



JAEA-Data/Code

2020-001

DOI:10.11484/jaea-data-code-2020-001

# 幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質データ (2017年度～2019年度)

Data of Groundwater Chemistry Obtained  
in the Horonobe Underground Research Laboratory Project  
(FY2017–FY2019)

宮川 和也 女澤 徹也 望月 陽人 笹本 広

Kazuya MIYAKAWA, Tetsuya MEZAWA, Akihito MOCHIZUKI and Hiroshi SASAMOTO

核燃料・バックエンド研究開発部門  
幌延深地層研究センター  
深地層研究部

Horonobe Underground Research Department  
Horonobe Underground Research Center  
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

March 2020

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2020

幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質データ（2017年度～2019年度）

日本原子力研究開発機構

核燃料・バックエンド研究開発部門 幌延深地層研究センター 深地層研究部

宮川 和也，女澤 徹也\*，望月 陽人，笹本 広

（2020年1月6日 受理）

幌延深地層研究計画における深地層の科学的研究では，実際の地下の地質環境特性を調査するための技術開発や，得られた地質環境特性に基づく地質環境モデルの構築が進められている。地質環境モデルの1つである地下水の地球化学モデルの構築・見直しにあたっては，地下施設周辺における地下水の水質データが必要である。

本報告は，2017年度～2019年度までの3年間に，幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質データとして，物理化学パラメータおよび水質の測定・分析結果を取りまとめたものである。

Data of Groundwater Chemistry Obtained in the Horonobe Underground Research Laboratory Project  
(FY2017–FY2019)

Kazuya MIYAKAWA, Tetsuya MEZAWA\*, Akihito MOCHIZUKI and Hiroshi SASAMOTO

Horonobe Underground Research Department  
Horonobe Underground Research Center  
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development  
Japan Atomic Energy Agency  
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received January 6, 2020)

Development of technologies to investigate properties of deep geological environment and model development of geological environment have been pursued in “Geoscientific Research” in the Horonobe Underground Research Laboratory (Horonobe URL) project. A geochemical model which is a part of geological environment model requires the data of groundwater chemistry around the Horonobe URL for the development.

This report summarizes the data obtained for 3 years from the fiscal year 2017 to 2019, especially for the results for measurement of physico-chemical parameters and analysis of groundwater chemistry, in the Horonobe URL project.

Keywords: Groundwater, Chemistry, Horonobe URL, Geoscientific Research

---

\* DIA CONSULTANTS (Collaborating Engineer until March 2018)

目 次

1. はじめに	1
2. 採取箇所および採取方法	1
3. 測定・分析方法	5
3.1 物理化学パラメータの測定	6
3.1.1 pH および水温	6
3.2.1 電気伝導度	7
3.2 地下水中の溶存成分の分析	7
3.2.1 $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{Li}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{NH}_4^+$	7
3.2.2 $\text{Sr}^{2+}$ , P, Total-Mn, Si, Total-Fe, Al, B	7
3.2.3 $\text{Cl}^-$ , $\text{Br}^-$ , I, $\text{NO}_3^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{PO}_4^{3-}$	8
3.2.4 F	8
3.2.5 アルカリ度 (P-Alkalinity および M-Alkalinity)	9
3.2.6 全有機炭素 (TOC), 不揮発性有機体炭素 (NPOC), 全無機炭素 (TIC)	10
3.2.7 $\text{CO}_3^{2-}$ , $\text{HCO}_3^-$	10
3.2.8 生物学的酸素消費量 (BOD)	11
3.2.9 化学的酸素要求量 ( $\text{COD}_{\text{Cr}}$ )	12
3.2.10 $\text{Fe}^{2+}$ および全鉄 ( $\text{Fe}^{2+}$ HACH および Total-Fe HACH)	13
3.2.11 硫化物 ( $\text{H}_2\text{S}$ , $\text{HS}^-$ など) ( $\text{HS}^-$ HACH)	13
3.3 同位体の分析	13
3.3.1 酸素同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ )	13
3.3.2 水素同位体比 ( $\delta\text{D}$ )	14
3.3.3 トリチウム ( $^3\text{H}$ )	15
3.4 微量元素の分析 (Co, As, Mo, Cs, Ba)	16
4. 測定・分析結果	16
4.1 イオンバランス	16
4.2 ヘキサダイアグラム (ステップダイアグラム)	16
4.3 試料採取後における水質変化について	17
5. おわりに	40
謝辞	40
参考文献	41

Contents

1. Introduction	1
2. Sampling locations and methods	1
3. Analytical methods	5
3.1 Physico-chemical parameters	6
3.1.1 pH and water temperature	6
3.2.1 Electrical conductivity	7
3.2 Dissolved components in groundwater	7
3.2.1 Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Li <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	7
3.2.2 Sr <sup>2+</sup> , P, Total-Mn, Si, Total-Fe, Al, B	7
3.2.3 Cl <sup>-</sup> , Br <sup>-</sup> , I <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	8
3.2.4 F <sup>-</sup>	8
3.2.5 P-Alkalinity and M-Alkalinity	9
3.2.6 Total organic carbon (TOC), Non-purgeable organic carbon (NPOC), Total inorganic carbon (TIC)	10
3.2.7 CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10
3.2.8 Biochemical oxygen demand (BOD)	11
3.2.9 Chemical oxygen demand (COD <sub>Cr</sub> )	12
3.2.10 Fe <sup>2+</sup> and total Fe (Fe <sup>2+</sup> HACH and Total-Fe HACH)	13
3.2.11 Sulfide (H <sub>2</sub> S, HS <sup>-</sup> etc.) (HS <sup>-</sup> HACH)	13
3.3 Isotope analysis	13
3.3.1 Oxygen isotope ratio (δ <sup>18</sup> O)	13
3.3.2 Hydrogen isotope ratio (δD)	14
3.3.3 Tritium ( <sup>3</sup> H)	15
3.4 Minor elements (Co, As, Mo, Cs, Ba)	16
4. Results	16
4.1 Ion balance	16
4.2 Hexadiagram (stiff diagram)	16
4.3 Changes of electrical conductivity after sampling	17
5. Summary	40
Acknowledgement	40
References	41

## 1. はじめに

幌延深地層研究計画では、平成 13 年（2001 年）3 月より、地上からの調査研究段階（第 1 段階）に着手し、平成 18 年（2006 年）3 月に第 1 段階の調査研究が終了し、その後、坑道掘削時の調査研究段階（第 2 段階）の調査研究が開始された<sup>1)</sup>。平成 22 年度（2010 年度）からは、地下施設における坑道の整備に伴い、第 2 段階の調査研究と並行し、地下施設での調査研究段階（第 3 段階）が開始されている<sup>1)</sup>。深度 350m の研究坑道掘削の終了までの期間（2005 年 4 月～2014 年 6 月）に行われた第 2 段階の調査研究の成果については、佐藤らにより取りまとめられている<sup>2)</sup>。

幌延深地層研究計画における深地層の科学的研究では、地下の地質環境特性を調査するための技術開発や、得られた地質環境特性に基づく地質環境のモデル化技術の整備が進められている。地質環境モデルの 1 つに、地下水の地球化学モデルがある。その構築にあたっては、ベースラインデータとして、地下施設周辺の地表から地下に至る領域の地表水（河川水）や地下水のデータが必要である。平成 13 年度～平成 22 年度（2001 年度～2010 年度）の第 1 段階及び第 2 段階の調査において得られたこれらのデータは、天野らにより取りまとめられている<sup>3)</sup>。天野らは、第 1 段階における地上からのボーリング調査を通じて得られた水試料（河川水、雨水、地下水、岩石コアからの抽出水）や、第 2 段階における地下施設建設時の調査を通じて得られた水試料（立坑壁面からの湧水、坑道から掘削されたボーリング孔からの湧水）を対象に、地下水の物理化学パラメータ（pH、酸化還元電位、電気伝導度）、水質（溶存成分、水の酸素・水素同位体）、溶存ガス、有機物および微生物について、幅広く既存の情報を収集・整理している<sup>3)</sup>。平成 23 年度（2011 年度）以降も、地下施設近傍にある既存の地上からのボーリング孔や地下施設内からの採水は、継続して行われている。平成 25 年度（2013 年度）からは、深度 350m に掘削された周回坑道（調査坑道）を利用した第 3 段階の調査研究が本格的に開始され、深度 350m の調査坑道から掘削されたボーリング孔からの採水も行われている。これらの平成 23 年度～平成 25 年度（2011 年度～2013 年度）において得られた水試料の分析結果については、笹本らにより取りまとめられている<sup>4)</sup>。第 2 段階の調査研究の終了後も引き続き第 3 段階の調査研究が継続され、平成 26 年度～平成 28 年度（2014 年度～2016 年度）において得られた地下水の分析結果は、宮川らにより取りまとめられている<sup>5)</sup>。

本報告書では、主に、地下施設の建設が地下水の水質に与える影響の調査等の第 3 段階の調査研究として 2017 年度～2019 年度の期間に得られた地下水試料の分析結果を取りまとめた。

## 2. 採取箇所および採取方法

本報告書で取りまとめた地下水試料は、地上からの浅層ボーリング孔 (Fig. 1) および、東立坑、西立坑および換気立坑の集水リング (Fig. 2)、各調査坑道から掘削されたボーリング孔 (Fig. 3) から採取された。浅層ボーリング孔の地下水の採取方法については、地上から地下水面まで採水チューブを下ろし、手動ポンプで地下水を汲み上げ、大気開放条件で採取した。集水リングの地下水の採取方法については、立坑壁面からの湧水が覆工コンクリートとの隙間を通り流れ落ちたものを、立坑の壁面に深度 30～40 m 間隔で設置されている集水リングで受け、そこから各調査坑道まで伸びる採水ホースを流れた地下水を、大気開放条件で採取した。集水リングの試料は、一つ上の深度に設置されている集水リングとの間の立坑壁面からの湧水を集めたものである。各調

査坑道から掘削されたボーリング孔からの地下水の採取方法については、パッカーで区切られた採水区間等のボーリング孔内から伸びるチューブを通し、大気解放条件で自然に湧出する地下水を採取した。各試料の詳細な採取位置情報や採水時のフィルタリングの有無については、Table 3の分析結果一覧表に合わせて示す。

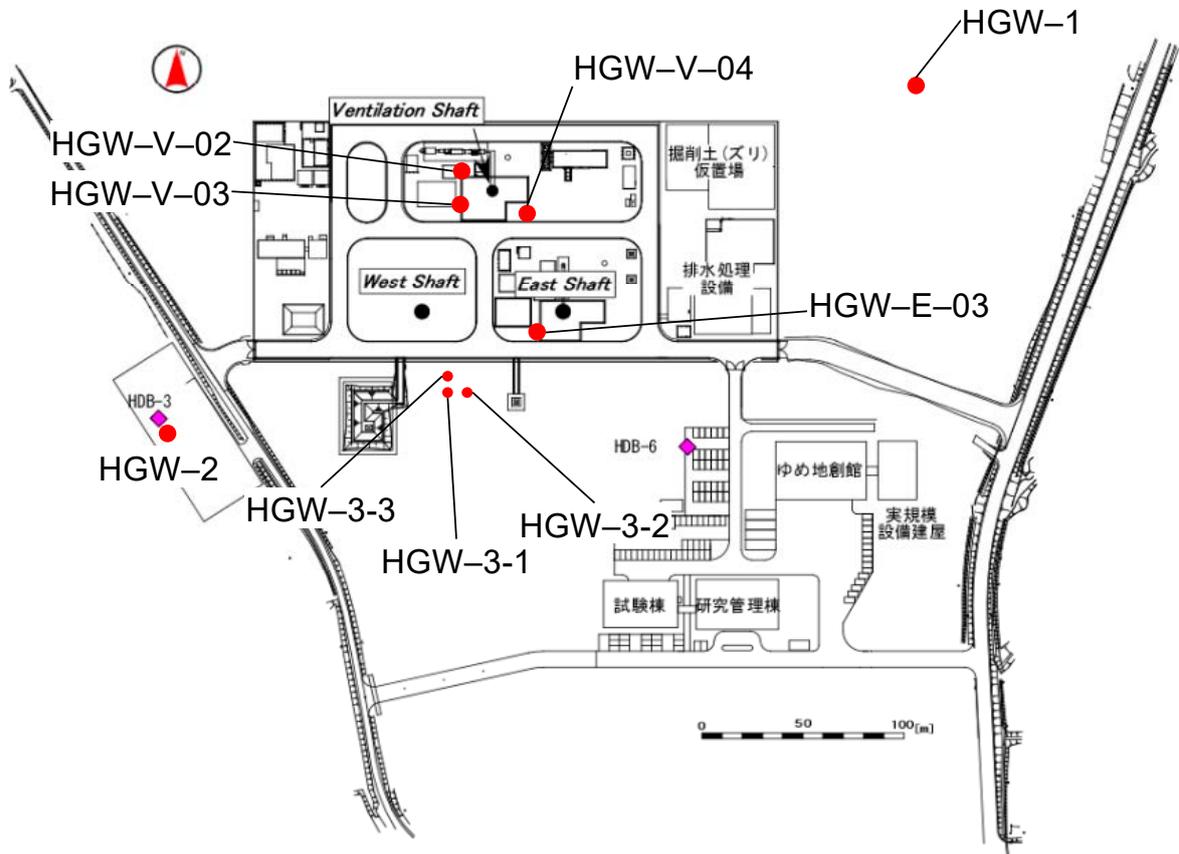


Fig. 1. Location map showing shallow boreholes (indicated by closed red circles) drilled from surface

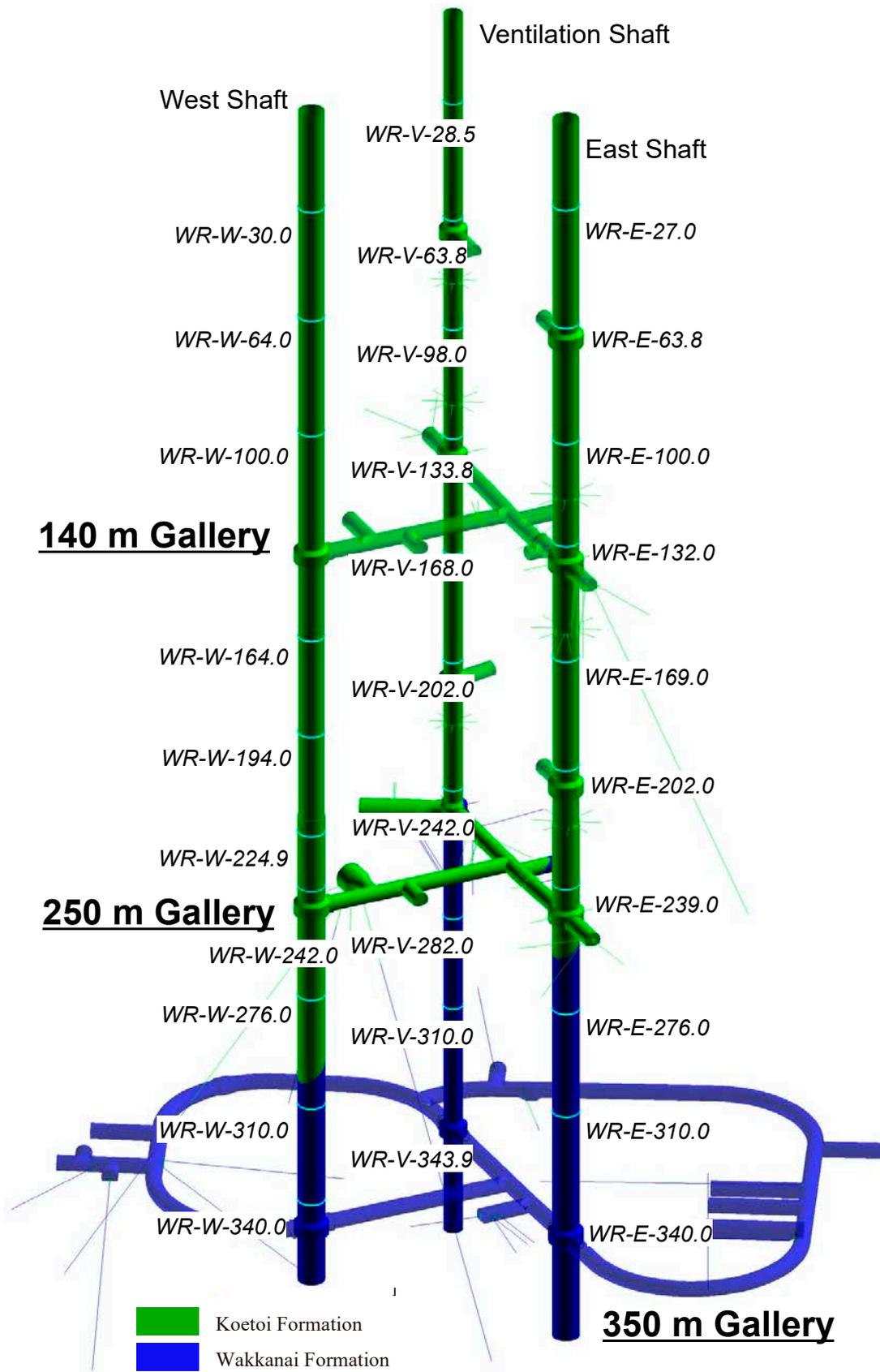


Fig. 2. Location map of water rings (WR) in the Horonobe URL

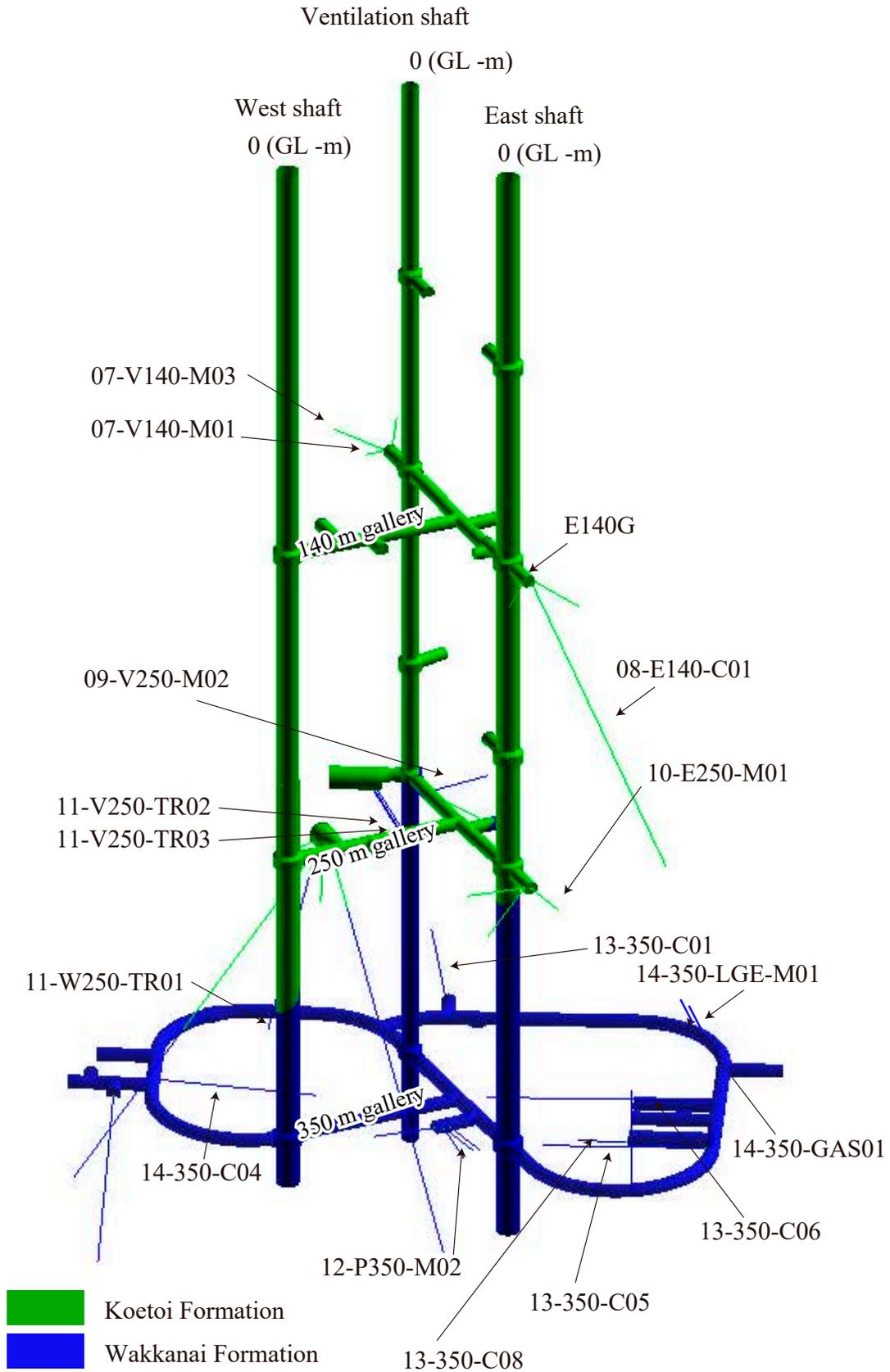


Fig. 3. Layout of the Underground Research Laboratory and boreholes

### 3. 測定・分析方法

日本原子力研究開発機構（JAEA）により採取された試料は、石油資源開発株式会社へ搬送後に測定・分析された。ただし、3.2.10 項および 3.2.11 項に示される 2 価鉄および全鉄濃度と硫化物濃度については、幌延深地層研究センターの地下施設に於いて、試料の採取直後に JAEA により分析された。測定・分析項目は次のとおりである：①物理化学パラメータ（pH, 電気伝導度, 水温）, ②地下水中の溶存成分（陽イオン：Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Li<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Sr<sup>2+</sup>, Total-Mn, Si, Total-Fe, Al<sup>3+</sup>, B, Fe<sup>2+</sup>, 陰イオン：F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, I<sup>-</sup>, P, その他：アルカリ度, 全有機炭素, 全無機炭素, 生物化学的酸素消費量, 化学的酸素要求量, 硫化物（H<sub>2</sub>S, HS<sup>-</sup>など））, ③同位体（酸素同位体比, 水素同位体比, トリチウム）, ④微量元素（As, Co, Mo, Cs, Ba）。Table 1 に、分析項目と分析方法の一覧を示す。次に、各測定・分析方法の詳細について示す。

