



瑞浪超深地層研究所における立坑内からの
パイロットボーリング調査報告書

Results of the Pilot Borehole Investigations Conducted from Bottom of Shafts
at the Mizunami Underground Research Laboratory

鶴田 忠彦 竹内 真司 竹内 竜史 水野 崇
大山 卓也

Tadahiko TSURUTA, Shinji TAKEUCHI, Ryuji TAKEUCHI, Takashi MIZUNO
and Takuya OHYAMA

東濃地科学センター
Tono Geoscience Center

February 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

瑞浪超深地層研究所における立坑内からのパイロットボーリング調査報告書

日本原子力研究開発機構

東濃地科学センター

鶴田 忠彦⁺，竹内 真司，竹内 竜史⁺，水野 崇⁺，大山 卓也⁺

(2008年11月25日受理)

瑞浪超深地層研究所における研究坑道の掘削は、排水中のフッ素及びホウ素の濃度が放流先河川において環境基準値を超えたことから、平成17年10月に研究坑道の掘削及び坑内湧水の排水を一時停止した。さらに研究坑道の掘削に伴う湧水量の予測解析結果は、排水処理設備の処理量を設定した時の湧水量の予測を上回る量であった。そのため、地上の排水処理設備を改良・整備するとともに、以深の研究坑道の掘削に伴って遭遇する地質環境の特性（地質・地質構造、岩盤水理、水質など）を把握することにより、それに基づいてその後の研究坑道の掘削において必要となる、1)排水処理設備の設計、2)グラウト施工計画ならびに3)施設設計の見直し、のための情報を取得することを目的に、パイロットボーリング調査を実施した。パイロットボーリングは主立坑及び換気立坑の坑底からそれぞれ1本ずつ掘削した。

その結果、深度500m付近までの地質環境を把握し、以下の情報を整備した。

- 主要なグラウティング対象箇所として、換気立坑の深度210m付近の低角度を有する割れ目の集中帯（LAFZ）と深度約400～460mの割れ目帯が抽出された。
- 二次元軸対称モデル及び三次元モデルを用いた数値解析による深度500mまでの研究坑道の掘削に伴う予測湧水量は、グラウトを実施しないケースで、2,000～2,500m³/日となった。これに基づいて当面の排水処理量を設定した。これは、研究坑道の掘削停止後にパイロットボーリングの情報が無い時点で実施した三次元予測解析結果と比較すると1/3～2/5程度である。
- 大量湧水の可能性のあるLAFZの透水性を2ルジオン相当まで低減させるグラウティングにより、当該箇所からの湧水を大幅に抑制することが可能である。
- 地下水圧測定の結果、著しく高い水圧の湧水に遭遇する可能性は低く、既存の設備によるグラウティングが可能である。
- 今後の支保工（壁面の補強等）の仕様及び水平坑道のレイアウト等を検討するために必要な地質・岩盤状況を把握した。
- 施設計画の策定にあたっては、立坑掘削地点での詳細なパイロットボーリング調査が必要不可欠であることを再認識した。

さらに本報告書では、調査中に得られた技術的知見やノウハウならびに失敗事例についても取りまとめた。

東濃地科学センター：〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64

＋：地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット

Results of the Pilot Borehole Investigations Conducted from Bottom of Shafts
at the Mizunami Underground Research Laboratory

Tadahiko TSURUTA⁺, Shinji TAKEUCHI, Ryuji TAKEUCHI⁺,
Takashi MIZUNO⁺ and Takuya OHYAMA⁺

Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency
Akeyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received November 25, 2008)

The excavation and pumping of water from the shafts of the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) were halted in October 2005 due to the discharge water of fluoride and boron concentrations that exceeded the Japanese Environmental Standards for discharge into rivers. Numerical simulations indicate that the water inflow into the shafts would increase considerably as shaft sinking advances. Consequently, JAEA decided to carry out pilot borehole investigations from the bottom of the shafts to acquire information needed for making a decision on the capacity of the water treatment facility, planning for the grouting and reconsideration of the facility design.

Based on the pilot borehole investigations, information on the geological environment to a depth of around 500 mbGL is obtained and the results are summarized as follows;

- The depths where grouting would be needed to mitigate volumes of major inflow water into the ventilation shaft are predicted to be around 210 mbGL in the LAFZ (Low-angled fractured zone) and in the fracture zone around 400-460 mbGL.
- The planned capacity of the water treatment facility, based on 2- and 3-dimensional numerical simulations of inflow water volumes due to the shaft excavations, is 2,000 to 2,500 m³/day.
- The numerical simulations indicate that grouting to drop to a 2 Lu in permeability of the LAFZ section will result in a significant decrease of inflow water volume.
- The existing grouting equipment can be used at the predicted hydraulic pressures, at least to a depth of 500mbGL, because the expected pressures are below the maximum capacity of the equipment.
- Geological and rock mechanical properties, which are needed for planning the support specifications for the shaft walls and for designing tunnel layouts, etc., are obtained.
- The necessity of pilot borehole investigations in advance of shaft excavations is understood for detail planning of the underground facility.

Know-how and lessons learned during the investigations are also described in this report.

⁺: Crystalline Environmental Research Group, Geological Isolation Research and Development Directorate

Keywords: Mizunami Underground Laboratory (MIU) Project, Pilot Borehole Investigations, Water Treatment Facility, Grouting , Facility Design

This is a blank page.

目 次

| | |
|-------------------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 目的 | 2 |
| 3. 計画 | 3 |
| 3.1 調査項目 | 3 |
| 3.2 湧水量及び水質の予測 | 8 |
| 4. 調査結果 | 9 |
| 4.1 調査の概要 | 9 |
| 4.2 ボーリング掘削 | 15 |
| 4.2.1 実施内容 | 15 |
| 4.2.2 結果 | 17 |
| 4.2.3 考察 | 19 |
| 4.2.4 教訓 | 19 |
| 4.3 地質学的調査 | 33 |
| 4.3.1 実施内容 | 33 |
| 4.3.2 結果 | 33 |
| 4.3.3 考察 | 45 |
| 4.3.4 教訓 | 45 |
| 4.4 水理学的調査 | 46 |
| 4.4.1 実施内容 | 46 |
| 4.4.2 結果 | 49 |
| 4.4.3 考察 | 53 |
| 4.4.4 教訓 | 56 |
| 4.5 地球化学的調査 | 61 |
| 4.5.1 実施内容 | 61 |
| 4.5.2 結果 | 63 |
| 4.5.3 考察 | 67 |
| 4.5.4 教訓 | 68 |
| 5. 湧水量及び水質の予測 | 70 |
| 5.1 地質構造モデル | 70 |
| 5.2 湧水量の予測 | 73 |
| 5.2.1 定常軸対称モデル（理論式）に基づく解析 | 73 |
| 5.2.2 二次元軸対称モデルに基づく解析 | 74 |
| 5.2.3 三次元モデルに基づく解析 | 76 |
| 5.2.4 まとめ | 78 |
| 5.3 水質の予測 | 80 |
| 5.3.1 研究所用地周辺におけるこれまでの調査結果 | 80 |
| 5.3.2 パイロットボーリング調査結果に基づく水質の予測 | 80 |

| | |
|--------------------------|------|
| 6. まとめ | 82 |
| 謝辞 | 84 |
| 参考文献 | 85 |
| 付録1 パイロットボーリング岩芯写真 | 87 |
| 付録2 水理試験計測データ | CD-R |

CONTENTS

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Objectives | 2 |
| 3. Investigations programme | 3 |
| 3.1 Field surveys | 3 |
| 3.2 Estimation of inflow rate and groundwater chemistry with depth | 8 |
| 4. Results of Field surveys | 9 |
| 4.1 Outline of field surveys | 9 |
| 4.2 Borehole drilling | 15 |
| 4.2.1 Methods | 15 |
| 4.2.2 Results of borehole drilling | 17 |
| 4.2.3 Discussion on borehole drilling | 19 |
| 4.2.4 Lessons learned from drilling work | 19 |
| 4.3 Geological investigations | 33 |
| 4.3.1 Methods | 33 |
| 4.3.2 Results of geological investigations | 33 |
| 4.3.3 Discussion on geological investigations | 45 |
| 4.3.4 Lessons learned from geological investigations | 45 |
| 4.4 Hydrogeological investigations | 46 |
| 4.4.1 Methods | 46 |
| 4.4.2 Results of hydrogeological investigations | 49 |
| 4.4.3 Discussion on hydrogeological investigations | 53 |
| 4.4.4 Lessons learned from hydrogeochemical investigations | 56 |
| 4.5 Hydrochemical investigations | 61 |
| 4.5.1 Methods | 61 |
| 4.5.2 Results of hydrochemical investigations | 63 |
| 4.5.3 Discussion on hydrochemical investigations | 67 |
| 4.5.4 Lessons learned from hydrochemical investigations | 68 |
| 5. Estimation of inflow rate and groundwater chemistry with depth | 70 |
| 5.1 Geological model | 70 |
| 5.2 Estimation of inflow rate | 73 |
| 5.2.1 Theoretical model | 73 |
| 5.2.2 2D model | 74 |
| 5.2.3 3D model | 76 |
| 5.2.4 Summary of estimation | 78 |
| 5.3 Estimation of groundwater chemistry | 80 |
| 5.3.1 Results based on the previous investigations | 80 |
| 5.3.2 Estimation based on results of the pilot borehole investigations | 80 |

| | |
|--|------|
| 6. Summary | 82 |
| Acknowledgment | 84 |
| References | 85 |
| Appendix 1: Photographs of core recovered from the pilot boreholes | 87 |
| Appendix 2: Hydraulic test data | CD-R |

1. はじめに

超深地層研究所計画は、原子力大綱に示された深地層の研究施設計画の1つであり、結晶質岩を対象とした研究開発計画である。この計画は、「第1段階：地表からの調査予測研究段階」、「第2段階：研究坑道の掘削を伴う研究段階」及び「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て進めている。

平成15年に開始した瑞浪超深地層研究所における「第2段階」の研究坑道の掘削深度は、平成17年10月末時点で、主立坑は深度172.6m、換気立坑では深度191.0mであった。当該深度における立坑からの排水量は、両立坑を合わせて約550m³/日であった。この時点で排水中に含まれるフッ素及びホウ素の濃度は、水質汚濁防止法に基づく排水基準は満たしていたものの、環境基本法に基づく環境基準を超える値を示した。このことから、平成17年10月27日に、一時、研究坑道の掘削工事を中断し、岐阜県及び瑞浪市と環境保全協定を結び、フッ素、ホウ素の濃度を環境基準内に抑制する対策をとることとした。その後、濃度を低減するための設備を設置し、試験的な河川放流時の濃度が環境基準に適合していることを確認し、平成17年11月17日から排水を再開した。

本調査の計画策定時点（平成18年6月）での排水処理量（申請量）は720m³/日であったが、立坑周辺のボーリング調査等のデータにより構築した水理地質構造モデルに基づく地下水流動解析のひとつの結果として、今後の立坑掘削に伴う湧水量は、深度500mで約6000m³/日（深度1000mでは約10000m³/日）と予測された。これは排水処理設備の処理量を設定した時の湧水量の予測を大幅に上回る値であることから、排水処理設備やグラウト施工などの計画立案にあたっては、“立坑設置地点”で取得したデータに基づく、より信頼性の高い予測が必要不可欠であると考えられた。そこで、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）の中期目標である中間ステージ深度（約500m）までの計画立案に必要な情報を取得するため、パイロットボーリングを現在の両立坑坑底から、それぞれ1本掘削することとなった。

本報告書では、パイロットボーリングにおける主な調査内容と結果及び得られた調査結果に基づく立坑湧水量及び水質の予測結果について記述する。特に、調査・解析の過程で行った判断根拠や得られた技術的知見、ならびにノウハウなどについても取りまとめた。そして得られた結果に基づいて、排水処理設備に必要な処理能力、グラウト施工計画など、今後の施設計画に必要な情報を取りまとめた。

本調査は平成18年6月から開始し、現場調査については同年11月までに終了した。また湧水量予測解析は、調査データに基づき簡易的に実施可能な理論式に基づく簡易解析、データの解釈に基づく二次元軸対象解析ならびに三次元解析を段階的に実施し、これらの結果を比較・検討することにより、今後の湧水量予測解析手法の位置づけを明確化することを目指した。

2. 目的

立坑湧水について水質や湧水量をふまえた適切な処理の観点から、パイロットボーリング調査の目標は、以下のように設定した。

- 排水処理設備の適切な設計
- 詳細なグラウト施工計画の策定
- 施設計画の見直し

これらの目標のうち、「排水処理設備の適切な設計」には、深度約 500m までの湧水量と水質の予測が必要である。この予測には、深度毎の岩盤の透水性や貯留性、ならびに水圧などに関するデータが必要である。「詳細なグラウト施工計画の策定」には、湧水が発生する可能性のある水みちの深度、幅、湧水量及び広がりなどに関する情報が必要である。これにより、湧水深度における適切なグラウトの施工方法の策定や必要な材料の量を見積もることが可能となる。さらに、「施設計画の見直し」には、支保設計や工程及び工事費などの見直しが含まれる。このうち支保設計には、断層や変質の分布、岩盤等級などの情報が必要である。

3. 計画

3. 1 調査項目

今回の調査の目的を達成するためには、パイロットボーリング孔における割れ目や断層などの分布とそれらの透水性、間隙水圧、水質などの地質環境特性の把握が必要である。これらの情報を取得するために以下の調査を計画した。

- ボーリング掘削（両立坑坑底からそれぞれ1本）
- 岩芯地質観察
- 孔壁画像調査（ボアホールテレビ観察）
- 物理検層
- 水理試験
- 採水・水質分析

今回の調査の目的と、それを達成するための調査項目との関係を Table 3.1 に示す。排水処理施設的设计への反映については、理論式および数値解析に基づく湧水量予測を段階的に実施することとし、それぞれの予測に必要な情報（透水係数など）を取得するための調査を選定した。また、グラウト施工計画への反映については、湧水箇所や、そこでの湧水量などを把握するための調査を、施設計画の見直しについては、岩盤等級や地質構造などに関する情報を得るための調査を選定した。また、個別調査の目的と主な仕様等を Table 3.2 に示す。ボーリングの孔口が岩盤が有する水頭よりも深部に位置するため、湧水条件下での調査となることが想定されること、さらに平成 19 年 4 月から排水処理設備等の設計に着手する必要から、平成 18 年 10 月末までに調査データを集約する必要があることを考慮して、30m ごとにボーリング孔掘削を中断し、水理試験と可能であれば採水を実施し、最終深度まで到達後に、ボアホールテレビ観察と物理検層を実施することを基本的な進め方とした。

Fig. 3.1 に調査位置図、Fig. 3.2 にはパイロットボーリング孔の配置を示した。また今回の調査において、予測された地質環境に応じた孔径やケーシングプログラムの下で、孔内での複数の調査を合理的に実施するための調査計画図を作成し、担当者で共有できるようにした（Fig. 3.3-1 及び 3.3-2）。本報告書では、主立坑、換気立坑のパイロットボーリング孔をそれぞれ 06MI02 号孔、06MI03 号孔と呼ぶ。

なお、立坑間やその周辺の割れ目の連続性を把握するためには、孔間トモグラフィー調査や孔間水理試験ならびにフローメータ検層が有効であるが、大量湧水下での試験となると予想されることや工程上の制約ならびに調査によっては技術開発的な要素が残されているものもあることから、今回は実施しないこととした。

上記の仕様は、孔壁の崩壊や試験装置の抑留などのトラブルが発生しないことを想定した基本ケースであり、これらが発生する場合はセメンチングやケーシングによる保孔、試験装置の引き上げなどの措置が別途必要となる。これら想定される事象については、事前に対応策を準備しておくこととした。

本調査の実施体制としては、東濃地科学センター施設建設課と地層処分研究開発部門の結晶質岩地質環境研究グループ及び結晶質岩工学技術開発グループの調査担当者からなる横断的なタスクチームを構成し、日常の工程及び安全管理はもとより、調査データの品質管理を確実に実施できるよう配慮した（Fig. 3.4）。

なお、本調査における深度の管理は 10cm 単位であるが、本報告書の本文中では m 未満を四捨五入して表記する（図表では 10cm 単位での記載を原則）。

Table 3.1 Required information and planned investigations

| | Investigations | | | | | | | |
|--------------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|---------------------|----------------|-----------------------|---------------------|--|
| | Drilling monitoring | Core description | BTV | Geophysical logging | Hydraulic test | GW sampling /analysis | Pressure monitoring | |
| Information required | Plant design (prediction) | | | | | | | |
| | Analytical approach | | | | | | | |
| | K | | | | XX | | | |
| | H | | | | XX | | | |
| | Numerical approach | | | | | | | |
| | Fracture data | | XX | XX | | | | |
| | K | | | | XX | | | |
| | Ss | | | | XX | | | |
| | Infiltration | | Surface hydrological data | | | | | |
| | Hydrochemistry | | | | | XX | | |
| | Grouting plan | | | | | | | |
| | WCF location | | XX | XX | X | | | |
| | WCF width | | X | X | X | | | |
| | WCF connectivity | | X | | | X | X | |
| | Q | X | | | | XX | | |
| | P | X | | | | XX | | |
| URL redesign | | | | | | | | |
| Mechanical properties | | XX | XX | XX | | | | |
| Weak rock (fracture zone etc.) | | XX | XX | XX | | | | |

* WCF : Water-conducting features

K: Hydraulic conductivity
H: Hydraulic head
Ss: Specific storage
Q: Volume of water inflow
P: Inflow pressure

XX : Direct information
X : Indirect information

Table 3.2 Objectives and specification for each investigations

| Investigation | Objectives | Specifications and rationale (for each borehole) |
|-------------------------------|--|--|
| Borehole drilling | >Full core recovery to obtain information on geological environment, and to provide a suitable borehole for downhole investigations >Identification of faults and water-conducting features (WCF) I | >Borehole length would be about 330-340m to reach over 500mbgl (from 180mbGL in the Main shaft and from 191mbGL in the Ventilation shaft) >Borehole diameter - PQ (123mm) to permit downsizing in case of borehole collapse. >Calliper logging, deviation logging, hydrotesting and groundwater sampling after drilling each 30m interval. >Monitoring any loss of drilling fluid volume >Monitoring of drilling parameters (drilling rate, depth, bit revolution, torque, electric conductivity and pH of drilling fluid etc.) *mbgl - metres below ground level |
| Core logging | >Identificaiton of faults, WCFs, Upper highly fractured domain (UHFD) and Low-angle fractured zone (LAFZ) etc. | >Logging entire borehole length (except for 5m from the casing part on top) >Based on the JAEA core logging manual |
| Borehole TV | > Obtain fracture depth and orientations. | >Survey of entire borehole length (except for 5m of casing at the top) |
| Geophysical logging | >Obtain geophysical properties of each structural unit | >Logging full borehole length (except for 5m of casing at top) Calliper, electrical, density, neutron, spectral gamma, sonic, temperature and deviation) |
| Hydraulic testing | >Obtain hydrogeological properties of each structural unit | >Number of tests: 15 test sections (11 sections tested after drilling each 30m interval and 4 test sections after drilling, for major WCFs) >Test interval changed if a major inflow feature intersected during drilling. >Pulse, constant head or constant rate test selected based on inflow rate >Applying JAEA hydrotesting tool |
| Groundwater sampling/analysis | >Obtain hydrochemical profile | >11 sampling sections in combination with hydrotesting >Major and trace elements, elements for environmental standards, isotopes, organics/microbes/colloids for analysis >Physico-chemical parameters of returned drilling fluid |

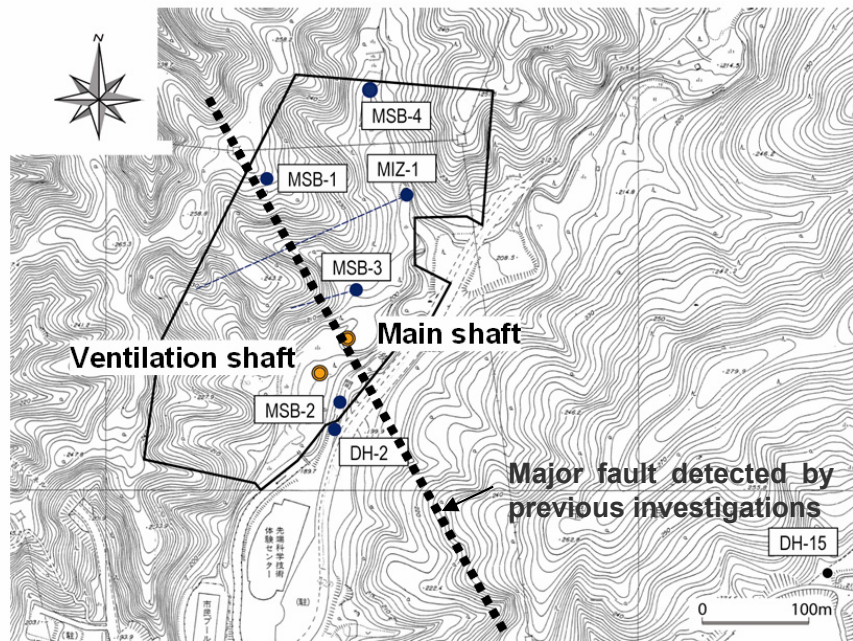


Fig. 3.1 Location of the shafts

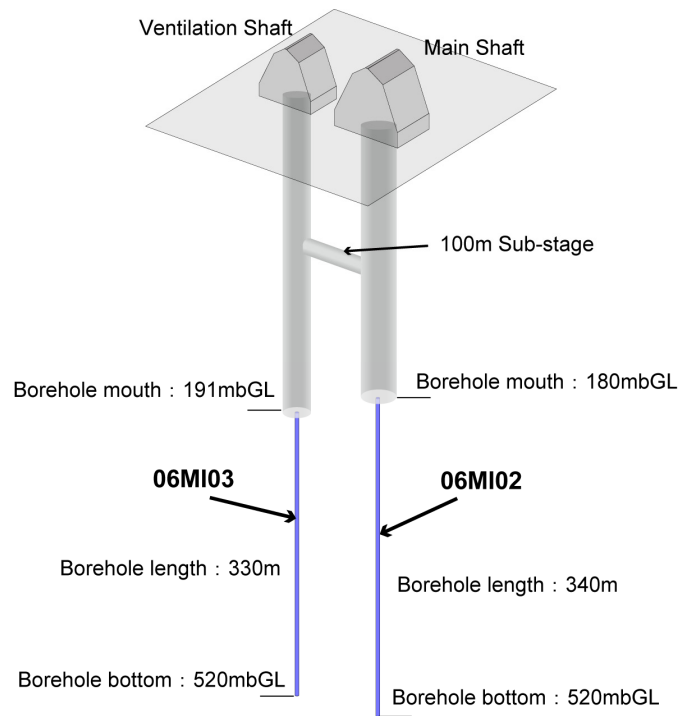
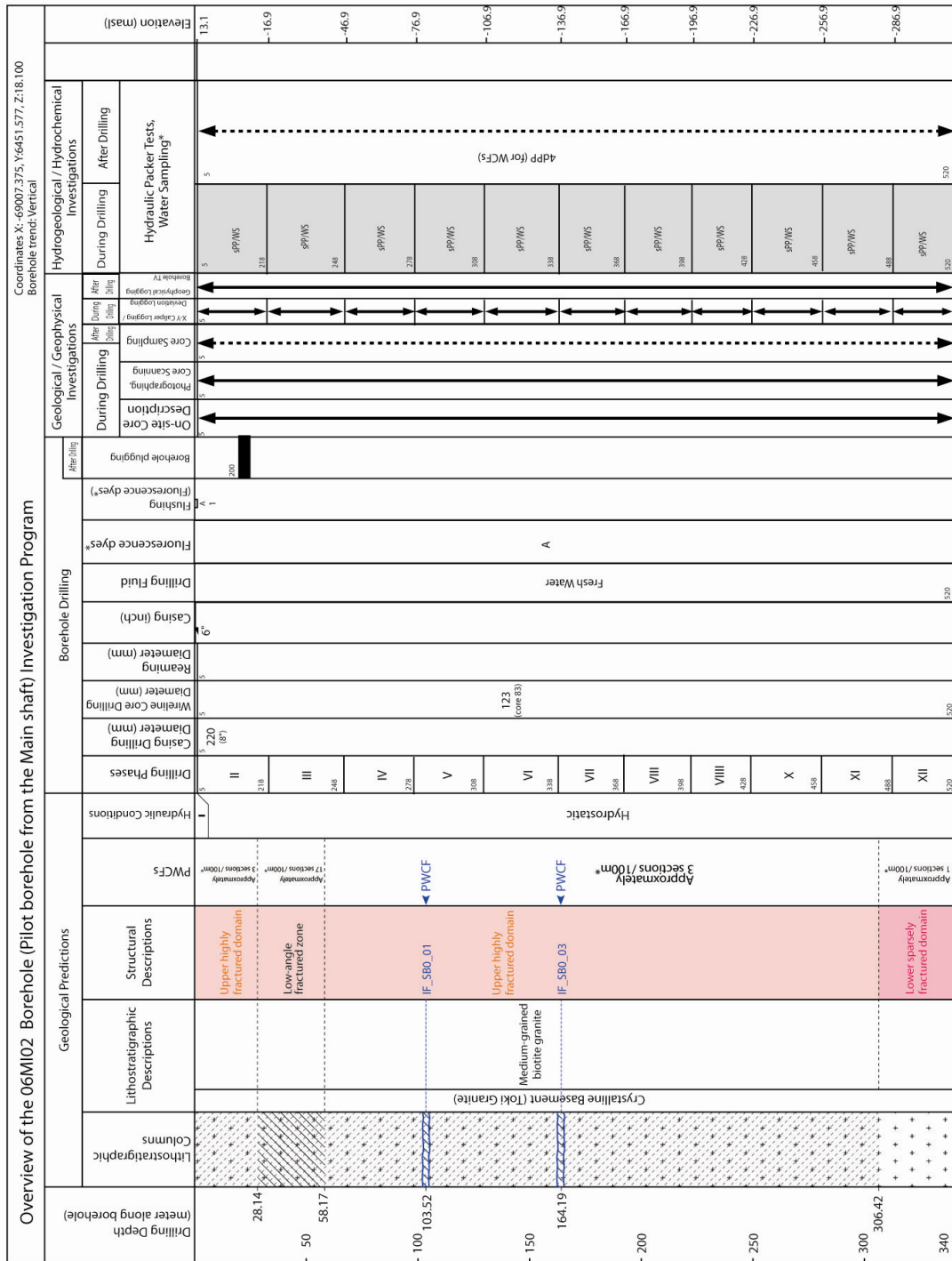


Fig. 3.2 MIU shafts with Pilot Boreholes



Geological Predictions: Based on Step4 geological model and shaft wall observations
 *Hydraulic Packer Tests / Water Sampling = s: Single packer, d: Double packers, PP: Pumping Test, SP: Slug and pulse tests, WS: Water sampling
 *Fluorescence dyes = A: Amino G acid
 ◀ PWCF: Potential Water-Conducting Feature (Prediction based on Step4 geological model and shaft wall observations)
 (*) Frequency estimated from the number of WCFs at existent boreholes)

Overview of the 06MI02 borehole investigation program

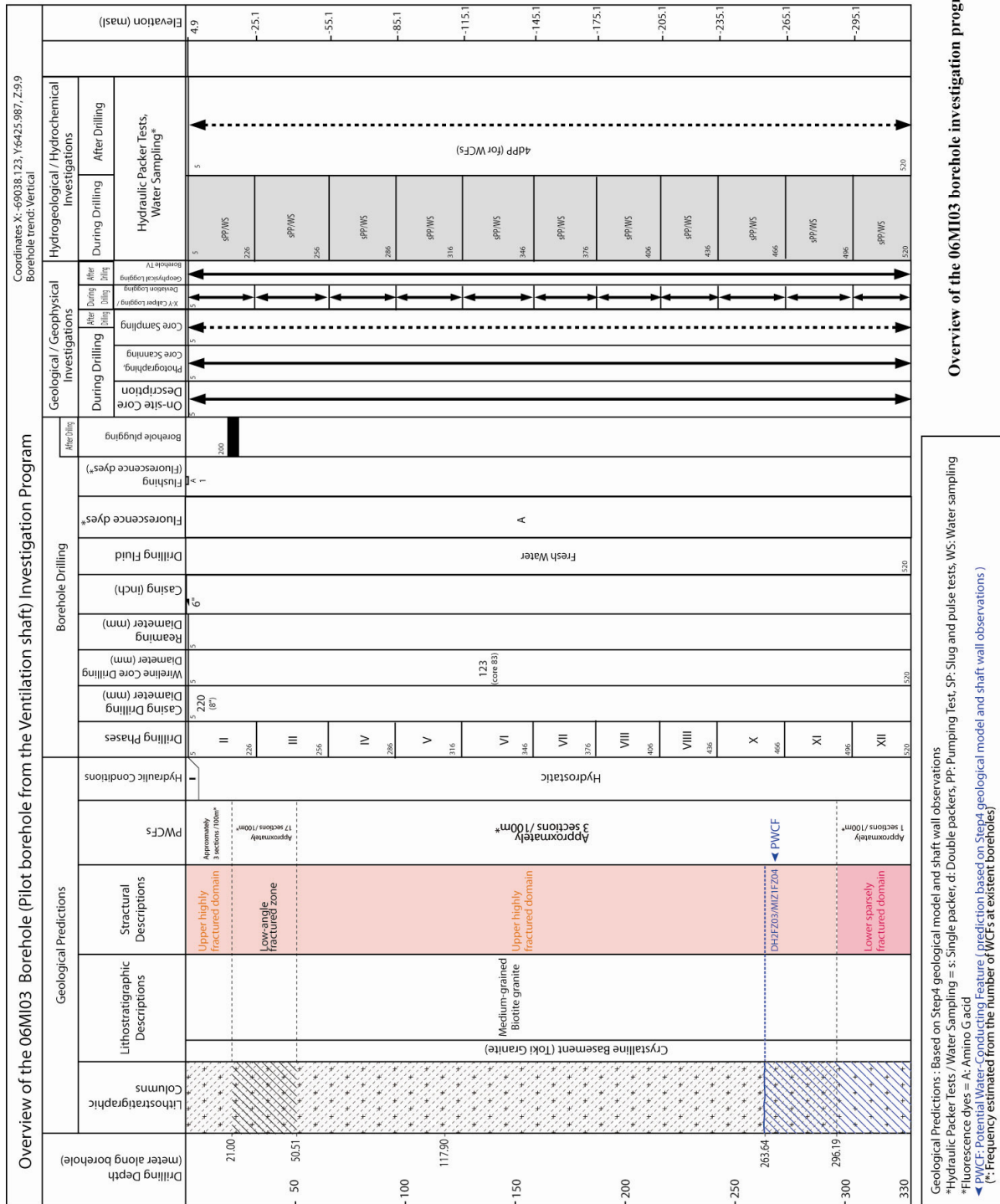


Fig. 3.3-2 Investigation program for 06MI03 borehole in the Ventilation shaft

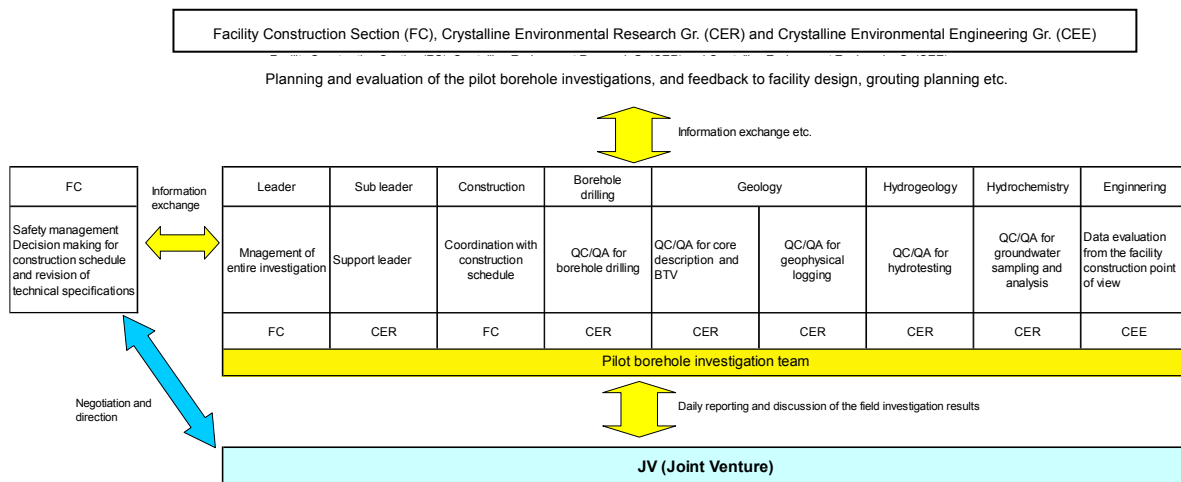


Fig. 3.4 Organization control for the promotion of pilot borehole investigations

3. 2 湧水量及び水質の予測

立坑掘削に伴う湧水量の予測は、パイロットボーリングの調査により得られたデータ等を基に、以下に示すような複数の手法を用いて実施することとした。これらの予測は、水理地質構造モデルの構築と、これに基づく地下水流動解析により実施することとした。また、予測手法によって予測結果を得るまでの時間が異なることから、結果の速報性等を勘案して予測を段階的に実施することとした。

