JAEA-Technology
2016-003
DOI:10.11484/jaea-technology-2016-003

幌延深地層研究センター 350m 調査坑道における地下水の地球化学モニタリング装置の改良・開発

Improvement and Development of Geochemical Monitoring System for Groundwater Installed in the 350 m Gallery of the Horonobe Underground Research Laboratory

女澤 徹也　宮川 和也　笹本 広　曽我 弘一

Tetsuya MEZAWA, Kazuya MIYAKAWA, Hiroshi SASAMOTO and Kohichi SOGA

バックエンド研究開発部門
幌延深地層研究センター

Horonobe Underground Research Center
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

May 2016

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。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2016

JAEA-Technology 2016-003

幌延深地層研究センター350m 調査坑道における
地下水の地球化学モニタリング装置の改良・開発

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 幌延深地層研究センター
女澤 徹也※，宮川 和也，笹本　広，曽我 弘一*1

(2016 年 1 月 18 日　受理)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構は，北海道幌延町において，深地層の研究施設を活用した地層科学研究および地層処分研究開発を行っている。幌延地域のような，低透水性の堆積岩および多量の溶存ガスを含有する地下水という特徴的な地下環境においては，原位置の地下水の地球化学データを得ることが難しく，データを取得するための観測技術の開発・改良が課題となっている。このような課題に対する取り組みは，地下施設の建設や埋め戻しに伴う水圧・水質変化を継続的に観測し，信頼性の高いデータを取得する観点からも重要である。

幌延深地層研究センターでは，これまでに地下施設内の 140m 調査坑道において，地下水の地球化学モニタリング装置の開発が行われた。その後，地下施設の建設が周辺地質環境に与える影響を調査するための技術開発の一環として，350m 調査坑道における試験坑道掘削に伴う周辺岩盤中の地下水の水圧・水質変化の観測を目的とし，モニタリング装置の改良・開発が行われた。

本報では, 350m 調査坑道における地下水の地球化学モニタリング装置の改良･開発の内容と，開発した装置を用いたデータ取得例について報告する。

幌延深地層研究センター：〒098-3224　北海道天塩郡幌延町字北進 432 番地 2
※ 技術開発協力員
＊1 （株）ダイヤコンサルタント

JAEA-Technology 2016-003

Improvement and Development of Geochemical Monitoring System for Groundwater Installed in the 350 m Gallery of the Horonobe Underground Research Laboratory

Tetsuya MEZAWA※, Kazuya MIYAKAWA, Hiroshi SASAMOTO and Kohichi SOGA*1

Horonobe Underground Research Center
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management
Japan Atomic Energy Agency
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received January 18, 2016)

Japan Atomic Energy Agency has been conducting R&D (research and development) for geoscientific study and for safe geological disposal of high-level radioactive waste in the Horonobe Underground Research Laboratory (URL). Development of the monitoring technique for hydro-geochemical conditions of groundwater in low permeable sedimentary rocks with high content of dissolved gases in the underground facility is one of key issues in the URL project in order to obtain the reliable geochemical data. Improvement and development of the monitoring technique is also important to monitor the hydro-geochemical conditions during the construction and closure stages of the URL with the reliable data.

Development of the monitoring system for the groundwater geochemistry was conducted previously at the 140m gallery in the Horonobe URL. Thereafter, improvement and development of the monitoring system have been performed at the 350m gallery as the course of development technology to monitor the hydro-geochemical conditions during the URL construction.

In this report, the results including the improvement and development of the monitoring system for the groundwater geochemistry at the 350m gallery and the several examples of data acquisition are presented.

Keywords: Geochemical Monitoring System, Horonobe URL, 350m Gallery, Dissolved Gas

---

※ Collaborating Engineer
＊1 DIA Consultants Co., Ltd.

目　次

1.　はじめに …… 1
2.　140m 調査坑道で開発されたモニタリング装置の概要 …… 2
　2.1　モニタリング装置の全体構成 …… 2
　2.2　モニタリング装置の適用例 …… 3
　2.3　装置開発・運用を踏まえた課題 …… 7
3.　350m調査坑道でのモニタリング装置の改良・開発 …… 8
　3.1　モニタリング装置の全体構成 …… 8
　3.2　モニタリングに向けた改良点の再整理 …… 9
　3.3　既往の装置に対する課題を踏まえた改良 …… 11
　　3.3.1　ガス発生による影響を低減するための改良 …… 11
　　3.3.2　メンテナンス性の向上に係る改良 …… 14
　　3.3.3　停電時の対応に対する改良 …… 15
　　3.3.4　データ記録・表示様式の改良 …… 16
　　3.3.5　急激な圧力変化による水質センサーへの影響低減に係る対策 …… 17
　3.4　改良した装置を用いたデータ取得例 …… 18
　　3.4.1　間隙水圧観測結果 …… 18
　　3.4.2　水質観測結果 …… 21
4.　おわりに …… 24
謝辞　…… 24
参考文献　…… 25

Contents

1. Introduction ····· 1
2. Summary of the monitoring system developed at the 140m gallery ····· 2
2.1 Design of the monitoring system ····· 2
2.2 Example of data acquisition using the monitoring system ····· 3
2.3 Identified issues through development and application of monitoring system ····· 7
3. Improvement of the monitoring system at the 350m gallery ····· 8
3.1 Scheme of hydro-geochemical monitoring system ····· 8
3.2 Issues to be solved for application of the monitoring system ····· 9
3.3 Improved points considering issues for development of the monitoring system ·· 11
3.3.1 Improvement for decreasing degassing effect ····· 11
3.3.2 Improvement for manipulation capability ····· 14
3.3.3 Improvement for handling restoration after electricity failure ····· 15
3.3.4 Improvement for data logging and displaying information ····· 16
3.3.5 Improvement for decreasing effects on sensor by rapid change of water pressure 17
3.4 Example of data acquisition using the improved monitoring system ····· 18
3.4.1 Results of monitoring of groundwater pressure ····· 18
3.4.2 Results of monitoring of geochemical conditions ····· 21
4. Conclusions ····· 24
Acknowledgement ····· 24
References ····· 25

図　リスト

図 2.1-1　水圧・水質モニタリング装置の全体構成 …… 2
図 2.2-1　140m 調査坑道に設置されたモニタリング装置の全体構成 …… 4
図 2.2-2　坑道モニタリング部の地下水循環経路図 …… 4
図 2.2-3　間隙水圧観測結果（2009 年～2015 年） …… 5
図 2.2-4　水質観測結果（区間 1 の例：2011/1/21～1/31） …… 6
図 3.1-1　350m 調査坑道での水圧・水質モニタリング装置の全体構成 …… 8
図 3.3-1　孔内装置における注水・採水口の配置箇所の改良 …… 11
図 3.3-2　ケーシングとパッカーの接続方式の改良 …… 12
図 3.3-3　水質モニタリングユニットにおけるドレンバルブの追加箇所 …… 13
図 3.3-4　水質モニタリングユニット内の接続継手によるモジュール化の様子 …… 14
図 3.3-5　停電時データの取得例 …… 15
図 3.3-6　データ表示・収録ユニットの画面構成 …… 16
図 3.3-7　差圧調整弁の使用例と構造 …… 17
図 3.4-1　350m 調査坑道における C05 孔および C06 孔の配置図 …… 18
図 3.4-2　間隙水圧観測結果（C05 孔） …… 19
図 3.4-3　間隙水圧観測結果（C06 孔） …… 20
図 3.4-4　水質観測結果（C05 孔　区間 2　2014/8/19～9/24） …… 22
図 3.4-5　水質観測結果（C06 孔　区間 1　2014/6/4～6/25） …… 23

List of Figures

Figure 2.1-1 Schematic illustration of hydro-geochemical monitoring system ····· 2
Figure 2.2-1 Scheme of monitoring system installed in 140m gallery ····· 4
Figure 2.2-2 Circulation pathway in monitoring system ····· 4
Figure 2.2-3 Monitoring results of pore pressure from 2009 to 2015 ····· 5
Figure 2.2-4 Observation of geochemical parameters (Zone1 2011/1/21 – 1/31) ····· 6
Figure 3.1-1 Design of monitoring system installed in 350m gallery ····· 8
Figure 3.3-1 Improvement of layout for injection and sampling ports ····· 11
Figure 3.3-2 Improvement of connection way between borehole insert systems ····· 12
Figure 3.3-3 Additional location of drain valve in improved monitoring system ····· 13
Figure 3.3-4 Modularization of each functions consisting monitoring system ····· 14
Figure 3.3-5 An example of observation when electricity failure ····· 15
Figure 3.3-6 Screen structure of data display and log unit ····· 16
Figure 3.3-7 Illustration of regulator of differential pressure ····· 17
Figure 3.4-1 Layout of boreholes of C05 and C06 in 350m gallery ····· 18
Figure 3.4-2 Monitoring results of groundwater pressure (C05) ····· 19
Figure 3.4-3 Monitoring results of groundwater pressure (C06) ····· 20
Figure 3.4-4 Observation of geochemical parameters (C05 Zone2 2014/8/19 – 9/24) ····· 22
Figure 3.4-5 Observation of geochemical parameters (C06 Zone1 2014/6/4 – 6/25) ····· 23

1. はじめに

幌延深地層研究計画における深地層の科学的研究では，地下施設における調査研究で使用するための調査技術や調査機器の開発を進めている [1]。幌延深地層研究計画は，地上からの調査研究段階（第 1 段階），坑道掘削時の調査研究段階（第 2 段階），地下施設での調査研究段階（第 3 段階）の 3 段階に分けて実施されており [1]，第 2・3 段階では，地下施設の建設が周辺の地質環境に及ぼす影響を調査するための調査技術・調査機器開発の一環として，地下水の水圧・水質モニタリング装置の開発が進められている [2]。

幌延地域に分布する新第三紀の堆積岩中の地下水には，堆積岩中の有機物が分解されることで生成したと推定されるメタン等の可燃性炭化水素ガスが溶存している [3]。地下水中の溶存メタンは，地下の水圧条件でほぼ飽和し，調査深度が増加すると溶存ガス量も増加することが確認されている [4]。これを踏まえて，水圧・水質モニタリングにおける溶存ガスの測定系への影響や対応について検討が行われている [2]。また，幌延地域に分布する珪藻質泥岩である声問層や珪質泥岩である稚内層は，地層中の割れ目の分布に依存するものの，比較的，透水性の低い地層である [5]。このように透水性が低く，地下水の流速が遅いと考えられる条件においては，信頼性の高い水質データを取得するためのセンサーなど，測定機器の選定も重要になる。

南條ら [2]は，上述したような幌延地域における地質環境特性を考慮し，幌延深地層研究施設の深度 140m に位置する調査坑道において，地下水の水圧・水質モニタリング装置を作製し設置・稼働させ，装置の耐久性や操作性等を確認するとともに，装置の一部を改良した。また南條ら [2]は，改良したモニタリング装置を用い，地下水の水圧・水質の連続モニタリングを行い，地下施設の建設段階における坑道周辺に分布する地下水の水圧・水質への影響に関わるデータを取得した。

その後，幌延深地層研究計画では，第 3 段階における研究として，深度 140m，250m での調査研究が進められ [1]，平成 24 年度（2012 年）からは深度 350m に掘削された周回坑道（調査坑道）を利用した調査研究が本格的に開始された。深度 350m における調査研究では，坑道掘削に伴う周辺岩盤中の地下水の水圧・水質への影響を調査するための調査技術・調査機器開発が進められた。そこでは南條らが深度 140m 調査坑道において開発した水圧・水質モニタリング装置 [2]を基に，深度 350m の地質環境条件への対応を念頭に，装置の改良が行われた。

本報では，南條らにより開発された既往の水圧・水質モニタリング装置の概要と，運用において抽出された課題を示し，それを踏まえて改良した装置を用いた深度 350m 調査坑道におけるデータ取得の例について報告する。

2. 140m 調査坑道で開発されたモニタリング装置の概要

幌延深地層研究センター350m 調査坑道に設置された地下水の地球化学モニタリング装置の設計思想および基本構成は，140m 調査坑道に設置されたモニタリング装置 [2]と同様である。本章では，南條らの報告 [2]を基に，モニタリング装置の全体構成を示すと共に，140m 調査坑道での観測結果から抽出された装置開発における課題をまとめる。

