

深地層を対象とした地下水の地球化学調査の現状†

岩月輝希^{††} 豊嶋賢治^{††} 吉田英一^{††}

岐阜県東濃地域において、深度 1,000m までの地下水の地球化学特性を体系的に把握するため、調査機器の開発と既存の調査機器の適用性評価および得られた地球化学特性データに基づき、深部地下水の水質形成機構や酸化還元電位などに関して解析手法の検討を行った。地下深部の地球化学特性データを取得するための調査技術に関しては、① 現存の技術と東濃地科学センターで開発された調査技術を併用することで、深部地下水の水質の把握が可能である。② 地下水の酸化還元電位測定技術については、調査坑道での測定技術が確立されており、調査解析が行われている。表層からの試錐孔を用いた調査については機器の開発が終了しており、今後の調査により花崗岩深部の酸化還元状態が明らかになるものと予想される。得られたデータに基づく解析手法に関しては、割れ目帯などの地下水流動経路の調査、割れ目表面鉱物の変質状態の観察、各種同位体を用いた地下水の起源の推定、鉱物の飽和平衡状態の計算、マスバランスに基づく解析などを併用することで、地下水の水質形成機構を定量的に解釈することが可能である。

Key words: 地下水, 地球化学調査, 調査機器, 物理化学パラメータ, 水質形成機構

The development of equipment for sampling and the evaluation of existing technology of in-situ physicochemical parameter for the geochemical investigation of deep groundwater carried out to understand the realistic geochemistry of deep geological environment at Tono area, Japan. The chemical and isotopic composition of deep groundwater to approx. 840m depth has been determined using existing and established techniques. The redox condition of groundwater in the deep granite at approx. 180m depth are monitored using developed equipment. The analysis of water-rock interaction in relation to hydrology, geological structure and mineral saturation indexes, and the analysis of chemical composition using mass balance are available to understand the groundwater evolution.

Key words: groundwater, geochemical investigation, equipment, physico-chemical parameter, groundwater evolution

1 はじめに

動燃・東濃地科学センターでは、地下水の地球化学特性の調査手法を確立し、地下水の地球化学的性質とその 3 次元的分布を把握することを目的として、深度約 1,000m までの調査機器の開発[1]および既存の調査機器の適用性評価、得られたデータに基づく解析を行っている。

地下深部の地球化学環境の調査では、以下の手法が基本となる(図 1)。

- ① 表層での調査および試錐孔を用いた調査による地下深部の地球化学データの取得(データセットの作成)。
- ② 水質形成機構や地下深部の酸化還元電位に関する地球化学モデルの構築。
- ③ 地球化学モデルの妥当性の確認。

地下水の地球化学データの取得に関しては、試錐孔掘削による影響を可能な限り避けるため清水を用いた試錐孔掘削、調査項目に応じた地下水の採水、分析が不可欠である。したがって、信頼性の高い地下水の地球化学データを取得するには、試錐孔掘削技術、地下水採水技術、物理化学パラメータの測定技術などについて、既存の技術の適用性の確認を行うとともに、新たに調査技術を開発する必要がある。

また、データセットに基づく地球化学モデルの構築に関

しては、酸化還元電位などの物理化学特性の分布に関するモデル、地下水の水質形成機構に関するモデルなどを構築する必要がある。このような、地球化学モデルの構築には、地下水の物理化学パラメータ、化学組成などの地下水の地球化学特性データだけでなく、地質、岩石に関する地質構造データ、鉱物特性データ、地下水流動経路などに関する水理データなども必要である。これらの情報を基に、より現実に近い地球化学モデルが構築できる。

本稿では、体系的調査手法の例として、岐阜県東濃地域で行われている深部地下水調査のうち、地球化学調査に関する調査技術とその適用性および調査解析の現状について報告する。なお、地下水流動調査などを含む深部地下水の調査の概要については、本特集の「小出 他, 深地層を対象とした地下水調査・解析手法の現状」に示している。

2 調査技術の現状

深部地下水の地球化学特性を把握するためには、地層中に本来存在している地下水(以下地層水と呼ぶ)を騒乱することなく採取する技術の確立が重要である。従来のような試錐孔全体を利用した採水方法では、地層水の混合や、試錐孔掘削時に試錐ロッドと岩石の摩擦を軽減するために用いる掘削水の混入が避けられない。また、地下水の物理化学パラメータの中には、大気と接触することによってパラメータ値が変化するものがある。このため、掘削水の混入や大気との接触のない地層水を採取し、信頼性の高いデータを取得するためには、採水地点の掘削水を除去した上で地層水のみを採水すること、大気に触れることなく物

† Investigatoion Technology and Approaches for the Deep Groundwater Geochemistry, by Teruki Iwatsuki (iwatsuki@tono.pnc.go.jp), Kenji Teshima and Hidekazu Yoshida

†† 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 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31

理化学パラメータの測定を行うことなど、調査項目に応じて採水方法や測定方法、分析方法などへの配慮が必要である。これらの課題を解決して東濃地科学センターで使用されている調査機器および東濃地科学センターで開発中の調査機器について、幾つかの例を紹介する(表1,図2)。

2.1 採水装置

以下に示す調査機器は既存の調査機器で、その現場適用性を確認したのち、実際の現場調査で使用されているもの、あるいは新規に開発され現場における性能試験を終了した装置である。

