

地層科学研究における地下水調査・解析技術開発の現状[†]

小出豊^{††} 中野勝志^{††} 尾方伸久^{††}

動力炉・核燃料開発事業団では、地層処分研究開発の基盤となる「地層科学研究」を実施しており、その主要項目として地質環境が本来備えている特性を明らかにするための研究がある。

地質環境の中で、地下水の流動と地球化学的性質は、岩盤の鉱物学的な性質と共に、物質移行現象を支配する主要因子であることから、これらの知見を蓄積し一般化することは、物質移行現象を理解する上で極めて重要である。そのため、東濃地科学センターでは、地層科学研究の一環として、地下水の流動と地球化学的性質に関する研究を「広域地下水水流動研究」と称して、岐阜県土岐市にある東濃鉱山とその周辺を研究の場として進めている。また、深地層における地下水の流動と地球化学的性質を理解するためには、岩盤の水理学的性質や地下水の水質に関する情報を取得し、現象をモデル化する必要があるため、大深度に対応した調査機器および解析・評価手法の開発を実施している。

Keywords: 地下水調査、地下水水流動、水理試験、採水試験、地下水水流動解析、フラクタル、多孔質モデル、亀裂ネットワークモデル

Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC) has been conducting geoscientific studies which provide a scientific basis on which the generic feasibility of the geological disposal concept can be assessed. The purpose of these studies is to understand the natural state of the deep geological environment. Hydraulic and geochemical properties of rock mass and groundwater are main factors which control mass transport behavior. PNC has been therefore conducting hydrogeological and geochemical studies in and around the Tono mine, central Japan, as these properties are important to understand mass transport in the rock mass. PNC has been also developing investigating instruments and methods to acquire data of these properties, modeling methods, and methodologies to evaluate simulation results.

Keywords: groundwater investigation, groundwater flow, hydraulic test, groundwater sampling, groundwater flow simulation, fractal, porous media model, fracture network model

1 はじめに

動力炉・核燃料開発事業団・東濃地科学センター(岐阜県土岐市)では、地層処分研究開発の基盤となる「地層科学研究」を実施しており、その主要項目として地質環境が本来備えている特性を明らかにするための研究がある[1]。

地質環境の中で、地下水の流動と地球化学的性質は、岩盤の鉱物学的な性質と共に、物質移行現象を支配する主要因子であることから、これらの知見を蓄積し一般化することは、物質移行現象を理解する上で極めて重要である。

そのため、東濃地科学センターでは、地層科学研究の一環として、地下水の流動と地球化学的性質に関する研究を「広域地下水水流動研究」と称して岐阜県の東濃地域(東濃鉱山とその周辺)を研究の場として進めている。

本報告では、広域地下水水流動研究において進められている深地層を対象とした地下水調査のための要素技術の開発の現状とこれまでの研究成果を紹介する。

2 広域地下水水流動研究の概要

広域地下水水流動研究は、地層科学研究の一環として平成4年度から岐阜県土岐市にある東濃鉱山およびその周辺域を対象に進められている。東濃鉱山が位置する東濃地域については、中生代白亜紀の花崗岩類の基盤を新第三紀層

が覆い、かつ複数の活断層が存在するという日本においても普遍的にみられる地質構造を有するとともに、東濃地科学センターが長年にわたって実施してきた東濃ウラン鉱床を対象とした調査研究や地層科学研究の成果として得られた知見や技術が蓄積されている。

本研究では、このような特徴を有する東濃地域において、地下水に関わる諸現象を理解するための地質構造、地下水の水理および地球化学などに関する調査研究が実施されている。

2.1 目標

地下深部の地下水が実際にどのような特性を有しているかを議論するためには、地質構造、水理・水文学的パラメータ、地下水の物理化学的パラメータおよび年代や環境同位体などの情報、さらに鉱物学的情報が必要である。

広域地下水水流動研究では、これらの情報を実際の地層から取得し、地下深部の岩盤および地下水の性質を事例的に示すとともに、得られた情報を一般化するため、地下水の流動および水質形成のメカニズムを検討し、モデル化することを目標としている。また、上記の地質環境に関する情報の取得およびモデル化のために必要となる調査手法・解析手法の開発、およびモデルの構築・解析のためのデータの品質管理や統合化といったデータ管理方法の構築も目指している。

2.2 研究対象領域の概要

広域地下水水流動研究の研究対象領域である岐阜県東濃地域(図1)は、名古屋の北東約30kmの位置にあり、標高

[†] Current Status of Development of Groundwater Investigation and Simulation Methodologies in the PNC's Geoscientific Study Programme, by Kaoru Koide(koide@tono.pnc.go.jp), Katsushi Nakano, Nobuhisa Ogata

^{††} 動力炉・核燃料開発事業団 東濃地科学センター Tono Geoscience Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 〒509-5102 岐阜県土岐市泉町走林寺 959-31

300m 前後の丘陵地帯である。丘陵頂部は比較的平坦であり、アカマツを中心とした森林に覆われている。丘陵地帯は、北側を木曽川によって美濃山地と区分され、また、南側を屏風山断層によって三河山地と区分されている。

本地域の地質は、中生層、濃飛流紋岩、花崗岩類を基盤とし、これらを新第三紀中新世の堆積岩層(瑞浪層群)および新第三紀鮮新世から第四紀更新世にかけての未固結砂礫層(瀬戸層群)が覆っている。この新第三紀の堆積岩層は、多くの貝化石を産することで有名である。また、日本最大の埋蔵量を有する東濃ウラン鉱床(月吉、美佐野、諏訪鉱床など)が新第三紀の堆積岩層中に胚胎している。

2.3 研究の構成

地下水流动を把握するためには、地質構造や地下水のポテンシャル分布などの情報が必要であり、また、地下水の流动経路を特定するためには、地下水の水質形成に関する知見が重要な判断根拠となる。一方、地下水の水質形成には、地下水の流动経路沿いの岩石の鉱物学的な性質が深く関係している。このため、地質構造、地下水の水理、および地下水の地球化学についての情報を統合することによって、本研究の目標を達成できるものと考えられる。