2.1 モニタリング装置の全体構成

ボーリング孔を用いた多区間地下水水圧・水質観測の手法については，観測センサーの設置位置の違いにより，下記のように 2 つに大別される。

・センサーを孔内の観測区間に設置し，測定する方法

・センサーを孔外（坑道等）に設置し，孔内の水を嫌気・被圧状態のまま孔外へ導き，測定する方法

幌延深地層研究センターでは，水質センサーが定期的なメンテナンスを必要とするため，上記の手法のうち，後者の原位置の水を孔外のモニタリング装置まで引き込む方法を採用している。図 2.1-1 に，水圧・水質モニタリング装置の全体構成を示す。図 2.1-1 は，概念図であり，掘削長やパッカーの数量などは，モニタリング対象となるボーリング孔によって異なる。モニタリング装置は，ボーリング孔内の多区間を隔離する“孔内パッカーシステム部”と，ボーリング孔外（坑道内）に設置した水圧･水質センサーなどの“坑道モニタリング部”から構成される（図 2.1-1）。

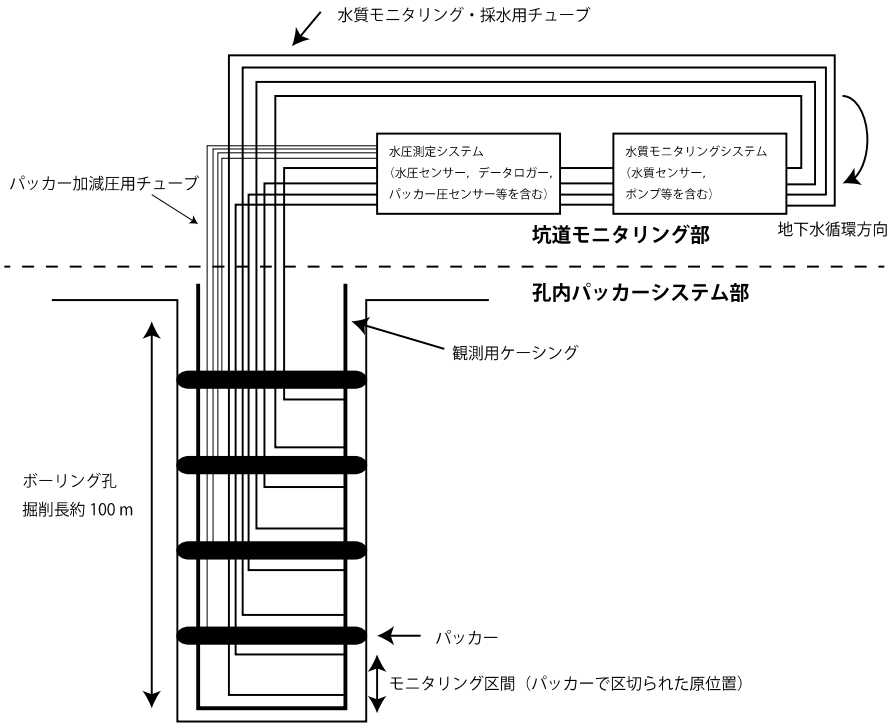

図 2.1-1 水圧・水質モニタリング装置の全体構成（南條らの図 [2] を一部改変）

水圧・水質のモニタリングにあたっては，孔内パッカーシステム部から坑道モニタリング部に至るチューブ内部を地下水で満たし，ポンプを用いてチューブ内の地下水を孔内パッカーシステム部と坑道モニタリング部との間で循環させることにより行われる。以下に，孔内パッカーシステム部および坑道モニタリング部における各部分の構成要素・機能の概要について記す。

孔内パッカーシステム部

孔内パッカーシステム部は，観測用ケーシングとパッカー，チューブ類から構成される。観測区間は，パッカーにより他の区間と仕切られる。各区間からは，観測用ケーシング内にチューブが導かれ，坑道モニタリング部へ接続される。また，各パッカーからは，加減圧用のチューブが坑道まで接続される。パッカーは，ラバー内部を水道水で満たし加圧することにより膨張し，ボーリング孔内壁面に押し当てられ，各区間が区切られる。

坑道モニタリング部

坑道モニタリング部は，水圧測定システムと水質モニタリングシステムから構成される。機器類は防水の箱内に設置され，坑道内からの地下水の飛散などでの電子機器類の浸水による故障から守られる。また，坑道内は湿度が高いため，結露を防ぐ目的で，防水箱の中には除湿機が設置されている。

水圧測定システムは，主に水圧センサーとパッカー圧センサーおよびそれらの制御機器から構成される。140m 調査坑道に設置されたモニタリング装置では，センサー類で取得されたデータの記録は，それら専用のデータロガーに保存される [2)]。データロガーは，地下施設と地上の管理棟とを結ぶ LAN ケーブルに接続され，また，データの回収は，専用のソフトウェアを用いて地上から行うことが可能である [2)]。

水質モニタリングシステムは，主に水質センサーとポンプおよびそれらの制御機器から構成される。140m 調査坑道に設置されたモニタリング装置では，多項目水質センサーとして使用可能水深が 246m である In-Situ 社製の TROLL9500 を用い，水素イオン指数（pH），酸化還元電位（ORP），電気伝導度（EC），溶存酸素濃度（DO），大気圧および水温のモニタリングが行われる [2)]。水質センサーが格納されるフローセルはステンレス製であり，これを孔内パッカーシステム部からのチューブと接続することにより，嫌気・被圧状態を維持した地下水水質の測定が可能である。

2.2　モニタリング装置の適用例

140m 調査坑道に設置されたモニタリング装置の全体構成を図 2.2-1 に示す。図 2.2-2 には，坑道モニタリング部の地下水循環経路図を示す。この装置は，2009 年に 140m 調査坑道の東立坑側から斜め下方（俯角 45 度）に掘削された長さ 100m のボーリング孔（08-E140-C01 孔，孔径 115mm）に設置され，これまでこの装置を用いたモニタリングが実施されている。なお，08-E140-C01 孔では，5 つの観測区間（区間 1～区間 5）が設けられている。

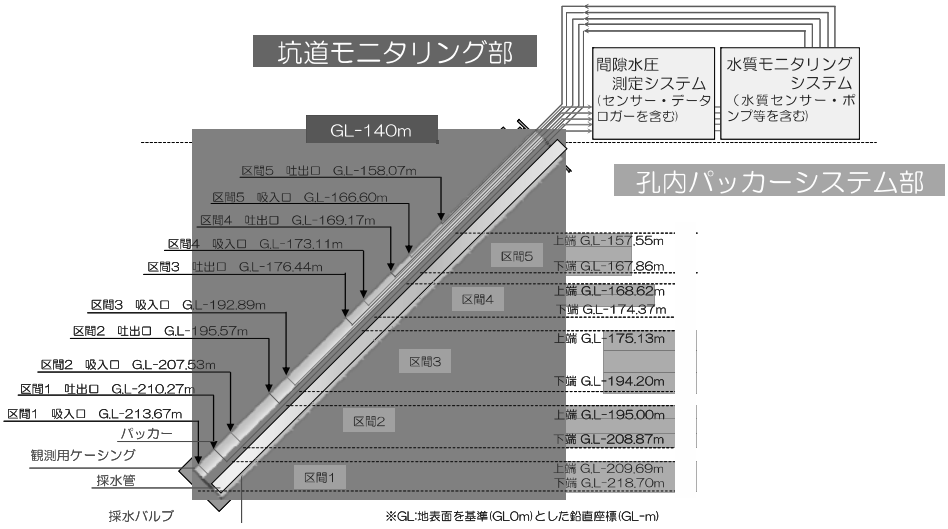

図 2.2-1　140m 調査坑道に設置されたモニタリング装置の全体構成 [2)]

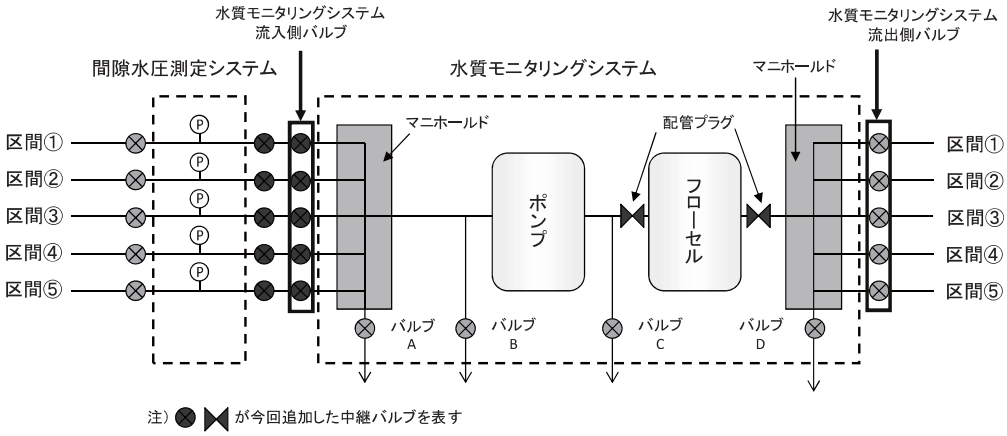

図 2.2-2　坑道モニタリング部の地下水循環経路図 [2)]

140m 調査坑道を対象に開発されたモニタリング装置を用いたデータ取得の適用例として，まず，機器が設置された 2009 年 3 月 15 日～2015 年 10 月までの区間 1～区間 5（zone1 - zone5）の水圧観測結果を図 2.2-3 に示す。図中の水圧は，140m 調査坑道に設置された坑道モニタリング部における水圧であり，観測区間における原位置の水圧ではない。原位置の水圧に換算するためには，図 2.2-1 に示す各観測区間の深度と，坑道モニタリング部の深度差に相当する静水圧の加算が必要である。

図 2.2-3 には，水圧の経時変化が示されており，時折認められる急激な水圧低下は，採水や水質センサーのメンテナンス作業の際，観測区間の圧力が開放されるためである。一方，水圧の急激な上昇は，原位置から坑道内までのチューブ内がガスで満たされた場合である。ガスは水と異なり圧の変化により体積が大きく変化し膨張するため，深部のより高い圧力を浅部まで伝えやすいと考えられる。このように，採水や脱ガス等，メンテナンス作業の影響等が認められるものの，水圧変化の概略的な変化の傾向は，適切に観測できている。

