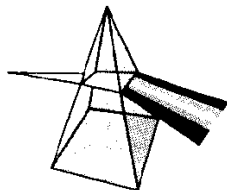


【技術報告】



地層科学研究における地下水調査・解析技術の現況

小出 馨

東濃地科学センター

資料番号：107-2

Current Status of Methods and Instruments for Characterizing
Groundwater Flow and Geochemical Properties in PNC's
Geoscientific Studies

Kaoru KOIDE
Tono Geoscience Center

地層処分研究開発の基盤となる深部地質環境の科学的研究（地層科学研究）の目標の1つとして、地下深部の地下水の流動と地球化学的性質を明らかにするための調査・解析技術の開発があげられる。これまでに深度1,000mまでの調査が可能な水理試験装置並びに採水装置が開発されており、地下深部の岩盤の透水性や地下水の水質に関する情報が取得可能となっている。また、岩盤の透水係数分布の推定法や地下水流動シミュレーションコードの開発等の解析技術、並びに解析結果を検証するための長期モニタリング装置の開発や環境同位体の解析技術の整備が行われており、一貫した調査・解析プロセスの構築に向けての研究開発が進められている。

This report describes the current status of methods and instruments for characterizing groundwater flow and geochemical properties as part of PNC's geoscientific studies. Since 1991, PNC has been developing instruments to measure rock mass hydraulic conductivity and sample groundwater to depths of 1,000m. Prototypes were completed in 1994. In 1997, advanced versions of these instruments were completed. These instruments are currently being used in PNC's geoscientific studies. Methods and instruments for geophysical and drilling investigations, intended to provide information of geological structure, are being improved and developed based on existing technologies. PNC has also been developing methods for estimating the spatial distribution of hydraulic conductivity in the rock mass and for modelling groundwater flow in porous and fractured media. Furthermore, studies for estimating the origin and age of groundwater by using stable isotope ratios and radioactive isotopes are being conducted for evaluating the results of groundwater flow simulation.

キーワード

地下水調査、地下水流動、水理試験、採水試験、地下水流動解析

Groundwater Investigation, Groundwater Flow, Hydraulic Test, Groundwater Sampling, Groundwater Flow Simulation

1. はじめに

我が国をはじめ、地層処分を計画している各国において、その根幹をなすコンセプトは、「多重バリアシステム」である。このシステムは、工学的な多層の防護（人工バリア）機能と地質環境に備わる地下水による物質移行の抑制（天然バリア）機能とを多重に組み合わせたものである。この多重バリアシステムの内、地質環境には、①物理的な隔離性、②人工バリアシステムの設置環境、③物質移行の遅延特性の3つの要件が求められている¹⁾。

これらの要件を評価するうえで最も重要な特性は、諸外国での先行研究からも明らかのように、地下水の流動と地球化学的性質である。しかし、地下深部におけるこれらの特性は、これまで社会的関心度や経済的理由等から学術的な調査事例が少なく、公開されているデータも限られている。また、数少ない公開データも、そのほとんどが地下資源探査や土木工事等の経済活動の中で取得されたものであり、調査の目的やデータに求められるレンジ・精度の違いから、これらの特性を議論

するために要求されるデータの精度や品質を十分に満たしているものは極めて少ない。このことは裏を返せば、必要とされる精度・品質を備えるデータを取得可能な調査機器が十分に整備されていないことを意味する。したがって、精度・品質が保証された地下深部の地下水の流動と地球化学的性質に関するデータを取得するための調査技術、及び現象を理解するための解析技術の開発が急務とされている。

このような背景から、動燃事業団は、地層処分研究開発の基盤となる深部地質環境の科学的研究（以下、地層科学研究という）の一環として、地下深部におけるこれらの地質環境特性を明らかにするための調査技術の開発を進めている。

本報告では、地層科学研究における地下深部の地下水に関する調査技術開発の現状を紹介するとともに、技術的課題を示す。

2. 調査技術の開発目標と方針

地下水の調査に必要な技術には、地下深部の地質学的、水理・水文学的、地球化学的データを取得するための調査技術、地下水流動のシミュレーションや水質形成機構のモデル化等のための解析技術、及び解析結果の妥当性を検証するための評価技術が含まれる。これらの技術については、地層処分は地下の深い地層中に行うという国の方針に基づき²⁾、現時点では深度1,000mまでの調査を可能とすることを目標にしている。

この目標に向けての調査技術の開発にあたっては、①取得されるデータの品質保証を第一に優先する、②利用可能な既存技術は有効性と適用範囲を確認する、③必要に応じて既存技術の改良及び新規開発を行う、④個々の技術を統合し、地質環境特性の調査プロセスとして体系化を図るという4つの方針に沿って研究開発を進めている。

3. 調査技術の現状

調査対象領域内の地下水の流動及び地球化学的性質を把握するためには、地質構造、岩盤の水理学的性質、及び地下水の水質に関する情報が必要である。そのため、これらの情報を取得するための新たな調査手法・機器の開発、並びに既存技術の有効性や適用範囲の確認、さらに性能向上のための改良を進めている。

