



瑞浪超深地層研究所における深度500mまでの
地球化学調査および調査技術開発

Hydrogeochemical Research and Development at Mizunami Underground Research
Laboratory up to 500m Depth

岩月 輝希 湯口 貴史 大森 一秋 長谷川 隆
宗本 隆志

Teruki IWATSUKI, Takashi YUGUCHI, Kazuaki OHMORI, Takashi HASEGAWA
and Takashi MUNEMOTO

地層処分研究開発部門
東濃地科学研究ユニット

Tono Geoscientific Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate

December 2013

本レポートは独立行政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 (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 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
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata Shirane, 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, 2013

瑞浪超深地層研究所における深度 500m までの地球化学調査および調査技術開発

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門
東濃地科学研究ユニット

岩月輝希, 湯口貴史, 大森一秋^{※1}, 長谷川 隆^{※1}, 宗本隆志^{※2}

(2013 年 7 月 8 日受理)

本報告書は、瑞浪超深地層研究所計画において第 1 期中期計画(平成 17～21 年度)および第 2 期中期計画(平成 22～26 年度)の中で行われた、地表から深度 500m までの「研究坑道の掘削を伴う研究段階(第 2 段階)」と「研究坑道を利用した研究段階(第 3 段階)」の地球化学研究の成果を取りまとめるものである。

第 2 段階の調査研究では、「地表からの調査予測研究段階(第 1 段階)」において構築された地球化学モデルの妥当性を確認するとともに、施設建設が周辺の地球化学特性に与える影響の観測とそれに基づく今後十数年程度の将来予測を行った。第 3 段階の調査研究では、研究坑道で利用する調査技術として地下水の酸化還元電位の計測技術、コロイド/有機物の調査技術の開発を行った。

深度 500m までの調査研究の結果、堆積岩および花崗岩における施設建設、維持管理時の水質変化が、塩分濃度の異なる地下水の混合状態の変化に起因することが明らかになった。また、研究坑道周辺の地下水の水質が将来的に花崗岩浅部の地下水の組成に変化していくことが明らかになった。これらの結果に基づき、第 1 段階および第 2 段階の調査に関わる留意点として、地球化学特性の擾乱に関わる高透水性の地質構造に焦点を当てたモニタリングの考え方や多変量解析の有効性を提示することができた。

今後は、研究坑道の閉鎖時や閉鎖後の地球化学特性の変化について観測事例を蓄積し、予測解析技術をより高度なものとして構築していくことが課題である。

東濃地科学センター (駐在) : 〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64

※1 技術開発協力員

※2 博士研究員

Hydrogeochemical Research and Development at Mizunami Underground Research
Laboratory up to 500m Depth

Teruki IWATSUKI, Takashi YUGUCHI, Kazuaki OHMORI ^{*1}, Takashi HASEGAWA ^{*1}
and Takashi MUNEMOTO ^{*2}

Tono Geoscientific Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Akeyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received July 8, 2013)

This report summarizes the results of hydrogeochemical research and development in the Construction phase (Phase II) and the Operation phase (Phase III) of Mizunami Underground Research Laboratory Project up to 500m depth during 1st and 2nd Mid-term plan.

We evaluated the “Phase I - hydrogeochemical model” constructed in the Surface-based investigation phase (Phase I), and observed hydrogeochemical changes resulting from facility construction in the Phase II. Additionally we developed investigation techniques on redox condition, colloid/organics, etc. employed at gallery in the Phase III.

Hydrogeochemical changes in sedimentary and granitic rocks resulting from facility construction have been caused by the change of mixing ratio among salinity-distinct groundwaters. Multivariate numerical analysis shows that the groundwater chemistry around drifts would change to that of shallow groundwater in the future. The know-hows were summarized to infer the hydrochemical changing processes during facility construction.

Accumulation of knowledge regarding hydrogeochemical change and development of the simulation method of long-term hydrogeochemical condition in the facility closure and the post-closure phase is significant subjects for a future study.

Keyword: Groundwater Chemistry, Excavation Disturbed Zone, Excavation Damaged Zone,
Mizunami Underground Research Laboratory

*1 Collaborating Engineer

*2 Post-Doctoral Fellow

目次

1. はじめに	1
2. 第1段階の調査技術の確認（地上からの調査結果に基づいて予測した地球化学特性の空間分布の妥当性確認）	2
3. 第2段階の調査技術（施設建設時の調査技術）	5
3.1 一般的に想定される諸現象と既存情報（国内外事例）	5
3.2 研究所における施設建設と観測の概要	6
3.3 EdZ*の地球化学特性の変化.....	10
3.3.1 表層から不整合部周辺（主に堆積岩）	10
3.3.2 不整合部周辺から深度 500m（主に花崗岩）	20
3.3.3 EdZ*の地球化学特性に関わる重要な知見	33
3.4 EDZ**の地球化学特性の変化	34
3.4.1 セメント材料の化学的影響に関わる諸現象	34
3.4.2 セメント材料の化学的影響の観察事例.....	35
3.4.3 EDZ**の地球化学特性に関わる重要な知見.....	42
4. 第3段階の調査技術（坑道で利用する調査技術）	44
4.1 物理化学パラメータの長期観測と関連する主要プロセスに関わる調査技術	44
4.2 コロイド／有機物の調査技術	47
5. 施設維持管理期間中の地球化学特性の将来変化の予測技術	50
5.1 水質変化について	50
5.2 pH, 酸化還元状態について.....	57
5.3 地球化学特性の将来変化と地下施設の閉鎖に関わる汎用的な知見.....	58
6. 第2期中期計画において得られた調査・観測・解析に関わる留意点, 汎用的知見.....	60
6.1 地上からの調査技術（第1段階）へのフィードバック	60
6.2 地下施設建設中の調査（第2段階）の留意点	60
7. 今後の指針.....	61
参考文献	62

*EdZ: Excavation disturbed zone, **EDZ: Excavation damaged zone

Contents

1. Introduction.....	1
2. Confirmation of Phase I hydrogeochemical model	2
3. Investigation techniques (Phase II).....	5
3.1 Generic FEP and previous study	5
3.2 Facility construction and observation of hydrochemical change.....	6
3.3 Hydrochemical change in Excavation disturbed Zone (EdZ)	10
3.3.1 Surface to unconformity (Sedimentary rock)	10
3.3.2 Unconformity to the depth of 500 m (Granite).....	20
3.3.3 Remarks on hydrochemical change in EdZ	33
3.4 Hydrochemical change in Excavation Damaged Zone (EDZ)	34
3.4.1 Generic process relating cement materials	34
3.4.2 Chemical influence of cement materials.....	35
3.4.3 Remarks on hydrochemical change in EDZ.....	42
4. Investigation techniques (Phase III)	44
4.1 Observation techniques of physico-chemical parameters	44
4.2 Investigation techniques of colloid/organics.....	47
5. Estimation of hydrochemical change in the future	50
5.1 Change of water chemistry.....	50
5.2 Change of pH and ORP.....	57
5.3 Remarks of the future change	58
6. Know-hows accumulated during Phase II	60
6.1 Feedback to Phase I investigation	60
6.2 Notes of Phase II investigation	60
7. Future direction	61
References.....	62

図表リスト

図 2.1	研究所周辺の地下水水質の深度分布.....	2
図 2.2	第 1 段階の地下水の地球化学モデル（地球化学特性の分布と形成プロセス）	2
図 2.3	第 1 段階と第 2 段階で得られた Cl 濃度分布の比較	3
図 2.4	第 1 段階と第 2 段階で得られた pH, 酸化還元電位の比較.....	4
図 3.2.1	研究所周辺における地上からの水圧・水質観測孔と観測方式	7
図 3.2.2	研究坑道における水圧・水質観測孔と観測方式（2012 年度末時点）	8
図 3.3.1	主立坑(上)および換気立坑(下)の集水リング位置	10
図 3.3.2	集水リングにおける湧水量（2004 年 4 月から 2012 年 5 月までの総量[m ³]）	11
図 3.3.3	MSB-2, 4 号孔における地下水圧の経時変化.....	12
図 3.3.4	MSB-2 号孔における地下水水質の経時変化（1）	14
図 3.3.5	MSB-2 号孔における地下水水質の経時変化（2）	15
図 3.3.6	MSB-4 号孔における地下水水質の経時変化（1）	16
図 3.3.7	MSB-4 号孔における地下水水質の経時変化（2）	17
図 3.3.8	MSB-2, 4 号孔における同位体比の経時変化.....	18
図 3.3.9	MSB-2, 4 号孔における同位体比の相互関係.....	19
図 3.3.10	瑞浪層群における水理地質特性と坑道掘削影響の概念	19
図 3.3.11	MIZ-1 号孔における地下水水質の経時変化（1）	20
図 3.3.12	MIZ-1 号孔における地下水水質の経時変化（2）	21
図 3.3.13	各深度の観測孔の水圧変化.....	22
図 3.3.14	主立坑（上）、換気立坑（下）の集水リングの地下水水質の経時変化.....	23
図 3.3.15	研究坑道から掘削された観測孔における水質の経時変化（07MI07 号孔）	25
図 3.3.16	研究坑道から掘削された観測孔における水質の経時変化（09MI20 号孔）	26
図 3.3.17	研究坑道から掘削された観測孔における水質の経時変化（09MI21 号孔）	27
図 3.3.18	研究坑道から掘削された観測孔における水質の経時変化（10MI26 号孔）	28
図 3.3.19	大気中のフロンガス濃度の推移と溶解度	29
図 3.3.20	各観測区間におけるフロンガス濃度の推移.....	29
図 3.3.21	各深度の観測孔の地下水の同位体組成（1）	30
図 3.3.22	各深度の観測孔の地下水の同位体組成（2）	31
図 3.3.23	各観測孔の同位体の相関.....	32
図 3.3.24	花崗岩における水理地質特性と坑道掘削影響の概念.....	33
図 3.4.1	セメント材料の使用により想定される諸現象.....	34
図 3.4.2	セメント材料の元素組成比と地下水の pH との相関（室内試験例）	36
図 3.4.3	コンクリートライナーの概略.....	36
図 3.4.4	コンクリートライナー周辺の地下水（集水リング）の pH の経時変化	37
図 3.4.5	集水リング採水管で確認された炭酸塩鉱物の沈殿.....	37
図 3.4.6	深度 200m 予備ステージにおけるグラウト領域とモニタリングの概略.....	38
図 3.4.7	グラウト領域とモニタリング区間の比抵抗特性	38

図 3.4.8	グラウト領域周辺の地下水の pH の経時変化	39
図 3.4.9	グラウト領域周辺の地下水水質の経時変化.....	40
図 3.4.10	09MI21 号孔（深度 300m 水平孔）より採取した地下水の pH 観測結果.....	41
図 3.4.11	09MI21 号孔（深度 300m 水平孔）より採取した地下水の水質観測結果.....	41
図 3.4.12	09MI21 号孔の区間 1 の地下水に対する鉱物の飽和指数とセメント溶解度に関わる 既存研究事例	42
図 4.1.1	pH, 酸化還元電位実測値と理論値の比較.....	46
図 4.2.1	ボーリング孔掘削後孔壁に形成された鉄水酸化物の被膜.....	48
図 4.2.2	地下水中のアナログ元素のコロイドサイズ依存性.....	49
図 5.1.1	地上の観測孔での水質経時変化に関わる主成分分析	50
図 5.1.2	地上の観測孔における地下水の水質に関する主成分値の経時変化.....	51
図 5.1.3	地上の観測孔における地下水の水質に関する主成分値と主要成分濃度の相関.....	52
図 5.1.4	集水リングから採水された地下水の水質経時変化に関わる主成分分析.....	53
図 5.1.5	集水リングから採水された地下水の主成分値の経時変化.....	53
図 5.1.6	集水リングから採水された地下水の水質に関する主成分値と溶存成分濃度の相関.....	54
図 5.1.7	研究坑道の観測孔における地下水の水質経時変化に関わる主成分分析.....	55
図 5.1.8	坑内観測孔における地下水の水質に関する主成分値の経時変化.....	56
図 5.1.9	地下水の水質に関する主成分値と主要溶存成分濃度の相関	57
表 3.2.1	地上からの水圧・水質観測区間（MIZ-1 の水質観測は区間 3, 5, 9 のみ）	7
表 3.2.2	研究坑道からの水圧・水質観測区間.....	9
表 4.1.1	各深度の観測孔における物理化学パラメータ観測値	45

Figure and table

Fig. 2.1 Depth profile of groundwater chemistry 2

Fig. 2.2 Phase I hydrogeochemical model (hydrogeochemical feature and process) 2

Fig. 2.3 Comparison of Cl profiles between Phase I and II 3

Fig. 2.4 Comparison of pH, Eh values between Phase I and II 4

Fig. 3.2.1 Hydrochemical monitoring at ground surface and the methods 7

Fig. 3.2.2 Hydrochemical monitoring at underground and the methods 8

Fig. 3.3.1 Location of water-collection rings in Main and Ventilation shaft 10

Fig. 3.3.2 Water inflow at the water-collection rings (Total amount from 2004~2012) 11

Fig. 3.3.3 Change of water pressure in MSB-2, 4 12

Fig. 3.3.4 Change of water chemistry in MSB-2 (1) 14

Fig. 3.3.5 Change of water chemistry in MSB-2 (2) 15

Fig. 3.3.6 Change of water chemistry in MSB-4 (1) 16

Fig. 3.3.7 Change of water chemistry in MSB-4 (2) 17

Fig. 3.3.8 Change of isotopes in MSB-2, 4 18

Fig. 3.3.9 Relationship among isotopes in MSB-2, 4 19

Fig. 3.3.10 Concept of hydrogeological feature and disturbance in sedimentary rocks 19

Fig. 3.3.11 Change of water chemistry in MIZ-1 (1) 20

Fig. 3.3.12 Change of water chemistry in MIZ-1 (2) 21

Fig. 3.3.13 Change of water pressure in monitoring boreholes every depths 22

Fig. 3.3.14 Change of Cl concentration in water-collection rings 23

Fig. 3.3.15 Change of water chemistry in 07MI07 25

Fig. 3.3.16 Change of water chemistry in 09MI20 26

Fig. 3.3.17 Change of water chemistry in 09MI21 27

Fig. 3.3.18 Change of water chemistry in 10MI26 28

Fig. 3.3.19 Evolution of CFCs in atmosphere and the solubility 29

Fig. 3.3.20 CFC concentration in groundwater 29

Fig. 3.3.21 Isotopic composition in monitoring borehole (1) 30

Fig. 3.3.22 Isotopic composition in monitoring borehole (2) 31

Fig. 3.3.23 Relationship among isotopes in monitoring boreholes 32

Fig. 3.3.24 Concept of hydrogeological feature and disturbance in granite 33

Fig. 3.4.1 Supposed chemical processes around cement material 34

Fig. 3.4.2 Elemental composition of cement and pH 36

Fig. 3.4.3 Illustration of concreat liner 36

Fig. 3.4.4 Change of pH aound concreat liner 37

Fig. 3.4.5 Carbonates precipitation in water sampling tube of water-collection ring 37

Fig. 3.4.6 Schematic view of grouting and the monitoring at 200m sub-stage 38

Fig. 3.4.7 Resistivity property around the grouting 38

Fig. 3.4.8	Change of pH around the grouting.....	39
Fig. 3.4.9	Change of water chemistry around the grouting.....	40
Fig. 3.4.10	pH values in 09MI21	41
Fig. 3.4.11	Groundwater chemistry in 09MI21	41
Fig. 3.4.12	Saturation index for groundwater in interval 1	42
Fig. 4.1.1	Comparison of observed pH and Eh with theoretical value	46
Fig. 4.2.1	Secondary precipitation of iron-hydroxides on borehole wall	48
Fig. 4.2.2	Relation among analog elements and colloids	49
Fig. 5.1.1	Principal component analysis for monitoring borehole at ground surface	50
Fig. 5.1.2	Change of principal components of groundwaters in monitoring borehole at ground surface.....	51
Fig. 5.1.3	Relationship among principal component and concentration of solutes in groundwaters of water collection ring	52
Fig. 5.1.4	Principal component analysis for groundwaters of water-collection rings.....	53
Fig. 5.1.5	Change of principal components in groundwaters of water-collection rings.....	53
Fig. 5.1.6	Relationship among principal component and concentration of solutes	54
Fig. 5.1.7	Principal component analysis for groundwaters of monitoring borehole at underground.....	55
Fig. 5.1.8	Change of principal components in groundwaters at monitoring boreholes.....	56
Fig. 5.1.9	Relationship among principal component and concentration of solutes in groundwaters.....	57
Table 3.2.1	Monitoring location in boreholes drilled from ground surface.....	7
Table 3.2.2	Monitoring location in boreholes drilled from underground drift	9
Table 4.1.1	Physico-chemical parameters in each borehole	45

1. はじめに

本報告書は、瑞浪超深地層研究所(以下、MIU)計画において、第1期中期計画(平成17～21年度)および第2期中期計画(平成22～26年度)の中で行われた、「地上からの調査予測研究段階(第1段階)」および「研究坑道の掘削を伴う研究段階(第2段階)」の地上から深度500mまでの地下施設建設の過程で得られた地球化学特性調査に関わる研究開発成果を取りまとめたものである。

地下施設建設に関わる地球化学特性の調査では、地上から深部地球化学特性を理解するための調査技術、地下施設の建設、維持管理、閉鎖に伴う地球化学特性の変化を理解するための調査技術、施設閉鎖後の地球化学特性を推測する技術などが必要となる。

第2期中期計画においては、第1期中期計画中に開始した観測を継続し、地上からの観測孔および深度500mまでの研究坑道から掘削したボーリング孔などから得られる地下水、岩石を対象として、以下の項目に関わる調査・解析技術の開発を行った。

- ・地上からの調査結果に基づいて予測した地球化学特性の空間分布の妥当性の確認(第1, 2段階の調査研究)
- ・施設の建設・維持管理に伴う周辺の地球化学特性の変化(変化量, プロセス・メカニズム)の把握, 十数年程度の中長期的な将来変化の予測(第2, 3段階の調査研究)
- ・地下水の物理化学パラメータや地下水中のコロイドと微量元素の相互作用などを理解するために研究坑道で利用する調査技術の開発(第3段階の調査研究)
- ・セメントなど研究坑道施工時に使用する人工材料が地下水の地球化学特性に与える影響の調査, 解析(第2, 3段階の調査研究)

2. 第 1 段階の調査技術の確認（地上からの調査結果に基づいて予測した地球化学特性の空間分布の妥当性確認）

第 1 段階においては、瑞浪超深地層研究所（以下、研究所）用地の堆積岩に対して 2 本（MSB-2, 4 号孔；深度 100～200m）、花崗岩に対して 1 本（MIZ-1 号孔；深度約 1,200m）のボーリング孔を掘削し、地下水の採水・分析を行った。また、広域地下水流動研究¹⁾で掘削された DH-2, 15 号孔の調査結果も参照して、施設建設前の地下水の水質分布（図 2.1）やその形成機構に関わる地球化学概念モデルを構築した。それらの調査解析の結果、研究所周辺の地下水の水質は、①堆積岩上部、②堆積岩下部および花崗岩浅部、③花崗岩深部の領域に分類でき、それぞれ、①Na, Ca, 溶存無機炭素（以下、IC と表記する）、SO₄に富む化学組成、②花崗岩深部に比べ低塩分濃度ながら Na, Ca, Cl に富む化学組成、③高塩分濃度の Na, Cl に富む化学組成であり、水質の空間分布はこれらの地下水の混合により形成されていることが明らかになっている（図 2.2）。

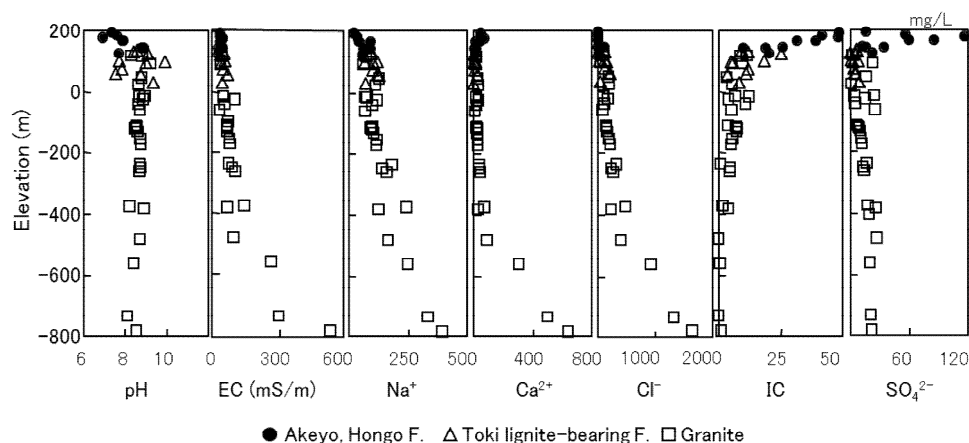


図 2.1 研究所周辺の地下水水質の深度分布²⁾

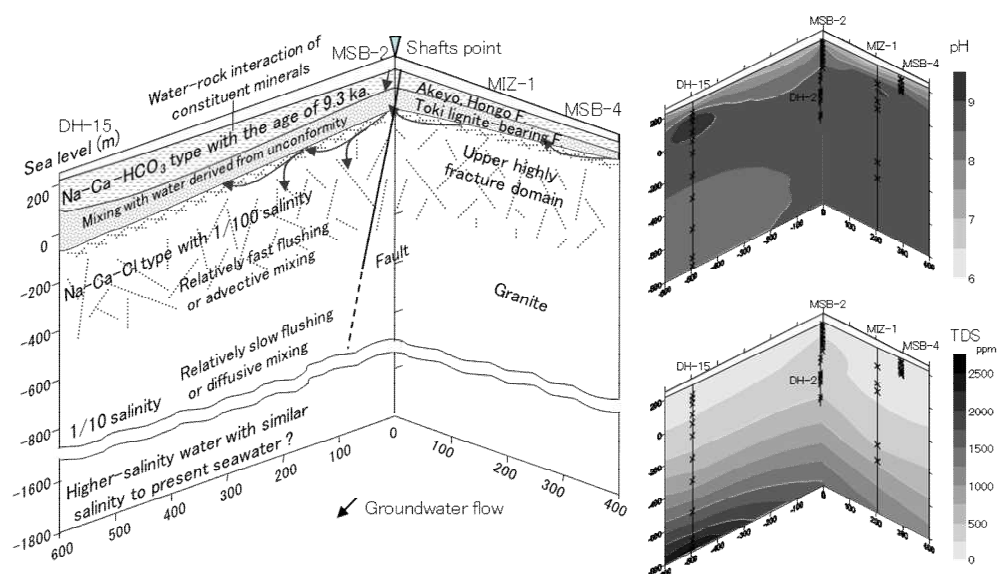


図 2.2 第 1 段階の地下水の地球化学モデル（地球化学特性の分布と形成プロセス²⁾）

第1段階の調査において得られた地球化学特性に関わる重要な知見は、特定の地質構造（涵養域と流出域の間にある月吉断層，研究所用地の瑞浪層群中の低透水層，研究所用地周辺の花崗岩の上部割れ目帯／下部割れ目低密度帯など）を境にして，地下水の水質型・塩分濃度分布が異なることである³⁾。また，以上の調査経験から得られた汎用的な知見として，地質環境調査実施時に同様な地質構造が認められる場合は，その両側（上下）で地下水の水質を確認可能な調査レイアウトを踏まえて調査計画立案を行うのが望ましいと言える。これらの第1段階で利用した調査技術については，三枝ほか（2007）³⁾に詳述してあるため，本章では割愛する。

第2期中期計画における第2段階の調査では，深度500mまでの研究坑道掘削時に得られた情報により，第1段階で予測した地球化学特性の空間分布の妥当性について確認した。研究坑道掘削後は，研究坑道の保坑に使用するセメントなどの人工材料や地下水の排水に伴う地球化学特性の変化が想定されるため（詳細は3.4参照），研究坑道掘削初期に得られる立坑に設置した集水リングの地下水データを利用して，第1段階の調査結果の妥当性を検証した。地下水中の主要な溶存成分であり，かつセメントなどの人工材料の影響を受けにくい代表的な成分であるClの濃度について，図2.3に各深度の集水リングで得られた地下水と第1段階の調査結果の比較（深度500mまで）を示す。Cl濃度は研究坑道掘削前の調査で得られた濃度とほぼ同等であり，第1段階の調査で理解した水質の深度分布は妥当であったと考えられる。

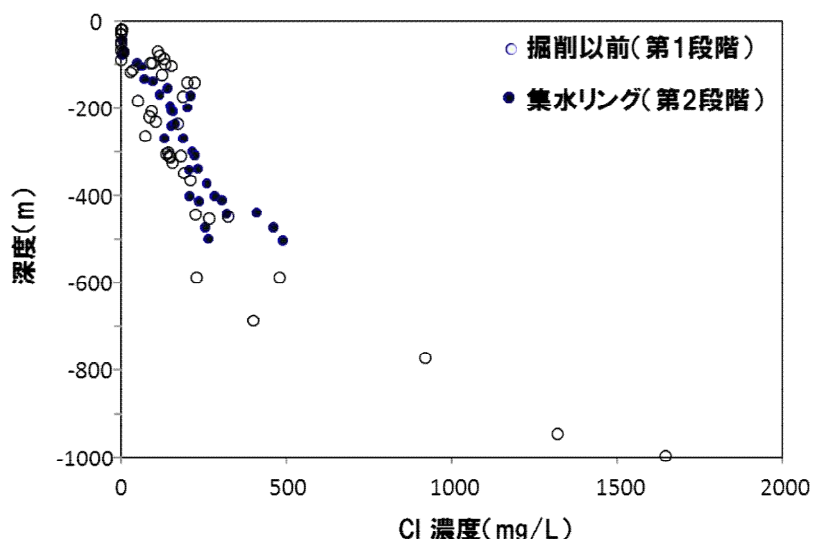


図 2.3 第1段階と第2段階で得られたCl濃度分布の比較

次に，地下水の物理化学パラメータ（pH，酸化還元電位）について，地上からの調査で得られた値と研究坑道掘削初期に得られた値を図2.4に示す。酸化還元電位については，広域地下水流動研究では，深度1,000mまでの地下水について約0～-385mVと測定されている⁴⁾。また，既往の測定値はこれまでの解析により主に二価鉄イオンと鉄水酸化物，二価鉄イオンと黄鉄鉱（Pyrite）の酸化還元反応により値が規定されていると推察されている^{2・4)}。

各深度の研究坑道で確認された酸化還元電位（Eh）は，深度200m，300mでは地上からの調査の値とほぼ一致しているが，深度400mにおいては既往データと一致していない。図2.4右図では，深度400mの地下水が二価鉄イオンと鉄水酸化物の酸化還元反応の平衡線付近と，二価鉄

イオンと黄鉄鉱の酸化還元反応の平衡線の中にプロットされており、相対的に酸化的な反応系から還元的な反応系への移行過程を示している可能性がある。

地上からの調査と研究坑道からの調査の測定値が一致しない原因としては、地上からの調査では予算や工程および環境条件（地下水の揚水可能量など）の制約から、安定した測定値を得る前に調査を終了せざるを得ない場合があるなどの理由により、データの品質が低いことが挙げられる。

以上のことから地下水の物理化学パラメータに関しては、地上からの調査でその分布や関連プロセスを正確に把握できず予察的な情報の取得に留まる可能性があり、研究坑道からの調査により補完する必要がある。

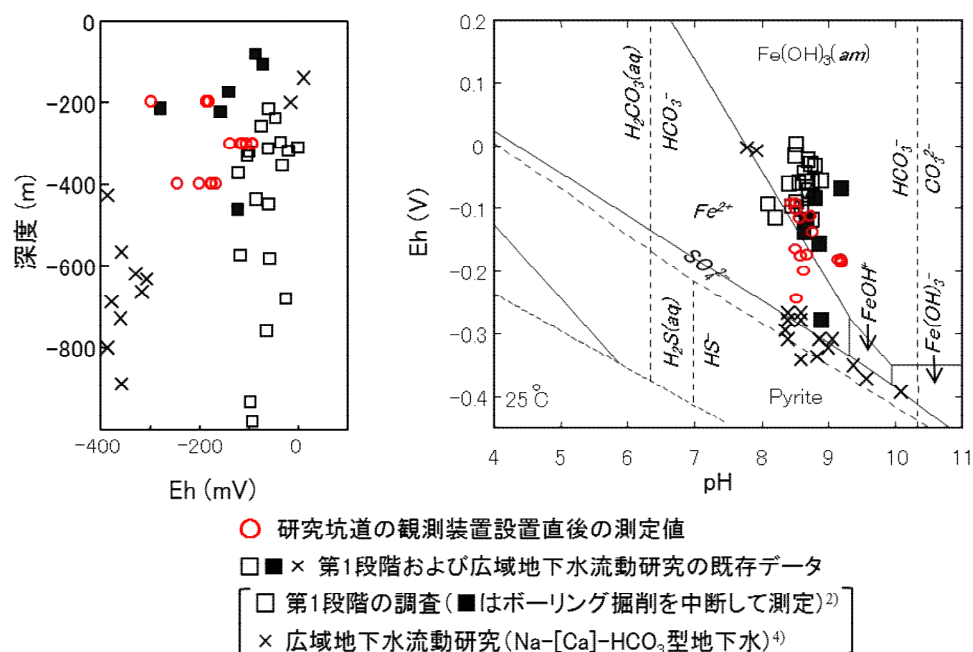


図 2.4 第1段階と第2段階で得られた pH, 酸化還元電位の比較

3. 第 2 段階の調査技術（施設建設時の調査技術）

数十年～百年にわたる地層処分場の建設・操業フェーズでは、建設・操業に伴う力学的、水理学的、化学的擾乱により、事前に地上からの調査結果に基づいて推察した地質環境特性が変化する。この期間は坑道が大気圧下であり、周囲の水理地質構造（透水性とその分布）に応じて坑道に湧水が発生する。湧水は周囲の地下水流動を変化させ、周辺の地下水頭低下や表層水の浸透、深部からの地下水の湧昇を引き起こす可能性がある。これらの影響は、周辺岩盤の透水性、坑道のレイアウト、坑道直近の止水（グラウト）状態に依存する⁵⁾。また、地下水流動の変化は地下水の水質変化を引き起こし、特に塩分濃度が上昇する場合は、ベントナイトなどの埋戻し材の膨潤やそのコロイド状溶脱に影響を与える⁵⁾。また、坑道掘削時に使用したグラウトやロックボルトなど人工材料の化学的影響も重要となる。

研究所用地における第 2 段階の調査では、以上の諸現象に関わる知見を得るとともに関連する調査技術を構築するために、研究坑道直近から研究所用地周辺の領域において、施設建設に伴う地球化学特性の変化について長期観測を実施した。また、完成した研究坑道において順次、地上からの調査で取得できない情報（地上からの調査では様々な制約によりデータの品質が低くなる酸化還元電位やコロイド／有機物など）の調査を実施した。

3.1 一般的に想定される諸現象と既存情報（国内外事例）

地下施設の建設、維持管理に伴う様々な影響については、関連する現象が起こるスケールや、影響が将来的に緩和、回復するか否かといった観点で分類できる。具体的には、坑道掘削時の物理的壊変（割れ目の形成など）やセメント材料など人工材料の使用などにより施設閉鎖後に施設建設前の地質環境条件に回復することが難しい領域（広義の Excavation Damaged Zone [EDZ]）と、岩盤自体の物理的壊変がなく地下水圧のように施設閉鎖後に施設建設前の地質環境特性に回復する可能性のある領域（Excavation disturbed Zone [EdZ]）に分類される⁶⁾。結晶質岩中の地下水の地球化学特性に関しては、前者は坑道から数 m～数十 m の範囲（人工材料周辺）、後者は坑道から数 m～数 km の範囲にあると想定される（ただし、これらの範囲は水理地質特性に依存して変動する）。