- 予測段階①：被圧帯水層における定常軸対称浸透流モデルを仮定した理論解に基づく解析
- 予測段階②：立坑の深度約 500m 到達までの工程や予算を概略的に把握するため、二次元軸対称モデルに基づく数値解析
- 予測段階③：確度の高い予測結果を得るため、断層などの地質構造の三次元分布を考慮したより現実的な水理地質構造モデルに基づく地下水流動解析

これらの予測解析結果を比較・検討することにより、今後の湧水量予測解析手法の位置づけを明確化することとした。

また、水質の予測については、各深度における水理試験中に実施する採水の水質分析値と地上から実施したボーリング調査により取得された水質データも併せて比較し、深度 500m 付近までの水質の傾向を予測することとした。

4 調査結果

4.1 調査の概要

パイロットボーリングは、主立坑及び換気立坑の坑底（主立坑；深度 180m，換気立坑；深度 191m）において、平成 18 年 6 月から資機材等の搬入に着手し、同年 7 月から掘削調査を開始し、同年 10 月末～11 月上旬に終了した。Table 4.1.1, Fig. 4.1.1-1 及び 4.1.1-2 に調査の概要と調査工程を示す。

Table 4.1.1 Outline of Borehole Investigations

| | 06MI02 Borehole (Main shaft) | 06MI03 Borehole (Ventilation shaft) |
|--|---|--|
| Location | Bottom of shaft : 180mbGL (X:69,007.38, Y:6,451.41, Z:20.90) | Bottom of shaft : 191mbGL (X:69,037.62, Y:6,426.41, Z:9.90) |
| Inclination of borehole | Vertical | |
| Maximum deviation of boreholes from the collar | 3.44m north, 1.25m west | 0.83 south, 0.51m east |
| Drilling length | 348mabh*(180～528mbGL) | 335mabh(191～526mbGL) |
| Borehole diameter | Drilling diameter; 123mm, Core diameter; 83.1mm (PQ size) | |
| Coring length | 6.09～348mabh(186.9～528mbGL) | 6.0～335mabh(197～526mbGL) |
| Drilling fluid | Fresh water tagged with Amino G. acid (5mg/L):0～29.7mabh(180～209.7mbGL and 305.7～328.2mbGL) Drilling mud tagged with Amino G. acid (5mg/L):except above intervals) | Fresh water tagged with Amino G. acid (5mg/L) |
| Geological investigation | Core description, Core photography and Laboratory work | |
| Scanning of borehole wall | Borehole TV and Borehole Televiewer | Borehole TV |
| Geophysical logging | X-Y calliper, Electrical (Spontaneous potential, Resistivity and Micro resistivity), Density, Neutron, Natural gamma, Spectral gamma, Acoustic, Deviation and PS well logging | |
| Flowmeter logging | Temperature | Electro-magnetic flowmeter |
| Hydraulic tests | 12 intervals | 15 intervals |
| Groundwater sampling | 2 intervals | 9 intervals |

*mabh: meters along the pilot borehole measured from the borehole collar.

06MI02 号孔は、変質の影響による脆弱な岩盤が分布し、孔壁崩壊やスライム排出不良などが頻繁に発生したことから、深度 180～210m 及び 306～328m 以外の区間については泥水により掘削するとともに、セメンチングとケーシングによる保孔を実施した。水理試験と物理検層については、当初計画の試験数量を実施することができたが、地下水採水については、掘削最深度（深度 500m 以深）においてデータを取得したのみに止まった。調査工程は、セメンチングなどの対策に時間を要した結果、当初予定を約 2 週間超過した。

一方、06MI03 号孔は、全深度にわたって非～弱変質の硬質な岩盤が分布し、06MI02 号孔のような孔内トラブルは発生しなかったが、深度 209m 付近において 300l/分を超える湧水が確認され、掘削や試験に影響を与えることが懸念されたため、深度約 344m まで掘削した時点で、湧水区間に対する部分セメンチングを行なった。水理試験、物理検層及び地下水採水については、当初の計画の試験数量を実施することができた。ただし、流体検層については当初、温度検層を計画したが、グラウト実施箇所を把握するために必要な詳細な湧水位置の特定は、温度検層の解像度や掘削長 30m ごとの水理試験では困難と判断し、電磁フローメータ検層に変更した（このセンサーでは、温度と電気伝導度も同時に測定可能である）。なお、調査工程は当初予定を約 1 週間超過した。

This is a blank page.

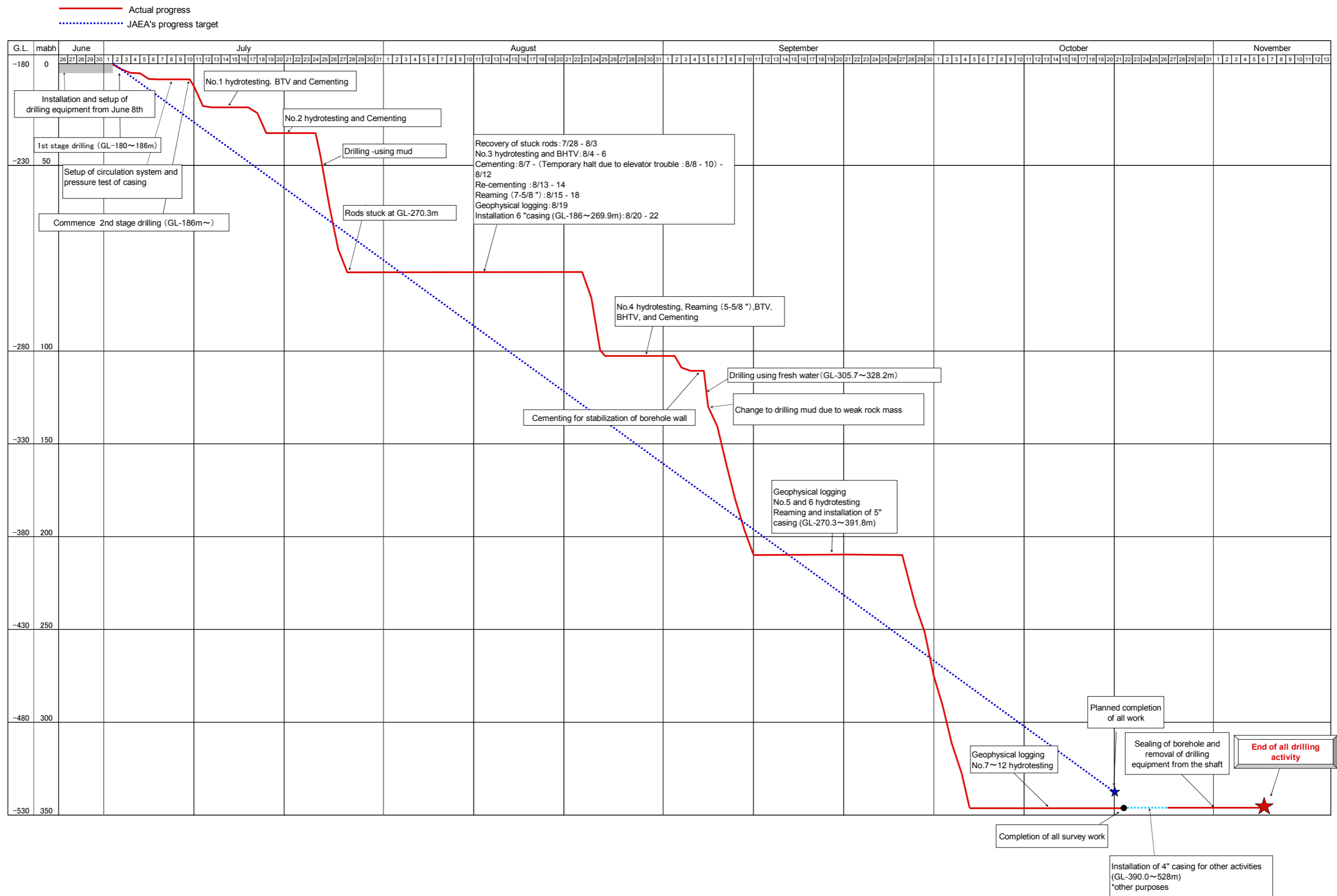


Fig. 4.1.1-1 Actual Activities and Progress of the 06MI02 Borehole Investigations (Main Shaft)

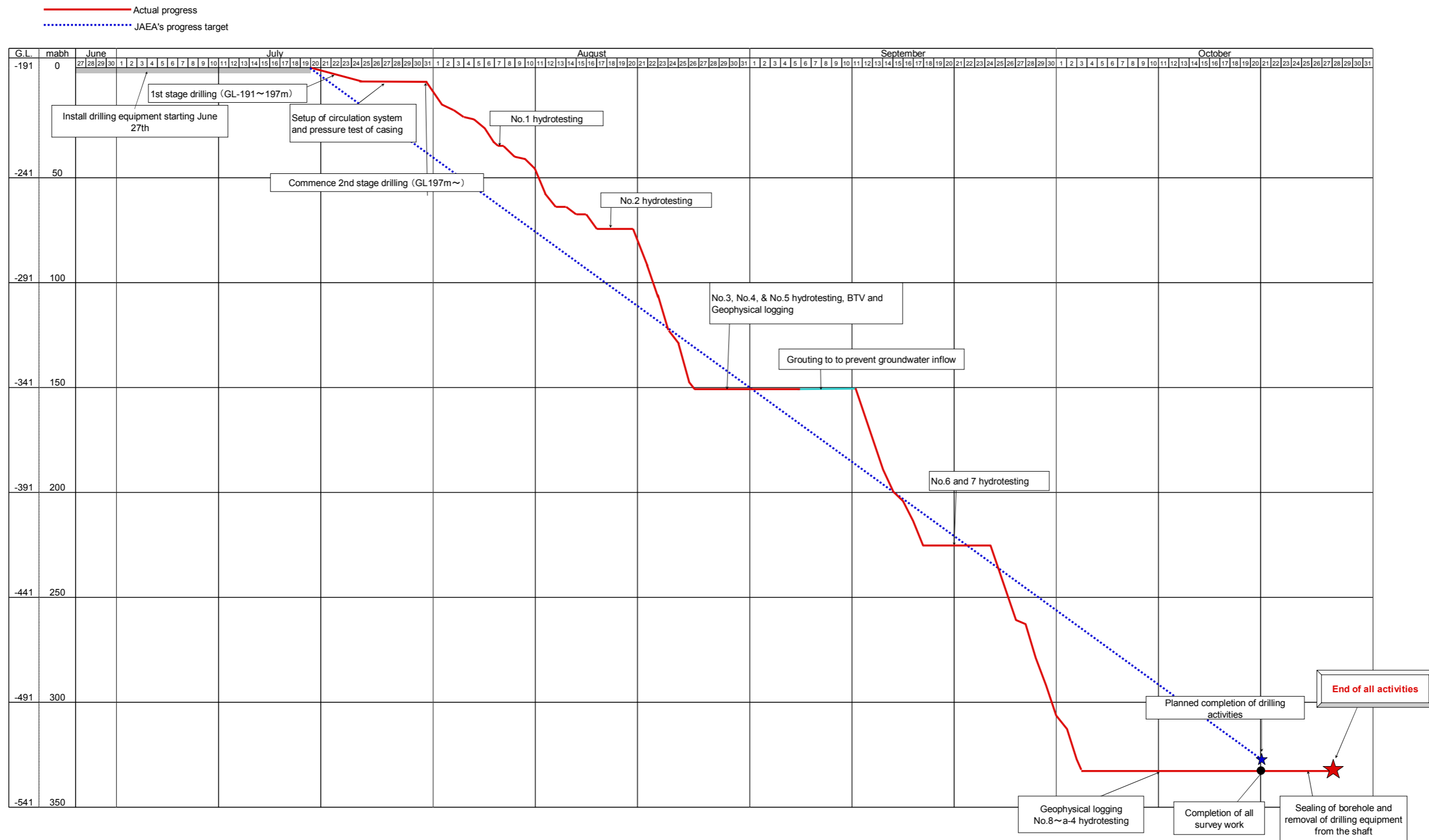


Fig. 4.1.1-2 Actual Activities and Progress of the 06MI02 Borehole Investigations (Main Shaft)

4. 2 ボーリング掘削

4. 2. 1 実施内容

ボーリング掘削は、清水によるワイヤーライン工法を採用し、原則として清水（孔壁を保護するための泥材を混ぜていない水）による掘削とした。孔口は長さ約 6m の 8～6 インチのケーシングを挿入し、それ以深の裸孔部を対象に調査を行った。調査は、前述の通り 30m 毎の掘削と、その後の水理試験、地下水採水を基本とした。

孔径については、水理試験の品質管理や孔内崩壊による段落し（崩壊部を掘削パイプで保孔し、以深の掘削を保孔パイプの径より小さい径で継続する）等の可能性を考慮し、PQ 相当（外径 123mm，コア径 83mm）とした。また、コア回収率の向上を図るため、アクリルパイプを内包した三重管工法を採用した。

掘削中は、孔内状況の迅速な把握・対処と、水みちの検出を目的として、掘削パラメータのモニタリングを実施した。湧水下のボーリング掘削では、循環タンクがオーバーフローする可能性があり、正確な湧・逸水量を把握するため、送排水管または三角堰等における流量測定を行なった。

本調査は、ボーリング孔口が周囲の岩盤が有する水頭より深部であることから、とりわけ湧水抑制対策に留意する必要がある。また、立坑内で実施するため、横方向への作業空間を拡張できないことから、狭隘空間における資機材配置にも留意する必要がある。以下、それぞれへの対策を記述する。

(1) 湧水抑制対策

これまでの調査結果から、対象深度の地下水の水頭は深度約 50m の静水圧分布であると予測された。したがって、深度 180～190m 付近から実施する本ボーリング調査においては、常に被圧下の状態で、ボーリング孔の掘削や試験等を実施することになる。また、高透水性の割れ目等が存在する場合は、多量の湧水も予測される。本調査時の排水処理量の上限（720m³/日）と研究坑道の湧水量（平均 550m³/日）から、本ボーリング孔からの湧水として許容できる湧水量は 2 本のボーリングの合計で 170m³/日（約 120m³/分）であったため、排水処理限度を超えるおそれを想定し、掘削時はボーリング孔口での湧水抑制対策として、ロッド挿入中のアニュラスからの湧水を遮断することが可能な防噴装置（BOP ; Blow Out Preventer）（Fig. 4.2.1），および孔内からの湧水を完全に遮断できるバルブを設置した（Fig. 4.2.1）。BOP を含めたこれらの装置の耐圧は、地表から深度 500m までの全水頭を想定し、5MPa に設定した。

また、孔内からの湧水量が多い場合は、インナーチューブやオーバーショット等のコア回収のためのツール押し込みが不能になる可能性があるため、掘削中の送水圧を維持する機能を有するオーバーショット、インナーチューブおよびそれらのセット・回収時に湧水を抑制できる装置を利用した（Fig. 4.2.1）。

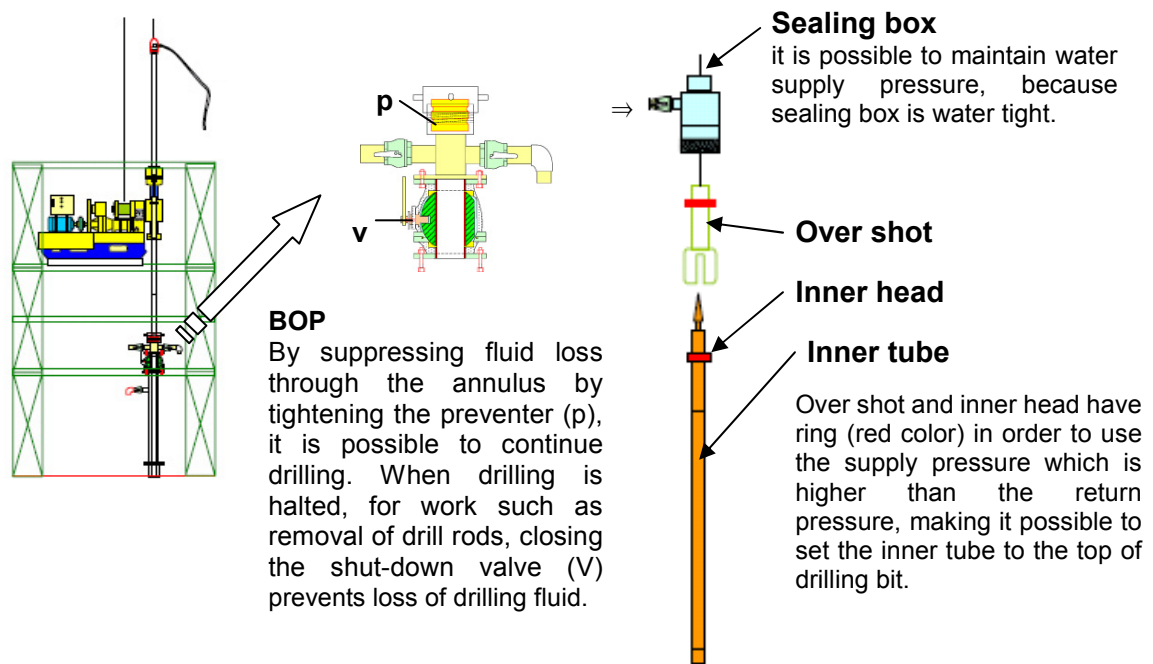


Fig. 4.2.1 Special drilling equipment for artesian conditions

(2) 狭隘（きょうあい）空間における資機材配置

本ボーリング調査は各立坑内（主立坑仕上り直径 6.5m，換気立坑 4.5m）において実施することから，ボーリング機械や櫓等の大きさが限定される。その他の資機材の搬出入についてもスカフォードやキブルの開口スペースによって制約を受ける。したがって利用可能な作業空間を最大限有効に利用することが必要である。そのため，作業架台を立坑内に多段に設置し資機材を配置するレイアウトを採用した。また，地表で使用される一般的な脚式櫓では，資機材の上げ下ろしや，作業通路の確保が困難であることが予想されたため，鉛直方向に断面変化のない形状とし，山留め鋼材を使用した塔式櫓とした（Fig. 4.2.2）。なお，本レイアウトはボーリング機械や電気設備を高い位置とすることが可能であることから，突発湧水等による坑内浸水への対応や感電などのリスク低減の観点でも有効である。

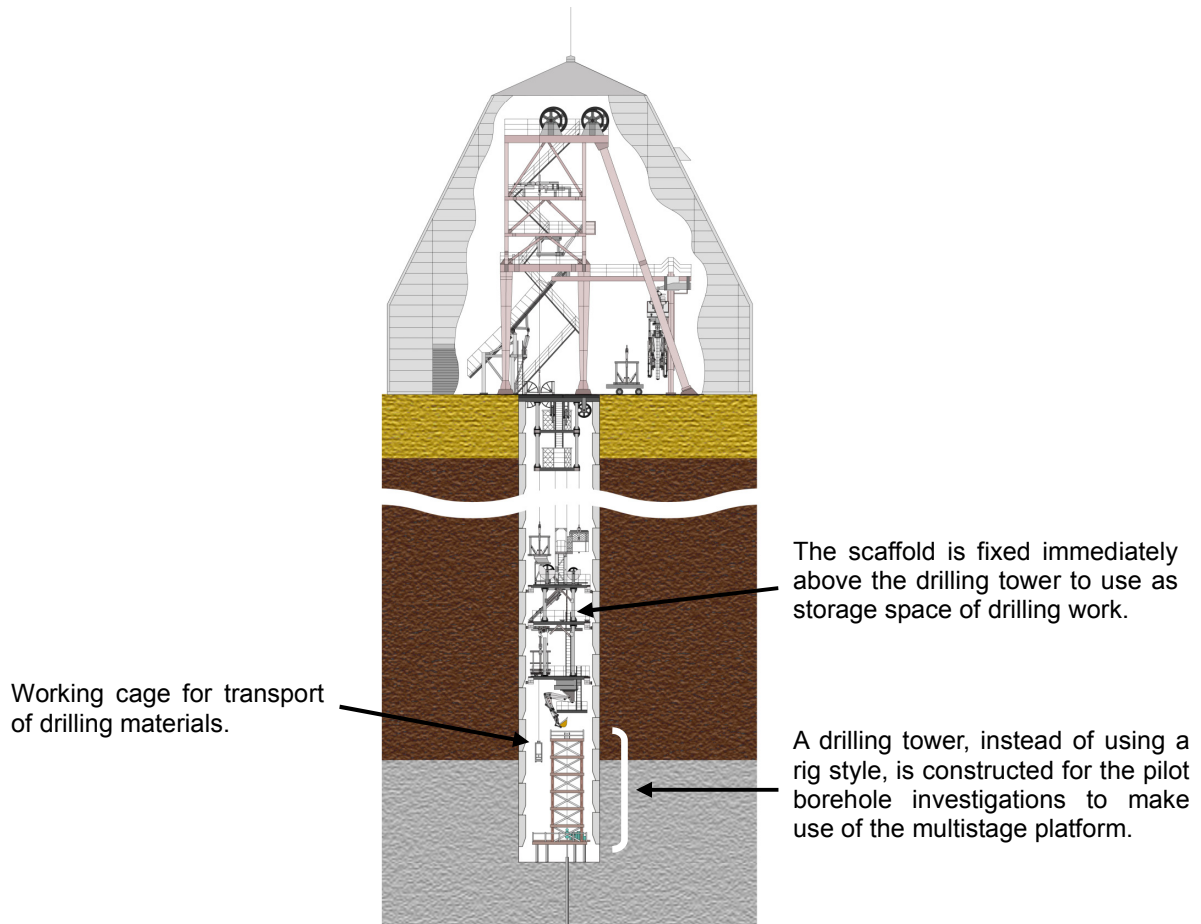


Fig. 4.2.2 Conceptual layout of facilities for the pilot borehole investigations

4. 2. 2 結果

Fig. 4.2.3-1 及び 4.2.3-2 に 06MI02 号孔と 06MI03 号孔のボーリング掘削と試験結果の総合柱状図を示す。また、Fig. 4.2.4-1 及び 4.2.4-2 に掘削モニタリングの結果を示す。

(1) 06MI02 号孔（主立坑）

1) 掘削概況

06MI02 号孔では強い変質を受けた岩盤が分布し、特に深度 193m から 270m、及び 327m から 401m の区間では、強い粘土変質を受けた脆弱な岩盤（電中研式の岩盤等級で CL 級以下）に遭遇した（詳細は 4.3 地質学的調査参照）。そのため、孔壁保護を目的として、深度 210m まで実施した清水掘削を泥水掘削に変更した。深度 270m 以深において比較的硬質な岩盤に遭遇したことから、硬質な岩盤の連続性を 30m 程度確認した深度 305m から清水掘削を再開した。しかし深度 327m から再び脆弱な岩盤に遭遇したことから、当該深度から再度泥水掘削を行い、結果として掘止め深度まで泥水掘削を継続した。また、このような岩盤状況を反映して、数回にわたるセメンチングを実施するとともに、深約 390m まで、6 インチおよび 5 インチの 2 段階にわたるケーシング保孔を実施し（Fig. 4.2.3-1：深度約 270m から 330m のリーミングは 5 インチケーシング挿入のために実施）、深度約 500m までの調査を継続した。なお、深度 388m から孔底までの 4 インチケーシングは、パイロットボーリング調査後に本孔の孔底に歪計を設置するための孔壁保護を目的として挿入したものである。

本孔では掘削パラメータのモニタリング等から顕著な湧水は確認されなかったが、深度約

490m から湧水を示唆する掘削リターン水の増加（タンクレベルの上昇）が確認されたことから、深度 500m 付近においては湧水環境下にある可能性がある。

2) トラブル対応

Table 4.2.1 に、ボーリング掘削の主なトラブルと、その対応を示す。本ボーリング掘削では、主に脆弱な岩盤に起因すると考えられるスライム排出不良や、孔径拡大、ロッドの抑留等が発生した。そのため、孔壁保全のためのセメンチングやケーシング挿入による対応を余儀なくされた。しかし、それらの対応に関しては、基本的な保孔対策のオプションとしてケーシングプログラムをはじめとする掘削計画に含まれていたことから、結果として 2 次におたるケーシング挿入を行なうことにより深度 500m 以深までの調査を完了することが出来た。

しかしながら、深度 270m 付近におけるロッドの抑留は、掘削モニタリングや掘削水の粘性等の情報をリスク情報として認識した上で、掘削水の入替え等のスライム排出を適切に管理していればトラブルを回避できた可能性があったと考えられる。

(2) 06MI03 号孔（換気立坑）

1) 掘削概況

06MI03 号孔は、全深度にわたって非～弱変質の硬質な花崗岩が分布し、孔壁崩壊等のトラブルは発生しなかった。一方で 209m 付近において 300ℓ/分をこえる湧水が発生し、深度 330m まで掘削を継続した結果、孔内からの湧水が 700ℓ/分をこえる状況（ロッド全揚管時）が確認された。作業性や施設の排水処理能力を考慮し、深度 344m に到達した時点で、湧水抑制のための部分セメンチングを実施した（後述）。その結果、セメンチング実施直後は約 20ℓ/分まで湧水を抑制することができた。当該深度以深の掘削により湧水量は徐々に増加し、特に深度約 410～440m にかけてロッド挿入時の湧水量が約 30ℓ/分から約 100ℓ/分に増加した。

2) トラブル対応

06MI03 号孔ではロッドの抑留等の物理的に掘削不能に陥るトラブルは生じなかったが、掘削の初期段階において、孔内からの湧水に対する対処及びボーリングビットの不適に起因する工程遅延に関する不具合が発生した（Table 4.2.1）。

孔内からの湧水に関しては、湧水抑制に必要な装置は一式設置されていたものの、十分に湧水を抑制しながら掘削を継続することができず、1 日あたりの排水処理量限度（170 m³/日：既述）を超えないようにするため、たびたび孔口を閉塞して作業を中断せざるを得なかった。また、ボーリングビットの不適に関しては、岩盤が予想以上に硬質であったことから、岩盤に適したボーリングビットの製作に時間を要した。これらの原因により、深度約 260m までは概ね 1 日あたり 4m の掘削長であった。その後、ボーリングビットのマトリックスの改良や、後述の湧水抑制セメンチングを行なうことにより、掘削効率の改善を図り、深度約 260m 以深は 1 日あたり約 12m の掘削長で掘削を行った（Fig. 4.1.1-2 参照）。

湧水抑制セメンチングは、掘削が深度 334m に到達後に電磁フローメータ検層を実施し、その結果に基づいて深度 208m～229m の区間を部分セメンチングすることとした。フルホールセメンチングを行なうオプションもあったが、その場合はセメント硬化後の浚渫区間が長く、工程のロスが大きいことや、浚渫により元孔を外れてボーリング孔の孔曲りが発生する可能性があること等の理由から、部分セメンチングを選択した。セメンチングの方法は、孔底から湧水帯の約 10m 下まで高濃度のベントナイト泥水で満たし、その上位約 10m をセメントで硬化させた。このセメント区間はパッカーにより圧入したセメントが、目的とした湧水帯より以深に浸入することを防ぐための緩衝区間としての機能を果たす。その上で孔口にパッカーを設置して湧水帯へセメントを圧入した（Fig. 4.2.5）。本セメンチングの結果、700ℓ/分をこえる場合もあった湧水が約 20ℓ/分まで低減した。本手法は研究坑道における湧水下でのボーリング調査時の湧水抑制に応用でき

ると考える。

4. 2. 3 考察

主立坑の脆弱な岩盤や換気立坑の湧水状況にも係わらず、坑道内から深度 500m までの掘削を行うとともに、調査品質を低減させることのない一定レベルの岩芯及び孔壁状態を提供することができた。また、工程に関しては、主立坑で約 2 週間、換気立坑で約 1 週間の遅延を生じたが、本調査以降の施工努力により、研究坑道掘削工事の全体工程に影響を与えない範囲内に工程を収めることができた。

トラブル防止については、主立坑におけるロッド抑留などの不十分な点もあったが、トラブル発生への対応に関しては、適切な計画策定や、施工者との十分な協議による対応などにより、トラブルを拡大することなく、適切に収束することが出来たと考える。

4. 2. 4 教訓

主立坑におけるロッドの抑留に関しては、掘削データなどを取得する目的や個々のデータの値や傾向による管理レベル（通常管理域、注意管理域、危険管理域等）についての認識が十分でなかったことがあげられる。特に、掘削モニタリングは他の研究データと異なり、掘削中のリスク管理としてリアルタイムに十分に利用される必要があり、その観点では、掘削モニタリングデータの監視が十分ではなかったと考えられる。本件のような掘削トラブルについては、結果論として取り扱われる傾向が強いが、これまでに研究所及びその周辺で蓄積してきたボーリング掘削事例を整理し、パラメータの値や変動幅に基づく掘削管理指標を構築する必要がある。

今後、研究坑道におけるボーリング掘削では湧水抑制が極めて重要となってくる。すなわち、湧水抑制が適切でない場合は、作業性の低下による工程の遅延や、排水処理コストの増大、排水処理限度の超過等による中断等、掘削の完遂に大きな影響を及ぼす。06MI03 号孔では掘削の初期段階では湧水抑制が不十分であったが、本ボーリング調査後に深度 200m レベルで実施した水理調査や先行変位調査のためのボーリング掘削に、パイロットボーリング調査での実績を踏まえたノウハウが反映された結果、適切な掘削管理を行なうことに成功している。

This is a blank page.

