



緩衝材の浸食現象評価

－ ベントナイトコロイドの生成挙動 －

Erosion Phenomenon Evaluation of Bentonite Buffer Material
- Generation Behavior of Bentonite Colloid -

松本 一浩 飯島 和毅 棚井 憲治

Kazuhiro MATSUMOTO, Kazuki IJIMA and Kenji TANAI

地層処分研究開発部門

ニアフィールド研究グループ

Near-Field Research Group

Geological Isolation Research and Development Directorate

February 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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, 2009

緩衝材の浸食現象評価

ー ベントナイトコロイドの生成挙動 ー

日本原子力研究開発機構

地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

松本 一浩^{*}, 飯島 和毅, 棚井 憲治

(2008年12月12日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、人工バリアシステム要素のひとつである緩衝材には、放射性核種の移行遅延等の機能が期待される。地層処分システムの安全評価における地下水シナリオでは、オーバーパックが破損した後、ガラス固化体と地下水が接触することにより、放射性核種が溶出し緩衝材中を移行することが想定される。緩衝材外側に到達した核種は、緩衝材を起源として生成されるベントナイトコロイドに収着し、擬似コロイドを形成することにより、核種の移行を助長することが考えられる。このため、コロイド影響に関して定量的な評価を行い、安全評価における不確実を低減させることが必要である。

本研究では、緩衝材を起源とするベントナイトコロイドの生成挙動について、地下水の流れ場を模擬した系で緩衝材の浸食実験を行い、流速とコロイド生成量との関係を把握するとともに、緩衝材起源のコロイドの生成メカニズムについて考察した。

その結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 蒸留水を用いた実験によって、時間と浸食コロイド濃度の関係を定量的に測定した結果、コロイド濃度は 7.2×10^{-7} m/s の流速条件において、約 1ppm 生成する可能性が示唆された。
- 2) コロイドの粒子径は、流速の低下にともなって小さくなる傾向が得られ、生成されるコロイド粒径には流速依存性があることが分かった。
- 3) 単位断面積と単位時間あたりに生成されるコロイド量を評価した結果、流速の低下にともなって、生成されるコロイド量も減少する傾向にあることが分かった。
- 4) 試験後の試料について、SEM-EDX と XRF により各部位の元素分析を行い、その組成状態について検討を行った結果、供試体側よりベントナイトゲルの先端部にかけて、「ベントナイトの組成が変化していない領域」、「スメクタイトが減少し他の鉱物が留まる領域」、「主にスメクタイトで構成される領域」という組成分布を形成することが推定された。

核燃料サイクル工学研究所（駐在） : 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

※ 技術開発協力員

Erosion Phenomenon Evaluation of Bentonite Buffer Material
— Generation Behavior of Bentonite Colloid —

Kazuhiro MATSUMOTO*, Kazuki IJIMA and Kenji TANAI

Geological Isolation Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 12, 2008)

In the geological disposal system of High Level Radioactive Waste (HLW), the bentonite buffer, which is composed of the engineered barriers system, is expected to play important roles for the post-closure safety such as retardation of radionuclide migration. In the groundwater scenario of safety assessment, it is assumed that a canister of vitrified waste makes contact with groundwater after an overpack is breached, and thereby radionuclides in waste tend to dissolve in groundwater and migrate through the bentonite buffer. It is also concerned that colloids are generated from the bentonite buffer and sorb radionuclides which are released from the buffer. This consequently allows the radionuclides to be more mobile in the geosphere because of forming stable pseudo-colloids.

In this study, experimental studies on bentonite erosion were carried out simulating a groundwater flow system. The generation rate of bentonite colloid from the buffer was also discussed.

Results obtained from the studies are summarized as follows:

- 1) In case of distilled flow velocity condition (7.2×10^{-7} m/s), measured concentration of bentonite colloid is around 1ppm.
- 2) The particle size of bentonite colloid decreases with decreasing flow velocity.
- 3) The colloid generation rate per unit cross-sectional area decreases with decreasing flow velocity.
- 4) Elemental composition for each part of the bentonite sample was carried out by SEM-EDX and XRF. As a result, three regions with different mineral composition are considered to be formed from original position to front line surface of extruded bentonite gel as follows: a) the region keeping original mineral composition, b) the region with lower smectite content, and c) the region mainly composed by smectite.

Keywords : Bentonite, Buffer Material, Colloid, Erosion

※ Collaborating Engineer

目 次

| | |
|--------------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 試験方法 | 2 |
| 2.1 試験装置概要および方法 | 2 |
| 2.2 試験条件 | 3 |
| 3. 試験結果 | 4 |
| 3.1 侵入距離 | 4 |
| 3.2 亀裂内流速 | 5 |
| 3.3 排水液の分析 | 6 |
| 3.3.1 コロイド濃度の推定 | 7 |
| 3.3.2 コロイド粒子径とゼータ電位 | 13 |
| 3.3.3 pH と Na イオン濃度 | 14 |
| 4. 流速と浸食コロイド量との関係 | 16 |
| 5. 試験後試料の分析 | 19 |
| 5.1 解体および分析試料の採取 | 19 |
| 5.2 元素分析 | 25 |
| 5.2.1 蛍光 X 線分析 (XRF) | 25 |
| 5.2.2 エネルギー分散型 X 線分析 (SEM-EDX) | 39 |
| 5.3 元素分析結果の整理 | 55 |
| 5.4 考察 | 60 |
| 6. おわりに | 62 |
| 参考文献 | 63 |

Contents

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Examination | 2 |
| 2.1 Equipment of examination | 2 |
| 2.2 Test condition | 3 |
| 3. Examination result | 4 |
| 3.1 Invasion distance | 4 |
| 3.2 Flow velocity | 5 |
| 3.3 Analysis | 6 |
| 3.3.1 Erosion colloid | 7 |
| 3.3.2 Colloid particle diameter and zeta potential | 13 |
| 3.3.3 pH and Na ionic density | 14 |
| 4. Erosion amount of colloid | 16 |
| 5. Analysis of bentonite sample | 19 |
| 5.1 Collection of bentonite sample | 19 |
| 5.2 Element analysis | 25 |
| 5.2.1 X-ray Fluorescence Analysis (XRF) | 25 |
| 5.2.2 Energy Dispersive X-ray Spectroscopy Analysis (SEM-EDX) | 39 |
| 5.3 Result | 55 |
| 5.4 Consideration | 60 |
| 6. Conclusions | 62 |
| Reference | 63 |

目 次

| | | |
|---------|--------------------------|----|
| 図 2.1 | 流水試験装置概略図 | 2 |
| 図 3.1 | 侵入形状および侵入距離測定箇所 | 4 |
| 図 3.2 | 経過時間と亀裂内流量の経時変化 | 5 |
| 図 3.3 | 元素分析フロー | 7 |
| 図 3.4 | モンモリロナイトの組成比 | 11 |
| 図 3.5 | 経過時間と浸食コロイド濃度の関係 | 13 |
| 図 3.6 | 平均粒径, ゼータ電位の経時変化 | 14 |
| 図 3.7 | pH, Na イオン濃度の経時変化 | 16 |
| 図 4.1 | 平均流速と浸食コロイド量の関係 | 17 |
| 図 4.2 | 平均流速と平均粒子径の関係 | 18 |
| 図 4.3 | 岩盤亀裂内におけるコロイド生成の模式図 | 18 |
| 図 5.1 | 実験中の観察写真 | 19 |
| 図 5.2 | 解体前 (亀裂水の排水) | 20 |
| 図 5.3 | 解体前 (恒温槽内における炉乾燥前) | 20 |
| 図 5.4 | 解体前 (恒温槽内における炉乾燥後) | 20 |
| 図 5.5 | 解体後 (上下部の試験容器の分離) | 21 |
| 図 5.6 | ベントナイトの採取風景 | 21 |
| 図 5.7.1 | 上部採取位置 | 22 |
| 図 5.7.2 | 下部採取位置 | 22 |
| 図 5.8 | 採取箇所分類 | 24 |
| 図 5.9 | XRF 測定フロー | 26 |
| 図 5.10 | プレス用ダイス | 26 |
| 図 5.11 | プレス後試料 | 26 |
| 図 5.12 | XRFホルダー | 26 |
| 図 5.13 | XRF チャート (標準試料: 5mg) | 27 |
| 図 5.14 | XRF チャート (標準試料: 10mg) | 27 |
| 図 5.15 | XRF チャート (標準試料: 20mg) | 28 |
| 図 5.16 | XRF チャート (標準試料: 50mg) | 28 |
| 図 5.17 | XRF チャート (標準試料: 100mg) | 29 |
| 図 5.18 | XRF チャート (標準試料: 200mg) | 29 |
| 図 5.19 | XRF による半定量結果 (標準試料: 元素) | 30 |
| 図 5.20 | XRF による半定量結果 (標準試料: 酸化物) | 30 |
| 図 5.21 | XRF チャート (本試料: a 域) | 33 |
| 図 5.22 | XRF チャート (本試料: b 域) | 34 |
| 図 5.23 | XRF チャート (本試料: c 域) | 34 |
| 図 5.24 | XRF チャート (本試料: d 域) | 35 |

| | | |
|--------|-----------------------------------|----|
| 図 5.25 | XRF チャート (本試料 : e 域) | 35 |
| 図 5.26 | XRF による半定量結果 (本試料 : 元素) | 36 |
| 図 5.27 | XRF による半定量結果 (本試料 : 酸化物) | 36 |
| 図 5.28 | SEM-EDX スペクトル (標準試料 : 40 倍視野) | 40 |
| 図 5.29 | SEM-EDX スペクトル (標準試料 : 100 倍視野) | 41 |
| 図 5.30 | SEM-EDX スペクトル (標準試料 : 200 倍視野) | 42 |
| 図 5.31 | SEM-EDX スペクトル (標準試料 : 500 倍視野) | 43 |
| 図 5.32 | SEM-EDX スペクトル (標準試料 : 1000 倍視野) | 44 |
| 図 5.33 | SEM-EDX スペクトル (標準試料 : 2000 倍視野) | 45 |
| 図 5.34 | SEM-EDX による半定量結果 (標準試料 : 元素) | 46 |
| 図 5.35 | SEM-EDX による半定量結果 (標準試料 : 酸化物) | 46 |
| 図 5.36 | SEM-EDX スペクトル (本試料 a 域 : 100 倍視野) | 48 |
| 図 5.37 | SEM-EDX スペクトル (本試料 b 域 : 100 倍視野) | 49 |
| 図 5.38 | SEM-EDX スペクトル (本試料 c 域 : 100 倍視野) | 50 |
| 図 5.39 | SEM-EDX スペクトル (本試料 d 域 : 100 倍視野) | 51 |
| 図 5.40 | SEM-EDX スペクトル (本試料 e 域 : 100 倍視野) | 52 |
| 図 5.41 | SEM-EDX による半定量結果 (本試料 : 元素) | 53 |
| 図 5.42 | SEM-EDX による半定量結果 (本試料 : 酸化物) | 53 |
| 図 5.43 | 測定位置における半定量値の推移 (元素) | 55 |
| 図 5.44 | 測定位置における半定量値の推移 (元素) | 56 |
| 図 5.45 | 測定位置における半定量値の推移 (元素) | 57 |
| 図 5.46 | 測定位置における半定量値の推移 (酸化物) | 57 |
| 図 5.47 | 測定位置における半定量値の推移 (酸化物) | 58 |
| 図 5.48 | 測定位置における半定量値の推移 (酸化物) | 59 |
| 図 5.49 | スメクタイト構成元素における含有率の傾向性 | 61 |

表 目 次

| | | |
|---------|-----------------------------|----|
| 表 2.1 | クニゲル V1 の鉱物組成 | 3 |
| 表 2.2 | 流水試験条件 | 3 |
| 表 3.1 | 侵入距離 | 4 |
| 表 3.2 | 排水液の分析項目および分析機器 | 6 |
| 表 3.3 | コロイド濃度分析測定条件（試験開始後 200 日まで） | 8 |
| 表 3.4 | コロイド濃度分析測定条件（試験開始後 200 日以降） | 8 |
| 表 3.5 | Si, Al, Mg 濃度の測定結果 | 9 |
| 表 3.6 | コロイド成分としての濃度および組成比 | 10 |
| 表 3.7 | コロイド濃度の推定結果 | 12 |
| 表 3.8 | コロイド粒径分布およびゼータ電位測定条件 | 13 |
| 表 3.9 | コロイド粒子の平均粒径およびゼータ電位の測定結果 | 14 |
| 表 3.10 | pH 測定条件 | 15 |
| 表 3.11 | イオンクロマトグラフ測定条件 | 15 |
| 表 3.12 | 排水液の pH および元素イオン濃度 | 15 |
| 表 4.1 | TEST CASE の凡例概要 | 17 |
| 表 5.1.1 | 解体後のベントナイトの採取結果（1） | 23 |
| 表 5.1.2 | 解体後のベントナイトの採取結果（2） | 24 |
| 表 5.2 | 蛍光 X 線分析装置仕様 | 25 |
| 表 5.3 | 蛍光 X 線分析測定条件 | 25 |
| 表 5.4 | XRF による半定量結果（標準試料：元素） | 31 |
| 表 5.5 | XRF による半定量結果（標準試料：酸化物） | 32 |
| 表 5.6 | XRF による半定量結果（本試料：元素） | 37 |
| 表 5.7 | XRF による半定量結果（本試料：酸化物） | 38 |
| 表 5.8 | XRF 測定に用いた試料量 | 38 |
| 表 5.9 | 走査型電子顕微鏡仕様 | 39 |
| 表 5.10 | エネルギー分散型 X 線分析装置 | 39 |
| 表 5.11 | SEM-EDX による半定量結果（標準試料：元素） | 47 |
| 表 5.12 | SEM-EDX による半定量結果（標準試料：酸化物） | 47 |
| 表 5.13 | SEM-EDX による半定量結果（本試料：元素） | 54 |
| 表 5.14 | SEM-EDX による半定量結果（本試料：酸化物） | 54 |

This is a blank page.

1. はじめに

地層処分システムにおける基本シナリオでは、廃棄体定置後 1,000 年以降よりオーバーパックが破損し、ガラス固化体より溶出した核種が緩衝材中へ、また、緩衝材から母岩へと移行することが想定されている。ガラス固化体より溶出した放射性核種は、イオン形態をとり緩衝材中を拡散により移行するほか、イオン形態の核種が非放射性のコロイド種に収着して擬似的にコロイドを形成（擬似コロイド）して移行することが考えられている。既存の研究では、核種がコロイドに収着し、擬似コロイドを形成する場合には、その移行が促進されることが移行実験から認められている^{1), 2), 3)}。地下水中に存在する可能性のあるコロイドとしては、天然コロイドのほか、地下水による浸食によって緩衝材から生成されるベントナイトコロイドが考えられている。また、核種移行評価においては、地下水中におけるコロイド濃度および核種のコロイドへの分配係数が評価上とくに重要なパラメータとなるとしている^{4), 5)}。核種移行に及ぼすコロイドの影響が顕在化する条件は、Millerら⁶⁾により、次の5つの条件が考えられている。①コロイドが存在するか、②コロイドは移動することができるか、③コロイドは安定であるか、④コロイドは核種収着性を有するか、⑤コロイドへの核種収着は不可逆であるか、である。安全評価で考慮すべきコロイドとしては、緩衝材内側と外側で生成する人工バリアを起源としたコロイド、および天然バリア中の地下水中に存在するコロイドが考えられる。このうち、緩衝材内側におけるコロイドの移行挙動に関しては、Au コロイド（15nm）を用いたコロイド移行のろ過実験結果から、緩衝材の有効粘土密度が 0.8 Mg/m³ 以上である場合に、緩衝材の間隙構造によって、コロイドがろ過されることが示唆されている⁷⁾。また、黒澤⁷⁾は、一般にコロイドとして定義される粒径 1~1000 nm のコロイドの最小粒子 1nm をろ過することが可能な緩衝材の仕様を検討しており、緩衝材の有効粘土密度を 1.5 Mg/m³ 以上とすることで、1 nm までのコロイドをろ過できると見積もっている。一方、緩衝材外側からのコロイド生成の可能性が指摘されているものの⁸⁾、地下水流速がきわめて速い環境でない限り、緩衝材を起源としたベントナイトコロイドは生成しにくいとの見通しが得られている⁹⁾。また、ベントナイト粒子の熱運動による地下水中への分散性について、黒澤⁷⁾は、一般的な地下水のイオン強度のもとではコロイド粒子の凝集性が高く、熱運動に起因して粒子が地下水中に分散する可能性は低いと推測している。

緩衝材を起源とするコロイド生成挙動に関する実験的な確認試験については実施した例が少なく、十分な知見が得られていない。そのため、コロイド生成に関する理論的な推測を確証させていく観点からも、より現象論的にその事実を実験により確認することが重要である。これまでに本研究では、降水系地下水を模擬した実験結果より、流速 2×10^{-6} m/s で生成される浸食コロイド量が 1.77×10^{-7} mg/cm²・s 程度と見積もっている。また、海水系地下水のもとではコロイド生成が顕著ではないことを報告した¹⁰⁾。一方、諸外国の浸食実験として、流量・イオン強度・pHなどをパラメータとし、花崗岩内に圧縮ベントナイトを設置した系での実験例がある。これらの実験結果からは、花崗岩とベントナイトとの界面よりコロイドが生成することや、流速の増加に伴いコロイドの生成濃度が増加し、約 1.5×10^{-7} m/s の流速でコロイドが生成することなどが報告されている^{11), 12)}。しかしながら、これらの実験の問題点として、コロイドを採取する際にフィルターを用いていることや、ゲルを目視観察できないことなど、環境条件の考慮や浸食メカニズムの解明という観点から課題が残る。

本研究では、緩衝材を起源とするベントナイトコロイドの生成挙動について、地下水の流れ場を模擬した系で緩衝材の浸食実験を行い、流速とコロイド生成量との関係を把握するとともに、緩衝材起源のコロイドの生成メカニズムについて考察したので報告する。

2. 試験方法

2.1 試験装置概要および方法

ベントナイトコロイドの生成／移行に関する浸食現象の把握には、図 2.1 に示す装置を用いた。ベントナイトを設置するセルはアクリル製でセル上方からベントナイトの膨潤状態を観察することができる。所定の乾燥密度に圧縮成型したベントナイト供試体を単一平行平板の模擬亀裂内の中央に設置し、給水口から試験溶液を注水すると模擬亀裂内を通じてベントナイトに水が浸潤し、ベントナイトの膨潤によって亀裂内にベントナイトゲルが生成される。これにより、処分環境における岩盤亀裂内へのベントナイトの侵入状態を模擬する。試験中は、装置上部の給水口より水を給水し、排水口から排水させることで亀裂内に供試体の周囲を流れる二次元的な水の流れ場を与え、地下水流れを模擬する。この流れによる侵入ベントナイトゲルの浸食を定量的に把握する。亀裂内への水の供給には、定量ポンプ（エムエス機器社製：ペリスタルティック型ポンプ）を用いた。また、ベントナイトの亀裂への侵入過程における膨潤圧は、供試体の下部よりロードセル（共和電業社製：LC-200KN）を用いて計測した。

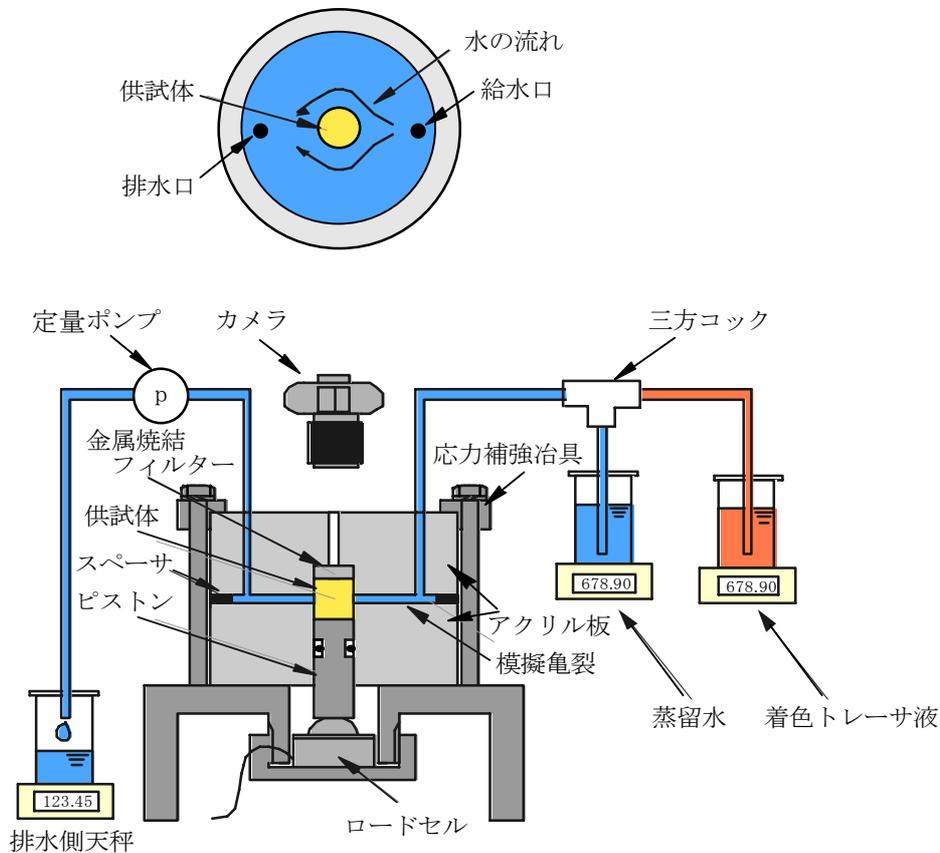


図 2.1 流水試験装置概略図

ベントナイトは、水の浸潤直後より亀裂中へ侵入するため、試験開始から亀裂内へ一定流量で流れを与えた場合には、ベントナイトの亀裂への侵入に伴う流路断面積の経時的な減少によって、亀裂内線流速の増加が生じる。このため、線流速を一定条件とするために、ベントナイトの亀裂中への侵入が安定するまでの間、試験容器内は静水状態として放置した。ベントナイトの亀裂への侵入が安定（侵入距離の定位置化）した後、定量ポンプにより一定流量で制御を行い、ベントナイトの形状変形の観察および排水液のサンプリングを行った。採取した排水については、pH測定、ゼータ電位測定、粒径分布測定、ろ過前後の元素分析を行った。また、流水試験の終了後、亀裂内の侵入ベントナイトの各部位について元素分析を行い、その組成分布について検討した。

2.2 試験条件

ベントナイトには、クニゲル V1（クニミネ工業社製：山形県月布産 Na 型ベントナイト）を用いた。クニゲル V1 の鉱物組成を表 2.1 に示す。供試体寸法は、φ10×H10mm とし、精密万能試験機（島津製作所製：オートグラフ AG-I）により、圧縮成型治具内において一軸圧縮成型したものをを用いた。試験条件を表 2.2 に示す。本試験は、亀裂内への送水流量を一定として行った。また、ベントナイトコロイドに着目した浸食挙動の把握のため、供試体にはケイ砂を混合せずに、ベントナイト単体の供試体を用いた。なお、既存の試験結果¹⁰⁾より、海水系地下水条件ではベントナイトコロイドの生成が顕著ではないことが把握されているため、試験水には蒸留水を使用し、降水系地下水を模擬した。

表 2.1 クニゲル V1 の鉱物組成¹³⁾

| 構成鉱物 | 含有量 [%] |
|----------|---------|
| モンモリロナイト | 59.3 |
| 石英 | 30.0 |
| 長石 | 6.0 |
| 方解石 | 4.0 |
| 黄鉄鉱 | 1.0 |

表 2.2 流水試験条件

| 試料（ベントナイト） | クニゲル V1 |
|---------------------------|------------------|
| 供試体寸法 [mm] | φ10×H10 |
| ケイ砂混合率 [%] | 0 |
| 乾燥密度 [Mg/m ³] | 1.6 |
| 初期含水比 [%] | 10 |
| 亀裂幅 [mm] | 1.0 |
| 流路直径 [mm] | 170 |
| 流量 [ml/min] | 0.0036 (Average) |
| 試験温度 [°C] | 室温 (20) |
| 試験水 | 蒸留水 |

3. 試験結果

3.1 侵入距離

模擬亀裂内におけるベントナイトの侵入距離は、亀裂へのベントナイトの侵入がほぼ収束したことを専用の定規を用いて測定した。試験開始（水の注水後）より約 17 日後に亀裂へのベントナイトの侵入は定位置化された。図 3.1 に、流水開始後 168 日後の侵入形状ならびに侵入距離の測定箇所を示す。侵入したベントナイトは、色の異なる 3 つの領域から構成され、最も内側の領域は、本来のベントナイトと同様な本色の領域（1 相域）、その外側に茶色の領域（2 相域）及び白色ゲル状の領域（3 相域）が認められた。浸食現象が生じる領域（ゲルフロント近傍）について判断できないため、2 相域外側と 3 相域外側という仮の指標を設け、それぞれの侵入距離を記載した。侵入距離を表 3.1 に示す。

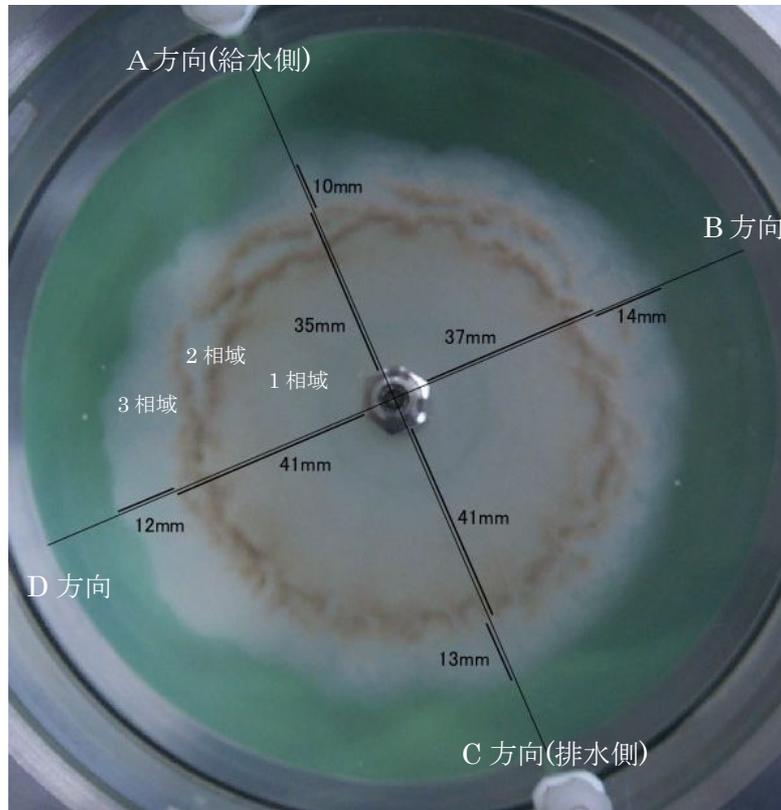


図 3.1 侵入形状および侵入距離測定箇所

表 3.1 侵入距離

| | 侵入距離[mm] | | | | |
|--------|----------|------|------|------|---------|
| | A 方向 | B 方向 | C 方向 | D 方向 | Average |
| 2 相域外周 | 35 | 37 | 41 | 41 | 38.5 |
| 3 相域外周 | 46 | 41 | 54 | 53 | 48.5 |

3.2 亀裂内流速

本試験では、亀裂内平均流量を流路断面積で割り、亀裂内平均流速として評価している。実際には、浸食現象に直接関係のある侵入ベントナイトのフロント近傍における流速は、亀裂内平均流速よりも大きい。着色トレーサー液を用いて亀裂内の流速分布を測定した結果からも、侵入ベントナイトのフロント近傍での流速は、亀裂内平均流速よりも約 2.7 倍大きいことが確認されている¹⁴⁾。したがって、亀裂内平均流速を用いた浸食現象評価は、保守側の評価になっており、実際の流速よりも低流速条件でコロイドが生成されるという評価になる。実験において実際にコロイドが生成される実流速と亀裂内平均流速との差が、浸食現象の評価上その精度への影響が大きいものか否かについては、今後検討していく必要があるものと考えられるが、実際の地下水流速条件との対比によるコロイド生成可能性の一つの指標としては保守的な平均流速値でも有効であるものとする。