したがって、本研究は、地質、地下水の水理、地下水の地球化学の各学問分野の調査研究が実施されると共に、対象となる地質環境を包括的に理解するため、各研究分野の成果の統合化が図られる(図2)。

3 地下水調査のための要素技術開発の現状

地下水調査に必要な技術には、地下深部の地質学的・水

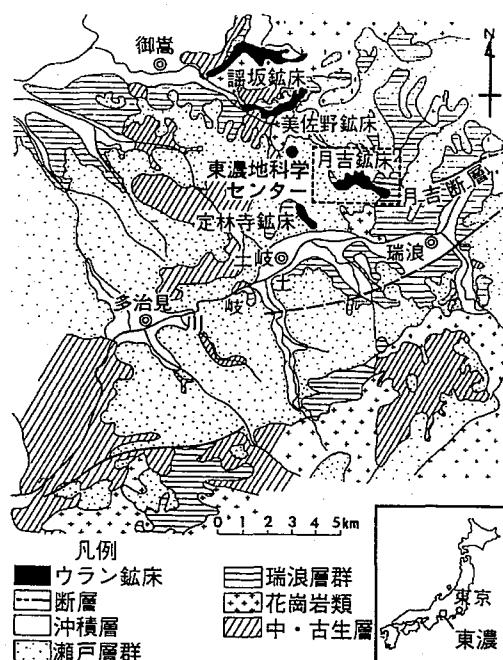


図1 岐阜県東濃地域の位置および地質

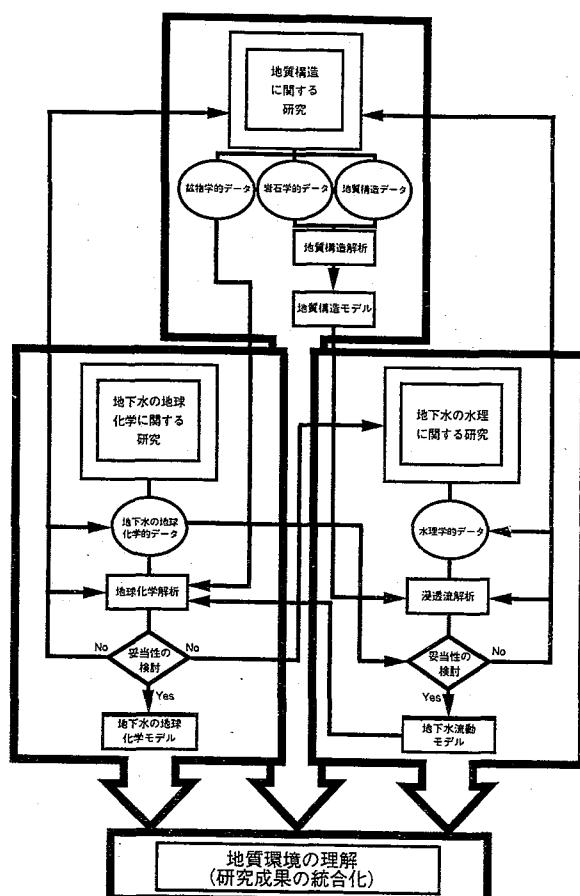


図2 広域地下水流动研究における各研究間の関係

理学的・地球化学的データを取得するための調査技術、地下水流动のシミュレーションや水質形成機構のモデル化などのための解析技術、および解析結果の妥当性を検討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、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、その有効性および適用範囲を確認する、③ 必要に応じて既存技術の改良および新規開発を行う、④ 個々の技術について合理化を図るという4つの方針に沿って研究開発が進められている。

3.1 調査技術

調査対象領域内の地下水の流动およ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、およ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調査手法・機器の開発、なら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が進められている。

3.1.1 地質構造調査

調査対象領域の地質および地質構造を把握することは、地下水の流动経路や水質形成機構を把握する上で重要である。

調査すべき地質構造は、対象となる地下水流动の規模に

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	線状地形から断層などの位置・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～十数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などの位置・規模を推定する。	地表に送・受信機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	割れ目などで反射してくれ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。発信周波数を上げ、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	ボーリング孔から十数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など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などの位置・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などの位置・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
反射法地震探査	岩相境界や割れ目帯などで反射してくれる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

よって異なることが考えられる。例えば、広域的な地下水流动を対象とする場合は、比較的規模の大きい断層・破碎帯などの把握が重要となり、調査領域のスケールが小さくなるほど、調査すべき地質構造のスケールも小さくなっていくと考えられる。そのため、地質構造調査に関する技術については、表1に示すように調査スケールに分けて、種々の既存調査手法の適用・評価、およびそれに基づく改良を実施している。また、ボーリング孔の掘削に伴う岩盤の透水性や地下水の水質への影響を極力避けるため、本研究では清水掘削を実施している。しかし、崩壊性の岩盤では従来工法での掘削が困難なため、三重管工法や部分保孔技術などの開発を進めている。

3.1.2 水理調査

地下水流动解析には、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養量、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などの水理学的情報が必要である。これらの水理学的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、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动を把握するためには、従来の土木分野など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、水理学的特性調査機器として、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3)。

本装置の基本構造には、ボーリング孔内で発生する孔内崩壊を考慮して、パイプ方式(測定部をロッ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 法と難透水性岩盤を対象に考案されたパルス法、および定常法の 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透水係数の測定範囲を確保している。

本装置の最大の特長は、5連のマルチパッカーや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 2 m から 14 m 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の一の遮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上で有効と考えられる。

