

電力中央研究所における岩盤中地下水流動の調査・解析手法の現状†

河西基† 馬原保典† 田中靖治† 田中和広†† 宮川公雄††† 塩崎功†

わが国においては、高レベル放射性廃棄物は深部岩盤中に処分することが基本方針とされているが、処分の安全性の評価等においては放射性核種の主要な移行媒体となる深部岩盤中の地下水の流動を評価することが重要となる。特に、わが国では、地下数 100m から 1000m 程度までの深地層中に処分することが基本方針とされており、結晶質岩系と堆積岩系が有望な候補岩体と考えられている。このため、割れ目・破碎帯や異方性などを含む複雑な地質構造における水理的特性や地下水流動をいかに適切に把握するかが重要な課題であり、このための調査や解析・評価に関する手法を体系的に確立しておく必要がある。

本稿では、深部岩盤中の地下水流動の評価に関する岩盤透水特性の調査・モデル化手法、岩盤の割れ目等を考慮した地下水流動の解析手法ならびに環境同位体・地下水流速測定による地下水流動の調査評価技術などについて、(財)電力中央研究所などにおけるこれまでの開発の現状と適用例について紹介する。

Keywords: 高レベル放射性廃棄物, 地層処分, 地下水流動, 調査技術, 解析手法

In Japan, the high-level radioactive wastes are in principle expected to dispose into the deep rock formations. So, it is very important to evaluate the groundwater flow in deep rocks, which is a main pathway of radionuclides released from the disposal facility. Especially, the target depth of geological disposal is basically considered about from several 100m to one 1000m below ground-surface and the crystalline or sedimentary rock is the most candidate geological formation in Japan.

Therefore, it is most important to evaluate appropriately the characteristics of hydraulic parameters, groundwater flow and so on in more complicated geological conditions, and it is necessary to establish a systematic technique to investigate or analyze the groundwater and its flow behavior in deep geological formations with fracture, fault and so on.

In this paper, the present status of techniques developed by CRIEPI for the investigation of hydraulic characteristics, the analysis methods of groundwater flow in fractured rocks, the investigation methods to evaluate the regional groundwater flow movement by using natural environmental isotopes or the direction and velocity of local groundwater flow by groundwater flow meter and so on, are summarized.

Keywords: high-level radioactive waste, geological disposal, groundwater flow, investigation technique, analysis method

1 はじめに

放射性廃棄物処分の安全評価等においては、放射性核種の主要な移行媒体となる地下水の流動を適切に評価することが重要となる。この場合、処分サイトの候補地や予定地を絞り込んでゆく初期の調査・選定段階でのかなりの広域から、その後の予定地調査段階でのサイト特性調査・事業許可申請段階で調査の主対象となる数 km 四方程度のスケールまで、対象とすべき場のスケールや目的に応じた詳細さ、規模等を勘案した地下水流動とその流動特性を規定する水理地質構造の調査・評価を適切に行うことが特に必要となる。

特に、わが国では、高レベル放射性廃棄物の処分に関しては、地下数 100m から 1000m 程度までの深地層中に処分することを基本方針としており、また結晶質岩系と堆積岩系が有望な岩体と考えられているが、割れ目・破碎帯や異方性などを含む複雑な地質構造における水理的特性や地下水流動をいかに適切に把握するかが重要であり、このための調査や解析・評価に関する手法を体系的

に確立することが必要である[1,2]。

本稿では、特に高レベル放射性廃棄物処分の推進において重要な深部岩盤中の地下水流動に関する調査・解析・評価手法の研究開発の現状について、(財)電力中央研究所における実施状況を中心に紹介する。

2 地下水流動の調査・解析の基本的な考え方

2.1 地下水流動・調査の必要性和役割

当面の課題である「処分予定地の選定」や「処分施設的设计・安全評価」など高レベル放射性廃棄物処分を推進するにあたっては、将来的に深部地下に設置される処分施設から出てくる放射性核種を人間環境にまで運ぶ主要媒体は地下水であると考えられることから、地下水流動の評価がきわめて重要な検討項目となっている。このため、水理地質構造調査技術と地下水流動に関する調査・解析手法の開発・高度化を行いつつ、その体系的な整備を図り、さらにその適用性を実証することが進められてきている。以下に、それらの研究開発上の基本的な考え方について述べる。

2.2 全体システムとしての地下水流動の調査・解析技術

地下水流動を評価する上では、対象となる場の水理地質構造、とりわけ透水特性や圧力ポテンシャル分布(動水勾配)の調査を行うとともに、それらの結果に基づいて地下水流動解析モデルを構築して予測解析を行うことによ

† Present Status of Investigation and Analysis Methods developed by CRIEPI for Groundwater Flow in Rocks, by Motoi Kawanishi (kawanishi@crieipi.denken.or.jp), Yasunori Mahara, Yasuharu Tanaka, Kazuhiro Tanaka, Kimio Miyakawa and Isao Shiozaki

†† (財)電力中央研究所 我孫子研究所 バックエンドプロジェクト Nuclear Fuel Cycle Back-End Project, Abiko Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646

††† (財)電力中央研究所 我孫子研究所 地質部 Department of Geology, Abiko Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646

り、定量的な地下水流動場を間接的に推定することが一般的に行われる。一方、ボーリング孔における地下水流動を直接的に調査する方法としては、地下水中の環境同位体、溶存希ガスや水質などを分析して地下水の起源・年代を測定することにより比較的広域のゆっくりとした地下水流動系を概略的ではあるが直接的に推定する技術がある。また、局所的な地下水の流向と流速を単一のボーリング孔で直接測定する技術も開発され、既に実用段階に達している。

これらの種々の技術を系統的に組み合わせて用いることにより、従来は間接的な推定の域にとどまっていたきらいのある地下水流動の調査・評価結果が、最近ではより定量的かつ精度、信頼性もかなり向上した結果として得ることが大いに期待される状況になってきている。以上のような近年の技術開発の進展を踏まえ、系統的に地下水流動の調査・評価を実施するための地質・地下水調査および地下水流動評価の手順を図1に示す[3]。

以下では、図1の基本的な考え方に基づいて実用化されてきている個々の調査・解析技術の代表的なものについて開発の現状と適用例について述べる。

3 地下水流動の調査技術とその適用

3.1 地下水理基本特性調査技術

地下水理基本特性としては、岩盤の“流れ易さ”を表

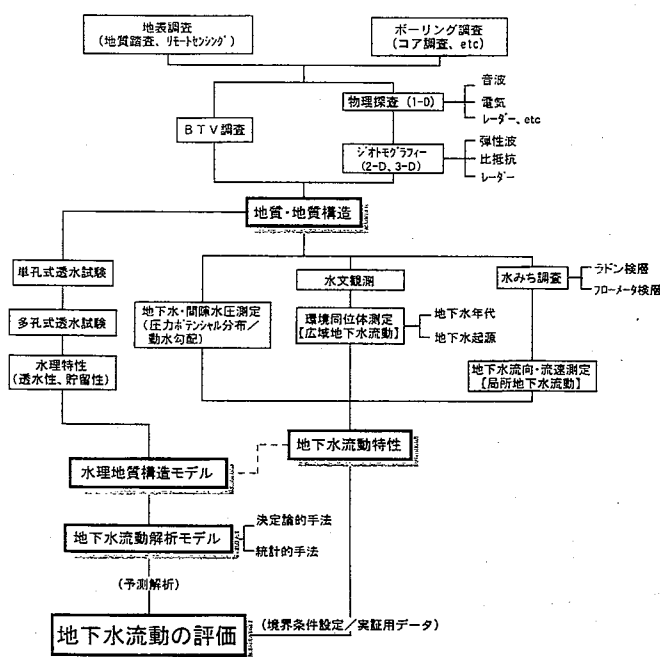


図1 地質・地下水調査と地下水流動評価の手順

す透水性が最も重要であり、また非定常の地下水流動解析ではさらに貯留性もパラメータとして必要となる。一方、地下水の流速は、媒体断面内の平均流速(いわゆるダルシー流速)として表現する場合と、間隙内の実流速(ダルシー流速を間隙率で除すパラメータで核種移行評価の際によく用いられる)として表現する場合がある。このため、間隙率なども地下水流動解析のパラメータとして重要ではあるが、ここでは水理パラメータとして最も重要な透水係数の調査技術について述べる。

透水係数は透水試験によって求められるが、ボーリングコアのサンプルを採取して室内試験によって求める方法と現場のボーリング孔を利用して原位置で試験する方法とがある。透水係数は、対象とする岩盤の間隙や割れ目の性状、連続性や異方性あるいは間隙内充填物の有無など、さまざまな地質形成過程の要因によってかなりの不均一性が示される場合が多い。このため、できるだけ正確な岩盤の透水係数を求めるために、原位置における単一ボーリング孔を用いた単孔式透水試験の他に、複数孔を利用して孔間の透水係数分布を求める多孔式透水試験が実施されている[3]。