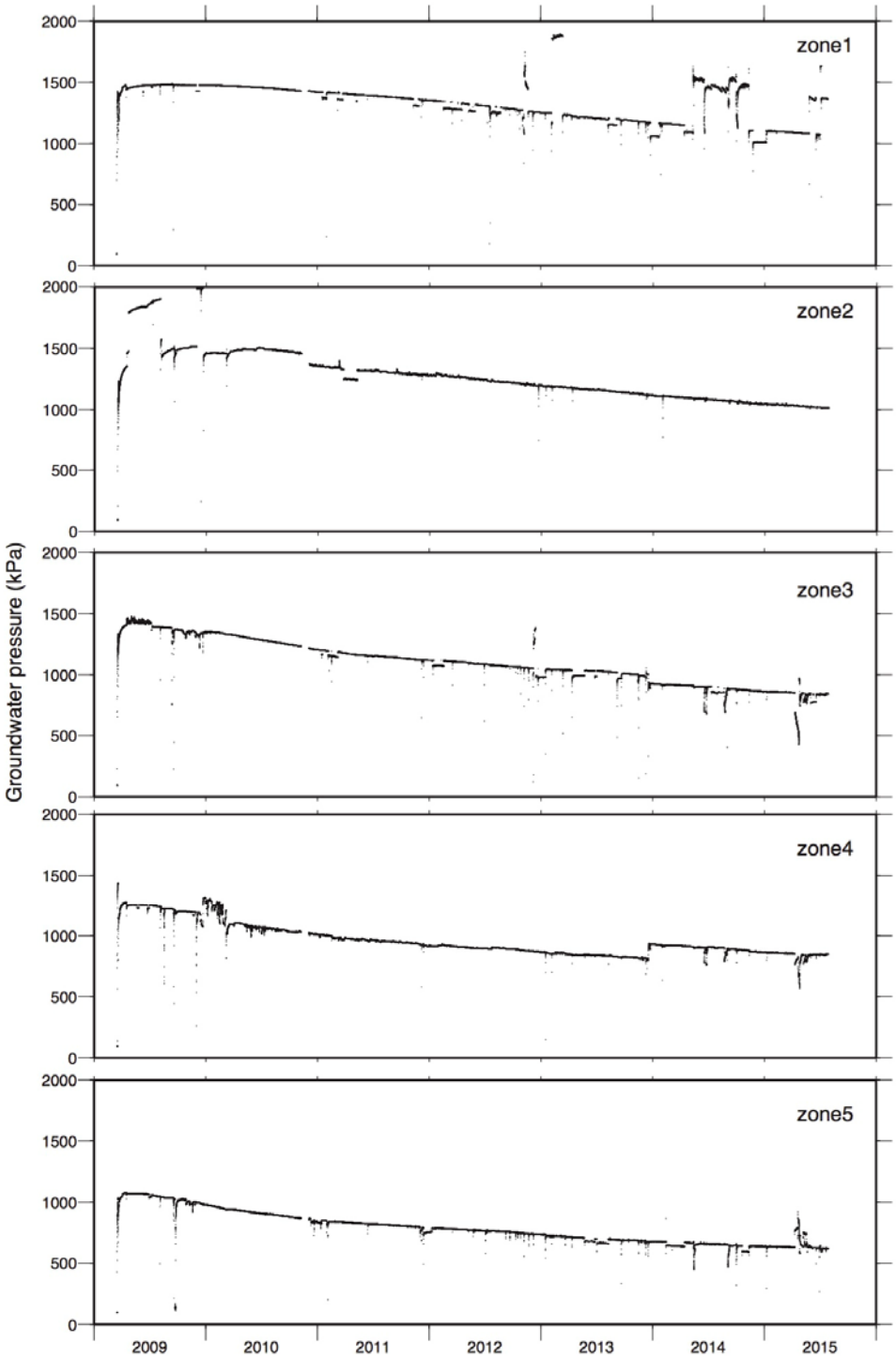

図 2.2-3　間隙水圧観測結果（2009 年～2015 年）

次に，水質の観測結果の例として，140m 調査坑道において南條らが報告している 2011 年 1 月 21 日～1 月 31 日の期間で得られた区間 1 の結果[2)]を図 2.2-4 に示す。図中の各区間は，図 2.2-1 に示されるシステム構成に相当する。この際，ポンプの流量は 50 mL/min の設定で地下水の循環が行われた。また，観測を開始する前には，pH と ORP の電極について，各々，校正が実施された。観測の結果，pH は，観測開始後 6.7 程度で，ほぼ安定した値を示した。一方，ORP は，

観測開始後，10 日間ほどかけて値が低下し，-430 mV 前後で安定した値を示した（なお，ここで示す ORP の値は白金電極による測定値であり，水素電極を基準にした値（Eh）に換算された値ではない）。また，EC は，観測開始後，33 時間経過した時点で値が変化し，その後は 500 mS/m 程度で安定した値を示した。なお，溶存酸素の観測は実施されていない。この理由としては，溶存酸素センサーは，脱ガスに伴う気泡発生の影響を受け易く，信頼性の高い安定した値を得ることが困難であったためである。このように，水質観測では約 2～3 週間の時間をかけて，坑道モニタリング部のセンサーと原位置との間で地下水を循環させながら観測が行われ，観測期間内において概ね安定した測定値が得られている。

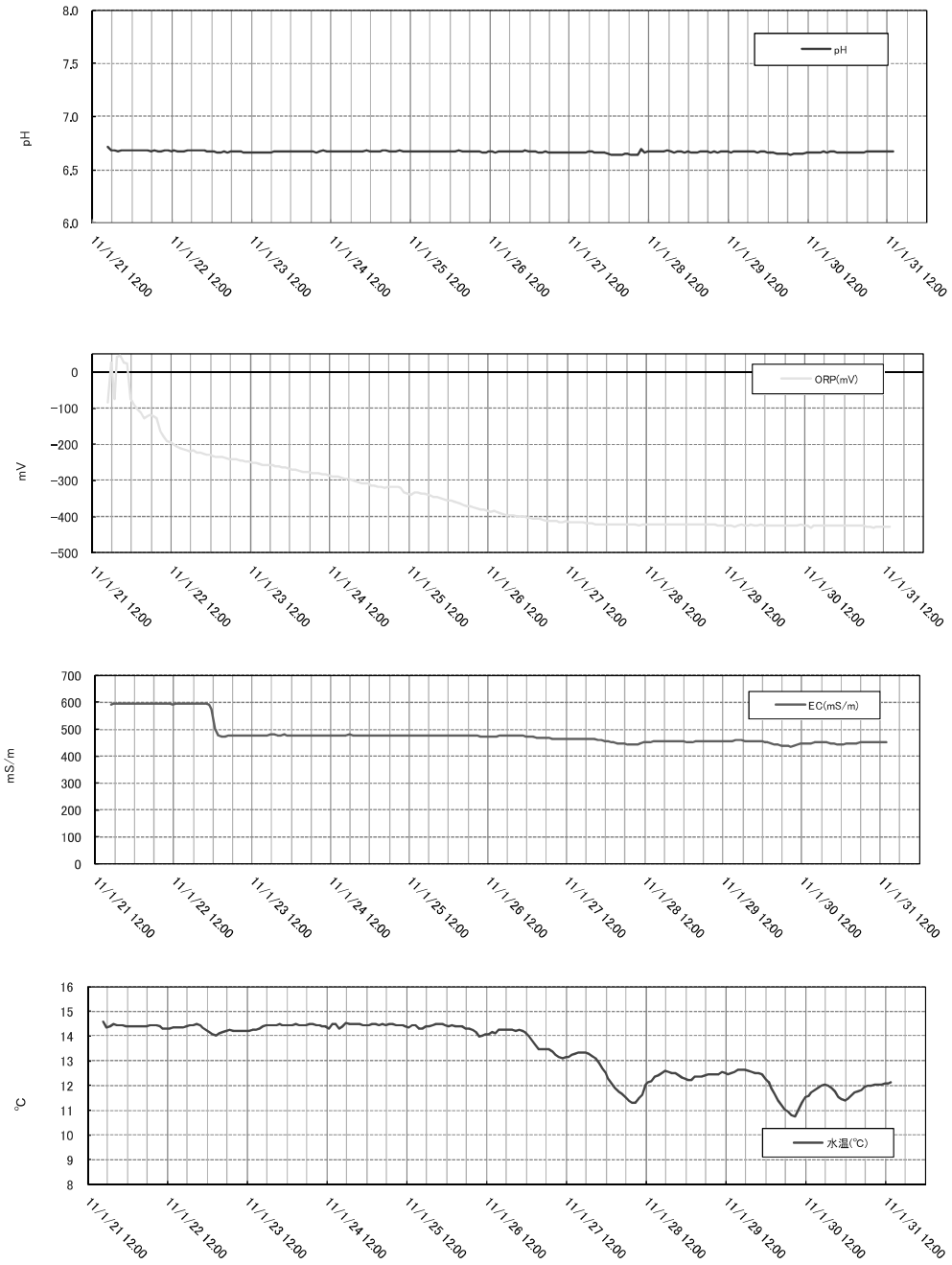

図 2.2-4　水質観測結果（区間 1 の例：2011/1/21～1/31）[2)]

2.3　装置開発・運用を踏まえた課題

140m 調査坑道に設置された地下水の地球化学モニタリング装置の開発・運用を踏まえ抽出された今後の主な課題として，以下に示す項目が抽出された[2)]。

(1) 防錆対策

幌延のような高塩分濃度の地下水を扱う場合，スチール製の材質をステンレス製にするなどの防錆対策が必要である。

(2) 脱ガス対策

幌延地域のような地下水中に多量の溶存ガスが含まれる場合，水圧の低下により脱ガスが生じ，水質モニタリングや採水に支障を来たす場合がある。そのため，ポンプの空回りを防ぐために，チューブ内に溜まったガスを排気する経路を設けるなどの対策が必要である。また，パッカーで仕切られた原位置の観測区間にもガスが溜まることが考えられるため，観測用ケーシングにある採水用チューブの穴の位置を，ガスの溜まりにくい下方へと変更するなどの対策が必要である。

(3) 水質センサーに急激な圧力変化を与えない構造

140m 調査坑道に設置されたモニタリング装置で用いられた水質センサーは，高耐圧性能を有するが，その使用にあたっては，徐々に圧力を増加および減少させて使用することが望ましい。急激な圧力変化が生じた場合，水質センサーに影響を与え，異常な値を示すことがある。このことから，水質センサーに関するシステム操作は，急激な圧力変化を生じさせないように行う必要がある。

(4) 停電時の対応

地下施設内の工事に伴う電圧降下や，落雷による停電が発生した場合，復電後はモニタリングシステム全体の電源が自動では入らない状態である。幌延地域のように，地下水中にメタンガスが溶存している環境においては，非常時の通電による爆発を防ぐ観点から，バッテリー類を含む無停電電源装置などを設置することができない。このため，停電が発生した場合，欠測が生じるが，復電後に電源が自動で復旧できるようにすることで，欠測期間を短くすることができる。

3. 350m 調査坑道でのモニタリング装置の改良・開発

2 章では，140m 調査坑道において実施された地下水の地球化学モニタリング装置の開発に関わる概要や，モニタリング装置の開発・運用を踏まえた課題について整理した。3 章では，より深度の深い 350m 調査坑道における地下水の地球化学モニタリングを念頭にした装置開発の方針（モニタリング装置の全体構成），2.3 節で抽出した課題を踏まえた装置改良にあたっての対策の再整理，350m 調査坑道でのモニタリングに向けた装置改良の具体的内容および改良した装置を用いたデータ取得例について述べる。

3.1 モニタリング装置の全体構成

350m 調査坑道での地下水の地球化学モニタリングにあたっては，2 章で述べたような 140m 調査坑道で開発されたモニタリング装置の開発・運用を踏まえた装置開発の方針が検討された。350m 調査坑道でのモニタリングにあたり検討された水圧・水質モニタリング装置の全体構成を図 3.1-1 に示す。図 3.1-1 は概念図であり，掘削長やパッカーの数量などはモニタリング対象となるボーリング孔により異なる。モニタリング装置は，140m 調査坑道において開発された既往の装置と同様に，ボーリング孔内の多区間を隔離する“孔内パッカーシステム部”と，ボーリング孔外（坑道内）に設置した水圧・水質センサーなどの“坑道モニタリング部”から構成される（図 3.1-1）。

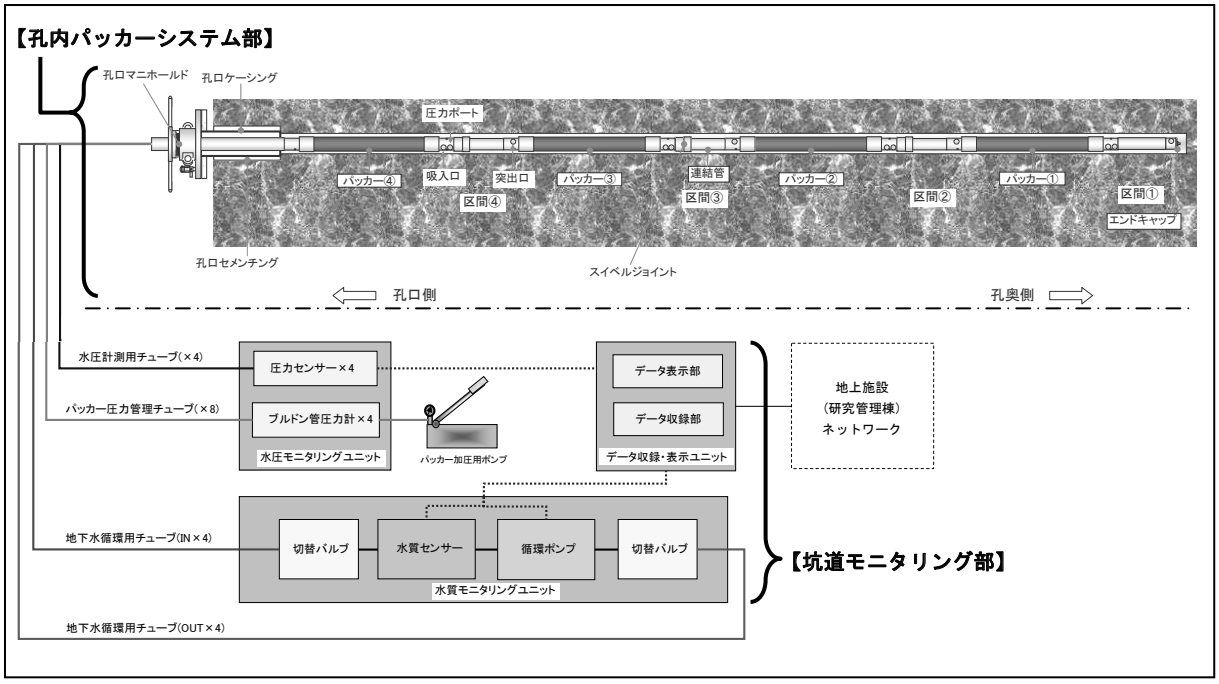

図 3.1-1 350m 調査坑道での水圧・水質モニタリング装置の全体構成

以下に，孔内パッカーシステム部と坑道モニタリング部の各部における構成要素・機能の概要についてまとめる。

孔内パッカーシステム部

孔内パッカーシステム部は，既往の装置と同様に，観測用ケーシングとパッカー，チューブ類から構成される。350m 調査坑道でのモニタリング装置は，既往の装置と比較してより高い差圧環境の中での耐圧性能が要求されるため，パッカーは深さ 350m（以上）の静水圧に耐えられるものに変更した。

