



JAEA-Data/Code  
2012-017

## 日本列島における地下水・温泉ガスの ヘリウム同位体比データベースの作成

Development of Helium Isotopic Database in Japan

草野 友宏 浅森 浩一 梅田 浩司

Tomohiro KUSANO, Koichi ASAMORI and Koji UMEDA

地層処分研究開発部門  
東濃地科学研究ユニット

Tono Geoscientific Research Unit  
Geological Isolation Research and Development Directorate

September 2012

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

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

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

日本列島における地下水・温泉ガスのヘリウム同位体比データベースの作成

日本原子力研究開発機構

地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット

草野 友宏<sup>\*</sup>, 浅森 浩一, 梅田 浩司

(2012年7月5日受理)

断層運動や隆起・侵食作用の原因となる地殻変動は、地質環境の長期的な安定性を評価する上で考慮すべき重要な外的要因である。これまでの研究によって地殻変動や火成活動が活発な地域ではマントル起源物質が地表から放出されている事例が数多く報告されている。本稿では代表的なマントル起源物質の一つであるヘリウム同位体に着目して、これらと地殻変動や火成活動の関連性を定量的に検討するための基盤情報として、国内においてこれまでに測定された地下水・温泉ガスのヘリウム同位体比を取りまとめたデータベースを作成した。このデータベースは、地下水井や温泉井から採取された遊離ガスおよび溶存ガスの希ガス同位体および主成分化学組成などについて、108件の学术论文などにより公表されている1728件のデータを取りまとめたものである。

Development of Helium Isotopic Database in Japan

Tomohiro KUSANO\*, Koichi ASAMORI and Koji UMEDA

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

(Received July 5, 2012)

We constructed “Helium Isotopic Database in Japan”, which includes isotope ratios of noble gases and chemical compositions of gas samples collected from hot springs and drinking water wells. The helium isotopes are excellent natural tracers for indicating the presence of mantle derived volatiles, because they are chemically inert and thus conserved in crustal rock-water systems. It is common knowledge that mantle degassing does not occur homogeneously over the Earth’s surface. The  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios higher than the typical crustal values are interpreted to indicate that transfer of mantle volatiles into the crust by processes or mechanisms such as magmatic intrusion, faulting. In particular the spatial variation of helium isotope ratios could provide a valuable information to identify volcanic regions and tectonically active areas. The database was compiled geochemical data of hot spring gas etc. from 108 published papers. As a result of the data compiling, the database has 1728 helium isotopic data.

Keywords: Isotope Ratio of Noble Gas, Chemical Composition

---

※ Collaborating Engineer

目次

1. はじめに	1
2. データベースの作成	1
3. データベースの記載項目	2
3.1 試料採取位置	2
3.2 採取試料情報	2
3.3 希ガス同位体組成	2
3.4 安定同位体比	2
3.5 主成分化学組成	2
4. まとめ	3
参考文献	9
付録 データベース引用文献リスト	11
付録 CD	

Contents

1. Introduction	1
2. Collection of literature data	1
3. Data configuration	2
3.1 Sampling location	2
3.2 Sample properties	2
3.3 Noble gas isotopic data	2
3.4 Stable isotopic data	2
3.5 Chemical composition data	2
4. Conclusion	3
References	9
Appendix Reference list of the database	11
Appendix CD	

This is a blank page.

## 1. はじめに

不活性ガスであるヘリウムは、地殻内での化学反応を生じにくいことから、マントル起源物質に関する情報を得るための重要な指標の一つとして用いられている。特にヘリウム同位体比( $^3\text{He}/^4\text{He}$ )は、大気・地殻・マントルで大きく異なることから、地下水や温泉水に付随するガスの起源を推定するための重要な手段と考えられている。一般に、ヘリウム同位体比は、火山フロントから背弧側では MORB(中央海嶺玄武岩)の値( $\sim 8R_A$ ;  $R_A=1.4 \times 10^{-6}$ )に近く、前弧域では大気や地殻物質の寄与を示すような低い値が報告されている。特に、火山近傍においては、地殻へのマグマの貫入によってマントル起源物質が地表付近に供給された結果、周囲に比して高い値を示すことが知られている。また、比較的規模の大きな地震の震源域においても高いヘリウム同位体比が確認されており、震源断層がマントル起源物質の上昇の通路となり得ることも指摘されている。

一方、日本列島はプレート収束帯に位置しており、安定大陸に比べて地殻変動や火成活動が活発である。そのため、地層処分システムが長期的に安全性能を保持するためには、まず地層処分システムに期待される物理的な隔離機能が自然現象によって損なわれる恐れがないようなサイト(最終処分施設建設地)を選ぶことが前提となる。日本原子力研究開発機構では、将来にわたる断層運動や火成活動の潜在的なリスクを排除する観点から、地下深部のマグマや高温流体のほか、伏在する活断層の存在を確認するための技術として、地下水井や温泉井から採取された遊離ガスおよび溶存ガスのヘリウム同位体比( $^3\text{He}/^4\text{He}$ )に着目した調査手法の整備を進めている。本報では、これらの研究開発によって蓄積された遊離ガスおよび溶存ガスの希ガス同位体および主成分化学組成データに加えて、学術論文などの文献に掲載されているデータを取りまとめることによって作成したデータベースについて報告する。

## 2. データベースの作成

本データベースの作成にあたっては、日本国内の地下水井および温泉井で採取された遊離ガスまたは溶存ガスのヘリウム同位体比について記載のある文献を収集した(付録;データベース引用文献リスト)。ここで収集した文献の総数は 108 編である。これらは、1978 年以降に公表された学術論文や研究機関の紀要のほか、地熱開発に関する報告書である。しかしながら、これらのうち半数以上の分析値については、試料の採取位置に関する情報(緯度、経度)が併記されていない。そのため、本データベースの作成にあたっては、これらの文献に掲載されている試料採取位置図などをもとに、可能な限り試料採取位置を特定した。なお、複数の文献において同一の試料に対する分析値が記載されている場合は、これらの重複を避けるため、原著となる文献の分析値のみをデータベースに収録した。これによって収集されたヘリウム同位体比データの総数は 1728 個であり、これに付随する主成分化学組成などのデータとともに Microsoft 社製 Excel 2007 を用いて取りまとめ、CD-ROM に収録した。なお、後述する各データ項目の記載にあたっては、各項目の単位を統一した。また、測定値の有効桁数については原文に従った。測定値が検出限界未満の場合には、「N.D.」と記載した。

### 3. データベースの記載項目

#### 3.1 試料採取位置

各試料の採取位置に係る情報として、試料番号、採取地点名、都道府県、市町村、採取地点の位置座標(緯度、経度)を収録した。このうち、試料番号および採取地点名は、文献に記載されている表記をそのまま使用した。また、採取地点の位置座標は十進法表記とし、世界測地系(WGS84)に従った。ここで、文献に採取地点の位置座標が記載されていない場合は、採取地点名や試料採取位置図を参考に、採取地点を Google Map (<http://maps.google.co.jp>) 上にプロットすることによって座標値を求めた。

#### 3.2 採取試料情報

各試料の採取日(日付が不明な場合は\*\*と記載)、採取深度のほか、各試料採取地点で計測された地下水または温泉水の温度、pH、電気伝導度を収録した。ここで、採取深度は、文献に記載されている試料採取井の掘削深度、スクリーン深度、パッカー区間深度を示す。さらに、採取した試料の形態を「Gas(遊離ガス試料)」および「Water(水試料)」の2つに区分して記載した。ここで、後述する各試料の希ガス同位体組成および主成分化学組成は、いずれもガス成分の測定結果を示すが、採取試料の形態が「Water」である場合は溶存ガスの測定結果であることを指す。

