

# 硬質堆積岩が分布する地域における 深部地下水の地球化学性状に関する考察

## CONSIDERATION CONCERNING GEOCHEMISTRY PROPERTIES OF DEEP UNDERGROUND WATER IN HARD SEDIMENTARY ROCK REGION

日比野悦久\*・南将行\*・小山俊博\*\*・白土博司\*\*\*・彌榮英樹\*\*

Etohisa HIBINO, Masayuki MINAMI and Toshihiro KOYAMA and Hiroshi SHIRATUTI and Hideki MIE

In this consideration, to understand geochemistry properties of the deep underground water in hard sedimentary rock region, it examined the deep underground water about the maximum 700m in depth by using the geochemistry data of water in the surface of the earth part around in the tunnel, which had concerning the origin and the water quality formation process of the deep underground water.

**Key Ward:** deep underground water, geochemistry properties, hard sedimentary rock

### 1. はじめに

近年、揚水発電所の地下発電所をはじめとして、石油地下備蓄など地山被りの大きな大深度地下に、大規模空洞を設置するような土木構造物に対するコストダウンや最適化のニーズが高まっている。地下水の地球化学的性状を適切に把握して、その結果から、水理地質構造モデルの精度を向上させることができれば、ドレーン設計の合理化など、工事費の低減に寄与するものと考えられる。

本検討では、硬質な堆積岩が分布する地域における深部地下水の地球化学的性状を把握するため、最大地山被り約 700 m を有するトンネル内および周辺地表部の水の地球化学データ（化学成分濃度や同位体組成など）を用いて、深部地下水の起源や水質形成過程に関する考察を行った。

### 2. 深部地下水の地球化学的調査

#### 2.1 調査の概要

調査地点は、関東山地の北西部に位置する。調査地点周辺には、秩父帯のジュラ紀オリストストロームからなる堆積岩が分布する。その構成岩種は、砂岩、チャート、泥岩、石灰岩、塩基性火山岩類などである。岩盤の平均的な一軸圧縮強度は、150 Mpa 程度であり非常に硬質な堆積岩である。

採水は延長約 4.5 km のトンネル（以下、H トンネルと称する）内湧水箇所 の 10 箇所（H-1 ～H-10）と、近傍に設置されているトンネル（以下、K トンネルと称する）内の湧水 3 箇所（K-1 ～K-3）、周辺の地表の沢 4 箇所の計 17 箇所で行った。同時に比較検討のための天水（降雨水）試料を 2 箇所で行った。採水箇所の湧水量は、最大で約 5 L/min であり、多くの箇所が

---

\* 正会員 東京電力(株) 建設部

\*\*正会員 東電設計(株) 第一土木本部

\*\*\*非会員 東電設計(株) 第一土木本部

1～2 L/min 程度もしくはそれ以下の少量湧水である。採水にあたっては、できるだけ外気の混入を避けようとして注意して慎重に採水を行った。Kトンネル内の採水箇所は、地山被り約460m～475mではほぼ一様であるのに対して、Hトンネル内の採水箇所は、地山被り170m～700m程度と一様でないという特徴がある。HトンネルならびにKトンネル内での採水箇所の断面位置を図-1に、採水箇所の地質ならびに地山被りを表-1に示す。

## 2.2 測定・分析結果

### 1)測定・分析項目

実施した測定・分析の、項目および内容を表-2に示す。物理化学パラメータと溶存成分の測定・分析は、すべての採水試料を対象に実施した。その他の測定・分析項目（同位体組成、地下水年代測定、溶存希ガス分析）は、湧水量と湧水状況を考慮して、測定・分析に適した箇所を抽出して実施した。

