JAEA-Technology
2015-023
DOI:10.11484/jaea-technology-2015-023

観測装置の地上移設に関わる概念設計

Conceptual Design for Relocation of the Underground Monitoring Systems to Ground Surface

戸谷 成寿　小川 賢　岩月 輝希　大貫 賢二

Naruhisa TOYA, Ken OGAWA, Teruki IWATSUKI and Kenji OHNUKI

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 Geoscientific Center
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

September 2015

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, 2015

JAEA-Technology 2015-023

観測装置の地上移設に関わる概念設計

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

戸谷　成寿*[1]，小川　賢*[1]，岩月　輝希，大貫　賢二※[1]

（2015 年 6 月 26 日受理）

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，深地層の科学的研究の一環として，超深地層研究所計画（以下，MIU 計画）を進めている。MIU 計画においては，今後の研究開発課題の１つとして研究坑道閉鎖（埋戻し）時および埋戻し後の地質環境特性の回復や定常化に至るプロセスに関する知見の蓄積を挙げており，研究坑道閉鎖時および埋戻し後の観測体系の構築が必要となる。

本報告書では，現在，研究坑道に設置して使用している観測装置の地上移設に関する詳細設計に資することを目的とし，各観測装置の地上移設に関わる制約や坑道閉鎖時および埋戻し後の観測に要求される要件等を整理し，概念設計を行った。

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
※1 技術開発協力員
＊1 株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング

JAEA-Technology 2015-023

Conceptual Design for Relocation of the Underground Monitoring Systems to Ground Surface

Naruhisa TOYA*1, Ken OGAWA*1, Teruki IWATSUKI and Kenji OHNUKI※1

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

(Received June 26, 2015)

One of the major subjects of the ongoing geoscientific research program, the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) Project in the Tono area, central Japan, is accumulation of knowledge on a recovery of the geological environment during and after the facility closure. Then it is necessary to plan the observation system which can be use of after the backfill of research tunnels.

The main purpose of this report is contribution to the detailed design for relocation of the underground monitoring systems to ground surface. We discussed the restriction and requirement for the underground monitoring systems which can be use of after the backfill. Furthermore, we made the conceptual design for relocation of the current underground monitoring systems to ground surface.

Keywords: Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) Project, Groundwater, Long Term Monitoring, Backfill

※1 Collaborating Engineer
＊1 Asano Taiseikiso Engineering Co.,Ltd.

目　次

1.　はじめに 1
2.　研究坑道における各観測装置の諸元 2
3.　地上移設に関わる制約 8
3.1 地上移設の概念設計に関わる前提 8
3.2 水圧モニタリング装置の移設条件 8
3.3 水圧・水質モニタリング装置の移設条件 12
3.4 岩盤変位測定装置の移設条件 13
3.5 地震計の移設条件 14
3.6 地上移設に関わる制約 14
4.　坑道閉鎖後の観測装置に要求される事項の整理 19
4.1 坑道閉鎖が観測装置に及ぼす影響 19
4.2 装置に要求される事項および限界 20
5.　観測装置の移設方法の検討 23
5.1 地上移設可能な装置の選定 23
5.2 移設方法に関わる概念設計 23
5.3 光式間隙水圧モニタリングの概念 24
5.4 インナープローブ式水質モニタリングの概念 25
5.5 光式岩盤歪計の移設概念 32
5.6 基本工程 32
6.　今後の課題 33
6.1 坑道閉鎖後の長期地質環境モニタリング技術に関する課題 33
6.2 長期地質環境モニタリングに関わる先端的技術 33
参考文献 35

CONTENTS

1. Introduction 1

2. Function and restriction about current monitoring systems 2

3. Restriction for relocation the monitoring systems to surface level 8

3.1 Premise 8

3.2 Constrained for hydraulic pressure monitoring systems 8

3.3 Constrained for geo-hydro-chemical/hydraulic pressure monitoring systems 12

3.4 Constrained for rock displacement sensor 13

3.5 Constrained for seismometer 14

3.6 Restriction for relocation of the monitoring systems 14

4. Requirement for monitoring systems using at backfilled condition 19

4.1 Influence of backfill to monitoring systems 19

4.2 Requirement and limitation for monitoring systems 20

5. Strategy of relocation of the monitoring systems 23

5.1 Movable monitoring systems 23

5.2 Conceptual design for relocation strategy 23

5.3 Fiber optic hydraulic pressure monitoring system 24

5.4 Hydrochemical monitoring and sampling system by inner probe 25

5.5 Fiber optic rock displacement sensor 32

5.6 Time schedule 32

6. Future tasks 33

6.1 Long term environmental monitoring systems after the backfill 33

6.2 Future technology for long term environmental monitoring 33

References 35

図表リスト

図 2-1 瑞浪超深地層研究所研究坑道における観測内容 2
図 2-2 MP システム概念図 5
図 2-3 PIEZO システム概念図 6
図 2-4 長期水圧観測装置概念図 6
図 2-5 シングルパッカー式水圧モニタリングシステム概念図 7
図 2-6 水圧・水質モニタリング装置概念図 7
図 3-1 MP システムのデータケーブル延長概念図 8
図 3-2 PIEZO システムの水圧観測ライン延長概念図 9
図 3-3 長期水圧観測装置の水圧観測ライン延長概念図 10
図 3-4 シングルパッカー式水圧モニタリング装置の水圧計ケーブルまたは水圧観測ライン延長概念図 11
図 3-5 水圧・水質モニタリング装置の水圧／水質観測ライン延長概念図 13
図 3-6 岩盤変位計の光ファイバーケーブル延長概念図 14
図 3-7 MP システムのプローブとロガーをつなぐデータケーブル 16
図 4-1 坑道閉鎖後の装置に要求される事項 22
図 5-1 光式間隙水圧モニタリング装置の全体概念図 24
図 5-2 インナープローブ式水質モニタリング装置の全体概念図 25
図 5-3 インナープローブタイプの比較 29
図 5-4 ポート付パッカーの機構 30
図 5-5 ポート付パッカーの概要 30
図 5-6 観測ポート開閉機構案 1（ラッチ式） 31
図 5-7 観測ポート開閉機構案 2（ポート付パッカー活用型） 31

表 2-1 観測装置情報一覧 3
表 3-1 各観測装置の移設条件 15
表 3-2 各観測装置の地上移設に関わる制約 18
表 4-1 地層処分モニタリングにおいて考慮すべき計測環境条件 19
表 4-2 地層処分施設の各坑道の埋戻し期間の検討例 21
表 5-1 地上移設可能な装置一覧 23
表 5-2 地下水モニタリング・採水方式の比較 26
表 5-3 水圧／水質観測ライン数 27
表 5-4 インナープローブタイプの比較 29
表 5-5 基本工程 32
表 6-1 地層処分における計測対象と計測センサー技術動向 33

Figure and Table

Fig. 2-1 Monitoring in Mizunami Underground Research Laboratory.....2
Fig. 2-2 MP system 5
Fig. 2-3 PIEZO system.....6
Fig. 2-4 Long-term water pressure monitoring 6
Fig. 2-5 Single packer water pressure monitoring system 7
Fig. 2-6 Hydrochemical monitoring system 7
Fig. 3-1 MP system data cable 8
Fig. 3-2 PIEZO system: water pressure monitoring circuit.....9
Fig. 3-3 Long-term water pressure monitoring: monitoring circuit.....10
Fig. 3-4 Single packer water pressure monitoring system: monitoring circuit.....11
Fig. 3-5 Monitoring line for water pressure and chemistry.....13
Fig. 3-6 Optical fiber system for rock dislocation 14
Fig. 3-7 MP system and data logger cable.....16
Fig. 4-1 Requirement for post closure monitoring.....22
Fig. 5-1 Optical water pressure monitoring system 24
Fig. 5-2 Inner probe hydrochemical monitoring system 25
Fig. 5-3 Comparison of inner probe types 29
Fig. 5-4 Packer system with sampling port 30
Fig. 5-5 Sampling port.....30
Fig. 5-6 Mechanism of monitoring port 1 31
Fig. 5-7 Mechanism of monitoring port 2 31

Table 2-1 List of monitoring system 3
Table 3-1 Condition of monitoring systems.....15
Table 3-2 Constraint on replacement 18
Table 4-1 Considerable monitoring condition 19
Table 4-2 Period for closure of geological isolation facility 21
Table 5-1 List of movable instruments.....23
Table 5-2 Comparison of monitoring and sampling methods 26
Table 5-3 Number of monitoring lines.....27
Table 5-4 Comparison of inner probes.....29
Table 5-5 Basic schedule.....32
Table 6-1 State of the art on sensors 33

1. はじめに

瑞浪超深地層研究所では，坑道埋戻し技術の開発を課題の一つとして挙げている。この課題には，坑道の埋戻し方法に関わる研究技術開発に加え，坑道埋戻し時および埋戻し後の地質環境特性の回復や定常化の過程を理解するためのモニタリング技術の研究開発が含まれている。瑞浪超深地層研究所において，これまでに構築されたモニタリング技術には，地上から掘削されたボーリング孔を利用した地下水の水圧・水質モニタリング技術，研究坑道から掘削されたボーリング孔を利用した岩盤変位モニタリング技術および地下水の水圧・水質モニタリング技術などがある。これらの技術については，研究坑道掘削時とその後の維持管理時の地質環境特性の変化の観測により，それらの適用性が確認，実証されている。

本報告書は，研究坑道全体の埋戻し時および埋戻し後の研究坑道周辺の地質環境特性の変化を把握するため，そのモニタリングに必要な技術開発について検討したものである。具体的には，研究坑道内に設置した各モニタリング装置を対象として，その技術的仕様を整理した上で，改良により研究坑道埋戻し後も利用可能となる装置類を抽出するとともに，その改良方法（モニタリング装置の地上化）について，概念設計を行った。

2. 研究坑道における各観測装置の諸元

超瑞浪深地層研究所の研究坑道内において，観測装置を設置しているボーリング孔の配置図を図 2-1 に示す。また，研究坑道に設置している地震計も含めた観測装置について，表 2-1 に観測項目ごとの諸元を整理した。