#### 3.3 希ガス同位体組成

希ガス同位体( $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{84}\text{Kr}$ ,  $^{132}\text{Xe}$ )の濃度および同位体比( $^3\text{He}/^4\text{He}$ ,  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ ,  $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ ,  $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ ,  $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ )とその測定誤差を収録した。ここで、それぞれの濃度については、遊離ガス試料(試料形態において「Gas」と記載される試料)による測定値と溶存ガス試料(「Water」と記載される試料)によるものを区分して記載した。また、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ (=R;ヘリウム同位体比)については、大気値( $R_A=1.4 \times 10^{-6}$ )で規格化した値( $R/R_A$ )、および試料中の大気混入率を考慮した補正值( $^3\text{He}/^4\text{He}_{(\text{cor})}$ および  $R/R_{A(\text{cor})}$ )を併記した。ここで、その補正方法は、それぞれの文献によって異なる計算方法が採用されているため、文献内に補正方法の記載があるものについては、「補正方法」欄にその出典を記載するとともに、【注釈】シートにその計算方法を掲載した。ただし、文献の内容から  $^3\text{He}/^4\text{He}$  の記載値が補正值であるか否かが判断できない場合は、その記載値が補正前のデータであるとした。なお、文献において  $^{20}\text{Ne}/^4\text{He}$  の分析値が記載されている場合は、その逆数を  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  とした。

#### 3.4 安定同位体比

ここでは、採取試料の安定同位体比として、遊離ガス試料の炭素同位体比( $\delta^{13}\text{C}$ )、水試料の水素同位体比( $\delta\text{D}$ )および酸素同位体比( $\delta^{18}\text{O}$ )を記載した。ここで、炭素同位体比は二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )中の同位体比を指す。

#### 3.5 主成分化学組成

ガス試料(遊離ガスまたは溶存ガス)の主成分として、 $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{He}$ ,  $\text{Ne}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ の濃度を記載した。これらは、試料に含まれる水蒸気( $\text{H}_2\text{O}$ )を除いた濃度を指す。文献の記載値が水蒸気を含めた濃度である場合(Scott *et al.*, 1994<sup>1)</sup>)は、水蒸気を除いた濃度に換算し、データベースに記載した。



また、文献の記載値が二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)や硫化水素(H<sub>2</sub>S)などを除いた濃度である場合(NEDO, 1988<sup>2</sup>), 1990a<sup>3</sup>), 1990b<sup>4</sup>), 1990c<sup>5</sup>), 1991a<sup>6</sup>), 1991b<sup>7</sup>), 1991c<sup>8</sup>), 1994<sup>9</sup>), 1995<sup>10</sup>), 1997<sup>11</sup>), 1998<sup>12</sup>), 1999a<sup>13</sup>), 1999b<sup>14</sup>), 1999c<sup>15</sup>), 2001a<sup>16</sup>), 2001b<sup>17</sup>), 2001c<sup>18</sup>)も、上記と同様の換算値を記載した。なお、文献内において希ガス同位体組成の記載があるものの、主成分化学組成について示されていないものについては、その引用文献において同一の試料に対する分析値であることが確認できるものについてのみ、備考欄にその文献名を示した上で、主成分化学組成の測定値を掲載した。

#### 4. まとめ

上述のように、日本国内の地下水井・温泉井で採取された遊離ガス・溶存ガスの同位体組成および主成分化学組成データを収集し、データベースとして取りまとめた。ここに収録される <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He の分析値は計 1728 個であり、その分布を図 4.1～図 4.8 に示す。なお、本図には、活断層<sup>19)</sup>および第四紀火山<sup>20)</sup>の分布をそれぞれ青線および赤三角で示す。これによると、火山フロントから前弧側の領域におけるヘリウム同位体比は総じて低く、その値は大気の数と同程度かそれよりも低い値を示す。一方で、背弧側の地域では大気よりも高い値を示し、特に第四紀火山の近傍においては 8R<sub>A</sub> に近い値を示すことから、このような地域においては、マグマの上昇に伴ったマントル起源ヘリウムの地表への供給が示唆される。このほか、2000 年鳥取県西部地震(M<sub>j</sub> 7.3)などの比較的規模の大きな地震を発生させた震源断層の近傍では、その周辺に比して高い <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He が確認されており、このような地下深部の断層がマントル起源ヘリウムの通路となっていることも指摘されている(Umeda *et al.*, 2008<sup>21)</sup>; Umeda and Ninomiya, 2009<sup>22)</sup>; Umeda *et al.*, 2011<sup>23)</sup>)。本データベースには、これらの特徴が見出されている <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He の測定値が網羅されているほか、その試料採取位置や主成分化学組成などのデータも併せて収録されている。このため、本データベースは、地震活動や火成活動などによる地殻－マントルの相互作用と地球化学的な特性との関連を、空間解析などによって検討することに利用することが可能である。

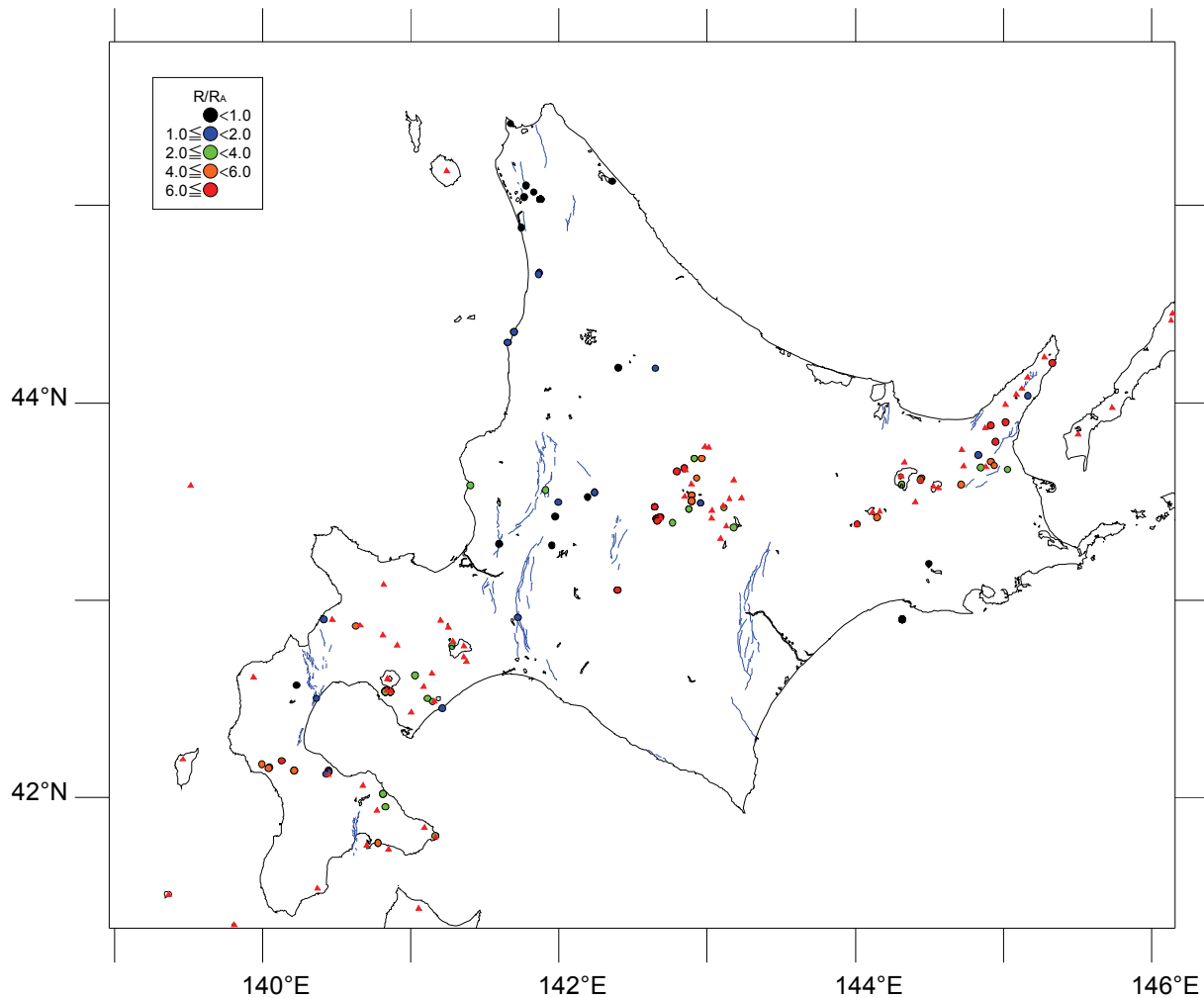


図 4-1 ヘリウム同位体比の分布(北海道)

