

# 地層処分事業に関わる地球化学分野の技術者が継承すべき知見のエキスパート化 —文献調査から精密調査段階における地球化学解析手順について—

岩月輝希\*1 水野崇\*1 國丸貴紀\*1 天野由記\*1 松崎達二\*1 仙波毅\*1

高レベル放射性廃棄物の地層処分は長期にわたって世代の異なるさまざまな技術者が関わる事業であり、その技術に関わる知見の継承やプロジェクト監理に関わる意思決定過程の追跡性を担保するための情報管理の仕組みが必要となる。筆者らは、地層処分に関わる地下深部の地質環境特性調査の手順、ノウハウ、留意点などの情報管理技術としてウェブ上で情報を利用（保管・閲覧）可能なエキスパートシステムを構築した。本報告では、その概要と、エキスパートシステムに収録した知見の一例として、文献調査から精密調査段階における地球化学解析の手順などについて述べる。

**Keywords:** 地層処分, 知識管理, エキスパートシステム, 地球化学調査・解析に関わるノウハウ

Various engineers from different generations are concerned in geological disposal project of high-level radioactive waste (HLW) over long time. It requires to manage information to ensure the traceability of the decision making process and the inheritance of technique involved in project management.

We developed an Expert system available on the Web to manage inheritable knowledge related to procedure, know-how and the notice of investigation techniques for deep geological environment. This report provides an overview of Expert system and the one of contents regarding hydrochemical modeling and the updating method in Literature survey stage ~ Detail investigation stage of geological disposal project.

**Keywords:** geological disposal of HLW, knowledge management, Expert system, know-how on hydrochemical investigation and modeling

## 1 はじめに

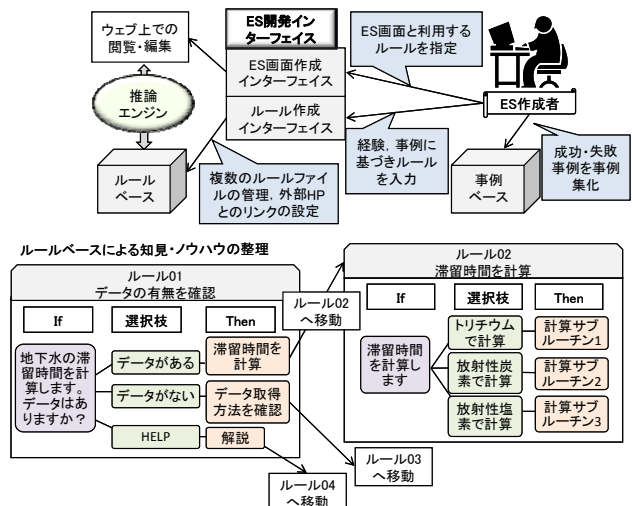
高レベル放射性廃棄物の地層処分事業では、文献調査から精密調査段階の地質環境調査において、既存情報の収集整理・予察的地質環境モデルの構築、調査計画の立案、地質環境調査の実施、調査結果に基づく地質環境モデルの更新といった作業が必要となる[1, 2]. これらの作業には長期にわたって分野・世代・経験の異なる多数の技術者・研究者が携わることになるため、その知見、経験、ノウハウおよび意思決定の考え方などを技術者・研究者間で継承していく知識管理の仕組みが不可欠となる。従来、このような経験則やノウハウは、経験者から未経験者への直接的な伝承、マニュアルや論文などによる間接的な伝達により引き継がれてきたが[3], 近年の情報管理技術の進歩とともに、コンピュータソフトウェアやインターネットを用いた知識管理が試みられつつある[4].

筆者らは、日本原子力研究開発機構（以下、JAEA）が岐阜県東濃地域、北海道幌延地域で進めてきた深部地質環境の調査技術開発を通して蓄積した知見や経験、国外の地層処分に関わる研究機関で得られた知見を事例集（以下、事例ベース）として整理し、それらから抽出できる汎用的な地質環境調査の経験則、ノウハウをウェブ上で利用できるシステムとして再構築してきた[5-8]. このシステムは複数の要素から構成されるが、とくに地質環境調査の計画立案、実施および評価を支援するシステムは、エキスパートシステム（Expert System, 以下、ES）として分野や個別調査ごとに作成している。

本報では、地質環境を理解するための地質調査や水文学的調査などさまざまな分野の ES のうち、とくに地球化学分野の技術者・研究者が参照、活用するために継承すべき知見、ノウハウについて ES 化した内容について述べる。この ES は地層処分事業が継続する限り、次世代の技術者・研究者により新たに得られる知見、経験、ノウハウを追加反映し、改良・高度化していくものであり、本報で示す内容はその原型（バージョン 0）として位置付けられる。

## 2 エキスパートシステムの概要と地球化学に関わるルールベース

筆者らが構築した ES は、調査研究の事例を整理した事例ベース、事例に基づいて汎用的な知見、経験則などを整理したルールベース、それらをウェブ上に公開、管理（編集・更新）するためのソフトウェア（ルール作成インターフェイス、ES 画面作成インターフェイス）などから構成される（Fig. 1）。このシステムでは、ウェブ上で以下の機能が利用可能である。



Expert system of hydrochemical modeling methods for geological disposal of HLW -Know-how on hydrochemical investigation and modeling in Literature survey stage to Detail investigation stage- by Teruki IWATSUKI (iwatsuki.teruki@jaea.go.jp), Takashi MIZUNO, Takanori KUNIMARU, Yuki AMANO, Tatsuji MATSUZAKI, Takeshi SEMBA

\*1 日本原子力研究開発機構  
Japan Atomic Energy Agency  
〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山之内 1-64  
(Received 29 March 2012; accepted 21 August 2012)

Fig. 1 Knowledge management by using Expert System

- ・**閲覧・編集機能**：事例ベースから抽出される地質環境調査のさまざまな経験則やノウハウを汎用的なルールとして再整理し、ある選択肢に対する判断、実行方法などの一連の作業を IF-THEN 方式で順次表示する。記述内容の理解を支援するため、記述内容を説明した外部ホームページや他の ES を参照リンクする。
- ・**バッチ計算・データベース機能**：Microsoft® Excel®や Microsoft® Word®など汎用的なソフトウェアで作成したデータファイルをシステムからダウンロード/アップロードすることにより、データ集の保管・更新（バージョン管理）、専門家が設定したルーチン計算や編集を行う。使用者（地層処分事業の実施や規制に関わる技術者、基礎研究を行う研究者などを想定）は、ウェブ上で調査に関わる制約条件、環境条件などを選択し、選択項目に応じて調査、解析手法のノウハウ、留意点などを対話形式で閲覧し、調査研究に反映するとともに、調査によって得られたデータを用いた一連の解析を行うことができる。

地下水調査に関わる一般的なノウハウについては、これまでにさまざまな学協会が取りまとめを行っている[9, 10]。また、地層処分を念頭に置いた地質環境調査項目については、深部地質環境研究センター（2007）[11]に提案されている。筆者らは、実際に地質環境調査を行ってきた過程で蓄積された経験に基づいて、文献調査から精密調査前半の地球化学調査で実施する項目に関わる具体的な調査・解析手順を考察し、以下の ES を構築した。

- ① 既存情報に基づく予察的地球化学モデルの構築
- ② ボーリング孔を利用した地球化学調査の計画立案
- ③ ボーリング孔を利用した採水調査
- ④ 調査結果に基づく地球化学モデルの構築

地球化学調査に課せられる命題は、調査地域において施設設計・建設時の社会環境管理に必要な地下水中の排水基準項目や環境基準項目[12]の濃度の確認や、安全評価時の核種移行計算に必要な地下水の水質、pH、酸化還元電位などの空間分布とその長期変動範囲を適切に把握することである。地球化学モデルとは、その考察のために地球化学特性（水質、起源・年代、pH、酸化還元電位など）の分布とその形成プロセスを整理した概念図であり、安全評価に必要な化学条件の長期変動範囲を考察するための基盤となるものである。上記の各 ES は、それぞれの調査段階で使用し、命題の達成に関わる情報の過不足を明確にし、命題を達成するまで繰り返し利用する（Fig. 2）。

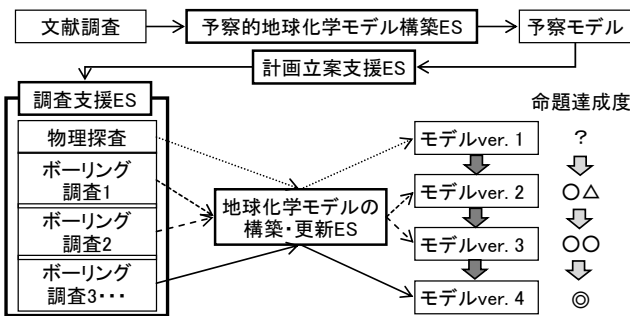


Fig. 2 Expert Systems on hydrochemical investigations

本報では、地球化学モデルの構築方法（主に①と④）について、ES 内に対話形式により作業を進めるために整理した記述内容について述べる。なお、実際の ES は、「[http://kms1.jaea.go.jp/ES/es\\_front/es.html](http://kms1.jaea.go.jp/ES/es_front/es.html) 解析モデル化 ES 地球化学モデル」で閲覧、使用することができる。

### 3 地球化学モデルの構築・更新に関わるノウハウ

地球化学モデルの構築・更新は、文献調査段階での既存情報に基づく予察的なモデルの構築と、その後の調査計画立案、地質環境調査を経てさまざまな情報を取得した後の調査結果に基づくモデルの構築・更新に分けられる。以下に述べる ES は、地球化学分野の調査計画立案に関わる技術者・研究者、または調査により得られたデータを利用して解析作業を行う技術者・研究者などを使用者として想定している。

