、ステップ0からステップ1にかけては、解析ケースが増加するとともに、実測値の再現性が顕著に低下しており、一見すれば、ステップ1への調査の進展に伴って地下水の流動特性に関する理解度が大幅に低下したものと読み取ることができる。しかし、ステップ0では、サイトスケール領域を対象とした調査が実施されておらず、動水勾配分布に影響を及ぼす可能性のある不連続構造などの地質・地質構造の存在の有無でさえほとんど把握されていない。言い換えれば“未検出の不確実性”を多く有する段階である。一方、ステップ1では、地表での調査によって不連続構造の存在が推定または確認され、水理地質構造モデルに断層として考慮されたものの、その存在や分布範囲の確実性及び水理特性が把握されていない。いわば“量と質がわからない検出された不確実性”を多く有する段階である。すなわち、両者は本質的に全く異なる不確実性であり、ステップ1の調査は次段階以降の調査対象とすべき重要な地質・地質構造を抽出し、その分布範囲や水理特性を把握していくための初期調査として重要な位置付けにあるといえる。地下水の流動特性に関する理解度を効率的に向上させるためには、まず動水勾配分布に影響を及ぼす可能性のある地質・地質構造の存在を推定したうえで、その地質・地質構造がどのように分布し、どのような水理特性を有しているかを調査していくことが重要である。

ステップ1の感度解析の結果から、北北西走向及び北東走向の断層が研究所用地の地下水流動場に大きな影響を及ぼすことが示された (Fig. 3.2.6(2)-4)。このことから、次段階以降の調査においては、これらの走向を有する断層の分布、幾何形状、水理特性などの評価が重要であると考えられた。そのため、ステップ2で実施した浅層ボーリング調査の計画立案に際しては、ステップ1の感度解析結果に基づき、研究所用地を通過する北北西走向の断層の幾何形状や水理特性の把握をボーリング調査の目的の一つとした。また、既存ボーリングにおいては、地質学的調査、断層などの不連続構造の分布や幾何形状、水理特性を把握することを目的とした水理学的調査を再度実施した。

(b)ステップ1からステップ2に伴う理解度の変遷

ステップ2では、浅層ボーリング及び既存ボーリングの調査結果に基づき、土岐花崗岩中の上部割れ目帯に低角度傾斜を有する割れ目帯が、新たに水理地質構造モデルに組み込まれるとともに、そのほかの地層の境界面の深度分布や北北西走向、東西走向の断層の幾何形状、並びにそれらの水理特性に関する情報が取得され、水理地質構造モデルに反映された (Fig. 3.2.6(2)-1)。ステップ2においては、断層の主要な走向ごとに12ケースの感度解析を実施した (Table 3.2.6(2)-3)。

Fig. 3.2.6(2)-2をみると、ステップ1からステップ2にかけては、解析ケース数が1/3程度に減少しており、岩盤中の透水性分布に関する理解度の向上が確認できる。これは、ステップ2で断層の地下深部での三次元的な分布及び水理特性が取得されたことに起因するものであり、それ

らの情報を直接取得することのできるボーリング調査が岩盤中の透水性分布に関する不確実性を低減させる有効な手段であることが示された。また、実測値の再現性が大きく向上している解析ケースがいくつか確認でき、それに伴い解析ケース間での全水頭分布のばらつきが大きくなっている。このことから、ステップ 2 では、まだ研究所用地周辺の地下水流動場に大きな影響を及ぼす断層の透水異方性の有無が推定されておらず、その透水異方性を推定することで、動水勾配分布並びに岩盤中の透水性分布に関する理解度が向上する可能性があることを示している。

ステップ 2 の感度解析の結果から、北北西走向、北西走向及び東西走向の断層が研究所用地の地下水流動場に大きな影響を及ぼすことが示された (Fig. 3.2.6(2)-5)。このことから、次段階以降の調査においては、これらの走向を有する断層の分布、幾何形状、水理特性などの評価が重要であると考えられた。そのため、ステップ 3 で実施した深層ボーリング調査の計画立案に際しては、ステップ 2 の感度解析結果 (3.2.3(3)参照) に基づき、研究所用地を通過する北北西走向、東西走向の断層の花崗岩中での幾何形状や水理特性の把握をボーリング調査の目的の一つとした。

(c)ステップ 2 からステップ 3 に伴う理解度の変遷

ステップ 3 では、深層ボーリングの調査結果に基づき、地層の境界面の深度分布や北北西走向、北西走向、東西走向の断層の幾何形状、並びにそれらの水理特性に関する情報が取得され、水理地質構造モデルに反映された (Fig. 3.2.6(2)-1)。ステップ 3 においては、断層の主要な走向ごとに 8 ケースの感度解析を実施した (Table 3.2.6(2)-4)。

Fig. 3.2.6(2)-2、Fig. 3.2.6(2)-6 をみると、ステップ 2 からステップ 3 にかけては、解析ケース数及び解析ケース間における全水頭分布のばらつきが減少するとともに、実測値の再現性が最大で 15m 程度向上している。このことから、ステップ 3 では、動水勾配分布並びに岩盤中の透水性分布に関する理解度が大きく向上したと判断できる。これらの理解度の向上は、主に、①ステップ 2 で重要な要素として特定した断層を対象としたボーリング調査による情報量の増加、②ステップ 2 で掘削した浅層ボーリング及び既存ボーリング孔を利用した掘削応答モニタリングや長期地下水モニタリングによって取得された間隙水圧の変化に基づき、ステップ 2 で研究所用地周辺の地下水流動場に大きな影響を及ぼすと推定された断層のうち、北北西系、東西系断層の大半の断層の水理特性が推定されたことに起因するものと考えられる。

ステップ 3 の感度解析の結果からは、特に新規ボーリング調査と既存ボーリング孔での掘削応答モニタリングを組合せた調査方法が、岩盤中の透水性分布に関する不確実性を低減させる有効な手段であることが示された。このことから、次段階以降の調査においては、研究所用地内及びその周辺にある複数のボーリング孔を有効に活用し、研究所用地周辺の水理地質構造の推定や、透水性構造の水理特性及びその連続性に関する情報を取得することが重要であると考えられた。そのため、ステップ 4 で実施した孔間水理試験の計画立案に際しては、孔間水理試験に伴う間隙水圧の非定常データあるいは、そのデータを活用した地下水流動解析に基づいて、研究所用地を通過する主要断層である北北西走向、東西走向の水理特性の推定が可能となるように、それらの断層の分布、幾何形状を考慮して揚水孔や観測孔の選定を行った。また、地下水の流動特性や研究坑道への地下水流入量に大きな影響を与える可能性が考えられる地質・地質構造として、揚水孔に遭遇し、かつ研究所用地内を通過する透水性の高い断層、及び土岐花崗岩中の上部割れ目帯に位置する低角度傾斜を有する割れ目の集中帯の連続性や水理特性の把握を調査の目的の一つとした。

(d)ステップ 3 からステップ 4 に伴う理解度の変遷

ステップ 4 では、ボーリング孔間を対象とした調査結果に基づき、地層の境界面の深度分布や研究所用地近傍に位置する断層の幾何形状に関する情報が取得され、ステップ 1 からステップ 3 までに取得された地質学的情報を含めた断層の分布、幾何形状の再解釈がなされており、水理地

質構造モデルに組み込まれた断層の分布、幾何形状が大きく更新された。また、より詳細な水理地質構造モデルを構築することを目的として、瑞浪層群中の明世／本郷累層と土岐夾炭累層の下部にそれぞれ基底礫岩を新たに水理地質構造としてモデル化した。さらに、長期地下水モニタリング装置が設置されてあるボーリング孔で観測された孔間水理試験に伴う間隙水圧の非定常データに基づく地下水流動解析を実施し、水理地質構造モデルのキャリブレーション及び断層の透水異方性の有無を推定した（Fig. 3.2.6(2)-1）。ステップ4においては、2ケースの感度解析を実施した（Table 3.2.6(2)-5）。

Fig. 3.2.6(2)-2 をみると、ステップ3からステップ4にかけては、解析ケース数が1/4に減少するとともに、実測値の再現性が最大で5m程度向上しており、岩盤中の透水性分布に関する不確実性が大きく低減することが確認された。また、二つの解析ケースからは、ほぼ同様の全水頭分布が得られた（Fig. 3.2.6(2)-7）。これらの理解度の向上は、孔間水理試験結果から得られた間隙水圧の非定常データを活用した水理地質構造モデルのキャリブレーションによって多くの断層の水理特性が推定されたことが主要因であると考えられる。孔間水理試験を実施して間隙水圧などの非定常データを取得することで、試験対象領域周辺の地下水流動の時間的な変化を把握することができ、①観測孔における水圧応答の有無などに基づく試験対象領域周辺の水理地質構造の推定、②非定常状態の地下水流動解析による地質・地質構造の分布、幾何形状、水理特性の推定が可能となる。これらのことから、大規模な孔間水理試験とみなすことができる第2段階での研究坑道の掘削に伴う間隙水圧の非定常変化のデータを取得可能な長期地下水モニタリングの重要性が示されるとともに、それらを用いた調査・解析・評価による動水勾配分布並びに岩盤中の透水性分布に関する理解度の向上が期待できる。

(e)まとめ

繰り返しアプローチに基づき、第1段階調査研究の各ステップにおいて、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、動水勾配分布並びに岩盤中の透水性分布に関する理解度を向上させることができた。水理地質構造モデルは、地質構造モデルに大きく依存することから、地質分野との連携が不可欠である。また、地球化学的特性などの観点から水理地質構造モデルや地下水流動解析結果の信頼性や妥当性を確認しながら調査を行っていくことが望ましい。これらのことから、地下水分野だけでなく地質、地球化学分野などの他分野との連携を深めた繰り返しアプローチの実施が有効である。

②第2段階以降の課題

第2段階以降の課題としては、研究坑道の掘削に伴う立坑内への湧水量計測及び研究坑道の掘削に伴う長期地下水モニタリングを実施し、サイトスケールの水理地質構造モデルの妥当性を確認するとともに、取得した情報に基づきそのモデルを更新していく必要がある。この際、立坑内への湧水量は、主に人工構造物を含むスキニング効果（人工構造物による湧水の抑制や掘削影響領域の形成による湧水の増加などの水理学的影響）やグラウトの影響を強く受ける（3.2.3(6)2、3.2.4(7)2、3.2.5(5)1参照）ことから、これらによる湧水抑制効果に関する情報を取得する必要がある。また、第1段階において、未だ解決できていない瑞浪層群中の明世／本郷累層以深の低水頭分布の解釈や再現などの課題（3.2.5(3)参照）も第2段階以降の調査・研究に取り入れる必要がある。一方、第1段階で実施したボーリング調査やボーリング孔を活用した長期地下水モニタリング、孔間水理試験によって、岩盤及び主要断層の巨視的な水理特性はおおむね把握されたものの、物質移行の遅延などの観点で重要と考えられる水理特性の不均質性は把握されていない。研究坑道周辺における亀裂などの不連続構造の分布に起因した岩盤の水理特性の不均質性、及び不連続構造そのものの水理特性の不均質性を評価するために、研究坑道周辺の数十から数百m程度の領域を対象とした水理地質構造モデルの構築及び地下水流動解析を実施する必要がある。

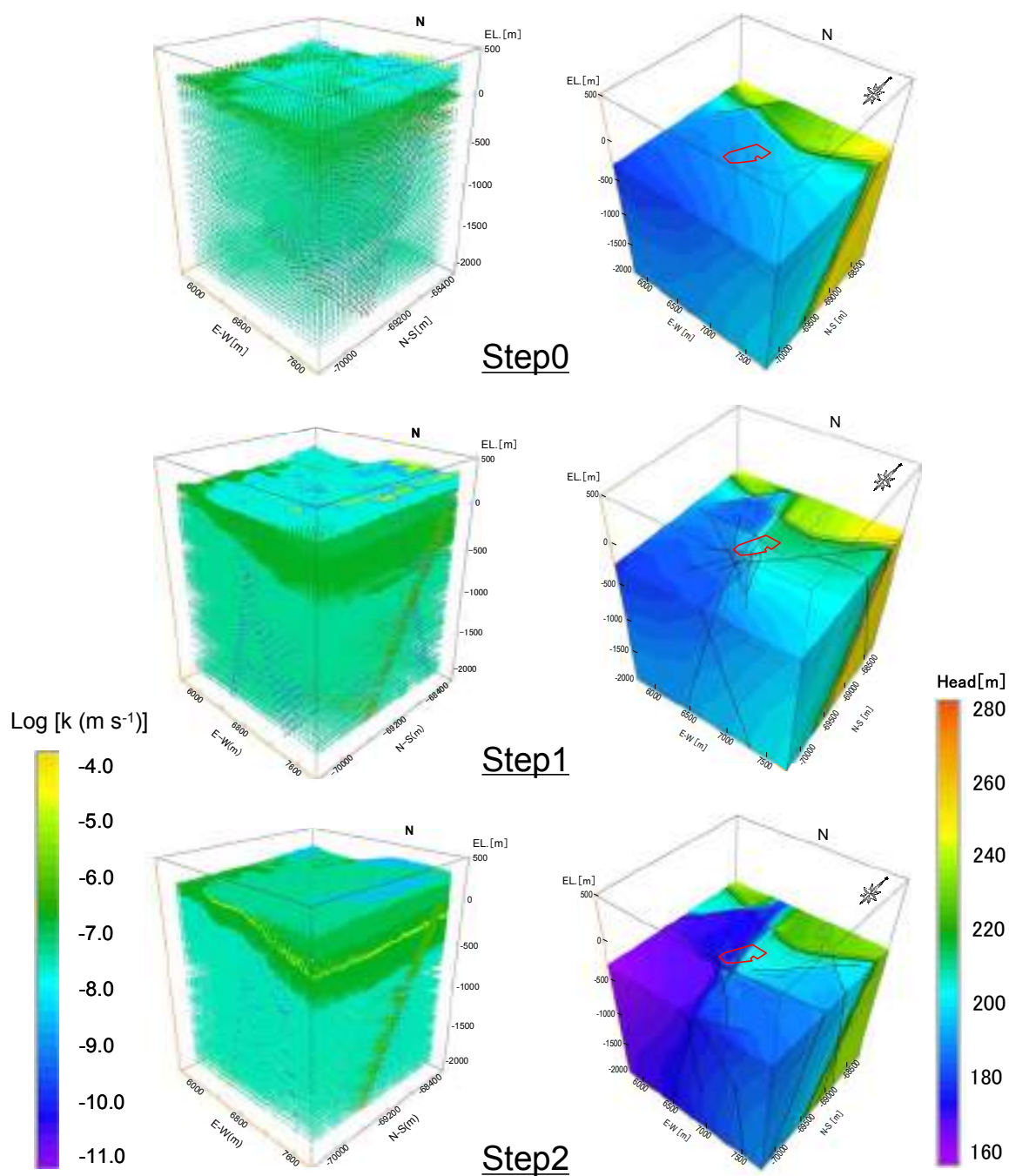


Fig. 3.2.6(2)-1 Iterations in the hydrogeological model and head distributions with stepwise progress of investigations (Left figures are hydrogeological model (3D distribution of hydraulic conductivity), Right figures are head distribution (Elevation -300 m : Depth of the shaft 500 m))

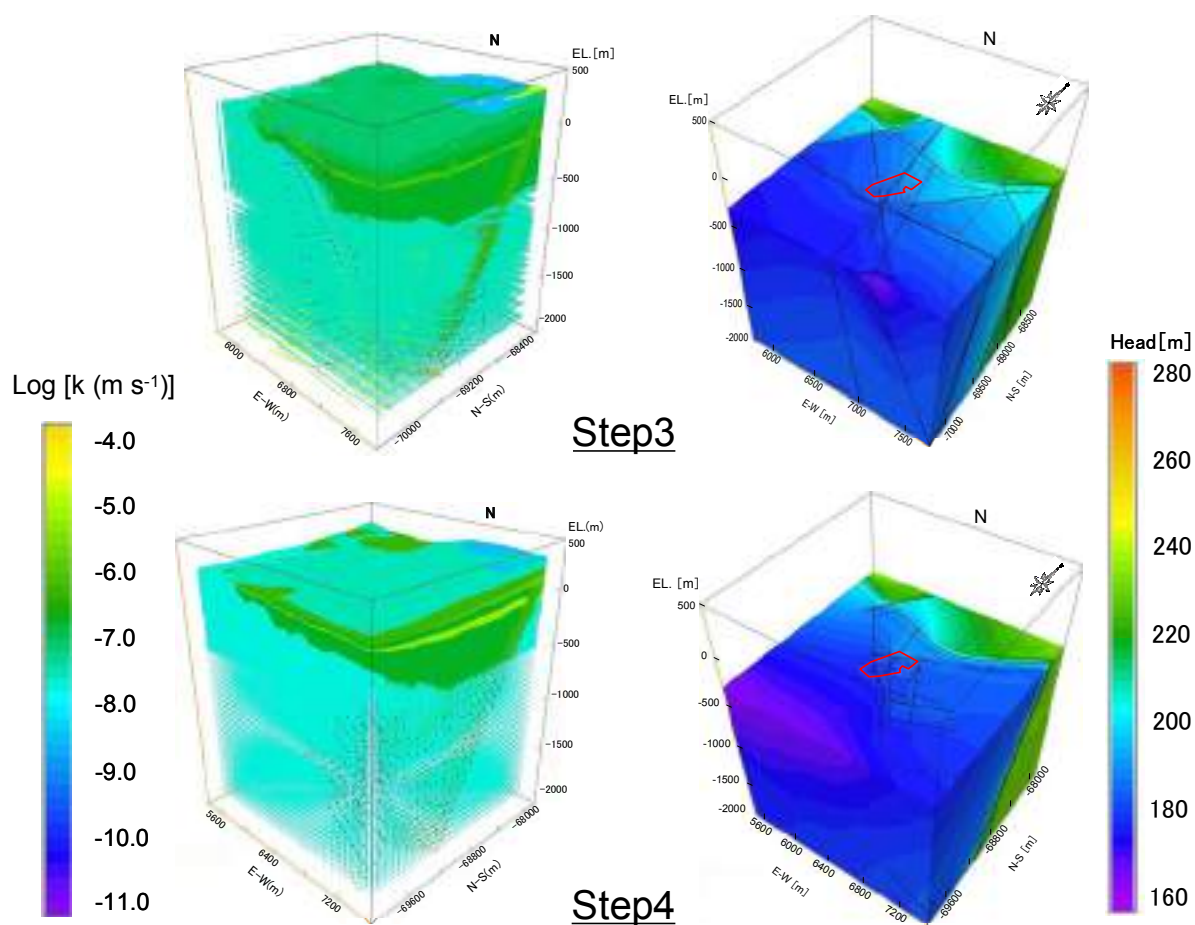


Fig. 3.2.6(2)-1 Iterations in the hydrogeological model and head distributions with stepwise progress of investigations (Left figures are hydrogeological model (3D distribution of hydraulic conductivity), Right figures are head distribution (Elevation -300 m : Depth of the shaft 500 m))
(Continued)

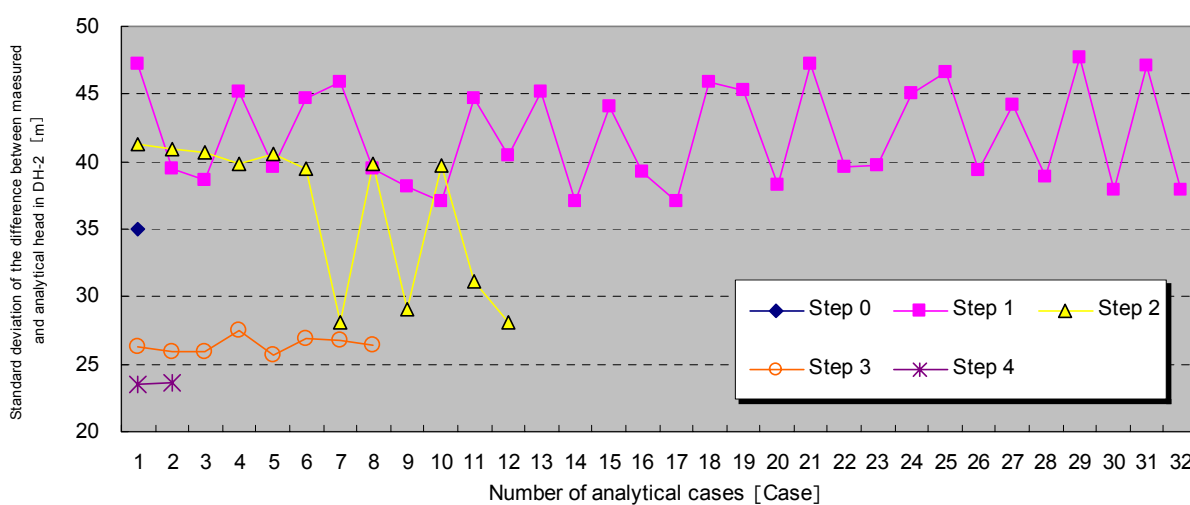
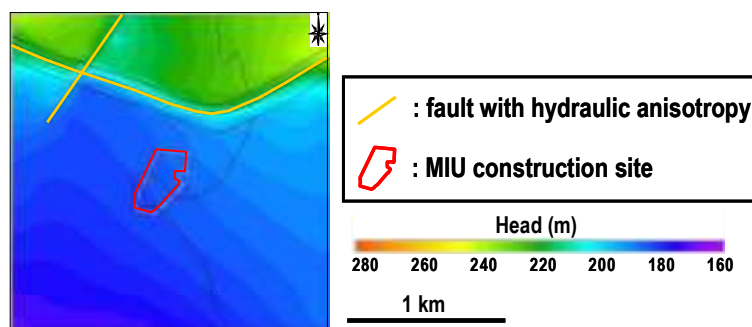


Fig. 3.2.6(2)-2 Improvement of the understanding of groundwater flow conditions with stepwise progress of investigations

Table 3.2.6(2)-1 Hydraulic conductivity of faults in Step 0 (Log [k (m s⁻¹)])

Fault	Case ID		base	
	C	P	C	P
Main part of Tsukiyoshi fault			-11.0	
Lineament with length more than 3km	-11.0	-5.2		

C : Normal to Fault, P : Parallel to Fault



(a) Case ID : Base

Fig. 3.2.6(2)-3 Head distribution in Step 0 (Elevation -300 m : Depth of the shaft 500 m)

Table 3.2.6(2)-2 Sensitivity analysis cases focused on hydraulic anisotropy of faults in Step 1 (Log k [m s⁻¹])

Case ID	base		NS 6		NE 6		NNW 6		EW 6		NW 6		NS NE 6		NS NNW 6	
	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P
Main part of Tsukiyoshi fault	-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0	
Lineament with length more than 3km	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2
NNW trending fault	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4
NW trending fault	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4
NE trending fault	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4
EW trending fault	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4
NS trending fault	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4

Case ID	NS EW 6		NS NNW 6		NE NNW 6		NE EW 6		NE NNW 6		NNW EW 6		NNW NNW 6		EW NNW 6	
	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P
Main part of Tsukiyoshi fault	-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0	
Lineament with length more than 3km	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2
NNW trending fault	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4
NW trending fault	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4
NE trending fault	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4
EW trending fault	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4
NS trending fault	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4

Case ID	EW NNW 11		NNW NNW 11		NNW EW 11		NE NNW 11		NE EW 11		NE NNW 11		NS NNW 11		NS EW 11	
	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P
Main part of Tsukiyoshi fault	-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0	
Lineament with length more than 3km	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2
NNW trending fault	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4
NW trending fault	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4
NE trending fault	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4
EW trending fault	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4
NS trending fault	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4

Case ID	NS NNW 11		NS NE 11		NS 11		NE 11		NNW 11		EW 11		NW 11		All 6	
	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P
Main part of Tsukiyoshi fault	-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0	
Lineament with length more than 3km	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2
NNW trending fault	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4
NW trending fault	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4
NE trending fault	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4
EW trending fault	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4
NS trending fault	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4

C : Normal to Fault, P : Parallel to Fault

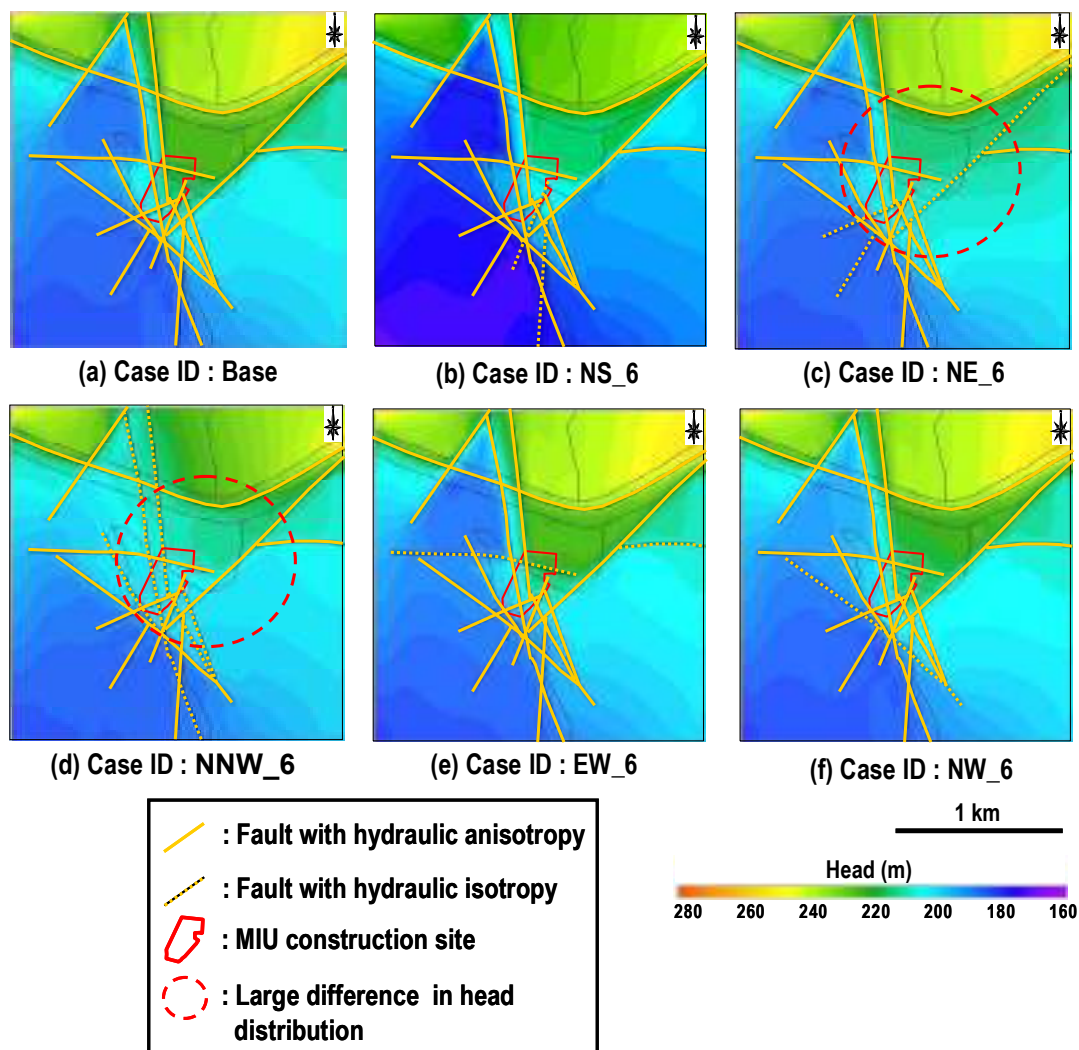


Fig. 3.2.6(2)-4 Example of a sensitivity analysis focused on hydraulic anisotropy of faults in Step 1 (Elevation -300 m : Depth of the shaft 500 m)

Table 3.2.6(2)-3 Sensitivity analysis cases focused on hydraulic anisotropy of faults in Step 2 (Log k [m s^{-1}])

Case ID	Base		NE_high		NNW_high		NW_high		NE_NNW_high		NE_NW_high	
	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P
Main part of Tsukiyoshi fault	-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0	
Lineament with length more than 3km	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2
NNW trending fault	-11.0	-4.9	-11.0	-4.9	-4.9		-11.0	-4.9	-4.9		-11.0	-4.9
NW trending fault	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4		-11.0	-6.4	-6.4	
NE trending fault	-11.0	-6.4	-6.4		-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4		-6.4	
EW trending fault	-4.0		-4.0		-4.0		-4.0		-4.0		-4.0	

Case ID	NE_high_anEW		NNW_high_anEW		NW_high_anEW		NE_NNW_high_anEW		NE_NW_high_anEW		All_aniso	
	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P
Main part of Tsukiyoshi fault	-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0		-11.0	
Lineament with length more than 3km	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2
NNW trending fault	-11.0	-4.9	-4.9		-11.0	-4.9	-4.9		-11.0	-4.9	-11.0	-4.9
NW trending fault	-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4		-11.0	-6.4	-6.4		-11.0	-6.4
NE trending fault	-6.4		-11.0	-6.4	-11.0	-6.4	-6.4		-6.4		-11.0	-6.4
EW trending fault	-11.0	-4.0	-11.0	-4.0	-11.0	-4.0	-11.0	-4.0	-11.0	-4.0	-11.0	-4.0

C : Normal to Fault, P : Parallel to Fault

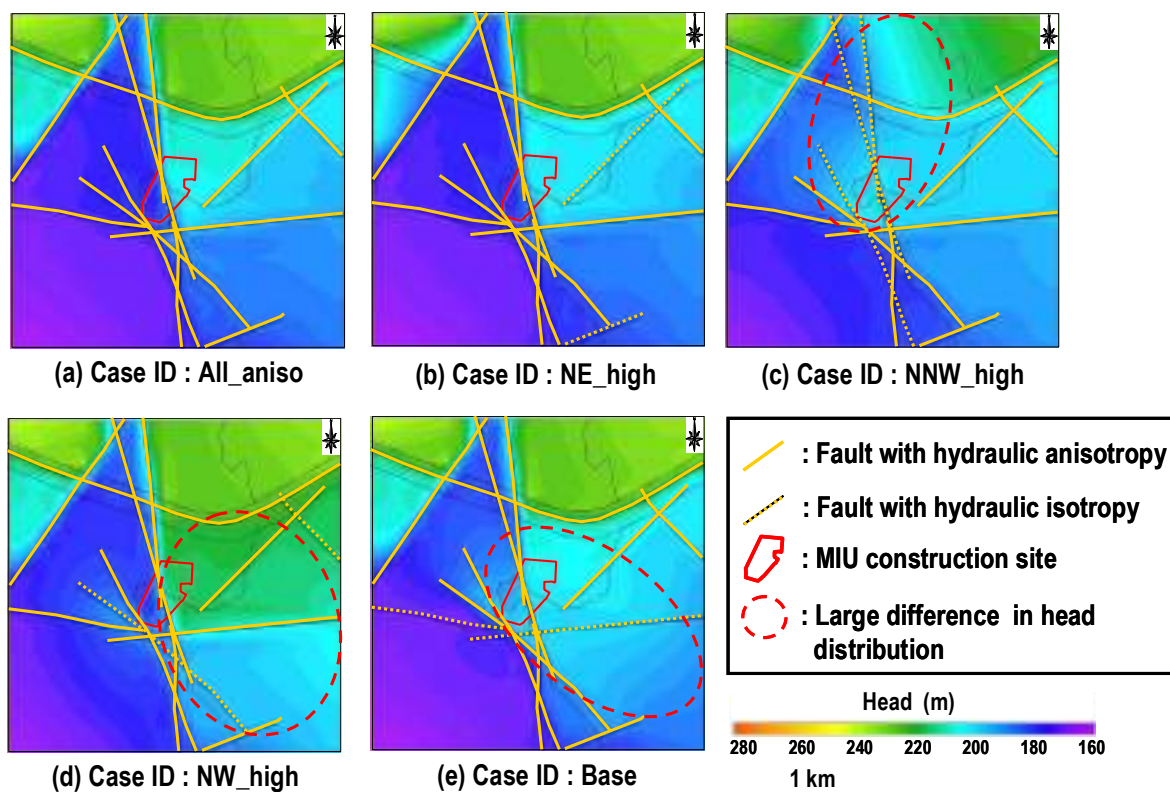


Fig. 3.2.6(2)-5 Example of a sensitivity analysis focused on hydraulic anisotropy of faults in Step 2 (Elevation -300 m : Depth of the shaft 500 m)

Table 3.2.6(2)-4 Sensitivity analysis cases focused on hydraulic anisotropy of faults in Step 3 (Log k [m s^{-1}])

Case ID	Base		NNW_high		NW_high		NE_high	
	C	P	C	P	C	P	C	P
Fault								
Main part of Tsukiyoshi fault	-11.0		-11.0		-11.0		-11.0	
Lineament with length more than 3km	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2
NNW trending fault	-11.0	-5.3	-5.3		-11.0	-5.3	-11.0	-5.3
	-4.7		-4.7		-4.7		-4.7	
	-11.0	-5.1	-11.0	-5.1	-11.0	-5.1	-11.0	-5.1
NW trending fault	-11.0	-8.0	-11.0	-8.0	-8.0		-11.0	-8.0
NE trending fault	-11.0	-3.9	-11.0	-3.9	-11.0	-3.9	-3.9	
EW trending fault	-5.1		-5.1		-5.1		-5.1	
	-5.0		-5.0		-5.0		-5.0	
	-4.2		-4.2		-4.2		-4.2	

Case ID	NNW_NW_high		NNW_NE_high		NW_NE_high		All_high	
	C	P	C	P	C	P	C	P
Fault								
Main part of Tsukiyoshi fault	-11.0		-11.0		-11.0		-11.0	
Lineament with length more than 3km	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2
NNW trending fault	-5.3		-5.3		-11.0	-5.3	-5.3	
	-4.7		-4.7		-4.7		-4.7	
	-11.0	-5.1	-11.0	-5.1	-11.0	-5.1	-11.0	-5.1
NW trending fault	-8.0		-11.0	-8.0	-8.0		-8.0	
NE trending fault	-11.0	-3.9	-3.9		-3.9		-3.9	
EW trending fault	-5.1		-5.1		-5.1		-5.1	
	-5.0		-5.0		-5.0		-5.0	
	-4.2		-4.2		-4.2		-4.2	

C : Normal to Fault, P : Parallel to Fault

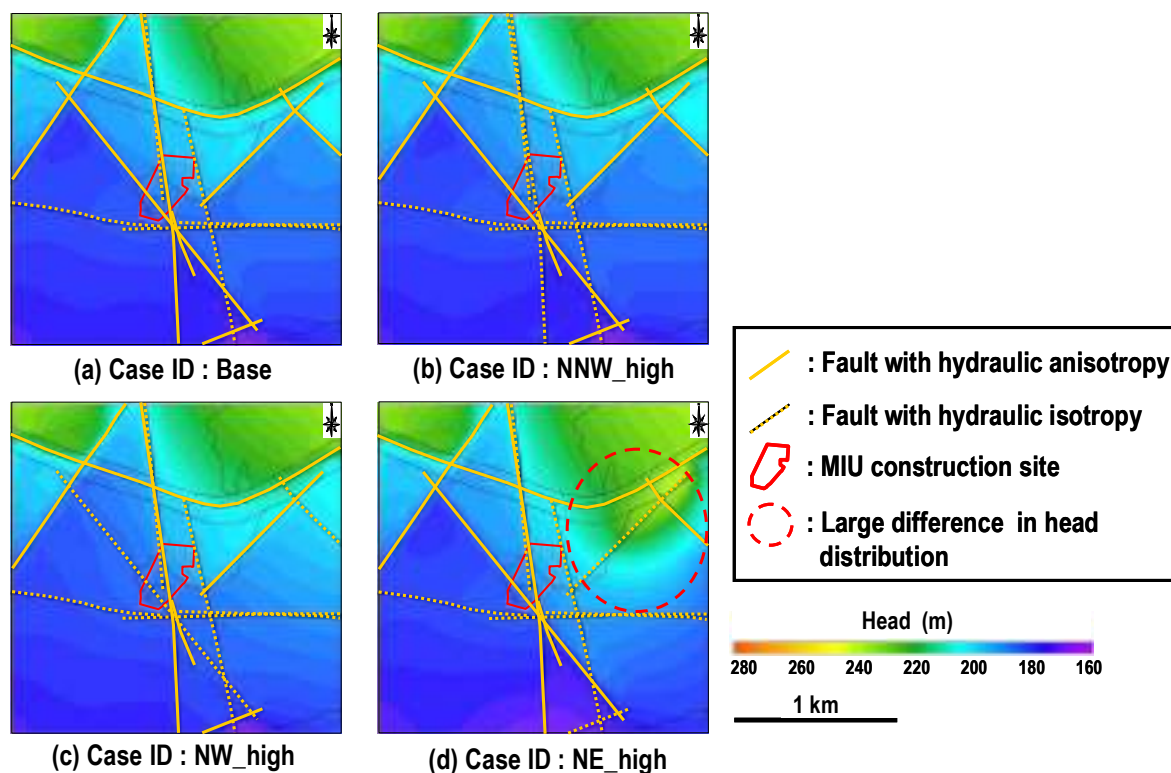


Fig. 3.2.6(2)-6 Example of a sensitivity analysis focused on hydraulic anisotropy of faults in Step 3 (Elevation -300 m : Depth of the shaft 500 m)

Table 3.2.6(2)-5 Sensitivity analysis cases focused on hydraulic anisotropy of faults in Step 4 (Log k [m s^{-1}])

Case ID Fault	Case1		Case2	
	C	P	C	P
Main part of Tsukiyoshi fault	-11.0		-11.0	
Lineament with length more than 3km	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2
NNW trending fault	-11.0	-7.3	-11.0	-7.3
	-5.9		-5.9	
	-4.0		-4.0	
NW trending fault	-6.1	-11.0	-6.1	-11.0
	-7.7		-7.7	
	-11.0	-8.7	-11.0	-8.7
	-9.0		-9.0	
NE trending fault	-11.0	-8.7	-11.0	-8.7
	-6.2		-6.2	
	-11.0	-4.2	-11.0	-4.2
EW trending fault	-11.0	-5.2	-11.0	-5.2
	-5.1		-5.1	
	-5.9		-5.9	

C : Normal to Fault, P : Parallel to Fault

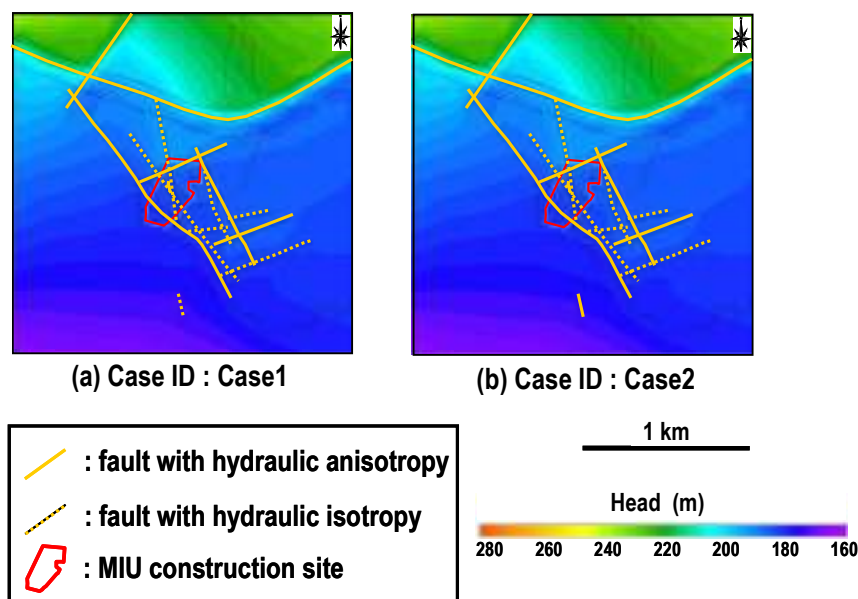


Fig. 3.2.6(2)-7 Sensitivity analysis cases focused on hydraulic anisotropy of faults in Step 4 (Log k [m s^{-1}])

(3)地下水の地球化学特性の把握

①調査の進展に伴う理解度の変遷

地下水の地球化学特性に関する調査・解析・評価においては、塩分濃度（水質）や pH、酸化還元電位の三次元的分布を調査することで、異なる水質を示す帯水層の分布を明確にし、帯水層ごとに地球化学特性を評価することができる。また、水質の異なる地下水の空間分布は、地質構造や地下水の流動状態と関連していると考えられ、各ステップの地質構造や地下水流動状態の調査結果と比較することで、その関連性を確認し各研究分野の調査・解析結果を統合化することができる。

ステップ 0 においては、鉱泉・温泉などの文献情報（多くは、採水方法や深度、採水時期（井戸掘削後の経過年数）、データ取得時までの揚水量などが不明確なため、定性的に存在する可能性のある地下水の水質を推測できるのみである）に加え、広域地下水流動研究のボーリング調査（本第 1 段階成果とりまとめでは既得情報として取り扱う）で得られた水質情報に基づき、三次元的な水質、pH、酸化還元電位の分布を推定することができた。この段階では、サイトスケールを包含するローカールスケールの領域において、水質や水質形成メカニズムの観点で主に 2 種類の異なる水質の地下水が分布していることを示すことができた。これらの地下水の分布領域の間には水理学的な遮水構造を有する月吉断層が存在しており、水質分布が断層などの大規模な地質構造に影響を受けている可能性が考えられた。また、サイトスケール領域の地下水水質の概要を把握することができた。このステップでは、ローカールスケール領域の地下水の地球化学特性の三次元的分布や水理地質構造との関連の概略を把握することができた。一方、サイトスケール領域の堆積岩中の地下水の地球化学特性に関する情報がないため、これと水理地質構造との関連などは不明確である。

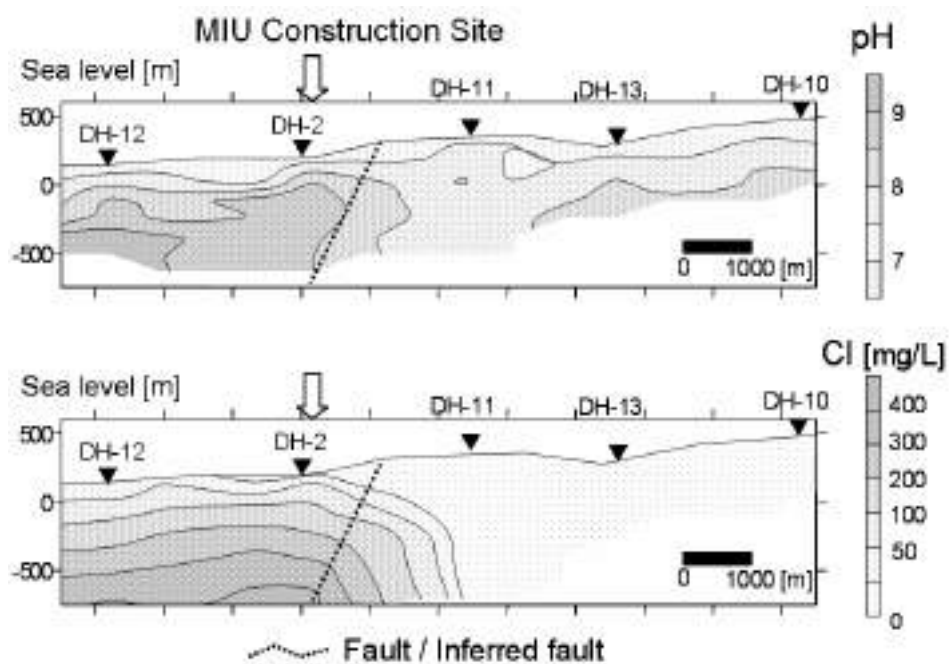
ステップ 2 では、ステップ 0 で不明確だった堆積岩中の地下水の地球化学特性やそれと水理地質構造の関連について明確にすることができた。サイトスケール領域に分布する堆積岩においては、瑞浪層群中の低透水層を境にして水質が異なっており、同位体（トリチウム）を指標とした

解析により低透水層より浅部では数～数十年という時間スケールで比較的速い涵養が起こっていると推測され、低透水層より深部では地下水が浅部と比較して長期にわたって滞留している可能性が示唆された（3.2.3(4)参照）。これらのことから、ステップ0で明らかになった、断層と地下水の地球化学特性との関連に加えて、堆積岩中の低透水層と地下水の地球化学特性の関連についても明らかになった。地質構造が地下水の地球化学特性の分布に与える影響については、各地質構造の透水性や分布状態といった水理地質構造、それに依存する地下水の流動特性が直接的な影響を与えている。このような情報は、第2段階以降の研究坑道の建設に伴う周辺地下水の水理的・化学的擾乱を予測するうえで不可欠である。堆積岩中の研究坑道建設に伴う擾乱の程度は低透水層を境にして各岩層への涵養速度や研究坑道掘削時の湧水量、透水性等に依存して異なることが予想できる。したがって、研究坑道掘削の際には水理地質構造を踏まえ、建設に伴う周辺地下水環境の擾乱が著しいと予想される岩層について擾乱を最小限に留めるべく設計を行う必要がある。

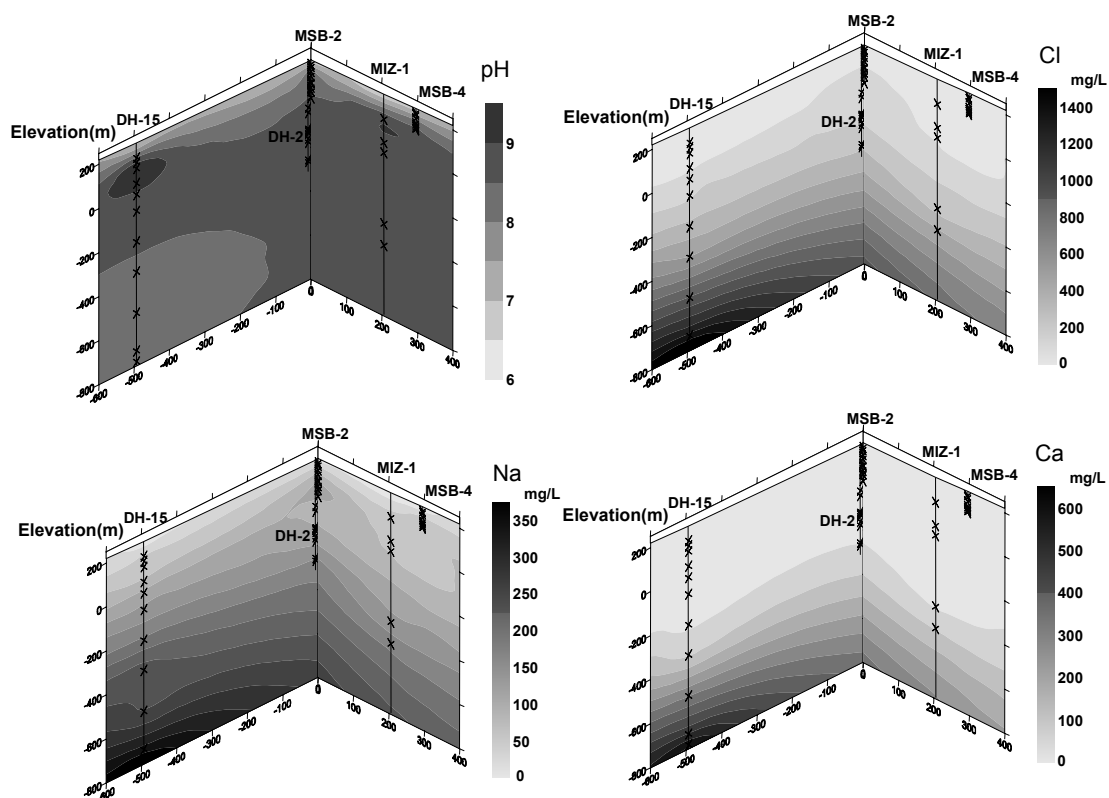
ステップ3においては、前ステップまでの調査・解析により推測されたサイトスケール深部の花崗岩中の地下水の地球化学特性やその分布が妥当なものであることを確認するとともに、より詳細に水質分布を把握することで、ローカルスケールの地球化学モデルを更新し、サイトスケールにおける研究坑道掘削前の未擾乱の初期状態についてモデルを構築した。データ取得～モデルの更新の手順を繰り返すことにより、実際の塩分濃度の深度分布をモデルに基づき再現することができた。このステップで構築されたモデルは、第2段階以降の研究坑道建設に伴う水理的・化学的擾乱を予測するための基礎となるものである（3.2.7(3)参照）。

②第2段階以降の課題

以上を踏まえて第2段階以降の課題として、以下のような項目が挙げられる。第1段階の調査・解析・評価で構築された地球化学モデルやそれに基づく地球化学的变化の予察について、実際に研究坑道で得られる地下水及び経時的に得られる研究坑道掘削に伴う地球化学的な場の変化の観測結果を参照して妥当性を確認していく。また、これらの研究を通して、研究坑道の建設や操業により長期間研究坑道が存在することにより起こり得る周辺の地球化学環境、水理環境の変化について、その普遍的なプロセス、メカニズムを把握し、人為的な水理化学的擾乱に対して地質環境の環境復元能力を明らかにするとともに、擾乱の回復にかかる時間や回復後の定常状態について推定する手法を構築していく。これらの技術は、処分場閉鎖後に定常状態に達する過程やその定常状態が研究坑道建設前とどのように異なっているか等を推測するための基盤技術として不可欠であり、安全評価に用いる様々なパラメータの不確実性を評価するとともに、長期にわたる安全評価技術の信頼性を担保するうえで非常に重要である。



(a) Estimated distribution of groundwater chemistry after Step 0



(b) Estimated distribution of groundwater chemistry after Step 4

Fig. 3.2.6.(3)-1 Step-wise understanding of groundwater chemistry around the MIU construction site

(4)物質移動の遅延効果の把握

①調査の進展に伴う理解度の変遷

物質移動の遅延効果における理解度の変遷並びに第2段階以降の課題に関しては、データの取得が可能であった二つのステップ（ステップ0、ステップ3）で得られた成果を基に評価を行った。

(a)岩盤の収着・拡散特性の把握

ステップ3で取得された値や岩石・鉱物特性データを用いた評価から、既得情報である JNC-SDB 収着データベース^{1),2)}や釜石鉱山の栗橋花崗閃緑岩によって推定した収着係数並びに拡散係数の値の妥当性を確認した。また、土岐花崗岩マトリクスと不連続構造における Cs 及び Sr の収着係数に関しては、実際の値がステップ0において推定した値より低く、かつ研究所用地内においては高 Na-Cl 濃度条件の地下水が分布していることから、既得情報で推定した範囲の低い値に絞り込むことができた。

(b)物質移動場の把握

物質移動場の把握においては、空隙構造とその広がりに関するデータのほか、土岐花崗岩では透水性割れ目近傍のウラン系列核種 (^{238}U 、 ^{234}Th 、 ^{230}Th) の分布プロファイルを用いた評価を実施した。ステップ3の結果から、瑞浪層群及び土岐花崗岩中の物質移動場の構造特性・空隙構造特性の値や範囲を推定し、その不確実性を低減することができた。ただし、ボーリングコアは掘削・採取や調査などに伴う物理的擾乱を伴っており、原位置のそれとは明らかに異なると考えられる^{3),4)}ため、ボーリングコアから得られるデータを物質移動場の特徴や性状を概括的に把握するための情報として取り扱う必要がある。

(c)コロイド／有機物／微生物の影響の把握

本項目の評価に必要な土岐花崗岩中の地下水のコロイド／有機物／微生物の化学特性については、ステップ0では該当する既得情報が存在しなかったほか、ステップ3で実施した深層ボーリング孔調査で採取した地下水試料の掘削水による汚染率が数～数十%と詳細な現存量調査を行うためには高く、品質の保証されたデータが取得困難であったため、それらに関しては評価できていない。

②第2段階以降の課題

第1段階における調査研究では、主に既得情報及び深層ボーリングコアを用いた室内試験により、瑞浪層群と土岐花崗岩の物質移動の遅延特性、特に主要な物質移動遅延メカニズムである収着並びにマトリクス拡散を概括的に把握・評価した。しかしながら、それらの不確実性をより低減するためには、実際の地質環境条件下での岩盤の収着・拡散特性並びに物質移動場に関するデータを主に原位置試験により取得する必要がある。また、コロイド／有機物／微生物の評価に対しては、実際の地下での条件を維持した汚染の極めて少ない地下水試料を採取することが不可欠であり、このためには研究坑道内のモニタリング孔を利用した長期にわたる採水調査が必要である。ただし、第2段階で掘削される研究坑道周辺では、研究坑道掘削に伴う水理学的・地球化学的擾乱が大きいと考えられ、実際の地下での物質移動試験や長期の採水調査にとって適切な環境とは言いがたい。したがって、第2段階の調査研究においては、第3段階で用いる調査技術の整備が中心的な課題になるとともに、先行する海外の地下研究施設を利用した共同研究等により、より効果的な研究計画の策定・推進を図っていく必要がある。

(5)希釈効果の把握

①調査の進展に伴う理解度の変遷

3.2.1(6)で述べたとおり、地下水の希釈効果を評価する際には、地下水の流束分布を把握する必

要がある。この流束分布を把握するうえでは、帯水層に相当する地質・地質構造の特性（正確には断面積）とその中での流速分布を把握する必要があるが、帯水層の断面積については空間的な不均質性があり、これを把握することは容易ではない。そこで、第1段階においては、帯水層の分布領域の広さを指標として、各ステップで構築された地質構造／水理地質構造モデルに基づき、あらかじめ帯水層として想定される地質・地質構造を抽出したうえで、地下水の流動特性を把握するために実施した地下水流動解析結果から、ダルシー流速の頻度分布を算出し、帯水層の希釈効果を把握した。その結果、地質・地質構造ごとに算出したダルシー流速分布は、その地質・地質構造ごとに異なる分布を示すことが推定されており、帯水層の希釈効果を把握するうえでの評価指標の一つになりうると考えられる。また、同一の地質・地質構造においても、調査の進展に伴って、そのダルシー流速の分布傾向は異なる結果が得られた。

上記を踏まえて、調査の進展に伴って各ステップで算出した地質・地質構造ごとのダルシー流速の分布傾向の変化を把握するために評価指標を以下のように設定し、調査の進展に伴う希釈効果に関する理解度を評価した。

- ・ダルシー流速分布の平均値
- ・ダルシー流速分布の標準偏差
- ・ダルシー流速分布の平均値及び標準偏差の変動量

ダルシー流速分布の平均値が高い地質・地質構造ほど、その希釈効果が期待される。また、ダルシー流速分布の標準偏差が大きい地質・地質構造ほど、その希釈効果の不均質性が高いと解釈できる。さらに、調査の進展に伴ってダルシー流速分布の平均値及び標準偏差が大きく変動する地質・地質構造ほど、その希釈効果を特定する地質構造特性や水理特性を十分に把握できておらず、更なる調査の実施の必要性があると解釈できる。

Fig. 3.2.6(5)-1 に、ステップ0 からステップ4 の水理地質構造モデルにおいて、比較的広い分布範囲を有する地質・地質構造を対象として、調査の進展に伴うダルシー流速の頻度分布及び平均値、標準偏差の変遷をとりまとめた。ここでは、基盤岩である土岐花崗岩のうち、ダルシー流速分布の平均値が $7.9 \times 10^{-10} \sim 3.2 \times 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ 程度と透水性が相対的に低い下部割れ目低密度帯を基準として、そのほかの地質・地質構造の希釈効果に関する理解度を評価した。なお、調査の進展に伴う下部割れ目低密度帯のダルシー流速分布の標準偏差及び平均値と標準偏差の変動量は、そのほかの地質・地質構造と比較して小さいことから、評価基準として設定可能と判断した。

以下より、水理地質構造モデルに考慮されている比較的広い分布範囲を有する地質・地質構造のステップの進展に伴う変遷（Fig. 3.2.6(5)-1）について、その概要をとりまとめる。

(a)生俵累層について

ダルシー流速分布の平均値が $3.2 \times 10^{-10} \sim 1.6 \times 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ 程度であり、下部割れ目低密度帯よりも低い値を示すことから、希釈効果を考えるうえでは重要な地質・地質構造ではないと考えられる。

(b)明世累層／本郷累層について

ダルシー流速分布の平均値が $2.5 \times 10^{-9} \sim 5.0 \times 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ 程度であり、ステップ2以降では下部割れ目低密度帯よりも高い値を示していることから、希釈効果を考えるうえでは重要な地質・地質構造と考えられる。しかし、調査の進展に伴うダルシー流速分布の平均値のばらつきが大きいとともに、ステップ3からステップ4にかけては、ダルシー流速分布の平均値が低下傾向にあることから、その希釈効果の不確実性は大きく、今後の調査の実施による希釈効果に関する理解度の向上が望まれる。

(c)明世累層／本郷累層の基底礫岩について

ステップ4で新たに水理地質構造モデルに考慮された地質・地質構造であり、現時点では調査の進展に伴う希釈効果に関する理解度については評価できない。ステップ4の段階では、ダルシー流速分布の平均値が $7.9 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ 程度であり下部割れ目低密度帯よりも高い値を示していることから、希釈効果を考えるうえでは重要な地質・地質構造と考えられる。今後実施される調査結果に基づき、ダルシー流速分布の平均値、標準偏差及びそれらの変動量を把握していく必要がある。

(d)土岐夾炭累層について

ダルシー流速分布の平均値が $7.9 \times 10^{-9} \sim 1.6 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ 程度であり、下部割れ目低密度帯よりも高い値を示していることから、希釈効果を考えるうえでは重要な地質・地質構造と考えられる。しかし、調査の進展に伴うダルシー流速分布の平均値のばらつきが大きいことから、今後の調査の実施による希釈効果に関する理解度の向上が望まれる。一方、ステップ2からステップ4にかけては、ダルシー流速分布の平均値が高くなるとともに、その標準偏差も減少する傾向にあることから、今後の調査においては、特に重要な地質・地質構造として注視する必要がある。

(e)土岐夾炭累層の基底礫岩について

明世累層／本郷累層の基底礫岩と同様に、ステップ4で新たに水理地質構造モデルに考慮された地質・地質構造であり、現時点では調査の進展に伴う希釈効果に関する理解度については評価できない。ステップ4の段階では、ダルシー流速分布の平均値が $1.0 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ 程度であり、下部割れ目低密度帯よりも高い値を示していることから、希釈効果を考えるうえでは重要な地質・地質構造と考えられる。今後実施される調査結果に基づき、ダルシー流速分布の平均値、標準偏差及びそれらの変動量を把握していく必要がある。

(f)月吉断層に伴う割れ目帯について

ダルシー流速分布の平均値が $6.3 \times 10^{-9} \sim 2.0 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ 程度であり、下部割れ目低密度帯よりも高い値を示していることから、希釈効果を考えるうえでは重要な地質・地質構造と考えられる。しかし、標準偏差が大きいことから、その希釈効果は不均質性が高いと推定される。また、調査の進展に伴うダルシー流速分布の平均値のばらつきが大きいことから、今後の調査の実施による希釈効果に関する理解度の向上が望まれる。一方、ステップ2からステップ4にかけては、ダルシー流速分布の平均値が高くなる傾向にあることから、今後の調査においては、特に重要な地質・地質構造として注視する必要がある。

(g)上部割れ目帯について

ダルシー流速分布の平均値が $4 \times 10^{-9} \sim 1.6 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ 程度であり、下部割れ目低密度帯よりも高い値を示していることから、希釈効果を考えるうえでは重要な地質・地質構造と考えられる。調査の進展に伴うダルシー流速分布の平均値のばらつきは下部割れ目低密度帯と同程度であるが、ステップ3からステップ4にかけては、ダルシー流速分布の平均値が低下するとともに標準偏差が大きくなる傾向にあることから、その希釈効果の不確実性は大きく、今後の調査の実施による希釈効果に関する理解度の向上が望まれる。

(h)低角度傾斜を有する割れ目の集中帯について

ステップ2で新たに水理地質構造モデルに考慮された地質・地質構造である。ダルシー流速分布の平均値が $2.5 \times 10^{-8} \sim 2.0 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ 程度とほかの地質・地質構造と比較して最も高い値を示しており、希釈効果を考えるうえでは重要な地質・地質構造と考えられる。しかし、標準偏差が大きいことから、その希釈効果は不均質性が高いと推定される。今後の調査においては、特に重要な地質・地質構造として注視するとともに、その不均質性を把握する必要がある。

(i)まとめ

Fig. 3.2.6(5)-1 をみると、ステップ 2 以降から、ダルシー流速の平均値、標準偏差の変動量が相対的に大きくなる地質・地質構造が認められる。これは、ステップ 2 以降に実施したボーリング調査やボーリング孔を利用した長期地下水モニタリング及び孔間水理試験結果から、地質・地質構造の水理特性に関する情報が取得されるとともに、水理地質構造モデルが更新されたことに起因しているものと考えられる。このことから、希釈効果を把握するうえでは、特に地質・地質構造の水理特性を取得することのできるボーリング調査やボーリングを利用した調査を実施することが重要である。

第 1 段階においては、希釈効果を考えるうえで特に重要な地質・地質構造として、土岐夾炭累層、月吉断層に伴う割れ目帯及び低角度傾斜を有する割れ目の集中帯が抽出された。しかし、それらの希釈効果には高い不均質性の存在が示唆されており、第 2 段階以降の調査・研究による希釈効果の理解度の向上が望まれる。

②第 2 段階以降の課題

第 2 段階以降の課題としては、研究坑道の掘削により取得した情報に基づく水理地質構造モデルの更新 (3.2.6(2)参照) とともに、それを用いた地下水流動解析によるダルシー流速分布を算出し、その分布傾向の変化を評価していく必要がある。

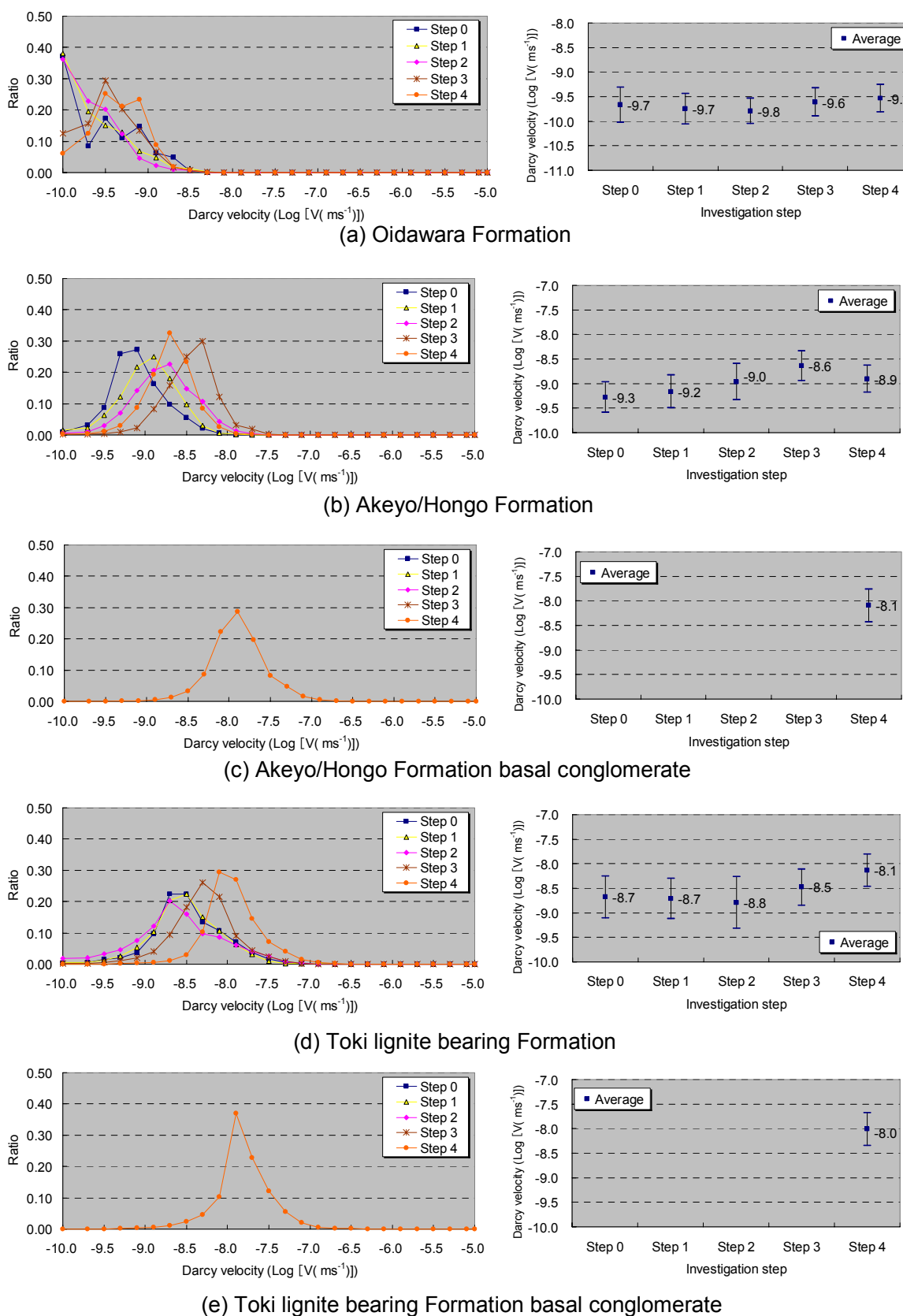


Fig. 3.2.6(5)-1 Darcy velocity distributions in geological units with stepwise progress of investigations

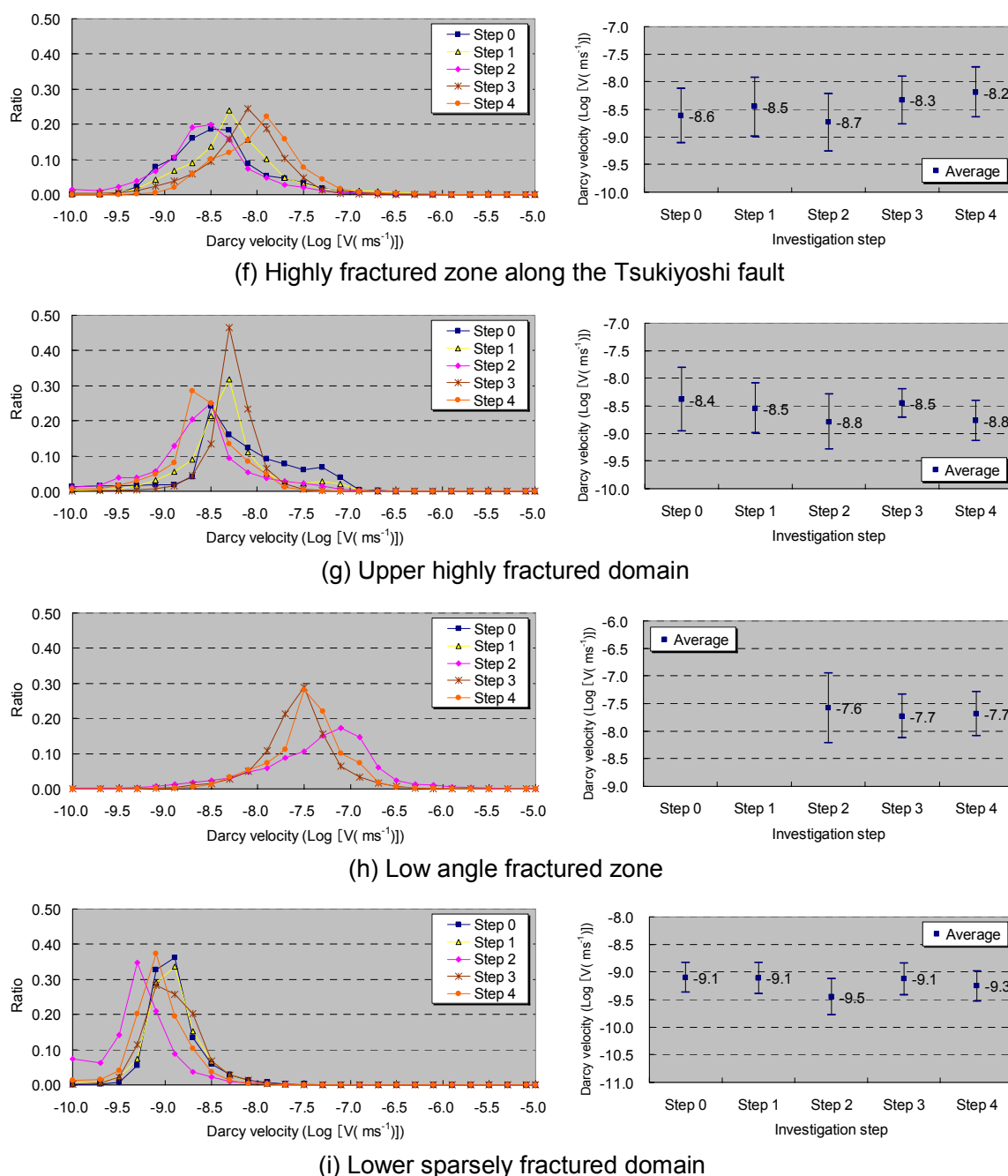


Fig. 3.2.6(5)-1 Darcy velocity distributions in geological units with stepwise progress of investigations (Continued)