EDZ の地球化学特性の変化に関わる研究については、主に海外での研究事例があるが、坑道を埋戻し材で閉鎖し、埋戻し材自体の変化の観測を主軸とし岩盤側についても観測を行っている事例が多く（DOPAS Project や PEBS project, BELBaR Project など “Implementing Geological Disposal - Technology Platform”⁷⁾ 参照）、人工材料の性能評価に関わる知見の取得が主目的となっている。また、主にセメント材料が引き起こす高アルカリブルームに関わる知見を得ることを目的とした研究、室内試験や高アルカリ泉を対象としたナチュラルアナログ研究が多い⁸⁾。

EdZ の地球化学特性の変化に関わる研究については、カナダのマニトバに建設された地下研究所における研究事例がある⁹⁾。同研究所では、約 25 年にわたる建設・維持管理により、立坑周りの地下水位が約 60m 低下し、2 本の立坑の深度 240m の破碎帯周辺において、深部に存在する氷河期前の塩水と浅部から浸透する年代の若い低塩分濃度の浅層地下水の混合が発生している。この地下水の混合を抑制するため、破碎帯に湧水抑制シーリングを施工し、その性能調査と並行して周辺の観測孔で水圧変化の長期モニタリングを実施している。湧水の規模は、数 m³/日程度であり、深度 240m の坑道が冠水するまで約 7.6 年を要すると試算している^{10,11)}。一方、国内に

においては神奈川県相模原市郊外の洪積台地（深度 82.5m）の地下空間実験場（通称ミニドーム）において地下水調査を実施した事例がある¹²⁾。この事例では、深度 50m～82.5 m の地下空間実験場の埋め戻し後に、深度 84.5m に設置していた水中ポンプを停止し、再冠水過程の周辺岩盤の地下水環境の変化を把握するため、水圧、水温、水質（pH、電気伝導度）、埋戻し材（流動化改良土）の固化熱による温度変化を計測しており、3次元数値シュミレータ(GEO-FLOWSV3)により水圧変化について解析を実施している。得られた汎用的知見として、堆積軟岩中の水理挙動・地下水環境変化を明らかにするために、①水質モニタリングによる地下水流動の実態計測、②平衡状態に至るまでの水理挙動の継続観測、③ほぼ平衡に回復したと確認された後にパルス試験、トレーサ試験や多孔式試験による短期および局所的な地下水流動の観測、④上記データを用いた熱解析および移流・拡散解析の必要性について提言している¹²⁾。

3.2 研究所における施設建設と観測の概要

研究坑道の直近では、湧水割れ目に対するグラウトが行われている。また、両立坑にはコンクリートライナーが施工されており、他の研究坑道の壁面には保坑用セメントモルタル吹き付けされている。したがって、研究所では EdZ における水圧低下や付随する水質変化と、EDZ におけるセメント材料による水質変化やそれらの経時変化に関わる知見を蓄積するとともに、関連する調査・解析技術の研究開発が可能である。

研究坑道は、2013年4月時点で深度約 500m まで建設が進んでおり、研究坑道の掘削に伴い日量数百トンの地下水の湧水（排水）がある。なお、立坑を深度約 180m まで掘削した時点で、地下水中のフッ素、ホウ素濃度を環境基準以下に低下させるために排水処理施設を増設することになり、排水量を一時的に減量する必要性が生じた。そのため、2005年10月～2006年2月の間は、立坑内の水位を深度約 50m に維持しながら排水を断続的に実施することでスカフォードなどの建設設備の水没を防ぎ、排水量を低減させた。同期間は研究坑道が深度約 50m まで水没している。

以上の地下水排水に伴う地下水流動の変化を解析するため、研究所付近では広域地下水流動研究で掘削された長期観測孔と合わせて7本の水圧観測孔で、施設建設前から観測を開始し継続している（図 3.2.1）。また、施設建設の進展に伴い、深度 500m までの各深度の研究坑道から掘削した長さ約 50～100m のボーリング孔の 20 観測区間において、研究坑道直近の水圧変化を観測している（図 3.2.2）。深度ごとの地下水の湧水量の経時変化については、両立坑に深度約 25m 毎に設置した集水リングにおいて個別の湧水量を計測するとともに、研究坑道に設けられた排水ピットにおいて、排水量を計測している。また、地下水の水質については、地表の水圧観測孔のうち3本と、深度 500m までの各深度の研究坑道からほぼ水平に掘削された長さ約 50～100m の水圧・水質観測孔において、定期的に採水・分析を行っている（表 3.2.1、表 3.2.2）。

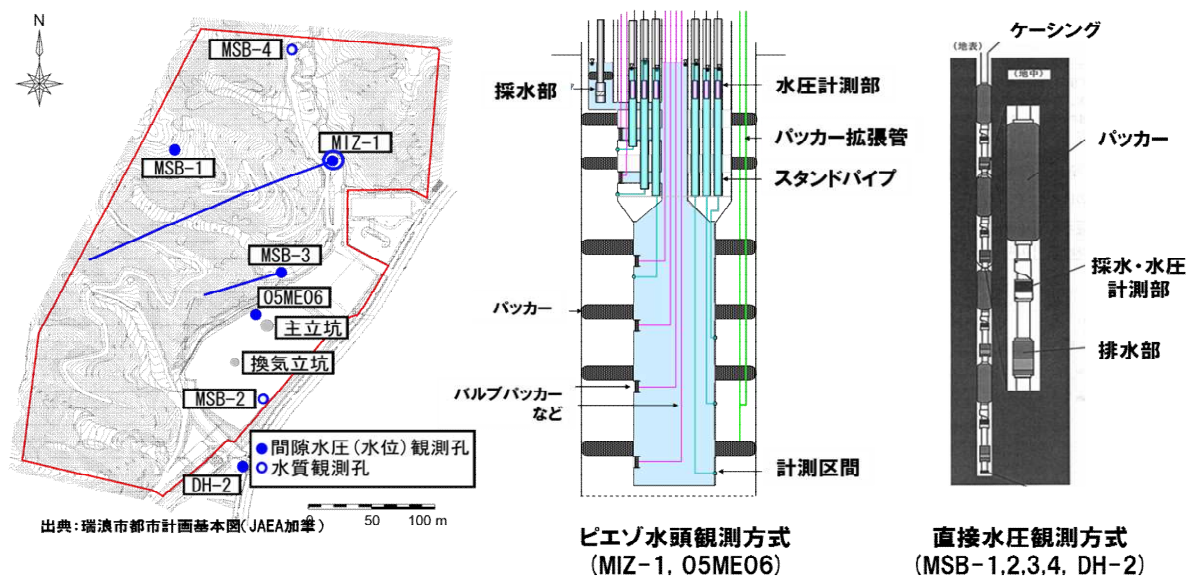


図 3.2.1 研究所周辺における地上からの水圧・水質観測孔と観測方式

表 3.2.1 地上からの水圧・水質観測区間 (MIZ-1 の水質観測は区間 3, 5, 9 のみ)

MSB-2号孔		孔口標高 E. L. (m) ; 198.466			地質
区間番号	区間深度 (m)		区間長 (m)		
	G. L. (-m)	E. L. (m)			
1	18.8 ~ 22.7	179.7 ~ 175.8	3.9	瑞浪層群	明世累層(上部)
2	23.6 ~ 38.9	174.9 ~ 159.6	15.3		明世累層(泥岩の上位)
3	39.8 ~ 68.2	158.7 ~ 130.3	28.4		明世累層/本郷累層(泥岩含む下位)
4	69.1 ~ 77.4	129.4 ~ 121.1	8.3		本郷累層基底礫岩部
5	78.3 ~ 120.2	120.2 ~ 78.3	41.9		土岐夾炭累層(主要部)
6	121.1 ~ 130.4	77.4 ~ 68.1	9.3		土岐夾炭累層(下部)
7	131.3 ~ 153.7	67.2 ~ 44.8	22.4		土岐夾炭累層基底礫岩(上部)
8	154.6 ~ 170.4	43.9 ~ 28.1	15.8		土岐夾炭累層基底礫岩(下部)
9	171.3 ~ 175.2	27.2 ~ 23.3	3.9		土岐花崗岩風化部
10	176.1 ~ 180.0	22.4 ~ 18.5	3.9		土岐花崗岩新鮮部

MSB-4号孔		孔口標高 E. L. (m) ; 214.448			地質
区間番号	区間深度 (m)		区間長 (m)		
	G. L. (-m)	E. L. (m)			
1	15.8 ~ 25.6	198.6 ~ 188.8	9.8	瑞浪層群	明世累層(泥岩の上位)
2	26.5 ~ 33.9	187.9 ~ 180.5	7.4		明世累層泥岩部
3	34.8 ~ 62.1	179.6 ~ 152.3	27.3		明世累層/本郷累層(泥岩の下位)
4	63.0 ~ 76.9	151.4 ~ 137.5	13.9		本郷累層基底礫岩部
5	77.8 ~ 81.7	136.6 ~ 132.7	3.9		土岐夾炭累層(上部)
6	82.6 ~ 93.9	131.8 ~ 120.5	11.3		土岐夾炭累層(主要部)
7	94.8 ~ 99.0	119.6 ~ 115.4	4.2		土岐花崗岩新鮮部

MIZ-1号孔		孔口標高 E.L.(m) ; 206.56			区間長 (mabh)	区間長 (m)	地質
区間番号	区間深度(m)			区間長 (mabh)			
	mabh	G.L.(-m)	E.L.(m)				
1	232.8 ~ 289.8	232.7 ~ 289.7	-26.2 ~ -83.2	57.0	57.0	土岐花崗岩	
2	290.8 ~ 647.3	290.7 ~ 640.7	-84.2 ~ -434.2	356.5	350.0	土岐花崗岩	
3	648.3 ~ 725.8	641.7 ~ 717.1	-435.1 ~ -510.6	77.5	75.4	土岐花崗岩	
4	726.8 ~ 915.3	718.1 ~ 901.4	-511.5 ~ -694.8	188.5	183.3	土岐花崗岩	
5	916.3 ~ 960.8	902.3 ~ 945.5	-695.8 ~ -739.0	44.5	43.2	土岐花崗岩	
6	961.8 ~ 982.8	945.8 ~ 966.9	-739.2 ~ -760.3	21.0	21.1	土岐花崗岩	
7	983.8 ~ 1095.8	967.1 ~ 1077.0	-760.6 ~ -870.5	112.0	109.9	土岐花崗岩	
8	1096.8 ~ 1147.8	1078.0 ~ 1127.7	-871.4 ~ -921.1	51.0	49.7	土岐花崗岩	
9	1148.8 ~ 1169.8	1128.7 ~ 1149.1	-922.1 ~ -942.6	21.0	20.5	土岐花崗岩	
10	1170.8 ~ 1300.0	1150.1 ~ 1276.0	-943.6 ~ -1069.5	129.3	125.9	土岐花崗岩	

MIZ-1号孔は斜孔のため掘削長深度(mabh)を示す。

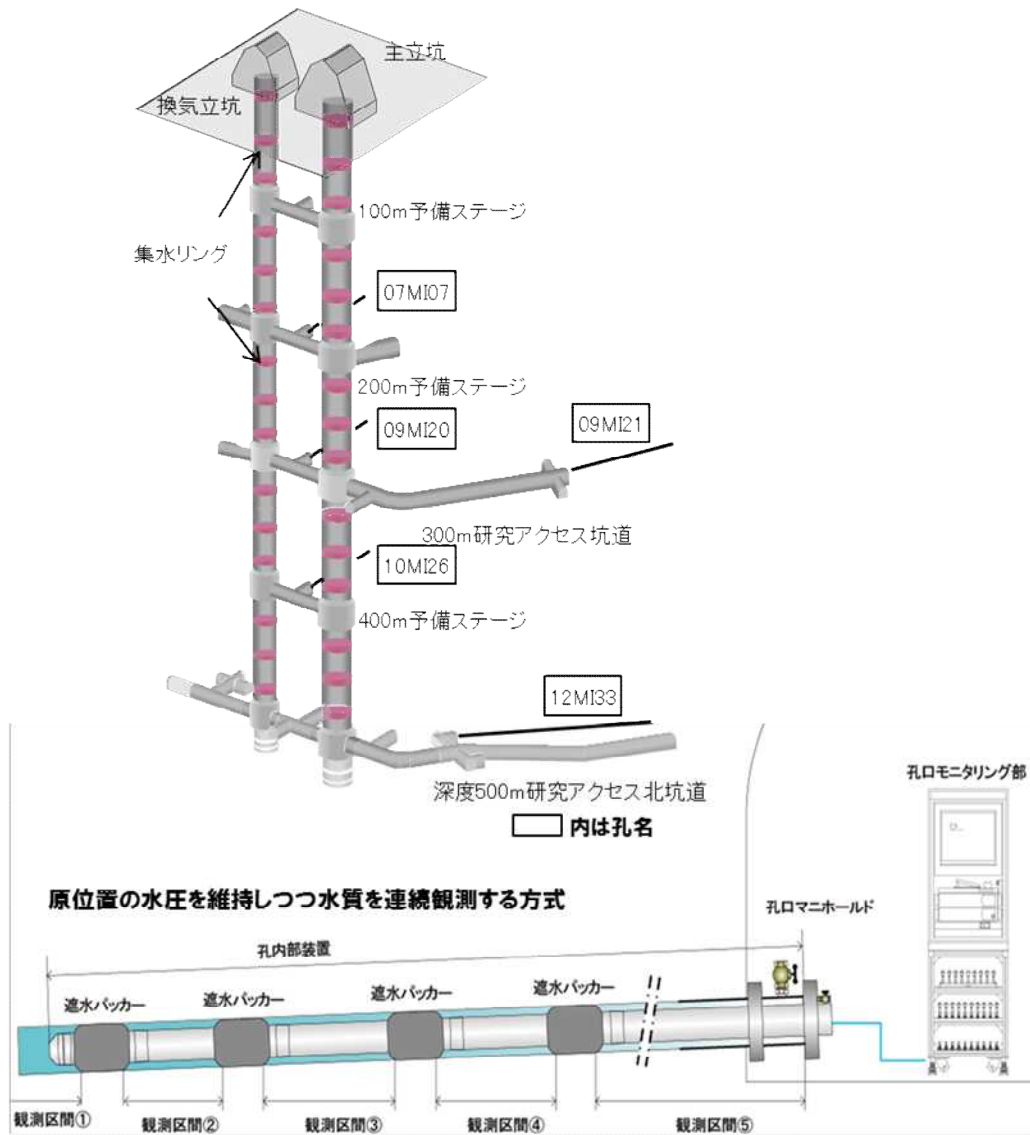


図 3.2.2 研究坑道における水圧・水質観測孔と観測方式 (2012 年度末時点)

表 3.2.2 研究坑道からの水圧・水質観測区間

孔名	区間	掘削長 (mabh)	区間長 (m)	区間体積 (m ³)
07MI07号孔	区間1	48.11	7.19	0.011
		55.30		
	区間2	38.69	8.52	0.011
		47.21		
	区間3	31.27	6.52	0.008
		37.79		
	区間4	26.85	3.52	0.004
		30.37		
	区間5	16.93	9.02	0.011
		25.95		
	区間6	0.00	16.03	0.020
		16.03		
09MI20号孔	区間1	96.08	5.82	0.009
		101.90		
	区間2	84.66	10.52	0.013
		95.18		
	区間3	58.74	25.02	0.031
		83.76		
	区間4	34.82	23.02	0.029
		57.84		
	区間5	19.40	14.52	0.018
		33.92		
	区間6	0.00	18.50	0.023
		18.50		
09MI21号孔	区間1	-0.59	51.09	0.120
		50.50		
	区間2	67.08	10.02	0.018
		77.10		
	区間3	78.05	10.02	0.018
		88.07		
	区間4	89.02	13.98	0.058
		103.00		
10MI26号孔	区間1	52.79	17.81	0.024
		70.60		
	区間2	50.59	1.25	0.002
		51.84		
	区間3	37.89	11.75	0.015
		49.64		
	区間4	30.19	6.75	0.008
		36.94		
	区間5	9.99	19.25	0.024
		29.24		
	区間6	0.00	9.04	0.011
		9.04		
12MI33号孔	区間1	105.40	1.60	0.004
		107.00		
	区間2	85.70	18.70	0.023
		104.40		
	区間3	64.00	20.80	0.026
		84.80		
	区間4	53.80	9.30	0.012
		63.10		
	区間5	44.10	8.80	0.011
		52.90		
	区間6	0.00	43.20	0.054
		43.20		

3.3 EdZ の地球化学特性の変化

3.3.1 表層から不整合部周辺（主に堆積岩）

本節では地上から掘削された観測孔（MSB-2, 4号孔）の観測結果を踏まえて、主に堆積岩中の地球化学特性の変化について考察する。地下水の水質変化に影響を与え得る研究坑道への湧水データとして、主立坑と換気立坑の集水リング（WR）の観測深度と地下水の湧水量を図 3.3.1, 図 3.3.2 に示す。

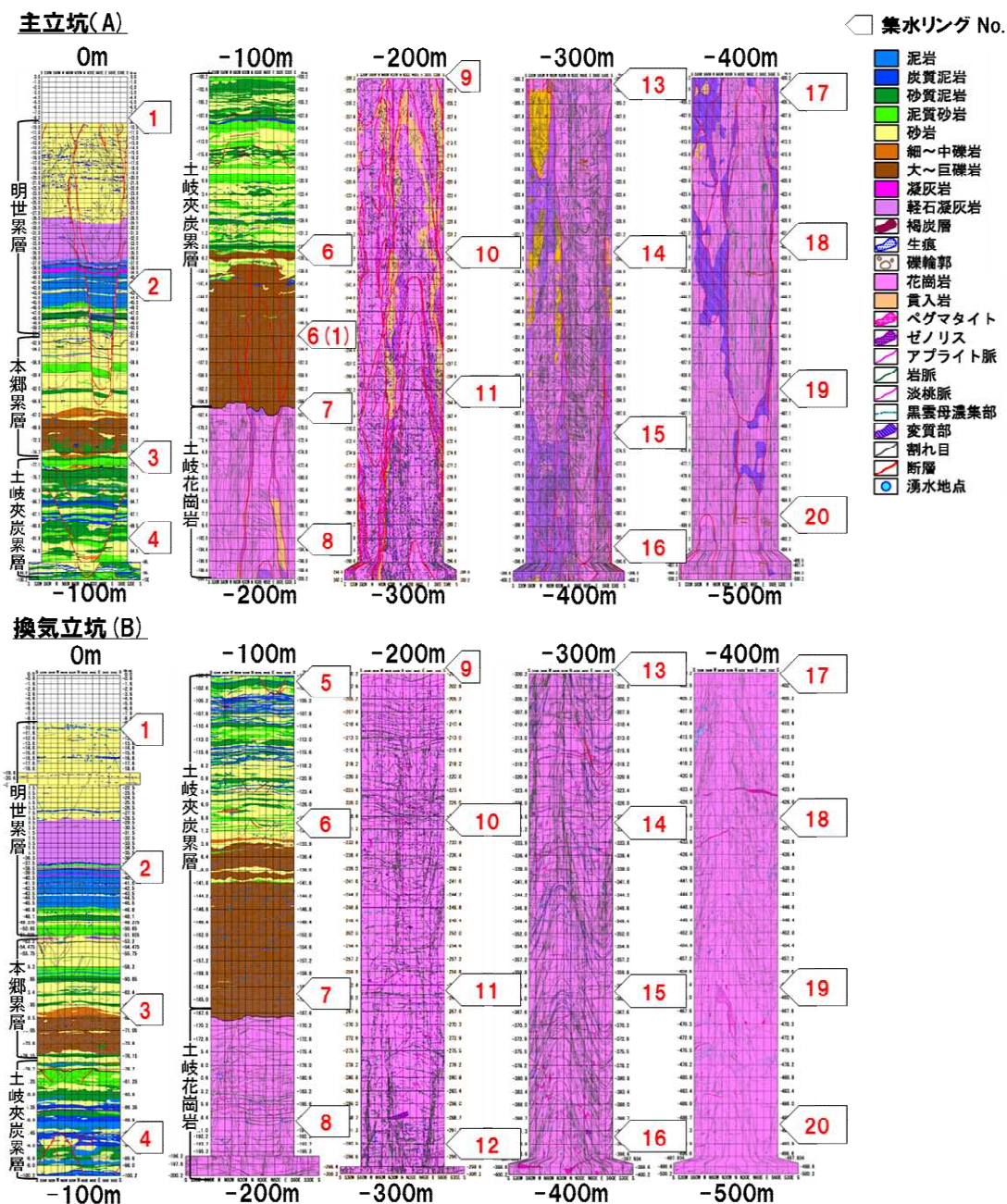


図 3.3.1 主立坑(上)および換気立坑(下)の集水リング位置 (川本ほか, 2012¹³⁾に加筆)
枠内数字が集水リング No.

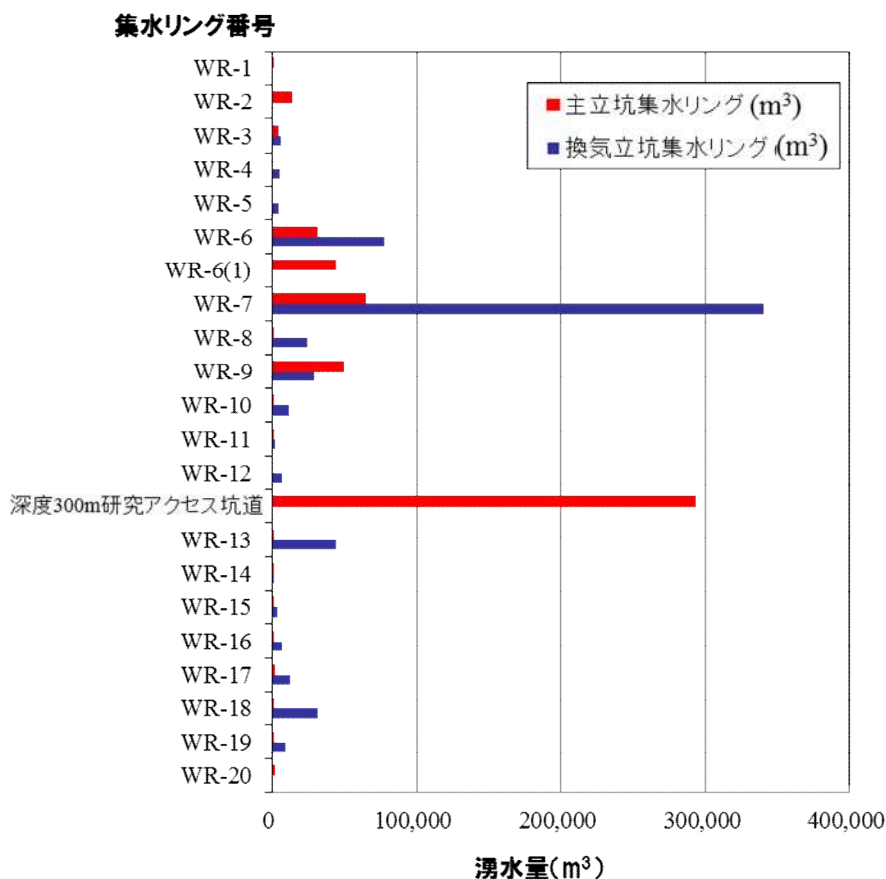


図 3.3.2 集水リングにおける湧水量 (2004年4月から2012年5月までの総量[m³])

研究坑道への湧水量は両立坑ともに、堆積岩中の礫岩部 (WR-6, 6(1), 7) で高く、2012年5月までの段階で換気立坑の集水リング WR-7 では 30 万 m³ を超える湧水を地上に排水している。また、その他の深度 (主に砂泥互層) では相対的に湧水量が非常に小さくなっている。このため、堆積岩における主要な水みちは礫岩層であり、礫岩層の周囲で地下水の水圧・水質変化が大きい可能性がある。

MSB-2, 4号孔における各観測区間の水圧の経時変化を図 3.3.3 に示す。両立坑から約 50m 離れた位置にある MSB-2 号孔では、観測区間 1, 2 が明世累層に分布する砂質泥岩、泥質砂岩 (図 3.3.1) からなる低透水層の上側 (明世累層)、区間 3~9 が低透水層下側 (本郷累層、土岐夾炭累層、土岐花崗岩) に位置している。研究坑道掘削とともに区間 4 以深の区間において地下水頭が低下しており、前述の研究坑道冠水時にはそれらが一時的に回復しているが、その後主に区間 6~9 (堆積岩礫岩部、花崗岩風化部) において、研究坑道掘削前に比べ約 70~80m 程度の水頭低下が認められる。これらの区間は両立坑の集水リングの WR-6, 6(1), 7 の深度に相当する。

両立坑から約 250m 離れた MSB-4 号孔においては、観測区間 1, 2 が低透水層上側 (明世累層)、区間 3~7 が低透水層下側 (明世累層、本郷累層、土岐夾炭累層、土岐花崗岩) に位置している。主に区間 4~7 において研究坑道掘削に伴う水頭低下が認められ、土岐夾炭累層基底礫岩部 (区間 6)、花崗岩風化部 (区間 7) においては、研究坑道掘削前に比べ、約 30~40m の水頭低下が認められる。なお、研究坑道冠水時の一時的な水圧回復についても認められるが、MSB-2 号孔に比べると水圧低下量は小さい。

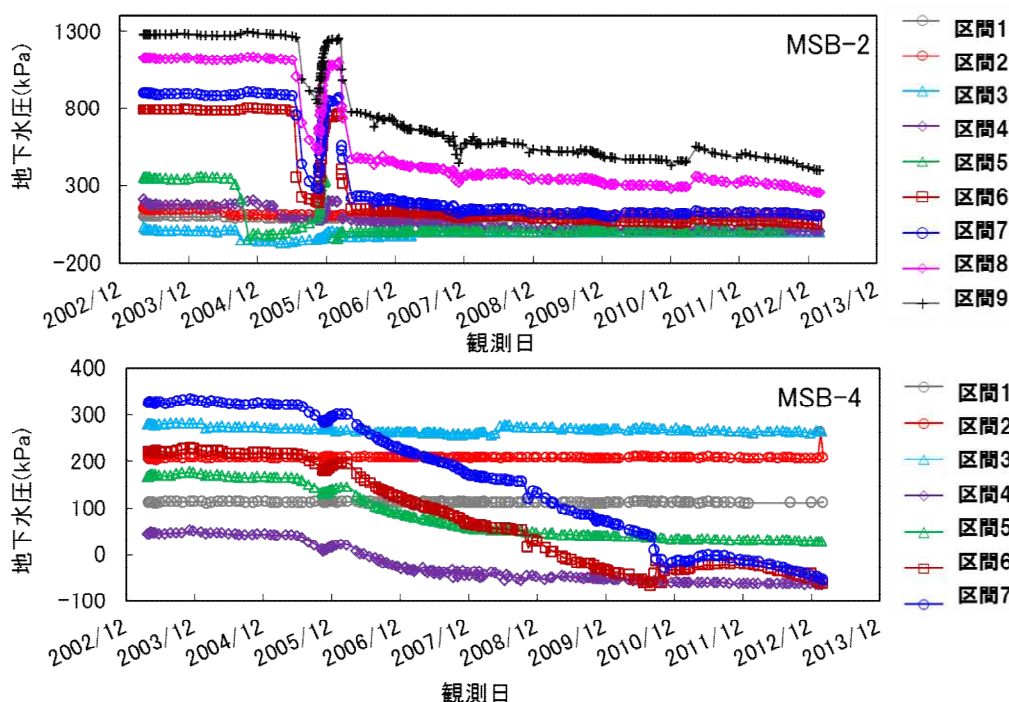


図 3.3.3 MSB-2, 4 号孔における地下水圧の経時変化

地下水の水質，同位体組成の経時変化を図 3.3.4～3.3.9 に示す。なお，図中では排水制御期間（2005 年 10 月～2006 年 2 月）を影塗りしている。MSB-2 号孔区間 1, 2 では，全観測期間を通して Ca, Mg, SO₄, IC（無機炭素）濃度が変動している。これらの成分は，地層中の硫酸塩鉱物や炭酸塩鉱物の風化変質（溶出）により濃度が変化しやすく，観測時期の涵養量や地下水面の変化に伴う風化，変質により，その濃度が変化していると考えられる¹⁴⁾。特に区間 1 ではこれらの成分に加え Fe, Mn 濃度も徐々に減少しており，用地造成土の風化鉱物からの溶出量が減少しつつある可能性がある。表層水の浸透については，トリチウム濃度を指標にできる。トリチウムは半減期約 12 年の天然の放射性元素であり，地下水中の濃度に基づき約 50 年程度の涵養年代を見積もることができる。トリチウムが地下水に含まれている場合，観測区間の地下水（もしくはその一部）が，この期間の間に表層から観測区間深度にもたらされたことになる。トリチウム濃度は区間 1, 2 で相対的に高く，同区間の IC の炭素同位体（¹⁴C, δ¹³C）は，年代の若い（現在の）表層有機物の同位体組成を示しており，水質の特徴と整合的である。区間 3 においては 2003 年後半において，地下水圧が低下し採水が不可能となった。区間 4～9 においては，排水抑制時（2005 年 10 月～2006 年 2 月）に Na, Cl, F, B 濃度が増加し，立坑の冠水に伴い，異なる深度の地下水が立坑から観測区間のある深度の地層に浸透したと推測される。その後，研究坑道からの地下水の排水に伴い，立坑掘削に伴い湧昇する深部地下水との混合により水質が変動している。

MSB-4 号孔では，主に区間 5, 6（土岐夾炭累層）において Na, Ca, F, Cl 濃度が増加し，IC, SO₄ 濃度が減少する傾向が認められる。一方で，その他の観測区間，観測成分においては顕著な変化はない。区間 5, 6 については，MSB-2 号孔と同様に深部地下水の湧昇などが影響している可能性があるが，区間 5, 6 より深部にある区間 7 ではそれらの増加，減少が認められず，かつ相

対的に濃度が低いため、深部からの地下水の湧昇ではなく、土岐夾炭累層の基底礫岩部を水みちとして水平方向に Na, Ca, F, Cl 濃度の高い地下水との混合割合が増加していると考えられる。ただし、周辺の土岐夾炭累層基底礫岩部の水質データを得るための観測孔がないため、この地下水の起源についての詳細は不明である。また、同区間においては、2006～2007年の観測でトリチウムが検出されており、表層から融雪剤などの化学成分（Na や K, Cl など）を含む表層水が浸透している可能性もあるが詳細は不明である。

以上の観測結果から得られた重要な知見は以下のとおりである。

- ・立坑への湧水に伴う地下水流動状態の変化は主に瑞浪層群中の低透水層以深で起こっている。排水抑制期間までの立坑からの地下水排出量は4ヶ月で約60,000トンであり、その結果、立坑の周囲数百mの地下水頭が低下している。両立坑の深度50mまでの水没後、2ヶ月程度で周囲の水頭は回復している。つまり、この時点までの施設建設の影響は、立坑周囲の低下した水頭が約2ヶ月で立坑掘削前の状態に回復する程度の影響である。その後、立坑からの距離に応じて、数十m水頭が低下した状態で定常状態になりつつある。
- ・研究所周辺では月吉断層のような断層面に直交する方向に遮水性を有する断層の存在がボーリング調査によって推測されている。水圧低下の観点では、このような遮水性を有する複数の断層に囲まれた領域内部では立坑掘削に伴う水圧低下が大きくなり、その外部では小さくなるといった不均一な水圧低下分布となると推察される。
- ・湧水量の観点では、遮水性を有する断層を研究坑道が通過し、それまでに研究坑道掘削に伴う水圧低下が生じていない領域に達した際には、急激に湧水量が増加する可能性が考えられる。更に、研究坑道の掘削に伴い、その掘削深度近傍で水圧低下が生じることによって地下深部の地下水の引き込みが生じる可能性がある。
- ・以上の堆積岩部の水理地質特性と研究坑道掘削に伴う影響については、図3.3.10のように概念モデルを構築することができる。