坑道モニタリング部

坑道モニタリング部は，水圧モニタリングユニットおよび水質モニタリングユニットに加え，新たにデータ収録・表示ユニットを加えた構成となる（図 3.1-1）。水圧・水質のモニタリングデータは，これまでユニットごとに別々に制御し，データ収録されていたが，350m 調査坑道でのモニタリング装置では，データ収録・表示ユニットに機能を集約し，水圧・水質のモニタリングデータを一括管理するシステムとした。

水圧モニタリングユニットは，水圧センサーとパッカー圧センサーから構成される。

水質モニタリングユニットは，主に多項目水質センサーとポンプから構成される。350m 調査坑道でのモニタリング装置では，より高い差圧環境への対応のため，多項目水質センサーとしては，従来の TROLL9500（In-Situ 社製，水深 246m まで対応）から，より耐圧性能の高いとされている OseanSeven305（IDRONAUT 社製，水深 1000m まで対応）に変更した。また，水質センサーを格納するフローセルは，材質をアクリルとした（耐圧 3.5 MPa）。アクリルは透明なので，内部の水質センサーの汚れ等の状態を目視で確認することが可能となった。

なお，配管経路にあたる水圧および水質モニタリングユニットでは，2.3 節で述べた 140m 調査坑道でのモニタリング装置開発で抽出された課題に対する対応として，ユニット内に組み込まれるポンプ等の機械内部においても，錆びやすいスチール製部品を使用していないものを選定した。

データ収録・表示ユニットでは，水圧・水質センサーの制御およびデータ収録が行われる。このユニットでは，液晶ディスプレイがセットされており，現地でリアルタイムに収録データを確認し，グラフ表示によるデータの経時変化を把握することも可能である。

3.2　モニタリングに向けた改良点の再整理

350m 調査坑道でのモニタリング装置の開発にあたっては，140m 調査坑道で開発されたモニタリング装置の運用および幌延の地下水の特徴を踏まえ，データの信頼性向上や効率的なデータ取得を行う上での改良として，以下のように再整理した。

(1) ガス発生による影響を低減するための改良

幌延地域の地下水には,メタンや二酸化炭素を主成分とするガスが比較的多量に溶存している。140m 調査坑道で開発された既往のモニタリング装置では，採水時など循環経路内の圧力を開放した際，これらのガスが脱離し孔内や循環経路に気相が残留することにより，地下水が循環しなくなる状況が発生した。350m 調査坑道においては，水圧が高く溶存ガス量も多くなることが予想されることから，140m 調査坑道でのモニタリングの場合よりも，より脱ガスの影響を抑制す

る工夫が必要となる。

(2) メンテナンス性の向上に係る改良

水質モニタリングに使用する水質センサーは，定期的なメンテナンスを前提としているが，140m 調査坑道で開発された既往のモニタリング装置では，センサーが水質モニタリングユニットの内部に組み込まれていたため，センサーの着脱が容易ではなかった。このため，長期間の水質モニタリングを想定した場合，作業の効率性の観点から，メンテナンス性の向上が課題である。また，水質データの信頼性向上の観点でも，信頼性の高い安定したデータを取得する上でメンテナンス性の向上が必要である。

(3) 停電時の対応に係る改良

調査坑道内では，建設工事における電源の切り替え（人為的要因）や落雷・積雪（電線着雪）による停電（自然的要因）が発生する。140m 調査坑道で開発された既往のモニタリング装置では，電源回復時に観測が自動復旧しないため，停電の都度，現地に赴き，手動で電源を回復することが必要であった。また，停電の都度，データの欠測が生じていた。効率的にデータ取得を行うためには，できるだけデータの欠損期間を低減することが重要であり，停電への対応策が必要である。

(4) データ収録・表示様式の改良

効率的にデータ取得を行うためには，センサーの不良や停電等のトラブルをいち早く認識し，対応する必要がある。140m 調査坑道で開発された既往のモニタリング装置で得られたデータは，装置内部のロガーに保存されており，データを確認するためには，地下施設内の観測装置へ足を運ぶ必要があった。このことは，データ確認の即時性という点において，改善すべき課題である。また，この課題に対応することで，データ回収作業の軽減にもつながる。

(5) 急激な圧力変化による水質センサーへの影響低減に係る対策

多項目水質センサーは，高い耐圧性能を持つものの，急激な圧力変化が生じた場合には，水質センサー内部の充填液が多量に漏れる等の異常が生じ，機器が故障する，あるいはデータの信頼性に悪影響を与えることがある。このため，水質センサーのメンテナンスの際，観測装置に水質センサーを脱着する場合，急激な圧力変化を起こさないような工夫が必要である。

3.3　既往の装置に対する課題を踏まえた改良

3.2 節で整理した 350m 調査坑道でのモニタリングに向けた対策に基づき，各対策に関わる具体的な改良内容などについて，以下にまとめる。

3.3.1　ガス発生による影響を低減するための改良

(1) 孔内装置における地下水循環出入り口の配置に係る改良

140m 調査坑道で開発された既往のモニタリング装置においては，地下水を取り入れる採水口を観測区間浅部の上側に配し，坑道モニタリング部を経て観測区間に戻る注水口を区間深部の上側に設けていた（図 3.3-1 左図）。これは，観測区間下側に沈殿した砂や泥が，採水口を閉塞する懸念に対する対策である。また，採水時の圧力解放に伴い，パッカーで区切られた区間内において多量のガスが遊離した場合，採水口が上部に設けられていることにより，採水装置内部がガスで満たされ，水の出が悪くなる状況が認められていた。

350m 調査坑道では，水平孔および鉛直孔にモニタリング装置を設置することが計画されていた。このような場合，ボーリング孔内でガスが多量に遊離した際，採水口がガスで満たされる状況が容易に発生し，地下水の循環が困難になることが予想される。このため，採水口を下側に，注水口を上側に配置する構造に改良した（図 3.3-1 右図）。

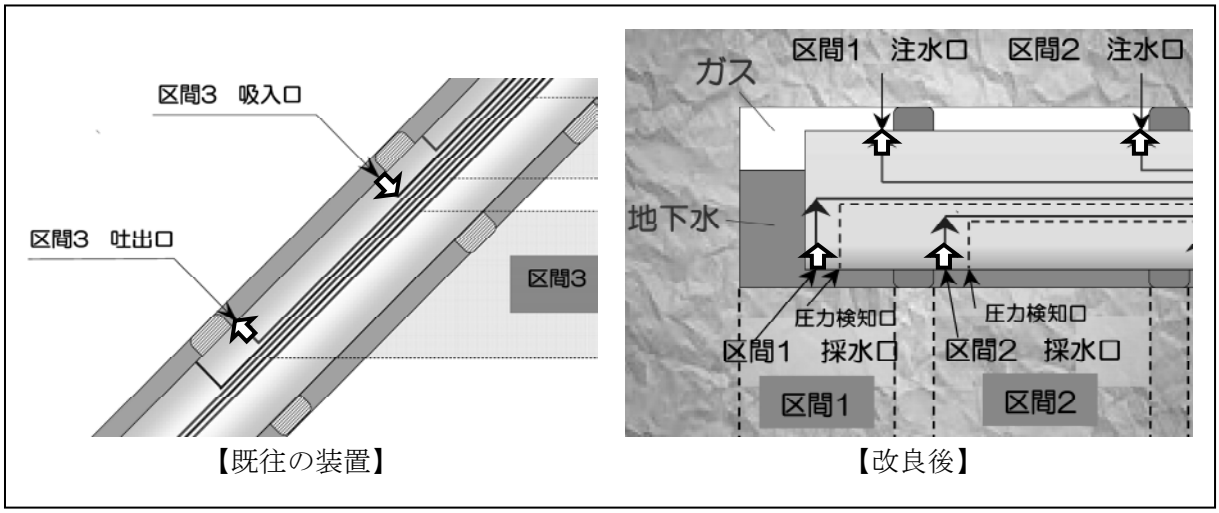

図 3.3-1　孔内装置における注水・採水口の配置箇所の改良

(2) ケーシングとパッカーの接続方式の改良

140m 調査坑道で開発された既往のモニタリング装置では，観測区間を保持するケーシングユニットとパッカーとの接続は，はめ込み式ビス止め固定であり，装置の制作後に採水・注水口の方向を変更することは困難であった。ボーリング孔の掘削は，必ずしも予定通りの角度で掘削されるとは限らず，孔曲がりが発生する場合がある。このため，掘削の状況に応じて，採水・注水口の方向を変更できる装置が望ましい。そこで，ケーシングユニットとパッカーとの接続をねじ込み式による固定に変更することによって，この問題に対応した。通常のねじ込み式の接続方法もまた，組み立て時に採水口の方向が保たれない欠点がある。新たに改良した装置では，接続部に回転軸受(スイベルジョイント)を挟むことにより,方向の調整と固定を可能とした(図 3.3-2)。この改良により，掘進角度や掘削後の孔の状態を確認してからの装置設計・製作ではなく，ボーリング孔内への設置時に，ボーリング孔の掘進方向や穴曲がり状況に応じて，採水口の方向を微調整することが可能になった。

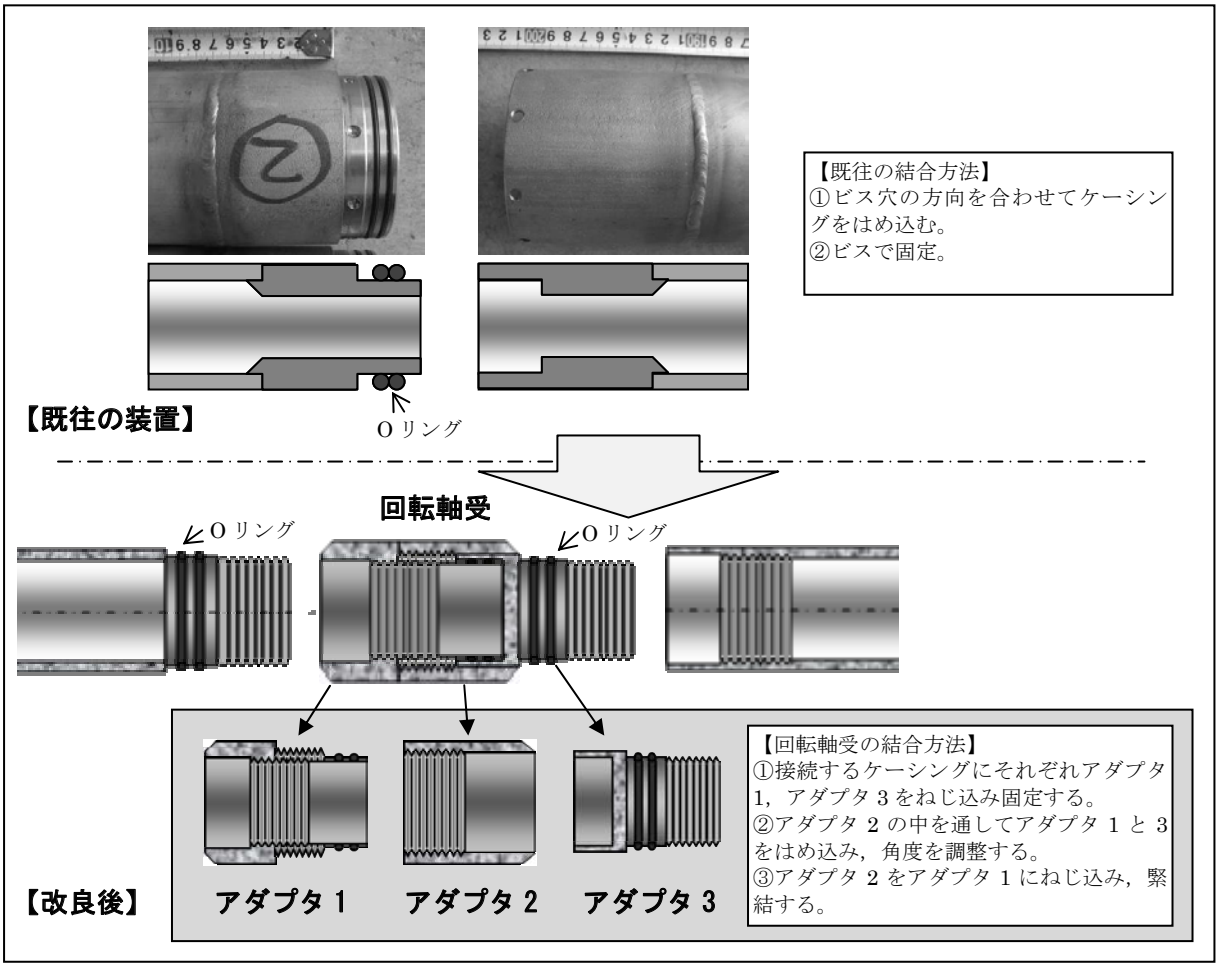

図 3.3-2　ケーシングとパッカーの接続方式の改良

(3) 坑道モニタリング部へのドレンバルブの追加

前項で述べた「ケーシングとパッカーの接続方式の改良」に係る対策を行ってもなお，孔内の観測区間と坑道モニタリング部に高低差（圧力差）が含まれる場合，水質モニタリングユニット