(6)地下空洞周辺の力学・水理状態の把握

1)応力場の把握、岩盤の物理・力学特性の把握、EDZ の分布／物理・力学特性の把握

①調査の進展に伴う理解度の変遷

応力場、岩盤の物理・力学特性については、ボーリング調査により、初期応力状態や物理・力学特性の深度分布及び三次元分布を調査する。初期応力状態や物理・力学特性の分布は深度依存性だけでなく、地質・地質構造と関連していると考えられることから、これらを加味し、岩盤力学モデルを構築することができる。EDZ の分布／物理・力学特性については、この岩盤力学モデル

ルを基に入力データを設定し、数値解析手法により研究坑道の掘削を解析上模擬することにより推定することができる。

(a)ステップ0からステップ2に伴う理解度の変遷

ステップ0では、正馬様用地において実施されたボーリング調査のデータとそれに基づく解釈を既得情報として参照し、初期応力状態、岩盤の物理・力学特性を取得し、岩盤力学モデルを構築した。

EDZの分布／物理・力学特性については、岩盤の不連続面の影響を考慮できる数値解析手法を用いて、研究坑道の掘削に伴う坑道周辺岩盤の掘削影響予測について感度解析を実施した。

ステップ2では、研究所用地近傍の既存ボーリング孔（DH-2号孔）のボーリングコアを用いた室内試験により、土岐花崗岩の物理・力学特性及び初期応力状態として主応力比及びその方向の分布を把握した。これにより、研究所用地近傍の土岐花崗岩上部割れ目帯の情報が新しく取得できたことから、その結果に基づいて研究所用地周辺の岩盤力学モデルを構築した。

(b)ステップ2からステップ3に伴う理解度の変遷

ステップ3においては、研究所用地内の深層ボーリング孔（MIZ-1号孔）のボーリングコアを用い土岐花崗岩の物理・力学特性を把握するとともに、原位置において水圧破碎試験を実施し、初期応力状態の分布を把握した。その結果、土岐花崗岩下部割れ目低密度帯の情報が付加され、その結果に基づき研究所用地の岩盤力学モデルを更新した。

また、EDZの分布／物理・力学特性については、岩盤の不連続面の影響を考慮できる数値解析手法に掘削損傷領域を加え、更新した岩盤力学モデルをもとに、研究坑道の掘削に伴う坑道周辺岩盤の掘削影響予測解析を実施した。

(c)まとめ

応力場、岩盤の物理・力学特性については、上述したように、調査・解析ステップごとに得られた土岐花崗岩の物理・力学特性及び初期応力状態をもとに、岩盤力学モデルを構築・更新し（Fig. 3.2.6(6)-1）、研究坑道周辺岩盤の掘削影響予測解析を実施した。調査・解析ステップが進むに従い、①モデル化に用いた調査ボーリング孔の位置が研究所用地に近づいていること、②ステップ2からステップ3においては、基盤花崗岩の情報が土岐花崗岩上部割れ目帯のみの情報であったものに土岐花崗岩下部割れ目低密度帯の情報が付加されたこと、③原位置における初期応力測定結果が得られたこと、④地質構造モデルとの対比により、初期応力状態の変化が、断層などの不連続構造近傍を境に発生していることが確認できたこと、⑤亀裂に関する情報が付加されたことなど、情報の蓄積により、理解度が変化している。

しかしながら、研究所用地内において取得した土岐花崗岩の物理・力学特性及び初期応力状態に関する情報については、1本の深層ボーリング孔における調査結果のみであり、研究坑道掘削地点とも離れていることから、研究坑道掘削地点における値は、地質構造などの違いによる影響を大きく受けることとなる。このことから、研究坑道掘削予定地点における応力場並びに岩盤の物理・力学特性を精度よく把握するためには、研究坑道掘削予定地点もしくはその近傍における深層ボーリング孔を利用した調査を実施し、応力場並びに岩盤の物理・力学特性に関する情報を取得することが望ましいと考えられる。

また、岩盤の不連続面を考慮した数値解析手法により研究坑道周辺岩盤の掘削影響予測解析を実施する際には、考慮する不連続面はボーリング調査で得られた亀裂群から卓越亀裂を抽出したり、統計的な処理を行ったりすることにより設定する。さらに掘削損傷領域を考慮する際も、過去の事例などに基づいた仮定により掘削損傷の程度と範囲を設定することとなる。しかしながら、これらの情報に関しては第1段階での調査においては正確に把握することが困難であり、既存の知見等を参考に設定する必要がある。

②第 2 段階以降の課題

第 2 段階の課題としては、第 1 段階で構築した岩盤力学モデルの妥当性を確認するために、研究坑道周辺（サイト／ブロックスケール）の応力場並びに岩盤の物理・力学特性に関わる情報を取得する必要があると考えられる。

したがって、予備ステージなどの研究坑道からボーリング調査を実施し、ボーリング孔を利用した初期応力測定及びボーリングコアを用いた物理・力学試験を行い、その結果との比較を行うことによって、第 1 段階で構築した岩盤力学モデルの妥当性を確認する予定である。また、EDZ の分布／物理・力学特性の把握については、研究坑道における掘削影響試験を通じて、第 1 段階における予測解析結果の妥当性を確認する必要がある。

2)地下空洞への地下水流入量の把握

①調査の進展に伴う理解度の変遷

研究坑道への地下水流入量の推定方法としては、主に等方均質媒体による理論式及び地下水流動解析が挙げられる。この地下水流動解析は、ボーリング調査結果などの情報を用いて水理地質構造モデルを構築し、それに基づき研究坑道の掘削を解析上模擬して実施するものである。特に、不均質性を有する水理地質構造を考慮する場合は、三次元での地下水流動解析が必要となる。このように三次元地下水流動解析を用いることによって、地下水流入量のより高い精度での推定が可能となる。しかしながら、三次元地下水流動解析は、理論式による推定と比較してメッシュ分割や計算に多大な時間を要することから、地下施設の設計・施工の観点で求められる予測精度によって両手法を使い分ける必要がある。

ステップ 0 では、研究用地周辺における断層などの水理地質構造の情報を取得できていないことから、研究坑道への地下水流入量は、等方均質媒体による理論式を用いて推定した。

また、ステップ 2 以降は三次元地下水流動解析による研究坑道への地下水流入量の推定を行った。この際、地下水流入量の推定精度を向上させるためには、地下水流動解析の基となる水理地質構造モデルの信頼性を向上させる必要がある。

ステップ 2 では、ステップ 0 で不明確であった堆積岩、土岐花崗岩中の上部割れ目帯及び主要な不連続構造の分布やそれらの水理特性を把握することができ、それに基づく水理地質構造モデルを構築することができた（3.2.3(3)参照）。ステップ 3 では、堆積岩や深度 1,000m 以深を含む土岐花崗岩、主要な不連続構造の分布やそれらの水理特性を把握することができ、それに基づく水理地質構造モデルを更新することができた（3.2.4(3)参照）。さらに、ステップ 4 では、主要な不連続構造の空間的な連続性やそれらの水理特性に関する情報を把握することができ、それに基づく水理地質構造モデルを更新することができた（3.2.5(3)参照）。

また、これらの水理地質構造モデルを用いた研究坑道掘削前の状態を対象とした地下水流動解析結果と間隙水圧分布の実測値を比較することによって、情報量の増加とともに水理地質構造モデルの信頼性が向上していることが確認できた（3.2.6(2)参照）。このことから、これらの水理地質構造モデルに基づいた地下水流動解析による研究坑道への地下水流入量の推定精度が向上したと考えられる。

この水理地質構造モデルの更新に伴い、研究坑道に出現すると予測された高透水性構造の数が変化し（3.2.6(6) 3 参照）、それによって地下水流入量の推定結果が大きく異なることが明らかになった（Fig. 3.2.6(6)-2）。このように地下水流入量に大きな影響を与えていることが明らかとなった高透水性構造については、当該地点では高角度の傾斜を有していることが確認されている。したがって、高透水性構造が研究坑道（特に立坑）に出現する数や位置は、高透水性構造の幾何形状の不確実性の影響を大きく受けることとなる。このことから、研究坑道に出現する高透水性

構造の数を精度よく把握するためには、研究坑道掘削地点での高透水性構造の空間分布や水理特性に関する情報を優先的に取得することが重要であると考えられる。しかしながら、第1段階の調査研究においては、サイトスケール全体の地下水流動特性を把握するための調査研究を優先させたことや、調査コスト及び工程といった制約条件のために、このような研究坑道掘削地点でのボーリング調査は実施されていない。よって、研究坑道への地下水流入量の推定精度が不十分である可能性があると考えられる。

また、地下水流動解析による地下水流入量の推定の際に、研究坑道壁面からの地下水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を考慮した検討を実施したところ、人工構造物を含むスキン効果などの影響を受ける研究坑道近傍の水理特性が地下水流入量に与える影響が非常に大きいことが明らかになった(3.2.3(6)2)、3.2.4(7)2)、3.2.5(5)1)参照)。しかしながら、この研究坑道近傍の水理特性については、第1段階での調査においては正確に把握することができない。さらに、地下水流動解析による推定結果では、高透水性部において多大な地下水流入量が発生することが考えられ、このように地下水流入量が多い地点においてはグラウチングなどによる湧水抑制対策を講じる必要があると考えられる。このグラウチングも、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と同様に研究坑道近傍の水理特性に対して影響を与えるものである。特に、グラウチングを行った場合は、研究坑道近傍の水圧状態が、グラウチングを行わない場合と比較して大きく異なると考えられる。

②第2段階以降の課題

地下水流入量の予測解析の結果から、地下水流入量や水圧低下などの現象は、人工構造物を含むスキン効果やグラウチング、掘削工程などの建設に伴う人為的な影響を強く受けることが明らかとなった。したがって、第2段階において研究坑道の掘削に伴う立坑内への地下水流入量計測及び立坑周辺での長期地下水モニタリング結果を用いて第1段階で構築した水理地質構造モデルの妥当性を確認するためには、研究坑道壁面近傍の覆工コンクリートや排水マットなどの人工構造物やグラウチングによる改良範囲を含むスキン効果などの影響を受ける研究坑道近傍の水理特性に関わる情報を取得することが重要であると考えられる。さらに、研究坑道への地下水流入に伴う水頭低下量や範囲を把握するために、第1段階に掘削したボーリング孔を用いた長期地下水モニタリングなどを継続する。

また、これらの情報に基づき第1段階で構築した水理地質構造モデルの妥当性を確認する際には、建設に伴う人為的な影響を考慮した実際に即した内部境界条件を用いた地下水流動解析を実施し、その結果と実測値の比較を行うことによって水理地質構造モデルの妥当性を確認する予定である。

3)不連続構造などの有無の把握

①調査の進展に伴う理解度の変遷

不連続構造などの有無の把握のための調査・解析・評価においては、調査の進展に合わせて、地質構造モデルを構築し、その理解度や不確実性を整理したうえで、次の調査を実施していくことで、効率的に研究坑道周辺の不連続構造の分布を把握していくことが重要である Fig. 3.2.6(6)-3 にステップ0～ステップ4までに構築した地質構造モデルについて、研究坑道を通過する断面をそれぞれ表示した。

ステップ0では、既得情報を基に不連続構造の情報を整理して、既存の地質図に記載されている月吉断層をモデル化し、月吉断層が研究坑道掘削予定地点においては出現しないことを把握した(3.2.1(7)3)参照)。

ステップ1では、既得情報に加えて、地表地質調査及び反射法弾性波探査により、月吉断層の

地表下での分布に関して、既得情報との整合性を確認するとともに、既得情報では得られなかった、サイトスケール領域に分布するより小規模な断層の分布を推定することができた (3.2.2(5)1 参照)。

ステップ 2 では、ステップ 1 までに確認・推定された断層の地下での実際の分布を確認することができ、ステップ 1 で推定された北北西走向の断層の地下での分布状況及び岩石・鉱物特性を確認するとともに、新たに南北及び東西走向を有する断層の花崗岩中の分布を推定することができた。この結果、研究坑道掘削予定地点においては、ステップ 1 に比べて、特に北北西走向を有する断層の出現位置の推定精度を向上させることができるとともに、東西走向を有する断層が新たに出現する可能性が高いことを推定することができた (3.2.3(6)3 参照)。

ステップ 3 では、花崗岩深部を対象に深層ボーリング調査を実施したことから、特にステップ 2 までには調査されなかった花崗岩深部に分布する断層を抽出することができた。本ステップでは、ステップ 2 において確認された東西走向の断層と一致すると推定される断層に加えて、北西～北北西走向を有する断層の分布状況及びその岩石・鉱物特性を把握でき、特にステップ 2 に比べて、花崗岩深部における研究坑道掘削予定地点での断層の出現位置の推定精度を向上させることができたと考えられる (3.2.4(7)3 参照)。

さらに、ステップ 4 では、孔間トモグラフィ探査に加えて、ステップ 3 の深層ボーリング孔を利用したマルチオフセット VSP 探査、さらには、これまで調査されていなかった研究所用地の北～北東領域において反射法弾性波探査を実施したことで、研究坑道近傍における断層分布を含めて、研究所用地を横断する断層の連続性などを詳細に検討することができた。その結果、ステップ 3 に比べて、研究坑道掘削予定地点における断層の出現位置の推定精度を大幅に高めることができたと考えられる (3.2.5(5)2 参照)。

ステップ 1 から 4 までの検討 (3.2.2(5)1、3.2.3(6)3、3.2.4(7)3、3.2.5(5)2) でも示したように、当該地域では多くの不連続構造が高角度の傾斜を有していることが推定された。このような構造と研究坑道との遭遇位置を精度よく予測するためには、研究坑道掘削予定地点における不連続構造の分布に関する情報を取得することが有効であると考えられる。

一方、3.2.2(2)に記したように、地表地質調査や物理探査及びボーリング調査により確認・推定された断層に比べて、断層としての分布の可能性の低いリニアメントについても地質構造モデルにおいて考慮されている。このことから、課題としては、このような情報も考慮した不確実性の定量化手法を含むモデル化技術の高度化が挙げられる。また、未調査領域における不連続構造の分布の推定手段のひとつとして、それまでに取得した地質学的・地球物理学的データを用いた地質構造シミュレーション解析の実施なども重要と考えられる。

②第 2 段階以降の課題

今後、第 2 段階の調査研究では、これらのモデル化された不連続構造の分布を確認し、第 1 段階の調査研究で予測された地質・地質構造の三次元分布の予測結果の妥当性の評価を行い、モデルを更新する。さらに、研究坑道に分布するより詳細な地質・地質構造として、特に不連続構造に着目して、その分布、幾何形状、構造形態、岩石・鉱物特性などを把握するとともに、より詳細なブロックスケールを対象とした地質構造モデルを構築する。

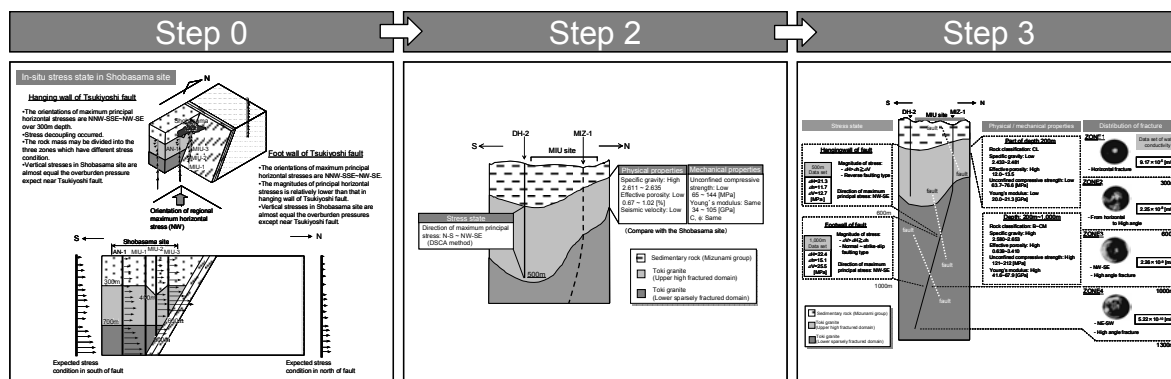


Fig. 3.2.6(6)-1 Evolution of rock mechanical model

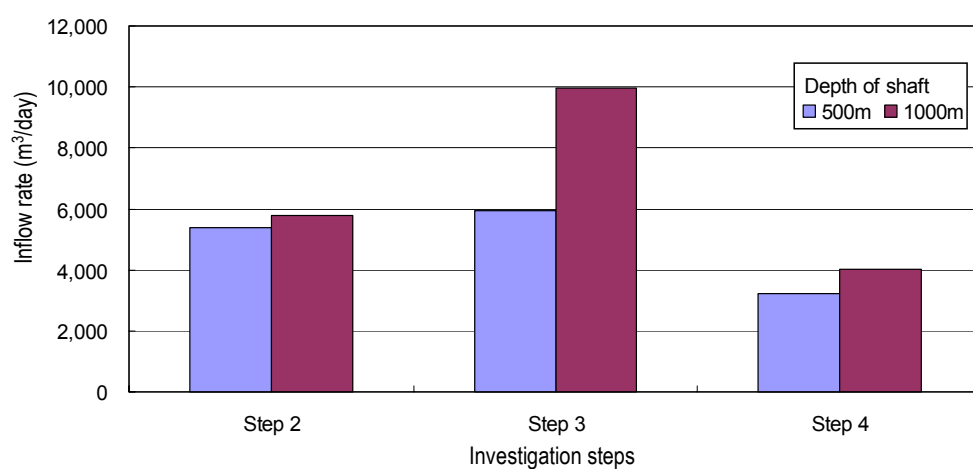
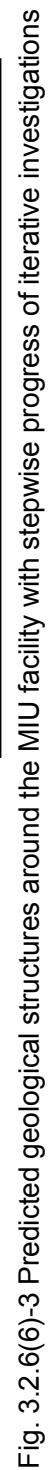


Fig. 3.2.6(6)-2 Inflow rate into MIU estimated by using groundwater flow simulations in the each investigation step (pressure relief factor: 0.2)



(7)地下の温度環境の把握

①調査の進展に伴う理解度の変遷

地下の温度環境の調査においては、温度検層及び熱特性試験により、調査対象領域の地温勾配及び熱特性の深度分布を把握することが可能である。

ステップ 0、ステップ 2、ステップ 3 での調査研究を通じて、地下の温度環境に関するデータのうち地温勾配は、火山地帯のように局所的な熱源が無い限り、ローカルスケール程度の規模の範囲内で大きな変化は見られないことが明らかとなった (Fig.3.2.6(7)-1)。このことから、ローカルエリア程度の規模の範囲内で、地温勾配については 1 箇所 (孔) 程度の温度検層により、また、熱特性については 1 本のボーリング孔のコア数個程度の熱特性試験により把握可能である。

②第 2 段階以降の課題

第 2 段階以降は、岩石の熱特性について、研究坑道からのボーリング調査で取得されたボーリングコアを用いた熱特性試験を適宜行い、第 1 段階において取得した結果の妥当性を確認することが課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 澁谷朝紀, 陶山忠宏, 柴田雅博: “核種のベントナイトおよび岩石に対する収着データベース”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8410 99-050 (1999).
- 2) 陶山忠宏, 笹本広: “JNC 収着データベース (JNC-SDB)の更新: 1998 年～2003 年までに公開された文献データの追加”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8410 2003-018 (2004).
- 3) Möri, A., Mazurek, M., Adler, M., Schild, M., Siegesmund, S., Vollbrecht, A., Ota, K., Ando, T., Alexander, W.R., Smith, P.A., Haag, P. and Bühler, Ch.: “Grimsel Test Site – Investigation Phase IV (1994-1996): The Nagra-JNC In Situ Study of Safety Relevant Radionuclide Retardation in Fractured Crystalline Rock IV: The In Situ Study of Matrix Porosity in the Vicinity of a Water-Conducting Fracture”, Nagra Technical Report, NTB 00-08 (2003).
- 4) Ota, K., Möri, 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, pp.131-145 (2003).

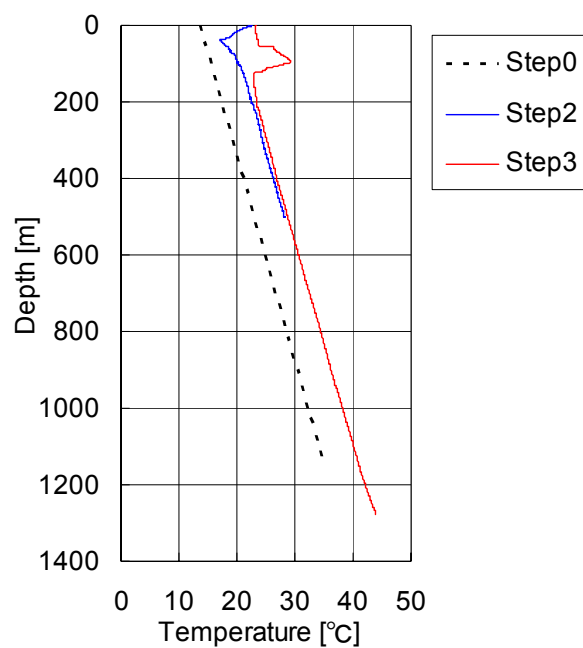


Fig. 3.2.6(7)-1 Transition of the temperature logging result

3.2.7 地下施設建設が周辺環境へ与える影響を把握する技術

3.2.1 から 3.2.6 では、安全評価及び地下施設の設計・施工にかかわる個別目標と課題に関する調査研究成果について取りまとめた。本項では、環境影響に関する評価にかかわる個別目標と課題にかかわる調査研究成果をまとめる。

(1)観測の考え方、進め方

超深地層研究所計画では、3.2.1 から 3.2.6 に示したように、安全評価及び研究坑道の設計・施工の観点から地層処分にとって重要な地質環境特性を理解するための調査・評価技術を整備することが重要である。また、処分事業の社会的受容を念頭に置いた環境上や社会的な側面からの総合的な評価（環境影響に関する評価）^{1),2),3)}に対しても、技術的な基盤を整備することが必要であると考えられる。

地下深部に施設を建設した場合、表層から地下深部にいたる地質環境のみならず社会環境に対しても様々な影響が及ぶことが想定されるものの、その種類・程度や重要度、それが安全評価などに与える影響、その低減あるいは修復の技術などについて明らかにはなっていない。今後、地上での大規模事業における環境アセスメントと同様に、処分事業においてもこのような環境影響評価が必要になることが想定される。

超深地層研究所計画では実際に研究坑道を建設し調査研究を進めていくことから、地下深部における研究坑道が周辺環境に与える影響に関する様々な事例をとおして技術的知見を蓄積し、研究坑道が周辺環境に与える影響の評価のための技術を整備することが可能となる。

以上のことから、研究坑道の掘削が周辺環境に与える影響の種類やその規模などに関する知見を蓄積することにより、有用な基礎情報として提供することが可能となると考えられる。

大規模地下施設の建設に伴い周辺環境で生じる可能性のある諸現象については、施設の規模やレイアウト、施工内容、操業期間、施設からの距離、観察時期などによって、様々なものが想定できる。これらの現象は、場の状態（地下水の流動状態や水質など）の変化にかかわるものや場の状態を形成する条件（透水係数や鉱物組成など）の変化にかかわるものなどに分類できる（Fig. 3.2.7(1)-1）。これらの変化を考慮し、超深地層研究所計画においては、環境評価法の対象外の事業であるが、瑞浪超深地層研究所を遂行するに当たり重要であると考えられる環境上や社会的な側面に着目し、以下の観測項目を設定した⁴⁾。

- ・地下水の水位や間隙水圧
- ・地下水の水質
- ・表層土壌水分
- ・河川流量
- ・騒音、振動

瑞浪超深地層研究所計画における第1段階では、研究坑道の掘削に伴う周辺環境の変化を把握するための初期状態の取得を目的として、上述した項目について観測を行った。これらのうち、表層部において研究坑道の掘削が周辺環境へ与える影響の調査については 4.2 で記述することとし、本項では研究坑道の掘削が表層から地下深部までの地下水の間隙水圧及び水質へ与える影響を観測する技術について述べる。

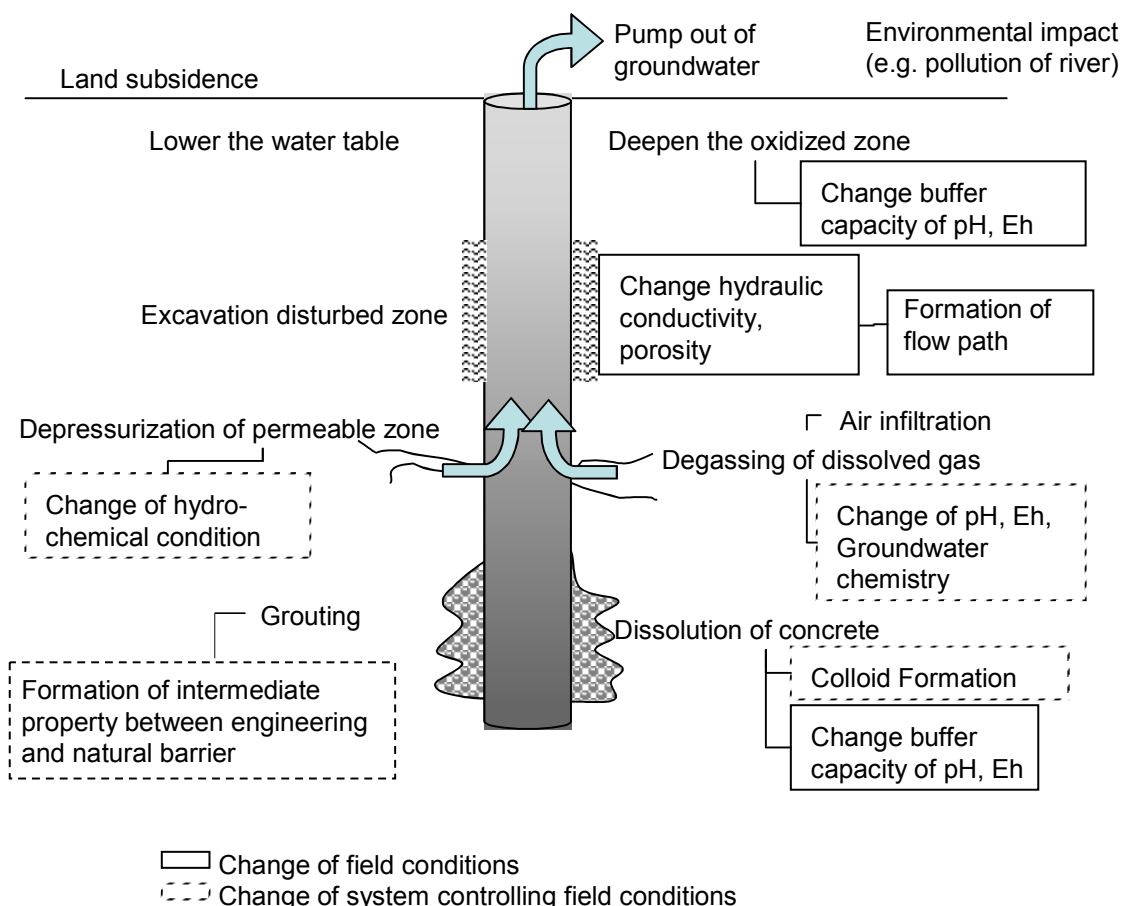


Fig. 3.2.7(1)-1 Hydrogeological and hydrochemical changes resulting from shaft construction

(2)地下水の間隙水圧の変化の把握

超深地層研究所計画では、研究坑道の掘削が地下水流動に与える影響を把握することを目的として間隙水圧観測を実施している。マルチパッカーシステムによる間隙水圧の観測方法としては、測定区間の間隙水圧を直接測定する方法と区間から立ち上がるピエゾ管内の水位を測定する方法がある (Fig. 3.2.7(2)-1)。これらの観測方法の特徴や利点を実際の観測を通して確認するために、研究用地とその周辺では両方のシステムを使用し連続観測を行っている。

マルチパッカーシステムを設置する際、間隙水圧が異なる複数のゾーンが同一の観測区間に存在すると、これらの平均的な水圧を取得することとなるため、研究坑道の掘削に伴う影響を正確に把握することは困難となることが想定される。そこで、マルチパッカーシステムを深層ボーリング孔内に設置する際には、事前に実施されるボーリング孔を利用した調査で取得された地質学的情報や水理学的情報などにに基づき、間隙水圧が異なると考えられる区間ごとに観測区間を設定した。前述の観測区間の考え方にしたがってマルチパッカーシステムを挿入することにより、初期値の取得からその後の掘削に伴う影響を正確に把握することが可能になると考えられる。

マルチパッカーシステムの設置に先立って実施されるボーリング孔を用いた各種調査は、観測区間設定に関する技術的根拠を与えることから、ボーリング孔に沿った深度方向への連続的な地質学的・水理学的な情報を取得しておくことが望ましい。

マルチパッカーシステムによるデータ取得の時間間隔は、現状では5分程度の間隔でデータを記録している。これにより季節変動をはじめとして、地球潮汐や大気圧変動、さらには大規模な

地震に同期した変動などを含む、研究坑道の掘削による影響が現れる前の初期状態のデータが取得されている (Fig. 3.2.7(2)-2)。データ取得の時間間隔については、研究坑道からボーリング孔までの距離や、水圧変化の要因となる作業の時間間隔 (例えば、研究坑道掘削のための発破の間隔)、観測対象となる地質・地質構造要素などに対して当該構造などを掘削する際に発生する変化の大きさなどを考慮して逐次、見直し、設定することが必要と考えられる。

取得された観測データには天然現象としての地球潮汐や大気圧変動、さらには観測機器のデジタルノイズ (イレギュラー成分) などの影響が含まれる。立坑掘削などによる間隙水圧の変動が小さい場合、把握すべき変動がこれらのノイズ成分と重なり認識できないことがある。よって、これらのノイズを除去することは、わずかな間隙水圧変動の把握に効果的である^{5),6)} (Fig. 3.2.7(2)-3)。また、観測データにボーリング孔の掘削や水理試験、研究坑道の掘削といった人為的な影響が含まれている場合、その影響を定量的に把握することが重要である。ニューラルネットワークモデル⁷⁾を用いたモニタリングデータ解析 (Fig. 3.2.7(2)-4) は、それまでに観測された間隙水圧データに基づき水圧変動を予測できる手法であり、簡便かつ定量的に水圧変動を予測することができることから、観測された水圧変動に人為的な影響が含まれているか否かを迅速に判断するための有効な手段である⁸⁾。

研究坑道の建設に伴う地下水の流動状況や水質の変化を観測するためには、水理地質構造、地下水の流動状態を念頭においた周辺観測孔の整備や地下施設の近傍で地下水の水圧測定、採取が可能な設計施工を行う必要がある。研究用地内のボーリング孔には、上述したように、間隙水圧の連続観測やバッチ式ボトル採水が可能な観測機器を設置しており、周辺観測孔において間隙水圧の連続観測や地下水の採水を継続する。

第2段階においては、グラウトの影響や坑道近傍の間隙水圧の変化を連続的に観測する必要があるが、その際、ボーリング孔は高差圧環境となるため、こうした環境で使用可能なモニタリング機器などの技術を開発する必要がある。

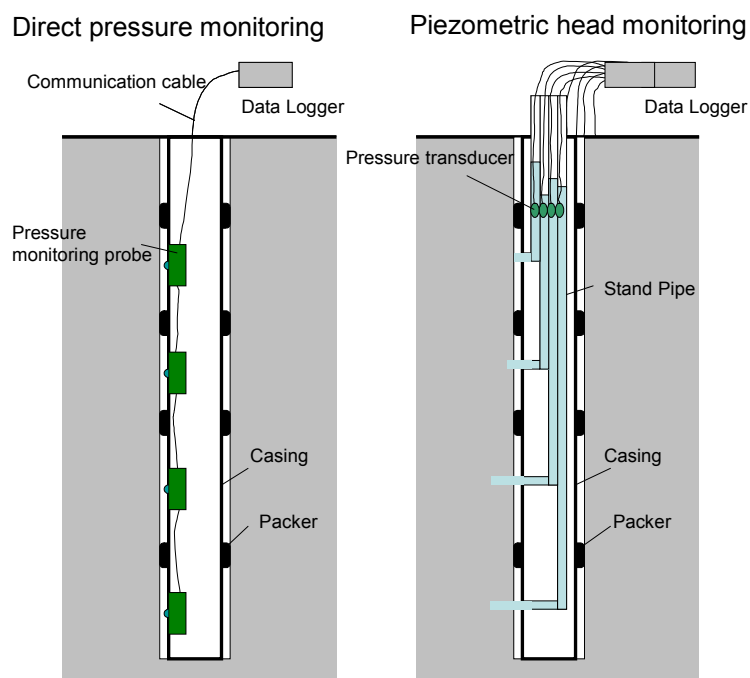


Fig. 3.2.7(2)-1 Schematic of Long-term Monitoring System Configuration⁶⁾

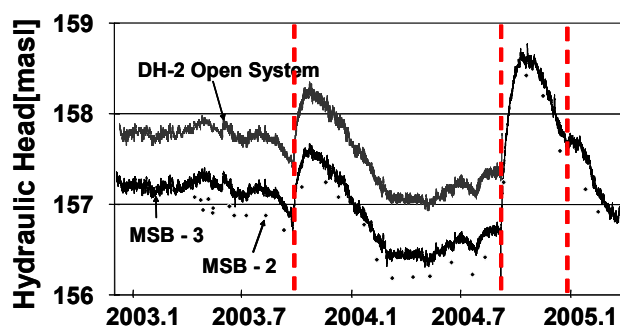


Fig. 3.2.7(2)-2 Example result of hydraulic head monitoring
(dashed vertical lines indicate earthquakes)

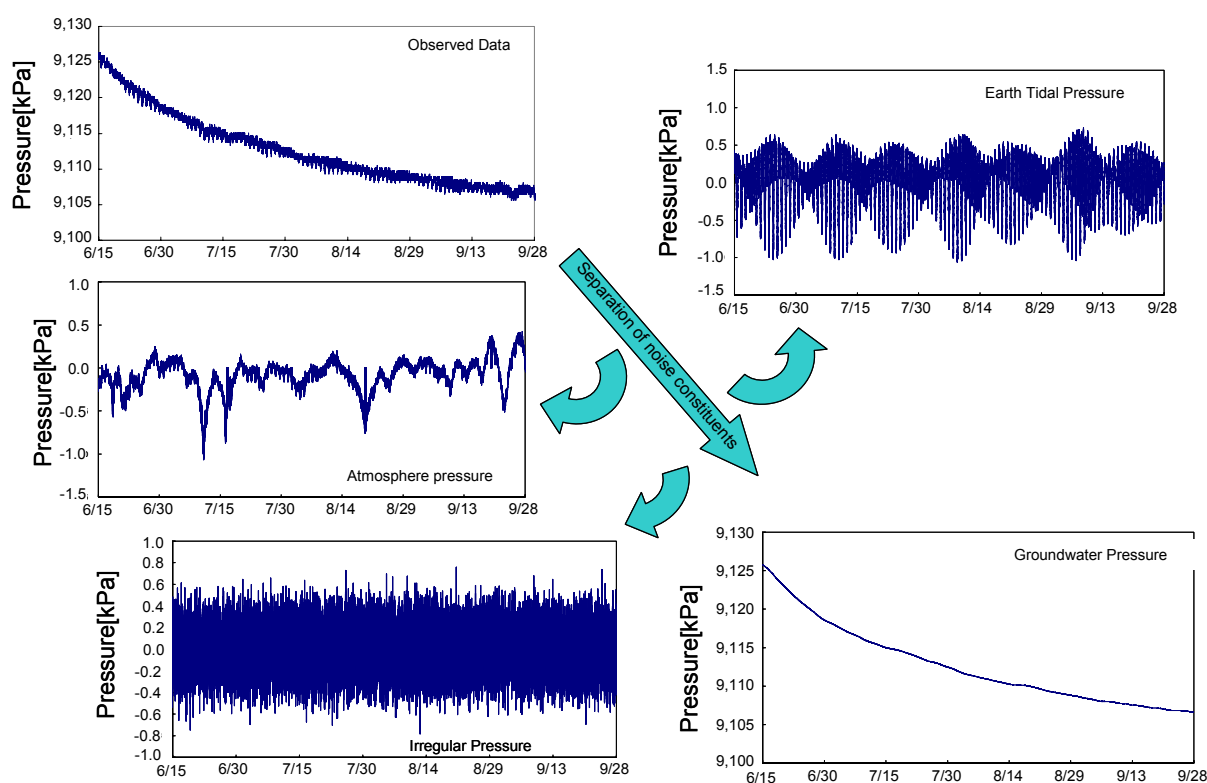


Fig. 3.2.7(2)-3 Elimination of noise constituents from groundwater pressure ⁶⁾

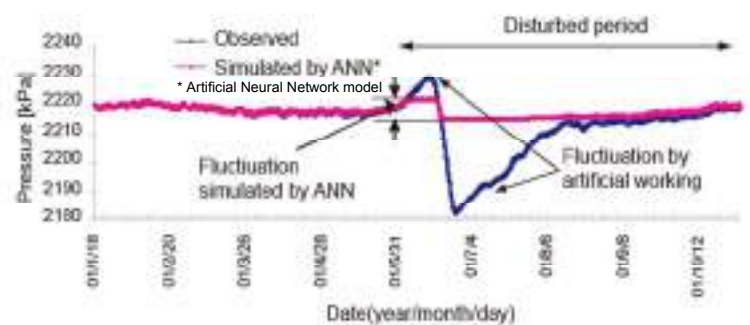


Fig. 3.2.7(2)-4 Comparison between observed and computed hydraulic pressure fluctuations during disturbed period (Modified from Gautam et al, 2003 ⁸⁾).

(3)地下水の水質変化の把握

地下水の水質変化にかかわるモニタリングでは、研究所用地周辺の地下水の地球化学特性の初期状態の把握及び研究坑道掘削に伴う地球化学特性の変化を把握することが目的の一つとして挙げられる。研究坑道掘削時には、坑道への周辺地下水の流入に起因する地下水圧の低下などにより、浅層部の酸化還元状態の変化、それに伴う溶存化学成分濃度の変化、溶存ガスの脱ガスなどの現象が想定される。地下水圧・水質のモニタリング装置のうち、ピエゾ管式の計測装置では、地下水試料を得るための連続的な地下水揚水により、観測区間の地下水圧を人為的に乱す可能性が高い。また、揚水方式では試料採取に伴う溶存ガスの脱ガスも生じる。したがって、研究坑道掘削に伴う現象を観測するためには、バッチ式採水ボトルによる地下水の採取が望ましい。しかしながら、溶存ガスを指標としない場合は、水理学的な影響を勘案したうえで、ピエゾ管式のモニタリング装置を使用して地球化学的なモニタリングを行うことも可能である。

研究所用地ではステップ 2 以降、研究坑道（立坑）から数十～数百 m の範囲の地下水の水質変化を把握することを目的として、バッチボトル式採水が可能な直接水圧計測方式のモニタリング装置（MP システム）を利用して、研究所用地内の浅層ボーリング孔において、瑞浪層群中の地下水を対象に研究坑道掘削の工程を考慮しつつ、月 1 回の地下水採水及び化学分析を行っている。採水頻度は観測区間数（十数区間）と観測に要する時間（1 区間当たり 1～2 日）に基づき決定した。得られた基礎データは、自然状態の地下水水質の変動と研究坑道掘削に伴う変動の評価に用いられる。研究坑道掘削に伴う地下水の水質変化を定量的に解析するためには、自然状態におけるそれらの変化量を事前に評価しておき、人為的に生じる変化と区別する必要がある。Fig. 3.2.7(3)-1 は、研究坑道の掘削が開始される前の、主立坑から約 70m 離れたボーリング孔（MSB-2 号孔）において得られた瑞浪層群中の地下水の pH 及び化学成分濃度の自然状態の変動幅を観測した例である⁹⁾。この例は、2003 年 1 月から 2004 年 3 月までの 14 ヶ月（14 回）の観測結果を、それぞれの観測区間について、平均値と最大値・最小値を示したものである。化学成分ごとにその変化量（地下水採水から分析までに生じる誤差も含んでいる）が異なることが分かる。地下浅部においては、地下水の pH の変動幅が大きく、採水時期による表層水の流入の変化を反映している可能性がある。また、低透水層を境にして、深部は浅部に比べて変動幅が小さいことから、地下に施設を建設する際には、このように各化学成分の自然変動幅を把握し、地質構造及び水理地質構造をあわせて考慮したうえで、地質構造ごとに人為的擾乱の有無の評価を行うことが効果的である。

研究坑道（立坑）近傍の地球化学的变化については、立坑掘削直後の坑道壁面から壁面湧水を採取する。さらに、立坑壁面に設置する集水リングを用いて、立坑の覆工コンクリート外側の地下水の採取が可能なように設計している。

第 2 段階では、グラウトの影響や研究坑道近傍の場の状態を形成する条件の変化についても評価していくために、研究坑道内からボーリング孔を掘削し、岩石や地下水試料を採取する技術、高差圧環境下でのボーリング孔を利用して地球化学環境を観測するモニタリング機器などの改良・開発を実施していく。

参考文献

- 1) AECL: “Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada’s Nuclear Fuel Waste”, Atomic Energy of Canada Limited, AECL-10711, COG-93-1 (1994).
- 2) Posiva: “The Final Disposal Facility for Spent Nuclear Fuel – Environmental Impact Assessment Report” (1999).
- 3) DOE: “Final Environmental Impact Statement for a Geologic Repository for the Disposal

of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste at Yucca Mountain, Nye County, Nevada”, U.S. Department of Energy, DOE/EIS-0250 (2002).

- 4) 核燃料サイクル開発機構: “超深地層研究所計画における調査研究の考え方と進め方 (平成 15～17 年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2004-008 (2004).
- 5) 後藤和幸, 升元一彦, 向井圭, 竹内真司: “水圧モニタリングデータの地球潮汐・気圧変動成分の分離解析”, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.445-450 (2004).
- 6) 升元一彦, 向井圭, 竹内真司: “花崗岩地域における大深度長期間隙水圧モニタリング”, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.277-282 (2004).
- 7) 馬場則夫, 小島史男, 小澤誠一: “ニューラルネットの基礎と応用”, 共立出版 (1994).
- 8) Gautam, M.R., Watanabe, K. and Saegusa, H.: “Analysis of hydraulic pressure fluctuation in deep geologic formations in Tono area, Japan, using artificial neural networks”, Journal of Hydrology, Vol. 282, pp.174-192 (2003).
- 9) 古江良治, 岩月輝希, 水野崇: “MSB-2 号孔・MSB-4 号孔における地下水水質観測 (2003 年 1 月～2004 年 3 月)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7450 2004-002 (2005).

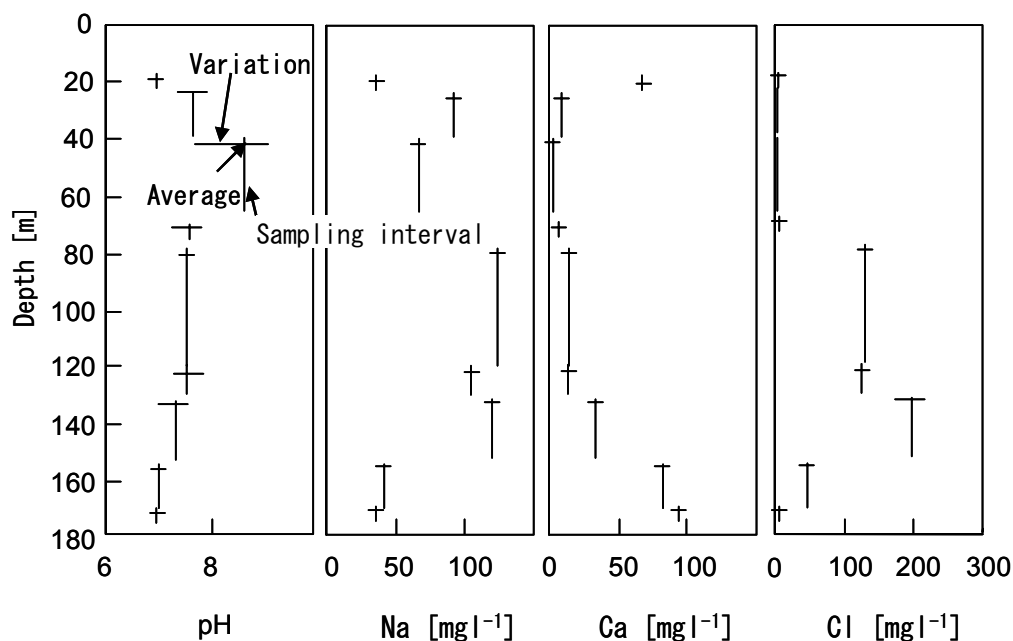


Fig. 3.2.7(3)-1 Monitoring results of groundwater chemistry before shaft excavation⁹⁾

3.2.8 第2段階の調査研究に向けた深部地質環境とその変化の推定

本項では、3.2.1 から 3.2.7 までに述べた第1段階の調査研究成果を踏まえた第2段階の調査研究に向けた深部地質環境とその変化の推定結果について取りまとめる。

(1)研究坑道近傍の地質・地質構造の推定

第1段階の調査研究で構築した地質構造モデル（3.2.5(1)参照）に基づき、研究坑道近傍の地質・地質構造の特徴を推定する（Fig. 3.2.8(1)-1、Fig. 3.2.8(1)-2）。

堆積岩部は、上位から明世累層、本郷累層、土岐夾炭累層であり、その下位の土岐花崗岩とは不整合面で接している。土岐花崗岩は、風化部、上部割れ目帯、上部割れ目帯の中の低角度傾斜を有する割れ目の集中帯、下部割れ目低密度帯に分けられる。中間ステージの建設が計画されている深度 500m 付近の花崗岩は、上部割れ目帯と下部割れ目低密度帯がそれぞれ分布することが予測される（Fig. 3.2.8(1)-2）。一方、最深ステージの建設が計画されている深度 1,000m 付近の花崗岩は、下部割れ目低密度帯と推定される。

不連続構造の走向は、おおむね北北西、北西、東西及び北東方向を示しており、このうち、北西及び北北西走向の分布が卓越して認められる。地表付近から主立坑と換気立坑の間付近を北西及び北北西走向の断層が横断することが予測され、中間ステージにおいても、北西及び北北西走向の断層が遭遇することが予測される。最深ステージにおいては、北西及び北東走向の断層が遭遇することが予測される。また、推定されたこれらの不連続構造は、いずれも高角度傾斜を有していることから、実際の立坑での遭遇深度は大きく異なる可能性があること、及び断層と立坑のなす角が鋭角になるために、立坑沿いに長い区間で断層に伴う破碎帯（Fig.3.2.8(1)-1 中の青色半透明部；幅はボーリング調査で確認した情報に基づく）が続く可能性があると考えられる。

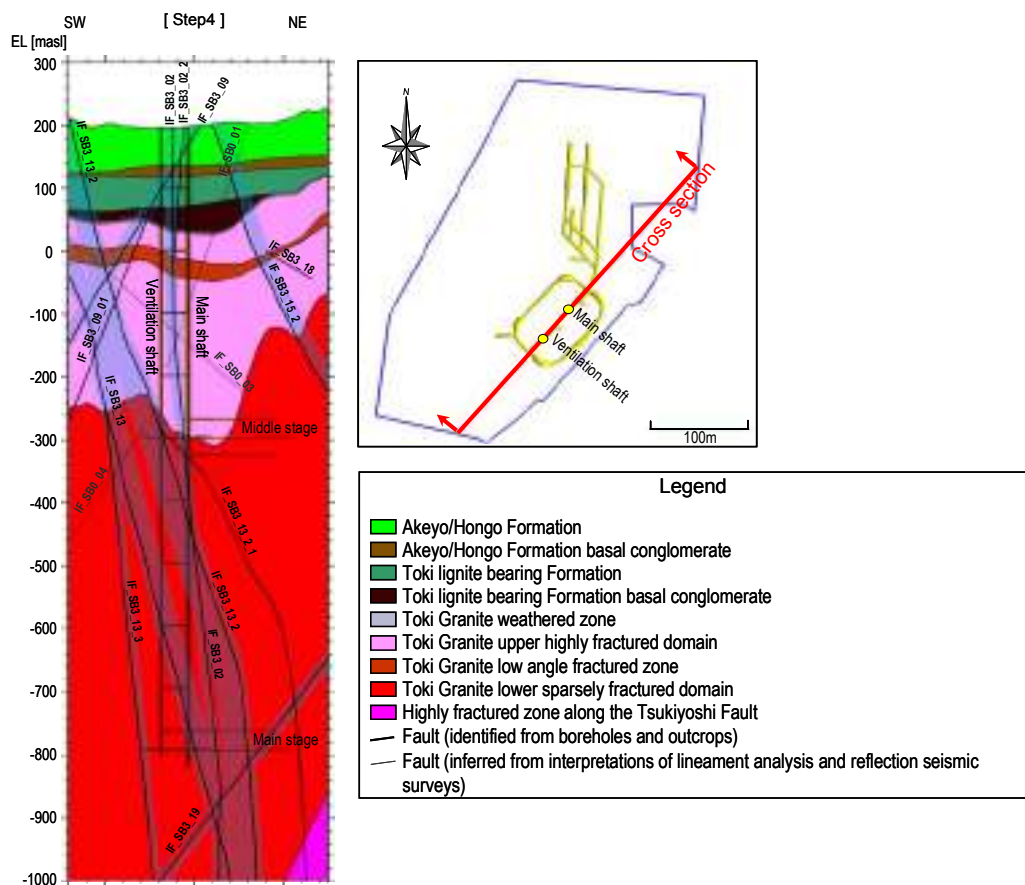


Fig. 3.2.8(1)-1 Predicted geological structures around the MIU facility (Step4)

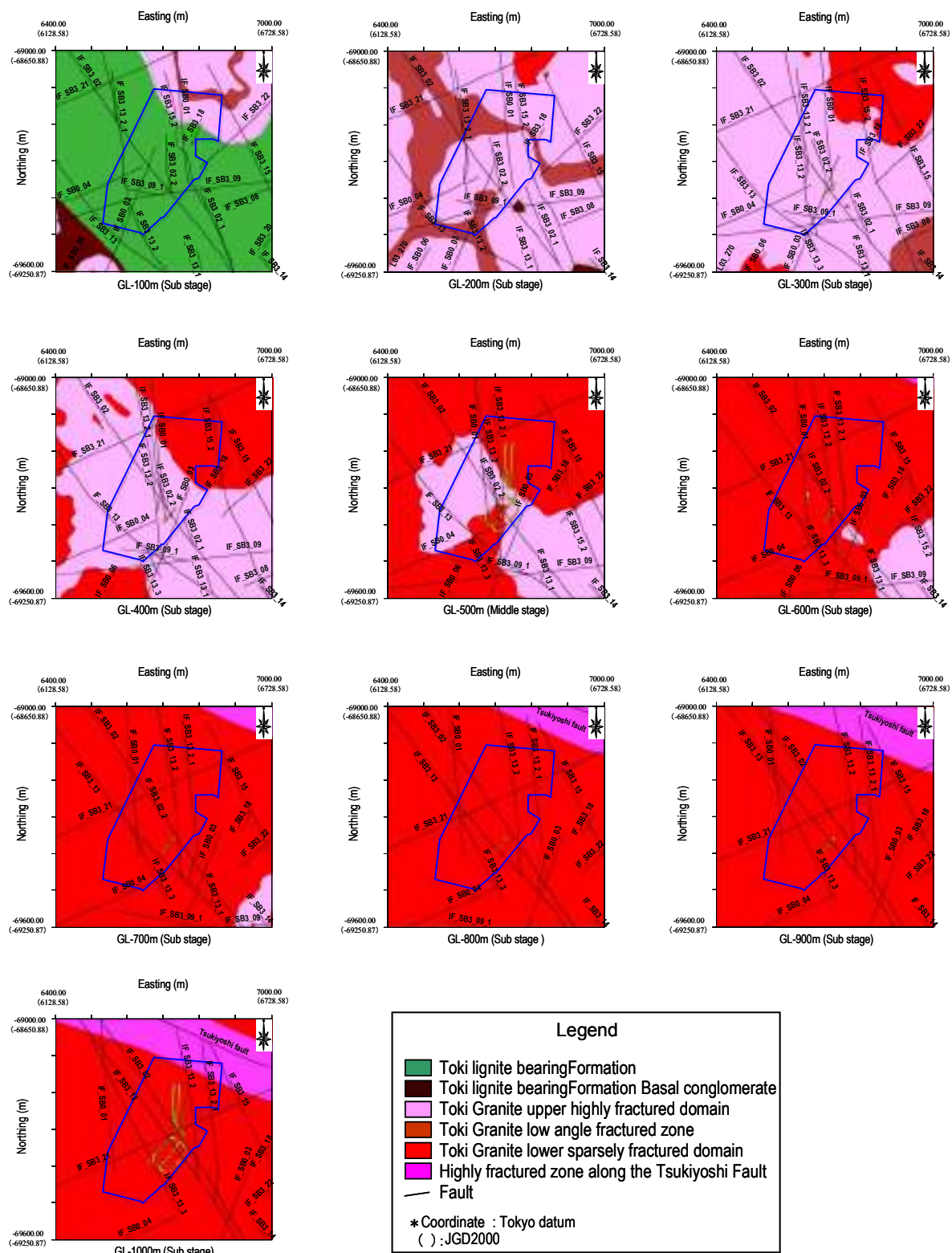


Fig. 3.2.8(1)-2 Horizontal sections through the Step4 Geological model (100 m intervals)

(2)研究坑道近傍の水理地質構造の推定及び研究坑道掘削に伴う地下水流動場の変化

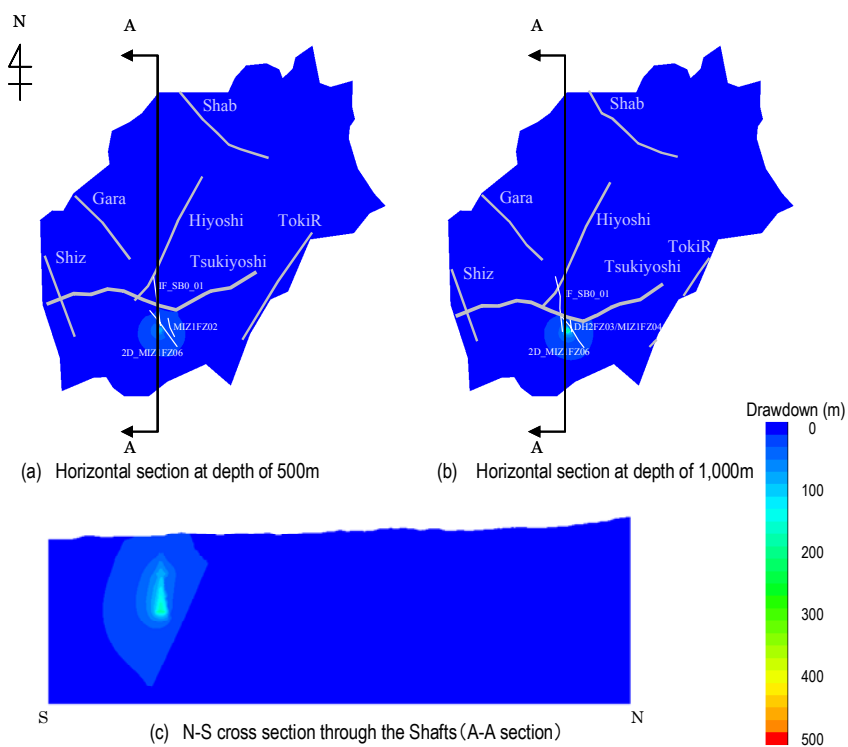
研究坑道近傍の水理地質構造は、ステップ0から4において推定した(3.2.1(3)、3.2.2(3)、3.2.3(3)、3.2.4(3)、3.2.5(3)参照)。さらに、この水理地質構造モデルに基づき、研究坑道の掘削を解析上模擬した地下水流動解析を実施し、研究坑道への地下水流入量を推定した(3.2.3(6)2)、3.2.4(7)2)及び3.2.5(5)1)参照)。地下水流動解析においては、研究坑道壁面からの地下水流入量に対する覆工コンクリートや覆工と岩盤の間に設置される排水マットなどの影響を考慮し、研究坑道壁面の境界条件を完全大気開放条件と不透水境界の中間に設定するために「圧力開放係数： α 」の概念を導入して内部境界条件を設定した。

解析の結果、圧力開放係数が大きい場合(不透水境界に近い場合；圧力開放係数=0.8)、水頭低下範囲は、モデル化した複数の断層によって包含される研究所用地周辺に限定される結果となった。(Fig. 3.2.8(2)-1(a))。一方、圧力開放係数が小さい場合(完全大気圧開放状態に近い場合；圧力開放係数=0.2)は、圧力開放係数が大きい場合と比較して水頭低下範囲は広範囲に及ぶことが分かった。数十 m オーダーの水頭低下範囲は研究所用地北方に分布する遮水性を伴う月吉断層北側には到達しないものの、東西方向にその範囲が拡大している (Fig. 3.2.8(2)-1(b))。

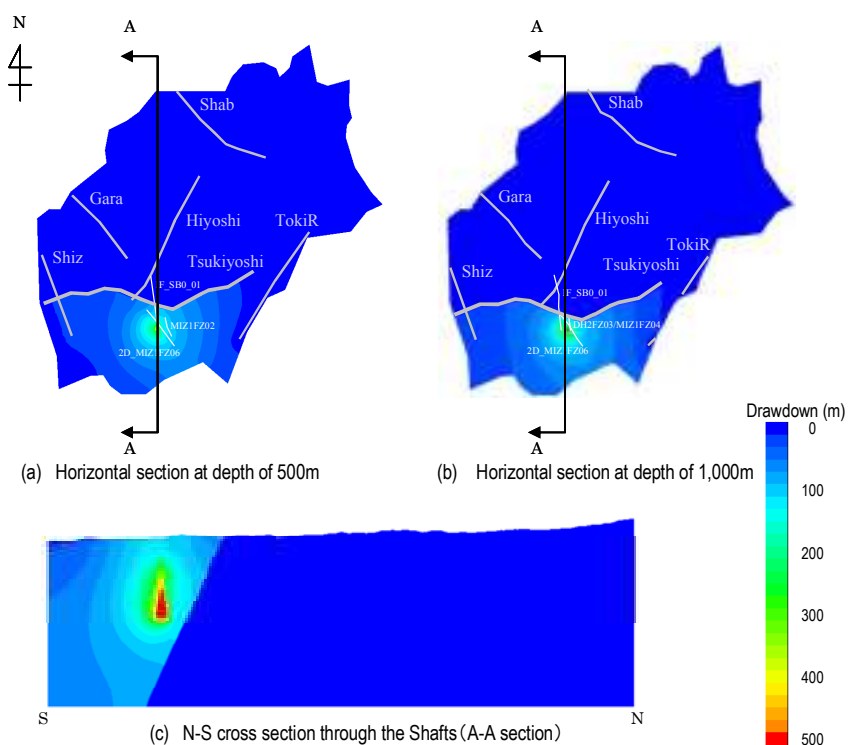
以上の解析結果では、特に圧力開放係数が小さい場合においては、高透水性部から研究坑道への多大な地下水流入量が発生すると結果が得られており、このように地下水流入量が多い地点においてはグラウチングなどによる湧水抑制対策を講じる必要があると考えられる。このように湧水量が多い地点を対象としたグラウチングを行うことによって、立坑周辺岩盤の透水性を低減し、水圧の大部分をこの改良岩盤で負担することとなる。

このことから、覆工コンクリートや排水マットとともに、このグラウトによる改良ゾーンも総合的に考慮して圧力開放係数を用いた境界条件を設定することを想定すると、圧力開放係数が小さい場合での水頭低下が、グラウチングを行うことによって圧力開放係数が大きい場合での結果に近づき、水頭低下範囲もより研究所用地近傍に限定されるようになると考えられる。

以上のように、研究坑道の掘削に伴う水圧低下などの地下水流動場の変化は、3.2.6(6)2)などでも述べたように人工構造物を含むスキニング効果やグラウチング、掘削工程などの建設に伴う人為的な影響を強く受けることから、第1段階で構築した水理地質構造モデルと、建設に伴う人為的な影響を考慮した実際に即した内部境界条件を用いた地下水流動解析を実施し、その結果と実測値の比較を行うことによって水理地質構造モデルの妥当性を確認する必要があると考えられる。



(a) Pressure relief factor: 0.8



(b) Pressure relief factor: 0.2

Fig. 3.2.8(2)-1 Drawdown distribution after URL construction

(3)研究坑道近傍の水質分布の推定及び研究坑道掘削に伴うその変化

研究坑道近傍の地下水の水質分布は深層ボーリング孔を用いた調査・解析によって、3.2.4(4)で述べたように推察されている。この水質分布や水理地質学的な情報に基づき、立坑掘削による周辺の地球化学的影響を予察することを目的として、水理化学計算コード TOUGHREACT^{1),2)}及び PHREEQC³⁾を用いて熱・水・地球化学連成解析を行った。

解析では、長期にわたる影響領域の経時的な拡がりを予察的に評価するため、既存の地下水観測孔を含む直径 8km、深さ 2km の円筒二次元モデルを使用し、中心に直径 6.5m の立坑を 6 年間にわたって一定の掘進率で 1,000m 掘削する前提とした。モデル範囲は 29 層 (2~500m) × 23 リング要素 (5cm~1,600m) に分割し、全部で 667 要素である。境界条件は、既存の地下水流動解析との整合をとるため上面は 0.1MPa 一定とし、側面は透水、温度・圧力一定境界とし、底面は不透水、温度一定閉境界として、立坑周辺の状態変化を予測した⁴⁾。なお、この解析では、立坑の覆工コンクリートの止水の影響や、土岐花崗岩中の透水係数分布を仮定している。

解析の結果、立坑掘削開始数ヶ月後には、立坑での湧水により周辺の地下水圧力が低下し、堆積岩中の難透水層直下で大気圧以下になり、1 年後には絶対圧で 43kPa になると計算された。また、立坑からの湧水により浅部地層中に空気が侵入し始め、掘削進行とともに不飽和領域が拡大すると推測された。花崗岩部を掘削して 3 年後には、立坑周辺の花崗岩において地下水から脱ガスが起ることが推測された。脱ガスが発生する範囲は、立坑から約 20m の範囲に広がり、現在地下水中で観察されるメタン、二酸化炭素、硫化水素の脱ガスが起ると考えられる。また、脱ガス及び地下水の流動に伴い、pH、Eh 及び水質が変化する。

以上の予測解析結果（現象が起こる時期やその程度）は、立坑の掘進速度などの工程変更によって実際と異なる可能性があるが、解析から得られた現象は、これまでのボーリング孔を用いた調査の過程でも確認されているため、研究坑道の掘削においても実際に起こる可能性が高い。現象の程度は水理地質構造の違いに依存して異なることが予想され、研究坑道掘削予定地周辺の断層や難透水性層の三次元的空間分布を参照しながら、第 2 段階以降の研究計画に反映するとともに、今後の観測により予測解析結果の妥当性を考察していく必要がある。

このような、予測解析手法の信頼性を向上することは、処分場閉鎖後以降の安全評価期間における地下水の地球化学特性を推察する技術の一つとなり得る。今後、ほかの計算コードを用いるなどの検討を継続し、予測結果の信頼性を向上させていく必要がある。

(4)研究坑道近傍の岩盤力学特性の推定及び研究坑道掘削に伴うその変化

第 1 段階における研究所用地の岩盤力学特性の推定結果は、ステップ 3 において構築した岩盤力学モデル (3.2.4(7)1参照) により表現される。すなわち、研究坑道近傍には電研式岩盤分類の A 級から CL 級までの岩盤が分布すると想定され、それぞれの岩盤等級における岩盤の物理・力学特性は、ステップ 3 における調査結果をもとに設定した (Table 3.2.8(4)-1)。また、研究坑道掘削に伴う研究坑道周辺岩盤の挙動予測解析に必要なデータとしては、岩盤の物理・力学特性のほか、岩盤の初期応力状態や亀裂特性、透水係数などがある。これらについてもすべてステップ 3 の調査結果をもとに設定した。

これらのデータを用いて、研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の挙動予測解析を行い、研究坑道掘削によって生じる坑道周辺岩盤の力学特性の変化を推定した。予測解析は、不連続面の影響を考慮可能な等価連続体モデルである MBC モデル及びクラックテンソルモデルと仮想割れ目モデルにより深度 500m 地点の接続部を対象として三次元解析を行った (Fig. 3.2.8(4)-1、Fig. 3.2.8(4)-2)。

掘削損傷領域を考慮した場合、MBC モデルを用いた解析では岩盤変位 (Fig. 3.2.8(4)-3) など

の挙動や最大せん断応力、局所安全率、亀裂開口量分布（Fig. 3.2.8(4)-4）などは、掘削損傷領域を考慮しない場合と大きな差は認められなかった。一方、クラックテンソルモデルと仮想割れ目モデルを用いた解析では、最大せん断応力、安全率に大きな差は認められなかったものの、岩盤変位（Fig. 3.2.8(4)-3）や透水係数の増加率（Fig. 3.2.8(4)-5）に影響が生じる結果となり、二つのモデル間で結果の差異が生じる場合があることが確認された。原因としては、両モデル間において、亀裂のモデル化手法が異なることなどが一因と考えられる。

次段階以降の調査研究では、予備ステージでの岩盤力学ボーリング調査による初期応力、物理・力学特性値の取得や、研究坑道内での各種計測により得られる地中変位や内空変位などの測定値と予測値との比較、及び掘削影響に関する原位置試験などを通じて、入力値や解析手法の適正を評価するとともに、不連続体解析手法の適用性の検討などが必要である。

参考文献

- 1) T. Xu and K. Pruess: “Coupled modeling of non-isothermal multi-phase flow, solute transport and reactive chemistry in porous and fractured media: 1. Model development and validation”, Report LBNL-42050, Berkley, California: Lawrence Berkeley National (1998).
- 2) T. Xu and K. Pruess: “Modeling Multiphase Non-Isothermal Fluid Flow and Reactive Geochemical Transport in Variably Saturated Fractured Rocks: 1. Methodology”, Am. J. Sci., 301, p.16-33, (2001).
- 3) D. L. Parkhurst and C. A. J. Appelo: “User’s guide to PHREEQC (Version 2) – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations”, Water-Resources Investigations Report 99-4259, USGS p.312, (1999).
- 4) 戸高法文, 阿島秀司, 中西繁隆, 手塚茂雄: “超深地層研究所周辺の地下水の水質変化に関する多変量解析”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7400 2005-001 (2005).