3.1 地質構造調査

調査対象領域の地質及び地質構造を把握することは、地下水の流動経路や水質形成機構を把握す

るうえで重要である。

調査すべき地質構造は、対象となる地下水流動の規模によって異なることが考えられる。例えば、広域的な地下水流動を対象とする場合は、比較的規模の大きい断層・破碎帯等の把握が重要となり、調査領域のスケールが小さくなるにつれ、調査すべき地質構造のスケールも、より微細なものになっていくと予想される。そのため、地質構造調査に関する技術については、表1に示すように

表1 地質構造調査技術の開発状況

項 目	測定／解析原理	データ取得方法	対象岩種	対象スケール	開発状況
リモートセンシング (1)リニアメント判読	線状地形から断層等の位置・規模を推定する。	人工衛星画像や空中写真を利用する。	堆積岩／結晶質岩	数十km四方	実用
リモートセンシング (2)植生活性度調査	植生の活性度の違いから地下水の流出域を推定する。	人工衛星や航空機に搭載されたMSSのデータを利用する。	堆積岩／結晶質岩表層部のみ対象	数km～数十km四方	評価中
電磁調査法	岩盤の比抵抗値から岩相の違いや割れ目帯等の位置・規模を推定する。	地表に送・受信線を展開してデータを取得する。	堆積岩／結晶質岩	数km四方	実用
レーダー法 (1)シングルホール反射法	割れ目等で反射してくる電磁波を測定することによって割れ目の位置を推定する。	単一のボーリング孔に発信・受信プローブを挿入しデータを取得する。	結晶質岩	ボーリング孔から数十mの範囲	実用／改良中
レーダー法 (2)シングルホール反射法	測定原理は(1)と同様。発信電波数を上げ、発信・受信アンテナに指向性を持たせることによって(1)の測定より割れ目の位置の検出精度を向上させている。	単一のボーリング孔に発信・受信プローブを挿入しデータを取得する。	結晶質岩	ボーリング孔から数十mの範囲	実用／改良中
レーダー法 (3)トモグラフィ調査法	岩盤中の電磁波の速度や振幅の変化から割れ目帯等の位置や規模を推定する。	複数のボーリング孔に発信プローブと受信プローブを別々に挿入しデータを取得する。	結晶質岩	孔間距離が数十m	実用／改良中
VSP法 (1)ゼロオフセットS波VSP法	S波の偏向異方性から割れ目の卓越方向を推定する。	単一のボーリング孔に受振器を挿入しデータを取得する。震源は地表あるいはボーリング孔内に置く。	結晶質岩	ボーリング孔近傍	評価中
VSP法 (2)ハイドロフォンVSP法	チューブ波の発生深度や振幅から開口性割れ目の幾何学情報・透水性を推定する。	単一のボーリング孔に受振器を挿入しデータを取得する。震源は地表あるいはボーリング孔内に置く。	結晶質岩	ボーリング孔近傍	評価中
弾性波トモグラフィ	岩盤中の弾性波の速度や振幅の変化から岩相の違いや割れ目帯等の位置・規模を推定する。	複数のボーリング孔に震源と受振器を別々に挿入しデータを取得する。	堆積岩／結晶質岩	検討中	実用／改良中
比抵抗トモグラフィ	岩盤の比抵抗値から岩相の違いや割れ目帯等の位置・規模を推定する。	複数のボーリング孔に電極を挿入しデータを取得する。	堆積岩／結晶質岩	検討中	実用／改良中
反射法地質調査	岩相境界や割れ目帯等で反射してくるP波やS波を観測することによって地質構造を推定する。	地表に震源を置き、受振器を展開してデータを取得する。	堆積岩／結晶質岩	測線長が数km	実用

調査スケールに分けて、各種の既存調査手法の適用・評価、及びそれに基づく改良を実施している。

また、地下深部の調査には、ボーリング孔の掘削技術も重要な項目である。一般にボーリング孔を掘削する際は、ボーリング孔の孔壁の崩落防止や切り屑の排出を容易にするため、掘削水に泥材を混入する。しかし、泥材による岩盤の目詰まりに起因する透水性の変化や地下水の水質への影響が避けられないため、地層科学研究の調査では泥材を用いない清水掘削を実施している。ただし、清水掘削は、泥材を用いる掘削方法に比べ、崩壊性の岩盤に遭遇した際に掘削不能に陥る可能性が高いという問題を有しているため、これを克服するため、三重管工法や部分保孔技術等の開発を進めている。

3.2 水理調査

地下水流動解析には、地質・地質構造に関する情報の他に、対象領域内の岩盤の透水性や上部境界条件となる地下水涵量（降水が岩盤にしみ込む量）、さらに側方境界条件や解析結果の検証用となる間隙水圧の分布等の水理・水文的情報が必要である。これらの情報を取得するため、表2に示すような調査機器や観測システムを開発して

