



JAEA-Data/Code

2008-007

## 炭素鋼と10年間接していた圧縮ベントナイト の変質挙動調査

Investigation of Alteration Behaviour of Compacted Bentonite Contacted  
with Carbon Steel for 10 Years

陶山 忠宏 上野 健一 笹本 広

Tadahiro SUYAMA, Kenichi UENO and Hiroshi SASAMOTO

地層処分研究開発部門  
核種移行研究グループ

Radionuclide Migration Research Group  
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-  
Data/  
Code

本レポートは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/index.shtml>)  
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター\*では実費による複写頒布を行つ  
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4  
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  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

\*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構内

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.029-282-6387, Fax.029-282-5920

## 炭素鋼と 10 年間接していた圧縮ベントナイトの変質挙動調査

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  
陶山 忠宏※, 上野 健一+, 笹本 広+

(2008 年 1 月 16 日受理)

圧縮ベントナイト中での炭素鋼の長期的な腐食挙動およびベントナイトの長期健全性を評価するため、窒素雰囲気下において人工海水および人工地下水を用い、50°C および 80°C での 10 年間にわたる浸漬試験が行われた。本調査では、この浸漬試験後の圧縮ベントナイトを対象とし、鉄-ベントナイト相互作用によるベントナイトの変質挙動を調査した。その結果を以下にまとめる。

- ・人工海水および人工地下水における試験後の圧縮ベントナイトを比較した場合、人工海水に浸漬されていた試料では、人工地下水の場合に比べて、炭素鋼の腐食に伴い生じた鉄がより圧縮ベントナイト内部にまで移行していた。
- ・人工海水（80°C）における試験後試料の TEM 観察では、粘土鉱物の特徴である層状構造が確認された。また、層間は約 12[Å]であり、通常の 2:1 型スマクタイトの層間と同様であった。従って、試験前後でスマクタイトに変化は生じていないと推察された。
- ・窒素雰囲気下と大気雰囲気下で行われた試験結果を比較すると、窒素雰囲気下では、炭素鋼の腐食に伴い生じた鉄が圧縮ベントナイト内部に移行しているのに対し、大気雰囲気下では、鉄はほとんど圧縮ベントナイト内部に移行していなかった。
- ・EPMA 分析の結果、圧縮ベントナイト中に移行した鉄の最大深さは約 0.2mm であった。
- ・鉄の移行が認められた圧縮ベントナイトを対象に XRD 分析を行った結果、圧縮ベントナイト中には鉄の腐食生成物と推定されるものは検出されなかった。また、XRD 分析結果から、ベントナイト中の粘土鉱物は 2-八面体構造を示し、さらに湿度制御下での測定では、Na 型スマクタイトと同様な膨潤性を示した。これらのことから、試験前の Na 型スマクタイトは、試験後も変化していなかったと推定された。

これまでに、鉄共存下でのベントナイトの変質挙動を把握するため、温度、溶液条件および試験期間等を変え、バッチ系での試験を実施してきた。それらの結果では、初期の Na 型スマクタイトの Fe 型化や微量の非膨潤性粘土鉱物への変化等、何らかの変化が認められた。しかしながら、今回調査を行った圧縮系での試験後試料では、圧縮ベントナイトへの鉄の移行は確認されたものの、初期の Na 型スマクタイトに変化は生じていないと推定された。したがって、処分環境のような圧縮系における鉄-ベントナイト相互作用による影響を評価する上では、バッチ系での試験結果をそのまま適用するのではなく、圧縮系で生ずる現象を十分に理解した上で評価することが重要である。

---

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 核燃料サイクル工学研究所 環境技術管理部 処分技術課(兼務)

+ 核燃料サイクル工学研究所 環境技術管理部 処分技術課(兼務)

Investigation of Alteration Behaviour of Compacted Bentonite Contacted  
with Carbon Steel for 10 Years

Tadahiro SUYAMA\*, Kenichi UENO<sup>+</sup> and Hiroshi SASAMOTO<sup>+</sup>

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

(Received January 16, 2008)

To evaluate long term behavior of corrosion for carbon steel in compacted bentonite, and to evaluate long term stability of bentonite, corrosion experiments were conducted using synthetic sea water and synthetic groundwater at 50 and 80°C for 10 years under anaerobic atmosphere. In the present study, the samples of compacted bentonite after experiments were investigated to understand the alteration behavior of bentonite by iron-bentonite interactions. Results were summarized below.

- Iron generated by corrosion of carbon steel was migrated into compacted bentonite further in the synthetic seawater case than in the synthetic groundwater case.
- Result of TEM observation for the sample of synthetic sea water case at 80°C showed that the original layer structure for clay minerals was maintained and the layer distance was about 12[Å] which was similar to the layer distance of normal 2:1 smectite. Thus, it was suggested that there was no change in smectite before and after experiments.
- Iron generated by corrosion of carbon steel was migrated into compacted bentonite in anaerobic condition case but scarcely migrated in aerobic condition case.
- Results of EPMA analysis indicated that the maximum migration depth of iron in compacted bentonite was about 0.2 mm for sample in synthetic sea water at 80°C under anaerobic condition.
- Results of XRD analysis for the sample in which iron migration in compacted bentonite was observed showed that there was no corrosion product in compacted bentonite and the structure of clay mineral in bentonite was di-octahedral. Furthermore, the result of XRD analysis under relative humidity controlled condition suggested that the swelling property of sample after experiment was similar to that of initial Na-type smectite. Therefore, it was supposed that the initial Na-type smectite did not change during the experiment.

Batch type experiments with different temperature, solutions and duration have been conducted to understand the alteration behavior of bentonite by interactions with iron material in our previous studies. According to the results of batch type experiments, some changes like ion type change from Na to Fe type smectite and production of very small amount of non-swelling minerals etc. were identified after experiments. However, no change was identified for the present study using compacted bentonite, although the iron migration in compacted bentonite was observed. In conclusion, in order to evaluate the iron-bentonite interactions in compacted system like repository conditions, it would be important not to utilize directly the results by batch type experiments but understand the phenomena which would be occurred in compacted bentonite.

Keywords : Iron-bentonite Interaction, Compacted Bentonite, Carbon Steel, Low Oxygen Atmosphere, Alteration Behaviour, Smectite

---

\* Collaborating Engineer: Waste Management Department, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories (Additional Post)

+ Waste Management Department, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories (Additional Post)

## 目次

1. はじめに .....	1
2. 試験方法 .....	1
2.1 炭素鋼試験片 .....	1
2.2 試験溶液 .....	2
2.3 緩衝材 .....	2
2.4 雰囲気・試験温度・浸漬期間 .....	2
2.5 浸漬試験の手順 .....	2
3. 試験試料の分析方法 .....	3
3.1 陽イオン交換容量分析 .....	3
3.2 スメクタイト層間陽イオン分析 .....	4
3.3 SEM／EDS 分析および TEM／EDS 分析 .....	4
3.3.1 SEM／EDS 分析前処理 .....	4
3.3.2 TEM／EDS 分析前処理 .....	4
3.4 EPMA 分析 .....	5
3.5 X 線回折分析 .....	5
3.5.1 不定方位分析 .....	5
3.5.2 定方位分析 .....	5
3.5.3 濡度制御条件下での定方位分析 .....	5
3.5.4 エチレングリコール処理定方位分析 .....	5
4. 結果および考察 .....	6
4.1 試料の外観 .....	6
4.2 浸漬溶液分析結果および考察 .....	6
4.3 陽イオン交換容量分析結果とスメクタイト層間陽イオン分析結果および考察 .....	6
4.3.1 陽イオン交換容量分析結果および考察 .....	6
4.3.2 スメクタイト層間陽イオン分析結果および考察 .....	7
4.4 SEM／EDS 分析および TEM／EDS 分析結果および考察 .....	7
4.4.1 SEM／EDS 分析結果および考察 .....	7
4.4.2 TEM／EDS 分析結果および考察 .....	7
4.5 EPMA 分析結果および考察 .....	8
4.6 X 線回折分析結果および考察 .....	8
4.6.1 不定方位分析結果および考察 .....	8
4.6.2 定方位分析結果および考察 .....	9
4.6.3 濡度制御条件下での定方位分析結果および考察 .....	9
4.6.4 エチレングリコール処理定方位分析結果および考察 .....	9
5. おわりに .....	9

謝辞	.....	10
参考文献	.....	11

## Contents

1. Introduction	1
2. Experimental methods	1
2.1 Carbon steel coupons	1
2.2 Tests Solution	2
2.3 Bentonite buffer	2
2.4 Atmosphere · Temperature · Saturation period	2
2.5 Procedure of saturation experiments	2
3. Analytical items	3
3.1 Cation exchange capacity analysis	3
3.2 Smectite inter-layer cation analysis	4
3.3 Scanning electron microscopy/energy dispersive X-ray spectrometer (SEM／EDS) analysis and Transmission electron microscopy/energy dispersive X-ray spectrometer (TEM/EDS) analysis	4
3.3.1 SEM／EDS analysis	4
3.3.2 TEM/EDS analysis	4
3.4 Electron probe micro analysis (EPMA)	5
3.5 X-ray diffraction (XRD) analysis	5
3.5.1 Analysis of random sample	5
3.5.2 Analysis of oriented sample	5
3.5.3 Analysis of oriented sample under humidity controlled conditions	5
3.5.4 Analysis of oriented sample by ethylene glycol treatment	5
4. Results and discussions	6
4.1 Appearance of sample	6
4.2 Result and discussion of saturated solution analysis	6
4.3 Result and discussion of cation exchange capacity and inter-layer exchangeable cation analysis	6
4.3.1 Result and discussion of cation exchange capacity analysis	6
4.3.2 Result and discussion of inter-layer exchangeable cation analysis	7
4.4 Result and discussion of sample surface analysis	7
4.4.1 Scanning electron microscopy/energy dispersive X-ray spectrometer (SEM／EDS) analysis	7
4.4.2 Transmission electron microscopy/energy dispersive X-ray spectrometer (TEM/EDS) analysis	7
4.5 Result and discussion of electron probe micro analysis	8
4.6 Result and discussion of X-ray diffraction (XRD) analysis	8

4.6.1 Result and discussion of random sample analysis .....	8
4.6.2 Result and discussion of oriented sample analysis .....	9
4.6.3 Result and discussion of oriented sample analysis under humidity controlled conditions .....	9
4.6.4 Result and discussion of oriented sample by ethylene glycol treatment analysis .....	9
5. Conclusions .....	9
Acknowledgement .....	10
References .....	11

## 表目次

表 2.1 : 炭素鋼試験片の化学組成 .....	12
表 2.2 : 試験に用いた溶液の組成 .....	12
表 2.4 : 試験条件 .....	12
表 4.2 : 浸漬溶液分析結果 .....	13
表 4.3.1-1 : 陽イオン交換容量および浸出陽イオン分析結果(未変質部) .....	13
表 4.3.1-2 : 固相の化学組成(未変質部) .....	13
表 4.3.2 : 層間陽イオン分析結果(未変質部) .....	14

## 図目次

図 2.5-1 : 緩衝材中における炭素鋼の浸漬試験カラムの模式図 .....	15
図 2.5-2 : 緩衝材中における炭素鋼の浸漬試験方法の模式図 .....	15
図 2.5-3 : 試験全体のフロー .....	16
図 3.1 : 陽イオン交換容量分析装置略図 .....	16
図 4.4.1-1 : SW-80°C試料の SEM/EDS 分析結果 .....	17
図 4.4.1-2 : SW-50°C試料の SEM/EDS 分析結果 .....	17
図 4.4.1-3 : GW-1-80°C試料の SEM/EDS 分析結果 .....	17
図 4.4.1-4 : GW-2-80°C試料の SEM/EDS 分析結果 .....	18
図 4.4.1-5 : SW-80°C大気条件試料の SEM/EDS 分析結果 .....	18
図 4.4.1-6 : SW-80°C Kunipia-F 試料の SEM/EDS 分析結果 .....	18
図 4.4.2 : SW-80°C試料の TEM/EDS 分析結果 .....	19
図 4.5-1 : EPMA による SW-80°C試料の断面 .....	20
図 4.5-2 : EPMA による SW-80°C試料のマッピング分布 .....	20
図 4.5-3 : EPMA による GW-1-80°C試料の断面 .....	21
図 4.5-4 : EPMA による GW-1-80°C試料のマッピング分布 .....	21
図 4.5-5 : EPMA による SW-80°C大気条件試料の断面 .....	22
図 4.5-6 : EPMA による SW-80°C大気条件試料のマッピング分布 .....	22
図 4.6.1-1 : SW-80°C変質部試料の不定方位測定結果 .....	23
図 4.6.1-2 : SW-80°C未変質部試料の不定方位測定結果 .....	23
図 4.6.1-3 : SW-50°C変質部試料の不定方位測定結果 .....	24
図 4.6.1-4 : SW-50°C未変質部試料の不定方位測定結果 .....	24
図 4.6.1-5 : GW-1-80°C変質部試料の不定方位測定結果 .....	25
図 4.6.1-6 : GW-1-80°C未変質部試料の不定方位測定結果 .....	25
図 4.6.1-7 : GW-2-80°C変質部試料の不定方位測定結果 .....	26
図 4.6.1-8 : GW-2-80°C未変質部試料の不定方位測定結果 .....	26

図 4.6.1-9 : SW-80°C 大気条件変質部試料の不定方位測定結果	27
図 4.6.1-10 : SW-80°C 大気条件未変質部試料の不定方位測定結果	27
図 4.6.1-11 : SW-80°C Kunipia-F 変質部試料の不定方位測定結果	28
図 4.6.1-12 : SW-80°C Kunipia-F 未変質部試料の不定方位測定結果	28
図 4.6.2-1 : SW-80°C 試料の定方位測定結果	29
図 4.6.2-2 : SW-50°C 試料の定方位測定結果	29
図 4.6.2-3 : GW-1-80°C 試料の定方位測定結果	29
図 4.6.2-4 : GW-2-80°C 試料の定方位測定結果	30
図 4.6.2-5 : SW-80°C 大気条件試料の定方位測定結果	30
図 4.6.2-6 : SW-80°C Kunipia-F 試料の定方位測定結果	30
図 4.6.3-1 : SW-80°C 変質部試料の湿度制御測定結果と 相対湿度に対する d(001)底面間隔の変化	31
図 4.6.3-2 : SW-80°C 未変質部試料の湿度制御測定結果と 相対湿度に対する d(001)底面間隔の変化	31
図 4.6.3-3 : SW-50°C 変質部試料の湿度制御測定結果と 相対湿度に対する d(001)底面間隔の変化	32
図 4.6.3-4 : SW-50°C 未変質部試料の湿度制御測定結果と 相対湿度に対する d(001)底面間隔の変化	32
図 4.6.3-5 : GW-1-80°C 変質部試料の湿度制御測定結果と 相対湿度に対する d(001)底面間隔の変化	33
図 4.6.3-6 : GW-1-80°C 未変質部試料の湿度制御測定結果と 相対湿度に対する d(001)底面間隔の変化	33
図 4.6.3-7 : GW-2-80°C 変質部試料の湿度制御測定結果と 相対湿度に対する d(001)底面間隔の変化	34
図 4.6.3-8 : GW-2-80°C 未変質部試料の湿度制御測定結果と 相対湿度に対する d(001)底面間隔の変化	34
図 4.6.3-9 : SW-80°C 大気条件変質部試料の湿度制御測定結果と 相対湿度に対する d(001)底面間隔の変化	35
図 4.6.3-10 : SW-80°C 大気条件未変質部試料の湿度制御測定結果と 相対湿度に対する d(001)底面間隔の変化	35
図 4.6.3-11 : SW-80°C Kunipia-F 変質部試料の湿度制御測定結果と 相対湿度に対する d(001)底面間隔の変化	36
図 4.6.3-12 : SW-80°C Kunipia-F 未変質部試料の湿度制御測定結果と 相対湿度に対する d(001)底面間隔の変化	36
図 4.6.4-1 : SW-80°C 試料の EG 処理定方位測定結果	37
図 4.6.4-2 : SW-50°C 試料の EG 処理定方位測定結果	37
図 4.6.4-3 : GW-1-80°C 試料の EG 処理定方位測定結果	37
図 4.6.4-4 : GW-2-80°C 試料の EG 処理定方位測定結果	38
図 4.6.4-5 : SW-80°C 大気条件試料の EG 処理定方位測定結果	38

図 4.6.4-6 : SW-80°C Kunipia-F 試料の EG 処理定方位測定結果 ..... 38

写真目次

写真 4.1 : 試料採取時の画像 ..... 39

This is a blank page.

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムにおいては、人工バリア材の構成要素としてオーバーパック（炭素鋼；鉄）と緩衝材（ベントナイト；スマクタイトを主成分とする粘土）が用いられる<sup>1)</sup>。放射性廃棄物の処分後、緩衝材が地下水で飽和し、炭素鋼オーバーパックが腐食した場合、オーバーパック腐食生成物と緩衝材との相互作用によって緩衝材の性質が変化する可能性がある。鉄とベントナイトの相互作用に伴うベントナイトの変化に関しては、これまでに多数の試験が行われており、環境条件（温度、期間、溶液条件など）により変質挙動が異なることがわかっている<sup>2)</sup>。また既往の研究により、処分環境に類似した条件での変質挙動としては、スマクタイトの層間イオンのイオン交換によるFe型化が主要な現象であると想定されている<sup>3)</sup>。これらを踏まえ、鉄共存下での緩衝材の長期的な変質挙動を把握するため、これまでに加速試験として、Fe型化スマクタイトを出発物質とし、高温でのバッチ試験を実施してきた。その結果、250°Cで6ヶ月間静置した試料では微量の非膨潤性粘土鉱物が生成したが大部分はスマクタイト層間の陽イオン交換に留まり、大きなスマクタイト構造の変化や膨潤性能等の特性の変化は起きていない<sup>4)</sup>。150°Cでの試料では1価の陽イオンが層間に存在する膨潤過程とも2価の陽イオンが層間に存在する膨潤過程とも多少異なった膨潤過程を示したがスマクタイトの構造の変化や膨潤性能等の特性の変化は起きていない<sup>5)</sup>。

これまでに実施してきた上記の試験はバッチ系であり、鉄とベントナイトの相互作用によりどのような現象が生じ得るか、その発生の要因や発生した場合の長期的な挙動を定性的に把握することを目的としていた。そのため、処分環境に比べると高温な条件や固液比の小さい条件での試験データであり、想定される処分環境とは異なる条件のデータも含まれることから、これらのデータをそのまま処分環境での変質現象として考慮して良いかどうか確認することが必要である。より処分環境に類似した条件での定量的なデータを得るには、圧縮系での炭素鋼共存下におけるベントナイトの変質挙動に関するデータが重要である。

今回、圧縮ベントナイト中の炭素鋼の長期的な腐食挙動を把握し併せてベントナイトの長期健全性を調べるため、10年間、窒素雰囲気下で浸漬された炭素鋼試験片の取り出しが行われた<sup>6)</sup>。本調査では、この浸漬試験後の圧縮ベントナイトを対象に物理的および化学的特性の変化の有無について詳細な調査を実施したので、その結果を報告する。

## 2. 試験方法

試験方法は炭素鋼腐食浸漬試験<sup>6)</sup>で詳細に記述されており、この節においては試験方法の概略を記述する。

### 2.1 炭素鋼試験片

炭素鋼試験片として、SM400Bを用いた。その化学組成を表2.1に示す。試験片の形状

は  $30 \times 30 \times 2\text{mm}$  の平板型とした。

試験片の表面はエメリー#800 の湿式研磨により仕上げ、アセトンで脱脂後、蒸留水で洗浄し、乾燥させた。

## 2.2 試験溶液

試験溶液として、以下の 3 種類の水溶液を用いた。それぞれの溶液組成を表 2.2 に示す。

- ・人工海水(SW, pH=7.9~8.4)
- ・人工地下水-1(GW-1, 高炭酸塩水溶液, 0.1M-NaHCO<sub>3</sub>, pH=8.7)
- ・人工地下水-2(GW-2, 低炭酸塩-低塩化物水溶液, 2.5mM-NaHCO<sub>3</sub>+2.5mM-NaCl, pH=9.1~9.2)