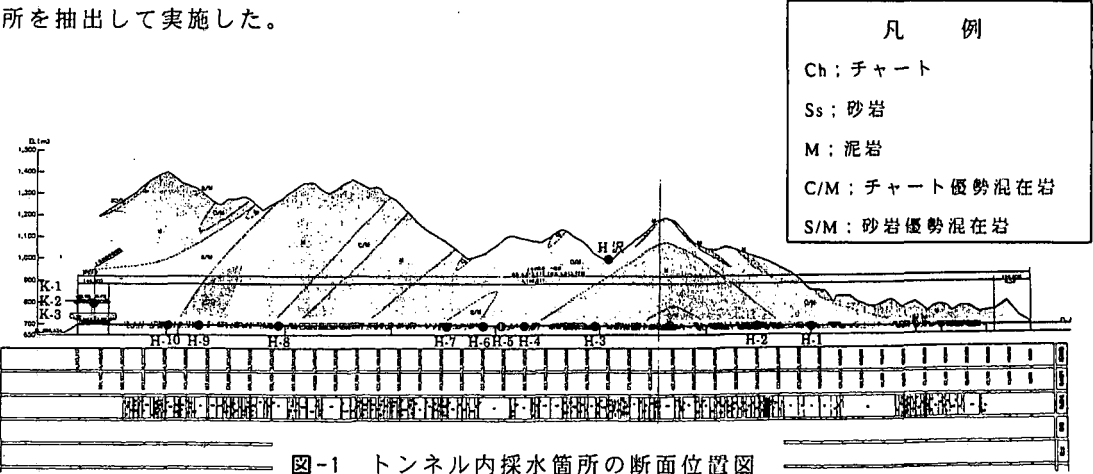


図-1 トンネル内採水箇所の断面位置図

表-1 採水箇所の地質ならびに地山被り

| No. | 試料名  | 標高<br>m | 地山標高<br>m | 地山被り<br>m | 地質      |
|-----|------|---------|-----------|-----------|---------|
| 1   | K-1  | 781     | 1241      | 460       | 砂岩      |
| 2   | K-2  | 781     | 1256      | 475       | 砂岩      |
| 3   | K-3  | 781     | 1240      | 459       | 砂岩      |
| 4   | H-1  | 690     | 860       | 170       | チャート    |
| 5   | H-2  | 691     | 1010      | 319       | チャート／泥岩 |
| 6   | H-3  | 692     | 1030      | 338       | チャート／泥岩 |
| 7   | H-4  | 692     | 1095      | 403       | チャート    |
| 8   | H-5  | 693     | 1070      | 377       | チャート    |
| 9   | H-6  | 693     | 1025      | 332       | チャート    |
| 10  | H-7  | 693     | 1070      | 377       | 砂岩/泥岩   |
| 11  | H-8  | 694     | 1249      | 555       | チャート    |
| 12  | H-9  | 694     | 1281      | 587       | チャート    |
| 13  | H-10 | 694     | 1396      | 702       | 砂岩/泥岩   |
| 14  | D沢   | 1565    | 1565      | 0         | (地表水)   |
| 15  | T沢   | 1170    | 1170      | 0         | 〃       |
| 16  | H沢   | 990     | 990       | 0         | 〃       |
| 17  | S沢   | 790     | 790       | 0         | 〃       |
| 18  | 天水1  | 555     | 555       | 0         | 〃       |
| 19  | 天水2  | 1320    | 1320      | 0         | 〃       |

表-2 測定・分析項目

| 項目        | 内容                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 物理化学パラメータ | 水温、pH、RpH、電気伝導度                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 溶存成分      | Na <sup>+</sup> 、K <sup>+</sup> 、Ca <sup>2+</sup> 、Mg <sup>2+</sup> 、Fe <sup>3+</sup> 、Fe <sup>2+</sup> 、Al <sup>3+</sup> 、Si <sup>4+</sup> 、Sr <sup>2+</sup> 、Cl <sup>-</sup> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、T-CO <sub>2</sub> 、TOC、NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、I <sup>-</sup> 、Br <sup>-</sup> 、B <sup>3+</sup> |
| 同位体組成     | δD (2H/1H)、δ13C (13C/12C)、δ18O (18O/16O)、34S/32S、87Sr/86Sr、3H (トリチウム)                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 地下水年代測定   | 14C法                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 溶存希ガス分析   | 溶存Heガス、3He/4He、222Rn                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

## 2) 水質の分類

各湧水箇所での水質の分類を行なうために、トリリニア・ダイアグラムとヘキサダイアグラムを作成した。一般に、トリリニアダイアグラムとヘキサダイアグラムは、水質分類を行なう上で基本的な解析手法であり、得られた主要成分を基に整理されるものである。