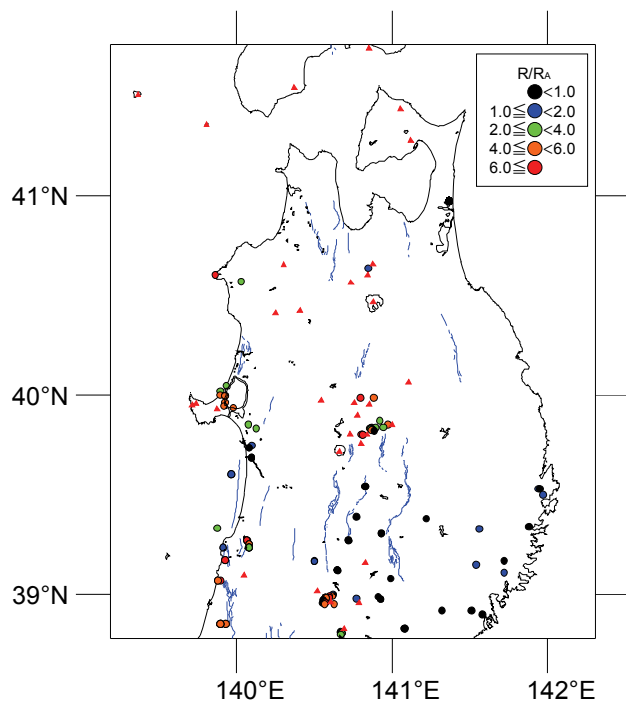


図 4-2 ヘリウム同位体比の分布(北東北)

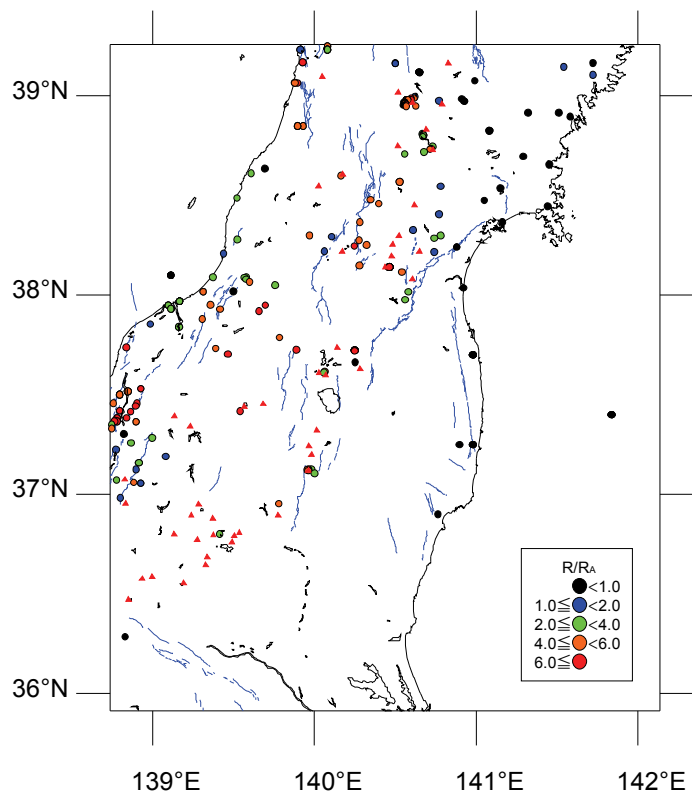


図 4-3 ヘリウム同位体比の分布(南東北・北関東)

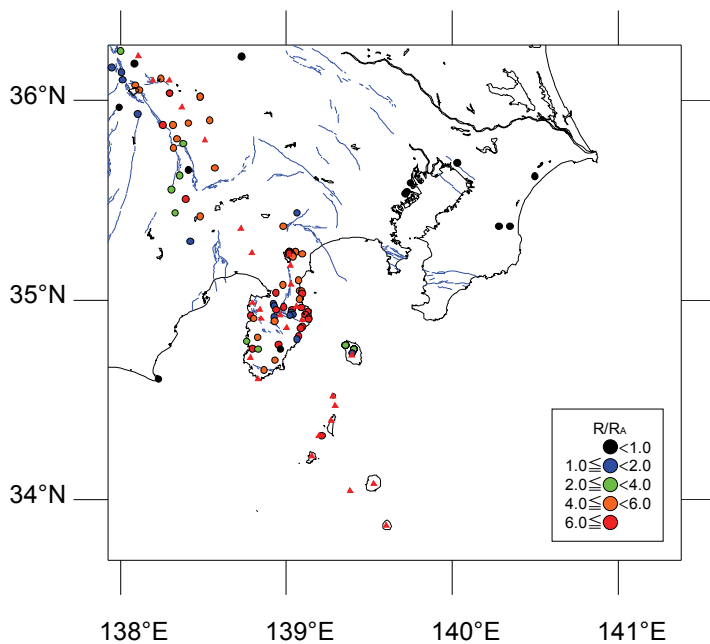


図 4-4 ヘリウム同位体比の分布(南関東)

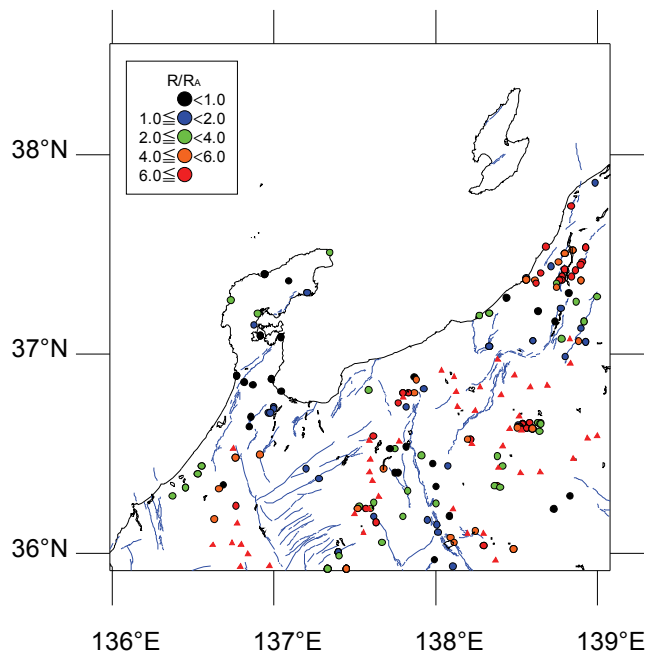


図 4-5 ヘリウム同位体比の分布(北陸)

