

閉塞された地下施設における 地下水水圧・水質観測システムの実証研究

Demonstration of the Groundwater Observation Network System
in Backfilled Underground Facility

村上 裕晃 竹内 竜史 岩月 輝希

Hiroaki MURAKAMI, Ryuji TAKEUCHI and Teruki IWATSUKI

核燃料・バックエンド研究開発部門

東濃地科学センター

地層科学研究部

Geoscientific Research Department

Tono Geoscience Center

Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

October 2022

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>)
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト (<https://www.jaea.go.jp>) より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

閉塞された地下施設における地下水水圧・水質観測システムの実証研究

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

村上 裕晃⁺, 竹内 竜史, 岩月 輝希⁺

(2022年8月18日受理)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構東濃地科学センターでは、瑞浪超深地層研究所の坑道の掘削に伴う地下深部の地下水環境の変化を把握するため、約24年にわたって坑道および研究所周辺のボーリング孔において地下水の水圧および水質観測を実施してきた。

令和元年度から開始した研究坑道の埋め戻しでは、環境モニタリング調査として、坑道の埋め戻し作業に伴う地下水の回復状況を確認することとしている。地上から地下深部の地下水環境を観測するためには、これまで研究坑道内で行ってきた地下水の水圧や水質の観測を地上から行うこととなるが、瑞浪超深地層研究所のような大規模な地下研究施設の埋め戻しは世界的にも前例がなく、新たな観測システムの開発が必要であった。そこで、瑞浪超深地層研究所の研究坑道周辺の環境を観測するために、坑道内に展開していた既存のモニタリングシステムを活用しつつ、地上からの観測を可能とする新たな観測網を整備し、環境モニタリングの実施を通じてその技術を実証することとした。

開発された観測システムを用いて坑道の埋め戻し前～埋め戻し期間中の地下水の水圧・水質を観測した結果、埋め戻した坑道内の地下水環境モニタリングにおける本システムの有効性を実証することができた。

Demonstration of the Groundwater Observation Network System in Backfilled Underground Facility

Hiroaki MURAKAMI⁺, Ryuji TAKEUCHI and Teruki IWATSUKI⁺

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

(Received August 18, 2022)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has been conducting the hydro-pressure and hydrochemical monitoring for more than two decades to understand the hydrochemical disturbance due to the excavation of tunnels at Mizunami Underground Research Laboratory (MIU).

To understand the environmental influence due to the backfilling of research tunnels that started in 2019, environmental monitoring of groundwater has been performed and recovery status of groundwater is being confirmed. In order to observe the deep-groundwater environment from the ground, the groundwater pressure monitoring and sampling, which have been performed in the research tunnel, are to be performed from the ground. However, backfilling of a large-scale underground facilities such as MIU is globally unprecedented, thus it was necessary to develop a new observation system. Accordingly, we developed a new observation network to observe the environment around the research tunnels of the MIU. This system enables monitoring of groundwater pressure and water sampling of the backfilled tunnel from the ground while utilizing the existing-monitoring system installed in the tunnels. Accordingly, we demonstrated its technology through the environmental monitoring of groundwater. The results of the environmental monitoring and the existing groundwater data of MIU indicate that this system is able to monitor the groundwater environment in the backfilled tunnels.

Keywords: Groundwater Pressure Monitoring, Hydro-chemical Groundwater Monitoring, Backfilling, Post-closure, Mizunami URL

⁺ Horonobe Underground Research Department, Horonobe Underground Research Center

目 次

| | |
|-------------------------------|----|
| 1. はじめに----- | 1 |
| 2. 目的----- | 3 |
| 3. 地上化の考え方----- | 4 |
| 3.1 地上化作業における制約----- | 4 |
| 3.2 従来の坑内観測装置を用いた観測方法----- | 5 |
| 3.3 地上化観測システムに用いる観測方法の選定----- | 6 |
| 3.4 観測区間の選定とレイアウト検討----- | 7 |
| 4. 観測システムの地上化----- | 11 |
| 4.1 水圧観測システムの地上化----- | 11 |
| 4.2 採水システムの地上化----- | 14 |
| 4.3 作業工程----- | 21 |
| 5. 地上化観測システムの機能確認----- | 23 |
| 5.1 地上化システム（水圧）の機能確認----- | 23 |
| 5.2 地上化システム（採水）の機能確認----- | 28 |
| 6. まとめ----- | 33 |
| 謝辞----- | 33 |
| 参考文献----- | 33 |

Contents

1. Introduction----- 1

2. Objective----- 3

3. Condition to develop the new groundwater observation network system ----- 4

 3.1 Constraint to install operation ----- 4

 3.2 Monitoring method using conventional monitoring system----- 5

 3.3 Selection of new monitoring method----- 6

 3.4 Consideration of monitoring sections and layout----- 7

4. Installation of the new groundwater observation network system----- 11

 4.1 Installation of groundwater pressure monitoring system ----- 11

 4.2 Installation of groundwater sampling system ----- 14

 4.3 Working process----- 21

5. Functional confirmation of the new groundwater observation network system ----- 23

 5.1 Functional confirmation of the groundwater pressure monitoring system ----- 23

 5.2 Functional confirmation of the groundwater sampling system ----- 28

6. Summery ----- 33

Acknowledgements ----- 33

References ----- 33

図リスト

| | | |
|--------|--|----|
| 図 1-1 | 瑞浪超深地層研究所の位置 ----- | 1 |
| 図 1-2 | 瑞浪超深地層研究所のレイアウト ----- | 2 |
| 図 2-1 | 埋め戻し前後の観測システムの概略図 ----- | 3 |
| 図 3-1 | 従来の坑内観測装置を用いた水圧・水質観測の主な対象孔 ----- | 4 |
| 図 3-2 | パッカーを用いた坑内観測装置の概念図 ----- | 6 |
| 図 3-3 | 立坑周辺の水理地質構造の概念図 ----- | 8 |
| 図 3-4 | 地上化観測システムの配置図 ----- | 9 |
| 図 4-1 | 地上化システム（水圧）の配置の概念図 ----- | 11 |
| 図 4-2 | 光ファイバー水圧計の接続手順の概念図 ----- | 13 |
| 図 4-3 | 光ファイバー水圧計の接続作業 ----- | 13 |
| 図 4-4 | 光ファイバーケーブルの坑道内の配置と埋め戻し後の風景 ----- | 14 |
| 図 4-5 | 地上化システム（採水）の概念図 ----- | 15 |
| 図 4-6 | MPシステムによる地下水採水（ボトル採水）の概念図 ----- | 16 |
| 図 4-7 | 採水用チューブの延長作業の概念図 ----- | 18 |
| 図 4-8 | 養生した採水用チューブの設置箇所の例 ----- | 18 |
| 図 4-9 | 立坑壁面に設置した採水用配管とその固定具 ----- | 18 |
| 図 4-10 | 埋め戻し面に設置した採水口の養生風景 ----- | 19 |
| 図 4-11 | 採水ポートの設置深度と採水ポートに接続した観測区間の一覧 ----- | 20 |
| 図 4-12 | 地上化システム（採水）の配置の概念図 ----- | 21 |
| 図 4-13 | 深度 13m における採水作業 ----- | 22 |
| 図 5-1 | 地上化観測システムに接続した坑内ボーリング孔と DH-2 号孔の位置関係 ----- | 23 |
| 図 5-2 | 坑内観測装置と光ファイバー水圧計の水圧観測結果の比較（07MI07 号孔） ----- | 24 |
| 図 5-3 | 地上化システム（水圧）の観測結果（07MI07 号孔，09MI20 号孔，10MI26 号孔の例） ----- | 25 |
| 図 5-4 | 地上化システム（水圧）の観測結果（09MI17 号孔，09MI19 号孔の例） ----- | 26 |
| 図 5-5 | 坑道の埋め戻し前後の水圧変化（深度 100m～300m） ----- | 27 |
| 図 5-6 | 坑道の埋め戻し前後の水圧変化（深度 400m～500m と DH-2 号孔） ----- | 28 |
| 図 5-7 | 地上化システム（採水）と坑内観測装置で採水した地下水の水質の比較 ----- | 31 |
| 図 5-8 | 各観測区間における塩化物イオン濃度の経時変化 ----- | 32 |

表リスト

| | | |
|-------|------------------------------------|----|
| 表 3-1 | 地上化観測システムを用いた観測対象区間および採水区間 ----- | 10 |
| 表 4-1 | 光ファイバーケーブルと光ファイバー水圧計の仕様 ----- | 12 |
| 表 4-2 | デッドボリュームの計算結果 ----- | 17 |
| 表 4-3 | 坑道の埋め戻しの進捗と地上化観測システムの設置の時系列 ----- | 22 |
| 表 5-1 | 地上化システム（採水）と他の水圧観測システムの水圧の比較 ----- | 30 |

This is a blank page.

1. はじめに

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）東濃地科学センターでは、超深地層研究所計画に基づき、岐阜県瑞浪市において深地層の科学的研究（地層科学研究）を1996年度から進めてきた（図 1-1、図 1-2）。2015年度以降は、地層処分事業や安全規制を進めていく上で不可欠な必須の課題として抽出された三つの課題（地下坑道における工学的対策技術の開発、物質移動モデル化技術の開発、坑道埋め戻し技術の開発¹⁾）に重点的に取り組み、十分な成果を上げたことから²⁾、2019年度をもって超深地層研究所計画における調査研究を終了した。

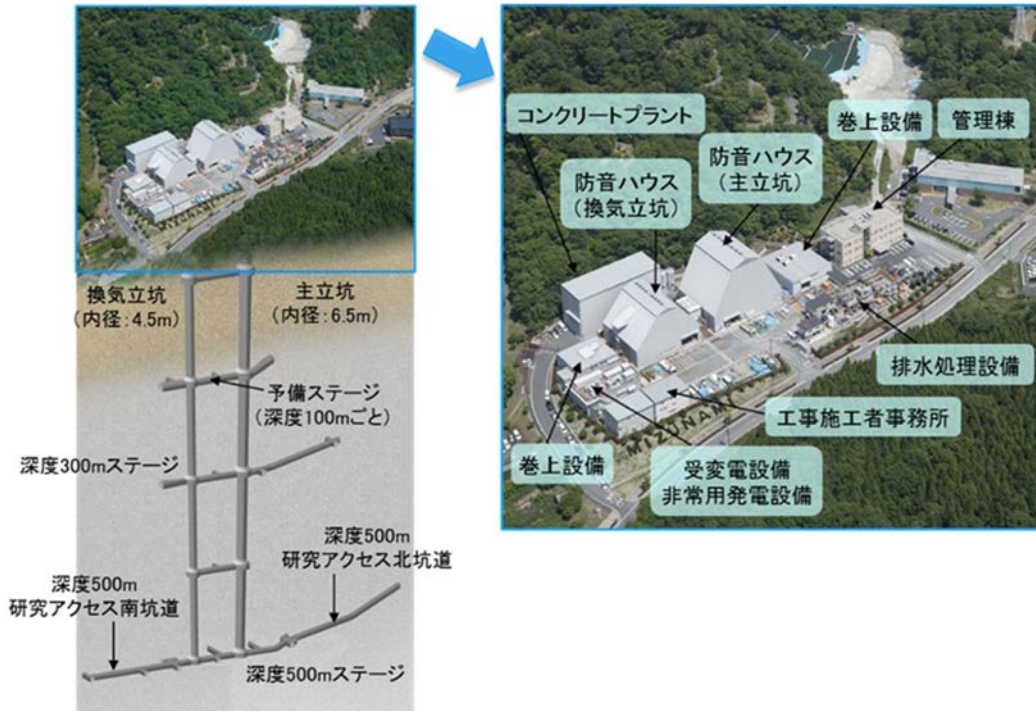
2020年度以降は、「令和2年度以降の超深地層研究所計画」³⁾に基づき、市有地の土地賃貸借契約の終了（2022年1月16日）までに坑道の埋め戻しおよび地上施設の撤去を行うこととした。加えて、坑道の埋め戻しに伴う地下水の水圧・水質の変化を確認するために、研究所用地および周辺における既存の地上からのボーリング孔や坑道からのボーリング孔等を利用した地下深部の水圧および水質の観測を、地下水の環境モニタリング調査として実施することとしている。

坑道の埋め戻し作業に伴う地下水の水圧・水質の変化を確認するためには、従来、坑道内で行ってきた地下水の水圧・水質の観測を地上から行う必要がある。しかし、瑞浪超深地層研究所のような大規模な地下研究施設の埋め戻しは世界的にも例がなく、地上から地下深部の地下水環境を観測する専用の観測システムを開発する必要があった。そこで、既存の地下の観測システムを活用しつつ地上からの観測を可能とする新たな観測網を整備し、環境モニタリングの実施を通じて、その技術を実証することとした。

本報告書は、実際に瑞浪超深地層研究所に設置した観測システムの詳細と、環境モニタリングの結果を用いて実証した観測システムの有効性について示すものである。



図1-1 瑞浪超深地層研究所の位置



(土地賃貸借契約の終了 (2022年1月16日) までに坑道の埋め戻しおよび地上施設の撤去を終えた。)

図 1-2 瑞浪超深地層研究所のレイアウト

2. 目的

従来の水圧・水質観測では、坑道内において掘削したボーリング孔内をパッカーによって区切り、各区分から坑道に設置したモニタリング装置（以下、坑内観測装置）までチューブを配置して接続し、作業員が坑道に入坑して水圧データの回収や採水を行ってきた。しかし、坑道の埋め戻し後は作業員が入坑し作業を行うことができないことから、本研究では既に坑道内に設置されている観測システムを活用しつつ、地上から目的とする深度の地下水の水圧測定と採水が可能な総合的な観測システムを開発して新たな観測網を整備し、システムの有効性を実証研究として確認することを目的とした（図 2-1）。以下、各項目の確認事項を示す。

水圧観測については、ボーリング孔内の観測区間の水圧を光ファイバー水圧計により計測し、これらのデータを主立坑に沿って敷設した光ファイバーケーブルを通じて転送し、地上に設置するデータ収録装置（データロガー）で水圧データを記録する。これらの水圧観測システムの整備により、地上から地下深部の水圧データを取得できることを実証する。

地下水の採水については、換気立坑に沿って採水用の配管を設置し、ボーリング孔からのチューブをその配管に接続する。配管中に採水ボトルを降下させ、チューブからの地下水を直接採取した後、採水ボトルを地上に引き上げ回収する。これらの水質観測システムの整備により、地上から坑道に設置したボーリング孔内の観測区間の地下水を、地下深部の状態を保ったまま（被圧・不活性状態）で採取できることを実証する。