## 2.3 緩衝材

緩衝材として以下に示すように第 1 次取りまとめ<sup>7)</sup>における緩衝材仕様を想定したもの用いた。第 1 次取りまとめ緩衝材仕様においては乾燥密度 1.8[Mg/m<sup>3</sup>], 100%クニゲル V1 とした。

また、比較として乾燥密度 1.8[Mg/m<sup>3</sup>], 100%クニピア F についても試験を行った。

## 2.4 霧囲気・試験温度・浸漬期間

浸漬試験は気相部酸素濃度 1ppm 以下に制御した窒素霧囲気のグローブボックス付属の恒温槽中で行った。試験温度は 80°C および 50°C とした。また、霧囲気による違いを確認するため、大気霧囲気での試験も行った。浸漬期間は 10 年とした。

以上の試験条件を表 2.4 にまとめた。

## 2.5 浸漬試験の手順

- ①試験前に試験片の重量の測定を行う。その後、図 2.5-1 に示すようにチタンカラム内に緩衝材と試験片を入れて、圧密した後にカラムの蓋をボルトで締めつけた。
  - ②試験カラムを霧囲気制御グローブボックスに搬入して、真空引きと窒素置換を 3 回以上繰り返した。更に真空中に約 24 時間保持した後、再び窒素置換する。試験溶液は同じグローブボックス中でボックス内のガスを 24 時間以上通気して脱気した。
  - ③図 2.5-2 に示すようにチタンカラムと試験溶液をテフロン製の容器に入れて、この容器をグローブボックス中の恒温槽内に所定期間(今回は 10 年間)静置した。
  - ④浸漬期間後、チタンカラムを解体して試験片とベントナイトを分割した。
  - ⑤分割したベントナイトの試験片接触面近傍を削り取った。
  - ⑥ベントナイト試料に対して以下(第 3 節)に示す分析項目を実施した。
- これらのフォロー図を図 2.5-3 に示す。

### 3. 試験試料の分析方法

浸漬期間（10年間）静置後、チタンカラムを解体し、炭素鋼試験片接触面近傍部のベントナイト固相分析により、ベントナイトの変化の有無を把握し、変化が認められた場合、新たに生じた固相（腐食生成物および変質生成物）を同定した。

#### 3.1 陽イオン交換容量分析

陽イオン交換容量(CEC)の測定には、日本ベントナイト工業会標準試験方法 JBAS-106-77<sup>8)</sup>に従った。以下に手順を示す。装置の略図を図3.1に示す。

- ①試料と混ぜ合わせる海砂のごみや塩素イオンを除去するため、脱イオン水で5~6回程度洗浄した。6Nの塩酸を加えて約1時間煮沸した。冷却後、プロナーロートでろ過し、塩素イオンが検出されなくなるまで脱イオン水で洗浄した。酢酸銀溶液により塩素イオンが検出されなくなったのを確認後、約60°Cの恒温槽で約8時間以上乾燥させた。
- ②上記①の操作を行った海砂と試料を混合した(海砂は試料に対して10倍程度の量)。
- ③浸出管Bの最下部に少量の石英ウールを平らに詰めた。その上に乳化ろ紙を3~5mm程度の厚さに詰めた。更に、②で混合した海砂と試料を詰めた。
- ④試料の入った浸出管Bに1N酢酸アンモニウム溶液を少しづつ入れ、試料中に完全に浸透したら浸出管Bを装置にセットし、洗浄液容器Aに入った100mlの1N酢酸アンモニウム溶液を4~24時間で浸出が終了するように、洗浄液容器Aのコックを調節して流下させた。
- ⑤洗浄液容器Aを充分に水洗した後、50mlの80%エチルアルコールを加え流下させて試料を洗浄した。
- ⑥洗浄液容器Aと受器Cを充分に水洗した後、洗浄液容器Aに100mlの10%塩化カリウム溶液を加えて流下させた後、試料中のアンモニウムイオンをカリウムイオンと交換させた。
- ⑦受器Cのアンモニウムイオンを含む流出液を蒸留装置に移した。ケルダール法に従って、アンモニアを蒸留した。流出液は一定量の0.1N硫酸に受け過剰の硫酸を0.1N水酸化ナトリウム溶液で滴定した。同時に、空試験を行った。次式により計算し、少数第一位までを乾燥試料100g当たりのミリ当量数(meq/100g)で表示した。

$$\text{CEC}(\text{meq}/100\text{g}) = \frac{(A - B)\Delta f \Delta 100}{S \Delta \frac{100 - M}{100}}$$

ここで、A：空試験に要した0.1N NaOHの容量(ml), B：実際に要した0.1N NaOHの容量(ml), f: 0.1N NaOHのファクター, S: 試料採取量(g), M: 試料の水分(%)

1試料当たりの測定繰り返し回数を2とした。

### 3.2 スメクタイト層間陽イオン分析

試験後ベントナイト試料のスメクタイト層間に存在する陽イオンの種類や量を把握するため、スメクタイト層間陽イオンの分析を行った。

試験片と分割した固相試料（ベントナイト）を用いて、以下の手順によりスメクタイト層間陽イオン分析用の溶液試料を準備した。

- ①遠心分離管に試料と80%のエタノールを入れて、遠心分離（回転数=12,000[rpm] 60分間）を行った。この操作を3回程度繰り返すことで不純物を除去した。
- ②雰囲気制御グローブボックス内で自然乾燥させた。そして、乾燥した試料を乳鉢により粉碎したベントナイト試料0.5gを精秤して遠心分離管に入れ、遠心分離（回転数=12,000[rpm] 60分間）を行った。
- ③遠心分離後の試料に1Nの酢酸アンモニウム( $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ )を加えてハンドシェイクにより良く攪拌することで、スメクタイト層間陽イオンと置換させた。再度、遠心分離（回転数=12,000[rpm] 90分間）を行った。
- ④遠心分離後の上澄み液をろ過（0.45cmのメンブレンフィルタによる濾過に続いて分画分子量10,000での限外濾過）した。

鉄の沈殿を防ぐため、濾過後の溶液に塩酸を加え、酸性（pH=3～4）にし、溶液分析用の試料に供した。溶液分析元素はCa, Na, K, MgおよびFeとした。

### 3.3 SEM/EDS分析およびTEM/EDS分析

試験片接触面近傍部のベントナイト試料の表面状態や表面に分布する元素の状態を比較するため、SEM/EDS分析を実施した。また、ベントナイト試料に対し、より微細なスケールで、スメクタイト層間に存在する元素の種類や分布状態に関する情報を得るため、TEM/EDS分析についても行った。以下に各々の分析に供するための前処理方法についてまとめる。

#### 3.3.1 SEM/EDS分析前処理

試験片接触面近傍部のベントナイト試料を両面テープの片面が貼り付けてある試料ホルダーに取り付けた。この試料ホルダーを雰囲気制御グローブボックスから取り出し、SEM/EDS分析を実施した。ベントナイト試料は非導電性であるため、前処理として金蒸着を行った。

#### 3.3.2 TEM/EDS分析前処理

試験片接触面近傍部のベントナイト試料を多量の蒸留水で溶解させた。この溶液をエポキシ樹脂の中に包埋した。雰囲気制御グローブボックスから取り出し、60°Cの恒温槽で一昼夜乾燥させた。このエポキシ樹脂を薄片にしてTEM/EDS分析を行った。

### 3.4 EPMA 分析

試験片接触面からベントナイト中への鉄の拡散プロファイルを確認するために EPMA による面分析を行った。各々の分析に供するための前処理として、試験片の形状を崩さぬよう電気炉(700°C, 20 分間)にて焼き固めた。この後、エポキシ樹脂にて試料を浸漬し、分析断面を切断、研磨して EPMA の試料とした。

### 3.5 X 線回折分析

任意期間静置後に腐食生成物や新たな結晶性鉱物の生成が認められるか、また試験後のベントナイトが試験前と同様に粘土鉱物としての特性である層状構造を有しているかどうかを確認するため、定方位分析および不定方位分析を行った。また、湿度制御条件下において試験後ベントナイトの定方位分析を行い、湿度変化に伴う試験後ベントナイトの底面間隔の広がりの変化から層間陽イオンを特定した。以下に、各分析における試料の前処理方法等についてまとめる。

#### 3.5.1 不定位分析

試験片接触面近傍部および遠隔部のベントナイト試料を、粉末 X 線回折用試料板に充填し、その後霧囲気制御セルを使用し、試料を大気と接触させない状態で X 線回折分析を行った。

#### 3.5.2 定方位分析

試験片接触面近傍部および遠隔部のベントナイト試料に蒸留水を加え、よく攪拌した後の試料の懸濁部分を無反射試料板の上に薄く延ばし、一昼夜自然乾燥させた。その後、霧囲気制御セルを使用し、試料を大気と接触させない状態で X 線回折分析を行った。鉄の影響が過剰な場合には、霧囲気制御グローブボックス内において超音波洗浄処理を行った後に X 線回折分析を行った。

#### 3.5.3 湿度制御条件下での定方位分析

試験片接触面近傍部および遠隔部のベントナイト試料に蒸留水を加え、よく攪拌した後の試料の懸濁部分を無反射試料板の上に薄く延ばし、一昼夜自然乾燥させた。その後、窒素ガスを常時注入できる湿度制御セルを使用し、湿度 0 %～100 %に変化させ、湿度を 10 %変化させる度に X 線回折分析を行った。鉄の影響が過剰な場合には、霧囲気制御グローブボックス内において超音波洗浄処理を行った後に X 線回折分析を行った。

#### 3.5.4 エチレングリコール処理定方位分析

試験片接触面近傍部および遠隔部のベントナイト試料に蒸留水を加え、よく攪拌した後の試料の懸濁部分を無反射試料板の上に薄く延ばし、20%エチレングリコール溶液を 1, 2

滴加えて反射試料板の上の試料に馴染ませて一昼夜自然乾燥させた。その後、雰囲気制御セルを使用し、試料を大気と接触させない状態でX線回折分析を行った。鉄の影響が過剰な場合には、雰囲気制御グローブボックス内において超音波洗浄処理を行った後にX線回折分析を行った。

#### 4. 結果および考察

これ以降の表記として、SW-80°C試料、SW-50°C試料、GW-1-80°C試料、GW-2-80°C試料、SW-80°C大気条件試料およびSW-80°C Kunipia-F試料はそれぞれ人工海水を使用した80°C試験、人工海水を使用した50°C試験、人工地下水-1を使用した80°C試験、人工地下水-2を使用した80°C試験、人工海水を使用した80°Cの大気条件試験および人工海水を使用した80°CのKunipia-Fベントナイト試験を示すこととする。

##### 4.1 試料の外観

試料採取時の画像を写真4.1に示す。写真中の(A)がチタンカラムである。写真中の(B)がチタンカラムの片側蓋を取り外した状態である。写真中の(C)がチタンカラムを取り外した状態である。上部の白い円筒形のものはセラミックフィルタである。写真中の(D)は粘土部分を二つに割って炭素鋼を取り除いた状態である。写真中の(D)の炭素鋼と接触していた表面は暗青色をしているのに対して炭素鋼と接触していないベントナイト部分は淡青色を呈していた。

##### 4.2 浸漬溶液分析結果および考察

浸漬溶液分析結果を表4.2に示す。人工海水系(SW-50°C試料およびSW-80°C大気条件試料)試験における浸漬溶液の濃度はほとんど変化していなかった。人工地下水系(GW-1-80°C試料およびGW-2-80°C試料)試験における浸漬溶液の濃度は各元素とともに増加しているが、際立った増加量ではなかった。いずれの試料においても炭素鋼溶解による鉄が溶存しており、GW-1-80°C試料では約75%が二価鉄であった。

浸漬溶液のpHは窒素雰囲気下での試験では初期pHより高くなる傾向(SW-50試料、GW-1-80°C試料およびGW-2-80°C試料)にあり、大気雰囲気下での試験では低くなる傾向(SW-80°C大気条件試料)にあった。また、酸化還元電位は還元剤を添加していないにもかかわらず低い値であると言え、試験期間中は還元雰囲気が保たれたと言える。

##### 4.3 陽イオン交換容量分析結果とスメクタイト層間陽イオン分析結果および考察

###### 4.3.1 陽イオン交換容量分析結果および考察

各試料の未変質部の陽イオン交換容量および浸出陽イオン分析結果を表4.3.1-1に示す。また、固相の化学組成を表4.3.1-2に示す。これらの2つの表において比較のためにクニゲルV1とクニピアFの値<sup>9)</sup>も合わせて示している。陽イオン交換容量において、クニゲル

V1 は 52.4[meq/100g] であるのに対して全ての試料において若干高い値となった。また、クニピア F は 116.5[meq/100g] であるのに対して SW-80°C Kunipia-F 試料は 111.2[meq/100g] と若干低い値となった。浸出陽イオン分析結果から、Na については GW-1-80°C 試料以外は減少していた。K については全ての試料において増加していた。海水系の試料においては Mg が増加しており Ca が減少していた。これはスメクタイトが溶解して Mg が増加して層間中の Ca と置換したと考えられる。また、地下水系の試料においては Mg が減少しており Ca が増加していた。これは、ベントナイト中方解石が溶解して Ca が増加して層間中の Mg と置換して溶液中に放出されたと考えられる。

表 4.3.1-2 から、鉄酸化物(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)は全ての試料においてクニゲル V1 およびクニピア F に対して若干増加していた。これは炭素鋼から溶出した鉄が影響しているものと考えられる。その他は多少の増減があるものの大きな違いは無かった。

#### 4.3.2 スメクタイト層間陽イオン分析結果および考察

未変質部分のスメクタイト層間陽イオン分析結果を表 4.3.2 に示す。表 4.3.1-1 の CEC の測定に伴う浸出陽イオン分析と比較すると、桁違いに大きくなつた。これは、エタノールによる可溶性塩の除去が完全ではなかったため、層間陽イオンとして存在する以外の元素についても分析値に加算されてしまったと考えられる。

### 4.4 SEM/EDS 分析およびTEM/EDS 分析結果および考察

#### 4.4.1 SEM/EDS 分析結果および考察

SW-80°C 試料、SW-50°C 試料、GW-1-80°C 試料、GW-2-80°C 試料、SW-80°C 大気条件試料および SW-80°C Kunipia-F 試料の SEM/EDS の分析結果を図 4.4.1-1 ~ 図 4.4.1-6 に示す。SEM 画像からはどの試料ともほとんど違いが見られず、生成物も確認できなかつた。EDS 分析では SW-80°C 試料、SW-50°C 試料、GW-2-80°C 試料および SW-80°C 大気条件試料において鉄が多く検出された。また、GW-1-80°C 試料以外では Ca も検出された。人工海水系の試料(SW-80°C 試料、SW-50°C 試料、SW-80°C 大気条件試料および SW-80°C Kunipia-F 試料)においては人工海水の成分である Ca が浸透したと考えられるが、GW-2-80°C 試料の浸漬液である人工地下水には Ca が入っていないことを考慮すると、ベントナイト表面での Ca はベントナイトに含まれる方解石が溶解したことによるものだと考えられる。

#### 4.4.2 TEM/EDS 分析結果および考察

SW-80°C 試料の TEM/EDS の分析結果を図 4.4.2 に示す。TEM 画像から層状構造が確認できた。層間は約 12[Å] であり、通常の 2:1 型スメクタイトの層間と同じ間隔であった。EDS 分析では、スメクタイトの主要構成元素である Si、Al および Mg の他に Fe と Ca が検出された。Fe は炭素鋼が溶解したもの、Ca は人工海水の成分である Ca が浸透したか若

しくはベントナイトの随伴鉱物の方解石が溶解したものと考えられる。このEDS分析からではFeとCaが層間に位置しているかを判断できなかった。

#### 4.5 EPMA分析結果および考察

SW-80°C試料の分析断面を図4.5-1, マッピング図を4.5-2に示す。GW-1-80°C試料の分析断面を図4.5-3, マッピング図を4.5-4に示す。また、SW-80°C大気条件試料の分析断面を図4.5-5, マッピング図を4.5-6に示す。図4.5-1, 図4.5-3および図4.5-5の白線で囲んだ部分がマッピングした範囲である。図の黒い部分が炭素鋼と接触していた場所である。

SW-80°C試料(図4.5-2)において、鉄は炭素鋼接触部で一番存在量が多く比較的ベントナイト内部(0.2mm程度)まで浸透している。Caは存在量が比較的少なかった。また、Naはベントナイト内部で一様に存在していた。

GW-1-80°C試料(図4.5-4)において、鉄は炭素鋼接触部のみでベントナイト内部まで浸透していなかった。逆にCaは炭素鋼接触部ではほとんど存在しておらず、ベントナイト内部に多く存在していた。Naはベントナイト内部で一様に存在しているが、炭素鋼接触部の方がベントナイト内部より存在量が多かった。

SW-80°C大気条件試料(図4.5-6)において、鉄は炭素鋼接触部のみでベントナイト内部まで鉄が浸透していなかった。CaはSW-80°C試料およびGW-1-80°C試料の結果とは異なり、存在する場所が点々としているが存在量が多かった。Naはベントナイト内部で一様に存在しているが、GW-1-80°C試料の結果より存在量が少なかった。

これらの結果から、炭素鋼との接触部から鉄は約0.2mm程度しかベントナイト中に浸透していないことが確認できた。SW-80°C大気条件試料においてはCaの存在量が多く、ベントナイト中に含まれる方解石の溶解によるものと考えられる。Naは全ての試料において多数量存在しており、ベントナイトの主要な構成成分であることが確認できた。

SW-80°C試料およびGW-1-80°C試料を炭素鋼接触面から除々に削り(重さ0.05~0.2[g])逐次抽出した結果<sup>10)</sup>において、炭素鋼接触面からの鉄の浸透厚さがSW-80°C試料では約0.5mmおよびGW-1-80°C試料では約3.5mmと報告している。EMPA分析の結果よりは鉄の浸透厚さが多い試料もあり、10年間で最大3.5mmである。

#### 4.6 X線回折分析結果および考察

##### 4.6.1 不定方位分析結果および考察

不定方位分析結果を図4.6.1-1~図4.6.1-12に示す。クニゲルV1を使用した図4.6.1-1~図4.6.1-10(SW-80°C試料, SW-50°C試料, GW-1-80°C試料, GW-2-80°C試料およびSW-80°C大気条件試料)についての $2\theta=58\sim64^\circ$ の図中で2つのピークが確認できた。 $60^\circ$ 付近のピークは石英のものであり, $62^\circ$ 付近のピークはスメクタイトのd(060)のものである。通常, d(060)面ピーク位置は2-八面体のスメクタイトで1.49~1.50[Å]に,

3-八面体のスメクタイトで  $1.52\sim1.54[\text{\AA}]$  に位置するとされている<sup>11)</sup>。このことから、いずれの試料においても 2-八面体構造であり試験前のスメクタイトと変化していないと言える。また、どの試料においても新たな腐食生成物のピークは検出されなかった。

#### 4.6.2 定方位分析結果および考察

定方位分析結果を図 4.6.2-1～図 4.6.2-6 に示す。全ての試料についての  $d(001)$  ピークは変質部および未変質部とともに底面間隔が約  $12.5[\text{\AA}]$  に位置しており、モンモリロナイトの底面間隔は普通の風乾状態(湿度 60%前後)では層間陽イオンが Na の場合  $13[\text{\AA}]$ 、層間陽イオンが Ca や Mg の場合  $15[\text{\AA}]$  となる<sup>12)</sup>ことから、今回の試験後試料は変質していないと考えられる。

#### 4.6.3 湿度制御条件下での定方位分析結果および考察

湿度制御条件下での定方位分析結果を図 4.6.3-1～図 4.6.3-12 に示す。図 4.6.3-1 の SW-80°C 変質部試料での湿度制御測定結果は Ca 型に近い膨潤性を示していた。図からも確認できるようにピークは明瞭ではないため、層間の主要な陽イオンが 2 倍の陽イオンであるとは断言できない結果であった。図 4.6.3-2～図 4.6.3-12 の試料での湿度制御測定結果は Na 型に近い膨潤性を示していた。しかし、いずれの試料においても膨潤性能は維持していることが確認できた。ほとんどの試料は層間の主要な陽イオンとして 1 倍の陽イオンが存在しているものと考えられる。