Table 1: List of analytical methods

分析項目	単位	基づいた JIS 法	分析方法
pH	-	JIS K0102 12.1	電極法
電気伝導度	mS/m	JIS K0102 13	
水温	°C	JIS K0102 7.2	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	JIS K0102 22.2	pH と全炭酸濃度から算出
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	JIS K0102 25.1	
アルカリ度	mg/L	JIS K0102 15	滴定法
全有機炭素	mg/L	JIS K0102 22.2	燃焼酸化赤外線式 TOC 自動計測法
全無機炭素	mg/L	JIS K0102 22.2	
Na <sup>+</sup>	mg/L	JIS K0102 48.3	イオンクロマトグラフ法
K <sup>+</sup>	mg/L	JIS K0102 49.3	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/L	JIS K0102 42.5	
Li <sup>+</sup>	mg/L	JIS K0127	
Ca <sup>2+</sup>	mg/L	JIS K0127	
Mg <sup>2+</sup>	mg/L	JIS K0127	
Cl <sup>-</sup>	mg/L	JIS K0102 35.3	
Br <sup>-</sup>	mg/L	JIS K0102 37.2	イオンクロマトグラフ法
I <sup>-</sup>	mg/L	JIS K0127	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	JIS K0102 43.2.5	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	JIS K0102 41.3	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/L	JIS K0127	
Si <sup>2+</sup>	mg/L	JIS K0116	ICP 発光分光分析法
P	mg/L	JIS K0116	
Total Mn	mg/L	JIS K0102 56.4	
Si	mg/L	JIS K0116	
Total Fe	mg/L	JIS K0102 57.4	
Al	mg/L	JIS K0102 58.4	
B	mg/L	JIS K0102 47.3	
F <sup>-</sup>	mg/L	JIS K0102-34.4	流れ分析法
生物化学的酸素消費量 (BOD)	mg/L	JIS K0102 21	滴定法
化学的酸素要求量 (COD <sub>Cr</sub> )	mg/L	JIS K0102 20	二クロム酸カリウムによる酸素消費量
酸素同位体比	‰		質量分析法
水素同位体比	‰		質量分析法
トリチウム濃度	T.U. (Bq/kg)		シンチレーションカウンター法
As, Co, Mo, Cs, Ba	μg/L	JIS K0116 等	ICP 質量分析法
Fe <sup>2+</sup> および全鉄濃度	mg/L	JIS K0400 57.10	1, 10-フェナントロリン吸光光度法
硫化物 (H <sub>2</sub> S, HS <sup>-</sup> など)	μg/L	JIS K0102	メチレンブルー吸光光度法

### 3.1 物理化学パラメータの測定

#### 3.1.1 pH および水温

ガラス電極法 (pH: JIS K0102 12.1, 水温: JIS K102 7.2 に基づく) により測定した。測定には、堀場製作所製 pH/ION METER F-72 および pH 電極 (MODEL 9615 JF15) を用いた。pH 標準液として、次の 3 種類の試薬を用いた。(1)フタル酸塩 pH 標準液 (和光純薬工業製 JCSS 特定二次 pH 標準液 pH4.01(25°C)), (2)中性リン酸塩 pH 標準液 (和光純薬工業製 JCSS 特定二次 pH 標準液

pH6.86(25°C)), (3)ホウ酸塩 pH 標準液(和光純薬工業製 JCSS 特定二次 pH 標準液 pH9.18(25°C))。

測定手順は次のとおりである。検出部を水で繰り返し 3 回以上洗い、きれいな柔らかい紙で拭いた。検出部の洗浄方法は以降の操作でも同様とした。中性リン酸塩 pH 標準液をビーカーに採り、検出部を浸して pH6.86(25°C)に校正した。フタル酸塩 pH 標準液をビーカーに採り、検出部を浸して pH4.01(25°C)に校正した。ホウ酸塩 pH 標準液をビーカーに採り、検出部を浸して pH9.18(25°C)に校正した。試料をビーカーに採り、検出部を浸して pH 値と測定温度を記録した。測定は 3 回繰り返し、平均値を算出した。品質管理の指標として、3 回の測定値の変動が $\pm 0.1$ 以内であることを確認した。

### 3.1.2 電気伝導度

JIS K0101 13 に基づき、電気伝導度の測定を行った。測定に用いた装置は、堀場製作所製 COND METER DS-72 および導電率電極 (3552-10D, セル定数:  $0.944 \times 100 \text{ m}^{-1}$ ) である。

測定手順は次のとおりである。検出部を水で繰り返し 3 回以上洗った。試料でセルを 2, 3 回洗浄した後、検出部を試料溶液で満たし、電気伝導度を測定した。測定値が $\pm 3\%$ で一致するまで数回測定し、電気伝導度 (mS/m) (25°C 自動補正值) を読み取った。日常の品質管理として、数回測定の変動が $\pm 3\%$ であることを確認した。月次の品質管理として、0.744 g/L 塩化カリウム標準液の電気伝導度が  $140.8 \text{ mS/m}(25^\circ\text{C}) \pm 10\%$  以内であることを確認した。また、7.437 g/L 塩化カリウム標準液の電気伝導率が  $1,286 \text{ mS/m}(25^\circ\text{C}) \pm 10\%$  以内であることを確認した。

## 3.2 地下水中の溶存成分の分析

### 3.2.1 $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{Li}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{NH}_4^+$

イオンクロマトグラフ法 ( $\text{Na}^+$ : JIS K0102 48.3,  $\text{K}^+$ : JIS K0102 49.3,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ : JIS K0127,  $\text{NH}_4^+$ : JIS K0102 42.5 に基づく) により分析した。測定装置は、ダイオネクス社製イオンクロマトグラフ ICS-1500 を用いた。分離カラムには、IonPac CS16 を用いた。溶離液には、30 mM メタンシルホン酸を用い、その流量は  $1.0 \text{ mL/min}$  とした。サプレッサーには、CSRS-500 (4 mm) を用いた。検出器は電気伝導度検出器であり、試料の注入量は  $25.0 \mu\text{L}$  である。用いた試薬は次のとおりである。(1)  $1,000 \text{ mg/L Na}^+$  標準液 (関東化学製), (2)  $1,000 \text{ mg/L K}^+$  標準液 (関東化学製), (3)  $1,000 \text{ mg/L Li}^+$  標準液 (関東化学製), (4)  $1,000 \text{ mg/L Ca}^{2+}$  標準液 (関東化学製), (5)  $1,000 \text{ mg/L Mg}^{2+}$  標準液 (関東化学製), (6)  $1,000 \text{ mg/L NH}_4^+$  標準液 (関東化学製), (7) メタンシルホン酸 特級 (和光純薬工業製)。

分析手順は次のとおりである。試料を  $0.45 \mu\text{m}$  のフィルターでろ過し、ろ液を試料溶液とした。標準液を段階的に希釈して標準溶液とし、検量線を作成した。試料溶液を測定し、検量線から濃度換算した。品質管理として、クロマトグラムのベースラインが安定していることを確認した。また、標準溶液の再測定値の違いが、標準値の $\pm 5\%$ 以内であることを確認した。

定量下限については、 $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$  が  $0.1 \text{ mg/L}$ ,  $\text{Li}^+$  が  $0.01 \text{ mg/L}$  である。

### 3.2.2 $\text{Sr}^{2+}$ , P, Total-Mn, Si, Total-Fe, Al, B

ICP 発光分光分析法 ( $\text{Sr}^{2+}$ , P, Si: JIS K0116, Total-Mn: JIS K0102 56.4, Total-Fe: JIS K0102 57.4, Al: JIS K0102 58.4, B: JIS K0102 47.3 に基づく) により分析した。用いた測定装置は、リガク製 SPECTRO Ciros CCD である。測定した波長は、 $\text{Sr}^{2+}$  については  $407.8 \text{ nm}$ , P については  $213.6 \text{ nm}$  ( $177.5 \text{ nm}$ ), Total-Mn については  $257.6 \text{ nm}$ , Si については  $251.6 \text{ nm}$ , Total-Fe については  $259.9 \text{ nm}$

(238.2 nm), Al については 396.2 nm (167.1 nm, 394.4 nm), B については 249.773 nm である。ただし、元素間干渉によるスペクトルの重なりがある場合には他の干渉のない分析線を使用した。用いた試薬は次のとおりである。(1) 硝酸 有害金属測定用 (和光純薬工業製), (2) 1,000 mg/L ストロンチウム標準液 (関東化学製), (3) 1,000 mg/L リン標準液 (関東化学製), (4) 1,000 mg/L マンガン標準液 (関東化学製), (5) 1,000 mg/L ケイ素標準液 (関東化学製), (6) 1,000 mg/L 鉄標準液 (関東化学製), (7) 1,000 mg/L アルミニウム標準液 (関東化学製), (8) 1,000 mg/L ホウ素標準液 (関東化学製)。

分析手順は次のとおりである。試料を硝酸で pH2 以下に調整し、0.45  $\mu\text{m}$  のフィルターでろ過し、ろ液を試料溶液とした。ろ過前には、十分に振り混ぜ、攪拌を行った。各成分元素の標準液を段階的に希釈して標準溶液とし、検量線を作成した。試料溶液を測定し、検量線から濃度換算した。品質管理として、硝酸添加後の試料溶液の pH が 2 以下であることを確認した。また、標準溶液の再測定値の違いが、標準値の $\pm 5\%$ 以内であることを確認した。

定量下限については、 $\text{Sr}^{2+}$ は 0.01 mg/L, Total-Mn, Total-Fe は 0.05 mg/L, Si, P, Al は 0.1 mg/L, B は 0.05 mg/L である。

### 3.2.3 $\text{Cl}^-$ , $\text{Br}^-$ , $\text{I}^-$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{PO}_4^{3-}$

イオンクロマトグラフ法 ( $\text{Cl}^-$ : JIS K0102 35.3,  $\text{Br}^-$ : JIS K0102 37.2,  $\text{I}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ : JIS K0127,  $\text{NO}_3^-$ : JIS K0102 43.2.5,  $\text{SO}_4^{2-}$ : JIS K0102 41.3 に基づく)により測定した。用いた装置は、ダイオネクス社製イオンクロマトグラフ ICS-2000 である。分離カラムには、IonPacAS-11-HC を用いた。溶離液には、0.5 mM および 22 mM の KOH 溶液を用い、その流量は、1.2 mL/min とした。サプレッサーには、AERS-500 (4 mm) を使用した。 $\text{Cl}^-$ と  $\text{Br}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ については、電気伝導度検出器を用い、 $\text{Br}^-$ と  $\text{I}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ については、UV 検出器を使用した。試料の注入量は、25  $\mu\text{L}$  である。用いた試薬は次のとおりである。(1) 水酸化カリウム EGCIH KOH (Thermo Fisher Scientific 製), (2) 1,000 mg/L 塩化物イオン標準液 (関東化学製), (3) 1,000 mg/L 臭化物イオン標準液 (関東化学製), (4) 1,000 mg/L ヨウ化物イオン標準液 (Fluka 製), (5) 1,000 mg/L 硝酸イオン標準液 (関東化学製), (6) 1,000 mg/L 硫酸イオン標準液 (関東化学製), (7) リン酸イオン標準液 (和光純薬工業製)。

分析手順は次のとおりである。0.45  $\mu\text{m}$  のフィルターで試料をろ過し、ろ液を試料溶液とした。標準液を段階的に希釈して標準溶液とし、検量線を作成した。試料溶液を測定し、検量線から濃度換算した。品質管理として、クロマトグラムのベースラインが安定していることを確認した。また、標準溶液の再測定値の違いが、標準値の $\pm 5\%$ 以内であることを確認した。

定量下限については、 $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ は 0.1 mg/L,  $\text{PO}_4^{3-}$ は 0.3 mg/L である。

### 3.2.4 $\text{F}^-$

フッ素化合物を JIS K0102 34.4 に基づく流れ分析法により分析した。用いた装置は、ビーエルテック社製の連続流れ分析装置 STAT-2000 である。用いた試薬は次のとおりである。(1) 1,000 mg/L フッ化物イオン標準液 (関東化学製), (2) アセトン 特級 (関東化学製), (3) 硫酸 特級 (関東化学製), (4) リン酸 特級 (関東化学製), (5) アルフッソン (同仁化学研究所製), (6) エタノール 特級 (関東化学製), (7) イミダゾール (関東化学製), (8) Triton X-100 (Sigma-Aldrich 製), (9) 酢酸 特級 (関東化学製)。

ランタン-アリザリンコンプレキソン溶液の調整手順は次のとおりである。アルフッソン 2.5 g

を水約 300 mL に溶かし、酢酸 40 mL、イミダゾール 10 g、アセトン 125 mL および 100 mg/L に調整したフッ化物イオン標準液 0.5 mL を加えて混合した。水を加えて 500 mL とした後、Triton X 溶液（Triton X-100 をエタノールに溶かしたもの）5 mL を加えて混合した。

分析手順は次のとおりである。分析装置に硫酸-リン酸の混合溶液（蒸留試薬溶液）を流し、装置内の流路が安定して流れていることを確認した。ランタン-アリザリンコンプレキソン溶液を流し、分析装置のベースラインが安定するまで待った。検量線用フッ素標準溶液（0.05~2.0 mg/L）および試料をサンプルトレイにセットし、測定を開始した。

分析装置内では、試料と蒸留試薬溶液が連続的に混合し蒸留される。蒸留した留分をランタン-アリザリンコンプレキソン溶液と混合し、反応させる。反応によって生成する青色の化合物の波長 620 nm における吸光度を測定し、検量線用フッ素標準溶液の吸光度と比較することでフッ素化合物の濃度を定量した。品質管理として、安定性確認用標準液を測定し、調整濃度の±10%以内であることを確認した。

定量下限は、0.1 mg/L である。

### 3.2.5 アルカリ度（P-Alkalinity および M-Alkalinity）

滴定法（JIS K0102 15 に基づく）により測定した。用いた試薬は、0.1 mol/L 塩酸（関東化学製容量分析用）である。

P アルカリ度（酸消費量(pH8.3)）の測定手順は次のとおりである。試料 20~100 mL をビーカーに取り、試料に pH 計の電極を浸した。マグネチックスターラーで攪拌しながら 0.1 mol/L 塩酸を用いて試料の pH が 8.3 になるまで滴定した。次式によって P アルカリ度を算出した。

$$\text{P アルカリ度 (CaCO}_3 \text{ mg/L)} = a \times f \times 1000/v \times 5.004,$$

$$\text{P アルカリ度 (meq/L)} = a \times f \times 0.1 \times 1000/v,$$

a : 滴定に要した 0.1 mol/L 塩酸の量 (mL),

f : 0.1 mol/L 塩酸のファクター,

v : 用いた試料量 (mL),

5.004 : 0.1 mol/L 塩酸 1 mL の炭酸カルシウム相当量 (mg),

0.1 : 0.1 mol/L 塩酸 1 mL の水素イオン濃度相当量 (mmol)。

M アルカリ度（酸消費量(pH4.8)）の測定手順は次のとおりである。試料 20~100 mL をビーカーに採り、試料に pH 計の電極を浸した。マグネチックスターラーで攪拌しながら 0.1 mol/L 塩酸を用いて試料の pH が 4.8 になるまで滴定した。次式によって M アルカリ度を算出した。

$$\text{M アルカリ度 (CaCO}_3 \text{ mg/L)} = a \times f \times 1000/v \times 5.004,$$

$$\text{M アルカリ度 (meq/L)} = a \times f \times 0.1 \times 1000/v,$$

a : 滴定に要した 0.1 mol/L 塩酸の量 (mL),

f : 0.1 mol/L 塩酸のファクター,

v : 用いた試料量 (mL),

5.004 : 0.1 mol/L 塩酸 1 mL の炭酸カルシウム相当量 (mg),

0.1 : 0.1 mol/L 塩酸 1 mL の水素イオン濃度相当量 (mmol)。

品質管理として、pH 電極で終点の pH を確認した。

定量下限については、1 mg/L または 0.02 meq/L である。

### 3.2.6 全有機炭素 (TOC) , 不揮発性有機体炭素 (NPOC) , 全無機炭素 (TIC)

燃焼酸化-赤外線式 TOC 自動計測法 (JIS K0102 22.2 に基づく) により分析した。用いた測定装置は、島津製作所製全有機体炭素計 TOC-VCSH である。キャリアーガスには純空気 (G1) を用いた。用いた試薬は次のとおりである。(1)フタル酸水素カリウム 特級 (和光純薬工業製), (2)炭酸水素ナトリウム 特級 (和光純薬工業製), (3)炭酸ナトリウム 特級 (和光純薬工業製), (4)25%リン酸溶液 (島津製作所製), (5) 2 mol/L 塩酸 (島津製作所製)。

分析手順は次のとおりである。フタル酸水素カリウム (容量分析用標準物質) を 120°C で約 1 時間加熱し、デシケーター中で放冷した。その 0.2125 g を測り取り、水で溶かして全量を 100 mL に調整し、これを TOC 標準液とした。TOC 標準液の一定量 (50 μL) を分析して指示値を読み取った。この操作を数回繰り返して、指示値が一定になることを確かめた。TOC 標準溶液を調整し、検量線を作成した。空試験として、標準溶液の調整に用いた水と同量の水を測定して検量線を補正した。試料に塩酸を加えて pH を 3 以下に調整し、通気して無機炭素と揮発性有機化合物を除去した溶液について、同様に測定し、これを全有機炭素濃度とした。ここで検出された全有機炭素は、地下水中に溶存しているメタンガスなどの揮発性有機化合物を含まないことから、不揮発性有機体炭素 (NPOC) と呼ばれる。品質管理として、標準溶液の再測定値が、標準値の±10%以内であることを確認した。

デシケーター中で 2 時間乾燥させた炭酸水素ナトリウムを 0.350 g, 280~290°C で 1 時間加熱してデシケーター中で放冷した炭酸ナトリウムを 0.441 g それぞれ測り取り、両者を水で 100 mL に定容し、これを TIC 標準溶液とした。TIC 標準液の一定量 (50 μL) を分析して指示値を読み取った。この操作を数回繰り返して、指示値が一定になることを確かめた。TIC 標準溶液を調整し、検量線を作成した。空試験として、標準溶液の調整に用いた水と同量の水を測定して検量線を補正した。試料の TIC 測定を行い、各検量線から濃度を換算した。また、試料 50 μL を装置に導入して全炭素 (TC) を測定し、次式から TOC を求めた。TOC = TC - TIC。品質管理として、標準溶液の再測定値が、標準値の±10%以内であることを確認した。

定量下限については、0.3 mg/L である。

### 3.2.7 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

試料中の全炭酸濃度と試料の pH から、次式によって算出した。全炭酸濃度は TIC 濃度から計算した。各 pH における炭酸イオンおよび炭酸水素イオンの存在割合については Table 2 を参照されたい。定量下限については、それぞれ 1 mg/L である。

$$\text{CO}_3^{2-} = C \times b \times 1.364,$$

$$\text{HCO}_3^- = C \times a \times 1.387,$$

CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>: 炭酸イオン (mg CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>/L) ,

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>: 炭酸水素イオン (mg HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L) ,