本稿では、これらの観測システムの総称を「地上化観測システム」と呼称する。また、地上化観測システムのうち、とくに水圧観測機能のことを指す場合は「地上化システム（水圧）」、採水機能のことを指す場合は「地上化システム（採水）」を用いる。

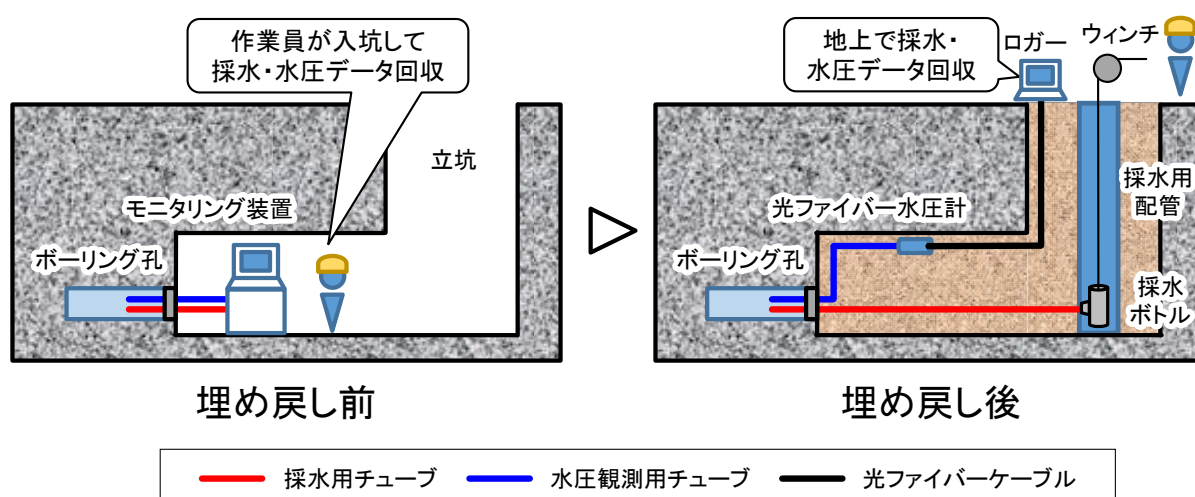


図 2-1 埋め戻し前後の観測システムの概略図

3. 地上化の考え方

3.1 地上化作業における制約

2019年度までに、瑞浪超深地層研究所の坑道から掘削したボーリング孔（以下、坑内ボーリング孔）にパッカーを設置して観測区間を設け、坑道に設置した坑内観測装置を用いて地下水の水圧・水質観測を実施してきた（図3-1）。これにより、坑道の掘削段階や操業・維持管理段階における坑道周辺の地下水環境の変化を把握してきた^{4,5)}。坑道の埋め戻しによる周辺環境への影響をモニタリングするうえでは、これらのデータがその基礎データとなるため、従来の観測区間を引き続きモニタリングすることが望ましいと考えられた。

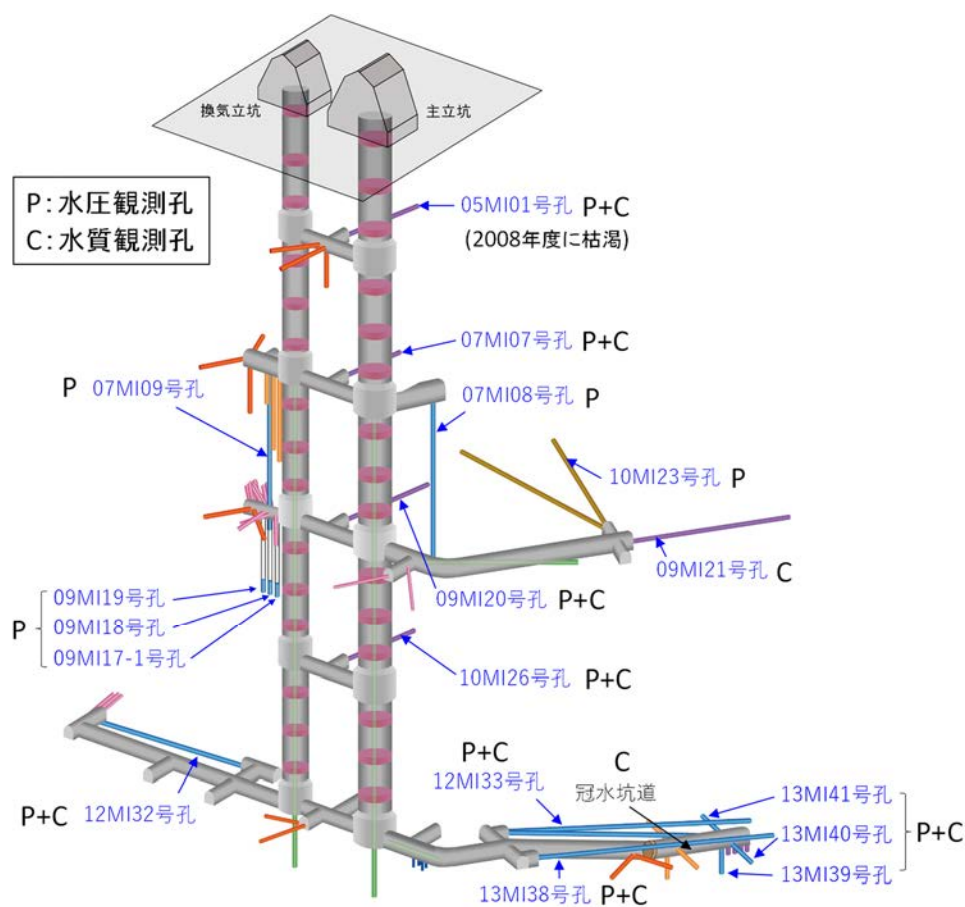


図 3-1 従来の坑内観測装置を用いた水圧・水質観測の主な対象孔

作業工程に着目すると、地上化観測システムの整備は坑道の埋め戻し作業と並行して行う必要があるため、埋め戻し作業の工程に合わせた設置計画を立案した。また、埋め戻し作業や坑道内の設備の撤去作業に重機を用いる予定であったため、これらの作業による機器の損傷を避けるために、坑道内に残置する観測システムはできるだけ小スペースに収める必要があると考えられた。

埋め戻し後の地下水環境を想定すると、坑道周辺の地下水水圧が掘削前の状態に回復し、深度

500m では最大で約 4.5MPa まで上昇すると想定された。また、坑道壁面に施工された吹付けコンクリートは、埋め戻し作業上の安全を踏まえて残置することとされているため、坑道内の地下水は吹付けコンクリートと反応してアルカリ性に変化する可能性があると考えられた。このため、坑道内に残置する観測システムは、回復した地下水圧に対する耐圧性と、アルカリ性の地下水に対する耐化学性を有する必要があると考えられた。

また、埋め戻し後は坑道内にはアクセスできないため、システムのメンテナンスが不可能となる。埋め戻しの開始から環境モニタリングの終了までは約 8 年と計画されていること³⁾から、この間においてメンテナンスが不要な観測システムを設置する必要がある。

なお、瑞浪超深地層研究所では地下水の塩濃度が海水の 1/100 程度と高くないことや、地温が最も高いと想定される深度 500m であっても約 30°C で、坑道埋め戻し前の観測条件と大きく変わらないことから、これらについてはシステム選定上における検討項目としなかった。

以上の制約を踏まえ、坑道内に残置する地上化観測システムは、これまで観測対象としてきた坑内ボーリング孔でのデータを取得可能で、耐圧性・耐化学性を有し、できるだけメンテナンスフリーかつシンプルな構造であることが望ましいと考えられた。また、従来の水圧・水質観測では、主にボーリング孔内をパッカーで区切って最大 6 つの観測区間を設けるマルチパッカー式の観測を行っていたが、全ての観測区間を対象としてモニタリングを継続する場合、坑道内に残置する観測システムの規模が大きくなるため、地上化観測システムに移行する観測区間数を減らす必要があると考えられた。

3.2 従来の坑内観測装置を用いた観測方法

従来の方法で観測していた坑内ボーリング孔では、シングルパッカー式とマルチパッカー式の 2 つの方法で観測区間を設定していた⁶⁾ (図 3-2)。深度 300m 研究坑道内において掘削した 07MI07-1 号孔、07MI08 号孔および 07MI19 号孔はシングルパッカー式を採用しており、ボーリング孔内に遮水パッカーを設置し、パッカーから口元までをコンクリートで充填することで観測区間を設定した。この 3 孔を除いたボーリング孔ではマルチパッカー式が採用されている。すなわち、ボーリング孔内を複数の遮水パッカーで区切って観測区間を設け、各区間から坑道までチューブを延長し、坑道内に設置したモニタリング装置に取り付けた水圧センサーで水圧を観測する方法である。また、水質分析に供する地下水の採水は、全てマルチパッカー式のボーリング孔が対象とされている。これらボーリング孔における採水は、ステンレス製サンプラーボトルを地下水採水チューブに接続し、地下水をオーバーフローさせながらボトルの上下にあるバルブを閉じることで、地下水を被圧・嫌気状態に保った状態で行われてきた。

これまでの坑内ボーリング孔における水圧、水質観測結果については、原子力機構の研究開発報告書類を参照されたい^{6,7)}。

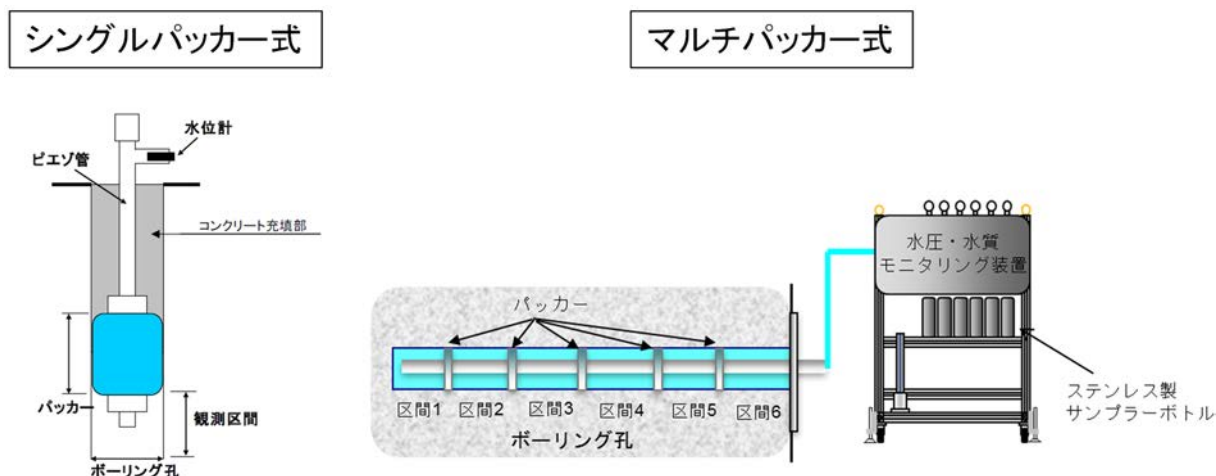


図 3-2 パッカーを用いた坑内観測装置の概念図

3.3 地上化観測システムに用いる観測方法の選定

これまで観測してきた坑内ボーリング孔のデータを地上から取得するためには、ボーリング孔内に設置してあるパッカーや水圧観測チューブ、地下水採水チューブをそのまま活用する方法が最も効率的であると考えられた。そこで、坑内ボーリング孔の内部に設置したパッカーや水圧観測チューブ、地下水採水チューブは埋め戻し後も活用することを前提に、地上化観測システムの観測方法を検討した。

最もシンプルな観測方法として、水圧観測や地下水採水のための耐圧チューブをそのまま地上まで延長し、耐圧チューブ内で水圧観測やポンプや採水ボトルで地下水を汲み上げ採水するピエゾ管式の観測方法がある。この方式は、水圧観測と地下水採水を1本のチューブで共用できるシンプルな構造であるものの、1つの観測区間に対し1本のチューブが必要となる。また、水圧観測や地下水採水を行うためには、水圧計やポンプ等が挿入可能なチューブ径が必要となる。そのため、観測区間が多くなるほど、観測システムの占有スペースが大きくなる。しかし、前述のとおり坑道の埋め戻し作業による観測システムの損傷を避けるため、観測システムは小さなスペースに収める必要があり、かつ、チューブを延長する距離は可能な限り短くあるべきであると考えられた。また、水圧観測、地下水採水を同一の観測システムで実施した場合には、観測システムで不具合が生じた際、水圧観測、地下水採水とも実施できなくなる可能性も考えられた。これらのことから、ピエゾ管方式の観測方法は採用せず、地上化システム（水圧）と地上化システム（採水）で別々の観測システムを構築することとした。

地上化システム（水圧）は、光ファイバー水圧計をボーリング孔の口元に設置し、水平坑道から立坑を通じて地上部に至る経路には光ファイバーケーブルを敷設することとした。光ファイバー水圧計は、水圧計測部に地下水を引き込み、地下水圧の変化を光信号に変換して送信する水圧測定方法であり、送信に使用する光ケーブルは海底ケーブル等に一般的に用いられているほか、幌延深地層研究センターでの原位置試験においても使用実績がある⁸⁾。光ファイバー水圧計をボーリング孔の口元に設置することで、坑道内に敷設するチューブの長さを最小限に抑えることができ、また、複数の光ファイバーケーブルを束ねた複合ケーブルとすることで、敷設および埋め戻しの作業時に取り回しの煩雑さを低減し、かつ、坑道内に敷設した際の占有

スペースを最小化できると考えられた。

地上化システム（採水）では、地上から掘削したボーリング孔で使用する MP システムで用いられている地下水観測用の配管の採水ポートを改良し、立坑壁面に設置することとした。ボーリング孔の各観測区間と接続した耐圧チューブを、ボーリング孔から水平坑道を通して立坑まで延長し、立坑に設置した配管の採水ポートへ接続する。地下水の採水時には、採水用プローブと採水用ボトルを配管内に降下させ、目的とする深度の採水ポートと接続してポートを開閉することで地下水を採水用ボトルへ通水する。この方法により、坑道内に敷設するチューブの長さを最小限に抑えることができる。

3.4 観測区間の選定とレイアウト検討

従来の観測システムから地上化観測システムに移行する観測区間は、これまでの観測結果に基づき、埋め戻し中から埋め戻し後にかけての水圧変化、水質変化それぞれの観点から、データを取得すべき区間を選定した。区間選定に際しては、坑道内に残置する観測システムのスペースをできるだけ小さくすることも考慮した。