図-2 に、トリリニア・ダイヤグラムを示す。図中の菱形座標の領域は、タイプⅠ～タイプⅤの、5つの水質タイプに分類され、それぞれの主要陽イオンと主要陰イオンは、表-3に示すイオンから構成される。本検討地域の水は、タイプⅠ、タイプⅢ、タイプⅣ、ならびにタイプⅢとタイプⅣの中間型、の4つのタイプに分類される。タイプⅠに分類される水は、沢水と地山被りの小さな箇所トンネル内湧水、タイプⅣに分類される水は、トンネル奥側の地山被りが相対的に大きな箇所の湧水、タイプⅢに分類される水は、トンネル中央付近の湧水である。また、タイプⅢとタイプⅣの中間型に分類される水(H-7)は、トンネル中央(タイプⅢ)よりも奥側の、やや地山被りの大きな箇所の湧水である。

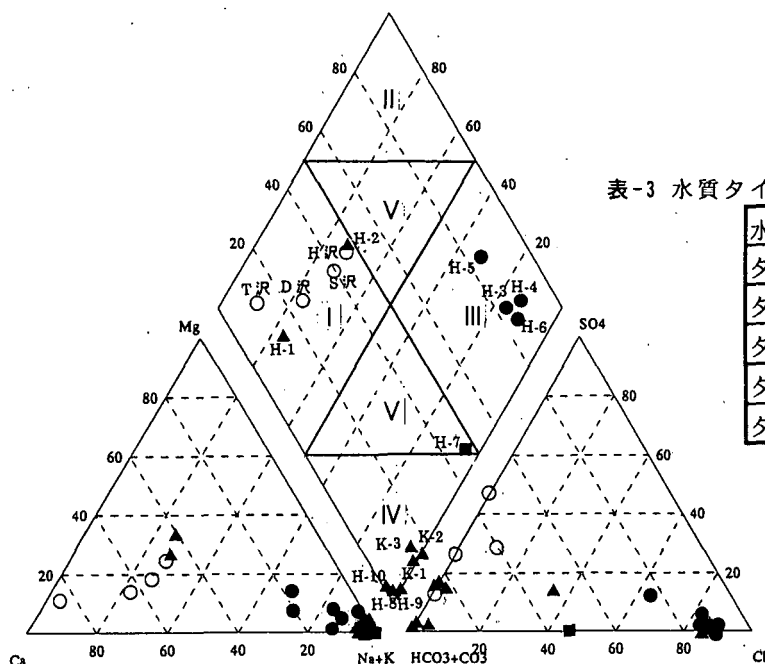


図-2 トリリニア・ダイヤグラム

表-3 水質タイプ別の主陽イオンと主陰イオン

| 水質タイプ | 主陽イオン                             | 主陰イオン                               |
|-------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| タイプⅠ  | $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ | $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ |
| タイプⅡ  | $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ | $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$    |
| タイプⅢ  | $\text{Na}^+ + \text{K}^+$        | $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$    |
| タイプⅣ  | $\text{Na}^+ + \text{K}^+$        | $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ |
| タイプⅤ  | 中間型                               | 中間型                                 |

次に、トリリニア・ダイアグラム（図-2）によって分類した4つの水質タイプ別の、代表的なヘキサダイアグラムを図-3に示す。ヘキサダイアグラム上では、水質組成を図の形状で、溶存成分量を図の広がり（大きさ）で示している。本検討対象地域において、タイプⅢに分類された水（H-3～H-6）は、他の水質タイプの水と比較して、全体的に高い溶存量を示し、特に、H-3およびH-4は、NaとClの濃度が相対的に高い水であることが特徴的である（濃度を示すと、Na；2995～2223 mg/l，Cl；4270～3196 mg/l）。H-5、H-6も他の坑道内湧水と比較して、NaとClの濃度が高い傾向が認めらる。

