**JAEA-Research** 2020-003 DOI:10.11484/jaea-research-2020-003



# 変質した火山岩の年代測定のための 岩石記載・化学組成・前処理に関する検討

Study on Sample Description, Composition, and Preparation for Dating of Altered Volcanic Rocks

> 丹羽 正和 植木 忠正 星 博幸 杉崎 雄一

Masakazu NIWA, Tadamasa UEKI, Hiroyuki HOSHI and Yuichi SUGISAKI

核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター

Tono Geoscience Center Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

July 2020

日本原子力研究開発機構

Japan Atomic Energy Agency

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

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

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2020

#### 変質した火山岩の年代測定のための岩石記載・化学組成・前処理に関する検討

日本原子力研究開発機構

核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター

丹羽 正和, 植木 忠正\*1, 星 博幸\*2, 杉崎 雄一\*3

(2020年3月6日受理)

火山岩の形成年代の情報を得ることは、地層処分のサイト特性調査や安全評価などにおいて火 山活動の影響を把握する上でも重要となる。火山岩の形成年代を決めるため、K-Ar 法などの放 射年代測定法が用いられることが多いが、火山岩が変質していると、確度の高い年代値を得るこ とはしばしば困難となる。そこで本研究では、変質した火山岩から正確な K-Ar 年代値を得るた めの測定対象を適切に選定するため、火山岩の偏光顕微鏡記載と、X線回折分析装置、蛍光X線 分析装置、走査型 X線分析顕微鏡および電子プローブマイクロアナライザによる鉱物・化学分 析を行った。また、火山岩の主要な斑晶鉱物の一つである斜長石について、変質したものを除去 して可能な限り新鮮な鉱物を高純度で集めるための、凍結融解処理や塩酸処理などの手法につい ても検討した。本報告書は、これらの手法および観察・分析結果を取りまとめたものである。

本研究は、日本原子力研究開発機構と愛知教育大学との共同研究として実施したものである。 東濃地科学センター:〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31

\*1:中央開発株式会社(2019年3月まで技術開発協力員)

\*2:愛知教育大学

<sup>\*3:</sup>愛知県立熱田高等学校

Study on Sample Description, Composition, and Preparation for Dating of Altered Volcanic Rocks

Masakazu NIWA, Tadamasa UEKI\*1, Hiroyuki HOSHI\*2 and Yuichi SUGISAKI\*3

Tono Geoscience Center Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development Japan Atomic Energy Agency Izumi-cho, Toki-shi, Gifu-ken

(Received March 6, 2020)

Ages of volcanic rocks are helpful information to understand the impact of volcanism concerning a site characterization and a safety assessment for geological disposal. Radiometric dating such as K–Ar method is widely used for the age determination. However, there have often difficulties to obtain accurate ages if the analyzed volcanic rocks are altered. In this study, mineralogical and geochemical data of altered volcanic rocks were collected using a polarizing microscope, X-ray diffractometer, X-ray fluorescence spectrometer, X-ray analytical microscope, and electron probe microanalyzer, to select targets suitable for reliable K–Ar dating. In addition, sample preparation procedures such as freeze-thawing and HCl treatment were examined to concentrate unaltered plagioclase which is one of major phenocrysts in volcanic rocks. These data and procedures were compiled in this report.

Keywords: Volcanic Rocks, Alteration, K-Ar Dating, Plagioclase, Freeze-thaw Technique, HCl Treatment

This work has been performed as a joint research between JAEA and Aichi University of Education.

<sup>\*1 :</sup> Chuo Kaihatsu Corporation (Collaborating Engineer until March 2019)

<sup>\*2:</sup> Aichi University of Education

<sup>\*3 :</sup> Aichi Prefectural Atsuta High School

## 目次

1. はじめに	1
2. 試料採取および偏光顕微鏡記載	2
2.1 試料採取	2
2.2 偏光顕微鏡記載	4
3. 分析手順	9
3.1 XRD 分析	9
3.2 XRF 分析	9
3.3 SXAM による元素マッピング	9
3.4 EPMA による元素マッピングおよび定量分析	9
3.5 鉱物分離	10
4. 結果	12
4.1 XRD 分析による鉱物組成	12
4.2 XRF 分析による全岩化学組成	13
4.3 SXAM および EPMA による元素分布	14
4.4 EPMA による鉱物の化学組成	23
4.5 塩酸処理による試料の変化	31
5. まとめ	32
謝辞	32
参考文献	33

## Contents

1. Introduction
2. Meso- and microscopic description of collected samples
2.1 Description in sampling site
2.2 Description in polarizing microscopy
3. Analytical procedures
3.1 XRD analysis
3.2 XRF analysis
3.3 Compositional mapping using SXAM
3.4 Compositional mapping and quantification using EPMA9
3.5 Mineral separation
4. Results
4.1 Mineral composition by XRD analysis12
4.2 Whole-rock composition by XRF analysis
4.3 Elemental distribution by SXAM and EPMA14
4.4 Chemical composition of minerals by EPMA
4.5 Changes in samples by HCl treatment
5. Summary
Acknowledgement
References

#### 1.はじめに

火山活動は、高レベル放射性廃棄物の地層処分における地質環境の長期変動を評価する上で重 要な自然現象の一つであるとともに、火山活動の時期を詳しく把握することは、火山噴火に対す る防災対策や日本列島の地殻変動の解明においても重要である。火山岩の形成年代は、火山活動 の時期を把握する上で有用な情報となりうるが、火山岩形成後に水や気体と化学的に反応して変 質している岩石試料による年代測定では、確度の高い値を得ることにしばしば困難を伴う。

<sup>40</sup>K が半減期 12.5 億年で<sup>40</sup>Ar に崩壊(電子捕獲)することを利用した K-Ar (カリウム-アルゴン)年代測定法は、岩石の放射年代測定の代表的な手法の一つである<sup>1)</sup>。K-Ar 法に用いられる 試料は、ある程度の K を含んでいて対象とする年数を経ても放射性起源 <sup>40</sup>Ar を保持できること が条件となる。火山岩の多くは K を含むので、K-Ar 法は採用できる年代測定法の一つであるが、 変質していると、特に希ガスである Ar が離脱してしまうことが考えられるため、確度の高い年 代値を得ることが難しい。火山岩は一般に、斑晶鉱物が析出した後、最後に石基が形成されるた め、石基に K が含まれていれば、石基の K-Ar 年代を火山岩の形成年代として採用するのが最も 理想的である。ただし石基はしばしば変質しやすいので、石基の K-Ar 年代の適用が難しい場合 も多い。一方、急冷して形成される火山岩の場合、冷却時に析出した斑晶鉱物の年代でも火山岩 の形成年代に概ね近似できると考えられる。火山岩中の K を含む斑晶鉱物の年代でも火山岩 させ、かつ変質したものを除去して新鮮な鉱物を高純度で集めることができれば、鉱物の K-Ar 年代から信頼性の高い火山岩の形成年代を明らかにできることが期待される。

そこで本研究では、変質した火山岩に対する K-Ar 年代測定の適用性の検討のため、偏光顕微 鏡での岩石記載に加え、試料に含まれる鉱物組成や化学組成の情報を得るための X 線回折 (XRD)分析、蛍光 X 線(XRF)分析、走査型 X 線分析顕微鏡(SXAM)および電子プローブ マイクロアナライザ(EPMA)による元素マッピングを行った。また、斑晶鉱物のうち特に斜長 石について、変質したものを除去して可能な限り新鮮な鉱物を高純度で集めるための、凍結融解 処理や塩酸処理などの手法についても検討を行った。本報告書は、これらの手法および結果を取 りまとめたものである。

なお、本研究は、平成28年度~平成30年度にかけて実施した国立大学法人愛知教育大学(以下、愛知教育大学)との共同研究「変質した火山岩のK-Ar年代測定法と古地磁気年代測定法に関する研究」の成果の一部である。

#### 2. 試料採取および偏光顕微鏡記載

#### 2.1 試料採取

本研究で検討した試料は、杉崎・星(2017)<sup>2</sup>により産状が詳しく記載されている岐阜県高山 市南東部、高根地域の塩蔵川および黍生川沿いに分布する岩脈群である。本地域の基盤岩は、美 濃帯ジュラ紀付加体の砂岩・泥岩からなり、塩蔵川沿いでは斑れい岩が砂岩・泥岩中に貫入して いる。岩脈群は、砂岩・泥岩または斑れい岩中に概ね ENE-WSW~E-W 走向・鉛直に近い高角で 貫入する 30 枚以上の安山岩質岩脈からなる。1 枚の岩脈の厚さは数 10 cm~30 m 程度である。岩 脈群の岩石は輝石安山岩、角閃石安山岩、輝石角閃石安山岩などからなるが<sup>34</sup>、程度の差こそ あれ概ね変質を受け、濃緑色、緑灰色、青灰色などの様々な色調を示す。