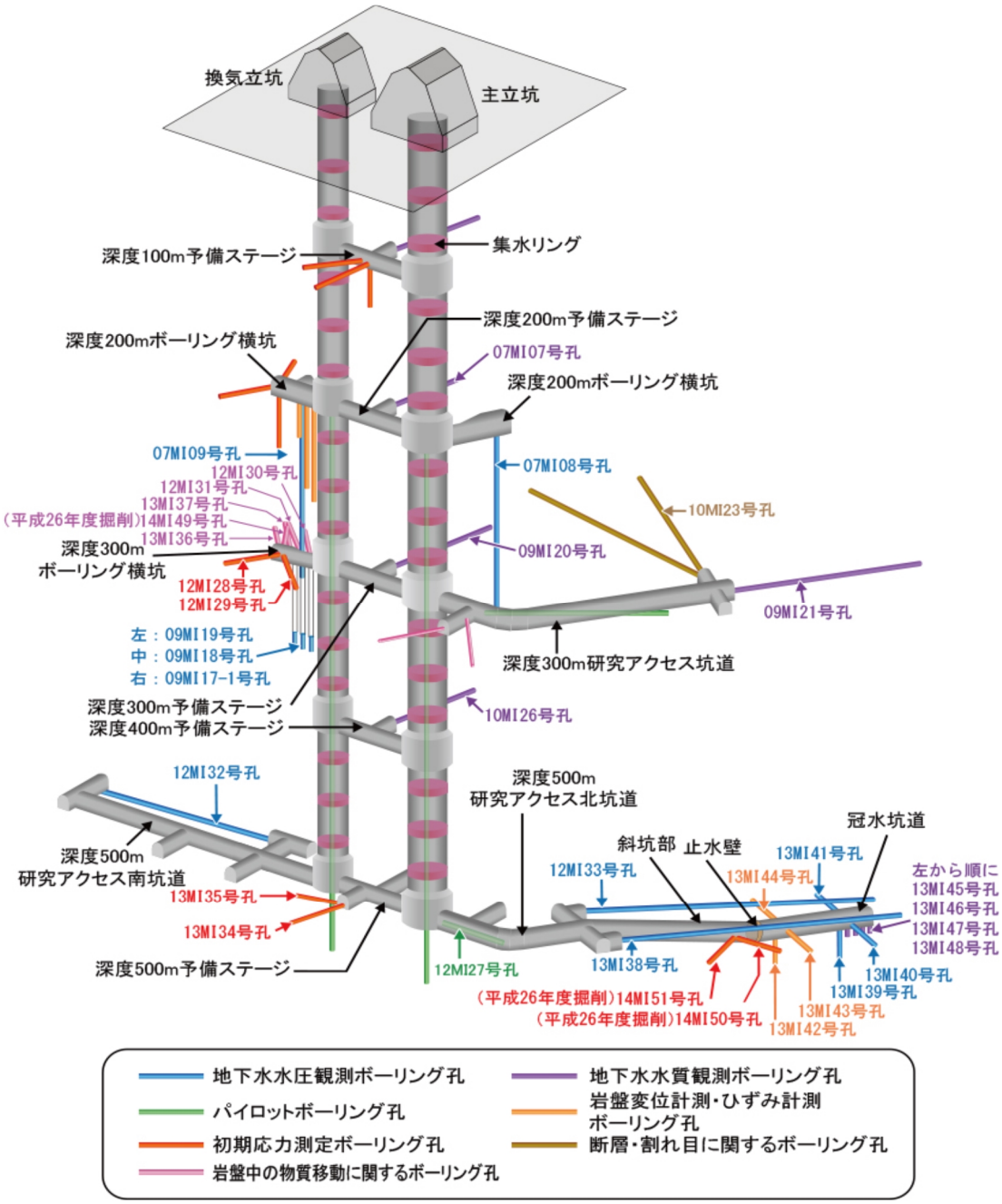


図 2-1 瑞浪超深地層研究所研究坑道における観測内容

表 2-1 観測装置情報一覧

観測目的	坑道内設置位置	ボーリング孔	対象地層	観測区間数	測定項目詳細	装置地上部	パッカーシステム	センサー方式	備考
水圧測定	GL-200mボーリング横坑(換気立坑)	07MI09	土岐花崗岩	5	・地下水位	・配管 ・計測用ラック(ロガー等,データ回収には要PC)	マルチパッカー 水圧拡張	電気	・ピエゾ管方式
	GL-200mボーリング横坑(主立坑)	07MI08	土岐花崗岩	7	・間隙水圧 ・水温	・計測用ラック(ロガー等,データ回収には要PC)	マルチパッカー 水圧拡張(調整不可)	電気	・WestBay社製MPシステム
	GL-300mボーリング横坑(換気立坑)	09MI17-1	土岐花崗岩	1	・間隙水圧, 水温	・センサーおよびケーブル(データ回収には要PC)	シングルパッカー	電気	・In-Situ社製Level Troll ・内蔵電池のメーカー保証:5年
		09MI18	土岐花崗岩	1			シングルパッカー	電気	・In-Situ社製Level Troll ・内蔵電池のメーカー保証:5年
		09MI19	土岐花崗岩	1			シングルパッカー	電気	・In-Situ社製Level Troll ・内蔵電池のメーカー保証:5年
	GL-300m研究アクセス坑道	10MI23	土岐花崗岩	5	・間隙水圧	・計測用ラック(ロガー等)	マルチパッカー 水圧拡張 個別拡張・収縮 片側スライド	電気	・耐圧:10MPa ・10MI22孔は装置回収済み
	GL-500m研究アクセス南坑道(PB)	12MI32	土岐花崗岩	3	・間隙水圧	・計測用ラック(ロガー等)	ダブルパッカー 水圧拡張 個別拡張・収縮 片側スライド	電気	・耐圧:10MPa
	GL-300m研究アクセス坑道	10MI24	土岐花崗岩	1	・間隙水圧	・センサーおよびケーブル(データ回収には要PC)	シングルパッカー	電気	・In-Situ社製Level Troll ・物質移動に関するボーリング孔 ・内蔵電池のメーカー保証:5年
	GL-300m研究アクセス坑道	10MI25	土岐花崗岩	1	・間隙水圧	・センサーおよびケーブル(データ回収には要PC)	シングルパッカー	電気	・In-Situ社製Level Troll ・物質移動に関するボーリング孔 ・内蔵電池のメーカー保証:5年
水圧/水質測定	GL-100m予備ステージ	05MI01	土岐夾炭累層	5	・間隙水圧 ・水質(TROLL) pH Eh/ORP EC DO 温度 Cl- ・排水流量	・配管ユニット ・水質分析ユニット ・データ表示ユニット	マルチパッカー 水圧拡張 個別拡張・収縮 片側スライド	電気	・耐圧:10MPa ・配管切り替え:プログラム連動(一部手動)
	GL-200m予備ステージ	07MI07	土岐花崗岩	6	・間隙水圧 ・水質(OCEAN 7) pH ORP EC DO 温度 ・排水流量	・配管ユニット(水質分析計含) ・データ表示ユニット	マルチパッカー 水圧拡張 個別拡張・収縮 片側スライド	電気	・耐圧:10MPa ・配管切り替え:プログラム連動(一部手動)
	GL-300m予備ステージ	09MI20	土岐花崗岩	6	・間隙水圧 ・水質(OCEAN 7) pH ORP EC DO 温度 ・排水流量	・配管ユニット(水質分析計含) ・データ表示ユニット	マルチパッカー 水圧拡張 個別拡張・収縮 片側スライド	電気	・耐圧:10MPa ・配管切り替え:プログラム連動(一部手動)
	GL-300m研究アクセス坑道100m計測横坑	09MI21	土岐花崗岩	4	・間隙水圧 ・水質(OCEAN 7) pH(測定停止中) ORP(測定停止中) EC(測定停止中) DO(測定停止中) 温度(測定停止中) ・排水流量	・配管ユニット(PC含)	マルチパッカー 水圧拡張 個別拡張・収縮 片側スライド	電気	・AIST共研(撤去希望?) ・耐圧:7MPa ・配管切り替え:手動
	GL-400m予備ステージ	10MI26	土岐花崗岩	6	・間隙水圧 ・水質(OCEAN 7) pH ORP EC DO 温度 ・排水流量	・配管ユニット(水質分析計含) ・データ表示ユニット	マルチパッカー 水圧拡張 個別拡張・収縮 片側スライド	電気	・耐圧:10MPa ・配管切り替え:プログラム連動(一部手動)

表 2-1 観測装置情報一覧（続き）

観測目的	坑道内設置位置	ボーリング孔	対象地層	観測区間数	測定項目詳細	装置地上部	パッカーシステム	センサー方式	備考
水圧/水質測定	GL-500m研究アクセス北坑道	13MI38	土岐花崗岩	6	・間隙水圧 ・水質（OCEAN 7） pH ORP EC DO 温度 ・排水流量	・圧力計ボックス ・被圧採水ボックス ・O/S,データロガーボックス ・フローコントロールボックス ・ライン切り替えボックス ・ライン採水，薬液添加ボックス ・データロガーボックス	マルチパッカー 水圧拡張 個別拡張・収縮 片側スライド	電気	・耐圧：5MPa
	GL-500m冠水坑道	13MI39	土岐花崗岩	4	・間隙水圧 ・水質（OCEAN 7） pH ORP EC DO 温度 ・排水流量	・圧力計ボックス ・被圧採水ボックス ・O/S,データロガーボックス ・フローコントロールボックス ・ライン切り替えボックス ・ライン採水，薬液添加ボックス ・データロガーボックス	マルチパッカー 水圧拡張 個別拡張・収縮 片側スライド	電気	・耐圧：5MPa
	GL-500m冠水坑道	13MI40	土岐花崗岩	4	・間隙水圧 ・水質（OCEAN 7） pH ORP EC DO 温度 ・排水流量	・圧力計ボックス ・被圧採水ボックス ・O/S,データロガーボックス ・フローコントロールボックス ・ライン切り替えボックス ・ライン採水，薬液添加ボックス ・データロガーボックス	マルチパッカー 水圧拡張 個別拡張・収縮 片側スライド	電気	・耐圧：5MPa
	GL-500m冠水坑道	13MI41	土岐花崗岩	4	・間隙水圧 ・水質（OCEAN 7） pH ORP EC DO 温度 ・排水流量	・圧力計ボックス ・被圧採水ボックス ・O/S,データロガーボックス ・フローコントロールボックス ・ライン切り替えボックス ・ライン採水，薬液添加ボックス ・データロガーボックス	マルチパッカー 水圧拡張 個別拡張・収縮 片側スライド	電気	・耐圧：5MPa
	GL-500m冠水坑道	13MI45	土岐花崗岩	1	・間隙水圧 ・水質（OCEAN 7） pH ORP EC DO 温度 ・排水流量	・圧力計ボックス ・被圧採水ボックス ・O/S,データロガーボックス ・フローコントロールボックス ・ライン切り替えボックス ・ライン採水，薬液添加ボックス ・データロガーボックス	シングルパッカー 水圧拡張 片側スライド	電気	・耐圧：5MPa ・配管切り替え：手動
	GL-500m冠水坑道	13MI46	土岐花崗岩	1	・間隙水圧 ・水質（OCEAN 7） pH ORP EC DO 温度 ・排水流量		シングルパッカー 水圧拡張 片側スライド	電気	・耐圧：5MPa ・配管切り替え：手動
	GL-500m冠水坑道	13MI47	土岐花崗岩	1	・間隙水圧 ・水質（OCEAN 7） pH ORP EC DO 温度 ・排水流量		シングルパッカー 水圧拡張 片側スライド	電気	・耐圧：5MPa ・配管切り替え：手動
	GL-500m冠水坑道	13MI48	土岐花崗岩	1	・間隙水圧 ・水質（OCEAN 7） pH ORP EC DO 温度 ・排水流量		シングルパッカー 水圧拡張 片側スライド	電気	・耐圧：5MPa ・配管切り替え：手動
	GL-500m研究アクセス北坑道(PB)	12MI33	土岐花崗岩	6	・間隙水圧 ・水質（OCEAN 7） pH ORP EC DO 温度 ・排水流量	・圧力計ボックス ・被圧採水ボックス ・O/S,データロガーボックス ・フローコントロールボックス ・ライン切り替えボックス ・ライン採水，薬液添加ボックス ・データロガーボックス	マルチパッカー 水圧拡張 個別拡張・収縮 片側スライド	電気	・耐圧：7MPa ・配管切り替え：手動
岩盤変位測定	GL-500m冠水坑道	13MI42	土岐花崗岩	3	・ひずみ量	・計測用ラック（ロガー等）	—	光ファイバ	—
		13MI43	土岐花崗岩	4	・ひずみ量		—	光ファイバ	—
		13MI44	土岐花崗岩	5	・ひずみ量		—	光ファイバ	—
地震動測定	GL-100m予備ステージ	—	—	—	・地震 ・相対重力	・計測用ラック（ロガー等） ・制御用キャビネット	—	電気	・地震研究所撤去予定
	GL-200m予備ステージ				・地震	・計測用ラック（ロガー等） ・制御用キャビネット	—	電気	
	GL-200mボーリング横坑（主立坑）				・地震	・計測用ラック（ロガー等）	—	電気	
	GL-200mボーリング横坑（換気立坑）				・地震 ・傾斜 ・応力	・計測用ラック（ロガー等）	—	電気	
	GL-300m予備ステージ				・地震	・計測用ラック（ロガー等） ・制御用キャビネット	—	電気	
	GL-300mボーリング横坑（換気立坑）				・地震	・計測用ラック（ロガー等）	—	電気	
	GL-300m研究アクセス坑道				・地震 ・応力	・計測用ラック（ロガー等） ・制御用キャビネット	—	電気	
	GL-400m予備ステージ				・地震	・計測用ラック（ロガー等）	—	電気	

水圧測定は，「直接水圧計測方式」または「ピエゾ水頭計測方式」が用いられている。直接水圧計測方式のものは Westbay 社製の「MP システム」のみであり，ロガーが収納された計測ラックが坑道内に設置されている（図 2-2）。

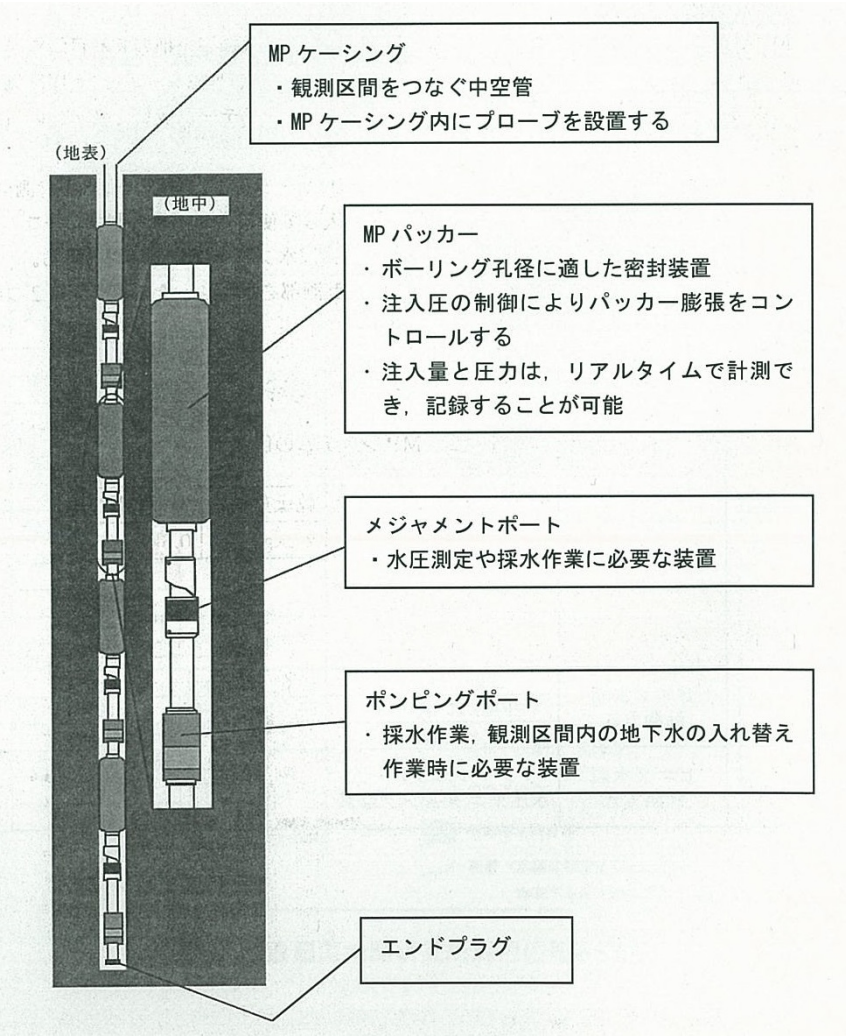


図 2-2 MP システム概念図 [1)]

ピエゾ水頭計測方式のものは，「PIEZO システム」，「長期水圧観測装置」および「シングルパッカー式水圧モニタリングシステム」が設置されており，このうち PIEZO システムおよび長期水圧観測装置は，装置地上部として，水圧観測用の配管およびロガーが収納された計測ラック等が坑道内に設置されている（図 2-3，図 2-4）。

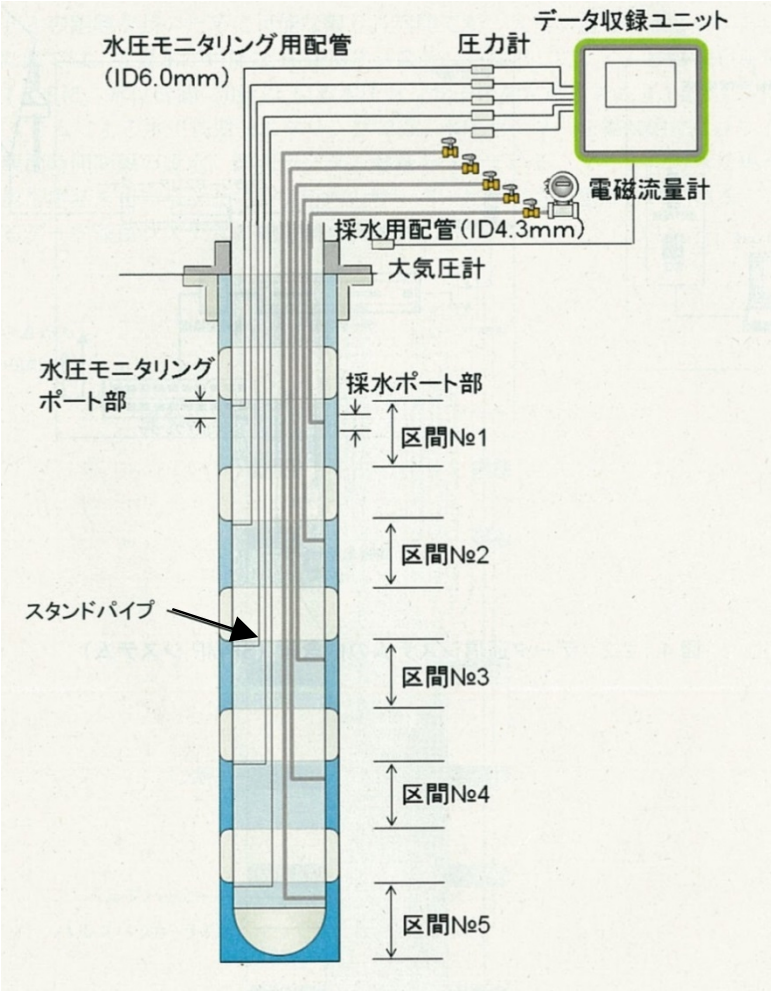


図 2-3 PIEZO システム概念図 1)