2.1.1 パッカー式地下水サンプラー

従来の試錐孔全体を利用したつるべ式の採水方法では、掘削水の混入や地層水の混合を避けることができない。パッカー式地下水サンプラーは、試錐孔内において採水区間の上下をパッカー(遮水性能を有する風船状の硬質ゴム)で区切ることによって、任意の深度から地下水を採取できるよう開発された装置である(図3)[2]。本装置は、スウェーデンBAT社が開発したBAT式地下水モニターシステム(両端針を用いて採水・測定を行うシステム)に遮水用のラバーパッカーを組み合わせたものである。地下水が存在していた環境を保持した状態(被圧・不活性状態)で地下水を採取でき、国内特許を取得している。装置は、1) 試錐孔内の採水区間を区切る上下パッカー部分、2) 採水区間から地下水を採取し、地上へ回収する部分(地下水サンプラー)、3) 昇降装置、から構成されている。地下水の採水

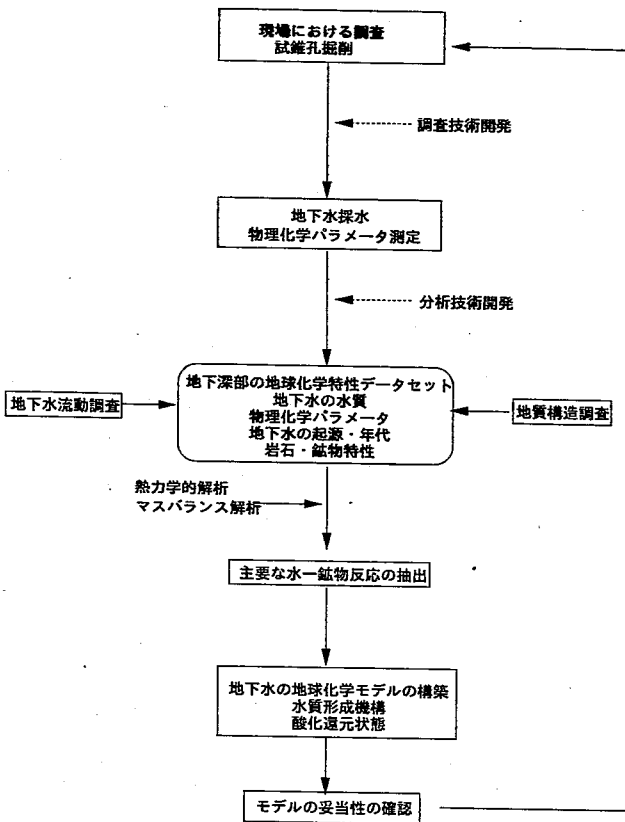


図1 深部地下環境の地球化学的調査手法の考え方

表1 地下水の地球化学調査機器の現状

| 調査機器 | 物理化学パラメータ | | | | | | 機能 | | 採水区間 | 調査実施箇所 | 測定可能深度 (m) | 使用温度環境 (°C) | 使用可能試錐孔径 (mm) |
|----------------------------|-----------|-------|----|--------|--------|----------|------|--------|------|-------------|------------|-------------|---------------|
| | 水温 | 電気伝導度 | pH | 酸化還元電位 | 溶存酸素濃度 | 硫化物イオン濃度 | 連続採水 | パッチ式採水 | | | | | |
| パッカー式地下水サンプラー | - | - | - | - | - | - | - | ○ | 一区間 | 地表・坑道からの試錐孔 | ~500 | - | 76~140 |
| MPシステム | - | - | - | - | - | - | - | ○ | 多区間 | 地表からの試錐孔 | ~1,000** | - | - |
| 1,000m対応地下水の地球化学調査機器 | | | | | | | | | | | | | |
| 採水装置 | - | - | - | - | - | - | - | ○ | 一区間* | 地表からの試錐孔 | ~1,000 | ~50 | 76~140 |
| 地球化学検層ユニット | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | - | - | - | 地表からの試錐孔 | - | ~50 | 76~140 |
| 1,000m対応地下水の地球化学調査機器 (高温型) | | | | | | | | | | | | | |
| 採水装置 | - | - | - | - | - | - | - | ○ | 一区間* | 地表からの試錐孔 | ~1,000 | ~70 | 76~140 |
| 地球化学検層ユニット | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | - | - | - | 地表からの試錐孔 | - | ~70 | 76~140 |
| 水質連続モニタリング装置 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | - | - | 坑道からの試錐孔 | - | - | - |