本実験における亀裂内流量の経時変化を図 3.2 に示す。亀裂内流量は、流量ポンプの回転数によって制御される。流水を開始した初期には若干大きめの流量を示しているが、その後はほぼ安定した流量で制御された。また、約 350 日後に流量が一時低下しているが、これは、流量ポンプのフレキシブルチューブの劣化による滑りが生じ、送水が抑制されたことによるものである。試験期間中における亀裂内平均流量は、0.0036 ml/min であった。この平均流量と表 3.1 に示す侵入距離から求まる流路断面積より亀裂内平均流速を求めると、侵入ベントナイトのフロントを 2 相域とした場合に 7.2×10^{-7} m/s、3 相域とした場合に 9.5×10^{-7} m/s と推定される。本試験の流速条件として、侵入ベントナイトのフロントを 2 相域または 3 相域のいずれかに設定する必要がある。現象論的には、目視によって確認できる最も外周にあたる 3 相域よりコロイドが生成するものと考えられるが、本評価ではベントナイトゲルの粒子層を明瞭に確認できる 2 相域を侵入ベントナイトのフロントとし、保守的に 7.2×10^{-7} m/s を本実験の流速とした。ここで保守的とは、コロイドの生成流速を低流速側で見積もることをいう。

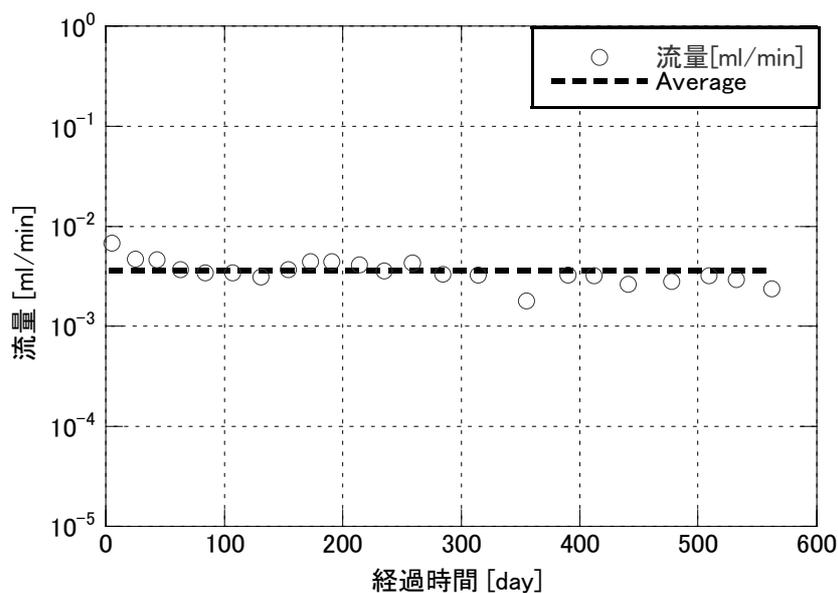


図 3.2 経過時間と亀裂内流量の経時変化

3.3 排水液の分析

亀裂中の侵入ベントナイトに対して流水場を設けてサンプリングを行った排水液は、110 ml 程度バッチ的に採取し、浸食によって生成したと考えられるベントナイトコロイドの濃度や特性（粒径分布、ゼータ電位など）について測定を行った。表 3.2 に、これらの分析項目および分析装置をまとめる。

表 3.2 排水液の分析項目および分析機器

| 分析項目 | 分析装置 | 仕様 | 備考 |
|-------------------------------------|--------------------------|---|-------------------------------------|
| コロイド濃度分析 | ICP-AES (SPS-1700VRS) | 高周波電源部：周波数 27.12MHz 最高出力：1.8kW 主分光器(B)：ツェルニターナ ホログラフィック 平面回折格子(3600 本/mm), 波長範囲 160~500nm 副分光器(A)：ツェルニターナ ホログラフィック 平面回折格子(1800 本/mm), 波長範囲 190~800nm | セイコーインスツルメンツ社製 |
| | ICP-MS (HP4500) | 高周波電源部：周波数 27.12MHz 最高出力：1.6kW 質量分析部：四重極質量分析計 質量範囲：2~280amu | ヒューレットパッカート社製 |
| 粒径分布測定 (動的光散乱法) | ゼータサイザー ナノ ZS | 粒径範囲：0.6~6000nm | マルバーク社製 |
| ゼータ電位測定 (レーザートッピングレーザ+M3-PALS 法) | | 測定範囲：-150~150mV | |
| pH 測定 (ガラス電極法) | pH 計 (F-21) | 電極：9610-10D pH 範囲：0~14.00 | 堀場製作所社製 |
| イオン濃度測定 | イオンクロマトグラフ (IC7000) | 検出器：導電率検出器 カラム：Shodex 社製 Y-521/Y-G | YOKOGAWA ANALYTICAL SYSTEM 社製 |

3.3.1 コロイド濃度の推定

ベントナイトコロイドの濃度分析は、亀裂内を通過した排水液の限外ろ過を行い、この限外ろ過前後の溶液について、モンモリロナイトの主要構成元素である Si, Al, Mg の濃度を ICP-AES または ICP-MS (表 3.2) でそれぞれ測定し、ろ別されたコロイド成分の定量を行った。

限外ろ過を行うことによりベントナイトコロイドは除去される。したがって、限外ろ過前後における差がコロイドとして排水液中に存在していた各元素の濃度となる。元素分析の測定に際しての限外ろ過および前処理は、図 3.3 に示すとおりである。また、測定条件は表 3.3 に示すとおりである。なお、本条件での測定は、試験開始から 200 日後までに得られたサンプルにおいて行った。試験開始後 200 日以降のサンプルについては、表 3.4 に示す ICP-AES によって分析を行った。

各バッチにおける排水液について、限外ろ過前後の Si, Al, Mg の濃度を表 3.5 に示す。次に、コロイド成分として存在していた各元素の濃度と、それから算出された組成比を表 3.6 に示す。ここで、モル組成比は白水¹⁵⁾の報告を参考とし Al (1.67) を基準にした。理想的なモンモリロナイトの組成式は以下のとおりである¹⁵⁾。

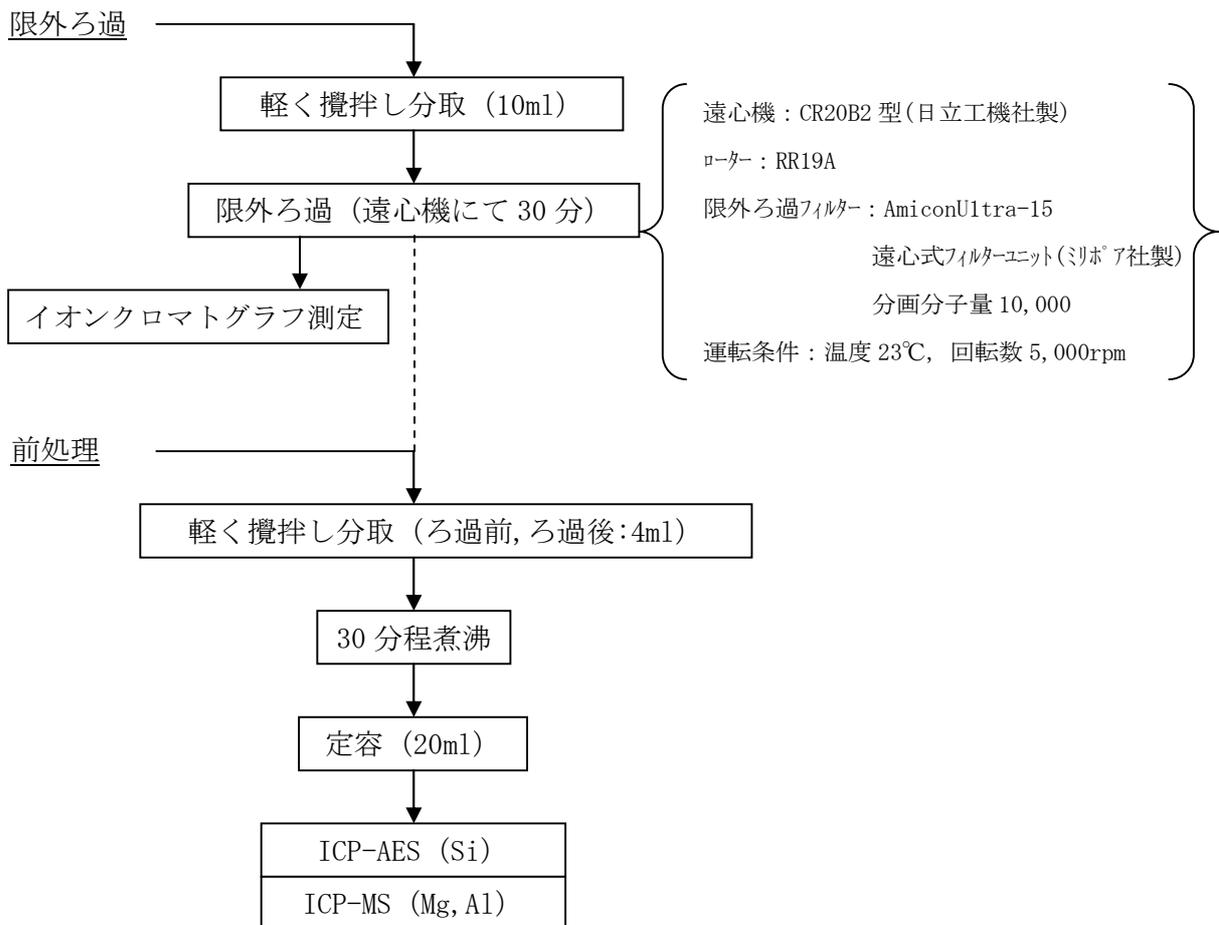
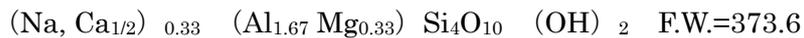


図 3.3 元素分析フロー

表 3.3 コロイド濃度分析測定条件 (試験開始後 200 日まで)

| | ICP-AES | ICP-MS |
|-----------|--|--------------------|
| 測光高さ | 12.0mm | — |
| 分光器 | A(Na イオン), B | — |
| 出力 | 1.3 kW | 1.5 kW |
| キャリアガス | 2 kgf/cm ² | 1.0 L/min |
| ネブライザー | — | クロスフロー |
| プラズマガス | 16 L/min | 15.5 L/min |
| サンプリングデブス | — | 15.5 mm |
| 補助ガス | 0.5/min | 1.0 L/min |
| 測定波長 | Mg:285.213nm,Al:396.152nm,Si:251.611nm | — |
| 測定質量数 | — | Mg:24amu, Al:27amu |
| 設定温度 | 23°C | 23°C |
| 測定環境 | クリーンルーム クラス 1000 | クリーンルーム クラス 1000 |

表 3.4 コロイド濃度分析測定条件 (試験開始後 200 日以降)

| | ICP-AES |
|------------|--|
| 光学系 | 1m ツェルニー・ターナー形式, ホログラフィックレーティング |
| 波長範囲 (格子数) | 160~458 nm (3600 ライン/mm) 458~850 nm (1800 ライン/mm) |
| 波長走査 | 最小ステップ波長 0.2pm 最大スピード 50 nm/s |
| 検出器 | 光電子倍增管 |

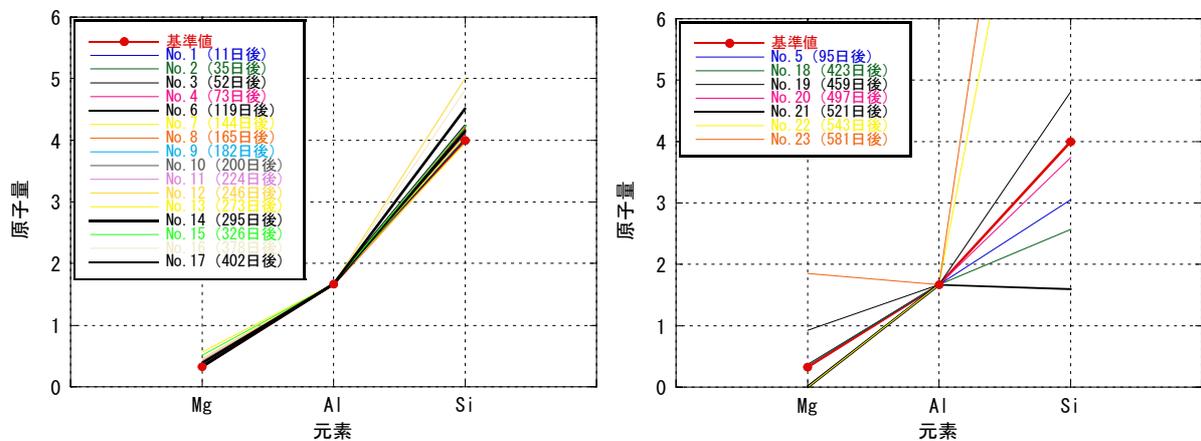
表 3.5 Si, Al, Mg 濃度の測定結果

| 経過時間 [day] | 流量 [ml/min] | 平均流速 [m/s] | Si | | Al | | Mg | |
|---------------|----------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | | ろ過前 [ppm] | ろ過後 [ppm] | ろ過前 [ppm] | ろ過後 [ppm] | ろ過前 [ppm] | ろ過後 [ppm] |
| 11 | 0.0069 | 1.39E-6 | 79 | 1.3 | 31 | <0.02 | 6.0 | <0.01 |
| 35 | 0.0047 | 9.44E-7 | 155 | 1.4 | 61 | <0.02 | 12 | <0.01 |
| 52 | 0.0047 | 9.44E-7 | 107 | 1.6 | 41 | <0.02 | 8.3 | <0.01 |
| 73 | 0.0037 | 7.43E-7 | 70 | 1.0 | 27 | <0.02 | 5.4 | <0.01 |
| 95 | 0.0034 | 6.83E-7 | 47 | 1.3 | 24 | <0.02 | 4.8 | <0.01 |
| 119 | 0.0034 | 6.83E-7 | 26 | 1.7 | 9.2 | <0.02 | 1.8 | <0.01 |
| 144 | 0.0031 | 6.22E-7 | 21 | 1.5 | 7.9 | <0.02 | 1.6 | <0.01 |
| 165 | 0.0037 | 7.43E-7 | 12 | 1.0 | 4.2 | <0.02 | 0.88 | <0.01 |
| 182 | 0.0045 | 9.04E-7 | 6.9 | 1.5 | 2.1 | <0.02 | 0.43 | <0.01 |
| 200 | 0.0044 | 8.84E-7 | 5.6 | 0.97 | 1.8 | <0.02 | 0.40 | 0.02 |
| 224 | 0.0041 | 8.23E-7 | 4.39 | 2.75 | 0.71 | 0.09 | 0.15 | 0.01 |
| 246 | 0.0036 | 7.23E-7 | 2.14 | 1.89 | 0.12 | 0.04 | 0.07 | 0.05 |
| 273 | 0.0043 | 8.63E-7 | 1.34 | 1.01 | 0.14 | 0.01 | 0.06 | 0.02 |
| 295 | 0.0033 | 6.63E-7 | 2.60 | 2.16 | 0.20 | 0.03 | 0.07 | 0.04 |
| 326 | 0.0033 | 6.63E-7 | 1.92 | 1.63 | 0.13 | 0.02 | 0.06 | 0.03 |
| 378 | 0.0018 | 3.61E-7 | 1.73 | 1.36 | 0.12 | 0.01 | 0.05 | 0.02 |
| 402 | 0.0033 | 6.63E-7 | 1.83 | 1.49 | 0.12 | 0.01 | 0.05 | 0.03 |
| 423 | 0.0032 | 6.43E-7 | 1.08 | 1.00 | 0.06 | 0.01 | 0.04 | 0.03 |
| 459 | 0.0026 | 5.22E-7 | 0.87 | 0.75 | 0.05 | 0.01 | 0.03 | 0.01 |
| 497 | 0.0028 | 5.62E-7 | 0.89 | 0.82 | 0.04 | 0.01 | 0.02 | 0.02 |
| 521 | 0.0032 | 6.43E-7 | 0.64 | 0.6 | 0.04 | <0.01 | 0.02 | 0.02 |
| 543 | 0.0029 | 5.82E-7 | 1.40 | 1.32 | <0.01 | <0.01 | 0.02 | 0.02 |
| 581 | 0.0024 | 4.82E-7 | 1.23 | 1.13 | <0.01 | <0.01 | 0.04 | 0.03 |

表 3.6 コロイド成分としての濃度および組成比

| 経過時間 [day] | 流量 [ml/min] | 平均流速 [m/s] | コロイド成分の濃度 | | | コロイド成分のモル組成比 | | |
|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|------|------|
| | | | Si [mol/L] | Al [mol/L] | Mg [mol/L] | Si | Al | Mg |
| 11 | 0.0069 | 1.39E-6 | 2.77E-3 | 1.15E-3 | 2.47E-4 | 4.02 | 1.67 | 0.36 |
| 35 | 0.0047 | 9.44E-7 | 5.47E-3 | 2.26E-3 | 4.94E-4 | 4.04 | 1.67 | 0.36 |
| 52 | 0.0047 | 9.44E-7 | 3.75E-3 | 1.52E-3 | 3.41E-4 | 4.12 | 1.67 | 0.38 |
| 73 | 0.0037 | 7.43E-7 | 2.46E-3 | 1.00E-3 | 2.22E-4 | 4.10 | 1.67 | 0.37 |
| 95 | 0.0034 | 6.83E-7 | 1.63E-3 | 8.89E-4 | 1.97E-4 | 3.06 | 1.67 | 0.37 |
| 119 | 0.0034 | 6.83E-7 | 8.65E-4 | 3.41E-4 | 7.41E-5 | 4.24 | 1.67 | 0.36 |
| 144 | 0.0031 | 6.22E-7 | 6.94E-4 | 2.93E-4 | 6.58E-5 | 3.96 | 1.67 | 0.38 |
| 165 | 0.0037 | 7.43E-7 | 3.92E-4 | 1.56E-4 | 3.62E-5 | 4.20 | 1.67 | 0.39 |
| 182 | 0.0045 | 9.04E-7 | 1.92E-4 | 7.78E-5 | 1.77E-5 | 4.13 | 1.67 | 0.38 |
| 200 | 0.0044 | 8.84E-7 | 1.65E-4 | 6.67E-5 | 1.56E-5 | 4.13 | 1.67 | 0.39 |
| 224 | 0.0041 | 8.23E-7 | 5.84E-5 | 2.30E-5 | 5.76E-6 | 4.24 | 1.67 | 0.42 |
| 246 | 0.0036 | 7.23E-7 | 8.90E-6 | 2.96E-6 | 8.23E-7 | 5.01 | 1.67 | 0.46 |
| 273 | 0.0043 | 8.63E-7 | 1.18E-5 | 4.82E-6 | 1.65E-6 | 4.07 | 1.67 | 0.57 |
| 295 | 0.0033 | 6.63E-7 | 1.57E-5 | 6.30E-6 | 1.23E-6 | 4.15 | 1.67 | 0.33 |
| 326 | 0.0033 | 6.63E-7 | 1.03E-5 | 4.08E-6 | 1.23E-6 | 4.23 | 1.67 | 0.51 |
| 378 | 0.0018 | 3.61E-7 | 1.30E-5 | 4.51E-6 | 1.10E-6 | 4.82 | 1.67 | 0.41 |
| 402 | 0.0033 | 6.63E-7 | 1.19E-5 | 4.41E-6 | 1.02E-6 | 4.52 | 1.67 | 0.39 |
| 423 | 0.0032 | 6.43E-7 | 2.85E-6 | 1.85E-6 | 4.11E-7 | 2.57 | 1.67 | 0.37 |
| 459 | 0.0026 | 5.22E-7 | 4.27E-6 | 1.48E-6 | 8.23E-7 | 4.81 | 1.67 | 0.93 |
| 497 | 0.0028 | 5.62E-7 | 2.49E-6 | 1.11E-6 | 0E+0 | 3.74 | 1.67 | 0.00 |
| 521 | 0.0032 | 6.43E-7 | 1.42E-6 | 1.48E-6 | 0E+0 | 1.60 | 1.67 | 0.00 |
| 543 | 0.0029 | 5.82E-7 | 2.85E-6 | 3.71E-7 | 0E+0 | 12.84 | 1.67 | 0.00 |
| 581 | 0.0024 | 4.82E-7 | 3.56E-6 | 3.71E-7 | 4.11E-7 | 16.04 | 1.67 | 1.85 |

表 3.6 におけるコロイド成分のモル組成比を図 3.4 に整理する。図は、白水¹⁵⁾ の文献値を基準として、X 軸に各元素、Y 軸に原子量を示しており、それぞれのバッチにおけるモル組成比を比較したものである。左図は、基準値と非常に近い組成比であるもの、右図は、組成比に変動が認められるものである。大半は、モンモリロナイトの組成比と非常に近い値を示していることから、排水液中にはベントナイトコロイドが含まれることが推測された。これらの結果より、モンモリロナイトの組成式によるベントナイトコロイドの濃度を推定算出し、表 3.7 にまとめる。また、経過時間とコロイド濃度の関係を図 3.5 に示す。図 3.5 では、モンモリロナイトの組成比がほぼ一致して算出されたコロイド濃度と、組成比に変動が認められた濃度とを合わせてプロットしたが、それぞれ色分けして示した。図からも分かるように、400 日以降もコロイド濃度は減少し続けている傾向があるものの、モンモリロナイトの組成比では変動が認められる領域となっている。コロイド濃度は初期に数百 ppm の濃度を示しているが、時間経過にともない減少する傾向にある。このようなコロイド濃度の時間的な減少傾向は、松本・棚井¹⁶⁾ により得られている既存の結果とも一致している。コロイド濃度の全体的な経時変化は、1 回目 (11 日後) のコロイド濃度よりも、2 回目 (35 日後) のコロイド濃度が増加し、その後、時間の経過にともないコロイド濃度が減少している。本試験は、流水の開始前に静水場である。したがって、ベントナイトからの溶出イオンにより、亀裂内の溶液のイオン強度が高くなっており、これにより 1 回目の排水液の採取時には粒子が分散しにくい状態であったことが考えられる。また、亀裂内において滞留していた水がより多く含まれたために、1 回目のコロイド濃度が見かけ上小さくなったことも要因として考えられる。2 回目の濃度の増加は、亀裂内溶液のイオン強度の変化によって斥力が大きくなったことから、粒子が分散しやすくなったことが要因として考えられる。その後のコロイド濃度は、約 200 日後まで連続的に減少したが、約 250~400 日の間、ほぼ濃度が 1ppm 程度で定常となった。この後のコロイド濃度は、モンモリロナイトの組成比に変動が認められる領域から計算された値であるため、本実験結果としては、モンモリロナイトの組成比が良く一致している 400 日までの結果を採用することとし、本流速条件において生成されるコロイド濃度は 1ppm とした。しかしながら、低濃度域においてモンモリロナイトの組成比に誤差が生じたものの、コロイド濃度



【組成比が良く一致したバッチ】

【組成比に変動が認められたバッチ】

図 3.4 モンモリロナイトの組成比

はさらに低下する可能性は示唆され、今後、分析精度の確認を行うなどしてコロイド濃度が 1ppm よりも減少するか否かについて検討する必要がある。

表 3.7 コロイド濃度の推定結果

| 経過時間 [day] | 流量 [ml/min] | 平均流速 [m/s] | コロイド濃度 [ppm] |
|---------------|----------------|---------------|-----------------|
| 11 | 0.0069 | 1.39E-6 | 257.04 |
| 35 | 0.0047 | 9.44E-7 | 505.79 |
| 52 | 0.0047 | 9.44E-7 | 339.96 |
| 73 | 0.0037 | 7.43E-7 | 223.88 |
| 95 | 0.0034 | 6.83E-7 | 199.00 |
| 119 | 0.0034 | 6.83E-7 | 76.28 |
| 144 | 0.0031 | 6.22E-7 | 65.50 |
| 165 | 0.0037 | 7.43E-7 | 34.83 |
| 182 | 0.0045 | 9.04E-7 | 17.41 |
| 200 | 0.0044 | 8.84E-7 | 14.93 |
| 224 | 0.0041 | 8.23E-7 | 5.14 |
| 246 | 0.0036 | 7.23E-7 | 0.66 |
| 273 | 0.0043 | 8.63E-7 | 1.08 |
| 295 | 0.0033 | 6.63E-7 | 1.41 |
| 326 | 0.0033 | 6.63E-7 | 0.91 |
| 378 | 0.0018 | 3.61E-7 | 0.93 |
| 402 | 0.0033 | 6.63E-7 | 0.90 |
| 423 | 0.0032 | 6.43E-7 | 0.41 |
| 459 | 0.0026 | 5.22E-7 | 0.33 |
| 497 | 0.0028 | 5.62E-7 | 0.25 |
| 521 | 0.0032 | 6.43E-7 | 0.33 |
| 543 | 0.0029 | 5.82E-7 | 0.08 |
| 581 | 0.0024 | 4.82E-7 | 0.08 |

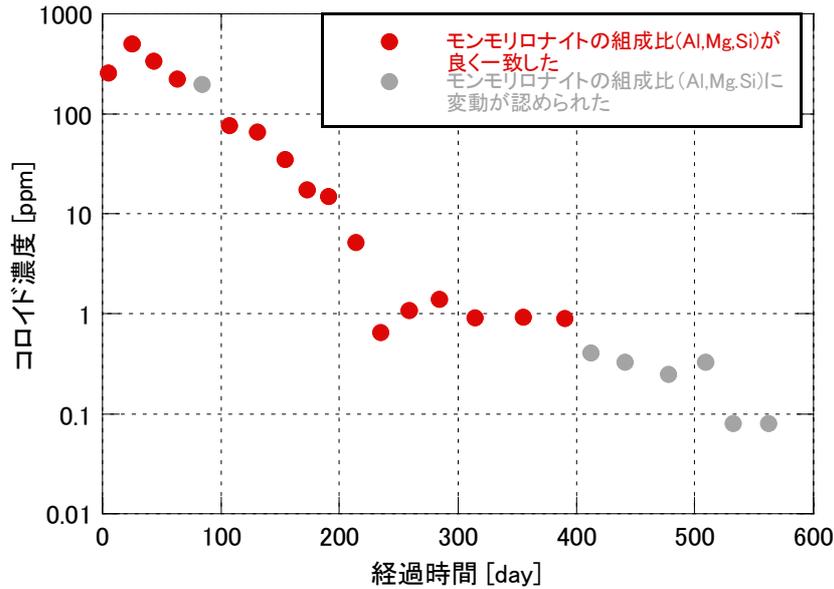


図 3.5 経過時間と浸食コロイド濃度の関係

3.3.2 コロイド粒子径とゼータ電位

模擬亀裂内のベントナイトゲルと接して得られた排水液について、粒径分布測定およびゼータ電位測定を行い、液中に含まれるコロイドの確認を行った。測定条件を表 3.8 に、コロイドの平均粒径およびゼータ電位の測定結果を表 3.9 に示す。また、これらの結果の経時変化を図 3.6 にまとめる。平均粒径の経時変化からは、流水の開始から約 200 日の間、おおよそ平均粒子径で 150～250 nm の粒子が認められる。また、150～200 日の間では、平均粒子径がほぼ 200 nm となった。一方、ゼータ電位は、分散された粒子の分散安定性の指標として用いられるものであり、微粒子の場合、ゼータ電位の絶対値が増加すれば、粒子間の反発力が強くなり粒子の分散性は高くなる。一方、ゼータ電位がゼロに近くなると、粒子は凝集しやすくなる。本試験の測定結果からは、ゼータ電位がおおよそ-40mV 前後の値となっていることから、排水液中における粒子は安定でいることが推察された。

表 3.8 コロイド粒径分布およびゼータ電位測定条件

| | 粒径分布測定 | ゼータ電位測定 |
|------------|----------------|------------------|
| セル | クォーツクエアセル | ディスポーザブルキャピラリーセル |
| 分散媒屈折度 | 1.33 | 1.33 |
| 分散媒粘度 | 0.8872 [mPa・s] | 0.8872 [mPa・s] |
| 分散媒誘電率 | 79 | 78.55 |
| 測定時間 | 20sec×15times | Auto |
| Attenuator | Auto | Auto |
| 測定セルポジション | Auto | Auto |
| 設定温度 | 25°C | 25°C |

表 3.9 コロイド粒子の平均粒径およびゼータ電位の測定結果

| 経過時間 [day] | 流量 [ml/min] | 平均流速 [m/s] | 平均粒径 [nm] | ゼータ電位 [mV] |
|---------------|----------------|---------------|--------------|---------------|
| 11 | 0.0069 | 1.39E-6 | 218 | -39.0 |
| 35 | 0.0047 | 9.44E-7 | 253 | -39.2 |
| 52 | 0.0047 | 9.44E-7 | 255 | -43.3 |
| 73 | 0.0037 | 7.43E-7 | 253 | -44.7 |
| 95 | 0.0034 | 6.83E-7 | 239 | -39.7 |
| 119 | 0.0034 | 6.83E-7 | 191 | -45.5 |
| 144 | 0.0031 | 6.22E-7 | 147 | -41.9 |
| 165 | 0.0037 | 7.43E-7 | 203 | -41.2 |
| 182 | 0.0045 | 9.04E-7 | 204 | -36.8 |
| 200 | 0.0044 | 8.84E-7 | 199 | -37.0 |