本岩脈群については棚瀬ほか(2001)<sup>5)</sup>により17.7 Ma~12.1 Ma までの範囲にわたる全岩 K-Ar 年代が報告されているが、岩石が変質していることから、これらの K-Ar 年代を岩脈の形成年代 と見なすには信頼性が低い。また、斑れい岩についても棚瀬ほか(2001)<sup>5)</sup>により15.18±0.68 Ma の全岩 K-Ar 年代が報告されているが、試料の大気<sup>40</sup>Ar 混入率が完晶質であるにもかかわら ずやや高いことから、やはり変質によって年代値が若返っている可能性が指摘されている<sup>2)</sup>。

本研究では、岩脈の肉眼での観察に加え、携帯型帯磁率計による帯磁率の測定値に基づき、相対的に変質の少ないことが予想された試料(安山岩質岩脈 5 試料、斑れい岩 2 試料)を採取し (図 2.1-1)、岩石薄片の偏光顕微鏡観察により、特に鉱物および石基の変質に関する詳細な記載 を行った。試料採取は、愛知教育大学により行われた。なお、火山岩の変質が進行すると、磁性 鉱物のうち磁鉄鉱が赤鉄鉱に変質し、帯磁率が低下することが期待される。そのため、試料採取 においては、帯磁率の相対的に高い位置を狙った採取を行った。



図 2.1-1 (a) 試料採取地点 (SZ、KB) 周辺の地質図。(b) SZ および KB 地点のルートマップ。 杉崎・星 (2017)<sup>2)</sup>に基づき作図。安山岩質岩脈 5 試料 (SZ102、SZ103、SZ105、KB101、 KB102) および斑れい岩 2 試料 (SZ101、SZ104)を採取。

#### 2.2 偏光顕微鏡記載

本研究で採取した安山岩質岩脈 5 試料(SZ102、SZ103、SZ105、KB101、KB102) および斑れ い岩 2 試料(SZ101、SZ104)について岩石薄片を作成し、偏光顕微鏡観察を行い、岩石組織、 鉱物組み合わせおよび変質の程度を記載した。記載結果を表 2.2-1、各試料の代表的な偏光顕微 鏡写真を図 2.2-1に示した。

偏光顕微鏡記載によると、SZ101、SZ102、SZ103、SZ104 は等粒状組織を示す。斜長石はいず れもマイクロクラックが発達したり、多少の変質鉱物が伴われるが、SZ104 の斜長石はわずかに 他の試料と比べて変質の程度が弱く見える。有色鉱物はいずれも強く変質している。

SZ105、KB101、KB102 は斑状組織を示すが、石基は極めて変質が著しい。斑晶は、SZ105 で は斜長石、有色鉱物ともに著しく変質し、外形が不明瞭になっている。KB101 も有色鉱物の斑 晶は全面的に変質してしまっているが、斜長石は SZ105 に比べると外形が明瞭である。KB102 は、他の試料と比べ有色鉱物(単斜輝石、普通角閃石)の斑晶が相対的に新鮮であり、斜長石も 多少の変質を伴うものの、外形は明瞭である。

以上の記載からは、安山岩質岩脈については、KB102の単斜輝石と普通角閃石が他の試料の 有色鉱物と比べて相対的に新鮮であることから、斜長石についても他の試料と比べて変質の程度 が弱いと判断した。斑れい岩については、SZ104の斜長石が他の試料と比べてやや変質の程度が 弱い。そこで本研究では、この KB102 と SZ104 を対象とし、変質状況の詳細を把握するための 鉱物組成・化学組成分析、および対象鉱物の新鮮なものを高純度で集めるための検討を進めるこ ととした。

主 つつ 1	<b>庐业</b>
衣 2.2-1	俪儿螟����������

試料名	組織・変質度	岩石	記載事項
SZ101	完晶質・等粒状 変質度:中	斑れい岩	やや粗粒の自形斜長石を主体とする。斜長石はマイク ロクラックを伴い、一部でセリサイト化、ソーシュラ イト化も見られる。石英が斜長石を埋めるように存在 する。 有色鉱物(単斜輝石と普通角閃石)は大部分が変質し て緑泥石、方解石、緑れん石、鉄酸化物などに置換さ れている。
SZ102	完晶質・等粒状 変質度:中	安山岩 (閃緑岩)	粗粒の斑晶と細かい自形斜長石からなるが、インター グラニュラー組織のような石基ではなく、鉱物がかみ 合った完晶質な岩石である。斜長石はマイクロクラッ クを伴い、一部でセリサイト化も見られる。石英が斜 長石を埋めるように存在する。 有色鉱物のうち、単斜輝石は割れ目に沿って著しく変 質している。普通角閃石も緑泥石化が進行している。 この他、変質鉱物として鉄酸化物を伴う。
SZ103	完晶質・等粒状 変質度:中	安山岩 (閃緑岩)	斜長石はSZ102と同様の産状だが、やや粒径が細かい。 有色鉱物として単斜輝石、普通角閃石、黒雲母が存在 するが、単斜輝石は割れ目に沿って著しく変質してい る。普通角閃石も変質により、多色性の見られない褐 色のものが主体となる。黒雲母も変質しているが、多 色性を顕著に残す。変質鉱物として緑泥石や鉄酸化物 を伴う。
SZ104	完晶質・等粒状 変質度 : (低〜) 中	斑れい岩	構成鉱物や組織はSZ101と同様であるが、変質の程度は SZ101と比べるとやや弱い。石英が斜長石を埋めるよう に存在する。変質鉱物として緑泥石や鉄酸化物を伴 う。
SZ105	斑状組織 変質度:高	安山岩	斑晶と石基が区別できる斑状組織を示すが、全体的に 変質が著しく、緑泥石や鉄酸化物が広く分布してい る。斜長石の斑晶は、変質して外形が不明瞭になって いる。有色鉱物の斑晶も著しく変質しており、おぼろ げな外形から単斜輝石と普通角閃石であることが推察 できる程度である。 石基は細粒な斜長石を主体とし、二次的に形成された 石英を伴う。細粒な黒雲母も含有する。 レンズ状の包有物(岩片か)も見られるが、変質して 不明瞭である。
KB101	斑状組織 変質度:高	安山岩	SZ105 と比べると斑晶の外形が明瞭であるが、やはり全体的に変質が著しく、緑泥石や鉄酸化物が広く分布する産状を示す。斜長石の斑晶にはマイクロクラックが多く発達する。 石基は針状の微細な斜長石からなる部分があるほか、ガラス質に見える部分もあるが、変質により不明瞭である。方解石も若干伴う。
KB102	斑状組織 変質度 : (低~) 中	安山岩	SZ105、KB101 と同様の斑状組織を示すが、それらより も斑晶の外形が保持されているものが多い。特に普通 角閃石と単斜輝石が他の試料よりも比較的新鮮な状態 で存在している。普通角閃石には双晶が目立つ。全体 的に普通角閃石の割合が単斜輝石よりも多い。 斜長石はやや変質し、マイクロクラックを伴い、一部 でセリサイト化、ソーシュライト化も見られる。石基 も全体的に褐色に変質し、緑泥石や鉄酸化物で占めら れている。二次的に方解石が空隙を充填している。



図 2.2-1 採取試料の代表的な偏光顕微鏡写真(1/3) PPL:単ポーラー、CPL:直交ポーラー Bt:黒雲母、Cal:方解石、Chl:緑泥石、Cpx:単斜輝石、Hbl:普通角閃石、 Op:不透明鉱物、Pl:斜長石、Qz:石英



図 2.2-1 採取試料の代表的な偏光顕微鏡写真(2/3)



図 2.2-1 採取試料の代表的な偏光顕微鏡写真(3/3)

#### 3. 分析手順

#### 3.1 XRD 分析

KB102 および SZ104 の一部は粉末化し、鉱物組成を把握するための XRD による不定方位分析 を行った。粉末化は、スタンプミルおよびボールミルを用いて行った。XRD 分析は、東濃地科 学センターに設置されている Rigaku Ultima IV を使用した。測定は管球出力 40 kV、30 mA の CuKa の X線、X線検出器 D/teX Ultra、Kβ フィルター、0.5°の発散スリット、10 mm の発散縦制 限スリット、8 mm の散乱スリットを用いて行った。測定条件は、走査範囲 3~70°(20)、スキャ ンスピード 1°/min (20)、サンプリング幅 0.01°(20) とした。

#### 3.2 XRF 分析

3.1 で粉末化した試料の一部は、融解してガラスビードを作成し、XRF 分析により試料の全岩 化学組成を明らかにした。測定は、東濃地科学センターに設置されている Rigaku ZSX Primus II により行った。分析手順・測定条件は清水ほか(2016)<sup>6</sup>に準拠した。測定の確度・精度の確認 のため、国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センターが提供している岩石標準試 料(香川県坂出市のかんらん石安山岩: JA-2)を同様の手順で測定した。JA-2の標準値は Imai et al. (1995)<sup>7</sup>に基づいた。