#### 3.1 文献調査段階の既存情報に基づく予察的地球化学モデルの構築

既存情報に基づく予察的地球化学モデルの構築においては、既存情報の収集・分析により、対象地域の地下水の涵養域から流出域までの深部地球化学環境に関わる予察的概念モデルを構築し、不明確な点を整理した上で地質環境調査の計画立案に反映することを目的とする。この段階では、一般的に表層水、浅層地下水の情報が多く、品質が担保された深層地下水の情報が少ないことが想定されるため、その確度について留意する必要がある。具体的な作業手順は Fig. 3 のように整理できる。

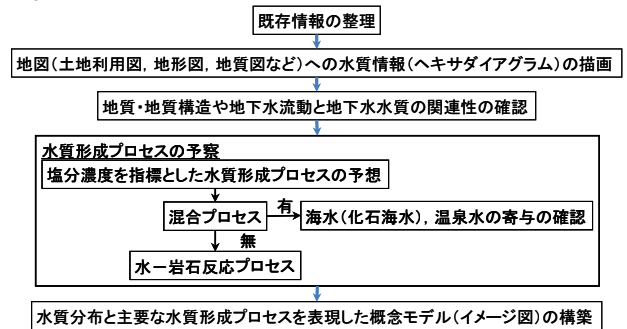


Fig. 3 Procedure of hydrochemical modeling in Literature survey stage

わが国において容易に取得可能な既存情報の情報源には、全国版地下水データベース（「いどじびき」：産業技術総合研究所）、水文学質データベース[13]、温泉地化学データベース[14]、2万5千分の1地形図[15]、20万分の1地質図[16]、資源探査関連資料、学術論文、湧き水情報[17]、自治体の温泉・鉱泉登録[18]、自治体の地下水工業利用登録などがある。

これらから得られた地下水水質（採水日・分析日を必ず確認する）情報を、座標情報や品質情報（地下水の利用目的、採水方法、ボーリング孔の掘削状況など）とともに整理する。資源探査関連資料においては電気・電磁（比抵抗）探査情報の有無を確認し、それらの情報が利用可能な場合

は、地質断面図を参照のうえ、地下水の塩分濃度分布の指標になり得るか検討するとともに、概要調査時の物理探査やボーリング調査の計画立案（調査レイアウトや対象深度など）に反映する（詳細は後述）。

次に、対象地域における帯水層の分布や地質構造、地下水流動状態と地下水水質の関連性を理解するため、地図上（地質図や地形図など）にヘキサダイアグラム形式で地下水の水質型を描画し分布状態を俯瞰するとともに、地質・地質構造や地形などから推測される地下水流動方向と水質型の関連性を確認する。

地質・地質構造により水質型が複数の領域に区分される場合は、地下水の水質分布が地質・地質構造に影響を受けている可能性があるため、領域ごとに予察を行っていく必要がある。各領域内において、地下水流動の上流側から下流側に向かって水質が変化する、または、水頭分布と水質に相関が認められる場合は、地下水流動に応じて、水質の異なる地下水の混合や水-岩石反応の程度の違いなどを反映している可能性がある。地下水の混合がある場合は、複数の水質型（形の異なるヘキサダイアグラム）とそれらの中間型のヘキサダイアグラムの平面分布が観察されることがある。水-岩石反応による水質形成が主である場合は、同じ水質型で地下水の流動経路に沿って塩分濃度が増加し、ヘキサダイアグラムが大きくなる傾向やイオン交換反応に伴いヘキサダイアグラム上で陽イオン濃度（ナトリウムやカルシウムイオンなど）が変化する傾向が観察されることがある。

水質分布と地質・地質構造や地下水の流動方向に関連性が認められない場合は、情報が少ないため認められないのか、真に関連性がないのか判断できない。とくに深度方向に対しては情報が少ないことが予想されるため、情報の量や質、およびそれらに起因する不確実性に関する整理が重要となる。そのため、この時点では不用意な仮説構築を行わない。なお、水質形成プロセスの考察方法については、次節に詳細を述べる。以上の過程で、前述の命題に関わる不明確な点を整理して、調査計画に反映する。例えば、情報不足によりある領域の水質が不明確である場合や水質分布と地質・地質構造の関連性について複数の仮説が想定できる場合には、その領域に物理探査測線や採水調査用のボーリング孔を配置し、不明確な項目の調査、分析を行う。

### 3.2 概要調査段階の調査結果に基づく地球化学モデルの構築・更新

物理探査やボーリング調査などにより新規データが得られた場合は、逐次 Fig. 4 の各項目を順番に実施しながらモデル構築・更新を進めていく。解析においては、前段で実施した内容を参照しながら後段の解析を行うことで作業を効率的に実施できる。例えば、水質形成プロセスの解析で明らかになる鉱物の飽和指数などを利用して、主要な酸化還元プロセスなどの解析を行っていく。これらの解析では、通常実施すべき解析内容が事前に入力された Microsoft® Excel®（ES からダウンロードして利用可能、以下、解析用

Excel と表記）や無償の地球化学解析ソフトウェア PHREEQC を利用して、解析を支援することができる。具体的には、ボーリング調査などで取得した水質データを入力して、データの品質確認、水質分布のグラフ描画、化学成分間の相関解析、理論的酸化還元電位の計算、熱力学計算（主要な水-鉱物反応の明確化）、地下水の滞留時間の計算などを行うことができる。この解析用 Excel を調査の進展に応じて繰り返し使用し、解析の履歴管理を行うことで、情報量の増加に伴うモデルの更新過程について公開ウェブ上で情報管理が可能となり、命題の達成過程に関わる追跡性と透明性を担保することができる。

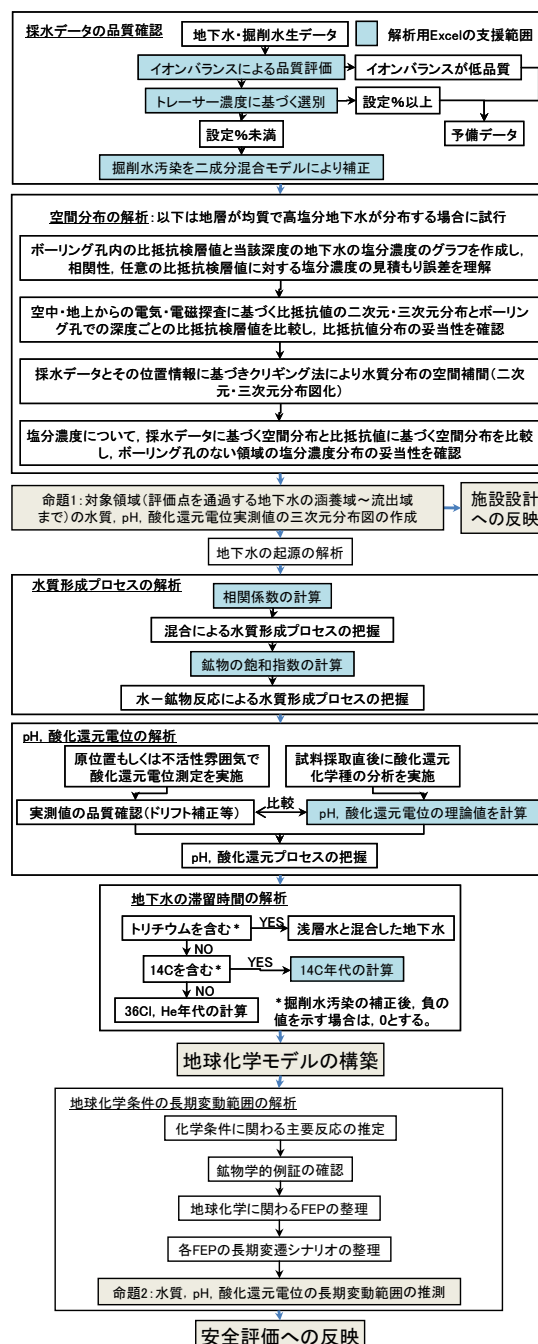


Fig. 4 Procedure of hydrochemical modeling and analysis of the long-term evolution in Preliminary and Detail investigation stages

前述のように、地球化学分野の命題は施設設計、安全評価への反映といった2つの視点に分けられる。まず、化学条件の三次元分布を把握して、施設建設時に想定しておくべき環境基準項目、排水基準項目の濃度を明確にし、地上の排水処理施設的设计やプロジェクトに関わる環境影響評価に反映する。次に、化学条件の形成に関わる主要プロセスを把握し、その長期的持続性、長期的変動範囲の推測という命題を達成した上で、安全評価（核種の主要な化学形態、溶解度の計算など）に利用する。具体的な作業手順について以下に述べる。

### 3.2.1 現在の地球化学特性を表現する地球化学モデルの構築手順

#### (1) 採水データの品質確認

ボーリング調査により得られる地下水の水質や物理化学パラメータ（pH や酸化還元電位など）のデータの品質は、採水方法や採水作業時の品質管理に大きく左右される。例えば、原位置から気密ボトルで採取した地下水と水理試験（揚水試験）などの過程で採取された地下水では、溶存ガスの脱ガスや大気との接触にともなう酸化などにより分析データの品質が異なることになる[19-21]。このように、複数の異なる手法で地下水データが得られている場合は、それらの品質に応じて解析の内容を制限するなどの留意が必要となる。

本報では、どの採水方法にも共通し基本的に欠くことのできない品質確認であり、最も簡易的にできる方法として、イオンバランスによる評価と掘削水汚染率（掘削水に加えるトレーサー濃度）による評価について述べる。イオンバランスによる評価では、下記計算式①、②、③で示した範囲に入るデータを解析に使用する[22]。