また、BTV によってリアルタイムで装置の前方および

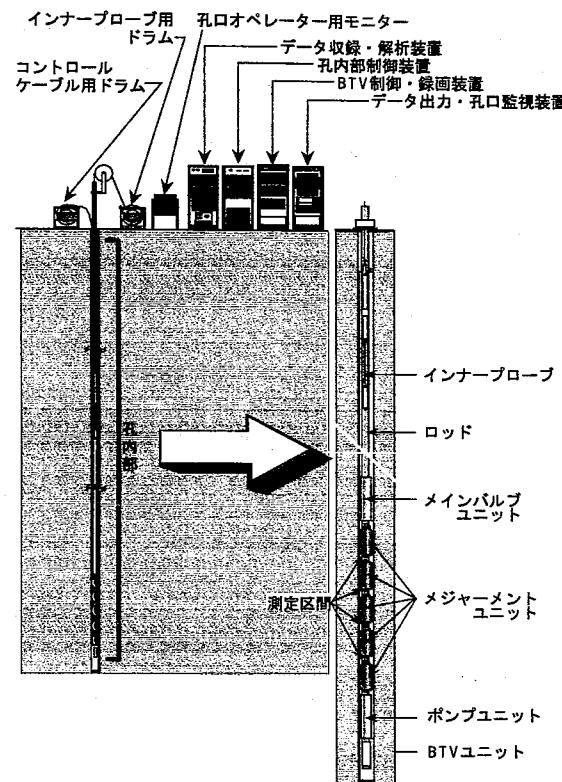


図 3 1,000m 対応水理試験装置の構造

側方の岩盤状況を把握することができるため、孔内抑留の可能性のある箇所の回避やパッカーセット部分の岩盤の状態の確認、さらに特定の割れ目(帶)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できる[2]。

(2) 試錐孔間水理試験装置

試錐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および比貯留係数、なら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、潮汐など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点である。現在、釜石鉱山内で適用試験を実施しており、設計性能の確認、および解析手法の検討を進めている。

3.1.3 地下水の地球化学調査

地表水や地下水の水質や環境同位体組成および年代に関する情報は、地下水の起源、流动経路、および滞留時間などを明らかにするためには極めて有効な情報である[3]。また、これらの情報は、地下水涵養時の古環境(気候・標高)を推定する上でも重要であり、古水理地質学的な研究には必要不可欠な情報である[4]。

これらの情報を取得するためには、地層中に本来存在し

表2 水理調査・地下水の地球化学調査用機器の開発状況

ている地下水、すなわち、地層水(Formation water)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(図4)[5]、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(パッカー式地下水サンプラー)等を開発した。これらの調査機器を用いた実際の調査研究の詳細については、本特集の「岩月他:深地層を対象とした地下水の地球化学的調査の現状」を参照していただくとし、ここでは、1,000m対応採水装置およ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)。これを基に、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5)、地下水を採取する機能は全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[6]。装置の基本仕様を表3に示す。

(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が確認可能である。これによって、ダブルパッカーデ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[6]。

本ユニットの構造ならびに仕様を図6、表4に示す。

3.2 解析技術

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、地下水流动解析を実施すること

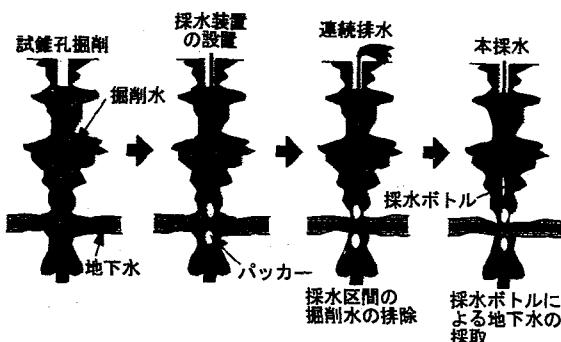


図4 地下水の掘削水による汚染を防止するための採水手順

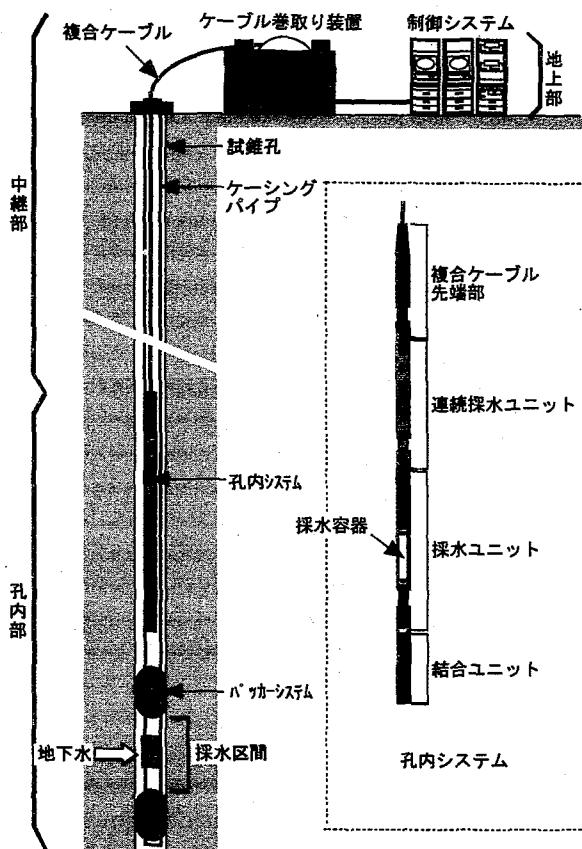


図5 1,000m対応採水装置の構造

表3 1,000m対応採水装置の仕様

適用深度	G.L. -1,000mまで
適用孔径	φ76mm~130mm
基本構造	パイプ方式
採水方式	ポンプ式：最大100ml/分 バッチ式：500ml/分
特 徴	原位置で被圧・不活性状態での採水可能