C: 全炭酸 (mg CO<sub>2</sub>/L) ,

a: 全炭酸に対する炭酸水素イオンの存在割合,

b: 全炭酸に対する炭酸イオンの存在割合,

1.364: 全炭酸の量を炭酸イオン相当量に換算する場合の係数 (60.01/44.01) ,

1.387: 全炭酸の量を炭酸水素イオン相当量に換算する場合の係数 (61.02/44.01) 。

Table 2: Abundance ratios of bicarbonate and carbonate ions at pH of 2.0–13.0

pH	濃度分布 (25°C)		pH	濃度分布 (25°C)		pH	濃度分布 (25°C)	
	a(HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	b(CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )		a(HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	b(CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )		a(HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	b(CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )
2.0	0.0000	-	6.0	0.3012	0.0000	10.0	0.6801	0.3197
2.1	0.0001	-	6.1	0.3517	0.0000	10.1	0.6281	0.3717
2.2	0.0001	-	6.2	0.4058	0.0000	10.2	0.5730	0.4269
2.3	0.0001	-	6.3	0.4623	0.0000	10.3	0.5160	0.4840
2.4	0.0001	-	6.4	0.5198	0.0001	10.4	0.4585	0.5414
2.5	0.0001	-	6.5	0.5767	0.0001	10.5	0.4021	0.5978
2.6	0.0002	-	6.6	0.6317	0.0001	10.6	0.3482	0.6517
2.7	0.0002	-	6.7	0.6834	0.0002	10.7	0.2980	0.7020
2.8	0.0003	-	6.8	0.7310	0.0002	10.8	0.2521	0.7479
2.9	0.0003	-	6.9	0.7737	0.0003	10.9	0.2112	0.7888
3.0	0.0004	-	7.0	0.8114	0.0004	11.0	0.1754	0.8246
3.1	0.0005	-	7.1	0.8440	0.0005	11.1	0.1445	0.8555
3.2	0.0007	-	7.2	0.8717	0.0006	11.2	0.1183	0.8817
3.3	0.0009	-	7.3	0.8951	0.0008	11.3	0.0963	0.9037
3.4	0.0011	-	7.4	0.9145	0.0011	11.4	0.0781	0.9219
3.5	0.0014	-	7.5	0.9304	0.0014	11.5	0.0630	0.9370
3.6	0.0017	-	7.6	0.9433	0.0018	11.6	0.0507	0.9493
3.7	0.0022	-	7.7	0.9536	0.0022	11.7	0.0407	0.9593
3.8	0.0027	-	7.8	0.9618	0.0029	11.8	0.0326	0.9674
3.9	0.0034	-	7.9	0.9681	0.0036	11.9	0.0261	0.9739
4.0	0.0043	-	8.0	0.9729	0.0046	12.0	0.0208	0.9792
4.1	0.0054	-	8.1	0.9762	0.0058	12.1	0.0166	0.9834
4.2	0.0068	-	8.2	0.9784	0.0073	12.2	0.0132	0.9868
4.3	0.0085	-	8.3	0.9794	0.0092	12.3	0.0105	0.9895
4.4	0.0107	-	8.4	0.9794	0.0116	12.4	0.0084	0.9916
4.5	0.0134	-	8.5	0.9783	0.0145	12.5	0.0067	0.9933
4.6	0.0169	-	8.6	0.9760	0.0183	12.6	0.0053	0.9947
4.7	0.0211	-	8.7	0.9726	0.0229	12.7	0.0042	0.9958
4.8	0.0265	-	8.8	0.9677	0.0287	12.8	0.0034	0.9966
4.9	0.0331	-	8.9	0.9613	0.0359	12.9	0.0027	0.9973
5.0	0.0413	-	9.0	0.9530	0.0448	13.0	0.0021	0.9979
5.1	0.0515	-	9.1	0.9425	0.0558			
5.2	0.0639	-	9.2	0.9294	0.0692			
5.3	0.0792	-	9.3	0.9133	0.0857			
5.4	0.0977	-	9.4	0.8936	0.1055			
5.5	0.1199	-	9.5	0.8700	0.1293			
5.6	0.1465	-	9.6	0.8419	0.1576			
5.7	0.1776	-	9.7	0.8090	0.1906			
5.8	0.2138	-	9.8	0.7710	0.2287			
5.9	0.2550	-	9.9	0.7280	0.2718			

### 3.2.8 生物化学的酸素消費量 (BOD)

滴定法 (JIS K0102 21 に基づく) により測定した。測定手順は次のとおりである。はじめに、試料中の残留塩素の還元処理を行った。試料 100 mL をビーカーに採り、約 1 N の塩酸または水酸化ナトリウム溶液 (濃度 40 g/L) を用いて試料の pH を 7 に中和した。アジ化ナトリウム (特級) 0.1 g とヨウ化カリウム (特級) 1 g を加え、約 1 N の塩酸を用いて試料の pH を 7 に中和した。暗所に数分間放置した後、1% でんぷん溶液指示薬を 1 mL 加え、遊離したヨウ素を亜硫酸ナトリウム溶液 (12.5 mmol/L) により指示薬の青色が消えるまで滴定した。この時に要した亜硫酸ナトリウム溶液の量を x mL とする。別の 100 mL ビーカーに試料を 100 mL 採り、亜硫酸ナトリウム溶液を x mL 加え、残留塩素を還元した。

約 1 N の塩酸または水酸化ナトリウム溶液 (濃度 40 g/L) を用い、試料の pH を 7 に中和し、これを溶液 A とした。培養瓶に溶液 A を段階的にとり、これを酸素に飽和させた超純水で希釈し、各濃度あたり同じものを 4 本用意した。4 本のうち 2 本については 15 分間放置し、残りの 2 本に

については5日間放置した後、ウィンクラー-アジ化ナトリウム変法により、試料中の溶存酸素濃度を測定した。

溶存酸素濃度の測定手順は、次のとおりである。放置後の試料溶液に塩化マンガン溶液(25%)を1 mL 加え、ヨウ化カリウムとアジ化ナトリウムのそれぞれの濃度が15%と2%である混合溶液を1 mL 加えて攪拌した。約1 Nの塩酸を3 mLを加えた後、0.01 mol/Lチオ硫酸ナトリウム溶液(関東化学製)で滴定した。溶液の色がある程度薄く変化した時点で1%でんぷん溶液を1 mL 加え、無色に変化する点を滴定の終点とした。15分放置した試料と5日間放置した試料の溶存酸素濃度の差からBODを算出した。溶存酸素濃度の算出方法を下に示す。

$$\text{溶存酸素濃度 (mg/L)} = a \times f \times 1/(V-2) \times 0.08,$$

- a : 滴定に要した0.01 mol/Lチオ硫酸ナトリウム溶液 (mL),
- f : 0.01 mol/Lチオ硫酸ナトリウム溶液のファクター,
- v : 培養瓶の容量 (mL),
- 2 : 酸素固定時に添加した試薬体積の合計 (mL),
- 0.08 : 0.01 mol/Lチオ硫酸ナトリウム1 mLに相当する酸素の質量 (mg)

BODの算出方法は次式のとおりである。

$$\text{BOD (mgO/L)} = (D_1 - D_2) \times \text{希釈率},$$

- D<sub>1</sub> : 15分間放置した試料の溶存酸素濃度 (mg/L),
- D<sub>2</sub> : 5日間放置した試料の溶存酸素濃度(mg/L)。

品質管理として、各滴定操作を2回行い、結果に有意な差が無いことを確認した。

定量下限については、0.5 mgO/Lである。

### 3.2.9 化学的酸素要求量 (COD<sub>Cr</sub>)

滴定法 (JIS K0102 20 に基づく) により測定した。用いた試薬は、次のとおりである。(1)硫酸特級 (関東化学製), (2)硫酸銀 (関東化学製), (3)硫酸水銀 (II) (関東化学製), (4)硫酸鉄 (II) 七水和物 (関東化学製), (5) 1, 10-フェナントロリン-水和物 (関東化学製), (6)二クロム酸カリウム (関東化学製), (7)硫酸アンモニウム鉄 (II) 六水和物 (関東化学製)。分析手順は次のとおりである。試料10 mLをあらかじめ硫酸水銀 (II) 0.4 gを入れた丸底フラスコに取り、水を加えて20 mLとし、よく振り混ぜた。1/240 mol/L二クロム酸カリウム溶液10 mLを加え、注意してよく振り混ぜながら硫酸銀-硫酸溶液30 mLを加えた後、沸騰石を数個入れた。還流冷却器を付けて2時間煮沸した。冷却した後、約10 mLの水で還流冷却器を洗い、洗液をフラスコに流し入れ、さらに水で約140 mLに希釈した。指示薬として、1, 10-フェナントロリン鉄 (II) 溶液を2, 3滴加え、過剰の二クロム酸を25 mmol/L硫酸アンモニウム鉄 (II) 溶液で滴定し、溶液の色が青緑色から赤褐色に変わった点を終点とした。空試験として、別に水20 mLを取り、上記の滴定試験を繰り返した。COD<sub>Cr</sub>の算出方法は次式のとおりである。

$$\text{COD}_{Cr} \text{ (mgO/L)} = 0.2 \times (a - b) \times f \times 1000/V,$$

- a : 滴定に要した25 mmol/L硫酸アンモニウム鉄 (II) 溶液の量 (mL),
- b : 空試験における滴定に要した25 mmol/L硫酸アンモニウム鉄 (II) 溶液の量 (mL),
- f : 25 mmol/L硫酸アンモニウム鉄 (II) 溶液のファクター,
- V : 用いた試料の量(mL),

0.2 : 25 mmol/L 硫酸アンモニウム鉄 (II) 溶液 1 mL の酸素消費量 (mg)。品質管理として、各滴定操作を 2 回行い、結果に有意な差が無いことを確認した。定量下限については、0.2 mg/L である。

### 3.2.10 Fe<sup>2+</sup>および全鉄 (Fe<sup>2+</sup> HACH および Total-Fe HACH)

1,10-フェナントロリン吸光光度法 (JIS K0400 57.10 に基づく) により分析した。用いた分析装置は、HACH 製の吸光光度計 DR2800 である。

分析手順は次のとおりである。試料を 0.45 μm のフィルターでろ過し、ろ液を試料溶液とした。試料溶液に 1,10-フェナントロリン試薬 (HACH Cat.1037-69) を加え、攪拌後、3 分間静置した。波長 510 nm の吸光度を測定し、装置に付属の検量線を用いて 2 価鉄の濃度を求めた。全鉄については、試料溶液に 1,10-フェナントロリン試薬および次亜硫酸ナトリウム等の還元剤 (HACH Cat.21057-69) を加え、攪拌後、3 分間静置し、波長 510 nm の吸光度を測定し、装置に付属の検量線を用いて求めた。品質管理の指標として、同一試料に対して上記の分析手順を 3 回行い、ばらつきを記録した。なお、本分析は、試料採取直後に現場において実施した。

### 3.2.11 硫化物 (H<sub>2</sub>S, HS<sup>-</sup>など) (HS<sup>-</sup> HACH)

メチレンブルー吸光光度法 (JIS K0102 に基づく) により分析した。用いた分析装置は、HACH 製の吸光光度計 DR2800 である。

分析手順は次のとおりである。試料を 0.45 μm のフィルターでろ過し、ろ液を試料溶液とした。試料溶液に N,N-ジメチル-p-フェニレンジアミンを含む硫酸試薬およびニクロム酸試薬 (HACH Cat.1816-32 および 1817-32) を加え、攪拌後、5 分間静置した。波長 665 nm の吸光度を測定し、装置に付属の検量線を用いて硫化物の濃度を求めた。品質管理の指標として、同一試料に対して上記の分析手順を 3 回行い、ばらつきを記録した。なお、本分析は、試料採取直後に現場において実施した。

## 3.3 同位体の分析

### 3.3.1 酸素同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ )

地下水の酸素同位体比を、質量分析法により測定した。前処理は、Thermo Fisher Scientific 製の Gas Bench II 汎用前処理装置を用い、二酸化炭素-水間酸素同位体平衡法により行った。測定装置は、Thermo Fisher Scientific 製 Delta V advantage コンティニューアスフロー方式安定同位体比質量分析装置を用いた。1 試料の測定につき、測定回数を 10 回以上とした (測定精度 $\pm 0.1\%$ )。一次標準試料には IAEA の標準物質である平均海水の VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) および南極の雪である VSLAP (Vienna Standard Light Antarctic Precipitation) を用いた。準一次標準試料にはグリーンランド氷床の雪である GISP (Greenland Ice Sheet Precipitation) を用いた。二次標準試料には、昭光サイエンス社の安定同位体比測定用スタンダード試料である DOW (Deep Ocean Water), SLW2 (Sugito Labo Water 2), ICE2 (ICE age 2) を用いた。作業標準資料には、M-DOW (Muroto-Deep Ocean Water) を用いた。平衡ガスには CO<sub>2</sub> (純度 > 99.999%) を 1%, He (>99.999%) をバランスとした混合ガスを用いた。キャリアーガスには He ガス ( $\geq 99.999\%$ ) を用いた。リファレンスガスには CO<sub>2</sub> ガス ( $\geq 99.995\%$ ) を用いた。

分析手順は次のとおりである。キャリアーガス (He) とリファレンスガス (CO<sub>2</sub>) の圧力が十分

であることを確認し、リファレンスガスの一次弁を開けた。安定同位体比質量分析計の調整を行った後に、スタビリティチェック（リファレンスガスの同位体比の10回測定）を行い、標準偏差が0.05%以下であることを確認した。サンプル容器内に試料および二次標準試料、作業標準試料を各0.2 mLずつ入れ、これを恒温トレイに設置し、トレイの温度を25℃にした。HeとCO<sub>2</sub>の混合ガスによるフラッシュ、20時間の平衡、測定の順に自動で測定を行った。二次標準試料（一次標準試料の検量線で規格化済）の測定値と試料の測定値から、試料の酸素同位体比をVSMOWスケールとして千分率（‰）に換算した。品質管理として、スタビリティチェック値および測定バッチ毎の二次標準試料の実測値を管理項目とし、分析装置の異常がないことを確認した。リファレンスガスの同位体比10回測定の標準偏差が0.05%以下であることを、出力を変化させてリファレンスガスの同位体比を測定したときに値の傾斜が0.06‰/V以下であることを確認した。試料の測定値をVSMOWスケールに換算する際に用いた二次標準試料の10回繰り返し測定における標準偏差が0.1%以下であり、かつ実測定値とVSMOWスケールの値との間の相関係数が0.999以上となることを確認した。未知試料5-10試料ごとに測定する作業標準試料の同位体変動が、測定バッチを通して±0.2%以下であることを確認した。変動がある場合は、変動が確認された作業標準試料と、その前後の正常に測定できている作業標準試料の間の未知試料について再測定を行った。ただし、変動が見られるものの軽微である場合は、変動のあった作業標準試料とその前後の正常に測定できている作業標準試料の間の未知試料の同位体比補正値を按分することで変動の補正を行った。

分析結果は、次式で表されるデルタ値（ $\delta$ ）として示す。 $\delta = (R)_{\text{sample}} / (R)_{\text{VSMOW}} - 1$ 。Rは酸素同位体比（<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O）の測定値である。

### 3.3.2 水素同位体比（ $\delta\text{D}$ ）

地下水の水素同位体比を、質量分析法により測定した。前処理は、Thermo Fisher Scientific製のGas Bench II汎用前処理装置を用い、水素-水間水素同位体平衡法により行った。測定装置は、Thermo Fisher Scientific製Delta V advantageコンティニューアスフロー方式安定同位体比質量分析装置を用いた。1試料の測定につき、測定回数を10回以上とした（測定精度±2%）。一次標準試料にはVSMOWおよびVSLAPを用いた。準一次標準試料にはGISPを用いた。二次標準試料にはDOW, SLW2, ICE2を用いた。作業標準試料には、M-DOWを用いた。平衡ガスには、H<sub>2</sub>（純度>99.999%）を2%、He(>99.999%)をバランスとした混合ガスを用いた。キャリアーガスには、Heガス（≥99.999%）を用いた。リファレンスガスには、H<sub>2</sub>ガス（≥99.995%）を用いた。

分析手順は次のとおりである。キャリアーガス（He）とリファレンスガス（H<sub>2</sub>）の圧力が十分であることを確認し、リファレンスガスの一次弁を開けた。安定同位体比質量分析装置の調整を行った後に、スタビリティチェック（リファレンスガスの同位体比の10回測定）を行い、標準偏差が0.5%以下であることを確認した。サンプル容器内に試料および二次標準試料、作業標準試料を各0.2 mLずつ入れ、これを恒温トレイに設置し、トレイの温度を25℃にした。その後、自動測定により順に、平衡ガスによるフラッシュ、疎水性白金触媒下で1時間の平衡、測定を行った。二次標準試料の測定値と試料の測定値から試料の水素同位体比をVSMOWスケールとして千分率（‰）に換算した。品質管理として、スタビリティチェック値および測定バッチ毎の二次標準試料の実測値を管理項目とし、分析装置の異常がないことを確認した。リファレンスガスの同位体比10回測定の標準偏差が0.5%以下であり、測定値のドリフトが0.1%/回以下であることを確認

した。試料の測定値を VSMOW スケールに換算する際に用いた二次標準試料の 10 回繰り返し測定における標準偏差が 2%以下であり、かつ実測定値と VSMOW スケールの値との間の相関係数が 0.999 以上となることを確認した。作業標準試料の同位体変動が、測定バッチを通して $\pm 4\%$ 以下であることを確認した。変動がある場合は、変動が確認された作業標準試料と、その前後の正常に測定できている作業標準試料の間の未知試料について再測定を行った。変動が見られるものの軽微である場合は、変動のあった作業標準試料とその前後の正常に測定できている作業標準試料の間の未知試料の同位体比補正值を按分することで変動の補正を行った。

分析結果は、次式で表されるデルタ値 ( $\delta$ ) として示す。 $\delta = (R)_{\text{sample}} / (R)_{\text{VSMOW}} - 1$ 。R は水素同位体比 (D/H) の測定値である。

### 3.3.3 トリチウム ( $^3\text{H}$ )

電解濃縮-液体シンチレーション測定法(文部科学省放射能測定法<sup>6)</sup>に基づく)により分析した。分析装置には、アロカ製 LSC-LB5 型低バックグラウンド液体シンチレーションカウンターを用いた。測定時間は 1000 分とした。用いた試薬は次のとおりである。(1)乳化シンチレーター (パーキンエルマー製ウルチマゴールド LLT), (2)JCSS 校正付トリチウム標準溶液 (日本アイソトープ協会製), (3)過酸化ナトリウム (キシダ化学製), (4)二酸化マンガン 1 級 (キシダ化学製)。

分析手順は次のとおりである。約 500 mL の試料水を、電気伝導率が 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  以下になるまで蒸留した。蒸留した試料水 350 mL を電解セルに入れ、過酸化ナトリウムを加え、約 1%のアルカリ溶液とし、さらに二酸化マンガンを加えた。直流電流を電極電流密度 90  $\text{mA}/\text{cm}^2$  で通電し、目的の残存量になるまで電解濃縮を行った。電解濃縮液に  $\text{CO}_2$  を吹き込み、電解液を中和した。中和した電解濃縮液の蒸留を行い、蒸留後の電解濃縮液 10 mL を乳化シンチレーター 10 mL と混合した。低バックグラウンド液体シンチレーション測定器に一夜程度静置後、1000 分間測定を行った。同時に測定される外部標準チャンネル比 (ESCR) と、トリチウム標準溶液を使用して得られるクエンチング補正曲線 (ESCR と計数効率の関係式) から、試料測定時の計数効率を得、電解濃縮液のトリチウム濃度を算出した。これをトリチウム濃縮率で除することにより試料のトリチウム濃度を得た。

トリチウム濃度は、試料の計数率からバックグラウンドの計数率を差し引いて正味計数率を求めた後、濃度既知のトリチウム標準溶液から得られたクエンチング補正曲線より求めた計数効率および測定に用いた試料量から計測用試料水中の濃度を求め、これに電解濃縮による体積濃縮率とトリチウム回収率および試料採取日までの減衰を補正することで、試料採取時のトリチウム濃度を算出した。なお、濃度計算に使用する計数値は、シグマ検定により異常値 (標準偏差 $\pm 2\sigma$  を超える値) を棄却した後のデータのみを用いた。試料の正味計数率が、定量下限計数率以下の場合には、トリチウムは検出されなかったものとし、定量下限計数率に相当する濃度を基準日における定量下限値とした。トリチウム濃度の単位は、1 秒間に 1 個の原子崩壊を起こす放射能を表す Bq (ベクレル) として表す。なお、水素原子 1018 個中のトリチウム原子数を表す単位である T.U. (トリチウム単位) ( $1 \text{ T.U.} = {}^3\text{H}/{}^1\text{H} = 10^{-18}$ ) との換算式は、 $1 \text{ T.U.} \simeq 0.119 \text{ Bq}/\text{L}$  である。

品質管理として、一次蒸留において、電解濃縮に使用する蒸留水の電気伝導度が 1  $\text{mS}/\text{m}$  以下であることを確認した。電解濃縮において、電解密度が一定 (90  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) であることおよび、冷却水槽の温度が適正值 (約 4°C) であることを確認した。試料計測時におけるバックグラウンドの計数率とその前後における液体シンチレーション用基準試料 (日本アイソトープ協会製) の測定値

を管理項目とし、測定器の異常がないことを確認した。

定量下限は、約 0.3 T.U. (約 0.04 Bq/L) である。ただし、定量下限の値は、電解濃縮による濃縮比やトリチウムの回収率が各セルで僅かに異なることや、試料採取日から計測日までの経過時間が異なること、バックグラウンドの計数値がランダム誤差を持つことなどの要因により、計算上、試料によって差が生じる場合がある。