いる。

ここでは、動燃事業団が開発した1,000m対応水理試験装置と試錐孔間水理試験装置について、その概要を述べる。

(1) 1,000m対応水理試験装置

地下深部の地下水流動を把握するためには、従来の土木分野等では不透水層として取り扱われていた 10^{-6} cm/sec以下の透水性を有する難透水性岩盤の水理学的特性を明らかにすることが必要である。また、調査対象深度が数百m以深であることから、調査機器には高温高圧下で高精度なデータを取得できることが求められている。そのため、水理試験装置として、深度1,000mまでの難透水性岩盤を対象としたボーリング孔による原位置透水試験装置を開発した（図1）。

本装置の基本構造には、ボーリング孔内で発生する崩壊を考慮して、パイプ方式（測定部をロードに接続して昇降する方式）を採用している。本装置により実施可能な透水試験方法は、非定常法のJFT（Johnson's Formation Test）法と動燃事業団が難透水性岩盤を対象に考案したパルス法、及び定常法の1つである揚水試験である。これらの透水試験法を併用することによって、 10^{-4} cm/secオーダーから 10^{-10} cm/secオーダーまでの幅広い

表2 水理調査・地下水の地球化学的調査用機器の開発状況

凡 例		開 発 状 況	水 理 試 験					地球化学パラメータの測定										凡 例				
			間隙水圧	透水係数測定 測定可能な 透水の透水性係数 (cm/s) 100の累乗の 指数で示す	定常法	非定常法	3次元水理特性 蒸気量測定	電気伝導度	pH	Eh	還元剤イオン濃度 ppm	溶存酸素濃度 ppm	連続採水	バッチ採水	測定可能深度 (m)	最大使用温度環境 (℃)	使用可能試錐孔径 (mm)	調査実施箇所	地表—地表 地表—地表からの試錐孔	室内—室内試験 室内—室内試験	坑壁—坑壁 坑壁—坑壁	坑壁—坑壁 坑壁—坑壁
実用化 改良中 製作中 設計中 計画 適用段階 調査中 測定可能 改良により測定可能		実	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
室内透水試験装置		実	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
表層水理定数測定システム		実	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
200m用低圧リジオン水理試験装置		実	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
200m対応動燃式低水圧制御水理試験装置		実	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
500m対応動燃式低水圧制御水理試験装置		実	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
1,000m対応水理試験装置		実	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
1,000m対応揚水試験装置		実	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
1,000m対応水理試験装置（高温環境型）		実	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
大深度対応地下水の長期モニタリング装置		設	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
蒸気量測定装置		実	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
水理学的締め領域計測装置		実	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
試錐孔間水理試験装置		通	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
100m対応バッカー式地下水サンプラー		実	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
500m対応バッカー式地下水サンプラー		実	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
1,000m対応地下水の地球化学特性調査機器		実	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
地球化学検閲ユニット ※採水装置ヘドッキング		実	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
1,000m対応地下水の地球化学特性調査機器（高温環境型）		実	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
地球化学検閲ユニット（高温環境型） ※採水装置ヘドッキング		実	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
水質連続モニタリング装置		実	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
坑道内地下水採水装置		実	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	
移動調査システム		通	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地表	室内	坑壁	坑壁	

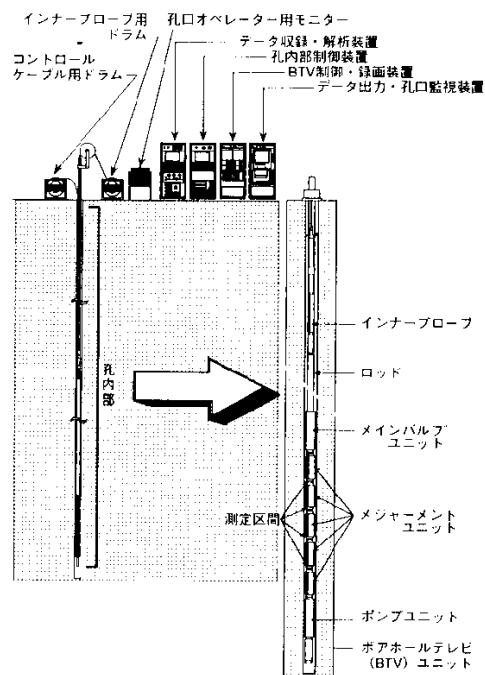


図1 1,000m対応水理試験装置の構造

透水係数の測定を可能にした。

本装置の最大の特長は、5連のマルチパッカーと装置の先端に装着したBTV(ボアホールテレビ)である。5連のマルチパッカーによって、装置の再設置なしに試験区間を2mから14mまで変更可能であり、試験区間以外の区間の間隙水圧を測定することにより、試験区間を区切るパッカーの透水効果を確認することができる。この機能は試験結果の品質を保証するうえで有効と考えられる。

また、BTVによってリアルタイムに装置の前方及び側方の岩盤状況を把握することができるため、装置が孔内に抑留される可能性のある箇所の回避やパッカー設置部分の岩盤の状態の確認、さらに特定の割れ目(帯)を対象とするような試験区間の設定に精度が求められる場合でも確実に装置を設置することが可能である³⁾。