- ①  $\Sigma$  陰イオンが 0-3.0meq/L のとき  
 $\Sigma$  陽イオン -  $\Sigma$  陰イオン =  $\pm 0.2$ meq/L 以内
- ②  $\Sigma$  陰イオンが 3.0-10.0meq/L のとき  
 $[\Sigma$  陽イオン -  $\Sigma$  陰イオン] /  $[\Sigma$  陽イオン +  $\Sigma$  陰イオン]  $\times 100 = \pm 2\%$  以内
- ③  $\Sigma$  陰イオンが 10.0-800meq/L のとき  
 $[\Sigma$  陽イオン -  $\Sigma$  陰イオン] /  $[\Sigma$  陽イオン +  $\Sigma$  陰イオン]  $\times 100 = \pm 2-5\%$  以内

ボーリング調査で得られる地下水試料には掘削水が混入している場合があり、その補正には掘削水の混入割合とそのときの水質の比例相関を利用する[19]。そのため、その相関が確認できる程度まで掘削水が排水されていなければならない。この相関式が得られるまでトレーサー濃度が低下していないデータは、解析に使用せず予備データとする。

#### (2) 空間分布の解析

解析用データの品質確認の後、水質の空間分布を理解するため塩分濃度などの深度分布図を作成する。とくに、沿岸域のように地下水として塩水が分布している場合、ボーリング調査で得られた岩盤の比抵抗検層値や採水した地下水の水質分析値と電気・電磁（比抵抗）探査結果の相互比較により、ボーリング調査で得られた塩分濃度の一次元情報を電気・電磁探査断面を介して二次元・三次元展開することにより、水質の空間分布図を補足できる可能性がある。

このような物理探査情報の活用は、採水データのみから推測する水質分布を強力に補完するものとなる。例えば、Fig. 5a は幌延地域においてボーリング孔2本（HDB-3, 4孔）での採水データに基づき塩分濃度の空間分布を推測した結果である。この推測では、HDB-3孔とHDB-4孔の同一標高における塩分濃度が顕著に異なるため、両孔の中間地点に塩分濃度が急激に変化する領域が生じている。

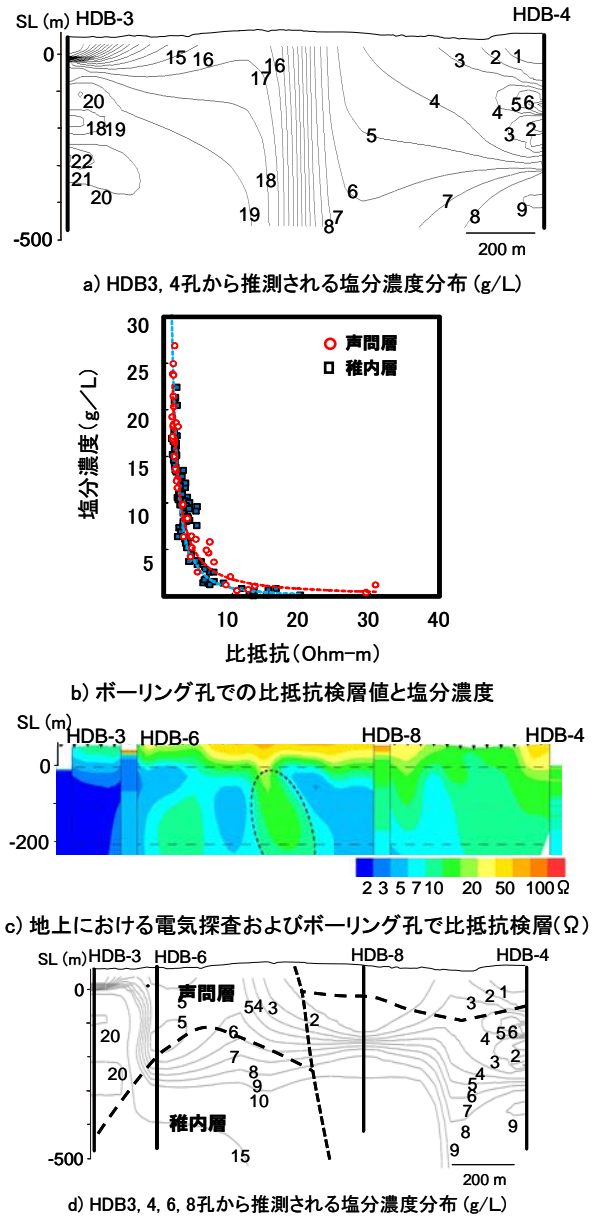


Fig. 5 Availability of resistivity in estimating groundwater salinity distribution at Horonobe area

このような場合、この領域に塩分濃度分布に影響を与える断層などの地質構造が存在していて、実際に水質が急激に変化しているのか、クリギング法でデータの無い領域を補間した結果、偶然生じたものであるのかを判断することはできない。しかしながら、Fig. 5b に示すように比抵抗検層値と地下水の塩分濃度の相関性を確認した上で、Fig. 5c に示すように地上における電気探査で得られる比抵抗値の

空間分布を参照することにより、Fig. 5a で不明確であったボーリング孔のない領域の塩分濃度分布が、実際に急激に変化していると推察できるようになる。Fig. 5d は新たなボーリング孔 HDB-6, 8 孔により、塩分濃度分布情報を取得し、電気探査結果を検証した例である。このように、塩分濃度分布のみでなく地層境界や断層の存在範囲などに関わる情報も追加することで、塩分濃度や比抵抗値の分布と地質・地質構造との関連性を確認できるようになる。ただし、以上のような解析を行うためには、固相（バックグラウンドとなる地層、岩石）の比抵抗特性が相対的に均質であり、計測された比抵抗値が主に地下水の塩分濃度に依存することが前提となる。

水質分布を俯瞰したら、排水基準項目、環境基準項目などについて確認し、施設設計（排水処理プラントや掘削土置き場の概念設計など）に反映する。

### (3) 地下水の起源、水質形成プロセスの解析

水素・酸素同位体比が得られている場合は、地下水の起源の推測を行う。一般的に、水素・酸素同位体比のグラフでは、海水や化石海水（長期の水-岩石反応を経た海水系地下水）は原点付近に、降水や降雪などの天水に由来する地下水は天水線付近にプロットされるため（Fig. 6）、グラフ上のプロットに基づき、各領域・深度の地下水の起源を推測する。なお、温泉水や化石海水など水-岩石反応が進んだ地下水には、酸素同位体比が正の方向にシフトするものがあるため、データが原点や天水線から離れてプロットされる地下水については、それらの可能性も考慮する。

地下水の水質は、表層水が地下に浸透していく過程での水-岩石反応により形成される[23]。また、海水や化石海水、温泉水に由来する高塩分濃度の地下水が調査領域内に存在する場合は、それらとの混合により水質が形成される

こともある。そのため、調査領域内に高塩分地下水が存在する場合と、そうでない場合とでは、考慮すべき事項が異なる。ここでは、さまざまなグラフを描いて解析を進めるうえで、塩分濃度がある程度高くないと相関性を確認できないという経験に基づいて、簡易的に塩分濃度 1g/L 程度を、考察方法を選択するための閾値とする。

塩分濃度が 1g/L 以上の地下水が観察される場合は、地史や周辺の温泉・鉱泉の情報から地熱系プロセスの有無や海水系地下水の長期滞留、混入の可能性について確認するため、異なる塩分濃度の地下水の混合を想定した解析を行う。対象地域が沿岸域であったり、海成層が存在し過去に海水が涵養していたと推察される場合は、過去に涵養した海水が長期の水-岩石反応を経て変化したり、天水との混合により地下水の水質が形成されている可能性を想定する。化石海水は、海水に比べ硫酸イオンやマグネシウムイオン、カリウムイオンが減少し、臭素やホウ素、無機炭素イオンが増加する傾向がある[24-26]。したがって、得られた水質情報を海水の組成とともにグラフ上にプロットし化学成分間の相関を確認することで、海水系地下水の寄与を確認することができる。臭素イオン/塩素イオン比 (Br/Cl)、ホウ素イオン/塩素イオン比 (B/Cl)、塩素イオン、水素・酸素同位体比 ( $\delta D \cdot \delta^{18}O$ ) などが指標となる (Fig. 6) [27]。酸素同位体比については、前述のように長期的水-岩石反応により値が変化するため天水線付近に位置しないこともある。また、地史にもとづいて海水が涵養していた時代を確認して、地下水の滞留性（海水が存在した時代から現在までの間に、どの程度海水が洗い出されたか？）などの地下水流動を推測するための情報として活用する。