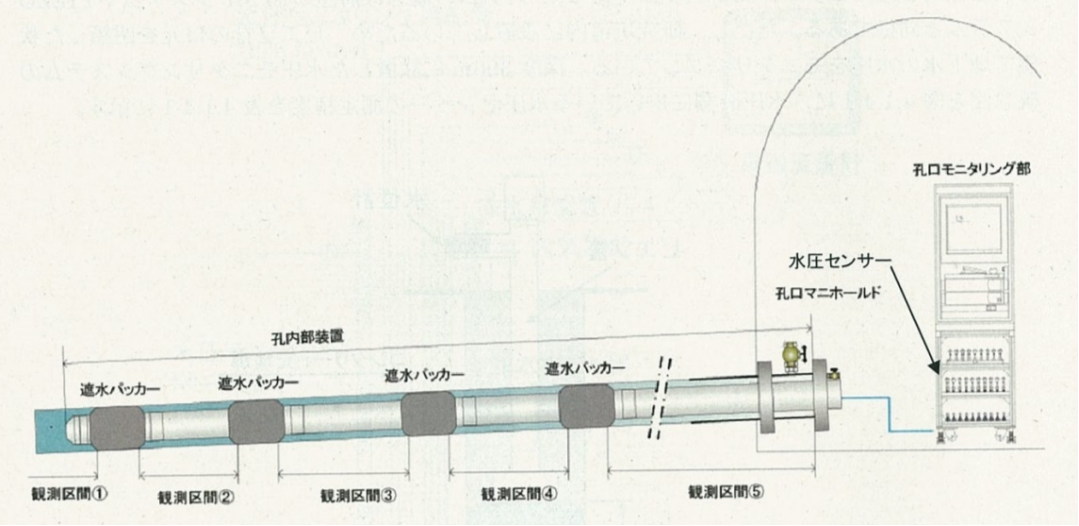


図 2-4 長期水圧観測装置概念図 1)

シングルパッカー式水圧モニタリングシステムは In-Situ 社製 Level Troll®が水圧センサーとして孔口に接続されている（図 2-5）。

水圧および水質測定装置として，「水圧・水質モニタリング装置」が使用されている。装置地上部として，地上配管ユニット，水分析ユニット，データ収録ユニットが必要に応じて坑道内に設置されている（図 2-6）。

岩盤変位測定には，光式の岩盤変位計が使用されており，装置地上部として，計測用ラックが坑道内に設置されている。

地震動は地震計により計測されており，装置地上部として，計測用ラックおよび制御用キャビネットが坑道内に設置されている。

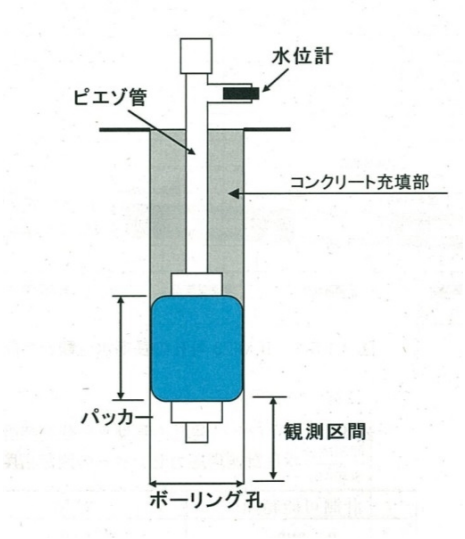


図 2-5 シングルパッカー式水圧モニタリングシステム概念図 [1)]

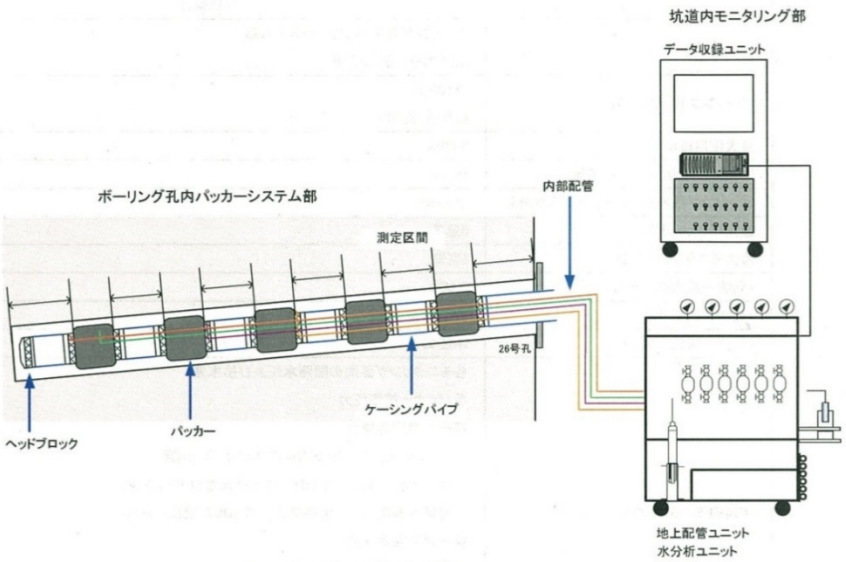


図 2-6 水圧・水質モニタリング装置概念図

3. 地上移設に関わる制約

3.1 地上移設の概念設計に関わる前提

現状の観測孔数量，方法，配置，坑道レイアウトを踏まえ，以下の項目を検討の前提条件として設定した。

- 坑道の埋戻しに先立ち，観測装置の一部（耐圧性能の無いセンサーおよびロガー部）を地上に移設する。
- 地上移設のための配線・配管の経路として，換気立坑を使用する。
- 水圧および水質モニタリングの測定区間数は，各孔最大 2 区間に限定する。
- 埋戻し開始時の立坑近傍の地下水位は GL-150m と仮定する。

3.2 水圧モニタリング装置の移設条件

(1) MP システム

直接水圧計測方式の水圧モニタリング装置として，Westbay 社製「MP システム」が，GL-200m ボーリング横坑（主立坑）の 07MI08 号孔に設置されている（図 3-1）。本装置の移設条件は以下の通りである。

- 水圧計（MP プローブ）のデータケーブルを地表まで約 250m（深度 200m + 換気立坑までの横引き約 50m）延長する必要がある。

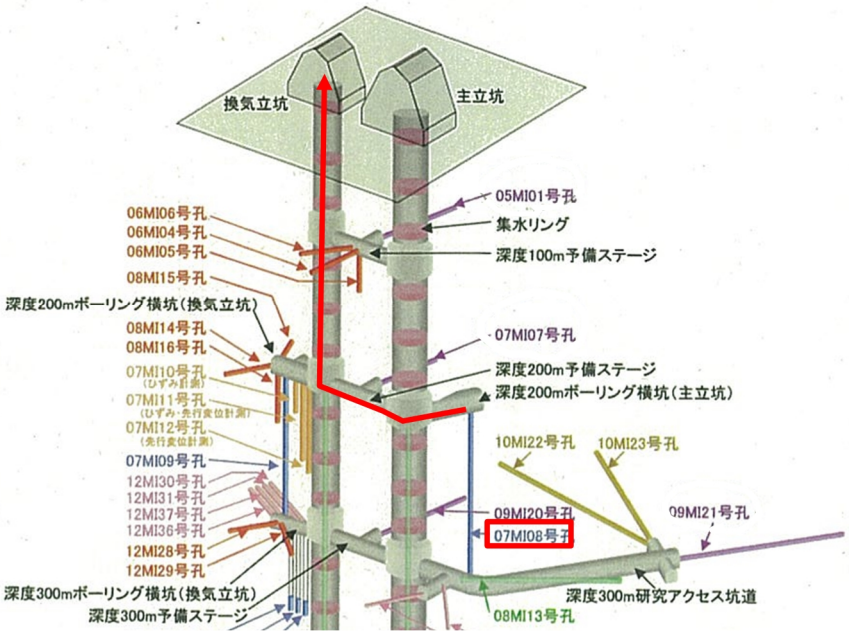


図 3-1 MP システムのデータケーブル延長概念図

(2) PIEZO システム

ピエゾ水頭計測方式の水圧モニタリング装置として，「PIEZO システム」が， GL-200m ボーリング横坑（換気立坑）の 07MI09 号孔に設置されている（図 3-2）。本装置の移設条件は以下の通りである。

・パッカー拡張ライン（×2）を地表まで約 200m 延長する必要がある。
・ピエゾ管から水圧観測ライン（×2）を地表まで約 200m 延長する必要がある。
・延長する水圧観測ラインは，GL-200m ボーリング横坑から一旦換気立坑まで横引きし，地上まで立ち上げる必要がある。
・延長する水圧観測ラインは，水位計設置深度以浅において，水位計を設置可能な径とする必要がある。

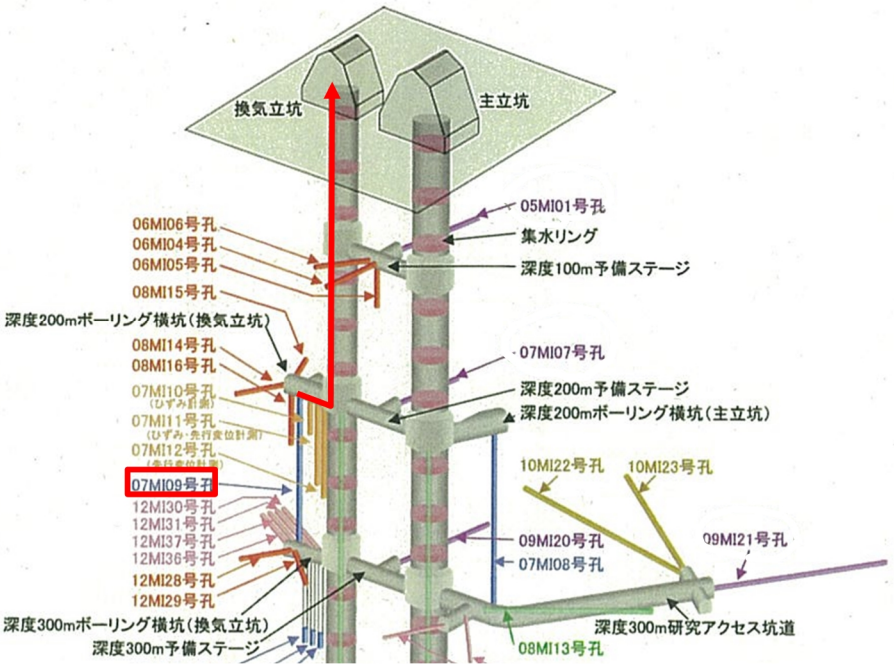


図 3-2 PIEZO システムの水圧観測ライン延長概念図

(3) 長期水圧観測装置

ピエゾ水頭計測方式の水圧モニタリング装置として，「長期水圧観測装置」が，GL-300m 研究アクセス坑道の 10MI23 号孔，GL-500m 研究アクセス南坑道の 12MI32 号孔に設置されている（図 3-3）。本装置の移設条件は以下の通りである。

・10MI23 号孔の場合，水圧観測ライン（×2）およびパッカー拡張ライン（×2）を地表まで約 450m（深度 300m＋GL-300m 研究アクセス坑道から換気立坑までの横引き約 150m）延長する必要がある。

・12MI32 号孔の場合，水圧観測ラインおよびパッカー拡張ラインを地表まで約 520m（深度 500m＋GL-500m 研究アクセス南坑道から換気立坑までの横引き約 20m）延長する必要がある。
・延長する水圧観測ラインは，研究アクセス坑道から一旦換気立坑まで横引きし，立ち上げる必要がある。
・延長する水圧観測ラインは，水位計設置深度以浅において，水位計を設置可能な径とする必要がある。