また別途、粉末化した試料約3gを分取し、強熱減量(LOI)の定量を行った。LOIは、正確 に秤量した試料を磁性皿に入れて1,000℃で1時間焼成し、焼成前後の試料の質量の差を計算し て求めた。

#### 3.3 SXAM による元素マッピング

試料中の元素・鉱物分布や変質の様子、特に、K-Ar 年代測定の親核種であるカリウムの分布 を把握するため、KB102 および SZ104 の薄片を用いて SXAM による元素分布のマッピングを行 った。SXAM は、東濃地科学センターに設置されている Horiba XGT-5000 を使用した。測定元素 はAl、Si、K、Ca、Ti、Mn、Feとした。なお、P、Sr、Zr、Baも同時にマッピングを行ったが、 元素の有意な濃集部がほとんど見られなかったので、結果に採用しなかった。測定条件は、X線 管球の電圧と電流を 30 kV と 1.00 mA、X線ビーム径を 100 μm とし、512 × 512 ピクセルの解像 度での測定を1回あたり 3,600 秒、合計 18 回積算して画像を取得した。取得した各元素の画像に 基づき斜長石および有色鉱物の分布を出力する方法は、植木・丹羽(2017)<sup>8</sup>)に準拠して行った。

#### 3.4 EPMAによる元素マッピングおよび定量分析

薄片全体の元素分布を明らかにした SXAM による分析に対し、より局所的な元素分布を把握 するため、KB102 については EPMA を用いて主要元素(Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Fe)の元素 マッピングを行った。なお、P、S、Ti、Mn、Ba も同時にマッピングを試みたが、元素の有意な 濃集部がほとんど見られなかったので、結果には示していない。また、EPMA による点分析によ り、斜長石や有色鉱物の主成分元素定量分析を行った。定量分析を行ったのは、KB102 は斜長 石、単斜輝石、普通角閃石、SZ104 は斜長石と単斜輝石である。SZ104 の普通角閃石は、ほぼ全 面的に変質していたので、定量分析を行わなかった。

EPMA は、東濃地科学センターに設置されている JEOL JXA-8530F を使用した。設定は、加速 電圧:15 kV、プローブ電流:50 nA、ビーム径:3 μm とした。補正計算には ZAF 法を用いた。

#### 3.5 鉱物分離

KB102 および SZ104 に対し、新鮮な斜長石を高純度で集めるため、凍結融解処理、および塩酸処理による鉱物分離を採用した。

凍結融解処理では、試料の凍結と融解の繰り返しによる鉱物粒子間の緩みを利用し、鉱物を人 為的に傷つけることなく粒界に沿って丁寧に分離する<sup>9</sup>。一般的には、断層ガウジ中の粘土鉱物 の分離<sup>10)</sup>のように軟岩に対して適用されるが、本研究では、火山岩中の斜長石にこびりつく微 細鉱物の除去を目的として適用を試みた。

塩酸処理は、斜長石は希塩酸だけでは分解しないのに対し、緑泥石や黒雲母は希塩酸と反応して分解する<sup>11)</sup>ことを利用し、やはり斜長石にこびりつく微細鉱物の除去を目的とした処理方法である。

鉱物分離は、図 3.5-1 に示すフローに基づいて行った。岩石試料はまず、スタンプミルを用い て 0.25 mm~1 mm 程度の大きさに粗粉砕した。凍結融解処理の手順は田村ほか(2017)<sup>10</sup>に準 拠した。粗粉砕した試料約 500 g を 500 ml のテフロン容器に入れ、超純水で満たし、容器をチ ャック付きポリ袋に入れたものを不凍液(50 %エチレングリコール)で満たされた高低温循環 型恒温器(Julabo F34-ME)に入れて処理を行った。設定は、2 時間かけて-20℃まで降温→-20℃ で 3 時間保持→1 時間 30 分かけて 20℃まで昇温→20℃で 3 時間保持、の合計 9 時間 30 分を1 サ イクルとして 21 サイクル繰り返すこととした。凍結融解処理後の試料のうち、#80 の篩を通過 したもののみを集めた。

集めた試料は、水洗・乾燥させた後、ネオジム磁石を用いて強磁性鉱物を除去した。続いて、 アイソダイナミックセパレーター(S. G. Frantz LB-1)により磁気選鉱を行い、有色鉱物を除去 した。磁気選鉱の際の手順と条件は、表 3.5-1 の通りとした。

磁気選鉱後の試料は、ほぼ白色の鉱物からなり、それらのほとんどは斜長石であるが、わずか に石英を含んでいる可能性がある。特に、SZ104 は目視でも石英の混入が認められたため、ポリ タングステン酸ナトリウム (SPT) 溶液を使用した重液分離を行った。SPT の比重は 2.68 に調整 し、重液に沈んだ試料 (石英の比重は 2.65 g/cm<sup>3</sup>で、斜長石の比重は 2.62~2.76 g/cm<sup>3</sup>なので<sup>12)</sup>、 重液に沈むのは斜長石のみとなる)を回収した。重液分離の方法は代永ほか (2018)<sup>13</sup>に準拠し た。

その後、磁気選鉱を経た KB102 および磁気選鉱・重液分離を経た SZ104 について、塩酸処理 を行った。塩酸処理は、八木(2006)<sup>14)</sup>および八木・板谷(2011)<sup>11)</sup>に準拠して実施した。試料 約2gを70℃に設定したホットプレート上で6N塩酸と15分反応させることを2回繰り返した。 塩酸(<sup>1</sup>H<sup>35</sup>Cl、<sup>1</sup>H<sup>37</sup>Cl)はアルゴン(<sup>36</sup>Ar、<sup>38</sup>Ar)と同重体となり、質量分析によるアルゴンの正 確な定量を妨げるため、試料を K-Ar 年代測定に使用する場合は、試料から残った塩酸を完全に 除去する必要がある。塩酸処理後の試料は、70℃ホットプレート上での超純水での洗浄(上澄み を捨てて新しい超純水を加えて攪拌)を5回繰り返した後、超音波洗浄機(SHARP UT-106;高 周波出力100 W、発振器周波数37 kHz)による洗浄を3分間行った。さらに、70℃ホットプレー ト上での超純水での洗浄(上澄みを捨てて新しい超純水を加えて攪拌し、30分放置)を10回繰 り返した後、70℃に設定した恒温槽内で一晩放置した。最後に、再度超音波洗浄を3分間行い、 超純水で洗浄した後、乾燥させた試料を回収した。塩酸処理において浮遊物が生じた場合は、上 澄みを捨てて新しい超純水を加える際に分析試料から除去した。

JAEA-Research 2020-003



表 3.5-1 磁気選鉱の手順

KB102	SZ104
<ol> <li>20 Vの設定で選鉱(主に石基を除去)</li> </ol>	① 80 Vの設定で選鉱(主に有色鉱物を除去)
② 40 Vの設定で選鉱(主に有色鉱物を除去)	② 130 Vの設定で選鉱(さらに有色鉱物を除去)
③ 70 Vの設定で選鉱(さらに有色鉱物を除去)	
→ほぼ白色鉱物(斜長石と石英)のみとなる	→ほぼ白色鉱物(斜長石と石英)のみとなる

#### 4. 結果

#### 4.1 XRD 分析による鉱物組成

XRD 分析の結果、KB102 からは斜長石(灰長石)、緑泥石、普通角閃石、石英、普通輝石、方 解石、および沸石が、SZ104 からは、斜長石(灰長石)、緑泥石、普通角閃石、石英、普通輝石、 沸石、およびセリサイトが検出された(図 4.1-1)。これらのうち緑泥石、石英、方解石、沸石、 およびセリサイトは二次生成鉱物であるが、緑泥石、方解石、および沸石は塩酸処理で分解する ことが可能である。



図 4.1-1 XRD 分析結果

## 4.2 XRF 分析による全岩化学組成

XRF 分析の結果は、表 4.2-1 の通りとなった。K<sub>2</sub>O の濃度は KB102、SZ104 の両方とも高くは ないものの、K-Ar 年代測定が適用可能な濃度である。また、いずれの試料も LOI がやや高く、 変質がある程度進んでいることがうかがえる。