### 3.4 微量元素の分析 (Co, As, Mo, Cs, Ba)

ICP-質量分析法 (JIS K0116 に基づく) により分析した。分析装置は、Agilent Technologies 製の Agilent7500CE または 8800 を用いた。標準試薬として、SPEX 製 XSTC-331 (Co, As, Cs, Ba 10 mg/L) および 1,000 mg/L モリブデン標準液 (関東化学製) を用いた。試料を 10 倍希釈の 5%硝酸溶液とし、ICP-MS で測定した。品質管理として、ICP-MS 装置のチューニングを行い、感度が安定していることを確認した。また、濃度 50ppb 標準溶液の再測定値が、標準値の±10%以内であることを確認した。

定量下限は、各元素 1 µg/L である。

## 4. 測定・分析結果

測定・分析結果を、試料の採取箇所名、試料名及び採取箇所の深度情報や座標等と合わせて Table 3 に示す。表中の測定日については、全ての項目の測定に要した期間を示してある。Table 3 の項目「Total-Fe HACH」と「Fe<sup>2+</sup> HACH」および「HS<sup>-</sup> HACH」は、3.2.10 項と 3.2.11 項で述べた試料採取直後の現場での分析結果に該当する。

### 4.1 イオンバランス

地下水中の溶存成分の分析結果について、全ての元素がイオンとして溶存していると仮定し、地下水の水質分析結果を評価するために、地下水中に溶存する陽イオンの総当量 ( $\Sigma$  cation) と陰イオンの総当量 ( $\Sigma$  anion) を計算し、電荷のバランスについて電気的中性が保たれているかどうかを確認した (Table 3)。計算では、陽イオンとして Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Li<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, 陰イオンとして F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> を用いた。Friedman and Erdmann<sup>7)</sup> は、 $\Sigma$  anion を基準として、次の各条件を満たす地下水に対し、それぞれ望ましいと考えられるイオンバランスの範囲を示している。(1)  $\Sigma$  anion = 0.0–3.0 meq/L の場合 :  $|\Sigma$  anion –  $\Sigma$  cation | < 0.2 meq/L。(2)  $\Sigma$  anion = 3.0–10.0 meq/L の場合 :  $|(\Sigma$  anion –  $\Sigma$  cation) / ( $\Sigma$  anion +  $\Sigma$  cation)| < 0.02。(3)  $\Sigma$  anion = 10.0–800 meq/L の場合 :  $|(\Sigma$  anion –  $\Sigma$  cation) / ( $\Sigma$  anion +  $\Sigma$  cation)| < 0.05。これらの基準に基づくと、試料番号 (Index no.) 2, 12, 13, 15, 20, 21, 22 の試料は、上記の基準(1)を、試料番号 3, 8, 9, 11, 17, 18, 19 の試料は、上記の基準(2)を超えていることが分かった。これらの試料は全て、塩濃度の低い表層地下水であり、その他の高塩濃度の試料と同時に分析されたことから、測定誤差が比較的大きくなっていることが考えられる。上記以外の全ての試料については、先に示した基準を満たしている。

### 4.2 ヘキサダイアグラム (スティッフダイアグラム)

地下水の水質形成機構を考察する上で、水質の分析結果を単純に表で示すのみでなく、ヘキサダイアグラムとして図示することは、一目で水質組成を把握できることから、有効的である。へ

キサダイアグラムは、主要溶存成分である  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  のそれぞれの濃度を当量値 (meq/L) とし、陽イオンと陰イオンに分けて図示したものである。本データ集では、幌延深地層研究計画における地下水の地球化学モデルの構築に際して、本報告データをより有益に活用するため、ヘキサダイアグラムを作成した (Fig. 4)。

#### 4.3 試料採取後における水質変化について

多くの測定結果において、試料採取時と分析機関での分析時における測定結果に多少の違いが見られる (Table 3)。幌延の深部地下水は、原位置では嫌気・還元状態であるため<sup>8,9)</sup>、試料採取時に酸素に触れることにより酸化還元反応が生じる可能性がある。また、幌延の深部地下水は、重炭酸イオンとして溶存二酸化炭素を多く含むことから、地下水採取による減圧により、二酸化炭素がゆっくりと脱ガスする。これらの要因により、酸化物や炭酸塩の沈殿が生じるなどし、試料溶液中の溶質が減少することで、試料採取時の水質と、試料採取後に時間が経過した試料の水質が異なる場合があると思われる。ここでは、電気伝道度 (EC) を指標として、試料採取日から分析時までの経過時間と、EC の変化量との関係性を調べた (Fig. 5)。Fig. 5 の右図は、試料採取時における EC の測定結果に対する相対変化量を示しており、正は分析時における低下を意味する。ほとんどの試料は、経過時間の長短に関わらず、10%以下の低下を示している (Fig. 5)。このことから、試料採取時と分析時の水質の違いの主な要因が、単に経過時間であると考えることが適切ではないことが分かる。上記の酸化反応による影響や、分析機関への空輸などの試料の輸送時における減圧などが他の要因として考えられる。





Table 3: Groundwater chemistry obtained in the Horonobe underground research laboratory project (FY2017-FY2019) (3 / 8)

Index no.	Depth (GL-)				Depth (EL)				Sampling date	Analyzing date	Geological formation	location (WGS84, UTM, Zone54)				Physico-chemical parameter				Temperature at site (°C)	pH at site at lab	EC at site (mS/m)	EC at lab (mS/m)	Filtration with 0.45 μm at the time of sampling	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Mn <sup>2+</sup> (mg/L)	Li (mg/L)	Si (mg/L)	B (mg/L)	Sr (mg/L)
	Min.	Max.	Mid.	Max.	Min.	Max.	Mid.	Max.				East	North	Z (middle depth)	EC at site (mS/m)	Z (middle depth)	East	North	Z (middle depth)														
41	08-E140-C0102-2019010	195.00	208.87	201.94	-135.00	-148.87	-141.94	2019/9/10	2019/9/20-10/28	Koetoi Formation	567709.78	4988238.29	-141.94	780	720	7.4	7.5	19.8	Yes	1760	57	28	20	<0.05	4.5	32	62	0.40					
42	08-E140-C01-zone1-171110	209.69	218.70	214.20	-149.69	-158.70	-154.20	2017/11/10	2017/12/5-12/26	Koetoi Formation	567757.84	4988232.41	-154.20	720	690	7.6	7.7	18.0	Yes	1630	52	29	18.2	0.05	4.1	31	0.44						
43	08-E140-C01-zone1-170630	209.69	218.70	214.20	-149.69	-158.70	-154.20	2017/6/30	2017/12/2-2018/11/10	Koetoi Formation	567757.84	4988232.41	-154.20	670		8.3			Yes	1630	52	29	18.4	<0.05	4.1	31	0.44						
44	08-E140-C01-zone1-180928	209.69	218.70	214.20	-149.69	-158.70	-154.20	2018/9/28	2018/10/11-11/13	Koetoi Formation	567757.84	4988232.41	-154.20	720	720	7.9	7.6	19.7	Yes	1640	52	28	18.2	<0.05	4.0	34	54	0.40					
45	08-E140-C01-2019010	209.69	218.70	214.20	-149.69	-158.70	-154.20	2019/9/10	2019/9/20-10/28	Koetoi Formation	567757.84	4988232.41	-154.20	730	690	7.4	7.6	19.6	Yes	1630	52	25	17.8	<0.05	4.1	33	54	0.40					
46	E140-G-171110	140.00	163.00	151.50	-80.00	-103.00	-91.50	2017/11/10	2017/12/6-12/26	Koetoi Formation	567729.60	4988276.20	-91.50	1280	1200	7.6	7.9	17.5	Yes	2900	92	67	45	<0.05	9.3	30		1.14					
47	E140-G-180926	140.00	163.00	151.50	-80.00	-103.00	-91.50	2018/9/26	2018/10/11-11/13	Koetoi Formation	567729.60	4988276.20	-91.50	1300	1240	7.7	7.7	19.2	Yes	2900	93	68	46	<0.05	9.3	32	110	0.90					
48	E140-G-20190905	140.00	163.00	151.50	-80.00	-103.00	-91.50	2019/9/5	2019/9/20-10/28	Koetoi Formation	567729.60	4988276.20	-91.50	1290	1200	7.5	7.7	18.6	Yes	2900	94	64	45	<0.05	9.4	29	110	1.00					
49	09-V250-M02-zone1-171109	248.85	248.91	248.88	-188.85	-188.91	-188.88	2017/11/9	2017/12/5-12/25	Koetoi and Wakkana formations	567699.92	4988339.41	-188.88	800	810	7.2	7.6	18.8	Yes	1930	50	39	25	<0.05	4.8	27		0.57					
50	09-V250-M02-zone1-180927	248.85	248.91	248.88	-188.85	-188.91	-188.88	2018/9/27	2018/10/11-11/13	Koetoi and Wakkana formations	567699.92	4988339.41	-188.88	860	840	7.4	7.4	19.6	Yes	1900	49	40	25	<0.05	4.7	28	50	0.50					
51	09-V250-M02H-20190905	248.85	248.91	248.88	-188.85	-188.91	-188.88	2019/9/5	2019/9/20-10/28	Koetoi and Wakkana formations	567699.92	4988339.41	-188.88	860	800	7.3	7.5	20.0	Yes	1920	51	39	25	<0.05	4.8	27	50	0.50					
52	10-E250-M01-171113	247.01	248.76	247.88	-187.01	-188.76	-187.88	2017/11/13	2017/12/6-12/26	Koetoi and Wakkana formations	567737.86	4988263.42	-187.88	780	770	7.2	7.6	20.1	Yes	1820	52	31	21	<0.05	4.7	31		0.47					
53	10-E250-M01-180926	247.01	248.76	247.88	-187.01	-188.76	-187.88	2018/9/26	2018/10/10-11/13	Koetoi and Wakkana formations	567737.86	4988263.42	-187.88	820	800	7.3	7.3	21.4	Yes	1830	52	31	21	<0.05	4.6	33	61	0.40					
54	10-E250-M01-20190905	247.01	248.76	247.88	-187.01	-188.76	-187.88	2019/9/5	2019/9/20-10/28	Koetoi and Wakkana formations	567737.86	4988263.42	-187.88	800	760	7.3	7.5	22.2	Yes	1830	52	26	20	<0.05	4.7	32	61	0.40					
55	11-V250-TR02-171114	252.70	280.41	266.56	-192.70	-220.41	-206.56	2017/11/14	2017/12/6-12/26	Koetoi and Wakkana formations	567711.90	4988360.85	-206.56	1380	1270	7.2	7.5	19.1	Yes	3000	75	92	61	0.06	7.7	26		1.28					
56	11-V250-TR02-180926	252.70	280.41	266.56	-192.70	-220.41	-206.56	2018/9/26	2018/10/10-11/13	Koetoi and Wakkana formations	567711.90	4988360.85	-206.56	1350	1310	7.4	7.4	19.6	Yes	3000	74	92	60	<0.05	7.6	28	75	1.00					
57	11-V250-TR02-20190910	252.70	280.41	266.56	-192.70	-220.41	-206.56	2019/9/10	2019/9/20-10/28	Koetoi and Wakkana formations	567711.90	4988360.85	-206.56	1370	1270	7.2	7.5	20.7	Yes	3200	77	93	60	0.10	7.9	27	76	1.10					
58	11-V250-TR03-171114	252.70	280.41	266.56	-192.70	-220.41	-206.56	2017/11/14	2017/12/7-2018/1/5	Koetoi and Wakkana formations	567712.28	4988359.80	-206.56	1310	1220	7.2	7.4	18.1	Yes	3000	75	90	59	0.10	7.6	27		1.23					
59	11-W250-TR01-171114	252.79	367.05	309.92	-192.79	-207.05	-249.92	2017/11/14	2017/12/7-2018/1/5	Wakkana Formation	567649.34	4988349.30	-249.92	870	830	7.8	8.0	19.3	Yes	1970	56	32	22	0.06	4.9	27		0.44					
60	11-W250-TR01-180927	252.79	367.05	309.92	-192.79	-207.05	-249.92	2018/9/27	2018/10/11-11/13	Wakkana Formation	567649.34	4988349.30	-249.92	880	860	7.9	7.9	20.5	Yes	1930	55	32	23	<0.05	4.8	29	54	0.40					
61	12-P350-M02-171115	347.35	349.25	348.30	-287.35	-289.25	-288.30	2017/11/15	2017/12/7-2018/1/5	Wakkana Formation	567708.70	4988386.78	-288.30	1610	1470	6.9	7.3	17.7	Yes	3700	76	91	67	<0.05	9.8	22		1.45					
62	12-P350-M02-171206(-)	347.35	349.25	348.30	-287.35	-289.25	-288.30	2017/12/6	2017/12/18-2018/1/11	Wakkana Formation	567708.70	4988386.78	-288.30	1230		6.9			No	3700	74	87	64	<0.05	9.7	22		1.48					
63	12-P350-M02-181003	347.35	349.25	348.30	-287.35	-289.25	-288.30	2018/10/3	2018/10/11-11/13	Wakkana Formation	567708.70	4988386.78	-288.30	1520	1520	7.3			Yes	3700	76	93	68	<0.05	9.7	24	100	1.30					
64	12-P350-M02-20190902	347.35	349.25	348.30	-287.35	-289.25	-288.30	2019/9/2	2019/9/20-10/28	Wakkana Formation	567708.70	4988386.78	-288.30	1630	1510	6.3	7.1	21.3	Yes	3700	78	96	68	<0.05	9.9	22	100	1.30					
65	13-350LGE-M01-171207	347.35	348.87	346.61	-287.35	-288.87	-286.61	2017/12/7	2017/12/12-2018/1/10	Wakkana Formation	567776.61	4988375.89	-286.61	1910	1560	6.8	7.1	14.7	Yes	4100	73	120	81	<0.05	10.5	22		1.25					
66	13-350LGE-M01-180927	347.35	348.87	346.61	-287.35	-288.87	-286.61	2018/9/27	2018/10/11-11/13	Wakkana Formation	567776.61	4988375.89	-286.61	1810	1720	7.0	7.1	21.4	Yes	4100	73	123	81	<0.05	10.1	23	110	1.50					
67	13-350LGE-M01-20190902	347.35	348.87	346.61	-287.35	-288.87	-286.61	2019/9/11	2019/9/20-10/28	Wakkana Formation	567776.61	4988375.89	-286.61	1840	1700	6.9	7.1	22.0	Yes	4100	75	121	81	<0.05	10.8	22	110	1.60					
68	13-350-C01-171109	348.52	349.39	348.96	-288.52	-289.39	-288.96	2017/11/9	2017/12/6-12/25	Wakkana Formation	567692.27	4988407.02	-288.96	1960	1700	7.4	7.6		Yes	4500	82	98	93	<0.05	11.5	22		2.0					
69	13-350-C01-180927	348.52	349.39	348.96	-288.52	-289.39	-288.96	2018/9/27	2018/10/11-11/13	Wakkana Formation	567692.27	4988407.02	-288.96	1950	1850	7.2	7.4	22.3	Yes	4400	81	105	92	<0.05	10.8	23	110	1.60					
70	13-350-C01-180927	348.52	349.39	348.96	-288.52	-289.39	-288.96	2018/9/27	2018/10/15	Wakkana Formation	567692.27	4988407.02	-288.96						No														
71	13-350-C01-20190828	348.52	349.39	348.96	-288.52	-289.39	-288.96	2019/8/28	2019/9/11-10/28	Wakkana Formation	567692.27	4988407.02	-288.96	1920	1780	7.2	7.4		Yes	4300	81	89	87	<0.05	11.1	23	100	1.60					
72	13-350-C01-20190830	348.52	349.39	348.96	-288.52	-289.39	-288.96	2019/8/30	2019/9/12-10/28	Wakkana Formation	567692.27	4988407.02	-288.96	1920	1720	7.2	7.6		Yes	4300	81	99	89	<0.05	11.1	21	110	1.70					
73	13-350-C01-20190830_原本	348.52	349.39	348.96	-288.52	-289.39	-288.96	2019/8/30	2019/9/12-10/28	Wakkana Formation	567692.27	4988407.02	-288.96	1920	1640	7.2	7.5		No	4300	81	98	89	<0.05	11.0	21	110	1.70					
74	13-350-C062-20190909	348.52	348.58	348.44	-288.52	-288.58	-288.54	20																									

Table 3: Groundwater chemistry obtained in the Horonobe underground research laboratory project (FY2017~FY2019) (4 / 8)