地山被りの大きな箇所でのトンネル内湧水（タイプⅣ）は、上記のタイプⅢの水と比較すると溶存量は低いものの、タイプⅠ（地山被りの小さな箇所のトンネル内湧水ならびに沢水）よりも、高い溶存量を持つ地下水であるという特徴が認められる。

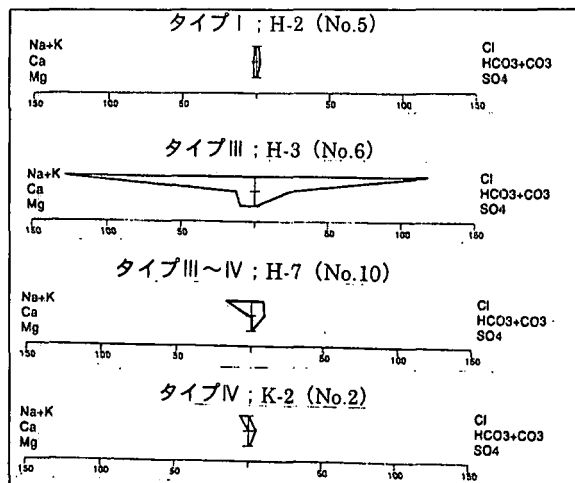


図-3 水質タイプ別の代表的なヘキサダイアグラム

### 3. 深部地下水の地球化学的特性に関する検討

#### 3.1 地下水の起源について

##### 1) 溶存成分を用いた起源水の検討

水質分類によって、タイプⅢに分類される地下水の起源を推定するために、Na成分とCl成分に着目した検討を行った。NaとClは、上記タイプⅢの地下水中に多く含まれていることが判明した成分であり、かつ、海水中に特徴的に多く含まれる成分である。図-4にClとNaの散布図を示す。図中では、現在の平均的な海水の、NaとClも併せて記している。図から、H-3～H-6は、平均的な海水と、当該地点の天水（Na濃度とCl濃度はいずれも0 mg/l）を端成分とする直線上（図中、破線）にほぼプロットされる。この比率から、H-3とH-4は、現在の平均海水が4～5倍程度に希釈された水質を示す水であり、H-5とH-6は、H-3とH-4よりも更に海水が薄められた水質を示す水であると考えられる。したがって、H-3～H-6のこれらの水の起源には、海水が関与している可能性が推定される。また、タイプⅢに分類されるトンネル中央部の湧水（H-3～H-6）には、ホウ素（B）が、現在の平均的な海水中よりも多く含まれているという特徴がある（濃度を示すと、H-3～H-6；23.9～5.0 mg/l、平均海水；4.5 mg/l程度）。ホウ素は、石油／天然ガス地域で天然ガスや石油に付随する高塩水（化石水）中には、比較的多く含まれている場合があることが知られている。このことから、H-3～H-6の起源水には、上記と同様の水質を示す高塩水が関与している可能性がある。

一方、タイプⅣに分類されたトンネル奥側の湧水は、タイプⅢの水と比較して、相対的に溶存成分量が少なく、NaとClの溶存量も少ない。したがって、トンネル奥側の湧水は、天水を起源とする地下水であると推定される。

##### 2) 同位体組成を用いた起源水の検討

水素および酸素の安定同位体である $\delta D$  ( $^2H/^1H$ ) と  $\delta^{18}O$  ( $^{18}O/^16O$ ) を用いて、起源水の検討を行った。図-5に $\delta^{18}O$ と $\delta D$ の散布図を示す。散布図上では、検討対象としたすべての試料が、 $\delta D = 8\delta^{18}O + 2 \sim \delta D = 8\delta^{18}O + 18$ の範囲内に入る。試料の多くは、Craig (1968) による一般的な天水ライン（図中、破線）と、対象地域の天水ライン（一点鎖線）との間にプロットされ、これらの箇所の地下水が天水を起源とする水であることが推定される。ただし、タイプⅢの水質に分類されたH-3～H-6に着目すると、これらは、上記の天水ラインからは、やや外れた位置にプロットされ、 $\delta^{18}O$ が重い方向へシフトする傾向が認められる。H-3～H-6の水の起源には、前記1)で推定したように、天水と異なる高塩水が、関与している可能性を裏付けている。