3.1.1 単孔式透水試験

ボーリング孔内の試験区間に水を注入し、圧力と注水量とから透水係数を求める方法(注水法)と、試験区間の地下水を揚水し、水位回復に要する時間から求める方法(回復法)がある。試験区間の割れ目分布の特定や測定深度の決定のため、BTV装置を装着できる試験装置も開発されており、地下300m程度における $10^{-4} \sim 10^{-8}$ cm/secオーダーの微小な透水係数の測定が可能となっている[3,4]。一方、動燃事業団では試験区間内で瞬時に大きな圧力パルスを生じさせて圧力の減衰状況を測定することにより透水係数を迅速に求める方法(パルス法)を考案し、1,000m深度に対応できる試験装置を開発している[5]。

3.1.2 多孔式(クロスホール)透水試験

本試験法は、複数のボーリング孔を利用し、発信孔から正弦波形やパルス状の水圧を送ったり、一定流量の水を送ったりして、水圧伝播応答を受信孔で観測することにより、孔間における2次元の透水係数分布をジオトモグラフィー同様にデータの逆解析を行って求める方法である。この方法では、地下水の水みちとなりそうな場所の特定も可能である。また、本試験装置では、高精度の微流量計と圧力計の装備により 10^{-9} cm/secオーダーの微小な範囲までの透水係数の空間分布測定が可能である[6-8]。

この試験法を花崗岩サイトに適用し[6]、そのデータをもとに解析的に孔間の透水係数分布を推定した。試験孔は深さ60mの3本の鉛直ボーリング孔が10m間隔で配置されており、2.5mの区間ごとにパッカーで区切って試験

を実施し、中央孔の3箇所を発信区間とする96本の測線(図2(a))でのデータを使用して透水係数の空間分布を推定した(図2(b))。なお、透水係数の初期値には、地質調査や5m間隔の単孔式透水試験結果を基に作成したルジオンマップの値を使用した。この推定結果として求められた領域内で透水係数が比較的大きな箇所は、地質調査により得られた系統的な割れ目帯の位置ともよく一致しており、透水係数の空間分布の推定が妥当に行われることが示されている。

3.2 広域地下水流動調査技術

3.2.1 地下水・圧力ポテンシャル分布測定

従来、地下水流動に関する調査では、複数のボーリング孔における地下水位測定を行い、地下水面分布から平面的な圧力ポテンシャル分布(動水勾配)を推定し、これに透水係数観測値を乗ずることにより地下水流動の速度と方向について平面的な概況が把握される。この方法は、各地点の鉛直方向における全水頭ポテンシャルの差がなく鉛直成分の流速が無視できる程小さいとする準3次元の流の仮定が成り立つような流れ場全体を概略的に把握するのに一般的に用いられる。また、最近ではボーリング孔内において多段式のバックで仕切られた区間ごとに間隙水圧を詳細に測定することにより、3次元空間的な流れの状況が従来に比べ詳細に推定することができるようになってきており、これらのデータは地下水流動解析モデルの設定(境界条件等)とともに、地下水流動の解析評価結果の妥当性実証用データとしても一部用いられる。

3.2.2 環境同位体測定による地下水流動調査[9-13]

地下水の動きを追跡するトレーサーとして自然環境中に存在する環境同位体や水質を分析することによる地下水流動調査は、主として地下水の滞留時間(年代)や起源等に関する直接的な情報を得ること、あるいは地下での地下水の混合や水理地質構造・水循環モデルの組み立て等に関する間接的な情報を得ることなどの目的に行われている。

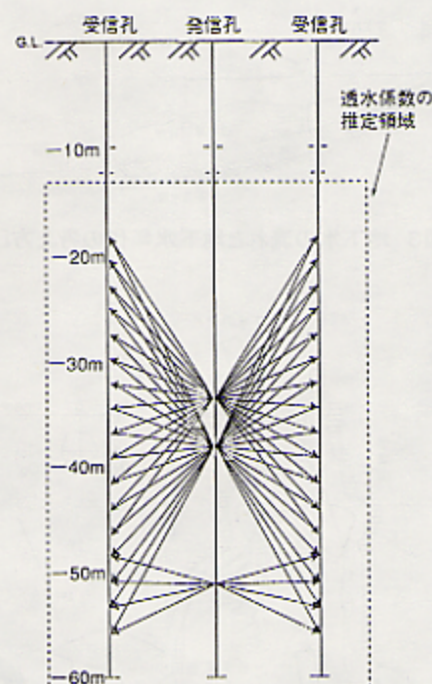
一般に、地下水年代(滞留時間)を直接的に測る手法には、主に次の3つの方法がある。

①大気起源で地下水に、あるいは地殻起源で地下水に含まれる放射性元素の壊変速度、蓄積速度や非平衡を活用する方法

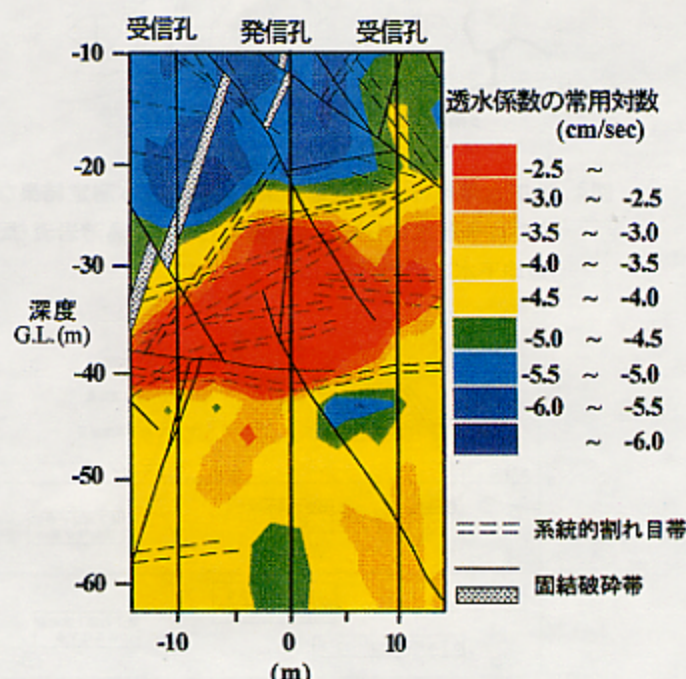
②地下水中における化学物質の分解・変化速度を活用する方法

③古気候あるいは既に年代決定がなされている地質学的事象と地下水の性質の関係を活用する方法

これらのうちで、地下水中に溶けている微量な放射性元素は、一定時間を経過することに半減を繰り返し他の



(a) 解析に使用した測線



(b) 透水係数の空間分布の推定結果

図2 正弦波圧力試験[6]

元素に変化するという放射能特有の性質があり、この性質を利用して地下水の年代を測ることができる(図3)。地下水年代測定に用いられる代表的な放射性元素と測定範

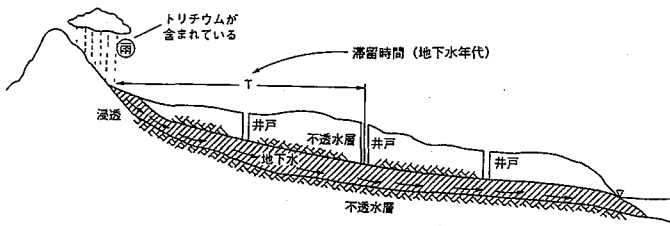


図3 地下水流れと地下水年代の考え方[10]

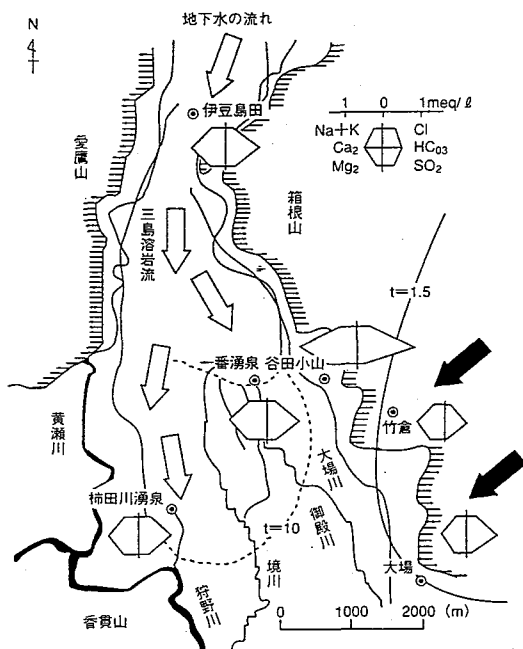


図4 地下水年代(t, 年)測定結果、環境同位体測定結果ならびに一般水質分析結果を基に行った三島溶岩流・周辺地下水の流動区分[10]

