

【小特集】



深度1,000m対応地下水調査機器の開発

中野 勝志 濱 克宏 和久田孝雄

東濃地科学センター

資料番号：102-7

Development of Instruments for Geoscientific Characterization of Deep Groundwater

Katsushi NAKANO Katsuhiro HAMA Takao WAKUDA
Tono Geoscience Center

地下深部の岩盤の水理特性および地下水の地球化学特性を調査するために、深度1,000mまで調査できる地下水調査機器を開発した。この調査機器は、水理試験装置と採水装置で構成される。

水理試験装置は、孔内部にマルチパッカーとボアホールテレビを備える。同装置は定流量揚水試験法、水位回復法、パルス法の試験を行うことができ、 10^{-6} m/secから 10^{-12} m/secオーダーまでの透水係数を測定できる。

採水装置は、地下深部の地下水を被圧不活性状態で採取する機能と、地下水の物理化学パラメータを原位で測定できる機能を有する。

本稿では、開発した装置の概要と、現場試験例について述べる。

The development of the equipment for in-situ measurement of hydrogeological and geochemical properties of deep groundwater is now complete. The equipment is capable of performing measurement down to a depth of 1,000 meters.

The main components of the system are hydrogeological testing unit and groundwater sampling unit.

The hydrogeological testing unit includes multiple packer and borehole television and is designed for pumping test, recovery test as well as puls test. The measurable hydraulic conductivity ranges from 10^{-6} m/sec to 10^{-12} m/sec.

The sampling unit is designed for sampling groundwater under inert condition and measuring physico-chemical parameters in-situ.

An overview of the equipment and some results from exploratory measurements are introduced.

キーワード

地下水、調査機器、透水係数、物理化学パラメータ、(被圧) 不活性状態

Groundwater, Equipment, Hydraulic conductivity, Physico-chemical parameter, Inert condition

1. はじめに

地層処分研究開発の基盤となる地層科学研究では、地質環境が本来備える特性を明らかにすることが主要な研究課題となっている。この研究課題の中では、地下深部の岩盤中の地下水の動きや性質をできるだけ正確に把握することが重要である。具体的には、深度1,000m程度までを対象に岩盤中の一つ一つの現象を詳細に吟味することができる品質に優れたデータが求められる。このようなデータを取得するためには、優れた精度と幅広い適応範囲を備えた調査機器が必要となるが、現在の調査機器は開発目的が異なるために、満足のゆ

くデータを十分に取得できない現状にあった。

以上の課題を解決するために、東濃地科学センターでは地表から掘削した試験孔において地質環境が本来備える特性をできるだけ乱さずに、深度1,000mまでの地下水の動きや性質を精度良くかつ迅速に測定できる調査機器の開発を進めてきた¹⁾。

本稿では、開発した深度1,000m対応地下水調査機器の概要と試験例について述べる。

2. 開発の基本概念

深度1,000m対応地下水調査機器は岩盤中の地

下水の動き（水理特性）を調査するための水理試験装置と、地下水の性質（地下水の地球化学特性）を調査するための採水装置で構成される。この調査機器の開発に際しては、それまでの機器開発や調査の経験および文献や技術情報の収集の結果をもとに、解決すべき課題として以下を設定した。

2.1 共通課題

(1) 耐圧・耐温度性能の向上

機器の調査深度は、最大1,000mに設定した。このことから、水圧10MPa以上の環境に対応できる構造にする。また、調査深度が深くなると地層の温度が上昇することを考慮して、3~4℃/100mの日本の平均地温勾配^{(2),(3)}に対応できるようにする。

(2) 孔内抑留に備えた装置剛性や機能の向上

試錐孔を利用した調査でしばしば発生する孔内崩壊により、調査機器が孔内で抑留することを防ぎ、抑留した場合でも孔内部を地上へ回収できる構造と装置剛性を備える。

(3) 深度誤差の低減

予め設定した試験区間へ確実に調査機器を設置するために、材料の伸び等起因する深度誤差を低減する。

2.2 水理試験装置に関する課題

(1) 試験データの品質向上

難透水性岩盤を対象に考案されたパルス法は透水係数 10^{-12} m/secオーダーまで測定できる数少ない試験法であるが⁽⁴⁾、その精度に関しては十分な比較検討がされていない。よって、すでに実績のある試験法に難透水性岩盤を測定できるように改良を加えて装置に適用し、その試験法とパルス法の測定範囲が重複する部分でデータをクロスチェックできるようにする。また、同時に複数の試験法を備えることで、幅広い測定範囲を確保する。さらに、注水行為を伴う水理試験の課題とされている、目詰まりによる透水性への影響を低減するための試験法を備える。