		KB102	SZ104	JA-2 測定値 (n=2の平均値)	JA-2 標準値 <sup>*</sup>	定量下限			
SiO <sub>2</sub>	(wt%)	55.27	55.96	56.74	57.13	0.0073			
TiO <sub>2</sub>	(wt%)	0.90	0.95	0.68	0.67	0.0016			
$AI_2O_3$	(wt%)	15.51	16.71	15.56	15.60	0.0048			
T-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(wt%)	7.77	8.07	6.43	6.29	0.0010			
MnO	(wt%)	0.13	0.14	0.11	0.11	0.0005			
MgO	(wt%)	4.65	4.30	7.74	7.70	0.0100			
CaO	(wt%)	6.61	7.00	6.40	6.37	0.0009			
Na <sub>2</sub> O	(wt%)	3.55	3.18	3.09	3.15	0.0160			
K <sub>2</sub> O	(wt%)	1.17	0.59	1.79	1.83	0.0006			
$P_2O_5$	(wt%)	0.12	0.15	0.16	0.15	0.0010			
LOI	(wt%)	4.73	3.02						
Ва	ppm	260	190	312	325	15			
Ce	ppm	13	14	30	33.1	7.9			
CI	ppm	ND	50	32	_	30			
Со	ppm	28	29	29	29.9	1.0			
Cr	ppm	160	210	444	442	1.3			
Ga	ppm	18	19	17	17.1	0.34			
Nb	ppm	4.9	4.7	10	9.59	0.53			
Ni	ppm	64	96	138	132	0.57			
Pb	ppm	8.0	5.2	19	19.4	0.97			
Rb	ppm	44	27	71	73.8	0.40			
S	ppm	73	13	19	(8.10)	2.0			
Sc	ppm	28	25	21	19.8	1.7			
Sr	ppm	360	390	249	251	0.77			
Th	ppm	1.38	1.11	3.80	5.09	0.58			
U	ppm	0.79	1.49	2.73	2.24	0.76			
V	ppm	190	200	124	128	3.5			
Y	ppm	23	19	19	18.5	0.79			
Zr ppm		110	100	111	117	0.65			

表 4.2-1 KB102 および SZ104 の全岩化学組成

\*Imai et al. (1995)<sup>7)</sup>による報告値で、吸着水を除いた値に換算したもの。

NDは定量下限未満。()は参考値。

T-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は全酸化鉄をFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に換算したもの。

#### 4.3 SXAM および EPMA による元素分布

KB102 および SZ104 の薄片の SXAM による元素分布の生データを図 4.3-1 および図 4.3-2 に示 す。さらに、これらのデータを薄片写真に重ね合わせて、植木・丹羽(2017)<sup>8)</sup>の手法を適用し て鉱物分布図を作成した。その結果、KB102 については、斜長石や有色鉱物よりも、石基の部 分(特に方解石の周辺)に K が濃集している部分があることが明らかとなった(図 4.3-3)。 SZ104 については、一部に見られる斜長石の変質部で特に K が濃集していることが明らかとなっ た(図 4.3-4)。これらは偏光顕微鏡観察との比較に基づくと、二次生成鉱物のセリサイトである。 SXAM に基づく鉱物分布図から SZ104 における鉱物の量比を計算すると、斜長石の割合が 60 vol%以上であるのに対し、斜長石変質部の割合は 0.8 vol%程度である(表 4.3-1)。

表 4.3-1 SXAM に基づく鉱物分布図から求めた SZ104 の鉱物量比

石英	14.70 vol%
斜長石	60.20 vol%
単斜輝石	11.72 vol%
変質有色鉱物	11.20 vol%
斜長石変質部	0.83 vol%
不透明鉱物	1.35 vol%

KB102 については、K が濃集している部分のより詳細な分布を確認するため、EPMA による元 素マッピングを行った(図4.3-5~図4.3-8)。その結果、EPMA でマッピングできる微細スケール においても、K が特に濃集している部分は、斜長石や単斜輝石、方解石といった鉱物内ではなく、 鉱物間を充填するように分布していることが明らかとなった。



図 4.3-1 KB102 の SXAM 画像 (1/2)



図 4.3-1 KB102 の SXAM 画像(2/2) Mn の元素分布は、低輝度を強調して示してある。



図 4.3-2 SZ104 の SXAM 画像 (1/2)









図 4.3-3 KB102 の薄片写真(直交ポーラー)に SXAM マッピングに基づく鉱物分布を重ね合わ せた画像

(a)は全体像。(b)および(c)は拡大像。図 4.3-6 の EPMA マッピング位置も示した。 赤色が有色鉱物(単斜輝石、普通角閃石)、薄い青灰色が斜長石、黄色が K の濃集部を示す。



図 4.3-4 SZ104 の SXAM マッピングに基づく鉱物分布図 黄色の斜長石変質部が特に K が濃集している部分。



図 4.3-5 KB102 の EPMA による元素マッピング位置(図 4.3-3、図 4.3-6 参照)の偏光顕微鏡写 真(左が単ポーラー、右が直交ポーラー) Cal: 方解石、Cpx: 単斜輝石



図 4.3-6 KB102 の EPMA による元素マッピング結果 (1/2)



図 4.3-6 KB102 の EPMA による元素マッピング結果 (2/2) BSE:反射電子像



図 4.3-7 KB102 の EPMA 元素マッピング画像の重ね合わせ結果



図 4.3-8 KB102 の反射電子像の拡大写真 拡大位置は図 4.3-6 を参照。 K:K 濃集部、Cal:方解石、Pl:斜長石、Qz:石英

## 4.4 EPMA による鉱物の化学組成

EPMA による点分析の結果を表 4.4-1~表 4.4-6 に示す。KB102、SZ104 ともに斜長石は Anorthite 成分のやや多い組成を示すものが多く、中性~塩基性岩中の斜長石の組成である。その ため、K<sub>2</sub>O の含有量は少なく、ほとんどが 0.1 wt%程度であった。KB102 の普通角閃石は、Leake et al. (1997)<sup>15</sup>に基づくと、チェルマーク角閃石に分類される。チェルマーク角閃石は Mg がやや 多く、低温で生成される角閃石ではないため、全岩化学組成および薄片観察と矛盾しない。 SZ104 は、著しい変質により普通角閃石の分析はできなかった。KB102 の普通角閃石の K<sub>2</sub>O 濃 度は斜長石よりも高く、0.3 wt%弱であった。単斜輝石は、KB102、SZ104 ともに、分析できたも のについては、Enstatite 成分がやや多い普通輝石(Augite)に分類される。これは、MgO の多い 全岩化学組成とも調和的である。また、KB102 の方が SZ104 と比べ Total がやや低く、変質が進 んでいることが示唆される。

22		53.18	0.05	28.50	0.45	00.00	0.06	10.94	4.88	0.12	98.18		2.38	0.00	1.50	0.02	0.00	0.00	0.52	0.42	0.01	54.9	44.3	0.7
21		53.52	0.02	28.36	0.41	0.00	0.04	10.89	4.93	0.12	98.28		2.39	00.0	1.49	0.02	0.00	00.0	0.52	0.43	0.01	54.6	44.7	0.7
20		52.46	0.05	29.16	0.50	0.02	0.07	11.83	4.46	0.11	98.65		2.35	0.00	1.54	0.02	0.00	0.00	0.57	0.39	0.01	59.1	40.3	0.6
19		50.19	0.04	30.55	0.52	0.03	0.07	13.26	3.47	0.08	98.21		2.28	00.00	1.64	0.02	00.00	00.00	0.65	0.31	0.00	67.6	32.0	0.5
18		52.08	0.02	29.04	0.48	00.00	0.05	11.80	4.35	0.09	97.92		2.35	00.00	1.55	0.02	00.00	00.00	0.57	0.38	0.01	59.7	39.8	0.6
17		52.87	0.04	28.85	0.42	0.00	0.04	11.43	4.72	0.10	98.47		2.37	0.00	1.52	0.02	0.00	0.00	0.55	0.41	0.01	56.9	42.5	0.6
16		51.31	0.09	30.01	0.52	0.00	0.07	12.50	4.00	0.09	98.58		2.31	0.00	1.59	0.02	0.00	0.00	0.60	0.35	0.00	63.0	36.5	0.5
15		54.70	0.04	27.94	0.26	0.02	0.02	10.03	5.48	0.14	98.63		2.42	0.00	1.46	0.01	0.00	0.00	0.48	0.47	0.01	49.9	49.3	0.8
14		53.89	0.04	28.10	0.38	0.00	0.02	10.50	5.22	0.18	98.32		2.40	0.00	1.48	0.01	0.00	0.00	0.50	0.45	0.01	52.1	46.9	1.0
13		52.89	0.06	28.28	0.51	0.03	0.06	11.28	4.66	0.09	97.86		2.38	0.00	1.50	0.02	0.00	0.00	0.54	0.41	0.01	56.9	42.6	0.5
12		49.12	0.02	31.43	0.28	0.00	0.02	14.11	2.98	0.05	98.01		2.24	0.00	1.69	0.01	0.00	0.00	0.69	0.26	0.00	72.1	27.5	0.3
1		52.91	0.03	28.72	0.36	00.0	0.02	10.98	4.87	0.10	98.01		2.37	0.00	1.52	0.01	0.00	0.00	0.53	0.42	0.01	55.1	44.3	0.6
10		50.83	0.01	30.02	0.44	00.0	0.03	12.65	3.90	0.07	97.95		2.31	00.0	1.60	0.02	00.0	00.0	0.61	0.34	0.00	63.9	35.6	0.4
6		53.21	0.06	28.64	0.40	0.02	0.05	11.04	4.86	0.10	98.38		2.38	00.0	1.51	0.01	00.0	00.0	0.53	0.42	0.01	55.3	44.1	0.6
8		52.22	0.03	29.21	0.44	0.00	0.04	11.65	4.45	0.09	98.14		2.35	0.00	1.55	0.02	0.00	0.00	0.56	0.39	0.01	58.8	40.7	0.6
7		52.40	0.06	28.72	0.46	00.0	0.04	11.41	4.68	0.11	97.86		2.36	00.0	1.53	0.02	0.00	00.0	0.55	0.41	0.01	57.1	42.3	0.7
9		47.51	0.05	32.10	0.50	0.02	0.03	15.17	2.47	0.06	97.91		2.19	00.0	1.74	0.02	00.0	00.0	0.75	0.22	0.00	76.9	22.7	0.4
5		51.93	0.07	29.47	0.53	0.02	0.06	11.62	4.69	0.10	98.47		2.33	00.0	1.56	0.02	00.0	00.0	0.56	0.41	0.01	57.5	41.9	0.6
4		52.37	0.04	29.38	0.40	0.02	0.03	11.55	4.58	0.10	98.47		2.35	0.00	1.55	0.01	0.00	0.00	0.55	0.40	0.01	57.9	41.5	0.6
ю		47.62	0.00	32.70	0.42	0.01	0.03	14.93	2.73	0.07	98.50		2.18	0.00	1.76	0.02	0.00	0.00	0.73	0.24	0.00	74.9	24.7	0.4
2		52.56	0.03	29.39	0.31	00.0	0.04	11.30	4.82	0.12	98.56		2.35	0.00	1.55	0.01	0.00	0.00	0.54	0.42	0.01	56.0	43.3	0.7
-		65.09	00.0	20.54	0.14	0.01	0.10	1.18	11.02	0.12	98.20		2.75	0.00	1.02	0.01	0.00	0.01	0.05	0.90	0.01	5.5	93.8	0.7
Number	(wt%)	$SiO_2$	$TIO_2$	$AI_2O_3$	FeO	MnO	MgO	CaO	$Na_2O$	K₂O	Total	O = 8	Si	Ξ	AI	Fe	Mn	Mg	Са	Na	¥	An	Ab	or