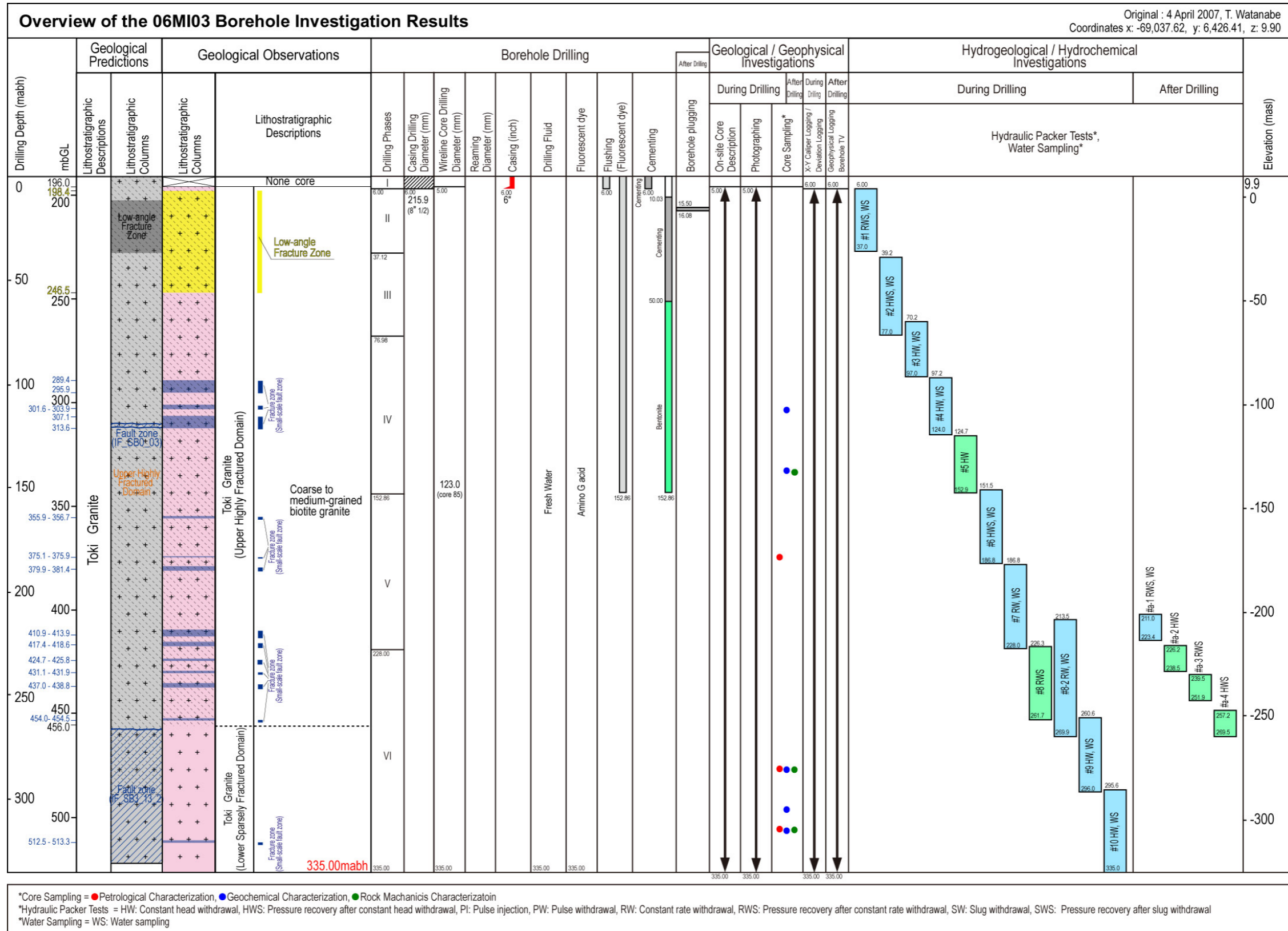
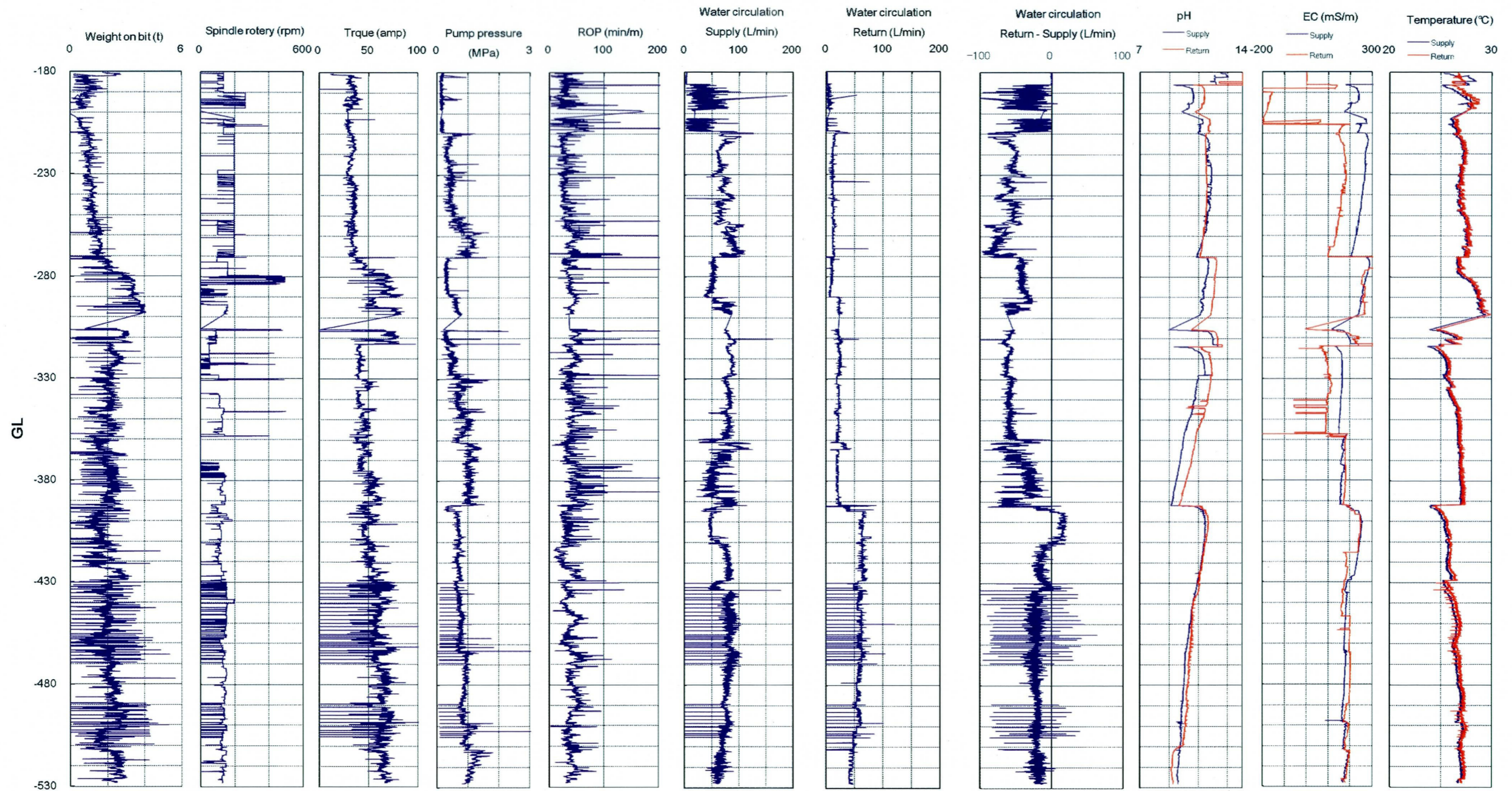


Fig. 4.2.3-2 Overview of the 06MI03 borehole drilling (Ventilation Shaft)



* Data loss : -199.1~-202.6m and -298.5~305.7m

Fig. 4.2.4-1 Drilling parameters — 06MI02 borehole monitoring (Main Shaft)

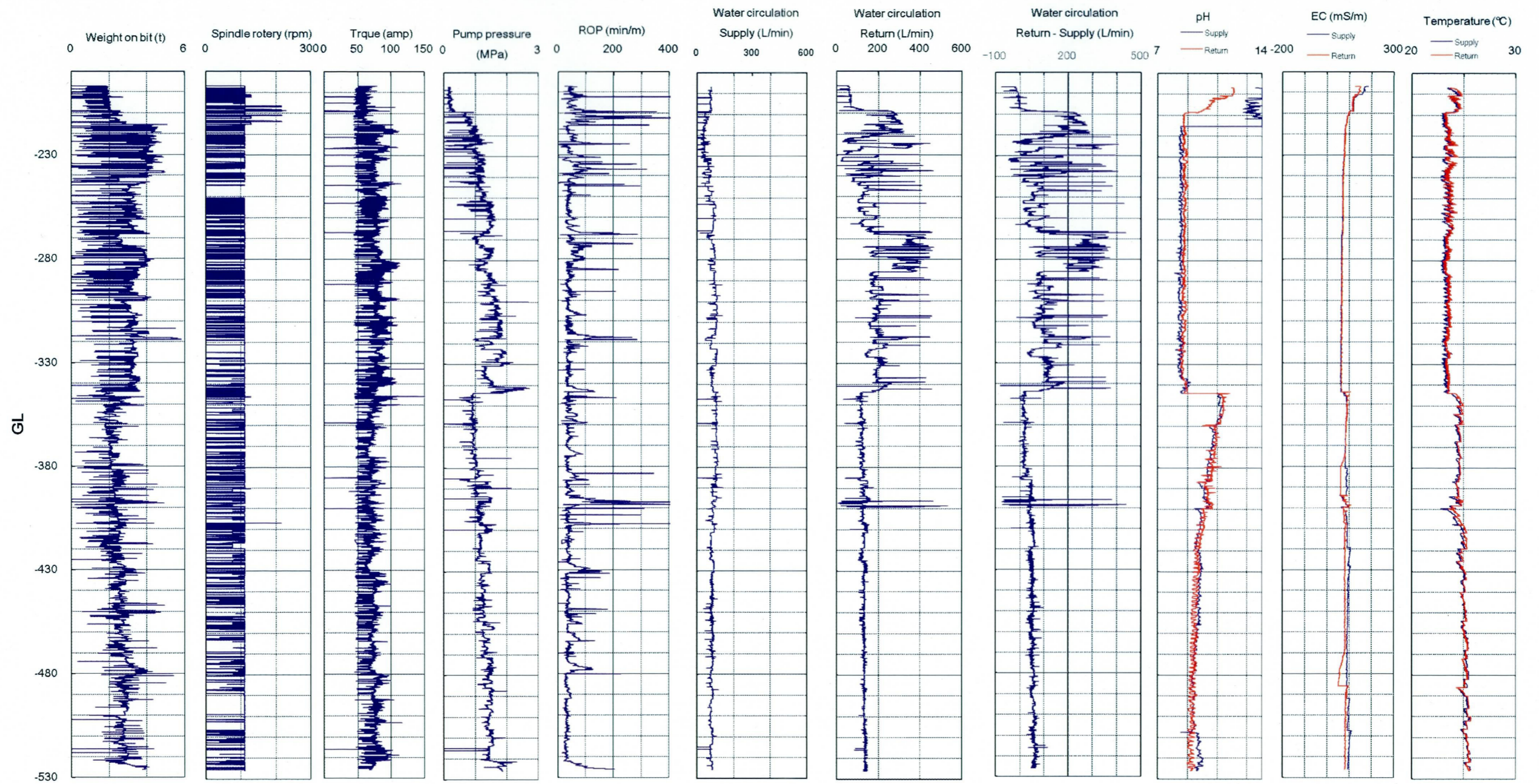
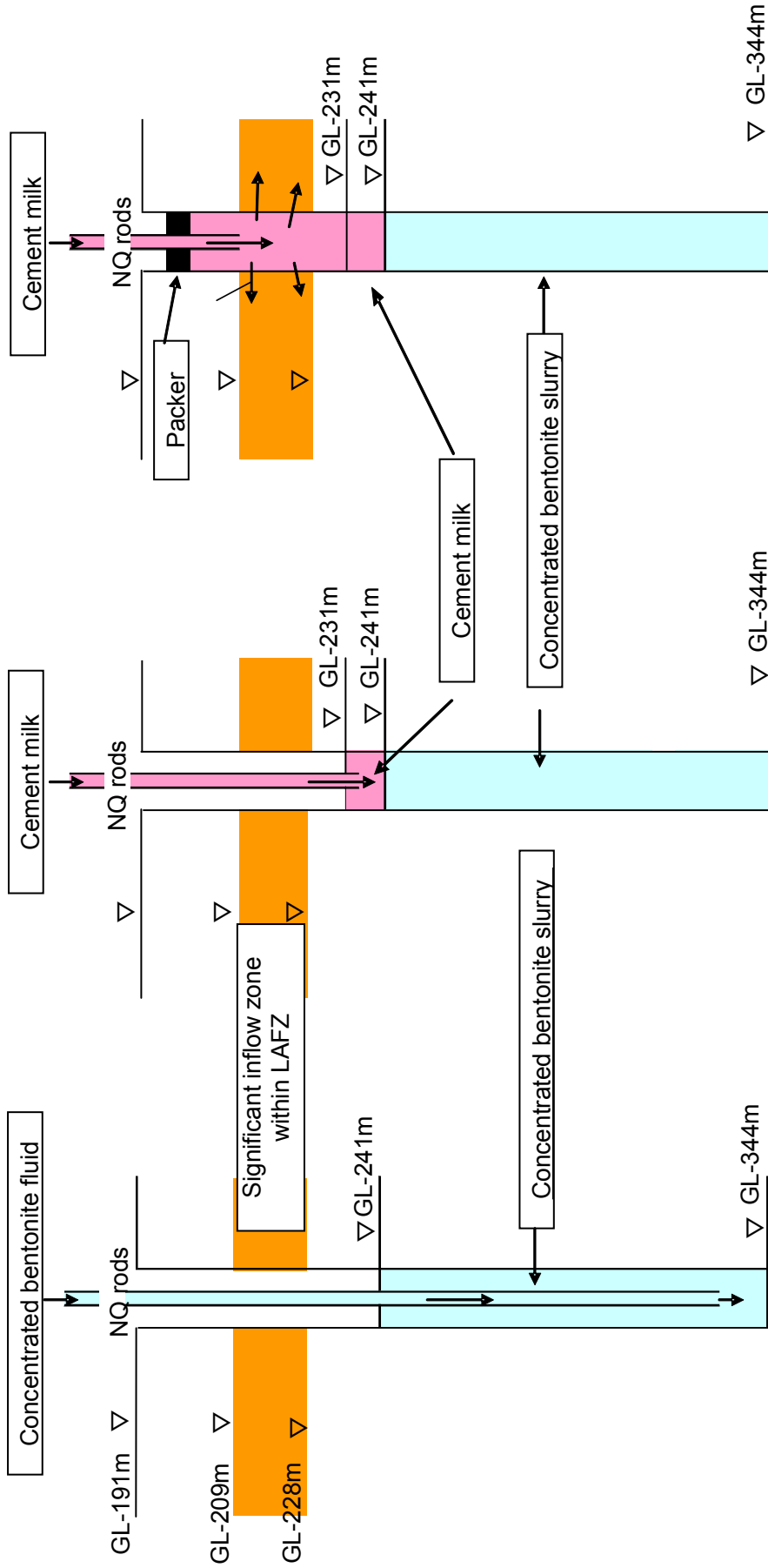


図 4.2.4-2 Drilling parameters — 06MI03 borehole monitoring (Ventilation Shaft)



Step 1; Concentrated bentonite slurry was injected in order to limit the cemented area.
Step 2; The zone above the bentonite was cemented to prevent mixing of bentonite slurry and injected cement milk (Step 3)
Step 3; Cement milk was injected into inflow zone using single packer system.

Fig. 4.2.5 Partial cementing procedures to suppress inflow from a significant WCF in 06M103 borehole (Ventilation Shaft)

This is a blank page.

Table 4.2.1 Trouble and countermeasure of pilot borehole investigations

| Major problems | | Countermeasures taken | |
|--|--|--|---|
| | | Details | Assessment |
| 06MI02 borehole (Main Shaft) | <ul style="list-style-type: none"> ● Difficulty of installing drilling rods, core loss and jamming of rods below approx. 193 mbgl¹ (13 mabh) was due to poor rock quality and strong alteration to clay. ● PB was drilled to approx. 200 mbgl (20 mabh), then hydrotesting and BTV investigation of drilled section were performed. ● BTV: It was impossible to install BTV to a deeper depth than approx. 193 mbgl (13 mabh), and good images could not be obtained due to turbidity of borehole water. | <ul style="list-style-type: none"> ● Significant structural boundaries were identified in core in the interval to approx. 192 mbgl. To obtain information on boundary conditions, BTV investigations were attempted 6 times, unsuccessfully. ● The 7th BTV survey was successful because flocculant added was able to reduce turbidity and thus information could be obtained on the structural boundary conditions in the borehole. | <ul style="list-style-type: none"> ● Because of the lack of important information on the structural conditions, it was important to persevere, despite the uncommon number of unsuccessful attempts at performing the BTV surveying. Ultimately, success of the surveying was due to good exchange of ideas and team work on the part of JAEA and the JV staff. |
| | <ul style="list-style-type: none"> ● To avoid discontinuation of the drilling due to borehole collapse, cementing the borehole to a depth of approx. 200 mbgl (20 mabh) was planned to stabilize the borehole wall. However, the need to prevent borehole deviation during re-drilling through the cemented section was considered critically important. | <ul style="list-style-type: none"> ● To prevent drill rod bending leading to borehole deviation during re-drilling, HQ drill rods were cemented into the borehole as guide rods. Then, overcoring with PQ rods through the cement was successful and borehole deviation out of the intended PB orientation was prevented. This technique was recommended by the JV staff. ● The same method was applied for cementing operations at a deeper depths. | <ul style="list-style-type: none"> ● It was appropriate to focus on avoiding difficulties due to flexure or bending of drill rods leading to potential borehole deviation. Agreement was unanimous between JAEA and the JV contractor that drill rod flexure and borehole deviation should be completely avoided. |
| | <ul style="list-style-type: none"> ● Even though drilling was successful to approx. 210 mbgl (30 mabh), repeat flushing was necessary due to the bad condition of the borehole wall. | <ul style="list-style-type: none"> ● To prevent jamming of test equipment and decreased core recovery due to borehole collapse leading to schedule delays, borehole protection measures such as using drilling mud and installing casing were implemented, until the PB passed through weak rock mass where problems might occur. Important points considered are as follows: <ul style="list-style-type: none"> • Because low permeability was expected in the weak rock mass, there is reduced chance of groundwater sampling. • Regarding hydrotesting, analysis based on skin effect was used. • BTV was a low-priority due to the expected low permeability. | <ul style="list-style-type: none"> ● This was a basic method for borehole protection deeper than 210 mbgl (30 mabh) ● Installing casing was the preferred option for basic well protection. Necessity for establishment of a casing program to deal with relevant problems was presented. |
| | <ul style="list-style-type: none"> ● While work was suspended and the casing was empty at a depth of approx. 270 mbgl (approx. 90 mabh), pumping pressure went from 0.1 to 7.6MPa, resulting in jammed drill rods. ● Attempts to hoist the rods to a depth of approx. 255 mbgl (75 mabh) were unsuccessful due to hoist breakdown and therefore, the attempt to free the rods using the hoist alone was abandoned. | <ul style="list-style-type: none"> ● Using a vibrator to free the rods was also unsuccessful. ● Sinking larger diameter rods (NL140; external diameter 140mm, internal diameter 123mm) in the annulus between the borehole wall and the stuck rods (external diameter 114mm) successfully freed the stuck rods. One week was required for the procedure. | <ul style="list-style-type: none"> ● Even though the following information was obtained: the viscosity of the drilling mud used for the drilling went up to 35 (average 30), the pumping pressure also went up, which means the drilling slime increased at a depth of approx. 260 mbgl. This information needs to be more effectively applied to prevent risks during drilling. ● There was inadequate supervision of procedures. Rods were left inside the borehole without proper monitoring, a rudimentary management mistake. ● To avoid increasing the amount of drilling slime while drilling, activity focused on the above mentioned and aggressively purge the drilling water to remove the slime were performed |
| 06MI03 borehole (Ventilation Shaft) | <ul style="list-style-type: none"> ● Work was frequently halted because of large water inflows (over several hundred litres/min) at a depth around 209 mbgl (19 mabh). | <ul style="list-style-type: none"> ● Special drilling equipment for artesian conditions had been installed; however, drillers were not experienced in its use. An experienced researcher gave instructions on correct use. ● To reduce the inflow as much as possible and to enhance workability, cementing to control water inflow was performed. | <ul style="list-style-type: none"> ● There were only a limited number of researchers experienced with drilling under artesian conditions, therefore an instruction manual for drilling under such water inflow conditions should be established. ● Important technical know-how on cementing to control water inflow was obtained (see text) |
| | <ul style="list-style-type: none"> ● Rock mass was harder than expected and the drill bit was not compatible to conditions resulting in decreased drilling rate. | <ul style="list-style-type: none"> ● Two weeks were spent testing drill bits with a variety of matrix materials and the most suitable bit was selected. ● Increased drilling rate was achieved using a softer matrix material. Increased friction on the matrix shortened the bit life. | <ul style="list-style-type: none"> ● To minimize the impact on the project schedule, field testing of bits and improvement of the bits based on the field testing are required. Cooperation with the bit manufacturer is the most important factor. |

Note 1. All depths mean depth below ground level or mbgl, whereas depth given as mabh mean metres along the pilot borehole measured from the borehole collar.

4. 3 地質学的調査

4. 3. 1 実施内容

パイロットボーリング調査における地質学的調査では、地質・地質構造の把握を目的として Table 4.3.1 に示す調査を実施した。

Table 4.3.1 Planned and actual geological investigations

| Planned investigations | | Actual investigations | | | |
|--|---|--|--|--|----------|
| Method | Acquired information | 06MI02 borehole (Main shaft) | 06MI03 borehole (Ventilation shaft) | | |
| Core description | General geological information | ●Major core loss intervals (> 30cm) 196.9~197.6m, 203.9~204.2m, 209.4~209.7, 303.1~304.0m, 333.7~334.2m, 409.6~410.7m | ●Major core loss intervals (> 30cm) None | | |
| Rock/mineral samples for laboratory work | Lithological, mineralogical and geochemical characteristics | Systematic sampling and testing (XRD, XRF, petrophysical tests., etc.) are carried out (results of evaluations will be provided later) | | | |
| Borehole TV | Strike & dip of significant structural features | ●Borehole TV 186~192m, 238~271m ●Borehole televiewer* 186~268m, 270~297m, 295~390m, 390~416m, 425~454m, 464~524m | ●Borehole TV 197~344m, 321~419m, 411~526m | | |
| Geophysical logging | X-Y calliper | Borehole diameter | 186~268m, 270~390m, 390~417m | 197~526m | |
| | Electrical (Spontaneous potential, Resistivity and Micro resistivity) | Petrophysical properties of rock mass | 186~268m, 270~390m, 390~419m, 425~454m, 464~527m | 197~349m(**), 197~526m | |
| | | | 186~268m, 270~390m, 390~417m, 425~454m, 464~527m | 197~526m | |
| | | | 186~268m, 270~390m, 390~417m, 425~355m, 464~527m | 197~526m | |
| | 186~268m, 270~390m, 390~417m, 425~453m, 464~525m | | 197~526m | | |
| | 186~459m, 380~523m | | 197~526m | | |
| | 186~265m, 270~384m, 390~414m, 425~451m, 464~523m | | 197~523m | | |
| | Deviation | | Borehole trace | 186~268m, 270~390m, 390~417m, 425~453m, 464~525m | 197~526m |
| | PS well logging | | Petrophysical properties of rock mass | 186~260m, 270~385m, 390~419m, 424~450m, 464~520m | 197~521m |

Borehole TV, borehole televiewer and geophysical logging in the Main shaft were carried out several times during borehole investigations, because repetition of drilling and borehole protection such as cementing or installation of drill rod was necessary due to clayey rock mass

*. Borehole televiewer surveys were carried out instead of borehole TV due to turbid water derived from clayey rock mass

** : Before partial cementing

06MI02 号孔では、これまで述べてきたように脆弱な岩盤に起因する孔壁崩壊等が発生した。そのため、孔内水の濁りや泥水掘削の適用により、ボアホールテレビ（以下、「BTV」という）計測をボアホールテレヴィューアー（以下、「BHTV」という）計測に変更するとともに、物理検層については、セメンチングやケーシング保孔の前に計測を実施する等、複数回の計測を行なった。また、一部の区間では孔径拡大箇所計測機器が引っかかり装置の挿入が出来ない等、欠測区間が発生した。

06MI03 号孔では非~弱変質の硬質な岩盤であったため、当初計画通りの調査を行なうことができた。

4. 3. 2 結果

Fig. 4.3.1-1-1 及び 4.3.1-2-1 に 06MI02 号孔及び 06MI03 号孔の岩芯地質観察、BTV 計測等の結果をまとめた総合柱状図を、Fig.4.3.1-1-2 及び 4.3.1-2-2 に物理検層の総合柱状図を示す。また、付録 1 に岩芯写真を示す。

(1) 06MI02 号孔 (主立坑)

1) 岩相

06MI02 号孔では土岐花崗岩と貫入岩の分布が確認された。

土岐花崗岩は、深度 270～330m 及び 430m 以深では、比較的変質が弱く原岩組織が確認できる。中～粗粒の花崗岩からなり、粗粒の長石による斑状組織が一般的であるとともに、有色鉱物の濃集部が認められる等、不均質な岩相を示す。

貫入岩は、細粒で灰白色を呈し、見かけ上数 m から十数 m 程度の幅で花崗岩中に断続的に分布する。強い変質のため肉眼では原岩を特定することは困難であるが、顕微鏡観察によると石英とセリサイトに交代された斜長石の仮像が卓越していること、化学分析では SiO_2 が約 45% と塩基性を示すことから、原岩としてはドレライト質の岩石であると推定される。

花崗岩と貫入岩の岩相境界面の形状や組織については、直線的な境界面を有する場合があるが (深度 259m 付近等)、一般的には強い変質のため不明瞭である。

2) 変質

全区間を通して中～強変質を被っている。特に、花崗岩と貫入岩の境界付近の花崗岩側の変質が強く、石英を除いてほとんどが白色粘土化している場合も確認される。変質鉱物としては、雲母粘土鉱物が卓越し、スメクタイトと若干の緑泥石を含む。また、相対的に変質が弱い区間 (深度 270～330m 付近及び 430m 以深) では、有色鉱物の緑泥石化や長石の白濁化が特徴的である。

3) 構造

Table 4.3.2 に本ボーリング調査で確認された主要な構造の分布と特性の概要を示す。

(a) 断層

岩芯地質観察の結果及び物理検層の情報を用いた多変量解析¹⁾の結果に基づいて、深度 193～270m 及び 327～401m の区間に比較的規模の大きな 2 条の断層帯を認定した (Fig. 4.3.1-1,2)。これらの断層帯は石英を除いてほとんどが白色～灰白色に粘土化している。また、特に、深度 193～270m の断層帯の分布は貫入岩の分布区間と整合的である。ガウジ等の内部構造は強い変質の影響により明瞭ではない。断層帯の境界付近の BTV 及び BHTV 計測の結果から、上位の断層帯は北西走向、高角 (約 80°) の西傾斜の境界を有し、一方、下位の断層帯は概ね南北走向、約 60° の東傾斜である。

また、深度 450m 以深にはカタクレーサイトが断続的に分布している。これらのカタクレーサイトは、一般的に数 mm サイズまで破碎された破碎岩片の基質、1cm 程度の石英粒及びそれらの間隙を細脈状に充填する微細な緑泥石や雲母からなる。カタクレーサイトでは、割れ目の頻度は他の区間に比べて高くなく、また湧水等は確認されていない。

(b) 地質構造区分

土岐花崗岩に認められる上部割れ目帯 (Upper Highly Fractured Domain, 以下、「UHFD」) や低角度を有する割れ目の集中帯 (Low-Angle Fractured Zone, 以下、「LAFZ」)²⁾については、強い変質の影響により割れ目の頻度や走向傾斜の把握が困難なことから、同孔では認定することができなかった。

(c) 透水性構造

本孔では掘削モニタリングにおいて顕著な湧・逸水箇所を認定していないが、温度検層の結果、深度 510m 付近で異なる地下水の流入を示唆する異常点が確認された。深度 490m 付近では掘削リターン水の増加が認められていることを踏まえ、深度 500m 付近の変質が弱く介在物の乏しい割れ目が透水性構造として機能している可能性がある。

4) 岩盤等級

本ボーリング調査では電中研式³⁾に基づき岩盤等級の認定を行なった。06MI02 号孔は、CM 級

以下の岩盤が多くを占め、特に上記の断層帯のほとんどは CL 級以下の岩盤に区分される。また、D 級に区分される極めて脆弱な岩盤の分布は貫入岩の分布と整合的である。

Table 4.3.2 Predicted and actual depths of the structural domains

| Structural Domain | 06MI02 Borehole (Main Shaft) | | 06MI03 Borehole (Vent. Shaft) | |
|--|--|------------------------|-------------------------------|------------------------|
| | Actual depth (mbGL) | Predicted depth (mbGL) | Actual depth (mbGL) | Predicted depth (mbGL) |
| Upper highly fractured domain (UHFD) | The three domains could not be distinctly identified based on the existing definition (ie degree of fracture frequency of low angle fractures) due to the strong alteration | 201~496 | 191 (T.O.B.)~456 | 191~456 |
| Low-angle fractured zone (LAFZ) | | 214~245 | 198~247 | 202~228 |
| Lower sparsely fractured domain (LSFD) | | 496~ | 456~ | 456~ |
| F146.60 Fault | N.A. | 180(T.O.B.)~201* | - | unexpected |
| IF_SB3_02 Fault | N.A. | 503~520 | - | unexpected |
| IF_SB3_13_2 Fault | - | unexpected | N.A. | 456~521 |
| Fault at Main Shaft (@192.76~270.60mbGL) | 192.67~270.60 | unexpected | - | unexpected |
| Fault at Main Shaft (@326.80~401.46mbGL) | 326.80~401.46 | unexpected | - | unexpected |

*: Area of Damage zone

(2) 06MI03 号孔 (換気立坑)

1) 岩相

06MI03 号孔では、土岐花崗岩のみが分布し、06MI02 号孔のような貫入岩は確認されなかった。土岐花崗岩は、中～粗粒の黒雲母花崗岩からなり、粗粒の長石による斑状組織が特徴的に認められる。有色鉱物の濃集部やアプライト脈等の分布は限定的であり、比較的均質な岩相を示す。

2) 変質

全区間を通して変質は弱い。確認される主な変質は割れ目の介在物の緑泥石化であり、特に深度 290～310m の割れ目帯に確認される。割れ目が認められない部分の変質としては長石の弱い絹雲母化に限定される。

3) 構造

(a) 断層

割れ目の頻度分布と物理検層の情報を用いた多変量解析¹⁾の結果、深度 300m 以深において幅数 m 程度の割れ目帯を十数か所認定したものの、岩芯地質観察では断層岩を確認していない。

(b) 地質構造区分

06MI03 号孔の BTV 計測データを利用した割れ目の頻度分布の解析結果から UHFD 及び LAFZ の分布を Table 4.3.2 の通り認定した。いずれの構造も概ね調査実施前の予測の範囲内にある。このうち LAFZ の上部については、ボーリング掘削中に 300l/分以上の湧水が確認された区間であり、BTV 計測の結果から多数の透水性割れ目が観察されている ((c) 参照)。