(2) 地下水位の低下に対処できる機能

地下水位が低下すると大きな水圧差が発生し、試験区間を限定するためのパッカー（水圧を加えることにより膨張し、試錐孔の壁面と密着してその上下間を遮断する装置）の拡張・収縮や透水試験を実施する際の水位や水圧（水頭差）の設定に支障をきたす。このために地下水位が低下しても確実に試験が進められる機能を備える。

2.3 採水装置に関する課題

(1) 迅速な地層水の置換機能

採水区間には、掘削水や目的とする深度以外の地下水が混在しているため、試錐孔内で採水区間を限定した上で、迅速に地層水（目的とする深度に本来存在する地下水）に置換できる機能を備える。

(2) 物理化学パラメータの測定機能

(1)の採水工程の中で、採水区間内の水が完全に地層水へ置換したか否かを判断するために、採水区間内の水の基本的な物理化学パラメータ（pH、電気伝導度、酸化還元電位、硫化物イオン濃度、水温）を測定できる機能を備える。

(3) 被圧不活性状態での地層水の採取

地下水の水質を正確に把握するために、被圧不活性状態（地下の水圧を保持し、大気と全く接触しない状態）で地層水を採取できる機能を備える。

3. 調査機器の概要

開発した調査機器の概要を以下に示す。

3.1 水理試験装置

(1) 装置の機能と性能

開発した装置は図1に示すように、①地上部②中継部③孔内部で構成される。水理試験を行うための主機能は試錐孔内に挿入する孔内部に集約し

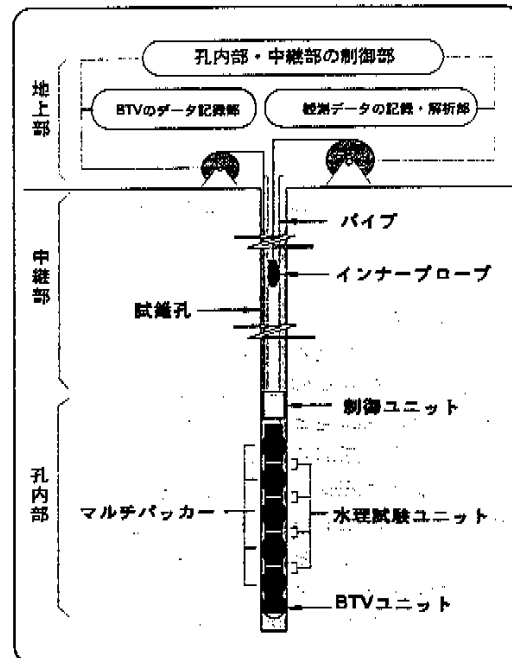


図1 1,000m対応水理試験装置の概念図

た。装置には、前章で示した課題を解決するために以下の機構を備えている⁵⁾。

耐圧・耐温度性能の向上に関する課題を解決するために、装置の耐圧性能を15MPa、耐温度性能を50℃まで向上させた。また、孔内抑留に備えた装置剛性の向上や深度誤差の低減に関する課題を解決するために、前方と側方を同時に観測できるボアホールテレビ (BTV) を開発し、孔内部先端に備えた。このBTVの前方画像により、孔内崩壊の危険性のある箇所を事前に確認できるとともに、同カメラの側方画像を用いて試験孔壁の状況を直接観察できるので、調査対象位置へ正確に試験区間を設定することができる。さらに、装置が孔内に抑留した場合でも装置の回収が可能となるように、パイプを接続して挿入する方式を採用した。この方式を採用したことにより、従来のホース型の試験装置では、深度1,000mまで挿入した場合、計算上は数m以上の深度誤差の発生が予測されていたが、開発した装置では剛性に優れたパイプを用いることにより深度誤差を0.3m以内にとどめることができた。