内部における遊離ガスの発生を防ぐことは困難である。坑道モニタリング部では，水圧が最も低下し，遊離ガスが発生しやすい。発生した遊離ガスによりポンプ内部が満たされてしまうと，ポンプの力が地下水に伝わらなくなり，地下水の循環が停止してしまう。このことから，装置内部に溜まった遊離ガスを系外へ排気するためのドレンバルブを，装置の採水側・注水側両端に設置した（図 3.3-3）。

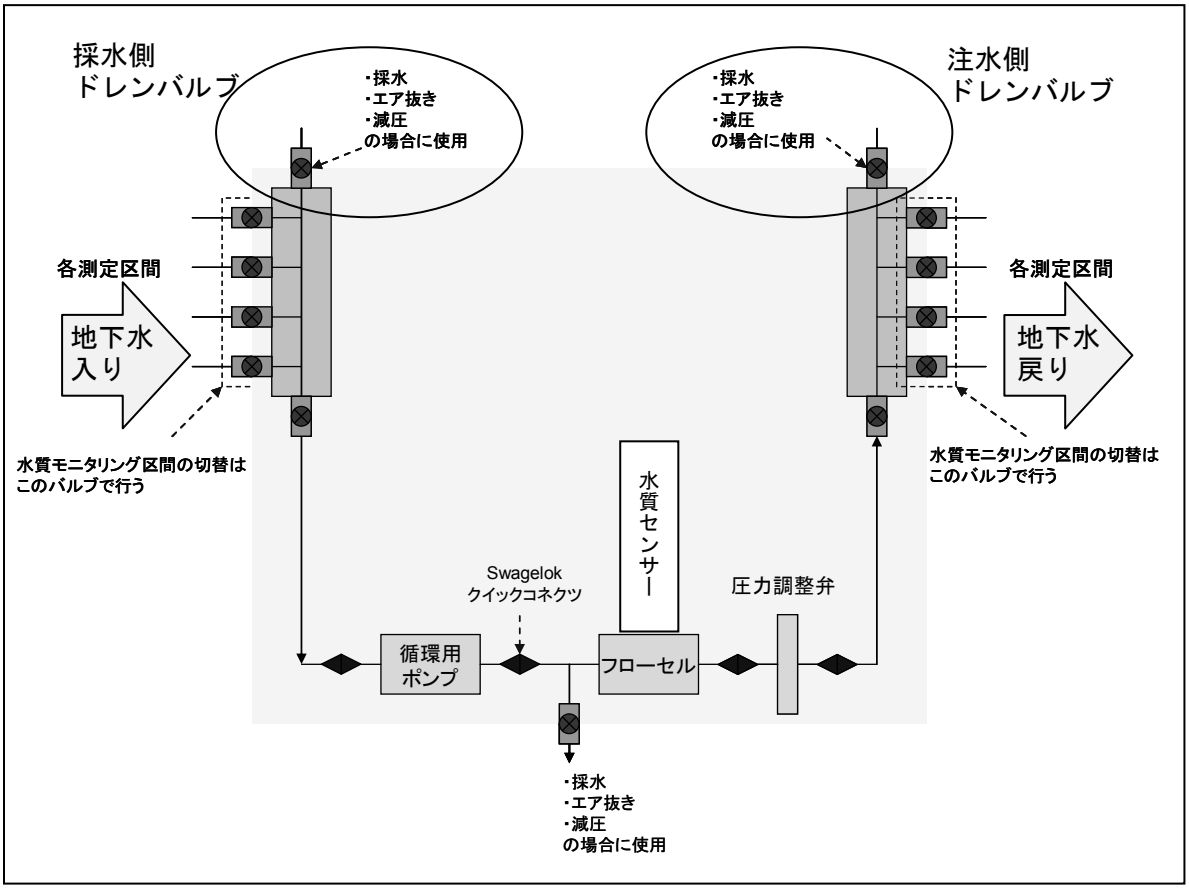

図 3.3-3　水質モニタリングユニットにおけるドレンバルブの追加箇所

3.3.2　メンテナンス性の向上に係る改良

140m 調査坑道で開発された既往のモニタリング装置では，水質センサーに至る地下水循環の配管をボルト･ナット接続していたため，センサーメンテナンス時の脱着の作業に手間を要した。そこで，水質センサーを水質モニタリングユニット外に配置し，着脱が容易な配管継手（Swagelok 社製クイックコネクツ）をセンサー前後に組み込んだ（図 3.3-4）。このワンタッチ継手は，バネと逆止弁を組み合わせた仕組みになっており，連結時に導通し，外すと自動的に閉塞する機構を有している。このため，手動によるバルブ開閉操作を必要とせず，また，この操作に伴う水漏れや水圧変化が起きない構造となっている。この継手を用いることにより，工具を使わずに水質センサーの脱着を可能とした。さらに，このワンタッチ継手を各種機器の前後に配置し，ユニット内の各機能をモジュール化することにより，部分的な故障時の部品交換や，循環経路内への採水器組み込みなど，メンテナンス性や拡張性が向上した。

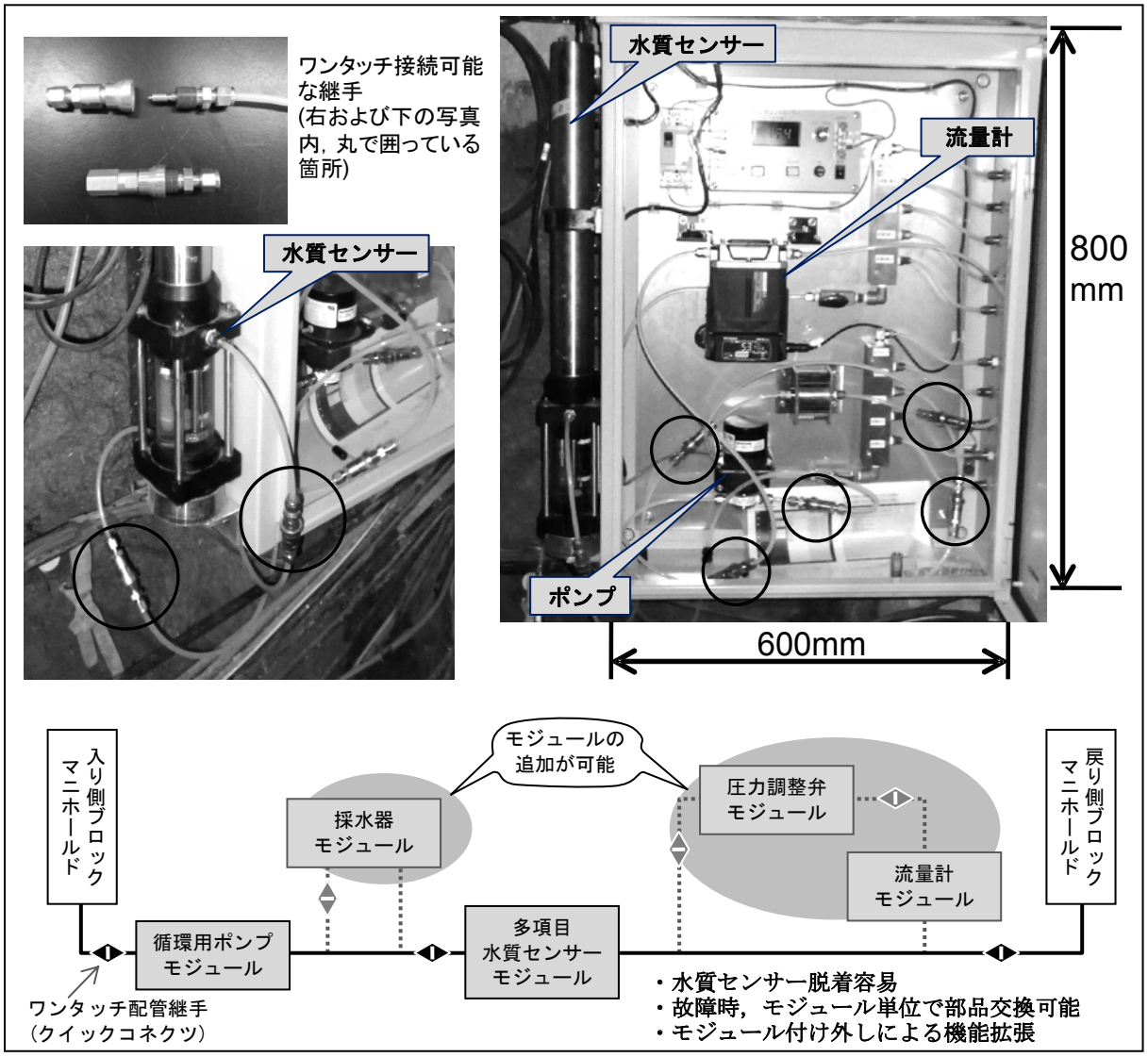

図 3.3-4　水質モニタリングユニット内の接続継手によるモジュール化の様子

3.3.3 停電時の対応に対する改良

140m 調査坑道で開発された既往のモニタリング装置では，停電等によりモニタリング装置への電源が遮断された場合，装置はただ停止するだけであった。電源の復旧後にモニタリングを再開するためには，現場にて装置を起動させる必要があった。このため，休日や他現場の都合等が重なると，欠測が長期間となることがあった。

停電対策として代表的なものには，サーバー等にも使用されている無停電電源装置（UPS）がある。これは停電を検知すると自動的にバッテリー電源へと切り替わるものである。しかしながら，幌延の地下水中には可燃性のメタンガスが含まれているため，坑道内のメタンガス濃度が上昇すると，自動的に坑内の電源が遮断され，火花等による発火・爆発を防ぐシステムになっている。このため，UPS による水圧水質観測装置の無停電化は安全管理上使用不可である。このことから，停電は不可避の事象とし，停電後の復帰を自動化する必要があった。

停電後の復帰を自動化するには，これまで別々に起動していたセンサーをまとめて制御できるコントロール機器の追加が効果的である。そこで，新たに追加したデータ表示・収録ユニットにセンサーの制御を集約し，自動復旧できる構造とした。また，制御用の機器としてパソコン（PC）を組み込み，停電後にも自動的に観測データの取得を再開させることを可能とした。これにより，取得されたデータ上で，観測中断期間の把握が可能になった。

地下水循環に係るポンプについては，復電後には必ず停止した状態で待機する設定とした。このため，復電後の装置の稼働状況を確認の上，ポンプの作動を復旧することになる。このような設定にしたのは，循環停止中にバルブを閉めた場合，そのままの状態でポンプが動くと，装置内で水圧が高まり，故障や事故の危険性が高まる可能性があるためである。また，この機器ユニットは，地上の研究管理棟の PC と LAN で接続されているため，現地に赴かなくても停電時の欠測やエラーの確認，およびポンプの電源操作を，研究管理棟の PC の画面上からも可能となった。参考までに，地上の研究管理棟の PC からデータを確認した例を，図 3.3-5 に示す。