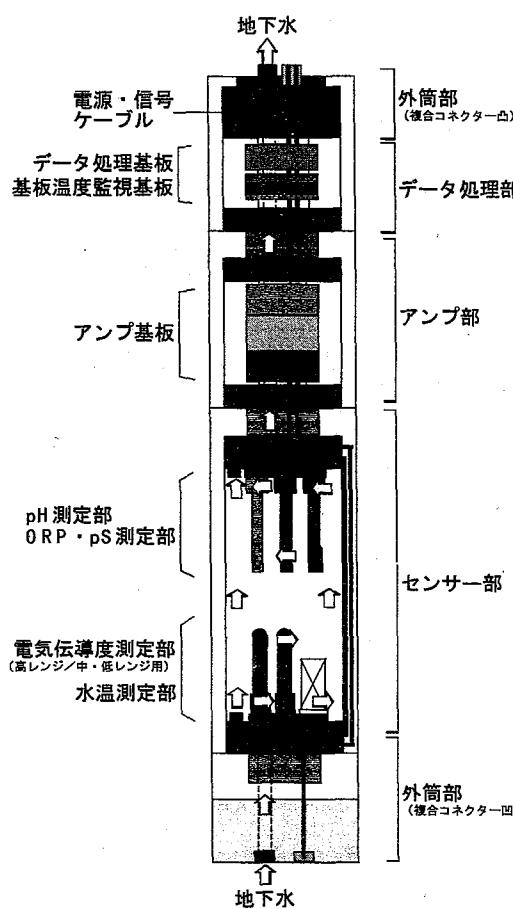


図 6 地球科学検層ユニットの構造

表 4 地球科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	-1～1 V ±10 mV
	EC	交流2電極式 電磁誘導式	なし	0～500 μS/cm 0～2000 μS/cm 0～100 mS/cm ±2 %FS
	pS	銀／硫化銀	銀／塩化銀	-1～0 V ±5 mV
	T	白金抵抗測温体	なし	0～60 °C ±0.1 °C

が重要である。

このため、既存の地下水流动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、および対象岩種に応じて適切な地下水流动解析が可能なよう、必要に応じ既存ソフトウェアの改良なら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作業の効率化のため、3次元地質解析システムを導入し、柱状図データからの地質構造モデルの構築やFEM解析のためのメッシュ作成の作業に利用している。

地下水の水質形成機構のモデル化については、米国地質調査所が開発した地球化学計算コード「PHREEQE」を導入し、解析に用いている[7]。

ここでは、岩盤の透水係数分布の推定手法と地下水流动解析手法について、その概要を述べる。

3.2.1 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[8]。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(図7)，両者間の相関式を基に、見掛け比抵抗値を透水係数に変換する。図8に推定例を示す。

また、花崗岩など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(図9)，両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[9]。

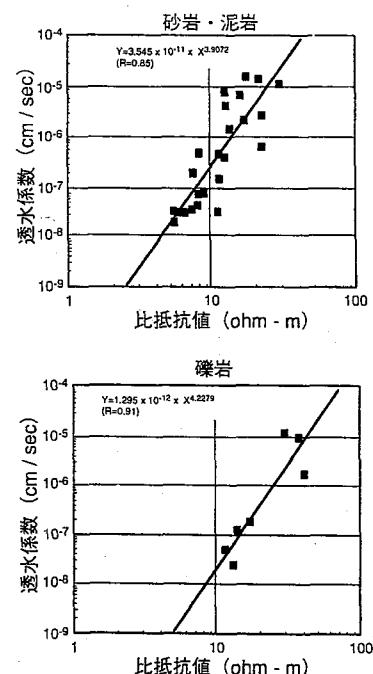


図 7 各岩相における見掛け比抵抗値と透水係数の関係

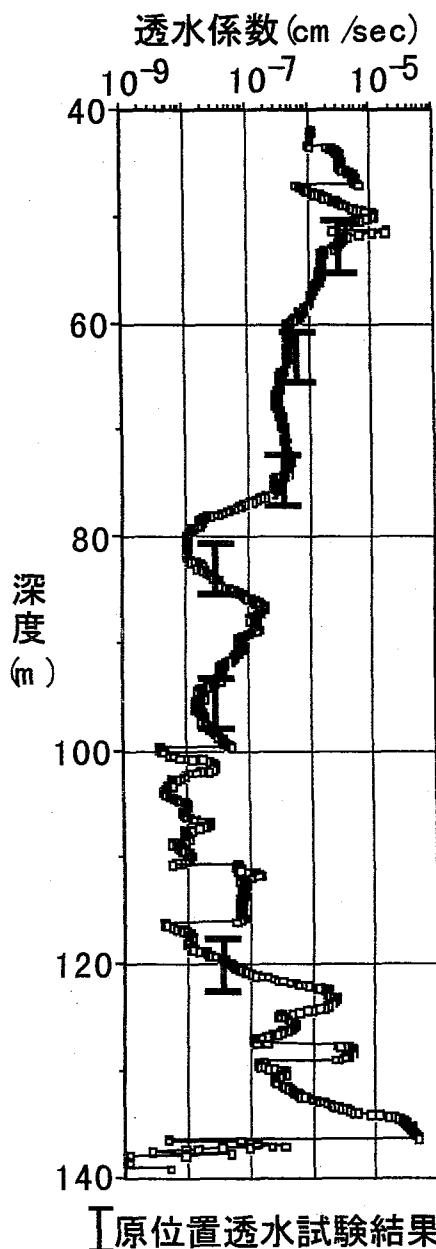


図 8 電気検層による透水係数値の推定結果

(2) フラクタル理論を応用した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点間の距離と統計量との関係が、フラクタルスケーリング則に従うことが確認されている[10]。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、バリオグラムの関数形を推定し、調査対象領域の全ての点での透水係数値を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を実施し、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[11]。この結果を

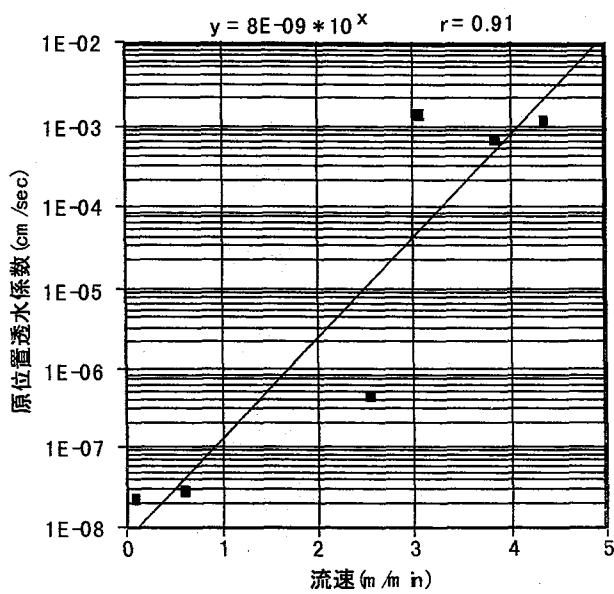


図 9 フローメータ検層で測定された孔内流速と原位置透水試験結果の関係

踏まえ、次に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(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基に、領域内の透水係数分布を推定した(図10)。推定された透水係数場の妥当性を検証するため、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た。