水圧については、坑道周辺の水圧が排水の影響を受けて全体的に低下しており、かつ坑道からの距離が近い観測区間ほど水圧の低下が大きい。また、埋め戻し中から埋め戻し後については、立坑内への地下水流入状況により深度によって水圧回復の経時変化が異なることが考えられた。これらのことから、坑道の埋め戻しに伴う環境変化をモニタリングするためには、立坑の直近および遠方の少なくとも2箇所を観測することが望ましいと考えられた。これを受けて、深度 100m～400m 水平坑道に掘削した 05MI01 号孔、07MI07 号孔、09MI20 号孔、10MI26 号孔の坑道から最も離れた区間と坑道に最も近い区間の2区間を水圧観測の対象とした。また、主立坑の位置と重なる高角度傾斜の断層（主立坑断層）が低透水層となり、主立坑断層を境に水圧変化の挙動が異なる（図 3-3）ことから、主立坑断層を境にして両側での水圧観測を継続することが望ましいと考えられた。これを受けて、深度 300m では換気立坑側の 07MI17-1 号孔と 07MI19 号孔および主立坑側の 09MI21 号孔と 10MI23 号孔を、深度 500m では換気立坑側の 12MI32 号孔と主立坑側の 13MI38～41 号孔を水圧観測の対象とした。

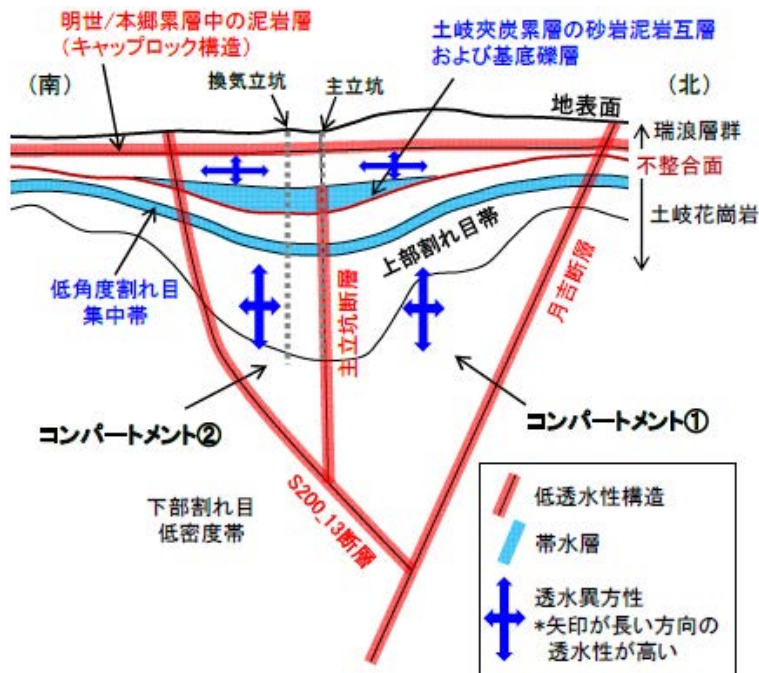


図 3-3 立坑周辺の水理地質構造の概念図⁹⁾

水質については、立坑周辺は地上付近に淡水が、地下深部には相対的に塩濃度が高い塩水（海水の 1/10 程度）が分布しており、主に両者の混合で水質が形成されていることが明らかとなっている¹⁰⁾。また、立坑からの排水の影響を受け、地下 500m では深部の塩水系地下水の混合率が上昇し、深度 300～400m には浅部の淡水が侵入して塩濃度が低下する傾向が認められた⁹⁾。つまり、坑道を埋め戻す前の段階においては、各深度に水質が異なる地下水が分布している。したがって、坑道の埋め戻しによる周辺環境への影響を確認するためには、各深度における水質観測を継続することが肝要であると考えられた。また、水圧観測結果と同様に、坑道直近と岩盤の奥側（坑道から離れた区間）で水質変化の傾向が異なる坑内ボーリング孔もあった。これらのことを受け、採水区間は深度 100m～400m 水平坑道に掘削した 05MI01 号孔、07MI07 号孔、09MI20 号孔、10MI26 号孔の坑道から最も離れた区間と坑道に最も近い区間および両者の中間に位置する区間の 3 区間と設定した。また、水圧観測と同じく、主立坑断層を境にした水質変化の過程に違いが生じる可能性があるとして想定されたため、換気立坑側と主立坑側にそれぞれ観測区間を設けることとした。すなわち、深度 300m では主立坑側の 09MI21 号孔を、深度 500m では換気立坑側の 12MI32 号孔と主立坑側の 12MI33 号孔を観測対象とした。また、埋め戻しに伴い立坑内を地下水が流動する可能性があると考えられたことから、立坑内の深度 100m ごとに新規の採水地点を設置した。さらに、深度 500m には、立坑を掘削した際に生じたウラン含有残土（土岐夾炭層に該当）を埋設する計画であったため¹¹⁾、深度 500m の水平坑道内にも複数の採水地点を設置した。立坑と深度 500m 水平坑道に新たに設置した採水地点については、片端をフィルター材で保護した採水チューブを直接埋め戻し面に埋設し、地上化システム（採水）の採水ポートと接続した。新たに設置した採水地点での採水チューブの設置方法の詳細については、4.2 節で述べる。

以上の検討結果に基づく地上化観測システムへ移行する観測区間および新たに設置した観測点を図 3-4 および表 3-1 に示す。

なお、シングルパッカー式の 09MI17-1 号孔および 09MI19 号孔を除き、マルチパッカー式のボーリング孔の観測区間番号について、基本的には最も孔底にある観測区間を区間 1 と設定した（図 3-2 参照）が、09MI21 号孔だけは逆で、最も孔口にある観測区間を区間 1 として設定してある。



図 3-4 地上化観測システムの配置図

表 3-1 地上化観測システムを用いた観測対象区間および採水区間

| 深度 (GL) | 観測地点 | 孔の向き | 区間No. | 観測区間 (mabh*) | 計測項目 | |
|-----------|-------------------|-------|-------|------------------|------|----|
| | | | | | 水圧 | 採水 |
| -100m | 05MI01 | 水平 | 1 | 64.8~69.4 | ○ | ○ |
| | | | 3 | 72.7~74.6 | - | ○ |
| | | | 5 | 82.8~101.2 | ○ | ○ |
| | 100m水平坑道 (換気立坑付近) | | - | - | - | ○ |
| -200m | 07MI07 | 水平 | 1 | 48.1~55.3 | ○ | ○ |
| | | | 3 | 31.3~37.8 | - | ○ |
| | | | 6 | 0.0~16.0 | ○ | ○ |
| | 09MI17-1 | 鉛直下向き | 1 | 346.6~352.6 (GL) | ○ | - |
| | 09MI19 | 鉛直下向き | 1 | 346.6~352.6 (GL) | ○ | - |
| | 200m水平坑道 (換気立坑付近) | | - | - | - | ○ |
| -300m | 09MI20 | 水平 | 1 | 96.1~101.9 | ○ | ○ |
| | | | 3 | 58.7~83.8 | - | ○ |
| | | | 6 | 0.0~18.5 | ○ | ○ |
| | 09MI21 | 水平 | 1 | 0.0~66.1 | ○ | ○ |
| | | | 3 | 78.1~88.1 | - | ○ |
| | | | 4 | 89.0~103.0 | ○ | ○ |
| | 10MI23 | 水平 | 1 | 74.9~109.7 | ○ | - |
| | | | 3 | 40.0~50.7 | ○ | - |
| | | | 5 | 0.0~16.8 | ○ | - |
| | 300m水平坑道 (換気立坑付近) | | - | - | - | ○ |
| -400m | 10MI26 | 水平 | 1 | 52.8~70.6 | ○ | ○ |
| | | | 3 | 37.9~49.6 | - | ○ |
| | | | 6 | 0.0~9.0 | ○ | ○ |
| | 400m水平坑道 (換気立坑付近) | | - | - | - | ○ |
| -500m | 12MI32 | 水平 | 1 | 87.6~106.4 | ○ | - |
| | | | 2 | 7.0~86.6 | ○ | ○ |
| | | | 3 | 0.0~6.0 | ○ | - |
| | 12MI33 | 水平 | 1 | 105.4~107.0 | ○ | - |
| | | | 2 | 85.7~104.5 | ○ | ○ |
| | | | 3 | 64.0~84.8 | ○ | - |
| | | | 4 | 53.8~63.1 | ○ | - |
| | | | 5 | 44.1~52.9 | ○ | - |
| | 13MI39 | 鉛直下向き | 1 | 12.2~16.2 | ○ | - |
| | 13MI40 | 水平 | 1 | 14.3~16.3 | ○ | - |
| | 13MI41 | 水平 | 1 | 14.8~16.3 | ○ | - |
| | 冠水坑道 | | 4 | - | - | ○ |
| | 500m水平坑道 (換気立坑付近) | | - | - | - | ○ |
| | 予備ステージ | | - | - | - | ○ |
| 研究アクセス北坑道 | | - | - | - | ○ | |

* meter along bore hole

4. 観測システムの地上化

4.1 水圧観測システムの地上化

3章で述べたとおり、水圧観測システムは、観測区間の水圧を光ファイバー水圧計により計測し、これらのデータを主立坑に沿って敷設した光ファイバーケーブルを通じて転送し、地上に設置するデータ収録装置（データロガー）で水圧データを記録することとした。

光ファイバーケーブルは主立坑に沿って鉛直に配置し、主立坑より北側の 09MI21 号孔、10MI23 号孔、13MI38～41 号孔で 1 系統、主立坑より南側の 05MI01 号孔、07MI07 号孔、09MI17-1 号孔、09MI19 号孔、09MI20 号孔、10MI26 号孔、12MI32 号孔で 1 系統の、合計 2 系統で敷設した（図 4-1）。このような配置にした理由は、3.3 節で述べたとおり、ケーブル本数が多いと敷設および埋め戻しの作業時に取り回しが煩雑になることに加え、埋め戻し時に切断される懸念が高まるため、ケーブル本数を可能な限り少なくなるようにしたものである。

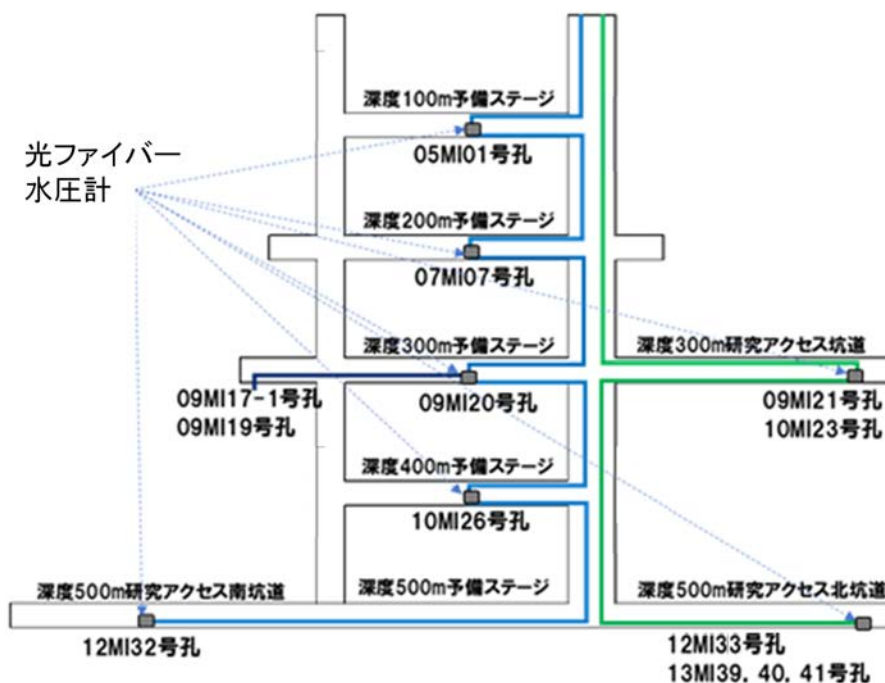


図4-1 地上化システム（水圧）の配置の概念図

光ファイバー水圧計測システムに用いた機器は、表 4-1 に示すとおりである。光ファイバー水圧計の接続手順の概要を図 4-2 に示す。坑内ボーリング孔の各観測区間から従来の孔内観測装置に接続されていた水圧観測チューブを分岐させて延長し、光ファイバー水圧計に接続した。光ファイバー水圧計は、坑道内に敷設した光ファイバーケーブルと融着接続し（図 4-3(a)）、耐圧性能 5MPa のクロージャボックス（防護用のステンレス製の囲い）で保護した（図 4-3(b)）。坑道内は非常に湿度が高い環境（90～100%）であったため、光ファイバーケーブルの接続時に 2m×2m 程度のテントで作業空間を仮囲いし、除湿器を用いて湿度を低下させたテント内で融着作業を行った。全ての光ファイバー水圧計と光ファイバーケーブルの接続作業が終了した後、

既往の坑内観測装置と光ファイバー水圧計を併用することで両者の観測値を比較し、光ファイバー水圧計を用いた水圧が既往の坑内観測装置の観測結果とおおむね一致することを確認した。既往の坑内観測装置と光ファイバー水圧計を併用した水圧観測結果の確認後、観測区間と従来の坑内観測装置を接続する水圧観測チューブを切り離し、観測区間から光ファイバー水圧計まで延長した水圧観測チューブおよび坑道壁面に設置した光ファイバーケーブルは、全てポリエチレン製のフレキシブル管で養生した。また、クロージャボックス内の水密性を確保するため、クロージャボックス内をレジンで充填した。

なお、従来の坑内観測装置から切り離した水圧観測チューブ（地上化システム（水圧）に移行しなかった区間から延長したチューブ含む）は、坑内観測装置から切り離した際に先端部に止水プラグを取り付けた。

光ファイバー水圧計と接続された光ファイバーケーブルは、ポリエチレン製のフレキシブル管で養生した上で立坑に沿って地上まで敷設し、地上でデータ収録装置（光信号変換器およびデータ収録用 PC）と接続した。