#### 4.6.4 エチレングリコール処理定方位分析結果および考察

エチレングリコール処理定方位分析結果を図 4.6.4-1～図 4.6.4-6 に示す。定方位分析結果(図 4.6.2-1～図 4.6.2-6)と比較して、全ての試料において、 $d(001)$  ピーク位置が約  $12.5[\text{\AA}]$  から約  $17.0[\text{\AA}]$  に底面間隔が拡がった。

スメクタイトとクロライトの混合粘土鉱物の場合、クロライトの混合割合が多くなるにしたがって、エチレングリコール処理を行ったスメクタイトの底面間隔は狭くなる傾向になることが確認されている<sup>13)</sup>。

今回の試料については、エチレングリコール処理を行った結果、全ての試料においてクロライトが混合していないスメクタイトの底面間隔( $=16.5[\text{\AA}]$ )とほとんど同じであり、クロライトのような非膨潤粘土鉱物が混合していないスメクタイトであると考えられる。

### 5. おわりに

圧縮ベントナイト中の炭素鋼の長期的な腐食挙動を評価するため、窒素雰囲気下において人工海水および人工地下水を用い、50°C および 80°C での 10 年間にわたる浸漬試験が行われた。本調査では、この浸漬試験後の圧縮ベントナイトを対象とし、これまでのバッヂ系試験で認められたようなスメクタイトの Fe 型化や非膨潤性粘土鉱物への変化等の鉄-

ベントナイト相互作用によるベントナイトの変質挙動を調査した。試験の結果を以下にまとめた。

- ・人工海水および人工地下水における試験後の圧縮ベントナイトを比較した場合、人工海水に浸漬されていた試料では、人工地下水の場合に比べて、炭素鋼の腐食に伴い生じた鉄イオンがより圧縮ベントナイト内部にまで移行していた。
- ・人工海水（80°C）における試験後試料の TEM 観察では、粘土鉱物の特徴である層状構造が確認された。また、層間は約 12[Å]であり、通常の 2 : 1 型スマクタイトの層間と同様であった。従って、試験前後でスマクタイトは変質していないと推察された。
- ・窒素雰囲気下と大気雰囲気下で行われた試験結果を比較すると、窒素雰囲気下では、炭素鋼の腐食に伴い生じた鉄イオンが圧縮ベントナイト内部に移行しているのに対し、大気雰囲気下では、鉄イオンはほとんど圧縮ベントナイト内部に移行していなかった。
- ・浸漬溶液の pH は窒素雰囲気下での試験では初期 pH より高くなる傾向にあり、大気雰囲気下での試験では低くなる傾向にあった。
- ・EPMA 分析の結果、圧縮ベントナイト中に移行した鉄の最大深さは約 0.2mm であった。
- ・鉄の移行が認められた圧縮ベントナイトを対象に XRD 分析を行った結果、圧縮ベントナイト中には鉄の腐食生成物と推定されるものは検出されなかった。また、XRD 分析結果から、ベントナイト中の粘土鉱物は 2-八面体構造を示し、さらに湿度制御下での測定では、Na 型スマクタイトと同様な膨潤性を示した。これらのことから、試験前の Na 型スマクタイトは、試験後も変化していなかったと推定された。

これまでに、鉄共存下でのベントナイトの変質挙動を把握するため、温度、溶液条件および試験期間等を変え、バッチ系での試験を実施してきた。それらの結果では、初期の Na 型スマクタイトの Fe 型化や微量の非膨潤性粘土鉱物への変化等、何らかの変化が認められた。しかしながら、今回調査を行った圧縮系での試験後試料では、圧縮ベントナイトへの鉄の移行は確認されたものの、初期の Na 型スマクタイトに変化は生じていないと推定された。したがって、処分環境のような圧縮系における鉄-ベントナイト相互作用による影響を評価する上では、バッチ系での試験結果をそのまま適用するのではなく、圧縮系で生ずる現象を十分に理解した上で評価することが重要である。

### 謝辞

10 年間、炭素鋼と接していたベントナイトの変質挙動調査を実施するにあたって、地層処分研究開発部門ニアフィールド研究グループの谷口直樹氏、川崎学氏および地層処分研究開発部門 TRU グループ本田明氏には、ベントナイト試料を提供して頂いた。また、試料採取時には御協力および御助言をして頂いた。文部科学省科学技術・学術政策局原子力安全課の柴田雅博氏には分析を行うにあたって御助言を頂いた。環境技術管理部処分技術課の久保田満氏には TEM/EDS 分析において御協力して頂いた。また、同課の大内祐司氏には EPMA 分析において御協力して頂いた。再処理技術開発センター技術開発部の関克己氏

には EPMA 分析の前処理において御協力して頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 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 技術資料, JNC TN1400 99-23 (1999).
- 2) 柴田雅博, 笹本広, 神徳敬, 油井三和：“緩衝材の長期安定性評価技術の現状”, 核燃料サイクル開発機構 技術資料, JMC TN8400 2004-010 (2004).
- 3) G. Kamei, C. Oda, S. Mitsui, M. Shibata and T. Shinozaki : “Fe(II)-Na Ion Exchange at Interlayers of Smectite : Adsorption-Desorption Experiments and a Natural Analogue”, Engineering Geology, vol.54, pp.15-20 (1999).
- 4) 陶山忠宏, 柴田雅博, 笹本広：“鉄型化ベントナイト水熱試験－低酸素雰囲気での高温条件下における鉄型化ベントナイトの変化の同定”, 日本原子力研究開発機構 技術資料, JAEA-Research 2006-064 (2006).
- 5) 陶山忠宏, 柴田雅博, 上野健一, 笹本広：“鉄型化ベントナイト水熱試験(II)－低酸素雰囲気, 150°Cにおける鉄型化ベントナイトの変化の同定”, 日本原子力研究開発機構 技術資料, JAEA-Research 2007-018 (2007).
- 6) 谷口直樹, 川崎学, 内藤守正：“緩衝材中における炭素鋼の腐食挙動の実験的検討- I – 10 年間の浸漬試験結果に基づく腐食進展挙動の検討 –”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2008-011 (2008).
- 7) 動力炉・核燃料開発事業団：“高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成3年度－”, 動力炉・核燃料開発事業団 技術資料 PNC TN1410 92-081 (1992).
- 8) 日本ベントナイト工業会標準試験方法：“ベントナイト(粉末)の陽イオン交換容量(CEC)測定方法, JBAS-106-77(1977).
- 9) 石川博久, 間野正, 伊藤雅和, 岡本真由美, 柴田雅博, 佐々木康雄, 壇原徹, 鈴木啓三, 渡辺隆：“ベントナイトの鉱物組成分析”, 動力炉・核燃料開発事業団 技術資料, PNC TN8430 93-003 (1993).
- 10) T. Ishidera, K. Ueno and T. Suyama : “Investigation of Montmorillonite Alteration and Form of Iron Corrosion Products in Compacted Bentonite in Contact with Carbon Steel for Ten Years”, Clays in Natural&Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, September 17-20, LILLE 3<sup>rd</sup> International Meeting abstracts, p.269 (2007).
- 11) 下田右：“粘土鉱物研究法”, 創造社 (1985).
- 12) 前野昌弘：“粘土の科学”, 日刊工業新聞社 (1993).
- 13) 渡辺隆：“Chlorite/Saponite 混合層鉱物のX線回折線プロファイル”, 九大理研報(地質), 12卷3号, pp.303-309 (1977).

表 2.1 炭素鋼試験片の化学組成

材料	C	Mn	Si	S	P
SM400B(JIS G3202)	0.13	0.69	0.19	0.007	0.011

表 2.2 試験に用いた溶液の組成 [mol/L]

成分	人工海水	人工地下水-1	人工地下水-2
Na <sup>+</sup>	$4.8 \times 10^{-1}$	$6.6 \times 10^{-1}$	$5.0 \times 10^{-3}$
K <sup>+</sup>	$1.0 \times 10^{-2}$	—	—
Ca <sup>2+</sup>	$1.0 \times 10^{-2}$	—	—
Mg <sup>2+</sup>	$5.5 \times 10^{-2}$	—	—
Cl <sup>-</sup>	$5.6 \times 10^{-1}$	$5.6 \times 10^{-1}$	$2.5 \times 10^{-3}$
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$2.9 \times 10^{-2}$	—	—
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$2.4 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-1}$	$2.5 \times 10^{-3}$
F <sup>-</sup>	$7.4 \times 10^{-5}$	—	—
Br <sup>-</sup>	$8.6 \times 10^{-4}$	—	—
BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup>	$4.4 \times 10^{-4}$	—	—
Sr <sup>2+</sup>	$7.0 \times 10^{-4}$	—	—
pH	7.9~8.4	8.3~8.7	9.1~9.2

表 2.4 試験条件

No.	試験溶液	温度(°C)	雰囲気	緩衝材	試験片
1	人工海水	80	窒素	H 3 仕様***	SM400B
2	人工海水	50	窒素	H 3 仕様***	SM400B
3	人工地下水-1*	80	窒素	H 3 仕様***	SM400B
4	人工地下水-2**	80	窒素	H 3 仕様***	SM400B
5	人工海水	80	大気	H 3 仕様***	SM400B
6	人工海水	80	窒素	Kunipia-F	SM400B

\*人工海水-1:[HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]= $1.0 \times 10^{-1}$ (M), [Na<sup>+</sup>]= $6.6 \times 10^{-1}$ (M)\*\*人工海水-2:[Cl<sup>-</sup>]= $2.5 \times 10^{-3}$ (M), [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]= $2.5 \times 10^{-3}$ (M), [Na<sup>+</sup>]= $5.0 \times 10^{-3}$ (M)\*\*\*H 3 仕様: 第1次取りまとめ緩衝材仕様を想定: 乾燥密度 1.8[Mg/m<sup>3</sup>], 100%クニゲル V1

表 4.2 浸漬溶液分析結果 [mol/L]

	SW-80°C	SW-50°C	GW-1-80°C	GW-2-80°C	SW-80°C 大気
Na	—	$4.74 \times 10^{-1}$	$7.05 \times 10^{-1}$	$1.79 \times 10^{-2}$	$4.70 \times 10^{-1}$
K	—	$1.40 \times 10^{-2}$	$1.73 \times 10^{-3}$	$9.21 \times 10^{-5}$	$1.38 \times 10^{-3}$
Ca	—	$1.02 \times 10^{-2}$	$2.00 \times 10^{-5}$	$1.75 \times 10^{-5}$	$1.21 \times 10^{-2}$
Mg	—	$5.22 \times 10^{-2}$	$8.23 \times 10^{-6}$	$4.11 \times 10^{-6}$	$4.44 \times 10^{-2}$
Fe (Fe <sup>2+</sup> )	—	$8.95 \times 10^{-7*}$ $(1.07 \times 10^{-5})^*$	$1.43 \times 10^{-5*}$ $(1.07 \times 10^{-5})^*$	—	$7.16 \times 10^{-7*}$ $(1.79 \times 10^{-7})^*$
Al	—	$<1.85 \times 10^{-5}$	$<1.85 \times 10^{-5}$	$<1.85 \times 10^{-5}$	$3.55 \times 10^{-2}$
Si	—	$4.81 \times 10^{-4}$	$3.52 \times 10^{-3}$	$2.14 \times 10^{-3}$	$<1.25 \times 10^{-5}$
Cl <sup>-</sup>	—	$5.84 \times 10^{-1}$	$6.88 \times 10^{-1}$	$2.73 \times 10^{-3}$	$5.16 \times 10^{-1}$
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	—	$2.62 \times 10^{-2}$	$4.06 \times 10^{-3}$	$3.25 \times 10^{-3}$	$2.43 \times 10^{-2}$
pH	6.8(ベントナイト表面)	8.67	10.08	9.50	7.30
Eh (mV)	—	108	-110	-267	151

\*浸漬溶液の pH を 3~4 に調整後測定

表 4.3.1-1 陽イオン交換容量および浸出陽イオン分析結果(未変質部)[meq/100g]

	Na	K	Mg	Ca	Total	CEC
SW-80°C	48.6	4.5	10.4	20.6	84.1	58.6
SW-50°C	41.1	3.9	23.9	31.1	100	55.6
GW-1-80°C	64.5	2.0	2.3	53.8	122.6	61.9
GW-2-80°C	44.7	1.5	2.6	43.1	91.9	58.6
SW-80°C Air	34.5	3.7	27.5	15.7	81.4	56.3
SW-80°C Kunipia-F	88.6	4.7	16.4	10.5	120.2	111.2
Kunigel V1 <sup>9)</sup>	52.4	1.3	6.6	41.9	104.4	52.4
Kunipia-F <sup>9)</sup>	114.9	1.1	2.6	20.6	139.2	116.5

表 4.3.1-2 固相の化学組成(未変質部)[%]

	SW-80°C	SW-50°C	GW-1-80°C	GW-2-80°C	SW-80°C 大気	SW-80°C Kunipia-F	Kunigel V1 <sup>9)</sup>	Kunipia-F <sup>9)</sup>
SiO <sub>2</sub>	69.6	69.2	69.2	69.8	69.7	61.3	70.7	61.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.8	14.1	14.2	14.6	14.2	23.4	13.8	21.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.65	2.41	1.98	2.14	2.44	2.55	1.49	1.78
TiO <sub>2</sub>	0.18	0.18	0.17	0.18	0.17	0.15	0.20	0.14
MgO	2.24	2.10	2.09	2.01	2.61	2.87	2.26	3.24
CaO	1.42	2.29	2.75	2.73	1.63	0.40	2.30	0.51
Na <sub>2</sub> O	1.80	1.35	2.62	1.88	1.23	2.03	2.56	3.42
K <sub>2</sub> O	0.48	0.51	0.33	0.35	0.54	0.23	0.33	0.10
Ig-loss [%]	6.83	7.82	6.65	6.32	7.44	7.07	—	—
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	91.38	92.39
Cl	0.32	0.28	0.32	0.00	0.15	0.27	<0.001	0.33
SO <sub>3</sub>	1.04	0.90	0.86	0.85	0.89	0.10	—	—

表 4.3.2 層間陽イオン分析結果(未変質部)[meq/100g]

	Na	K	Mg	Ca	Fe(Fe <sup>2+</sup> )
SW-80°C	396.4	23.7	36.8	57.9	9.0(9.0)
SW-50°C	340.1	19.9	66.2	94.3	18.6(18.1)
GW-1-80°C	389.7	5.6	9.0	93.3	1.8(1.3)
GW-2-80°C	314.0	8.2	17.7	97.6	1.1(1.1)
SW-80°C 大気	282.7	21.5	85.6	60.9	9.0(8.6)
SW-80°C Kunipia-F	781.2	21.0	27.3	16.6	0.52(0.50)