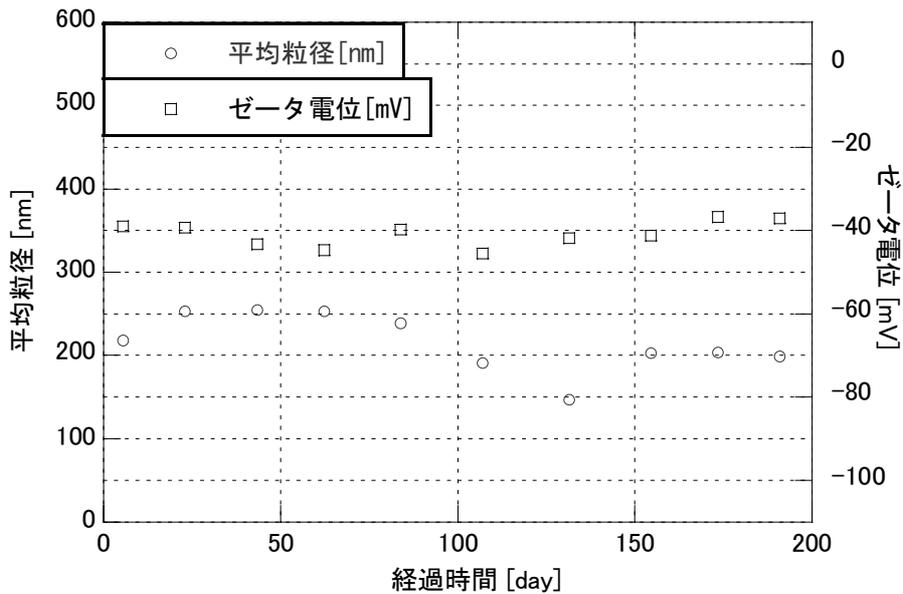


図 3.6 平均粒径，ゼータ電位の経時変化

3.3.3 pH と Na イオン濃度

試験開始から約 200 日後までの各バッチにおける pH および Na イオン濃度の測定を行った。pH の測定条件を表 3.10 に、イオンクロマトグラフによるイオン濃度の測定条件を表 3.11 に示す。測定結果を表 3.12 および図 3.7 にまとめて示す。測定結果より、pH は 7.2~8.0 の範囲内であり中性であるが、試験日数 100 日を境に前半と後半では若干 pH に差異が認められる傾向がある。一方、Na イオン濃度は、試験開始後の最初のサンプルで濃度が比較的に大きく、その後、時間経過とともに減少していく傾向が認められた。本試験は、初期に（ベントナイトの亀裂内への侵入

距離が定位置化される間) 亀裂内の水が静水場であるため、ベントナイトより浸出陽イオンが液中に浸出しているとすれば、液中のイオン強度が大きくなることが考えられる。このため、亀裂内に送水タンクから流水を開始すると、亀裂内の水は経時的に純水と入れ代わる。したがって、採取する最初のバッチは、必然的にイオン濃度の高い液となることが考えられる。このことから、図 3.7 に示されるように初期に Na イオン濃度が高いものとなっていると推察される。また、その後のバッチについては、ベントナイト中の Na の拡散が律速となるため、徐々にイオン濃度が減少しているものと考えられる。

表 3.10 pH 測定条件

| | | |
|--------|-----------------|----------------|
| 使用電極 | 9610-10D (硝子電極) | |
| 構成ポイント | 4.01 | フタル酸塩 (関東化学製) |
| | 6.86 | 中性リン酸塩 (関東化学製) |
| | 9.18 | ほう酸塩 (関東化学製) |
| 温度 | 23°C | |

表 3.11 イオンクロマトグラフ測定条件

| | |
|----------|----------------------------------|
| 試料注入量 | 50 μ L |
| 溶離液 (流量) | 5mM HNO ₃ (1.3mL/min) |
| 恒温槽温度 | 40°C |
| 測定環境 | クリーンルーム クラス 1000 |

表 3.12 排水液の pH および元素イオン濃度

| 経過時間 [day] | 流量 [ml/min] | 平均流速 [m/s] | pH | Na イオン濃度 [ppm] |
|---------------|----------------|---------------|-----|-------------------|
| 11 | 0.0069 | 1.39E-6 | 7.7 | 43 |
| 35 | 0.0047 | 9.44E-7 | 7.9 | 18 |
| 52 | 0.0047 | 9.44E-7 | 7.8 | 14 |
| 73 | 0.0037 | 7.43E-7 | 7.7 | 14 |
| 95 | 0.0034 | 6.83E-7 | 8.0 | 12 |
| 119 | 0.0034 | 6.83E-7 | 7.4 | 11 |
| 144 | 0.0031 | 6.22E-7 | 7.3 | 10 |
| 165 | 0.0037 | 7.43E-7 | 7.2 | 8.1 |
| 182 | 0.0045 | 9.04E-7 | 7.4 | 6.3 |
| 200 | 0.0044 | 8.84E-7 | 7.3 | 5.5 |

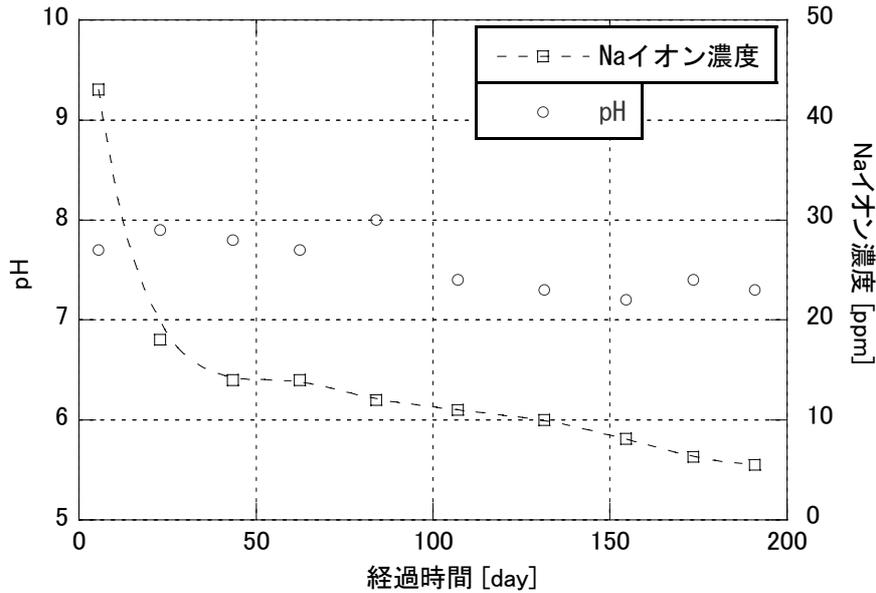


図 3.7 pH, Na イオン濃度の経時変化

4. 流速と浸食コロイド量との関係

本試験で得られた結果を、流速と浸食コロイド量との関係としてまとめる。ここでは、浸食が発生する場を、水と侵入ベントナイトの先端部の界面であるものとし、浸食影響を受けると考えられる界面の表面積を概算により求め、試験より得られたコロイド濃度より、単位断面積当たりのコロイド生成量を求めた¹⁰⁾。図 4.1 に本試験で得られた結果 (TEST CASE-5) と既存の結果 (TEST CASE-1~4) とを合わせて示す。なお、図 4.1 における各 TEST CASE の凡例の概要については、表 4.1 に示すとおりである。これらの流速と浸食コロイド量との関係により、流速が小さくなることで、浸食コロイド量が減少する傾向があることが分かる。また、生成されるコロイドの粒子径に関しては図 4.2 に示すとおり、流速が小さいほど生成されるコロイドの粒子径も小さくなる傾向がある。第 2 次取りまとめでは、コロイドが核種移行に及ぼす影響に関して、天然コロイドのみを考慮し、地下水の流速を 0.05~50 m/y (10^{-9} ~ 10^{-6} m/s) とした評価が行われた。当時、緩衝材を起源とするコロイドの生成に関しては、黒澤ら¹⁷⁾の理論的な検討によって見積もられた流速 300~3,000 m/y (10^{-5} ~ 10^{-4} m/s) 程度であるという報告、また、本試験における TEST CASE-1 の定性的な結果が同程度であったことから、地下水流速がきわめて速い環境でない限り、コロイドは生成しにくいと考えられていた。しかしながら、本試験におけるその後の定量的な結果からは、降水系地下水条件において 10^{-5} m/s よりも低流速条件下においてコロイドの生成が確認されたことにより、緩衝材を起源とするコロイドの生成可能性が示唆される結果となっている^{18), 19)}。一方、海水系地下水条件で行った試験結果からは、 8×10^{-6} m/s の流速条件においてコロイドの生成が認められないことから (TEST CASE-4)、海水系地下水条件での浸食現象は顕著ではなく、降水系地下水条件において留意する必要があるとしている²⁰⁾。これらから、地下水の環境条件とし、コロイドの生成可能性が想定される降水系地下水条件においてデータの整備を進め、流速と生成されるコロイド量について把握しておく必要がある。

実際の処分環境においてガラス固化体が溶解し始めるのは、廃棄体の定置後よりオーバーパッ

クが破損するものと想定した 1,000 年後以降である。したがって、人工バリアが定置される環境が亀裂性岩盤の場合には、地下水の移行経路となる亀裂は、緩衝材の膨潤によって充填されていることが想定される。実際の処分環境においては、図 4.3(a)に示す模式図のように、ベントナイトゲルの侵入部と交差する亀裂からの地下水流れによってコロイドが生成される形態、または、このように交差する亀裂による地下水の流れがない場合には、図 4.3(b)に示すように、EDZなどを介して岩盤壁面とベントナイトとの界面やベントナイトゲル中の透過水により生成されることも考えられる。このような水理場の違いにより、評価されるコロイド生成量が変わることが考えられ、今後このような形態におけるコロイド生成の可能性についても確認することが課題である。

また、本結果により地下水中におけるベントナイトコロイドの濃度を評価する場合、亀裂頻度や亀裂開口幅より、地下水流れと接するゲルの断面積を仮定してコロイド生成量を評価することになる。これらは、本来複雑である水理場を単純化して設定されるため、不確実性を含むことや過度に保守的な評価になる可能性があることに留意しておく必要がある。

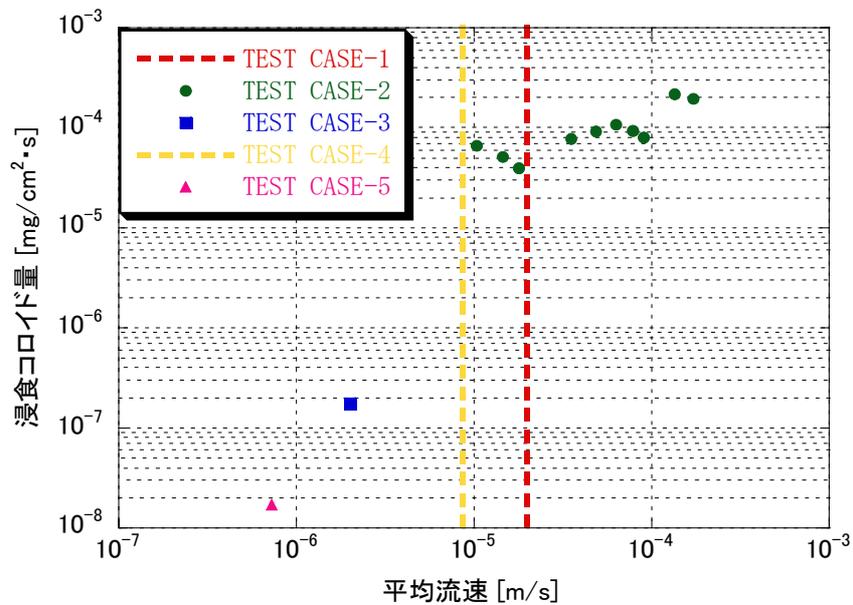


図 4.1 平均流速と浸食コロイド量の関係

表 4.1 TEST CASE の凡例概要

| 試験 | 試験水 | 試験概要 | 結果 |
|-------------|---------|---------------------------------|--|
| TEST CASE-1 | 蒸留水 | 形状変形により、臨海流速値を概略的に推定 | 臨海流速値を $2 \times 10^{-5} \text{m/s}$ と評価 |
| TEST CASE-2 | 蒸留水 | 流速を多段階で増加させ、元素濃度分析により、コロイド濃度を推定 | TEST CASE-1 の臨海流速値よりも低流速場でのコロイド生成可能性を示唆 |
| TEST CASE-3 | 蒸留水 | 流速を一定条件とし、元素濃度分析により、コロイド濃度を推定 | コロイド生成の時間的依存性および、流速 $2 \times 10^{-6} \text{m/s}$ における浸食コロイド量を把握 |
| TEST CASE-4 | NaCl 溶液 | 流速を一定条件とし、元素濃度分析により、コロイド濃度を推定 | 流速 $8 \times 10^{-6} \text{m/s}$ でコロイドが生成しないことを把握 |
| TEST CASE-5 | 蒸留水 | 流速を一定条件とし、元素濃度分析により、コロイド濃度を推定 | $7 \times 10^{-7} \text{m/s}$ における浸食コロイド量を把握 |

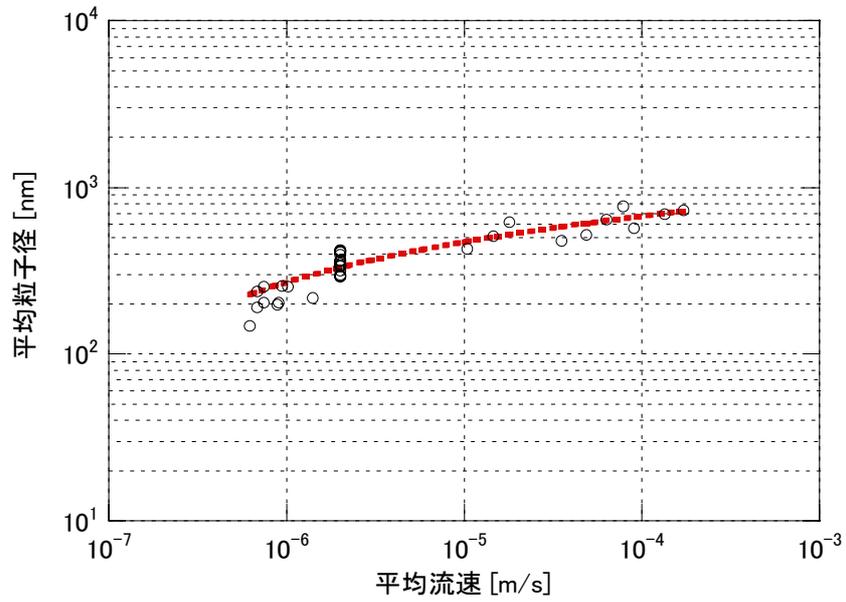


図 4.2 平均流速と平均粒子径の関係

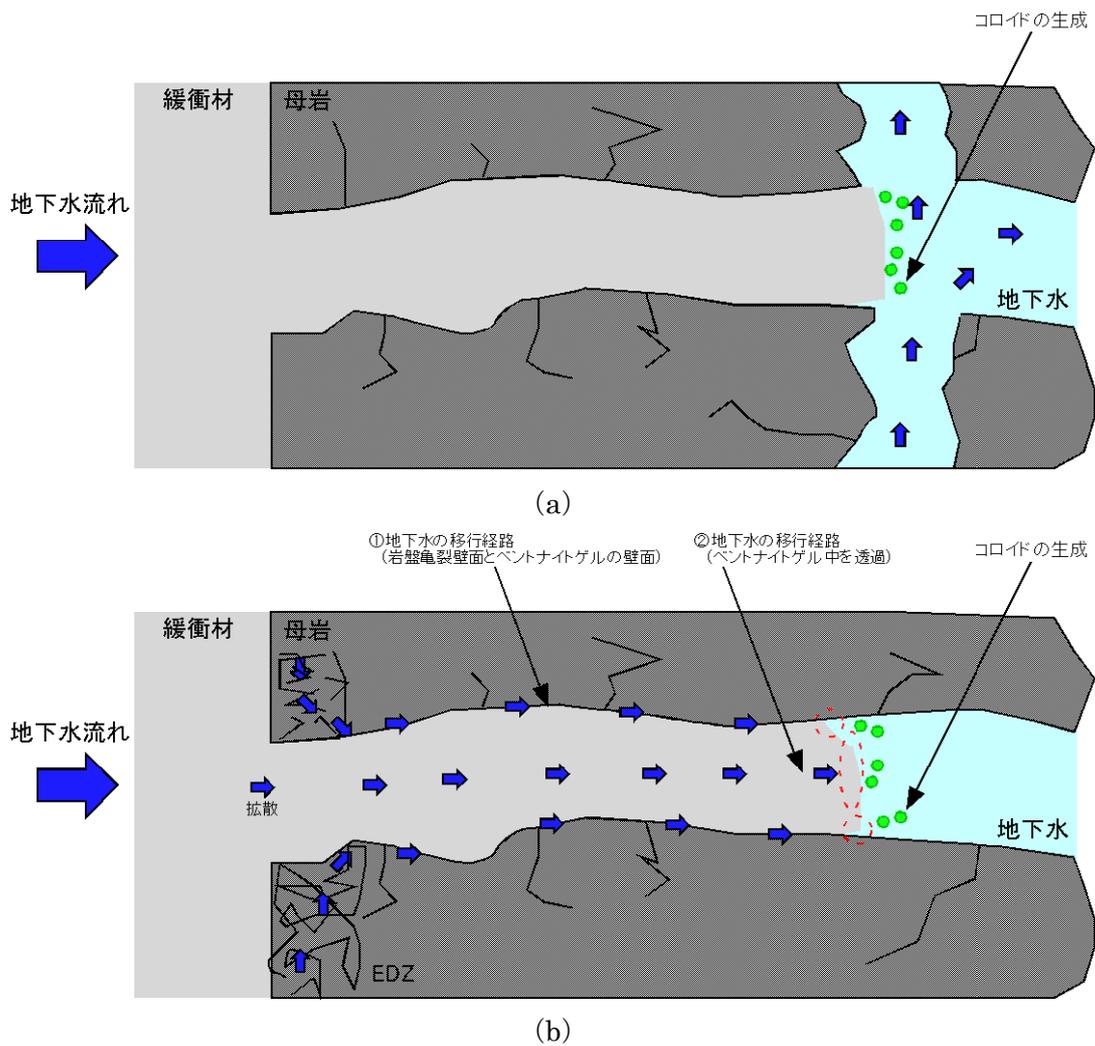


図 4.3 岩盤亀裂内におけるコロイド生成の模式図

5. 試験後試料の分析

5.1 解体および分析試料の採取

実験における亀裂内に侵入したベントナイトゲルは、観察写真（図 5.1）から分かるように、内側から外側にかけてベントナイト色の濃淡がある。図中の A 域は、クニゲル V1 が膨潤した際の通常色の領域。B 域は、通常よりも濃い色の領域。C 域は、白濁した色の領域である。これまでの実験においても同様な傾向が観察されており、これらの違いが生じる原因を把握することは、現象理解を進めるうえで重要である。ここでは、コロイドの生成挙動に起因するベントナイトゲル域の元素分析を行うことにより、これらの組成の把握を試みた。

試験後の亀裂内ベントナイトゲルの採取は、図 5.2 に示すように亀裂内にある水を実験条件と同様な流量でゆっくりと排水させた。（図中においてベントナイトゲルが抜けている箇所については、試験を終了する前の段階で、何らかの原因により供試体上部の空気孔よりエアが混入し、侵入ベントナイトを押し退けた流路痕である。）その後、試験容器ごと恒温槽に入れ（図 5.3）、30℃からベントナイトが乾燥していく温度まで徐々に昇温させ炉乾燥を行った。最終的に亀裂内のベントナイトが乾燥した温度は 70℃であった。図 5.4 は、乾燥後におけるベントナイトであるが、乾燥させたことによりかなりベントナイトが収縮した。次に、上下部のアクリル容器を分離し（図 5.5）、上部と下部容器の表面のベントナイトをそれぞれ採取した（図 5.6）。採取したベントナイトの箇所情報は、図 5.7.1 および図 5.7.2 に示すとおりである。また、表 5.1.1 および表 5.1.2 に採取の結果を示す。表は、採取した位置を図 5.8 のように整理している。ここで、a：供試体部，b：侵入ベントナイトの内側付近，c：侵入ベントナイトの中間付近，d：侵入ベントナイトの外側付近，e：水域側のものである。

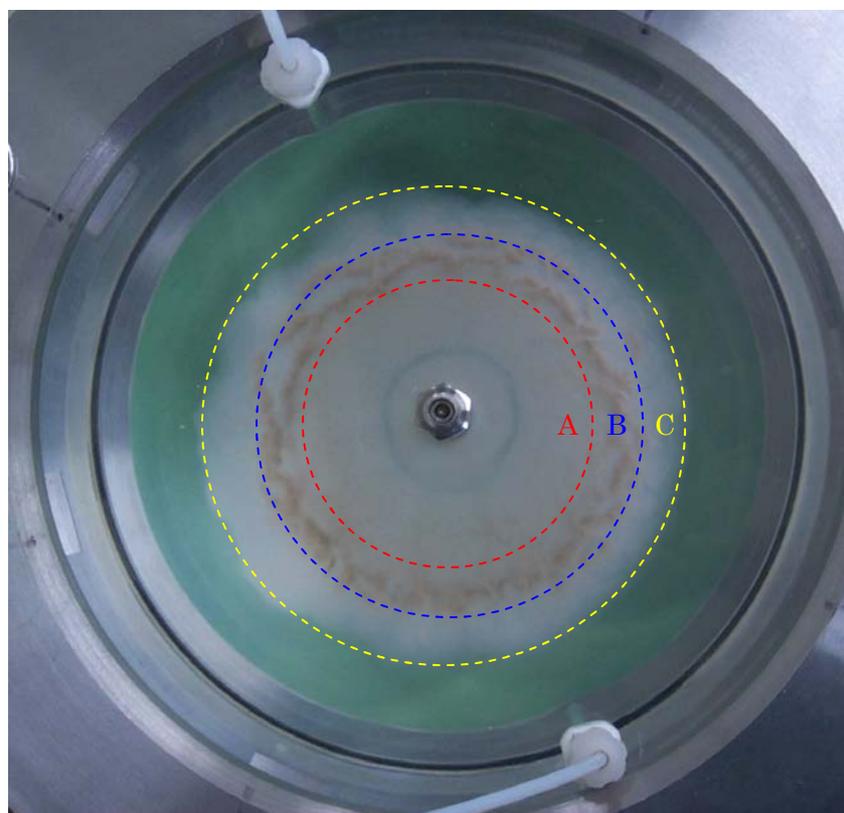


図 5.1 実験中の観察写真

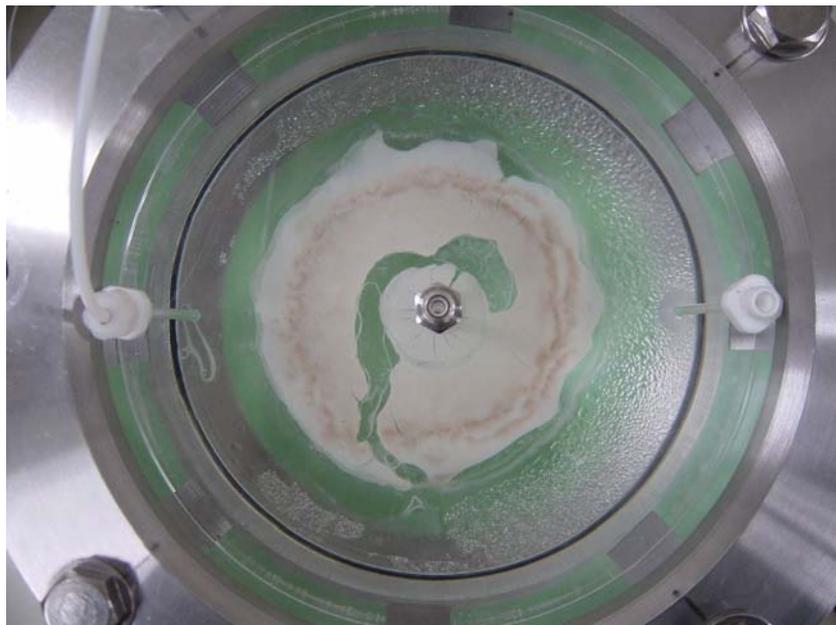


図 5.2 解体前（亀裂水の排水）

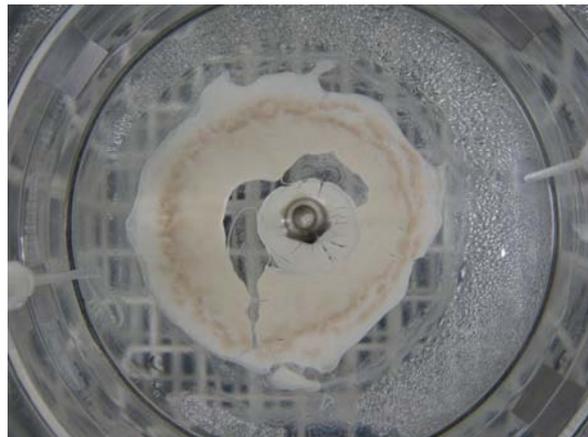


図 5.3 解体前（恒温槽内における炉乾燥前）

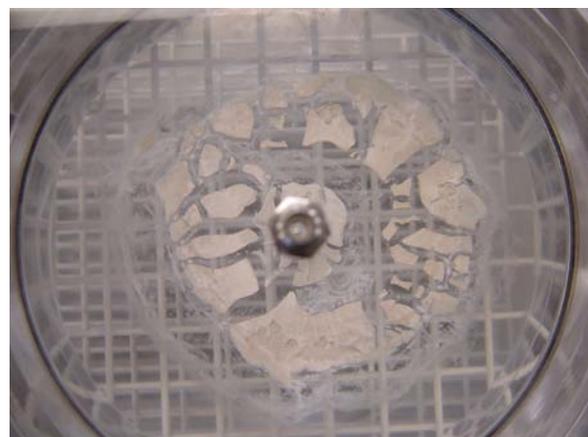
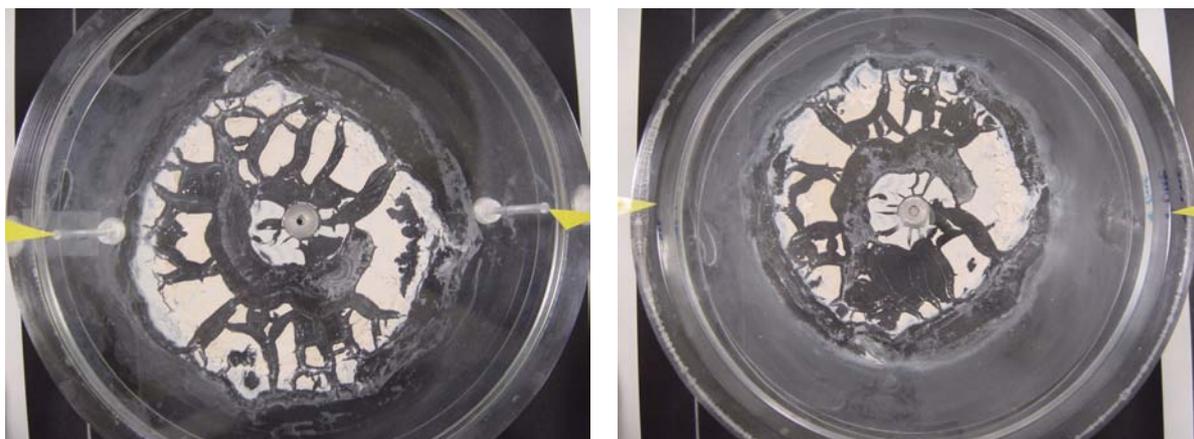