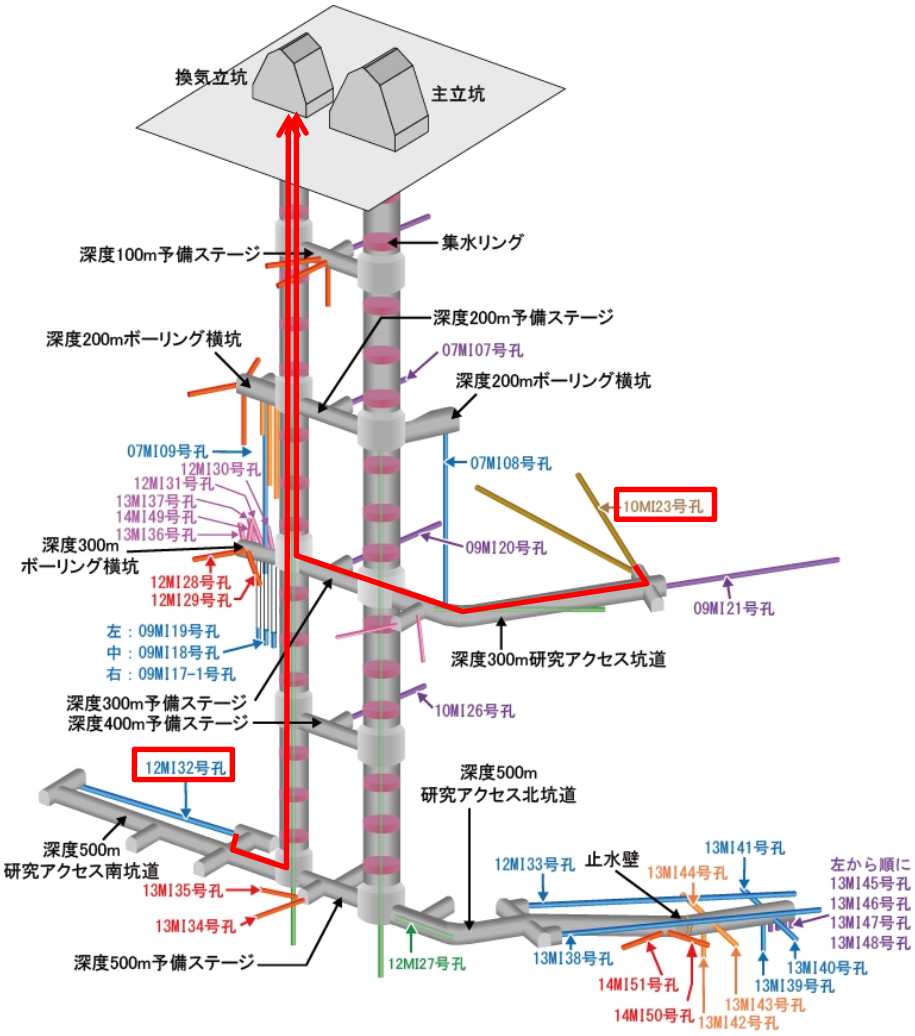


図 3-3 長期水圧観測装置の水圧観測ライン延長概念図

(4) シングルパッカー式水圧モニタリング装置

ピエゾ水頭計測方式の水圧モニタリング装置として，In-Situ 社製 Level Troll®が，GL-300m ボーリング横坑（換気立坑）の 09MI17-1 号孔，09MI18 号孔，09MI19 号孔，GL-

300m 研究アクセス坑道の 10MI24 号孔，10MI25 号孔に設置されている（図 3-4）。本装置の移設条件は以下の通りである。

・09MI17-1 号孔, 09MI18 号孔, 09MI19 号孔について，Level Troll を埋設する場合，水圧計ケーブル（×各 1）を地表まで約 300m 延長する必要である。
・09MI17-1 号孔, 09MI18 号孔, 09MI19 号孔について，Level Troll を埋設せず，水圧観測ライン（×各 1）を新規に設置する場合，これを地表まで約 300m 延長する必要である。
・10MI24 号孔，10MI25 号孔について，Level Troll を埋設する場合，水圧計ケーブル（×各 1）を地表まで約 360m（深度 300m + GL-300m 研究アクセス坑道から換気立坑までの横引き約 60m）延長する必要がある。
・10MI24 号孔，10MI25 号孔について，Level Troll を埋設せず，水圧観測ライン（×各 1）を新規に設置する場合，これを地表まで約 360m（深度 300m + GL-300m 研究アクセス坑道から換気立坑までの横引き約 60m）延長する必要がある。
・Level Troll を埋設しない場合，新規に設置する水圧観測ラインは，水位計設置深度以浅において，水位計を設置可能な径とする必要がある。

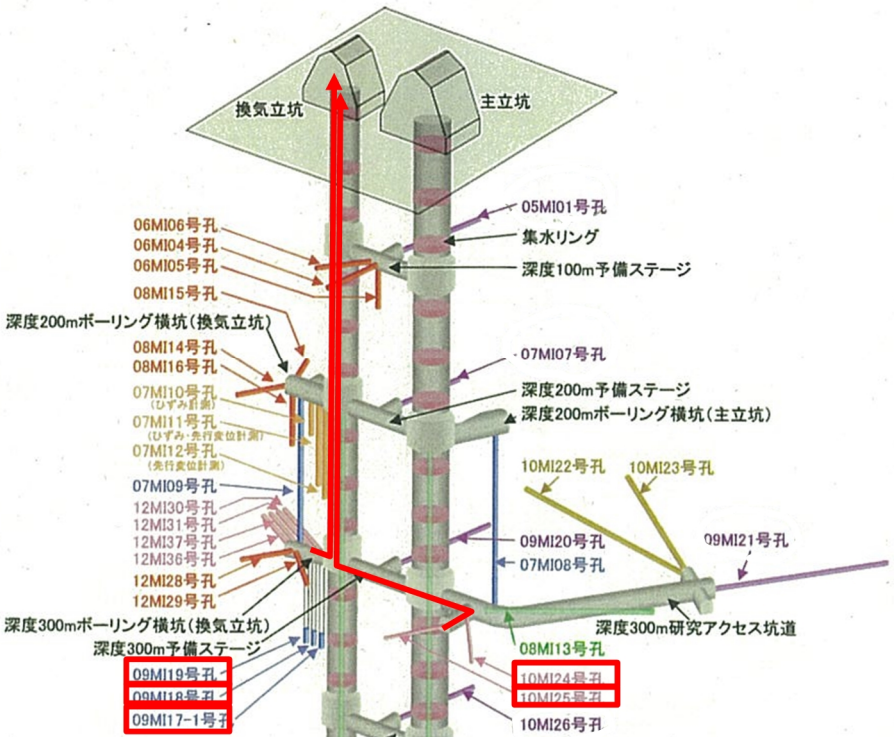


図 3-4 シングルパッカー式水圧モニタリング装置の水圧計ケーブルまたは水圧観測ライン延長概念図

3.3 水圧・水質モニタリング装置の移設条件

水圧・水質モニタリング装置は，GL-100m 予備ステージの 05MI01 号孔，GL-200m 予備ステージの 07MI07 号孔，GL-300m 予備ステージの 09MI20 号孔，GL-300m アクセス坑道 100m 計測横坑の 09MI21 号孔，GL-400m 予備ステージの 10MI26 号孔，GL-500m 研究アクセス北坑道の 12MI33 号孔，13MI38 号孔，GL-500m 冠水坑道の 13MI39 号孔，13MI40 号孔，13MI41 号孔，13MI45 号孔，13MI46 号孔，13MI47 号孔，13MI48 号孔に設置されている（図 3-5）。本装置の移設条件は以下の通りである。

- 05MI01 号孔の場合，水質／水圧観測ライン（×2）およびパッカー拡張ライン（×2）を地表まで約 130m（深度 100m + GL-100m 予備ステージから換気立坑までの横引き約 30m）延長する必要がある。
- 07MI07 号孔の場合，水質／水圧観測ライン（×2）およびパッカー拡張ライン（×2）を地表まで約 230m（深度 200m + GL-200m 予備ステージから換気立坑までの横引き約 30m）延長する必要がある。
- 09MI20 号孔の場合，水質／水圧観測ライン（×2）およびパッカー拡張ライン（×2）を地表まで約 330m（深度 300m + GL-300m 予備ステージから換気立坑までの横引き約 30m）延長する必要がある。
- 09MI21 号孔の場合，水質／水圧観測ライン（×2）およびパッカー拡張ライン（×2）を地表まで約 450m（深度 300m + GL-300m 研究アクセス坑道から換気立坑までの横引き約 150m）延長する必要がある。
- 10MI26 号孔の場合，水質／水圧観測ライン（×2）およびパッカー拡張ライン（×2）を地表まで約 430m（深度 400m + GL-400m 予備ステージから換気立坑までの横引き約 30m）延長する必要がある。
- 12MI33 号孔，13MI38 号孔の場合，水質／水圧観測ライン（×各 2）およびパッカー拡張ライン（×各 2）を地表まで約 610m（深度 500m + GL-500m 研究アクセス北坑道から換気立坑までの横引き約 110m）延長する必要がある。
- 13MI39 号孔，13MI40 号孔，13MI41 号孔，13MI45 号孔，13MI46 号孔，13MI47 号孔，13MI48 号孔の場合，水質／水圧観測ライン（×各 2）およびパッカー拡張ライン（×各 2）を地表まで約 700m（深度 500m + GL-100m 予備ステージから換気立坑までの横引き約 200m）延長する必要がある。
- 延長する水質／水圧観測ラインは，水圧計，採水ポンプ等の設置深度以浅において，これら機器を設置可能な径とする必要がある。

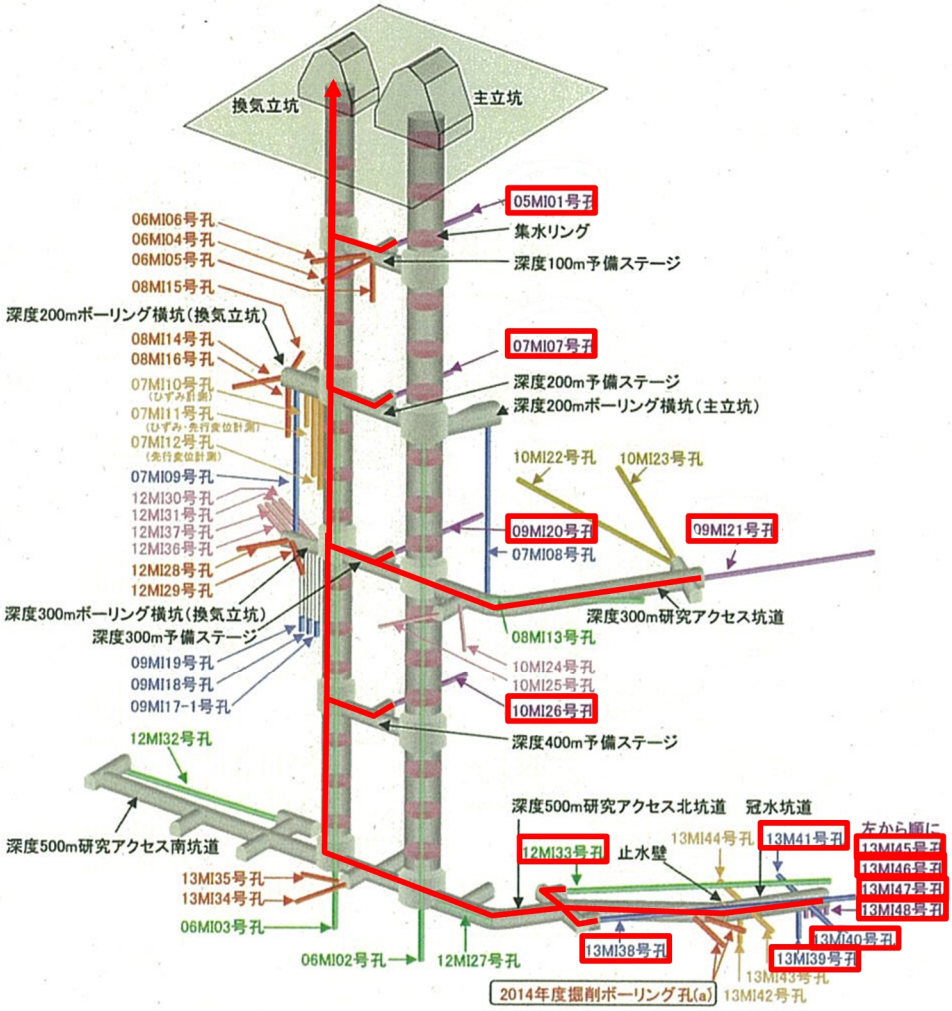


図 3-5 水圧・水質モニタリング装置の水圧／水質観測ライン延長概念図

3.4 岩盤変位測定装置の移設条件

岩盤変位計が，GL-500m 冠水坑道の 13MI42 号孔，13MI43 号孔，13MI44 号孔に設置されている（図 3-6）。本装置の移設条件は以下の通りである。

・13MI42 号孔，13MI43 号孔，13MI44 号孔の場合，岩盤ひずみセンサーの光ファイバーケーブル（×各 1）を地表まで約 700m（深度 500m + GL-500m 冠水坑道から換気立坑までの横引き約 200m）延長する必要がある。

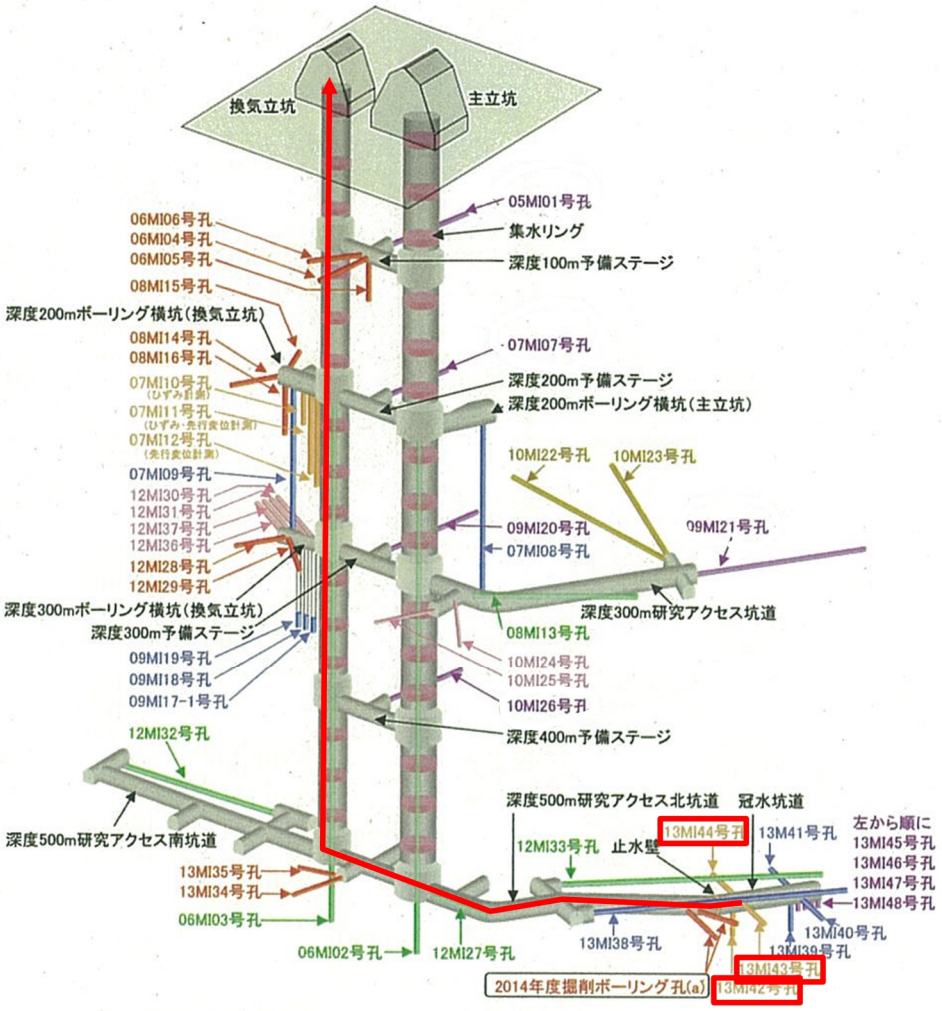


図 3-6 岩盤変位計の光ファイバーケーブル延長概念図

3.5 地震計の移設条件

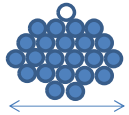
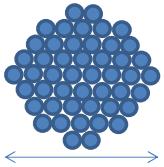
地震計が，GL-100m 予備ステージ，GL-200m 予備ステージ，GL-200m ボーリング横坑（主立坑），GL-200m ボーリング横坑（換気立坑），GL-300m 予備ステージ，GL-300m ボーリング横坑（換気立坑），GL-300m 研究アクセス坑道，GL-400m 予備ステージに設置されている。