Table 3.2.8(4)-1 Average of physical / mechanical properties (MIZ-1)

Rock mass classification*	Apparent specific gravity	Moisture content (%)	Effective porosity (%)	Unconfined Compressive Strength (MPa)	Rock Young's modulus ** (GPa)	Rock mass Young's modulus *** (GPa)	Poisson's ratio	Cohesion (MPa)	Angle of internal friction (°)
A	2.63	0.37	1.10	143.0	50.6	50.6	0.29	39.7	51.1
B	2.62	0.40	1.12	159.6	50.3	50.3	0.27	39.3	52.6
CH	2.63	0.36	0.98	181.3	55.8	49.3	0.27	34.3	52.4
CM	2.59	0.92	2.43	174.7	53.7	50.5	0.18	37.6	49.3
CL	2.34	5.31	12.65	71.8	20.9	20.9	0.24	25.2	30.1

* : Method by Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI)

** : 50% tangential Young's modulus

***: Revised using the following expression

Rock mass's E = Rock's E × Fracture coefficient

where; fracture coefficient = $(V_{p(site)} / V_{p(lab.)})^2$

$V_{p(site)}$: P-wave velocity by sonic wave logging

$V_{p(lab.)}$: P-wave velocity by ultrasonic wave velocity test in laboratory

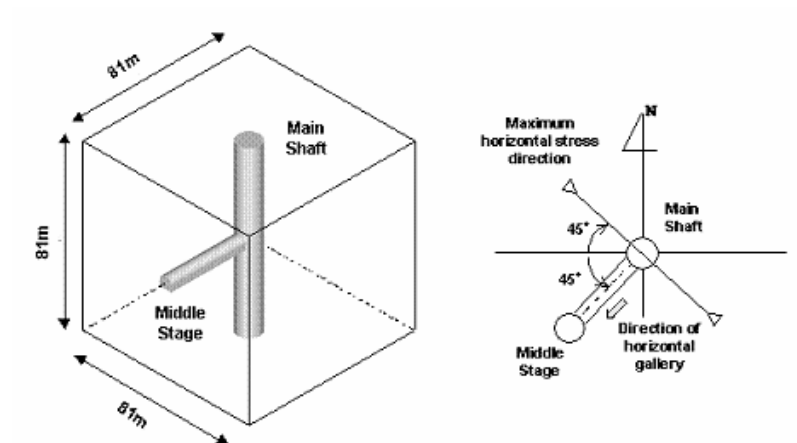
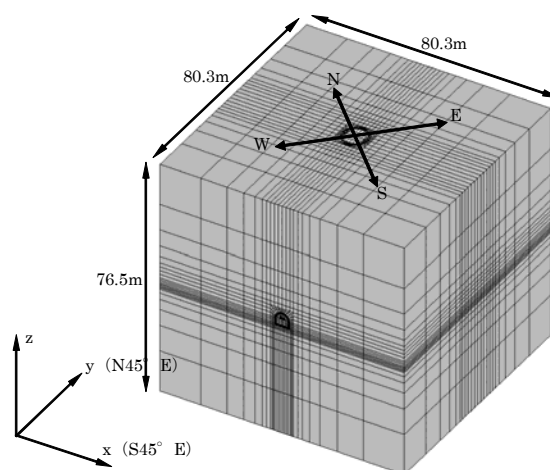


Fig. 3.2.8(4)-1 Direction of horizontal gallery



(Crack tensor model and virtual fracture model)

Fig. 3.2.8(4)-2 Example of analysis mesh

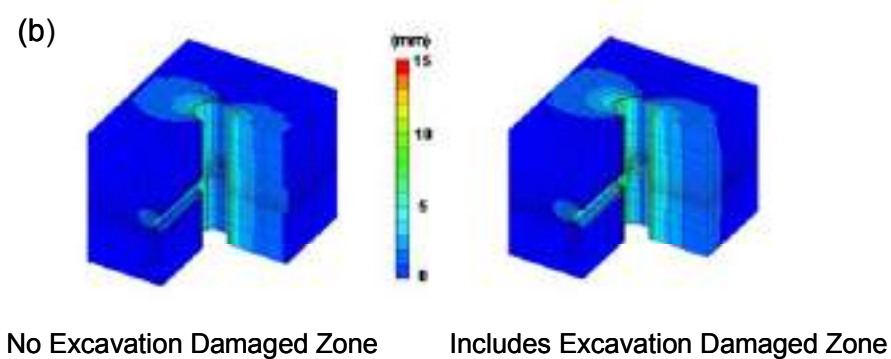
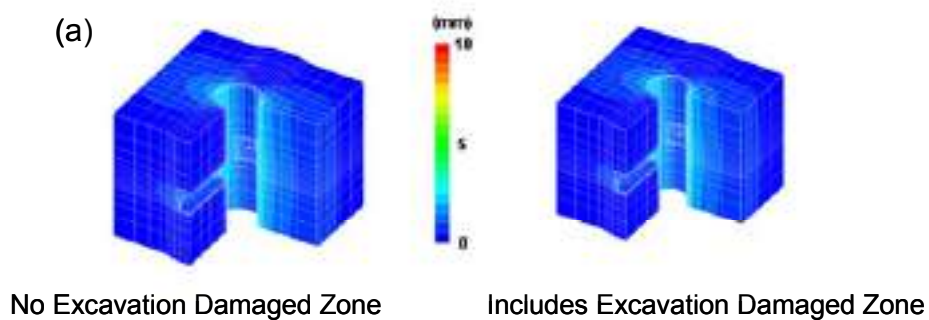


Fig.3.2.8(4)-3 Distribution of rock displacement (Class CH)

(a) MBC model, (b) Crack tensor model and virtual fracture model

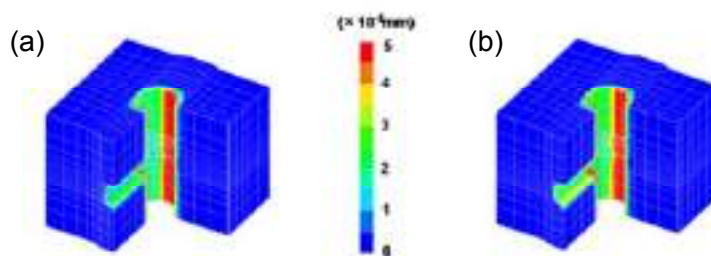


Fig. 3.2.8(4)-4 Distribution of fracture aperture based on MBC model (Class CH)

(a) No Excavation Damaged Zone, (b) Includes Excavation Damaged Zone

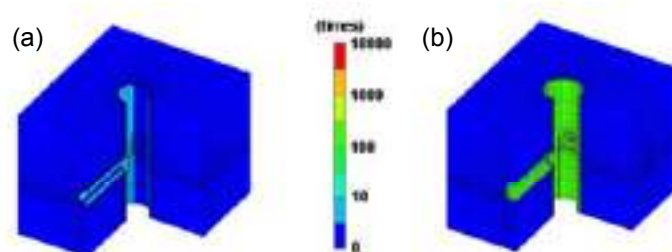


Fig. 3.2.8(4)-5 Increase in hydraulic conductivity based on Crack tensor model and virtual fracture model (Class CH)

(a) No Excavation Damaged Zone, (b) Includes Excavation Damaged Zone

3.3 地質環境の調査・評価技術の整備

超深地層研究所計画では様々な調査研究を実施し、3.2.1 から 3.2.6 に示したように個別目標と課題として設定した地質環境特性を段階的に理解しつつ、それに必要な調査・解析技術を開発・改良してきた。第 1 段階においては、例えば、リニアメントと地表地質調査の組合せによる不連続構造の分布頻度の推定技術、地質構造や不連続構造の分布などを精度良く評価するための複数の地上物理探査技術及びそれらの組合せ、ボーリング孔の掘削とそのボーリング孔を利用した地質、水理、地球化学などの一連の調査・評価技術などの適用性を確認した。また、地質構造や水理地質構造などのモデル化技術、地下水流動や水質分布などの解析・推定技術などについても整備を図ってきた。

本項では、第 1 段階において地質環境特性を合理的かつ精度良く調査・解析・評価するうえで重要と考えられる調査・解析技術及び研究成果の品質管理手法についての概要及びそれに関わる技術的知見をまとめる。また、付録 8 に地質環境の調査・解析技術ごとの目的・背景・トラブル事例や成果・反映事項・ノウハウ・課題などを取りまとめた。

3.3.1 リニアメント調査技術

岩盤中の地下水の流動や水質の分布に影響を及ぼすと考えられる不連続構造の分布を把握することは重要な課題の一つであることから、ローカルスケール領域において不連続構造の推定を目的としたリニアメント調査が複数回実施されてきた。高角な断層が一般的な風化侵食作用を上回って変位した場合や差別侵食された場合には、地上部には直線状の地形（直線状の谷やケルンコルなど）が形成され、このようなリニアメントは、これらの地形要素を基に判読する。リニアメント調査は主に活断層を認定する際などに用いられる手法の一つであり、従来の研究事例においては、リニアメントを判読した場所における地表踏査の結果から、長さ 3km 以上のリニアメントが断層や割れ目帯などの不連続構造とほぼ 100%一致することなどが報告されている¹⁾。しかしながら、大縮尺の画像で判読した長さ数 km 以下の小規模リニアメントとほかの調査結果から得られた不連続構造との関係を検討した研究事例はほとんどないため、どの程度の規模のリニアメントまでが不連続構造の推定に有効なのかは明らかではなかった。そこで、一般的に用いられるなかで最も大縮尺の画像（1 万分の 1 縮尺の空中写真）からリニアメントを判読し、さらには抽出できるリニアメントの規模の限界や判読精度について検討した²⁾。また、本調査以前に実施した地表地質調査やボーリング調査などで確認されている断層や割れ目との比較を行い、小規模のリニアメントが断層や割れ目の推定に有効かどうかを検討した。

広域地下水流動研究実施領域を対象とした 1 万分の 1 縮尺の空中写真によるリニアメント判読では、判読範囲 100～3,000m 程度のリニアメントが 472 本判読でき、地表の地質状況によりリニアメントの分布傾向（方向、分布密度、長さなど）が異なることが明らかになった。また、その結果について統計的解析を実施した結果、適正に判読できるリニアメントの規模は、基盤岩（後期白亜紀花崗岩）分布地域では長さ約 300～1,000m 程度、瑞浪層群（新第三紀中新世の堆積岩）分布地域では約 400～1,000m 程度と推定された（Fig. 3.3.1-1 直線近似される範囲、Table 3.3.1-1）。今回用いた判読画像は一般にリニアメント判読に用いられる最大の縮尺であることから、上記の規模（長さ約 300～400m）程度が小規模なリニアメントの判読限界であると考えられる。また、リニアメントは先述のとおり、特定の地形要素をもとに判読するため、その地形の取り得る幅（谷幅など）20～60m 程度がモデル化などで不確実性の幅を考慮する際に必要なリニアメント判読位置の精度であると推定された。さらに、長さ数百 m 程度のリニアメントと既往の調査（地表地質調査や反射法弾性波探査など）で確認（もしくは推定）された断層や割れ目帯とを比較した結果、両者の分布及び方向性に関しておおむね整合的な箇所を確認できた（Fig. 3.3.1-2 青線で示すリ

ニアメント)。この結果は、数百 m 程度のリニアメントが断層や割れ目帯を反映している可能性を示唆している。フラクタル特性についての統計的な解析結果からは、リニアメントと基盤岩の露頭で観察した割れ目は、おおむね同一のフラクタル特性を有することが明らかになり (Fig. 3.3.1-3)、両者の関係を利用すれば露頭調査やリニアメント調査では抽出が難しい数 m～数百 m 規模の割れ目の頻度を推定できる可能性があると考えられる。

これらリニアメントに関する調査・解析に関しては、判読に用いる画像の縮尺、解像度、移写する地形図の縮尺により、リニアメントの伸張に直交する位置の取り得る幅が変化し判読誤差が増加してしまうことや、地形が改変された場合、リニアメントが抽出できないこと、判読者の技量などいくつかの不確定要素も含まれている。つまり、リニアメントの判読結果には必ず誤差が含まれている。そのため、必然的にリニアメントと露頭の割れ目との関係から中規模の不連続構造の分布特性を推定する手法にも誤差が含まれている。今後の課題としては、例えば研究坑道掘削時において、長さ数 m～数百 m 規模の割れ目データを取得し検討することにより、この手法の有効性及び不確実性の幅を低減させるとともに、モデル化に関するリニアメントの有効規模を検討することなどが挙げられる。

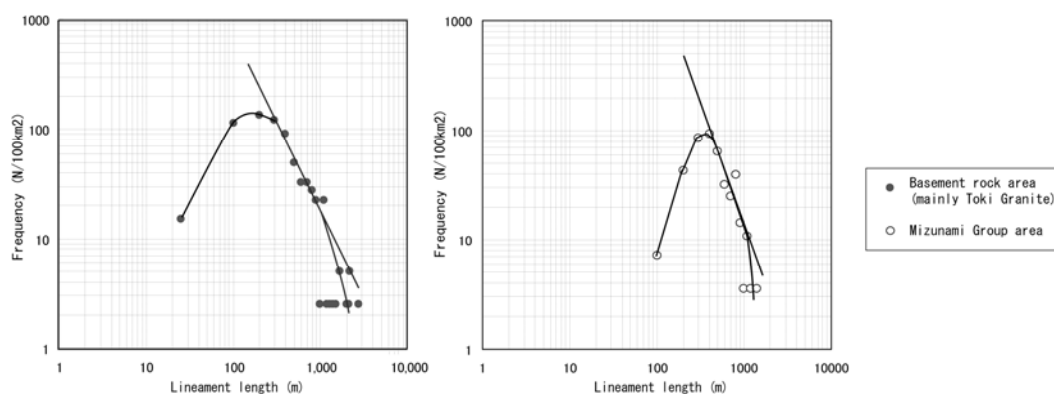


Fig. 3.3.1-1 Lineament length frequency distribution²⁾

Table 3.3.1-1 Lineament length defined from 1:10,000 scale aerial photographs²⁾

Class	Possible	Partly possible *1	Difficult *2	May be impossible *3
Basement Rock	300~1,000m	Over 1,000m	100~300m	Under 100m
Mizunami Group	400~1,000m	Over 1,000 m	300~400m	Under 300m

* 1 It is possible to define, but estimation of continuity is difficult.

* 2 Scale of lineament that can be interpreted in some case.

* 3 Scale of lineament that can be hardly interpreted.

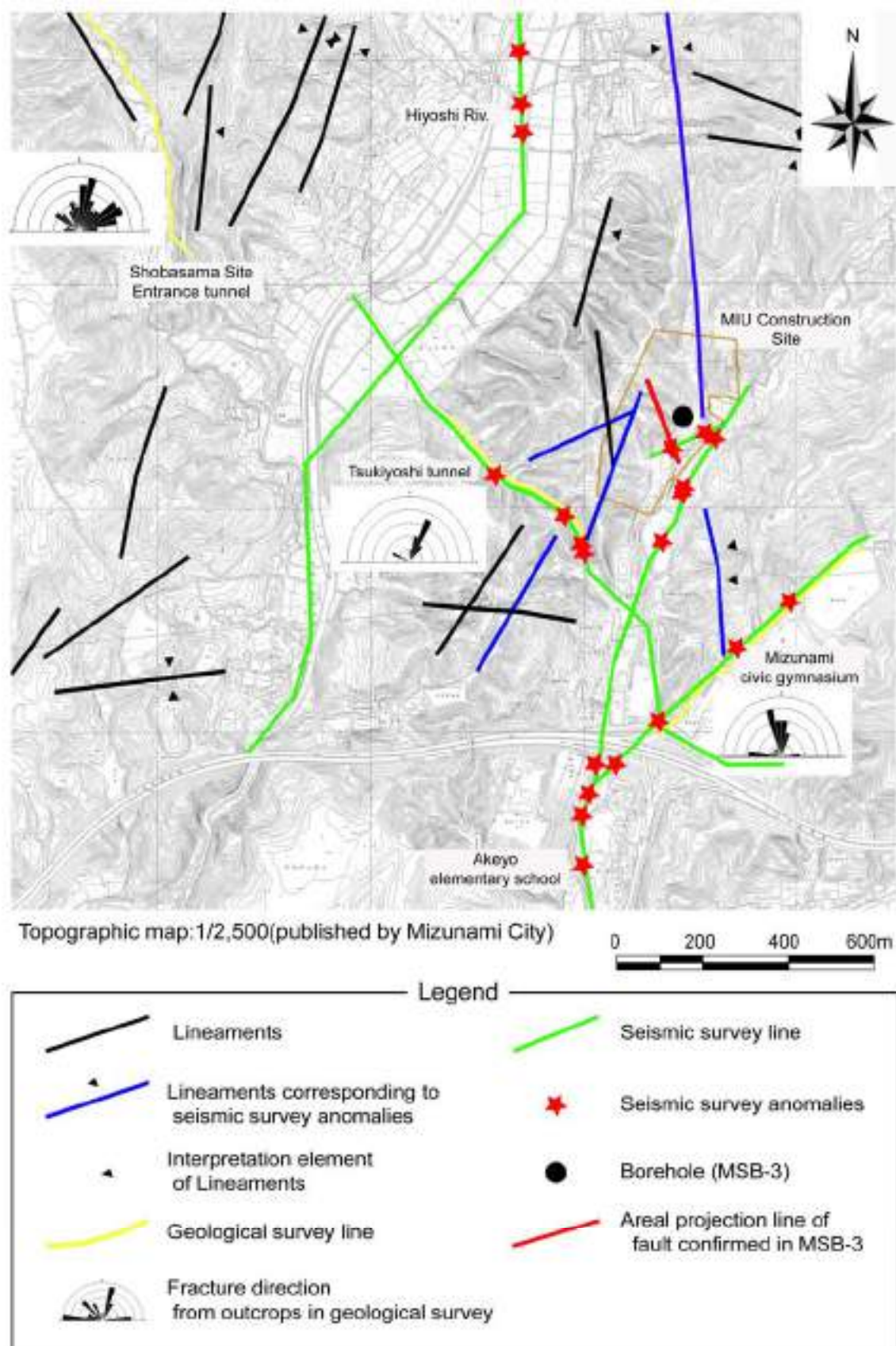


Fig. 3.3.1-2 Comparison between lineament analysis and other investigation results²⁾

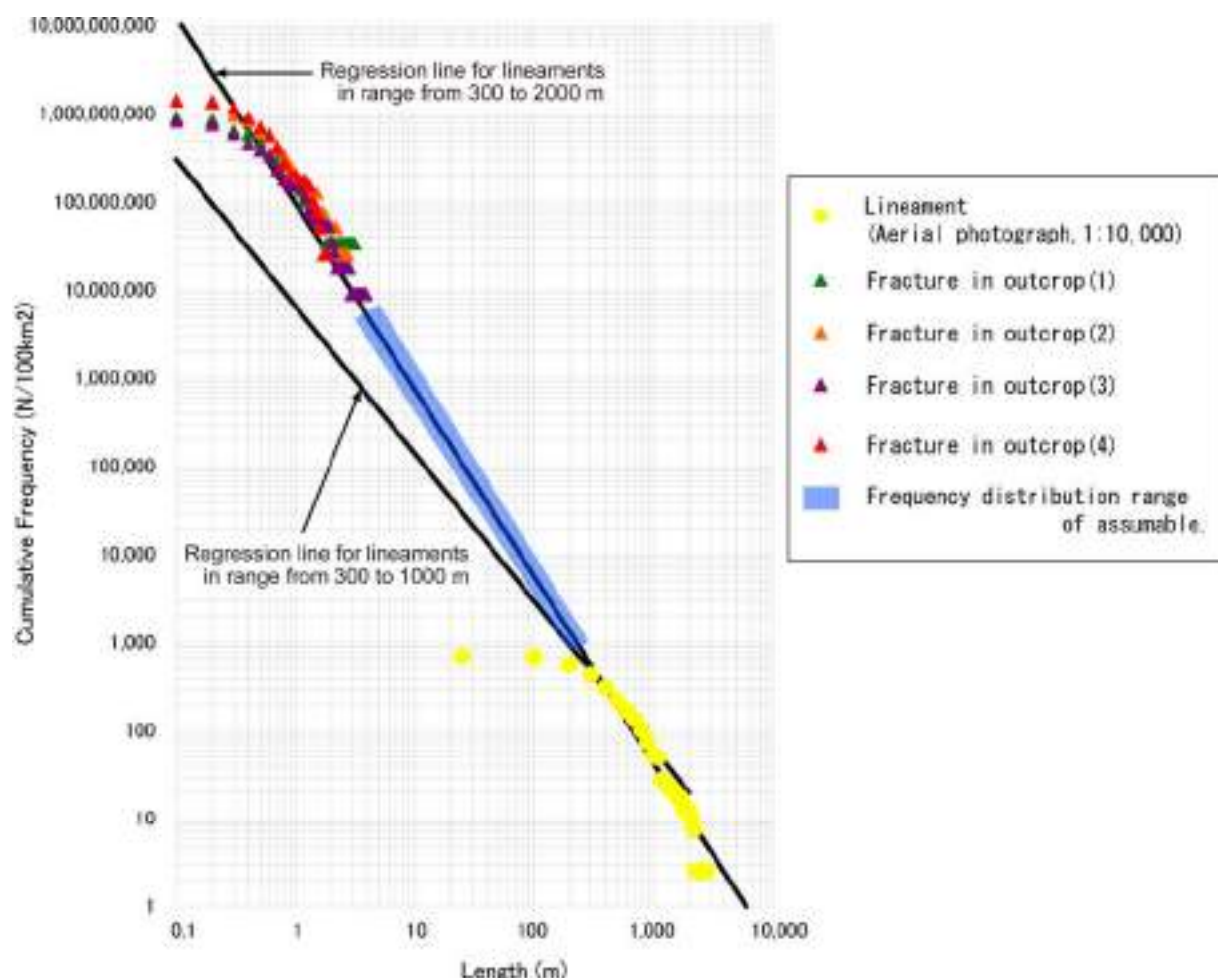


Fig. 3.3.1-3 Cumulative frequency distributions – lineament and fracture lengths²⁾

3.3.2 物理探査技術

(1) 反射法弾性波探査

反射法弾性波探査は、主に堆積岩中における地層境界面の検出などの構造把握を目的として発展してきた手法である。したがって、堆積岩を対象とした本探査の適用性については、石油分野などの資源探査において、ボーリング孔データとの対比が数多く行われており、比較的良く把握されていると言える。一方、花崗岩を対象としたその適用性については、これまでに十分に議論されていないため、花崗岩を対象とした反射法弾性波探査データに対して様々な処理・解析を適用し、その有効性について検討を行った。

ローカルスケール領域及びサイトスケール領域を対象に、それぞれ 10～20m 及び 2～5m の発震・受振間隔において反射法弾性波探査を実施³⁾した結果、反射断面記録には、瀬戸層群及び瑞浪層群中の地層境界や堆積岩と土岐花崗岩との不整合面などに対応する連続性の良い反射イベントが得られたほか、土岐花崗岩中の上部割れ目帯に対応する深度にもいくつかの反射イベントが認められた (Fig. 3.3.2-1(a)参照)。しかしながら、花崗岩中に認められる反射イベントについては、それをゾーンとして見た場合には、ステップ 0 やステップ 2 などにおいて把握した地質構造と一致しているものの、その詳細を比較した場合には、個々の反射イベントに対応する地質構造

に一致しない箇所が認められた^{4),5)}。したがって、花崗岩を対象とした、より詳細な地質構造解釈のための解析技術開発として、花崗岩中の反射イベントの S/N (Signal / Noise) 比や反射イメージング精度の向上を目的とした、いくつかの反射法処理・解析を試みた。

まず、堆積岩と花崗岩の急激な速度コントラストにより、この境界近傍での NMO (Normal Move Out) 補正時の波形の急激な変化によるイメージングの低下や花崗岩中での反射振幅の低下による相対的な各種ノイズ振幅の増大などの問題が考えられたため、簡易的な処理・解析として、堆積岩のイメージングを考慮せずに、花崗岩を対象に NMO 補正速度とデコンボリューションパラメータを適用した。その結果、通常の処理・解析を適用した反射断面記録 (Fig. 3.3.2-1(a)) に比べて、花崗岩を対象とした処理・解析を適用した反射断面記録 (Fig. 3.3.2-1(b)) の方が、物理検層データから作成した花崗岩中の合成地震記録に見られるイベントとよく一致する結果を得ることができた⁴⁾。

また、追加の処理・解析項目として、表面波抑制処理、サーフィスコンシステントデコンボリューション、相対振幅保存処理、重合前時間マイグレーションを適用した。その結果、通常の処理・解析結果 (Fig. 3.3.2-2(a)) に比べて再処理・解析による反射断面記録 (Fig. 3.3.2-2(b)) の方が、反射イベント (特に Fig. 3.3.2-2 中の赤色点線で囲った範囲) と合成地震記録とはよく一致しているとともに、更に花崗岩中の断層や割れ目の規模などに対応すると思われる合成地震記録上の反射イベントの振幅の強弱なども反映した結果を得ることができた⁶⁾。このような反射イベントの強弱が得られることにより、相対的に花崗岩中において断層や割れ目などによる不均質の影響が大きいと思われる領域 (例えば、Fig. 3.3.2-2(b)中の青色点線で囲ったいくつかの反射イベントが認められる箇所) を推定することが可能と考えられる。以上のことから、前述のような処理・解析によって、花崗岩中の実際の地質構造を反映していると思われる反射イベントを可視化することができ、特に花崗岩の上に堆積岩が厚く被覆するような条件下では、地質構造解釈をするうえで、通常の処理・解析に加えてこのような処理・解析手法の適用が効果的であると考えられる。

(2)高密度電気探査

花崗岩が地表に露出する地域においては、反射法弾性波探査 (ローカルスケール領域及びサイトスケール領域) では、指標となる堆積岩中の地層境界などの明瞭な反射イベントが得られないために、堆積岩が花崗岩を被覆する地域に比べて高角度の不連続構造を推定することが難しくなる。このような条件下における不連続構造の調査技術開発として、一般に高比抵抗を示す花崗岩の健岩部と低比抵抗を示す断層に伴う破碎帯などの軟質部の比抵抗差から不連続構造を検出できることが期待される高密度電気探査を、ローカルスケール領域における花崗岩が地表に露出する場所において実施した^{6),7)}。その結果、解析断面の端部において、断層を示唆する数十 Ωm 程度の顕著な低比抵抗体が検出された。しかしながら、低比抵抗体の構造を確認するために実施したボーリング調査では、対応する深度付近に断層は確認されず、比抵抗値も非常に高い値 (2,000 ~ 5,000 Ωm) であった (Fig. 3.3.2-3)。

このため、ボーリング孔における電気検層結果を利用した高密度電気探査データの再解析とその信頼性を確認するためのシミュレーション解析を実施した⁷⁾。その結果、北東部の低比抵抗部は、調査測線の延長方向の表層部に低比抵抗層が分布している場合に、測線端部に偽像が現れることが分かった。また、電気検層結果を拘束条件とした再解析によって、花崗岩の健岩部と風化部の境界並びに中～高角度に傾斜する3条の不連続構造を推定することができた (Fig. 3.3.2-4)。以上のことから、高密度電気探査では、ボーリング孔による情報を解析の拘束条件とすることにより正確な解析結果を得ることができることから、花崗岩中の風化部や不連続構造などの分布に関する確度の高い地質構造解釈をするうえでは、このような解析・検討が効果的であると考えら

れる。また、更にその地質構造解釈の精度を向上させるためには、ボーリング孔と地表間を対象とした比抵抗トモグラフィ探査を実施し、ボーリング孔情報と高密度電気探査データをより精密に対応付けることが有効であると思われる。さらに、調査計画の策定に際しては、地質構造が予想よりも複雑であるというような調査対象の不確実性を考慮して、探査測線を設定することなども重要と考えられる。

(3)マルチオフセット VSP 探査

マルチオフセット VSP 探査は、反射法弾性波探査結果を補完するとともに、ボーリング孔周辺に複数の発震点を設けることによって、反射法弾性波探査よりも詳細にボーリング孔周辺における不連続構造や割れ目帯の分布を推定することが期待される。このため、詳細な地質学・水理学的調査を実施したボーリング孔を利用し、不連続構造を対象とした調査技術開発として、マルチオフセット VSP 探査を実施した。その結果、VSP マイグレーションを適用した各オフセット VSP 記録を重合した断面において、地表地質調査や反射法弾性波探査で確認・推定された高角度の断層の花崗岩深部への延長と考えられる反射イベントの不連続を抽出することができた (Fig. 3.3.2-5(a))⁸⁾。また、これらの高角度の断層について、さらに、このマルチオフセット VSP 探査に使用した 3 成分受振器 (ジオフォン) のうち、水平 2 成分記録を用いて、通常のオフセット VSP 記録と同様に解析・重合した断面から、これらの高角度の断層から直接に反射したと考えられる反射イベント (Fig. 3.3.2-5(b)中の矢印) が抽出でき、ボーリング孔周辺の高角度の断層の分布を推定することができた。

以上のことから、マルチオフセット VSP 探査は、反射法弾性波探査の結果を補完する際に有効であるほか、反射法弾性波探査では抽出が困難なより深部の高角度の不連続構造の分布を抽出することが可能であると考えられる。

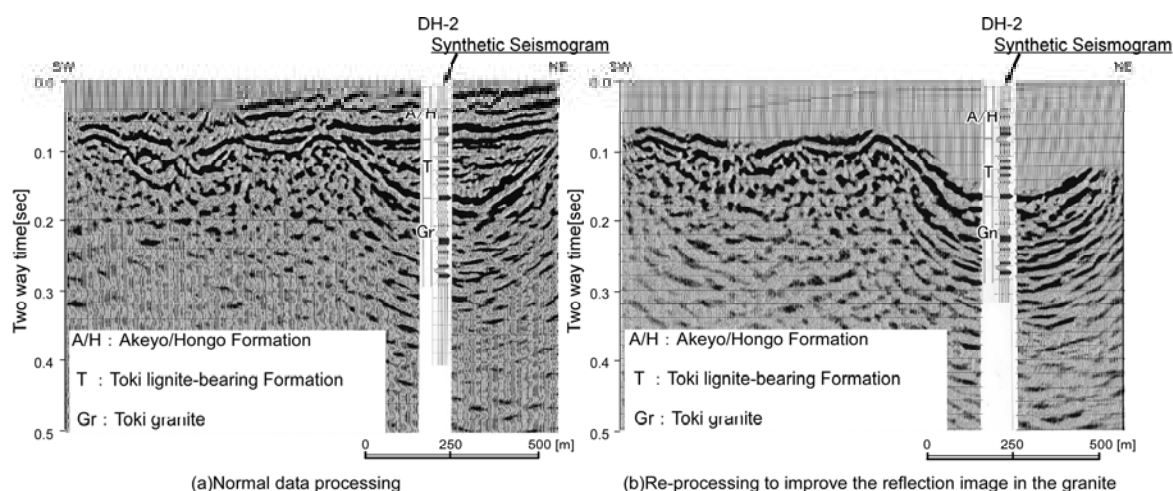


Fig. 3.3.2-1 Comparison between reflection seismic profiles (1)⁴⁾

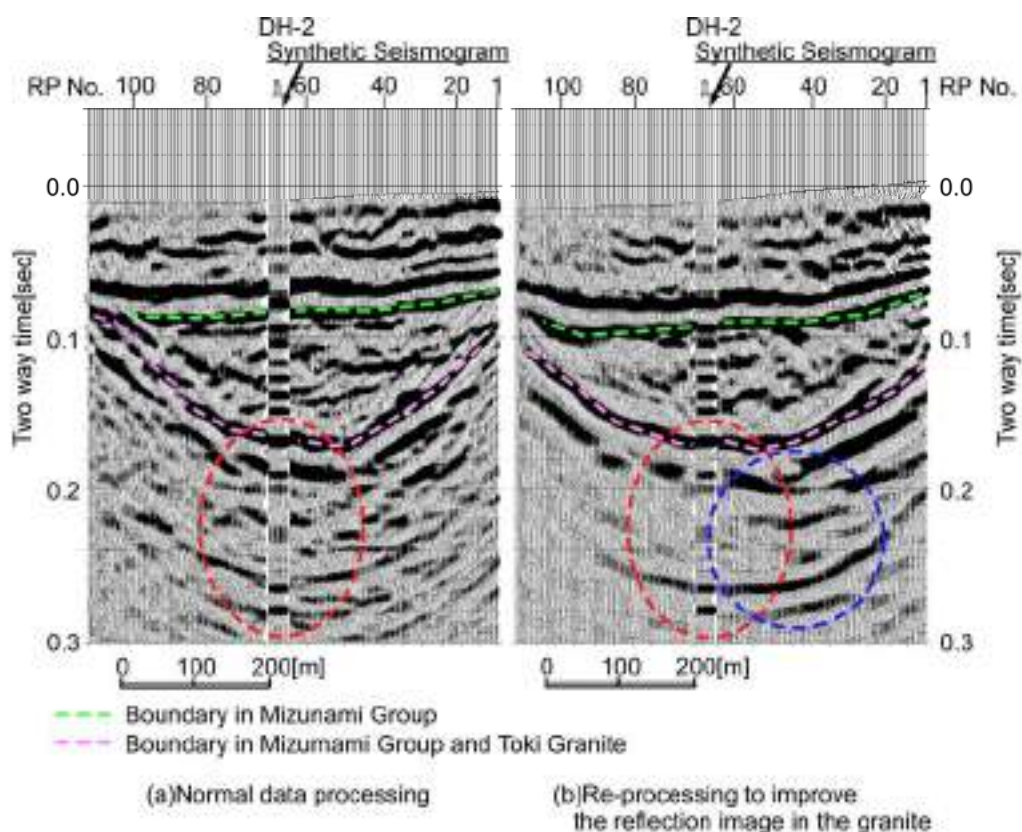


Fig. 3.3.2-2 Comparison between reflection seismic profiles (2)⁶⁾

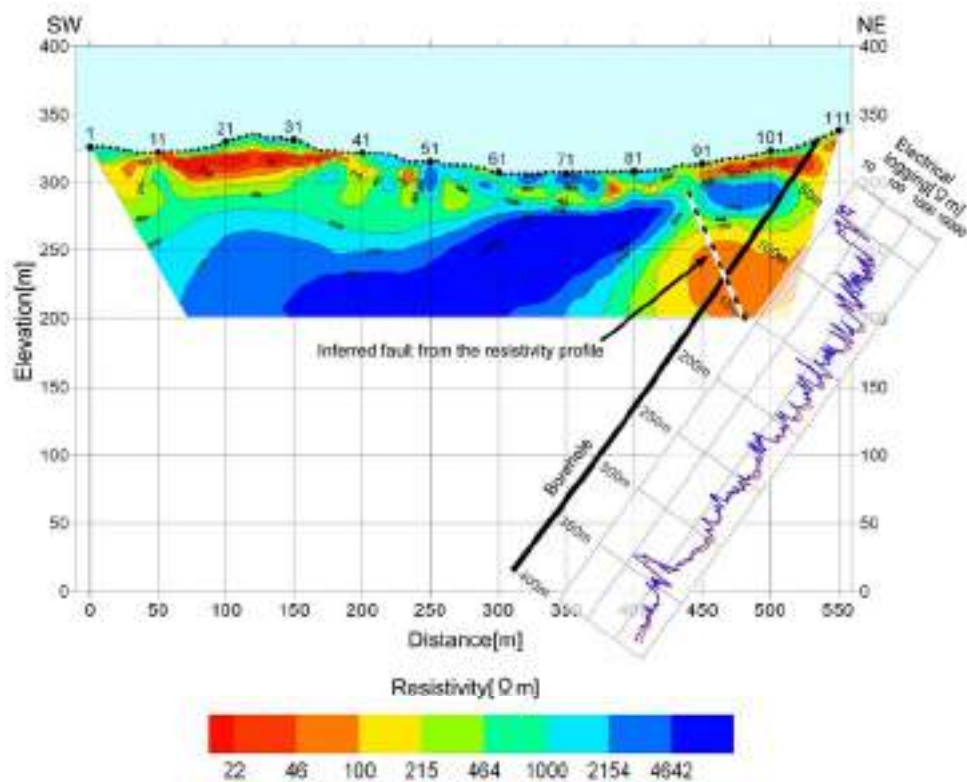


Fig. 3.3.2-3 Result of electrical surveying⁷⁾

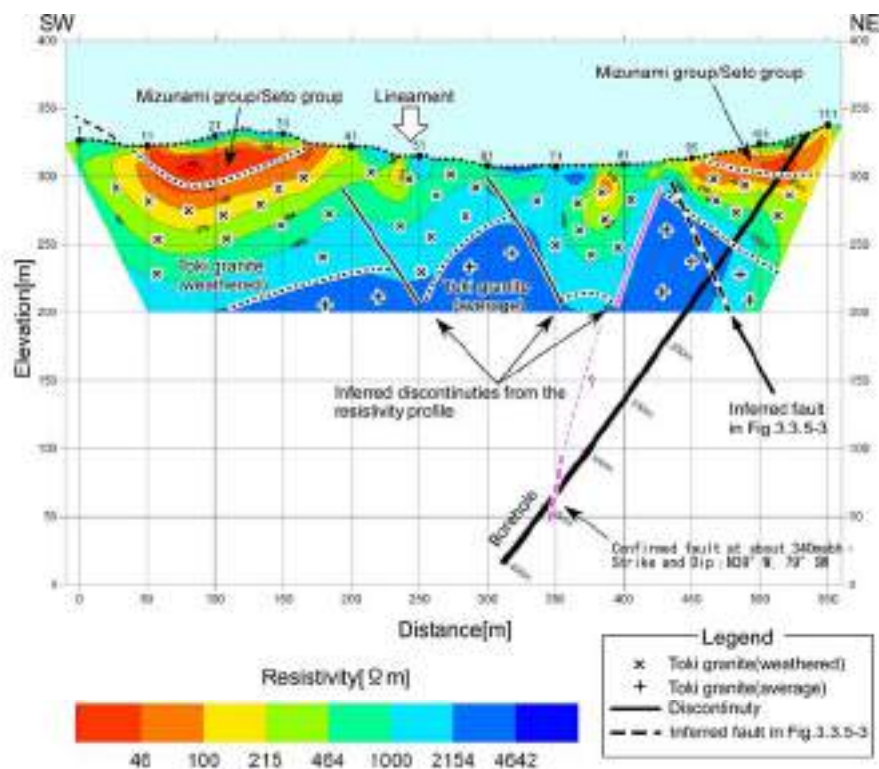


Fig. 3.3.2-4 Interpretation of resistivity profile⁷⁾

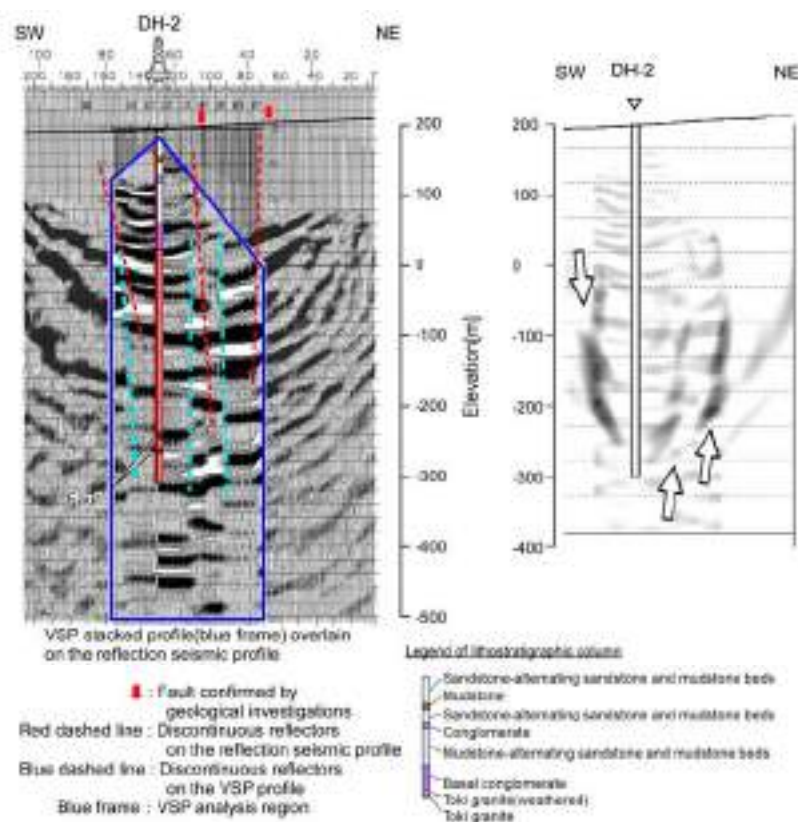


Fig. 3.3.2-5 VSP Stacked section⁸⁾

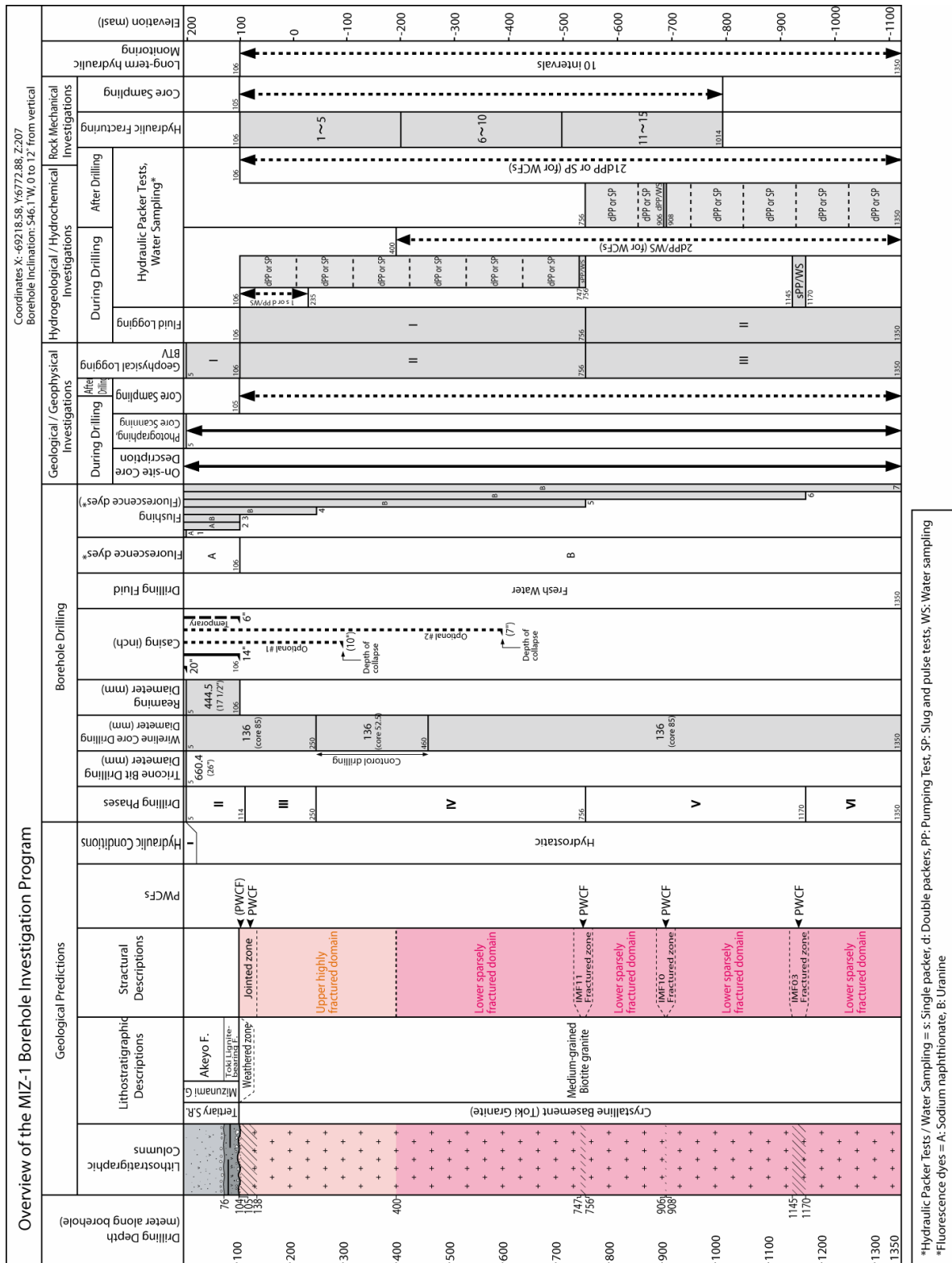
- (a) VSP stacked section using vertical component of 3-component geophone (Right fig.)
 (b) VSP stacked section using horizontal component of 3-component geophones (Left fig.)

3.3.3 ボーリング調査に関わる計画の策定と改定

ボーリング調査は地表からの調査の中で地下深部の地質環境情報を直接取得できる調査であり、地質環境調査の中で特に有効な調査手法の一つと考えられる⁹⁾。しかしながら、ボーリングはビットを回転させながら岩盤に押し付けて掘削する方法¹⁰⁾であることから、岩盤の状況などに起因する孔内崩壊などのトラブルに迅速かつ適切に対応することが重要である。そのためには、トラブル対応などを想定した詳細な調査計画の立案と、調査の進展に伴う計画の見直しが必要である。

調査計画立案に当たっては、それ以前のステップまでの地質環境の理解に基づき調査対象を特定し、調査目標を明確にするとともに、調査対象の地質環境の予測結果並びに時間や予算などの制約条件を踏まえて、ボーリング孔のレイアウトや個別の調査項目・手法などの最適化及び合理化を図ることが必要となる⁹⁾。特に、地質環境の予測から想定されるトラブル（脆弱岩盤による孔壁崩壊、透水性割れ目による逸水など）に対する対応策の検討と、それらの対応によって品質が低下する調査データの項目と許容限度を設定し、調査関係者間で認識を共有することが重要である。そこで超深地層研究所計画においては、正馬様用地において実施した MIU-4 号孔ボーリング調査、研究所用地における浅層ボーリング孔を利用した調査（ステップ 2）及び深層ボーリング孔を利用した調査（ステップ 3）の実施に当たって調査研究計画書を策定した^{11),12),13)}。それらの調査研究計画書では、予測される地質環境に対する孔径、ケーシングプログラムなどのボーリング掘削と、孔壁画像調査、流体検層（3.3.6 参照）、水理試験（3.3.7 参照）、地下水の採水（3.3.8 参照）などの調査研究の実施のタイミング、区間などの調整を図り、その結果を Fig. 3.3.3-1 に示すボーリング調査計画図に集約した。この集約作業を通してボーリング掘削と調査・研究の最適化を図ることが可能となる。また、調査計画書には、物理検層（3.3.5 参照）、水理試験などの個々の調査目的に対する詳細な手法及び品質管理手法に加え、孔壁崩壊や逸水などのトラブル発生時の対応オプションなどについても規定した。なお、ボーリング調査におけるトラブル対応事例や、データ取得時の品質管理に関するノウハウは、一般的に公開情報が乏しいことから、調査研究計画書を策定し、内外の専門家からの助言を得ることが極めて重要である。

ボーリング調査では、地質・地質構造、地下水の水理特性、地球化学的特性、岩盤の応力状態などの調査データを取得することが可能である。しかし、調査量の増加に伴い高価となりかつ工程も増加することから、様々な調査ニーズを最適化する必要があり、各調査の関係者間で十分な議論と認識の共有が必要である。加えて、地質環境をより良く理解するためには、異なる分野間のデータや解析結果を統合して、多面的な検討を行う必要がある。そのため、超深地層研究所計画では Fig. 3.3.3-2 に示すように、従来の分野別の上位に、分野間を調整する中核スタッフ（PI: Principal Investigator）を配置するほか、各分野間で共通する調査試験を監理するための調査試験チームを設け、分野別縦割り組織の他に、横断的組織を設置し、マトリックスを形成する組織体制を構築して調査を実施した¹⁴⁾。



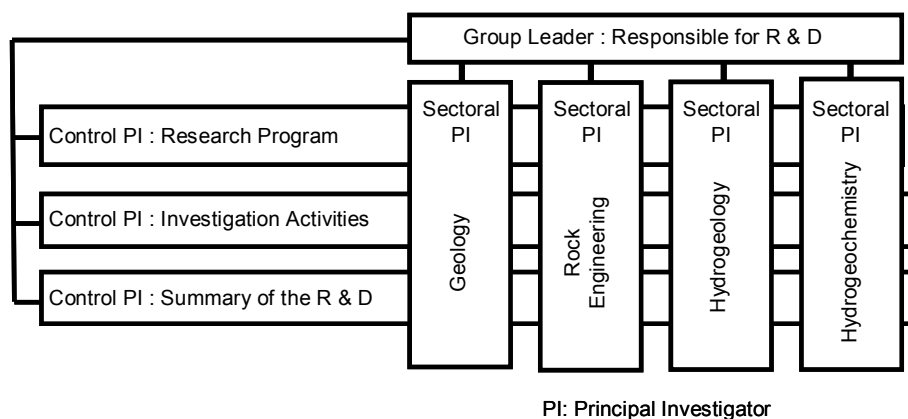


Fig. 3.3.3-2 Organization control for the promotion of R & D activities in MIU project¹⁴⁾

3.3.4 掘削技術

掘削水を使用するボーリング調査は、掘削そのものが外部から水を注入する行為であることから、超深地層研究所計画においては、その人為的な影響を可能な限り抑え、地質環境特性を適切に理解し評価していくという基本的考え方で調査を進めてきた⁹⁾。また、広域地下水流動研究や正馬様用地におけるボーリング調査の経験に基づき、逸水（掘削中に掘削水が岩盤中に流出する現象）や孔内崩壊、あるいは人為的ミスなどによるトラブルの発生を想定し、そのようなトラブルに対応する措置を講じて調査・試験が可能な仕様を基本としている。超深地層研究所計画における土岐花崗岩を主な研究対象とした地表におけるボーリング調査の基本仕様を Table 3.3.4-1 に示す。

(1)孔径

ボーリング孔径は原則として 5 1/2"（約 135mm）以上としている。その技術的背景^{9),15)}を、以下に示す。

- ・岩盤の透水性は高透水から低透水までの幅広いレンジを有する。特に、高透水性の岩盤を対象とした水理試験においては圧力損失の発生に伴うデータの品質低下が懸念されることなどから、試験装置内の大孔径配管の使用などの対策が必要であり、そのため原子力機構は水理試験装置配管径の拡大化などの改良を実施した（3.3.7 参照）。本装置は孔径が 120mm 以上（掘削パイプでは概ね PQ サイズ以上に相当）であることを想定して改良したものであるが、MIU-4 号孔における PQ サイズの掘削パイプの切断（3.3.4(6)参照）などを踏まえ、掘削パイプの強度を考慮して孔径を 5 1/2"（約 135mm）以上としている。
- ・透水性が高い岩盤部分が存在すると、比較的短期間で採水調査が可能である。その一方で、逸水などの発生により掘削水の岩盤中への浸透などの発生により掘削水の岩盤中への浸透も早く、品質の担保された地下水の地球化学特性に関わる情報を取得するためには、岩盤へ浸透した掘削水を迅速に回収する必要がある、高揚程・高流量のポンプの配置や配管径の拡張のため、試験装置の径の拡大が必要である。
- ・ボーリングコアからの多くの地質学的情報を得るためにボーリングコアの採取率を向上させる必要がある、そのためには十分な孔径が必要である。
- ・不連続構造が発達している場合、孔内崩壊や大規模な逸水などがしばしば発生するため、セメ

ントによる保孔や逸水対策の簡便性を考慮する必要がある。特に深い深度で断層などに遭遇し掘削が困難となった場合に、それまでに使用している掘削パイプをケーシングに代用し、以深の掘削を一回り小さい径で行うことができるオプションを残しておくことが必要である。

(2)ボーリング位置の選定

ボーリング位置の選定に当たっては、調査目的に応じた技術的な根拠に加えて社会的な側面を考慮し、最適な位置とレイアウトを決定する必要がある。ステップ3の深層ボーリング孔(MIZ-1号孔)を利用した調査においては、既得情報に基づいて予測した主要な不連続構造と、それ以外の花崗岩部を対象とした深度1,000m以深の地質環境特性を把握することを目的とした。また、本調査が第1段階の最後のボーリング調査であり、用地の広い範囲の地質環境情報を取得することが必要であったこと、ステップ4で実施する孔間弾性波トモグラフィ探査における発振孔と受振孔とのジオメトリの観点などの技術的な理由とともに、ボーリング孔が研究所用地を越境しないことや研究坑道掘削工事における地上設備の設置工事の妨げにならない(3.2.4参照)ことなどを総合的に勘案し、地表から深度250mまで垂直に掘削し、その後、研究対象の不連続構造に遭遇させるため、用地北東部から南西方向に向けて深度460mまで、30mごとに1.5度ずつ傾斜させ、最終的に地表から孔底までの傾斜角が水平から78度とし、ボーリングコアの採取を伴うコントロールボーリングを計画した(Fig. 3.3.4-1の橙色孔跡)^{9),13),14)}。

(3)ボーリング孔の孔跡管理

MIZ-1号孔におけるコントロールボーリングについては、期待されたコントロール機能が有効に働かず、深度約500mまでの孔跡が計画孔跡から90°東に逸れた結果となった(Fig. 3.3.4-1の黒色孔跡)。この時点で孔跡の修正は困難と判断し、孔底から深度約350mまでをセメントで埋め戻し、この深度からウェッジ工法及びMWD工法(掘削方向を測定しながら掘削する工法)により南西方向に向かってサイドトラック掘削を行った^{16),17)}。その結果、計画の方位・傾斜(Fig. 3.3.4-1の赤色孔跡)にボーリング孔を曲げることに成功した。再コントロール掘削後(深度約495m)からは、通常工法であるワイヤーライン工法での沿角掘削(傾斜・方位を一定に保った状態で行う掘削)を行い、最終的にはほぼ計画どおりの掘削孔跡を得ることができた(Fig. 3.3.4-1の青色孔跡)^{9),14),17)}。MIZ-1号孔において計画した孔跡が制御できなかった原因としては、傾斜・方位の管理方法が十分でなかったこと、及び導入したコントロール掘削装置が岩盤の強度に対して十分な能力を発揮できなかったことが考えられる^{9),17)}。

(4)孔内崩壊への対応

掘削中に崩壊が発生した場合は一旦掘削を中断し、計画した孔内での物理検層や試験を当該深度まで実施することがボーリング孔沿いの岩盤や地下水の諸特性を効率的に把握する上で適当である。崩壊箇所までの物理検層及び試験の終了後は当該箇所をセメント保孔し、更に深部における掘削及び調査を継続する。セメント箇所において崩壊が継続する場合は、当該箇所までケーシングパイプを挿入し、セメント固定したうえで更に深部の掘削を継続する。崩壊箇所が浅部の場合は、ケーシングパイプ挿入前に径の大きなビットで拡孔をした後にケーシングパイプを挿入しセメント保孔することで、掘削前と同一の孔径で掘削することが可能である。一方、深部の場合は、掘削孔径を小さくすることで掘削を継続することが可能である。また、断層などの影響により孔壁崩壊が継続し掘削の継続が困難である場合や、セメント保孔などの対策工による工程遅延が許容できない場合は、泥水を利用した掘削に切り替えることも事前に想定しておく必要がある。MIZ-1号孔においては、掘削長920mから980m付近の断層の影響による岩盤不良部分(Fig. 3.2.4(2)-1参照)において孔壁崩壊が発生したため、数回にわたるセメントによる保孔対策を行った。また、掘削工程の遅延により調査目的が達成されないことを回避するためと、以深における掘削障害を低減するために泥水による掘削を行った¹⁵⁾。泥水とセメントによる保孔対策を併用

する場合は、泥水によるセメントのゲル化に起因する硬化不良などに留意する必要がある¹⁷⁾。

(5)掘削水の管理

掘削水については岩盤が本来有する透水性や地下水の組成を調査するため、上述の崩壊対策時などを除いて天然の地下水を用いた清水掘削を行った。ここで、清水とは調査地域の地下水や岩盤との反応を極力なくするため、地球化学的に同等の地下水を使用するとともに、孔壁を保護するための泥剤を混ぜていない水のことをいう。このため、掘削循環水の比重が掘削スライムの比重より小さいことから、泥水による掘削に比べてスライムの排出不良が発生する可能性が高く、その結果、孔壁の拡大や掘削パイプの埋没などの原因となる。そこで岩盤に最適なビット選択（スライムの微細化）、及び掘削孔径と掘削パイプ径がほぼ同じであるワイヤーライン工法（掘削循環水の流速の向上）を採用することにより、スライムの排出改善を行った。加えて、遠心分離装置などを用いて積極的にスライムの排出を行った。なお、掘削循環水の流速が大きすぎる場合には孔壁崩壊を誘発させる可能性があることから、掘削工法、孔径、送水量及び送水圧に留意し、岩盤状況に応じてアニュラス（掘削パイプと孔壁の間隙）の循環水量を適切に調整する必要がある¹⁵⁾。

地下水の採水調査において採水した地下水中に残留している掘削水の割合を定量的に評価するために、掘削水に蛍光染料を添加し、その濃度を一定にする管理も行った（3.3.8 参照）。

(6)掘削パイプの強度

正馬様用地で実施した MIU-4 号孔（掘削長約 790m の傾斜掘り）では、断層帯の孔壁崩壊などに起因する掘削スライムの排出不良により掘削パイプのネジ部が切断し、掘削パイプが抑留した。その回収と孔壁状況の改善（セメント保孔）のため約 3 ヶ月の工期を要した^{18),19)}。また、同じ正馬様用地で実施した MIU-1 号孔では、ステンレス製の仮ケーシングパイプの切断による掘削パイプの抑留が発生し、約 1.5 ヶ月の工程の遅延をもたらした²⁰⁾。したがって、孔壁崩壊の対応や掘削水の管理とともに、適切な掘削工法の選択と孔内で使用するパイプのネジ部の強度や締め付けトルク管理、パイプ自体の強度にも十分に留意する必要がある。

(7)掘削パラメータの取得

掘削中の岩盤状況や逸水などの孔内状況を把握するため、掘削パラメータ（掘削能率、回転数、ビット荷重、送水量、送水圧力、リターン水量、トルク、水温、電気伝導度、pH など）を取得した。MIU-3 号孔までは掘削オペレータが掘削長毎（3m 程度）に代表値を記録していたが、MIU-4 号孔以降は連続的にパラメータを取得できるようにモニタリング装置を導入した。これにより掘削パラメータを常時監視・記録することにより、孔内状況及び今後の掘削における最適な掘削パラメータを把握することが可能となった。これらの掘削パラメータは掘削スライムの増加、埋没による送水圧や電気伝導度の増加の検出による孔壁崩壊などの前兆予測の情報として、また掘削ビットとパラメータの最適化の指針として有効であった。また、地質環境特性情報としてはリターン水量、水温、電気伝導度、pH の変化などが重要な透水性割れ目の深度の特定などに利用される。これらの情報はトラブルの発生位置や規模、水理試験・採水区間の選定情報などとして利用されることから、迅速なデータの入手が不可欠であり、MIZ-1 号孔の調査では現場から電話回線を経由して居室のパソコンに常時データを確認できるシステムを採用し、迅速なトラブル対応や試験区間の選定を可能とした¹⁵⁾。

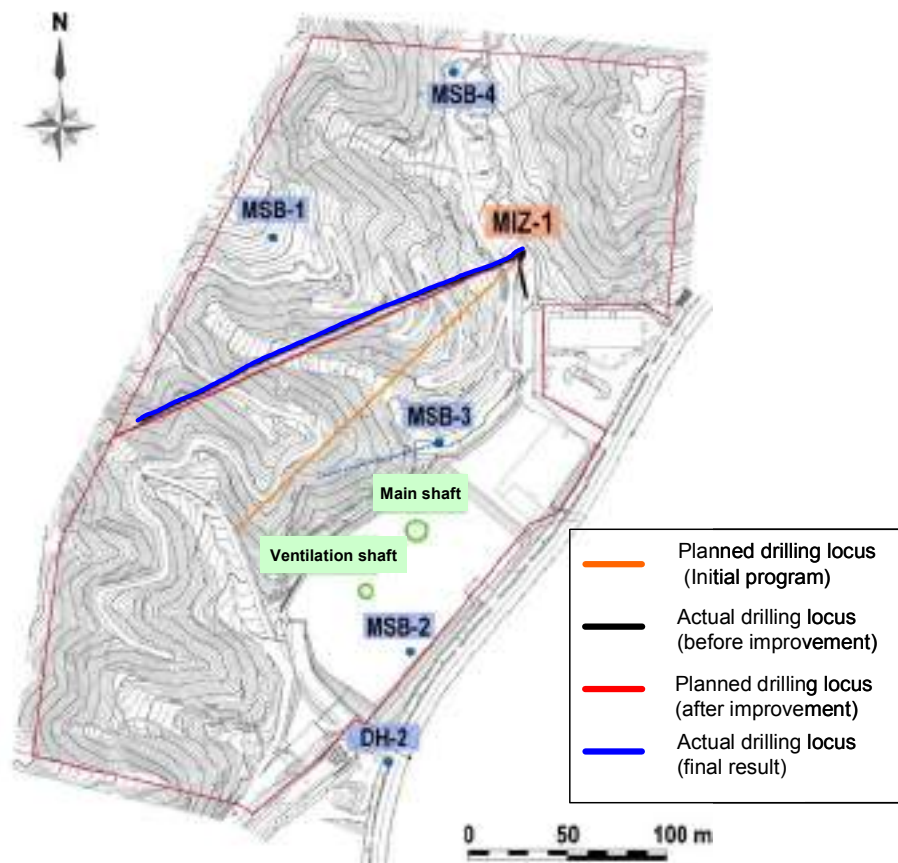
(8)ボーリングコアの採取

ボーリングコアの採取率の向上はボーリング掘削における最重要課題である。二重管ワイヤーライン工法においてもボーリングコアの採取率は 90%以上であったが、ボーリングコアの取り出しの際に破壊してしまうことや、特に断層の影響などによる岩盤不良部の採取率低下や、復元困難などの課題があったことから、コアバレルのインナーチューブに透明アクリル管を用いた三重

管工法を採用した¹⁸⁾。その結果、ボーリングコアの取り出しやコア箱への保管の際の破損を低減するとともに、比較的規模の大きい一部の断層などの影響による岩盤不良部を除き、ほぼ完全なボーリングコアの採取が可能となり、完全採取に至らなかった断層についても従来に比べ比較的良好な採取率を示した⁹⁾。コア採取については掘削オペレータの掘削技術に依存する部分が多く、掘削水量、回転数、掘削速度などのパラメータの調整はオペレータの勘と経験に頼っているのが現状であるが、これまでに取得した掘削パラメータは、オペレータの経験を踏まえた適切な対処データであるため、これらを定量化した最適な掘削フローを調査計画書や施工手順に定めておくことが重要である。

Table 3.3.4 -1 Basic specifications for the deep borehole investigation⁹⁾

Borehole diameter	Above 5 ½"	
Casing program	Multistage drilling	
Drilling water	Fresh water tagged with fluorescent dye	
Control for the drilling water	Monitoring for fluorescent dye concentration and loss of drilling fluid during drilling	
Coring	Triple-barrel drilling method with an acrylic inner core barrel	
Borehole protection	Fluid loss	Plugging with LCM (Lost Circulation Material, e.g. cellulose)
	Collapse	Partial cementing
	Large scale collapse	Installation of casing pipes and full hole cementing



Topographic map: 1/1,000 (made by JAEA)

Fig. 3.3.4-1 Planned and actual drilling locus of MIZ-1 borehole investigation⁹⁾

3.3.5 物理検層技術

割れ目が密に発達する割れ目帯は、岩盤の水理学的特性に影響を与えると考えられ²¹⁾、その分布や地質学的・水理学的特性を把握することは重要な調査項目として位置づけられる。このため、ボーリング調査を実施する際には、コア観察や孔壁画像調査などにより割れ目帯の分布や特性について調査・検討が行われる。しかしながら、一般に割れ目帯の定義やそれに基づく客観的な抽出基準が整備されていないことから、割れ目帯の深度を一義的に決定することが難しい。そこで、割れ目帯の客観的な定義及び抽出基準を構築することを目的として、深度方向に連続的かつ定量的なデータが取得できる孔壁画像調査や物理検層²²⁾など複数のデータを主成分分析²³⁾し、得られた主成分得点を用いて割れ目帯と健岩部を区分した (Fig. 3.3.5-1)。主成分得点の大小を基に統計学的処理を行い抽出したアノマリは、変質帯など、健岩部とは異なる物性値を有する区間が押並べて抽出される傾向にあるため、最終的な割れ目帯の設定には岩芯の破碎・変質の程度を確認する必要がある。しかしながら、主成分得点が低いほど破碎や変質の程度が強い傾向が認められること、また、主成分得点より健岩部とした区間には、顕著な割れ目帯は認められないことから、この抽出方法はおおむね有効であると考えられる²⁴⁾。

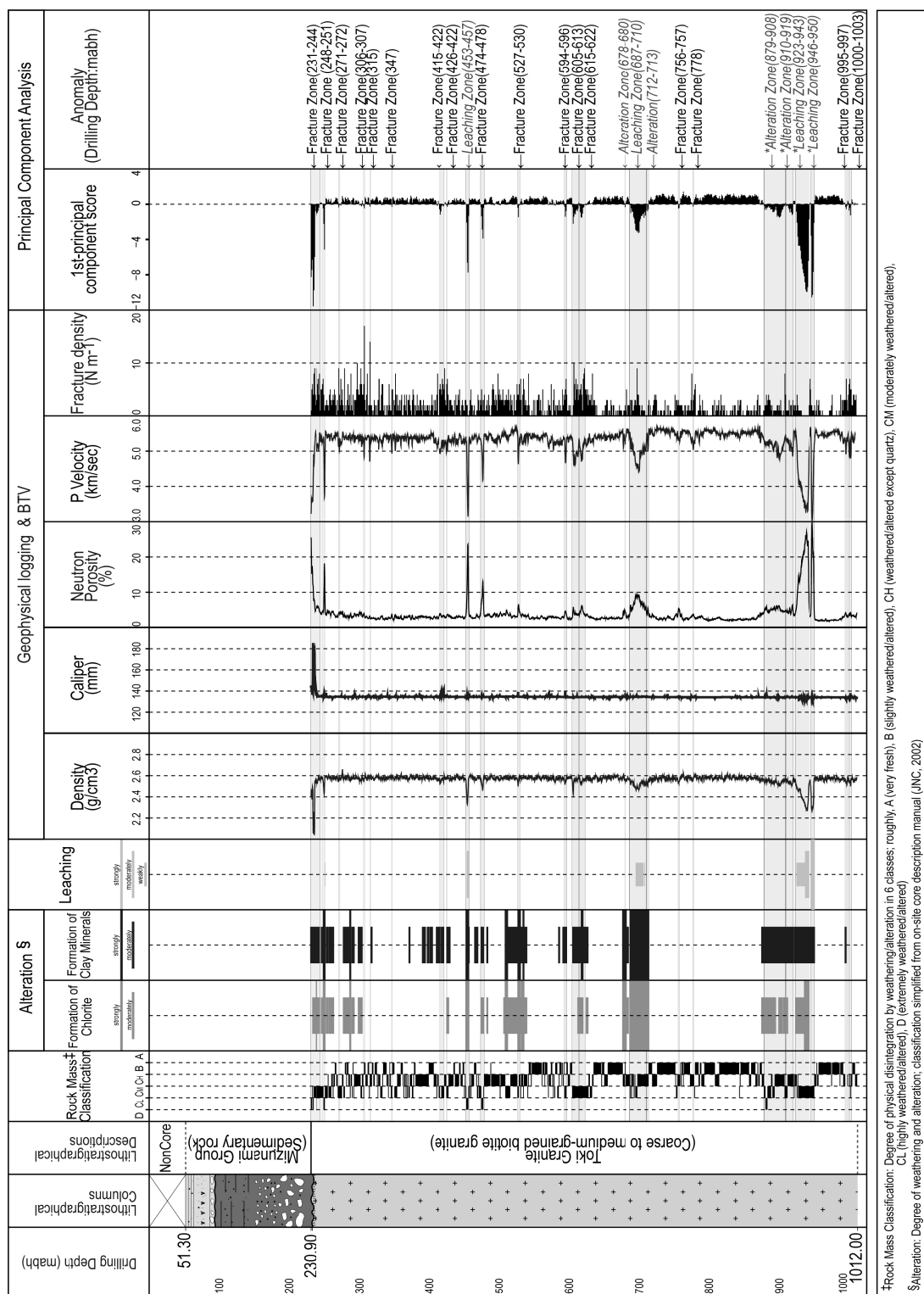


Fig. 3.3.5-1 Identification of fracture zone intervals using the principal component analysis based on geophysical logging data (DH-15)

3.3.6 流体検層技術

結晶質岩のような亀裂性岩盤においては割れ目（帯）が主要な地下水の経路となることから、水理地質構造のモデル化や地下水流動解析などに反映する上で、主要な地下水の流動経路となる水みちの位置を把握することが重要である。ステップ 2、ステップ 3 における調査では、高解像度で水みちを把握する手法として電気伝導度検層を実施した。本手法は孔内水を地下水の電気伝導度と異なる水（脱イオン水や塩水など）で置換し、その後、揚水をしながら孔沿いの電気伝導度を測定することにより、電気伝導度の有意な変化が認められる亀裂を検出する方法である²⁵⁾。

ステップ 2、ステップ 3 における調査では水質への影響や地上設備の設置スペースの制限などを考慮して、イオン交換樹脂を介して孔内水を循環させることにより精製した脱イオン水を用いて孔内水を置換した。これにより、これまで水みちを検出する目的で一般的に使用されてきたフローメータ検層では検出できなかった詳細な地下水の流入点を把握することが可能となった^{26),27),28)} (Fig. 3.3.6-1)。さらに検出された水みちを対象とした水理試験を実施した結果、検出された透水性割れ目は透水量係数で $10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ よりも大きい透水性を示す割れ目の検出が可能であることが分かった²⁹⁾。これにより電気伝導度検層はこれまでの流体検層と比較すると 2 桁程度低い値を有する透水性割れ目の検出が可能であることが確認された。