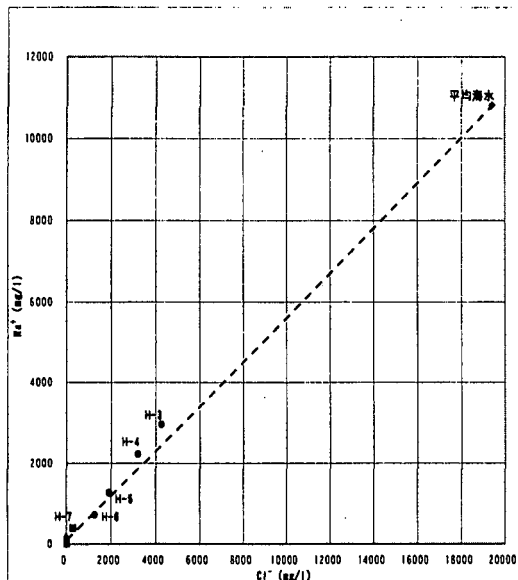


図-4 Cl と Na の散布図

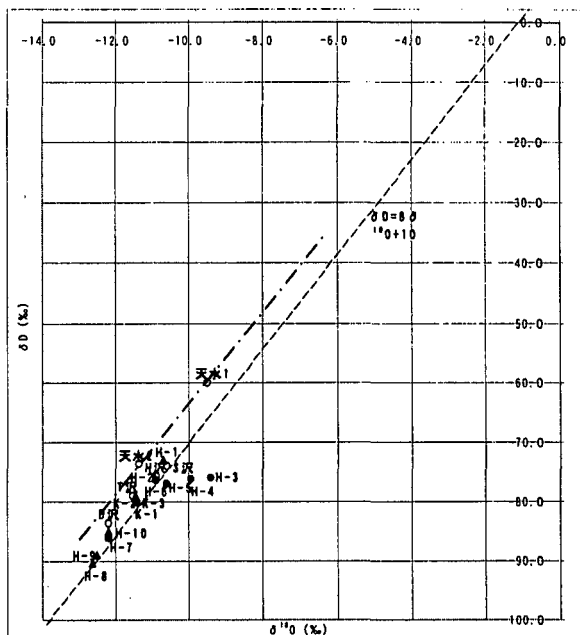


図-5  $\delta^{18}\text{O}$  と  $\delta\text{D}$  の散布図

### 3.2 地下水の水質形成過程について

ダイヤグラムを用いた検討によって、天水起源の水は、地山被り（土被り）が相対的に小さな箇所では、タイプⅠ（ $\text{Ca}+\text{Mg}-\text{HCO}_3$  型）の水質を、地山被りが相対的に大きな箇所では、タイプⅣ（ $\text{Na}+\text{K}-\text{HCO}_3$  型）の水質を示すことが判明した。また、タイプⅣの水質を示す水は、タイプⅠの水質を示す水よりも、溶存成分濃度が高いことが判った。各採水箇所における地下水の流動経路は特定できていないため、地山被りが大きな箇所が、地山被りが小さな箇所よりも相対的に流動経路が長いということは必ずしも結論できないが、上記のような状況を仮定した場合、本検討対象地域の天水を起源とする地下水は、深度が増大するとともに、すなわち地下水と岩石が接触する面積や時間が長くなるとともに、水と岩石の反応が進行して、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ に富む水質から、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$ に富む水質へと変化する、また、岩石中の鉱物（アルバイト質な斜長石やモンモリロナイトなど）から地下水中に溶出する成分（ $\text{K}^+$ など）も増加する可能性が高いことが確認された。

図-6 に、主要成分の一つである Na と、土被りとの関係を示す。この図は、タイプⅣ（天水起源）に分類される水と、タイプⅠ（天水起源）に分類される水に、着目した図である。図からは、検討対象地域における天水起源の水は、土被りが大きくなるにつれて Na 濃度の増加する傾向が認められる。このことは、天水起源の水は、土被りが大きくなる（この場合、流動経路が長くなると仮定）と、水-岩石反応が進行した水質を示す地下水に、変化することを示しているものと考えられる。