(c) 透水性構造

掘削モニタリングの結果から、深度 209m 付近において 300l/分をこえる湧水が確認されるとともに、深度約 410～440m にかけても明瞭な湧水が確認された。また、電磁フローメータ検層の結果でも、これらを含む区間において明瞭な流速の変化点を確認されている (4.4 水理調査参

照)。

同ボーリング孔ではMIZ-1号孔やDH-2号孔と同様に孔壁が黒色に変色する現象がみられる⁴⁾。これらの変色帯のうち、特に深度209m付近の湧水箇所では、割れ目からの湧水によって、黒色変色の脱色あるいは黒色の付着が妨げられている箇所が認められる (Photo 4.3.1の赤○)。そのような透水性割れ目の概要は以下の通りである。

- ほとんどが低角度を有する単一割れ目であるが、高角度の割れ目と交錯する場合も認められる (深度209.3m付近の割れ目)
- 割れ目を介した岩芯同士はかみ合わせが悪く密着しない
- 割れ目介在鉱物は方解石からなる場合が多いが、割れ目を完全にシールするような産状は確認されず、方解石の一部、または、ほとんどが溶脱したような産状を示す。

また、深度約410~440m区間については黒色の変色帯の溶脱が顕著でないことから、個々の透水性割れ目を特定することは困難であるが、同湧水帯は北東走向の中~高角を有する割れ目が卓越する割れ目帯と一致していることから、深度209m付近の透水性割れ目と異なり、高角を有する割れ目のみの寄与が推定される。

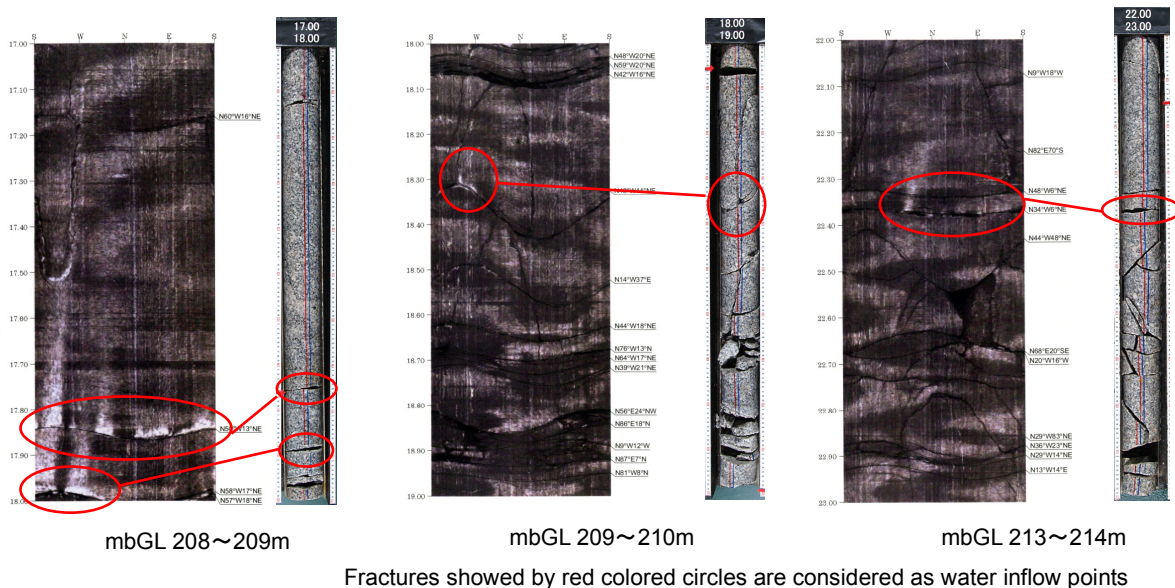


Photo 4.3.1 Borehole TV images (left) and core photos (right) of 06MI03 borehole

4) 岩盤等級

本ボーリング孔では深度約290~310mの割れ目帯が概ねCM級の岩盤等級を示す他は、CH級以上の岩盤に区分される。

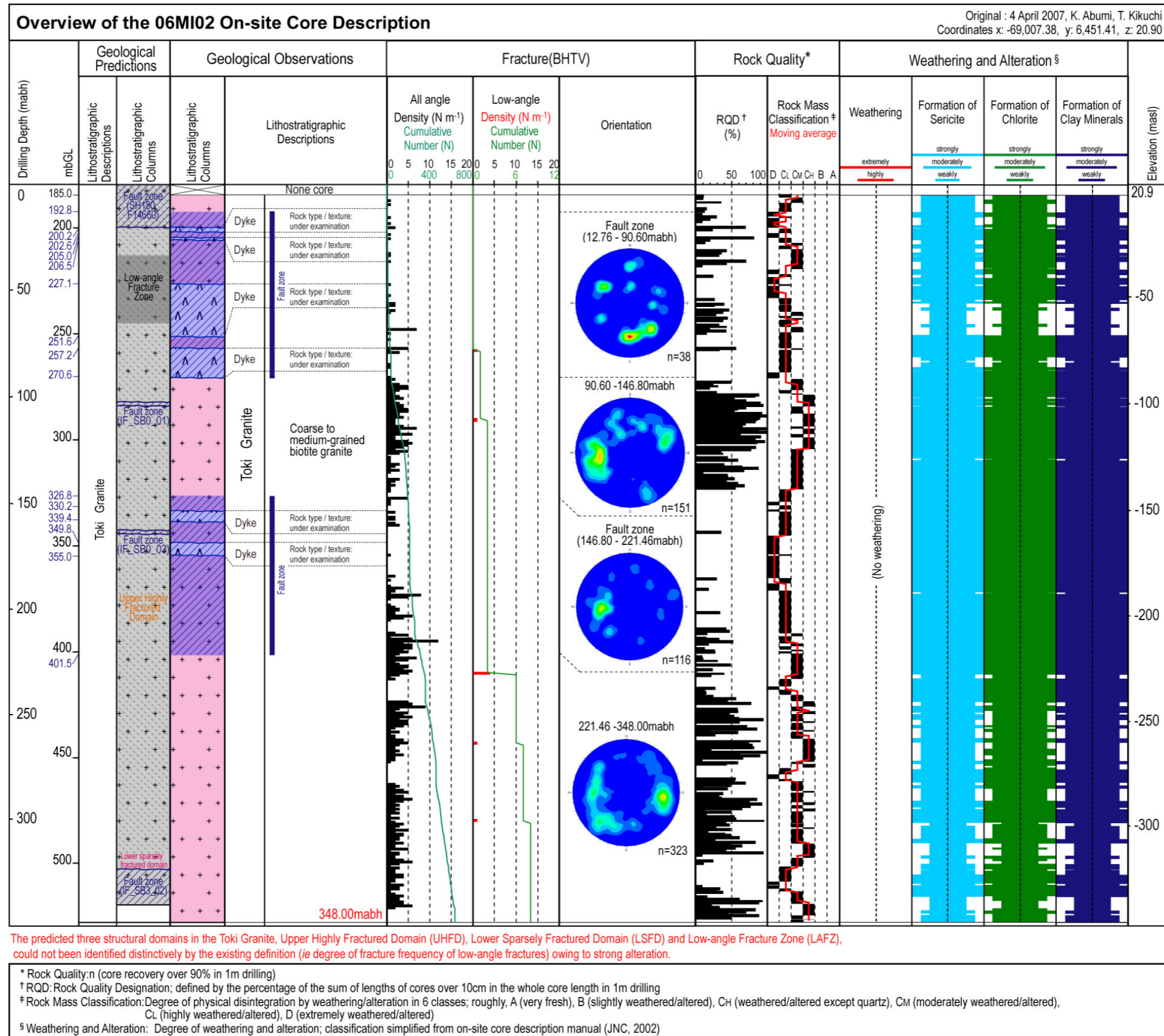


Fig. 4.3.1-1-1 Overview of the 06MI02 borehole geological investigations

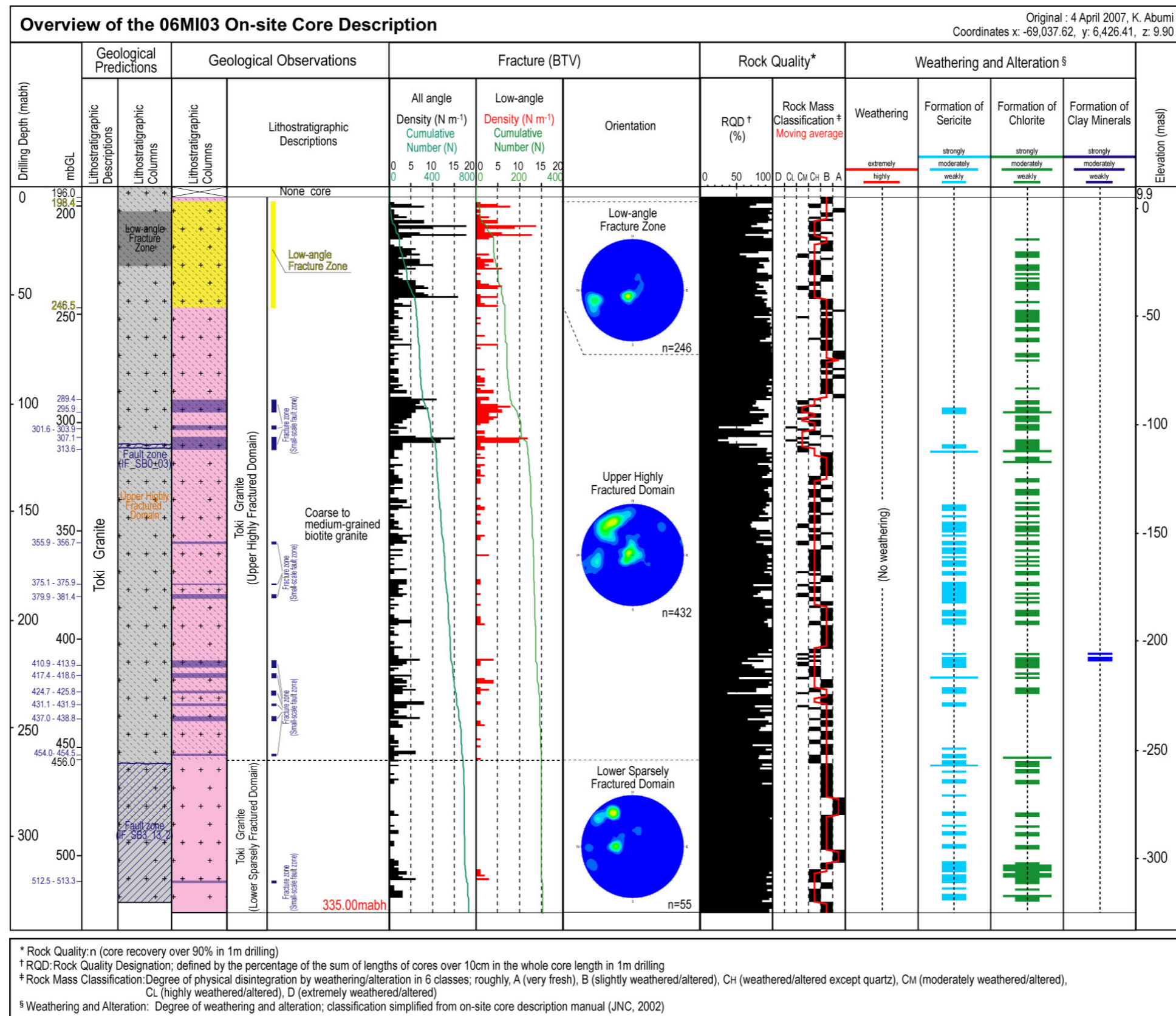


Fig. 4.3.1-2-1 Overview of the 06MI03 borehole geological investigations

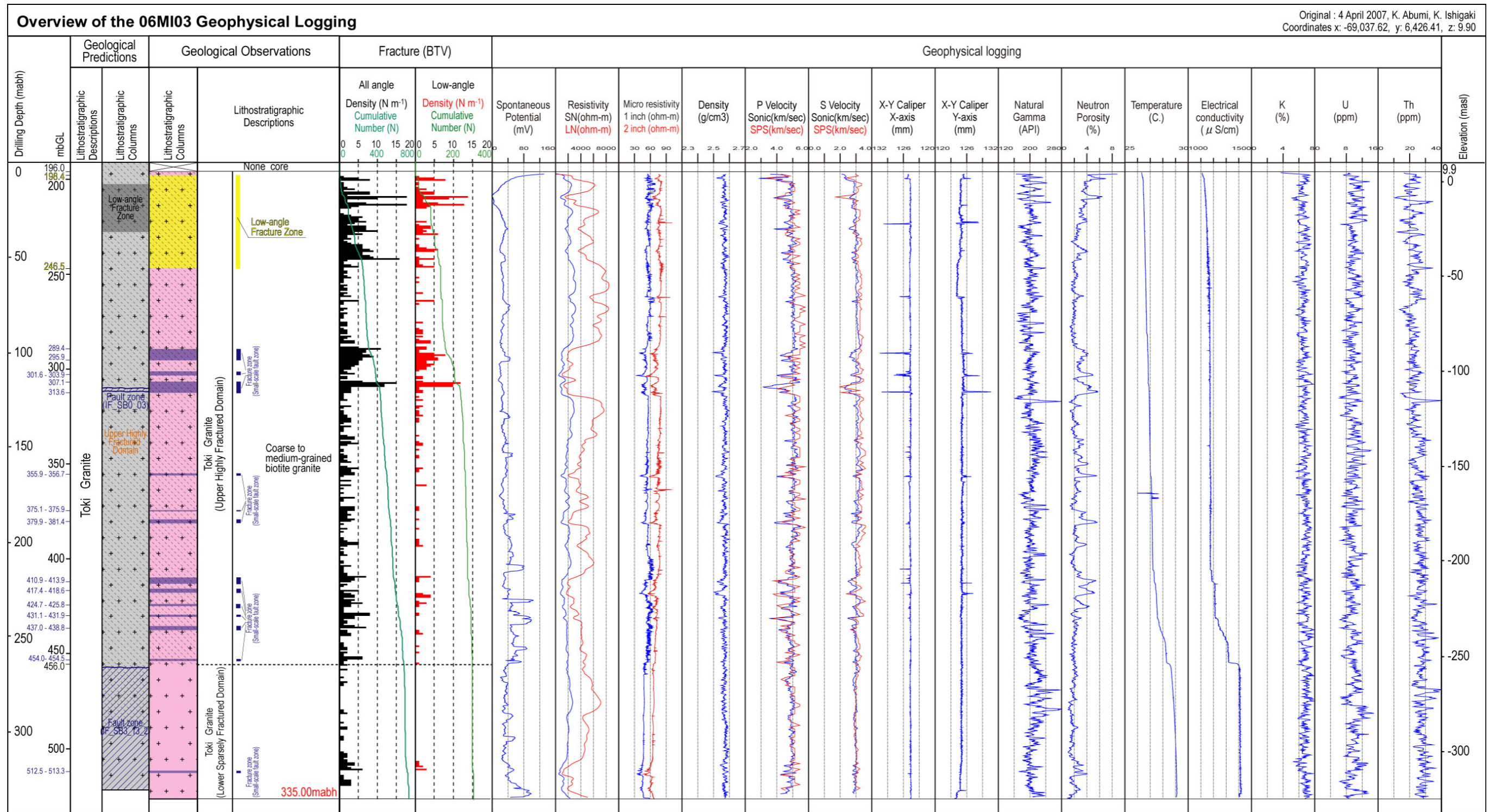


Fig. 4.3.1-2-2 Overview of the 06MI02 borehole geophysical investigations

4. 3. 3 考察

地質学的調査の結果、湧水抑制や施設計画の観点で重要な地質・地質構造として、以下の点があげられる。

(1) 06MI02 号孔（主立坑）で確認された強い変質を伴う断層

これらの断層は、強い粘土変質部を含む変質帯を伴うことから、遮水性の構造として機能する可能性を有している。一方で、06MI03 号孔では弱い変質が認められたのみであることから、同断層及びそれに伴う変質帯は、鉛直方向に限られた分布を示すものと考えられる（5.1 地質構造モデル参照）。主立坑周囲の地下水（圧）が、このような遮水性構造によって分布を規制されている場合、遮水性構造の背面に達する立坑の掘削を行った時に、大量の湧水が発生する可能性がある。したがって、立坑の掘削にあたっては常に変質の程度に留意しつつ、慎重に掘削を進める必要がある。

また、変質を伴う脆弱な岩盤の掘削となることから、モルタル注入等の地山の補強を目的とした補助工法を考慮した掘削計画を策定する必要がある。

(2) 06MI03 号孔（換気立坑）における深度 209m 付近及び 410～440m の透水性構造

深度 209m 付近の透水性構造は、LAFZ の低角の割れ目に起因した透水性構造であり、特に、低角の割れ目密度が 1m あたり 10 本を超える LAFZ の上部に確認される。これまでに MIZ-1 及び DH-2 号孔で確認されている LAFZ の低角の割れ目密度は最大でも 5 本/m 程度⁹⁾であることから、本ボーリングで確認された LAFZ の割れ目密度は有意に高いものと判断できる。また、高角度傾斜を有する割れ目については、本ボーリング調査で透水性構造と判断した割れ目は存在しなかったが、高角の割れ目と交差する低角の割れ目で湧水が認められていることから、低角の割れ目間を連結する役割を担う等、透水性構造との関連について、研究坑道における調査や、傾斜ないし水平ボーリング孔等に基づくデータにより検討する必要がある。したがって、深度 209m 付近の透水性構造を対象とした湧水抑制としては、LAFZ の上部区間の低角の割れ目を第 1 のターゲットとしつつも、高角度の割れ目の分布にも留意した対策が必要であると考えられる。

深度 410～440m の湧水区間では、北東走向の高～中角度を有する割れ目が卓越していることから、LAFZ 中の透水性構造と異なる分布・特性を有すると考えられる。特に高角度の割れ目が透水性構造として機能している場合は、400m 以浅における予備ステージ避難所等の水平坑道のレイアウトの検討にあたって、同構造の分布延長や特性を考慮することが重要となる。

4. 3. 4 教訓

地質学的な調査によって、事故に繋がる大量湧水のリスクに留意して立坑掘削を進める必要性を確認できたことは極めて重要である。したがって立坑掘削地点におけるパイロットボーリングによる地質学的評価は、事故、トラブル等のリスクを低減させるための通常の施工の一環として、立坑の掘削に先立って実施すべき必須の調査であることを再認識した。

調査研究の観点では、06MI02 号孔で確認された極めて強い変質が、第 1 段階の調査研究の結果に基づく予測では想定されていなかった点について、技術的な評価を行う必要がある。なお、前述の通り、06MI02 号孔では深度 450m 以深には断続的なカタクレーサイトの分布が確認されるが、物理検層の解析では断層帯と認定されるような有意なアノマリが確認されないこと、岩芯観察の結果から割れ目の頻度が他の区間と比べて有意に高くないこと、カタクレーサイト分布区間で顕著な湧水や逸水等が確認されていないこと等から、特に、今回の調査目的を勘案して、重要な地質・地質構造として考慮しないこととした。しかし、カタクレーサイトと断層や透水性構造との分布や特性の関連について検討を行い、今後の調査・評価対象としての位置づけを明らかにする必要がある。

4. 4 水理学的調査

4. 4. 1 実施内容

水理学的調査では、水理試験および流体検層を実施した。

水理試験においては、立坑内の環境（湧水環境，狭隘空間等）を考慮して既存の試験装置を改良し，Fig 4.4.1 に示す基本構成を備えた試験装置を用いて試験を実施した。

装置は、湧水環境下での使用となることから、孔内装置の電動バルブ，圧力計などの電気・通信系機器を孔外に配置し，漏水等による電氣的なトラブルを避けるとともに，孔内プローブを簡素化することで挿入等における装置の取り扱いを容易にした。また，掘削ツールスである BOP または口元パッカー（Fig4.4.1 の最上部のパッカー）を用いて口元からの湧水を遮水する構成とした。

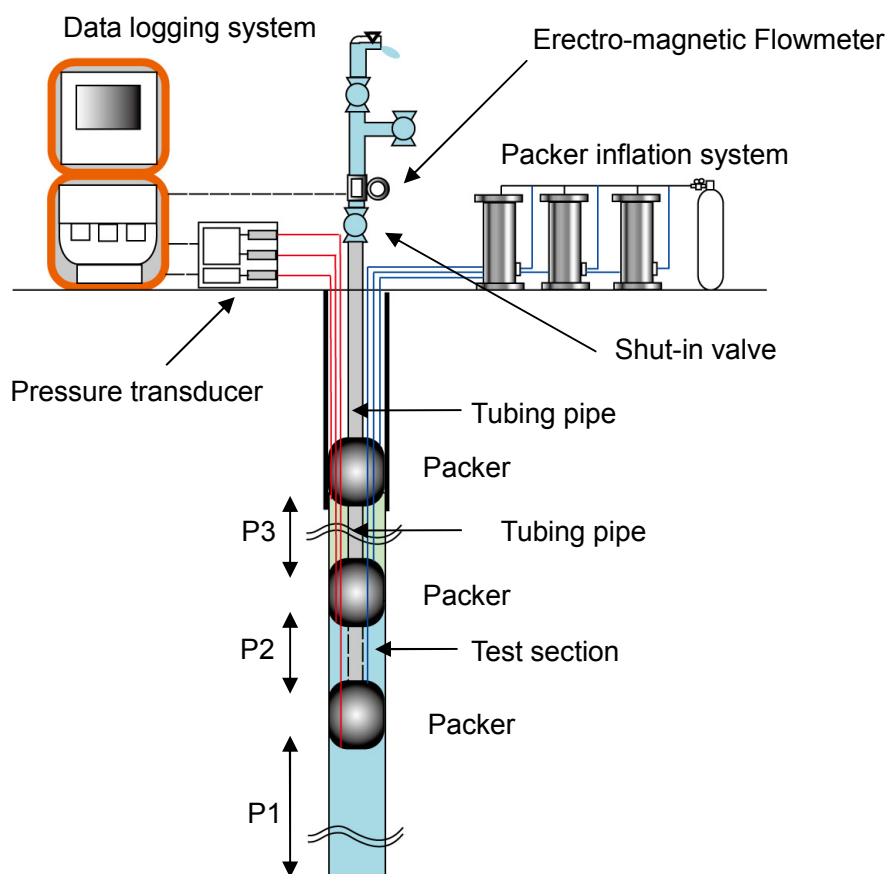


Fig. 4.4.1 Schematic view of hydraulic testing system

両ボーリング調査とも，掘削長 30m 毎のシングルパッカーによる水理試験を基本とし，掘削後については透水性を有する水みちの位置を把握するための流体検層（温度検層）を実施するとともに，掘削中の湧水・逸水量の変化，掘削長 30m 毎の水理試験の結果から特定された高透水性の水みちの透水性及び間隙水圧を把握することを目的としたダブルパッカーでの水理試験を計画した。なお，06MI03 号孔では大量の湧水が認められたため，温度検層と同時に流速の変化が測定可能な電磁フローメータ検層及び，孔内比抵抗検層を実施した。

水理試験手法については，湧水環境下を想定して，自然湧水条件での定圧湧水試験を基本とし，透水性に応じて，スラグ試験，パルス試験等を実施することとした。

湧水下，非湧水下，湧水量が著しい場合の試験方法は以下の通りである。なお，試験方法の略

称は Table4.4.1 に示す通りである。

- 湧水環境：パルス試験 (PW), スラグ試験 (SW,SWS)
- 非湧水環境：注入法 (PI,SI)
- 湧水量が著しい場合 (約 30ℓ/分以上)：定圧湧水試験 (HW, HWS), 定流量湧水試験 (RW, RWS)

Table 4.4.1 Abbreviated test name and contents

| Abbreviated test name | Contents |
|-----------------------|--|
| INF | Packer Inflation |
| PSR | Static Pressure Recovery (shut-in) |
| PW | Pulse Withdrawal |
| PI | Pulse Injection |
| SI | Slug Injection |
| SW | Slug Withdrawal |
| SWS | Pressure Recovery after Slug Withdrawal (shut-in) |
| HW | Constant Head Withdrawal |
| HWS | Pressure Recovery after Constant Head Withdrawal (shut-in) |
| HWR | Pressure Recovery after Constant Head Withdrawal |
| DEF | Packer Deflation |

スラグ試験の実施に際しては、本ボーリング孔が湧水条件であることを想定すると、試験装置だけでは十分な水位回復量を確保することができない可能性がある。よって、スラグ試験を実施する場合にはロッドを数 m 立ち上げて行った。なお、高透水性を有する水みちにおいて、湧水量が排水処理量を超え、一定圧力条件下での湧水を許容することが困難な場合には、試験装置の口元に設置したバルブにより一定湧水量になるように調整して定流量湧水試験を実施した。また、これらの試験に先立って、間隙水圧観測を実施した。

なお、非湧水条件あるいは 0.1MPa 程度の湧水圧条件では十分な水頭差を設定するために揚水ポンプを用いた試験が有効であると考えられる。しかしながら、今回の水理試験では湧水条件を想定し、試験装置の孔内部バルブを排し地上部に設置している。よって、揚水試験を実施するためには、間隙水圧測定後に一旦バルブを取り外し揚水ポンプを挿入した上で、試験区間を開放した状態で揚水を開始しなければならないため、作業が煩雑になり非効率である。また、平衡間隙水圧からの揚水が行えず試験結果の信頼性が大きく低下することになる。そこで調査の目的が施工対策のためのデータ取得（高透水区間の位置および透水性の把握）であることを勘案し、試験区間が非湧水環境であった場合は、これまでの東濃地域における調査結果から透水性が低めに見積もられることが判明しているものの、一般の土木分野において数多くの実績があり、かつ作業が簡便な、注入法による水理試験を実施することとし、透水性に応じて定圧または定流量注水試験、スラグ試験、パルス試験を実施した。

試験実施中は、原位置にて圧力の時間変化とその時間微分プロット (Derivative plot) を用いて実測データをリアルタイムで確認することにより、解析の前提となる放射状均質流れ (Infinite acting radial flow : IARF) が生じていることや井戸貯留による影響、境界条件の影響の有無を判断し試験結果の品質の確保に努めた。各ボーリングの水理試験区間、試験手法等を Table 4.4.2-1 および 4.4.2-2 に示す。

Table 4.4.2-1 Test sequence of 06MI02 borehole

| Test No. | Test interval depth (mbGL) | Test sequence |
|----------|----------------------------|--|
| 1 | 186.0~199.6 | PSR-PI |
| 2 | 199.6~209.6 | PSR-SW-SWS-(HW-HWR) |
| 3 | 197.5~270.3 | INF-PSR-SW-SWS-DEF |
| 4 | 270.3~305.7 | INF-PSR-Pumping-PSR2(HWS) -SW/SWS-PW1-PW2-DEF |
| 5 | 305.7~321.9 | INF-PSR-PW1-PW2-DEF |
| 6 | 322.8~391.8 | INF-PSR-SW-SWS-PW-DEF |
| 7 | 391.8~406.1 | INF-PSR-PW-cessation |
| 8 | 391.8~528.0 | INF-PSR-PW1-HW-HWS-PW2-DEF |
| 9 | 424.8~443.1 | INF-PSR-PW1-SW-SWS-PW2-DEF |
| 10 | 424.8~528.0 | INF-PSR-PW1-HW-HWS-PW2-DEF |
| 11 | 479.3~500.1 | INF-PSR-HW-HWS-PW-DEF |
| 12 | 501.0~528.0 | INF-PSR-PW1_3-HW-HWS-DEF |

Table 4.4.2-2 Test sequence of 06MI03 borehole

| Test No. | Test interval depth (mbGL) | Test sequence |
|----------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 197.0~228.0 | INF-PSR-RW-RWS-DEF |
| 2 | 230.2~268.0 | INF-PSR-HW-HWS-DEF |
| 3 | 261.2~288.0 | INF-PSR-HW-HWS-DEF |
| 4 | 288.2~315.0 | INF-PSR-HW-HWS-HW-HWS-DEF |
| 5 | 315.7~343.9 | INF-PSR-HW-HWS-DEF |
| 6 | 342.5~377.8 | INF-PSR-PW1-HW-HWS-PW2-DEF |
| 7 | 377.8~419.0 | INF-PSR-PW1-RW-RWS-PW2-DEF |
| 8 | 417.3~452.7 | INF-PSR-PW1-RW-RWS-DEF |
| 8-2 | 404.5~460.9 | INF-PSR-PW1-RW-RWS-PW2-DEF |
| 9 | 451.6~487.0 | INF-PSR-PW1-HW-HWS-PW2-DEF |
| 10 | 486.6~526.1 | INF-PSR-PW1-HW-HWS-PW2-DEF |
| a-1 | 402.0~414.4 | INF-PSR-PW1-RW-RWS-PW2-DEF |
| a-2 | 417.2~429.5 | INF-PSR-PW1-HW-HWS-PW2-DEF |
| a-3 | 430.5~442.9 | INF-PSR-PW1-RW-RWS-PW2-DEF |
| a-4 | 448.2~460.5 | INF-PSR-PW1-HW-HWS-PW2-DEF |

06MI02 号孔については合計 12 点の水理試験を実施した。ボーリング孔全体が脆弱な岩盤に遭遇しており孔壁が崩壊しやすい状態が続いたことから、そのような箇所が連続する区間では、試験装置の抑留や孔壁状況の悪化をできるだけ避けるため、試験区間を 70~130m 程度に一括して試験を実施し、試験時間の短縮や孔内水の擾乱による孔壁不良の低減に努めた。深度 500m 以深を除き、掘削中に有意な湧水が確認されなかったことから、透水試験はパルス・スラグ試験を主体とし、湧水が認められた区間で定圧湧水試験を実施するとともに、採水と水質モニタリングを実施した。なお、No.7 区間はパッカー圧の漏洩が認められたため試験を中止した。また、No.1,

No.2 区間については孔口からの試験実施深度が浅いこと、口元においてセメンチングを実施したことから、シングルパッカーの代替機構として、掘削ツールである BOP を用いた試験を実施した。

06MI03 号孔については合計 15 点の水理試験を実施した。当初は約 30m 掘削毎に水理試験を実施する予定であったが、ボーリング孔の崩壊の危険性が少なく、かつ顕著な湧水が生じていない場合は、作業効率を優先して掘削を継続し、ボーリング孔掘削後に、2～4 区間での水理試験（各区間長は 26～42m）を連続して行った。また、掘削終了後に実施した電磁フローメータ検層で流速が大きく高透水性であることが推測された深度 402～460m の 4 区間（a-1～a-4 区間）でも、掘削後に水理試験を行った。換気立坑では、全ての区間で湧水が確認されたことから定圧湧水試験を基本とし、顕著な湧水が確認された No.1, No.7, No.8, No.8-2, a-1, a-3 区間では、定流量湧水試験を実施した。また、掘削中に可燃性ガスの発生が確認された No.6 区間以深については、水理試験中のガスの発生状況の把握とガスが試験結果に及ぼす影響の程度の把握を目的としたパルス試験（PW）を実施した。なお、No.8 区間では試験中に顕著なパッカーバイパス（試験区間とその上下区間の割れ目を介した連結）が推定されるデータが得られたことから、改めてパッカー位置を設定した上で No.8-2 区間の試験を実施した。よって、No.8 区間の試験結果は参考値とした。また、No.1 区間については、試験実施深度が孔口から浅いこと、大量の湧水が確認されたことから、閉鎖機構として掘削ツールである BOP を用い、試験装置を使用しないで試験を行なった。