先に述べたとおり、電気伝導度検層は地下水の電気伝導度のコントラストから水みちの位置及び、その透水性を評価する手法であるため、計測結果は岩盤の透水性のみならず、地下水の水質（電気伝導度）を反映したものとなる。具体的には、同じ電気伝導度を有する地下水が存在する場合、流体電気伝導度検層で計測された電気伝導度のコントラストは岩盤の透水性を反映したものとなるため、電気伝導度の高い箇所はより多くの地下水が流入している（透水性が高い）と考えられる。一方で、同じ透水性の岩盤であっても電気伝導度の異なる地下水が存在する場合には、電気伝導度の高い地下水が存在する箇所での電気伝導度が高くなる。よって、電気伝導度検層の結果を評価する際には、地下水の電気伝導度の違いを考慮することが重要である。

また、電気伝導度検層を含む流体検層全般の課題として、掘削泥水による影響が挙げられる。掘削泥水の影響については、ボーリング孔掘削中に掘削泥水が本来高透水性の水みちに流出した場合に泥水による目詰まりが生じ、ボーリング孔近傍の透水性が低下する可能性がある。流体検層ではボーリング孔近傍の透水性が検層結果に反映されることから、流体検層の結果は水みちの透水性を本来の透水性より低く評価してしまう可能性がある。

これらのことから、ボーリング孔に沿った透水性を評価するためには、流体検層と水理試験とを組合せて実施し、流体検層において抽出された水みちの透水性を水理試験により確認することが有効である。

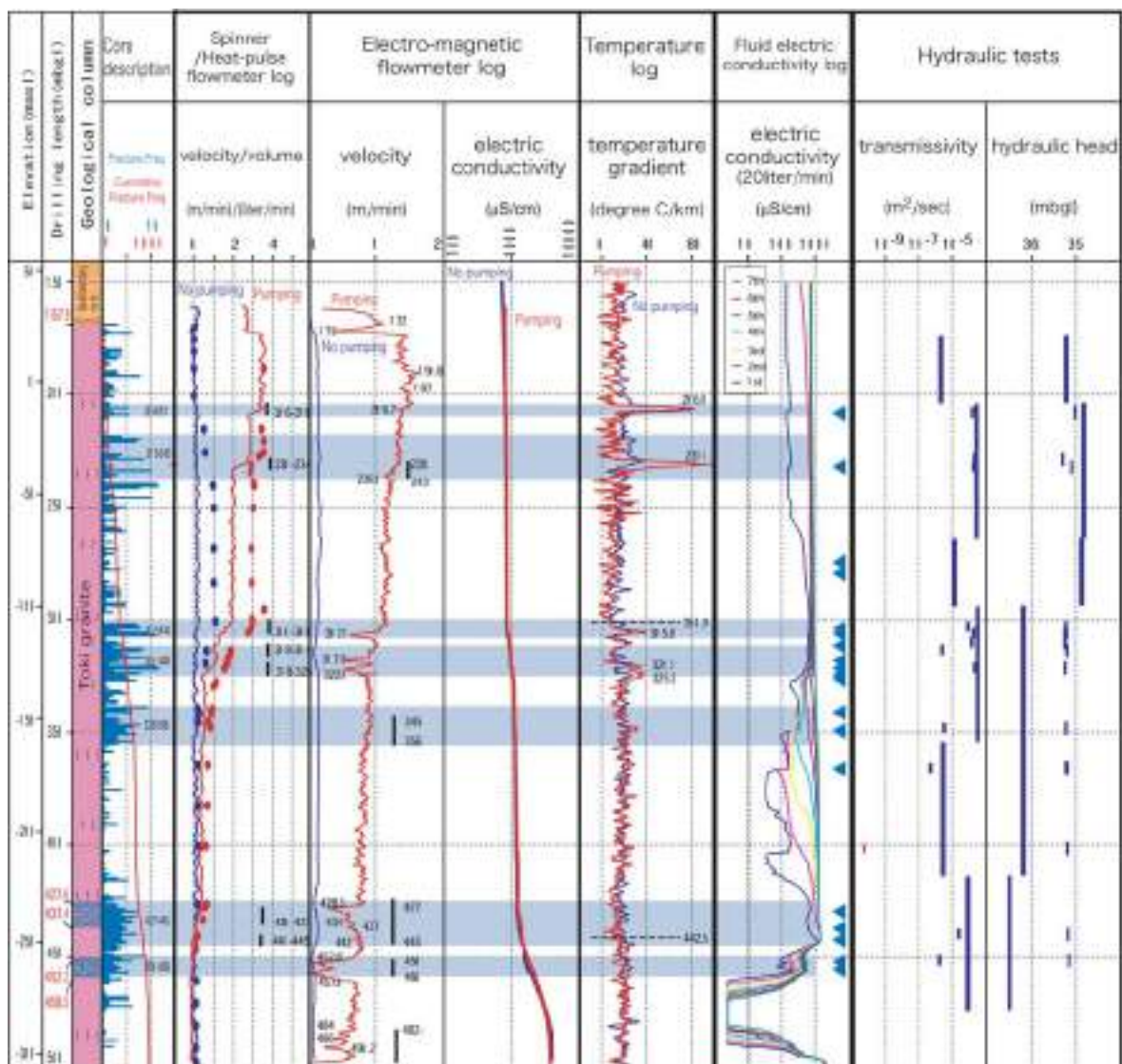


Fig. 3.3.6-1 Results of fluid logging and hydraulic test in 500m borehole

3.3.7 水理試験技術

ボーリング孔を利用した単孔式水理試験は、調査対象岩盤の水理特性（透水性や間隙水圧など）や水理地質構造モデルを構築、改良する上で最も重要な調査の一つである。水理試験技術については、幅の広い透水性を有する岩盤（透水係数が $10^{-12} \sim 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ オーダー程度^{30),31)}）に対して、試験データの品質を確保する必要があることから、品質を確保した試験データを取得するための試験装置の改良、試験手法の構築並びにデータの評価手法の改良からなる一連の試験手法を構築した¹⁶⁾。

原子力機構が開発した難透水性岩盤を対象とした水理試験装置³²⁾は、パルス試験、スラグ試験を主たる試験機能としていたため、配管系が数 mm 程度と小さなものであった。このため、透水性が高い岩盤において同試験装置を用いて試験を実施した場合、配管の管路抵抗による圧力損失が生じ試験データの品質を確保することが困難であった。そこで、試験装置の改良に関しては、高透水性岩盤において岩盤に明瞭な水圧変動を発生させることを目的として、配管の管路抵抗を

できるだけ小さくするよう配管径の拡大化を実施した。また、揚水試験により岩盤本来の透水性を評価する上で障害となる要因のひとつである、孔内貯留の影響を低減し、適切に水理特性を評価可能な時間領域のデータを長時間にわたって取得することを目的として大揚水流量での揚水、井戸貯留の低減が可能なポンプ (Fig. 3.3.7-1(a)、Fig. 3.3.7-1 (b)) の改良・適用を行うとともに、これらのポンプを装備できる装置に改良した。

同じ試験手法を用いて透水性の高い岩盤と透水性の低い岩盤で水理試験を実施した場合、透水性の低い岩盤の方が試験に時間を要する。一方で実際の現場試験では、試験時間が限られている場合があるため、特定の試験手法のみを行った場合には、透水性により試験結果の品質が異なることとなる。よって、試験手法に関しては、試験結果の品質を確保するために試験区間の透水性に相応した試験手法を適切に選択でき、効率的な試験の実施が可能な試験手法（シーケンシャル試験: Fig. 3.3.7-2）を構築³³⁾した。これはパッカー拡張後の間隙水圧測定に要する時間や難透水性岩盤に対して有効な試験手法であるパルス試験により岩盤の概略の透水性を把握し、その結果から岩盤の透水性に応じて次の試験手法を選択するものである。また、試験データの評価に関しては、取得データから透水性を算出するデータ領域を適切に抽出するための圧力変化の時間微分プロットの導入³⁴⁾などを実施した。圧力変化の時間微分プロットは試験データを評価する際の有効なデータ範囲（例えば、揚水試験における直線勾配法での直線区間）や境界条件による影響などを容易に確認することができるため、技術者の経験などによる評価結果のばらつきを低減することができる。また、計測している圧力の収束状況も把握することができることから、計測終了の判断を的確に行うことができる。

上記の試験装置及び一連の試験手法をボーリング孔の水理試験に適用した結果、限られた時間の中でデータの品質を確認しつつ透水性などの水理特性を把握できたことから、構築した一連の手法の現場適用性が確認された。

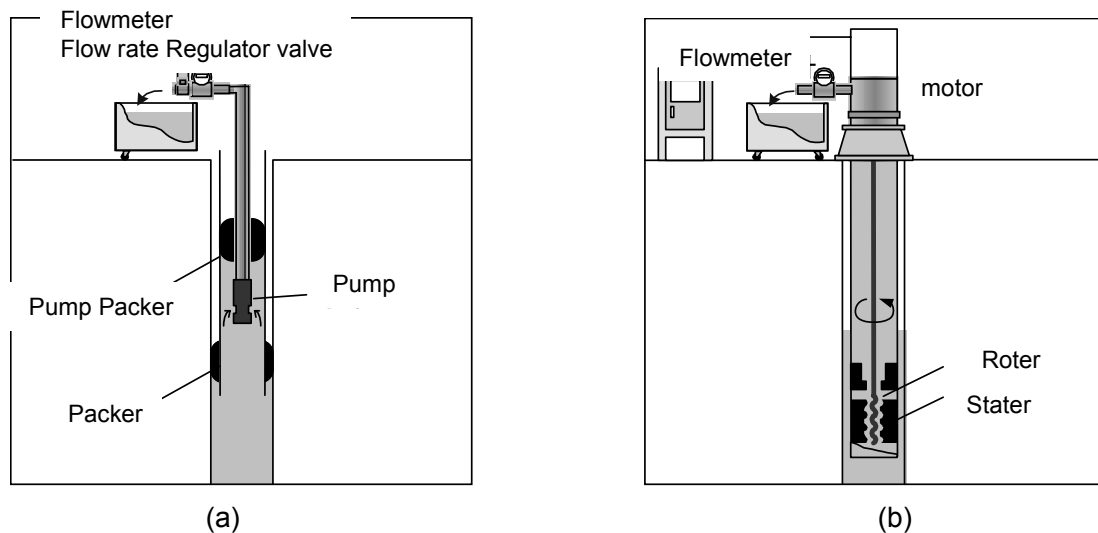


Fig. 3.3.7-1 (a) Schematic Figure of Pump Packer (b) Schematic Figure of Cavity pump

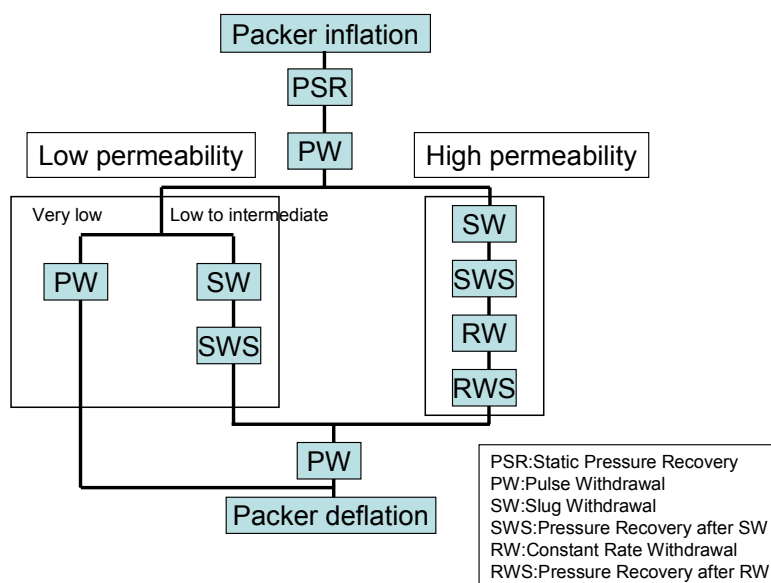


Fig. 3.3.7-2 Sequential hydraulic test

3.3.8 地下水の地球化学調査に関わる調査技術

結晶質岩のような亀裂性岩盤中に掘削したボーリング孔を利用して、地下水の採水を行う場合には、ボーリング孔の掘削過程で、透水性の岩相（逸水帯や湧水帯など）に遭遇した時点で随時、揚水試験と組合せて行うことがデータの品質を向上させるために必要である。正馬様用地で実施した深層ボーリング調査（MIU-1、2、3 号孔）では、目的とする深度（1,000m）までボーリング掘削を終了した後に、地下水採水を行う手順としていた。しかし、この手順ではボーリング掘削中に、掘削水が逸水する割れ目（帯）に遭遇し、大量（数十～数百 m^3 ）の掘削水を岩盤に注入してしまったため、掘削水による汚染を除去できず、これらの区間からの地下水採水が不可能であった。この問題点を解決するために、ボーリング掘削作業中に揚水試験と合わせて地下水の採水を行うこととし、岩盤中への掘削水の混入量を低減させる観点から、掘削中の逸水発生時に掘削を中断して揚水試験と組合せて実施する手順を構築した。この際に重要な点は掘削水による汚染の割合の把握である。その方法として、揚水試験中に排水される地下水の化学成分濃度、蛍光染料（掘削水に一定濃度で添加）濃度と pH や電気伝導度などの物理化学パラメータ、主要化学成分を定期的に分析・測定し、蛍光染料濃度が十分に低下し（添加濃度に対して 1% 以下）、かつ物理化学パラメータが大きな変化を示さなくなった時点で地下水を採水する方法を検討し、調査に適用した^{35),36)}。また、蛍光染料濃度が低下しない場合は、掘削水の排水過程で行う排水の定期的な化学分析結果に基づき、蛍光染料濃度と地下水の化学成分濃度の相関性を把握することで、掘削水による汚染のない地下水の化学成分濃度を外挿により推定することも可能となる。しかしながら、濃度が低いあるいは水-岩石反応により容易に濃度が変化するなどの理由で、蛍光染料濃度と相関性のない化学成分（アルミニウムイオンなど）や同位体については、その濃度を外挿で推定することができないため、可能な限り掘削水を除去する必要がある。このような手法を用いるためには、掘削水と地下水の 2 成分混合を仮定する必要がある、掘削水の水質を調査期間中一定に維持することが不可欠である。このため、掘削水の pH や電気伝導度などを常時モニタリングし、水質の変化の兆候が観察された場合は、掘削水を交換することが必要である。

揚水試験に伴う採水手法の短所の一つは、揚水中の脱ガスにより溶存ガスの濃度が変化することや物理化学パラメータ値が変化することである。これを解決するためには、揚水試験装置の採

水区間に直接バッチ式採水ボトルを挿入し、原位置の圧力環境下で地下水を採水する、あるいは揚水試験終了後に地下水採水のための専用の装置を用いて、地下水採水を行う方法を採用する必要がある。

地下水採水調査は、ボーリング調査の中では調査期間が長いことが多いため、目的・調査期間（予算）に応じて、地下水採水の実施の要否を検討する必要がある、実施する場合には地下水採水手法を選定し、さらにデータ品質を確保するための現場の作業を決定する、といった事前の検討が重要である。

ボーリング孔の全長掘削を終了後に地下水水質長期モニタリング装置を設置し、バッチ式ボトルで採水する方法^{35),36)}もあるが、ボーリング孔掘削終了後から地下水長期モニタリング装置までの期間に、帯水層間の水頭差によりボーリング孔を水路として、本来と異なった深度の地下水が流入する場合もあることから、この場合には可能な限り早期に地下水長期モニタリング装置を設置する必要がある。

また、調査中に経験した事例として、ボーリング掘削に伴う地質環境の擾乱が確認された。サイトスケールの領域内でのボーリング調査においては、孔壁画像調査によりボーリング孔壁に掘削水中の鉄分と硫化水素ガスが反応して生じたと考えられる黑色鉄化合物（主に水酸化鉄や硫化鉄）の付着が観察された³⁷⁾。これは、ボーリング掘削用ビットの磨耗によって、ビットに含まれる鉄が掘削水に溶解し、地下水中の硫化物と反応することにより生じたと考えられる。このような鉄化合物は、主要な酸化還元反応制限固相になり得るため、もともとの地下水の酸化還元電位を変化させる原因となる可能性がある。したがって、地下水の酸化還元電位値を得るためには、岩盤中に存在する酸化還元反応物質と、ボーリング掘削時に地下にもたらされる人為的な酸化還元反応物質による酸化還元反応について熱力学計算による事前予測、並びに孔壁画像調査により、人為的にもたらされる酸化還元反応制限固相の有無の確認が必要である。

3.3.9 初期応力測定技術

岩盤の初期応力は研究坑道の設計・掘削において最も重要な因子のひとつであり、研究坑道のレイアウト及び安定性にも大きく影響する。初期応力測定技術に関しては、実用段階のものから研究段階のものまで、今日までに極めて多数の手法が提案されている³⁸⁾。文献調査や測量・GPS情報などによる測地学的評価方法や解析的な手法を除けば、初期応力測定技術は、ボーリング孔を用いた方法と、ボーリングコアを用いた方法とに大別される。前者の代表例としては、水圧破壊法や応力解放法などが、後者の代表例としては、ボーリングコア内のマイクロクラックの挙動に基礎をおく AE (Acoustic emission) 法、DRA (Deformation rate analysis) 法、DSCA (Differential Strain Curve Analysis) 法などがあり、それぞれの手法については、第1段階における調査手法として用いている。

研究坑道の規模が大きい場合や、研究坑道が立体的に配置される場合、岩盤の三次元主応力を求める必要が生じる。しかし、三次元の初期応力状態を大深度ボーリング孔にて1回の測定で評価する手法は実用レベルに至っていないため、上記の手法の組合せにより三次元の応力状態を評価している。ボーリング孔を利用する初期応力測定技術のうち、主応力の大きさと方向に関して、値の算出に仮定を設けずに三次元主応力を決定でき、最も信頼性・実績のある方法のひとつは応力解放法であることが分かった³⁹⁾。応力解放法は、ボーリング孔の先端に小孔径のパイロット孔を掘削し、そこにひずみ計を設置した後、孔軸を一致させてオーバーコアリングを行い、ひずみ計を設置した岩石に作用している応力を解放して、その際の弾性回復の測定量から、初期応力を算出する方法である。大深度ボーリング孔で、応力解放法による初期応力測定の実績が少ない理由として、耐水性、耐熱性及びハンドリングの困難さが挙げられる。したがって、これらの問題

を解決し、既存の応力解放法による初期応力測定技術の大深度ボーリング孔への適用性の拡大を目指し、測定装置の開発を行った。

開発した初期応力測定装置は、応力解放ひずみを計測するひずみゲージセル及び接着装置、応力解放ひずみを収録するデータロガー、方位傾斜計測装置、リチウム電池から構成される (Fig. 3.3.9-1)。データロガーなどはステンレス製のアップセル (耐圧容器) に格納されており、深度 1,000m の水圧に耐えられる。ひずみゲージセルは、埋設タイプと孔壁貼付けタイプのひずみゲージセルの二つを用いているが、そのほかのタイプのひずみゲージセルも使用可能である。本装置で用いている埋設タイプのひずみゲージセルは、先端に取り付けられた接着装置が孔底に押し込まれると、孔内水を排除し、ひずみゲージセルの周りに接着剤が回り込む構造となっている。また、孔壁貼付けタイプのひずみゲージセルは、接着装置が孔底に押し込まれると、パイロット孔の孔壁に 3 枚のロゼット型ひずみゲージが直接貼り付けられる構造となっている。測定作業では、パイロット孔の掘削から初期応力測定装置の設置、オーバーコアリングまでをワイヤラインシステムにより実施可能なシステム⁴⁰⁾を採用することにより、作業効率を格段に高めることができた。このシステムにより、通常数日以上要する応力解放法による初期応力測定に関わるこれら一連の作業を 6 時間以内で実施可能となった。

本装置を用いた初期応力測定は、岐阜県土岐市に位置する東濃鉾山の地表からボーリング孔を掘削し、地表からの深度 200m～250m を掘削中に実施した。試験対象となる岩石は土岐花崗岩であり、ボーリング孔の深度 200m～250m の区間内の天然き裂を含まない箇所で行った。試験の結果、天然き裂がひずみゲージセルの近傍にない場合は、応力解放に伴う連続的なひずみ変化を測定でき (Fig. 3.3.9-2)、大深度ボーリング孔において応力解放法による初期応力測定が可能であることを確認した⁴¹⁾。

初期応力状態は、3.2.4(7) 1)でも述べたように、特に断層などの不連続構造の存在により大きく変化する場合もある。したがって、主要な不連続構造を把握した上で測定計画を立てる必要がある。

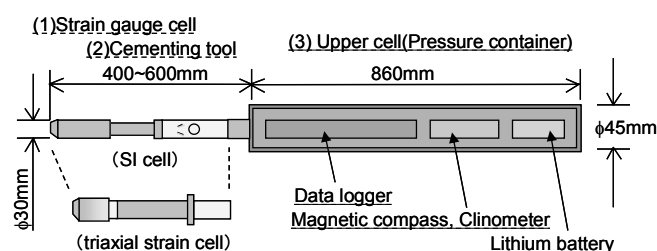
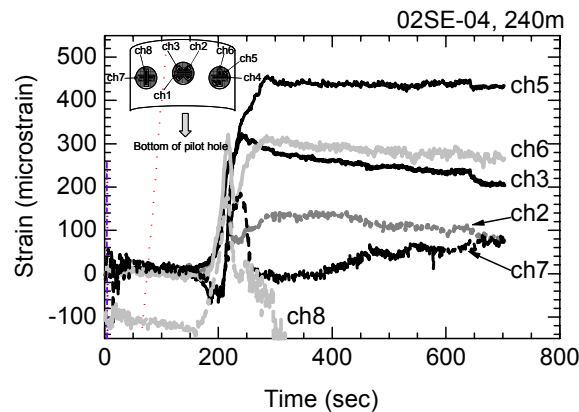


Fig. 3.3.9-1 Outline of the new stress measurement equipment⁴¹⁾

Fig. 3.3.9-2 Measured stress relief curves⁴¹⁾

3.3.10 地質構造／水理地質構造のモデル化及び地下水流動解析

地質環境特性を効率的・合理的に把握するためには、調査量と地質環境特性の理解度や不確実性との関係を段階的に明確にすること、及び次の調査で確認すべき重要な要素を特定することが重要である。このためには、地質環境モデルを構築し、新たな知見をもとに適宜そのモデルを改良していくことが必要である⁴²⁾。また、以下に示すような効果が期待できることから、地質環境モデルを一つの有効なツールとして組み込んだ調査研究が必要である。

- ・ 各時点のデータやモデルなどの情報を記録しておくことにより、調査研究全体が時系列的に整理され、同様の調査研究計画などを効率的に策定するための情報を提供することができる。
- ・ 多種多様の技術的情報をモデル化し可視化することにより、分野の異なる研究者間における認識の共有化のみならず、専門家以外の人達への情報提供を容易にする。

地質環境特性を効率的・合理的に把握するためには、調査終了後、迅速に取得したデータの解釈、地質環境モデルの構築、その結果に基づく次の調査計画が立案できることが重要である。このような迅速な地質環境モデルの構築を支援することを目的に、地質構造モデルの構築から水理地質構造モデルの構築及び地下水流動解析までの一連の作業に必要なソフトウェアや解析コードを統合した **GEOMASS (GEOLOGICAL MODELLING ANALYSIS AND SIMULATION SOFTWARE)** システムを構築した⁴³⁾。

この **GEOMASS** システムは、地質構造モデルの構築及び可視化を支援する **EarthVision®**、水理地質構造のモデル化と地下水流動解析を行う **Frac-Affinity** から構成される (Fig. 3.3.10-1)。**EarthVision®**は、Dynamic Graphics, Inc.によって開発された、複雑な地質構造の幾何学形状のモデル化などを行うソフトである⁴⁴⁾。**Frac-Affinity** は、**EarthVision®**で構築した地質構造モデルに基づき、グリッド分割及び数値解析を行うための地下水流動解析コードである⁴⁵⁾。

本システムの特徴としては、モデル化作業と数値解析作業が一体化されていること、不連続構造と岩盤マトリクス部を同時に考慮できることが挙げられる。前者の特徴により労力の節減を図ると同時に、情報量の増加などに伴うモデルの修正、解析の再実行を短期間で行うことができる。また後者の特徴により、岩盤中の地下水流動をより現実的に表現することが可能となる。

(a)EarthVision®について

EarthVision®は地質構造の複雑な幾何学形状のモデル化、石油・天然ガスの調査及び開発に関する問題、水理学的問題（地下水流動問題）などに適用されており、Sellafield (Nirex)、Wellenberg (Nagra)、Äspö HRL (SKB)、及び Yucca Mountain (USGS、USDOE) においても地質構造モデルの構築に使用された実績を有するソフトウェアである⁴⁶⁾。EarthVision®による地質構造モデルは、各地層の境界面や断層などの不連続面の形状を推定し、これらの面をその位置関係や形成過程を考慮して組合せることによって構築される。

この機能に加えて地下水流動解析コードである Frac-Affinity 用のデータ出力機能 (Frac-Affinity Export) を付加させ、EarthVision®から Frac-Affinity へのデータの受け渡しを容易に行うことを可能とした。

(b)Frac-Affinity Interface について

Frac-Affinity Interface は EarthVision®で取り扱うためのデータと Frac-Affinity で取り扱うためのデータの相互変換を行うモジュールとして開発した。Frac-Affinity Interface は EarthVision®で作成した地質構造モデルから Frac-Affinity で数値解析を行うための差分格子を自動的に発生させる。ユーザーは格子分割のためのいくつかの制御パラメータ（セルの大きさの下限など）を指定する。また、必要に応じて解析結果をモニターする点、線及び面を指定することができ、特定のポイントにおける解析結果の変化などを簡単に出力することが可能である。

(c)Frac-Affinity による解析結果データの変換

Frac-Affinity で計算した解析結果から、物性（透水係数、間隙率、比貯留係数）分布、水頭分布、流速分布及びフラックス分布などについて、EarthVision®で可視化するためのファイルを出力する。

(d)Frac-Affinity について

Frac-Affinity は地下水流動解析を質量保存則に基づき差分法により行う数値解析コードであり、多孔質媒体と亀裂性媒体を同時に表現が可能なハイブリッド媒体 (Fig. 3.3.10-2) としての取り扱いが可能であるとともに、湾曲した断層などの構造のモデル化が容易、決定論的割れ目と確率論的割れ目の両者の考慮が可能、多孔質媒体及び決定論的割れ目の物性値について、フラクタル則^{47),48),49)}を用いた地球統計学的手法により不均質に設定することが可能、決定論的割れ目及び確率論的割れ目に対して透水異方性の設定が可能及び坑道掘削を考慮することが可能といった特徴を有する。

本システムを用いて、3.2 に示したサイトスケール領域を対象とした各ステップにおいて、地質構造／水理地質構造モデルの構築及び地下水流動解析を実施した (Fig. 3.3.10-3)。この際、複数の岩相（花崗岩、堆積岩）や断層が複雑に分布する地域の地質構造モデルを、可視化画像で確認しながら視覚的に構築することができた (Fig. 3.3.10-3)。また、地質構造モデルから地下水流動解析を行うための分割要素（離散モデル）が自動的に作成されることにより、煩雑な要素分割作業に伴う労力を削減できた。特に、複雑な地質構造をモデル化するとともに、それに基づく地下水流動解析を実施する場合や、複数のモデルを作成するような場合（感度解析など）、離散モデルの自動構築機能は労力の削減に効果的と言える。さらに、地下水流動解析結果を可視化し、解析結果の考察を効率的に進めることができた (Fig. 3.3.10-3)。

以上のことから、地質構造モデルの構築から水理地質構造モデルの構築及び地下水流動解析までの一連の作業に必要なソフトウェアや解析コードを統合したシステムを構築したことにより、これらの作業の労力と時間を大幅に節減することが可能となり、情報量の増加などに伴うモデルの更新に対して迅速な対応が可能となった。また、このシステムを用いることによって、調査終了後に、直ちに地質環境モデルを構築することができ、地質環境特性を把握する際に、調査と地

質環境モデルの構築を有機的に組合せることが可能となった。

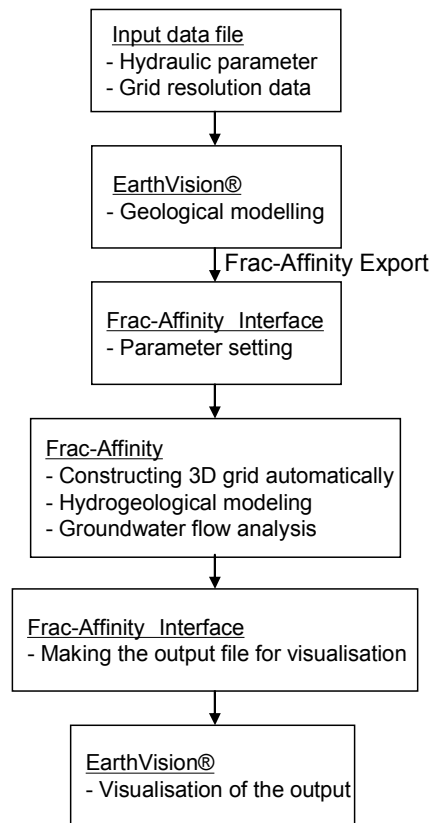


Fig. 3.3.10-1 GEOMASS system working flow

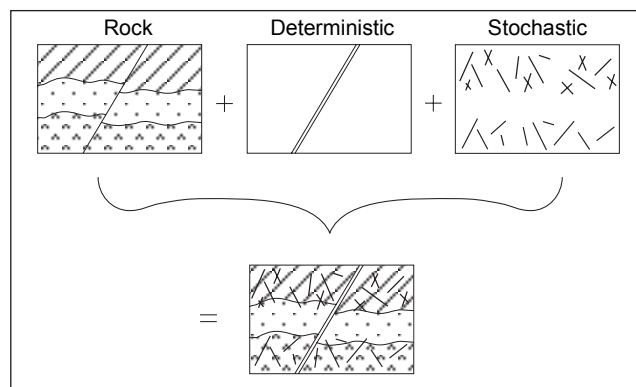


Fig. 3.3.10-2 Schematic of the constituent components of a hybrid medium

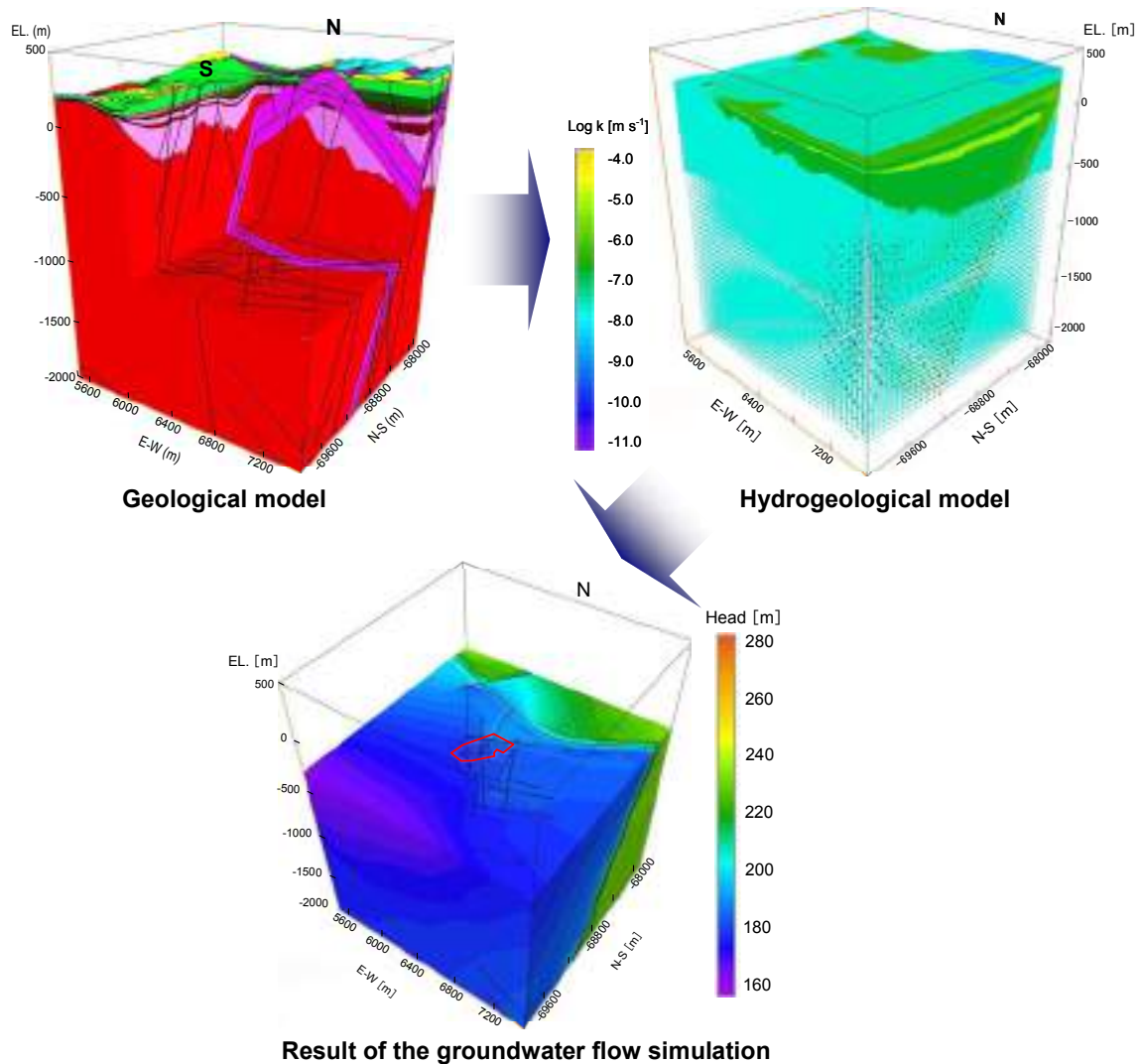


Fig. 3.3.10-3 Geological / hydrogeological modeling and visualization of the groundwater flow analysis result by using GEOMASS system (Step 4)

3.3.11 品質管理手法

地層処分技術や地質環境に関する研究成果などの信頼性を恒常的に高めていくためには、処分事業や国の安全規制及びこれらの各段階で関与する多様な関係者に、研究開発業務で得られた成果を伝え、その妥当性について理解を得る必要がある。研究成果の品質を保証する上で、「透明性」、「追跡性」、「公開性」、「専門家のレビュー」の4点に留意することが肝要であり、超深地層研究所計画では、そのためのアクションプログラムとしてボーリング調査や物理探査などの調査ごとに実施計画書を策定している¹⁴⁾。本計画書には作業工程、作業体制、使用する調査・解析手法、予想される問題の対策、各作業の手順、品質管理や安全確保のための作業チェックリストなどを定め、調査の開始には実施計画書の内容に関する品質保証の責任者の承認が必要となっている。特に調査を第三者に委託する場合は、実施計画の策定を通して調査に関わる関係者に当該調査で達成すべき目標や要求されるデータ品質などを十分に周知・徹底することが重要である。ボーリング調査の場合は実施する作業項目も多岐にわたることから、調査毎の実施計画書を統合した調査研究計画書（3.3.3 参照）に基づき、個別の調査の品質管理計画書を策定した。ステップ 3 の

深層ボーリング調査（MIZ-1 号孔）では、掘削作業、コア観察、ボーリングコアを用いた室内試験、孔壁画像調査、物理検層、水理試験、井戸水・掘削水・揚水試料の分析などに関する個別の計画書を策定し、品質の確保に努めた¹⁵⁾。

調査目的を効率的かつ適切に達成するためには、孔壁崩壊や逸水などの発生し得る事象を事前に可能な限り想定し、それぞれの対応策を検討・準備することが必要である。事象への対応が遅延することによる経費の増大に加えて、事象の進行による復旧の困難さの増大や、データ取得の遅延による解析・評価の遅れなどの当該調査への影響のみならず、当該調査の後に計画されている調査研究の調査仕様への反映の時宜を逸する、あるいは研究計画全体の工程を遅延させる必要が生じるなど、繰り返しアプローチの考え方にに基づき段階的に地質環境を理解するための調査研究手法⁹⁾には極めて重大な問題となる。そのため、類似事例の経験を有する専門家によるレビューが極めて重要である。また、MIZ-1 号孔のボーリング調査に適用した PDPC (Process Decision Program Chart) の活用なども有用である¹⁵⁾。

参考文献

- 1) 井上大栄, 水落幸広, 桜田裕之: “リニアメントの断裂系としての特性とその評価”, 応用地質, 第 33 巻 3 号, pp.25-34 (1992).
- 2) 佐々木圭一, 太田久仁雄: “大縮尺の空中写真により判読したリニアメントに関する検討—東濃地域における事例研究—”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN 7400 2004-007 (2004).
- 3) 松岡稔幸, 石垣孝一: “花崗岩分布地域における地球物理学的手法を用いた地質構造調査—反射法弾性波探査およびマルチオフセット VSP 探査の適用—”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2005-003 (2005).
- 4) 松岡稔幸, 上原大二郎, 藪内聡, 太田陽一, 川中卓: “花崗岩地域を対象とした反射法弾性波探査の適用”, 平成 14 年度応用地質学会中部支部研究発表会・講演予稿集, pp.31-36 (2002).
- 5) 太田久仁雄, 天野健治, 熊崎直樹, 松岡稔幸, 竹内真司, 升元一彦, 藪内聡, 三枝博光, 稲葉薫, 向井圭, 片岡達彦, 岩月輝希, 佐藤稔紀, 中間茂雄, 今津雅紀, 玉井猛, 見掛信一郎, 大澤英昭, 川瀬啓一, 小出馨: “超深地層研究所計画年度報告書 (平成 14 年度)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2003-006 (2003).
- 6) 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研究開発—平成 15 年度報告—”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 2004-007 (2004).
- 7) 石垣孝一, 松岡稔幸, 上原大二郎: “花崗岩を対象とした断層調査技術の開発—高密度電気探査, マルチオフセット VSP 探査の適用性評価—”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7400 2005-009 (2005).
- 8) 松岡稔幸, 太田久仁雄, 川中卓, 植原省吾, 土家輝光, 成田憲文: “東濃地域における花崗岩を対象とした地質構造調査への反射法弾性波探査の適用例”, 物理探査学会第 110 回 (平成 16 年度春季)学術講演会講演論文集, pp.129-132 (2004).
- 9) 核燃料サイクル開発機構: “高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成 17 年取りまとめ— 一分冊 1 深地層の科学的研究—”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 2005-014 (2005).
- 10) 社団法人地盤工学会: “地盤調査の方法と解説”, 丸善, pp.139 (2004).
- 11) Ota, K., Nakano, K., Metcalfe, R., Ikeda, K., Amano, K., Goto, J., Takeuchi, S., Hama, K. and Matsui, H.: “Working Programme for MIU-4 Borehole Investigations”, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN7410 99-007 (1999).
- 12) Goto, J., Ikeda, K., Kumazaki, N., Mukai, K., Iwatsuki, T., and Hama, K.: “Working

- Program for Shallow Borehole Investigations”, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN7400 2002-005 (2002).
- 13) Nakano, K., Amano, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Saegusa, H., Hama, K., Kumazaki, N., Iwatsuki, T., Yabuuchi, S., and Sato, T.: “Working Program for MIZ-1 Borehole Investigations”, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN7400 2002-008 (2003).
 - 14) 小出馨, 池田幸喜, 竹内真司, 太田久仁雄, 坂巻昌工: “超深地層研究所計画・第1段階(2002年度-2004年度)に関する評価報告書ー地上からの調査研究から得られたプロジェクト管理上の教訓ー”, 日本原子力研究開発機構, JAEA- Evaluation 2007-001 (2007).
 - 15) 太田久仁雄, 佐藤稔紀, 竹内真司, 岩月輝希, 天野健治, 三枝博光, 松岡稔幸, 尾上博則: “東濃地域における地上からの地質環境の調査・評価技術”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-023 (2005).
 - 16) Takeuchi, S. and Ota, K.: “Working Program for MIZ-1 Borehole Investigations: Revision of Working Program after Phase IV”, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN7400 2005-010 (2005).
 - 17) 魚住直己, 村上真也, 大石保政, 河村秀紀: “超深地層研究所計画における試錐調査(MIZ-1号孔)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7440 2005-091 (2005).
 - 18) 栗原正治, 山口昌司, 名取二郎, 濱野幸治, 丸山亮, 森林成生: “正馬様用地における試錐調査(MIU-4号孔)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7440 2002-008 (2001).
 - 19) 栗原正治, 山口昌司, 名取二郎, 濱野幸治, 丸山亮, 森林成生: “月吉断層を対象にした水理特性調査”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7440 2002-009 (2001).
 - 20) 西出四郎, 窪田亮, 川西繁, 水落幸広, 馬場秀人, 西内哲雄, 棚瀬充史: “立坑掘削予定地点における試錐調査(MIU-1号孔)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ7440 98-001 (1998).
 - 21) National Research Council: “Rock fractures and fluid flow - contemporary understanding and applications -”, National Academic Press, Washington D.C., pp.551 (1996).
 - 22) 小村健太郎, 池田隆司, 飯尾能久, 新井崇史, 小林健太, 島田耕史, 田中秀実, 平野聡, 松田達生: “断層破砕帯部の物理検層ー野島断層平林 NIED 井の場合ー”, 物理探査, vol.56, no.6, pp.401-414 (2003).
 - 23) Ollson O.,ed.: “Site characterization and validation - final report: Stripa Project”, TR 92-22, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm (1992).
 - 24) 佐々木圭一・天野健治: “物理検層結果による割れ目帯の評価”, 日本応用地質学会平成16年度研究発表会講演論文集, pp.247-250 (2004).
 - 25) Tsang, C.-F., Hufschmied, P. and Hale, F.V.: “Determination of Fracture Inflow parameters with a Borehole Fluid Conductivity Logging Method”, Water Resources Research, vol.26, No.4, pp.561-578 (1990).
 - 26) 竹内真司, 天野健治, 下茂道人, 松岡清幸: “電気伝導度検層を用いた亀裂性岩盤中の水みち検出技術”, 土木学会第58回年次学術講演会概要集, pp.413-414 (2003).
 - 27) Takeuchi, S., Shimo, M., Doughty, C. and Tsang, C.-F.: “Identification of the Water-Conducting Features and Evaluation of Hydraulic parameters using Fluid Electric Conductivity Logging”, Proceedings of the Second International Symposium on Dynamics of Fluids in Fractured Rock, pp.349-354 (2004).
 - 28) 竹内真司, 下茂道人, 城まゆみ, Chin-Fu Tsang: “電気伝導度検層による深部花崗岩中の水みちの抽出と水理特性の評価”, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム論文講演集, pp.451-456

(2004).

- 29) 藤田有二, 竹内真司: “瑞浪超深地層研究所を中心とした東濃における深地層の科学的研究－深層ボーリング孔を用いた岩盤の水理特性評価技術の開発－”, 地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会要旨集, G018-P002 (CD-ROM) (2005).
- 30) 竹内真司, 天野健治, 藤田有二: “広域地下水流動研究における単孔式水理試験データ”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7450 2005-010, (2005).
- 31) 竹内真司, 藤田有二: “超深地層研究所計画における単孔式水理試験データ”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7450 2005-011, (2005).
- 32) 中野勝志, 田村雅彦, 尾方伸久, 後藤和幸, 西垣誠: “1,000m 対応水理試験装置の開発”, 日本地下水学会 1995 年秋季講演会講演要旨, pp14-19 (1995).
- 33) 小出馨, 杉原弘造, 長谷川健, 武田精悦: “花崗岩を対象とした深部地質環境の調査技術開発の課題と現状－測定データの品質保証の観点で構築した地下水調査法の提案－”, 資源と素材, Vol.117, No.10, pp.785-793 (2001).
- 34) 藪内聡, 竹内真司: “深層岩盤を対象とした単孔式透水試験”, 日本地下水学会 2003 年秋季講演会講演要旨, pp32-35 (2003).
- 35) 古江良治, 岩月輝希, 彌榮英樹, 水野崇: “試錐孔を利用した地下水の地球化学特性調査手法と品質管理”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7520 2003-001 (2003).
- 36) 古江良治, 岩月輝希, 濱克宏: “深層ボーリング孔を用いた地下水の地球化学調査の課題”, 応用地質, 46, 4, pp.232-236 (2005).
- 37) Ota, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Horimoto, S., Amano, K., Yabuuchi, S., Fujita, Y., Iwatsuki, T. and Furue, R.: “An Overview of the MIZ-1 Borehole Investigations during Phase III: MIZ-1 Progress Report 03-02”, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN7400 2005-001 (2005).
- 38) 菅原勝彦: “岩盤応力測定に関する研究の動向”, 資源と素材, Vol.114, pp.834-844 (1998).
- 39) 佐藤稔紀, 加藤春實: “1,000m 対応の応力解放法による測定装置開発の現状”, 資源・素材'98 企画発表・一般発表(A)資料, pp.41-44 (1998).
- 40) 加藤春實, 田中博: “大深度応力解放法におけるボーリングのためのワイヤラインツールズ”, 月刊地球, Vol.26, No.2, pp.80-83 (2004).
- 41) Nakama, S., Sato, T. and Kato, H.: “Status of study on in-situ stress in the Mizunami Underground Research Laboratory Project”, Proceedings of the 40th U.S. Rock Mechanics Symposium, Alaska Rocks 2005, CD-ROM 05-887 (2005).
- 42) 太田久仁雄, 天野健治, 須山泰宏, 三枝博光: “広域地下水流動研究における三次元地質構造モデルの構築”, 核燃料サイクル開発機構, No.4, pp.101-110 (1999).
- 43) 稲葉薫, 三枝博光, M.J. White, P. Robinson: “地下水流動の予測解析統合システム (GEOMASS システム) の概要と東濃地域への適用事例”, 地下水学会誌, 第 44 巻第 2 号, pp.105-123 (2002).
- 44) Beims, T.: “3-D Structural Modeling Mitigates Risk”, The American Oil & Gas Reporter, Nov.1997 (1997).
- 45) White, J. M., Humm, P. J., Todaka, N., Takeuchi, S. and Oyamada, K.: “GEOMASS: Geological Modelling Analysis And Simulation Software For The Characterization Of Fractured Hard Rock Environments”, Proc. the third Äspö International Seminar, Oskarshamn, June 10-12 1998, SKB Technical Report, TR-98-10,233-242 (1998).
- 46) McEwen, T.: “The Scientific and Regulatory Basis for the Geological Disposal of

- Radioactive Waste”, Chapter 8, pp.239-320, John Wiley & Sons (1995).
- 47) Hewett, A. T.: “Fractal distributions of reservoir heterogeneity and their influence on fluid transport”, SPE 15386 (1986).
- 48) Peitgen, O. H. and Saupe, D: “The Science of Fractal Images”, Springer-Verlag (1988).
- 49) Saegusa, H., Takeuchi, S., White, J. M. and Inaba, H.: “Modeling of Heterogeneous Hydraulic Conductivity Field Using Fractal Theory”, The 7th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation (1999).

3.4 まとめ

深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備に関する調査研究では地層処分にとって重要な地質環境の特性やプロセスを、サイトスケールを主な対象として、「安全評価」、「地下施設の設計・施工」及び「環境影響評価」の観点から整理し、調査研究の個別目標と課題を設定した。この個別目標と課題の達成に向けて、第1段階の調査研究をステップ0からステップ4までの五つに区分し、各調査ステップにおいて、統合化データフローに基づき、繰り返しアプローチを用いた調査研究を進めた。

具体的には、調査研究の進展に伴う情報の種類・量と地質環境の理解度や調査研究の達成度との関係を順次評価するとともに、この評価結果に基づき次のステップの調査研究における課題（特性、プロセス）を明確にしてその調査計画に反映した。その結果、地質構造モデルや水理地質構造モデルなどの変遷で例示されたように、地層処分にとって重要な地質環境の特性やプロセスについての理解を深めることができた。また、取得するデータの種類、データの解釈及び異なる分野で得られた情報の統合などの観点から調査ステップごとに、調査から評価までの合理的な道すじ（系統的なデータの流れ）を統合化データフローとして整理した。

地質環境を対象とした調査研究を行う際には、調査研究の対象となる地質環境の特性やプロセスをできる限り具体的にするとともに、時間や予算などの制約条件あるいは、環境への影響を考慮し、調査の項目や手法の最適化及び合理化を図った調査研究計画を策定することが重要であることを確認した。また、データの品質が保証できる調査研究における品質管理体系と実施体制作りが不可欠であることも確認した。調査研究をとおして得られた技術的知見、失敗事例やノウハウなどについては、できる限り文書として残すよう試み、処分事業や安全規制の基盤技術として知識化を図った。

なお、実際の地質環境（結晶質岩）を対象とした調査研究をとおして整備した調査・評価技術や技術的知見などの多くの部分は、これまでの国外における同様の調査研究事例から、場所や地質環境条件などが異なっても多くの場合普遍的に適用できると考えられる。さらに、与えられた場の地質環境特性の差異や与条件などを考慮し、適切に変更を加えることにより、第1段階で得られた調査・解析・評価技術や技術的知見などを広く活用することができるものと考えられる。

4. 深地層における工学技術の基盤の整備

超深地層研究所計画においては、地質環境を調査・解析・評価する技術の信頼性や適用性を実際の地質環境への適用を通じて確認していくことが大きな目標であるが、一方で、得られた地質環境情報に基づいて研究坑道を設計・施工していくことを通じて、『情報の取得や技術の実証を目的とした地下施設』を設置・維持するための工学技術の基盤を確立していくことも重要な目標である。つまり、研究坑道の掘削だけが目的ではなく、地質環境を理解するための調査手段として、また深部の地質環境下での調査研究を行う場に到達するために、地下に研究坑道を展開していくのである。このような研究坑道の設計、施工及び維持管理を通じて培われた技術や経験は、実際の処分事業における技術基盤として、精密調査での坑道掘削などに活用されることになる。

具体的には、瑞浪超深地層研究所において、第1段階で得られる地質環境情報に基づきながら、現状の土木工学や資源工学の技術を適用して、調査研究に必要となる地下深部までの研究坑道を設計する。そして、第2段階において計測結果などの得られた情報を設計・施工法へフィードバックを行いながら、実際に研究坑道を安全かつ合理的に施工することを通じて、第3段階に利用される場の構築と維持・管理ができることを確認することにより、深地層における工学技術の基盤を整備していく。その際、研究坑道の掘削による地質環境への影響を評価するための手法の整備や、研究坑道近傍のEDZのうちの掘削損傷領域を修復・軽減するための技術（グラウチングなど）の開発なども重要な課題となる^{1),2)}。また、深地層における工学技術の基盤の整備で得られた成果は、処分施設の設計・施工や人工バリアなどに関する工学技術の開発にも基礎的な情報として寄与するものである。

また、瑞浪超深地層研究所は深地層の科学研究を実施する主要な施設として位置づけられると共に、原子力政策大綱に示されている深地層に対する国民の理解促進の場としてもその役割は大きく、このような役割を踏まえて施設の設計・建設を進める必要がある。

本章においては、花崗岩（硬岩）を対象とした超深地層研究所計画について、第1段階で実施した研究坑道の設計に関する地質環境情報（第3章）の整備状況や研究坑道の安定性解析などの結果を示すと共に、これらを通じて得られた知見や経験も合わせて示す。

4.1 第1段階における研究坑道の設計・施工計画の検討

4.1.1 進め方

通常、瑞浪超深地層研究所のような地下施設の設計は、研究所用地周辺の地質環境条件が明らかになった段階、すなわち第1段階調査がある程度進んだ時点から進めることが設計を合理的・経済的に進めるという観点からは望ましい。ここでは、設計に関する知見を得ることを目的に、瑞浪超深地層研究所の設計は第1段階調査と同時並行に進めることとし、研究所用地及びその周辺での調査ボーリング孔が少ない状況で設計に着手した。このため、本報告においては第1段階の調査の進捗によってどのように設計が変わったかという観点からの検討を加えた。

具体的には、研究坑道のレイアウトや研究坑道の大きさ、支保パターンなどを具体的に計画する実施設計時点では、研究所用地及びその近傍には研究坑道の掘削予定深度である1,000mまで到達するボーリング孔の情報は存在せず、既存ボーリング孔として、広域地下水流動研究のために掘削した深度約500mのボーリング孔（DH-2号孔）の情報のみが存在した。これに、地質構造が類似していると想定された正馬様用地で掘削した深度1,000mに達するボーリング孔のうち、月吉断層と交差していないMIU-1号孔のデータを加えて、研究坑道の掘削予定位置での地質構造と岩盤等級を想定し、実施設計を行った。これらの情報は、第3章に示すステップ0に相当する。

その後、第1段階調査研究として研究所用地内で土岐花崗岩に達する深度約200mの浅層ボーリング孔（MSB-1、2、3、4号孔）と掘削長1,300mに達する深層ボーリング孔（MIZ-1号孔）を掘削したので、そのデータを用いて設計を見直した（以下、調整設計）。これらの情報は、第3章に示すステップ2及び3に相当する。

これらの設計は主に岩盤等級や空洞安定性及び支保に関するものであるが、第2段階では地質構造や岩盤状況に関する各種データを取得し、その情報を設計・施工へフィードバックする情報化施工を取り入れることにより、より適切な設計・施工が可能となる。このため、フィードバック技術について検討した。

更に、道路や鉄道のトンネルなどの一般的な土木構造物とは異なり、研究坑道は大深度に及び、更にレイアウトが複雑で入坑者も多様となる。この点に着目すると、研究坑道の地震時を含めた安定性の検討、突発事象対策、通気網解析に基づく防災の検討、安全対策などが設計において重要な課題と認識し、これらについても検討した。

4.1.2 研究坑道のレイアウト

地下へのアクセス方式として、立坑方式と斜坑方式を比較した結果、コストや工期、必要とする用地の大きさなどにおいて種々のメリットがあるため、立坑方式を採用することとした。第3段階の研究内容を想定し、2本の円形立坑（主立坑及び換気立坑）と複数深度での水平坑道（中間ステージ、最深ステージなど）の掘削を計画している^{3),4)}。Fig. 4.1.2-1に研究坑道の基本レイアウトを、また、Table 4.1.2-1及びTable 4.1.2-2に研究坑道を構成する立坑と水平坑道の概要を示す。

なお、土木学会のトンネル標準示方書「山岳工法編」⁵⁾によれば、水平トンネル中心間隔を掘削径の2倍（地山が完全弾性体の場合）～5倍（地山が軟弱な場合）とすれば、ほぼ相互に力学的な影響がないとされていることから、立坑の中心間隔は主立坑掘削径（7.3m）の5倍を確保できるように40mと設定した。

4.1.3 研究坑道の安定性・支保安定性の検討

(1)検討全体のフロー

ここでは、研究坑道実施設計で行った研究坑道の安定性及び支保安定性の検討結果を述べる。Fig. 4.1.3-1に検討全体のフローを示す。基本的には、研究坑道及び支保の安定性検討は数値解析で行うこととし、研究所の実実施設計及び詳細設計を行うそれぞれの時点での情報よりパラメータなどを設定して検討を行い、支保パターンを設定したうえで、決定した支保パターンの妥当性の確認としての計測についても検討を行うものである。

研究坑道の安定性及び支保安定性の検討については、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⁶⁾、日本道路公団⁷⁾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。これに基づいて、二次元及び三次元有限要素解析により研究坑道の力学的安定性を検討すると共に、支保発生応力が許容応力を下回ることを確認することにより、設計としての支保パターンを確定した。以下に、具体的な検討結果を示す。

(2)設計における前提条件の整理

1)地山区分

研究所用地周辺で実施されているボーリング調査位置をFig. 4.1.3-2に示す。これらの結果のうち、実施設計においては立坑予定位置に最も近い位置で比較的深く花崗岩まで掘削を行っているDH-2号孔（深度約500m）、及び正馬様用地で実施したボーリング孔のうち月吉断層を貫いて

いない MIU-1 号孔（深度約 1,000m）の調査結果を採用した。

また、調整設計においては、3.2.4(2)で示した研究所用地内にて深度約 1,300m まで到達する MIZ-1 号孔の調査結果を加えた研究所用地周辺のステップ 3 の三次元地質構造モデルの結果を参考にして、設計で用いる岩盤物性値の見直し、及び深度と岩盤等級によるパラメータスタディの検討を行っている。

なお、地山区分の基準となる岩盤分類は電研式（田中式）岩盤分類⁸⁾を用いた。

2) 岩盤物性値

実施設計では、3.2.1(7)で述べたように既往の調査結果⁹⁾をまとめ、設計に用いる岩盤物性値を Table 4.1.3-1 のように設定した。花崗岩の物性値のうち、岩盤等級にあまり依存しない項目（単位体積重量、ポアソン比、内部摩擦角）については、コアを用いた室内試験の平均値をそのまま適用した。一方、岩盤等級に依存する項目（一軸圧縮強度、弾性係数、粘着力）については、コアの弾性波速度（ v_p ）と物理検層による岩盤の弾性波速度（ V_p ）より低減率（ $k=(V_p/v_p)^2$ ）を設定し、各項目の平均値（ m ）と標準偏差（ σ ）から B 級（ $m \times k$ ）、 C_H 級（ $(m - \sigma) \times k$ ）、 C_M 級（ $(m - 2\sigma) \times k$ ）と設定した。堆積岩の物性値については、 C_L 級として東濃鉾山の第 2 立坑建設時に実施した試験値の平均値を、D 級として研究所用地周辺で実施されたボーリングコアを用いた試験の最小値を設定した。一方、調整設計においては、3.2.4(7)に示したように MIZ-1 号孔のボーリングコアを電研式の岩盤等級で分類し、花崗岩において同じ岩盤等級内の試験結果の平均値を用いる項目（単位体積重量、軸圧縮強度、ポアソン比、内部摩擦角）と、上述の弾性波速度に基づく低減率を乗じる項目（弾性係数、粘着力）に分けて設定した。設定結果を Table 4.1.3-2 に示す。

初期応力に関して、実施設計では 3.2.1(7)に示した正馬様用地の AN-1、MIU-2 及び MIU-3 号孔で実施された水圧破碎試験の結果を整理して用いた。Fig. 4.1.3-3 に示すように、水平方向の応力に関しては最小主応力 $\sigma_{\min}$ は岩石の単位体積重量から算出される推定土被り圧 σ_v と同程度であり、月吉断層の上盤側では、最小主応力 $\sigma_{\min}$ と最大主応力 $\sigma_{\max}$ の比は平均約 2 倍程度である。これより解析に用いる初期応力は、堆積岩部も含めて連続していると考え、 $\sigma_v : \sigma_{\min} : \sigma_{\max} = 1 : 1 : 2$ とした。調整設計においては、3.2.4(7)に示した MIZ-1 号孔での水圧破碎試験の結果を整理して用いた。Fig. 4.1.3-4 に示すように、初期応力は深度 600m 付近を境に傾向が大きく異なっており、深度 600m より浅部では上述の正馬様用地の月吉断層上盤側と同様に最小水平主応力 $\sigma_{\min}$ は推定土被り圧 σ_v と同程度である一方、最大主応力 $\sigma_{\max}$ は最小主応力 $\sigma_{\min}$ の平均約 1.7 倍程度である。これに対して、深度 600m 以深では最大主応力 $\sigma_{\max}$ が推定土被り圧 σ_v と同程度となるのに対して、最小主応力 $\sigma_{\min}$ は最大主応力 $\sigma_{\max}$ の平均約 65%程度である。このような傾向を考慮して、調整設計において用いた初期応力は、深度 600m 以浅と以深に分け、かつそれぞれの試験値により直線回帰して得られる各深度の値を用いた。検討に用いた初期応力を Table 4.1.3-3 に示す。

3) 支保工物性値

設計に用いる支保工の物性値を Table 4.1.3-4 に示す。このうち、吹付けコンクリートと覆工コンクリートの弾性係数については、式 (4.1.3-1)、(4.1.3-2)¹⁰⁾により、覆工コンクリート打設完了から次ステップのズリ搬出が完了し型枠脱型までのコンクリート養生時間を積算基準より約 20 時間と想定し、材齢 1 日として検討を進めた。

$$f'_c(t) = \frac{t}{a + bt} d(i) f'_{ck} \quad (4.1.3-1)$$

$$E_e(t) = \Phi(t) \times 4.7 \times 10^3 \times \sqrt{f'_c(t)} \quad (4.1.3-2)$$

ここに、 $f'_c(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートの圧縮強度 $[\text{N mm}^{-2}]$

f'_{ck} : コンクリートの設計基準強度 $[\text{N mm}^{-2}]$

t : 材齢 $[\text{日}]$

i : 設計基準強度の基準材齢 $[\text{日}]$ 、 $i=28$

a, b : セメントの種類による定数。早強セメントの場合、 $a=2.9$ 、 $b=0.97$

d : 材齢 28 日に対する材齢 91 日の強度増加率。早強セメントの場合、 $d(28)=1.07$

$E_c(t)$: 材齢 t 日における有効ヤング係数 $[\text{N mm}^{-2}]$

$\Phi(t)$: 温度上昇時におけるクリープの影響が大きいことによるヤング係数の補正係数、材齢 3 日まで $=0.73$

4) 応力解放率

立坑は、1 発破当たり 1.3m の掘削を 2 回行って 2.6m を素掘り掘削した後に、覆工コンクリートを打設するショートステップ工法を採用する計画であり、毎回の掘削ごとに支保を設置する通常の NATM 工法による掘削に比べて掘削後の支保の導入が遅れる。そこで、数値解析における支保導入時の応力解放率は通常の NATM 工法での採用値（60%程度が多い）より大きな 80%と設定した。なお、別途実施した掘削過程を模擬した軸対称解析結果より、支保導入時の応力解放率 80%はほぼ妥当と判断された。

なお、水平坑道は NATM 工法を採用するため、応力解放率は通常と同様に 60%と設定した。

(3) 研究坑道の力学的安定性の検討方法

研究坑道の力学的安定性の検討については、前述した解析用の物性値を用いて、Fig. 4.1.3-5 に示す検討フローにより、二次元及び三次元有限要素解析により実施した。このうち、研究坑道の標準断面に相当し、後述する接続・交差の影響を受けない一般部に関しては、二次元弾塑性有限要素解析により研究坑道及び支保工の安定性を検討した。一方、立坑と水平坑道、若しくは水平坑道同士が接続・交差する箇所は三次元的な挙動を考慮する必要があり、二次元的な挙動が支配的な一般部よりも安定性が低下するものと想定される。そこで、二次元解析と三次元解析を組み合わせることで安定性を検討することとした。各検討部位に対する具体的な検討方法を以下に示す。なお、研究坑道掘削による研究坑道周辺岩盤の安定性評価については、数値解析により求められた研究坑道周辺岩盤の最大せん断ひずみ（ $\gamma_{\max}$ ）を、Table 4.1.3-1 及び Table 4.1.3-2 に示す限界せん断ひずみ（ γ_0 ）と対比することにより行った。

1) 立坑一般部

立坑一般部はショートステップ工法で施工を行うため、覆工コンクリートを永久構造物として扱うものとし、初期応力を考慮した水平断面において、二次元弾塑性解析により覆工に発生する応力を求め、それを許容応力度（ $f'_{ck}/4$ ）で評価した。

2) 水平坑道一般部

水平坑道一般部は NATM 工法で施工を行うため、NATM 工法で用いるそれぞれの支保部材を永久構造物として扱うものとし、初期応力を考慮した鉛直断面において、二次元弾塑性解析によりそれぞれの支保部材に発生する応力を求め、それを許容応力度で評価した。

3) 立坑と水平坑道の接続・交差部

立坑と水平坑道の接続・交差部は、NATM 工法で施工を行うものとして検討を行った。接続部の立坑及び水平坑道は、NATM 工法で一次支保を行いながら施工を進め、最後に二次覆工コンクリートを打設する。そこで、代表箇所において三次元弾性有限要素解析を行い、その解析結果を二次元弾性解析による同一深度の一般部の立坑及び水平坑道の結果により正規化して「影響度」を求め、これを各深度の一般部の立坑と水平坑道の二次元弾塑性解析結果に乗じることで、研究

坑道の安定性の検討を行った。ここで、一次支保工が許容応力度の範囲内であれば、二次覆工に荷重がかからないものとする。一方、一次支保工の吹付けコンクリート応力が許容応力度 ($f'_{ck}/4$) を超過した場合には、一次支保を仮設部材の短期許容応力度 ($f'_{ck}/1.3$) で検討し、二次覆工は一次支保工が降伏した場合の応力増分を考慮して検討した。

4)研究坑道の断面形状及び支保パターン

研究坑道の力学的安定性に関する検討位置については、縦断図を Fig. 4.1.3-6 に、平面図を Fig. 4.1.3-7 に示す。

支保工の安定性に関する解析には支保部材を設定する必要がある。ここでは、立坑に関してはいくつかの施工実績を参考に、水平坑道に関しては日本鉄道建設公団⁶⁾及び日本道路公団⁷⁾で示されている標準支保パターンを参考に暫定支保パターンを仮設定し、この暫定支保パターンに基づいて解析を実施して最適な支保パターンを決定した。解析に用いた暫定支保パターンのうち、立坑一般部の暫定設計支保パターンを Table 4.1.3-5 に示す。

(4)研究坑道の力学的安定性の検討結果

1)一般部

実施設計における立坑と水平坑道の接続の影響を考慮しない一般部の検討結果の概要を Fig. 4.1.3-8 に示す。なお、本検討における断面位置は、Fig. 4.1.3-7 における水平坑道の平面図での断面表示 (例えば A-A) に相当する。本図は、立坑深度ごとの立坑と水平坑道の解析結果のうち、岩盤に発生するひずみ量又は支保部材に発生する応力を、前述した岩盤の限界ひずみ又は支保部材の許容応力度と比較した結果を示したものである。

また、調整設計においては、花崗岩部を対象に、立坑については深度 200～1,000m (200m ごと)、水平坑道については深度 200～500m (100m ごと) に、深度と岩盤等級の組合せにより検討を行った。なお、採用した岩盤等級については、支保パターンと関連づけて、立坑では C_M 級と C_L 級の 2 種類、水平坑道では B 級、 C_M 級、 C_L 級の 3 種類である。また、水平坑道の検討断面については、今後予備ステージの断面にオプションを持つことを考慮し、通常の予備ステージ断面 (3.0m×3.0m) のほかに、4.0m×4.0m、5.0m×5.0m、8.0m×6.5m の合計 4 種類について検討した。実施設計と同様に岩盤に発生するひずみ量又は支保部材に発生する応力について、代表的な例として立坑については主立坑の検討結果を Fig. 4.1.3-9 に、水平坑道については 3.0m 坑道の検討結果を Fig. 4.1.3-10 に示す。

①立坑

立坑の設計において、覆工コンクリートは普通コンクリート (設計基準強度 $f'_{ck}=24$ MPa) を標準とし、許容応力度を超えた場合は高強度コンクリート (設計基準強度 $f'_{ck}=40$ MPa) を用いることとして検討を行った。

実施設計における検討の結果、次に示す深度については、岩盤の最大せん断ひずみが限界せん断ひずみを上回ることが予想されるため、4.1.4 に示す計測・観察により研究坑道の壁面の安定性を監視しながら施工を進める情報化施工による対応が必要であると評価された。

- ・ 深度 63.2～175.2m
- ・ 深度 826.2～1,025.0m

一方、調整設計における検討の結果、 C_L 級岩盤の次に示す深度については、岩盤の最大せん断ひずみが限界せん断ひずみを上回ることが予想されるため、4.1.4 に示す計測・観察により研究坑道の壁面の安定性を監視しながら施工を進める情報化施工による対応が必要であると評価された。

- ・ 深度 450～1,000m

②水平坑道

水平坑道の設計において、吹付けコンクリートは普通吹付けコンクリート (設計基準強度 f'_{ck}

=18MPa)を標準とし、許容応力度を超えた場合は高強度吹付けコンクリート ($f'_{ck}=36\text{MPa}$)を用いて検討を行った。

実施設計における検討の結果、次に示す深度については、岩盤の最大せん断ひずみが限界せん断ひずみを上回ることが予想されるため、4.1.4に示す計測・観察により研究坑道の壁面の安定性を監視しながら施工を進める情報化施工（フィードバック技術）による対応が必要であると評価された。

- ・深度 100m
- ・深度 900m、970m
- ・深度 1,000m

一方、調整設計における検討結果では、各岩級別に次のような結果となった。

- ・ B 級及び C_M 級岩盤ではロックボルト、吹付けコンクリート共に許容値を下回り、支保の安定性を確保することができる。ただし、450m 以深で岩盤のせん断ひずみが限界せん断ひずみを上回ることが予想されるため、前述の情報化施工による対応が必要である。
- ・ C_L 級岩盤では岩盤のせん断ひずみは 200m 以深、鋼製支保工応力は 260m 以深、ロックボルト軸力は 380m 以深、吹付けコンクリート応力は 460m 以深で許容値を上回る結果となる。これに対して支保の安定性を確保するために、支保工のピッチと厚さなどを調整した結果、深度 300m ではピッチを 100cm から 90cm に縮めることで、深度 400m では支保厚を 10cm から 12.5cm (H125 を使用) に増し、ピッチを 85cm に縮めることで、深度 500m では支保厚を 15cm (H150) に増し、ピッチを 80cm に縮めることで許容値を満足することができる結果となる。しかしながら、岩盤の最大せん断ひずみが限界せん断ひずみを超過することが予想されるため、前述の情報化施工による対応が必要である。