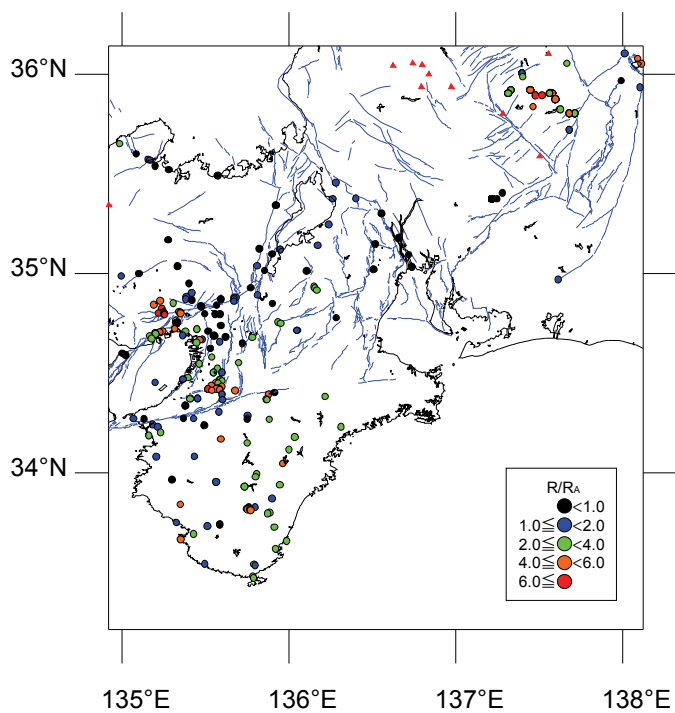


図 4-6 ヘリウム同位体比の分布(東海)

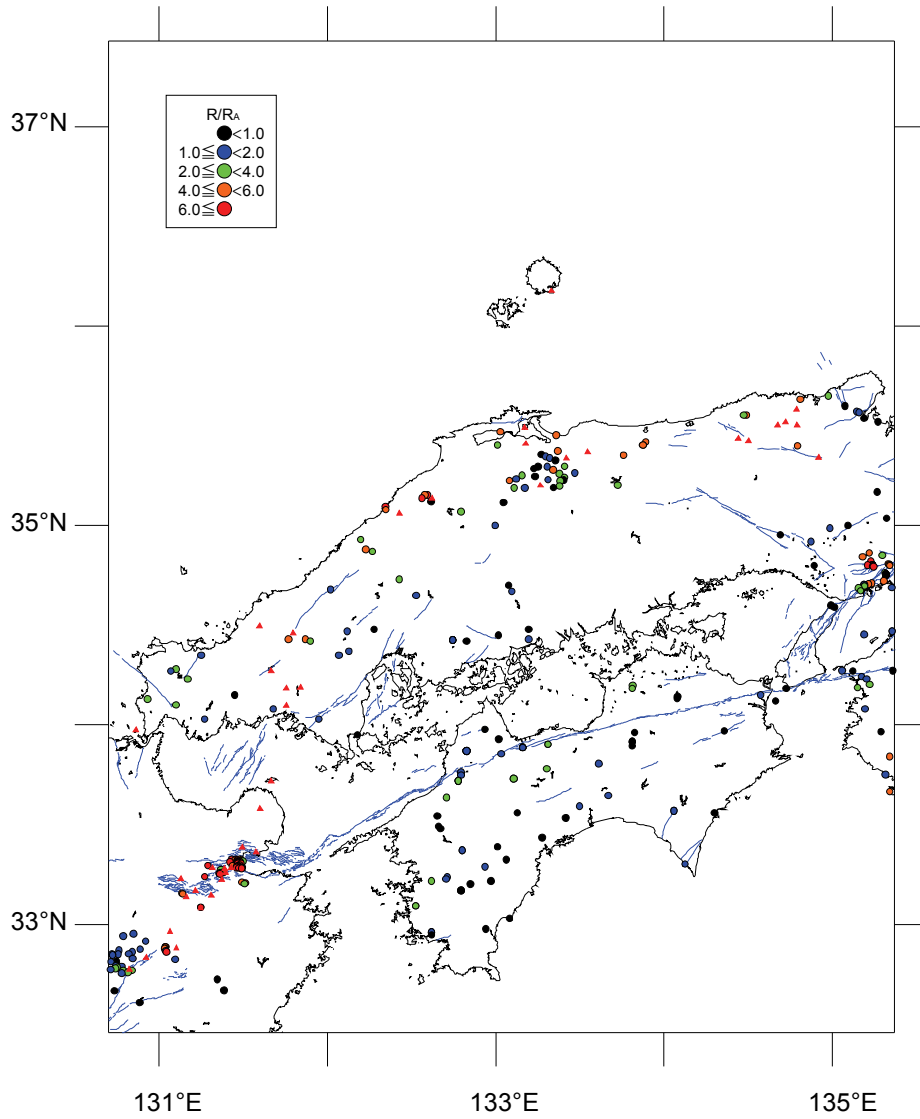


図 4-7 ヘリウム同位体比の分布(中国・四国)

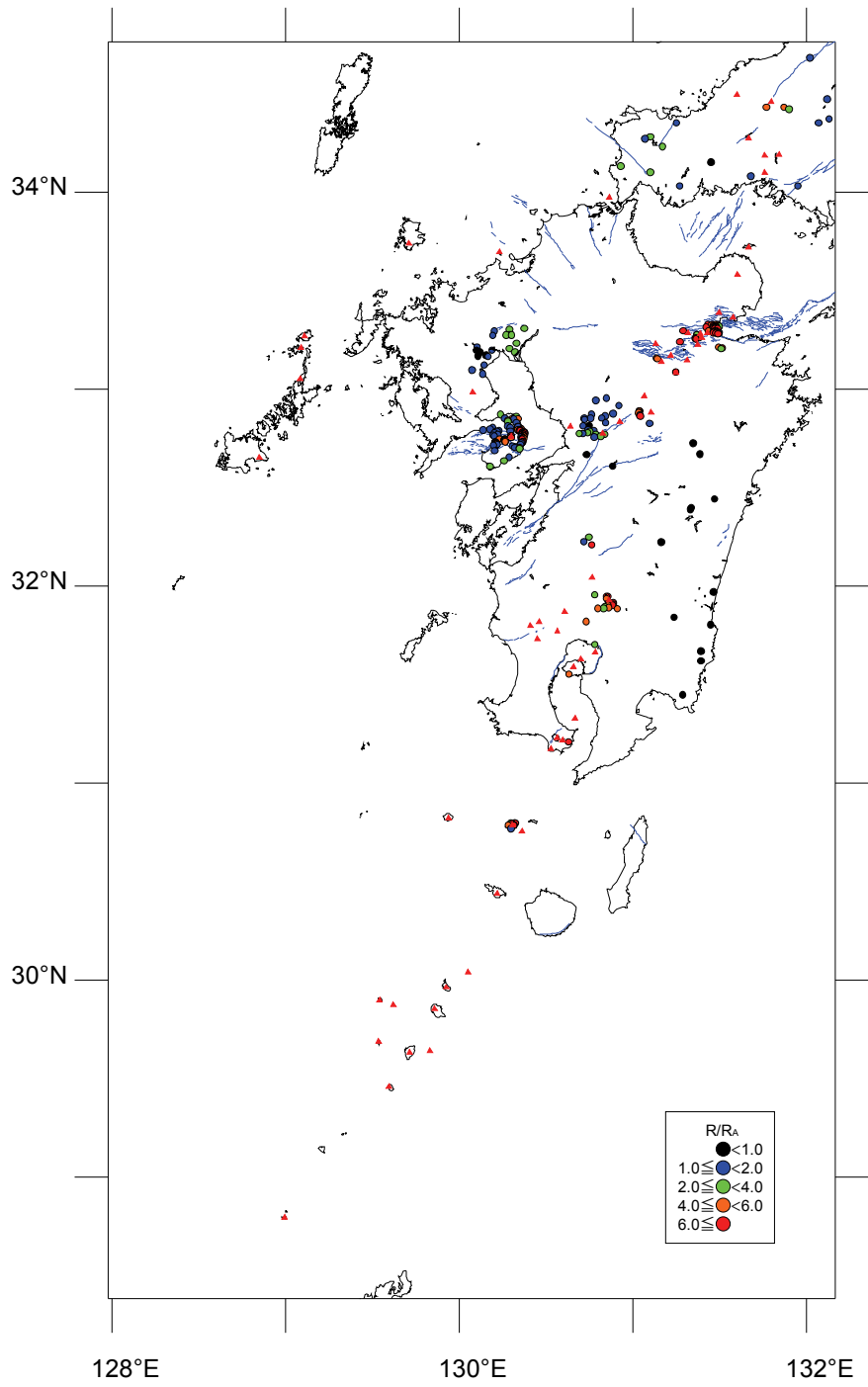


図 4-8 ヘリウム同位体比の分布(九州)