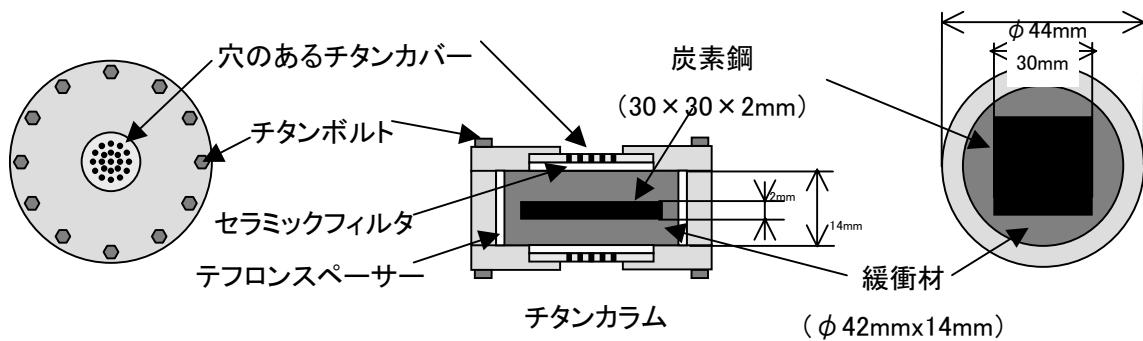


図 2.5-1 緩衝材中における炭素鋼の浸漬試験カラムの模式図

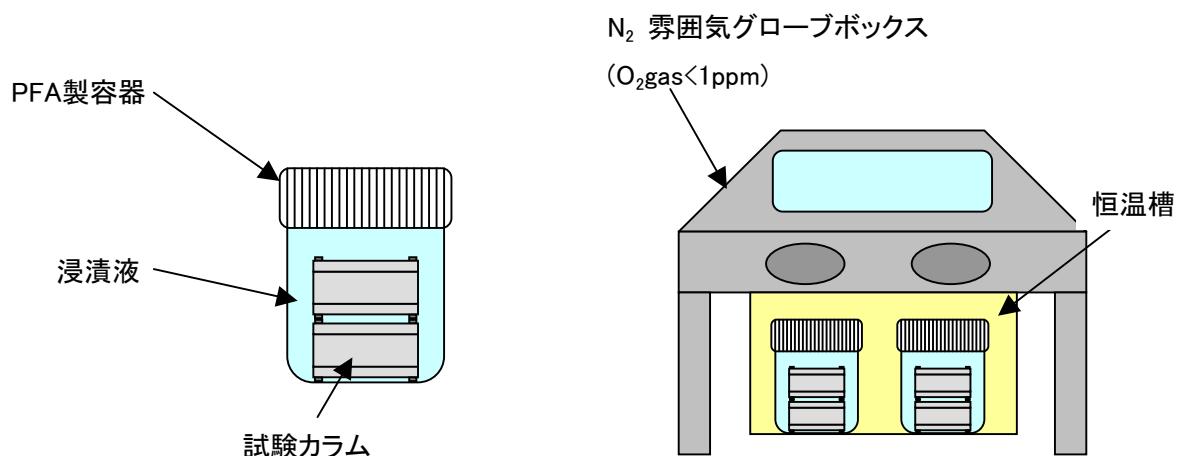


図 2.5-2 緩衝材中における炭素鋼の浸漬試験方法の模式図

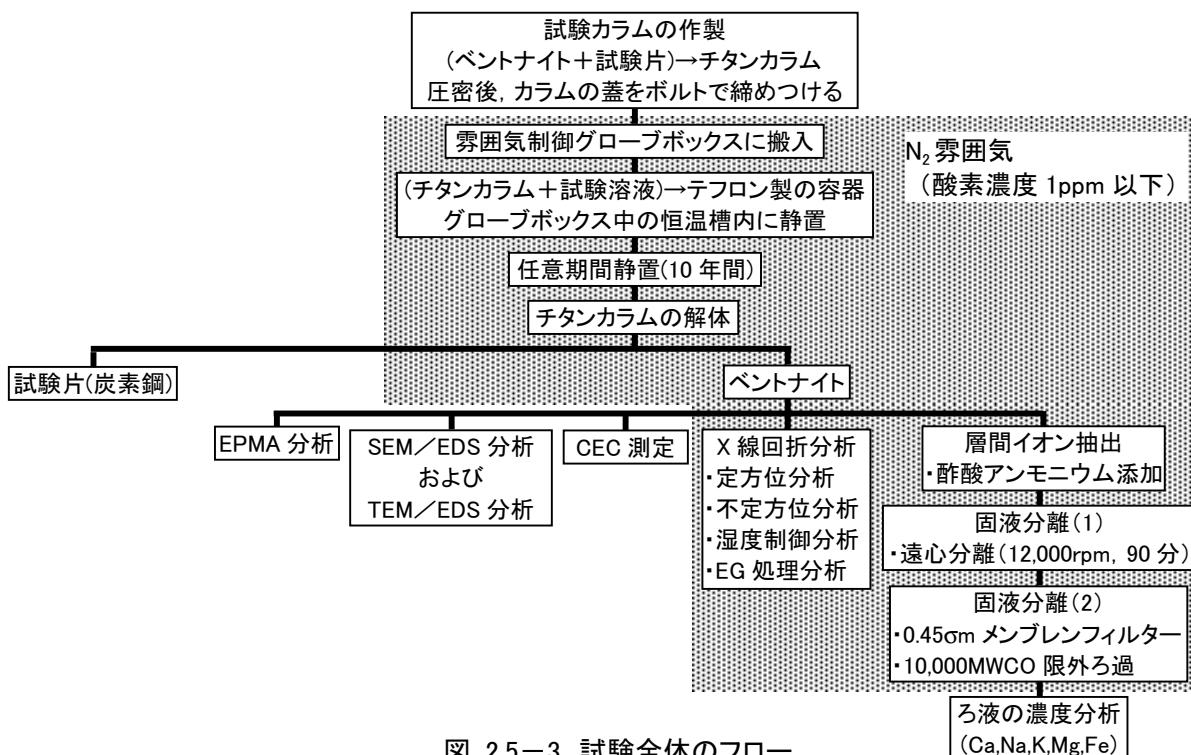


図 2.5-3 試験全体のフロー

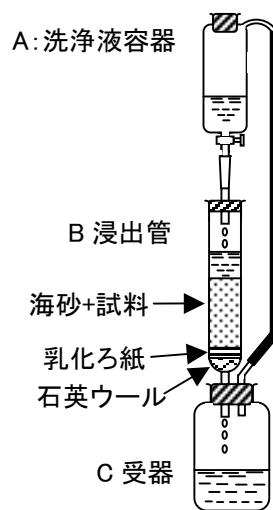


図 3.1 陽イオン交換容量分析装置略図

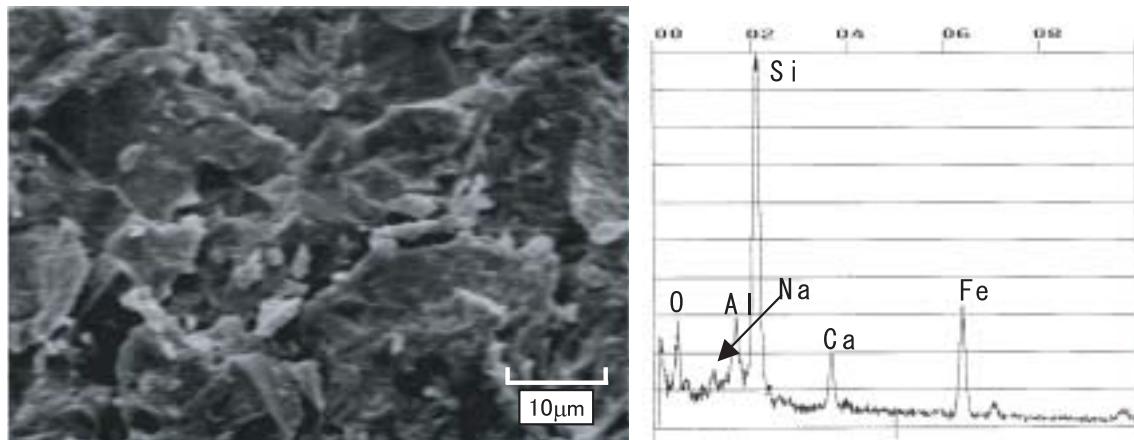


図 4.4.1-1 SW-80°C試料の SEM／EDS 分析結果

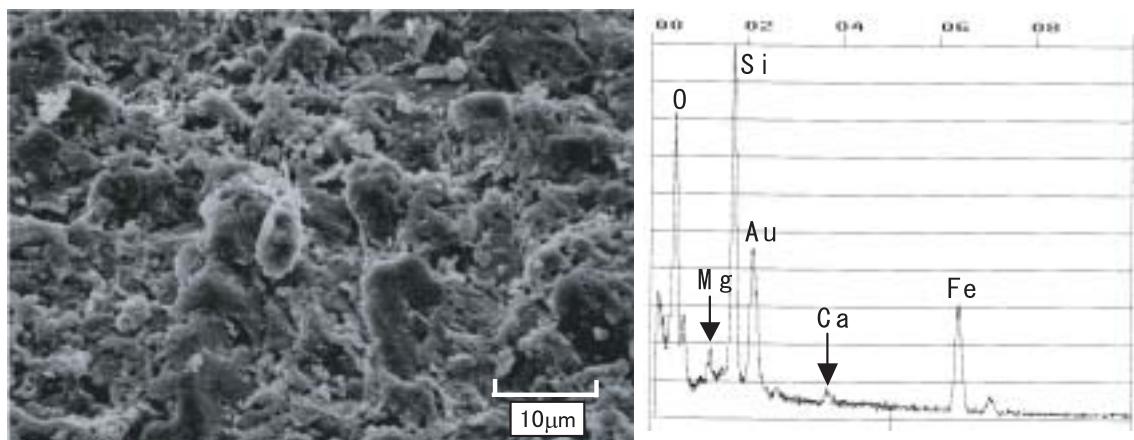


図 4.4.1-2 SW-50°C試料の SEM／EDS 分析結果

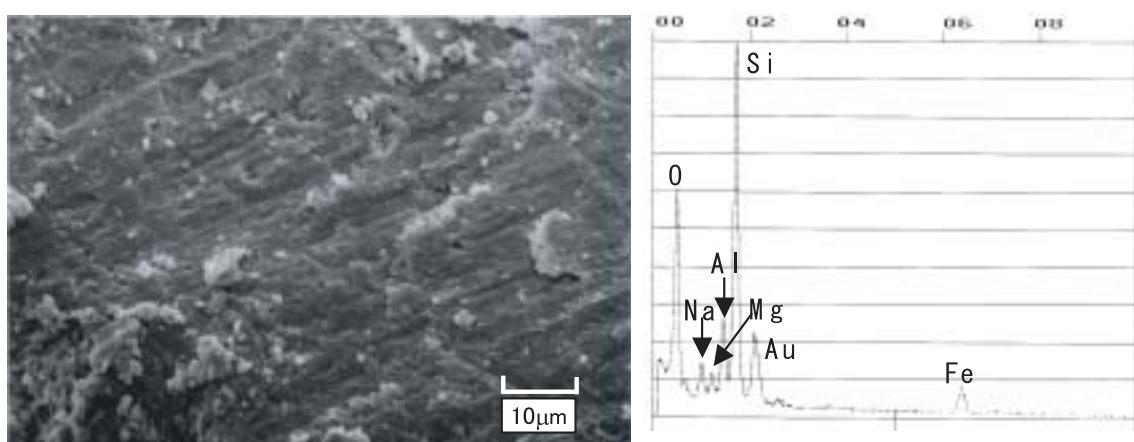


図 4.4.1-3 GW-1-80°C試料の SEM／EDS 分析結果

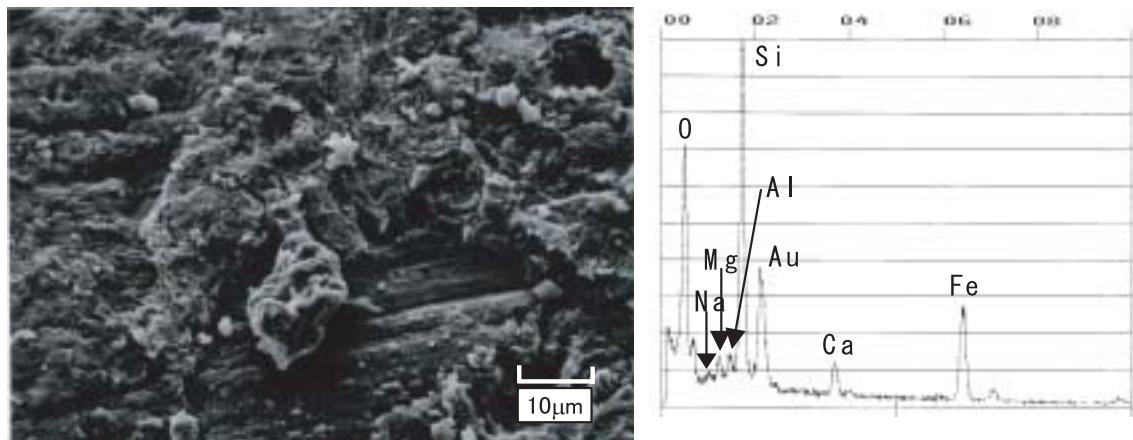


図 4.4.1-4 GW-2-80°C試料の SEM/EDS 分析結果

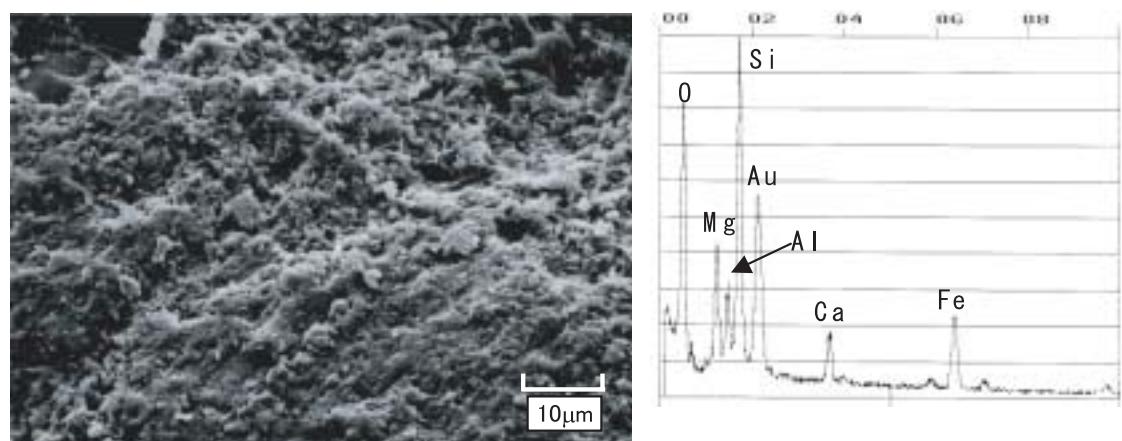


図 4.4.1-5 SW-80°C大気条件試料の SEM/EDS 分析結果

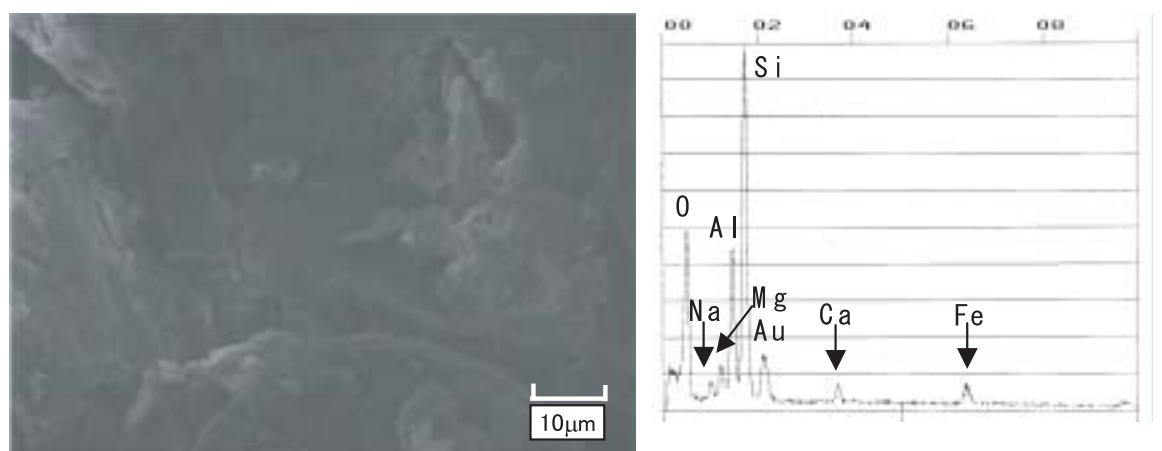


図 4.4.1-6 SW-80°C Kunipia-F 試料の SEM/EDS 分析結果

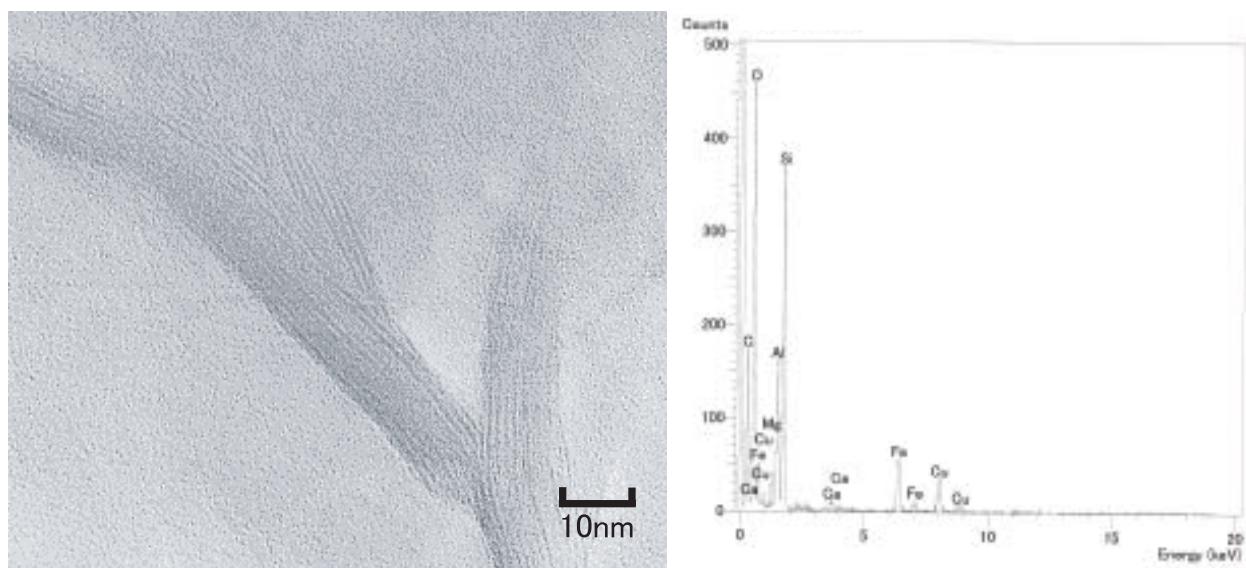


図 4.4.2 SW-80°C試料のTEM／EDS 分析結果

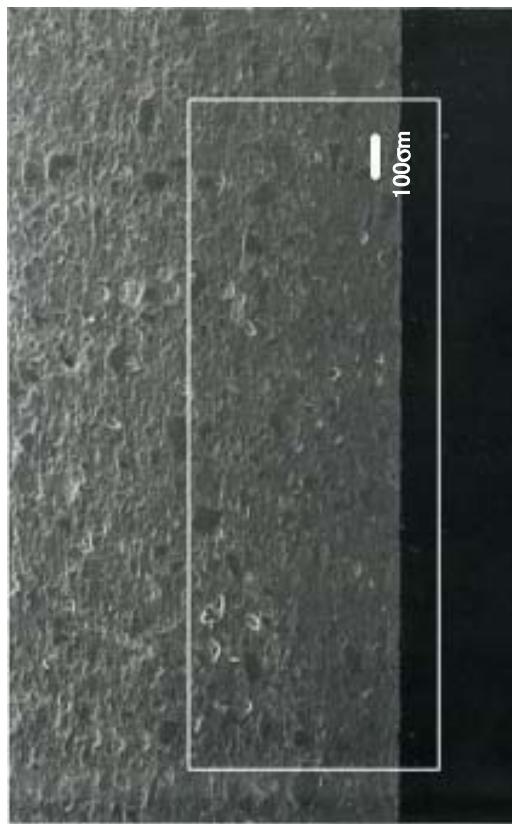


図 4.5-1 EPMA による SW-80°C 試料の断面

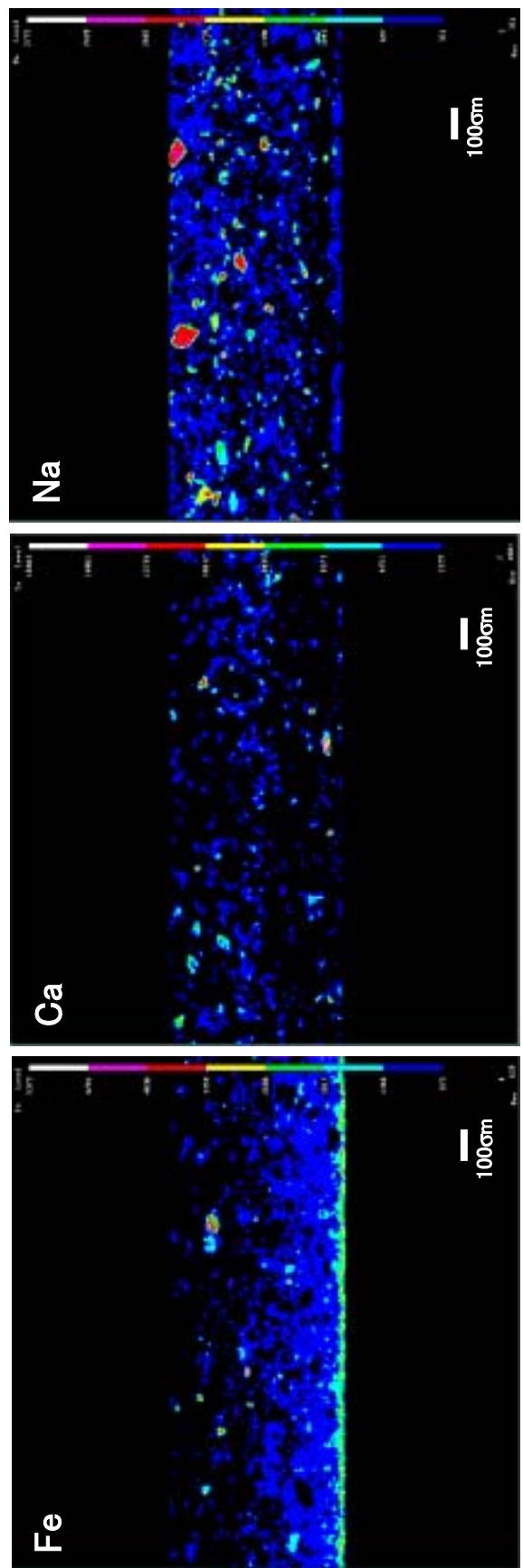


図 4.5-2 EPMA による SW-80°C 試料のマッピング分布

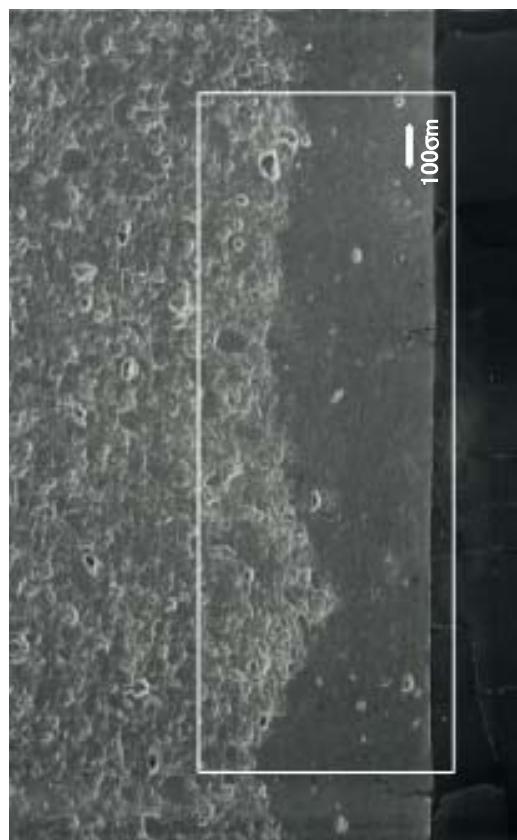


図 4.5-3 EPMA による GW-1-80°C 試料の断面

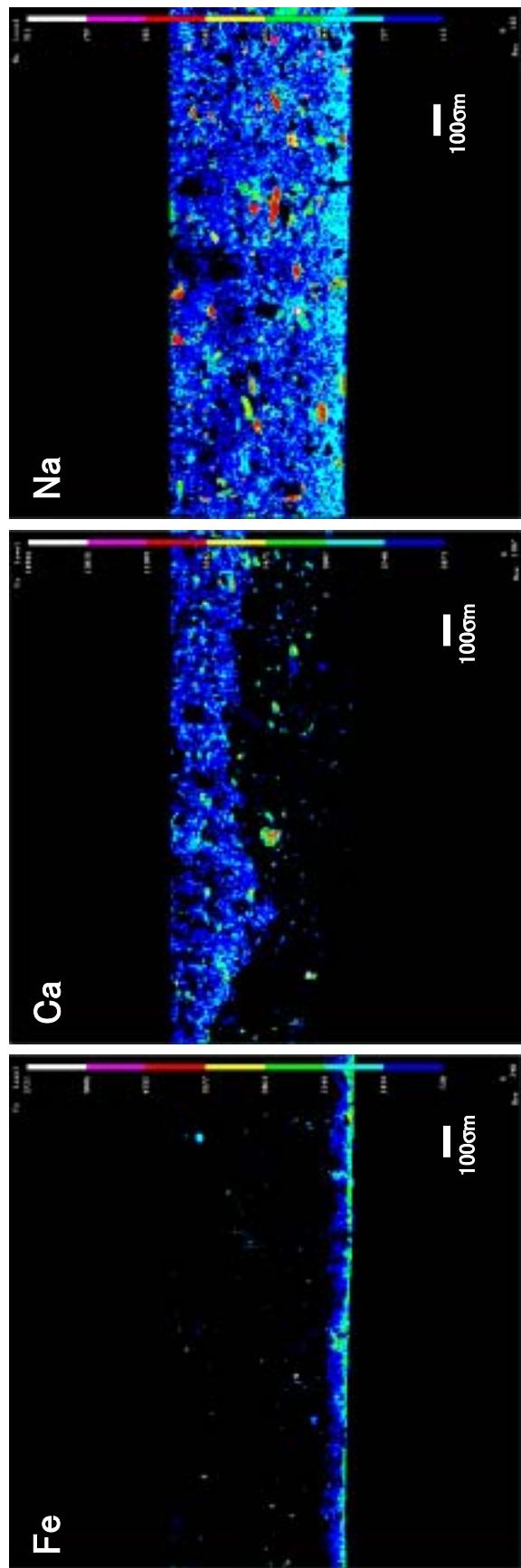


図 4.5-4 EPMA による GW-1-80°C 試料のマッピング分布

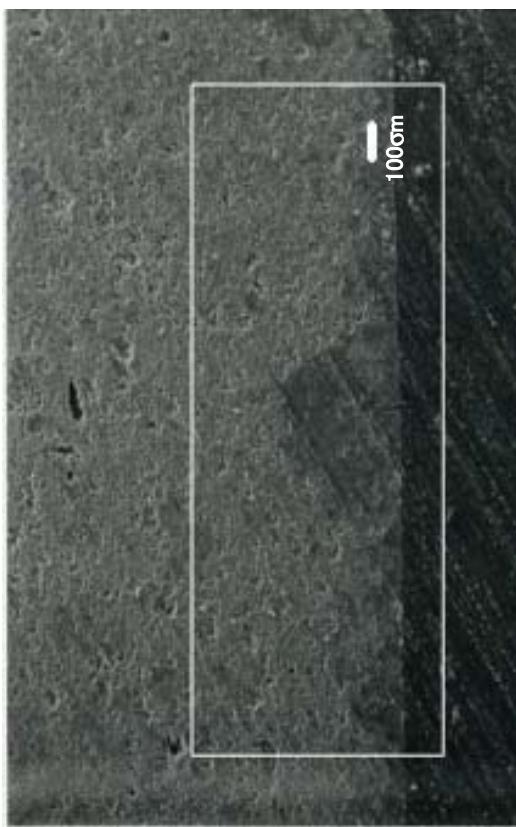


図 4.5-5 EPMA による SW-80°C 大気条件試料の断面

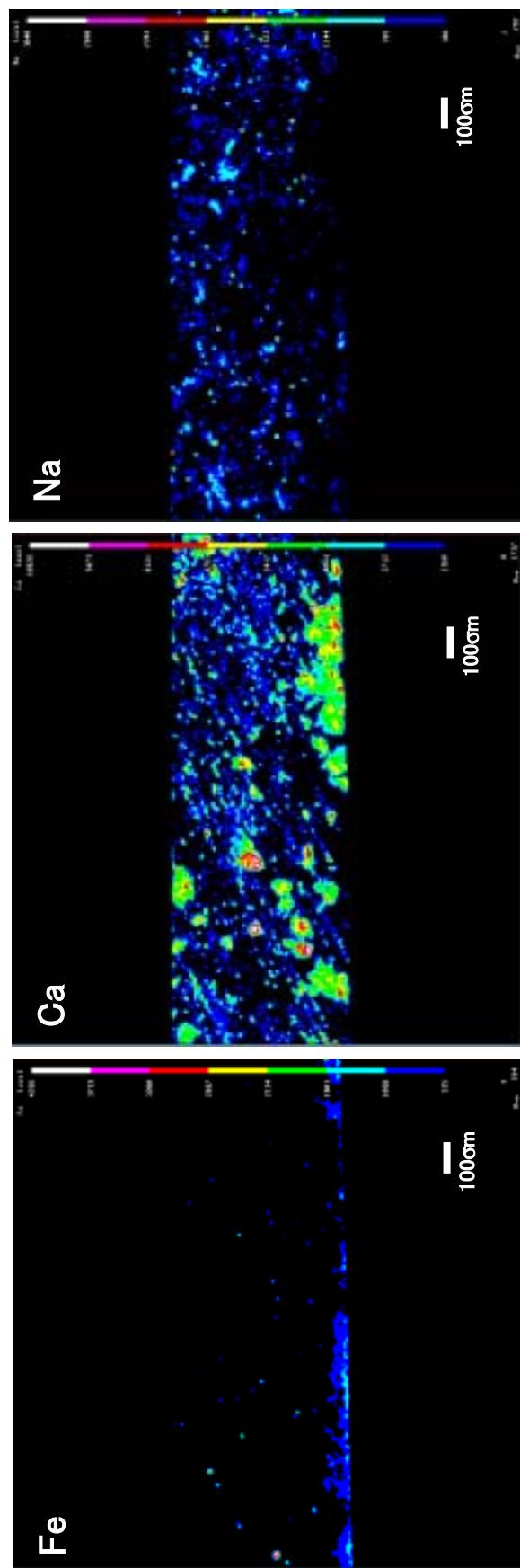


図 4.5-6 EPMA による SW-80°C 大気条件試料のマッピング分布

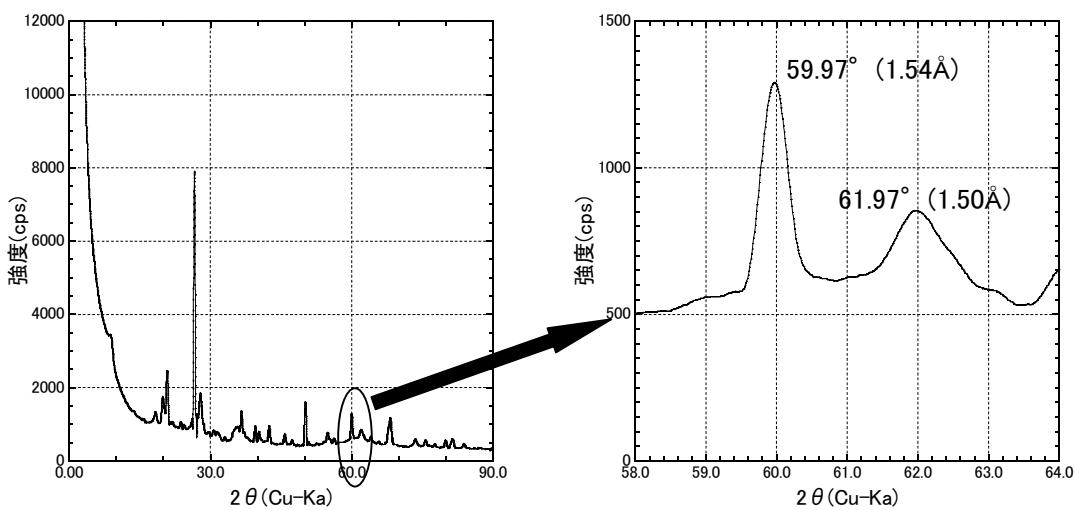


図 4.6.1-1 SW-80°C 変質部試料の不定方位測定結果

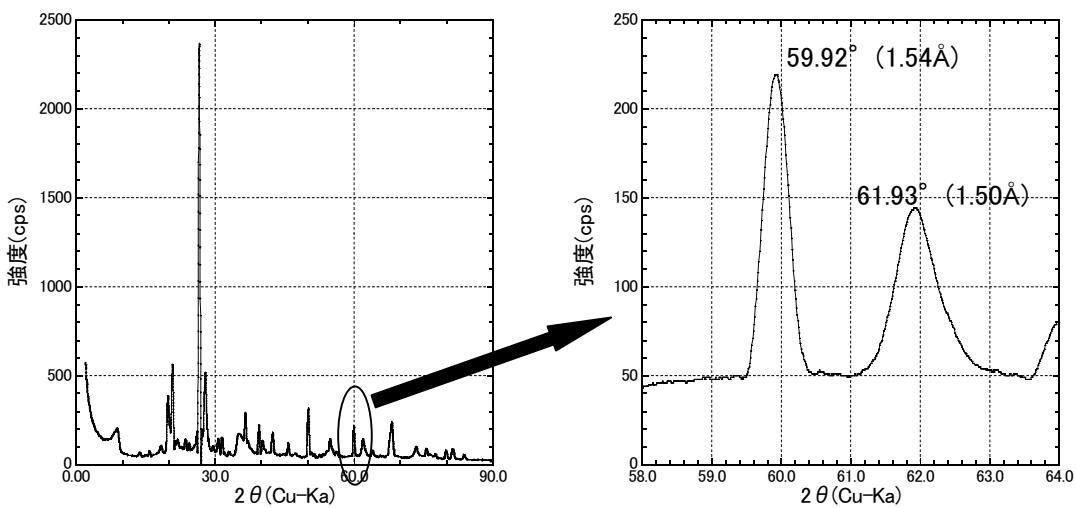


図 4.6.1-2 SW-80°C 未変質部試料の不定方位測定結果

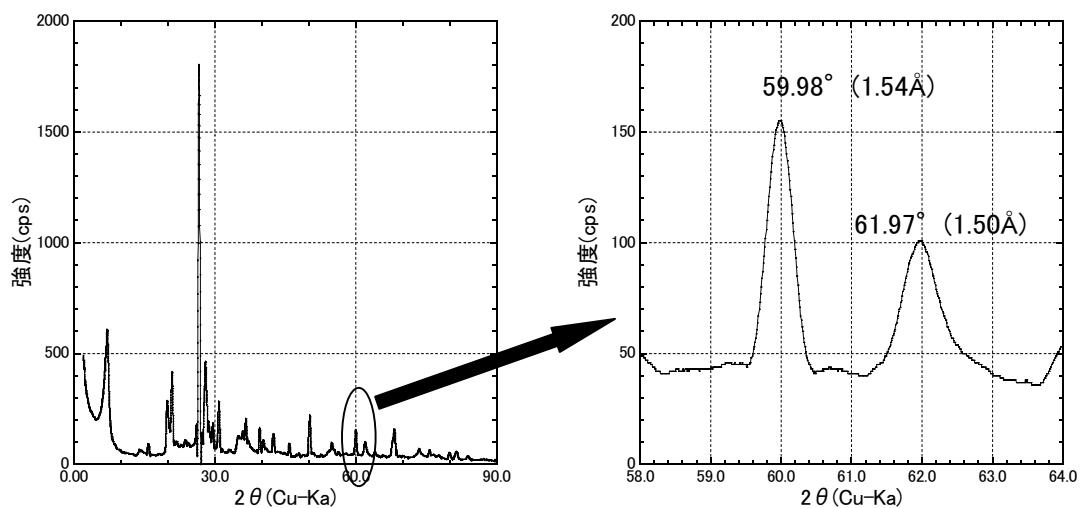


図 4.6.1-3 SW-50°C 変質部試料の不定方位測定結果

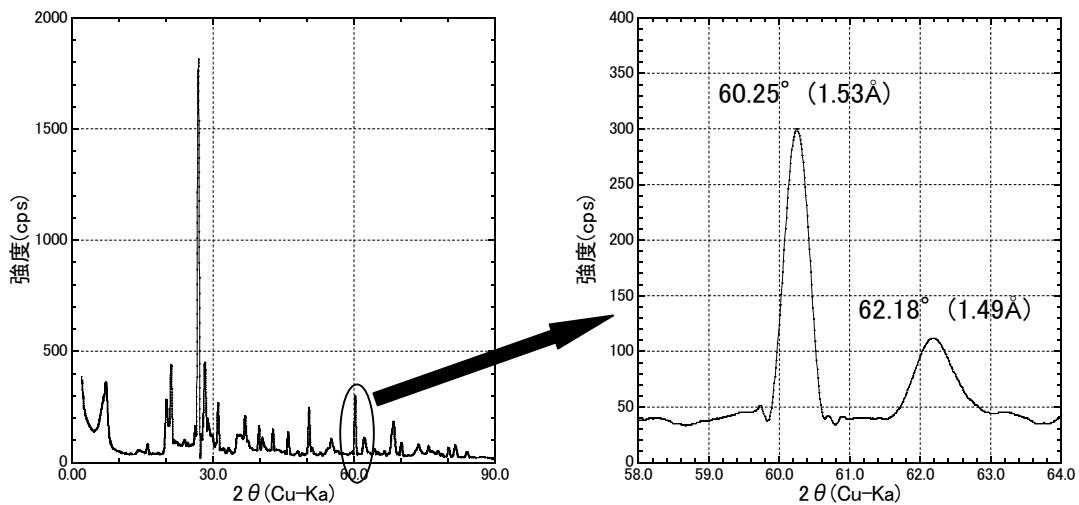


図 4.6.1-4 SW-50°C 未変質部試料の不定方位測定結果

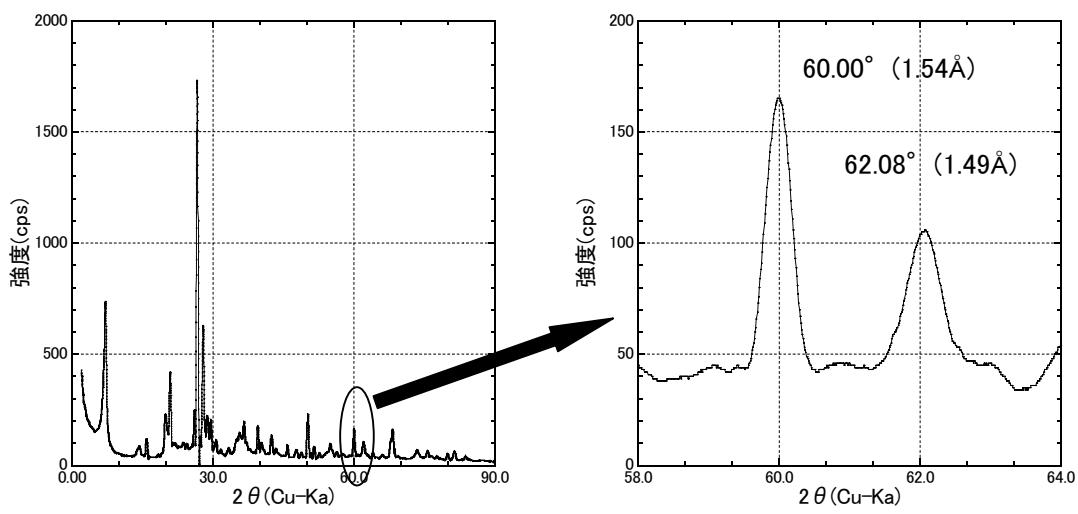


図 4.6.1-5 GW-1-80°C変質部試料の不定方位測定結果

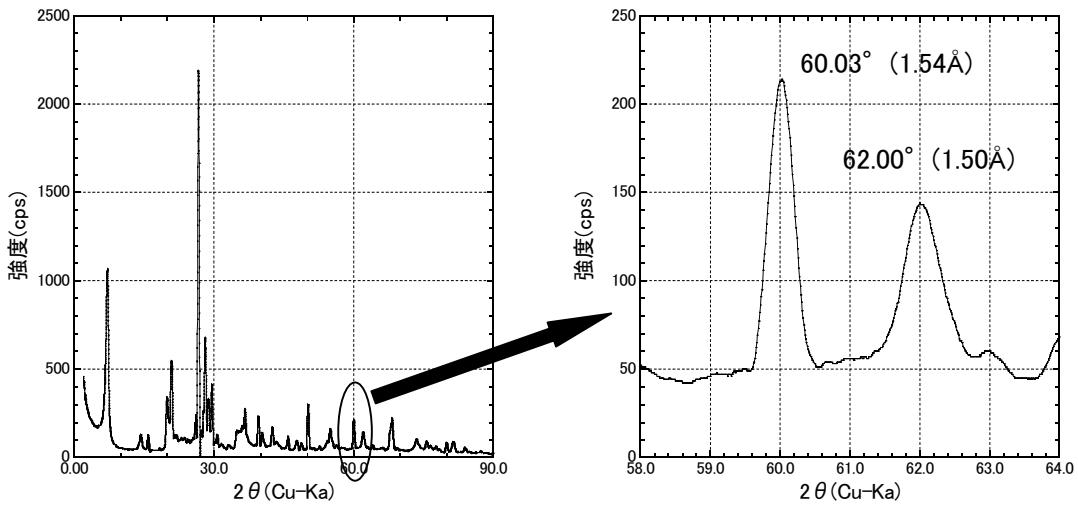


図 4.6.1-6 GW-1-80°C未変質部試料の不定方位測定結果