(2) 試験孔間水理試験装置

試験孔間水理試験装置は、物質移行現象の解明に不可欠な単一割れ目の透水係数及び比貯留係数、並びにこれらの水理定数の異方性や水理学的連続性に関するデータを取得するために開発された。本装置の最大の特長は、正弦波圧力注水試験が実施できることである。正弦波パターンの圧力注水の利点は、潮汐等によってバックグラウンドの水圧が変化した場合でも、試験の圧力応答が抽出

できることである。

本装置の性能試験が釜石鉱山内の岩盤(花崗閃緑岩)を対象に実施され、設計性能通りに本装置が現場で確実に作動することを確認した⁴⁾。

3.3 地下水の地球化学調査

地表水や地下水の水質や水素・酸素の同位体比及び年代は、地下水の起源、流動経路、及び滞留時間等を明らかにするためには極めて有効な情報である。また、これらの情報は、地下水涵養時の古環境(気候・標高)を推定するうえでも重要であり、古水理地質学的な研究には必要不可欠であるといえる⁵⁾。

これらの情報を取得するためには、地層中に本来存在している地下水、すなわち、地層水のみを採取する技術が必要である。この課題に対しては、本来の地下水と掘削水との混合問題を解決するための地下水の採取方法を提案し⁶⁾、また、地下水を、採取した地点の圧力を保持し、空気に触れない状態(被圧不活性状態)で採取できる装置(バッカー式地下水サンプラー)等を開発した。

ここでは、動燃事業団が開発した1,000m対応採水装置及び地球化学検層ユニットについて、その概要を述べる。

(1) 1,000m対応採水装置

地表から掘削したボーリング孔を利用して、地質環境が本来有する特性を可能な限り乱すことなく、地表から地下深部までの地下水の地球化学的性質を高精度かつ迅速に把握するための調査機器の開発を実施しており、これまでに深度500mまでの地下水を原位置で採取する装置の開発を終了し、実際の調査に活用している(表2)。

これをもとに、今後の調査深度の拡大に対応するため、深度1,000mまで対応可能な採水装置を開発した。

本装置は、地上部、中継部、孔内部から構成されており(図2)、地下水を採取する機能はすべて孔内部に集約されている。装置の基本構造には、水理試験装置と同様に、孔内崩壊を考慮してパイプ方式を採用している。

採水機能については、被圧不活性状態で地下水を採取できるようにするためのバッチ式採水機能を備えるとともに、採水作業の効率化を図るためにポンプアップによる連続排水機能も装備している⁷⁾。

(2) 地球化学検層ユニット

本ユニットは、原位置における地下水の物理化学パラメータの取得を目的に開発されたものであ

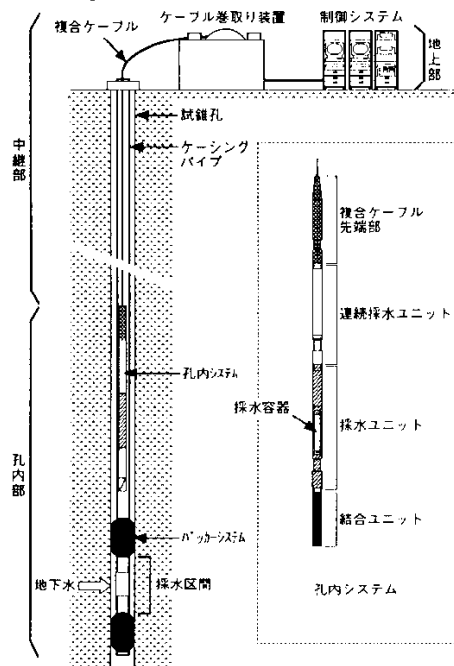


図2 1,000m対応採水装置の構造

り、pH、酸化還元電位、電気伝導度、硫化物イオン濃度、水温が測定可能である。

本ユニットは、1,000m対応採水装置内に装着して使用され、連続採水時にリアルタイムで地下水の物理化学パラメータを確認することが可能である。これによって、パッカーで区分された採水区間内において、孔内水が地層水に置換されていく様子が確認可能であり、的確な地下水採取のタイミングを知ることができる⁷⁾。本装置の仕様を表3に示す。

表3 地球化学検層ユニットの仕様

適用深度	G.L. -1,000mまで				
形 状	外形57mm、長さ3.6m、1,000m対応採水装置に装着して使用、				
測定項目	pH、電気伝導度（EC）、水温（T）、酸化還元電位（ORP） 硫化物イオン濃度（pS）				
電極仕様	作用電極	参照電極	測定範囲	精度	
測 定 項 目	pH	ガラス	銀/塩化銀	0～14	±0.1
	ORP	金白金 グラシーカーボン	銀/塩化銀	-1～1V	±10mV
	EC	交流2電極式	なし	0～500 μS/cm	±2%FS
		電磁誘導式	なし	0～2000 μS/cm 0～100 mS/cm	
	pS	銀/硫化銀	銀/塩化銀	-1～0V	±5mV
	T	白金抵抗測温対	なし	0～50℃	±0.1℃