現在設置されている地震観測装置については，埋戻し前に撤去することを基本としていることから，ここでは考慮しない。

3.6 地上移設に関わる制約

表 3-1 に各観測装置の移設条件一覧を示す。

表 3-1 各観測装置の移設条件

観測装置	装置設置場所	ボーリング孔No.	配管延長(m)			センサー設置可能最大深度(GL-m)	地下水位をGL0mとした場合の，6×4mmチューブ延長分デッドボリューム(ℓ)	移設時観測区間数	移設時配管延長分6×4mmチューブ本数	移設時配管延長分断面直径(mm)
			横引き	鉛直	総延長					
PIEZOシステム	GL-200mボーリング横坑(換気立坑)	07MI09	0	200	200	200	2.5	2.0	4	MPケーブル径+22本分
MPシステム	GL-200mボーリング横坑(主立坑)	07MI08	50	200	250	200	3.1	7.0	-	 36mm
シングルパッカー式水圧モニタリング装置	GL-300m研究アクセス坑道	10MI24	60	300	360	300	4.5	1.0	2	
	GL-300m研究アクセス坑道	10MI25	60	300	360	300	4.5	1.0	2	
	GL-300mボーリング横坑(換気立坑)	09MI17-1	0	300	300	300	3.8	1.0	2	
		09MI18	0	300	300	300	3.8	1.0	2	
		09MI19	0	300	300	300	3.8	1.0	2	
長期水圧観測装置	GL-300m研究アクセス坑道	10MI23	150	300	450	300	5.7	2.0	4	
	GL-500m研究アクセス南坑道(PB)	12MI32	20	500	520	500	6.5	2.0	4	
水圧・水質モニタリング装置	GL-100m予備ステージ	05MI01	30	100	130	100	1.6	2.0	4	48本分
	GL-200m予備ステージ	07MI07	30	200	230	200	2.9	2.0	4	
	GL-300m予備ステージ	09MI20	30	300	330	300	4.1	2.0	4	
	GL-300m研究アクセス坑道 100m計測横坑	09MI21	150	300	450	300	5.7	2.0	4	 48mm
	GL-400m予備ステージ	10MI26	30	400	430	400	5.4	2.0	4	
	GL-500m研究アクセス北坑道	13MI38	110	500	610	500	7.7	2.0	4	
	GL-500m冠水坑道	13MI39	200	500	700	500	8.8	2.0	4	
	GL-500m冠水坑道	13MI40	200	500	700	500	8.8	2.0	4	
	GL-500m冠水坑道	13MI41	200	500	700	500	8.8	2.0	4	
	GL-500m冠水坑道	13MI45	200	500	700	500	8.8	1.0	2	
	GL-500m冠水坑道	13MI46	200	500	700	500	8.8	1.0	2	
	GL-500m冠水坑道	13MI47	200	500	700	500	8.8	1.0	2	
	GL-500m冠水坑道	13MI48	200	500	700	500	8.8	1.0	2	
	GL-500m研究アクセス北坑道(PB)	12MI33	110	500	610	500	7.7	2.0	4	
岩盤変位測定装置	GL-500m冠水坑道	13MI42	200	500	700	500	8.8	2.0	4	光ケーブル12本分 多芯ケーブル使用 要吊り下げ強度 <50mm
		13MI43	200	500	700	500	8.8	2.0	4	
		13MI44	200	500	700	500	8.8	2.0	4	

光ファイバー方式を採用している岩盤変位計については，地上移設に関わる大きな制約事項は考えられない。また地震計については，撤去を基本としているため，ここでは考慮しない。以下に，水圧モニタリング装置および水圧・水質モニタリング装置の地上移設に関わる制約，観測装置共通の地上移設に関わる制約について述べる。

(1) 水圧モニタリング装置

MP システムは，坑道埋戻し後においてパッカー圧の調整を行うことができないため，地下水位回復に伴い，パッカーの拡張圧が不足し，観測区間の維持が困難になると考えられる。また，MP プローブのデータケーブルを横引きする必要があり，坑道埋戻し後の間隙水圧計のメンテナンス（回収・再設置）は不可能である（図 3-7）。

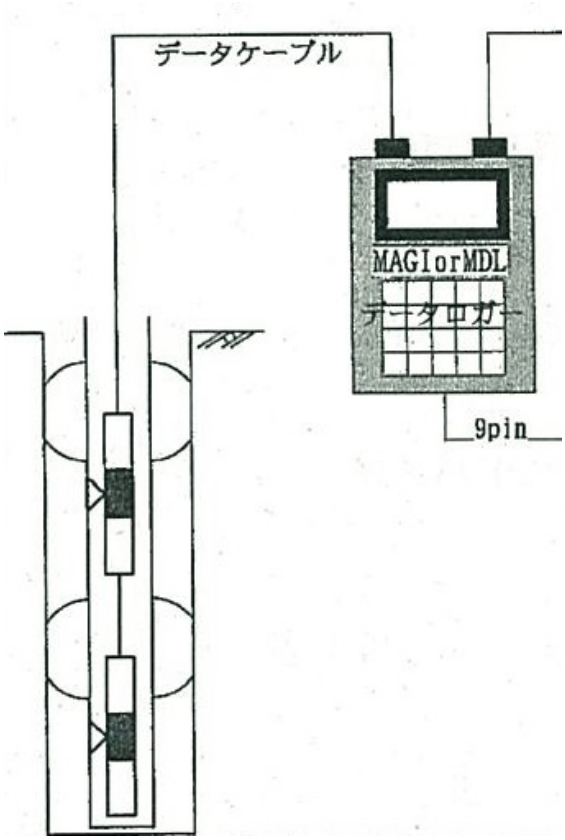


図 3-7 MP システムのプローブとロガーをつなぐデータケーブル [1)]

PIEZO システムおよび長期水圧観測装置，シングルパッカー式水圧モニタリング装置（水圧観測ラインを新設する場合）は，地下水中に遊離ガスが含まれていると，水圧観測ラインの狭小部において遊離ガスがスタックし，水圧観測に支障を及ぼす可能性がある [2)]。特に水圧観測ラインの横引き部では，浮力が十分に効かず遊離ガスがより排出されにくくなると考えられる。従って，水圧観測ライン内に遊離ガスがスタックし難い構造とするか，または

注水等のガスを除去するためのメンテナンスが可能な構造にすべきと考えられる。水圧観測ライン内に設置する水圧センサーのメンテナンス（校正等のための回収・再設置）を考慮する場合，水圧観測ラインの横引き部以深にセンサーを設置することは困難である。従って，少なくとも地下水位が水圧観測ラインの横引き部以浅まで回復するまで，水圧を測定できない。

シングルパッカー式水圧モニタリング装置において，Level Troll を埋設する場合，その回収・再設置は不可能である。また，観測可能期間は内蔵電池・サンプリングレート・外部電池に依存する（内蔵電池のメーカー保証：5 年）。従って，現在坑道内で計測に使用し年数の経過した Level Troll をそのまま埋設し使用することは避けるべきである。

(2) 水圧・水質モニタリング装置の地上移設に関わる制約

地下水に遊離ガスが含まれる場合，前述の水圧モニタリング装置同様，延長する水圧／水質観測ラインの横引き箇所において，遊離ガスがスタックし，水圧観測に支障を及ぼす可能性がある。従って，水質／水圧観測ライン内に遊離ガスがスタックし難い構造とするか，または注水等のガスを除去するためのメンテナンスが可能な構造とすべきと考えられる。水質／水圧観測ライン内に設置する水圧計のメンテナンス（校正等のための回収・再設置）を考慮する場合，水質／水圧観測ラインの横引き部以深にセンサーを設置することは困難である。従って，地下水位が水圧／水質観測ラインの横引き部以浅まで回復するまでは，水圧を測定できない。

水圧／水質観測ラインから試験区間の地下水採水をするためには，採水容器設置地点から孔内観測区間までの水圧／水質観測ラインのデッドボリューム分（例えば GL-500m 冠水坑道の 13MI39 号孔から 6×4mm チューブを地表まで延長した場合で約 8.8L）を採水前に排水しなければならない。またこの場合，試験区間周辺の地下水をデッドボリューム分集水することとなる。これを避けるには，坑道埋戻し後の環境に対応した循環方式による採水方法を開発・適用することが考えられる。

(3) 観測装置共通の地上移設に関わる制約

地上移設にあたり各装置から観測ラインを延長する場合には，各観測地点から換気立坑まで横引きした後，換気立坑内を地上まで立ち上げる必要がある（表 3-2）。この観測ラインの立ち上げ部は，移設作業段階において地下水による浮力を期待できないため，例えば，GL-500m に設置された観測装置では，観測ラインの立ち上げ部に 500m 分の自重が掛かる。この時，観測ライン立ち上げ部に，十分な引張強度があるかまたは重量を分散する仕組みがないと，変形や破断の発生が懸念される。従って，観測ライン立ち上げ部が自重に耐えうる設置方法，構造，材質等を検討する必要がある。

表 3-2 各観測装置の地上移設に関わる制約

観測装置分類	装置種類	移設条件	装置移設に関わる制約
水圧モニタリング装置	MPシステム	MPプローブ埋設 MPプローブケーブル延長	・地下水位回復に伴うパッカー昇圧は不可能 ・埋設後のMPプローブのメンテナンスは不可能
	PIEZOシステム	水圧観測ライン延長	・観測ラインに遊離ガスがスタックないよう要対策 ・観測ライン横引き深度以深に地下水位がある場合は計測できない。 ・観測ライン立坑内立ち上げ部が自重に耐えられる方法，構造，材質を要検討
	長期水圧観測装置	水圧観測ライン延長	・観測ラインに遊離ガスがスタックないよう要対策 ・観測ライン横引き深度以深に地下水位がある場合は計測できない。 ・観測ライン立坑内立ち上げ部が自重に耐えられる方法，構造，材質を要検討
	シングルパッカー式水圧モニタリング装置	LevelTroll埋設	・LevelTrollの内蔵電池，サンプリングレート等により観測可能期間が制限される。
		水圧観測ライン延長	・観測ラインに遊離ガスがスタックないよう要対策 ・観測ライン横引き深度以深に地下水位がある場合は計測できない。 ・観測ライン立坑内立ち上げ部が自重に耐えられる方法，構造，材質を要検討
水圧・水質モニタリング装置		水圧/水質観測ライン延長	・観測ラインに遊離ガスがスタックないよう要対策 ・採水において，水質/水圧観測ラインのデッドボリュームを考慮した機構を要開発 ・観測ライン横引き深度以深に地下水位がある場合は計測できない。 ・観測ライン立坑内立ち上げ部が自重に耐えられる方法，構造，材質を要検討

4. 坑道閉鎖後の観測装置に要求される事項の整理

ここでは，現在観測に使用している装置に限らず，一般論として「坑道閉鎖が観測装置に及ぼす影響」および「装置に要求される事項および限界」について整理する。

例えば，原子力環境整備促進・資金管理センター（以下，RWMC）の地層処分におけるモニタリングに関わる検討[3)]では，モニタリングにおいて考慮すべき計測環境条件として温度，圧力，水質等を挙げており，それらは表 4-1 のように整理できる。本検討では，坑道埋戻し後における坑道周辺の地質環境に着目しているため，廃棄体近傍における計測環境条件については考慮しない。

表 4-1 地層処分モニタリングにおいて考慮すべき計測環境条件[4)]

項目	廃棄体近傍	廃棄体遠方
温度	最大 100℃	45℃（深度 1000m）
圧力	11MPa（深度 1000m）	10MPa（深度 1000m）
水質	塩水／淡水	塩水／淡水
放射線	$3X10^{-0}$mGy/h（ガンマ線）	考慮する必要なし
	$3X10^{-2}$mGy/h（中性子線）	

4.1 坑道閉鎖が観測装置に及ぼす影響

坑道埋戻しにより，岩盤の熱伝導により初期の地温にまで回復すると考えられる。また，GL-1,000m で地温は約 45℃である[4)]。また，地下水位の自然回復に伴い，観測装置が受ける水圧が増加する。地下水位が地表面まで回復すると仮定した場合，例えば深度 GL-1,000m に設置された観測機器には，約 10MPa の水圧（封圧）が作用する。坑道内に埋設する機器については，初期の地下水の水質およびコンクリート支保等による影響を受けた地下水の水質が化学的に影響を及ぼす可能性がある。観測装置にパッカーが用いられている場合には，地下水位回復に伴いパッカー拡張圧が不足し，測定区間の維持が困難となる可能性が考えられる。坑道内に埋設する機器については，坑道埋戻しによる土圧が発生する。埋め戻し材および埋戻し方法によっては，局所的に大きな力が作用する可能性も考えられる。

また坑道埋戻しにより，設置した観測装置のメンテナンス（回収・交換）が困難となる。特に，地上からメンテナンスの対象となる装置箇所までの配管・配線距離が長く，また経路が複雑になるほど，メンテナンスの難易度が上がると考えられる。

4.2 装置に要求される事項および限界

(1) 耐熱性

観測装置のうち，地下に埋設される機材は，埋戻し後の温度環境（設置深度および地温勾配に依存）に対する耐熱性を有することが要求される（図 4-1）。埋戻し後の地下の熱環境に対する計測の限界は，観測装置の構成に依存するが，例えば観測装置に一般的なナイロンチューブ（仮に潤工社 As2 とする）を用いると仮定すると，その使用可能温度から，80℃程度が計測の限界と考えることができる。