図 5.4 解体前（恒温槽内における炉乾燥後）



a.容器上部

b.容器下部

図 5.5 解体後（上下部の試験容器の分離）

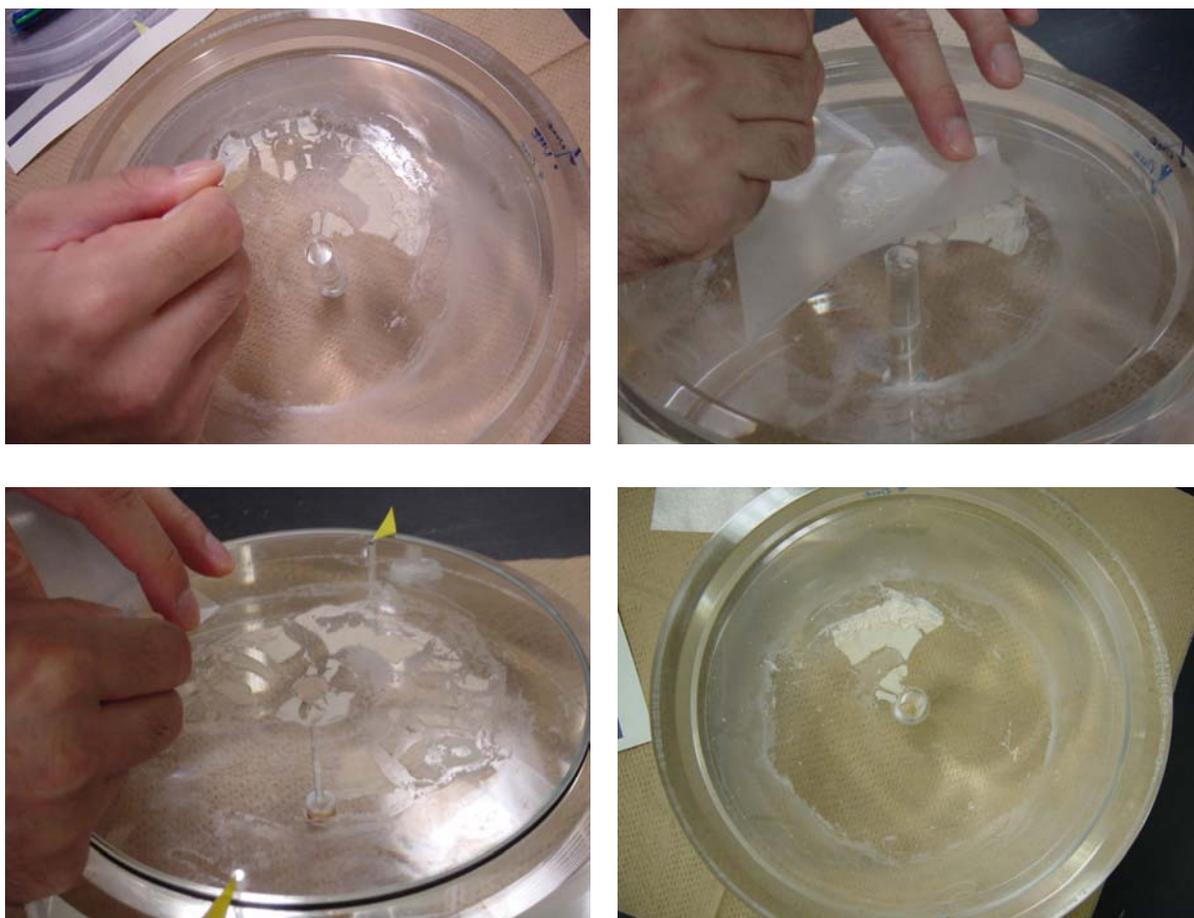


図 5.6 ベントナイトの採取風景

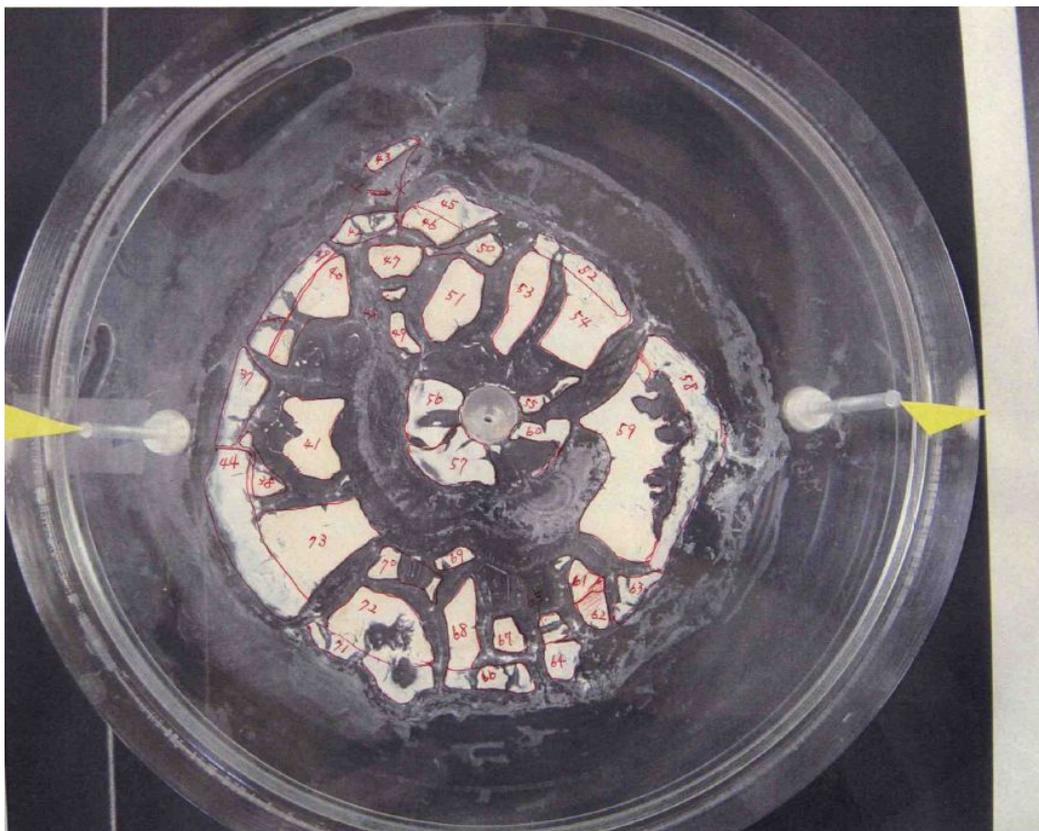


图 5.7.1 上部採取位置

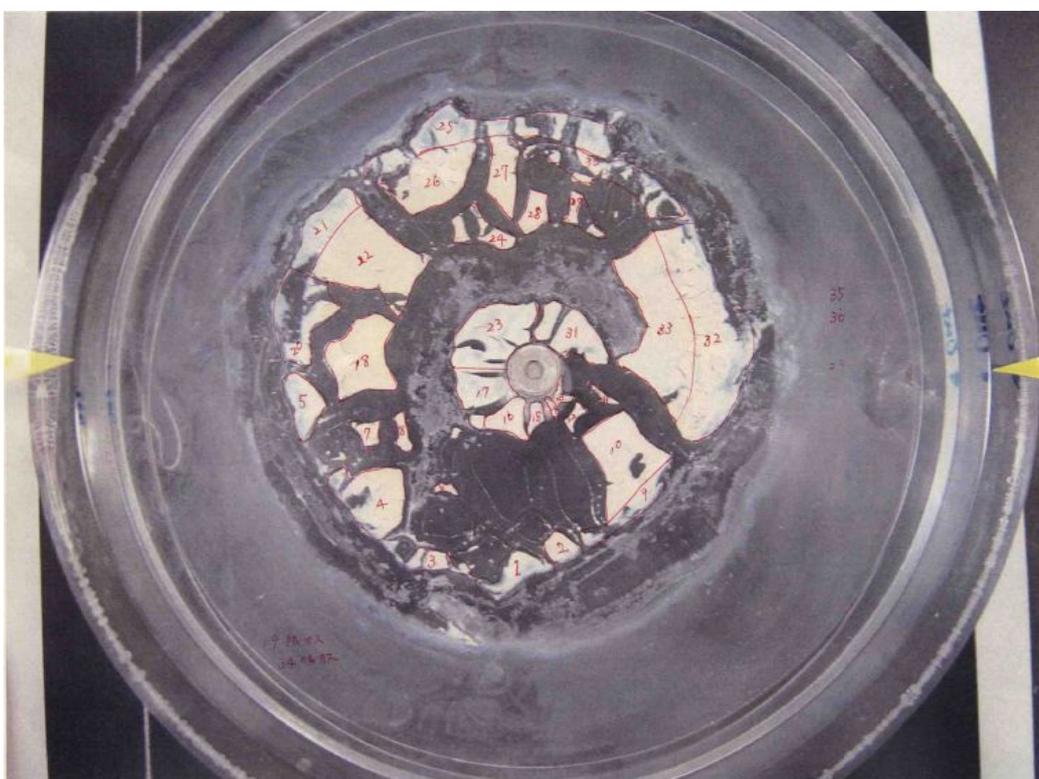


图 5.7.2 下部採取位置

表 5.1.1 解体後のベントナイトの採取結果 (1)

| 位置 | 下部採取 No | 重量[g] | 上部採取 No | 重量[g] | 総重量[g] |
|------------------|---------|--------|---------|--------|--------|
| a. 供試体部 | — | 0.1618 | — | — | 0.1618 |
| b. 供試体周辺 (内側) | 11 | 0.0024 | 55 | 0.0054 | 0.0756 |
| | 12 | 0.0052 | 56 | 0.0062 | |
| | 13 | 0.0011 | 57 | 0.0077 | |
| | 14 | 0 | 60 | 0.0035 | |
| | 15 | 0.0032 | — | — | |
| | 16 | 0.008 | — | — | |
| | 17 | 0.0054 | — | — | |
| | 23 | 0.0148 | — | — | |
| | 31 | 0.0127 | — | — | |
| c-1 (中間) | 7 | 0.0114 | 38 | 0.0053 | 0.1569 |
| | 8 | 0.0132 | 41 | 0.0244 | |
| | 18 | 0.0363 | 73 | 0.0302 | |
| | 20 | 0.0066 | — | — | |
| | 22 | 0.0295 | — | — | |
| c-2 (中間) | 24 | 0.0095 | 61 | 0.009 | 0.1699 |
| | 26 | 0.0245 | 62 | 0.0119 | |
| | 27 | 0.012 | 63 | 0.0056 | |
| | 28 | 0.012 | 65 | 0.002 | |
| | 29 | 0.0121 | 67 | 0.0131 | |
| | 30 | 0.0097 | 68 | 0.0134 | |
| | — | — | 69 | 0.0027 | |
| | — | — | 70 | 0.0116 | |
| | — | — | 72 | 0.0208 | |
| c-3 (中間) | 6 | 0.0012 | 48 | 0.0029 | 0.1293 |
| | — | — | 46 | 0.0162 | |
| | — | — | 47 | 0.0244 | |
| | — | — | 49 | 0.0081 | |
| | — | — | 50 | 0.012 | |
| | — | — | 51 | 0.0344 | |
| | — | — | 53 | 0.0301 | |
| c-4 (中間) | 10 | 0.0197 | 54 | 0.0166 | 0.1127 |
| | 33 | 0.0351 | 59 | 0.0413 | |

表 5.1.2 解体後のベントナイトの採取結果 (2)

| 位置 | 下部採取 No | 重量[g] | 上部採取 No | 重量[g] | 総重量[g] |
|----------|---------|--------|---------|--------|--------|
| d-1 (外側) | 21 | 0.0053 | 44 | 0.0176 | 0.06 |
| | 25 | 0.0193 | 64 | 0.0032 | |
| | — | — | 66 | 0.0064 | |
| | — | — | 71 | 0.0082 | |
| d-2 (外側) | 4 | 0.0157 | 37 | 0.0069 | 0.0592 |
| | 5 | 0.006 | 39 | 0.0085 | |
| | — | — | 40 | 0.0221 | |
| d-3 (外側) | 1 | 0.0032 | 42 | 0.006 | 0.1024 |
| | 2 | 0.0056 | 45 | 0.0041 | |
| | 3 | 0.0037 | 52 | 0.0146 | |
| | 9 | 0.0027 | 58 | 0.0145 | |
| | 32 | 0.048 | — | — | |
| e (水域側) | 35 | 0.0046 | — | — | 0.014 |
| | 36 | 0.0081 | 75 | 0.0013 | |
| 残試料 | 19 | 0.0068 | 74 | 0.0049 | 0.0149 |
| | 34 | 0.0032 | — | — | |
| その他 | — | — | 43 | 0.0027 | 0.0027 |

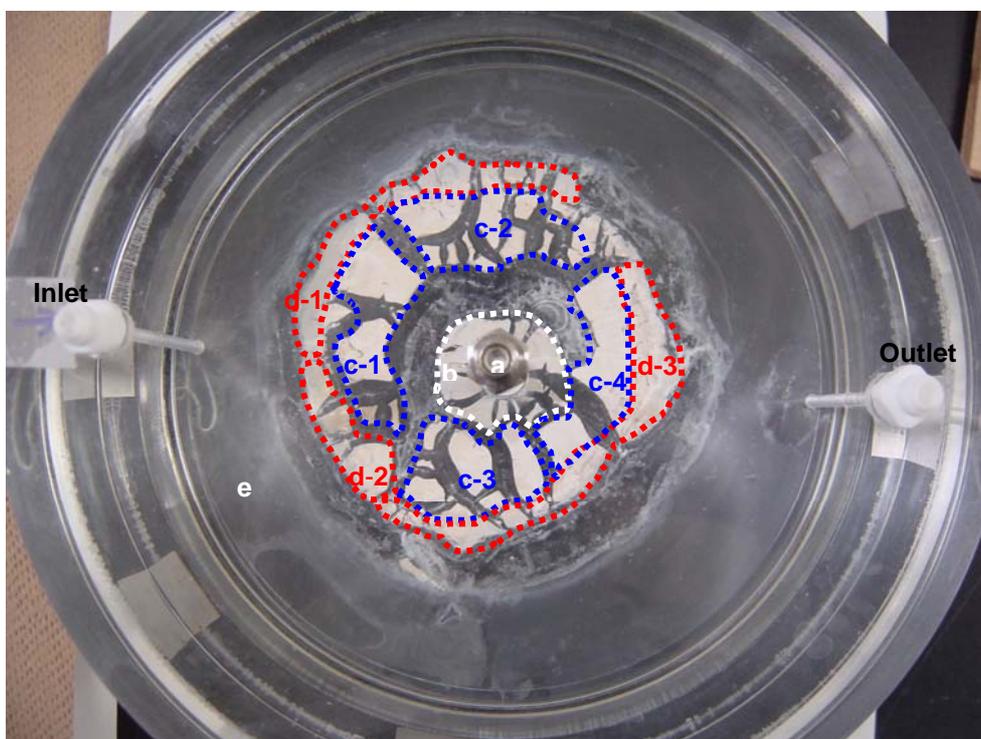


図 5.8 採取箇所分類

5.2 元素分析

本試験に用いるベントナイトの質量は、乾燥重量にして約 1.26 g である。したがって、試験後の局所的な元素分析を行う場合には、分析に用いるための質量が制限される。表 5.1.1, 表 5.1.2 に示したように、試験後の採取試料の質量は、各サンプリングエリアで、少ない箇所では 50 mg 程度、最も多い箇所でも 150 mg 程度である。このため、試験後試料の元素分析については、比較的少量の質量で可能な方法により行う必要があった。このことから、本測定では、蛍光 X 線分析 (XRF) およびエネルギー分散形 X 線分析 (SEM-EDX) の二つの分析により、試験後試料の元素分析を実施した。

5.2.1 蛍光 X 線分析 (XRF)

蛍光 X 線分析の特徴は、簡便に非破壊で同時に多元素分析ができ、試料の準備が容易、且つ分析が迅速に行え、定性分析や大まかな定量分析ができることなどである。分析装置には、蛍光 X 線分析装置 Sys3270E 型 (理学電機工業社製) を用いた。装置の仕様を表 5.2 に、測定条件を表 5.3 に示す。また、XRF の測定フローは、図 5.9 に示すとおりである (図 5.10~図 5.12 に補足図を示す)。

前述したように、本試験では少量の質量による実験であり、サンプリングによる局所的な箇所の元素分析を行う場合には、その分析に要する質量はさらに微量である。したがって、XRF 分析による測定感度を確認するための事前検討とし、ベントナイト (クニゲル V1) の標準試料を用い、測定質量 5~200 mg における各元素の半定量分析を行い、質量差による XRF の測定精度の確認を行った。測定チャートを図 5.13~図 5.18 に、半定量結果を図 5.19, 図 5.20 および表 5.4, 表 5.5 に示す。これらの結果より、100 mg 程度から蛍光 X 線の検出強度が飽和傾向となることが分かった。

表 5.2 蛍光 X 線分析装置仕様

| | |
|--------|--------------|
| X 線管 | 端窓型 Rh ターゲット |
| X 線通路 | 真空 |
| 分析径 | 20mm |
| 波高分析条件 | 微分法 |
| 印加電圧電流 | 50kV-50mA |
| スリット条件 | コース (粗) スリット |

表 5.3 蛍光 X 線分析測定条件

| 元素 | 分光結晶 | 走査ステップ | 計測時間 |
|-----------------|------|----------|-------------|
| 重元素(Ti~U) | LiF | 0.02 deg | 0.2 sec/deg |
| Ca, K, Cl, S, P | GE | 0.05 deg | 0.4 sec/deg |
| Si, Al | PET | 0.05 deg | 0.4 sec/deg |
| Mg, Na, F | TAP | 0.05 deg | 1.0 sec/deg |

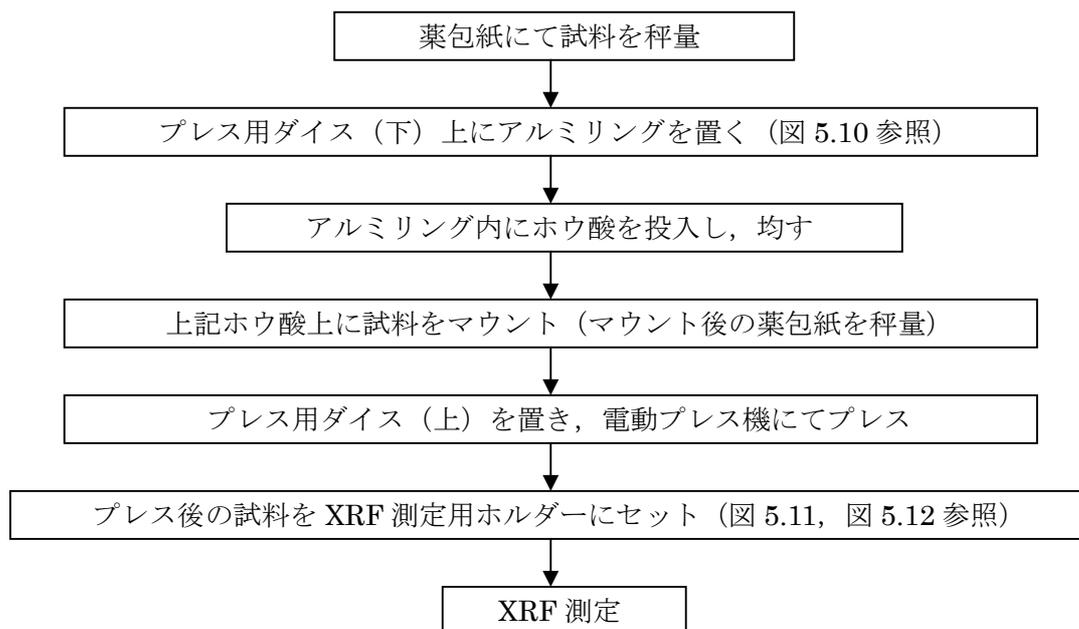


図 5.9 XRF 測定フロー

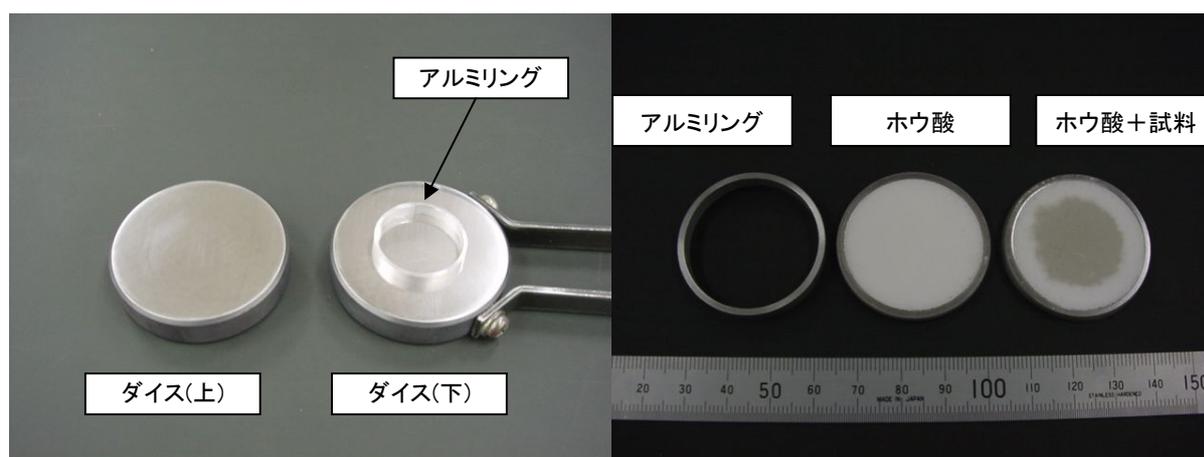


図 5.10 プレス用ダイス

図 5.11 プレス後試料

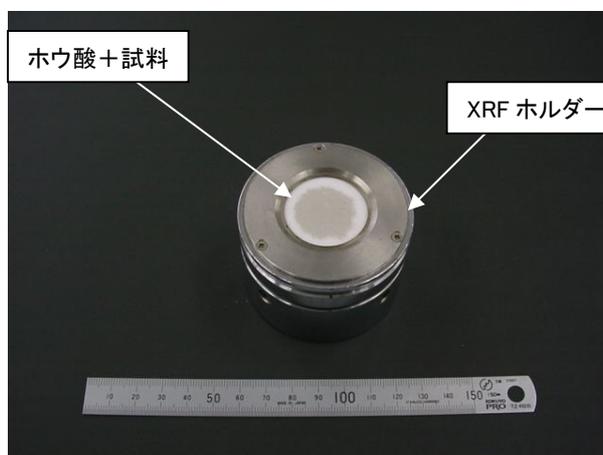


図 5.12 XRFホルダー

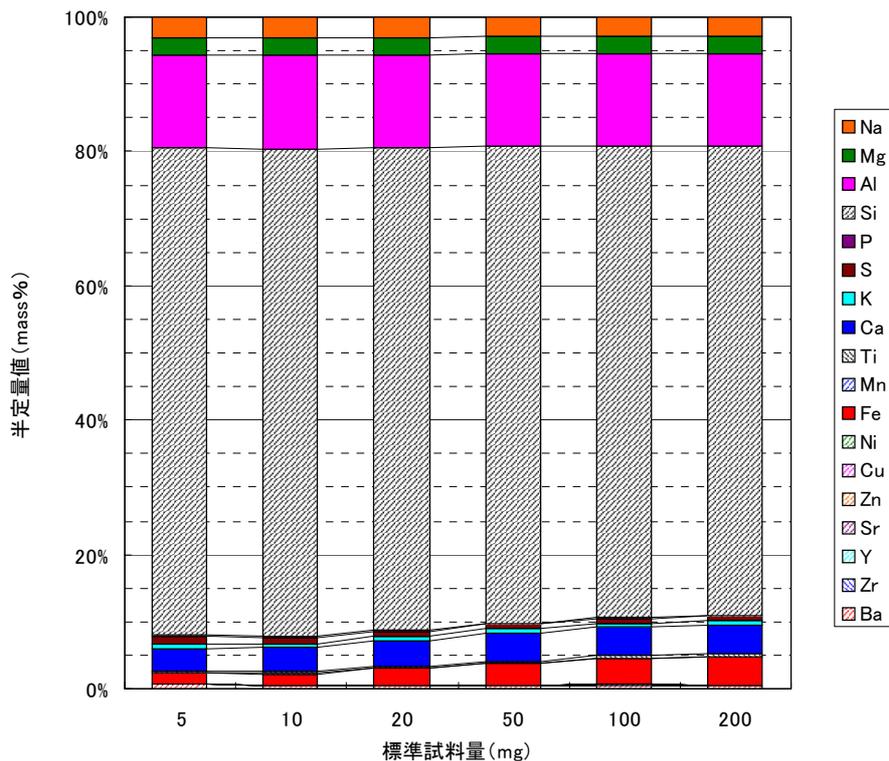


図 5.19 XRF による半定量結果 (標準試料：元素)

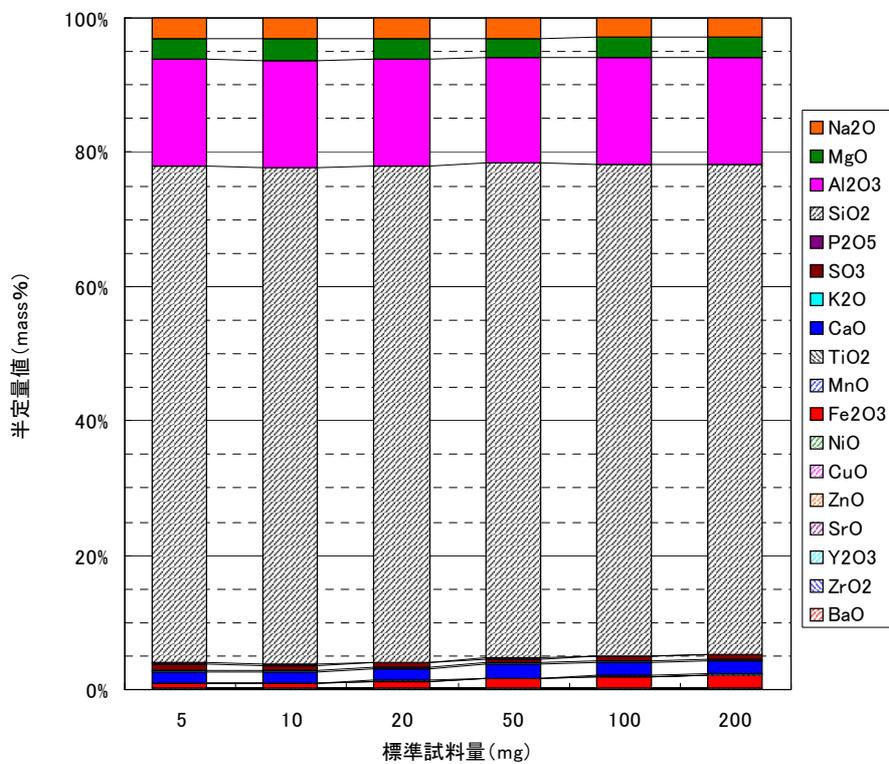


図 5.20 XRF による半定量結果 (標準試料：酸化物)

表 5.4 XRF による半定量結果 (標準試料 : 元素)

| 元素 \ ベントナイト重量 [mg] | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 | 200 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Na | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 2.9 | 2.8 | 2.9 |
| Mg | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.5 | 2.6 | 2.6 |
| Al | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| Si | 73 | 73 | 72 | 71 | 70 | 70 |
| P | 0.13 | 0.011 | 0.080 | 0.068 | 0.080 | 0.069 |
| S | 1.2 | 0.97 | 0.83 | 0.77 | 0.73 | 0.69 |
| K | 0.61 | 0.54 | 0.61 | 0.63 | 0.67 | 0.64 |
| Ca | 3.4 | 3.6 | 3.9 | 4.1 | 4.3 | 4.3 |
| Ti | 0.18 | 0.20 | 0.24 | 0.28 | 0.24 | 0.32 |
| Mn | 0.079 | 0.073 | 0.088 | 0.12 | 0.12 | 0.15 |
| Fe | 1.6 | 1.7 | 2.4 | 3.2 | 3.9 | 4.2 |
| Ni | 0.034 | 0.039 | 0.012 | 0.018 | 0.016 | 0.013 |
| Cu | — | 0.014 | 0.017 | 0.009 | 0.008 | 0.004 |
| Zn | — | — | 0.005 | 0.011 | 0.016 | 0.018 |
| Sr | — | — | 0.007 | 0.015 | 0.022 | 0.038 |
| Y | — | — | — | 0.004 | 0.003 | 0.003 |
| Zr | — | 0.014 | 0.005 | 0.010 | 0.018 | 0.031 |
| Ba | 0.68 | 0.45 | 0.54 | 0.51 | 0.57 | 0.43 |

— : 不検出 , 単位 : mass%

表 5.5 XRF による半定量結果 (標準試料：酸化物)

| ベントナイト重量 酸化物 [mg] | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 | 200 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Na ₂ O | 3.19 | 3.20 | 3.16 | 3.08 | 2.95 | 2.95 |
| MgO | 3.06 | 3.12 | 3.03 | 2.87 | 2.95 | 2.95 |
| Al ₂ O ₃ | 15.80 | 16.00 | 15.80 | 15.70 | 15.80 | 15.80 |
| SiO ₂ | 74.00 | 74.00 | 73.80 | 73.70 | 73.20 | 73.10 |
| P ₂ O ₅ | 0.098 | 0.082 | 0.063 | 0.054 | 0.064 | 0.056 |
| SO ₃ | 1.04 | 0.807 | 0.699 | 0.663 | 0.635 | 0.603 |
| K ₂ O | 0.238 | 0.211 | 0.241 | 0.255 | 0.272 | 0.261 |
| CaO | 1.51 | 1.61 | 1.75 | 1.91 | 2.00 | 2.04 |
| TiO ₂ | 0.09 | 0.103 | 0.123 | 0.146 | 0.129 | 0.169 |
| MnO | 0.03 | 0.028 | 0.034 | 0.048 | 0.046 | 0.059 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.693 | 0.729 | 1.03 | 1.37 | 1.69 | 1.84 |
| NiO | 0.013 | 0.014 | 0.004 | 0.007 | 0.006 | 0.005 |
| CuO | — | 0.005 | 0.006 | 0.003 | 0.003 | 0.002 |
| ZnO | — | 0.005 | 0.002 | 0.004 | 0.006 | 0.006 |
| SrO | — | — | 0.002 | 0.005 | 0.008 | 0.013 |
| Y ₂ O ₃ | — | — | — | 0.002 | 0.001 | 0.003 |
| ZrO ₂ | — | — | 0.002 | 0.004 | 0.007 | 0.012 |
| BaO | 0.23 | 0.154 | 0.187 | 0.177 | 0.201 | 0.154 |