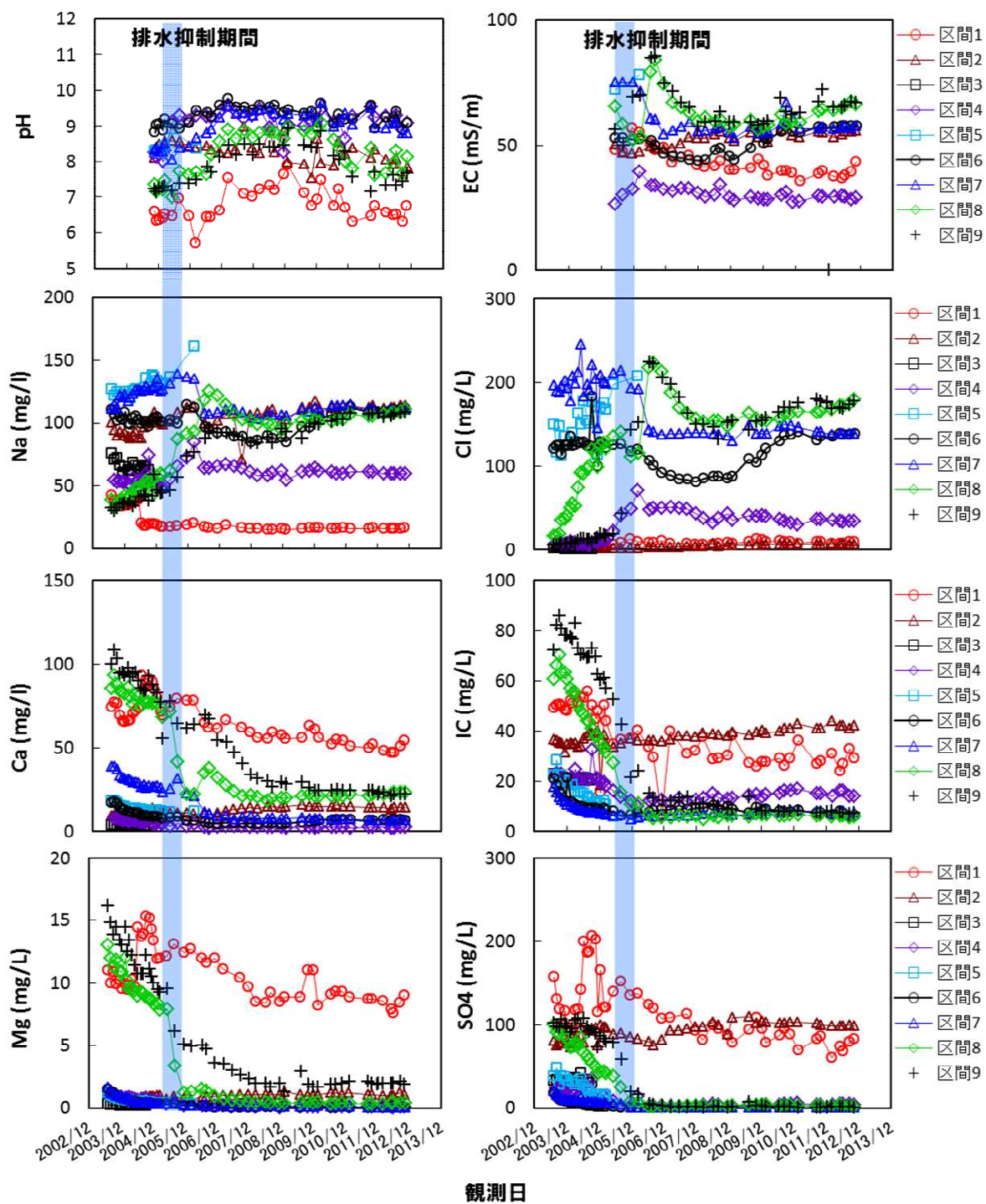


図 3.3.4 MSB-2 号孔における地下水水質の経時変化 (1)

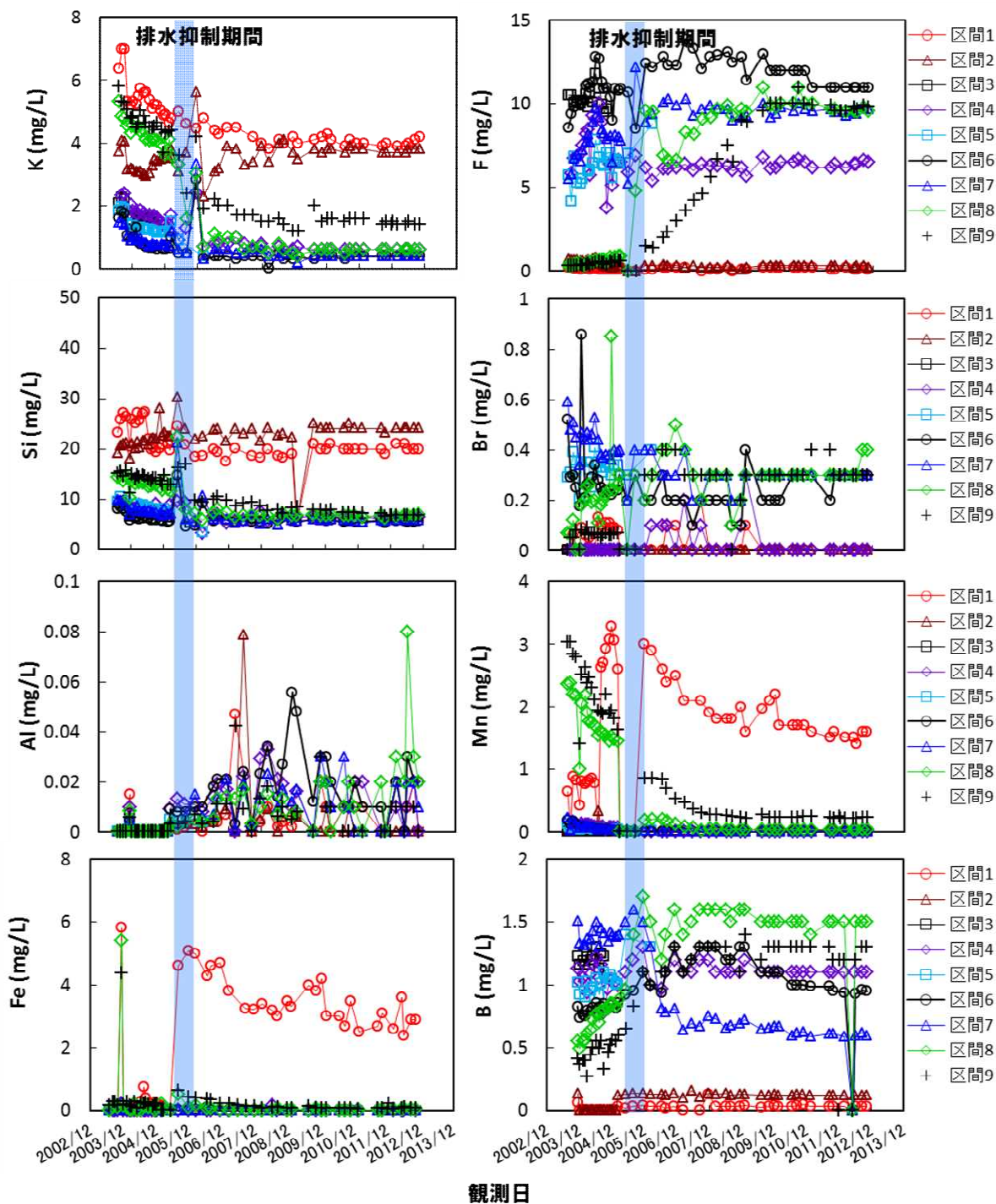


図 3.3.5 MSB-2 号孔における地下水水質の経時変化 (2)

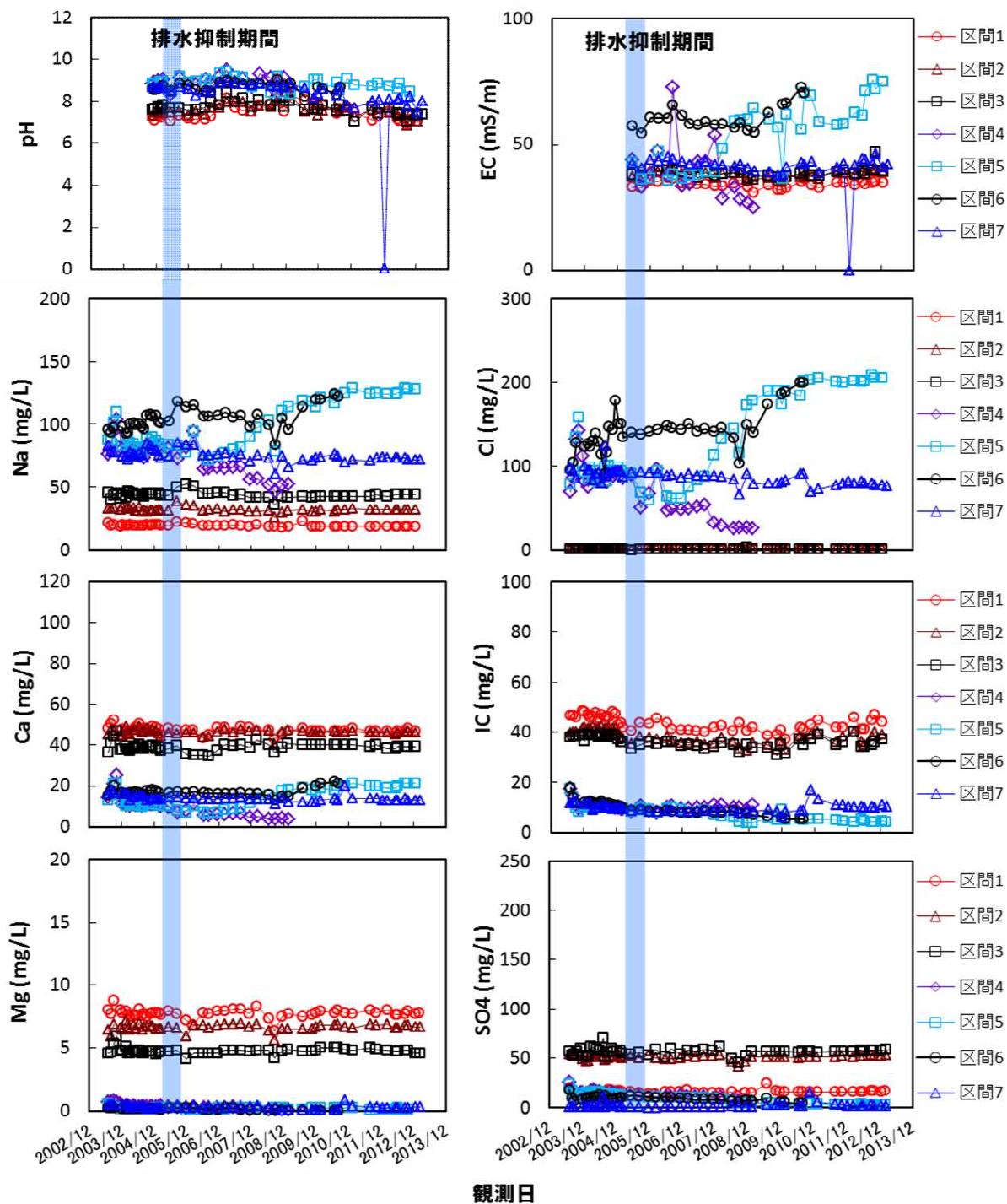


図 3.3.6 MSB-4 号孔における地下水水質の経時変化 (1)

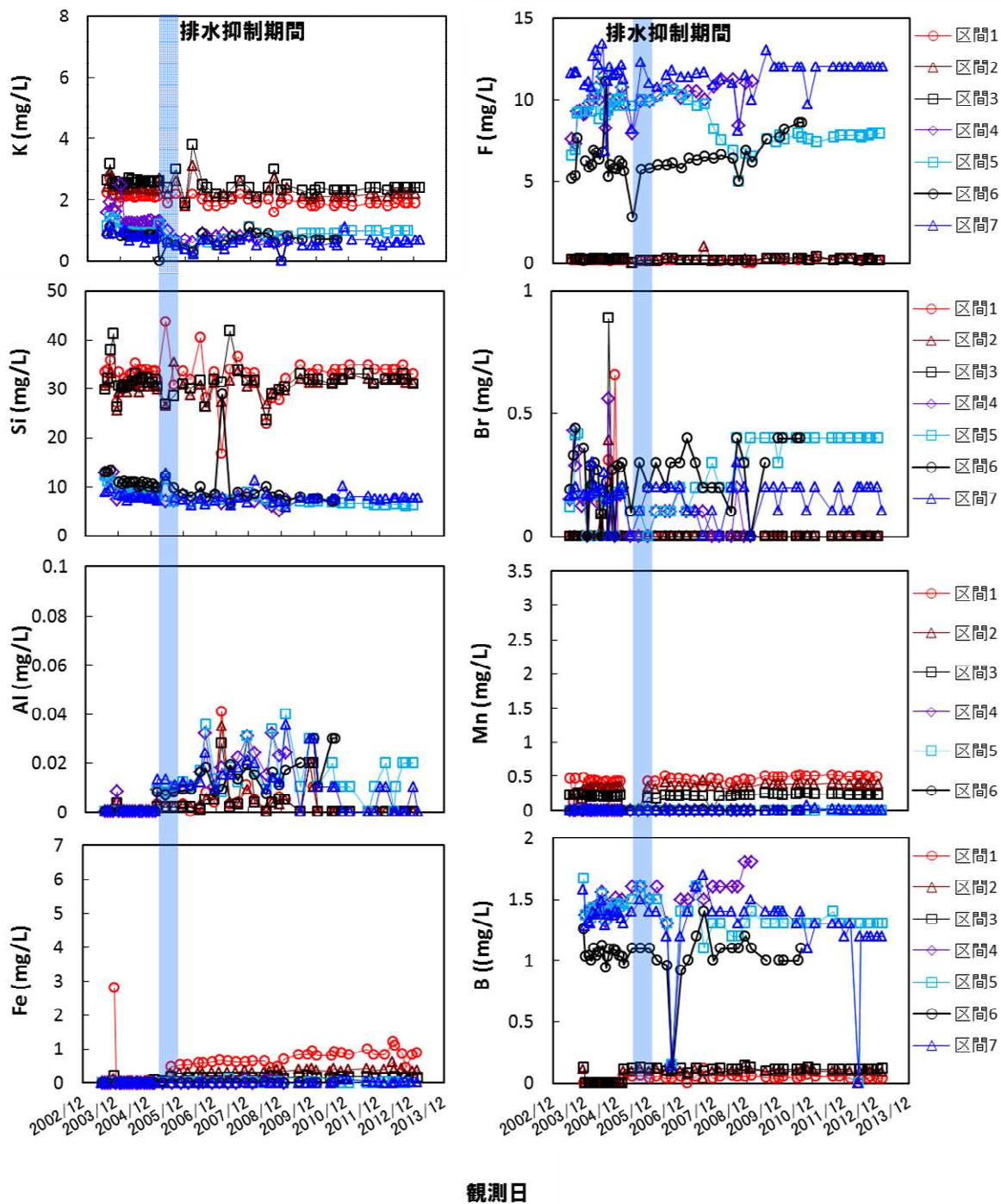


図 3.3.7 MSB-4 号孔における地下水水質の経時変化 (2)

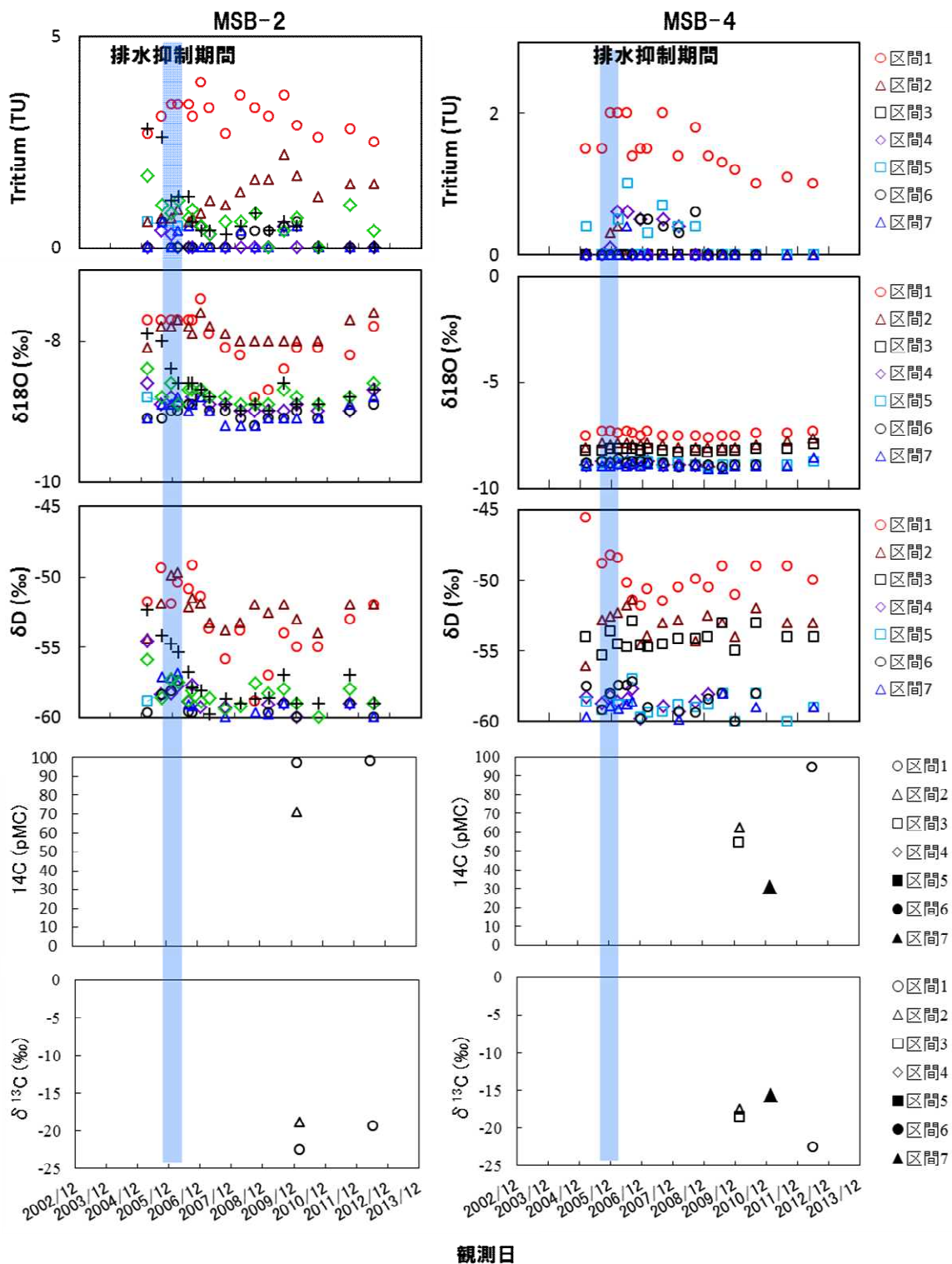


図 3.3.8 MSB-2, 4号孔における同位体比の経時変化

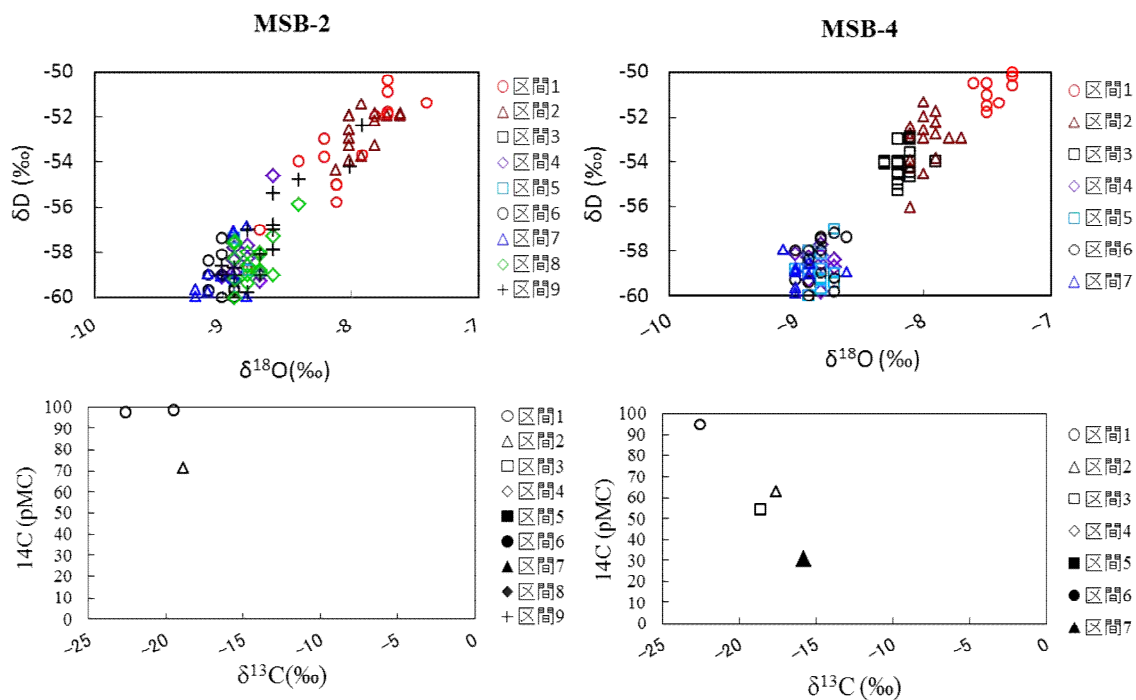


図 3.3.9 MSB-2, 4号孔における同位体比の相互関係

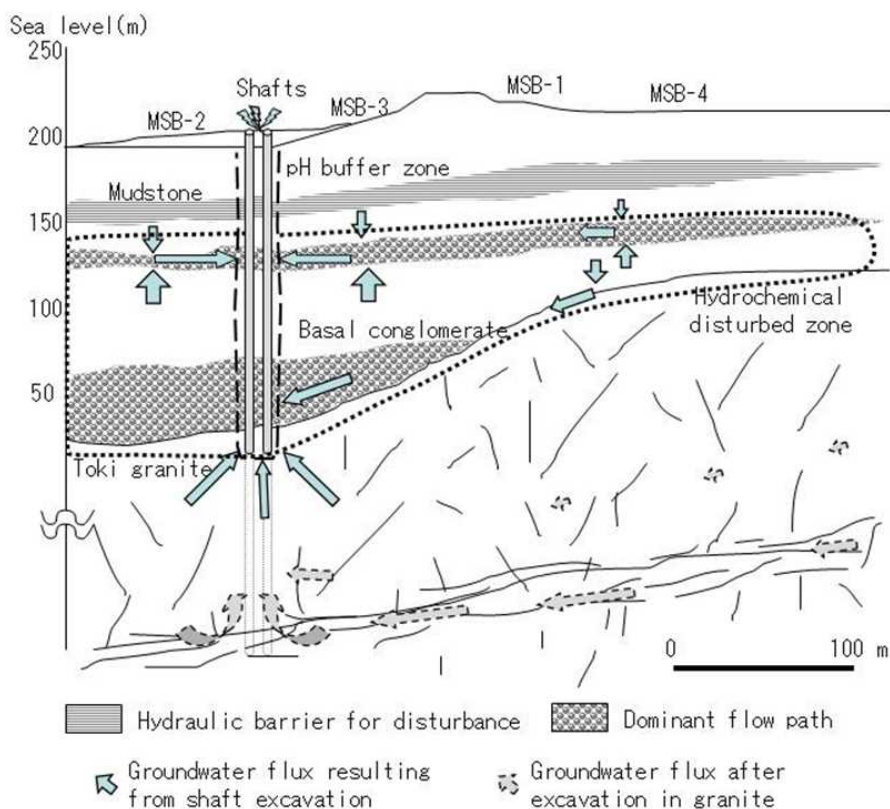


図 3.3.10 瑞浪層群における水理地質特性と坑道掘削影響の概念¹⁴⁾

3.3.2 不整合部周辺から深度 500m（主に花崗岩）

花崗岩においては、地上から掘削された MIZ-1 号孔と各深度の研究坑道から掘削された観測孔、両立坑に設けられた集水リングなどにおいて、水質変化を観測している。

MIZ-1 号孔における水質の経時変化について図 3.3.11, 図 3.3.12 に示す。各年の水質データがある区間 9（深度約 1150m）の地下水については、主な溶存成分に経時変化は認められない。IC や SO₄, Fe, Mn などについては濃度変動が認められるが、濃度が微量であるため採水から分析までのバラツキである可能性がある。以上のことから、深度 500m までの研究坑道掘削の影響は、花崗岩深部まで及んでいないと推察される。

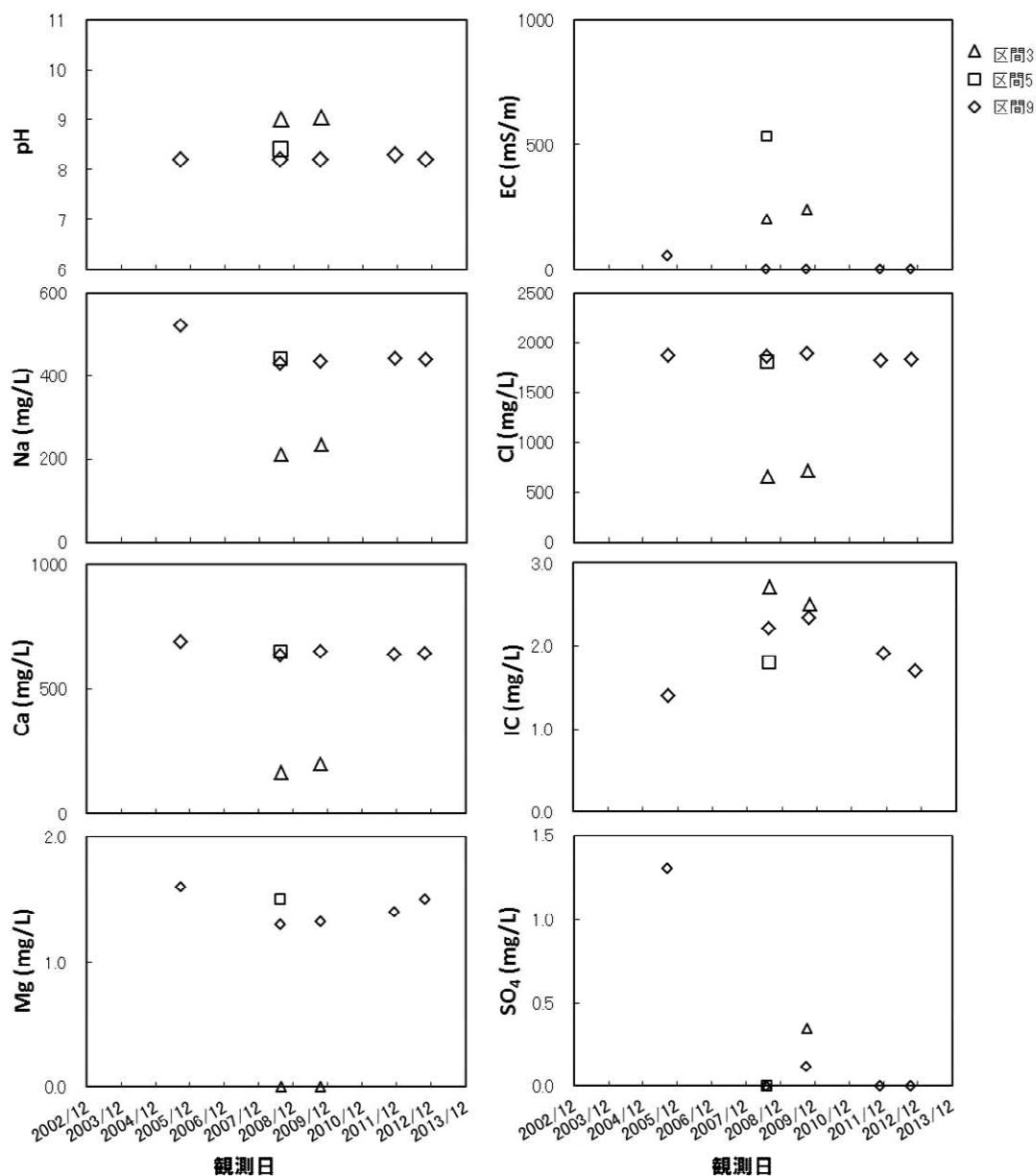


図 3.3.11 MIZ-1 号孔における地下水水質の経時変化 (1)

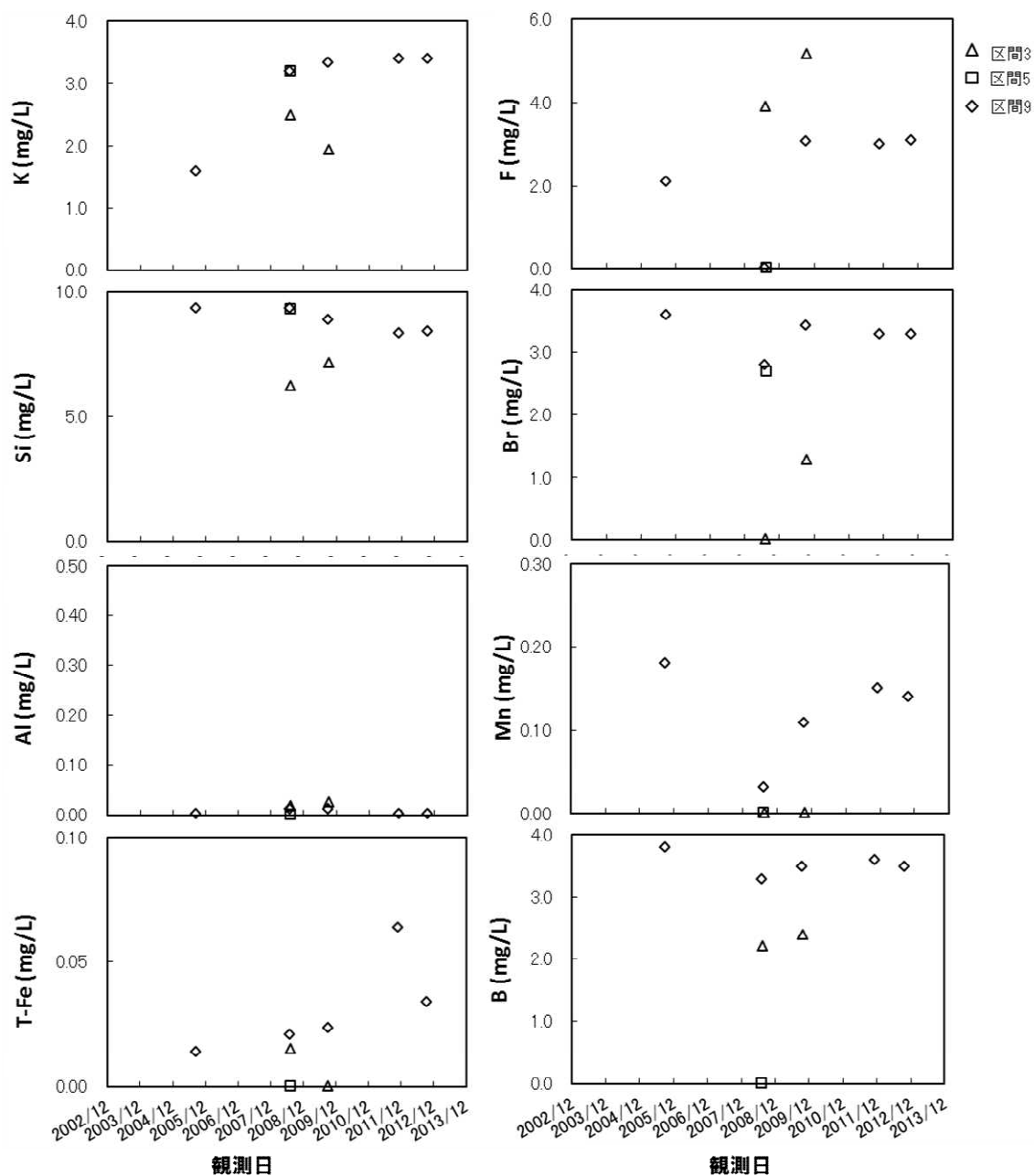


図 3.3.12 MIZ-1 号孔における地下水水質の経時変化 (2)