対象地域において、塩分濃度が 1g/L 以上の地下水が観察されるにも関わらず過去に海水が涵養していないと推察

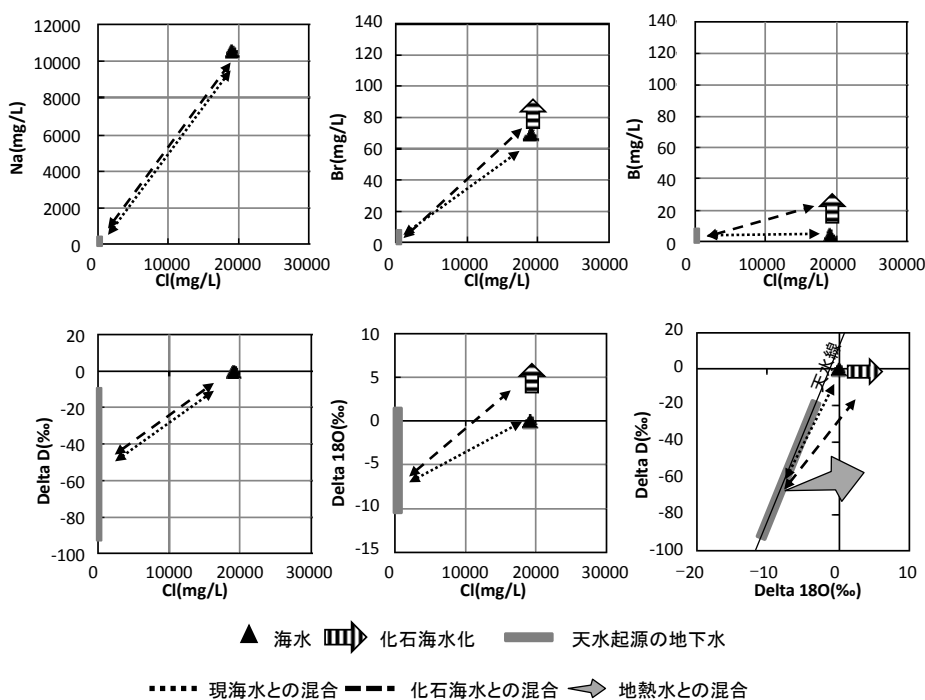


Fig. 6 Analysis of groundwater origin and the mixing process

される場合は、高温環境下での水-岩石反応により形成された高塩分地下水との混合により地下水の水質が形成されている可能性がある。周辺の温泉・鉱泉の情報から地熱系プロセス（高温環境下での水-岩石反応、深部熱水の混入など）の有無について推察する。地熱系プロセスを経た地下水は、高温下での水-岩石反応により酸素同位体比が顕著に正の方向にシフトする（5~10%程度[28]）ため、水素・酸素同位体比のグラフにおいて、データが天水線より傾きの小さい相関線上にプロットされているか確認する。以上のような塩分の異なる地下水の混合状態の解析には、相関係数の解析（解析用 Excel）や多変量解析ソフトウェアを利用した解析[29, 30]が有効である。

化学成分間の相関グラフで各深度の化学成分濃度を海水（化石海水）や温泉水と天水などとの端成分地下水の混合で説明できる場合は、地下水の水質分布がそれらの混合割合の違いで形成されていると解釈できる。加えて、水理地質構造や地下水流動が混合状態に影響を与え、水質分布を決定している可能性があるため、水理地質構造モデル、地下水流動モデルを参照して、それらと水質分布の関連性を確認する。また、端成分地下水の混合により濃度を説明できない化学成分については、混合プロセスのみでなく水-鉱物反応によりその濃度が増減している可能性を考える。例えば、このような成分には、水-鉱物反応によって濃度が増減しやすいナトリウム、カリウム、カルシウム、マグネシウム、硫酸、炭酸水素イオンなどが挙げられ、関連する水-鉱物反応を同定するためには、後述の熱力学解析を行う。

対象地域において、塩分濃度が 1g/L 未満の地下水が観察される場合は、天水起源の地下水が岩石と反応することにより水質が形成されていると考えられる。このような場では、天水の塩分濃度が低いため岩盤中の鉱物との反応状態を反映した水質になり、岩石中に一般的に含まれる鉱物である石英や長石類などのケイ酸塩鉱物、炭酸塩鉱物、硫化

鉱物などと反応し、 $Si \cdot Na \cdot Ca - HCO_3 \cdot SO_4^{2-}$ の組み合わせで表現できる水質型となることが多い。したがって、主要な水-鉱物反応を同定するための熱力学解析を行う。

熱力学解析では、ボーリング調査で得られる鉱物組成の各鉱物の地下水に対する飽和指数（溶け易さ、沈殿し易さ）を計算する。一般的に一次鉱物（正長石や曹長石など）に比べ二次鉱物の反応速度は速く、反応が平衡状態にあることが多い。解析においては、pH や酸化還元電位に関わる二次鉱物として炭酸塩鉱物、含鉄・含硫黄鉱物の飽和指数に着目する。この計算には、米国地質調査所（USGS）が開発した無償の計算ソフト PHREEQC の利便性が高い。本 ES では、PHREEQC の計算用入力ファイルをダウンロード可能とし、使用方法を例示している。

**(4) pH, 酸化還元電位の解析**

pH, 酸化還元電位の形成プロセスの解析では、pH・酸化還元電位に関わる溶存成分や鉱物の分布を俯瞰し、それらの反応に関わる熱力学解析を行い、深度・領域ごとの主要プロセスを同定する。ボーリングコアの観察データから、pH, 酸化還元電位に関わる鉱物（炭酸塩鉱物や鉄水酸化物、硫化鉱物など）の深度分布、飽和指数などを Fig. 7 の例のように整理し、pH, 酸化還元電位の分布、主要プロセスに関わる概念モデルを構築する。

一般的に、浅部は中性~弱酸性の涵養水により炭酸塩鉱物が溶脱しており、長期的な視点で化学的擾乱領域に相当する。逆に炭酸塩鉱物が存在する深度以深では、中性~弱アルカリ性の pH 条件になっていることが多い[31]。炭酸塩鉱物（方解石やアラレ石、菱鉄鉱など）の溶解・沈殿反応が pH に関わる主要反応であることが多いため、最初にそれらの飽和指数を確認する。Fig. 7 のように、pH と鉱物の飽和指数の深度分布図と鉱物分布図を比較し、pH が深度とともに中性~弱アルカリ性になり、炭酸塩鉱物の飽和指数が同深度で飽和平衡状態を示す（0 に近づく）か否か、同深度から炭酸塩鉱物の存在を確認できるか否かを確

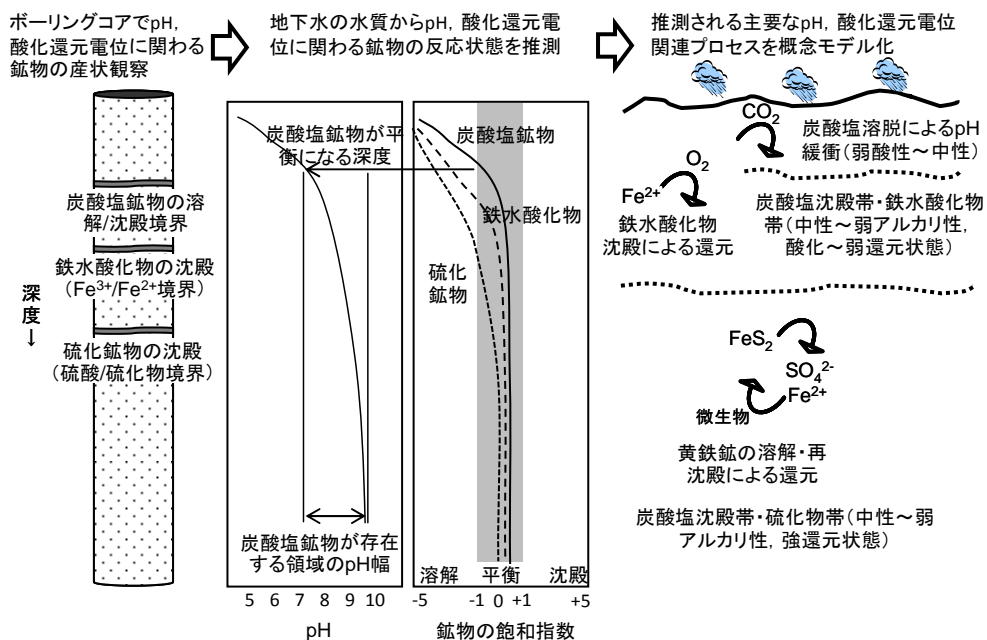
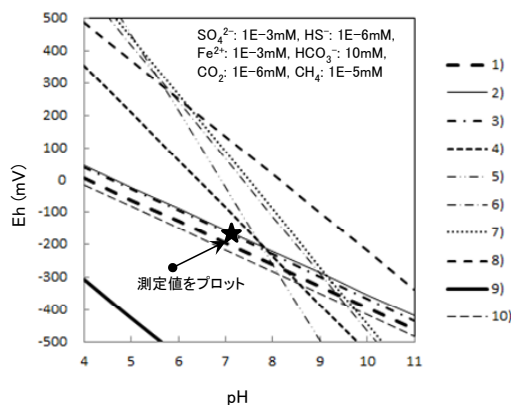


Fig. 7 Schematic diagram of pH and redox condition by core observation and chemical analysis

認する。これらの点が成り立つ場合は、pHに関わる主要反応が炭酸塩鉱物の溶解・沈殿反応である可能性が高い。成り立たない場合は、炭酸塩鉱物の溶解・沈殿以外の反応がpHをコントロールしていると推測されるが、地上での地下水採取時には溶存炭酸ガスの脱ガスや大気中の炭酸ガスの溶解などによりpHや無機炭素濃度が真値から変化することがある(脱ガスの場合は、pHが0.5前後上昇する事例がある[32])ため、飽和指数の計算に用いたpH測定値、無機炭素濃度(炭酸水素イオン濃度など)が原位置(地下水を採取した深度)の値と異なっている可能性について確認する。データの品質が保証されていると判断できる場合は、粘土鉱物やケイ酸イオンによるpH緩衝反応が主要プロセスである可能性がある。