— : 不検出 , 単位 : mass%

ベントナイトの標準試料を用いた XRF 分析における検出強度の確認結果からは、サンプル量として 100mg 以上が望ましいことが把握できたものの、本試料の質量は各サンプリング位置においてこの質量には満たない。しかしながら、図 5.19 の試料量と半定量値からも分かるように、最少質量の 5mg であっても極めて低濃度成分でない限りは検出が可能であることから、各サンプリングエリアの質量を考慮したうえで本試料を用いた分析を実施した。サンプリングエリア毎の測定チャートを図 5.21～図 5.25 に、半定量結果を図 5.26, 図 5.27 および表 5.6, 表 5.7 に示すとおりである。

XRF 分析における本試料に用いた使用量は、実測で表 5.8 に示すとおりであった。サンプリングエリア a 域～d 域に関しては、ほぼ 50mg の分析質量が担保された。なお、e 域においては、アクリルセルの表面に付着していた微量のサンプリング試料であったため、1.5mg という少量による測定となった。

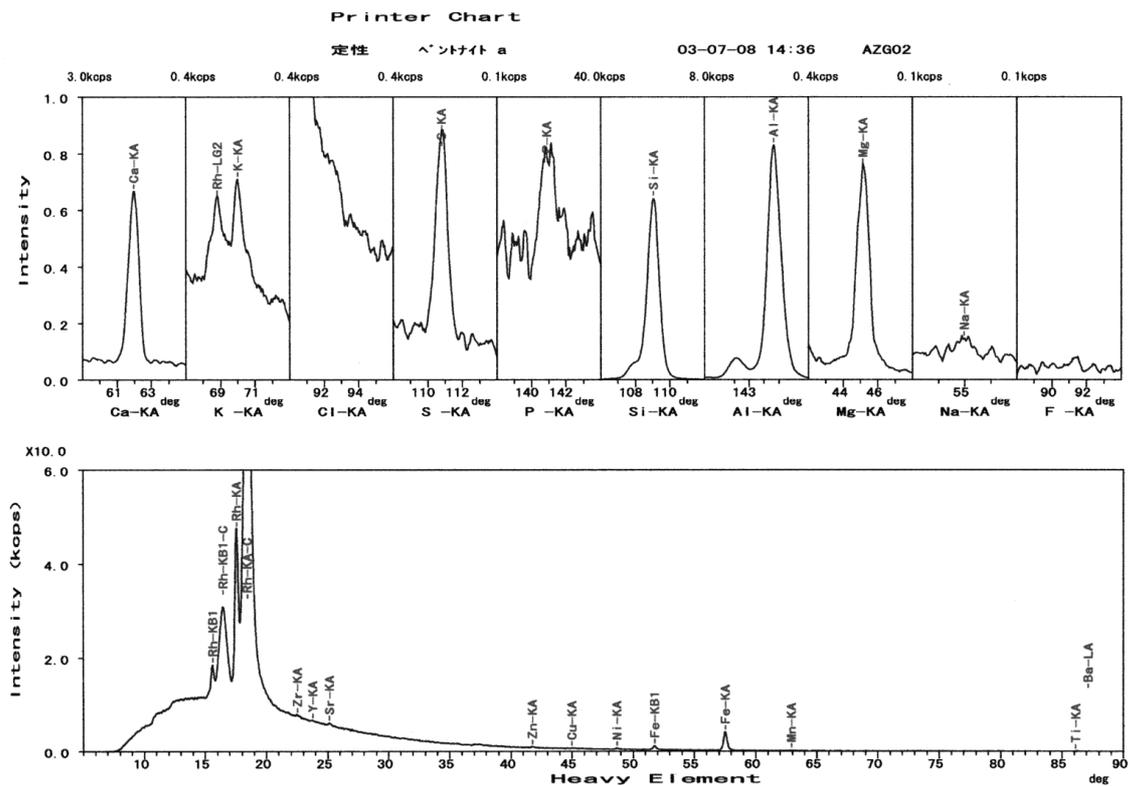


図 5.21 XRF チャート (本試料: a 域)

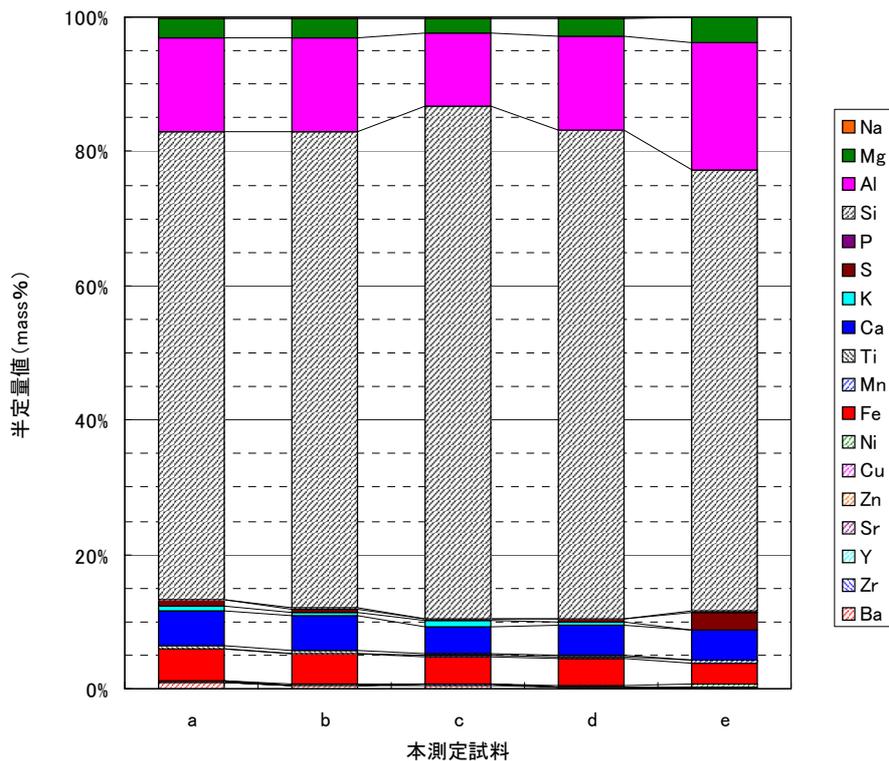


図 5.26 XRF による半定量結果 (本試料：元素)

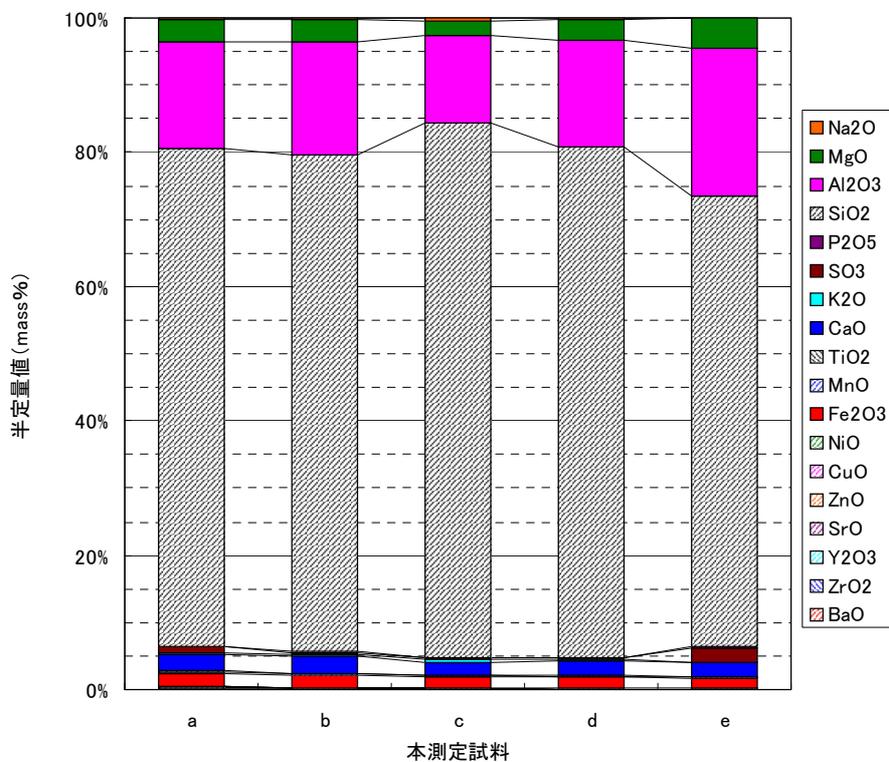


図 5.27 XRF による半定量結果 (本試料：酸化物)

表 5.6 XRF による半定量結果 (本試料 : 元素)

| 測定エリア 元素 | a 域 | b 域 | c 域 | d 域 | e 域 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|------|
| Na | 0.24 | 0.24 | 0.35 | 0.22 | — |
| Mg | 2.8 | 2.8 | 2.0 | 2.6 | 3.9 |
| Al | 14 | 14 | 11 | 14 | 19 |
| Si | 70 | 71 | 76 | 73 | 66 |
| P | 0.096 | 0.057 | 0.11 | 0.083 | 0.30 |
| S | 0.90 | 0.46 | 0.28 | 0.30 | 2.6 |
| K | 0.69 | 0.62 | 0.79 | 0.49 | — |
| Ca | 5.2 | 5.2 | 4.1 | 4.6 | 4.5 |
| Ti | 0.40 | 0.37 | 0.36 | 0.34 | — |
| Mn | 0.17 | 0.14 | 0.15 | 0.18 | 0.31 |
| Fe | 4.6 | 4.5 | 4.0 | 4.1 | 3.3 |
| Ni | 0.12 | 0.044 | 0.027 | 0.032 | 0.35 |
| Cu | 0.040 | 0.013 | 0.010 | 0.012 | — |
| Zn | 0.056 | 0.023 | 0.040 | 0.046 | 0.26 |
| Sr | 0.058 | 0.029 | 0.029 | 0.009 | — |
| Y | 0.012 | 0.008 | 0.011 | 0.004 | — |
| Zr | 0.033 | 0.017 | 0.024 | 0.015 | — |
| Ba | 0.92 | 0.50 | 0.58 | 0.25 | — |

— : 不検出 , 単位 : mass%

表 5.7 XRF による半定量結果 (本試料: 酸化物)

| 測定エリア 酸化物 | a 域 | b 域 | c 域 | d 域 | e 域 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Na ₂ O | 0.24 | 0.25 | 0.36 | 0.22 | — |
| MgO | 3.2 | 3.2 | 2.3 | 3.0 | 4.6 |
| Al ₂ O ₃ | 16 | 17 | 13 | 16 | 22 |
| SiO ₂ | 74 | 74 | 79 | 76 | 67 |
| P ₂ O ₅ | 0.08 | 0.046 | 0.084 | 0.066 | 0.24 |
| SO ₃ | 0.81 | 0.41 | 0.24 | 0.26 | 2.3 |
| K ₂ O | 0.29 | 0.26 | 0.32 | 0.20 | — |
| CaO | 2.5 | 2.4 | 1.9 | 2.1 | 2.1 |
| TiO ₂ | 0.22 | 0.20 | 0.19 | 0.18 | — |
| MnO | 0.068 | 0.055 | 0.058 | 0.073 | 0.12 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.0 | 2.0 | 1.7 | 1.8 | 1.5 |
| NiO | 0.045 | 0.016 | 0.010 | 0.012 | 0.13 |
| CuO | 0.015 | 0.005 | 0.004 | 0.004 | — |
| ZnO | 0.020 | 0.008 | 0.014 | 0.016 | 0.094 |
| SrO | 0.019 | 0.010 | 0.009 | 0.003 | — |
| Y ₂ O ₃ | 0.004 | 0.003 | 0.004 | 0.001 | — |
| ZrO ₂ | 0.012 | 0.006 | 0.009 | 0.006 | — |
| BaO | 0.33 | 0.18 | 0.20 | 0.088 | — |

— : 不検出 , 単位 : mass%

表 5.8 XRF 測定に用いた試料量

| サンプリングエリア | 実測試料量 [mg] |
|-----------|------------|
| a 域 | 49.9 |
| b 域 | 49.5 |
| c 域 | 103.3 |
| d 域 | 50.5 |
| e 域 | 1.5 |

5.2.2 エネルギー分散型X線分析 (SEM-EDX)

エネルギー分散形X線分析の特徴は、測定範囲 (B~U) の全エネルギーが同時に短時間で測定が可能であることや、特殊な試料を除いて前処理が不要で分析が行えることなど、未知試料の分析に適している。分析装置には、走査型顕微鏡 (日立製 : S-4200) , エネルギー分散型 X 線分析装置 (HORIBA 製 : EMAX-5770) を用いた。装置の仕様を表 5.9, 表 5.10 に示す。

5.2.1 項の XRF 分析と同様に SEM-EDX の測定感度を確認するための事前検討とし、ベントナイト (クニゲル V1) の標準試料を用い、40~2000 倍において各元素の半定量分析を行い、測定精度の確認を行った。測定結果を図 5.28~図 5.35 および表 5.11, 表 5.12 に示す。これらの結果より、倍率による変動は比較的小さいことを把握した。高倍率ほど試料自体の不均一性の影響を受けやすい可能性があるため、低倍率 (500 倍以下) での測定が妥当であることが考えられた。今回の検討での試料質量は約 2 mg であるが、試料固定時のロスを考慮すると数十 mg 以上の質量が必要であるものと考えられた。

表 5.9 走査型電子顕微鏡仕様

| | |
|---------|--|
| 分解能 | 1.6nm(加速電圧 15kV WD=5mm) |
| 倍率 | ×20~×100,000 |
| 最大試料サイズ | 120mm (直径) |
| 試料移動範囲 | X,Y 方向 : 0~25mm Z 方向 : 5~30mm 傾斜 : -5~45 度 |

表 5.10 エネルギー分散型 X 線分析装置

| | |
|----------|-----------|
| 検出器 | スーパーゼロフィー |
| エネルギー分解能 | 144eV 以下 |
| 検出可能元素 | B~U |

これらの事前の検討を踏まえ、本試料における測定は、100 倍の倍率として実施した。また、各エリアでサンプリングした試料は、乾燥したことにより固結していたため、粉碎処理を行った後、半定量分析を実施した。測定結果を図 5.36~図 5.42 および表 5.13, 表 5.14 に示す。

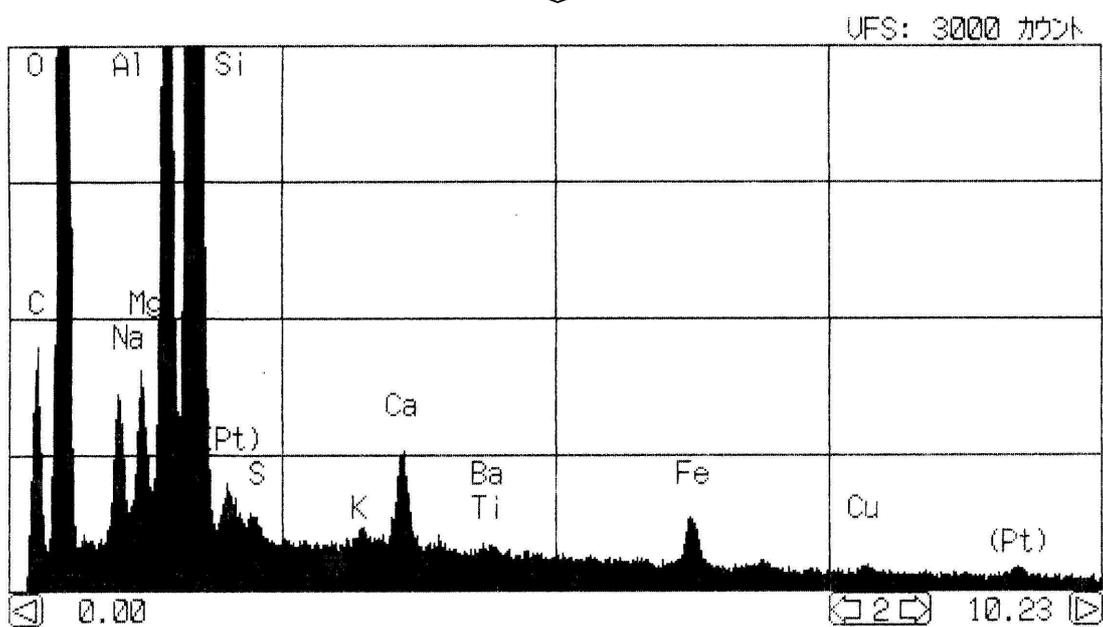
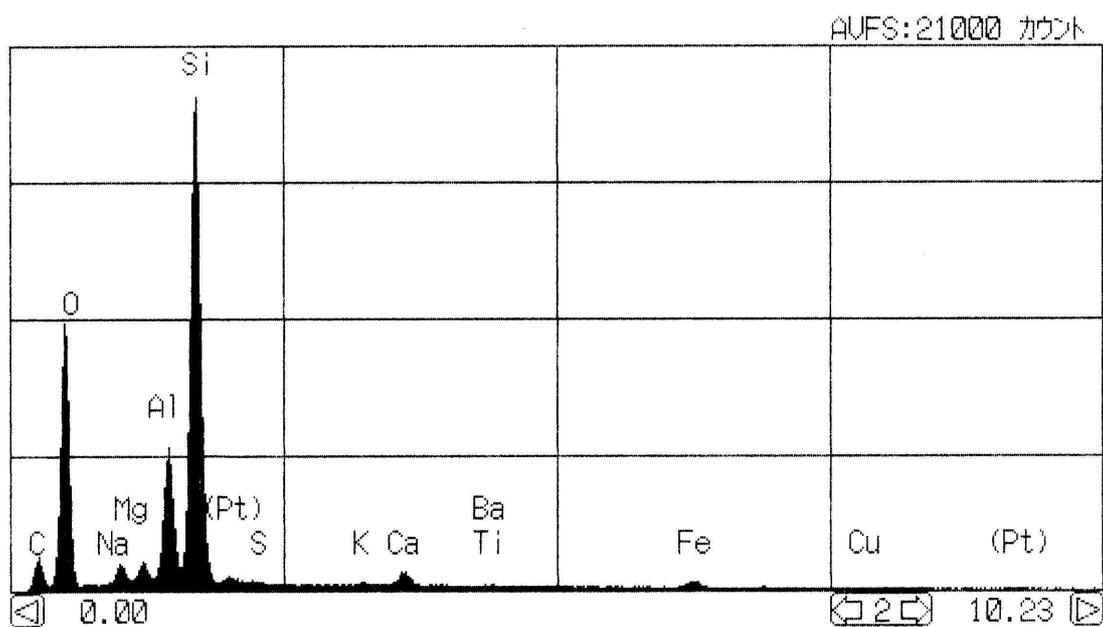


図 5.28 SEM-EDX スペクトル (標準試料 : 40 倍視野)

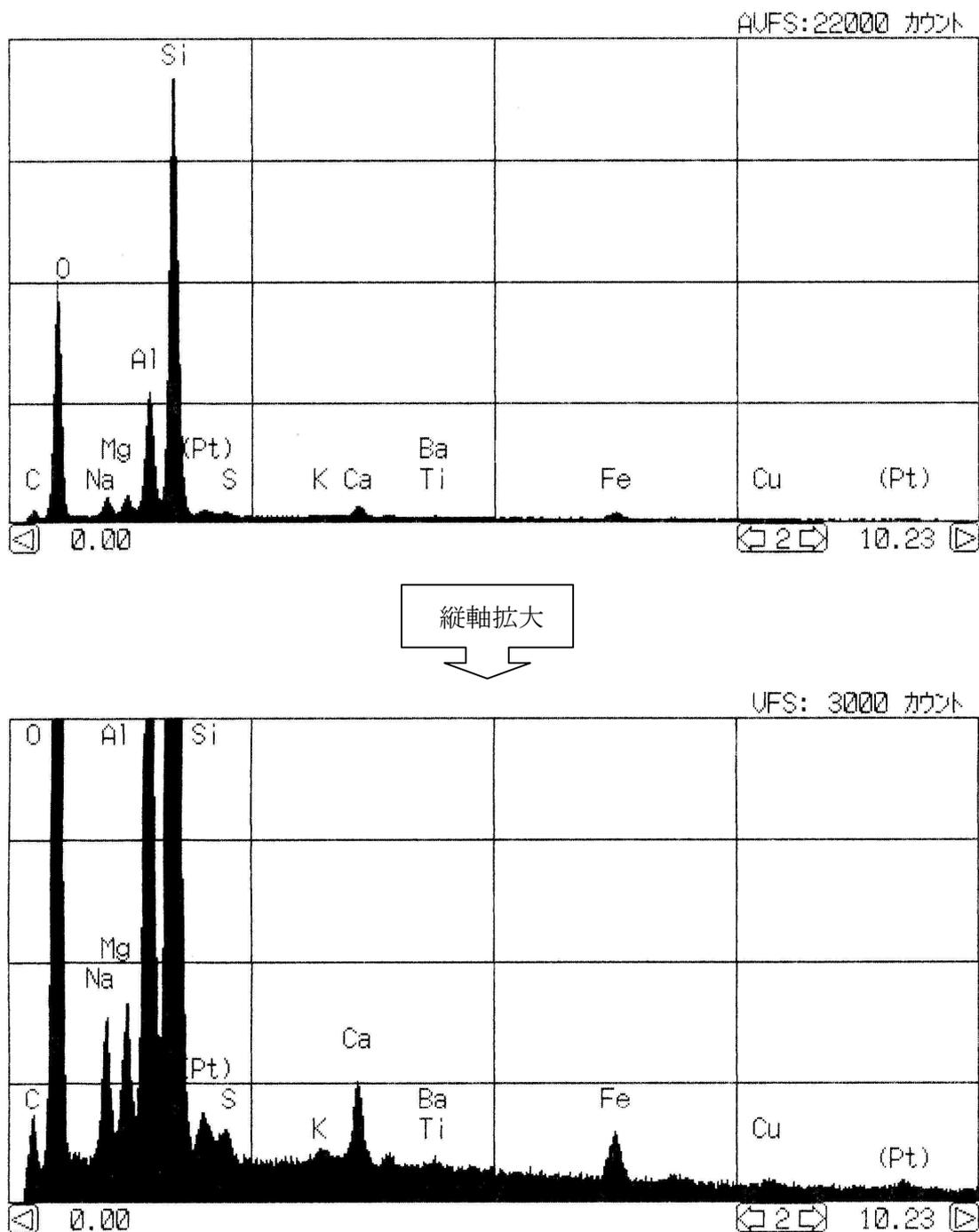


図 5.29 SEM-EDX スペクトル (標準試料 : 100 倍視野)

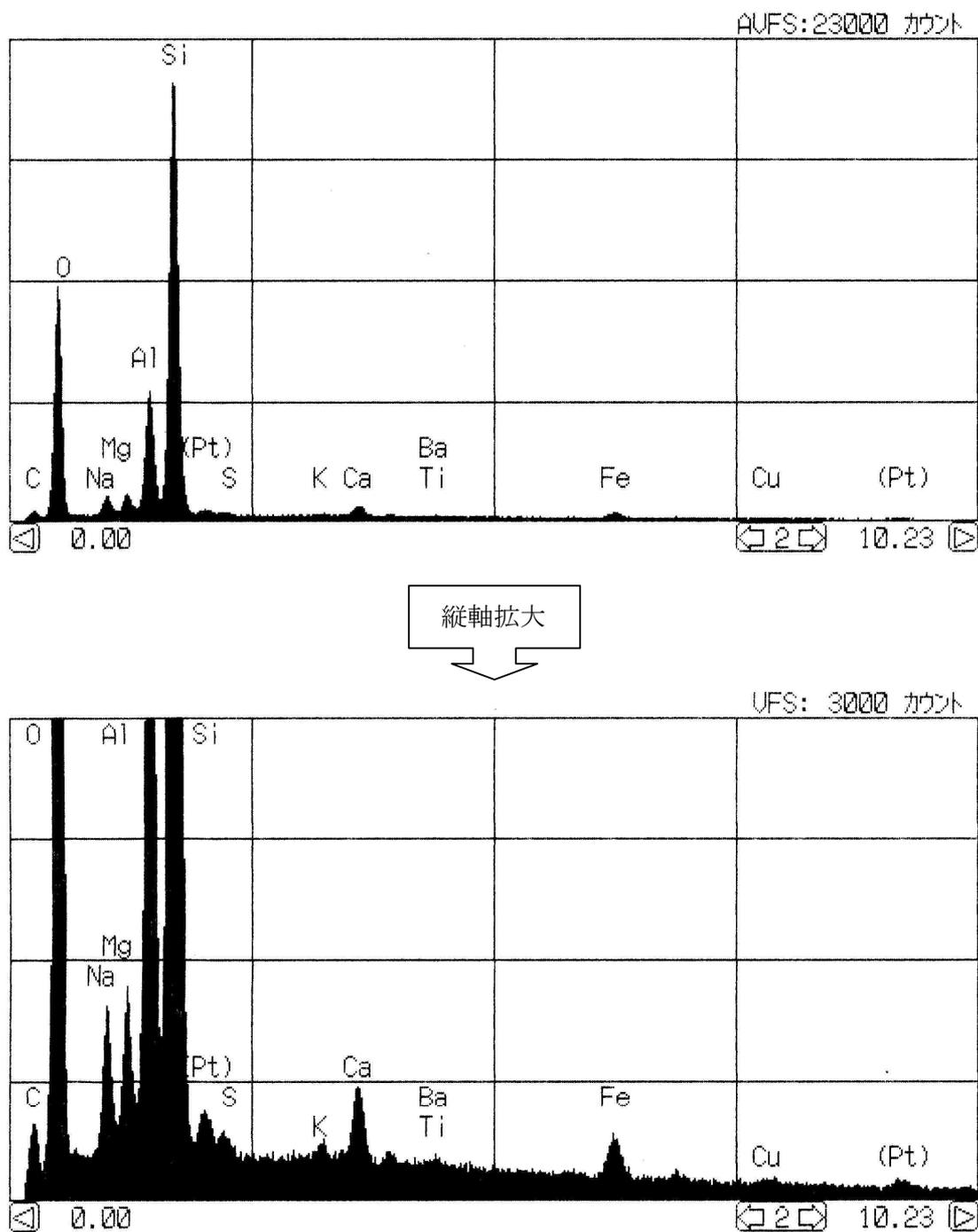


図 5.30 SEM-EDX スペクトル (標準試料 : 200 倍視野)