試験データの品質向上に関する課題を解決するために、透水試験法として、従来より広く用いられている水位回復法、難透水性岩盤を対象に考案されたパルス法⁴⁾、および難透水性岩盤を測定できるもう一つの方法として、定流量揚水試験法を採用した。定流量揚水試験法は従来より広く用いられてきた揚水試験法（開放系で水位変化を測定

表1 試験装置の基本性能

適用深度	G.L. - 1,000mまで
適用孔径	φ75mm~100mm
挿入方式	パイプ方式
透水試験法	定常法：定流量揚水試験 非定常法：非定常法入法 非定常回復法 パルス法 圧力の回復を測定する パルス法 試験時間の短縮化を図るための パルス法
地下水位の低下限界	G.L. - 300m
耐温度性能	50℃まで
特殊機能	BTV（前方・側方同時観測型） マルチバックカー（最大4区間）

する）を、完全閉鎖系で圧力変化を測定することにより難透水性岩盤が測定できるように改良した方法である。また、パルス法に関しては、すでに考案されたパルス法に加えて、難透水性岩盤の試験を効率的に行うための試験時間の短縮化を図るパルス法と、注水行為に伴う目詰まりによる影響を低減するために圧力の回復を測定するパルス法を考案し⁶⁾、装置の試験法に加えた。これら複数の試験法を備えることにより、測定範囲が重複する部分において各試験結果の比較検討が可能となり、試験データの信頼性の向上を図ることができた。さらに、これらの試験法を組み合わせることで、 $10^{-6} \sim 10^{-12}$ m/secオーダーまでの幅広い透水係数の測定範囲を確保できた。

試験方法	透水係数 [m/s]							
	10^{-12}	10^{-11}	10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}
水位回復法								
パルス法								
試験時間の短縮化を図るためのパルス法								
定流量揚水試験								

図2 各透水試験法の透水係数の測定範囲

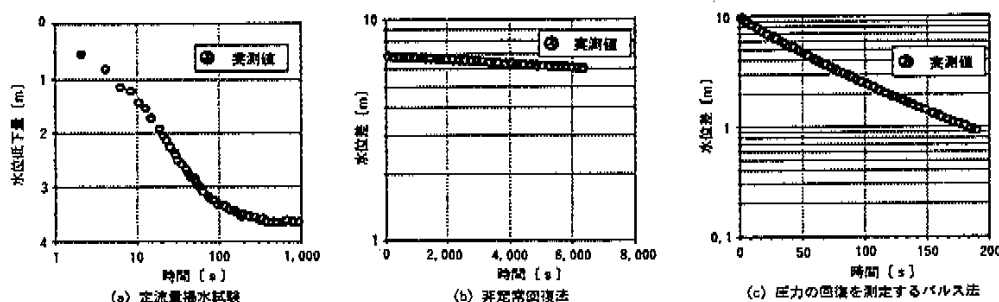


図3 試験結果の一例

なお、表1に開発した装置の基本性能を、図2に各透水試験法の透水係数の測定範囲を示す。

(2) 現場試験例

花崗岩中の同一深度で行った試験結果の一例を図3に示す。図3の(a)は定流量揚水試験法、(b)は水位回復法、(c)は圧力の回復を測定するパルス法の実測値である。各実測データからの透水係数の算定は、定流量揚水試験法では Jacob-Cooper により提案された(1)および(2)式⁷⁾、水位回復法では Hvorslev により提案された(3)式⁸⁾、パルス法では(3)式に仮想井戸半径の概念を取り入れた(4)式を用いた⁴⁾。

$$k = \frac{Q}{4\pi L(h_1 - h_2)} \ln \left\{ \frac{t_1/r^2}{t_2/r^2} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$Ss = 2.25k(t/r^2)_{(t=0)} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

- k : 透水係数 (m/sec)
- Q : 揚水流量 (m³/sec)
- L : 試験区間長 (m)
- t₁, t₂ : 経過時間(sec)
- h₁, h₂ : 経過時間t₁, t₂に対応する水位(m)
- r : 試験孔半径 (m)
- Ss : 比貯留係数 (m⁻¹)

$$k = \frac{(2Rw)^2 \ln(mL/r)}{8L(t_2 - t_1)} \ln(h_1/h_2) \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