### 3.3 地下水の滞留時間について

地下水の滞留時間を検討するため、地下水中の  $^3\text{H}$ （トリチウム）と  $^{14}\text{C}$  濃度を測定した。 $^3\text{H}$  は、測定箇所のほとんどで、検出限界以下の値となった。 $^3\text{H}$  が検出された箇所は、相対的に地山被り小さな箇所である H-2（H-1 は測定対象外）と、地山被りの相対的に大きな箇所の一つである K-3 である。H-2 は、天水起源で溶存成分濃度が非常に小さな水の水質を示すことから、この箇所には、流動速度の速い水（ $^3\text{H}$  の検出範囲内の年代の水）が、割合的に多く入り込んで

いるものと考えられる。また、K-3 にも、流動速度の速い水 ( $^3\text{H}$  の検出範囲内の年代の水) が、入り込んでいと判断されるが、その水質は、近傍の K-1、K-2 と同様であることから、割合としては少ないものと考えられる。

また、 $^{14}\text{C}$  濃度から算出した  $^{14}\text{C}$  年代値は、11,280~39,230 yBP の範囲内にあり、このうち 30,000~40,000 yBP 程度の、 $^{14}\text{C}$  法の飽和年代に近い年代値のものが多く得られた。 $^3\text{H}$  が検出された箇所や、H-1 のように地山被りの小さな箇所では、得られた  $^{14}\text{C}$  年代値のうちでも相対的に新しい年代値 (11,280~15,690 yBP) となった。 $^{14}\text{C}$  による地下水の年代測定法は、現状では、地下水が浸透する過程で接してきた有機物質や炭酸塩鉱物から付加される  $^{14}\text{C}$  分の補正の問題など、研究段階の手法であるため、 $^{14}\text{C}$  年代値を絶対年代値として扱うことには課題がある。しかし、今回の  $^{14}\text{C}$  年代値を、大よその年代値としてとらえて、 $^3\text{H}$  測定結果を考慮すると、以下のような推察が可能である。すなわち、本検討対象地域の深部地下水は、滞留時間の非常に長い地下水を主体としており、流動経路の短い相対的に浅部な箇所ならびに、地山被りが大きな箇所のうち透水性の高い割目などを有し、流動時間が相対的に短いごく一部で、 $^3\text{H}$  の検出範囲内である水が流入して、地下水の水質を形成している。

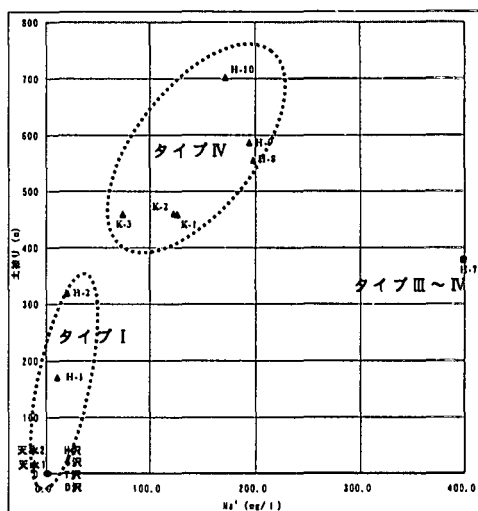


図-6 Na と土被りとの関係

#### 4. まとめ

本検討では、硬質な堆積岩が分布する対象地域の深部地下水の地球化学的データを用いて、地下水の起源、形成過程、滞留時間についての考察を行なった。

- (1) 溶存成分ならびに同位体組成を用いた検討によって、対象地域の地下水の起源には、天水起源の水と、これとは異なる高塩水の水が関与している可能性があり、H トンネル中央部で認められるように、天水起源の水と高塩水の水が希釈・混合し合って、水質を形成している箇所が推定される。
- (2) 天水起源の地下水は、地下深部では、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  に富む水質から、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$  に富む水質へと変化する傾向が確認された。
- (3) 対象地域の深部地下水は、滞留時間の非常に長い地下水を主体とする。このことは、当該地域の深部の地下水は、基本的には流動速度が極めて小さな地下水からなることを示唆していると考えられる。