4. 解析技術の現状

地表から地下深部までを対象とした地下水の流動を正確に把握するためには、調査対象領域内の水理地質構造を適切にモデル化し、その場の特性を十分に反映した初期条件や境界条件を設定して、地下水流動解析を実施することが重要である。このため、既存の地下水流動解析プログラムを有効に活用することを基本として、解析目的、解析スケール、及び対象岩種に応じて適切な地下水流動解析が可能のように、必要に応じ既存ソフトウェアの改良、並びに新規にソフトウェア開発を実施している。また、水理地質構造モデルの作成にあたっては、岩盤中の水理学的不均質性を評価することが重要であることから、岩盤が本来有する不均質性を保持したまま、離散した水理試験データから岩盤中の透水係数の空間分布を推定する手法の開発を進めている。

一方、地下水の水質形成機構のモデル化については、米国地質調査所によって開発された地球化学計算コード「PHREEQE」を導入し、水-岩石反応のシミュレーションに用いている⁸⁾。

ここでは、動燃事業団が開発した岩盤の透水係数分布の推定手法と地下水流動解析手法について、その概要を述べる。

4.1 岩盤の透水係数分布の推定手法

(1) 物理検層による岩盤の透水係数分布の推定

ボーリング孔沿いに離散する原位置透水試験データを補完する手法として、物理検層の1手法である電気検層から取得される岩盤の見掛け比抵抗値の分布から岩盤の透水係数を推定する手法を考案した⁹⁾。この手法は、岩盤（堆積岩）の見掛け比抵抗値が透水係数と高い相関を示すことを利用したものであり、両者間の相関式をもとに、見掛け比抵抗値を透水係数に変換する。図3に推定例を示す。

また、花崗岩等の亀裂性岩盤については、フローメータ検層で測定された流速と原位置透水試験結果との間に相関関係が認められることから、両

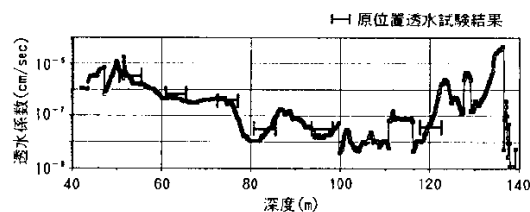


図3 電気検層による透水係数値の推定結果

者間の相関式を用いて岩盤の透水係数を推定する手法を検討している¹⁰⁾。

(2) フラクタル理論による岩盤の透水係数分布の推定

岩盤の透水係数に関しては、2点間の距離と分散との関係が、べき乗関数で表現できる（フラクタルスケールリング則に従う）ことが確認されている¹¹⁾。

本手法（MACRO-AFFINITY）は、この関係を用いて、原位置透水試験データ（実際は電気検層データによって補完された1次元の連続データ）に対して、べき乗関数を適合することにより、バリオグラム（2点間の距離と分散の関係）の関数形を推定し、調査対象領域のすべての点での透水係数値を推定したバリオグラムを満足するように統計的に割り当てていく。この手法を検証するため、ガラスビーズで設定した不均質透水係数場による試験が実施され、本手法によって実際の流動パターンが忠実に再現されることを確認している¹²⁾。

この結果を踏まえ、本手法を実際の地層に適用し、その妥当性を確認した。適用試験は東濃鉱山の敷地内に掘削された4本のボーリング孔を包含する領域（ウラン鉱化部を含む100m四方の垂直2次元平面）で実施され、電気検層データから推定された透水係数データをもとに、領域内の透水係数分布を推定した。推定結果の妥当性の評価は、推定された岩盤の透水係数分布を用いて、パーティクルトラッキングによるウランの移行解析を実施し、パーティクルの通過量の分布と実際のウラン鉱化部との位置を比較することによって行った。その理由は、東濃鉱山周辺のウラン鉱床の成因が地下水によるウランの移行と考えられており、ウラン鉱化部へはウランを含む地下水の流量が相対的に大きいことが予想されるからである。

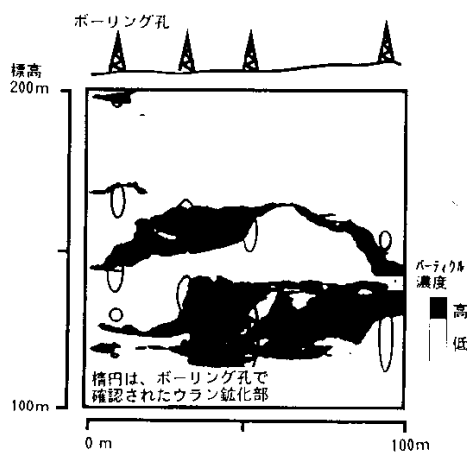


図4 ウラン移行シミュレーションの結果

なお、パーティクルトラッキングとは、仮想的に流動場に粒子（パーティクル）を流し、粒子の移動経路を追跡することによって、流動経路や流量などを推定する方法である。

その結果、図4に示すようにパーティクルの通過量の大きい場所とウラン鉱化部の位置が一致し、このことから本手法の妥当性及び現場適用性が確認された¹³⁾。現在、本手法の3次元化を進めている¹⁴⁾。