その結果、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(図11)、このことから本手法の妥当性および現場適用性が確認された[12]。現在、本手法の3次元化を進めている[13]。

3.2.2 地下水流動解析手法

(1) 多孔質モデル

地下水流动場を多孔質媒体で取り扱う地下水流动解析コードとして、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「TAGSAC」[14]をベースに、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)を採用したプログラムを使用している[15]。

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动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および既存坑道内への湧水量を非定常解析で予測するもので、その結果は、立坑・既存坑道内で測定される湧水量、およ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、図12に示すように湧水量の予測値は実測値と良く一致して

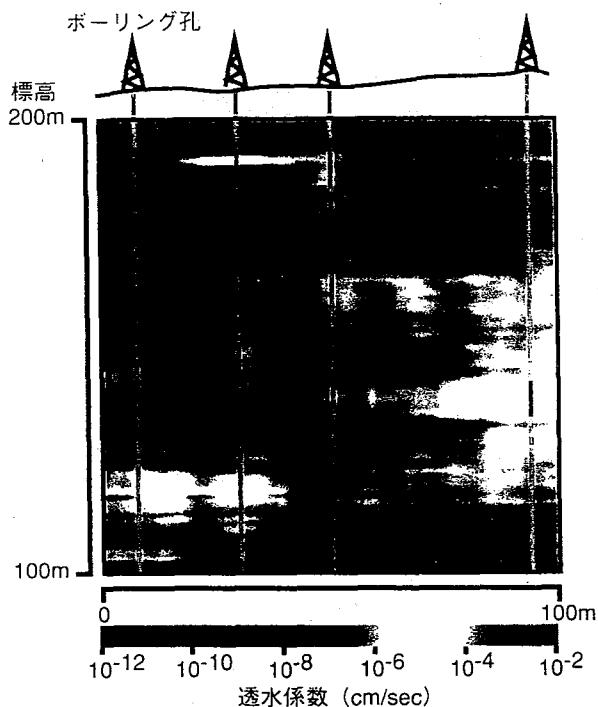


図 10 フラクタル理論を応用した推定手法による岩盤内の透水係数分布の推定結果

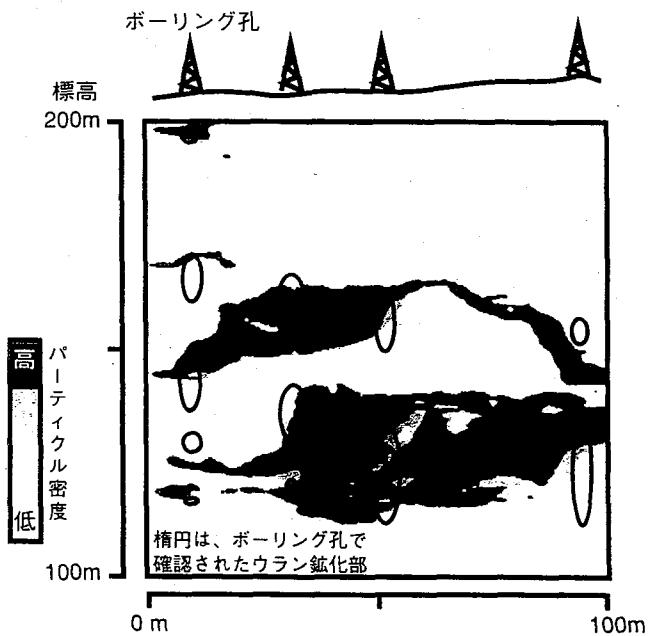


図 11 ウラン移行シミュレーションの結果

おり、また、水頭変化についても、第2立坑の掘削に伴う水頭変化の範囲は100m前後であるという予測解析の結果と実測値がほぼ一致した(図13)[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、地下水のチャネル流れを管路のように考え、それらが作る3次元管

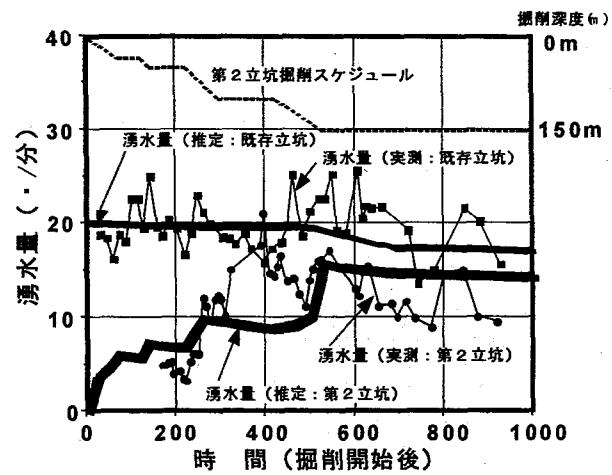


図 12 東濃鉱山第2立坑の掘削に伴う既存坑道と第2立坑内への地下水湧水量の時間的変化の予測値と実測値の比較

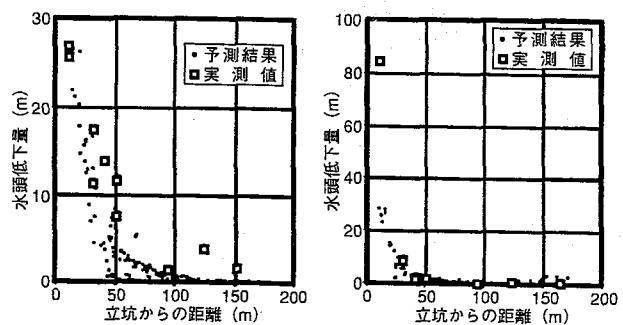


図 13 立坑の掘削に伴う水頭低下量の予測値と実測値の比較

路網を用いて岩盤中の地下水流动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(図14)。

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た。これらの情報を基に管路を発生させ、原位置透水試験結果を基に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、およ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