(2) 耐圧性

観測装置のうち，坑道内に埋設される機材は，埋戻し後の地下水位回復に対する耐圧性能（静水圧以上）を有することが要求される。また坑道の埋戻しによる土圧については，埋設する機器を予めセメントで固化するなど，保護・対策が必要である。埋戻し後の地下水圧力環境に対する計測の限界については，観測装置の構成に依存する。密封された構造を有する観測機器を用いる場合には，その内外に差圧（仮に 1,000m 地下なら約 10MPa 程度）が発生するため，環境に合わせた計測機器や計測方法を選択する必要がある。

(3) 耐化学性

観測装置のうち，坑道内に埋設される機材は，埋戻し後の地下水の水質（初期地下水の水質および支保等の影響を受けた地下水の水質）に対する耐化学性が要求される。埋戻し後の地下の化学環境に対する計測の限界は，観測装置の構成に依存する。通常の地下水環境の範囲を超えるような地下水（例えば低 pH や高 pH）の存在および発生が想定される場合には，事前に装置の耐化学性の限界を確認するべきと考えられる。

(4) メンテナンス性

観測装置のうち埋設される機材は，観測が必要とされる期間においてメンテナンスが不要であるか，地上からのメンテナンスが可能であることが要求される。

例えば，測定区間の形成にパッカーを用いる場合は，グラウト材等によるパッカー固化によりメンテナンスフリーとするか，地下水位の回復に合わせ地上からパッカーの加圧が可能であるなど，測定区間を維持できる機能・構造が要求される。

これらメンテナンスが必要な機材においては，メンテナンス作業が簡便かつ安全であることが好ましい。

(5) 耐久性（長期観測性能）

観測装置はメンテナンス等を通じ，閉鎖後長期間，地質環境を観測するための耐久性が要求される。

第 2 次取りまとめに示された基本スケジュールによれば，操業終了～閉鎖までの期間は

約 10 年とされる。この間の埋戻し対象は「連絡坑道」,「坑底施設等」,「立坑」である。従って,「操業終了～閉鎖までの 10 年」および必要に応じて「閉鎖後数年程度」の合計 10～20 年程度の期間において観測可能な耐久性が要求される可能性が考えられる。一方,「処分坑道」および「主要坑道」については,「連絡坑道」,「坑底施設等」,「立坑」に先立ち，操業開始～操業終了までの期間（基本スケジュールでは約 50 年）に順次埋め戻される（表 4-2)。したがって,「処分坑道」および「主要坑道」に観測装置を設置する場合には，これら順次埋戻される期間も考慮する必要がある。

表 4-2 地層処分施設の各坑道の埋戻し期間の検討例 [4)]

坑道	岩種	定置方式	施工速度	埋戻し延長	埋戻し期間
主要坑道	硬岩	竪置き	32m/日	1133.68m/本	3.6か月
	軟岩	竪置き	64m/日	938.92m/本	2.7か月
処分坑道	硬岩	横置き	32m/日	2,933m	2.0か月
		竪置き		3,684m	2.6か月
	軟岩	横置き	64m/日	2,908m	1.0か月
		竪置き		4,053m	1.4か月
連絡坑道	硬岩	横置き	32m/日		32.1か月
		竪置き			34.9か月
	軟岩	横置き	64m/日		24.4か月
		竪置き			27.3か月
立坑	硬岩		0.57m/日	1,045m	81.9か月
	軟岩		0.57m/日	525m	42.2か月

（6）回収可能性

第 2 次取りまとめでは,「地表からのボーリング孔は地下施設と短絡する水みちに，坑道内からのボーリング孔についても新たな水みちとなりえることが想定される。そこで，これらのボーリング孔は適切に処置する必要がある」,「ボーリング孔の埋戻しの品質に関しては，それが地上と地下を結ぶ流路とならないような低透水性を確保することが求められる」としている [4)]。

従って，観測装置のうち，特に深度方向に設置される配管・配線類など，その経路が水みちとなりうる装置箇所は，埋戻し後にその回収が可能であるなど，地上と地下を結ぶ水みちとならないような機能・構造が要求される。

坑道閉鎖が観測装置に及ぼす影響	装置に要求される事項および限界
・地温の回復	■耐熱性 ・回復後の地温（設置深度および地温勾配に依存）に耐えうること
・水圧の回復	■耐圧性 ・回復後の水圧（静水圧以上）に耐えうること（例：GL.-1,000m設置装置の場合約10MPaの耐圧）
・水質の回復および変化	■耐化学性 ・埋戻し後の水質（初期地下水の水質および支保等の影響を受けた地下水の水質）に耐えうること
・パッカー拡張圧の不足	■メンテナンス性 ・メンテナンスフリーまたは地上からのメンテナンスが可能であること ・パッカーの固化または埋設後のパッカー加圧が可能であること
・装置メンテナンス（回収・交換）の難化	■耐久性 ・観測装置の機能が長期の観測に耐えうること （例：坑道閉鎖後10年程度の期間において作動すること） ■回収可能性 ・深度方向に配置された装置配管・配線など，埋設後に水みちとなりうる装置箇所が閉鎖後回収可能であるなど，水みちとならない機能，構造を有すること

図 4-1 坑道閉鎖後の装置に要求される事項

5. 観測装置の移設方法の検討

5.1 地上移設可能な装置の選定

表 5-1 に地上移設可能な装置を示す。パッカーラインによるパッカー圧の調整および埋戻し後のプローブのメンテナンスが不可能な MP システム，バッテリー交換が不可能な Level Troll は除外することとした。

表 5-1 地上移設可能な装置一覧

設置深度 m	装置設置場所	ボーリング孔No.
100	GL-100m予備ステージ	05MI01
200	GL-200mボーリング横坑（換気立坑）	07MI09
	GL-200m予備ステージ	07MI07
300	GL-300m研究アクセス坑道	10MI23
	GL-300m予備ステージ	09MI20
	GL-300m研究アクセス坑道 100m計測横坑	09MI21
400	GL-400m予備ステージ	10MI26
500	GL-500m研究アクセス北坑道	13MI38
	GL-500m研究アクセス南坑道（PB）	12MI32
	GL-500m研究アクセス北坑道(PB)	12MI33
	GL-500m冠水坑道	13MI39
		13MI40
		13MI41
		13MI45
		13MI46
		13MI47
		13MI48
		13MI42
		13MI43
		13MI44

5.2 移設方法に関わる概念設計

水圧モニタリング装置および水圧・水質モニタリング装置の移設方法として，仮にスタンドパイプによるピエゾメーター方式を採用する場合には，各深度の予備ステージから換気立坑内に複数のスタンドパイプを立てることとなる。その内径は，水位計および採水ポンプを挿入可能な径とする必要があるため，本検討のように観測区間が多い場合には，換気立坑（φ約 4,500mm）の断面積に占めるスタンドパイプ割合が大きくなり，施工が困難となる。

本検討では，水圧モニタリング装置および水圧・水質モニタリング装置の移設方法として，「光式間隙水圧モニタリング」と「インナープローブ式水質モニタリング」を提案する。なお，既存の観測装置のパッカーは，装置の循環ライン等を利用して，グラウト材等で観測区間を形成することとし，水位回復に対応するためのパッカーの加圧を不要とする。また，これと合わせ，各装置の観測区間数を整理し，1 観測装置あたり最大 2 区間程度とする。

一方，岩盤変位測定装置については，光ファイバーケーブルを地上まで延長し，既設の測定機器を地上に設置する。「光式間隙水圧モニタリング」および「インナープローブ式水質モニタリング」，「岩盤変位測定装置移設」の各概念について以降に述べる。

5.3 光式間隙水圧モニタリングの概念

(1) 装置地下部

各観測孔から換気立坑まで延長された観測ライン（後述のインナープローブ式水質モニタリング装置用の観測ラインと共通）に，長期耐久性を有する光ファイバー式水圧計を設置するシステムを提案する（図 5-1）。坑道の埋戻しとともに光ファイバー式水圧計を埋設し，埋戻し後の水圧センサーのメンテナンスは不要とする。換気立坑に光ファイバー用アウターケーシングを設置し，管内を経由し地上まで光ファイバーケーブル（多芯ケーブル）を敷設する。なお，観測ラインが後述のインナープローブ式水質モニタリング装置の観測ラインと共通であるため，遊離ガスがスタックした場合は，インナープローブ式水質モニタリング装置の注排水機構を用いて除去することができる。

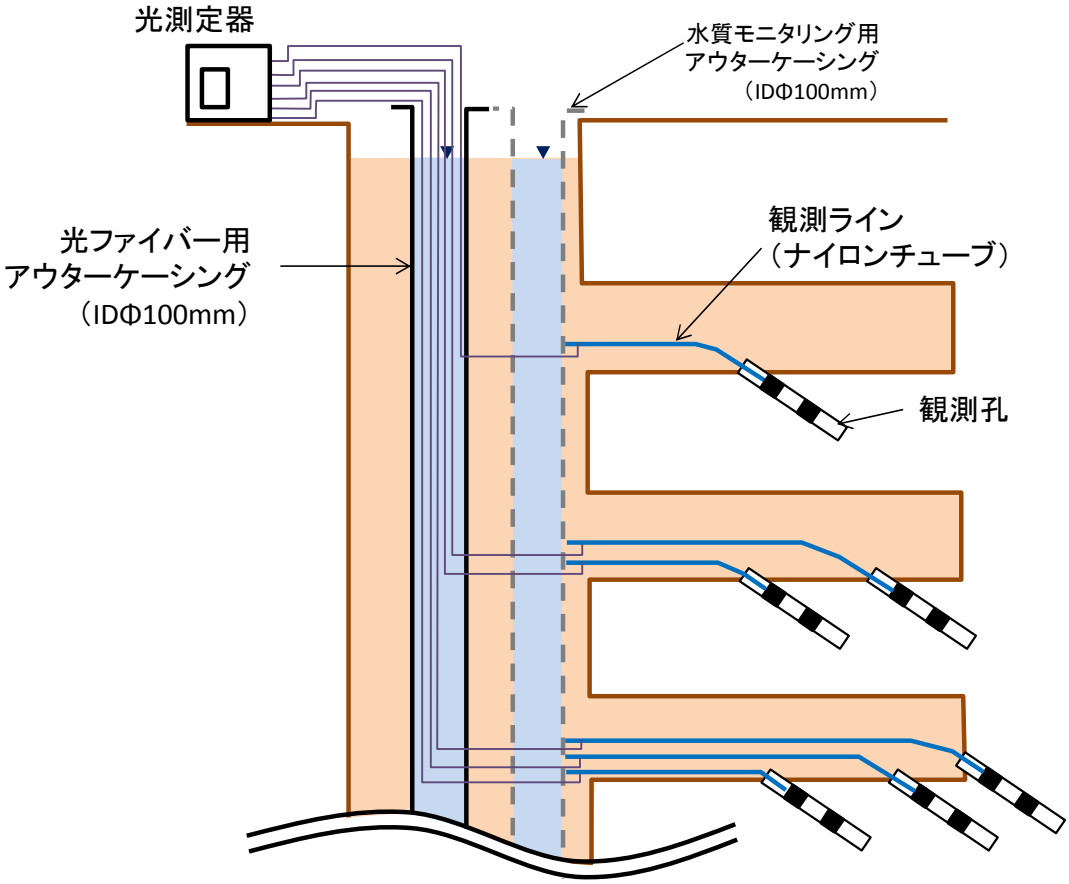


図 5-1 光式間隙水圧モニタリング装置の全体概念図

(2) 装置地上部

地上部には，測定器（光源・ロガー含む）を設置し，測定深度から延びる光ファイバーケーブルを接続する。

測定器は，坑道埋戻し後の地下水圧の回復挙動について常時モニタリング（5 分ピッチ程度の圧力表示およびロギング）を行う。また，水圧センサーは後述のインナープローブ式水質モニタリング装置の観測ラインに接続されるため，インナープローブによる観測ポートへのアクセスおよびモニタリング・採水時の圧力挙動もモニタリングすることができる。

5.4 インナープローブ式水質モニタリングの概念

(1) 装置地下部

各観測孔から延長された観測ライン（ナイロンチューブ）が接続された，観測ポートを有するアウターケーシングと，アウターケーシング内を昇降し，観測ポートから水質モニタリングおよび採水を行うインナープローブからなるシステムとする（図 5-2）。本装置の最大のメリットは，地下水の封圧採水が可能な点である。

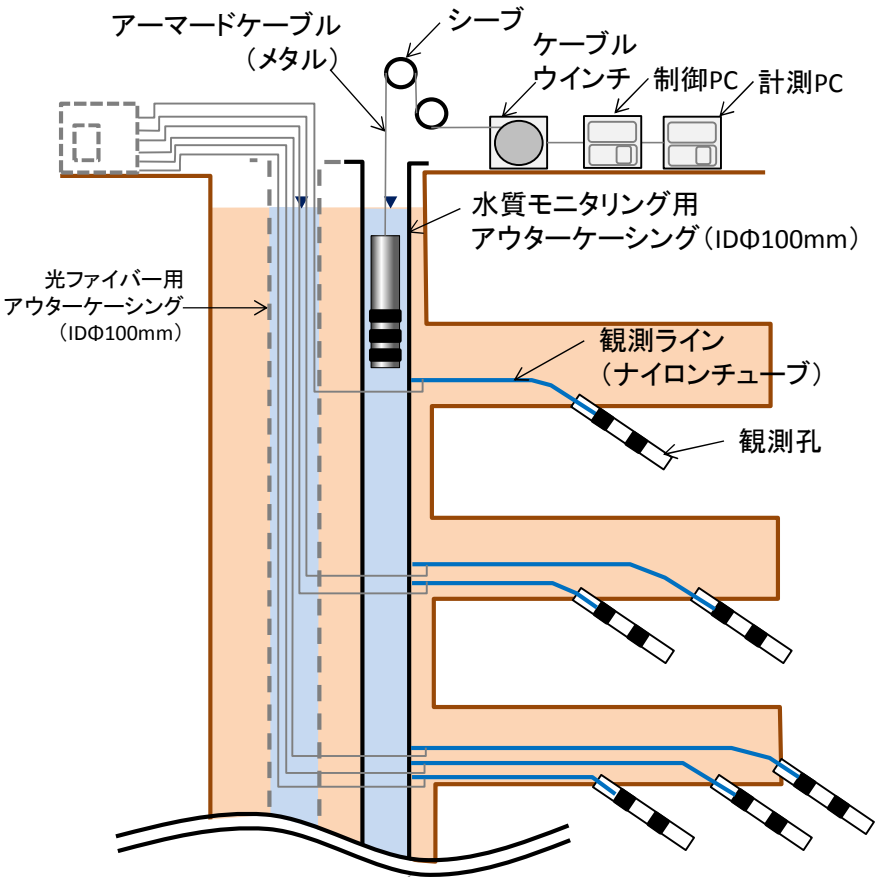


図 5-2 インナープローブ式水質モニタリング装置の全体概念図

a. インナープローブの検討

インナープローブは，アウターケーシングの観測ポートにアクセスし，地下水のモニタリングおよび採水が可能なものとする。この際の地下水モニタリング・採水の方式は，圧力差により観測区間の地下水をインナープローブに取り込む「単純採水方式」と，循環ポンプで観測区間の地下水を減圧せずにインナープローブに取り込む「循環採水方式」が考えられる（表 5-2）。