Index no.	Name	P (mg/L)	Total-Fe (mg/L)	Fe-HACH (mg/L)	Fe-HACH (mg/L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	F <sup>-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	Br <sup>-</sup> (mg/L)	I <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	HS <sup>-</sup> -HACH (μg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	M-Alkalinity (mg/L)	P-Alkalinity (mg/L)	TOC (mg/L)	TOC (NPOC) (mg/L)	TIC (mg/L)	Σcation (meq/L)	Σanion (meq/L)	Ionic balance (%)	<sup>2</sup> H (T.U)	δD (‰)	δ <sup>18</sup> O (‰)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	As (μg/L)	Co (μg/L)	Mn (μg/L)	Cs (μg/L)	Ba (μg/L)					
41	08-E140-C0102-20190910	1.8	0.30	<0.1	<0.1	<0.1	1450	8.9	2.9	<0.1	74	3.9	<0.1	2400	3	2100	2100	2100	2100	14.7	16	530	86	81	2.7												700			
42	08-E140-C01-zone1-171110	1.8	0.56	0.64	0.56	<0.1	1420	9.6	4.2	0.2	70	3.7	<0.1	1.0	2300	4	2300	2300	2300	42	470	80	78	1.30			-64	-7.0												
43	08-E140-C01-zone1-170630	1.8	0.72			<0.1	1420	8.9	4.0	0.1	65	3.9	<0.1	2200	16	2200	2200	2200	51	450	79	77	1.42																	
44	08-E140-C01-zone1-180928	1.7	0.50	0.64	0.08	0.1	<0.1	1420	9.1	2.3	<0.1	71	3.6	<0.1	4.3	2200	3	1950	16.5	37	460	80	76	2.6			-65	-6.8									430			
45	08-E140-C0101-20190910	1.8	0.60	0.34	0.13	<0.1	1410	9.2	2.5	<0.1	69	3.8	<0.1	2200	3	1940	12.2	17	470	79	76	76	2.0			-63	-6.9											420		
46	E140-G-171110	1.5	0.68	0.75	0.30	<0.1	3200	22.1	9.8	0.1	130	2.6	<0.1	0.7	3100	9	2700	28	34	640	145	140	1.69			-48	-2.7										960			
47	E140-G-180926	1.4	0.30	0.28	0.16	<0.1	3200	22.5	7.9	<0.1	120	2.2	<0.1	0.3	3100	6	2700	25	34	640	145	140	1.69			-48	-2.4										950			
48	E140-G-20190905	1.3	0.20	0.26	0.12	<0.1	3200	22.4	7.6	0.3	130	1.5	<0.1	3.0	3000	6	2700	54	630	144	139	1.65																390		
49	09-V250-M02-zone1-171109	1.2	0.27	0.36	0.3	<0.1	1920	12.8	4.8	<0.1	72	2.2	<0.1	3.0	2100	3	1830	9.9	18	430	93	87	3.5			-61	-7.2										380			
50	09-V250-M02-zone1-180927	1.1	0.20	0.29	0.28	<0.1	1920	12.5	4.7	<0.1	74	2.1	<0.1	0.0	1960	2	1830	8.0	20	450	93	88	2.7			-60	-6.7											370		
51	09-V250-M02H-20190905	1.2	0.30	0.31	0.31	<0.1	1920	12.7	2.5	4.0	70	1.9	<0.1	2100	2	1840	47	500	89	85	1.82						-60	-6.7										320		
52	10-E250-M01-171113	1.5	0.34	0.41	0.37	<0.1	1650	10.9	4.9	0.1	72	3.2	<0.1	0.7	2300	3	2000	13.0	36	490	89	82	4.0			-62	-6.4											310		
53	10-E250-M01-180926	1.5	0.30	0.40	0.38	<0.1	1640	10.5	2.7	0.4	74	3.0	<0.1	2.0	2200	2	2000	10.3	23	490	89	84	2.4			-61	-6.6												770	
54	10-E250-M01-20190905	1.5	0.30	0.37	0.14	<0.1	1660	11.1	1.8	<0.1	71	2.9	<0.1	2300	3	2000	12.4	24	520	149	144	1.92			-50	-3.8													810	
55	11-V250-TR02-171114	0.8	2.8	3.0	1.13	<0.1	3700	25	10.7	0.1	120	<0.3	<0.1	0.0	2400	2	2100	10.2	28	510	159	144	4.9			-40	-1.6	1.6	50									220		
56	11-V250-TR02-180926	0.3	0.20	0.22	0.13	<0.1	3700	24	10.2	<0.1	120	<0.3	<0.1	3.7	2700	2	2400	11.0	31	400	94	90	2.3			-61	-6.7													
57	11-V250-TR02-20190910	0.8	3.0	1.68	1.21	<0.1	3700	25	10.1	<0.1	97	0.1	0.5	2400	3	2100	62	600	180	172	2.4						-40	-1.6	1.6	51									1300	
58	11-V250-TR03-171114	0.7	5.8	8.0	0.12	<0.1	3700	25	10.7	0.1	100	<0.3	<0.1	0.0	2400	2	2100	15.6	21	640	181	173	2.3			-40	-1.4												1400	
59	11-W250-TR01-171114	0.8	0.54	0.56	0.11	<0.1	3100	13.3	6.0	0.1	75	1.3	0.5	1.7	2000	8	1750	49	590	200	196	2.1																	1600	
60	11-W250-TR01-180927	0.8	0.10			<0.1	2000	13.1	5.7	0.3	79	1.3	0.8	1960	6	1750	16.3	38	570	200	194	2.6																	1500	
61	12-P350-M02-171115	0.8	3.7	4.3	2.6	<0.1	4500	33	13.3	0.1	130	<0.3	<0.1	3.7	2700	2	2600	13.6	21	570	200	195	1.99			-38	-0.6													
62	12-P350-M02-171206(0)	0.8	3.5			<0.1	4500	29	13.0	<0.1	130	<0.3	<0.1	0.0	2400	1	2400	16.2	50	520	220	210	1.69			-35	-0.6	<0.5	42											1800
63	12-P350-M02-181003	0.7	3.8			<0.1	4500	31	10.0	<0.1	130	<0.3	<0.1	1.0	2500	2	2500	14.1	28	550	210	210	0.12			-37	-0.7													
64	12-P350-M02-20190902	0.8	3.8			<0.1	4500	31	10.7	<0.1	120	<0.3	<0.1	0.0	2400	2	2600	13.9	17.2	550	210	210	-0.33			-36	-0.7													
65	13-350LGE-M01-171207	1.0	2.8			<0.1	4500	38	16.2	0.1	150	<0.3	<0.1	2500	2	2400	13.8	17.2	540	210	210	0.01			-37	-0.7														
66	13-350LGE-M01-180927	0.6	2.8	3.2	2.1	<0.1	4500	38	15.4	0.1	150	<0.3	<0.1	1.0	2500	1	2400	15.6	30	670	176	169	2.1			-43	-1.8													
67	13-350LGE-M01-20190902	0.7	6.9	5.7	3.4	<0.1	5500	39	9.9	<0.1	130	<0.3	<0.1	1.7	2400	1	2300	13.6	21	570	200	195	1.99			-47	-2.8													
68	13-350-C01-171109	0.5	0.27	0.40	0.18	<0.1	6100	43	17.5	<0.1	140	<0.3	0.2	1.7	2500	4	2200	16.2	50	520	220	210	1.55			-44	-2.2													
69	13-350-C01-180927	0.4	<0.05	0.72	0.56	<0.1	6000	42	17.0	0.8	150	<0.3	<0.1	1.0	2400	2	2200	14.4	26	500	158	155	1.00			-44	-2.2													
70	13-350-C01-180927																																							
71	13-350-C01-20190828	0.5	2.9			<0.1	5900	44	17.2	0.2	100	<0.3	<0.1	2500	2	2300	14.1	28	550	210	210	0.12			-37	-0.7														
72	13-350-C01-20190830	0.5	2.2	1.62	0.26	<0.1	6000	43	16.6	0.5	110	<0.3	<0.1	3.7	2600	4	2200	13.9	17.2	550	210	210	-0.33			-36	-0.7													
73	13-350-C01-20190830_原水	0.3	<0.05			<0.1	5900	44	16.5	0.1	100	<0.3	<0.1	0.0	2400	3	2200	13.8	17.2	540	210	210	0.01			-37	-0.7													
74	13-350-C0602-20190909	0.8	0.50			<0.1	4200	29	7.3	<0.1	120	0.5	<0.1	3000	3	2800	15.6	30	670	176	169	2.1			-43	-1.8														
75	13-350-C06-zone2-171116	0.7	0.39	0.44	0.31	<0.1	3800	26	11.0	0.1	87	0.4	<0.1	3.3	2400	5	2100	14.4	26	500	148	145	0.95			-47	-2.8													
76	13-350-C0602-20190909	0.7	0.30			<0.1	4100	23	2.8	31	81	0.8	<0.1	2400	4	2100	14.4	26	500	158	155	1.00			-44	-2.2														
77	13-350-C06-zone1-171116	0.8	0.52	0.65	0.64	<0.1	4400	32	13.1	0.1	120	0.4	<0.1	4.3	2700	3	2300	13.3	13.7	550	170	167	1.08			-44	-1.9													
78	13-350-C0601-20190903	0.8	0.50			<0.1	4500	30	11.3	<0.1	97	0.7	<0.1	2500	2	2300	13.3	13.7	550	170	167	1.08			-42	-1.8														
79	13-350-C08-zone2-171115	0.8	0.78			<0.1	4200	30	10.8	<0.1	120	<0.3	<0.1	2600	2	2300	69	600	171	161	1.61						-42	-1.8												
80	13-350-C0904-20190909	0.8	0.40			<0.1	4300	28	11.6	<0.1	120	0.6	<0.1	2300	2	2200	20	38	520	164	156	1.56			-44	-2.1														



Table 3: Groundwater chemistry obtained in the Horonobe underground research laboratory project (FY2017–FY2019) (6 / 8)

Index no.	Name	P (mg/l)	Total-Fe (mg/l)	Fe <sup>2+</sup> (mg/l)	Al <sup>3+</sup> (mg/l)	F <sup>-</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	Br <sup>-</sup> (mg/l)	I <sup>-</sup> (mg/l)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	HS <sup>-</sup> (μg/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	M-Alkalinity (mg/l)	P-Alkalinity (mg/l)	TOC (mg/l)	TOC (NPOC) [mg/l]	TIC (mg/l)	Σcation (meq/l)	Σanion (meq/l)	Ionic balance (%)	<sup>3</sup> H (T.U)	δD (‰)	δ <sup>18</sup> O (‰)	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	As (μg/L)	Co (μg/L)	Mn (μg/L)	Cs (μg/L)	Ba (μg/L)					
81	14-350-C04-zone6-171116	0.7	4.7	7.2	3.8	<0.1	<0.1	4600	33	13.6	0.1	140	<0.3	<0.1	5.3	2900	7	59	600	181	178	1.00			-44	-2.1													
82	14-350-C046-20190902	0.8	2.4	2.2	2.1	<0.1	<0.1	4600	33	11.1	<0.1	120	<0.3	<0.1	2.0	2500	2	15.5	27	590	180	172	2.1		-42	-2.0										1300			
83	14-350-C04-zone5-171204	0.7	1.39			<0.1	<0.1	4900	36	15.7	0.1	140	<0.3	<0.1	2700	2	52	620	192	183	2.3			-40	-1.6											1500			
84	14-350-C046-20190903	0.8	1.20	1.48	1.40	<0.1	<0.1	5000	35	11.8	<0.1	140	<0.3	<0.1	2500	2	15.3	27	590	191	182	2.3		-40	-1.4											2200			
85	14-350-GAS01-180928	0.4	0.10			<0.1	<0.1	6500	46	18.3	<0.1	150	<0.3	<0.1	2400	1	14.3	20	550	230	220	2.2		-35	0.2											2000			
86	14-350-GAS01-20190902	0.6	0.80	1.05	0.59	<0.1	<0.1	6300	45	17.4	0.1	140	<0.3	<0.1	4.7	2300	1	14.3	20	550	230	220	1.97		-34	0.0													
87	WR-V-98-0-171027																							0.95															
88	WR-V-98-0-171130	0.9	<0.05			<0.1	0.2	1470	10.2	2.5	180	2.1	45	1020	2		54	220	66	62	6.2	2.9		-45	-5.2											180			
89	WR-V-98-0-180831	1.0	<0.05			<0.1	0.1	1150	6.4	1.5	200	0.5	2.5	880	7		14.4	32	177	53	51	1.33		1.1	-54	-6.7													
90	WR-V-98-0-181003																																						
91	WR-V-133-8-20171208																																						
92	WR-V-133.8_20190827	1.0	0.10			<0.1	0.1	2100	15.5	4.4	184	16.0	2.6	33	1450	8	17.3	24	290	89	88	0.83		1.32±0.12	-48	-5.7													
93	WR-V-168-0-170828																																						
94	WR-V-168-0-171130	1.0	0.07			<0.1	0.1	2600	17.6	7.3	30	74	2.2	2.0	2400	28	56	480	117	114	1.42				-54	-5.2													
95	WR-V-202-0-180831	1.3	<0.05			<0.1	0.1	2200	11.8	4.8	180	0.7	3.7	5.1	2000	19	17.3	25	410	103	98	2.4			-0.3	-5.3	-5.4										340		
96	WR-V-242-0-171027																																						
97	WR-V-242-0-171130	1.1	<0.05			<0.1	0.1	2100	13.4	5.5	40	61	2.3	1.1	2100	8	17.4	43	390	113	105	3.3			-0.29	-5.7	-5.4										360		
98	WR-V-242-0-180831	1.1	<0.05			<0.1	0.1	2500	13.8	6.1	140	30	2.8	3.4	1900	6	11.6	28	360	96	89	4.2			-0.32	-6.0	-6.6										360		
99	WR-V-242-0-20190826	1.0	<0.05			<0.1	0.1	2100	14.1	4.6	24	55	2.8	2.7	1760	5	11.6	28	360	96	89	4.2			-0.33														
100	WR-V-282-0-171024																																						
101	WR-V-282-0-171129	0.6	<0.05			<0.1	0.2	3900	26	8.8	43	78	1.0	2.2	2300	9	13.1	20	440	152	145	2.2			-53	-4.1													
102	WR-V-282-0-180831	0.6	<0.05			<0.1	0.1	3900	22	10.2	25	68	1.4	2.0	2100	3	11.9	18.5	430	113	109	2.0			-49	-3.6												810	
103	WR-V-282-0-181206	0.7	<0.05			<0.1	0.1	3900	24	10.8	58	88	1.4	1.9	2500	6	13.3	12.4	510	159	153	1.83																820	
104	WR-V-282-0-20190826	0.6	<0.05			<0.1	0.1	4000	29	10.1	17.8	85	1.0	1.4	2400	4	11.4	20	510	154	153	0.42																900	
105	WR-V-310-0-171024																																						
106	WR-V-310-0-171129	0.8	<0.05			<0.1	0.2	2700	17.3	6.8	11.0	74	1.5	2.5	2200	4	11.9	18.5	430	113	109	2.0			-57	-5.8													
107	WR-V-310-0-180831	0.8	<0.05			<0.1	0.2	2600	14.8	6.4	21	52	2.1	3.3	2100	5	11.6	13.8	470	116	115	0.42																480	
108	WR-V-310-0-20190826	0.8	<0.05			<0.1	0.2	2700	18.3	6.3	12.0	73	1.9	2.1	2300	6	11.6	13.8	470	116	115	0.42																540	
109	WR-V-343-9-171129	0.1	<0.05			<0.1	0.2	2700	17.4	7.7	<0.1	78	1.4	1.9	2300	5	11.9	21	440	118	113	2.3			-60	-5.8													
110	WR-V-343-9-180831	0.8	<0.05			<0.1	0.2	2800	18.1	6.6	<0.1	63	1.8	2.0	2100	4	12.4	11.7	480	118	114	1.82																590	
111	WR-V-343-9-181206	0.9	<0.05			<0.1	0.1	2700	17.0	7.8	<0.1	81	1.6	1.6	2300	5	12.4	11.7	480	118	114	1.82																540	
112	WR-E-27-0-171026																																						
113	WR-E-27-0-171129	1.4	0.17			<0.1	0.2	192	1.4	0.1	3.9	10.0	3.4	30	310	1	16.0	66	119	114	2.1				-71	-10.4													
114	WR-E-27-0-20171130																																						
115	WR-E-27-0-180828	1.6	<0.05			<0.1	0.2	370	1.4	0.2	68	0.1	3.8	25	400	2	10.0	15.2	81	19.7	18.8	2.2			0.64±0.10													60	
116	WR-E-27-0-20190827	1.6	0.90			<0.1	0.2	220	1.8	0.1	3.3	11.0	4.2	27	360	1	9.1	16.0	75	13.0	12.8	0.70				-67	-10.1										51		
117	WR-E-63-8-171026																																						
118	WR-E-63-8-171129	1.5	<0.05			<0.1	<0.1	1720	11.3	3.1	72	54	3.7	4.3	1860	7	17.0	22	340	75	71	2.6			0.51±0.10	-57	-6.9											360	
119	WR-E-63-8-180831	1.6	<0.05			<0.1	<0.1	1520	8.4	3.2	51	29	4.0	1.9	1630	4	17.0	22	340	75	71	2.6																	
120	WR-E-63-8-181003																																						

Table 3. Groundwater chemistry obtained in the Horonobe underground research laboratory project (FY2017–FY2019) (7 / 8)

Index no.	Name	Depth (GL-)				Depth (EL)				Geological formation	location (WGS84, UTM, Zone54)			Physico-chemical parameter				Temperature at site (°C)	Filtration with 0.45 μm at the time of sampling	Na <sup>+</sup> (mg/l)	K <sup>+</sup> (mg/l)	Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	Mg <sup>2+</sup> / (Mg <sup>2+</sup> +Ca <sup>2+</sup> )	Li (mg/l)	Si (mg/l)	B (mg/l)	Sr (mg/l)
		Min.	Max.	Mfd.	Mid.	Min.	Max.	Middle	Depth (EL)		East	North	Z (middle depth)	EC at site (mS/m)	EC at lab (mS/m)	pH at site	pH at lab											
121	WR-E-63.8-20190827	63.80	63.80	63.80	63.80	-3.80	-3.80	2019/8/27	2019/9/12-2028	Koetoi Formation	567724.04	4988286.46	-3.80	990	680	7.5	7.9	14.0	14.0	1670	63	36	24	<0.05	5.5	30	62	0.50
122	WR-E-132.0-171027	132.00	132.00	132.00	132.00	-72.00	-72.00	2017/10/27	2018/11/09-131	Koetoi Formation	567724.04	4988286.46	-72.00	15	7.4	7.4	11.0	11.0	3000	103	60	43	<0.05	9.7	27	11.5	1.15	0.50
123	WR-E-132.0-171027	132.00	132.00	132.00	132.00	-72.00	-72.00	2017/10/27	2017/12/13-2018/11/10	Koetoi Formation	567724.04	4988286.46	-72.00	1500	1160	7.4	7.9	11.0	11.0	3100	108	59	44	<0.05	9.7	30	110	0.90
124	WR-E-132.0-180831	132.00	132.00	132.00	132.00	-72.00	-72.00	2018/8/31	2018/10/10-10/26	Koetoi Formation	567724.04	4988286.46	-72.00	1450	1290	7.8	7.8	15.0	15.0	2800	104	45	38	<0.05	9.0	28	110	0.80
125	WR-E-132.0-20190827	132.00	132.00	132.00	132.00	-72.00	-72.00	2019/8/27	2019/9/12-10/28	Koetoi Formation	567724.04	4988286.46	-72.00	1660	1100	7.5	7.9	14.0	14.0	2400	77	26	22	<0.05	7.1	30	110	0.52
126	WR-E-169.0-171129	169.00	169.00	169.00	169.00	-109.00	-109.00	2017/11/29	2017/12/13-2018/11/10	Koetoi Formation	567724.04	4988286.46	-109.00	1340	900	7.8	8.1	14.0	14.0	2400	83	25	23	<0.05	7.0	35	96	0.40
127	WR-E-169.0-180831	169.00	169.00	169.00	169.00	-109.00	-109.00	2018/8/31	2018/10/11-11/13	Koetoi Formation	567724.04	4988286.46	-109.00	1150	980	8.2	7.9	17.0	17.0	2400	83	25	23	<0.05	7.0	35	96	0.40
128	WR-E-169.0-20190827	169.00	169.00	169.00	169.00	-109.00	-109.00	2019/8/27	2019/9/13-10/28	Koetoi Formation	567724.04	4988286.46	-109.00	1270	940	7.9	8.0	16.0	16.0	2300	74	20	20	<0.05	6.4	31	96	0.40
129	WR-E-202.0-171026	202.00	202.00	202.00	202.00	-142.00	-142.00	2017/10/26	2018/11/09-131	Koetoi Formation	567724.04	4988286.46	-142.00	1370	7.6	7.6	15.0	15.0	3300	120	32	37	<0.05	9.9	30	110	0.73	
130	WR-E-202.0-171129	202.00	202.00	202.00	202.00	-142.00	-142.00	2017/11/29	2017/12/13-2018/11/11	Koetoi Formation	567724.04	4988286.46	-142.00	1620	1230	8.0	8.5	14.0	14.0	2800	100	31	31	<0.05	8.3	32	110	0.50
131	WR-E-202.0-180831	202.00	202.00	202.00	202.00	-142.00	-142.00	2018/8/31	2018/10/11-11/13	Koetoi Formation	567724.04	4988286.46	-142.00	1340	1160	8.2	7.9	17.0	17.0	3100	108	22	34	<0.05	9.3	30	120	0.60
132	WR-E-202.0-20190827	202.00	202.00	202.00	202.00	-142.00	-142.00	2019/8/27	2019/9/13-10/28	Koetoi Formation	567724.04	4988286.46	-142.00	1540	1250	8.1	8.3	16.0	16.0	1920	62	8.9	11.7	<0.05	4.8	29	78	0.20
133	WR-E-239.0-20190826	239.00	239.00	239.00	239.00	-179.00	-179.00	2019/8/26	2019/9/13-10/28	Koetoi Formation	567724.04	4988286.46	-179.00	1400	790	8.2	8.1	17.0	17.0	1890	58	17.2	13.0	<0.05	4.6	30	71	0.20
134	WR-E-276.0-180928	276.00	276.00	276.00	276.00	-216.00	-216.00	2018/9/28	2018/10/11-11/13	Wakkamai Formation	567724.04	4988286.46	-216.00	910	780	8.2	8.1	14.0	14.0	2100	55	37	25	<0.05	5.5	22	63	0.50
135	WR-E-310.0-171129	310.00	310.00	310.00	310.00	-250.00	-250.00	2017/11/29	2017/12/13-2018/11/11	Wakkamai Formation	567724.04	4988286.46	-250.00	1180	870	7.4	8.0	14.0	14.0	2200	55	37	26	<0.05	5.3	25	63	0.50
136	WR-E-310.0-180928	310.00	310.00	310.00	310.00	-250.00	-250.00	2018/9/28	2018/10/11-11/13	Wakkamai Formation	567724.04	4988286.46	-250.00	1090	920	7.9	7.9	15.0	15.0	2500	59	48	34	<0.05	6.5	22	60	0.81
137	WR-E-340.0-171024	340.00	340.00	340.00	340.00	-280.00	-280.00	2017/10/26	2018/11/09-131	Wakkamai Formation	567724.04	4988286.46	-280.00	1290	7.2	7.2	13.0	13.0	2500	61	47	33	<0.05	6.2	25	72	0.60	
138	WR-E-340.0-171129	340.00	340.00	340.00	340.00	-280.00	-280.00	2017/11/29	2017/12/13-2018/11/11	Wakkamai Formation	567724.04	4988286.46	-280.00	1340	1000	7.3	7.8	12.0	12.0	2600	59	52	36	<0.05	6.4	23	67	0.70
139	WR-E-340.0-180928	340.00	340.00	340.00	340.00	-280.00	-280.00	2018/9/28	2018/10/11-11/13	Wakkamai Formation	567724.04	4988286.46	-280.00	1160	1060	7.3	7.8	15.0	15.0	2400	59	52	36	<0.05	6.4	23	70	0.60
140	WR-E-340.0-181206	340.00	340.00	340.00	340.00	-280.00	-280.00	2018/12/6	2018/12/11-2019/11/10	Wakkamai Formation	567724.04	4988286.46	-280.00	1040	1040	8.0	8.0	17.0	17.0	2400	55	40	30	<0.05	5.7	24	70	0.60
141	WR-E-340.0-20190826	340.00	340.00	340.00	340.00	-280.00	-280.00	2019/8/26	2019/9/13-10/28	Wakkamai Formation	567724.04	4988286.46	-280.00	1090	1030	7.5	7.8	17.0	17.0	2500	94	130	78	<0.05	8.5	26	69	1.30
142	WR-W-64.0-181031	64.00	64.00	64.00	64.00	-4.00	-4.00	2018/10/31	2018/11/6-12/11	Koetoi Formation	567654.07	4988285.38	-4.00	1230	1140	7.7	7.3	12.9	12.9	4100	146	156	102	<0.05	14.6	27	120	2.3
143	WR-W-64.0-20190830	64.00	64.00	64.00	64.00	-4.00	-4.00	2019/8/30	2019/9/12-10/28	Koetoi Formation	567654.07	4988285.38	-4.00	1160	1060	7.3	7.8	18.4	18.4	2400	96	105	70	<0.05	8.1	27	71	1.20
144	WR-W-100.0-181031	100.00	100.00	100.00	100.00	-40.00	-40.00	2018/10/31	2018/11/6-12/11	Koetoi Formation	567654.07	4988285.38	-40.00	1880	1770	7.1	7.2	12.8	12.8	4100	140	154	101	<0.05	14.1	26	110	2.2
145	WR-W-100.0-20190830	100.00	100.00	100.00	100.00	-40.00	-40.00	2019/8/30	2019/9/20-10/28	Koetoi Formation	567654.07	4988285.38	-40.00	1760	1760	7.5	7.5	12.5	12.5	4900	197	60	101	<0.05	17.0	27	140	1.20
146	WR-W-164.0-181030	164.00	164.00	164.00	164.00	-104.00	-104.00	2018/10/30	2018/11/6-12/11	Koetoi Formation	567654.07	4988285.38	-104.00	2300	2100	8.5	8.3	15.5	15.5	4000	144	105	81	<0.05	12.7	27	120	1.70
147	WR-W-164.0-20190830	164.00	164.00	164.00	164.00	-104.00	-104.00	2019/8/30	2019/9/12-10/28	Koetoi Formation	567654.07	4988285.38	-104.00	1830	1690	7.5	7.8	18.8	18.8	4000	144	105	81	<0.05	9.9	28	92	1.00
148	WR-W-194.0-181030	194.00	194.00	194.00	194.00	-134.00	-134.00	2018/10/30	2018/11/6-12/11	Koetoi Formation	567654.07	4988285.38	-134.00	1460	1350	7.8	7.8	13.1	13.1	3200	117	60	48	<0.05	9.3	30	99	0.80
149	WR-W-194.0-20190830	194.00	194.00	194.00	194.00	-134.00	-134.00	2019/8/30	2019/9/12-10/28	Koetoi Formation	567654.07	4988285.38	-134.00	1350	1220	7.8	8.1	19.3	19.3	3100	114	49	41	<0.05	9.3	30	99	0.80
150	WR-W-224.0-181030	224.00	224.00	224.00	224.00	-164.00	-164.00	2018/10/30	2018/11/6-12/11	Koetoi Formation	567654.07	4988285.38	-164.00	1230	1150	7.7	7.7	12.9	12.9	2700	96	47	36	<0.05	7.9	29	79	0.70
151	WR-W-224.0-20190830	224.00	224.00	224.00	224.00	-164.00	-164.00	2019/8/30	2019/9/12-10/28	Koetoi Formation	567654.07	4988285.38	-164.00	1230	1150	7.7	7.9	19.1	19.1	2700	95	41	34	<0.05	7.6	30	89	0.80
152	WR-W-276.0-20190830	276.00	276.00	276.00	276.00	-216.00	-216.00	2019/8/30	2019/9/12-10/28	Koetoi Formation	567654.07	4988285.38	-216.00	940	870	7.9	8.1	19.8	19.8	2100	73	21	17.1	<0.05	4.6	27	58	0.40
153	WR-W-310.0-181030	310.00	310.00	310.00	310.00	-250.00	-250.00	2018/10/30	2018/11/6-12/11	Wakkamai Formation	567654.07	4988285.38	-250.00	1130	1080	8.0	8.0	15.2	15.2	2500	73	56	38	<0.05	6.4	27	60	0.70
154	WR-W-340.0-181030	340.00	340.00	340.00	340.00	-280.00	-280.00	2018/10/30	2018/11/6-12/11	Wakkamai Formation	567654.07	4988285.38	-280.00	1150	1080	7.6	7.7	14.2	14.2	2500	66	49	35	<0.05	6.5	23	63	0.60
155	WR-W-340.0-20190830	340.00	340.00	340.00	340.00	-280.00	-280.00	2019/8/30	2019/9/13-10/28	Wakkamai Formation	567654.07	4988285.38	-280.00	1140	1080	7.6	7.9	19.0	19.0	2500	66	49	35	<0.05	6.0	23	71	0.60