次に、主に両立坑の集水リング，研究坑道から掘削された観測孔 (07MI07, 09MI20, 09MI21, 10MI26 号孔；図 3.2.2) の観測結果を踏まえて水圧・水質変化について考察する。

各深度の観測孔の水圧の経時変化を図 3.3.13 に示す。なお、区間名は観測孔先端から研究坑道に向かって昇り順 (1→6) で設定している。研究坑道掘削開始から 2013 年の深度 500m 研究アクセス北坑道の掘削までの間に、研究坑道から約 100m の範囲の地下水の水圧は徐々に低下している。深度 200m 予備ステージから掘削された観測孔 (07MI07 号孔) においては、各区間の水圧が一様に低下しており、深度 300m, 400m 予備ステージから掘削された観測孔 (09MI20, 10MI26 号孔) では、研究坑道に最も近い区間 6 の水圧が大きく低下している。各観測孔の水圧

観測値から、研究坑道から 100m 程度の範囲においては、水頭が 100~150m 程度 (1.0~1.5MPa 程度) 低下していることが判る。主立坑周辺には主立坑に沿って断層 (以下、主立坑断層) が分布している¹³⁾。深度 300m の 09MI20 号孔と 09MI21 号孔を比較すると、09MI21 号孔の水頭低下量が相対的に小さくなっており、主立坑断層の影響と考えられる。

集水リングの水質の経時変化を図 3.3.14 に示す。地下水の水質変化には異なる地下水の混合状態の変化に伴うものと水-鉱物反応に起因するものがあるが、ここでは前者に関わる変化を確認するため、水-鉱物反応で濃度が変化しにくい Cl 濃度を指標として示す。なお、水-鉱物反応に伴う変化については EDZ におけるセメント材料に由来する変化として 3.4 節に後述する。

主立坑では WR 9, 換気立坑では WR 8, 9, 10, 13, 17, 18, 19 の集水リングにおいて湧水量が多い (図 3.3.2)。両立坑における湧水量の違いは主立坑断層の存在に起因すると推測される。主立坑の集水リングにおける Cl 濃度の経時変化は顕著でないものの、全般的に濃度が低下傾向にあり、湧水量の大きい WR 9 の集水リングでは低下がより明瞭になっている。一方、両立坑の WR 17~20 の集水リングでは相対的深部からの塩分濃度の高い地下水の湧昇により Cl 濃度が上昇する傾向にある。

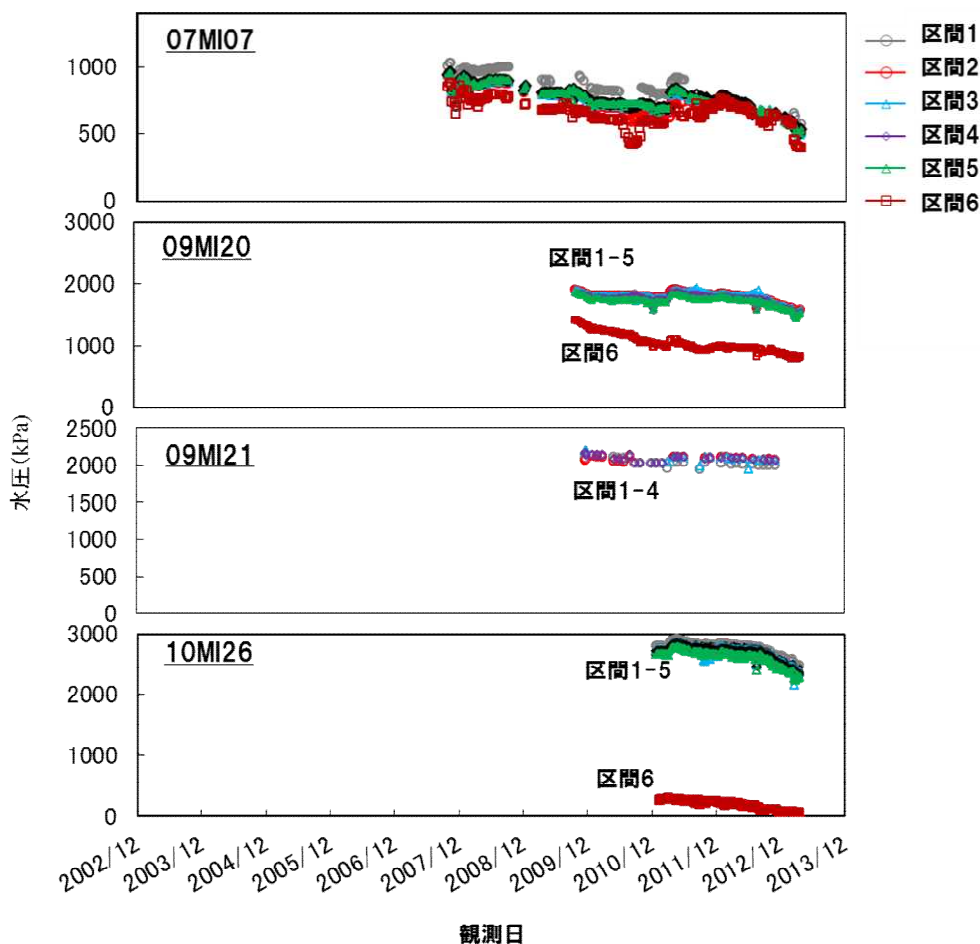


図 3.3.13 各深度の観測孔の水圧変化

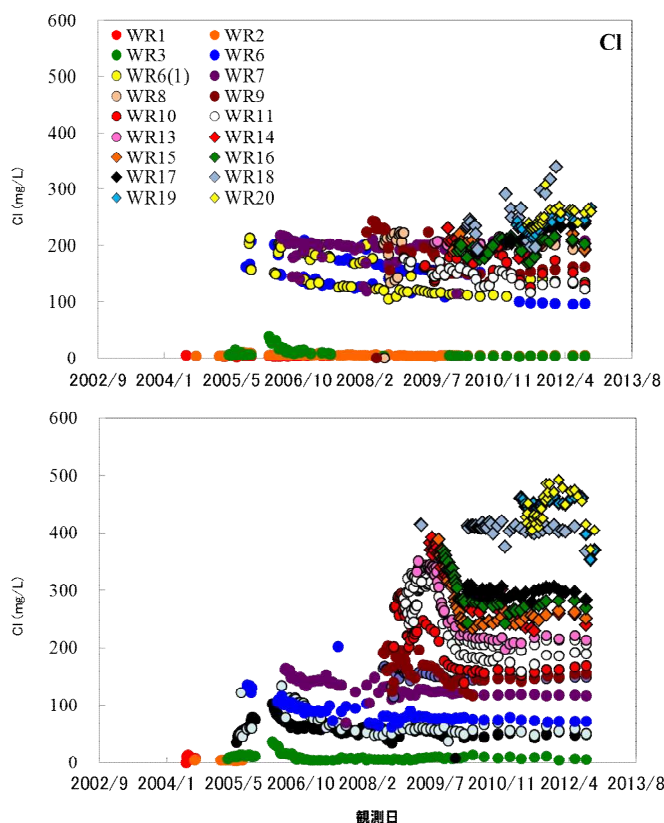


図 3.3.14 主立坑（上）、換気立坑（下）の集水リングの地下水水質の経時変化

換気立坑では、各集水リングで観測初期に Cl 濃度が増加し、その後低下する傾向にある。特筆すべき点は、WR 11 以深の Cl 濃度が主立坑の同等の深度の Cl 濃度に比べ相対的に高くなっていることであり、湧水量が多い換気立坑では、深部からの塩分濃度の高い地下水の引き込みが大きいと推察される。この深部からの地下水の湧昇については、第 1 段階で得られている Cl 濃度の深度分布に基づいて、立坑掘削直後に得られる地下水がどの深度から湧昇してきたかを推測することができる。例えば、換気立坑の深度 400m 付近の集水リング（WR16）では観測開始当初に約 400mg/L の Cl 濃度が得られており、この濃度は第 1 段階の調査で深度 500m 付近の地下水で認められる濃度と同等であるため、相対的に約 100m 深部の地下水が立坑切羽まで湧昇していると推測できる。一方で、WR11 以浅の Cl 濃度は、主立坑のそれと同等かもしくは低くなっており、浅部から相対的に Cl 濃度の低い地下水が浸透することにより濃度が低下している。

次に、研究坑道から掘削した観測孔の各観測区間の水質の経時変化を図 3.3.15～図 3.3.18 に示す。深度 200m、300m の予備ステージから掘削した 07MI07、09MI20 号孔に共通して認められる傾向として、観測開始時には Na、Ca、Cl イオン濃度が相対的に高く、時間とともに低下する傾向があり、一方で、IC、 SO_4^{2-} イオンは当初濃度が低く、時間とともに増加する傾向がある。これらの傾向は、研究坑道に近い観測区間（区間 6、区間 5）ほどその傾向が顕著である。深度 400m 予備ステージから掘削された 10MI26 号孔においても、顕著ではないものの同様の傾向が認められる。深度 300m 研究アクセス坑道から掘削された 09MI21 号孔では、このような傾向は認めら

れない。これは、07MI07, 09MI20, 10MI26 号孔は換気立坑を含む主立坑断層南側に位置しており、集水リングで観察される傾向と同様に、立坑掘削時に周辺地下水の排水に伴い湧昇した相対的に深部の地下水（相対的に Na, Ca, Cl イオン濃度が高い地下水）が、ボーリング孔での観測開始時に周辺に分布しているためと考えられる。また、その後の水質変化は、各研究坑道からの恒常的な地下水排水に伴い周辺の地下水位が低下し、相対的に浅部の地下水が研究坑道の周囲に分布するようになるためと推察される¹⁵⁾。09MI21 号孔は主立坑断層の北側に位置し、周辺の研究坑道においても顕著な湧水がないため、水質の変化速度が他のボーリング孔に比べ緩慢になっていると考えられる。

長期的な地下水の排水に伴う相対的に浅部の低塩分濃度地下水の浸透については、浅層地下水や表層水に含まれるトリチウム、フロンガスの濃度が指標になる。フロンガスは、1930 年代に人工的に生産され大気中に放出された化合物であり、大気中の濃度は図 3.3.19 のように求められており、トリチウムと同様に表層水由来のトレーサーとして利用できる。各観測区間におけるフロンガス濃度、トリチウム濃度は図 3.3.20～図 3.3.23 のように求められた。各観測区間においてトリチウムが検出され、フロンガスについても 2009 年度は検出されなかったものの、その後、深度 200～300m では徐々に濃度が上昇しており、深度 400m においても検出されている。これらのことから研究坑道掘削後、数年の間に表層水が深度 400m 付近まで混入する地下水流動状態になっていることが判る。研究所用地の天水中に含まれるフロンガス濃度は約 220pg/kg であり、地下水と天水のフロンガス濃度を比較すると、表層水が最大 6%程度、深部地下水に混入していると思積もることができる。また、各観測区間のフロンガス濃度を比較すると、一部の観測区間（09MI20 区間 4, 09MI21 区間 1, 2, 4, 10MI26 区間 1, 4）で深度 200m（07MI07 号孔）の濃度より相対的に高く、浅層地下水が研究所周辺の連続性・連結性の大きい高透水性割れ目・断層を介して、直上の深度以外の領域から供給されている可能性がある。ボーリング調査や研究坑道壁面の地質観察のみで施設スケールの割れ目の連続性・連結性を推測することは困難であり、長期的なフロンガス濃度の観測は、間接的にそれらを推測する手段になり得ると考えられる。

同位体比については、酸素同位体比が時間とともに高くなる傾向が認められる（図 3.3.21～図 3.3.23）。水素同位体比については、07MI07, 09MI20 号孔においてわずかに高くなる傾向があるが明瞭ではない。14C 濃度については 07MI07 号孔で時間とともに微増しており、年代の若い表層水の混合と矛盾しない。14C と $\delta^{13}\text{C}$ の間には負の相関が認められ、14C を含まない地下水の $\delta^{13}\text{C}$ は -5‰ 付近と思積もられる。

以上の研究坑道周辺の花崗岩における施設の建設影響は図 3.2.24 のように概念化することができる。

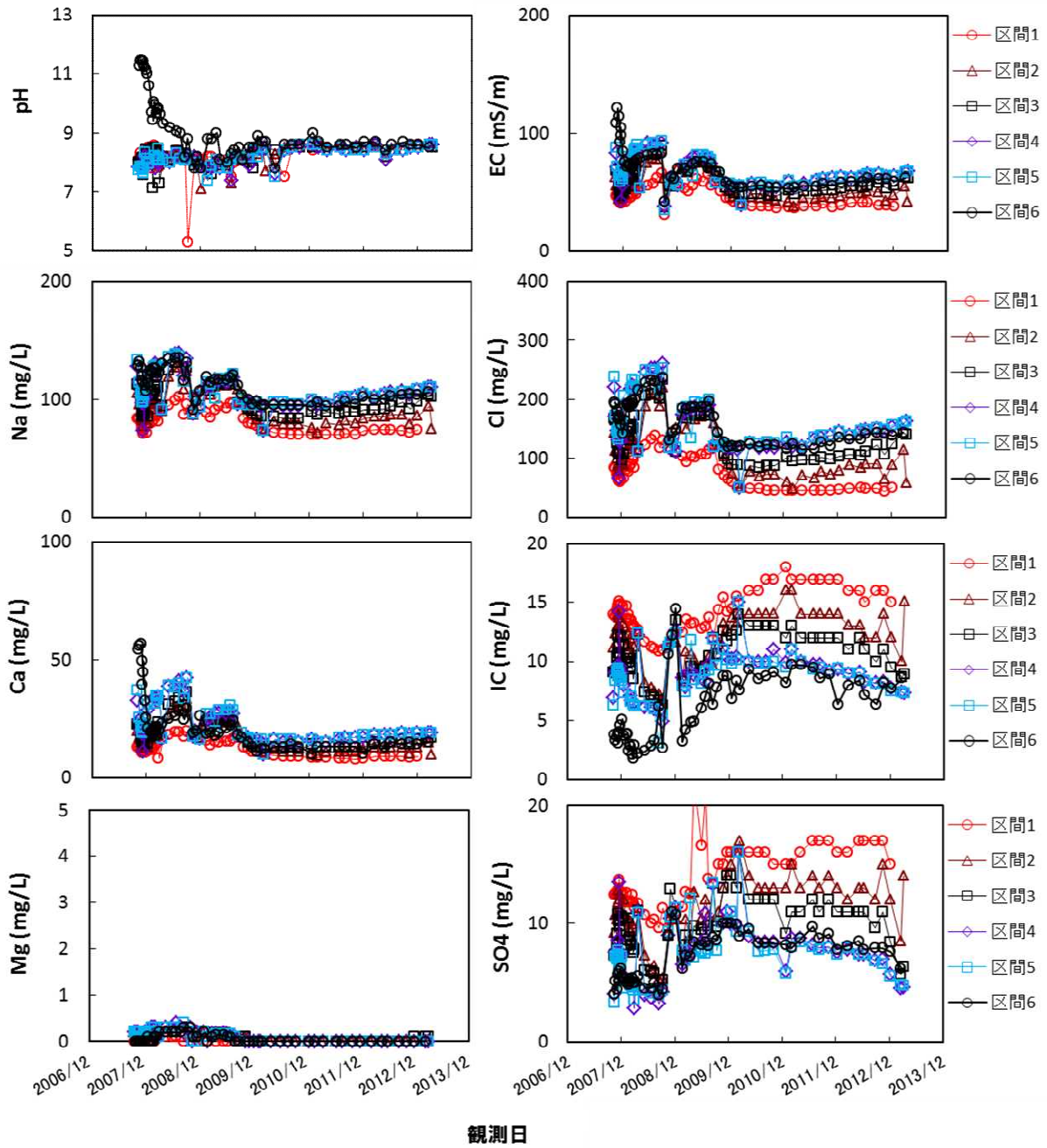


図 3.3.15 研究坑道から掘削された観測孔における水質の経時変化 (07M107 号孔)

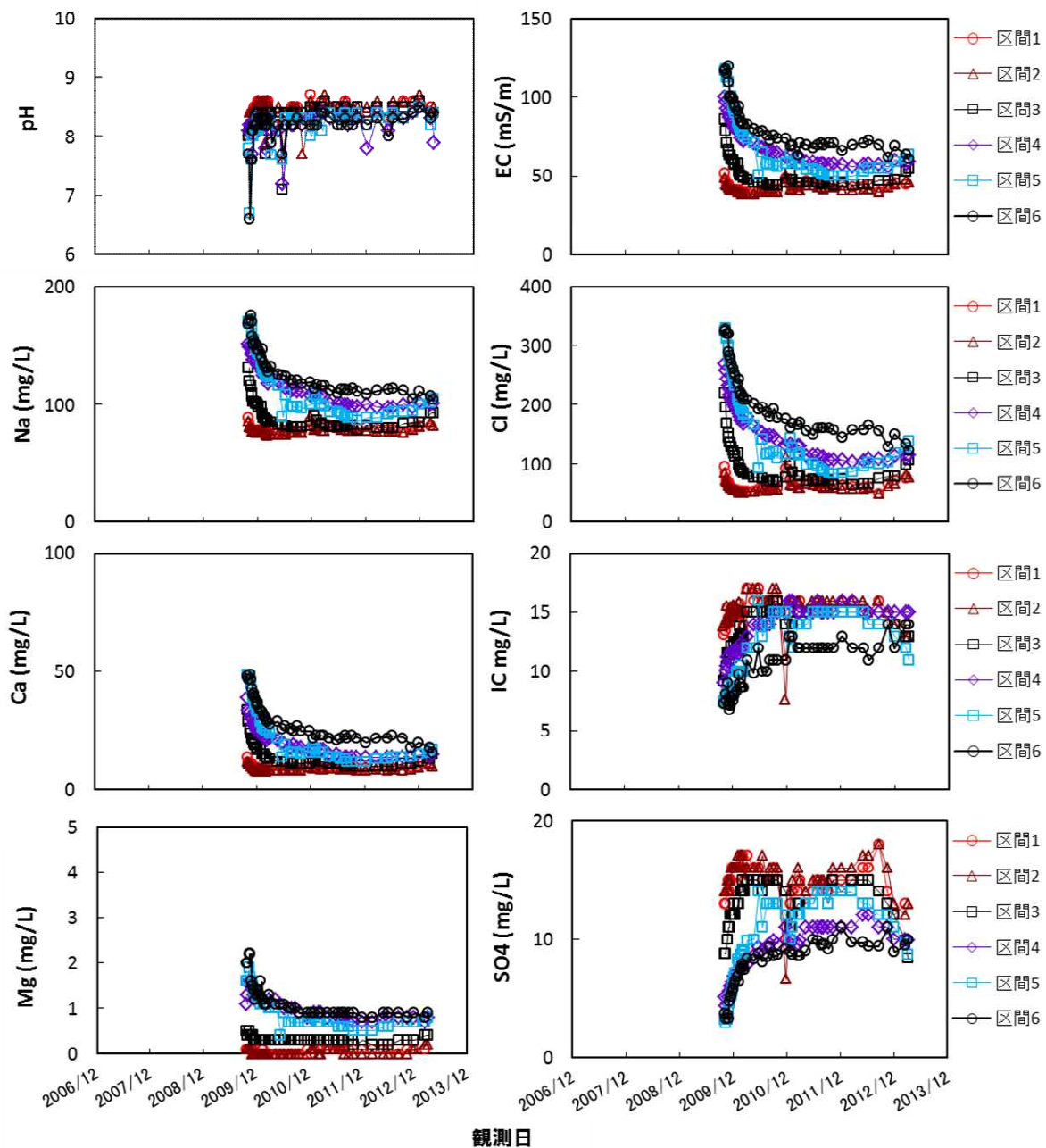


図 3.3.16 研究坑道から掘削された観測孔における水質の経時変化 (09MI20 号孔)

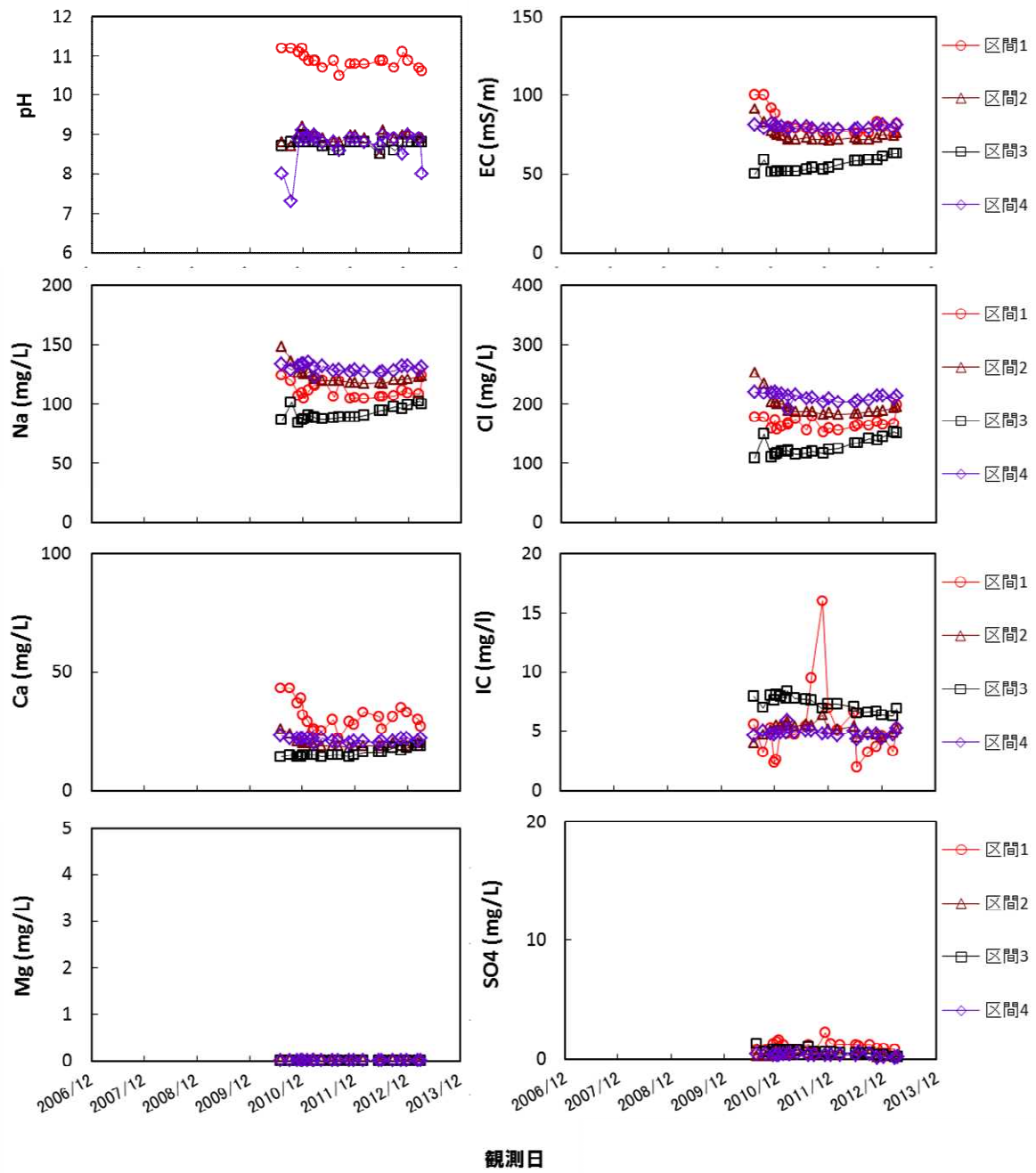


図 3.3.17 研究坑道から掘削された観測孔における水質の経時変化 (09M121 号孔)

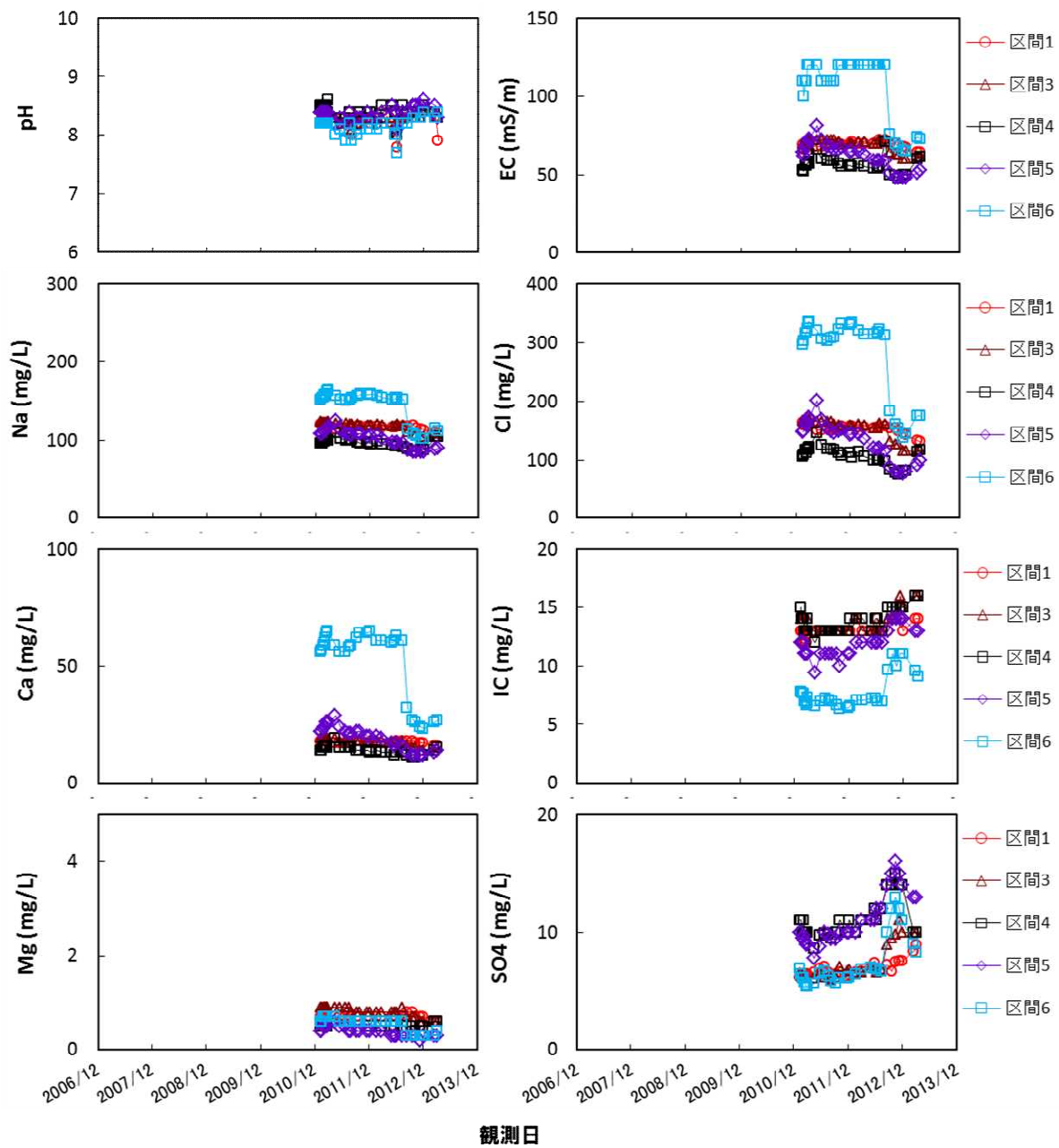
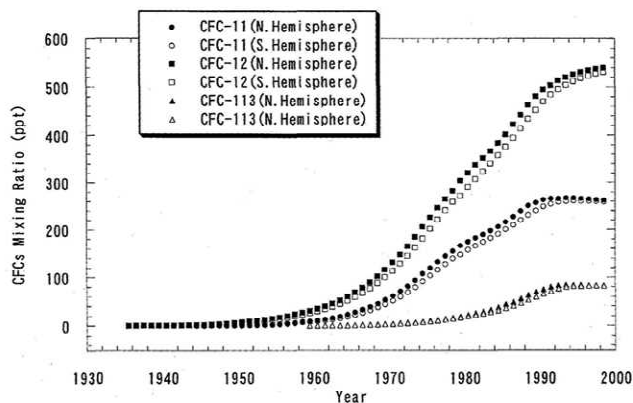
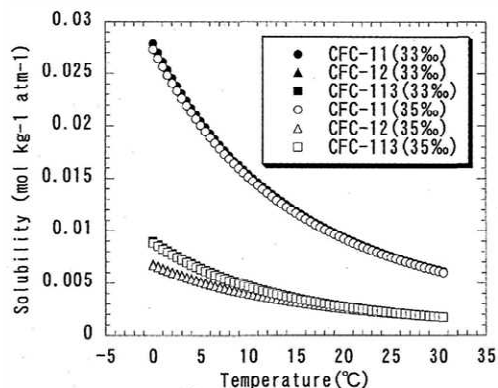


図 3.3.18 研究坑道から掘削された観測孔における水質の経時変化 (10MI26 号孔)