An: Anorthite 成分、Ab: Albite 成分、Or: Orthoclase 成分。

(KB102の斜長石)
点分析結果
EPMA
表 4.4-1

- 24 -

18		52.27	0.04	30.02	0.49	0.01	0.05	12.24	4.33	0.13	99.58		2.33	0.00	1.57	0.02	0.00	0.00	0.58	0.37	0.01	60.5	38.7	0.8
17		54.39	0.02	28.87	0.46	0.03	0.03	10.45	5.36	0.18	99.80		2.39	0.00	1.49	0.02	0.00	0.00	0.49	0.46	0.01	51.3	47.6	1.1
16		53.10	0.08	29.25	0.58	0.01	0.07	11.37	4.87	0.15	99.49		2.35	0.00	1.53	0.02	0.00	0.00	0.54	0.42	0.01	55.8	43.3	0.9
15		53.19	0.06	29.49	0.60	0.00	0.06	11.31	4.96	0.14	99.79		2.35	0.00	1.54	0.02	0.00	0.00	0.53	0.42	0.01	55.3	43.9	0.8
14		53.03	0.03	29.49	0.61	00.0	0.07	11.49	4.80	0.15	99.67		2.35	00.0	1.54	0.02	00.0	00.0	0.54	0.41	0.01	56.4	42.7	0.9
13		52.36	0.02	29.89	0.59	0.00	0.07	12.15	4.41	0.12	99.61		2.33	0.00	1.57	0.02	0.00	00.00	0.58	0.38	0.01	59.9	39.3	0.7
12		53.95	0.02	28.93	0.57	0.00	0.06	10.90	5.13	0.22	99.79		2.38	0.00	1.50	0.02	0.00	0.00	0.51	0.44	0.01	53.3	45.4	1.3
11		55.73	0.05	27.54	0.64	0.01	0.08	9.65	5.79	0.24	99.72		2.44	0.00	1.42	0.02	0.00	0.01	0.45	0.49	0.01	47.3	51.3	1.4
10		47.87	0.04	33.16	0.53	0.00	0.04	15.46	2.54	0.06	99.70		2.17	0.00	1.77	0.02	00.00	00.00	0.75	0.22	0.00	76.8	22.8	0.3
6		52.60	0.04	29.76	0.60	0.01	0.08	11.58	4.78	0.14	99.59		2.33	0.00	1.56	0.02	0.00	0.01	0.55	0.41	0.01	56.8	42.4	0.8
8		53.14	0.05	29.72	0.59	0.00	0.07	11.69	4.77	0.14	100.16		2.34	0.00	1.54	0.02	0.00	0.00	0.55	0.41	0.01	57.1	42.1	0.8
7		53.78	0.06	29.35	0.57	0.05	0.07	11.21	4.90	0.15	100.12		2.37	0.00	1.52	0.02	0.00	0.00	0.53	0.42	0.01	55.3	43.8	0.9
9		52.95	0.04	29.39	0.55	0.03	0.06	11.56	4.67	0.15	99.40		2.35	0.00	1.54	0.02	0.00	0.00	0.55	0.40	0.01	57.3	41.8	0.9
5		52.31	0.04	29.68	0.62	0.01	0.08	11.78	4.58	0.14	99.24		2.33	0.00	1.56	0.02	0.00	0.01	0.56	0.40	0.01	58.2	41.0	0.8
4		52.47	0.03	29.94	0.53	00.0	0.06	12.07	4.46	0.13	99.68		2.33	00.0	1.57	0.02	00.0	00.0	0.57	0.38	0.01	59.5	39.8	0.7
3		53.16	0.05	29.49	0.56	0.04	0.05	11.23	4.99	0.15	99.72		2.35	0.00	1.54	0.02	0.00	0.00	0.53	0.43	0.01	55.0	44.1	0.9
2		53.51	0.05	29.18	0.58	0.01	0.09	11.28	4.94	0.15	99.80		2.36	0.00	1.52	0.02	0.00	0.01	0.53	0.42	0.01	55.3	43.8	0.9
٢		53.89	0.04	29.52	0.54	0.00	0.07	11.26	4.97	0.15	100.43		2.36	0.00	1.53	0.02	0.00	0.00	0.53	0.42	0.01	55.1	44.0	0.9
Number	(wt%)	$SiO_2$	$TIO_2$	$AI_2O_3$	FeO	MnO	MgO	CaO	$Na_2O$	K <sub>2</sub> O	Total	0 = 8	Si	i	A	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	¥	An	Ab	ō

An: Anorthite 成分、Ab: Albite 成分、Or: Orthoclase 成分。

表 4.4-2 EPMA 点分析結果(SZ104 の斜長石)(1/3)

- 25 -

10	UC C	24	00	23	PC	<u>о</u> Е	<u>л</u> е	77	96	00	30	21	37	23	75	35	36
	R	7	77	S	24	C7	20	71	70	87	20	0	32	<b>S</b>	54	22	30
3.22	53.19	52.91	52.34	53.40	53.28	51.73	52.04	51.84	53.21	53.92	52.40	52.84	51.60	54.44	52.20	52.69	53.27
0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.08	0.04	0.03	0.05	0.08	0.05	0.06	0.06	0.04	0.05	0.04	0.04
9.45	29.58	29.63	30.08	29.38	29.44	30.31	30.32	30.51	29.20	28.54	29.89	29.80	30.69	28.61	30.23	29.59	29.40
0.58	0.55	0.55	0.55	0.47	0.58	0.59	0.52	0.59	0.55	0.77	0.59	0.58	0.58	0.59	0.52	0.55	0.64
0.00	0.01	0.00	00.0	0.00	0.01	00.0	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	00.0	0.00
0.06	0.07	0.06	0.05	0.04	0.08	0.06	0.07	0.09	0.08	0.17	0.06	0.06	0.07	0.08	0.04	0.05	0.07
11.61	11.47	11.55	11.86	11.28	11.60	12.65	12.44	12.77	11.22	10.97	12.15	11.72	12.55	10.47	11.92	11.78	11.49
4.78	4.81	4.80	4.63	4.96	4.77	4.12	4.23	4.12	5.00	5.06	4.39	4.74	4.20	5.39	4.54	4.64	4.83
0.14	0.15	0.14	0.13	0.16	0.15	0.11	0.12	0.12	0.16	0.18	0.13	0.16	0.12	0.18	0.13	0.15	0.15
99.89	99.88	99.68	99.68	99.74	99.93	99.65	99.77	100.07	99.49	99.69	99.65	96.96	99.86	99.81	99.64	99.48	99.89
2.35	2.35	2.34	2.32	2.36	2.35	2.31	2.31	2.30	2.36	2.38	2.33	2.34	2.30	2.39	2.32	2.34	2.35
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	00.0	0.00	00.00	0.00	0.00	00.00	0.00	0.00	0.00	0.00	00.0	0.00
1.53	1.54	1.55	1.57	1.53	1.53	1.59	1.59	1.60	1.52	1.49	1.57	1.55	1.61	1.48	1.58	1.55	1.53
0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
0.00	00.00	0.00	00.00	0.00	0.00	00.0	0.00	00.00	0.00	00.00	00.00	00.0	0.00	0.00	0.00	00.0	0.00
0.00	00.00	0.00	00.00	0.00	0.01	00.0	0.00	0.01	0.00	0.01	00.00	00.0	0.00	0.00	0.00	00.0	0.00
0.55	0.54	0.55	0.56	0.53	0.55	09.0	0.59	0.61	0.53	0.52	0.58	0.55	0.60	0.49	0.57	0.56	0.54
0.41	0.41	0.41	0.40	0.42	0.41	0.36	0.36	0.35	0.43	0.43	0.38	0.41	0.36	0.46	0.39	0.40	0.41
0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
56.8	56.4	56.6	58.2	55.2	56.9	62.5	61.5	62.7	54.9	53.9	60.0	57.2	61.8	51.2	58.8	57.9	56.3
42.3	42.7	42.6	41.1	43.9	42.3	36.9	37.8	36.6	44.2	45.0	39.2	41.9	37.4	47.7	40.5	41.3	42.8
0.8	0.9	0.8	0.7	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.9	1.0	0.7	0.9	0.7	1.1	0.7	0.9	0.9