4. 4. 2 結果

以下に、両ボーリング孔で実施した水理調査の結果を示す。なお、両ボーリング孔の水理、水質総合柱状図は Fig. 4.4.7 を参照のこと。また、巻末の付録 2 に計測データを記す。

(1) 06MI02 号孔（主立坑）

温度検層の結果を Fig. 4.4.2 に、水理試験結果を Table 4.4.3 及び、Fig. 4.4.3 に示す。

06MI02 号孔では、ボーリング孔の孔壁が脆弱であったことから、温度検層はすべて深度約 390m まで孔壁保護を目的とした 5 インチケーシングを挿入した後に実施されたため、深度約 390m 以浅のデータは、すべてケーシング内の測定値となっている。また、深度約 390m 以深でも、“No.2” と “No.3” は、それぞれ深度 425m と深度 464m まで降下したロッド内を通過した測定値となっている。裸孔区間の検層結果から、深度 510m 以深（図中の赤色矢印以深）で温度勾配の変化が認められることから、深度 510m 付近に水みちとなる地下水の流入点が存在すると考えられる。

水理試験結果については、理論式による解析を基本とし、パルス試験、スラグ試験では Hvorslev 法または Cooper 法、定圧湧水試験では Jacob-Lohman 法による解析を行うこととした。また、スラグ試験におけるバルブ閉鎖後の回復試験及び、定圧湧水試験の回復試験では Agarwal 法による解析を行うこととした。さらに、No.1～No.4 区間（深度 186～306m）については試験時間が十分確保できなかったこと、泥水掘削によるスキンの影響が懸念されたことから、理論式による解析結果が真値を示さない可能性がある。また、湧水量予測の観点からは脆弱部の外側の健岩部の透水性を求めることが重要となる。よって、脆弱部外側の健岩部の透水係数、比貯留係数、間隙水圧を推定するために、井戸試験解析ソフトである nSIGHT を用いて、立坑沿いに分布する脆弱部を内側領域、健岩部を外側領域としたコンポジットモデル（ボーリング孔を中心に 2 層の異なる透水性を有する構造が存在すると仮定したモデル）による解析を実施した。

本ボーリング孔では No.2 区間（深度 200～210m）及び No.10 区間（深度約 430m）以深で透水係数 10^{-8}m/s オーダー（透水量係数 $10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ ～ $10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$ オーダー）の比較的高い透水性が確認されたものの、その他区間では透水係数 10^{-10}m/s オーダー以下の低透水性を示す結果となった。

水理試験の結果は、粘土変質を伴う断層帯による脆弱な岩盤がボーリング孔に沿って深度 430m 付近まで分布している一方で、深度 430m 付近を境界にそれ以深では比較的変質が弱い岩盤が分布する地質状況と概ね一致している。

間隙水圧は深度が深くなるにつれ高くなる傾向を示しており、浅部の No.1 区間（深度 186～200m）では水位標高換算値で約 160mbgl であるのに対し、最深部の No.12 区間（深度 501～528m）では水位標高換算値で換気立坑よりも高い約 70mbgl であることを確認した。

また、No.1 区間（深度 186～200m）では、脆弱部の広がり方を推定するために、コンポジットモデルの内側領域（脆弱部）の半径を未知数とした解析を実施した結果、2.2m との結果を得た。

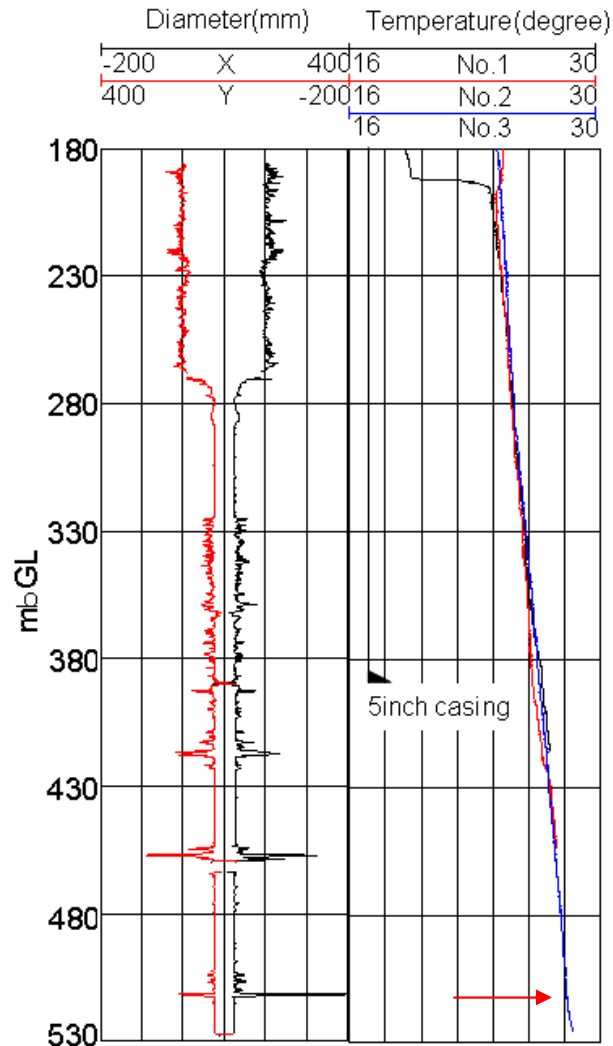


Fig. 4.4.2 Result of temperature and X-Y calliper logging (06MI02 borehole)

Table 4.4.3 Result of hydraulic tests (06MI02 borehole)

| Drilling campaign | Test interval (mbGL) | | Interval length(m) | k(m/s) | T(m ² /s) | ss(1/m) | Head(mbGL) | Hydraulic test for analysis | Analytical proceader |
|-------------------|----------------------|-------|--------------------|---------|----------------------|---------|------------|-----------------------------|----------------------|
| 1 | 186.0 | 199.6 | 13.6 | 2.1E-11 | 2.9E-10 | 2.1E-07 | 159.6 | PI | nSIGHT |
| 2 | 199.6 | 209.6 | 10.0 | 9.0E-08 | 9.0E-07 | 1.0E-05 | 130.0 | SW/SWS-HW/HWR | nSIGHT |
| 3 | 197.5 | 270.3 | 72.8 | 2.3E-11 | 1.7E-09 | 6.3E-05 | 127.5 | SW/SWS | nSIGHT |
| 4 | 270.3 | 305.7 | 35.4 | 5.7E-11 | 2.0E-09 | 2.8E-09 | 119.4 | SWS1-SWS2-PW1-PW2 | nSIGHT |
| 5 | 305.7 | 321.9 | 16.2 | 8.8E-12 | 1.4E-10 | 4.4E-07 | 74.3 | PW | Cooper |
| 6 | 322.8 | 391.8 | 69.0 | 6.0E-10 | 4.1E-08 | 1.3E-08 | 86.2 | SWS | Cooper |
| 8 | 391.8 | 528.0 | 136.2 | 1.0E-08 | 1.4E-06 | 2.7E-09 | 63.8 | HW | Jacob Loman |
| 9 | 424.8 | 443.1 | 18.3 | 1.8E-11 | 3.2E-10 | 9.4E-06 | 96.1 | SWS | Agarwal |
| 10 | 424.8 | 528.0 | 103.2 | 1.3E-08 | 1.4E-06 | 6.8E-09 | 61.7 | HWS | Agarwal |
| 11 | 479.3 | 500.1 | 20.8 | 5.3E-08 | 1.1E-06 | 1.E-12 | 69.9 | HWS | Agarwal |
| 12 | 501.0 | 528.0 | 27.0 | 3.9E-08 | 1.1E-06 | 1.E-12 | 69.9 | HWS | Agarwal |

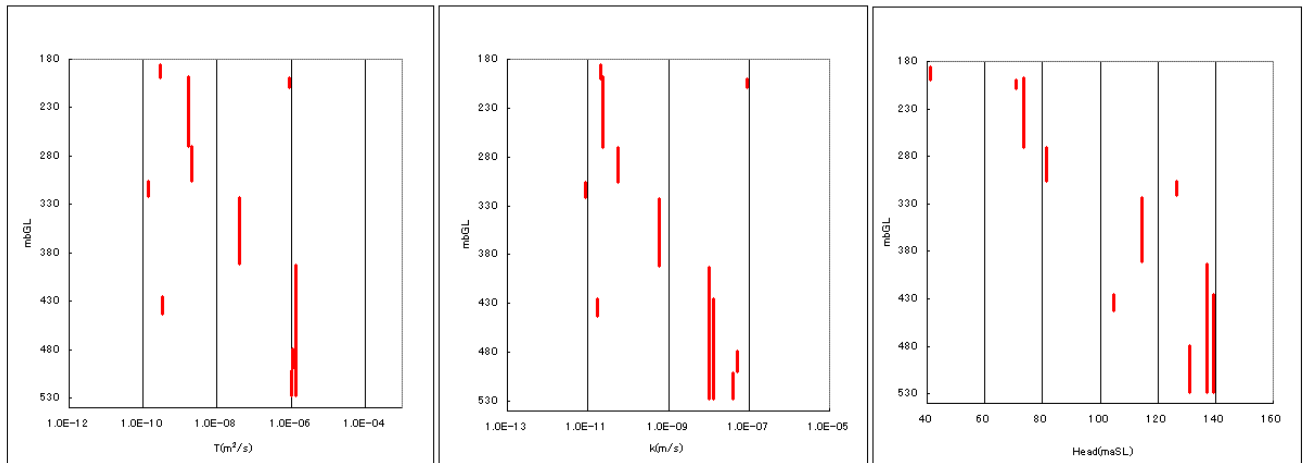


Fig. 4.4.3 Results of hydraulic tests (06MI02 borehole)

(2) 06MI03 号孔 (換気立坑)

電磁フローメータ検層結果を Fig. 4.4.4 に、水理試験結果を Table 4.4.4 及び Fig. 4.4.5 に示す。

電磁フローメータは深度 229m 以浅の湧水帯のセメンチング前後で実施しており、合計 15 箇所の水みちを検出した。特に、深度 229m 以浅、深度 400m から 450m 付近で顕著な水みちが確認できた。

水理試験結果に基づく水理パラメータの算出は、理論式による解析を基本とし、定圧湧水試験では Jacob-Lohman 法、定流量湧水試験では Jacob-Cooper 法による解析を行うこととし、定圧湧水試験、定流量湧水試験後の回復試験では Agarwal 法による解析を行うこととした。

パルス試験では Hvorslev 法または Cooper 法の解析を行うとともに、遊離した溶存ガスの存在の有無を把握するために圧縮率 (compressibility) の算定を行った (Table 4.4.5)。算定された圧縮率は、理論値 (10⁻¹⁰ オーダー) に対し 1 桁程度大きい、この値は MIZ-1 号孔で実施した水理試験で得られた値と同程度のもの²⁾であることから、試験開始時において試験区間にガスはほとんど存在しなかったと考えられる。さらに、試験前後でも圧縮率の値は概ね一致していることから、試験中においても顕著なガスの発生は無く、遊離した溶存ガスが試験結果に与える影響は小さいと考えられる。

06MI03 号孔では 06MI02 号孔と比較すると全般的に透水性が高く、特に No.1 区間 (深度 197 ~ 228m) 以浅、No.8-2~No.9 区間 (深度 404~487m) 付近の透水係数は 10⁻⁶m/s~10⁻⁷m/s (透水量係数 10⁻⁴m²/s~10⁻⁵m²/s オーダー) であり、透水性の高い水みちが存在していると考えられる。これらの高透水区間は前述したフローメータ検層から検出された顕著な水みちの位置と整合している。このうち、No.1 区間 (深度 197~228m) 以浅は LAFZ 中に位置しており、地表から

のボーリング調査でも高透水性を有する水みちの存在が確認されている。
 間隙水圧は水位標高換算値で概ね 110~120mbgl 程度の静水圧分布であった。

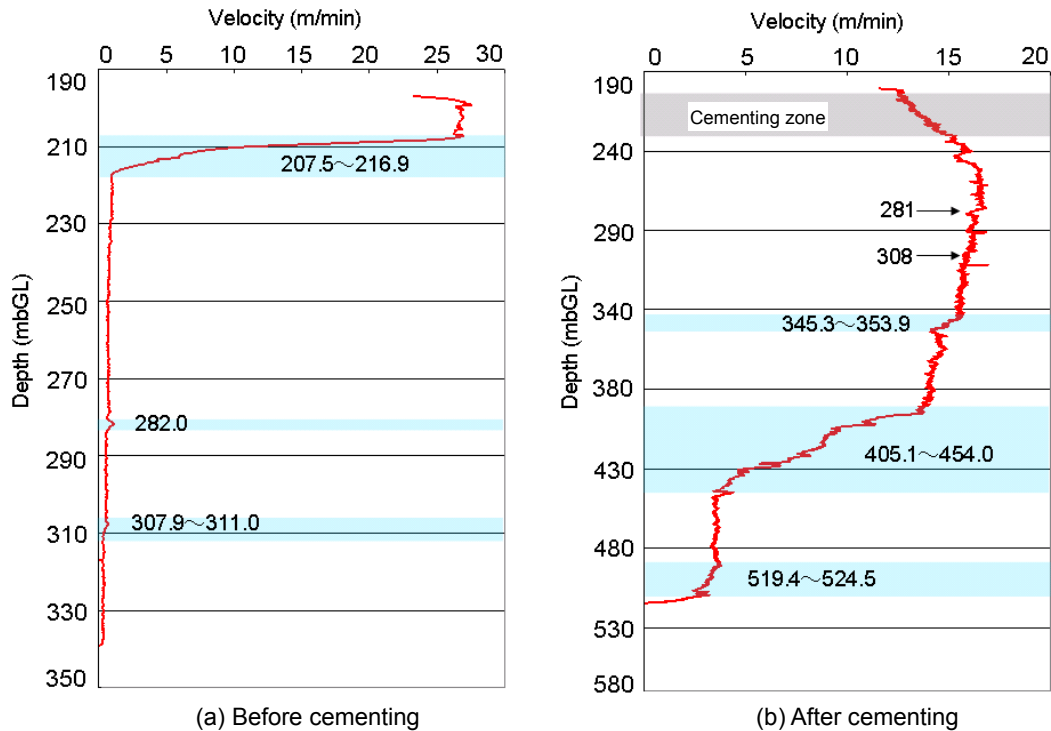


Fig. 4.4.4 Results of electro-magnetic flow meter logging (06MI03 borehole)

Table 4.4.4 Result of hydraulic tests (06MI03 borehole)

| Drilling campaign | Test interval (mbGL) | | Interval length(m) | k(m/s) | T(m ² /s) | ss(1/m) | Head(mbGL) | Hydraulic Test | Analytical proceader |
|-------------------|----------------------|-------|--------------------|---------|----------------------|---------|------------|----------------|----------------------|
| 1 | 197.0 | 228.0 | 31.0 | 6.4E-06 | 2.0E-04 | 1.5E-07 | 89.0 | RWS | Agarwal |
| 2 | 230.2 | 268.0 | 37.8 | 3.5E-08 | 1.3E-06 | 1.E-12 | 83.3 | HWS | Agarwal |
| 3 | 261.2 | 288.0 | 26.9 | 2.5E-08 | 6.6E-07 | 1.E-12 | 89.4 | HW | Jacob_Loman |
| 4 | 288.2 | 315.0 | 26.9 | 1.2E-08 | 3.2E-07 | 2.6E-05 | 87.7 | HW | Jacob_Loman |
| 5 | 315.7 | 343.9 | 28.2 | 2.7E-09 | 7.6E-08 | 1.6E-10 | 84.0 | HW | Jacob_Loman |
| 6 | 342.5 | 377.8 | 35.4 | 4.6E-08 | 1.6E-06 | 9.1E-07 | 79.3 | HWS | Agarwal |
| 7 | 377.8 | 419.0 | 41.2 | 2.1E-07 | 8.4E-06 | 7.0E-06 | 79.2 | RW | Jacob |
| 8 | 417.3 | 452.7 | 35.4 | 5.1E-07 | 1.8E-05 | - | 80.3 | RWS | Agawal |
| 8-2 | 404.5 | 460.9 | 56.4 | 4.1E-07 | 2.3E-05 | 1.0E-05 | 80.4 | RW | Jacob |
| 9 | 451.6 | 487.0 | 35.4 | 5.7E-07 | 2.0E-05 | 1.E-12 | 80.9 | HWS | Agawal |
| 10 | 486.6 | 526.0 | 39.4 | 7.5E-08 | 3.0E-06 | 2.6E-07 | 80.1 | HWS | Agawal |
| a-1 | 402.0 | 414.4 | 12.4 | 6.4E-07 | 7.9E-06 | 1.2E-05 | 80.8 | RWS | Agwal |
| a-2 | 417.2 | 429.5 | 12.4 | 1.6E-06 | 2.0E-05 | 1.E-12 | 81.1 | HWS | Agawal |
| a-3 | 430.5 | 442.9 | 12.4 | 2.3E-06 | 2.9E-05 | 9.9E-11 | 81.0 | RWS | Agawel |
| a-4 | 448.2 | 460.5 | 12.4 | 2.3E-07 | 2.8E-06 | 1.5E-11 | 80.9 | HWS | Agawal |

Drilling campaign No.8 is Referential data

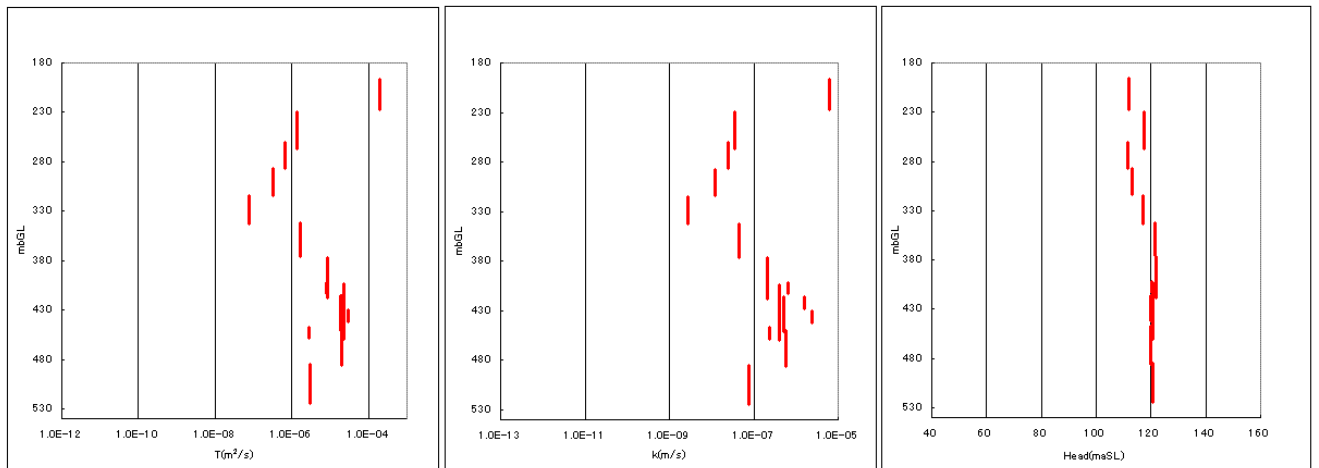


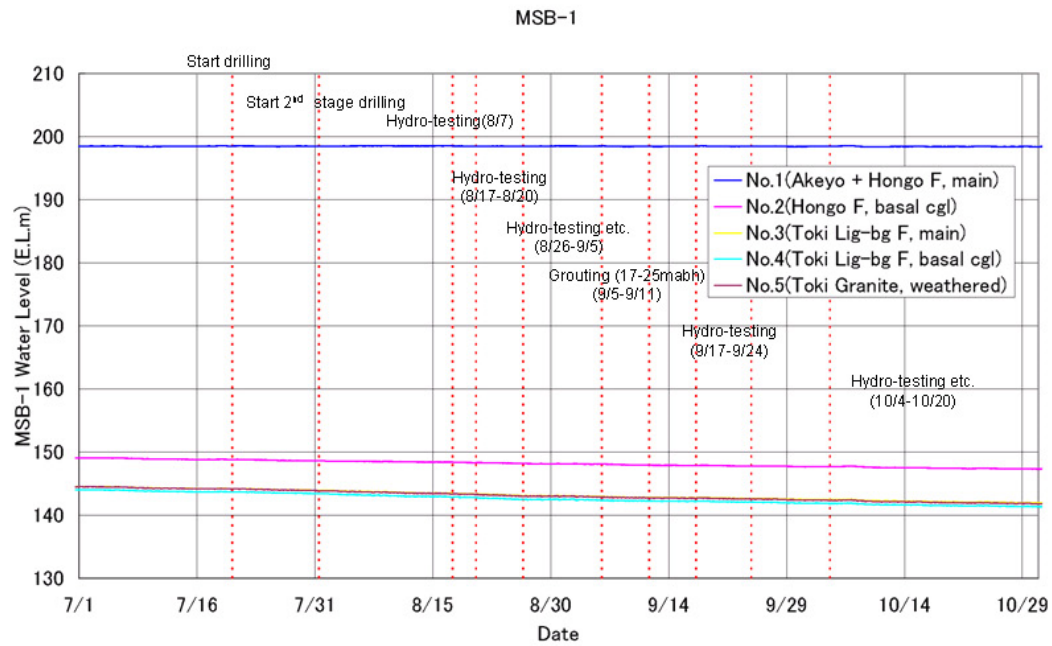
Fig. 4.4.5 Result of hydraulic tests (06MI03)

Table 4.4.5 Compressibility of 06MI03 borehole

| Test No. | Compressibility(m ³ /Pa) | | Theoretical compressibility(m ³ /Pa) |
|----------|-------------------------------------|------------------------|---|
| | Before testing | After testing | |
| 6 | 8.16×10 ⁻¹⁰ | 7.49×10 ⁻¹⁰ | 2.71×10 ⁻¹⁰ |
| 7 | 6.93×10 ⁻⁹ | 8.49×10 ⁻⁹ | 3.12×10 ⁻¹⁰ |
| 8 | 2.19×10 ⁻⁹ | - | 3.05×10 ⁻¹⁰ |
| 8-2 | 1.27×10 ⁻⁸ | 7.59×10 ⁻⁹ | 4.10×10 ⁻¹⁰ |
| 9 | 7.29×10 ⁻¹⁰ | 7.34×10 ⁻¹⁰ | 3.20×10 ⁻¹⁰ |
| 10 | 1.10×10 ⁻⁹ | 1.53×10 ⁻⁹ | 3.51×10 ⁻¹⁰ |
| a-1 | 1.85×10 ⁻⁹ | 1.58×10 ⁻⁹ | 1.76×10 ⁻¹⁰ |
| a-2 | 6.62×10 ⁻¹⁰ | 3.05×10 ⁻¹⁰ | 1.83×10 ⁻¹⁰ |
| a-3 | 2.57×10 ⁻⁹ | 2.17×10 ⁻⁹ | 1.88×10 ⁻¹⁰ |
| a-4 | 6.42×10 ⁻¹⁰ | 4.77×10 ⁻¹⁰ | 1.96×10 ⁻¹⁰ |

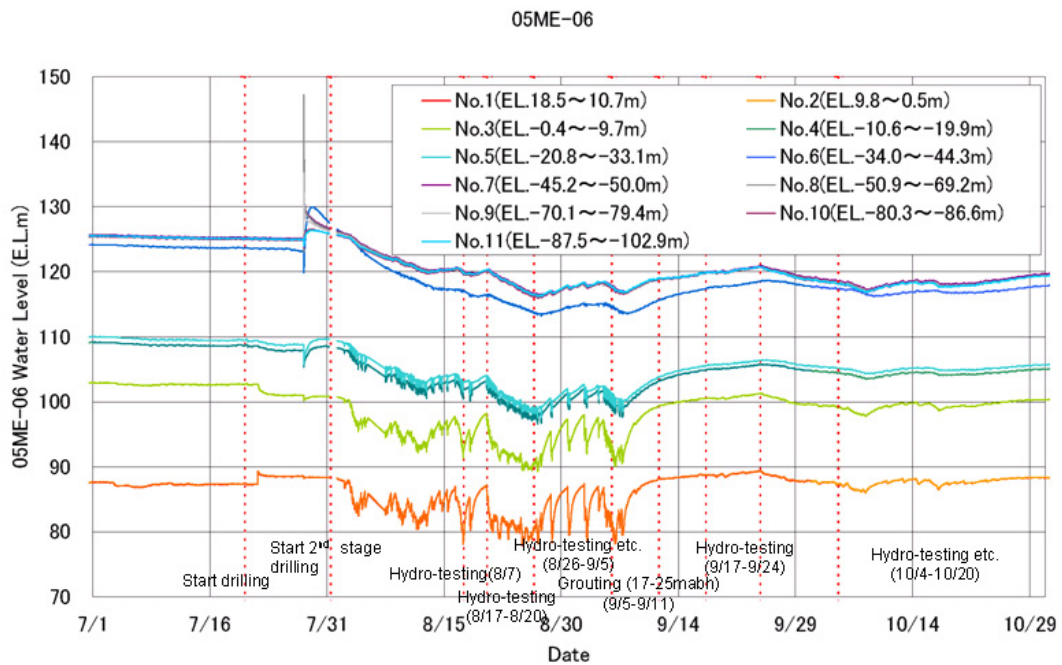
4. 4. 3 考察

間隙水圧分布について、06MI02号孔では深度が深くなるにしたがって高くなる傾向を示したが、ボーリング孔全体が低透水性であることを考慮すると、今回の水理試験期間では間隙水圧が安定するに至っておらず、時間の経過とともに水圧はさらに上昇する可能性がある。この結果は、nSIGHTを用いた初期間隙水圧の推定において得られた結果が実測値よりも高いことと整合的である(付録2参照)。一方で、06MI03号孔では水位標高換算値で概ね110~120mbgl程度の静水圧分布であり、06MI02号孔の深部に比べると低い間隙水圧を示した。これは、換気立坑側では研究坑道の掘削に伴い周辺での水圧低下が生じている結果であると考えられる。また、Fig4.4.6-1~4に示す研究坑道周辺のボーリング孔で観測された間隙水圧は、主立坑沿いに分布する低透水性を有している脆弱部(断層)の南西側に位置するDH-2号孔、MSB-3号孔(傾斜孔)の深部(土岐夾炭累層以深)では、換気立坑の掘削・調査に伴う明瞭な水圧応答が確認できるのに対し、同断層の北東側に位置するMSB-3号孔の浅部(明世累層、本郷累層)および、MSB-1号孔では両立坑での掘削・調査に伴う水圧応答は確認できず、主立坑沿いの断層を挟んで、水圧



Broken lines show the activities of the 06MI03 borehole.

Fig. 4.4.6-1 Monitoring results around MIU site (MSB-1 borehole)



Broken lines show the activities of the 06MI03 borehole.