南北両半球における大気中のフロンガス濃度



フロンガスの液相(海水)に対する溶解度

図 3.3.19 大気中のフロンガス濃度の推移と溶解度¹⁶⁾

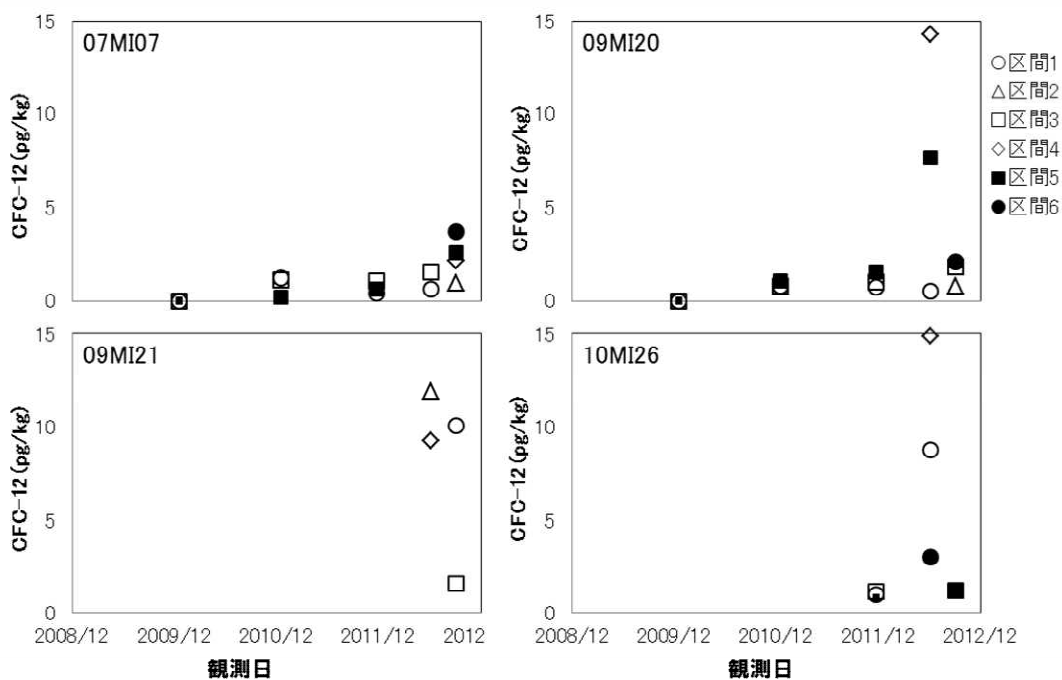


図 3.3.20 各観測区間におけるフロンガス濃度の推移

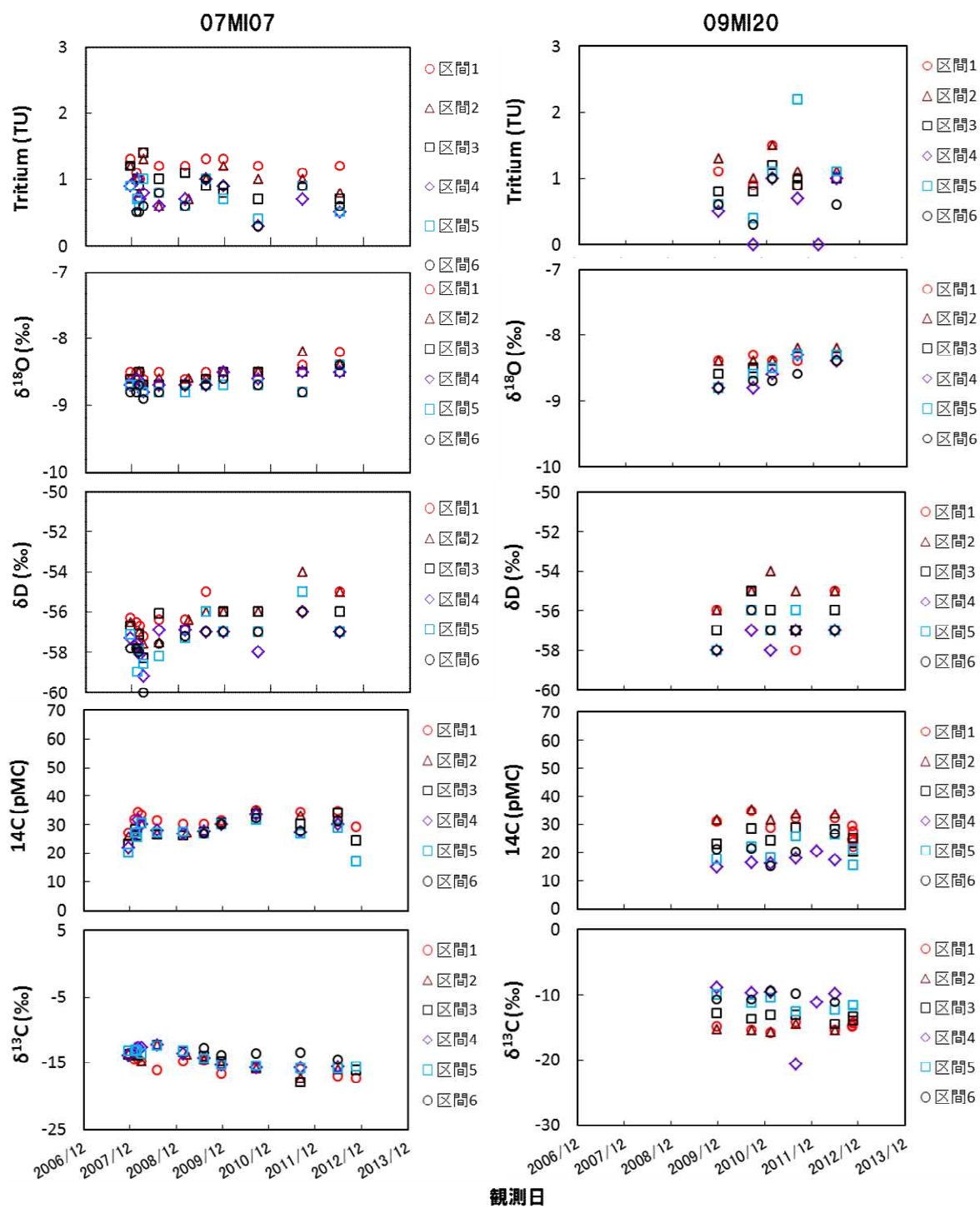


図 3.3.21 各深度の観測孔の地下水の同位体組成 (1)

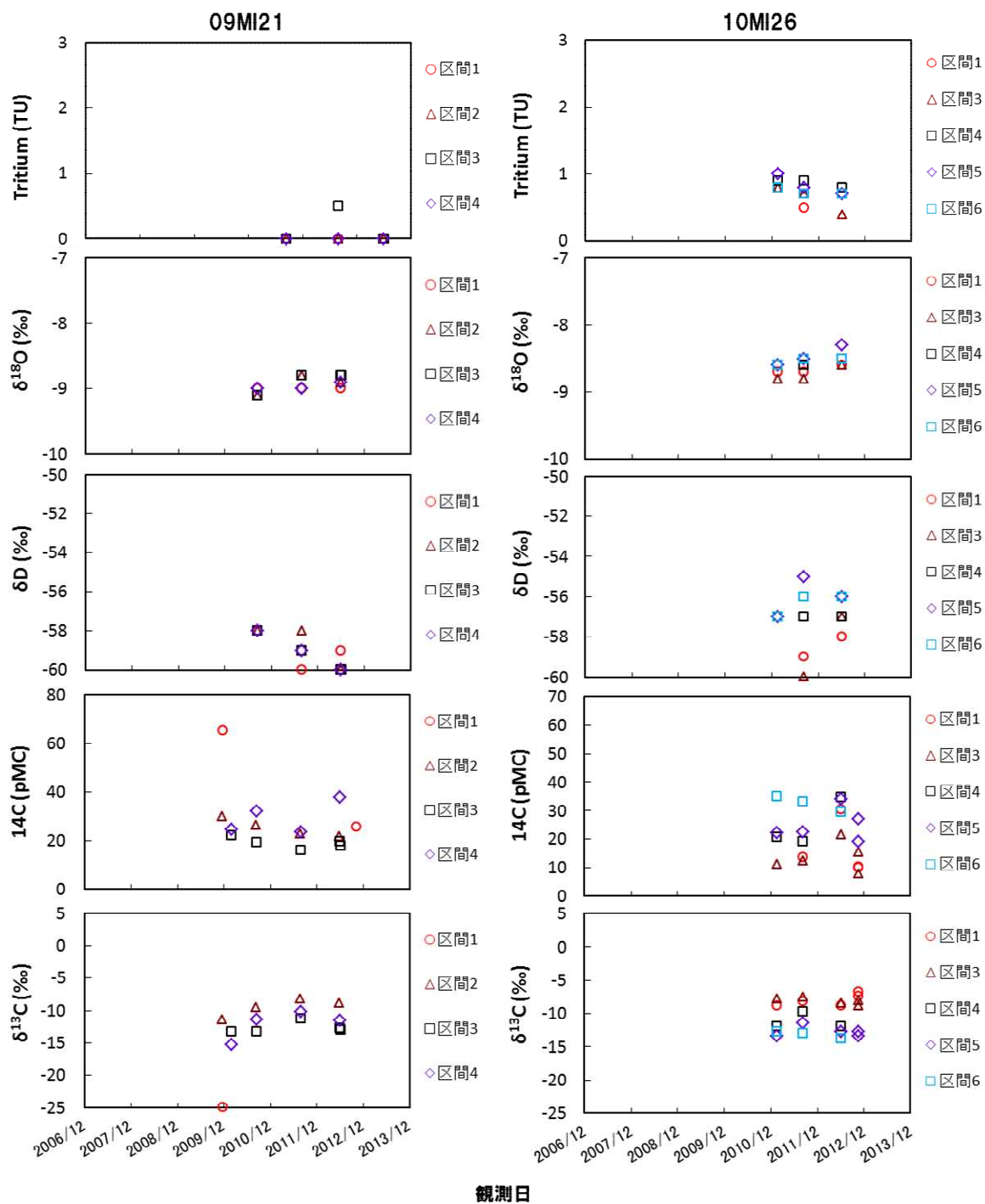


図 3. 3. 22 各深度の観測孔の地下水の同位体組成 (2)

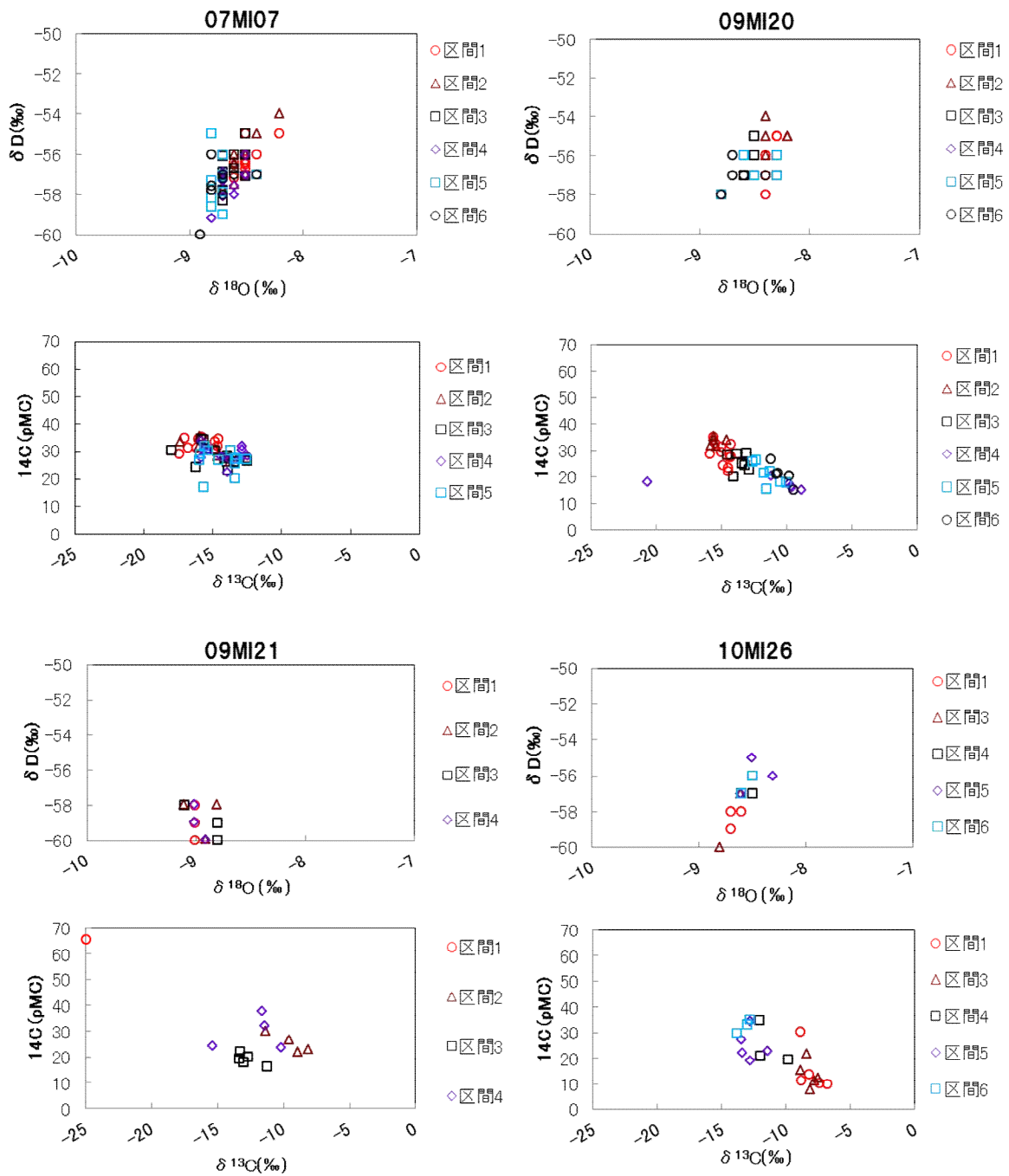


図 3.3.23 各観測孔の同位体の相関

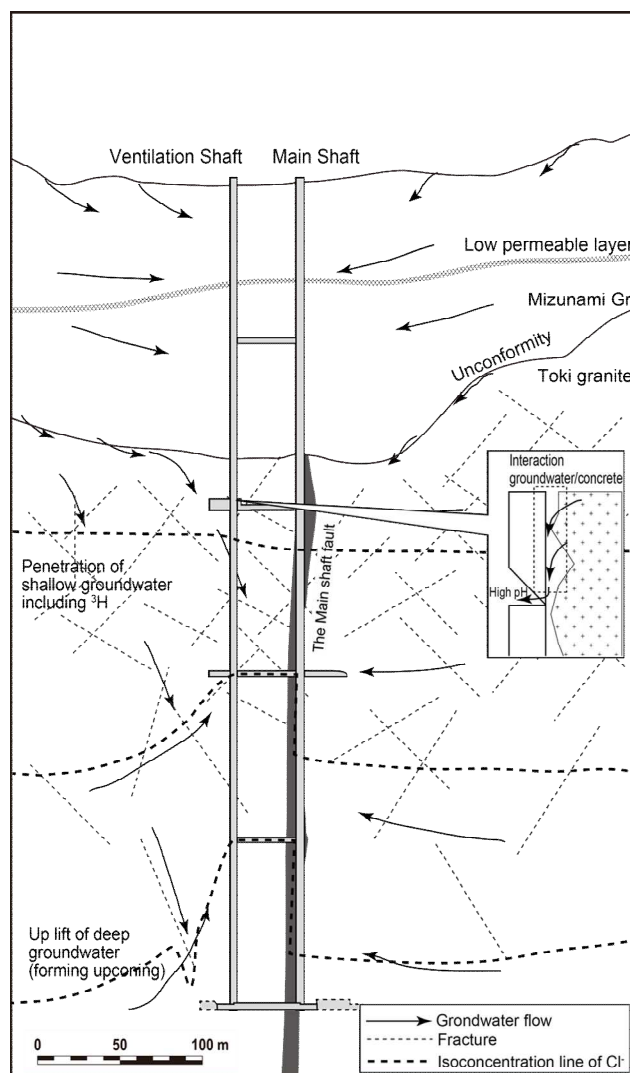


図 3.3.24 花崗岩における水理地質特性と坑道掘削影響の概念¹⁵⁾

3.3.3 EdZ の地球化学特性に関わる重要な知見

- 研究坑道掘削時に最深部の周縁では、地下水の排水に伴い相対的に深部の地下水の上昇が認められ、研究坑道の掘削深度がより深部に移動した後も、上昇した地下水が立坑周縁部に数か月間にわたって残留する。その後、各深度の研究坑道における定常的な地下水の排水により、相対的に浅部の地下水が浸透し、地下水が再度入れ替わる傾向が認められる。それに伴い地下水の水質も経時変化する。この変化は、各深度の地下水の混合割合に基づいて解析することができる。
- 一般的に、地下施設建設時に大量の湧水が発生する岩盤では、比較的短期間に水圧低下やそれに伴う水質変化が起こる可能性があるため、研究坑道掘削直後から水圧・水質の変化を把握するための観測孔の設置および観測計画が必要になる。観測孔は、高透水性の地質構造（礫岩部や割れ目帯など）に優先配置する。
- サイトスケールの割れ目の連続性・連結性を間接的に推測するための手段として、地下水中の長期的な同位体（トリチウムなど）、フロンガスの観測が有効となる。

3.4 EDZの地球化学特性の変化

3.4.1 セメント材料の化学的影響に関わる諸現象

セメントなどの人工材料が地下深部の地球化学特性に与える影響に関わる研究開発では、実際の深部地質環境での観察事例を蓄積して、現象の普遍性を確認するとともに、坑道閉鎖後の化学的状態について予測解析技術を構築しておく必要がある。

坑道の建設時は作業の安全確保や地下水湧水の止水のため、セメント材料の使用は不可避であり、地層処分における関連現象は、図 3.4.1 のように想定される。

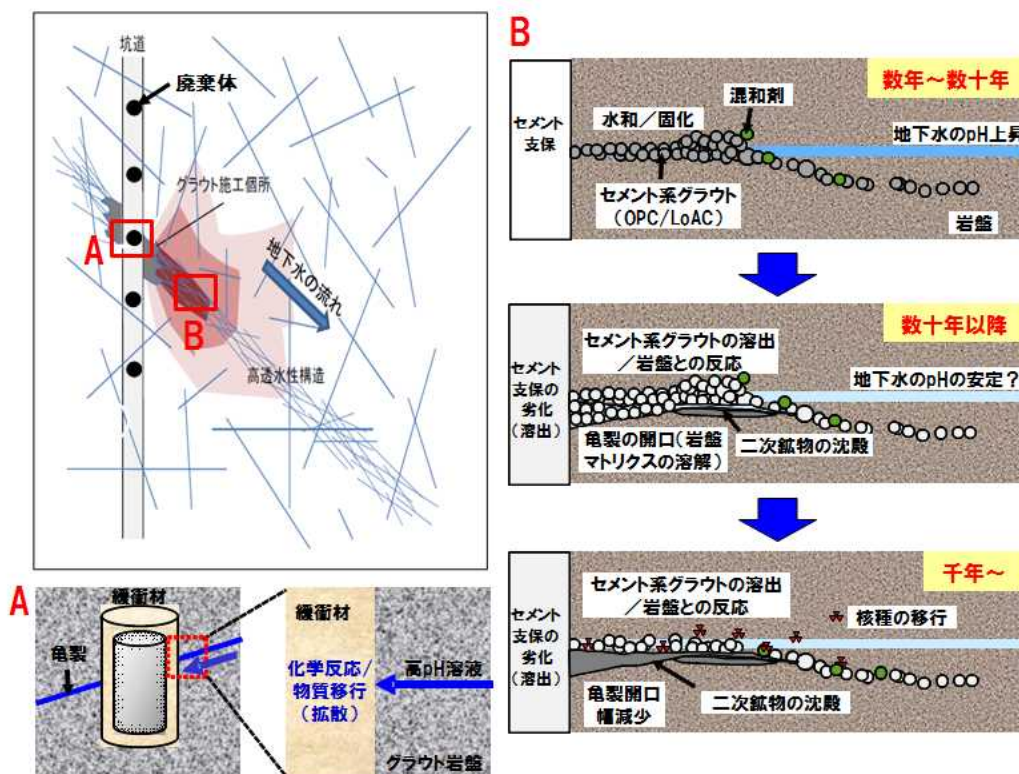


図 3.4.1 セメント材料の使用により想定される諸現象(日本原子力研究開発機構, 2012¹⁷⁾を編集)

セメント材料は溶脱や再沈殿により、地下水の pH を変化させるとともに、コロイド粒子の起源となり得る。その影響評価においては、溶脱に関わる熱力学データや生成する二次鉱物の種類、溶解速度などが必要となる。

このような研究は、材料工学の面からも様々な研究が行われており、主に室内試験でセメント材料の続成過程と pH の関連について図 3.4.2 のようにまとめられた例がある¹⁸⁾。様々な室内試験を俯瞰すると、セメント中のケイ酸カルシウム水和物 CSH (hydrated calcium-silicate)は、徐々に Si に富む組成に変化し、変質初期は主に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が溶脱し、液相中の Ca 濃度が増加し、その後 Ca が相対的に少ない CSH で安定となること、Ca の一部は Calcite, Ettringite として沈殿することなどが明らかになっている。

以上のような研究については、日本原子力研究開発機構 (2008, 2009, 2010, 2011, 2012)^{17, 19, 20, 21, 22)}に詳述しており、本節ではグラウトに関わる観察事例の概要とその他集水リングやボーリング孔で観察された未報告の事例について述べる。

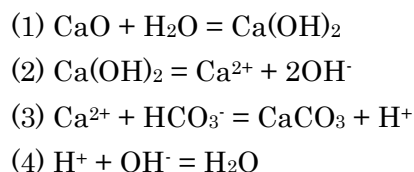
3.4.2 セメント材料の化学的影響の観察事例

第2期中期計画においては、実際の地質環境においてセメント材料周辺の pH に関わる知見を得るため、①主・換気立坑のコンクリートライナーの表面・裏面を介して研究坑道に流出する地下水(集水リングの地下水)、②グラウト周辺の地下水、③研究坑道から掘削されたボーリング孔のセメント保孔部の地下水を対象として、それぞれ調査解析を行った。

①コンクリートライナーの表面・裏面を介して研究坑道に流出する地下水

地下水は図 3.4.3 のように岩盤から研究坑道内に流入する過程でコンクリートライナーに接していることから、集水リングで各深度の地下水を採取し、pH の変化について確認した。結果の一例として換気立坑の集水リングから得られた地下水の pH の経時変化を図 3.4.4 に示す。各集水リングの地下水の pH は、初期にコンクリートライナーとの接触により上昇しているものの、半年程度で当初の pH に回復している。コンクリートの中性化反応にはより長期の時間を要することから、この pH の変化は、セメントの影響を受けた地下水が、岩盤から湧出する地下水により洗い流され置換したためと考えられる。集水リングの一部では採水管に炭酸塩鉱物のスケールが確認され(図 3.4.5)、コンクリートの溶脱により地下水に供給された Ca が方解石として沈殿したものと推察される。コンクリートの中性化に関わる炭酸塩鉱物によるコンクリートライナー裏面の炭酸塩鉱物によるコーティングの有無については未確認である。

炭酸塩鉱物の形成プロセスは以下のような化学反応で説明できる。



②グラウト周辺の地下水

2007年に深度200m予備ステージに施工されたグラウト(図3.4.6)周辺の地下水のpHについて、その長期変化を確認した。当該場所では、比抵抗特性の違いに基づきグラウトの岩盤改良領域と非改良領域を分類するとともに(図3.4.7)、観測孔のボーリングコアの観察に基づいて強変質境界を同定し、グラウト浸透・固化領域、中間領域、強変質領域に分類している。プレグラウト実施(2007年6月)後、研究坑道掘削、モニタリング装置の設置を行い、約半年後からpH測定を開始した結果、当初、pH10~12程度の地下水が約1年後にバックグラウンドと同等の値まで低下したことが確認された(図3.4.8)。また、観測孔のボーリングコアの観察に基づいてグラウト浸透・固化領域、中間領域、強変質領域に分類したそれぞれの観測区間で、地下水の水質を分析した結果、時間経過とともに各領域の水質がほぼ一様に変化しており、研究坑道への地下水の排水を反映していると推察された¹⁷⁾(図3.4.9)。