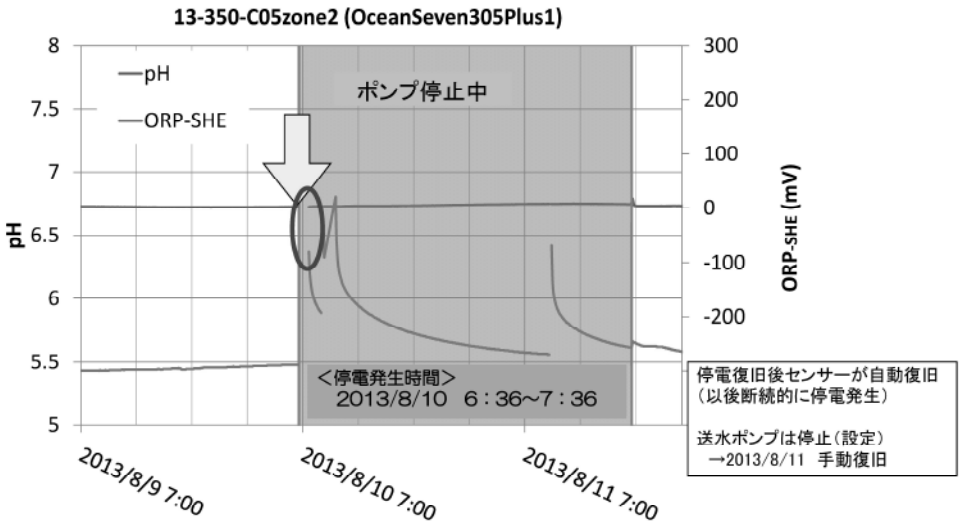

図 3.3-5 停電時データの取得例

3.3.4　データ記録・表示様式の改良

140m 調査坑道で開発された既往のモニタリング装置では，水圧モニタリングユニットと水質モニタリングユニットがシステム的に独立しており，水圧計のデータと，多項目水質センサーのデータとを別々に回収する必要があった。また，水圧・水質のリアルタイムデータの確認や経時的な変化の現地での確認が容易でないため，センサーの不調等のシステムの状況は，データの回収・処理後に確認する状態であった。

3.3.3 節でも述べたとおり，新たにデータ収録ユニットを設け，ここに観測機器を一元管理する PC を搭載したことから，これまで別々に取得していたデータも 1 ファイルにまとめることが可能になり，データ回収および観測データの処理が簡略化された。また，坑道内に設置された LAN 接続により，研究所内の専用 PC からも観測データの確認，取得が可能となり，作業効率が向上した。なお，装置のモニターでは，取得データの経時的な変化を示すグラフ表示のほか，地下施設の一般見学者にも調査研究の状況を把握してもらいやすくするため，ボーリング孔のどこでどのような観測を行っているかが直感的に理解しやすい概念図表示に，画面を切り替えられるような改良も図った（図 3.3-6）。

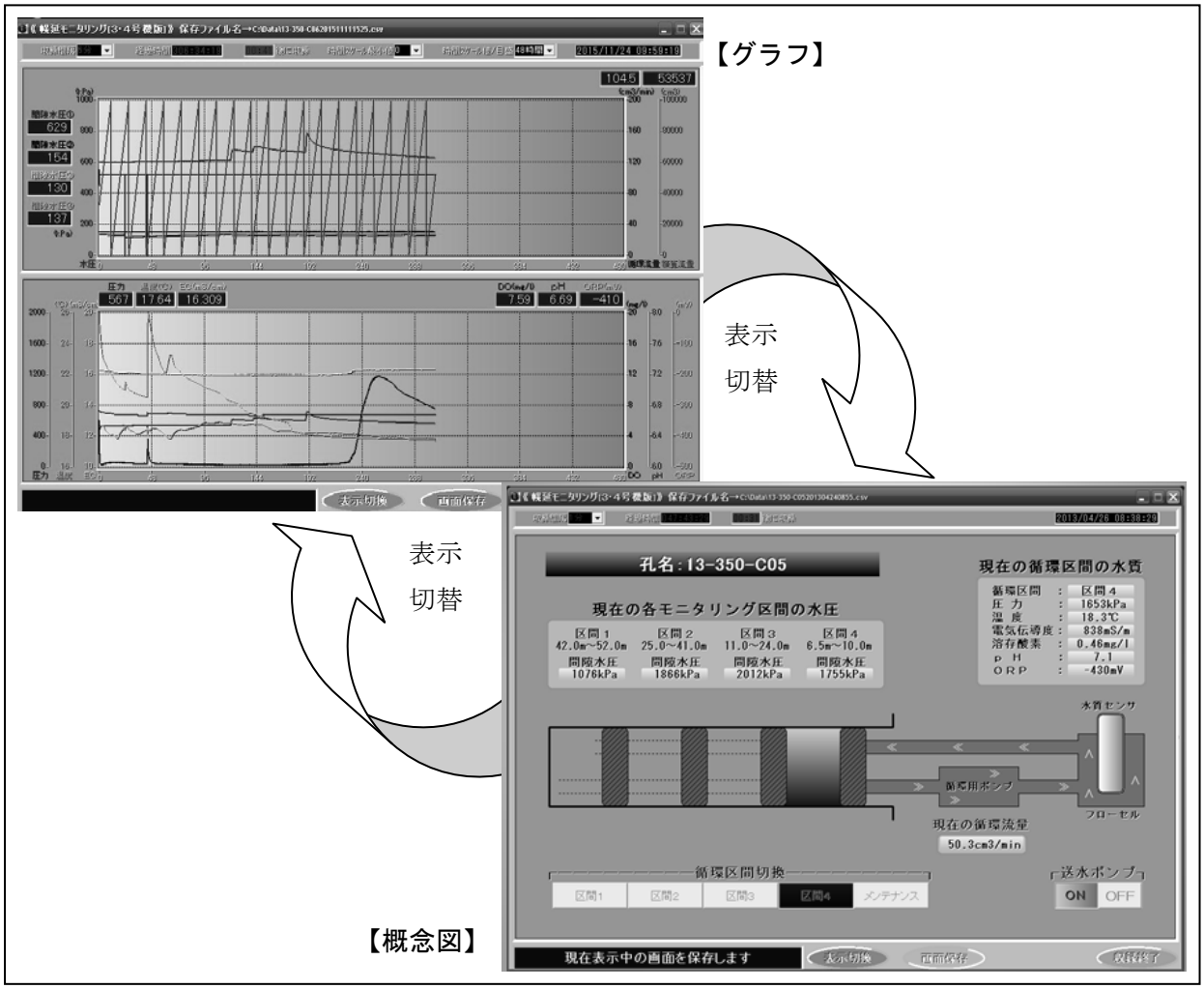

図 3.3-6　データ表示・収録ユニットの画面構成

3.3.5　急激な圧力変化による水質センサーへの影響低減に係る対策

高圧状態にある地下水などを対象として，pH や ORP などの物理化学パラメータを測定する場合，溶存ガスの脱ガスによる値の変化を防止するため，高圧環境下に測定電極を設置して測定を行う必要がある。しかしながら，耐圧性測定電極は，急激な圧力変化があると故障する可能性が高い。そこで，多項目水質センサーの保護を目的とし，急激な圧力変化を防ぐ差圧調整弁を開発した（図 3.3-7）。ここで開発した技術は，バルブ開閉時の急激な液体の流入を抑制し，ウォーターハンマー現象による圧力変化を緩慢にすることで，配管に接続した各種計測機器内の水圧が外圧と等しくなると液体が通常流速で流れる差圧調整弁である。幌延深地層研究センターの地下施設内のような，高差圧環境下にある地下水を対象とした場合の配管などで使用に適している。

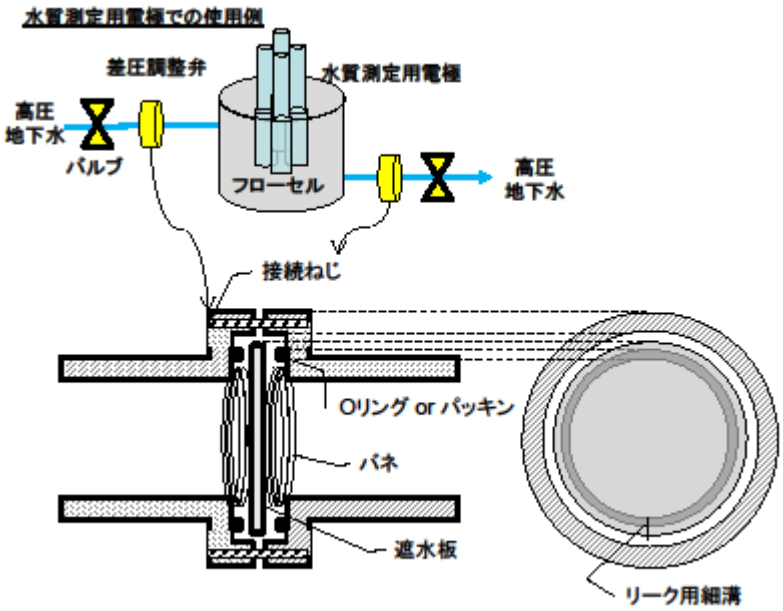

図 3.3-7　差圧調整弁の使用例と構造

差圧調整弁両端の圧力差が大きい場合（0.15MPa 程度），図中の O リングと遮水板により回路が閉塞されるが，遮水板に細溝が刻まれているため，微量の地下水を通過させることができる（図 3.3-7）。このことにより，急激な差圧が生じた場合に，その差圧を徐々に減少させることが可能になり，センサー類への悪影響が無くなる。そして，差圧調整弁両端の圧力差が小さい場合（0.02MPa 程度），バネの力により回路が開放される。このことにより，地下水を循環させて水質観測を行う場合，差圧調整弁両端の圧力が等しくなると，通常通りに地下水を循環させることが可能になる。なお，本技術は，原子力機構と株式会社ダイヤコンサルタントの両社による発明であり，両社により特許願が提出されている（2015 年 12 月時点，名称：水質測定システム及び差圧調整弁，特許公開番号：2014-145648）。

3.4　改良した装置を用いたデータ取得例

3.3 節で述べたような 350m 調査坑道でのモニタリングに向けた装置改良を踏まえて開発された観測装置は，2012 年～2013 年にかけて製作された。また，2013 年の 3 月～6 月頃にかけて，350m 調査坑道において水平方向に掘削されたボーリング孔である 13-350-C05 孔および 13-350-C06 孔（以下 C05 孔および C06 孔と略す）に設置された。設置箇所の詳細なレイアウトは，図 3.4-1 に示す通りである。

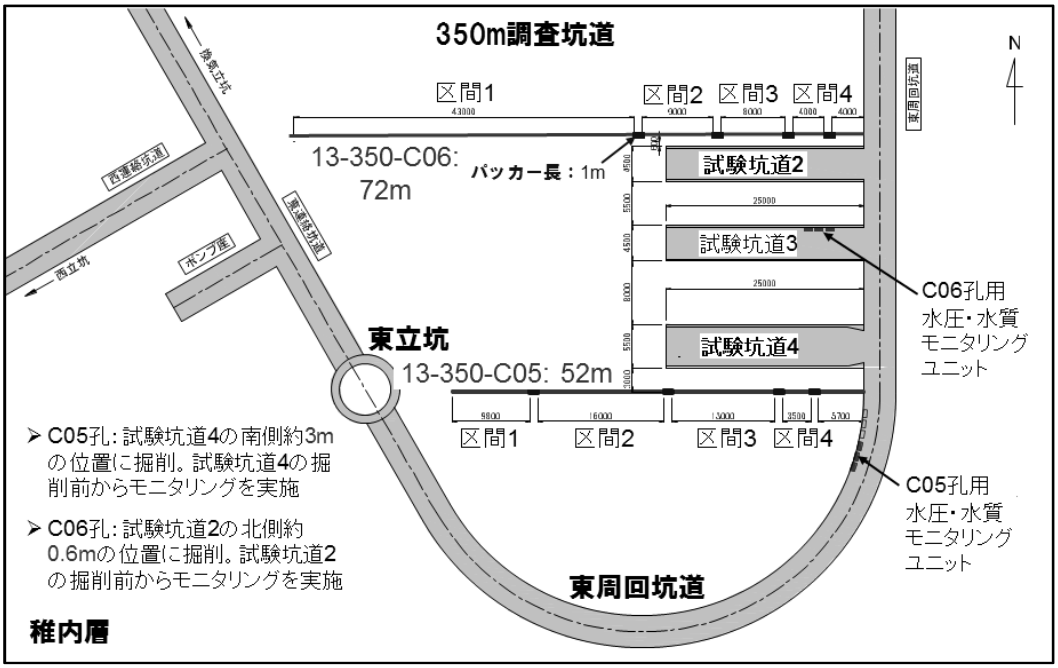

図 3.4-1　350m 調査坑道における C05 孔および C06 孔の配置図

3.4.1　間隙水圧観測結果

観測開始（C05：2013/4/24，C06：2013/7/8）から，2015 年 3 月 31 日までの C05 孔と C06 孔での間隙水圧の観測結果を各々，図 3.4-2 および図 3.4-3 に示す。両孔ともに，観測区間は 4 つに仕切られ，区間 1～区間 4（zone 1～zone 4）が設けられている。観測結果に認められる瞬間的な水圧低下とそれに引き続く曲線的な水圧の回復は，採水やメンテナンスなどの作業により一時的に圧が解放されるためである。なお，図 3.4-2 および図 3.4-3 中において，2014 年 1 月前後に，大幅な水圧低下が観測されているが，これは 2013 年 11 月 5 日～12 月 4 日にかけて行われた試験坑道 4 の掘削や, 2013 年 12 月 4 日～2014 年 1 月 17 日にかけて行われた試験坑道 2 の掘削に伴う影響である。