表 4-1 光ファイバーケーブルと光ファイバー水圧計の仕様

(光ファイバーケーブル)

| 項目 | | 仕様 |
|---------|-------|----------------------------|
| 型式 | | M(32/36)24GI-WAFR |
| 光ファイバー線 | 種類 | 石英系G型 |
| | 芯線数 | 24本 |
| | コア径 | 50 ± 3 μm |
| | クアッド径 | 125 ± 2 μm |
| | 被覆材質 | UV硬化型樹脂 |
| | 被覆外径 | 250 ± 15 μm |
| ステンレス管 | 材料 | SUS 304 または SUS316 |
| | 厚さ | 0.2 mm |
| | 標準外径 | 3.6 ± 0.005 mm |
| 内部シース | 材料 | ポリエチレン |
| | 標準外径 | 5.0 mm |
| 外装 | 材料 | 硬鋼線 |
| | 標準線径 | 0.8 mm |
| 防食シース | 材料 | ポリエチレン |
| | 色 | 黒 |
| | 厚さ | 2.0 mm |
| | 標準外径 | 11 mm |
| 概算質量 | | 200 kg / 1000 m |
| 制作数量 | | 1,100m × 1本 1,200m × 1本 |

(光ファイバー水圧計)

| 項目 | 仕様 |
|--------|------------|
| 測定方法 | ファブリペロー方式 |
| 計測レンジ | 0~6 MPa |
| 分解能 | 0.00625%FS |
| 精度 | 0.25 FS |
| 作動温度範囲 | -20~60°C |

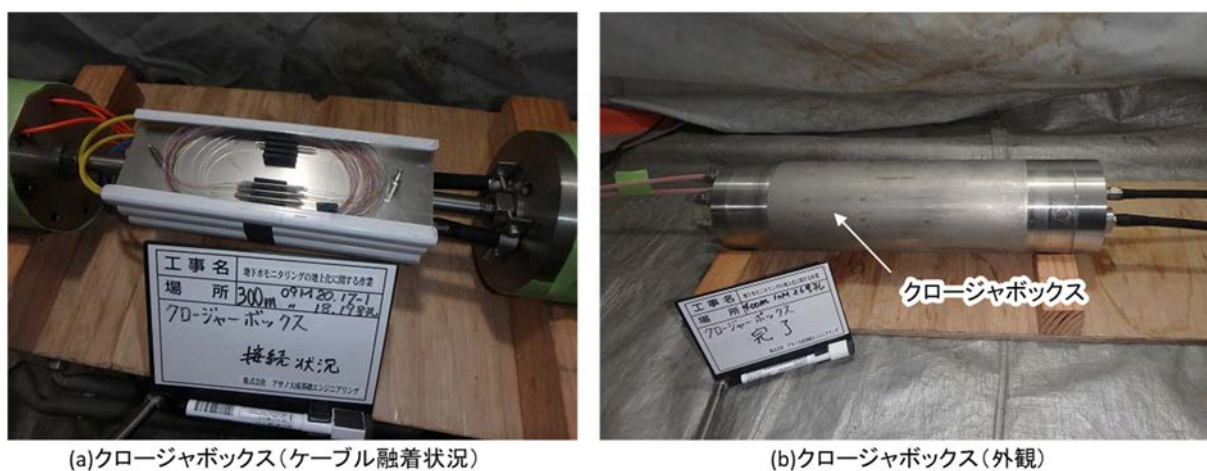
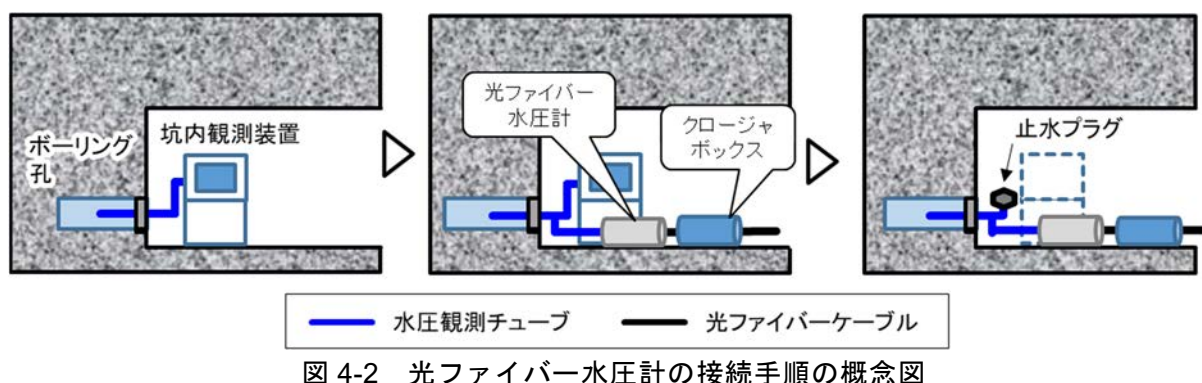


図4-3 光ファイバー水圧計の接続作業

光ファイバーケーブルの敷設とデータ収録装置の設置作業は、坑道の埋め戻しに先立って実施しており、2019年3月には、光ファイバー水圧計と主立坑の地上施設内に設置したデータ収録装置を接続して水圧観測を開始した。そのため、坑道の埋め戻し前に、従来の坑内観測装置と光ファイバー水圧計の両方で水圧観測を行い、両者の観測結果を比較した。

2019年11月には、従来の坑内観測装置を用いた観測を終了したため、従来の孔内観測装置に接続されていた水圧観測チューブを坑内観測装置から切り離し、その先端に止水プラグを取り付けた。

埋め戻し作業が地上部に近づく段階では、地上部の埋め戻し作業や建屋の解体作業による光ファイバーケーブルやデータ収録装置の損傷を避けるため、観測を停止し、光ファイバーケーブルとデータ収録装置を一時的に切り離した。地上部における埋め戻し作業が終了するまでの間、データ収録装置は別の建屋で保管し、光ファイバーケーブルは、フレキシブル管に加えて、塩ビ管やステンレス管で養生した(図4-4)。主立坑を地上まで埋め戻した後は、データ収録用機器を地上建屋内に収納し、連続観測を再開した。



図 4-4 光ファイバケーブルの坑道内の配置と埋め戻し後の風景

4.2 採水システムの地上化

2章で述べたとおり、地下水の採水は、換気立坑に沿って採水用の配管（ケーシング）を設置して、その配管に観測区間から延長したチューブを接続し、配管中を降下させた採水ボトルにチューブからの地下水を直接採取した後、採水ボトルを地上に引き上げ回収する方法とした（図 4-5）。

採水用配管の構造と考え方は沖原ほか（2020）¹²⁾に詳述してあるため、本稿では概要を記す。採水用配管として求められる要件としては、(1) 埋め戻し作業の妨げにならない、(2) 狭溢な場所に設置できる、(3) 十分な強度を有する、(4) 止水性・耐圧性を有する、(5) 長期間の観測が可能である点が挙げられる。これらの要件を満たす配管として、Westbay Instruments 社製の MP システムの配管を利用して採水ポートを増設した。MP システムは、ボーリング孔内に複数のパッカーを備えた配管（ケーシング）を設置することにより、深度別の水圧計測と地下水サンプリングが可能なシステムであり、瑞浪超深地層研究所の調査ボーリングにおいて多数の実績を有する。

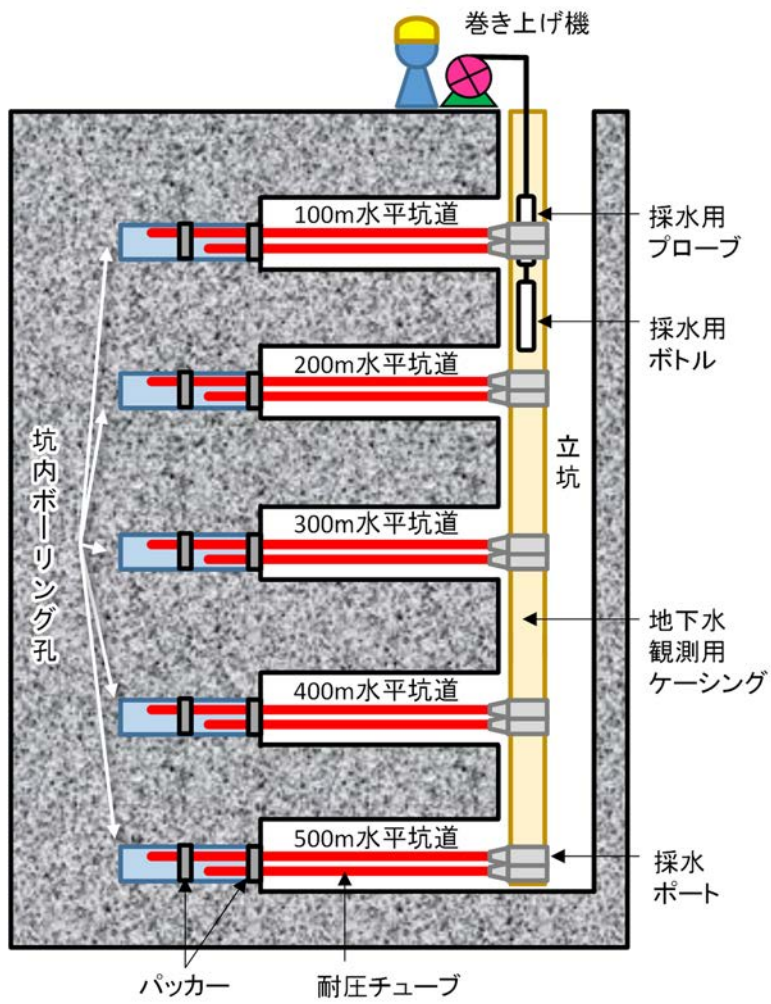


図4-5 地上化システム（採水）の概念図

採水方法は、プローブとボトルを連結して採水ポートから採水するボトル採水（バッチ式採水）方式を採用した（図 4-6）。この方法は、地下水の水圧を保持したまま採水可能で、ボトル 1 本につき最大 1L の採水が可能である。ボトルは連結可能な構造であり、1 回の採水操作につき 1L（ボトル 1 本）または 2L（ボトル 2 本の連結）の採水が可能である。また、採水用プローブには水圧計が備えられており、採水時の区間水圧を計測可能であることから、採水時に対象区間の地下水を被圧状態で採水できていることが確認できる。

また、観測区間から水平坑道を経て採水用配管に至るまでチューブを延長する。延長する採水チューブの内径は、目詰まり防止の観点では大きい方が望ましいものの、埋め戻し作業等による観測システムの損傷を避けるためにはできるだけ小さくすべきであった。この 2 点を加味した結果、使用する耐圧チューブのサイズを外径 4 mm×内径 3 mm とした。ただし、採水に際してはこのチューブの体積（デッドボリューム）の地下水を予備排水する必要がある。工事図面を用いて観測区間から立坑までの距離を概算し、採水チューブ（内径 3mm）のデッドボリュームを計算した結果を表 4-2 に示す。この結果に基づき、全ての採水区間に対して 2 L の地下水を排水することで、デッドボリュームに溜まっていた地下水を排水することとした。

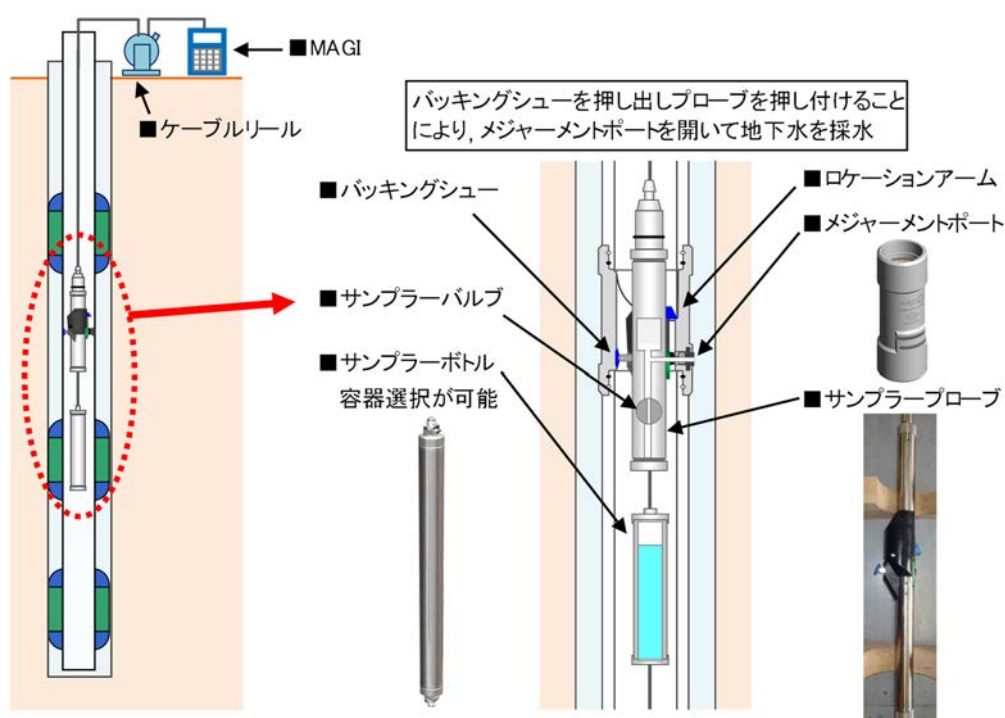


図 4-6 MP システムによる地下水採水（ボトル採水）の概念図

表 4-2 デッドボリュームの計算結果

| 深度 [m] | 観測区間 | 区間圧 [MPa] | 区間流量 [L/min] | 概算距離 [m] | デッドボリューム [L] |
|-----------|-----------|--------------|-----------------|-------------|-----------------|
| 100 | 05MI01 #1 | - | - | 25 | 0.3 |
| | 05MI01 #3 | - | - | 25 | 0.3 |
| | 05MI01 #5 | - | - | 25 | 0.3 |
| | 水平坑道 | - | - | - | - |
| 200 | 07MI07 #1 | 0.5 | 0.8 | 25 | 0.3 |
| | 07MI07 #3 | 0.4 | 0.7 | 25 | 0.3 |
| | 07MI07 #6 | 0.4 | <0.1 | 25 | 0.3 |
| | 水平坑道 | - | - | - | - |
| 300 | 09MI21 #1 | 1.4 | <0.1 | 140 | 1.8 |
| | 09MI21 #3 | 1.8 | 0.2 | 140 | 1.8 |
| | 09MI21 #4 | 1.8 | <0.1 | 140 | 1.8 |
| | 09MI20 #1 | 1.5 | 1.3 | 30 | 0.4 |
| | 09MI20 #3 | 1.5 | 1.4 | 30 | 0.4 |
| | 09MI20 #6 | 0.5 | 0.2 | 30 | 0.4 |
| | 水平坑道 | - | - | - | - |
| 400 | 10MI26 #1 | 2.4 | 0.6 | 30 | 0.4 |
| | 10MI26 #3 | 2.2 | 0.5 | 30 | 0.4 |
| | 10MI26 #6 | <0.1 | <0.1 | 30 | 0.4 |
| | 水平坑道 | - | - | - | - |
| 500 | 12MI32 #2 | 3.3 | 未測定 | 30 | 0.4 |
| | 12MI33 #2 | 1.1 | 0.6 | 110 | 1.4 |
| | 冠水坑道 | - | - | 140 | 1.8 |
| | 12MI38 #5 | 3.3 | 1.3 | 110 | 1.4 |
| | 12MI38 #1 | 2.9 | 1.2 | 110 | 1.4 |
| | 水平坑道 | - | - | - | - |