2) 接続・交差部

立坑と水平坑道、若しくは水平坑道同士が交差する接続・交差部では、前述のように一般部よりも安定性が懸念される。接続・交差部は NATM 工法で施工するものとし、三次元解析による影響度を二次元弾塑性解析の結果に乗じて評価した。

実施設計における検討の結果、次に示す深度において安定性が懸念された。なお、接続・交差部については、調整設計は実施していない。

- ・深度 100m

一般部と同様に立坑、水平坑道（予備ステージ）において吹付けコンクリート応力が許容応力度 ($f'_{ck}/4$) を超過するものの、短期許容応力度 ($f'_{ck}/1.3$) を下回る。そこで、応力増分を考慮して二次覆工（覆工コンクリート）の応力解析を実施した結果、許容応力度を満足することを確認した。また、この吹付けコンクリートの許容応力超過範囲は接続部から数 m 以内と想定される。しかしながら、岩盤の最大せん断ひずみは限界せん断ひずみを大幅に超過している。また、予備ステージと避難坑道の交差部についても、岩盤の最大せん断ひずみ及び吹付け応力共に限界せん断ひずみ、許容応力を超過している。以上より、前述の情報化施工による厳重な対応が必要である。

- ・深度 900m、970m、1,000m

立坑において吹付け応力が許容応力度 ($f'_{ck}/4$) を超過するものの、短期許容応力度 ($f'_{ck}/1.3$) を下回る。そこで、二次覆工（覆工コンクリート）の応力を検討したところ、二次覆工が負担する応力はごくわずかと想定され、二次覆工の安定を確認した。しかしながら、岩盤の最大せん断ひずみは限界せん断ひずみを超過していることより、前述の情報化施工による厳重な対応が必要である。

(5)研究坑道の安定性・支保安定性の検討に関するまとめ

研究坑道の設計のうち、研究坑道の安定性・支保安定性の検討については、実施設計（ステップ0に相当）と調整設計（ステップ3に相当）の2段階で進めることとした。前述のように、瑞浪超深地層研究所のような研究坑道の設計は、通常は研究所用地周辺の地質環境条件が明らかになった段階から進めることが望ましい。ここでは、主に検討の対象としている結晶質岩（花崗岩）について、正馬様用地での研究成果を活用することができたため、設計における知見を得ることを目的に、第1段階の調査がほとんど進んでいないステップ0の段階での実施設計と、調査がある程度進んだステップ3の段階で調整設計を行ったものである。

研究坑道の設計のうち、実施設計（ステップ0）から調整設計（ステップ3）への移行に伴う検討条件の変化については、次のようにまとめられる。岩盤物性と初期応力については、ステップ0では既得情報に基づいて設定した情報を、ステップ3では研究所用地内で実施された MIZ-1 号孔で得られた情報により岩盤物性や初期応力などの見直しを行い、検討に反映した。一方、岩盤等級については、研究所用地の地質構造が非常に複雑であることが調査を進めるにしたがって明らかになってきたことから、実施設計で行ったように深度ごとに岩盤等級を確定して検討を行うことは、不確実性を内在し、追加検討を余儀なくされるものと判断された。そこで、調整設計では岩盤等級（≒支保パターン）をパラメータとして深度ごとに検討を行うことにより、支保パターン毎の深度への適用性を評価する内容とし、最終的には掘削時に岩盤等級を評価して支保パターンを選択することができるようにした。

今後、このような研究坑道の設計に当たっては、今回の事例から次のような点に留意する必要がある。

- ・ 地質環境条件（岩盤物性、初期応力など）は、できるだけ研究坑道予定位置の近傍で得られたデータに基づくことを基本とし、そのデータが適用できる条件（断層の上盤側・下盤側などの地質構造、岩盤等級など）を明確にしておくこと。
- ・ 岩盤等級（≒支保パターン）を確定情報とすると、実際の掘削時に設計時の想定と相違する場合に追加検討が必要となる可能性がある。また、特に基盤岩の上に厚い被覆層がある場合には断層構造などが隠れている場合もあるため、上記の傾向がより一層強まる可能性が高い。このため、研究坑道の安定性・支保安定性の検討に当たっては、岩盤等級はパラメータとして扱う方がよい。
- ・ このような設計の不確実性を減じるためにも、研究坑道掘削位置、あるいはその近傍におけるボーリング調査が望まれる。

4.1.4 計測結果の設計・施工計画へのフィードバック技術の検討

第2段階において研究坑道の施工中に得られる各種データを用い、設計における地山評価、支保仕様、対策工選定へフィードバックすることは、より適切な設計・施工方法を確立するために不可欠である。特に、施工中に生じる予想外の事象として、当初予測し得なかった地質構造、研究坑道掘削に伴う変形挙動及び地下水挙動の3項目を抽出し、フィードバック技術を用いた支保仕様の変更、対策工とその計測結果の事例を調査・整理した。

地山評価のフローにおいては、研究坑道の壁面地質観察、岩盤変位や支保応力などの計測結果など、研究坑道掘削時に実施される調査項目を含めて、各調査項目のフィードバック解析における位置づけを検討し、Fig. 4.1.4-1 に示すフィードバックフローを作成した。今後、堆積岩部に適用していくと共に、花崗岩部に対応した見直しを実施していく。

地山変形挙動のフィードバック技術については、既存の東濃鉱山第2立坑掘削時に計測された立坑内空変位計測結果を用いて、逆解析により地山の弾性係数と主応力比を求め、その結果を用

いて改めて順解析を実施して、実測値との比較を行った。その結果、南北方向変位が実測値：3.3mm、解析値：3.1mm、東西方向変位が実測値：1.8mm、解析値：0.6mm となり、変位の異方性については不十分ながらも、最大変位量についてはおおむね一致した結果を得ることができた。また、順解析結果の応力分布を用い、粘着力と内部摩擦角を設定することにより局所安全係数（破壊接近度）の分布を求めることができ、塑性領域の分布状況などを評価することが可能であることを確認した。Fig. 4.1.4-2 に局所安全係数解析例（実測値及びより大きな変位（ここでは実測値の 10 倍と仮設定した）が発生した場合）を示す。

立坑湧水量に関するフィードバック技術については、ある区間における湧水量の予測値と実測値との比較により、予測時の透水係数の見直しを行い、この透水係数を用いて以深の掘削区間における湧水量を算定し直すことにより実施する。研究坑道の実施設計においては、正馬様用地において実施された原位置透水試験結果の平均的な値として透水係数 $K=10^{-8} \text{ m sec}^{-1}$ を用いて井戸理論により湧水量を算定し（3.2.1(7) 2参照）、これに従い常時の排水設備を設置し、非常用にもう一系統を設置することにより 2 倍の安全率を確保することとした¹¹⁾。研究坑道掘削時においては、切羽湧水と裏面排水材を通じて集水リングに導水された湧水は、高揚程ポンプにより地上に排水されるが、このうち集水リングの湧水は電磁流量計により、総排水量は排水処理設備において計測される。したがって、常に予測湧水量と実際の湧水量を比較し、フィードバックを繰り返すことにより、適切な排水設備の準備につなげていくことが可能となる。

以上、計測結果の設計・施工計画へのフィードバック技術（情報化施工）については、観察、計測及び解析による地山評価を組合せた具体的なフィードバックフロー図を作成した。また、地質観察については、複数の岩盤分類法を適用して立坑壁面の地質状況进行评估するうえで最適な方法を検討した。

4.1.5 研究坑道における地震時安定性に関する検討

超深地層研究所計画は深度 1,000m を超える計画であるため、通常の地下構造物に比べて極めて大深度で鉛直方向に長大な構造物となる。このため、研究坑道の地震時応答挙動や健全性を評価するうえで、地下深部における地震動特性を適切に評価する必要がある。

ここでは、基本的に第 2 次取りまとめ¹²⁾に示されている研究坑道の耐震安定性評価手法を踏襲した静的解析法である応答震度法による評価に加え、FEM 動的解析を合わせて実施^{13),14)}した。なお、モデル形状や岩盤物性、入力地震動などについては、瑞浪超深地層研究所の実施設計時の条件を反映した。

入力地震動を検討するに当たり、過去の歴史地震、周辺の活断層に加え、本地域は想定新東海地震（東海・東南海地震）の影響域に含まれるため、これを考慮することとした。Fig. 4.1.5-1 にこれらの地震により想定される模擬地震波スペクトルを示す。この中で最も影響が大きいものは屏風山断層を震源とする地震であると評価される。そこで Fig. 4.1.5-2 に示すように模擬地震波スペクトルを包含するように検討用水平地震動のターゲットスペクトルを設定した。これを正弦波合成法により検討した結果、その最大加速度は地表面で 478gal と想定された。

また、一般に耐震設計で用いる上下動の大きさは水平動の 1/2～2/3 であるが、岩盤深部では地表面近傍との増幅環境の違い、斜め入射などの影響により上下動の大きさが水平動と同程度になる場合もある。そこで、岩盤深部で得られた既往の地震記録を用いて、岩盤深部における上下地震動の特性を検討した。既往の地震記録は防災科学技術研究所 KIK-net 観測点のデータを用い、地表面と深度 1,500m で観測されている羽鳥観測点及び岩盤が露出した地表面と深度 615m で観測されている釜石鉾山の記録¹⁵⁾から、一次元波動論により地震基盤面のはぎ取り波（露頭波）を算定することで、水平動と上下動のスペクトル比を比較した。その結果を Fig. 4.1.5-2 に示す。両

観測点での地下深部における上下／水平スペクトル比はそれぞれ平均 0.97、0.88 程度となり、地表面での平均 0.66 より上下動の比率が高い。そこで、釜石鉱山での観測記録を参考に、地表面での検討用上下方向地震動のターゲットスペクトルを水平地震動の 2/3 倍（最大加速度 350gal）とした。その結果、地下 1,500m での上下／水平スペクトル比は 0.86 となり、地表の 0.66 に比べて大きく、羽鳥（平均 0.97）、釜石（平均 0.88）の観測記録と同程度となった。

このように作成した水平及び鉛直地震動を用いて、FEM 動的解析により瑞浪超深地層研究所の主要構造物である立坑の覆工コンクリートを対象として健全性評価を実施し、以下に示す結果を得た。

- ・ 水平地震動により立坑覆工コンクリートには面内せん断力が卓越して発生するものの、水平方向の圧縮応力についてはその地震時増分は小さい。その結果、支保安定性の検討時に実施した FEM 非線形解析により得られた掘削時の発生応力度に地震時増分応力を足し合わせた立坑覆工コンクリートの発生応力度は破壊強度に比べて十分に小さいと評価された。
- ・ 鉛直地震動により、覆工コンクリートには水平方向及び鉛直方向の軸力が卓越して発生する。しかしながら、その地震時増分応力度は水平地震動による増分に比べて半分程度であり、掘削時の応力に足し合わせた覆工コンクリートの発生応力度は、破壊強度に比べて十分に小さいと評価された。

以上のように、耐震設計については、瑞浪地域の特徴を考慮して、歴史地震、周辺の活断層、東海地震及び東南海地震を震源と想定して水平地震動を作成し、これに対して第 2 次取りまとめの手法を踏襲して立坑の覆工コンクリートの許容応力度を照査した。更に、大深度立坑の特徴を考慮して鉛直地震動についても検討を行い、耐震性が十分であることを確認した。

4.1.6 突発事象に対する掘削・施工対策技術の検討

立坑工事における突発事象の中で、予期していない大量の湧水、すなわち突発湧水は避けなければならないトラブルの一つである。突発湧水に対して、まず基本となる地質条件を前提とした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の立案、グラウチング実施基準などの計画立案、更にそのほかの対策技術の検討を行った。Fig. 4.1.6-1 に基本的な考え方を示す。突発湧水に対する対策技術としては、立坑では湧水は地上へ排水しなければならないこと、及び周辺環境への影響に配慮するという本計画の理念を考慮して、グラウチングによる止水を基本とし、その計画を立案した。グラウチングのうち、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：事後の注入）には期間と予算が多くなることが想定されるため、プレグラウト（事前の注入）が基本的な対策工となる。

前方予測技術については、直接的な先行ボーリングと間接的な物理探査手法に大別される。前者の先行ボーリングは、掘削に先行して切羽前方をボーリングで直接調査するものであり、突発湧水の状況を確実に特定できる。後者の物理探査手法は、透水層や遮水層となりえるある程度の幅で分布する亀裂や破碎帯部の物性が健全部と異なる性質を利用するもので、反射法弾性波探査法、電気・電磁探査法などにより物性変化領域を検出することを検討している。

突発湧水に対する止水工法としての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、湧水量及び排水設備（ポンプ能力など）を勘案したうえで、通常の排水工法からの切り替え基準、グラウチング実施判定フロー、注入圧力基準、注入完了基準などを立案する必要がある。Fig. 4.1.6-2 にグラウチングの実施フローを示す。

例えば、地質環境の調査などにより亀裂の分布が予測され、前方予測により湧水箇所が想定された場合に実施するプレグラウトについては、既往の事例や指針などを参照して、注入孔は掘削径の 3 倍の範囲を 1.5m ピッチで 3 列の配置とする計画とした。今後、地質構造モデルなどに基

づいて研究坑道における亀裂出現位置などを予測するなど、詳細な検討を実施していく予定である。

また、このほかの突発事象として、深部硬岩領域で発生が懸念される山はね現象と、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¹⁶⁾を行うと共に、その発生の可能性や対策工法などの検討を行った。

4.1.7 安全対策に関する検討

(1)通気網解析に基づく防災コンセプトの検討

1)通気網解析

研究坑道において重大な災害につながる可能性の高い火災については、発生した場合の避難路と避難時間の確保が最も重要である。瑞浪超深地層研究所においては、その深度などから地上への十分な退避時間を確保できない場合があり得ると判断し、防災の基本コンセプトとして火災発生時は地表への退避のほか坑内の避難所へ退避することとして、安全に避難できる位置（安全区画）の選定、避難時間の確保、避難所のスペース、形状、具備すべき条件について検討した。これらの検討のために、鉱山分野において適用実績の多い通気網解析を用いて、研究坑道の三次元レイアウトと通気状況に基づいた研究坑道の環境を予測すると共に、火災時を想定した解析を行った¹⁷⁾。通気網解析とは、地下施設の設計や日常の通気管理、災害時の通気制御にとって重要な通気網（地下空間を構成する各坑道や切羽、また風管や漏風回路などの集合）を流れる風量や坑内温湿度あるいは火災時のガスや煙の挙動を把握するために行われるコンピュータ解析のことである。通気網解析を適用した理由は、土木分野におけるトンネル掘削と違い、研究坑道は立坑及び水平坑道が複数存在し、かつ接続・交差しているため、単純な理論式に基づく風量計算では対応できないためである。

通気網解析を用いた火災時解析による火災ガスの挙動を予測した結果の概要を Table 4.1.7-1 に示す。ここでは、施工段階を細分化して、火元を変えて火災が発生した際の火災ガスの状況を解析した。この結果に基づき、避難所の位置や仕様を検討し、各水平坑道に避難所を設置するレイアウトとすると共に、換気設備や消火設備を設計した。

研究坑道完成時における通気システムの概要を Fig. 4.1.7-1 に示す。深度 500m に立坑が到達した時点で、局部換気ファンと風管による換気システムから立坑全体を使用した坑道換気システムに変更する。以深の立坑掘削時には深度 500m に局部換気ファンを設置し、風管を延長しながら換気する。最終深度に到達した時点でこれらを撤去し、立坑全体を使用した坑道換気システムとする。中間ステージや最深ステージの換気は局部換気ファンと風管により行うこととした。

2)坑内統合管理システム

研究所においては、掘削工事や坑道内での調査研究に伴い、工事関係者のほかに研究者や見学者など多数の入坑が想定される。このため、火災などの災害発生時に入坑者の安全を確保することに対して通常の工事より配慮が必要である。そこで、研究坑道内の安全対策システムとして、①入出坑管理システム、②坑内環境管理システム、③坑内通信管理システム、④坑内火災監視システムからなるそれぞれが独立したシステムを検討した。これらのシステムは、導入当初においてはそれぞれ独立したシステムであるが、これらを連動させ体系的なシステムとして構築を進める。一例を示すと、研究坑道内のある箇所において火災が発生した場合、坑内火災監視システムにて速やかに火災場所を特定すると共に、坑内通信管理システムにより入坑者に連絡が届く。一方で、その時点における坑内環境管理システムで得られた坑内環境を入力データとした火災時解析が実行され、火災ガスの挙動が予測される。入坑者が火災ガスによる被害を受けないように最適な通気システムが抽出され、風門の開閉や換気システムの運転が制御されると共に、入坑者に

は安全な避難ルートや待避所の位置が指示される。このような坑内統合管理システムの概念を Fig. 4.1.7-2 に示すと共に、以下に解説する。

このシステムは以下の項目に関連した個別のシステムを連動させている。

- ・固定データ管理システム（研究坑道レイアウトや位置座標）
- ・変動データ管理システム（研究坑道内に設置するセンサー類のデータ）
- ・情報処理・解析システム（異常検知システムや火災影響範囲解析システムなど）

これらを連動させて、表示や制御・指示機能を有するシステムを構築し、坑内状況を常時管理すると共に、災害の発生を未然に防ぐ一方、万が一災害が発生した場合にも災害の拡大を防ぎ、入坑者の安全を確保することが可能となる。これら四つのシステムに通気網解析を用いた火災ガス挙動予測のための火災時解析と温度・湿度・風速などの分布予測のための熱環境解析を連動させた専門プログラムを作成すると共に、避難ルート解析を含む GIS（Geographical Information System: 地理情報システム）情報管理アプリケーションを介して管理者の判断を補佐するシステムを試構築した。このシステムでは、入坑者の位置情報及び坑内外の環境データは常にモニタリングにより把握されている。一方で、熱環境解析を同時に実行して坑内環境データとの比較が行われ、異常個所が抽出された場合には火災時解析が行われ、これによって火災による危険範囲と退避ルートが特定される。これらの解析結果や入力データは GIS 情報管理アプリケーションに入力され、データベースに蓄積されると共に、ユーザーインターフェイスを通じて管理者に情報が伝達される。

このようにして構築したシステムを用いて東濃鉱山をモデルとして、坑内で取得された実測データにより、デモンストレーションを行った。この結果、東濃鉱山の坑道レイアウトに基づいた各種センサーのモニタリングと坑内環境解析、入坑者位置特定、及び異常時退避ルート表示など、一連の構築したシステムが正常に動作し、かつその有効性が確認された。Fig. 4.1.7-3 にある条件下での東濃鉱山での避難ルート表示例を示す。今後は、瑞浪超深地層研究所の研究坑道をモデル化して坑内情報管理システムを構築すると共に、立坑掘削で取得されるデータを用いて課題点などの改善を行っていく。

(2) リスクマネジメント

瑞浪超深地層研究所は、2 本の深度 1,000m 級の立坑と複数深度での水平坑道群で構成され、世界的にも有数の大深度の研究坑道となる。このため、その建設工事は経験の少ないものとならざるをえず、様々なリスクが内在されており、そのリスクは建設工事に重大な影響を及ぼす可能性がある。このようなリスクをあらかじめ抽出・評価し、低減などの方策を検討、実施することがリスクマネジメントと呼ばれる手法である。この手法は元々は金融分野で発達し、近年工学分野への適用が積極的に図られている。ここでは、研究坑道を掘削する際に生じるおそれのあるリスクに限定して事象（以下、イベントと呼ぶ）抽出を行い、イベント間の相関性評価や統計データ、イベントツリーなどを用いた損失の定量的な評価を行った^{3),18),19)}。

ここでは、施工深度で分けた 4 種類の施工範囲において、専門家へのアンケートなどにより 12 種類のイベントを抽出し、これらを分類・再編した後、工事遅延、工事金額損失及び社会信用損失を評価のパラメータとして定量的評価を行った。Fig. 4.1.7-4 に専門家へのアンケートに基づくリスクの相関関係を示す。抽出された 12 種類のイベントを七つのグループに再編して相関関係を示している。この分類に基づき、リスクの定量的評価の一例として、施工範囲別に想定される各グループの損失日数（イベントの発生により、工事が遅延した日数）を示す（Fig. 4.1.7-5）²⁰⁾。統計データの不足などによりばらつきは大きいものの、全深度で Group5（落下＋機械＋火災）による損失日数が最も多く、500m より浅い位置では Group4（突発湧水）によるリスクがそれより深い深度よりも相対的に大きいなど、深度別及びイベント別の損失日数に関する数値による

比較が可能となった。

最後に、リスクの低減方策について検討を行った。対策の方向性として、事前対策（リスク低減）、通常管理（リスク保有）、保険（リスク転嫁）、事後対策（リスク保有）の四つとして、各イベントについて対策を立案した。例えば、故障した時に工程への影響が大きい設備の改良や交換部品の準備、計測管理・情報化施工・定期点検頻度増加によるリスク兆候の早期把握、対策工法の事前検討などが挙げられる。特に研究坑道における情報化施工は、トンネル工学の分野では NATM 工法の導入に伴い発達してきた施工時のリスク回避策であり、設計条件・設計手法の妥当性検証も含めたリスク保有技術といえる。

以上のような検討の結果、リスクの大きさを定量的に評価することにより、対策の方向性を明確にすることができた。今後、研究坑道掘削中に取得される情報をフィードバックして、本手法の適用性の評価及び手法の高度化を図る予定である。

このように、本プロジェクトを推進するうえで最も重要な安全対策としては、入出坑、環境、通信、火災の各システムと通気網解析を組合せた統合管理システムを構築すると共に、立坑の特徴を考慮したリスクマネジメント手法を活用することにより、リスクを抽出し、安全対策に反映した。

4.1.8 施工計画の検討

(1)全体計画の概要

超深地層研究所計画では、前述したような深地層の研究施設の位置づけに加えて、以下のような瑞浪超深地層研究所の特徴を考慮して、深度 1,000m まで坑道を掘削する予定である。

- ・硬岩系岩盤の処分深度を 1,000m と想定した第 2 次取りまとめで示された地層処分の技術的信頼性を実証する場
- ・通常の土木工事と比較して突発湧水や山はねの対策などの難度が高いいくつかの技術が要求されるという大深度における坑道掘削などの工学技術的な意義
- ・深度 1,000m を超えると建設コストが急増するが、1,000m であれば許容範囲内のコスト増にとどまるという立坑掘削の経済性の特徴

以下に、瑞浪超深地層研究所の建設地点の地形・地質概要及び掘削工事概要を述べる。

(2)研究坑道掘削地点

超深地層研究所計画は、岐阜県瑞浪市明世町山野内の研究所用地に研究坑道を設置する。研究所用地は約 7.8 ha の面積があり、このうち造成した約 1.2 ha の敷地に研究坑道を建設するための地上設備を設置する。

(3)地形・地質概要

研究所用地周辺の地形は標高 200m 程度の丘陵地であり、敷地内を普通河川の狭間川が流れている。研究所用地及び正馬様用地を含む東濃地域の地質は、基盤をなす後期白亜紀の土岐花崗岩を新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）が被覆し、更にそれを固結度の低い新第三紀鮮新世の砂礫層（瀬戸層群）が被覆している。

(4)工程

瑞浪超深地層研究所の研究坑道を用いた調査研究は、原環機構が行う処分事業や国が行う安全規制などの精密調査地区の選定に必要な技術基盤としてその成果が反映されることを想定している。2003(平成 15)年 3 月に研究坑道掘削工事を開始し、2009 年度までに中間的な深度(約 500m)までの掘削を予定しており、その後、最終的な深度の 1,000m までの掘削を行っていく。

(5)施工設備

施工に伴う設備は、坑口設備、掘削設備、周辺設備に分けることができる⁹⁾。地上に設置され

る設備の配置を Fig. 4.1.8-1 に示す。

(6)掘削の進め方

掘削は、Fig. 4.1.8-2 に示すように、造成などの準備工事の後、3 段階に分けて実施することとした。

1)坑口上部工

坑口部基礎コンクリートは岩着（ここでは瑞浪層群中の安定した泥岩）させる直接基礎形式とし、主立坑で深度 9.0m、換気立坑で深度 10.5m を基礎岩着深度とする。敷地が狭小であることから、親杭横矢板・切梁工法により掘削を行い、掘削終了後に基礎コンクリートの打設を行うこととした。

2)坑口下部工

坑口下部工は、立坑一般部を本格的に掘削するためのスcafford（移動足場）などの掘削設備が立坑内に設置できる深さまでの区間である。Scafford の高さと発破待避距離などとの関係から、坑口下部工の深さは主立坑で 42.0m（坑口上部工と合わせて 51.0m）、換気立坑で 35.0m（坑口上部工と合わせて 45.5m）とした。施工方法としては、ここでは安全性、工期及び経済性などの観点から、1 掘進長 1.0m のショートステップ工法を採用した。坑口下部工の掘削終了後、引き続いて地上設備を構築した。

3)一般部掘削

Scafford などの各種設備の構築終了後、これらの設備を用いて本格的な掘削を行う。

掘削のサイクルと 1 回当たりの発破進捗の関係を検討し、安全かつ最も効率の良い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 の覆工コンクリート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。ただし、岩盤状況が悪い場合には、1.3m の発破とズリ搬出終了後に覆工コンクリートを打設する一般的なショートステップ工法に変更する。Table 4.1.8-1 に研究坑道の壁面地質観察など研究のための時間を 1 サイクル当たり 3 時間確保した深度 500m 地点におけるサイクルタイムの例を示す。

立坑掘削においては、深度が深くなるにつれて発破したズリの搬出時間が全体の掘削作業時間に占める割合が大きくなる。このため、効率の良いズリ出し方法として 2 缶のズリキブルを坑内の Scafford で受け替えてキブル搬送時間を短縮する替えキブル方式を深部の掘削に採用することを検討した。

Table 4.1.2-1 Overview of Shafts

		Main Shaft	Ventilation Shaft
Aims		- To reach depth of investigation galleries - To confirm Phase I geological model - To confirm the validity of the support plan	
		Mucking route from galleries to the surface	Ventilation system for shafts and galleries
		Transport route for construction and research equipment	Space for new hoist cage
Depth		1,025 m	1,010 m
Diameter	During excavation	7.3 m	5.3 m
	Final	6.5 m	4.5 m

Table 4.1.2-2 Overview of Galleries

	Main Stage	Middle Stage	Research Galleries	Sub Stage
Aims	Main investigation stage at GL. -1,000 m depth (MIU target depth)	Main investigation stage to understand the geological impact depend on the depth at GL. -500 m (Half depth of MIU target depth)	Measuring station to observe for rock mass behavior around EDZ of Main and Middle Stage	- Connect both shafts - Space for excavation and investigation equipment - Additional investigation galleries for depth dependent studies
Depth	1,000 m	500 m	472m, 528m, 970 m	every 100 m
Length	770 m	770 m	240 m	32 m

Table 4.1.3-1 Rock Properties used in Initial Design

Geology	Rock Class	Unit Weight	Unconfined Compressive Strength	Young's Modulus	Poisson's Ratio	Cohesion	Internal Friction Angle	Critical Strain	Critical Shearing Strain
	[-]	γ_t [kN m ⁻³]	qu [MPa]	E [GPa]	ν [-]	C [MPa]	ϕ [deg]	ε_0 [%]	γ_0 [%]
Granite	B	26.0	116.36	35.6	0.35	18.9	53.9	0.33	0.44
	C _H	26.0	89.74	30.1	0.35	14.6	53.9	0.30	0.40
	C _M	26.0	63.12	24.5	0.35	10.3	53.9	0.26	0.35
Sedimentary Rock	C _L	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

Table 4.1.3-2 Rock Properties used in Revised Design

Geology	Rock Class	Unit Weight	Unconfined Compressive Strength	Young's Modulus	Poisson's Ratio	Cohesion	Internal Friction Angle	Critical Strain	Critical Shearing Strain
	[-]	γ_t [kN m ⁻³]	qu [MPa]	E [GPa]	ν [-]	C [MPa]	ϕ [deg]	ε_0 [%]	γ_0 [%]
Granite	A	26.3	143.00	50.6	0.29	39.7	51.10	0.28	0.36
	B	26.2	151.11	50.3	0.27	39.2	52.53	0.30	0.38
	C _H	26.3	181.30	49.3	0.27	34.3	52.43	0.37	0.47
	C _M	25.9	174.67	50.5	0.18	37.6	49.30	0.35	0.41
	C _L	23.4	71.83	20.9	0.24	25.2	30.10	0.34	0.43

Table 4.1.3-3 Initial Stress Condition used in Revised Design

Geology	Depth [m]	Vertical Stress σ_v [MPa]	Minimum Horizontal Stress σ_h [MPa]	Maximum Horizontal Stress σ_H [MPa]
Granite	200	5.20 (1.00)	5.57 (1.07)	9.39 (1.81)
	400	10.40 (1.00)	11.14 (1.07)	18.78 (1.81)
	600 upper	15.60 (1.00)	16.71 (1.07)	28.17 (1.81)
	600 lower	15.60 (1.00)	11.83 (0.76)	17.21 (1.10)
	800	20.80 (1.00)	13.49 (0.65)	20.51 (0.99)
	1000	26.00 (1.00)	15.16 (0.58)	23.81 (0.92)

Table 4.1.3-4 Properties of Support Materials used in Design

Support Member	Design Strength f_{ck} [MPa]	Allowable Compressive Stress		Young's Modulus E [GPa]	Poisson's Ratio ν [-]
		Short Term $f_{ck}/1.3$ [MPa]	Long Term $f_{ck}/4$ [MPa]		
Concrete Liner	24	-	6.0	8.81	0.20
	40	-	10.0	11.4	0.20
Shotcrete	18	13.8	4.5	3.4	0.20
	36	27.7	9.0	6.0	0.20

Support Member	Material	Allowable Tensile Stress [MPa]	Design Strength of Rock Bolt [kN]	Young's Modulus E [GPa]	Poisson's Ratio ν [-]
Steel Support	SS400	160	-	210	0.30
Rock Bolt	SD345	-	120	210	-

Table 4.1.3-5 Tentative Support System proposed for Main Part of Shaft

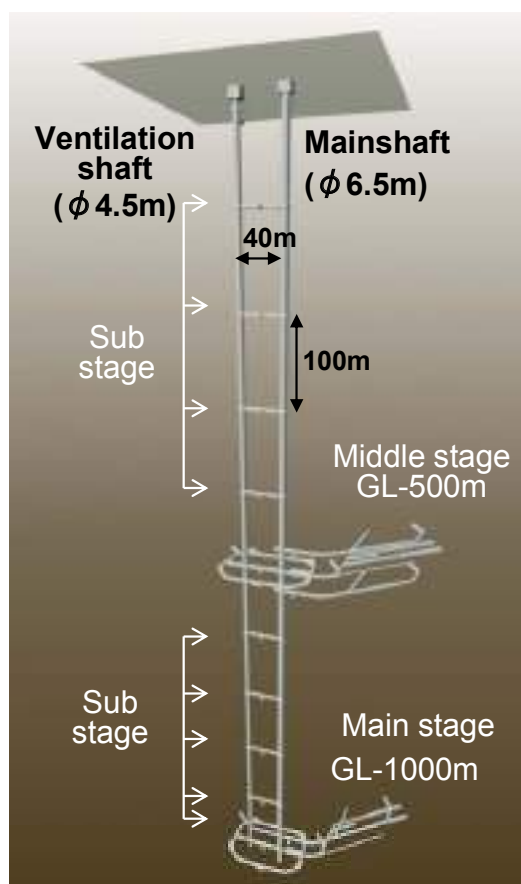
Geology	Rock Class	Concrete Liner Thickness	Steel Support
Sedimentary Rock	D	400 mm	H-125
	C _L		
Granite	C _M		-
	C _H		
	B		

Table 4.1.7-1 Ventilation Network Analysis in case of Fire

Location of Fire	State of fire condition	Means of escape
Main Stage and Middle Stage	Maintain operational airflow conditions. Smoke-laden air will exhaust via Vent Shaft.	Main Shaft and Middle Stage will be safe area. It is possible to escape from the Main Shaft.
Lower Part of Main and Ventilation Shaft	Smoke-laden air will exhaust via Vent Shaft. Some back-flow of smoke laden air into sub-stage and into whole URL may occur. Incremental increase in heat and gas concentration is <u>expected to be low.</u>	Recommended option is to wait in a refuge station but escape via Main Shaft using O2 mask will be Possible.
Upper part of Main Shaft	Smoke laden air will exhaust through the Vent Shaft via the Middle Stage. Gas flow into the whole URL will take considerable time.	Same as above.

Table 4.1.8-1 Cycle Time for Shaft Sinking (eg., Main Shaft, granite, rock class B, GL. -500 m)

Activity	1st Day																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Drill & Blast	1.8													1.3m										
Mucking																								
Liner																								
Research (Shaft Wall Observation)																								
Equipment Maintenance																								
Manpower Change																								
1 shaft sinking cycle																								



Layout of shafts and galleries

- Maximum depth : 1,025m
- Main stage : depth of 1,000m
- Middle stage : depth of 500m
- Sub stages : every 100m

Specification of shafts

- Access : Shaft
- The number of access shaft : 2 shafts
- The interval of access shaft : 40m
- Shapes : Circle
- Inner diameter :
 - Main shaft : $\Phi 6.5\text{m}$
 - Ventilation shaft : $\Phi 4.5\text{m}$

Fig. 4.1.2-1 Conceptual Design of Mizunami Underground Research Laboratory

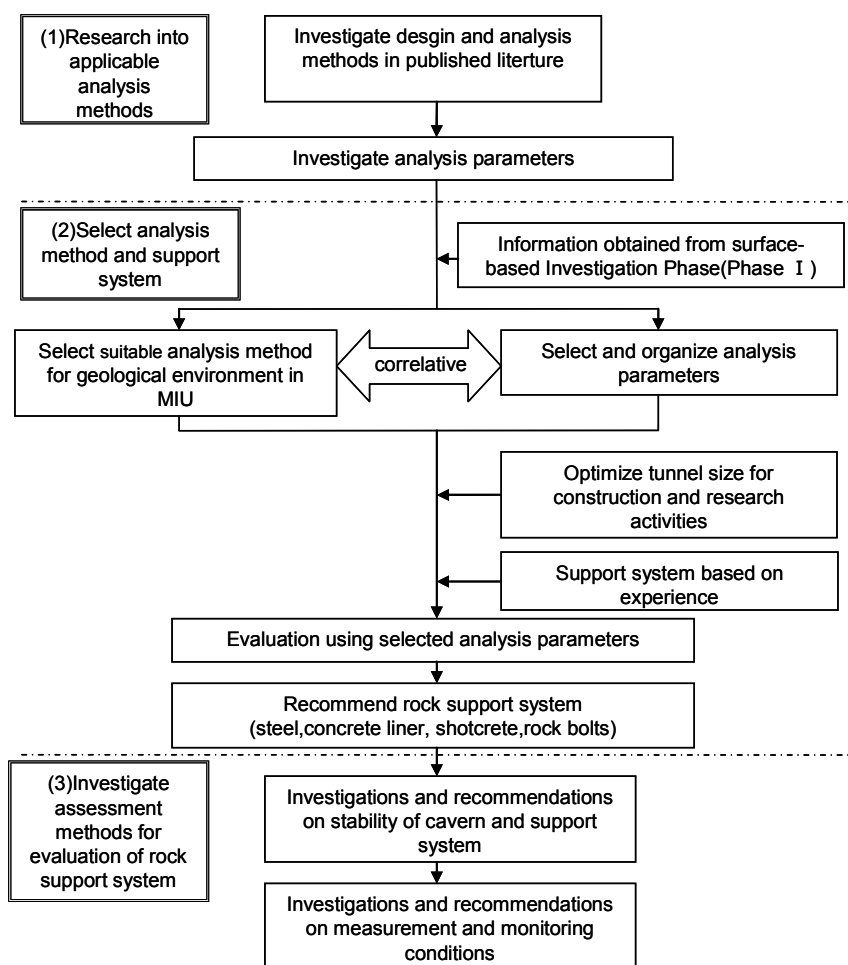


Fig. 4.1.3-1 Flow Chart for Assessment of Rock Support System Stability

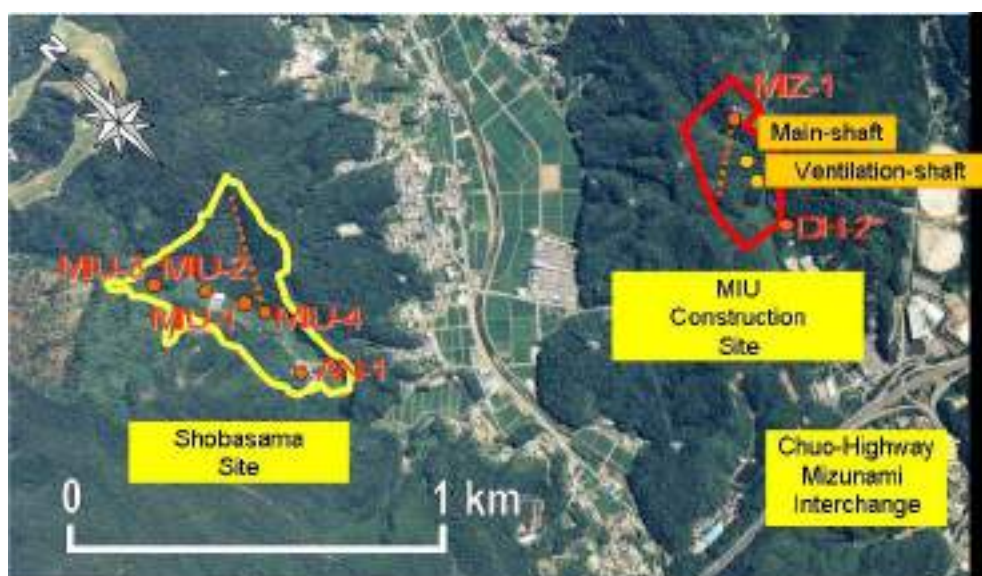


Fig. 4.1.3-2 Location of Boreholes around Mizunami Underground Research Laboratory Site

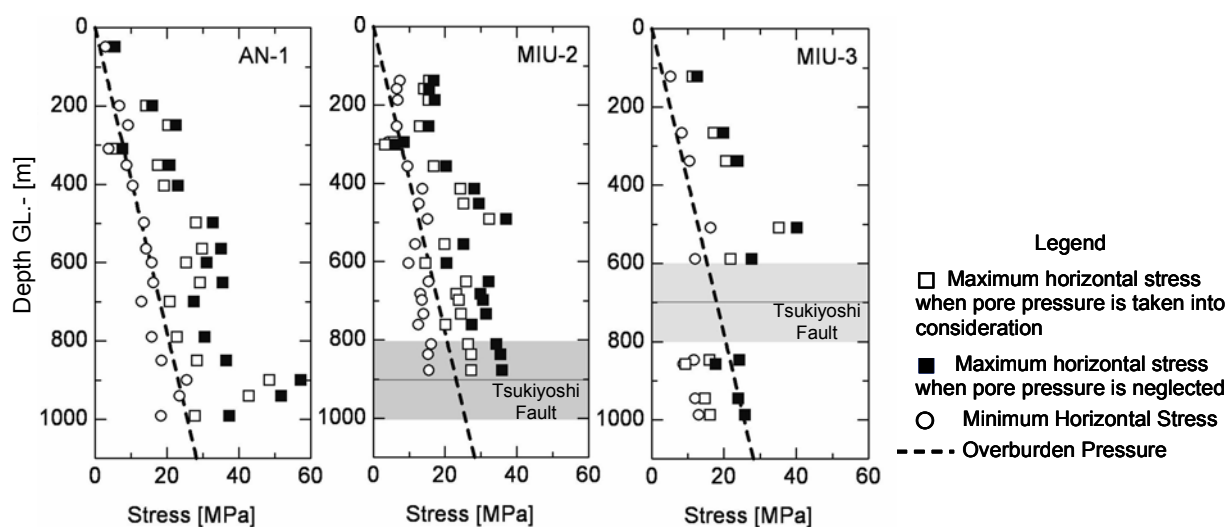


Fig. 4.1.3-3 In Situ Stress Measurements (Shobasama site)

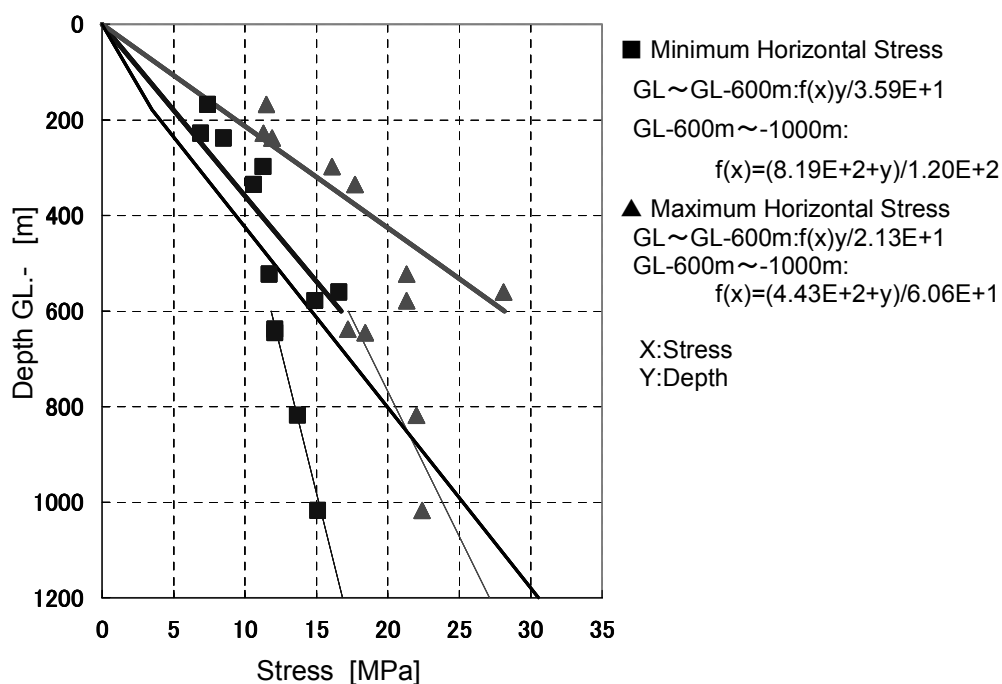


Fig. 4.1.3-4 In Situ Stress Magnitudes used for Revised Design based on MIZ-1 Measurements

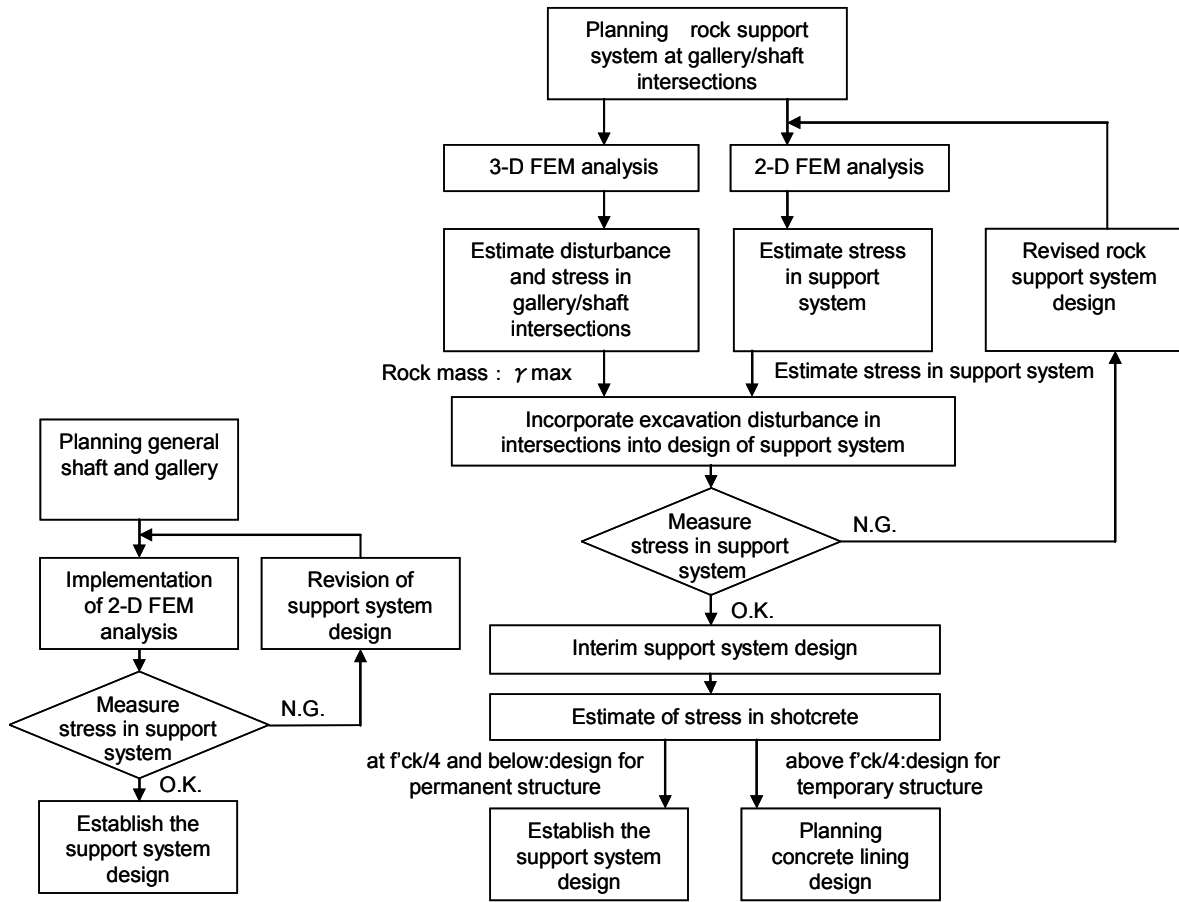


Fig. 4.1.3-5 Flow Chart -Investigation of Gallery Stability

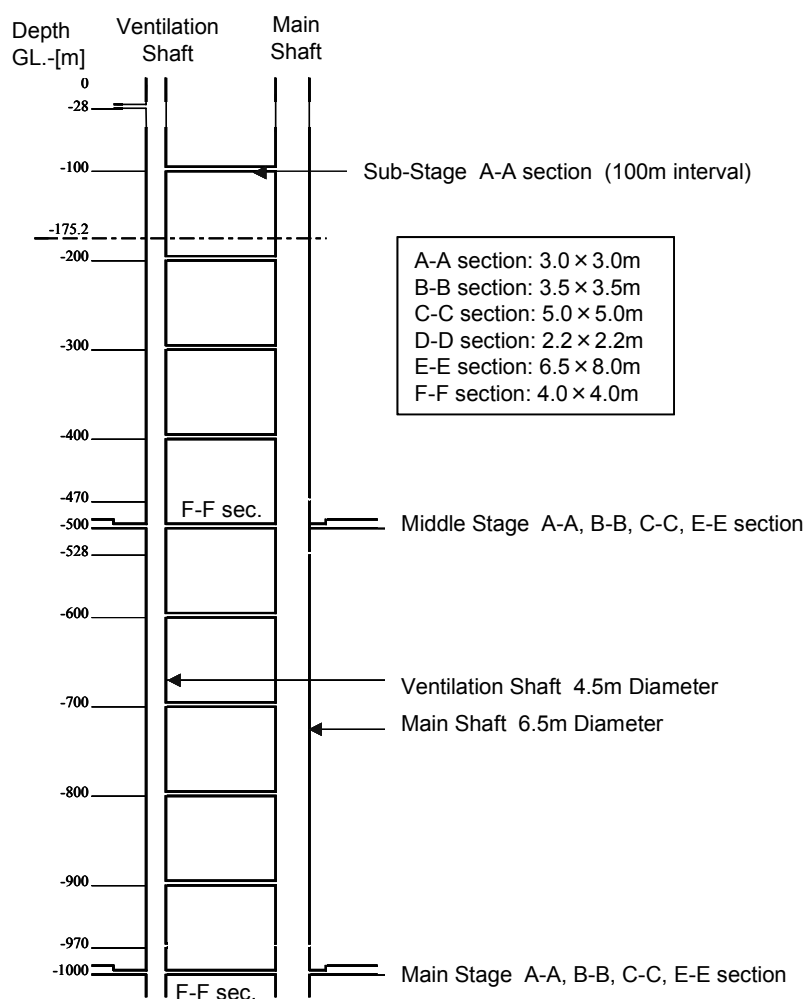


Fig. 4.1.3-6 Investigation Sections for Mechanical Stability in Galleries(vertical X-section)

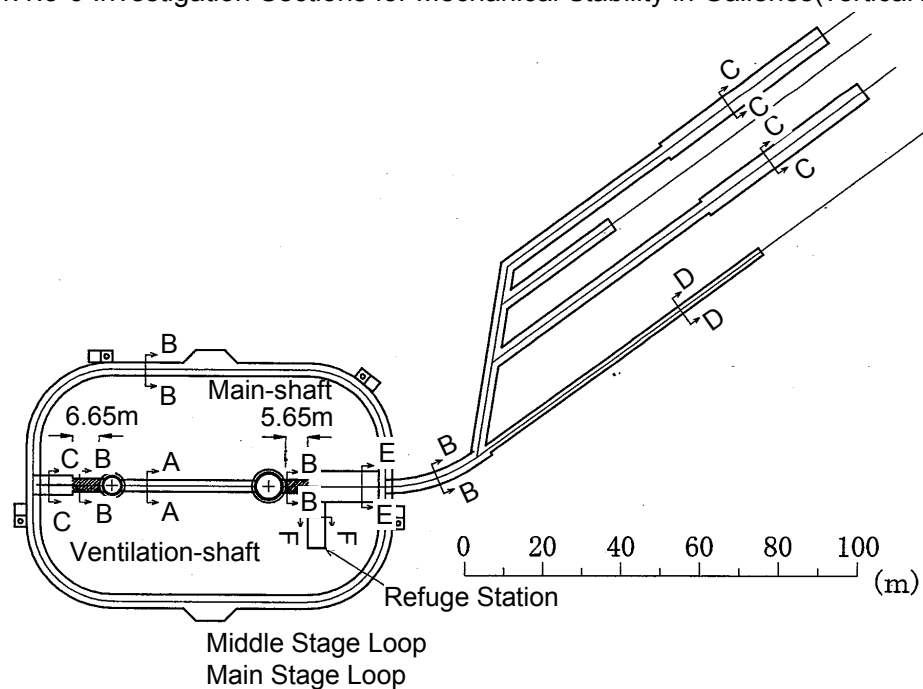


Fig. 4.1.3-7 Investigation Section for Mechanical Stability in Galleries

Ventilation Shaft				Main Shaft			Galleries							
Rock Class	Depth GL.- [m]	Stress Level of Support system *1				Depth GL.- [m]	Rock Class	Depth GL.- [m]	Stress Level of Support system *1					
		f _{ck} 24	f _{ck} 40	f _{ck} 40	f _{ck} 24				A-A	B-B	F-F	C-C	E-E	B-B wide
	0					0		0						
	10.5					9.0								
C L	63.2	I			I	63.2	C L	28	I					
D	100	II	II	II	II	85	D	100	II					
C L	124.2	II	II	II	II	124.2	C L							
	160	II	II	II	II	144								
	175.2	III-b			III-b	175.2								
B	234.2	I			I	234.2	B	200	I					
CH	247.2	I			I	247.2	CH							
CM	262.2	I			I	262.2	CM							
CH	309.2	I			I	309.2	CH	300	I					
CM	359.2	I			I	359.2	CM							
CH	435.2	I			I	435.2	CH	400	I					
E	466.2					466.2	E							
CM	482.2	I			I	466.2	CM	470.0	I					
B		I			I	482.2	B	500	I	I	I	I	I	I
B	576.2	I			I	576.2	B	528.0	I					
CH	598.5	I			I	598.5	CH	600	I					
B	826.2	I			I	826.2	B	700	I					
B		I			I			800	I					
CH	911	I			I	899	CH	900	II					
CH	972.5	II			II	972.5	CH	970	II					
	1010.0					1025.0	CH	1000	II	II	II	II	II	I

Fig. 4.1.3-8 Summary of Requirements for Shafts and Galleries in the Initial Design

※1 Stress Level of Support

- I : Rock Mass-below Critical Shear Strain,
Support System Members-below Allowable Stress
- II : Rock Mass-above Critical Shear Strain,
Support System Members-below Allowable Stress
- III-a : Rock Mass-below Critical Shear Strain,
Support System Members-above Allowable Stress
- III-b : Rock Mass-above Critical Shear Strain,
Support System Members-above Allowable Stress

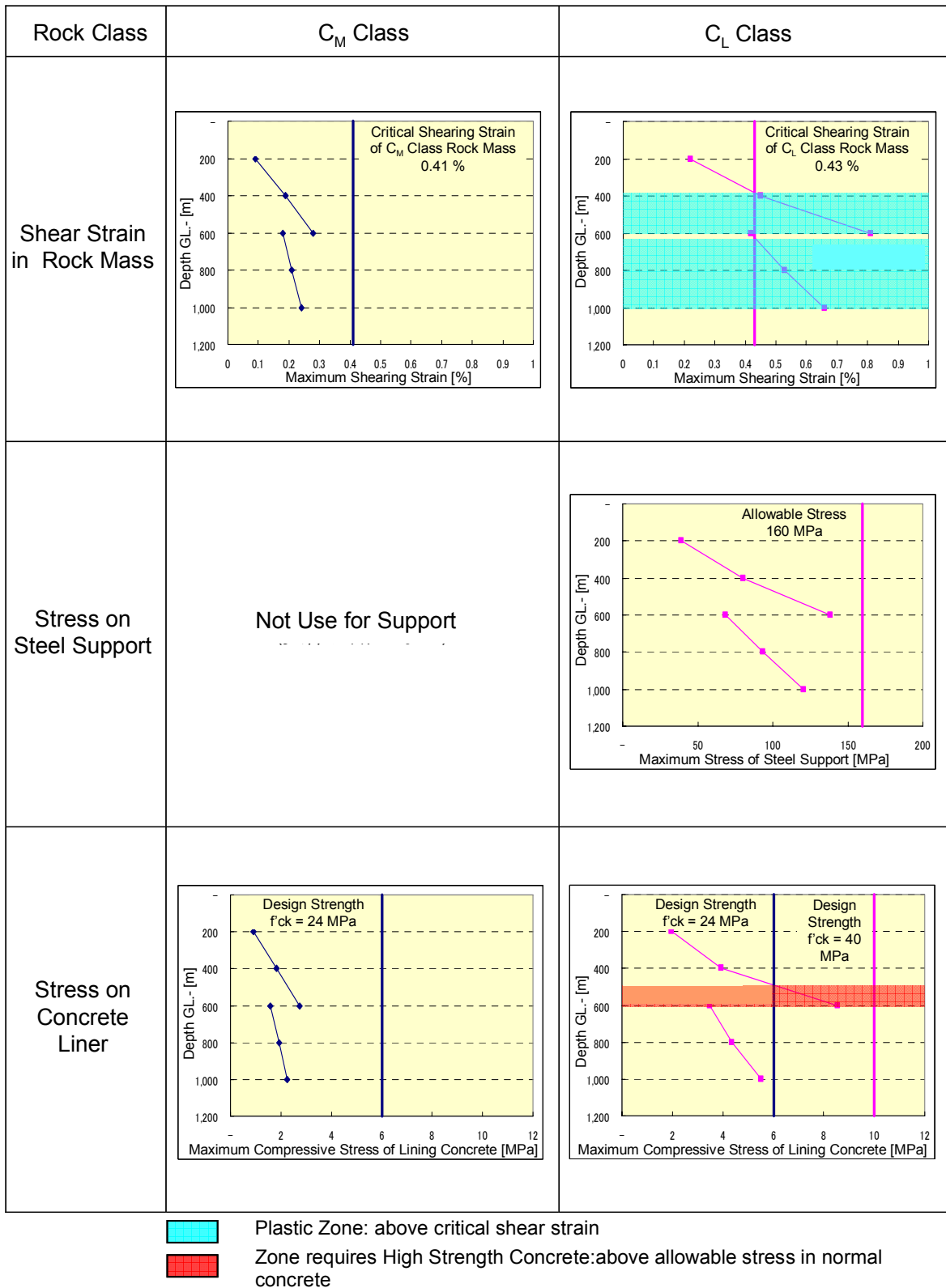


Fig. 4.1.3-9 Revised Stress and Strain in Typical Sections of the Shafts based on Site Specific Data

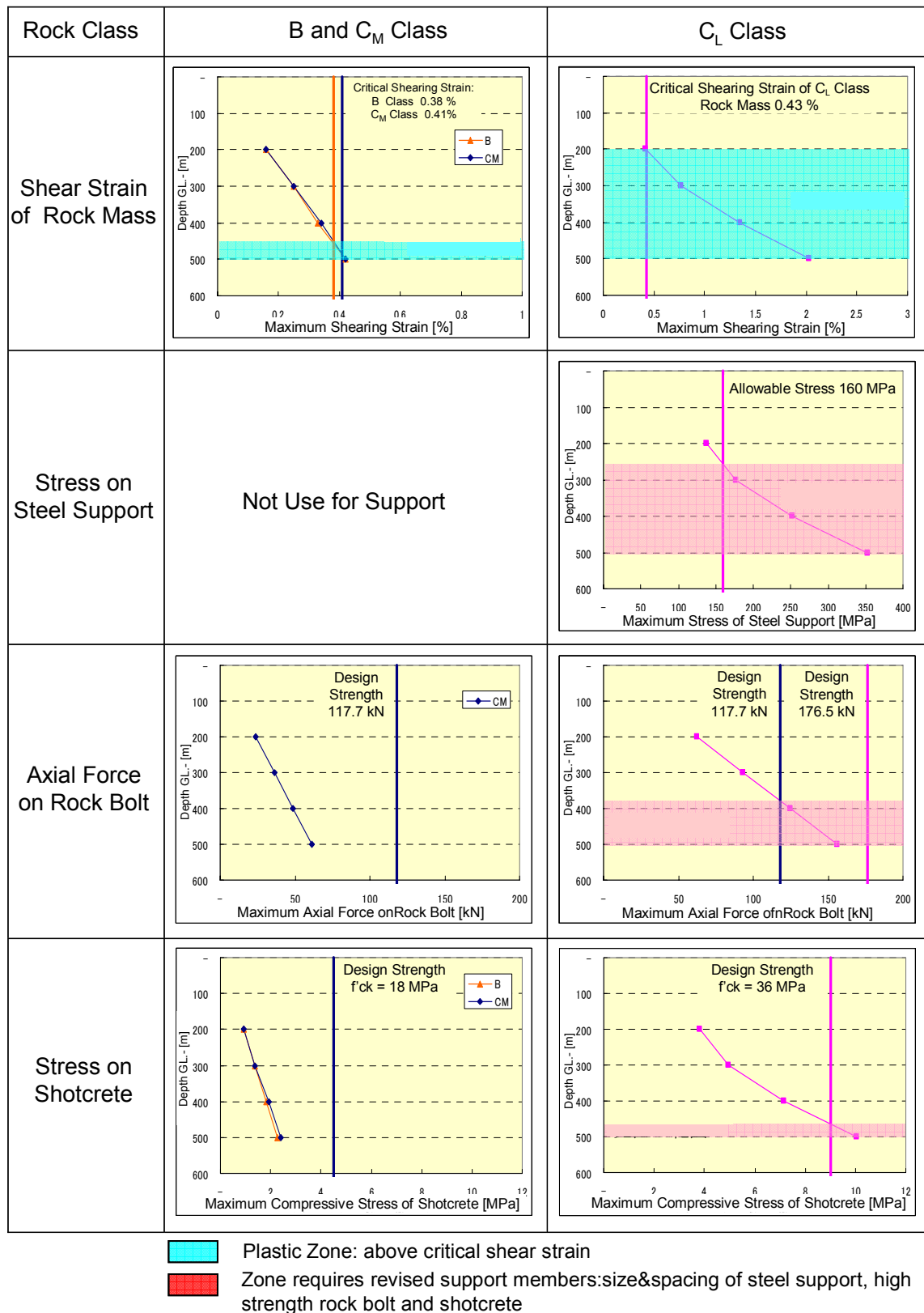


Fig. 4.1.3-10 Revised Stress and Strain in Typical Sections of the Galleries based on Site Specific Data

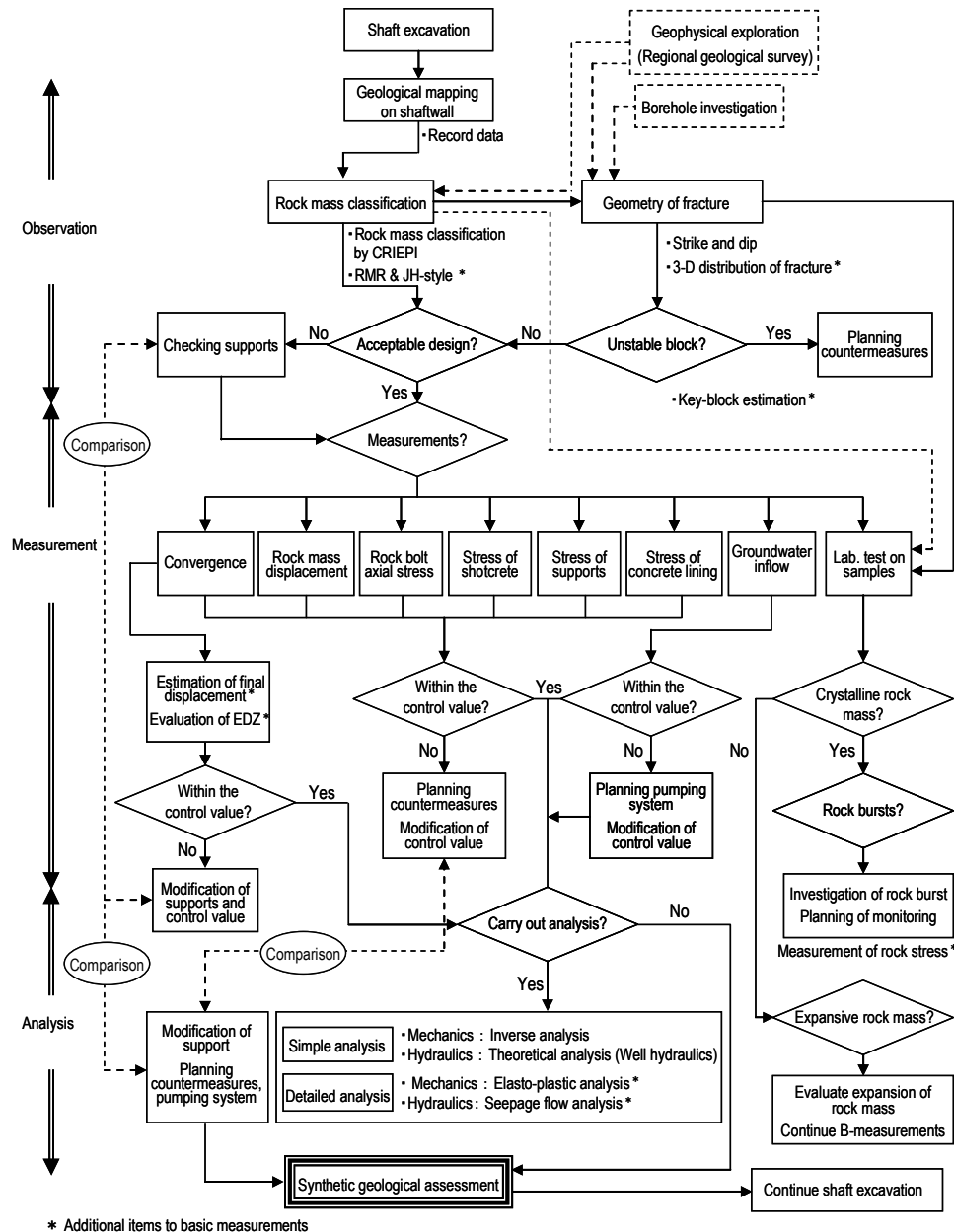


Fig. 4.1.4-1 Flow Chart -Rock Mass Assessment for Shaft Excavation

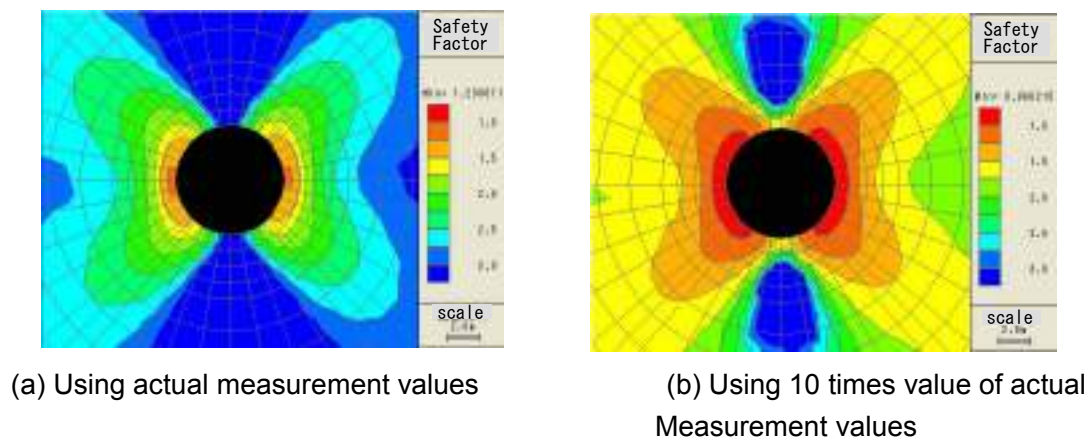
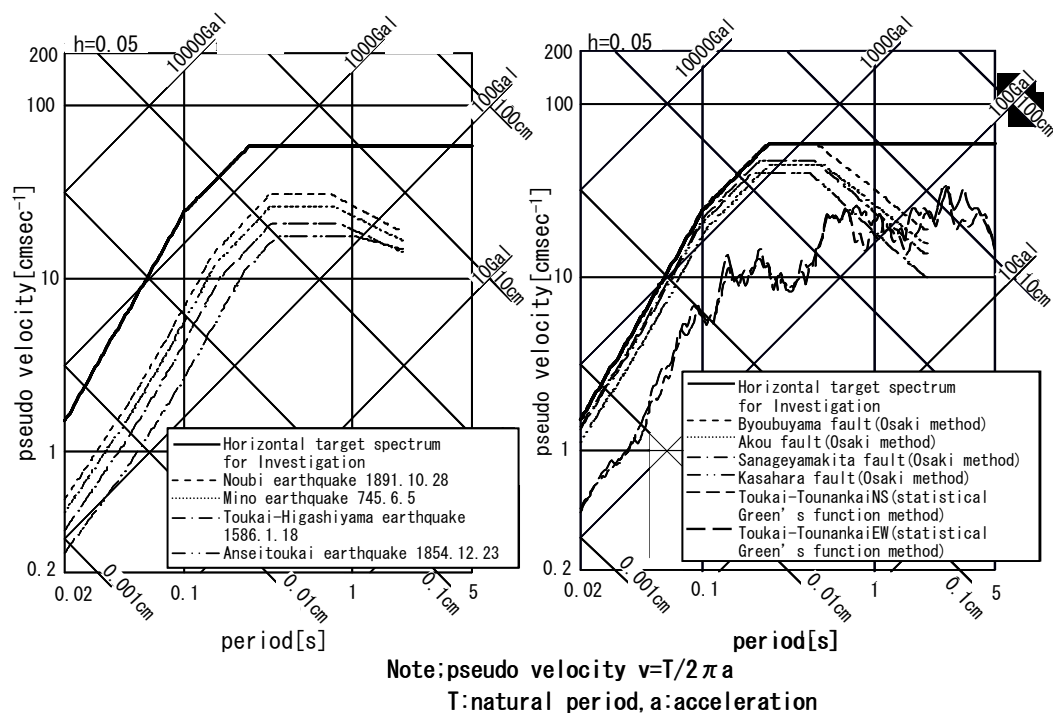
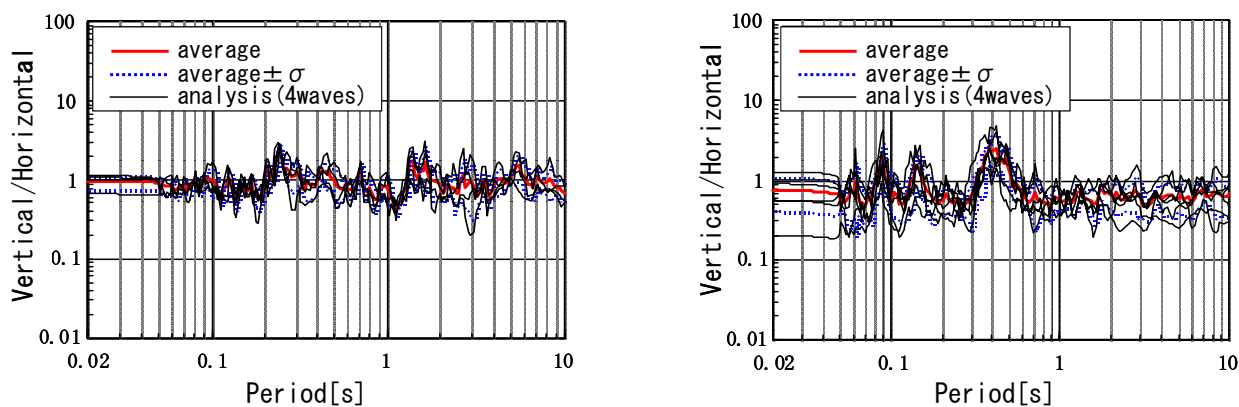