*採水終了後、何度でも深度変更可能。

**日本での設置例。イギリスでは深度1,500m程度まで設置した例がある。

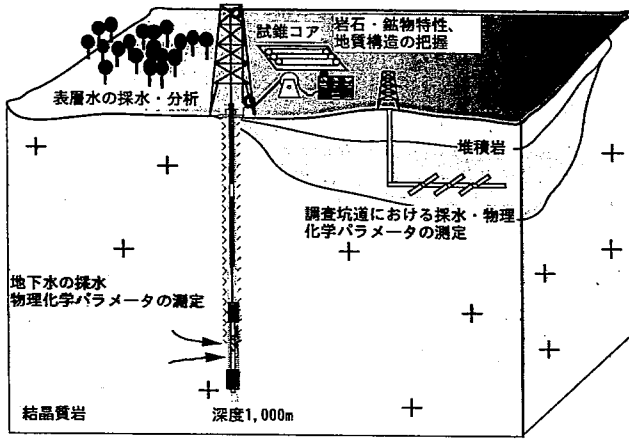


図2 深部地下水の地球化学調査の概要

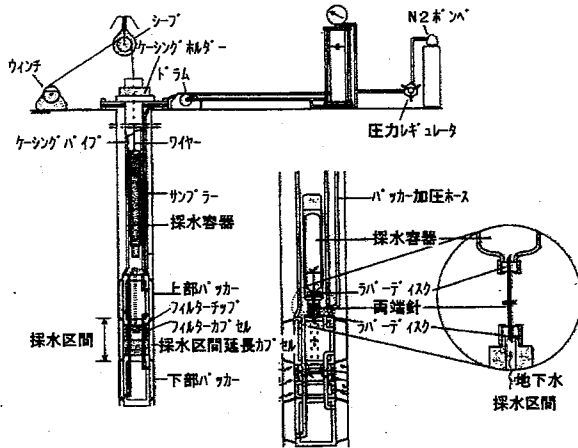


図3 パッカー式地下水サンプラーの構造

区間は、0.5m から3m の間で0.5m 毎に任意に設定することができる。地下水サンプラーには容量 500ml のステンレス製ボトルを用いており、深度 500m までの採水に適用可能である。この装置を用いた採水においては、予備採水終了の判断基準が重要であり、地層水の化学組成が一定であるとの仮定に基づいて、採取した試料水の物理化学パラメータ値および主要化学成分濃度が、採水量とともに一定の値に達した時点で、採水区間が地層水と完全に置き変わったと判断している。実際に値が一定になるかどうか検討するために、採取した試料水について上記のパラメータなどを連続測定した結果、採水区間の 5 倍程度採水すると、ほぼ一定の値が得られることが明らかになった。また、予備採水の途中で取得したデータから、2 成分混合モデルにより計算される地層水の値と予備採水終了後の地層水の値が一致することから、試錐孔崩壊などの理由により予備採水の途中で採水が困難となった場合でも、2 成分混合モデルにより地層水の化学組成を推定することが可能である [3,4]。

MP システム

ワイヤおよび水圧表示部

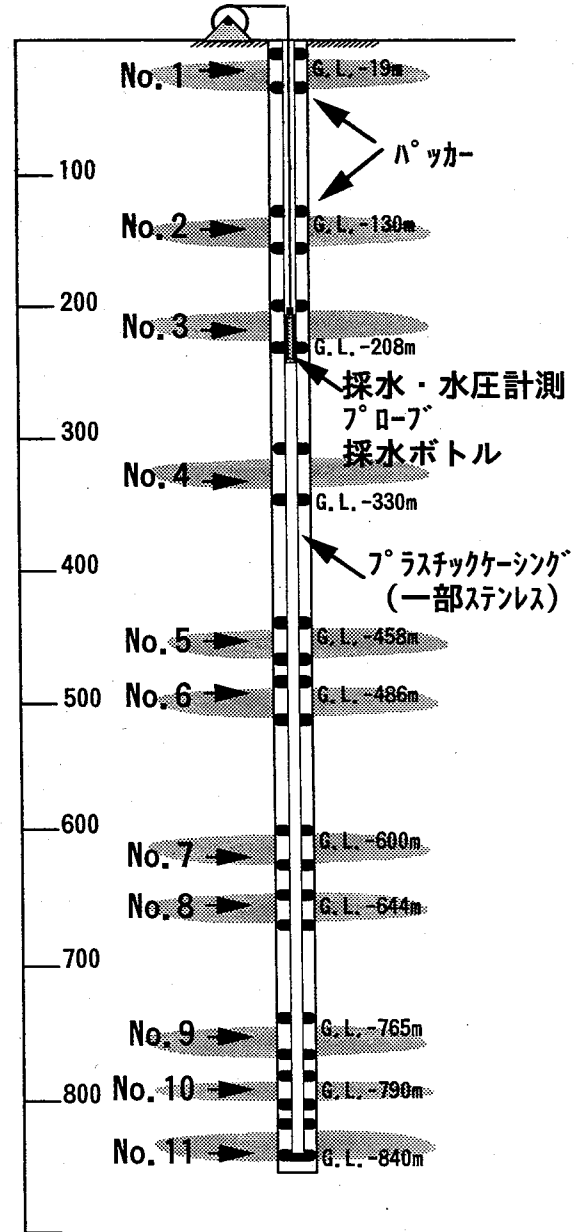


図4 東濃地域における MP システムによる地下水採水例

2.1.2 MP システム

MP(Multiple Piezometer)システムは、カナダにおいて開発された地下水モニタリングシステムで、試錐孔内に複数のパッカーを設置することによって、多区間での水圧計測および地下水採取が可能となるシステムである(図4)。本システムは、1) 1本の試錐孔内で同時に多数の測定・採水区間を設定できる、2) 各区間における間隙水圧や透水係数の測定および採水が可能である、3) 被圧・不活性状態を保存したままの地下水採水が可能である、などの特長がある

[5]. 装置のケーシングは、硬質プラスチックあるいはステンレスで形成されており、水圧計測プローブを定点設置することにより、複数の任意区間の水圧を連続的にモニターすることができる。また、採水プローブを用いて500mlの採水ボトル(250ml×2本)に、バッチ式採水ができる。予備採水では、採水区間の排水ポートを開け、採水区間とケーシング内を連結し、つるべによる連続排水が可能である。国内では、深度200m程度までの設置例が多数あり、岐阜県東濃地域においては、深度840m(約84kgf/cm²)までの温度や水圧などの定常測定、地下水採水を行った例がある。国外では、イギリスのシェラフィールドにおいて深度1,500m程度までの適用例がある。