参考文献

- 1) Scott, G., M. Kusakabe, J. Hirabayashi, T. Ohba, K. Nagao and I. Kita (1994): “Geochemical evolution and origin of volcanic gases and springs in Japan”, *Journal of Geological Society of the Philippines*, 59, pp.89–110.
- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1988):昭和 62 年度 全国地熱資源総合調査(第 3 次)広域熱水流動系調査 十勝地域 流体地化学調査報告書 要旨.
- 3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1990a):平成元年度 全国地熱資源総合調査(第 3 次)広域熱水流動系調査 十勝地域 地熱調査成果図集.
- 4) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1990b):平成元年度 全国地熱資源総合調査(第 3 次)広域熱水流動系調査 那須地域 地熱調査成果図集.
- 5) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1990c):平成元年度 全国地熱資源総合調査(第 3 次)広域熱水流動系調査 鶴見岳地域 地熱調査成果図集.
- 6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1991a):平成 2 年度 全国地熱資源総合調査(第 3 次)広域熱水流動系調査 秋田駒地域 地熱調査成果図集.
- 7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1991b):平成 2 年度 全国地熱資源総合調査(第 3 次)広域熱水流動系調査 磐梯地域 地熱調査成果図集.
- 8) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1991c):平成 2 年度 全国地熱資源総合調査(第 3 次)広域熱水流動系調査 阿蘇地域 地熱調査成果図集.
- 9) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1994):地熱開発促進調査報告書 No.37 本宮地域.
- 10) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1995):地熱開発促進調査報告書 No.38 阿蘇山西部地域.
- 11) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1997):地熱開発促進調査報告書 No.A-2 標津岳地域.
- 12) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1998):地熱開発促進調査報告書 No.C-2 山葵沢地域.
- 13) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1999a):地熱開発促進調査報告書 No.A-3 姫川地域.
- 14) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1999b):地熱開発促進調査報告書 No.B-2 安代地域.
- 15) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1999c):地熱開発促進調査報告書 No.B-3 熊石地域.
- 16) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(2001a):地熱開発促進調査報告書 No.A-4 薫別岳地域.
- 17) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(2001b):地熱開発促進調査報告書 No.B-5 武佐岳地域.
- 18) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(2001c):地熱開発促進調査報告書 No.C-3 秋ノ宮地域.

- 19) 産業技術総合研究所(2009):“活断層データベース 2009年7月23日版”, 産業技術総合研究所研究情報公開データベース DB095, 産業技術総合研究所,  
<http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/index.html>.
- 20) 産業技術総合研究所(2010):“日本の第四紀火山”, 産業技術総合研究所研究情報公開データベース DB095, 産業技術総合研究所, [http://riodb02.ibase.aist.go.jp/strata/VOL\\_JP/index.htm](http://riodb02.ibase.aist.go.jp/strata/VOL_JP/index.htm).
- 21) Umeda, K., A. Ninomiya and G. F. McCranks (2008): “High  $^3\text{He}$  emanations from the source regions of recent large earthquakes, central Japan”, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9, Q12003, doi:10.1029/2008GC002272.
- 22) Umeda, K., A. Ninomiya and T. Negi (2009): “Heat source for an amagmatic hydrothermal system, Noto Peninsula, Central Japan”, *Journal of Geophysical Research*, 114, B01202, doi:10.1029/2008JB005812.
- 23) Umeda, K., K. Asamori, T. Negi and T. Kusano (2011): “A large intraplate earthquake triggered by latent magmatism”, *Journal of Geophysical Research*, 116, B01207, doi:10.1029/2010JB007963.



## 付録 データベース引用文献リスト

- Asamori, K., K. Umeda, Y. Ogawa and T. Oikawa (2010): “Electrical resistivity structure and helium isotopes around Naruko volcano, northeastern Japan and its implication for the distribution of crustal magma”, *International Journal of Geophysics*, 2010, doi:10.1155/2010/738139.
- Asamori, K., K. Umeda, A. Ninomiya and T. Negi (2011): “Manifestations of upwelling mantle flow on the earth's surface”, *The Earth's Core: Structure, Properties and Dynamics* (ed: Jon M. Phillips), Nova Science Publishers, New York, pp.79–94.
- Craig, H., J. E. Lupton and Y. Horibe (1978): “A mantle helium component in circum-Pacific volcanic gases: Hakone, the Mariana and Mt. Lassen”, *Terrestrial Rare Gases* (eds. E.C. Alexander Jr and M. Ozima), Center for Academic Publications Japan, pp.3–16.
- Doğan, T., H. Sumino, K. Nagao and K. Notsu (2006): “Release of mantle helium from forearc region of the Southwest Japan arc”, *Chemical Geology*, 233, pp.235–248, doi:10.1016/j.chemgeo.2006.03.008.
- Giggenbach, W. F. and S. Matsuo (1991): “Evaluation of results from second and third IAVCEI field workshops on volcanic gases, Mt Usu, Japan, and White Island, New Zealand.”, *Applied Geochemistry*, 6, pp.125–141, doi:10.1016/0883-2927(91)90024-J.
- 平林順一・大場 武・吉田 稔・日下部 実・G. L. Scott (1992): “雲仙岳火山ガスの組成と放出量”, 日本火山学会講演予稿集, p.103.
- Horiguchi, K. and J. Matsuda (2008): “On the change of  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios in hot spring gases after The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008”, *Geochemical Journal*, 42, e1–e4.
- Horiguchi, K., S. Ueki, Y. Sano, N. Takahata, A. Hasegawa and G. Igarashi (2010): “ Geographical distribution of helium isotope ratios in northeastern Japan”, *Island Arc*, 19, pp.60–70, doi:10.1111/j.1440-1738.2009.00703.x.
- Iwasaki, I., T. Ozawa, M. Yoshida, T. Katsura, B. Iwasaki and M. Kamada (1962): “Chemical composition of volcanic gases in Japan”, *Bulletin of Volcanology*, 24, pp.23–48, doi:10.1007/BF02597741.
- Jenden, P. D., I. R. Kaplan, R. J. Poreda and H. Craig (1988): “Origin of nitrogen-rich natural gases in the California Great Valley: Evidence from helium, carbon and nitrogen isotope ratios”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, pp.851–861, doi:10.1016/0016-7037(88)90356-0.
- 北 逸郎・長尾敬介 (1996): “石油基礎試錐からの気体採取法の評価と深層気体の He 同位体比”, 地質ニュース, 506, pp.29–34.
- 北 逸郎・長尾敬介・中村裕二・田口幸洋 (1992): “秋田県泥湯・川原毛地熱系に放出される気体の化学及び同位体特性による深部情報”, 日本地熱学会誌, 14, pp.115–128.