地上化システム（採水）のうち、観測孔に設置されていた採水用チューブの延長手順の概念図を図 4-7 に示す。観測孔の各観測区間から坑内観測装置に延長してあるチューブを分岐させ、換気立坑まで延長した。延長したチューブは全てポリエチレン製のフレキシブル管で養生し、坑道の側壁・天井や側溝内など、埋め戻し作業時に切断されるおそれが少ない位置に設置した（図 4-8）。

全ての観測区間の延長作業が終了した後、配管（MP ケーシングパイプおよび採水ポート）を換気立坑に設置し、採水ポートに延長したチューブを接続した。使用したケーシングパイプの材質としては、採水ポート部はステンレス製で、それ以外の一般部は塩ビ製である。換気立坑の壁面に設置したケーシングパイプのたわみを防ぐため、ブラケットおよびケーシングバンドを使用してケーシングを壁面に固定し、さらに埋め戻し作業時に切断されないよう防護板で保護した（図 4-9）¹³⁾。

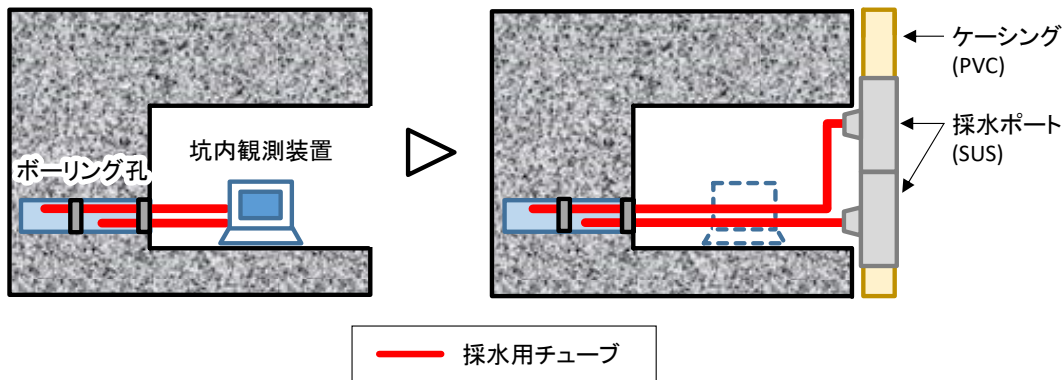


図 4-7 採水用チューブの延長作業の概念図



図 4-8 養生した採水用チューブの設置箇所例



図 4-9 立坑壁面に設置した採水用配管とその固定具

また、埋め戻し後に冠水した坑道内の地下水水質の変化を把握するため、立坑接続部と深度 500m 研究坑道に新たに設置した採水チューブの設置手順を図 4-10 に示す。採水用配管の採水ポートに接続した採水用チューブの先端にろ過孔径 10 μm のフィルター巻き付け、同じくろ過孔径 10 μm のフィルターバッグに入れ、バッグ内に碎石やガラス玉を詰めてからバッグの口を結束バンドで絞った。これと同様に、ろ過孔径 50 μm , 100 μm , 200 μm のフィルターバッグを順番に被せた。養生が完了した採水口は、当該深度に埋め戻しが到達したタイミングで坑底

に置き、その上に土のうを積み上げた。採水ポートから養生した採水口までの間の採水用チューブは、ポリエチレン製のフレキシブル管で養生し、切断されるおそれを低減するため防護板や坑底に固定した。



図 4-10 埋め戻し面に設置した採水口の養生風景

採水ポートの設置深度と観測区間の一覧を図 4-11 に、地上化システム（採水）の配置の概念図を図 4-12 にそれぞれ示す。深度 200m, 300m, 400m の採水ポートは、それぞれの水平坑道の底盤+1m から上方に採水ポートを設置したが、深度 500m は水平坑道の底盤+約 6m から上方に採水ポートを設置した。これは、MP システムの構造上、採水作業時に採水用プローブやボトルを最深部の採水ポートよりも深い位置まで降下させる必要があるため、採水用プローブがケーシングの最下部に衝突して故障することを防ぐためである。また、深度 100m の採水ポートを 100m 水平坑道よりも深い側に設置したのは、埋め戻し工事の工程との兼ね合いで、採水用配管を深度 500m から深度 100m まで取り付けたタイミングで採水機能の動作確認を行ったため、深度 100m の採水ポートの上端が深度 100m 付近になるよう設置したためである。

以上の採水用配管の設置は、以下に示す 3 段階にわたって行った。深度 500m~100m までの設置および採水ポートと各観測区間との接続は、坑道の埋め戻し前に行った。深度 100m から深度 13m までの採水用配管は、埋め戻しが深度 100m までの埋め戻しが終了した後に、坑道の

埋め戻しと同時に設置した。深度 13m から地上部までの採水用配管は、地上部の設備を撤去した後に立ち上げた。

地上化システム（採水）を深度 100m まで設置して最初に採水した 2020 年 1 月には、従来の坑内観測装置を用いた採水が終了していた（坑内観測装置を用いた採水は 2019 年 11 月まで実施）。このため、2020 年 1 月に採水した地下水の分析結果を、従来の坑内観測装置を用いて採水した 2019 年 11 月の分析結果と比較することで、地上化システム（採水）の機能確認を行った。

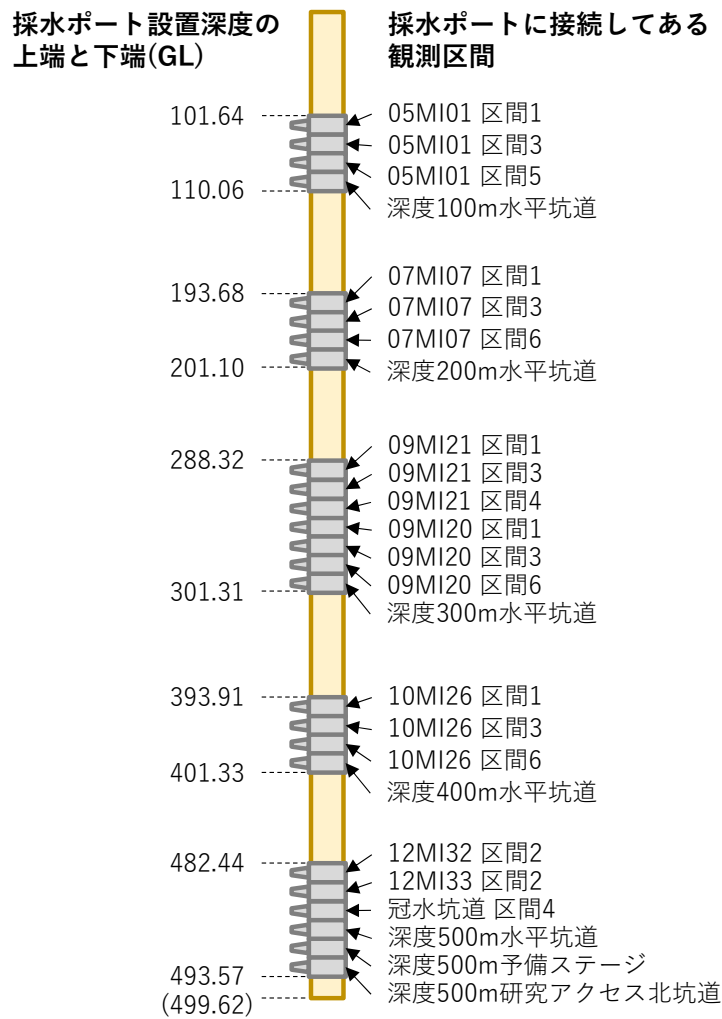


図 4-11 採水ポートの設置深度と採水ポートに接続した観測区間の一覧

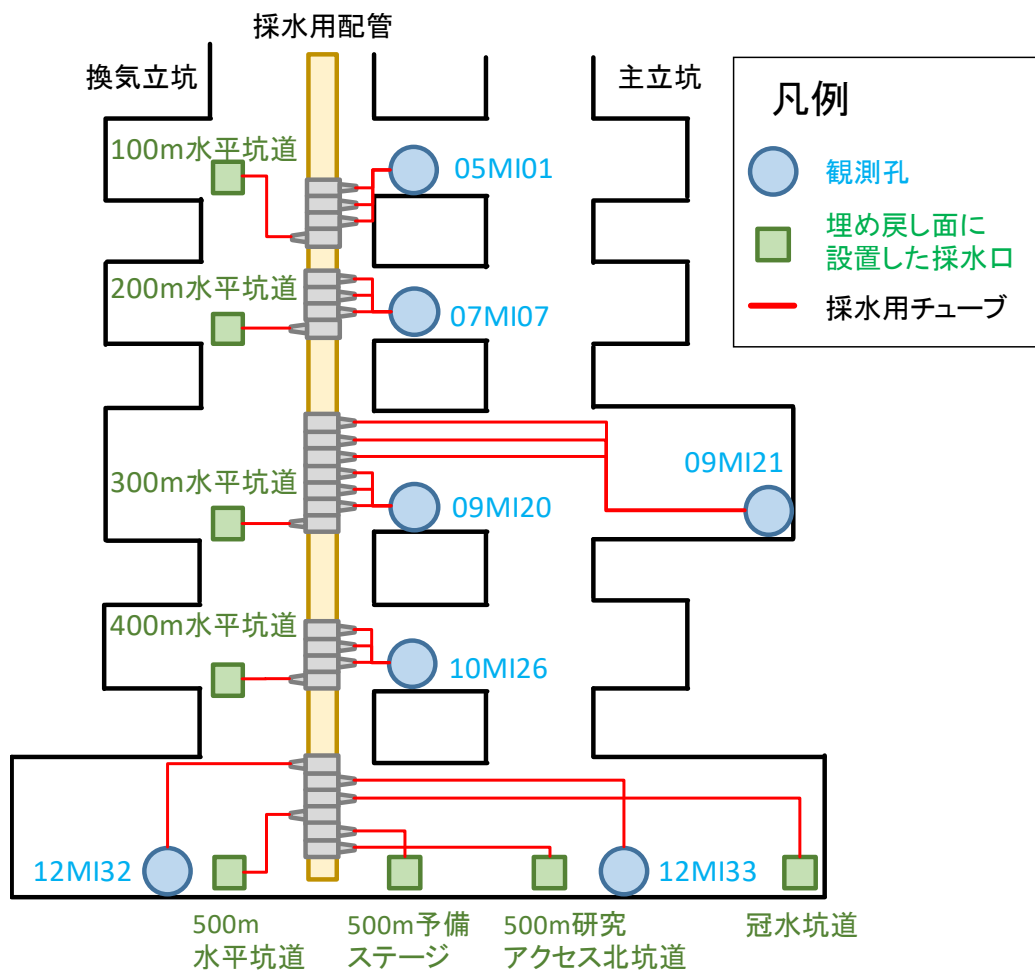


図 4-12 地上化システム（採水）の配置の概念図

4.3 作業工程

地上化観測システムの設置と動作確認は、坑道の埋め戻し作業の工程に合わせて計画・実施された（表 4-3）。坑道の埋め戻し作業が開始されたのは 2020 年 2 月で、主立坑と換気立坑の埋め戻し面がそれぞれ深度 32m と深度 13m に到達した 2021 年 5 月に埋め戻し作業を中断し、地上設備の撤去作業に移行した。その後、2021 年 10 月に埋め戻し作業を再開し、2021 年 12 月には両立坑の埋め戻し面が地上まで到達した。

地上化システム（水圧）は坑道の埋め戻しに先立って設置され、2019 年 4 月から連続観測が開始されたが、2021 年 6 月の地上設備の撤去作業の開始に伴い地上に設置したデータ収録装置を切り離し、観測を中断した。その後、地上施設の撤去と坑道の埋め戻し作業が終了した 2021 年 12 月から観測を再開した。

地上化システム（採水）は、まず深度 500m～100m まで採水用配管を設置して、2019 年 6 月に動作確認を行った。この動作確認では、各観測区間の水圧計測と採水操作は行ったが、採水した地下水の水質は分析していない。その後、深度 100m から 3 回の採水を行い（2020 年 1 月，8 月，10 月），これ以降の地下水についてはその水質も分析した。深度 13m まで配管を延長し（2021 年 4 月），埋め戻し面が深度 13m に到達したタイミングで埋め戻し面から 4 回目の採水

を行った（2021年6月；図4-13）。立坑浅部（深度15m～0m）の設備の撤去作業の終了後に配管を深度13mから0mまで設置し（2021年10月）、5回目の採水は埋め戻しが完了した後に実施した（2022年1月）。

表 4-3 坑道の埋め戻しの進捗と地上化観測システムの設置の時系列

| イベント | | 2019 | | | | 2020 | | | | 2021 | | | | 2022 |
|-----------------|------|-------------|---|---|----|----------|-----|-----|----|----------|---|--------|----|------|
| | | 1 | 4 | 7 | 10 | 1 | 4 | 7 | 10 | 1 | 4 | 7 | 10 | 1 |
| 坑内観測装置による観測 | | (観測継続) 観測終了 | | | | | | | | | | | | |
| 地上化システム (水圧) | 設置 | 設置完了 | | | | | | | | | | | | |
| | 観測 | 連続観測開始 | | | | | | | | 観測中断 | | | | 観測再開 |
| 地上化システム (採水) | 設置 | 500m-100m | | | | | | | | 100m-13m | | 13m-0m | | |
| | 採水 | ▼動作確認 | | | | ▼採水 | 採水▼ | ▼採水 | | ▼採水 | | 採水▼ | | |
| 坑道の 埋め戻し | 主立坑 | | | | | 500m-32m | | | | 地上部撤去 | | 32-0m | | |
| | 換気立坑 | | | | | 500m-13m | | | | 地上部撤去 | | 13-0m | | |