2.1.3 1,000m 対応地下水の地球化学調査機器

この装置は図5に示すように、採水を行う深度1,000m対応の採水装置と物理化学パラメータの測定を行う地球化学検層ユニット(2.2.2で述べる。)からなり、1) 試験孔の調査区間内に残留する掘削水を迅速に除去して地層水に置換した上で、原位置における地下水のpH、酸化還元電位、電気伝導度などの物理化学パラメータの測定、および大気と全く接触させずに被圧状態での地下水の採水が可能であること、2) 深度1,000mまでの温度条件(日本の平均地温勾配(約3℃/100m)から推定すると地上部付近の地下水温度+30℃となる)および水圧100kgf/cm²の条件に耐え得る構造であること、3) 選定した調査深度に確実に装置を設置するために、材料の伸びなどに起因する深度誤差を低減すること等を基本概念として開発されたものであり、深度1,000mまでの地下水採水と物理化学パラメータの原位置での測定が可能である[6]。装置は地上部、中継部、孔内部から構成されており、地上部は電源部とデータ収録装置から、中継部、孔内部はそれぞれケーシングパイプ、複合ケーブル、パッカーシステムおよび孔内システムなどから構成されている。現場における本装置の適用試験の結果、以下の様なデータが得られている。

- 1) 間隙水圧 92Mpa の条件下で、平均採水速度 47ml/分 (ポンプ式採水)で採水が可能(表2)。
- 2) 前記の間隙水圧条件下でパッカーが十分な遮水性能を有している。
- 3) 水温 35℃、間隙水圧 92Mpa の環境条件下で孔内部が確実に制御でき、正常にデータを表示・収録できる[7, 8]。

適用試験においては、深度1,000mまでの調査機能・性能が確認されている。

2.2 物理化学パラメータ測定機器

2.2.1 地下水水質連続モニタリング装置

地下水の物理化学パラメータ値は、地下水を大気に開放して測定した場合、大気中の酸素や二酸化炭素の影響に

表2 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 | 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 (ℓ/h) |
| バッチ式採水量 | 15 (ℓ) (30回分) |

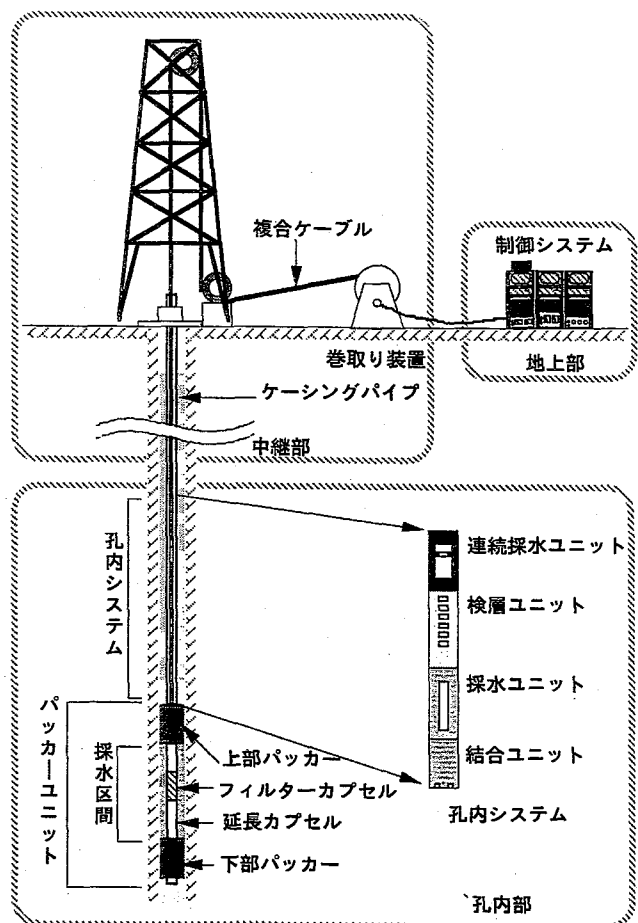


図5 1,000m 対応地下水の地球化学特性調査機器の概念図

よって変化する。特に、地下水の酸化還元電位は、測定ともなう様々な因子(大気、共存イオン、測定電極の種類、測定時間など)によって影響を受けるため、信頼性の高い測定値を得ることは容易ではない。この課題を解決するために、地下水を大気に触れさせずに、酸化還元電位を含め物理化学パラメータ(電気伝導度、pH、溶存酸素濃度、水温)を連続的に測定できる水質連続モニタリング装置を開