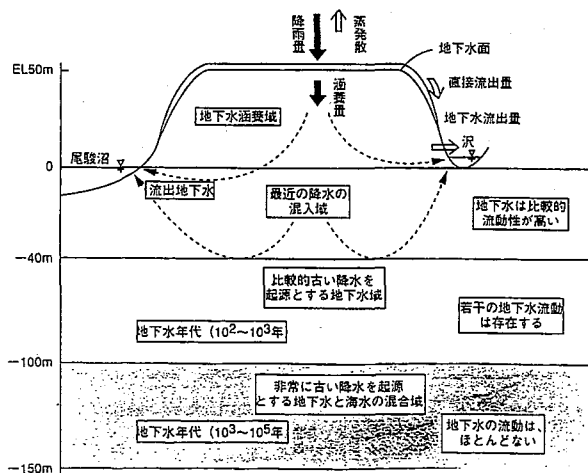


図5 溶存ヘリウム測定法による地下水年代測定結果を基にした六ヶ所サイトにおける地下水循環概念モデル[12]

図, 測定に必要な採水量や分析方法などについて表 1 に示す。

特に、馬原ら[9-12]は地下水中に溶けているヘリウムガスを用いた測定法を開発適用してきている。この方法では、質量分析装置を用いて溶存ヘリウム濃度を高精度で測ることにより、次のように若い地下水から非常に古い地下水の年代が統一的に測定できるという利点がある。

① トリチウム(^3H) + ヘリウム $3(^3\text{He})$ 法: ^3H は、 β 壊変して ^3He になるので、地下水試料に含まれる ^3H 濃度と ^3He 濃度を正確に測定することにより地下水年代を精度良く決定できるという方法であり、数ヶ月から数十年程度の比較的若い地下水の年代をかなり正確に測定することが可能である。本手法を適用して三島溶岩流や熊本平野の地下水年代を測定した例では、前者が 10 年、後者が 1~50 年という結果が得られた。図 4 は、地下水年代と環境同位体(δD , $\delta^{18}\text{O}$)の測定結果を考慮して推定した三島地区の地下水流動区分と地下水年代分布を示す[10]。

② ヘリウム蓄積法: 地盤・岩盤中には、ウラン(U)やトリウム(Th)とその娘核種である α 核種が含まれており、これらが α 壊変するたびに、He が地盤・岩盤中に放出され地下水中に蓄積される。He が地下水中に蓄積される割合が一定であれば、地下水中に蓄積された He 量から地下水の年代を決定することが可能となる。この方法では、地下水の滞留時間が長くなるほど、地下水に蓄積されるヘリウムの量が増えることになり測定は容易となるので、数百年~数万年という非常に古い地下水の年代測定が可能となる。実際に、オーストラリアの大鑽井盆地の地下には百万年以上の滞留時間を持つ地下水の存在することが、この方法で確認されている[11]。さらに、わが国においても、六ヶ所村の低レベル放射性廃棄物埋設処分サイトの深部地下には数万年以上の滞留時間をもつ地下水が存在する可能性が示唆されている(図 5)[12]。

ただし、地下水中において、蓄積されたヘリウムの起源を明らかにすることや、別の場所で発生したヘリウムがどの程度、拡散移動し蓄積しているかを成分分離して評価しなければならないという問題点も残されており、拡散解析等を加味するなどの精度向上策を検討している[9]。

3.3 局所地下水流動調査技術

3.3.1 ラドン検層

本調査法は、地下水中に溶存するラドン ^{222}Rn は半減期が短い(約 3.82 日)放射性希ガスで、周辺岩盤や地下水中の溶存共存物とも反応しないという特徴を利用したものである。ラドン検層は、ボーリング孔内に一定間隔にフィルムを設置し、約 1 週間放置後に回収して薬品処理し、ラドンが崩壊するときに放出するアルファトラックの本数、密度を計測し、孔内の原位置での地下水中ラドン濃度を求める方法である[13]。ボーリング孔内でラドン濃

表1 代表的な地下水年代測定方法とその測定範囲[9]

測定法	放射性核種	半減期(年)	降水中初期濃度	地下水年齢測定範囲(年)	測定に必要な採水量(ml)	実測例	分析方法
大気起源の放射性核種を用いた測定	^{85}Kr	10.7	10^{-8} (dpm/l) 以下 (ただし1950年前)	1~40	$1.2 \times 10^5 \sim 3.6 \times 10^5$	ポーランドのCrakowの地下について10~40年という結果を考えている。	溶存ガス抽出後、アルゴン分離精製後、比例計数管にて β 線測定
	^3H	12.3	3.6 (dpm/l) (ただし1954年前)	1~60	1000	たとえば、六甲山の地下水循環系について調査し、六甲トンネル内の地下水の年代は40年で、流速は0~17m/yである。	電解濃縮後、低バックグラウンド液体シンチレーションカウンターによる β 線計測
	^{39}Ar	270	4×10^{-5} (dpm/l)	50~2000	$7 \times 10^6 \sim 9 \times 10^6$	^3H 法で測定して50年以上と判定されたZurzachの温泉水の年代を測定し、70年以下との結果を得た。	多重遮蔽付の低バックグラウンド気体計数管を用いて β 線測定
	^{14}C	5,730	2×10^{-1} (dpm/l)	500~2000	2×10^6	たとえば、熊本平野の地下水に対し、 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{234}U 、 ^{238}U で調査し、地下水は主に最近の降水と非常に古い滞留時間(3~4万年)を持つ地下水によって形成されていることを明らかにした。	液体シンチレーションカウンター、あるいは気体計数管で β 線計測(地下水より BaCO_3 として、炭素を捕獲後、炭素を分離)・タンデム型加速器質量分析(元素状の炭素として)
	^{81}Kr	210,000	7×10^{-9} (dpm/l)	$10^4 \sim 10^6$	10^4 (RISによる分析) *2 $10^8 \sim 10^9$ (通常の放射能測定)	カナダ、マニトバ州のミルキーリバー帯水層地下水で 1.4×10^6 年を得た。	溶存ガス抽出分離精製後、加速器質量分析
	^{36}Cl	301,000	$1 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-4}$ (dpm/l)	$5 \times 10^4 \sim 2 \times 10^6$	1000~5000 (タンデム加速器分析) $10^8 \sim 10^9$ (通常の放射能測定)	オーストラリアのGreat Artesian Basinの地下水は $10^5 \sim 10^6$ 年との結果を得た。また、カナダ、ミルキーリバーの地下水に対し、 $6 \times 10^5 \sim 1.6 \times 10^6$ 年を得た。	タンデム型加速器質量分析(CIを AgCl として抽出精製)
地下水に蓄積される希ガスを測定	^3He	安定核種	$\sim 10^{-14}$ ccSTP/g *1 (バックグラウンド)として	1~100 (^3He と組み合わせて)	>15	三島溶岩帯内および周辺の地下水に対し、10~15年・庄川流域の地下水に対し、1~20年	質量分析(希ガス分離後)
	^4He	安定核種	$\sim 10^{-8}$ ccSTP/g (バックグラウンド)として	$10^4 \sim 10^7$ (ウラン、トリウムと組み合わせて)	>15	サバンナリバー周辺の地下水に対し、年代を測定し、 8.4×10^3 年、これを基に地下水流速は、0.06m/yと推定した。	質量分析(希ガス分離後)
	^{222}Rn	0.01	—	0.03以下	1000	Glian (スイス) 河川流域で地表水からの地下水の混雑を評価した。その結果、地下水の平均的な流速は4.6m/dayとの結果を得た。	トルエン抽出後、液体シンチレーションカウンターによる α 線計測

*1: 単位重量の水に溶解している気体の量を標準状態(0°C, 1気圧)の下での体積で表したもの

*2: レーザーパルスを用いて量子状態で選択的に原子をイオン化し、小型の質量分析器と組み合わせることによって高精度な分析が可能となり、ヘリウム、ネオンを除く希ガスを原子単位で計測できる。

適用深度: 0m~500m

適用孔径: $\phi 66\text{mm} \sim 120\text{mm}$

流速測定可能範囲: 0.0004~3.3m/sec

ポンプ揚水能力: 36L/min (70m揚底時10L/min)