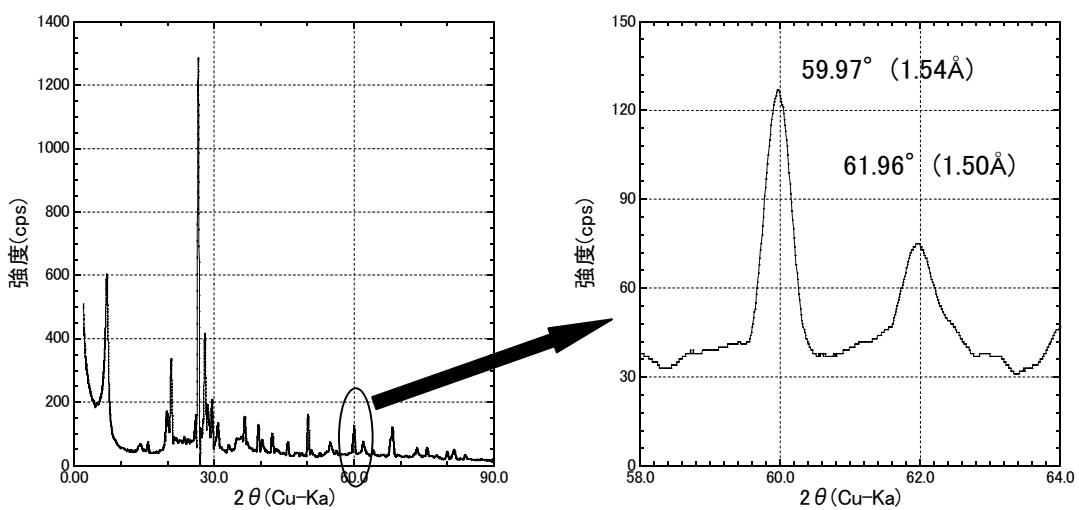


図 4.6.1-7 GW-2-80°C 変質部試料の不定方位測定結果

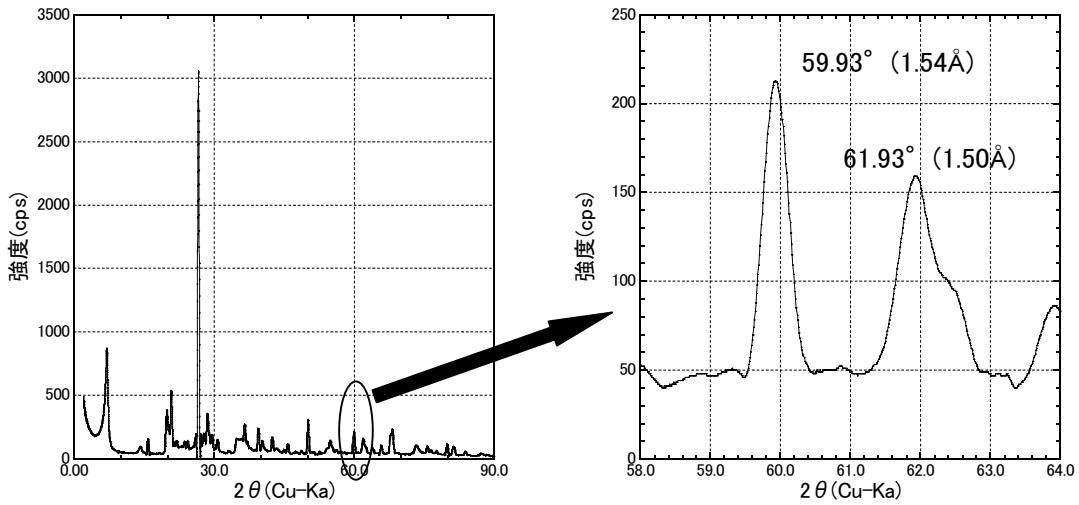


図 4.6.1-8 GW-2-80°C 未変質部試料の不定方位測定結果

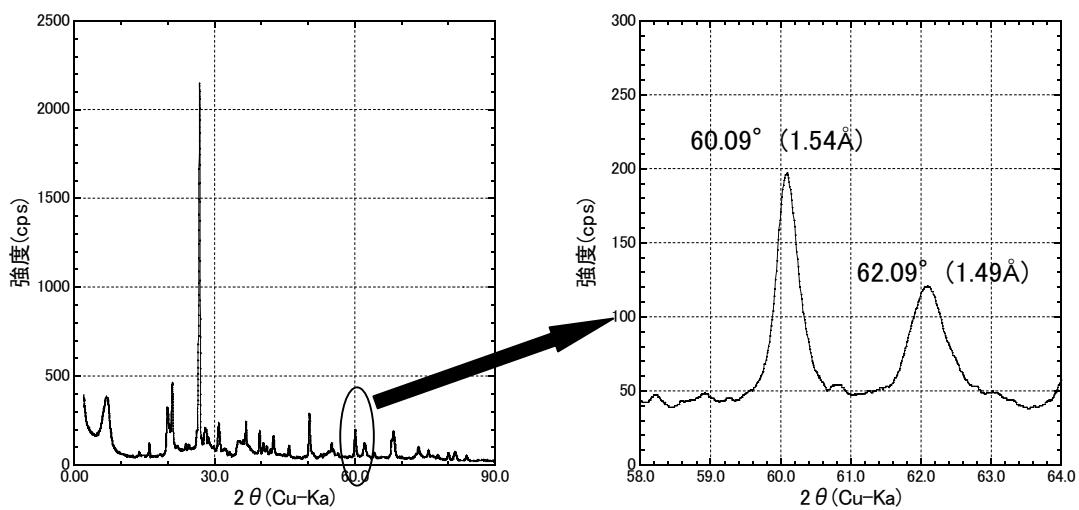


図 4.6.1-9 SW-80°C 大気条件変質部試料不定方位測定結果

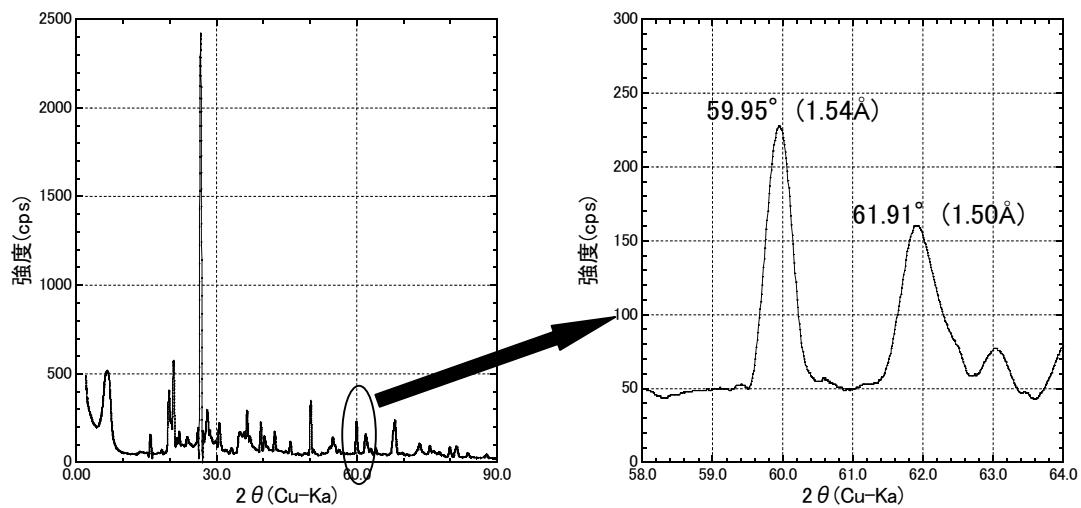


図 4.6.1-10 SW-80°C 大気条件未変質部試料の不定方位測定結果

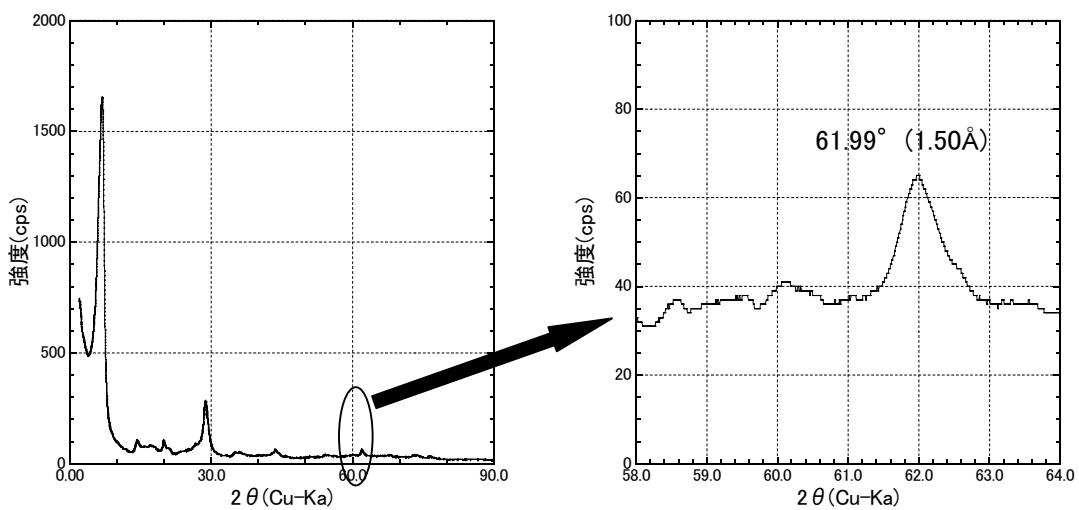


図 4.6.1-11 SW-80°C Kunipia-F 変質部試料の不定方位測定結果

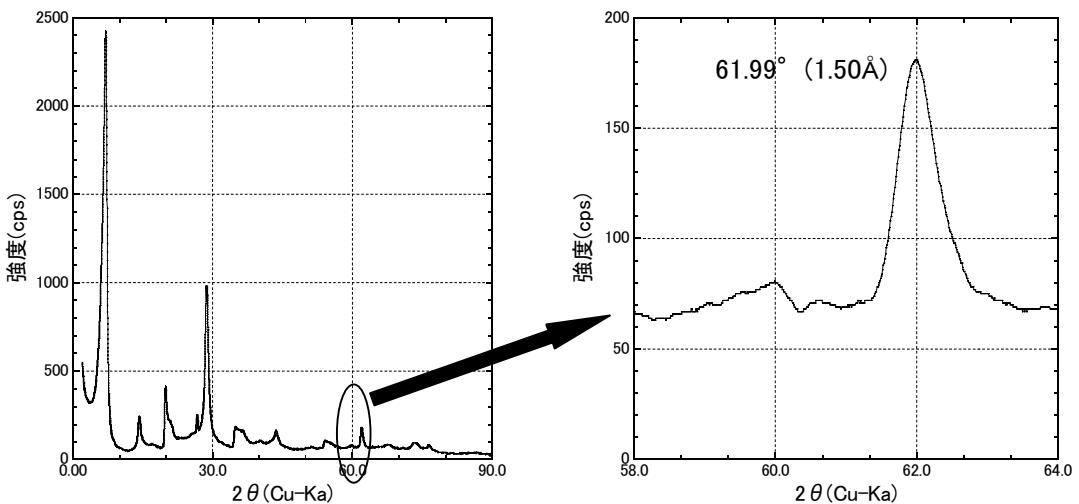


図 4.6.1-12 SW-80°C Kunipia-F 未変質部試料の不定方位測定結果

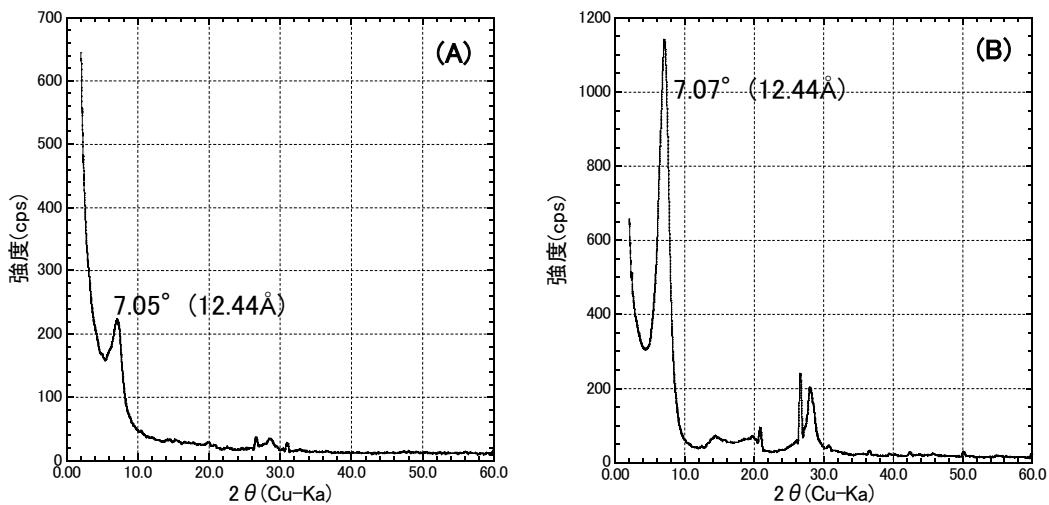


図 4.6.2-1 SW-80°C試料の定方位測定結果  
(A): 変質部試料, (B): 未変質部試料

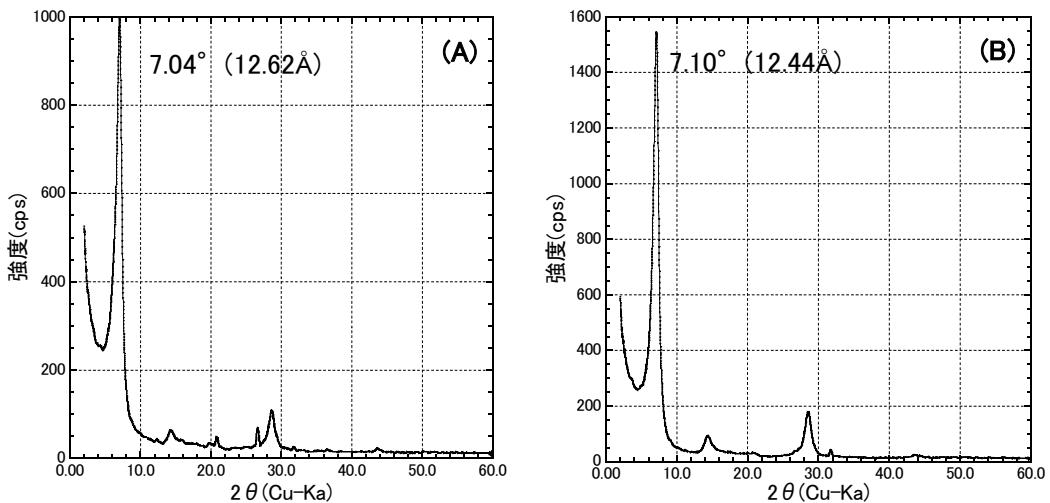


図 4.6.2-2 SW-50°C試料の定方位測定結果  
(A): 変質部試料, (B): 未変質部試料

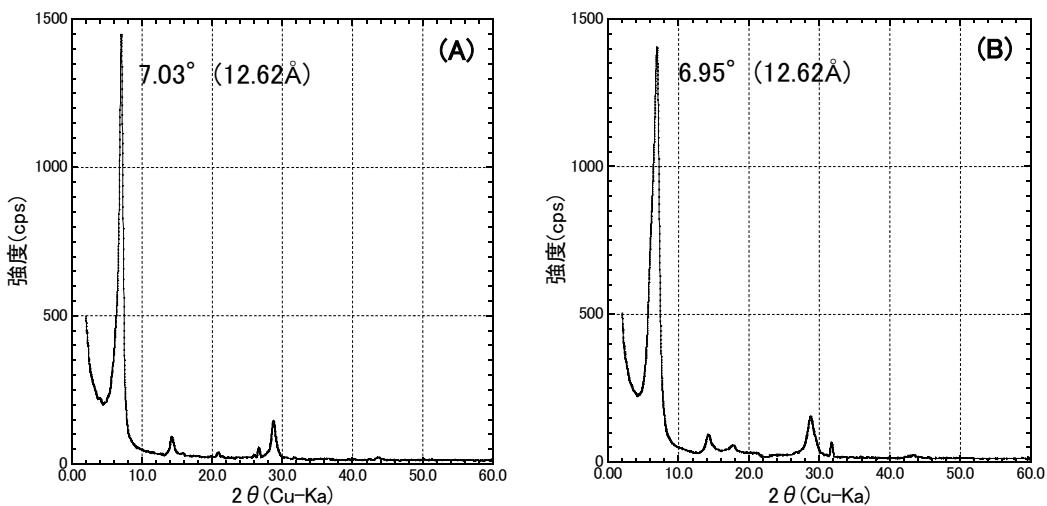


図 4.6.2-3 GW-1-80°C試料の定方位測定結果  
(A): 変質部試料, (B): 未変質部試料

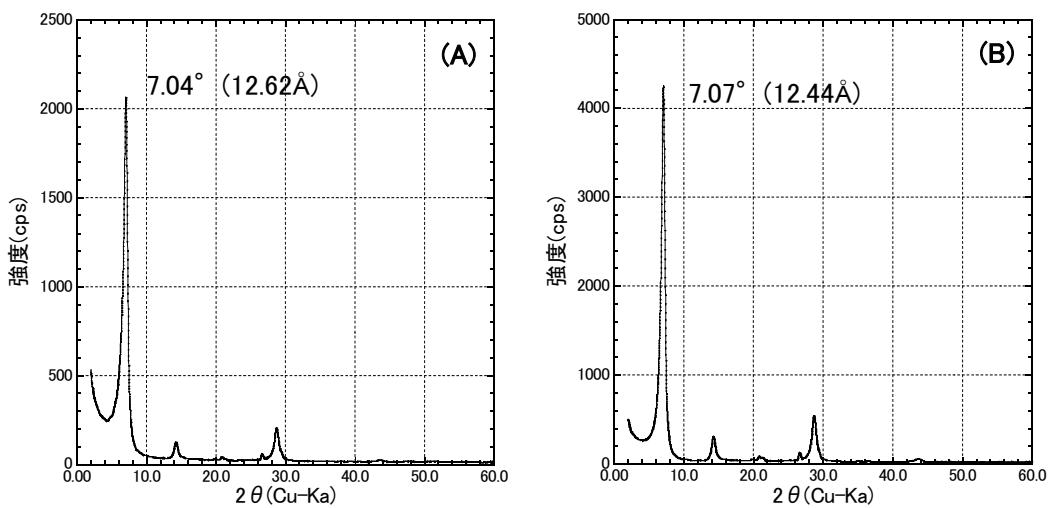


図 4.6.2-4 GW-2-80°C試料の定方位測定結果

(A): 变质部試料, (B): 未变质部試料

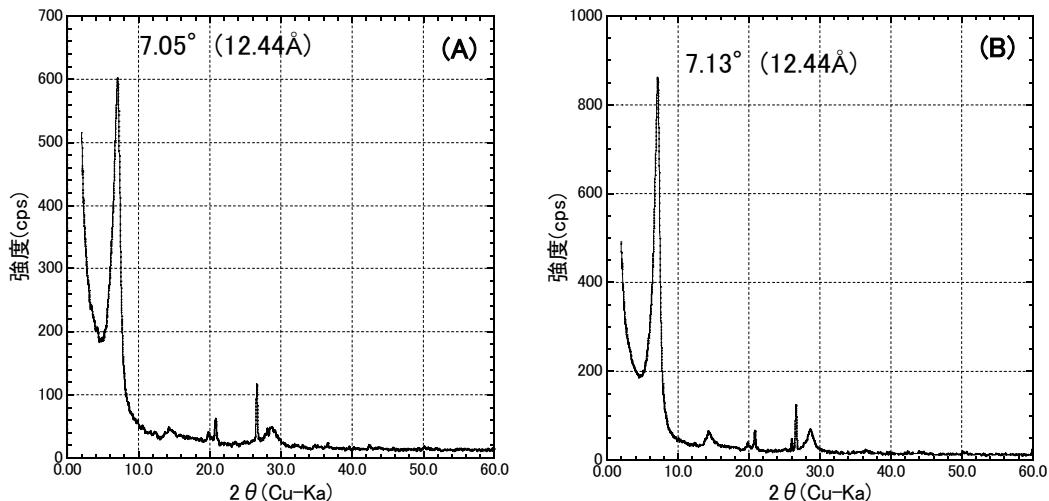


図 4.6.2-5 SW-80°C 大気条件試料の定方位測定結果

(A): 变质部試料, (B): 未变质部試料

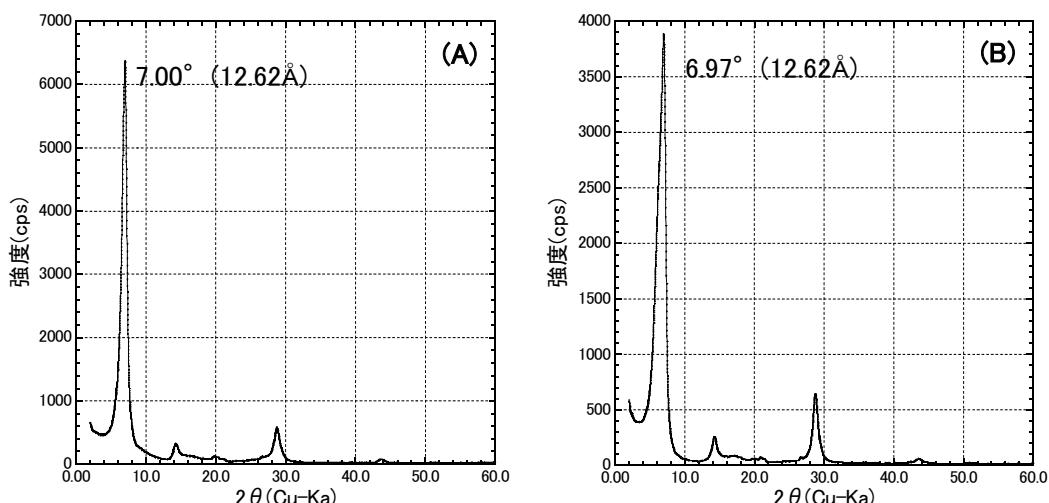


図 4.6.2-6 SW-80°C Kunipia-F 試料の定方位測定結果

(A): 变质部試料, (B): 未变质部试

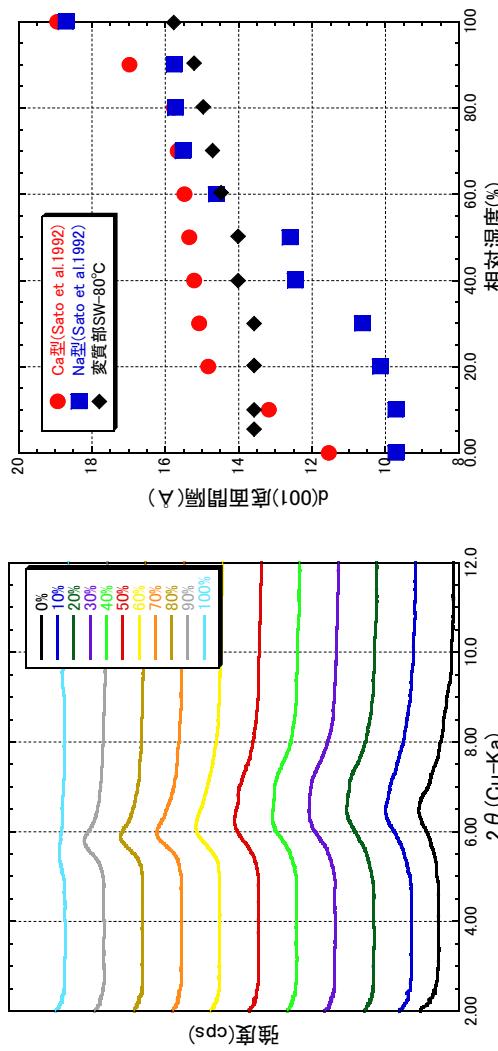


図 4.6.3-1 SW-80°C変質部試料の湿度制御測定結果

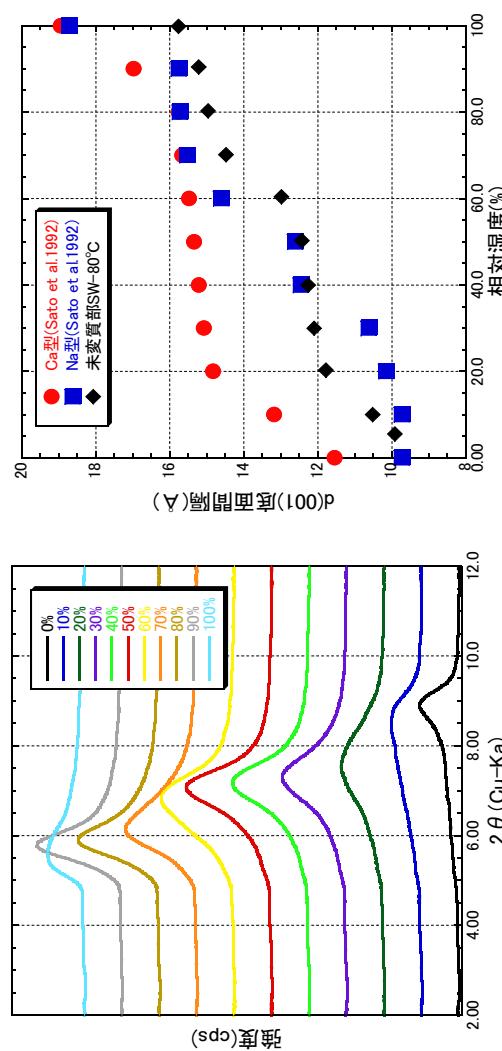


図 4.6.3-2 SW-80°C未変質部試料の湿度制御測定結果

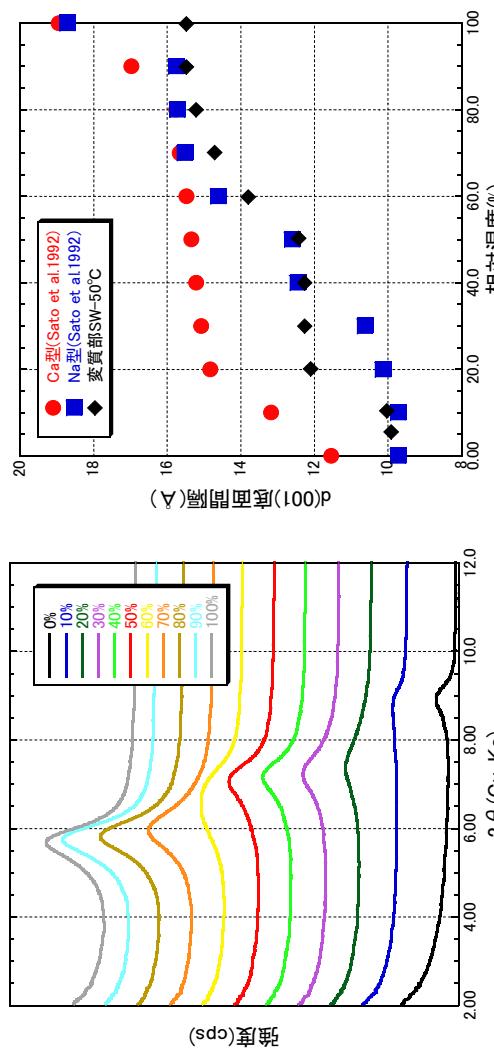


図 4.6.3-3 SW-50°C変質部試料の湿度制御測定結果と相対湿度に対するd(001)底面間隔の変化

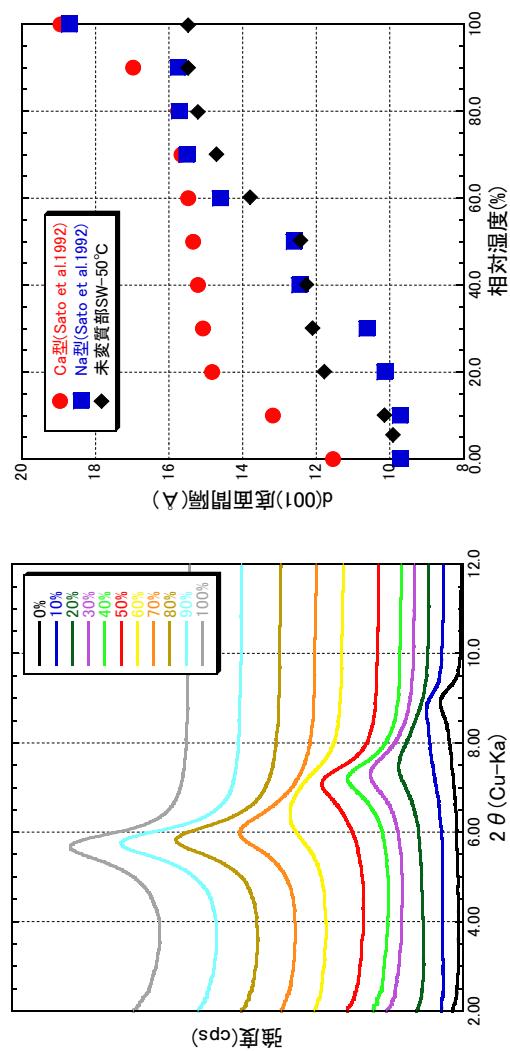


図 4.6.3-4 SW-50°C未変質部試料の湿度制御測定結果と相対湿度に対するd(001)底面間隔の変化

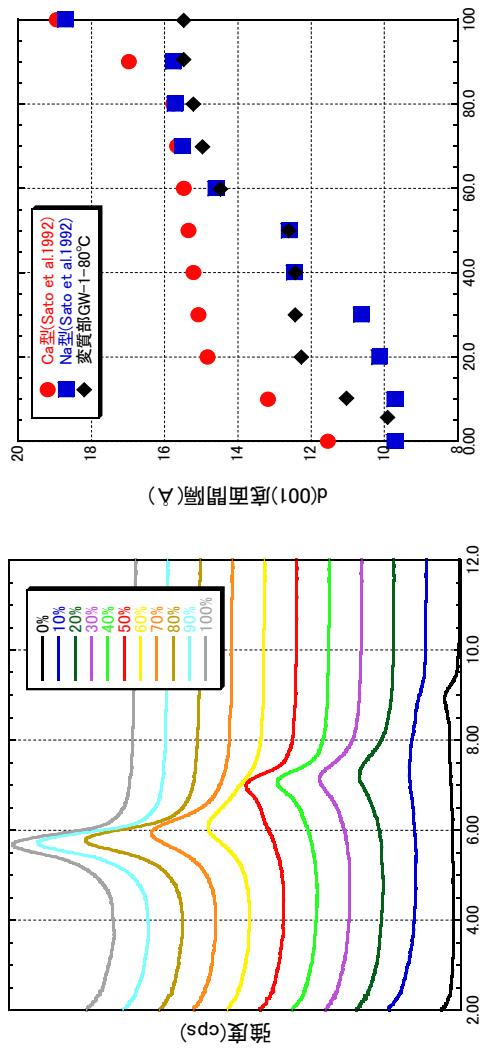


図 4.6.3-5 GW-1-80°C変質部試料の湿度制御測定結果

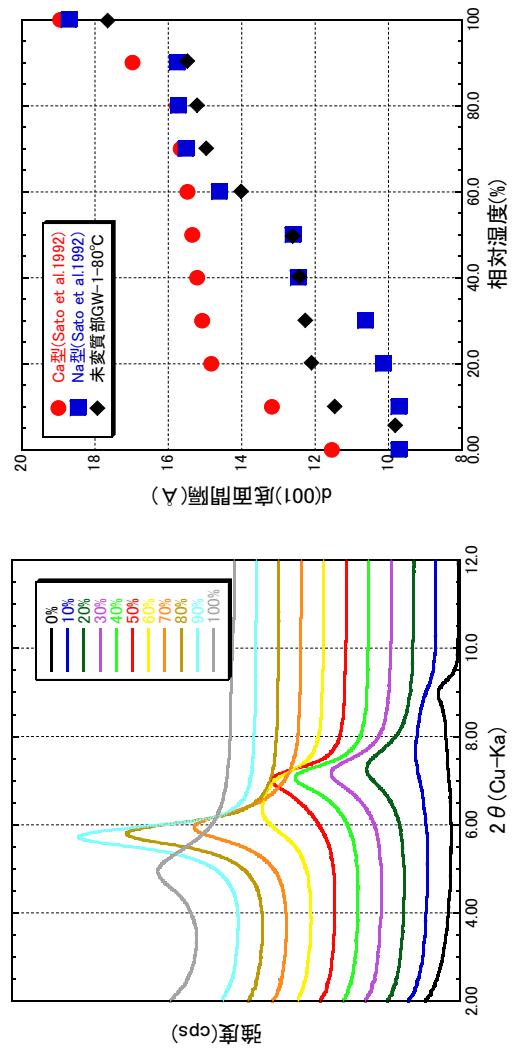


図 4.6.3-6 GW-1-80°C未変質部試料の湿度制御測定結果

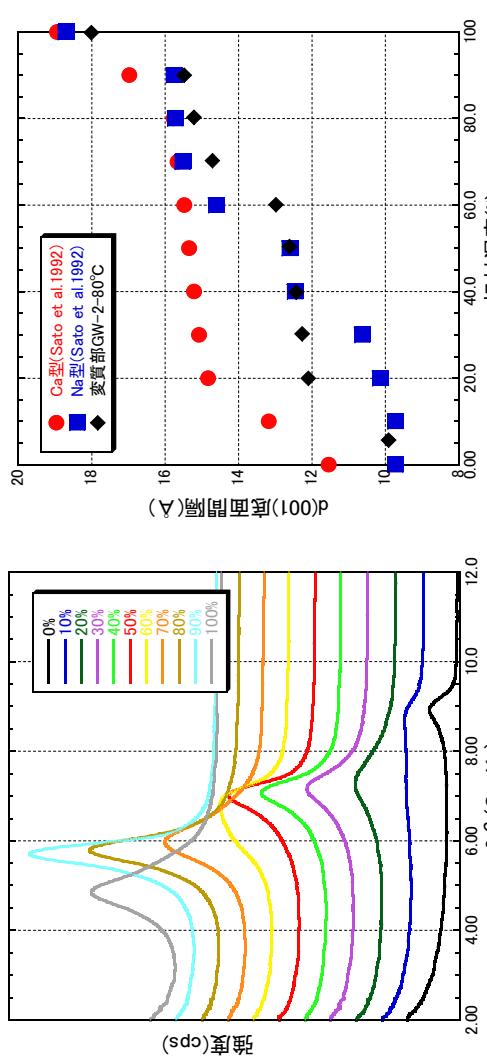


図 4.6.3-7 GW-2-80°C変質部試料の湿度制御測定結果と相対湿度に対するd(001)底面間隔の変化

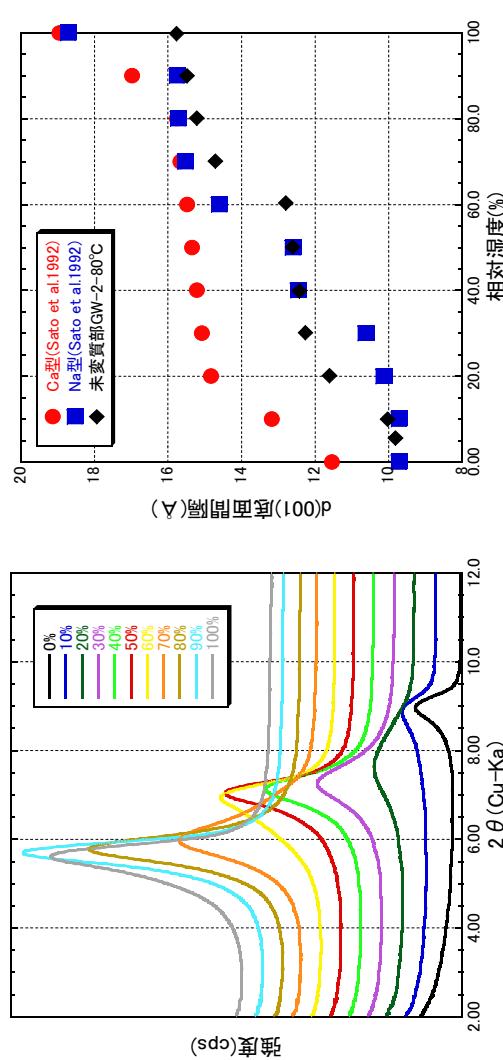


図 4.6.3-8 GW-2-80°C未変質部試料の湿度制御測定結果と相対湿度に対するd(001)底面間隔の変化