Fig. 4.1.4-2 Distribution of Local Safety Factor



(a) Historical Earthquake Spectrum (b) Active Fault Spectrum
Fig. 4.1.5-1 Historical Earthquake and Active Fault Spectrum for Investigation



(a) Hatori Point(depth 1,500m) (b)Kamaishi-Mine Point(depth 615m)
Fig. 4.1.5-2 Vertical/Horizontal Spectrum Ratio

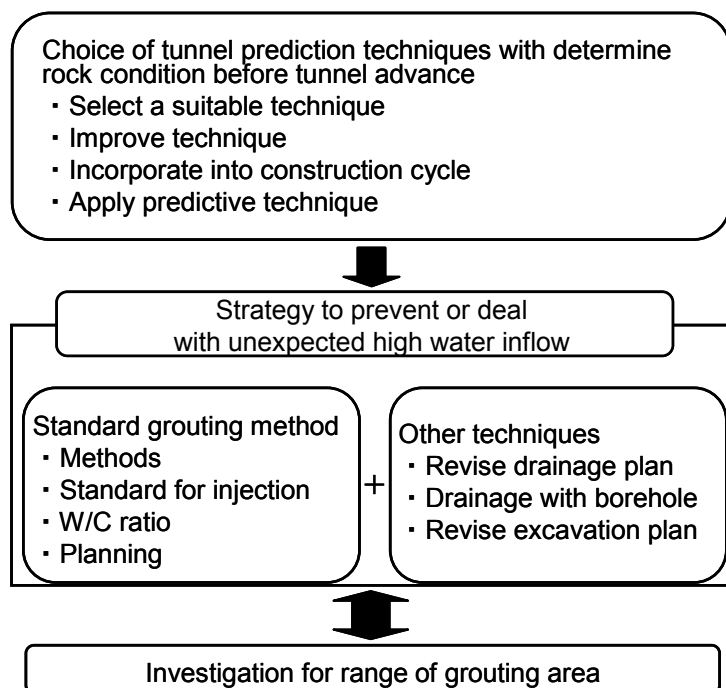


Fig. 4.1.6-1 Countermeasures for Unexpected High Water Inflow

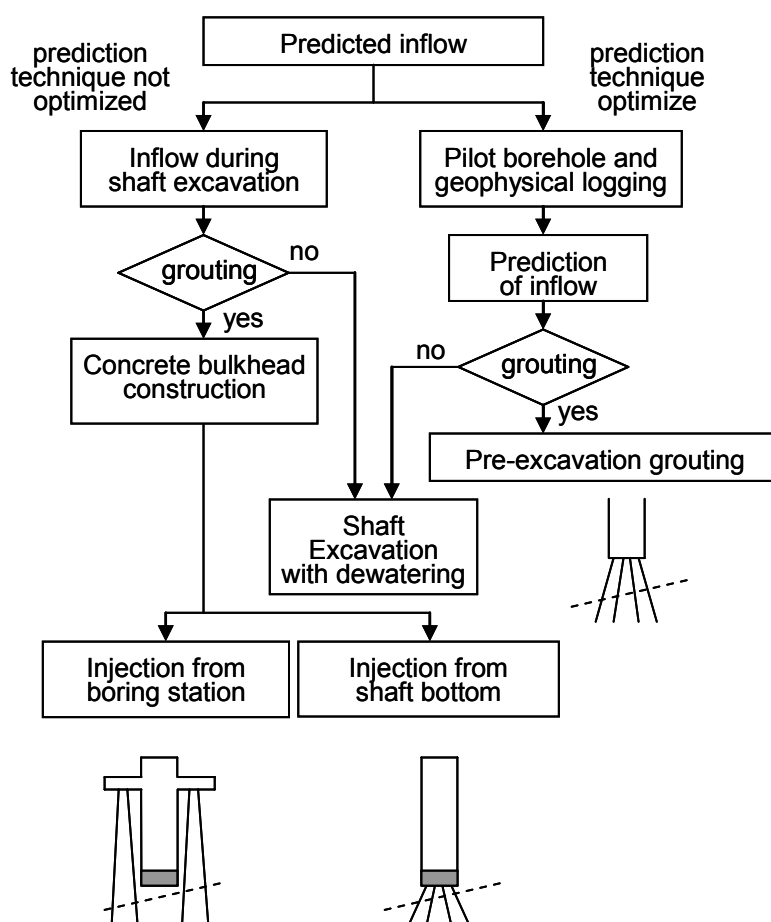


Fig. 4.1.6-2 Grouting Flow Chart

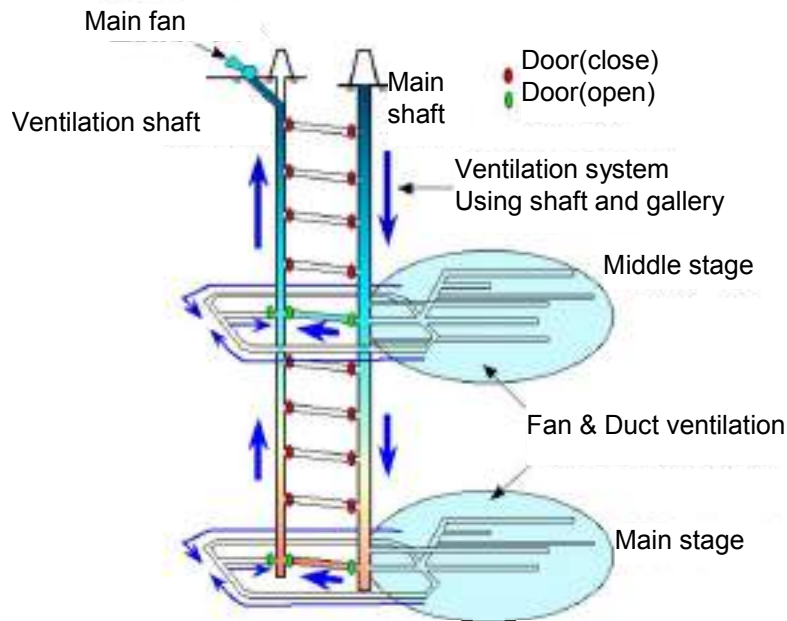


Fig. 4.1.7-1 Ventilation System based on Ventilation Network Analysis

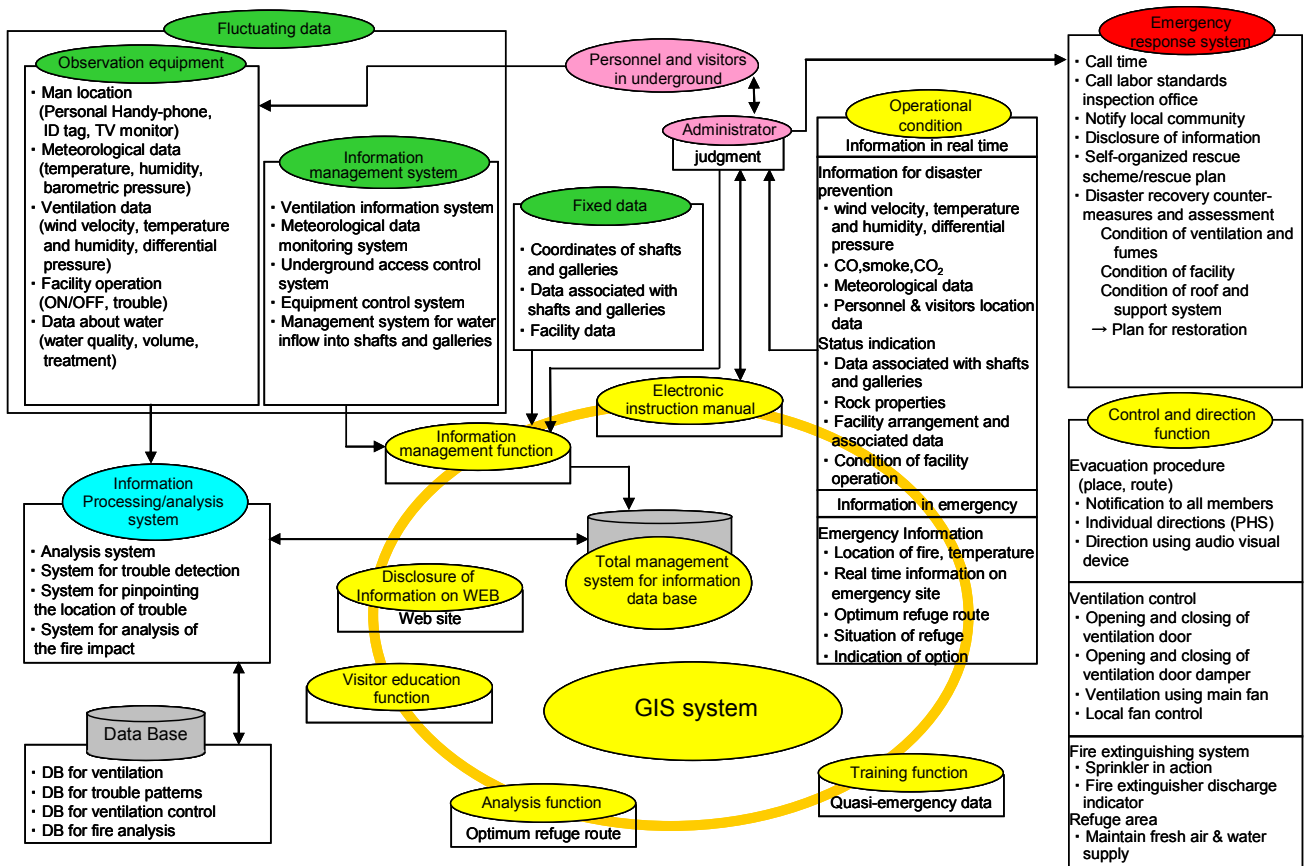


Fig. 4.1.7-2 General Conception of URL Total Control System

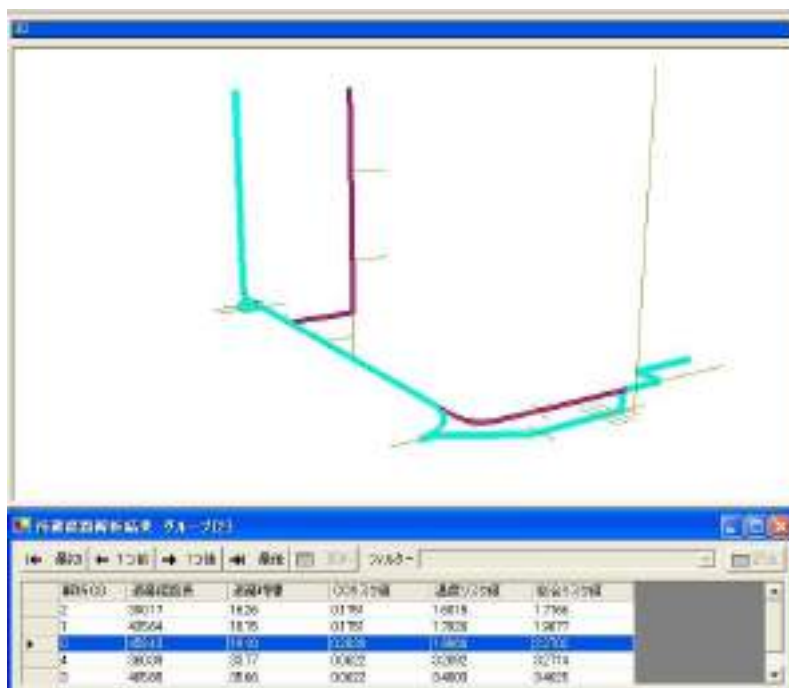


Fig. 4.1.7-3 3D-Display Sample of Refuge Route in Tono Mine (blue line)

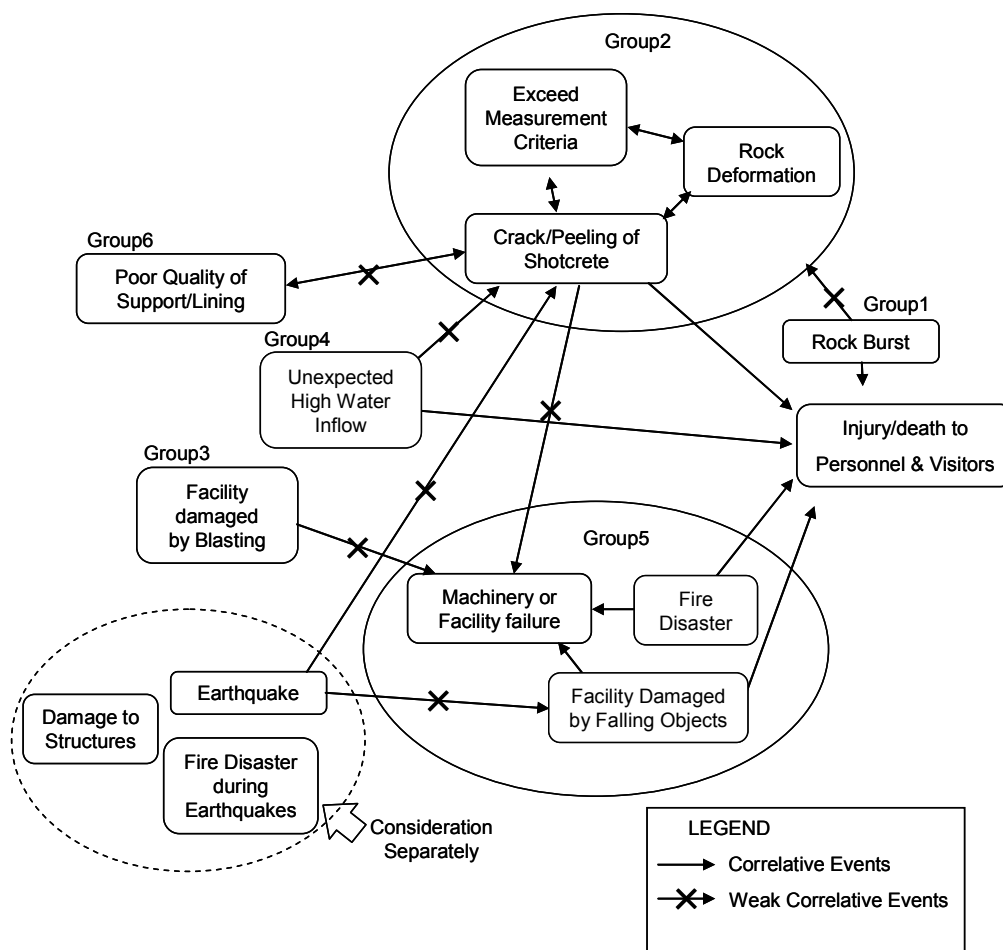


Fig. 4.1.7-4 Risk Correlation

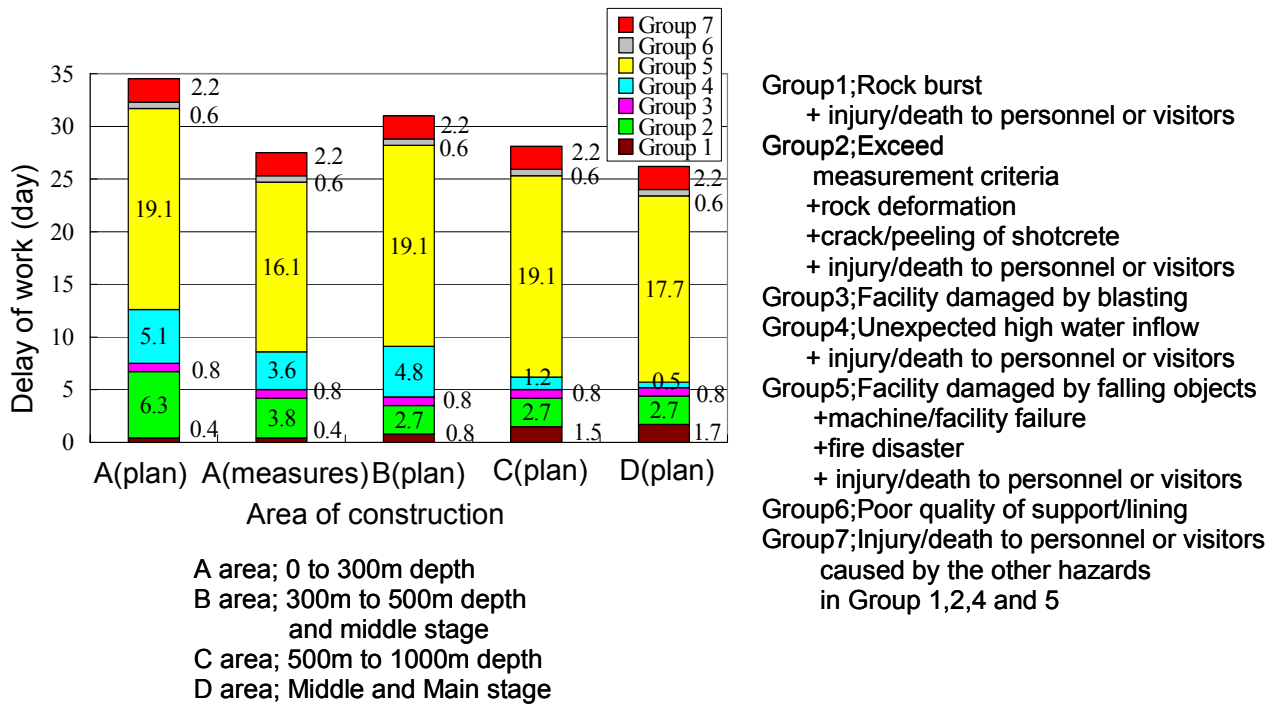


Fig. 4.1.7-5 The Result of Risk Evaluation (Delay of Work)

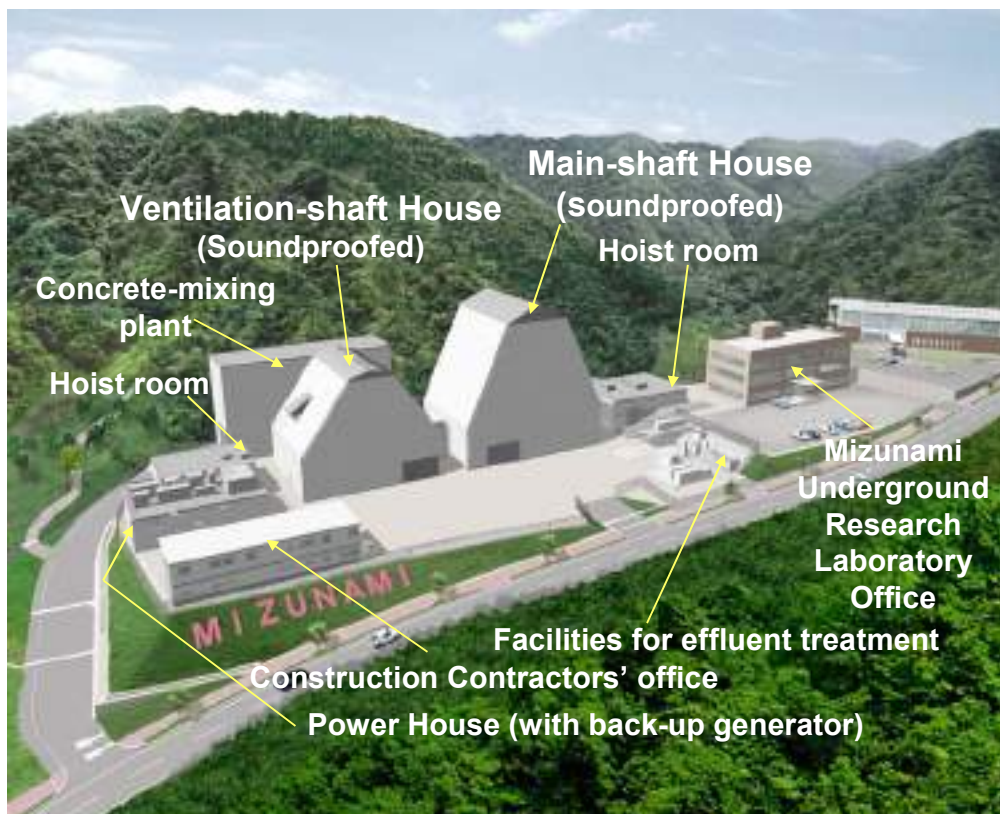


Fig. 4.1.8-1 Layout of Surface Facilities

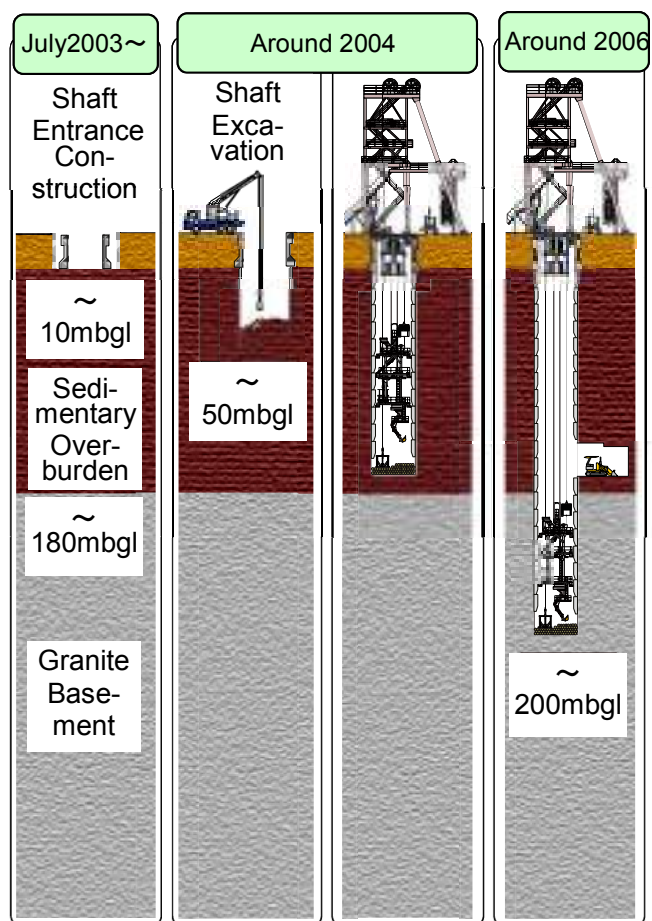


Fig. 4.1.8-2 Construction of Mizunami Underground Research Laboratory

4.2 周辺環境への影響調査

瑞浪超深地層研究所の研究坑道の掘削が周辺環境に与える影響の種類やその程度を把握することは、研究的側面のみならず、社会的側面においても非常に重要と考えられる。人間の活動が環境へ与える影響の評価については、1997年に制定された「環境影響評価法」における環境アセスメントの考え方を指標の一つとして挙げることができる²¹⁾。瑞浪超深地層研究所の建設工事は工事規模としては同法の対象には該当しないものの、環境影響における指標を検討するに当たり、研究坑道の掘削で影響が懸念される項目を環境要素の範囲から抽出した。Table 4.2-1 にその結果を示す。

特に研究所用地周辺の生活圏への影響が懸念される項目として、大気環境としての騒音、振動、水環境としての河川（表流水）水質、底質及び水文（河川流量、表層地下水位）が挙げられる。そこで、これらの項目について、第1段階として研究坑道掘削開始前のデータを蓄積したうえで、第2段階以降の研究坑道掘削の進捗に伴う調査結果と比較検討を実施し、影響の程度を評価している。以下にそれぞれの項目について詳述する。なお、地形、景観、廃棄物及び重要な動植物などについては、本建設工事は法律の定める対象事業の規模を大幅に下回ることや、既に造成などの開発が行われていたことから、影響の程度は限定的と判断し、正馬様用地で継続していた一部の動植物のモニタリングを実施するにとどめた。

4.2.1 騒音・振動調査

第1段階の研究坑道掘削前の調査として、研究所用地を中心とする半径約1kmを目安に7箇所の測定地点を選定し、騒音及び振動調査を実施した。これにより、各地点の毎時10分間の騒音レベルと振動レベル、及び騒音源と振動源の特徴を把握した。

第2段階の研究坑道の掘削が開始された後は、代表的な施工工種が実施されている時期を選んで騒音・振動調査を実施する計画である。この調査においては研究坑道の掘削工事で稼働している機械を調べ、その影響を把握することとしている。

4.2.2 河川（表流水）水質・底質調査

第1段階の研究坑道掘削前の調査として、研究所用地内を流れる狭間川の水質及び底質を、豊水期と渇水期に試料を採取して分析を行った。試料採取箇所は、研究所用地の上流（立坑より約200m）と下流（立坑より約100m）の2箇所である。Table 4.2.2-1 に分析項目を示す。分析方法はJIS規格や環境庁告示などに従った。これにより、研究坑道掘削前の狭間川の水質及び底質のベースライン情報が得られ、その特徴を把握することができた。

第2段階の研究坑道の掘削が開始された後は、同じ地点で試料を採取し、工事の影響を把握することとしている。

4.2.3 水文調査

水文調査に関しては、第1段階の調査として、敷地内を流れる狭間川の河川流量、及び研究所用地周辺の浅井戸などの表層地下水位を計測するシステムを研究坑道掘削開始前に設置した。第2段階開始以降も観測を継続することとしている。これらの解析により、研究坑道掘削開始前のベースライン情報を把握すると共に、掘削開始後の変化の有無を評価する基準とする。

(1)河川流量調査

狭間川の3箇所に設置した河川流量計（水位計）により調査を実施している。設置場所は狭間川の上流（研究所用地より約1.3km）、中流（研究所用地周辺）及び下流（研究所用地より約0.8km）の計3箇所である。測定方法は、計測点において観測される水位と流量の関係をあらかじめ求め

ておき、この関係を用いて流量を算定する方法（流速計測法）である。

計測は水位観測データを 10 分ごとに PC カードに収録して毎月回収し、降雨のデータなどと比較した。河川流量の観測結果から、晴天時には 3 地点共に $0.01\text{m}^3\text{sec}^{-1}$ オーダーの流量であるが、数 mm hour^{-1} 程度の降雨であっても敏感に反応し、流量が増加することが分かった。

(2)表層地下水位調査

研究所用地周辺の民家などが使用している浅井戸など 10 箇所地下水位計を設置して、地下水位調査を実施している。水位計を設置した浅井戸は、ボーリング孔が 1 箇所、残り 9 箇所は丸井戸である。また、井戸は深さ 10m 未満が 7 箇所、深さ 10m 以上が 3 箇所である。

観測を継続することにより、各地点において年間を通じての地下水位の変動幅が把握されると共に、揚水との関係、降雨時の地下水位の反応状況などを把握した。また、年間の平均的な地下水位の基準が分かり、研究坑道の掘削に伴う変動の有無を確認する際の基本となる情報や留意点（降雨との反応、使用頻度、水位回復傾向など）などが明らかになった。

Table 4.2-1 Range of Factors for Environmental Impact Assessment and Possible Issues due to MIU Construction

Environmental Factors for the Environmental Impact Assessment			Potential Issues at the MIU Construction Site	
			Expected Condition	Monitoring
Preserve the Natural Environmet	Atmosphere	Air Quality	—	—
		Noise Level	Excessive noise due to blasting and other construction activities	○
		Vibration	Strong vibrations due to blasting and other construction activities	○
		Odor	—	—
		Others	—	—
	Water	Surface Water Quality	Decrease in water quality as water flows into shaft	○
		Sediment Quality	River and stream sediment quality affected by drop in water table and reduced run-off	○
		Groundwater	Drawdown of groundwater from groundwater inflow into the shafts	○
		Others	Decresed river flow due to drawdown of water table	○
	Bedrock & Soil	Topography, Geology	Modification of toporography	—
		Ground	—	—
		Soil	—	—
		Others	—	—
Conservation and Preserve the Biodiversity of the Natural Environment		Vegetation	—	—
		Biological	—	—
		Ecosystem	—	—
Human Interaction		Preserve Natural State of Landscape	Changes of landscape by development of MIU site and surface facilities	—
		Green Space	—	—
Other Environmental Aspects		Waste Materials	Material excavated during underground construction(muck pile)	—
		Greenhouse Gases	—	—

Table 4.2.2-1 Water Quality and Sediment Analysis

Analytical Test Areas		Items to test	Samples needed	Analyses to do
Water Quality	Basic tests	5	2	2
	Biological tests	7	2	2
	Health tests	26	2	1
Sediment Analysis	Content test	Basic tests	11	2
		Health tests	23	2
	Elution	Health tests	26	2

4.3 まとめ

深地層における工学技術に関する調査研究では、研究坑道の詳細レイアウトを決定し、空洞安定性や支保の設計、耐震設計などを実施した。あわせて、実際に適用する施工技術並びに機械・設備を選定し、具体的な施工計画を策定すると共に、突発事象対策や安全を確保する技術の整備を行った。研究坑道掘削時に取得される情報や第3段階において実施する原位置試験によってこれら設計の妥当性が最終的には評価されるものの、現時点における設計の成果は、以下のとおりである。

- ・空洞安定性評価と支保設計：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、この区分に応じた物性値を設定してトンネル標準示方書を参考に支保を仮設定した。これに対して二次元及び三次元有限要素法解析により各坑道の力学的安定性を評価すると共に、支保発生応力が許容応力を満足することを確認し、設計としての支保を確定した。なお、本検討は第1段階調査と平行して実施したため、ステップ0のデータに基づく実施設計により坑道レイアウト、大きさ、支保パターンなどを計画し、ステップ3のデータに基づく調整設計により設計の見直しを進めた。この結果、岩盤等級をパラメータとして設計すること、並びに研究坑道掘削位置あるいはその近傍におけるボーリング調査が有効であることを示した。
- ・耐震設計：瑞浪地域の特徴を考慮して、歴史地震、周辺の活断層、想定新東海地震及び東南海地震を震源と想定して地震波を作成し、これに対して第2次取りまとめの手法を踏襲して立坑及び覆工コンクリートの許容応力度を照査した。更に、大深度立坑の特徴を考慮して鉛直地震動についても検討を行い、耐震性を確認した。
- ・計測結果の設計・施工計画へのフィードバック技術（情報化施工）：観察、計測及び解析による地山評価を組合せた具体的なフィードバックフロー図を作成した。地質観察については、複数の岩盤分類法を適用して立坑壁面の地質状況を評価するうえで最適な方法を検討している。
- ・突発湧水に対する対策技術：基本的には地上へ排水しなければならないこと、及び周辺環境への影響を最小限にとどめるという本計画の理念を考慮して、グラウトによる止水を基本とし、その計画を立案した。突発湧水や大量出水が発生した後での対応には期間と予算が多大となることが想定されるため、プレグラウト（事前のグラウト）の実施を基本として検討した。
- ・安全対策：入出坑、火災、環境及び通信に関するシステムと通気網解析を組合せた統合管理システムの概念を構築すると共に、立坑の特徴を考慮したリスクマネジメント手法を活用することにより、リスクを抽出し、安全対策に反映した。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：“深地層研究所（仮称）計画 地表から行う調査研究（第1段階）計画”，核燃料サイクル開発機構, JNC TN1410 2001-001 (2001).
- 2) 核燃料サイクル開発機構：“超深地層研究所地層科学基本計画”，核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 2001-018 (2002).
- 3) 佐藤稔紀, 見掛信一郎, 玉井猛, 今津雅紀, 坂巻昌工：“地下 1,000m に向けて・瑞浪超深地層研究所の建設計画”，核燃料サイクル開発機構, サイクル機構技, No.20(2003.9), pp.31-43 (2003).
- 4) 今津雅紀, 佐藤稔紀, 坂巻昌工：“地下 1,000m の立坑工事に着手・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.35, pp.1-12 (2004).
- 5) 土木学会：“トンネル標準示方書「山岳工法編」・同解説”，土木学会トンネル工学委員会 (1996).
- 6) 日本鉄道建設公団：“NATM 設計・施工指針”，p.339 (1996).
- 7) 日本道路公団：“設計要領第三集・トンネル編”，p92 (1997).

- 8) 田中治雄: “土木技術者のための地質学入門”, 山海堂 (1964).
- 9) 松井裕哉: “AN-1 号孔および MIU-1 号孔における力学特性調査結果”, 土木学会第 55 回年次学術講演会, CS171 (2000).
- 10) 土木学会: “コンクリート標準示方書「施工編」”, pp.52~53 (2002).
- 11) 今津雅紀, 佐藤稔紀, 見掛信一郎, 玉井猛: “瑞浪超新地層研究所立坑の湧水とその排水方法”, 第 39 回地盤工学会研究発表会論文集, pp.1677-1678 (2004).
- 12) 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”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1410 99-020, p.IV-9 (1999).
- 13) 延藤遵, 佐藤稔紀, 見掛信一郎, 今津雅紀, 西川洋二: “瑞浪超深地層研究所主立坑の地震時挙動について”, 第 58 回土木学会年次学術講演会 (2003).
- 14) 藤川智, 須原淳二, 萩原哲也, 延藤遵, 佐藤稔紀, 見掛信一郎, 今津雅紀: “超深地層研究所計画における施設設計・施工の現状—研究坑道の耐震健全性評価に用いる検討用地震動の試算—”, 第 59 回土木学会年次学術講演会 (2004).
- 15) 佐々木俊二, 佐藤清孝, 駒田広也, 川村淳, 青木和弘: “釜石鉱山の地下深部における地震動特性”, 電力中央研究所報告, 研究報告 U99029 (1999).
- 16) 櫻井春輔, 清水則一, 芥川真一, 吉田秀典, 佐藤稔紀, 山地宏志: “国内超大 深度立坑工事の地山崩壊形態から見た崩壊発生機構に関する考察”, 土木学会 論文集 F, No.62, Vol.4, pp.662-673 (2006).
- 17) 坂井哲郎, 萩原育夫, 佐藤稔紀, 見掛信一郎: “深地層の研究施設における通気・防災上の検討”, 資源と素材 2003 春季大会講演集 (I) 資源編, No.3204, pp.114-115 (2003).
- 18) 佐藤稔紀, 見掛信一郎, 田口洋輔, 亀村勝美, 下野正人: “超深地層における研究坑道建設プロジェクトのリスクマネジメント”, 第 5 回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム, 日本材料学会, pp.209-212 (2003).
- 19) 見掛信一郎, 佐藤稔紀, 下野正人, 田口洋輔, 亀村勝美: “超深地層研究所施設建設へのリスクマネジメント手法の適用について”, 土木学会第 58 回年次学術講演会, (2003).
- 20) Shimono, M., Suzuki, S., Taguchi, Y., Kamemura, K., Sato, T. and Mikake, S: “Risk assessment approach for underground research laboratory, Proceedings of the ISRM International Symposium: 3rd Asian Rock Mechanics Symposium, Kyoto, Japan”, pp.359-365 (2004).
- 21) 環境影響評価法 (平成 9 年 6 月 13 日制定, 法律 81 号) および関連施行令, 施行規則等

5. おわりに

超深地層研究所計画は、原子力政策大綱¹⁾などに示された深地層の研究施設計画の一つとして、結晶質岩（花崗岩）を対象に、1996年度から実施しているプロジェクトである。調査研究を段階的に進めながら、地層処分に関連する様々な技術を実際の地質環境に適用することを通じて、地質環境に対する理解を深めながら、これを調査・解析・評価するための技術基盤を整備していくことが主たる目的である。2002年1月には、現在の瑞浪超深地層研究所に研究坑道及び関連施設を設置することとし、研究所用地における第1段階の調査研究を開始した。また、2003年7月からは、第1段階の調査研究と並行して、研究坑道の掘削工事を進めている。地表での調査は2004年度をもって終了し、2005年度には研究坑道の掘削が堆積岩層を通過して花崗岩上部に到達した。

超深地層研究所計画の第1段階においては、「地表での調査・研究による地質環境モデルの構築及び研究坑道掘削前の深部地質環境の状態の把握」、「研究坑道の詳細設計及び施工計画の策定」、及び「研究坑道の掘削を伴う研究段階の調査・研究計画の策定」の三つを段階目標として調査研究を進めてきた。

本報告書は、これらのうち「地表での調査・研究による地質環境モデルの構築及び研究坑道掘削前の深部地質環境の状態の把握」及び「研究坑道の詳細設計及び施工計画の策定」について、2004年度までに行った成果を取りまとめたものであり、東濃地域の結晶質岩を対象とした地上かの調査研究を事例として、地層処分にとって重要な地質環境特性を段階的に調査・評価していくための一連の方法論を示したとも言える。具体的には、研究所用地を中心とするサイトスケールを主な対象として、繰り返しアプローチを実践する過程で採用した考え方や得られた知見、及び一連の調査を進める過程で整備してきた個別の調査・解析技術などを整理するとともに、処分事業を進めるうえで有効な情報となり得るノウハウなどについて可能な限り詳細に記述した。これらは、原環機構が処分地の選定に向けて、概要調査や精密調査（前段の地上からの調査）を進めていくうえでの、また、国が精密調査地区選定に係わる環境要件や安全審査基本指針などを策定していくうえでの技術基盤として活用できるものとする。

第1段階で残された重要な課題として、「実際の地質環境に適用可能な体系的な技術の提示」に関する信頼性の向上が挙げられる。超深地層研究所計画において適用している段階的な調査研究の進展に伴い、地質環境を理解するための一連の方法論の詳細化とその評価を重ねつつ、あわせて、その過程で得られた経験（失敗例を含む）やノウハウをできるだけ知識化して提示していくことが重要となる。

以上のことから、「実際の地質環境に適用可能な体系的な技術の提示」に関する信頼性を向上させるために、第2段階以降の調査研究では、第1段階の課題の解決と調査研究成果（例えば、地質環境モデルや地質環境の変化の推定結果など）や設計・施工技術の妥当性の確認を行うとともに、繰り返しアプローチに基づく段階的な調査研究を継続することにより、地層処分にとって重要な地質環境特性に係る理解度を深めるための調査・解析・評価技術の体系化を図る予定である。そのために、第2段階以降で、新たに得られる知見などを踏まえ、統合化データフローの下位を構成する調査フローなどを整備し、より具体化するとともに、階層的な技術体系としての整理を試みる予定である。さらに、他研究機関で進められている調査研究の成果や議論を踏まえつつ、処分事業や安全規制を支える技術基盤として厚みを加えていく考えである。

工学技術においては、第2段階の調査研究として、研究坑道の設計結果の検証を掘削中に得られる計測データなどに基づいて実施していくとともに、建設技術、施工対策技術、安全性を確保する技術の確認を本格的に進めていく。具体的には、今後もデータの取得を継続し、設計時に行

った検討内容の妥当性の評価及び設定の見直しなどにより、以深の研究坑道掘削にフィードバックしていくことを繰り返すことにより設計・施工技術の高度化を図るとともに、掘削工事に伴う周辺環境への影響を観測していく計画である。

なお、第2段階以降の地質環境特性や工学技術に関する調査研究計画については、第1段階の調査研究成果に基づいた研究坑道のレイアウトの見直しを含めた検討を実施し、具体的な調査研究計画を別途策定している。

超深地層研究所計画は、研究坑道を掘削しながら調査研究を進める段階にあり、2006年度末現在、主立坑及び換気立坑を深度約200mまで掘削するとともに、深度200mの水平坑道の掘削に着手した。今後は、坑道掘削時に得られる情報に基づき、地上からの調査研究で構築した地質環境モデル（地質構造モデル、水理地質構造モデル、地球化学モデル、及び岩盤力学モデル）を確認しながら、地表での調査技術やモデル化手法の妥当性を検討していく。また、あわせて研究坑道の設計や掘削・覆工技術の妥当性、及び実際の岩盤や湧水の状況に応じた施工対策の有効性などを確認し、研究坑道の施工・維持管理技術の整備・高度化を進めていく。これらの調査研究によって得られる成果については、処分事業や安全規制を支える技術基盤として、当面は、平成20年代前半を目途とする「精密調査地区の選定」に照準を合わせて取りまとめていく予定である。

原子力機構は、我が国における中核的な研究開発機関として、今後とも、超深地層研究所計画及び幌延深地層研究計画の二つの深地層の研究施設計画や茨城県東海村の室内試験施設（ENTRY、QUALITY）などを活用した基盤的な研究開発を進め、成果の公表、施設の公開、国内外の関係機関や大学との研究協力などを通じて、我が国の地層処分計画を長期にわたって支えていくための技術の継承や研究者の育成、国民の地層処分に対する理解の増進に寄与していく考えである。

本報告書で紹介した研究成果は、国内外の数多くの研究者や研究機関などのご協力をいただいたものである。ご協力いただいた関係者の方々に感謝の意を表するとともに、今後ともよりいっそうのご支援とご指導をいただければ幸いである。

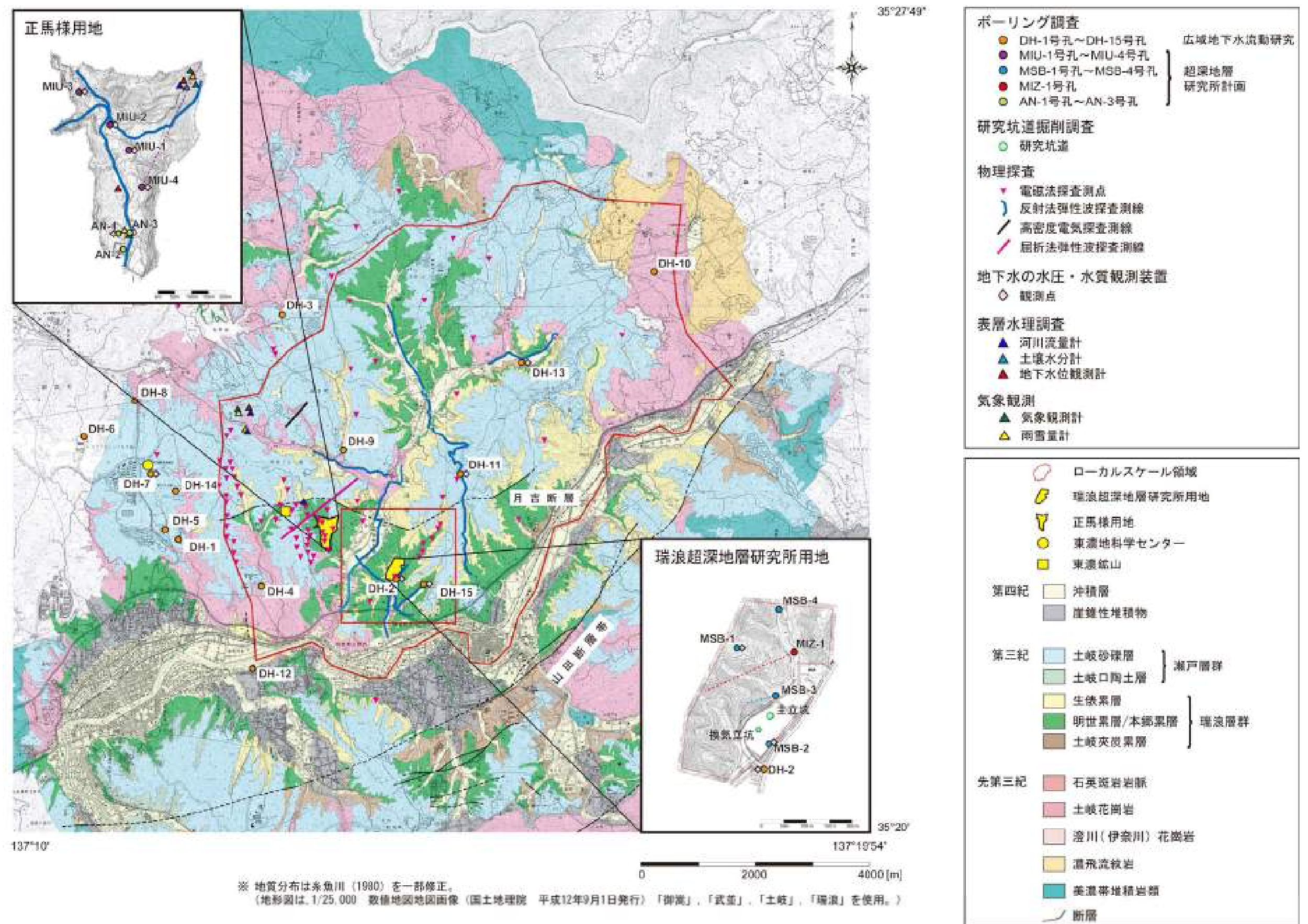
参考文献

- 1) 原子力委員会: “原子力政策大綱”, 原子力委員会 (2005).

付録 1

広域地下水流動研究及び超深地層研究所計画第 1 段階における

調査研究の実施位置図



付録 2

第 1 段階における調査研究のスケジュール



付録 3

ボーリング孔を利用した調査の概要

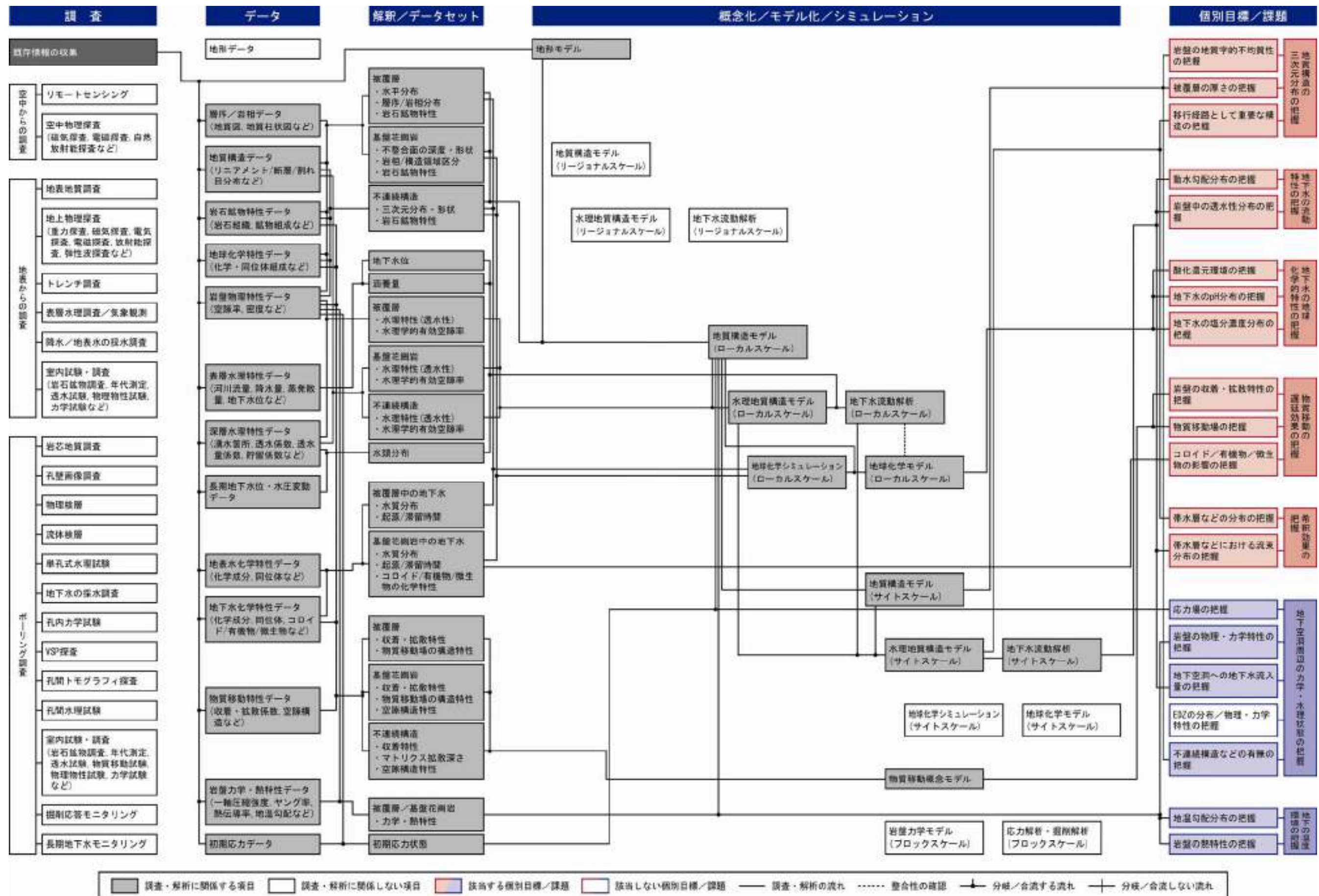
ボーリング孔を利用した調査の概要

孔名		調査目的	掘削地点 (世界測地系JGD2000)	掘削長 (m)	孔径	掘削水	実施項目																										長期モニタリング					
							地質・地質構造																岩盤水理					地球化学				岩盤力学						
							岩芯記載	岩石・鉱物学的調査	孔壁画像検査		ボアホールレーダー (超音波を用いた反折面像)	孔曲り検層	孔径検層	電気検層	マイクロ比抵抗	密度検層	中性子検層	自然ガンマ線検層	スペクトル検層	温度検層	音波検層	セメントボンド検層	希磁率・比抵抗試験	電磁フローメーター検層	フローメーター検層	電気伝導度検層	透水試験	揚水試験	同位体・水質分析	有機物・微生物分析	ガス分析	物理化学パラメーター		力学試験	物理試験	熱特性試験	水圧破碎試験	孔内載荷試験
									ボアホールテレビ (可視画像)																													
広域地下水流動研究*	DH-2	ボーリング掘削・調査技術の確立、および土岐花崗岩の地質環境特性の把握	北緯 35°22'36.86378" (-69125.013) 東経 137°14'15.06221" (6437.382) 標高 193.158m	501	98.4mm (HQ)	清水 (増粘材 (レスター) 使用)	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○				○	○	○	○	○		○	○	○							MPシステム 圧力連続観測実施中		
	DH-9	ローカスケール東部の地質環境特性の把握	北緯 35°23'50.46962" (-66857.41) 東経 137°13'38.42126" (5511.229) 標高 275.42m	1030	123mm (1020mまで) 98.4mm (1030m) (PQウエルマン工法)	清水	○		○			○	○	○	○	○	○				○		○	○		○		○							MPシステム 観測休止中			
	DH-10	ローカスケール周縁部の地質環境特性。特に土岐川水系と木曾川水系の分水界付近における水理、地球化学特性の把握	北緯 35°25'31.3027" (-63745.17) 東経 137°17'13.95187" (10945.735) 標高 475.562m	1012	98.4mm (HQ)	清水	○	○	○			○	○	○	○	○	○				○		○	○		○	○	○	○	○								
	DH-11	ローカスケール中央部の地質環境特性。特に堆積岩深部の水理、地球化学特性の把握	北緯 35°23'36.53405" (-67285.355) 東経 137°14'59.62225" (7560.463) 標高 339.883m	1012	98.4mm (HQ)	清水	○	○	○			○	○	○	○	○	○				○		○	○		○	○	○	○	○						MPシステム 圧力連続観測実施中		
	DH-12	ローカスケールの地下水流動系の流出域における地質環境特性の把握	北緯 35°21'45.9499" (-70695.4) 東経 137°12'35.88713" (3935.04) 標高 137.385m	716	98.4mm (HQ)	清水	○	○	○			○	○	○	○	○	○				○		○	○			○											
	DH-13	ローカスケールの地下水流動系の扇状域における地質環境特性などの把握	北緯 35°24'40.12797" (-65324.696) 東経 137°15'41.91513" (8625.771) 標高 277.514m	1015	98.4mm (HQ)	清水	○	○	○			○	○	○	○	○	○				○		○	○			○									MPシステム 圧力連続観測実施中		
	DH-15	研究所周地を通過する東西走向の断層の地質環境特性の把握	北緯 35°22'33.72832" (-69221.278) 東経 137°14'34.06865" (6917.15) 標高 213.225m	1012	134.5mm (CHD-134)	清水	○	○	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○		○											SPMPシステム 圧力連続観測実施中	
超深地層研究所計画	MIZ-1	研究所周地における北北西走向の断層、上部割れ目帯など地質環境特性の把握	北緯 35°22'45.21313" (-68867.674) 東経 137°14'17.69641" (6503.679) 標高 206.563m	1300	134.5mm (CHD-134)	清水	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○				SPMPシステム 圧力連続観測実施中
	MSB-1	研究所周地における地表から地下浅部の地質環境特性の把握	北緯 35°22'45.51329" (-68858.514) 東経 137°14'12.74108" (6378.611) 標高 253.081m	201	123mm (PQ)	清水	○	○	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○		○	○										MPシステム 圧力連続観測実施中	
	MSB-2	研究所周地における地表から地下浅部の地質環境特性の把握	北緯 35°22'38.67879" (-69069.074) 東経 137°1415.50737" (6448.577) 標高 198.488m	176	123mm (PQ)	清水	○	○	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○		○	○	○	○	○							MPシステム 定期採水/圧力観測実施中	
	MSB-3	研究所周地における地表から地下浅部の地質環境特性の把握。特に北北西走向の断層の分布、特性の把握	北緯 35°22'42.12533" (-68962.856) 東経 137°14'16.08543" (6463.09) 標高 204.622m	182	123mm (PQ)	清水	○	○	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○		○	○										MPシステム 圧力連続観測実施中	
	MSB-4	研究所周地における地表から地下浅部の地質環境特性の把握	北緯 35°22'48.24724" (-68774.2) 東経 137°14'16.36972" (6470.129) 標高 214.448m	99	123mm (PQ)	清水	○	○	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○		○	○	○	○								MPシステム 定期採水/圧力観測実施中	
	MIU-1	正馬様用地における地下深部の地質環境特性の把握	北緯 35°23'04.30137" (-68280.295) 東経 137°13'26.74404" (5217.414) 標高 220.070m	1012	98.4mm (HQ)	清水	○	○	○			○	○	○	○	○	○				○		○	○					○	○	○						MPシステム 圧力連続観測実施中	
	MIU-2	正馬様用地における地下深部の地質環境特性の把握	北緯 35°23'06.8011" (-68203.296) 東経 137°13'24.54537" (5161.884) 標高 223.280m	1012	98.4mm (HQ)	清水	○	○	○			○	○	○	○	○	○				○		○	○					○	○	○	○					MPシステム 圧力連続観測実施中	
	MIU-3	正馬様用地における月吉断層の地質環境特性の把握	北緯 35°23'09.95371" (-68106.199) 東経 137°13'20.85962" (5068.816) 標高 230.375m	1014	98.4mm (HQ)	清水	○	○	○			○	○	○	○	○	○				○		○	○					○	○	○	○						MPシステム 圧力連続観測実施中
	MIU-4	正馬様用地における月吉断層の地質環境特性の把握	北緯 35°23'00.77324" (-68388.994) 東経 137°13'28.28716" (5256.42) 標高 216.994m	780	123mm (PQ)	清水	○	○	○	○			○	○	○	○	○	○	○	○			○	○		○	○	○	○	○	○							MPシステム 圧力連続観測実施中

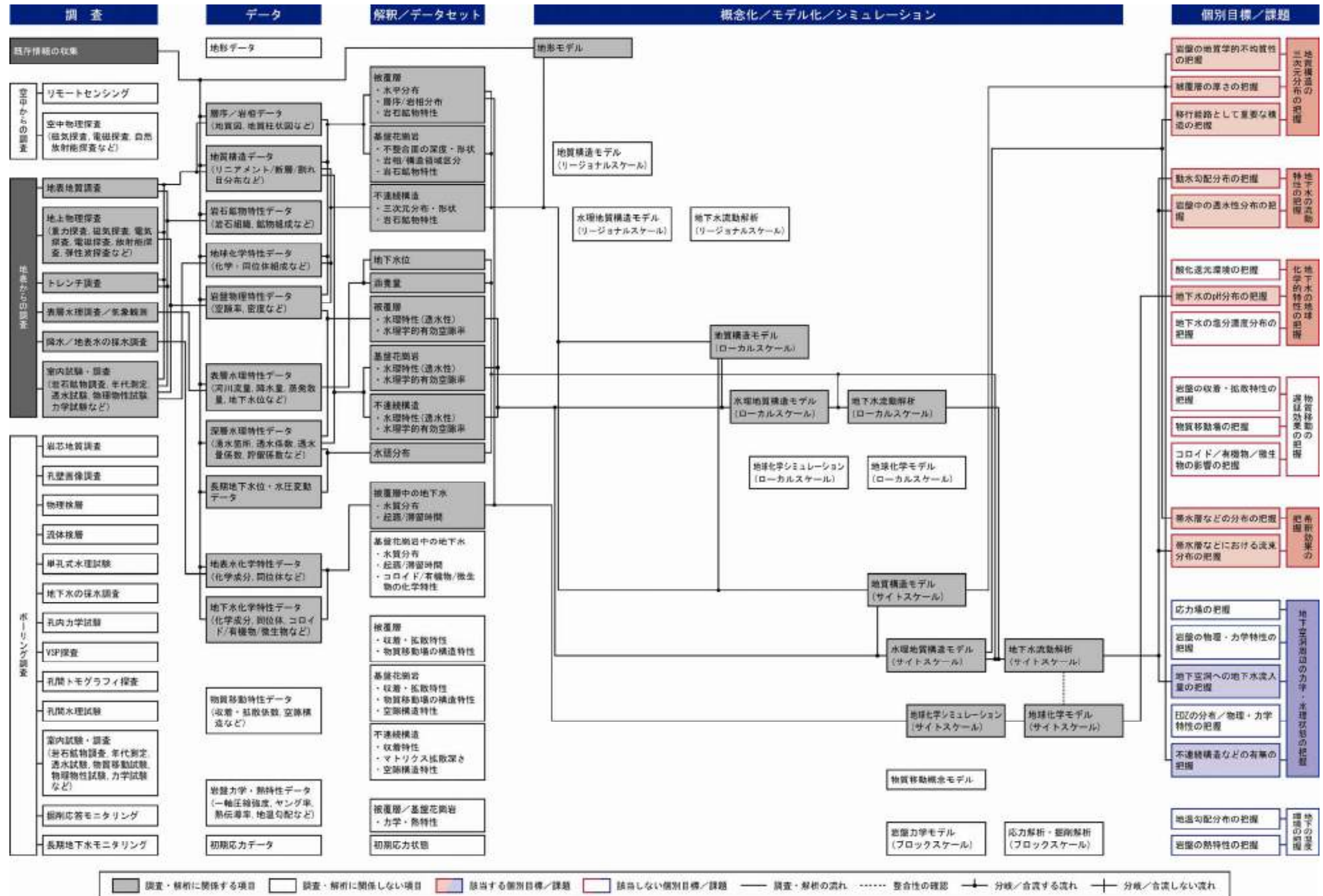
* 広域地下水流動研究についてはサイトスケールにおける初期条件と境界条件の設定に必要なボーリング孔の概要を示す。

付録 4

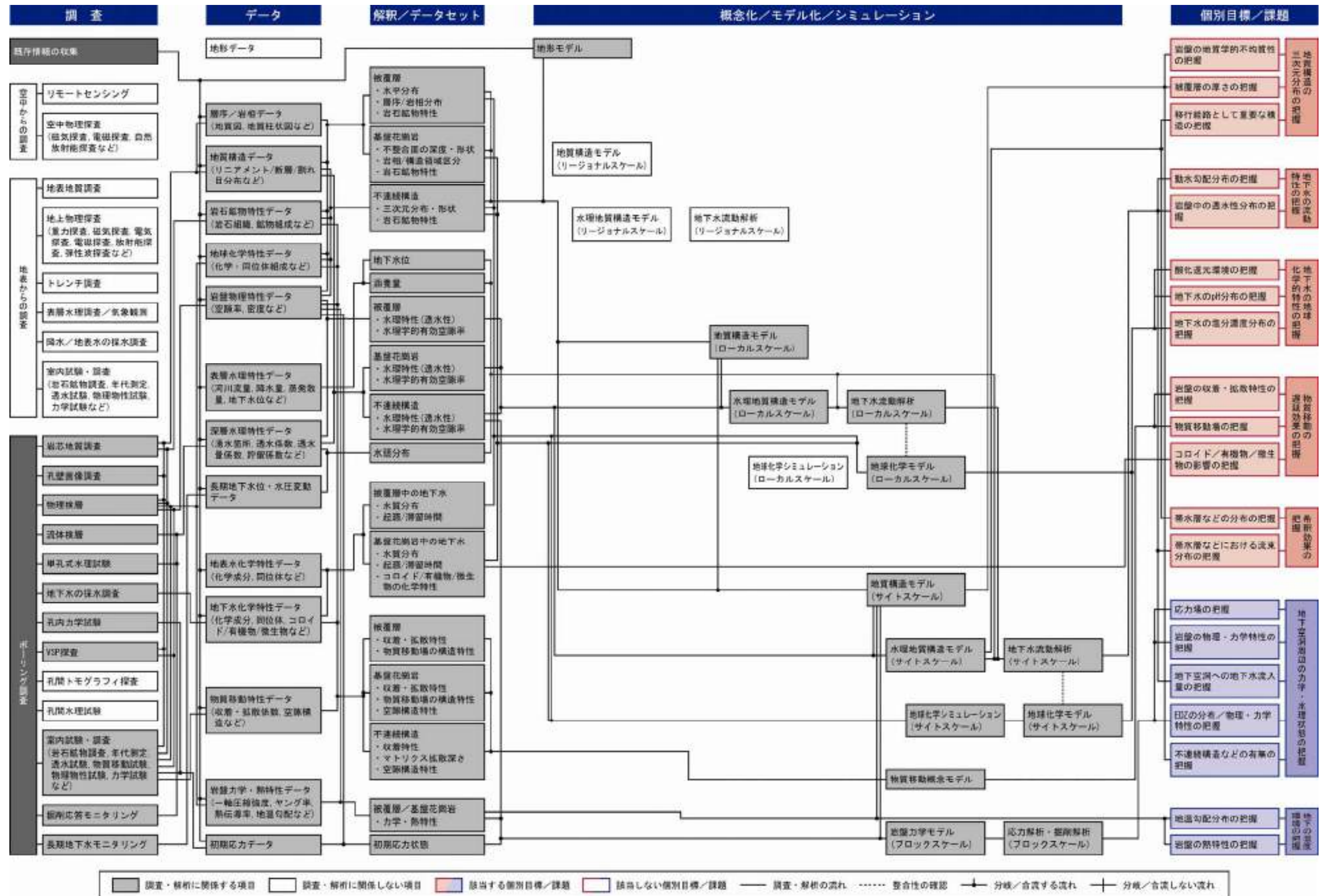
統合化データフロー



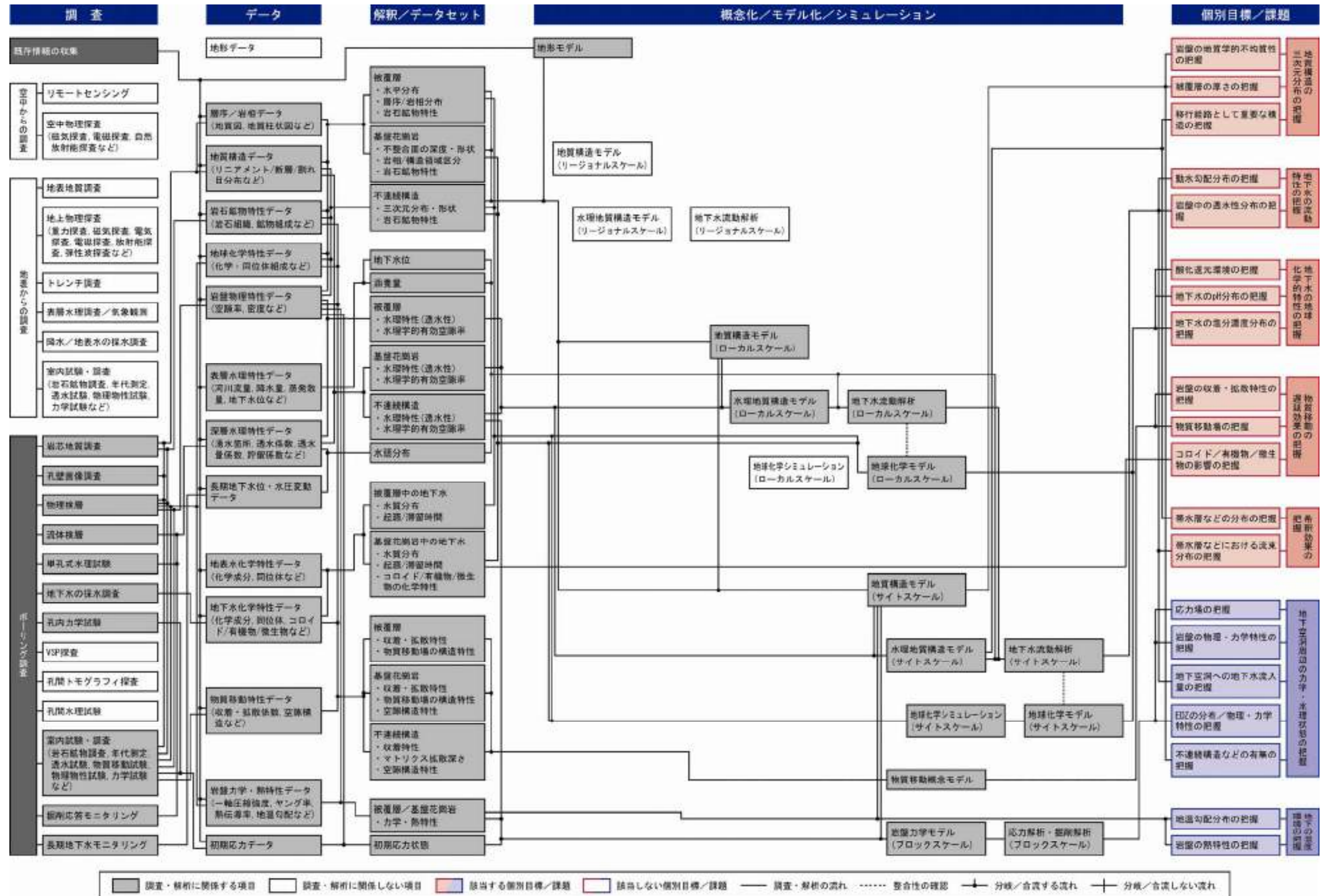
統合化データフロー（ステップ0）



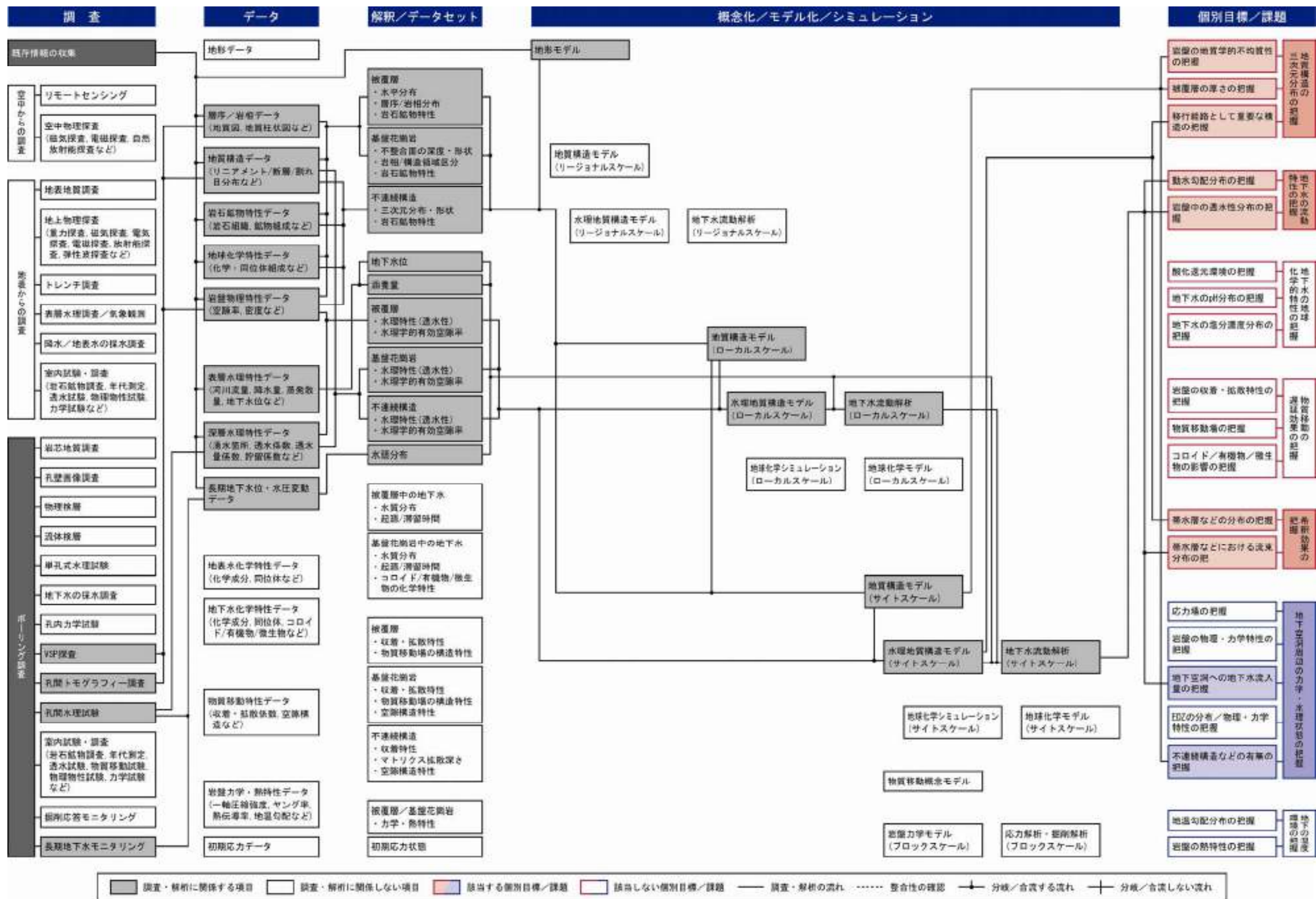
統合化データフロー（ステップ1）
 （「既存情報」とはステップ0までに取得した情報を示す）