4.2 地下水流動解析手法

(1) 多孔質モデル

地下水流動場を多孔質媒体で取り扱う地下水流動解析コードとして、渡辺が開発した有限要素法による3次元飽和・不飽和浸透流解析コード¹⁵⁾「TAGSAC」を基本に、計算時間の短縮を図るため、連立一次方程式の解法にPCG法（Preconditioned Conjugate Gradient method）を採用したコードを使用している。

本解析コードの妥当性の評価は、東濃鉱山の第2立坑の掘削に伴う地下水流動予測解析を通して行われた。予測解析は第2立坑を含む300m×300m×深さ300mの領域を対象に実施され、立坑の掘削に伴って生じる地下水の水頭変化と立坑及び既存坑道内への湧水量を非定常解析で予測した。予測された値は、立坑・既存坑道内で実際に測定される湧水量、及び立坑周辺に掘削された観測用ボーリング孔で取得された間隙水圧値と比較された。その結果、予測された値は実測値と良く一致していることから（図5）、「TAGSAC」コードの妥当性を示すことができた¹⁶⁾。

(2) 亀裂ネットワークモデル

渡辺らが開発したDon-chanモデル¹⁷⁾は、地下

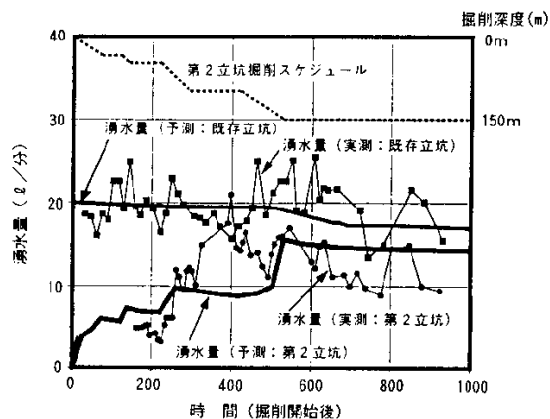


図5 東濃鉱山第2立坑の掘削に伴う既存坑道と第2立坑内への地下水湧水量の時間的変化の予測値と実測値の比較

水のチャンネル流れを管路のように考え、それらが作る3次元管路網を用いて岩盤中の地下水流動を表現する手法である。

管路網の発生方法は、透水経路となる構造を主要割れ目の交線部、派生割れ目と主要割れ目の交線部、割れ目のステップ構造部、さらに割れ目形成時のずれの方向を示す条線と規定し、原位置で測定された割れ目の幾何学情報からこれらの透水経路の位置を決定して、その位置に管路を発生させる方法を採用している。

Don-chanモデルの妥当性を検証するため、釜石鉱山内のKD-90坑道で実施された食塩によるトレーサー試験のシミュレーション解析を実施した。割れ目のモデル化にあたっては、坑壁に見られる割れ目の形態や幾何学情報を収集し、これをもとに管路を発生させ、原位置透水試験結果によって管路の透水係数を設定した。

このモデルを用いてパーティクルトラッキング法でトレーサーの出現位置、及び破過曲線を推定した。その結果、トレーサーの出現位置については、実際の試験結果と良く一致しており、破過曲線についても、ピークの位置や曲線全体の傾向を表現することができた(図6)¹⁹⁾。

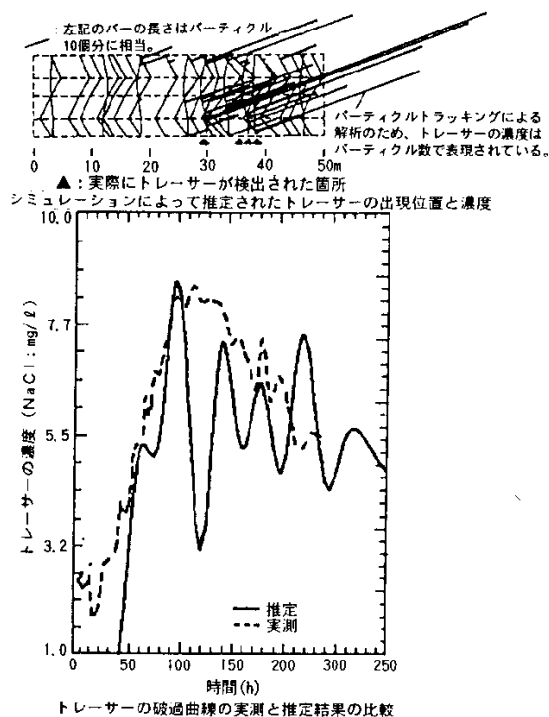


図6 Don-chanモデルによるトレーサー試験のシミュレーション結果と実測値の比較

5. 評価技術の現状

地下水流動解析結果の検証は、これまでボーリング孔で計測された間隙水圧の分布や坑道内への湧水量との比較等の方法で実施している。これに加え、現在、地下水の地球化学的データから解析結果の妥当性を評価する手法を検討中である。一方、これらの方法による評価結果の信頼性は利用できるボーリング孔の本数に依存するため、解析対象領域が広がるほど、検証として利用したボーリング孔の代表性が問題となる。