単純採水の場合，観測区間の地下水を圧力差でインナープローブに取り込むため，基本的に減圧を伴う。従って，地下水に溶存ガスが含まれる場合には，遊離ガスになる可能性がある。遊離ガスが観測ライン中にスタックした場合には，先に述べた間隙水圧観測に支障を及ぼす可能性がある。また，一旦，観測ラインに遊離ガスが発生した場合には，インナープローブで注水をし，遊離ガスを観測区間に押し込むか，または地下水圧の自然回復で再び地下水中に溶存するのを待つしかないと考えられる。遊離ガスの発生を防ぐ方法としては，インナープローブ側の圧力を制御することで，観測区間の圧力との差を小さくする方法が考えられる。この場合，地下水のモニタリング・採水に長い時間を要することになる。一方で，1 観測区間あたり，1 観測ラインとなるため，アウターケーシングの観測ポート数が少なくて済む（長さあたりに確保できるポート設置数が多い）というメリットがある（表 5-3）。

循環採水の場合，観測区間の地下水を基本的には減圧せずにインナープローブに取り込むことができる。観測ラインに遊離ガスが発生した場合には地下水の循環により除去することができる。一方で，1 観測区間あたり，2 観測ラインとなるため，アウターケーシングの観測ポート数は，単純採水の 2 倍になる（長さあたりに確保できるポート設置数が少ない）。

表 5-2 地下水モニタリング・採水方式の比較

採水方式	取得されるデータ品質	メンテナンス性	確保できるポート数
単純採水方式	地下水減圧あり（採水容器は真空またはピストン型）	ガス抜き不可能	1ポート/1観測区間のため多い
循環採水方式	地下水減圧なし	ガス抜き可能	2ポート/1観測区間のため少ない

表 5-3 水圧／水質観測ライン数

設置深度GL-m	装置設置場所	ボーリング孔No.	横引き(m)	採水・圧力測定ポートまでの6×4mmチューブ延長分デッドボリューム(ℓ)	移設時観測区間数	採水・圧力測定ポート数	
						パッカー無し	パッカー無し(循環)
100	GL-100m予備ステージ	05MI01	30	0.4	2.0	2本分	4本分
200	GL-200mボーリング横坑(換気立坑)	07MI09	0	0.0	2.0	4本分	8本分
	GL-200m予備ステージ	07MI07	30	0.4	2.0		
300	GL-300m研究アクセス坑道	10MI23	150	1.9	2.0	6本分	12本分
	GL-300m予備ステージ	09MI20	30	0.4	2.0		
	GL-300m研究アクセス坑道 100m計測横坑	09MI21	150	1.9	2.0		
400	GL-400m予備ステージ	10MI26	30	0.4	2.0	2本分	4本分
500	GL-500m研究アクセス北坑道	13MI38	110	1.4	2.0	16本分	32本分
	GL-500m研究アクセス南坑道(PB)	12MI32	20	0.3	2.0		
	GL-500m研究アクセス北坑道(PB)	12MI33	110	1.4	2.0		
	GL-500m冠水坑道	13MI39	200	2.5	2.0		
		13MI40	200	2.5	2.0		
		13MI41	200	2.5	2.0		
		13MI45	200	2.5	1.0		
		13MI46	200	2.5	1.0		
		13MI47	200	2.5	1.0		
		13MI48	200	2.5	1.0		
		13MI42	−	−	−	別途多芯ケーブル使用 (要吊り下げ強度)	
		13MI43	−	−	−		
		13MI44	−	−	−		

インナープローブとして考えられる 4 つのタイプについての比較を表 5-4，図 5-3 に示す。なお，アウターケーシングの観測ポート開閉機構については，次項にて別途述べる。

インナープローブタイプのうち「ダブルパッカー方式」は，上下パッカーの間にインナープローブの地下水取り込み口（モニタリング／採水ポート）を有するものである。アウターケーシング内を降下させ，観測ポートをインナープローブの上下パッカーで挟むように閉鎖区間を形成し，地下水をインナープローブに取り込む。単純採水方式のみに対応する。構造上，アウターケーシングの観測ポートとインナープローブのモニタリング／採水ポートまでのデッドボリュームは比較的大きくなる。デッドボリューム低減方法としては，パッカー間隔を小さくするか，プローブの径を大きくすることである。観測ポートへのアクセスについては，深度合わせのみが要求される。構造は比較的単純であり，技術的なハードルは低い。

「トリプルパッカー方式」のインナープローブは，上・中・下パッカーを有し，上・中パッカー間および中・下パッカー間に，それぞれ循環ポート（IN ／ OUT×各 1）を有する。循環採水方式に対応するものである。構造上，アウターケーシングの観測ポートとインナープローブの循環ポートまでのデッドボリュームは比較的大きくなる。デッドボリューム低減方法としては，パッカー間隔を小さくするか，プローブの径を大きくすることである。観測ポートへのアクセスについては，深度合わせのみが要求される。ただし，パッカーの編成上，2 つの循環ポート間隔をある程度以下には小さくできないため，アウターケーシングの観測ポート間隔を大きくとらなければならない（長さあたりに設置できるポート設置数が少ない）。構造は比較的単純であり，技術的なハードルは低い。

「ポート付パッカー方式」のインナープローブは，一つのパッカーラバーにモニタリング／採水ポートまたは循環ポートを有しており，単純および循環採水方式に対応するものである。採水ポートを有するポート付パッカーのイメージを図 5-4 および図 5-5 に示す。図 5-4 はパッカー表面の軸対面に循環ポートを有する例であるが，実際には，パッカーラバーの上下深度方向に循環ポートの IN ／ OUT を配置する。これら循環ポートは，パッカーの拡張によりアウターケーシングの観測ポートにアクセスする。このため，アウターケーシングの観測ポートとインナープローブの循環ポートまでのデッドボリュームは比較的小さいと言える。また，拡張したパッカーラバーの循環ポート円周上とアウターケーシングの間に一定の隙間（観測ポートから循環ポートまでの円周方向の地下水経路）を作ることで，インナープローブによる方位合わせを不要とできるため，観測ポートへのアクセスについては，深度合わせのみが要求される。構造は比較的単純であるが，技術的には開発要素が存在する。

「MP プローブ方式」のインナープローブは，Westbay 社製の MP システムに類似した高度な機構を有する。単純および循環採水方式に対応する。インナープローブはバッキングシューの展開により，プローブのモニタリング／採水ポートまたは循環ポート（モニタリング／採水ポートおよび送水用ポート×各 1）を直接，アウターケーシングの観測ポートにドッキングさせるため，アウターケーシングの観測ポートとインナープローブのこれらポートまでのデッドボリュームは極めて小さい。観測ポートへのアクセスについては，深度および方位合わせ（ガイドアーム機構等）が要求される。機構が複雑であり，技術的には開発要素が極めて大きい。

インナープローブの機能（採水の品質）および技術的ハードルを考慮すると，「ポート付パッカー方式」のインナープローブを採用することが，現時点で最良の選択と考えられる。

表 5-4 インナープローブタイプの比較

インナープローブタイプ	採水方式	アウターケーシングから プローブまでのデッドボリューム	観測ポートへのアクセス条件	技術的ハードル
①ダブルパッカー方式	単純採水	大 （閉鎖区間容積に依存）	深度合わせ	容易
②トリプルパッカー方式	循環採水	大 （閉鎖区間容積に依存）	深度合わせ	容易
③ポート付パッカー方式	単純採水 循環採水	小 （ポート付パッカー区間容積に依存）	深度合わせ	普通
④MPプローブ方式	単純採水 循環採水	小	深度合わせ 方位合わせ ガイドアームおよびバッキングシュー展開	複雑

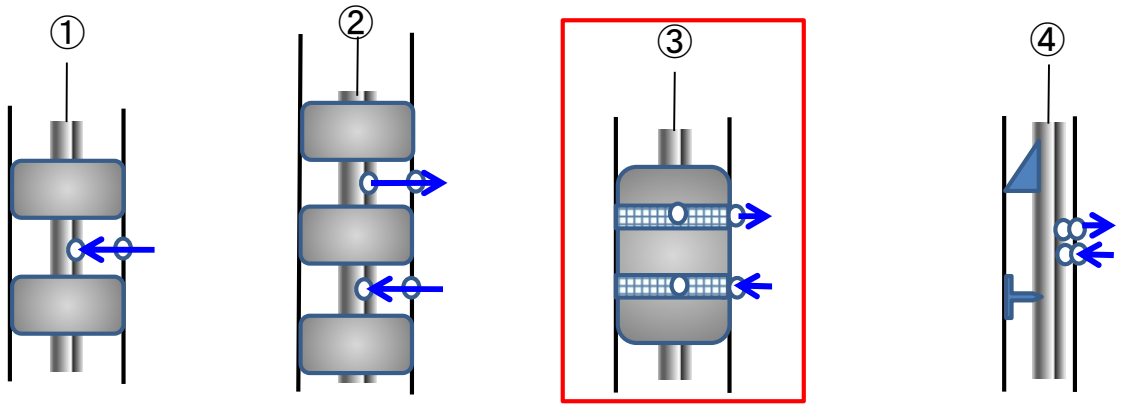
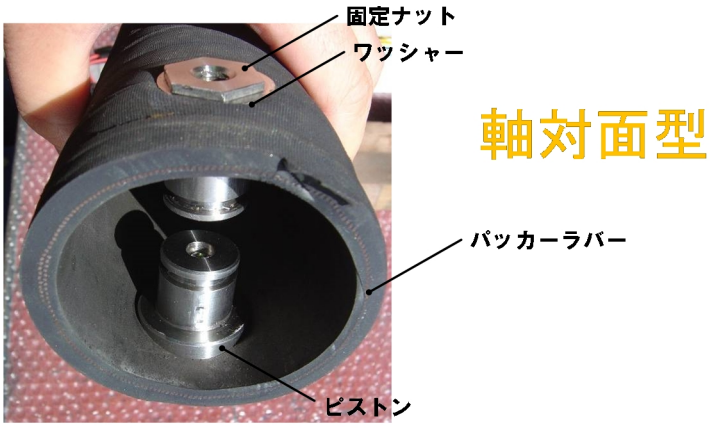


図 5-3 インナープローブタイプの比較

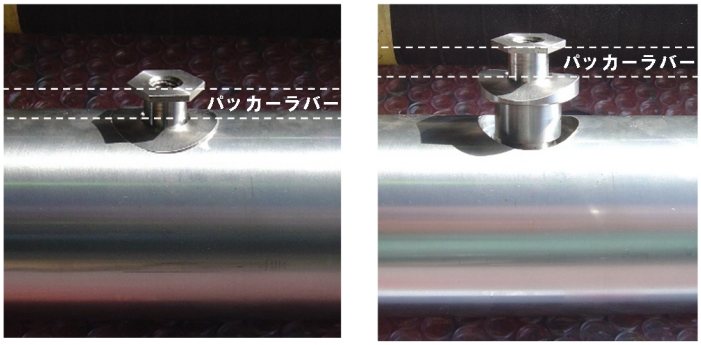
b. アウターケーシング観測ポート開閉機構の検討

アウターケーシングの観測ポート開閉機構としては，アウターケーシング側に動力を持たせて観測ポートを開閉する方法と，インナープローブの動力により観測ポートを開閉する方法が考えられる。前者については，アウターケーシング側の観測ポート開閉機構に問題が生じた場合，坑道を埋め戻した後では修理不能となる。従って，メンテナンス性の観点から，ここでは，インナープローブ側の動力により，アウターケーシングの観測ポートを開閉する機構について検討する。

図 5-6，5-7 に観測ポートの開閉機構の案を示す。図 5-6 は，インナープローブに展開／収納可能な上下ラッチおよび伸縮機構（スライダー）を搭載し，上下スライド式のアウターケーシングの観測ポートを開閉するものである。図 5-7 は，ポート付パッカーの拡張による力を利用し，プッシュ式のアウターケーシングの観測ポートを開閉するものである。