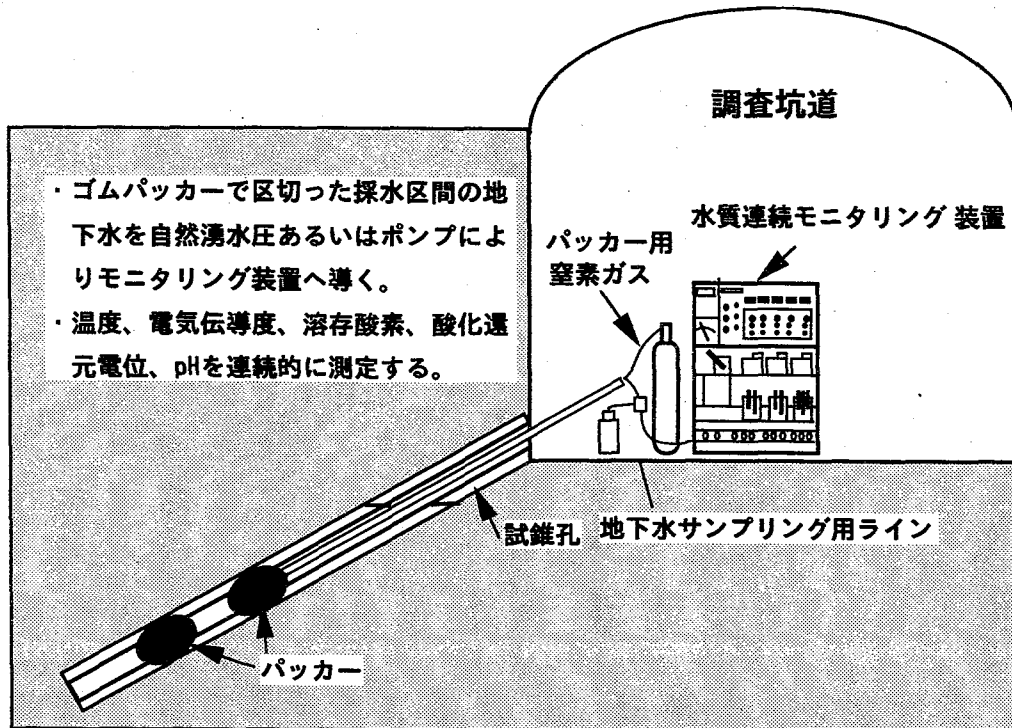


図6 地下水水質連続モニタリング装置の概念図

した。装置は、地下水との反応性が低いアクリル性のフローセル構造を有しており、各パラメータ測定用の電極を備えている。特に、地下水の酸化還元電位測定に2種類の金属電極(金、白金)を、参照電極に甘こう電極を用いている。この装置を用いた物理化学パラメータの測定では、一定流量で地下水が電極に供給されることが必要であり、定流量ポンプで地下水を汲み上げられること、あるいは自然湧水により地下水が絶えず得られることが必要である。そのため、この装置は、湧水が得られ易く、周囲の温度環境が決して氷点下にならない坑道において、坑道から掘削された試錐孔を対象に用いた(図6)。

現場における性能試験により信頼性のあるデータ取得するために、東濃鉱山調査坑道内に掘削した試錐孔からの湧水を対象として、酸化還元電位を含めた物理化学パラメータ(電気伝導度、pH、溶存酸素濃度、水温)が約1年間連続的に計測されている。また、地下水の水質などから理論的に酸化還元電位を推定し、実測値と比較することにより、実測値の妥当性が確認されている[9,10]。

2.2.2 地球化学検層ユニット

地球化学検層ユニットは、1,000m 対応地下水採水装置と連結して使用する装置である。1,000m 対応地下水採水装置を用いた予備採水の過程で、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)を測定すると同時

に、予備採水終了後はパッカー式地下水サンプラーやMPシステム、地下水水質連続モニタリング装置では測定することのできない深度1,000mまでの地下水の原位置物理化学パラメータを測定できる機能を備えている(表3)。物理化学パラメータの測定では、採水装置により採水区間の地下水を連続的に地球化学検層ユニットに供給することにより、物理化学パラメータのモニタリングが可能である。

岐阜県東濃地域の土岐花崗岩に掘削された試錐孔において、装置の機能を確認するために現場試験を実施した。この試験では、深度966~973mにおいて地下水の連続採水を行い、物理化学パラメーターの連続測定を行った(図7)。この例では、連続採水量が150Lを越えた時点より、pH、電気伝導度とも安定する傾向を示した。連続採水量の150L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倍程度の連続採水を必要とした報告事例[3,4]とよく一致した。このことから、装置が備える物理化学パラメーターの計測機能により、採水区間中の水が地層水に置換されたか否かが判断可能である。

3 地球化学調査の現状

東濃地域の土岐花崗岩には、これまでに5本の試錐孔(深度500m×3本、深度840m×1本、深度1,000m×1本:図8)が掘削されており、上記調査機器を用いた地球化学調査

が行われている。地下水の地球化学特性データとして、パッカー式地下水サンプラーとMPシステムを用いて2本の試験錐孔(DH-3; 840m までの7地点, DH-4 号孔; 深度 186m)で、地下水を採取した結果を示した(表 4)。

地下水は弱アルカリ性で、総溶存成分濃度が 150mg/l 以下という特徴を持つ。水質は、深度 208m, 330m, 486m 地点で、他の成分に比べて Na, Ca, HCO₃ に富み、深度 644m, 790m, 深度 840m 地点で Na, HCO₃ に富む。深度

186m 地点の地下水は中性で、Na, Ca, HCO₃ の他に Fe²⁺ イオンに富む。地下水の水質は、深度に依存しており、深度 500m 付近までは Na, Ca, HCO₃ に富む水質であり、深度 500m 以深では Na, HCO₃ に富む水質になる傾向がある [11]。これは、日本全国の深部地下水の水質が持つ一般的な傾向と一致する [12]。