地下水の酸化還元電位に関わる化学成分には、溶存酸素、窒素化合物(硝酸・亜硝酸・アンモニウムイオン)、マンガニオン、鉄イオン、硫酸イオン、硫化水素イオン、炭酸・メタンガスなどが挙げられる。酸化還元電位の解析では、これらの化学種の分析値をもとに、それぞれの酸化還元反応に関わる理論的平衡電位を計算し(解析用 Excel)、原位置の実測値が平衡電位と同等になるか否か確認する

(Fig. 8)。実測値がいずれかの酸化還元反応の平衡電位と同等になる場合は、その酸化還元反応が平衡状態に達して酸化還元電位を決定している可能性がある。なお、一般的に液相中の反応物質質量(上記溶存成分のモル量)に比べ固相の反応物質質量(含鉄・硫黄鉱物のモル量)の方が有意に大きい場合、複数の酸化還元反応の平衡電位線に実測値がプロットされた場合は、固相を含む酸化還元反応を主要反応とする。



- 1)  $\text{SO}_4^{2-} + 9\text{H}^+ + 8\text{e}^- = \text{HS}^- + 4\text{H}_2\text{O}$  ( $E_0=0.249$ ; Drever, 1988)
- 2)  $\text{SO}_4^{2-} + \text{FeCO}_3 + 9\text{H}^+ + 8\text{e}^- = \text{FeS(s)} + \text{HCO}_3^- + 4\text{H}_2\text{O}$  ( $E_0=0.280$ ; Stumm and Morgan, 1996)
- 3)  $\text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+ + 14\text{e}^- = \text{FeS}_2(\text{Pyrite}) + 8\text{H}_2\text{O}$  ( $E_0=0.362$ ; Langmuir, 1997)
- 4)  $\text{Fe}_3(\text{OH})_6(\text{s}) + 3\text{HCO}_3^- + 5\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 3\text{FeCO}_3 + 8\text{H}_2\text{O}$  ( $E_0=1.126$ ; Langmuir, 1997)
- 5)  $\text{Fe}_3(\text{OH})_6(\text{s}) + 8\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 3\text{Fe}^{2+} + 8\text{H}_2\text{O}$  ( $E_0=1.102$ ; Langmuir, 1997)
- 6)  $\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$  ( $E_0=0.95$ ; Stumm and Morgan, 1996)
- 7)  $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{am}) + 3\text{H}^+ + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$  ( $E_0=0.975$ ; Langmuir, 1997)
- 8)  $\text{FeCO}_3 + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{H}^+ + \text{HCO}_3^- + \text{e}^-$  ( $E_0=1.078$ ; Langmuir, 1997)
- 9)  $\text{FeCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{FeOOH(s)} + 2\text{H}^+ + \text{HCO}_3^- + \text{e}^-$  ( $E_0=0.045$ ; Stumm and Morgan, 1996)
- 10)  $\text{HCO}_3^- + 9\text{H}^+ + 8\text{e}^- = \text{CH}_4 + 4\text{H}_2\text{O}$  ( $E_0=0.206 + 0.0074 \text{Log}[\text{HCO}_3^-]/[\text{H}^+]^9/[\text{CH}_4]$ ; Langmuir, 1997)

Fig. 8 Analysis of dominant redox process by using the prearranged Microsoft® Excel® file in Expert system

実測値がどの平衡電位付近とも一致しない場合は、酸化還元電位の測定値が安定状態に達する前にデータが取得さ

れているか、酸化還元平衡電位を計算するのに用いた水質データが適切でない(酸化した試料を分析したなど)可能性があるため、データの品質を再確認し、品質が不明確な場合は、解析に使用しない。また、原位置の実測値がない場合は、Fig. 7のような含鉄・含硫黄鉱物の産状・分布状態を指標として、実際に観察される鉱物を含む酸化還元反応式に、地下水の溶存成分濃度を代入して計算される平衡電位より低い酸化還元状態にあると仮定する。これは、平衡電位以上だと、長期的に鉱物が溶解・消失してしまい観察できないためである。

### (5) 地下水の滞留時間の解析

地下水の滞留時間は、地下水流動概念の構築や地球化学環境の長期的な変遷を考察する上で欠くことのできない情報である。その推定には、一般的にトリチウム ( $^3\text{H}$ : 半減期約 12 年. 推定範囲 50 年程度まで)、放射性炭素 ( $^{14}\text{C}$ : 半減期約 5,730 年. 推定範囲 55,000 年前後まで)、放射性塩素 ( $^{36}\text{Cl}$ : 半減期約 301,000 年. 推定範囲 100 万年程度まで)などの天然に存在する放射性同位体が用いられる[33]。

放射性同位体の半減期に基づく推測手法は、地下水流動が涵養源から地下水採取地点までの間に異なる流動系の地下水と混合しないという前提(ピストン流)が必要となる。とくに、結晶質岩のような割れ目媒体中の地下水については、複雑に連結した割れ目あるいは割れ目帯を優先的に地下水が流れるため、ピストン流の前提が成り立たない場合もある。例えば、地下水から  $^3\text{H}$  と  $^{14}\text{C}$  の両方が検出されて、試料採取時や分析時の品質も保証され両方の分析値が正しいと考えられる場合は、採取地点の地下水自体が滞留時間の異なる複数の地下水の混合状態にある(ピストン流の前提が成り立たない)可能性が高い。このような場合は、複数地点の相対的な放射性同位体濃度の違いから大局的な地下水の流動状態について推測するといった適用性に留まることになる。また、 $^{14}\text{C}$  や  $^{36}\text{Cl}$  など溶存物質中の放射性同位体を利用する場合は、岩石から放射性同位体濃度の異なる溶存物質が地下水に付加される場合があるため、測定された放射性同位体濃度の補正が必要となる。

地下水の滞留時間の推測では、トリチウム濃度から順番に解析を行う。地下水がトリチウムを含む場合は、滞留時間が 50 年以下と推定できる。次に、トリチウムが含まれていない地下水を対象として、 $^{14}\text{C}$  濃度に基づき滞留時間を推定する。実際の地下水においては、 $^{14}\text{C}$  を含まない炭素(デッドカーボン)が岩石(炭酸塩鉱物や有機物など)から供給されることで、 $^{14}\text{C}$  濃度が希釈されるため、その希釈量を各成分の炭素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) により補正する(解析用 Excel) [34]。ただし、有機物に富み長期閉鎖系にある堆積岩(海成層や天然ガスが存在する地層であることが多い)においては、地層の続成作用により  $\delta^{13}\text{C}$  値が変化することがある。このような環境条件下での  $^{14}\text{C}$  濃度希釈量の補正方法は確立されておらず、今後の研究課題である。 $^{14}\text{C}$  が含まれておらず 5 年以上の滞留時間を有する可能性のある地下水については、塩化物イオン中の  $^{36}\text{Cl}$  濃度から滞留時間を推測できる可能性がある。 $^{36}\text{Cl}$  濃度を基

にした地下水の滞留時間は、地表からの涵養水に含まれていた  $^{36}\text{Cl}$  の放射壊変に伴う濃度減少か、岩盤中の放射化反応に伴い生成する  $^{36}\text{Cl}$  の濃度を基に算出する[28, 34-39].

**(6) 地球化学モデルの構築**

以上の解析で整理した地下水の水質やその形成プロセス、滞留時間などを地質・水理地質構造とともに表記し、地球化学モデルを構築する[40, 41]. とくに、地球化学および物質移動プロセスに密接に関わる重要項目として水理地質特性（透水性の違い）と地球化学特性との関連に着目し、高透水性領域と低透水性領域や異なる地球化学特性の領域を区分する (Fig. 9; 以下、区分した個々の領域をサブシステムと呼ぶ). このような領域区分は、地下施設の建設計画立案に関わるさまざまなアセスメントや安全評価手法を検討する上で不可欠である. とくに処分場候補深度とその深度の地下水の涵養域・流出域を包含するサブシステムについて水理地質特性、地球化学特性を明確にするとともに、周囲のサブシステムとの関連を確認する.

以上のようなモデル構築（更新）作業は、文献調査段階から精密調査段階の調査において、新しいデータが得られる度に行い、図の作成に当たっては汎用性のあるソフトウェアを用い、どの時点の情報を基にモデルを構築したのか（バージョン情報）を必ず明記する.

**3.2.2 地球化学モデルに示された化学条件の長期変動範囲の解析**

評価対象領域の地下水の滞留時間が安全評価期間より長い場合は、現在観察できる地下水の水質形成プロセスを理解することで、その長期変遷を概観することができる. 一方、地下水の滞留時間が安全評価期間より短い場合は、鉱物学的手法などにより現在観察できない過去の地下水の化学条件について推測する.

地下水の化学条件の将来にわたる変動範囲を推測するた

めには、それに関わるさまざまな地質学的イベントやプロセスを理解しておく必要がある. 長期にわたり異なる時空間スケールで起こるさまざまな地質現象と地下深部の化学条件の関連性を解析する方法として、特性要因図法やマトリクス図法、系統図法など複数の解析手法が挙げられるが、直感的に理解しやすい表現方法として、ここでは年表形式で連関図法を用いた情報の整理手法について述べる. この手法では、過去の気候変動に伴う地下水涵養量の変化や隆起・浸食、断層の形成など地質学的事象と付随する地質・地質構造、水理特性、鉱物特性、化学条件の変化、関連する主要プロセスなどについて、シナリオとして整理する[42, 43]. シナリオを将来に外挿し、蓋然性の高いプロセスを参照して化学条件の変動範囲を見積もる (Fig. 4).