統合化データフロー (ステップ2)
 (「既存情報」とはステップ1までに取得した情報を示す)



統合化データフロー（ステップ3）
 （「既存情報」とはステップ2までに取得した情報を示す）

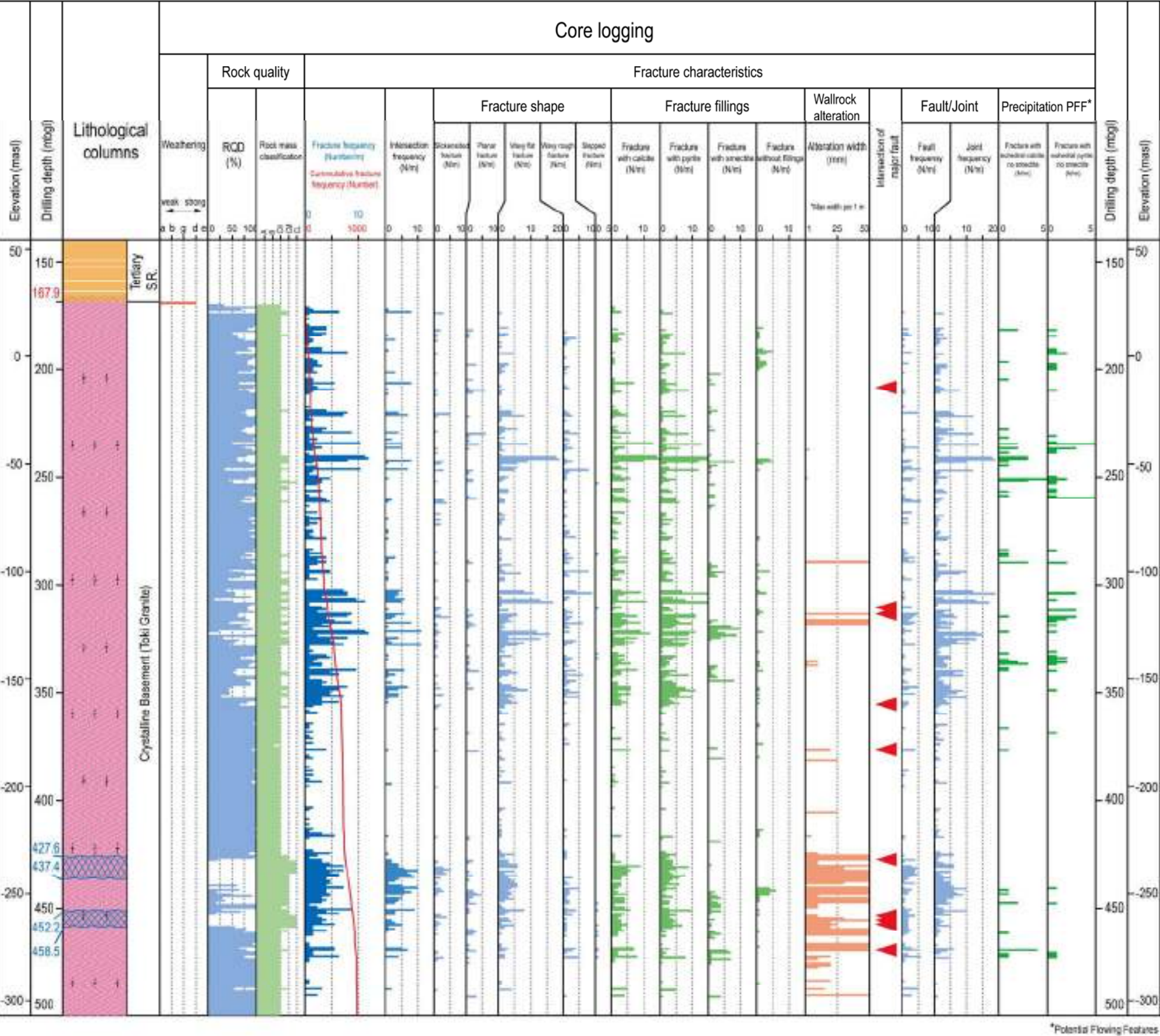


統合化データフロー（ステップ4）
 （「既存情報」とはステップ4までに取得した情報を示す）

付録 5

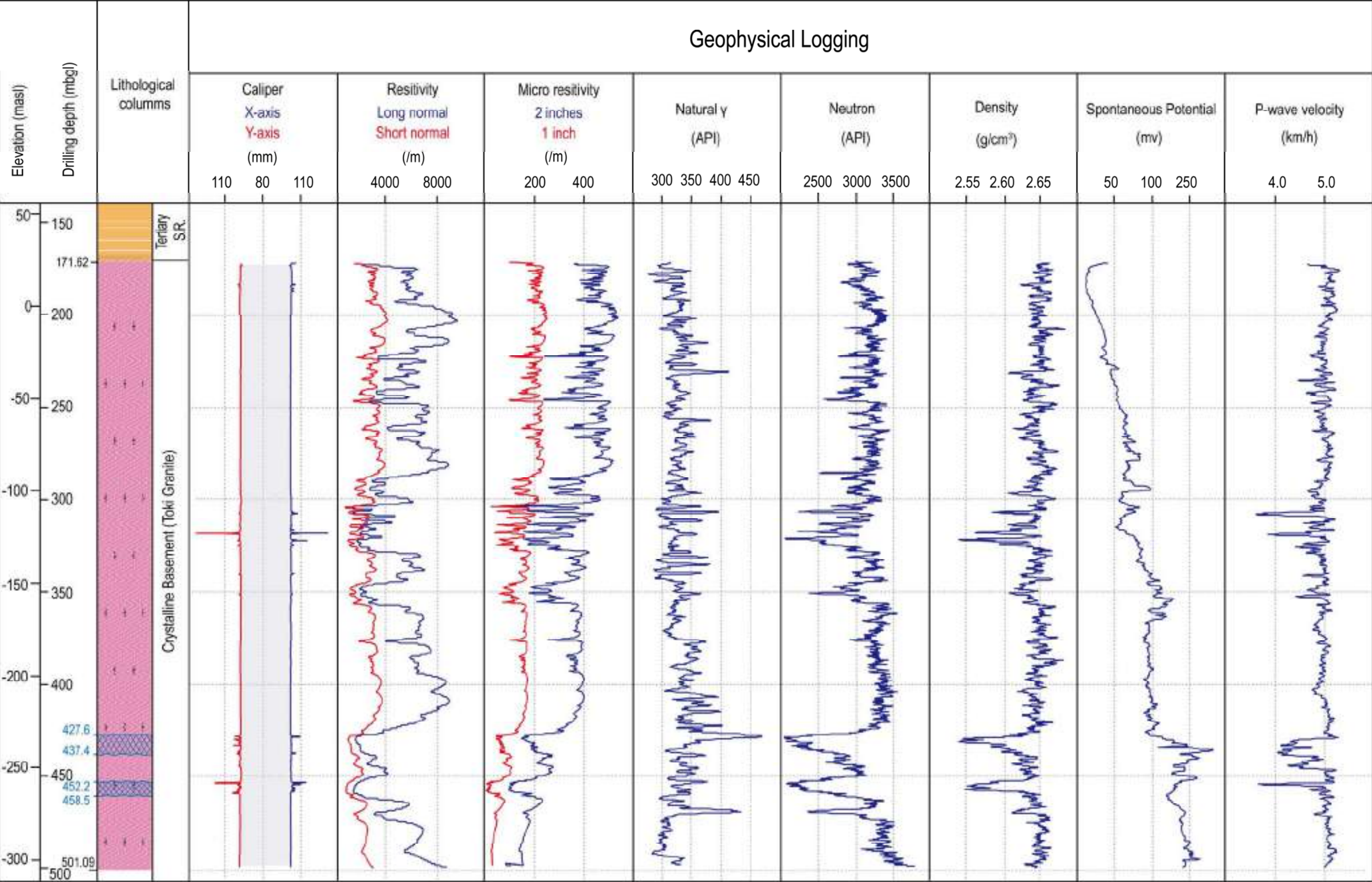
広域地下水流動研究におけるボーリング孔を利用した調査の結果概要

Core Logging in DH-2 Borehole

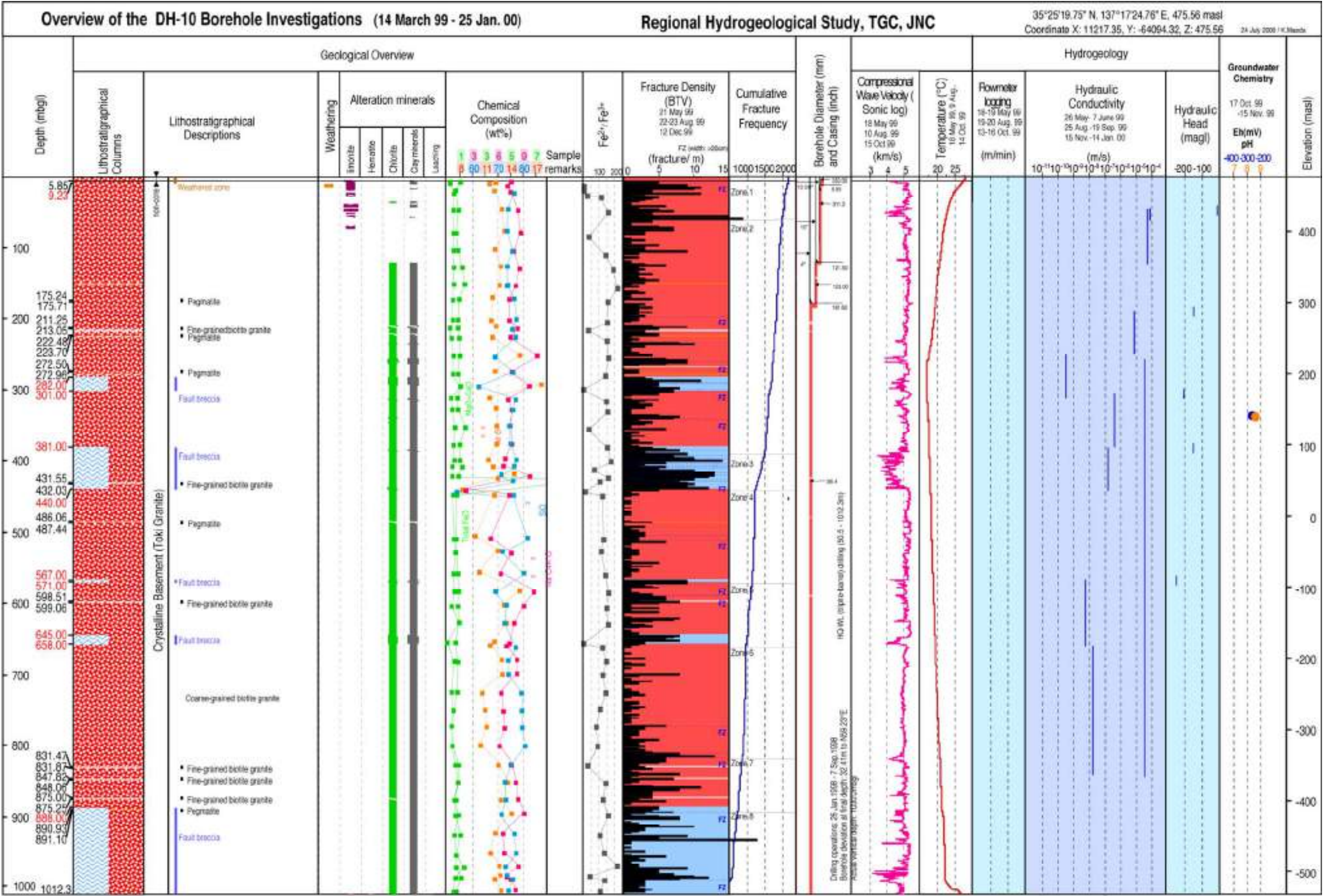


広域地下水流動研究におけるボーリング孔を利用した調査結果（DH-2 号孔：地質）

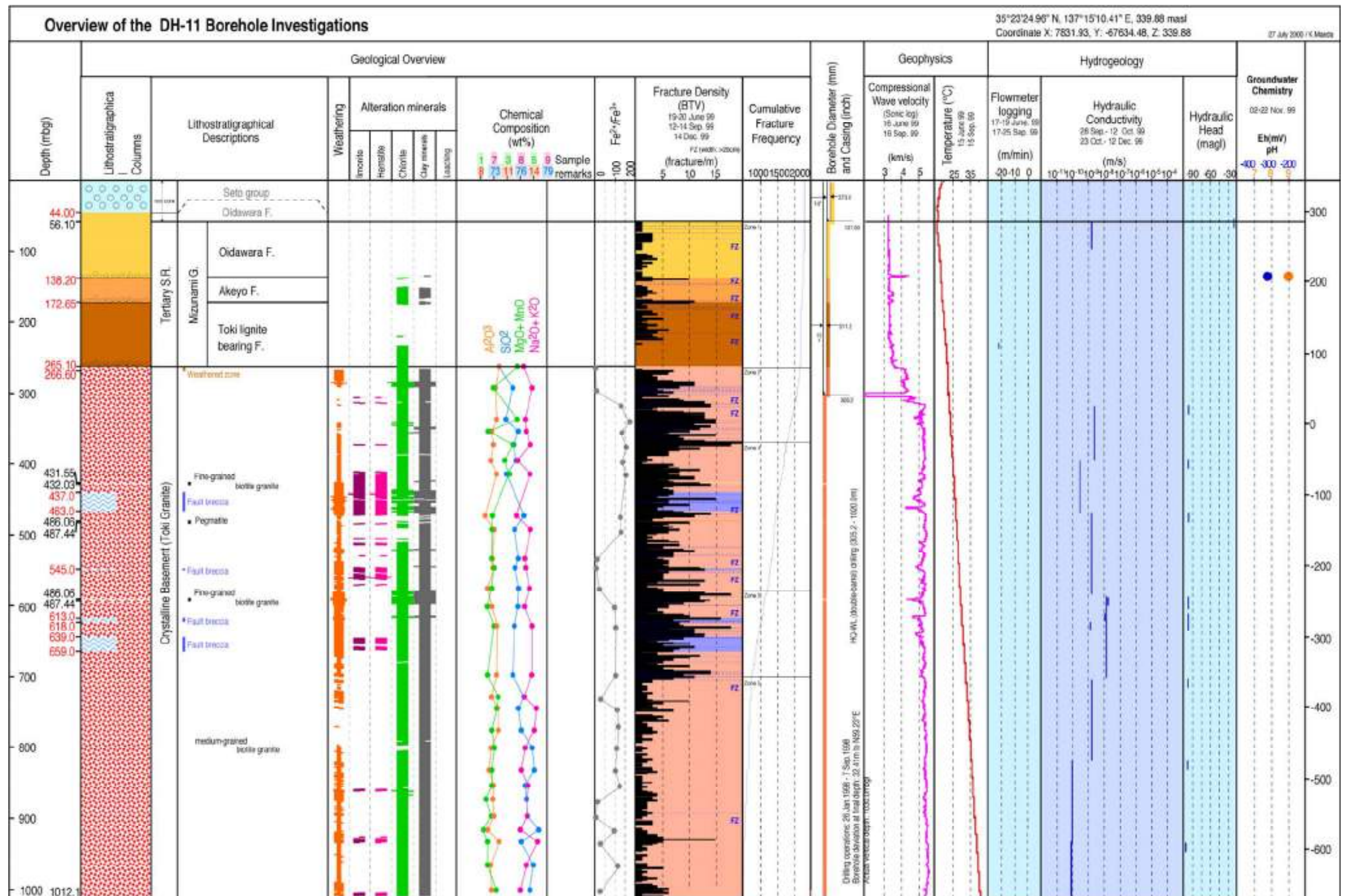
Geophysical Logging in DH-2 Borehole



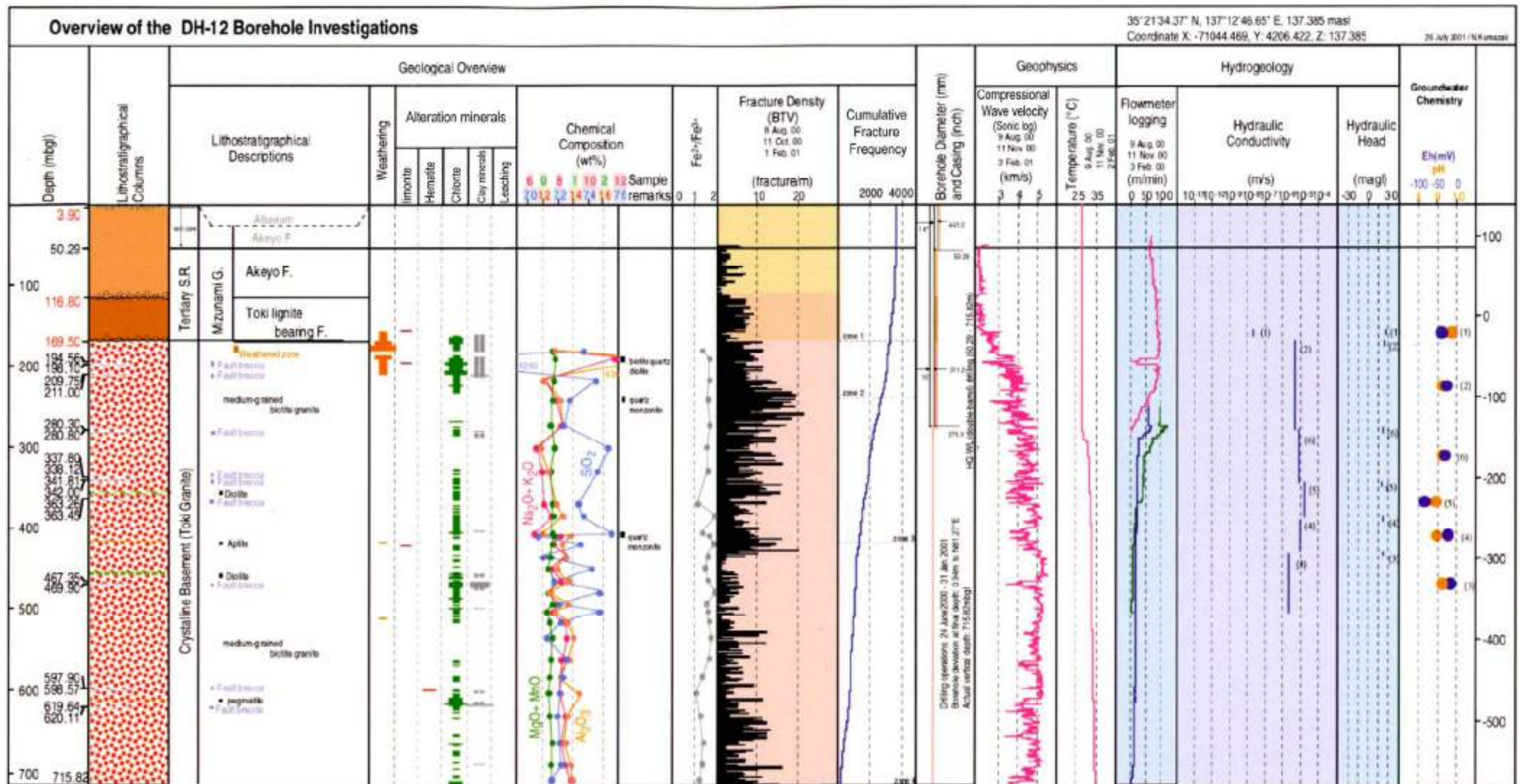
広域地下水流動研究におけるボーリング孔を利用した調査結果（DH-2 号孔：検層）



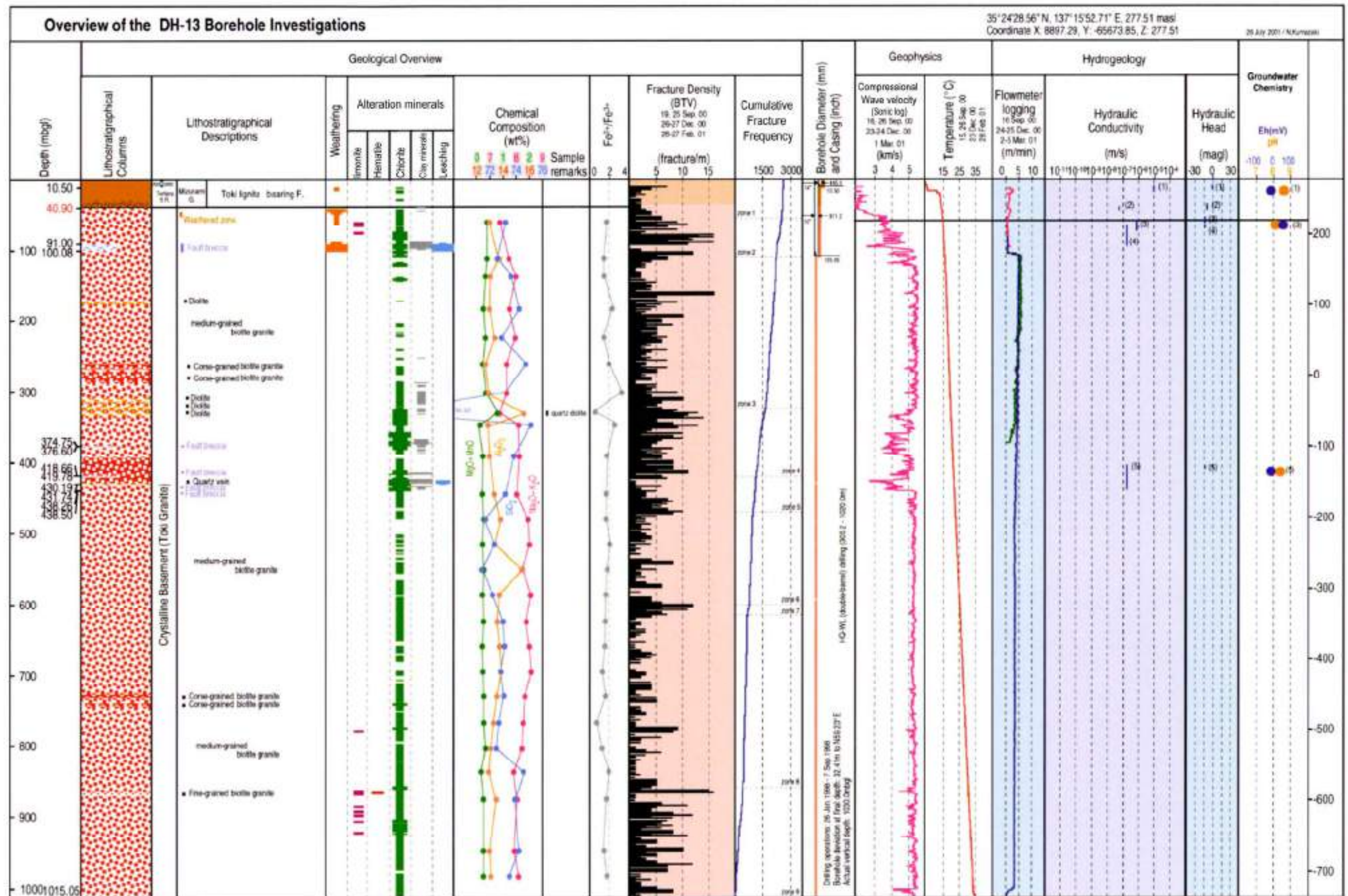
広域地下水流動研究におけるボーリング孔を利用した調査結果 (DH-10 号孔)



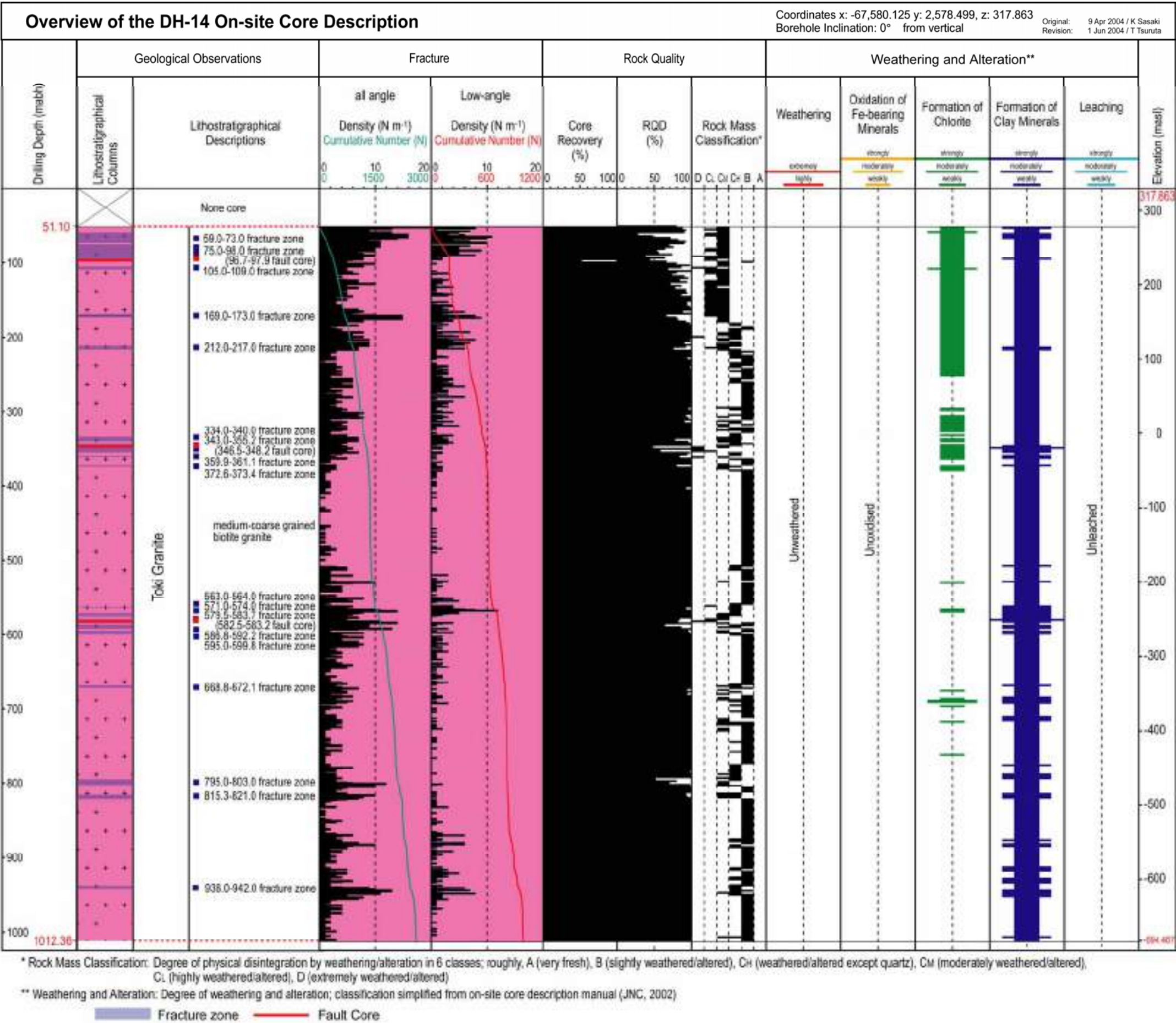
広域地下水流動研究におけるボーリング孔を利用した調査結果 (DH-11 号孔)



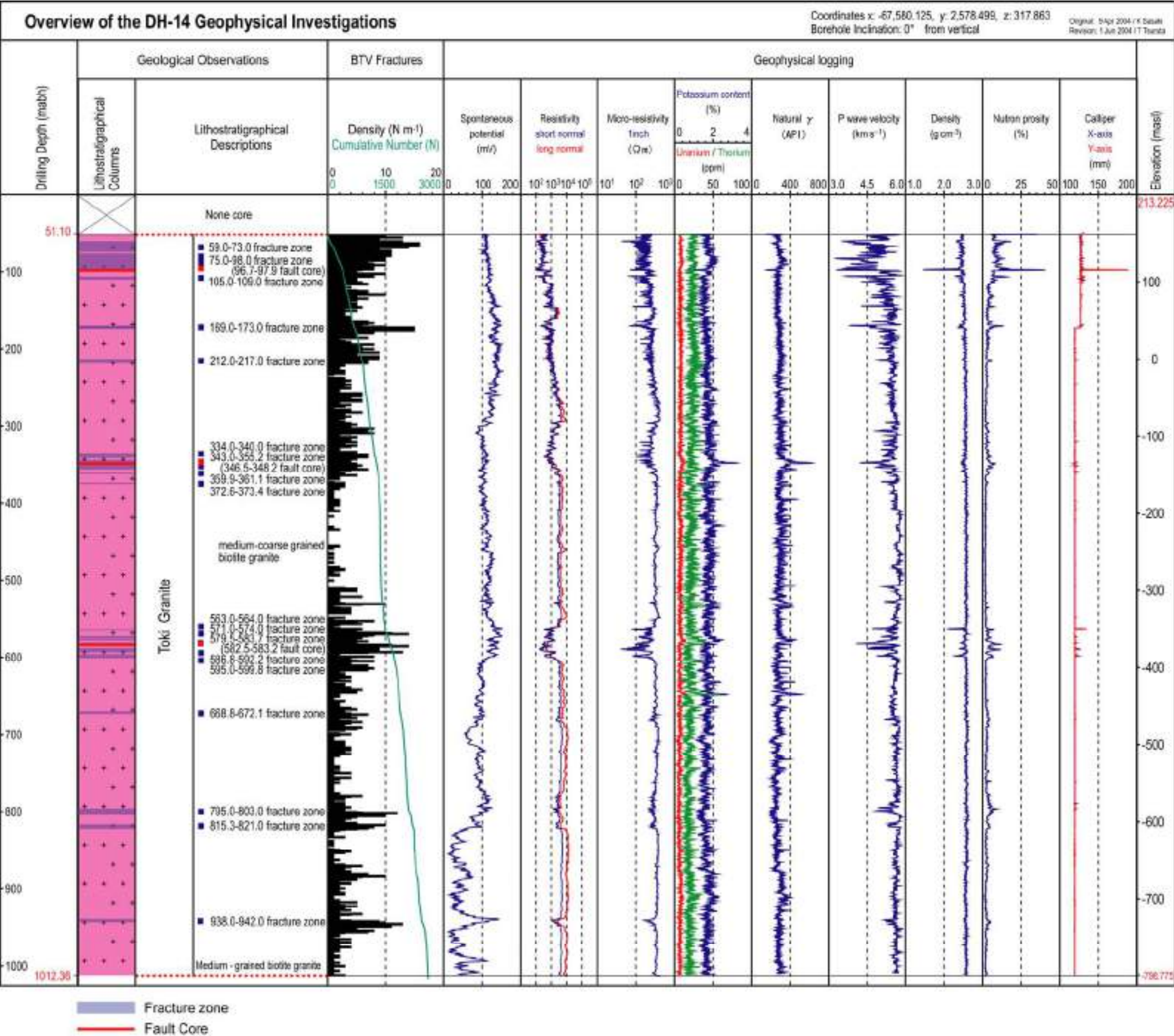
広域地下水流動研究におけるボーリング孔を利用した調査結果 (DH-12 号孔)



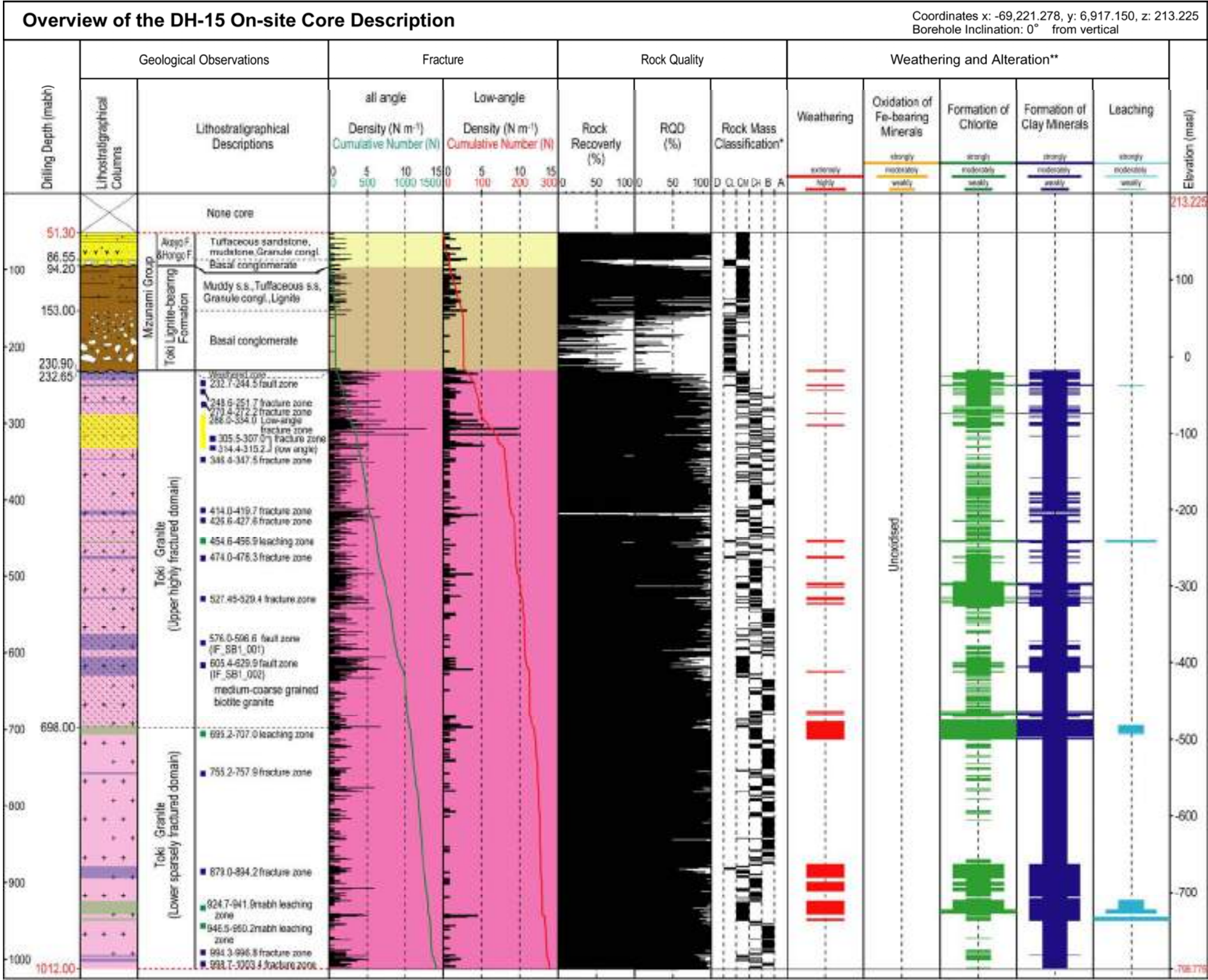
広域地下水流動研究におけるボーリング孔を利用した調査結果 (DH-13 号孔)



広域地下水流動研究におけるボーリング孔を利用した調査結果（DH-14 号孔：地質）



広域地下水流動研究におけるボーリング孔を利用した調査結果（DH-14 号孔：検層）



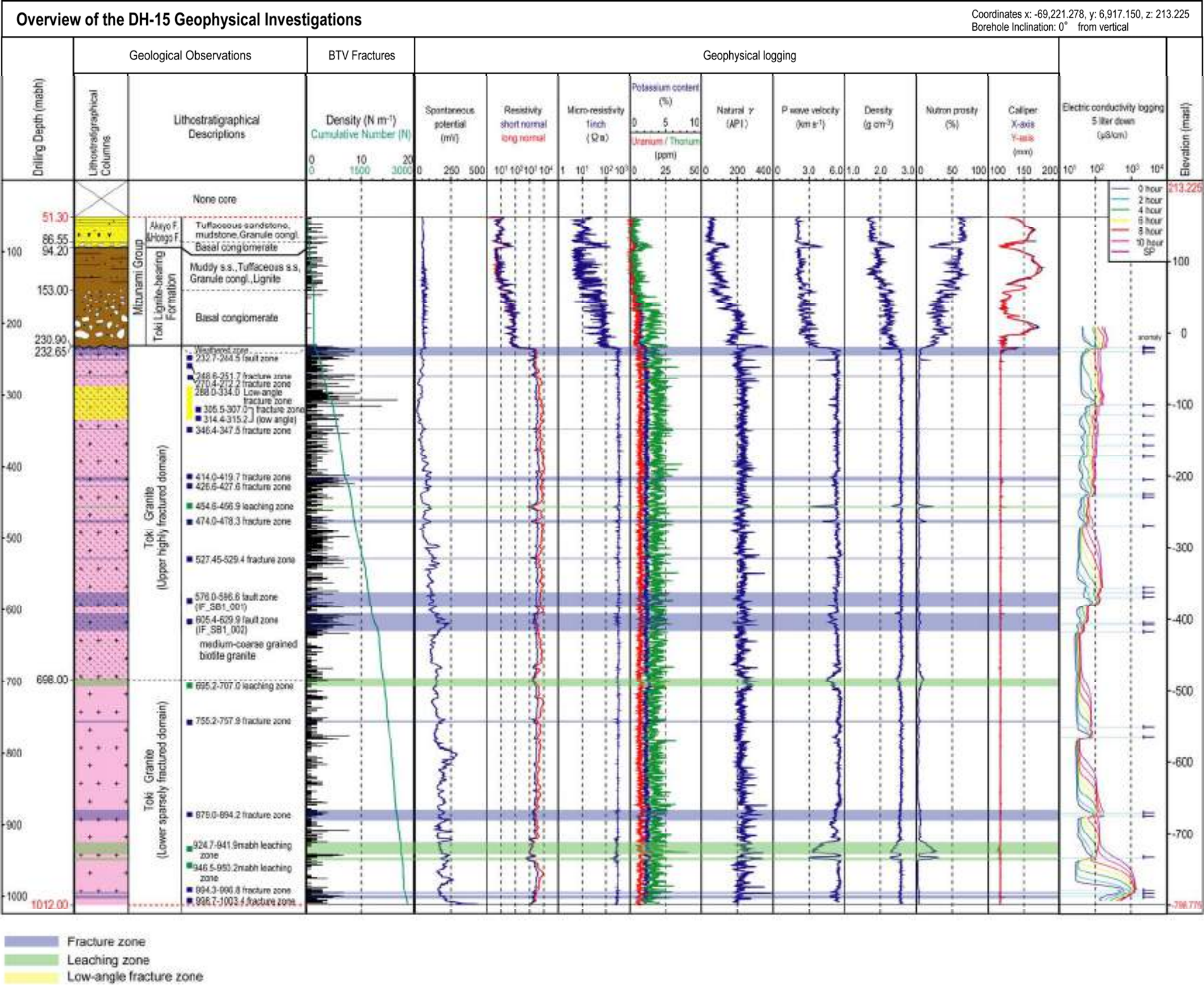
* Rock Mass Classification: Degree of physical disintegration by weathering/alteration in 6 classes; roughly, A (very fresh), B (slightly weathered/alterd), CH (weathered/alterd except quartz), CM (moderately weathered/alterd), CL (highly weathered/alterd), D (extremely weathered/alterd)

** Weathering and Alteration: Degree of weathering and alteration; classification simplified from on-site core description manual (JNC, 2002)

Fracture zone

Leaching zone

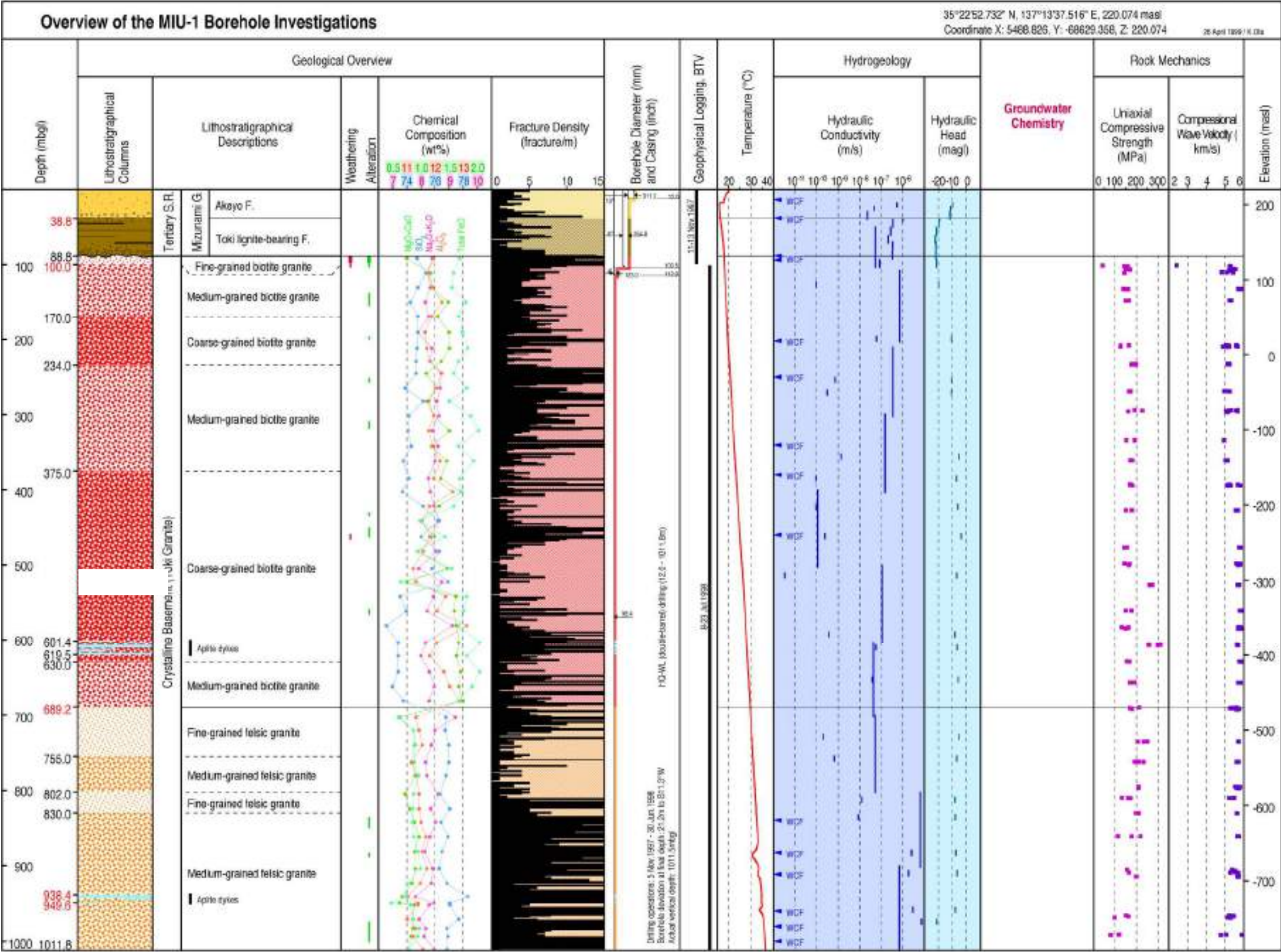
Low-angle fracture zone



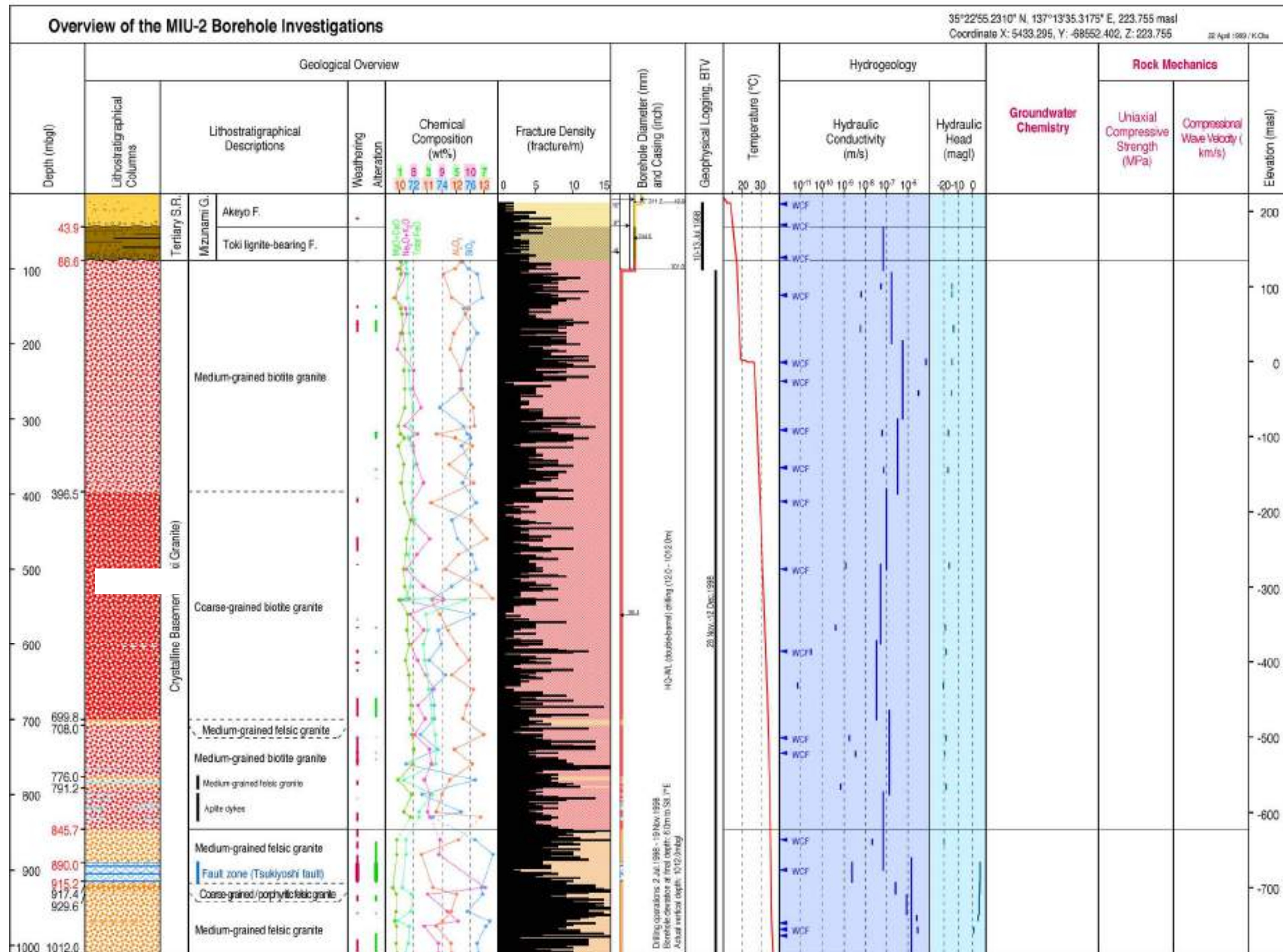
広域地下水流動研究におけるボーリング孔を利用した調査結果 (DH-15 : 検層)

付録 6

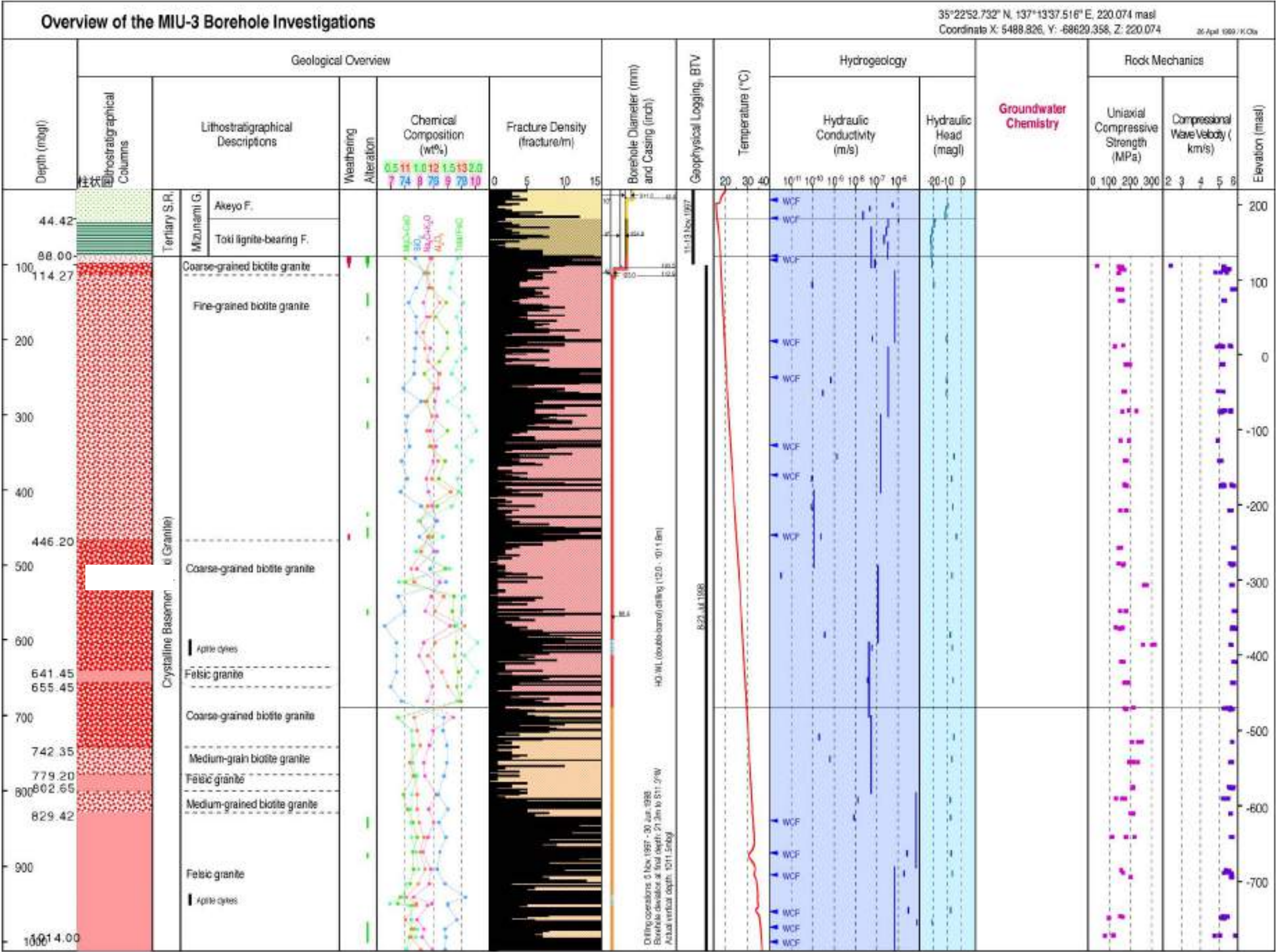
正馬様用地におけるボーリング孔を利用した調査の結果概要



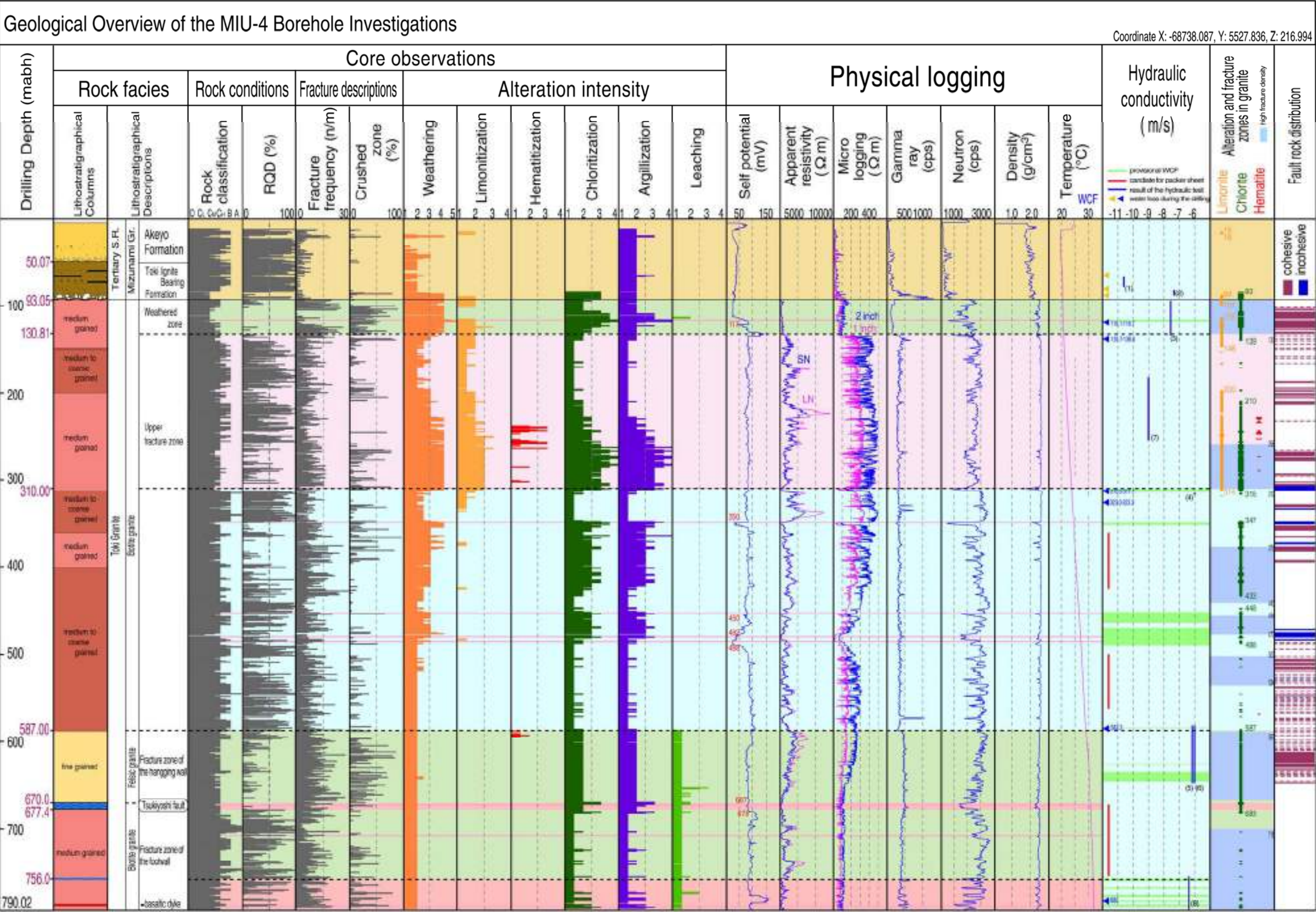
正馬様用地におけるボーリング孔を利用した調査結果 (MIU-1)



正馬様用地におけるボーリング孔を利用した調査結果 (MIU-2)



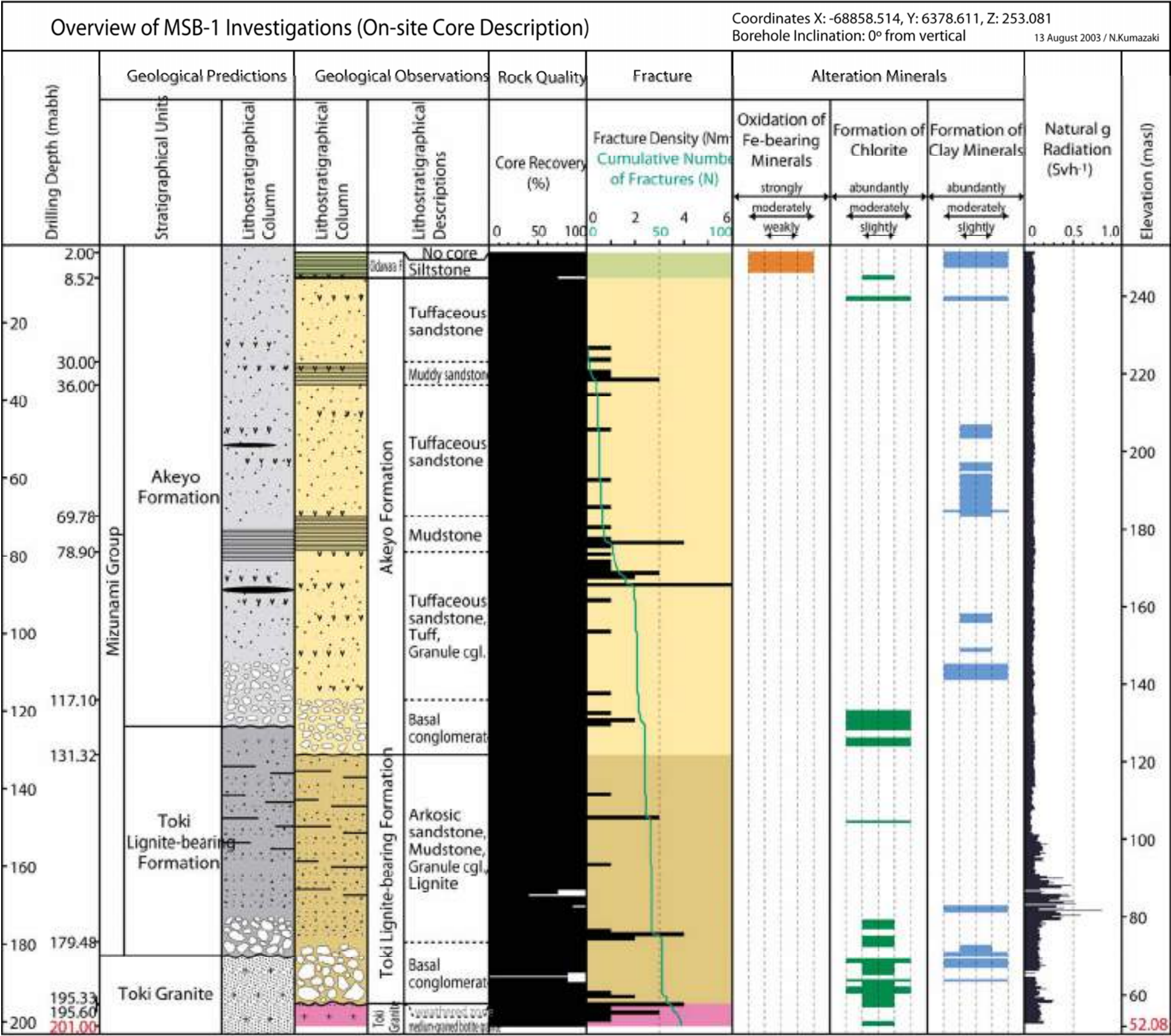
正馬様用地におけるボーリング孔を利用した調査結果（MIU-3）



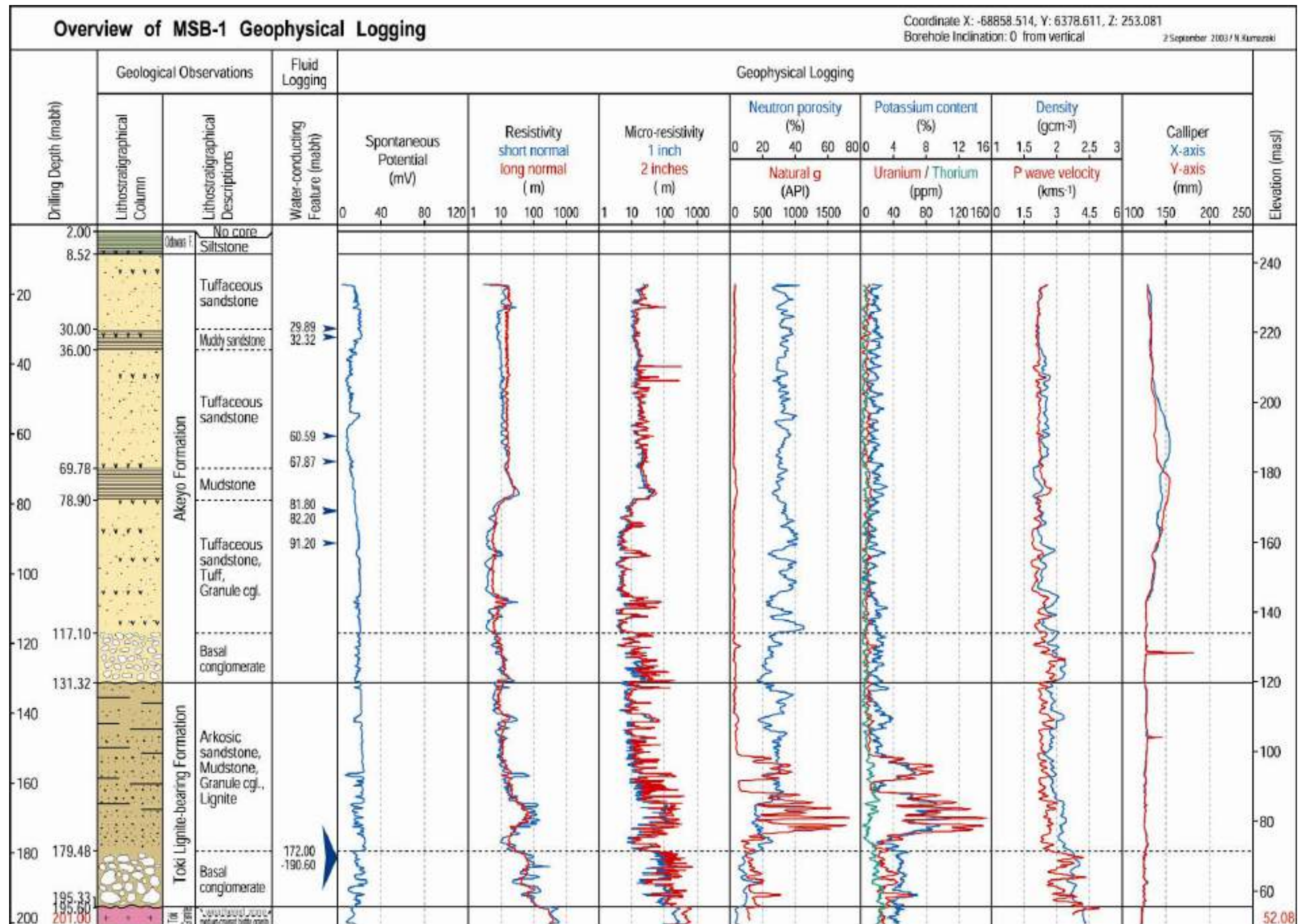
正馬様用地におけるボーリング孔を利用した調査結果 (MIU-4)