このような問題に対する1つの試みとして、広域を同じ精度で調査可能なリモートセンシング技術を用いた地下水流動解析結果の評価方法を検討している¹⁹⁾。

ここでは、水理学的データ及び地球化学的データによる評価技術について、その概要を述べる。

(1) 水理学的データによる検証

立坑掘削に伴う地下水流動の変化を予測するような非定常解析の結果を検証する場合、地下水の間隙水圧の経時変化のデータが必要不可欠である。このようなデータを取得する代表的な装置として、カナダWestbay社によって開発された地下水モニタリングシステム(MPシステム)がある。本システムは、ボーリング孔内で同時に多数の測定区間を設定でき、各区間での間隙水圧の測定や被圧状態を保持したままの採水が可能であるといった特長を有している。ただし、一度設置すると回収が困難なため、ボーリング孔を利用した各種の計測が終了した後に、孔内に設置することになる。

地層科学研究では、東濃鉱山の第2立坑の掘削影響試験研究において、すでに8年以上の連続計測の実績がある²⁰⁾。

(2) 地下水の地球化学的データによる検証

地下水の水素・酸素の同位体比、並びに地下水に溶存している重炭酸イオン中の炭素同位体の含有量等から地下水の起源や年代を明らかにするため、タンデム型加速器質量分析計と安定同位体比測定用質量分析計を導入した。

タンデム型加速器質量分析計は、米国NEC社製のペレトロン15SDH-2であり、図7に示す構造及び性能を有している。

加速粒子としては、C、Cl、Ca、Be、Al、Iが使用可能であり、測定精度は $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ で0.5%以下である。

現在、偶然誤差、系統誤差等の基礎データの収集を実施しており、1998年(平成10)からは炭素の同位体比測定のルーチン化とともに、各種同位体の分析のための前処理及び測定技術の開発を実

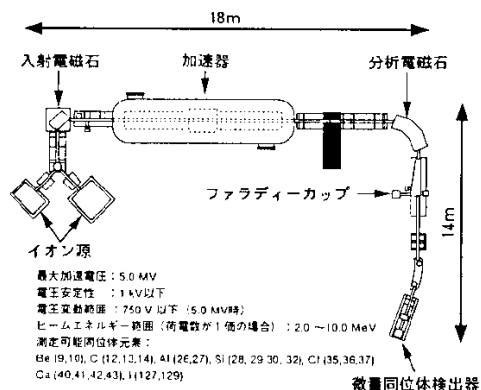


図7 タンデム型加速器質量分析計の構造と性能

施していく予定である²¹⁾。

本装置により得られる地下水の年代等の情報によって、地下水流動解析で推定される地下水の滞留時間等の解析結果を検証することが可能であり、今後の成果が期待される。

6. 今後の課題

今後の重要な課題としては、個々の調査技術の改良・高度化に加え、地下水に関する特性を明らかにするための調査プロセスの構築があげられる。これについては、岐阜県東濃地域を研究の場として実施されている広域地下水流動研究、並びに超深地層研究所計画を通して、個々の調査技術の有効性と適用範囲を評価し、それにもとづいて効率的な調査プロセスを検討していく予定である。

以下に今後の検討課題を項目別に列挙する。

(1) 調査技術

花崗岩等の亀裂性岩盤中の地下水流動を把握するためには、地下水の流動経路を形成する透水性割れ目(帯)の検出とその透水性及び連続性の把握が重要である。そのため、透水性割れ目(帯)を精度良く、かつ効率的に調査できる調査プロセスを構築するための個々の調査技術の組み合わせの検討が課題とされる。

また、岩盤の不均質性・異方性についての評価手法の確立において、岩盤の透水性に関するスケール効果を把握するために必要な大量の水理試験を、短期間にかつ、低コストで実施可能な水理試験法を考案することが重要であり、さらに調査対象となる地質構造への遭遇率を向上させるために有効と考えられるコントロールドリリング技術及び屈曲したボーリング孔内でも測定可能な地下水調査機器の開発が課題である。

(2) 解析技術

花崗岩等、亀裂性岩盤中の地下水流動を把握するためには、水理学的な連続性を有する割れ目(帯)と割れ目以外の基質の部分の透水性の分布を、解析対象となる領域の規模に対応してモデル化することが重要である。そのため、亀裂性岩盤における透水係数等の水理定数の空間分布を推定する手法の開発、並びに解析スケールを考慮したモデル化手法の開発が課題とされる。