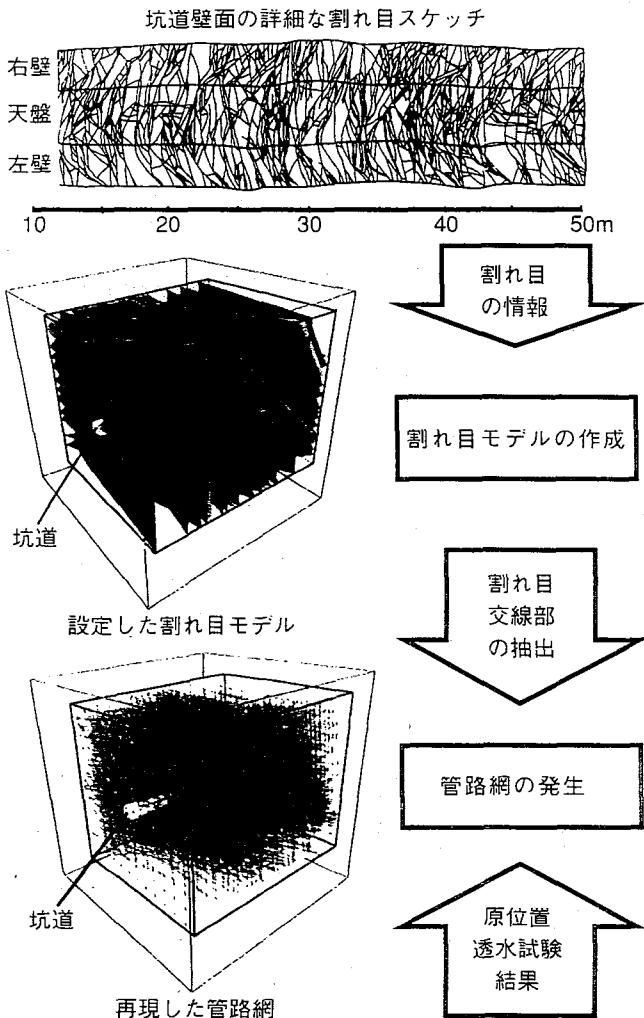


図 14 Don-chan モデルにおける割れ目モデルの構築

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 15)[18].

3.3 評価技術

地下水流动解析結果の検証は、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など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、これらの方針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、解析対象領域が広くなるほど、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りモートセンシング技術を用いた地下水流动解析結果の評価方法を検討している[19]。

(1) 水理学的データによる検証

MPシステムは、カナダの Westbay 社によって開発された地下水モニタリングシステムで、図 16 に示すように、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