**(1) 鉱物学的手法による過去の化学条件変動範囲の推測**

岩盤中の鉱物（主に二次鉱物）の分布、化学組成、同位体組成を指標として、pH と酸化還元電位、塩分濃度などの長期的な変動範囲を推測する. pH の指標となる鉱物には、中性～アルカリ条件で安定な炭酸塩鉱物（主に方解石）が挙げられ、その分布を調べることで pH の長期的な安定領域を推察できる[44-46]. 先に述べたように、一般的に地表付近および浅部においては、長期にわたって弱酸性の表層水が涵養することにより炭酸塩鉱物が溶脱しており、炭酸塩鉱物が分布している深度においては、炭酸塩鉱物が溶脱しない化学条件にあったと推察される. そのため、地下水の滞留時間が安全評価の時間スケールより長い場合は、Fig. 7 のように炭酸塩鉱物の存在領域における地下水の pH のバラツキ幅を長期的な変動可能性範囲と見なすことができる.

一方、地下水の滞留時間が安全評価の時間スケールより短い場合は、炭酸塩鉱物の沈殿年代（≒溶解することなく保存されてきた期間）を見積もることで、pH の長期的安定

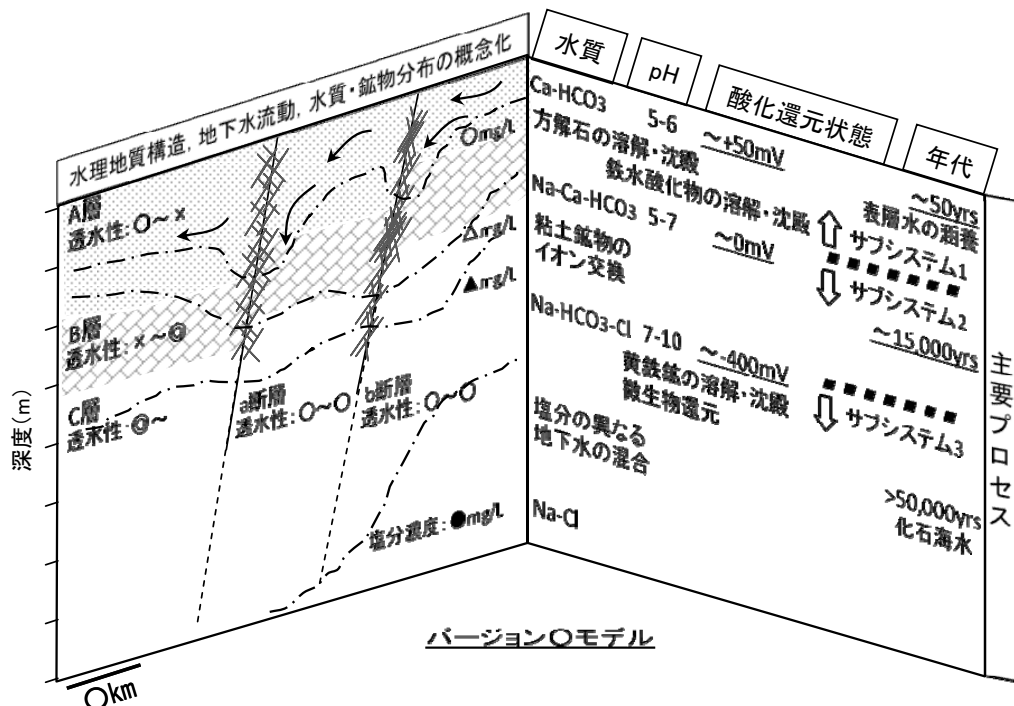


Fig. 9 Schematic diagram of hydrochemical model construction based on the previous analysis



性を考察することができる。炭酸塩鉱物の沈殿年代は同位体組成 ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) や結晶形, 地史などに基づいて推測する。例えば, 炭酸塩鉱物が未飽和から飽和・平衡状態に達する深度付近では鉱物中に  $^{14}\text{C}$  が含まれていることがあり, その半減期から過去5万年以内に沈殿したと判断できる。また, 海成層が存在し過去に海水が浸透していた地域においては, 地下水が時代ごとに海水や淡水などに入れ替わってきた可能性がある。そのため, 同位体組成や結晶形により炭酸塩鉱物の起源(海水或いは特定の時代の淡水など)を明らかにし地史と比較することで, より長時間スケールで沈殿年代を見積もることができる[47-50]。ただし, 地下水の組成が時代ごとに変化し, その変化を追跡して方解石が沈殿している場合には, 結晶内部における化学組成や同位体組成の累帯構造や結晶形の変化について沈殿層ごとに確認する必要がある。海水が涵養していた可能性がない場合は, 炭酸塩鉱物の酸素同位体比から推測できる沈殿温度(古水温)に基づいて熱水起源の炭酸塩鉱物の有無について確認し[51], 地史と対比し熱水活動が起こっていた時代から沈殿年代を推測する。以上の手法の適用条件として同位体組成が大きく異なる地下水が過去に入れ替わってきたことが必要であり, 地下水が地層形成時から保持されている環境では利用できないこともある。

酸化還元状態の長期変遷については, 酸化還元状態に応じて溶解・沈殿する水酸化鉄や黄鉄鉱などの含鉄・含硫黄鉱物が指標になる。これらの鉱物が地下水に対して未飽和の場合はそれぞれの溶解速度で長期的に溶解, 消失してしまうため, 存在が確認できた場合にはその沈殿年代以降, 地下水がこれらの鉱物に対して飽和もしくは平衡状態にあったことを示唆する(未飽和の場合は, それぞれの溶解速度で長期的に溶解, 消失してしまうため, そもそも観察することができない)。したがって, それらの鉱物が飽和・平衡状態となる酸化還元電位を見積もることで変動可能性範囲を推測できる。計算に使用する地下水の化学組成は, 地下水流動の上流側・下流側に存在する地下水の値や, その領域に過去に涵養していた海水の値などを幅広く仮定することで保守的に設定する。例えば, Fig. 8 で整理された主要な酸化還元反応が黄鉄鉱(Pyrite)と地下水の反応と同定された場合, 岩盤中の黄鉄鉱が存在する領域の酸化還元電位は Fig. 10 で示される範囲と見積もられる(図は市販のソフトウェア Geochemist's Workbench による作図)。具体的には, 炭酸塩鉱物の産状から推測される pH 条件の範囲において, 黄鉄鉱(Pyrite)の飽和・平衡領域に基づいて酸化還元電位の変動可能性範囲を推測する(Fig. 10: 斜線部)。なお, 図の飽和・平衡領域は地下水の水質により上下するため(例えば, Fig. 10 の点線は海水が涵養していた場合の相平衡線であり, 影塗部はそのときの酸化還元電位の領域となる), 次項のシナリオ解析において想定される地下水の種類を参照して水質を設定し計算を行う。

含鉄・含硫黄鉱物の沈殿年代や起源を推測する手法については, 化学組成や同位体組成に基づいて海成層堆積時の初期続成由来の硫化鉱物を同定している例[52]はあるが,

研究事例は少ない。また, 近年, 試みられている手法として, 上述の炭酸塩鉱物の沈殿年代推定手法と併用して, 炭酸塩鉱物中のウランや鉄などの金属元素濃度, それらの液相-炭酸塩鉱物間の分配係数に基づいて酸化還元電位を推測する手法[50, 53, 54]があるが, 適用事例が少なく今後の研究開発課題となっている。

水質の長期変遷に関しては, 炭酸塩鉱物中の流体包有物を利用し塩分濃度の変遷を推測する手法がある。流体包有物の凍結温度は塩分濃度に依存することが明らかになっており, 流体包有物を含む試料を冷却しながら観察することで, 直接的に炭酸塩鉱物沈殿時の地下水の塩分濃度を求めることが可能である[50]。分析に適した試料が得られない場合は, 直接的に塩分濃度の変動幅を推測する手法がないため, 次項で構築するシナリオ解析に基づいて推測を行う。

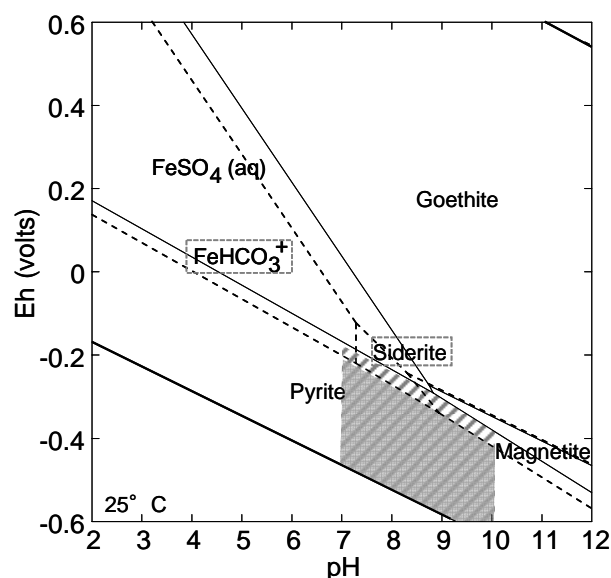


Fig. 10 Estimation of long-term variation of pH and redox potential based on occurrence of carbonates and iron/sulfur-bearing minerals

## (2) 将来予測のためのシナリオ構築

鉱物学的例証などにより推測される過去の化学条件の長期変動範囲を, 将来に外挿して安全評価などに利用するためには, 対象地域のさまざまな地質現象が地下深部の化学条件に与える影響を理解しておく必要がある。そのため, 以下の手順で過去から現在までの地質・地質構造, 水理地質構造, 地球化学環境に関わる諸プロセスとそれらの関連性を時間断面ごとに整理し, 化学条件に関わる主要プロセスを同定する。