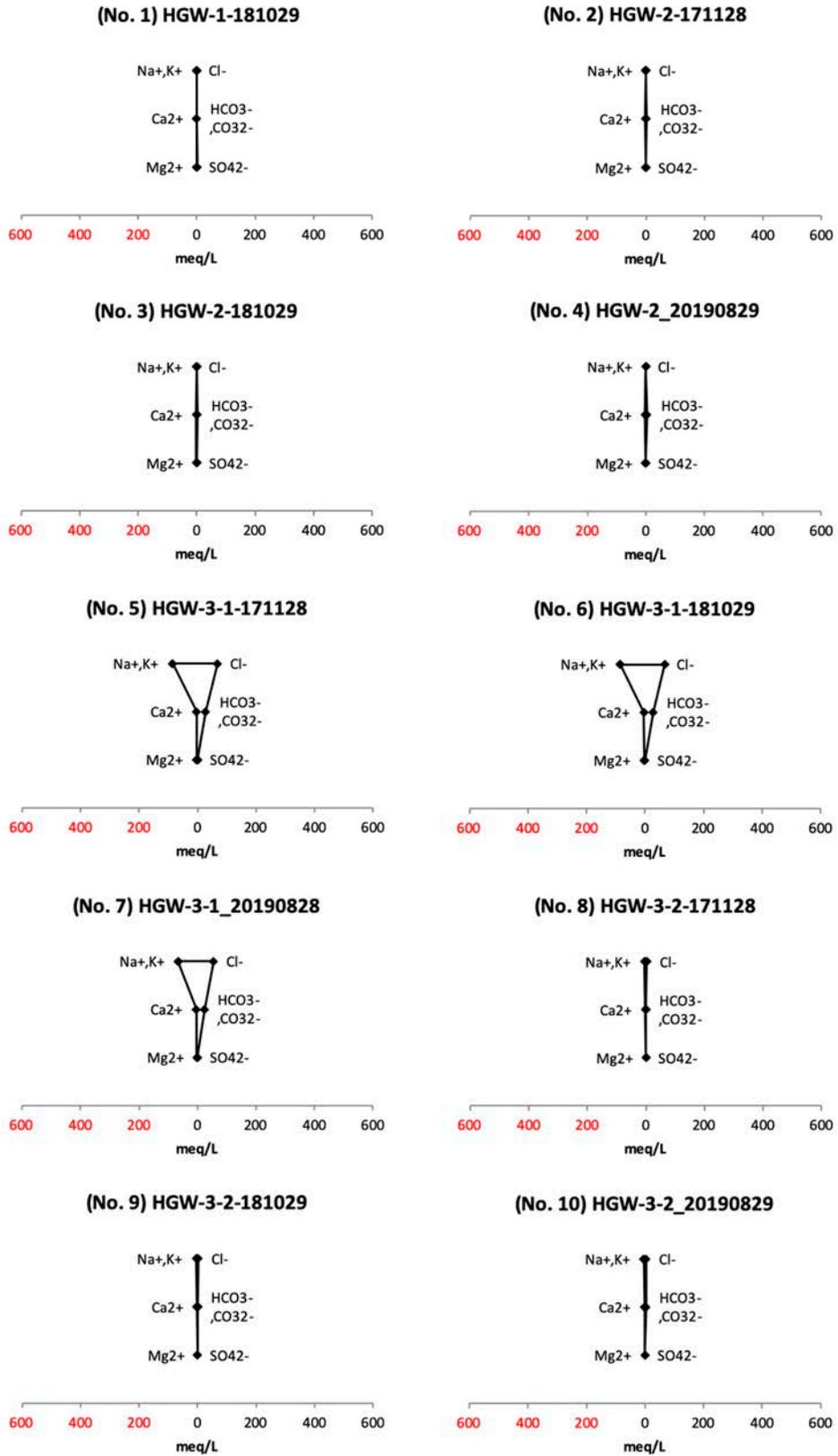


Fig. 4-a. Hexadiagrams (Stiff diagrams) for the data of index no. 1–10.

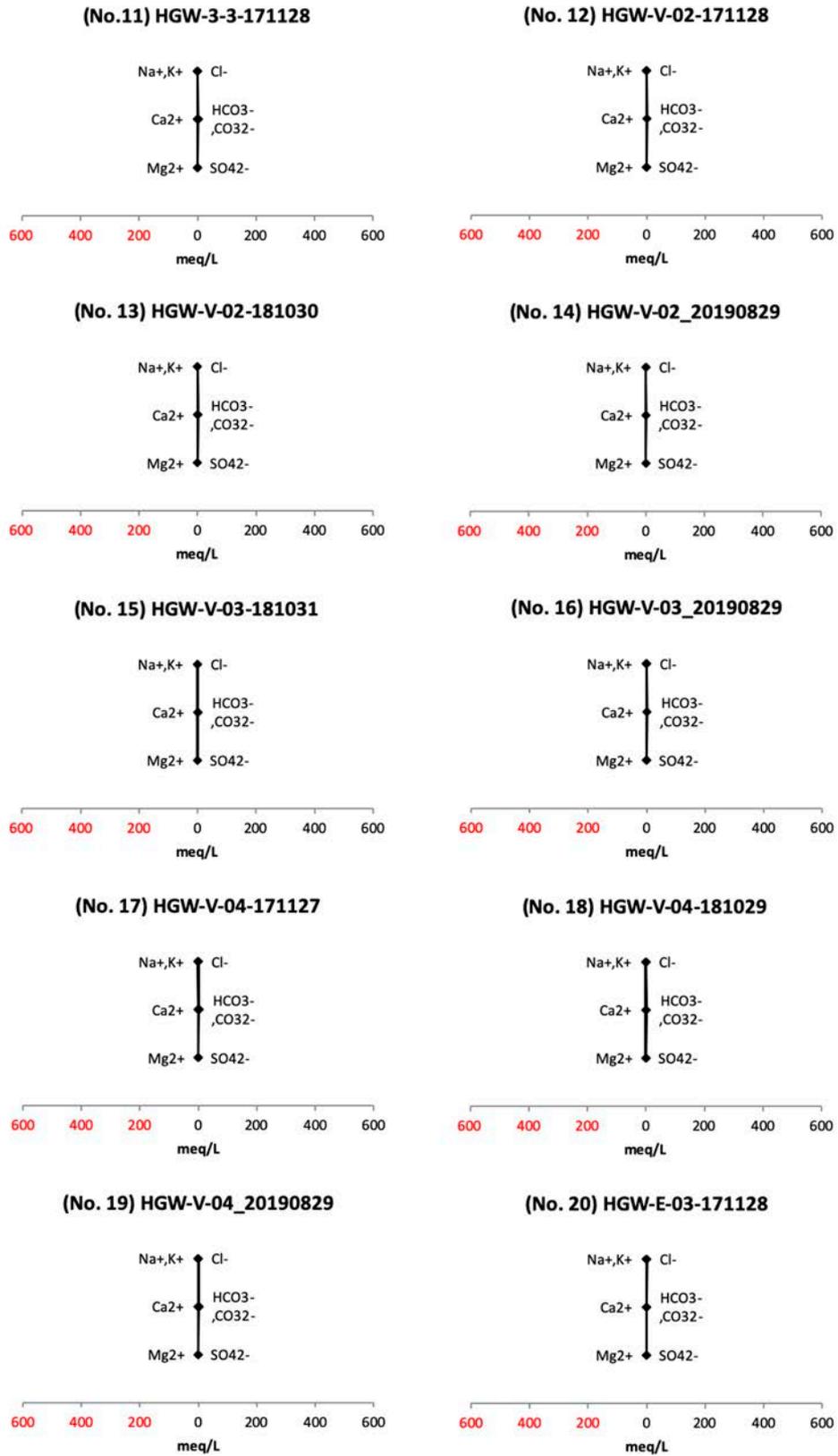


Fig. 4-b. Hexadiagrams (Stiff diagrams) for the data of index no. 11–20.

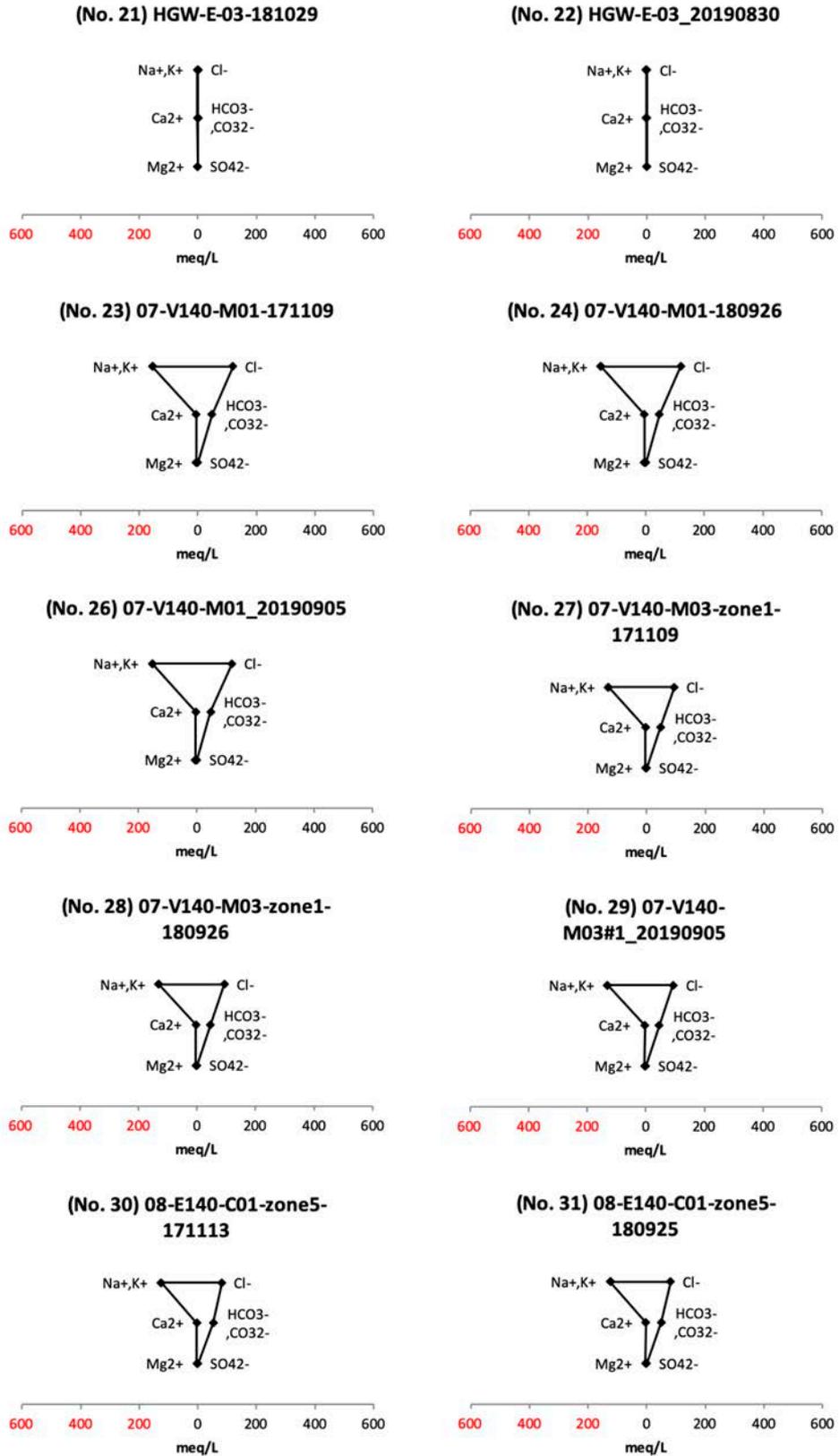


Fig. 4-c. Hexadiagrams (Stiff diagrams) for the data of index no. 21–31.

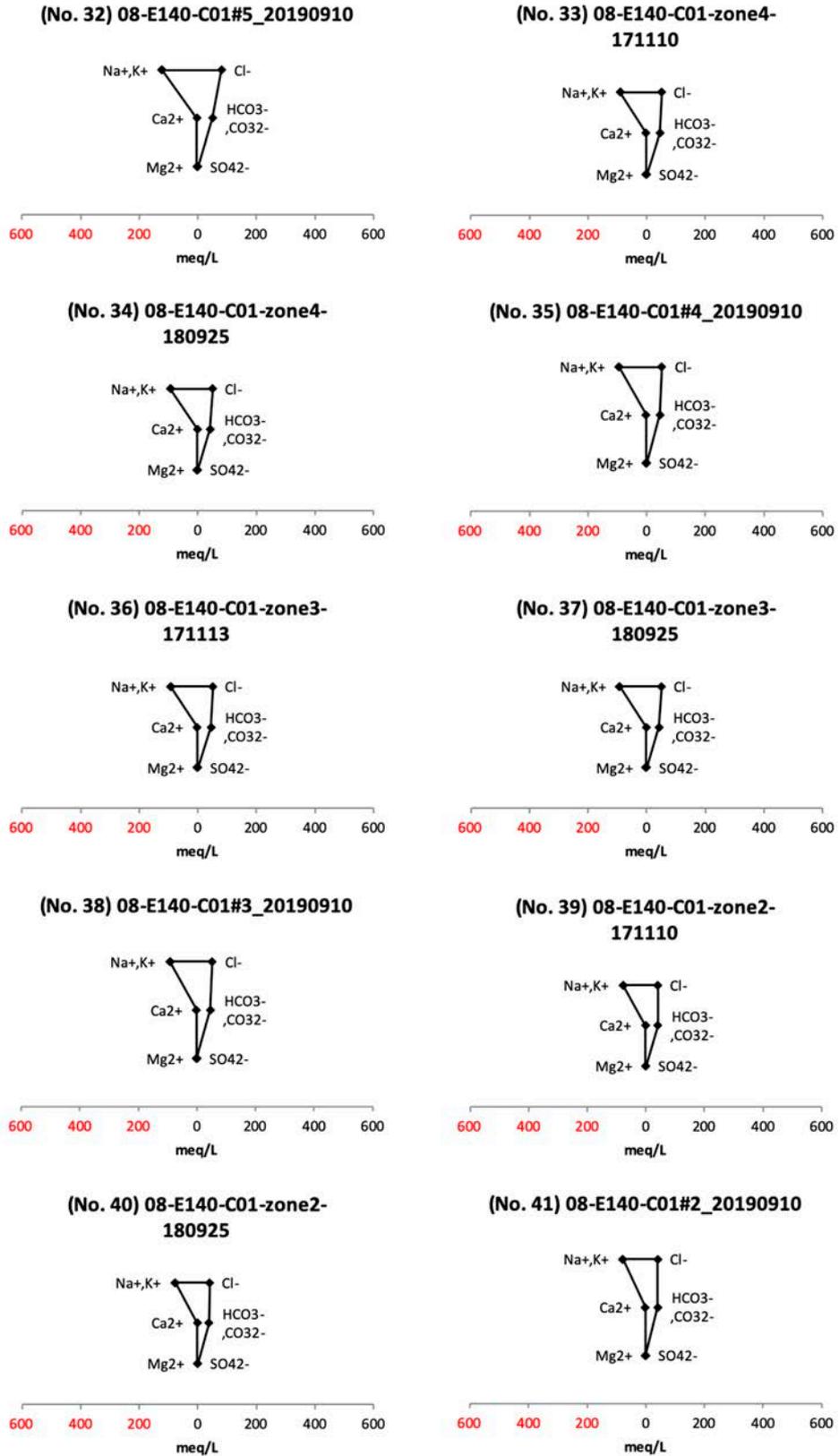


Fig. 4-d. Hexadiagrams (Stiff diagrams) for the data of index no. 32-41.