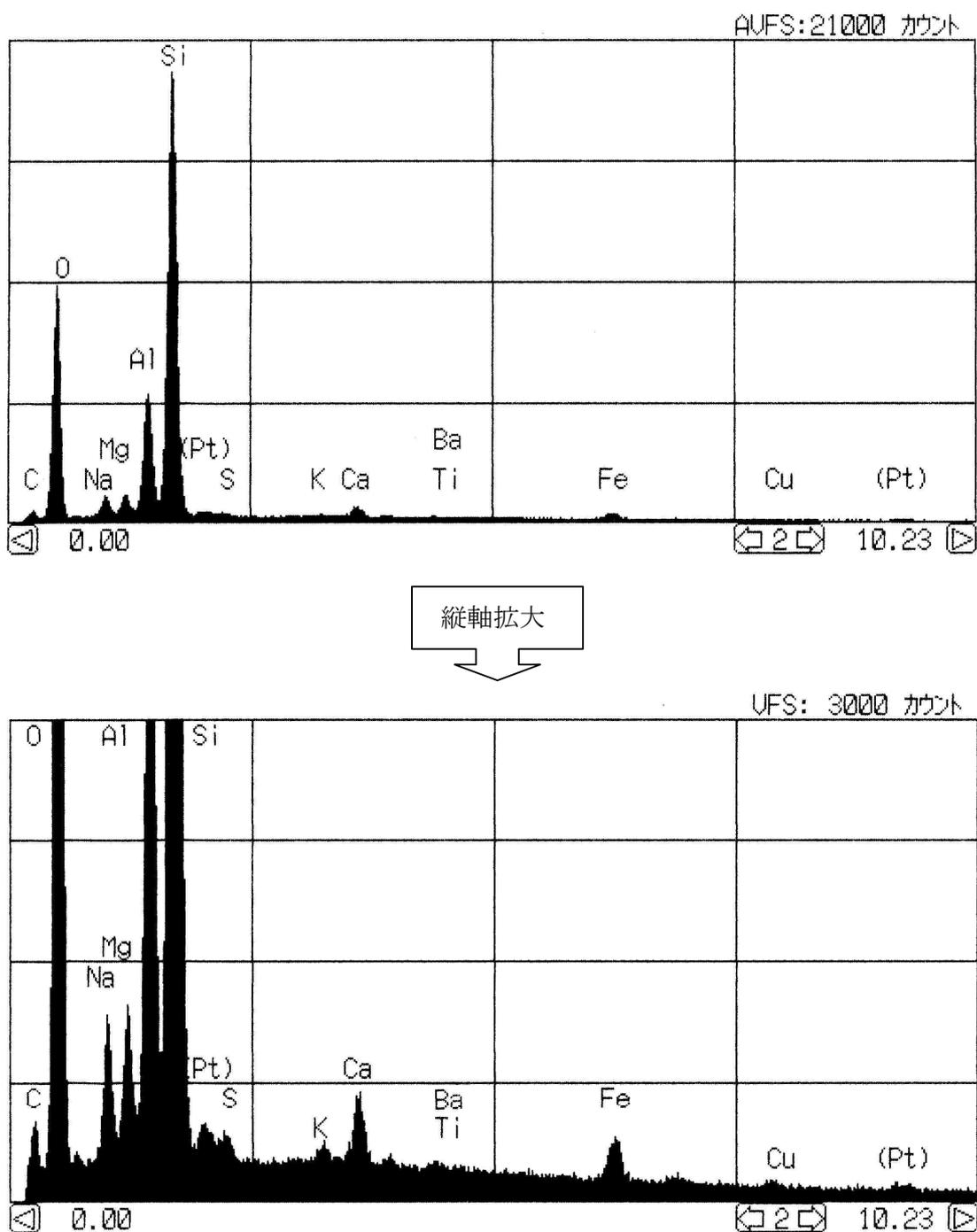
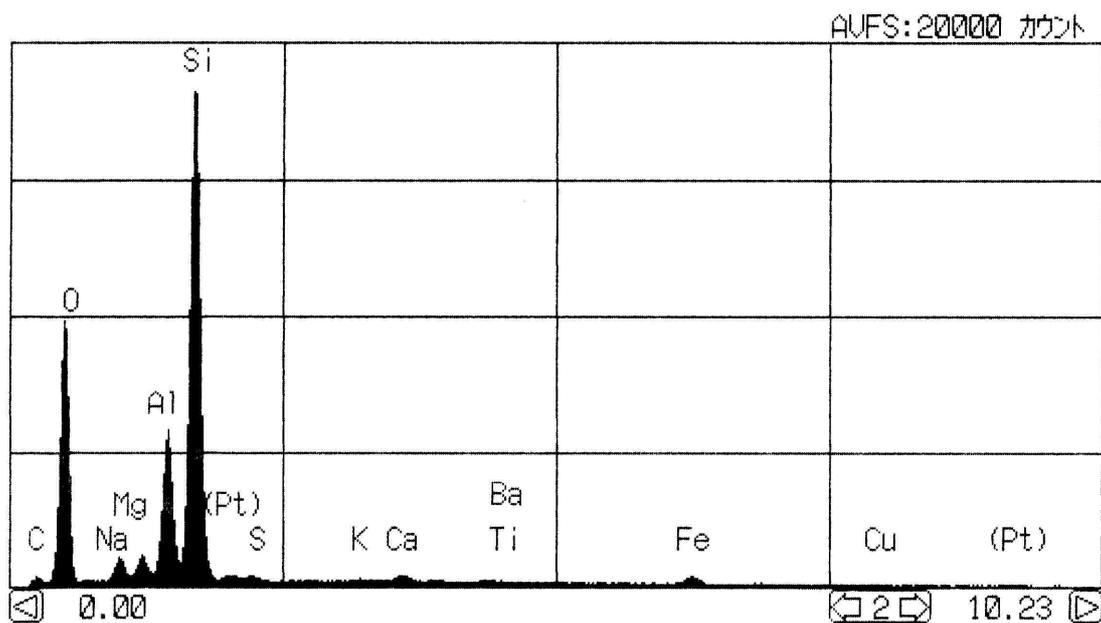


図 5.31 SEM-EDX スペクトル (標準試料 : 500 倍視野)



縦軸拡大

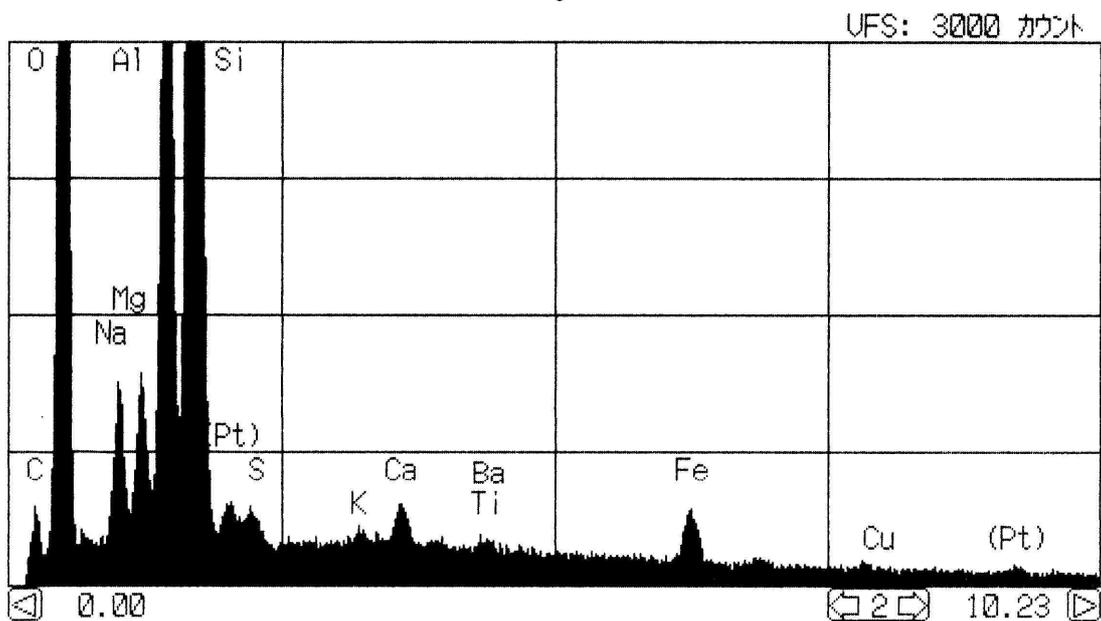
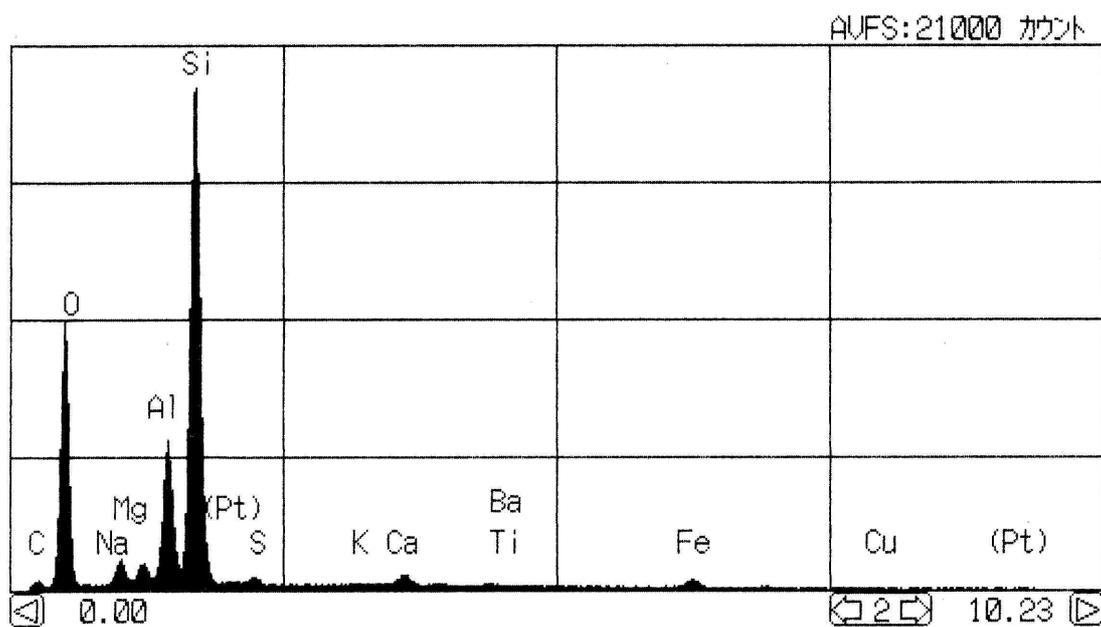


図 5.32 SEM-EDX スペクトル (標準試料 : 1000 倍視野)



縦軸拡大

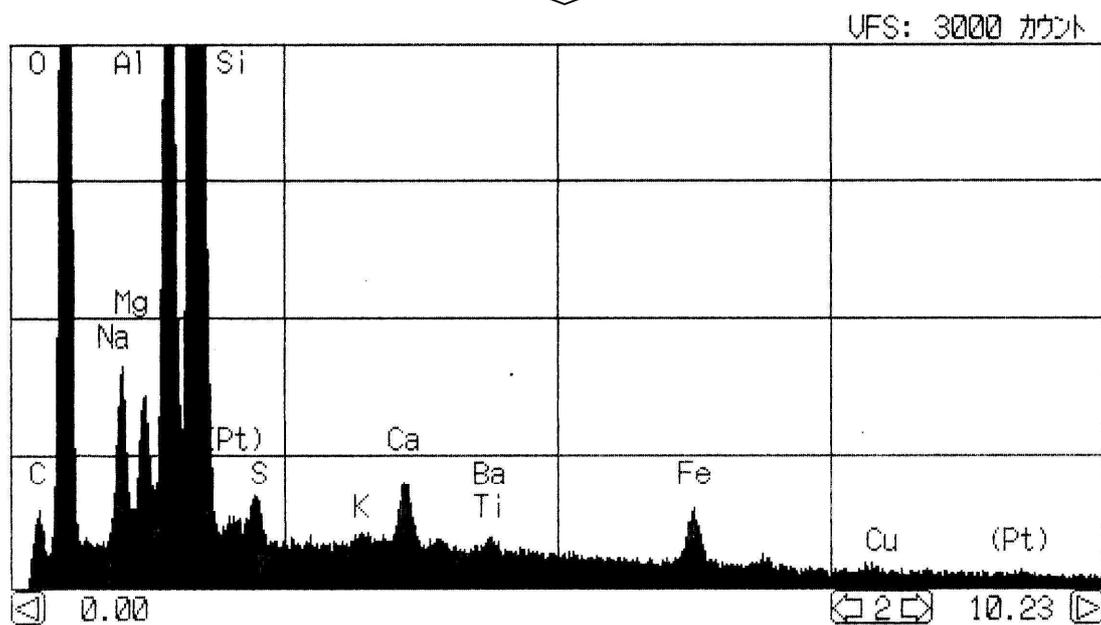


図 5.33 SEM-EDX スペクトル (標準試料 : 2000 倍視野)

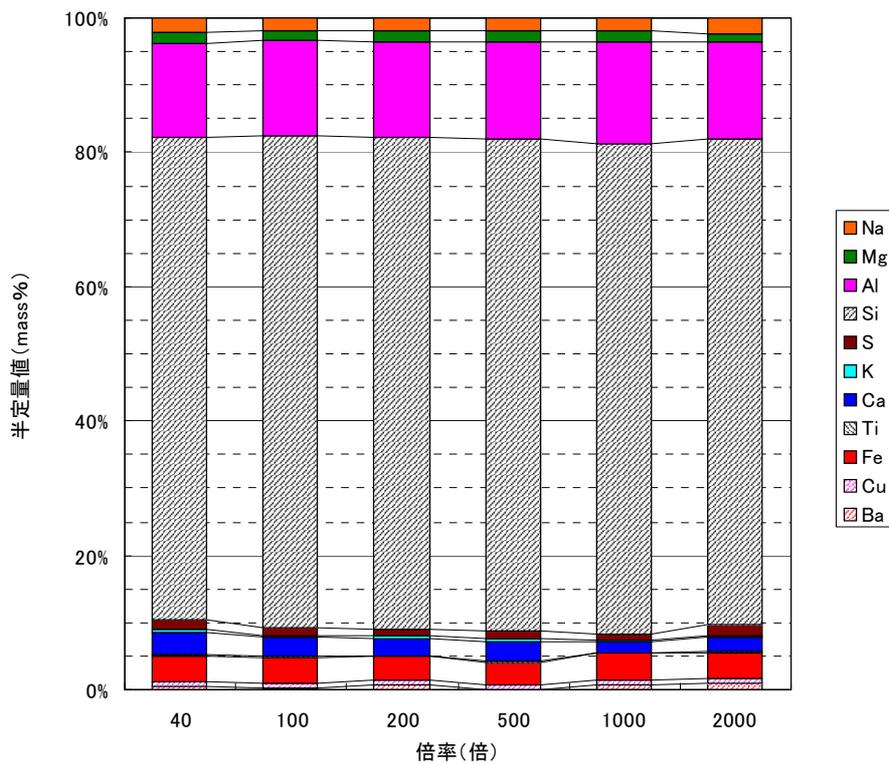


図 5.34 SEM-EDX による半定量結果 (標準試料：元素)

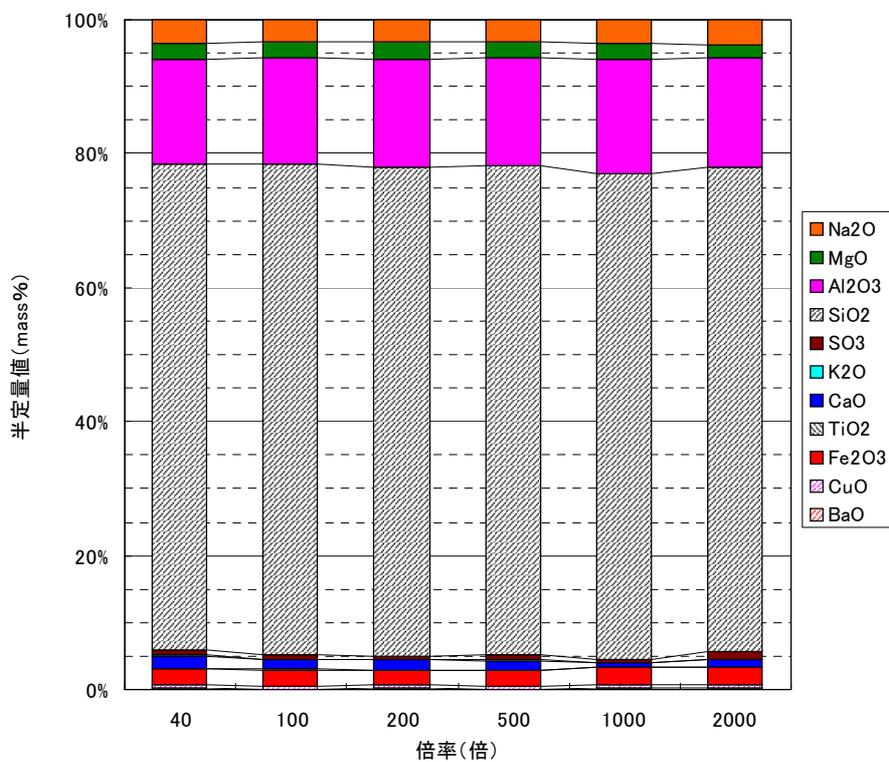


図 5.35 SEM-EDX による半定量結果 (標準試料：酸化物)

表 5.11 SEM-EDX による半定量結果 (標準試料 : 元素)

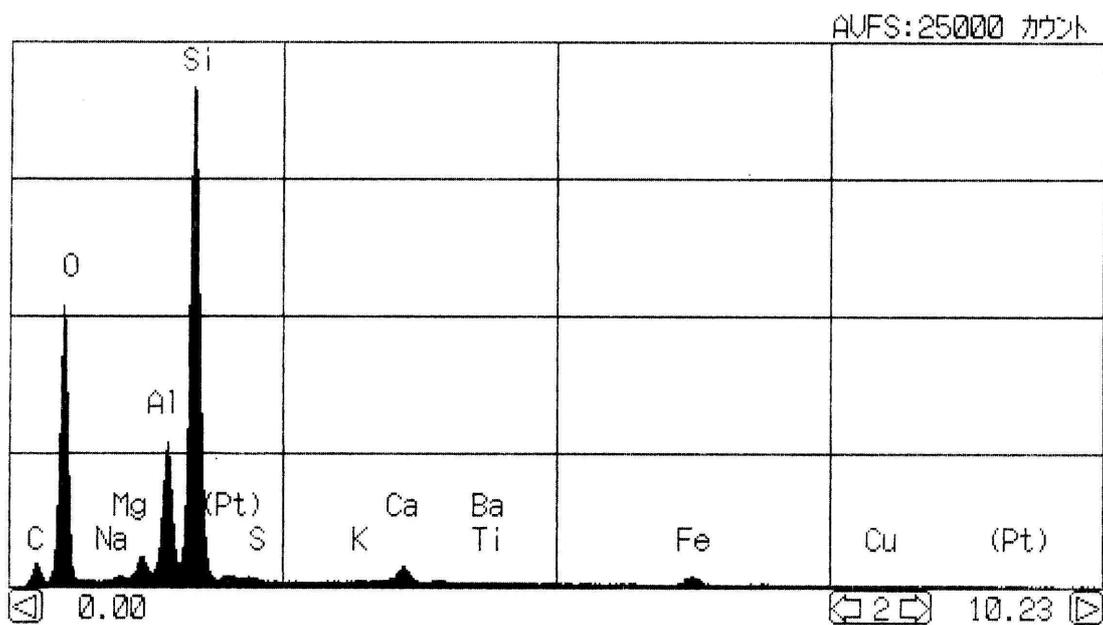
| 倍率 [倍] 元素 | 40 | 100 | 200 | 500 | 1000 | 2000 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Na | 2.23 | 1.87 | 2.01 | 2.00 | 2.01 | 2.43 |
| Mg | 1.60 | 1.40 | 1.51 | 1.46 | 1.44 | 1.23 |
| Al | 13.98 | 14.31 | 14.35 | 14.38 | 15.21 | 14.42 |
| Si | 71.82 | 73.14 | 73.07 | 73.10 | 73.05 | 72.22 |
| S | 1.28 | 1.17 | 0.99 | 1.11 | 1.05 | 1.67 |
| K | 0.49 | 0.29 | 0.40 | 0.51 | 0.24 | 0.19 |
| Ca | 3.38 | 2.85 | 2.77 | 2.74 | 1.43 | 2.20 |
| Ti | 0.17 | 0.16 | — | 0.24 | — | 0.14 |
| Fe | 3.82 | 3.78 | 3.47 | 3.38 | 4.19 | 3.93 |
| Cu | 0.78 | 0.76 | 0.72 | 0.64 | 0.64 | 0.73 |
| Ba | 0.43 | 0.26 | 0.69 | — | 0.73 | 0.85 |

— : 不検出 , 単位 : mass%

表 5.12 SEM-EDX による半定量結果 (標準試料 : 酸化物)

| 倍率 [倍] 酸化物 | 40 | 100 | 200 | 500 | 1000 | 2000 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Na ₂ O | 3.47 | 3.25 | 3.39 | 3.36 | 3.46 | 3.70 |
| MgO | 2.48 | 2.35 | 2.46 | 2.40 | 2.41 | 2.10 |
| Al ₂ O ₃ | 15.68 | 16.06 | 16.10 | 16.14 | 17.01 | 16.14 |
| SiO ₂ | 72.35 | 73.06 | 73.02 | 72.95 | 72.50 | 72.37 |
| SO ₃ | 0.81 | 0.66 | 0.52 | 0.61 | 0.53 | 1.12 |
| K ₂ O | 0.18 | 0.07 | 0.13 | 0.17 | 0.04 | 0.02 |
| CaO | 1.87 | 1.54 | 1.50 | 1.46 | 0.75 | 1.19 |
| TiO ₂ | 0.12 | 0.10 | — | 0.15 | — | 0.10 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.40 | 2.35 | 2.17 | 2.37 | 2.61 | 2.46 |
| CuO | 0.47 | 0.45 | 0.43 | 0.39 | 0.39 | 0.44 |
| BaO | 0.17 | 0.10 | 0.29 | — | 0.30 | 0.35 |

— : 不検出 , 単位 : mass%



縦軸拡大

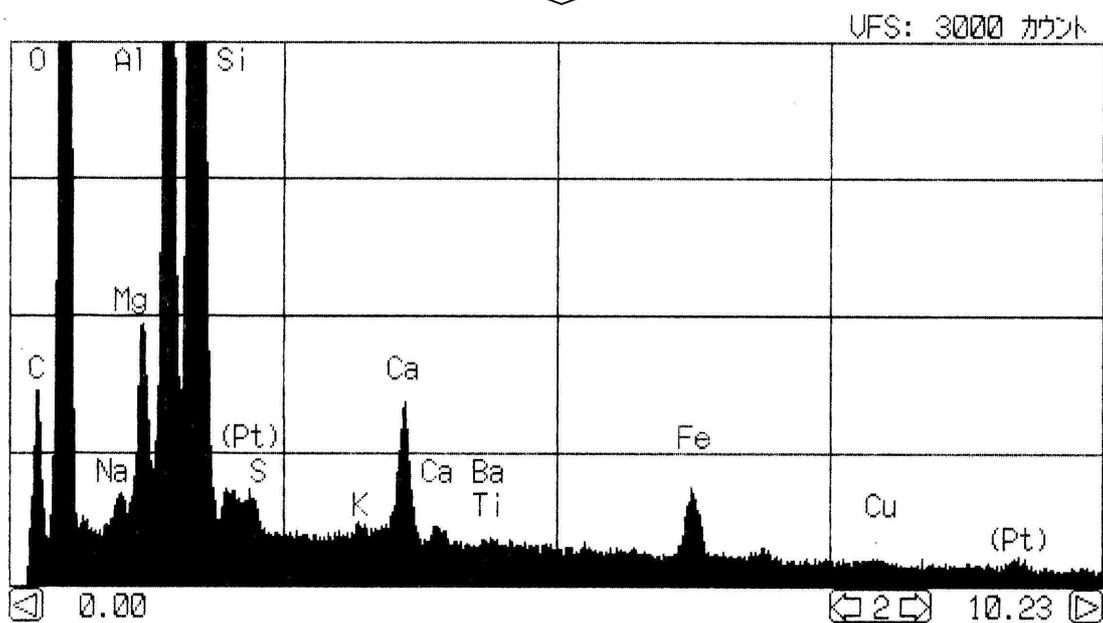
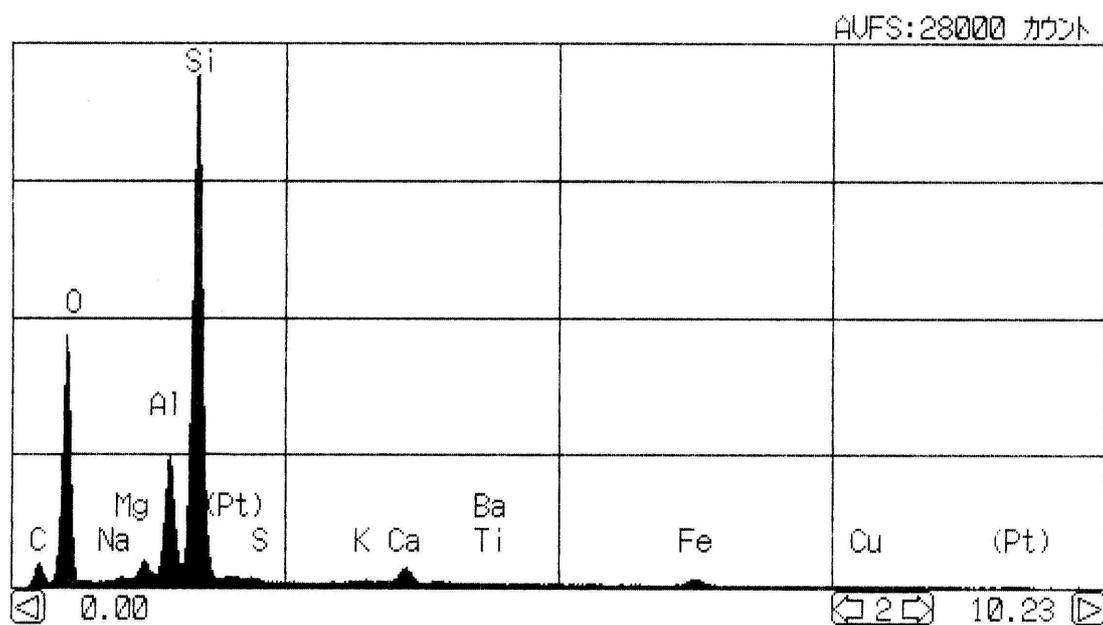


図 5.36 SEM-EDX スペクトル (本試料 a 域 : 100 倍視野)



縦軸拡大

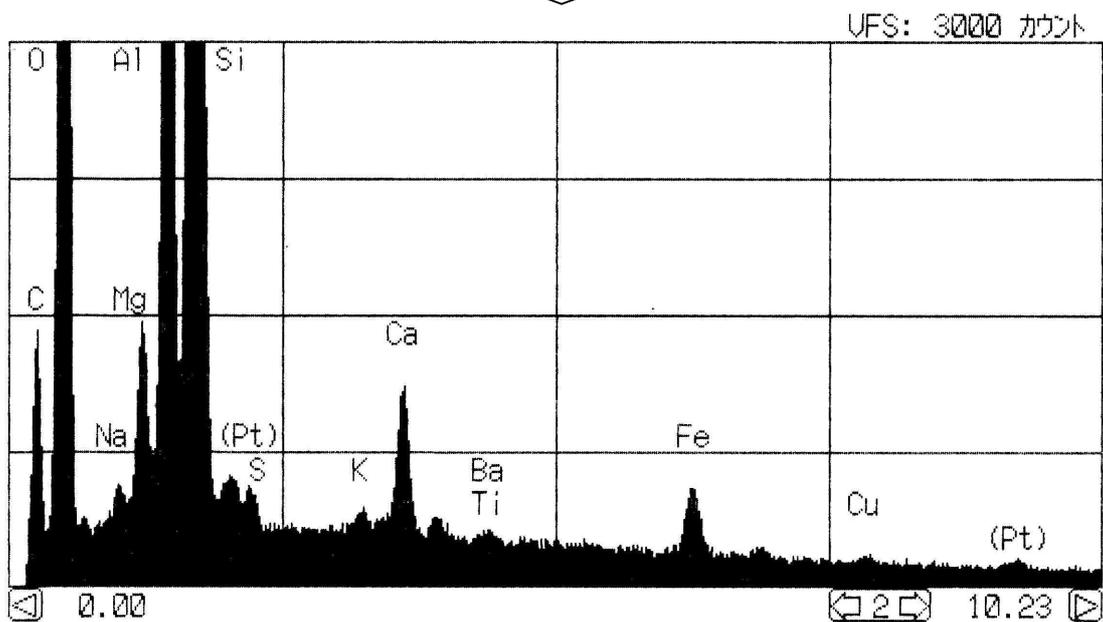
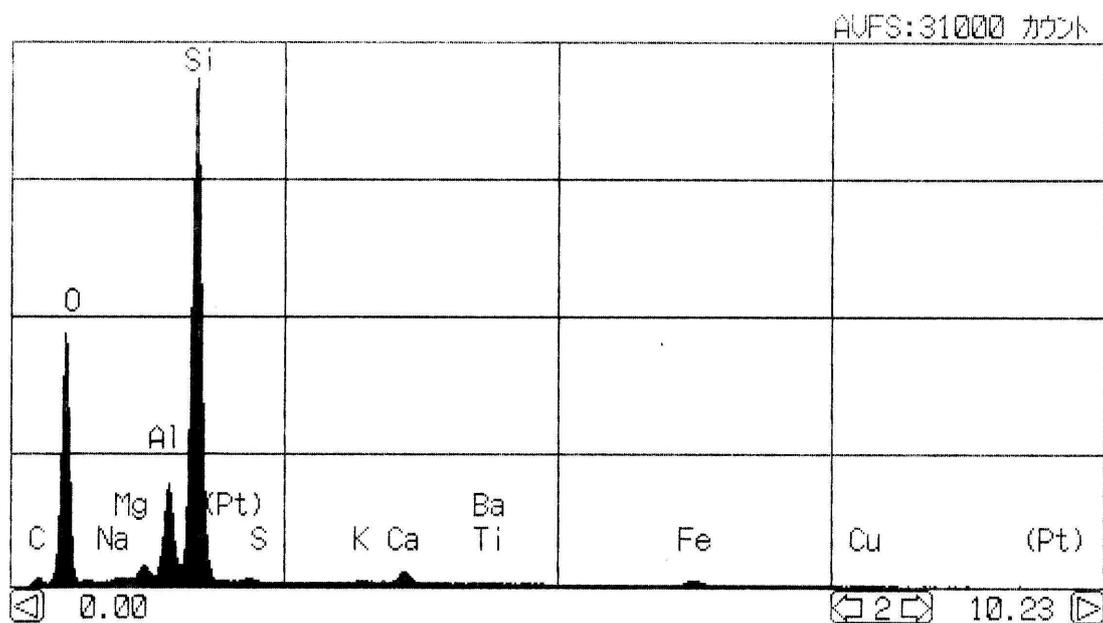