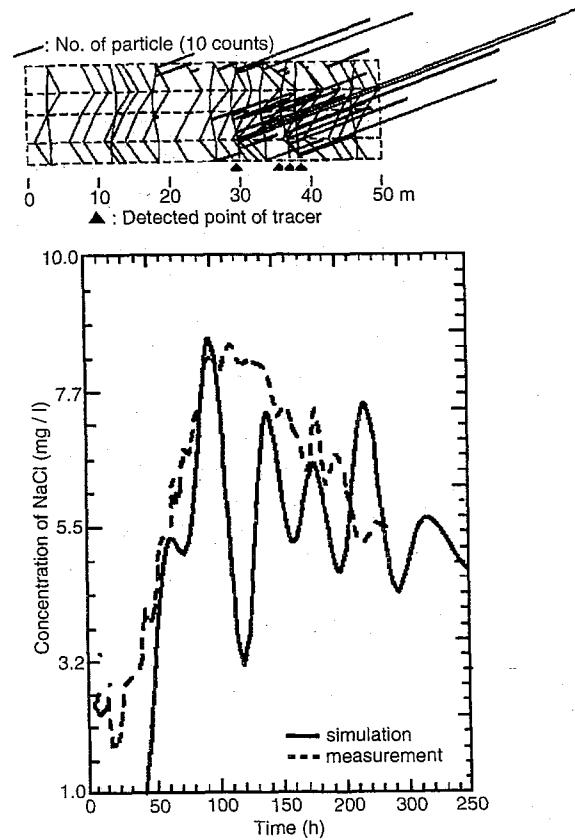


図 15 Don-chan モデルによるトレーサー試験のシミュレーション結果と実測値の比較

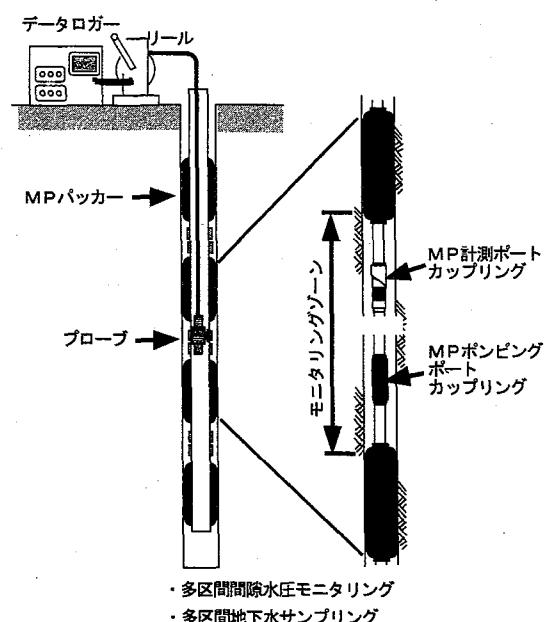


図 16 MP システムの構造

が可能であるといった特長を有している。ただし、一度

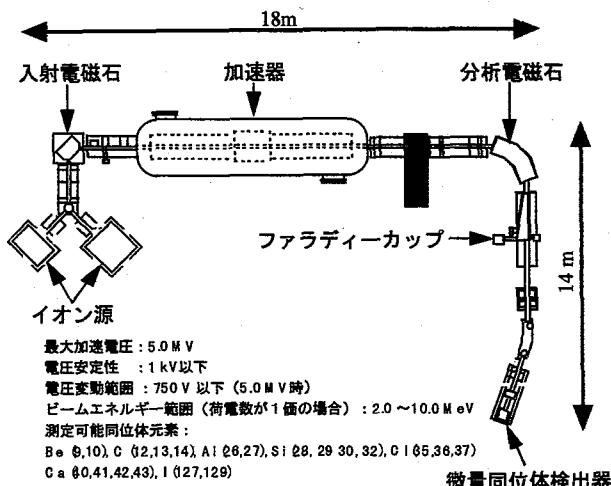


図17 タンデム型加速器質量分析計の構造と性能

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。東濃地科学センターでは、既に8年以上の連続計測の実績があり[20]、最近、1,000mのシステムを導入し、観測を開始している。

(2) 地下水の地球化学データによる検証

東濃地科学センターは、地下水の年代や起源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17に示す構造およ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¹⁴C/¹²Cで0.5%以下である。一方、安定同位体比質量分析計には英国MICROMASS社のモデルOPTIMAを採用した。

現在、偶然誤差、系統誤差などの基礎データの収集を実施しており、平成10年度からは炭素の同位体比測定のルーチン化と共に、各種同位体の分析のための前処理および測定技術の開発を実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などの情報によって、地下水流动解析で推定される地下水の滞留時間など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。

4 これまでの研究成果

東濃鉱山およびその周辺を研究対象として、平成4年度より、地質調査、物理探査、ボーリング調査が実施されており、表層から地下深部までの地質学的、水理・水文学的、地球化学的データが取得されている。

これまでの広域地下水流动研究で得られた表層から地下深部までの地下水の流动と地球化学的性質に関する知見は以下の通りである。

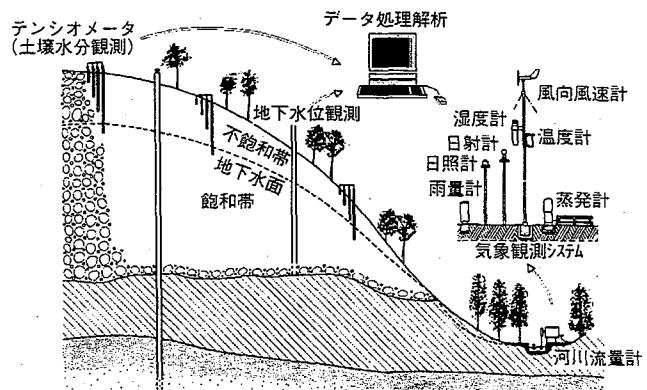


図18 表層水理定数観測システムの概略図

4.1 水理・水文

4.1.1 表層水理

① 地下水涵養量

表層水理定数観測システム(図18)による1990年から1994年までの5年間の観測結果から、新第三紀中新世の堆積岩を新第三紀鮮新世～第四紀更新世の未固結砂礫層が被覆する地質条件下における地下水涵養量として、1日あたり平均0.94mm(観測流域の上流側観測域)および0.19mm(観測流域全流域)が得られている。上流側観測域の地下水涵養量が流域全体の5倍の値を示すことから、上流側観測域は涵養域と考えられる[22]。

② 自由地下水水面の変動

表層水理観測により、自由地下水の年間水位変動は、尾根部で最大10mである[23]。

③ 表層水の水質と地質との関係

渴水期の河川水調査(流出高、電気伝導度、水質)により、表層の未固結砂礫層は高い貯留能を有し、表層部の地下水流出に大きく関与している。また、水質と表層地質との間には密接な関係がある[24]。

④ 地下水流域と植生状態との関係

人工衛星データから抽出された植生の高活性度部分は、地形的には傾斜変換点に多く分布し、また、地質的には表層の未固結砂礫層と堆積岩層、および未固結砂礫層と花崗岩との不整合部分に位置しており、対象領域での水理地質構造における高透水性部分と一致している[19]。

4.1.2 深層水理

① 地質構造

対象領域の地質構造は、表層部に未固結砂礫層、その下部に堆積岩層、さらにその下部に風化花崗岩(層厚約20m)が分布し、基盤花崗岩中には高角度割れ目帯が発達することが、岩芯観察やBTV観察により明らかにされている[25]。

② 岩盤の透水性

ボーリング孔による原位置透水試験により、対象領域内

に分布する堆積岩の透水係数は $10^{-6} \sim 10^{-8}$ cm/sec オーダー、また、花崗岩の健岩部分は、 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ cm/sec オーダー、花崗岩中の割れ目部分では貯留効果が認められる場合(充填鉱物がある場合)が、 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ cm/sec オーダー、貯留効果が認められない場合(開口割れ目の場合)は、 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ m/sec オーダーに分類できる。また、RQD(岩芯の回収率)が 50% 以下の割れ目部分の透水性は、深度が深くなるにつれて小さくなる傾向が認められる[8,26]。

4.2 地下水の地球化学

① 地下水の起源

地下水の環境同位体分析により、表層の未固結砂礫層中の地下水は、現気候下での降水が涵養したものであり、堆積岩層と花崗岩中の地下水は、過去の気温の低かった時期の降水に由来するものと推定されている[27]。

② 地下水の年代

新第三紀中新世の堆積岩層最下部(地表下 160m)の地下水の年代は、炭素 14 濃度分析の結果、1 万数千年と推定されている[28]。

③ 地下水の酸化還元電位

堆積岩層最下部(地表下 160m)の地下水は、弱アルカリ性(およそ pH9)であり、酸化還元電位は、-300mV 対標準水素電極値を示す[29]。

5 今後の予定

今後も深地層での地質環境の理解を深めるため、岩盤および地下水の流動と地球化学的性質に関するデータを取得し知見を蓄積していくと共に、地下水調査のための要素技術の開発を進め、地下水に関わる諸現象のモデル化と要素技術の体系化を図っていく所存である。以下に今後の検討課題を項目別に列挙する。

5.1 要素技術開発

(1) 調査技術

課題：地下水流动経路を形成する透水性割れ目(帯)の検出と透水性の把握

- ・ 弹性波トモグラフィ用小孔径ボーリング孔内震源(スピーカー)の開発。
- ・ 可探距離の拡大に向けたボアホールレーダへの連続波信号処理理論の応用。
- ・ 透水性割れ目の幾何学的・水理学的情報を効率的に取得するための調査手順の構築。

課題：岩盤の不均質性・異方性の評価

- ・ 岩盤の透水性に関するスケール効果を把握するために要求される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の考案。

- ・ 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の適用・評価、およ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。

(2) 解析技術

課題：岩盤の不均質性・異方性のモデル化

- ・ 花崗岩などの亀裂性岩盤における水理定数の空間分布を推定する手法の開発。
- ・ 解析スケールを考慮した亀裂性岩盤を対象としたモデル化手法の開発。

(3) 評価技術

課題：地下水の地球化学的データによる流动解析結果の評価

- ・ 地下水の水質、年代、起源に基づく地下水流动経路および滞留時間の評価方法の構築。

課題：坑道近傍における長期モニタリング

- ・ 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。

5.2 調査研究

(1) 表層水理

- ・ 花崗岩分布域における地下水涵養量の算定

(2) 深層水理

- ・ 花崗岩岩盤の透水性(異方性・不均質性・深度依存性を考慮)の評価
- ・ 割れ目帯や断層・破碎帯などの透水構造の透水性(異方性・不均質性・深度依存性を考慮)の評価
- ・ 1 つの地下水域を対象とした水理地質構造モデルの構築とそれに基づいた解析による地下水の流动経路と滞留時間の推定

(3) 地下水の地球化学

- ・ 地下水の水質分布の把握とそれに基づく水質形成機構の解明
- ・ 深部地下水の起源・年代の評価

6 おわりに

深地層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およ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言っても過言ではない。したがって、調査を行う度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、地下水流动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、

地球化学など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など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] 動力炉・核燃料事業団：地層処分研究開発の現状(平成8年度). PNC TN1410 96-071 (1996).
- [2] 中野勝志 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, pp.2145-2156 (1996).
- [3] 嶋田純, 宮岡邦任：トリチウム濃度による今市扇状地の地下水流动. 日本地下水学会1994年秋季講演会講演要旨, pp.118-126 (1994).
- [4] Yusa, Y. 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).
- [5] Hama, K. et al.: A sampling procedure of formation water and its application to geochemical investigation of groundwater in the Tono area, Japan. Proc. of the Workshop "Hydraulic and hydrochemical Characterisation of Argillaceous Rocks" OECD/NEA, pp.213-226 (1994).
- [6] 濱克宏 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, pp.20-25 (1995).
- [7] Iwatsuki, T., Yoshida, H.: 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).
- [8] 尾方伸久 他：堆積岩の地質学的特性および透水係数、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 32(6), 51-61 (1992).
- [9] 尾方伸久 他：ローメータ検層による花崗岩中の透水性割れ目の把握とその透水係数の算出. 日本応用地質学会平成9年度研究発表会講演論文集, pp.249-252 (1997).
- [10] Humm, J., Impey, M.: Fractal fitting of the Tono mine data. Intera report ID3249-7 Version 1 (1994).
- [11] Hatanaka, K. et al.: Experimental study on groundwater flow and mass transport in a heterogeneous porous medium. MRS'95, Boston, U.S.A., pp.739-746 (1995).
- [12] Clark, K. et al.: Natural analogue of uranium migration in the Tono mine. MRS 1995 Fall Meeting, pp.597 (1995).
- [13] 竹内真司 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, pp.50-55 (1997).
- [14] 渡辺邦夫：山地小流域の地下水流出解析による流れ場の特性評価. 応用地質 27(4), 40-50 (1986).
- [15] 柳澤孝一 他：立坑掘削影響試験における地下水流动影響予測解析. PNC TN7410 91-013 (1991).
- [16] Yanagizawa, K. et al.: The effects of a shaft excavation experiment on the hydrology of the Tono research field, Japan. Journal of Hydrology 171, 165-190 (1995).
- [17] 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1). 応用地質 35(3), 22-33 (1994).
- [18] 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2). 応用地質 35(4), 2-12 (1994).
- [19] 小出馨, 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, pp.131-136 (1994).
- [20] 山根正樹 他：立坑掘削に伴う間隙水圧変化の長期観測. 土と基礎 44(11), 24-26 (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, pp.28-29 (1996).
- [22] 小林公一 他：表層水理測定システムによる水収支の算定－岐阜県東濃鉱山におけるケーススタディー. 動燃技報 97, 145-150 (1996).
- [23] 動力炉・核燃料開発事業団：地層処分研究開発の現状(平成5年度). PNC TN1410 94-094 (1994).
- [24] 尾方伸久 他：河川水の流量および水質による表層部の地下水流动の推定. 応用地質 36(1), 2-13 (1995).
- [25] 吉田英一 他：深部花崗岩中の割れ目解析. 応用地質 30(3), 11-22 (1989).
- [26] 柳澤孝一 他：動燃式低水圧制御水理試験装置(動燃式JFT)の原理と適用例. 地下水学会誌 30(3), 127-137 (1988).
- [27] 太田久仁雄 他：東濃地域における深部地下水の地球化学的研究(III)－地下水の起源・年齢について－日本原子力学会 1992年春の大会予稿集, p.113 (1992).
- [28] 水谷義彦 他：岐阜県東濃鉱山深層地下水の¹⁴C年代. 加速器質量分析と炭素同位体の学際的応用シンポジウム論文集, pp.159-168 (1992).
- [29] Seo, T., Yoshida, H.: Natural analogue studies of the Tono uranium deposit in Japan. Proc. of 5th CEC Natural Analogue Working Group Meeting and ARAP Final Workshop, Toledo, Oct. 5-8, pp.179-184 (1992).