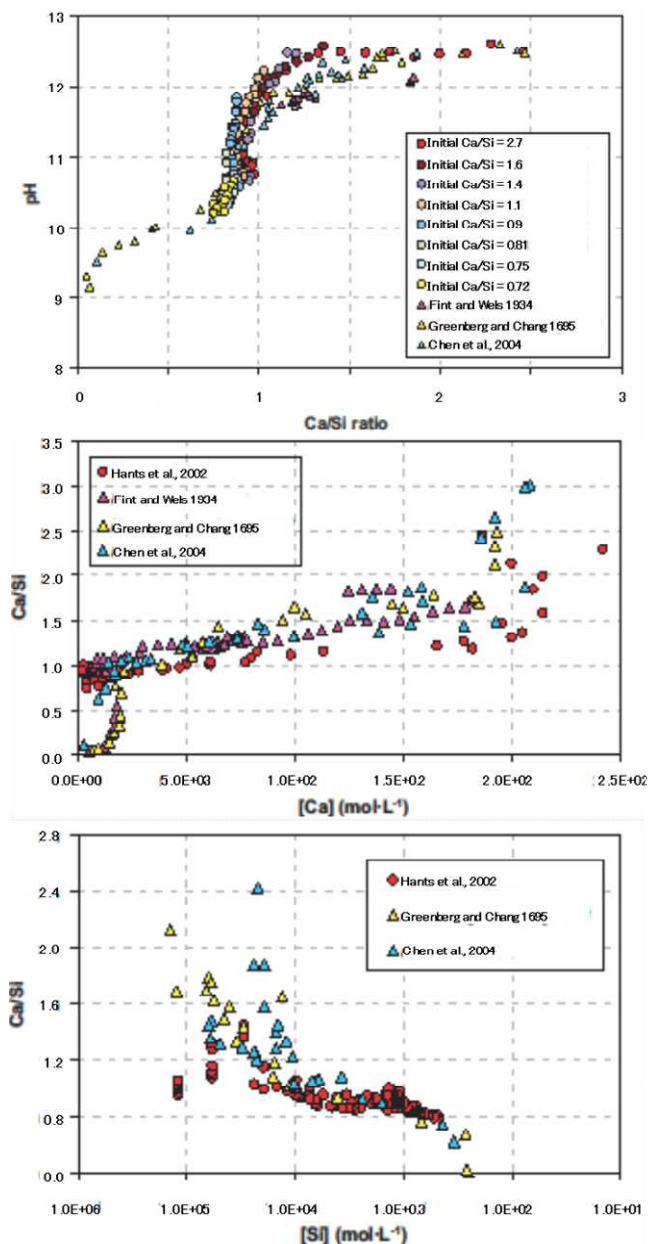


図 3. 4. 2 セメント材料の元素組成比と地下水の pH との相関（室内試験例）

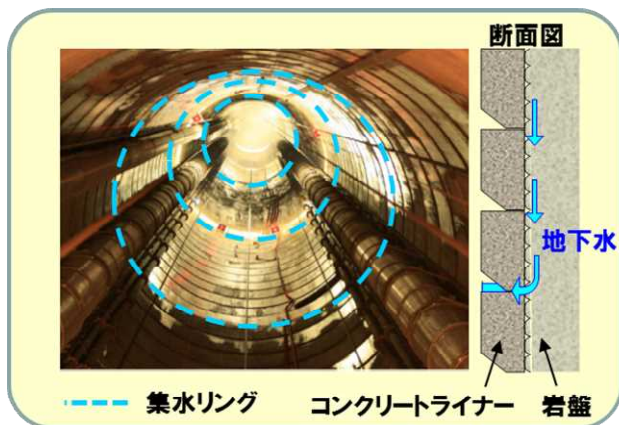


図 3. 4. 3 コンクリートライナーの概略

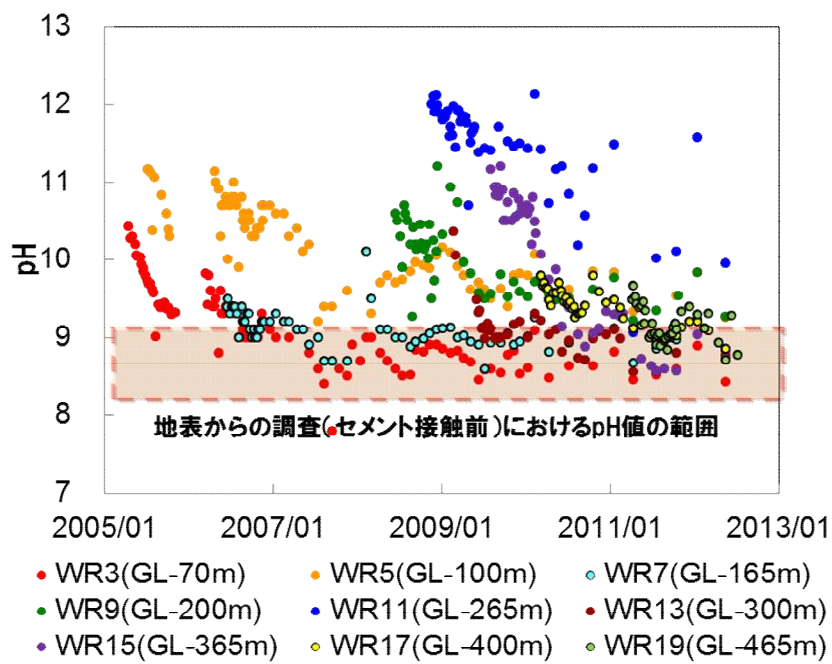


図 3.4.4 コンクリートライナー周辺の地下水（集水リング）の pH の経時変化

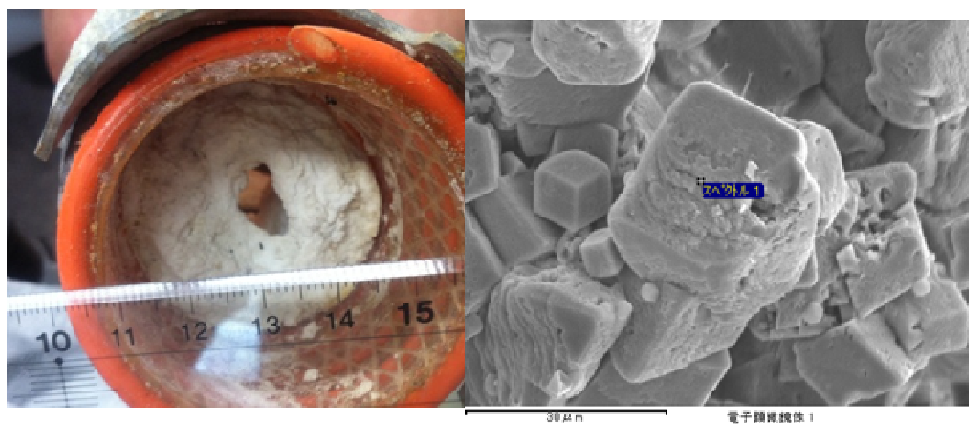


図 3.4.5 集水リング採水管で確認された炭酸塩鉱物の沈殿

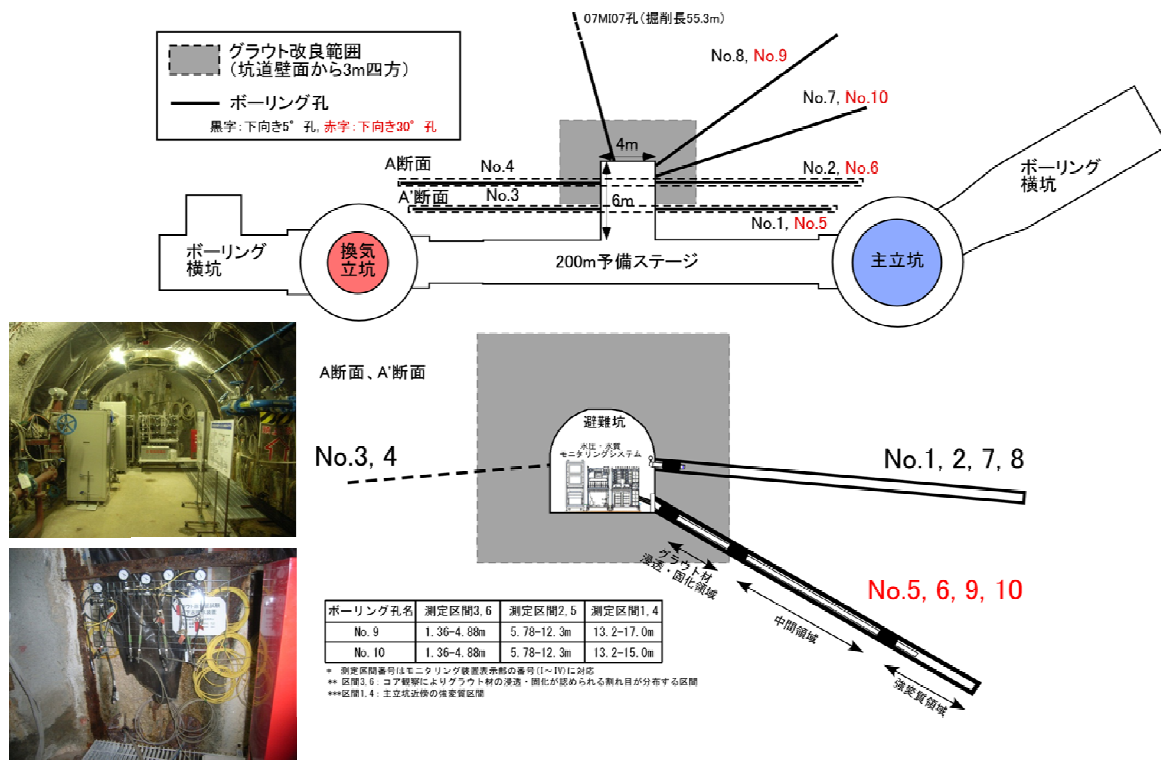


図 3.4.6 深度 200m 予備ステージにおけるグラウト領域とモニタリングの概略

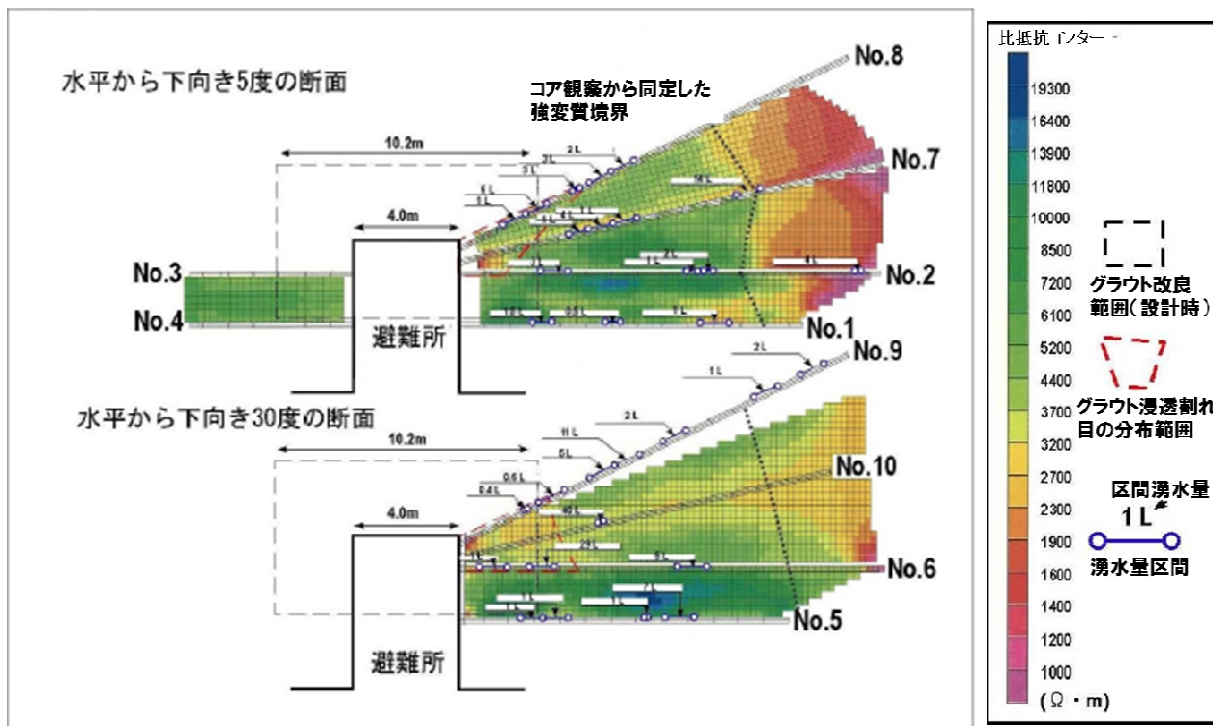


図 3.4.7 グラウト領域とモニタリング区間の比抵抗特性¹⁷⁾

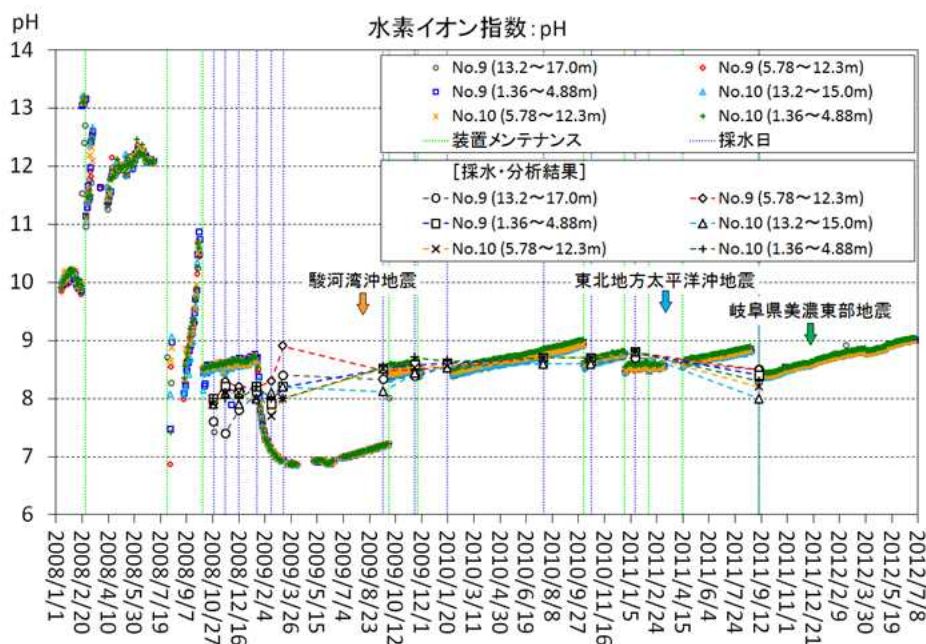


図 3.4.8 グラウト領域周辺の地下水の pH の経時変化¹⁷⁾

③研究坑道から掘削されたボーリング孔のセメント保孔部の地下水

研究坑道から掘削したボーリング孔(09MI21号孔)のセメント打設部(区間1)において、地下水の pH の長期変化について確認した。同ボーリング孔では、セメントを打設していない区間2~4の地下水の pH と比較することで、セメントの影響を確認することができる。区間1の地下水は2年間にわたって高 pH 状態(11前後)が継続しており、前述①、②の観測例と比較して、研究坑道周辺への地下水湧出が少ないことから、セメントと反応した地下水が置換されずに滞留しているものと推測された(図 3.4.10)。各区間の水質の経時変化を図 3.4.11 に示す。区間1においては、セメント由来成分と考えられる Ca や Al などの化学成分濃度、アルカリ度の高い状態が継続している。これらの化学成分濃度をもとに、図 3.4.2¹⁸⁾を参照すると、セメント打設区間の pH から推測される CSH の組成(Ca/Si 比)および Ca, Si 濃度実測値から推測される CSH の組成は、共に 0.8~1.0 の範囲となり、室内試験で得られる知見と実際の天然環境の状態が整合的であることを確認できた。

また、化学成分濃度をもとに観察されたアルカリ条件下で安定な鉱物相について、熱力学計算コード PHREEQC を用いて推定すると、石英やギブサイトなどの溶解・沈殿反応が平衡状態にあり、方解石など炭酸塩鉱物は過飽和状態であると見積られる。地下水が滞留し入替わらない条件においては、pH の変化は主に地下水と鉱物相との反応に依存する。そのため、各鉱物と地下水の反応が平衡状態に達したと仮定して PHREEQC により pH の変化を見積もると現状の 10.8 が約 11 で安定状態になると推測された。そのため、当該観測区間の花崗岩に含まれる鉱物自体のアルカリ条件を緩和する緩衝能力は小さいと言える。なお、セメントの溶解・沈殿反応の平衡定数が不明なため、本解析ではセメントを固相として考慮していない。既往研究では、CSH の組成比とその溶解度のモデル解析がなされており(図 3.4.12)、今後、実際の組成比の観察に基づいて、施工したセメントが将来的に溶解するのか、平衡状態となるのかを熱力学解析することで、pH 条件の変遷について推論できる可能性がある。

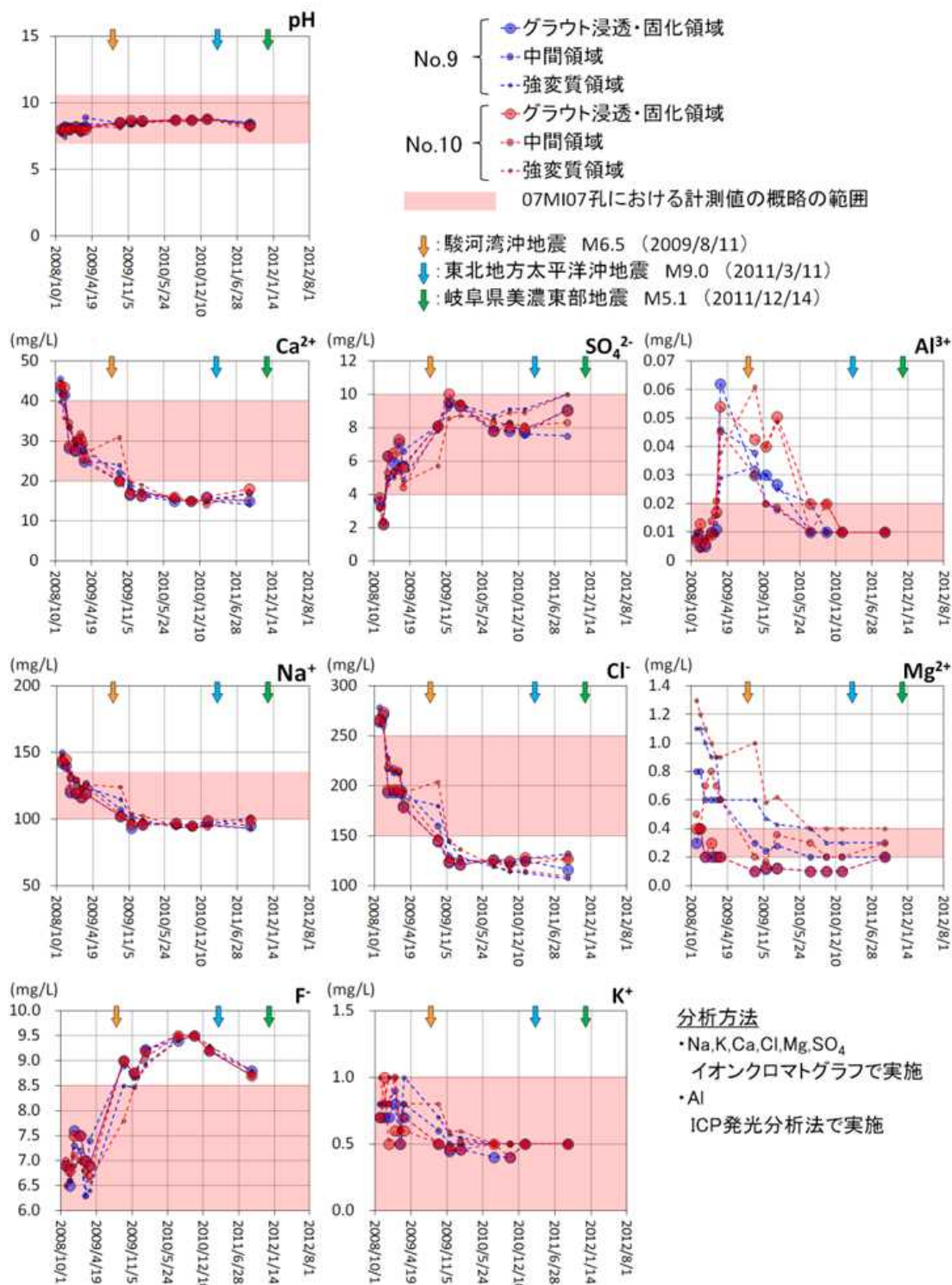


図 3. 4. 9 グラウト領域周辺の地下水水質の経時変化¹⁷⁾

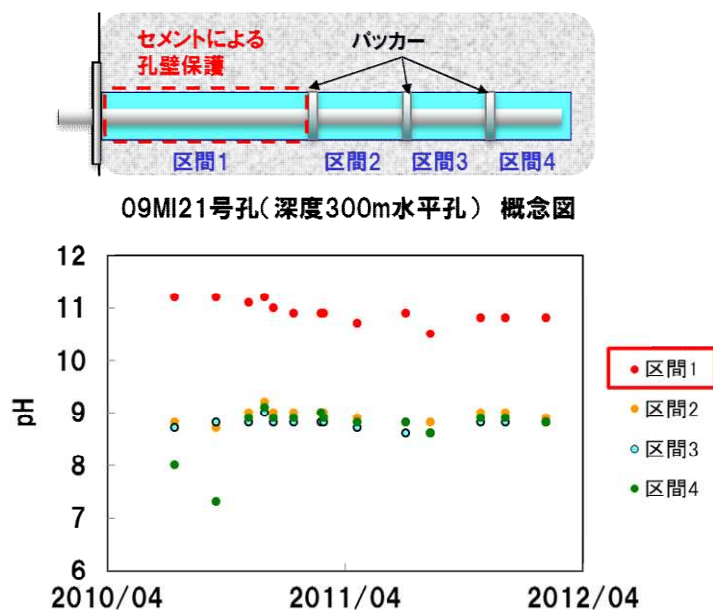


図 3.4.10 09MI21 号孔（深度 300m 水平孔）より採取した地下水の pH 観測結果
 (09MI21 号孔は産業技術総合研究所により掘削された観測孔であり、区間番号順が 07MI07, 09MI20, 10MI26 号孔と逆になっている)

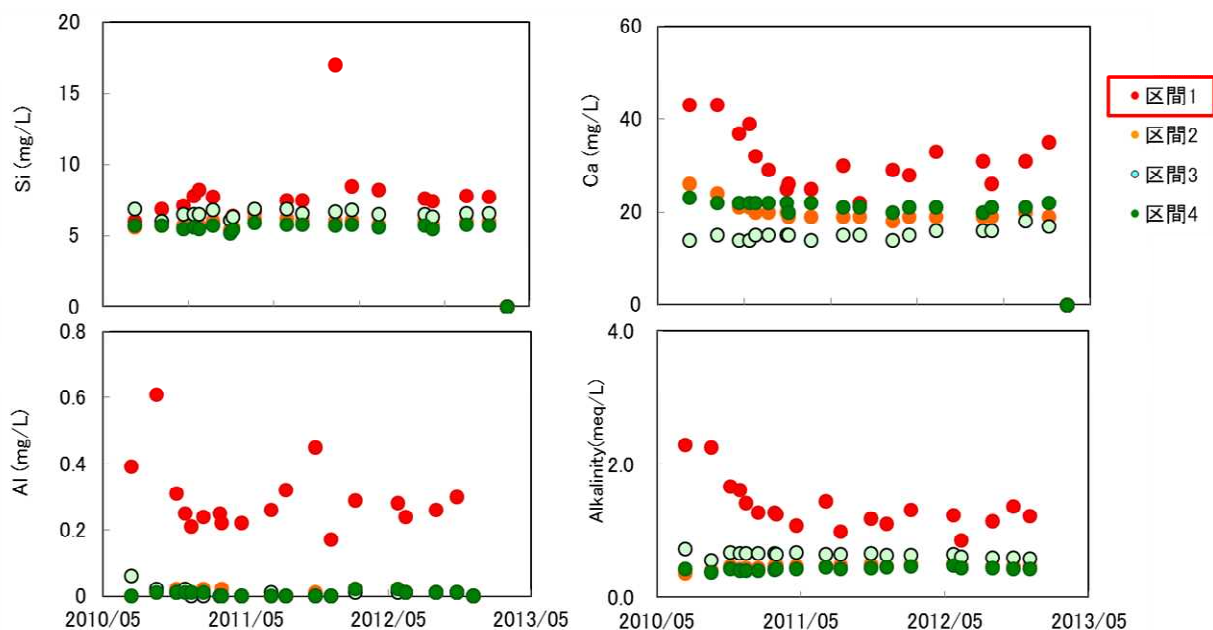


図 3.4.11 09MI21 号孔（深度 300m 水平孔）より採取した地下水の水質観測結果

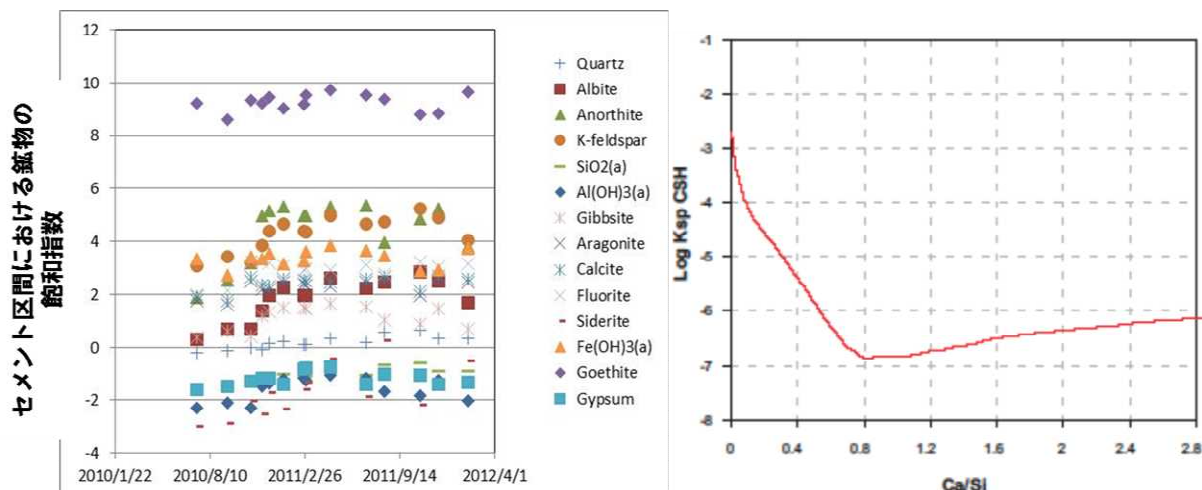


図 3.4.12 09MI21 号孔の区間 1 の地下水に対する鉱物の飽和指数とセメント溶解度に関わる既存研究事例²³⁾

3.4.3 EDZ の地球化学特性に関わる重要な知見

前述の①, ②の事例は地下施設の維持管理期間の地球化学特性の変化に相当すると言える。周辺の地下水が研究坑道に湧水することにより地下水が入れ替わるため、セメント材料の影響は短期的に解消される。影響範囲, 期間は地下水の入れ替わり速度とセメント材料の溶解・変質速度に依存する。③の事例は、施設閉鎖後の地球化学特性の変化に相当する。周辺で研究坑道への湧水がないため地下水がセメントと接した状態で数年間にわたって反応するが、岩盤の中性化緩衝能力が小さいためアルカリ性地下水が滞留する。

以上の観察事例を踏まえて、セメント材料の施工に関わる汎用的な知見および課題は以下のように整理することができる。

強度の観点では、セメント材料の中性化に伴う内部鉄筋などの腐食、構造劣化が問題となる(坑道のライナーに内部鉄筋を使用しない場合は考慮不要)。一方で、セメント材料の中性化は、長期的なアルカリブルームの形成を抑制するため、強度の維持と化学影響の低減はトレードオフの関係にあると言える。想定される汎用的な知見は次のとおりである。

- 地下水に接しているコンクリートでは、地下水中の Ca^{2+} と HCO_3^- が反応し、更に脱炭酸して炭酸カルシウム(CaCO_3)が生成する。硬化体表面が連続した炭酸カルシウムで覆われれば、 CO_2 の拡散が抑止され中性化が抑制される。ただし、地下水の水質は地域により異なるので、中性化抑制効果も一律には期待できない。
- 維持管理期間中は地下水が坑道に流入し、施設閉鎖後は坑道に空気がないため、構造体内部に空気が浸透せず、鉄筋腐食は進行し難いと考えられる(ただし、不均質性がある)。

周辺岩盤への化学影響の観点(高アルカリブルームの生成に伴う化学特性の変化)での汎用的知見および今後の課題は以下のとおりである。

- 維持管理期間中は、セメント材料周辺のアルカリ性地下水が坑道に湧出し、坑外に排出される。一方で、地下水が坑道に湧出しない条件においては、アルカリ性地下水が長期滞留するため、施設周辺に化学環境の不均質性が生じる可能性がある。

- ・ 坑道閉鎖および冠水後は地下水が滞留する。高アルカリプルームの規模、分布を想定するためには、維持管理期間中(数十年内)のセメント材料表面の中性化量、化学組成比、グラウトによる止水領域(維持管理中、坑道にアルカリ性地下水が排水されない領域)の分布を把握するための技術(物理探査技術など)が必要となる。また、坑道冠水条件で、周辺のアルカリ性地下水の移流拡散解析手法の検証が必要である。

4. 第3段階の調査技術（坑道で利用する調査技術）

施設建設時には坑道掘削と並行して、整備された坑道から地質環境特性の調査を行う。その目的は、前述したような地上からの調査結果の妥当性確認や施設建設時の周辺（EdZ, EDZ）の地質環境特性の変化の解析に反映する初期データの取得などである。また、これらの目的に加えて、地上からの調査では取得することが難しい（調査予算に依存する工程上の制約やボーリング掘削水の一部残留など避けられない汚染のため低品質のデータしか取得できない）情報の取得が挙げられる。このような項目には、原位置の酸化還元状態や地下水中のコロイド／有機物などが挙げられる。本章では、それらの調査事例と情報を取得するための調査解析技術について述べる。

4.1 物理化学パラメータの長期観測と関連する主要プロセスに関わる調査技術

地上からのボーリング調査においては、原位置に物理化学パラメータ（温度、pH、酸化還元電位など）の計測機器を挿入し、長期モニタリングを行うことでその値を取得することができる。また、採取した地下水の化学組成に基づいて理論的に酸化還元電位を推定することができる。しかしながら、現実的には工程上の制約があるため、多数の観測点で三次元的にその分布を把握することは困難である。坑道からの調査においては、任意の方向に観測孔を掘削することができ三次元的な観測レイアウトを容易に設定できるとともに、岩盤と坑道間の水圧差を利用して地下水を物理化学パラメータ計測機器に流し、長期的に自動で計測することができるという利点がある。

研究所の研究坑道内で使用している水圧・水質連続モニタリングシステムは、被圧不活性状態（測定区間の水圧を維持し、大気に触れない状態）で物理化学パラメータを測定する装置である。ただし、分析用地下水の採取時には、観測区間の水圧が一時的に変化し、水圧データの品質が低下するという短所もあるため、調査目的の優先順位を踏まえて観測に利用する必要がある。

深度 200～400m の予備ステージから掘削した観測孔（07MI07, 09MI20, 10MI26 号孔）での観測結果と同時期に採取された地下水の水質を表 4.1.1 に示す。各区間の観測値は、07MI07 号孔区間 6 の観測初期の値を除いて、pH8～10、酸化還元電位（ORP_{SHE}）が-100～-250mV の範囲にあり、明瞭な経時変化は認められない。07MI07 号孔区間 6 においては、直近において前述したグラウト試験が行われており、セメント材料の影響により pH が高くなったと推察される。各観測点における主要な酸化還元反応を同定するため、観測値と水質に基づいて計算できる理論的な酸化還元電位（平衡電位）の比較を行った（図 4.1.1）。理論的な平衡電位の計算に使用した酸化還元反応式と基準電位を以下に示す。これらの反応式は、土岐花崗岩中に存在する鉱物、地下水中に含まれる溶存成分を参照して選択した。

- 1) $\text{SO}_4^{2-} + 9\text{H}^+ + 8\text{e}^- = \text{HS}^- + 4\text{H}_2\text{O}$ ($E_0 = 0.249 \text{ V}$)²⁴⁾
- 2) $\text{SO}_4^{2-} + \text{FeCO}_3 + 9\text{H}^+ + 8\text{e}^- = \text{FeS(s)} + \text{HCO}_3^- + 4\text{H}_2\text{O}$ ($E_0 = 0.280 \text{ V}$)²⁵⁾
- 3) $\text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+ + 14\text{e}^- = \text{FeS}_2 \text{ (Pyrite)} + 8\text{H}_2\text{O}$ ($E_0 = 0.362 \text{ V}$)²⁶⁾
- 4) $\text{Fe}_3(\text{OH})_{8(\text{s})} + 3\text{HCO}_3^- + 5\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 3\text{FeCO}_3 + 8\text{H}_2\text{O}$ ($E_0 = 1.126 \text{ V}$)²⁶⁾
- 5) $\text{Fe}_3(\text{OH})_{8(\text{s})} + 8\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 3\text{Fe}^{2+} + 8\text{H}_2\text{O}$ ($E_0 = 1.102 \text{ V}$)²⁶⁾
- 6) $\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$ ($E_0 = 0.95 \text{ V}$)²⁵⁾
- 7) $\text{Fe}(\text{OH})_3 \text{ (am)} + 3\text{H}^+ + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$ ($E_0 = 0.975 \text{ V}$)²⁶⁾
- 8) $\text{FeCO}_3 + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{H}^+ + \text{HCO}_3^- + \text{e}^-$ ($E_0 = 1.078 \text{ V}$)²⁶⁾

表4.1.1 各深度の観測孔における物理化学パラメータ観測値

Table with columns: 観測番号, 深さ, pH, ORP, 分層材料採取日, Na, K, Ca, Mg, 全鉄濃度, 全銅濃度, 全亜鉛濃度, アルミニウム濃度, SO4, F, Cl, NO3, NO2, Br, I, NH4, PO4, Si, Al, TFe, Fe, Mn, B, U. Rows include 07MI07, 09MI20, 10MI26, 13MI28, 16MI28, 17MI28, 18MI28, 19MI28, 20MI28, 21MI28, 22MI28, 23MI28, 24MI28, 25MI28, 26MI28, 27MI28, 28MI28, 29MI28, 30MI28, 31MI28, 32MI28, 33MI28, 34MI28, 35MI28, 36MI28, 37MI28, 38MI28, 39MI28, 40MI28, 41MI28, 42MI28, 43MI28, 44MI28, 45MI28, 46MI28, 47MI28, 48MI28, 49MI28, 50MI28, 51MI28, 52MI28, 53MI28, 54MI28, 55MI28, 56MI28, 57MI28, 58MI28, 59MI28, 60MI28, 61MI28, 62MI28, 63MI28, 64MI28, 65MI28, 66MI28, 67MI28, 68MI28, 69MI28, 70MI28, 71MI28, 72MI28, 73MI28, 74MI28, 75MI28, 76MI28, 77MI28, 78MI28, 79MI28, 80MI28, 81MI28, 82MI28, 83MI28, 84MI28, 85MI28, 86MI28, 87MI28, 88MI28, 89MI28, 90MI28, 91MI28, 92MI28, 93MI28, 94MI28, 95MI28, 96MI28, 97MI28, 98MI28, 99MI28, 100MI28.

pH, ORPはOCEAN-1による観測値に不活性炭層での測定値を参考にしている(測定後にドリフトの補正を施していないため)

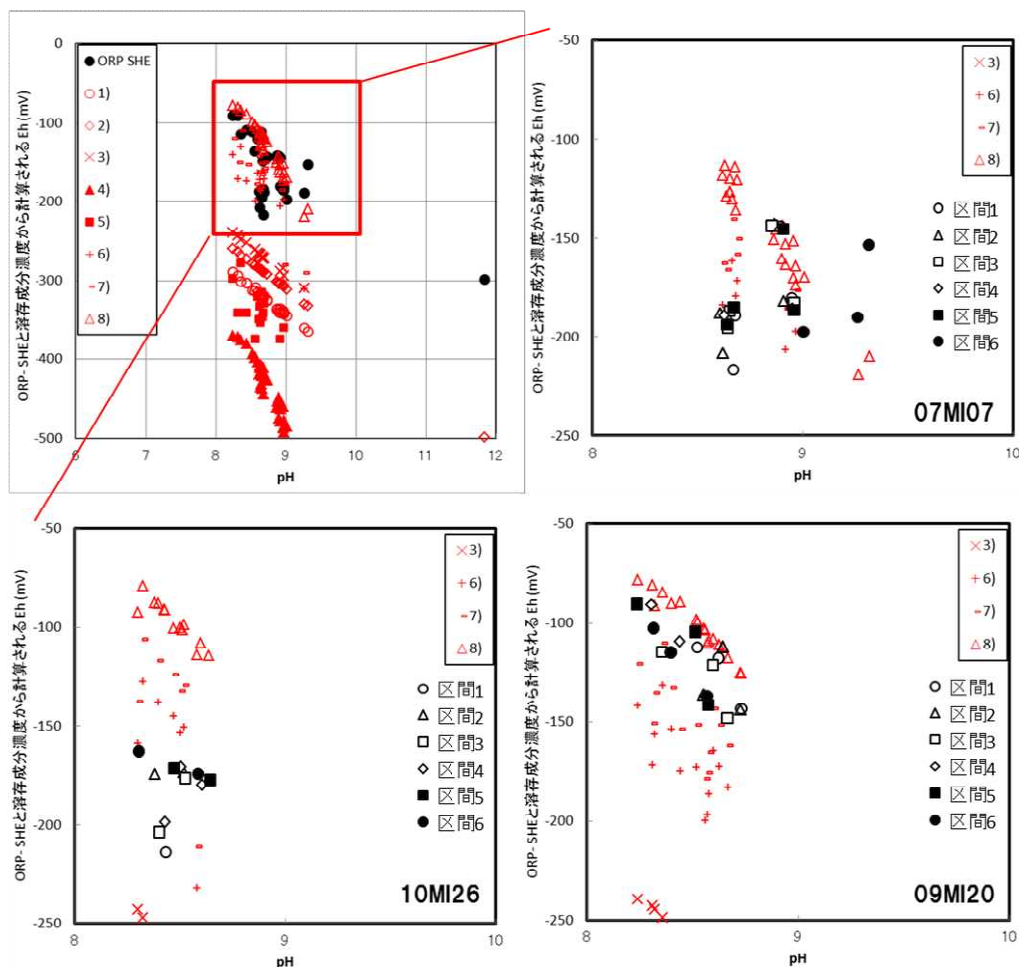


図 4.1.1 pH, 酸化還元電位実測値と理論値の比較

図 4.1.1 (左上図) から、pH, 酸化還元電位の实測値は反応式 6), 7), 8) から計算される理論値周辺にプロットされ、これらの水-鉱物反応により酸化還元電位が決められている可能性がある。観測孔毎に比較すると、07MI07 号孔では 6) か 8) の反応の理論値と実測値が一致する傾向がある。09MI20 号孔の実測値は 7) と 8) の反応の理論値周辺に位置する。10MI26 号孔については、6) と 3) の反応の理論値の間に位置する。以上のことから、深度 200~300m にかけては、鉄水酸化物 ($\text{Fe}(\text{OH})_3$)、菱鉄鉱 (FeCO_3) の緩衝反応が酸化還元電位を規定していると考えられる。深度 400m においては、3) の硫化鉄物 (FeS_2) の水-鉱物反応が主要な反応になる過渡的な状態を表している可能性がある。