パッカーラバーと注入/圧力検知ピストンの
仮組立状況（パッカーの芯金を除く）



(1) パッカー拡張前　　(2) パッカー拡張後

図 5-4 ポート付パッカーの機構（一般財団法人電力中央研究所特許番号 5350136「パッカー一体型水理試験装置」）

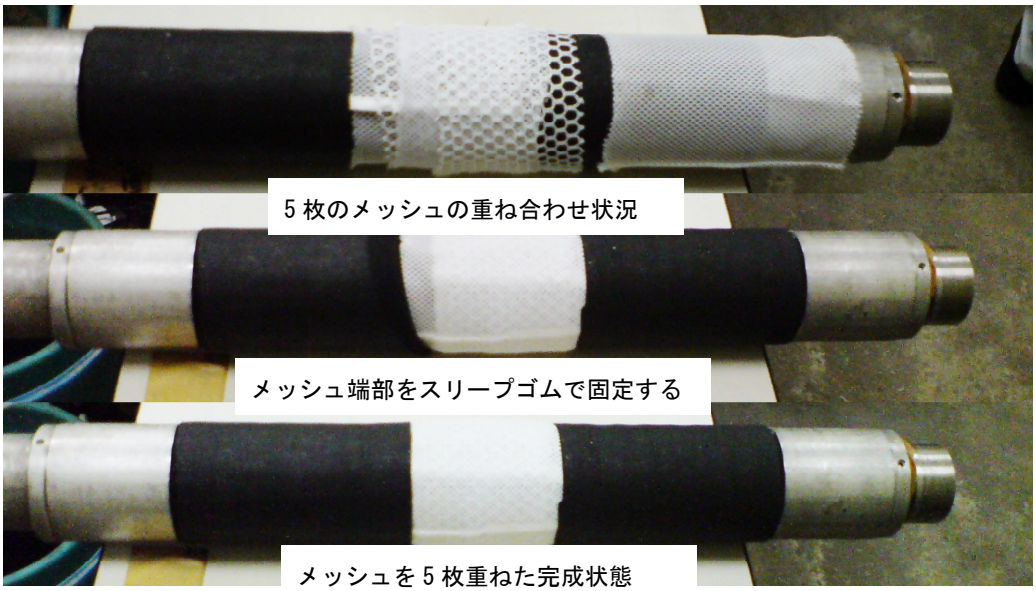


図 5-5 ポート付パッカーの概要

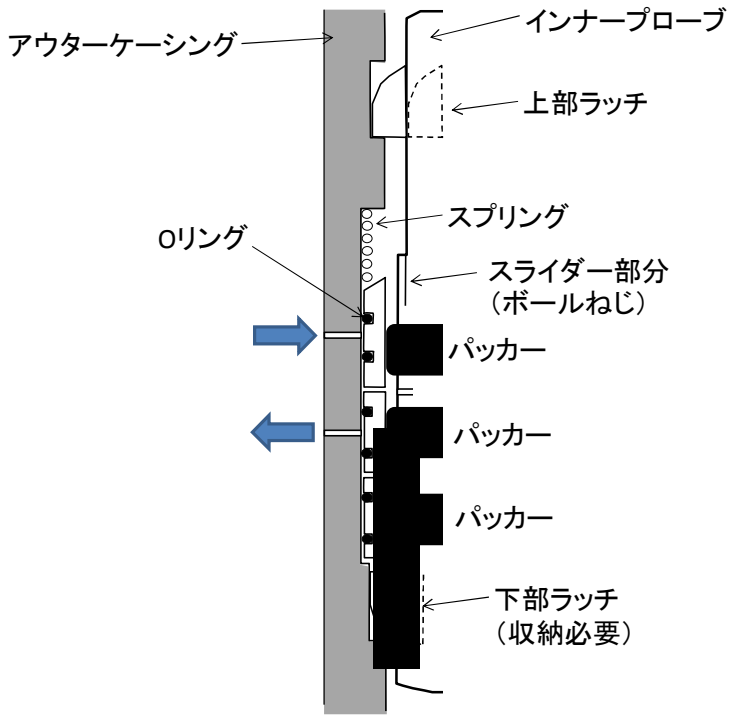


図 5-6 観測ポート開閉機構案 1（ラッチ式）

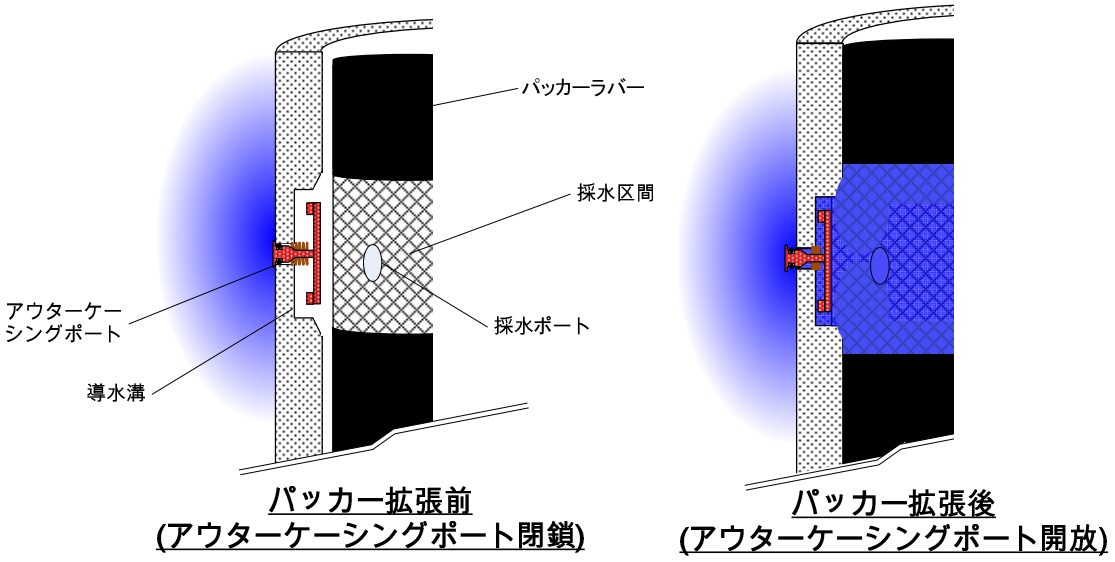


図 5-7 観測ポート開閉機構案 2（ポート付パッカー活用型）

(2) 装置地上部概念

装置地上部は，インナープローブ昇降用のケーブルウインチ，シーブ，制御 PC，計測 PC からなる。ケーブルウインチおよびシーブは深度読み取り機構を有し，インナープローブのアウターケーシング内深度を読み取る（プローブ深度について高い精度が要求される場合には，磁力セン

サーおよびマグネチックカラーを併用)。

制御 PC は，ケーブルウインチおよびインナープローブの制御機能を有し，インナープローブの昇降，パッカーの拡張・収縮，インナープローブによるアウターケーシングの観測ポート開閉，モニタリング・採水のためのバルブ開閉，ポンプ作動等を行う。

計測 PC は，インナープローブの深度，地下水圧，水質，水温，流量等のモニタリング・採水データの表示およびロギングを行う。

5.5 光式岩盤歪計の移設概念

既設の光式岩盤歪計の光ファイバーケーブルを観測孔から延長し，前項に述べた光ファイバー用アウターケーシング内を通して地上に引き出す。坑道内に既設の光測定器を，地上に再設置する。

5.6 基本工程

インナープローブ式水質モニタリング装置の要素技術開発には，1～1.5 年の工期が必要となる。この要素技術開発にはアウターケーシングの開閉機構も含まれる。2 年目には光式水圧モニタリング装置の要素技術開発と，両装置の詳細設計，3 年目には，両装置の製作を実施することで，4 年目以降に両装置の設置が可能となる（表 5-5）。

表 5-5 基本工程

基本工程

項　　目	1年目		2年目		3年目		4年目	
光式水圧モニタリング装置要素技術開発								
インナープローブ式水質モニタリング（採水）装置要素技術開発								
光式水圧モニタリング装置詳細設計								
インナープローブ式水質モニタリング（採水）装置詳細設計								
光式水圧モニタリング装置製作								
インナープローブ式水質モニタリング（採水）装置製作								
設置作業								

6. 今後の課題

6.1 坑道閉鎖後の長期地質環境モニタリング技術に関する課題

ここでは，現在，観測に使用している装置の地上移設に限らず，一般論として坑道閉鎖後の地下水環境の長期モニタリングに関する課題について述べる。RWMC は，地層処分のモニタリングにおいて想定される計測対象と技術的課題についてまとめている[3]（表 6-1）。

計測対象「熱」の計測項目「温度」については，導電性金属の変化・劣化が課題とされているが，近年では光ファイバー式温度計による計測事例が蓄積されている[5]。

計測対象「地下水」の計測項目「水位」，「間隙水圧」，「含水率」については，化学法，電気法（導電計測）による長期の信頼性が課題とされている。このうち「水位」，「間隙水圧」については，近年では光ファイバー式の圧力計による計測事例が蓄積されている[5]。「含水率」については，光ファイバー式の水分計の開発が行われているが実用化には至っていない[6, 7]。

計測対象「応力」の計測項目「岩盤圧」，「亀裂変位」，「ひずみ」については，音響等発信・受信計測のエネルギー供給が課題とされている。これら計測方法として音響（AE），ひずみ／変位計が挙げられているが，AE については，近年，光ファイバー式の AE センサーが開発され，倉敷および波方国家石油ガス備蓄基地で使用された実績がある[8, 9]。ひずみ／変位については，近年，光ファイバーを用いたひずみ／変位計の開発が進んでおり，計測事例が蓄積されている[10]。

計測対象「化学」の計測項目「水質化学」「溶存成分」については，原理的に化学反応センサーのため変化，劣化への対処が必要とされている。現時点で地下水化学特性の長期観測に適した化学反応センサー以外のセンサーで実用化されているものは認められない。

表 6-1 地層処分における計測対象と計測センサー技術動向

計測対象分類	計測項目	計測方法	地層処分モニタリング技術の観点での課題
熱	温度	熱電式計測	導電性金属使用のため、環境での変化、劣化をきたす。
地下水	水位、間隙水圧 含水率	水位、水圧、水分計	化学法、電気法(導電計測)ともに長期の信頼性が課題
応力	岩盤圧、亀裂 変位、ひずみ	音響（AE） ひずみ／変位計	音響等発信・受信計測のエネルギー供給
化学	水質化学 溶存成分	Eh/pH 計測 腐食電位	原理的に化学反応センサのため変化、劣化への対処
その他複合計測	光学ファイバ複合センサ （反射型、透過型等） 応力－光透過特性変化 化学－光波長 感熱－光波長、屈折率変化		センサとファイバ材料の、化学的構造的耐久性が未知である。 光通信ケーブル等の知見の反映

6.2 長期地質環境モニタリングに関わる先端的技術

RWMC は，放射性核種の物質移行特性へ及ぼす影響の観点から，地下水化学特性の計測のうち，Eh，pH が特に重要としている[3]。しかしながら前述のとおり，現時点では地下水化学特性の長期観測に適した，化学反応センサー以外のセンサーで実用化されているものは認められない。

pH の計測については，従来のガラス電極に代わる，イオン感応性電界効果型トランジスタ

（ISFET）による pH センサーが開発されている[11]。ISFET は，内部液を有する電極を用いないことから，原理的には長期的な計測に適していると考えられる。

一方，PreSens 社は，pH 変化に感度を持つ蛍光染料を光ファイバーの先端にコートした，光学式 pH 計を販売している。この pH センサーから放たれる蛍光エネルギーは周囲の pH 値に依存するため，蛍光の信号を測定することにより測定部位（生体組織）の pH 値を知ることができるとしている。同技術は塩分濃度の高い溶液を対象としており，塩分濃度の低い地下水の長期観測への適用可能性は不明である。その他，コンクリート内部の pH を計測するための光ファイバーセンサーの開発が行われている[12]。これは，光ファイバーに pH 指示薬液（フェノールフタレイン溶液）を塗布し，吸光を生じたエバネセント波スペクトルを解析することで，周囲の pH 変化を検知するものである。なお，これら pH 指示薬液については可逆性も確認されている。ただし，pH 指示薬が乾燥すると，指示薬としての機能が失われる点など，現時点では長期観測への適用には課題が多いと考えられる。

また，モニタリングに必要となる通信については，ケーブル等を用いる有線方式とケーブル等を用いない無線方式が考えられる。有線方式の場合，ケーブルを通すことに起因する水みちが周辺の水理場に影響を与えることが想定されることから，これを避けるため，地中無線通信による伝送技術を地層処分へ適用するための研究開発が進められている。地中無線通信は，ダムや河川構造物の分野では既に実用化されており，例えば，均質な結晶質岩の塩水地下環境での実験結果によれば，約 100m 程度まではデータ転送が可能とされている[13),14]。しかしながら，地下 300m 以深が想定される地層処分場との通信のためには，更なる能力の向上が必要と考えられる。

参考文献

1）狩野智之，竹内竜史：“超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング（2010 年度）”，JAEA-Data/Code 2012-002（2012），110p.
2）岩月輝希，竹内竜史，尾上博則：“瑞浪超深地層研究所における第 2 段階の調査研究―地下水流動・水質に関わる施設建設影響と評価解析技術，「平成 24 年度東濃地科学センター地層科学研究情報・意見交換会」資料集”，pp.24-33，JAEA-Review 2012-049（2012）.
3）原子力環境整備促進・資金管理センター：“地層処分にかかわるモニタリングの研究―位置付け及び技術的可能性―”，原環センター技術報告書，RWMC-TRJ-04003（2004）.
4）核燃料サイクル研究開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性；地層処分研究開発第 2 次取りまとめ”，分冊 2，地層処分の工学技術，JNC-TN1400 99-022（1999），703p.
5）平田洋一，大丸修二：“光ファイバーを用いた地下水圧観測システムの適用性確認試験”，JNC-TJ 7410 2005-008（2005）.
6）小松満，西垣誠，瀬尾昭治，平田洋一，竹延千良，田岸宏孝，國丸貴紀，前川恵輔，山本陽一，戸井田克，中野勝志：“土中水分観測手法としての光ファイバー計測技術の開発（共同開発）”，JAEA-Research 2012-001（2012），77p.
7）瀬尾昭治，竹延千良，田岸宏孝，西垣誠，小松満，岸敦康：“光ファイバーを用いた水分計測センサーの性能確認試験”，土木学会平成 25 年度全国大会，第 68 回年次学術講演概要集，（2013）.
8）畑浩二，宮崎裕光，田仲正弘，藤井宏和，斉藤義弘，布谷勝彦：“長期信頼性と防爆性の向上を目指した光式 AE センサの開発”，土木学会平成 22 年度全国大会第 65 回年次学術講演概要集，（2010）.
9）町島祐一：“光ファイバ式アコースティックエミッションセンサを用いた大型構造物の状態監視”，第 61 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集，（2014）.
10）柏井善夫，大丸修二，真田祐幸，松井裕哉：“光ファイバー式岩盤内変位計の開発 3”，JAEA-Technology 2008-047（2008），77p.
11）下島公紀：“ISFET-pH 電極を用いた海洋の現場計測用 pH センサの開発”，Horiba technical reports, No.30，（2005）.
12）西崎到，冨山禎仁：“コンクリートの化学的モニタリング手法に関する研究”，平成 20 年度土木研究所成果報告書，（2008）.
13）樋口佳意，遠目塚良一：“「地中無線通信システム」を用いた地盤の無線調査技術”，地盤工学会誌，58(8)，pp.22-25，（2010）.
14）原子力環境整備促進・資金管理センター：“欧州モニタリング共同研究 MoDeRn における原環センターの取り組み”，原環センタートピックス，2010.9，No.95，pp.3-8，（2010）.

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）