付録 7

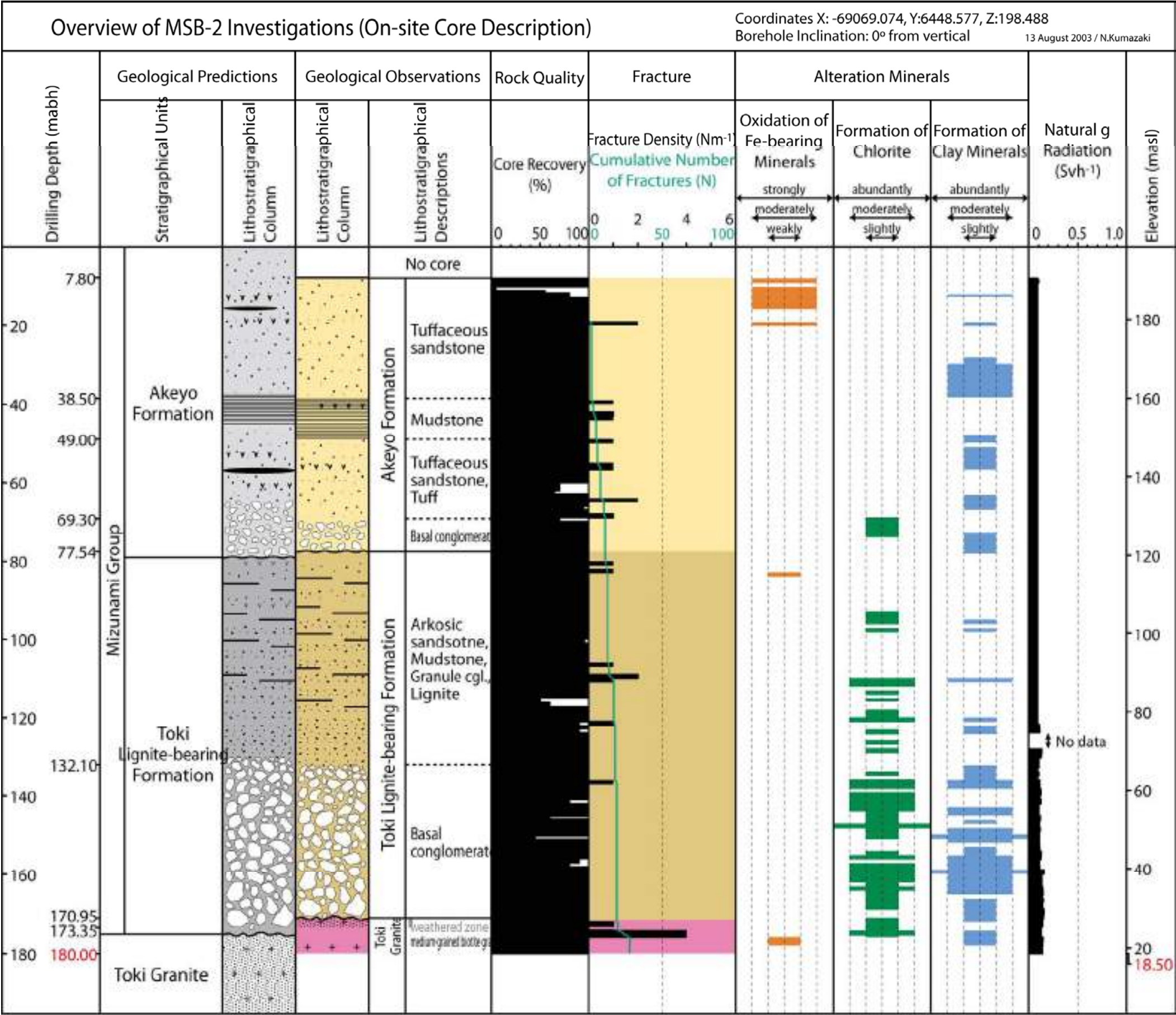
研究所用地におけるボーリング孔を利用した調査の結果概要



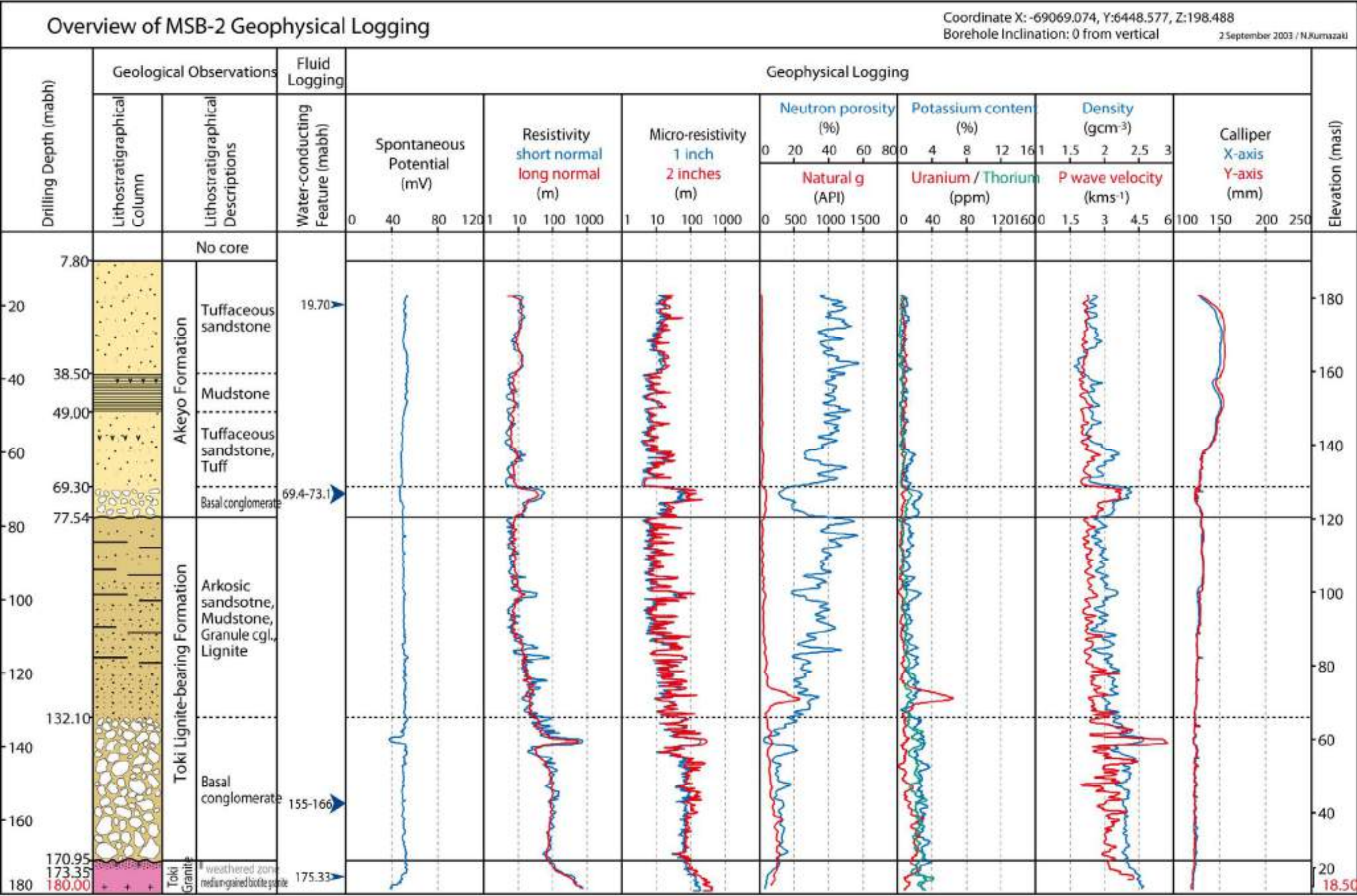
研究用地におけるボーリング孔を利用した調査結果（MSB-1 号孔：地質）



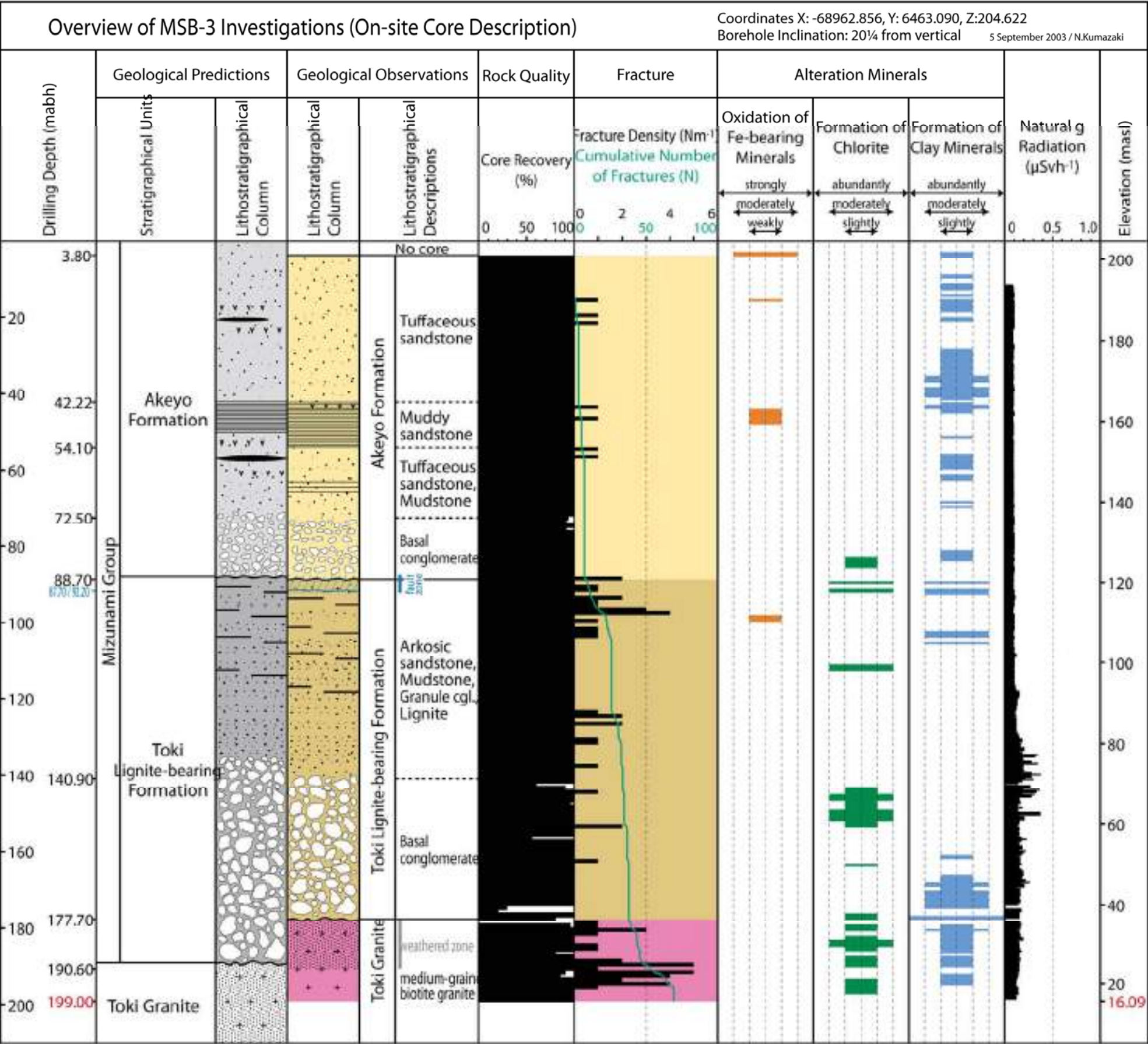
研究用地におけるボーリング孔を利用した調査結果 (MSB-1 号孔: 検層)



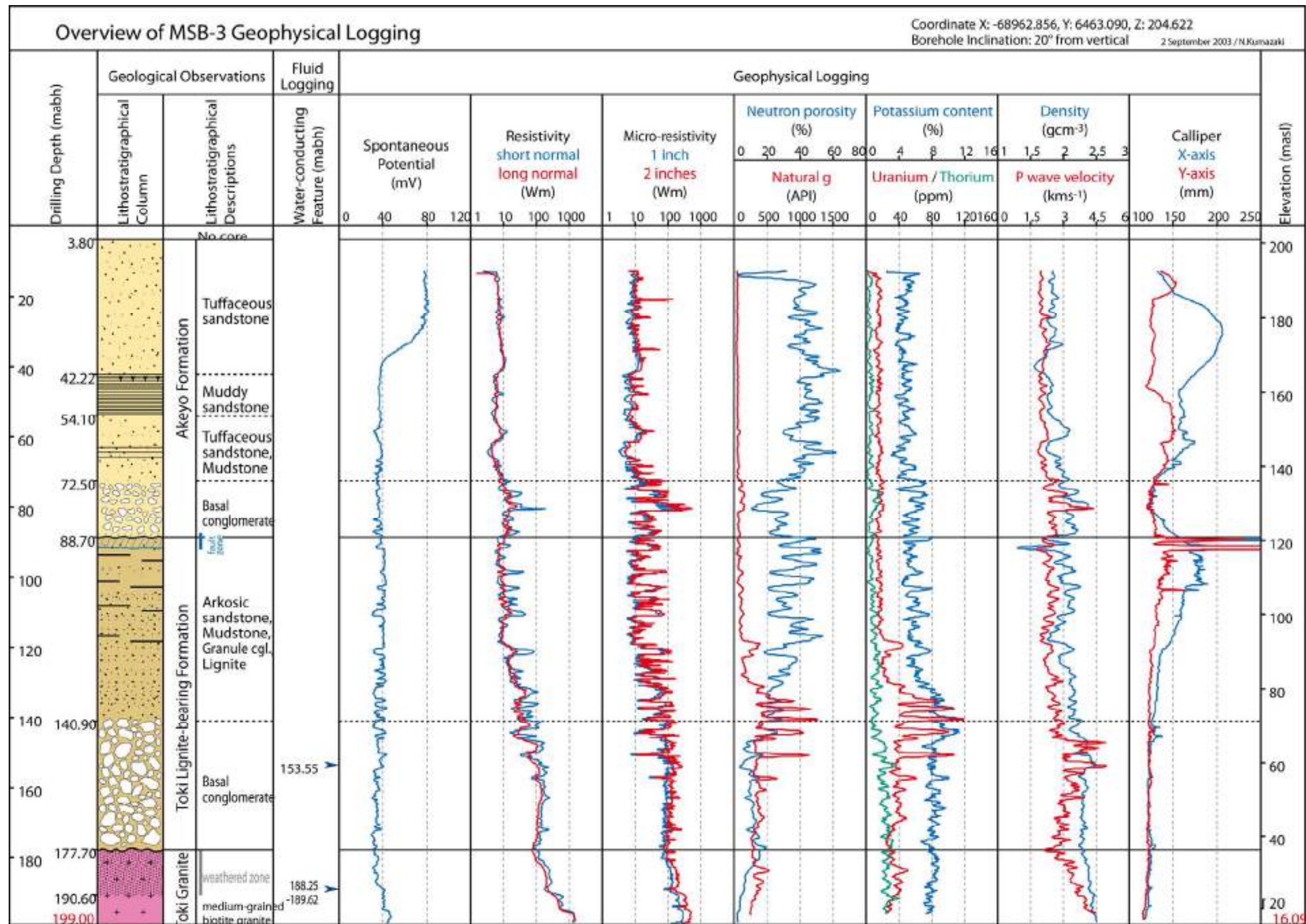
研究所周地におけるボーリング孔を利用した調査結果（MSB-2 号孔：地質）



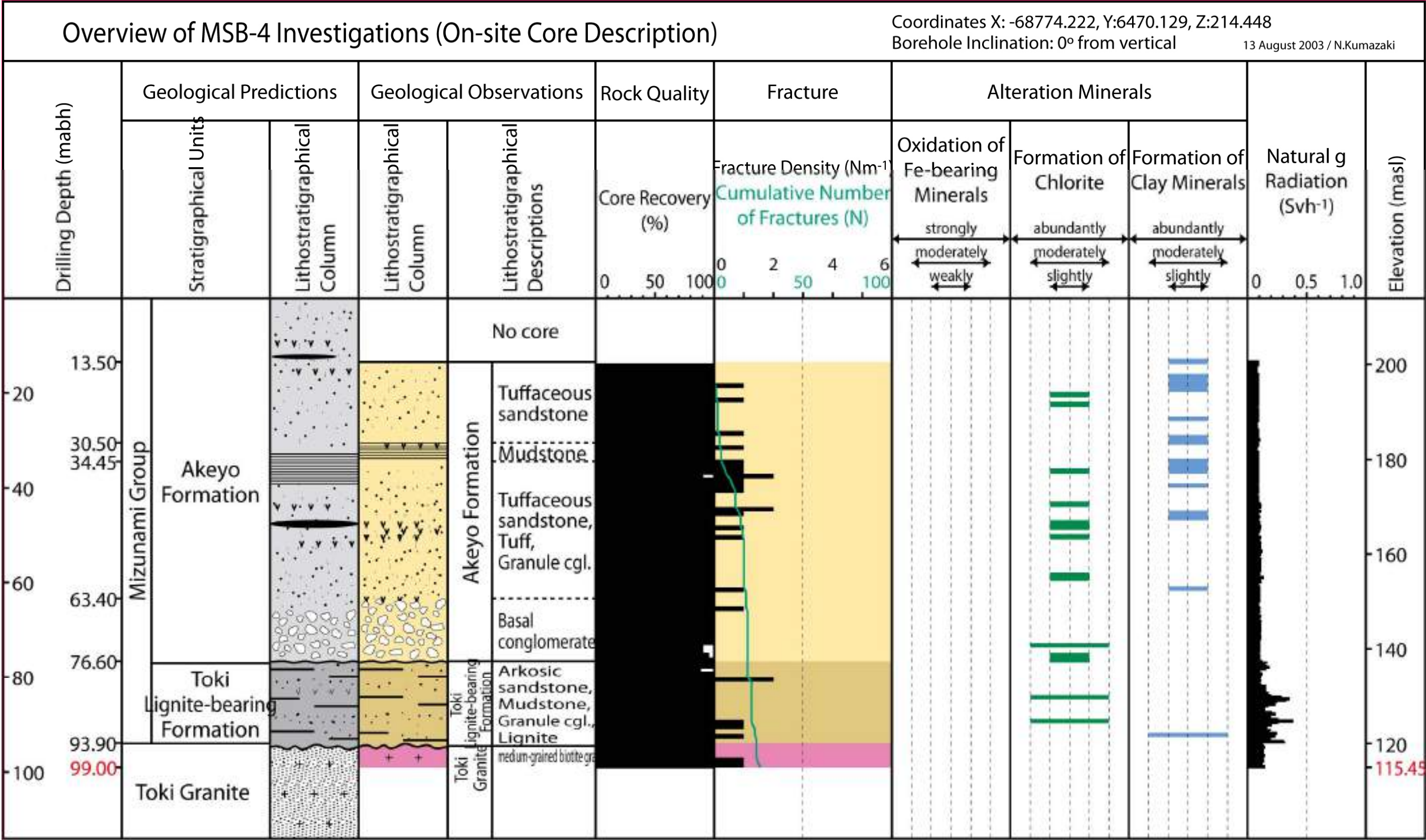
研究所用地におけるボーリング孔を利用した調査結果（MSB-2 号孔：検層）



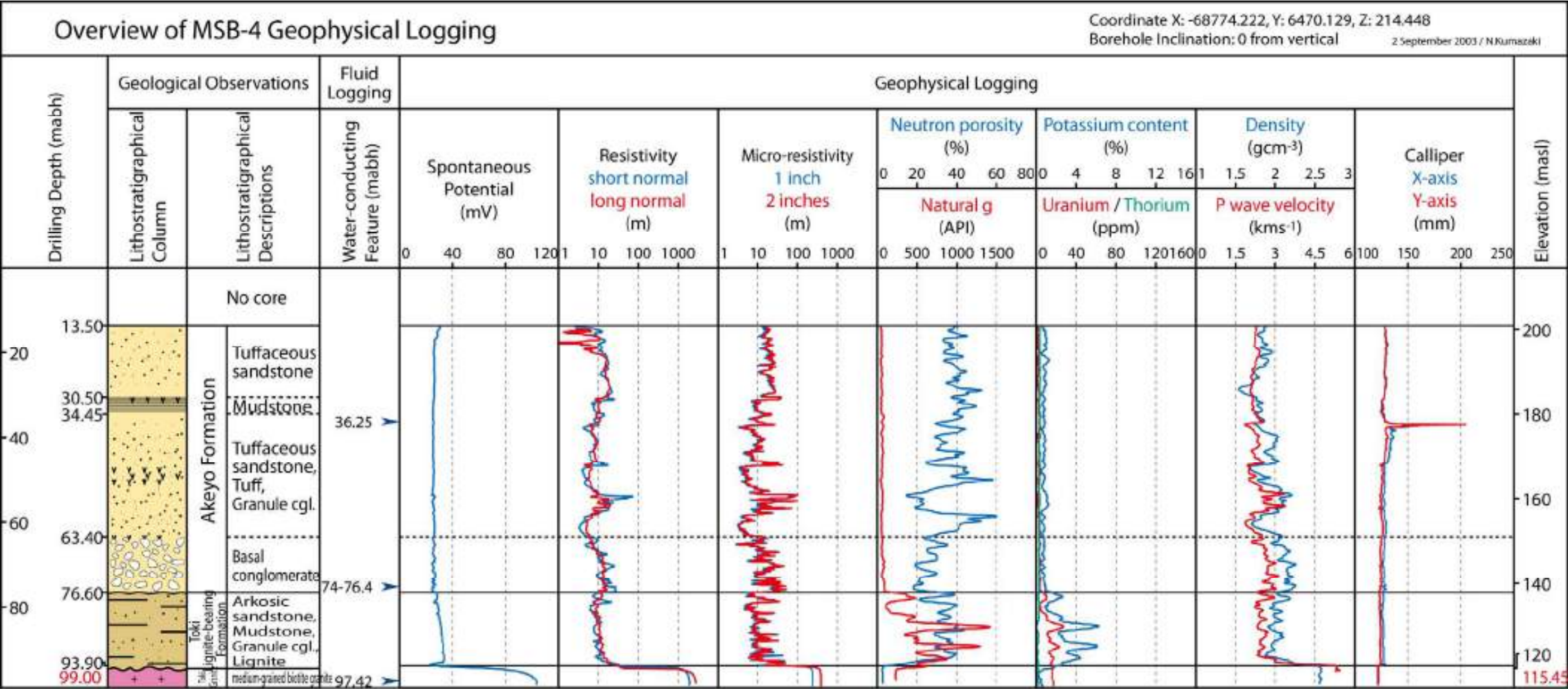
研究所用地におけるボーリング孔を利用した調査結果（MSB-3 号孔：地質）



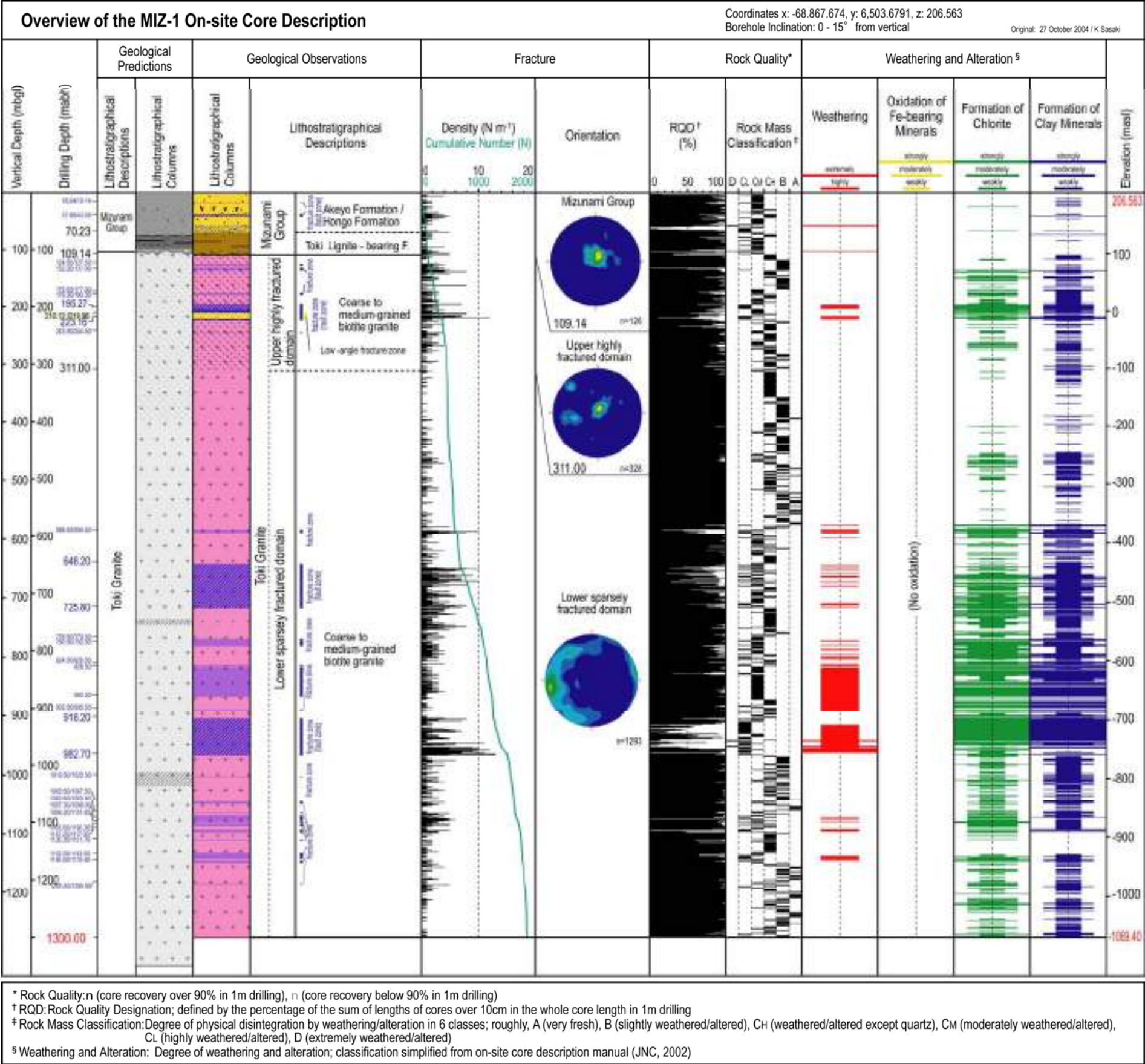
研究用地におけるボーリング孔を利用した調査結果 (MSB-3 号孔 : 検層)



研究所用地におけるボーリング孔を利用した調査結果（MSB-4 号孔：地質）

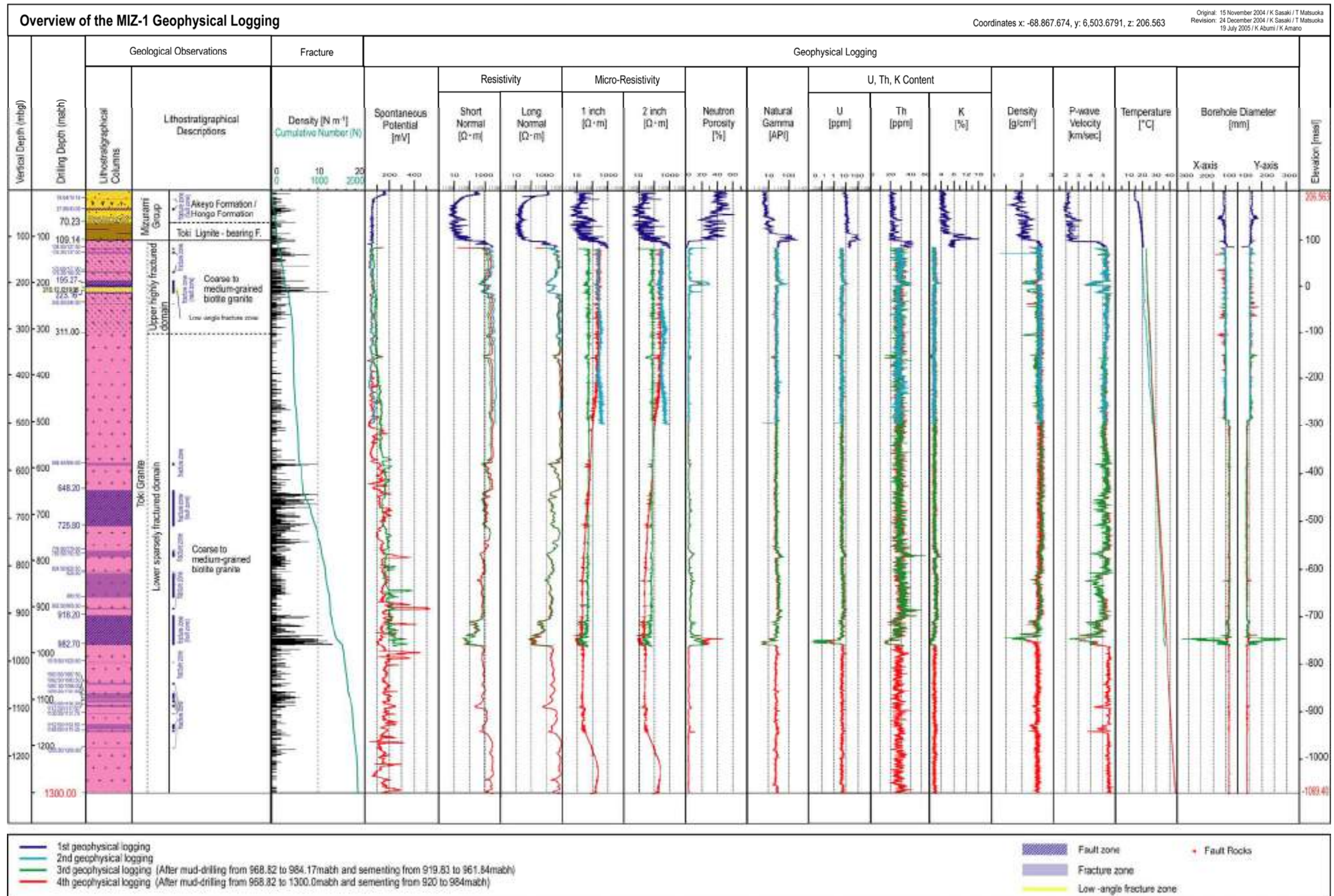


研究所用地におけるボーリング孔を利用した調査結果（MSB-4 号孔：検層）



研究用地におけるボーリング孔を利用した調査結果（MIZ-1 号孔：地質）

Coordinates x: -68.867.674, y: 6,503.6791, z: 206.563

Original: 15 November 2004 / K Sasaki / T Matsuoka
Revision: 24 December 2004 / K Sasaki / T Matsuoka
19 July 2005 / K Abumi / K Amano

研究所用地におけるボーリング孔を利用した調査結果（MIZ-1 号孔：検層）

付録 8

第 1 段階で実施、開発した地質環境の調査・評価技術

第 1 段階で実施、開発した地質環境の調査・評価技術(1/3)

調査・評価技術		目的・背景・トラブル事例など	成果・反映事項・ノウハウ・課題など
リニアメント調査技術		・リニアメントの判読精度を把握するために、一般的に用いられる中で最も大縮尺の画像(1万分の1縮尺の空中写真)を用いたリニアメント判読を行い、適正に抽出できるリニアメントの規模や判読精度について検討する。 ・小規模なリニアメントが、断層や割れ目帯などの不連続構造の推定に有効かどうか検討するために、これまでに他の調査結果(地表地質調査やボーリング調査結果など)から得られた不連続構造の位置や走向との比較検討を行う。	・小規模リニアメントの判読限界は、基盤岩分布地域では長さ約300～1,000m程度、瑞浪層群分布地域では約400～1,000m程度である。 ・リニアメントは特定の地形要素を元に判読するため、その地形の取り得る幅(谷幅など)約20～60m程度が、判読位置の精度の幅である。 ・小規模なリニアメントと他の調査結果から得られた不連続構造とを比較した結果、両者の分布および方向性に関して概ね整合的な箇所を確認できた。この結果は、数百m程度のリニアメントが断層や割れ目帯を反映している可能性を示唆している。 ・リニアメントと基盤岩露頭で観察した割れ目において、それぞれの長さと分布密度の関係から、両者が概ね同一のフラクタル特性を有することが確認された。この結果は、両者の関係を利用すれば露頭調査やリニアメント調査では抽出が難しい数m～数百m規模の割れ目の頻度を推定できる可能性を示唆している。
物理探査技術	反射法 弾性波探査	・堆積岩を対象とした適用性については、比較的良く把握されているが、花崗岩を対象とした適用性については、これまでに十分に議論されていないため、花崗岩を対象として、その有効性について検討する。	・花崗岩中の反射イベントのS/N(Signal / Noise)比や反射イメージング精度の向上を目的とした処理・解析の試みとして、花崗岩を対象としたNMO(Normal Move Out)補正速度とデコンボリューションパラメータを適用した。さらに、表面波抑制処理、サーフィスコンシステントデコンボリューション、相対振幅保存処理ならびに重合前時間マイグレーションも適用した。 ・これらの処理・解析では、花崗岩中の実際の地質構造を反映していると思われる反射イベントの可視化ができ、特に花崗岩の上に堆積岩が厚く被覆するような条件下では、地質構造解釈をする上で、一般的な処理・解析に加えてこのような処理・解析手法の適用は効果的である。
	高密度 電気探査	・花崗岩が地表に露出する地域においては、反射法弾性波探査では、指標となる堆積岩中の地層境界などの明瞭な反射イベントが得られないため、高角度の不連続構造を抽出することは困難であることから、このような地域(条件下)における不連続構造の調査技術開発として実施する。	・ボーリング孔による情報を解析の拘束条件とすることにより正確な解析結果を得ることができ、花崗岩中の風化部や不連続構造などの分布に関する確度の高い地質構造解釈をするうえでは、高密度電気探査結果の解析・検討が効果的である。 ・さらに地質構造解釈の精度を向上させるためには、ボーリング孔と地表間を対象とした比抵抗トモグラフィ探査を実施し、ボーリング孔情報と高密度電気探査データをより精密に対応付けることが有効となり得ると考えられる。 ・調査計画の策定に際しては、地質構造が予想よりも複雑であるというような調査対象の不確実性を考慮して探査測線を設定することなどが重要である。
	マルチオフセット VSP探査	・反射法弾性波探査結果を補完するとともに、ボーリング孔周辺に複数の発震点を設けることによって、ボーリング孔周辺における反射法弾性波探査よりも詳細に不連続構造や割れ目帯の分布を推定する可能性を検討する。	・VSPマイグレーションを適用した各オフセットVSP記録を重合した断面においては、地表地質調査や反射法弾性波探査で確認・推定された高角度の断層の花崗岩深部への延長と考えられる反射イベントの不連続を抽出可能である。 ・マルチオフセットVSP探査に使用した3成分受振器のうち、水平2成分記録を用いて、通常のオフセットVSP記録と同様に解析・重合した断面から、これらの高角度の断層から直接に反射したと考えられる反射イベントが抽出でき、ボーリング孔周辺の高角度の断層の分布を推定可能である。
ボーリング調査に関わる 計画の策定と改定		・岩盤の状況に応じて発生する様々なトラブルに迅速かつ適切に対応することが重要であり、トラブル対応などを想定した詳細な調査計画の立案と、調査の進展に伴う計画の見直しが必要である。 ・調査計画立案にあたっては、それ以前のステップまでの地質環境の理解に基づき調査対象を特定し、調査目標を明確にするとともに、調査対象の地質環境の予測結果ならびに時間や予算などの与条件を踏まえて、ボーリング孔のレイアウトや個別の調査項目・手法などの最適化および合理化を図ることが必要である。 ・特に、地質環境の予測から想定されるトラブルに対する対応策の検討と、それらの対応によって品質が低減する調査データの項目と許容限度を設定し、調査関係者間で認識を共有することが重要である。 ・様々な調査ニーズを最適化する必要がある、各調査の関係者間で十分な議論と認識の共有が必要である。	・正馬様用地において実施したMIU-4号孔ボーリング調査、浅層ボーリング孔を利用した調査および深層ボーリング孔を利用した調査の実施にあたって調査研究計画書を策定した。 ・予測される地質環境に対する孔径、ケーシングプログラムなどのボーリング掘削と、孔壁画像調査、流体検層、水理試験、地下水の採水などの調査・研究の実施のタイミング、区間などの調整を図り、その結果をボーリング調査計画図に集約した。 ・調査研究計画書には、物理検層、水理試験などの個々の調査目的に対する詳細な手法および品質管理手法に加え、孔壁崩壊や逸水などのトラブル発生時の対応オプションなどについても規定した。 ・分野別という縦割り組織に対して横断的に、マトリックスを形成する組織体制を構築して調査を実施した。 ・従来の分野別の上位に、分野間を調整する中核スタッフを配置した。 ・各分野間で共通する調査試験を監理するための調査試験チームを設置した。
掘削技術	孔径	・断層などに遭遇し掘削が困難となった場合に、以深の掘削を一回り小さい径で行うことができるオプションを残しておく必要がある。 ・高揚程・高流量のポンプの配置や配管径の拡張のため、試験装置の径の拡大が必要である。 ・ボーリングコアからの多くの地質学的情報を収集する必要がある。	・ボーリング孔径は原則として5 1/2”(約135mm)以上とする。
	ボーリング位置の 選定	・調査目的に応じた技術的な根拠に加えて社会的な側面を勘案し最適な位置とレイアウトを決定する必要がある。	・用地、設備配置と得たい地質環境情報の深度との兼ね合いを総合的に勘案し、コントロールボーリングを採用した(MIZ-1号孔)。
	ボーリング孔の 孔跡管理	MIZ-1号孔において計画した孔跡が制御できなかった。 原因: ・傾斜, 方位の管理方法が不十分であった。 ・導入したコントロール掘削装置が岩盤の強度に対して不十分であった。	・孔底から深度途中までをセメントで埋め戻し、その深度からウエッジ工法およびMWD工法によりサイドトラック掘削を実施し、計画通りの孔跡を得ることができた。

第 1 段階で実施、開発した地質環境の調査・評価技術(2/3)

調査・評価技術		目的・背景・トラブル事例など	成果・反映事項・ノウハウ・課題など													
掘削技術 (続き)	孔内崩壊への対応		・掘削中に崩壊が発生した場合は一旦掘削を中断し、計画した孔内での検層や試験を当該深度まで実施することが、データの欠損を最小限に留めることができるとともに、ボーリング孔沿いの諸特性の信頼性を確保する上で適当である。 ・崩壊箇所までの検層および試験の終了後は当該箇所をセメント保孔し、深部における掘削および調査を継続可能である。 ・セメント箇所において崩壊が継続する場合は、当該箇所までケーシングパイプを挿入し、セメント固定したうえでさらに深部の掘削が継続可能である。 ・崩壊箇所が浅部の場合は、ケーシングパイプ挿入前に径の大きなビットで拡孔をした後にケーシングパイプを挿入しセメント保孔することで、掘削前と同一の孔径で掘削することが可能である。 ・深部の場合は、掘削孔径を小さくすることで掘削を継続することが可能である。 ・断層などの影響により孔壁崩壊が継続し掘削の継続が困難である場合や、セメント保孔などの対策工による工程遅延が許容できない場合は、泥水を利用した掘削に切り替える。 ・泥水とセメントによる保孔対策を併用する場合は、泥水によるセメントのゲル化に起因する硬化不良などに留意する必要がある。													
	掘削水の管理	・清水掘削を行う場合、掘削循環水の比重が掘削スライムの比重より小さいことから、泥水による掘削に比べてスライムの排出不良が発生する可能性が高く、孔壁の拡大や掘削パイプの埋没などの原因となりやすい。	・岩盤に最適なビット選択(スライムの微細化)、および掘削孔径と掘削パイプ径がほぼ同じであるワイヤーライン工法の採用(掘削循環水の流速の向上)により、スライムの排出を改善した。 ・遠心分離装置などを用いて積極的にスライムを排出した。 ・掘削循環水の流速が大きすぎる場合には孔壁崩壊を誘発させる可能性があるため、掘削工法、孔径、送水量および送水圧に留意し、岩盤状況に応じてアニュラス(掘削パイプと孔壁の間隙)の循環水量を適切に調整する。 ・地下水の採水調査において採水した地下水中に残留している掘削水の割合とその不確実性を定量的に評価するために、掘削水として用いる清水に蛍光染料を添加し、その濃度を一定にする管理を行う。													
	掘削パイプの強度	・MIU-4号孔(掘削長約790mの傾斜掘り)で、断層帯の孔壁崩壊などに起因する掘削スライムの排出不良により掘削パイプのネジ部が切断し、掘削パイプが抑留した。その回収と孔壁状況の改善(セメント保孔)のため工程が約3ヶ月遅延した。 ・MIU-1号孔で、ステンレス製の仮ケーシングパイプの切断による掘削パイプの抑留が発生し、工程が約1.5ヶ月遅延した。	・孔壁崩壊への対応や掘削水の管理とともに、適切な掘削工法の選択と、孔内で使用するパイプのネジ部の強度や締め付けトルク管理、パイプ自体の強度にも十分に留意する。													
	掘削パラメータの取得	・掘削管理、岩盤状況や地質環境特性情報取得、逸水などの孔内状況把握のため必要である。 ・迅速なトラブル対応のため必要である。 ・トラブルの発生位置や規模、水理試験・採水区間の選定情報などとして利用されることから、迅速なデータの入手が不可欠である。	・掘削パラメーター(掘削能率、回転数、ビット荷重、送水量、送水圧力、リターン水量、トルク、水温、電気伝導度、pHなど)を取得した。 ・掘削管理の観点では、掘削パラメータを常時監視・記録することにより、孔内状況および今後の掘削における最適な掘削パラメータの把握が可能である。とくに、掘削スライムの増加、スライム中へのロッド埋没による送水圧や電気伝導の増加の検出による孔壁崩壊などの前兆予測の情報として、また掘削ビット交換時期とパラメータの最適化の指針として重要である。 ・地質環境特性情報としてはリターン水量、水温、電気伝導度、pHの変化などを重要な透水性割れ目の深度の特定などに利用した。 ・MIU-4号孔以降は連続的にパラメータを取得できるモニタリング装置を導入した。 ・MIU-4号孔では、現場から電話回線を経由して居室のパソコンに常時データを確認できるシステムを採用した。													
	ボーリングコアの採取	・岩芯採取率の向上のために必要である。 ・二重管ワイヤーライン工法においてもコアの採取率は90%以上であったが、コアの取り出しの際に破壊してしまうことや、特に断層および破碎帯でのコアの採取率低下や、復元困難などの課題がある。	・コアバレルのインナーチューブにアクリル管を用いた三重管工法を採用した。 ・掘削水量、回転数、掘削速度などの掘削パラメーターとオペレーターの経験を踏まえた最適な掘削フローを確立することが必要である。 ・コア採取については掘削オペレータの掘削技術に依存する部分が多く、掘削水量、回転数、掘削速度などのパラメータの調整はオペレータの経験と勘に頼っているのが現状であるが、第1段階で取得した掘削パラメータは、オペレータの経験を踏まえた適切な対処データであるため、これらを定量化した最適な掘削フローを調査研究計画書や施工手順に定めておくことが重要である。													
	超深地層研究所計画における土岐花崗岩を主な研究対象とした地表におけるボーリング調査の基本仕様		<table><tr><td>孔径</td><td>5 1/2"以上</td></tr><tr><td>ケーシングプログラム</td><td>多段掘削</td></tr><tr><td>掘削水</td><td>原則として清水</td></tr><tr><td>掘削水管理</td><td>染料濃度および逸水量の管理による循環水監視</td></tr><tr><td>コアリング</td><td>アクリルパイプを内包した三重管工法</td></tr><tr><td rowspan="3">保孔技術</td><td>逸水時 : 逸水防止剤による閉塞</td></tr><tr><td>崩壊 : 部分セメンチング</td></tr><tr><td>大規模崩壊 : ケーシング保孔</td></tr></table>	孔径	5 1/2"以上	ケーシングプログラム	多段掘削	掘削水	原則として清水	掘削水管理	染料濃度および逸水量の管理による循環水監視	コアリング	アクリルパイプを内包した三重管工法	保孔技術	逸水時 : 逸水防止剤による閉塞	崩壊 : 部分セメンチング
孔径	5 1/2"以上															
ケーシングプログラム	多段掘削															
掘削水	原則として清水															
掘削水管理	染料濃度および逸水量の管理による循環水監視															
コアリング	アクリルパイプを内包した三重管工法															
保孔技術	逸水時 : 逸水防止剤による閉塞															
	崩壊 : 部分セメンチング															
	大規模崩壊 : ケーシング保孔															

第 1 段階で実施、開発した地質環境の調査・評価技術(3/3)

調査・評価技術		目的・背景・トラブル事例など	成果・反映事項・ノウハウ・課題など
物理検層技術	割れ目帯の抽出技術	・一般に割れ目帯の定義やそれに基づく客観的な抽出基準が整備されておらず、割れ目帯の幅を一義的に決定するとともに、ボーリング孔間の対比が難しいことから、割れ目帯の客観的な定義および抽出基準を構築する。	・深度方向に連続的かつ定量的なデータが取得できる孔壁画像調査や物理検層など複数のデータを主成分分析し、得られた主成分得点を用いて割れ目帯と健岩部を区分した。 ・主成分得点が低いほど破碎や変質の程度が強い傾向があること、主成分得点で健岩部とした区間には、顕著な割れ目帯は認められないことなどから、この抽出方法は概ね有効である。 ・主成分得点の大小を基に統計学的処理を行い抽出したアノマリは、変質帯など、健岩部とは異なる物性値を有することだけで抽出される傾向にあるため、最終的な割れ目帯の設定には岩芯の破碎・変質の程度を確認する必要がある。
流体検層技術		・孔内水を地下水の電気伝導度と異なる水(脱イオン水や塩水など)で置換し、その後、揚水をしながら孔沿いの電気伝導度を測定することにより、電気伝導度の有意な変化が認められる亀裂を検出する方法(電気伝導度検層技術)を確立する。	・イオン交換樹脂を介して孔内水を循環させることにより精製した脱イオン水を用いて孔内水を置換することにより、これまで一般的に使用されてきたフローメータ検層では検出できなかった詳細な地下水の流入点を把握することが可能となる。 ・透水量係数で10-8m2 s-1よりも大きい透水性を示す割れ目の検出が可能である。 ・電気伝導度検層はこれまでの流体検層と比較すると2桁程度低い値を有する透水性割れ目の検出が可能である。 ・電気伝導度検層の結果を評価する際には、地下水の電気伝導度の違いを考慮するとともに、電気伝度検層で検出された水みちを対象とした水理試験を実施し、透水性を確認することが重要である。
水理試験技術		幅の広い透水性を有する岩盤(10 ⁻¹² ~10 ⁻³ m ² s ⁻¹ オーダー程度)に対して、試験データの品質を確保して取得するための試験装置の改良、試験手法の構築ならびにデータの評価手法の改良からなる一連の試験手法を構築する。	・高透水性岩盤において岩盤に明瞭な水圧変動を発生させることを目的として、配管の管路抵抗をできるだけ小さくするよう配管径を拡大する。 ・孔内貯留の影響を低減し、適切に水理特性を評価可能な時間領域のデータを長時間にわたって取得することを目的として、大揚水流量での揚水、井戸貯留の低減が可能なポンプの改良と、改良ポンプを装備可能な装置を製作した。 ・試験区間の透水性に相応した試験手法を適切に選択し、効率的な試験の実施が可能な試験手法(シーケンシャル試験)を構築 ・試験データの評価に関して、取得データから透水性を算出するデータ領域を適切に抽出するために、圧力変化の時間微分プロットを導入した。
地下水の地球化学調査に関わる調査技術		・地下水試料中の掘削水の混入による汚染割合を把握する。 ・正馬様用地で実施した深層ボーリング調査(MIU-1,2,3号孔)では、目的とする深度(1000m)までボーリング掘削を終了した後に、地下水採水を行う手順としていたが、この手順ではボーリング掘削中に、掘削水が逸水する割れ目(帯)に遭遇し、大量(数十~数百m ³)の掘削水を岩盤に注入してしまったため、掘削水による汚染を除去できず、これらの区間からの地下水採水が不可能であった。 ・上記問題点を解決するために、ボーリング掘削の途中で揚水試験と合わせて地下水の採水を行うこととし、岩盤中への掘削水の混入量を低減させる観点から、掘削中の逸水発生時に掘削を中断して揚水試験と組み合わせて実施する手順を構築する。 ・揚水試験に伴う採水手法の短所である、揚水中の脱ガスにより溶存ガスの濃度変化や、物理化学パラメータ値の変化を解決する。 ・ボーリング掘削にともなう地質環境の擾乱の有無を確認する。	・掘削水にトレーサ物質(蛍光染料)を一定濃度で添加する。 ・揚水試験中に排水される地下水の化学成分濃度、蛍光染料濃度とpHや電気伝導度などの物理化学パラメータを定期的に分析、測定し、蛍光染料濃度が十分に低下し、物理化学パラメータが一定になった時点で地下水を採水する方法が有効である。 ・掘削水のpHや電気伝導度などを常時モニタリングし、水質の変化の兆候が観察された場合は、掘削水を入れ替える必要がある。 ・溶存ガスの濃度変化や、物理化学パラメータ値の変化を解決するためには、揚水試験装置の採水区間に直接バッチ式採水ボトルを挿入し、原位置の圧力環境下で地下水を採水する、あるいは揚水試験終了後に地下水採水のための専用の装置を用いて、地下水採水を行う方法を採用した。 ・地下水の酸化還元電位値を得るために、岩盤中に存在する酸化還元反応物質と、ボーリング掘削時に地下にもたらされる人為的な酸化還元反応物質による酸化還元反応についての熱力学計算による事前予測や、孔壁画像調査により人為的にもたらされる酸化還元反応制限固相の有無の確認が必要である。
初期応力測定技術		・ボーリング孔を利用する調査において、主応力の大きさと方向に関して、値の算出に仮定を設けずに三次元主応力を決定できる方法を確立する。 ・耐水性、耐熱性およびハンドリングの困難さを克服する。 ・既存の応力解放法による初期応力測定技術の大深度ボーリング孔への適用性を拡大する。	・応力解放ひずみを計測するひずみゲージセルおよび接着装置、応力解放ひずみを収録するデータロガー、方位傾斜計測装置、リチウム電池から構成される初期応力測定装置を開発した。 ・パイロット孔の掘削から初期応力測定装置の設置、オーバーコアリングまでをワイヤラインシステムにより実施可能なシステムを採用することにより、作業効率が向上し、大深度ボーリング孔への適用を実現した(東濃鉱山で検証)。 ・初期応力状態は、特に断層などの不連続構造の存在により大きく変化する場合もあるため、主要な不連続構造を把握した上で測定計画を立てる必要がある。
地質構造／水理地質構造のモデル化および地下水流動解析		迅速な地質環境モデルの構築支援ツールを開発する。	地質構造モデルの構築から水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析までの一連の作業に必要なソフトウェアや解析コードを統合したGEOMASS(GEOLOGICAL MODELLING ANALYSIS AND SIMULATION SOFTWARE)システムを構築した。
品質管理手法		・地層処分技術や地質環境に関する研究成果などの信頼性を恒常的に高めていくため。	・研究成果の品質を保証する上で、「透明性」、「追跡性」、「公開性」、「専門家のレビュー」の4点に留意することが肝要である。 ・調査目的を効率的かつ適切に達成するために、発生し得る事象を事前に可能な限り想定し、それぞれの対応策を検討・準備することが必要である。 ・アクションプログラムとしてボーリング調査や物理探査などの調査毎に実施計画書を策定した。 ・計画書には作業工程、作業体制、使用する調査・解析手法、予想される問題の対策、各作業の手順、品質管理や安全確保のための作業チェックリストなどを定め、調査の開始には実施計画書の内容に関する品質保証の責任者の承認が必要とした。 ・ボーリング調査の場合は実施する作業項目も多岐にわたることから、調査毎の品質を確保するため、調査毎の品質管理計画書を策定した。 ・深層ボーリング調査(MIZ-1号孔)では、掘削作業、岩芯調査、岩芯室内試験、ポアホールテレビ測定、物理検層、水理試験、井戸水・掘削水・揚水試料の分析などに関する個別の計画書を策定した。 ・類似事例の経験を有する専門家によるレビューを実施した。 ・PDPC(Process Decision Program Chart)を活用する。

付録 9

共同研究リスト

大学等研究機関との共同研究等、研究協力一覧表

研究協力機関・所属		研究協力実施テーマ	実施内容及び成果の概要	実施期間
【大学等】				
埼玉大学	理工学研究科	地下水流動調査研究： 地下水流動の総合調査・解析システムの開発	地下水流動の総合調査・解析システムの開発の一環として、地表部での水収支を把握することを目的に、地下水モニタリング解析システムの構築に関する基礎的研究を実施した。その結果、水収支の把握や表層モニタリングデータの相互関係を評価する上で、ニューラルネットワークモデルによる解析手法が有効であることを示した。	平成8年度～平成11年度
	地圏科学研究センター	地下水流動特性評価に関する研究： 地下水総合モニタリング情報を用いた水理地質構造モデル化手法の開発に関する研究	水理地質構造モデルを構築するための地下水モニタリングデータの活用方法を開発することを目的として、ニューラルネットワークモデルを適用したモニタリングデータ解析を実施した。その結果、モニタリングデータ間の相関関係を把握し、その結果に基づく水理地質構造区分を推定できることを示した。また、モニタリングデータに影響を及ぼしている人為的な影響の定量的評価を行うことができることを示した。	平成12年度～平成14年度
京都大学	工学研究科 合成・生物化学専攻	深部地質環境に対する微生物の影響に関する研究： (2) 深部地下における微生物生態系とその物質循環系の解析	深部地質環境中における微生物の役割を把握することを目的として、東濃地域の堆積岩および花崗岩中の微生物について、DNA解析手法に基づいて、微生物が生成する酵素などについて調査解析を実施した。その結果、還元環境において、還元環境の形成に関わる微生物を抽出し、それらの微生物の代謝過程で出される酵素を特定することができた。	平成10年度～平成11年度
広島大学	生物生産学部 生物生産学科	深部地質環境に対する微生物の影響に関する研究： (1) 深部地質環境における微生物生態系の多様性と機能に関する研究	深部地質環境中における微生物の役割を把握することを目的として、堆積岩（瑞浪層群）中の地下水について、微生物の存在量などの測定を実施した。その結果、特定微生物（硫酸還元菌、鉄酸化・還元菌など）の存在と地下水の地球化学特性には相関があることを示した。	平成10年度～平成11年度
	生物生産学部 生物生産学科	深部地質環境に対する微生物の影響に関する研究： 地下微生物群集の種組成と代謝の多様性に関する研究	深部地質環境中における微生物の役割を把握することを目的として、花崗岩（土岐花崗岩）中の地下水について、微生物の存在量などの測定を実施した。その結果、特定微生物（硫酸還元菌、鉄酸化・還元菌など）の存在と地下水の地球化学特性には相関があることを示した。また、堆積岩（瑞浪層群）、花崗岩（土岐花崗岩）を対象として、岩石を利用した微生物研究を行うための試料採取方法を構築することができた。	平成12年度～平成14年度
東北大学	工学研究科 地球工学専攻	マグマの固結・定置プロセスにおけるき裂形成メカニズムと透水性き裂の評価	形成年代の異なる2つの花崗岩体を対象とした野外調査と室内実験（弾性波速度測定）により節理の異方性についての検討を行った。その結果、微視き裂の方向性は露頭に分布する節理面の方向と調和的であるほか、弾性波速度の異方性と節理面および微視き裂の方向性とは良い一致を示すことから、弾性波速度の異方性から岩体内の節理構造や節理面の発達の評価が可能であることを示した。	平成12年度～平成14年度
	環境科学研究科 環境科学専攻	傾斜計を用いたモニタリング技術の開発	地表で計測される微小な傾斜データから地下水流動に影響を与える可能性のある水理地質構造を推定する手法を開発することを目的として、ナノラジアンオーダーの微小な傾斜変化を測定可能な傾斜計を利用して研究坑道の掘削に伴う地表の傾斜変化のモニタリングを実施した。これまでに取得した傾斜データを利用して逆解析を実施した結果、求められた地下水の増減領域がこれまでの調査研究で確認・推定されている水理地質構造と整合的であることを明らかにし、本手法により水理地質構造を推定できる可能性を示した。	平成17年度～
東京大学	理学系研究科 附属地殻化学実験施設	ストロンチウム同位体比及び希ガスをを用いた地球化学的研究手法の確立	東濃地域の堆積岩および花崗岩中の地下水・岩石を対象に、地下水の起源、水質形成プロセスを推定することを目的として、ストロンチウム同位体、希ガス同位体比の測定を実施した。その結果、地下水の起源は過去の天水であること、水－岩石反応が主要な地下水水質形成プロセスであることなどを明らかにすることができた。	平成13年度～平成15年度
北海道大学	地球環境科学研究科 地圏環境科学専攻	天然環境における有機物の化学特性に関する研究	金属元素との錯体形成能に関わる基礎情報を得ることを目的として、地下水中の有機物について分子サイズ毎に分離し、分離溶液毎の金属元素濃度を定量するための手法の検討を行なった。その結果、予備的に地下水中の腐植物質の構成有機物や構造特性の概要を把握する手法として、3次元蛍光スペクトルによる高分子化合物の分析、高速イオンクロマトグラフによる低分子有機物の組成分析が有効であること、天然有機物の濃縮方法として、地下水圧を利用し逆浸透膜で分子サイズ毎に濃縮する手法が効率的かつ安易な方法として使用できることを示した。	平成14年度～平成16年度
早稲田大学	教育・総合科学学術院	ルミノスコープを用いた微小割れ目による応力場解析に関する基礎研究： 花崗岩に発達するヒールドマイクロクラックの準3次元解析に基づく古応力場の復元：淡路島野島花崗岩の例	花崗岩の古応力場を復元するための手法開発を目的として、土岐花崗岩中を対象としてヒールドマイクロクラックを3次元的な測定および流体包有物を対象とした解析を実施した。ヒールドマイクロクラックの3次元方位測定の結果、ヒールドマイクロクラック形成時の主応力軸は南北方向であり、流体包有物の解析から形成時期は70～60Maであることが示された。この結果は、日本海拡大による西南日本の回転を考慮すると当時のプレート運動方向と調和的であり、本研究で開発した手法が古応力場を復元するための手法として有効であることを示した。	平成15年度～平成17年度
【その他研究機関】				
産業技術総合研究所	地圏資源環境研究部門	岩芯を用いた岩盤応力評価手法の高度化に関する研究	岩芯を用いた初期応力測定方法の高度化を目的として、AE法およびDRA法について岩芯採取からの経過時間が初期応力推定結果に及ぼす影響について検討した。具体的には、岩芯の採取から試験までの間の経過時間を変えて実施することにより、経過時間の影響を定量的に把握することを試みた。その結果、初期応力の推定結果は時間経過に伴いばらつきが大きくなる傾向が認められ、今後この要因を定量的に把握する必要があることを示した。	平成16年度～平成18年度
【国外機関】				
SNL（サンディア国立研究所）		サイト特性調査技術の開発	サイト特性調査技術の開発の一環として、データ量と予測結果の関係を評価する手法の構築を目的とした地球統計学的手法による割れ目密度分布の予測解析や、ニューラルネットワークモデルによるボーリング孔沿いの透水係数分布の推定手法の開発に関する検討を実施した。また、水理地質構造の概念モデルの不確実性評価に関する研究を実施した。これらの検討は、水理地質構造のモデル化および地下水流動解析技術の高度化に反映された。	平成11年度～平成14年度
NAGRA （スイス放射性廃棄物処分協同組合）		深地層の研究施設計画の立案支援	超深地層研究所計画について、全体計画の立案、深層ボーリング調査計画の立案および調査の実施、調査結果の取りまとめについて、技術的な支援を受けた。	平成13年度～
KAERI（韓国原子力研究所）		地質環境の調査手法の開発	花崗岩中の地下水流動および水質形成メカニズムを把握するための原位置調査手法・モデル化技術の整備・活用の一環として、両機関の地下研究施設（瑞浪超深地層研究所、韓国地下研究所）計画の技術情報交換および研究者の受け入れ・派遣を行った。これまでに、両機関が公表した報告書に関する技術議論を行うとともに、瑞浪超深地層研究所でのKAERI研究者3名の技術研修（岩盤水理調査、地下水の地球化学調査、モデル化・解析技術）を実施した。	平成16年度～

付録 10

用語集

安全評価¹⁾

地層処分システムが安全上受け入れられるものか否かを判断するため、システムの将来挙動の予測を踏まえた人間とその生活環境への影響に関する解析結果を放射線の影響を表す適切な線量などの指標を用いて示し安全基準と比較する。なお、安全評価において実施する一連の解析を安全評価解析という。

EDZ : Excavation Disturbed Zone²⁾

岩盤中に坑道を掘削すると、割れ目の発生・進展、応力状態の変化、間隙水圧の変化が生じることにより、坑道周辺岩盤の破壊強度や変形特性などの力学的性質、透水係数などの水理学的性質あるいは地下水の酸化還元電位などの地球化学的性質が変化することが想定される。この変化が生じる領域を掘削影響領域（EDZ : Excavation Disturbed Zone）と呼ぶ。掘削影響領域は、掘削損傷領域（マイクロクラックが発生し物性の低下する領域）、不飽和領域（間隙水圧が低下し地下水の化学的状態が変化する領域）および応力再配分領域（応力状態が変化し既存の割れ目の開閉が生じる領域）の三つの領域の重ね合わせと考えられる。

塩分濃度³⁾

地下水や海水 1kg 中に含まれる溶存物質の総重量をグラム数で表したもの。外洋の海水 1kg 中に含まれる塩分は平均 35g 程度であり、通常 35‰と標記する。

概要調査地区⁴⁾

応募地域およびその周辺地域についての文献調査結果に基づき原子力発電環境整備機構が選定する地区をいう。概要調査地区では、ボーリング調査、地表踏査、物理探査などの地表からの調査(概要調査)が行われる。

下部割れ目低密度帯

東濃地科学センターにおける結晶質岩を対象とした研究の中で、地質構造区分の一つとして定義した名称。瑞浪層群が被覆する土岐花崗岩中において、低角度傾斜（0～30°）を有する割れ目の分布密度が相対的に低い岩盤領域。

酸化還元電位⁵⁾

溶液の酸化力の強さを表す量。酸化還元電極の平衡電極電位。

収着^{5), 6)}

固体表面と原子、分子あるいは粒子との反応。一般に、収着には、吸収（固体中の空隙内で広く生じる収着）および吸着（空隙の無い固体表面でおこる収着）が含まれる。収着現象は大きく、化合物の生成を引き起こすと同程度の力（化学結合）による化学吸着とファンデルワールス力などの弱い分子間力による物理吸着に分けられる。

上部割れ目帯

東濃地科学センターにおける結晶質岩を対象とした研究の中で、地質構造区分の一つとして定義した名称。瑞浪層群が被覆する土岐花崗岩中において、低角度傾斜（0～30°）を有する割れ目の分布密度が相対的に高い岩盤領域。

水理特性⁷⁾

岩盤の性状によって規定される地下水の流れの速さや量など、その動きに関する性質をいう。

精密調査地区⁴⁾

概要調査地区での概要調査の結果に基づき原子力発電環境整備機構が選定する地区をいう。精密調査地区では、最終処分施設建設地の選定に向けて、地表からのさらに詳細な調査および地下の特性などを調べるために地下に調査施設を建設しての調査（精密調査）が行われる。

断層^{3), 8), 9)}

岩石の破壊によって生ずる割れ目のうち、面に平行な方向への相対的変位のあるものをいう。断層における変位の大半が集中する領域は、断層主要部（**fault core**）といわれる。断層主要部には、単一のすべり面のほか、粘土鉱物に富む未固結な断層ガウジ帯、角礫化した変質帯、あるいは著しく硬化したカタクレーサイト帯などが含まれる。また、断層主要部に沿って副次的に形成された地質構造（小断層、脈、割れ目、へき開、褶曲など）がネットワーク化した領域を断層に伴うダメージゾーン（**fault damage zone**）という。

本報においては、過去数十万年前以降繰り返し活動したことがある断層で、将来も活動する可能性のある断層を活断層といい、活断層より古い時期に活動した断層で、現在や将来にわたって活動する可能性の少ない断層を地質断層という。

遅延⁶⁾

岩盤マトリクスとの反応（例えば、収着）によって放射性核種などの物質の移動速度が低減すること。

地下水の地球化学特性⁷⁾

地下水の化学的な性質をいう。地下水の化学組成、pH、酸化還元電位などが該当する。

地質環境

地層処分の観点から見た地下の環境。岩盤とそこに含まれる地下水などからなる。

地質環境条件¹⁰⁾

地層処分の観点から見た地質環境の条件。岩盤や地下水の性質（地質環境の特性）とそれらの長期にわたる安定性（地質環境の長期安定性）にわけてとらえることができる。地質環境の特性としては、人工バリアの設置環境および天然バリアとしての機能の観点から、地下水の流動特性、地下水の地球化学特性、岩盤の熱特性・力学特性および岩盤中での物質移動特性が重要である。

また、地質環境の長期安定性としては、これらの岩盤や地下水の性質に大きな変化を及ぼす可能性のある天然現象（地震・断層活動、火山・火成活動、隆起・沈降・侵食、気候・海水準変動）の発生の可能性やそれらによる影響が重要である。

地質環境モデル¹⁰⁾

既知および調査による情報の解釈を踏まえつつ、地表から地下深部の岩盤および地下水の性状や諸特性の空間分布などを可視化（概念化）したもの。地質環境モデルは、可視化する目的や記述する情報により、地質構造モデル、水理地質構造モデル、地球化学モデル、岩盤力学モデル、物質移動モデルなどに分けられる。これらのモデルには、ある時点の場の状態を表現したものと、

時間の経過に伴う現象を表現したものがある。これらのモデルは情報量の増加とともに更新され、地下環境の理解の程度を推し量る材料として、さらには将来の予測などに用いられる。

地質構造モデル : 対象とする場における地質・地質構造の空間分布を表現したもの。

水理地質構造モデル : 対象とする場における透水性などの水理特性 (⇒「水理特性」を参照) の空間分布を表現したもの。水理地質構造モデルを用いて、時間経過に伴う地下水流動の変化を予測するための数値解析 (地下水流動解析) が行われる。水理地質構造モデルと地下水流動解析を包括して地下水流動モデルなどの表現を用いる場合もある。

地球化学モデル : 対象とする場における地下水水質の空間分布と水質形成プロセス (異なる水質の地下水の混合や水-鉱物-生物相互反応など) を表現したもの。場の状態や現象を概念的に表現したものと数式化したものがある。

物質移動モデル : 対象とする場における物質移動 (⇒「物質移動」を参照) 現象と、その現象が生じている場の構造を単純化して表したもの。場と現象を概念的に表したものと現象を数式化したものがある。

岩盤力学モデル : 対象とする場における岩盤の物理・力学特性や初期応力状態の空間分布を表したもの。岩盤力学モデルを用いて、坑道掘削に伴う影響を評価するための数値解析などが行われる。

動水勾配⁸⁾

地下水の動きを決める要因の一つで、地下水が流れる方向の単位距離あたりの水圧 (正確には水頭) の差をいう。地下水は、水圧の高い方から低い方へ移動するので、水圧の高さが同じところを結んだ等水圧線に対して、垂直な方向が動水勾配の方向となる。

ナチュラルアナログ¹¹⁾

廃棄物埋設後の放射性核種の挙動や人工バリアの腐食・変質など、地層処分システムにおいて想定される現象と類似した、自然界で過去に起こった長期的変化に関する現象をさす。

火山から噴出した火山ガラス、古代の遺跡などから発掘される銅鐸、地下に埋設された古い鉄管などは、人工バリアの候補材であるガラスや金属に類似しているため、これらの地下での長期的な変化を調べることで、人工バリア中で生じ得る現象の確認および、評価方法の妥当性をチェックすることができる。また、天然の放射性核種を含むウラン鉱床などは、地層処分システム全体のナチュラルアナログの研究の場として利用できる。

不確実性¹²⁾

データと知識から推定されたモデルなどの結果が確定的に定まらない性質。不確実性は、統計的方法によって評価された客観的確率によって表現されるものと、その他の手段によって評価された、不確かさを含む知識に基づく主観的確率で表現されるものの2種類に分類できる。

物質移動／物質移行⁶⁾

環境中における物質の移動 (あるいは移行)。物質移動には、移流 (地下水や空気などの流体の動きによる物質の移行)、拡散 (当該物質の濃度の高い領域から低い領域への濃度勾配による物質の移行)、収着 (⇒「収着」を参照) などの自然現象 (例えば、地下水による放射性核種の移行) が含まれ、人間による物質の意図的な移動 (例えば、放射性廃棄物の輸送) はこれには該当しない。

不連続構造 ^{3),13)}

岩石中に認められる構造的な破断の総称。割れ目、節理、弱面、断層（帯）などが含まれ、場合によっては、堆積・浸食面を指すこともある。本報では、特に、断層、節理、割れ目を総称する場合に用いる。断層および節理は、面に平行な方向への変位の有無によって区分（変位のあるものを断層、変位のないものを節理という）し、割れ目は、断層、節理を総称して呼ぶ場合、もしくは断層、節理に区分されない場合に用いる。

水みち ^{14),15)}

一般に地下水の流れを地層内の空隙を結ぶ水分子の流れとしてみたときの、その流れの経路のことをいう。本報では、Mazurek（2000）で定義されている water-conducting features（岩盤中の有意に高い透水量係数を有する帯状の広がり）を称する場合に用いる。

山はね ¹⁶⁾

トンネル掘削において、坑道周辺（切羽の鏡、天端、側壁等）の岩盤の一部が大きな音響を伴って内空に突然飛び出す現象。山はねの発生は、地山岩石中に過度に蓄えられた弾性ひずみエネルギーがトンネル掘削により解放されることに起因すると考えられている。この現象は、岩盤が硬質で比較的割れ目の少ないマッシュなもので、土被りが大きいあるいは地殻変動の影響を受けて地山応力が高い場合に起こりやすい。日本では大清水トンネル、関越トンネル等で発生している。

参考文献

- 1) 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会：“高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について”，平成 9 年 4 月 15 日(1997)。
- 2) 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 次とりまとめ一分冊 1 わが国の地質環境”，核燃料サイクル開発機構、JNC TN1400 99-021 (1999)。
- 3) 地学団体研究会編：“新版地学事典” (1996)。
- 4) 原子力発電環境整備機構：“概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠—「概要調査地区選定上の考慮事項」の説明資料—”，原子力発電環境整備機構、NUMO-TR-04-02 (2004)。
- 5) 長倉三郎，井口洋夫，江沢洋，岩村秀，佐藤文隆，久保亮五編：“岩波理化学辞典 第 5 版”(1998)。
- 6) IAEA：“Radioactive Waste Management Glossary: 2003 Edition”(2003)。
- 7) 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” NUMO-TR-04-01 (2004)。
- 8) 原子力発電環境整備開発機構：“概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠”，(2004)。
- 9) Caine, J.S., Evans, J.P. and Forster, C.B.: “Fault zone architecture and permeability structure”, *Geology*, Vol. 24, No. 11, pp.1025-1028 (1996) .
- 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 年取りまとめ一分冊 1 深地層の科学的研究”，JNC TN1400 2005-014 (2005)。
- 11) 原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会：“高レベル放射性廃棄物の地層処分 研究開発の今後の進め方について” (2001)。
- 12) 日本規格協会：“計測における不確かさの表現のガイド” (1996) .
- 13) U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation: “ENGINEERING GEOLOGY FIELD MANUAL SECONDEDITION VOLUME II”, pp.91-127 (2001)。

- 14) Mazurek, M.: “Geological and hydrogeological properties of water-conducting features in crystalline rocks”, In I. Stober and K. Bucher (eds.), Hydrogeology of Crystalline Rocks, Kluwer, Netherland, pp.3-26 (2000).
- 15) 山本莊毅編: “地下水学用語辞典”, 古今書院 (1993).
- 16) 土木学会編: “土木用語大辞典”, 技報堂出版 (1999).

国際単位系（SI）

表 1. SI 基本単位

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

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度（質量密度）	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積（比体積）	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
（物質量の）濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	（数の）1	1

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表される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 ^(a)	rad		m・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m・kg・s ⁻²
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
工率，放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg・s ⁻³
電荷，電気量	クーロン	C		s・A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度 ^(d)	セルシウス度	°C		K
光強度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
（放射性核種の）放射能	ベクレル	Bq		s ⁻¹
吸収線量，質量エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量，組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表 4 に示されている。
- (b) 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“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表 4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

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

表 6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーバ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表 7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で 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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733 (49) × 10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402 (10) × 10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691 (30) × 10 ¹¹ m

表 8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600) m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1 Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=1(1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位		1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