- i) 地質学的現象が網羅された OECD/NEA の FEP リスト[11, 55]を参照し, 時間断面ごとの地質学的イベントを抽出し年表形式で整理する。とくに, 安全評価対象となるサブシステムでの地質現象と, 付随する水理地質プロセス(隆起・沈降や浸食, 断層形成, しゅう曲・とう曲形成, それらに伴う水理地質特性の変化など)について可能な限り定量的に推測する。
- ii) 年表の範囲は安全評価の時間スケールを包含し, かつ

将来の安全評価期間に各現象を外挿できる範囲とする（例えば、1 万年、10 万年、100 万年）。長期サイクルで繰り返し起こる現象、不可逆的現象など各現象の普遍性にも留意する[56-59]。

- iii) 時間断面ごとの水理地質特性の変化（表層からの天水の涵養や温泉水の湧昇、長期的な物質循環閉鎖系の形成など）に付随する地球化学プロセスを推察するとともに、化学条件に関わる水-鉱物反応、微生物反応などの主要プロセスの相互関係とその変遷の整理を行う。具体的には、鉱物の産状や化学・同位体組成などにに基づき、起こり得る水-鉱物-微生物反応を推定し、蓋然性の高い相互作用について結線する（例えば、微生物による硫酸還元→黄鉄鉱の沈殿→地下水中の硫酸イオン濃度減少、圧密による空隙サイズの縮小→透水係数の低下→化学反応物質の供給量減など）。
- iv) 水理地質学プロセスに対する地球化学条件の応答性、頑健性を考察するとともに、過去から現在までの主要な地質・水理・地球化学プロセスを将来に外挿し、安全評価期間における地球化学条件の変動幅を推測する。外挿時には各プロセスの不可逆性・可逆性、繰り返し性、現象の時間スケールに留意する。

Fig. 11 は、北海道幌延地域で筆者らが実際に行ったシナリオ解析例である。この例では、過去の地盤の隆起・浸食や地下水流動特性の変化、それらと地下水の地球化学特性の相互作用について連関図法で表現し、化学条件に関わる主要なプロセスを明らかにすることで、長期的な化学条件の変動を提示している。また、将来の変化についても、過去の蓋然性の高いプロセスを外挿することで、化学条件の頑健性を提示している。このような解析を行うことで、将来の化学条件とともに、好ましい地質環境条件が長期的に維持される領域を明確化することもできる。例えば、この地域では、深度 500m 付近（★）における過去から現在までの地下水の化学条件は、地下水流動や水-鉱物反応、微生物反応などの結果、中性の pH、還元環境にあったと考えられる。将来、隆起・浸食（約 0.3m/千年と仮定）に伴う地形・地質構造の変化により 10 万年後の化学条件、地質構造は現在とほぼ同様だが、数十万年後以降は塩水環境から

淡水環境になり、連続性の大きな断層（割れ目）が周囲に分布する可能性がある」と推察される。

#### 4 まとめ

本報では、長期にわたる研究技術開発に不可欠な知識管理の方法として、ウェブ上に構築したエキスパートシステムを利用した知識管理の仕組みについて概説し、実際にエキスパートシステムとして収納しているコンテンツの一例として、地層処分に関わる地質環境調査のうち地球化学分野における解析・モデル化のノウハウについて述べた。

本報で述べたエキスパートシステムを利用して、施設設計や安全評価に必要な化学条件の評価を支援できるが、残された課題（直接的に過去の酸化還元電位の長期変動範囲を推定する手法の確立など）については、今後の研究開発の成果にもとづきエキスパートシステムを更新し、実際の概要調査時に、より有効に利用できるシステムとしていく必要がある。

このシステムは、世代間の知識継承や技術者の育成を容易にするとともに、新たな知見に基づきノウハウのデータベースを随時更新することでその汎用性を高め高度化していくことが可能であり、その履歴管理により、知識の変遷の追跡性や論拠の透明性も担保することができる。一方で、既存のマニュアルや論文などを利用した知識管理手法に比べ更新や管理が容易な反面、技術的保証（信頼性の担保）方法を明確にしておく必要がある。知見の更新に当たっては、記載内容の技術的確認が行われて公開された資料や数多くの調査研究事例で再現性、汎用性を備えた論拠に基づき改良していくことが不可欠である。

#### 謝辞

本報は、資源エネルギー庁事業「地質環境総合評価技術高度化開発：次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発（平成 19 年度～平成 23 年度）」の成果に基づくものである。

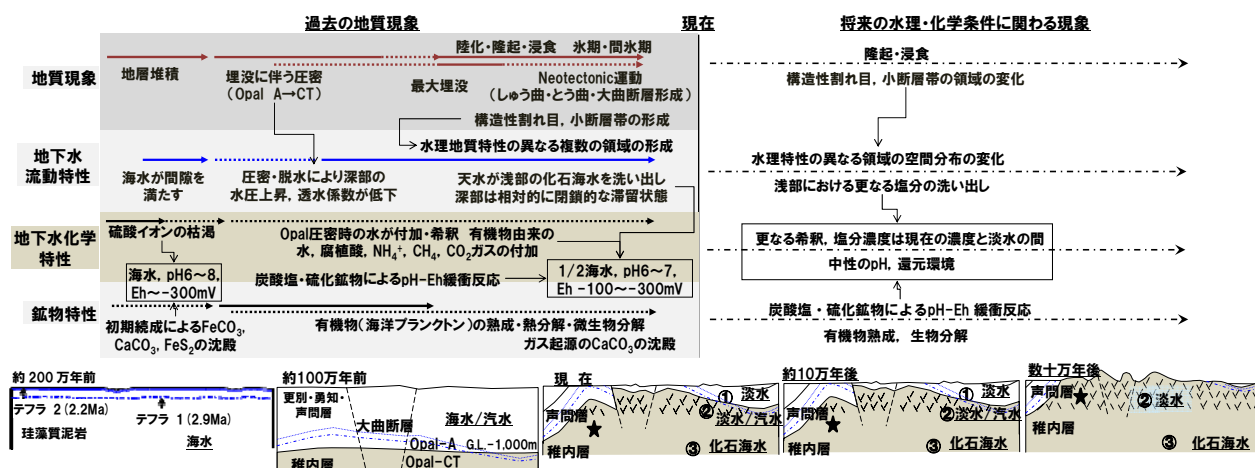


Fig. 11 Scenario analysis of long-term evolution of geological environment using the inter-relation diagram at Horonobe area, Japan (modified Iwatsuki et al., 2009 [59]).

## 参考文献

- [1] 原子力安全基盤機構規格基準部：地層処分の立地選定段階の調査に関わるガイドラインの検討－将来の安全評価に必要な調査のあり方と調査活動に関する品質保証について－. JNES-SS-0802 (2008).
- [2] 原子力発電環境整備機構：地層処分事業の安全確保 (2010年度版)－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－. 原子力発電環境整備機構. NUMO-TR-11-01 (2010).
- [3] 物理探査評価研究小委員会基盤内弱層検討ワーキンググループ：トンネル地質調査におけるリスクマネジメントシステム導入の提唱. 応用地質 **44**, 36-47 (2003).
- [4] 戸内順一：図解エキスパートシステム入門, 日本理工出版会 (1997).
- [5] 日本原子力研究開発機構：地層処分技術調査等委託費地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発報告書(2007). (<http://www.enecho.meti.go.jp/rw/library/library05.html> 2012年3月確認).
- [6] 日本原子力研究開発機構：地層処分技術調査等委託費地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発報告書(2008). (<http://www.enecho.meti.go.jp/rw/library/library05.html> 2012年3月確認).
- [7] 日本原子力研究開発機構：地層処分技術調査等委託費地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発報告書(2009). (<http://www.enecho.meti.go.jp/rw/library/library05.html> 2012年3月確認).
- [8] 日本原子力研究開発機構：地層処分技術調査等委託費地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発報告書(2010). (<http://www.enecho.meti.go.jp/rw/library/library05.html> 2012年3月確認).
- [9] 地盤工学会：地盤調査の方法と解説, 地盤工学会地盤調査法改訂編集委員会, 丸善 (2004).
- [10] 建設産業調査会：地下水ハンドブック, 地下水ハンドブック編集委員会, 建設産業調査会 (1980).
- [11] 深部地質環境研究センター：概要調査の調査・評価項目に関する技術資料－長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方－. 地質調査総合研究センター研究資料集 **459**, 産業技術総合研究所地質調査総合研究センター (2007).
- [12] 環境省: (<http://www.env.go.jp/water/mizu.html> 2012年3月確認).
- [13] 国土交通省：水文水質データベース (<http://www1.river.go.jp/> 2012年3月確認).
- [14] 日本原子力研究開発機構：温泉地化学データベース (<http://www.jaea.go.jp/04/tono/siryou/dbghs/dbghs.html> 2012年3月確認).
- [15] 国土地理院：地図閲覧サービス (<http://watchizu.gsi.go.jp/> 2012年3月確認).
- [16] 産業総合技術研究所：地質図カタログ (<http://www.gsj.jp/Map/JP/dgm.htm> 2012年1月確認).
- [17] 環境省：湧水保全ポータルサイト (<http://www.env.go.jp/water/yusui/> 2012年3月確認).
- [18] 金原啓司：日本温泉・鉱泉分布図一覽 (2005). ([http://www.gsj.jp/Map/JP/docs/dgm\\_doc/dgm\\_gt02.htm](http://www.gsj.jp/Map/JP/docs/dgm_doc/dgm_gt02.htm) 2011年3月確認).
- [19] 古江良治, 岩月輝希, 濱克宏: 深層ボーリング孔を用いた地下水の地球化学調査の課題に対する試み. 応用地質 **46**, 232-236 (2005).
- [20] 水野崇, Metcalfe, R., 岩月輝希, 彌榮英樹: 地下水の地球化学調査に関わるデータ品質評価手法の提案. 日本地下水学会誌 **49**, 139-152 (2007).
- [21] Tröjbom, M., Mopelikan: Hydrochemistry of surface water and shallow groundwater - Site descriptive modeling SDM-Site Laxemar. SKB Report R-08-46, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (2008).
- [22] 日本分析化学会北海道支部: 水の分析, 第4版, 化学同人 (1994).
- [23] 尾山洋一, 高橋正明, 塚本斉, 風早康平, 安原正也, 高橋浩, 森川徳敏, 大和田道子, 芝原暁彦, 稲村明彦: 日本列島の非火山地域における深層地下水水質と地質との関係について. 原子力バックエンド研究 **18**, 25-34 (2011).
- [24] 村下敏夫: 本邦における地下水の塩水化. 地質調査所月報 **33**, 479-530 (1982).
- [25] Fritz, P. and Frape, S. K.: Saline water and gases in crystalline rocks. *GAC Special paper* **33**, ISBN 0-919216-32-3 (1987).
- [26] 松浪武雄: 北海道中央部新第三系体積盆の塩水について. 地下資源調査所報告 **65**, 55-72 (1993).
- [27] 馬原保典, 中田英二, 大山隆弘, 宮川公雄, 五十嵐敏文, 市原義久, 松本裕之: 化石海水の同定法の提案: 太平洋炭鉱における地下水水質・同位体分布と地下水年代評価. 地下水学会誌 **48**, 17-33 (2006).
- [28] 酒井均, 松久幸敬: 安定同位体地球化学, 東京大学出版会 (1996).
- [29] Laaksoharju, M., Skärman, C. and Skärman, E.: Multivariate Mixing and Mass-balance (M3) calculations, a new tool for decoding hydrogeochemical information, *Applied Geochemistry* **14**, 861-871 (1999).
- [30] 阿島秀司, 戸高法文, 岩月輝希, 古江良治: 多変量解析による瑞浪超深地層研究所周辺の地下水化学モデルの構築. 応用地質 **47**, 120-130 (2006).
- [31] Paces, J.B., Peterman, Z.E., Neymark, L.A., Whelan, J.F., Marchall, B.D.: Constraints on Quaternary unsaturated-and saturated-zone hydrology from geochronological and isotopic studies of calcite and silica, Yucca mountain, Nevada, USA. In: *Use of*