- Kita, I., K. Nagao, S. Taguchi, K. Nitta and H. Hasegawa (1993): “Emission of magmatic He with different  $3\text{He}/4\text{He}$  ratios from the Unzen volcanic area, Japan”, *Geochemical Journal*, 27, pp.251–259.
- Kusakabe, M., M. Ohwada, H. Satake, K. Nagao and I. Kawasaki (2003): “Helium isotope ratios and geochemistry of volcanic fluids from the Norikura volcanic chain, central Japan: Implications for crustal structures and seismicity”, *Society of Economic Geologists*, 10, pp.75–89.
- 馬原保典(1994): “地下水年代決定法の検討(その3)―溶存希ガスを活用した地下水流動評価法の提案―”, 電力中央研究所報告(U94027).
- Mahara, Y. and T. Igarashi (2003): “Changes in isotope ratio and content of dissolved helium through groundwater evolution”, *Applied Geochemistry*, 18, pp.719–738, doi:10.1016/S0883-2927(02)00177-4.
- Mahara, Y. and K. Kitaoka (2009): “Helium isotopic fingerprints of the heavy land subsidence left in groundwater of the Saga Plain, near Beppu-Shimabara graben, Kyushu, Japan”, *Applied Geochemistry*, 24, pp.438–446, doi:10.1016/j.apgeochem.2008.12.028.
- 馬原保典・中田英二(2003): “化石海水の同定手法の提案―太平洋炭鉱における地下水水質・同位体分布と  $^{36}\text{Cl}$  測定による地下水年代評価―”, 電力中央研究所報告, U03019.
- Marty, B., A. Jambon and Y. Sano (1989): “Helium isotopes and  $\text{CO}_2$  in volcanic gases of Japan”, *Chemical Geology*, 76, pp.25–40, doi:10.1016/0009-2541(89)90125-3.
- Matsubayashi, O., S. Matsuo, I. Kaneoka and M. Ozima (1978): “Rare gas abundance pattern of fumarolic gases in Japanese volcanic areas”, *Terrestrial Rare Gases* (eds. E.C. Alexander Jr and M. Ozima), pp.27–32.
- Matsumoto, T., T. Kawabata, J. Matsuda, K. Yamamoto and K. Mimura (2003): “ $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios in well gases in the Kinki district, SW Japan: surface appearance of slab-derived fluids in a non-volcanic area in Kii Peninsula”, *Earth and Planetary Science Letters*, 216, pp.221–230, doi:10.1016/S0012-821X(03)00479-5.
- 松波武雄・和気 徹・早川福利・二間瀬湧・横山英二・内田 豊・酒匂純俊・斎藤尚志(1979): “北海道の地熱・温泉(C)北海道中央部”, 地下資源調査所調査研究報告, 7.
- Matsuo, S., J. Ossaka, J. Hirabayashi, T. Ozawa and K. Kimishima (1980): “Chemical nature of volcanic gases of the Usu volcano in Japan”, *1st Workshop on Volcanic Gases, Bulletin P.I.R.P.S.E.V, Centre national de la recherche scientifique, Paris*, 31, pp.3–12.
- 森川徳敏(2001): “地球化学的調査に基づいた地下水流動に関する研究―東濃地域を対象とした溶存希ガスによる地下水調査―”, JNC-TN7400 2001-003.

- Morikawa, N., K. Kazahaya, M. Yasuhara, A. Inamura, K. Nagao and H. Sumino (2005): “Estimation of groundwater residence time in a geologically active region by coupling  $^4\text{He}$  concentration with helium isotopic ratios”, *Geophysical Research Letters*, 32, L02406, doi:10.1029/2004GL021501.
- Morikawa, N., K. Kazahaya, E. Fourre, H. A. Takahashi, P. Jean-Baptiste, M. Ohwada, F. J. LeGuern and A. Nakama (2008a): “Magmatic He distribution around Unzen volcano inferred from intensive investigation of helium isotopes in groundwater”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175, pp.218–230, doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.03.038.
- Morikawa, N., K. Kazahaya, H. Masuda, M. Ohwada, A. Nakama, K. Nagao and H. Sumino (2008b): “Relationship between geological structure and helium isotopes in deep groundwater from the Osaka Basin: Application to deep groundwater hydrology”, *Geochemical Journal*, 42, pp.61–74.
- 長尾 敬介 (2004) : “ストロンチウム同位体比及び希ガスをを用いた地球化学的研究手法の確立”, JNC-TY7400 2004-001.
- Nagao, K., N. Takaoka and O. Matsubayashi (1979): “Isotopic anomalies of rare gases in the Nigorikawa geothermal area, Hokkaido, Japan”, *Earth and Planetary Science Letters*, 44, pp.82–90, doi:10.1016/0012-821X(79)90010-4.
- Nagao, K., N. Takaoka, H. Wakita, S. Matsuo and N. Fujii (1980a): “Isotopic compositions of rare gases in the Matsushiro earthquake fault region”, *Geochemical Journal*, 14, pp.63–69.
- Nagao, K., N. Takaoka, S. Matsuo, Y. Mizutani and O. Matsubayashi (1980b): “Change in rare gas composition of the fumarolic gases from the Showa-shinzan volcano”, *Geochemical Journal*, 14, pp.139–143.
- Nagao, K., N. Takaoka and O. Matsubayashi (1981): “Rare gas isotopic compositions in natural gases of Japan”, *Earth and Planetary Science Letters*, 53, pp.175–188, doi:10.1016/0012-821X(81)90152-7.
- Notsu, K., S. Nakai, G. Igarashi, J. Ishibashi, T. Mori, M. Suzuki and H. Wakita (2001): “Spatial distribution and temporal variation of  $^3\text{He}/^4\text{He}$  in hot spring gas released from Unzen volcanic area, Japan”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 111, pp.89–98, doi:10.1016/S0377-0273(01)00221-9.
- Ohno, M., H. Sumino, P. A. Hernandez, T. Sato and K. Nagao (2011): “Helium isotopes in the Izu Peninsula, Japan: Relation of magma and crustal activity”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 199, pp.118–126, doi:10.1016/j.jvolgeores.2010.11.001.
- Ohsawa, S. and Y. Yusa (2001): “High  $\delta^{13}\text{C}$  fumarolic  $\text{CO}_2$  discharged from Ogasawara-Iwojima, an active volcanic island in the Izu-Bonin arc”, *日本地熱学会誌*, 23, pp.197–205.