(3) 評価技術

地下水の地球化学的データによる流動解析結果の評価において、地下水の水質、年代、起源にもとづく地下水流動経路及び滞留時間の評価方法の構築を検討する必要がある。

また、坑道近傍における長期モニタリングのため、坑道周辺に生じる高差圧環境を考慮した大深度対応長期モニタリング装置の開発が重要となっている。

7. おわりに

地下深部における地下水に関する研究は、深度1,000m対応の水理試験装置及び採水装置が完成したことにより、ようやく緒に就いたばかりである。冒頭に述べたように、数百m以深の深部岩盤は、社会的関心度や経済的な理由から、学術的な研究例が少なく、水理学をはじめ、他の研究分野においても未知の領域といっても過言ではない。したがって、調査を行うたびに新しい知見が得られる一方、同時に新たな学術的・技術的課題が生じるという難しさがあることも事実である。また、地下水流動に関する現象の解釈にしても、水理学的なアプローチのみならず、地質学、地球化学等の分野の支援が必要である。さらにシミュレーション技術等の計算科学の分野や計測技術といったハードウェアの分野も日進月歩であり、これらの科学技術分野との連携も地下水の流動や地球化学的性質の評価にとって必要不可欠である。したがって、研究の進捗に伴い、山積する課題の解決には、これらの分野に関連する国内外の研究機関との協力体制が必要不可欠である。

参考文献

- 1) 梅本博之：“性能評価とサイト調査のリンケージ”，日本原子力学会放射性廃棄物部会主催第12回放射性廃棄物夏期セミナー，p1-10，(1996)。
- 2) 原子力委員会編：“21世紀の扉を拓く原子力—原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画”，(1994)。
- 3) 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。

- (1996).
- 4) 竹内竜史, 仙波毅, 他: "孔間透水試験装置の開発と現場適用例", 第10回岩の力学シンポジウム講演論文集, p725-731, (1998).
 - 5) Y. Yusa, K. Ishimaru, et al.: "Geological and Geochemical Indicators of Paleohydrogeology in Tono Uranium Deposit, Japan", *OECD/NEA SEDE Workshop on Paleohydrogeological Methods and Their Applications for Radioactive Disposal*, (1992).
 - 6) K. Hama, T. Seo, et al.: "A Sampling Procedure of Formation Water and its Application to Geochemical Investigation of Groundwater in the Tono Area, Japan", *Proceedings of the Workshop Hydraulic and hydrochemical Characterisation of Argillaceous Rocks, OECD/NEA*, p213-226, (1994).
 - 7) 濱克宏, 瀬尾俊弘, 他: "1,000m対応採水装置の開発", 日本地下水学会1995年秋季講演会講演要旨, p20-25, (1995).
 - 8) T. Iwatsuki, H. Yoshida: "Water-rock interaction analysis in relation to geological structure in deep crystalline rock at the Tono area, Japan", *Chemical containment of wastes in the geosphere, BGS, Notts, U.K.*, (1996).
 - 9) 尾方伸久, 大澤英昭, 他: "堆積岩の地質学的特性及び透水係数, 見かけ比抵抗相互の関係とその水理地質構造モデル化への適用", 応用地質, Vol.32, No.6, p51-61, (1992).
 - 10) 松岡清幸, 尾方伸久, 他: "物理検査手法による花崗岩中の透水性に関する一考察", 物理探査学会第97回学術論文集, p331-335, (1997).
 - 11) J. Humm, M. Impey: "Fractal fitting of the Tono mine data." *Intera report ID3249-7 Version 1*, (1994).
 - 12) K. Hatanaka, S. Watari, et al.: "Experimental Study on Groundwater Flow and Mass Transport in a Heterogeneous Porous Medium", *MRS'95, Boston, U.S.A.*, p739-746, (1995).
 - 13) K. Clark, H. Takase, et al.: "Natural Analogue of Uranium Migration in the Tono Mine", *MRS 1995 Fall Meeting*, p597, (1995).
 - 14) 竹内真司, 稲葉秀雄, 他: "フラクタル理論による堆積岩中の透水係数分布の推定", 日本地下水学会1997年秋季講演会講演要旨, p50-55, (1997).
 - 15) 渡辺邦夫: "山地小流域の地下水流解析による流れ場の特性評価", 応用地質, Vol.27, No.4, p40-50, (1986).
 - 16) K. Yanagizawa, H. Imai, et al.: "The effects of a shaft excavation experiment on the hydrology of the Tono research field, Japan", *Journal of Hydrology*, 171, p165-190, (1995).
 - 17) 田中達也, 渡辺邦夫, 他: "地質構造を基礎としたフラクチャーネットワークモデルの開発 (その1)", 応用地質, Vol.35, No.3, p22-33, (1994).
 - 18) 渡辺邦夫, 田中達也, 他: "地質構造を基礎としたフラクチャーネットワークモデルの開発 (その2)", 応用地質, Vol.35, No.4, p2-12, (1994).
 - 19) 小出繁, 柳澤孝一: "植生を指標とした地下水流出域の抽出", 日本写真測量学会秋季学術講演会論文集, p131-136, (1994).
 - 20) 山根正樹, 中野勝志, 他: "立坑掘削に伴う間隙水圧変化の長期観測", 土と基礎, Vol.44, No.11, P24-26, (1996).
 - 21) 伊藤茂, 岩月輝希: "東濃地科学センターにおけるタンデム型加速器導入計画", 第1回加速器質量分析シンポジウム要旨集, p28-29, (1996).