表 4.4-2 EPMA 点分析結果(SZ104 の斜長石) (2/3)

- 26 -

54		49.62	0.03	32.05	0.60	0.00	0.04	14.33	3.13	0.09	99.89		2.23	0.00	1.70	0.02	0.00	0.00	0.69	0.27	0.01	71.3	28.2	0.5
53		53.22	0.03	29.29	0.62	0.00	0.06	11.51	4.77	0.14	99.64		2.36	0.00	1.53	0.02	0.00	00.0	0.55	0.41	0.01	56.7	42.5	0.8
52		53.40	0.06	29.18	0.62	0.00	0.07	11.57	4.77	0.15	99.82		2.36	0.00	1.52	0.02	0.00	0.00	0.55	0.41	0.01	56.8	42.4	0.9
51		51.63	0.04	30.50	0.57	0.00	0.05	12.82	4.08	0.10	99.79		2.30	0.00	1.60	0.02	0.00	0.00	0.61	0.35	0.01	63.1	36.3	0.6
50		51.58	0.02	30.77	0.51	0.02	0.04	12.73	4.10	0.14	99.91		2.29	0.00	1.61	0.02	0.00	0.00	0.61	0.35	0.01	62.6	36.5	0.8
49		53.55	0.06	29.43	0.59	0.03	0.06	11.45	4.86	0.13	100.14		2.36	0.00	1.53	0.02	00.0	00.00	0.54	0.41	0.01	56.1	43.1	0.8
48		52.31	0.04	30.11	0.56	0.00	0.05	12.05	4.46	0.13	99.70		2.32	00.00	1.58	0.02	00.00	0.00	0.57	0.38	0.01	59.5	39.8	0.7
47		53.74	0.02	29.46	0.57	0.00	0.08	11.16	5.03	0.16	100.21		2.36	0.00	1.53	0.02	0.00	0.00	0.53	0.43	0.01	54.6	44.5	0.9
46		54.50	0.05	28.55	09.0	0.02	0.05	10.45	5.35	0.16	99.73		2.40	0.00	1.48	0.02	0.00	0.00	0.49	0.46	0.01	51.4	47.6	0.9
45		53.42	0.04	29.19	0.55	0.02	0.06	11.33	4.88	0.14	99.62		2.36	00.00	1.52	0.02	00.00	00.00	0.54	0.42	0.01	55.8	43.4	0.8
44		52.07	0.08	30.00	0.59	0.00	0.06	11.95	4.48	0.12	99.36		2.32	0.00	1.58	0.02	0.00	0.00	0.57	0.39	0.01	59.1	40.1	0.7
43		52.27	0.03	29.95	0.54	0.00	0.07	11.96	4.48	0.13	99.42		2.33	0.00	1.57	0.02	0.00	0.00	0.57	0.39	0.01	59.1	40.1	0.8
42		52.80	0.04	29.82	0.58	0.00	0.08	11.93	4.48	0.13	99.85		2.34	0.00	1.56	0.02	0.00	0.01	0.57	0.38	0.01	59.1	40.2	0.7
41		53.36	0.06	29.31	0.59	0.00	0.08	11.24	4.90	0.16	99.68		2.36	0.00	1.53	0.02	0.00	0.00	0.53	0.42	0.01	55.4	43.7	0.9
40		52.78	0.04	29.60	0.54	0.00	0.07	11.76	4.63	0.14	99.56		2.34	0.00	1.55	0.02	0.00	0.00	0.56	0.40	0.01	57.9	41.3	0.8
39		53.21	0.06	29.05	0.60	0.00	0.08	11.37	4.83	0.16	99.36		2.36	0.00	1.52	0.02	0.00	0.01	0.54	0.42	0.01	56.0	43.0	0.9
38		53.00	0.02	29.66	0.56	0.02	0.07	11.76	4.64	0.15	99.89		2.34	0.00	1.55	0.02	0.00	0.00	0.56	0.40	0.01	57.8	41.3	0.9
37		53.44	0.04	29.42	0.60	0.00	0.08	11.61	4.76	0.14	100.08		2.36	0.00	1.53	0.02	0.00	0.01	0.55	0.41	0.01	57.0	42.2	0.8
Number	(wt%)	$SiO_2$	$TIO_2$	$Al_2O_3$	FeO	MnO	MgO	CaO	$Na_2O$	K <sub>2</sub> O	Total	0 = 8	Si	⊨	AI	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	¥	An	Ab	ŗ

表 4.4-2 EPMA 点分析結果 (SZ104 の斜長石) (3/3)

Number	-	2	с	4	5	6	7	8	6	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
(wt%)																						
$SiO_2$	42.02	40.47	41.21	40.88	40.71	41.72	43.13	42.15	42.99	41.04	42.15	42.57	42.76	42.12	41.79	42.84	40.74	42.40	42.77	43.86	43.48	41.84
TIO <sub>2</sub>	1.44	2.22	1.95	1.88	2.56	1.79	1.06	1.94	1.68	2.72	1.69	2.24	1.51	2.10	1.95	2.23	2.18	1.75	1.84	1.62	2.12	2.60
$AI_2O_3$	11.57	12.84	12.05	12.71	12.64	12.05	11.26	12.26	11.09	12.47	12.28	10.69	11.07	11.65	11.71	10.65	12.86	11.86	11.87	11.35	9.84	11.12
FeO	15.39	11.74	14.23	14.38	12.87	12.66	14.87	10.28	13.56	12.47	12.86	14.51	14.24	12.99	14.67	14.04	15.61	13.83	10.91	11.31	15.17	14.82
MnO	0.32	0.16	0.24	0.22	0.17	0.20	0.32	0.16	0.22	0.14	0.23	0.25	0.25	0.18	0.25	0.21	0.26	0.23	0.15	0.19	0.25	0.21
MgO	11.81	13.78	12.28	11.87	12.84	13.16	11.96	14.51	12.64	12.85	12.76	11.99	12.25	12.75	11.90	12.41	10.77	12.39	14.73	14.14	12.36	11.76
CaO	9.56	10.11	10.31	11.02	10.59	10.61	10.00	10.56	10.20	10.49	10.44	10.13	10.30	10.40	10.41	10.22	10.16	10.40	10.36	10.55	10.01	10.24
$Na_2O$	2.05	2.39	2.09	2.20	2.29	2.09	2.00	2.31	1.94	2.23	2.12	2.06	1.94	2.16	2.07	2.02	2.25	2.01	2.27	1.98	1.88	2.24
K <sub>2</sub> O	0.23	0.26	0.30	0.34	0.26	0.25	0.24	0.27	0.44	0.28	0.25	0.30	0.27	0.27	0.27	0.34	0.27	0.26	0.26	0.23	0.32	0.36
Total	94.41	93.99	94.65	95.49	94.94	94.55	94.83	94.43	94.75	94.69	94.78	94.72	94.60	94.62	95.03	94.95	95.10	95.11	95.14	95.23	95.43	95.20
O = 23																						
Si	6.24	5.99	6.14	6.10	6.04	6.19	6.39	6.20	6.38	6.10	6.24	6.36	6.37	6.26	6.23	6.37	6.10	6.27	6.22	6.40	6.43	6.25
AI <sup>IV</sup>	1.76	2.01	1.86	1.90	1.96	1.81	1.61	1.80	1.62	1.90	1.76	1.64	1.63	1.74	1.77	1.63	1.90	1.73	1.78	1.60	1.57	1.75
$AI^{VI}$	0.27	0.24	0.25	0.33	0.26	0.30	0.36	0.32	0.31	0.28	0.38	0.24	0.31	0.30	0.28	0.23	0.37	0.34	0.26	0.35	0.14	0.21
ï⊐	0.16	0.25	0.22	0.21	0.29	0.20	0.12	0.21	0.19	0.30	0.19	0.25	0.17	0.24	0.22	0.25	0.25	0.19	0.20	0.18	0.23	0.29
Fe <sup>3+</sup>	1.48	1.33	1.22	0.93	1.05	1.09	1.22	1.01	1.06	0.97	1.04	1.01	1.09	0.98	1.08	1.00	1.08	1.08	1.20	1.00	1.20	0.96
Fe <sup>2+</sup>	0.43	0.12	0.55	0.87	0.55	0.48	0.63	0.25	0.62	0.58	0.55	0.80	0.69	0.64	0.74	0.75	0.87	0.63	0.13	0.38	0.67	0.89
Mn	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03
Mg	2.61	3.04	2.72	2.64	2.84	2.91	2.64	3.18	2.79	2.84	2.81	2.67	2.72	2.82	2.64	2.75	2.40	2.73	3.19	3.07	2.72	2.62
Ca	1.52	1.60	1.65	1.76	1.68	1.69	1.59	1.66	1.62	1.67	1.65	1.62	1.64	1.66	1.66	1.63	1.63	1.65	1.61	1.65	1.58	1.64
Na <sub>A</sub>	0.11	0.29	0.25	0.40	0.34	0.29	0.16	0.32	0.18	0.31	0.26	0.22	0.20	0.28	0.26	0.21	0.28	0.22	0.25	0.21	0.12	0.29
Na <sub>B</sub>	0.48	0.40	0.35	0.24	0.32	0.31	0.41	0.34	0.38	0.33	0.35	0.38	0.36	0.34	0.34	0.37	0.37	0.35	0.39	0.35	0.42	0.36
¥	0.04	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.08	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.06	0.07