付属ボアホールTV: 360度展開型

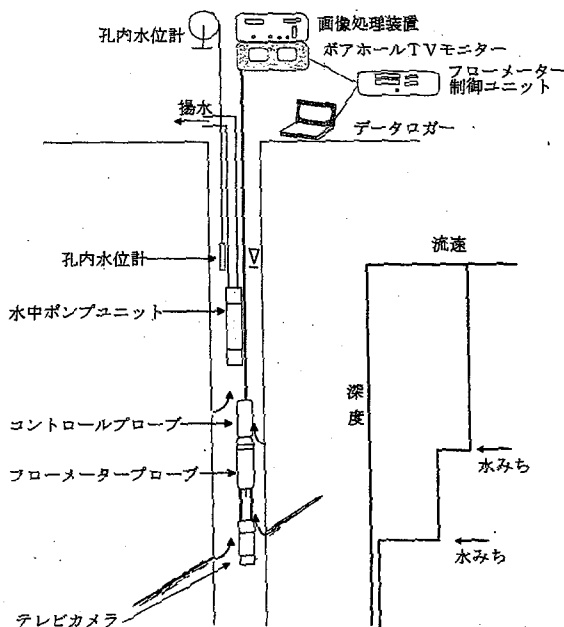


図6 フローメータ検層装置概念図

度を測定することにより、地下水の流出区間でラドン濃度が上昇し、停滞水区間では著しく濃度が低下することなどを木村[14]が報告しているように、この方法は、ボーリング孔内において地下水の流動箇所(水みち)を特定するための有効な手法となり得るものである。

3.3.2 フローメータ検層

本調査は、ボーリング孔内において孔軸方向の孔内水の流速を測定することにより、水みちとなる割れ目を特定することを主な目的としている。一般に、自然状態と揚水時、注水時の地下水環境下で検層を行い、孔軸方向の流速の変化を検出するとともに、透水量係数、透水係数を求めるためにも用いられる。この検層で用いられるフローメータには、従来から種々の特徴を有する機構のものが開発されてきているが(表2)、いずれも孔軸方向の孔内水の流速を測ることによって水みちの推定を行っている。宮川ら[15]は、当初は、他の方法に比べて簡便なプロペラタイプのもの(スピナー検層方式)を用いていたが、その後、より高精度の測定が期待される超音波式のものを開発し、さらに割れ目位置などを視覚的にも確認できるようにBTVカメラを装着できるようにした検層装置を開発し適用を開始している(図6)。これまでの適用の実績から考えるとこのようなフローメータによって検知できる透水係数はおよそ 10^{-5} cm/sec オーダー以上

表2 フローメータの原理

タイプ	特 徴
プロペラ	水と同程度の比重でできたプロペラを使用し、回転数から流速を決定する。 構造が簡単で適用が簡便である。
ヒートパルス	熱を発生させ、一定区間離れた箇所での熱の伝搬時間を計る。 微流速での計測精度が高い。
電磁気	磁場中を水が流れる際に生じる電流を計測し、流速を決定。 微流速から高速まで広レンジで測定が可能。

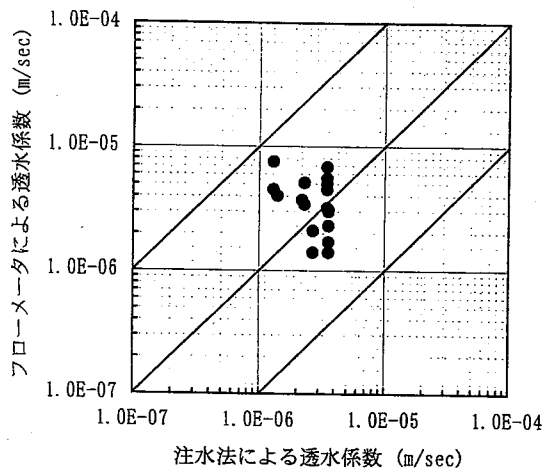


図7 フローメータおよび注水法による透水係数の比[15]

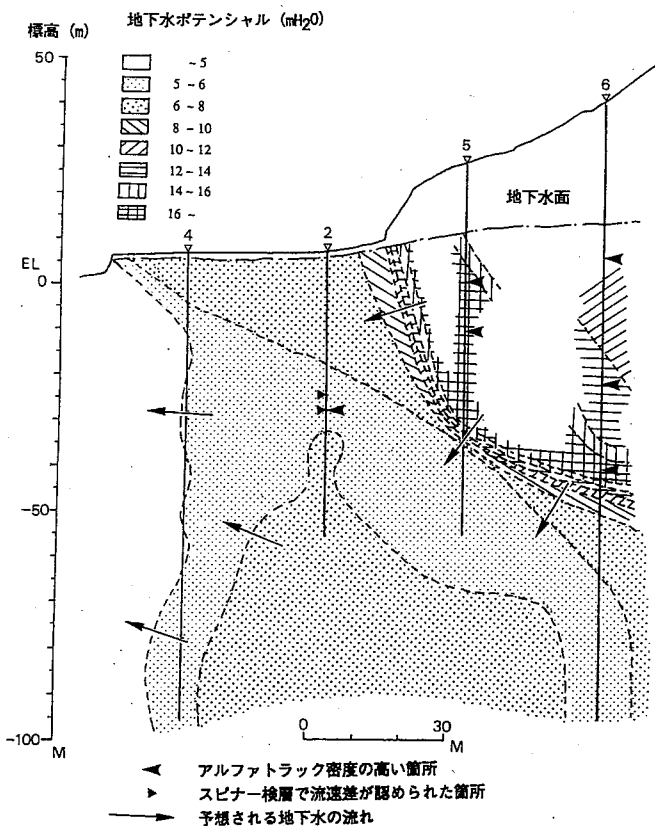


図8 ラドン検層、フローメータ検層、地下水ポテンシャル測定結果から推定される地下水流れ[13]

と考えられる。片麻状花崗岩を主体とする試験サイトへの適用結果(図7)を見ると、注水法による透水係数とフローメータ検層から得た透水係数は、概ね1桁以内のオーダーの差に収まっている[15]。

図8は、上述のラドン検層(アルファトラック法)、フローメータ検層の原位置への適用結果と地下水ポテンシャル測定結果から推定される地下水流れの概略的な方向とを比較整理したものである[3]。全体として、山側から海側に向かう流れが予想される。また、一部の割れ目密集部が水みちとなる一方、斜面と平坦部の境界付近から傾斜する固結破砕帯が地下水流れに大きな影響を与えていることが強く示唆された。

3.3.3 単一孔式地下水流向流速計

最近では、単一ボーリング孔を利用した地下水の微流速と流向を同時に測る技術も、地下水調査法の一つとして開発されてきている。代表的な単一孔式の地下水流向流速計としては、次のものがある[16]。

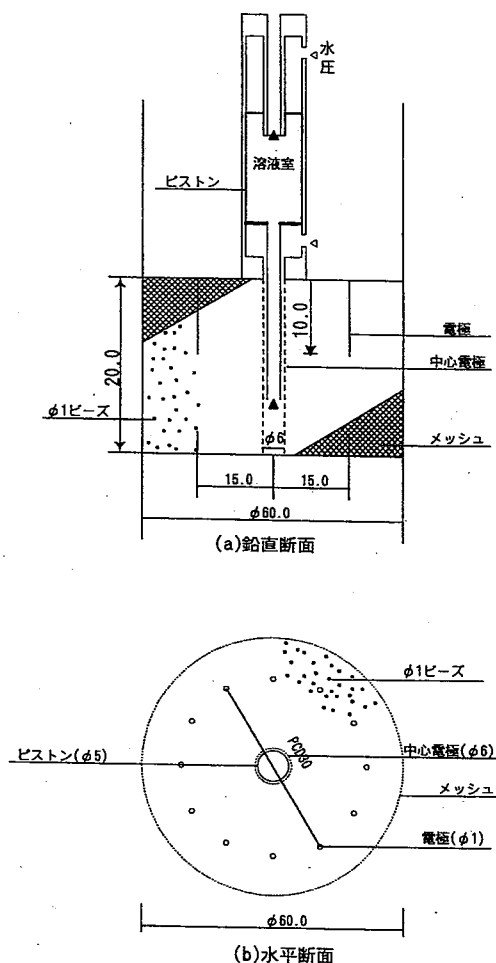
①中性子計数方式：トレーサーとして熱中性子吸収断面積の大きいホウ素を用い、指向性の中性子水分計による熱中性子測定から地下水の流向流速を求める測定法である。

②定温度加熱～熱拡散方式：高流速範囲($10^{-2} \sim 10^0$ cm/sec)の測定では加熱平衡量(放熱量)が流速と比例するという性質、また低流速範囲($10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm/sec)では熱の移流拡散が流速と比例する原理を応用した測定法である。

③電位差測定方式：観測井内において、電気比抵抗が地下水とは数桁のオーダーで異なる溶液(基本的に蒸留水を利用)をトレーサーとして注入し、この溶液が地下水の流れとともに拡散しながら移動し、比抵抗分布が変化する状況をあらかじめ配置された電極間の電位差として測ることにより流向流速を求める方法である。