- 大沢信二・由佐悠紀・大上和敏・北岡豪一(1998):“海洋地域の沈み込み帯から放出される低 N<sub>2</sub>/He 比のマグマ性ガス—伊豆-マリアナ弧の小笠原硫黄島について—”, 温泉科学, 48, pp.9–14.
- Ohsawa, S., T. Sakai, M. Yamada, T. Mishima, S. Yoshikawa and T. Kagiya (2011): “Dissolved inorganic carbon rich in mantle component of hot spring waters from the Hitoyoshi Basin in a non-volcanic region of central Kyushu, Japan”, *Journal of Hot Spring Sciences*, 60, pp.410–417.
- Ohwada, M., H. Satake, K. Nagao and K. Kazahaya (2007): “Formation processes of thermal waters in Green tuff: A geochemical study in the Hokuriku district, central Japan”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 168, pp.55–67, doi:10.1016/j.jvolgeores.2007.07.009.
- Okada, T., T. Itaya, M. Sato and K. Nagao (1994): “Noble gas isotopic composition of deep underground water in Osaka plain, central Japan: Evidence of mantle He and model for new volcanism”, *The Island Arc*, 3, pp.221–231, doi:10.1111/j.1440-1738.1994.tb00108.x.
- Ono, A., Y. Sano, H. Wakita and W. F. Giggenbach (1993): “Carbon isotopes of methane and carbon dioxide in hydrothermal gases of Japan”, *Geochemical Journal*, 27, pp.287–295.
- Ossaka, J., T. Ozawa, T. Nomura, T. Ossaka, J. Hirabayashi, A. Takaesu and T. Hayashi (1980): “Variation of chemical composition in volcanic gases and waters at Kusatsu-Shirane volcano and its activity in 1976”, *Bulletin of Volcanology*, 43, pp.207–216, doi:10.1007/BF02597622.
- Sakamoto, M., Y. Sano and H. Wakita (1992): “<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He ratio distribution in and around the Hakone volcano”, *Geochemical Journal*, 26, pp.189–195.
- Sakata, S. (1991): “Carbon isotope geochemistry of natural gases from the Green Tuff Basin, Japan”, *Geochimica et Cosmochimica*, 55, pp.1395–1405, doi:10.1016/0016-7037(91)90316-W.
- 坂田 将・高橋 誠・星野一男(1986):“深部火山岩中の天然ガスの成因に関する地球化学的考察”, 石油技術協会誌, 51, pp.228–237.
- 坂田 将・牧 真一・矢崎清貫・永田松三(1987):“紀伊半島の石油・天然ガス資源に関する地球化学的考察”, 地球化学, 21, pp.65–74.
- Sakata, S., M. Takahashi, S. Igari and N. Suzuki (1989): “Origin of light hydrocarbons from volcanic rocks in the "Green Tuff" region of northeast Japan: biogenic versus magmatic”, *Chemical Geology*, 74, pp.241–248, doi:10.1016/0009-2541(89)90035-1.
- 坂田 将・高橋 誠・猪狩俊一郎・松久幸敬・星野一男(1996):“火山性貯留岩に集積する天然ガスの炭化水素の起源に関する地球化学的研究”, 地質調査所月報, 47, pp.619–642.
- 産業技術総合研究所(2004):“地層処分にかかる地質情報データの整備”, 平成 15 年度事業報告書 (独立行政法人 産業技術総合研究所 深部地質環境研究センター), p.73

- Sano, Y. and B. Marty (1995): "Origin of carbon in fumarolic gas from island arcs", *Chemical Geology*, 119, pp.265–274, doi:10.1016/0009-2541(94)00097-R.
- Sano, Y. and H. Wakita (1985): "Geographical distribution of  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios in Japan: implications for arc tectonics and incipient magmatism", *Journal of Geophysical Research*, 90, pp.8729–8741, doi:10.1029/JB090iB10p08729.
- Sano, Y. and H. Wakita (1988): "Helium isotope ratio and heat discharge rate in the Hokkaido Island, Northeast Japan", *Geochemical journal*, 22, pp.293–303.
- Sano, Y., T. Tominaga, Y. Nakamura and H. Wakita (1982): " $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios of methane-rich natural gases in Japan", *Geochemical Journal*, 16, pp.237–245.
- Sano, Y., Y. Nakamura, H. Wakita, A. Urabe and T. Tominaga (1984): "Helium-3 emission related to volcanic activity", *Science*, 224, pp.150–151, doi:10.1126/science.224.4645.150.
- Sano, Y., Y. Nakamura and H. Wakita (1985): "Areal distribution of  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios in the Tohoku district, northeastern Japan", *Chemical Geology*, 52, pp.1–8, doi:10.1016/0168-9622(85)90004-1.
- Sano, Y., Y. Nakamura, H. Wakita, K. Notsu and Y. Kobayashi (1986): " $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratio anomalies associated with the 1984 western Nagano earthquake: possibly induced by a diapiric magma", *Journal of Geophysical Research*, 91, pp.12291–12295, doi:10.1029/JB091iB12p12291.
- Sano, Y., Y. Nakamura, K. Notsu and H. Wakita (1988): "Influence of volcanic eruptions on helium isotope ratios in hydrothermal systems induced by volcanic eruptions", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, pp.1305–1308, doi:10.1016/0016-7037(88)90284-0.
- Sano, Y., K. Notsu, J. Ishibashi, G. Igarashi and H. Wakita (1991): "Secular variations in helium isotope ratios in an active volcano: Eruption and plug hypothesis", *Earth and Planetary Science Letters*, 107, pp.95–100, doi:10.1016/0012-821X(91)90046-K.
- Sano, Y., J. Hirabayashi, T. Oba and T. Gamo (1994): "Carbon and helium isotopic ratios at Kusatsu-Shirane Volcano, Japan", *Applied Geochemistry*, 9, pp.371–377, doi:10.1016/0883-2927(94)90059-0.
- Sano, Y., T. Gamo, K. Notsu and H. Wakita (1995): "Secular variations of carbon and helium isotopes at Izu-Oshima Volcano, Japan", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 64, pp.83–94, doi:10.1016/0377-0273(94)00041-E.
- Sano, Y., Y. Nishio, S. Sasaki, T. Gamo and K. Nagao (1998a): "Helium and carbon isotope systematics at Ontake volcano, Japan", *Journal of Geophysical Research*, 103, pp.23863–23873, doi:10.1029/98JB01666.

- Sano, Y., N. Takahata, G. Igarashi, N. Koizumi and N. C. Sturchio (1998b): “Helium degassing related to the Kobe earthquake”, *Chemical Geology*, 150, pp.171–179, doi:10.1016/S0009-2541(98)00055-2.
- Sano, Y., N. Takahata and T. Seno (2006): “Geographical distribution of  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios in the Chugoku district, Southwestern Japan”, *Pure and Applied Geophysics*, 163, pp.745–757, doi:10.1007/s00024-006-0035-0.
- Sano, Y., A. Kameda, N. Takahata, J. Yamamoto and J. Nakajima (2009): “Tracing extinct spreading center in SW Japan by helium-3 emanation”, *Chemical Geology*, 266, pp.50–56, doi:10.1016/j.chemgeo.2008.10.020.
- 佐藤雅規・森 俊哉・野津憲治・脇田 宏 (1999): “霧島火山地帯から放出される噴気, 温泉ガスの炭素およびヘリウム同位体比”, *火山*, 44, pp.279–283.
- Sato, M., T. Mori, Y. Shimoike, K. Nagao and K. Notsu (2002): “Carbon isotope systematics of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  and  $\text{CH}_4$  in fumarolic gases from Satsuma-Iwojima volcanic island, Japan”, *Earth Planets Space*, 54, pp.257–263.
- Scott, G., M. Kusakabe, J. Hirabayashi, T. Ohba, K. Nagao and I. Kita (1994): “Geochemical evolution and origin of volcanic gases and springs in Japan”, *Journal of Geological Society of the Philippines*, 59, pp.89–110.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1988): 昭和 62 年度 全国地熱資源総合調査(第 3 次) 広域熱水流動系調査 十勝地域 流体地化学調査報告書 要旨.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1990a): 平成元年度 全国地熱資源総合調査(第 3 次) 広域熱水流動系調査 十勝地域 地熱調査成果図集.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1990b): 平成元年度 全国地熱資源総合調査(第 3 次) 広域熱水流動系調査 那須地域 地熱調査成果図集.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1990c): 平成元年度 全国地熱資源総合調査(第 3 次) 広域熱水流動系調査 鶴見岳地域 地熱調査成果図集.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1991a): 平成 2 年度 全国地熱資源総合調査(第 3 次) 広域熱水流動系調査 秋田駒地域 地熱調査成果図集.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1991b): 平成 2 年度 全国地熱資源総合調査(第 3 次) 広域熱水流動系調査 磐梯地域 地熱調査成果図集.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1991c): 平成 2 年度 全国地熱資源総合調査(第 3 次) 広域熱水流動系調査 阿蘇地域 地熱調査成果図集.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1994): 地熱開発促進調査報告書 No.37 本宮地域.