- Rw : ピエゾメーター管内半径 (m)
- m : 鉛直水平方向の透水係数比 (m=1)

$$k = \frac{R^2 \cdot \ln(L/r)}{2L(t_2 - t_1)} \ln(h_1/h_2) \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

- R : 仮想井戸半径 (m)

表2は試験結果を取りまとめたものである。各試験結果ともほぼ一致した値を示しており、装置の実用性が確認できた。

表2 現場試験結果の一例

	透水係数 (m ^s -1)
定流量揚水試験	4×10 ⁻⁹
非定常回復法	5×10 ⁻⁹
圧力の回復を測定するパルス法	3×10 ⁻⁹

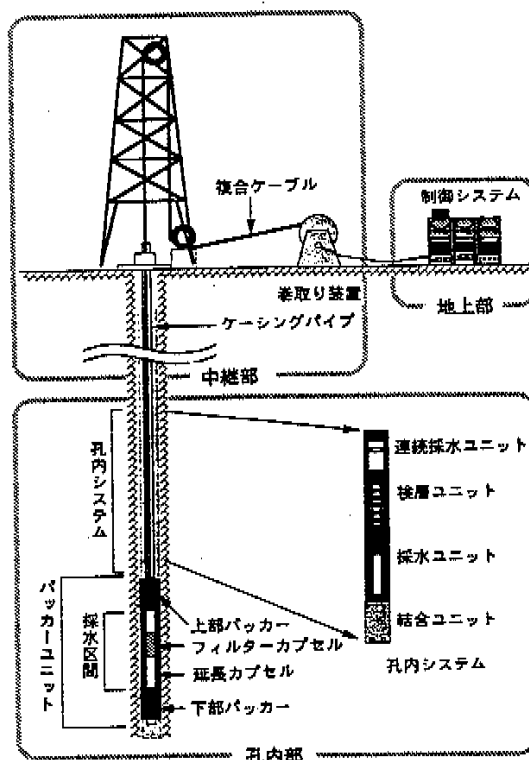


図4 1,000m対応地下水の地球化学特性調査機器の概念図

3.2 採水装置

(1) 装置の機能と性能

開発した装置は図4に示すように、①地上部②中継部③孔内部で構成される。地下水を採取するための主機能は孔内部の孔内システムに集約した。装置は前章で示した課題を解決するために以下の機能を備えた⁹⁾。

耐圧・耐温度性能の向上に関する課題を解決するために、装置の耐圧性能を15MPa、耐温度性能を50℃まで向上させた。また、孔内抑留に備えた装置剛性の向上や深度誤差の低減に関する課題を解決するために、採水区間を限定するパッカーユニットは、極めて伸びの少ないステンレス製のケーシングパイプで試験孔内に挿入する構造とした。装置の心臓部である孔内システムは、孔壁崩壊時に発生する装置の孔内抑留を回避するために、ケーシングパイプ内を通路とし、地下深部でパッカーユニットと着脱できる構造とした。

迅速な地層水の置換機能に関する課題を解決するために、採水区間を上下2つのパッカーで限定して、外部の環境と隔離できる機構を採用した。

表3 1,000m対応地下水の地球化学特性調査機器の基本性能

運用深度	G.L.-1,000 [m]
適用孔径	φ75~130 [mm]
耐温度性能	50℃まで
地下水位低下限界	G.L.-300 [m]
挿入方式	バックヤユニット：ケーシングパイプ 孔内ユニット：複合ケーブル
総重量	約15[t]
採水方式	ポンプアップによる連続採水方式 採水容器による被圧不活性採水方式
採水量	連続採水：最大6 [ℓh ⁻¹] バッチ式採水：0.5 [ℓ] (採水容器1本あたり)
測定項目	pH、酸化還元電位、電気伝導度 硫化物イオン濃度、水温、間隙水圧 バックヤ水圧、採水容器内圧力

また、孔内システムの一つである連続採水ユニットに内蔵されたポンプを用いて上下のパッカーで限定された採水区間の地下水を連続的に地上に採取（連続採水）し、採水区間内の地下水を迅速に地層水に置換することができるようにした。さらに、物理化学パラメータの測定機能に関する課題を解決するために、孔内システムの一つである検層ユニットにより、地下水の物理化学パラメータの変化を原位置で測定できるようにした。この機能により、連続採水期間中に採水区間の水がどの程度地層水へ置換したかを確認できる。最後に、被圧不活性状態での地層水の採取に関する課題を解決するために、採水区間内の水が地層水へ置換されたことを確認した後、孔内システムの一つである採水ユニットに内蔵された採水容器内に被圧不活性状態で地層水を採取し（バッチ式採水）、地上に回収できる機構を採用した。表3に開発した装置の基本性能を示す。