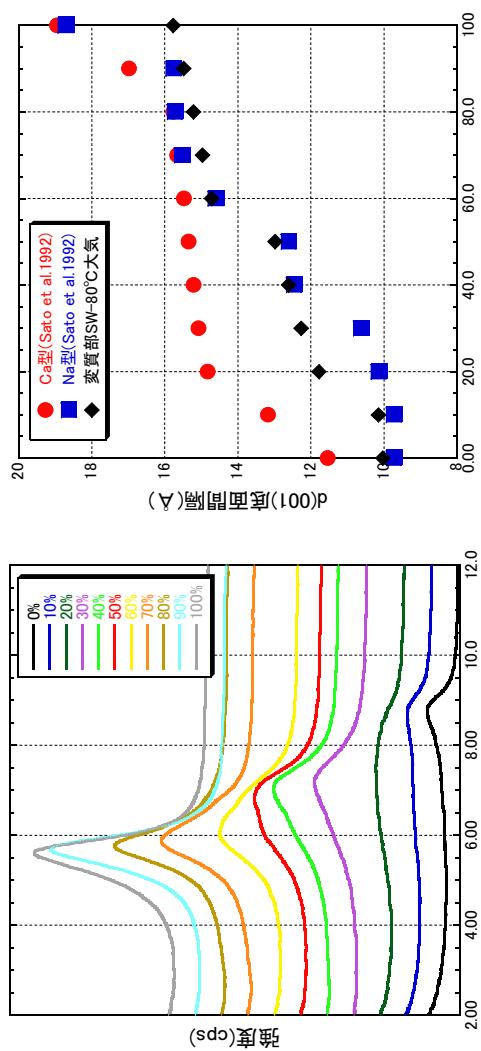


図 4.6.3-9 SW-80°C 大気条件変質部試料の湿度制御測定結果

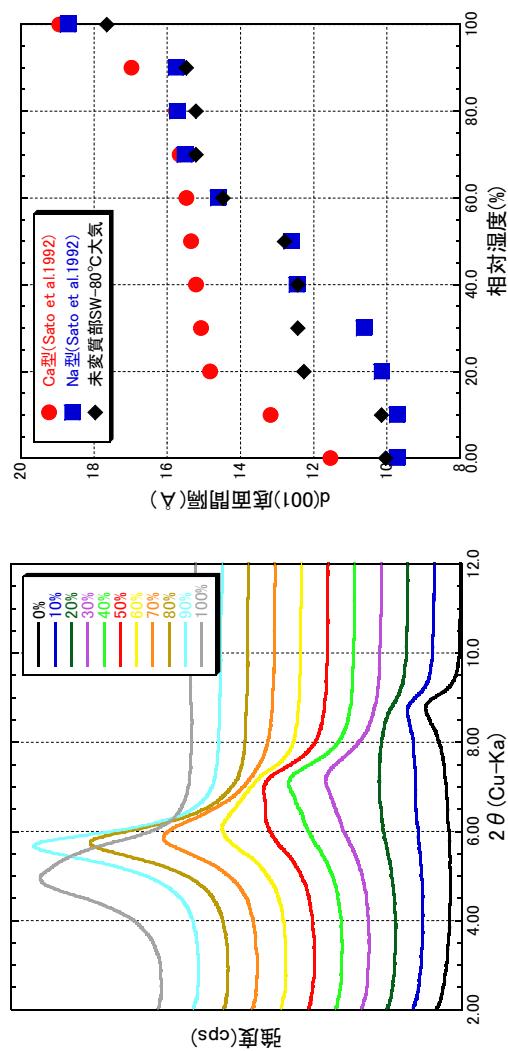


図 4.6.3-10 SW-80°C 大気条件未変質部試料の湿度制御測定結果

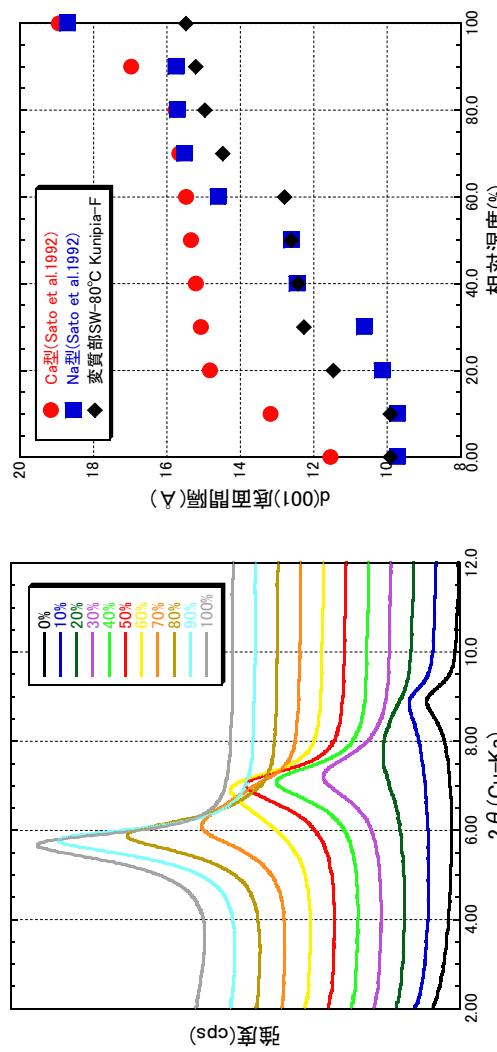


図 4.6.3-11 SW-80°C Kunipia-F 変質部試料の湿度制御測定結果と相対湿度の変化

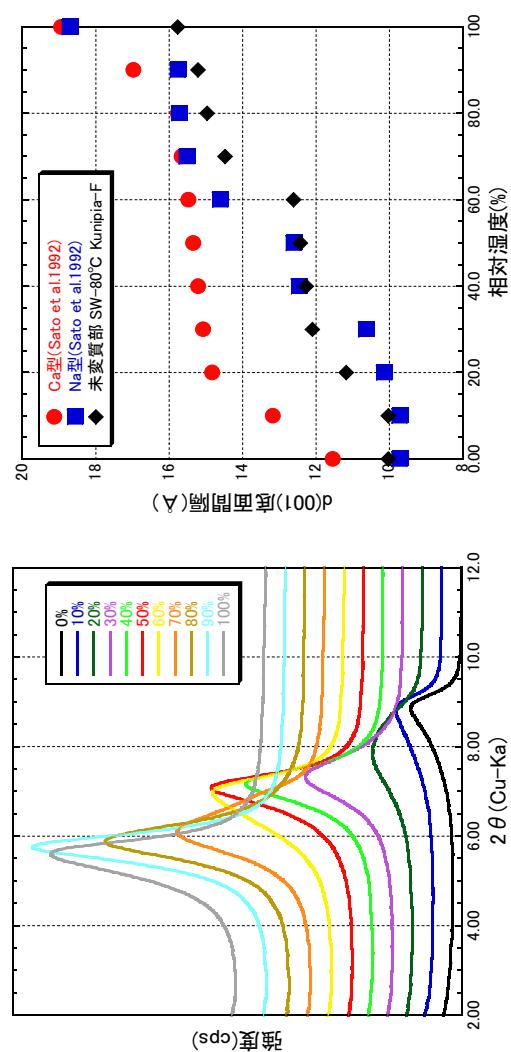


図 4.6.3-12 SW-80°C Kunipia-F 未変質部試料の湿度制御測定結果と相対湿度の変化

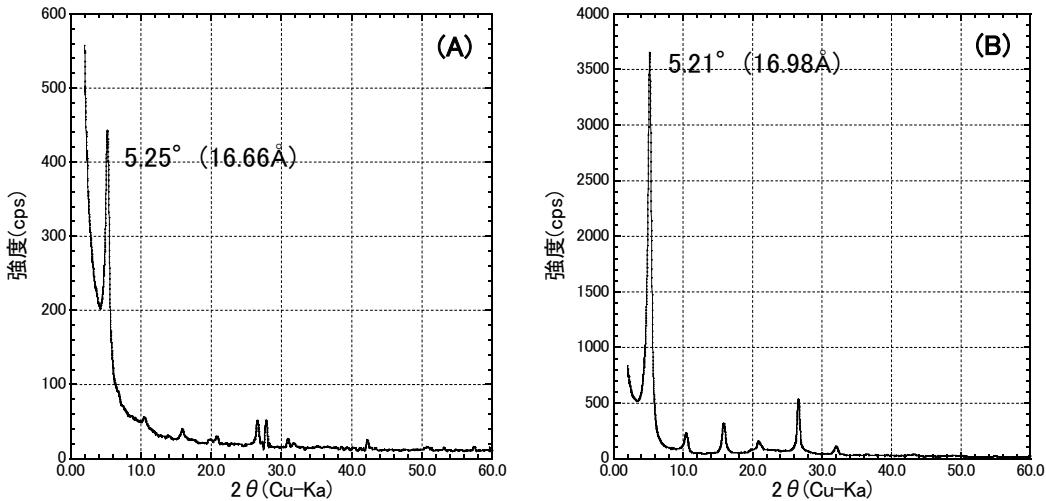


図 4.6.4-1 SW-80°C 試料の EG 処理定方位測定結果  
(A): 変質部試料, (B): 未変質部試料

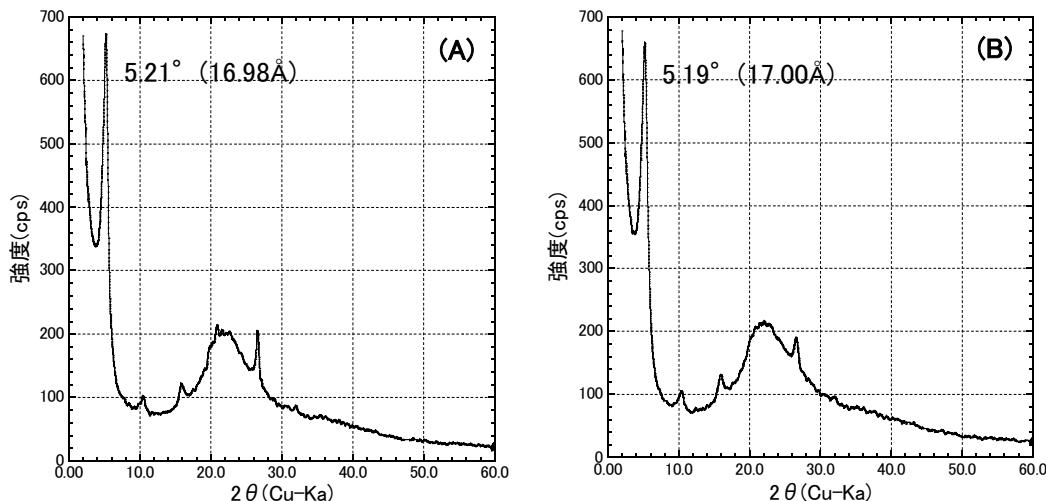


図 4.6.4-2 SW-50°C 試料の EG 処理定方位測定結果  
(A): 変質部試料, (B): 未変質部試料

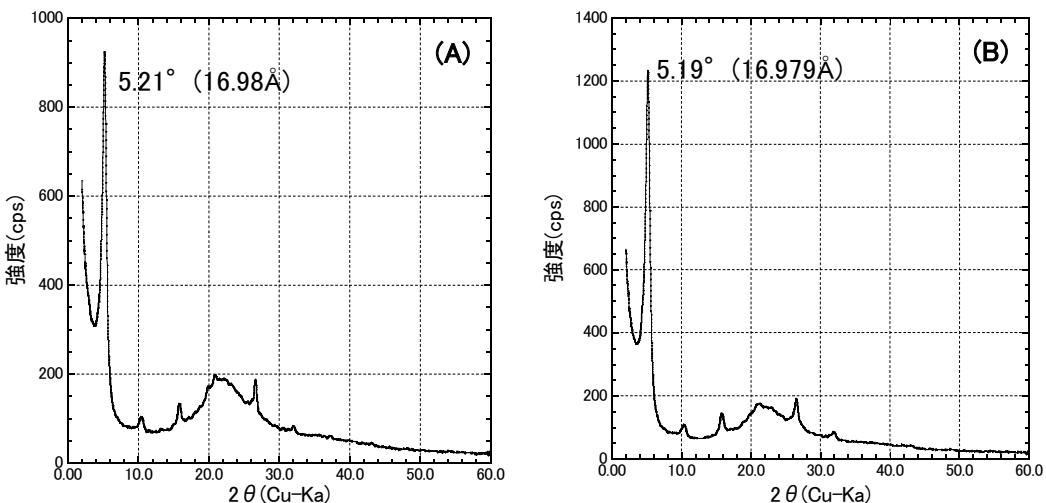


図 4.6.4-3 GW-1-80°C 試料の EG 処理定方位測定結果  
(A): 変質部試料, (B): 未変質部試料

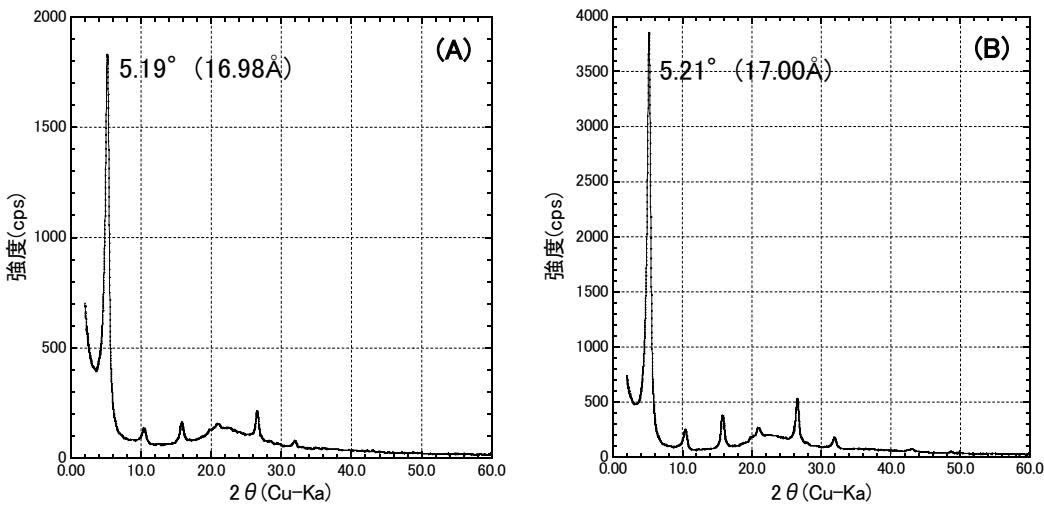


図 4.6.4-4 GW-2-80°C試料のEG処理定方位測定結果  
(A):変質部試料, (B):未変質部試料

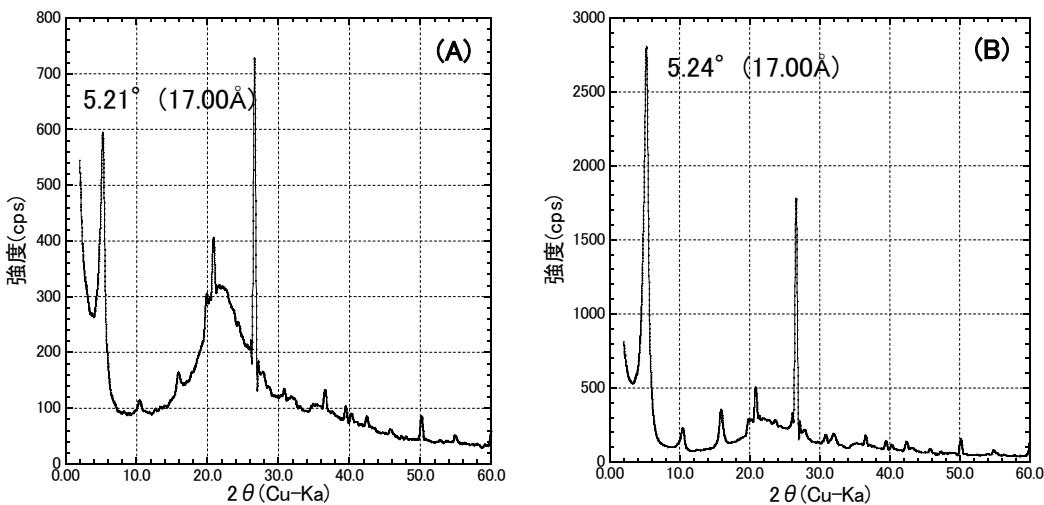


図 4.6.4-5 SW-80°C大気条件試料のEG処理定方位測定結果  
(A):変質部試料, (B):未変質部試料

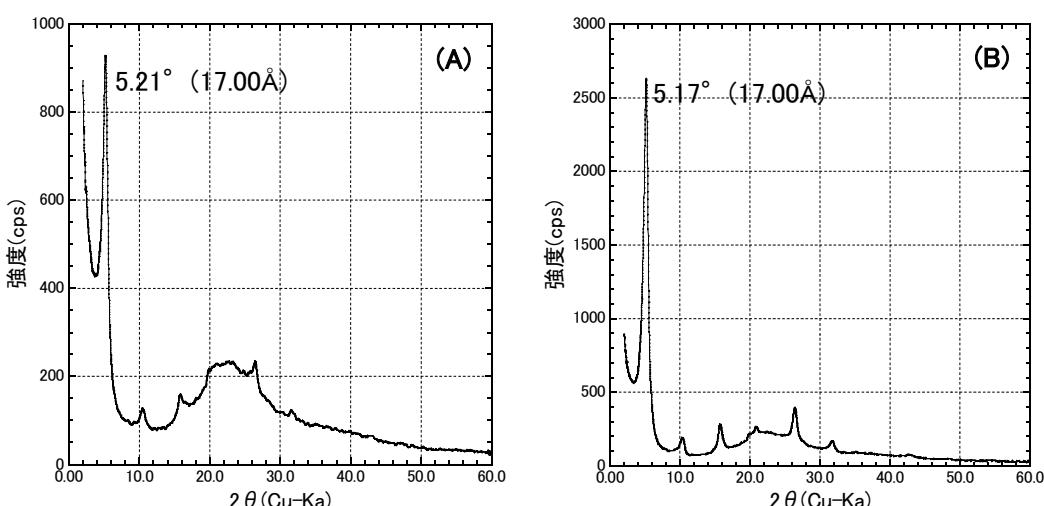
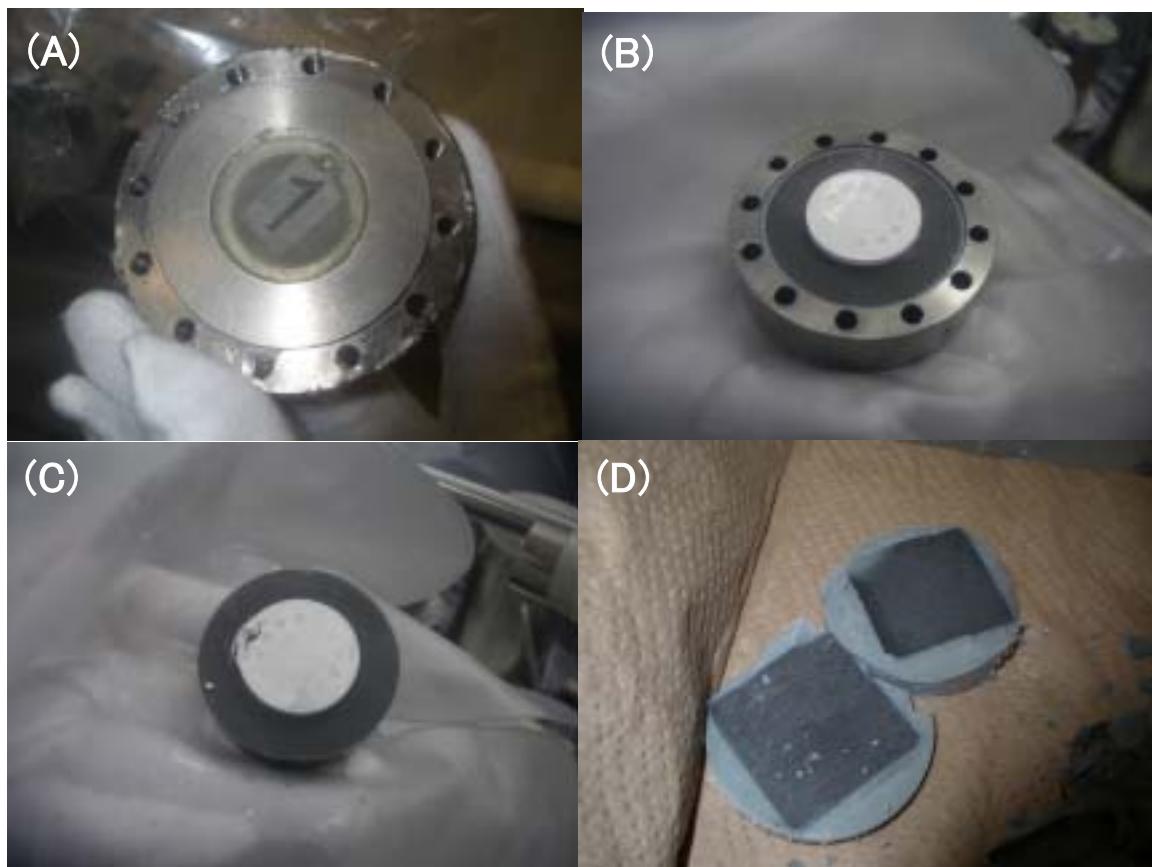


図 4.6.4-6 SW-80°C Kunipia-F試料のEG処理定方位測定結果  
(A):変質部試料, (B):未変質部試料



(A):取り出し時のチタンカラム

(B):チタンカラムの片側蓋を取り外した状態

(C):チタンカラムを取り外した状態。上部の白い円筒形のものはセラミックフィルタ

(D):粘土部分を二つに割って炭素鋼を取り除いた状態

写真 4.1 試料採取時の画像

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 <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	メートル毎秒	m <sup>-1</sup>
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
質量体積(比体積)	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率	(数の)1	1

表5. SI 接頭語

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

表3. 固有の名称とその独自の記号で表される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 <sup>(a)</sup>	rad	$m \cdot m^{-1}=1^{(b)}$
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2}=1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
圧力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー率、放熱束	ジユール	J	$N \cdot m$