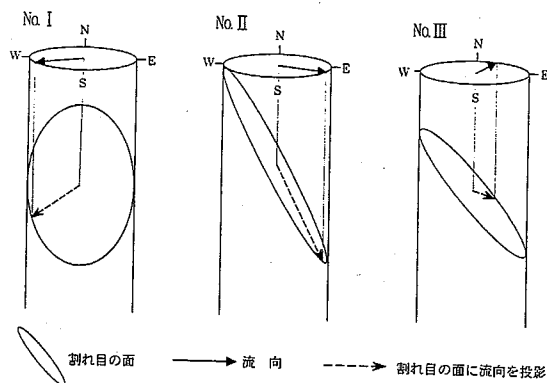
上記以外の測定方式としては、観測井中のテレビカメラからの画面により地下水の浮遊物質等の移動状況を観測することによる粒子トレーサー方式、地下水中の懸濁物質のような微粒子の動きをレーザー光を用いて測るレーザードップラー・フリンジ方式なども近年提案されている。一方、以上述べたような単一孔式流向流速計の基本的な測定原理は、いずれもトレーサー方式に分類されるものであり、このような単一孔式地下水流向流速計は、国外ではほとんど見あらず、わが国独自の技術といえることができる。また、これまでの測定の実績からみると、中性子計数方式と電位差方式が現場等で多く用いられているようであり、開発当初において $10^{-2} \sim 10^{-5}$ cm/sec オーダーの遅い地下水の流速と流向が測れるとされている[17]。

以下では、測定手法に関する実験的検討や現場測定例が豊富に報告されている(財)電力中央研究所と大成基礎



測定電極部の構造(φ60mmタイプ)

図9 電位差方式地下水流向流速計の測定原理と測定装置[19]



割れ目性状と流向流速測定結果

測定深度	割れ目性状	流向	流速
No I (GL-81.0m)	シャープな単一割れ目が存在する箇所	S55° W	約 7×10^{-4} cm/sec
No II (GL-102.5m)	開口割れ目が比較的良好に集中している箇所	S65° E	約 1×10^{-3} cm/sec
No III (GL-160.5m)	岩全体が比較的変質し、微少な割れ目が多数認められる箇所	N25° E	約 2×10^{-2} cm/sec

図10 AN-1号試験孔における地下水流向流速測定結果[20]

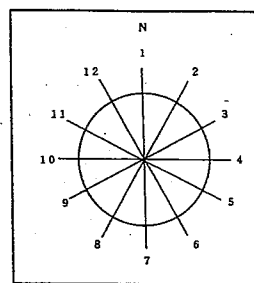
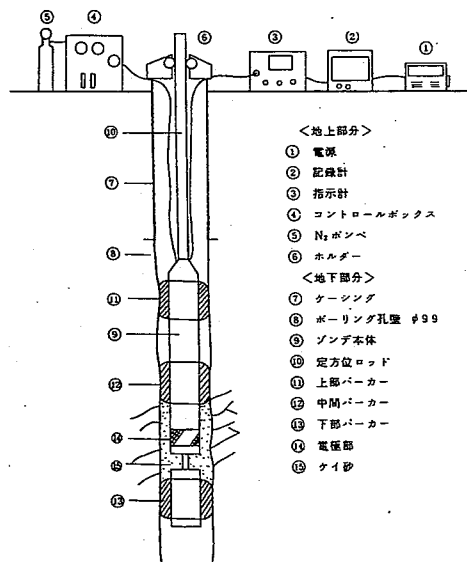


図-7.1 電極の配置



測定装置の概要

設計(株)との共同研究として河西・小松田・平田[18]により開発された電位差方式による地下水流向流速測定の実状について述べる。

図9はこの電位差測定方式による地下水流向流速計の測定原理の概要を示したものであり、主な特徴は次のとおりである[19,20]。

① 上述したように、蒸留水が一般的な地下水に比べて電気伝導度が2桁程度も小さいという性質を利用し、環境に全く問題のない蒸留水を標準的なトレーサーとして用いている。

② 計測区間における電極部内をガラスビーズあるいはスポンジ等で、また計測器本体と孔壁との間にはケイ砂あるいはスポンジ等で充填し、計測区間での地下水の流れが乱れないように工夫している。

③ 流速が 10^{-5} cm/sec オーダー程度以下の遅い場合、トレーサーの挙動が移流成分に比して分散効果が支配的となり、流速を波形ピークから直接的に推定するのは難しくなるため、トレーサー濃度～電極間抵抗分布の関係を移流分散解析的に解くことにより、移流成分を分離し、従来より1から2桁小さい $10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/sec オーダーの微

流速と流向を推定することが可能である(本装置の計測精度の妥当性は、室内試験等によって確認されている[19]).

動燃事業団との共同研究の一環として、東濃鉱山のA N-1 号試験孔における原位置試験研究の割れ目系岩盤中の地下水流向流速測定に適用した例を示したのが図 10 である。この結果、比較的発達した割れ目帯の中で割れ目性状が異なる 3 タイプの深度で測定したところ、流速は $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-7}$ cm/sec の範囲であり、コア観察や BTV 調査等でわかっている割れ目面内でほぼ下向きに流れていることも推定され、全体的に周辺の地形・地層の傾斜方向にほぼ沿った地下水流れになっていることがわかった[20]。図 11 は、測定流速が比較的早い深度(No.II)と遅深度(No.III)における観測値(各電極間の電位差変化の最大電位差との比)と解析結果との比較を示したものである。いずれの場合でも、上述のデータ解析により、このようなかなり遅い流速範囲までの地下水流向流速測定が原位置で十分適用できることがわかった。

以上、この地下水流向流速計を用いることにより、 1×10^{-6} cm/sec 程度までの微流速領域の地下水流向流速測定が十分な精度で行え、さらにはほぼ測定の限界となり信頼性がやや小さくなる 1×10^{-7} cm/sec オーダーの超微流速範囲でも、移流分散解析による移流成分の分離を行うことにより検出可能となる見通しも得られた。

4 水理地質構造のモデル化とその可視化

岩盤中での地下水や物質の移行を解析する場合、上述したような種々の地質・地下水理の調査データに基づいて評価・解析のための水理・地質構造モデルを作成することになる。その際、専門家が作成した地質断面図、検層データ、トモグラフィー等による岩盤物性の空間分布を 3 次元的に推定し、その結果を可視化することが不可欠である。さらに、作成された水理地質構造モデルおよびそれをベースに構築された地下水流動解析モデルによる計算結果等を、近年の技術革新が著しいコンピュータグラフィックにより可視化することが行われてきており、モデル化および解析結果の妥当性検証という技術的側面ばかりでなく、地下水流動現象に対する一般の理解をより深める上でもきわめて有効である。

宮川ら[21]は、図 12 に示すように、現地調査から得られた水理・地質データを地盤統計的な手法を用いて補間し、3 次元の地質構造・物性構造を可視化する「水理地質構造の可視化システム」[22]を開発した。このシステムは、地下水流動解析等の数値シミュレーションが行いやすいように、あらかじめ有限要素メッシュを作成した後、物性値を推定できるようになっている。図 13 に、透水係数の 3 次元分布を地盤統計学的手法を用いて可視化

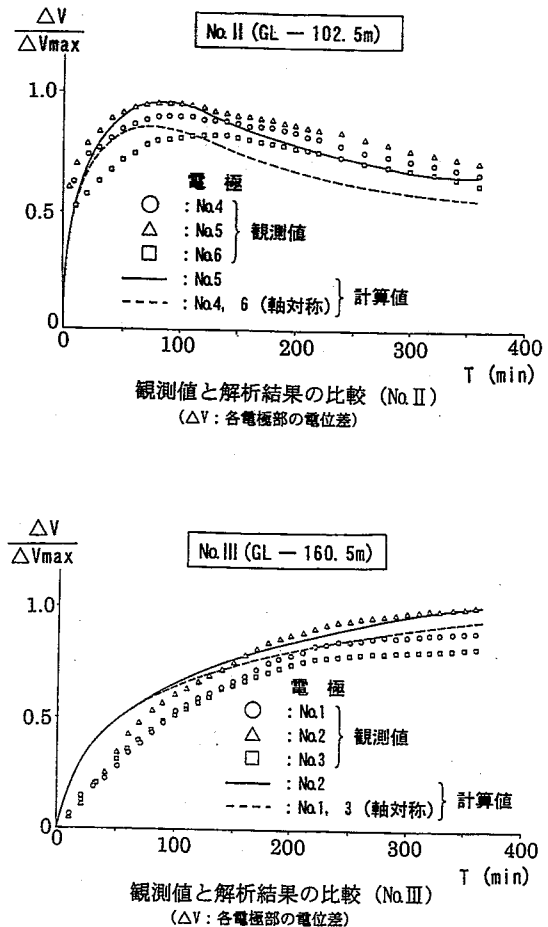


図11 電位差の観測値と解析結果の比較例[20]