図 5.37 SEM-EDX スペクトル (本試料 b 域 : 100 倍視野)



縦軸拡大

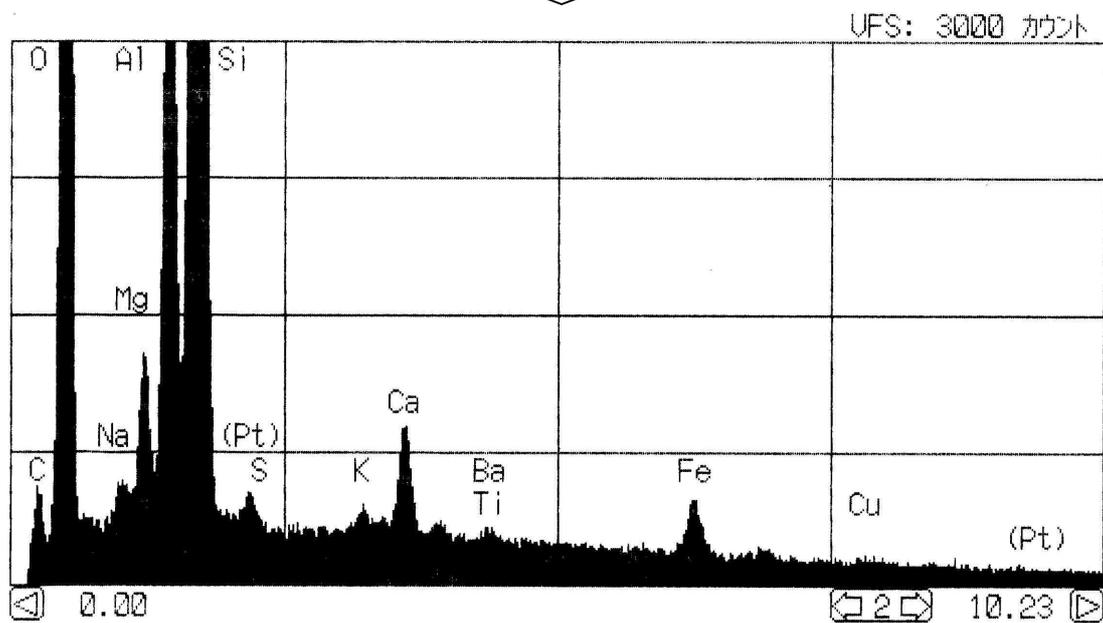


図 5.38 SEM-EDX スペクトル (本試料 c 域 : 100 倍視野)

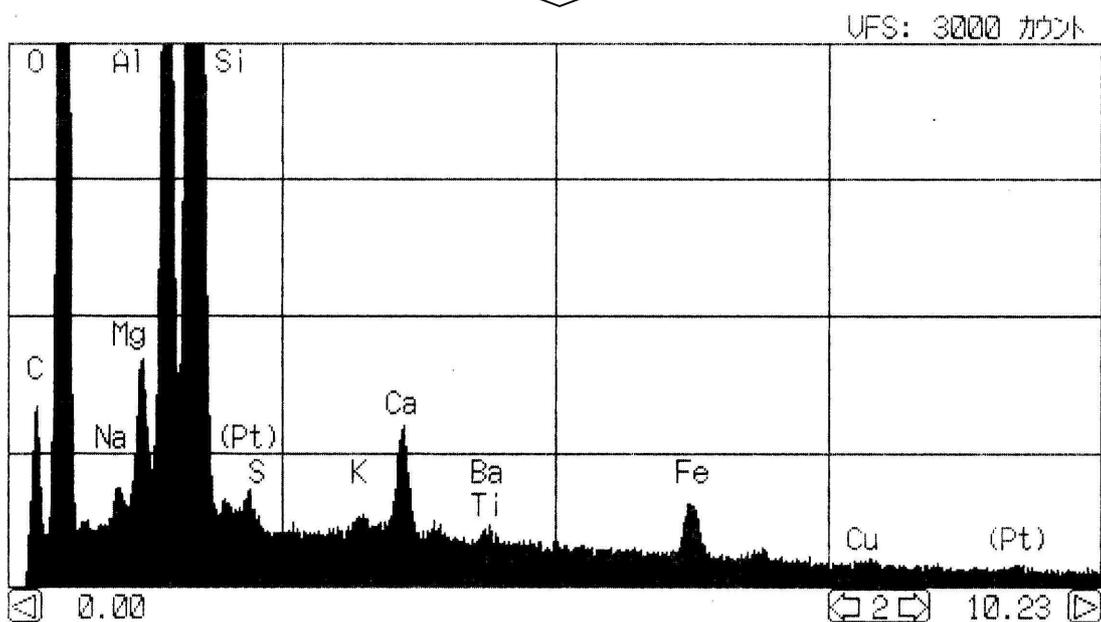
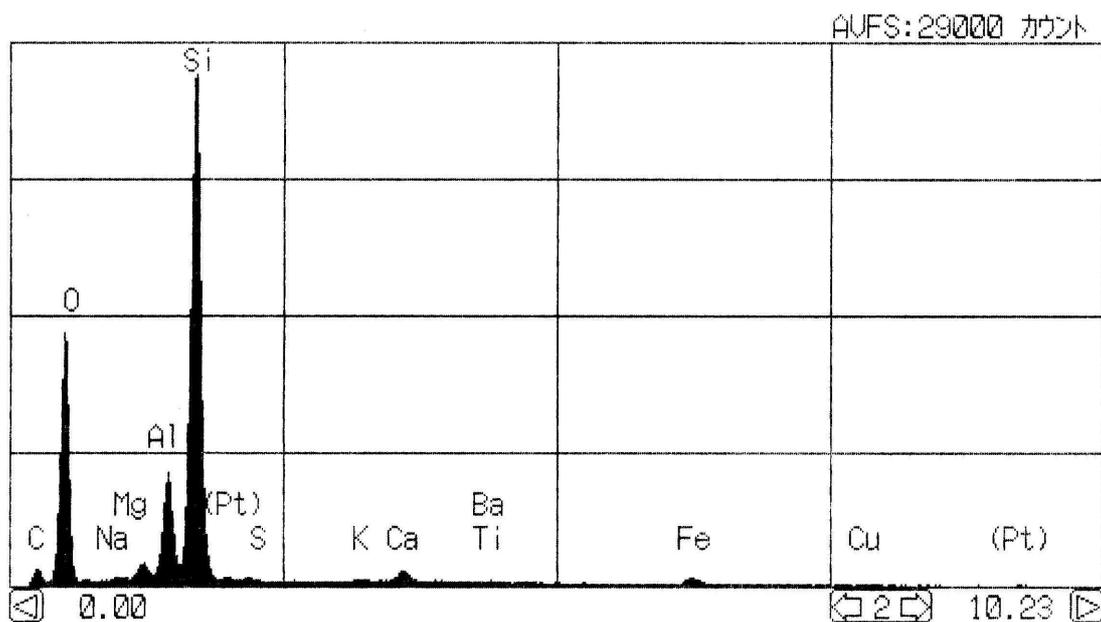
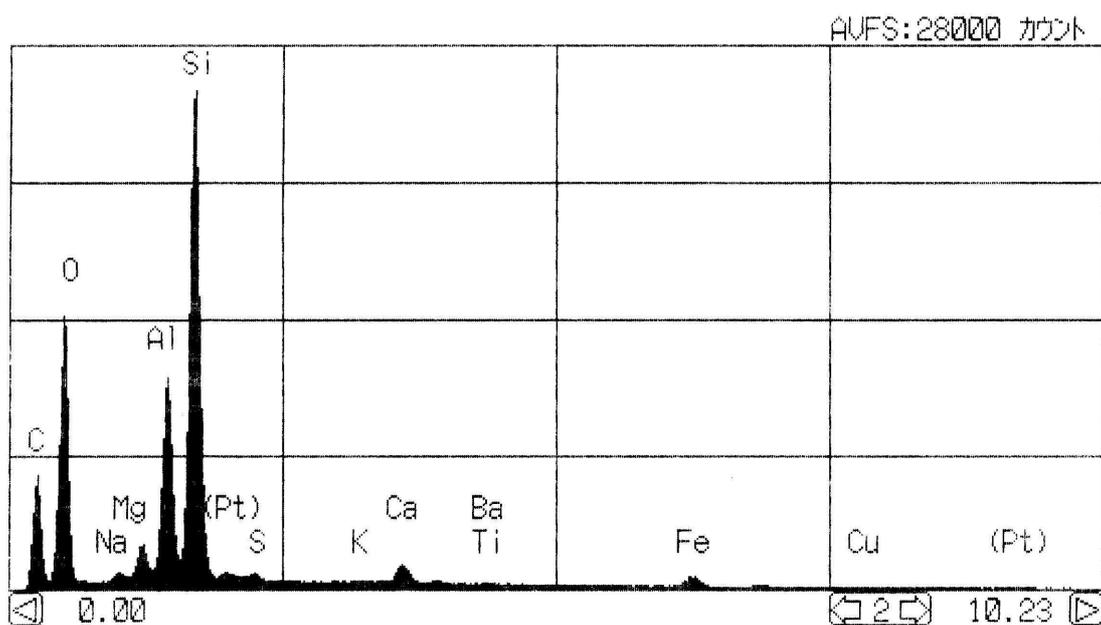


図 5.39 SEM-EDX スペクトル (本試料 d 域 : 100 倍視野)



縦軸拡大

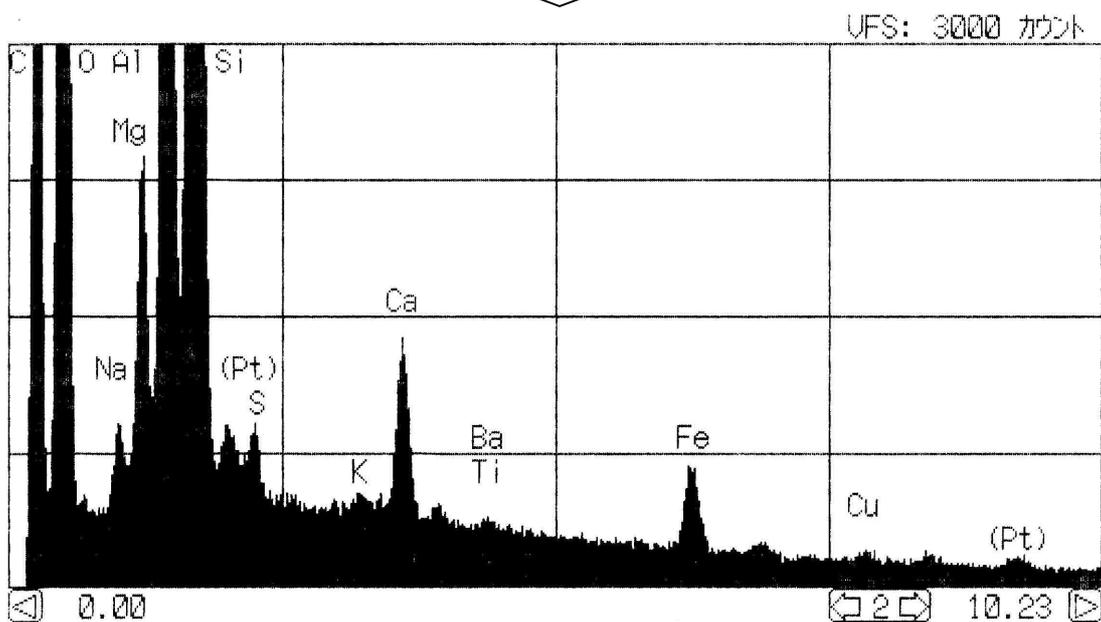


図 5.40 SEM-EDX スペクトル (本試料 e 域 : 100 倍視野)

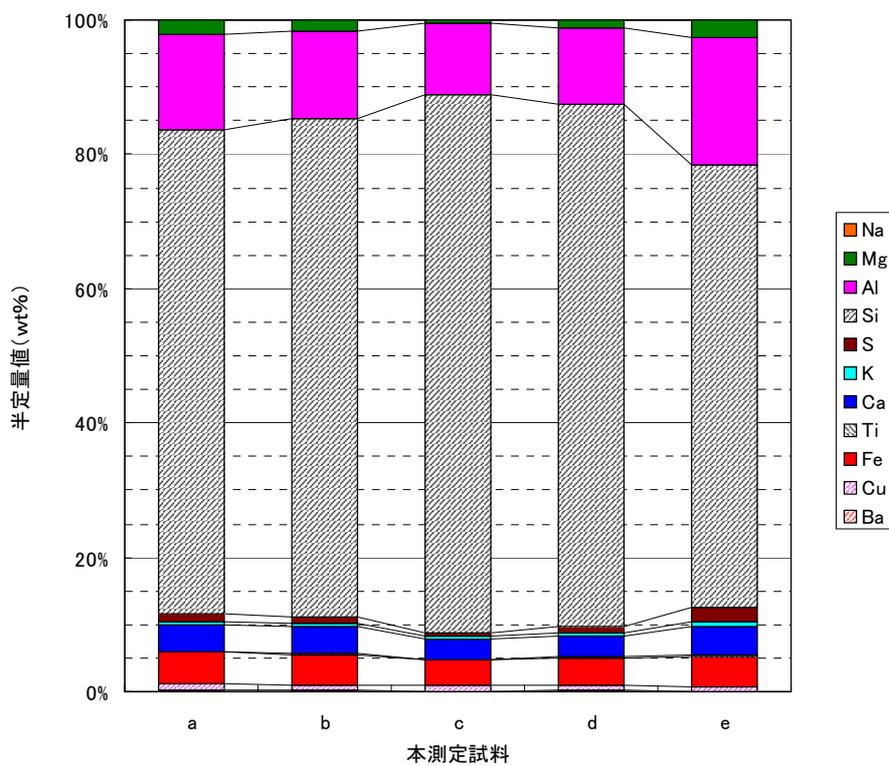


図 5.41 SEM-EDX による半定量結果 (本試料：元素)

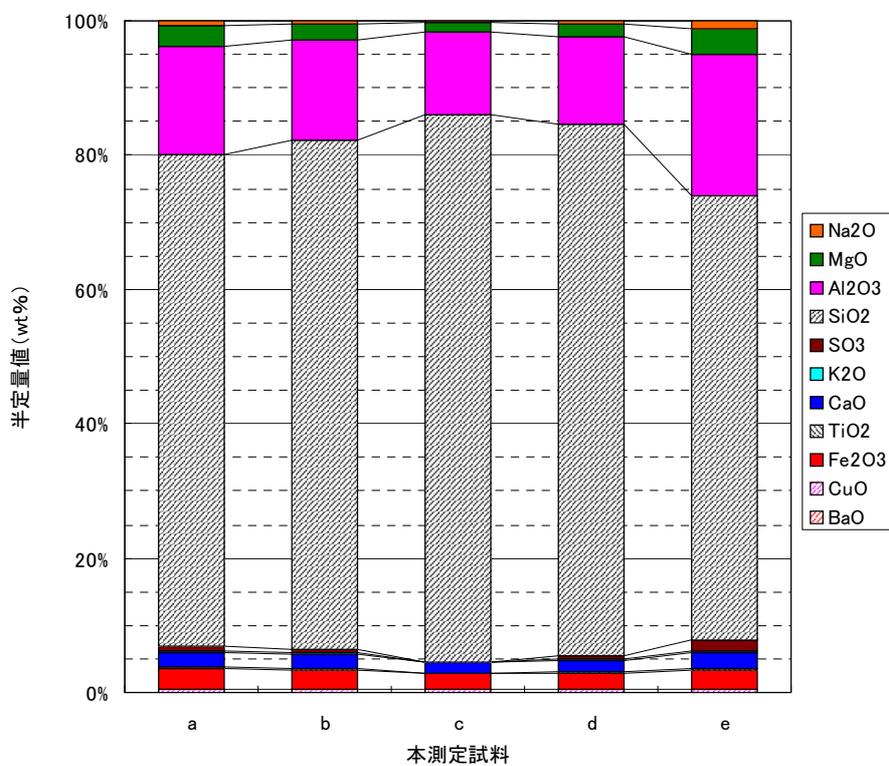


図 5.42 SEM-EDX による半定量結果 (本試料：酸化物)

表 5.13 SEM-EDX による半定量結果 (本試料 : 元素)

| 測定エリア 元素 | a 域 | b 域 | c 域 | d 域 | e 域 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Na | — | — | — | — | — |
| Mg | 2.13 | 1.56 | 1.50 | 1.07 | 2.72 |
| Al | 14.26 | 13.14 | 10.54 | 11.42 | 18.83 |
| Si | 71.92 | 74.09 | 80.23 | 77.80 | 65.87 |
| S | 1.33 | 1.11 | 0.52 | 0.87 | 2.26 |
| K | 0.41 | 0.48 | 0.28 | 0.44 | 0.56 |
| Ca | 3.91 | 3.97 | 3.10 | 3.11 | 4.21 |
| Ti | 0.20 | 0.25 | 0.18 | 0.32 | 0.36 |
| Fe | 4.76 | 4.38 | 3.76 | 4.02 | 4.56 |
| Cu | 0.84 | 0.78 | 0.87 | 0.69 | 0.63 |
| Ba | 0.24 | 0.23 | — | 0.25 | — |

— : 不検出 , 単位 : mass%

表 5.14 SEM-EDX による半定量結果 (本試料 : 酸化物)

| 測定エリア 酸化物 | a 域 | b 域 | c 域 | d 域 | e 域 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Na ₂ O | 0.75 | 0.49 | 0.20 | 0.43 | 1.15 |
| MgO | 2.99 | 2.44 | 1.55 | 1.97 | 3.74 |
| Al ₂ O ₃ | 16.09 | 14.93 | 12.16 | 13.02 | 21.23 |
| SiO ₂ | 73.22 | 75.65 | 81.51 | 79.19 | 66.06 |
| SO ₃ | 0.90 | 0.66 | 0.02 | 0.39 | 1.72 |
| K ₂ O | 0.14 | 0.17 | 0.09 | 0.22 | 0.23 |
| CaO | 2.20 | 2.21 | 1.63 | 1.68 | 2.38 |
| TiO ₂ | 0.14 | 0.17 | 0.09 | 0.22 | 0.23 |
| Fe ₂ O ₃ | 3.02 | 2.76 | 2.29 | 2.48 | 2.91 |
| CuO | 0.49 | 0.46 | 0.50 | 0.40 | 0.38 |
| BaO | 0.06 | 0.07 | — | 0.07 | — |

— : 不検出 , 単位 : mass%

5.3 元素分析結果の整理

XRFならびにSEM-EDXにて測定を行った各元素について、測定位置を考慮し、その傾向性の確認を行った。図5.43～図5.45に元素の半定量値を整理した結果を、図5.46～図5.48に酸化物形態での半定量値を整理した結果を示す。図は、X軸に標準試料と元素分析を行ったサンプリング位置のa域～e域の範囲、Y軸に半定量値を示している。図から分かるように、試験に供する前の標準試料と、分析した域による半定量値の推移傾向（半定量値の減少や増加）が分かる。

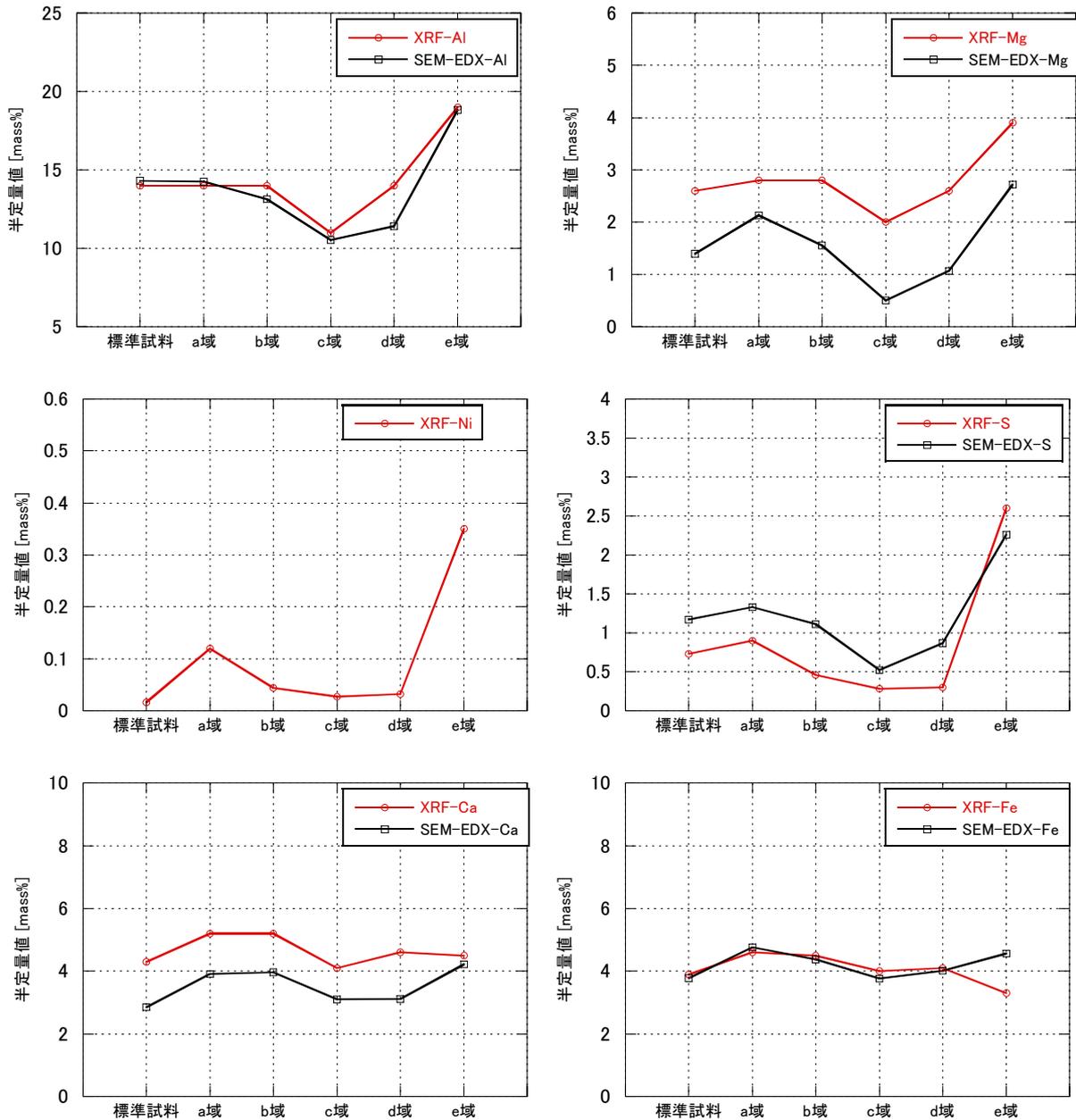


図 5.43 測定位置における半定量値の推移 (元素)

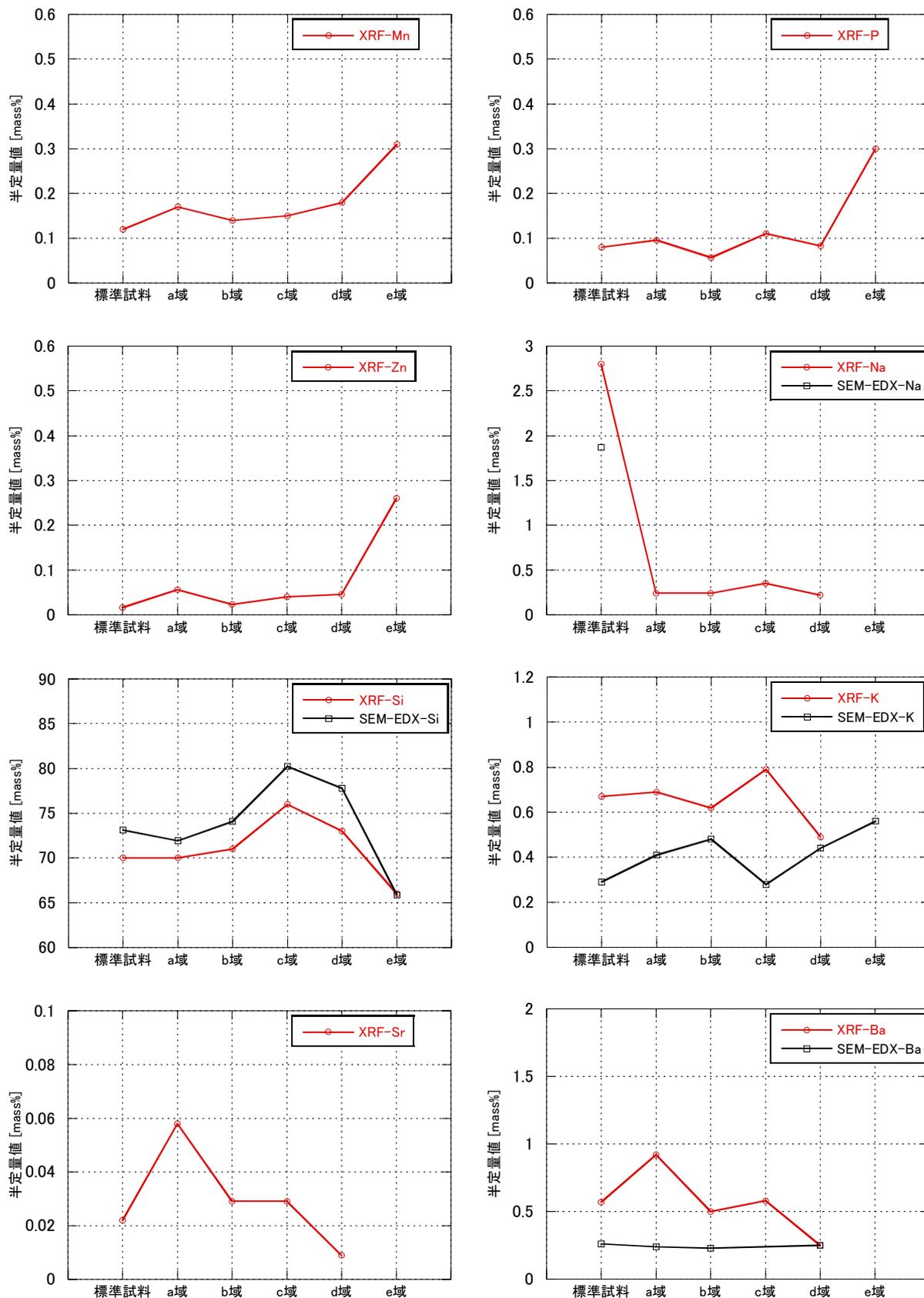


図 5.44 測定位置における半定量値の推移 (元素)