新エネルギー・産業技術総合開発機構(1995):地熱開発促進調査報告書 No.38 阿蘇山西部地域.

新エネルギー・産業技術総合開発機構(1997):地熱開発促進調査報告書 No.A-2 標津岳地域.

新エネルギー・産業技術総合開発機構(1998):地熱開発促進調査報告書 No.C-2 山葵沢地域.

新エネルギー・産業技術総合開発機構(1999a):地熱開発促進調査報告書 No.A-3 姫川地域.

新エネルギー・産業技術総合開発機構(1999b):地熱開発促進調査報告書 No.B-2 安代地域.

新エネルギー・産業技術総合開発機構(1999c):地熱開発促進調査報告書 No.B-3 熊石地域.

新エネルギー・産業技術総合開発機構(2001a):地熱開発促進調査報告書 No.A-4 薫別岳地域.

新エネルギー・産業技術総合開発機構(2001b):地熱開発促進調査報告書 No.B-5 武佐岳地域.

新エネルギー・産業技術総合開発機構(2001c):地熱開発促進調査報告書 No.C-3 秋ノ宮地域.

Sturchio, N. C., S. Ohsawa, Y. Sano, G. Arehart, K. Kitaoka and Y. Yusa (1996): “Geochemical characteristics of the Yufuin outflow plume, Beppu hydrothermal system, Japan”, *Geothermics*, 25, pp.215–230, doi:10.1016/0375-6505(95)00049-6.

Sumino, H., K. Notsu, S. Nakai, M. Sato, K. Nagao, M. Hosoe and H. Wakita (2004): “Noble gas and carbon isotopes of fumarolic gas from Iwojima volcano, Izu-Ogasawara arc, Japan: implications for the origin of unusual arc magmatism”, *Chemical Geology*, 209, pp.153–173, doi:10.1016/j.chemgeo.2004.05.002.

Takahata, N. and Y. Sano (2000): “Helium flux from a sedimentary basin”, *Applied Radiation and Isotopes*, 52, pp.985–992, doi:10.1016/S0969-8043(99)00159-1.

Takahata, N., R. Yokochi, Y. Nishio and Y. Sano (2003): “Volatile element isotope systematics at Ontake volcano, Japan”, *Geochemical Journal*, 37, pp.299–310.

高岡宣雄(1985):“希ガス同位体による火山ガスの研究—噴火予知を目指して—”, 火山, 30, pp.185–195.

高岡宣雄・今田 正(1989):“温泉ガス中のヘリウム同位体比測定”, 御所山-総合学術調査報告, pp.37–38.

Takaoka, N. and Y. Mizutani (1987): “Tritogenic  $^3\text{He}$  in groundwater in Takaoka”, *Earth and Planetary Science Letters*, 85, pp.74–78, doi:10.1016/0012-821X(87)90022-7.

Ueda, A., K. Nagao, T. Shibata and T. Suzuki (2010): “Stable and noble gas isotopic study of thermal and groundwaters in northwestern Hokkaido, Japan and the occurrence of geopressed fluids”, *Geochemical Journal*, 44, pp.545–560.

- Umeda, K. and A. Ninomiya (2009): “Helium isotopes as a tool for detecting concealed active faults”, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 10, Q08010, doi:10.1029/2009GC002501.
- Umeda, K., Y. Ogawa, K. Asamori and T. Oikawa (2006a): “Aqueous fluids derived from a subducting slab: Observed high  $^3\text{He}$  emanation and conductive anomaly in a non-volcanic region, Kii Peninsula southwest Japan”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 149, pp.47–61, doi:10.1016/j.jvolgeores.2005.06.005.
- Umeda, K., S. Kanazawa, C. Kakuta, K. Asamori and T. Oikawa (2006b): “Variations in the  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios of hot springs on Shikoku Island, southwest Japan”, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 7, Q04009, doi:10.1029/2005GC001210.
- Umeda, K., G. F. McCranks and A. Ninomiya (2007a): “Helium isotopes as geochemical indicators of a serpentinized fore-arc mantle wedge”, *Journal of Geophysical Research*, 112, B10206, doi:10.1029/2007JB005031.
- Umeda, K., K. Asamori, A. Ninomiya, S. Kanazawa and T. Oikawa (2007b): “Multiple lines of evidence for crustal magma storage beneath the Mesozoic crystalline Iide Mountains, northeast Japan”, *Journal of Geophysical Research*, 112, B05207, doi:10.1029/2006JB004590.
- Umeda, K., Y. Sakagawa, A. Ninomiya and K. Asamori (2007c): “Relationship between helium isotopes and heat flux from hot springs in a non-volcanic region, Kii Peninsula, southwest Japan”, *Geophysical Research Letters*, 34, L05310, doi:10.1029/2006GL028975.
- Umeda, K., A. Ninomiya, K. Shimada and J. Nakajima (2008a): “Helium isotope variations along the Niigata-Kobe tectonic zone, central Japan”, *The Lithosphere: Geochemistry, Geology and Geophysics* (eds. J.E. Anderson et al.), pp.141–169.
- Umeda, K., A. Ninomiya and G. F. McCranks (2008b): “High  $^3\text{He}$  emanations from the source regions of recent large earthquakes, central Japan”, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9, Q12003, doi:10.1029/2008GC002272.
- Umeda, K., A. Ninomiya and T. Negi (2009): “Heat source for an amagmatic hydrothermal system, Noto Peninsula, Central Japan”, *Journal of Geophysical Research*, 114, B01202, doi:10.1029/2008JB005812.
- Umeda, K., K. Asamori, T. Negi and T. Kusano (2011a): “A large intraplate earthquake triggered by latent magmatism”, *Journal of Geophysical Research*, 116, B01207, doi:10.1029/2010JB007963.
- Umeda, K., A. Ninomiya and K. Asamori (2011b): “Release of mantle helium and its tectonic implications”, *Helium: Characteristics, Compounds, and Applications* (ed. Lucas A. Becker), pp.81–101.



Urabe, A., T. Tominaga, Y. Nakamura and H. Wakita (1985): “Chemical compositions of natural gases in Japan”, *Geochemical Journal*, 19, pp.11–25.

宇都浩三・早川由紀夫・荒牧重雄・小坂丈予(1983):“草津白根火山地質図”, 地質調査所.

Wakita, H. and Y. Sano (1983): “ $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios in  $\text{CH}_4$ -rich natural gases suggest magmatic origin”, *Nature*, 305, pp.792–794, doi:10.1038/305792a0.

Wakita, H., N. Fujii, S. Matsuo, K. Notsu, K. Nagao and N. Takaoka (1978): ““Helium spots”: caused by a diapiric magma from the upper mantle”, *Science*, 200, pp.430–432, doi:10.1126/science.200.4340.430.

Wakita, H., Y. Sano and M. Mizoue (1987): “High  $^3\text{He}$  emanation and seismic swarms observed in a nonvolcanic, forearc region”, *Journal of Geophysical Research*, 92, pp.12539–12546, doi:10.1029/JB092iB12p12539.

Wakita, H., Y. Sano, A. Urabe and Y. Nakamura (1990): “Origin of methane-rich natural gas in Japan: formation of gas fields due to large-scale submarine volcanism”, *Applied Geochemistry*, 5, pp.263–278.

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	モル	mol
光	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	数メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	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>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1L=11=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg

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

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=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=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

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

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

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	fm	1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

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

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

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘り	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表面張力	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 <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
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 <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
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> sA
電表面積電荷	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>-3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
透磁率	ヘンリー毎メートル	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 <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
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> sA
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol