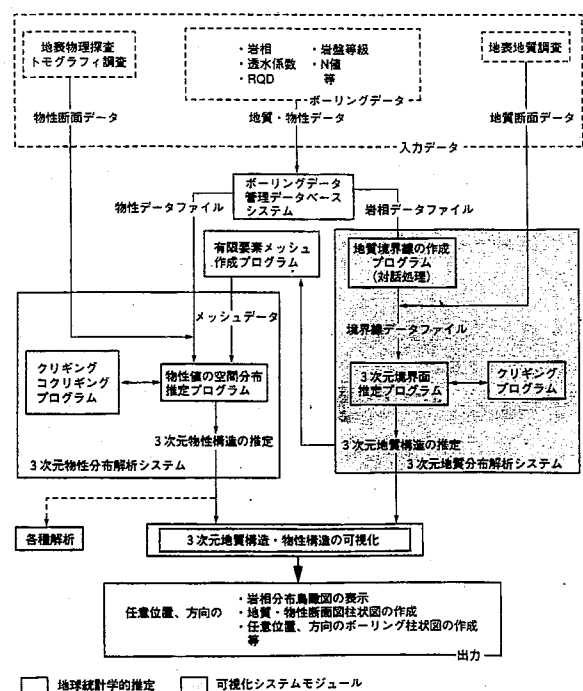


図 12 水理地質構造の可視化システム[22]

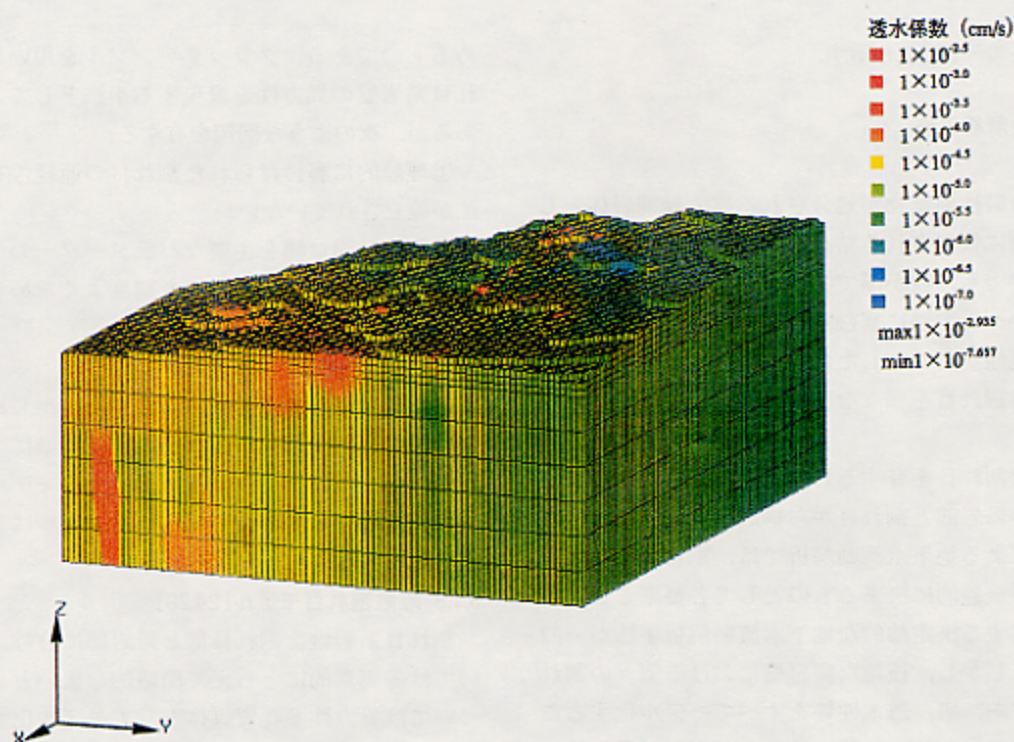


図 13 透水係数の三次元分布特性の地盤統計学的推定結果の例

表 3 割れ目系岩盤のモデル化の概念

岩盤要素モデル	特徴	適用対象
① 異方性多孔体要素	従来の多孔媒体モデル 要素 A (母岩) 要素 B (割れ目)	割れ目を特にゾーン分けしなくても通常の多孔媒体としてのモデル化で十分対応できる場合
② 離散割れ目要素	割れ目のみを一次元線要素的に扱えるようにモデル化し、演算の効率化が図れる。 	割れ目の分布が比較的シャープで単純な場合、特に割れ目のみを一次元的な簡略化した取扱いとするが、母岩部については通常の多孔体の取扱いが必要な場合
③ 二重間隙要素	割れ目と母岩部の両方を一次元線要素的に扱えるようにモデル化。母岩部は平行ブロック、球形(円柱)ブロックのモデルが選択できる。 	割れ目の分布が比較的シャープで単純な場合、特に割れ目における地下水流れの特性の把握を主眼とし、母岩中の流れについては簡略化し、一次元的取扱いで十分な場合
④ スメアード割れ目要素	割れ目が通過する要素の各物性を面積比配分により異方性を考慮して等価な物性値に変換して解析するモデルであり、従来のモデルに比べ容易に複雑な岩盤割れ目物性の特性を考慮することができる。 K₁ ~ K₇ は等価な物性値へ変換対象の要素	割れ目の分布が比較的複雑であり、それぞれの割れ目を線要素的にモデル化するのが容易でない場合

推定した結果の一例[22]を示す。

5 地下水流動解析手法

高レベル放射性廃棄物が処分される有力候補岩体としては、花崗岩に代表される結晶質岩、泥岩等の堆積岩があり、この中でも、我が国で多く分布する結晶質岩盤では、不均質かつ異方性に富む割れ目・破碎帯が主要な流路となる可能性がある。したがって、地下水流動解析においては岩盤割れ目を様々な手法でモデル化することが不可欠となる。

このような割れ目を有する岩盤は、基本的には多孔質媒体としての母岩部と割れ目から構成される。従来の有限要素法等による地下水流動解析では、割れ目と母岩部の透水特性が一義的に決まるものとして各要素ごとに透水係数を設定する決定論的な地下水流動解析手法が一般的であった。しかし、複雑な実岩盤における個々の割れ目の位置、方向、幅、透水性等をすべてモデル化することは實際上困難であり、地質・地下水調査から得られた割れ目特性に関するデータから地下水流動に参与する割れ目の分布特性を統計的に同定し、その統計特性を考慮できるようにした統計的地下水流動解析が試みられている。このような地下水流動解析に関する決定論的手法と統計的手法、および解析適用例について、次節以降に述べる。

5.1 地下水流動の決定論的解析手法

割れ目を対象にした地下水流動の決定論的解析手法については、Fuyakorn et al.[23]によって論じられている。また、河西ら[24]は、有限要素法における割れ目のモデル化表現を対象とする岩盤の性状、目的および取り扱いの簡便性などに応じて、異方性多孔媒体モデル、スメアード割れ目モデル、離散割れ目モデル、二重間隙モデルによるモデル化ができる解析手法を提案している。このような、決定論的解析手法としては次の4つが代表的なものである(表3)。

5.1.1 異方性多孔質媒体モデル[25]

割れ目系岩盤と等価な透水性を多孔質媒体要素に与えることにより、従来からの均質異方性の多孔質媒体として岩盤をモデル化する手法である。等価多孔質媒体モデルにおいて、割れ目系岩盤と等価な透水性を求める代表的な手法としては、小田ら[26]のクラックテンソルを用いた手法がある。この手法は、割れ目を平行な円板と仮定し、平行平板における流速が開口幅とその方向から計算されることを用いて、割れ目の幾何学的特性(方向、長さ、開口幅、密度)の分布から、代表的単位体積(REV: Representative elementary volume [27])の透水テンソルを求

めるものである。クラックテンソルを用いた手法は、割れ目系岩盤の異方性を表現する手法として、特に有効であるが、次のような問題を有する。

①理論的に裏付けられた割れ目の連続性を決定する方法が確立されていない。

②割れ目開口幅を主要なパラメーターの一つとしているが、一般に割れ目開口幅を精度よく求めることが困難である。

5.1.2 スメアード割れ目モデル[24]

割れ目分布を意識せずに岩盤をあらかじめ規則的に細かく要素分割し、割れ目が通過する要素については異方性を考慮した等価透水係数で置換するモデルである。取り扱いとしては異方性多孔質媒体モデルに類似した簡便な手法である。

5.1.3 離散割れ目モデル[24,28]

割れ目系岩盤を割れ目部と母岩部に分け、割れ目については線要素的にとらえて簡略的な扱いとし、母岩部については異方性多孔質媒体としてモデル化する手法である。

5.1.4 二重間隙モデル[20,21,26]