また、東濃鉱山調査坑道から掘削された試験錐孔において、深度 180m 付近の花崗岩中の地下水を対象にして、地下水

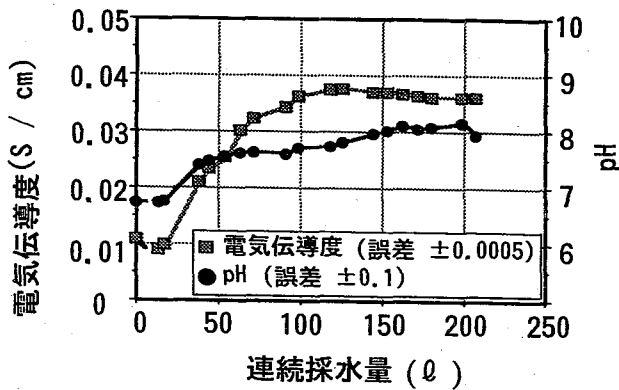
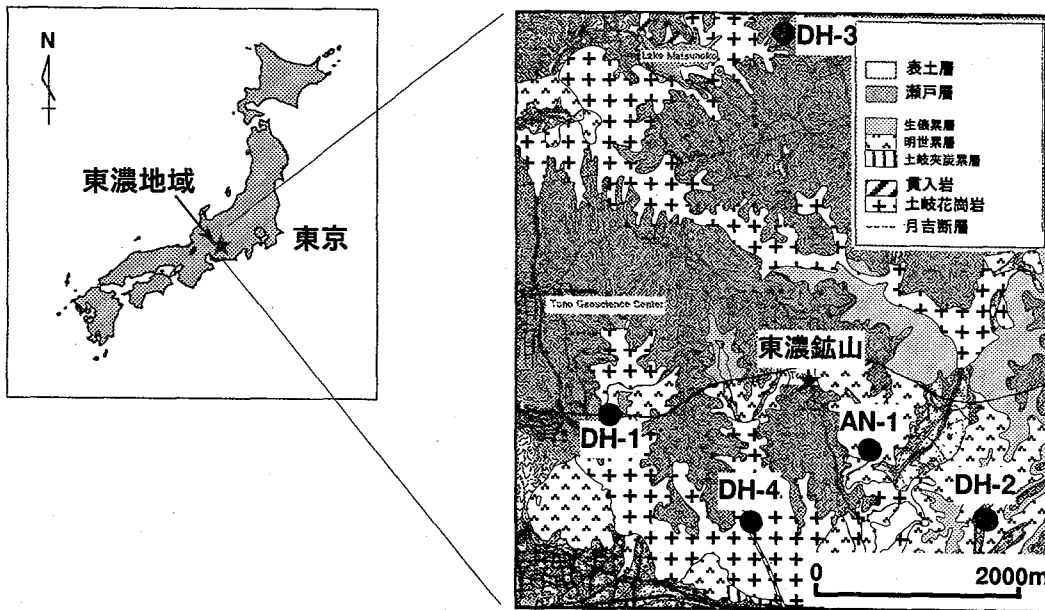


図 7 物理化学パラメータの計測結果

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

| | |
|----------|--|
| 適応深度 | G.L.-1,000 (m) |
| 適応孔径 | φ75~130 (mm) |
| 耐温度性能 | 0~50 (°C) |
| 地下水位低下限界 | G.L.-300 (m) |
| 挿入方式 | パッカーユニット：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 ℓ/h 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 パッカー水圧, 採水容器内圧力 |



DH-1: 500m DH-3: 840m AN-1: 1000m
DH-2: 500m DH-4: 500m

図 8 岐阜県東濃地域における試験錐孔掘削位置

表4 岐阜県東濃地域の深部花崗岩中の地下水の地球化学特性(調査例)

| サンプリング地点 | 表層水 | DH-4 | DH-3 | DH-3 | DH-3 | DH-3 | DH-3 | DH-3 | DH-3 | 単位 |
|-------------------------------|-------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| 採水方法 | — | ハッカー式サンプラー | MPシステム | MPシステム | MPシステム | MPシステム | MPシステム | MPシステム | MPシステム | |
| 深度 (G.L.-m) | 0 | -186 | -208 | -330 | -486 | -608 | -644 | -790 | -840 | (G.L.-m) |
| pH | 6.2 | 6.8 | 9.7 | 8.9 | 9.7 | 9.8 | 9.6 | 9.0 | 9.3 | (ppm) |
| Si | 5.96 | 5.60 | 8.23 | 13.8 | 2.47 | 6.08 | 5.62 | 4.05 | 5.53 | (ppm) |
| Ti | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | (ppm) |
| Al | 0.16 | <0.02 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | (ppm) |
| Fe ²⁺ | <0.05 | 9.34 | <0.05 | <0.05 | <0.05 | <0.05 | <0.05 | <0.05 | <0.05 | (ppm) |
| Fe ³⁺ | <0.05 | <0.05 | <0.05 | <0.05 | <0.05 | <0.05 | <0.05 | <0.05 | <0.05 | (ppm) |
| ΣFe | 0.20 | 9.34 | <0.02 | 0.06 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | <0.02 | <0.02 | (ppm) |
| Mn | 0.76 | 0.77 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | (ppm) |
| Mg ²⁺ | 0.18 | 1.88 | 0.14 | 0.12 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.19 | 0.05 | (ppm) |
| Ca ²⁺ | 1.04 | 17.6 | 16.0 | 12.2 | 9.60 | 4.22 | 4.09 | 4.68 | 3.72 | (ppm) |
| Sr ²⁺ | <0.01 | 0.11 | 0.12 | 0.12 | 0.10 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | (ppm) |
| Na ⁺ | 12.3 | 13.3 | 8.2 | 11.6 | 19.5 | 39.5 | 36.5 | 36 | 39.5 | (ppm) |
| K ⁺ | 10.1 | 6.13 | 3.45 | 0.93 | 1.60 | 1.02 | 1.15 | 1.15 | 0.80 | (ppm) |
| F ⁻ | 0.17 | 4.99 | 1.99 | 4.09 | 3.45 | 11.41 | 10.91 | 8.92 | 9.73 | (ppm) |
| Cl ⁻ | 1.43 | 2.74 | 2.30 | 3.69 | 4.16 | 3.24 | 3.48 | 3.87 | 3.11 | (ppm) |
| NO ₂ ⁻ | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | (ppm) |
| PO ₄ ⁻ | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | 0.08 | 0.17 | 0.19 | <0.02 | <0.02 | (ppm) |
| Br ⁻ | <0.02 | 0.08 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | 0.04 | (ppm) |
| NO ₃ ⁻ | 0.08 | 0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | (ppm) |
| SO ₄ ²⁻ | 1.37 | 0.09 | 2.27 | 6.66 | 12.7 | 8.32 | 9.10 | 6.84 | 6.21 | (ppm) |
| TC | 47.0 | n.m. | 14.0 | 11.8 | 20.4 | 13.8 | 15.6 | 19.3 | 14.0 | (ppm) |
| IC | 8.42 | n.m. | 12.0 | 9.23 | 7.9 | 10.7 | 13.6 | 16.2 | 13.5 | (ppm) |
| TOC | 38.6 | n.m. | 1.99 | 2.61 | 7.90 | 3.10 | 2.38 | 3.11 | 0.50 | (ppm) |
| NPOC | 35.9 | n.m. | 1.97 | 109 | 10.1 | 2.10 | 2.40 | 3.01 | 4.60 | (ppm) |
| δD | -51.7 | -52.5 | -53.7 | -53.6 | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | -53.2 | (‰) |
| δ ¹⁸ O | -8.1 | -8.0 | -8.2 | -8.3 | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | -8.0 | (‰) |
| トリチウム | n.m. | 4.6 | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | (TU) |