図 4-13 深度 13m における採水作業

5. 地上化観測システムの機能確認

地上化観測システムを用いて取得した水圧・水質モニタリングの結果が妥当であることを確認することで、地上化観測システムの有効性を確認した。

具体的には、坑道の埋め戻し前は、従来の坑内観測装置で取得した観測値との比較を行った。坑道の埋め戻し中～埋め戻し後は、坑道の直近に掘削されている DH-2 号孔（図 5-1）の観測値や、これまでのモニタリングで蓄積された水圧・水質の観測値との比較を行い、整合性を確認した。

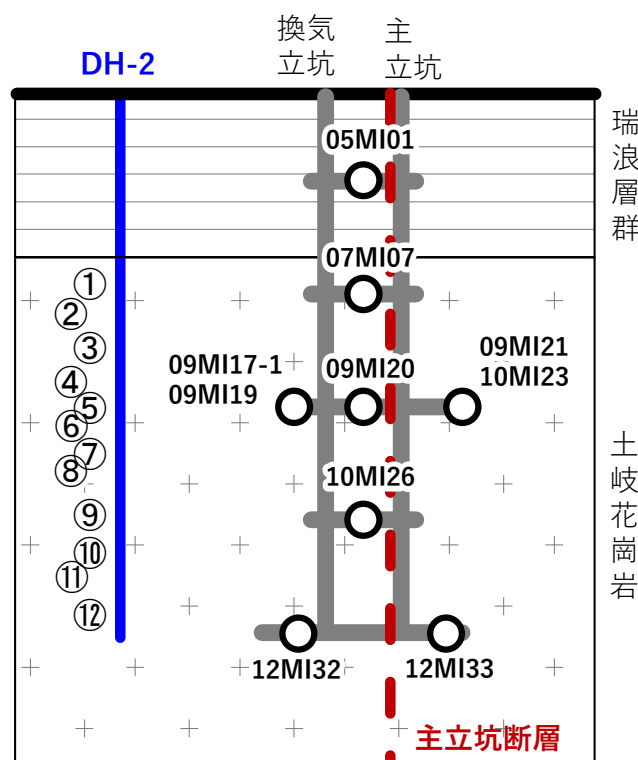


図 5-1 地上化観測システムに接続した坑内ボーリング孔と DH-2 号孔の位置関係

5.1 地上化システム（水圧）の機能確認

5.1.1 坑道埋め戻し前における機能確認

2019 年 11 月までは、従来の坑内観測装置を用いた水圧観測と、光ファイバー水圧計を用いた水圧観測の両方を実施していた。そこで、従来の水圧観測システムと光ファイバー水圧計の水圧観測結果を比較し、光ファイバー水圧計を用いた観測の妥当性を検証した。例として深度 200m から掘削した 07MI07 号孔の比較結果を図 5-2 に示す。光ファイバー水圧計の値は、坑道内の換気による気温にตอบสนองして変化するため、温度計で記録した坑道内の気温を用いて温度補正を行った。

光ファイバー水圧計で観測した水圧の値は、従来の坑内観測装置で観測した水圧値とほぼ同等の値を示しており、採水による一時的な水圧の低下も明瞭に観測できていた。このことから、

光ファイバー水圧計を用いた水圧観測は、従来の坑内観測装置を用いた観測と同等の観測が可能であると判断した。

また、2019年4月～11月の観測では、光ファイバー水圧計を用いた観測時間を1時間間隔に設定した。この結果、観測値が数時間程度の周期で上下する傾向が認められた。値の変動が生じる原因は不明であるが、この変動は観測値と比較して数%程度に収まるため、水圧変化の傾向を把握するうえでは大きな問題にならないと判断した。一方で、仮に観測間隔を半日以上に設定すると、値のブレがある影響で水圧変化の傾向を判断しづらくなるおそれがあったため、埋め戻しを開始した後も観測の間隔は1時間のままとした。

なお、埋め戻し後の坑道内は地下水で満たされ温度が安定することから、光ファイバー水圧計による水圧値の温度補正は必要なくなる。このため、坑道が埋め戻された後の観測値に対しては、温度補正は行っていない。

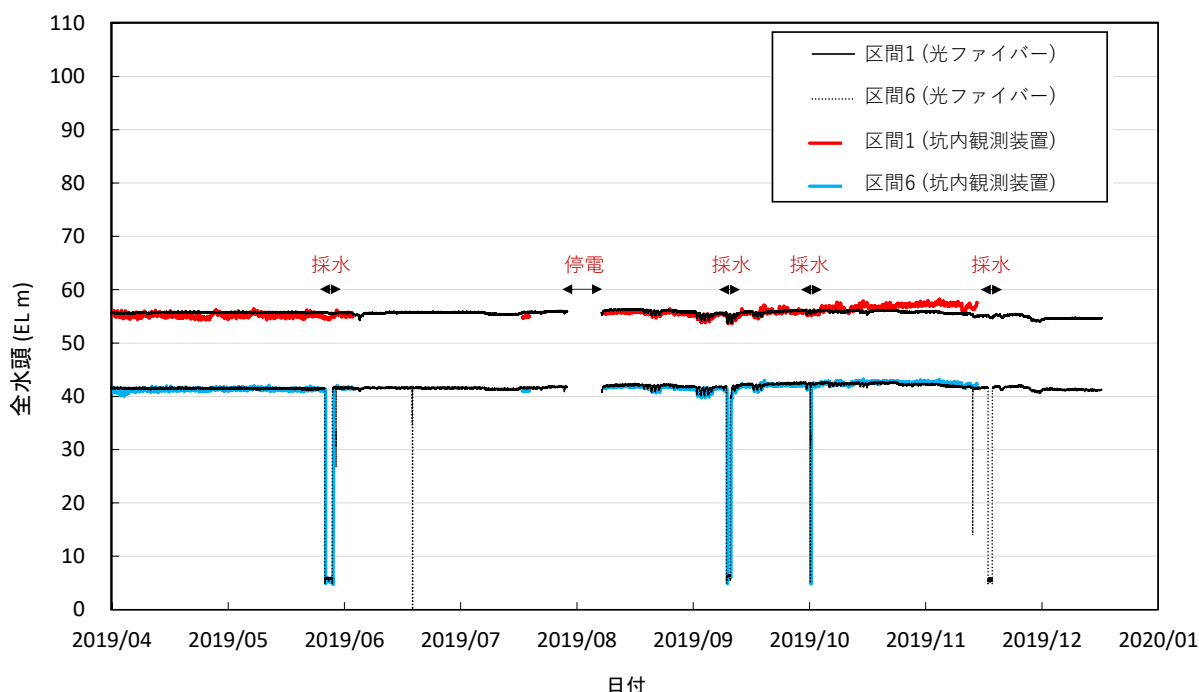


図 5-2 坑内観測装置と光ファイバー水圧計の水圧観測結果の比較（07MI07 号孔）

5.1.2 坑道の埋め戻し中の機能確認

坑道の埋め戻し期間における水圧の観測結果を全水頭に換算したグラフを主立坑および換気立坑の埋め戻し深度とともに図 5-3、図 5-4 に示す。図 5-3 は深度ごとの水圧変化を図示したもので、深度 200m、300m、400m の予備ステージからそれぞれ掘削した 07MI07 号孔、09MI20 号孔、10MI26 号孔の観測結果を掲載した。図 5-4 は、換気立坑の南側に設置され、ほぼ同一深度でかつ換気立坑からの離隔距離が異なる 3 区間の結果を図示したものであり、換気立坑から離隔距離は、09MI17 号孔は約 3m、09MI19 号孔は約 9m、DH-2 号孔は約 85m である。

坑道の掘削前の段階においては、深度 100m～500m における全水頭は標高 150m (GL-55m) 前後であった¹⁴⁾が、坑道からの排水の影響を受けて、全区間の全水頭が標高 50m 前後かそれ以

下に低下していた。各深度の予備ステージにおいて掘削した 07MI07 号孔, 09MI20 号孔, 10MI26 号孔の全水頭のうち, 09MI20 号孔と 10MI26 号孔の坑道に最も近い区間 6 (0~20 mabh) では全水頭の低下が顕著であった (図 5-3)。換気立坑南側の 3 区間の全水頭も, 換気立坑に最も近い 07MI17-1 号孔が最も低い値で推移していた (図 5-4)。

2020 年 1 月に坑道の埋め戻しが始まり, 深度約 400m (標高-200m) まで埋め戻された 2020 年 9 月前後に, 各観測区間の全水頭が上昇を始めた。全水頭の変化 (回復) 幅は, 低下が顕著だった区間であるほど大きい傾向があった。また, 埋め戻し面が各区間で観測される全水頭と同等の深度に到達したタイミング以降は, 観測区間の全水頭が埋め戻し深度の上昇に追従する傾向を示した。これら全ての観測区間は, 坑道の埋め戻し面が深度約 100m (標高 100m) に到達した 2021 年 4 月頃には標高約 110m となり, その後, 観測を一時中断する 2021 年 6 月まで緩やかに上昇を続けた。このような全水頭の変化は, 深度 500m 坑道から順に地下水で満たされて水圧が回復していった過程を捉えたものと考えられる。

以上のように, 地上化システム (水圧) で取得した全ての観測区間の全水頭は, 坑道の埋め戻しの進捗に伴い上昇する傾向を示し, かつ地上からの観測孔である DH-2 号孔の全水頭と同様の傾向を示した。このことから, 地上化システム (水圧) は, 地上から地下深部の水圧データを取得する機能を有していると判断した。

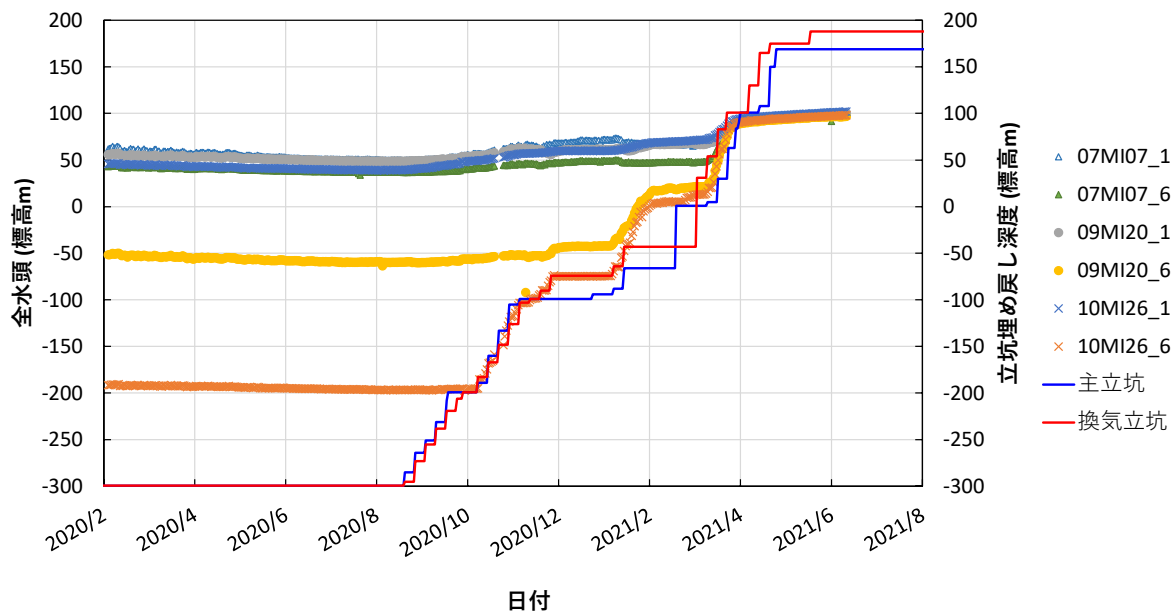


図 5-3 地上化システム (水圧) の観測結果 (07MI07 号孔, 09MI20 号孔, 10MI26 号孔の例)

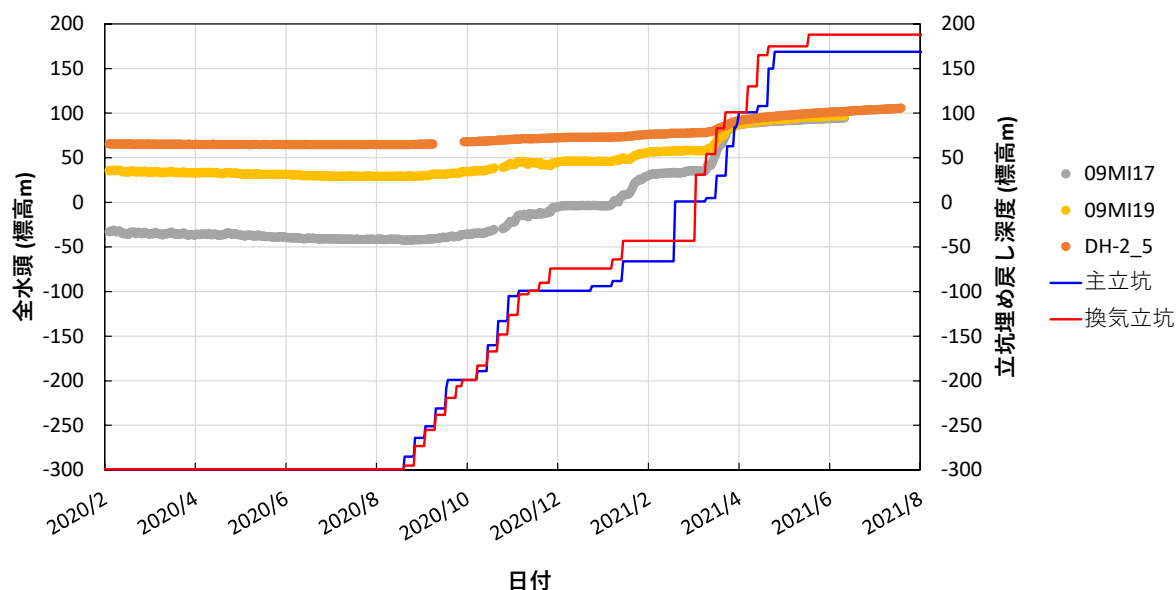


図 5-4 地上化システム（水圧）の観測結果（09MI17 号孔，09MI19 号孔の例）

5.1.3 坑道の埋め戻し後の機能確認

2021 年 6 月～2021 年 12 月の中断を経て，観測を再開後の観測結果を図 5-5 および図 5-6 に示す。5.1.2 で述べたとおり，埋め戻し深度が 100m に到達してから観測を中断するまでの 2021 年 4 月～6 月頃には，全区間の全水頭が標高 90m～100m 前後に収束しつつ，緩やかに上昇する傾向を示していた。約半年の中断期間を経て 2022 年 1 月に観測を再開すると，全区間の全水頭は観測中断前よりも上昇し，標高 100m～110m を示した。坑道の埋め戻し作業中に連続観測を行っていた DH-2 号孔でも同様に，全水頭が継続して上昇する傾向が認められた。