また、予察的な値であるが、深度 500m 坑道における壁面湧水 (湧水地点番号: A-SP-203) は pH8.4, 酸化還元電位約-163mV と得られており、6) の反応の理論値とほぼ一致している。

広域地下水流動研究におけるボーリング調査では、土岐花崗岩中の酸化還元電位について、深度約 500m 以深で-280~-385mV と測定されている⁴⁾。そのため、今後、深度 500m 以深の地下水を対象とした観測を行うことにより、より還元的な値が得られる可能性もある。

4.2 コロイド／有機物の調査技術

地下水中のコロイド粒子は、特定の元素を担持した擬似コロイドとして地下水の流れとともに物質の移動に寄与する一方で、地下水の流動経路となる岩盤中の間隙の狭窄部において物理的にろ過されるなど、様々なメカニズムにより物質の移動・遅延に関与する。このようなコロイド粒子による物質移動・遅延効果を評価するためには、その種類や主要・微量元素組成、それらのサイズごとの違いを調査し、その移動経路となる岩盤中の割れ目開口幅を勘案しながら移動プロセスを理解するための調査解析手法が必要となる。

これまでにコロイド粒子の種類や量、放射性核種のアナログ元素となる希土類元素およびウラン、トリウム濃度の調査品質に関わる課題やその要因として、以下のような知見を得ている。

- ・ ボーリング孔から地下水を採取して行う調査手法では、アナログ元素濃度が採水時間とともに変化することがあり、コロイド粒子の分離濃集作業に長時間を要する限外ろ過法では再現性のある結果を得られないことがある（アナログ元素濃度の経時変化の理由は、採水区間の地下水の入れ替わりや次に述べる人為生成コロイドの剥離などの要因が考えられる）。
- ・ ボーリング孔掘削には、新たに地下水に接することになるボーリング孔壁の岩石表面が水-鉱物反応により変質し、従来存在していなかったコロイド態物質が生成する場合がある（図 4.2.1）。このようなコロイドは、限外ろ過作業時の圧力変化に伴いボーリング孔壁から非定常的に剥離し、限外ろ過作業の再現性を低下させる。
- ・ 理論上はろ過孔径が小さくなるほど、ろ過膜で捕集されるコロイド粒子量が増えるため、ろ過液中のアナログ元素濃度が減少するため、その差異によりアナログ元素濃度のコロイドサイズ依存性を確認することができるが、以上のような品質低下要因により、ろ過孔径の小さいろ過液の方がろ過孔径の大きいろ過液よりもアナログ元素濃度が高くなることもあり、コロイド態のアナログ元素の移動について考察できない。

以上の課題を踏まえて、深度 300m の研究坑道で観察される 2ヶ所の湧水割れ目（実際に地下水の流れとともにコロイド粒子が移動している可能性のある割れ目）の地下水をバッチ式気密容器に採取して研究試料とすることで、ボーリング掘削に伴う人為的なコロイド生成や地下水の経時変化といった品質低下要因のない条件下において、地下水をろ過しアナログ元素濃度のコロイドサイズ依存性について考察した。

0.2 μm 、200 kDa、50 kDa、30kDa、10kDa、5kDa (Da：分画分子量) のろ過膜を用いて限外ろ過、クロスフロー式ろ過を実施し（限外ろ過とクロスフロー式ろ過では市販されているろ過膜の孔径が異なるため、それぞれのろ過膜を使用した）、ろ過膜上のコロイド粒子の SEM-EDX 分析を行った結果、地下水中のコロイド粒子は C や S、Si、Al、Na、Ca、Fe などから構成されていた。これらの化学組成から、コロイド粒子は主に有機物、ケイ酸塩鉱物、水酸化鉄などにより構成されていると考えられた。ろ過液中のアナログ元素濃度は、ろ過孔径により違いが認められ、概ねろ過孔径が小さくなるほど濃度が低くなる傾向を確認することができた。このため、今回得られたデータは、アナログ元素濃度のコロイドサイズ依存性について考察可能な品質であると考えられた。

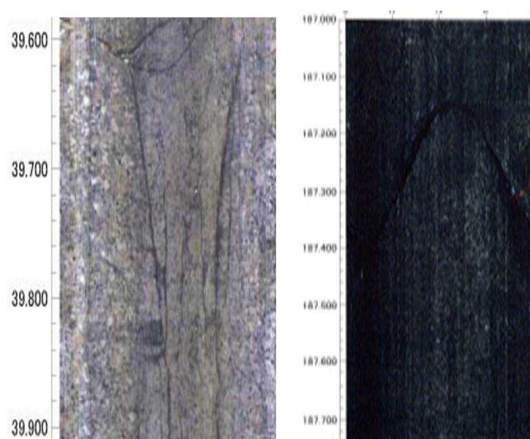


図 4.2.1 ボーリング孔掘削後孔壁に形成された鉄水酸化物の被膜
(左：掘削直後，右：被膜生成後)

図 4.2.2 に各サイズ画分に含まれるアナログ元素濃度を示す。各ろ過膜孔径のろ過液中のアナログ元素濃度の差分に基づいてアナログ元素濃度のコロイドサイズ依存性について確認したところ、 $0.2\mu\text{m}$ 以上、 $0.2\mu\text{m}\sim 30\text{kDa}$ のサイズ画分のアナログ元素濃度が相対的に高く、アナログ元素がこれらのサイズのコロイド粒子として移動していると考えられた。なお、 10kDa 以下、 5kDa 以下のサイズ画分については溶存態のアナログ元素も含まれているため、アナログ元素がコロイド態なのか溶存態で存在しているのか判別できない。

また、アナログ元素がコロイド態のケイ酸塩鉱物を構成する元素として移動しているのか、コロイド粒子に吸着して移動しているのかは不明である。前者の場合は、地下水中に溶出したアナログ元素がコロイド態で移動していることにはならないため、調査を行った地下水の化学条件においてコロイド態でのアナログ元素の移動を想定する必要がなくなる。したがって、今後、コロイド粒子の組成について詳細な分析を行う必要がある。

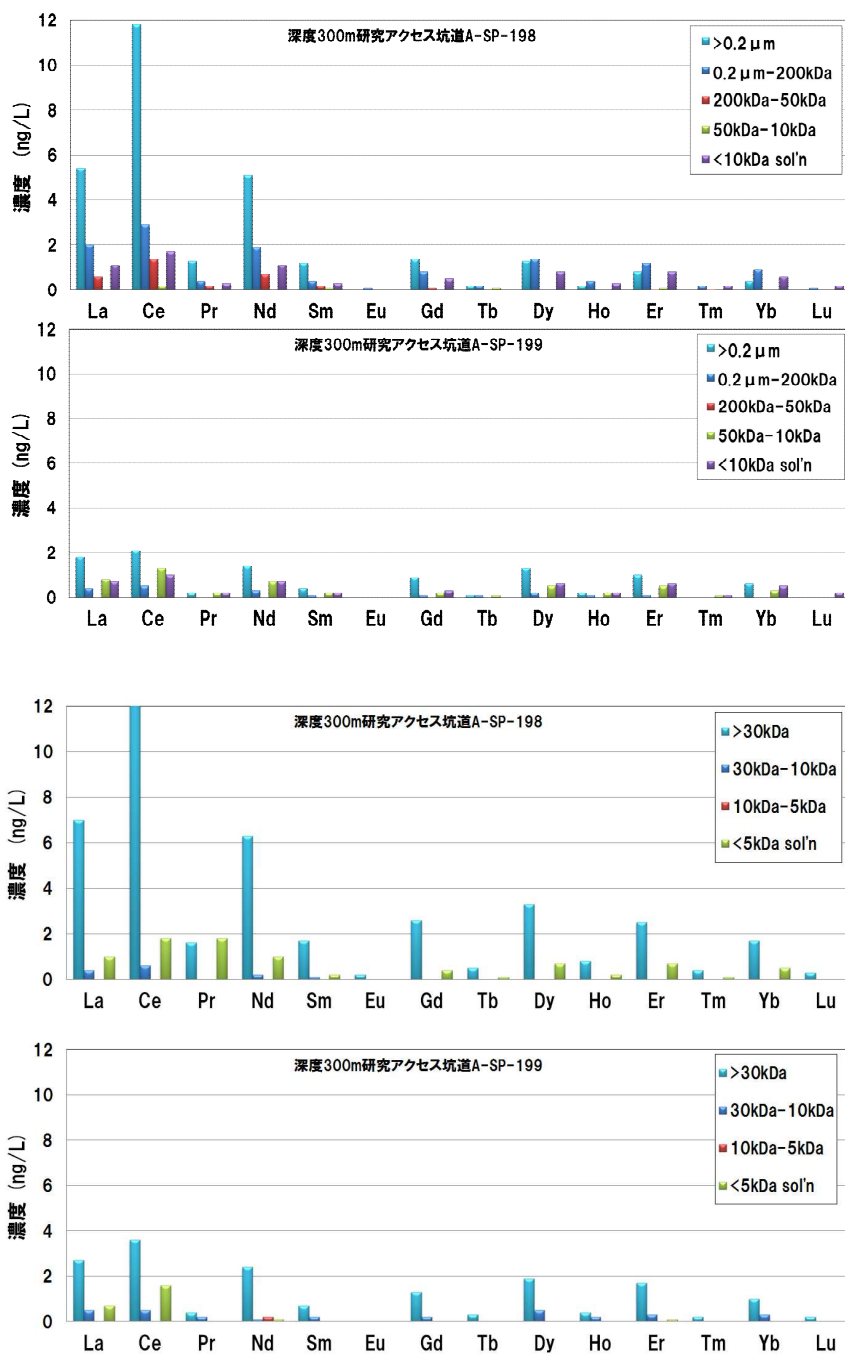


図 4.2.2 地下水中のアナログ元素のコロイドサイズ依存性
 (上 2 図 : 限外ろ過, 下 2 図 : クロスフローろ過 ; A-SP-198, 199 は湧水地点番号)

5. 施設維持管理期間中の地球化学特性の将来変化の予測技術

研究所建設に伴う EdZ の水圧変化は、透水性の異なる地質構造の分布を反映しており、花崗岩部における水質変化は深部と浅部の塩分濃度の異なる地下水の混合割合の変化に起因している。これらの現象は高透水性の割れ目が多く地下施設建設の影響を受けやすい花崗岩のような岩盤に特有の現象と考えられる。前述の長期観測から得られた知見に基づき、地球化学特性の変化プロセスの詳細解析を行い、今後の数年～数十年程度の中長期的な将来変化について考察を行った。なお、EDZ の人工材料施工に由来する地球化学特性の変化については、前述したように坑道への地下水排水により維持管理期間中においては小さいと考えられる。

5.1 水質変化について

水質変化プロセスの解析においては、水質変化が塩分濃度の異なる地下水の混合割合の変化に起因することを念頭において、地上の観測孔、両立坑の集水リングおよび深度 500m までの各深度の研究坑道から掘削された観測孔で得られた地下水の水質データ（2005～2013 年に分析された約 3,300 試料の主要成分濃度）を対象として多変量解析（主成分分析）を行った。

最初に地表から掘削したボーリング孔の観測データの解析結果を図 5.1.1 に示す。各孔で得られた地下水の水質は、主に K, Mg, IC, SO₄, F, Si 濃度の増減を反映する主成分 1 と主に Na, Ca, Cl 濃度の増減を反映する主成分 2 で表現することができる。

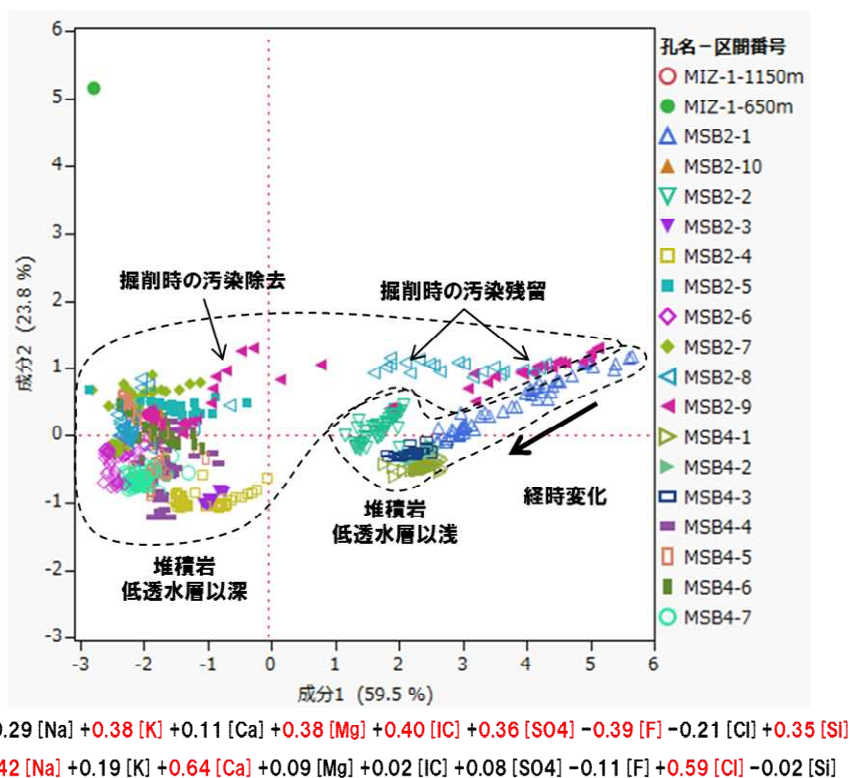


図 5.1.1 地上の観測孔での水質経時変化に関わる主成分分析

また、各主成分値の経時変化と、主成分値と主要成分濃度の関係を図 5.1.2, 図 5.1.3 に示す。MSB-2, 4 号孔で得られた堆積岩中の地下水の主成分値は、堆積岩中の低透水層以浅 (MSB-2 区

間 1, 2, MSB-4 区間 1, 2, 3) と以深 (MSB-2 区間 3 以深, MSB-4 区間 4 以深) で分けられる。低透水性層以浅の地下水は時間とともに主成分 1, 2 が低下する傾向がある (図 5.1.2)。これは主に SO_4 , IC 濃度の減少を反映しているものと考えられる (図 5.1.3)。また, MSB-2 号孔区間 8, 9 では, 2005 年から 2008 年にかけて主成分値が低透水性層以浅の値から低透水性層以深の値に大きく変化している (図 5.1.2)。これは, ボーリング孔掘削時からモニタリング装置設置時までには地層中に混入した浅層地下水が, 長期的な観測のための採水により排除されたためと推察される。一方で MIZ-1 号孔の掘削長深度約 1,150m においては経時変化が認められず (図 5.1.2), 深度 500m までの研究坑道掘削の影響は同深度まで及んでいないことが判る。また, MSB-2, 4 号孔の主成分値の変化は近年収束しつつあり, 今後の地下水水質は収束した主成分値を主成分値と主要成分濃度の相関 (図 5.1.3) に代入することで推測することができる。

例えば, 研究坑道への地下水湧水量が多い礫岩層の区間 (MSB-2 号孔区間 6, 7, 8) においては, 主成分 1 の値が -2 付近, 主成分 2 の値が -0.3 付近となり, Na 濃度が 100mg/L 程度, Cl 濃度が 100 数十 mg/L 程度の水質となる。

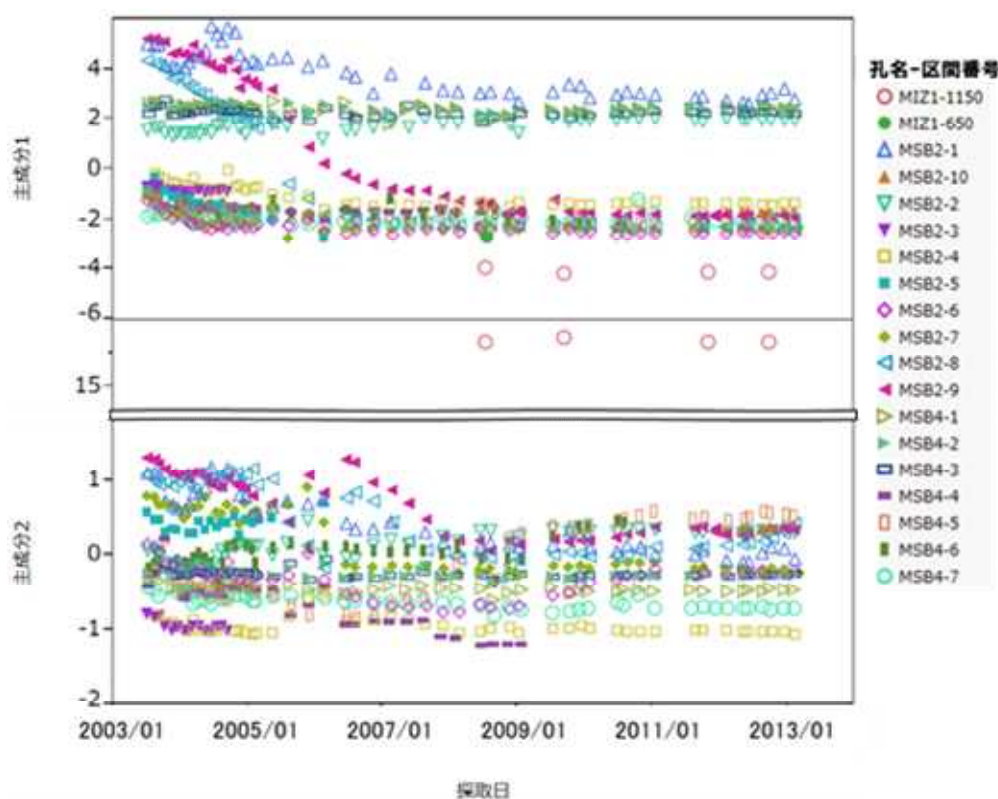


図 5.1.2 地上の観測孔における地下水の水質に関する主成分値の経時変化

次に, 集水リングの水質データの解析結果を図 5.1.4 に示す。両立坑の集水リングで得られた地下水の水質は, 主に Mg, SO_4 , Si 濃度の増減を反映する主成分 1 と主に Na, K, Ca 濃度の増減を反映する主成分 2 で表現することができ, 主成分値の分布は, 低透水性層以浅の堆積岩浅部の集水リングと低透水性層以深の集水リング (図 3.3.1) に分類することができる。

各集水リングの主成分値の経時変化を図 5.1.5 に示す。湧水量が相対的に多い集水リングでは経時変化が小さいものの, 堆積岩浅部では主に主成分 1 の, 湧水量の少ない集水リングでは主成

分 2 の変化量が大きい。後者においては湧水量が少ないためコンクリートライナー打設直後のセメントの影響が相対的に大きく、セメント材料に由来する K や Ca の影響により主成分値が変化しやすいと考えられる。各集水リングの主成分値は概ね一定になりつつあるが、換気立坑最深部の集水リング (WR-19, 20) では 2012 年 6 月頃から大きく変化 (主成分 1 が増加, 主成分 2 が低下) している。また, 堆積岩中の土岐夾炭累層基底礫岩部に位置する集水リングなど湧水量の多い集水リング (WR-6, 7 など) においても変化が収束していない (主成分 2 が徐々に増加)。主成分値と各溶存成分濃度の相関 (図 5.1.6) から, 前者の変化は, 相対的に塩分濃度の低い地下水の割合が増えたためと推測される。後者の変化は, 3.3.1 節に述べたように立坑からの地下水の排水に伴い, 堆積岩中の相対的に高透水性の地層に沿って水平方向の地下水の引き込みが生じ, 塩分濃度の高い地下水の混合割合が増加している可能性がある。なお, この塩分濃度の高い地下水の起源は, 現段階で不明である。

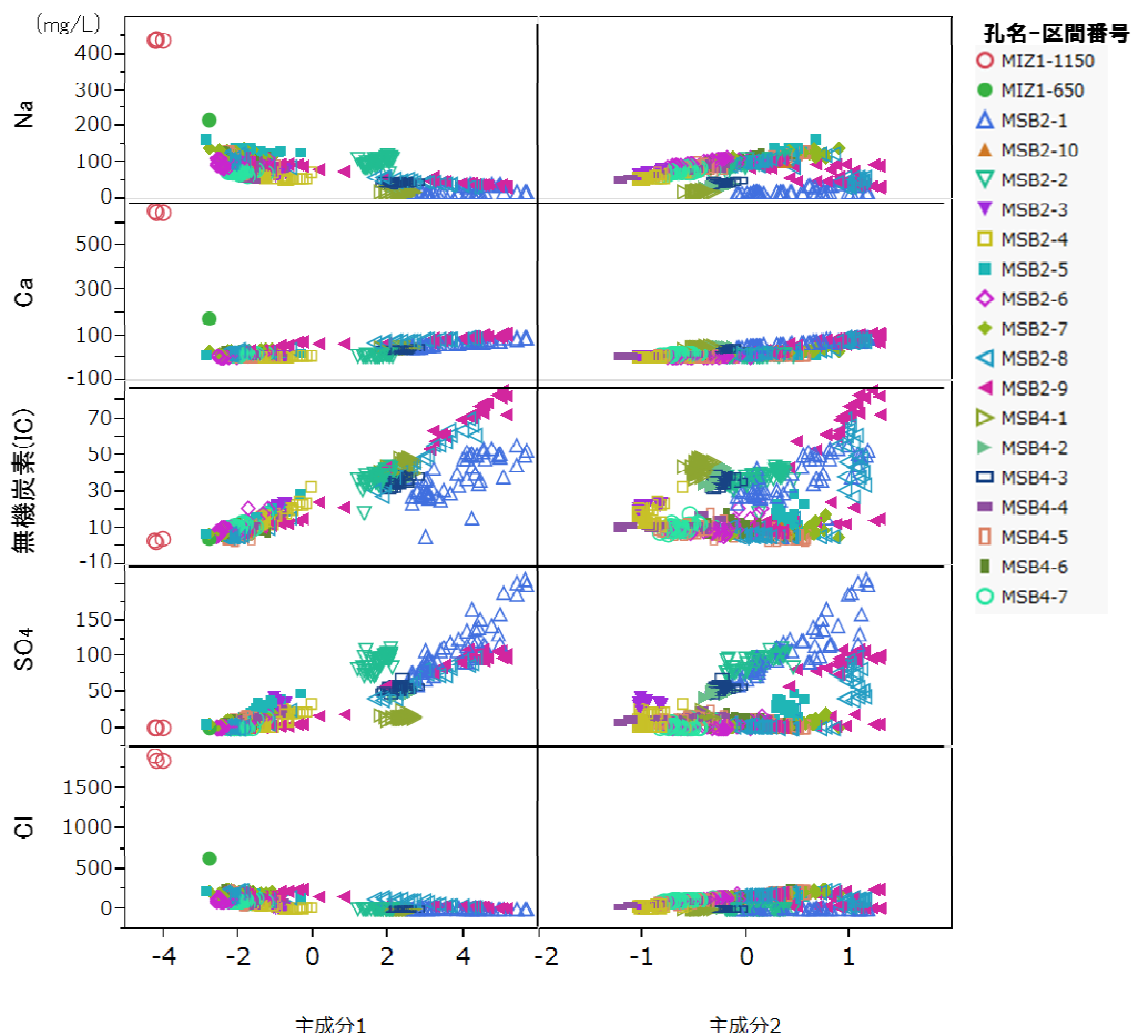


図 5.1.3 地上の観測孔における地下水の水質に関する主成分値と主要成分濃度の相関

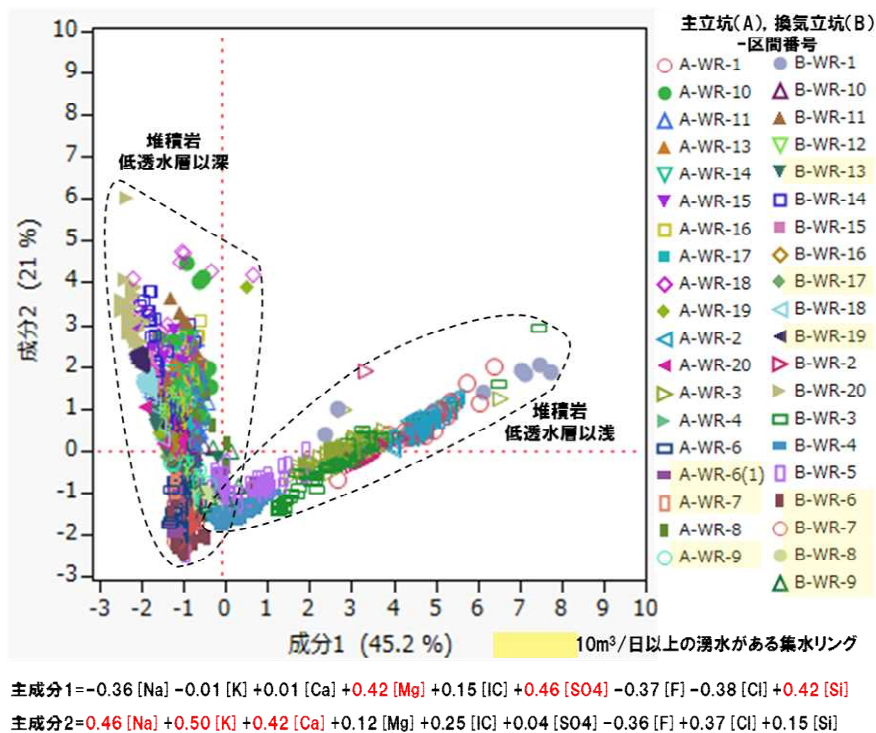


図 5. 1. 4 集水リングから採水された地下水の水質経時変化に関わる主成分分析

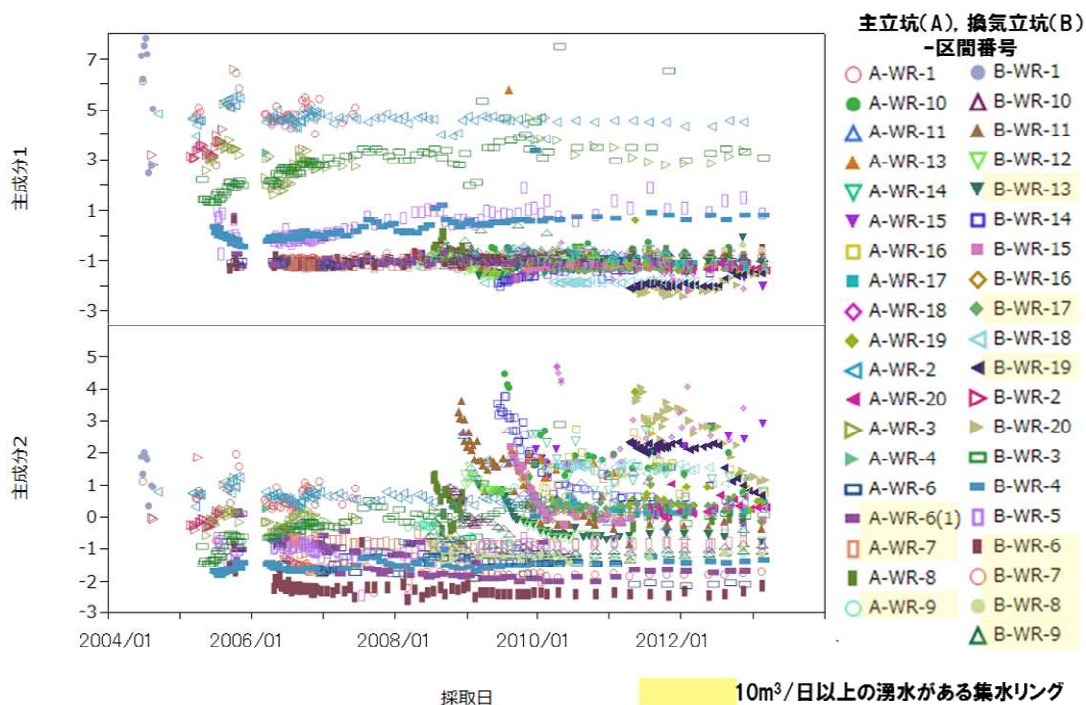


図 5. 1. 5 集水リングから採水された地下水の主成分値の経時変化

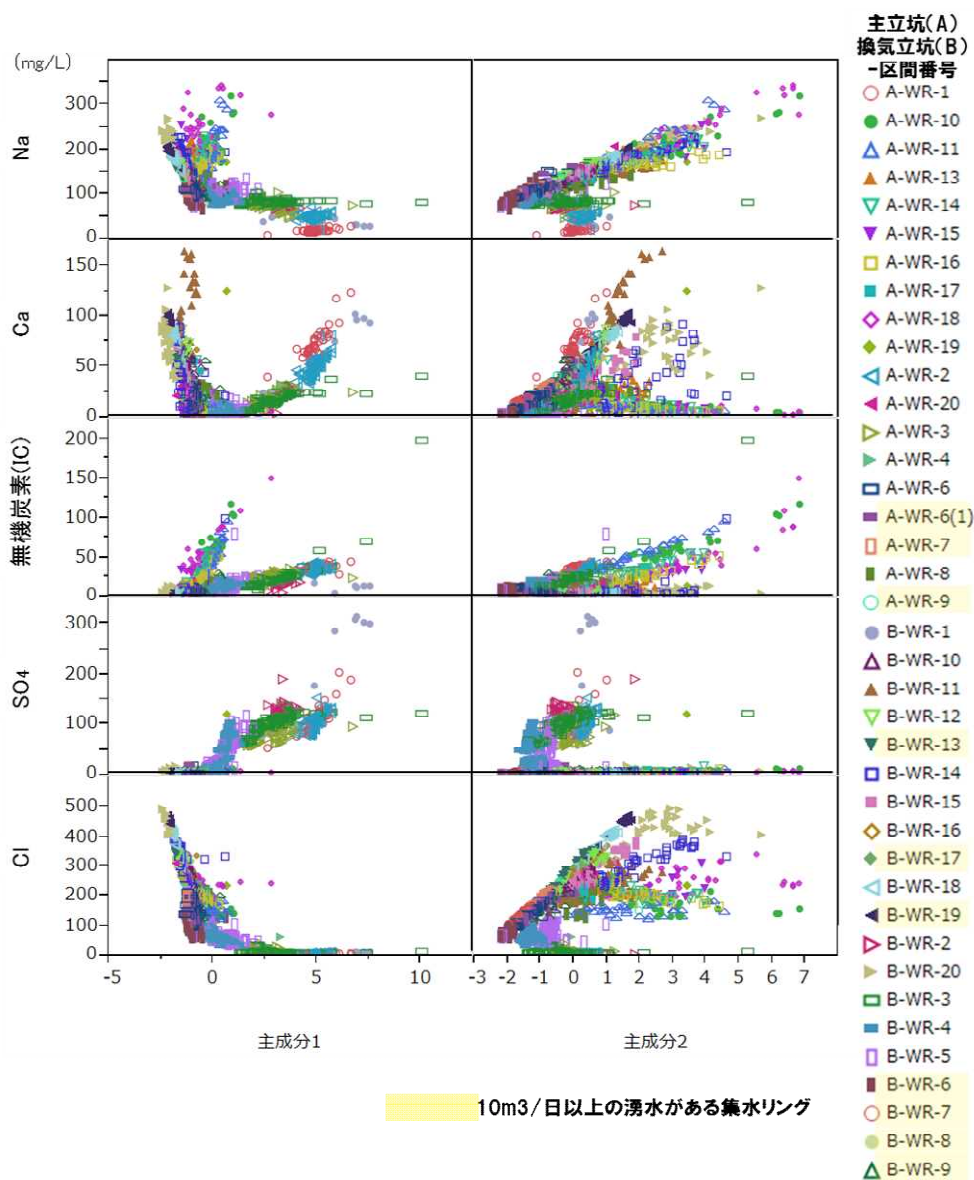


図 5.1.6 集水リングから採水された地下水の水質に関する主成分値と溶存成分濃度の相関

次に、坑内のボーリング孔で得られた地下水の主成分分析結果を図 5.1.7 に示す。各観測区間で得られた地下水の水質は、主に Na, Ca, Cl 濃度の増減を反映する主成分 1 と主に Mg, IC, SO₄, F 濃度の増減を反映する主成分 2 で表現することができる。各データは、塩分濃度の高い（主成分 1 の値が相対的に高い）地下水と塩分濃度の低い（主成分 1 の値が相対的に低い）地下水の混合を示唆している。