n.m. = 未測定

表5 地下水の酸化還元電位測定

| 深度180m付近 | 花崗岩 |
|-------------------------------|---------|
| pH | 8.3 |
| Eh | 0 mV |
| EC | 177 |
| Temp. | 18.9 °C |
| DO | 0 mg/l |
| Fe ²⁺ | <0.05 |
| Fe ³⁺ | <0.05 |
| Mn | <0.01 |
| NO ₃ ⁻ | <0.02 |
| SO ₄ ²⁻ | 0.17 |
| HS ⁻ * | - ppm |

* HS⁻は S²⁻ 濃度から計算した。

を大気に触れることなく採取し、地下水水質連続モニタリング装置により酸化還元電位やpH等の物理化学パラメータを数ヶ月間連続的に測定した結果、表5のような結果を得ている。

得られた地下水水質データから、深部地下水の水質形成機構、酸化還元電位を決めるメカニズムに関して以下の調査解析を並行して行い[11,13-15]、地球化学モデルの構築を行っている。

3.1 岩芯観察

各試錐孔から得られた岩石試料を用いて、地下水の流動経路と成りうる割れ目や割れ目帯の分布を把握するための、岩相、強度、割れ目頻度、変質状態、割れ目充填鉱物などに着目したコアスケッチ、および地下水の水質形成に関与している鉱物を明らかにするための鉱物表面の溶解、沈殿跡の微視的観察を行った結果、花崗岩中に緑色変質を伴う割れ目帯、白色変質を伴う割れ目帯が存在すること、

割れ目帯中の鉱物の表面に水-鉱物反応によりエッチピット構造が生じていることが判明した。

3.2 鉱物の飽和指数の計算

地球化学計算コード(PHREEQE, [16]) を用いて、化学平衡論に基づいて鉱物の地下水に対する飽和指数の計算を行い、各々の鉱物の地下水-鉱物反応が未飽和状態、飽和平衡状態、過飽和状態のいずれの状態にあるかを推定した結果、石英、方解石、蛍石が地下水に対しほぼ平衡状態にあり、長石類、カナイト等が地下水に溶解する傾向があることがわかった。

3.3 水質形成機構の推定

鉱物の飽和指数、鉱物の微視的観察、溶存成分のマスマランスに基づく解析から、花崗岩上部では長石類、方解石の溶解反応が、花崗岩深部では割れ目充填鉱物と地下水間のイオン交換反応が、水質形成に寄与する主要な反応であると推定できた。

3.4 深部地下環境の酸化還元状態の推定

鉱物の微視的観察、熱力学的解析から、深度 180m 付近の地下水の酸化還元電位に寄与する反応として、鉄の化学種の酸化還元反応が挙げられる。なお、この地点では地下水中のコロイド/有機物、微生物に関する研究も行っており、それらが地下水の酸化還元電位に与える影響については、現在調査中である。

3.5 地球化学モデルの構築

岐阜県東濃地域の深部結晶質岩の地球化学的環境は、図 9 のように表わされる。地下深部の地球化学特性は、岩相や地質構造に大きく依存しており、その調査においては、地質構造と地下水の地球科学特性を 3 次元的に把握していく手法が重要となる。

4 まとめ

本稿では、主に調査技術、手法の現状および調査結果について述べた。地下深部の地球化学特性データを取得するための調査技術については、現存の技術と東濃地科学センターで開発された調査技術を併用することで、深部地下水の水質の把握が可能である。また、得られたデータに基づいた深部地下水の水質形成機構を把握するための解析に関しては、割れ目帯などの地下水流動経路の調査、割れ目表面鉱物の変質状態の観察、各種同位体を用いた地下水の起源の推定、鉱物の飽和平衡状態の計算、マスマランスに基づく解析などを組み合わせて適用することにより定量的な解釈が可能である。地下環境の酸化還元状態を把握するための調査解析に関しては、調査坑道からの調査技術が確立している。今後、深度 1,000m 対応地下水の地球化学調査機器(採水装置・地球化学検層ユニット)による原位置での物理化学パラメータ測定が軌道に乗ることにより、表層からの試錐孔を用いて深部地下環境の酸化還元状態を明らかにしていくことができると考えられる。