坑道から遠ざかる方向（坑道とほぼ直交する方向）へ水平に掘削した各深度のボーリング孔では，坑道に近い観測区間（07MI07 号孔の区間 6，09MI20 号孔の区間 6，09MI21 号孔の区間 1，10MI23 号孔の区間 5，10MI26 号孔の区間 6）が，坑道遠方の観測区間（09MI21 号孔の区間 4 とそれ以外の各ボーリング孔の区間 1）と比較して埋め戻し前の水圧低下が大きく，埋め戻し後の全水頭も低い傾向がある（図 5-5，図 5-6）。また，深度 300m に掘削した鉛直下向きの 09MI17-1 号孔と 09MI19 号孔も同様に，換気立坑に近い 09MI17-1 号孔の水圧が 09MI19 号孔よりも低い（図 5-5）。さらに，地上化システム（水圧）によって観測された全ての観測区間の全水頭は，DH-2 号孔と同じかそれより低い傾向にある。これらのことから，2022 年 1 月時点においても，全水頭の分布は坑道から外側へ向かって高くなっていると推定される。このような水圧変化の傾向は，カナダの結晶質岩中に建設されたホワイトシェル URL の閉鎖に伴う水圧モニタリングにおいても報告されていることから¹⁵⁾，地上化システム（水圧）により取得された水圧データは，坑道埋め戻しに伴う地下水水圧の変化を観測できていると判断した。

なお，前述のとおり，坑道の掘削前の全水頭は標高約 150m であったことから，坑道周辺の全水頭は今後も緩やかに上昇を続けると想定される。

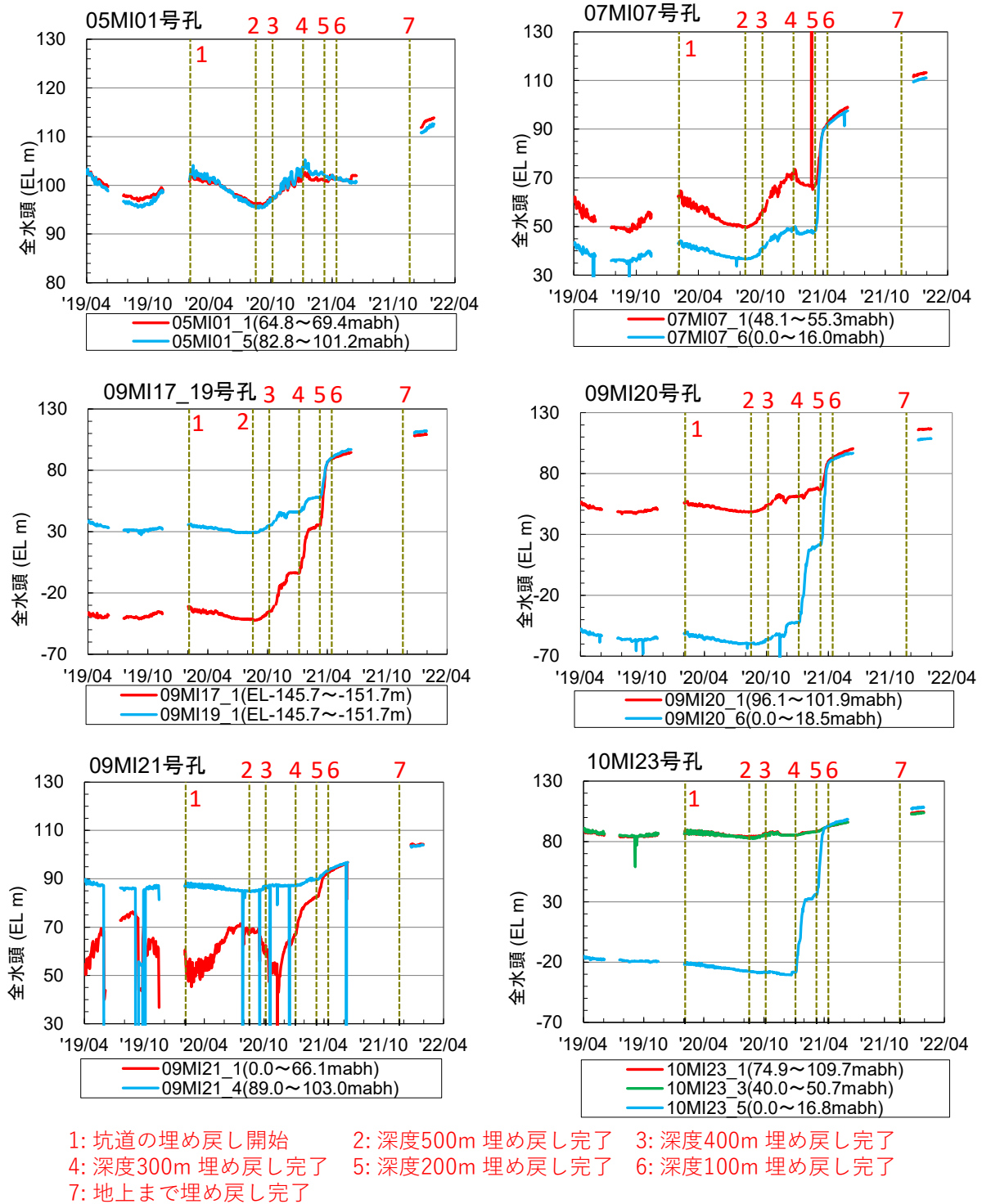


図 5-5 坑道の埋め戻し前後の水圧変化（深度 100m~300m）

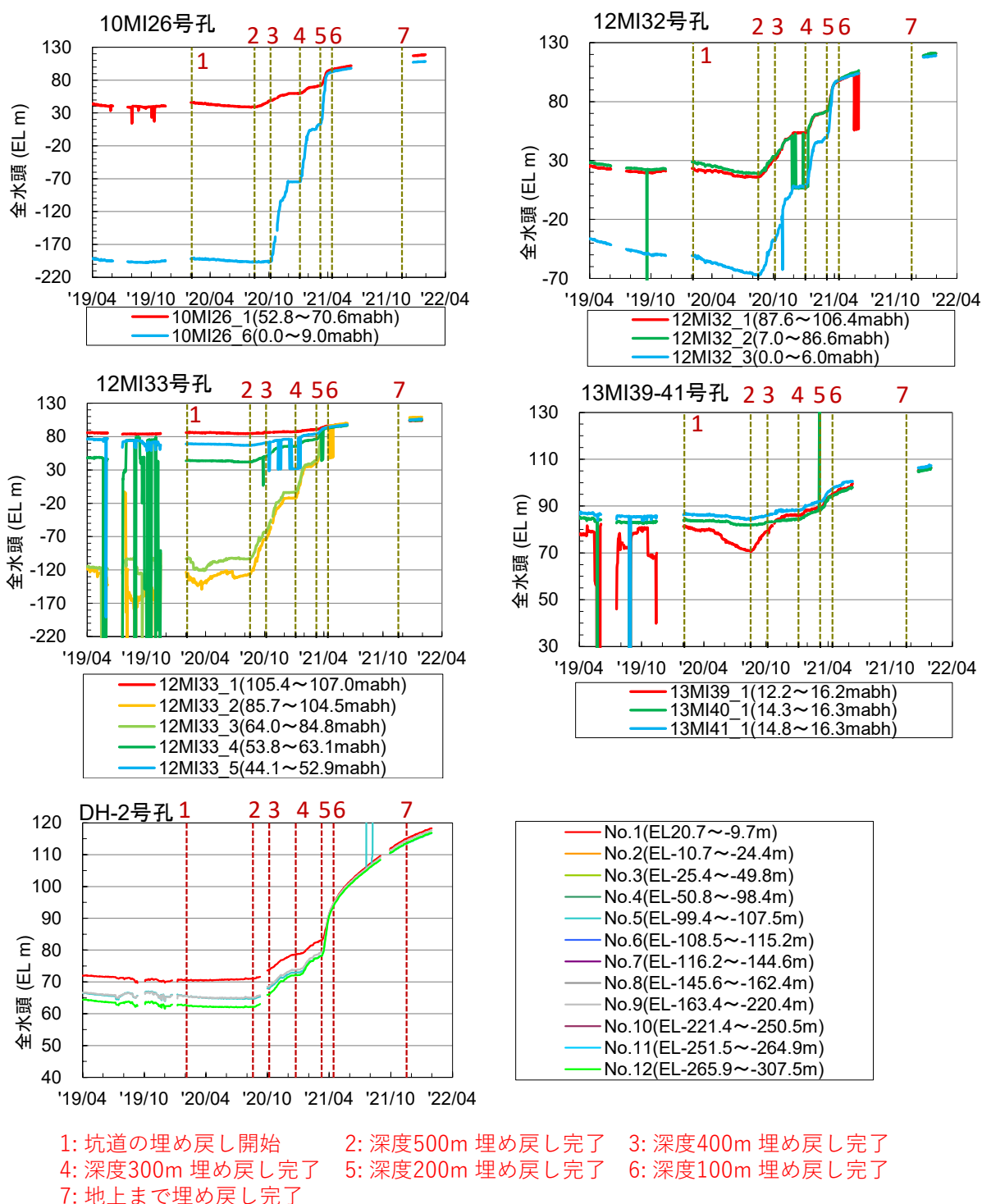


図 5-6 坑道の埋め戻し前後の水圧変化（深度 400m～500m と DH-2 号孔）

5.2 地上化システム（採水）の機能確認

5.2.1 坑道埋め戻し前における機能確認

坑道を埋め戻す前の 2020 年 1 月までに、深度 100m まで設置した地上化システム（採水）を用いた動作確認（2019 年 6 月）と採水作業（2020 年 1 月）を行った。

まず、採水時に対象区間の水圧を保持したまま採水できていることを確認するため、地上化システム（採水）を用いて測定した水圧データを、従来の坑内観測装置および光ファイバー水圧計を用いた観測結果と比較した。地上化システム（採水）を用いた水圧計測は、2019年6月の動作確認時および2020年1月の採水作業時に2回取得したため、両方のデータを確認に用いた。その結果、地上化システム（採水）による水圧が、坑内観測装置および光ファイバー水圧計による水圧とほぼ一致した（表5-1）。このことから、地上化システム（採水）が、原位置の水圧を保持したまま採水する機能を有していると判断した。ただし、10MI26号孔の区間1・区間3では、2019年6月の地上化システム（採水）による水圧が他の観測結果よりも低い値を示した。この原因は不明であるが、同区間の2020年1月における水圧値が他の観測結果と同程度の値を示していたことから、正常な値が取得できると判断した。

次に、地上化システム（採水）を用いて採水した地下水の水質分析を行い、従来の坑内観測装置で採水した地下水の分析結果と比較した。2019年6月の動作確認では、地上化システム（採水）により採水した地下水の水質分析は実施していない。また、坑内における採水作業は2019年11月で終了した。これらのことから、2019年11月に坑内観測装置を用いて採水した地下水の分析結果と、2020年1月に地上化システム（採水）を用いて採水した地下水の分析結果を比較した。一例として、塩化物イオン（Cl⁻）濃度と、アルカリ度から換算した重炭酸イオン（HCO₃⁻）濃度の比較結果を図5-7に示す（全ての分析結果は福田ほか⁷⁾を参照）。12MI32号孔区間2のデータを除き、両者の値は1:1の関係を示す灰色の直線上にプロットされた。このことから、地上化システム（採水）を用いて、従来の坑内観測装置と同じように原位置の地下水を採水できていると判断した。なお、12MI32号孔の区間2の地下水については、坑内観測装置で2019年11月に採水した後に、2020年1月の地上化システム（採水）による採水時に採水ポートの不具合が生じ¹³⁾、区間内の地下水を大量に排水したため、2020年1月の地上化システム（採水）を用いた採水では別の領域から引きこまれた地下水を採水し、結果として水質が乖離した可能性がある。

以上のことから、坑道を埋め戻す前の状態において、深度100mまで立ち上げた地上化システム（採水）を用いることで、水圧を保持した状態で深度500mまでの地下水を採水可能であることを確認した。

表 5-1 地上化システム（採水）と他の水圧観測システムの水圧の比較

| ポート 深度 | 観測区間 | | 2019年6月のキャンペーン | | | | 2020年1月のキャンペーン | | |
|-----------|----------|-----|----------------|-----------|-------------|-----------------|----------------|--------|-------------------|
| | | | 地上化システム（採水） | | 坑内観測 装置* | 光ファイバ - 水圧計* | 地上化システム（採水） | | 光ファイバ - 水圧計*** |
| | | | 設置時* | 2019/6/25 | | | 2020/1/10 | 採水時*** | |
| | | | MPa | MPa | MPa | MPa | MPa | MPa | MPa |
| 100m | 05MI01 | 区間1 | — | — | — | — | — | — | — |
| | | 区間3 | — | — | — | — | — | — | — |
| | | 区間5 | — | — | — | — | — | — | — |
| | 100m水平坑道 | | — | — | — | — | — | — | — |
| 200m | 07MI07 | 区間1 | 0.54 | 0.53 | 0.53 | 0.49 | 0.53 | 0.53 | 0.58 |
| | | 区間3 | 0.52 | 0.52 | 0.44 | — | 0.52 | 0.52 | — |
| | | 区間6 | 0.45 | 0.45 | 0.39 | 0.35 | 0.46 | — | 0.40 |
| | 200m水平坑道 | | — | — | — | — | — | — | — |
| 300m | 09MI20 | 区間1 | 1.51 | 1.51 | 1.49 | 1.46 | 1.51 | 1.51 | 1.50 |
| | | 区間3 | 1.53 | 1.52 | 1.49 | — | 1.52 | 1.52 | — |
| | | 区間6 | 0.54 | 0.55 | 0.47 | 0.44 | 0.51 | 0.51 | 0.44 |
| | 09MI21 | 区間1 | 1.54 | 1.56 | 1.61 | 1.38 | 1.39 | — | 1.49 |
| | | 区間3 | 1.83 | 1.74 | 1.80 | — | 1.82 | 1.82 | — |
| | | 区間4 | 1.83 | 1.75 | 1.81 | 1.81 | 1.82 | — | 1.82 |
| 300m水平坑道 | | — | — | — | — | — | — | — | |
| 400m | 10MI26 | 区間1 | 2.38 | 1.91 | 2.43 | 2.32 | 2.38 | 2.38 | 2.38 |
| | | 区間3 | 2.17 | 1.95 | 2.21 | — | 2.16 | 2.16 | — |
| | | 区間6 | — | — | 0.02 | 0.01 | — | — | 0.01 |
| | 400m水平坑道 | | — | — | — | — | — | — | — |
| 500m | 12MI32 | 区間2 | 3.11 | 3.11 | (欠測) | 3.18 | 3.06 | 3.11 | 3.20 |
| | 12MI33 | 区間2 | 0.25** | 1.40 | 1.41 | 1.50 | 1.60 | 1.62 | 1.69 |
| | 冠水坑道 | | — | — | — | — | — | — | — |
| | 予備ステージ | | — | — | — | — | — | — | — |
| | 研究アクセス坑道 | | — | — | — | — | — | — | — |
| | 500m水平坑道 | | — | — | — | — | — | — | — |