Fig. 4.4.6-2 Monitoring results around MIU site (05ME-06 borehole)

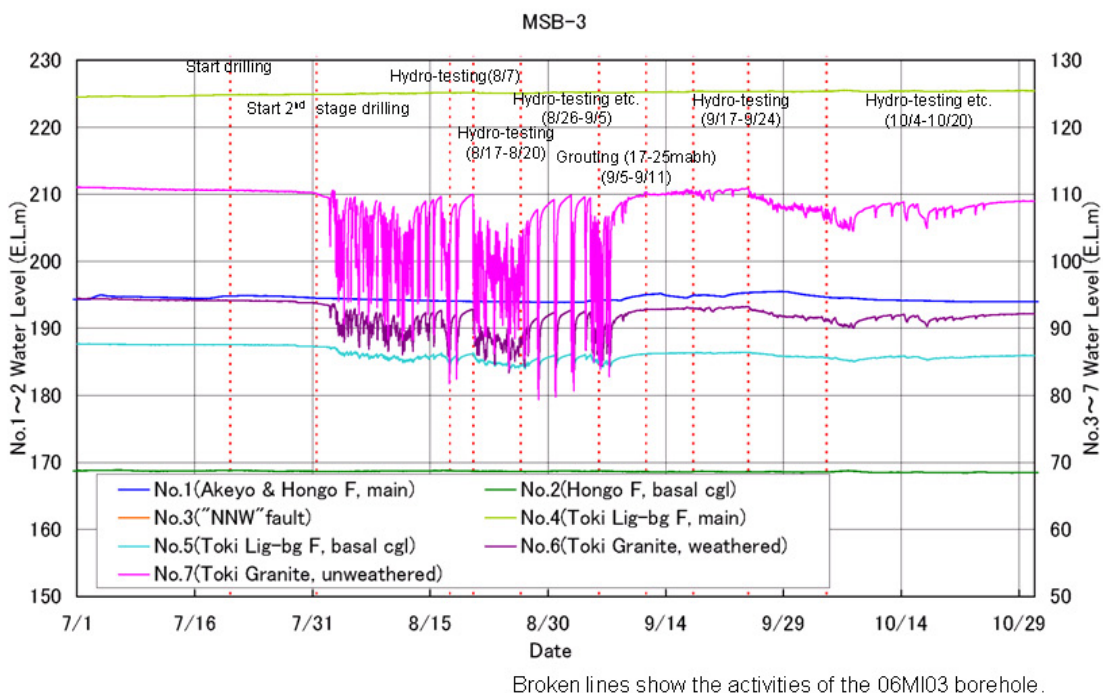


Fig. 4.4.6-3 Monitoring results around MIU site (MSB-3 borehole)

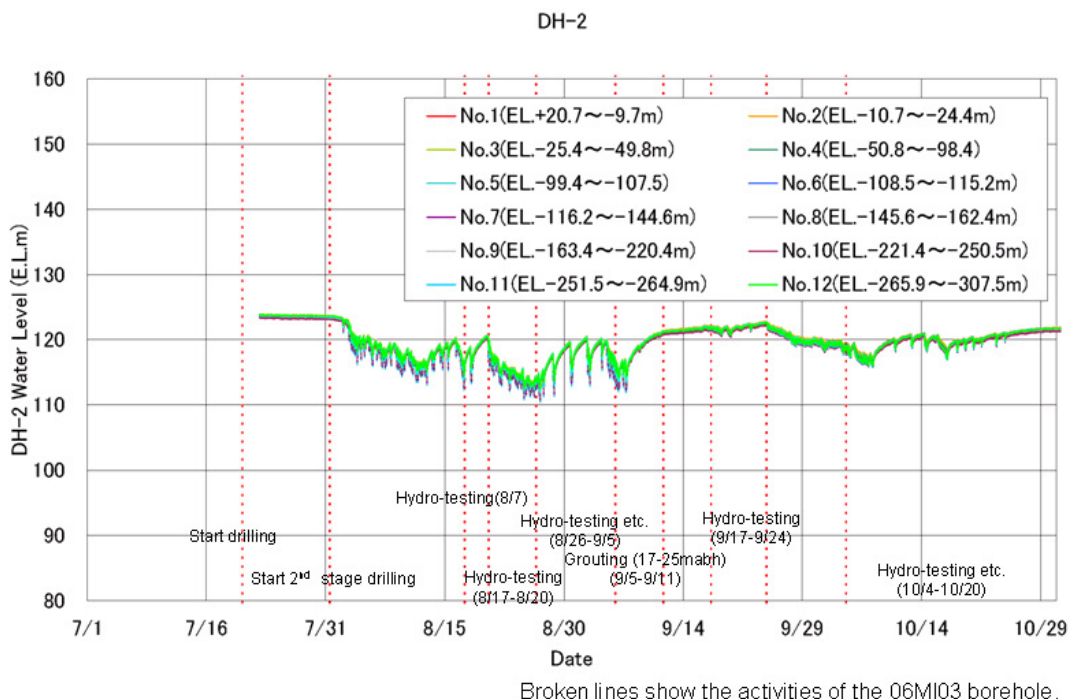


Fig. 4.4.6-4 Monitoring results around MIU site (DH-2 borehole)

応答の傾向が大きく異なることが確認された。また、05ME06 号孔では (Fig. 4.4.6-)、06MI02 号孔での一部作業、および 06MI03 号孔での掘削・調査に伴う水圧反応が確認されていることから、同孔は主立坑沿いの断層部に位置する可能性が示唆される。

これらのことから、主立坑沿いに分布する変質を伴う断層は、研究所用地周辺の地下水流動を

規制する重要な構造であると考えられる。

4. 4. 4 教訓

今回の水理学的調査は、湧水環境下で実施した初の本格的な調査であったことから以下の教訓を得ることができた。

(1) 試験装置について

- 従来の試験装置孔内部の主要な機構である、水圧計、閉鎖バルブをボーリング孔口に配置し、湧水圧を利用した定圧・定流量試験が実施可能な構成とした。これにより、試験装置孔内部接続部の遮水不良による試験装置(特に電気系統)の故障を回避することができた。
- 湧水圧・湧水量の自動制御機能を準備することができなかつたため水理試験時の定圧・定流量制御を手動で実施した。このことにより、水理試験時の現場作業が煩雑となり試験中の作業量の増加につながった。現場作業の軽減、及びより品質の高い試験データを取得するため、孔内部の調査システムとして定圧または定流量自動制御装置の開発が課題である。
- 浅部の水理試験や流体検層において、試験装置のパッカーの代替として BOP を活用し、良好な試験結果を得ることができた。湧水環境下では試験区間からの湧水とともに、孔口からの湧水を抑制することが作業環境上、及び試験データの品質向上の観点から重要である。試験時の孔口閉鎖機構として BOP を積極的に活用することが有効であった。
- 湧水環境下では試験装置の浮き上がりに対する対策を十分にとる必要がある。特に、大量湧水が生じている場合は、湧水による試験装置の押し上げによる事故が発生する危険がある。試験装置の固定はもとより、装置の昇降時にボーリング孔内の圧力を逃がす構造を検討する必要がある。
- 06MI02 号孔のように透水性が低く湧水量が少ない場合では、定圧・定流量試験が実施できないため、スラグ試験、パルス試験を想定した試験装置の構成が重要である。しかしながら、湧水圧が高い条件でスラグ試験を実施するためには、水位計測のための導水管を立ち上げる必要があり(今回の試験では 100m 程度の水管が必要であった)、また、導水管内の水位調整機構も準備する必要がある。

(2) 試験方法について

- 湧水圧を利用した今回の試験については、定圧・定流量試験では圧力変化の時間微分プロット (Drivative plot) により試験開始、継続、終了の判断を行うことで、効率的に、かつ、品質の高い試験が実施できた。
- 06MI03 号孔に見られた溶存ガスの遊離については、試験前後でのパルス試験から得られる圧縮率を比較することでガスの影響の程度を把握することが可能である。今回の水理試験ではガスの影響が無い品質の高いデータが得られたと考えているが、仮に、試験前後での圧縮率に大きな違いが見られた場合には、一度パッカーを収縮して試験区間内のガスを解放するとともに、小さな水頭差での試験を実施することにより、ガスの影響の少ないデータが取得できると考えられる。

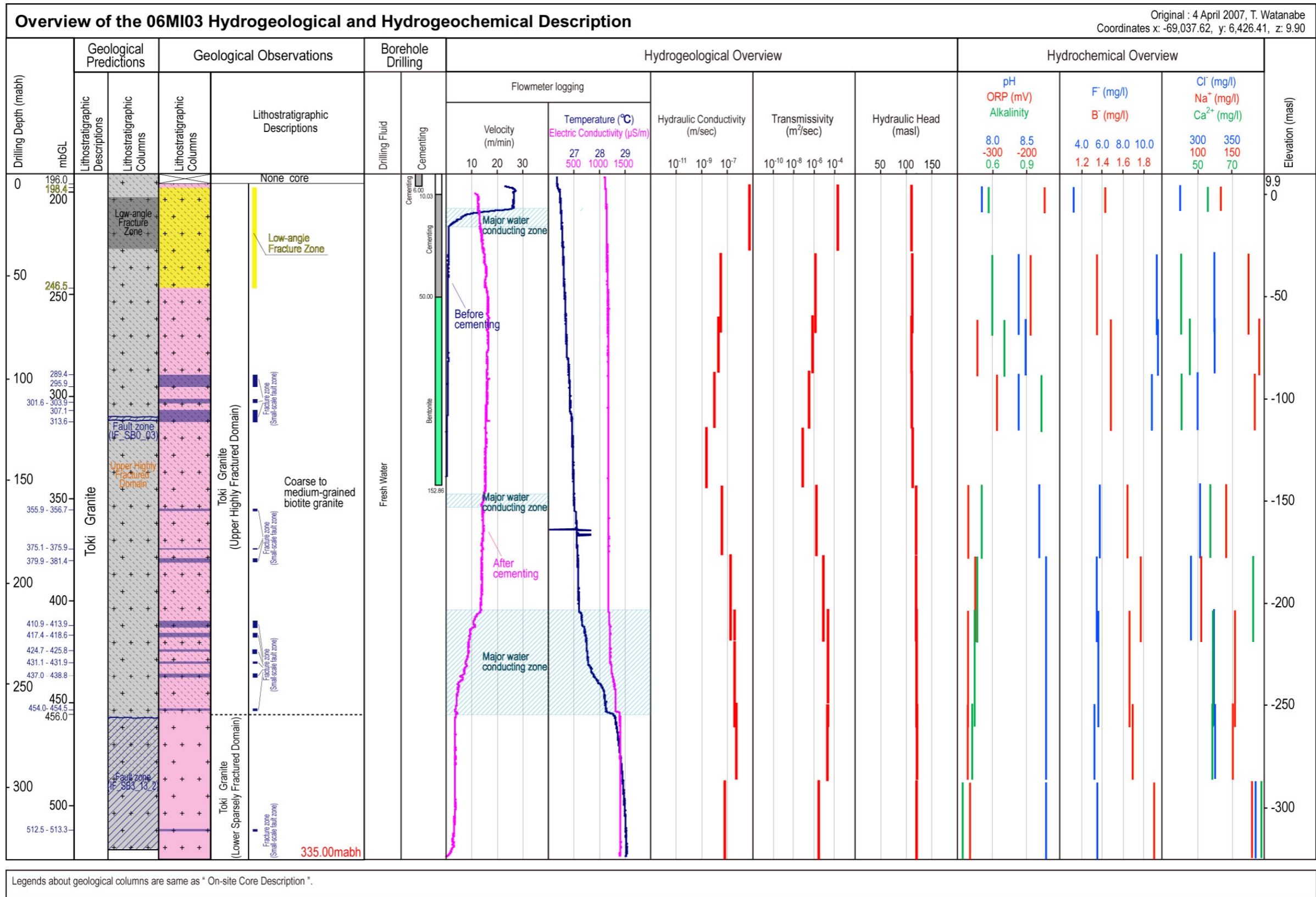


Fig. 4.4.7-2 Overview of the 06MI03 borehole hydrogeological and hydrogeochemical investigations

4. 5 地球化学的調査

4. 5. 1 実施内容

地球化学的調査では、06MI02 号孔及び 06MI03 号孔の両孔において、水理試験時の湧水を利用して、地下水採水調査を行うこととした。また、地下水採水時に溶存ガスを簡易な方法により採取し、溶存ガス中の成分について定性分析を実施することとした。

地下水化学的調査の際の品質管理として、掘削に使用する掘削源水及び掘削中に得られる掘削リターン水を対象とした分析を行い、掘削による地下水への汚染を定量的に評価するための指標とすることとした。掘削源水には、トリチウムの分析結果に対する影響を考慮し、最深部の集水リング（WR-7：167mbGL）から採取した地下水を利用した。採水作業における品質管理としては、採水前の予備排水中に pH、溶存酸素濃度、酸化還元電位、電気伝導度等の物理化学パラメータの連続測定を実施し、溶存酸素濃度がゼロであり、かつ、酸化還元電位の測定値が安定したことを確認した後に、地下水を採取することとした。物理化学パラメータ測定機器（in-situ 社製 Troll9000）については、測定毎に校正作業を行うこととした。Table 4.5.1 及び Table 4.5.2 に各ボーリング孔の採水及び溶存ガス採取区間を示す。

Table 4.5.1 groundwater and dissolved gases sampling interval in 06MI02 borehole

| Intervals | Depth (mabh) | | Depth (mbGL) | | Groundwater sampling and analysis | Dissolved gas sampling and analysis |
|-----------|--------------|--------|--------------|--------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| | Top | Bottom | Top | Bottom | | |
| 1 | 6.0 | 19.6 | 186.0 | 199.6 | | |
| 2 | 19.6 | 29.6 | 199.6 | 209.6 | | |
| 3 | 17.5 | 90.3 | 197.5 | 270.3 | | |
| 4 | 90.3 | 125.7 | 270.3 | 305.7 | | |
| 5 | 125.7 | 141.9 | 305.7 | 321.9 | | |
| 6 | 142.8 | 211.8 | 322.8 | 391.8 | | |
| 8 | 211.8 | 348.0 | 391.8 | 528.0 | | |
| 9 | 244.8 | 263.1 | 424.8 | 443.1 | | |
| 10 | 244.8 | 348.0 | 424.8 | 528.0 | | |
| 11 | 299.3 | 320.1 | 479.3 | 500.1 | ● | ● |
| 12 | 321.0 | 348.0 | 501.0 | 528.0 | ● | ● |

Table 4.5.2 groundwater and dissolved gases sampling interval in 06MI03 borehole

| Intervals | Depth (mabh) | | Depth (mbGL) | | Groundwater sampling and analysis | Dissolved gas sampling and analysis |
|-----------|--------------|--------|--------------|--------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| | Top | Bottom | Top | Bottom | | |
| 1 | 6.0 | 16.8 | 197.0 | 207.8 | × | × |
| 2 | 39.2 | 77.0 | 230.2 | 268.0 | × | × |
| 3 | 70.2 | 97.0 | 261.2 | 288.0 | × | × |
| 4 | 97.2 | 124.0 | 288.2 | 315.0 | × | × |
| 5 | 124.7 | 152.9 | 315.7 | 343.9 | | |
| 6 | 151.5 | 186.8 | 342.5 | 377.8 | × | × |
| 7 | 186.8 | 228.0 | 377.8 | 419.0 | × | × |
| 8-2 | 213.5 | 269.9 | 404.5 | 460.9 | × | × |
| 9 | 260.2 | 296.0 | 451.2 | 487.0 | × | × |
| 10 | 295.6 | 335.0 | 486.6 | 526.1 | × | × |

(1) 06MI02 号孔（主立坑）

06MI02 号孔においては既述の通り泥水掘削を実施したこと及び十分な湧水量が得られなかったことから、採水の品質を確保できないと判断し、水理試験実施時においてもほとんどの区間で採水作業を実施しなかった。しかし、No.11 及び No.12 区間（深度 497～528m）の水理試験時においては、十分な湧水量が見込めたため 2 箇所において採水を実施した。

(2) 06MI03 号孔 (換気立坑)

06MI03 号孔においては、水理試験と併せて、Table 4.5.2 に示す箇所での採水調査及び溶存ガスの採取を実施した。採水の際には、被圧・不活性条件下での物理化学パラメータのモニタリングを実施するために、Fig.4.5.1 に示した装置を用いて、物理化学パラメータの測定及び採水を実施した。区間 1 (深度 197~208m) については、大量の湧水が生じ、直ちにセメンチングによる湧水抑制対策が講じられる可能性があったため、水理試験のための閉塞システムを構築する前に採水作業を実施した。そのため、物理化学パラメータは大気解放状態での測定となった。また、区間 5 (深度 288~315m) では十分な湧水量が見込まれなかったことから、工程上の制約を勘案して採水を実施しなかった。

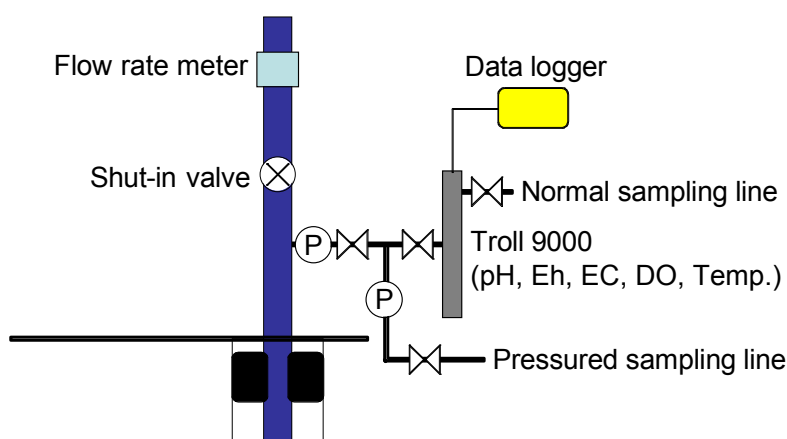


Fig. 4.5.1 Schematic view of groundwater sampling equipment

物理化学パラメータ測定については、当初予定していた測定機器が、校正時には正確な値を示すものの、測定中に測定値が大きく変動するため、補助データとして別の物理化学パラメータ測定機器 (堀場製作所製 W-22XD) を併用した。W-22XD は耐圧性能が低いため、被圧条件下での測定は実施せず、専用のフローセルを用いて物理化学パラメータの測定を行った。

溶存ガスの採取は簡易的に地下水から溶存ガスを脱ガスさせ、アルミニウムバッグによってガスを採取した (Fig.4.5.2)。本方法では、脱ガスしたガス量に対する地下水量が把握できないために、被圧状態での地下水中の溶存ガス濃度を定量することはできないものの、溶存ガスの種類を把握するための定性分析とそれらの脱ガス中における割合を測定することは可能である。これらの他、¹⁴C による地下水年代測定用の試料については、現場において炭素を固定する作業を実施した。

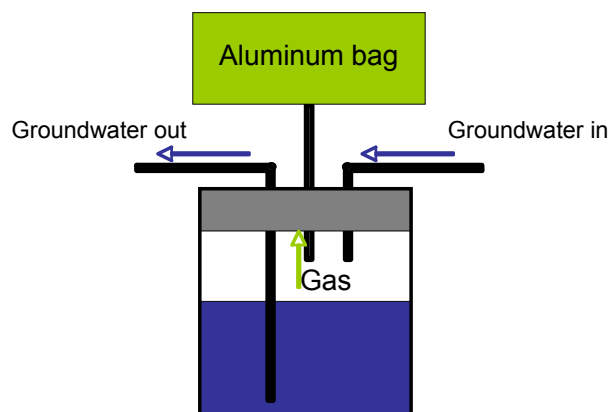


Fig. 4.5.2 Schematic view of dissolved gas sampling equipment

4. 5. 2 結果

各ボーリング孔の水利，水質総合柱状図については Fig. 4.4.7 を参照のこと。

(1) 06MI02 号孔（主立坑）

06MI02 号孔から採取した地下水を対象とした分析結果を Table 4.5.3 に示す。物理化学パラメータの測定結果からは，掘削水による汚染や大気との接触の影響が大きく，試料の品質が非常に低いと考えられることから，今回の分析の結果は参考値として扱うこととし，以後の考察や深部の予測における情報としては用いないこととした。

(2) 06MI03 号孔（換気立坑）

06MI03 号孔から採取した地下水を対象とした化学分析結果を Table 4.5.3 に，それぞれの予備排水中に測定した物理化学パラメータの結果を Fig.4.5.3 に示す。また，環境基準項目の分析結果を Table 4.5.4 に示す。なお，工程順守を最優先した結果，酸化還元電位については，データが十分に安定するまで計測を継続することが出来なかったため，参考値として扱うこととしている。水質は全体を通して Na-Cl 型の水質を示す。Cl 濃度は深度と共に上昇傾向を示し，Ca, Na, B などの溶存成分は Cl 濃度と調和的な傾向を示す。

Table 4.5.5 及び Fig.4.5.4 に同位体分析の結果を示す。Fig.4.5.4 に示した酸素及び水素同位体分析の結果では，今回の調査で採取した地下水の起源が，天水であることを示している。また，トリチウムの分析結果からは 4 区間からトリチウムが検出されている (Fig. 4.5.5)。

Table 4.5.6 に溶存ガス分析の結果を示す。各試料中の溶存ガス成分として酸素が検出されているが，予備排水中の物理化学パラメータ測定による溶存酸素濃度の測定結果がゼロであることから，溶存ガス試料採取時の大気による汚染であると考えられる。溶存ガス成分の大半はメタンガスと窒素であり，その他，微量の二酸化炭素，ヘリウム及びアルゴンが検出されている。

Table 4.5.3 Chemical composition of groundwater

| Intervals | Depth (mabth) | | DO µg/L | ORP mV | pH | Temp. °C | Na ⁺ mg/L | K ⁺ mg/L | Ca ²⁺ mg/L | Mg ²⁺ mg/L | Mn mg/L | Total Fe mg/L | Fe ²⁺ mg/L | SiO ₂ mg/L | Al mg/L | F ⁻ mg/L | B ⁻ mg/L | Cl ⁻ mg/L | Br ⁻ mg/L | NO ₃ ⁻ mg/L | NO ₂ ⁻ mg/L | SO ₄ ²⁻ mg/L | NH ₄ ⁺ mg/L | f | S ²⁻ mg/L | PO ₄ ³⁻ mg/L | U mg/L | Alkalinity meq/L | TIC mg/L | TOC mg/L | Uranine mg/L | Sodium Naphthalene mg/L | Amino G. Acid mg/L | |
|-----------|---------------|--------|------------|-----------|-----|-------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|------|-------------------------|---------------------------------------|-----------|---------------------|-------------|-------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------|--------|
| | Top | Bottom | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 290.29 | 320.09 | 479.3 | 500.1 | 7.3 | -178 | 85.4 | 23.3 | 144.6 | 1.0 | 25.9 | 0.144 | -0.01 | -0.05 | 5.40 | 0.07 | 6.73 | 1.6 | 234.2 | 0.40 | -0.3 | -0.2 | 0.97 | -0.2 | -7 | -0.01 | -10 | <0.0001 | 0.35 | 4.28 | 14.1 | <0.001 | <0.01 | <0.005 |
| 12 | 321.02 | 348.00 | 501.0 | 528.0 | 8.7 | 91 | 89.9 | 22.8 | 145.1 | 1.0 | 30.7 | 0.122 | 0.0 | 0.02 | -0.05 | 6.10 | 0.08 | 6.78 | 1.5 | 239.4 | 0.54 | -0.2 | 0.811 | -0.2 | -7 | -0.01 | -10 | <0.0001 | 0.44 | 4.59 | 5.1 | <0.001 | <0.01 | <0.005 |

| Intervals | Depth (mbGL) | | EC mS/m | Temp. °C | Na ⁺ mg/L | K ⁺ mg/L | Ca ²⁺ mg/L | Mg ²⁺ mg/L | Mn mg/L | Total Fe mg/L | Fe ²⁺ mg/L | SiO ₂ mg/L | Al mg/L | F ⁻ mg/L | B ⁻ mg/L | Cl ⁻ mg/L | Br ⁻ mg/L | NO ₃ ⁻ mg/L | NO ₂ ⁻ mg/L | SO ₄ ²⁻ mg/L | NH ₄ ⁺ mg/L | f | S ²⁻ mg/L | PO ₄ ³⁻ mg/L | U mg/L | Alkalinity meq/L | TIC mg/L | TOC mg/L | Uranine mg/L | Sodium Naphthalene mg/L | Amino G. Acid mg/L | | | | |
|-----------|--------------|--------|------------|-------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|------|-------------------------|---------------------------------------|-----------|---------------------|-------------|-------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------|------|--------|-------|------|
| | Top | Bottom | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 6.0 | 16.8 | 197.0 | 207.8 | 7.9 | -145 | 92.3 | 24.5 | 148.2 | 1.05 | 44.9 | 0.29 | 0.007 | 0.03 | <0.05 | 14.7 | 0.03 | 5.70 | 1.46 | 288.6 | 0.53 | <0.1 | <0.1 | 2.45 | 0.24 | -2 | <0.5 | <0.005 | <0.001 | 30.3 | 6.36 | 0.21 | <0.001 | <0.01 | <0.1 |
| 2 | 39.2 | 77.0 | 230.2 | 288.0 | 8.4 | -186 | 100.7 | 24.4 | 155.2 | 1.23 | 40.2 | 0.88 | <0.01 | 0.03 | <0.05 | 15.9 | 0.036 | 5.43 | 1.42 | 283.3 | 0.52 | <0.1 | <0.1 | 1.43 | 0.23 | -2 | <0.5 | <0.005 | <0.001 | 31.7 | 7.25 | 0.19 | <0.001 | <0.01 | <0.1 |
| 3 | 70.2 | 97.0 | 261.2 | 288.0 | 8.5 | -342 | 111.6 | 24.4 | 170.8 | 1.55 | 44.4 | 2.09 | 0.028 | 0.04 | 0.07 | 17.0 | 0.022 | 6.70 | 1.48 | 319.0 | 0.58 | <0.1 | <0.1 | 1.03 | 0.24 | -2 | <0.5 | 0.005 | <0.001 | 32.3 | 7.77 | 0.17 | <0.001 | <0.01 | <0.1 |
| 4 | 97.2 | 124.0 | 288.2 | 315.0 | 8.4 | -285 | 103.1 | 24.3 | 166.0 | 1.69 | 39.5 | 2.13 | 0.028 | 0.01 | <0.05 | 17.4 | 0.017 | 6.07 | 1.51 | 292.8 | 0.55 | <0.1 | <0.1 | 0.84 | 0.20 | -2 | <0.5 | 0.006 | 0.002 | 41.8 | 9.86 | 0.19 | <0.001 | <0.01 | <0.1 |
| 6 | 151.5 | 186.8 | 342.5 | 377.8 | 8.7 | -369 | 108.9 | 24.2 | 168.9 | 1.35 | 46.7 | 1.32 | 0.02 | 0.03 | <0.05 | 16.6 | 0.012 | 5.77 | 1.58 | 320.4 | 0.59 | <0.1 | <0.1 | 1.84 | 0.27 | -2 | <0.5 | 0.005 | <0.001 | 24.1 | 5.52 | 0.20 | <0.001 | <0.01 | <0.1 |
| 7 | 186.8 | 228.0 | 377.8 | 419.0 | 8.8 | -349 | 103.0 | 24.2 | 160.5 | 1.15 | 46.9 | 0.75 | 0.007 | 0.02 | <0.05 | 16.5 | 0.015 | 5.33 | 1.73 | 309.7 | 0.54 | <0.1 | <0.1 | 1.87 | 0.25 | -2 | <0.5 | <0.005 | <0.001 | 21.5 | 4.78 | 0.25 | <0.001 | <0.01 | <0.1 |
| 8-2 | 213.5 | 269.9 | 404.5 | 460.9 | 8.8 | -370 | 108.4 | 24.2 | 168.0 | 1.15 | 52.2 | 0.52 | 0.009 | 0.02 | <0.05 | 16.4 | 0.016 | 5.23 | 1.66 | 325.6 | 0.56 | <0.1 | <0.1 | 2.66 | 0.27 | -2 | <0.5 | <0.005 | <0.001 | 21.0 | 4.89 | 0.17 | <0.001 | <0.01 | <0.1 |
| 9 | 260.2 | 296.0 | 451.2 | 487.0 | 8.8 | -371 | 109.9 | 24.3 | 167.4 | 1.17 | 53.3 | 0.28 | 0.007 | 0.03 | <0.05 | 16.4 | 0.011 | 4.51 | 1.72 | 321.4 | 0.57 | <0.1 | <0.1 | 3.17 | 0.26 | -2 | <0.5 | <0.005 | <0.001 | 21.0 | 4.83 | 0.20 | <0.001 | <0.01 | <0.1 |
| 10 | 295.6 | 335.0 | 486.6 | 526.1 | 8.8 | -364 | 128.7 | 24.4 | 183.2 | 1.36 | 73.1 | 0.33 | 0.013 | 0.01 | <0.05 | 16.9 | 0.024 | 5.01 | 2.03 | 391.9 | 0.70 | <0.1 | <0.1 | 1.66 | 0.28 | -2 | <0.5 | <0.005 | <0.001 | 18.5 | 3.43 | 0.16 | <0.001 | <0.01 | <0.1 |

Table 4.5.4 Concentrations of elements subject to Environmental Law Standards

| Interval | Depth (mabth) | | Cd mg/L | CN mg/L | Pb mg/L | Cr ⁶⁺ mg/L | As mg/L | Total Hg mg/L | R-Hg mg/L | Se mg/L | Ni mg/L | Mo mg/L | Sb mg/L | | |
|----------|---------------|--------|------------|------------|------------|--------------------------|------------|---------------------|--------------|------------|------------|------------|------------|-------|-------|
| | Top | Bottom | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 6.0 | 16.8 | 197.0 | 207.8 | 16.8 | 77.0 | 97.0 | 261.2 | 288.0 | 315.0 | 377.8 | 419.0 | 460.9 | 487.0 | 526.1 |
| 2 | 39.2 | 77.0 | 230.2 | 288.0 | 16.8 | 77.0 | 97.0 | 261.2 | 288.0 | 315.0 | 377.8 | 419.0 | 460.9 | 487.0 | 526.1 |
| 3 | 70.2 | 97.0 | 261.2 | 288.0 | 16.8 | 77.0 | 97.0 | 261.2 | 288.0 | 315.0 | 377.8 | 419.0 | 460.9 | 487.0 | 526.1 |
| 4 | 97.2 | 124.0 | 288.2 | 315.0 | 16.8 | 77.0 | 97.0 | 261.2 | 288.0 | 315.0 | 377.8 | 419.0 | 460.9 | 487.0 | 526.1 |
| 6 | 151.5 | 186.8 | 342.5 | 377.8 | 16.8 | 77.0 | 97.0 | 261.2 | 288.0 | 315.0 | 377.8 | 419.0 | 460.9 | 487.0 | 526.1 |
| 7 | 186.8 | 228.0 | 377.8 | 419.0 | 16.8 | 77.0 | 97.0 | 261.2 | 288.0 | 315.0 | 377.8 | 419.0 | 460.9 | 487.0 | 526.1 |
| 8-2 | 213.5 | 269.9 | 404.5 | 460.9 | 16.8 | 77.0 | 97.0 | 261.2 | 288.0 | 315.0 | 377.8 | 419.0 | 460.9 | 487.0 | 526.1 |
| 9 | 260.2 | 296.0 | 451.2 | 487.0 | 16.8 | 77.0 | 97.0 | 261.2 | 288.0 | 315.0 | 377.8 | 419.0 | 460.9 | 487.0 | 526.1 |
| 10 | 295.6 | 335.0 | 486.6 | 526.1 | 16.8 | 77.0 | 97.0 | 261.2 | 288.0 | 315.0 | 377.8 | 419.0 | 460.9 | 487.0 | 526.1 |

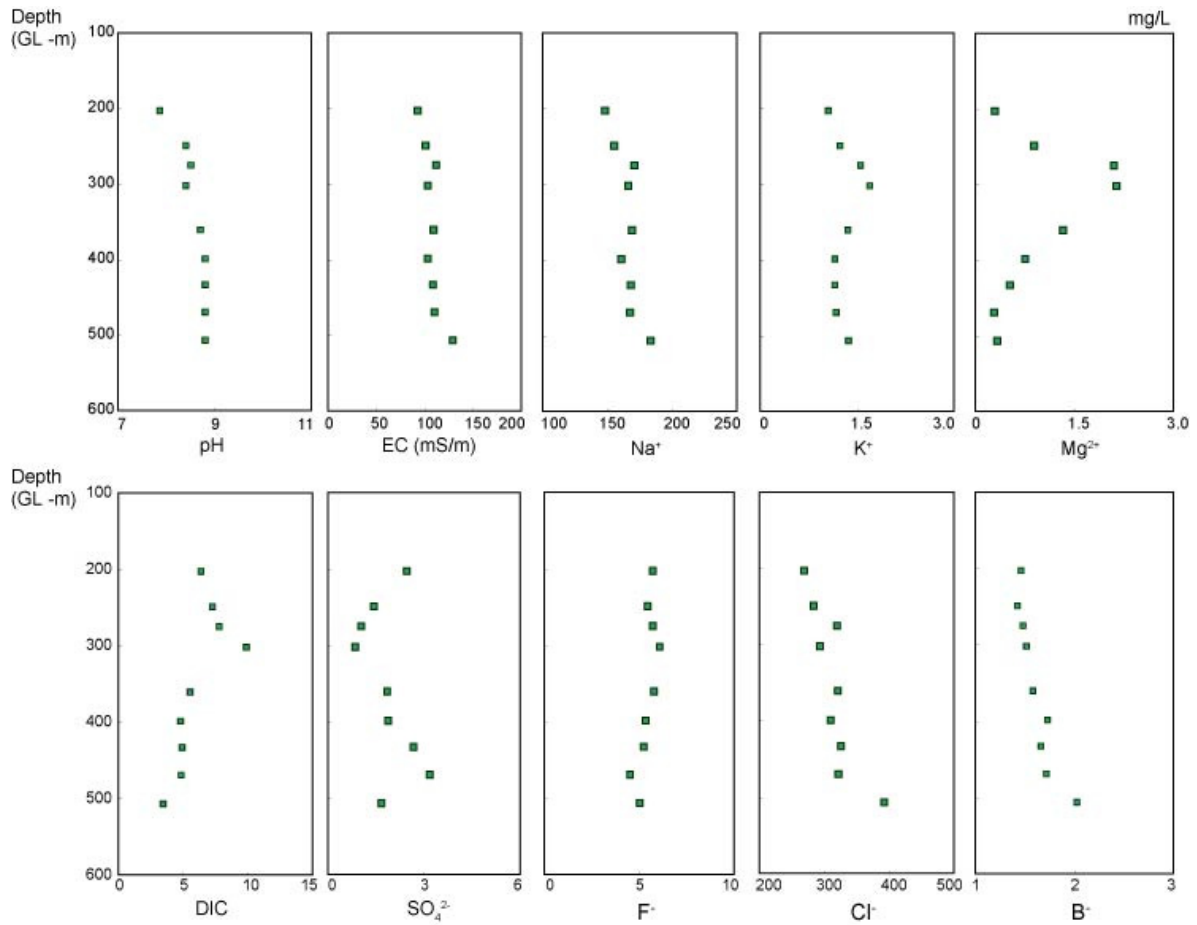


Fig 4.5.3 Variations in groundwater chemistry with depth

Table 4.5.5 Isotopic composition of groundwater

| Interval | Depth (mabh) | | Depth (mbGL) | | d ¹⁸ O _{SMOW} ‰ | dD _{SMOW} ‰ | H ³ T.U. |
|----------|--------------|--------|--------------|--------|--|-------------------------|------------------------|
| | Top | Bottom | Top | Bottom | | | |
| 1 | 6.0 | 16.8 | 197.0 | 207.8 | -8.8 | -57.8 | 0.4±0.2 |
| 2 | 39.2 | 77.0 | 230.2 | 268.0 | -8.8 | -58.8 | 0.6±0.2 |
| 3 | 70.2 | 97.0 | 261.2 | 288.0 | -9.5 | -60.6 | N.D. |
| 4 | 97.2 | 124.0 | 288.2 | 315.0 | -9.5 | -63.6 | N.D. |
| 6 | 151.5 | 186.8 | 342.5 | 377.8 | -9.4 | -63.1 | N.D. |
| 7 | 186.8 | 228.0 | 377.8 | 419.0 | -9.4 | -60.7 | 0.5±0.2 |
| 8-2 | 213.5 | 269.9 | 404.5 | 460.9 | -9.4 | -62.2 | N.D. |
| 9 | 260.2 | 296.0 | 451.2 | 487.0 | -9.3 | -62.6 | 0.7±0.2 |
| 10 | 295.6 | 335.0 | 486.6 | 526.1 | -9.5 | -61.5 | N.D. |