- Hydrogeochemical Information in Testing Groundwater Flow Models*. Technical Summary of Workshop, Borgholm, Sweden, September 1997, NEA/OECD, Paris, France. (1998).
- [32] 岩月輝希, 森川佳太, 細谷真一, 吉川英樹: 深部地下水の物理化学パラメータ (pH, 酸化還元電位) の測定とその留意点. 地下水学会誌 **51**, 205-214 (2009)
- [33] Kazemi, A., Lehr, J. H. and Perrochet, P.: Groundwater age, A JOHN WILEY & SONS, INC. (2006).
- [34] Andrews, J.N., Edmunds, W.M., Smedley, P.L., Fontes, J-Ch., Fifield, L.K. and Allan, G.L.: Chlorine-36 in groundwater as a palaeoclimatic indicator: the East Midlands Triassic sandstone aquifer (U.K.). *Earth and Planetary Science Letters* **122**, 159-171 (1994).
- [35] Andrews J. N., Davis S. N., Fabryka-Martin J., Fontes J.-C., Lehmann B. E., Loosli H. H., Michelot J.-L., Moser H., Smith B., and Wolf M.: The in-situ production of radioisotopes in rock matrices with particular reference to the Stripa granite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **53**, 1803-1815 (1989).
- [36] Andrews J. N., Fontes J. C., Michelot J. L., and Elmore D.: In-situ neutron flux, <sup>36</sup>Cl production and groundwater evolution in crystalline rocks at Stripa, Sweden. *Earth and Planetary Science Letters* **77**, 49-58 (1986).
- [37] 長谷川琢磨, 馬原保典, 中田弘太郎, 秦野輝儀: 地下水年代測定評価技術の開発(その4) -<sup>36</sup>Clと<sup>4</sup>Heによる地下水年代測定法のオーストラリア大鑽井盆地における検証-. 電力中央研究所報告. N05068 (2006).
- [38] 長谷川琢磨, 中田弘太郎, 大山隆弘: 地下水年代測定評価技術の開発(その8) -<sup>36</sup>Clによる難透水層評価方法の検討-. 電力中央研究所報告. N07038 (2008).
- [39] 中田弘太郎, 長谷川琢磨: 地下水年代測定評価技術の開発(その10) -北海道幌延地域における<sup>4</sup>He・<sup>36</sup>Cl法適用の試み-. 電力中央研究所報告. N09027 (2010).
- [40] Black, J.H. and Brightman, M.A.: Conceptual Model of the Hydrogeology of Sellafield. *Quarterly Journal of Engineering Geology* **29**, 83-93 (1996).
- [41] Metcalfe, R., Hama, K., Amano, K., Iwatsuki, T. and Saegusa, H.: Geochemical approaches to understanding a deep groundwater flow system in the Tono area, Gifu-ken, Japan, In: *Groundwater Engineering*, (Kono, I., Nishigaki, M. and Komatsu, M. ed.), Taylor & Francis, pp.555-561 (2003).
- [42] Bath, A.: Geochemical Investigations of Groundwater Stability. SKI Report 2006:12. Swedish Nuclear Power Inspectorate (2005).
- [43] SKB: Project SAFE Scenario and system analysis. SKB Report R-01-13. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (2001).
- [44] Tullborg, E.-L., Drake H., Landstrom B.: Palaeohydrogeology: A methodology based on fracture mineral studies. *Applied Geochemistry* **23**, 1881-1897 (1999).
- [45] Milodowski, A.E., Gillespie, M.R., Naden, J., Fortey, N.J., Shepherd, T.J., Pearce, J.M., Metcalfe, R.: The petrology and paragenesis of fracture mineralisation in the Sellafield area, West Cumbria. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society* **52**, 215-241 (1998).
- [46] Bath, A.H., Milodowski, A.E., Ruotsalainen, P., Tullborg, E.-L., Cortéz Ruiz, A. and Aranyossy, J-F.: Evidence from mineralogy and geochemistry for the evolution of groundwater systems during the quaternary for use in radioactive waste repository safety assessment (EQUIP project). European Commission Nuclear Science and Technology Project Report EUR 19613. ISBN 92-894-0120-6 (2000).
- [47] Folk, R. L.: The natural history of crystalline calcium carbonate: effect of magnesium content and salinity. *Sedimentary Petrology* **44**, 40-53 (1974).
- [48] Iwatsuki, T., Satake, H., Metcalf, R., Yoshida, H. and Hama, K.: Isotopic and morphological features of fracture calcite from granitic rocks of the Tono area, Japan: a promising paleohydrogeological tool. *Applied Geochemistry* **17**, 1241-1257 (2002).
- [49] Blyth, A., Frape, S., Ruskeenieni, T., Blomqvist, R.: Origins, closed system formation and preservation of calcites in glaciated crystalline bedrock: evidence from Palmottu natural analogue site, Finland. *Applied Geochemistry* **19**, 675-686 (2004).
- [50] Milodowski, A.E., Tullborg, E.-L., Buil, B., Gómez, P., Turrero, M.J., Haszeldine, S., England G., Gillespie, M.R., Torres, T., Ortiz, J.E., Zachariás, J., Šilar, J., Chvátal A.L., M., Strnad, L., Šebek, O., Bouch, J.E., Chenery, S.R., Chenery, C., Shepherd, T.J., Mc Kervey, J.A.: Application of mineralogical petrological and geochemical tools for evaluating the palaeohydrogeological evolution of the PADAMOT Study sites. PADAMOT Project Technical Report WP2. EU FP5 Contract No. FIKW-CT2001-20129 (2005).
- [51] O'Neil, J.R., Clayton, R.N., Maeda, T.K.: Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. *Journal of Chemical Physics* **51**, 5547-5558 (1969).
- [52] Shikazono, N. and Utada, M.: Stable isotope geochemistry and diagenetic mineralization associated with the Tono sandstone-type uranium deposit in Japan. *Mineralium Deposita* **32**, 596-606 (1997).
- [53] Arthur, R. C., Iwatsuki, T., Sasao, E., Metcalfe, R., Amano, K., Ota, K.: Geochemical constraints on the origin and solubility of the Tono uranium deposit, Japan. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* **6**, 33-48 (2006).
- [54] 水野崇, 岩月輝希: 地下深部における地球化学的環境の長期的変遷 -炭酸塩鉱物中の微量元素に基づく解析例-. 地球化学 **40**, 33-45 (2006).

- [55] OECD/NEA: Features, Events and Processes (FEPs) for geologic disposal of radioactive waste. An international database. OECD/NEA (2000).
- [56] 楠瀬勤一郎, 小出仁: 地質環境予測期間と不確実性の取り扱い. 資源と素材 **117**, 801-815 (2001).
- [57] 山元孝広, 小玉喜三郎: 日本の地層処分で考慮すべき地質および気候関連事象について. 月刊地球 **26**, 452-456 (2004).
- [58] 新里忠史, 安江健一: 幌延地域における地質環境の長期安定性に関する研究－長期安定性の評価・予測における地域特性の考慮－. 原子力バックエンド研究 **11**, 125-137 (2005).
- [59] 岩月輝希, 石井英一, 新里忠史: 北海道幌延地域における深部地球化学環境の長期変遷シナリオの構築. 地学雑誌 **118**, 700-716 (2009).