二重間隙モデルは、一つの媒体中に透水性の異なる二種類の間隙系を考えるものである。割れ目部、母岩部ともに1次元平均流的な取り扱いとし、母岩ブロックでの貯水効果も考慮しつつ、それらがブロックごとに水理的に連結するとしてモデル化する手法である。

上記のモデルのうち、どれを用いるかは対象とする岩盤の性状や解析目的にもよるが、割れ目における流れを細かく議論する必要のある場合は離散割れ目あるいは二重間隙モデルが考えられるが、割れ目が複雑になるとモデル化が容易でない。このような場合、ある程度は割れ目も表現でき、かつ解析は多少簡便にできるスメアード割れ目モデルが有効である。さらに簡単な取り扱いでも十分な場合には、透水係数場を異方性多孔質媒体的にモデル化することができる。

5.2 地下水流動の統計的解析手法

5.2.1 地盤統計学的手法

地盤統計学的手法を浸透問題に適用することにより、流れ場の非均質性をモデル化しようとする手法であり、代表的な手法にクリギングがある[30]。クリギングは、透水係数の実測値の分布から透水係数の空間的な相関性を求めて、線形補間により実測値のない地点の透水係数を推定する手法であり、実際の透水性を直接的にモデルに反映させ、場の非均質性を合理的に表すことができる点で有効である。

しかし、この手法は透水性の高い領域を推定することはできるが、割れ目による異方性をモデル化することが

できない。そこで、この両者を組み合わせる試みが、Kobayashi ら[31]によりなされている。これらの手法はあくまでも等価多孔質媒体モデルを用いるものであり、割れ目系岩盤内の全体的な地下水流動を近似的に表現することはできるが、割れ目に支配される局所的な地下水流動をモデル化することはできないと考えられている。一方、高レベル放射性廃棄物処分においては、放射性核種の移行に関する支配的な経路を評価する必要がある、局所的な地下水流動をモデル化することも重要である。そこで、近年、割れ目ネットワークモデルの適用により、割れ目による局所的な地下水流動のモデル化が試みられるようになってきた。

5.2.2 割れ目ネットワークモデル[25]

確率論的に割れ目を取り扱う手法は、Long ら[32]により開発されたものである。Long らは、割れ目の長さ、方向、開口幅の確率密度関数と割れ目密度を求め、モンテカルロ法により 2 次元領域に割れ目を発生させ割れ目ネットワークモデルを構築した。

3 次元の割れ目ネットワークモデルには計算機の性能向上が不可欠であったが、近年の計算機の発達に伴い、その開発が活発になってきた。主な解析コードに、Golder Associate の Frac Man[33]、AEA の NAPSAC[34]、Cacas ら[35,36]、水戸ら[37]、田中ら[38]のモデルがある。Frac Man、NAPSAC は割れ目を平行平板として、Cacas ら、水戸ら、田中らのモデルはパイプとしてモデル化したものである。

割れ目ネットワークモデルは、割れ目を幾何学的特性と水理学的特性の統計量に基づき確率論的にモデル化する。このうち、幾何学的特性の統計量に基づくモデル化は、岩盤力学の分野で用いられてきた手法(例えば菊池ら[39])を応用したものである。一方、水理学的特性の統計量に基づくモデル化は、新たに研究・開発された部分であり、各解析コードによりアプローチが異なり、各解析コードを特徴づけている。例えば、Frac Man、NAPSAC では、原位置透水試験のパッカー区間と交差する割れ目の透水量係数の和が、パッカー区間の透水量係数と等しくなるとする仮定に基づき割れ目の透水量係数分布を同定している。

5.3 解析の適用例

上記で示した岩盤割れ目のモデル化した地下水流動解析手法をフィールドに適用した事例としては、五十嵐ら[40]、Tanaka ら[41]によるスメアード割れ目モデルのスウェーデンHRL地下研究施設での原位置試験研究への適用例、内田ら[42]による、Frac Man の釜石鉱山におけるトレーサ試験への適用例がある。

ここでは、解析モデルを現位置試験に適用してその妥

当性を実証した一例として、Tanaka ら[41]によるスメアード割れ目モデルを用いた地下水流動解析手法の適用事例を紹介する。

5.3.1 解析モデル

スウェーデン核燃料廃棄物管理会社(Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 以下 SKB と呼ぶ)では、スウェーデン南東部のバルチック海に面したエスポ島に、1986 年より高レベル放射性廃棄物深地層処分のための地下研究施設(Äspö Hard Rock Laboratory, 以下 HRL と呼ぶ)の建設、サイト特性調査、および各種試験研究を実施している[43]。電力中央研究所は、SKB との国際共同研究に 1991 年より動燃事業団とともに参加しており、割れ目・破碎帯が多く存在するエスポ島 HRL サイトに対して、スメアード割れ目モデルを中心に地下水流動解析コード(FEGM)の適用性を実証してきた[40,41]。

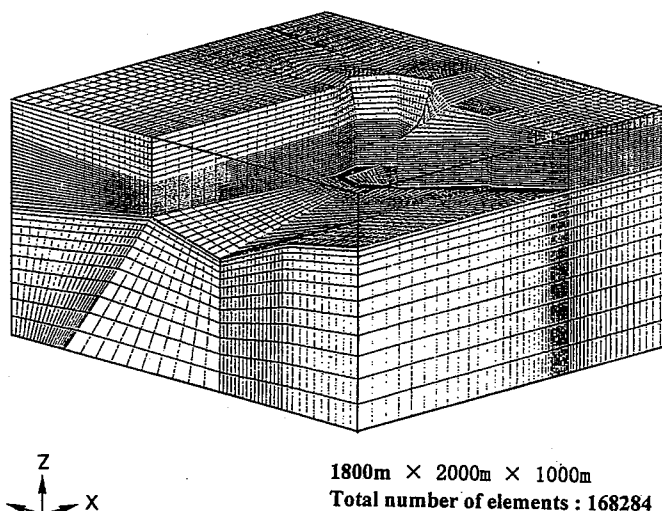


図 14 エスポ HRL での地下水流動解析のための要素分割 [41]

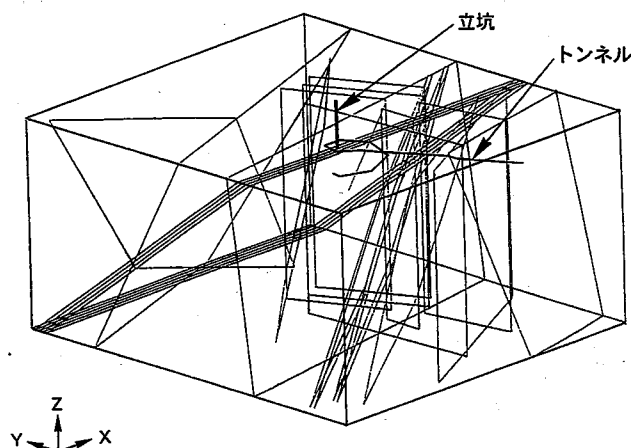


図 15 主要割れ目帯の分布とトンネル立坑の分布[41]

周辺海域を含めたエスポ島全域を解析領域に含めた要素分割図を図 14 に、主要割れ目とトンネル・立坑の分布と位置関係を図 15 に示す。この解析領域内には考慮すべき主要な割れ目帯が約 19 本あり、さらに掘削された地下トンネルも表現する必要があるが、このスミアード割れ目モデルでは、割れ目の分布に左右されずに有限要素分割が規則的に行えるため、精度的に無理な要素形状を避けることができ、さらに割れ目の位置や幅等の変更が容易にできるなどの利点がある。本解析では、この他にトンネル部を線要素としてモデル化する工夫も施し、従来に比べ水理地質構造の実態を十分に反映しつつ簡易な取り扱いで有限要素モデル表現ができるなど実用的に適用できることを確認した。

5.3.2 解析結果[41]

約 460m 深度、総延長約 3700m のトンネル掘削に伴う地下水位低下について、上記で設定した割れ目モデルに基づき、地下水流動解析を行った。この結果、図 16 に示すようにトンネル内湧水地点のグラウト施工の効果などを考慮することにより、観測水位変化と解析結果とは非常に良い一致が示されることが明らかとなり、本解析手法が十分な精度で適用できることを確認した。

一方、このような解析結果をふまえて地下水流動解析モデルの妥当性を確認した上、自然状態での割れ目・破碎帯等の主要な水みちを対象とした地下水流動解析結果と地下水年代測定や地下水流向流速測定結果等との総合的な比較評価を現在行っているところであり、サイト内の地下水流動評価とその信頼性確認に大きな役割を果たし得るものと期待されている。

6 あとがき

岩盤中の地下水流動特性をより的確に調査評価するためには、対象とする場のスケールや目的等を十分に考慮し、地質・地質構造や地下水理基本特性および広域・局所地下水流動などの各種調査を有機的に行うことが必要である。また、それらの調査結果と解析モデルによる結