(2) 現場試験例

岐阜県東濃地域の土岐花崗岩に掘削された試験孔において装置の機能を確認するために現場試験を実施した。表4に現場試験の概要を示す。この

表4 現場試験の概要

採水区間	G.L.-966~-973 [m]
岩相	花崗岩
採水区間体積	27 [ℓ]
地下水温度	35 [℃]
間隙水圧	9.2 [MPa]
ポンプ式採水量 (平均採水速度)	201 [ℓ] (72時間) 2.8 [ℓh ⁻¹]
バッチ式採水量	15 [ℓ] (30回分)

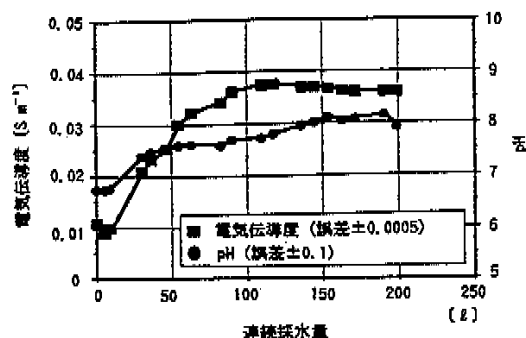


図5 物理化学パラメータの計測結果の一例

試験により、G.L.-966~-973mにおいて連続採水で200 ℓ、バッチ式採水で15 ℓの地下水が採取でき、装置の採水性能を確認できた。また、連続採水中の物理化学パラメータの計測結果の一例を図5に示す。このデータから連続採水量が150 ℓを越えた時点より、pH、電気伝導度とも安定する傾向が得られた。連続採水量の150 ℓは、採水区間体積の約5.5倍に相当し、地層水を採水するために採水区間体積の5倍以上の連続採水を必要とした報告事例¹⁰⁾とよく一致した結果を得た。このことから、装置が備える物理化学パラメータの計測機能により、採水区間中の水が地層水に置換されたか否かを判断できることが確認できた。

4. おわりに

本稿では、主に調査機器の開発課題と開発した調査機器の構造と性能および現場試験例について述べた。今後は、これらの成果と経験を基により高温環境への対応や機動性、操作性の向上を目指した改良機の開発を進めるとともに、実際の調査に適用し、信頼性のあるデータを蓄積してゆく計画である。

参考文献

- 1) 中野勝志、竹内竜史、他：“水文学的研究に必要な調査技術・機器の開発”。地層処分研究開発の現状、P288-289。
- 2) 新井正：“陸水の温度”。陸水、P25-39。
- 3) 力武常次、荻原幸雄：“物理地学”。地球科学講座9、P226。
- 4) 柳沢孝一、斉藤泰、他：“新しい現場透水試験法（動態式JPT）の開発と測定例”。地盤工学会、土と基礎、37、7、P47-52。（1989）。
- 5) 中野勝志、竹内竜史、他：“1,000m対応水理試験装置の結晶質岩への適用例”。第31回地盤工学研究発表会予稿集、P2145-2156。
- 6) 竹内竜史、中野勝志、他：“難透水性岩盤を対象とした現場透水試験に関する検討”。日本地下水学会1995年秋季講演要旨集、（1995）。
- 7) Jacob, C.E.: "Radial flow in a leaky artesian aquifer", *American Geophysical Union*, 27, 2, P198-205, (1946)。

- 8) Hvorslev, M.J.: "Time lag and soil permeability in ground-water observations", Corps of Engineers U.S. Army, *Waterways Experiment Station*, 36, (1951).
- 9) 濱克夫, 瀬尾俊弘, 他: "地球科学的研究に必要な調査技術・機

- 器の開発", 地層処分研究開発の現状, *PNC TN1410 96-071* P299-301, (1996).
- 10) 柳澤孝一, 中野勝志, 他: "ベッカー式地下水サンプラーの開発", 日本地下水学会1991年度秋季講演会講演要旨, (1991).