* 地上化システム（採水）の設置日時は、500mが2/15・2/18、400mが3/6、300mが5/9、200mが6/19。

坑内観測装置は6/25の、光ファイバ水圧計は6/3の観測結果（2019年）。

** ポート設置時に採水中だったため水圧が低下。*** 採水は1/14～1/29、光ファイバは1/31の観測結果（2020年）。

 は観測の対象外の、  は観測未実施の区間。

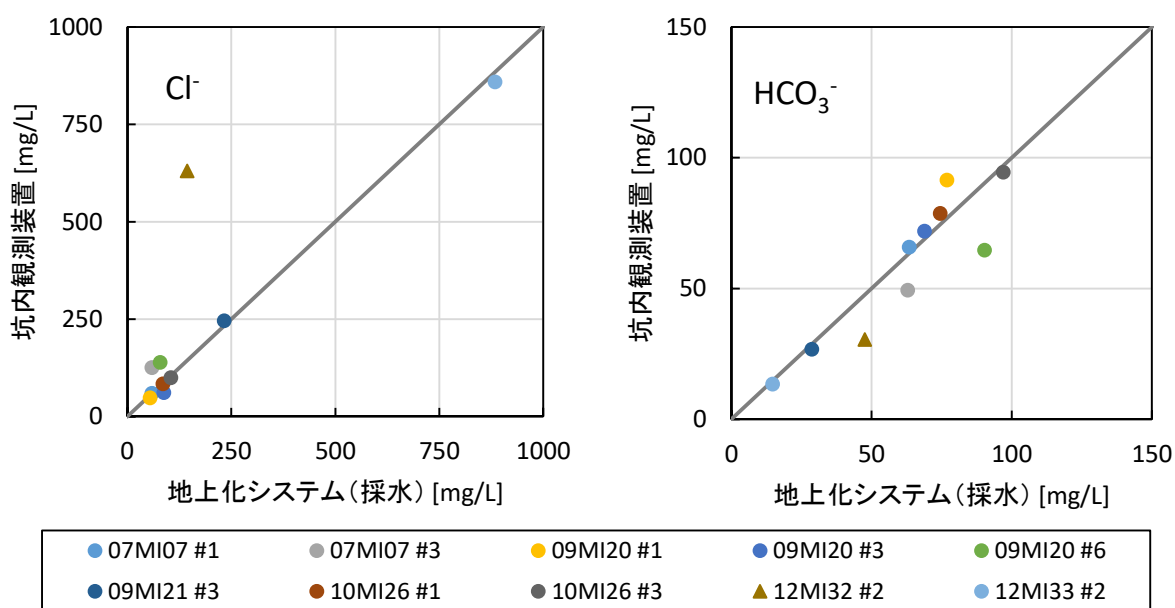


図 5-7 地上化システム（採水）と坑内観測装置で採水した地下水の水質の比較

5.2.2 坑道の埋め戻し中～埋め戻し後の機能確認

坑道の埋め戻し前から、埋め戻しが開始された 2020 年 1 月を経て 2021 年 6 月までに採水した地下水の水質分析結果のうち、一例として塩化物イオン (Cl⁻) 濃度の結果を図 5-8 に示す。本図には、DH-2 号孔の分析結果も併せて示す。地上化システム（採水）を用いて採水した地下水の Cl⁻濃度は、観測区間によっては数十 mg/L の変化はあるものの、坑道を埋め戻す前の分析結果とおおむね連続する値であった。比較のため掲載した DH-2 号孔の水質変化も同様に、埋め戻しの直前から大きく変化していない。これらのことから、地上化システム（採水）を用いることで、坑道の埋め戻し後においても坑道内に掘削したボーリング孔の地下水を採水可能であると判断した。

また、05MI01 号孔の全区間および 10MI26 号孔の区間 6 は、坑道を埋め戻す前は水圧が低下して採水が不可能だったが、埋め戻し後の 2021 年 6 月には再び採水できるようになった。さらに、立坑内部の埋め戻し面に設置した採水口からも、埋め戻し後には地下水を採水することができた。このように、地下施設の維持管理段階の途中で枯渇してしまった観測区間や、坑道内のように埋め戻し前は地下水で満たされていない場所であっても、坑道埋め戻し後の地下水位が観測区間や採水口よりも上位に回復する位置関係であれば、埋め戻し後のモニタリングにおいて地下水が採水可能になる。

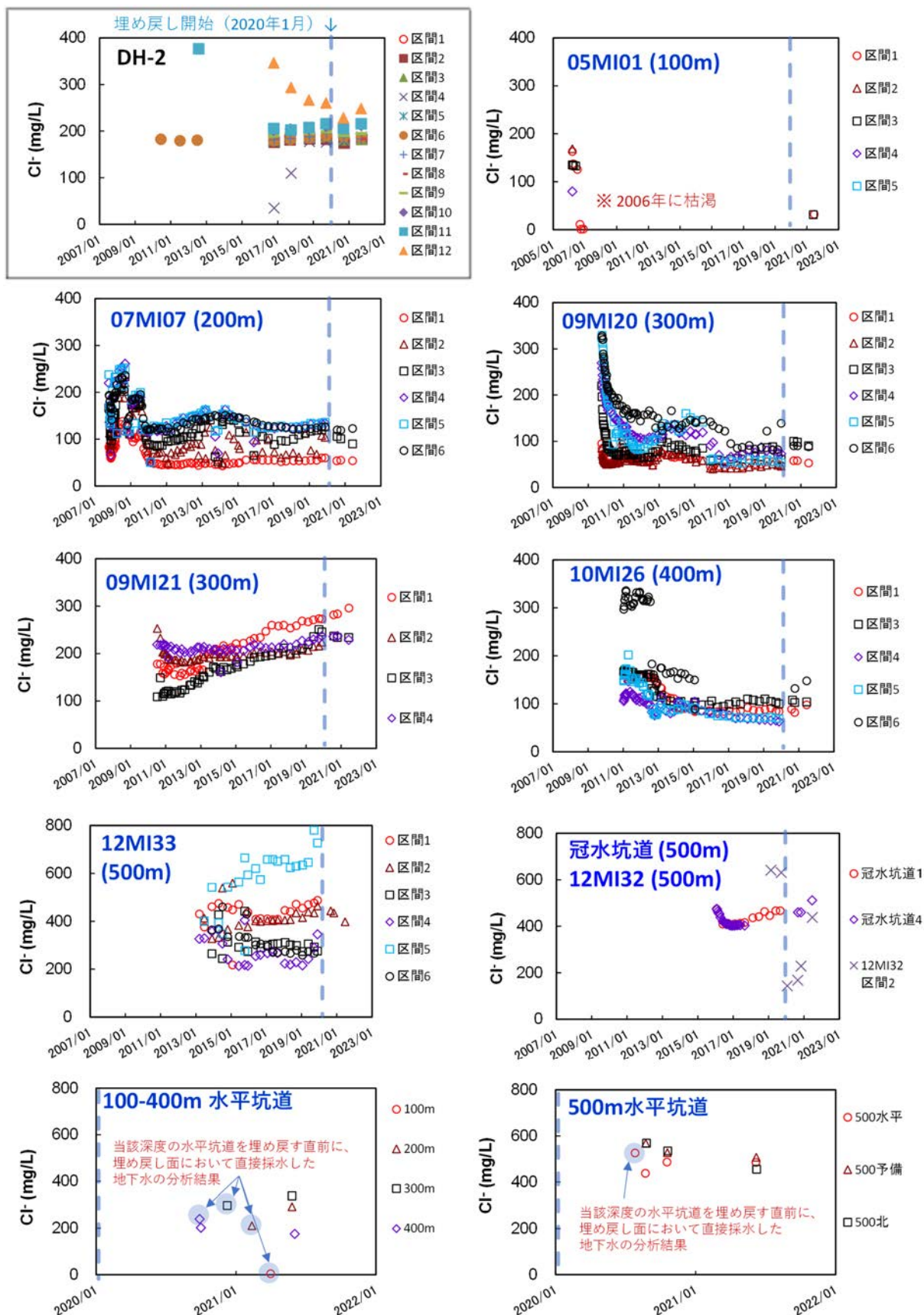


図 5-8 各観測区間における塩化物イオン濃度の経時変化

6. まとめ

坑道の埋め戻しに伴う周辺環境への影響を把握するため、これまで坑道内で行ってきた地下水の水圧・水質の観測を、既存の観測システムを活用しつつ地上からの観測を可能とする新たな観測網を整備した。坑道の埋め戻し作業の工程や予算等の制約がある中で地上化観測システムの設計を行った結果、水圧観測は光ファイバー水圧計を用いた観測システムを、採水は MP システムを用いた採水ラインを整備することとした。

整備した地上化観測システムを用いて得られた観測値と従来の坑内観測装置を用いた観測値を比較し、地上化観測システムを用いることで従来の観測と同様のデータを取得可能であることを確認してから、坑内観測装置を観測区間から切り離し、坑道の埋め戻し作業を開始した。

坑道の埋め戻し中および埋め戻し後における地上化観測システムを用いた観測結果は、坑道の埋め戻し前に取得していた水圧・水質観測結果と整合的な結果を示し、かつ地上から掘削したボーリング孔を用いた観測結果と同様の結果を示した。このことから、地上化観測システムを用いることで、深度 500m までの埋め戻した坑道周辺の環境モニタリング調査が可能であることを実証した。

今後は、本システムを用いて環境モニタリング調査を行っていく。

謝辞

本報告は、株式会社大林組を代表企業とするグループが設立する特定目的会社（瑞浪バックフィルサポート株式会社）が実施する「瑞浪超深地層研究所の坑道埋め戻し等事業」における環境モニタリング調査業務の一環で行われた研究用地内及び研究用地周辺のボーリング孔等における水質観測の成果である。本調査を実施した全ての関連会社および関係者に深く感謝いたします。また、地上化観測システムの設置では、東濃地科学センター 地層科学研究部 研究成果統合化グループ（旧）の従業員並びに瑞浪超深地層研究所研究坑道掘削工事における施工会社および関係会社の関係者にご助力・ご協力いただきました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 濱 克宏・岩月輝希・松井裕哉・見掛信一郎・笹尾英嗣・大澤英昭：超深地層研究所計画における調査研究計画－第 3 期中長期計画における調査研究－，JAEA-Review 2016-004，(2016) 38p.
- 2) 松岡稔幸・濱 克宏編：必須の課題に関する研究成果報告書，JAEA-Research 2019-012，(2020) 157p.
- 3) 日本原子力研究開発機構：令和 2 年度以降の超深地層研究所計画，(2020)
<https://www.jaea.go.jp/04/tono/miu/pdf/r020127koutei.pdf> (2022 年 2 月 28 日閲覧).
- 4) 岩月輝希・天野由記・井岡聖一郎・三枝博光・竹内竜史：大規模地下施設の建設に伴う周

- 辺地下水環境の変化, 日本原子力学会和文論文誌, vol.6, no.1, (2007) pp.73-84.
- 5) 尾上博則・三枝博光・竹内竜史: 超深地層研究所計画の研究坑道の掘削を伴う研究段階における地下水流動のモデル化・解析, 土木学会論文集 C, vol.72, no.1, (2016) pp.13-26.
 - 6) 尾上博則・竹内竜史: 超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング (2017～2019年度), JAEA-Data/Code 2020-010, (2020) 112p.
 - 7) 福田健二・渡辺勇輔・村上裕晃・天野由記・青才大介・原直広: 超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究－瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集－ (2019年度), JAEA-Data/Code 2020-012, (2020) 80p.
 - 8) 畑浩二・丹生屋純夫・鶴山雅夫・中岡健一・深谷正明・青柳和平・櫻井彰孝・棚井憲治: マルチ光計測プローブを用いた立坑周辺岩盤の掘削影響領域の長期モニタリングとその評価 (共同研究), JAEA-Research 2020-010, (2020) 142p.
 - 9) 野原 壯・三枝博光・岩月輝希・濱 克宏・松井裕哉・見掛信一郎・竹内竜史・尾上博則・笹尾英嗣: 超深地層研究所計画における研究坑道の掘削を伴う研究段階 (第2段階) 研究成果報告書, JAEA-Research 2015-026, (2016) 98p.
 - 10) Iwatsuki, T., Furue, R., Mie, H., Ioka, S., Mizuno, T.: Hydrochemical baseline condition of groundwater at the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU). *Applied Geochemistry*, vol.20, no.12, (2005) pp.2283-2302.
 - 11) 清水麻由子・天野健治・水野 崇・濱 克宏: 「深地層の研究施設計画に関する報告会 2020」資料集, JAEA-Review 2021-004, (2021) 92p.
 - 12) 沖原光信・矢萩良二・岩月輝希・竹内竜史・村上裕晃: モニタリング装置用配管の設置に関わる概念設計, JAEA-Technology 2019-021, (2020) 77p.
 - 13) 東濃地科学センター 保安・施設建設課: 瑞浪超深地層研究所 研究坑道掘削工事 (その8) 建設工事記録, JAEA-Review 2020-052, (2020) 116p.
 - 14) 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), JNC TJ7440 2005-091 (2005).
 - 15) Thompson, P. and Priyanto, D.: Canada's Underground Research Laboratory (1980-2014) – 16274, Proceedings of “WM2016 Conference”, March 6, 2016, Phoenix, Arizona, USA.