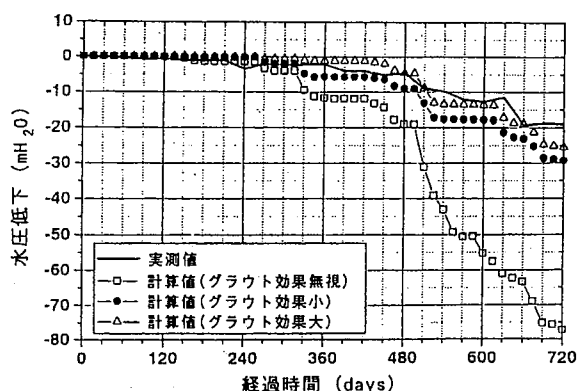


図 16 トンネル掘削に伴う地下水の低下量(実測値と計算値)[41]

果とを合わせて総合的に地下水流動特性を評価することが、近年有効に行われる状況になってきている。

今後は、これらの技術の原位置試験への適用による実証、品質保証・管理等の考え方の構築をさらに進め、より信頼される体系化された技術として確立してゆくとともに、超長期の地下水流動の予測評価や海岸立地における塩水影響を含む地下水化学環境の評価など、放射性廃棄物の深部地下処分特有の問題に対する研究開発を益々推進してゆく必要があると考える。

参考文献

- [1] 原子力委員会：原子力の研究、開発および利用に関する長期計画 (1994)。
- [2] 原子力委員会 高レベル放射性廃棄物処分懇談会：高レベル放射性廃棄物処分に向けての基本的考え方について(案) (1997)。
- [3] 田中和広 他：割れ目系岩盤における水理地質構造の調査手法の提案と適用。応用地質, 36(6), 414-426 (1996)。
- [4] 田中靖治 他：低透水性岩盤を対象とした多機能型透水試験装置の開発。電中研研究報告 U92019 (1992)。
- [5] 動力炉・核燃料開発事業団：地層処分研究開発の現状(平成 8 年度)。PNC TN1410 96-071 (1996)。
- [6] 田中靖治, 本島勲：正弦波圧力試験による原位置岩盤中の透水係数分布の逆推定。土木学会年次学術講演会講演集, III-67, pp.128-129 (1994)。
- [7] Tanaka, Y. and Motojima, I.: Estimation of spatial distribution of hydraulic conductivities using the data of the crosshole sinusoidal pressure tests, *Proc. of the 3rd. Int. Conf. on Nucl. Eng.* (1995)。
- [8] 本島勲, 打田靖夫：正弦波圧力試験による岩盤の地下水理特性の考察—岩盤の透水性, 貯留性および異方性—。電中研研究報告 U96040 (1997)。
- [9] 馬原保典：最近の地下水調査方法と計測技術。7. 環境の計測。7.2 環境同位体分析, 地下水学会誌, 36(4), 473-485 (1994)。
- [10] 馬原保典：地下水年代決定法の検討(その 2)—トリウム・ヘリウム-3 測定法の原位置への適用性—。電中研研究報告 U90050 (1990)。
- [11] 馬原保典：溶存希ガスを用いた地下水年代測定法の開発—溶存希ガス地下水調査法の体系化—。電中研研究報告 U97052 (1998)。
- [12] 馬原保典 他：地球化学的手法を用いた地下水流動調査法の提案—六ヶ所サイトにおける地下水流動特性の把握—。電中研研究報告 U95044 (1996)。
- [13] 馬原保典 他：天然溶存希ガスを用いた地下水調査法の提案(その 2)—水中 α トラック法を用いた溶存ラドン測定による地下水流れの検出—。電中研研究

- 報告 U95039 (1996).
- [14] 木村重彦: 水に含まれる放射性同位体による地中水の挙動解析. 農業土木試験場報告, **25** (1986).
- [15] 宮川公雄, 田中靖治, 田中和広: 水みち推定を目的としたフローメーター検層の適用性評価. 電中研研究報告 U96047 (1997).
- [16] 河西基: 応用地質 Q&A. 応用地質 **33**(3), 48-49 (1992).
- [17] 建設省: 建設大臣技術評価書, No. 83401, No. 83402, No. 83403 (1984).
- [18] 河西基, 小松田精吉, 平田洋一: 電位差方式連続型地下水流向流速計の開発. 第30回水理講演会論文集, pp. 337-342 (1986).
- [19] 河西基 他: 単一孔における地下水流向流速の測定と流れの特性. 日本地下水学会 1993 年秋季講演会 pp.158-163 (1993).
- [20] 河西基 他: 東濃鉱山における花崗岩の断裂系の特性調査と岩盤評価-岩盤割れ目系における地下水流動調査への単一孔式微流速・流向計の適用(その 1). 電中研研究報告 U88014 (1988).
- [21] 宮川公雄, 田中靖治, 田中和広: トモグラフィ-データを用いた物性値の空間分布の推定. 第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.321-325 (1996).
- [22] (財)電力中央研究所: 地下の探査・可視化技術. 電中研レビュー, **35** (1997).
- [23] Huyakorn, P.S., Lester, B.H. and Faust, C.R.: Finite element techniques for modeling groundwater flow in fractured aquifers. *Water Resour. Res.*, **19**(4), 1019-1035 (1983).
- [24] 河西基, 田中靖治, 五十嵐敏文: 高レベル放射性廃棄物地層処分の天然バリア性能評価手法の開発(その 1)-割れ目系岩盤中の地下水流動解析手法-. 電中研研究報告 U93054 (1993).
- [25] 重野喜政, 宮川公雄: 地下水流動・物質移行解析における割れ目ネットワークモデルの現状と課題. 電中研研究報告 U95009 (1995).
- [26] Oda, M.: An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses. *Water Resour. Res.*, **22**(13), 1845-1856 (1986).
- [27] Bear, J.: *Dynamics of Fluids in Porous Media*. American Elsevier, pp.19-21 (1972).
- [28] 例えば, 大西有三 他: 不連続性岩盤における浸透流と核種移行の有限要素解析. 第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.191-195 (1985).
- [29] 渡辺邦夫, 佐藤邦明: Double porosity model を導入した岩盤浸透流研究. 第24回水理講演会論文集, pp.115-120 (1980).
- [30] 田中靖治 他: 透水係数の空間分布を考慮した確率論に基づく地下水流動解析手法の開発. 電中研研究報告 U94024 (1994).
- [31] Kobayashi, A. et al.: Analyses of LPT2 in the Äspö HRL with continuous anisotropic heterogeneous model. SKB ICR 94-07 (1994).
- [32] Long, J. C. S., Remer, J. S. and Wilson, C. R.: Porous media equivalents for network of discontinuous fractures. *Water Resour. Res.*, **18**(3), 645-658 (1982).
- [33] Dershowitz, W. S., Wallmann, P. and Kindred, S.: Discrete fracture modeling for the Stripa site characterization and validation drift inflow predictions. SKB Stripa Project TR 91-16 (1991).
- [34] Herbert, A., Gale, J., Lanyon, G. and MacLeod, R.: Modeling for the Stripa site characterization and validation drift inflow; Prediction of flow through fractured rock. SKB Stripa Project TR 91-35 (1991).
- [35] Cacas, M. C. et al.: Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network; Calibration and validation 1. The flow model. *Water Resour. Res.*, **26**(3), 479-489 (1990a).
- [36] Cacas, M. C. et al.: Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network; Calibration and validation 2. The transport model. *Water Resour. Res.*, **26**(3), pp.491-500 (1990b).
- [37] 水戸義忠 他: 節理性岩盤における 3 次元浸透流解析システムの提案. 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.496-500 (1993).
- [38] 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)-解析の考え方-. 応用地質, **35**(3), 26-33 (1994).
- [39] 菊地宏吉, 水戸義忠, 本多真: 節理分布性状の確率統計学的モデル化に関する研究(その 1)-対象領域の区分と節理母集回の節理群への区分-. 応用地質, **33**(4), 26-33 (1992).
- [40] 五十嵐敏文 他: スウェーデン・ハードロック地下研究施設における高レベル廃棄物処分のための国際共同研究(その 2)-長期揚水・トレーサ移行実験に対する 3 次元スメアード割れ目モデルの適用-. 電中研研究報告 U94054 (1995).
- [41] Tanaka, Y. et al.: Application of three-dimensional smeared fracture model to the hydraulic Impact of Äspö tunnel. SKB-ICR, 96-07 (1996).
- [42] 内田雅大, 澤田淳: 亀裂ネットワーク水理物質移行モデルの開発. 動燃技法, No.90, pp.74-82 (1994).
- [43] 宮川公雄: スウェーデン・ハードロック地下研究施設における高レベル廃棄物処分のための国際共同研究(その 1)-事前調査期のサイト特性調査の考え方とその手法-. 電中研研究報告 U94005(1994).