表 4.4-3 EPMA 点分析結果(KB102 の普通角閃石)

- 28 -

Number	1	2	3	4	5
(wt%)					
SiO <sub>2</sub>	50.05	51.29	49.66	51.11	51.20
TiO <sub>2</sub>	0.57	0.32	0.68	0.35	0.36
$AI_2O_3$	2.28	2.64	2.85	1.68	2.64
FeO	11.05	6.91	9.50	10.03	7.38
MnO	0.39	0.21	0.28	0.31	0.19
MgO	13.45	15.84	13.84	13.98	15.60
CaO	18.90	19.46	19.69	19.42	19.37
Na <sub>2</sub> O	0.39	0.31	0.32	0.30	0.32
K <sub>2</sub> O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Total	97.07	96.98	96.82	97.18	97.07
O = 6					
Si	1.93	1.94	1.91	1.96	1.94
Ti	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01
Al	0.10	0.12	0.13	0.08	0.12
Fe	0.36	0.22	0.31	0.32	0.23
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.77	0.89	0.79	0.80	0.88
Ca	0.78	0.79	0.81	0.80	0.79
Na	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wo	40.9	41.5	42.5	41.6	41.4
En	40.5	47.0	41.5	41.6	46.3
Fs	18.7	11.5	16.0	16.8	12.3

表 4.4-4 EPMA 点分析結果(KB102 の単斜輝石)

Wo: Wollastonite 成分、	En: Enstatite 成分、	Fs: Ferrosilite 成分。
----------------------	-------------------	---------------------

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(wt%)										
SiO <sub>2</sub>	52.97	52.24	51.96	51.89	51.78	50.81	50.80	51.45	50.80	51.40
TiO <sub>2</sub>	0.17	0.12	0.33	0.20	0.19	0.39	0.40	0.47	0.52	0.36
$Al_2O_3$	0.59	0.37	1.23	0.87	0.90	2.76	2.20	1.51	1.57	1.96
FeO	8.11	10.66	9.36	11.35	9.58	7.82	8.85	9.55	9.30	7.99
MnO	0.23	0.35	0.26	0.37	0.31	0.24	0.28	0.28	0.23	0.20
MgO	14.36	13.25	14.21	12.84	13.82	14.97	14.56	14.49	14.70	14.92
CaO	22.48	21.16	20.95	20.33	21.33	20.19	20.30	20.20	20.23	21.20
Na <sub>2</sub> O	0.10	0.33	0.23	0.43	0.24	0.31	0.31	0.27	0.27	0.25
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Total	99.00	98.48	98.54	98.30	98.14	97.50	97.71	98.21	97.64	98.27
O = 6										
Si	1.99	1.99	1.96	1.98	1.97	1.93	1.93	1.95	1.94	1.94
Ti	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Al	0.03	0.02	0.05	0.04	0.04	0.12	0.10	0.07	0.07	0.09
Fe	0.25	0.34	0.30	0.36	0.30	0.25	0.28	0.30	0.30	0.25
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.80	0.75	0.80	0.73	0.78	0.85	0.82	0.82	0.84	0.84
Ca	0.90	0.86	0.85	0.83	0.87	0.82	0.83	0.82	0.83	0.86
Na	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
К	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wo	46.1	44.2	43.6	43.2	44.4	42.8	42.8	42.3	42.2	44.0
En	40.9	38.5	41.2	38.0	40.0	44.2	42.7	42.2	42.7	43.1
Fs	13.0	17.4	15.2	18.8	15.6	13.0	14.6	15.6	15.1	12.9

表 4.4-5 EPMA 点分析結果(SZ104 の単斜輝石)

Wo: Wollastonite 成分、En: Enstatite 成分、Fs: Ferrosilite 成分。

		KB102		SZ	104
	斜長石	普通角閃石	単斜輝石		単斜輝石
(wt%)	n=22の平均値	n=22の平均値	n=5の平均値	n=54の平均値	n=10の平均値
SiO <sub>2</sub>	52.49	42.07	50.66	52.85	51.61
TiO <sub>2</sub>	0.04	1.96	0.46	0.04	0.31
$AI_2O_3$	29.05	11.72	2.42	29.68	1.40
FeO	0.42	13.52	8.97	0.57	9.26
MnO	0.01	0.22	0.28	0.01	0.28
MgO	0.04	12.63	14.54	0.06	14.21
CaO	11.46	10.32	19.37	11.72	20.84
Na <sub>2</sub> O	4.65	2.12	0.33	4.66	0.27
K <sub>2</sub> O	0.10	0.29	0.00	0.14	0.01
Total	98.25	94.85	97.02	99.75	98.18

表 4.4-6 EPMA 点分析結果(各鉱物の平均値)

## 4.5 塩酸処理による試料の変化

塩酸処理を行った試料は、緑泥石や方解石などの二次生成鉱物が溶解により除去されることが 期待できる。KB102 については、塩酸を加えた直後に若干の発砲が認められるとともに、塩酸 処理後の超音波洗浄に伴い、溶液がわずかに白濁した。偏光顕微鏡観察および XRD 分析結果も 踏まえると、これらは方解石の溶解によるものと考えられる。さらに加熱すると、時間の経過と ともに溶液が黄色くなる傾向が認められた(図 4.5-1)。この黄色くなる傾向は、2 回の塩酸処理 のうち、初回の処理でより顕著に見られた。SZ104 においても、初回の塩酸処理で溶液が黄色く なる傾向が見られるとともに、若干の浮遊物が発生した(図 4.5-1)。これらは、主に緑泥石など の二次生成鉱物の溶解と、その溶解により空隙が増えた斜長石が浮遊したことによるものと考え られる。



図 4.5-1 塩酸処理による溶液の色の変化 6N 塩酸で 70℃、15 分反応させた後の様子。

#### 5. まとめ

本研究では、岐阜県高山市高根地域に分布する安山岩質岩脈群を事例対象として、変質した火山岩に対し K-Ar 年代測定を適用する上で必要な情報を得るための記載岩石学・地球化学的検討を行った。偏光顕微鏡観察による詳細な岩石記載の結果、相対的に変質の程度が小さいと考えられる KB102 の安山岩および SZ104 の斑れい岩について、変質の程度を定量的に把握するための化学分析を実施した。

偏光顕微鏡観察および XRD 分析に基づくと、これらの岩石には、緑泥石、鉄酸化物、セリサイト、石英、方解石、沸石、および緑れん石が二次生成鉱物として存在していると考えられる。 XRF 分析からは、いずれの試料も LOI がやや高く、変質がある程度進んでいることが分かる。 ただし KB102 については普通角閃石および単斜輝石が比較的新鮮な状態で残存しており、K を 含む普通角閃石を濃集させることで K-Ar 年代測定が適用できる見込みがある。