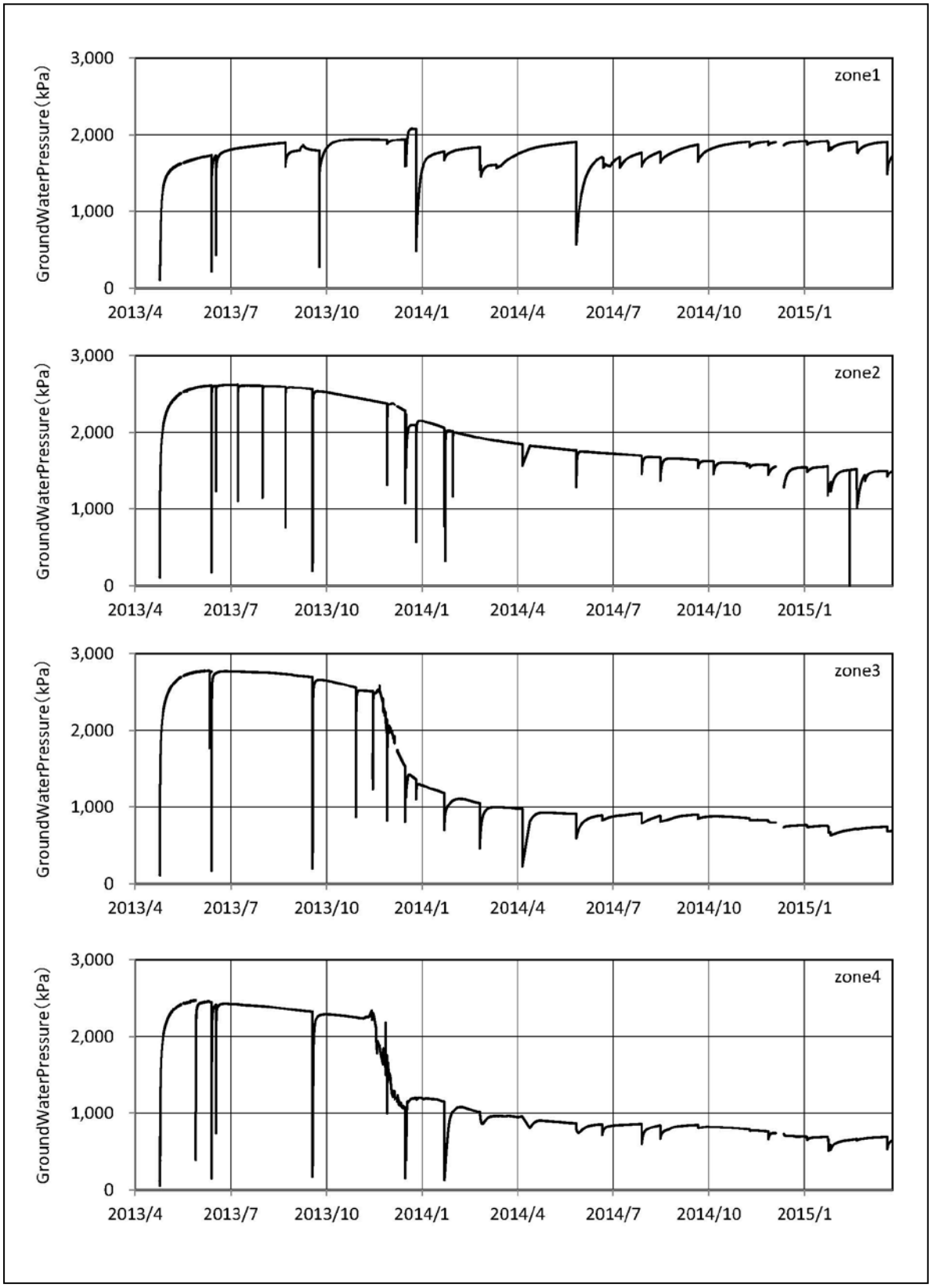

図 3.4-2　間隙水圧観測結果(C05 孔)

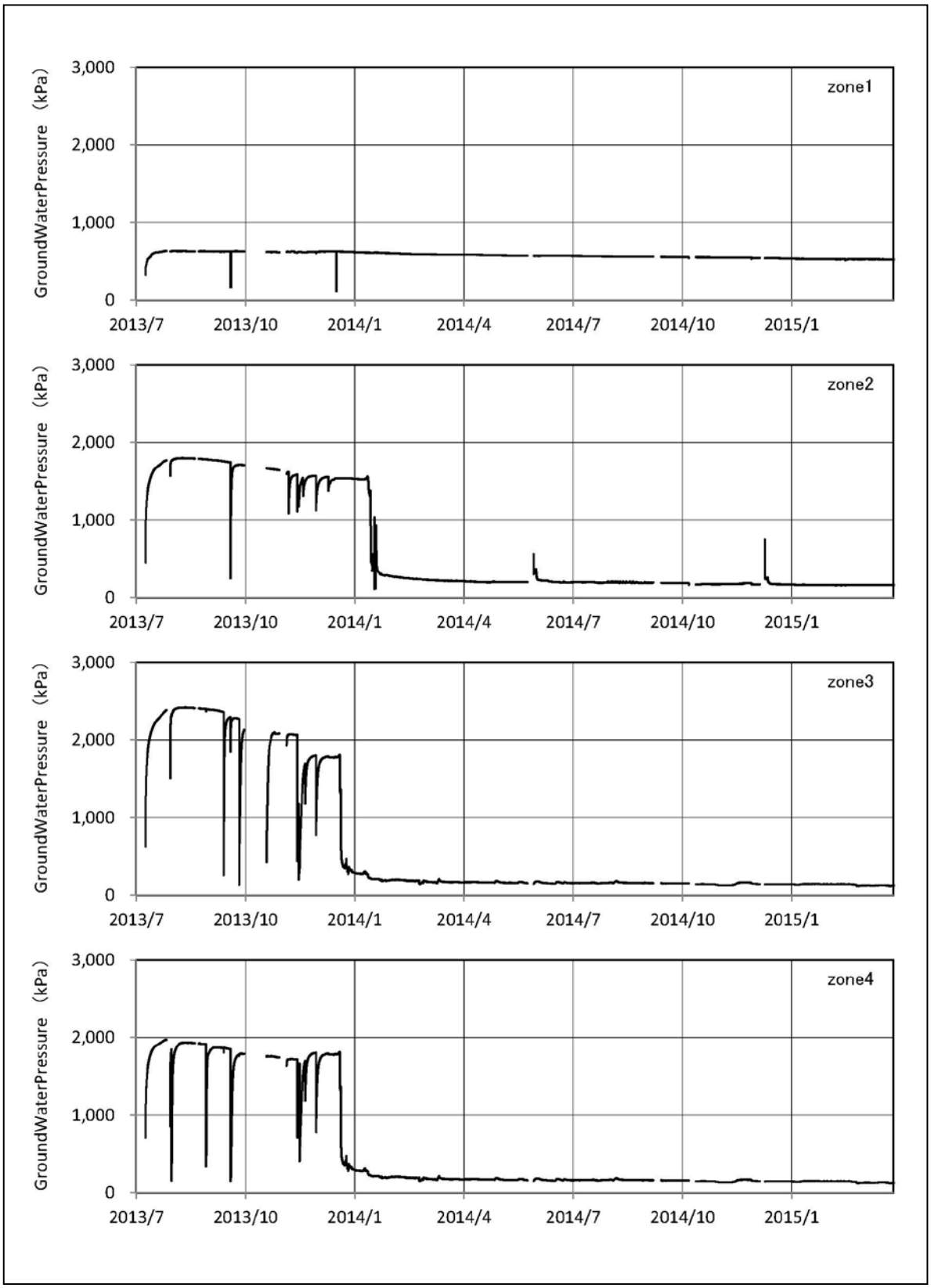

図 3.4-3　間隙水圧観測結果(C06 孔)

3.4.2 水質観測結果

水質モニタリングの一例として，C05 孔での 2014 年 8 月 19 日～9 月 24 日の期間で得られた区間 2 の結果を図 3.4-4 に示す。この時，ポンプの流量は，90 mL/min の設定で地下水の循環を行った。水質観測を開始する前には，pH と ORP の電極について，各々，校正を実施した。水質観測の結果，pH は観測期間全体を通して微増し，最終的には約 6.6 を示した。ORP は，観測開始後から 2 週間程度かけて大きく低下し，その後は微減して約-400mV で安定した値を示した（ここでの ORP は前述に同じく，白金電極による測定値である）。電気伝導度（EC）は，観測開始 1 日後から約 1,590 mS/m で安定した値を示した。また，水温は，観測開始後から坑道内の気温変化に追従する傾向を示した。なお，9/9 の 9:35～9:42 の間に停電が発生しており，ポンプは 9/11 の 10:25 に再開している。ポンプ停止期間においては ORP の低下，EC の上昇が認められる。

同様に，C06 孔での 2014 年 6 月 4 日から 6 月 25 日の期間で得られた区間 1 の結果を図 3.4-5 に示す。この時，ポンプの流量は，50 mL/min の設定で地下水の循環を行った。観測を開始する直前に，pH と ORP の電極について，各々，校正を実施した。pH は観測期間全体を通して微減し，最終的には約 6.9 を示した。一方で，ORP は観測開始後から一週間ほどかけて上下しつつも傾向として低下し，そのさらに一週間後に約-400mV で安定した値を示した（ここでの ORP は前述に同じく，白金電極による測定値である）。EC は，観測開始から一週間程度の後に約 1,650 mS/m で安定した値を示した。また，水温は，観測開始後から坑道内の気温変化に追従する傾向を示した。直後から坑道内の気温を示す理由としては，坑道モニタリング部にある水質センサーと坑内パッカーシステム部との距離が大きく，そこを地下水が流れている間に，熱交換が行われてしまっていることが考えられる。

なお，350m 調査坑道での水質モニタリングの場合でも，溶存酸素の連続観測は実施していない。溶存酸素センサーが，脱ガスによる気泡の影響を受けやすい点については，本報告で述べたガス発生による影響を低減するための改良を行っても，十分な改善を行うことができなかった。

上述したように，350m 調査坑道での水質モニタリングにおいても，約 2～3 週間の時間をかけて，坑道モニタリング部のセンサーと原位置との間で地下水を循環させながら，観測を行うことで，観測期間内において概ね安定した測定値を得ることができた。