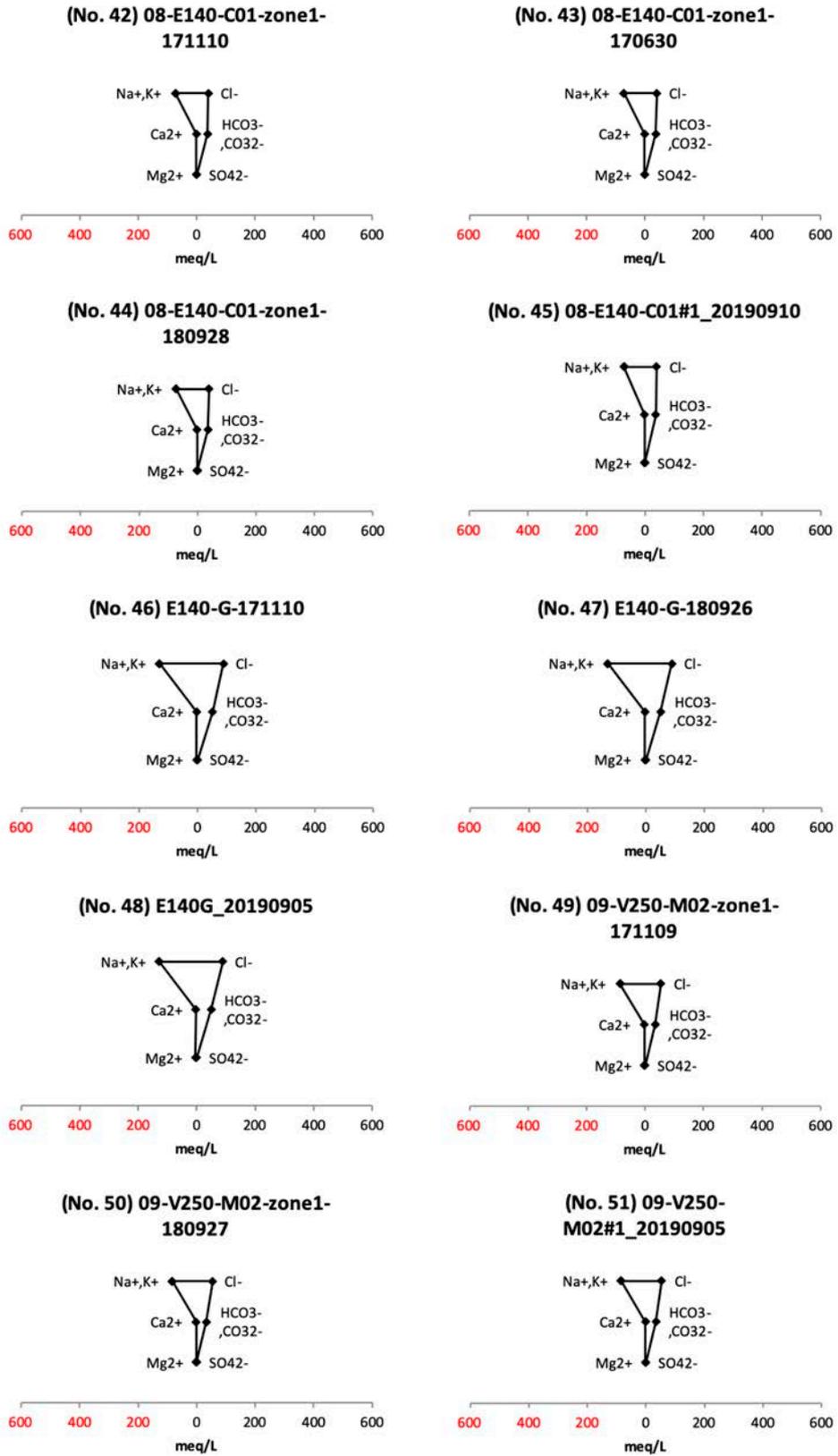
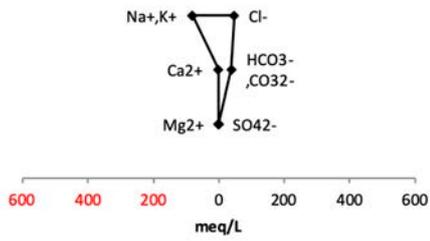
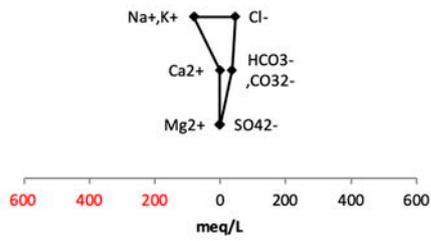


Fig. 4-e. Hexadiagrams (Stiff diagrams) for the data of index no. 42–51.

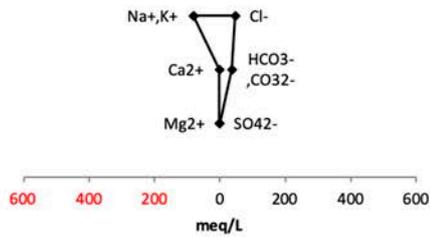
**(No. 52) 10-E250-M01-171113**



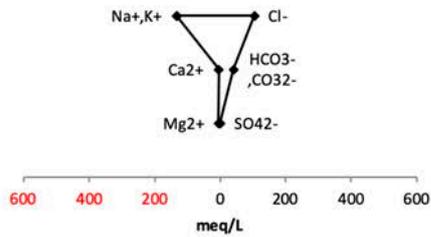
**(No. 53) 10-E250-M01-180926**



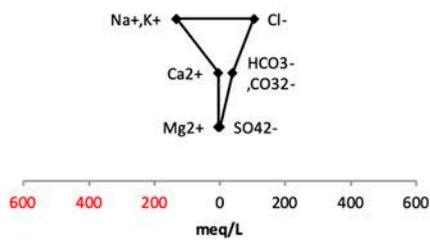
**(No. 54) 10-E250-M01\_20190905**



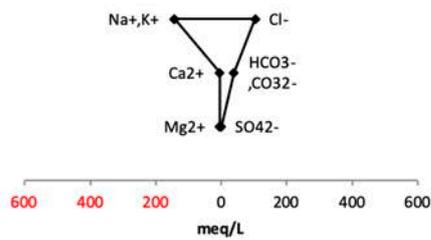
**(No. 55) 11-V250-TR02-171114**



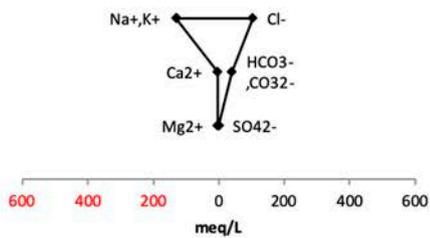
**(No. 56) 11-V250-TR02-180926**



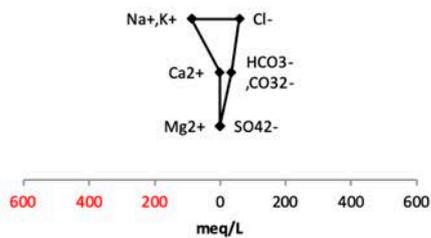
**(No. 57) 11-V250-TR02\_20190910**



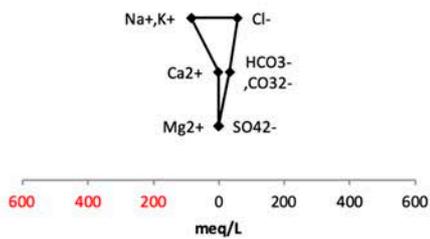
**(No. 58) 11-V250-TR03-171114**



**(No. 59) 11-W250-TR01-171114**



**(No. 60) 11-W250-TR01-180927**



**(No. 61) 12-P350-M02-171115**

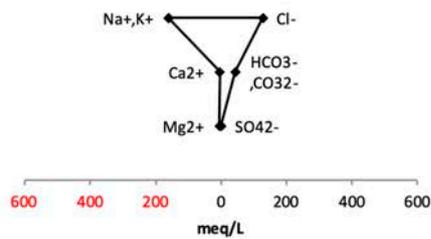
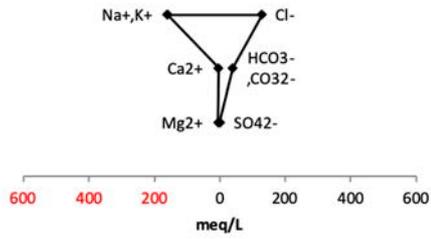
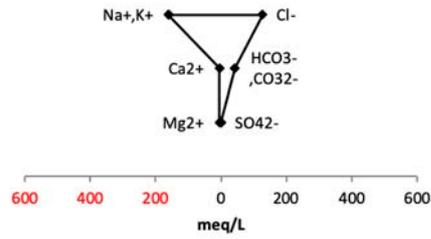


Fig. 4-f. Hexadiagrams (Stiff diagrams) for the data of index no. 52–61.

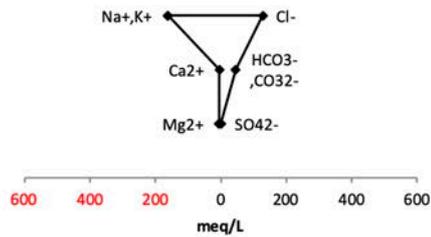
**(No. 62) 12-P350-M02-171206-(0)**



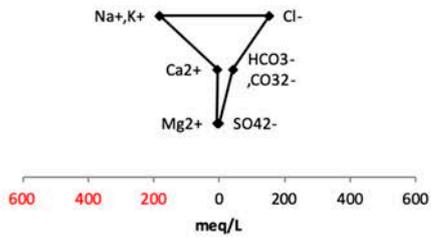
**(No. 63) 12-P350-M02-181003**



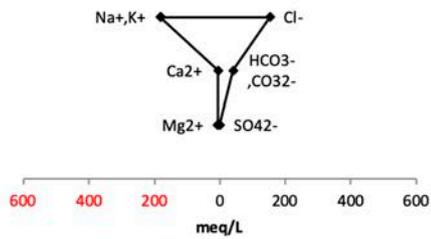
**(No. 64) 12-P350-M02\_20190902**



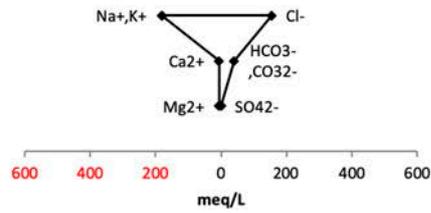
**(No. 65) 13-350LGE-M01-171207**



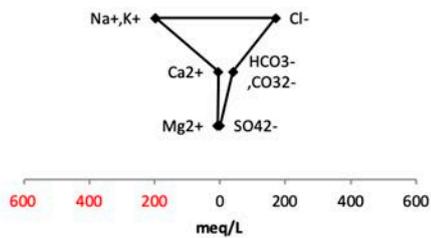
**(No. 66) 13-350LGE-M01-180927**



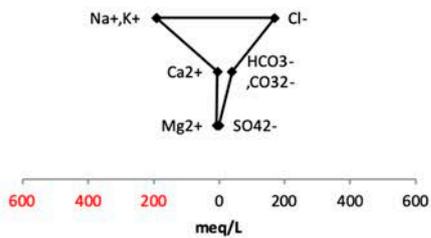
**(No. 67) 13-350LGE-M01\_20190902**



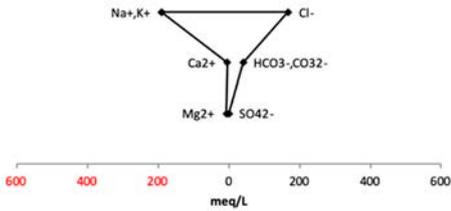
**(No. 68) 13-350-C01-171109**



**(No. 69) 13-350-C01-180927**



**(No. 71) 13-350-C01\_20190828**



**(No. 72) 13-350-C01\_20190830**

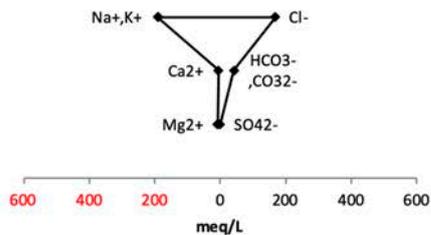


Fig. 4-g. Hexadiagrams (Stiff diagrams) for the data of index no. 62–72.

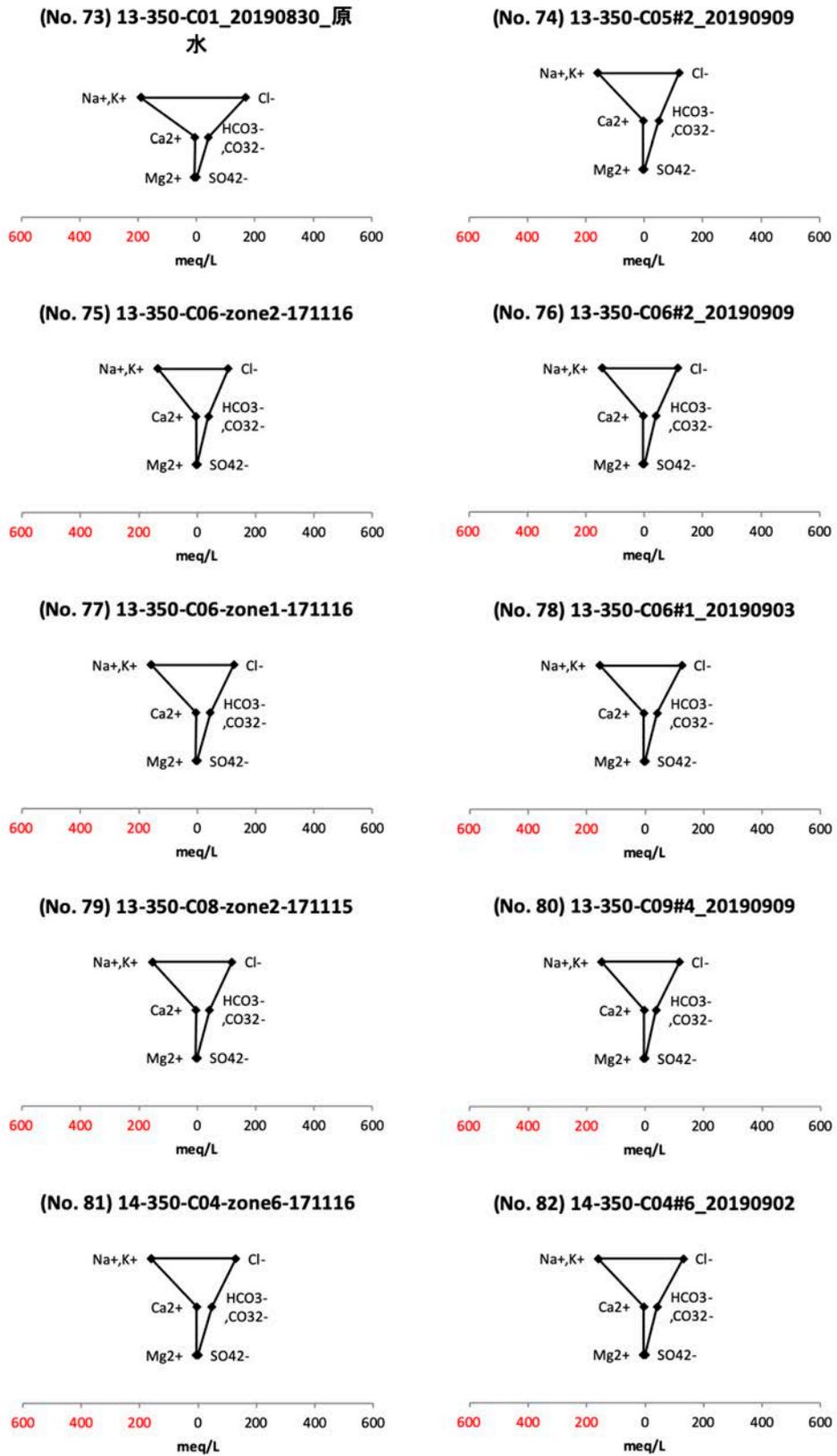
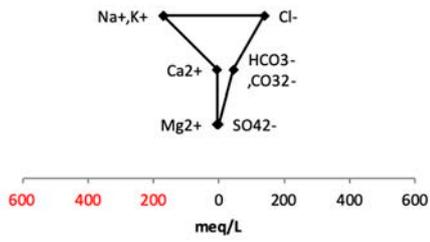
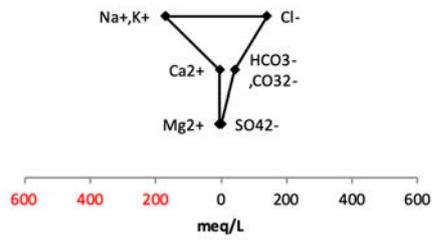


Fig. 4-h. Hexadiagrams (Stiff diagrams) for the data of index no. 73–82.

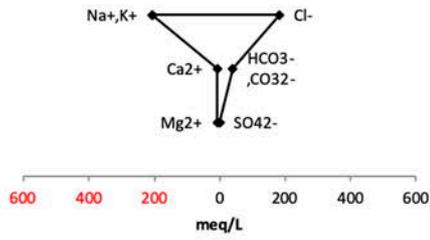
(No. 83) 14-350-C04-zone5-171204



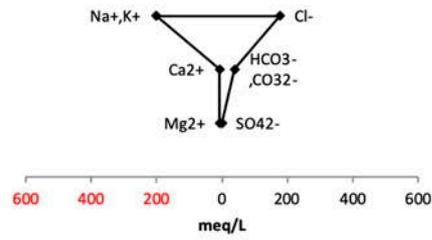
(No. 84) 14-350-C04#5\_20190903



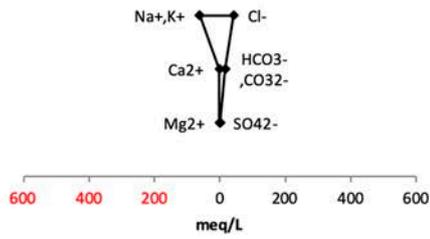
(No. 85) 14-350-GAS01-180928



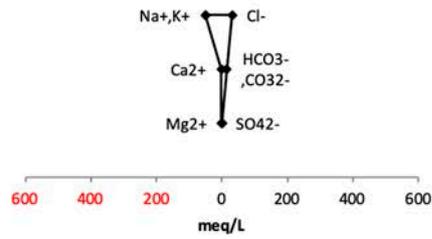
(No. 86) 14-350-GAS01\_20190902



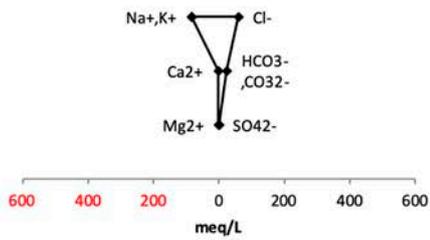
(No. 88) WR-V-98.0-171130



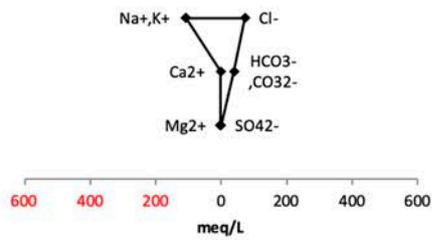
(No. 89) WR-V-98.0-180831



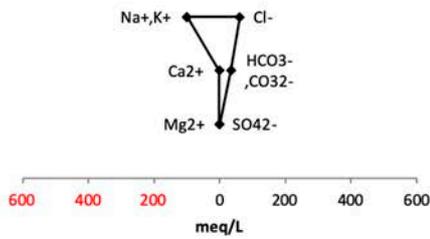
(No. 92) WR-V133.8\_20190827



(No. 94) WR-V-168.0-171130



(No. 95) WR-V-202.0-180831



(No. 97) WR-V-242.0-171130

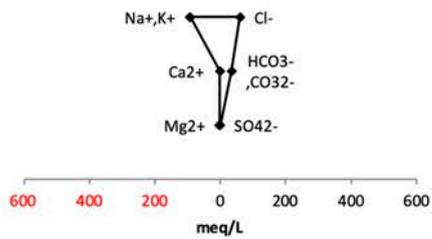
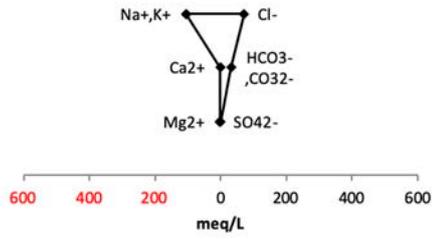
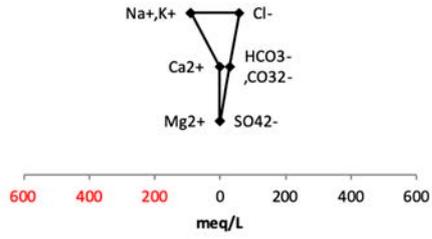


Fig. 4-i. Hexadiagrams (Stiff diagrams) for the data of index no. 83–97.