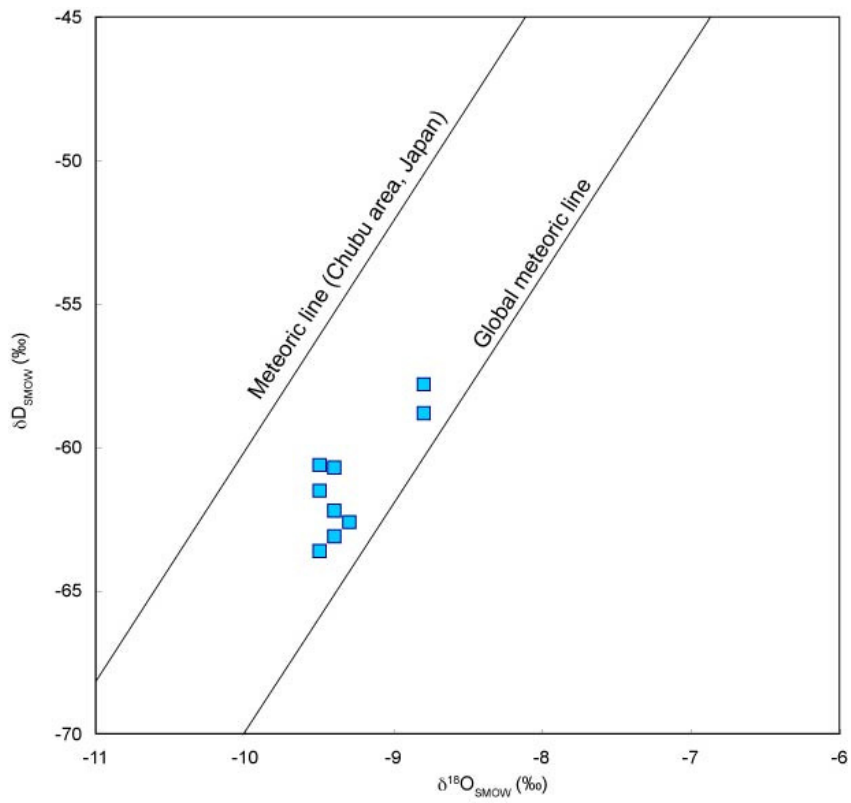


Fig. 4.5.4 Hydrogen and Oxygen stable isotopes

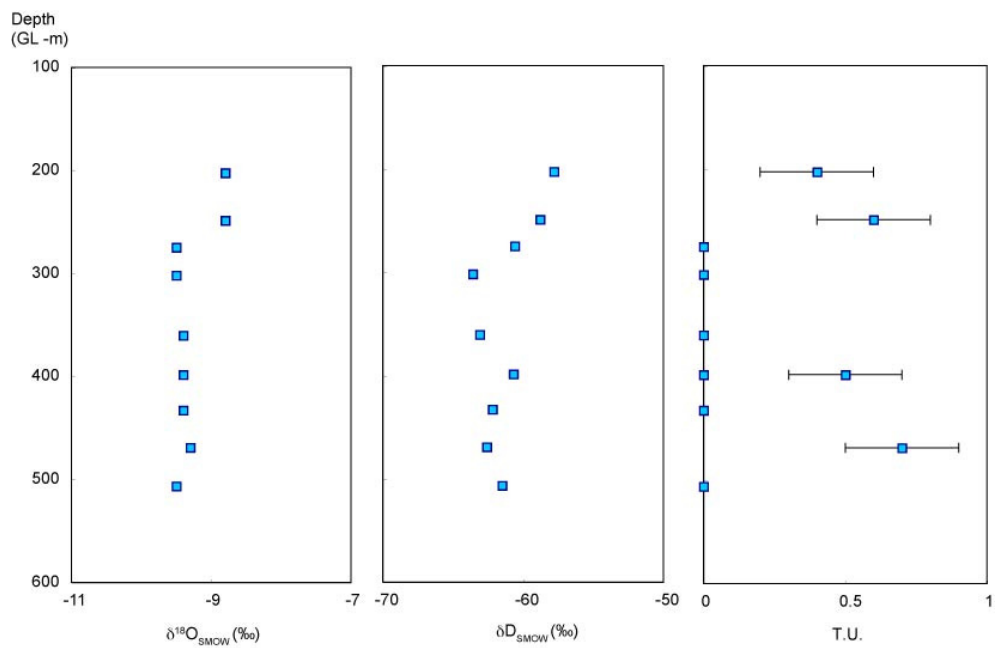


Fig. 4.5.5 Oxygen, hydrogen and Tritium isotope plot with depth

Table 4.5.6 Dissolved gas composition

| Intervals | Depth (mabh) | | Depth (mbGL) | | N ₂ % | CH ₄ % | H ₂ % | O ₂ % | CO % | CO ₂ % | He % | Ar % | H ₂ S % | others % |
|-----------|--------------|--------|--------------|--------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------|----------------------|---------|---------|-----------------------|-------------|
| | Top | Bottom | Top | Bottom | | | | | | | | | | |
| 1 | 6.0 | 16.8 | 197.0 | 207.8 | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. |
| 2 | 39.2 | 77.0 | 230.2 | 268.0 | 77.5 | 5.2 | <0.01 | 16.5 | <0.0001 | 0.06 | 0.1 | 0.9 | <0.00002 | -0.3 |
| 3 | 70.2 | 97.0 | 261.2 | 288.0 | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. |
| 4 | 97.2 | 124.0 | 288.2 | 315.0 | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. |
| 6 | 151.5 | 186.8 | 342.5 | 377.8 | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. | N.M. |
| 7 | 186.8 | 228.0 | 377.8 | 419.0 | 76.1 | 21.3 | <0.01 | 1.3 | <0.0001 | 0.07 | 0.2 | 0.6 | <0.00002 | 0.4 |
| 8-2 | 213.5 | 269.9 | 404.5 | 460.9 | 76.3 | 21.3 | <0.01 | 2.0 | <0.0001 | 0.08 | 0.2 | 0.6 | <0.00002 | -0.5 |
| 9 | 260.2 | 296.0 | 451.2 | 487.0 | 75.8 | 21.4 | <0.01 | 2.2 | <0.0001 | 0.06 | 0.2 | 0.6 | <0.00002 | -0.3 |
| 10 | 295.6 | 335.0 | 486.6 | 526.1 | 77.5 | 11.5 | <0.01 | 10.8 | <0.0001 | 0.2 | 0.03 | 0.7 | <0.00002 | -0.7 |

4. 5. 3 考察

(1) 深度 500m までの地下水の地球化学特性（環境基準項目）

今回の調査結果において、フッ素及びホウ素を除く環境基準物質が、それぞれの基準値を超過する結果は得られていない。多くの分析結果は定量下限値以下であるが、ニッケルについては区間 1, 3, 4 において検出されている。花崗岩中にも微量成分としてニッケルが含まれることが知られており⁶⁾、今回検出されたニッケルは、水-岩石反応により花崗岩中から溶出したものであると考えられる。

これらの結果から、深度 500m までの地下水において、フッ素及びホウ素以外の環境基準項目が、それぞれの基準値を超える可能性が低いことが明らかになった。

他方、フッ素及びホウ素については、全ての区間において環境基準値を超える結果となっている。これまでの調査により、フッ素は深度とともに減少傾向を示し、ホウ素は増加傾向を示すことが明らかとなっている。今回の調査結果においても、概ね同様の傾向を示す（詳細については 6.3 参照）。そのため、フッ素及びホウ素については、今後も排水のための濃度低減処理が必要となる。

(2) 深度 500m までの地下水の地球化学特性（環境基準項目以外）

今回の調査結果では、地下水が Na-Cl 型であり、主要な溶存成分であるナトリウム、カルシウム及び塩化物の各イオン濃度は、深度とともに増加することが明らかになった。第 1 段階の調査研究結果に基づいた研究では⁷⁾、研究所周辺の花崗岩中の水質について、Na-Cl 型の地下水であり、深度とともに塩化物イオン濃度が増加し、深度約 600m 以深においては、塩化物イオンの深度に対する増加率が高くなることが示されている。また、酸素、水素の安定同位体組成も、この深度を境に傾向が変化し、浅部では天水起源の範囲を示すのに対して、深部では塩化物イオン濃度の増加とともに海水の安定同位体組成に近づく傾向を示す。これらの結果と比較すると、06MI03 号孔から採取した地下水は、第 1 段階の調査研究結果に報告されている⁷⁾塩化物イオン濃度の低い Na-Cl 型地下水に該当し、溶存成分濃度や起源について従来の第 1 段階における調査結果と調和的である。そのため、研究坑道周辺における深度 500m までの地下水の地球化学特性は、深度とともに緩やかに塩化物イオン濃度が増加する天水起源の地下水とすることができる。また、地下水中の溶存ガスについては、調査現場において脱ガスさせ採取したために、定量値は得られていない。そのため、溶存ガス濃度の深度依存性については不明であるが、メタンを主体とするガスの組成は、各深度において明瞭な差は認められておらず、深度 500m までの溶存ガスの主な成分はメタンであると考えられる。

(3) 滞留時間

06MI03 号孔においては、区間 1（深度 197～208m）、区間 2（深度 229～268m）、区間 7（深度 378～419m）及び区間 9（深度 451～487m）からトリチウムが検出された。トリチウムは半減期が約 12 年と非常に短く、地下水から検出された場合には、その地下水の滞留時間が数十年

未満であることを示す。従来の調査で深度 300m 超える深度から採取した地下水において、トリチウムが検出された例はない。トリチウムが検出された区間において、最深の区間 9 は深度 451m から 486m であり、このような深度に存在する地下水の滞留時間が数十年というのは、従来の調査結果では認められていない。この原因としては、1) 外部からのトリチウムを含む地下水（もしくは地表水）による汚染、2) 地表近くに存在する滞留年代の若い地下水の地下深部への直接的な涵養、が挙げられる。1)については、地表に近い地下水のトリチウム濃度を従来の結果 7 から 2T.U.とし、深度 500m 付近における原位置の地下水にはトリチウムが含まれていないと仮定すると、0.5T.U.を示した区間 7 の地下水は、採水試料が 25%の汚染を受けている（試料中の 25%が原位置でない水である）ことになる。06MI03 号孔は湧水状態での掘削だったために、添加した蛍光染料濃度の分析からも掘削水による汚染は、認められない。そのため、試料の 25%が汚染されている可能性は極めて低い。2)については、地表に近いトリチウムを含む地下水が直接的に涵養した場合においても、試料中の 25%の地下水が地表近くの地下水に置換されている必要がある。ただし、溶存成分濃度の分析結果は、地表からのボーリング孔を用いた調査で得られた結果と整合的であり、地表近くの溶存成分濃度が低い地下水が混入した可能性は低い。今回の結果は、現在分析中の ^{14}C を用いた年代測定の結果や、地質構造及び水理学的な情報と併せて、今後の検討課題である。

4. 5. 4 教訓

(1) 水質分析

06MI03 号孔から取得した地下水の化学分析では、塩化物イオン、ナトリウムイオンなどの分析値が、当初の想定と大きく異なる結果が得られたため、確認のための再分析を実施した。その比較を Fig. 4.5.6 に示す。再分析は試料採取時に 20l ポリタンクに採取した、バックアップ用試料を用いて実施した。

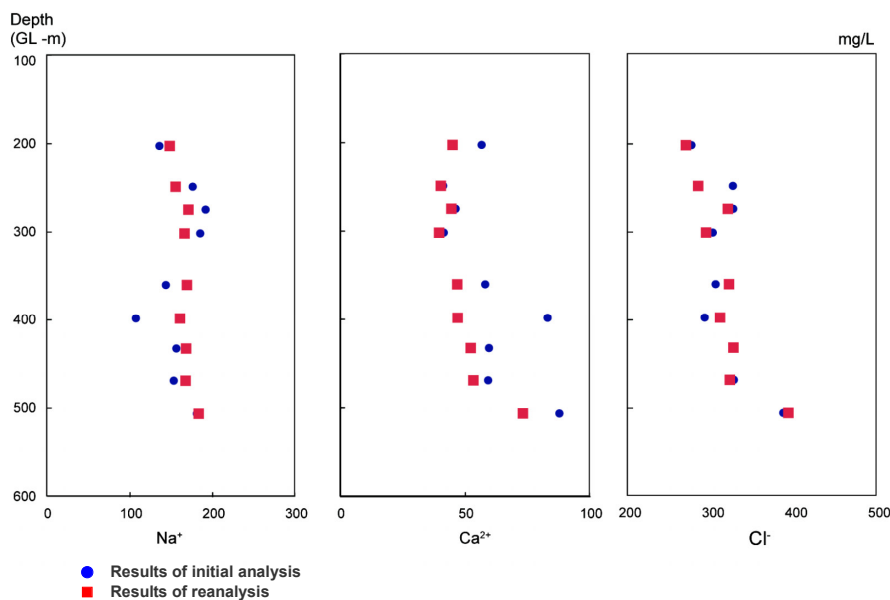


Fig. 4.5.6 Comparison of result between initial analysis and reanalysis

分析値が異なることの原因としては、1) 試料保管時に炭酸分圧が上昇し、遊離元素が錯体を形成して沈殿してしまうことに起因する試料自体の変化、2) ポリタンクから溶出する成分による外部からの要因による変化、3) 分析手順や分析方法の不備もしくは分析機器の不具合による人為的な要因、が考えられる。これらに対し、詳細な作業手順書の精査やブランク試験、複数回

測定などの作業を実施した結果、主な要因が 3) であることが明らかとなった。具体的には、試料の過大な希釈による不確実性の増大、希釈作業における人為的な誤差及び試料の取り違えが分析値を大きく変動させた原因であった。これらを解決するための方策としては、事前に作業手順書を十分に精査することが挙げられる。ただし、この方策においても、分析者に依存する操作誤差や誤りを無くすことは困難である。そのため、ISO9000 シリーズや ISO17025 に代表される品質管理基準に対する認定を受けている試験所を選定することを最低限の品質確保方策としつつも、ブランク試験や、複数回または異なる試験所でのクロスチェックを行えるだけの十分な量の試料採取が必要である。

(2) モニタリング装置

今回の調査における物理化学パラメータ測定は、被圧・不活性状態での測定を実施するために専用のフローセルを作製した。測定機器は耐圧性能を考慮して、in-situ 社製 Troll9000 を選定した。測定装置の品質管理としては、使用時毎の校正を実施し、指示値が正常であることを確認した後に使用することとした。校正にはメーカーが推奨する校正溶液を使用した。しかし、Troll9000 の校正は正常に行えるものの、現場での測定を開始すると指示値が安定せず、pH 等の物理化学パラメータが想定される値よりも大きく異なる値を示すケースが多数発生した。この原因は不明であるが、各電極を新品に交換した後も同様の不具合が見られたため、プローブ内部の電気的な不具合が原因と推定できる。この不具合を調査中に解消できなかったために、堀場製作所製 W-22XD を併用して物理化学パラメータモニタリングを実施した。W-22XD についても使用前にマニュアルに指定された手順によって校正を実施し、安定した計測値を取得することができた。前述の通り、W-22XD は耐圧性能が低いために被圧状態での測定はできなかったが、フローセルを用いて大気と接触しない条件下での測定が可能であった。今回の結果から、機器の使用前の確認はもちろんであるが、機器の長時間の測定の信頼性についても十分に検討することが必要である。

(3) ORP 測定

酸化還元電位の測定については、十分に安定した値を得るために約 3 日間程度の連続測定が必要であることが、従来の調査において経験的に示されている⁸⁾。pH や電気伝導度が約 1 日で安定に達するのに対して長時間の観測が必要な理由としては、溶液系内の酸化還元反応の非平衡や、電極表面への電気化学的に活性あるいは不活性な物質の吸着による電極-溶液間の電気化学環境の変化などが考えられている。研究所において実施された第 1 段階調査においても、工程の制約から原位置での酸化還元電位の値が把握できないとする反省点が得られている⁹⁾。

今回の調査では、調査の目的が排水処理設備などの計画の見直しに資する情報の取得であり、地球化学調査に特化したものではなかったことから、工程の制約から酸化還元電位を測定するための十分な時間は確保できなかった。しかしながら、酸化還元電位は地下水の地球化学特性や地下水中での物質移動特性を検討する際には非常に重要な要素であることから、調査研究の観点では酸化還元電位を測定するための十分な時間を確保した調査や、短時間で酸化還元電位が測定可能な技術の開発が必要である。

5. 湧水量及び水質の予測

5. 1 地質構造モデル

パイロットボーリングの孔口（主立坑；深度 180m，換気立坑；深度 191m）までの立坑の壁面地質調査の結果，主立坑において堆積岩から孔口深度まで断続的に分布する 3 条の断層が確認されており（Fig. 5.1.1），これらの断層は規模や方向性，変位等から，第 1 段階での調査研究において両立坑間に分布すると予測していた断層に相当すると考えられた¹⁰⁾。

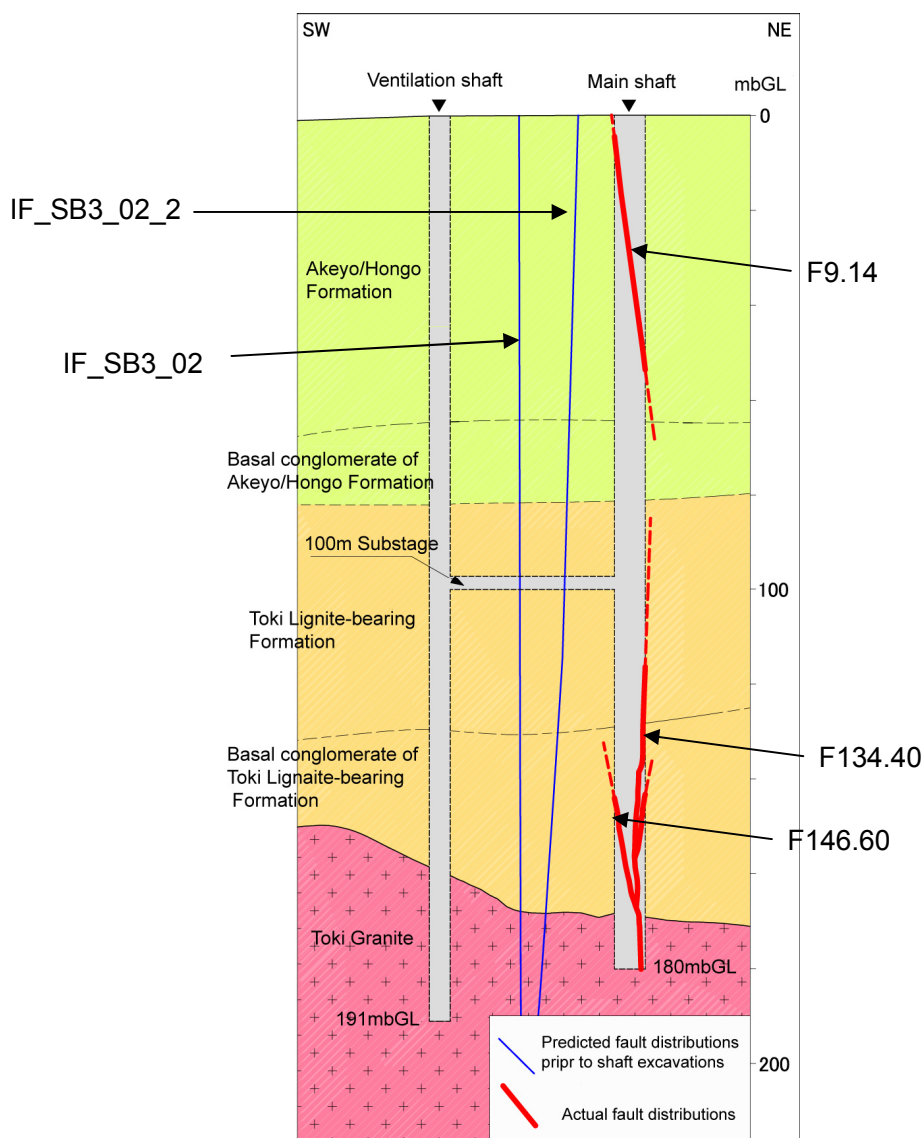


Fig. 5.1.1 Fault distributions based on the results prior to the pilot borehole investigations

主立坑で確認されたこれらの断層は，1) 走向がほぼ同一（北西～北北西走向）であるが，F134.40 断層は上下の断層と傾斜が異なること，2) それぞれを単一断層とした場合，特に F146.60 断層の浅部方向への延長部で該当するような断層を確認していないこと等に基づき，主立坑とその周辺には雁行断層による一連の断層群が形成されていると想定した。その想定を前提として，パイロットボーリングの地質学的調査に基づいて更新した地質構造モデルを Fig. 5.1.2

の左に示す。06MI02号孔(主立坑)で確認された2条の断層帯は、上位の断層帯(P500_06MI02_1)が西傾斜、下位の断層帯(P500_06MI02_2)が東傾斜を示す。この結果とP500_F146.60断層の傾斜及び断層形成モデルを考慮し、これら3条の断層は雁行断層による一連の断層群と解釈した。また、パイロットボーリングで確認されなかったP500_SB3_13_2断層(旧名:IF_SB3_02_2)及びP500_MIZ1FZ06(旧名:IF_SB3_02)については、分布を否定する結果が得られていないことから、それらの分布をボーリングと遭遇しない深度に修正した。UHFD及びLAFZについては、06MI03号孔(換気立坑)についてはこれらが確認された深度を、06MI02号孔(主立坑)については割れ目頻度や走向傾斜の把握が困難なことから堆積岩の層厚とその相関性などに基いて決定した。主立坑については、深度430m以深から比較的変質が弱くなる傾向が認められるもの、Fig.5.1.2によれば、パイロットボーリングでは把握していない深度530m以深において再びP500_MIZ1FZ06およびP500_SB3_13_2断層に遭遇し、破碎や変質等が顕著になることが予想される。また、換気立坑も同様に深度530m以深において断層に遭遇する可能性が高い。

同地質構造モデルとパイロットボーリングの岩芯調査の結果に基づき、電研式の岩盤分類による岩級分布の推定を行なった(Fig. 5.1.2 右)。断層帯にはCL級以下の岩盤が分布することから、主立坑とその周辺ではCL級程度の脆弱な岩盤が深度500m以深も分布すること、また換気立坑についても、深度500以深で脆弱CM級から場所によってはCL級の岩盤が出現することが予測される。

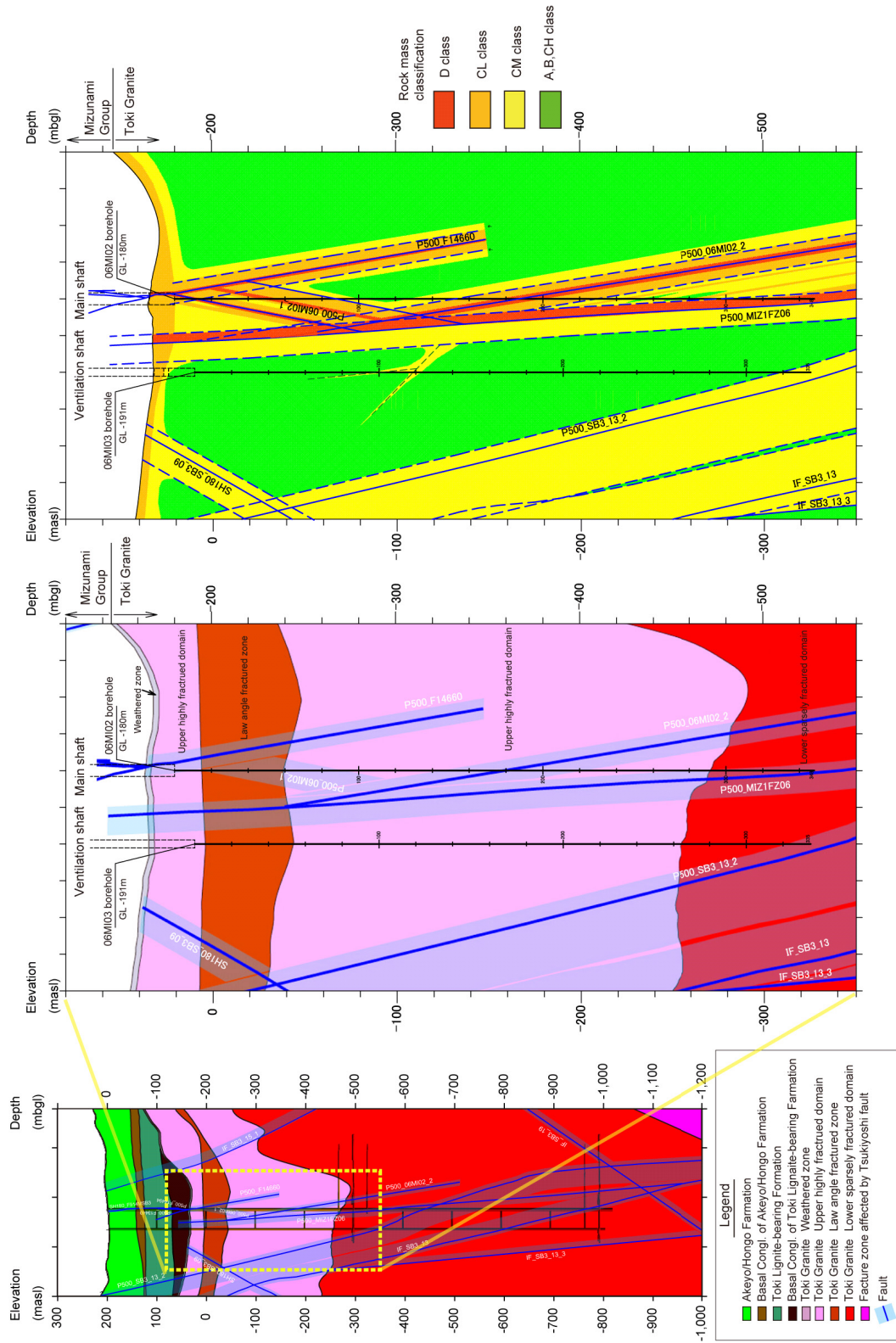


Figure 5.1.2 Geological model based on results of the pilot borehole investigations

5. 2 湧水量の予測

湧水量の予測については、結果の速報性等を勘案して、段階的に実施した。また、それらの予測解析結果を比較・検討することにより、今後の湧水量予測解析手法の位置づけを明確化することも念頭において予測を実施した。以下に、各モデルによる予測結果をまとめる。

5. 2. 1 定常軸対称モデル（理論式）に基づく解析

(1) 計算方法及びパラメータの設定

計算に用いた定常流対象浸透流モデルの理論式を下記に示す。

$$Q = \frac{2\pi \cdot T \cdot Sw}{\ln(R/rw)}$$

T：透水量係数，Sw：水頭差，R：掘削影響半径，rw：井戸半径

各パラメータの設定根拠及び条件を以下に示す。

- 透水係数はパイロットボーリングの水理試験で得られた結果を用いた。
- 水頭差は、基本的に水理試験で得られた初期間隙水頭と掘削深度の差を用いた。
- 立坑の掘削影響（立坑掘削作業に伴う水位変動）については、立坑から約 500m離れた観測孔 DH-15 号孔よりも遠方の観測孔（AN-3, MIU-3, 4, DH-11 等）において明瞭に観測できなかったこと、及び掘削影響半径を過剰に見積もった場合、予測される湧水量を過少に評価する恐れがあることから、安全を見て掘削影響半径を 500mとした。

(2) 深度 500m 付近までの湧水量予測結果

以下に主立坑及び換気立坑における各深度の湧水量予測計算結果と、深度 500m 付近までの湧水量の総量を示す (Fig. 5.2.1)。

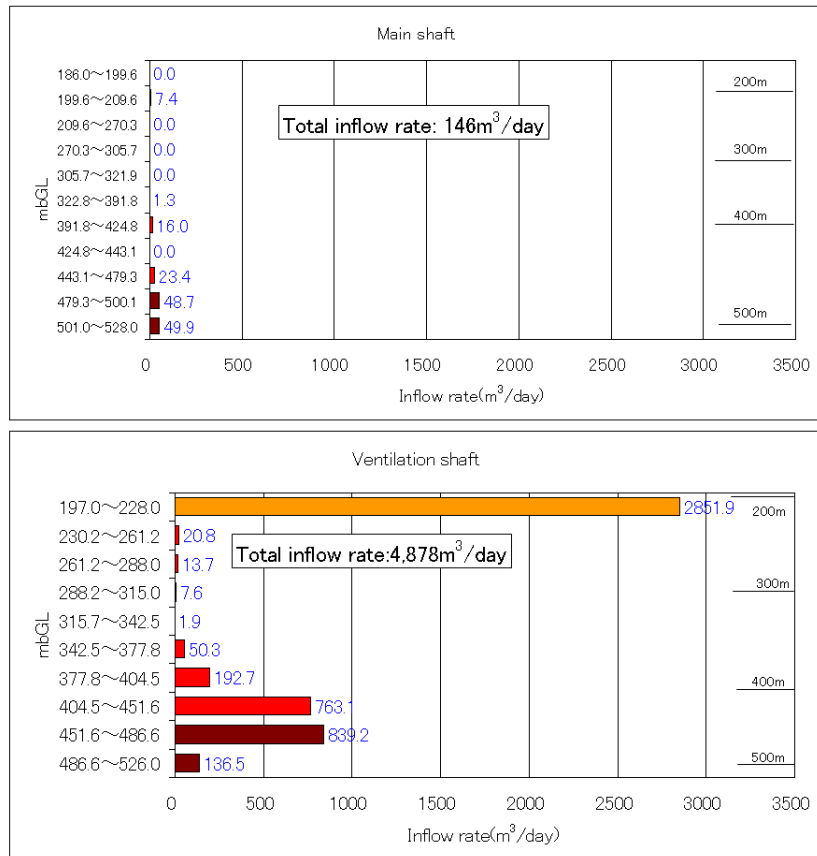


Fig. 5.2.1 Estimated Inflow rate from each interval

5. 2. 2 二次元軸対称モデルに基づく解析

(1) モデル化・解析領域

二次元モデルは、換気立坑中心を中心軸とした軸対称モデルとし、モデル化・解析領域は、鉛直方向に約 1,000m、水平方向に定水位境界と考えられる河川までの約 2,000mを解析領域とした。軸対称モデルに基づく解析では、パイロットボーリング調査の結果に基づいて、高い透水性を有する換気立坑のみを解析対象とした¹¹⁾。