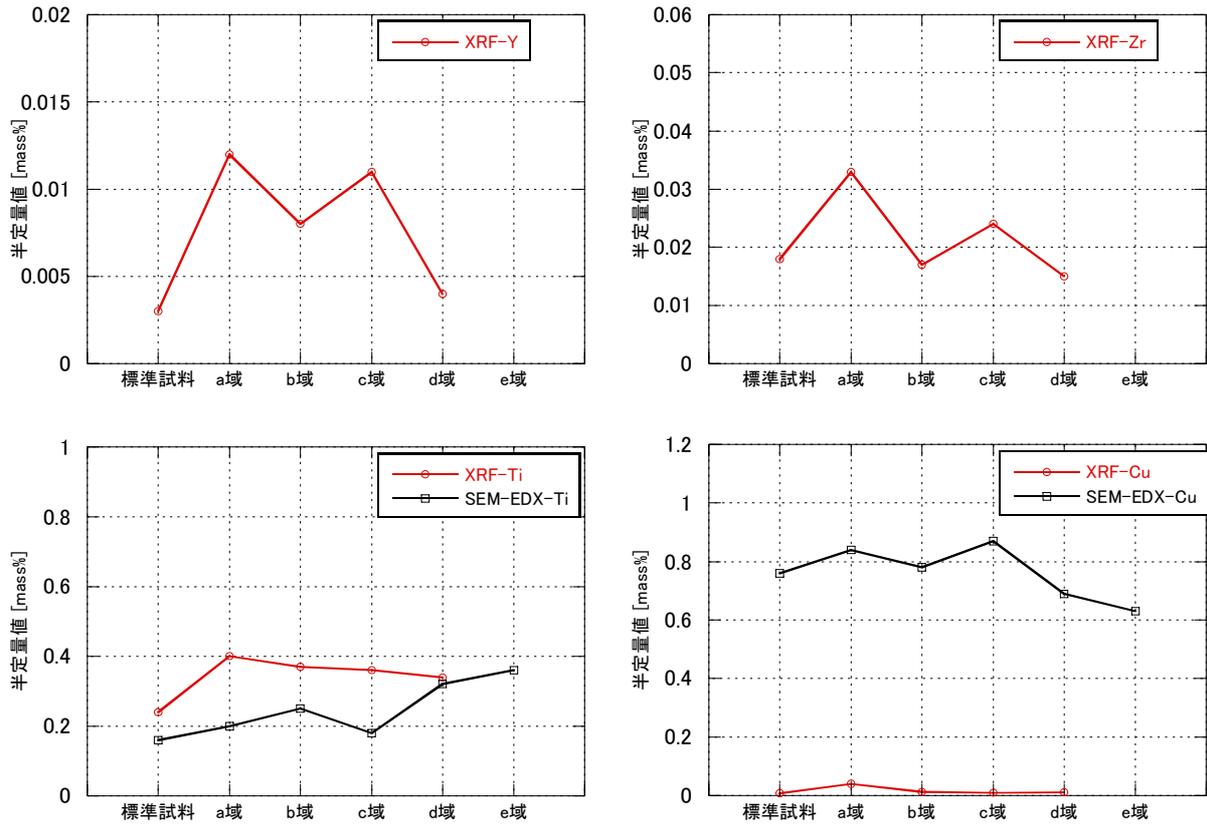


図 5.45 測定位置における半定量値の推移 (元素)

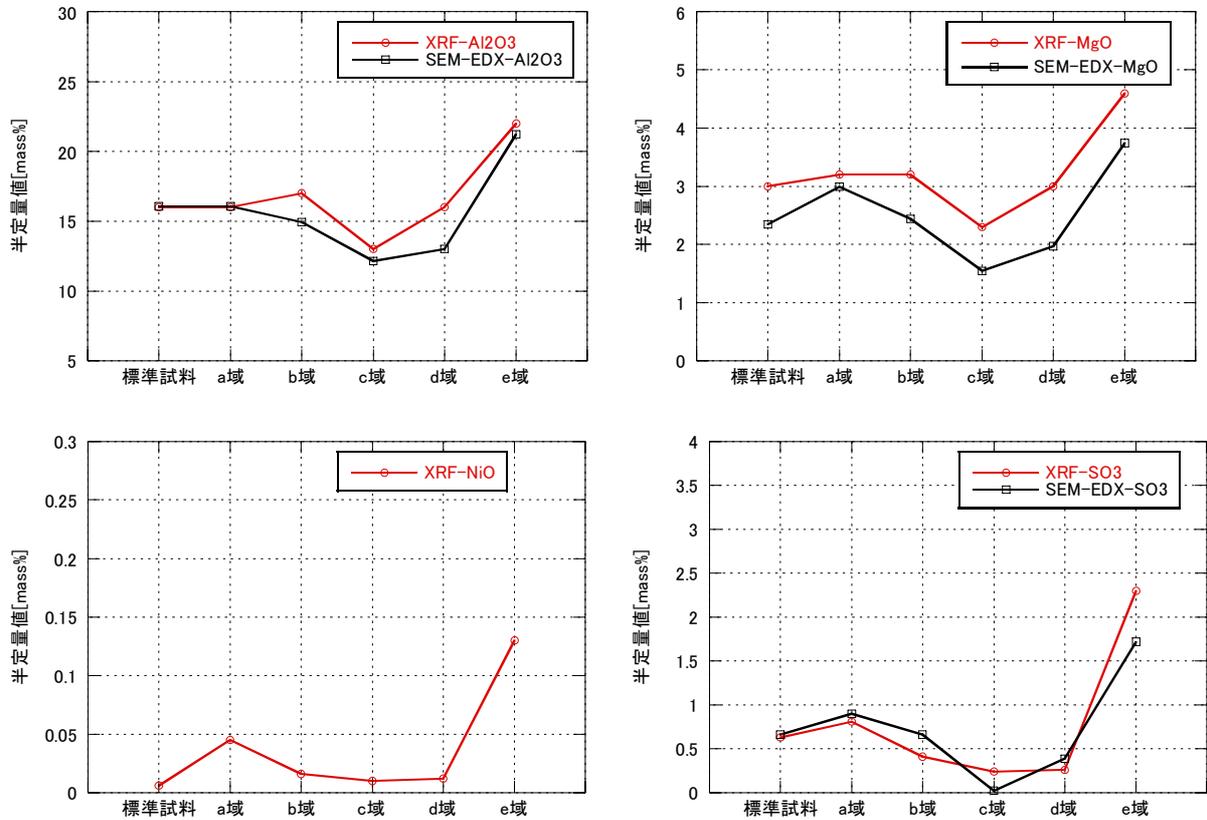


図 5.46 測定位置における半定量値の推移 (酸化物)

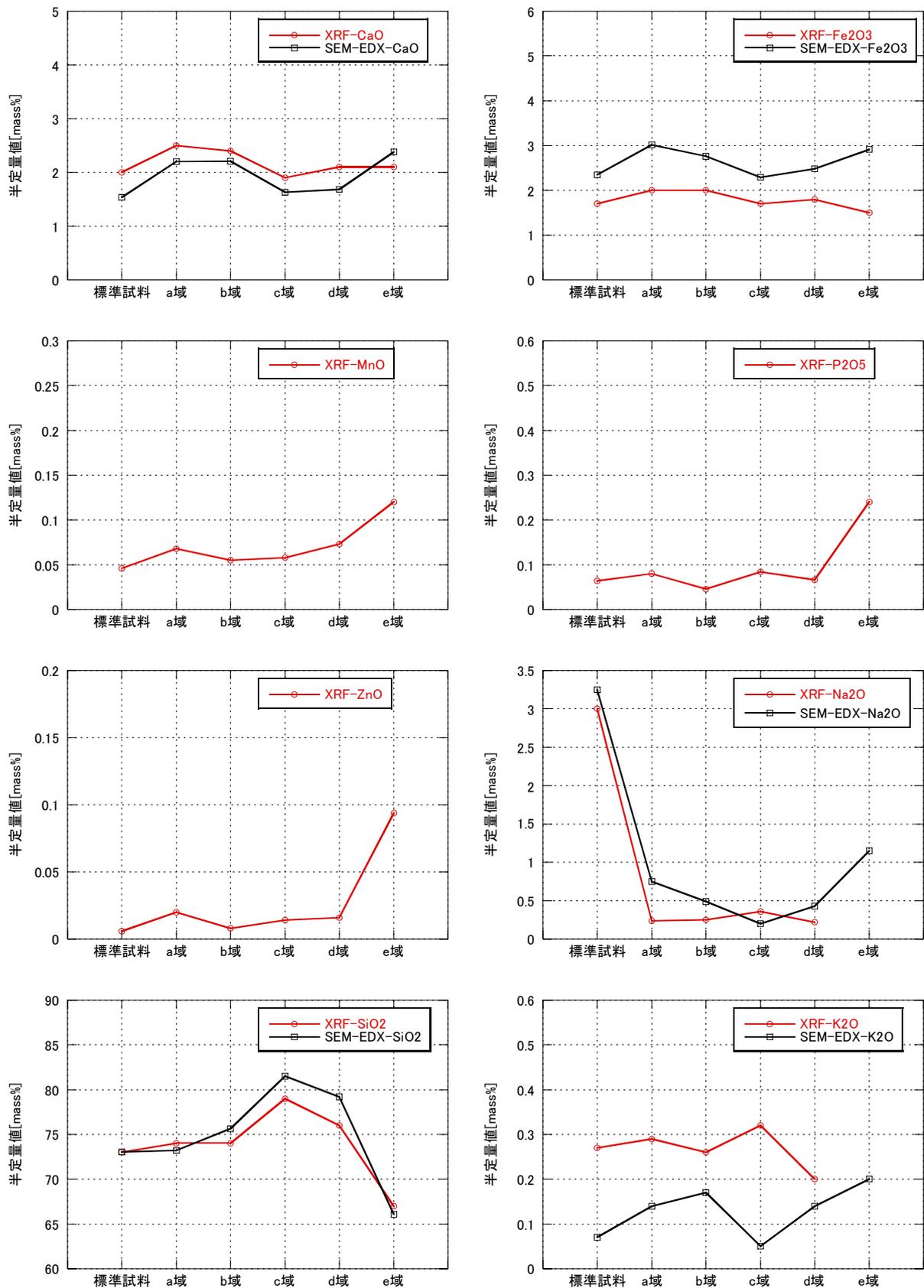


図 5.47 測定位置における半定量値の推移 (酸化物)

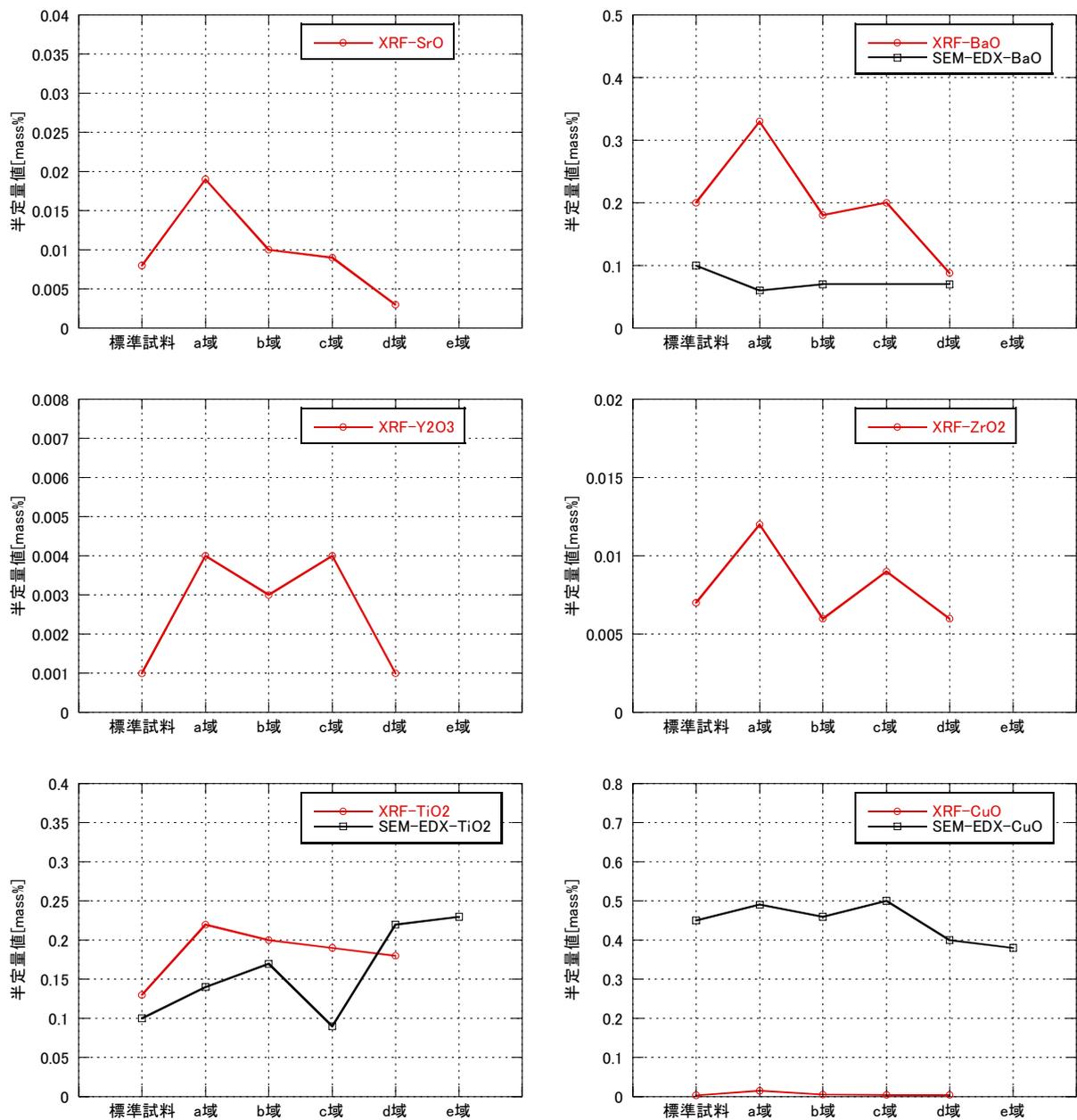


図 5.48 測定位置における半定量値の推移 (酸化物)

5.4 考察

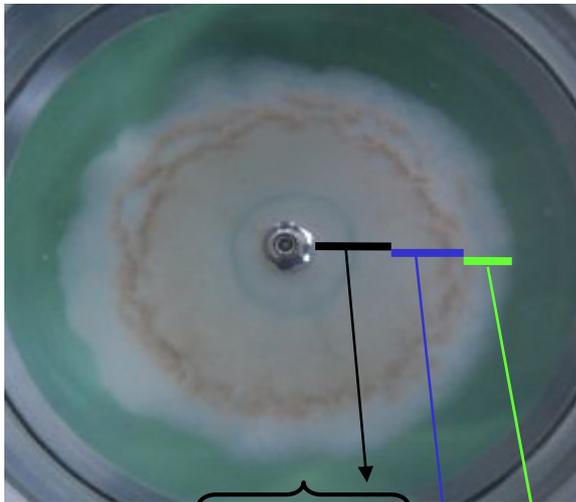
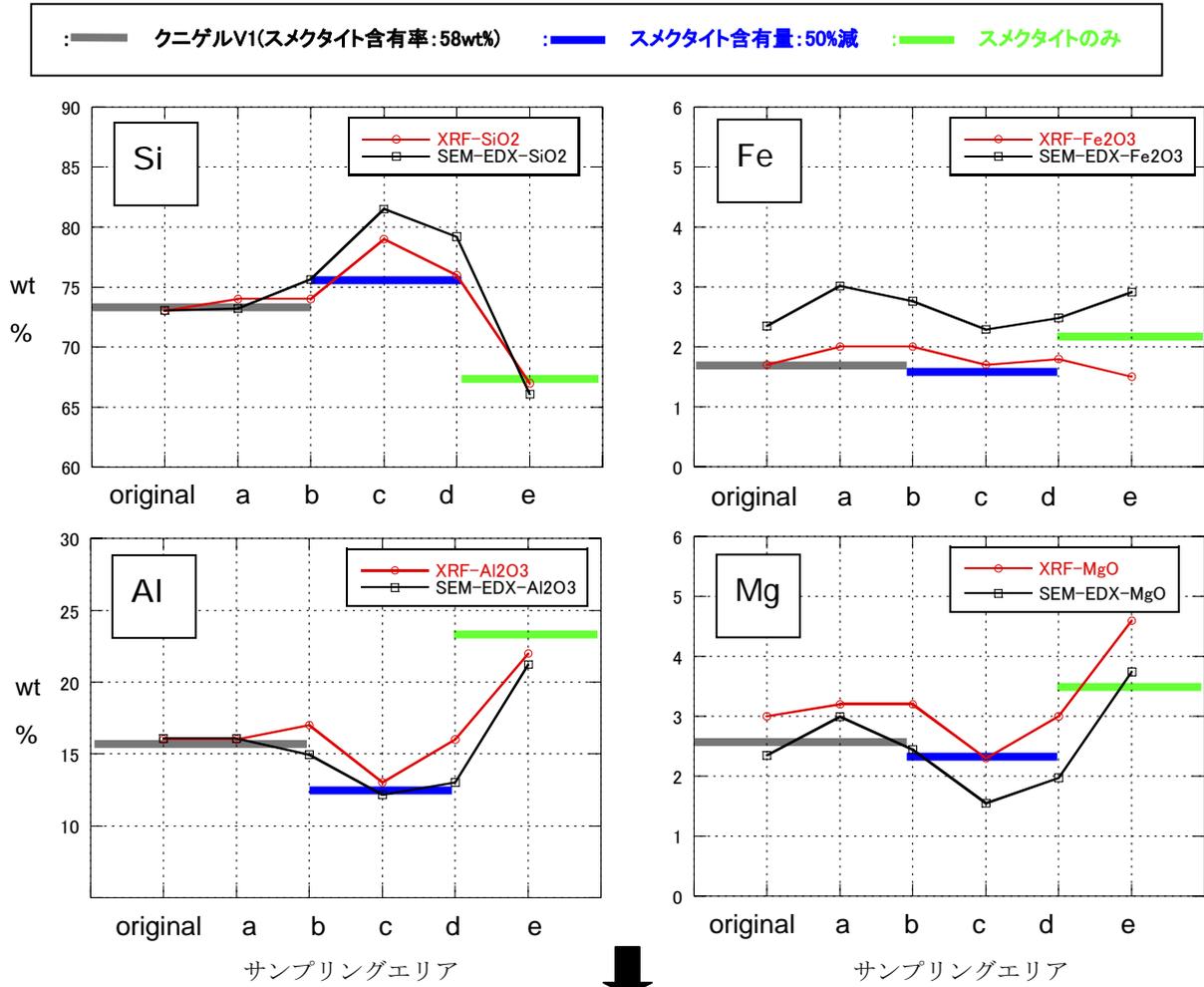
本分析結果により、サンプリングエリアにおいて、元素組成の違いが認められたことから、ベントナイト中のスメクタイトおよび随伴鉱物組成を変えることによる元素組成の変化について計算を行った。図 5.49 にスメクタイトの構成元素におけるサンプリングエリアごとの含有率の傾向について示す。図は、X 軸にサンプリングエリア、Y 軸に元素量を wt% で示している。図中のプロットは、各元素のサンプリングエリアごとの変化を示している。本検討では、各元素の含有率の増減傾向について、スメクタイトの含有量を標準試料 (58wt%)、標準試料の 50% に減少させた場合、全量がスメクタイトであるとした場合の各元素含有量の変化をシミュレーションした。その結果、図中のプロットの傾向と、シミュレーションによる元素の増減傾向がほぼ一致したものととなった。

このことから、供試体部からベントナイトゲル先端部にかけて、大きく以下のような 3 つの組成領域を形成していることが考えられた。

- ① ベントナイトの組成が変化していない領域
- ② スメクタイトが減少し他の鉱物が留まる領域
- ③ 主にスメクタイトで構成される領域

このようなベントナイト中の鉱物組成分布の形成は、物理的作用や化学的作用によるベントナイト膨潤の影響が起因していることが考えられる。ベントナイトの含水開始後は、膨潤挙動によって供試体部からベントナイト先端部に向かって密度勾配が形成されており、ベントナイトの先端部に向かうほど密度は小さい¹⁶⁾。この膨潤過程においてゲル先端部よりも比較的膨潤圧が大きい供試体側で、スメクタイトが他の随伴鉱物を流動させることができる。しかし、外側に向かうほどスメクタイトの密度の低下によって膨潤圧も小さくなることから、随伴鉱物を混在しながらの流動ができなくなり、スメクタイトのみの移動となることが考えられる。一方、本実験では、試験開始からベントナイトゲルの侵入がほぼ安定するまでの間、亀裂内は静水場であり、ベントナイトと接触している模擬亀裂内の試験溶液の入れ替わりはない。したがって、ベントナイトからの溶出イオンにより、模擬亀裂内の溶液のイオン強度が高くなる。その後、亀裂内へ流水を開始すると、亀裂内試験溶液のイオン強度が小さくなるため、スメクタイト粒子間の斥力は大きくなる。したがって、ベントナイト先端部分ではスメクタイト粒子が外側に向かって分散し、随伴鉱物とスメクタイトが分離することが考えられる。

本検討より推察された組成分布が、コロイドの浸食現象に起因することも考えられ、イオン強度が変化することによって引起される化学的作用のようなケースの場合には、実験手法に関して見直す必要がある。一方、物理的作用によって組成分布が形成される場合には、今後の現象理解の進展に応じ、浸食現象のメカニズムに関して適宜検討していく。



凡例



考えられる3つの組成領域

- a-b: ベントナイト組成が変化していない領域
- c-d: スメクタイトが減少し、他の鉱物が留まる領域
- e: 主にスメクタイトで構成される領域

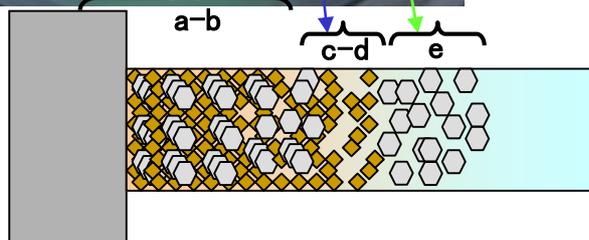


図 5.49 スメクタイト構成元素における含有率の傾向性

6. おわりに

本報では、放射性核種の移行を助長することが想定されるコロイドについて、とくに緩衝材を起源として生成するベントナイトコロイドに関して、実験的にその生成可能性や生成量についてデータの取得を行った。実験により得られた結果を以下にまとめる。

亀裂侵入ベントナイトに水の流れ場を与え、浸食によって生成される排水液中の元素濃度分析により、コロイド濃度の評価を行った。

その結果、

- 1) 蒸留水を用いた実験によって、時間と浸食コロイド濃度の関係を定量的に測定した結果、コロイド濃度は 7.2×10^{-7} m/s の流速条件において、約 1ppm 生成する可能性が示唆された。
- 2) また、生成されるコロイドの粒子径は、流速の低下によって小さくなる傾向が得られ、生成されるコロイド粒径には流速依存性があることが分かった。
- 3) 単位断面積と単位時間あたりに生成されるコロイド量を評価した結果、流速の低下にともない生成されるコロイド量が減少することが分かった。

また、試験後の試料について、SEM-EDX と XRF により各部位の元素分析を行い、その組成状態について検討を行った結果、供試体側よりベントナイトゲルの先端部にかけて、「ベントナイトの組成が変化していない領域」、「スメクタイトが減少し他の鉱物が留まる領域」、「主にスメクタイトで構成される領域」という組成分布を形成することが推定された。

今後は、引き続き降水系地下水条件におけるデータの拡充を継続し、データの充足ならびに信頼性を向上させ、流速と浸食コロイド生成量との関係式を得るなどして性能評価研究に反映させていくとともに、コロイドの生成メカニズムに関して検討していく。

参考文献

- 1) Gutierrez, M.G., Bidoglio, G., Avogadro, A., Mingarro, E. and D'alessandro, M. :
“ Experimental Investigations of Radionuclide Transport Through Vored Granite Samples”, Radiochim. Acta, Vol.52/53, pp.213-217 (1991) .
- 2) Gutierrez, M.G., Bidoglio, G., Avogadro, A., De Llano, A. Y. : “Studies on Hydro-Geochemical Controls of Neptunium and Selenium Migration in Granite Columns”, Radiochim. Acta, Vol.58/59, pp.277-280 (1992) .
- 3) Nagasaki, S., Tanaka, S., Suzuki, A. : “Influence of Fe(III) Colloids on Np(V) Migration through Quartz-Packed Column”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol.31, pp.143-150 (1994) .
- 4) Baek, I. and Pitt, Jr. W.W : “Colloid-facilitated Radionuclide Transport in Fractured Porous Rock, Waste Manage” ,Vol.16, No.4, pp.313-325 (1996) .
- 5) 久野義夫, 油井三和, 黒澤進, 加藤博康, 上田真三 : “亀裂岩石中におけるコロイドに助長された核種移行の評価”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 99-022 (1999) .
- 6) Miller, W., Alexander, W., Chapman, N., McKinley, I. and Smellie, J. : “Geological Disposal of Radioactive Wastes and Natural Analogues” , Waste Management Series, Vol.2, Pergamon, Amsterdam (2000) .
- 7) 黒澤進 : “高レベル放射性廃棄物地層処分システムにおける核種移行評価に及ぼすコロイド影響に関する研究 –第2次取りまとめ以降の検討–”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2005-007 (2005) .
- 8) A, Avogadro and G, DE Marsily : “The Role of Colloids in Nuclear Disposal”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management VII. pp.495-505 (1984) .
- 9) 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– 分冊3 地層処分システムの安全評価”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 99-023 (1999) .
- 10) 松本一浩, 棚井憲治 : “緩衝材の流出/侵入特性 (II) –幌延地下水(HDB-6号孔)を用いた緩衝材の侵入特性評価–”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2004-026 (2005) .

- 11) Missana, T., Alonso, U., Turrero, M.J. : “Generation and stability of bentonite colloids at the bentonite/granite interface of a deep geological radioactive waste repository” , J. Contam. Hydrol. Vol.61,pp.17–31 (2003) .
- 12) Baik, M.H., Cho, W.J., Hahn, P.S. : “Erosion of bentonite particles at the interface of a compacted bentonite and a fractured granite” , Engineering Geology, Vol.91, pp.229-239 (2007) .
- 13) 菊池広人, 棚井憲治 : “幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8430 2004-005 (2005) .
- 14) 松本一浩, 棚井憲治 : “ベントナイト緩衝材の流出特性の評価 (II)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2003-006 (2003) .
- 15) 白水晴雄 : “粘土鉱物学 ー粘土科学の基礎ー”, 朝倉書店, (1991) .
- 16) 松本一浩, 棚井憲治 : “緩衝材の流出／侵入特性”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2003-035 (2004) .
- 17) 黒澤進, 久野義夫, 加藤博康, 上田真三, 油井三和 : “ベントナイトコロイドの特性に基づくベントナイトの侵食に関する検討”, 日本原子力学会「1998年春の年会」要旨集, p.598 (1998) .
- 18) 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研究開発 ー平成13年度報告ー”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 2002-003 (2002) .
- 19) 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研究開発 ー平成15年度報告ー”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 2004-007 (2004) .
- 20) 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 ー平成17年取りまとめー 分冊3 安全評価手法の開発”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 2005-016 (2005) .

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 | 立方メートル | 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 |
| 比誘電率 ^(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 | SI基本単位による表し方 |
| 平面角 | ラジアン ^(b) | rad | 1 ^(b) |
| 立体角 | ステラジアン ^(b) | sr ^(b) | 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 | 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 | ジーメンズ | 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 |
| 光強度 | ルーメン | lm | cd sr ^(f) |
| 照射度 | ルクス | lx | lm/m ² |
| 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 (CF-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 |
| 粘り | パスカル秒 | Pa s | m ⁻¹ kg s ⁻¹ |
| 力のモーメント | ニュートンメートル | N m | m ² kg s ⁻² |
| 表面張力 | ニュートン毎メートル | N/m | kg s ⁻² |
| 角速度 | ラジアン毎秒 | rad/s | m ¹ s ⁻¹ s ⁻¹ |
| 角加速度 | ラジアン毎秒毎秒 | rad/s ² | m ¹ s ⁻² s ⁻² |
| 熱流密度, 放射照度 | ワット毎平方メートル | W/m ² | kg s ⁻³ |
| 熱容量, エントロピー | ジュール毎ケルビン | J/K | m ² kg s ⁻² K ⁻¹ |
| 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) | m ² s ⁻² K ⁻¹ |
| 比エネルギー | ジュール毎キログラム | J/kg | m ² s ⁻² |
| 熱伝導率 | ワット毎メートル毎ケルビン | W/(m K) | m kg s ⁻³ K ⁻¹ |
| 体積エネルギー | ジュール毎立方メートル | J/m ³ | m ⁻¹ kg s ⁻² |
| 電界の強さ | ボルト毎メートル | V/m | m kg s ⁻³ A ⁻¹ |
| 電荷密度 | クーロン毎立方メートル | C/m ³ | m ⁻³ s A |
| 表面電荷 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ⁻² s A |
| 電束密度, 電気変位 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ⁻² s A |
| 誘電率 | ファラド毎メートル | F/m | m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ² |
| 透磁率 | ヘンリー毎メートル | H/m | m kg s ⁻² A ² |
| モルエネルギー | ジュール毎モル | J/mol | m ² kg s ⁻² mol ⁻¹ |
| 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) | m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹ |
| 照射線量 (X線及びγ線) | クーロン毎キログラム | C/kg | kg ⁻¹ s A |
| 吸収線量 | グレイ毎秒 | Gy/s | m ² s ⁻³ |
| 放射強度 | ワット毎ステラジアン | W/sr | m ³ m ⁻² kg s ⁻³ m ² kg s ⁻³ |
| 放射輝度 | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | W/(m ² sr) | m ² m ⁻² kg s ⁻³ kg s ⁻³ |
| 酵素活性濃度 | カタール毎立方メートル | kat/m ³ | m ⁻³ s ⁻¹ mol |

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 | ゼン | 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 | zepto | z |
| 10 ¹ | デカ | da | 10 ⁻²⁴ | yocto | 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 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 |
| バトン | 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単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。 |
| ベベル | 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 |
|-----------------------|-----|---|
| エルグ | 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 |
| ステルブ | sb | 1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻² |
| フォト | 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 _g =(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 | fm | 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=4.185 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ) |