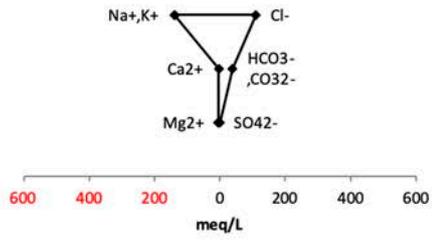
(No. 98) WR-V-242.0-180831



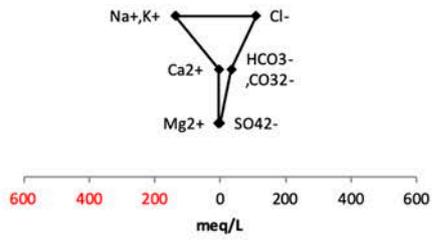
(No. 99) WR-V242.0\_20190826



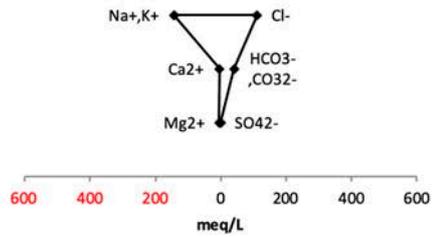
(No. 101) WR-V-282.0-171129



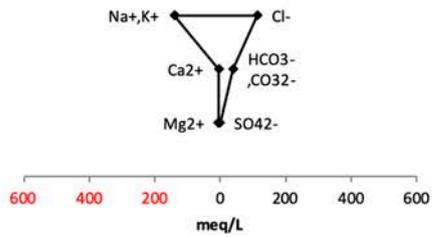
(No. 102) WR-V-282.0-180831



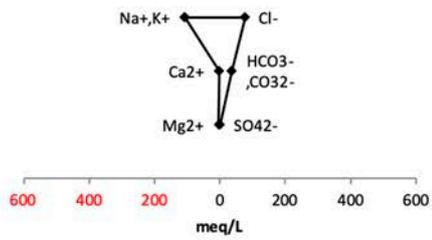
(No. 103) WR-V-282.0-181206



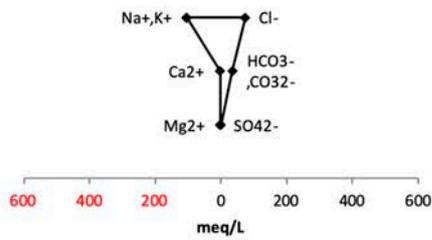
(No. 104) WR-V282.0\_20190826



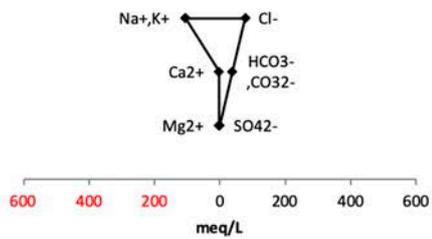
(No. 106) WR-V-310.0-171129



(No. 107) WR-V-310.0-180831



(No. 108) WR-V310.0\_20190826



(No. 109) WR-V-343.9-171129

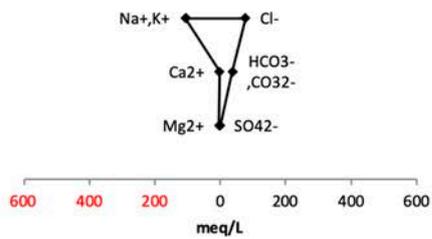
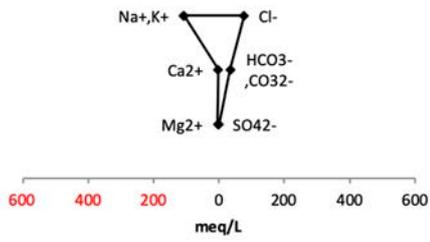
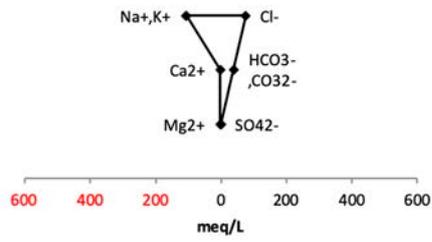


Fig. 4-j. Hexadiagrams (Stiff diagrams) for the data of index no. 98–109.

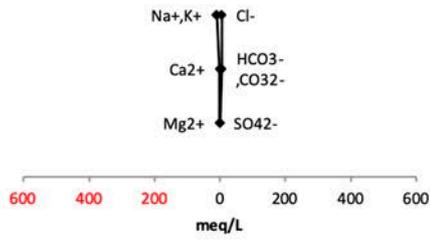
(No. 110) WR-V-343.9-180831



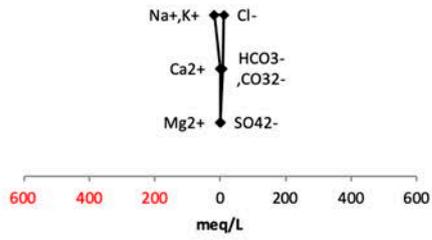
(No. 111) WR-V-343.9-181206



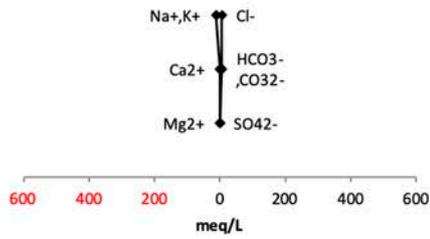
(No. 113) WR-E-27.0-171129



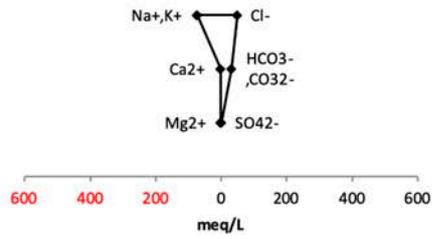
(No. 115) WR-E-27.0-180628



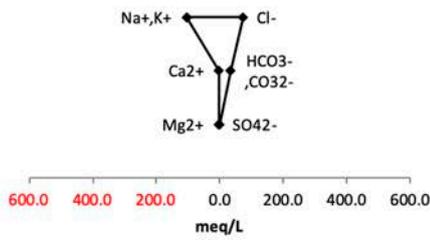
(No. 116) WR-E27.0\_20190827



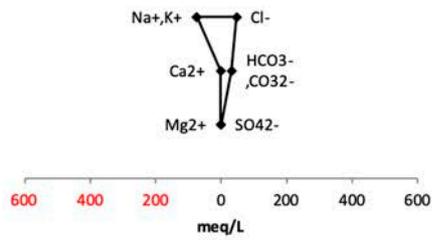
(No. 118) WR-E-63.8-171129



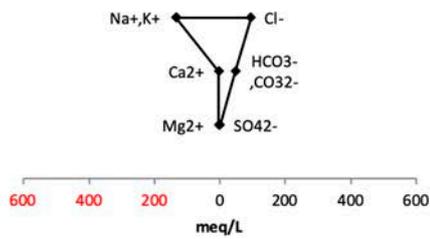
(No. 119) WR-E-63.8-180831



(No. 121) WR-E63.8\_20190827



(No. 123) WR-E-132.0-171027



(No. 124) WR-E-132.0-180831

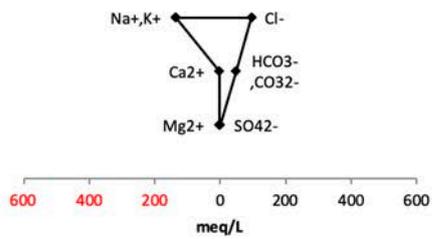
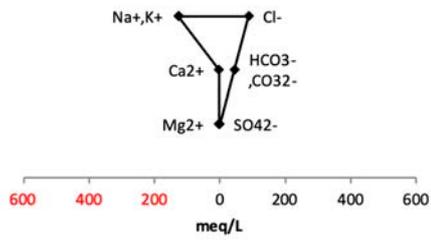
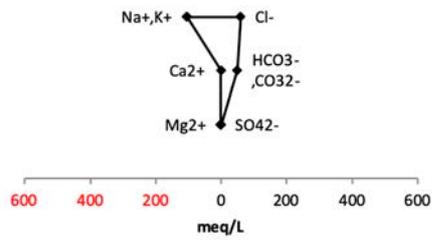


Fig. 4-k. Hexadiagrams (Stiff diagrams) for the data of index no. 110–124.

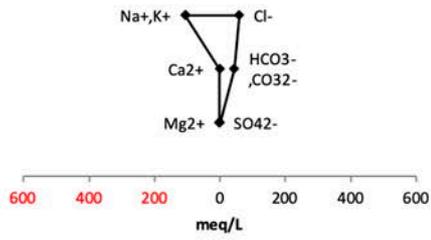
(No. 125) WR-E132.0\_20190827



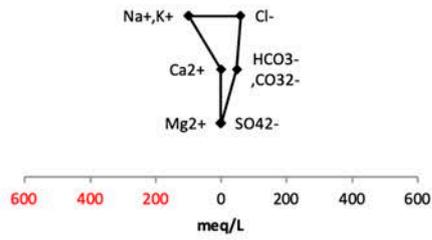
(No. 126) WR-E-169.0-171129



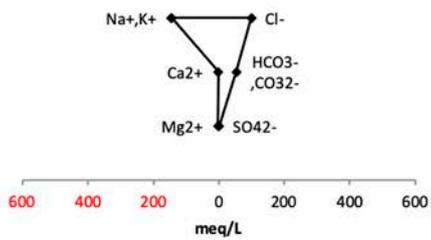
(No. 127) WR-E-169.0-180831



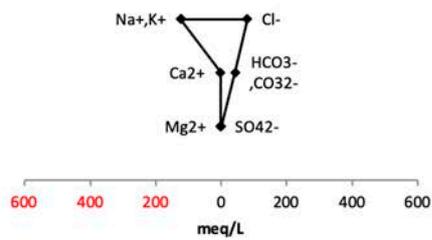
(No. 128) WR-E169.0\_20190827



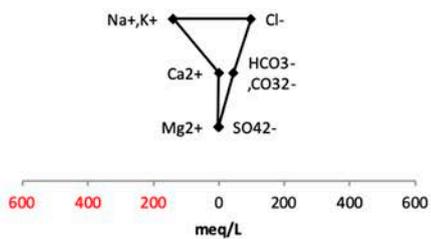
(No. 130) WR-E-202.0-171129



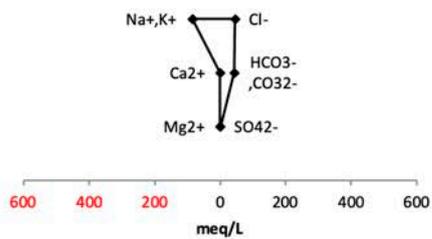
(No. 131) WR-E-202.0-180831



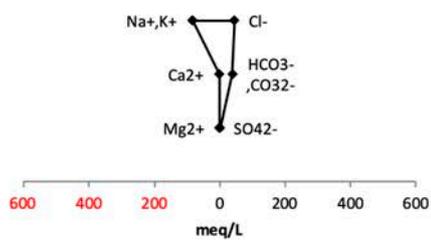
(No. 132) WR-E202.0\_20190827



(No. 133) WR-E239.0\_20190826



(No. 134) WR-E-276.0-180928



(No. 135) WR-E-310.0-171129

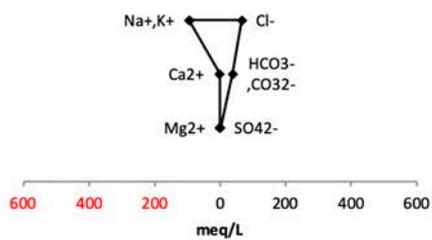
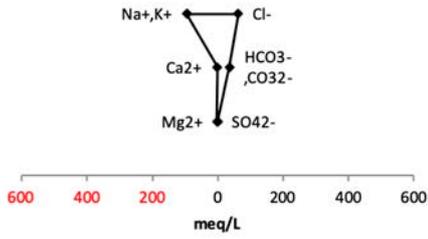
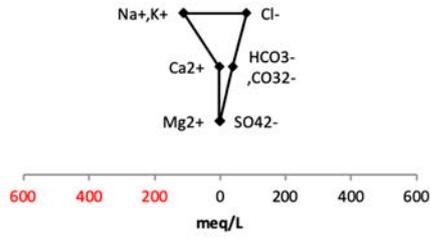


Fig. 4-1. Hexadiagrams (Stiff diagrams) for the data of index no. 125-135.

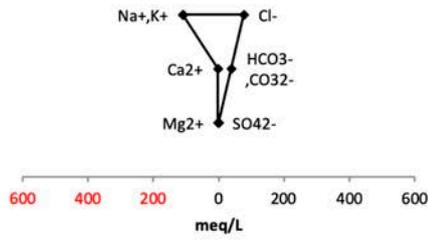
(No. 136) WR-E-310.0-180928



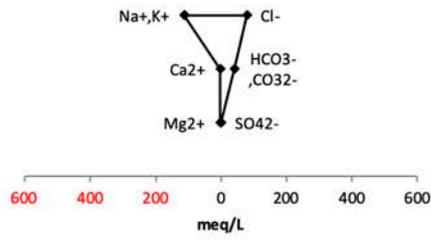
(No. 138) WR-E-340.0-171129



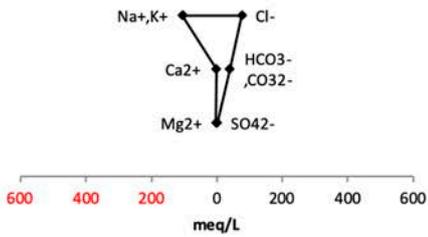
(No. 139) WR-E-340.0-180928



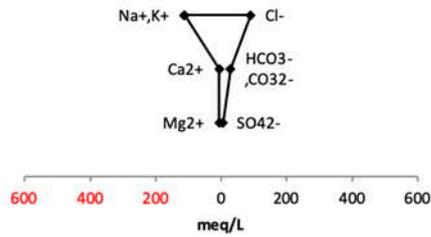
(No. 140) WR-E-340.0-181206



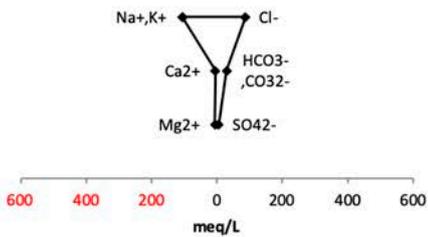
(No. 141) WR-E340.0\_20190826



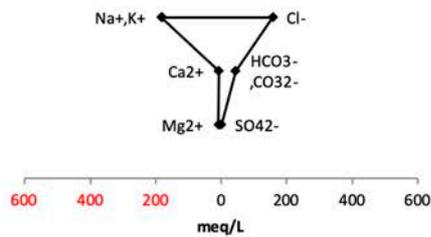
(No. 142) WR-W-64.0-181031



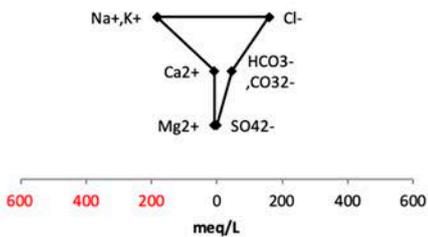
(No. 143) WR-W64.0\_20190830



(No. 144) WR-W-100.0-181031



(No. 145) WR-W100.0\_20190830



(No. 146) WR-W-164.0-181030

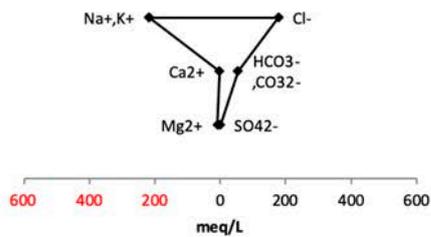
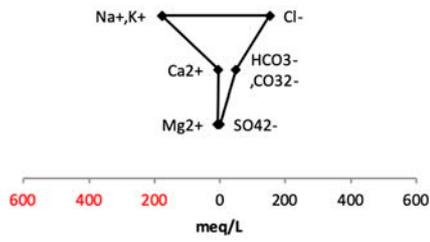
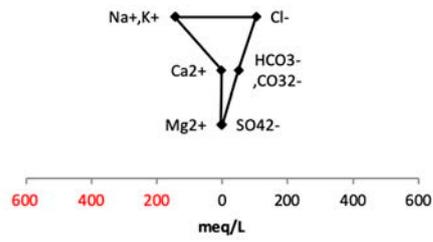


Fig. 4-m. Hexadiagrams (Stiff diagrams) for the data of index no. 136–146.

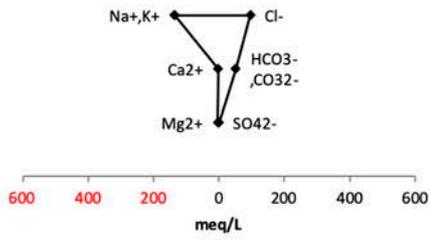
(No. 147) WR-W164.0\_20190830



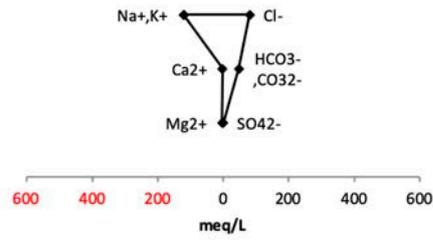
(No. 148) WR-W194.0-181030



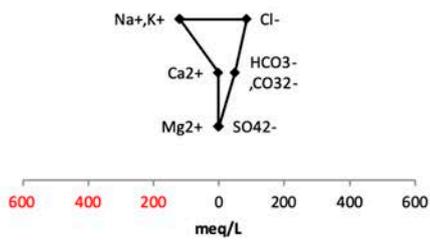
(No. 149) WR-W194.0\_20190830



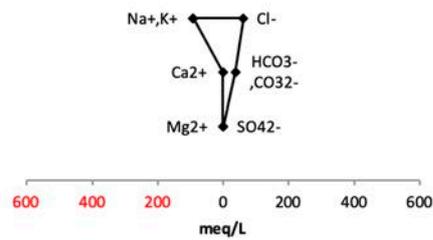
(No. 150) WR-W224.9-181030



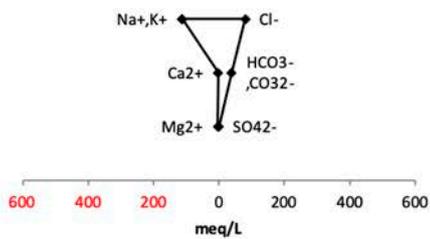
(No. 151) WR-W224.9\_20190830



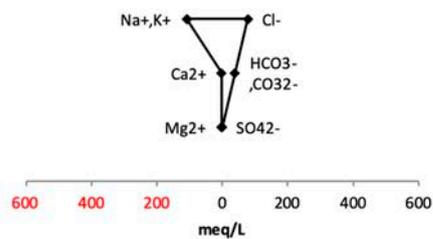
(No. 152) WR-W276.0\_20190830



(No. 153) WR-W-310.0-181030



(No. 154) WR-W-340.0-181030



(No. 155) WR-W340.0\_20190830

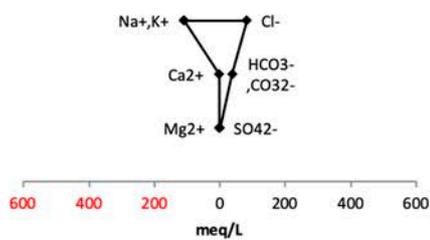


Fig. 4-n. Hexadiagrams (Stiff diagrams) for the data of index no. 147–155.

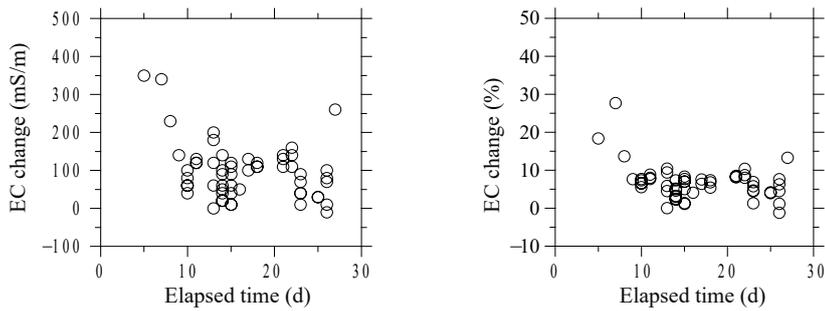


Fig. 5. Changes of electrical conductivity after sampling

### 5. おわりに

本報告書では、2017年度～2019年度に分析された地下水の物理化学パラメータ及び水質の測定・分析結果をまとめた。幌延深地層研究計画では、地下水の地球化学モデルの構築および更新の一環として、地下施設の建設が地下水の組成に与える影響を評価するために、今後も継続して地下水の調査を実施し、得られた結果を適宜取りまとめ、公開を図る。

### 謝辞

本報告書で取りまとめの対象としたデータについて、試料採取の際には、幌延深地層研究センターの佐俣洋一氏の協力を頂いた。また、試料の分析の際には、石油資源開発株式会社の諸氏に協力を頂いた。以上の方々に、この場を借りて、深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター：“幌延深地層研究計画 地下施設での調査段階（第3段階）計画-その1：深度350mまでの調査研究計画”，平成22年7月，16p.
- 2) 佐藤稔紀，笹本広，石井英一，松岡稔幸，早野明，宮川和也，藤田朝雄，棚井憲治，中山雅，武田匡樹，横田秀晴，青柳和平，大野宏和，茂田直孝，花室孝広，伊藤洋昭：“幌延深地層研究計画における坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階：深度350mまで）研究成果報告書”，JAEA-Research 2016-025 (2017), 313 p.
- 3) 天野由記，山本陽一，南條功，村上裕晃，横田秀晴，山崎雅則，國丸貴紀，大山隆弘，岩月輝希：“幌延深地層研究計画における地下水，河川水および降水の水質データ（2001～2010年度）”，JAEA-Data/Code 2011-023 (2012), 312 p.
- 4) 笹本広，山本信幸，宮川和也，水野崇：“幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質データ（2011年度～2013年度）”，JAEA-Data/Code 2014-033 (2015), 43 p.
- 5) 宮川和也，女澤徹也，望月陽人，笹本広：“幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質データ（2014年度～2016年度）”，JAEA-Data/Code 2017-012 (2017), 60 p.
- 6) 文部科学省：“トリチウム分析法（2訂）”，放射能測定法シリーズ9 (2002), 127 p.
- 7) Friedman, L.C. and Erdmann, D.E.：“Quality assurance practices for analyzes of water and fluvial sediments (Tech. Water Resources Inc., Book 5, Chapter A6)”，1982.
- 8) 女澤徹也，望月陽人，宮川和也，笹本広：“幌延の地下施設における地下水の地球化学モニタリング装置を用いた物理化学パラメータ測定結果”，JAEA-Data/Code 2018-001 (2017), 55 p.
- 9) 望月陽人，笹本広，女澤徹也，宮川和也：“深部地下水における酸化還元電位の不確かさ評価：北海道・幌延地域を事例として”，地下水学会誌，61, pp. 3-20, (2019).

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(e)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr <sup>(e)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加減	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