SXAM および EPMA の元素マッピング結果からは、KB102 では石基、SZ104 では斜長石の変 質部で特に K が濃集している。また、KB102 の石基の大部分は変質しており、かつ、K の濃集 部は変質鉱物である方解石の近傍に分布する傾向がある。さらに、偏光顕微鏡観察や XRD 分析 結果と合わせて考えると、SZ104 の斜長石の変質部は主にセリサイトからなる可能性が高い。

本研究では、新鮮な斜長石を効率よく分離する手法を整備する目的で、凍結融解処理による鉱物の分離手法を検討した。しかし、凍結融解処理、さらには有色鉱物や石英を除去するための磁気選鉱・重液分離を行った試料でも、塩酸処理を行うと、液が黄色を帯び、緑泥石などの二次生成鉱物が有意に残っていることが分かった。また、KB102 では若干の発砲も認められ、方解石も残存していることが分かった。凍結融解処理・磁気選鉱・重液分離のみでは、二次生成鉱物を十分に除去することは困難であると考えられる。

EPMA による点分析の結果からは、普通角閃石の K<sub>2</sub>O 量は斜長石よりも多い。また、偏光顕 微鏡観察からは、KB102 の普通角閃石は斜長石よりも相対的に新鮮である。したがって、本研 究で対象とした試料の中では、KB102 の普通角閃石が K-Ar 年代測定に最も有望な鉱物であると 考えられる。また、薄片観察に加え、チェルマーク角閃石に分類される鉱物化学組成から、KB102 の普通角閃石は岩脈形成後の冷却過程で晶出したものや二次的な変質を被ったものでは なく、岩脈貫入前のマグマ中で晶出したものと判断できる。このことから、普通角閃石が示す年 代は岩脈の形成年代に近似できると考えられる。

信頼性の高い K-Ar 年代を得るためには、本研究のように詳細な記載岩石学・地球化学的検討 を行い、測定鉱物を絞り込むことが非常に重要であるが、変質の進んだ岩石の場合は、確度の高 い年代値が得られる見込みのある鉱物が非常に限られる場合も多い。そのため、測定対象の異な る様々な年代測定手法を視野に入れた多角的な検討も重要である。

#### 謝辞

技術開発協力員(現:九電産業株式会社)の佐野直美氏には、XRF および EPMA 分析におい て多くのご助力を賜った。株式会社ペスコの吉川清盛氏には、薄片作成においてお世話になった。 以上の方々に心より御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 兼岡一郎:年代測定概論,東京大学出版会,315p. (1998).
- 杉崎雄一・星 博幸:飛騨地方の中新世岩脈群から得られた古地磁気方位の地質学的意味, 地質学雑誌, Vol.123, pp.953–967 (2017).
- 3) 山田直利・足立 守・梶田澄雄・原山 智・山崎晴雄・豊 遙秋:高山地域の地質,地域地質 研究報告(5万分の1図幅) 金沢(10)第52号,地質調査所,111p.(1985).
- 4) 中野 俊・大塚 勉・足立 守・原山 智・吉岡敏和:乗鞍岳地域の地質,地域地質研究報告
   (5万分の1地質図幅) 金沢(10)第53号,地質調査所,139p.(1995).
- 5) 棚瀬充史・梅田浩司・水落幸広・二ノ宮 淳:岐阜県高山市東方に分布する安山岩岩脈群の K-Ar 年代,日本地質学会第108年学術大会講演要旨, p.225 (2001).
- 6) 清水麻由子・佐野直美・柴田健二:東濃地科学センターにおける蛍光 X 線分析装置を用いた岩石試料の主要元素および微量元素の定量分析, JAEA-Testing 2016-004, 40p. (2016).
- Imai, N., Terashima, S., Itoh, S., Ando, A. : 1994 compilation of analytical data for minor and trace elements in seventeen GSJ geochemical reference samples, "Igneous rock series", Geostandards Newsletter, Vol.19, pp.135–213 (1995).
- 8) 植木忠正・丹羽正和: 走査型 X 線分析顕微鏡と画像処理・解析ソフトウェアを用いたモー ド測定, 地質学雑誌, Vol.123, pp.1061–1066 (2017).
- Liewig, N., Clauer, N., Sommer, F. : Rb–Sr and K–Ar dating of clay diagenesis in Jurassic sandstone oil reservoir, North Sea, American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Vol. 71, pp.1467– 1474 (1987).
- 10) 田村 肇・柴田健二・高橋直哉・丹羽正和:東濃地科学センターにおける断層ガウジ試料の カリウム-アルゴン(K-Ar)年代測定, JAEA-Testing 2017-001, 52p. (2017).
- 11) 八木公史・板谷徹丸:塩酸処理による主要鉱物の K-Ar 年代への影響,地質技術, Vol.1, pp.37-43 (2011).
- 12) Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J. : An introduction to the rock-forming minerals, second edition, Longman, 696p. (1992).
- 13) 代永佑輔・清水麻由子・佐野直美・植木忠正・吉川清盛・丹羽正和:東濃地科学センター における電子プローブマイクロアナライザを用いた化学組成分析に基づき重鉱物組成を迅 速に推定するための試料処理及び分析手順, JAEA-Testing 2018-001, 29p. (2018).
- 14) 八木公史: K-Ar 年代測定のための鉱物分離マニュアル, 地質技術, 創刊準備号, pp.19-25 (2006).
- 15) Leake, B.E., Woolley, A.R., Arps, C.E.S., Birch, W.D., Gilbert, M.C., Grice, J.D., Hawthorne, F.C., Kato, A., Kisch, H.J., Krivovichev, V.G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J.A., Maresch, W.V., Nickel, E.H., Rock, N.M.S., Schumacher, J.C., Smith, D.C., Stephenson, N.C.N., Ungaretti, L., Whittaker, E.J.W., Youzhi, G. : Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names, The Canadian Mineralogist, Vol.35, pp.219–246 (1997).

This is a blank page.

\_

表1.	SI 基本単位	<u>Ľ</u>
甘大昌	SI 基本ì	単位
本平里	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	Α
熱力学温度	ケルビン	Κ
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
AI 立長 SI 組立単位	
名称	記号
面 積 平方メートル	m <sup>2</sup>
体 積 立方メートル	m <sup>3</sup>
速 さ , 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 <sup>-1</sup>
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積 立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m
量 濃 度 <sup>(a)</sup> , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m <sup>8</sup>
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1
比 透 磁 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では	t物質濃度

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

#### 表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 租工单位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体鱼	ステラジアン <sup>(b)</sup>	$sr^{(c)}$	1 (b)	$m^2/m^2$
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	-	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	Ν		m kg s <sup>-2</sup>
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$kg s^{2} A^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

酸素活性(1) ダール kat [s<sup>1</sup> mol]
 (w)SH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。
 (h)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。
 (a)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)へルツは周期現象についてのみ、ペラ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。 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。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はとおらの単位で表しても同じである。
 (b)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物告2(CI-2002)を参照。

#### 表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[ 組立単位	
組立量	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 <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	$m m^{-1} s^{-1} = s^{-1}$
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	$W/m^2$	kg s <sup>-3</sup>
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 <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
誘 電 卒	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
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 <sup>-1</sup> s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
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 <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	$m^{-3} s^{-1} mol$

		表5.8	I 接頭語		
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
$10^{24}$	<b>э</b> 9	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	с
$10^{18}$	エクサ	E	$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{15}$	ペタ	Р	$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{12}$	テラ	Т	$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	р
$10^{6}$	メガ	М	$10^{-15}$	フェムト	f
$10^3$	+ 1	k	$10^{-18}$	アト	а
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	z
$10^{1}$	デカ	da	$10^{-24}$	ヨクト	v

表 6. SIに,	属さない	いが、SIと併用される単位
名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	۰	1°=(π/180) rad
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	$1 t=10^3 kg$

#### 表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

	表記	され	る数値	が実験的に得られるもの
3	名称		記号	SI 単位で表される数値
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダル	- F	$\sim$	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

#### 表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値	
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa	
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa	
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m	
海 里	Μ	1 M=1852m	
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$	
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s	
ネーパ	Np	ci単位しの粉結的な間接け	
ベル	В	対数量の定義に依存。	
デシベル	dB -		

#### 表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値			
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s			
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$			
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx			
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>			
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	1 G =1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T			
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4 π)A m <sup>-1</sup>			
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≦ 」					

は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例								
名称					記号	SI 単位で表される数値		
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq		
$\scriptstyle  u$	$\sim$	ŀ	ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$		
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy		
$\scriptstyle  u$				L	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv		
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$		
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m		
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 <sup>-4</sup> kg		
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa		
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa		
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J		
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)		
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$		