主成分値の経時変化を図 5.1.8 に示す。深度 200m と 300m 予備ステージから掘削された観測孔（07MI07, 09MI20 号孔）では、主成分 1 の値が時間とともに低下しており、立坑の掘削初期に当該深度付近に供給された花崗岩深部の塩分濃度の高い地下水が、花崗岩浅部の塩分濃度の低い地下水に入れ替わりつつあることが判る。深度 400m の 10MI26 号孔では、区間 6 の主成分 1 の値が、2012 年 6 月頃より急激に低下しており、先に述べた集水リング（B-WR-19, 20）での変

化と同様の変化が認められた。なお、研究坑道に近い区間（区間 6 側）ほど、研究坑道掘削時の塩分濃度の増加が大きく、研究坑道掘削の影響が大きいと考えられる。

図 5.1.8 に示されるように、09MI20 号孔の区間 1, 2, 3 の主成分 1 の値は 07MI07 号孔の区間 1 と同様の値となっており、09MI20 号孔区間 4, 5, 6 においても、徐々に 07MI07 号孔の値に近づきつつある。これらのことから、主立坑断層の換気立坑側の領域では深度 300m 付近まで深度 200m 付近と同様の水質の地下水が浸透している可能性がある。10MI26 号孔では、区間 4, 5 が 07MI07 号孔区間 1 の値に近づきつつある。一方で、09MI21 号孔では以上のような経時変化は認められず、区間 3 のみ主成分値（塩分濃度）が増加する傾向がある。これらのことから、換気立坑側の排水に伴う動水勾配が大きな領域においては、当初、深部からの地下水の引き込みが大きいものの、研究坑道の掘削工事が深部へ進むにしたがって、施設全体では地下水位の低下とともに花崗岩浅部の地下水が徐々に深部に移動していることが主成分分析からも明確になった。

主成分値と溶存成分濃度の相関を図 5.1.9 に示す。例えば、深度 300m の 09MI20 号孔周辺においては、主成分 1 の経時変化率に基づくと、今後、数年～数十年後には深度 200m 付近の地下水と同等の水質（深部地下水に比べ Na, Ca, Cl 濃度が低く、SO₄ や IC に富む組成）に変化すると予測できる。ただし、この予測は、現状の研究坑道レイアウトおよび地下水排水量が継続した場合の見積もりであり、研究坑道掘削が更に進展した場合、排水量が増加し、より早期に深部地下水が浅部地下水と置換する可能性がある。

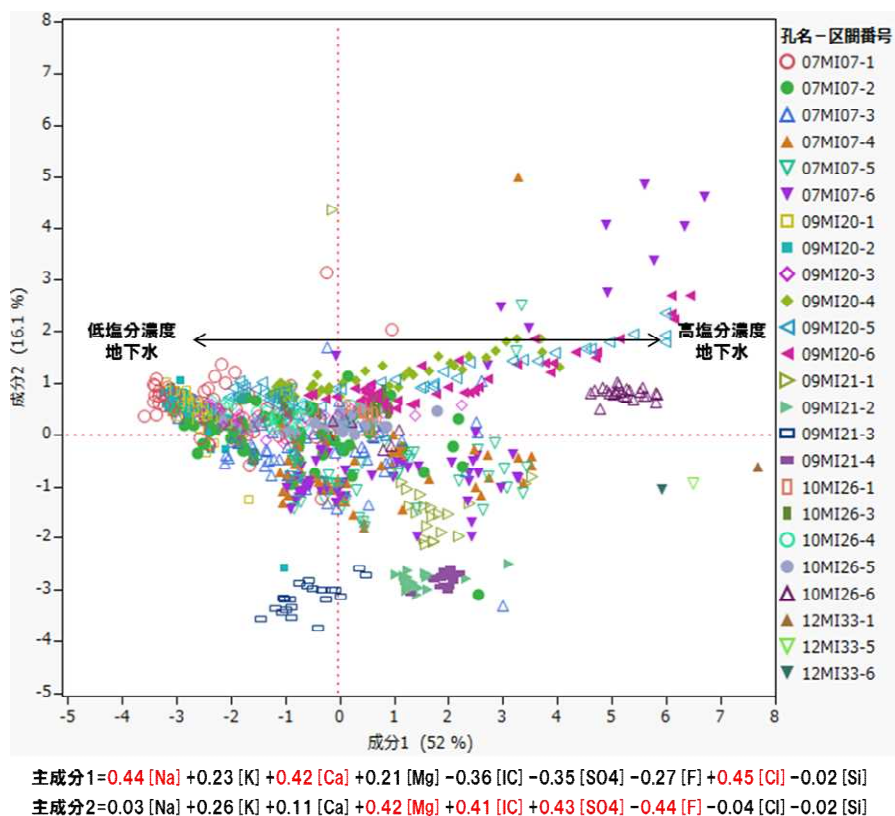


図 5.1.7 研究坑道の観測孔における地下水の水質経時変化に関わる主成分分析

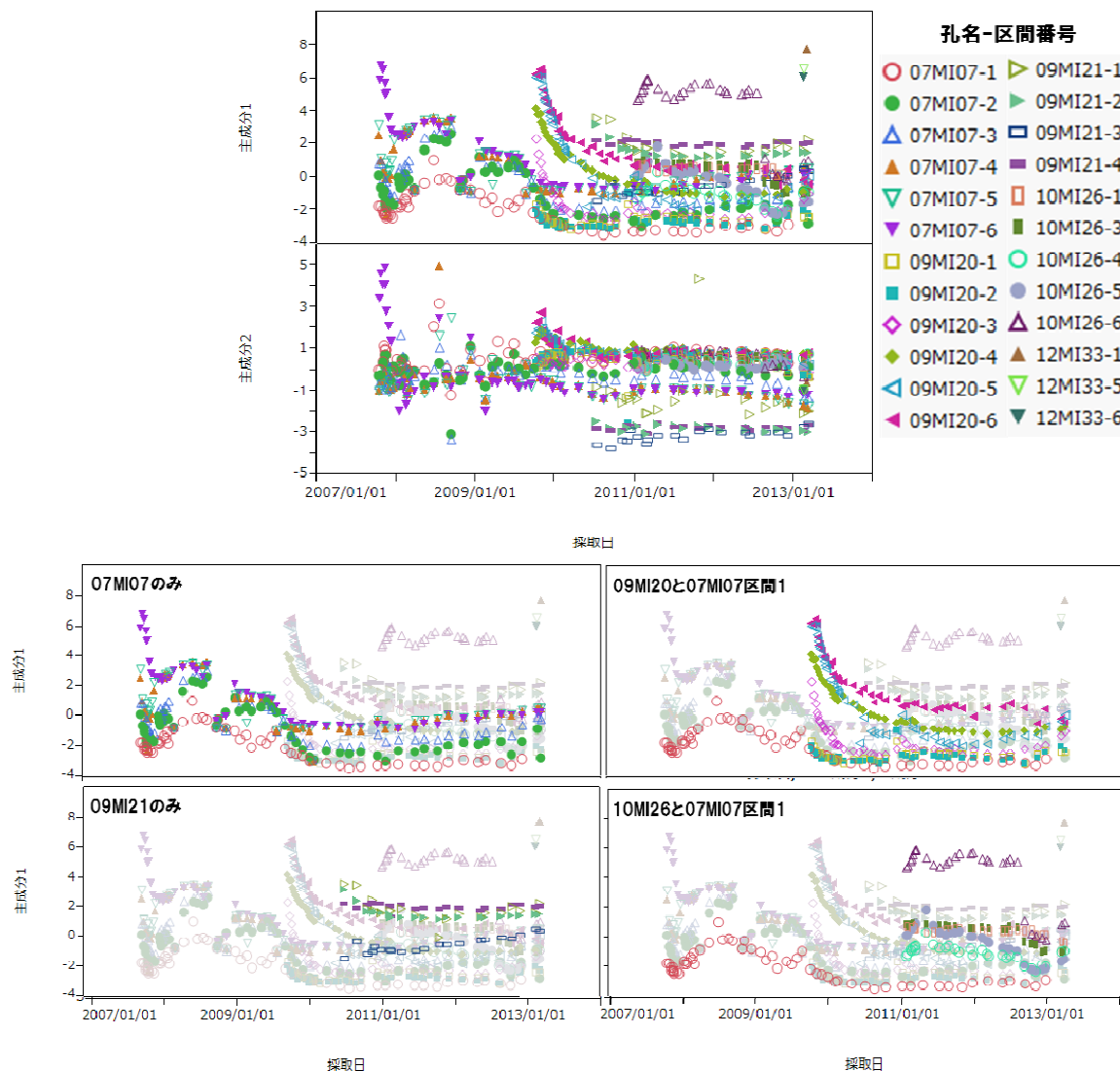


図 5.1.8 坑内観測孔における地下水の水質に関する主成分値の経時変化

研究所周辺の深度 500m 付近までの地下水は、研究坑道の存在により今後数十年の間に花崗岩浅部の地下水に置換されていく可能性があり、その時の水質は、主成分値の経時変化と水質成分の相関に基づいて一定の幅を持って予測することができる。現在の花崗岩深部の地下水は Na, Ca, Cl 濃度に富む水質であるが、将来はそれらが減少し、IC, SO₄, F の濃度が相対的に増加すると推察される。

このように予想された将来の水質は、研究所を閉鎖する時点の地球化学特性の初期値と位置付けることができ、研究坑道再冠水に伴う水質回復の予測解析において初期条件として活用することができる。

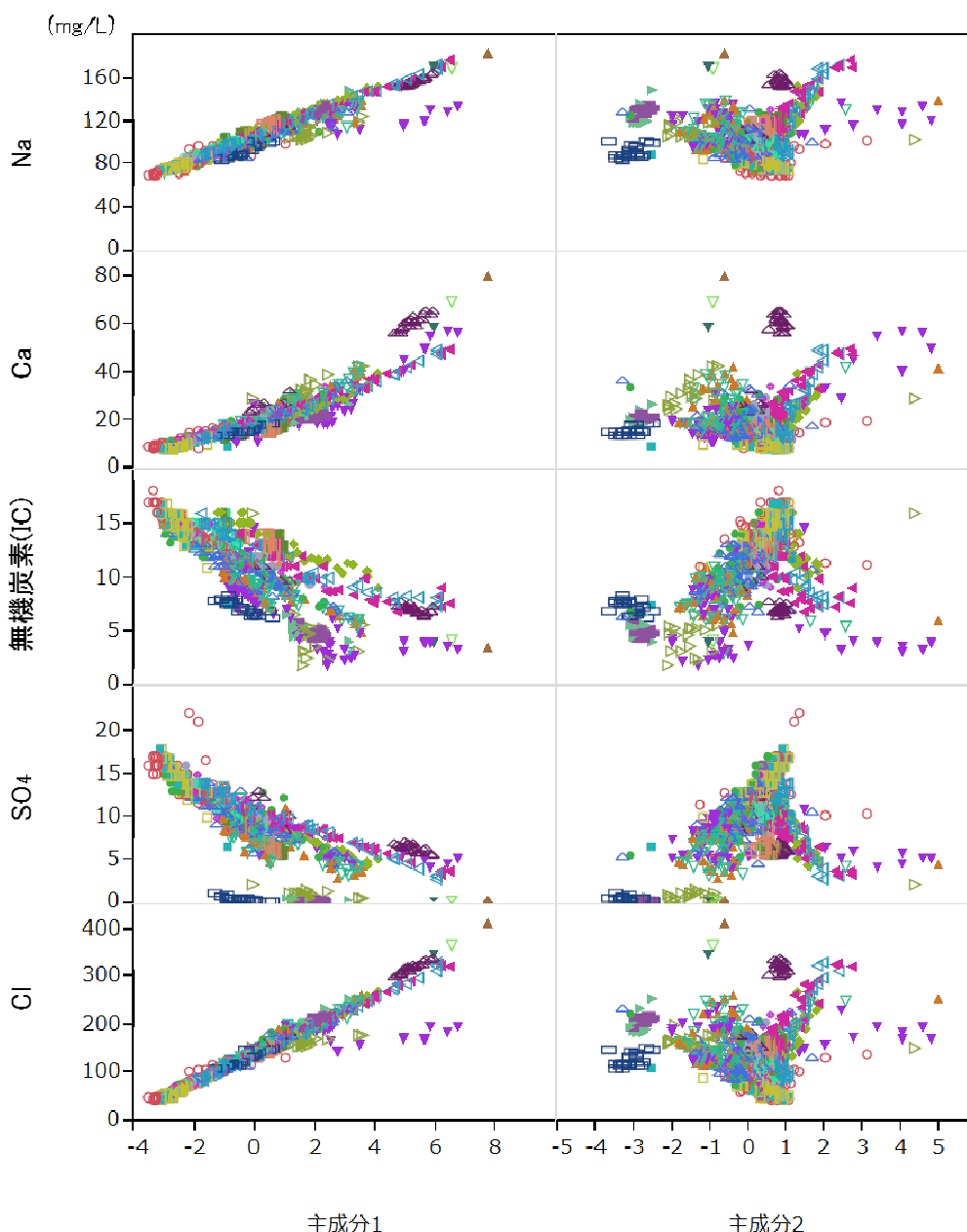


図 5.1.9 地下水の水質に関する主成分値と主要溶存成分濃度の相関

5.2 pH, 酸化還元状態について

前述の予測では、将来的に研究所周辺の地下水は、花崗岩浅部からの地下水の涵養により相対的に塩分濃度が低く SO₄, IC 濃度が高い水質に変化していくことになる。地下深部の pH や酸化還元電位に関わる主要な緩衝反応は、炭酸塩鉱物の溶解・沈殿, 含鉄・含硫黄鉱物の溶解・沈殿であり²⁸⁾, 将来の pH, 酸化還元電位の変化は、浅部から浸透する相対的に酸化的な地下水と地下水流動経路における pH・酸化還元緩衝鉱物との間の緩衝反応に依存する。岩盤中に緩衝鉱物が十分に存在する場合は、図 5.1.8 に示した水質変動に応じて、4.1 に示した反応式に基づいて酸化還元電位を推測することができる。深度 200~400m の酸化還元電位に関わる主要反応は、

- 6) $\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ + e^- = \text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$ ($E_0 = 0.95 \text{ V}$)
 7) $\text{Fe}(\text{OH})_3 (\text{am}) + 3\text{H}^+ + e^- = \text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$ ($E_0 = 0.975 \text{ V}$)
 8) $\text{FeCO}_3 + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{H}^+ + \text{HCO}_3^- + e^-$ ($E_0 = 1.078 \text{ V}$)

深度 400m 以深では、

- 3) $\text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+ + 14e^- = \text{FeS}_2 (\text{Pyrite}) + 8\text{H}_2\text{O}$ ($E_0 = 0.362 \text{ V}$)

であり、将来の二価鉄イオン、炭酸水素イオン、硫酸イオン濃度を代入することで酸化還元電位を推定することができる。これらの将来的な値について、pH、二価鉄イオンは主成分分析において主成分値と相関がないことから、今後深部に涵養する深度 200m 付近 (07MI07 号孔区間 1) の観測値で代用し、

pH : 約 7.5~8.5

Fe^{2+} : 0~3.6 μM (0~0.2mg/L)

HCO_3^- : 1.3~1.7mM (IC : 15~20mg/L から換算)

SO_4^{2-} : 0.17~0.21mM (SO_4^{2-} : 15~20mg/L から換算)

とすると、酸化還元電位は、深度 200~400m で約-230~-10mV もしくは深度 400m で約-250~-180 mV と見積もることができる。

しかしながら、岩盤中の緩衝鉱物量が、浅部からの長期的な地下水の涵養により溶脱・消失してしまう場合や、研究坑道からの地下水排水に伴う浅部地下水の涵養速度が水-鉱物反応速度よりも早い場合は、緩衝鉱物の水-鉱物反応による化学条件の維持は期待できない。そのため、深部の化学条件が浅部から涵養する地下水の化学条件に置き換わることになる。

研究所においては、研究坑道掘削後数年を経て前述のように深度 400m において、地表水の指標となるフロンが検出されることから、水-鉱物反応速度よりも研究坑道からの地下水排水に伴う浅部地下水の涵養速度の方が早いと考えられる。地下水に含まれるフロンの濃度から、深度 400m の地下水に混合した表層水の割合は研究坑道掘削後 3 年で最大 6%程度と見積もられ、今後数十年間、現在と同様に排水を継続した場合、研究坑道周辺は酸化的な化学条件になる可能性が高い。また、地下水の流動経路となる割れ目表面には水酸化鉄、黄鉄鉱を普遍的に観察することができるが、浅部からの長期的な地下水の涵養によりこれらの還元環境の維持に関与する鉱物が溶脱・消失してしまう場合は、研究坑道閉鎖後も酸化的な地下水が周辺に残留する可能性がある。

酸化的な地下水が周辺に残留した場合、研究坑道閉鎖後に早期に還元環境に回復させるためには、研究所建設、維持管理時に浸透した相対的に浅部の地下水を研究坑道閉鎖時に、より還元状態にある深部の地下水に入れ替える必要がある。そのためには、深度毎の研究坑道への湧水量、水質を把握した上で、深部の研究坑道から還元的な地下水を利用して冠水させるための研究坑道閉鎖手順を確認しておく必要がある。

5.3 地球化学特性の将来変化と地下施設の閉鎖に関わる汎用的な知見

- 地下施設周辺の化学条件の変化を避けるためには、地下施設の建設、維持管理期間中の地下水の排水を抑制し、酸化的地下水が深部に涵養し施設周辺が酸化的になる前に坑道を閉鎖し、低下した地下水頭を回復させる必要がある。地下水の排水を抑制するためには、坑道掘削時に壁面を止水しながら施設を建設する必要がある。しかしながら、坑道への地下水湧水を完全に止

水すると坑道壁面に全水圧がかかり突発湧水を招きやすくなるなどの問題があり、安全管理上、坑道への湧水を完全止水することは困難である。したがって、坑道への湧水を可能な限り低減するとともに湧水による周辺の擾乱を低減するためには、割れ目が少なく低透水性の岩盤の分布を地上からの調査時に評価し、坑道のレイアウト計画に反映させることが望ましい。

- 一方で、低透水性の岩盤では、施設の建設、維持管理期間中に坑道の周囲に形成される不飽和領域が飽和状態に戻らず局所的に残留し、坑道周辺の地質環境特性が不均質化する可能性もある。そのため、坑道閉鎖時に不飽和状態の回復プロセスについて留意する必要がある。
- 高透水性で擾乱が早い環境条件は逆に地質環境特性の回復も早いという見方もでき、この場合は、酸化地下水を地表に排水しながら深部の還元的地下水で坑道周辺を満たし、化学環境を回復させるといった施設閉鎖方法を念頭におく必要がある。

6. 第2期中期計画において得られた調査・観測・解析に関わる留意点，汎用的知見

6.1 地上からの調査技術（第1段階）へのフィードバック

- ・ 第1段階取りまとめ³⁾に述べられている調査技術により，地下水水質の空間分布を評価することが可能である。一方で，物理化学パラメータについては，予察的な調査結果を坑道からの調査により補完する必要がある。
- ・ 第1段階では，ボーリング調査で遭遇する地層毎の透水性やその空間分布（層厚や広がり）に基づき，地下施設による周辺環境の擾乱の範囲や程度を事前評価する事が非常に重要である。建設中，維持管理中の影響評価においては，透水係数の異なる地質構造（断層，割れ目帯，礫岩層，泥岩層など）毎の水圧・水質モニタリングが有効であり，施設建設に伴う水理化学的擾乱と変化の程度を岩層毎に評価することで影響範囲をより正確に理解できる。そのため，ボーリング調査で，地下施設建設候補地に達する可能性のある地質構造に遭遇したボーリング孔の中で長期利用が可能なボーリング孔については，地質環境調査後，地下施設建設，維持管理，閉鎖過程の地質環境条件をモニタリングするための観測孔としての活用を念頭においた調査計画を立案することが重要である。

6.2 地下施設建設中の調査（第2段階）の留意点

- ・ 天然バリアとして岩盤の能力を有効利用するためには施設の建設，維持管理期間中に，可能な限り元の水理化学的状態を乱さないように施工，維持管理を行なうことが重要である。そのため，地下施設への排水路となり得る高透水性の地層について事前にその分布を予測した上で施工時に止水を行ない，擾乱の程度を最低限に留めることが効果的であると考えられる。
- ・ 割れ目が多い岩盤における地下施設建設では，施設周辺の複数観測点における長期的な水質データの取得，多変量解析（主成分分析）による経時変化プロセスの把握，経時変化量に基づく将来予測により，地下施設建設，維持管理時の中長期的な水質変化を推察できる。
- ・ 多変量解析（主成分分析）については，①水質変化に対する寄与が大きい端成分地下水の明確化，②当該端成分地下水の寄与割合の経時変化に基づく変化速度の見積もり，③将来の地下水水質の外挿，という手順で施設建設，維持管理中の将来的な地下水水質を推定することが可能である。ただし，この解析手法は，水質変化が異なる水質の混合状態の変化に起因している場合にのみ有効である。また，坑道閉鎖以降の長期的な水質変化については，地下水流動が滞留し混合プロセスの前提が成り立たなくなるとともに，閉鎖系での水-鉱物-微生物反応が主要なプロセスとなる可能性がある。
- ・ 地下施設の閉鎖後，施設建設前の水理化学的状態に戻り得るか否かについては，施設建設中や維持管理中に大規模な冠水試験を行ない，周辺モニタリング孔で水圧，水質を観察することで知見を得ることができると考えられる。モニタリングは，地下水涵養域から流出域までを含む広範囲な領域で行うことが効果的である。ただし，期間の短い冠水試験では，低透水性層等で維持管理期間の数十年間に時間をかけて起こる水理化学的変化について評価できない可能性もある。

7. 今後の指針

第2期中期計画における調査研究では、地上からの調査および深度500mまでの研究坑道掘削、維持管理中の約10年間にわたる連続観測に基づいて、施設建設に伴う地球化学特性の変化プロセスを理解するとともに、今後数十年間、現在と同様の条件で維持管理した場合に起こり得る地球化学特性の将来変化について推測した。これらの知見および活用した調査解析技術は、主に大規模地下施設の建設・維持管理に伴う数年～数十年オーダーの人為的变化に関わるものであり、大規模地下施設の設計のみならず、維持管理期間中の表層水系への排水の長期管理などの社会環境管理にも反映可能なものである。

一方で、地層処分に関わる安全評価においては、そのシナリオで想定しているオーバーパックの腐食・損傷後（約千年後以降）の地下水の地球化学特性に基づき放射性核種の溶解度を計算するため、約千年後以降の地球化学特性を推測する技術が必要となる。

一般的に地下施設を建設する前の地下水の地球化学特性は、地下水流動（滞留）の時間スケール内における水-鉱物反応や水質の異なる地下水の混合プロセスによって形成されており、地下水の滞留時間と安全評価の時間スケールを比較しながら、将来の長期的な地球化学特性を推察することができる。このような解析の基本的考え方は、過去の天然現象と地球化学特性の相互関連性の分析に基づいて将来の地球化学特性の変動幅を外挿予測するものである²⁹⁾。

しかしながら、例えばEDZにおける人工材料の持ち込みや新たな地下水流動経路の形成など長期的に形成されたシステム自体の改変や、EdZにおける人為的な地下水水質分布の改変といった、大規模地下施設の建設・維持管理・閉鎖に関わる変化については、先に述べたように施設維持管理期間中の数十年程度の時間スケールの水質変化を外挿予測するための知見（経験）が得られているに過ぎない。特に、研究坑道閉鎖後の地球化学特性の変化に関わる現象については観察事例も極端に少ない。以上のことから、今後の重要な研究課題として以下の点が挙げられる。

- ・ 研究坑道閉鎖後のEDZ, EdZの地球化学特性の経時変化の観察事例を蓄積すること
 - ・ 観察事例に基づいて研究坑道閉鎖に伴って一般的に起こり得る現象を明確にすること
 - ・ 研究坑道閉鎖後の人為由来現象の収束に要する時間スケールと収束時の地球化学特性を推測する技術を構築すること
 - ・ 過去の天然現象と地球化学特性の相互関連性の分析に基づいて外挿予測される千年後の地球化学特性の変動幅（文献調査、ボーリング調査の情報に基づいて推測される。地下施設がない条件での変動幅に相当）と上記予測を比較し、より変動幅の大きな条件で安全評価を行う手順（考え方）を提示すること
 - ・ 人為由来現象と天然現象の相互関連性を時間断面（千年後、1万年後、10万年後）毎に提示し、千年後以降の地球化学特性変遷に関わるシナリオを提示する技術を構築すること
- 今後の研究計画においては、これらの課題に関わる調査研究を重点的に行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 鶴田忠彦, 藤田有二, 鏡頭正, 彌榮英樹, 富士代秀之: 広域地下水流動研究におけるボーリング調査(DH-15号孔), JNC TN7400 2005-025, 2005.
- 2) Iwatsuki, T., Furue, R., Mie, H., Ioka, S., Mizuno, T.: Hydrochemical baseline condition of groundwater at the Mizunami underground research laboratory (MIU). *Applied Geochemistry*, 20, 2005, pp.2283-2302.
- 3) 三枝博光, 瀬野康弘, 中間茂雄, 鶴田忠彦, 岩月輝希, 天野健治, 竹内竜史, 松岡稔幸, 尾上博則, 水野崇, 大山卓也, 濱克宏, 佐藤稔紀, 久慈雅栄, 黒田英高, 仙波毅, 内田雅大, 杉原弘造, 坂巻昌工: 超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第1段階)研究成果報告書, JAEA-Research 2007-043, 2007.
- 4) 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—総論レポート, JNC TN1400 99-020, 1999.
- 5) SKB: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Main report of the SR-Site project. Vol II, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2011.
- 6) Tsang, Chin-Fu, Bernier, F. and Davies, C.: Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays - in the context of radioactive waste disposal, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 42, 2005, pp.109-125.
- 7) Implementing Geological Disposal - Technology Platform : <http://www.igdtp.eu/> (平成25年4月1日確認)
- 8) Alexander, W.R. and Milodowski, A.E.: Cyprus Natural Analogue Project (CNAP) Phase II. Final Report, Posiva Working Report 2011-08, 2011.
- 9) Gascoyne, M., Kotzer, T. : Isotopic methods in hydrogeology and their application to the underground research laboratory, Manitoba. AECL-11370, 1995.
- 10) Dixon, D.A., Martino, J.B., Onagi, D.P.: Enhanced Sealing Project (ESP): Design, Construction and Instrumentation Plan, APM-REP-01601-0001, Atomic Energy of Canada Limited, 2009.
- 11) Holowick, B., Dixon, D.A., Martino, J.B.: Enhanced Sealing Project (ESP): Project Status and Data Report for Period Ending 31 December 2010, APM-REP-01601-0004, Atomic Energy of Canada Limited, 2011.
- 12) 動力炉・核燃料開発事業団: 再冠水に関する原位置試験研究(その2), JNC TJ1400 99-038, 1999.
- 13) 川本康司, 窪島光志, 石橋正祐紀, 鶴田忠彦, 笹尾英嗣, 池田幸喜, 見掛信一郎, 原郁夫, 山本勝: 超深地層研究所計画瑞浪超深地層研究所 研究坑道の壁面調査データ集, JAEA-Data/Code 2012-009, 2012.
- 14) 岩月輝希, 天野由記, 井岡聖一郎, 三枝博光, 竹内竜二: 大規模地下施設の建設に伴う周辺地下水環境の変化, *原子力学会誌*, 6, 2007, pp.73-84.
- 15) 水野崇, 青才大介, 新宮信也, 萩原大樹, 山本祐平, 福田朱里: 瑞浪超深地層研究所の建設に伴う地下水水質の変化, *原子力学会誌*, 12, 2013, pp.89-102.

- 16) 時枝隆之, 井上 (吉川) 久幸: 大気および海水中のクロロフルオロカーボン類の精密測定と気象研究所クロロフルオロカーボン類標準ガスの確立, 気象研究所, ISSN 0386-4049, 2004
- 17) 日本原子力研究開発機構: 平成23年度地層処分技術調査等委託費 (高レベル放射性廃棄物処分関連: 地下坑道施工技術高度化開発) 報告書, 2012.
- 18) Molinero, J., Arcos, D.: Evaluation of low-pH cement degradation in tunnel plugs and bottom plate systems in the frame of SR-Site. SKB TR-10-62. Svensk Kärnbränslehantering AB, 2010.
- 19) 日本原子力研究開発機構: 平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 (高レベル放射性廃棄物処分関連: 地下坑道施工技術高度化開発) 報告書, 2008.
- 20) 日本原子力研究開発機構: 平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 (高レベル放射性廃棄物処分関連: 地下坑道施工技術高度化開発) 報告書, 2009.
- 21) 日本原子力研究開発機構: 平成 21 年度地層処分技術調査等委託費 (高レベル放射性廃棄物処分関連: 地下坑道施工技術高度化開発) 報告書, 2010.
- 22) 日本原子力研究開発機構: 平成 22 年度地層処分技術調査等委託費 (高レベル放射性廃棄物処分関連: 地下坑道施工技術高度化開発) 報告書, 2011.
- 23) Sugiyama, D., and Fujita, T.: A thermodynamic model of dissolution and precipitation of calcium silicate hydrates. *Cement and Concrete Research*, 36(2), 2006, pp.227-237.
- 24) Drever, J. I.: *The geochemistry of natural waters* 2nd Edition. Prentice Hall, Inc, 1988.
- 25) Stumm, W. & Morgan, J.J.: *Aquatic Chemistry* 3rd edn. John Wiley & Sons, New York, 1996.
- 26) Langmuir, D.: *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1997.
- 27) 井岡聖一郎, 古江良治, 岩月輝希: 深層ボーリング孔を用いた岩盤中の地下水の採取方法—地下水の酸化還元状態の把握のために—, *日本水文科学会誌*, 36, 2006, pp.181-190.
- 28) 核燃料サイクル開発機構: 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 - 平成 17 年取りまとめ - 分冊 1 地質環境調査技術の開発, JNC TN 1400 2005-014, 2005.
- 29) 岩月輝希, 水野崇, 國丸貴紀, 天野由記, 松崎達二, 仙波毅: 地層処分事業に関わる地球化学分野の技術者が継承すべき知見のエキスパート化—文献調査から精密調査段階における地球化学解析手順について—, *原子力バックエンド研究*, 19, 2012, pp.51-63.

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
物質の量	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 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(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
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
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
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	Vs
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg
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 ^(g)	Sv	J/kg
酸素活性化	カタール	kat	s ⁻¹ 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間には同一である。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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s
表面張力	ニュートンメートル	N m
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s
角加減速	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³
電表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²
誘電率	ファラド毎メートル	F/m
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr
放射線輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ²⁴	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=60s
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/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ 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 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ 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 ¹¹ 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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
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	
デジベル	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	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 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 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ 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=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