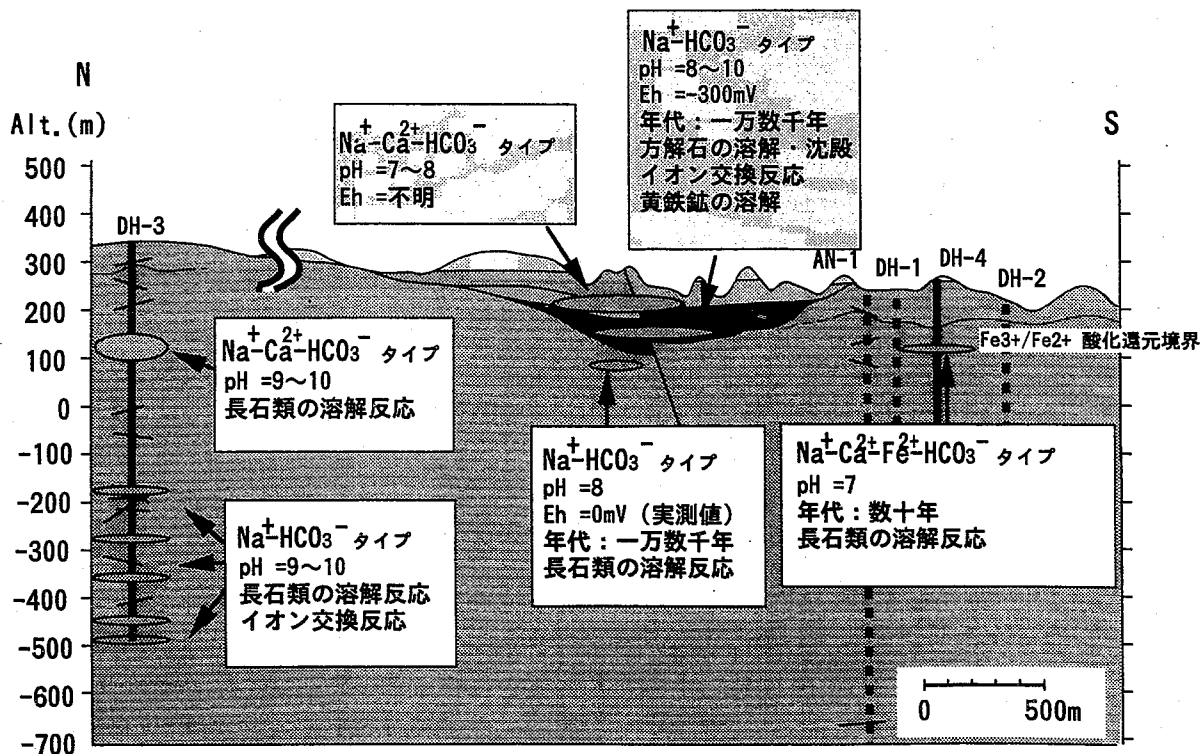


図 9 東濃地域における地下水の地球化学特性

参考文献

- [1] 中野勝志 他：水理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, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN1410 96-071, pp. 288-289 (1996).
- [2] 柳澤孝一 他：パッカー式地下水サンプラーの開発, 日本地下水学会 1991 年度秋季講演会要旨集, 沖縄宮古島, 平成 3 年 10 月 23-26 日, pp. 204-207 (1991).
- [3] 濱克宏 他：東濃地域における深部地下水の地球化学的研究, 日本原子力学会 1993 年春の年会予稿集, 京都大学, 平成 5 年 3 月 27-29 日, p. 416 (1993).
- [4] Hama, K. et al.: A sampling procedure of formation water and its application to geochemical investigation of groundwater in the Tono area, Japan, *Proc. the OECD/NEA SEDE CLAY CLUB Workshop England*, pp. 213-216, British Geological Survey, keyworth Nottingham, June 6, 1994.
- [5] Black, W.H., Smith, H.R., Patton, F.D.: Multiple level groundwater monitoring with the MP system, *Proc. NWWA-AGU Conf. on Surface and Borehole Geophysical Methods and Groundwater Instrumentation*, pp. 41-61 (1986).
- [6] 濱克宏 他：地球化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, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN1410 96-071, pp. 299-301 (1996).
- [7] 中野勝志 他, 深度 1,000m 対応地下水調査機器の開発, 動燃技報 No.102, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN1340 97-002, pp.47-52 (1997).
- [8] 濱克宏 他：1,000m 対応採水装置の開発, 日本地下水学会 1995 年秋季講演会要旨, 同志社大学, 平成 7 年 10 月 25 日, pp. 20-25 (1995).
- [9] 岩月輝希 他：東濃地域における地下水の地球化学的研究—地下水の硫黄濃度と酸化還元電位について—, 日本原子力学会中部支部第 25 会研究発表会講演予稿集, 核融合科学研究所, 平成 5 年 12 月 6 日, p. 10 (1993).
- [10] 根山敦史 他：実測された地下水 Eh の地球化学モデルによる評価, 日本原子力学会 1990 年秋の大会予稿集, 東北大学, 平成 2 年 10 月 2-5 日, p. 720 (1990).
- [11] Iwatsuki, T., Yoshida, H.: Water-rock interaction analysis in relation to geological structure in deep crystalline rock at the Tono area, Japan, *Proc. Chemical Containment of Wastes in the geosphere*, British Geological Survey, keyworth Nottingham, September 3-4, 1996.
- [12] 瀬尾俊弘 他：我が国における地下水の水質に関するデータの収集・解析, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN7410 92-017(1992).
- [13] 岩月輝希 他：東濃地域における地下水の地球化学的研究, —化学平衡論に基づく水質形成機構のモデル化—, 1995 年度日本地球化学会要旨集, 静岡大学, 平成 7 年 11 月 10 日, p 94 (1995).
- [14] 岩月輝希 他：岐阜県東濃地域における深部地下水の酸化還元電位とその分布について, 1997 年日本原子力学会秋の年会予稿集, 沖縄, 平成 9 年 10 月 14-17 日 p. 687 (1997).
- [15] 岩月輝希 他：東濃地域における地下水の地球化学的研究, 動燃技報 No.102, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN1340 97-002, pp31-37 (1997).
- [16] Parkhurst, D. L., Thorstenson, D. C. and Plummer, L. N: PHREEQE -A Computer Program for Geochemical Calculations., U.S. Geological Survey. Water-Resources Investigations 80-96 (1980).