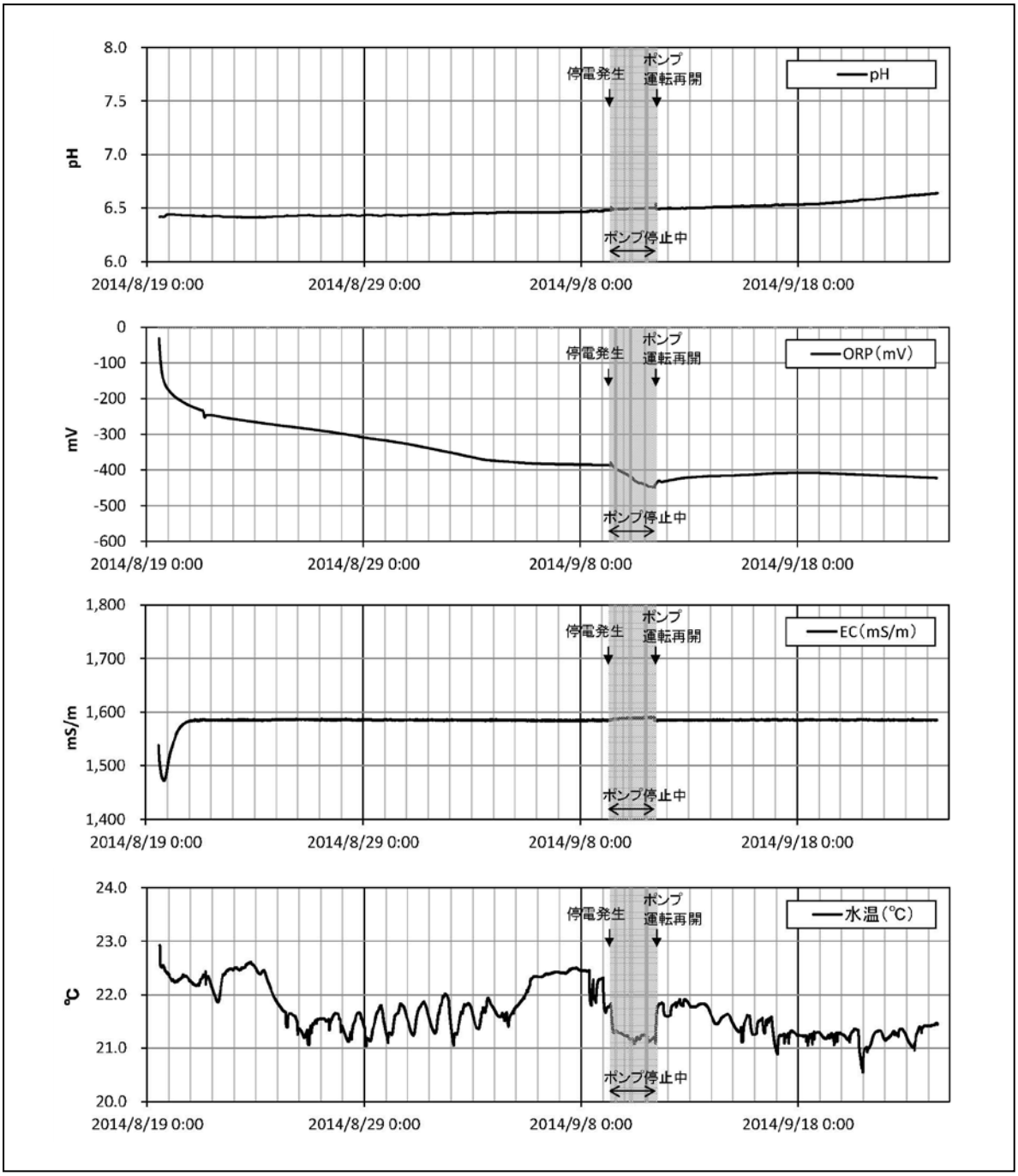

図 3.4-4　水質観測結果(C05 孔　区間 2　2014/8/19～9/24)

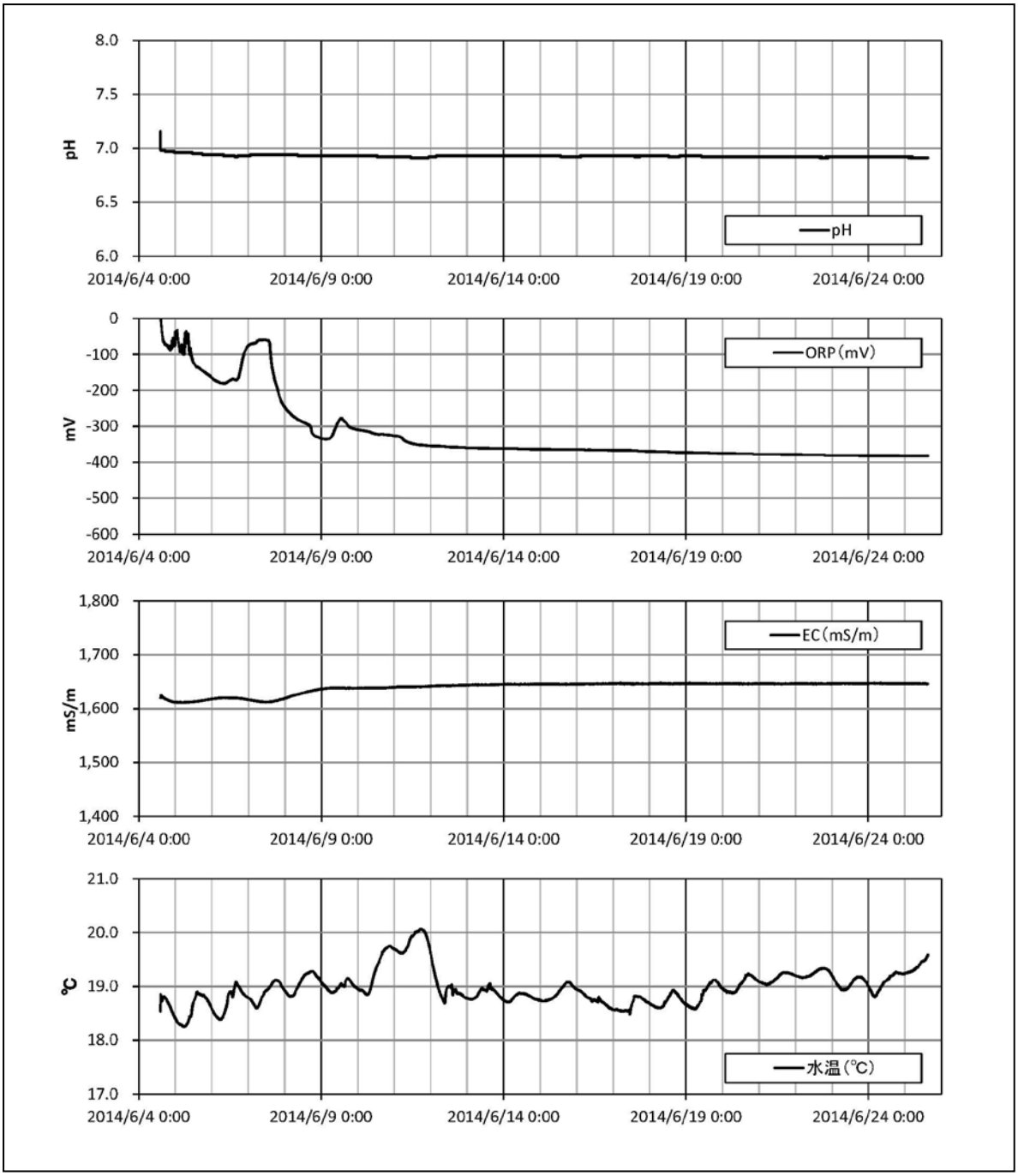

図 3.4-5　水質観測結果(C06 孔　区間 1　2014/6/4～6/25)

4. おわりに

140m 調査坑道で開発された地下水の地球化学モニタリング装置の運用をもとに，より深部の地質環境条件への対応を念頭に，モニタリング装置を改良・開発した。また，同装置を用いて，350m 調査坑道における水圧・水質モニタリングを行い，装置の適用性について確認した。その結果，低透水性ならびに溶存ガスを含有する地下深部の堆積岩環境において，地下 350m における原位置の圧力を維持した状態での地下水の水圧・水質データを取得することができた。

本報で報告したような低透水性の堆積岩中の地下水を対象とした原位置での水圧・水質モニタリング技術の開発は，海外における地下研究施設を利用した調査・研究の中でも鋭意進められており，より深度の深い地質環境でのモニタリング（例えば，深度 430～500m 程度）も実施されている[6]。今回，深度 350m の地質環境条件への対応として，既往の装置の改良を試みたが，今後，より深い地質環境でのモニタリングも念頭に，今回改良した装置の改善点や見直しも検討していくことが重要である。特に，幌延の地下水に特徴的な多量の溶存ガスに対する対策については，今回の改良に留まらず，引き続き検討を進めていくことが必要である。

なお，今後に向けた具体的な課題としては，例えば，溶存酸素濃度の安定したモニタリング技術の確立が挙げられる。溶存酸素センサーは，酸素透過性のプラスチック薄膜を固体電極にかぶせた隔膜電極法を用いている。しかしながら，幌延の地下水のような多量の溶存ガスが存在する場合，脱ガスに伴い生じた気泡が膜の表面に付着し，測定に大きな影響を与えることから，安定した観測を行うことが難しい。膜の表面に付着した異物を取り除く対策などが必要である。

また，差圧調整弁の開放圧力が小さすぎる点が問題となり，地下水の循環が行えない事態がしばしば生じたため，開放圧力を大きくするなどの改良も必要である。わずかな差圧で作動してしまう場合，水質センサーのメンテナンス等の作業に支障をきたすこともあることから，水質センサーへの影響と作業性への影響とを比較し，最適な開放圧力を設定することが望ましい。

謝辞

深度 350m の地質環境条件への対応を念頭にした水圧・水質モニタリング装置の開発は，PFI 事業（Private Finance Initiative : 民間資金等活用事業）: 地下研究施設整備（第Ⅱ期）等事業（平成 23 年 1 月 31 日～平成 31 年 3 月 31 日）における研究支援業務の一部として行われた。

PFI 事業の研究部門として装置の改良・開発に携わった大成建設株式会社の本島貴之氏，装置製作およびメンテナンスを担当した株式会社ダイヤコンサルタントの細谷真一氏・若浜洋氏に，この場を借りて厚く御礼申し上げます。また，350m 調査坑道におけるモニタリング装置の設置・運用にあたっては，株式会社ダイヤコンサルタントの南條功氏・三井住友建設株式会社の山本信幸氏（両氏は，当時の技術開発協力員として原子力機構に従事）および原子力機構の水野崇氏には，終始，ご協力を賜った。この場を借りて，謝意を表します。

参考文献

1) 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター：“幌延深地層研究計画 地下施設での調査研究段階（第 3 段階）計画－その 1：深度 350m までの調査研究計画”，平成 22 年 7 月，16p, 2010.

2) 南條功，天野由記，岩月輝希，國丸貴紀，村上裕晃，細谷真一，森川佳太：“幌延深地層研究センター東立坑 140m 調査坑道における地下水の地球化学モニタリングに関する研究開発”，JAEA-Research 2011-048,pp.1-162, 2011.

3) 舟木泰智，石山宏二，早稲田周，加藤進，渡辺邦夫：“北海道北部，幌延地域に分布する新第三紀堆積岩中の炭化水素ガスの分子組成と炭素同位体組成”，地学雑誌，121(6), pp.929-945, 2012.

4) 山本陽一，高橋直樹，黒川幸彦：“溶存メタンセンサーによる原位置メタン量測定”，三井住友技術報告書，第 5 号，pp.69-78, 2007.

5) 岩月輝希，石井英一，新里忠史：“北海道幌延地域における深部地球化学環境の長期変遷シナリオの構築”，地学雑誌，118(4), pp.70-716, 2009.

6) Vinsot, A., Mettler, S., Wechner, S.：“In situ characterization of the Callovo-Oxfordian pore water composition”, Physics and Chemistry of the Earth, 33, pp. S75-S86, 2008.

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

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

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の）　1	1
比透磁率[b]	（数字の）　1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

表５．SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 $hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	1 L=1 l=1 $dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	1 t=10^3 kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10^{-19}J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10^{-27}kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10^{11}m

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10^5Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	1 b=100fm^2=$(10^{-12}cm)^2$=$10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デシベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10^{-7} J
ダイン	dyn	1 dyn=10^{-5}N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm^{-2}=0.1Pa s
ストークス	St	1 St =$1cm^2\ s^{-1}$=$10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm^{-2}=10^4cd m^{-2}
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm^{-2} =10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s^{-2}=$10^{-2}ms^{-2}$
マクスウエル	Mx	1 Mx = 1G cm^2=10^{-8}Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm^{-2} =10^{-4}T
エルステッド[a]	Oe	1 Oe ≙ $(10^3/4\pi)$A m^{-1}

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

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10^{10}Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10^{-4}C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10^{-2}Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10^{-9}T
フェルミ		1 フェルミ=1 fm=10^{-15}m
メートル系カラット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10^{-4}kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー），4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年）