電荷、電気量	ワット	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
電位差(電圧)、起電力	クーロン	C	$J/s$
静電容量	ワット	V	$W/A$
電気抵抗	アーチム	F	$C/V$
コンダクタンス	ジemens	S	$V/A$
磁束密度	ウエーバー	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	$Wb/m^2$
インダクタンス	ヘンリイ	H	$kg \cdot s^2 \cdot A^{-1}$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C	$Wb/A$
光束度	ルクス	lx	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種の)放射能吸収線量、質量エネルギー一分与、カーマ	ベクレル	Bq	$lm/m^2$
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個	シーベルト	Sv	$cd \cdot sr \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$
人線量当量、組織線量当量			$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもつた量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 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“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srが単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含む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
粘度	パスカル秒	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン每秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン每平方秒	rad/s <sup>2</sup>	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エントロピー	ジュール每ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール每キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エントロピー	ジュール每ケルビン	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール每キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル每ケルビン	W/(m · K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン每立方メートル	C/m <sup>3</sup>	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン每平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール每モル每ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h = 60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	$1L=1 \text{ dm}^3=10^{-3} \text{ m}^3$
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$
ネーベル	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) \ln 10(Np)$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{ J}$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} \text{ m}$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600) m/s
アード	a	$1a=1 \text{ dam}^2=10^3 \text{ m}^2$
ヘクタール	ha	$1ha=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{ m}^2$
バル	bar	$1 \text{ bar}=0.1 \text{ MPa}=100 \text{ hPa}=10^5 \text{ Pa}$
オングストローム	Å	$1 \text{ Å}=0.1 \text{ nm}=10^{-10} \text{ m}$
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=10^{-28} \text{ m}^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 \text{ erg}=10^{-7} \text{ J}$
ダイニン	dyn	$1 \text{ dyn}=10^{-5} \text{ N}$
ボアズ	P	$1 P=1 \text{ dyn} \cdot s/cm^2=10^{-4} \text{ Pa} \cdot s$
ストーカス	St	$1 St=1 \text{ cm}^2/s=10^{-4} \text{ m}^2/s$
ガウス	G	$1 G=10^{-8} \text{ T}$
エルステッド	Oe	$1 Oe=\frac{1}{4}\pi \text{ A/m}$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^{-8} \text{ Wb}$
スチル	sb	$1 sb=1 \text{ cd}/\text{cm}^2=10^4 \text{ cd}/\text{m}^2$
ホル	ph	$1 ph=10^4 \text{ lx}$
ガル	Gal	$1 Gal=1 \text{ cm}/\text{s}^2=10^{-2} \text{ m}/\text{s}^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$
ラド	rad	$1 rad=1 \text{ Gy}=10^{-2} \text{ Gy}$
レム	rem	$1 rem=1 \text{ cSv}=10^{-2} \text{ Sv}$
X線単位	IX unit	$1 IX \text{ unit}=1.002 \times 10^{-4} \text{ nm}$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 \text{ nT}=10^{-9} \text{ T}$
ジャンスキー	Jy	$1 Jy=10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 \text{ fm}=10^{-15} \text{ m}$
メートル系カラット	metric carat	$1 metric \text{ carat}=200 \text{ mg}=2 \times 10^{-4} \text{ kg}$
トル	Torr	$1 Torr=(101.325/760) \text{ Pa}$
標準大気圧	atm	$1 atm=101.325 \text{ Pa}$
カラリ	cal	$1 cal=1 \text{ J}=1 \text{ J}=1 \text{ J}$
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \mu \text{m}=10^{-6} \text{ m}$