(2) 水理地質構造モデルの構築

地質構造区分は、立坑壁面調査結果とパイロットボーリング調査結果¹²⁾に基づき、透水性の違いから、堆積岩を明世累層／本郷累層、明世累層／本郷累層基底礫、土岐夾炭累層、土岐夾炭累層基底礫の4つに区分し、花崗岩はUHFDとLSFDに分類した。さらにUHFD中のLAFZをモデル化した。LAFZは、一層でモデル化したケース（以下、ケース(a)）と、パイロットボーリング調査で明らかになった水理的不均質性（透水性が高い領域と低い領域が存在）を考慮し、高透水性部（LAFZ1）とそれ以外の部分（LAFZ2）に分けてモデル化したケース（以下、ケース(b)）の2ケースを検討した。各地質構造の水理パラメータは、ケース(b)のLAFZはパイロットボーリングの調査結果¹²⁾に基づき、それ以外については第1段階での調査研究に基づき設定した（Fig. 5.2.2）。

(3) 解析条件

境界条件は、側方を定水頭境界、中心軸及び底部を不透水境界、立坑壁面は大気圧開放で浸出面境界とした。

また、グラウトによる湧水量の低減効果を把握するため、グラウトによる改良幅（グラウトによって透水性を低下させる立坑壁面からの水平方向の距離）をパラメータとし、0m（グラウトなし）、2m、3m、4mおよび5mの5ケースを設定した解析を実施した。グラウトの対象は特に大量の湧水が予測されるLAFZとし、ケース(a)ではLAFZ全体、ケース(b)では高透水性部のLAFZ1のみとした。なお、グラウト部の透水係数は $2.68 \times 10^{-7} \text{m/s}$ （2ルジオン相当）とした。

(4) 解析結果

パイロットボーリング調査開始時の立坑の孔底深度200mから500mまでを1ステップあたり50mの掘削を模擬した定常解析を実施した。解析には、有限要素法による飽和不飽和二次元浸透流解析プログラムであるAC-UNSAF2D¹³⁾を使用した。グラウトを実施しない場合の解析結果をFig. 5.2.3に示す。この図からケース(a)、(b)のどちらの場合も、LAFZを含む深度からの湧水量が非常に大きく、ケース(b)ではLAFZ1からの湧水量が特に大きい結果となった。Fig. 5.2.4にグラウトを考慮した解析結果を示す。Fig. 5.2.4の縦軸は、グラウトなしの場合（Fig. 5.2.3）を100とし、100あった湧水量が30になった場合に30%と表示している。この図から、LAFZにグラウトを実施することで、LAFZの水理的不均質性を考慮しないケース（ケース(a)）では約30～40%の湧水量を低減できること、水理的不均質性を考慮したケース（ケース(b)）では、約70～75%の湧水量を低減できることが示された。また、改良幅に着目した場合、特に不均質性を考慮したケースで、改良幅を2mから5mまで変化させても、湧水量の低減効果に大きな違いがないことが示された。

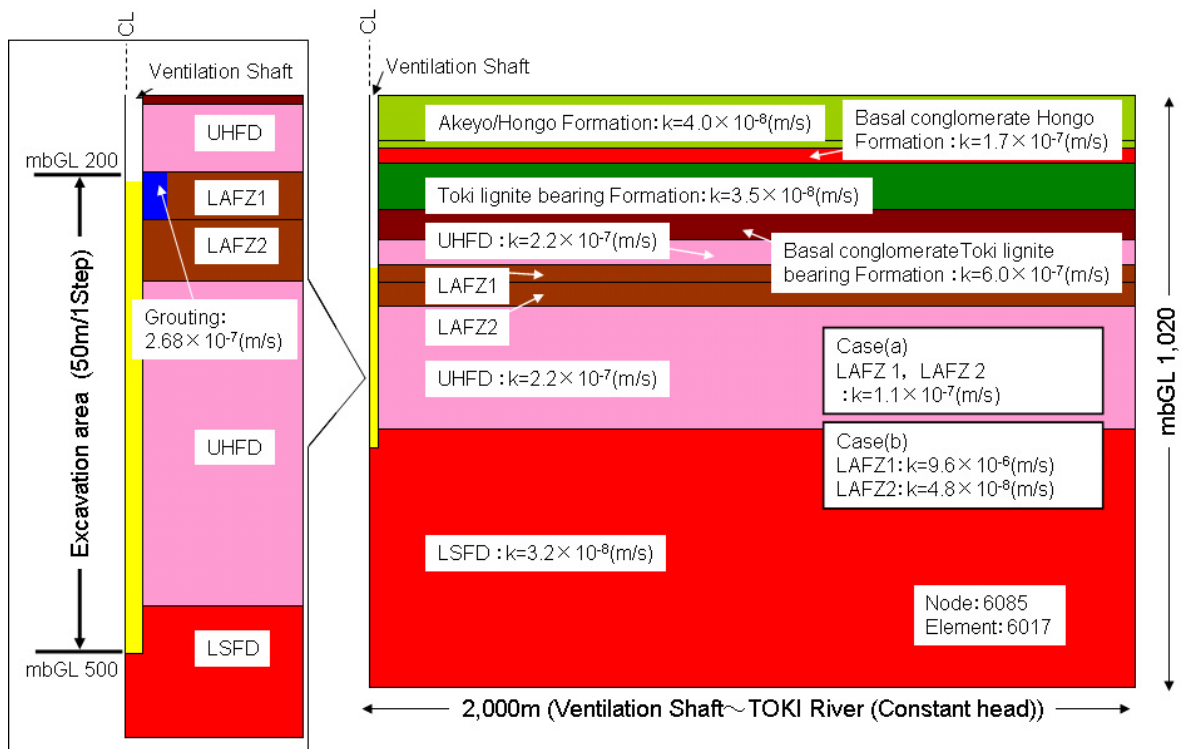


Fig. 5.2.2 Hydrogeological model (2D_Axisymmetric model)

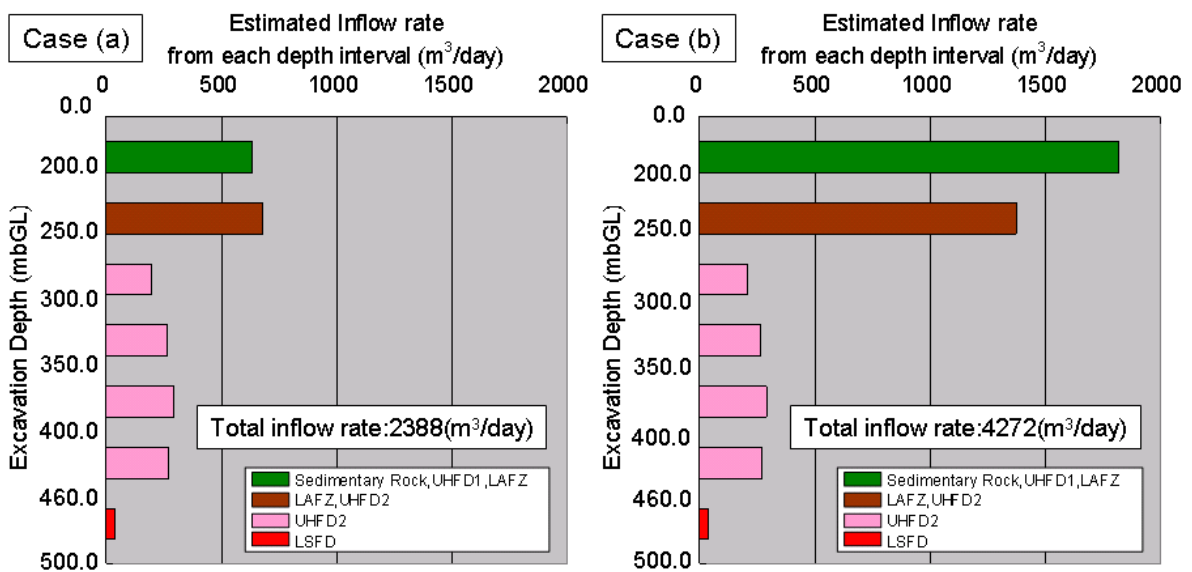


Fig. 5.2.3 Results of analysis in no grouting case (2D_Axisymmetric model)

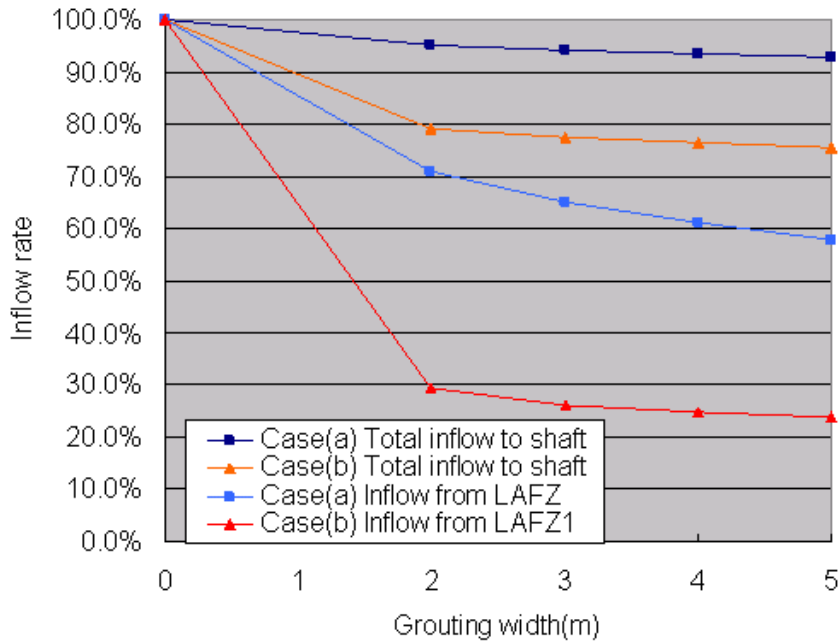


Fig. 5.2.4 Results of sensitivity analysis (2D_Axisymmetric model)

5. 2. 3 三次元モデルに基づく解析

(1) モデル化・解析領域

三次元モデルのモデル化・解析領域は、境界条件が解析結果に及ぼす影響を避けるために、尾根線や河川などの分水界で囲まれた約 9km 四方とし¹⁴⁾、両立坑、中間ステージ、最深ステージ及び予備ステージをモデル化の対象とした。また、水理地質構造モデルはパイロットボーリング調査の結果に基づく地質構造モデル (Fig.5.1.2 参照) に基いた¹²⁾。Fig. 5.2.5 に解析領域を示す。なお、これらをモデル化するには、広範囲な解析領域に対し、最も立坑掘削の影響が大きいことが想定される研究所用地近傍の水理地質構造モデルの解像度の低下を避けるため、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¹¹⁾。

(2) 水理地質構造モデルの構築

地質構造モデルのうち研究所近傍の外側部分については、瀬戸層群、瑞浪層群、UHFD、LSFD の地層・構造境界、及び主要な断層として月吉断層ならびに同等の規模を有すると考えられるトレース長が 3km 以上のリニアメントをモデル化した。研究所用地近傍においては、瑞浪層群を生俵累層、明世累層／本郷累層、本郷累層基底礫、土岐夾炭累層、土岐夾炭累層基底礫に分割し、LAFZ をモデル化した。加えて、第 1 段階での調査研究によって抽出された断層 (IF_SB0_01, IF_SB3_15_2, P500_MIZ1FZ06, P500_06MI02_2 など) と、深度 180m までの立坑の壁面地質調査で新たに追加された断層 (Shaft180_SB3_02_2 など) をモデル化した。

ここで構築した地質構造モデルに、第 1 段階の調査結果¹⁵⁾に基づいて水理パラメータを設定し、水理地質構造モデルを構築した。

この水理地質構造モデルに、パイロットボーリング調査で新たに推定された断層 (06MI02_1_top, 06MI02_1_bottom, 06MI02_2, Pilot500_F14660 など) を追加し、パイロットボーリング調査における水理試験結果に基づいて水理パラメータを設定した。さらに、第 1 段階の調査と立坑の壁面地質調査によって抽出された断層の一部 (Pilot500_SB3_02, Pilot500_SB3_13_2, Shaft180_SB3_02_2) は、パイロットボーリング調査の結果から、断層の位置や形状を更新した。Fig. 5.2.6 に水理地質構造モデルの立坑近傍における断面図を示す。

(3) 解析条件

上部境界条件は、モデルキャリブレーションの結果から 80.5mm/年の一定涵養量及び自由浸出面境界とし、側方及び下部境界条件は不透水境界とした。また、掘削後の立坑壁面は、集水マツトや覆工コンクリートなどの影響により、大気圧開放と不透水境界の間にあると考えられるため、「圧力開放係数： α 」の概念を導入し、立坑壁面の境界は、掘削前の初期水圧と大気圧の差に、この α を掛けて求めた水圧を設定した¹⁶⁾。 α が0の場合は大気圧開放状態、1の場合は不透水状態を示す。本解析では、モデルキャリブレーションの結果から、 α を0.2と仮定した。

(4) 解析結果

構築した水理地質構造モデルを用いて、深度 1,000mまでの研究坑道の掘削を模擬した飽和・不飽和状態における非定常解析を行った。解析には、等価不均質連続体モデルを用いた有限要素法による三次元飽和不飽和浸透流解析コードである EQUIV_FLO¹⁷⁾を使用した。解析の結果、グラウトなどの湧水抑制対策を施さない条件では、特に換気立坑においては、掘削が LAFZ に到達する深度 200m 付近から湧水量が急激に増加し、その後、深度 500m 付近まで湧水量の増加傾向が続き、掘削が深度 500m 以深の下部低密度割れ目帯 (Lower Sparsely Fractured Domain, Table 4.3.2 参照) 到達すると湧水量の増加傾向は低下する。(Fig. 5.2.7)。このことから、LAFZ のような高透水性の構造を対象とした湧水抑制対策を実施することにより、立坑への湧水を大幅に抑制することが可能であると考えられる。また、深度 1,000m の最深ステージの掘削を完了した付近で、総湧水量は最大の約 3,600m³/日となり、第 1 段階の水理地質構造モデル¹⁵⁾を用いた解析結果 (約 10,000 m³/日以上) と比較し、大幅に少ない湧水量となった。この内訳は、主立坑が約 790 m³/日、換気立坑が約 1,420m³/日で、換気立坑からの湧水量が多くなった。これは、特に土岐夾炭累層 (基底礫) から UHFD にかけて、第 1 段階の調査では明らかになっていなかった、P500_06MI02_1, P500_06MI02_2, P500_F146.60 などの周辺の地層と比べて透水性の低い不連続構造を主立坑の近傍にモデル化したことにより、これらが湧水量の増加を抑制したためと考えられる。

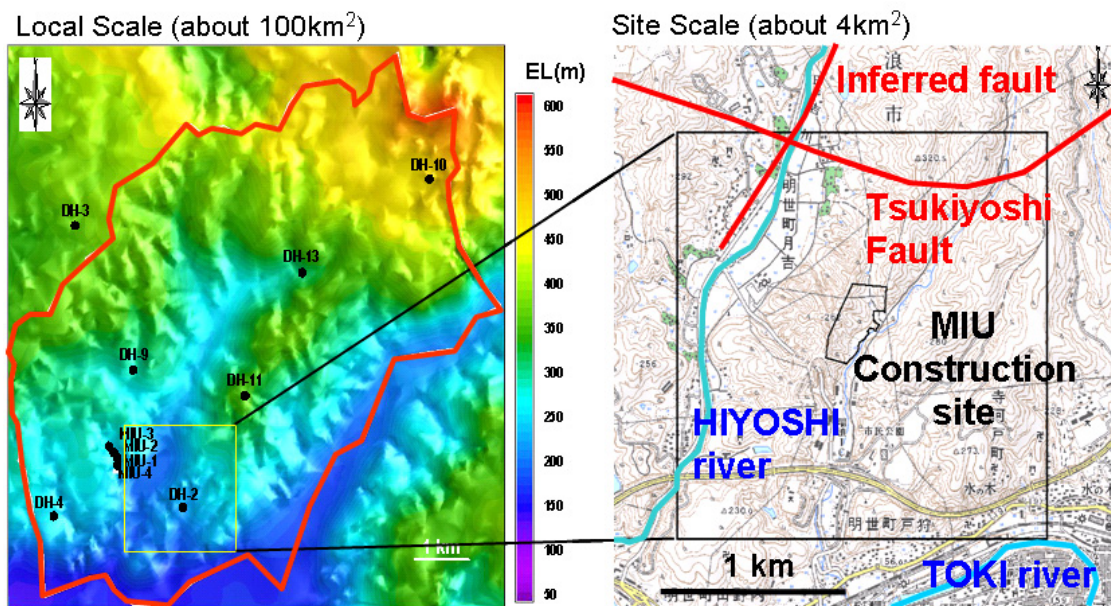


Fig. 5.2.5 Modeling area (3D model)

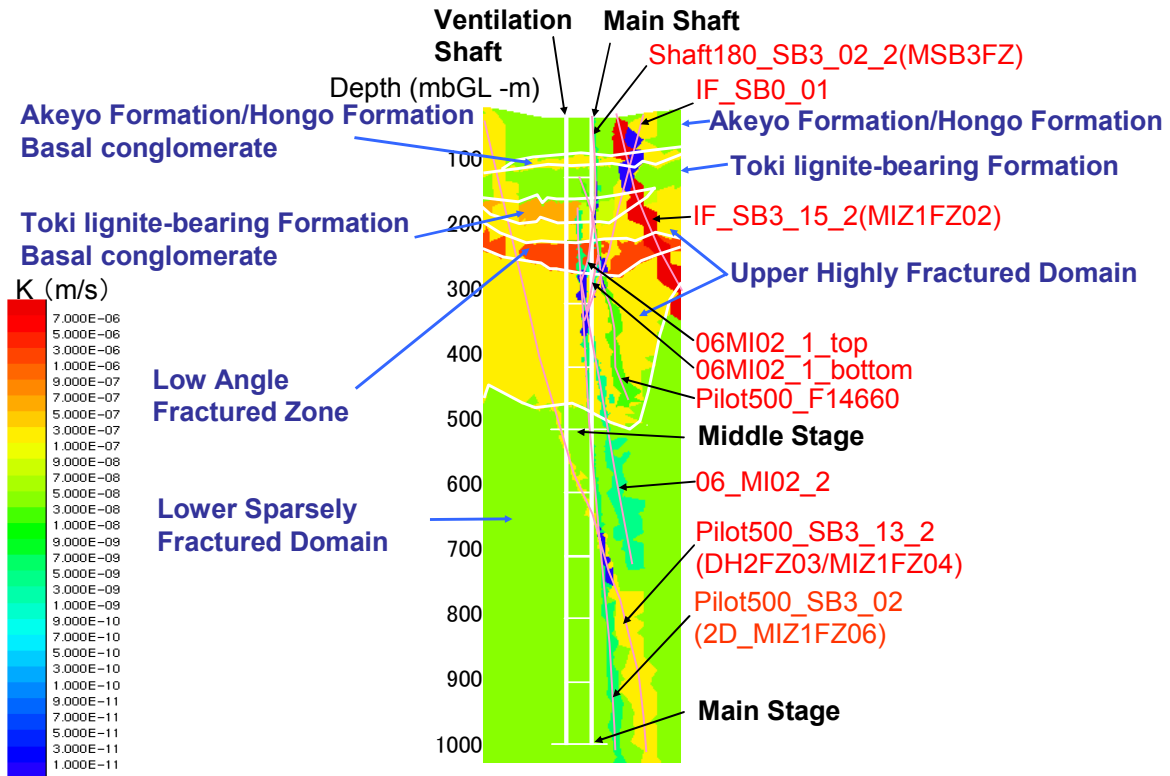


Fig.5.2.6 Hydrogeological model around shafts (3D model)

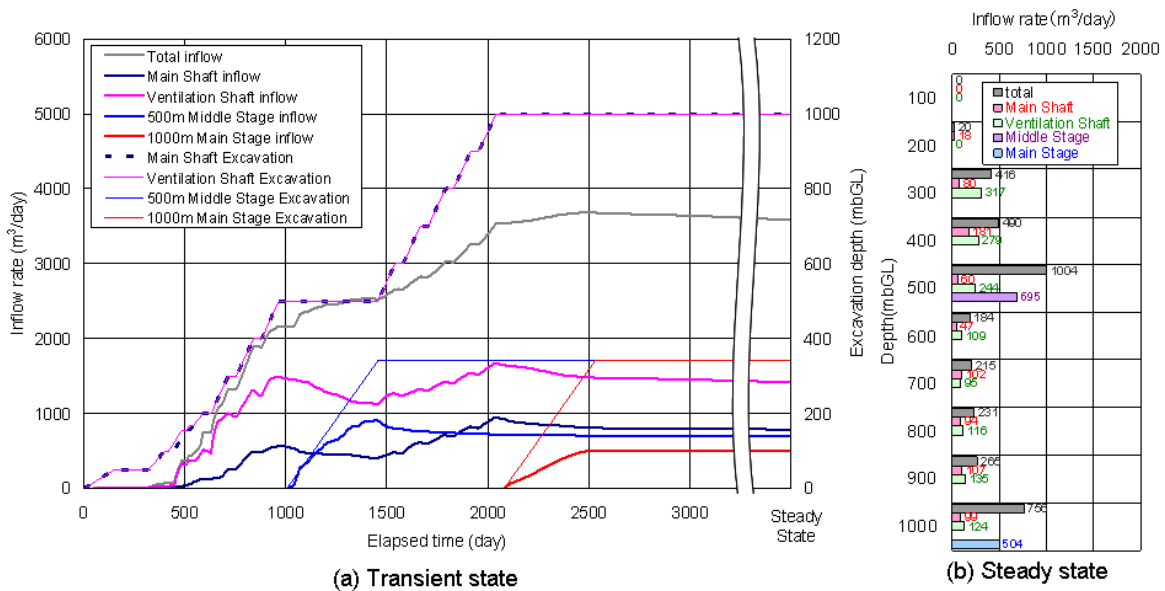


Fig. 5.2.7 Results of analysis (3D model)

5. 2. 4 まとめ

各解析段階の解析条件をTable 5.2.1に示す。理論式に基づく計算結果からは、主立坑からの湧水量と比較して、換気立坑からの湧水量が非常に大量となり、パイロットボーリング調査の結果から透水性が高いことが明らかとなった深度210m付近と深度400~460m付近からの湧水が多い結果となった。

二次元軸対称モデルに基づく解析では、パイロットボーリング調査の結果から、高い透水性を示し、湧水量が多量となることが予想される換気立坑のみをモデル化の対象とした。軸対称モデルでは、地層区分などを考慮することが可能となる一方、中間ステージや最深ステージ、高角度の傾斜を有する断層などはモデル化できないため、モデルに取り込んでいない。LAFZ中の深度210m付近に存在する高透水性部の影響を推定するため、LAFZの水理学的不均質性を考慮し、グラウトによる湧水量の低減効果を推定することを目的として、グラウトの幅をパラメータとした感度解析を実施した。その結果、LAFZにグラウトを実施することにより、湧水量を低減できる可能性が示唆されたが、グラウトの幅は湧水量の低減効果への感度が低く、グラウトの幅を2m以上としても、湧水量の低減効果はほとんど変化しないことが示された。

三次元モデルに基づく解析では、二次元軸対称モデルでは考慮できなかった主立坑や中間ステージなどの研究坑道や高角の断層、パイロットボーリング調査の結果から得られた断層などをモデル化し、研究坑道の掘削を模擬した非定常解析を行った。その結果、主立坑と比較して換気立坑からの湧水量が多いこと、深度200mから500mの間で湧水量が増加し、花崗岩健岩部で湧水量が低下する傾向があることが示された。

以上から、高透水性の構造を対象としてグラウトなどの湧水抑制対策を実施することにより、湧水量を大幅に抑制することができる可能性が示唆された。

また、総湧水量に着目した場合、二次元軸対称モデルによる解析結果と三次元モデルによる解析結果がほぼ同様となる結果になった。これは、湧水量が多く湧水量に与える影響が大きいと推定される換気立坑周辺の地層・地質構造区分と透水係数を二次元軸対称モデルと三次元モデルで同一としたことによるものと考えられる。

以上の結果から、今後は湧水量の予測にあたっては、以下のような考えに基き各解析手法を適用していく。理論式に基づく計算は、簡便に湧水量の予測が可能であるが、実際の水理地質構造を考慮できないため、湧水量の予測値は暫定的な速報値として取り扱う。二次元軸対称解析は、地層など水平な地質構造を考慮でき比較的短時間で解析が可能であるが、断層など高角度の傾斜を有する水理地質構造を考慮できないため、湧水量の予測値は概略的な湧水量の予測と中間ステージの掘削程度の短期的な排水処理設備の設計、グラウトの施工条件が湧水量に与える影響の把握などの検討材料として用いることとする。三次元モデルに基づく解析は、次段階の調査で対象とすべき重要な構造の特定や周辺への環境影響評価、最深ステージまでの掘削などの長期的な排水処理設備の設計の見直し等、プロジェクト管理の検討材料とする。

Table 5.2.1 Comparison of analysis conditions

| | Theoretical equation | 2D Axisymmetric model | 3D model |
|--|---|---------------------------|-------------------------------------|
| Upper boundary condition | - | - | •Constant recharge rate •Seepage |
| Shaft modeling | • Main shaft • Ventilation shaft (calculation:separately) | • Ventilation shaft | • Main shaft • Ventilation shaft |
| Hydraulic conductivity | Isotropy | Isotropy | Anisotropy |
| Consideration of high permeable zone in LAFZ | Yes | case(a):No case(b):Yes | No |
| Grouting effect | No | Yes/No | No |
| Skin Effect | No | No | Yes |

5. 3 水質の予測

5. 3. 1 研究所用地周辺におけるこれまでの調査結果

第1段階における調査結果⁷⁾では、研究所用地周辺の地下水は、Na-(Ca)-HCO₃型地下水とNa-Cl型地下水に区分でき、両者は堆積岩中に存在する低透水性の泥岩層によって境されている。Na-Cl型地下水については、深度とともに溶存成分濃度が増加し、深度1,000m付近では現在の海水の約1/10程度の溶存成分濃度を示す。多変量解析の結果では、花崗岩中の地下水水質はこのような濃度の異なるNa-Cl型地下水の混合によって形成されていることを示す。他方、Na-(Ca)-HCO₃型地下水は水-岩石反応が主な水質形成機構であることが明らかになっている。地下水の起源については、同位体組成より、Na-(Ca)-HCO₃型地下水は天水起源であることが明らかにされているものの、Na-Cl型地下水については明らかにされていない。地下水の滞留時間については、放射性炭素同位体の分析結果から、深度600m程度で5万年程度の年代を示す。それ以深では放射性炭素が検出されないことから、概ね5万年より古い滞留時間を有すると考えられる。

5. 3. 2 パイロットボーリング調査結果に基づく水質の予測

Fig. 5.3.1 に今回の調査結果と従来の調査結果を併せた水質の深度分布図を示す。地下水がNa-Cl型を示すことや、溶存成分濃度が深度とともに増加することなど、今回の調査結果は従来の調査結果と整合的である。ただし、パイロットボーリング調査における浅部、すなわち深度300m（掘削深度約100m）程度までは、第1段階の調査結果に対して、より深部の環境を反映している可能性がある。これは、研究坑道の掘削に伴う水圧の低下により、より深部に存在する地下水が上昇しているためと考えられる。深部からの地下水が上昇することを考慮すると、フッ化物イオンは深度とともに減少する傾向を示すため、環境基準値を超過する水準ではあるものの、従来の調査結果よりも濃度が低下する可能性がある。他方、ホウ素については、従来の調査結果よりも高い濃度を示す地下水が湧水として研究坑道内に流入する可能性が高く、早めの排水処理対策が必要となる。研究坑道掘削に伴う深部地下水の上昇については、現在実施している研究坑道内における壁面湧水や集水リングでの地下水水質モニタリングを継続するとともに、今後、数値解析等により定量的に評価する必要がある。

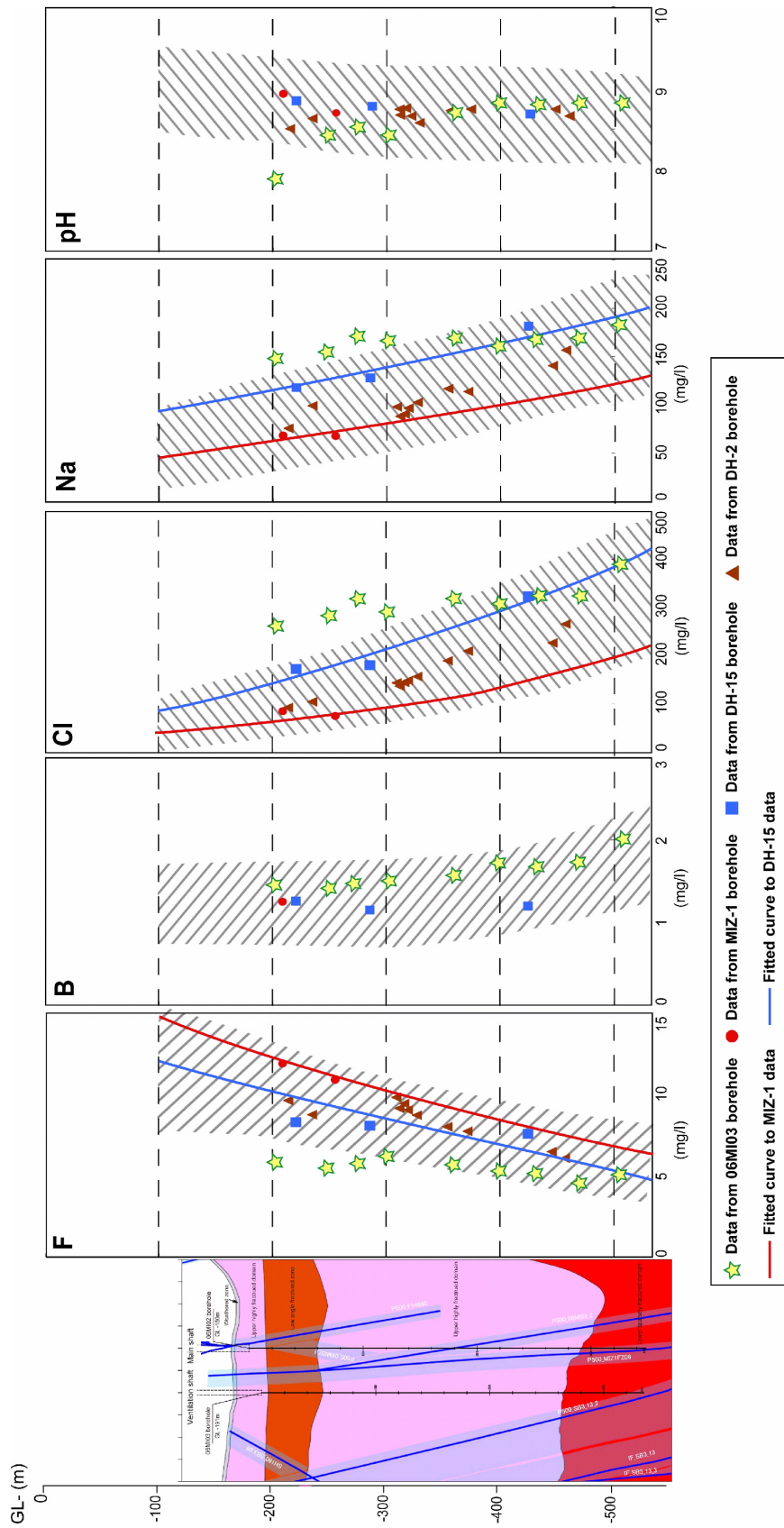


Fig.5.3.1 Summary of hydrochemical investigation